

平成28年度  
漁港・漁場の施設の設計手法の高度化  
検討調査事業  
報 告 書

平成29年3月

国立研究開発法人水産研究・教育機構  
一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所  
一般社団法人マリノフォーラム21  
国際気象海洋株式会社  
復建調査設計株式会社  
株式会社アルファ水工コンサルタンツ

# 平成 28 年度漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査事業

## 年次報告書

### 1. 課題名

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査事業

#### 【小課題】

- (1) 耐震設計手法高度化の検討
- (2) 耐津波設計手法高度化の検討
- (3) 漁場の施設の設計手法高度化の検討
- (4) 既存漁場施設の機能発揮状況調査
- (5) 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討

#### 【その他】

- (6) 検討委員会等の設置

### 2. 実施機関及び担当者

#### (1) 耐震設計手法高度化の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所

水産土木工学部水産基盤グループ

主任研究員

佐伯公康

主幹研究員

中村克彦

復建調査設計株式会社

防災部 部長

藤井照久

東京支社第一技術部河川港湾技術課 主任エンジニア

佐貫哲朗

水工部沿岸技術課係長

佐藤秀政

東京支社第一技術部地盤技術課

西本敦範

#### (2) 耐津波設計手法高度化の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所

水産土木工学部水産基盤グループ

水産基盤グループ長

大村智宏

研究員

杉松宏一

研究員

古市尚基

一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所

第1調査研究部長

西崎孝之

第1調査研究部 主席主任研究員

加藤広之

株式会社アルファ水工コンサルタンツ

東京本社 執行役員

綿貫 啓

東京本社 執行役員

佐藤勝弘

東京本社 グループリーダー

寺澤知彦

東京本社 技術部統括

富澤伸樹

東京本社 技術部チームリーダー

平井豊規

東京本社 技術部主任	小金山透
東京本社 技術部主任	千原美季
東京本社 技術部技師	野地雅貴
北海道本社 技術部チームリーダー	小玉 篤
北海道本社 技術部技師	林 浩毅
国際気象海洋株式会社	
技術部 グループリーダー	小林 学
技術部 グループリーダー	門 安曇
技術部 技師	中島優香
技術部 技師	鈴木宏満

(3) 漁場の施設の設計手法高度化の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所	
水産土木工学部生物環境グループ	
グループ長	川俣 茂
主幹研究員	森口朗彦
水産土木工学部水産基盤グループ	
研究員	杉松宏一
主幹研究員	中村克彦
水産土木工学部長	中山哲嚴
国際気象海洋株式会社	
技術部 グループリーダー	小林 学
技術部 グループリーダー	門 安曇
技術部 技師	中島優香
技術部 技師	鈴木宏満
株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京本社	
執行役員	綿貫 啓
東京本社 グループリーダー	寺澤知彦
東京本社 技術部チームリーダー	平井豊規
一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所	
第2調査研究部長	伊藤 靖
第2調査部 主任研究員	松本卓也

(4) 既存漁場施設の機能発揮状況調査

国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所	
水産土木工学部生物環境グループ	
主任研究員	南部亮元
株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京本社	
執行役員	綿貫 啓

(5) 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討

一般社団法人マリノフォーラム21	
開発部長	吉田儀弘

専門研究員  
専門研究員  
専門研究員  
開発部

青山 勸  
志賀隆顕  
高橋延幸  
岸 真二郎

#### (6) 検討委員会の設置

国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所

水産土木工学部生物環境グループ

グループ長

川俣 茂

主幹研究員

森口朗彦

水産土木工学部水産基盤グループ

研究員

杉松宏一

主幹研究員

中村克彦

水産土木工学部長

中山哲巖

一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所

第1調査研究部長

西崎孝之

第1調査研究部 主席主任研究員

加藤広之

第1調査研究部 主席主任研究員

竹原洋一郎

第2調査研究部長

伊藤 靖

### 3. 本調査事業の概要

#### (1) 研究開発の目的

漁港・漁場の施設の設計手法については、平成27年度より、従来の「仕様規定型」から「性能規定型」へ移行を果たすとともに、これまでに蓄積された新たな技術的知見を取り入れることで、よりの確かつ効率的な新たな体系として運用が開始されたところである。

本事業では、漁港・漁場の施設の設計手法について、残された課題及び将来的な課題に対応すべく、技術の進歩、社会情勢・需要の変化等に応じた更なる高度化を図るための調査・検討を行った。

#### (2) 成果の概要

課題ごとの成果の概要は次のとおりである。

##### 1) 耐震設計手法高度化の検討

二次元応答解析を用い、強固な地盤（Ⅰ種、Ⅱ種地盤）条件上の矢板式係船岸における周波数特性と変形量の把握を行い、平成27年度水産庁委託調査で得られた知見を踏まえ、強固な地盤から軟弱な地盤（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ種）までを網羅した漁港用フィルター関数の検討を行った。

##### 2) 耐津波設計手法高度化の検討

構造上弱点のうち防波堤の隅角部・堤頭部を対象に、作用時間の長い津波に対する水理模型実験と非線形長波理論による数値解析を行い、津波波力について水工研式の適用性の確認を行った。

また、上部エパラペット構造の工夫について、作用時間の長い津波に対する水理模型実験と数値波動水路による解析を行い、被覆ブロックの安定性向上の効果を検証した。

##### 3) 漁場の施設の設計手法高度化の検討

これまでの水理模型実験の結果の解析に基づき、石材の安定質量算定式について、従来の最大流速のみの影響を考慮する式から底質条件（摩擦係数）、石材密度、流れの非対称性などを考慮したより汎用的な算定式に改良した。また、その新提案式の妥当性を現地実験結果との比較に基づき確認した。

#### 4) 既存漁場施設の機能発揮状況調査

既存漁場施設について、長崎県を対象に魚礁の設置年数や配置等、ならびにこれらの魚礁を利用した漁獲量データを整理し、漁獲量と魚礁設置条件の関係性について分析した。また、常設型魚群探知を利用した魚礁の蝸集機能について検討した。

既存藻場礁について、機能発揮状況及び機能回復対策事例を踏まえ、藻場礁の機能低下（老朽化）の把握の実態について、全国の自治体にアンケート調査した結果を再整理するとともに、藻場礁の機能低下の診断手法を既往の知見を基に提案した。

#### 5) 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討

過去の流出事故の切断原因を分析するとともに、ロープメーカーが行った擦れ摩耗試験結果の提供を受け、流出軽減のための方策を検討した。

流出警報発信機の防水・耐久性能の検討として、市販の従来改良型と新型の発信機に対して、耐圧試験を行った後、長崎県対馬近海の実際の中層浮魚礁の礁体上部(水深約 40m)に取付けた。(約 1 年経過後の 29 年度中に回収し、流出警報の正常発信や漏水の有無を調査予定)

設置後約 7 年と設置後約 8 年で流出した中層浮魚礁の係留索の残存強度を測定し、既存のデータと同様、残存強度には問題がないことを確認した。

## 4. 実施報告

以下、課題別に、ねらい、調査方法、調査結果、今後の課題等を示す。引用文献についても明示する。

- 4.1 耐震設計手法高度化の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・4-1-1～4-1-63
- 4.2 耐津波設計手法高度化の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・4-2-1～4-2-23
- 4.3 漁場の施設の設計手法高度化の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・4-3-1～4-3-45
- 4.4 既存漁場施設の機能発揮状況調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・4-4-1～4-4-10
- 4.5 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・4-5-1～4-5-15
- 4.6 検討委員会の設置・・・・・・・・・・・・・・・・・・4-6-a1～239、4-6-b1～73

## 4-1 耐震設計手法高度化の検討

### (1) ねらい

係船岸の性能規定に応じた耐震性能の照査には、現地に来襲する地震動の周波数特性および構造物に生ずる変形量を詳細に考慮できる方法を用いることが理想的である。二次元地震応答解析を行えばそれらを考慮した検討が可能である。一方、レベル1地震動に対する耐震性能照査に標準的に使用されている震度法については、そのような方法が存在していなかったが、「港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年版」<sup>1)</sup>（以下、「港湾基準」と称す）にはフィルター関数を使用する方法<sup>2)</sup>が示され、施設ごとの地盤や水深の違いによる周波数特性及び変形量を考慮した設計水平震度（照査用震度）の算出が可能となっている。港湾施設に比べて水深の浅い漁港の係船岸（岸壁・物揚場）についても、「漁港・漁場の施設の設計参考図書 2015年版」<sup>3)</sup>（以下、「設計参考図書」と称す）において重力式係船岸についてフィルター関数（いわゆる漁港フィルター）が示され、周波数特性及び変形量を考慮した設計水平震度の算出が可能となっている。

一方、漁港の係船岸に多く採用されている構造形式には重力式のほか矢板式がある。漁港の矢板式係船岸のレベル1地震動に対する耐震性能の照査は、「設計参考図書」掲載の地域別震度を使用すれば多くの場合変形と応力は許容できる範囲内に収まることが確認されているが、地域別震度では周波数特性および構造物に生ずる変形量を詳細に考慮することができない。そのためフィルター関数の提示が必要と考えられる。そこで下記の①~③を実施する。

#### ① 矢板式係船岸のフィルター関数の検討

漁港の典型的な矢板式係船岸をモデル化した解析を行い、解析から得られる係船岸の変形量と構造部材の応力に着目し、変形量と地盤の周波数特性を考慮できる耐震設計手法の検討を行う。具体的には、水深を3種類に設定した二次元地震応答解析を実施し、その解析の結果より周波数と応答値の関係を整理する。この結果と、26~27年度の解析結果をもとに、漁港の矢板式係船岸に適するフィルター関数の素案を示す。このフィルター関数について、「港湾基準」に示された水深の深い矢板式のフィルター関数との違いを確認する。

#### ② 矢板式係船岸の部材応力および変形特性の検討

フィルター関数は、耐震性能を変形量によって評価する考え方を前提としているが、構造物の安全性を表す指標値には変形量のほかに構造部材の応力が挙げられる。そこで、①の解析で得られた矢板式係船岸の構造部材（前面矢板、控え矢板、タイロッド）の応力と天端変形量との関係を整理する。レベル1地震動に対する性能照査においては通常、構造部材の降伏を許容していないことから、降伏応力以内であることを確認する。また、①の解析で得られた矢板式係船岸の変形を既往の研究成果と比較することにより、耐震性能を変形量によって評価する考え方を適用することの妥当性を確認する。

### ③ レベル1地震動入力時の応答値確認および照査用震度の試算

①のうち代表的な解析モデルを用いて、幾つかの代表的なレベル1地震動を入力波とした二次元地震応答解析を行い、求まる応力～変形量の関係が②で整理した関係と近いものであることを確認する。次に、この解析で得られる応答加速度と①で提示したフィルター関数を用いて照査用震度を試算し、その値が解析モデルに対して妥当なものかを判断することによりフィルター関数の適用性を確認する。

## (2) 方法

### 1) 矢板式係船岸のフィルター関数の検討

#### ① 基本方針

漁港の矢板式係船岸について、重力式係船岸のフィルター検討と同様に、周波数を種々に設定した正弦波を入力する二次元地震応答解析を実施し、係船岸天端の残留変形量が所定の値に達するのに必要な正弦波の振幅を探索する。

27年度の本調査で、漁港と港湾の水深の違いおよび、「港湾基準」と「設計参考図書」に記載されている矢板式係船岸の設計手法の違いにより、漁港の矢板式係船岸における変形量に対応した照査用震度を設定するには「港湾基準」のフィルターとは別に漁港の係船岸に適するフィルターの設定が必要であると指摘されている。

また、軟弱な地盤（Ⅲ種地盤）上の漁港の矢板式係船岸に対する解析は27年度までの本調査で実施されている。

そこで今年度は硬質な地盤（Ⅰ種地盤）と中間的な地盤（Ⅱ種地盤）を対象に解析を行い、この解析結果と27年度までの解析結果をもとに周波数と応答値の関係を整理し、漁港の矢板式係船岸の照査用震度の算定に使用できるフィルター関数の素案を示す。

図4-1-1に検討フローを示す。このフローは文献<sup>2)</sup>を参考とした。

検討モデルの地盤条件は硬質な地盤（Ⅰ種地盤）と中間的な地盤（Ⅱ種地盤）とし、水深条件は3水深（-2.1m、-4.1m、-5.1m）を設定した。控え工は漁港において適用実績の多い控え直杭式とした。表4-1-1に、既往検討も含めて解析ケース一覧を示す。地盤条件・水深条件については次項で詳述する。

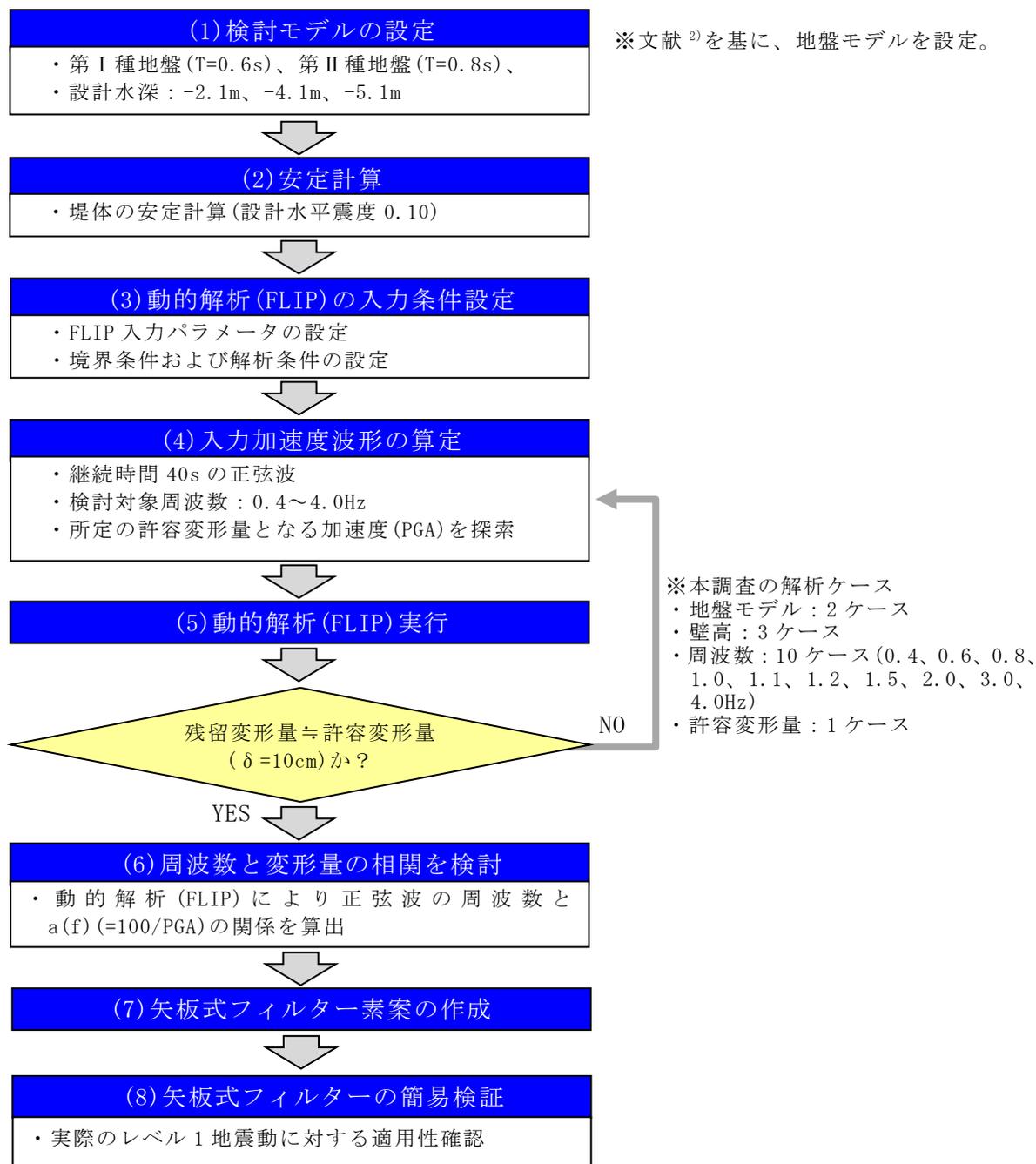


図 4-1-1 矢板式係船岸のフィルター関数の検討フロー

表 4-1-1 フィルター検討ケース（既往検討を含む）

構造水深 (m)	壁高 (m)	第 I 種地盤	第 II 種地盤	第 III 種地盤
-2.0	4.0	◇	◇	◇
-2.1	3.6	●▲	●▲	●▲
-3.0	6.0	◇	◇	◇
-4.1	6.1	●▲	●▲	●▲
-5.1	7.1	●▲	●▲	●▲
-7.5	11.5	○△□☆	○△□☆	○△□☆
-11.0	15.0	○△□☆	○△□☆	○△□☆
-14.5	18.5	○	○	○

※：  : 漁港の検討ケース (●; 重力式 (kh=0.10), ▲; 控え直杭矢板 (kh=0.10))  
 : 港湾の検討ケース (○; 重力式 (kh=0.10), △; 控え直杭矢板 (kh=0.10), □; 控え組杭矢板 (kh=0.15), ◇; 自立矢板 (kh=0.10), ☆; 二重矢板 (kh=0.10))  
 ※: ▲: 今年度実施ケース

## ② 検討断面の設定

### i) 設計水平震度

設計水平震度は既往検討（文献<sup>2) 4)</sup> ならびに水産基盤整備調査委託事業「平成 26 年度漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」・「平成 27 年度漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査」に合わせ kh=0.10 とした。

### ii) 施設条件

施設条件は既往検討（文献<sup>4)</sup> ならびに水産基盤整備調査委託事業「平成 26 年度漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」・「平成 27 年度漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査」に合わせ表 4-1-2 の 3 パターンとした。

表 4-1-2 天端・水深等の条件

水深 (m)	天端高 (m)	壁高 (m)	上載荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	水位条件	背後地盤 条件
-2.1	+1.50	3.60	常時 10.0 地震時 5.0	HWL+0.50m LWL±0.0m RWL+0.33m	$\gamma_t=18.0\text{kN/m}^3$ $\gamma_{\text{sat}}=20.0\text{kN/m}^3$ $\phi=40^\circ$
-4.1	+2.00	6.10			
-5.1	+2.00	7.10			

### iii) 地盤条件

地盤条件は、固有周期 T=0.4s、(第 I 種地盤)、0.8s (第 II 種地盤) の 2 パターンとし、文献<sup>2)</sup>表-3 の case2 (第 II 種地盤) の地盤物性値を用いて、原地盤の層厚を調整して、表 4-1-3 のとおり設定した。

なお、文献<sup>2)</sup>のⅡ種地盤で用いられたせん断波速度 ( $V_s$ ) を、今回の検討ではⅠ種・Ⅱ種地盤の両方に使用した。その理由として、今回の検討のように埋土の層厚が小さい場合、文献<sup>2)</sup>のⅠ種地盤の埋土に使用された  $V_s=210\text{m/s}$ 、 $250\text{m/s}$  という値を  $N$  値・せん断弾性係数・せん断波速度の関係式 (有効拘束圧を考慮した式) にあてはめると、20~40 程度の非常に大きな  $N$  値が求まり、矢板式を通常は適用しない地盤になってしまう。そのため、Ⅰ、Ⅱ種地盤の  $V_s$  を同一値とし、工学的基盤の深さのみ変えた。

表 4-1-3(1) 水深-2.1m、第Ⅰ種地盤モデル

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )		
1	Bs	砂質土	1.50	18.0	-	180.0	0.007
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.014
3	As	砂質土	-2.10	-	20.0	190.0	0.073
4	Base	基盤	-16.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.093
$T=4 \Sigma H_i/V_{si}=$							0.373

表 4-1-3(2) 水深-4.1m、第Ⅰ種地盤モデル

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )		
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.025
3	As	砂質土	-4.10	-	20.0	190.0	0.063
5	Base	基盤	-16.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.097
$T=4 \Sigma H_i/V_{si}=$							0.386

表 4-1-3(3) 水深-5.1m、第Ⅰ種地盤モデル

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )		
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.030
3	As	砂質土	-5.10	-	20.0	190.0	0.057
5	Base	基盤	-16.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.097
$T=4 \Sigma H_i/V_{si}=$							0.387

表 4-1-3(4) 水深-2.1m、第Ⅱ種地盤モデル

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)
				湿潤 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )		
1	Bs	砂質土	1.50	18.0	-	180.0	0.007
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.014
3	As上	砂質土	-2.10	-	20.0	190.0	0.084
4	As下	砂質土	-18.00	-	20.0	250.0	0.096
5	Base	基盤	-42.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s =$	0.200
$T=4 \Sigma H_i/V_{si} =$							0.799

表 4-1-3(5) 水深-4.1m、第Ⅱ種地盤モデル

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)
				湿潤 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )		
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.025
3	As上	砂質土	-4.10	-	20.0	190.0	0.073
4	As下	砂質土	-18.00	-	20.0	250.0	0.092
5	Base	基盤	-41.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s =$	0.199
$T=4 \Sigma H_i/V_{si} =$							0.796

表 4-1-3(6) 水深-5.1m、第Ⅱ種地盤モデル

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)
				湿潤 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )		
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.030
3	As上	砂質土	-5.10	-	20.0	190.0	0.068
4	As下	砂質土	-18.00	-	20.0	250.0	0.092
5	Base	基盤	-41.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s =$	0.199
$T=4 \Sigma H_i/V_{si} =$							0.797

iv) 構造諸元

以上の設計条件で、安定計算を実施し、構造諸元を設定した。安定計算は、「設計参考図書」に示され漁港の係船岸に一般に使用されている方法を使用した。設定した構造諸元を図 4-1-2 に示す。なお、構造物周辺の地盤条件は同じであるため、Ⅰ、Ⅱ種地盤の構造諸元は同一となる。

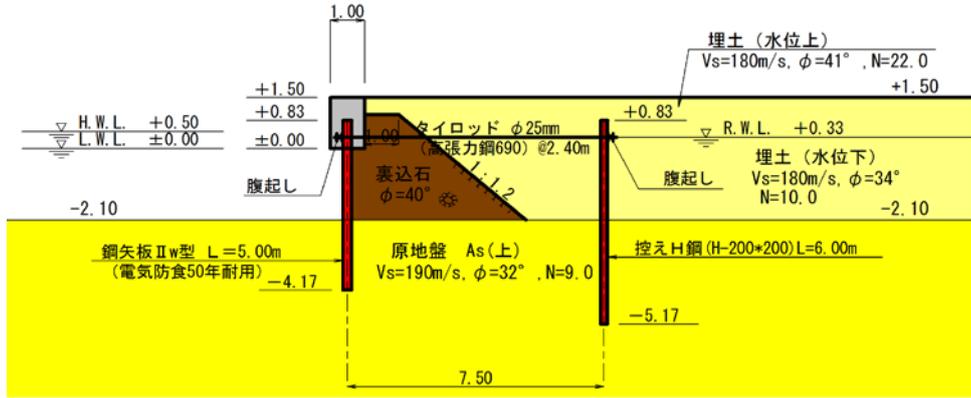


図 4-1-2(1) 設定した構造諸元 (水深-2.1m)

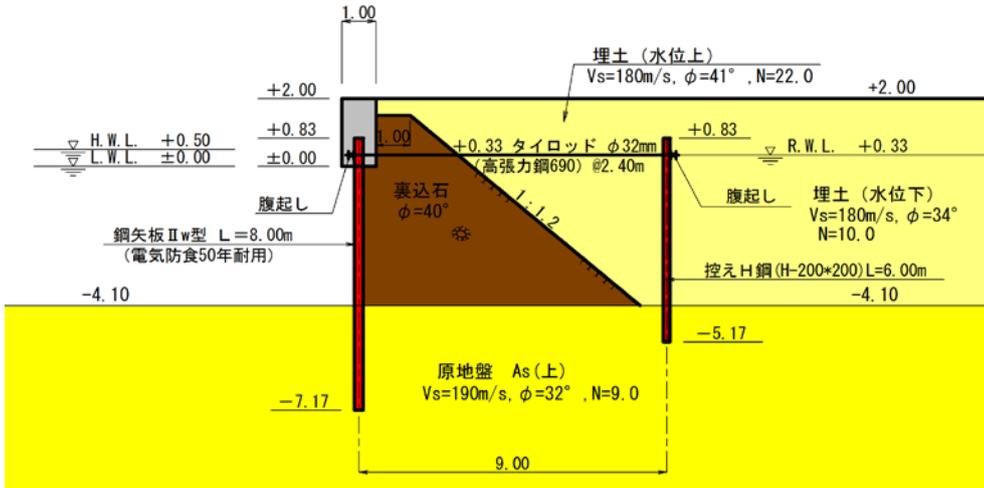


図 4-1-2(2) 設定した構造諸元 (水深-4.1m)

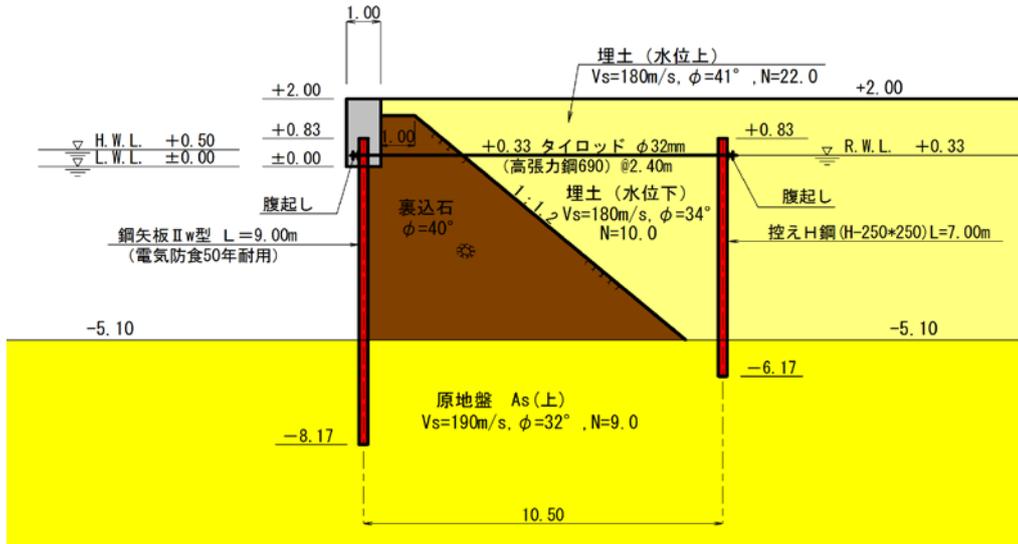


図 4-1-2(3) 設定した構造諸元 (水深-5.1m)

### ③ 二次元地震応答解析

#### i) 解析手法

検討に用いる二次元地震応答解析ツールは、既往検討（文献<sup>2) 4)</sup>ならびに水産基盤整備調査委託事業「平成 26 年度漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」・「平成 27 年度漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査」と同様に二次元非線形地震応答解析コード FLIP<sup>5)</sup>とした。

#### ii) 地盤および構造部材の定数

##### (a) 地盤定数

FLIP による解析では、地盤の変形特性を規定するため、表 4-1-4 に示すようなパラメータが必要となる。以下に、主な入力定数の設定方法を示す。

表 4-1-4 FLIP 解析で必要となる地盤定数

分類	パラメータ	
物理試験結果	$\gamma$	単位体積重量
	$n$	間隙率
動的変形特性	$\sigma_{ma}'$	$G_{ma}$ 、 $K_{ma}$ に対応する平均有効応力
	$G_{ma}$	初期せん断剛性( $\sigma_m' = \sigma_{ma}'$ における値)
	$K_{ma}$	初期体積弾性係数( $\sigma_m' = \sigma_{ma}'$ における値)
	$\phi_r'$	せん断抵抗角
	$c$	粘着力
	$h_{max}$	履歴減衰の上限值

##### (b) 単位体積重量 $\gamma$

「② 検討断面の設定」に示した値を用いる。

##### (c) 基準有効拘束圧 $\sigma_{ma}'$

層中心の平均有効応力で、98 (kN/m<sup>2</sup>)に設定した。

##### (d) 初期せん断剛性 $G_{ma}$

$G_{ma} = \rho V_s^2$ より設定した。

ここに、 $\rho$  : 密度 (kN/m<sup>3</sup>)

$V_s$  : せん断波速度 (m/sec)

なお、平均有効応力  $\sigma_{ma}'$  (=98kN/m<sup>2</sup>)に対応する値とした。また、 $V_s$ は「② 検討断面の設定」に示した値を用いた。

##### (e) 初期体積弾性係数 $K_{ma}$

$K_{ma} = \{2(1+\nu)\} / \{3(1-2\nu)\} G_{ma}$ より設定した。

ここに、 $\nu$  : ポアソン比 (=0.33)

##### (f) 基準有効拘束圧 $\sigma_{ma}'$ (=98kN/m<sup>2</sup>)に対する N 値

基準有効拘束圧に対する N 値で、 $G_{ma} = \rho V_{sma}^2$  および  $V_{sma} = 89.8 N_{131}^{0.341}$  より設定した。

(g) せん断抵抗角  $\phi_f'$ 、粘着力  $c$

せん断抵抗角  $\phi_f'$  については、文献<sup>6)</sup>に示される、相対密度  $D_r$  とせん断抵抗角  $\phi_d$  の関係より設定した。なお、相対密度は、 $D_r = 21\sqrt{\{100N/(\sigma_v' + 70)\}}$  (Meyerhof) の関係から  $N$  値より設定した。

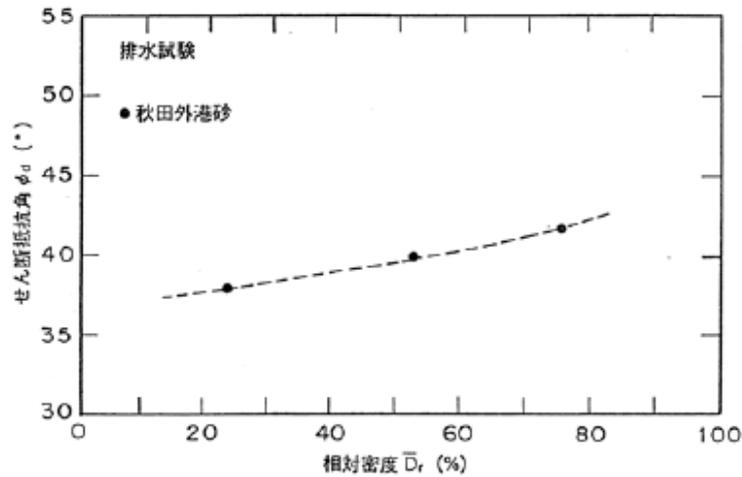


図 4-1-3 相対密度  $D_r$  とせん断抵抗角  $\phi_d$  の関係 (文献<sup>6)</sup>)

(h) 履歴減衰の上限値  $h_{max}$

文献<sup>7)</sup>に示される  $I_p < 30$  の試料に対する既往の動的変形特性試験結果を参考に、 $h_{max} = 0.24$  に設定した。

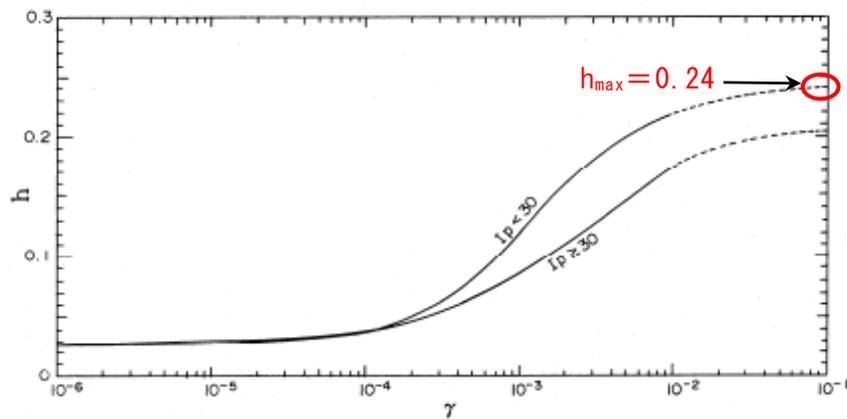


図 4-1-4  $h \sim \gamma$  関係図 (文献<sup>7)</sup>)

(i) 間隙率  $n$

砂質土は  $n = 0.45$  に設定した。

以上より設定した地盤定数を表 4-1-5 にまとめて示す。

表 4-1-5(1) FLIP の地盤定数 (水深-2.1m)

■FLIP入力データ (構造水深(-2.1m)地盤モデル (第I種地盤))

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 せん断剛性 $G_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 弾性係数 $K_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	せん断 抵抗角 $\phi$ (度)	粘着力 $c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	最大減衰 $h_{max}$	間隙率 $n$
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )									
1	Bs	砂質土	1.50	18.0	-	180.0	0.007	98.00	209,633	546,690	44	0	0.24	0.45
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.014	98.00	131,159	342,041	41	0	0.24	0.45
3	As	砂質土	-2.10	-	20.0	190.0	0.073	98.00	78,579	204,923	39	0	0.24	0.45
4	Base	基盤	-16.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.093	-	-	-	-	-	-	-

■FLIP入力データ (構造水深(-2.1m)地盤モデル (第II種地盤))

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 せん断剛性 $G_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 弾性係数 $K_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	せん断 抵抗角 $\phi$ (度)	粘着力 $c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	最大減衰 $h_{max}$	間隙率 $n$
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )									
1	Bs	砂質土	1.50	18.0	-	180.0	0.007	98.00	209,633	546,690	44	0	0.24	0.45
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.014	98.00	131,159	342,041	41	0	0.24	0.45
3	As上	砂質土	-2.10	-	20.0	190.0	0.084	98.00	75,367	196,546	39	0	0.24	0.45
4	As下	砂質土	-18.00	-	20.0	250.0	0.096	98.00	80,957	211,122	39	0	0.24	0.45
5	Base	基盤	-42.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.200	-	-	-	-	-	-	-

表 4-1-5(2) FLIP の地盤定数 (水深-4.1m)

■FLIP入力データ (構造水深(-4.1m)地盤モデル (第I種地盤))

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 せん断剛性 $G_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 弾性係数 $K_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	せん断 抵抗角 $\phi$ (度)	粘着力 $c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	最大減衰 $h_{max}$	間隙率 $n$
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )									
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009	98.00	175,467	457,589	43	0	0.24	0.45
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.025	98.00	104,605	272,795	40	0	0.24	0.45
3	As	砂質土	-4.10	-	20.0	190.0	0.063	98.00	72,789	189,823	39	0	0.24	0.45
5	Base	基盤	-16.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.097	-	-	-	-	-	-	-

■FLIP入力データ (構造水深(-4.1m)地盤モデル (第II種地盤))

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 せん断剛性 $G_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 弾性係数 $K_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	せん断 抵抗角 $\phi$ (度)	粘着力 $c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	最大減衰 $h_{max}$	間隙率 $n$
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )									
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009	98.00	175,467	457,589	43	0	0.24	0.45
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.025	98.00	104,605	272,795	40	0	0.24	0.45
3	As上	砂質土	-4.10	-	20.0	190.0	0.073	98.00	70,214	183,107	39	0	0.24	0.45
4	As下	砂質土	-18.00	-	20.0	250.0	0.092	98.00	80,462	209,832	39	0	0.24	0.45
5	Base	基盤	-41.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.199	-	-	-	-	-	-	-

表 4-1-5(3) FLIP の地盤定数 (水深-5.1m)

■FLIP入力データ (構造水深(-5.1m)地盤モデル (第I種地盤))

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 せん断剛性 $G_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 弾性係数 $K_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	せん断 抵抗角 $\phi$ (度)	粘着力 $c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	最大減衰 $h_{max}$	間隙率 $n$
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )									
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009	98.00	175,467	457,589	43	0	0.24	0.45
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.030	98.00	99,930	260,601	40	0	0.24	0.45
3	As	砂質土	-5.10	-	20.0	190.0	0.057	98.00	71,467	186,374	39	0	0.24	0.45
5	Base	基盤	-16.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.097	-	-	-	-	-	-	-

■FLIP入力データ (構造水深(-5.1m)地盤モデル (第II種地盤))

	土質	分類	層上面 標高 (m)	単位体積重量		せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	$h/V_s$ (sec)	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 せん断剛性 $G_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	基準体積 弾性係数 $K_{ma}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	せん断 抵抗角 $\phi$ (度)	粘着力 $c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	最大減衰 $h_{max}$	間隙率 $n$
				湿潤 $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	飽和 $\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )									
1	Bs	砂質土	2.00	18.0	-	180.0	0.009	98.00	175,467	457,589	43	0	0.24	0.45
2	Bs	砂質土	0.33	-	20.0	180.0	0.030	98.00	99,930	260,601	40	0	0.24	0.45
3	As上	砂質土	-5.10	-	20.0	190.0	0.068	98.00	69,025	180,006	39	0	0.24	0.45
4	As下	砂質土	-18.00	-	20.0	250.0	0.092	98.00	80,462	209,832	39	0	0.24	0.45
5	Base	基盤	-41.00	-	20.0	$\Sigma H/V_s=$	0.199	-	-	-	-	-	-	-

(j) 裏込石・基礎捨石に関する定数

裏込石・基礎捨石は、マルチスプリング要素によりモデル化し、文献<sup>8)</sup>に示される一般値に設定した。表 4-1-6 に、裏込石・基礎捨石に関する解析定数を示す。

表 4-1-6 裏込石・基礎捨石に関する解析定数

材料名	湿潤単位 体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和単位 体積重量 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波 速度 $V_s$ (m/sec)	せん断 抵抗角 $\phi$ (°)	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	基準せん断 剛性 $G_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	基準体積 弾性係数 $K_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	最大減衰 $\eta_{max}$	間隙率 $n$	ポアソン比 $\nu'$
裏込石(空中)	18.0	-	300	35.0	20.0	98	180,000	469,000	0.24	0.45	0.33
裏込石(水中)	-	20.0	300	35.0	20.0	98	180,000	469,000	0.24	0.45	0.33
基礎捨石	-	20.0	300	35.0	20.0	98	180,000	469,000	0.24	0.45	0.33

(k) 鋼材に関する定数

矢板、控え直杭は、供用期間中（50年）の腐食を考慮して単位幅当りの断面諸元を設定した。矢板と控え直杭は、材料非線形性を考慮してバイリニアモデルを適用し、タイ材は圧縮力を受持たず、引張力のみ受持つように非線形バネ要素でモデル化した。表 4-1-7 に、鋼材に関する解析定数を示す。

なお、26～27年度のⅢ種地盤の解析では供用期間を30年としていた。しかし今年度の解析を開始するにあたり再検討を行った結果、次ページの「注 供用期間を見直した理由について」に記した理由により供用期間を50年に変更することとした。実施済みのⅢ種地盤の解析についても供用期間を50年に変更し、供用期間中の腐食を考慮して単位幅当りの断面諸元を設定しなおして解析をやり直した。やり直した結果は、供用期間30年の場合（26～27年度の報告書に記述）とわずかな違いが生じたが、結果の解釈が変わるような大きな違いは生じなかった。この報告書に載せているⅢ種地盤の結果は、供用期間を50年とした解析の結果である。

表 4-1-7(1) 鋼材に関する解析定数（水深-2.1m）

No.	部材名称	材質	種類	高さ(m)		腐食代(mm)		降伏応力 $\sigma_y$ <sup>※3</sup> (kN/m <sup>2</sup> )	設置間隔 (有効幅) (m)	腐食後 断面積 A (m <sup>2</sup> /m)	腐食後 断面二次 モーメント I (m <sup>4</sup> /m)	腐食後 断面係数 Z (m <sup>3</sup> /m)	降伏曲げ モーメント My (kNm/m)	軸剛性EA (kN/m)
				上端	～ 下端	海側t1	陸側t2							
1	前面矢板①	SY295	II w型	+1.50	～ +0.00	0.00	0.00	295,000	0.60	1.31E-02	1.30E-04	1.00E-03	295	-
2	前面矢板②	SY295	II w型	+0.00	～ -1.00	0.00	1.00	295,000	0.60	1.18E-02	1.17E-04	9.00E-04	266	-
3	前面矢板③	SY295	II w型	-1.00	～ -2.10	0.50	1.00	295,000	0.60	1.12E-02	1.11E-04	8.50E-04	251	-
4	前面矢板④	SY295	II w型	-2.10	～ -4.17	0.15	1.00	295,000	0.60	1.17E-02	1.16E-04	8.90E-04	263	-
5	控えH型鋼	SHK400	H200	+0.83	～ -5.17	1.00	1.00	235,000	2.40	2.10E-03	1.58E-05	1.59E-04	37	-
6	タイロッド	高張力鋼690	φ25	+0.33	～ +0.33	1.50		690,000	2.40	0.00016	-	-	-	31,678

表 4-1-7(2) 鋼材に関する解析定数（水深-4.1m）

No.	部材名称	材質	種類	高さ (m)		腐食代 (mm)		降伏応力 $\sigma_y$ ※3 (kN/m <sup>2</sup> )	設置間隔 (有効幅) (m)	腐食後断面積 A (m <sup>2</sup> /m)	腐食後断面二次モーメント I (m <sup>4</sup> /m)	腐食後断面係数 Z (m <sup>3</sup> /m)	降伏曲げモーメント My (kNm/m)	軸剛性 EA (kN/m)
				上端 ~ 下端	海側 t1	陸側 t2								
1	前面矢板①	SY295	II w型	+2.00 ~ +0.00	0.00	0.00	295,000	0.60	1.31E-02	1.30E-04	1.00E-03	295	—	
2	前面矢板②	SY295	II w型	+0.00 ~ -1.00	0.00	1.00	295,000	0.60	1.18E-02	1.17E-04	9.00E-04	266	—	
3	前面矢板③	SY295	II w型	-1.00 ~ -4.10	0.50	1.00	295,000	0.60	1.12E-02	1.11E-04	8.50E-04	251	—	
4	前面矢板④	SY295	II w型	-4.10 ~ -7.17	0.15	1.00	295,000	0.60	1.17E-02	1.16E-04	8.90E-04	263	—	
5	控えH型鋼	SHK400	H200	+0.83 ~ -5.17	1.00	1.00	235,000	2.40	2.10E-03	1.58E-05	1.59E-04	37	—	
6	タイロッド	高張力鋼690	φ 32	+0.33 ~ +0.33	1.50		690,000	2.40	0.00028	—	—	—	55,043	

表 4-1-7(3) 鋼材に関する解析定数（水深-5.1m）

No.	部材名称	材質	種類	高さ (m)		腐食代 (mm)		降伏応力 $\sigma_y$ ※3 (kN/m <sup>2</sup> )	設置間隔 (有効幅) (m)	腐食後断面積 A (m <sup>2</sup> /m)	腐食後断面二次モーメント I (m <sup>4</sup> /m)	腐食後断面係数 Z (m <sup>3</sup> /m)	降伏曲げモーメント My (kNm/m)	軸剛性 EA (kN/m)
				上端 ~ 下端	海側 t1	陸側 t2								
1	前面矢板①	SY295	II w型	+2.00 ~ +0.00	0.00	0.00	295,000	0.60	1.31E-02	1.30E-04	1.00E-03	295	—	
2	前面矢板②	SY295	II w型	+0.00 ~ -1.00	0.00	1.00	295,000	0.60	1.18E-02	1.17E-04	9.00E-04	266	—	
3	前面矢板③	SY295	II w型	-1.00 ~ -5.10	0.50	1.00	295,000	0.60	1.12E-02	1.11E-04	8.50E-04	251	—	
4	前面矢板④	SY295	II w型	-5.10 ~ -8.17	0.15	1.00	295,000	0.60	1.17E-02	1.16E-04	8.90E-04	263	—	
5	控えH型鋼	SHK400	H250	+0.83 ~ -6.17	1.00	1.00	235,000	2.40	3.13E-03	3.73E-05	3.01E-04	71	—	
6	タイロッド	高張力鋼690	φ 32	+0.33 ~ +0.33	1.50		690,000	2.40	0.00028	—	—	—	55,043	

【注 供用期間を見直した理由について】

現在に至るまで、漁港の係船岸は部材の耐用年数を 30 年として設計することが一般的であった。しかし「設計参考図書」に、一般的な漁港の施設では設計供用期間 50 年を標準的な値として用いることが多いとある (p.8) ことから、今後は、矢板式係船岸の設計供用期間は 50 年が標準的となると考えられる。すると、本体工となる矢板本体、土中部材となるタイ材、控え工などの耐用年数を 50 年（あるいはそれ以上）として性能照査することが増えると考えられる。

鋼部材の耐用年数と性能照査との関係について、以下に 2 つの例を示す。

例 1 鋼部材の耐用年数を 50 年に設定する場合

建造 → → → → → → → 腐食が進行 → → → → → → → 50 年後の断面

↳ 要求性能を満たすか照査

例 2 鋼部材の耐用年数を 30 年に設定する場合

建造 → → → 腐食が進行 → → → 30 年後の断面

↳ 要求性能を満たすか照査

性能照査における要求性能は例 1 でも例 2 でも同じである。つまり、静的な安定計算で OK か NG かを判断する際の判断基準は例 1 も例 2 も変わらない。

但し、鋼部材は一般に、入手可能な規格品の中から選定される。規格品の諸元（矢板幅、杭径など）は飛び飛びの値になっている（なお、諸元は時代とともに新製品の開発などにより変化することがある）。

この事を踏まえると、耐用年数の違い（50 年、30 年）は、断面に、次の状況ア、状

況イのいずれかの状況をもたらす。

(状況ア) 例1と例2で異なる鋼材が選定され、鋼材の規格値が飛び飛びであることと、年数による腐食量の違いのために、例1の50年経過後と例2の30年後経過後では断面に相違が生じる。

(状況イ) 例1と例2で同じ鋼材が選定されるが、年数による腐食量の違いのために、例1の30年経過後と例2の50年経過後では断面に相違が生じる。

ここで、26～27年度に検討対象とした3パターン(Ⅲ種地盤。水深-2.1m、-4.1m、-5.1m)について、鋼部材の耐用年数を50年とした場合の性能照査(静的な安定計算)をして断面を算出し、その結果を26～27年度の断面(鋼部材の耐用年数を30年とした)と比較した。

その結果、耐用年数30年を50年に変更した場合、-4.1mモデルの腹起し部材がワンランク上がった(つまり上記の(状況ア)に該当)。それ以外は変更が無かった(上記の(状況イ)に該当)。

つまり、-4.1mモデルの腹起し部材以外は、腐食による剛性低下が部材余裕の中に収まり、耐用年数30年でも50年でも当初断面は同じ断面となった。つまり耐用年数50年のほうが腐食が進むぶん、やや断面剛性が小さくなる結果となった。

一般論として、断面モデルの選定は、「安全側の結果が導かれるほうを採る」という観点でおこなうのが良い。

断面剛性が小さいモデルを使って二次元地震応答解析すると、安全側のフィルター関数が導き出される。つまり今回の設計条件では、供用期間50年、つまり耐用年数50年としたモデルを使用するほうが安全側のフィルター関数が得られる。そのため、供用期間50年のモデルを使用することとした。

#### (I) レーレー減衰定数

レーレー減衰定数 $\beta$ は、背後自由地盤部の1次固有周期に対して1%の減衰定数を与える方法により設定した。

第Ⅰ種地盤の自由地盤部の一次固有周期 $T(=4\sum H/V_s) \approx 0.4s$ より、

$$\beta = 0.01T/\pi = 0.01 \times 0.4/3.14 \approx 0.001$$

第Ⅱ種地盤の自由地盤部の一次固有周期 $T(=4\sum H/V_s) \approx 0.8s$ より、

$$\beta = 0.01T/\pi = 0.01 \times 1.2/3.14 \approx 0.003$$

#### iii) 解析条件

##### (a) 境界条件

境界条件は、初期自重解析および地震応答解析のそれぞれで以下に示すように設定した。

##### (b) 初期自重解析

自由地盤部および不規則領域ともに、解析領域左右端を鉛直ローラー、解析領域下

端を固定境界とする。

### (c) 地震応答解析

自由地盤部では、側方自由境界、底面粘性境界とする。一方、不規則領域では、側方は粘性境界を通じて自由地盤部と接続する Joiner 境界とする。底面は粘性境界とし、2E 波にて地震波を入力する。

### (d) 数値解析条件

表 4-1-8 に、数値解析条件を示す。

表 4-1-8 数値解析条件

要素積分法	SRI (体積成分 1 次、偏差成分 2 次)
時間積分法	Wilson $\theta$ 法 ( $\theta = 1.4$ )
時間ステップ	0.01sec
解析実行時間	0.0~40.0sec
減衰定数	$\beta = 0.004$ (第 III 種地盤)
使用プログラム	FLIP Ver. 7.1.9

### iv) 有限要素モデルの作成

上記で設定した断面および諸定数を取り入れて有限要素モデルを作成した。その例を図 4-1-5 に示す。なお実際に用いた有限要素モデルは岸壁法線から海側、陸側ともに 100m の範囲をモデル化しており、図 4-1-5 にはその一部分 (岸壁法線から約 20m 範囲) を示している。

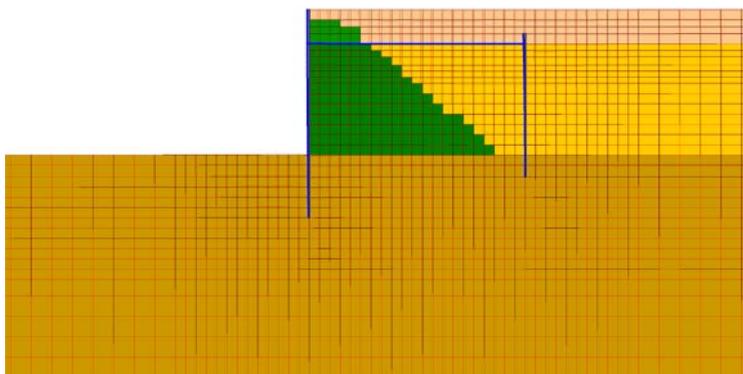


図 4-1-5 有限要素モデルの例 (水深-5.1m, I 種地盤の例)

## v) 入力波形

入力波形は、既往検討（文献<sup>2) 4)</sup>ならびに水産基盤整備調査委託事業「平成 26 年度漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」・「平成 27 年度漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査」にならい、継続時間 40sec の正弦波、主要動継続時間を 5 秒とし、主要動の前後にはコサイン状のテーパーをかけた波形を用いた。周波数は、26～27 年度のⅢ種地盤の検討と同様に、0.4～4.0Hz の範囲で 10 種類（0.4、0.6、0.8、1.0、1.1、1.2、1.5、2.0、3.0、4.0Hz）とした。波形の一例として、図 4-1-6 に周波数 1.0Hz、加速度 100Gal の波形を示す。

許容変形量（解析において目標値とする変形量）は  $\delta = 10$  cm とした。すなわち、周波数別に、係船岸天端の残留水平変形量が 10cm になる正弦波の振幅を探索した。

26～27 年度のⅢ種地盤 ( $T=1.2$ s) の解析では、変形量  $\delta = 10$ cm と  $\delta = 20$ cm の解析を行い、それぞれの結果を使用してフィルター関数の案を示した。しかし  $\delta = 20$ cm の解析では部材に降伏が生じたケースが多かった。レベル 1 地震動に対する耐震設計では一般に降伏の発生を許容しない。 $\delta = 20$ cm の解析で降伏が多発したことから、漁港の矢板式係船岸のレベル 1 地震動に対する耐震設計において許容変形量  $\delta$  を 20cm に設定することは不適切と考えられる。そのため今年度は  $\delta = 10$ cm の解析のみ行った。また、本報告書に載せているⅢ種地盤の解析結果は、特に断らない限り  $\delta = 10$ cm の解析結果である。

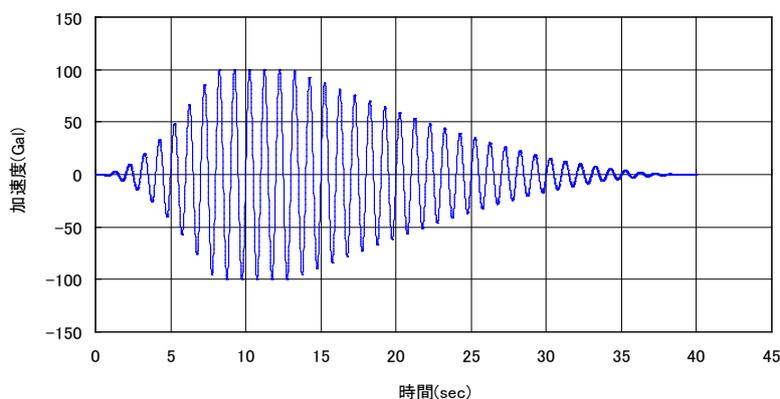


図 4-1-6 入力波形の一例（周波数 1.0Hz、加速度 100Gal）

### ④ 矢板式フィルター（案）の作成

解析により得られた周波数と応答値の関係を近似するフィルターを作成した。フィルターの関数は「港湾基準」に合わせて式(4-1-1)・式(4-1-2)・式(4-1-3)とし、関数に含まれる 6 つの係数  $c_1 \sim c_6$  および  $f_b$  を求めた。求め方の細部は解析結果を踏まえて判断するものとした。

$$a(f) = \begin{cases} b & (f \leq f_b(\text{Hz})) \\ \frac{b}{1 - \{g(f)\}^2 + c_1 g(f)i} & (f > f_b(\text{Hz})) \end{cases} \quad \text{--- 式(4-1-1)}$$

$$g(f) = c_6(f - f_b) \quad \text{--- 式(4-1-2)}$$

$$b = c_2 \frac{H}{H_R} + c_3 \frac{T_b}{T_{bR}} + c_4 \frac{T_u}{T_{uR}} + c_5 \quad \text{--- 式(4-1-3)}$$

$f$  : 周波数 (Hz)

$f_b$  : 境界周波数 (Hz)

$i$  : 虚数単位

$H$  : 壁高 (m)

$H_R$  : 基準壁高 (= 15.0m)

$T_b$  : 背後地盤の初期固有周期 (s)

$T_{bR}$  : 背後地盤の基準初期固有周期 (= 0.8s)

$T_u$  : 壁体下地盤の初期固有周期 (s)

$T_{uR}$  : 壁体下地盤の基準初期固有周期 (= 0.4s)

## 2) 矢板式係船岸の部材応力および変形特性の検討

「1) 矢板式係船岸のフィルター関数の検討」の解析結果とⅢ種地盤の解析結果（供用期間 50 年の断面における解析結果）から、矢板、タイロッド、控え杭の変形と応力のデータを抽出し、分布形状や大小関係を図化した。これを既往の知見と比較することにより、水深の浅い矢板式係船岸の部材応力と変形特性を明らかにした。

## 3) レベル 1 地震動入力時の応答値確認および照査用震度の試算

「1) 矢板式係船岸のフィルター関数の検討」で設定したフィルター（案）の妥当性について、詳細な検証は 29 年度に地震動継続時間の影響、種々のレベル 1 地震動への適用性など多角的に実施されるものとし、今年度は実際の耐震設計に使用される地震動を想定して簡易な検証を行った。

具体的には、フィルター検討に用いたモデル（設計水平震度  $kh=0.10$ 、地盤条件としてⅠ・Ⅱ・Ⅲ種地盤の 3 種類、設計水深-4.1m。Ⅲ種地盤については供用期間 50 年の断面モデル）を用い、4 種類のレベル 1 地震動を入力する二次元地震応答解析（解析コードとして FLIP を使用）を実施した。使用した地震動は全国の港湾のレベル 1 地震動<sup>9)</sup>のうち特性の異なる 4 波形であり、岸壁天端の残留水平変形量（はらみ出し量）が 10cm となるよう、入力波の振幅を調整した。図 4-1-7 に検討地震動（振幅調整する前の波形とそのフーリエ振幅スペクトル）を示す。

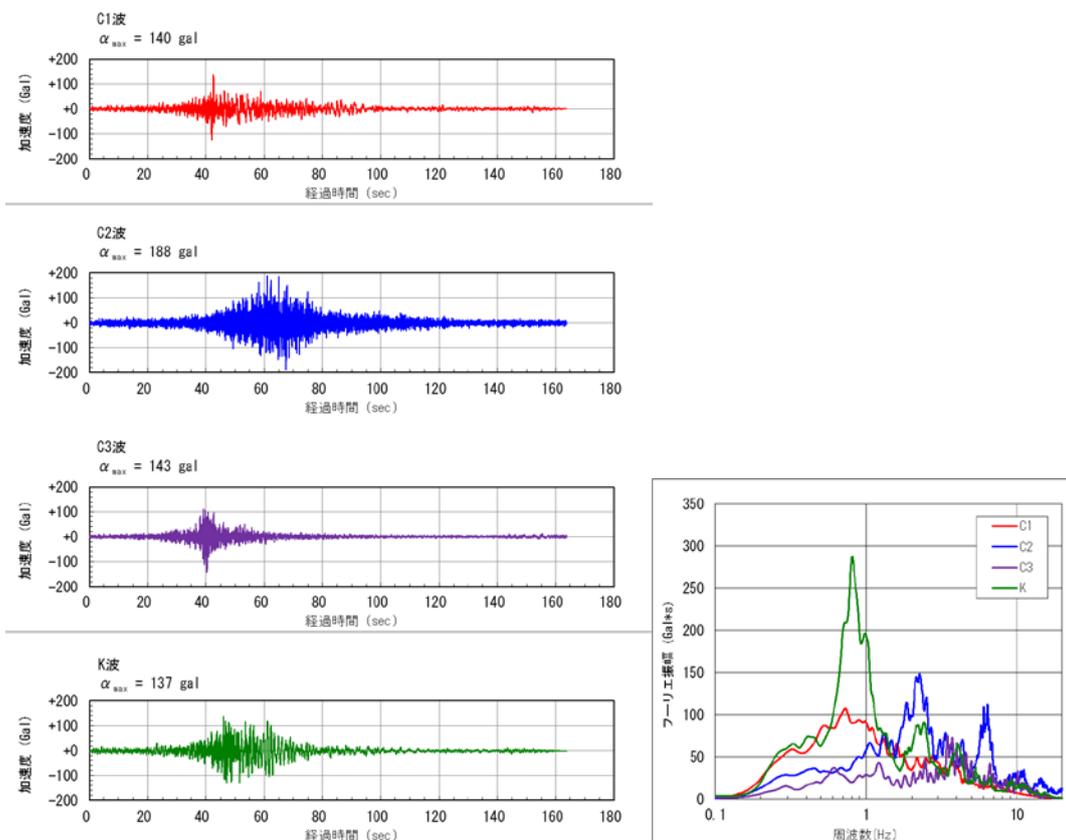


図 4-1-7 簡易な検証に使用した地震動(加速度時系列波形、加速度振幅スペクトル)

この解析で得られた地表面応答加速度のスペクトルに、「1) 矢板式係船岸のフィルター関数の検討」で設定した矢板式フィルター（案）を乗じ、さらに「港湾基準」の地震動の継続時間補正式を使用して、補正後の加速度最大値から照査用震度を求めた。

「1) 矢板式係船岸のフィルター関数の検討」で設定した矢板式フィルターは、「地表面加速度が 100gal の地震動は、設計水平震度 0.10 の施設に対し、岸壁天端に 10 cm の残留水平変形量をもたらす」という論理を素地として、地震動の周波数による変形への影響度の違いを設計水平震度に反映させるためのフィルターである。

したがって、本項「3) レベル 1 地震動入力時の応答値確認および照査用震度の試算」の解析で求まる照査用震度は 0.10 になるべきものである。0.10 に近い値が求まったか否かにより矢板式フィルターの妥当性を評価した。

### (3) 結果

#### 1) 矢板式係船岸のフィルター関数の検討

解析コード FLIP を使用し、岸壁天端の残留水平変形量が 10cm となるように振幅調整した正弦波を入力した二次元地震応答解析を実施した。その結果の例として水深 -5.1m、第 I 種地盤、周波数 0.4Hz の結果を図 4-1-8(1)に、周波数 4.0Hz の結果を図 4-1-8(2)に示す。

岸壁天端の残留変形量が 10cm となる条件について、正弦波の周波数と地表面応答加速度の関係を表 4-1-9、図 4-1-9 に示す。表 4-1-9 には工学的基盤に入力した波形の加速度振幅も併記している。

これより、既往検討と同様に高周波側では非常に大きな入力地震動が必要であるが、低周波側では小さな入力地震動で 10cm の変形が発生する結果となった。

また、本解析結果が設計水平震度 0.10 のモデルで算定されたことを考慮して、いずれの周波数においても地表面応答加速度が 100Gal となるような補正係数  $\alpha(f)$  を算出して図 4-1-10 に示す。これがフィルター関数の素地になるものである。

この解析で求めた部材応力と変形量を吟味した。その結果は「2) 矢板式係船岸の部材応力および変形特性の検討」で述べる。

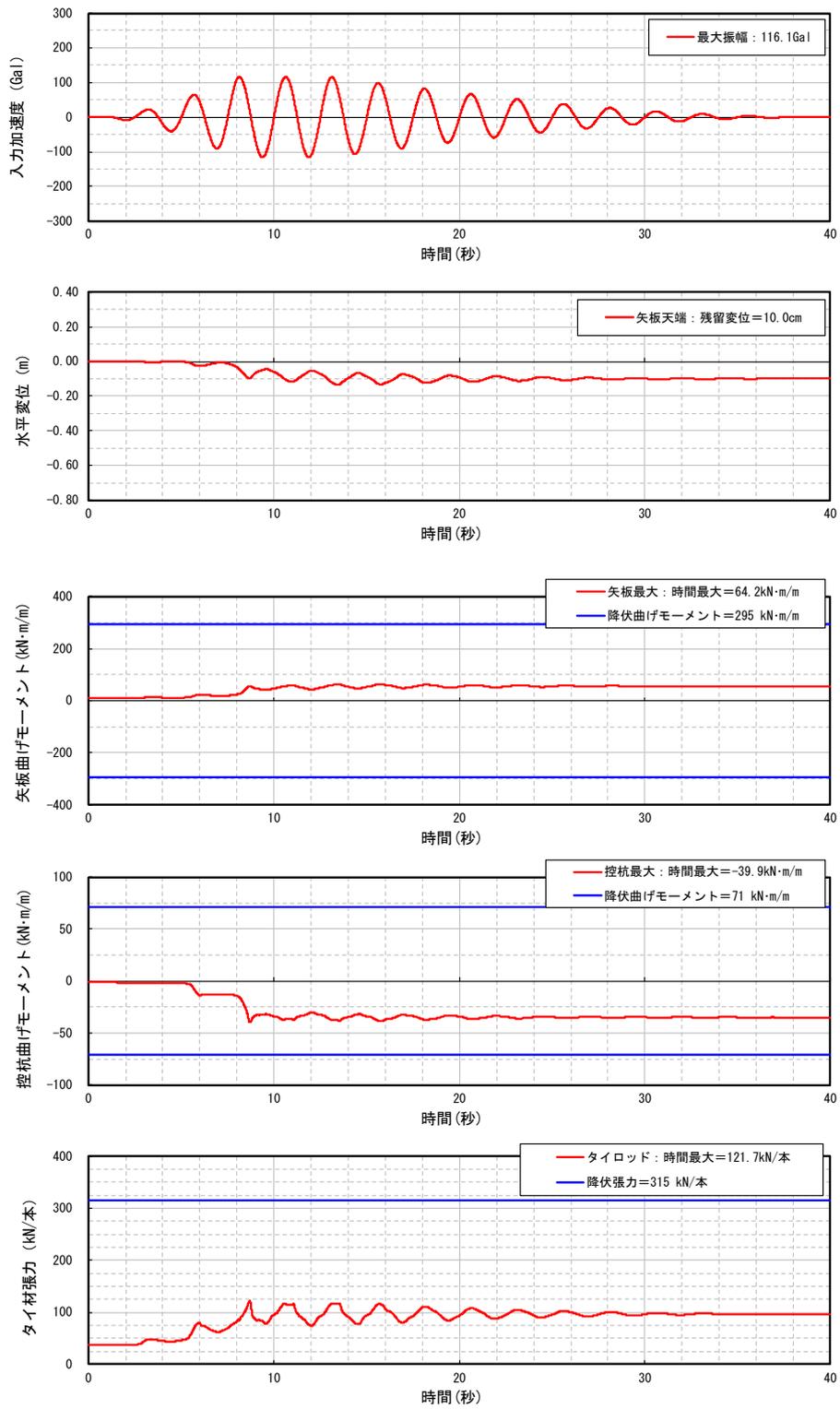


図 4-1-8(1) FLIP 解析結果(水深-5.1m, I 種地盤, 0.4Hz)

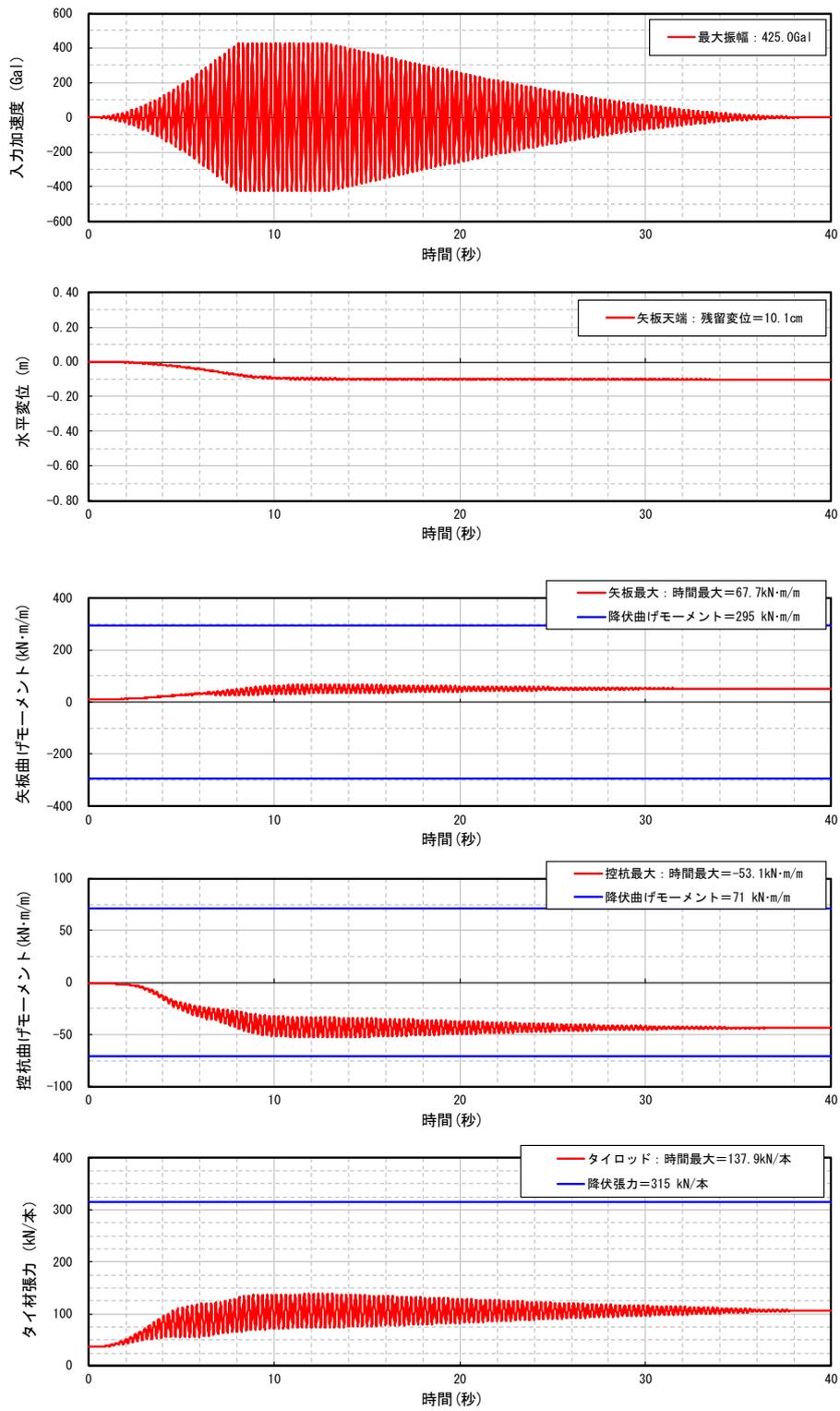


図 4-1-8(2) FLIP 解析結果(水深-5.1m, I 種地盤, 4.0Hz)

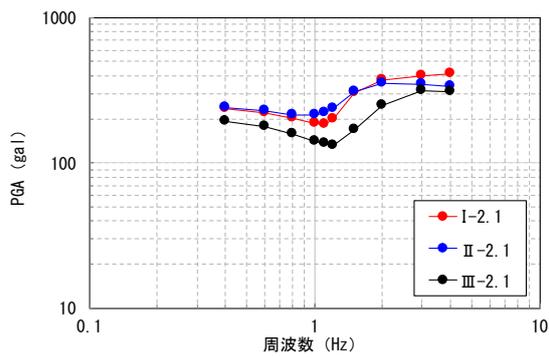
表 4-1-9 10cm 変形時の正弦波と地表面応答加速度の関係

	I 種地盤				II 種地盤				III 種地盤			
	周波数 Hz	振幅 Gal	PGA Gal	a(f) (100/PGA)	周波数 Hz	振幅 Gal	PGA Gal	a(f) (100/PGA)	周波数 Hz	振幅 Gal	PGA Gal	a(f) (100/PGA)
水深-2.1m	0.4	190.1	237.8	0.421	0.4	159.1	242.1	0.413	0.4	103.6	192.6	0.519
	0.6	164.0	222.6	0.449	0.6	142.6	230.2	0.434	0.6	93.1	179.0	0.559
	0.8	140.6	202.8	0.493	0.8	139.1	215.5	0.464	0.8	95.4	158.0	0.633
	1.0	121.8	186.5	0.536	1.0	151.6	213.7	0.468	1.0	99.7	141.0	0.709
	1.1	114.9	185.2	0.540	1.1	165.7	220.4	0.454	1.1	101.0	136.1	0.735
	1.2	114.1	201.7	0.496	1.2	187.5	235.2	0.425	1.2	101.2	132.5	0.755
	1.5	268.8	307.3	0.325	1.5	425.0	312.5	0.320	1.5	125.0	169.0	0.592
	2.0	800.0	371.5	0.269	2.0	3400.0	357.2	0.280	2.0	300.0	250.8	0.399
	3.0	4200.0	401.3	0.249	3.0	19200.0	348.1	0.287	3.0	4000.0	313.3	0.319
4.0	10800.0	412.0	0.243	4.0	45200.0	337.6	0.296	4.0	18400.0	308.5	0.324	
水深-4.1m	0.4	127.0	142.8	0.700	0.4	116.9	150.9	0.663	0.4	86.4	145.7	0.686
	0.6	122.7	151.5	0.660	0.6	104.6	154.8	0.646	0.6	65.3	134.4	0.744
	0.8	108.3	139.4	0.717	0.8	88.5	138.6	0.722	0.8	62.7	115.2	0.868
	1.0	90.9	122.6	0.816	1.0	77.9	118.6	0.843	1.0	65.7	99.9	1.001
	1.1	83.0	114.4	0.874	1.1	74.2	111.1	0.900	1.1	67.3	94.2	1.062
	1.2	75.7	106.4	0.940	1.2	71.0	104.5	0.957	1.2	68.3	90.0	1.111
	1.5	57.7	87.9	1.138	1.5	63.9	88.6	1.129	1.5	89.1	111.5	0.897
	2.0	64.1	109.5	0.913	2.0	93.8	113.5	0.881	2.0	193.8	202.1	0.495
	3.0	218.8	214.5	0.466	3.0	362.5	247.3	0.404	3.0	750.0	298.5	0.335
4.0	437.5	336.4	0.297	4.0	1000.0	313.8	0.319	4.0	4400.0	330.7	0.302	
水深-5.1m	0.4	116.1	129.6	0.772	0.4	107.9	136.7	0.732	0.4	80.2	130.0	0.769
	0.6	112.2	135.6	0.737	0.6	97.3	139.0	0.719	0.6	57.1	118.5	0.844
	0.8	98.8	124.9	0.801	0.8	80.1	122.9	0.814	0.8	51.8	99.3	1.007
	1.0	81.9	107.9	0.927	1.0	67.8	102.8	0.973	1.0	55.0	86.5	1.156
	1.1	74.3	100.2	0.998	1.1	63.4	95.1	1.052	1.1	56.7	81.3	1.230
	1.2	67.2	92.5	1.081	1.2	60.0	88.9	1.125	1.2	58.3	77.8	1.285
	1.5	50.3	74.7	1.339	1.5	53.8	75.9	1.318	1.5	84.4	104.3	0.959
	2.0	71.9	121.5	0.823	2.0	93.8	112.8	0.887	2.0	187.5	198.1	0.505
	3.0	212.5	209.1	0.478	3.0	337.5	240.6	0.416	3.0	600.0	289.6	0.345
4.0	425.0	336.6	0.297	4.0	800.0	307.4	0.325	4.0	2800.0	326.8	0.306	

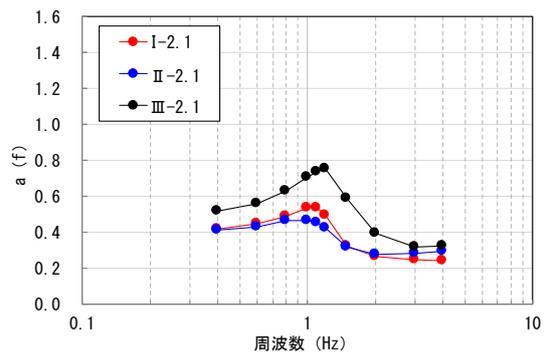
(注) 本表の「振幅 (Gal)」: 工学的基盤の入力加速度の振幅

「PGA」: 地表面加速度の最大値 (Peak Ground Acceleration)

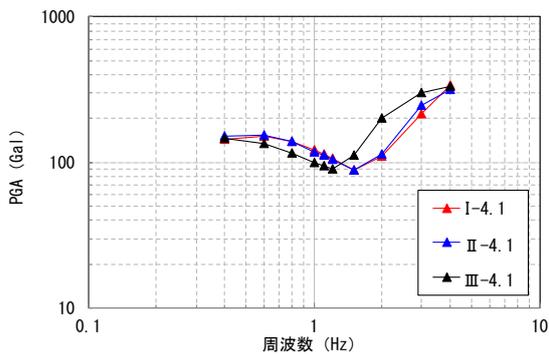
「a(f)」: フィルター関数を導出するための補正係数 ( =100÷PGA )



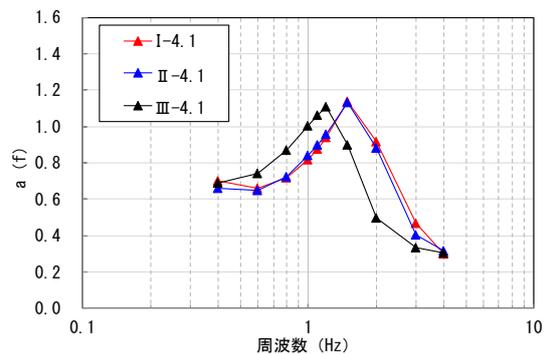
(水深-2.1m)



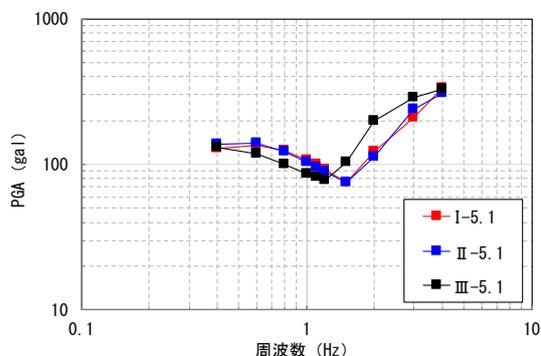
(水深-2.1m)



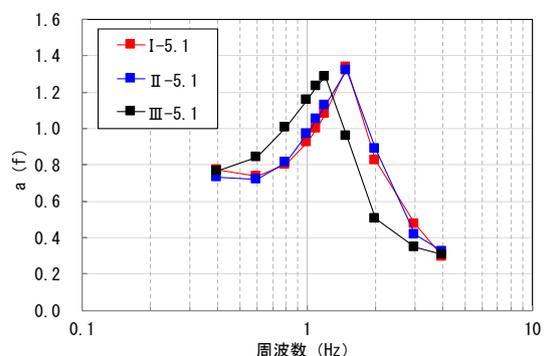
(水深-4.1m)



(水深-4.1m)



(水深-5.1m)



(水深-5.1m)

図 4-1-9 正弦波の周波数と  
地表面応答加速度 (PGA) の関係

図 4-1-10 周波数特性  
考慮用フィルター

解析結果を用いて、次の1~2の手順で、漁港の矢板式係船岸についてのフィルター関数(案)を4種類作成した。

[手順1: 境界周波数  $f_b$  以下のフィルター設定]

図 4-1-10 に示した  $a(f)$  値を吟味し、表 4-1-10 に示す①~④の4つの方法で目的変数  $b$  値(低周波側のフラット部分の高さ)と境界周波数  $f_b$ (フラット部分と右下がり部分の境界の周波数)を設定し、それぞれ、 $H/H_b$ 、 $T_b/T_bR$ 、 $T_u/T_uR$  を説明変数として

重回帰分析を行うことにより、係数  $c_2 \sim c_5$  を求めた。

表 4-1-10 フィルター設定方法の一覧

方法	目的変数 $b$ 値	境界周波数 $f_b$	備考
①	0.8Hz の $\alpha$ ( $f$ )	1.0Hz	港湾基準の手法
②	1.0Hz より小さい $\alpha$ ( $f$ ) の平均値	1.0Hz	
③	1.2Hz より小さい $\alpha$ ( $f$ ) の平均値	1.2Hz	
④	1.5Hz より小さい $\alpha$ ( $f$ ) の平均値	1.5Hz	

[手順 2 : 境界周波数  $f_b$  以上のフィルター設定]

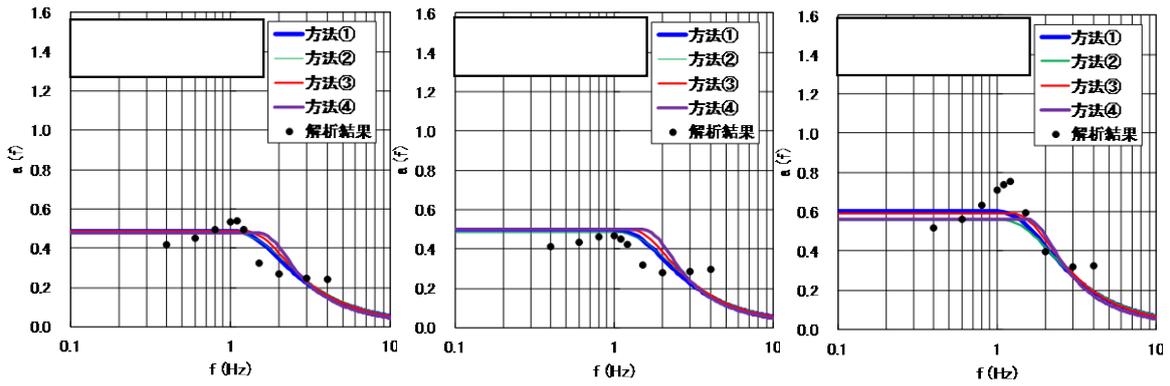
境界周波数  $f_b$  より高周波側は式(4-1-1)を用いて周波数と応答値の関係を近似する係数  $c_1$ 、 $c_6$  を求めた。具体的には、方法①～④それぞれについて、解析値と近似線の誤差が最小となる係数  $c_1$ 、 $c_6$  を最小二乗法により求め、その平均値を係数  $c_1$ 、 $c_6$  とした。

表 4-1-11 に、上述の方法①～④で設定したフィルター係数を示す。

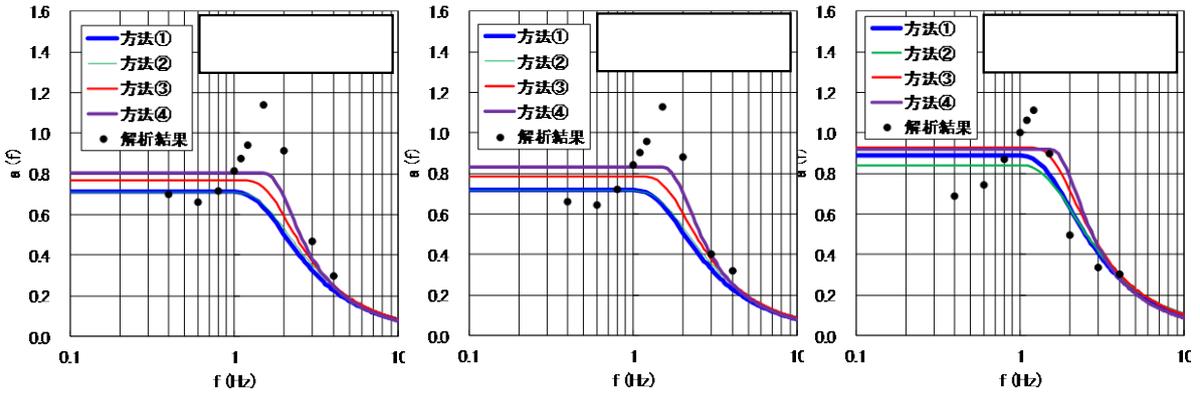
図 4-1-11 に解析結果と方法①～④で求めたフィルターの比較を示す。表 4-1-12 に方法①～④で求めたフィルターと解析結果との偏差より求めた分散を示す。この分散が小さいほどフィルターが解析結果を良く近似できているといえる。各ケースの分散の合計値を比較すると、方法④が最も小さくなっている。

表 4-1-11 変形量  $\delta=10\text{cm}$  に対するフィルター係数

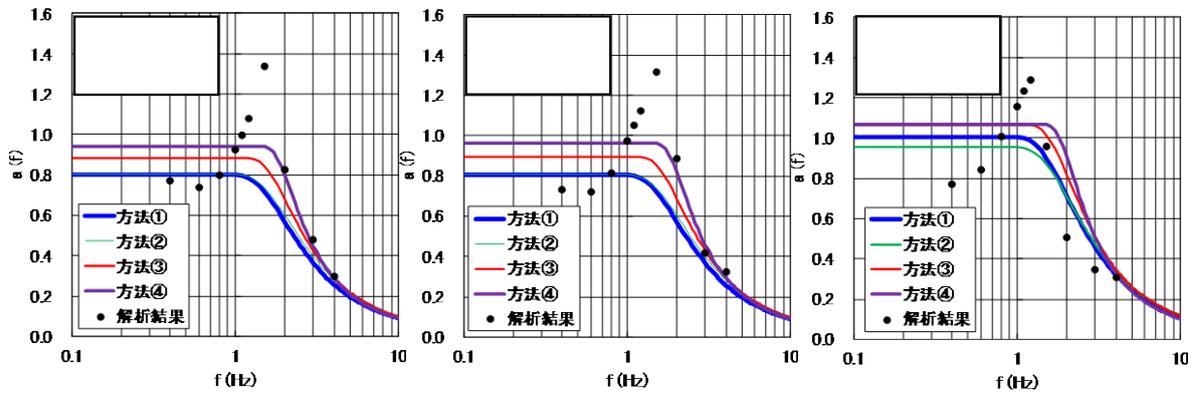
係数	方法①	方法②	方法③	方法④
$c_1$	12.003	9.925	11.695	14.877
$c_2$	0.534	0.801	1.036	1.632
$c_3$	1.932	1.416	1.581	0.866
$c_4$	-0.958	-0.702	-0.777	-0.410
$c_5$	0.162	0.141	0.071	-0.018
$c_6$	0.083	0.090	0.088	0.084
$f_b$	1.000	1.000	1.200	1.500



(水深-2.1m)



(水深-4.1m)



(水深-5.1m)

図 4-1-11 周波数特性考慮用フィルター

表 4-1-12 変形量  $\delta=10\text{cm}$  における各検討ケースの分散値とその合計値の比較

構造水深 (m)	地盤種別	方法①	方法②	方法③	方法④
-2.1	第Ⅰ種	0.0039	0.0039	0.0050	0.0063
	第Ⅱ種	0.0063	0.0053	0.0081	0.0100
	第Ⅲ種	0.0091	0.0126	0.0090	0.0127
-4.1	第Ⅰ種	0.0542	0.0500	0.0337	0.0234
	第Ⅱ種	0.0507	0.0474	0.0310	0.0219
	第Ⅲ種	0.0197	0.0231	0.0214	0.0247
-5.1	第Ⅰ種	0.0611	0.0565	0.0363	0.0273
	第Ⅱ種	0.0671	0.0627	0.0400	0.0302
	第Ⅲ種	0.0307	0.0356	0.0357	0.0423
合計値		0.3027	0.2971	0.2203	0.1989

比較のため「港湾基準」の矢板式用フィルターを図 4-1-12 に示す。「港湾基準」のフィルターは、本調査で検討中の漁港の矢板式用フィルターに比べて、低周波側の一定値 (b 値) が小さく、一定値から右肩下がりに移行する境界の周波数が低周波側に位置する。この違いにより、本調査で検討中のフィルターによって計算される照査用震度は、「港湾基準」のフィルターによって計算された照査用震度よりも大きめになる。なお、「港湾基準」の矢板式用フィルターには b 値の上・下限値の規定があり、図 4-1-12 の b 値はすべて上限・下限のいずれかの規定が適用されて決まっている。

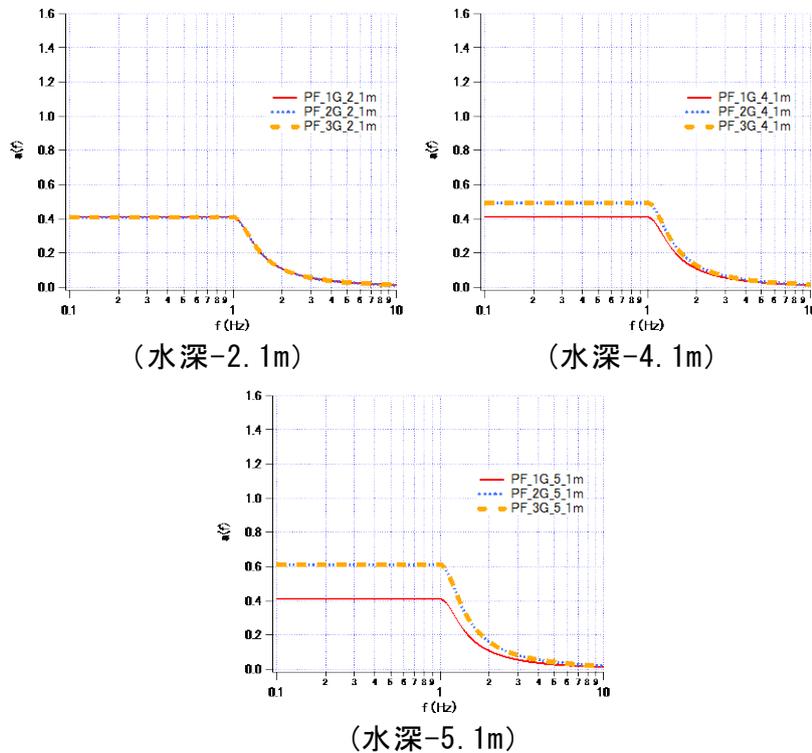


図 4-1-12 「港湾基準」の矢板式係船岸用フィルター例

## 2) 矢板式係船岸の部材応力および変形特性の検討

1)に示した解析結果とⅢ種地盤に対する解析結果を基に、応力と変形量の整理を行った。

### ①変位量と発生応力の整理

まず部材別の変位量と発生応力を整理した。この整理は、「1) 矢板式係船岸のフィルター関数の検討」で設定した10の周波数のうち、一つおきに5の周波数を対象とした。

その結果を図4-1-13に示す。矢板については-2.1mでは全体的に前方（海側）へ動く挙動を示し曲げモーメントの発生はごく小さく、-4.1m、-5.1mでは弓なりに変形して曲げモーメントが発生しているが降伏までの余裕が見られた。控え杭については弓なりに変形するケースが多く、発生する曲げモーメントの降伏に対する余裕は矢板よりも小さかった。また、控え杭の曲げモーメントが大きい場合にタイロッドの張力も大きく発生する傾向が見られた。

次に、矢板、タイロッド、控え杭の発生応力を「最大値÷降伏値」として整理した結果を図4-1-14に示す。また、図4-1-14で省いた周波数も加え、表示方法を変えて図4-1-15に示す。これより、降伏に対する余裕が小さいのは控え杭あるいはタイロッドであった。矢板の応力については余裕が大きい結果となった。控え杭が降伏に達するケースが2ケース、タイロッドの張力が降伏値に至るケースが1ケースあった。

また、矢板の水平変位と曲げモーメントの関係に着目した。発生する曲げモーメントは、矢板上部と下部の変位差と密接な関係があると考えられるため、最下部と最上部の水平変位の差と曲げモーメントとの関係を整理して図4-1-16に示す。解析途中の最大値に着目した整理と残留値（解析の最後に矢板最上部の変位量が10cmになった状態）に着目した整理をした。曲げモーメントは、降伏値に対する比として整理した。これより、水平変位と曲げモーメントの間に比例関係が見られ最大値に着目した場合も降伏値に着目した場合も同じ傾向であった。但し、図の左下にプロットされた、水平変位（最下部と最上部の差）が負値、つまり最上部より最下部のほうがはらみ出しが大きく、曲げモーメントがほとんど発生しないケースも見られた。これはいずれも水深-2.1mの解析結果であった。

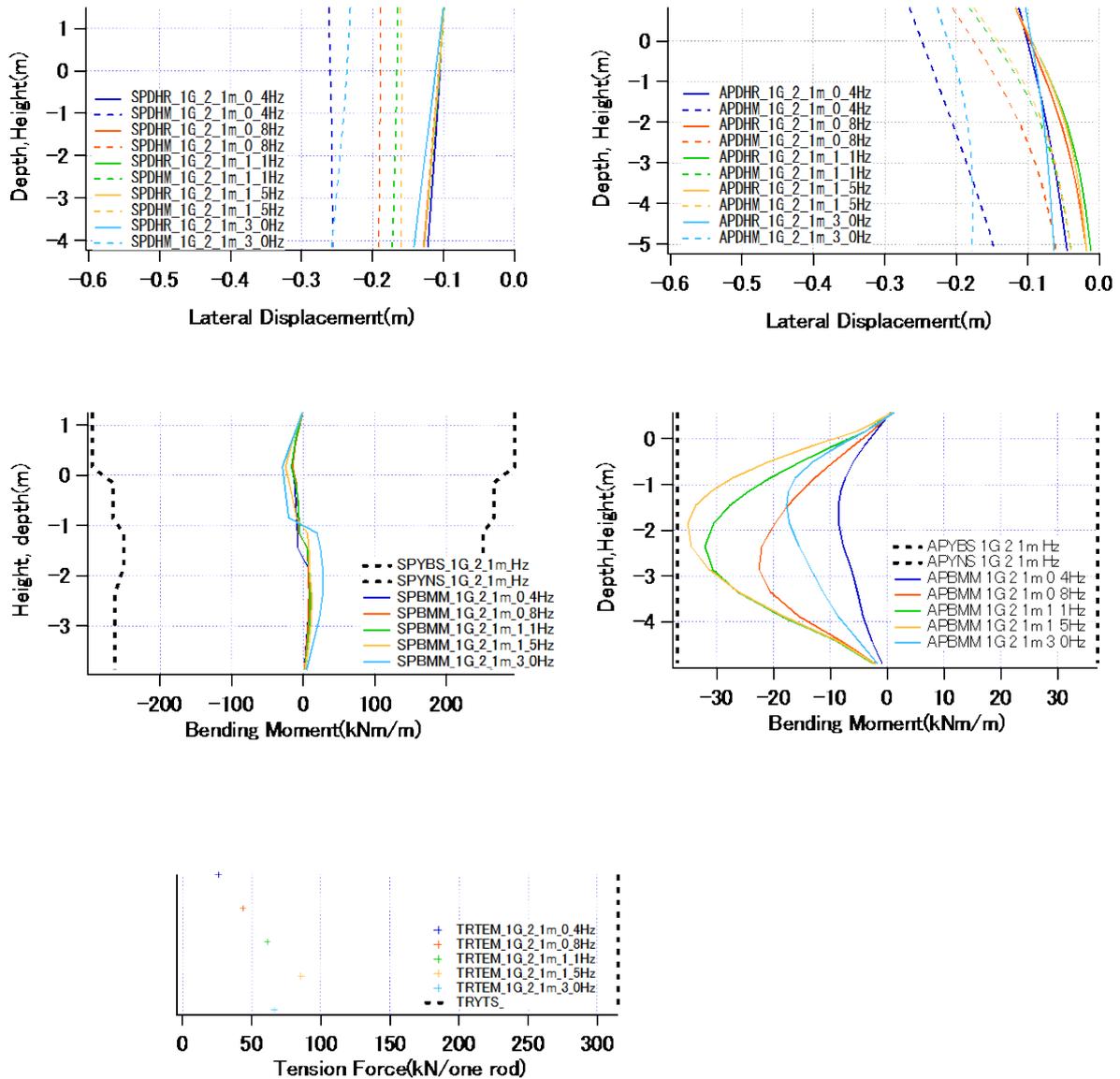


図 4-1-13(1) 部材別の変位量と発生応力 (I種地盤、水深-2.1m)

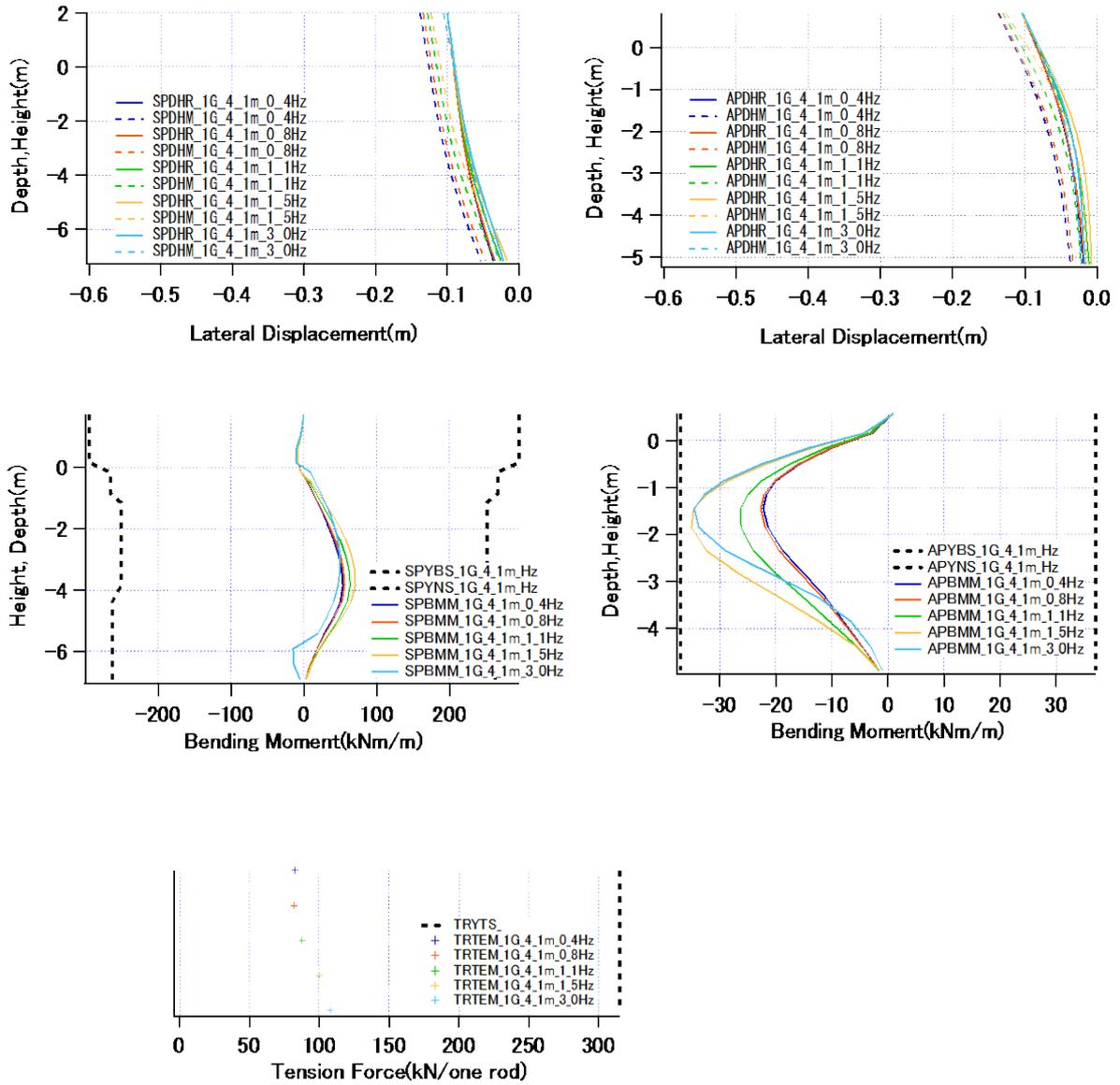


図 4-1-13(2) 部材別の変位量と発生応力 (I種地盤、水深-4.1m)

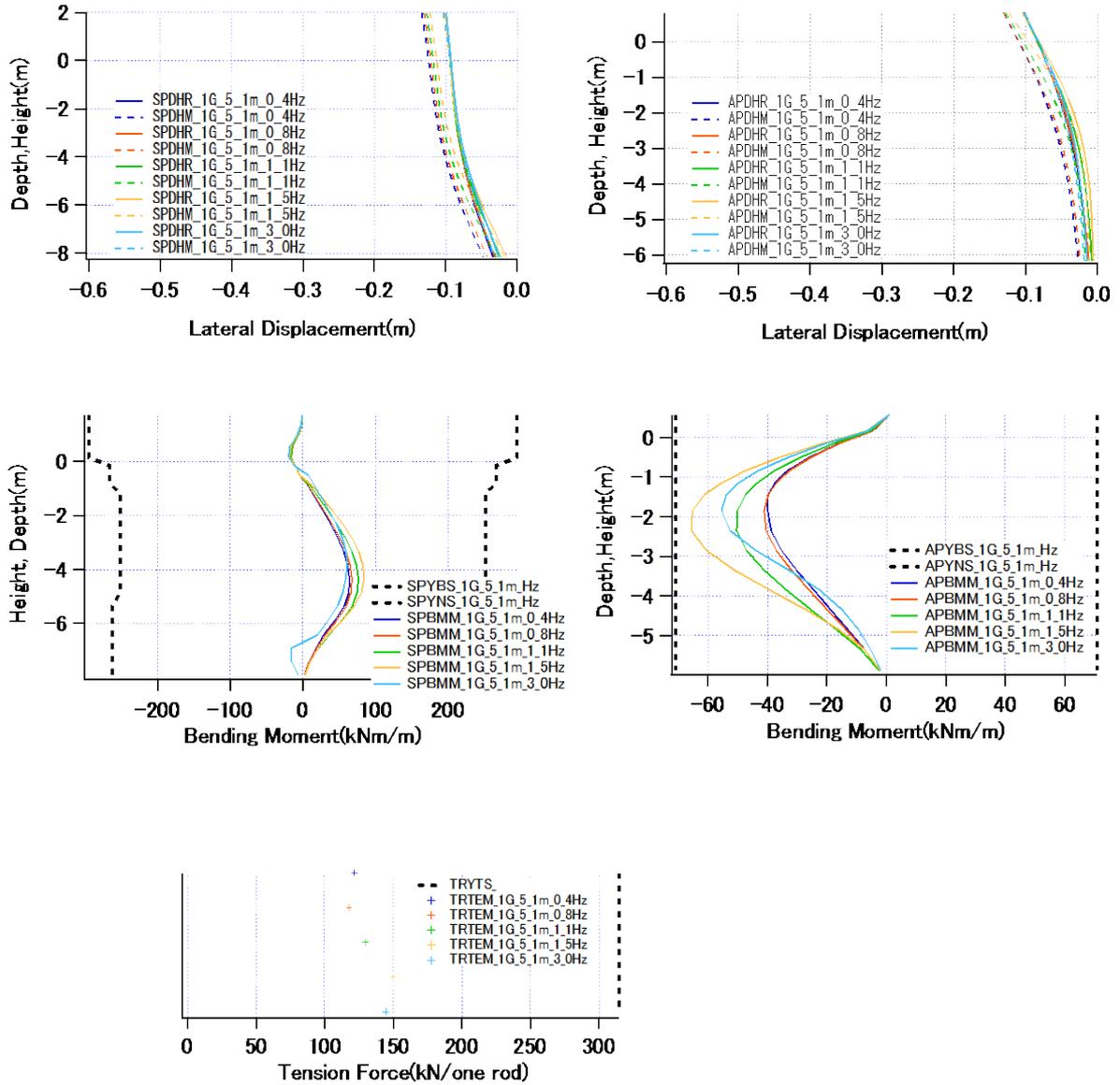


図 4-1-13(3) 部材別の変位量と発生応力 (I種地盤、水深-5.1m)

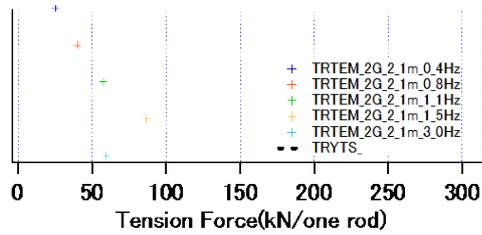
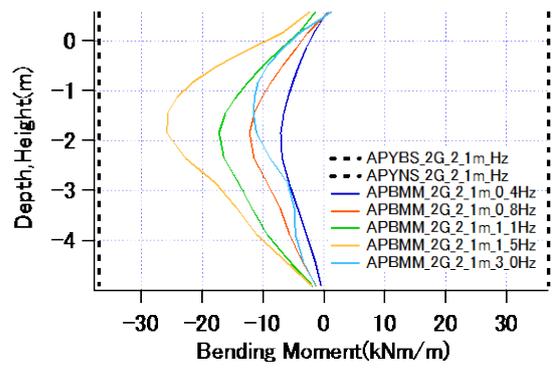
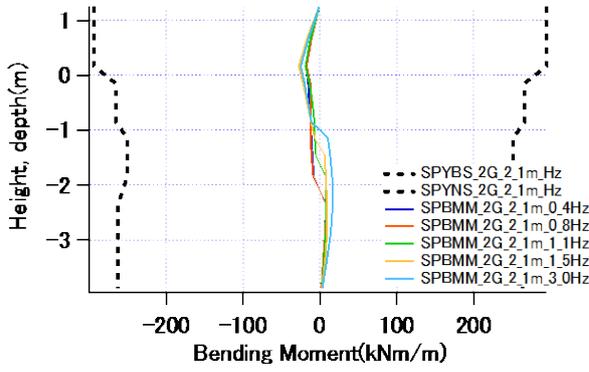
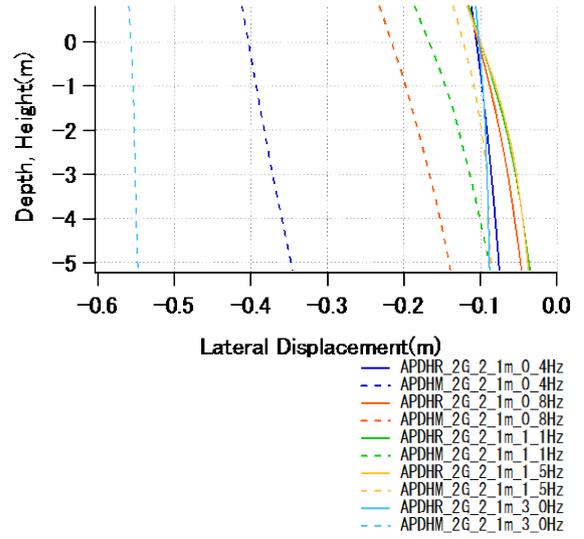
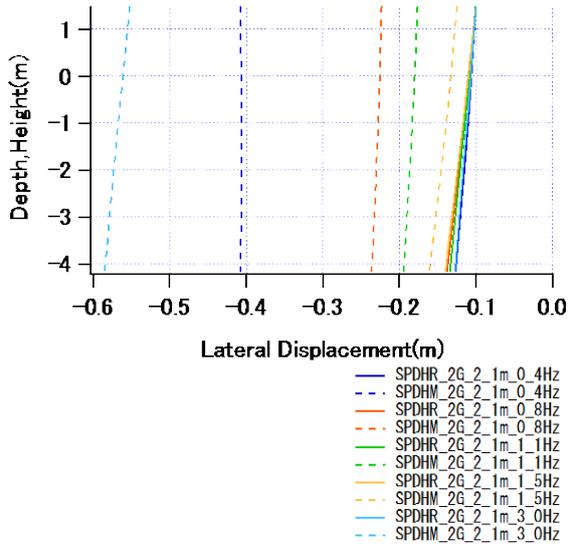


図 4-1-13(4) 部材別の変位量と発生応力 (Ⅱ種地盤、水深-2.1m)

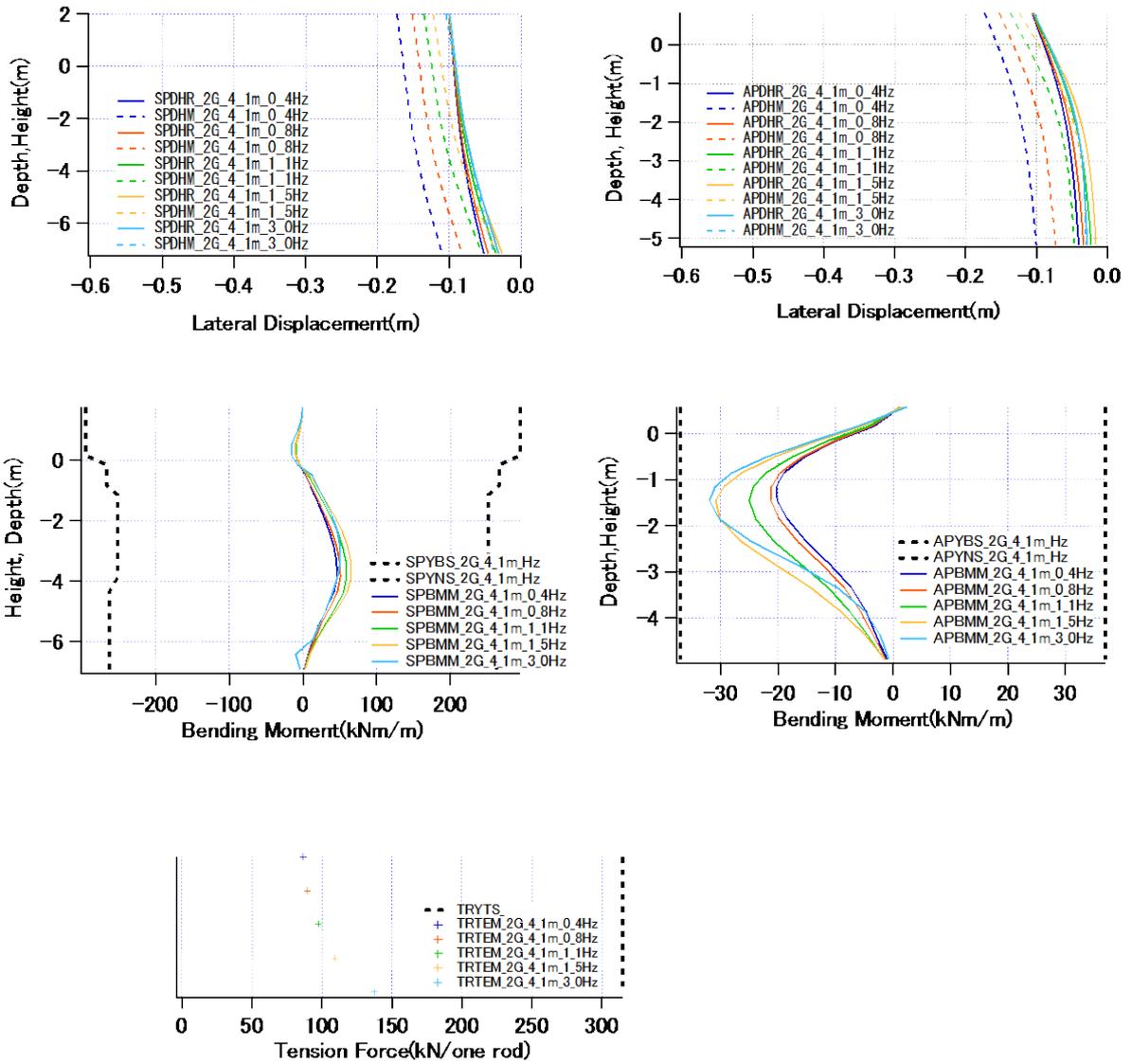


図 4-1-13(5) 部材別の変位量と発生応力 (Ⅱ種地盤、水深-4.1m)

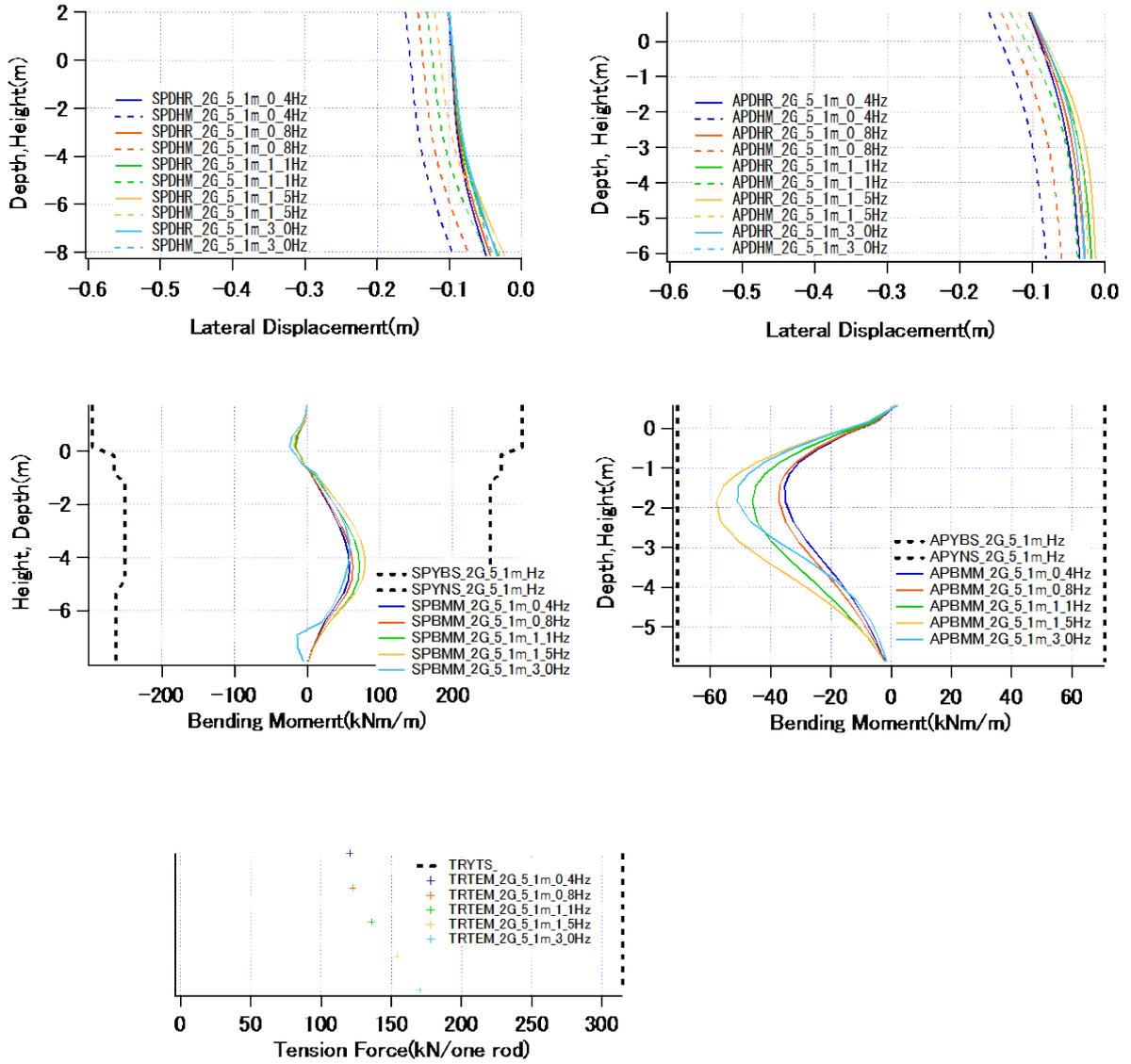


図 4-1-13(6) 部材別の変位量と発生応力 (Ⅱ種地盤、水深-5.1m)

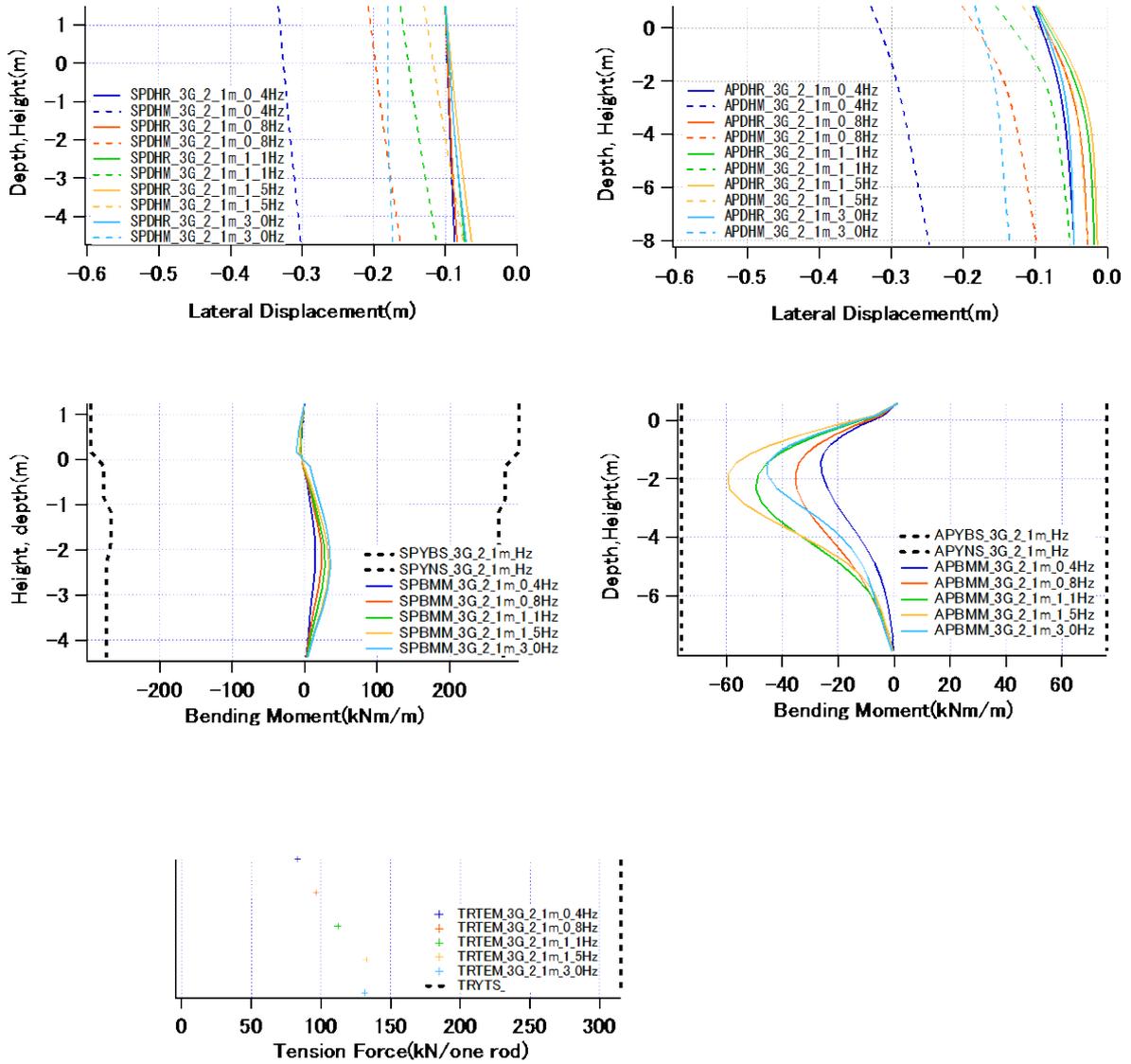


図 4-1-13(7) 部材別の変位量と発生応力 (Ⅲ種地盤、水深-2.1m)

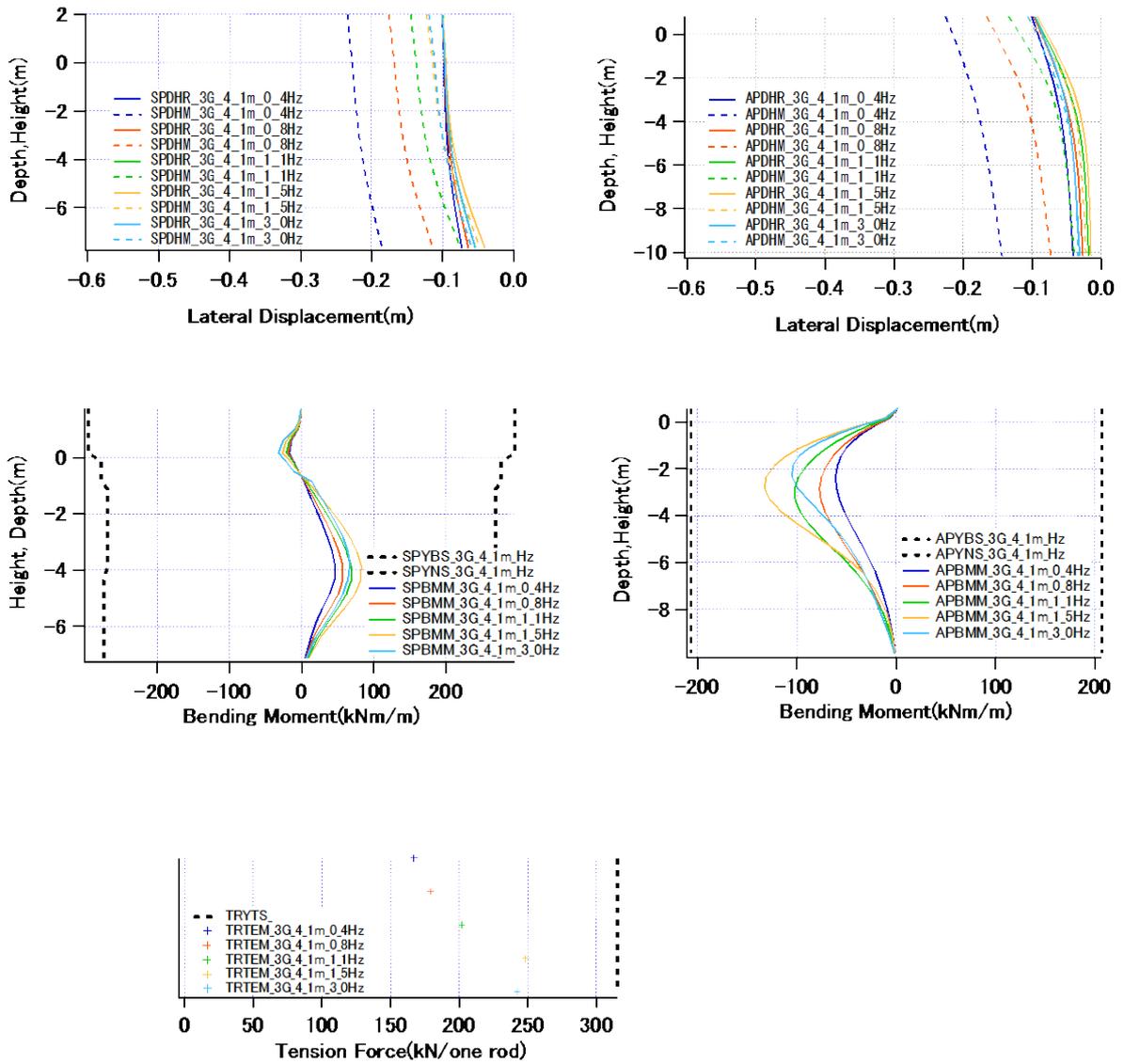


図 4-1-13(8) 部材別の変位量と発生応力 (Ⅲ種地盤、水深-4.1m)

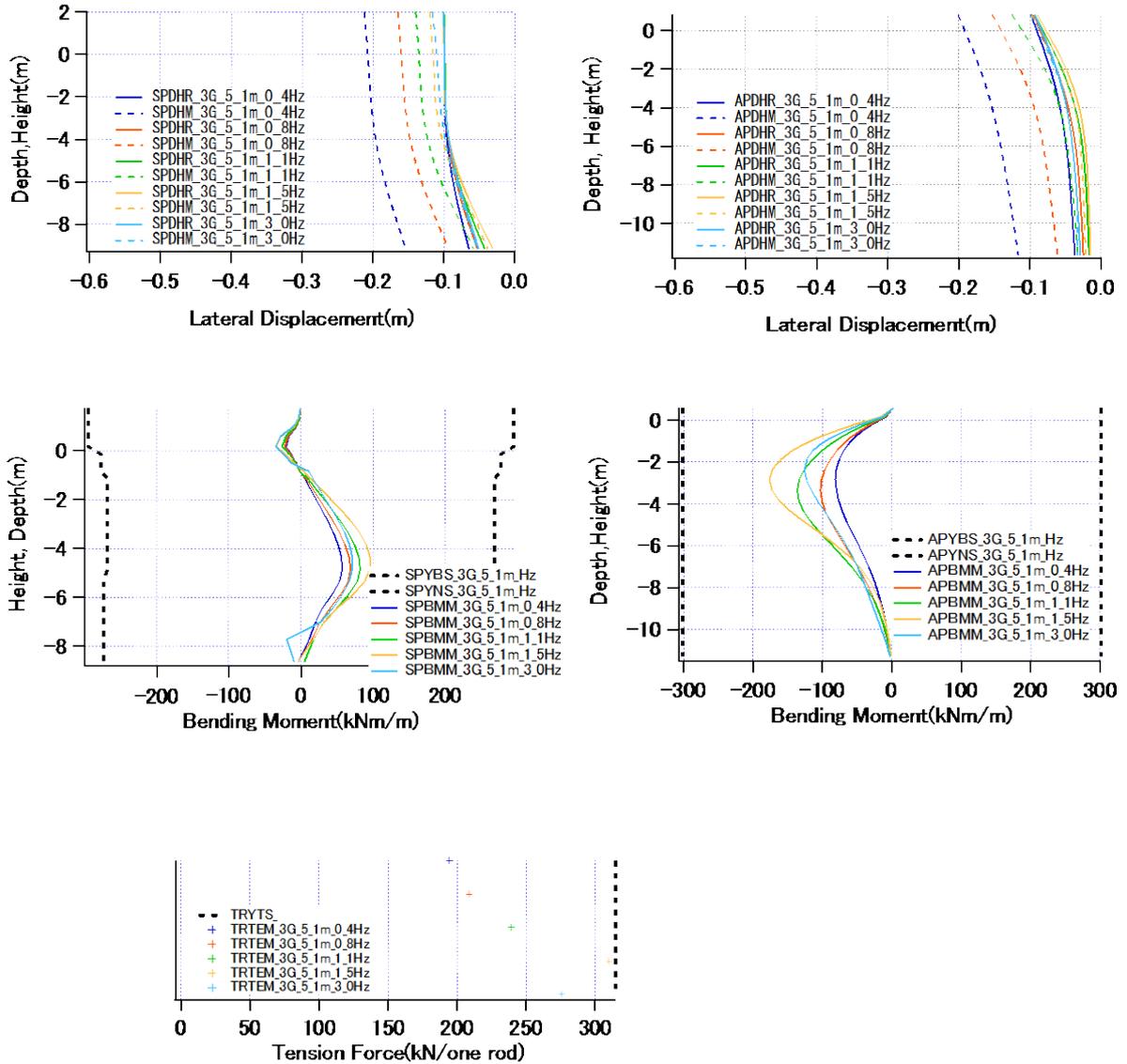
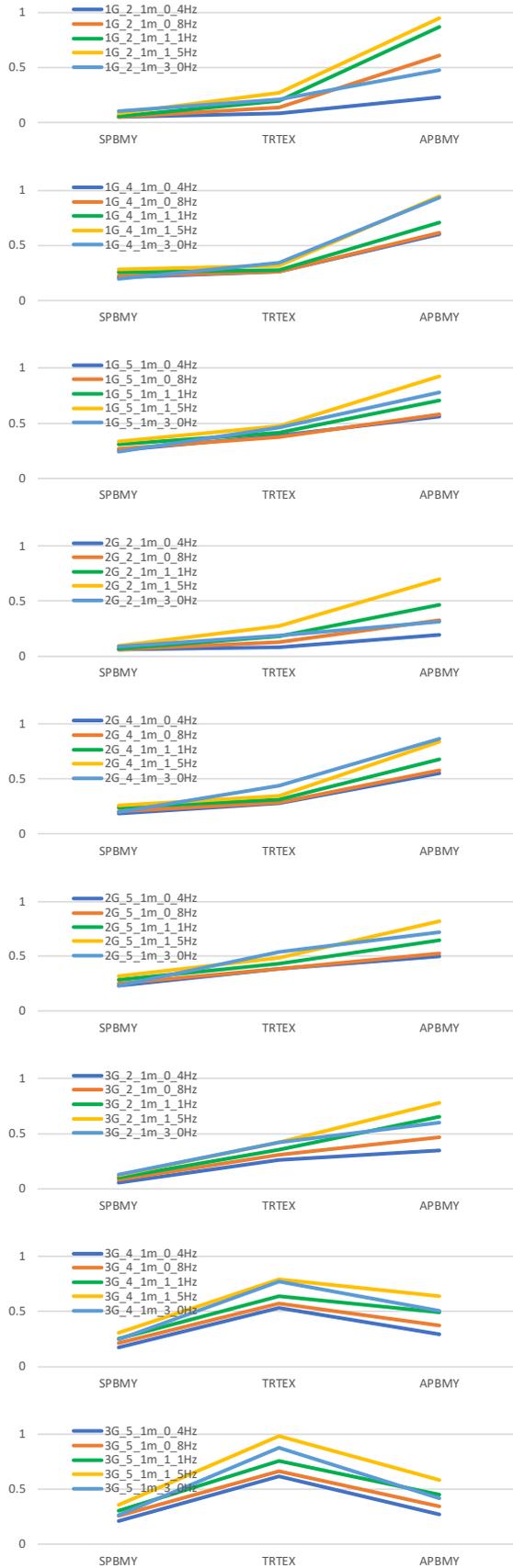


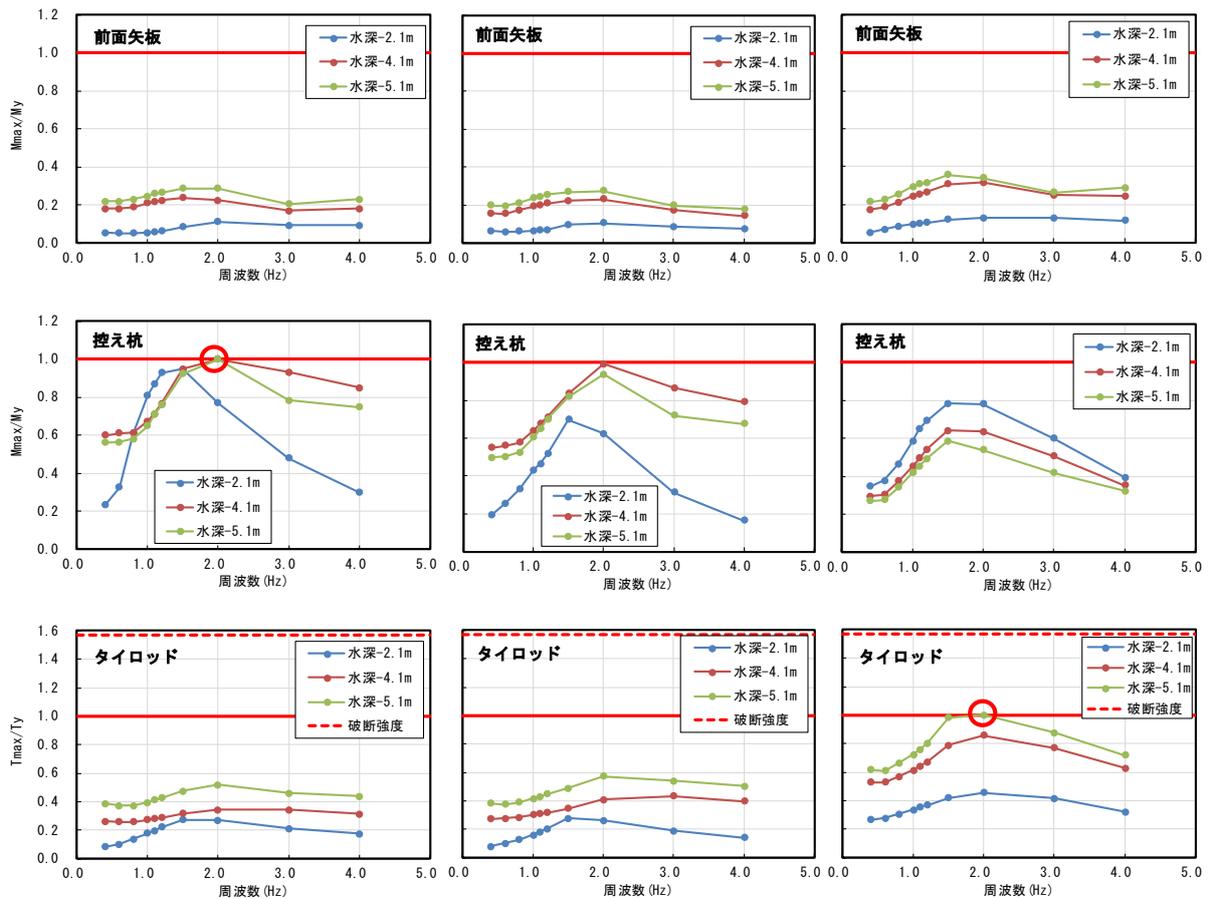
図 4-1-13(9) 部材別の変位量と発生応力 (Ⅲ種地盤、水深-5.1m)



【横軸の略号】  
 SPBMY：矢板の曲げモーメント  
 TRTEX：タイロッドの張力  
 APBMY：控え杭の曲げモーメント

【解析ケースの略号】  
 (例) 1G\_5\_1m\_0.4Hz  
 ① ② ③  
 ①：地盤種別 (上例は1種地盤)  
 ②：水深 (上例は5.1m)  
 ③：周波数 (上例は0.4Hz)

図 4-1-14 矢板、タイロッド、控え杭に発生した応力 (発生した最大値÷降伏値。地盤種別・水深別プロット)



(Ⅲ種地盤)

図 4-1-15 矢板、控え杭、タイロッドに発生した応力  
(発生した最大値÷降伏値。地盤種別・部材別プロット)

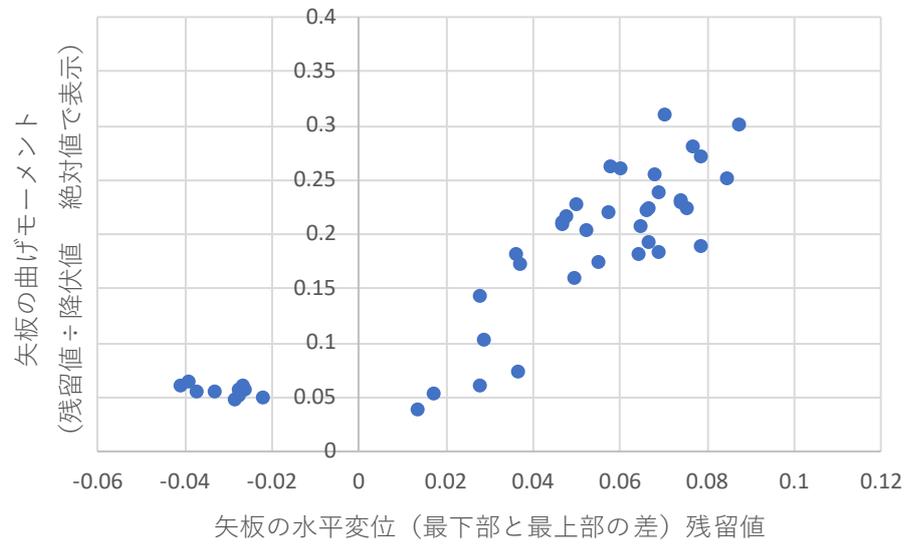
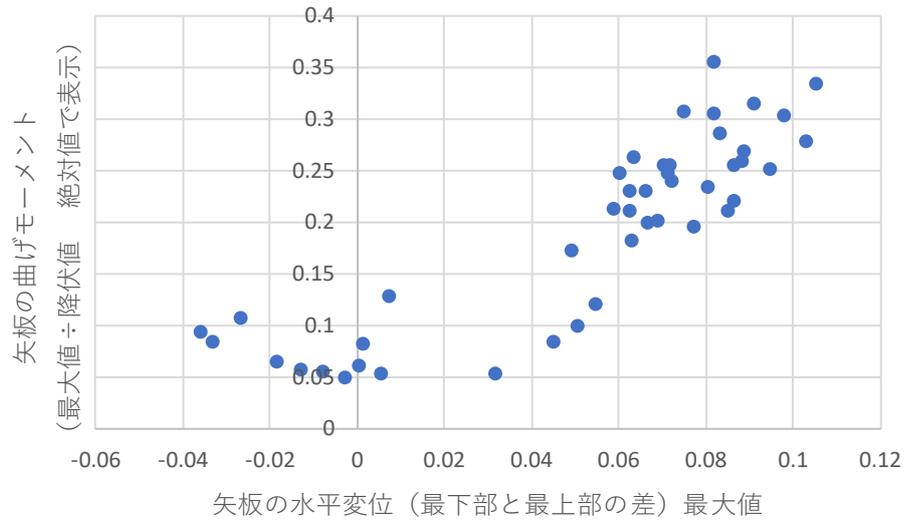


図 4-1-16 矢板の水平変位と曲げモーメントの関係

## ②変形量が大きくなったケースの吟味

図 4-1-13 より、水深-2.1m の条件において、曲げモーメントが小さくとどまるものの、解析途中で矢板が水平移動する様相を呈し、大きめな変形が生じる結果が示された。

一般に微小変形理論に基づく有限要素解析で変形量が大きくなると、モデルの中に組み込まれた数式の適用すべき範囲を超えるなどして、実現象との整合を図ることが次第に難しくなる。FLIP は数十 cm という変形量が生じた事例であっても実現象を適切に再現することが検証されているが、本調査のように、フィルター関数の素材を得るために或る変形量 (10 cm) になるケースを探求する目的の場合、実現象と解析との整合性についてより一層の留意が必要といえよう。

そのため、解析途中で大きな変形が出た場合、目的と照らし合わせて適切に解析がなされたかどうか解析過程の確認が必要と思われる。

そこで、変形の大きい、水深-2.1m、Ⅱ種地盤の条件において、3つの周波数を入力した際の解析を検証する。その結果としてせん断ひずみ分布図・変形図を図 4-1-17 に示す。いずれも残留変形が 10 cm となった解析の途中で発現した最大ひずみ・変形の状態である。

同図(1)は 0.4Hz の正弦波を入力したときの状態である。矢板天端の最大はらみ出し量は 41cm であった。このとき、工学的基盤には 159.1Gal の正弦波を入力している。入力加速度は実際のレベル 1 地震動と同程度である。地盤モデルの深部から浅部にわたり全体にひずみが発生し、矢板の下部において 5% を超える大きなひずみが発生した地盤要素がいくつか見られる。かつ、矢板の最大はらみ出し量は 41 cm と大きい。ひずみと最大はらみ出し量の大きさから、(1) のケースでは、最終のはらみ出し量が 10 cm に収束することについての信頼性が低めといえよう。

同図(2)は 1.5Hz の正弦波を入力したときの状態である。矢板天端の最大はらみ出し量は 12 cm であった。このとき、工学的基盤には 425.0Gal の正弦波を入力している。入力加速度は実際のレベル 1 地震動に比べてやや大きめである。地盤モデルの浅部にひずみが発生し、矢板の下部において 5% を超える大きなひずみが発生した地盤要素がいくつか見られる。ただし矢板の最大はらみ出し量は 12cm であり特段大きくない。ひずみの大きさから、(2) のケースでは、最終のはらみ出し量が 10 cm に収束することについて信頼性がやや低めといえよう。

同図(3)は 3.0Hz の正弦波を入力したときの状態である。矢板天端の最大はらみ出し量は 55cm であったが、このとき、工学的基盤には 19200Gal という実際には全く起こりえない非常に大きい加速度を入力している。モデルの最下部に 10% 超える非常に大きなひずみが発生したが、入力の大きさを踏まえるとこれは現実から乖離した数値解析であり、精度を追究することの範疇を越えているといえよう。

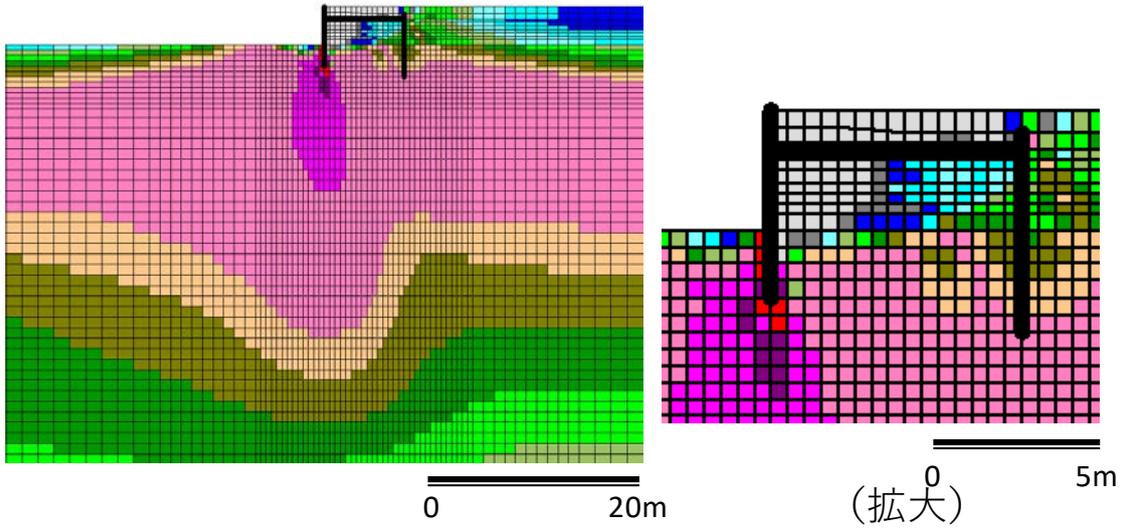
以上を踏まえると、この解析ケースで 0.4Hz 付近の低周波数の正弦波を入力した解析結果については、フィルター関数に使用することへの信頼性が低めといえる。ただしこれはあくまで正弦波を使用しての解析結果である。実際の地震動には幅広い周波数の揺れを含む。かつ、フィルター関数を求める過程では幅広い周波数帯の解析結果を平滑化することになる。そのため、フィルター関数の提案に向けた検討において、水深-2.1m の係船岸に 0.4Hz 付近の低周波数の正弦波を入力した解析結果については、

特に注意を払いつつ使用していくことが現実的な対処法と思われる。すなわち、水深-2m程度の係船岸に実際の地震動として0.4Hz付近が卓越する地震動が作用する場合に、その影響を的確に考慮できるフィルターに仕上がっているかどうかについて特に注意を払うべきと思われる。

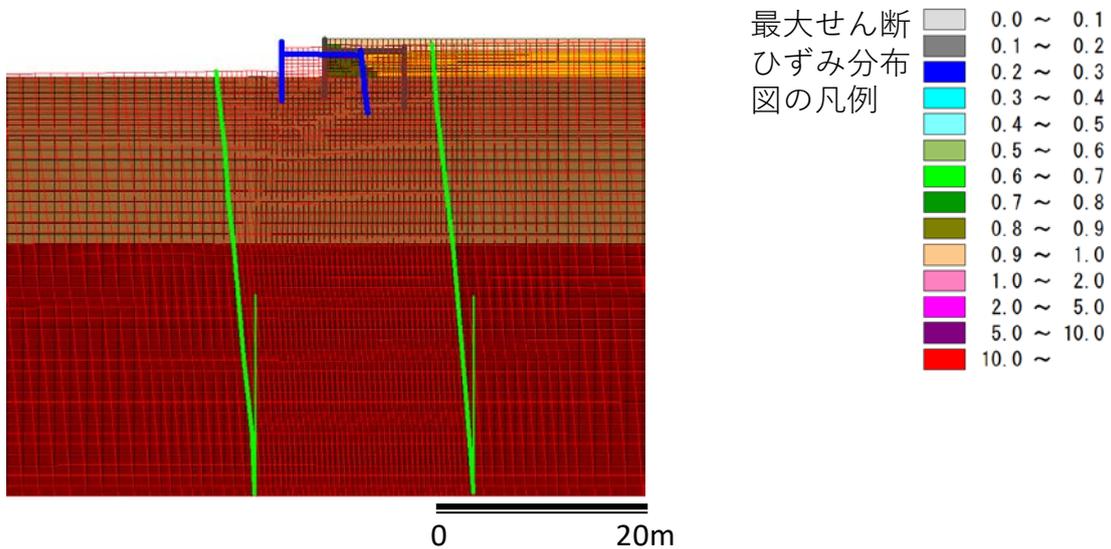
また、水深-2.1mの係船岸に1.5Hz付近の周波数帯の正弦波を入力した解析結果についても、ある程度注意を払いながら使用していくことが現実的な対処法と思われる。

また、水深-2.1mの係船岸に3.0zの正弦波を入力するケースは現実から乖離した数値解析となったが、その付近の周波数の震動はほとんど変形をもたらさないことがわかったことから、今後提案するフィルターが「3.0Hz付近の帯域の震動がほとんど変形をもたらさない」ことを意味するものとなっていれば、それで良いであろう。

なお、今回のような、解析途中で矢板が水平に移動して曲げモーメントが小さくどまるという結果は、矢板自身が曲がることによって土圧に抵抗するという、矢板本来の機能が発揮されていないと解釈することもできる。この解釈は、照査用震度の算定ではなく静的な設計手法をめぐる論議になるため本調査の扱う範囲から外れるが、「(4) 今後の課題」の中で再び述べたい。



最大せん断ひずみ分布図



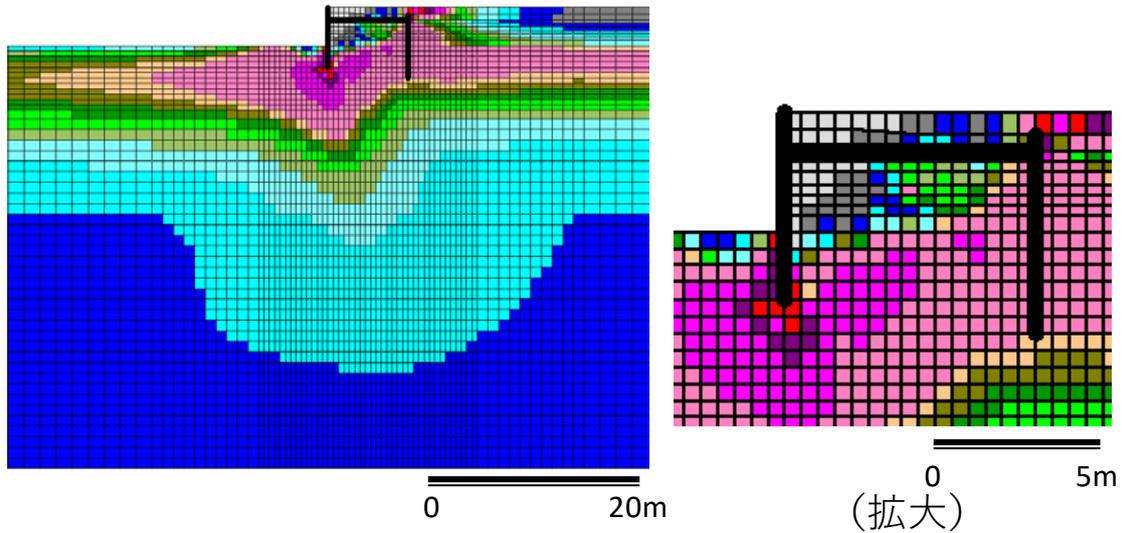
最大変形図

最大変形図は変形状態を赤線で記す。変形量は見易さのため10倍で表示。

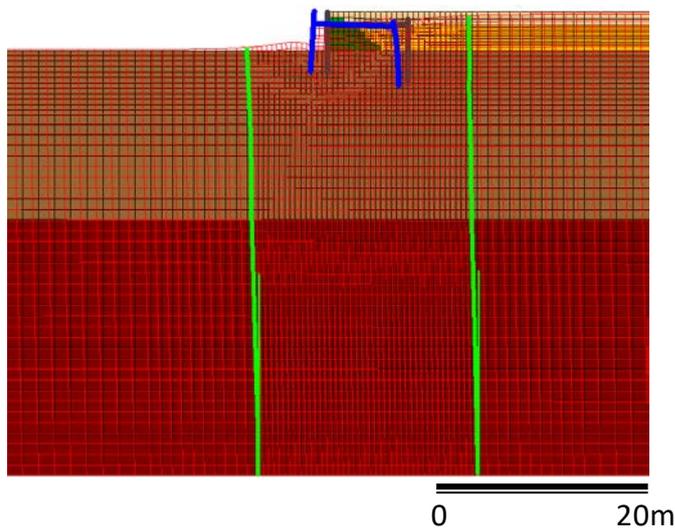
工学的基盤入力波形の最大加速度	159.1Gal
地表面における最大加速度	242.1Gal
矢板天端における最大変位	0.41m

Ⅱ種地盤 水深-2.1m 0.4Hz

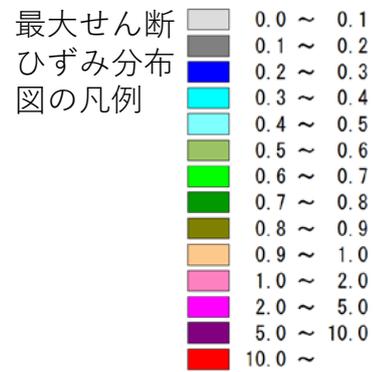
図 4-1-17(1) Ⅱ種地盤 水深-2.1m 0.4Hz の条件におけるせん断ひずみ分布図・変形図



最大せん断ひずみ分布図



最大変形図

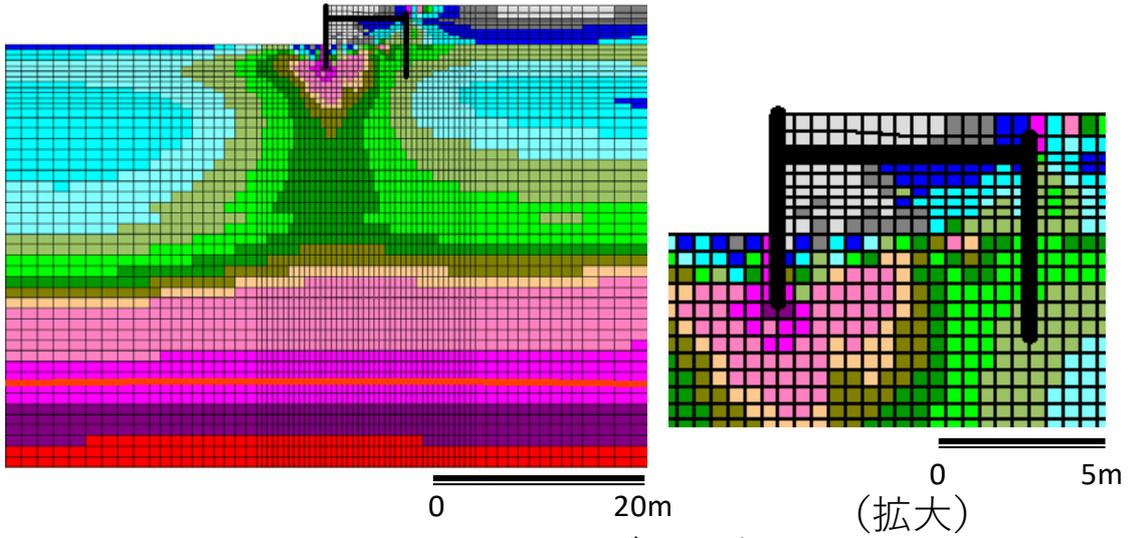


最大変形図は変形状態を赤線で記す。変形量は見易さのため10倍で表示。

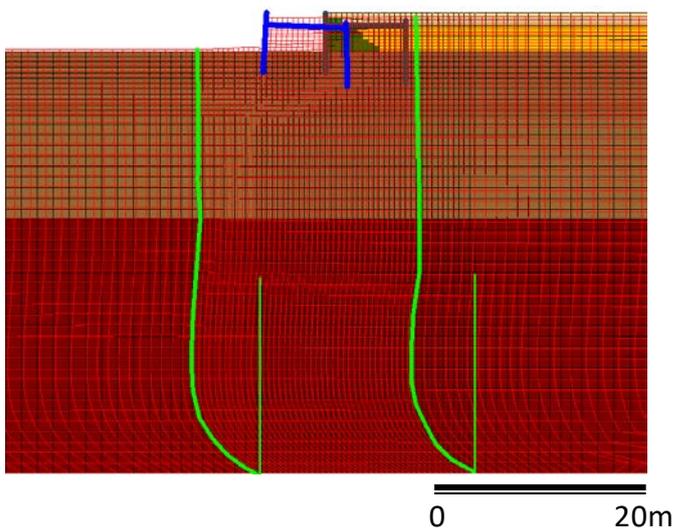
工学的基盤入力波形の最大加速度	425.0Gal
地表面における最大加速度	312.5Gal
矢板天端における最大変位	0.12m

Ⅱ種地盤 水深-2.1m 1.5Hz

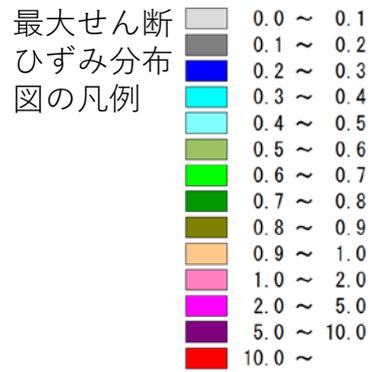
図 4-1-17(2) Ⅱ種地盤 水深-2.1m 1.5Hz の条件におけるせん断ひずみ分布図・変形図



最大せん断ひずみ分布図



最大変形図



最大変形図は変形状態を赤線で記す。変形量は見易さのため10倍で表示。

工学的基盤入力波形の最大加速度	19200Gal
地表面における最大加速度	348.1Gal
矢板天端における最大変位	0.55m

Ⅱ種地盤 水深-2.1m 3.0Hz

図 4-1-17(3) Ⅱ種地盤 水深-2.1m 3.0Hz の条件におけるせん断ひずみ分布図・変形図

### ③降伏したケースの吟味

レベル 1 地震動に対する耐震設計では一般に部材の降伏を許容しない。今回検討しているフィルター関数は、レベル 1 地震動に対する耐震性能照査に使用されるものである。またフィルター関数は、変形量のある範囲内に収めれば施設の安全性が確保できるという考え方の上に成り立っている。そのためフィルター関数は、降伏に達しない解析ケースを素材として構築するほうが望ましい。

そこで、控え工が降伏に達したケース（水深-4.1m と -5.1m、I 種地盤、2.0Hz）について、試算として、控え工の  $M-\phi$  関係を線形とし降伏点を設けない線形はり要素に変更して、発生曲げモーメントが降伏値をどれくらい超えるか確認した。その解析結果を図 4-1-18 に示すが、発生曲げモーメントは降伏曲げモーメントをわずかに超える程度であったため、この解析結果をフィルター関数作成の素材とすることに特に問題は無いと判断した。

また、タイロッドが降伏に達したケース（水深-5.1m、III 種地盤、2.0Hz）で発生した最大張力は 315.8kN/本であり、降伏張力（315kN/本）からの超過は僅かであったため、この解析結果をフィルター関数作成の素材とすることに特に問題は無いと判断した。

なお、このケースのような水深・地盤条件においては実際の地震動が入力した際に降伏が発生する可能性がある。そのためレベル 1 地震動を入力する検証（後述）においても発生応力に注意すべきと考えられる。

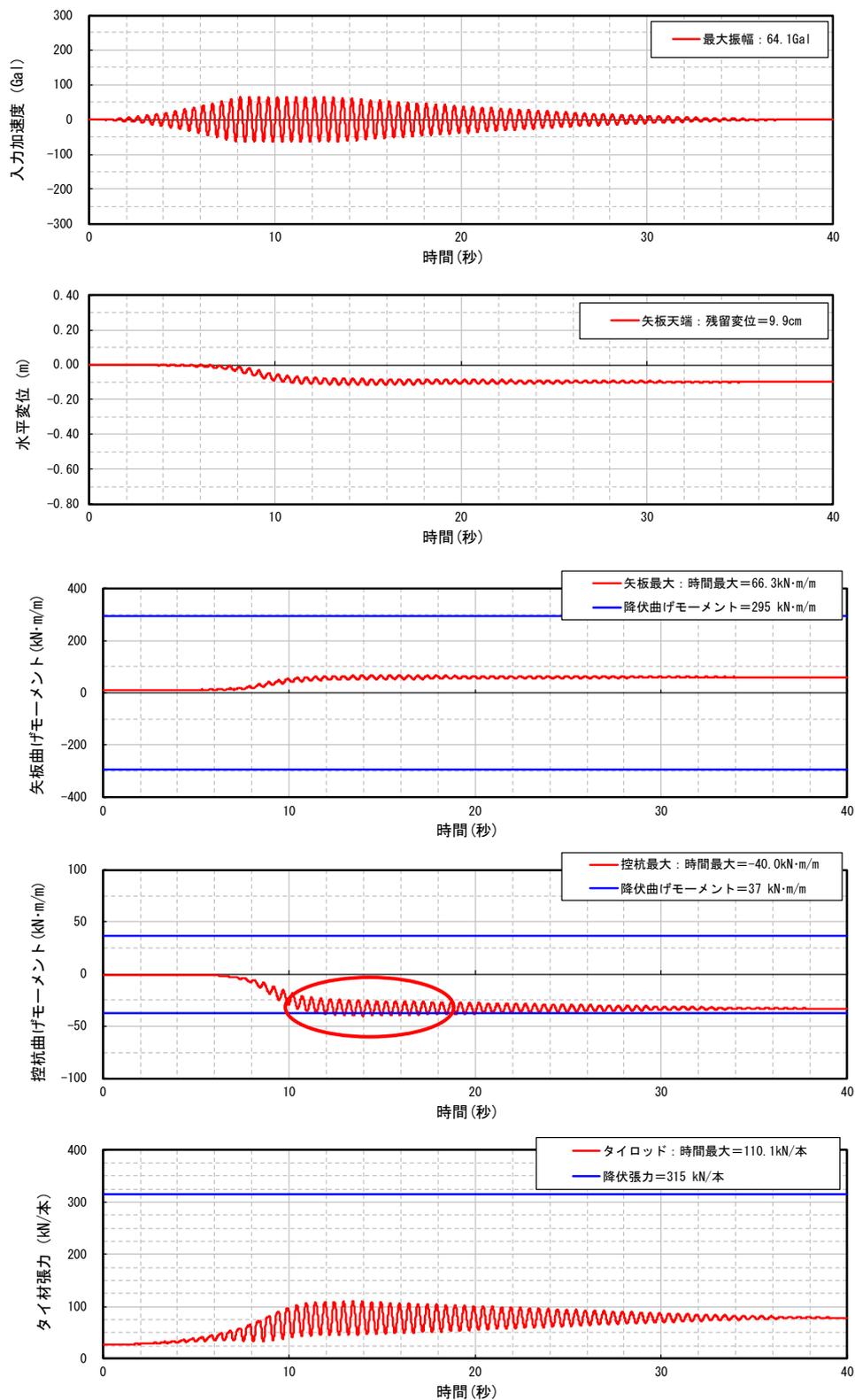


図 4-1-18(1) FLIP 解析結果(水深-4.1m, I 種地盤, 2.0Hz, 控え工を線形はり要素としたケース)

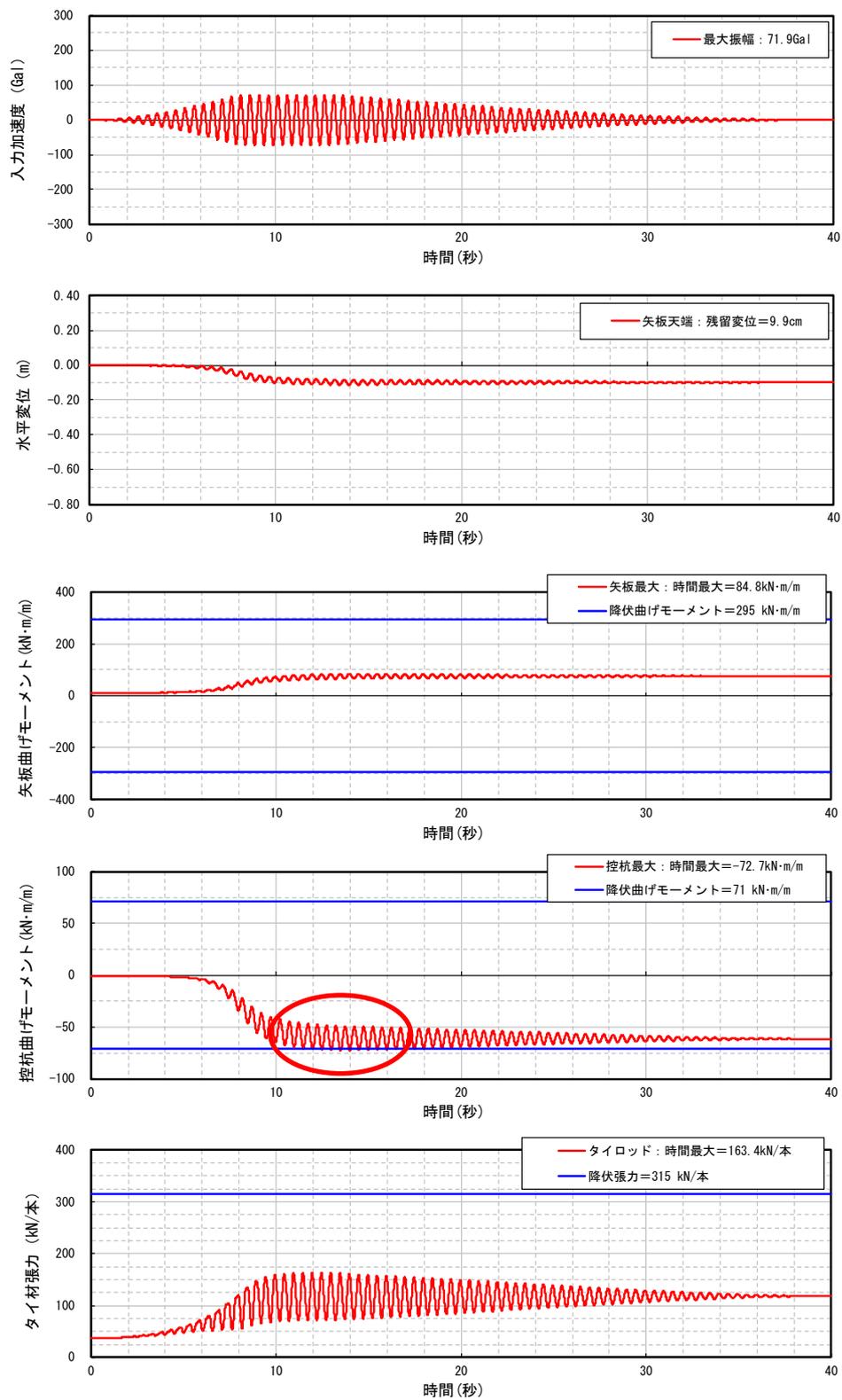


図 4-1-18(2) FLIP 解析結果(水深-5.1m, I 種地盤, 2.0Hz, 控え工を線形はり要素としたケース)

#### ④変形しやすい周波数と降伏が生じる周波数が一致しない理由の吟味

「I種地盤 水深-5.1m」の条件において、入力加速度が最小、つまり最も変形しやすいのは1.5Hzのケースであったが、控え杭が降伏したのは1.5Hzではなく2.0Hzのケースであった。

この相違の検討のため、1.5Hzと2.0Hzにおける控え杭の変形形状を図4-1-19に示す。これより、最大変形は1.5Hzの方がやや大きいですが、2.0Hzでも大差はなく、-2.0m付近の大きい曲がり大きい曲げモーメントを発生させたことが見て取れる。また、前面矢板・控え杭の各4点（上端、下端、海底面、最大曲げモーメント発生位置）について、水平加速度、水平変位、曲げモーメントの時刻歴を図4-1-20に示す。これより、1.5Hzより2.0Hzの方が曲げモーメントの振幅がやや大きいことが見て取れる。

また水平加速度の時刻歴より、1.5Hzに比べて2.0Hzでは上端と下端の位相のずれが大きく、上端に冲向きの加速度が作用するとき下部には岸向きの加速度が作用していたことが見て取れる。このような位相特性は2.0Hzの曲げモーメントを大きくした一因と考えられる。

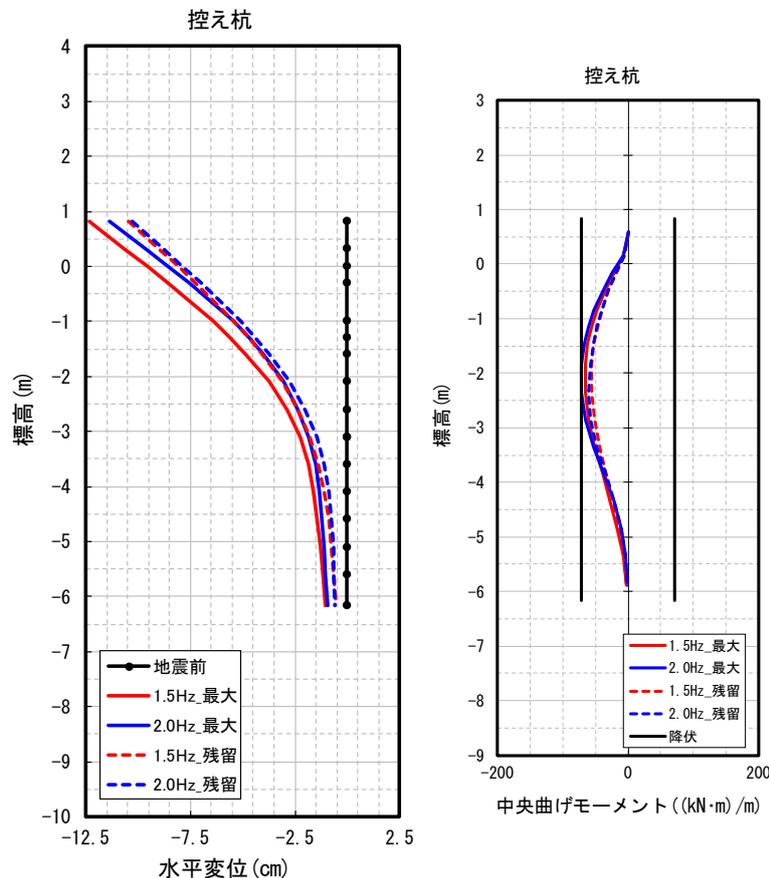


図4-1-19 控え杭の水平変位および曲げモーメントの分布  
(I種地盤 水深-5.1m 周波数1.5および2.0Hz)

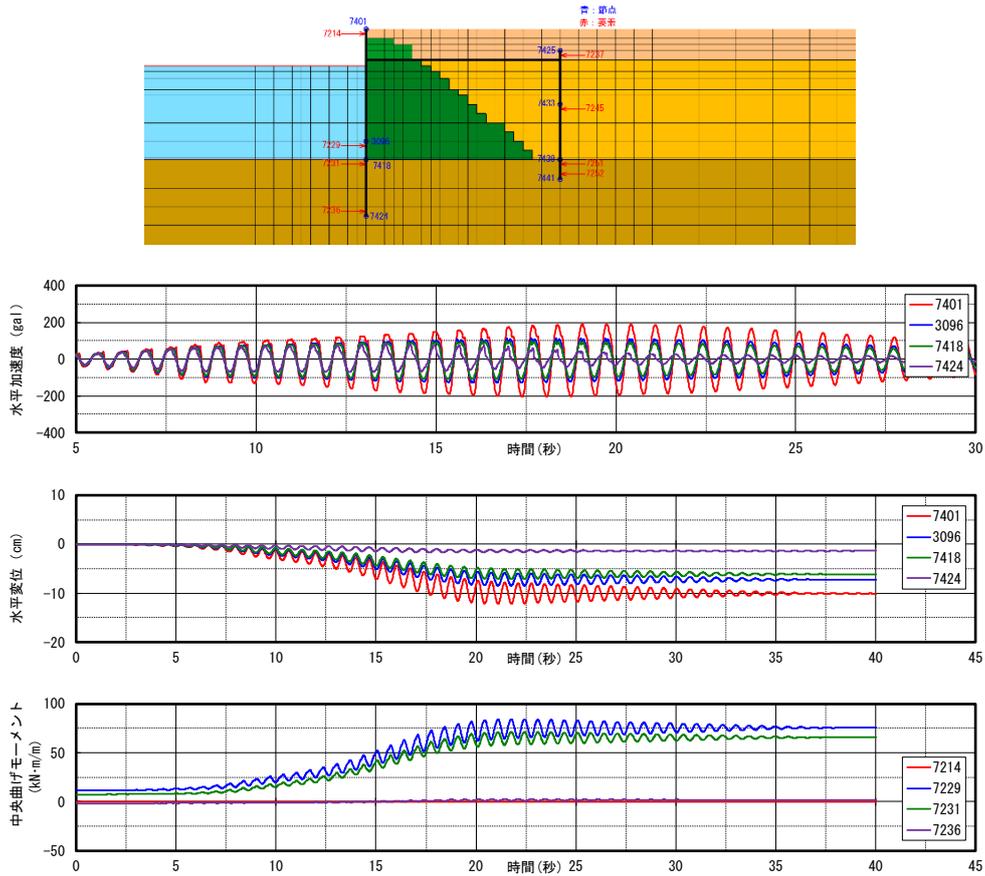


図 4-1-20(1) 前面矢板の時刻歴図(水深-5.1m, I種地盤, 1.5Hz)

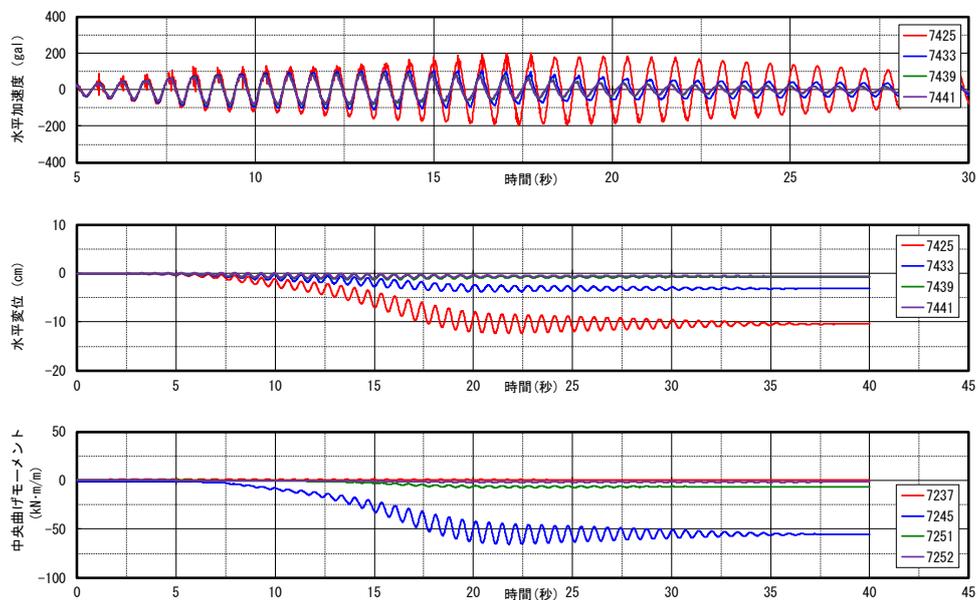


図 4-1-20(2) 控え杭の時刻歴図(水深-5.1m, I種地盤, 1.5Hz)

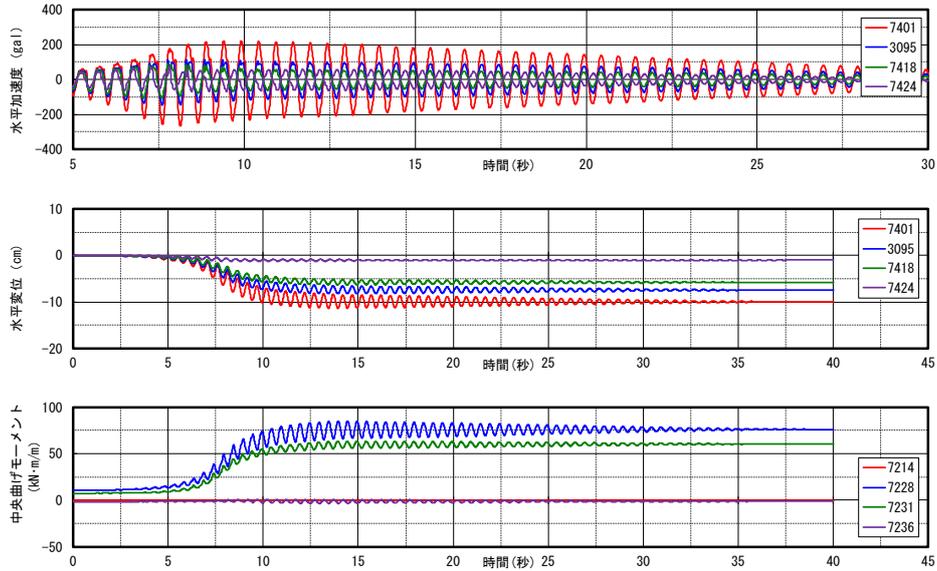
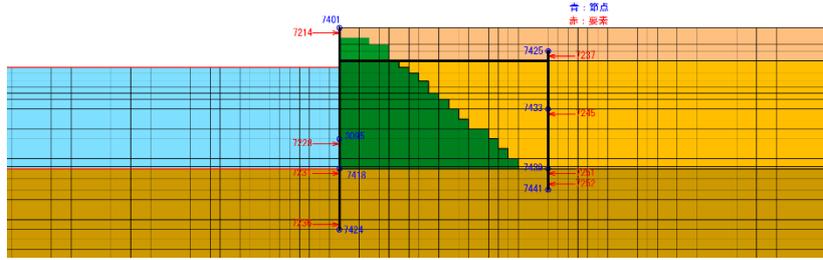


図 4-1-20(3) 前面矢板の時刻歴図(水深-5.1m, I種地盤, 2.0Hz)

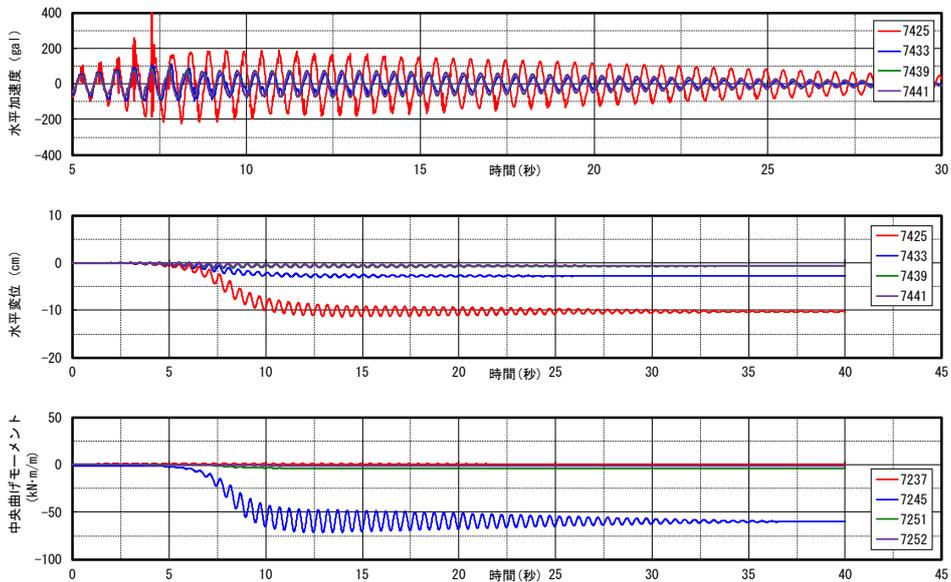


図 4-1-20(4) 控え杭の時刻歴図(水深-5.1m, I種地盤, 2.0Hz)

## ⑤ 既往の知見との比較

①に示した解析結果を、既往の知見と比較する。

「設計参考図書」には、矢板式係船岸の設計に使用できる土圧分布・曲げモーメント分布のモデルとして「フリーアースサポート法」(図 4-1-21) が掲載されている。これと照合すると、図 4-1-13 の水深-5.1m の曲げモーメント分布形状は「フリーアースサポート法」に近いものである。一方、水深-2.1m の曲げモーメントは値が小さく、「フリーアースサポート法」との近似性がはっきりしない。

一方、「港湾基準」に掲載されている矢板式係船岸の設計手法は「設計参考図書」とは異なっている。(漁港ではフリーアースサポート法で根入れ長を決め、仮想ばり法で断面を設計するのに対し、港湾基準ではそれらに加えて Rowe の方法による照査も実施する) これは、港湾の大水深化に伴って大断面の矢板や鋼管矢板が増えたことを反映したものと考えられる。

図 4-1-22～図 4-1-23<sup>10)</sup> に港湾の矢板式係船岸の解析結果を示す。これを今回の解析結果(図 4-1-13)と比較すると下記のような違いが見られる。この違いは上記の設計手法の違いと水深の違いによるものと考えられる。

矢板の変形形状について、図 4-1-13 の水深-4.1m と-5.1m では上端のはらみ出しが最も大きく、水深-2.1m では上端のはらみ出しが最も大きいケースと下端のはらみ出しが最も大きいケースが半々程度である。これに対して図 4-1-22 の 2 事例では上端よりもやや下(-4m 付近)のはらみ出しが最も大きい。

矢板の下方の 3 分の 1 程度の範囲の曲げモーメント分布に着目すると、図 4-1-13 ではほとんどのケースで正の値から深さ方向に減少して最下部でゼロに近い値となっているのに対し、図 4-1-23 の 1) では正の値から深さ方向に減少し負の値を示してから増加に転じて最下部でゼロに近い値となっている。(なお図 4-1-13 と図 4-1-23 は横軸の正負の記載が左右逆である)

また、図 4-1-24<sup>11)</sup> に過去の地震によって被災した港湾施設の矢板構造物の変形パターンを示す。これと照合すると、今回の解析の水深-4.1、-5.1m のケースの変形形状は上半が「② 前傾くの字型」に似るが変曲点の無いものとなっている。また水深-2.1m のケースの変形形状は①～③のどれとも異なり全体に沖方向へ移動するものとなっている。一方、図 4-1-22 の変形形状は「② 前傾くの字型」に近いものとなっている。

また、図 4-1-25<sup>10)</sup> に港湾の矢板式係船岸の解析から得られた断面力のコンター図(曲げモーメント最大値÷降伏曲げモーメントまたは張力最大値÷降伏張力の図)を示す。矢板が最も降伏値に近く、控え直杭が最も余裕がある結果となっており、今回の解析結果とは大小関係が異なっている。この大小関係の違いは、主に、「設計参考図書」と「港湾基準」に掲載されている矢板式係船岸の設計手法の違いによるものと考えられる。

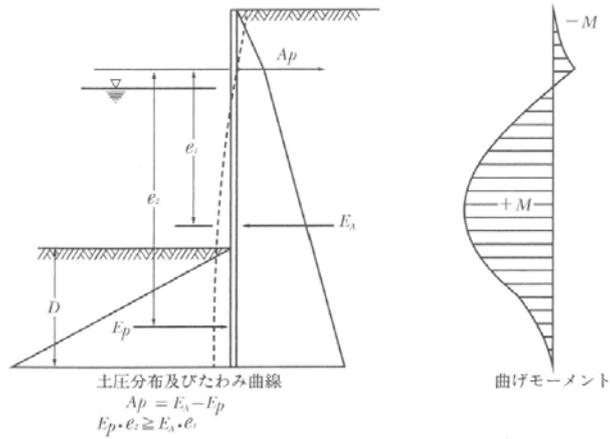


図 4-1-21 フリーアースサポート法による土圧・曲げモーメント分布<sup>3)</sup>

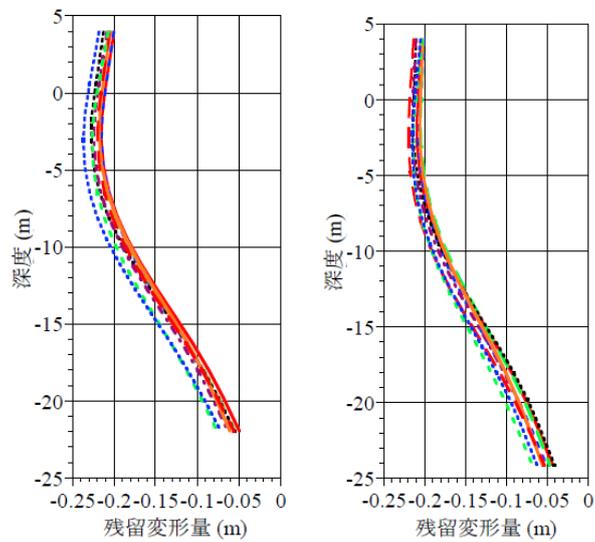


図 4-1-22 港湾の矢板式係船岸の変形モードの例 (文献<sup>10)</sup> から 2 事例を抜粋)

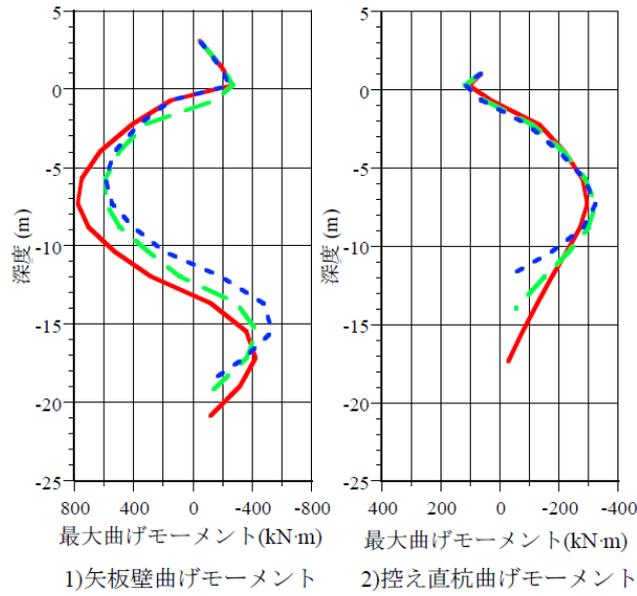


図 4-1-23 港湾の矢板式係船岸の断面力分布の例<sup>10)</sup>

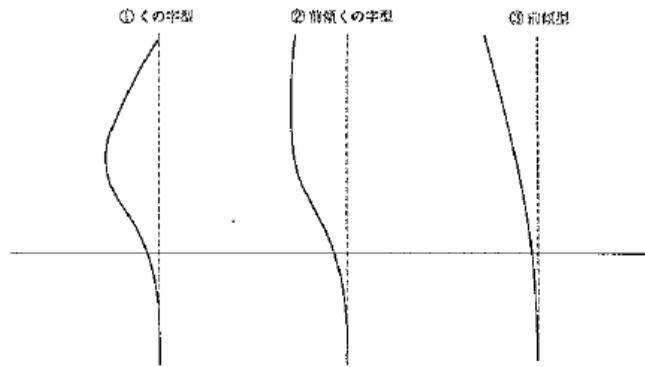


図 4-1-24 矢板の変形パターン<sup>11)</sup>

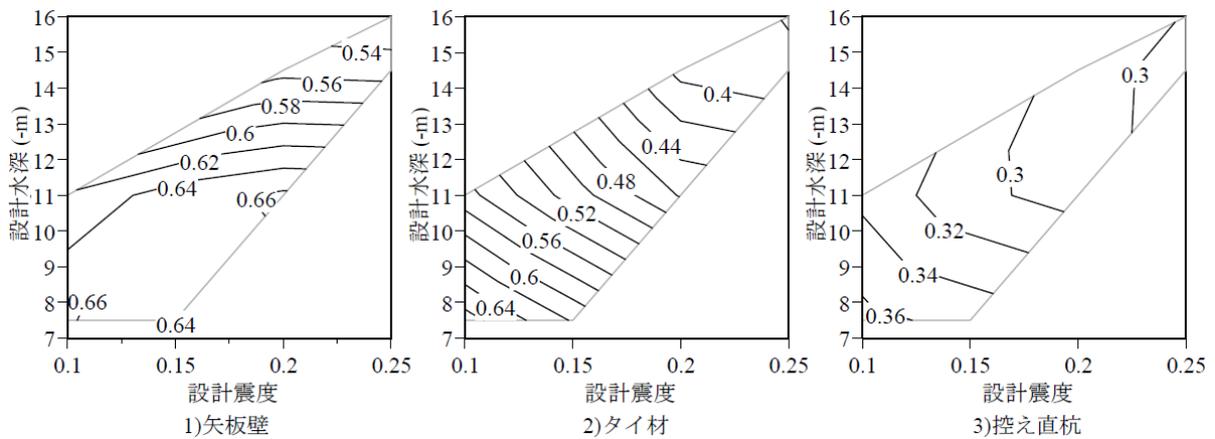


図 4-1-25 港湾の矢板式係船岸の断面力危険度（天端 20 cm 変形時）<sup>10)</sup>

### 3) レベル1地震動入力時の応答値確認および照査用震度の試算

図 4-1-26 に、地震応答解析の結果の時刻歴の例を 2 つ示す（I 種地盤で C2 港のレベル 1 地震動のケース及び、I 種地盤で K 港のレベル 1 地震動のケース）。

図 4-1-27 に、地震応答解析の結果の全ケースの部材の最大応力と降伏応力の比を整理して示す。これより、I 種地盤の波形 C2 のみ、控え杭が降伏に達した。部材ごとの降伏までの余裕は、控え杭が最も小さく、前面矢板が最も大きい傾向となった。これは、フィルター検討時の水深-4.1m のケース（図 4-1-11 参照）と同様の傾向となった。

図 4-1-28 に、地表面応答加速度のフーリエスペクトルを示す。このフーリエスペクトルとフィルター関数の案①～④により、照査用震度を試算した。表 4-1-13 および図 4-1-29 に試算結果を示す。今回設定した条件の場合、求まる照査用震度  $k_h$  が 0.10 になることが望まれるが、表と図に示すように、どの検討ケースも、レベル 1 地震動の照査用震度は平均的には概ね 0.10 となった。

また、各ケースで求めた照査用震度と 0.10 との偏差より分散（＝偏差平方和÷データ数）を求めると、方法②のフィルターを用いた場合が分散値は最も小さくなった。しかし平均値は 0.10 よりも小さく、平均的にはやや危険側の照査用震度となる。方法②の次に分散が小さいのは方法④で、平均値は 0.11 と若干安全側の照査用震度となる。

これより、本検討では方法④のフィルターの適用性が高そうであるが、4 波形のみによる簡易な検証であるため、今後、既往の地域別震度等との比較や二次元地震応答解析による検証を行い、最適なフィルターを決定する必要がある。

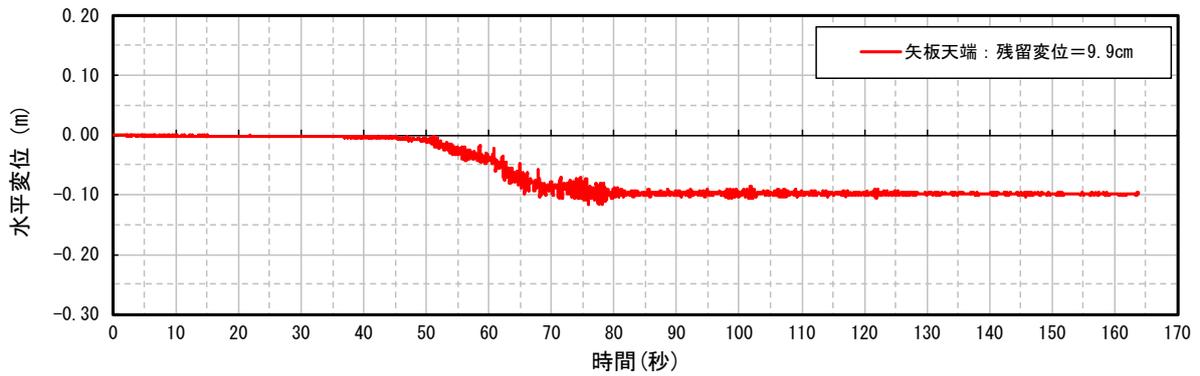
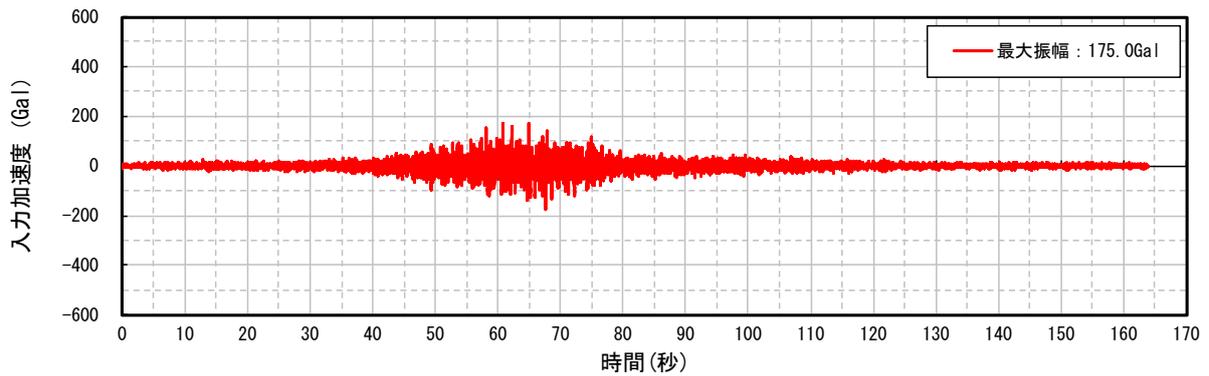
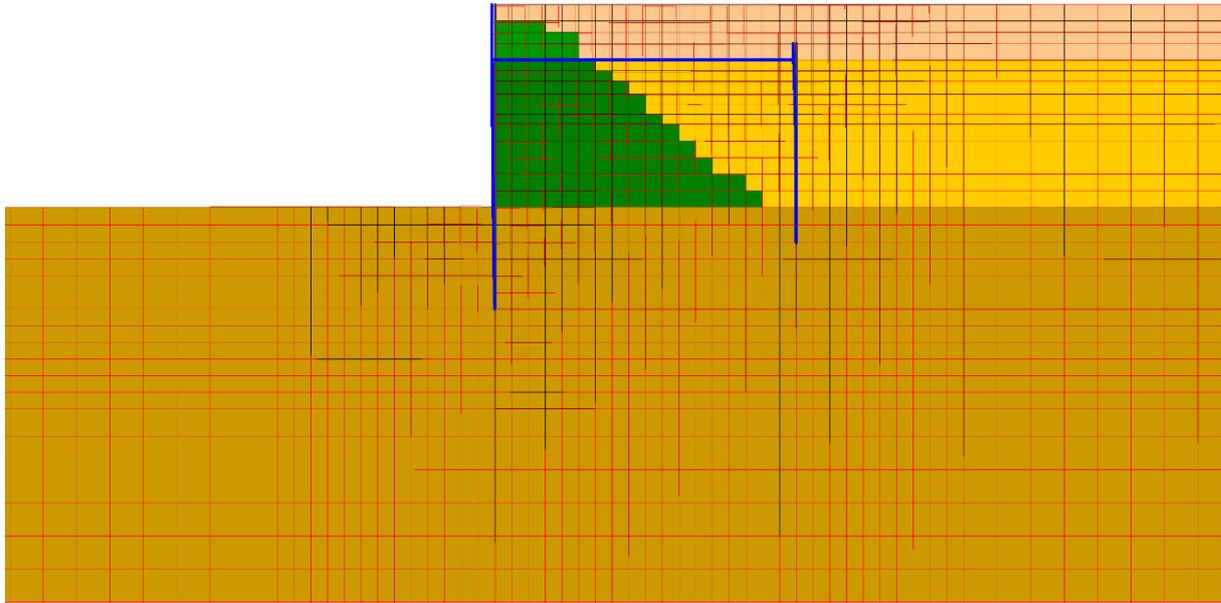


図 4-1-26(1) レベル 1 地震動を入力した解析結果  
 (変形量  $\delta = 10\text{cm}$ 、C2 港のレベル 1 地震動、I 種地盤 その 1)

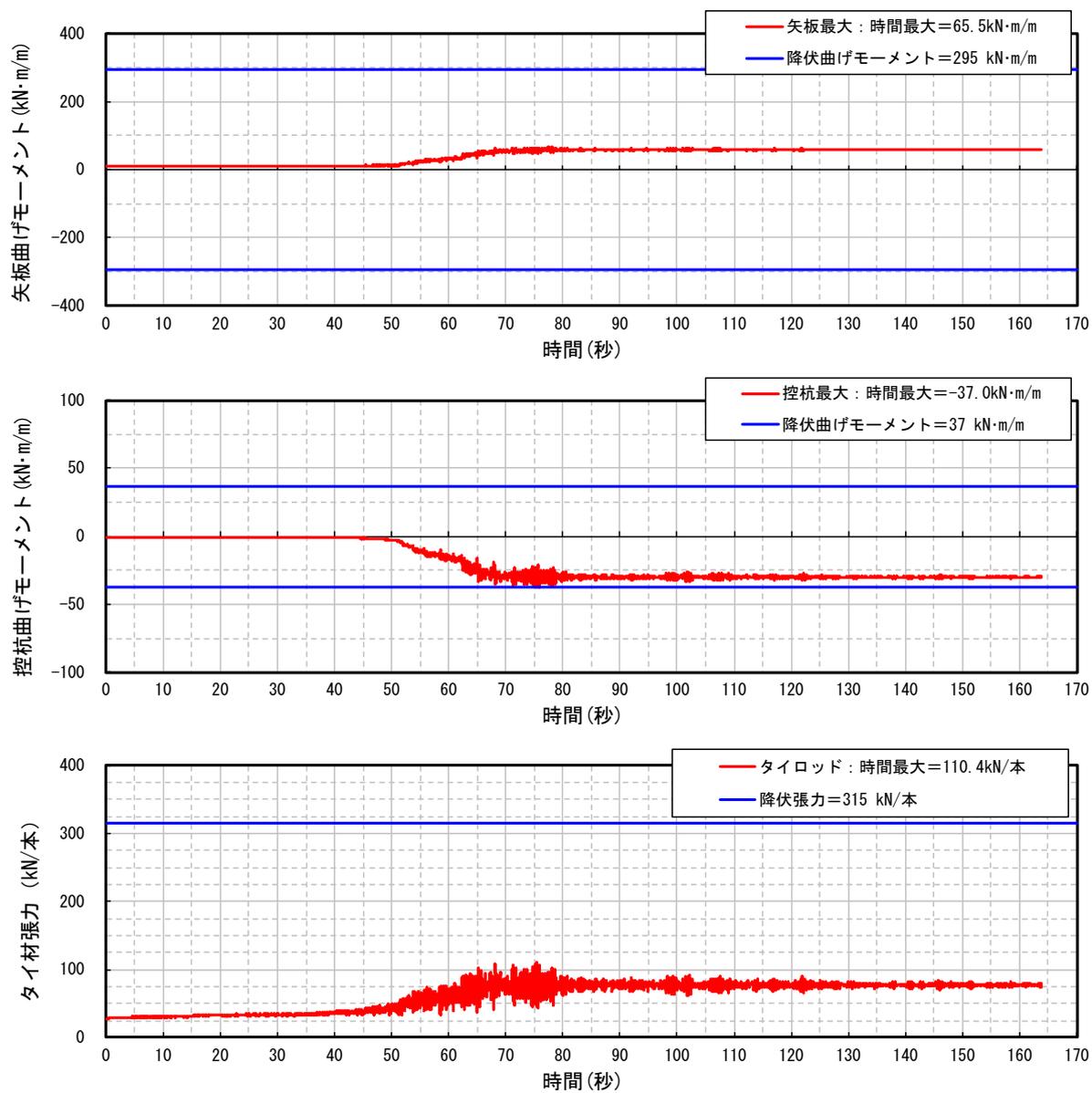


図 4-1-26(1) レベル 1 地震動を入力した解析結果  
 (変形量  $\delta=10\text{cm}$ 、C2 港のレベル 1 地震動、I 種地盤 その 2)

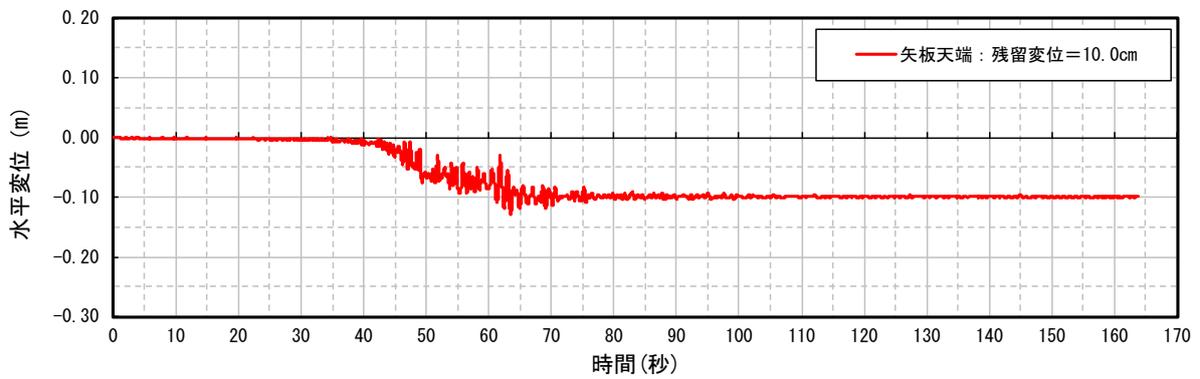
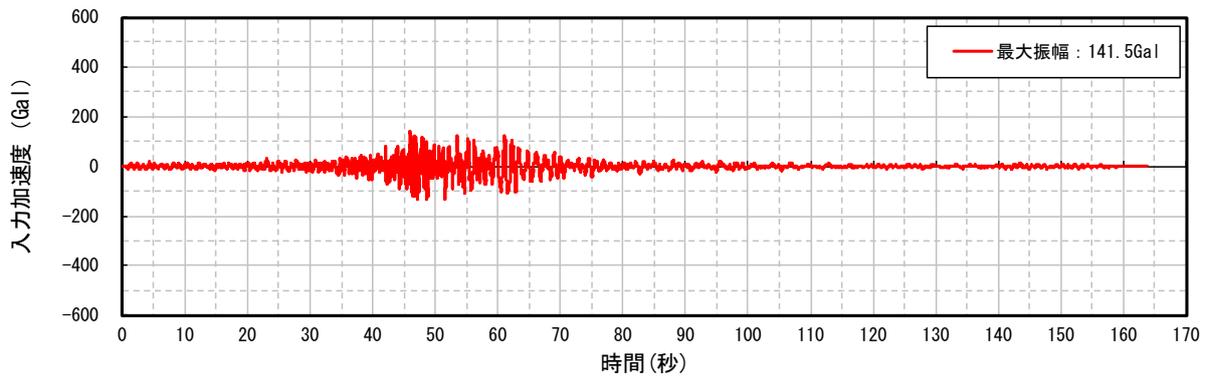
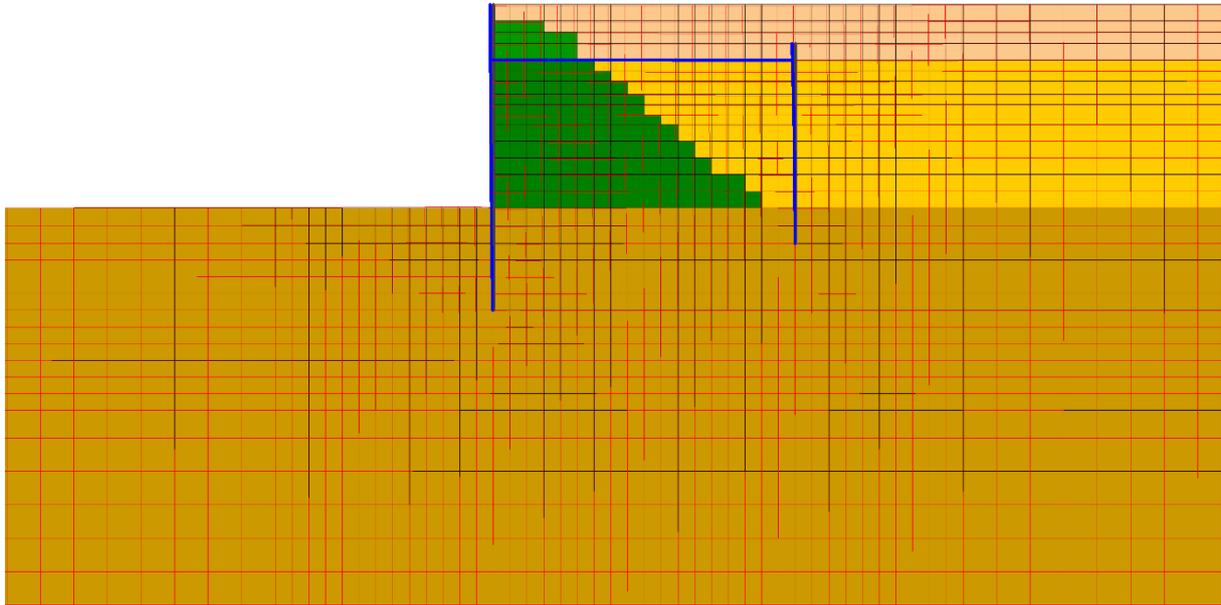


図 4-1-26(2) レベル 1 地震動を入力した解析結果  
 (変形量  $\delta = 10\text{cm}$ 、K 港のレベル 1 地震動、I 種地盤 その 1)

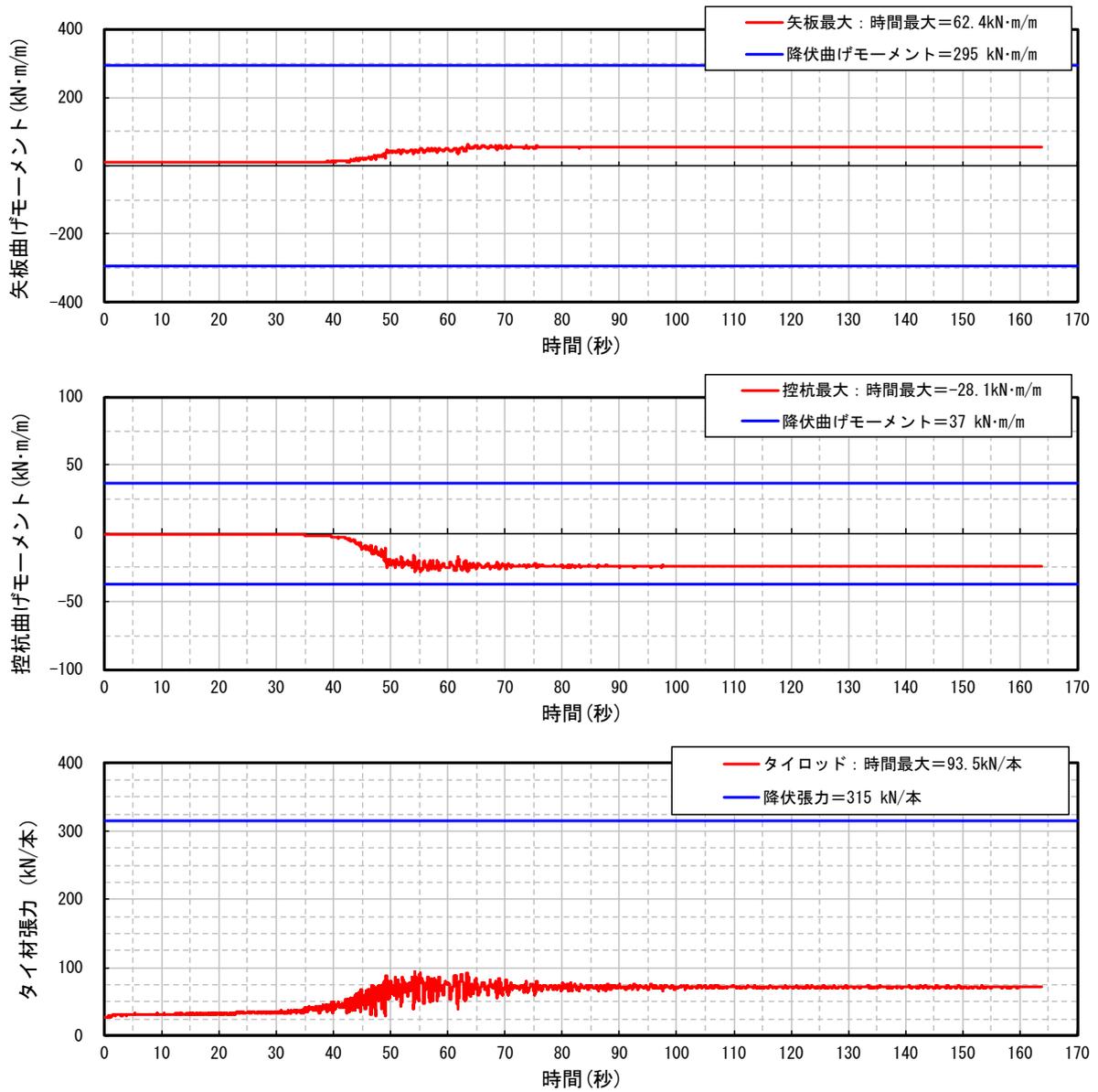


図 4-1-26(2) レベル 1 地震動を入力した解析結果  
 (変形量  $\delta = 10\text{cm}$ 、K 港のレベル 1 地震動、I 種地盤 その 2)

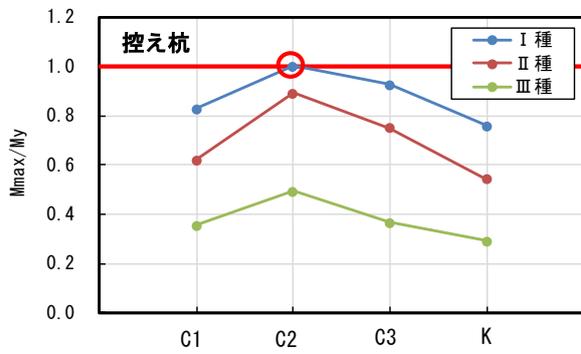
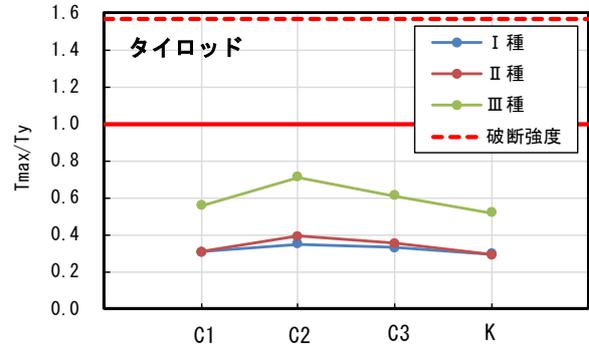
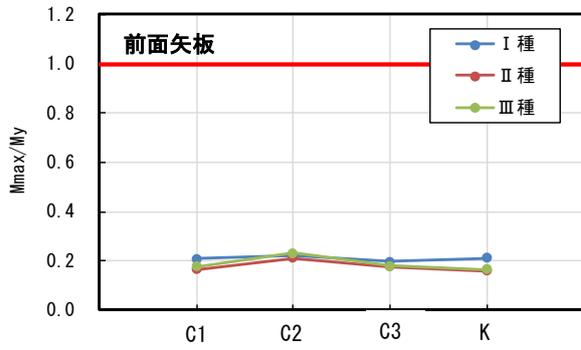
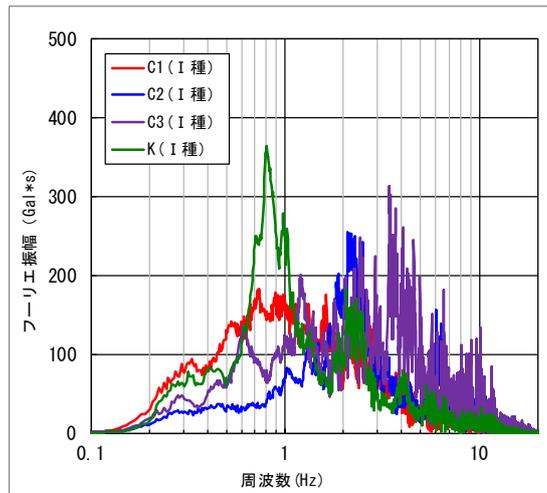
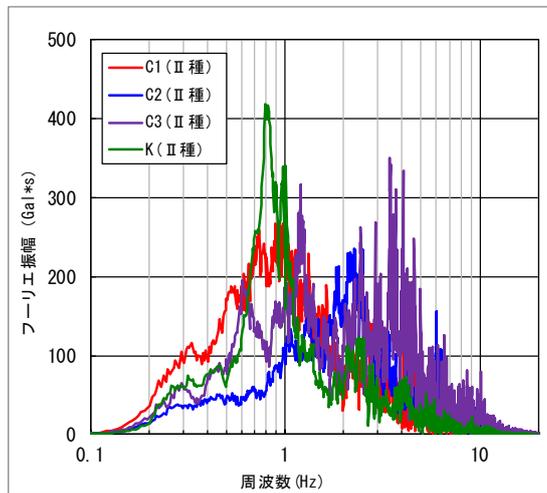


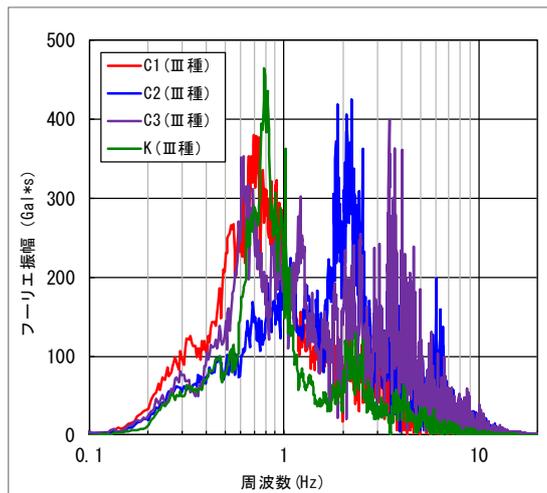
図 4-1-27 部材に発生する最大応力と降伏応力の比  
(レベル1地震動入力時)



( I 種地盤 )



( II 種地盤 )



( III 種地盤 )

図 4-1-28 地表面応答加速度のフーリエスペクトル

表 4-1-13 レベル 1 地震動に対する照査用震度の試算結果

地盤条件	地震波	地表面応答 加速度 (gal)	照査用震度kh				備考
			方法①	方法②	方法③	方法④	
I 種	C1	182.8	0.08	0.08	0.09	0.09	
	C2	167.4	0.06	0.06	0.07	0.08	
	C3	287.5	0.08	0.09	0.09	0.10	
	k	169.0	0.09	0.09	0.10	0.10	
II 種	C1	169.6	0.09	0.09	0.10	0.11	
	C2	157.2	0.07	0.07	0.08	0.09	
	C3	224.3	0.10	0.10	0.11	0.11	
	k	139.8	0.09	0.09	0.10	0.10	
III 種	C1	163.0	0.12	0.11	0.13	0.13	
	C2	184.1	0.12	0.12	0.13	0.14	
	C3	222.4	0.13	0.13	0.14	0.14	
	k	128.5	0.10	0.10	0.11	0.10	
平均値			0.09	0.09	0.10	0.11	全体
kh=0.10からの分散(=偏差平方和÷データ数)			0.00044	0.00039	0.00043	0.00041	全体

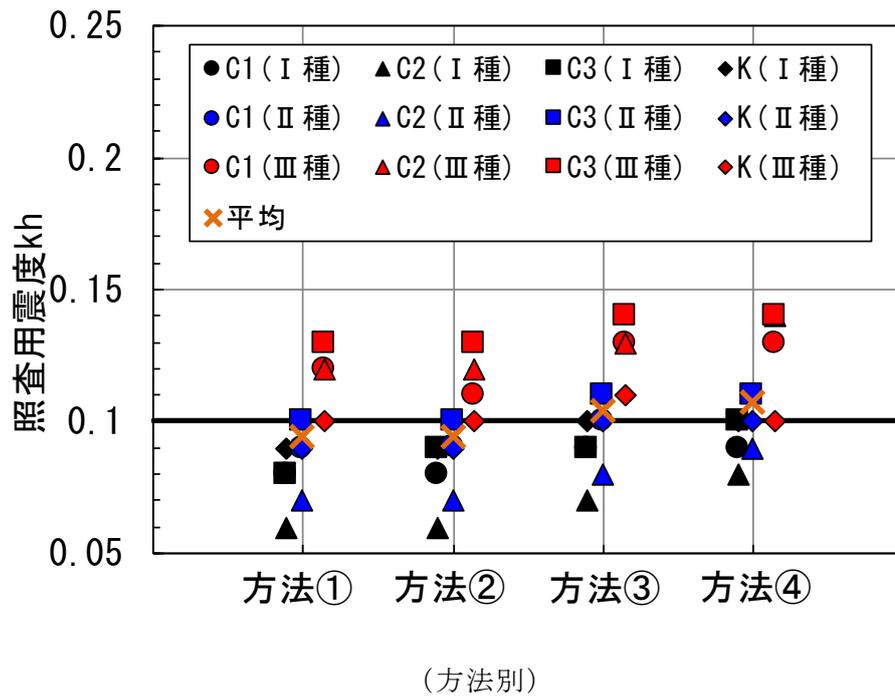
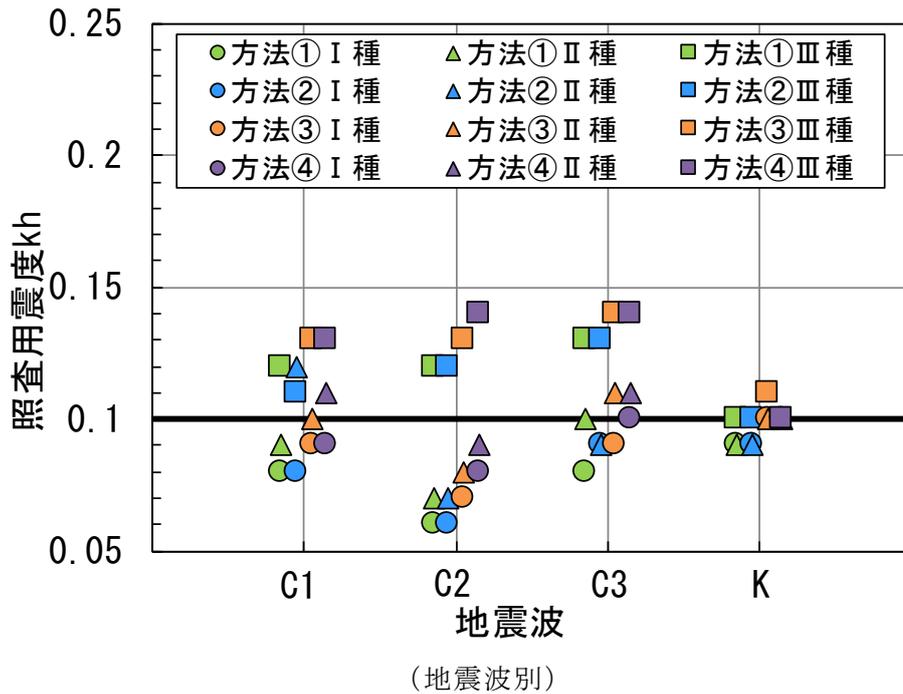


図 4-1-29 レベル 1 地震動に対する照査用震度の試算結果

#### (4) 今後の課題

今年度は、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種地盤を網羅した二次元地震応答解析の結果を基に、複数案を併記する形でフィルター関数の案を示した。

フィルター関数を実際の設計に利用可能なものとするため、今後、次のような取り組みが必要と考えられる。

##### ① 漁港用フィルター関数の決定、地震動の継続時間の影響に対する検証

今年度に検討した矢板式係船岸用フィルター案の中から、真値に対して誤差が小さい最適なフィルター案を選出する。

また、今年度の検討では、地震動の継続時間の影響がまだ十分に検証されていない。継続時間の影響については「港湾基準」掲載の補正式があることから、レベル 1 地震動波形を使用した試算を行い、この補正式の適用性を検証する。

##### ② フィルター関数を使用して求められる照査用震度の妥当性の検証

①でとりまとめた漁港用フィルター関数および継続時間の補正式を用いて求まる照査用震度の妥当性を検証する。すなわち①で選出したフィルターと継続時間補正式を使用して種々のレベル 1 地震動に対する照査用震度を試算して値の妥当性を見る。

また、いくつかのレベル 1 地震動について、それから求まる照査用震度を用いて断面を決定し、当該地震動を入力する二次元地震応答解析を行い、求まる残留変形量が本来求まるべき値に近いかな否かにより妥当性を検証する。また、比較のため、従来の地域別震度を用いて断面を決定し、同様にレベル 1 地震動を入力する二次元地震応答解析を行って、求まる残留変形量を比較することにより、照査用震度と地域別震度の差を明らかにする。

以上については、有識者の見解も聴取して検討し、「設計参考図書」への反映を念頭において取りまとめる必要がある。その過程では、次の点に注意することが必要と考えられる。

- フィルター関数の形状の妥当性(既往のフィルター関数はフラットな部分と右下がりの部分から成る比較的単純な関数形だが、この関数形が今回の解析結果を表すものとして妥当かどうか判断する)
- 水深-2.1m 程度の条件におけるフィルター関数適用の妥当性(今回の検討では、最も浅い水深-2.1m の条件(正弦波を入力)において解析途中に矢板が比較的大きく動いたケースがあった。そのため今後、水深-2.1m 程度のモデルに地震動を入力して変形形状を確める等の検討をすることにより、漁港の水深-2.1m 程度の矢板式係船岸にフィルター関数を適用することの妥当性を判断する)

また、今回の解析で最も浅い水深-2.1m の解析ケースで見られた、矢板が水平移動し曲げモーメントが小さくとどまる結果は、矢板自身が曲がることによって土圧に抵抗するという、矢板本来の機能が発揮されていないと解釈することもできる。今回の結果は正弦波を入力した時のものだが、今後、実際の地震動の場合も含めてさらなる検

討が望まれる。すなわち、照査用震度算定方法の検討とは別に、「設計参考図書」掲載の静的なモデル化の手法（土圧のモデル化、矢板の根入れ長と断面の決定法）について、その妥当な適用範囲を、最近の動的解析技法を使用して検証してみることも考えられる。

#### （参考文献）

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007年.
- 2) 長尾毅，岩田直樹，藤村公宜，森下倫明，佐藤秀政，尾崎竜三：レベル1地震動に対する重力式及び矢板式係船岸の耐震性能照査用震度の設定手法，国土技術政策総合研究所資料第310号，2006年.
- 3) 漁港・漁場の施設の設計参考図書，2015年.
- 4) 小松勝久，林誉命，鈴木一行，西多道祐，船橋雄大，佐伯公康：浅い水深の重力式係船岸に対する周波数特性を考慮した照査用震度算定法の構築，土木学会論文集B3，Vol.70，No.2，I\_810-I\_815，2014年.
- 5) 井合進，松永康男，亀岡知弘：Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility，（ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル），港湾技術研究所報告，Vol.29，No.4，pp.27-56，1990年.
- 6) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾空港技術研究所資料No.869，1997年.
- 7) 運輸省港湾局監修：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），1997年.
- 8) （財）沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成19年改訂版），上巻第2編係留施設，p.1-65，2007年.
- 9) 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室ホームページ.
- 10) 長尾毅，尾崎竜三：控え直杭式矢板岸壁のレベル1地震動に対する性能規定化に関する研究，土木学会地震工学論文集第28巻，2005年.
- 11) 小泉哲也，山本修司，竹地晃一郎，門脇陽治：被災した係留施設の残存耐力の評価手法の開発，港湾空港技術研究所資料No.912，1998年.

## 4-2 耐津波設計手法高度化の検討

### 4-2-1 ねらい

漁港施設の耐津波設計手法については、基本的な波圧の算定手法は確立されたものの<sup>1)2)3)</sup>、構造物の隅角部及び端部等、構造上弱点となりやすい箇所における波圧の評価手法等は確立されていない。また、発生頻度の高い津波を超える津波において施設の修復性や安全性を確保するための設計法(粘り強い構造)について、一定の具体的な対策工(いわゆる「腹付工の付加」)は提案されているものの、その他の対策工については、効果の評価方法を含めて不明な部分が多い。

先般の東日本大震災での津波災害の被害実態等の詳細な検討を行うため、平成27年度に「平成23年度水産関係施設等被害状況調査事業」<sup>4)</sup>で構築したデータベースの改良を行ったが、それをもとにした被災事例の構造的特徴を整理・分析し、耐津波性能を向上させるための対応策を検討する。

重力式防波堤の粘り強い構造の対策工法として提案された「腹付工の付加」の他に考えられる工法を提案し、水理模型実験及び数値波動水路等の解析手法を用いて対策効果を検証し、設計方法を検討する。

### 4-2-2 方法

#### (1) 構造上の弱点箇所における設計方法及び対策工法

##### 1) 被災事例の構造的特徴の整理・分析

前年度に構築したデータベースの改良を行う。耐津波対策を推進する上で有益となる基礎情報の補完、条件検索機能の拡充を行う。また改良したデータベースを用いて、防波堤を対象とした被災事例の構造的特徴の整理・分析を行う。

##### 2) 水理模型実験等による検討

構造的弱点のうち防波堤の隅角部及び堤頭部等を対象に、作用時間の長い津波に対する水理模型実験や、非線形長波理論による津波解析を通じ、構造上の弱点箇所における津波の流れや波力の特性や根固・被覆ブロックの安定性について検討する。

水理模型実験については、平成27年度は長水路(造波水路)を使用し基礎的な検討を行ったが、今年度は定常流水路を使用して津波波力特性の把握を行う。

数値解析については、非線形長波理論により水位・流速等について実験結果との比較を行い適用性を確認した上で、側壁の影響について検討を行う。

##### 3) 対策工法の検討

対策工法として堤体や根固・被覆ブロック等の安定性照査及び対策工法の適用性について検討を行う。

#### (2) 粘り強い構造にかかる性能評価手法、設計方法及び対策工法

##### 1) 水理模型実験等による検討

抽出された技術的課題のうち上部工パラペット構造の工夫について、作用時間の長い津波に対する水理模型実験や、数値波動水路の解析を行い、津波の流れや波力の特性や根固・被覆ブロックの安定性について検討する。

水理模型実験については、平成27年度は長水路（造波水路）により水面形等の比較を行ったが、今年度は定常流水路を使用して被覆材の安定実験を行い、形状の工夫による効果を検証した。

数値解析については、数値波動水路により水位・流速、水面形状等について実験結果との比較を行い適用性を確認するとともに、被覆ブロック周辺の圧力について検討を行った。

## 2) 対策工法の検討

発生頻度の高い津波を越える津波に対する、本体工の粘り強さの確保について、期待滑動量や経済性と安定性能上の比較など、設計に必要なアプローチの考え方を整理する。

#### 4-2-3 結果

##### (1) 構造上の弱点箇所における設計方法及び対策工法

###### 1) 被災事例の構造的特徴の整理・分析

前年度に構築したデータベース（以下、DB）の改良を行った。具体的に、耐津波対策を推進する上で有益となる基礎情報の補完、条件検索機能の拡充を行った。

###### ① 基礎情報の補完

被災事例の分析は、岩手県・宮城県・福島県 3 県の県管理漁港の漁港施設（表 4-2-1 参照）を対象とし、災害査定資料をもとに実施した。

表 4-2-1 分析データ諸元

	平成 28 年度	平成 27 年度	備考
漁港数	62 漁港	23 漁港	全 68 漁港
岩手県	31 漁港	14 漁港	全 31 漁港
宮城県	21 漁港	5 漁港	全 27 漁港
福島県	10 漁港	4 漁港	全 10 漁港
漁港施設数	1,051 施設 (296 施設)	281 施設 (97 施設)	括弧内は防波堤の施設数
入力断面数	2,016 断面 (756 断面)	643 断面 (252 断面)	括弧内は防波堤の断面数

###### ② 条件検索機能の拡充

本 DB は、平成 23 年度に水産庁事業で作成した WEB GIS システムの DB をデスクトップ上の GIS システムに改良したもので、詳細な被災状況（被災箇所、規模等）を扱っている。本システムは地図画面上で各漁港施設の被災状況を視覚的に把握可能であり、今年度は報告書等のとりまとめに資するため、被災状況の分析結果をエクセルで出力できるようにするなど、主に以下に示す機能を拡充した。

<拡充した機能>

###### ○絞り込み検索機能

例：防波堤に係る全ての情報から「被災箇所（堤頭部、隅角部等）」、「構造形式」、「上部工形状」等、様々な条件で絞り込みを行い、当該箇所の「大きく滑動・転倒」した割合等を表示

###### ○分析結果の表示・出力機能

例：被災状況の分析結果（画像）の表示・出力機能（図 4-2-1）。

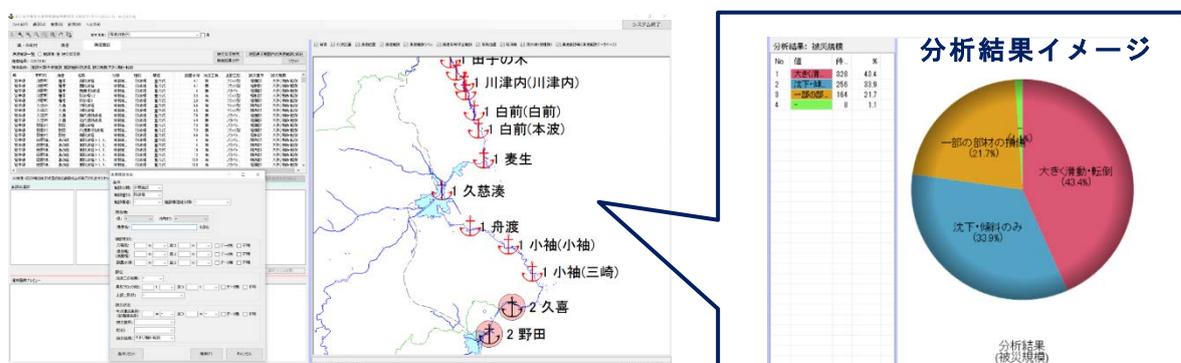


図 4-2-1 GIS システムのイメージ

### ③ 分析結果

上記改良した DB を用いて、防波堤を対象とした被災事例の構造的特徴の整理・分析を行った。次頁以降に結果の概要を示す。

なお、分析結果で使用している被災規模の定義を表 4-2-2 に示す。

表 4-2-2 被災規模の定義

定義	内容	事例
大きく滑動・転倒	構造物が移動、倒壊し、施設の機能が消失しているケース。	
一部の部材の損傷	構造物の一部が被災し、施設の機能が限定的に低下しているケース。 消波工の散乱や基礎工の洗掘、構造物の一部破損等。	
沈下・傾斜のみ	構造物の位置は変わらず、構造物が沈下や傾斜した事例。施設の機能が大きく低下していないケースであり、地震に起因した被災と想定。	

- ・今次津波による防波堤（混成堤）の被災状況の整理・分析結果より、堤頭部と隅角部では、堤幹部を含む全断面と比較して被災規模がより大きくなる傾向が確認された（図 4-2-2）。
- ・堤頭部や隅角部が被災し易い理由として、堤頭部周辺での複雑な流況による基礎工の被災や隅角部における外力（水位）の増加が考えられる。
- ・防波堤の構造形式別の被災状況では、混成堤の被災規模が直立式や矢板・杭式と比べて大きくなる傾向が確認された（図 4-2-3）。
- ・混成堤に比べて、直立堤は静止摩擦係数が大きく基礎地盤が強固で洗掘されにくいため、また矢板・杭式は地盤の変位（沈下・洗掘）が即座に構造物の崩壊に繋がりにくいため、被災規模が小さいと推察される。

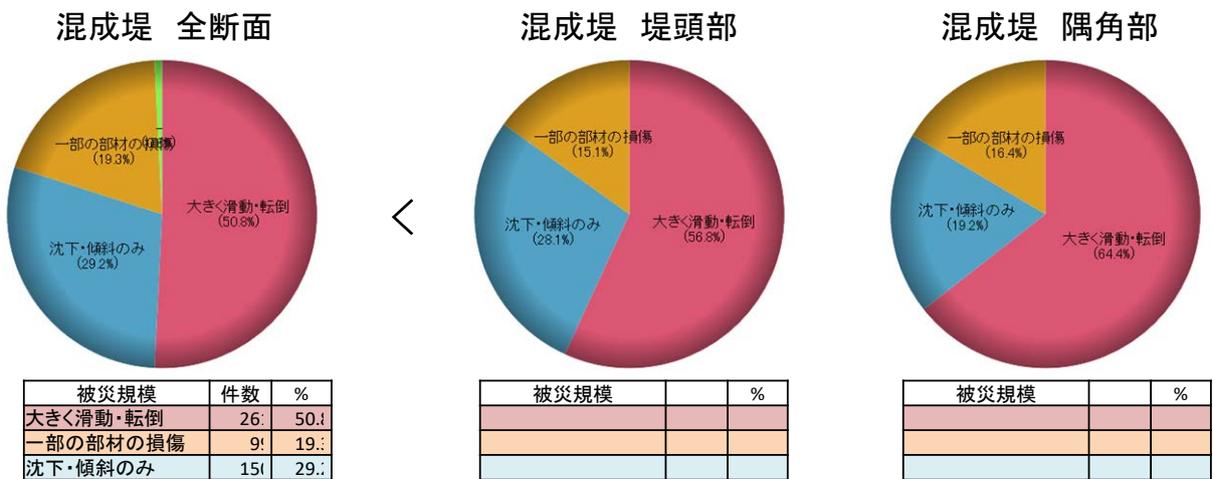


図 4-2-2 防波堤（混成堤）の被災箇所ごとの被災規模



図 4-2-3 防波堤の構造形式ごとの被災規模

## 2) 水理模型実験等による検討

### ① 水理模型実験

#### a) 実験内容

構造的な弱点となる防波堤の堤頭部及び隅角部について、平成 27 年度の長水路（造波水路）による計測に引き続き、今年度は定常流水路を使用して津波波力特性の把握を行った。

実験施設は水産工学研究所の定常流水路（幅 0.5m，深さ 1.0m）を使用し、漁港防波堤模型を設置した（図 4-2-4 参照）。模型縮尺は 1/50 とし、模型形状は防波堤の隅角部または堤頭部を切り出した半無限堤とし（図 4-2-5(a)）、参考として直入射、斜め入射でも実験を行った。防波堤の諸元は典型的な漁港防波堤を参考に、表 4-2-3 の通り設定した。なお、捨石マウンドは設置していない。津波の作用時間は、定常状態に達してから約 2min（現地換算約 15min）とした。

波圧の計測には半導体型動歪み式波圧計を使用し、水路中央の防波堤前面 5 箇所、背面 5 箇所、および天端 2 箇所の計 12 箇所を設置し、サンプリング間隔 1kHz で計測した（図 4-2-5(b)）。また水位の計測には容量式波高計、流速の計測にはプロペラ流速計を使用し、水路中央の波圧計測位置の他、水路横断方向 3 箇所に設置し、サンプリング間隔 50Hz で計測した（図 4-2-5(a)）。

実験ケースは模型形状 5 種、津波高 5 種、水位 1 種（L.W.L.）を組み合わせた計 25 ケースとした。得られたデータについて、防波堤前後の水位と波圧の関係を整理し、現行参考図書に記載されている水工研式（図 4-2-6）との比較を行った。

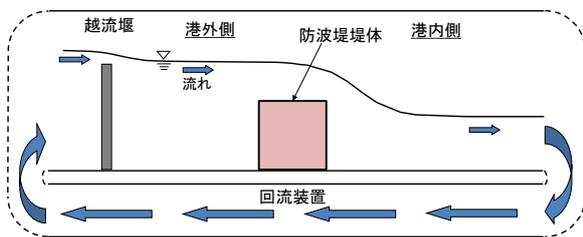
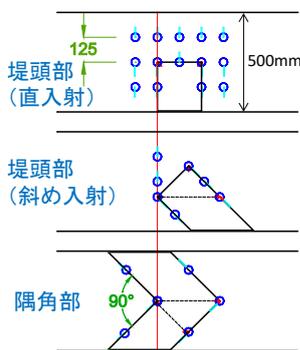


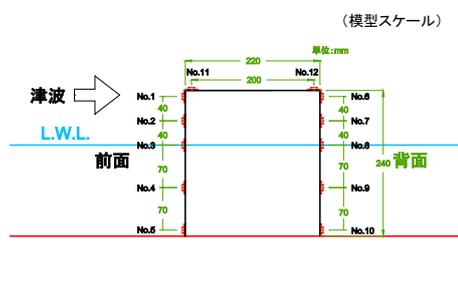
図 4-2-4 定常流実験模式図

表 4-2-3 防波堤諸元  
(括弧内は現地スケール換算)

堤体高	24cm (12m)
堤体幅	22cm (11m)
設置水深	15cm (7.5m)
静水面上の天端高	9cm (4.5m)



(a)水位・流速計測位置



(b)波圧計測位置 (水路中央)

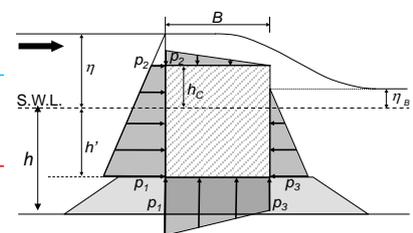


図 4-2-6 水工研式概念図

図 4-2-5 模型形状と計測位置

b) 実験結果

直立部前面（港外側）と背面（港内側）の作用波圧  $p$  と直立部底面からの高さ  $z$  の関係を図 4-2-7～図 4-2-11 に示す。前面では直立部前面近傍の水位を、背面では直立部背面から約 80cm 背後の水面形が安定する位置の水位をそれぞれ用いて無次元化し整理した（ $\rho$ ：水の密度， $g$ ：重力加速度， $\eta$ ：津波高， $h$ ：直立部前面水深）。図中には静水圧分布を破線で、前面では静水圧の 1.1 倍、背面では静水圧の 0.9 倍の分布を点線で示した。

無限堤の直入射時では、前面の作用波圧は静水圧の 1.0～1.1 倍の範囲内、背面では 0.9～1.0 倍程度であり、平成 27 年度に実施した造波水路の結果よりも静水圧に近い傾向となった。また斜め入射時でもほぼ同様の結果となった。

直入射時の堤頭部では、前面で静水圧を有意に下回り、0.8 倍前後となっている。これは堤体に沿う流れに伴う圧力低下が主な要因であると推察される。図 4-2-12 に堤頭部の流速分布を示すが、開口部側、特に背面側（No.4,5）で流速が速くなる傾向が見られる。また、斜め入射時の堤頭部は、前面では概ね静水圧であるが、背面では越流の多いケースで静水圧の 0.9 倍を大きく下回っている。以上の結果は、堤頭部では前面と背面の差に相当する水平波力が堤幹部より高くなる可能性を示唆している。

隅角部では、前面・背面ともに直入射時の結果と同じ傾向が認められた。隅角部では波圧係数としては直入射時と同様と考えられるが、収斂により水位が上昇すると考えられるため、直入射時と水位の比較を行った。沖水位（堤体前面から 140cm 沖側）に対する堤体直前面の越流水深の比較を図 4-2-13 に示すが、直入射時に比べて隅角部では前面の水位が 1.1 倍程度高くなっている。ただし、これは水路幅 0.5m の限定的な実験条件下の結果であり、水位上昇分の割増係数については、平面実験により詳細に検討する必要がある。

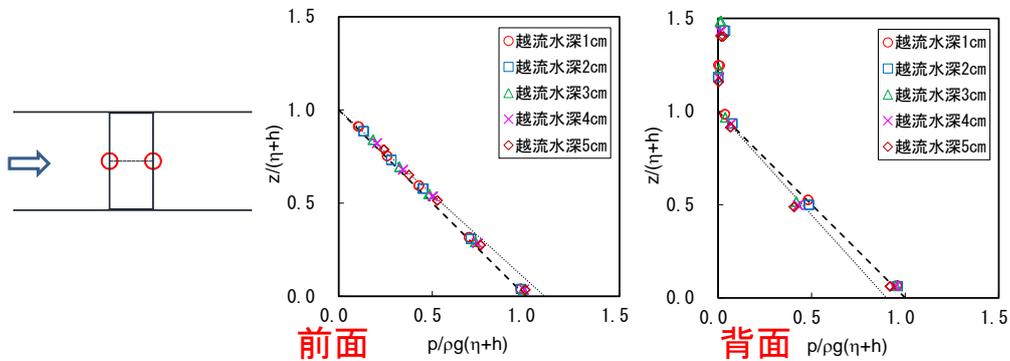


図 4-2-7 直入射時の直立壁に作用する波圧

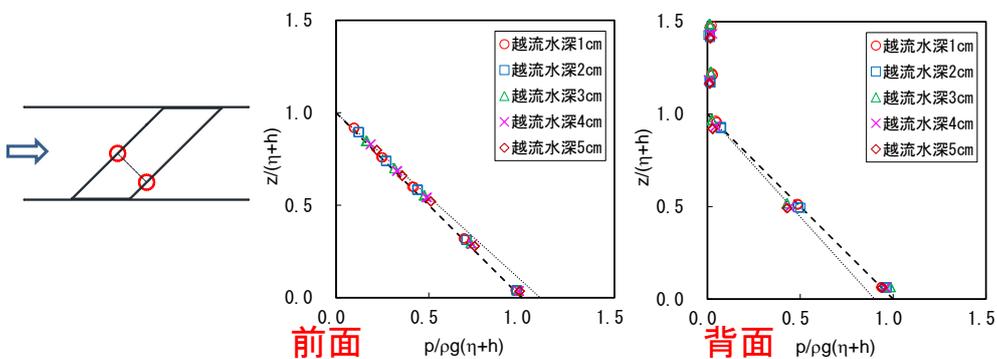


図 4-2-8 斜め入射時の直立壁に作用する波圧

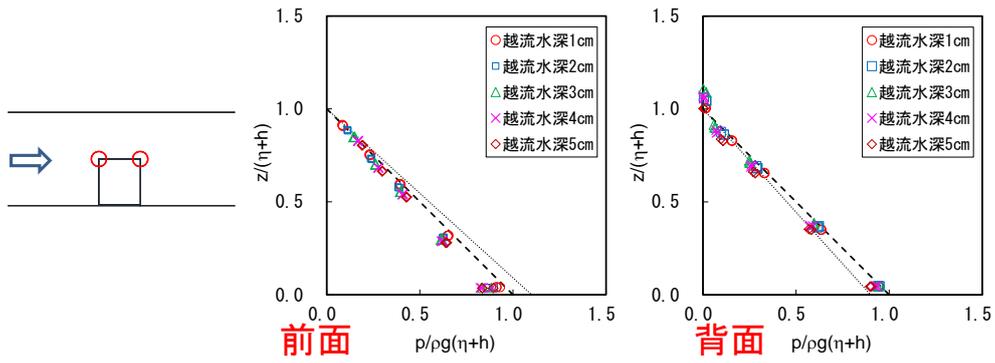


図 4-2-9 直入射時の堤頭部に作用する波圧

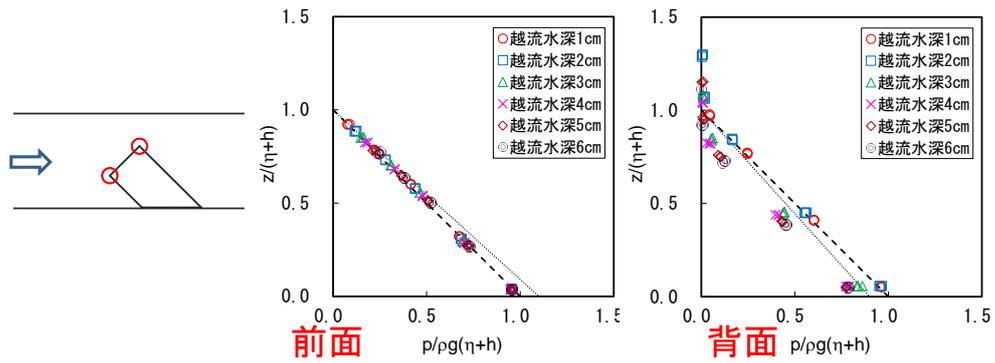


図 4-2-10 斜め入射時の堤頭部に作用する波圧

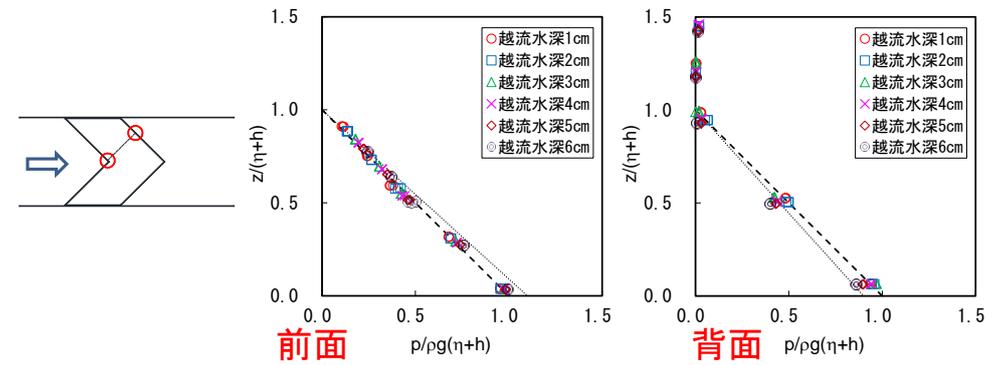


図4-2-11 隅角部に作用する波圧

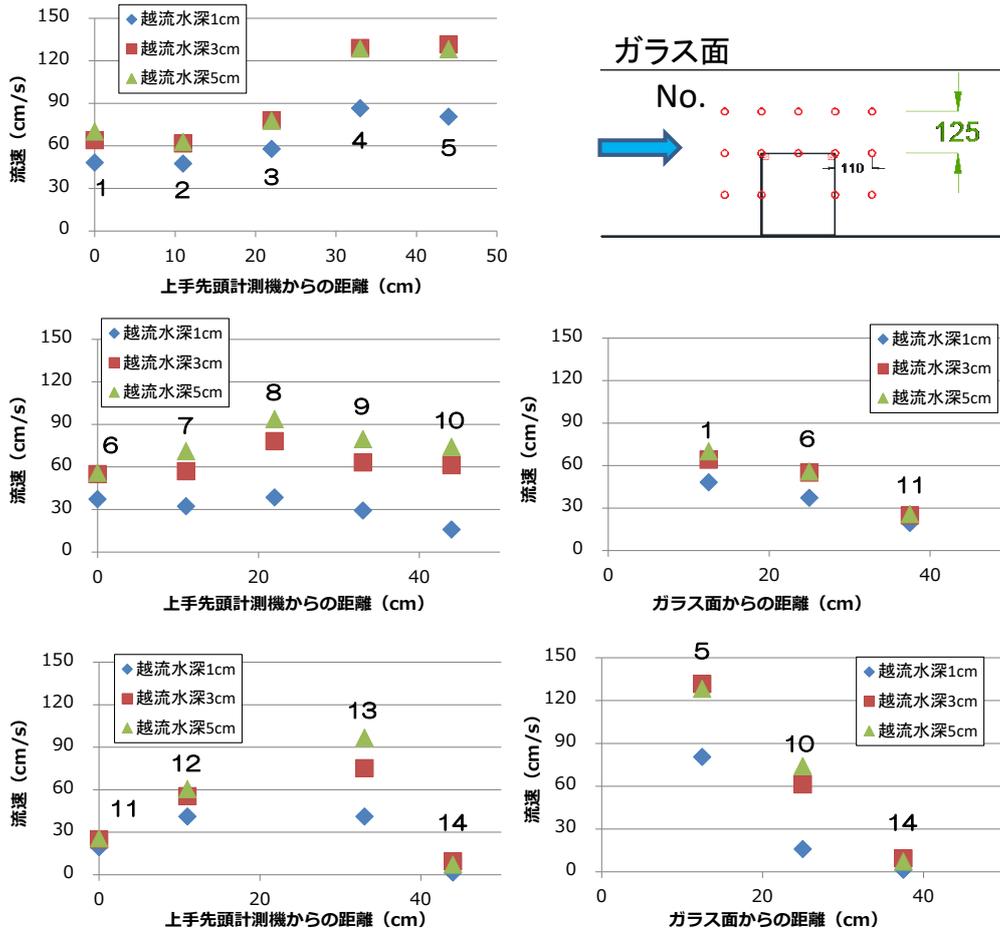


図4-2-12 直入射時の堤頭部の流速分布

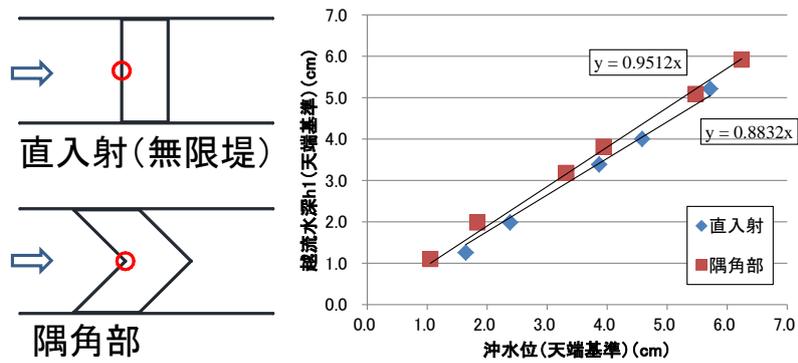


図4-2-13 直入射（無限堤）と隅角部の水位の比較

## ② 非線形長波方程式による数値計算

### a) 目的

非線形長波理論による津波解析は設計条件の標準的な設定方法であるが、隅角部や堤頭部への適用性を水理模型実験と同じ条件で計算を実施することにより整合性を確認した。また水路幅を変更した条件など、実験を実施した条件以外でのケースについても検討を行い有効性を検証した。

### b) 計算条件と計算ケース

実験で使用した水産工学研究所の定常水路（幅 0.5m、水深 1.0m）中に作成した模型（縮尺 1/50）を実スケールで計算を実施した。計算条件を表 4-2-4 に示す。

表 4-2-4 計算条件一覧

項目		設定条件（実スケール）	
計算手法	基礎方程式	【連続式】 平面2次元連続式 【運動方程式】 非線形長波方程式（底面摩擦含む）	
	差分法	【空間差分】 スタガード格子による差分 【時間差分】 リープフロッグ法による差分	
	境界条件	入射境界	実験と同様の越流水深
		側方境界	不透過境界
	計算領域	25[m]×176[m]の領域	
	計算格子間隔	1.0[m]	
	計算時間	定常状態に達した後、約15分まで	
	計算時間間隔	0.02s	
	地形条件	一定水深7.5mに防波堤(天端+4.5m、幅11m)を設置	
	粗度条件	マンニングの粗度係数0.01[m <sup>-1/3</sup> s]を使用	

### c) 計算結果の整理

隅角部の収斂状況を確認するため、図 4-2-14、図 4-2-16 に示す 4 ケースについて計算を実施した。図 4-2-15 より、case1、case2 の前面水位は実験結果をほぼ再現しており、隅角部（p3）の水位は周辺点に比べ極端な増加はなかった。また、図 4-2-16 のように case3、case4 は実験領域の幅を 5 倍に拡大し、壁面の影響を小さくした状態で計算を行った。計算は流量一定（30m<sup>3</sup>/m/s）として実施した。定常状態では case1、case2 と同様に隅角部（p3）で極端な水位の上昇は見られなかったが、周辺点（p1、2、4、5）よりも若干の水位上昇が確認された（図 4-2-17）。時系列でみると、越流前は隅角部（p3）の水位は無限堤（直入射）（p3）の水位より大きく、越流直前は隅角部で無限堤（直入射）より 1.04～1.07 倍程度水位が高くなった（図 4-2-18）。

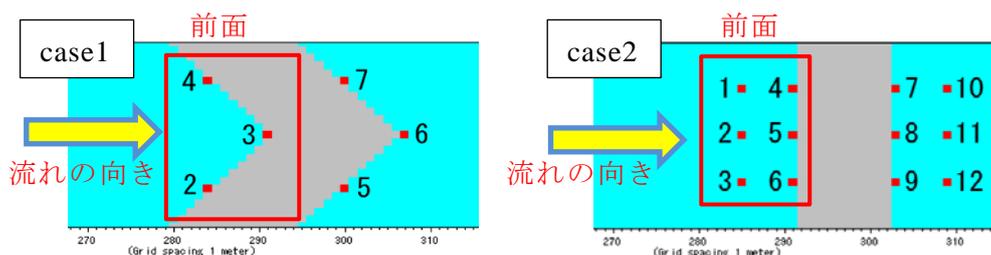


図 4-2-14 隅角部(左)と無限堤(直入射)(右)の水位比較位置番号

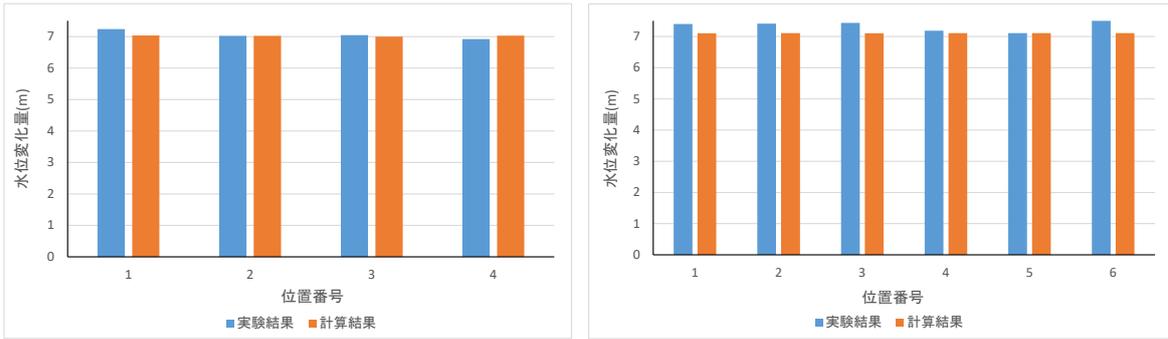


図 4-2-15 隅角部(左)と無限堤(直入射)(右)の実験結果と計算結果の前面水位比較

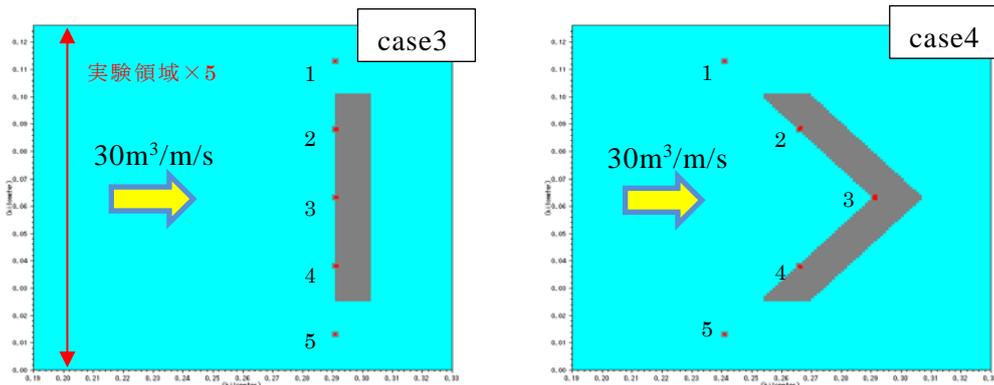


図4-2-16 無限堤(直入射)と隅角部の水位比較位置番号

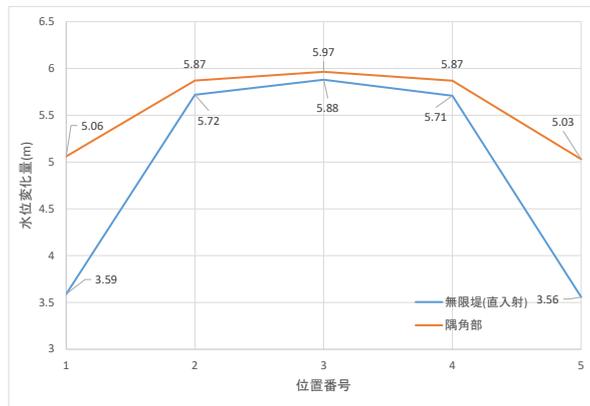
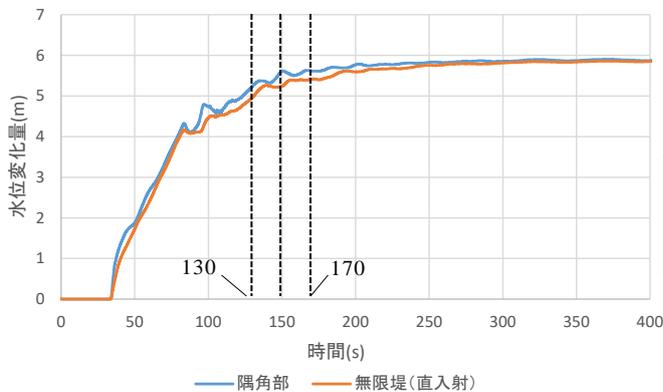


図 4-2-17 無限堤(直入射)と隅角部の各位置番号の定常状態での水位変化量



経過時間(s)	p3水位(m)		隅角部水位/ 無限堤(直入射)
	隅角部	無限堤(直入射)	
130	5.24	4.97	1.05
170	5.62	5.42	1.04
150	5.61	5.24	1.07

図 4-2-18 越流前の水位の時系列変化図(左)と各時間での水位比較(右)

さらに、堤頭部での流速の比較を行った。水位と流速の分布図を図 4-2-19 に示す。図 4-2-20 より、計算された流速分布は実験の傾向を再現しているものの、防波堤の前面では大きく、背面では小さい傾向が見られた。壁面の影響を確認するため、実験領域の水路幅を 3 倍に拡大した領域を作成し、流速の比較を行った。p1、p2、p9、p10 では流速の増減に同様の傾向が見られるが、壁面と防波堤間の領域にある p5、p6 では流速の大小関係が異なっており、壁面が影響していると推察される (図 4-2-21)。

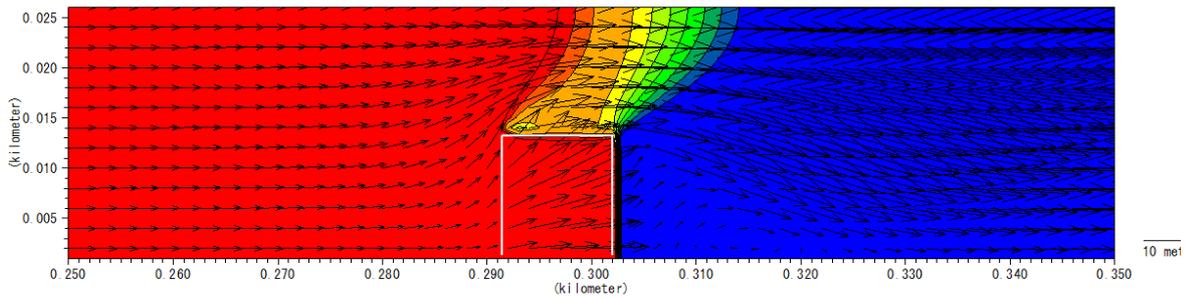


図 4-2-19 堤頭部 (直入射) の水位・流速分布

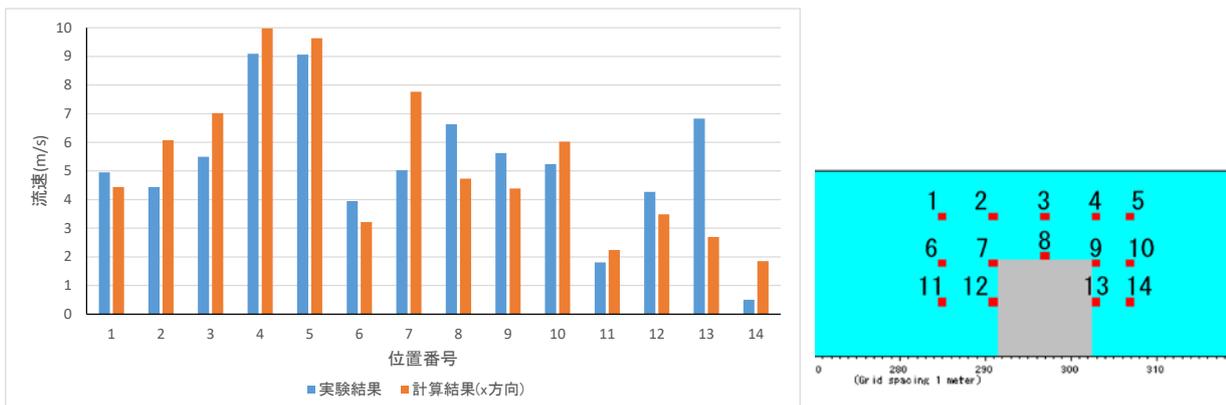


図 4-2-20 堤頭部 (直入射) の各位置番号の流速 (左) と水位・流速比較位置番号 (右)

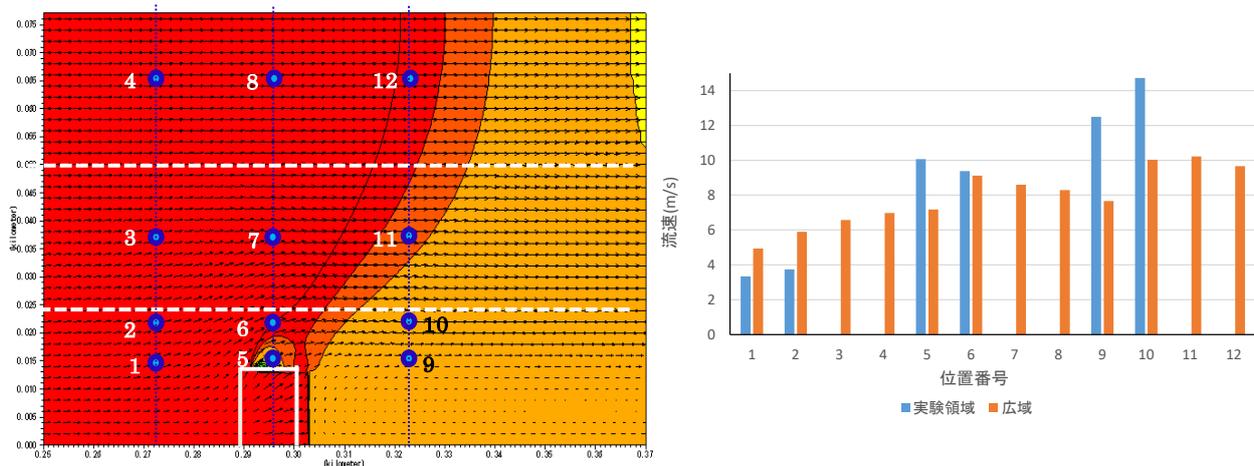


図 4-2-21 拡大領域での計算結果 (左) と各位置番号での流速比較 (右)

### 3) 対策工法の検討

「被災事例の構造的特徴の整理・分析」および「水理模型実験等による検討」で着目した構造上の弱点(堤頭部・隅角部)について、対策工法を検討する。

発生頻度の高い津波を対象に、堤頭部については複雑な流況に対して被覆材(被覆ブロック、捨石等)の重量を安定数  $N$  による安定性の評価手法を、隅角部については直線部と比較し津波水位が高くなることから、設計水位の設定方法についての検討を予定している。また、新形状防波堤(上部斜面堤等)による本体工の改良についても検討を行う予定である。

これらの検討にあたっては、次年度実施の水理模型実験や数値解析結果より、新たな評価方法の確立を目指すものである。

## (2) 粘り強い構造にかかる性能評価手法、設計方法及び対策工法

### 1) 水理模型実験等による検討

#### ① 水理模型実験

##### a) 実験内容

上部パラペットの形状を変化させた断面について、平成 27 年度は長水路(造波水路)により水面形等の比較を行ったが、今年度は定常流水路を使用して被覆材の安定実験を行い、形状の工夫による効果を検証した。

実験施設は水産工学研究所の定常流水路(幅 0.5m, 深さ 1.0m)を使用し、漁港防波堤模型を設置した(図 4-2-22 参照)。模型縮尺は 1/50 とし、模型形状は捨石マウンド上のパラペット付防波堤で、港内側のマウンド上に方塊型または有孔型(開口率 10%)の被覆材を設置した。防波堤各諸元の定義を図 4-2-23、パラペット堤の断面図を図 4-2-24、諸元を表 4-2-5 に示す。津波の作用時間は、定常状態に達してから約 2min(現地換算約 15min)とした。

計測項目は水位、流速、及び VTR 撮影による落水・被覆材の被災状況である。実験ケースは模型形状 10 種(パラペット付 9 種(天端幅 3 種×高さ 3 種)、及びパラペット無し)、水位 2 種(L.W.L.及び H.W.L.)を組み合わせた計 20 ケースとし、各ケースについて越流水深を段階的に変え、被覆材の被災状況を整理した。

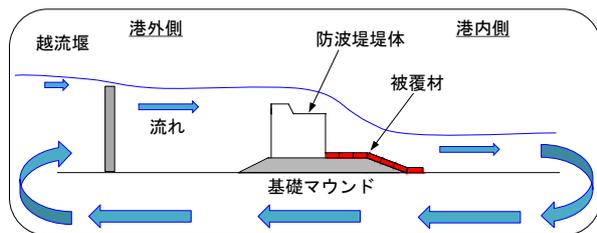


図 4-2-22 定常流実験模式図

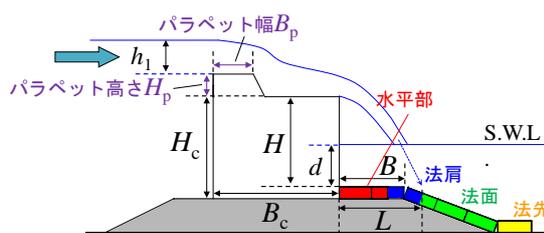


図 4-2-23 防波堤各諸元の定義

表 4-2-5 パラペット付防波堤の諸元

堤体高さ $H_c$	18cm (現地 9m)
堤体幅 $B_c$	22cm (11m)
パラペット高さ $H_p$	2, 4, 8cm (1, 2, 4m)
パラペット幅 $B_p$	2, 7, 14cm (1, 3.5, 7.0m)
マウンド高さ $H_m$	6cm (3m)
マウンド幅 $B$	被覆材 3 個並
腹付工有無	無し
越流水深 $h_l$	約 1~9cm (約 0.5~4.5m)
被覆材	方塊型 or 有孔型 (開口率 10%) 質量 150g (20t)
設置水深	15cm (7.5m)

※括弧内は現地スケール

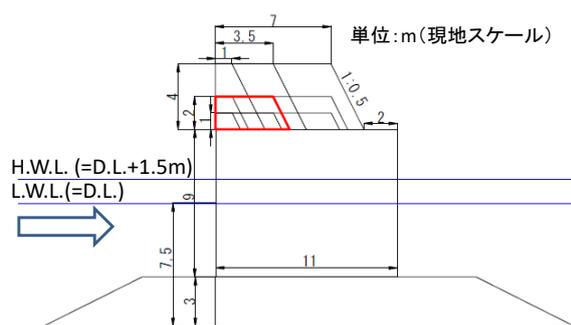


図 4-2-24 パラペット付防波堤断面図

b) 実験結果

背後マウンドの被覆ブロックの安定性については、三井ら（2013）<sup>5)</sup>が提案した次式の安定数  $N$  を用いて、パラペット無し、およびパラペット付防波堤の実験結果を整理した。

$$N = \frac{h_1}{(S_r - 1)D_n}$$

ここで、 $h_1$ ：天端上の越流水深、 $S_r$ ：ブロックの比重、 $D_n$ ：ブロック代表長さ（=ブロック体積  $V$  の3乗根）である。

方塊型について、パラメータを  $d/(H+Hp-d)$  ( $d$ ：被覆ブロック上水深、 $H+Hp-d$ ：静水面からのパラペットを含む天端までの高さ) とした場合の安定数  $N$  の比較結果を図4-2-25に示す。図中に塗りつぶしで表示したプロットが被災の発生した条件に対応しており、パラペットがない場合の被災限界を赤線で記載している。パラペットの設置により、被災限界の安定数は高くなる傾向があるが、パラペット幅が小さい場合、効果が小さいケースも見られる。有孔型について、安定数  $N$  の比較結果を図4-2-26に示すが、方塊型と同様にパラペットにより被災限界の安定数は高くなる傾向が見られる。

以上の結果から、パラペット幅と堤体幅の比 ( $B_p/B_c$ ) をパラメータとして被災限界の安定数を整理した結果を図4-2-27に、パラペット無しに対する安定数の比を表4-2-6に示す。 $B_p/B_c$  が0.3以上のとき、方塊型・有孔型の被覆ブロックともに安定数はパラペット無しに対して15%以上増加しており、このことはパラペットの設置により越流水深として15%程度の増加に耐えられる効果があることを示している。ただし、パラペット幅が小さい場合は効果がほとんど見られないケースもあり、留意が必要であると言える。

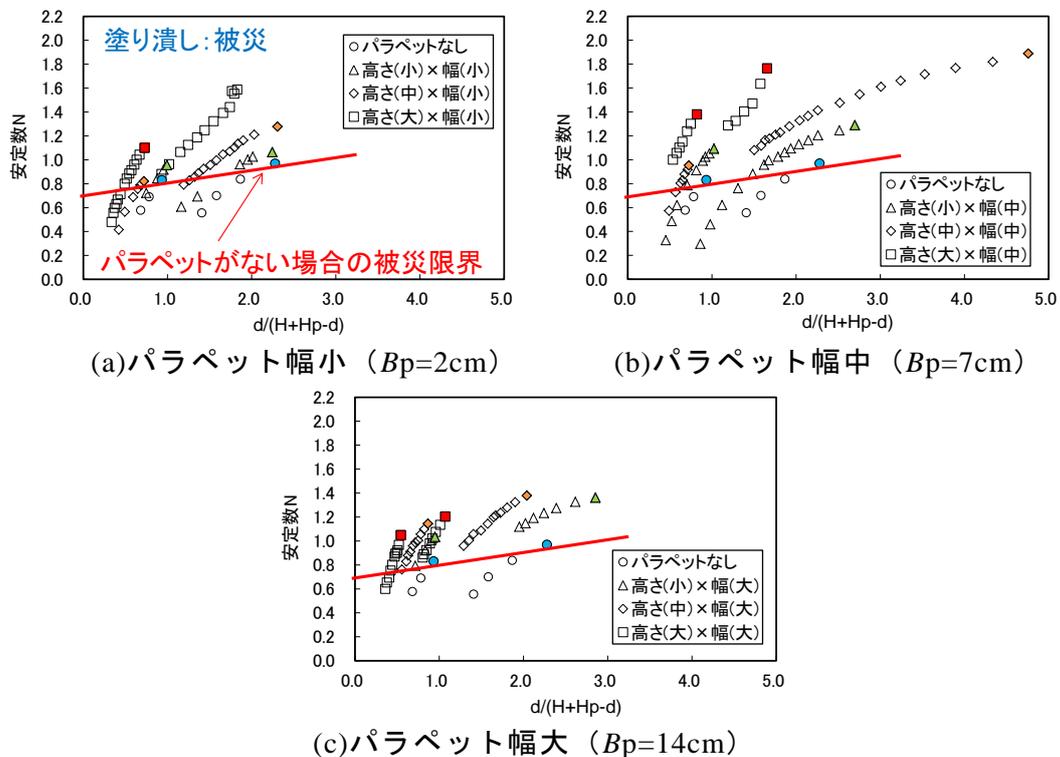


図4-2-25 パラペット形状による安定数の比較（方塊型）

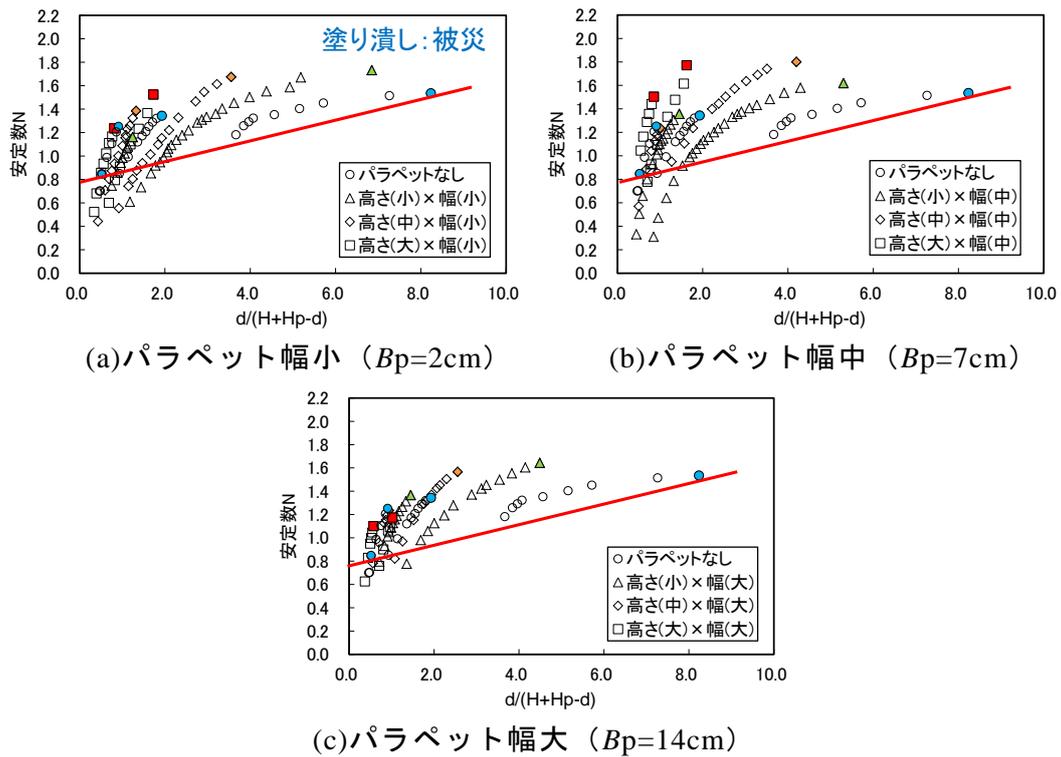


図4-2-26 パラペット形状による安定数の比較（有孔型）

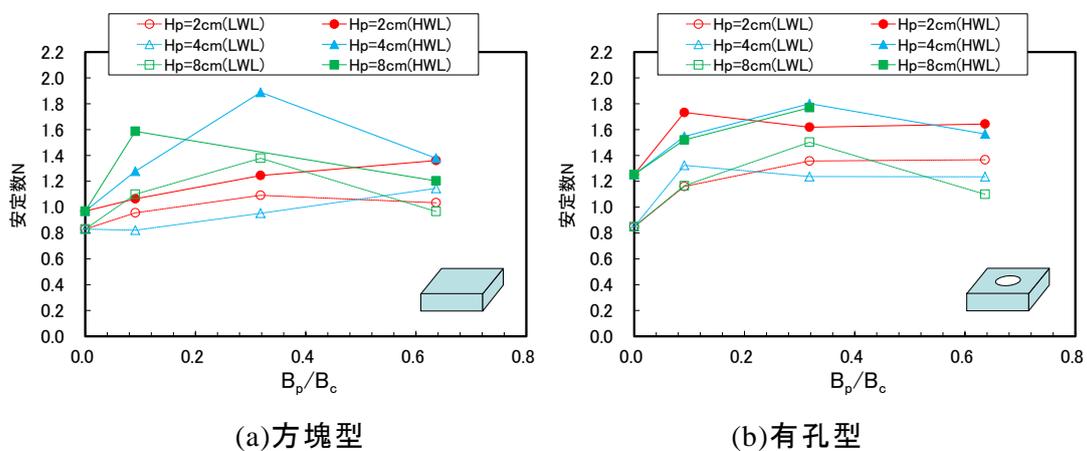


図4-2-27 パラペット幅による被災限界の安定数

表4-2-6 パラペット無しに対する被災限界の安定数の比

パラペット幅	方塊型	有孔型
パラペット無し	1.00	1.00
$B_p/B_c=0.09$	0.99~1.64 (1.25)	1.21~1.56 (1.36)
$B_p/B_c=0.32$	1.15~1.95 (1.47)	1.29~1.77 (1.50)
$B_p/B_c=0.64$	1.16~1.42 (1.31)	1.25~1.61 (1.38)

※最低値～最高値（平均）

## ② 数値波動水路による数値計算

### a) 計算条件と計算ケース

一般的かつ比較的簡易な数値計算手法である数値波動水路（CADMAS-SURF/2D）で実験を再現することが出来れば、コストのかかる水理模型実験を行わなくとも現象の把握が可能である。実験を実施した条件以外についても検討を行えることから、数値波動水路の適用性について検討を行った。

数値計算は前述の通りCADMAS-SURF/2Dを使用し、計算条件および構造物諸元（現地スケール）は実験と同様、マウンドおよび防波堤を配置し、越流水深は実験で被災した水深と同じ水深となるように調整した。

計算格子間隔は鉛直水平共に0.25～1.00 mとし、防波堤周辺については0.25 mとした。なお、防波堤および被覆ブロックは不透過、マウンドはポーラスセルとし、被覆ブロック間は1格子分（0.25 m）隙間を空けた。

検討項目は図4-2-28に示すように水位（防波堤前後）、流速（防波堤天端上前後端2地点）、水面形状（越流形状、打ち込み位置）、圧力（被覆ブロック上下面）とした。計算ケースを表4-2-7に示すが、実験で被覆ブロックが被災したケースを中心に検討を行った。

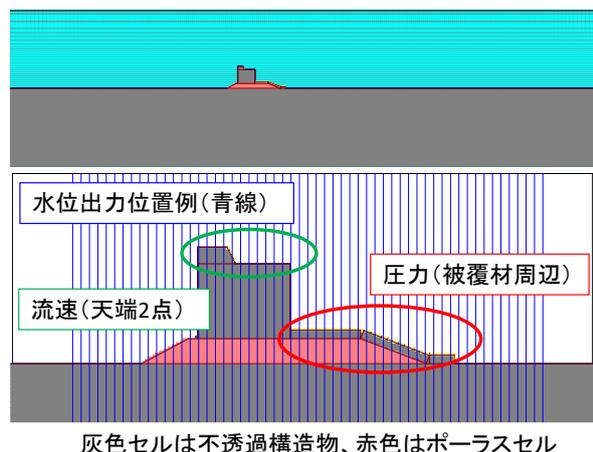


図 4-2-28 防波堤と計測位置図

表4-2-7 ケース一覧

No	条件	潮位	被覆材	越流水位 [m]	P高さ [m]	P天端幅 [m]	
1	定常流	L.W.L.	方塊	被災水位	2.2	0	0.0
2					2.5	1	1.0
3					2.9		3.5
4					2.7	7.0	
5					2.2	2	1.0
6					2.5		3.5
7					3.0	4	7.0
8					2.9		1.0
9					3.6	3.5	
10					2.5	7.0	
11	定常流	L.W.L.	有孔	被災水位	3.5	0	0.0
12					3.1	1	1.0
13					3.6		3.5
14					3.6	7.0	
15					3.5	2	1.0
16					3.3		3.5
17					3.2	4	7.0
18					3.2		1.0
19					3.9	3.5	
20					2.9	7.0	

### b) 計算結果の整理

まず、数値波動水路の適用性の確認として、越流水深ごとに水面形状の確認を行った（図4-2-29）。図より、越流水深1.5 m以下で落水塊が明らかに不連続となり打ち込み後の水理現象の再現が困難となっている。実験において被災した最低越流水深は2.2 mであることから本検討では影響が小さいと考えられる。

圧力、流速、渦度の計算結果の各分布図を図4-2-30～図4-2-32に、計算および実験結果の水位の時系列を図4-2-33に、流速の時系列および実験との相関、流量の実験との相関を図4-2-34に示す。水位、流速については概ね実験を再現できていることが確認された。水面形状の比較を図4-2-35に示すが、堤体背後から落水位置までは実験を概ね再現しているものの、落水位置より背後の水面形状は実験と異なっている。この理由として、数値波動水路では気泡の巻き込みが十分表現できないことが挙げられる。

被覆ブロックの上面圧力について整理した結果を図 4-2-36 に、越流水深と上下圧力差（揚圧力）の関係を図 4-2-37 に、上下圧力差の 1/10 最大値と、実験においてめくれに起因して被災した被覆ブロック位置の関係を図 4-2-38 に示す。上面圧力については、打ち込み位置かつ実験での被災位置（被覆ブロック③：天端側法肩）で平均上面圧力が下がっていることから、打ち込み位置でめくれ被災が起き易くなっている可能性が示唆される。他ケースについても同様の結果となった。

被覆ブロックの上下圧力差については、越流水深の増大に伴い圧力差も大きくなっている。また、圧力差が大きい位置と実験での被災位置が概ね一致しており、めくれ被災が上下圧力差によって発生し得ることが示唆される。ただし、特に天端側法肩で圧力差が大きい場合でも実験では被災していないケースも見られた。

以上より、水面形状（越流形状、打ち込み位置）、水位および天端上流速についての数値波動水路の適用性が確認された。

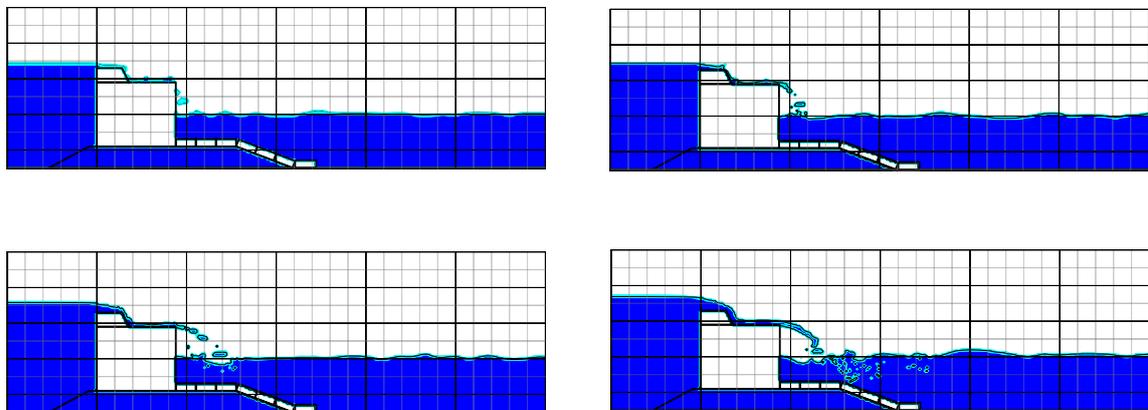


図 4-2-29 水面形状の比較

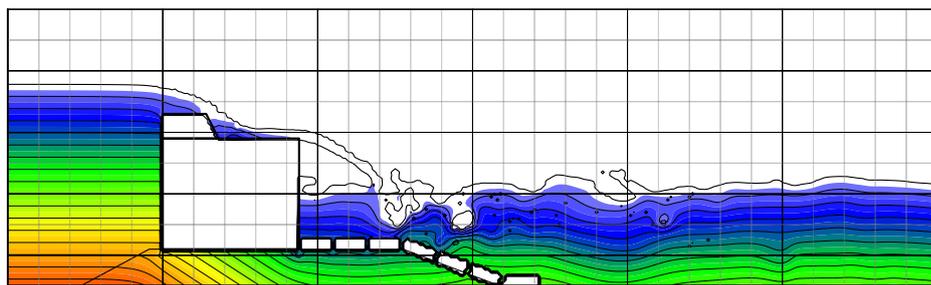


図 4-2-30 圧力分布図

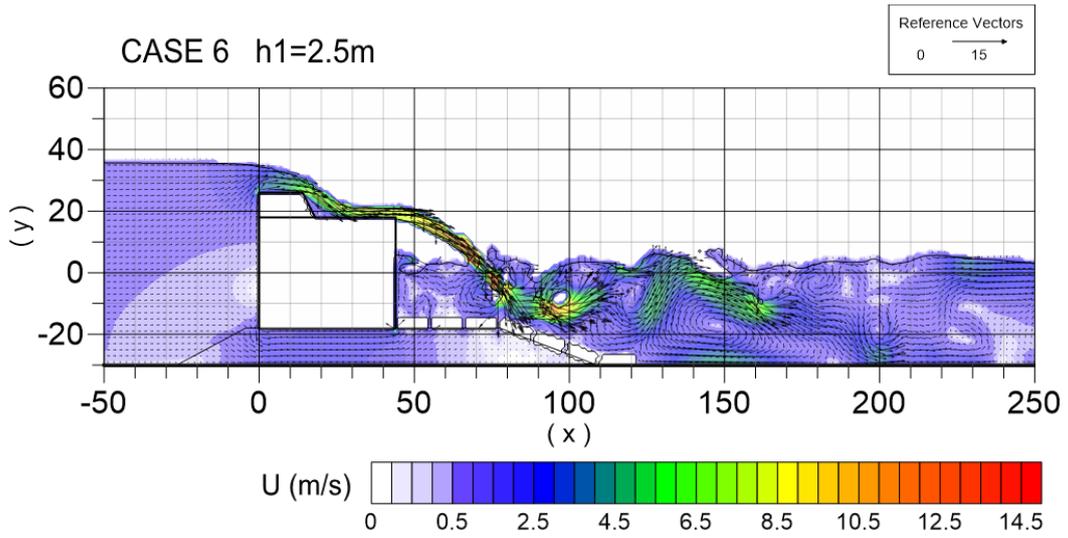


図 4-2-31 流速分布図

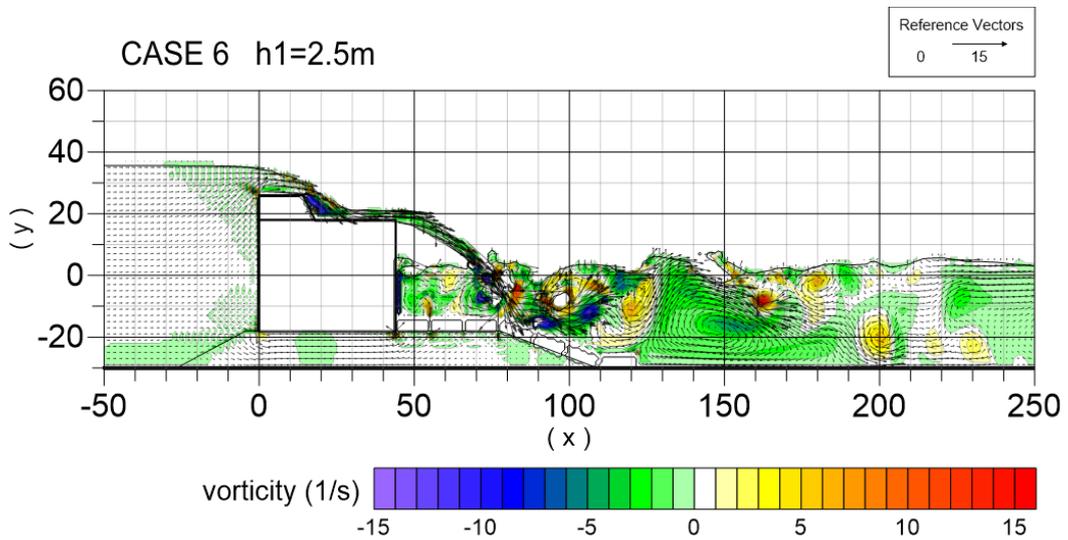


図 4-2-32 渦度分布図

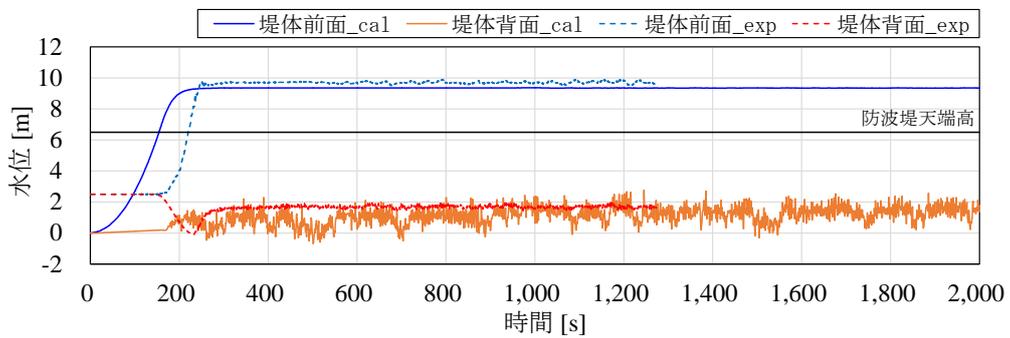
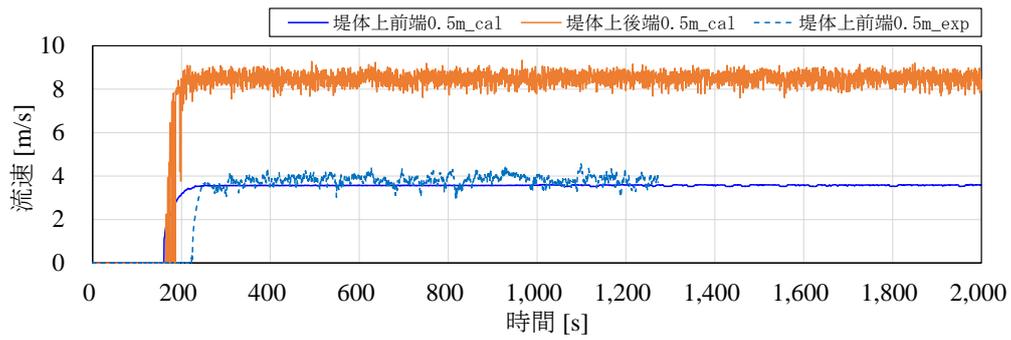
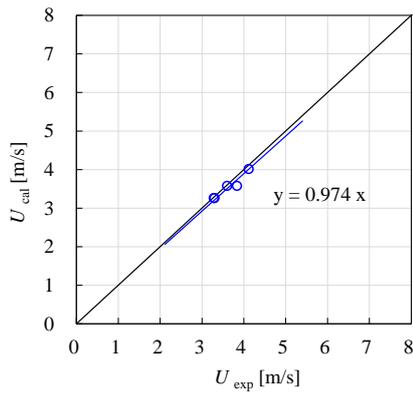


図 4-2-33 水位時系列の計算と実験の比較



流速の実験と計算結果の相関



流量比較(前面流速より算出)

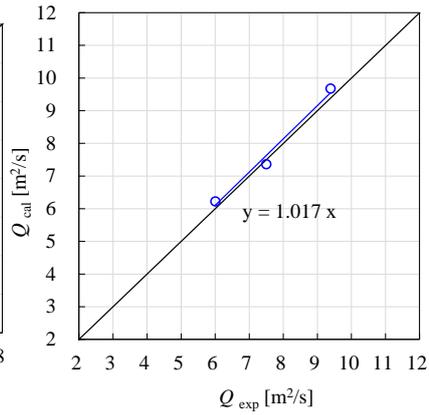


図 4-2-34 流速の時系列および実験との相関，流量の実験との相関

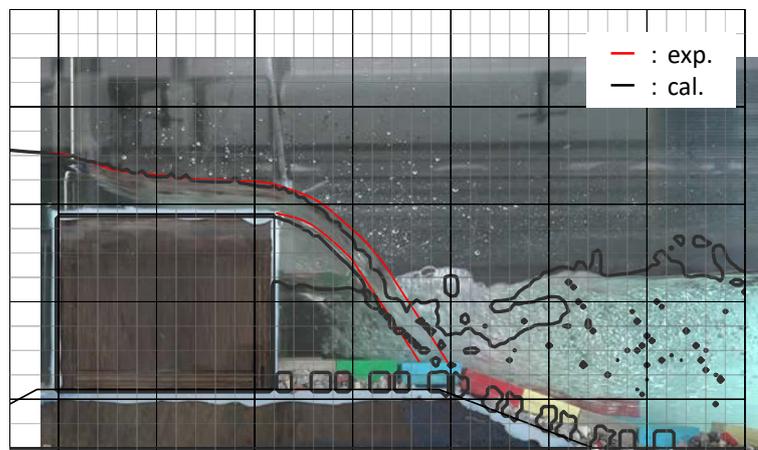


図 4-2-35 水面形状の実験との比較

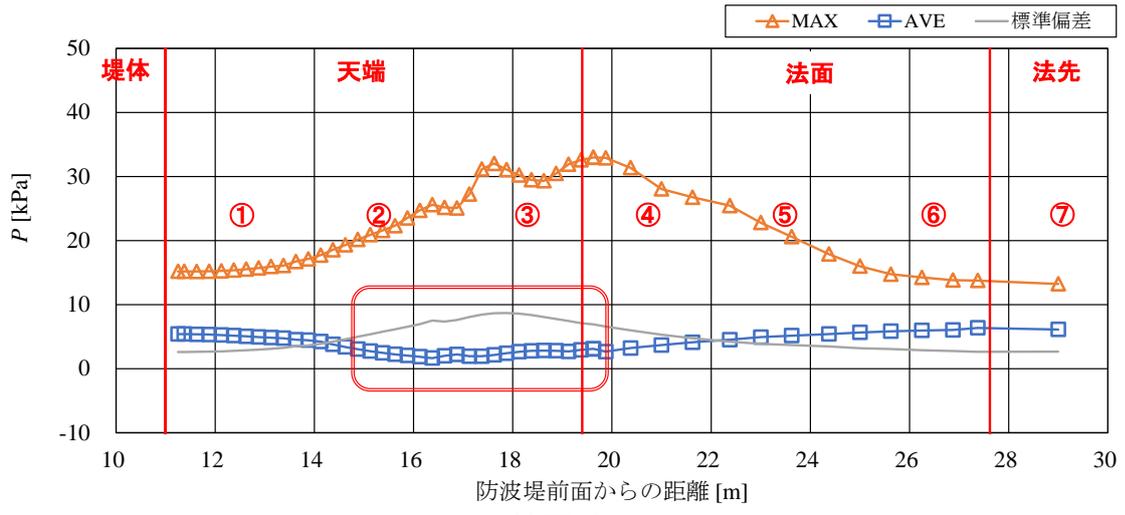
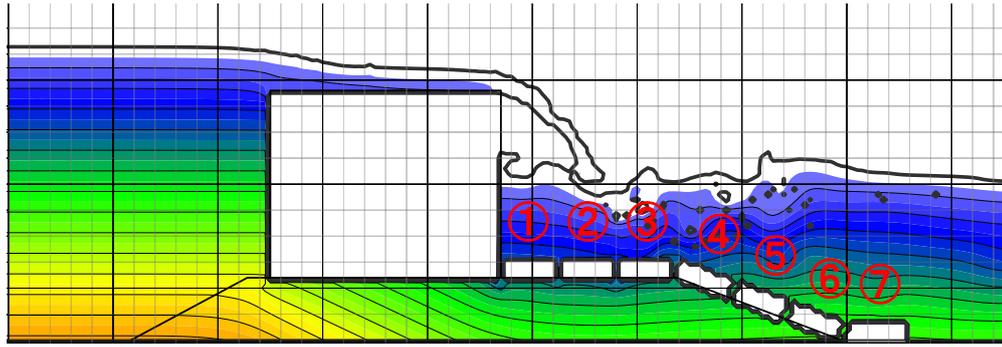


図 4-2-36 被覆ブロックの上面圧力

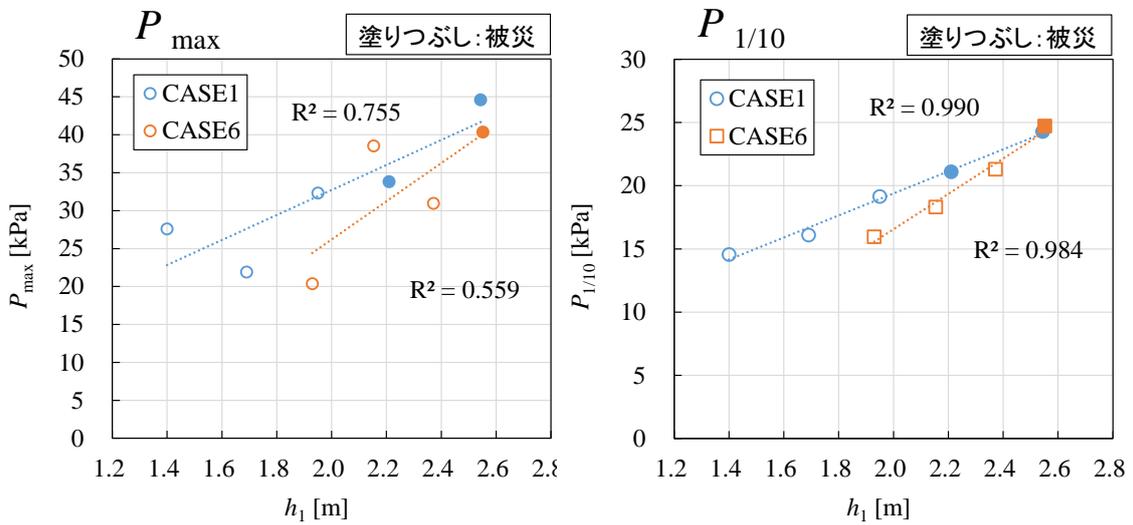


図 4-2-37 越流水深と上下圧力差の関係

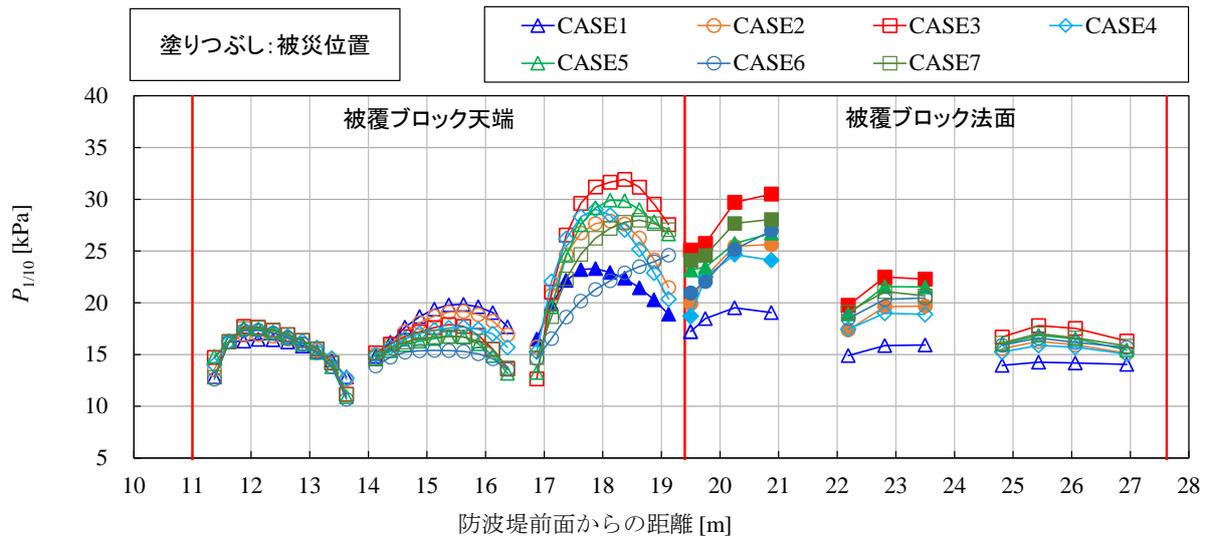


図 4-2-38 被覆ブロック上下圧力差と被覆ブロック位置

## 2) 対策工法の検討

発生頻度の高い津波を超える津波に対し、漁港の特徴（狭隘で浅い港内）を考慮した粘り強い構造について対応策の検討を行う。

防波堤の粘り強さを向上させる対策工として各種の手法が提案されているが、漁港特有の泊地の狭さや水深の浅さを考慮すると、適用が困難な工法もある。そこで、本検討では漁港の特徴を考慮し、上部工形状の工夫による水塊の落下位置の移動、鉛直力の増加（上部斜面提）、基礎材の安定性の評価手法の各対策について、次年度実施の水理模型実験や数値解析結果より、新たな知見を提案する予定である。

### 4-2-4 まとめと今後の課題

#### (1) 構造上の弱点箇所における設計方法及び対策工法

##### 1) 被災事例の構造的特徴の整理・分析

- ・今次津波による防波堤の被災状況を整理・分析した結果、堤頭部と隅角部で被災規模がより大きくなる傾向が確認された。

##### 2) 弱点箇所（堤頭部・隅角部）における津波波力の特性検討

- ・直入射時の堤頭部では、静水圧に対する波圧係数が定常流・造波水路ともに前面では 0.8、背面では 1.0 倍程度であり、前面で波圧係数の低減が見られ、堤体に沿った流れによる影響がある。また斜め入射時の堤頭部では、背面で静水圧の 0.9 倍を大きく下回るケースがある。このため、前面と背面の差に相当する水平波力が堤幹部より高くなる可能性があり、設計では波圧係数の割増が必要であると考えられる。
- ・隅角部では、静水圧に対する波圧係数は直入射時と比較して大きな相違はないが、定常流実験では水位が 1.1 倍程度高くなっている。このため、水位上昇分を考慮する必要がある。
- ・非線形長波式による数値計算で実験の再現計算を行った結果、実験の長水路の形状では側壁の影響があることを確認した。このため波圧や水位の割増係数については、

平面実験やそれに相当する数値計算により詳細に検討する必要がある。

## (2) 粘り強い構造にかかる性能評価手法、設計方法及び対策工法

### 1) 防波堤上部工の工夫による効果

- ・被覆ブロックの安定実験の結果、パラペットの設置により被災限界の安定数が高まり、パラペット幅と堤体幅の比が 0.3 以上のとき、越流水深で 15% 程度の増加に耐えられる効果があることを示した。
- ・数値波動水路による数値計算では、実験の落水位置を概ね再現でき、数値計算により落水位置の推定が可能であることを確認した。
- ・ブロック形状によりパラペットの効果が異なることから、ブロック形状の違いに応じた安定性能については水理実験や数値計算を実施し、効果を検証することが望ましい。

## (3) 設計実務に適用する上での課題

### 1) 波圧式

- ・発生頻度の高い津波に対して、堤頭部・隅角部については設計フローに新たな知見を追記する必要がある。

### 2) 上部パラペット形状

- ・天端高を下げるのは防波堤の本来の機能から考えると現実的ではない。よって天端幅の拡幅、被覆質量の増大、またはこれらの組み合わせの具体的な設計手順を提案する必要がある。

## 引用文献

- 1) 水産庁：平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方 平成 26 年 1 月 23 日, <http://www.jfa.maff.go.jp/j/seibi/gyokogyojo/pdf/120406.html>, 2014.
- 2) 八木 宏・中山哲巖・大村智宏・杉松宏一・門 安曇・滑川 順・佐藤勝弘・奥野正洋・劔崎聖生：漁港施設の津波被災の特徴と耐津波設計への取り組み, 水産工学 Vol.52 No.2, pp.103-112, 2015.
- 3) 大村智宏・八木 宏・中山哲巖・内田 智・朝倉邦友・門 安曇・滑川 順・加藤広之：津波越流時における防波堤の波圧特性と被覆ブロックの安定性に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, I\_967-I\_972, 2016.
- 4) 水産庁・平成 23 年度水産関係施設等被害状況調査共同研究機関：平成 23 年度水産関係施設等被害状況調査事業報告書, 2012.
- 5) 三井順・松本朗・半沢稔・灘岡和夫：防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, I\_956-I\_960, 2013.

#### 4-3-1 ねらい

漁場施設には漁港施設や他の海洋構造物にはない特殊性（複雑で多様な形状の構造）と評価が技術的に困難な海中での設計条件（構造の複雑な海洋の流れ、波と流れの交差する複雑な条件、大水深域での海底地盤）があるため、その合理的設計には多くの実験と調査を要するが、同時に事業の経済性にも配慮した簡便性も求められる。漁場施設の波浪、流れに対する安全性の照査法については、上述の観点からこれまで検討を行い、着定基質（石材）の安定質量算定手法、沈設魚礁の流体力算定手法、波による設計流速算定手法、を提案したが、実際の設計への適用には以下のような解決すべき課題が残されており、採択には至っていない。

着定基質の安定質量算定手法については、粗度（摩擦係数）の異なる海底面に単体で設置した石材の移動限界を水理模型実験で調べ、海底粗度や石の密度の影響も考慮できる汎用的な安定質量算定式として次式を提案した。

$$M = \alpha \rho_s \left[ \frac{K_m}{2\mu g(\rho_s / \rho - 1)} \right]^3 U^6 \quad (4-3-1-1)$$

ここに、 $M$ ：石材の安定質量(t)、 $\mu$ ：静止摩擦係数、 $\rho_s$ 、 $\rho$ ：石材と海水の密度(t/m<sup>3</sup>)、 $K_m$ ：質量算定係数、 $U$ ：設計流速(m/s)で、波の場合では最大波動流速  $U_m$ 。  $K_m$ は流れの状態と石材の形状に依存する係数で、波の場合及び流れの場合における割石の場合はそれぞれ  $K_m = 3.5$  及び  $K_m = 2.3$  としてよい。

$\alpha$ ：石材の敷き詰め密度に依存する補正係数で、以下を用いることができる。

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{単体で設置} \\ 0.2 & \text{敷き詰め密度75\%以上の群で設置} \\ 0.04 & \text{囲い礁を設けて敷詰め密度75\%以上の群で設置} \end{cases}$$

$$U = \begin{cases} U_{\max} & \text{波の場合 (} U_{\max} \text{: 最大波動流速)} \\ U_c & \text{流れの場合 (} U_c \text{: 底面から石の高さまでの2乗平均流速)} \end{cases}$$

当式は従来式との整合性を図るため、係数 $\alpha$ を導入し、石材の群体設置と囲い礁付設置の場合にも適用できるようにされている。提案式については、昨年度実施した水理模型実験により、群体設置と囲い礁付群体設置の場合及び石の密度が変わった場合にも全体的に妥当な推定値が得られることが確認された。しかし、詳細には推定値に波の周期による系統的な誤差がみられるとともに、2～3 トン級の割石を用いた現地実験では石の安定所要質量は提案式からの推定値よりもさらに小さくできることが示唆され、提案式に改善の余地があることがわかった。

沈設魚礁の流体力算定手法については、ISO等の他の設計法及びこれまでの実験結果との整合性、設計の簡便さを考慮した、最大力係数  $C_{F\max}$  による方法等の実用的手法を提案したが、流速算定対象波の変更（有義波から最大波へ）と、流体力係数の決定法の見直し（定常流中での実験値と理論値を混用した従来法から波動流中での模型実験による方法へ）により、算定流体力がかなり増加することになった。しかしながら、深い水深に設置される沈設魚礁については、これまで滑動、転倒の被災報告がほとんどなかっただけでなく、その滑動量を詳しく調べた事例もなかった。このため、実態把握のための事例情報の収集が必要であるとともに、沈設魚礁の安全性の照査では、不確定要素（波の方向分散性、波と流れの交差の影響、模型実験の縮尺効果）による流体力の過大評価の可能性を考慮して

現地での広範な施設（沈設魚礁、増殖礁を含む）を対象にした流体力算定手法の検証と、従来の設計では考慮されていない魚礁の砂地盤での沈下、埋没及び群体設置による滑動抵抗への影響も考慮した安定性の評価手法の総合的な見直しが必要であると考えられる。

また、漁場の施設の設計流速については、波だけでなく、流れの成分の決定手法の確立も重要な課題となっている。特に、魚礁が設置される大水深域では表層流速から底層付近の流速の推定や底層での流れの長期観測が困難になるため、難易度が高い。その対策として、近年、全球的計算と観測データの同化により精度向上が進んでいる海洋モデルの利用が考えられる。しかし、そのモデル予測を設計へ応用するためには、シミュレーションモデルの妥当性の検証方法、妥当性の判断と予測誤差を考慮した設計流速の妥当な決定方法を提示することが望まれるが、現時点ではそれらの指針となるものがない。

これらのことから、本課題では以下の項目について取り組んだ。

#### ① 着定基質（石材）の安定質量算定手法の検討

昨年度の検討で示された提案式の問題を解決するため、これまでに得られている実験結果の再解析と回流水槽を用いた模型実験を行い、模型実験と現地実験の結果を統一的に説明できる提案式の改良を行う。

上述の回流水槽を用いた模型実験では、振動流と定常流との共存場を再現し、底面の摩擦係数を変えて単体設置した碎石の移動限界流速を調べる。

#### ② 沈設魚礁の安全性の照査法の検討

(1) 流体力算定法の妥当性の検討：今年度は、調査対象施設（コンクリート魚礁と増殖礁）が設置後に遭遇した最大の暴風時における最大流速を波浪の数値シミュレーション等により推算するとともに、調査対象施設の波動流中での流体力係数を水理模型実験によって測定する。

(2) 実態把握のための事例情報の収集：昨年度に引き続き、滑動の安全率が許容値 1.2 に近い沈設魚礁（増殖礁を含む）を探索する。その中から安定性の確認が可能な施設を抽出し、その滑動・転倒等の安定性に関して実態調査を行い、事例情報の収集を図る。

(3) 沈設魚礁の安定性の検討：昨年度実施した沈設魚礁の沈下・埋没に関する文献レビューと簡単な予備実験での検討により、砂地に設置された沈設魚礁が沈下、埋没がわずかであっても滑動抵抗が有意に増加する可能性が予想されたことから、滑動抵抗の再評価のため、以下の手順で砂地上でのコンクリート魚礁の滑動に関する模型実験を行う。1)コンクリート魚礁の模型を製作し、波動流中での流体力係数を調べる。2)砂地上での摩擦係数を測定する。3)不規則波下での砂地上での魚礁模型の移動状況と流速から予測される流体力と滑動・転倒との関係を調べる。

#### ③ 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討

海洋モデルを利用した数値シミュレーション手法がどの程度、実際の大水深域（想定水深 30～100m 前後）での流速ベクトルを再現できるかを検討するため、長期間の流速観測データが得られている海域の事例の更なる収集・分析を行い、海洋モデルを利用して設計流速を決める方法の可能性と課題を整理する。

#### 4-3-2 着定基質の安定質量算定手法の検討

##### 1) 方法

提案式(式 4-3-1-1)では、石の不安定性は以下の無次元量で表現できると仮定している。

$$\frac{\text{流体力}F}{\text{摩擦力}R} \propto \frac{\rho U^2 D^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD^3} = \frac{U^2}{\mu s g D} \quad (4-3-2-1)$$

ここに、 $s \equiv (\rho_s - \rho) / \rho$ 、 $D$  は石の代表長さで、 $D \equiv (M / \rho_s)^{1/3}$

昨年度示した提案式の問題点としては、現地試験の事例では安定質量算定値は現行式で 46t、提案式で 15t に対し実際は約 2t であり、提案式がまだかなり過大な安定質量を算出することを示唆している。また、周期による系統的差異が見られることから、 $\mu$  と  $\rho_s$  の一定の条件下でも被害率は必ずしも最大流速  $U_{\max}$  のみで評価できないこと、非対称な流速波形の影響の評価やより高い KC 数の場合（回流水槽実験の場合）への適用性が検討されていないこと、が課題として残されている。以上をふまえ、以下の検討を行った。

検討 1 被害率と最も密接な相関関係のある流れの特性値の再検討

検討 2 高 KC 数と非対称振動流速に関する実験データの補強（回流水槽実験の追加実施）

検討 3 被害率の説明変数の検討：仮定 “ $U^2/(\mu s g D) = \text{定数}$ ” の妥当性の確認し、定数と見なせない場合は代替の無次元量の検討

a) 流速の評価方法（検討 1）

被害率の変化を最もよく説明できる物理量を  $U_{max}$ 、 $U_a$  および  $a_{max}$ （図 4-3-2-1）との比較により検討した。ここに、

$$U_a \equiv (U_{max} + |U_{min}|) / 2 \quad (4-3-2-2)$$

$a_{max}$  は最大加速度である。 $U_{max}$  と  $U_a$  の値は、超音波流速計で計測された水平流速データのローパスフィルター（遮断周波数は造波水槽実験で 2Hz、回流水槽実験で 1Hz）をかけた値より求め、 $a_{max}$  はその平滑化データの時間微分（すなわち、加速度）の最大値として求めた。また  $a_{max}$  は、流速が 0 から  $U_{max}$  に達するまでの時間  $T_{zp}$  と  $U_{max}$  とから次式で近似できることから  $T_{zp}$  も求めた。

$$a_{max} = \eta \frac{U_{max}}{T_{zp}} \quad (4-3-2-3)$$

例えば、正弦波の場合は  $r_1 = \pi/2 = 1.57$  となるが、造波水槽実験（図 4-3-2-2）では、 $r_1 = 1.411$  であった。

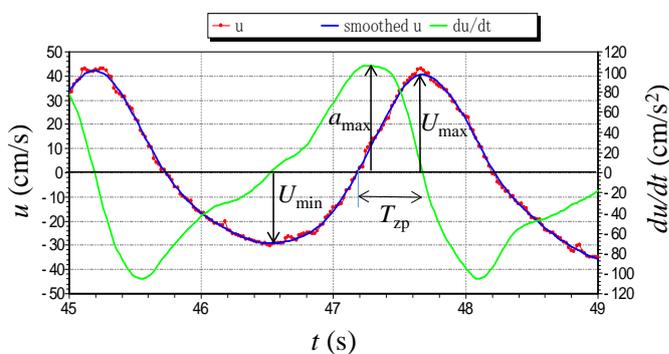


図 4-3-2-1 流速の測定例と記号の定義

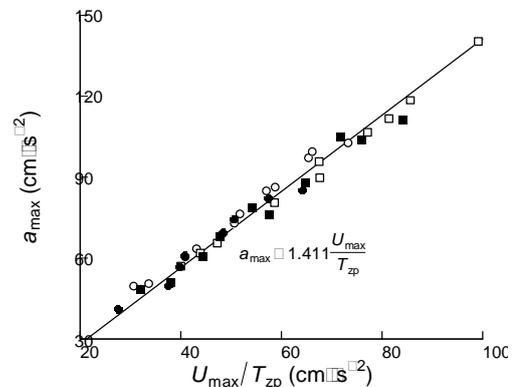


図 4-3-2-2 造波水槽実験による  $U_{max}/T_{zp}$  と  $a_{max}$  の関係

b) 回流水槽実験（検討 2）

実験には縦型循環式回流水槽（試験区  $0.4 \times 0.4 \times 3\text{m}$ ）を用いた（図 4-3-2-3）。従来の試験に用いた碎石 100 個を用いて、玉砂利底（硬質塩化ビニル板  $495 \times 395 \times 5\text{mm}$ 、6 枚に玉砂利 8~12mm を 1 層密着するようにシリコンシーラントで貼り付けたもの）上に碎石を単体で設置し、周期 10s で流速振幅が徐々に増加する振動流を与えて 100 個の碎石全て

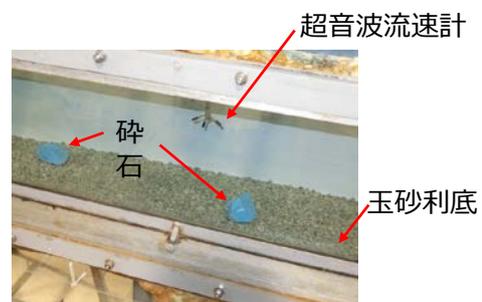
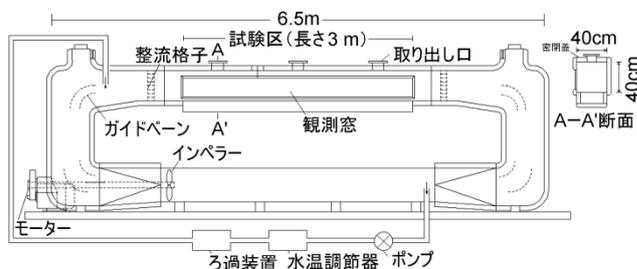


図 4-3-2-3 実験に用いた回流水槽と試験状況  
（インペラーを順・逆転させることで振動流も発生可能）

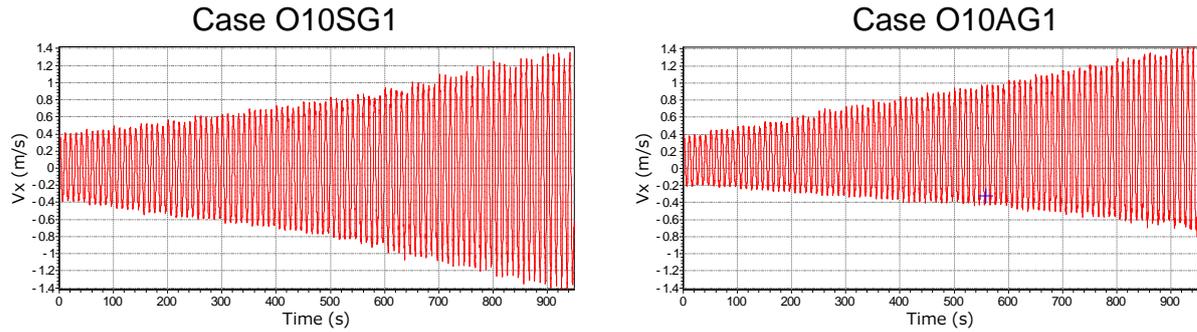


図 4-3-2-4 発生させた振動流の流速の時間変化

の移動限界を調べた。碎石は、試験区の両端から 50cm 以上、側面から 10cm 以上離れた中央部に、流軸方向に約 40cm 間隔で、水路幅方向に互い違いに 6 個ないし 4 個ずつ設置した。その際の碎石の設置については、これまでと同様に、最も大きい面を下に、また石の長軸が水路幅方向に平行になるように向けた。発生させた振動流は図 4-3-2-4 に示す 2 ケース (O10SG1 と O10AG1) で、前者は流速波形が対称形 ( $U_{\max} \approx |U_{\min}|$ ) で、後者は非対称形で  $U_{\max} \approx 2|U_{\min}|$  となるように設定した。

また、実験条件における静止摩擦係数  $\mu$  を求めるため、試験に用いた玉砂利底の一部分を取り出し、その上に 100 個の試験碎石を 1 個ずつデジタル傾斜計 (STS (株)、DL270LV) を用いて摩擦角 (サンプル底面上に碎石を置いて徐々に傾けていったときの石が滑り出す直前の角度)  $\theta$  を測定した (図 4-3-2-5)。その際、上述の実験と同様に碎石は長軸が傾斜に直角になるように置き、碎石 1 個につき位置を無作為に変えて測定を 3 回繰り返した。 $\mu$  は  $\tan\theta$  として算出し、その中央値を解析に用いた。

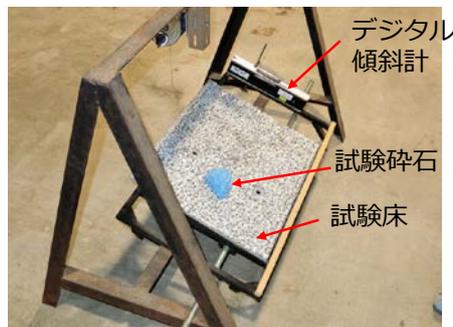


図 4-3-2-5 摩擦角の測定装置

### c) 被害率の説明変数の検討 (検討 3)

被害率の説明変数として、従来の提案式では次式で定義される無次元量  $\psi_1$  のみで説明できると仮定してきた。

$$\psi_1 \equiv \frac{\rho U_{\max}^2 D_{50}^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD_{50}^3} = \frac{U_{\max}^2}{\mu s g D_{50}} \quad (4-3-2-4)$$

$$\text{ここに、} D_{50} \equiv (M_{50} / \rho_s)^{1/3} \quad s \equiv (\rho_s - \rho) / \rho$$

しかしここでは、その説明変数として次式で定義される  $\psi_2$  と  $\psi_3$  を加えた 3 つの無次元量で説明力の比較を行った。

$$\psi_2 \equiv \frac{\rho U_a^2 D_{50}^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD_{50}^3} = \frac{U_a^2}{\mu s g D_{50}} \quad (4-3-2-5)$$

$$\psi_3 \equiv \frac{\rho a_{\max} D_{50}^3}{\mu(\rho_s - \rho)gD_{50}^3} = \frac{a_{\max}}{\mu s g} \quad (4-3-2-6)$$

またこの解析に用いる  $\mu$  は、基本的には上述のように実際の試験床サンプルを用いた摩擦角測定によったが、モルタル底上での造波水槽実験（Case WM1、平成 25 年度実施）の場合のみ、実際のモルタル試験床と表面性状が類似したモルタル板を製作して摩擦角測定を行ったため、実際の値と異なる可能性があった。そこで、データの正確化のため、実験に用いた造波水槽のモルタル試験床からサンプル片（約 30×30cm）を切りだし、これまでと同様の方法で  $\mu$  を測定し、解析に用いた。

## 2) 結果

### a) 流速の評価方法（検討 1）

底面の粗度または石の密度が異なる 4 条件（実験ケース WP1、WG1、WM1、WG2）で実施した造波水槽実験での被害率（石が 1 個分以上移動した割合）を説明変数  $U_{\max}$ 、 $U_a$  および  $a_{\max}$  に対してプロットした図を図 4-3-2-6～図 4-3-2-9 に示す。各図には折れ線に当てはめた回帰式と被害率 10%点における被災限界の値を示した。被害率は説明変数を  $U_{\max}$  とした場合は周期により系統的な差異が見られ、また  $a_{\max}$  では  $U_{\max}$  よりもむしろばらつきが大きくなった。これに対して、 $U_a$  ではどの実験ケースでも  $U_{\max}$  よりもばらつきが小さくなった。このことは、流速波形の非対称性が大きい場合（図 4-3-2-10 の右図の例）、石の移動には岸向きのピーク流速だけではなく、その直前の極小流速も重要になることを示唆する。

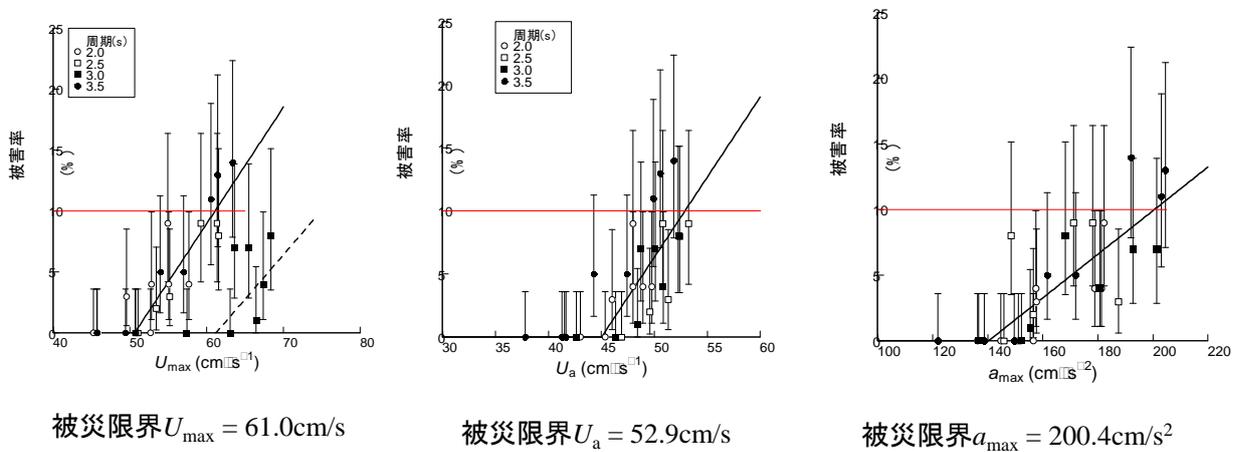
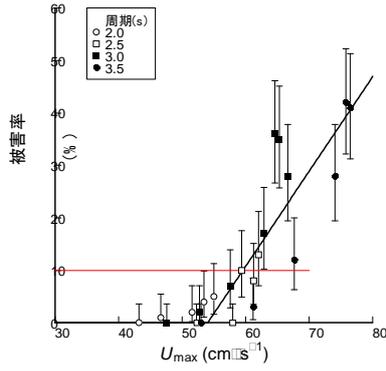
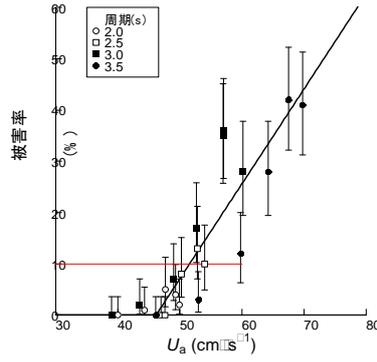


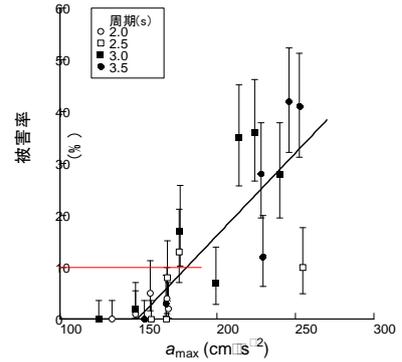
図 4-3-2-6 波浪中の玉石底上の碎石（Case WP1）



被災限界  $U_{max} = 59.5 \text{ cm/s}$

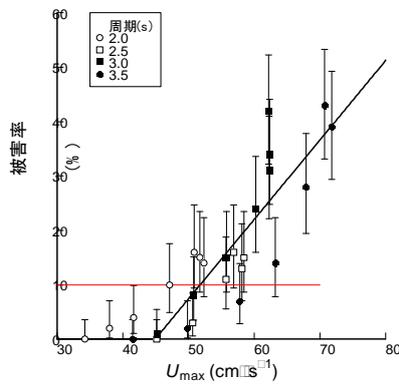


被災限界  $U_a = 51.5 \text{ cm/s}$

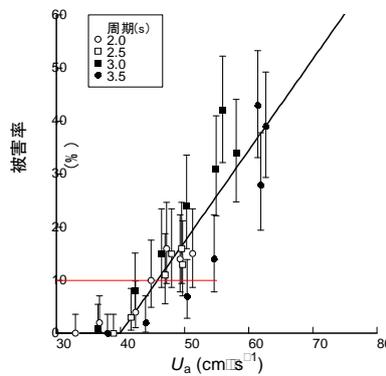


被災限界  $a_{max} = 180.5 \text{ cm/s}^2$

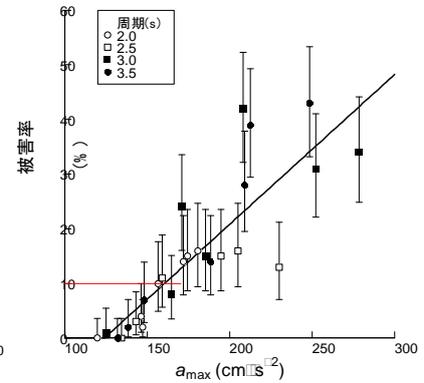
図 4-3-2-7 波浪中での玉砂利底上の碎石 (Case WG1)



被災限界  $U_{max} = 51.7 \text{ cm/s}$

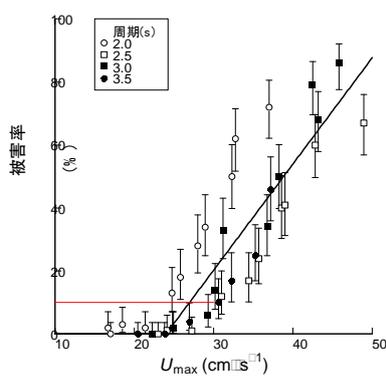


被災限界  $U_a = 45.7 \text{ cm/s}$

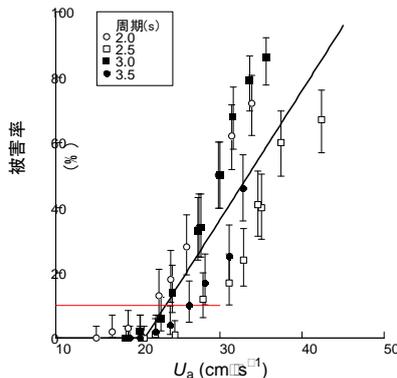


被災限界  $a_{max} = 160.3 \text{ cm/s}^2$

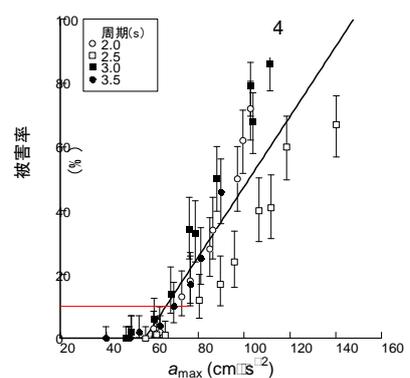
図 4-3-2-8 波浪中でのモルタル底上の碎石 (Case WM1)



被災限界  $U_{max} = 26.9 \text{ cm/s}$



被災限界  $U_a = 23.3 \text{ cm/s}$



被災限界  $a_{max} = 65.9 \text{ cm/s}^2$

図 4-3-2-9 波浪中での玉砂利底上の碎石複製模型 (Case WG2)

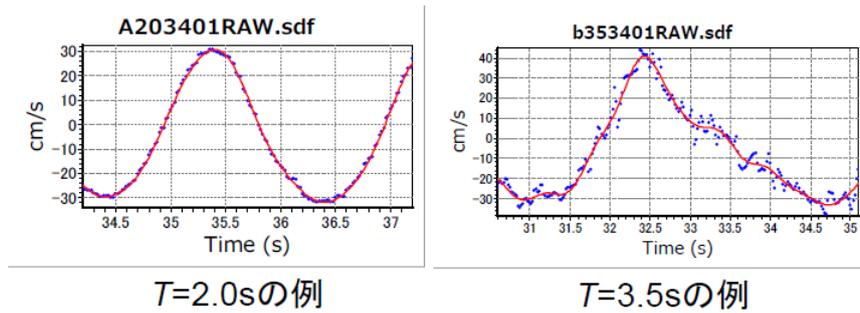


図 4-3-2-10 造波水槽実験における流速波形の例

b) 回流水槽実験（検討 2）

玉砂利底上の碎石の被害率を対称振動流 (Case O10SG1) と非対称振動流 (Case O10AG1) 中で調べた実験結果を図 4-3-2-11 に示す。

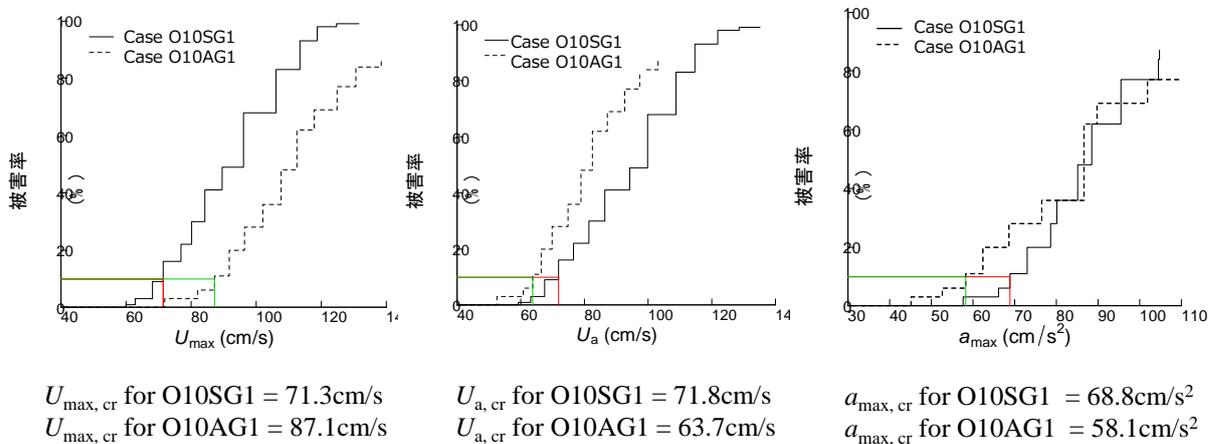


図 4-3-2-11 振動流中の玉砂利底上の碎石の実験結果：被害率と移動限界

回流水槽実験で用いた玉砂利底上の碎石の静止摩擦係数の測定結果を図 4-3-2-12 に示す。以降の解析で用いる  $\mu$  の中央値は 0.721 であった。

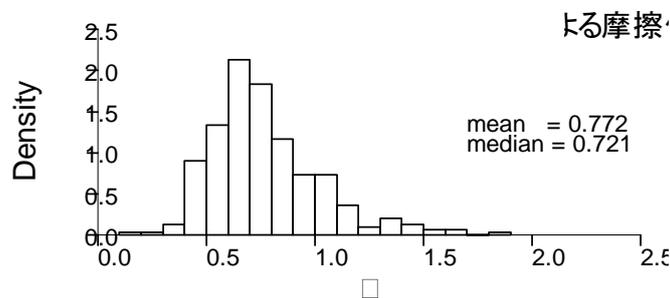


図 4-3-2-12 回流水槽実験での玉砂利底上の碎石の静止摩擦係数の密度分布

c) 被害率の説明変数の検討（検討 3）

実験に用いた造波水槽から切り出したモルタル底試験床サンプルを用いて測定された静止摩擦係数を図 4-3-2-13 に示す。静止摩擦係数の中央値はこれまでの複製モルタル板を

用いて測定された仮の値 (0.66) より小さく、0.62 になった。また、これによって得られた全実験ケースにおける静止摩擦係数の累積相対頻度をまとめて図 4-3-2-14 に示す。

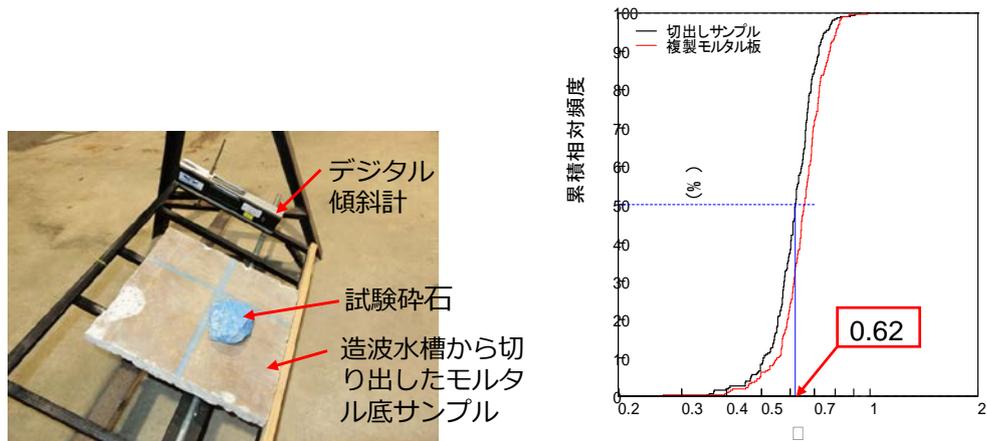


図 4-3-2-13 造波水槽のモルタル底上の碎石の摩擦角測定と測定結果

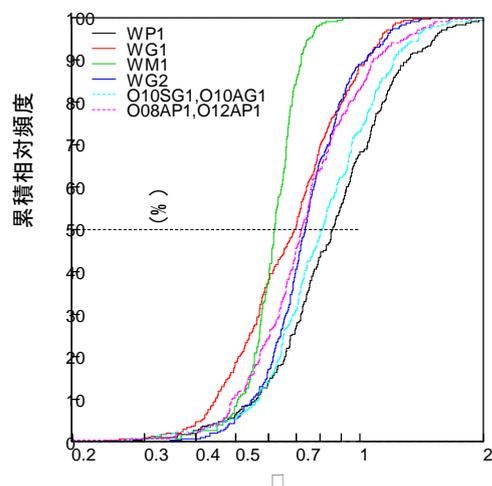


図 4-3-2-14 全実験ケースにおける静止摩擦係数の累積相対頻度

無次元量  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$  と被害率との関係を図 4-3-2-15 に示す。プロットのばらつきは  $\psi_3$ 、 $\psi_1$ 、 $\psi_2$  の順で小さくなり、 $\psi_2$  が被害率を最もよく説明する無次元量になることは明らかであるが、被災限界を推定する指標としてはまだばらつきが大きい。

無次元量の比較評価を表 4-3-2-1 に示す。 $\psi_3$  は石の大きさの効果を評価できないだけでなく、石の密度による効果も適切に評価できないことが分かる。また、 $\psi_1$  と  $\psi_2$  は周期が長い (KC 数が大きい) 振動流の影響を過大評価し、 $\psi_3$  は周期が長い (KC 数が大きい) 振動流の影響を過小評価した。

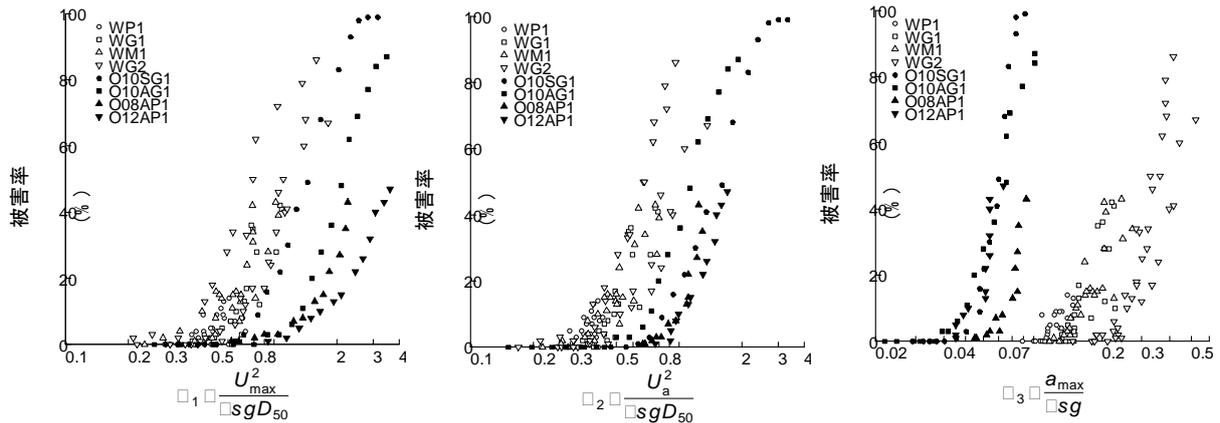


図 4-3-2-15 無次元量  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$  と被害率の関係

表 4-3-2-1 無次元量の比較評価

Case	流動条件	底質	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$	被災限界			被災限界無次元量			基準値
					$U_{max,cr}$ (cm/s)	$U_{a,cr}$ (cm/s)	$a_{max,cr}$ (cm/s <sup>2</sup> )	$\psi_{1,cr}$	$\psi_{2,cr}$	$\psi_{3,cr}$	
WP1	波	玉石底	2.62	0.86	61.0	52.9	200.4	0.565	0.425	0.147	}
WG1	波	玉砂利底	2.62	0.70	59.5	51.5	180.5	0.661	0.494	0.162	
WM1	波	モルタル底	2.62	0.62	51.7	45.7	160.3	0.563	0.440	0.163	
WG2	波	玉砂利底	1.34	0.74	26.9	23.3	65.9	0.559	0.420	0.245	
O10SG1	振動流	玉砂利底	2.62	0.72	71.3	71.8	68.8	0.921	0.934	0.060	
O10AG1	振動流	玉砂利底	2.62	0.72	87.1	63.7	58.1	1.375	0.735	0.051	
O08AP1	振動流	玉石底	2.62	0.81	98.6	82.2	103.6	1.566	1.089	0.081	
O12AP1	振動流	玉石底	2.62	0.81	101.5	78.5	66.1	1.660	0.993	0.051	

O08AP1:周期8sの非対称振動流中での玉石底上の碎石 (H25年度実施)

O12AP1:周期12sの非対称振動流中での玉石底上の碎石 (H25年度実施)

被災限界無次元量のセルの色は基準値 (最上段3ケースの値) に対する相対的評価 (赤色: 過大、緑色: 妥当、水色: 過小) を表す。

以上の結果は、最大流体力が  $\rho U_a^2 D_{50}^2$  だけでは表せないことに関係していると考えられる。最大流体力を  $C \times \rho U_a^2 D_{50}^2$  で表すと、係数  $C$  が  $KC$  数の関数になることから、 $\phi = \psi_2 \times$  補正值 ( $KC$  数の関数) で被害率のよりよい説明変数が求められると考えられる。このような考え方にに基づき、いくつかの式型を考え、非線形最小2乗法による回帰分析を行った結果、当てはまりが格段によい式として次式を得た。

$$r_d = e^{-\exp[-b(\phi-c)]} \quad (4-3-2-7)$$

$$\phi = (a - \ln K_C) \psi_2 \quad (4-3-2-8)$$

$$K_C = U_{max} T_{zp} / D_{50} \quad (4-3-2-9)$$

ここに、 $r_d$ : 被害率、 $a, b, c$ : 実験係数で、その最尤推定値は  $a = 7.28, b = 0.608, c = 4.17$  であった。図 4-3-2-16 に  $\phi$  と  $r_d$  との関係を示す。 $\psi_2$  では造波水槽実験のデータと回流水槽実験のデータは分かれていたが、 $\psi_2$  を  $KC$  数の関数で補正した  $\phi$  値により両者のデータはほぼ重なりあい、データ全体が回帰式によってよく近似されている。以上より、 $\phi$  値が被害率のよい指標になると考えられる。

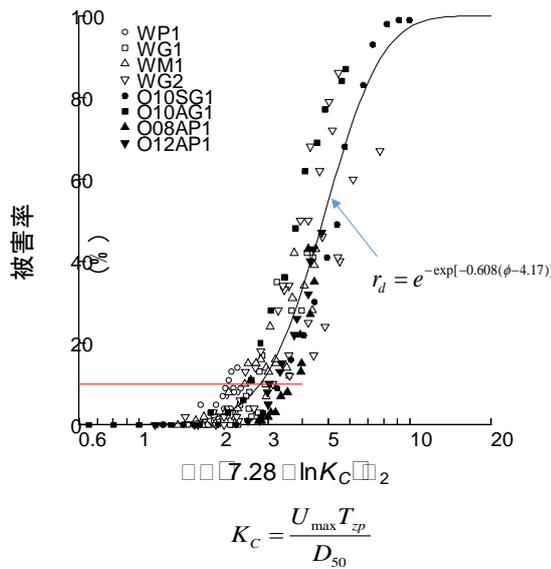


図 4-3-2-16 無次元量 $\phi$ と被害率との関係

被災限界 ( $r_d=0.1$ ) のときの  $\phi$  は式(4-3-2-7)の回帰式より  $\phi_{cr}=2.80$  となる。したがって、次式から繰り返し計算により求めた  $D_{50}$  に基づき安定質量を  $M_{50}=\rho_s D_{50}^3$  として算出することができる。

$$\left( a - \ln \frac{U_{\max} T_{zp}}{D_{50}} \right) \frac{U_a^2}{\mu s g D_{50}} = \phi_{cr} \quad (4-3-2-10)$$

ここに、 $a = 7.28$ 、 $\phi_{cr} = 2.80$ 。

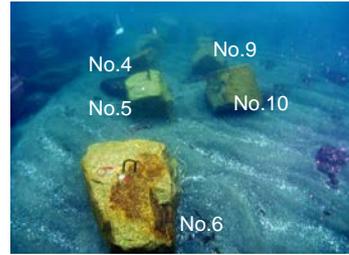
#### d) 新提案式による推定と現地試験結果との比較

新算定式(4-3-2-10)について、現地試験結果への適用性の検討を行った。図 4-3-2-16 に現地試験の概要を示す。平成 27 年度に実施した試験地では、2~3t クラス (1.16~3.01t ;  $M_{50} = 2.04t$ ) の割石 10 個を設置したが、調査開始前、台風 11 号が襲来した 2015 年 7 月 16 日に割石は被災限界相当量移動して安定化したとみられる。その後同年 8 月 22~23 日にわずかに(9cm 以下)移動が確認されたため、その際に被災限界相当の流速が再発生したと推察された。

そのときの最大流速発生時における水圧データから推定された底面流速の時系列を図 4-3-2-17 に示す。この波形より  $U_{\max}=3.5\text{m/s}$ 、 $U_{\min}=-1.5\text{m/s}$ 、 $T_{zp}=2.0\text{s}$  が得られた。また  $\rho_s = 2.59 \text{ t/m}^3$ 、 $\rho = 1.025 \text{ t/m}^3$ 、 $\mu=0.8$  として従来算定式と新算定式により安定質量を算定した。試験割石の質量  $M_{50} = 2.0 \text{ t}$  に対して、従来の提案式による安定質量は明らかに過大な  $M_{50} = 15.0 \text{ t}$  になったが、新算定式によると  $D_{50}=0.985 \text{ m}$ 、 $M_{50}=1.0 \text{ t}$  となる。この値は、試験割石の質量のばらつきが大きいことと、試験割石の移動が、初期の姿勢から横倒しになっただけの被災とはみなし難い程度のものであったことを考慮すると、概ね妥当なものと推察される。



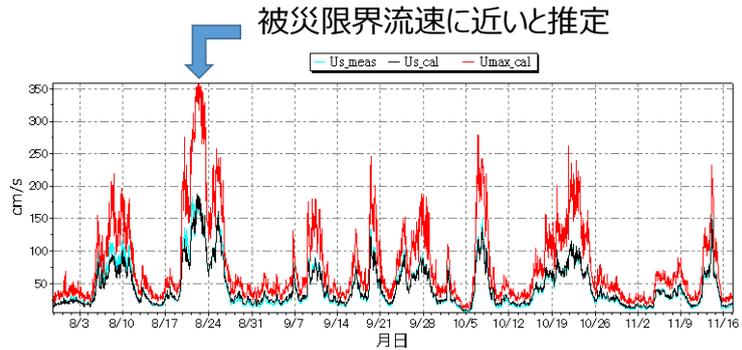
(a) 試験地（志和岐）の位置



(b) 割石設置時の状況  
(吊り下げ金具は上側)



(c) 調査開始前に横転していた割石



(d)  $U_{max,cal}$ : 水圧からの最大波動流速の推定値

図 4-3-2-17 現地試験結果の概要

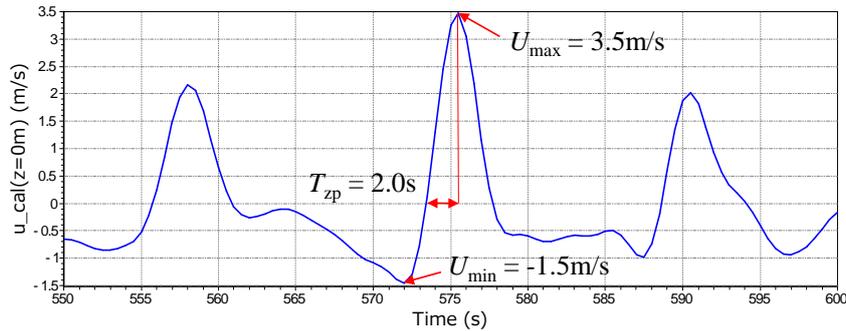


図 4-3-2-18 最大流速発生時における流速波形（水圧からの推定値）  
(2015年8月22～23日)

e) 新提案式のまとめ

これまでの検討結果をとりまとめ、石材の安定質量の算定の新提案式を整理して以下に示す。

$$\text{石材の安定質量} : M_{50} = \alpha \rho_s D_{50}^3$$

ここに、 $\alpha$  : 設置方法の効果を表す係数（以下の値）、 $\rho_s$  : 石材の密度、

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{単体で設置} \\ 0.2 & \text{敷き詰め密度75\%以上の群で設置} \\ 0.04 & \text{囲い礁を設けて敷詰め密度75\%以上の群で設置} \end{cases}$$

$D_{50}$  : 石材の立方体相当径で波の場と流れの場で異なり、以下により求められる。

$$\text{波の場} : \left( a - \ln \frac{U_{\max} T_{zp}}{D_{50}} \right) \frac{U_a^2}{\mu(\rho_s / \rho - 1)gD_{50}} = \phi_{cr}$$

$$U_a = (U_{\max} + |U_{\min}|) / 2 \quad \text{または} \quad U_a = (U_{\max} - U_{\min}) / 2$$

$$\text{流れの場} : D_{50} = \frac{K_m U_c^2}{\mu(\rho_s / \rho - 1)g}$$

ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $a = 7.28$ 、 $\mu$ ：静止摩擦係数、 $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 、 $T_{zp}$ ：底面軌道流速の最大値、最小値及び流速ゼロから最大流速までの時間、 $\phi_{cr}$ ：10%被害率における被災限界係数(=2.8)、 $g$ ：重力加速度、 $K_m = 2.3$ 、 $U_c$ ：流速分布を考慮した底面から石材の天端までの二乗平均流速で、べき乗則を仮定して次式で算定してもよい。

$$u(z) = U_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^n \quad U_c = \sqrt{\frac{1}{b} \int_0^b u^2(z) dz} = \frac{1}{\sqrt{2n+1}} \left( \frac{b}{z_0} \right)^n U_0$$

ここに、 $z$ ：底面からの高さ、 $b$ ：石材の比高、 $U_0$ ： $z = z_0$ における流速、 $n = 1/7$

### 3) 今後の課題

着定基質の安定質量算定手法について、今後の課題を以下にまとめる。

- ① 非対称的な波動流速の特性値 ( $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 、 $T_{zp}$ ) の算出手法の確立  
既往文献と水槽実験に基づき、実用的な手法の確立が必要である。
- ② 算定式の現地検証
  - ・現地では試験割石の大きな移動はまだ確認できていない。確実に検証データが得られるよう、より小さい割石を用いた現地実験が必要である。
  - ・新提案式から、石の安定性に波周期が影響することが予想される。これまでの現地実験地（徳島県沿岸）では周期が非常に長いうねりが卓越していたが、周期の短い風波が被災の主因となる海域（北海道日本海沿岸など）でも割石を用いた事業は盛んに実施されており、現地実験が必要である。
- ③ 波の場と流れの場の算定式の適用限界の決定

## 4-3-3 沈設魚礁の安全性の照査法の検討

### (1) 流体力算定の妥当性の検討

#### 1) 方法

流体力算定法の現地検証については、図 4-3-3-1 の手順により行った。今年度は調査対象施設（コンクリート魚礁と増殖礁）が設置後に遭遇した最大の暴風時における最大流速を波浪の数値シミュレーションにより推算するとともに、調査対象施設の波動流中での流体力係数を水理模型実験によって測定し、算定法の妥当性の検討を行った。

また昨年度に引き続き、滑動の安全率が許容値 1.2 に近い沈設魚礁（増殖礁を含む）を探索した。その中から安定性の確認が可能な施設を抽出し、その滑動・転倒等の安定性に関して実態調査を行い、事例情報の収集を図った。

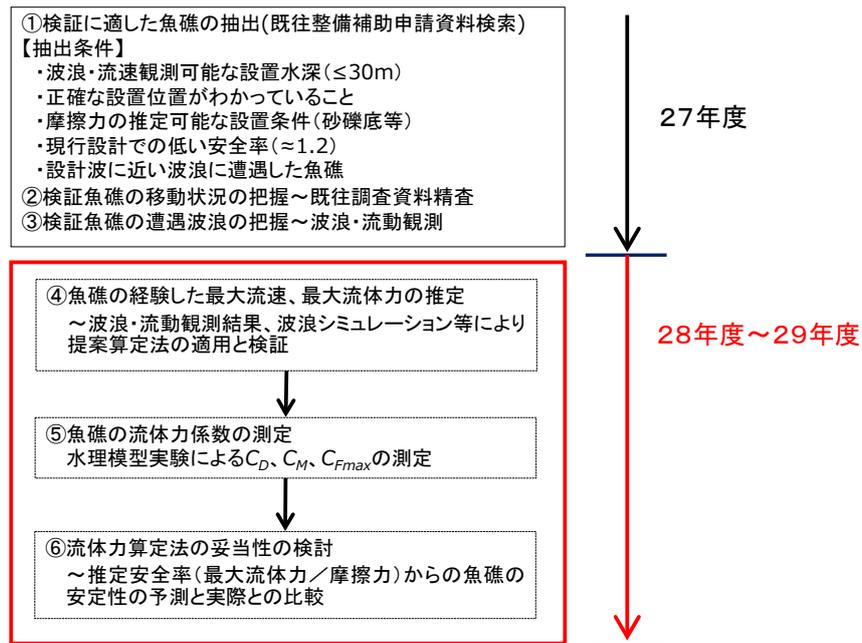


図 4-3-3-1 流体力算定法の現地検証の流れ

#### a) 被災時の高波浪推定

X 県が実施した調査により 2014 年に施設の滑動、転倒、埋没、破損が確認された。その原因とされている 2014 年 7 月台風 8 号 (T1408) の来襲時の波浪を推定した。また、2015 年 9 月～12 月、A 工区と B 工区において実施した流速計付波高計と ADCP による波浪・流速データと最寄りの波浪観測点 (NOWPHAS、伊王島) での観測データを用いて波浪推算モデルの検証を行った (図 4-3-3-2)。

NOWPHAS (伊王島) の波浪観測データは、対象地点での波浪との相関が必ずしも高くなかったため、以下の手順で波浪推算を行った。

##### ①海上風の推定

気象庁 MSM (メソ数値予報モデル、格子間隔：約 5km) の解析値及び予報値を使用した。

##### ②波浪推算 (図 4-3-3-3)

推算モデルとして、第 3 世代スペクトル法である WAM に準拠した 3G 深海域モデル (格子間隔：5km) を使用した。

##### ③波浪変形計算

エネルギー平衡方程式法 (格子間隔 20m) により対象位置の波浪を推定した。



図 4-3-3-2 調査対象工区と波浪観測位置

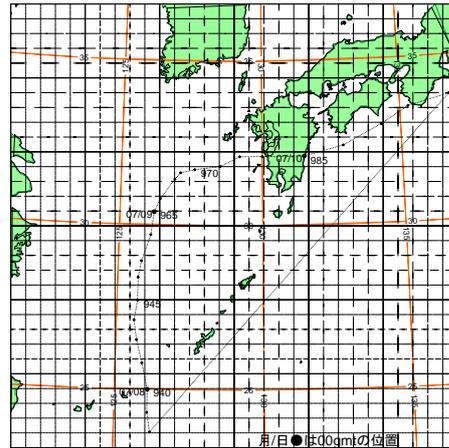


図 4-3-3-3 波浪推算の計算領域と T1408 の経路

### b) 対象施設の流体力係数の測定

昨年度実施した現地検証試験の対象施設（A 工区：増殖礁、B 工区：魚礁、図 4-3-3-4 参照）の波動流中での流体力係数を KC 数の関数として定式化するとともに、不規則波中での最大流体力の妥当な算定方法を検討した。

実験水槽は造波水槽（長さ 70.0m×幅 0.7m×深さ 2.2m×水深 1.2m）を使用し、模型縮尺は 1/25 とし、3D プリンタにより製作した（表 4-3-3-2、図 4-3-3-9）。

実験方法の概要を図 4-3-3-10 に示す。2 分力計 2 台によって支持された模型をモルタル床上に貼り付けたスポンジに接するように固定した。スポンジは、微小な力しか作用させずに、模型が底面に設置された状態を再現するためで用いた。この状態で固定された模型にばね式テンションゲージまたは重りの载荷により水平または鉛直方向に作用させた既知の力が、分力計 2 台の合力として妥当な精度（相対誤差 7% 以下）で計測できることを確認した。この流体力測定と同時に、容量式波高計による水面変動測定と、超音波式流速計による水平・鉛直流速測定を 50 Hz で行った。

測定は、まず表 4-3-3-3 に示す周期と波高の 17 組み合わせ条件の規則波を与えて行い、KC 数と流体力係数との関係式を決定した。次にそれと同数の組み合わせ条件で不規則波（Bretschneider-光易スペクトル；250 波以上）下での測定を行った。

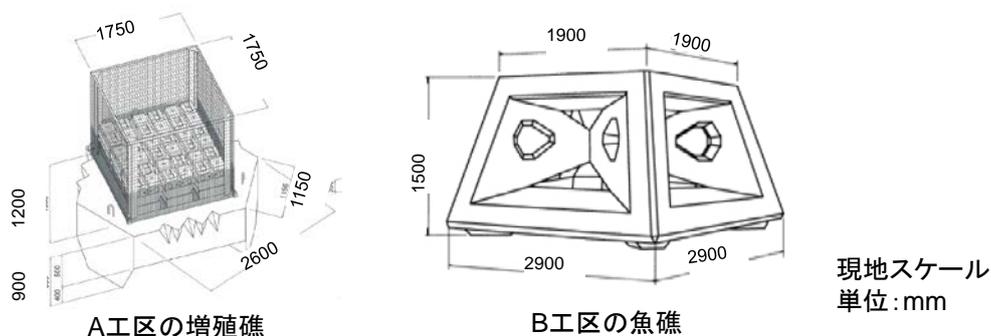


図 4-3-3-4 現地検証試験の対象施設

表 4-3-3-1 実験模型の諸元

項目	模型A	模型B	
		迎角0°	迎角45°
部材幅 $D$ (cm) <sup>注1)</sup>	2.0	1.2	1.2
射影面積 $A$ (cm <sup>2</sup> ) <sup>注2)</sup>	60.80 <sup>注3)</sup>	93.90	94.34
実容積 $V$ (cm <sup>3</sup> )	229.76	257.09	257.09
定常流中の抗力係数 $C_{DS}$	1.10 <sup>注4)</sup>	0.67	0.83

注1)  $D$ はKC数の計算に用いる部材幅。<sup>注2)</sup>射影面積は重なった部分も加算。  
 注3) 網を除いた値。<sup>注4)</sup>「漁港漁場の施設の設計参考図書2015年版」表15.2.1より算出。

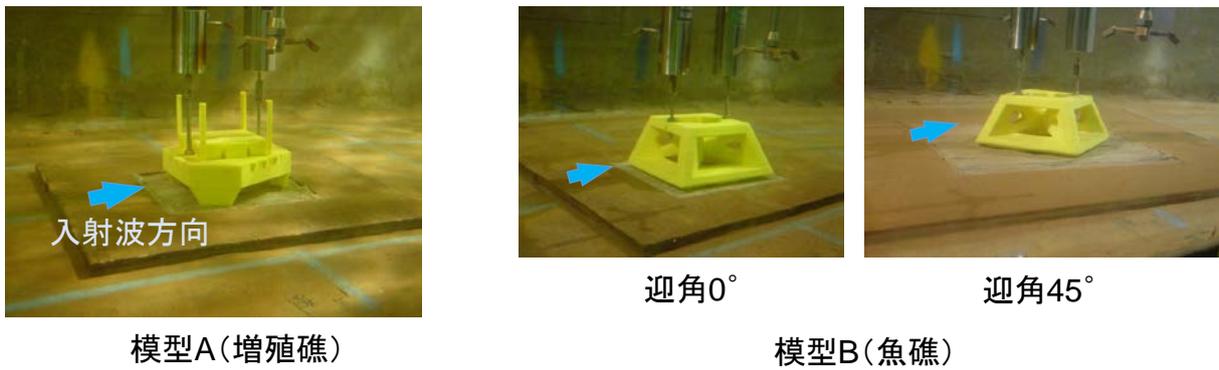


図 4-3-3-5 流体力測定時の実験模型

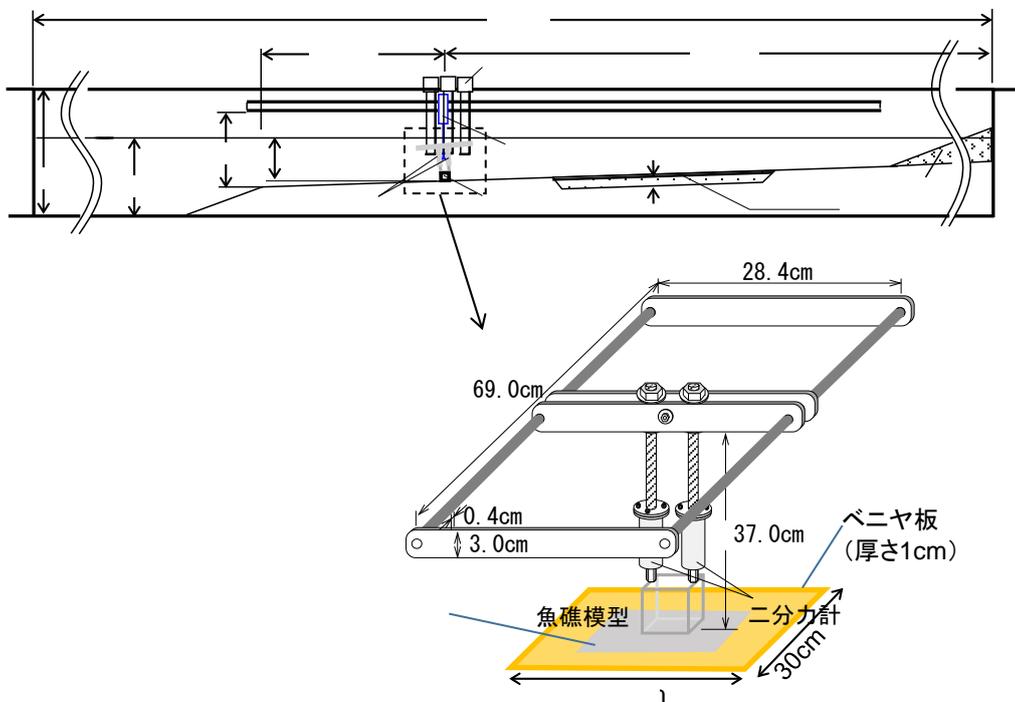


図 4-3-3-6 実験装置の模式図

表 4-3-3-2 作用波の周期と波高の組み合わせ条件

周期(s)	波高(cm)				
	5	10	20	30	40
1.5	6	9			
2.0	15	31	62	92	123
3.0	27	53	106	160	213
4.0	37	74	148	222	297

※数値（規則波実験における $D=1.0\text{cm}$ として計算した $KC$ 数）が記入された条件で実験を実施。不規則波実験の周期と波高は有義波の値。

流体力係数は以下の方法により求めた。

モリソン式における  $C_D$  と  $C_M$  は、規則波実験によって得られた水平流体力  $F_x$  と水平流速  $u$  の時系列データより、最小二乗法、すなわち  $F_x$  の計算値：

$$F_x = au^2 + b \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4-3-3-1)$$

と測定値との残差の2乗和が最小になるよう決定した係数  $a$  と  $b$  より次式で算出される。

$$C_D = \frac{2a}{\rho A}, \quad C_M = \frac{b}{\rho V} \quad (4-3-3-2)$$

ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $A$ ：模型の基準面積、 $V$ ：模型の基準体積（ここでは実容積）

一方、 $C_{F_{\max}}$  は規則波実験によって得られた水平最大流体力  $F_{\max}$  と水平最大流速  $U_{\max}$ （図 4-3-3-7）より次式で求められる。

$$C_{F_{\max}} = \frac{F_{\max}}{(1/2)\rho AU_{\max}^2} \quad (4-3-3-3)$$

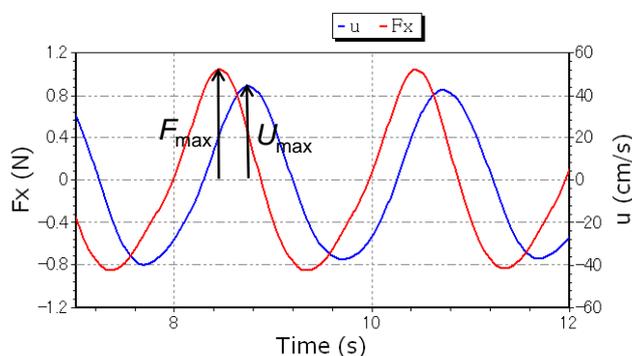


図 4-3-3-7 規則波中での水平流速  $u$  と水平流体力  $F_x$  の測定例

不規則波中での最大流体力を算定する際の課題としては、流体力係数は規則波実験による  $KC$  数との関係式から求められるが、不規則波の場合の  $KC$  数の妥当な定義が明らかでないことが挙げられる。そこで、 $KC$  数を表 4-3-3-3 に示す 4 つの方法で定義し、 $KC$  数と流体力係数の実験式から不規則波実験における流体力を求め、それらの妥当性を比較検討した。

また最大力係数  $C_{F_{\max}}$  により不規則波の波群中の最大流体力  $F_{\max}$  を

$$F_{\max} = \frac{1}{2} C_{F_{\max}} A U_{\max}^2 \quad (4-3-3-4)$$

で推定することが考えられる。ここに、 $U_{\max}$  は不規則波中での最大波動流速である。 $C_{F_{\max}}$  は規則波実験により  $KC$  数の関数として定式化されるが、その  $KC$  数としてどのような値

を与えればよいかは明らかでない。そこで、式 (4-3-3-4) の計算に用いる KC 数を以下の 2 式で定義し、比較検討した。

$$K_{C1} = \frac{U_{\max} T_{1/3}}{D} \quad (4-3-3-5)$$

$$K_{C2} = \frac{U_a T_{1/3}}{D} \quad (4-3-3-6)$$

ここに、 $D$  : 魚礁の代表幅、 $T_{1/3}$  : 波動流速の有義波周期、 $U_a = (U_{\max} - U_{\min})/2$ 、 $U_{\min}$  :  $U_{\max}$  の発生直前の極小流速。

表 4-3-3-3 KC 数の算出方法

方法	KC 数の算出方法
cal1	個々波（ゼロダウクロス法による）内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = U_a T/D$ より計算。ここに、 $U_a = (U_c - U_l)/2$ （記号の定義については図 4-3-3-8 を参照）。
cal2	個々波内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = K_{Cex}$ より計算。ここに、 $K_{Cex}$ は流速波形の非線形性を考慮した KC 数（拡張 KC 数）で $K_{Cex} \equiv \pi s/D$ （ここに、 $s = ( s_1  + s_2)/2$ ; 記号の意味は図 4-3-3-8 を参照）で定義。
cal3	波群内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = u_{rms} T_z/D$ より計算 <sup>*1</sup> 。ここに、 $u_{rms}$ は流速の rms 値、 $T_z$ は流速スペクトルから求められる平均周期。
cal4	波群内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = U_{rms} T_z/D$ より計算。ここに、 $U_{rms}$ は流速振幅の rms 値 ( $=\sqrt{2}u_{rms}$ )。

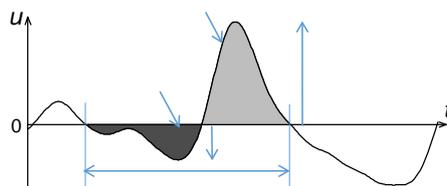


図 4-3-3-8 不規則波の波群中の個々波の流速波形と記号の定義

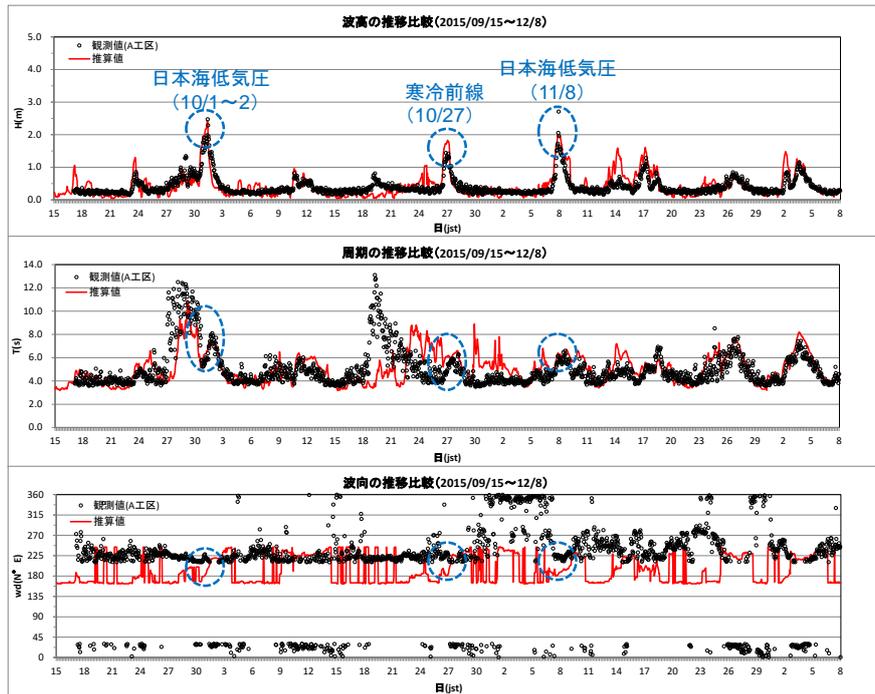
## 2) 結果

### a) 被災時の高波浪の推算

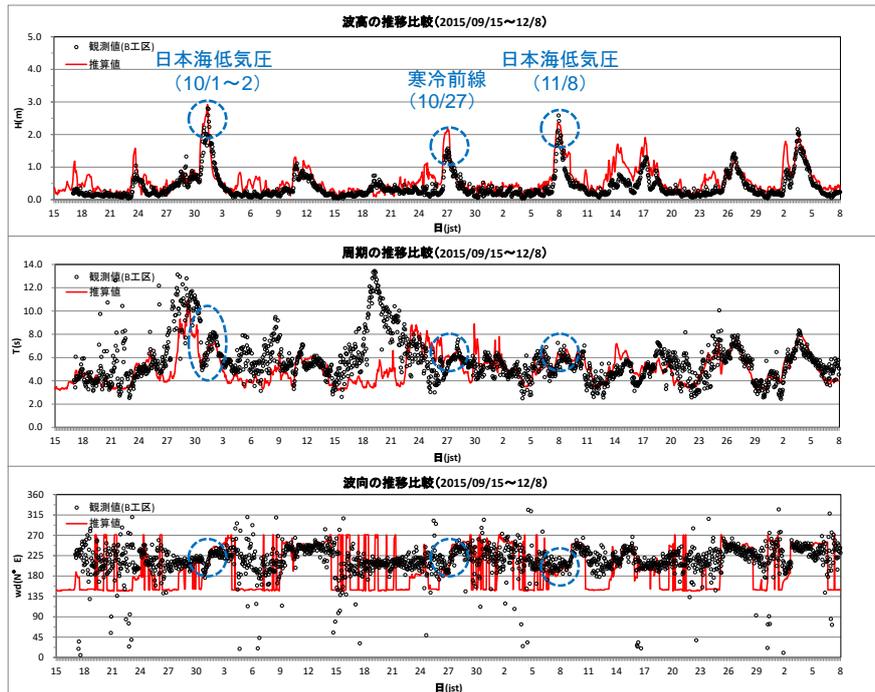
2015 年、A 工区と B 工区で観測した波浪と推算波浪との比較を図 4-3-3-9 に、また 2014 年 7 月台風 8 号 (T1408) の来襲時に NOWPHAS 伊王島での観測波浪と推算波浪との比較を図 4-3-3-10 に示す。高波浪時の推算値は観測値に概ね一致し、シミュレーション結果の妥当性を支持した。

A 工区、B 工区での沖波推算結果を図 4-3-3-11 に示す。沖波波高の最大値は 8.04m となった。この沖波波高最大時における浅海域での波浪変形計算結果を図 4-3-3-12 に示す。表 4-3-3-4 に示すように、その結果、推算された A 工区と B 工区における T1408 による最大

波浪は有義波高でそれぞれ 6.32m と 6.81m となった。

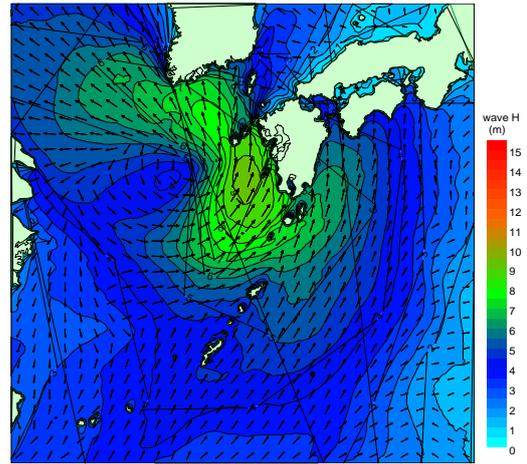
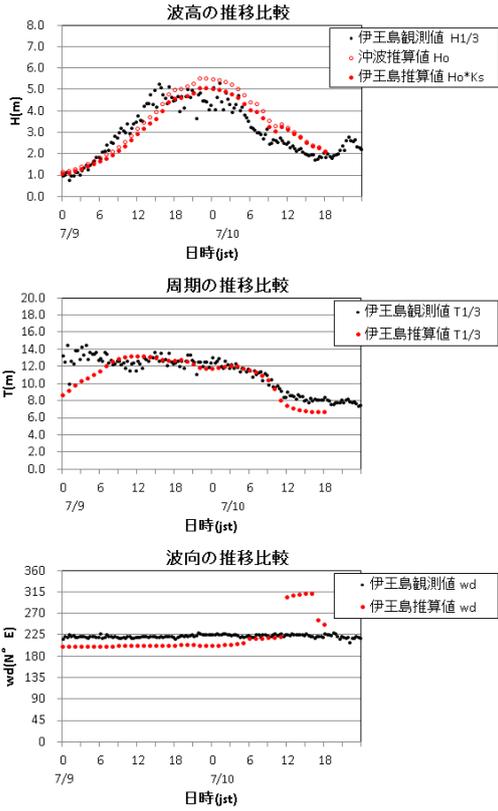


(a) A 工区



(b) B 工区

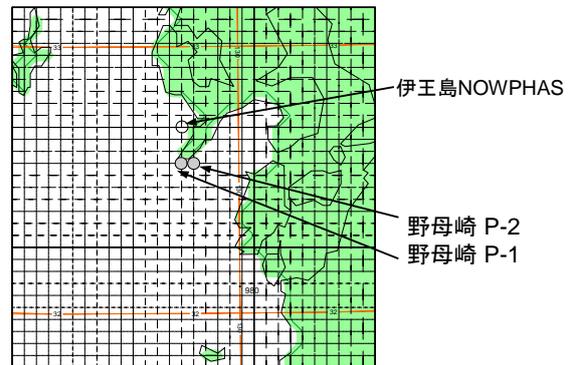
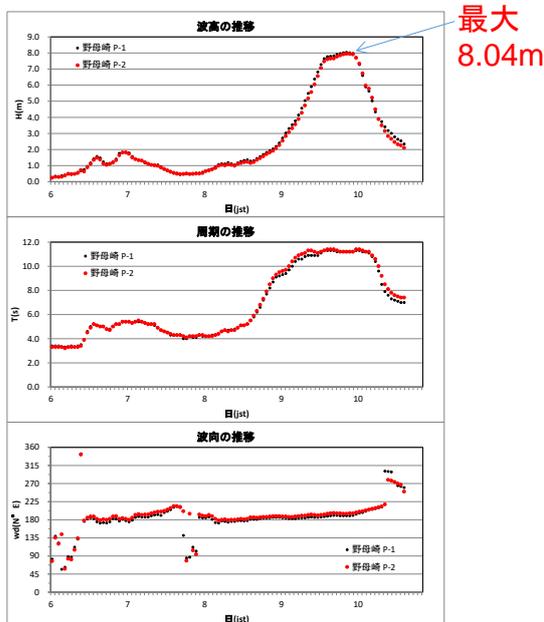
図 4-3-3-9 波浪推算モデルの検証結果 (2015/9/15~12/8)



(a)伊王島における観測波浪と  
推算波浪の推移の比較

(b)推算波高最大時の波高分布  
(伊王島、2014/07/09/23 時)

図 4-3-3-10 T1408 襲来時における伊王島での波浪の推算値と観測値



(a) A 工区と B 工区での推算波浪の推移

(b) 推算地点位置図

図 4-3-3-11 T1408 襲来時における A 工区と B 工区での波浪推算結果

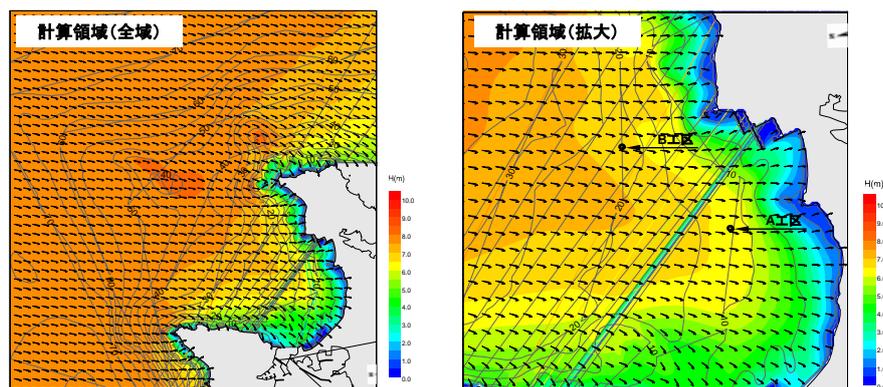


図 4-3-3-12 T1408 による最大波高発生時における推算波高分布図  
( $H_0=8.04\text{m}$ ,  $T=11.2\text{s}$ , 波向  $\text{N}190^\circ\text{E}$ )

表 4-3-3-4 T1408 襲来時の各地点での最大波浪の発生時刻、推算値と水深

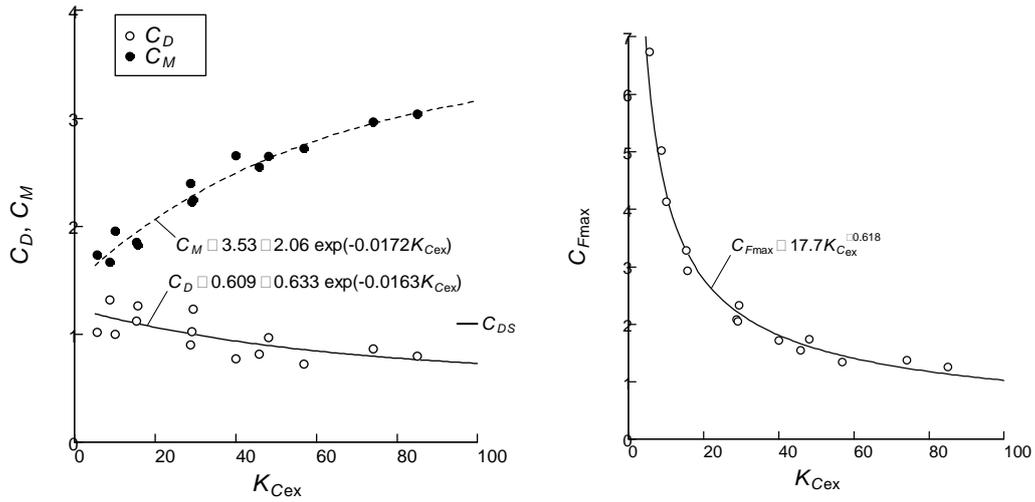
地点	起時	T1408による最大波浪						海底地盤高 D.L.*3)(m)
		沖波			対象位置			
		$H_0(\text{m})$	$T_0(\text{s})$	波向( $^\circ$ )	$H_{1/3}(\text{m})$	$T_{1/3}(\text{s})$	波向( $^\circ$ )	
伊王島 NOWPHAS	2014/7/9 23:00 (2014/7/9 15:20)	5.53	11.7	202	5.05*2) (5.26)	11.7 (12.6)	202 (221)	—
A工区	2014/7/10 00:00	8.04	11.2	190	6.32	11.2	187	-12.1
B工区					6.81		196	-23.0
*1)伊王島の観測値水深：T.P.-31.9m								
*2) 推算波高 $H_0 \times K_s$								
*3)潮位は気象庁の長崎（松ヶ枝）を採用し、日時は推算波高最大の7/10 00時：T.P.+0.18m。 ここでT.P.=M.S.L.=D.L.+1.64m（保安庁潮汐表より）．計算潮位 =T.P.+0.18m=D.L+(1.64+0.18)=D.L+1.82m								

#### b) 対象施設の流体力係数の測定

対象施設の流体力係数の測定結果を図 4-3-3-13 に示す。ここで、測定は規則波下で行ったが、流速波形に多少非対称性がみられたため、KC 数に拡張 KC 数  $K_{Cex}$  を用いた。また、模型 B では基準面積は迎角によってほとんど変化しない（表 4-3-3-1）が、 $C_{Fmax}$  が迎角  $45^\circ$  で有意に大きくなっていること（図 4-3-3-13）から流体力は迎角  $45^\circ$  で大きくなるのがわかる。

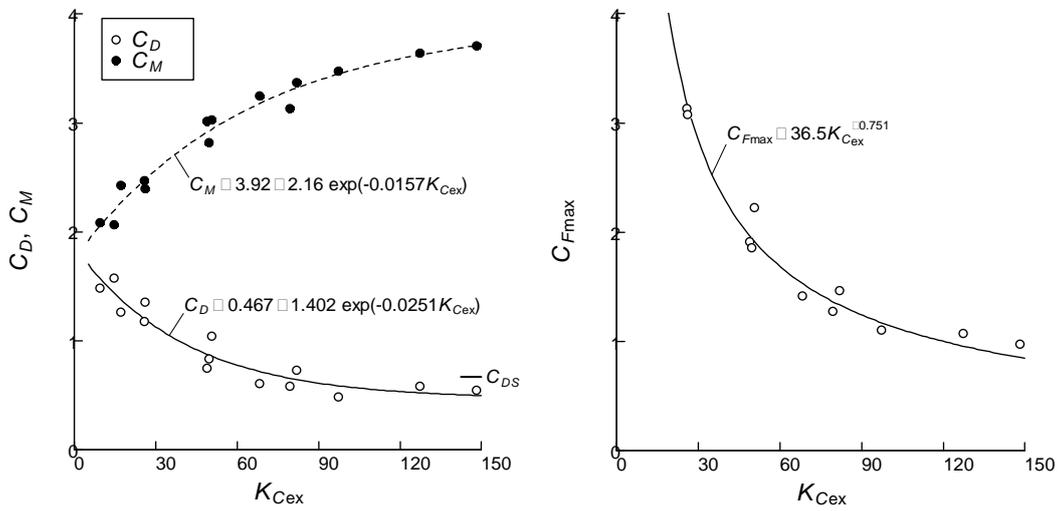
KC 数を表 4-3-3-4 の 4 つの方法で算出し、図 4-3-3-13 中に示す実験式より求められる  $C_D$  と  $C_M$  の値を用いてモリソン式で求められる流体力の計算値（ $F_{x\_cal1}$ 、 $F_{x\_cal2}$ 、 $F_{x\_cal3}$ 、 $F_{x\_cal4}$ ）と測定値の比較例（模型 A の場合）を図 4-3-3-14 に示す。流体力の推定波形は全体的によく一致したが、大きい波のピーク値が測定値に比べて低くなる傾向がみられた。その傾向を確かめるため、個々波ごとの最大流体力  $F_p$  の比較を行った。

不規則波の個々波毎の最大流体力  $F_p$  について、モリソン式による計算値と測定値で比較した（図 4-3-3-15）。個々波毎に異なる KC 数を定義する計算値（cal1 と cal2）では誤差が比較的小さくなったが、モリソン式はいずれの KC 数の定義を用いても最大流体力  $F_p$  を過小評価する傾向がみられた。

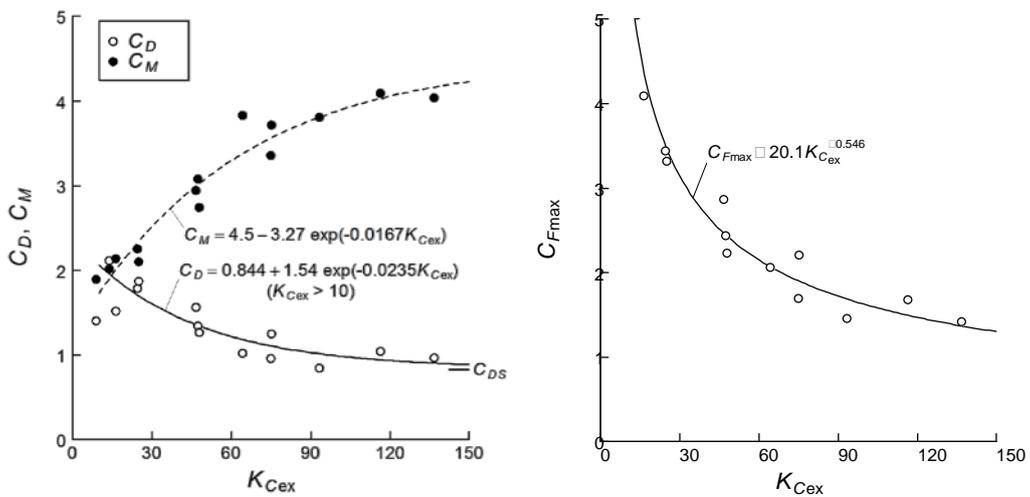


(a) 模型 A

注 1 図中の  $C_{Ds}$  値は定常流中での実験値ではなく、手引に記載された抗力係数の表から算出された設計値で、造波水槽での実験値に比べて大きいことから、 $C_{Ds}$  としてはおそらく 30% ほど過大な値。



(b) 模型 B、迎角 0°



(c) 模型 B、迎角 45°

図 4-3-3-13 対象施設の流体力係数の測定結果

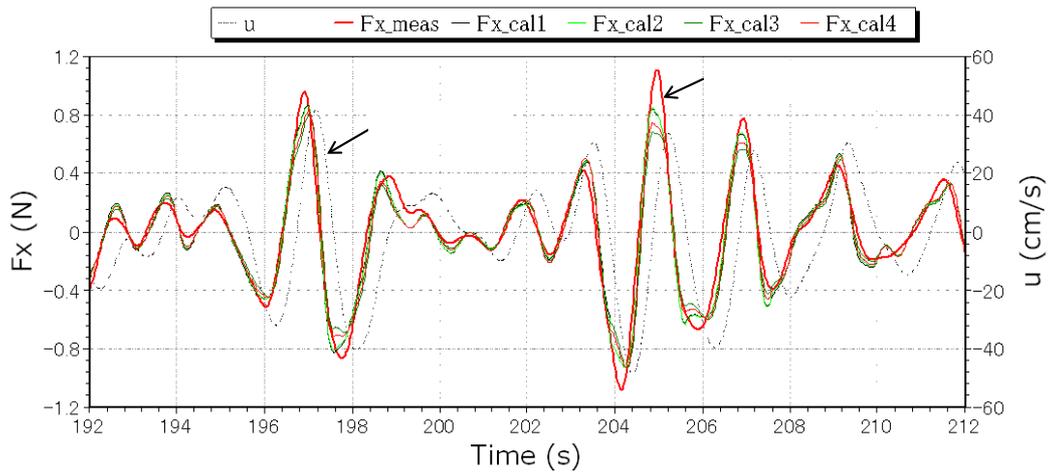


図 4-3-3-14 不規則波での水平流体力  $F_x$  の測定値 ( $F_{x\_meas}$ ) とモリソン式による計算値の例 (模型 A の場合)

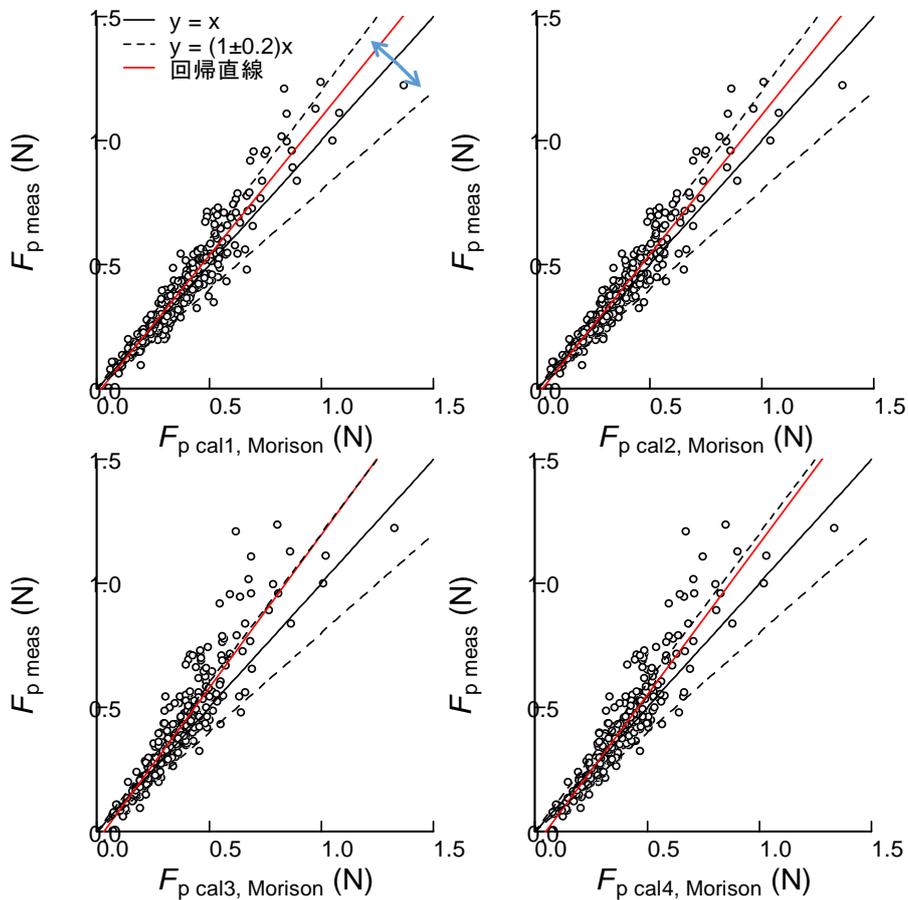


図 4-3-3-15 不規則波における個々波の最大流体力  $F_p$  のモリソン式による計算値と測定値  $F_{p\_meas}$  との比較例 (模型 A ;  $T_{1/3}=2s$  で波高が最も大きい条件の不規則波)

以上と同じ個々波毎の最大流体力について、 $C_{Fmax}$  の式による計算値を測定値と比較した (図 4-3-3-16)。計算値はすべての方法で過大評価となり、特に波群内で一定の  $KC$  数を仮定する方法 (cal3 と cal4) ではその程度が著しくなった。以上の結果は、 $C_{Fmax}$  の式による

流体力推定が KC 数の定義によって大きく影響されることを示唆する。

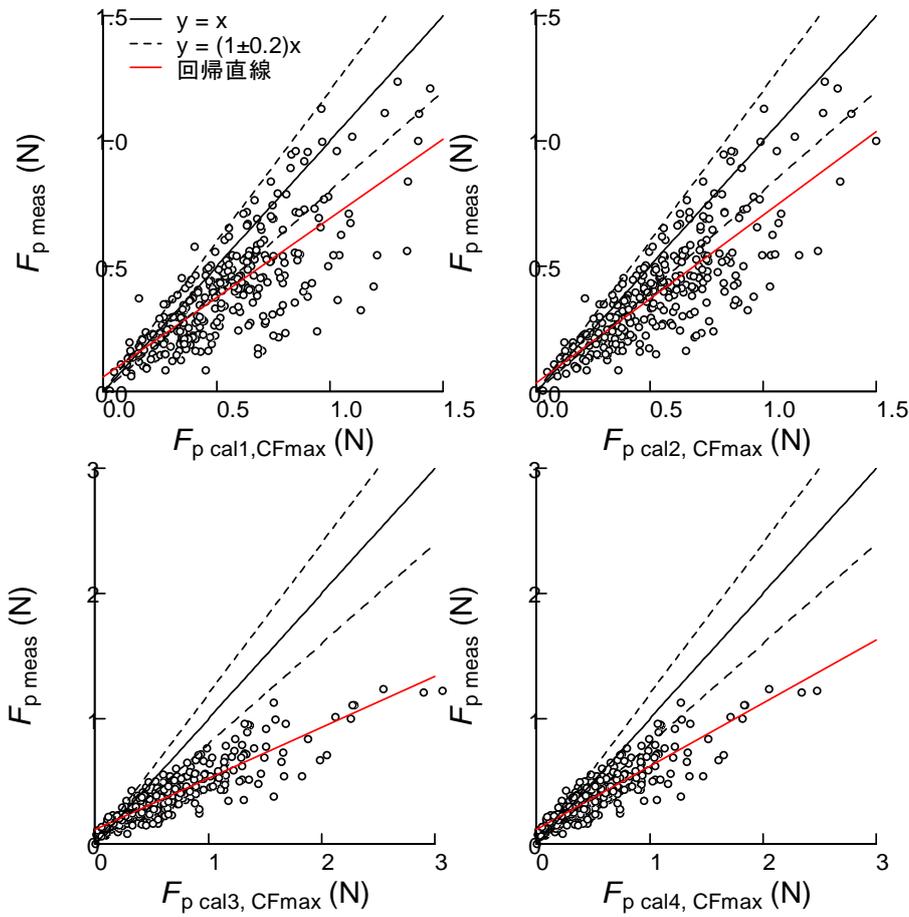
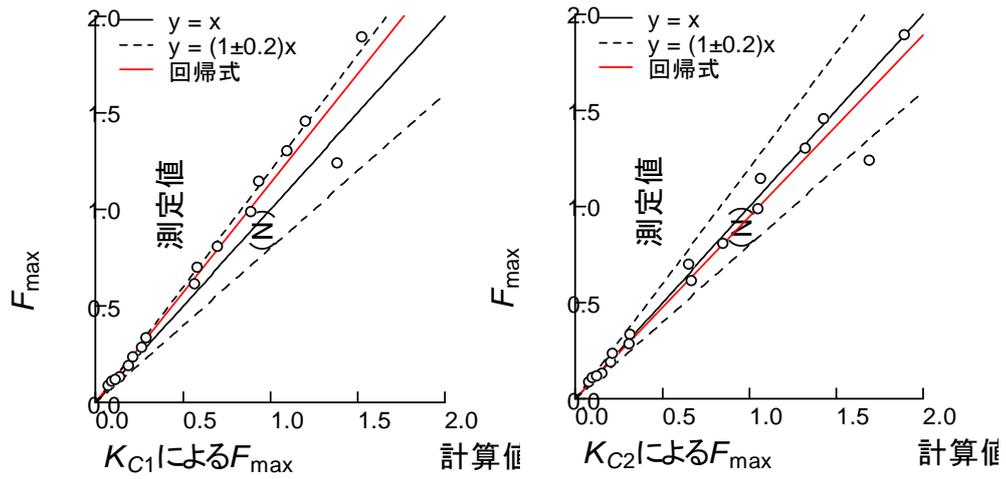
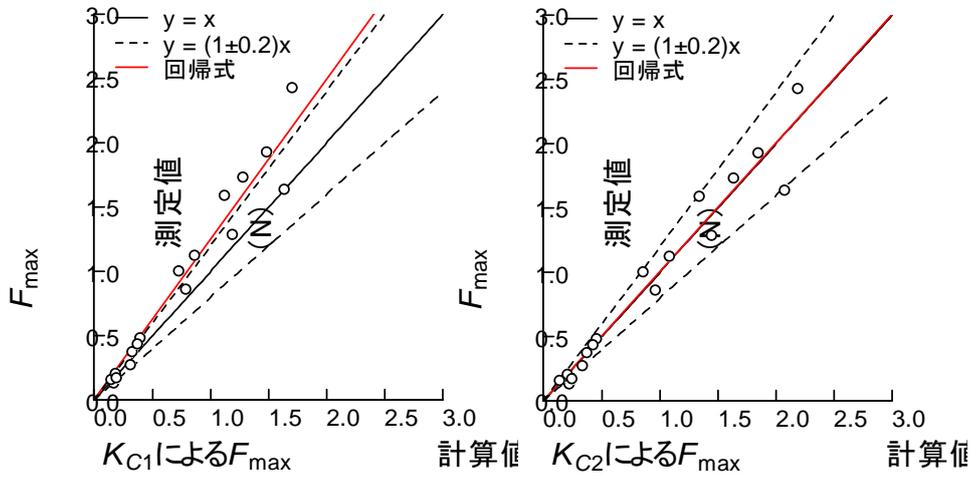


図 4-3-3-16 不規則波における個々波の最大流体力  $F_p$  の  $C_{Fmax}$  の式による計算値と測定値との比較

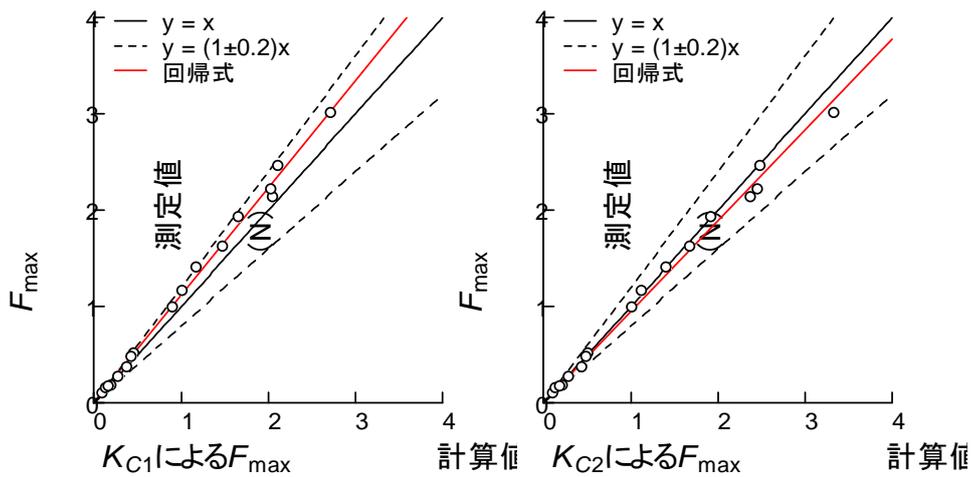
次に、 $C_{Fmax}$  の式により波群中の最大流体力  $F_{max}$  を推定した結果（図 4-3-3-17）をみてみる。個々波毎の最大流体力の結果と異なり、 $F_{max}$  の推定はすべての模型の条件で予想外に良好な一致を示した。その推定誤差は KC 数の算定法に依存したが、 $K_{C2}$  で概ね 20%以下の誤差となり、妥当な推定値を期待できる結果となった。



(a) 模型 A



(b) 模型 B、迎角  $0^\circ$



(c) 模型 B、迎角  $45^\circ$

図 4-3-3-17 KC 数の算定方法による比較結果

### c) 従来法と提案法との比較

A 工区について従来法と提案法の比較結果を表 4-3-3-5 に示す。ここで、計算条件は以下とした。

最大波浪発生時の水深  $h = 13.92\text{m}$ 、 $\rho = 1.03\text{t/m}^3$ 、水中重量  $W = 47.36\text{kN}$ 、

$\mu = 0.6$  (捨石上)、滑動抵抗  $R = \mu W = 28.42\text{N}$ 、流れの速度  $U_c = 0\text{m/s}$  (砕波領域のため)

施設が被災したことから安全率  $< 1$  とならなければならないが、従来法は、安全率が 1 を大幅に上回り、明らかに流体力を過小評価すると判断できる。また従来法のうち、設計波を有義波から最大波に変えた修正法  $\alpha$  では、安全率が 1 となったが、図 4-3-3-13(a)で示したように、この  $C_D$  値に従来法で通常用いる定常流中での実験値を採用すれば、安全率は有意に 1 を超え、同様に流体力の過小評価を示唆する結果になると予想される。一方、提案法では安全率が 1 をかろうじて下回ったが、非対称的な流速波形が分からないため、算出可能な  $K_{C1}$  を暫定的に用いて試算した。 $K_{C1}$  は最大流体力を 20%ほど過小評価する可能性が高いため、 $K_{C2}$  等のより適切な KC 数を用いて  $C_{Fmax}$  を求めれば、最大流体力が大きくなり、安全率は 1 を有意に下回ると考えられる。

表 4-3-3-5 従来法と提案法の比較 (A 工区の場合)

計算法	被災時最大波浪		波動流速 $U_m$ (m/s)	流体力係数	最大流体力 $F_{max}$ (kN)	安全率 $R/F_{max}$
	波高	周期				
従来法	$H_{1/3} = 6.32\text{m}$	11.2s	2.25	$C_D = 1.10$ <sup>注1</sup> , $C_M = 2.0$	12.9	2.20 <sup>注1</sup>
修正法 $\alpha$ <sup>注2</sup>	$H_{max} = 9.86\text{m}$ <sup>注3</sup>		3.52		28.5	1.00 <sup>注1</sup>
提案法	$H_{max} = 9.86\text{m}$ <sup>注3</sup>	11.2s	3.52	$C_{Fmax} = 1.19$ ( $K_{C1} = 78.8$ ) <sup>注4</sup>	28.9 <sup>注4</sup>	0.98 <sup>注4</sup>

注1 この  $C_D$  値は定常流中での実験値よりも大きい可能性がある (図 4-3-3-13(a)を参照)。

注2 修正法  $\alpha$ : 従来法のうち、対象波のみを有義波から最大波に修正する方法

注3 砕波領域になるため、 $H_{1/3}$  の推算値から砕波の影響を考慮した  $H_{max}(=H_{1/250})$  を、波高の水深変化に関する合田のモデル (合田 1975 ; Goda 2010) により推算 (海底勾配 1/50)

注4 流体力係数の算定に用いる KC 数としては  $K_{C2}$  の方が適切であるが、流速の非対称性が分からないため、算出可能な  $K_{C1}$  を暫定的に用いた。

2015 年、B 工区で ADCP により観測された底層での平均流速と有義波高の経時変化を図 4-3-3-17 に示す。平均流速と波高との相関はみられなかったことから、被災時の平均流速は最大でも 0.18m/s 程と推定される。

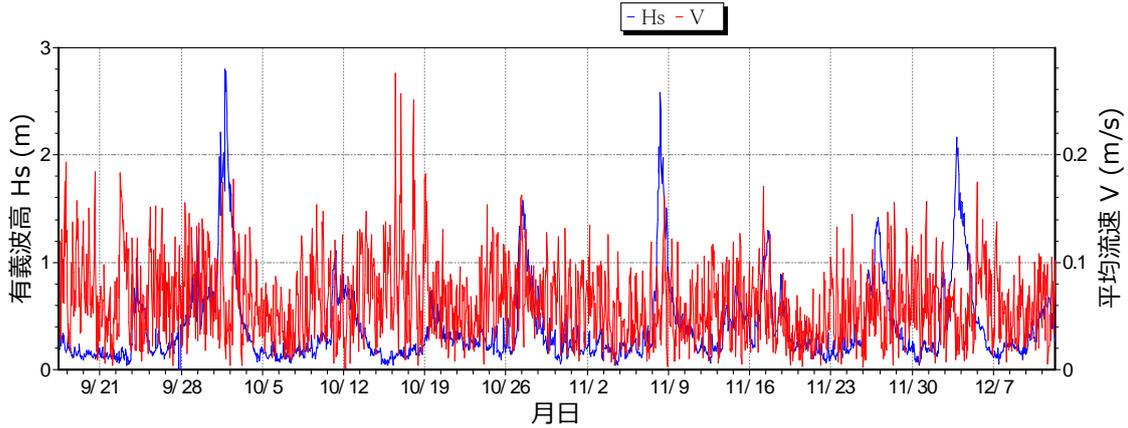


図 4-3-17 2015 年 B 工区での ADCP により測定された有義波高 Hs と  
底層 ( $z=2.1\text{m}$ ) での 10 分間平均流速 V の時系列

B 工区での安全率について、従来法と提案法の比較結果を表 4-3-3-6 に示す。計算条件は以下とした。

最大波浪発生時の水深  $h = 24.82\text{m}$ 、 $\rho = 1.03\text{t/m}^3$ 、 $W = 55.18\text{kN}$ 、  
 $\mu = 0.5$  (コンクリート魚礁上)、 $R = \mu W = 27.59\text{N}$ 、 $U_c = 0 \sim 0.18\text{m/s}$

施設が被災したことから安全率は 1 を下回らなければならないが、従来法では安全率が 1 を大きく上回り、修正法  $\alpha$  でも 1 を少し上回った。従来法は明らかに過小評価であり、設計波を有義波から最大波に見直しただけでは不十分であると考えられる。一方、提案法では 1 を下回り、その流体力算定値は妥当な範囲にあると判断された。

表 4-3-3-6 従来法と提案法の比較 (B 工区の場合)

計算法	被災時最大波浪		波動流速 $U_m(\text{m/s})$	流体力係数 <sup>注4</sup>	最大流体力 $F_{\max}(\text{kN})$	安全率 $R/F_{\max}$
	波高	周期				
従来法	$H_{1/3}=6.81\text{m}$	11.2s	1.58 <sup>注2</sup>	$C_D=0.83,$ $C_M=2.0$	8.38~9.65	2.86~3.29
修正法 $\alpha$	$H_{\max}=12.26\text{m}$ <sup>注1</sup>		2.84 <sup>注2</sup>		22.35~24.86	1.11~1.23
提案法	$H_{\max}=12.26\text{m}$ <sup>注1</sup>	11.2s	2.83 <sup>注3</sup>	$C_{F_{\max}}=1.58$ $(K_{C1}=105.7)$ <sup>注5</sup> 、 $C_{DS}=0.83$	38.20~38.28 <sup>注5</sup>	0.72 <sup>注5</sup>

注1 非碎波領域のため、レイリー分布より  $H_{\max}=1.8H_{1/3}$

注2 2 層目の魚礁の頂上の高さ( $z=3\text{m}$ )における流速

注3 2 層目の魚礁の圆心の高さ ( $z=1.5\text{m}+0.729\text{m}=2.229\text{m}$ ) における流速

注4 流体力が大きくなる迎角  $45^\circ$  の値

注5 流体力係数の算定に  $K_{C1}$  を暫定的に用いたため、 $F_{\max}$  を 20%ほど過小評価する可能性がある。

## (2) 実態把握のための事例情報の収集

### 1) 方法

現地検証を比較的容易にできる場合として、層積みされたコンクリート魚礁を対象に探索を行った。もし層積みされた魚礁が移動すれば、落下によって移動したか否かを容易に

判断できる。検証は以下の手順により行うこととした。

- ① 全国の安定計算表から安全率の比較的低い魚礁を絞り込み、調査する。出来型の音響調査結果を入手し、マルチビーム（EM2040）による測量を行い、移動・礁高変化の有無を確認する。
- ② 聞き取り等により落下が確認されている層積み魚礁を調べ、安定計算表および施工後の映像記録等の関連情報の入手、潜水調査による滑動の確認、および最寄りの波浪観測情報等からの被災原因の推定を行う。
- ③ 調査対象魚礁の受けた最大波浪を推定し、現行の設計法と提案法の妥当性を検討する（次年度予定）

## 2) 結果

### a) 安全率の低い層積み魚礁の事例抽出

安全率の低い層積み魚礁の事例として、北海道豊浜沖の層積み魚礁の事例（図 4-3-3-18）に示す。施工は平成 24 年度から実施されており、施工開始から 4 年が経過し、現状は不明であったが、層積み高さが 9m より下がってれば被災と判断できる。

調査では水深約 40m の人工魚礁 2 群を対象にマルチビームによる深淺測量を実施し、平成 26 年に北海道庁が実施した深淺測量の結果と比較した。

#### 設計条件と安全率

018-1	豊浜沖合漁場
波高	7.67m
周期	13.5sec
水深	39m以上
安全率(滑動)	1.34
安全率(転倒)	2.23

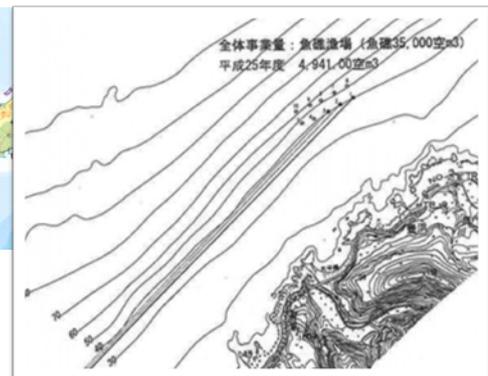
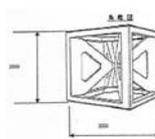
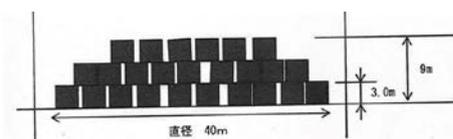


図 4-3-3-18 北海道豊浜沖の層積み魚礁の事例

平成 26 年 10 月（施工後 2 年経過）と平成 28 年 10 月のマルチビーム測量結果の比較を図 4-3-3-19 に示す。用いた計測機器の性能が異なるため、明確な比較はできないが、平成 26 年に計測された魚礁は平成 28 年に計測した結果に比べ、全体的に盛り上がっているように見える。また矢印で示した No.2 の一部は低くなっているようである。

平成 28 年の No.1 礁、No.2 礁の点群データを図 4-3-3-20 に示す。No.1 礁では、魚礁の高さは高いところで 9m を確保しているが、No.2 礁では、高いところでも 7m となっている。

以上から、測定機器の精度差のため明確ではないが、No.2 の魚礁群の 1 部で高さが低くなったと考えられる。また据付時に魚礁の高さを管理しているとするれば、No.2 の魚礁群では高さ 9m が確保できていないため、施工後に落下したと考えられる。

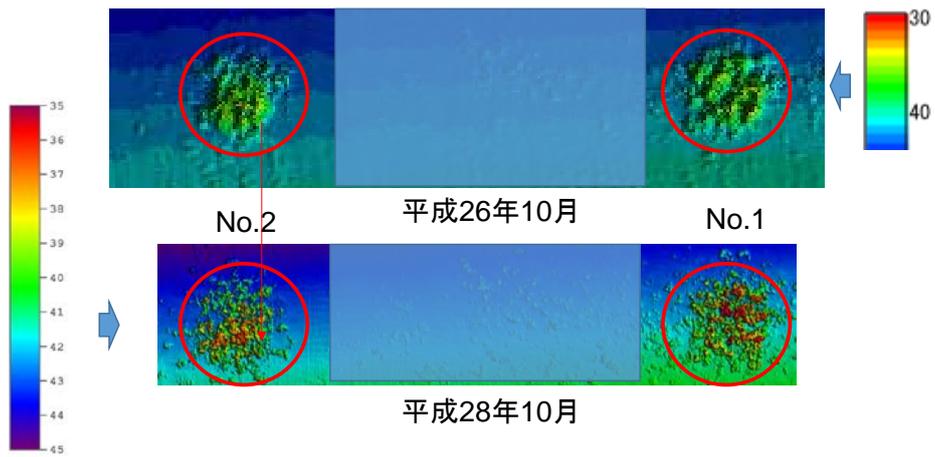
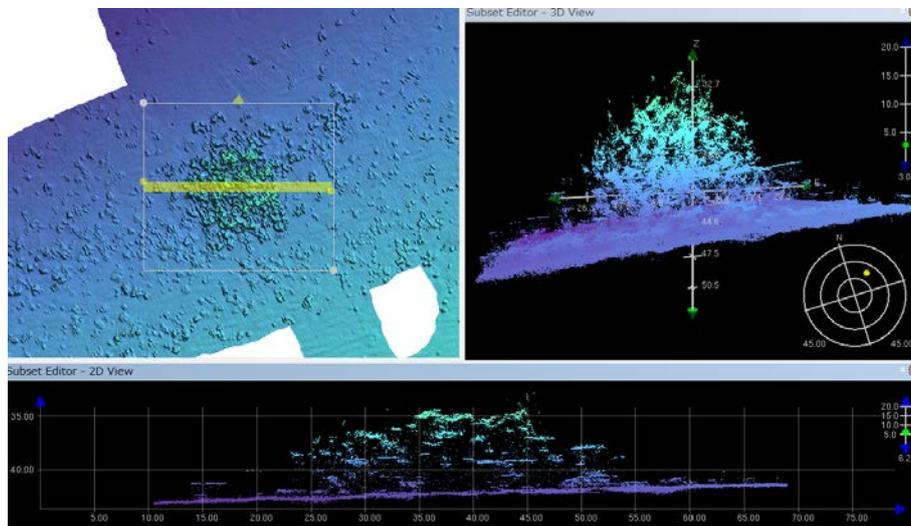
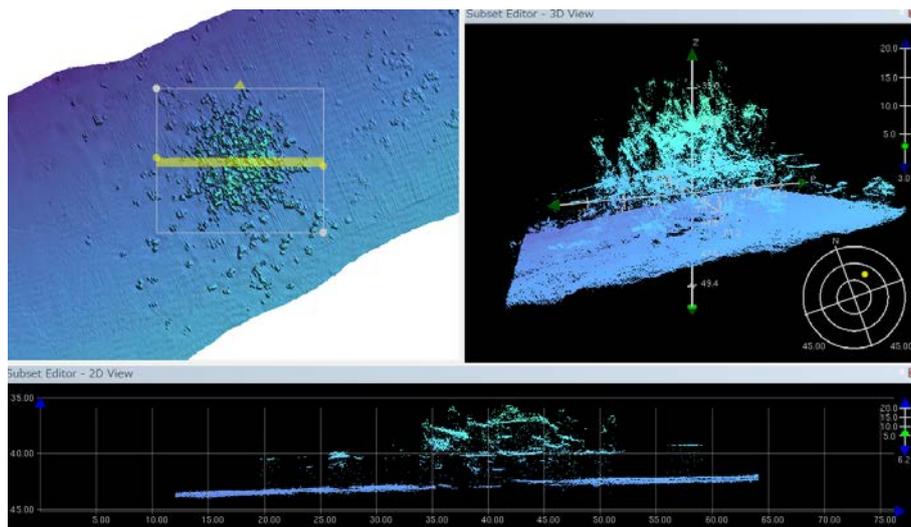


図 4-3-3-19 同一魚礁群の測量結果の比較



(a) No.1 礁



(b) No.2 礁

図 4-3-3-20 点群データ (平成 28 年 10 月)

b) 落下が確認できた層積み魚礁の事例（千葉県館山沖）

千葉県館山沖の層積み魚礁の事例を図 4-3-3-21 に示す。2010 年、水深約 19m、半径 15m の範囲に FP 魚礁 3m 型が 2 層積みで設置された。当魚礁は東京海洋大学館山ステーションでの定期観察により 2 層目の落下が確認され、その原因は 2014 年 10 月の台風 18 号によると推察されている（図 4-3-3-22）。



図 4-3-3-21 千葉県館山沖の事例

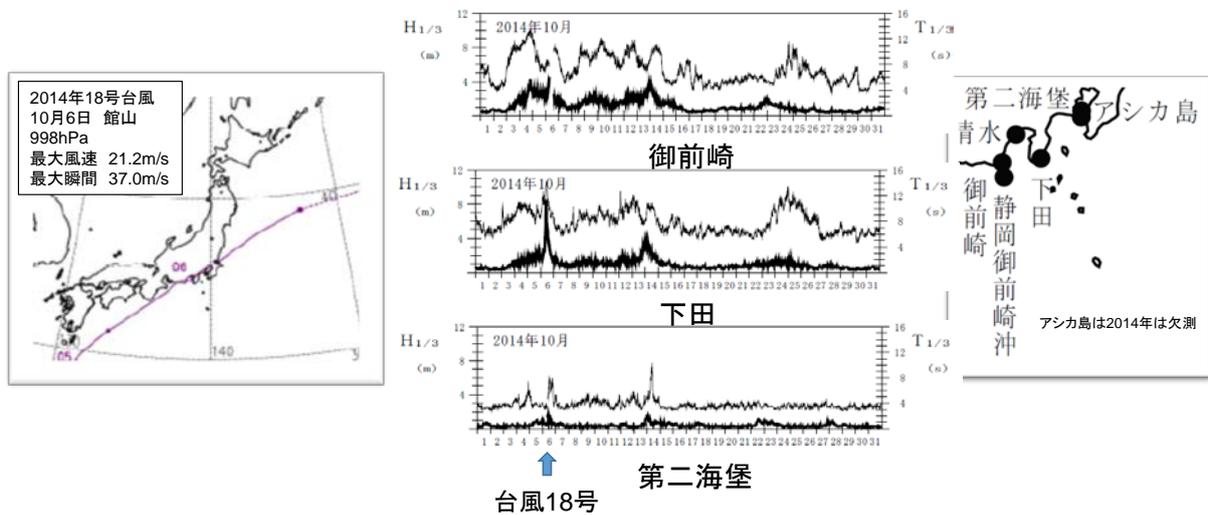


図 4-3-3-22 2014 年台風 18 号の経路と波浪状況

魚礁区 No.18 と No.19（図 4-3-3-23）で行った潜水調査の調査結果を図 4-3-3-24 に示す。水深の比較的深い No.18 では、平成 23 年 11 月に実施された ROV 調査と比較すると、現状でもほぼ同様な配置状況で、2 層目の落下はみられなかった。砂質底への埋没は 10cm 程度である。これに対して水深の比較的浅い No.19 では、2 層目で直立していたブロックは 2 個のみであり、他は傾いていたり、落下したりしていた。砂質底への埋没はなかった。

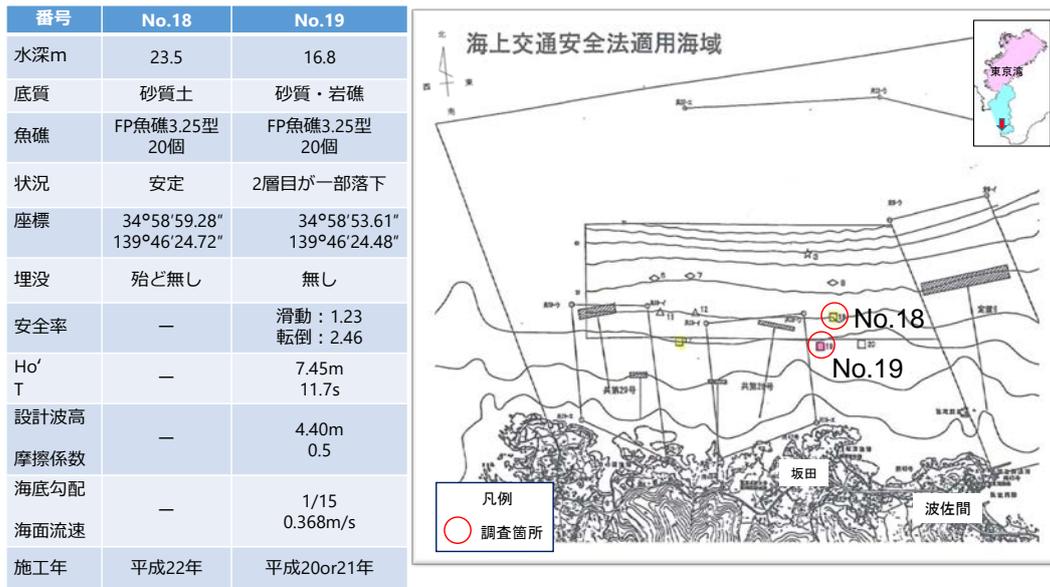
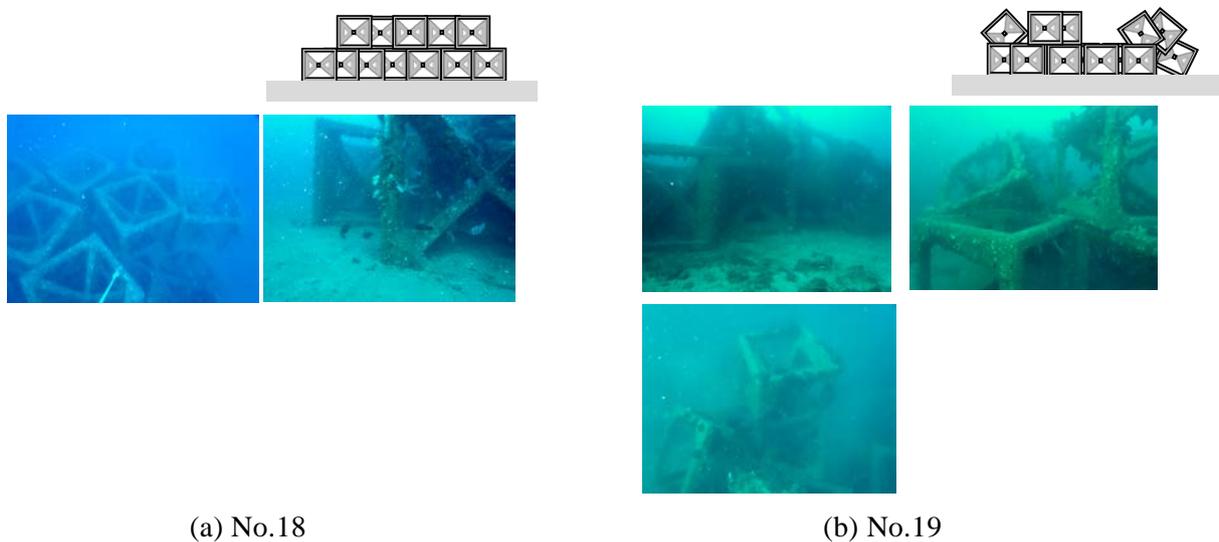


図 4-3-3-23 人工魚礁の安定性確認調査箇所

施工条件としては、設置はクレーン船による着底方式であり、位置管理は DGPS によるものと推測される。自動反転フックによる切り離しで、作業ダイバーは使っていないため多少傾いて施工された可能性はあるものの、No.19 でみられた魚礁の落下が施工の不備によるものとは考え難い。

以上から今後の課題として、2014 年 10 月 6 日の台風 18 号の波浪を把握し、魚礁の安定性を検討する必要がある。



(a) No.18

(b) No.19

図 4-3-3-24 潜水調査結果（平成 28 年 10 月）

### (3) 沈設魚礁の安定性の検討

#### 1) 方法

砂質底上での魚礁の安定性については、平成 27 年度の検討により、①洗掘等に伴い滑動抵抗が有意に増加する、②揺動限界（現在の設計法における「転倒」限界）は被災限界と

しては過大である、③魚礁1個分の移動は転倒によって生じる、ことが予見された。これらに基づき、砂質底上での魚礁の転倒限界の予測手法を不規則波実験により検討した。

魚礁模型は、密度を変えた角型魚礁の1/25縮尺模型を用いた(表4-3-3-7、図4-3-3-25)。

表 4-3-3-7 実験模型の密度と諸元

模型名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	他の諸元
模型 N	2.3	部材幅 $D = 1.2\text{cm}$ ,
模型 L	1.6	基準面積 $A = 59.52\text{cm}^2$ , 基準体積 $V = 110.59\text{cm}^3$ (実容積)

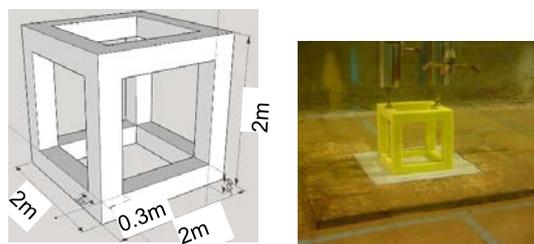


図 4-3-3-25 角型魚礁模型 (寸法: 実物大)

実験には前述の造波水槽を用い、以下の検討を行った。

- 検討1 前掲と同様の方法により規則波実験で  $KC$  数と流体力係数の関係式を決定
- 検討2 不規則波実験により波群中の最大流体力の推定方法を検討
- 検討3 実験水槽内水深  $56\text{cm}$  に設けた砂質底 (粒径  $0.12\text{mm}$  の珪砂) に模型を設置し、引張試験により摩擦係数を測定
- 検討4 上記砂質底上で不規則波(Bretschneider-光易スペクトル)  $250$  波以上を作用させ、模型の動きのビデオ解析と流速からの最大流体力  $F_{\max}$  の推定により、転倒限界と外力との関係を検討

## 2) 結果

角型魚礁の流体力係数と  $KC$  数の関係を図 4-3-3-26 に示す (検討 1)。

不規則波中の最大流体力  $F_{\max}$  を代表波の  $KC$  数から  $C_{F_{\max}}$  の式により計算した場合の計算値と測定値の比較を図 4-3-3-27 に示す (検討 2)。角型魚礁でも、 $K_{C2}$  から算出される  $C_{F_{\max}}$  を用いると概ね妥当な推定値が得られた。

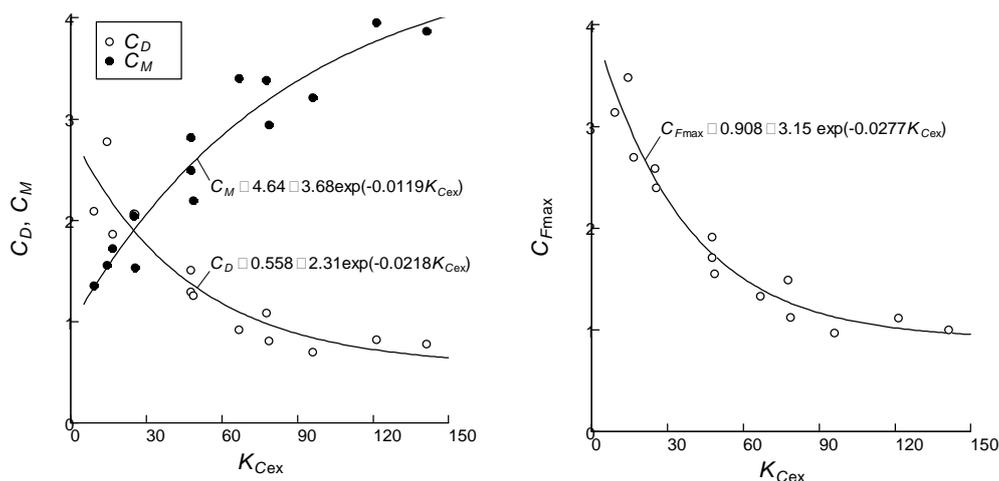


図 4-3-3-26 流体力係数の測定結果

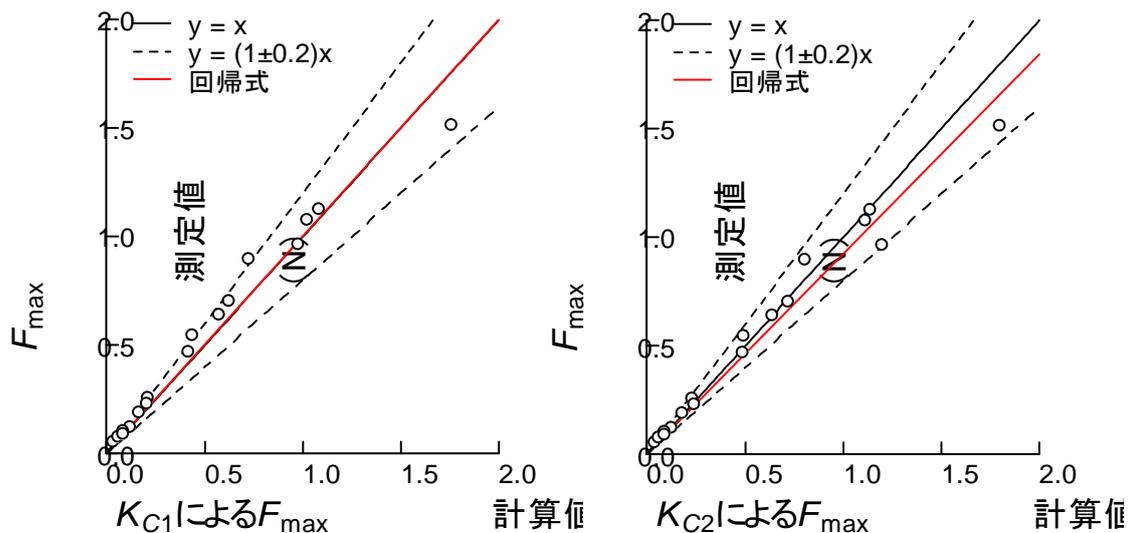


図 4-3-3-27  $C_{F_{max}}$  の式による不規則波中の最大流体力  $F_{max}$  の計算値と測定値の比較

引張試験により、魚礁模型の平らな砂面上での摩擦力 ( $N=12$  または  $16$ ) を測定した結果を図 4-3-3-28、図 4-3-3-29 に示す (検討 3)。静止摩擦係数  $\mu$  は魚礁の密度による有意な差はなく、平均で  $\mu=0.45$  となった。

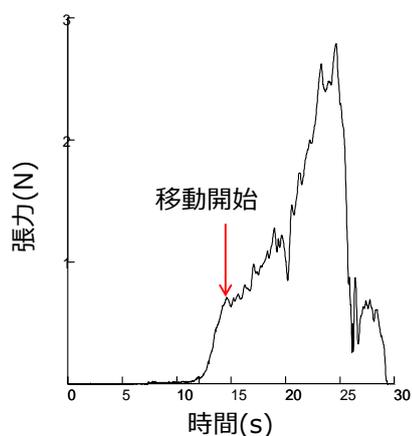


図 4-3-3-28 引張試験による砂面上での角型魚礁模型の摩擦力測定結果の例

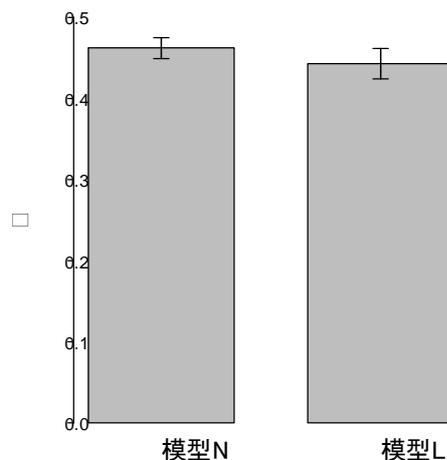


図 4-3-3-29 静止摩擦係数の測定結果

角型魚礁の挙動の例 (模型 N の場合) を図 4-3-3-30 に示す (検討 4)。角型魚礁は、砂れんが形成される前の平坦な砂面の初期状態でわずかに滑動することはあっても、洗掘、砂れん形成後には安定化し、流体力により魚礁が傾いても転倒しない限り、魚礁 1 個分以上の有意な移動は観察されなかった。

従来の設計法と同じ考えの下、鉛直流体力 (揚力)  $F_z$  の影響は無視できる (すなわ

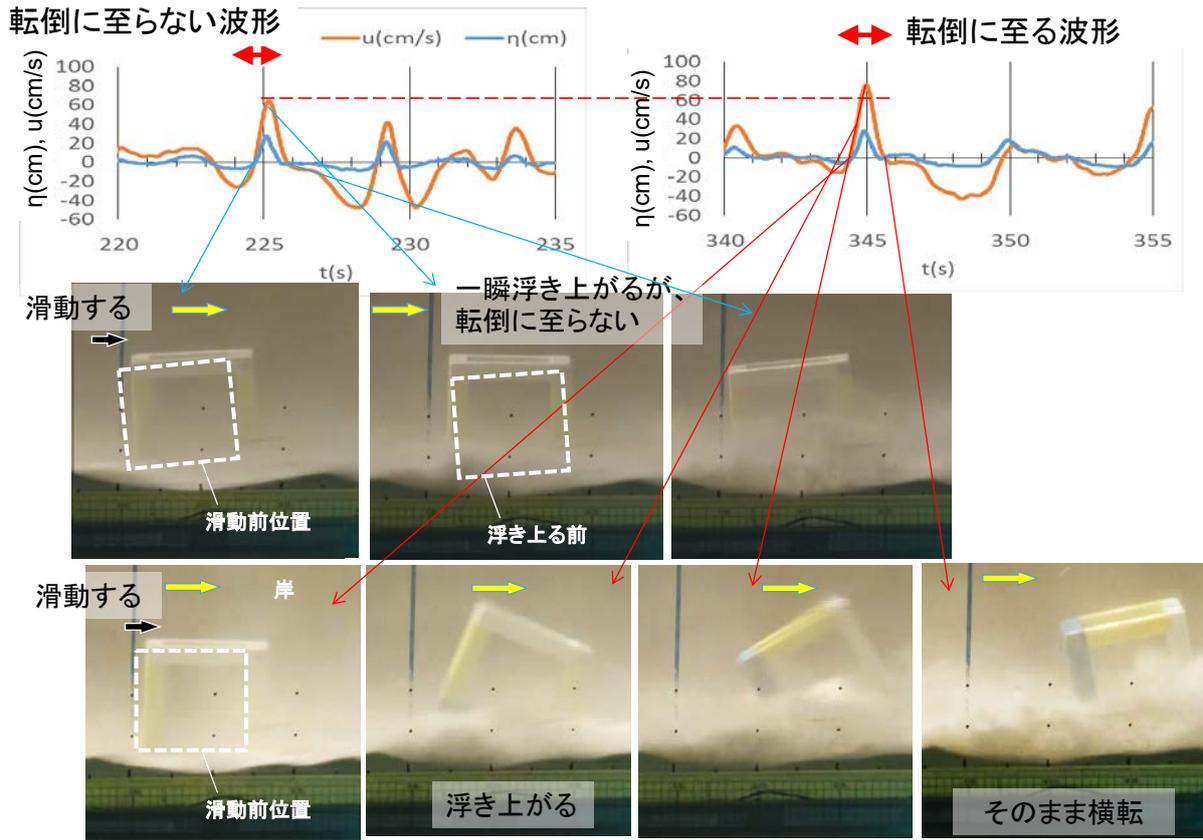


図 4-3-3-30 沈設魚礁の挙動（模型 N の実験例）

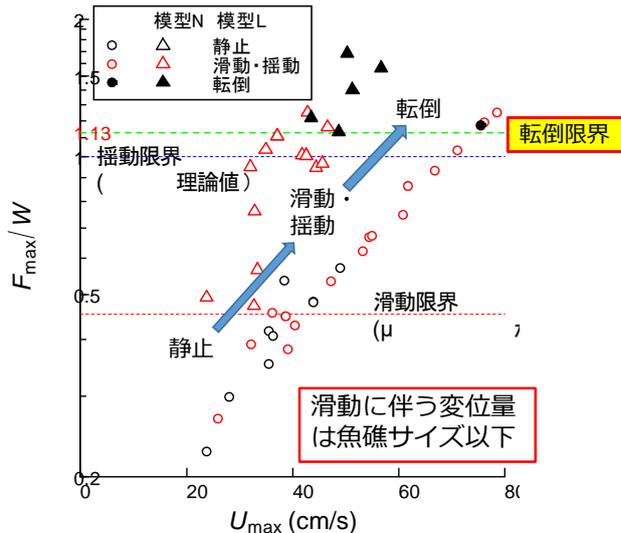
ち、 $F_z=0$ ) と仮定した場合の各挙動限界を図 4-3-3-31 に示す。模型 N の滑動は、必ずしも  $F_{\max}/W > \mu$  のときのみ発生するとは限らなかったが、揺動を伴っても、転倒（横転、反転）しない限り、その滑動に伴う変位量はいずれのケースでも魚礁 1 個分よりも有意に小さかった。角型魚礁は対称形であるため、 $F_z=0$  の場合、転倒は少なくとも、揺動限界を超えた

$$\frac{F_{\max} l_A}{W l_V} \approx \frac{F_{\max}}{W} > 1 \quad (\because l_A \approx l_V)$$

とならない限り発生しないことになる。転倒には揺動限界を超える流体力が持続的に作用する必要があるため、転倒限界の  $F_{\max}/W$  は 1 よりもかなり大きくなると予想された。実験では模型 N と模型 L の転倒が、 $F_{\max}/W$  がほぼ同じ限界値 (1.13) を超えると、発生した。その限界値は上述の揺動限界を超えているため、理論的矛盾はないが、予想外に揺動限界の理論値に近く、揚力  $F_z$  の影響が疑われた。

不規則波中の水平流速と角型魚礁の水平・鉛直流体力 ( $F_x$ 、 $F_z$ ) との測定例を図 4-3-3-32 に示す。岸向流速 ( $u > 0$ ) のとき、下向きの力 ( $F_z < 0$ ) が作用し、角型魚礁は安定化するが、冲向流速 ( $u < 0$ ) のとき、上向きの力 ( $F_z > 0$ ) が発生し、不安定化することが示唆された。

そこで、他の構造物についても鉛直流体力の相対的大きさを調べてみた (図 4-3-3-33)。模型 A と模型 B (迎角  $45^\circ$ ) の揚力の相対的大きさは、角型魚礁よりも小さくなり、構造物の形状によって異なることを示した。



$U_{max}$  : 不規則波中の水平最大流速、  
 $F_{max}$  : 不規則波中の最大流速振幅から  $K_{C2}$  に  
より求められる最大流体力  
 $W$  : 水中重量、 $\mu$  : 静止摩擦係数 (=0.454)

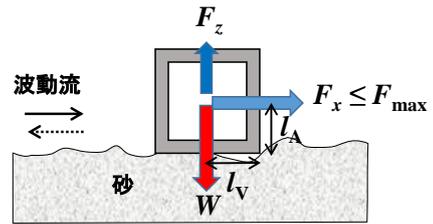


図 4-3-3-31 水平流体力と各挙動限界との関係

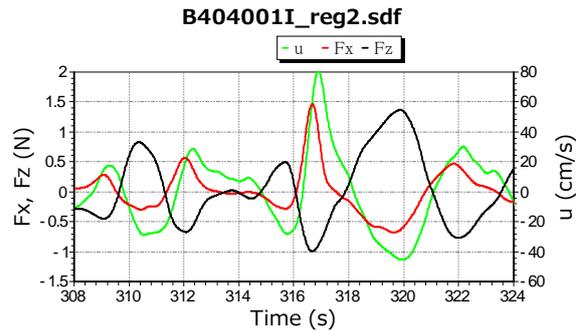
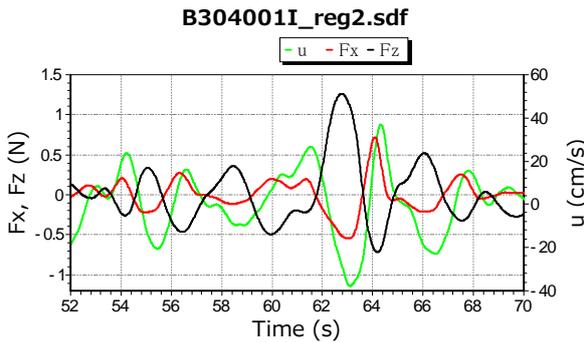
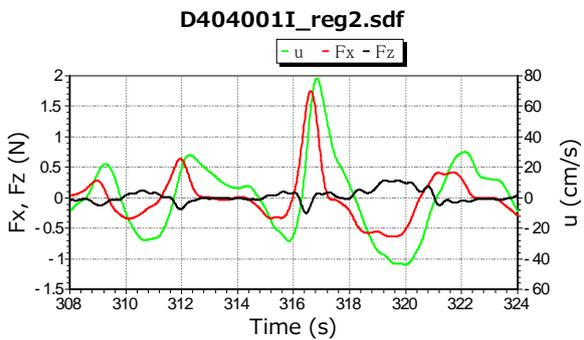
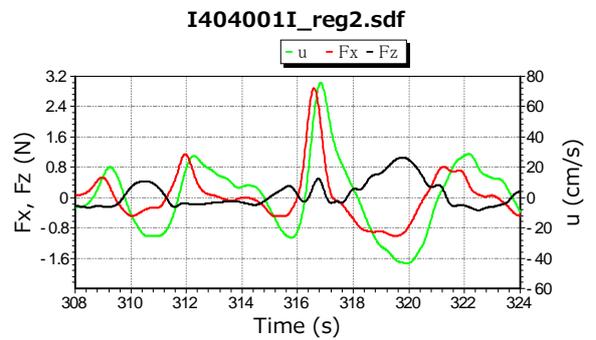


図 4-3-3-32 不規則波中の水平流速( $u$ )と角型魚礁の水平・鉛直流体力( $F_x, F_z$ ) の測定例



(a) 模型 A



(b) 模型 B (迎角  $45^\circ$ )

図 4-3-3-33 不規則波群中での他の構造物の鉛直・水平流体力の測定例 (流速値は図 4-3-3-32 右とほぼ同じであることに注意)

## (4) まとめと今後の課題

### 1) 検討結果のまとめ

- ・モリソン式は不規則波による水平流体力を全体的に精度良く推定できるが、波群中の最大力については過小評価する傾向がみとめられた。
- ・これに対して、 $C_{Fmax}$  の式は KC 数の適切な定義 ( $K_{C2}$  を提案) により波群中の水平最大流体力を比較的精度良く推定できる。
- ・被災事例の解析結果から、少なくとも従来法が流体力を過小評価すると判断できる。
- ・砂質底上の回転対称形魚礁 (角型魚礁) では洗掘等に伴う滑動抵抗の増加により、転倒しない限り有意な移動 (魚礁 1 個分以上) は起こらないことが不規則波実験で確認された。
- ・角型魚礁の転倒限界は、揚力を無視した、水平流体力と水中重量とのモーメント比から推定される揺動限界にほぼ一致したが、流体力の測定結果は魚礁の構造によって揚力が重要になる可能性を示唆した。

### 2) 今後の課題

1. 新たに明らかになった揚力の影響の可能性について、まず
  - ・どのような形状の魚礁で揚力の評価が要/不要になるかの検討
  - ・揚力の評価手法の確立を行う必要がある。これらの検討を経て、再度、①被災事例の検証、および②砂質底上での被災 (転倒) 限界を予測する手法の確立を行い、沈設魚礁の安全性の照査法を検討し直す必要がある。
2. 沈設魚礁の安全性の照査法については、見直し根拠となる被災事例がまだ少ない。事例の蓄積のため、今回被災が新たに確認された事例についても波浪予測に基づく詳細な解析を行う必要がある。
3. 波動流速の非対称性を考慮した  $U_a$  の算出法の確立が必要である。
4. 波・流れ共存場での流体力算定手法の提案式については、妥当性の理論的検討はなされているが、模型実験または現地調査による検証がなされていない。

#### 4-3-4 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討

##### 1) 方法

実海域で起こる流れ場は、海域によって外力等の条件が異なるため、事例を積み重ねる必要がある。そのため昨年度の福島県沖に加えて、長期流速観測と海洋モデルによる数値計算を行っている茨城沖、島根県沖を事例海域として検討した。また、表層型浮魚礁での流速観測データ（高知沖と宮崎沖）を収集し、深海域での海洋モデルの予測値（但し、日平均化データ）との比較を行った。

##### 2) 結果

###### a) 表層型浮魚礁データ：高知県沖

表層型浮魚礁データの一例として、2015年の黒潮牧場10号ブイにおけるスカラー流速の時系列を図4-3-4-1に示す。数ヶ月周期で流速の変動が見られ、黒潮の影響が示唆される。最大流速は7月16日に100m深において2.98m/sが発生していた。

観測結果と外洋モデルの結果の比較を図4-3-4-2に示す。平均的な流速場は非常に良く一致しているものの、観測値で出現していた7月16日の100m深における最大流速2.98m/sは外洋モデルでは表現できていない。最大流速が発生した要因は定かではないが、台風通過に原因があるものと考えられる(図4-3-4-3)。

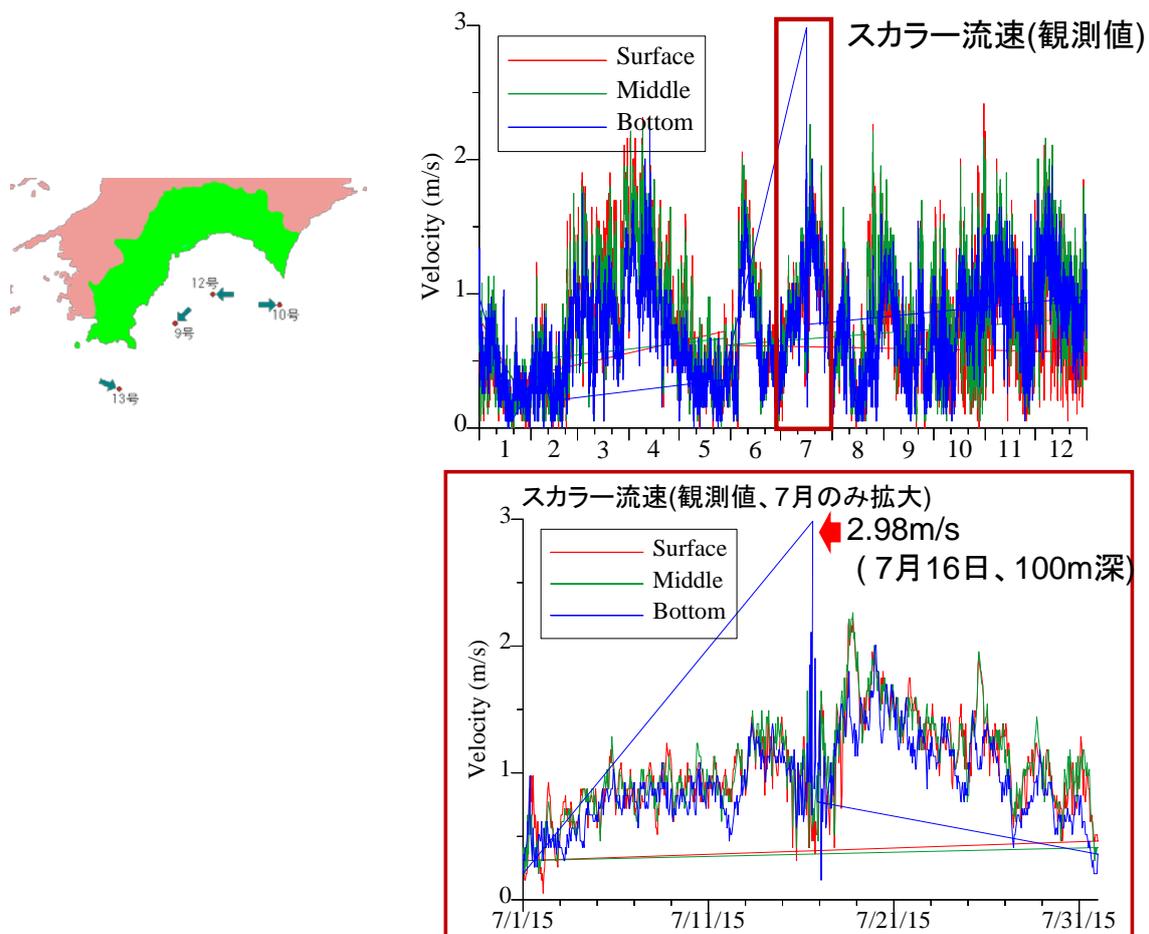


図 4-3-4-1 高知県沖浮魚礁観測データ(黒潮 10 号ブイ)

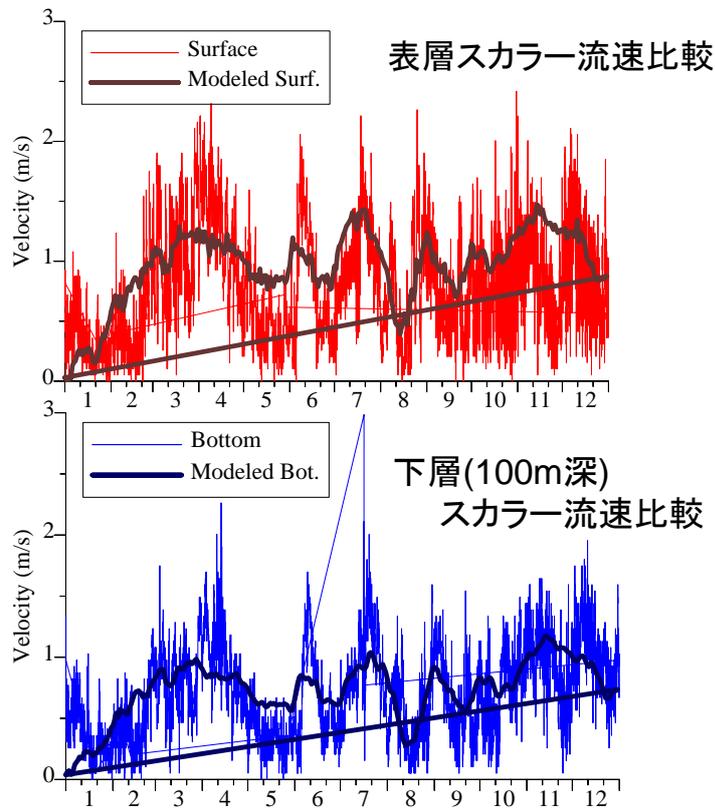
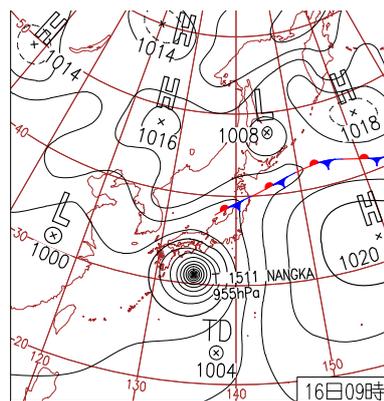


図 4-3-4-2 高知県沖浮魚礁観測データと外洋モデル結果の比較



**16日(木)四国を中心に大荒れ**

台風第11号が四国上陸。湿った気流で西～北日本の各地で非常に激しい雨。高知県魚梁瀬87.5mm/1h、奈良県上北山で日降水量521.5mm、高知県室戸岬で最大瞬間風速42.6m/s。

図 4-3-4-3 最大流速発生時の気象概況

## b) 表層型浮魚礁データ：宮崎県沖

表層型浮魚礁データの一例として、2015年のうみさち1号ブイにおけるスカラー流速の時系列を図4-3-4-4に示す。数ヶ月周期で流速の変動が見られ、黒潮の影響が示唆された。最大流速は8月25日に100m深において5.67m/sが発生していた。当日は台風が直撃しており、浮魚礁の動揺に伴う異常値と考えられ、データの品質チェックの必要性が認識された。

異常値が認められた水深100mのデータを除いた、2015年のうみさち1号ブイにおけるスカラー流速の時系列を図4-3-4-5に示す。最大流速は3月13日、10m深の2.31m/sであり、気圧の谷通過に伴うものであることが示唆された。また、水深10mにおける観測値と外洋モデルの予測値を図4-3-4-6に示す。3月13日に観測された最大流速はモデル側には認められなかった。

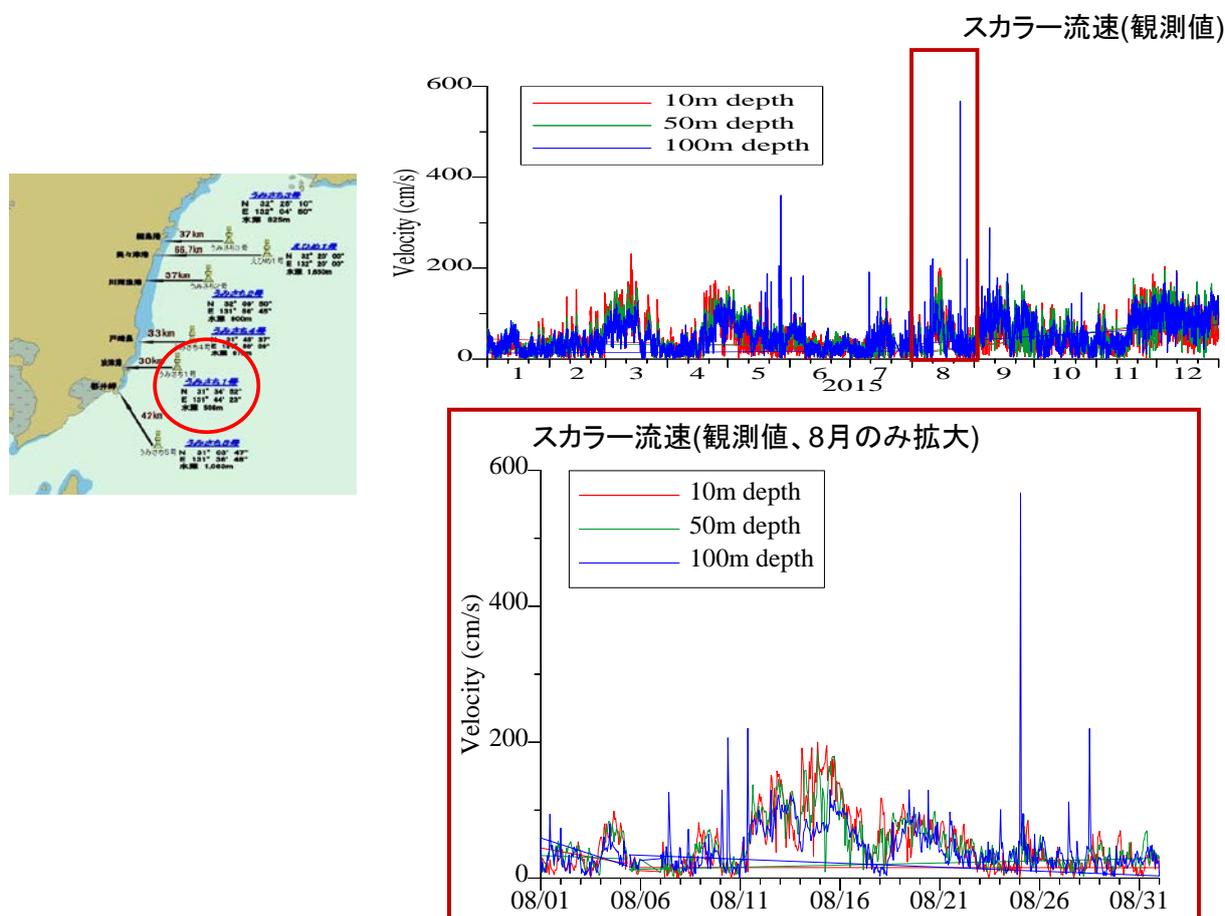


図 4-3-4-4 宮崎県沖浮魚礁観測データ(うみさち1号ブイ)

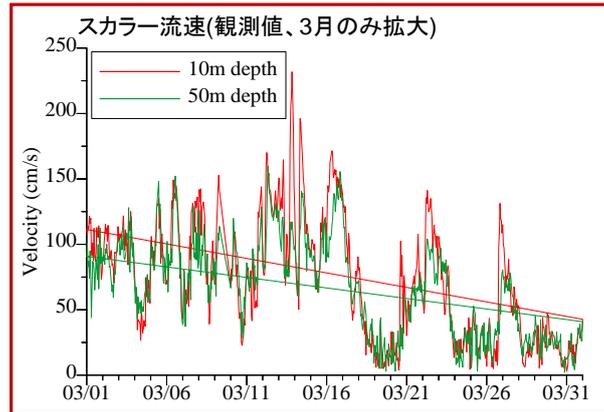
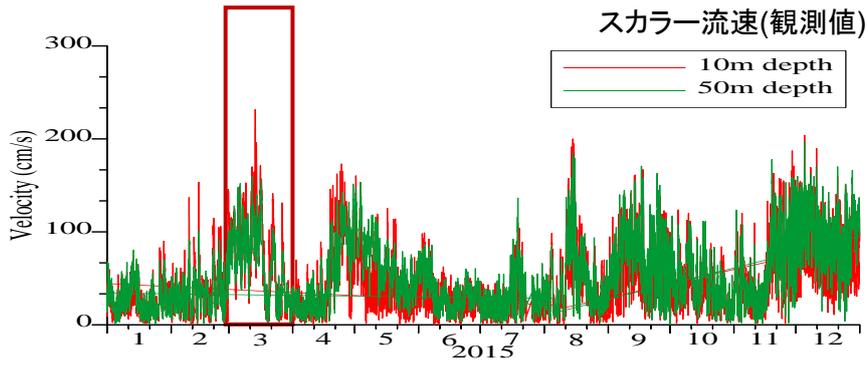


図 4-3-4-5 宮崎県沖浮魚礁観測データ(うみさち1号ブイ)

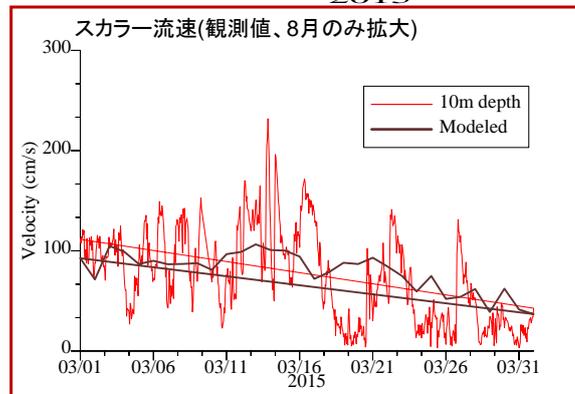
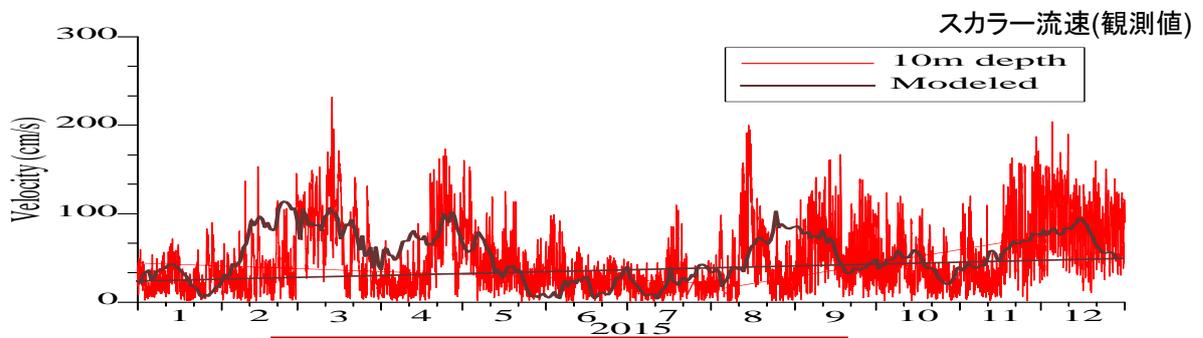


図 4-3-4-6 宮崎県沖浮魚礁観測データと外洋モデル結果の比較

c) 鹿島灘

鹿島灘における観測値と海洋モデル(JCOPE2.1)の底層流速の比較を図 4-3-4-7 に示す。ただし、鹿島灘において流速計を設置した水深は 41m であるのに対し、該当座標のモデル上水深は 154m と差がある点は注意する必要がある。観測期間の最大値は 46cm/s(2014 年 11 月 27 日)であり、台風通過に伴うものと考えられる(図 4-3-4-8)。

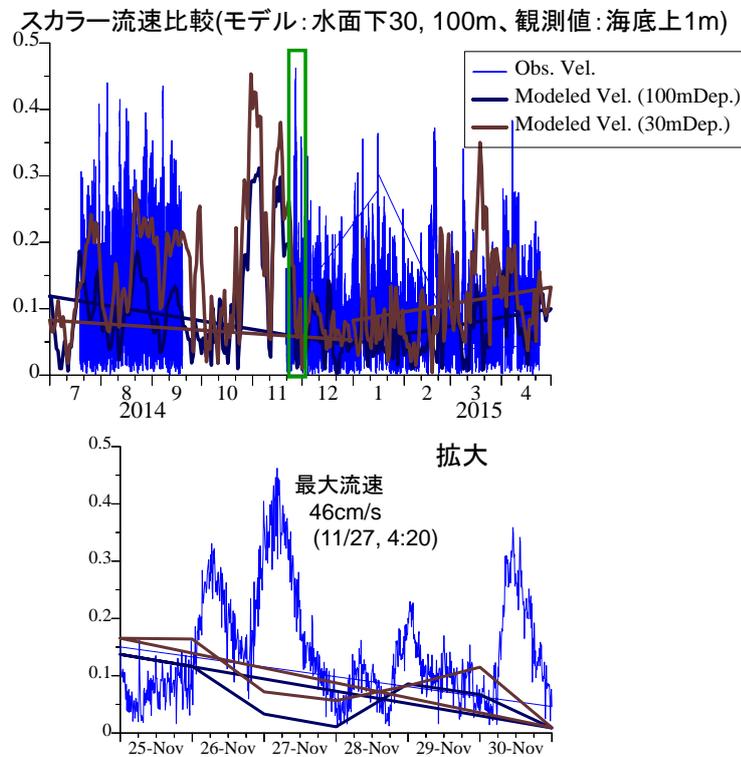
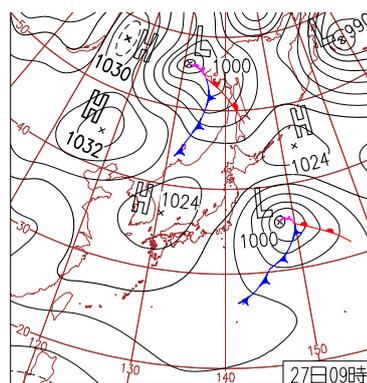


図 4-3-4-7 鹿島灘におけるスカラー流速比較(観測値:海底上 1m、モデル:水面下 30, 100 m)



**27日(木)西～北日本は天気回復**

沖縄・奄美は気圧の谷の影響で曇りや雨、沖縄県与那国空港、石垣市伊原間で 76mm/1h。西～北日本は、低気圧が去り一部雨の所も次第に晴れに。大阪市などでカエデ紅葉。

図 4-3-4-8 2014 年 11 月 27 日における気象概況

d) 隠岐沖

2008年8月の隠岐沖における観測されたスカラー流速と JCOPE との比較を図 4-3-4-9 に示す。日本海を寒冷前線が東進していた 8月19日に期間最大流速が記録された。また、松江の気象観測所における地上風速も、期間中の最大風速を記録しており、最大流速の出現は風速と関係があることが示唆された。スカラー流速値と風速の比較を図 4-3-4-10 に整理する。相関係数は  $R^2=0.104$  であり、ラグ相関もみられなかった(図は省略)。風向に注目すると、観測期間では東西成分の風向が卓越しており、大きい流速が観測されるときは西よりの風向きが多いことが分かった。最大流速の発生要因は風だけではなく、気圧や近隣海域の気象場にも左右されることが想定される。

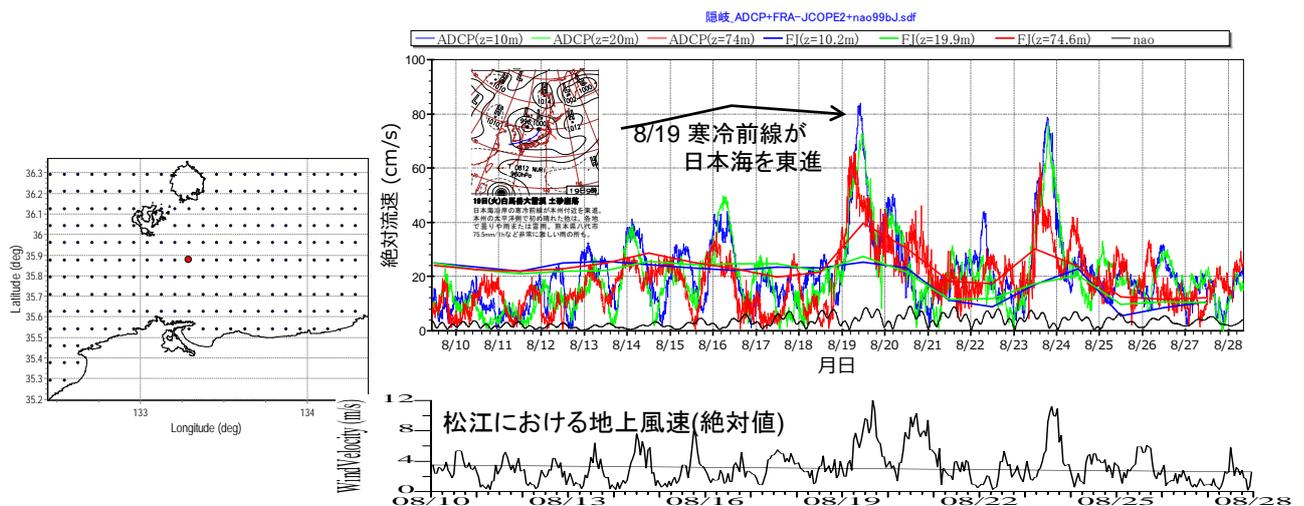


図 4-3-4-9 隠岐沖におけるスカラー流速比較と松江における地上風速

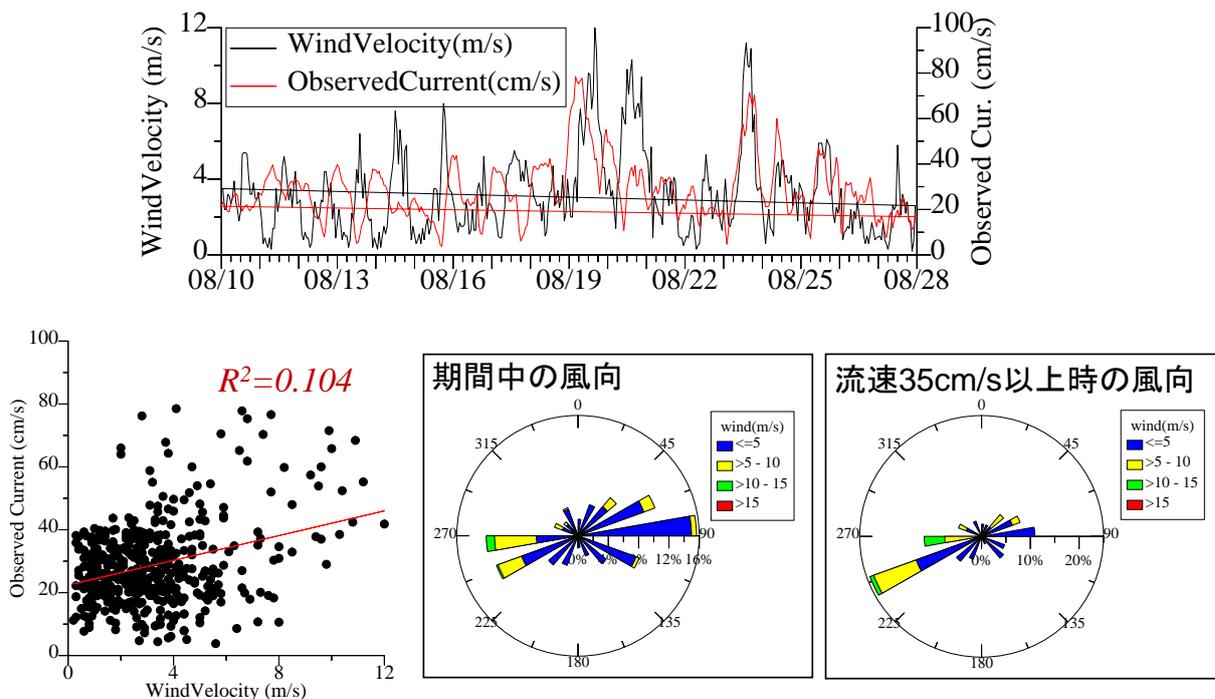


図 4-3-4-10 隠岐沖におけるスカラー流速と松江における地上風速の関係

e) 福島沖

2013年の福島沖において観測されたスカラー流速と、福島沿岸モデルから得られた流速の比較を図4-3-4-11に示す。2013年10月16日に大型台風が通過し、観測値の期間最大値0.67m/sが記録されたが、沿岸モデルの方でも多少の時間のずれはあるもののその値に近い最大値0.58m/sが出力された。このときの小名浜における風は、風速10m/s以上の南向きの風であった。

一方、2013年4月3日に南岸低気圧の通過に伴い、福島沖でも59cm/sの比較的大きい流速が観測されたが、この流速はモデル上では表現されていない。小名浜における風は、最大流速が良好に再現されていた10月16日と同じく南向きであり、この最大流速の発生原因は不明であった。

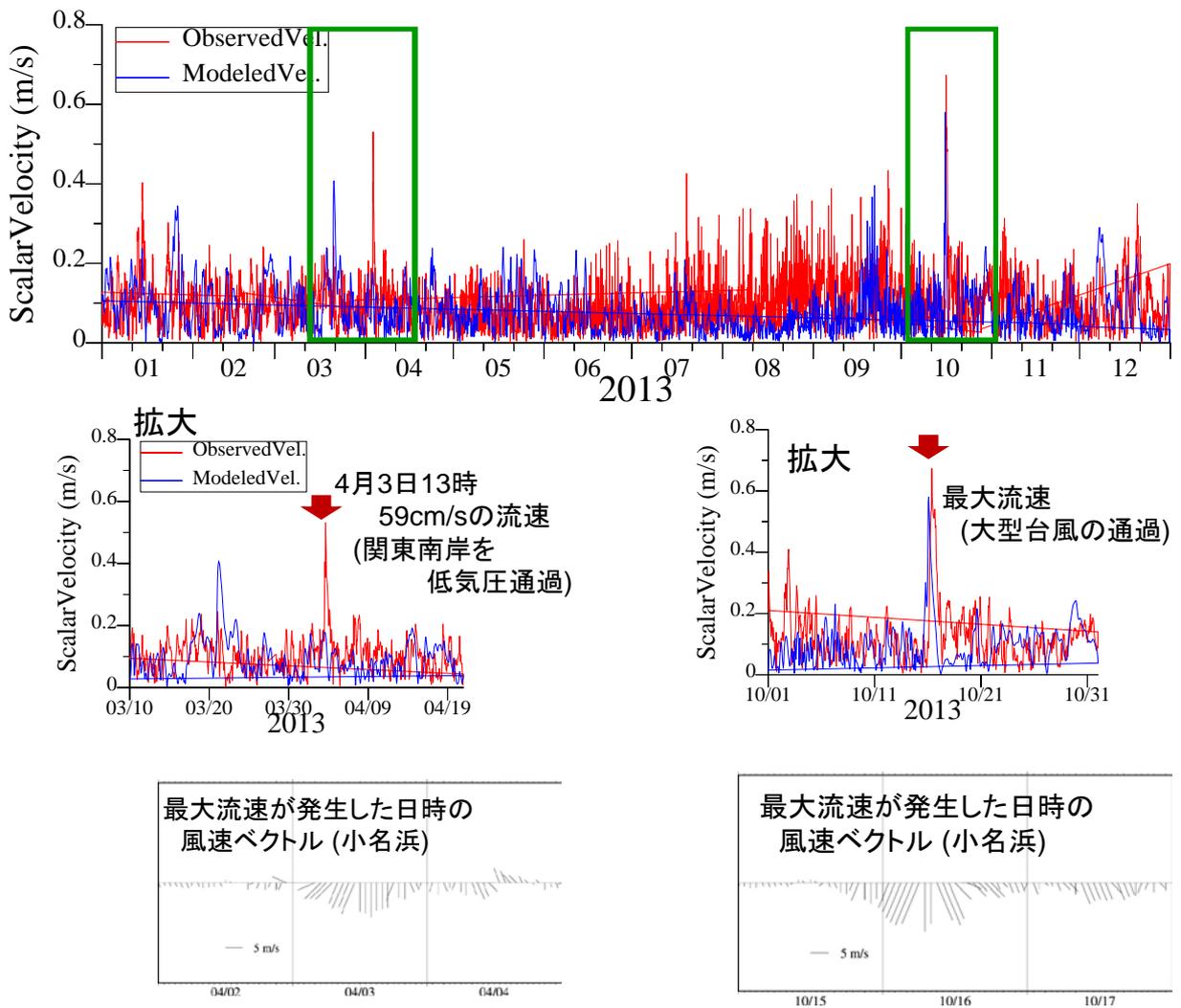


図 4-3-4-11 福島沖におけるスカラー流速比較と、小名浜における地上風速

f) 海洋モデルを利用する際の留意事項の整理

JCOPE等の外洋モデルに代表される海洋モデルで、再現可能な現象と不可能な現象をここに整理する。図4-3-4-12に黒潮流路の比較を示す。黒潮の最大流速の位置を概略的に表す黒潮流軸の位置など、外洋における平均的な流動場は良好に再現されている。一方で、

局所的な変動を表現することは難しく、例えば豊後水道周辺の水温分布比較を示す図 4-3-4-13 では。豊後水道における急潮発生の要因となる黒潮前線の擾乱は、モデルの空間解像度の不足のため表現されていない。また、低気圧の通過など、気象擾乱に伴うような変動も、時間的・空間的な解像度の不足から、表現することは難しいと考えられる。

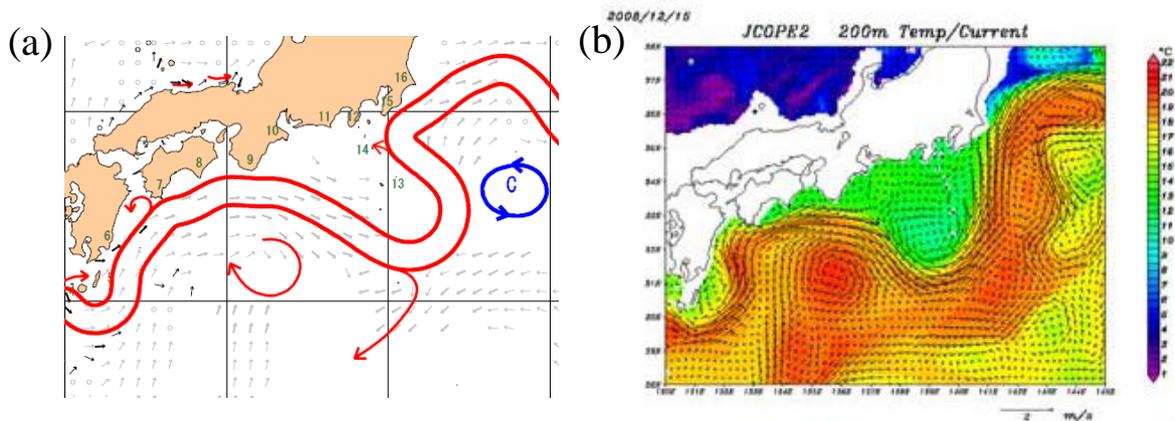


図 4-3-4-12 黒潮流路比較(日本深海技術協会会報、2009 年 1 号)

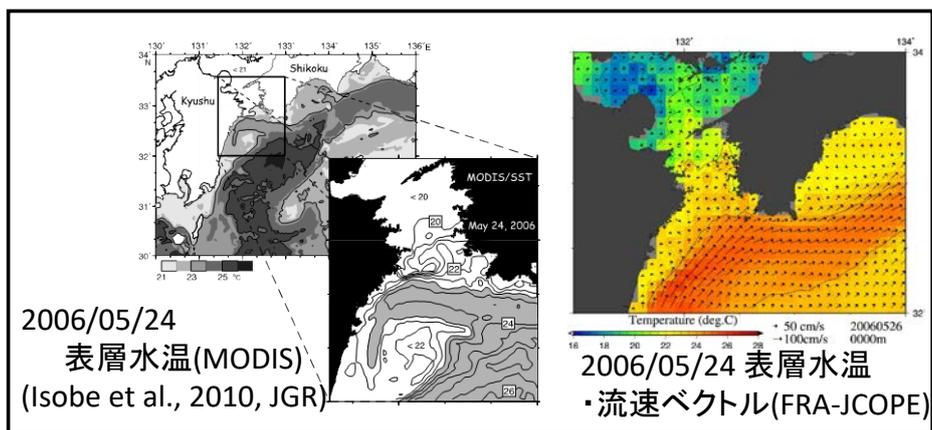


図 4-3-4-13 豊後水道周辺の表層水温比較

### g) まとめ

黒潮の卓越する深海域での流速データとして、高知県沖および宮崎県沖の表層型浮魚礁で観測されている流速データを入手した。平均的な流速変動は外洋モデルによって比較的よく再現されているが、再現されない短周期の変動成分があり、最大流速の推定は不可能であることがわかった。また非常に大きい流速（高知沖で 2.9m/s、宮崎沖で 5m/s 超）が記録されることがあり、データの品質チェックの必要性和外洋モデルでは表現不可能な外力(風など)との関連性が示唆された。

福島県沖に加えて茨城県沖、島根県沖の事例を検討し、島根県沖の観測データでは地上風の風向との関係が示唆された。

沿岸モデルの適用例として福島沖の事例を検討し、最大流速が再現できる場合とできない場合があり、さらなる検証の必要性が示唆された。

### 3) 今後の課題

今後の課題として以下が挙げられる。

(1) 大水深域での最大流速の要因の把握

表層型浮魚礁データが蓄積されている宮崎沖～高知沖周辺海域において、大きい流速 (>2m/s)の発生メカニズム(発生の同時性や伝播方向、または局所性、周辺気象データとの関係など)の解析

(2) 沿岸域での最大流速の要因の把握と波浪との関連性（同時性や向き）の検討

観測データの蓄積と沿岸モデルが構築されている福島沖を対象に、①気象擾乱通過時の流速発生または伝播過程の解析と、②極大波との同時性および向きの関係の検討

(3) 流れに関する設計条件の決定に関する留意事項の整理

#### 4-4 既存漁場施設の機能発揮状況調査

##### (1) ねらい

近年、日本周辺海域は、海水温上昇による魚種の分布変化が報告されており、今後、漁業活動における魚種や漁獲量に大きな影響を与えると考えられている。魚礁は、①広く分布する魚類を集める機能、②稚仔魚の保護や棲処を与える機能、③食物連鎖の強化による魚類の生産性を高める機能などが知られている。海水温上昇に代表される気候変動はこれらの機能にも影響を与えると予想されるが、魚礁の詳細なメカニズムの解明には至っていない。このため、魚礁機能が高いレベルで持続している要因を抽出し、その機構を明らかにすることが、今後の気候変動や環境変動にも影響されにくい魚礁の利用方法および機能回復、向上の提案につながると期待される。以上のことから、本課題では、下記の3つの小課題を設定し、長期間にわたる漁獲量等の時系列データが蓄積されている海域を対象に、既存の漁場施設(漁場や藻場礁)データ(設置位置、水深、規模など)および魚礁の利用実態、魚種、漁獲量を整理し、魚礁の継続利用に関わる各種要因分析を行う。

##### 1) 既存魚礁の実態把握調査

長期間にわたる漁獲量等の時系列データが蓄積されている海域(長崎県)を対象に、既存の魚礁データ(設置位置、水深、規模など)および魚種、漁獲量、海域環境などの変動傾向について整理しデータベースの作成を行う。

##### 2) 魚礁利用状況の把握

現在の魚礁の蝟集状況や利用状況について、常設型魚群探知機や聞き取り調査を実施し、魚礁利用の現状についてデータ構築を行う。

##### 3) 魚礁機能発揮状況に関する解析手法の検討

上記で示した2つの小課題で得られた結果に基づいて、統計的手法を用いて魚礁機能の特徴を明らかにする方法を検討する。

##### 4) 藻場礁の機能発揮状況の現状と機能回復対策の整理

藻場礁の機能に関する実態調査の結果から、藻場礁の現状と課題を整理し、藻場礁の機能診断の手法と機能修復方法を検討する。

##### (2) 方法

##### 1) 既存魚礁の実態把握調査

長崎県を対象海域として、魚礁データならびに標本船調査による漁獲データの整理を行った。データは、(一社)水産土木建設技術センター長崎支所より提供されたものを利用した。魚礁データとして、「魚礁の位置座標」、「魚礁の種類(角形、FP、大型、など)」、「設置方法(単体、乱積、併設、など)」、「設置水深」、「投入された魚礁の個数」「空 m<sup>3</sup>」、「経過年数」を整理した。漁獲データは、2013年12月～2014年11月の1年分を対象に対馬8漁船、壱岐5漁船、五島6漁船、県北5漁船、県南6漁船について、「漁獲を行った位置座標」「1回あたり漁獲した魚種ならびに漁獲量」について整理した。対象魚種はマダイやキダイなど長崎県全海域で整理されている魚種について整理した。魚礁ならびに漁獲データはGIS上で可視化ならびに解析できるようにデータ構築した。

## 2) 魚礁利用状況の把握

千葉県館山市館山湾沖合に設置している大型魚礁を対象に、連続観測による魚礁集積効果を把握する技術を開発するために、常設型魚群探知機によるモニタリング観測を実施した。常設型魚群探知機はGPSおよび魚群探知機が搭載されているブイ(SV6000ES型、緑星社製)(以降、魚探ブイ)で、衛星通信によりリアルタイムで魚群情報を得ることができる。本調査では、館山湾沖水深70mに設置している

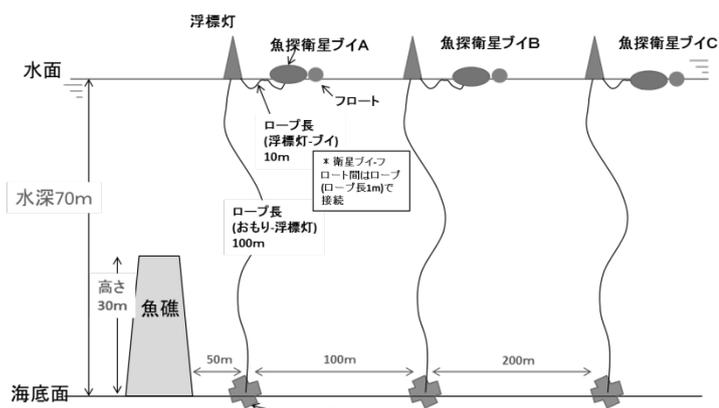


図 4-4-1 魚群探知付き衛星ブイによる魚礁周辺での観測計画。

大型魚礁に対して、50m、150m、350mの距離で魚探ブイを設置した(図4-4-1)。観測条件は、水中の解像度を5mとして、1時間に1回、9レプリケートの反射強度(dB)を収集するように設定した。入手したデータは、1時間あたりの反射強度の平均値を算出した。また、出現傾向を把握するために、各魚探ブイの誤差を考慮して、解析に利用する水深帯(20m~60m)の反射強度の平均値および標準偏差から、標準化した反射強度を算出した。

## 3) 魚礁機能発揮状況に関する解析手法の検討

1) で整理したデータをもとに、以下の条件で漁獲量と魚礁設置条件について解析を行った。条件1: 海域を同じ漁法および魚種を年間通して漁獲している壱岐・対馬海域とした。条件2: 漁法をGPSログのデータから推定される混獲の少ない一本釣り漁法を対象とした。条件3: 対象魚種を魚礁で多く漁獲されているマダイおよびキダイとした。データの抽出はGIS上から次のように行った。①漁獲データの位置座標から魚礁で漁獲したデータを抽出した。その際、魚礁の中心座標から直径200mの範囲で漁業活動した場合に魚礁で漁獲したとみなした。②GIS上で空間検索を行い、どの魚礁(200m範囲)で漁獲したのか抽出した。これにより、各魚礁でどの魚種がどれくらい漁獲されたか関連付けすることが可能となる。③どのような魚礁で漁獲されているかを明らかにするために、一般化加法モデル(Generalized Additive Model: GAM)を利用した。このモデルは、線形モデルと異なり、環境勾配が非線形でも当てはめることができる。本モデルでは、応答変数を各魚種のCPUE、説明変数を水深、投入個数、空m<sup>3</sup>、水深と空m<sup>3</sup>の交互作用とした。なお、水深、投入個数、空m<sup>3</sup>についてはsmoothingによる線形予測とした

## 4) 既存藻場礁の機能発揮状況調査と機能診断手法の提案

水産庁が平成28年3月に各自治体の藻場礁担当者に対して藻場礁の現状と管理に関するアンケートを実施した。その結果から藻場礁の管理の実態および課題を整理し、藻場礁の機能診断の手法を検討する必要性を確認した。そこで、磯焼け対策ガイドラインや水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン、先駆的に検討されている自然環境調和型構造物の機能診断手法等を参考に、藻場礁の機能診断の手法と機能修復方法を検討した。

### (3) 結果

#### 1) 既存魚礁の実態把握調査

長崎県の魚礁について次のように整理された。魚礁の配置形態は 6 種に分類され、「並型」が 915 カ所、「まとまり」が 400 カ所、「乱積」が 176 カ所、「併設」が 298 カ所、「併設および乱積」が 60 カ所、「単体」が 133 カ所となった(図 4-4-2)。それぞれの配意されている平均水深は、「並型」では 37.5m、「まとまり」では 68.9m、「乱積」では 74.6m、「併設」では 75.7m、「併設および乱積」では 73.3m、「単体」では 89.7mであった(図 4-4-3)。経過年数については、全魚礁の約 22%が設置から 30 年以上経過しており、また「並型」、「併設および乱積」および「乱積」ではほとんどの施設が設置から約 30 年以上経過している。一方で「併設」「まとまり」「単体」については、設置から 5 年未満の魚礁も約 15% 程度あることが明らかとなった(図 4-4-4)。空 m<sup>3</sup>については、比較的水深の浅い場所に設置される「並型」の堆積は小さく、沖合に設置される「単体」は 200~5500m<sup>3</sup>までの様々な大きさの魚礁が設置されている(図 4-4-5)。

長崎県の漁獲量データは、5 つの海域「対馬」「壱岐」「五島」「県北」「県南」で整理される。漁獲量データはその他魚種を含めて 40 種類あり、全海域共通の魚種はマダイ、県南を除く 4 海域で共通の魚種はメダイであった。以降、マダイおよびメダイの分布の特徴について示す。マダイは対馬南部、壱岐西部、五島北部で多く漁獲されていること、また漁獲される範囲が狭いことから、局所的に分布していることが確認できる(図 4-4-6)。メダイはマダイと異なり、対馬、壱岐海域の広い範囲で分布していること、また、漁獲量のプロットが同じ位置にあることから、魚礁を利用していることが確認できる(図 4-4-7)。以上のように、GIS 上で整理し、可視化することで各魚種の分布および漁場の特徴を示すことが可能となる。

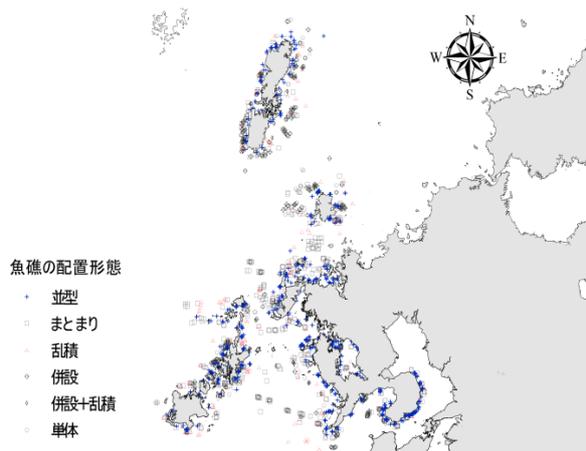


図 4-4-2 長崎県における魚礁の形態別の配置.

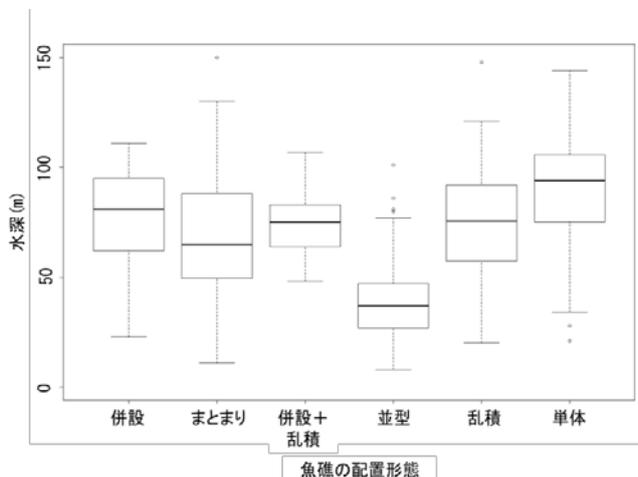


図 4-4-3 長崎県における魚礁の形態別の設置水深.

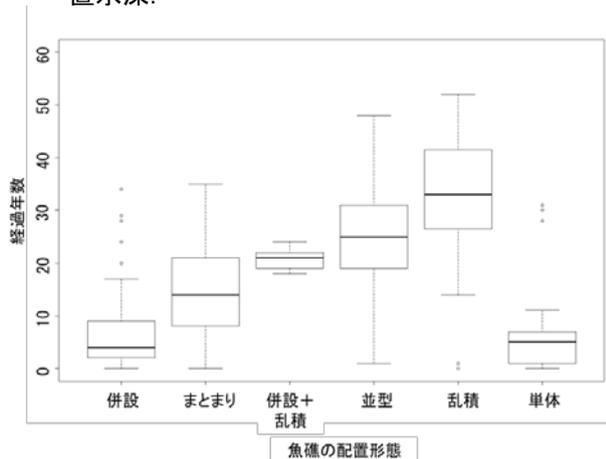


図 4-4-4 長崎県における魚礁の形態別の経過年数.

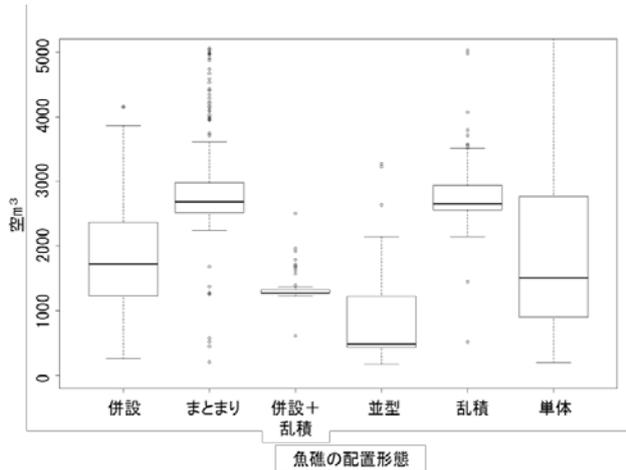


図 4-4-5 長崎県における魚礁の形態別の空  $m^3$ .

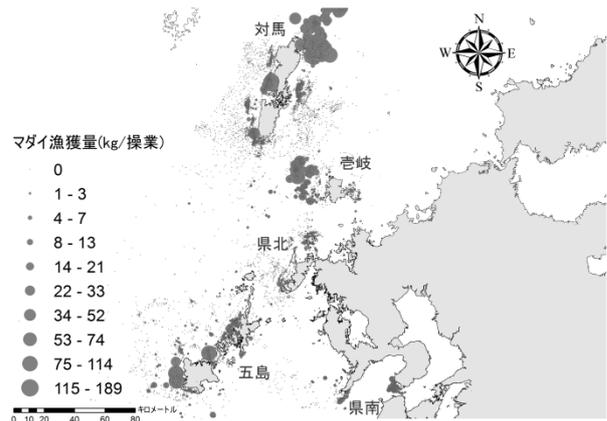


図 4-4-6 長崎県におけるマダイ漁獲量分布.

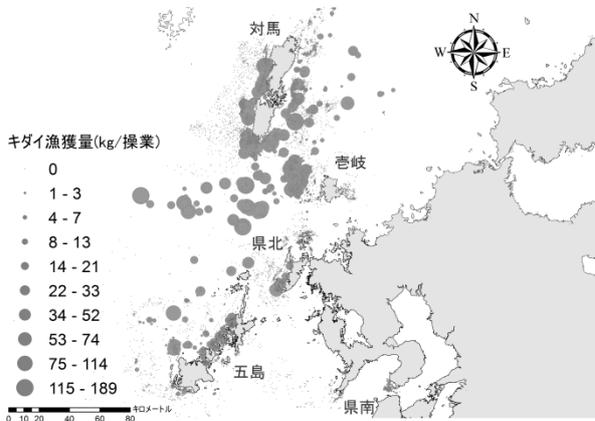


図 4-4-7 長崎県におけるキダイ漁獲量分布.

## 2) 魚礁利用実態の把握

魚探ブイで 3 地点を同時に観測した期間は、2017 年 1 月 25 日～31 日となった。以後、共通の観測機関の結果について整理する。魚礁に一番近い魚探ブイは時化で大きく移動していた。また、反射強度は西から東への流れがある時に高くなる傾向が見られた(図 4-4-8)。各水深帯の反射強度の時系列推移から、魚探ブイは水深 65m～70m の海底面を感知していることから、水中の反射強度は魚群であると考

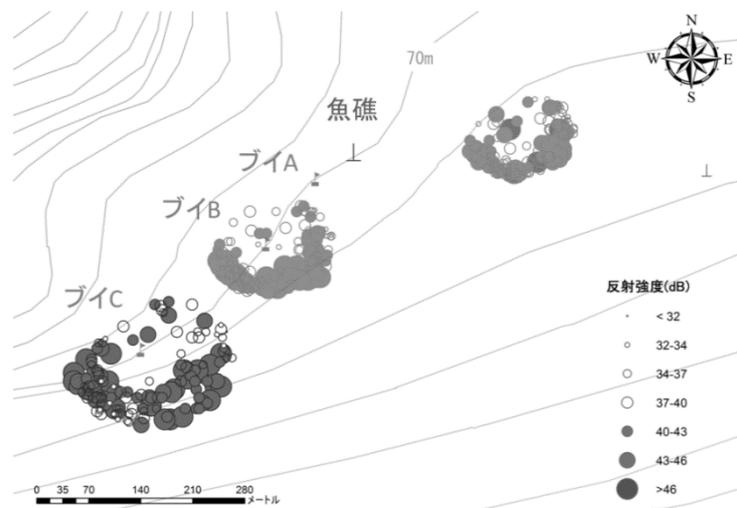


図 4-4-8 千葉県館山市館山湾沖合における魚群探知付き衛星ブイの観測位置。白丸は平均反射強度より低い観測、色のついた丸は平均反射強度より高いことを示す。ブイ A は魚礁から 50m の位置に設置していたが、岸側へ移動していることが確認できる。

えられる。また、表層から水深 15m までは波による攪乱で気泡などによって反射強度が高くなることが確認された(図 4-4-9)。以上のことから、水深 20m~60m で観測された反射強度を、魚群に対する反応とした。これに基づいて、各ブイの 1 観測あたりの対象水深の全反射強度の平均値を算出し、水中あたりの反射強度とした。

観測期間における各ブイの反射強度は、30~55dB の範囲を変動した(図 4-4-10)。水中あたりの標準化した反射強度を算出して累積した反射強度の時系列推移を求めたところ、魚礁に近いブイ A と魚礁から遠いブイ C で同程度の魚類の反応が確認された。また、全ての魚探から夜間から早朝にかけて魚類が集積している傾向が示された(図 4-4-11)。以上のことから、反応の大きさは異なるが、出現傾向は一致することから、魚礁から 300m の範囲では魚礁による蝟集効果があると推定される。

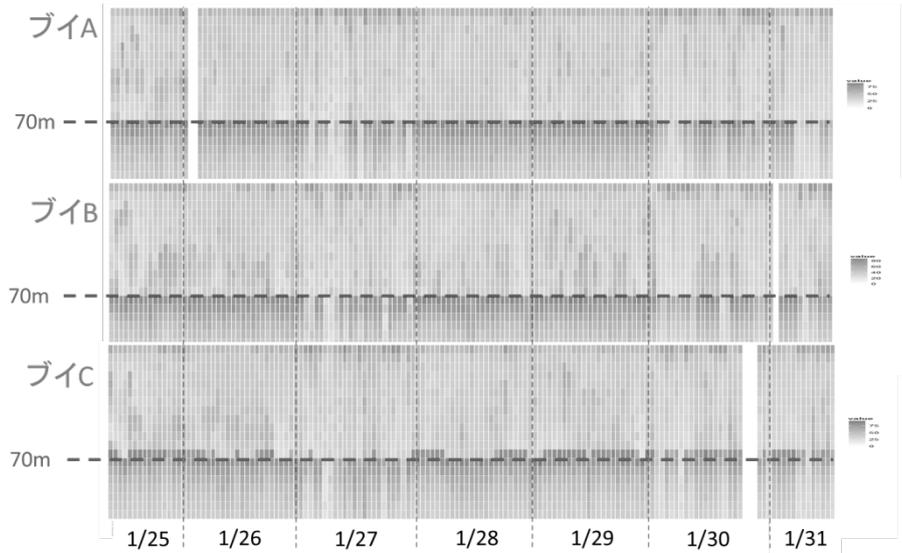


図 4-4-9 各魚群探知付き衛星ブイの反射強度の水深帯別の時系列推移。縦軸は水深(5m/セル)、横軸は観測日を示す。色が黒いほど、反射強度(dB)が高いことを示す。水深 70m に高い反射強度が観測されており、海底面をとらえていることを確認できる。

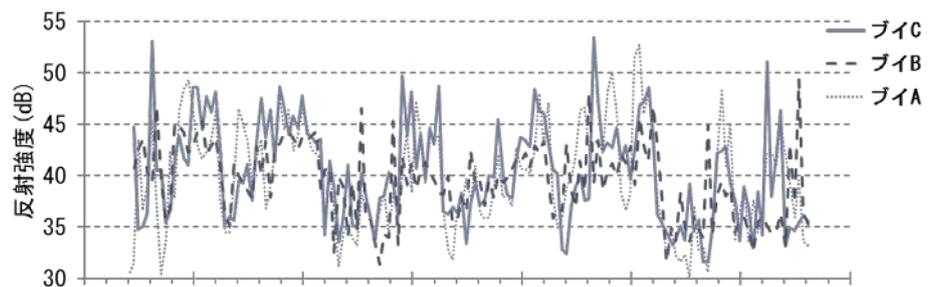


図 4-4-10 各魚群探知付き衛星ブイの水中あたりの反射強度の時系列推移。

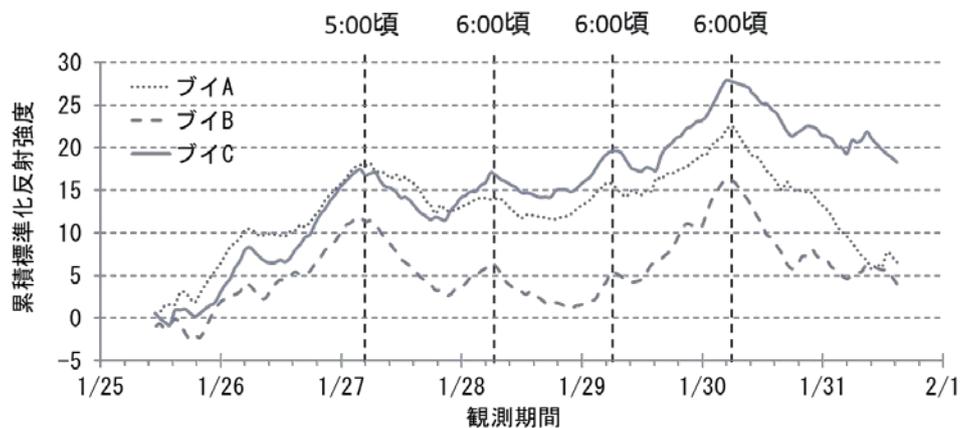


図 4-4-11 各魚群探知付き衛星ブイの水中あたりの標準化した累積反射強度の時系列推移。

### 3) 魚礁機能発揮状況に関する解析手法の検討

魚礁の配置特性と各魚種の漁獲量の関係性について、一般化加法モデル(Generalized Additive Model)を用いて解析した。なお、魚礁は「単体」「乱積・まとまり」の配置形態別に抽出して、単体魚礁については説明変数の投入個数を除き、設置経過年数を加えて解析を行った。乱積・まとまり魚礁において、マダイの漁獲量は魚礁を設置している水深が有意に関係していること、また水深と空 m<sup>3</sup> の交互作用に有意な相関が認められた(図 4-4-12)。

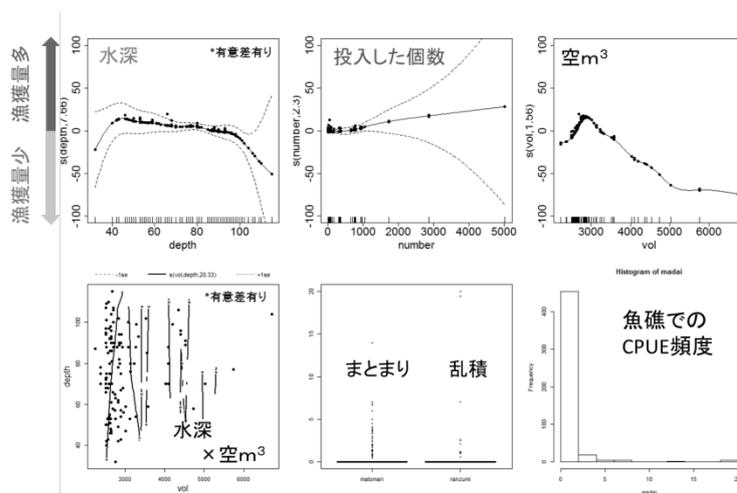


図 4-4-12 一般化線型モデルによるマダイ漁獲量と乱積・まとまり魚礁の設置条件の関係。実線がスプライン予測による平均値、点線は 95%信頼区間を示す。

メダイでは、投入する魚礁の個数が多いほど漁獲量が多くなる関係性が示された(図 4-4-13)。単体魚礁において、マダイでは有意な設置条件は示されなかったが、乱積・まとまり魚礁と比べて水深の深い位置で漁獲量が高い傾向が見られた(図 4-4-14)。一方、メダイでは、水深と空 m<sup>3</sup> の交互作用に有意な相関が認められた(図 4-4-15)。

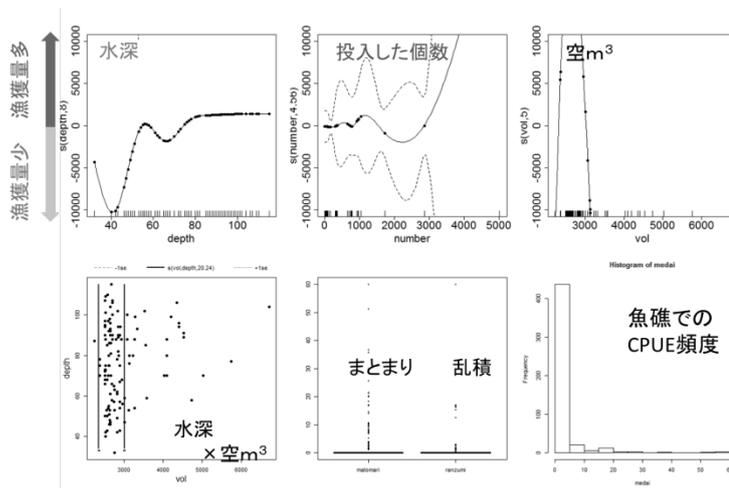


図 4-4-13 一般化線型モデルによるメダイ漁獲量と乱積・まとまり魚礁の設置条件の関係。実線・点線は図 4-4-12 と同じである。

これは、例えば、乱積・まとまり魚礁のマダイおよび単体魚礁のメダイでは、水深と空 m<sup>3</sup> との交互作用に有意な相関があった。これは、特定の水深に魚礁の体積を大きくすることで漁獲量が増えることを示している。以上のように、本年度は対象魚種および設置形態によって、漁獲量と魚礁設置の関係性を示すことを可能としたと考える。

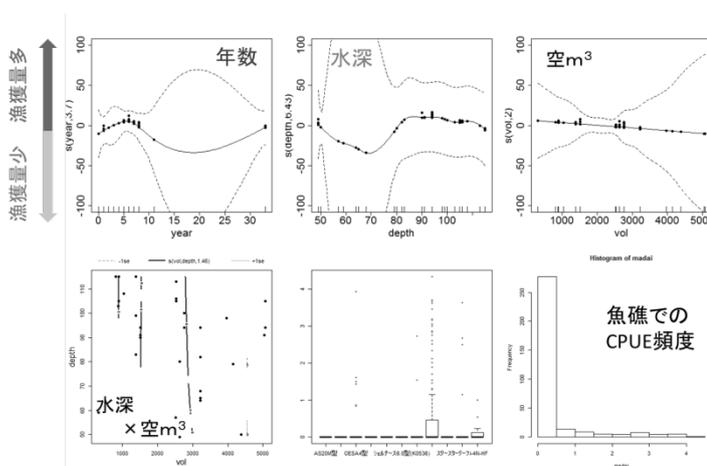


図 4-4-14 一般化線型モデルによるマダイ漁獲量と単体魚礁の設置条件の関係。実線・点線は図 4-4-12 と同じである。

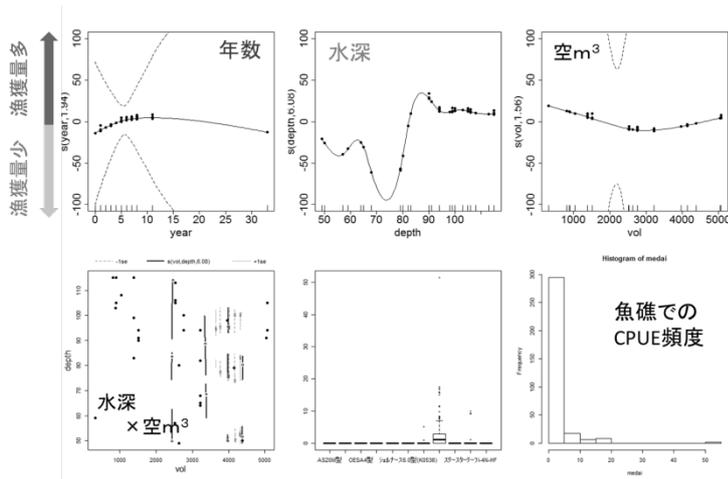


図 4-4-15 一般化線型モデルによるメダイ漁獲量と単体魚礁の設置条件の関係。実線・点線は図 4-4-12 と同じである。

#### 4) 既存藻場礁の機能劣化の実態と機能診断手法の検討結果

既存の藻場礁の機能に関する自治体へのアンケートでは 40 都道府県から 90 施設について回答があった。対象は水産基盤整備事業、農山漁村整備交付金等により整備された増殖場（藻場礁）である。アンケートの結果、藻場礁の機能を定期的に潜水目視している管理者は約 1/3 であり、その 2 割は藻場礁の機能劣化を認識していた。機能劣化の判断は海藻の繁茂状況であり、施工後 3~5 年で気づくことが多い。機能劣化の約 1/4 は基質の埋没・移動・転倒、約 1/3 が海藻の消失であった。その要因は波浪、漂砂、植食動物による食害との回答であった。これらの機能劣化の程度は管理者の判断に委ねられており、機能劣化の標準的な指標が望まれた。

このような経緯から、藻場礁の機能をできるだけ定量化し客観的に評価することが望まれた。そこで、水産基盤施設ストックマネジメントのガイドライン等を参考にして、藻場礁の機能診断手法の全体スキームを図 4-4-16 のように提案した。機能診断は機能評価、要因特定、対策・効果判定の 3 段階の構成とした。簡易調査により藻場礁の機能を評価し、機能低下と判断された場合は潜水調査や機器による詳細調査を実施する。詳細調査により藻場の形成

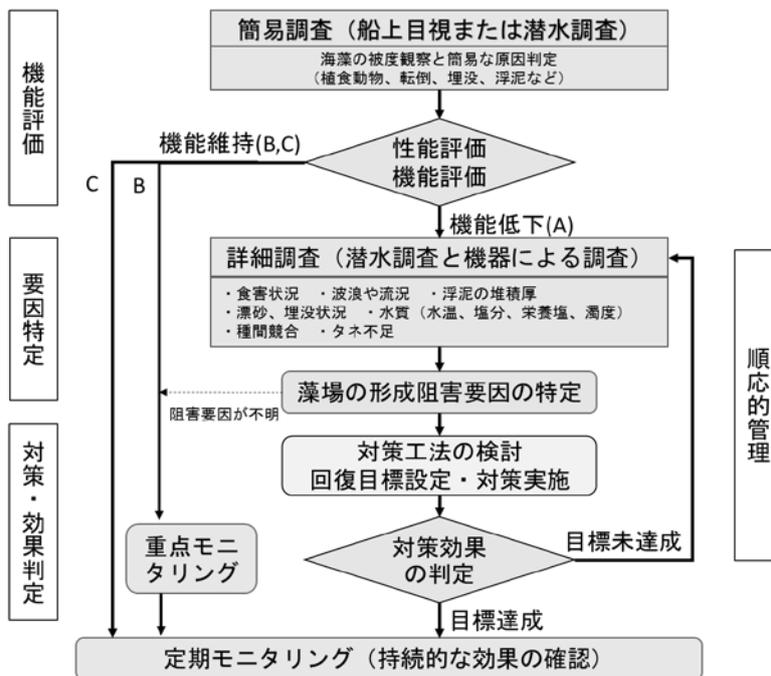


図 4-4-16 藻場礁の機能診断・対策の全体フロー

阻害要因を特定後、回復目標を設定し、その要因を排除する対策を実施する。その対策で目標が達成できれば通常の定期モニタリングを継続する。達成できない場合は藻場の形成阻害要因の特定が誤っていた可能性があるため、詳細調査に戻り、順応的に取り組む。

このフロー図の判断方法について以下のように整理した。

簡易調査は漁業者や管理者が船上目視あるいは潜水調査を行い、藻場礁の数カ所で海藻の被度を測定する。被度は表 4-4-1 を参考に各調査点の劣化レベル (a, b, c) を評価する。なお、簡易調査では、磯焼けの原因を想定しやすくするため、植食動物による食害の有無、転倒・埋没、浮泥の堆積などの基質の状況を判る範囲で観察する。海藻の生育は水温等の環境変化に大きく影響されるため、天然藻場においても、その現存量は年変動をする。したがって、簡易調査では藻場礁に近い同水深帯の天然藻場で被度調査を実施し、天然礁の被度と同程度以上であることを確認する。藻場礁の健全度を機能低下 A、中庸 B、保持 C の 3 段階に判定し (表 4-4-2)、機能低下 A と判断された場合は詳細調査を実施する。

詳細調査は潜水調査を基本とし、必要に応じて計測機器による環境調査を実施する。アンケート調査結果を参考に、調査項目には植食動物による食害の状況、基質の状態 (転倒・移動) や波浪や流況調査、浮泥の堆積厚調査、漂砂による埋

表 4-4-1 海藻の被度階級と劣化レベル

被度区分の基準	区分	被度階級	被度(%)	劣化レベル
海底面がほとんど見えない	濃生	5	75<	c
海底面より植生の方が多い	密生	4	50~75	
植生より海底面の方が多い	疎生	3	25~50	b
植生はまばらである	点生	2	5~25	
植生は極めてまばら	極く点生	1	<5	a
植生はない	なし	0	0	

表 4-4-2 藻場礁の健全度評価

健全度	施設の状況	評価の判定基準
A	海藻の被度がかなり低く、藻場創出機能が低下している。天然藻場に比較して被度が低い。	a が過半数を占める
B	藻場創出機能は保持されているが、長期的に機能低下の可能性がある。天然藻場と同程度であり、継続観察が必要である。	A、C以外
C	機能の低下は認められず、十分な機能を保持している。天然藻場の被度と同程度以上である。	c が過半数を占める

表 4-4-3 植食動物の分布密度による劣化レベル

劣化レベル	植食性魚介類の分布密度 (下記より選択。複数可)		
	キムササギ	エゾハナヅク	小型巻貝
a	6個/m <sup>2</sup> 以上	10個/m <sup>2</sup> 以上	40個/m <sup>2</sup> 以上
b	1個/m <sup>2</sup> ~6個/m <sup>2</sup>	2個/m <sup>2</sup> ~10個/m <sup>2</sup>	13個/m <sup>2</sup> ~40個/m <sup>2</sup>
c	1個/m <sup>2</sup> 未満	2個/m <sup>2</sup> 未満	13個/m <sup>2</sup> 未満

表 4-4-4 基質の転倒や埋没による劣化レベル

劣化レベル	基質の転倒・破損	基質の埋没
a	ほとんどのブロックが転倒・破損している	長期にほとんどの基質が砂に埋没
b	ブロックの一部が転倒・破損している	基質の一部が一時的に砂に埋没
c	異常なし	異常なし

表 4-4-5 浮泥の堆積と付着動物の着生による劣化レベル

劣化レベル	浮泥の堆積	付着動物の競合
a	長期にわたり基質や葉面に1mm以上の浮泥が堆積	全面に付着動物が優占
b	基質に浮泥が部分的に堆積	付着動物被度が50%以下
c	異常なし	異常なし

没の有無、水質調査、他の付着生物との競合の状況、タネの供給の有無等を把握する。植食動物はウニ類、小型巻貝の生息密度と海藻の被度に関する既往の調査事例を参考にして、藻場の形成に影響を与えない生息密度を提案した（表 4-4-3）。ただし、植食性魚類については判断基準とすべき既往の研究調査事例がなく、課題が残された。核藻場を目的としたカゴ付き藻礁ブロックでは転倒すると機能しないため、基質の転倒や埋没については藻場礁の構造により判定が異なる（表 4-4-4）。浮泥の堆積については、既往の研究事例を参考に浮泥の堆積厚による判定を提案し、カキやフジツボ等の付着動物との競合による海藻の着生面積の減少も考慮した（表 4-4-5）。これらの判定から藻場の形成阻害要因を特定し、劣化レベルごとに対策手法を提案した（表 4-4-6）。

表 4-4-6 機能低下の要因の除去・緩和のための対策

機能の低下要因	機能保全の検討項目	ソフト対策	ハード対策
ウニによる食害	嵩上げ、流動促進		○
	ウニ除去、ウニフェンス	○	
小型巻貝による食害	巻貝除去	○	
砂による埋没	嵩上げ		○
浮泥の堆積	嵩上げ		○
基質の転倒による基質不足	再設置		○
競合生物による着生場所の不足	磯掃除（基質更新）	○	
海藻のタネ不足	母藻移植・播種	○	
貧栄養化	施肥・深層水利用	○	
透明度の低下による光量不足	嵩上げ		○
	水質浄化		○
有害物質による水質汚濁	水質浄化		○
塩分低下	水深変更		○

#### (4) 今後の課題

##### 1) 既存魚礁の実態把握調査

本年度は、平成 26 年の漁獲データおよび魚礁の形態や設置条件について GIS 上でデータ整理を行い、統計量として提示した。一方で、漁獲データとしては海域ごとに整理されている魚種がばらばらであること、漁法を GPS のトラッキングログから推定していること、魚礁データとしては魚礁の高さ情報が不足しているおり、今後、正確な統計量の算出や統計解析に利用できるように情報を追加および再整理していく必要がある。

##### 2) 魚礁利用状況の把握

魚礁蝟集効果については、魚群探知付き衛星ブイ(魚探ブイ)を利用することで、魚礁に蝟集する空間スケールや蝟集する時間帯を明らかにすることを可能とした。今後は、魚探ブイが移動したことから安定した係留系の構築、漁期である春から夏を含めた季節変動を把握し、魚礁による蝟集効果の空間スケールを示すことが課題となる。さらに、長期間運用を実現するための観測計画を構築が必要である。

##### 3) 魚礁機能発揮状況に関する解析手法の検討

漁獲量と魚礁の設置条件の関係性について示すことは可能となった。一方で、設置している魚礁の底質・流況・魚礁間の空間配置の考慮・地形など、魚類の蝟集に関わる他の物理的条件の情報が不足している。また、漁獲量データとしては、魚種、海域、設置形態でデータを抽出することで、解析に使えるデータ数は著しく減少する。本年度解析したマダイ、メダイについては平成 26 年の全海域における約 19500 操業のうち約 170 操業しか利用できなかった。今後、解析に利用できる操業数を増やし、これらの情報を整理することで、より精度の高いモデルを構築して、複数の魚種について具体的な魚礁設置条件を示すことが必要である。

##### 4) 藻場礁の機能診断の診断基準の検討

藻場礁の機能診断の検討では、定量的、客観的に診断ができるように診断手法の全体スキームと既往の調査事例を参考に診断基準案を示した。診断手法の考え方や劣化レベルの基準値は多くの事例を参考に、さらに合理的な基準を設定して管理者が判断しやすいようにする必要がある。また、対策に必要な事業費を考慮し、合理的で経済的な対策のあり方を検討することが望ましい。さらに、基準化に当たっては、提案した機能診断について、現地での検証を行うことが必要である。

## 4-5 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討

### 4-5-1 ねらい

中層浮魚礁は、水産基盤整備事業において平成 13 年度以降各地方自治体にてのべ 342 基（平成 27 年度末まで）が設置され、事業継続中である。一方で現在（平成 27 年度調査）までに流出事故としては 16 件の報告がある。

流出事故の原因は、係留索の経年劣化や波浪・潮流ではなく、人為的な要因であることが示唆されている。また、実証試験（平成 25～27 年度）で流出警報発信機を引上げて機器の機能や部材劣化などについて調査した結果、防水性能や耐久性に課題が残されていることが示唆された。そこで、本事業では流出警報発信機による確実な警報システムの構築と流出事故の軽減技術について検討することを目的とする。

### 4-5-2 方法

#### (1) 流出警報発信機の防水性能・耐久性能の検討

従来の流出警報発信機を改良した「従来改良型」と新規に開発された「新型」の 2 機種種の流出警報発信機の性能を評価する。流出警報発信機は海中に 10 年設置することが必要条件であることから、防水性能と耐久性能を評価する。

防水性能については、設計の耐圧水深 300m を条件とし加圧試験を行い、浸水が無いことを確認した機器を実海域試験に設置した。（次年度設置 12 ヶ月後に回収し再度、浸水の有無を確認する。）

#### (2) 流出軽減技術の検討

過去の中層浮魚礁流出事故に関する情報整理を行い、事故原因と有効な対策方法の検討を行った。

また、中層浮魚礁設置都県が採用している流出軽減措置のアンケート調査を行い、現状把握した。

さらに、係留部材を対象としてロープメーカーが行った擦れ摩耗試験の結果の提供を受け、対策方法の効果検討の参考とした。

#### (3) 既存中層浮魚礁の部材劣化試験

設置後約 7 年と 8 年を経過して流出した中層浮魚礁の係留部の残存強度試験を実施し、経年劣化の程度の把握を行った。

### 4-5-3 結果

#### (1) 流出警報発信機の防水性能・耐久性能の検討

現在市販されている 2 機種種の流出警報発信機の概要を下表に示した。

表 4-5-1 流出警報発信機の概要

名 称	新 型	従来改良型
-----	-----	-------

特 徴	多くの実績を有する耐圧フロートの内部に通信機器を配置することで水密性を確保している。	金属部品の組立製品であるため、最新の防食設計により水密性を高めている。	
環境条件	使用海域	イリジウム衛星通信圏内	イリジウム衛星通信圏内
	耐圧	30 気圧(水深 300m)	30 気圧(水深 300m)
	耐温度	-20℃ ～ +60℃	0℃ ～ +40℃
制御	起動	沈設前に手動で起動させることで、海中で 2 時間毎の通信装置が動作する。浮上後は 1 時間毎(変更可能)に通信動作が起動する。	海中において起動しない。浮上後、圧力センサーまたはフロートスイッチの何れかで起動する。安全性を高めるため 2 重の起動方法である。
	記録	起動時から通信動作をロガーにて記録する。(試験機には未搭載)	圧力容器内への漏水を検知する水位ロガーを同封し記録する。(試験機には未搭載)
通信諸元	送信データ	時刻、緯度経度、電源電圧	時刻、緯度経度、電源電圧
	通信間隔(浮上後)	1 回/1 時間(変更可能)	1 回/1 時間(変更可能)
電源諸元	電池種類	アルカリ電池	リチウム電池
	電池寿命	10 年経過後に浮上した場合、1 回/1 時間の通信間隔で約 480 時間(20 日間)の通信動作が可能。	浮上後、1 回/1 時間の通信間隔の場合、約 200 時間以上の通信動作が可能。
標体諸元	寸法	φ 448mm	φ 270mm×720mm
	全質量	約 20kg	約 27kg
	主要材質	ABS 樹脂	SUS316
	姿図		

### 1) 加圧試験

実海域の中層浮魚礁に取り付けるにあたり、初期の防水性能の確認のため、高圧実験水槽による加圧試験を行った。

- ・ 試験日：従来改良型：平成 28 年 8 月 24 日  
 新型：平成 28 年 9 月 9 日

・試験場所：日油技研工業株式会社 川越工場内高圧実験水槽(埼玉県川越市)

・試験条件：

加圧値は、流出警報発信機の耐圧水深 300m 仕様から 3MPa とした。

加圧方法は旧太洋無線型の開発段階での条件を踏襲し、下記の 2 方法で試験を行った。

A 試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 無負荷から 1MPa ごとに 5 分保持し、3MPa まで加圧</li> <li>・ 3MPa で 15 分保持</li> <li>・ 試験水槽から取り出して目視確認、通信試験</li> </ul>
B 試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 無負荷から 3MPa のサイクル試験 15 回 (無負荷と 3MPa で 5 分保持)</li> <li>・ 試験水槽から取り出し目視確認、通信試験</li> </ul>



高圧実験水槽（密閉作業中）



高圧実験水槽（開放状態）



目視確認（新型）



目視確認（従来改良型）

・試験結果

新 型	従来改良型
-----	-------

A 試験、B 試験とも目視確認には問題無く、正常に通信したことを確認。  
 製造時に気密試験を行い内部から空気漏洩がないことを確認済み。  
 加圧試験で通信確認できたことで止水が保たれていると判断し、実海域試験へ使用した。従来改良型同様、乾燥剤を内蔵している。



気密試験状況

A 試験、B 試験とも目視確認には問題無く、正常に通信したことを確認。  
 後日工場へ持ち帰り、分解、漏水確認を行ったところ、電子機器室への止水が保たれていることを確認できたため、乾燥剤を入れて再組立をし、所定の部分を接着シールし、実海域試験へ使用した。



再組立状況

## 2) 実海域試験 (設置)

長崎県が平成 25 年度(26 年 3 月)に設置した中層浮魚礁に 2 機種種の流出警報発信機(従来改良型と新型)を平成 28 年 9 月 23 日に設置した。

### ・設置した中層浮魚礁と場所

設置水深：礁体ヘッド位置海面下 40m (設置位置の水深 86m)

礁体タイプ：剛体タイプ



図 4-5-1 中層浮魚礁設置地区

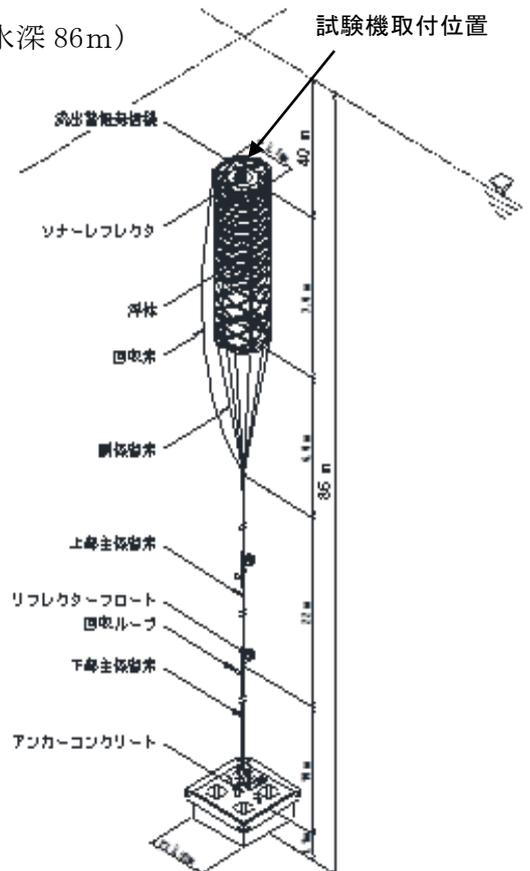


図 4-5-2 中層浮魚礁の概要

・潜水取付作業

作業日：平成 28 年 9 月 23 日(金) 天候：晴れ、気温：22.5°  
 水温：22°C(50m) 水面 24°C、最大風速：NNE 4.1m/s  
 波高：0.5m~1.5m、流速：0.3~0.8kn、 流向：N

b) 流出警報発信機の取付状況



従来改良型



新型



設置当初からの発信機



作業状況

・今後の調査予定

平成 29 年度 (約 12 ヶ月後)に回収し、防水性・耐久性について調査を行う。

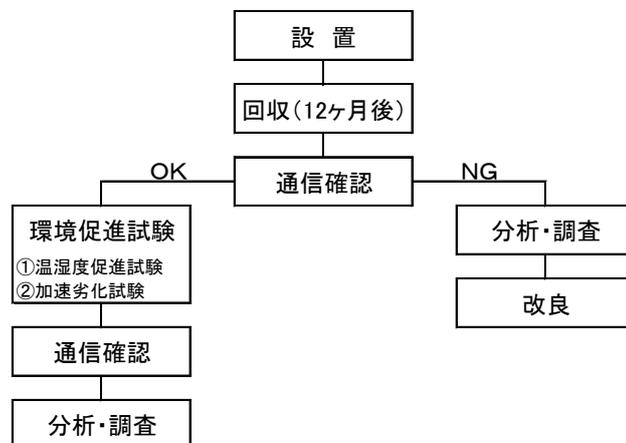


図 4-5-3 回収後の試験フロー

調査方法は回収直後に通信を確認し、受信した場合は環境促進試験を行うことで試験機に負荷を与え、再度通信を確認し、劣化状態を調査・分析する。回収直後に受信できなかった場合においても調査・分析し、今後の改良に役立てる。

### 3) 通信試験(付着生物の影響試験)

従来改良型は通信基盤部の外側を覆うキャップが浮上時に脱落する構造となっているため、付着生物も脱落し通信障害が出ない対策を施している。しかし、新型は通信基盤部を覆う耐圧容器(ABS 樹脂)に生物が付着した状態で浮上・漂流するため、付着生物(海水)による通信への影響を確認する必要がある。そこで、生物が付着した場合の新型の通信状態を以下の方法で確認した。

試験日：平成 29 年 2 月 2 日

試験場所：宮崎県宮崎港

試験方法：

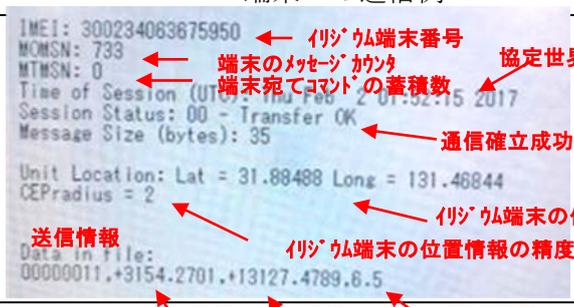
耐用年数 10 年を経過して回収された中層浮魚礁の耐圧フロート(ABS 樹脂・付着生物付)を入手し、半割に加工した後、準備した流出警報発信機の上へ被せて通信試験を行った。

通信の確認は、流出警報発信機が発信した流出情報を陸上局端末で受信できたかどうかで判定した(通信システムの流れ：流出警報発信機→イリジウム衛星→陸上局→インターネット通信→陸上局端末)。なお、浮上・漂流時の状態を再現するため、付着物に海水をかけ湿潤状態にしてから流出警報発信機を起動し、通信間隔を 5 分間隔とし 30 分間の通信を確認した。

試験結果：

付着物(被度約 95%)に覆われた状態において、6 回の通信試験のうち 5 回の通信を確認した。未受信(1 回)については、イリジウム衛星の天空位置及び電波状態の影響によるものと思われた。

表 4-5-2 通信結果と端末通信例

通信回数	受信時間	通信結果	端末への通信例
1 回目	10 : 52	○	
2 回目	10 : 57	○	
3 回目	11 : 02	○	
4 回目	11 : 08	○	
5 回目	11 : 13	×	
6 回目	11 : 18	○	



試験状況(左：回収された中層浮魚礁、右上：流出警報発信機、右下：付着物付試験機)

耐圧フロートへの付着生物は、主にカイメン類・ゴカイ類・フジツボ類であった。表面を覆うのは主にカイメン類であった。付着厚は最大で 3cm 程度のフジツボが確認された。付着量としては礁体表面に比べ少なかった。



耐圧フロートへの付着生物状況

## (2) 流出軽減技術の検討

過去の流出事故、設置都県が採用している流出軽減措置、係留索の擦れ摩耗試験等、既往知見を情報収集・整理し、流出軽減に有効な対策方法の検討を行った。

### 1) 流出事故の検証

過去の流出事例を以下にまとめた。

16 事例のうちロープが残存していない K,N,P 3 例を除き、判断の付く 13 例については、切断面が揃っているなど、劣化や強度不足での切断とは考えにくい痕跡があり、漁具による擦れ摩耗または故意による人為的な切断と推定された。

また、切断した係留索の種類は副係留索が 1 例、上部係留索(ワイヤー外装ロープ)が 9 例、下部係留索(裸ロープ)が 3 例、不明が 3 例であった。

切断箇所は上部係留索(ワイヤー外装ロープ)の上端、シンカー直上など様々で規則性は見いだせなかった。

表 4-5-3 流出事故事例 (1) ※切断水深は無潮流時の推定値

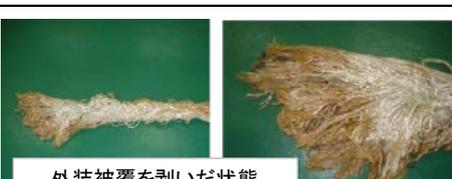
事例	設置日 流出日 回収日	設置水深 /切断水深※ 切断カ所	係留索仕様	切断状況	原因調査	写真
A	H20.3	172m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ65mm	切断したヤ ンの長さが 揃っている	アンカーか何かで引っ張ら れ、横方向に強い力を受け、浮魚礁全体が移動。 更にアンカーが転倒し、アン カーフィンが下部索と接触し たことにより切断。	
	H20.3	169m				
	H20.3	下部主係留 索の下端か ら1.4m				
B	H20.3	172m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ65mm	切断部の 被覆部及び 芯繊維の 切り口が直 線状	角のある物体によりせん 断、加圧を受け切断。切 断部に鉄イオン反応有り。	
	H20.3	93m				
	H20.3	上部主係留 索の上端か ら47m				
C	H20.3	164m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ65mm	切断部及び 上部索の 外層皮膜に ずれ、蛇腹 状の皺	上部係留索の端末部に 引っかかった状態で横 方向に引っ張られ、浮魚 礁全体が移動。その際 に被覆のずれが生じ、接 点で屈曲、加圧を受け切 断。	
	H20.3	150m				
	H20.3	上部主係留 索の上端か ら117m				
D	H20.3	水深81~97m	主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ30mm	複雑な切断 面。ワイ ヤーがズタ ズタに切れ ている	横向きに何らかの強い 力が加わり切断。	
	H20.12	80m				
	H20.12	アンカーとの連 結部から 15.8m				
E	H20.3	水深81~97m	主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ30mm	ちぎれたよ うな切断 面。鋭利な ものではな い	切断部分に何かが巻き ついて捻られながら切 断。何が巻きついたのか 特定はできず。	
	H21.4	35m				
	H21.4	主係留索の 上端から 2.6m				
F	H21.6	水深84~100	主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ32mm 副係留索: ワイヤー外装ホリス テル Φ35mm	係留索の 途中で切断 されている	鋭利なもので切断。	
	H21.11	29m				
	H22.2	副係留索				
G	H15.6	1327m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ30mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ40mm	切断面が 揃っている	切断面は鋭利なものに よるせん断に酷似。繊維 間融着無し。	
	H22.11	108m				
	H22.11	上部主係留 索の上端か ら54m				
H	H16.7	1188m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ30mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ40mm	40cm毎に 外装が剥 離。切断面 が揃ってい る	剥離は回転体巻付に酷 似。切断面は鋭利なもの によるせん断に酷似。繊 維間融着なし。流出7日 後250km離れた位置で 通信、翌月設置場所近く で回収	
	H19.1	442m				
	H20.2	上部主係留 索の上端か ら390m				

表 4-5-4 流出事故事例 (2) ※切断水深は無潮流時の推定値

事例	設置日 流出日 回収日	設置水深 /切断水深※ 切断カ所	係留索仕様	切断状況	原因調査	写真
I	H18.3	798m	上部主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ32mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ36mm	切断面が 揃っている	切断面は鋭利なものに よるせん断に酷似。繊維 間融着なし。	 
	H22.8	409m				
	H22.8	下部主係留 索の下端か ら388m				
J	H15.12	74-86m	主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ39mm	切断面が 揃っている	切断面は鋭利な外的要 因によるもの	
	H17.9	32m				
	H17.9	礁体から3m 付近				
K	H15.12	74-86m	主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ39mm	-	-	
	不明	-				
	H21.6	-				
L	H15.2	1264-1287m	上部主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ30mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ40mm	係留索の 断面の約 半分が揃っ ている	係留索の断面の約半分 が鋭利なもので切断され た形跡あり	 
	H22.9	549m				
	H22.9	下部主係留 索の上端か ら200m				
M	H20.3	155m	上部主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ65mm	係留索の 切断面が 揃っている	・切断部の直上は十分 な強度が残っている。 ・切断面が鋭利なエッジま たはナイフによる切断面と 類似している。	 
	-	152m				
	H27.8	下部主係留 索の下端か ら1.7m				
N	H23.5	1634m	上部主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ30mm	(不明)	・流出回収時に上部索を 切断(下写真)したことか ら、流出原因は不明。 ・残存している副係留索 は十分な強度が残って いる。	 
	-	(不明)				
	H27.7	(不明)				
O	H20.3	156m	上部主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ65mm	過荷重によ る撚りや繊 維の乱れも 軽度で繊維 端が概ね 揃っている	・十分な強度が残ってい る。 ・切断面は鋭利なエッ ジまたはナイフによる切 断面に類似している。	 
	-	103m				
	H28.5	上部主係留 索の下端か ら42m				
P	H25.3	200m	上部主係留索: ワイヤ-外装ポリアリ レート Φ36mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ50mm	(不明)	何らかの物体と接触し、 浮体下部が欠損し上部 のみ流出した。又は係留 索の切断により流出し、 漂流中何らかの物体と 衝突し、浮体上部のみ漂 着した。	 
	-	(不明)				
	H28.5	(不明)				

2) 既存の流出軽減方法

中層浮魚礁を設置している 8 都県が、どのような流出軽減措置を用いているか、現状を把握するため、アンケート調査票を郵送し、用いている流出軽減措置技術について回答を依頼した。

全 8 都県で流出軽減措置を講じており、その種類は係留索の補強(外装)であった。外装ロープの長さは、浅海タイプについてはすべて、深海タイプについては礁体下部から 200~600m で、漁具による擦れ損傷の軽減を理由としていた。予想される漁法としては、延縄、まき網、曳縄、旗流し、ソデイカ漁が挙げられた。

表 4-5-5 既存の流出軽減方法

都県	水深区分	措置の有無	流出軽減措置の種類	軽減措置を講じる理由	予想される漁法	ワイヤー外装ロープ等の長さ	自由意見	事故事例
a	深海	有	樹脂被覆ロープ	地理的条件から安全を見込んで	-	礁体下部から 600m	-	
b	深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	延縄	礁体下部から 330m まで	-	
c	浅海 深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	-	礁体下部から 300m	-	JKL
d	浅海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	まき網、延縄、曳縄など	全てワイヤー外装ロープ	本県の中層型浮魚礁の流出事例では人為的な要因による切断と考えられる事例が多くみられた。	ABCD EFM O
e	浅海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	-	全てワイヤー外装ロープ	-	
f	深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	-	礁体下部から 200m まで	-	IP
g	深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	旗流し、延縄	礁体下部から 550m	-	G
h	深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	ソデイカ漁	礁体下部から 500m	-	HN

### 3) 係留索の擦れ摩耗試験

ワイヤー外装ロープについては、これまでワイヤーの種類や量と擦れ摩耗耐性に関する知見が公開されていなかった。そこで擦れ摩耗試験を行っているロープメーカー2社から外装スペックと試験結果の提供を受け、以下にまとめた。ワイヤー外装により、被覆の無いロープより擦れ摩耗耐性能が向上しており、SUS ワイヤーロープ外装については40 k g 荷重 300mmストローク 50 往復（総接触長 30m）でワイヤーロープは健全、亜鉛メッキ鉄線外装については7.5 k g 荷重 150mmストローク 1000 往復（総接触長 300m）でワイヤーは健全であった。このことから、ワイヤー外装されていない裸ロープと比較すると、擦れ摩耗による切断の危険性は相当程度軽減できると考えられた。

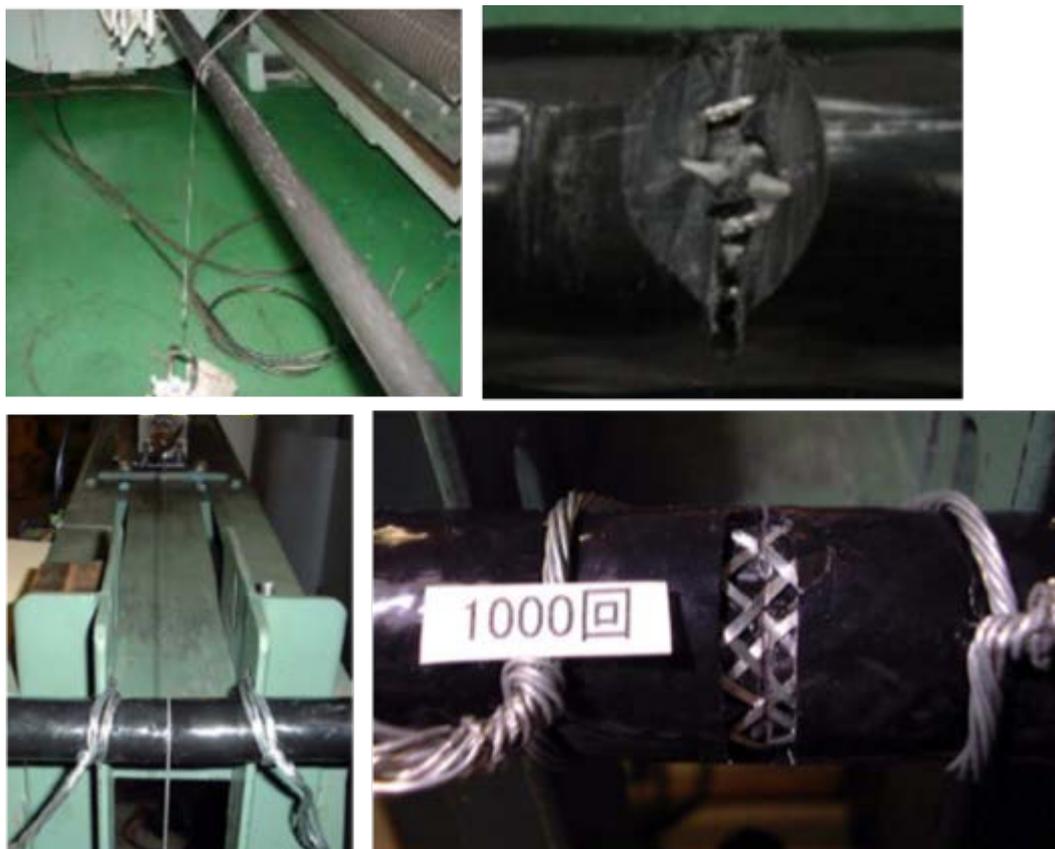


写真 擦れ摩耗試験の状況

表 4-5-6 擦れ摩耗試験結果

No.	試験ロープ仕様				接触ワイヤー仕様		結果	備考
	ロープ径 /外径 (mm)	ロープ素材	ワイヤー種	被覆 樹脂	荷重 (kg)	ストローク (mm) /往復回数		
1	30 /38	ポリエステル 8打ち	SUSワイヤーロープ Φ1mm12本 約75g/m	ポリエチレン	40	300 /50	ワイヤーロープは健全	2種の保護加工と裸ロープの比
2	30	ポリエステル 8打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.5mm	ポリエチレン	40	300 /50	鉄線は未切断。但し被覆損傷有	
3	40	ポリエステル 8打ち	-	-	40	300 /50	ヤーンの折損有り	
4	22	リアリート 12打ち	-	-	7.5	150 /300	切断無	裸ロープの往復回数と劣化の関係
5	22	リアリート 12打ち	-	-	7.5	150 /1000	表面のフィラメントに毛羽立ちが発生	
6	22	リアリート 12打ち	-	-	7.5	150 /1200	表面のフィラメントがわずかに切れ始める	
7	22	リアリート 12打ち	-	-	7.5	150 /2000	最外層ヤーンの半分が切れる	
8	22 /30	リアリート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /500	被覆表面に軽度の傷が発生	保護加工ロープの往復回数と劣化の関係
9	22 /30	リアリート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /1000	外装被覆が破れ、ワイヤー編組へ達する	
10	22 /30	リアリート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /2000	ワイヤーの一部に断線発生	
11	22 /30	リアリート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /2500	一対(左右)の編組が切断し、直下の被覆に深く傷が入る	

試験はすべて乾燥状態で実施。接触ワイヤーは#29 1×7 約0.9mm

#### 4) 流出軽減策の検討

以上を踏まえ、さらに流出軽減を図るための対応策を検討した。

##### ① 係留システムの改良

事件事例を係留索種別、切断原因別に分類し、それぞれの対策案を示した。

上部索等で切断したもののうち5例は切断面がそろっており、故意による人為的切断と推定された。これらの切断は不可抗力であり、係留索の強度アップを図っても切断を防止することは困難と考えられた。

上部索等で切断したもののうち4例と下部索で切断した4例は、故意による人為的な切断とは限定できないものの、強い力が加わって切断しており、漁具等による擦れ摩耗の可能性も考えられる。なお、切断箇所はいずれも200m以浅であり、前述の擦れ摩耗試験の結果を踏まえ、ワイヤー外装ロープによる補強を行うことで、一定程度防護効果があるものと判断された。

表 4-5-7 係留索種別、切断原因、対策案

係留索種 ※	事例	切断原因	対策案
上部索等	B,E,F,G,J	切断面がそろっており、故意による人為的な切断と推測される	切断は不可抗力であり、係留索の強度アップを図っても流出軽減は困難
上部索等	C,D,H,O	切断面がそろっており、故意による人為的な切断、または漁具による擦れ摩耗と推測される	強い力が加わって切断しており、切断面も様々で共通の対策が見いだせない
下部索	A,I,L,M		ワイヤー外装ロープの延長や施工上の理由で外装できない部分への保護カバー装着
	K,N,P	切断部分の係留索が残存せず、原因不明	

※上部索等：副係留索,上部索(ワイヤー外装ロープ)、下部索：(裸ロープ)

##### ② 周知・啓発

流出した礁体や係留索には、漁具等の引掛り、絡まりによる破損箇所が散見されるとともに、上述のように故意による人為的な切断についても、あらかじめ中層浮魚礁があることが分からず、漁具等を誤って引掛けた後、漁具の保全・船体の航行を優先するため、やむをえず係留索を切断していることも考えられる。そのため漁業者への中層浮魚礁の位置情報提供、使用方法の啓発をできる限り徹底することが重要であると思われた。

(3) 既存中層浮魚礁の部材劣化試験

1) 係留索の残存強度試験

長崎県が設置後7年目と8年目に流出した中層浮魚礁の係留索を供試体とした残存強度試験を行い、既存データとともに初期規格強度に対する低減率として整理した結果を以下に取りまとめた。

$$\text{低減率} = \text{強度試験結果} \div \text{初期規格強度} \times 100 \quad \%$$

その結果、低減率に変動幅は見られるものの、全ての値が理論値（年率10%低減）以上であり、中層浮魚礁の係留索の強度保持（設計強度の安全性）が確認された。

表 4-5-8 係留索の初期規格強度に対する低減率

調査年度	魚礁名	副係留索			上部主係留索			下部主係留索			備考
		上端側	下端側	直線部	上端側	下端側	直線部	上端側	下端側	直線部	
H23	M1		67%		100%		100%				水産H23
H23			63%								水産H23
H23			69%								水産H23
H23	M2	74%		68%	100%	100%	80%	85%	84%		水産H23
H23			62%	76%		100%					水産H23
H23			59%	73%							水産H23
H23				76%							水産H23
H23				68%							水産H23
H23				68%							水産H23
H24	K2									81%	メーカー
H24	K4	78%	78%		100%	100%	77%			73%	メーカー
H24		63%	91%								メーカー
H24		64%	76%								メーカー
H24	K5	69%	78%		100%	100%	100%	75%	79%	77%	メーカー
H24		65%	71%				100%				メーカー
H24		66%	68%								メーカー
H24	K6	69%	86%		100%	100%	77%	87%	83%		メーカー
H24		70%	88%								メーカー
H24		71%	85%								メーカー
H25	ON1		76%		85%	88%		68%	68%	65%	メーカー
H25	ON2	73%	78%			96%	100%	74%	73%	80%	メーカー
H25	ON3	74%	75%		92%	87%		79%	74%	75%	水産H25
H25	OH1			100%	100%	100%	100%	92%	96%	100%	メーカー
H25	OH2	73%	78%		100%	96%		74%	73%	80%	メーカー
H25	OH3	74%	75%		92%	87%		79%	74%	75%	水産H25
H25	K11	60%	61%		100%		100%	74%	72%	76%	水産H25
H25	M3	66%	58%		100%		100%	69%		78%	メーカー
H25	M4	54%	60%		100%		100%	73%		79%	水産H25
H26	K10	59%			100%		100%	62%		69%	水産H26
H26	OI3	80%	82%		100%		100%	74%		76%	水産H26
H26	OK1			100%		100%	100%	100%	100%	100%	水産H26
H26	OY2			100%		100%	100%	100%	100%	100%	水産H26
H27	K21	83%			100%	100%	100%	69%	76%	77%	水産H27
H27	N6							94%			水産H27
H28	N6		89%		98%			95%			水産H28
H28	N5		84%		98%			100%			水産H28
データ数		22	23	9	15	13	17	21	13	19	

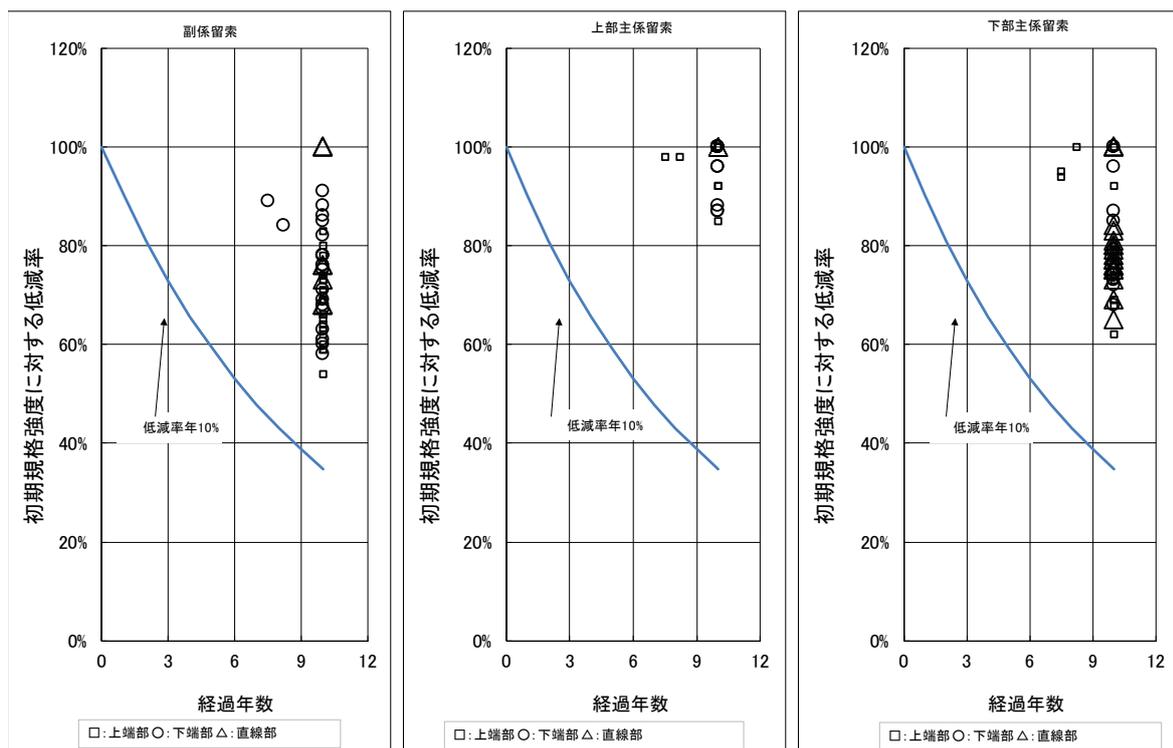


図 4-5-4 初期規格強度に対する低減率

#### 4-5-4 今後の課題

##### (1) 流出警報発信機の防水性能・耐久性能の検討

- ・ 従来改良型および新型の流出警報発信機の防水性能、耐久性能の確認
- ・ 現機種で、防水性能・耐久性能の弱点が判明した場合の改良による防水性能・耐久性能の向上

##### (2) 流出軽減技術の検討

- ・ 誤って中層浮魚礁に漁具を絡ませないために、中層浮魚礁の設置場所を関係漁業者に周知させる効果的な普及啓発方法
- ・ 偶発的な漁具との接触による係留索の破損を軽減させる、コスト面でも実用的な外装方法の開発

## 4. 6 検討委員会等の設置

### 4.6.1 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

#### (1) 委員の選定

的確かつ効率的な技術的助言・指導を得て研究成果の向上を実現するため、平成 28 年度の検討項目を踏まえ、以下の委員を選定した。

#### ●委員会メンバー

	氏 名	所 属 ・ 役 職
委 員	大竹 臣哉	福井県立大学 海洋生物資源学部 海洋生物資源学科 教授
〃	岡安 章夫	東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 海洋システム工学専攻 教授・研究科長
〃	田島 芳満	東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授

#### (2) 検討委員会の開催

##### ・第 1 回検討委員会

日時：平成 28 年 7 月 15 日（金） 13:00～15:00

場所：TKP 神田駅前ビジネスセンターカンファレンスルーム 5G

##### ・第 2 回検討委員会

日時：平成 28 年 12 月 12 日（月） 15:00～17:00

場所：エッサム神田ホール 1 号館 601

##### ・第 3 回検討委員会

日時：平成 29 年 2 月 20 日（月） 10:00～12:00

場所：エッサム神田ホール 1 号館 601

#### (3) 委員会資料

委員会資料及び議事録は、以降にまとめて添付した。

平成 28 年度

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第 1 回検討委員会資料

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の  
施設の設計手法高度化技術検討委員会

第一回委員会

議 事 次 第

日 時：平成 28 年 7 月 15 日（金）  
13:00～15:00

場 所：TKP 神田駅前ビジネスセンター  
カンファレンスルーム 5G

1. 開 会

2. 水産庁挨拶

3. 議 事

- (1) 平成 27 年度第二回委員会の指摘と対応
- (2) 「漁場の施設の設計手法高度化の検討」に関する調査全体計画
- (3) 沈設魚礁の性能照査法の改訂の方向性について
- (4) 着定基質の安定質量算定式の検討について
- (5) 海洋モデルの利用による流れの設計条件の決定に関する検討について

4. 閉 会

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の  
施設の設計手法高度化技術検討委員会 第一回委員会  
配布資料

- 出席者名簿
- 座席表
- 資料 1 平成 27 年度第二回委員会の指摘と対応
- 資料 2 「漁場の施設の設計手法高度化の検討」に関する調査全体計画
- 資料 3-1 沈設魚礁の性能照査法の改訂の方向性について
- 資料 3-2 沈設魚礁の流体力算定法（たたき台）
- 資料 3-3 沈設魚礁（増殖礁を含む）の設計における場合分け
- 資料 3-4 移動量を考慮した沈設魚礁（並型）の安定性評価について
- 資料 3-5 沈設魚礁の安全性の照査法の検討 H28 年度計画
- 資料 4 着定基質の安定質量算定式の検討 H28 年度計画
- 資料 5 海洋モデルの利用による流れの設計条件の決定に関する検討
- 参考資料-1 最大力係数  $CF_{max}$  について
- 参考資料-2 平成 27 年度第二回委員会の議事抄録

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

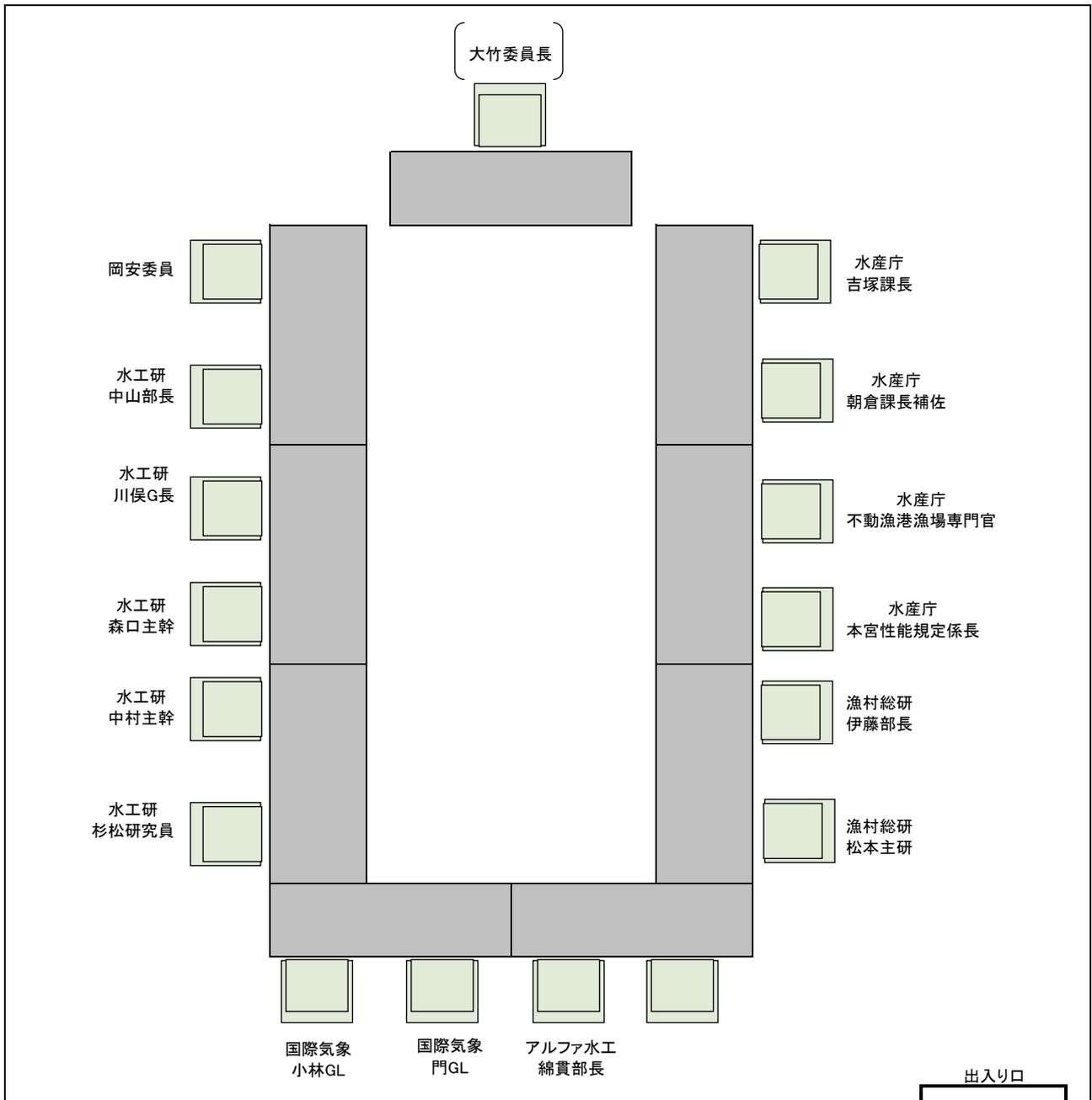
第 1 回委員会 出席者名簿

	所 属 ・ 役 職	氏 名	備 考
委員	福井県立大学 海洋生物資源学部海洋生物資源学科 教授	大竹 臣哉	
	国立大学法人 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 海洋科学系海洋環境学部門 教授	岡安 章夫	
	東京大学 大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授	田島 芳満	欠席
水産庁	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 課長	吉塚 靖浩	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 課長補佐(設計班担当)	朝倉 邦友	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 漁港漁場専門官	不動 雅之	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 性能規定係長	本宮 佑規	
事務局	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 部長	中山 哲厳	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 生物環境グループ グループ長	川俣 茂	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 生物環境グループ 主幹研究員	森口 朗彦	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ 主幹研究員	中村 克彦	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ 研究員	杉松 宏一	
	(一財) 漁港漁場漁村総合研究所 第 2 調査研究部 部長	伊藤 靖	
	(一財) 漁港漁場漁村総合研究所 第 2 調査研究部 主任研究員	松本 卓也	
	株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京本部 技術部 部長	綿貫 啓	
	国際気象海洋株式会社 技術部 銚子事業所 グループリーダー	小林 学	
	国際気象海洋株式会社 技術部 第 2 グループリーダー	門 安曇	

(敬称略)

平成28年度 漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査  
 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第1回委員会 座席表



## 漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

## 平成 27 年度第二回委員会の指摘と対応

指摘者	指摘事項	対応
田島委員	<p>【(1)調査の背景と本調査の検討項目について】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実際に転倒等している事例を集めて課題を抽出することが必要である。</li> </ul>	海中の施設であり、調査事例は極端に少ないと推察されるが、全国的に聞き取りを行い事例収集し、課題の抽出を行うこととする。
田島委員	<p>【(4)沈設魚礁の安全性の照査法の検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・波高、周期のスケールを変えて比較検討することも必要だろう。</li> </ul>	H26 年度にすでに高層魚礁を中心に検討しているが、コンクリート魚礁については今年度の計画の中で検討する。
田島委員 岡安委員 大竹委員長	<p>【(4)沈設魚礁の安全性の照査法の検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・CFmax では抗力のみで加速度による力が表せないのではないか。</li> <li>・注釈としてある KC 数以上では適用できるといった注意書きが必要だろう。</li> <li>・魚礁には、側面に設けて魚類の侵入や流れの通過を促進する穴がある。それに関して、どの程度の大きさならば提案式が使えるといった検討も必要。</li> </ul>	CFmax の理論的根拠を示す資料を作成し、委員に詳細に説明する。 (参考資料 1)
大竹委員長	<p>【(4)沈設魚礁の安全性の照査法の検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・沈下埋没の実態把握が必要である。</li> </ul>	既往の調査等について確認を進める。
大竹委員長	<p>【(4)沈設魚礁の安全性の照査法の検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・移動の許容については、論点を整理して明確にし、課題を抽出すべき。許容値をどこまで設計に取り込めるか。そのためにも移動の実態を知りたい。もう少し議論を深める必要がある。</li> </ul>	安定とみなされる範囲を施設タイプごとに検討、整理する。
田島委員	<p>【(5)海洋モデルによる流動情報の設計への使用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・1/7 乗則の適用の問題性からモデル利用が浮上したが、利用についてはもう少し議論やデータ蓄積が必要であろう。どのような場合なら使えるのか考えてほしい。</li> </ul>	事例をなるべく多く収集し、ご指摘の適用性についても検討する。

## 「漁場の施設の設計手法高度化の検討」に関する調査全体計画

項目	課題	H26 まで実施済事項	H27 実施済事項	H28 実施予定事項	H28 討議・確認事項
着定基質（石材）の安定質量算定手法の検討	算定式の見直しと適用性の検証	算定式の見直し ・水理模型実験 ①回流水槽実験 ②造波水槽実験（単体設置は実験済み） ・現地実験（試験割石は移動せず）	算定式の適用性検証 ・水理模型実験による群体設置／囲い礁付設置、密度の影響の検討 ・現地実験（波浪のより強い場での実験）	<ul style="list-style-type: none"> <li>実験データの再解析と補足実験による提案式の改良または見直し</li> <li>新算定式による設計参考図書改訂案の策定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>データ解析・実験への指導と提案式の妥当性確認</li> <li>波・流れ共存場での適用方法に係る妥当性確認と指導</li> </ul>
沈設魚礁の安全性の照査法の検討	流体力算定法の現地検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>水理模型実験</li> <li>①全体模型</li> <li>②部材模型</li> <li>最大力係数 <math>C_{Fmax}</math> による流体力算定式提案。</li> <li>波・流れ共存場への適用方法の提案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既往整備魚礁の安定計算表の収集と現地調査適地の選定</li> <li>選定施設における波浪・流動観測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測結果を基にした数値解析等による外力算定と対象魚礁の流体力係数の模型実験による計測による新手法の妥当性検証</li> <li>安全率の低い施設の実態に関する事例の蓄積</li> <li>設計参考図書の改訂にむけた取りまとめ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>改訂方針案の審議</li> <li>実験・解析への指導</li> <li>新手法の妥当性確認と指導</li> </ul>
	砂地盤での滑動抵抗の再検討		<ul style="list-style-type: none"> <li>文献レビュー</li> <li>造波水槽での予備実験</li> </ul>	砂地盤での沈下・埋没過程、新手法への適用の模型実験による検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>実験・解析への指導</li> <li>とりまとめ指導</li> </ul>
海洋モデルによる流れに関する設計条件の検討	海洋モデル利用上の留意事項の整理		海洋モデルを用いた数値解析による予測可能性検証（福島長期観測との対比）	<ul style="list-style-type: none"> <li>検証事例の蓄積</li> <li>海洋モデルによる設計流速算定の可能性と課題の抽出</li> <li>設計参考図書改訂にむけた取りまとめ</li> </ul>	方向性、数値解析手法の妥当性確認

平成28年度計画

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①着定基質の安定質量算定手法の検討	■											
②沈設魚礁の安全性の照査法の検討	■											
③海洋モデルの利用による流れの設計条件に関する検討		■										
④漁場の施設の設計手法高度化検討委員会			■				■			■		
			第1回				第2回			第3回		

## 沈設魚礁の性能照査法の改訂の方向性について

沈設魚礁の性能照査法の改訂にはいくつかの選択肢があり、それぞれの概要と課題を以下に整理する。

## 1) 流体力の算定式

案	概要	技術的課題（検証事項）	実施上の留意点
A 案	造波水槽での模型実験により KC 数の関数として決定した $C_D$ 、 $C_M$ を用い、モリソン式で流体力を算出する。	現地検証	• ほとんどの魚礁で造波水槽での模型実験が必要になる。
B 案	ISO 等の標準的設計法との整合性を図りつつ、魚礁の特殊性と設計の実用性を考慮し、流体力を算定する方法（資料3-2、その骨子は以下）。 <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_{Fmax}</math> による簡略式をモリソン式の代替法として併記する。</li> <li>• 流体力係数（<math>C_{Fmax}</math>、<math>C_D</math>、<math>C_M</math>）は KC 数だけでなく、レイノルズ数、波と流れの流速比などにも依存することを考慮して、全体模型法、部材流体力法、経験的推定法のいずれかにより決定する。</li> <li>• 波・流れ共存場での流体力算定の適正化のため、経験的推定法と <math>C_{Fmax}</math> の簡略式を導入。</li> <li>• 部材流体力法により、造波水槽での模型実験なしに設計できる方法を提示。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 現地検証</li> <li>• 部材流体力法のコンクリート魚礁での適用性の検討</li> </ul>	• 造波水槽での模型実験または経験的推定法を行うまでは流体力係数として暫定的に安全側の（過大な）設計値を用いることになる。

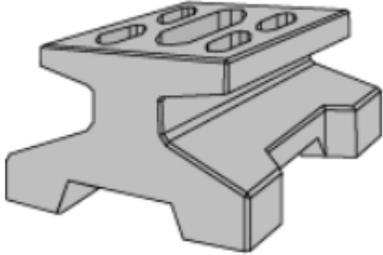
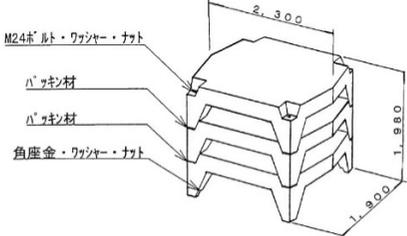
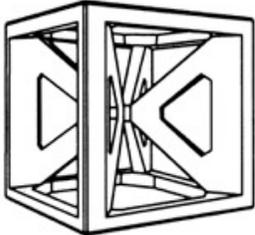
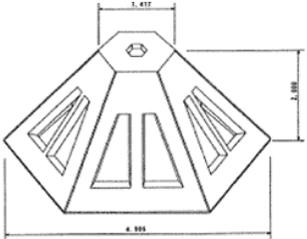
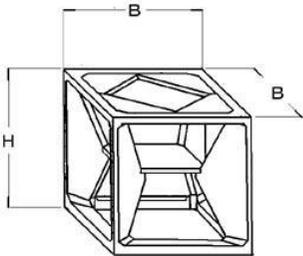
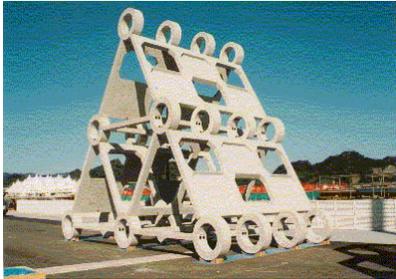
## 2) 波による流速の算定方法

案	概要	技術的課題（検証事項）	実施上の留意点
A 案	単一の周期と方向の波を仮定し、設計波を有義波から最大波に見直す。	特になし	特になし
B 案	波動流速の算定法で、波の不規則性（有義波⇒最大波）だけでなく、波の方向分散性と周波数スペクトルも考慮し、流速算定の適正化を図る。	方法の検討とその検証	特になし

## 3) 施設の機能に応じた照査基準

案	概要	技術的課題（検証事項）	実施上の留意点
A 案	「滑動」と「転倒」の定義を見直し、設計条件の場合分けを行い（資料3-3）、条件によって安全性の判断基準を適正化（緩和）する。	• 場合分けされた各条件での安全性の判断基準の検討	特になし
B 案	高層魚礁以外の魚礁では許容移動量を設定し、移動を許容する（資料3-4）。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 許容移動量の設定の根拠</li> <li>• 移動量の推定方法と検証</li> </ul>	特になし

(参考) 沈設魚礁及び増殖礁施設の例

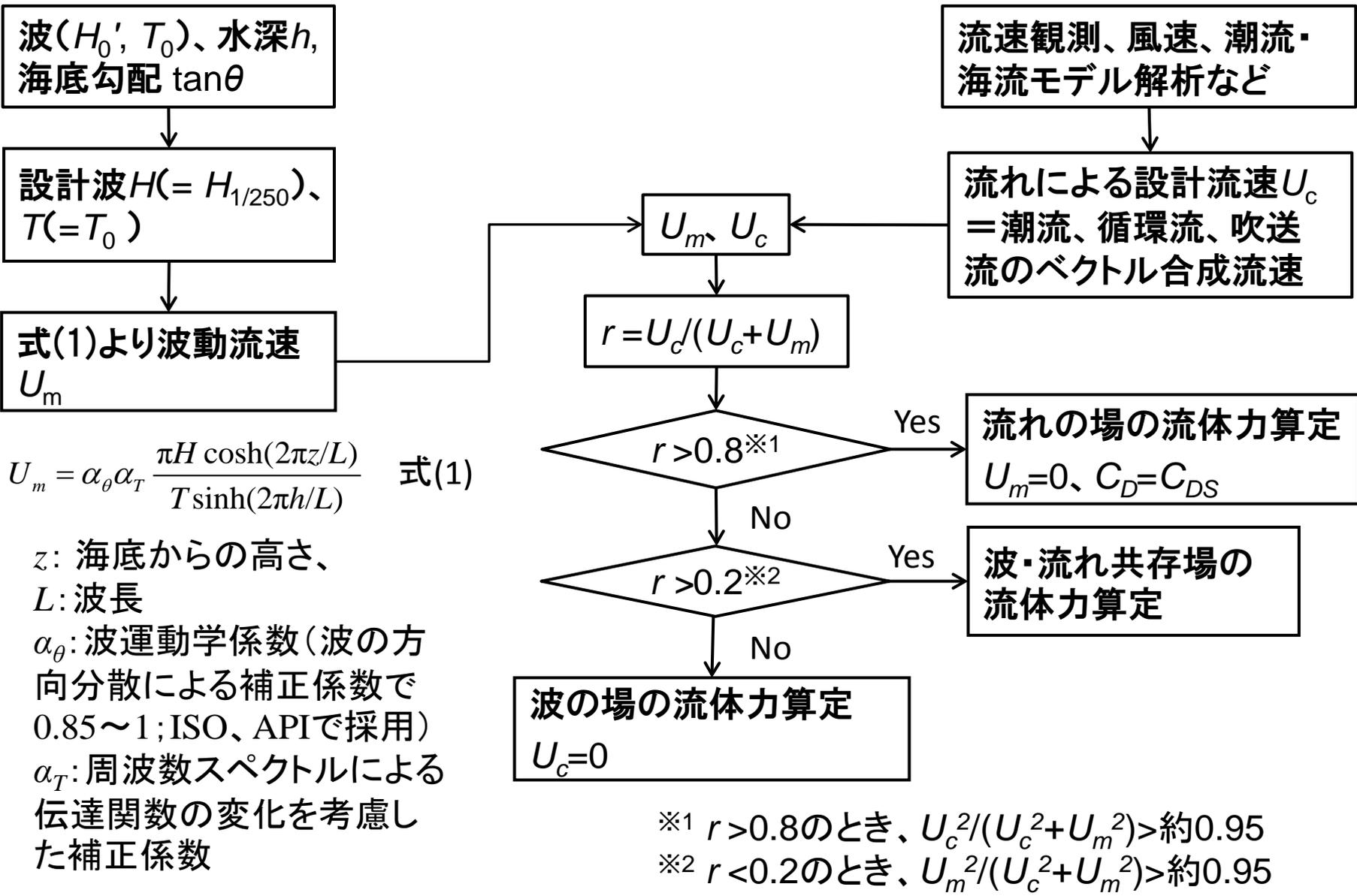
 <p>πブロック (海洋土木 (株))</p>	 <p>ドラゴンリーフカプセル (太平洋マテリアル (株))</p>	 <p>円筒形魚礁 (共和コンクリート工業 (株))</p>	 <p>カルセラリーフ (日本リーフ (株))</p>
 <p>テラス育成礁 (広和 (株))</p>	 <p>NKリーフ (スミリーフ (株))</p>	 <p>F P魚礁 (海洋土木 (株))</p>	 <p>トラスリーフ (技研興業 (株))</p>
 <p>ネットブルリーフ (日本リーフ (株))</p>	 <p>テトラリーフ (スミリーフ (株))</p>	 <p>ジャンボ魚礁 (石川島建材工業 (株))</p>	 <p>ピラミッド型魚礁 (広和 (株))</p>



# 沈設魚礁の流体力算定法(たたき台)

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所

# 沈設魚礁の流体力算定の流れ



# 流体力算定式

## 流れの場の流体力算定式

$$F = \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2 \quad \text{式(2)}$$

$F$ : 流体力、 $\rho$ : 水の密度、 $C_{DS}$ : 定常流の抗力係数、 $A$ : 基準面積、 $U_c$ : 設計流速

## 波の場及び波・流れの共存場の流体力算定式

最大流体力は、式(3) より最大の $F$ を与える位相 $\theta$ を求めて算出するか、式(5)により直接算出する。

モリソン式 
$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A (u + U_c) |u + U_c| + \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{式(3)}$$

$$u = U_m \sin \theta \quad \text{式(4)}$$

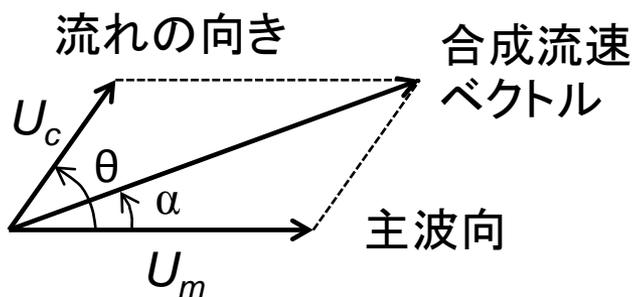
代替式 
$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F \max} A U_m^2 + \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2 \quad \text{式(5)}$$

$C_D$ : 波動流中の抗力係数、 $u$ : 水平波動流速、 $C_M$ : 慣性力係数、 $V$ : 基準体積、 $\partial u / \partial t$ : 水粒子加速度、 $\theta$ : 波の位相、 $C_{F \max}$ : 最大力係数

# 流体力算定式の選択

波・流れ共存場では、波動流と流れの交差角 $\theta$ が明らかである場合は、式(6)により求められる合成流速ベクトル方向の波動流と流れの流速成分を用いて流体力を計算する。交差角が明らかでない場合は、 $\theta=0^\circ$ を仮定する。流体力算定式には、式(3)を用いることができるが、実用的には代替式(5)を用いてもよい。実際の流体力は $r$ の増加とともに式(3)の算定値よりも低下し、流れの場の算定式(2)に近づく。式(5)はこの変化を実質的に表現できる。

KC数は、式(3)では平均流成分の影響を考慮した式(7)を用いるが、式(5)では波単独の値(後述する式(11))を用いる。



$$\alpha = \arctan \frac{U_c \sin \theta}{U_m + U_c \cos \theta} \quad \text{式(6)}$$

設計方向の波動流速成分： $U_m \cos \alpha$

設計方向の定常流流速成分： $U_c \cos(\theta - \alpha)$

$$K_C = \pi s / D \quad \text{式(7)}$$

$s$ :半周期での流体の水平移動距離

モリソン式における $C_D$ と $C_M$ は、適正な方法によって決定した実験値を用いる。

式(5)は、水平最大力を無次元化した係数を用いる方法である。この方法は、モリソン式と異なり、波力の位相を求められないが、慣性力係数や基準体積を求める必要がない。

**論点3:** ベクトルの合成方法の是非

# 沈設魚礁の流体力係数の決定方法

流体力係数の決定方法には、以下の三つの方法がある。

**全体模型法** 構造物全体の模型を用いて風洞や実験水槽での流体測定に基づいて決定する方法

**部材流体力法** 構造物を構成する各部材が流れの中に単独で存在すると仮定して各部材の流体力係数を決定する方法。構造物全体の流体力は部材の流体力の総和として算定する。

**経験的推定法** 試験的にまたは、過去に実海域に設置した同形同大の構造物の追跡調査から流体力係数を推定する方法

複雑な形状を有する魚礁の流体力係数の妥当な設計値を得るためには、全体模型法によらなければならない。部材流体力法は、部材間隔が粗い魚礁に適する方法である。構成部材が単純で、その流体力係数が既知であれば実験を行わずに部材流体力法を用いて決定することができる。しかし、これらの二つの方法に基づく模型実験では、現場での条件を正確には再現できない。模型の縮尺効果、波の多方向性、波と流れの交差等により、流体力係数を過大評価する可能性がある。実海域での流体力係数を求めるためには現地実験が不可欠である。そのための簡易的方法が経験的推定法である。

# 流体力係数を決定する際の留意事項1

- 流体力係数 ( $C_D$ 、 $C_M$ 、 $C_{Fmax}$ ) は、一般にレイノルズ数  $Re$ 、クーリガン・カーペンター数 (KC数)  $K_C$  及び相対粗度の関数であり、流体力係数にはこれらを考慮した適切な設計値を用いなければならない。
- 抗力係数及び慣性力係数とレイノルズ数との関係は、円柱についてはよく調べられているが、その他の形状の物体についての知見は非常に限られている。
- 抗力係数は、低  $Re$  領域では  $Re$  の増加に伴い低下するが、あるレイノルズ数の範囲でほぼ一定の値を示し、臨界レイノルズ数を超えると、激減する。設計条件での  $Re$  が臨界レイノルズ数を超える場合で、実験装置の性能上、その流れを発生できない場合は、安全側の設計値として亜臨界域の値を用いることができる。
- 抗力は、物体の全面と背面の圧力差に起因する圧力抗力と、粘性せん断力に起因する摩擦抗力から成る。大きい抗力は物体背面に形成される剥離領域 (後流渦) での圧力低下に密接に関連した圧力抗力による。物体表面から境界層が剥がれて形成される剥離領域は、円柱などの鈍い断面形状の物体では、剥離点の変化しやすく、レイノルズ数、KC数、相対粗度や主流の乱れによっても大きく変化する。しかし、断面形状に鋭い角部をもつ部材では、剥離点がほとんど変わらないため、抗力係数は、実用的にはレイノルズ数や表面粗度に依存しないとされる (API 2005)。しかしながら、角型ブロックの抗力係数が、 $Re$  が  $1.3 \times 10^5$  ほどを超えると、激減することを示した実験例があり (高木ら 1991)、円柱の場合と同様に臨界域で大幅に低下する可能性もある。

## 流体力係数を決定する際の留意事項2

- 抗力係数は定常流中と波動流中で異なることに注意しなければならない。一般に、 $C_D > C_{DS}$ であるため、波が卓越する場で  $C_D = C_{DS}$ を仮定すると、主要な外力である波力が過小評価される。魚礁模型を用いた実験では、波動流中の $C_D$ が定常流中の $C_{DS}$ の2倍以上も大きいことがあり、この影響は無視できない。KC数が高い領域では、 $C_D$ は $C_{DS}$ の値に近づくが、実験によらず $C_D = C_{DS}$ を仮定することはできない。
- 慣性力係数は、抗力係数とともに、モリソン式を実験値に当てはめ、最適値を決定する必要がある(次頁参照)。KC数がある程度高くなると、実験値は、後流渦の形成によって、ポテンシャル理論から求められる付加質量の理論値と大きく異なる。このため、一般に慣性力係数の理論値を用いることは適切でない。
- 実験によって得られた慣性力係数は、基準体積との積で慣性質量を表すものであり、基準体積との組み合わせで決められることに注意すべきである。基準体積は、構造の多少の変更や他構造との比較ができるようにするため、一般には、部材の基準体積の合計によって表示することが望ましい。しかし、鋼製魚礁等の沈設魚礁では、形状が複雑であるため、適正に決め難い場合があり、任意性を完全に排除できない。そのことから、基準体積の定義も明らかにしておく必要がある。
- 波動流中での $C_D$ と $C_M$ は、KC数の関数として表示する。これらの係数は、レイノルズ数依存にするが、実用的には縮尺模型実験で得られた値を安全側の設計値として用いることができる。

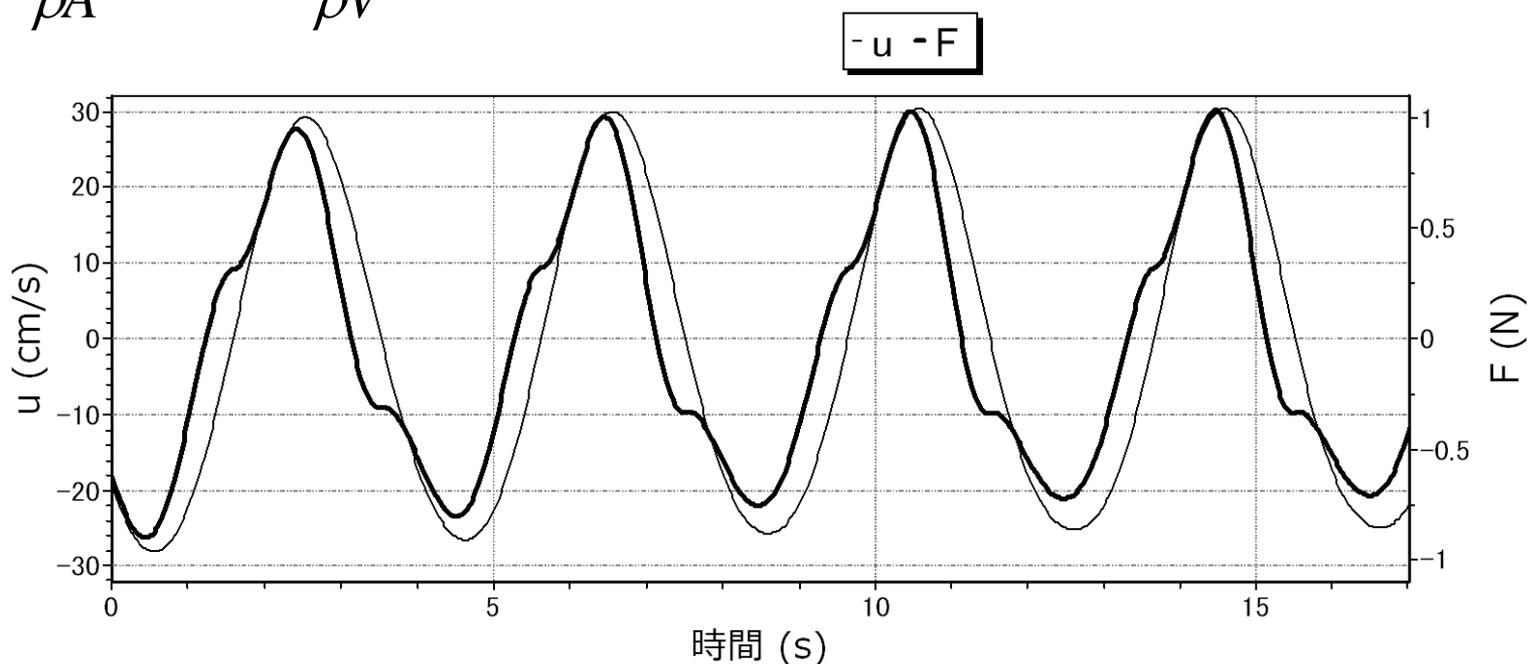
# 波動流中での流体力係数の決定方法

実験によって得られた $F$ と $u$ の時系列データより、最小二乗法によって最も当てはまりのよい係数 $a$ 、 $b$ を決定し、適正な基準面積と基準体積から、 $C_D$ と $C_M$ を決定する。

$$F = au^2 + b \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{式(8)}$$

$$C_D = \frac{2a}{\rho A}, \quad C_M = \frac{b}{\rho V} \quad \text{式(9)}$$

$F$ : 水平流体力、 $u$ : 水平流速、 $\partial u/\partial t$ : 水粒子加速度、 $a$ 、 $b$ : 最小二乗回帰係数、 $\rho$ : 水の密度、 $A$ : 基準面積、 $V$ : 基準体積、 $C_D$ : 抗力係数、 $C_M$ : 慣性力係数



$F$ と $u$ の時系列データの例

# 全体模型法の留意事項

- 流体力測定は、底面による壁面効果を考慮し、模型を底面に置いた状態で行う。
- 定常流中での抗力係数 $C_{DS}$ は、平均部材幅 $D_A$ に基づくレイノルズ数 $Re(=U_c D_A/\nu)$ を考慮し、回流水槽、風洞等で測定した流体力に基づき決定する。ここに、 $D_A$ は式(10)で求められる平均部材幅である。
- 流路内に模型を設置すると、模型の閉塞によって流体力係数が変わるため、その影響がない範囲で実験を行うことが望ましい。その目安は、一般に概ね5%以内の閉塞率とされるが、閉塞率がその目安を超える場合は、既存の文献(省略)を参考にして流体力係数を適切に補正する必要がある。
- 波動流中での流体力係数は、造波水槽での水理模型実験によって決定する。その係数はレイノルズ数だけでなく、KC数 $K_C$ に依存する。KC数は式(11)で表される。一般に、レイノルズ数が低い場合は、抗力係数は大きくなるため、縮尺模型の実験値は安全側の設計値として用いることができる。しかし、その反面、模型縮尺が小さい場合は、過大な設計値になる可能性があるため、大型造波水槽を用いた大縮尺の模型実験を行うことが望ましい。
- 基準面積及び基準体積は、一般に部材流体力法に準じて決定する。

$$\text{魚礁の平均部材幅: } D_A = \sum A_i D_i / \sum A_i \quad \text{式(10)}$$

ここに、 $A_i$ と $D_i$ はそれぞれ第 $i$ 部材の基準面積と幅

$$K_C = U_m T / D_A \quad \text{式(11)}$$

# 部材流体力法の留意事項

1) 部材の基準面積と基準体積は、設計流速のベクトル方向に対して主要部材の流体力係数表(後出)を参考にして適正に定める。その際、複数の部材が接合する場合や接近している場合は、類似する一つの部材とみなす方が適切である。

2) 部材流体力法の適用では、以下の項目を考慮しなければならない。

- 流体力係数は、長さ $l$ と幅 $D$ の比 $l/D$ によって変化する。
- $l/D$ の影響が不明の場合は、安全側の設計のため、二次元部材( $l/D = \infty$ )の係数値を用いる。
- 流体力係数は、部材間隔と魚礁の大きさによっても変化する。
- 流体力係数は、流れ方向の部材間隔が密になるほど、遮蔽効果により低下するが、流れに直交する方向の部材間隔が密になると、逆に閉塞効果により増加する。
- 定常流中では、遮蔽効果の方が強く影響し、部材の集合体の流体力係数は一般には単独部材よりも低下するが、波動流中では、閉塞効果の方がより強く影響して単独部材よりもむしろ増加する。ただし、その増加は、 $K_C$ 数の増加とともに減少し、 $K_C$ 数がある一定値(概ね80)以上のとき、部材流体力法による算定値に漸近する。
- 魚礁の大きさが小さくなると、閉塞効果は小さくなり、部材流体力の和は安全側の設計値を与えるが、逆に規模の大きい高層魚礁などの構造物では、閉塞効果により流体力係数が増加する。

3) 実用的観点から、以下の二要件が満たされれば、迎え角 $90^\circ$ の二次元平板の値を安全側の設計値として用いることができる。

- ① 構造が揚力を発生し難いこと
- ② 波の場または波・流れ共存場で $K_C$ 数が高い( $K_C > 60$ )こと

# 経験的推定法の留意事項1

経験的推定法で沈設魚礁の流体力係数を推定する際は、以下に留意する。

- 1) 実海域に設置した魚礁が調査期間に破損、埋没または転倒していないことを明らかにすること
- 2) その設置地点において、調査期間に魚礁が遭遇した流速の最大値を信頼できる方法で推定すること

流体力係数は、全体模型法に準じた流体力算定式を用い、推定最大流速と摩擦係数、水中重量(最大流速発生時の予測値)から、流体力が摩擦力に等しいと仮定して逆算する。逆算に用いる流体力算定式については、波・流れ共存場における信頼できる算定法が確立されていないため、波動流成分または平均流成分のどちらか一方の卓越成分を最大流速とし、波単独または流れ単独の場合の式を用いる。

波動流が卓越する( $r < 0.5$ )場における $C_{Fmax}$ の設計値は、次式により推定できる。

$$C_{Fmax,UL} = \frac{2\mu W}{\rho A U_m^2} \quad \text{式(12)}$$

ここに、 $C_{Fmax,UL}$ :  $C_{Fmax}$ の設計値、 $\mu$ : 設計に用いた静止摩擦係数、 $U_m$ : 構造物が遭遇した最大流速、 $A$ : 基準面積、 $W$ :  $U_m$ 遭遇時における構造物の推定水中重量

## 経験的推定法の留意事項2

経験的推定法により求められる流体力係数は、その魚礁の上限値を表すもので、安全側の設計値として用いることができる。また、この方法の適用は、同形同大の魚礁に限るものとする。

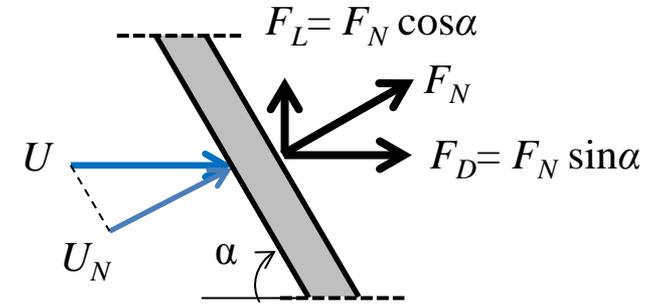
経験的推定法による $C_{Fmax,UL}$ は、ある時点までの調査結果に基づく上限値であり、 $C_{Fmax}$ の真値がそれよりも小さくなり得ることを想定している。したがって、その後の調査でより小さい $C_{Fmax,UL}$ 値が得られれば、その都度設計値を更新できる。

$C_{Fmax}$ は、一般にKC数の増加、すなわち波動流速の増加とともに低下するので、設計波動流速がより大きい場であっても、安全側の設計値であると判断できる。逆に、設計波動流速がより小さい場合は、 $C_{Fmax}$ が過小評価される可能性があるが、同形同大の魚礁であれば、自動的に安全性が保証される。

# 様々な部材からなる魚礁の部材の流体力モデル

魚礁の構成部材が単独で存在する場合を想定して、以下の事項を参考にして流体力係数を適切に定める。

- 基本的部材の流体力係数は、表(後出)を参考にして定められる。
- 迎え角のある細長い部材では、交差流の原理により、部材軸の法線方向の流速成分のみを用いて抗力と慣性力を計算することができる。接線方向の流速成分による力は一般に無視できる。
- 迎え角 $90^\circ$ の円筒のように、内部に流れを遮る空間がある場合の基準体積は、内部空間を含む外周体積とする。
- 細長い部材または板材で、その軸または面が流れに沿う向きの場合、基準体積は部材の実容積とする。
- 形状の複雑な部材の基準体積は、水理実験や数値解析に基づき適正に決める必要があるが、安全側の設計値として部材幅を直径とする円柱の値を用いてもよい。
- 部材流体力法において、主要でない種々の部材の抗力係数と慣性力係数は、実験や数値解析に基づき決めることができるが、実用的に類似の物体の $C_{DS}$ と付加質量の理論値を参考にして決めてもよい。



$$F_N = \frac{1}{2} \rho C_D A_N U_N |U_N| + \rho C_M V \dot{U}_N$$

$$A_N = D l$$

$$A = A_N \sin \alpha$$

$$U_N = U \sin \alpha$$

$D$ : 流れに垂直方向の部材幅

$A_N$ : 法線方向の投影面積

$A$ : 斜材の基準面積

迎え角のある細長い部材の流体力モデル

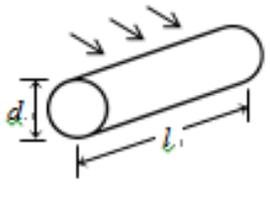
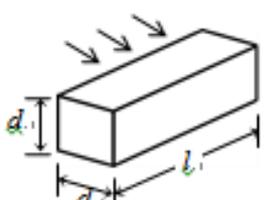
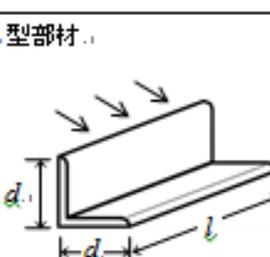
慣性力係数は、付加質量 $m_a$ から次式で計算される $b$ を、式(9)に代入して求められる。

$$b = \rho V_r + m_a$$

ここに、 $V_r$ : 部材の実容積

# 様々な部材の流体力係数

表1 様々な部材の基準面積 ( $A$ )、定常流中の抗力係数 ( $C_{DR}$ )、基準体積 ( $V$ ) 及び付加質量の理論値

形状	寸法比	$A$	レイノルズ数	$C_{DR}$	$V$	付加質量
 円柱	$l/d=1$	$d$	$0.9 \times 10^5$	0.63	$\pi d^2 l / 4$	$\rho \pi d^2 l / 4$
	2			0.68		
	5			0.74		
	10			0.82		
	20			0.90		
	40			0.98		
	$\infty$			1.00		
 正方形角柱	$l/d=1$	$d$	$3.6 \times 10^5$	1.05	$\pi d^2 l / 4$	$1.51 \rho \pi d^2 l / 4$
	2			1.08		
	4			1.13		
	5			1.14		
	10			1.25		
	20			1.50		
	$\infty$			2.0		
 平板	$l/d=1$	$d$	$(0.9 \sim 3.9) \times 10^5$	1.14	$\pi d^2 l / 4$	$\rho \pi d^2 l / 4$
	2			1.15		
	5			1.22		
	10			1.27		
	20			1.50		
	$\infty$			1.86		
 L型部材	$l/d=\infty$	$d$	$0.9 \times 10^5$	2.0	$\pi d^2 l / 4$	

この係数表(未定稿)のほか、二次元部材(円柱、正方形角柱、平板、L型部材、十字部材、迎え角のある正方形角柱と平板)の抗力係数、基準面積、基準体積、付加質量及び $C_{Fmax}$ の一覧表を作成する。

# 沈設魚礁（増殖礁を含む）の設計における場合分け

# 設計における場合分けの必要性

## 従来法

一律に施設が完全に動かないよう設計

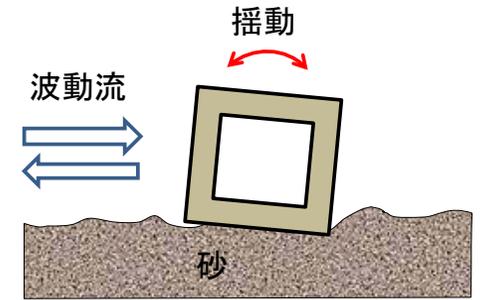
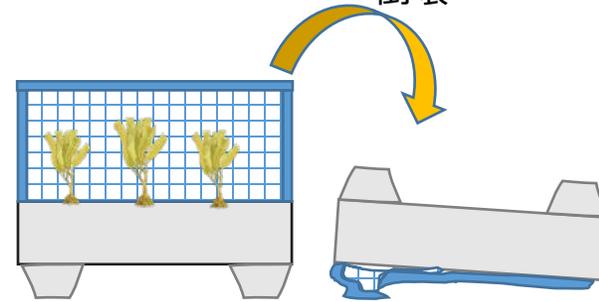
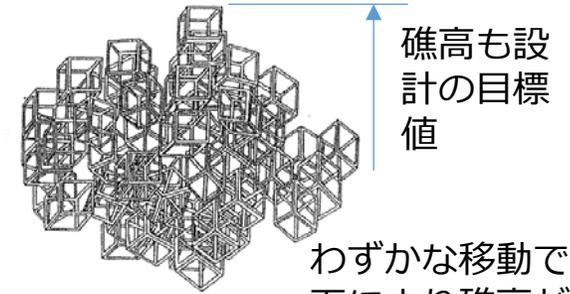
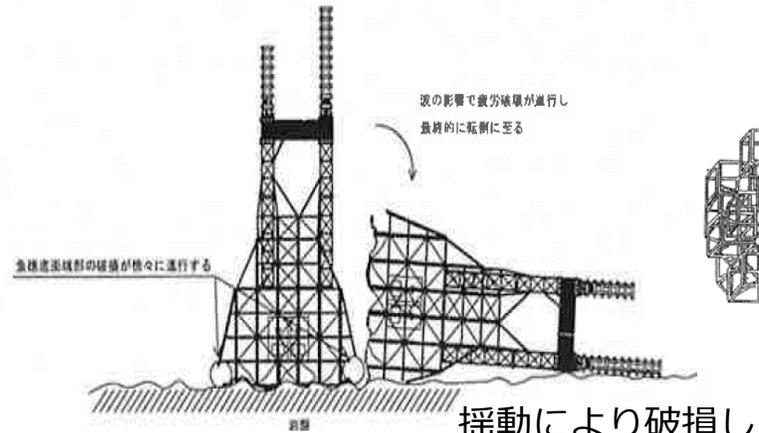
※ 設計上の「転倒」≠物理的な転倒 ⇒  
過大な安全設計

設計が簡略化し過ぎて実態に合っていない。

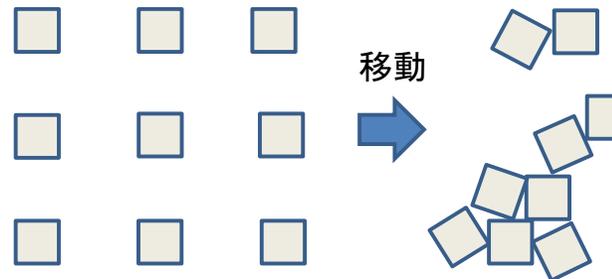
※ 起こり得る現象・問題が場合によって異なる。



様々な条件があることを考慮しつつ、  
過度な安全設計も含めて設計体系全  
体の見直しを行う必要がある



揺動しても損傷しない



4-6-a28 移動量が大きければ、効果・  
利用に問題が発生



# 用語の見直し

## 従来法での定義

**滑動** 水平流体力が摩擦力を上回ること

**転倒** 流体力による転倒モーメントが水中重量による復元モーメントを上回ること



## 見直し案での定義

**滑動** 水平流体力が摩擦力を上回ってすべり出す現象（※1）

**揺動** 流体力による転倒モーメントが水中重量による復元モーメントを上回って、底面の一端が持ち上がった後、元の状態に戻る現象

**転倒** 流体力による転倒モーメントが水中重量による復元モーメントを上回って、施設が横転または反転する現象

※1 設置初期に施設がわずかに移動した後、安定化する場合は「滑動」に含めないが、次頁のとおり、場合によっては従来どおり、わずかな滑動も許容しない。



# 場合分け

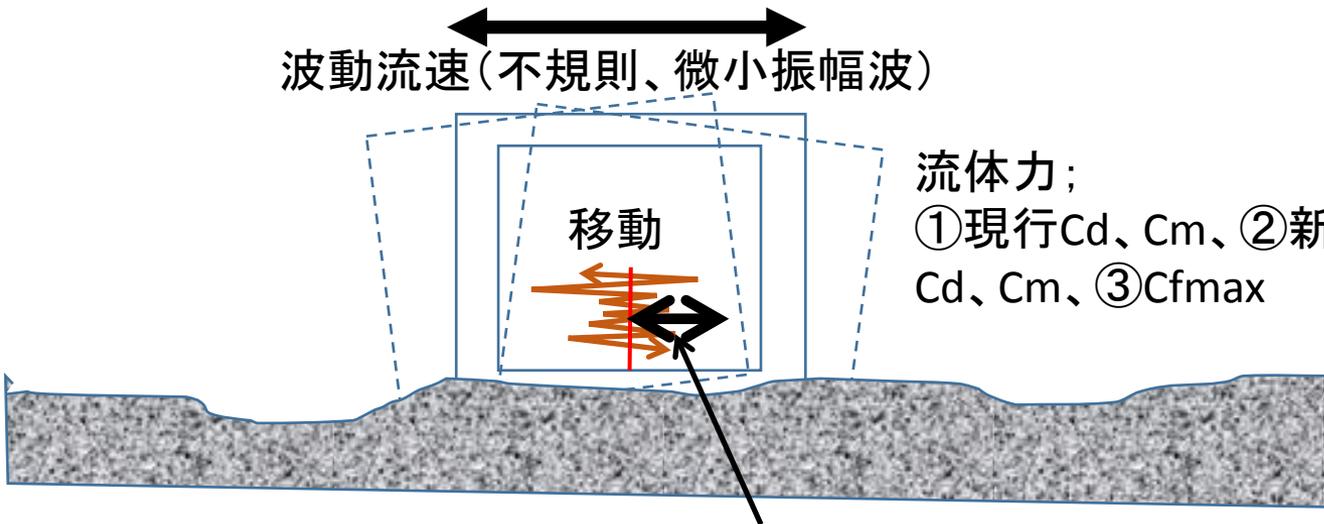
ケース名	礁のタイプと底質	検討すべき状況・現象	滑動	揺動	転倒	備考
ケース1	高層魚礁（平坦な砂礫底上のみ） 岩礁上の大型魚礁	<ul style="list-style-type: none"> <li>揺動に伴う衝撃、繰り返し動的荷重による部材の破壊</li> </ul>	不可 <sup>1)</sup>	不可	不可	1)最大限の安全性の確保のため
ケース2	層積み・乱積み魚礁	<ul style="list-style-type: none"> <li>魚礁単体の滑動・転倒に伴う落下（礁の高さの低下）</li> </ul>	不可	不可 <sup>2)</sup>	不可	2)設置状態の不確実性から揺動も許容し難い
ケース3	砂礫底上の大型魚礁 機能部材付または上下非対称形の小型魚礁	<ul style="list-style-type: none"> <li>移動による利用面での支障</li> <li>転倒による機能・効果の低下・喪失</li> </ul>	不可 <sup>3)</sup>	許容	不可	3)但し、魚礁1個分程度の初期移動は許容
ケース4	上下対称形の小型魚礁	<ul style="list-style-type: none"> <li>移動による利用面での支障</li> </ul>	不可 <sup>3)</sup>	許容	許容	

許容する初期移動は摩擦係数の見直しによって考慮する（今年度検討課題）。  
大型魚礁と小型魚礁との区分は要検討（案としては、例えば1点支持により部材の破壊が生じるか否かにより判別）。

# 移動量を考慮した沈設魚礁(並型)の安定性評価 について

# 移動量を考慮した沈設魚礁(並型)の安定性評価について

1. 最大作用流体力はHmax時に発現する。現状;有義波で流体力算定、大幅な外力増加
2. 最大流体力で静的に安定性を評価すると従来と大幅な相違。
3. 上記のことから、魚礁が動くとして、不規則外力に対して最大波の移動量、1波群の移動量(累積片振幅移動量)とその機能を検討する必要がある。



水理模型実験と移動モデルによる比較検討すでに実施済み

- ・実態との相違はあるが、移動量の指標としては適切と判断
- ・防波堤の期待滑動量と同じ手法

移動;岸沖に移動、平均0=>片振幅移動量で移動量評価  
移動モデルで計算、Hmax一波での移動量、波群での累積量

**多少の移動量(施工精度程度)では魚礁の機能には影響しない。**

\* 長崎の例でも移動量数m程度

\* 高さ、姿勢などが重要な要素となっている魚礁は含まない。

**許容移動量に対応した安定限界波高を算定、現行安定性照査法との比較**

# 魚礁の設置条件および設計波

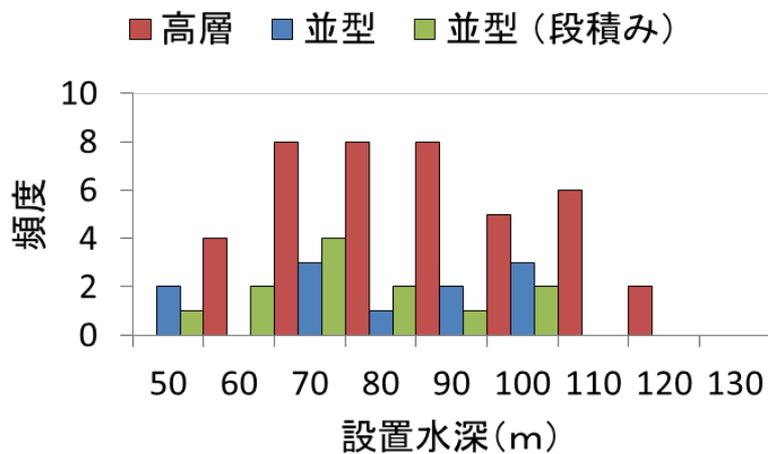


図-1 設置水深

(高層: 51~120m, 並型: 41~95m)

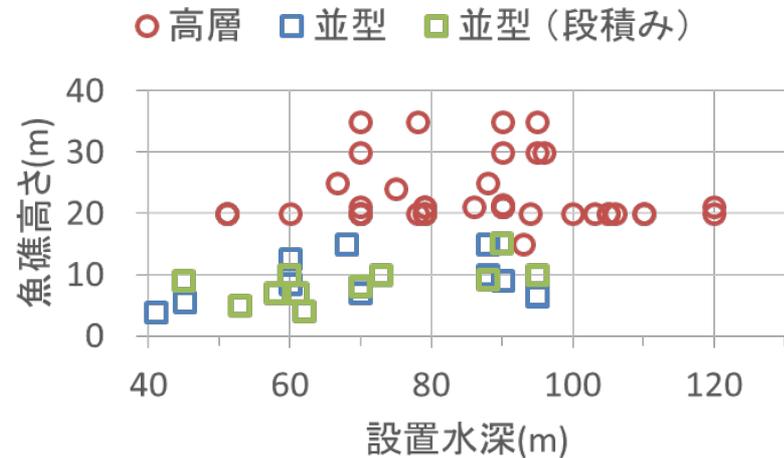


図-2 礁高(礁高で区分)

(高層: 20~35m, 並型: 4~15m(段積含む))

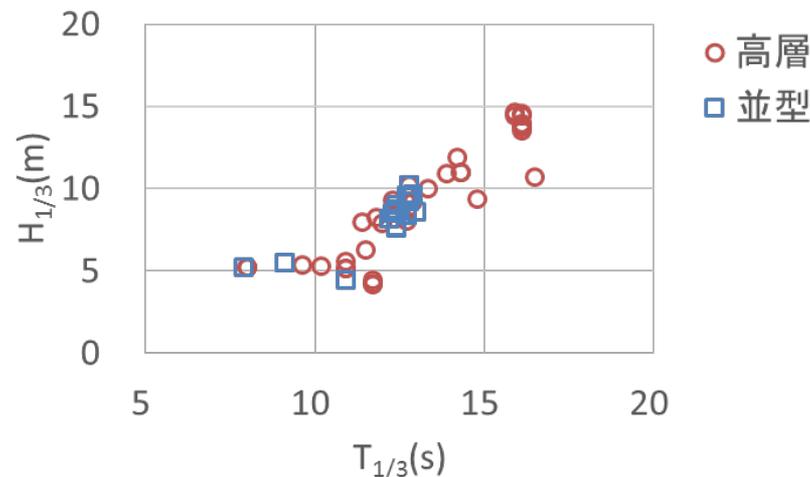


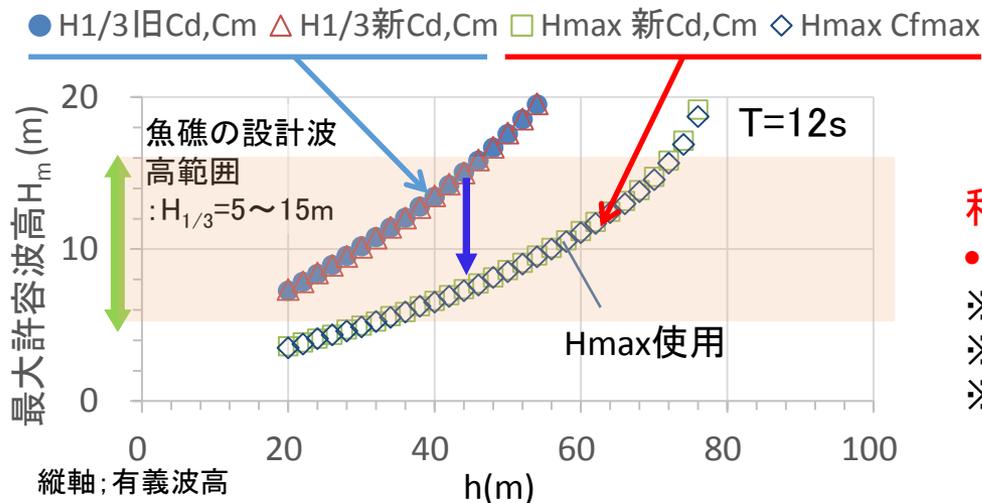
図-3 設計波

高層:  $H_{1/3}=4.2\sim 14.6\text{m}$ ,  $T_{1/3}=8.0\sim 16.5\text{s}$

並型:  $H_{1/3}=4.5\sim 10.2\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.9\sim 13.0\text{s}$

# 移動を考慮した場合の流体力算定法の比較

## 最大流体力で静的安定性を評価する方法(②, ③)と現行法(①)の比較



最大流体力で評価すると静的安定評価では

- 最大許容波高: 現行法より小さくなる
- 安定重量: 現行法より重くなる



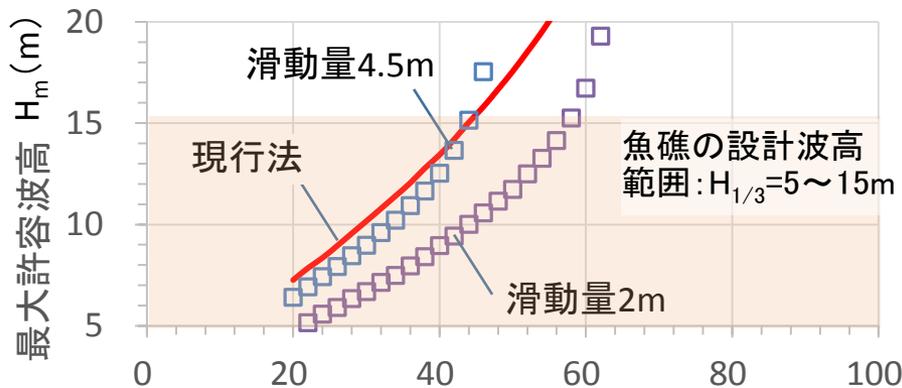
### 移動を考慮した検討

- 許容移動量4.5mで現行の $H_m$ と同等(下図参照)。
- ※施工精度 $\pm 10\text{m}$  or  $\pm 30\text{m}$ (参考1参照)
- ※移動量の計算方法は参考2~6参照
- ※最大許容波高 $H_m$ は安定となる最大の波高

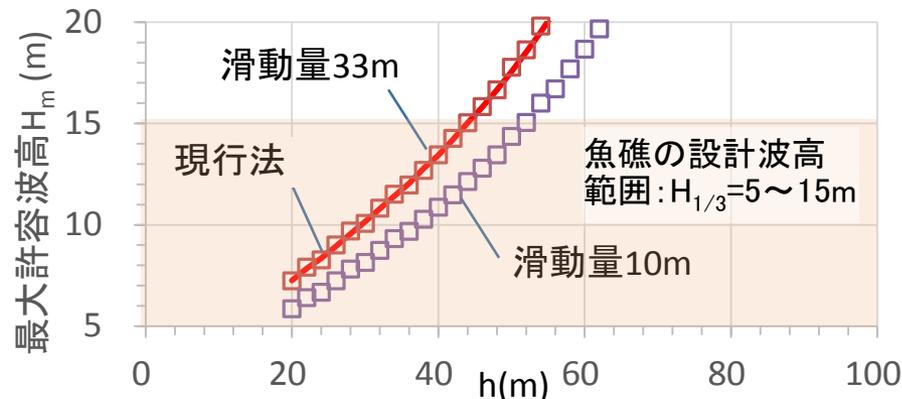
※現行法: 漁港漁場の施設の設計参考図書2015年(参考1参照)

## 現行法と移動量を許容した場合での最大許容波高 $H_m$ (有義波)の比較( $T=12\text{s}$ , ②新Cd,Cm)

◎Hmaxの片振幅移動量4.5m許容: $H_m$ 従来法と同等



◎期待累積片振幅移動量33m許容: $H_m$ 従来法と同等



施工精度程度の滑動量許容、現行設計とほぼ同じ傾向＝実態的に魚礁の移動量は数m？

# 参考1. 魚礁沈設工の出来高管理

## ■ 漁港漁場関係工事共通仕様書(平成26年3月改定)

### 2-3 魚礁沈設工 1.魚礁沈設

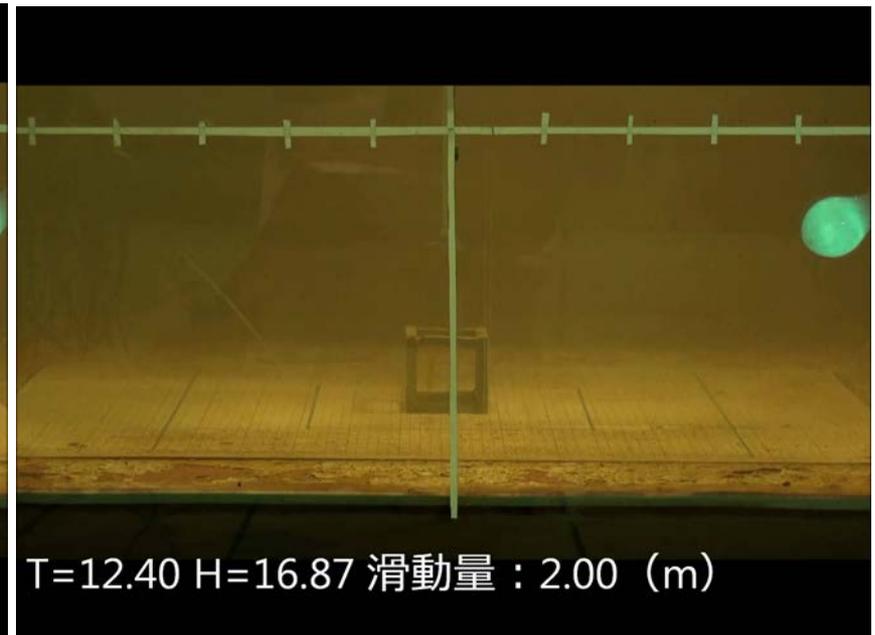
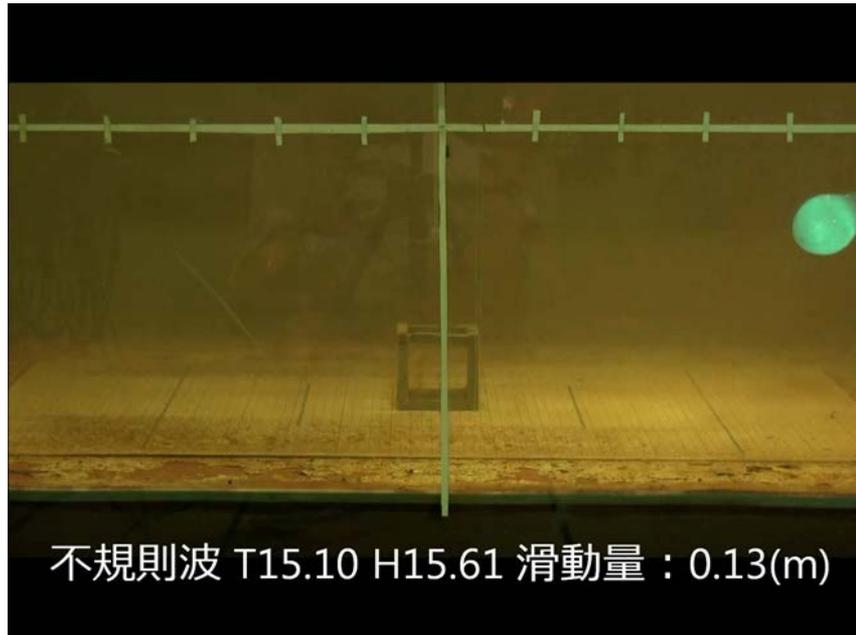
位置	許容範囲
集中配置(乱積配置)	配置中心点が±30m、その他は特記仕様書による。
ゾーン配置	ゾーン内
計画配置(相対配置)	±30m

## ■ 自治体(兵庫県:平成26年4月)の水産関係工事共通仕様書・施工管理基準

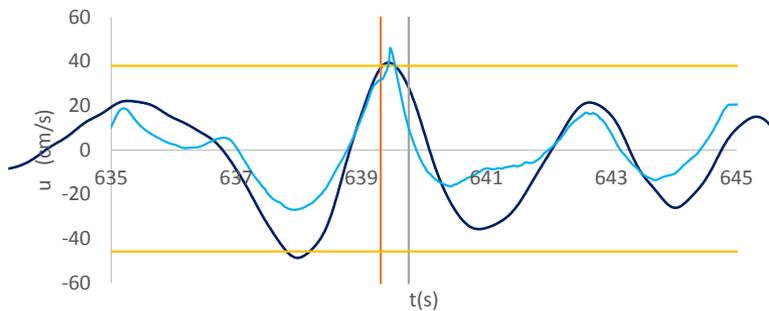
### 2-1. 出来高管理基準及び規格値 1)魚礁工 3.魚礁沈設工 1.魚礁沈設

位置	許容範囲
集中配置(乱積配置)	配置中心点が±10m、その他は特記仕様書による。
ゾーン配置	ゾーン内
計画配置(相対配置)	±10m

# 参考2. 魚礁の移動モデルの検証実験\_滑動実験 VTR

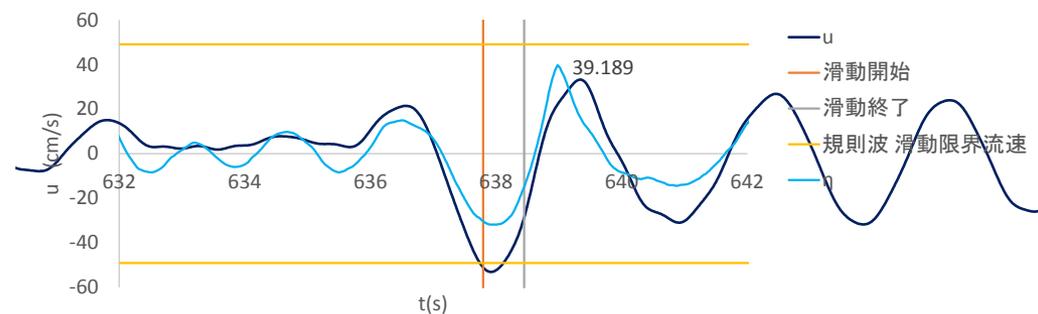


動画①:  $H_{1/3}=15.6\text{m}$ ,  $T_{1/3}=15\text{s}$



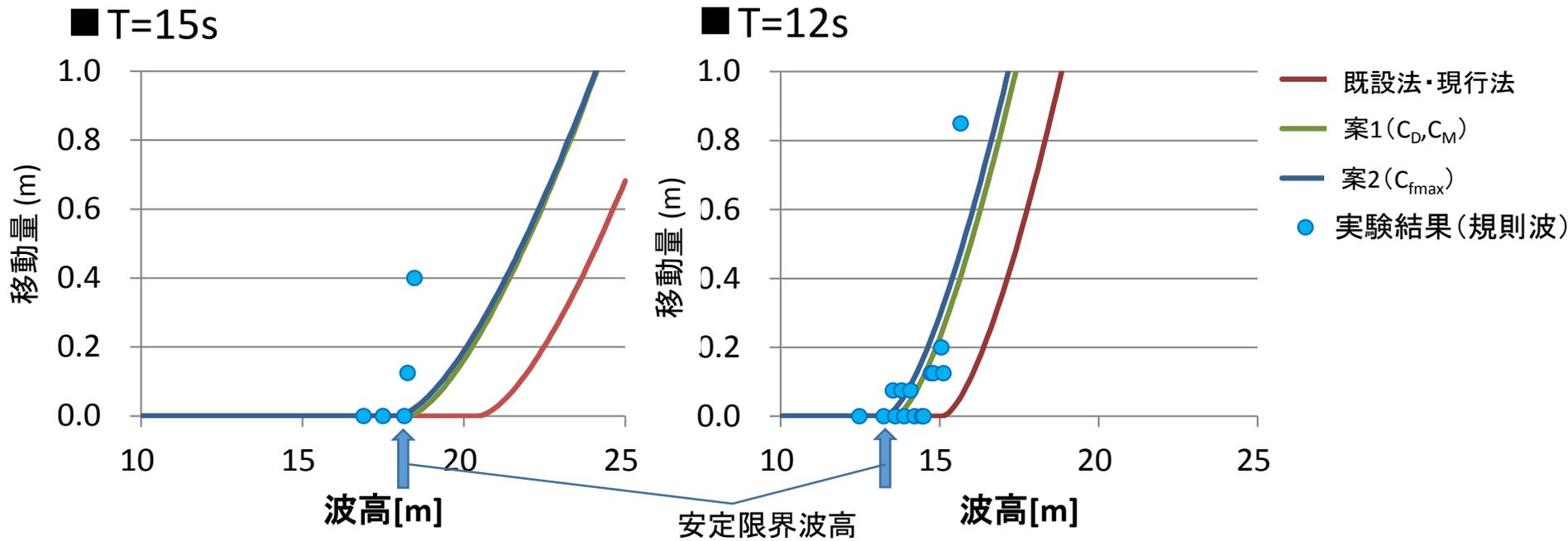
岸側へ滑動

動画②:  $H_{1/3}=16.7\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=12\text{s}$



沖側へ滑動

# 参考3. 移動モデルの検証実験\_移動量の計算値と実験値



※実験で用いた床材の摩擦係数 $\mu=0.96$

- 既設法・現行法で算定した安定限界波高は、実験結果とおおむね一致する。
- 移動量を算定するには、滑動後の動摩擦係数を適切に設定する必要がある。

# 参考4. 魚礁の移動モデル\_運動方程式

## ■ 滑動開始の判定と流体力の算定式

谷本勝利・古川浩司・中村廣昭: 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第43巻, 1996, p.p.846-850.

上記論文での運動方程式を次式のように修正。

$$(M+m)\frac{du_s(t)}{dt} = P - \mu W', \quad P_D = \frac{1}{2}C_D A \rho_w U_m^2, \quad P_M = C_M \rho_w V \frac{2\pi}{T} U_m, \quad \begin{cases} P = P_M & 2P_D \leq P_M \\ P = P_D + P_M^2 / (4P_D) & 2P_D > P_M \end{cases}$$

$M$ : 質量、 $W'$ : 水中重量、 $P$ : モリソン式により算定される流体力、 $\rho_w$ : 水の密度

$m$ : 付加質量 (物体と同体積の流体の質量)

## ■ 運動方程式

桑原久実・日向野純也・中村義治・三村信男 (1994): 波浪による二枚貝の移動予測モデルの妥当性と移動機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 376 - 380. を改良

$$\begin{aligned} \frac{dX(t)}{dt} &= u_s(t) \\ (M+m)\frac{du_s(t)}{dt} &= m \frac{du_b(X,t)}{dt} + C_M m \frac{d\{u_s(t) - u_b(X,t)\}}{dt} \\ &\quad + \frac{1}{2}C_D A \rho_w |u_b(X,t) - u_s(t)| \{u_b(X,t) - u_s(t)\} \\ &\quad - (M-m)g \sin \beta - \mu g (M-m) \cos \beta \frac{u_s(t)}{|u_s(t)|} \end{aligned}$$

$u_b$ : 流速、 $u_s$ : 物体の移動速度、 $X$ : 物体の移動距離、 $A$ : 物体の投影面積、

$M$ : 物体の質量、 $m$ : 物体と同体積の流体の質量、 $\mu$ : 底面の静止摩擦係数、

$\beta$ : 海底勾配、 $C_M$ : 質量力係数、 $C_D$ : 抗力係数、※検討では  $\mu=0.6$ 、動摩擦係数  $0.6 \cdot \mu$

# 参考5. 最大波1波の移動量と流速の関係

## ■ 海底勾配1/50

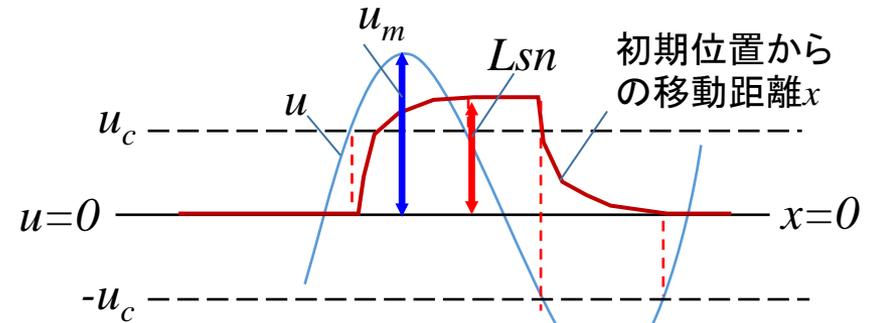
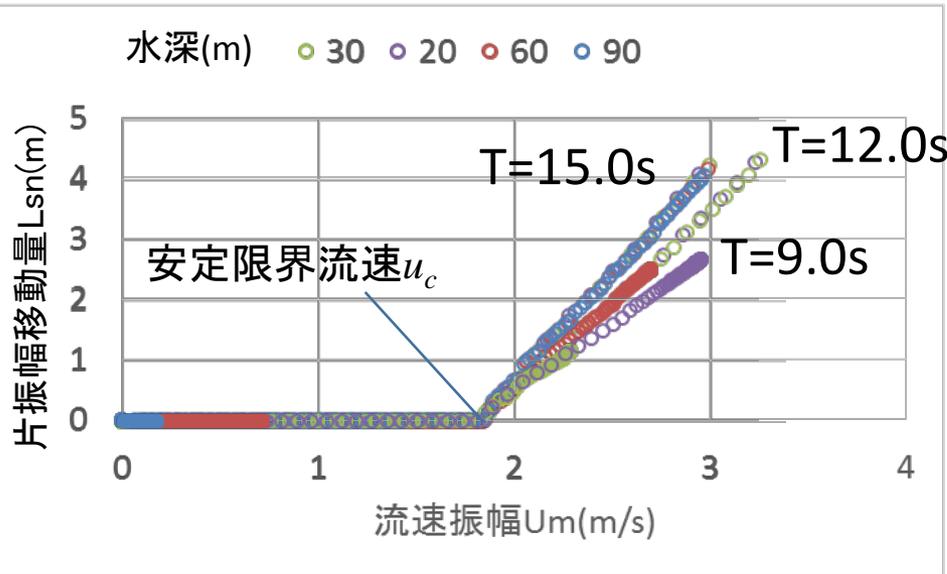
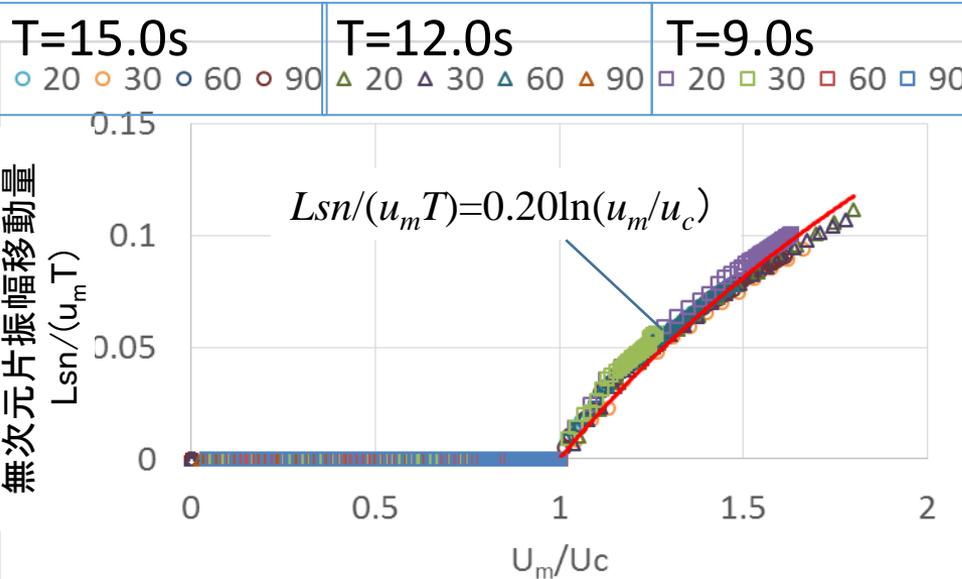


図-4 1波当たりの片振幅移動量  $L_{sn}$  と流速の関係 (イメージ図)

- 最大流速振幅  $u_m$  を安定限界流速  $u_c$  で無次元化
- 最大波1波による片振幅の移動量  $L_s$  を流速軌道振幅  $u_m \cdot T$  で無次元化

1波当たりの片振幅移動量  $L_{sn}$  は次式で表される。

$$\frac{L_{sn}}{u_m T} = 0.20 \ln \left( \frac{u_m}{u_c} \right)$$



# 参考6. 1波群での累積片振幅移動量

レイリー分布 (波数  $N = p(H/\bar{H}) \cdot N_0 \cdot d(H/\bar{H})$ )

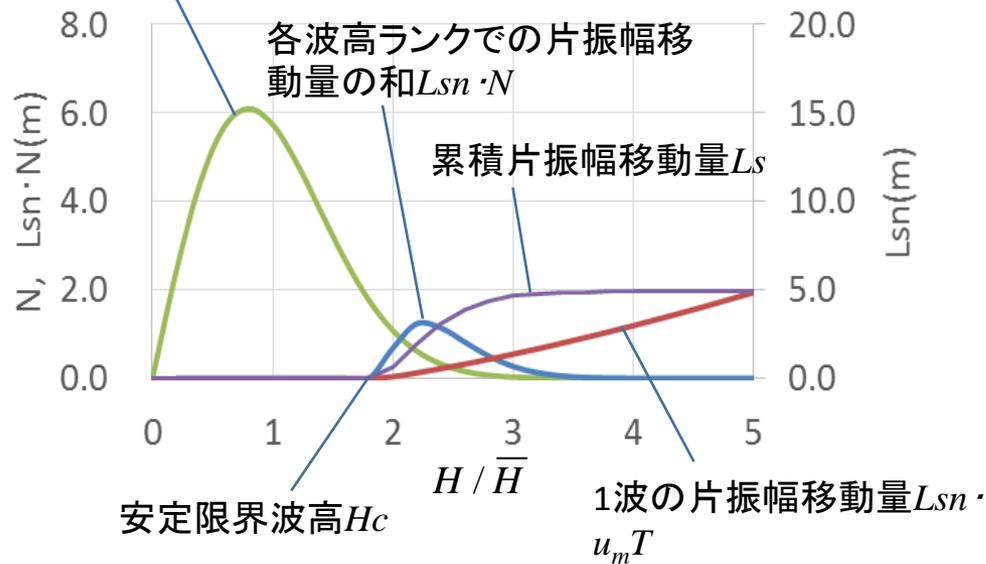


図-5 レイリー分布と移動量の関係

1波群を250波として波高出現頻度分布にレイリー分布を仮定し、安定限界波高 $H_c$ 以上での各波高の波数 $N$ に移動量 $L_{sn}$ を乗じ、すべてを加算して期待累積片振幅移動量 $L_s$ を求めた。

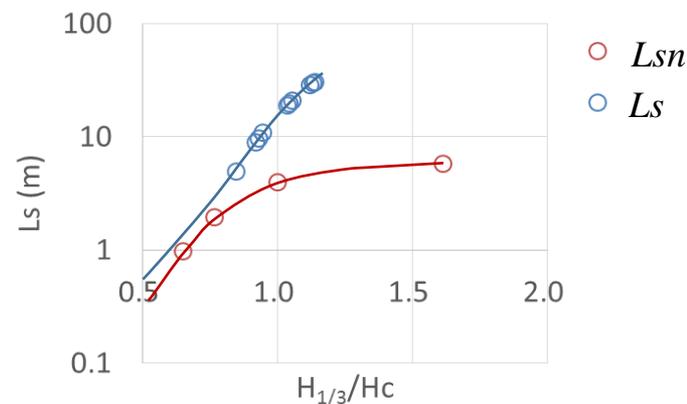


図-7 片振幅移動量 $L_{sn}$ と累積片振幅移動量 $L_s$

累積片振幅移動量 $L_s$   
: 片振幅移動量 $L_{sn}$ の和

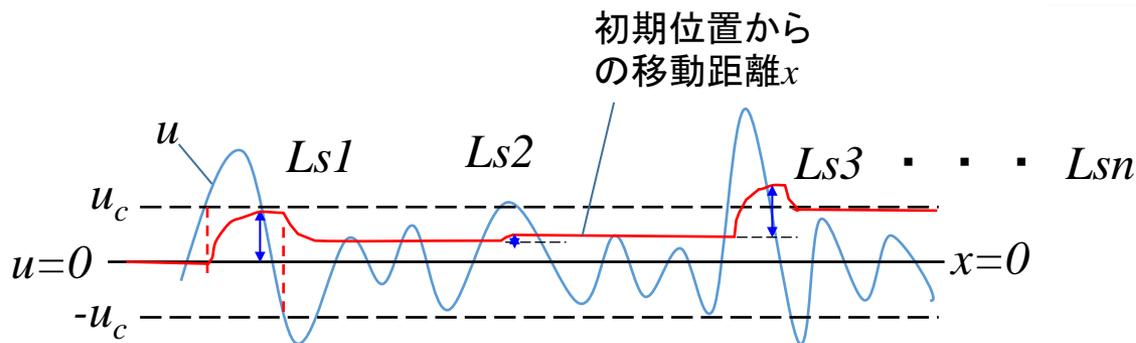


図-6 個々波による累積片振幅移動量 $L_s$ と流速の関係 (イメージ図)

# 沈設魚礁の安全性の照査法の検討 H28年度計画

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所  
国際気象海洋(株)  
(株)アルファ水工コンサルタンツ

# H28年度計画の概要

沈設魚礁の安全性の照査法について以下を検討

## 課題1 流体力算定法の現地検証（継続）

27年度、施設の移動が確認された2工区について、①移動原因と考えられている激浪（2014年7月の台風8号）時の流速を、気象データから波浪のシミュレーションにより推算、②模型実験により施設の流体力係数を測定、③流体力算定の従来法と提案法で最大流体力を推定し、現状との対比により両者の妥当性を比較検討する。

## 課題2 照査法の妥当性に関する沈設魚礁の実態調査（追加）

照査法見直しの必要性については現場での情報が不足している。更なる判断材料を得るため、層積みまたは乱積みされたコンクリート魚礁を対象に実態調査を行う。

## 課題3 砂質底上での安全性の照査法に関する実験的検討

砂面上での魚礁模型の安定性に関する造波水槽実験を行う。

不規則波実験により、初期滑動限界、および洗掘後の滑動限界と転倒（横転、反転）限界を調べる。波高の確率分布を考慮した、これらの限界の推定方法を検討する。

# 課題 1 流体力算定法の現地検証 被災時の高波浪推定

- N県が実施した調査により2014年にブロックの滑動，転倒，埋没，破損が確認。その原因とされている2014年7月台風8号（T1408）の来襲時の波浪を推定する。
- 2015年9月～12月、A工区とB工区において実施した流速計付波高計とADCPによる波浪・流速データを検証データの一つに用いる。

## 【波浪推定の手順】

対象域の周辺ではNOWPHAS（伊王島）で波浪観測が行われているが、対象域から北側に約16Km離れており、有効な入射波向もSW象限に限られているので、下記の手順で対象域の波浪（極大波高を対象）の推定手法を選定し、T1408の高波を次頁の手順により推定する。



調査対象工区と波浪観測位置

a) NOWPHASと対象域(A,B工区)観測波浪の相関分析  
GPVとNOWPHAS,対象域波浪の相関分析

2015年の現地観測期間を対象にNOWPHASとA,B工区での観測波の相関を調べる

b) NOWPHAS→沖波→対象域高波浪の推定  
・波浪変形計算:エネルギー平衡方程式法  
・現地観測期間で妥当性の検証

NOWPHAS波浪を逆解析して求めた沖波について、沖→A,B工区の波浪変形計算によりA,B工区の波浪を求め、現地観測との整合性を検証する。

妥当な推定か

Yes

手法b)によるT1408高波浪の推定

No

c) GPV→NOWPHAS,GPV→対象域の高波の推定  
・波浪変形計算:エネルギー平衡方程式法  
・現地観測期間で妥当性の検証

気象庁波浪解析データ(GPV)を沖波として、GPV→NOWPHAS, GPV→A,B工区の整合性を検証する。

妥当な推定か

Yes

手法c)によるT1408高波浪の推定

No

d) 波浪推算  
・海上風の推算:局地気象モデル\*1), 台風モデル  
・波浪推算 :スペクトル法\*2)  
・現地観測期間で妥当性の検証  
・T1408高波の推算  
\*1)局地気象モデルの境界条件は気象庁GSM(日本域)を使用  
\*2)波浪推算モデルは第3世代のスペクトル法

気象庁GSM(日本域)を境界条件としての局地気象モデルまたは台風モデルにより海上風を推算し、スペクトル法での波浪推算を行い、T1408の高波を推算する。

# 課題1 流体力算定法の現地検証：対象施設の流体力係数の測定（その1）

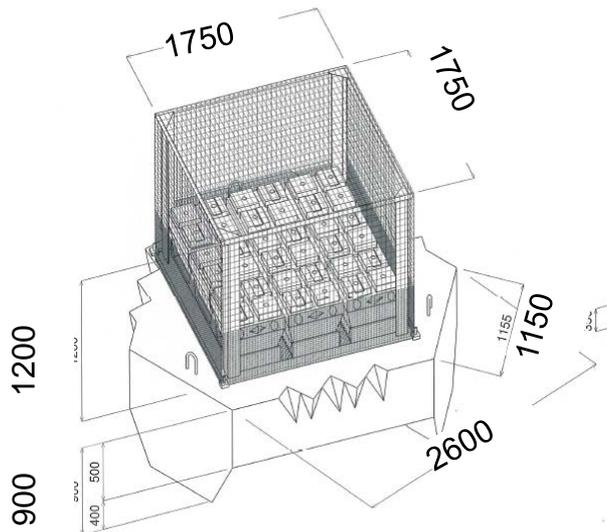
## 目的

昨年度実施した現地検証試験の対象施設（A工区：増殖礁、B工区：魚礁）の波動流中での流体力係数の測定

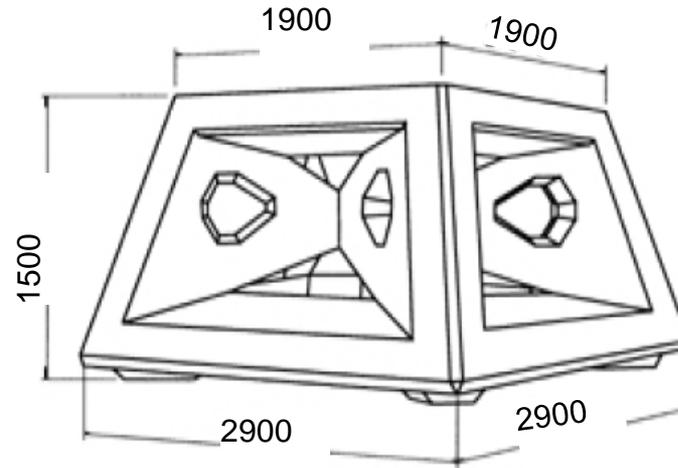
## 方法

実験水槽：造波水槽（長さ70.0m×幅0.7m×深さ2.2m×水深1.2m）

模型縮尺：1/25



A工区の増殖礁



B工区の魚礁

現地スケール  
単位:mm

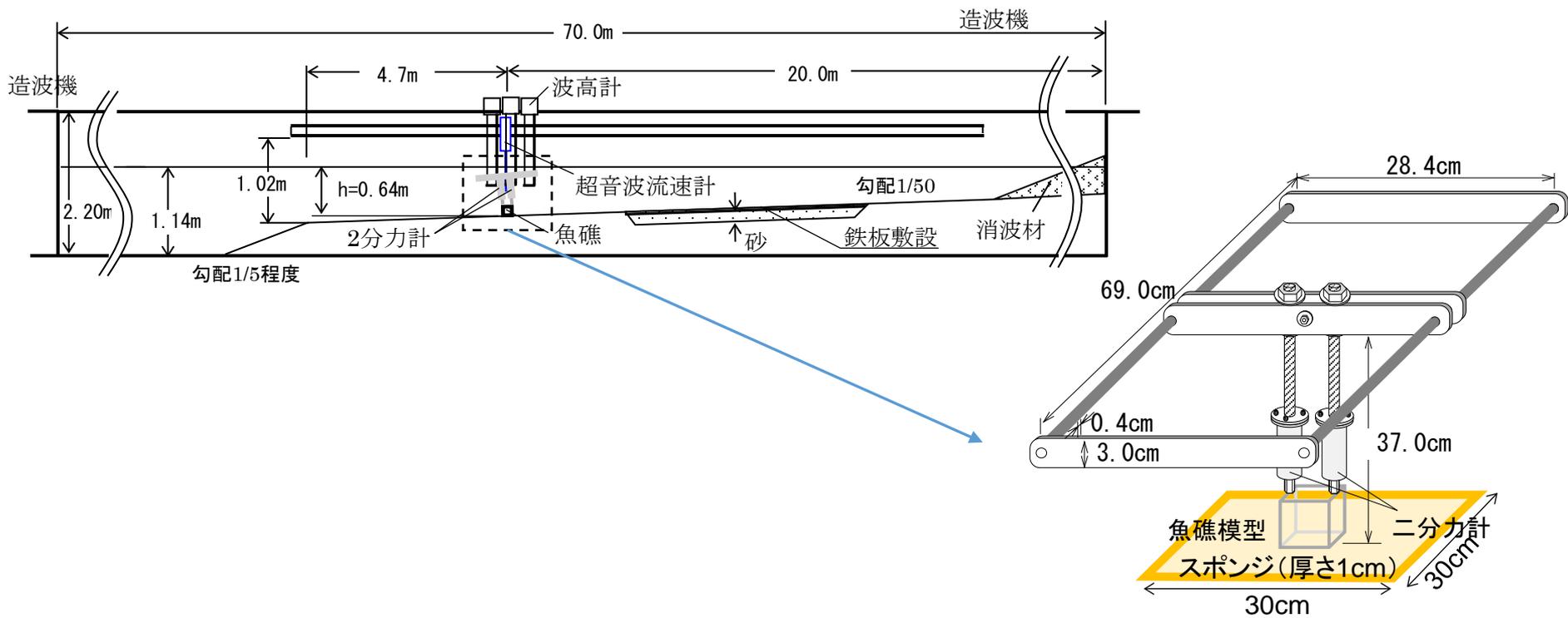
# 課題 1 流体力算定法の現地検証：対象施設の流体力係数の測定（その2）

## 方法（続き）

作用波：周期2.0, 3.0, 4.0 sの3通りに対して波高5通り（5~40cm）の規則波

計測項目（計測機器）：水面変動（容量式波高計）、水平・鉛直流速（超音波流速計）、水平・鉛直流体力（分力計）

流体力の測定：底面上に置かれた状態を想定して下図に示す方法で測定



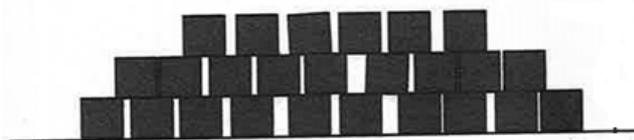
計測イメージ図

## 課題 2 照査法の妥当性に関する沈設魚礁の実態調査

- 昨年度は、沈設魚礁の移動状況を位置の変化から把握できる施設を全国の施設の中から探索したが、正確な設置位置情報が少なく（調査に適する施設は4カ所のみですべて最近の同一県）。このような調査方法を全国の魚礁調査に適用するのは難しい。
- 全国的調査の可能性のある方法として、層積みされたコンクリート魚礁の高さの変化に焦点を当てた調査を検討する。層積み魚礁では、その高さも設計の目標値とされ、施工後、音響測深等により調査されている。そこで、層積み魚礁の高さが落下により低下していないかを調べる。

### 【調査方法】

- 1) 昨年度収集した全国の安定計算表（H24～25年度、約220件）の中から該当する施設で、安全率の比較的低い魚礁を絞り込み、調査を実施する。調査では、出来型の音響調査結果を入手し、マルチビームによる測量を行い、移動・礁高変化の有無を調べる。
- 2) 補足として、落下が確認された層積み魚礁を調査する（施工資料の収集と潜水による現状調査）。
- 3) 調査対象魚礁の受けた最大波浪を推定し、現行の設計法の妥当性を検討する。

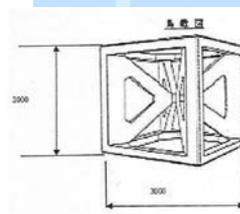
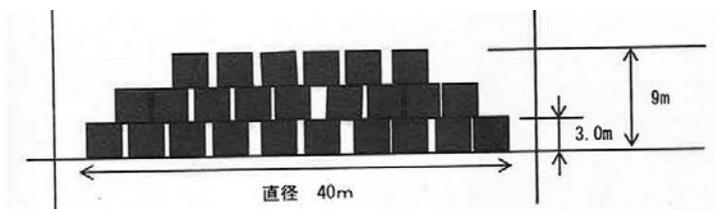


層積み魚礁の例

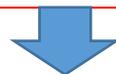
# 課題2 沈設魚礁の実態調査（その2）：抽出された安全率の低い層積み魚礁

## 設計条件と安全率

018-1	豊浜沖合漁場
波高	7.67m
周期	13.5sec
水深	39m以上
安全率(滑動)	1.34
安全率(転倒)	2.23



- 施工開始から4年を経過
- 現状は不明
- 層積み高さが9mより下がってれば被災と判断

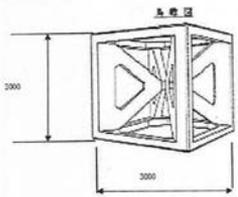


- マルチビームソナーによる滑動の確認
- 最寄りの波浪観測情報等から遭遇した最大波浪を推定し、設計条件と比較

# 課題2 沈設魚礁の実態調査（その3）：落下の確認情報が得られた層積み魚礁

## 経緯

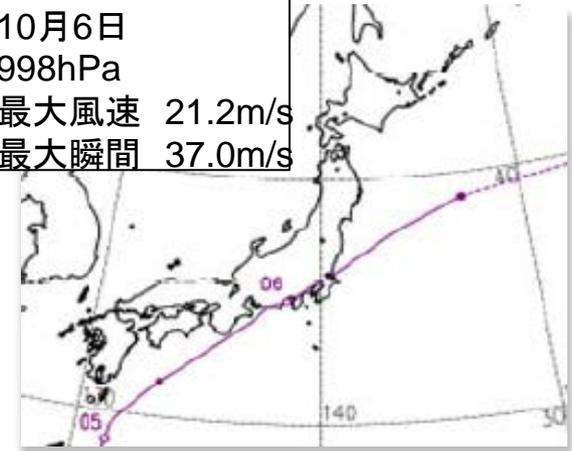
- 館山沖水深約19m、半径15mの範囲にFP魚礁3m型が防衛省により2層積みで設置（2010年施工）
- 東京海洋大学館山ステーションで定期観察され、2014年10月の台風18号で魚礁が落下したことが推察



## 検討計画

- 安定計算表、施工後のビデオ映像の入手
- 潜水調査による滑動の確認
- 最寄りの波浪観測情報等から被災時の波浪条件を推定し、設計条件と比較

2014年18号台風  
10月6日  
998hPa  
最大風速 21.2m/s  
最大瞬間 37.0m/s



# 課題3 砂質底上での安全性の照査法に関する 実験的検討

## 目的

砂質底上での魚礁模型の安定性について、不規則波中での洗掘、移動状況及び被災限界を明らかにする。また、砂面上での見掛けの摩擦係数について妥当な設計値を再検討する。

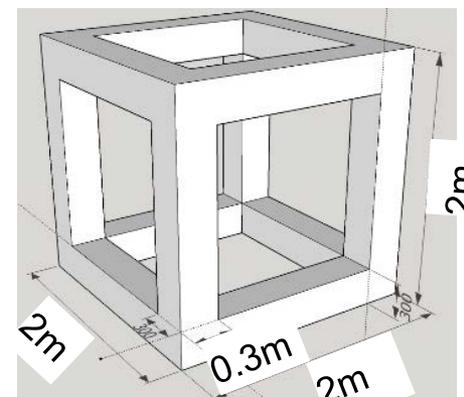
## 方法

実験水槽：前掲と同じ

模型縮尺：1/25

魚礁模型：角型魚礁の1/25縮尺模型で、密度を4.6、2.3、1.5g/cm<sup>3</sup>の3通りに変える

作用波：以下の限界波高を有義波高とした不規則波



角型魚礁(寸法:実物スケール)

予想される滑動／転倒の限界波高

魚礁の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	有義波周期(s)		
	2.0	3.0	4.0
1.5	16.0/19.0	14.5/17.0	14.3/17.0
2.3	27.0/32.5	24.0/29.0	23.5/28.5
3.5	38.2/46.5	34.0/41.0	33.5/41.0

# 課題3 砂質底上での安全性の照査法に関する 実験的検討（その2）

砂面上での見掛けの摩擦係数を定数と仮定できるか（すなわち、設計値を新たに設定できるか）を検討する。

## 方法

小型魚礁の被災限界（転倒限界を想定）における見掛けの摩擦係数を以下で定義する。

$$\text{見掛けの摩擦係数} = \frac{\text{被災限界での水平流体力}}{\text{魚礁の水中重量} - \text{揚力}} \text{※1}$$

※1 別途測定する最大水平流体力発生時の揚力

魚礁模型の見掛けの摩擦係数がどのように変わるかを実験により調べる。



一定と仮定できれば設計値を設定できる。

砂面上での見掛けの摩擦係数は、以下の理由で測定が難しい。

- 波によって洗掘・埋没状態が変化し、それによって見掛けの摩擦係数が変化する。
- 砂面上の摩擦力を引張試験で測定した場合、砂面が変形しやすく、最大静止摩擦力の評価が難しくなる。

# 着定基質の安定質量算定式の検討 H28年度計画

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所  
国際気象海洋(株)

# 着定基質（石材）の安定質量算定法の検討

これまでの提案式は以下のとおり

$$M = \alpha \rho_s \left[ \frac{K_m}{2\mu g(\rho_s / \rho - 1)} \right]^3 U^6$$

$M$ : 石材の安定質量(t)

$\mu$ : 静止摩擦係数

$\rho_s$ 、 $\rho$ : 石材と海水の密度(t/m<sup>3</sup>)

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{単体で設置} \\ 0.2 & \text{敷き詰め密度75\%以上の群で設置} \\ 0.04 & \text{囲い礁を設けて敷詰め密度75\%以上の群で設置} \end{cases}$$

$$K_m = \begin{cases} 3.5 & \text{波の場} \\ 2.3 & \text{流れの場} \end{cases}$$

$$U = \begin{cases} U_m & \text{波の場 (} U_m \text{: 最大波動流速)} \\ U_c & \text{流れの場 (} U_c \text{: 底面から石の高さまでの2乗平均流速)} \end{cases}$$

## 昨年度の結論と今年度の方針

模型実験では、提案式は全体的には概ね妥当な推定値を与えることが確認  
しかし現地実験では、提案式が現行式よりも改善されたものの、まだかなり過  
大な安定質量を算出する（安定質量算定値は現行式で46t、提案式で15t、実  
際は約2t）ことが示唆。今年度は、この問題が模型実験結果でみられた周期に  
よる系統的差異に関係すると考え、その差異も適切に説明できるよう提案式の  
改良または全面的見直しを行う。



# 着定基質の安定質量算定法の検討

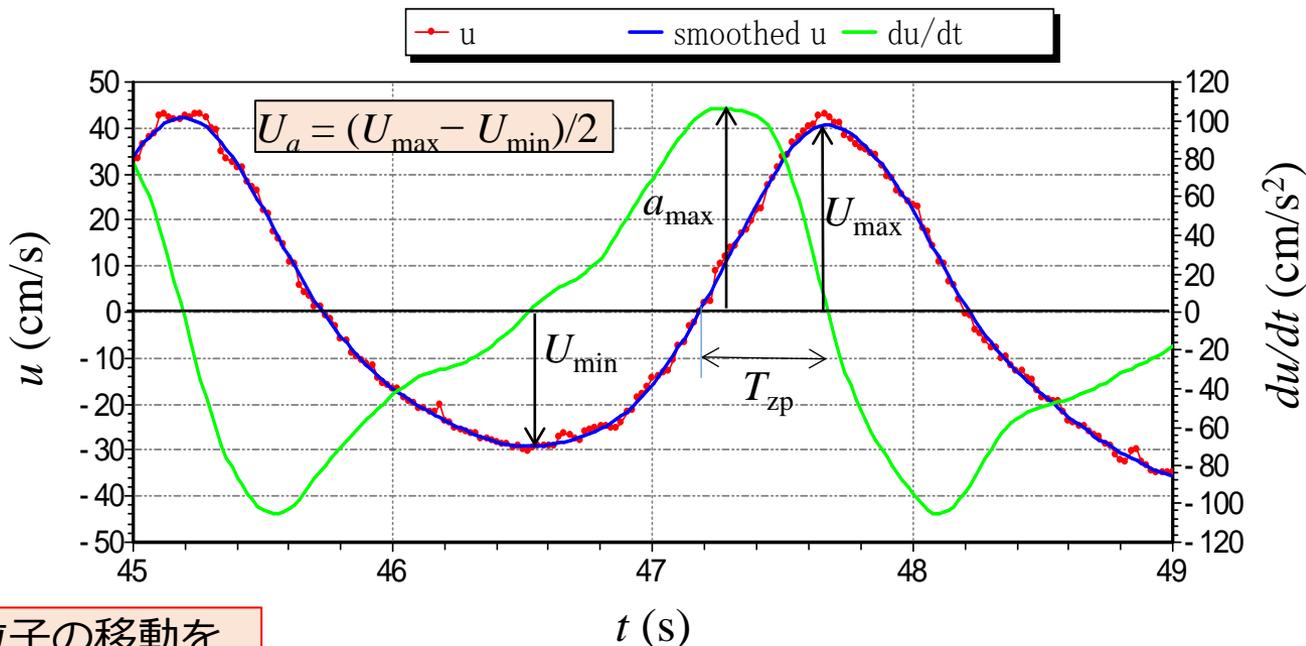
## 流速の評価方法と提案式の係数の再検討

これまでの模型実験データの再解析と補足実験により提案式の見直しを行い、現地実験の結果にも合致した式の再構築を試みる。

### 流速の評価方法

被害率の変化を最もよく説明できる特性値を明らかにする。

$U_{\max}$  と  $U_a$ 、 $a_{\max}$  との比較



(参考) 振動流中での底質粒子の移動を支配する無次元量：

$$\frac{\rho U_{\max}^2}{(\rho_s - \rho)gD}, \frac{\rho U_{\max}}{(\rho_s - \rho)gT}, \frac{a}{D}, \dots$$

ここに、 $D$ ：粒径、 $T$ ：振動流の周期、 $a$ ：底面での水粒子軌道振幅

流速の測定例と記号の定義



# 着定基質の安定質量算定法の検討（続き）

## 補足実験（回流水槽実験）

### 目的

以下を実験的に確認する

- 非対称な流速波形の評価の妥当性
- 波・流れ共存場への拡張性
- KC数（水粒子軌道と石の径との比）

※1の影響の確認

※1 これまでの模型実験は割石1t、縮尺1/15を想定して実施。しかし実際の割石サイズ範囲は30kg~3tと広い。

### 方法

砕石の被災限界流速を以下の条件で調べる

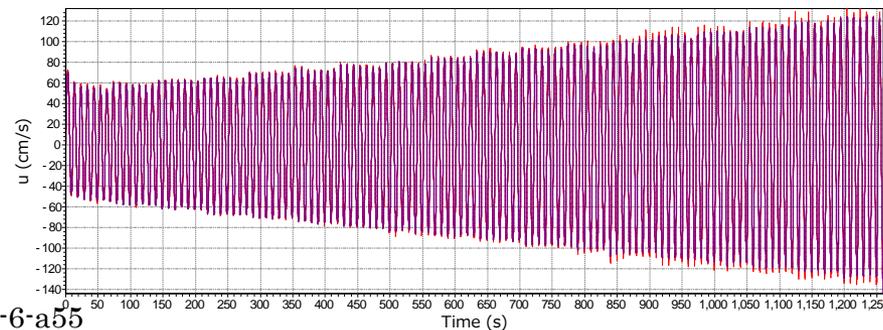
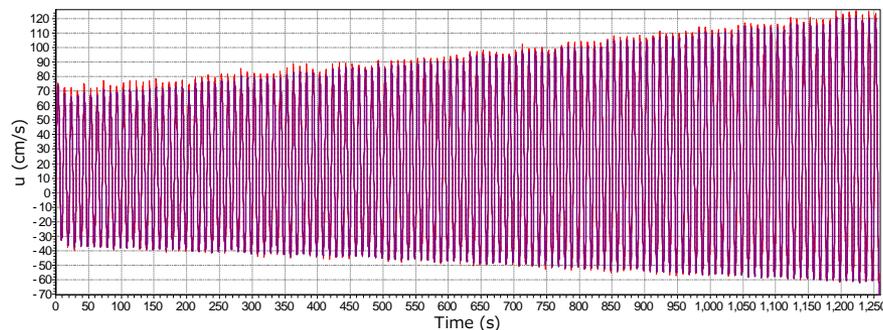
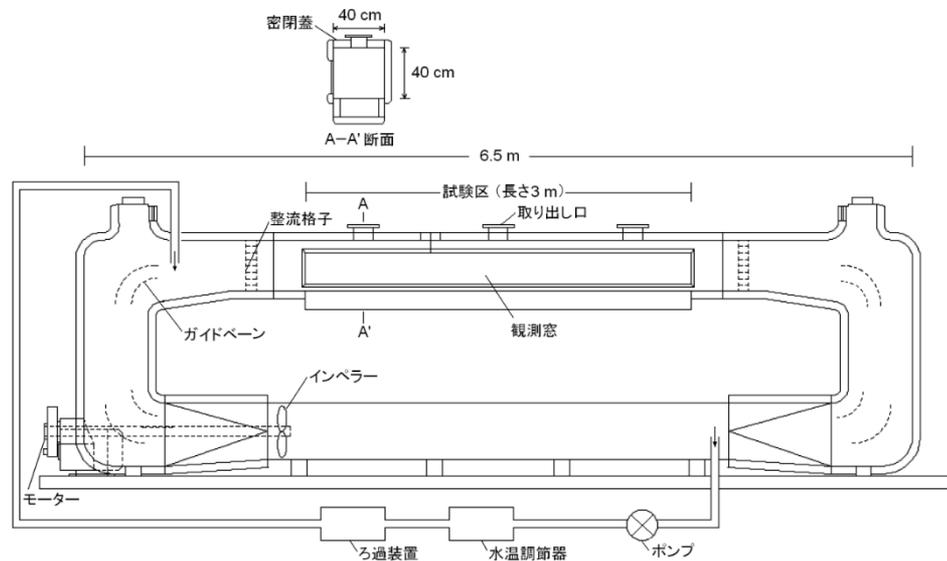
1)非対称振動流 ( $U_{max} = -2U_{min}$ )

2)対称振動流 ( $U_{max} = -U_{min}$ )

周期はともに10s

非対称  
振動流

対称振  
動流



# 海洋モデルの利用による流れの設計条件 の決定に関する検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所

# H28年度計画

## 事例の蓄積

海域によって外力等の条件が異なるため、事例の積み重ねが必要である。

福島県沖に加えて、長期流速観測と海洋モデルによる数値計算を行っている茨城沖、島根県沖を事例海域として検討する。

さらに表層型浮魚礁での流速観測データを収集し、深海域での海洋モデルの予測値（但し、日平均化データ）との比較を行う。

## 検討内容

海洋モデルの適合性を検討するとともに、海洋モデルを設計流速の決定に利用する際の注意事項を整理する。

注意事項としては、密度成層と適合性との関係、最大波高と最大流速の同時性や方向関係などを検討する。

## 最大力係数 $C_{F_{\max}}$ について

H27 年度第 2 回委員会において、 $C_{F_{\max}}$  は加速度による力（慣性力）を考慮していない、あるいは慣性力が卓越する大型の魚礁の場合は問題になるといった意見があった。そのようなことはないことを以下に示す。

### 説明

#### 1) 支配的な物理法則に基づく次元解析（江守一郎 1985）による説明

$$\text{流体力 } F = F_D + F_I \quad (1)$$

$$\text{抗力 } F_D = \rho u^2 l^2 \propto \rho U_m^2 l^2 \quad (2)$$

$$\text{慣性力 } F_I = \rho \frac{u}{t} l^3 \propto \rho \frac{U_m}{T} l^3 \quad (3)$$

ここに、 $\rho$  : 流体の密度、 $u = U_m \sin(2\pi t/T)$  : 波動流速、 $l$  : 物体の代表長さ

慣性力と抗力の比を

$$\frac{F_I}{F_D} = \alpha \frac{\rho U_m l^3 / T}{\rho U_m^2 l^2} = \alpha \frac{l}{U_m T} = \frac{\alpha}{K_C} \quad (4)$$

ここに、 $K_C = U_m T / l$ 、 $\alpha$  : 係数（KC 数に依存）

とおく。式(1)の両辺を  $F_D$  で割ると、

$$\frac{F}{F_D} = 1 + \frac{F_I}{F_D} = 1 + \frac{\alpha}{K_C} \quad (5)$$

すなわち、次式が得られる。

$$\frac{F}{\rho U_m^2 l^2} \propto 1 + \frac{\alpha}{K_C} \quad (6)$$

したがって、次式で定義される  $C_{F_{\max}}$  も  $K_C$  の関数（主要パイナンバーが KC 数）である。

$$C_{F_{\max}} \equiv \frac{F_{\max}}{\rho U_m^2 l^2} \quad (7)$$

流体力に粘性力も重要であれば、式(1)の右辺に粘性力  $F_V = \mu u l \propto \mu U_m l$  ( $\mu$  : 流体の粘性係数) を加える。その場合は、 $C_{F_{\max}}$  が KC 数だけでなく、レイノルズ数  $Re = U_m l / \nu$  ( $\nu \equiv \mu / \rho$ ) の関数になることが示される。

#### 2) 微分方程式からの説明

$$F = \frac{1}{2} \rho u^2 C_D A + \rho \frac{\partial u}{\partial t} C_M V = \rho U_m^2 C_D A \sin^2 \frac{2\pi t}{T} + C_M V \rho U_m \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (8)$$

式(8)の両辺を $(1/2)\rho U_m^2 A$ で割ると、

$$\frac{F}{\rho U_m^2 A/2} = C_D \sin^2 \frac{2\pi t}{T} + \frac{2C_M}{K_C'} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (9)$$

ここに、 $K_C' = U_m T A / (\pi V)$  ( $U_m T / \pi$ は半周期の水粒子軌道振幅であることに注意)

$y = F / \rho U_m^2 A$ 、 $x = \cos(2\pi t / T)$ とおくと、式(9)は次式となる。

$$y = C_D(1 - x^2) + \frac{2C_M}{K_C'} x \quad (10)$$

したがって、 $F = F_{\max}$  (すなわち、 $y$ が最大) となるときの  $x$  は  $\partial y / \partial x = 0$  より、

$$\frac{\partial y}{\partial x} = -2C_D x + \frac{2C_M}{K_C'} = 0 \quad (11)$$

よって

$$x = \frac{C_M}{C_D K_C'} \quad (12)$$

式(10)と式(12)より  $y$  の最大値、すなわち  $C_{F_{\max}}$  は次式で表される。

$$C_{F_{\max}} = C_D \left[ 1 - \left( \frac{C_M}{C_D K_C'} \right)^2 \right] + \frac{2C_M^2}{C_D K_C'^2} \quad (13)$$

$C_D$ と $C_M$ が共にKC数の関数である場合、式(13)は $C_{F_{\max}}$ もKC数の関数であることを表す。

## まとめ

- 次元解析から導かれる最大力係数  $C_{F_{\max}}$  は主要パイナンバーの関数として近似される。
- 主要パイナンバーとしてKC数、レイノルズ数などが考えられるが、 $C_D$ 、 $C_M$ の主要パイナンバーがKC数であれば、 $C_{F_{\max}}$ の主要パイナンバーもKC数となる。その場合は、 $C_{F_{\max}}$ は抗力と慣性力との比 (すなわちKC数) とは無関係に、 $C_{F_{\max}}$ はKC数の関数として表すことができる。
- モリソン式では原理的に任意の流速波形に対して最大流体力を求めることができる。
- これに対して、 $C_{F_{\max}}$ の式では流速波形が正弦波で近似できることを前提としている。しかし、沈設魚礁の設計では、正弦波形の波動流速が仮定されているので、波の場では式(13)が成立する。また、波・流れ共存場での  $C_{F_{\max}}$  の提案式では、波による力と流れによる力は独立で、流体力は両者の和として表されると仮定されているので、式(13)は同様に成り立つ。すなわち、 $C_{F_{\max}}$ の式はモリソン式と同様にKC数に無関係に適用され、設計体系としても矛盾しない。

平成 27 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会  
議 事 抄 録

日時：平成 28 年 2 月 19 日（金） 13:30～16:30

開催場所：エッサム神田ホール

**(1)開会****◎事務局(水工研 明田部長):**

委員会を始めさせていただきます。本日は年度末のお忙しい中、委員の先生方ご出席いただきありがとうございます。昨年度までの調査で一定の成果は出ているが、今年度は魚礁、着底基質に着眼して設計手法の高度化について議論を進めていきたい。3人の先生におかれましてはよろしくご指導いただきたい。

**(2)水産庁挨拶****◎水産庁(吉塚課長):**

本日は先生方ご多忙の中委員会にご出席いただきありがとうございます。仕様規定から性能設計への移行、近年の技術の進歩を鑑みて設計手法の改訂を進めてきたが、漁場施設については技術的知見が十分でなかったため、それを深める意味でこの委員会を行うこととした。先生方の貴重なご意見を賜れば幸いであり、よろしくご指導をお願いいたします。

**(3)委員長挨拶****◎大竹委員長:**

委員の先生方お集まりいただきありがとうございます。前回委員会からある程度時間が経過したので、進捗したところを説明してほしい。

**(4)調査の背景と本調査の検討項目について、前回委員会の指摘と対応****◎事務局(漁村総研 吉野主研):資料-1、資料-2:(省略)****◎質問・意見:****◎大竹委員長:**

漁場には様々な施設があるが、今回は 2 種が対象となっている。これらの設計条件をどのように考えるか。港湾は Hmax を使っているがそれに準じるのか。潮流等流れの鉛直分布をどのように変えていくのか。等々大きな課題になっている。そこで水産庁に聞きたいが、本委員会での議事は、設計参考図書

の修正を念頭にとりまとめることを求められているのか確認したい。

**◎水産庁:(内田課長補佐)**

必ずしも、設計指針を改訂することのみを前提とした議論を本委員会にお願いしているわけではなく、残された課題について、様々な知見を大きな視点で議論して頂きたい。

**◎大竹委員長:**

委員は研究者として、事業のことはわからないが、技術に関する事項については対応できる。

**◎水産庁:(内田課長補佐)**

検討していただいた改善策は、すぐに設計参考図書へ反映させるものと今後研究を継続するものの2つに分けて対応することとなるのではないかと。

**◎田島委員:**

実際に転倒等している事例を集めて課題を抽出することが必要である。

**◎事務局:(漁村総研 吉野主研)**

没水施設ということもあり、調査事例が少ない。そのため、本当に被災していないのか、被災しても顕在化していないのかわからないというのが現状である。今後この調査の中で、安全率の低い施設が既往最大クラスの気象擾乱を受けた際に調査に行くことも考えている。

**◎事務局:(水工研 中山部長)**

最近魚礁メーカーも様々な施策を講じているので、被災はほとんどないと聞いている。

**(5)着底基質の安定質量算定手法の検討**

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料-3:(省略)**

**◎田島委員:**

$U^6$ 式は質量と抗力のバランスの式と理解しているが、そうだと比重が変わると係数も変わるのではないかと。

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):**

それを考慮してある。導出については前回委員会資料に記載されている。

◎田島委員:

現地調査の割石のサイズは？また、加速度の経時変化によると 10 月 10 日に加速度が検出されている石と検出されていない石がある。これを移動の有無とできないか。

◎事務局(水工研 川俣 G 長):

割石サイズは 1.16~3.01t である。10 月 10 日の加速度は微小でノイズの可能性がある。

◎田島委員:

実験結果では周期の効果が認められるが、そうなると加速度に影響する。慣性力も効いてくるのではないか。

◎事務局(水工研 川俣 G 長):

そのとおりだが、実際には反流、マイナスの流速で動いている。

◎岡安委員:

それは波形がゆがむということか。

◎事務局(水工研 川俣 G 長):

そのとおり。

◎岡安委員:

加速度が検出されても、結局は石が動いていないのはどのようなことか。

◎事務局(水工研 川俣 G 長):

石がロックしていることである。

◎大竹委員長:

設計流速は何を使うのか。

◎事務局(水工研 川俣 G 長):

作用波から求められる最大流速を使う。

◎岡安委員:

施工については、石の密度が単体、75%、囲い礁付の三択しか想定しないのか。係数  $\alpha$  を滑らかに変化

させられるなら選択の幅が広がる。また、囲い礁の高さはどのように決めているか。石が飛び出すような移動は観察されたか。

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):**

密度については、その 3 種で実事業の内容を包含できると考えている。囲い礁高さは石と同程度。石が飛び出すような移動は観察されなかった。

**◎岡安委員:**

被災の定義は実験では移動の有無になるが、実施設でもその定義は妥当か。多少動いても問題ないのではないか。

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):**

動いて他の意思と当たって割れることもある。被災の定義は妥当と考えている。

**◎大竹委員長:**

囲い礁の石と内部の石の移動特性は違ってくるか。また、この考えで求められる質量の石材で地元は合意するだろうか。

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):**

恐らくほとんど変わらない。質量については生物的判断も加わるが問題ないと思う。

**◎水産庁:(内田課長補佐)**

石が砂にめり込んで摩擦係数が大きくなることはあるか。

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):**

あるだろうが、安全側を見込んで変更しないほうが良い。

**◎大竹委員長:**

追加の現地調査を行う予定はあるか。

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):**

新たな現地調査は行わず、これまでの結果を基にまとめていきたい。

**◎大竹委員長、岡安委員、田島委員:**

新たな現地調査は行わず、これまでの結果を基にまとめていくことで合意する。

## (6)沈設魚礁の安全性の照査法の検討

◎事務局(水工研 川俣 G 長、アルファ水工 綿貫部長):資料-4、補足資料-4.1、補足資料-4.2:(省略)

### 【提案式について】

#### ◎田島委員:

提案式は抗力のみを考慮し、加速度は非考慮なのか。

#### ◎事務局(水工研 中山部長):

両方を繋げている。両者に位相差はあるが、KC 数が大きく慣性力項は小さいので良い線行っている。設計流速なので、最大値を押さえればよい。部材が大きくなると KC 数が小さくなるが、魚礁のような部材自体は小さい場合は問題にはならない。また、この式一本とするわけではなく、モリソン式と併記としたい。

#### ◎大竹委員長:

実際の魚礁の KC 数はどの程度か。

#### ◎事務局(水工研 川俣 G 長):

概ね 60 以上である。

#### ◎田島委員:

流速の 2 乗を使うと安全側になるので、この考えで良いと思う。また、波高、周期のスケールを変えて比較検討することも必要だろう。

#### ◎岡安委員:

補足資料-4.1 の p.5 で CM が KC 数に合わせて大きくなるが、KC 数が大きくなると慣性力項の寄与が小さくなるため、結局結果にはあまり影響しないだろう。

#### ◎田島委員:

大きな魚礁の適用に問題ないか。

#### ◎事務局(水工研 川俣 G 長):

高層魚礁は幼生期のほとんどが空隙なので問題ない。円筒型の魚礁には若干の懸念があるが、大きな

穴があるので問題ないと思う。

**◎岡安委員：**

大きくなるほど空隙が大きくなり抗力が卓越する。魚礁内に死水域があると慣性力が効いてくるが、それほど大きくはならないだろう。ただし、注釈としてある KC 数以上では適用できるといった注意書きが必要だろう。

**◎大竹委員長：**

魚礁の穴に関して、どの程度の大きさならば使えるといった検討も必要。

**◎事務局(水工研 中山部長)：**

メーカー側の努力も必要。CD は既出だが、振動流中の実験も行うべき。

**◎岡安委員：**

本来ならばレイノルズ数も関連付けねばならないだろう。

**◎事務局(水工研 川俣 G 長)：**

難しい。平板ならば実スケール実験を行っており、計算と実験で値は整合していた。

**【現地調査について】**

**◎田島委員：**

A、B 両方で動いているが、摩擦係数はどのような値を使っているか。

**◎事務局(アルファ水工 綿貫部長)：**

B はコンクリート同士なので 0.5 を使っていると思う。確認した上で、今後作用流体力の検討を行う。

**【沈下埋没について】**

**◎水産庁(内田課長補佐)：**

経年変化での沈下と、設計上の問題による沈下の両者があるのか。

**◎大竹委員長：**

両方あるだろう。魚礁整備においては、きちんと地盤の調査を行っていないことが多い。沈下埋没には実態把握が必要だが、そのような、例えばアンケート調査のようなことができるか。

**◎事務局(水工研 中山部長):**

魚礁協会等で行っていると思う。調べてみる。

**◎水産庁(内田課長補佐):**

海中施設なので管理という考えが無かったのが現状である。

**◎岡安委員:**

経年変化である程度は沈むだろうが、復旧に多大なコストを要するならば諦めることも考えるべき。構造によって沈みやすい施設があるなら問題である。

**◎大竹委員長:**

水産庁で状況調査を行っているなら委員会を出してほしい。

**◎水産庁(内田課長補佐):**

過去のデータを調べる。

**【移動について】**

**◎田島委員:**

移動量を考慮するという事は、外力の作用時間も定めねばならないが、その辺どのように考えているか。

**◎事務局(水工研 中山部長):**

実施することは可能だが、そこまで適用すべきかは議論が必要。許容値は通常魚礁なら施工精度程度は許容し、高層魚礁は転倒につながるので許容しないという考え方もある。

**◎大竹委員長:**

課題をもう少し絞るべき。許容値をどこまで設計に取り込めるか。そのためにも移動の実態を知りたい。

**◎水産庁(内田課長補佐):**

結局、例えば着底基質なら石1個、石2個という議論に帰着してしまう。

**◎事務局(水工研 中山部長):**

着底基質なら被害率でまとめるが、魚礁は難しい。

◎大竹委員長:

この件については、もう少し議論を深める必要がある。

(7)海洋モデルによる流動情報の設計への取り組み

◎事務局(水工研 杉松研究員):資料-5:(省略)

◎岡安委員:

日最大値は概ね合っているが、その発生時刻は合っていないということで良いか。

◎田島委員:

設計に使うなら、ある擾乱イベントのみ精度が確保できればよいという考えもある。

◎岡安委員:

そのイベント発生有無が計算を回さないとわからないところが苦しい。

◎大竹委員長:

1/7 乗則という便利な方法の精度が低いことがわかり、その対処案としてモデル利用が浮上した。ただし、利用についてはもう少し議論やデータ蓄積が必要であろう。どのような場合なら使えるのか考えてほしい。

(8)今後の課題

◎事務局(漁村総研 吉野主研):

沈設魚礁設計の提案手法の適用範囲検討について、今後の議題とさせてほしい。

◎大竹委員長:

魚礁を公共事業で整備しているのは日本だけであり、日本が技術でリードできる分野である。そのため、データを蓄積するような組織も必要だろう。

(9)その他

特に無し。

## (10)閉会

### ◎事務局(水工研 明田部長)

以上いただいた意見を基に検討を進める。委員の皆様におかれては、今後もよろしくご指導を賜りたい。

平成 28 年度

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第 2 回検討委員会資料

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会（第 2 回）

## 議 事 次 第

日 時：平成 28 年 12 月 12 日（月） 15:00～17:00

場 所：エッサム神田ホール 1 号館 601 会議室

### 1. 開 会

### 2. 議 事

(1) 平成 28 年度第 1 回委員会の指摘と対応について

(2) 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討について

- ・ 沈設魚礁の流体力算定の検討について
- ・ 沈設魚礁の安定性の検討について

(3) 着定基質の安定質量算定式の検討について

(4) 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討について

### 3. 閉 会

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会（第 2 回）

配布資料

- 出席者名簿
- 座席表
- 資料 1 平成 28 年度第 1 回委員会の指摘と対応
- 資料 2 論点メモ 第 2 回検討委員会での論点
- 資料 3 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討
- 資料 4 着定基質の安定質量算定式の検討
- 資料 5 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討
- 参考資料 平成 28 年度第 1 回委員会の議事抄録

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

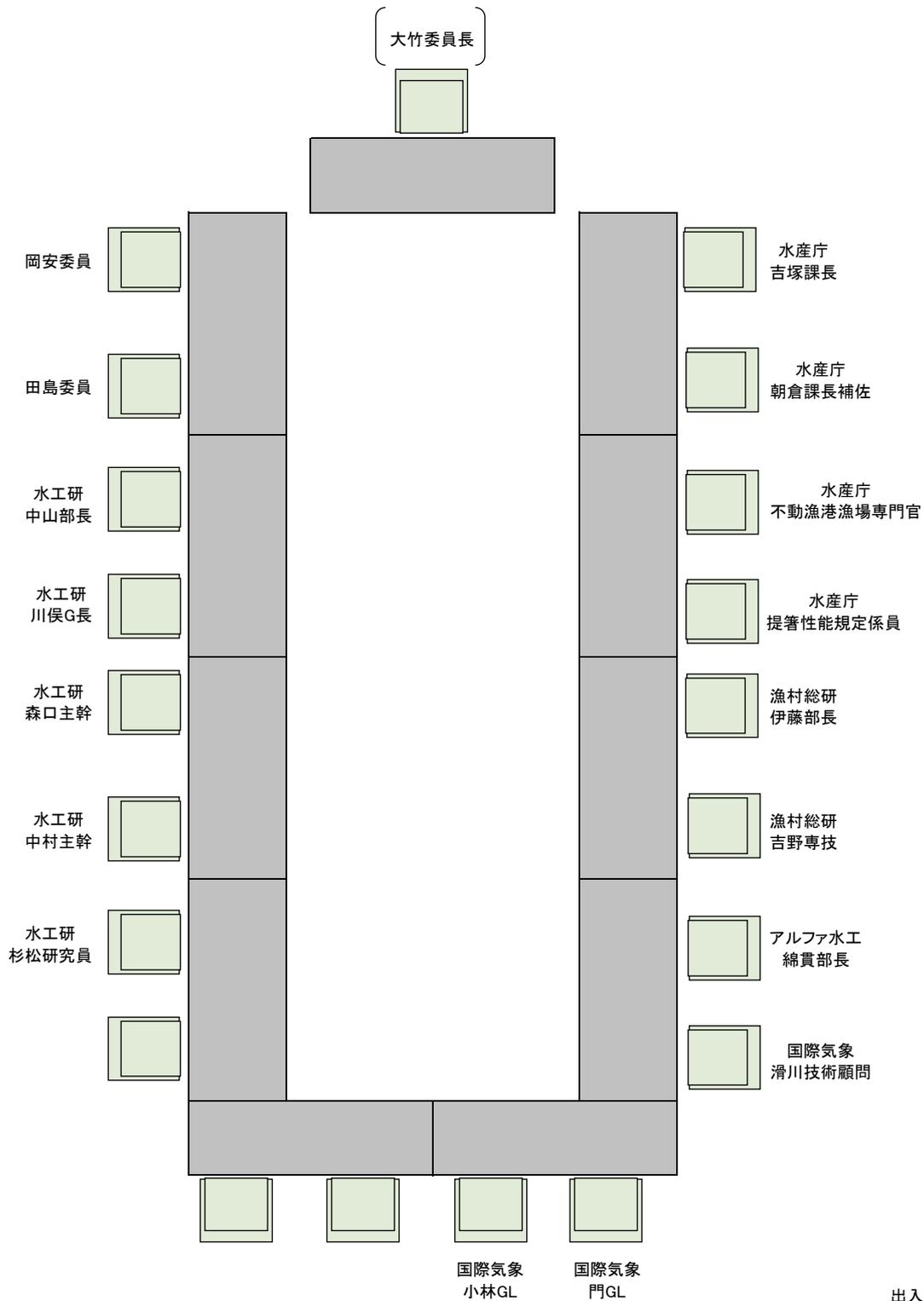
第 2 回委員会 出席者名簿

	所 属 ・ 役 職	氏 名	備 考
委員	福井県立大学 海洋生物資源学部海洋生物資源学科 教授	大竹 臣哉	
	国立大学法人東京海洋大学 学術研究院 海洋科学系海洋環境学部門 教授	岡安 章夫	
	東京大学 大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授	田島 芳満	
水産庁	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 課長	吉塚 靖浩	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 課長補佐(設計班担当)	朝倉 邦友	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 漁港漁場専門官	不動 雅之	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 性能規定係員	提箸 真弘	
事務局	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 部長	中山 哲厳	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 生物環境グループ グループ長	川俣 茂	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 生物環境グループ 主幹研究員	森口 朗彦	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ 主幹研究員	中村 克彦	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ 研究員	杉松 宏一	
	(一財) 漁港漁場漁村総合研究所 第 2 調査研究部 部長	伊藤 靖	
	株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京本部 技術部 部長	綿貫 啓	
	国際気象海洋株式会社 技術顧問	滑川 順	
	国際気象海洋株式会社 技術部 銚子事業所 グループリーダー	小林 学	
国際気象海洋株式会社 技術部 第 2 グループリーダー	門 安曇		

(敬称略)

平成28年度 漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査  
 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第2回委員会 座席表



# 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

## 平成 28 年度第 1 回委員会の指摘と対応

委員名	指摘事項	対応
<b>●沈設魚礁の安全性の照査法の改訂の方向性について</b>		
大竹 委員長	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 流体力算定式の場合分けについて、魚礁単体、層積み、高層魚礁のそれぞれどのように選択するのか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 流体力算定式については、場合分けせずに同一方法の適用を考えている。</li> </ul>
大竹 委員長	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 魚礁の効果は移動によって変わるため、許容移動量というものを考えない方がよいのではないか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 水中における沈設魚礁の挙動を把握した上で、適切な照査方法を検討していきたい。</li> <li>■ 今回では、水槽実験で明らかとなった沈設魚礁の挙動を報告する。</li> </ul>
岡安委員	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 魚礁を群体制置した場合と単体制置との流体力の考え方の整理が必要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 群体制置により魚礁単体に作用する流体力が減少する可能性はあるが、端部に位置する魚礁には単体制置と同程度の流体力が作用すると考えられる。</li> <li>■ しかし、沈設魚礁の効果や施工性等を考慮すると、施設の安全性の確保の観点から、設計上は群体制置の効果を検討しないことがよいと考えている。</li> </ul>
<b>●海洋モデルの利用による流れの設計条件の決定に関する検討について</b>		
大竹 委員長	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 浮魚礁での流速観測データは重要であり、蓄積すること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 高知県に加えて宮崎県での観測データの入手を進め、事例の蓄積を行う。</li> </ul>

## 第2回検討委員会での論点

### 1. 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討

#### (沈設魚礁の流体力算定の検討)

- 被災事例の検証手法や結果の解釈に問題がないか。
- 検証結果から、提案式に設計に用いる妥当性があるといえるか。
- 追加で検証しておくべき事項はあるか。

#### (沈設魚礁の安定性の検討)

- 実験手法や結果の解釈に問題はないか。
- 実験による沈設魚礁の挙動を考慮すると、安定性の照査にあたってはどのような観点から検討を進めていくべきか。(事務局では、これまでに①砂地での実際の滑動抵抗や被災過程を考慮した安定性評価と②許容移動量を考慮した安定評価の2つの案を提示している。)

### 2. 着定基質の安定質量算定式の検討

- 新提案式の構築にあたって用いた整理方法や仮定等に問題がないか
- 現地試験結果との比較を通して妥当性があるといえるか。
- 汎用性の確認のために残された課題として整理した内容に不足はないか。

### 3. 海洋モデルの利用による流れの設計条件の決定に関する検討

- 事例の分析手法、結果の解釈に問題がないか。
- 加えて蓄積すべき事例等はないか。

# 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討

1. 沈設魚礁の流体力算定の検討
2. 沈設魚礁の安定性の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所  
国際気象海洋(株)  
(株)アルファ水工コンサルタンツ

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

## 検討経緯と現行設計における問題点

- 山形沖での高層魚礁の被災（H15～17）を契機に流体力算定法について造波水槽での模型実験で再検討（H19～23）。その結果、従来法（モリソン式の簡略的用法）は波力を過小評価することなどが判明
- 魚礁の流体力に関する様々な水理模型実験を追加実施（H25～26）。その結果、現行設計において、以下の課題が判明。

$$\text{モリソン式 } F = \frac{1}{2} \rho C_D A (u + U_c) |u + U_c| + \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{式(1)}$$

$$u = U_m \sin(2\pi t / T) \quad \text{式(2)}$$

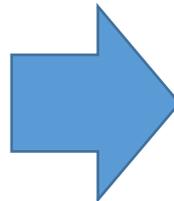
$F$ が最大となる $t$ を求め、最大力 $F_{\max}$ を算出

$\rho$ : 水の密度、 $C_D$ : 抗力係数、 $A$ : 基準面積、 $u$ : 水平波動流速、 $U_c$ : 流れによる設計流速、 $C_M$ : 慣性力係数、 $V$ : 基準体積、 $\partial u / \partial t$ : 水粒子加速度、 $U_m$ : 波による流速振幅、 $T$ : 波の周期

### 現行(従来法)

「手引」では簡略的に以下が仮定

- $U_m$  = 有義波からの算定値
- $C_D$  = 定常流中での値
- $C_M = 2$ 、 $V$  = 実容積



### 現行設計の課題

- 従来法は、波による流体力が過小評価されるおそれ
  - ・ 最大波力は波群中の最大波で発生
  - ・ 波動流の $C_D >$  定常流中での $C_D$

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

波による最大流体力が波群中の最大波で発生することを踏まえ、より実用的な算定式として、モリソン式の代替法を提案した。

## モリソン式の代替法（提案式）

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F_{\max}} A U_m^2$$

$\rho$ : 水の密度、 $C_{F_{\max}}$ : 最大力係数 (KC数の関数)、  
 $A$ : 基準面積、 $U_m$ : 最大波動流速※1

※1 算出方法は今後の検討課題であるが、(①最大波 ( $H_{1/250}$ 、 $T_{1/250}=T_{1/3}$ ) から微小振幅波理論により算出する方法、②周波数スペクトルや方向分散性を考慮する方法などが考えられる)

- 本提案式については、水理模型実験によって計測された最大流体力と比較することで、妥当性等が確認されている。
- **実用するに当たっては、現地レベルでの提案式の妥当性を検証する必要がある。**  
(今回報告内容)

しかし、実海域の条件は実験での条件と異なり、波・流れが共存する場となっていることから、上の提案式を基本として、共存場への適用を考慮し、以下の式を提案しているが、今後、この妥当性等についての検証が必要である。(次回以降報告予定)

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F_{\max}} A U_m^2 + \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2$$

$C_{DS}$ : 定常流中の抗力係数  
 $U_c$ : 設計で考慮する流れの速度

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

## 流体力算定法の妥当性の現地検証の流れ

① 検証に適した魚礁の抽出(既往整備補助申請資料検索)

【抽出条件】

- ・波浪・流速観測可能な設置水深(≤30m)
- ・正確な設置位置がわかっていること
- ・摩擦力の推定可能な設置条件(砂礫底等)
- ・現行設計での低い安全率(≈1.2)
- ・設計波に近い波浪に遭遇した魚礁

② 検証魚礁の移動状況の把握～既往調査資料精査

③ 検証魚礁の遭遇波浪の把握～波浪・流動観測

④ 魚礁の経験した最大流速、最大流体力の推定  
～波浪・流動観測結果、波浪シミュレーション等により  
提案算定法の適用と検証

⑤ 魚礁の流体力係数の測定  
水理模型実験による $C_D$ 、 $C_M$ 、 $C_{Fmax}$ の測定

⑥ 流体力算定法の妥当性の検討  
～推定安全率(最大流体力/摩擦力)からの魚礁の  
安定性の予測と実際との比較

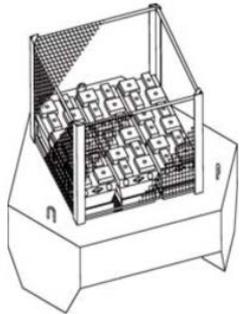
27年度

28年度～29年度

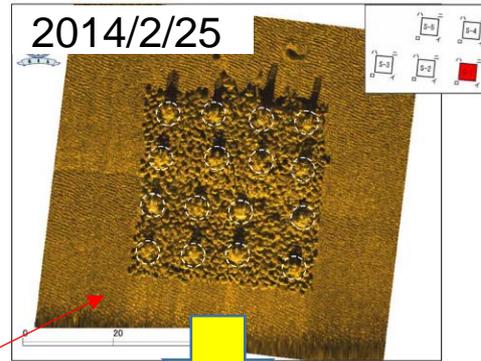
検証対象海域

- ・長崎県野母崎沖(結果報告)
- ・北海道豊浜沖(途中報告)
- ・千葉県館山沖(途中報告)

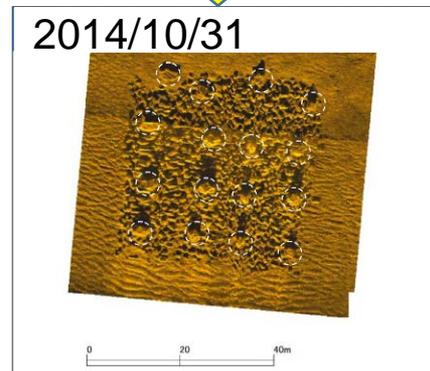
# (参考) 流体力算定法の妥当性の現地検証： 調査結果(長崎県野母崎沖A工区)



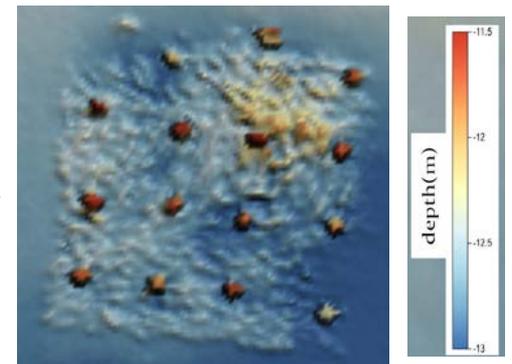
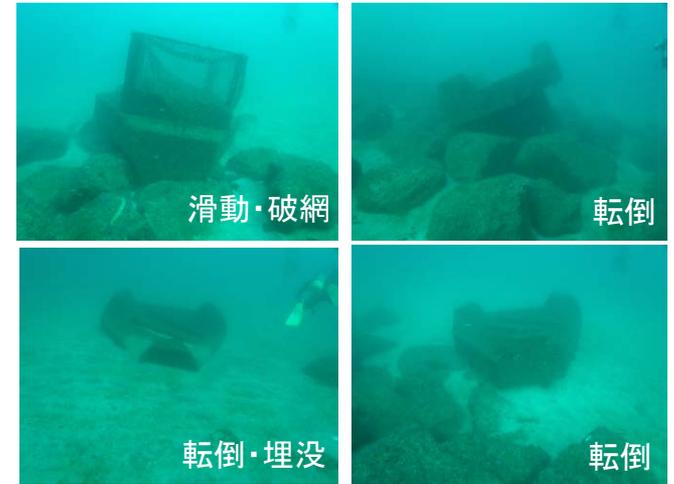
増殖礁



※白円の点線は調査機確認位置 (以下同)



(2014年7月の台風通過後)

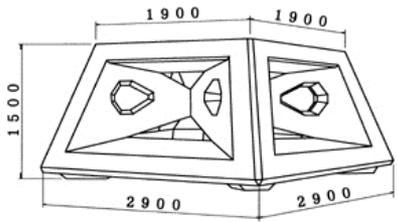


2015年12月

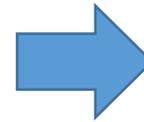
北側のブロックが最大約2m  
移動したと推定

A工区の捨石マウンド上の増殖礁：北側のブロックが滑動・転倒

# (参考) 流体力算定法の妥当性の現地検証： 調査結果(長崎県野母崎沖B工区)



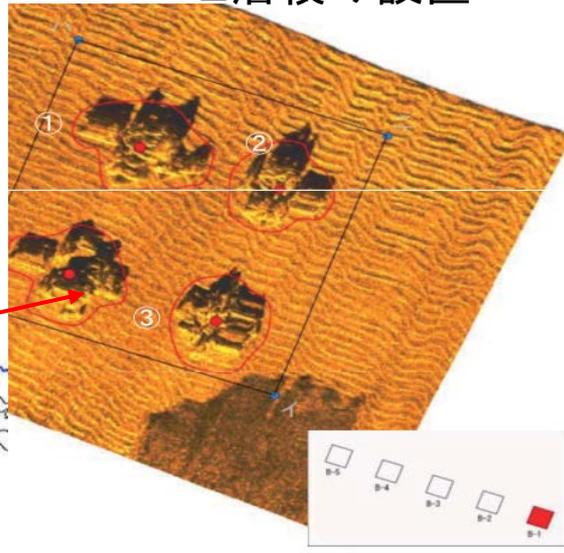
2層積み設置



2015年12月



2層目が落下し平坦化、設置範囲が拡大



2013年11月計測(施工直後)

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ① 被災時の高波浪推定

長崎県野母崎沖

- N県が実施した調査により2014年にブロックの滑動，転倒，埋没，破損が確認。その原因とされている2014年7月台風8号（T1408）の来襲時の波浪を推定する。
- 2015年9月～12月、A工区とB工区において実施した流速計付波高計とADCPによる波浪・流速データと最寄りの波浪観測点（NOWPHAS、伊王島）での観測データを用いて波浪推算モデルの検証を行う。

### 【波浪推算の方法】

NOWPHAS（伊王島）の波浪観測データは、対象地点での波浪との相関が必ずしも高くなったため、以下の手順で波浪推算を実施。

#### ① 海上風の推定

気象庁MSM（メソ数値予報モデル）の解析値及び予報値を使用（格子間隔：約5km）

#### ② 波浪推算

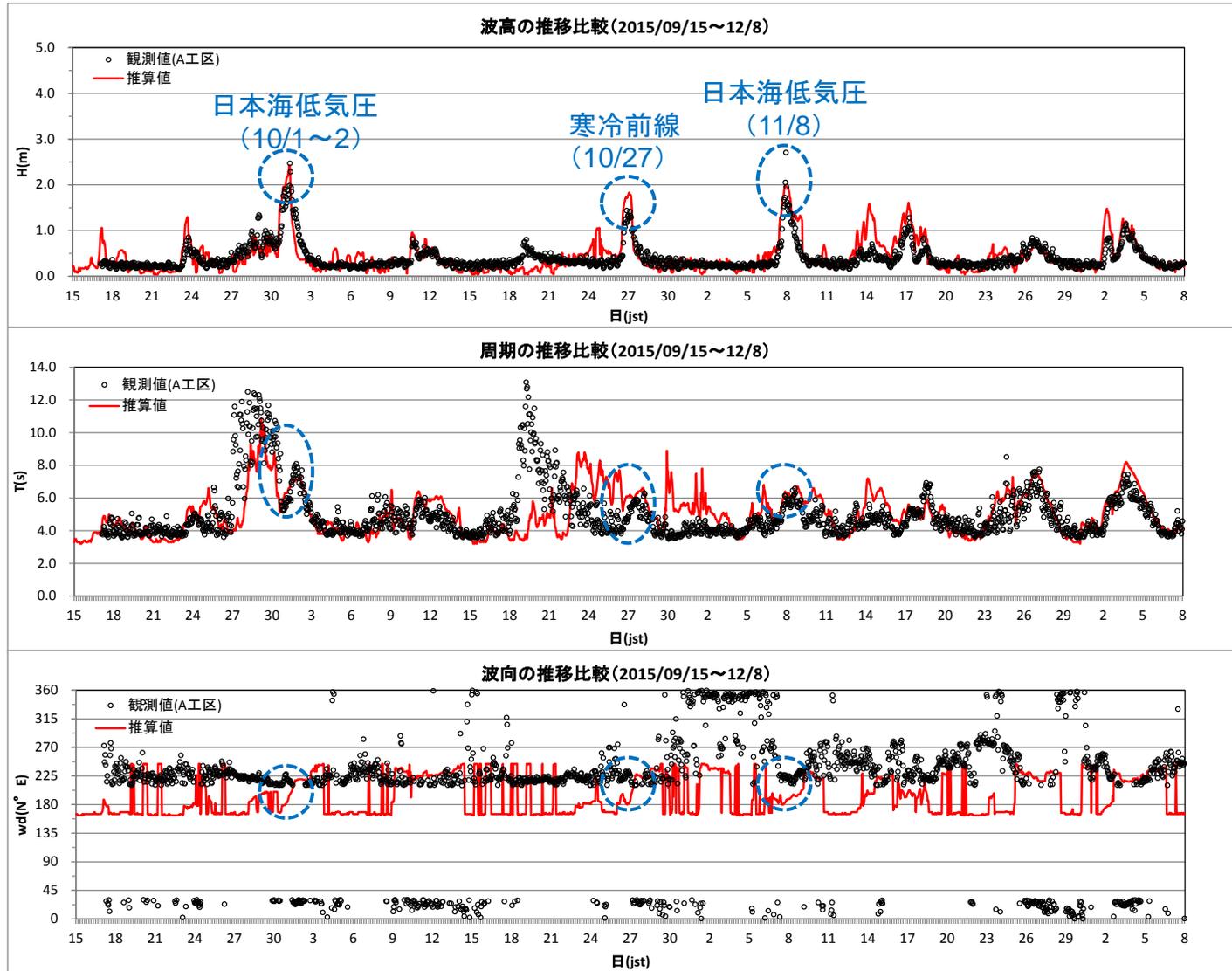
推算モデル：第3世代スペクトル法であるWAMに準拠した3G深海域モデル（格子間隔：5km）

#### ③ 波浪変形計算

エネルギー平衡方程式法（格子間隔20m）

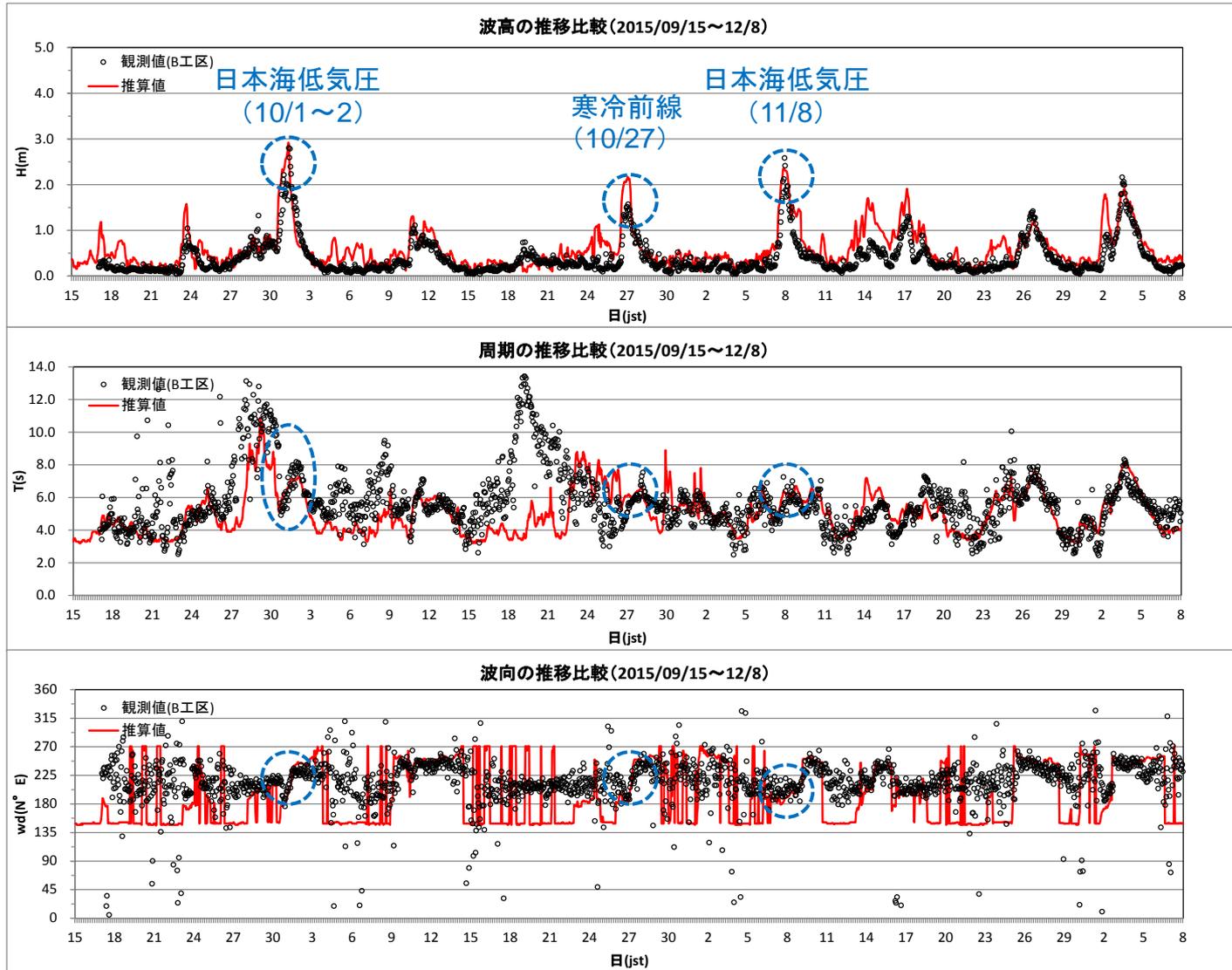


# 推算モデルの検証 (A工区, 2015/9~12)



野母崎A工区の観測波浪と推算波浪 ( $H_{1/3}$ ) の推移の比較 (2015/9/15~12/8)  
 高波浪時の推算波は観測値を再現している

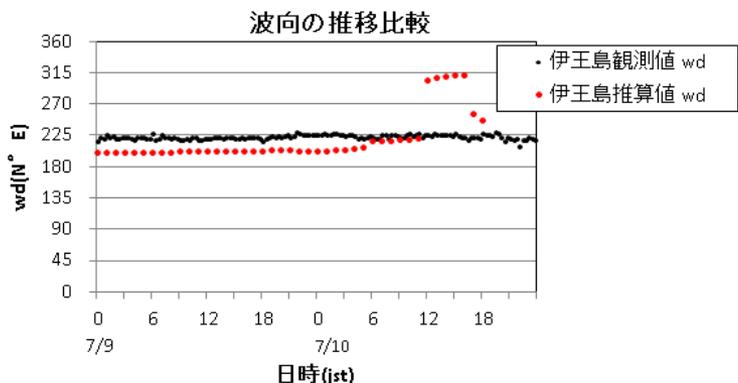
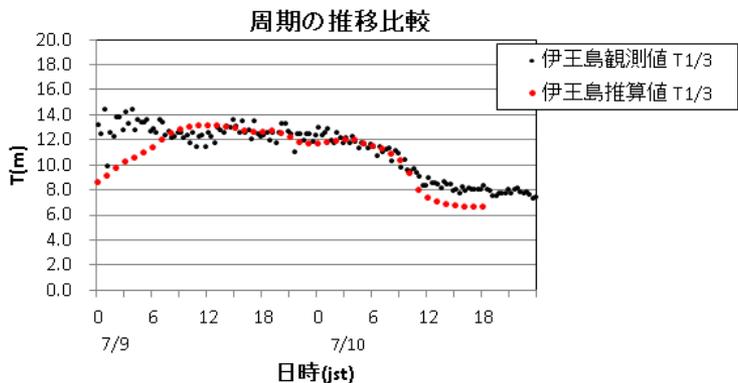
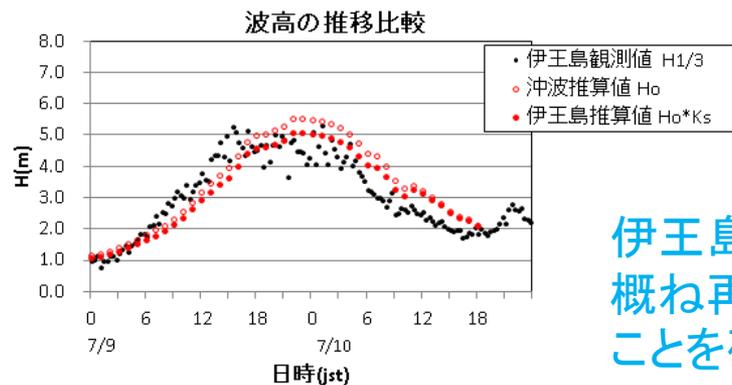
# 推算モデルの検証 (B工区, 2015/9~12)



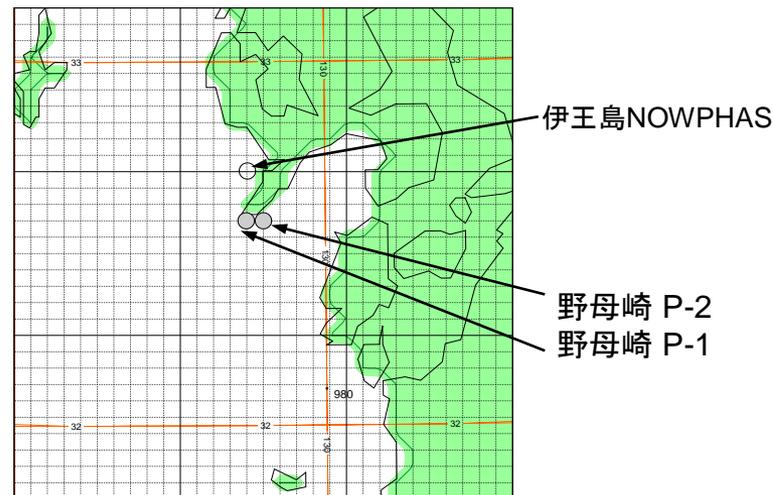
野母崎B工区の観測波浪と推算波浪 ( $H_{1/3}$ ) の推移の比較 (2015/9/15~12/8)  
 高波浪時の推算波は観測値を再現している

# 【波浪推算の結果(T1408)】

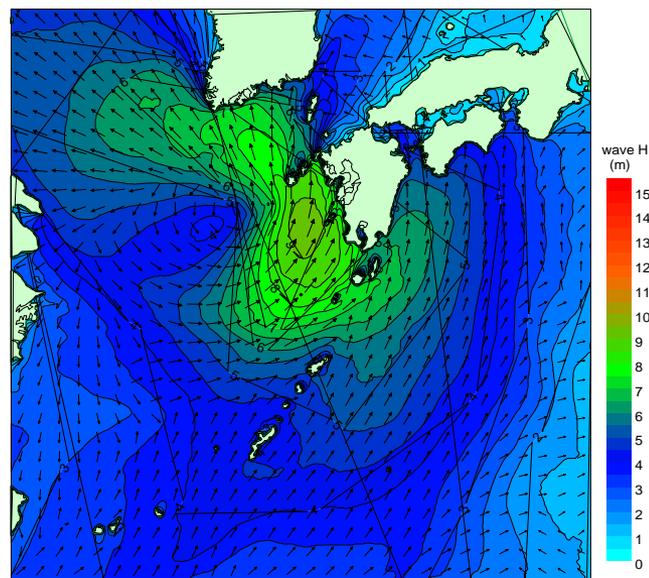
## ◆ NOWPHAS伊王島における推算波と観測波の比較



推算波と観測波の推移比較  
(伊王島, 2014/07/09~10)



推算地点位置図



推算波高最大時の波高分布  
(伊王島, 2014/07/09/23時)

# 【波浪推算の結果(T1408)】

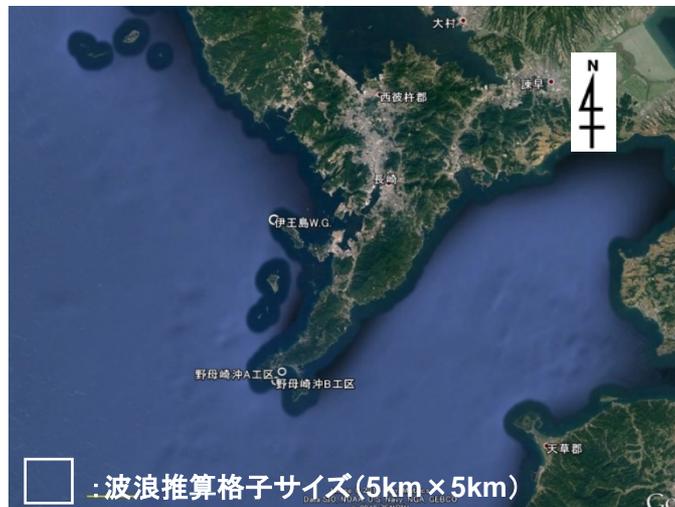
## ◆ 最大有義波高(伊王島、野母崎)まとめ

地点		T1408による最大波浪							海底地盤高 D.L.* <sup>3)</sup> (m)
		沖波			対象位置			起時	
		H <sub>0</sub> (m)	T <sub>0</sub> (s)	波向(°)	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (s)	波向(°)		
伊王島 NOWPHAS	観測値	—	—	—	5.26	12.6	221	2014/7/9 15:20	—
	推算値* <sup>2)</sup>	5.53	11.7	202	5.05	11.7	202	2014/7/9 23:00	
推算値	A工区	8.04	11.2	190	6.32	11.2	187	2014/7/10 00:00	-12.1
	B工区				6.81		196		-23.0

\*1)伊王島の観測値水深：T.P.-31.9m

\*2) 推算波高H<sub>0</sub>×Ks

\*3)潮位は気象庁の長崎（松ヶ枝）を採用し，日時は推算波高最大の7/10 00時：T.P+0.18m.  
ここでT.P=M.S.L=D.L+1.64m（保安庁潮汐表より）．計算潮位=T.P+0.18m=D.L+(1.64+0.18)=D.L+1.82m



伊王島(NOWPHAS)と野母崎観測位置

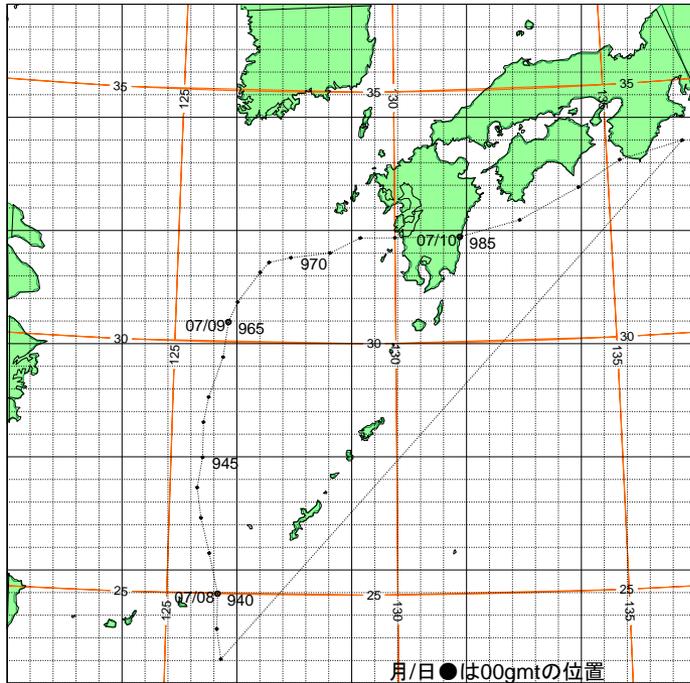
4-6-a87



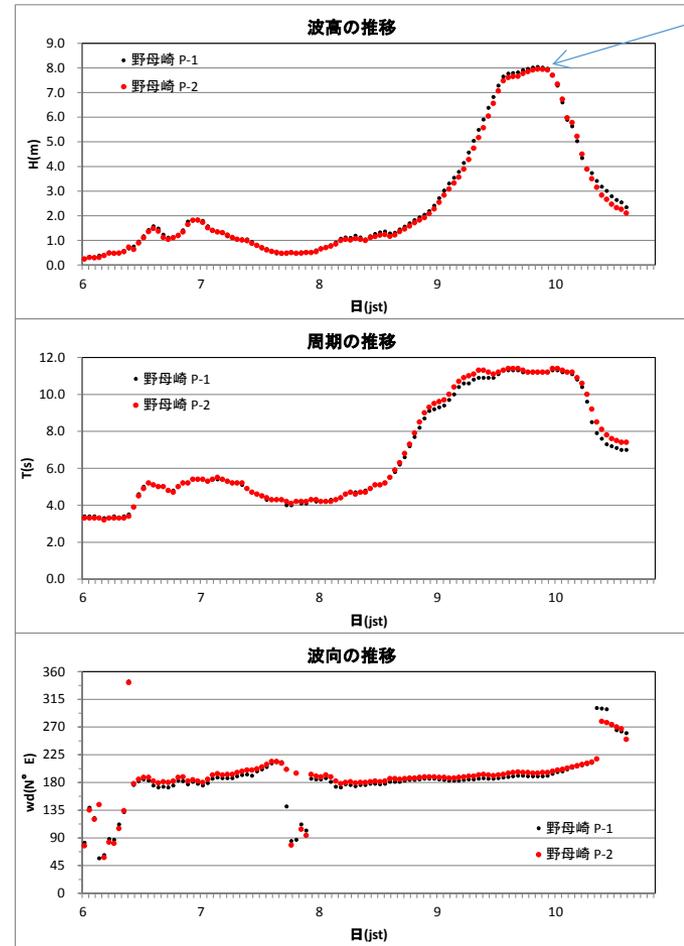
野母崎観測位置(2015/09~12)

# <参考> 波浪推算 (計算条件・野母崎における計算結果)

最大  
8.04m



計算領域とT1408の経路

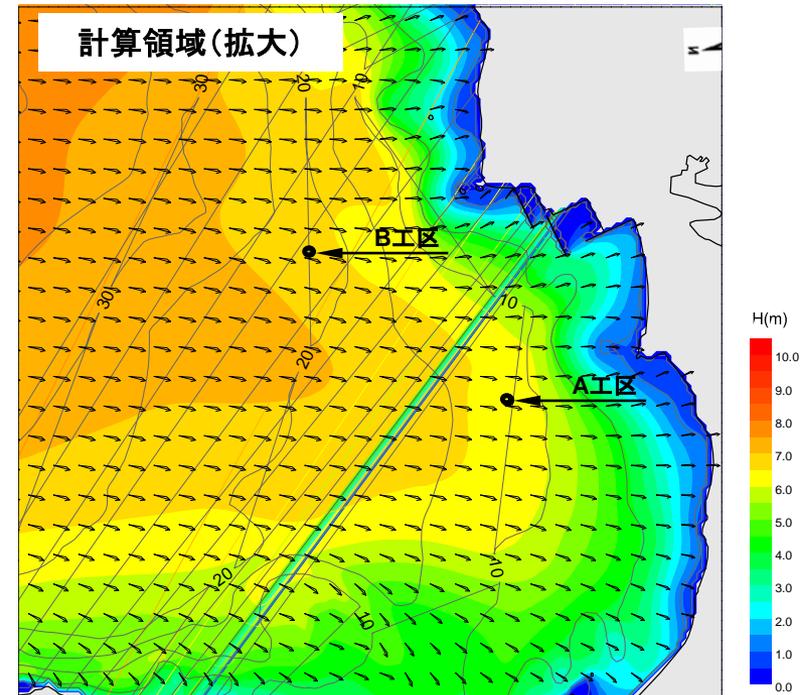
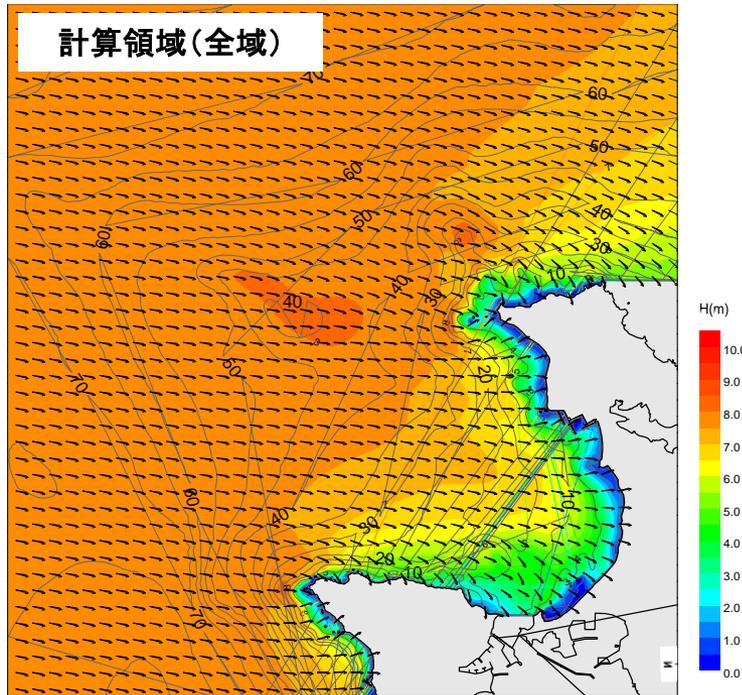


推算波浪(野母崎A,B工区)の推移

## ※) 計算条件

- ・計算領域: 30.0N, 129.0Eを中心とした1500km × 1500km, 格子間隔: 5km, 単領域
- ・推算ステップ: 120s, 1時間毎に出力
- ・海上風場は気象庁MSM解析値及び予報値を使用(3時間毎の実況解析とその間の1時間毎の予想)
- ・推算モデル: WAMIに準拠した3G深海域モデル, 方向分割角10°, 周波数分割数22
- ・周期は $1.03T_{2m}$ ,  $T_{2m} = [1/E(\int f^2 S(f) df)]^{-1/2}$ . 波向はエネルギー加重平均法

# <参考> 波浪変形計算(計算条件)



波浪変形計算領域と波高分布(T1408の最大波高時,  $H_o=8.04\text{m}$ ,  $T=11.2\text{s}$ , 波向 $N190^\circ E$ )

## ※) 計算条件

- ・計算領域:  $8.0\text{km} \times 8.4\text{km}$ , 格子間隔:  $20\text{m}$
- ・計算方法: エネルギー平衡方程式法
- ・方向分割角:  $5^\circ$ , 周波数分割数: 11分割
- ・入射波 :  $H_o=8.04\text{m}$ ,  $T=11.2\text{s}$ , 波向= $N190^\circ E$  (波浪推算位置; 野母崎 P-1の推算波高を採用)

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ② 対象施設の流体力係数の測定（目的・方法）

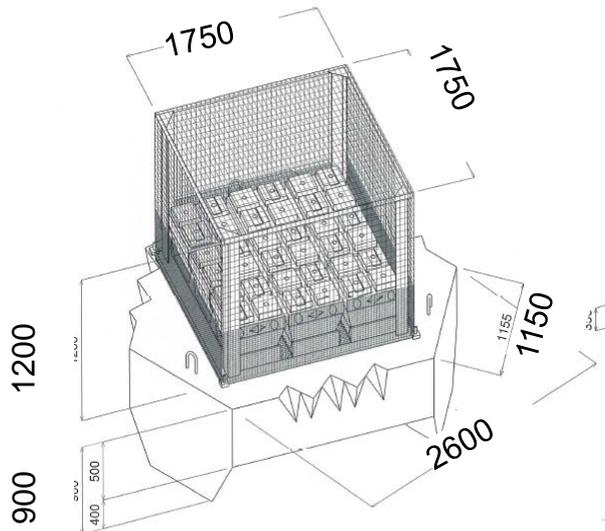
### 目的

昨年度実施した現地検証試験の対象施設（A工区：増殖礁、B工区：魚礁）の波動流中での流体力係数の測定

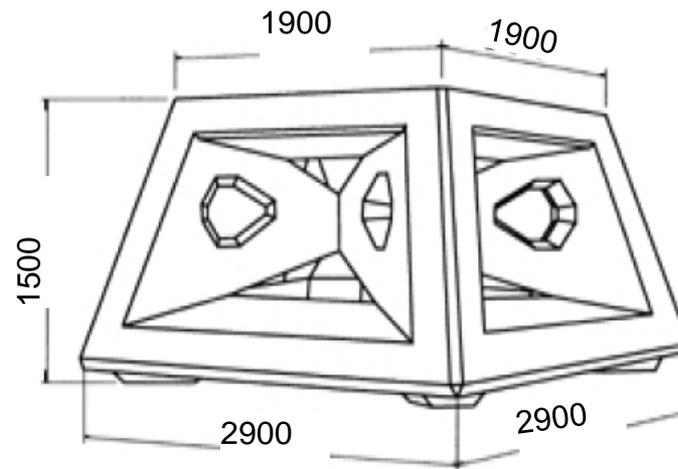
### 方法

実験水槽：造波水槽（長さ70.0m×幅0.7m×深さ2.2m×水深1.2m）

模型縮尺：1/25



A工区の増殖礁



B工区の魚礁

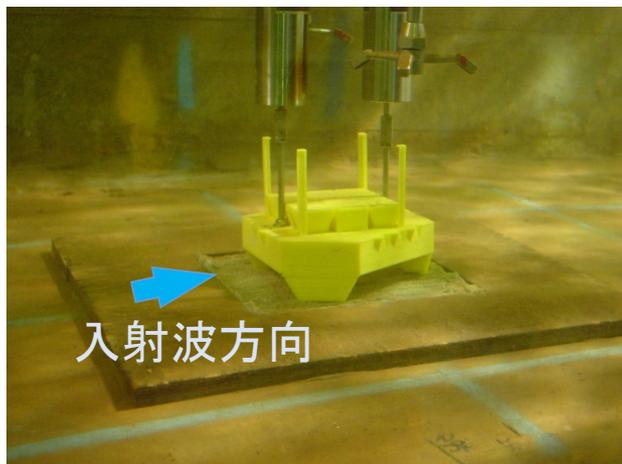
現地スケール  
単位：mm

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

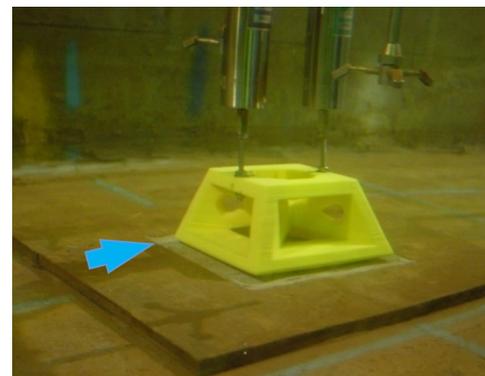
## ② 対象施設の流体力係数の測定(模型実験)

項目	模型A	模型B	
		迎角0°	迎角45°
部材幅 $D$ (cm) <sup>注1)</sup>	2.0	1.2	1.2
射影面積 $A$ (cm <sup>2</sup> ) <sup>注2)</sup>	60.80 <sup>注3)</sup>	93.90	94.34
実容積 $V$ (cm <sup>3</sup> )	229.76	257.09	257.09
定常流中の抗力係数 $C_{DS}$	1.10 <sup>注4)</sup>	0.67	0.83

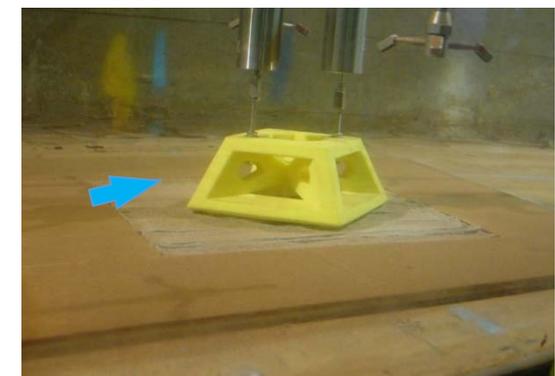
注1)  $KC$ 数 $K_C=U_m T/D$ ( $U_m$ :流速振幅,  $T$ :周期)の計算に用いる。注2)射影面積は重なった部分も加算。注3) 網を除いた値。注4)「漁港漁場の施設の設計参考図書2015年版」表15.2.1より算出。



模型A(増殖礁)



迎角0°



迎角45°

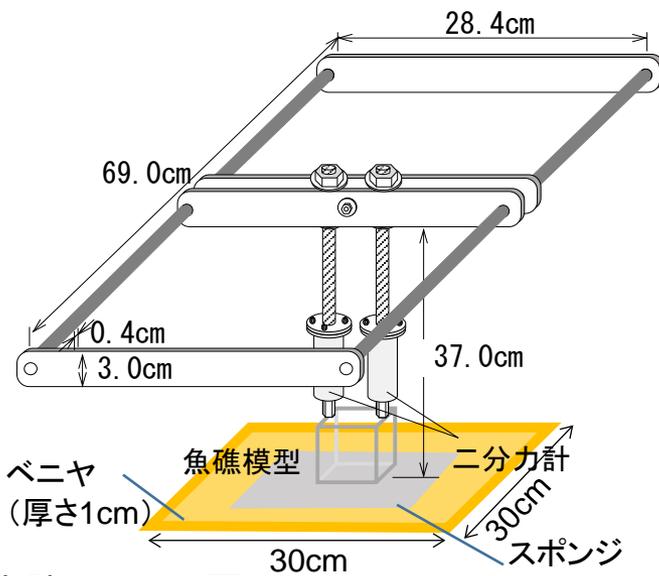
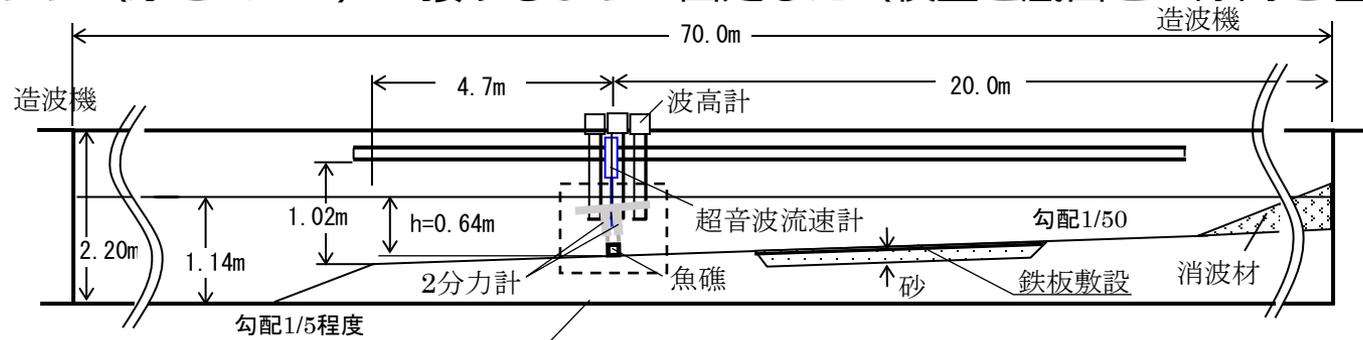
模型B(魚礁)

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ② 対象施設の流体力係数の測定（測定方法）

計測項目（計測機器）：水面変動（容量式波高計）、水平・鉛直流速（超音波式流速計）、水平・鉛直流体力（分力計）

計測方法：2分力計2台によって支持された模型をコンクリート床（下図）上に貼り付けたスポンジ（厚さ10mm）に接するように固定した（模型と底面との隙間を埋めるため）。



計測治具拡大

作用波の各条件（波高と周期）におけるKC数

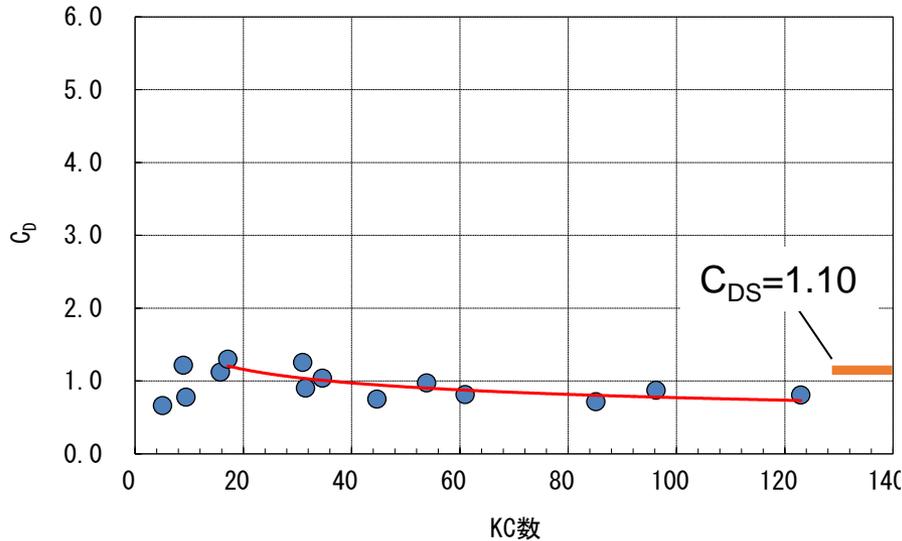
周期(s)	波高(cm)				
	5	10	20	30	40
1.5	6	9			
2.0	15	31	62	92	123
3.0	27	53	106	160	213
4.0	37	74	148	222	297

※KC数はD=1.0cmとして計算。

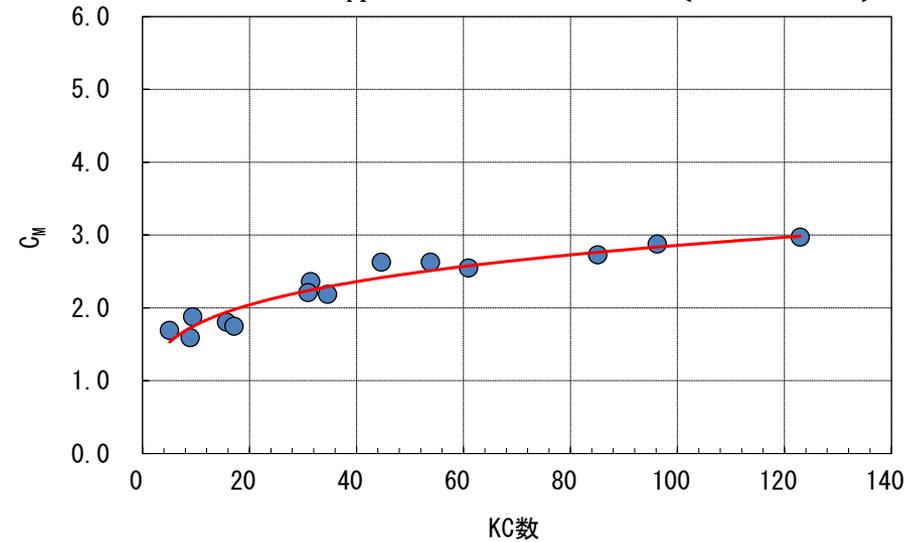
# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

## ② 対象施設の流体力係数の測定 (測定結果: 模型Aの $C_D$ と $C_M$ )

赤実線:  $C_D = 2.479 \times KC^{-0.253} (KC > 17.15)$

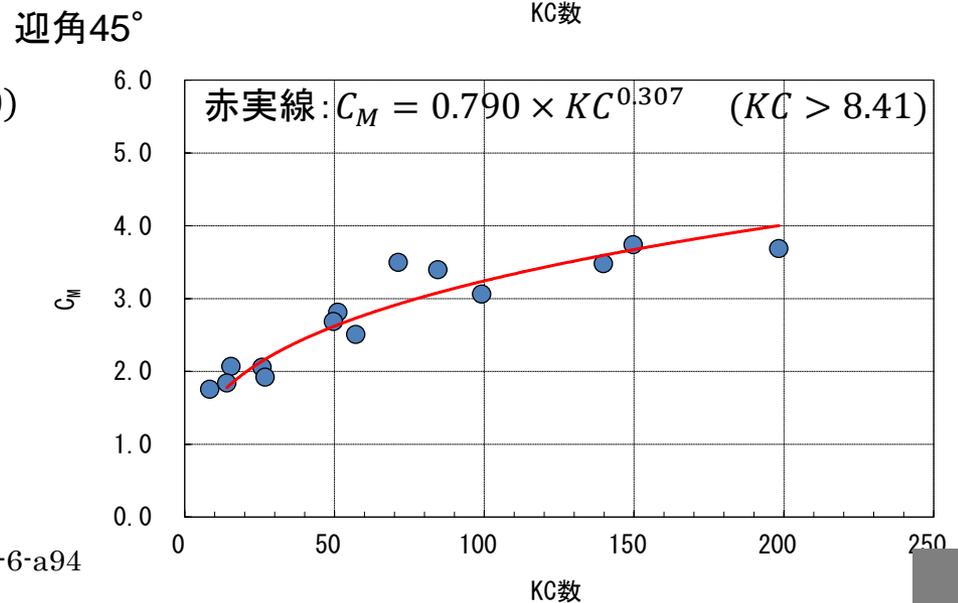
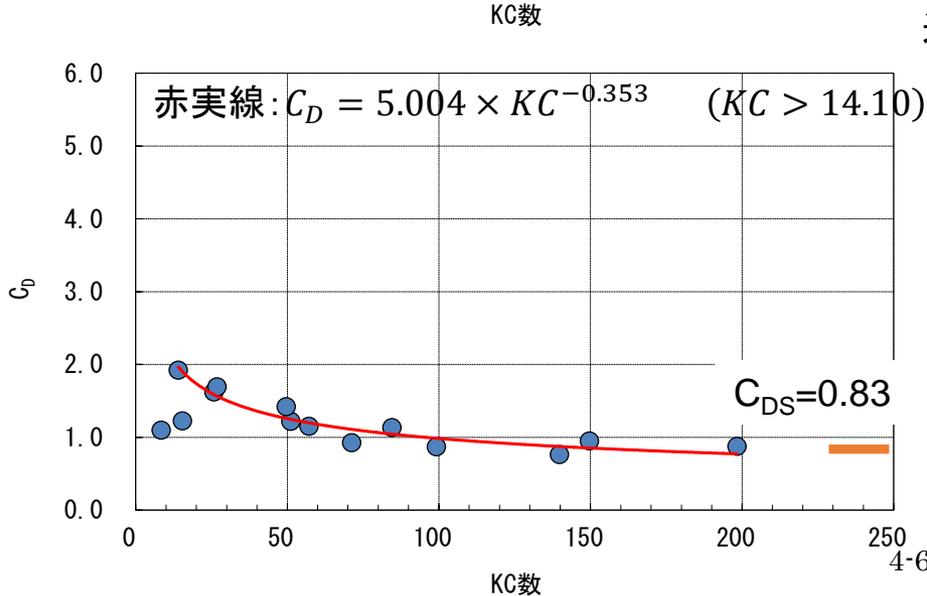
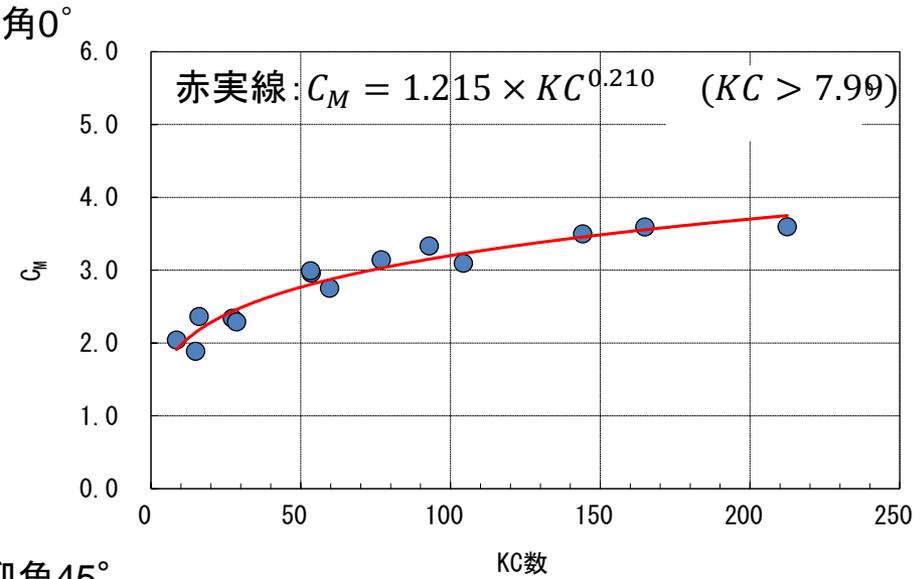
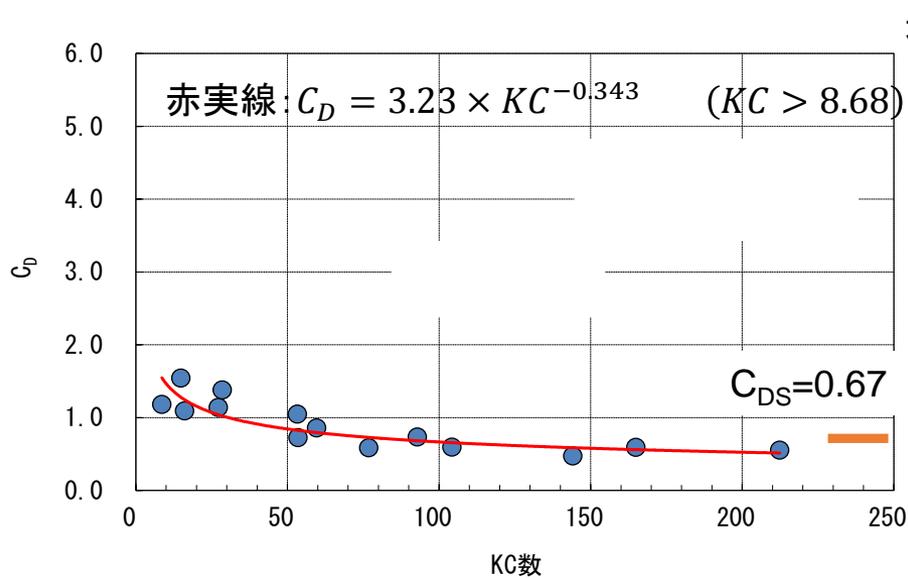


赤実線:  $C_M = 1.091 \times KC^{0.209} (KC > 5.07)$



# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

## ② 対象施設の流体力係数の測定 (測定結果: 模型Bの $C_D$ と $C_M$ )

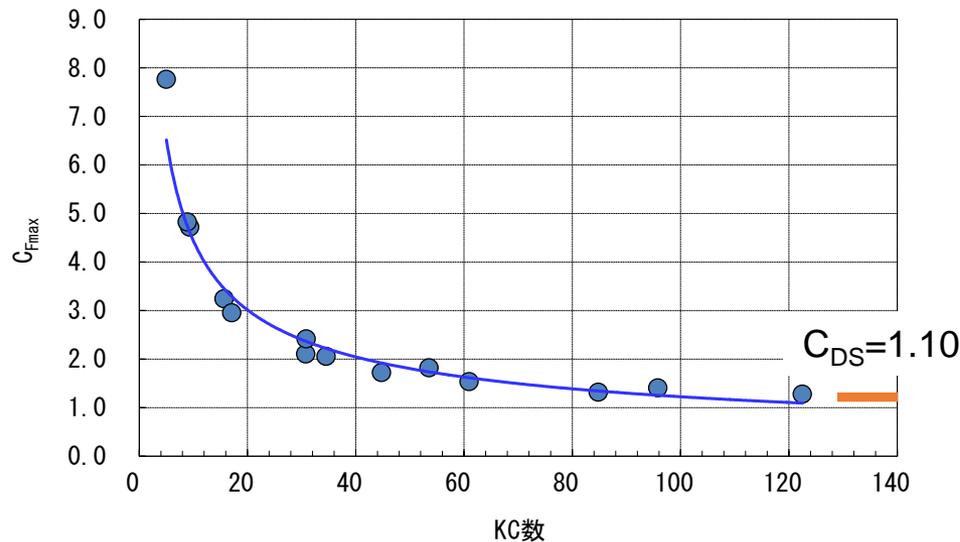


# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

## ② 対象施設の流体力係数の測定 (測定結果: 模型Aと模型B(迎角45°)の $C_{Fmax}$ )

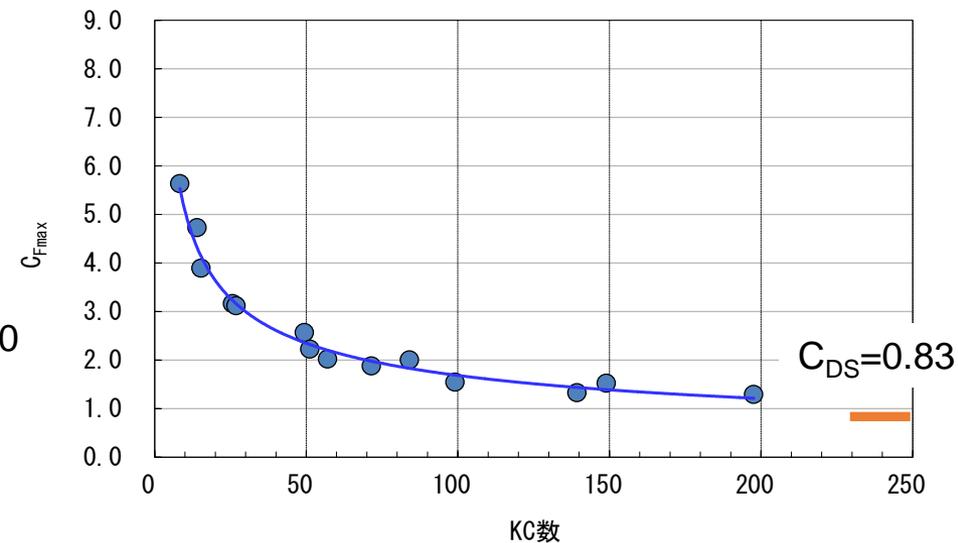
模型A

青実線:  $C_{Fmax} = 16.089 \times KC^{-0.559}$  ( $KC > 5.04$ )



模型B(迎角45°)

青実線:  $C_{Fmax} = 15.301 \times KC^{-0.479}$  ( $KC > 8.34$ )



# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

## ③ 従来法と提案法との比較(A工区)

### 設計条件と安定計算の概要

#### 設計条件

設置水深: 13.83(8.2~11.2)m    波・流れ: 波単独  
海底勾配: 1/50    設計流速: 2.678m/s※1  
設計波高:  $H_{1/3} = 10.63\text{m}$     図心高さ: 2.1m  
周期:  $T_{1/3} = 15.30\text{s}$     転倒中心距離: 1.450m  
底質: 貝殻混じり砂礫  
摩擦係数: 0.6(捨石上)    ※1 旧手引による碎波帯での設計流速算定式  $U_m = K\sqrt{ghl}$  による。改訂後の設計参考図書によると、 $U_m = 4.15\text{m/s}$

### 被災時の予測

台風8号襲来時の最大波  
 $H_{1/3} = 6.32\text{m}$  (<設計波の $H_{1/3}$ )  
 $T_{1/3} = 11.2\text{s}$  (<設計波の $T_{1/3}$ )  
工区平均水深  $h = 13.92\text{m}$

碎波の影響あり

摩擦係数  $\mu = 0.6$   
水中重量: 47.36kN  
滑動抵抗力  $R = 28.42\text{kN}$

$$H = H_{1/3}, C_D = 1.10, C_M = 2.0$$

#### 設計上の安全率

流体力: 15.448kN  
安全率(滑動):  $1.83 \geq 1.2$   
安全率(転倒):  $2.11 \geq 1.2$

#### 従来法による滑動安全率

$H = H_{1/3} = 6.32\text{m}$   
 $U_m = 2.25\text{m/s}$   
最大流体力  $F_{\max} = 12.5\text{kN}$   
(微小振幅波を仮定し、モリソン式で算定)  
安全率  $R/F_{\max} = 2.27$

#### 提案法による滑動安全率

$H = H_{\max} = 9.98\text{m}$   
 $U_m = 3.60\text{m/s}$   
 $F_{\max} = 34.02\text{kN}$   
( $C_{F_{\max}}$ の式による)  
安全率  $R/F_{\max} = 0.84$   
(参考)  $H = H_{1/3}$  とすると、  
 $R/F_{\max} = 1.61$

- 従来法は流体力をかなり過小評価
- 提案法による試算は妥当な範囲  
(ただし、多少過大評価の可能性あり)

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

## ③ 従来法と提案法との比較(B工区)

### 設計条件と安定計算の概要

#### 設計条件

設置水深: 23m (23~24m)    海面流速: 0.177m/s  
海底勾配: 1/50    設計流速: 0.212m/s  
設計波高:  $H_{1/3} = 8.89\text{m}$     **設計波動流速: 2.540m/s**  
周期:  $T_{1/3} = 15.60\text{m}$     波・流れ: 混在  
底質: 砂    積重ね高さ: 3m  
摩擦係数: 0.5 (ブロック上)    凵心高さ: 0.729m  
    転倒中心距離: 1.450m

$$H=H_{1/3}, C_D=0.83, C_M=2.0$$

#### 設計上の安全率

流体力: 20.116kN  
安全率(滑動):  $1.26 \geq 1.2$   
安全率(転倒):  $5.02 \geq 1.2$

### 被災時の予測

台風8号襲来時の最大波  
 $H_{1/3} = 6.81\text{m}$  (<設計波の $H_{1/3}$ )  
 $T_{1/3} = 11.2\text{s}$  (<設計波の $T_{1/3}$ )  
 $h = 24.82\text{m}$

砕波の影響なし  
摩擦係数  $\mu = 0.5$   
水中重量: 55.18kN  
滑動抵抗力  $R = 27.59\text{kN}$   
試算(簡略化のため  
流れを無視)

#### 従来法による滑動安全率

$H = H_{1/3} = 6.82\text{m}$   
最大流体力  $F_{\max} = 8.15\text{kN}$   
(微小振幅波を仮定し、モリソン式で算定)  
安全率:  $R/F_{\max} = 1.74$

#### 提案法による滑動安全率

$H = H_{\max} = 12.25\text{m}$   
 $U_m = 2.81\text{m/s}$   
 $F_{\max} = 38.76\text{kN}$   
( $C_{F_{\max}}$ の式で算定)  
安全率:  $R/F_{\max} = 0.71$   
(参考)  $H = H_{1/3}$ とすると、  
 $R/F_{\max} = 1.74$

- 従来法は流体力を過小評価
- 提案法による試算は妥当な範囲  
(ただし、多少過大評価の可能性あり)

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証②）

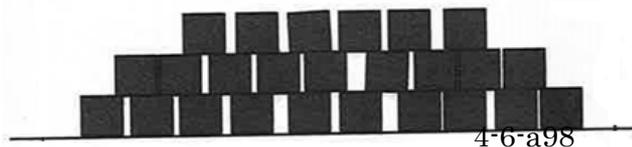
## 現地検証の方針・方法

### 【検証方針】

- 層積みされたコンクリート魚礁の高さの変化に焦点を当てた調査

### 【検証方法】

- ① 全国の安定計算表から安全率の比較的低い魚礁を絞り込み、調査する。出来型の音響調査結果を入手し、マルチビームによる測量を行い、移動・礁高変化の有無を確認する。（今回報告）
- ② 落下が確認された層積み魚礁を調査する。（今回報告）
- ③ 調査対象魚礁の受けた最大波浪を推定し、現行の設計法の妥当性を検討する。（次回以降報告）



層積み魚礁の例

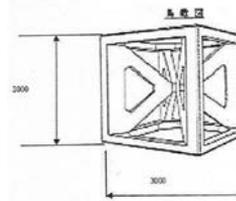
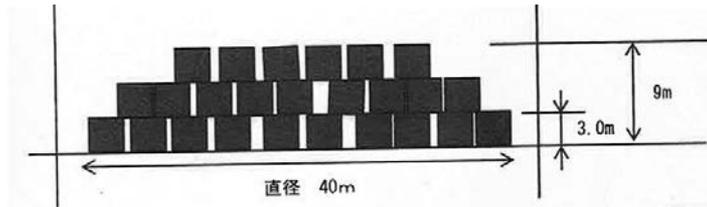
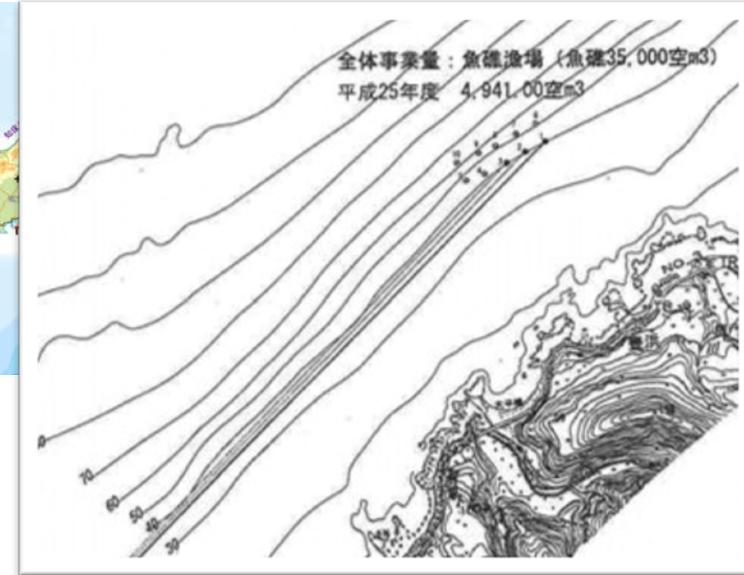
# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証②）

## 安全率の低い層積み魚礁の事例

北海道豊浜沖

### 設計条件と安全率

018-1	豊浜沖合漁場
波高	7.67m
周期	13.5sec
水深	39m以上
安全率(滑動)	1.34
安全率(転倒)	2.23



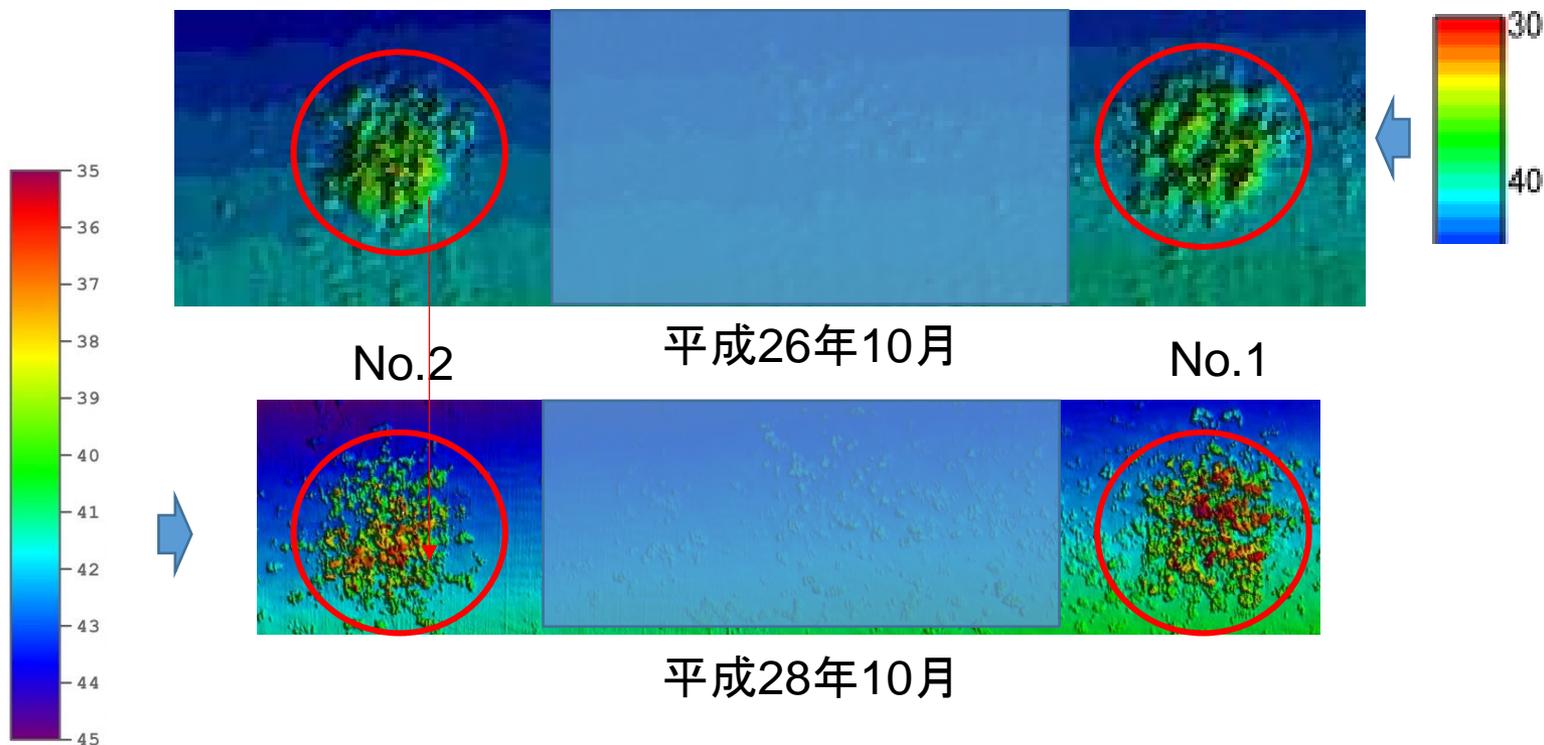
- 施工開始から4年を経過
- 現状は不明
- 層積み高さが9mより下がっていれば被災と判断

調査ではマルチビーム（EM2040）を使用して、水深約40mの人工魚礁2群を対象に深浅測量を実施した。平成26年に北海道庁が実施した深浅測量の結果と比較した。施工は平成24年度から実施

# 安全率の低い層積み魚礁の事例

北海道豊浜沖

平成26年に計測された魚礁は平成28年に計測した結果に比べ、全体的に盛り上がっているが、計測機器の性能が異なるため、計測精度の差に起因する可能性もある。矢印で示したNo.2の一部は低くなっているようである。

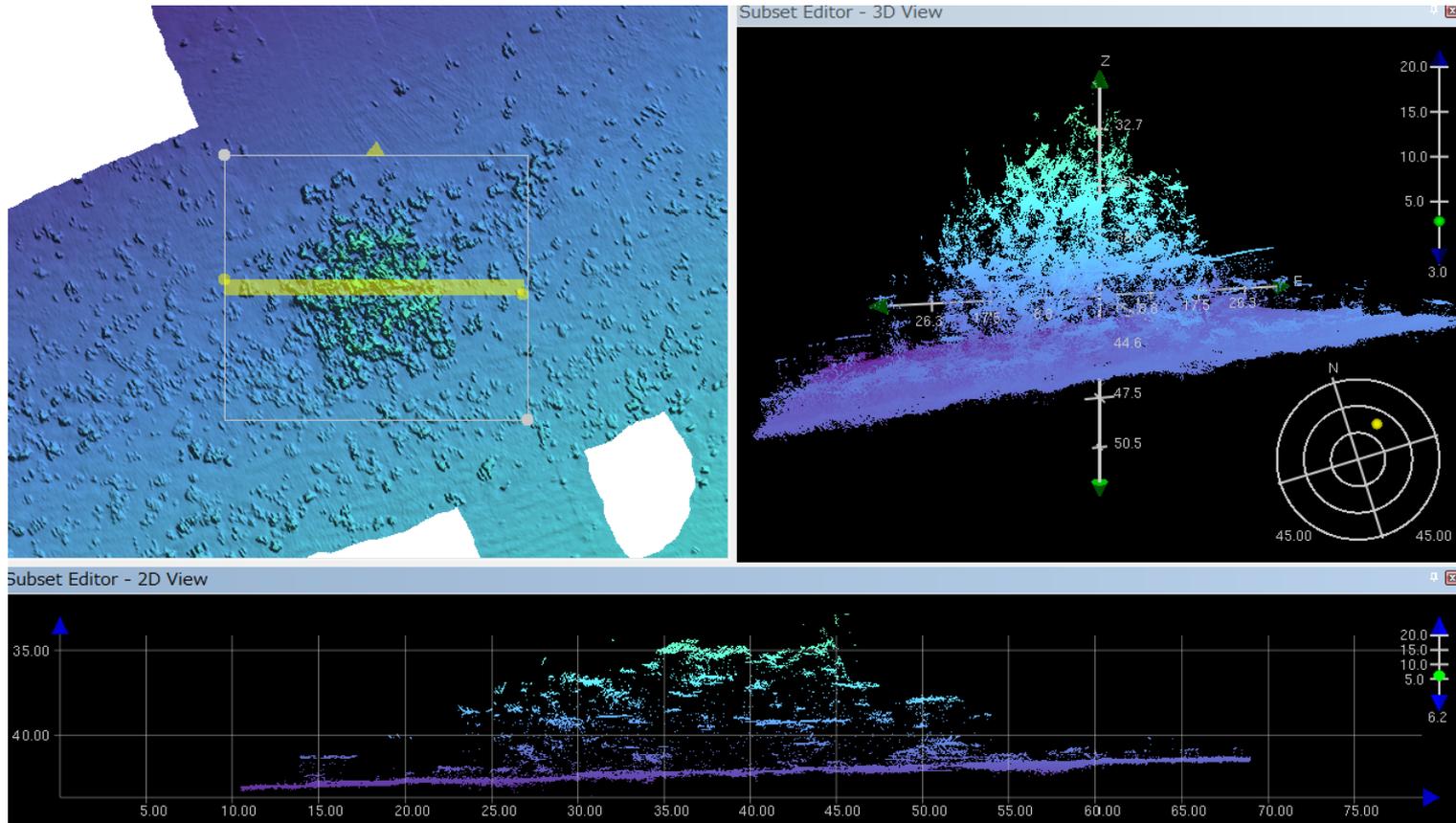


同一魚礁群の測量結果の比較

# 安全率の低い層積み魚礁の事例

北海道豊浜沖

No.1礁の点群データ(平成28年10月)

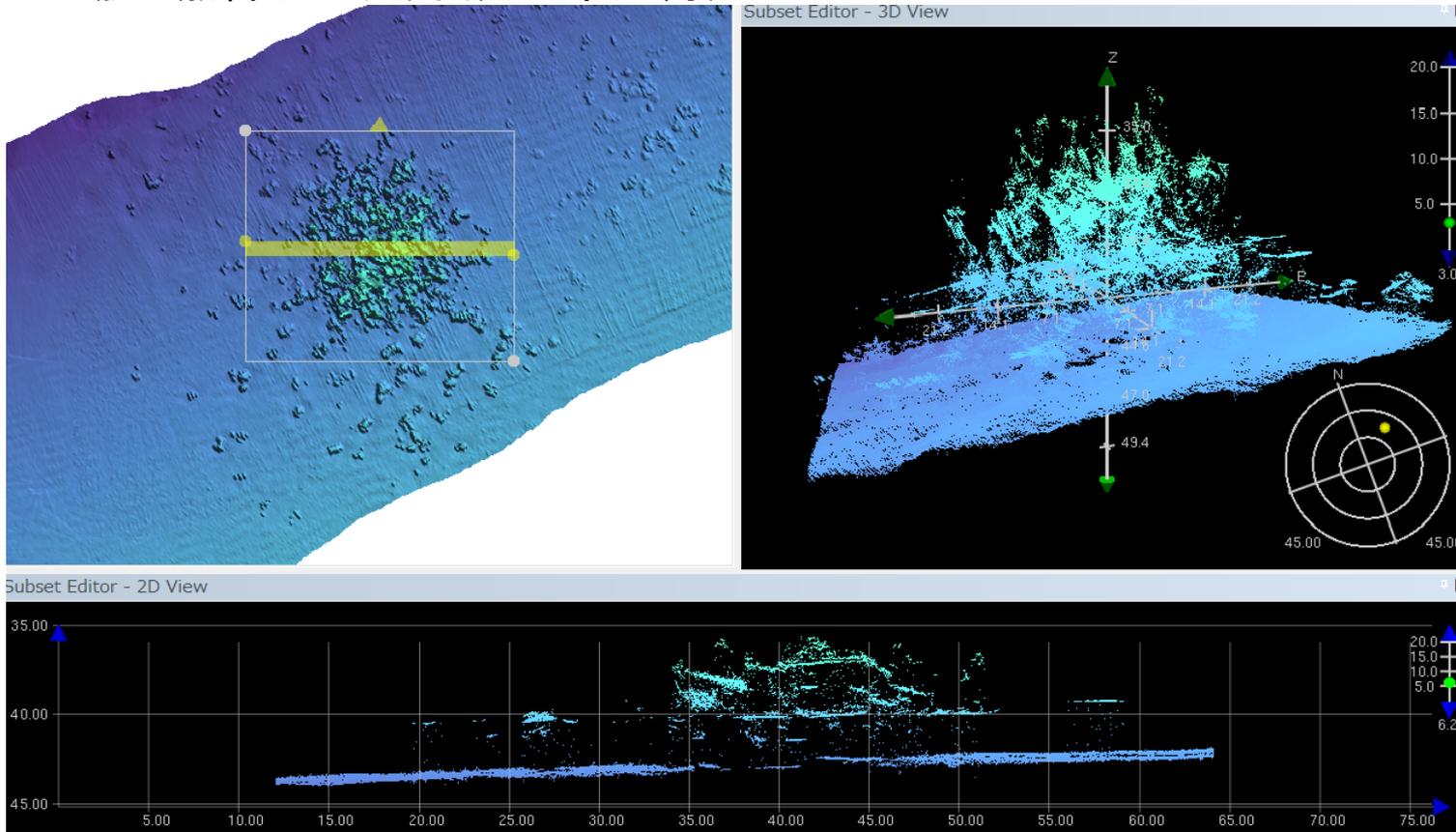


魚礁の高さは高いところで高さ9mを確保

# 安全率の低い層積み魚礁の事例

北海道豊浜沖

No.2礁の点群データ(平成28年10月)



魚礁の高さは  
高いところでも7m

【結果】平成26年10月(施工後2年経過)と平成28年10月のマルチビーム測量結果を比較すると、測定機器の精度差のため、明確ではないが、No.2の魚礁群の1部で高さが低くなっているように見える。据付時に魚礁の高さの管理をしているとすれば、No.2の魚礁群では高さ9mが確保できていないため、施工後に落下したと考えられる。

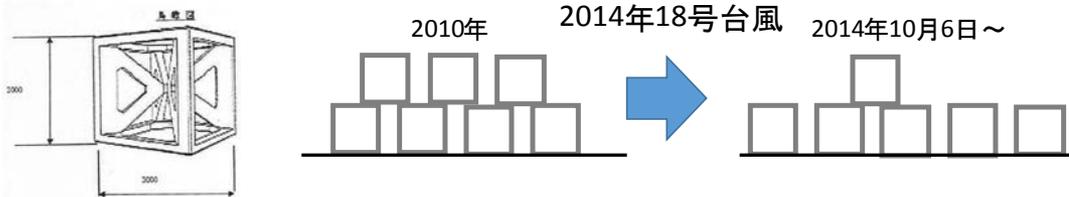
# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証②)

## 落下が確認できた層積み魚礁の事例

千葉県館山沖

### 経緯

- 館山沖水深約19m、半径15mの範囲にFP魚礁3m型が防衛省により2層積みで設置 (2010年施工)
- 東京海洋大学館山ステーションで定期観察され、2014年10月の台風18号で魚礁が落下したことが推察



### 検討計画

- 安定計算表、施工後のビデオ映像の入手
- 潜水調査による滑動の確認
- 最寄りの波浪観測情報等から被災時の波浪条件を推定し、設計条件と比較

2014年18号台風  
10月6日  
998hPa  
最大風速 21.2m/s  
最大瞬間 37.0m/s

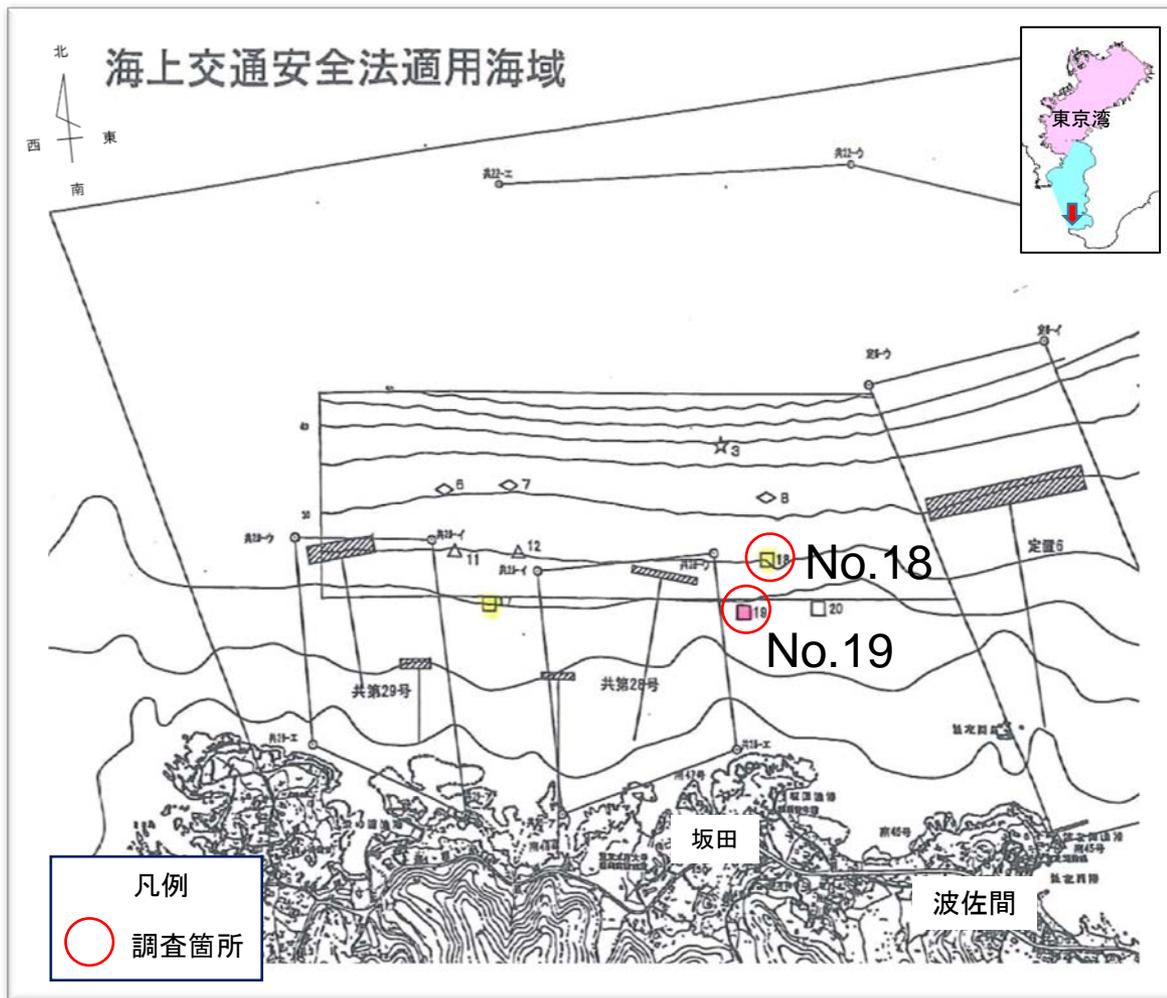


# 落下が確認できた層積み魚礁の事例

千葉県館山沖

## 千葉県館山地区人工魚礁の安定性確認調査

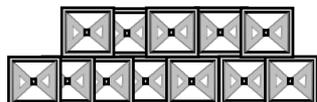
番号	No.18	No.19
水深m	23.5	16.8
底質	砂質土	砂質・岩礁
魚礁	FP魚礁3.25型 20個	FP魚礁3.25型 20個
状況	安定	2層目が一部落下
座標	34°58'59.28" 139°46'24.72"	34°58'53.61" 139°46'24.48"
埋没	殆ど無し	無し
安全率	—	滑動：1.23 転倒：2.46
Ho' T	—	7.45m 11.7s
設計波高	—	4.40m
摩擦係数	—	0.5
海底勾配	—	1/15
海面流速	—	0.368m/s
施工年	平成22年	平成20or21年



# 落下が確認できた層積み魚礁の事例

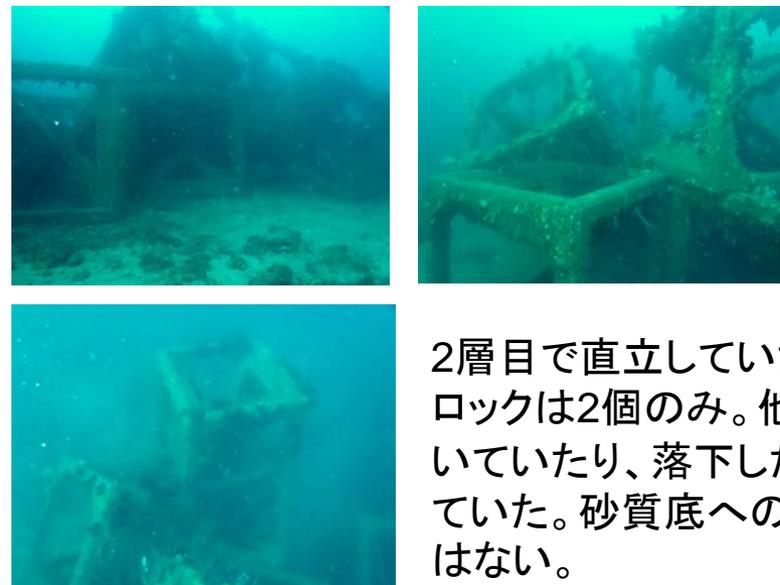
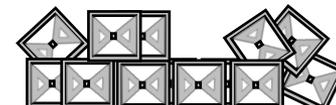
千葉県館山沖

No.18(水深23.5m)  
平成22年施工



平成23年11月に実施したROV調査と比較すると、現状でもほぼ同様な配置状況(2層目は落下していない)。砂質底への埋没は10cm程

No.19(水深16.8m)  
平成20または21年施工



2層目で直立していたブロックは2個のみ。他は傾いていたり、落下したりしていた。砂質底への埋没はない。

## 平成28年10月調査

施工条件：設置はクレーン船による着底方式。位置管理はDGPSによるものと推測。

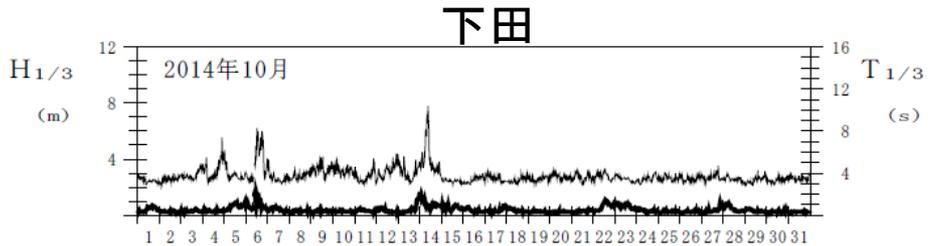
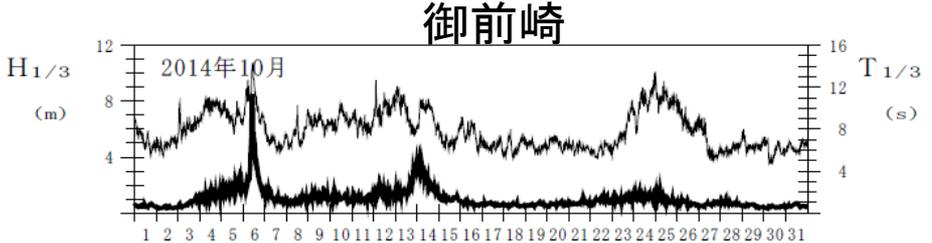
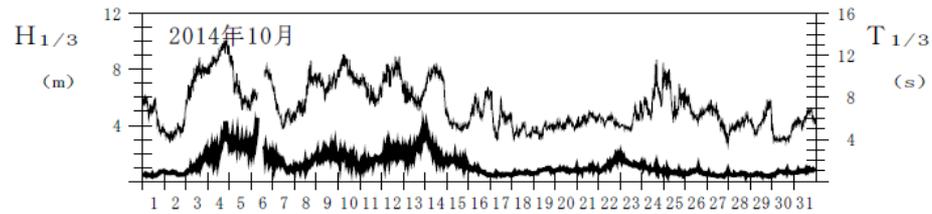
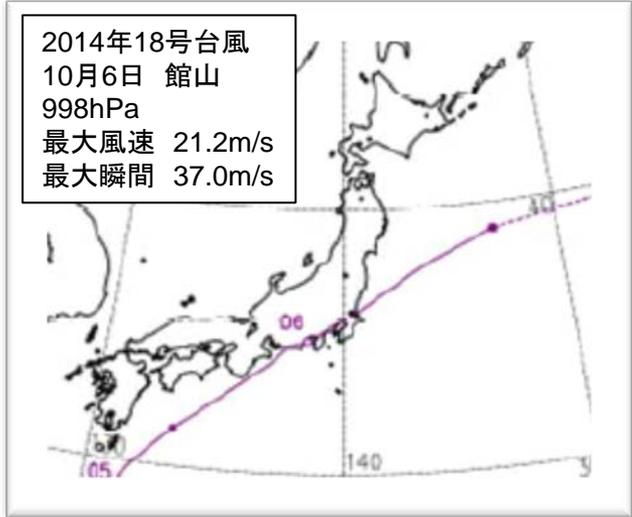
自動反転フックによる切り離しで、作業ダイバーは使っていないため多少傾いて施工された可能性はある

ヒアリング結果：東京海洋大の技官、ダイビングショップの社長によると、No.19は2年前の台風の直撃で一部が落下

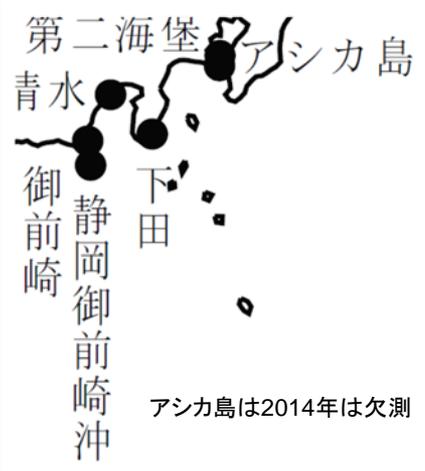
# 落下が確認できた層積み魚礁の事例

千葉県館山沖

2014年10月6日の波浪を把握し、魚礁の安定性を検討する必要がある。



↑  
台風18号



2008年以降、館山で観測された極大風速(m/s)

	日最大風速・風向			日最大瞬間風速・風向		
1	21.2	南西	2014/10/6	38.5	北	2013/10/16
2	20.1	北北西	2013/10/16	37.0	南南西	2014/10/6
3	13.7	南西	2016/10/6	28.2	南南西	2009/10/8

## 2. 沈設魚礁の安定性の検討

## 2. 沈設魚礁の安定性の検討

### 検討の背景と必要性

- 沈設魚礁が砂地への沈下・埋没することによって滑動抵抗が増加することが指摘され、実験的に検討されている（糸漕ら 1990、鵜戸口ら 1991、水上・谷山 1997）。
- 沈設魚礁の埋没が滑動抵抗の増加に寄与するかは埋没過程に関わる。
- 例えば、①激浪時に洗掘し、その後に埋没する場合や②埋没していても激浪時に再洗掘される場合は、滑動抵抗の増加に寄与しない。



沈設魚礁の合理的な安定性の照査のため、①沈設魚礁の砂地への沈下・埋没の挙動特性を把握し、それを踏まえた②適切な安定性の照査方法が必要である。

# 沈下・埋没に関する文献レビュー（参考）

- 魚礁の埋没は、局所洗掘、沈下と洗掘孔の拡大、埋積によって起こる（Sheng 2000 after Tian 1994）

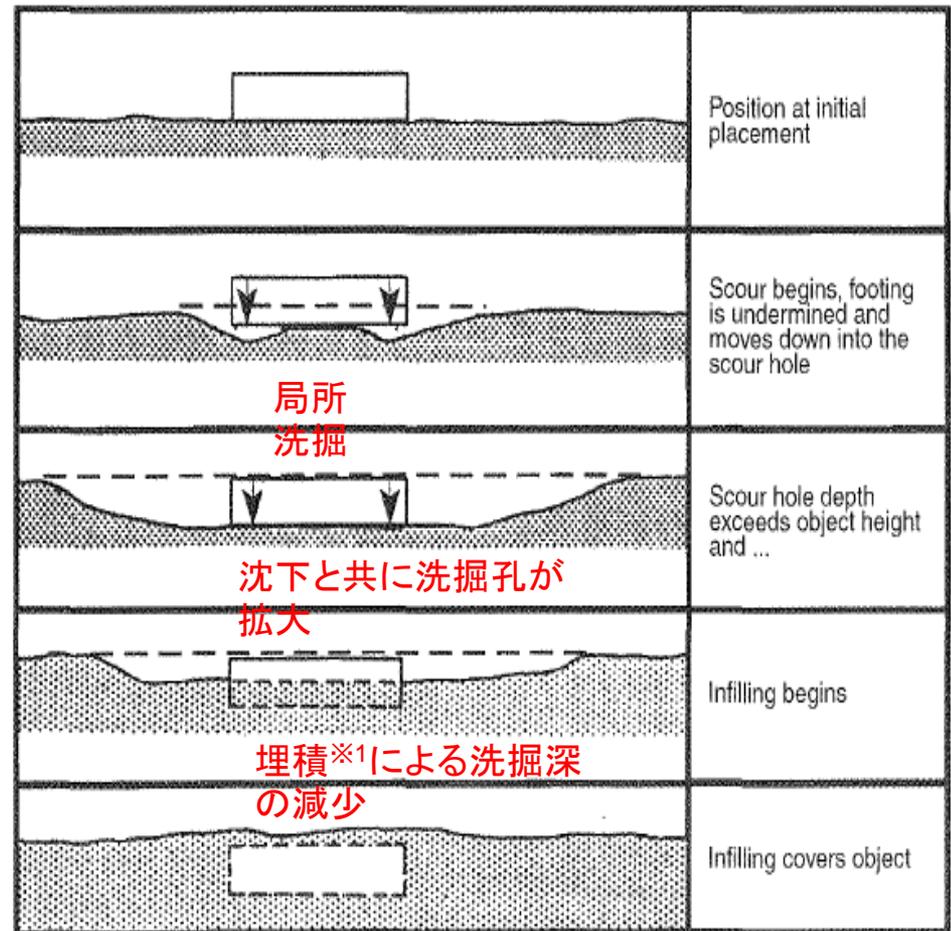
（⇒最大洗掘深を越えて埋没し得ることに注意）

- 底層流速が底質の砂の移動限界流速以下であっても魚礁周辺では局所流（渦流）によって洗掘が生じ得る（榎木・松見 1983）

- 最大洗掘深は砂の移動限界流速のときに発生し、流速がそれ以上大きくなっても増加しない（木村ら 1996）

- 最大洗掘深はKC数の増加に伴い増加するが、魚礁の形状、特に隅角部の有無によって顕著に変化する（金ら 1996）

- 隅角部底面がすり鉢状に洗掘され、そこから板状の隙間が魚礁底面に沿って発達する。その結果生じる接触面積の減少、支持荷重の集中により魚礁の沈下が起こる。魚礁は傾いたり滑ったりしながら沈んでいく（金ら 1996）



可能性のある小型構造物の埋没機構（Sheng 2000）

※1 埋積作用：堆積物で地表の窪みを埋めて同一の基準面に一致させようとする作用（岩石学辞典）

## 2. 沈設魚礁の安定性の検討

### 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討

#### 目的

砂質底上での魚礁模型の安定性について、不規則波中での洗掘、移動状況及び被災限界を明らかにする。また、砂面上での見掛けの摩擦係数について妥当な設計値を再検討する。

#### 方法

実験水槽：前掲と同じ

模型縮尺：1/25

魚礁模型：密度を変えた角型魚礁の1/25縮尺模型

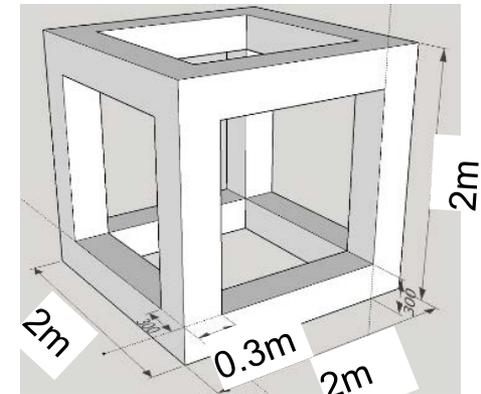
作用波：以下の限界波高を有義波高とした不規則波

滑動・揺動限界波高（周期3sのとき）

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	滑動／揺動限界波高(cm)
1.14	6.9/9.0
1.6	14.9/19.4
2.3	22.1/28.7

限界波高は、流体力係数 ( $C_D, C_M$ の値または  $C_{Fmax}$ )と周期= $T_{1/3}$ から算定される流体力と  $\mu=0.6$  (砂面上のブロックの値) を仮定して算定。

4-6-a110

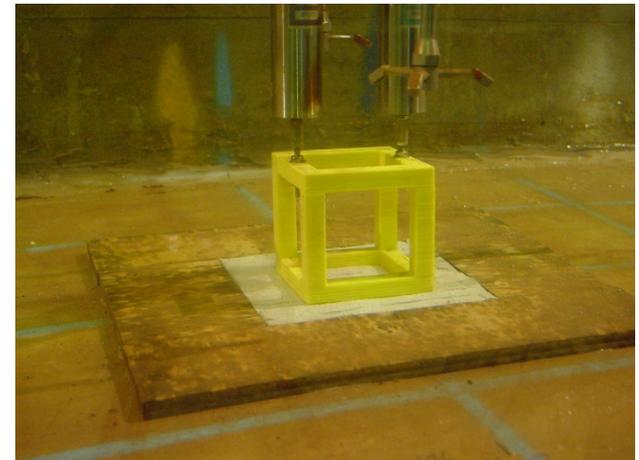


角型魚礁（寸法：実物スケール）

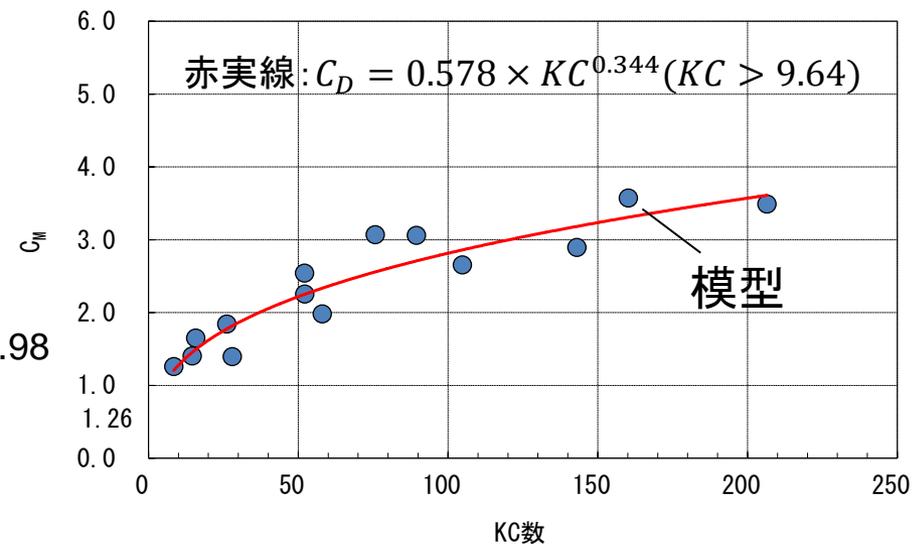
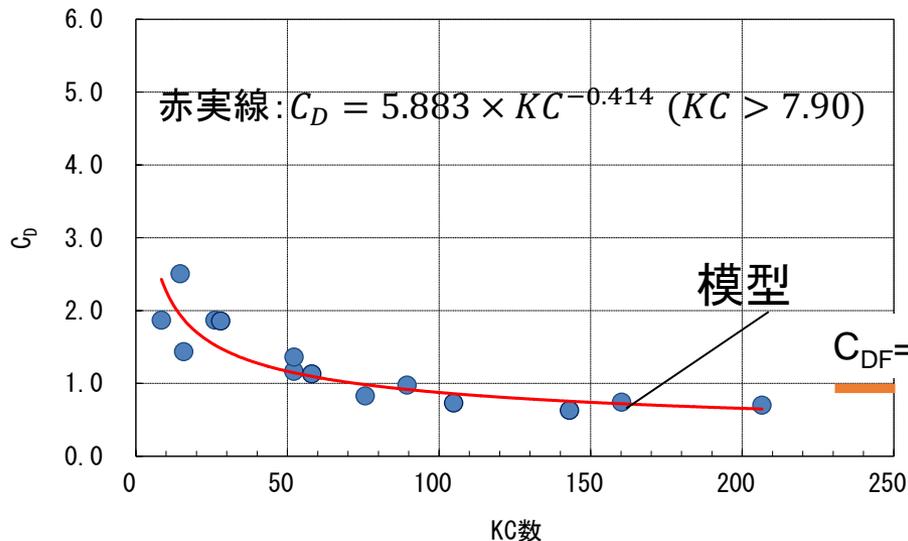
揺動限界＝現在の設計法における「転倒」限界

# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討 (実験結果：流体力係数)

項目	値
部材幅D(cm)	1.2
射影面積A(cm <sup>2</sup> )	59.52
実容積V(cm <sup>3</sup> )	110.59
定常流中の抗力係数C <sub>DF</sub>	0.98(正面)

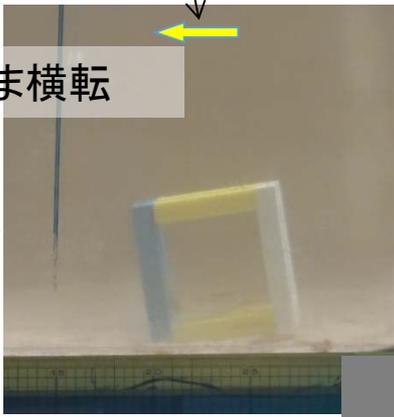
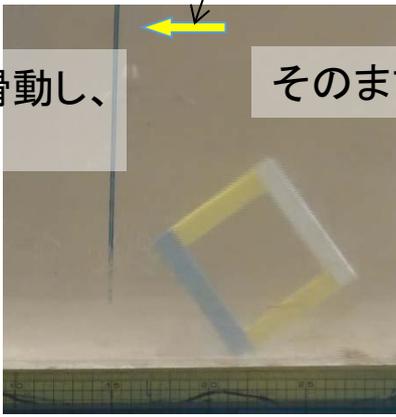
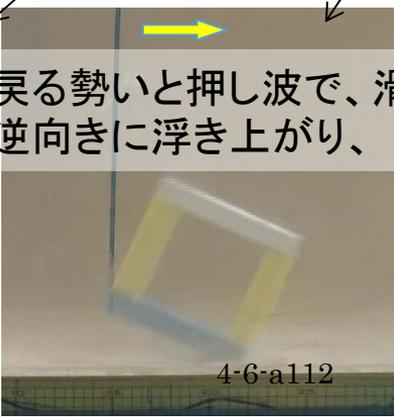
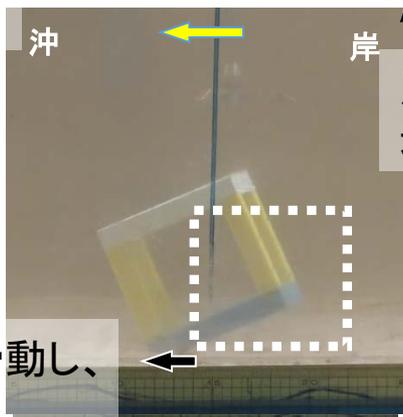
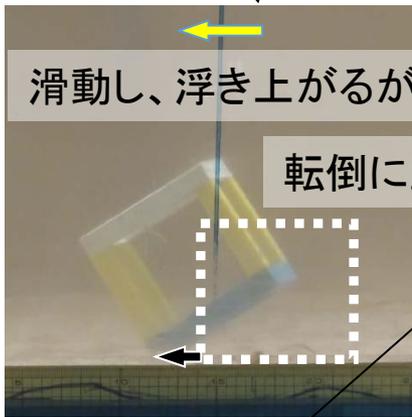
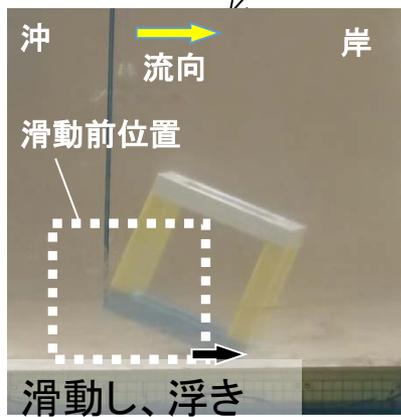
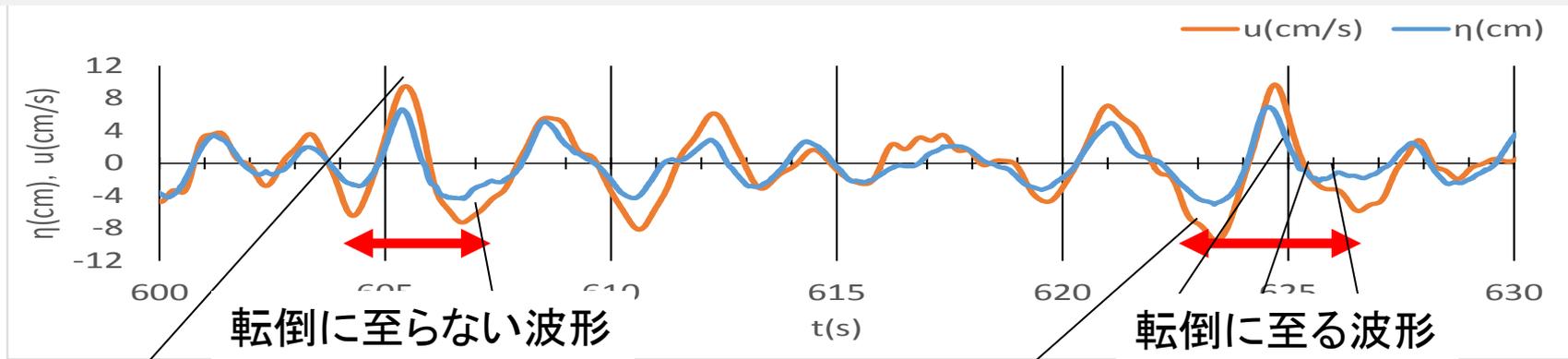


魚礁模型の流体力測定

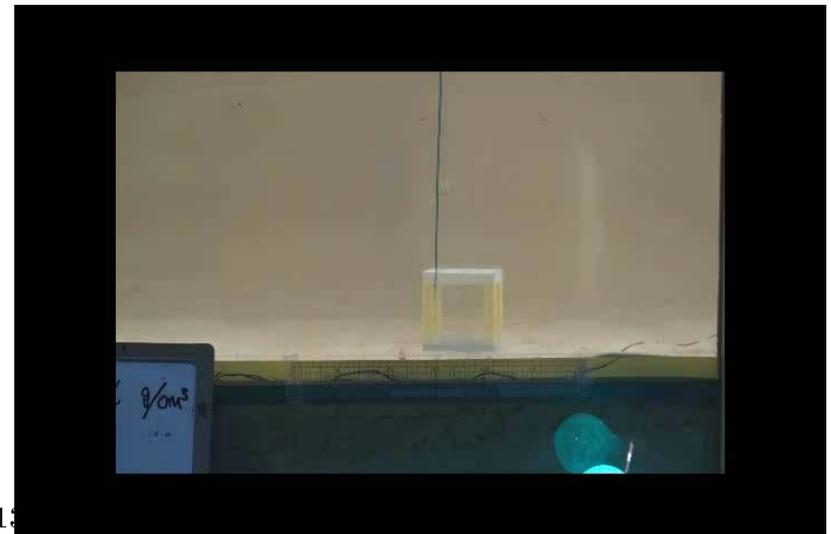
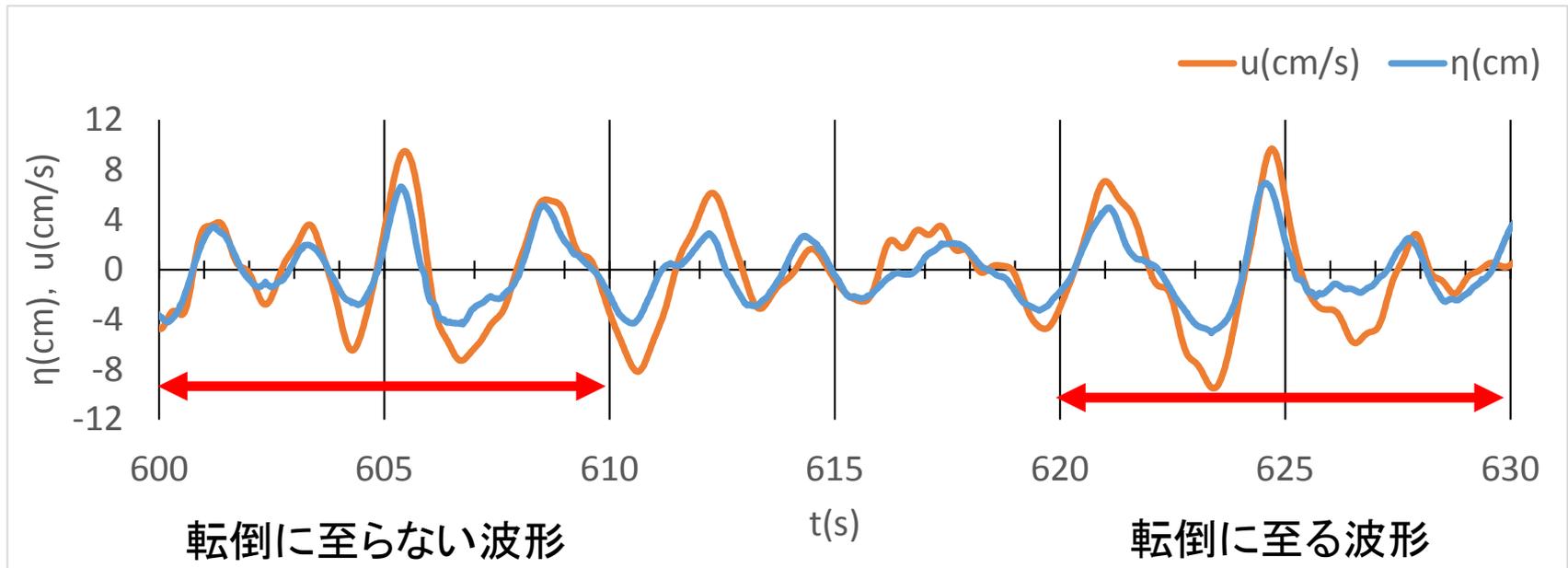


流体力係数の測定結果

# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討 (実験結果：沈設魚礁の挙動)



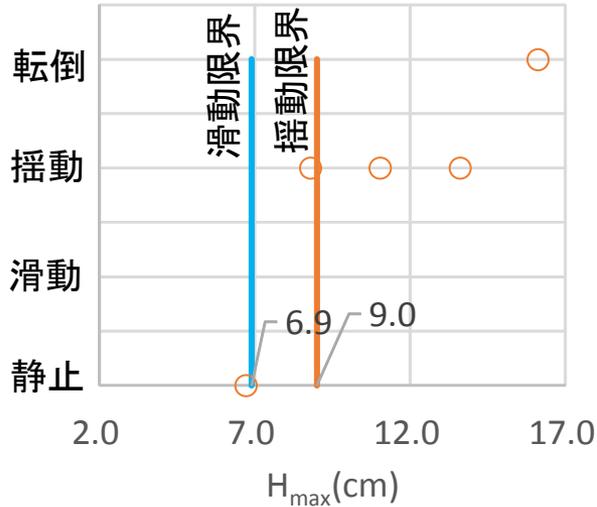
# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討 (実験結果：沈設魚礁の挙動)



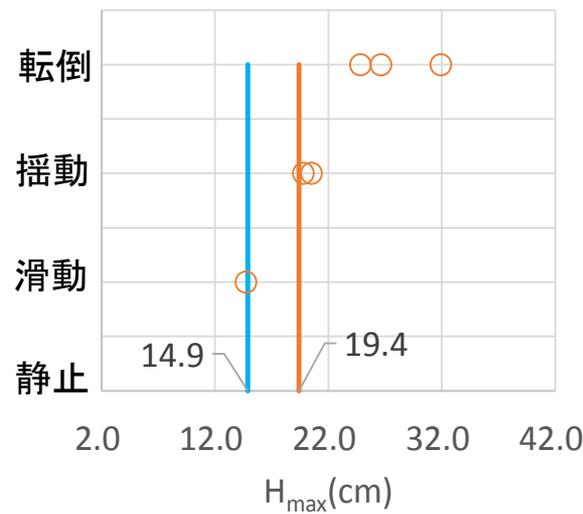
4-6-a11

# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討 (実験結果：作用波高と移動の状態)

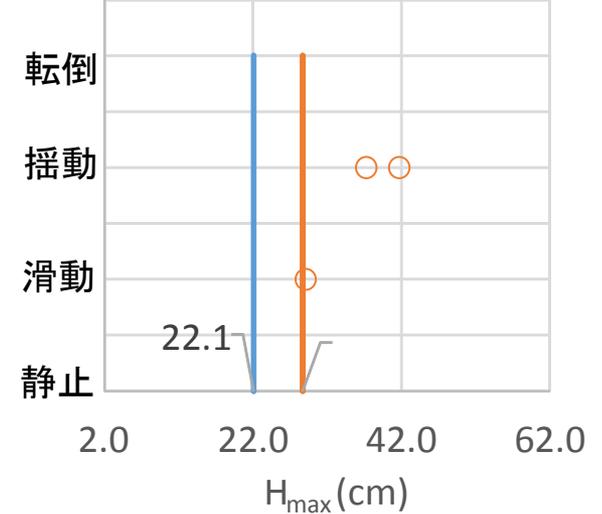
密度1.14g/cm<sup>3</sup>の模型



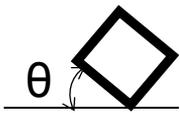
密度1.6g/cm<sup>3</sup>の模型



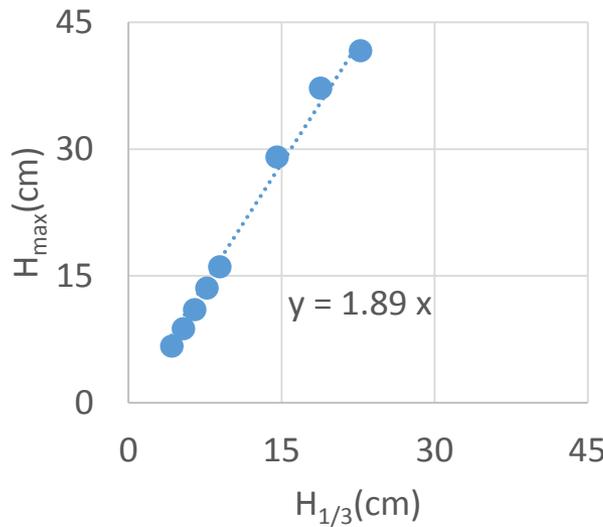
密度2.3g/cm<sup>3</sup>の模型



滑動・揺動限界は  
 $\mu=0.6$ を仮定した  
計算値



$\theta < 90^\circ$  : 揺動  
 $\theta \geq 90^\circ$  : 転倒



- 滑動・揺動の発生限界波高は $H_{1/3}$ ではなく、むしろ $H_{max}$ に近い (⇒魚礁の安定性は最大波で規定)
- 初期移動後に埋没・洗掘に伴い滑動抵抗の増加が推察
- 滑動限界 < 揺動限界 < 転倒限界

今後の検討 摩擦係数の実測値と推定値との比較検討等により、砂質底上での被災限界評価手法の確立に向けた検討を進める。

$H_{max}$ と $H_{1/3}$ の関係

# 着定基質の安定質量算定式の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所  
国際気象海洋(株)

# 着定基質（石材）の安定質量算定法の検討

## これまでの提案式

$$M = \alpha \rho_s \left[ \frac{K_m}{2\mu g (\rho_s / \rho - 1)} \right]^3 U^6$$

$M$ : 石材の安定質量(t)

$\mu$ : 静止摩擦係数

$\rho_s, \rho$ : 石材と海水の密度(t/m<sup>3</sup>)

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{単体で設置} \\ 0.2 & \text{敷き詰め密度75\%以上の群で設置} \\ 0.04 & \text{囲い礁を設けて敷詰め密度75\%以上の群で設置} \end{cases}$$

$$K_m = \begin{cases} 3.5 & \text{波の場} \\ 2.3 & \text{流れの場} \end{cases}$$

$$U = \begin{cases} U_{\max} & \text{波の場 (} U_{\max} \text{: 最大波動流速)} \\ U_c & \text{流れの場 (} U_c \text{: 底面から石の高さまでの2乗平均流速)} \end{cases}$$

## 問題点

- 現地試験の結果は、提案式がまだかなり過大な安定質量を算出する（安定質量算定値は現行式で46t、提案式で15t、実際は約2t）ことを示唆。
- $\mu$ と $\rho_s$ の一定の条件下でも、被害率は必ずしも最大流速 $U_{\max}$ のみで評価できない（周期による系統的差異がみられることがある）。
- 非対称な流速波形の影響の評価やより高いKC数の場合（振動流水槽実験の場合）への適用性が検討されていない。

提案式の汎用性がまだ十分でない

(参考) KC数は水粒子軌道と石のサイズとの比であるが、以下の抗力と慣性力の比でもある。

$$K_C = \frac{\text{抗力}}{\text{慣性力}} = \frac{\rho U_{\max}^2 D^2}{\rho a_{\max} D^3} = \frac{U_{\max}^2}{a_{\max} D} \propto \frac{U_{\max}^2}{(U_{\max} / T_{zp}) D} = \frac{U_{\max} T_{zp}}{D}$$



# 算定法の再検討

## これまでの提案式の仮定

$$\frac{\text{流体力}F}{\text{摩擦力}R} = \text{一定}$$

$$\frac{F}{R} \propto \frac{\rho U^2 D^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD^3} = \frac{U^2}{\mu s g D}$$

$$F \propto \rho U^2 D^2, \quad R = \mu \times \text{水中重量} W$$

ここに、

$$s \equiv (\rho_s - \rho) / \rho$$

$D$ は石の代表長さで、以下では $D \equiv (M / \rho_s)^{1/3}$

**参照** 提案式を変形すると

$$D \equiv (M / \rho_s)^{1/3} = \frac{K_m U^2}{2 \mu s g} \quad \rightarrow \quad \frac{U^2}{\mu s g D} = \frac{2}{K_m} = \text{一定}$$

$U^2 / (s g D)$ は底質粒子の可動性を表す一般的指標

## 再検討の方法

- 検討1 波の影響を表す最も妥当な物理量の検討 ( $U_{\max}$  と  $U_a$ 、 $a_{\max}$  との比較)
- 検討2 高KC数と非対称振動流速に関する実験データの補強 (振動流水槽実験の追加実施)
- 検討3 仮定“ $U^2 / (\mu s g D) = \text{定数}$ ”の妥当性の確認。定数と見なせない場合は補正の検討。



# 検討 1 流速の評価方法

被害率の変化を最もよく説明できる物理量を  $U_{\max}$  と  $U_a$ 、 $a_{\max}$  との比較により明らかにする。ここに、

$$U_a \equiv (U_{\max} + |U_{\min}|) / 2$$

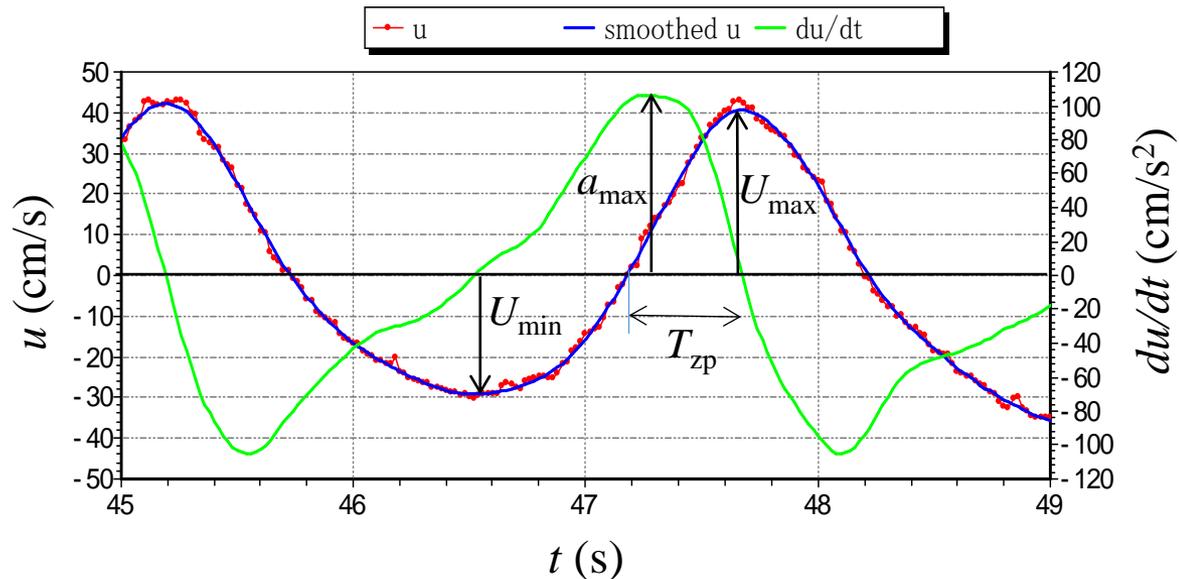
$a_{\max}$  は最大加速度で

$$a_{\max} = r_1 \frac{U_{\max}}{T_{zp}}$$

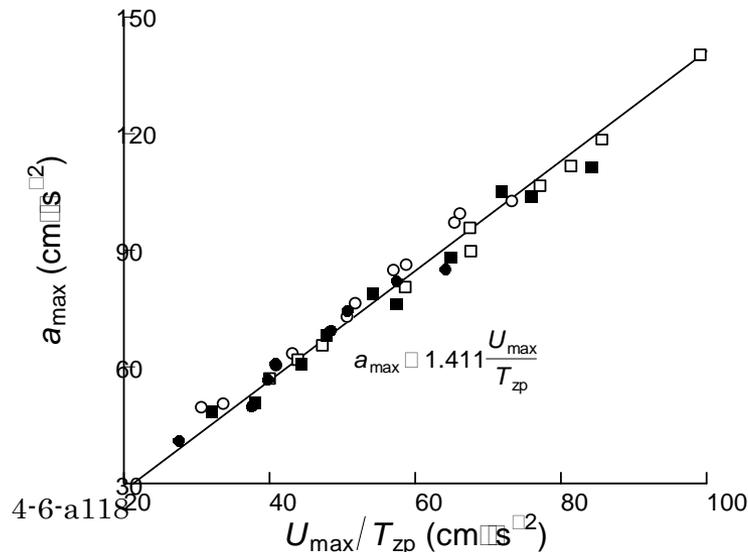
で近似できる。正弦波の場合は

$$r_1 = \pi/2 = 1.57$$

となるが、造波水槽実験（右図）では、 $r_1 = 1.411$ であった。



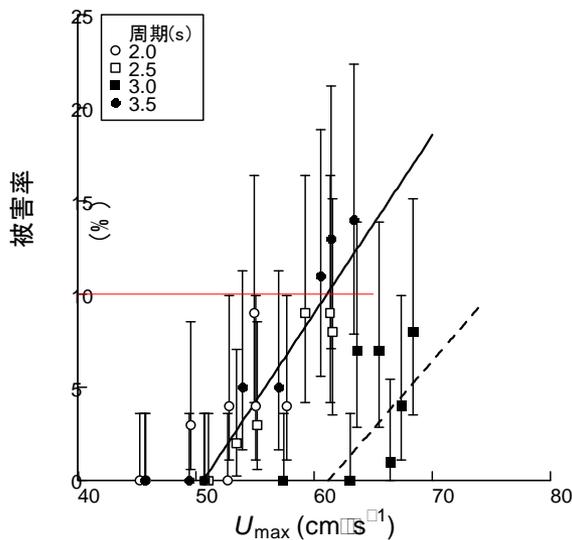
流速の測定例と記号の定義



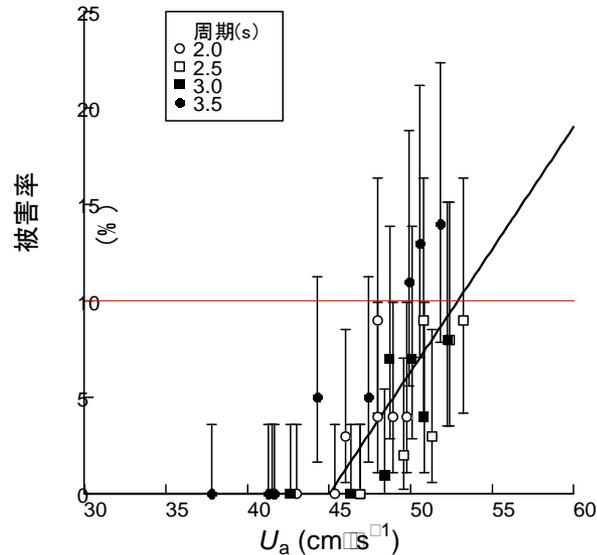
4-6-a118



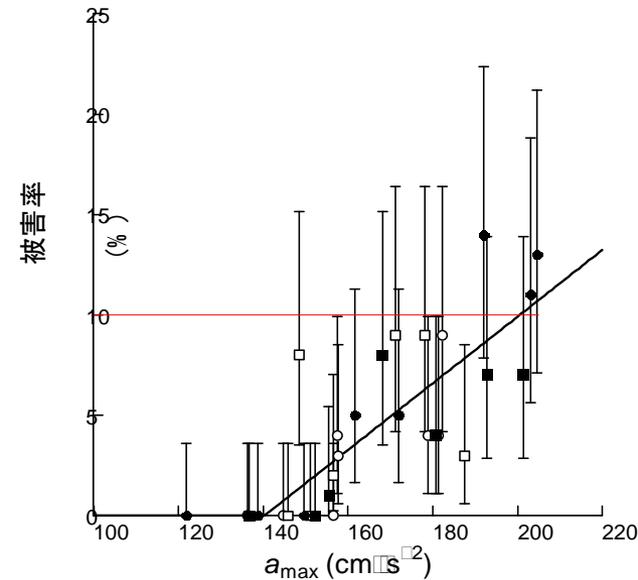
# 被害率の説明変数の検討： 波浪中の玉石底上の碎石 (Case WP1)



被災限界  $U_{\max} = 61.0 \text{ cm/s}$



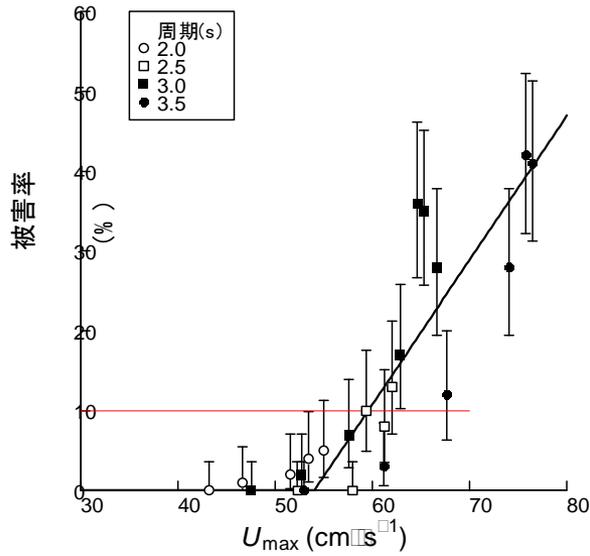
被災限界  $U_a = 52.9 \text{ cm/s}^2$



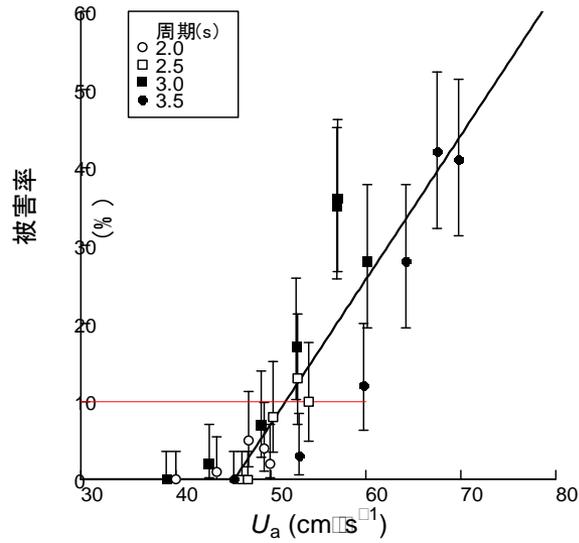
被災限界  $a_{\max} = 200.4 \text{ cm/s}^2$



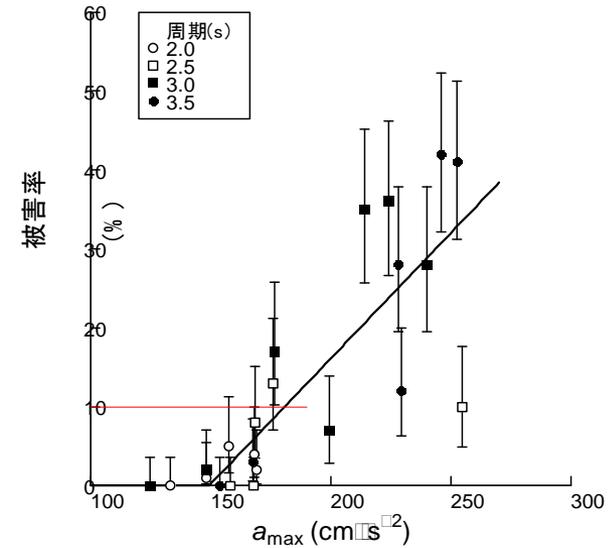
# 被害率の説明変数の検討： 波浪中での玉砂利利底上での砕石 (Case WG1)



被災限界  $U_{\max} = 59.5\text{cm/s}$



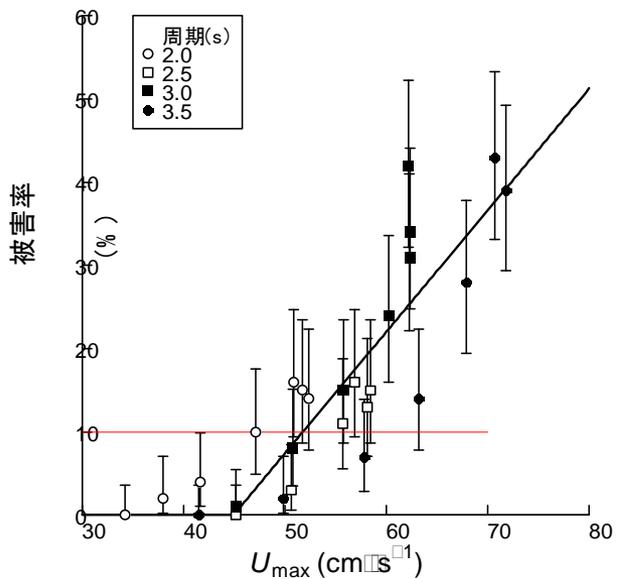
被災限界  $U_a = 51.5\text{cm/s}^2$



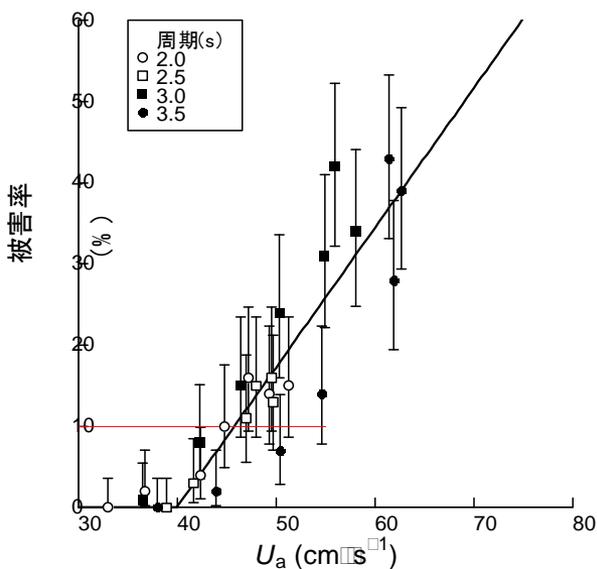
被災限界  $a_{\max} = 180.5\text{cm/s}^2$



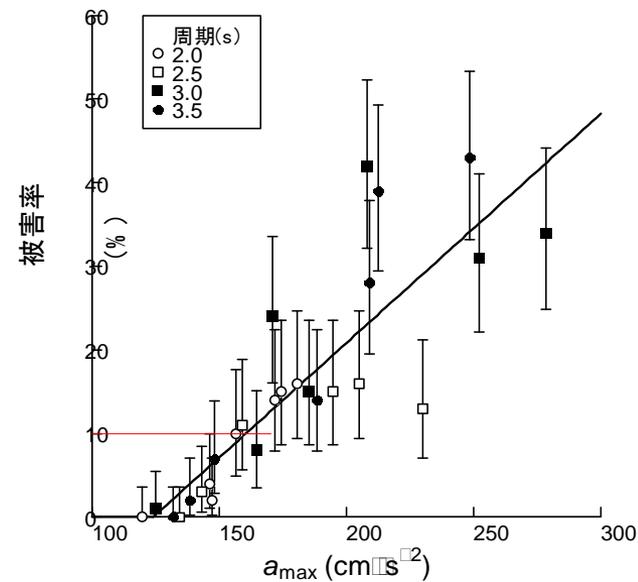
# 被害率の説明変数の検討： 波浪中でのモルタル底上の碎石 (Case WM1)



被災限界  $U_{max} = 51.7$ cm/s



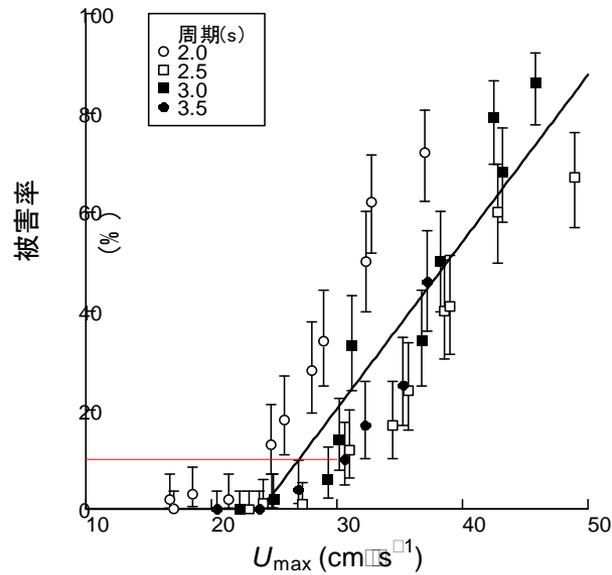
被災限界  $U_a = 45.7$ cm/s



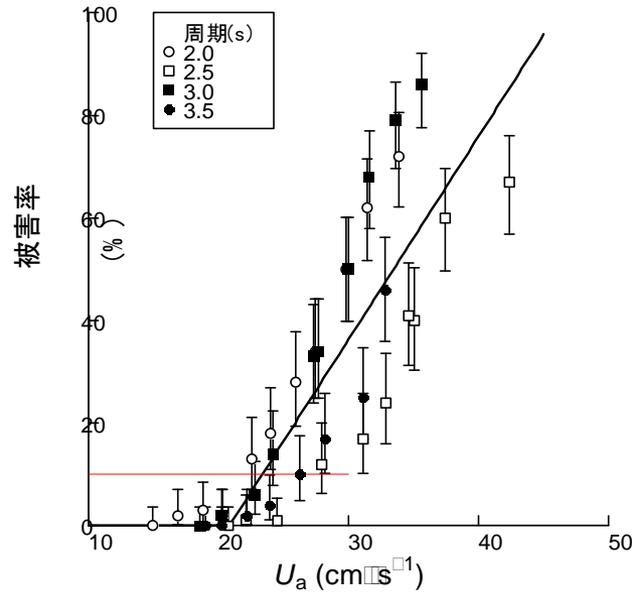
被災限界  $a_{max} = 160.3$ cm/s<sup>2</sup>



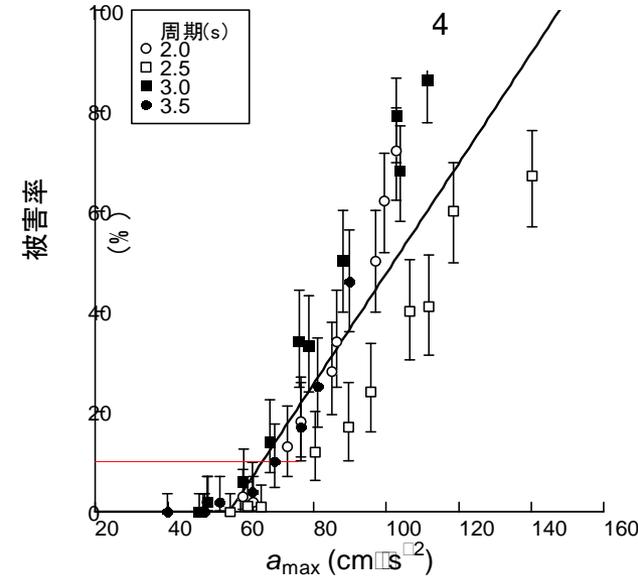
# 被害率の説明変数の検討： 波浪中での玉砂利利底上の碎石複製模型 (Case WG2)



被災限界  $U_{\max} = 26.9$  cm/s



被災限界  $U_a = 23.3$  cm/s



被災限界  $a_{\max} = 65.9$  cm/s<sup>2</sup>

# 検討 2 振動流中での玉砂利底上の碎石 実験方法

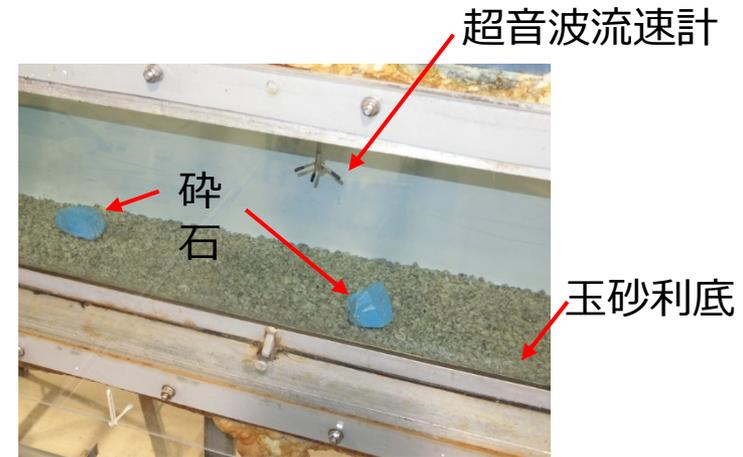
- 縦型循環式回流水槽（試験区0.4×0.4×3m）を用いる
- 従来の試験と同じ碎石100個を用いて、玉砂利底上に単体で碎石を設置し、周期10sで、流速振幅が徐々に増加する振動流を与えて、移動限界流速を調べる。

発生させた振動流は以下の2種類

Case O10SG1 対称振動流 ( $U_{\max} \approx |U_{\min}|$ )

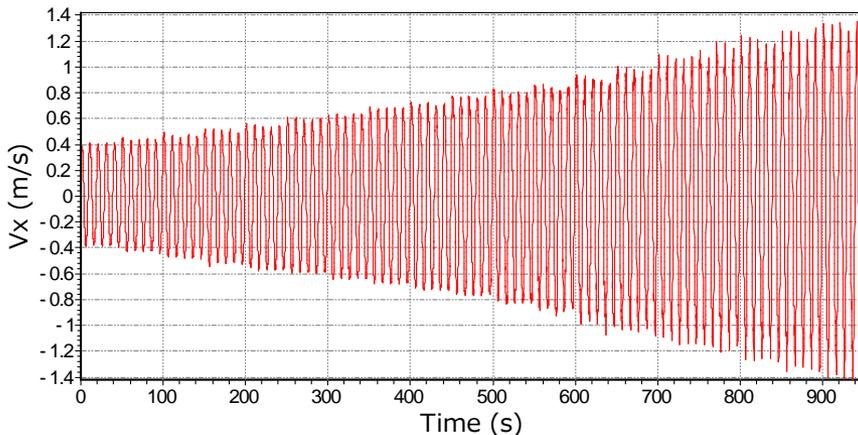
Case O10AG1 非対称振動流 ( $U_{\max} \approx 2|U_{\min}|$ )

- 静止摩擦係数を引張試験と摩擦角試験により測定

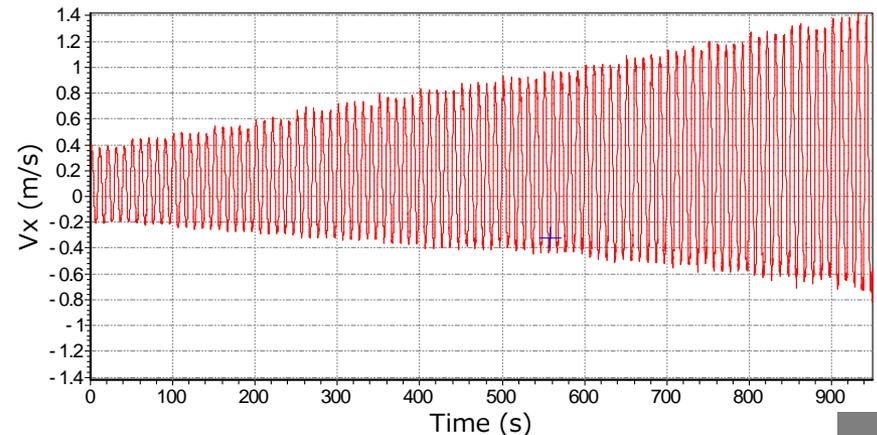


振動流水槽での試験の様子

Case O10SG1



Case O10AG1

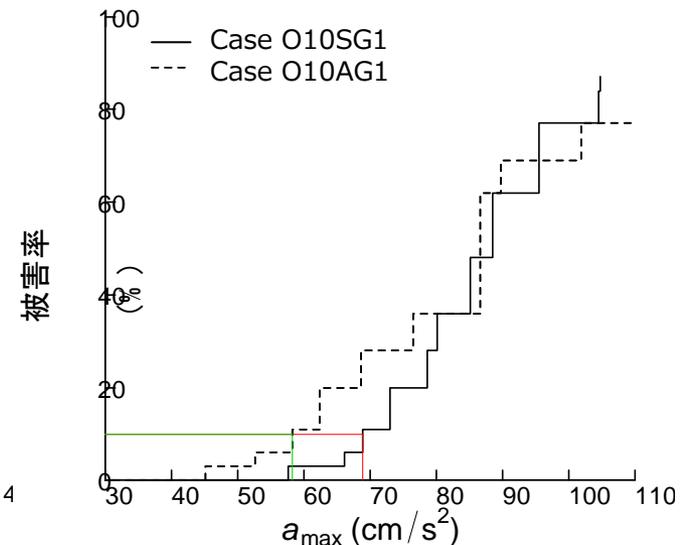
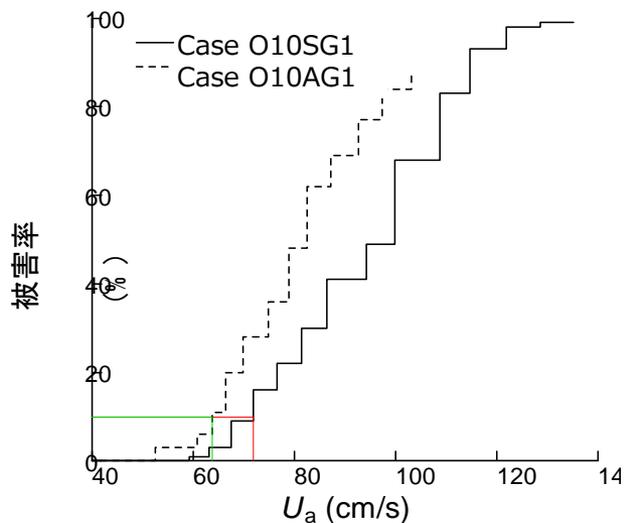
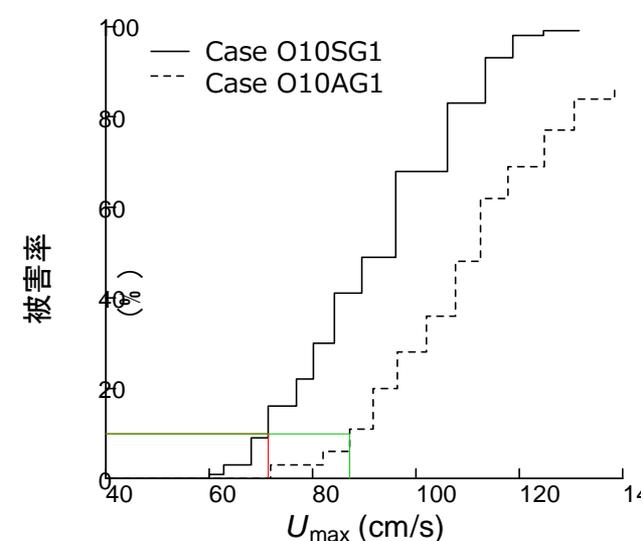


発生させた振動流の流速の時間変化



## 検討 2

# 振動流中での玉砂利底上の碎石 実験結果（移動限界の流速と加速度）



$U_{\max, cr}$  for O10SG1 = 71.3cm/s  
 $U_{\max, cr}$  for O10AG1 = 87.1cm/s

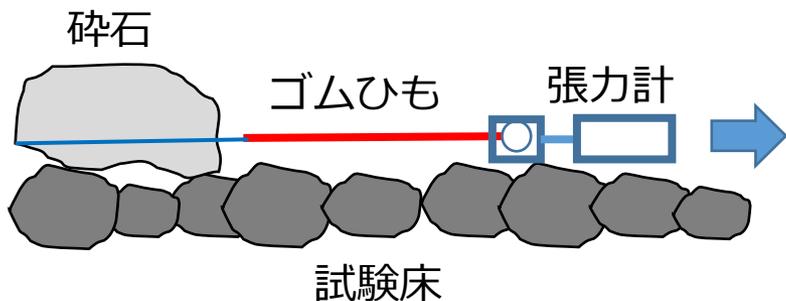
$U_{a, cr}$  for O10SG1 = 71.8cm/s  
 $U_{a, cr}$  for O10AG1 = 63.7cm/s

$a_{\max, cr}$  for O10SG1 = 68.8cm/s<sup>2</sup>  
 $a_{\max, cr}$  for O10AG1 = 58.1cm/s<sup>2</sup>

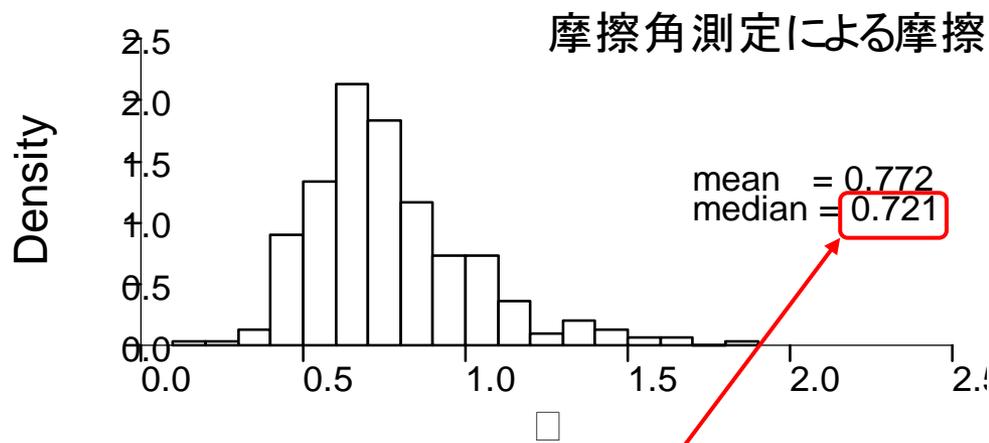
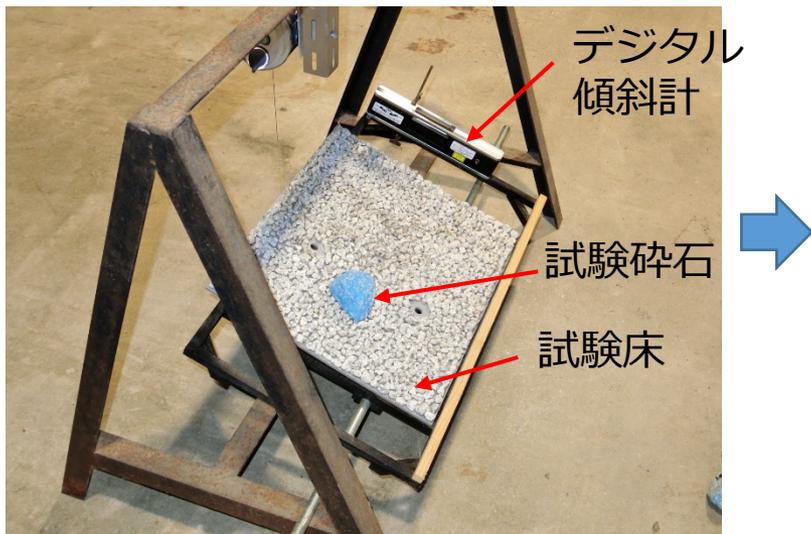
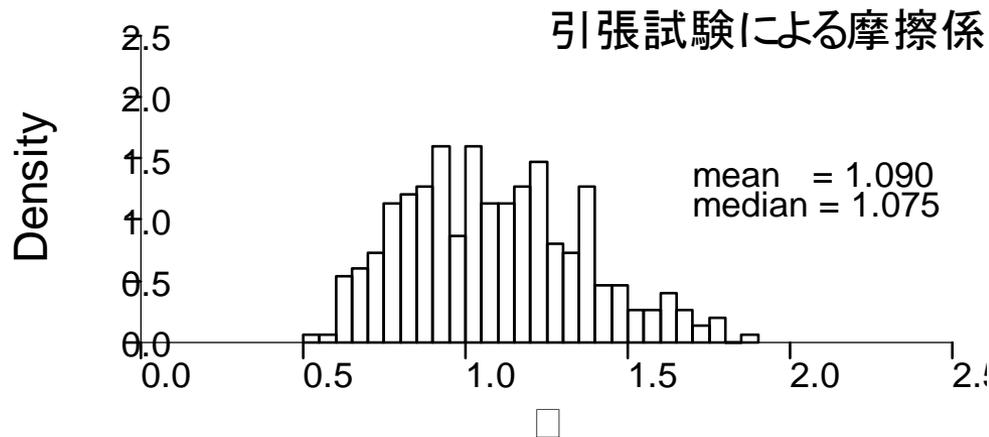


# 検討2 振動流中での玉砂利底上の碎石 実験結果 (摩擦係数)

以下の測定を100個の碎石について  
場所を変えて3回実施



石をゆっくり引っ張り、1個分移動間に  
発生した最大張力を測定



以降の解析  
で用いた値

滑り出しの直前の傾斜角 (摩擦角) を測定 4-6-a125



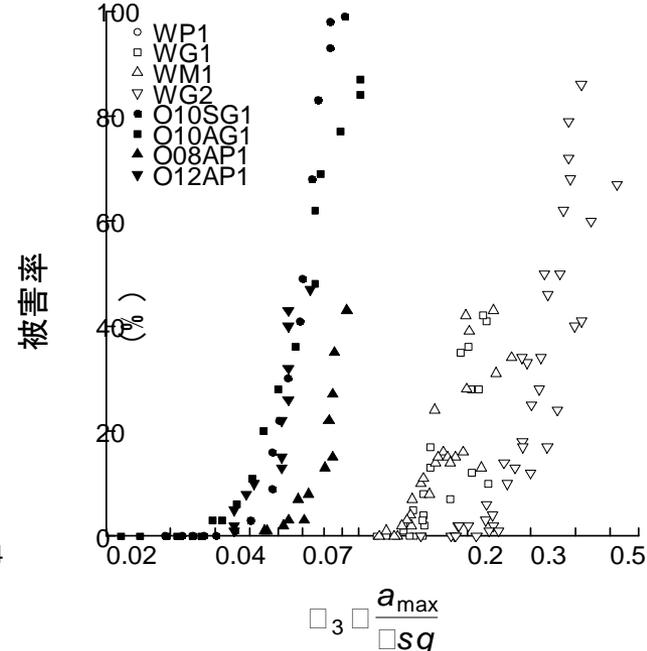
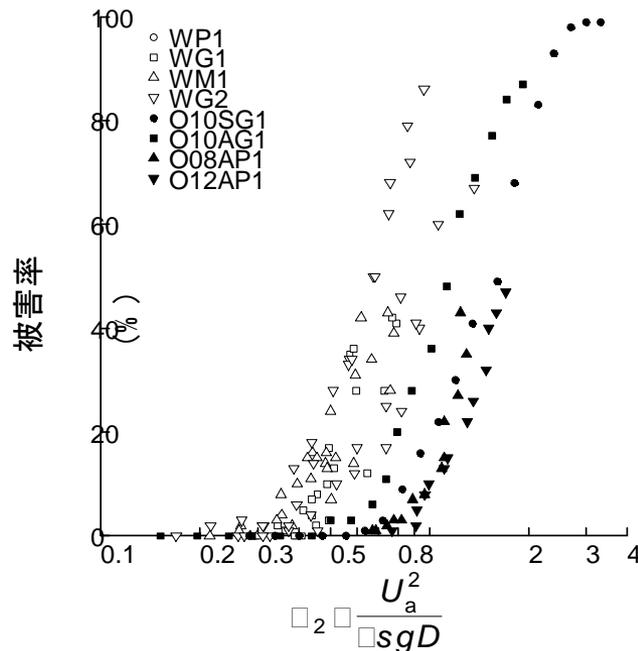
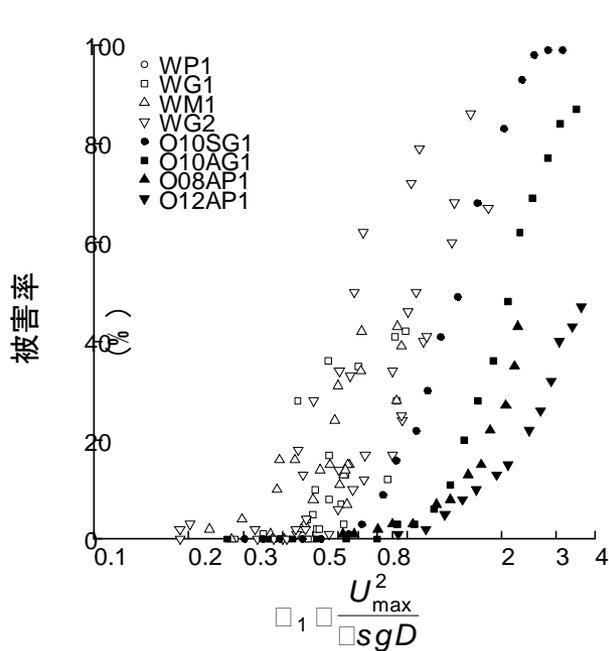
# 検討3 被害率の説明変数としての無次元量

石の可動性の指標:

$$\psi_1 = \frac{\rho U_{\max}^2 D^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD^3} = \frac{U_{\max}^2}{\mu s g D}, \quad \psi_2 = \frac{\rho U_a^2 D^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD^3} = \frac{U_a^2}{\mu s g D}, \quad \psi_3 = \frac{\rho a_{\max} D^3}{\mu(\rho_s - \rho)gD^3} = \frac{a_{\max}}{\mu s g}$$

ここに、  $D \equiv (M_{50} / \rho_s)^{1/3}$        $s \equiv (\rho_s - \rho) / \rho$

従来の提案式は波浪中の被害率が $\psi_1$ のみで説明できると仮定



O08AP1: 周期8sの非対称振動流中での玉石底上の碎石 (H26年実験)  
 O12AP1: 周期12sの非対称振動流中での玉石底上の碎石 (H26年実験)

# 検討3 無次元量の比較評価

Case	流動条件	底質	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$	被災限界			被災限界無次元量		
					$U_{max,cr}$ (cm/s)	$U_{a,cr}$ (cm/s)	$a_{max,cr}$ (cm/s <sup>2</sup> )	$\psi_{1,cr}$	$\psi_{2,cr}$	$\psi_{3,cr}$
WP1	波	玉石底	2.62	0.86	61.0	52.9	200.4	0.565	0.425	0.147
WG1	波	玉砂利底	2.62	0.70	59.5	51.5	180.5	0.661	0.494	0.162
WM1	波	モルタル底	2.62	0.66	51.7	45.7	160.3	0.528	0.413	0.153
WG2	波	玉砂利底	1.34	0.74	26.9	23.3	65.9	0.559	0.420	0.245
O10SG1	振動流	玉砂利底	2.62	0.72	71.3	71.8	68.8	0.921	0.934	0.060
O10AG1	振動流	玉砂利底	2.62	0.72	87.1	63.7	58.1	1.375	0.735	0.051
O08AP1	振動流	玉石底	2.62	0.81	98.6	82.2	103.6	1.566	1.089	0.081
O12AP1	振動流	玉石底	2.62	0.81	101.5	78.5	66.1	1.660	0.993	0.051

基準値

評価

- 過大
- 妥当
- 過小

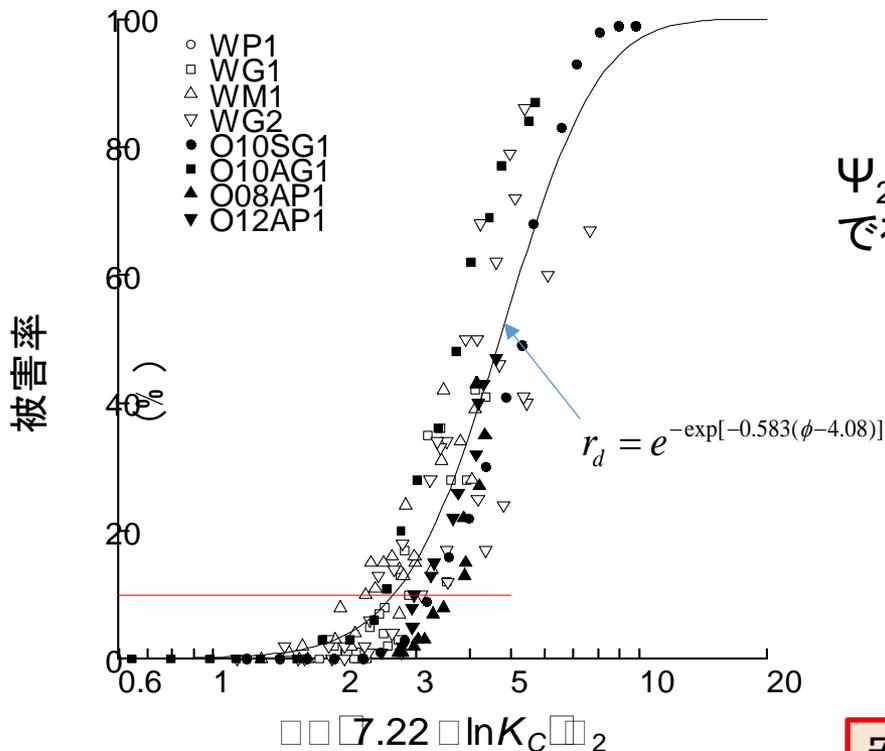
- $\psi_3$ は石の大きさの効果を評価できないだけでなく、石の密度による効果も適切に評価できない。
- $\psi_1$ と $\psi_2$ は、周期が長い(KC数が大きい)振動流の影響を過大評価する。
- $\psi_3$ は、周期が長い(KC数が大きい)振動流の影響を過小評価する。



# 検討3 新算定式の構築

## 算定式の考え方

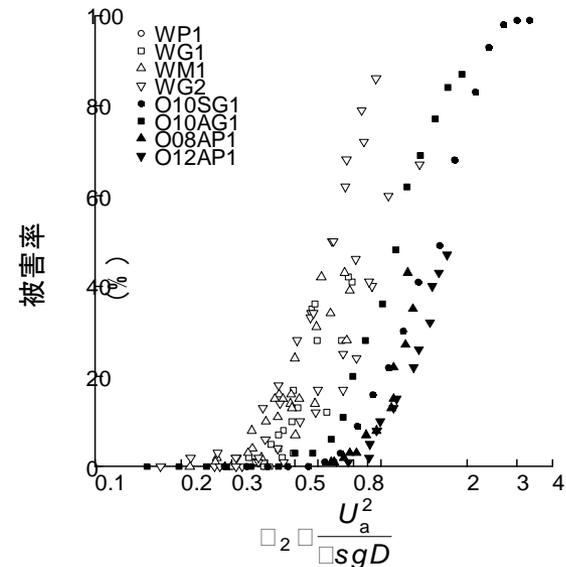
$C_{Fmax}$  の式を援用し、最大流体力 =  $C \times \rho U_a^2 D^2$  で表す。ここに、係数  $C$  は  $KC$  数の関数。



$\psi_2$  を  $KC$  数の関数で補正



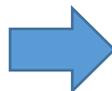
被災限界の指標としては  $\psi_2$  でもまだばらつきが大過ぎる



$$K_C = \frac{U_{\max} T_{zp}}{D}$$

被害率  $r_d = 0.1$  のとき

$$\phi \equiv \phi_{cr} = 2.65$$



安定質量  $M = \rho_s D^3$  は次式から繰り返し計算により求めた  $D$  に基づき算出する。

$$\left( a - \ln \frac{U_{\max} T_{zp}}{D} \right) \frac{U_a^2}{\mu sg D} = \phi_{cr}$$

ここに、 $a = 7.22$ 、 $\phi_{cr} = 2.65$

# 検討3 新算定式の現地試験結果への適用 (参考) 試験結果の概要 (H27年度実施)



試験地 (志和岐) の位置

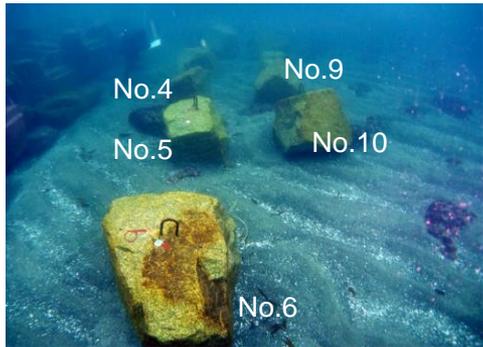


調査開始前に横転していた割石

- 調査開始前 (台風11号襲来した7/16) に割石は被災限界相当量移動 (⇒移動により安定化)
- 8/22~23にわずか(9cm以下)に移動

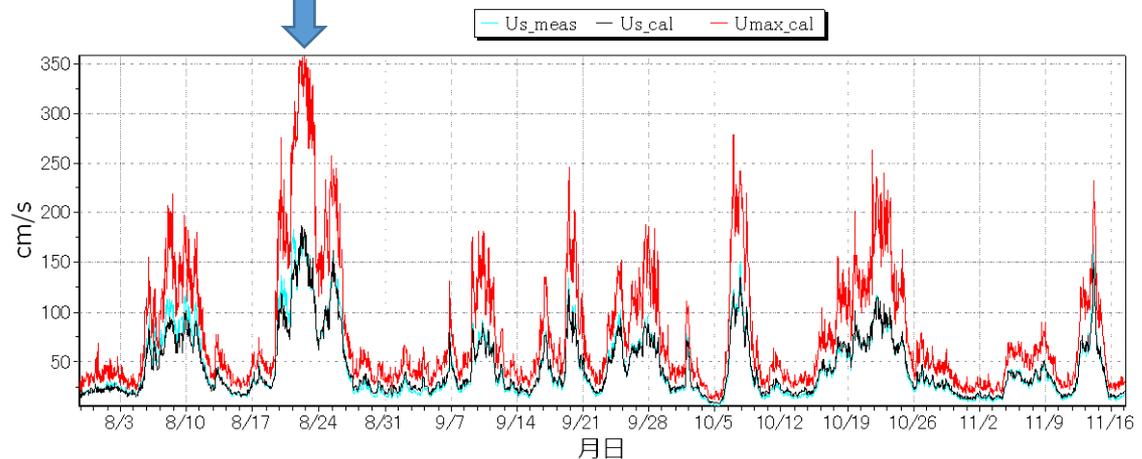


被災限界相当の流速が再度発生したと推察



2~3tクラス (1.16~3.01t ;  $M_{50}=2.04t$ ) の割石10個を設置。設置時の割石 (吊り下げ金具は上側)

被災限界流速に近いと推定

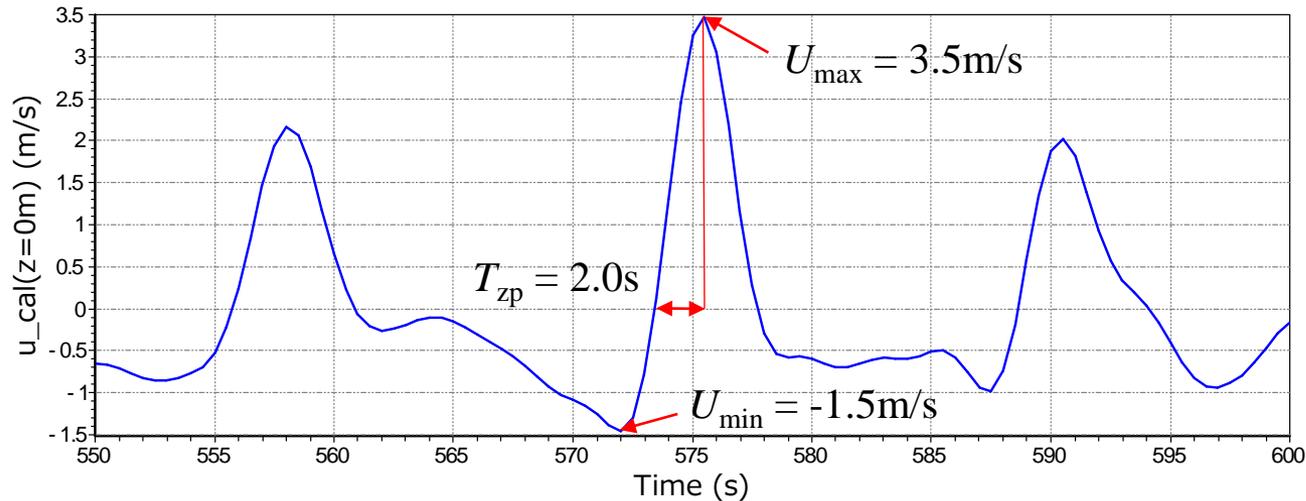


Umax\_cal: 水圧からの最大波動流速の推定値



# 検討3 新算定式の現地試験結果への適用結果

## 最大流速発生時における流速波形



2015年8月22～23日、志和岐地区で観測された最大流速発生時の流速波形（水圧からの推定値）の例

$\rho_s = 2.59 \text{ t/m}^3$ ,  $\rho = 1.025 \text{ t/m}^3$ ,  
 $\mu = 0.8$ ,  $U_{max} = 3.5 \text{ m/s}$ ,  
 $U_{min} = -1.5 \text{ m/s}$ ,  $T_{zp} = 2.0 \text{ s}$

従来の提案式による  
 安定質量  $M = 15.0 \text{ t}$

かなり過大

実際の質量  
 $M_{50} = 2.0 \text{ t}$

新算定式による  
 $D = 1.05 \text{ m}$   
 安定質量  $M = 1.2 \text{ t}$

ほぼ妥当?

# 残された課題

- 摩擦係数の再見直し

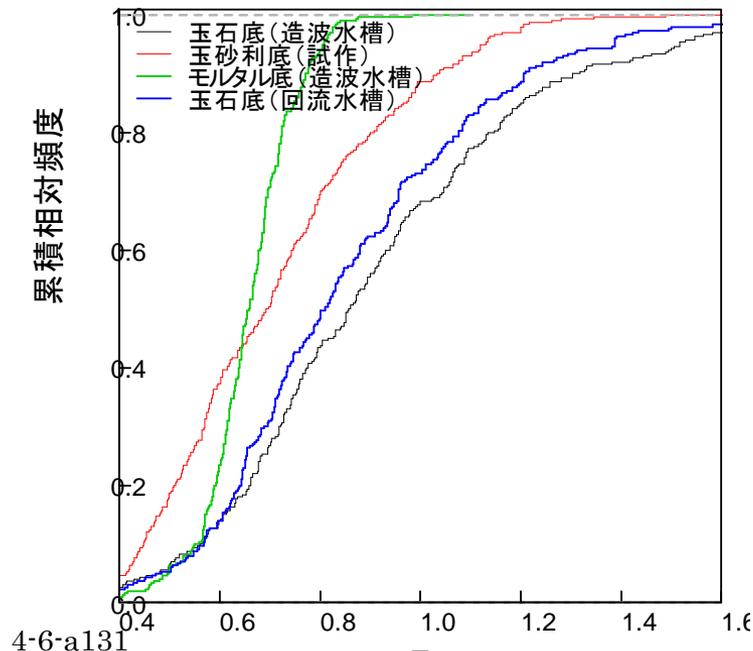
摩擦係数（特に、モルタル底の値）を再点検し、無次元量  $\phi$  と被害率との相関を改善できないかを再検討。

- 非対称的な流速波形の予測手法の確立（次年度以降）

$U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 、 $T_{zp}$ （または $a_{\max}$ ）

- より小さい割石を用いた現地での移動限界の確認（次年度以降）

摩擦角から測定した  
摩擦係数の結果



# 海洋モデルの利用による流れに関する 設計条件の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所

# 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討

## ●事例の蓄積（今回報告）

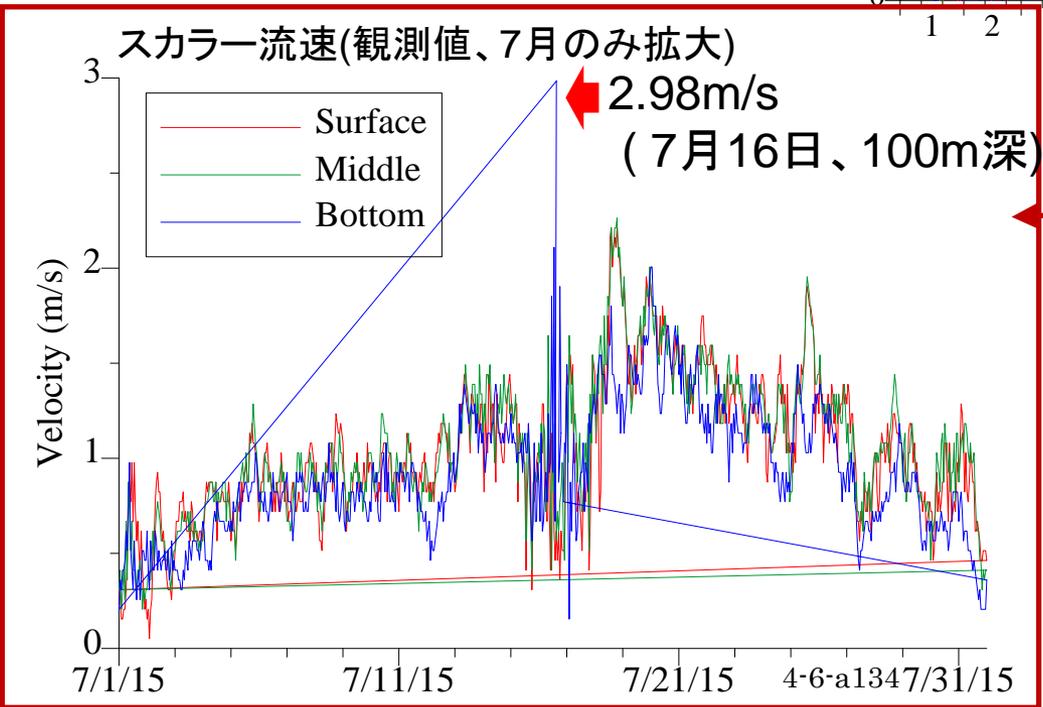
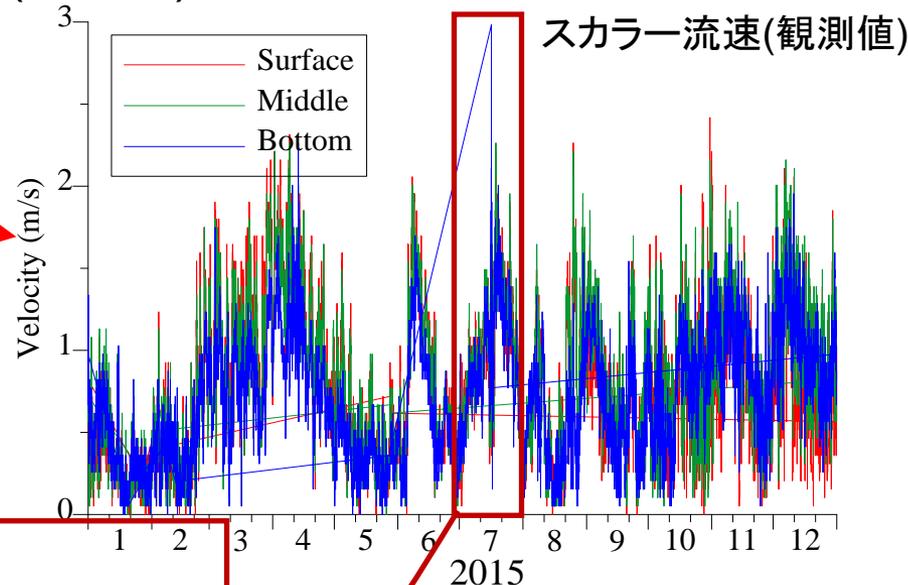
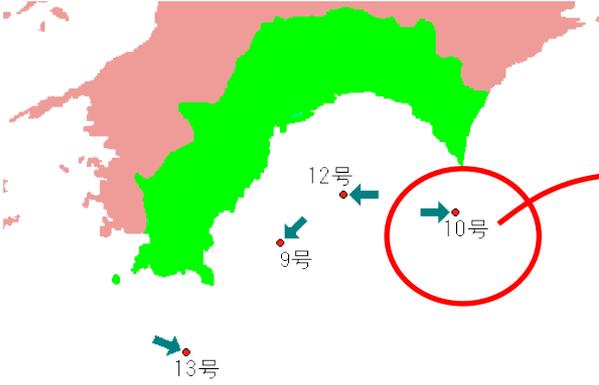
- 海域によって外力等の条件が異なるため、事例の積み重ねる。
- 福島県沖に加えて、長期流速観測と海洋モデルによる数値計算を行っている茨城沖、島根県沖を事例海域として検討する。
- さらに表層型浮魚礁での流速観測データを収集し、深海域での海洋モデルの予測値（但し、日平均化データ）との比較を行う。

## ●検討内容（次回以降報告）

- 海洋モデルの適合性を検討するとともに、海洋モデルを設計流速の決定に利用する際の注意事項を整理する。
- 密度成層と適合性との関係、最大波高と最大流速の同時性や方向関係などに留意する。

# 事例の蓄積1

データ例：高知県沖、黒潮牧場10号ブイ(2015年)



○数ヶ月周期で  
流速の変動が見られる  
→ 黒潮の影響

○最大流速は  
7月16日、100m深の  
2.98m/s

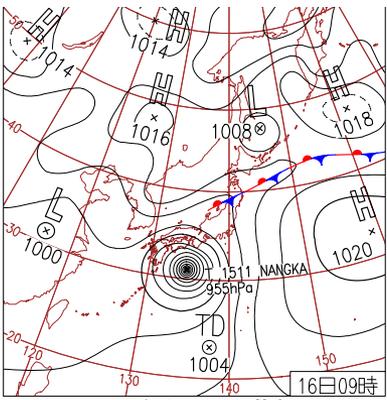
# 事例の蓄積1

モデルとの比較 (外洋モデル：JCOPE2.1 vs 黒潮牧場10号ブイ)

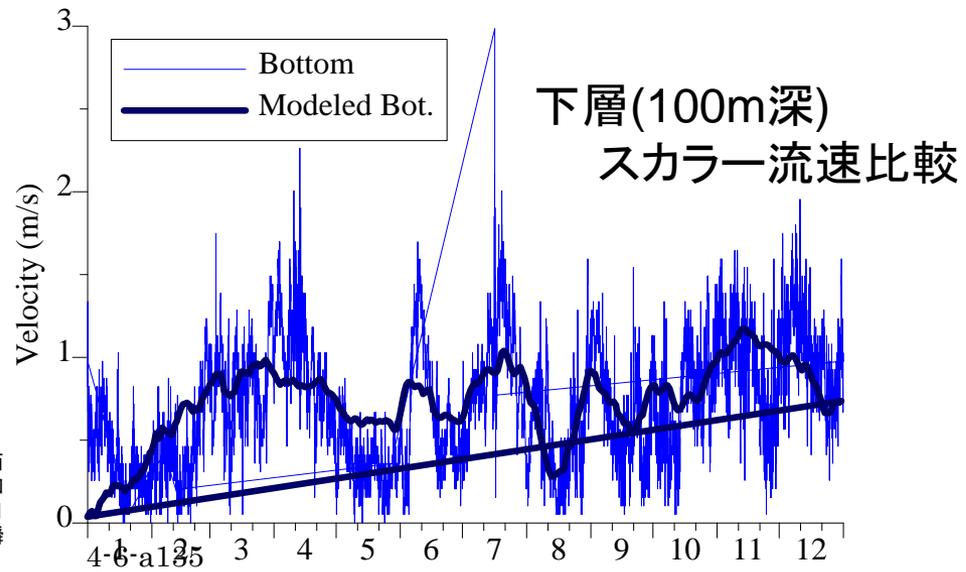
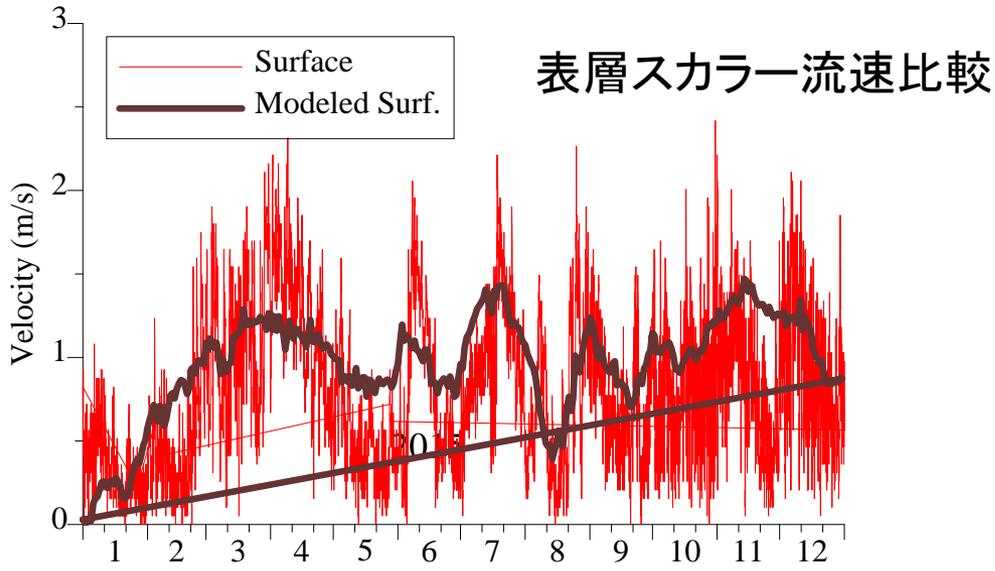
- 数ヶ月周期で  
流速の変動が見られる  
→ 黒潮の影響
- 平均的な流速場は  
非常に良く一致している
- 7月16日の100m深における  
最大流速2.98m/sは  
外洋モデルでは  
表現できていない  
(モデル上0.90m/s)



最大流速が発生した要因は定かではないが、台風通過に原因があるものと考えられる (外洋モデルでは表現不可能)



16日(木)四国を中心に大荒れ  
台風第11号が四国上陸。湿った気流で西～北日本の各地で非常に激しい雨。高知県魚梁瀬87.5mm/1h、奈良県上北山で日降水量521.5mm、高知県室戸岬で最大瞬間風速42.6m/s。

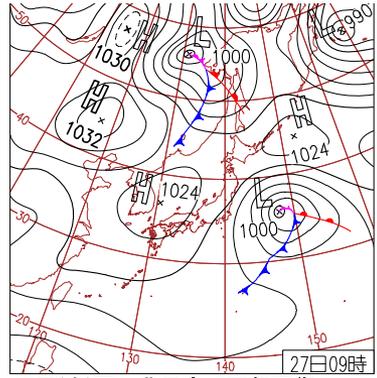


# 事例の蓄積 2 鹿島灘沖

モデルとの比較：外洋モデル(JCOPE2.1) vs 鹿島沖観測値 (2014-2015年)

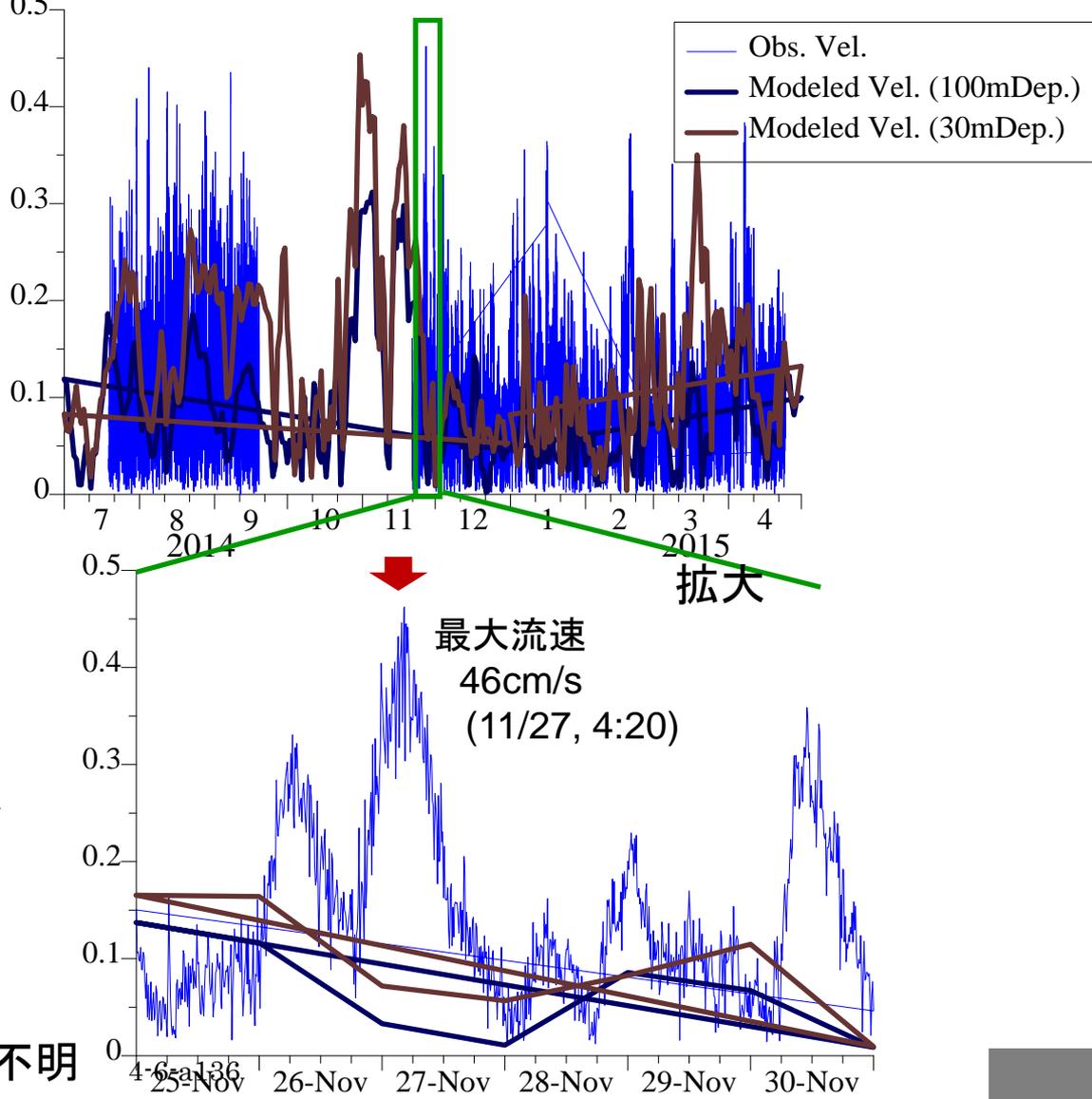
- 観測水深: 41m  
モデル上の水深: 154m  
水深に差異あり!

- 最大値 46cm/s  
(2014年11月27日)  
台風通過に伴うものと考えられる  
(モデル上は表現されていない)



27日(木)西～北日本は天気回復  
沖縄・奄美は気圧の谷の影響で曇りや雨、  
沖縄県与那国空港、石垣市伊原間で  
76mm/1h。西～北日本は、低気圧が去り  
一部雨の所も次第に晴れに。大阪市など  
でカエデ紅葉。

スカラー流速比較(モデル:水面下30, 100m、観測値:海底上1m)



- 2014年10月から11月にかけて  
モデル上では40cm/sを超える  
流速が現れるが、観測値は欠損で不明

# 事例の蓄積3 隠岐沖

2008/8/9~8/28

2014年度検討資料再検証

水深:約80m

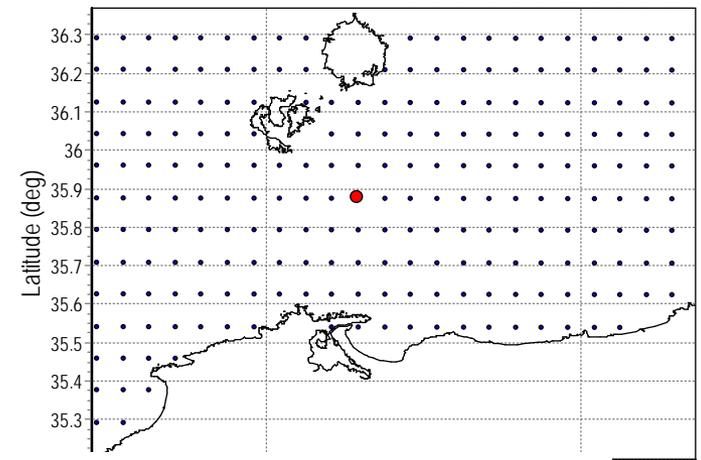
(FRA-JCOPE2での水深78.1m)

ADCP:ADCPによる10分間隔、2分間平均流速

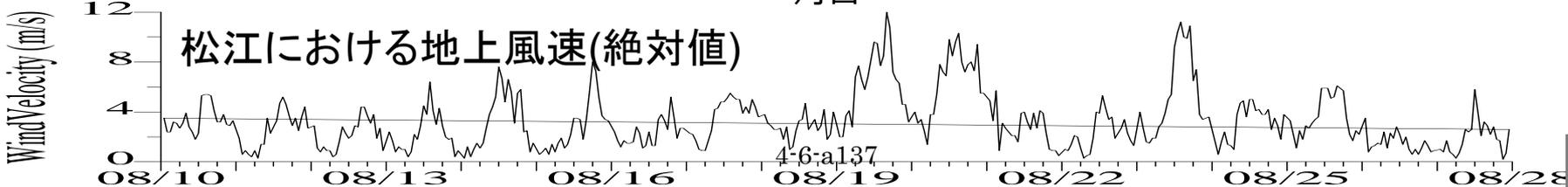
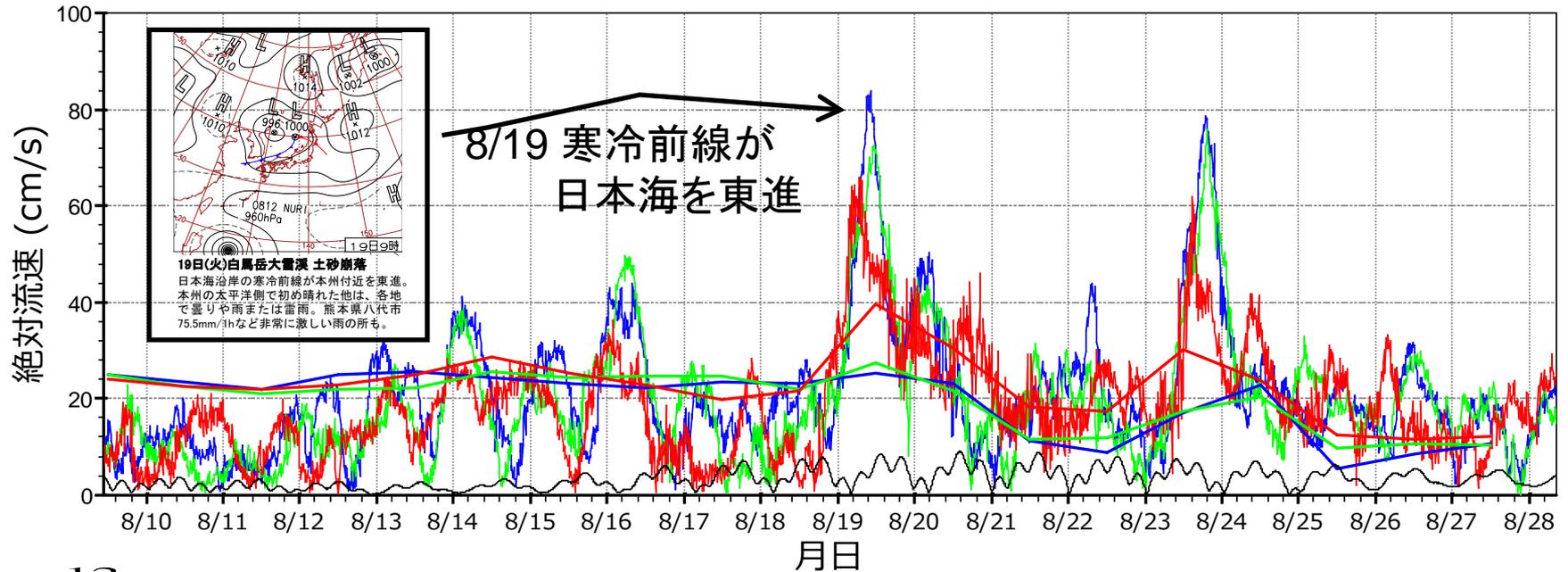
FJ:FRA-JCOPE2による日平均流速

nao:NAO.99Jbの分潮流の調和定数からの計算値

隠岐\_ADCP+FRA-JCOPE2+nao99bJ.sdf

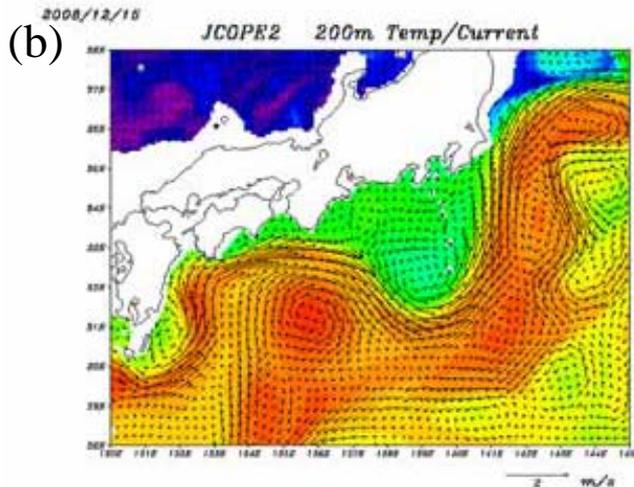
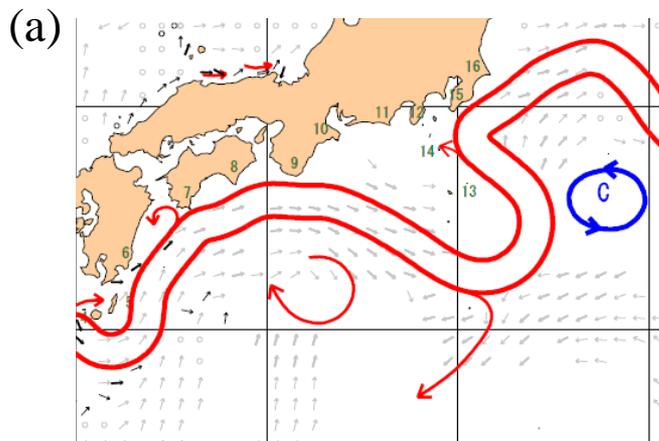


— ADCP(z=10m) — ADCP(z=20m) — ADCP(z=74m) — FJ(z=10.2m) — FJ(z=19.9m) — FJ(z=74.6m) — nao



# 海洋モデル(FRA-JCOPE等)で表現できるもの、できないもの

○黒潮流路等、外洋の平均的な流れはよく再現される

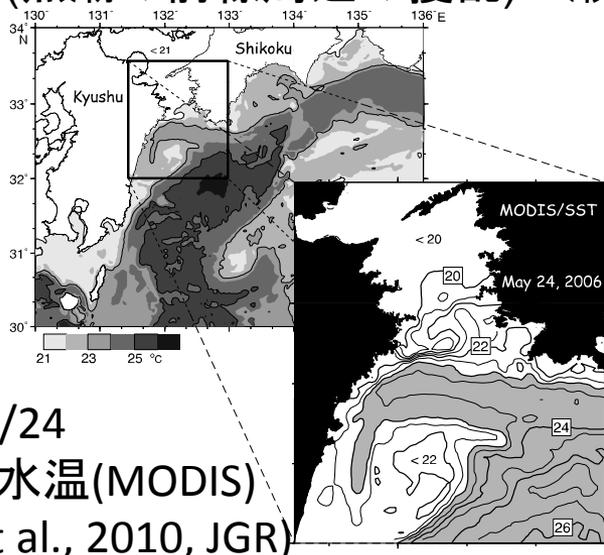


(社)日本深海技術協会  
会報2009年1号  
より抜粋

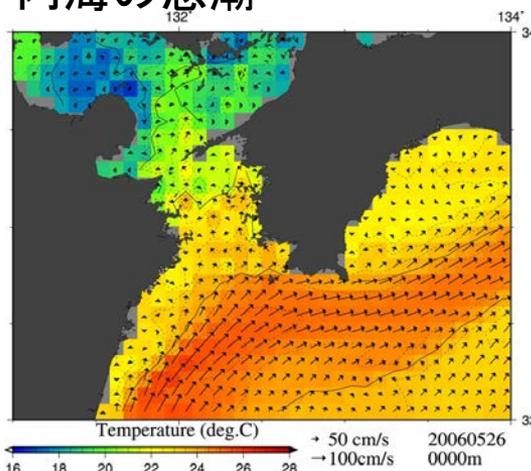
図3. 2008年12月15日の黒潮流路  
(a) 海洋速報(海上保安庁海洋情報部)  
(b) 図2bの状態を初期状態として予報した  
200m深の水温と流れ。

○局所的な変動は苦手

・解像度の不足に起因: (例) 黒潮前線波動  
(黒潮の前線周辺の変動) ≒ 瀬戸内海の急潮



2006/05/24  
表層水温(MODIS)  
(Isobe et al., 2010, JGR)



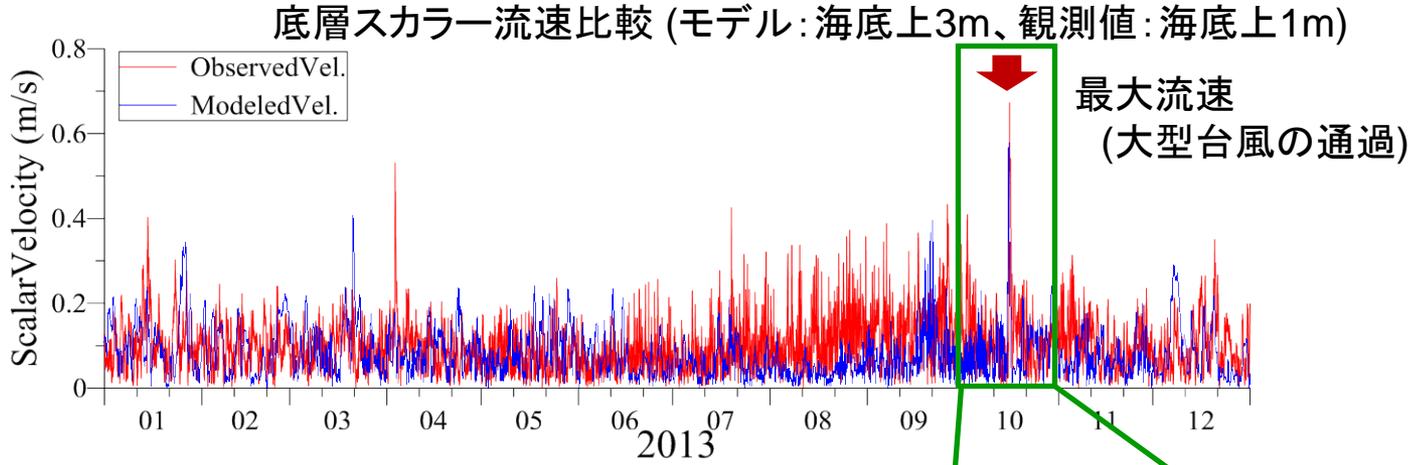
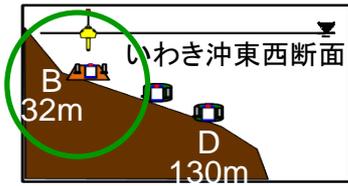
2006/05/24 表層水温  
・流速ベクトル(FRA-JCOPE)

・外力の不足に起因  
(例) 低気圧の通過など、  
気象擾乱に伴うもの  
(JCOPEで与えている  
気象場は、1/2°メッ  
シュであり、低気圧の  
スケール(10数キロ)を  
表現できない)

# 事例の蓄積 4

福島沖沿岸モデル vs 観測値 (2013年) : モデル結果がよく一致する場合の検証

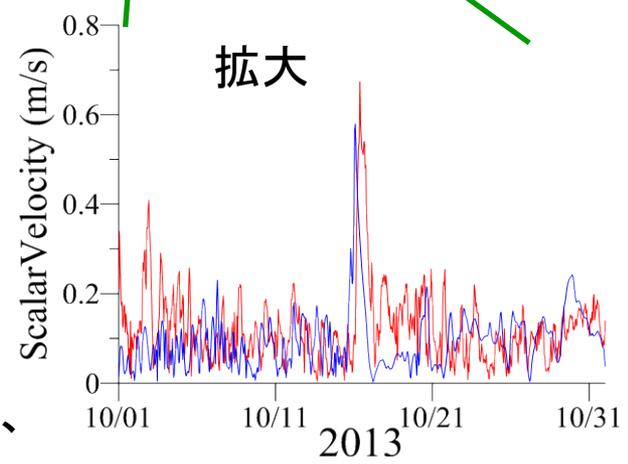
モデル結果比較, 岸側, Sta.B



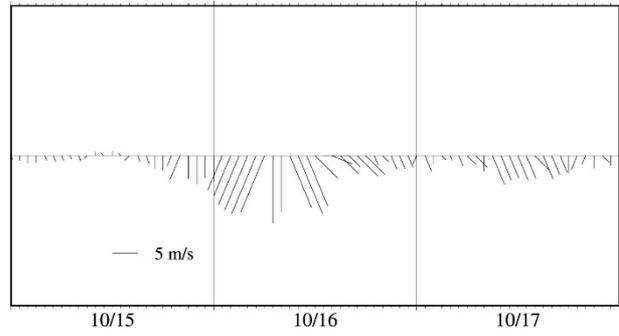
観測値 0.67m/s  
(2013/10/16 09:00)  
計算値 0.58m/s  
(2013/10/16 02:00)  
時間にずれがあるものの  
値は良好



南向きの風(10m/s以上)で、  
観測値とモデル結果が  
良好に一致



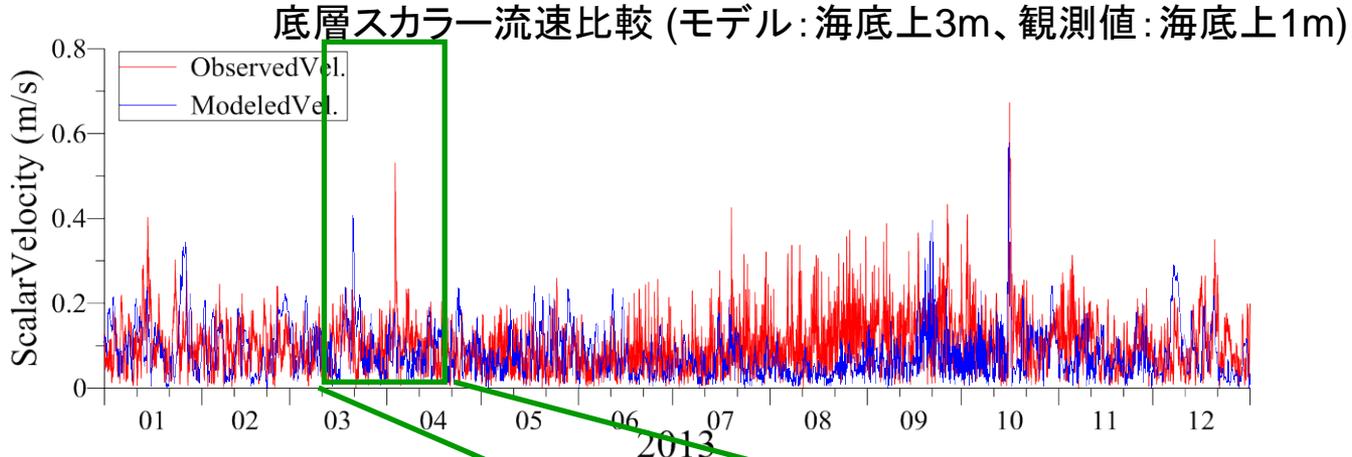
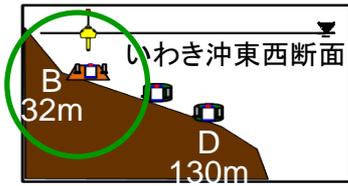
最大流速が発生した日時の  
風速ベクトル (小名浜)



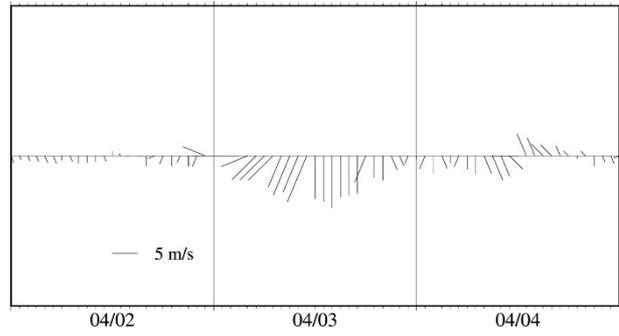
# 事例の蓄積 4

福島沖沿岸モデル vs 観測値 (2013年) : モデル結果と一致しない場合

モデル結果比較, 岸側, Sta.B



最大流速が発生した日時  
の風速ベクトル (小名浜)

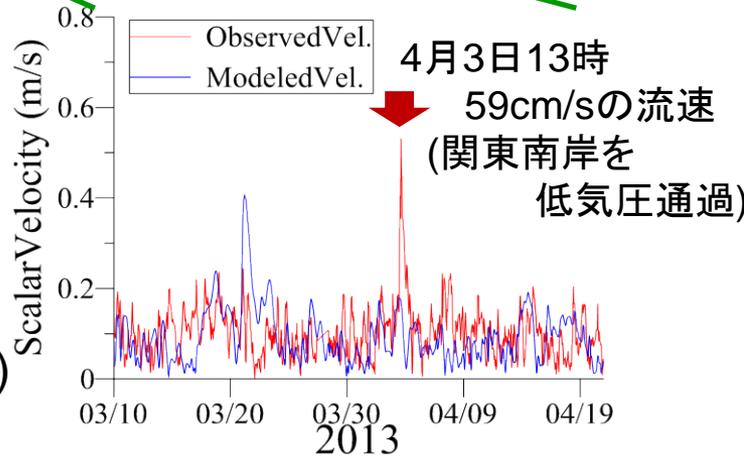


2013年4月3日に大  
きい流速 (59cm/s)  
が観測されたが、モ  
デルでは表現できて  
いない



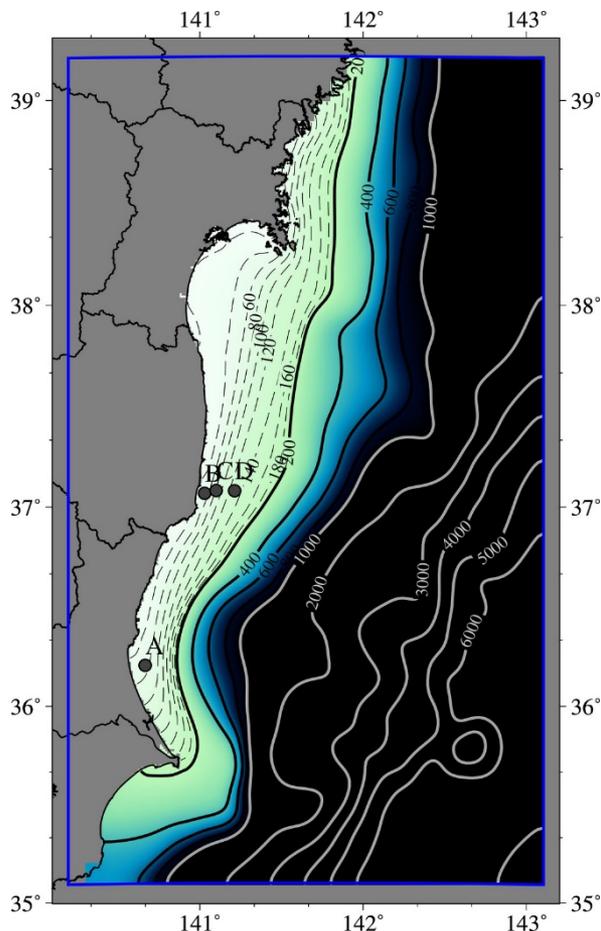
(一致する場合と同じく)  
南への風ではある  
モデルで表現できない原因は不明

拡大



参考:

## 福島沿岸モデルの概要



ベース: Regional Ocean Modeling System (ROMS)

計算領域: 宮城、福島、茨城県海域(左図)

水平解像度:  $1/90^\circ \times 1/90^\circ$  (約1km)

鉛直解像度:  $\sigma$ 座標 20層

河川: 1級2級河川

開境界条件: 潮汐,

**外洋変動**

**(FRA-ROMS: 太平洋および我が国周辺の  
海況予測システム, 水研機構)**

気象条件: **気象庁GPV-MSM**

計算対象期間: 2013年1月~12月 (1年間)

図中、茨城県沖A点、福島県沖B~D点は現地調査地点

今回はB点(水深30m, モデル上水深49m)と、

D点(水深130m, モデル上水深131m)における比較を示す

東日本周辺沿岸モデルのモデル領域

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会  
議 事 抄 録

日時：平成 28 年 7 月 15 日（金） 13:00～15:00

開催場所：TKP 神田駅前ビジネスセンターカンファレンスルーム 5G

## (1)開会

### ◎事務局(漁村総研 伊藤部長):

委員会を始めさせていただきます。委員会の開催が遅れたことをお詫び申し上げます。水産庁の吉塚課長がお見えですのでご挨拶をお願い申し上げます。

## (2)水産庁挨拶

### ◎水産庁(吉塚課長):

本日は先生方ご多忙の中委員会にご出席いただき厚く御礼申し上げます。水産庁では昨年 4 月に設計体系を久しぶりに見直しました。仕様規定から性能設計への移行、東日本大震災を受けての知見を踏まえた耐震の考慮が主眼点です。しかし、漁場施設に関しては、沈設魚礁に対する流体力の計算方法、着底基質の安定重量の算定方法、海洋モデルによる漁場の設計流速の算定方法の 3 点については継続した検討を要するため、この委員会を設置しました。今年度中のとりまとめを目指して鋭意努力をしていきたいと考えております。タイトなスケジュールですが、先生方におかれましてはご理解賜り、よろしくご指導をお願いいたします。

## (3)平成 27 年度第 2 回委員会の指摘と対応

### ◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 1:(省略)

### ◎質問・意見:

特になし。

## (4)「漁場の施設の設計手法高度化の検討」に関する調査全体計画

### ◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 2:(省略)

### ◎質問・意見:

### ◎大竹委員長:

資料 2 右端枠の指導を受けるとは誰からなのか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

委員である。

#### (5)沈設魚礁の性能照査法の改定の方向性について

◎事務局(水工研 川俣 G 長、中山部長、アルファ水工 綿貫部長):資料 3-1~5:(省略)

◎質問・意見:

◎大竹委員長:

流体力の算定式を 2 種提案したということで良いか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

適切な方を選択するということである。

◎事務局:(水工研 中山部長)

外力が同じなら  $C_{fmax}$  と CDCM が並記でも良い。

◎大竹委員長:

場合分けをどう考えるか。魚礁単体、層積、高層魚礁それぞれの式を用いるのか。

◎事務局:(水工研 中山部長)

例えば、移動距離が厳しくなる方を選択することも考えられる。

◎大竹委員長:

魚礁の効果を考えた場合、移動することでどのように変化するか考えねばならない。そうするとあまり許容移動量というものを考慮すべきではないのでは。

◎事務局:(水工研 中山部長)

静的安定で評価してもよいが、現実的な空間スケールで移動を評価できているので問題ない。また、新手法を導入すると現行の施設の安全率が低くなることもあり、許容移動量で評価すべきである。施工精度くらいの移動は許容してもよいと考える。

◎大竹委員長:

事務局の提案のたたき台は B 案( $C_{Fmax}$ )か。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

そのとおりである。

**◎岡安委員：**

資料 3-2、p.5 の全体・部分評価について、魚礁を単体または複数置いた際に流体の挙動は変化する。流速振幅が部材間隔でどれほど影響を受けるのか。複合的な実験と単体での実験の考え方の整理が必要である。もっとも、実際の魚礁では部材にかなり距離がある。しかし、魚礁を積むなら相互作用はあるだろう。その辺よく考えるべき。

**◎大竹委員長：**

流体力算定式の場合分けについて、魚礁単体、層積、高層それぞれどのように選択するのか。

**◎事務局：(水工研 中山部長)**

2 手法の選択と滑動転倒の許容を併せた話になる。例えば、乱積なら CD は単体とあまり変わらない。

**◎大竹委員長：**

高層魚礁での調査は行うか。

**◎事務局：(水工研 川俣 G 長)**

水深が深く難しいので浅海域のコンクリート魚礁のみである。

**◎岡安委員：**

資料 3-5、p.8-9 の調査はこれから行うのか。

**◎事務局：(アルファ水工 綿貫部長)**

そのとおりである。

**◎岡安委員：**

転倒について、水理模型実験では一瞬転倒モーメントが復元モーメントを上回ってもロッキングにとどまることがあるので注意すべき。

**◎事務局：(水工研 川俣 G 長)**

摩擦係数が大きいと転倒の安全率が低くなるので注意する。

**◎水産庁：(不動専門官)**

資料 3-1 における波による流速算定方法の検討は今後どのように進めるのか。

**◎事務局:(水工研 川俣 G 長)**

B 案(波の不規則性考慮)も検討するとなると難しい。

**◎事務局:(水工研 中山部長)**

B 案はリアリスティックだが、規則波の A 案の方が安全側になる。これと許容移動量を併せて検討し、落としどころを探ればよい。

**(6)着底基質の安定質量算定式の検討**

**◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 4:(省略)**

**◎質問・意見:**

**◎事務局:(水工研 中山部長)**

2t で動かなかったといっても、下限がわからない。調査で、軽めの石を入れることが少々難しい。また、多少は動いた方が、基質が更新されて良いという考えもある。

**◎事務局:(水工研 川俣 G 長)**

徳島での割石はギリギリ動かなかったらしいので、検討期間の最大外力に対して 2t が限界と考えている。

**◎岡安委員**

移動を支配するのは流速値によるか、それとも係数  $\alpha$  に依存するのか。

**◎事務局:(水工研 中山部長)**

既往手法では、それらよりも不安定な底質条件としていたため、質量が巨大となっていた。

**◎事務局:(漁村総研 伊藤部長)**

動いても良いというのは理解できるが、実際に動いているのは藻場礁のブロックである。これはもっとも動いてはいけない施設であり注意してほしい。

**◎事務局:(水工研 中山部長)**

高さが性能に作用するような施設は、当然移動は許容しない。その辺の考え方をしっかり理解してい

れば移動の許容と性能の維持は矛盾しない。

### **(7)着底基質の安定質量算定式の検討**

◎事務局(水工研 杉松研究員):資料 5:(省略)

◎質問・意見:

◎大竹委員長

浮魚礁のデータは重要であり、最近は入手しやすくなっているので蓄積すること。宮崎県沖で水深100mの流速が水深25mより大きく、2.8m/sが観測されたこともある。黒潮の影響があると考えられる。その辺は水産庁にも協力してほしい。

### **(8閉会**

◎事務局(漁村総研 伊藤部長)

以上いただいた意見を基に検討を進める。委員の皆様におかれては、今後もよろしくご指導を賜りたい。

平成 28 年度

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第 3 回検討委員会資料

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会（第 3 回）

## 議 事 次 第

日 時：平成 29 年 2 月 20 日（月） 10:00～12:00

場 所：エッサム神田ホール 1 号館 601 会議室

### 1. 開 会

### 2. 議 事

(1) 平成 28 年度第 2 回委員会の指摘と対応について

(2) 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討について

- ・ 沈設魚礁の流体力算定の検討について
- ・ 沈設魚礁の安定性の検討について

(3) 着定基質の安定質量算定式の検討について

(4) 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討について

### 3. 閉 会

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会（第 3 回）

配布資料

- 出席者名簿
- 座席表
- 資料 1 平成 28 年度第 1 回委員会の指摘と対応
- 資料 2 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討
- 資料 2-1 沈設魚礁の流体力係数の検討
- 資料 3 着定基質の安定質量算定式の検討
- 資料 4 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討
- 参考資料 平成 28 年度第 2 回委員会の議事抄録

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

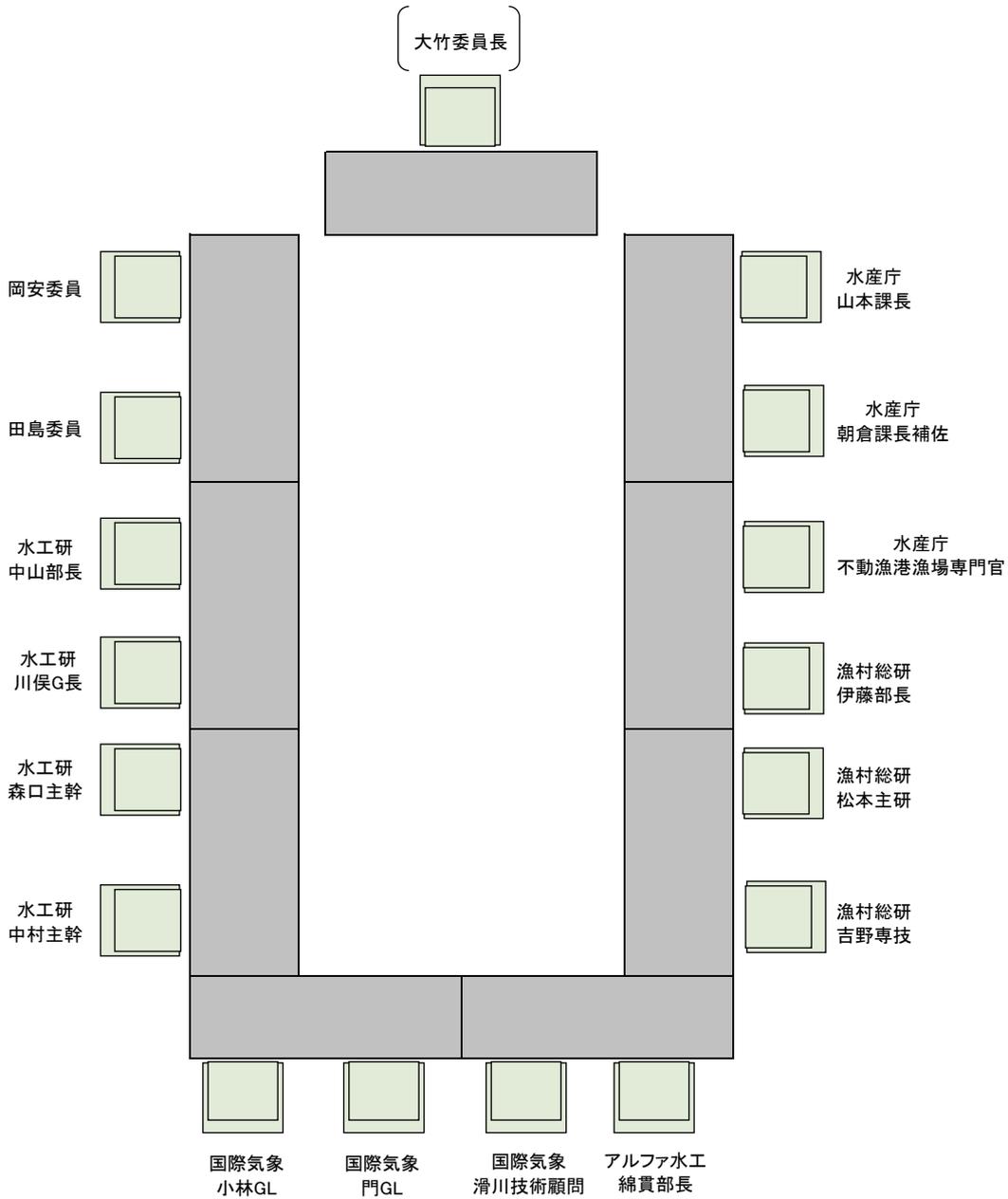
第 3 回委員会 出席者名簿

	所 属 ・ 役 職	氏 名	備 考
委員	福井県立大学 海洋生物資源学部海洋生物資源学科 教授	大竹 臣哉	
	国立大学法人東京海洋大学 学術研究院 海洋科学系海洋環境学部門 教授	岡安 章夫	
	東京大学 大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授	田島 芳満	
水産庁	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 課長	山本 竜太郎	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 課長補佐(設計班担当)	朝倉 邦友	
	水産庁 漁港漁場整備部 整備課 漁港漁場専門官	不動 雅之	
事務局	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 部長	中山 哲巖	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 生物環境グループ グループ長	川俣 茂	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 生物環境グループ 主幹研究員	森口 朗彦	
	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ 主幹研究員	中村 克彦	
	(一財) 漁港漁場漁村総合研究所 第 2 調査研究部 部長	伊藤 靖	
	(一財) 漁港漁場漁村総合研究所 第 2 調査研究部 主任研究員	松本 卓也	
	株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京本部 技術部 部長	綿貫 啓	
	国際気象海洋株式会社 技術顧問	滑川 順	
	国際気象海洋株式会社 技術部 銚子事業所 グループリーダー	小林 学	
国際気象海洋株式会社 技術部 第 2 グループリーダー	門 安曇		

(敬称略)

平成28年度 漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査  
 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第3回委員会 座席表



出入口

# 漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

## 平成 28 年度第 2 回委員会の指摘と対応（案）

委員名	指摘事項	対応
●沈設魚礁の安全性の照査法の改訂の方向性について		
田島委員・大竹委員長	流体力算定が妥当になっているのが $H_{max}$ を使うことによるものか、式（流体力係数）を変えたことによるかを確認すべきである。	今回の委員会で検討結果を示す。
岡安委員	$CF_{max}$ と $CD$ 、 $CM$ とによる流体力算定は、非線形性のある流速の場合に一致しないのではないか。検討が必要である。	
大竹委員長	流速を与える高さは、魚礁の頂上とするのか図心とするのか。	現行法では安全側の設計のため、魚礁頂上での流速（礁高が高い場合は数層の層に区分した各層の頂上部の流速）を設計に用いることになっているが、高層魚礁のような礁高の高い魚礁であっても図心の高さでの流速を代表流速として算定される流体力で精度良く滑動限界を予測でき、図心の高さでの値で適切であることを示している（H25～26年度委員会報告済み）。なお、これは、礁高の高い魚礁では流体力を受ける部材が下部に集中しており、その高さでの流速から十分な精度で流体力を推定できることによると推察される。
田島委員	固有振動数が魚礁の揺動に効いてくる。周期について検討すべきである。	魚礁の転倒には、ご指摘の周期または水粒子軌道振幅も重要な影響因子になる可能性があり、今後の解析の中で検討する。なお、静水中の魚礁は傾けてもほとんど揺動することなく、すぐに直立状態へ復帰することや、揺動が特定の波周期で増幅するといった共振現象は高層魚礁の転倒実験でもみられなかったことから、流体力によるモーメントが転倒限界の主因と考えている。
●着定基質の安定質量算定式の検討について		
田島委員	$U_{max}$ と $U_a$ は異なるが、これらを同じ式に入れ込むことに矛盾は生じないか。	$U_{max}$ は $U_a$ では説明できない二次的要因として最大加速度を $U_{max}/T_{zp}$ で表すために導入している。実験値はかなり複雑な条件を含んでおり、それらをなるべく少ない物理量で統一的に表せる式の構築を検討した。他の

		物理量の組み合わせも検討したが、適合性の有意な改善はみられなかったため、現状では提案式が最適と考えている。
大竹委員長	実験式なので、何らかの適用範囲があるのではないか。	実験範囲に基づき、最終的な改訂案の中で適用範囲を示す。
<b>●海洋モデルの利用による流れの設計条件の決定に関する検討について</b>		
岡安委員	設計に活用するなら最大値や最大期待値が必要になるので、計算自体はもう少し簡略化できると思う。	多くの場合、海洋モデルではなく、沿岸モデルによる再解析が必要になると考えている。海洋モデルだけでなく、沿岸モデルを用いて最大値を適切に決めるための留意事項を整理する。

# 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討

1. 沈設魚礁の流体力算定の検討
2. 沈設魚礁の安定性の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所  
国際気象海洋(株)  
(株)アルファ水工コンサルタンツ

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

## 検討経緯と現行設計における問題点

- 山形沖での高層魚礁の被災（H15～17）を契機に流体力算定法について造波水槽での模型実験で再検討（H19～23）。その結果、従来法（モリソン式の簡略的用法）は波力を過小評価することなどが判明
- 魚礁の流体力に関する様々な水理模型実験を追加実施（H25～26）。その結果、現行設計において、以下の課題が判明。

$$\text{モリソン式 } F = \frac{1}{2} \rho C_D A (u + U_c) |u + U_c| + \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{式(1)}$$

$$u = U_m \sin(2\pi t / T) \quad \text{式(2)}$$

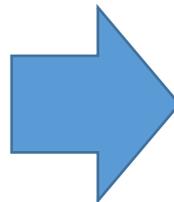
$F$ が最大となる $t$ を求め、最大力 $F_{\max}$ を算出

$\rho$ : 水の密度、 $C_D$ : 抗力係数、 $A$ : 基準面積、 $u$ : 水平波動流速、 $U_c$ : 流れによる設計流速、 $C_M$ : 慣性力係数、 $V$ : 基準体積、 $\partial u / \partial t$ : 水粒子加速度、 $U_m$ : 波による流速振幅、 $T$ : 波の周期

### 現行(従来法)

「手引」では簡略的に以下が仮定

- $U_m$  = 有義波からの算定値
- $C_D$  = 定常流中での値
- $C_M = 2$ 、 $V$  = 実容積



### 現行設計の課題

- 従来法は、波による流体力が過小評価されるおそれ
  - ・ 最大波力は波群中の最大波で発生
  - ・ 波動流の $C_D >$  定常流中での $C_D$

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

波による最大流体力が波群中の最大波で発生することを踏まえ、より実用的な算定式として、モリソン式の代替法を提案した。

## モリソン式の代替法（提案式）

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F_{\max}} A U_m^2$$

$\rho$ : 水の密度、 $C_{F_{\max}}$ : 最大力係数 (KC数の関数)、  
 $A$ : 基準面積、 $U_m$ : 最大波動流速※1

※1 算出方法は今後の検討課題であるが、(①最大波 ( $H_{1/250}$ 、 $T_{1/250}=T_{1/3}$ ) から微小振幅波理論により算出する方法、②周波数スペクトルや方向分散性を考慮する方法などが考えられる)

- 本提案式については、水理模型実験によって計測された最大流体力と比較することで、妥当性等が確認されている。
- **実用するに当たっては、現地レベルでの提案式の妥当性を検証する必要がある。**  
(今回報告内容)

しかし、実海域の条件は実験での条件と異なり、波・流れが共存する場となっていることから、上の提案式を基本として、共存場への適用を考慮し、以下の式を提案しているが、今後、この妥当性等についての検証が必要である。(次回以降報告予定)

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F_{\max}} A U_m^2 + \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2$$

$C_{DS}$ : 定常流中の抗力係数  
 $U_c$ : 設計で考慮する流れの速度

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討

## 流体力算定法の妥当性の現地検証の流れ

① 検証に適した魚礁の抽出(既往整備補助申請資料検索)

【抽出条件】

- ・波浪・流速観測可能な設置水深( $\leq 30\text{m}$ )
- ・正確な設置位置がわかっていること
- ・摩擦力の推定可能な設置条件(砂礫底等)
- ・現行設計での低い安全率( $\approx 1.2$ )
- ・設計波に近い波浪に遭遇した魚礁

② 検証魚礁の移動状況の把握～既往調査資料精査

③ 検証魚礁の遭遇波浪の把握～波浪・流動観測

④ 魚礁の経験した最大流速、最大流体力の推定  
～波浪・流動観測結果、波浪シミュレーション等により  
提案算定法の適用と検証

⑤ 魚礁の流体力係数の測定  
水理模型実験による $C_D$ 、 $C_M$ 、 $C_{Fmax}$ の測定

⑥ 流体力算定法の妥当性の検討  
～推定安全率(最大流体力/摩擦力)からの魚礁の  
安定性の予測と実際との比較

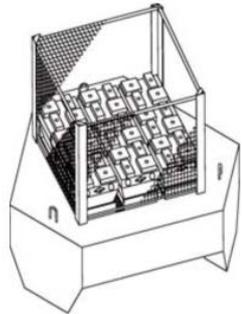
27年度

28年度～29年度

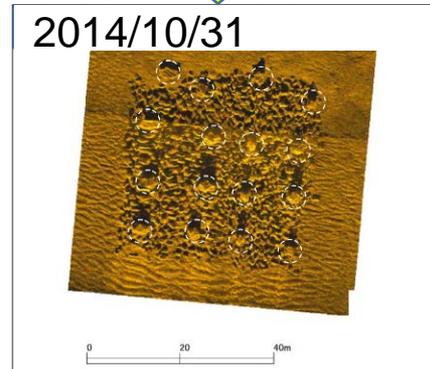
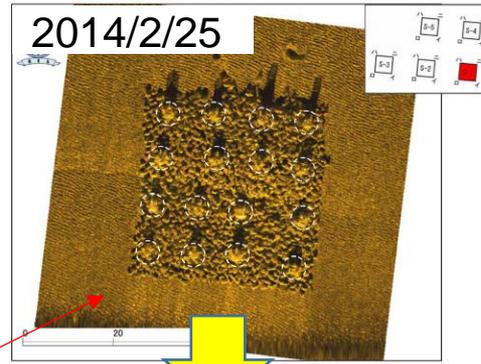
検証対象海域

- ・長崎県野母崎沖(結果報告)
- ・北海道豊浜沖(途中報告)
- ・千葉県館山沖(途中報告)

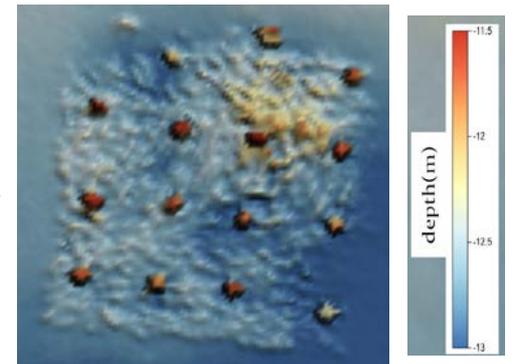
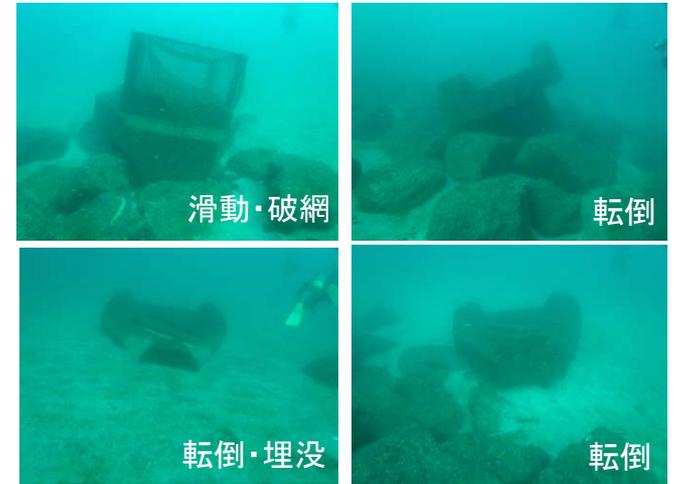
# (参考) 流体力算定法の妥当性の現地検証： 調査結果(長崎県野母崎沖A工区)



増殖礁



(2014年7月の台風通過後)

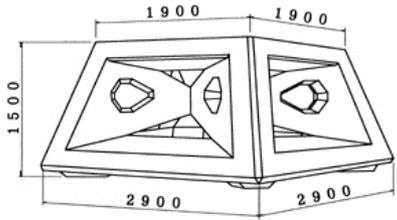


2015年12月

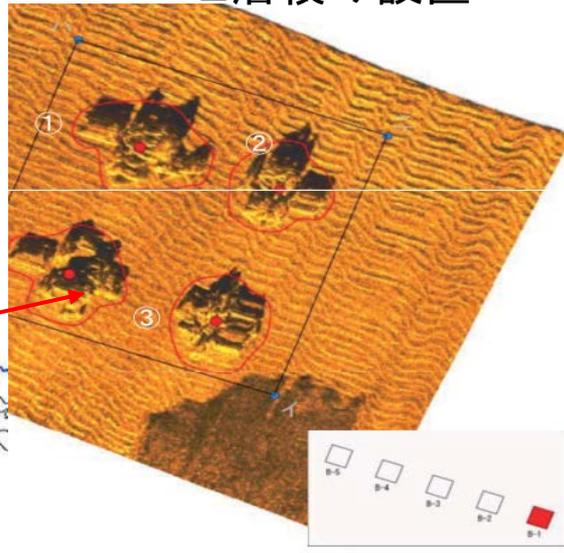
北側のブロックが最大約2m  
移動したと推定

A工区の捨石マウンド上の増殖礁：北側のブロックが滑動・転倒

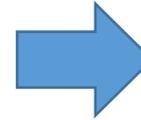
# (参考) 流体力算定法の妥当性の現地検証： 調査結果(長崎県野母崎沖B工区)



2層積み設置



2013年11月計測(施工直後)



2015年12月



2層目が落下し平坦化、設置範囲が拡大

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ① 被災時の高波浪推定

長崎県野母崎沖

- N県が実施した調査により2014年にブロックの滑動，転倒，埋没，破損が確認。その原因とされている2014年7月台風8号（T1408）の来襲時の波浪を推定する。
- 2015年9月～12月、A工区とB工区において実施した流速計付波高計とADCPによる波浪・流速データと最寄りの波浪観測点（NOWPHAS、伊王島）での観測データを用いて波浪推算モデルの検証を行う。

### 【波浪推算の方法】

NOWPHAS（伊王島）の波浪観測データは、対象地点での波浪との相関が必ずしも高くなかったため、以下の手順で波浪推算を実施。

#### ①海上風の推定

気象庁MSM(メソ数値予報モデル)の解析値及び予報値を使用(格子間隔:約5km)

#### ②波浪推算

推算モデル:第3世代スペクトル法であるWAMに準拠した3G深海域モデル(格子間隔:5km)

#### ③波浪変形計算

エネルギー平衡方程式法(格子間隔20m)



調査対象工区と波浪観測位置

# 【波浪推算の結果(T1408)】

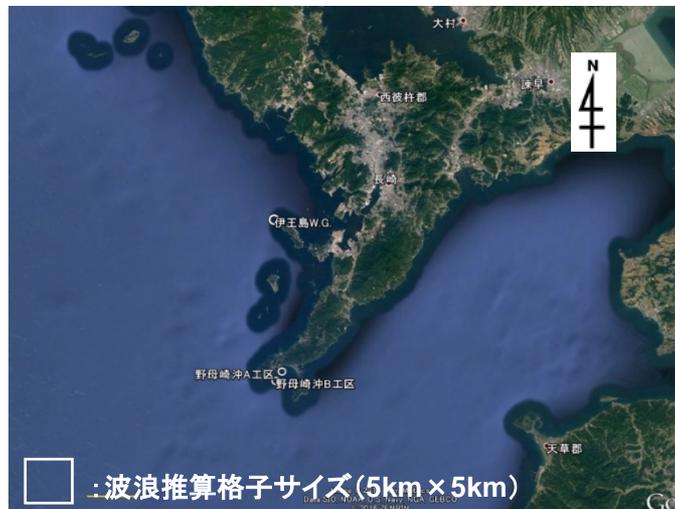
## ◆ 最大有義波高(伊王島、野母崎)まとめ

地点		T1408による最大波浪							
		沖波			対象位置			起時	海底地盤高 D.L.* <sup>3)</sup> (m)
		H <sub>0</sub> (m)	T <sub>0</sub> (s)	波向(°)	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (s)	波向(°)		
伊王島 NOWPHAS	観測値	—	—	—	5.26	12.6	221	2014/7/9 15:20	—
	推算値* <sup>2)</sup>	5.53	11.7	202	5.05	11.7	202	2014/7/9 23:00	
推算値	A工区	8.04	11.2	190	6.32	11.2	187	2014/7/10 00:00	-12.1
	B工区				6.81		196		-23.0

\*1)伊王島の観測値水深：T.P.-31.9m

\*2) 推算波高 $H_0 \times K_s$

\*3)潮位は気象庁の長崎（松ヶ枝）を採用し，日時は推算波高最大の7/10 00時：T.P+0.18m.  
ここで $T.P=M.S.L=D.L+1.64m$ （保安庁潮汐表より）．計算潮位= $T.P+0.18m=D.L+(1.64+0.18)=D.L+1.82m$



伊王島(NOWPHAS)と野母崎観測位置

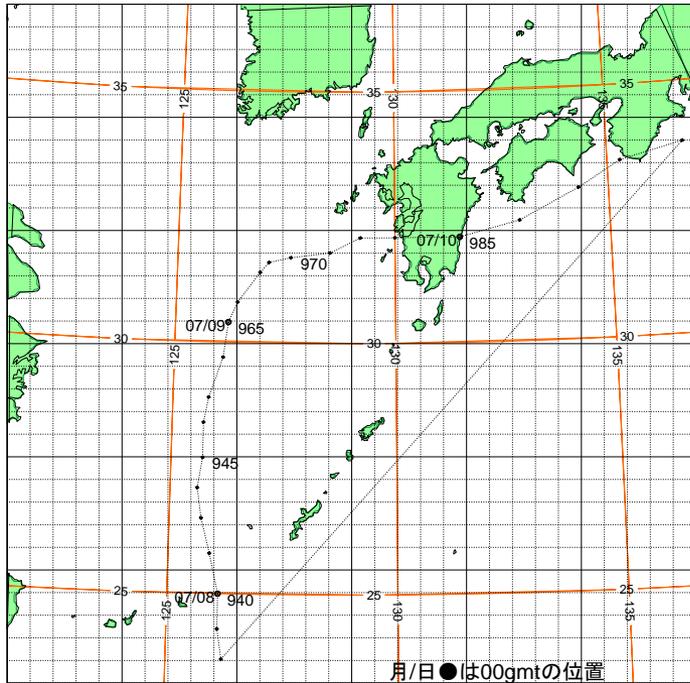
4-6-a162



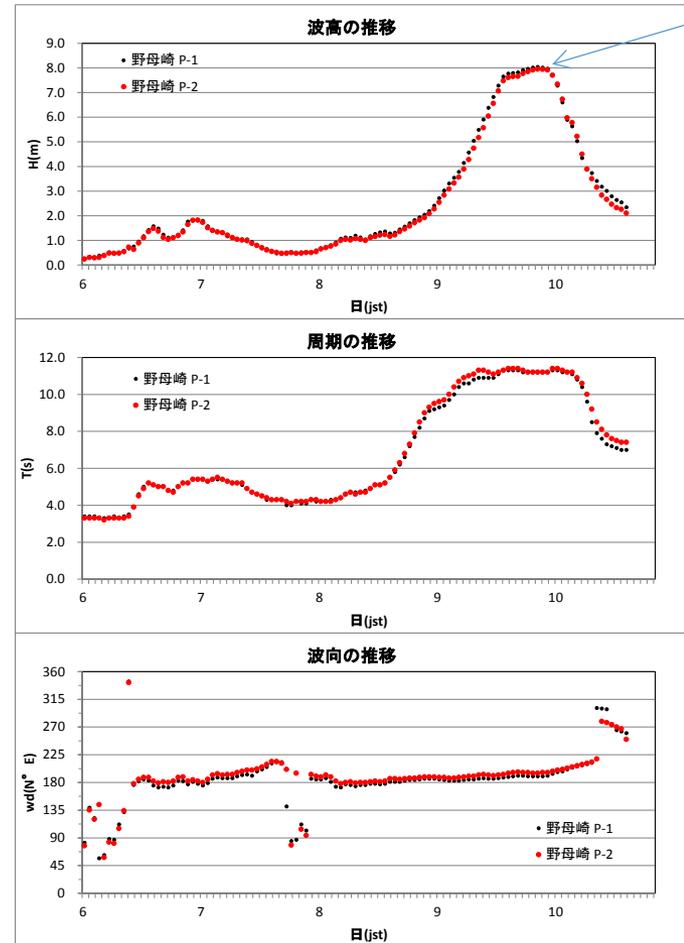
野母崎観測位置(2015/09~12)

# <参考> 波浪推算 (計算条件・野母崎における計算結果)

最大  
8.04m



計算領域とT1408の経路

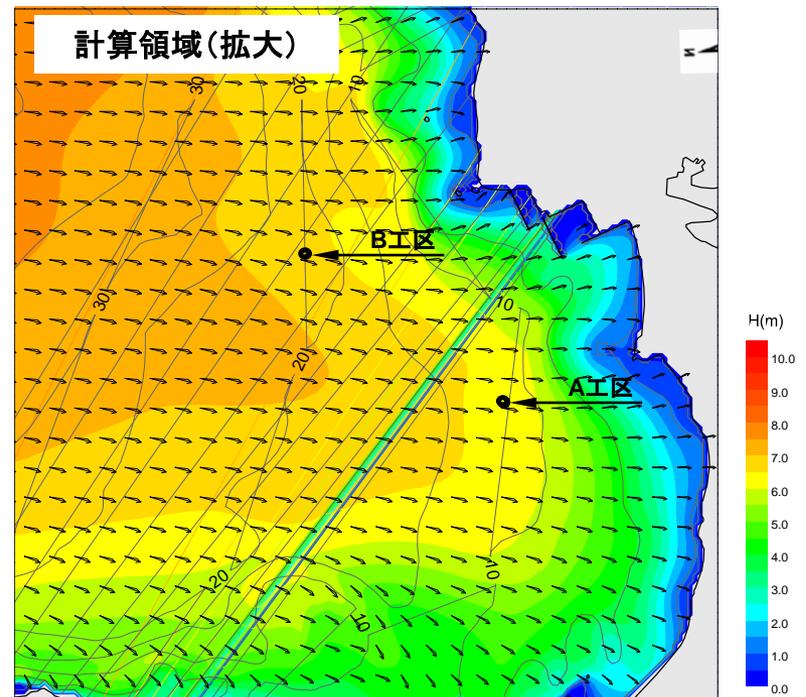
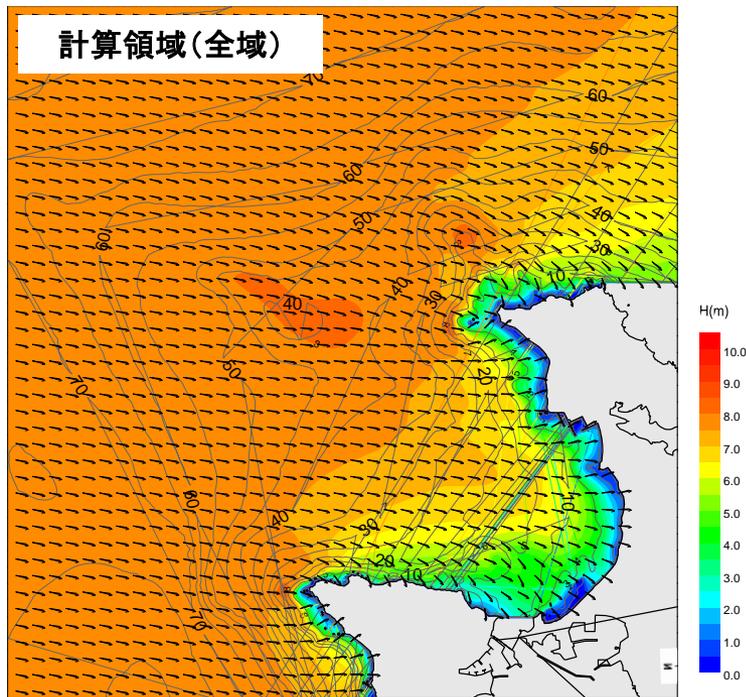


推算波浪(野母崎A,B工区)の推移

## ※) 計算条件

- ・計算領域: 30.0N, 129.0Eを中心とした1500km × 1500km, 格子間隔: 5km, 単領域
- ・推算ステップ: 120s, 1時間毎に出力
- ・海上風場は気象庁MSM解析値及び予報値を使用(3時間毎の実況解析とその間の1時間毎の予想)
- ・推算モデル: WAMIに準拠した3G深海域モデル, 方向分割角 $10^\circ$ , 周波数分割数22
- ・周期は $1.03T_{2m}$ ,  $T_{2m} = [1/E(\int f^2 S(f) df)]^{-1/2}$ . 波向はエネルギー加重平均法

# <参考> 波浪変形計算(計算条件)



波浪変形計算領域と波高分布(T1408の最大波高時,  $H_o=8.04\text{m}$ ,  $T=11.2\text{s}$ , 波向N190° E)

## ※) 計算条件

- ・計算領域:  $8.0\text{km} \times 8.4\text{km}$ , 格子間隔:  $20\text{m}$
- ・計算方法: エネルギー平衡方程式法
- ・方向分割角:  $5^\circ$ , 周波数分割数: 11分割
- ・入射波 :  $H_o=8.04\text{m}$ ,  $T=11.2\text{s}$ , 波向=N190° E (波浪推算位置; 野母崎 P-1の推算波高を採用)

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ② 対象施設の流体力係数の推定（目的・方法）

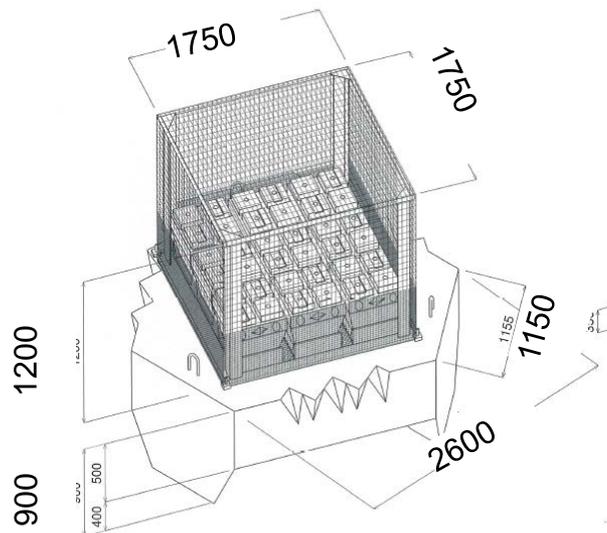
### 目的

昨年度実施した現地検証試験の対象施設（A工区：増殖礁、B工区：魚礁）の波動流中での流体力係数をKC数の関数として定式化するとともに、**不規則波中での最大流体力の妥当な算定方法**を検討する。

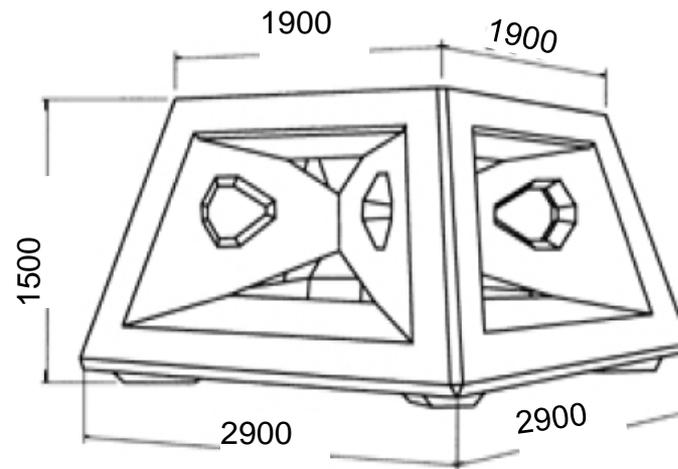
### 方法

実験水槽：造波水槽（長さ70.0m×幅0.7m×深さ2.2m×水深1.2m）

模型縮尺：1/25



A工区の増殖礁



B工区の魚礁

現地スケール  
単位：mm

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ② 対象施設の流体力係数の測定（実験模型）

実物の1/25模型を3Dプリンタにより製作

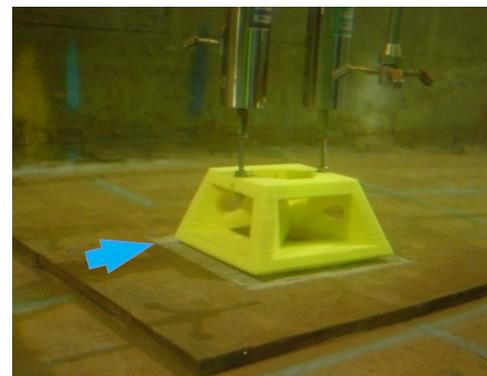
項目	模型A	模型B	
		迎角0°	迎角45°
部材幅 $D$ (cm) <sup>注1)</sup>	2.0	1.2	1.2
射影面積 $A$ (cm <sup>2</sup> ) <sup>注2)</sup>	60.80 <sup>注3)</sup>	93.90	94.34
実容積 $V$ (cm <sup>3</sup> )	229.76	257.09	257.09
定常流中の抗力係数 $C_{DS}$	1.10 <sup>注4)</sup>	0.67	0.83

注1)  $D$ はKC数の計算に用いる部材幅。注2)射影面積は重なった部分も加算。

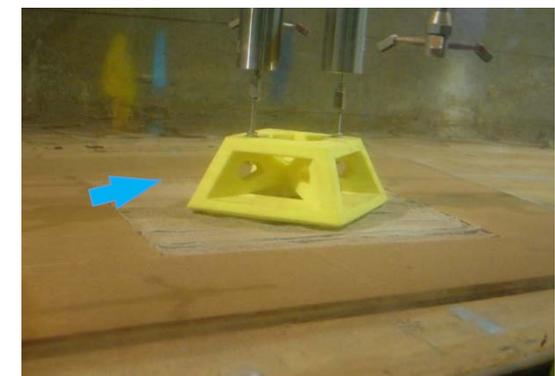
注3) 網を除いた値。注4) 「漁港漁場の施設の設計参考図書2015年版」表15.2.1より算出。



模型A(増殖礁)



迎角0°



迎角45°

模型B(魚礁)

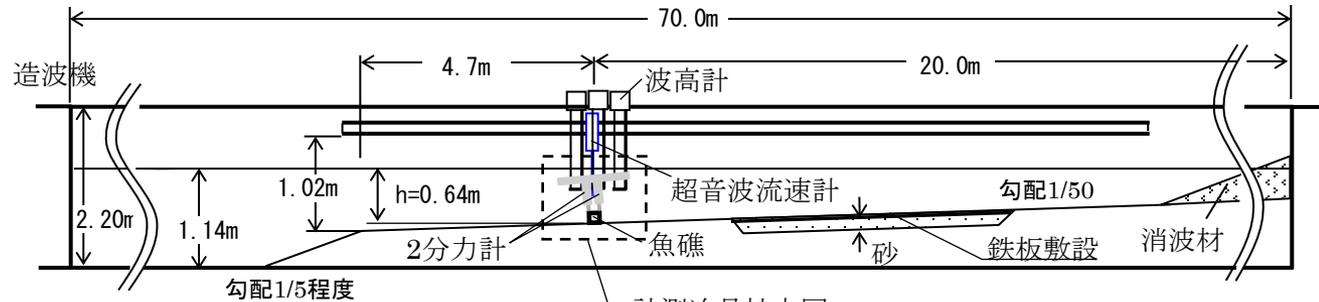
# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ② 対象施設の流体力係数の測定（実験方法）

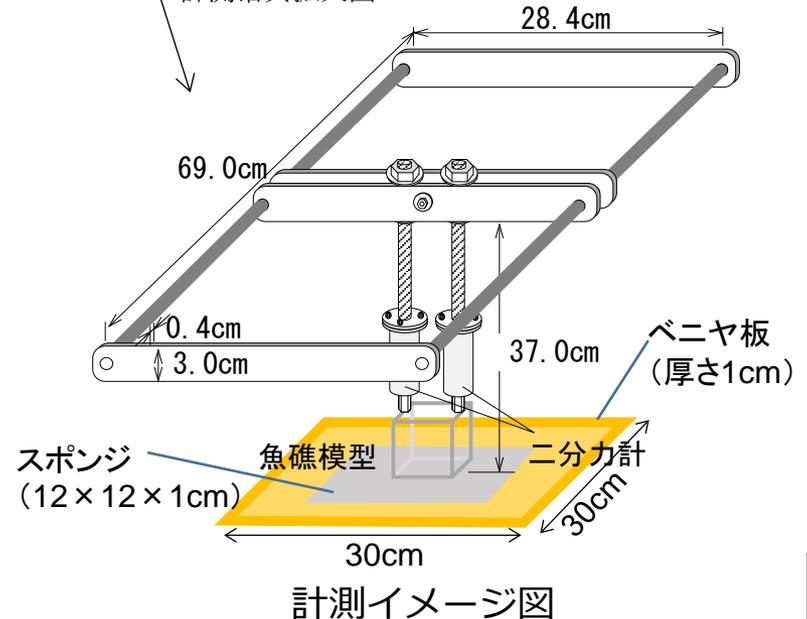
**測定装置：** 2分力計 2台によって支持された模型をモルタル床（下図）上に貼り付けたスポンジに接するように固定（微小な力しか作用させずに底面との隙間を埋めるため）。

**測定項目（計測機器）：** 水面変動（容量式波高計）、水平・鉛直流速（超音波式流速計）、水平・鉛直流体力（分力計）

**測定条件：** 周期と波高の17組み合わせ条件（下表）の規則波を与えてKC数と流体力係数との関係式を決定。  
同数の条件の不規則波（Bretschneider-光易スペクトル；250波以上）を与えて不規則波中での流体力も測定。



計測治具拡大図



作用波の周期と波高の組み合わせ条件

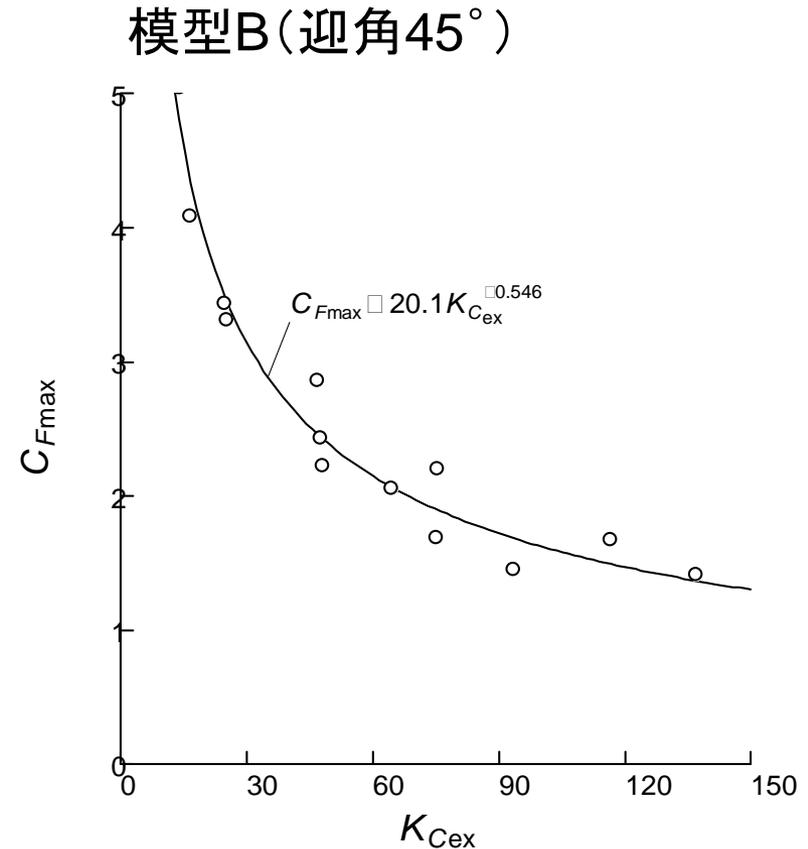
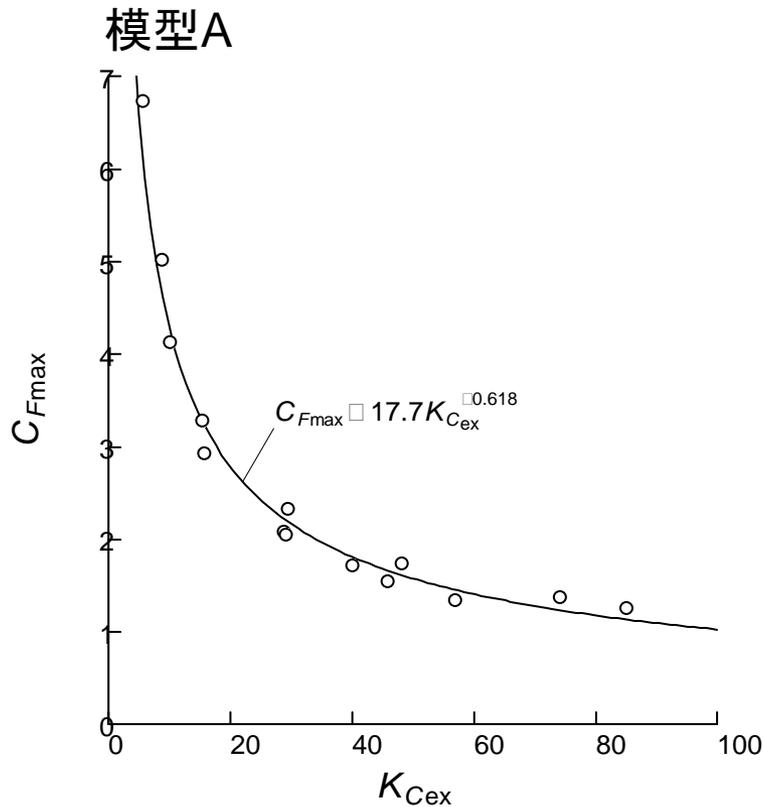
周期(s)	波高(cm)				
	5	10	20	30	40
1.5	6	9			
2.0	15	31	62	92	123
3.0	27	53	106	160	213
4.0	37	74	148	222	297

※数値（規則波実験における $D=1.0\text{cm}$ として計算したKC数）が記入された条件で実験を実施。不規則波実験の周期と波高は有義波の値。

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

## ② 対象施設の流体力係数の測定(測定結果)

詳細は資料2-1



模型A及び模型Bの拡張KC数 $K_{Cex}$ と $C_{Fmax}$ との関係

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ② 対象施設の流体力係数の測定（測定結果：不規則波中での流体力の推定法）

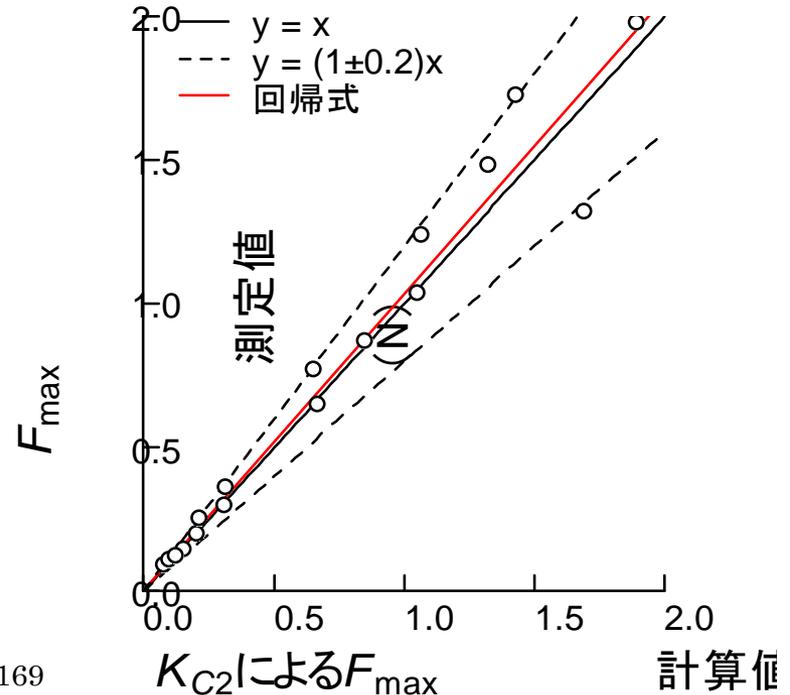
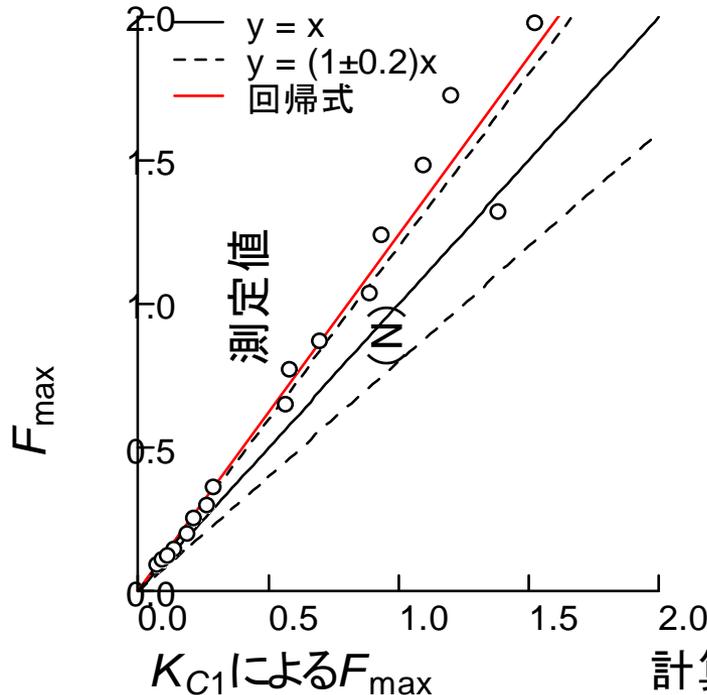
不規則波の波群中の最大流体力 $F_{\max}$ を $C_{F\max}$ の式で求める際に用いるKC数を以下の2式で比較検討

$$K_{C1} = \frac{U_{\max} T_{1/3}}{D} \quad K_{C2} = \frac{U_a T_{1/3}}{D}$$

ここに、 $D$ ：魚礁の代表幅、 $T_{1/3}$ ：波動流速の有義波周期  
 $U_{\max}$ ：最大波動流速、 $U_a = (U_{\max} - U_{\min})/2$ 、  
 $U_{\min}$ ： $U_{\max}$ の発生直前の極小流速

$K_{C2}$ を用いて算出される $C_{F\max}$ から $F_{\max}$ の妥当な推定値が得られる（下図；詳細は資料2-1を参照）。

模型Aの場合



# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ③ 従来法と提案法との比較（A工区の場合）

### 計算条件

最大波浪発生時の水深 $h = 13.92\text{m}$ 、 $\rho = 1.03\text{t/m}^3$ 、水中重量 $W = 47.36\text{kN}$ 、 $\mu = 0.6$ （捨石上）、滑動抵抗 $R = \mu W = 28.42\text{N}$ 、  
 流れの速度 $U_c = 0\text{m/s}$ （砕波領域のため）

施設は被災⇒安全率 $< 1$

計算法	被災時最大波浪		波動流速 $U_m(\text{m/s})$	流体力係数	最大流体力 $F_{\max}(\text{kN})$	安全率 $R/F_{\max}$
	波高	周期				
従来法	$H_{1/3} = 6.32\text{m}$	11.2s	2.25	$C_D = 1.10^{\text{注1}}$ , $C_M = 2.0$	12.9	2.20 <sup>注1</sup>
修正法 $\alpha^{\text{注2}}$	$H_{\max} = 9.86\text{m}^{\text{注3}}$		3.52		28.5	1.00 <sup>注1</sup>
提案法	$H_{\max} = 9.86\text{m}^{\text{注3}}$	11.2s	3.52	$C_{F\max} = 1.19$ $(K_{C1} = 78.8)^{\text{注4}}$	28.9 <sup>注4</sup>	0.98 <sup>注4</sup>

注1 この $C_D$ 値は定常流中の実験値ではなく、机上の設計値。KC数が大きいときの波動流中の $C_D$ よりかなり大きいことから、定常流中での値よりも大きいと考えられる。修正法 $\alpha$ の安全率が $< 1$ となった原因の一つにその影響があることに注意。

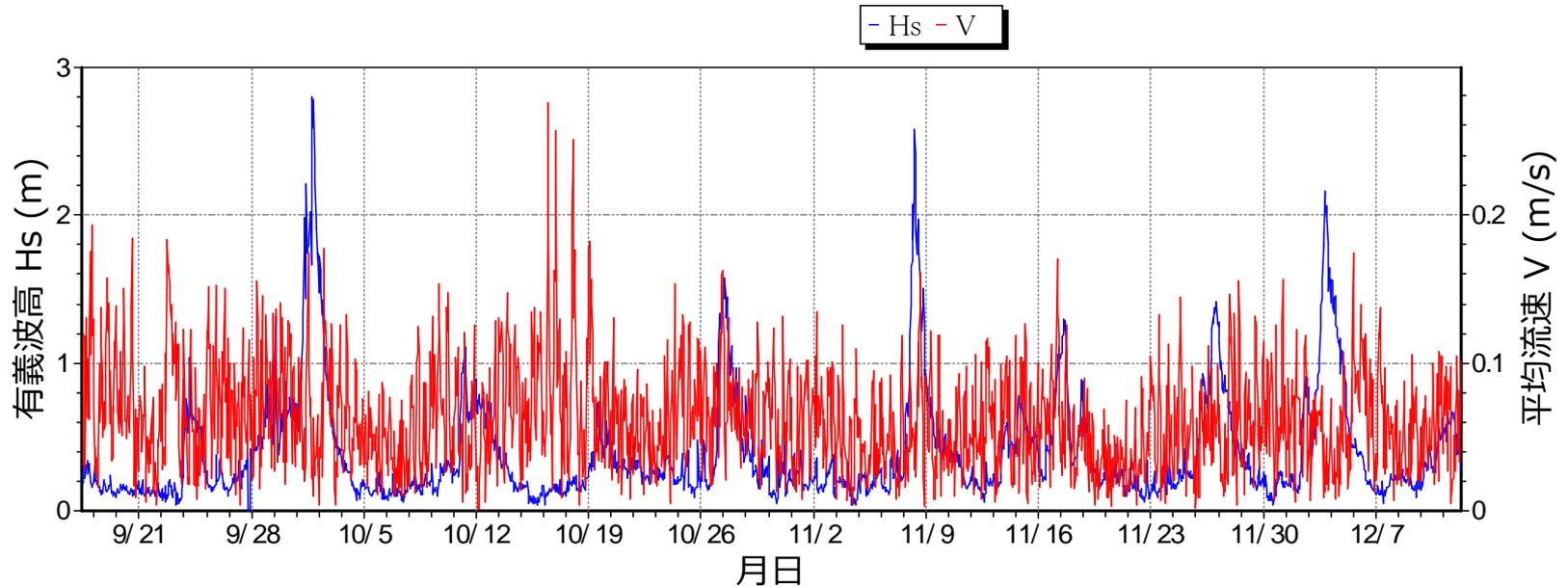
注2 修正法 $\alpha$ ：従来法のうち、対象波のみを有義波から最大波に修正する方法

注3 砕波領域になるため、 $H_{1/3}$ の推算値から砕波の影響を考慮した $H_{\max}(=H_{1/250})$ を、波高の水深変化に関する合田のモデル（合田 1975；Goda 2010）により推算（海底勾配1/50）

注4 流体力係数の算定に用いるKC数としては $K_{C2}$ の方が適切であるが、流速の非対称性が分からないため、算出可能な $K_{C1}$ を暫定的に用いた。そのため、提案法では $F_{\max}$ を20%ほど過小評価する可能性がある。

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討 (流体力算定法の現地検証①)

## ③ 従来法と提案法との比較(B工区の場合)



2015年B工区でのADCPにより測定された有義波高Hsと底層 ( $z=2.1\text{m}$ ) での10分間平均流速Vの時系列



平均流速と波高との関連はみられず、被災時の遭遇流速としては、最大でも $0.18\text{m/s}$ 程と推定

# 1. 沈設魚礁の流体力算定の検討（流体力算定法の現地検証①）

## ③ 従来法と提案法との比較（B工区の場合）

計算条件

$h = 24.82\text{m}$ 、 $\rho = 1.03\text{t/m}^3$ 、 $W = 55.18\text{kN}$ 、 $\mu = 0.5$ （コンクリート魚礁上）、 $R = \mu W = 27.59\text{N}$ 、 $U_c = 0 \sim 0.18\text{m/s}$

施設は被災⇒安全率<1

計算法	被災時最大波浪		波動流速 $U_m(\text{m/s})$	流体力係数 <sup>注4</sup>	最大流体力 $F_{\max}(\text{kN})$	安全率 $R/F_{\max}$
	波高	周期				
従来法	$H_{1/3} = 6.81\text{m}$	11.2s	1.58 <sup>注2</sup>	$C_D = 0.83,$ $C_M = 2.0$	8.38~9.65	2.86~3.29
修正法 $\alpha$	$H_{\max} = 12.26\text{m}$ <sup>注1</sup>		2.84 <sup>注2</sup>		22.35~24.86	1.11~1.23
提案法	$H_{\max} = 12.26\text{m}$ <sup>注1</sup>	11.2s	2.83 <sup>注3</sup>	$C_{F\max} = 1.58$ $(K_{C1} = 105.7)$ <sup>注5</sup> 、 $C_{DS} = 0.83$	38.20~38.28 <sup>注5</sup>	0.72 <sup>注5</sup>

注1 非碎波領域のため、レイリー分布より $H_{\max} = 1.8H_{1/3}$

注2 2層目の魚礁の頂上の高さ( $z=3\text{m}$ )における流速

注3 2層目の魚礁の図心の高さ( $z=1.5\text{m}+0.729\text{m}=2.229\text{m}$ )における流速

注4 流体力が大きくなる迎角 $45^\circ$ の値

注5 流体力係数の算定に $K_{C1}$ を暫定的に用いたため、提案法では $F_{\max}$ を20%ほど過小評価する可能性がある。

## 2. 沈設魚礁の安定性の検討

## 2. 沈設魚礁の安定性の検討

### 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討

**目的** 砂質底上での魚礁の安定性については①洗掘等に伴い滑動抵抗が有意に増加する、②揺動限界<sup>注1</sup>は被災限界としては過大である、③魚礁1個分の移動は転倒によって生じる。これらの考察に基づき、砂質底上での魚礁の転倒限界の予測手法を不規則波実験により検討する。

**注1** 揺動限界 = 現在の設計法における「転倒」限界

#### 方法

**魚礁模型** 密度を変えた角型魚礁の1/25縮尺模型（下表）

**実験装置** 前述の造波水槽

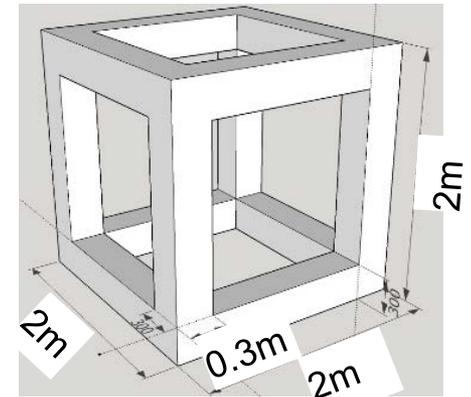
#### 実験内容

**検討①** 前掲と同じ方法で規則波実験により流体力係数とKC数との関係式を決定。

**検討②** 不規則波実験により波群中の最大流体力の推定方法を検討。

**検討③** 実験水槽内水深56cmに設けた砂質底（粒径0.12mmの珪砂）に模型を設置し、引張試験により摩擦係数を測定。

**検討④** 上記砂質底上で不規則波(Bretschneider-光易スペクトル) 250波以上を作用させ、模型の動きのビデオ解析と流速からの最大流体力 $F_{max}$ の推定により、転倒限界と外力との関係を検討。



角型魚礁（寸法：実物大）

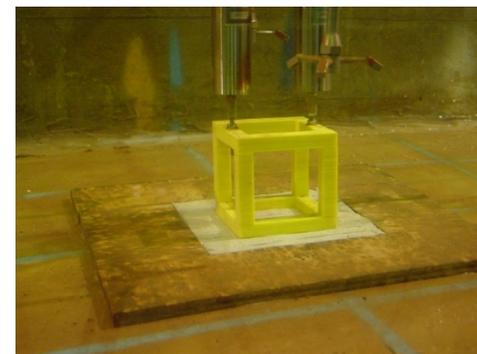
実験模型と密度

模型名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
模型N	2.3
模型L	1.6

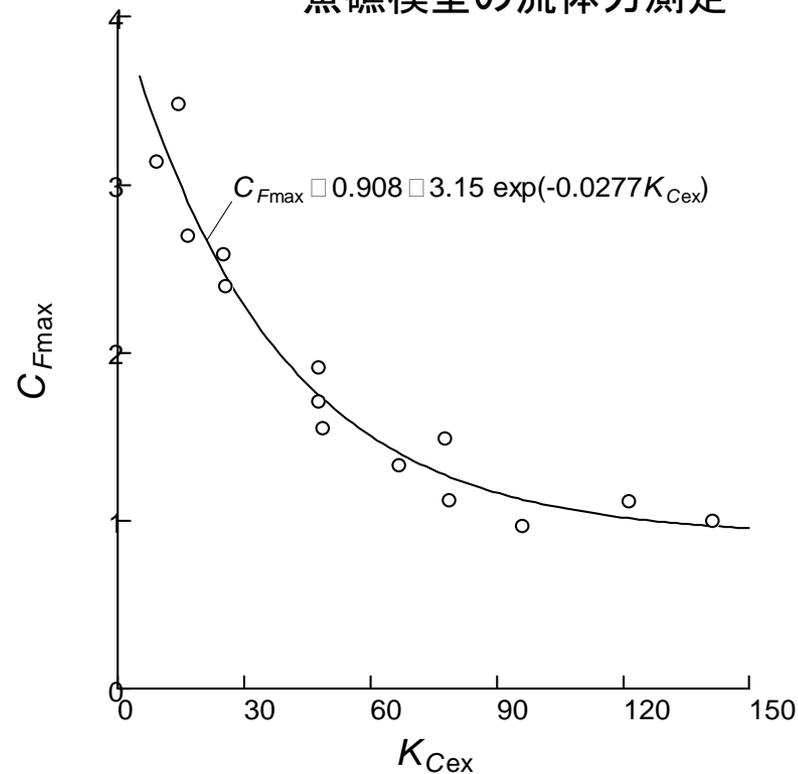
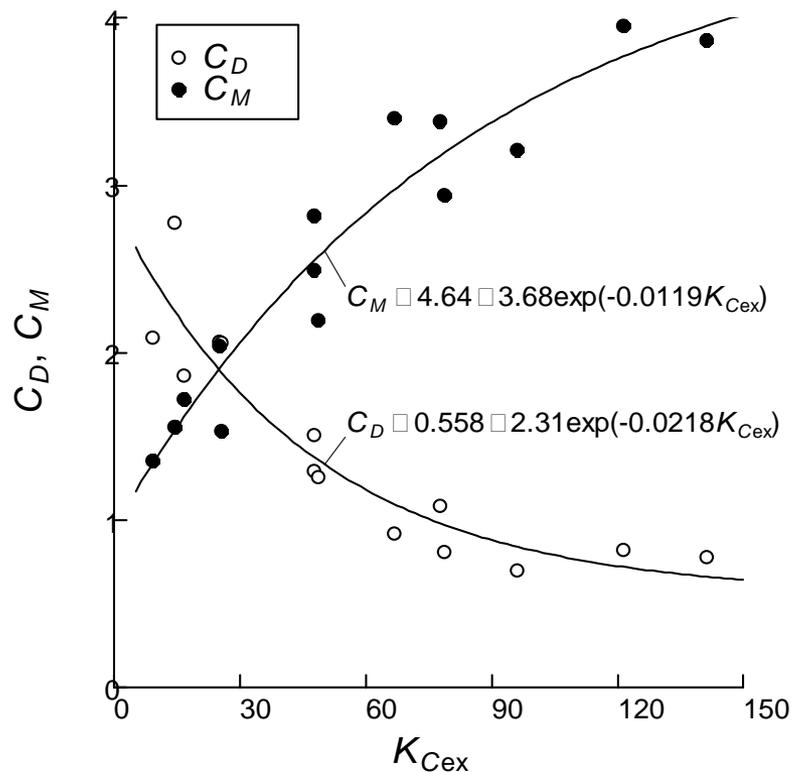
# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討①

## (実験結果：流体力係数)

項目	値
部材幅 $D$ (cm)	1.2
基準面積 $A$ (cm <sup>2</sup> )	59.52
基準体積 $V$ (実容積) (cm <sup>3</sup> )	110.59



魚礁模型の流体力測定

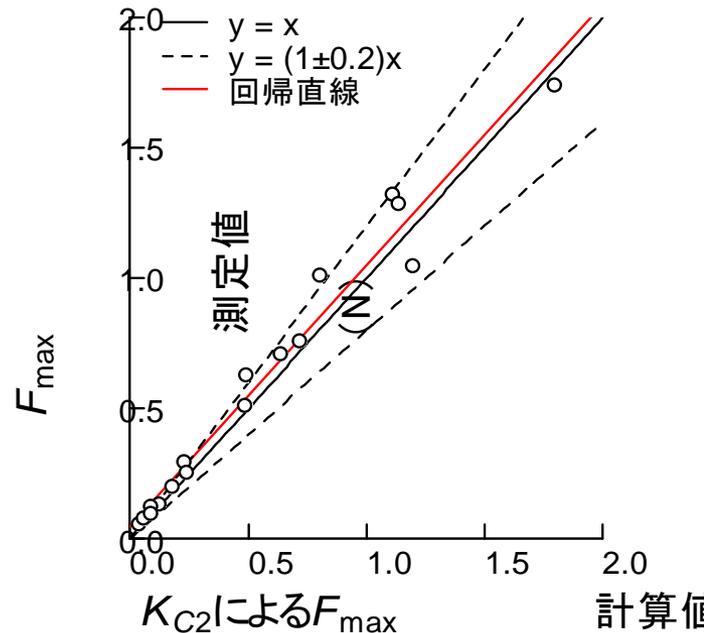
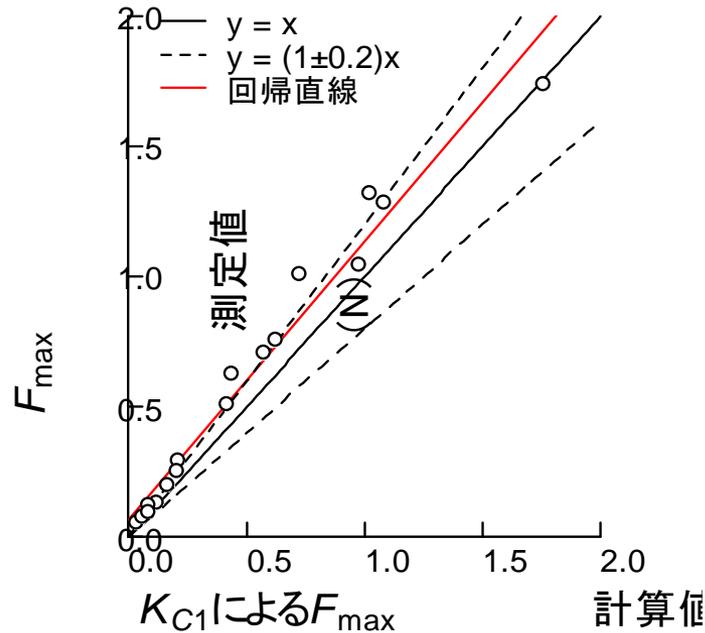


流体力係数の測定結果



# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討② (不規則波の流体力算定におけるKC数と係数の算出方法の影響)

不規則波中の最大流体力 $F_{\max}$ を代表波のKC数から $C_{F_{\max}}$ の式により計算した場合



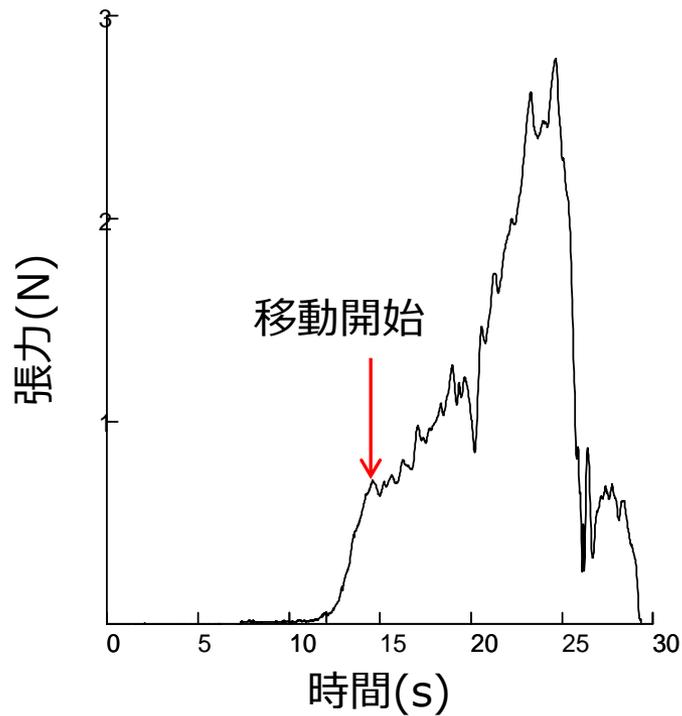
$C_{F_{\max}}$ の式による不規則波中の最大流体力 $F_{\max}$ の計算値と測定値の比較

角型魚礁でも、 $K_{C2}$ から算出される $C_{F_{\max}}$ を用いると概ね妥当な推定値が得られた。

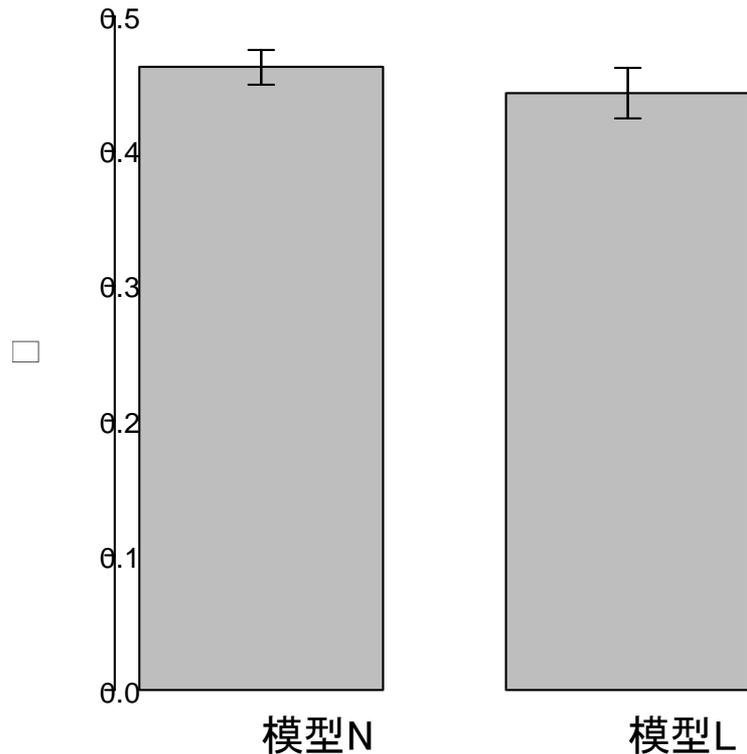
# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討③ (実験結果：静止摩擦係数)

## 静止摩擦係数

魚礁模型の平らな砂面上での摩擦力 ( $N=12$ または $16$ ) を測定  
静止摩擦係数 $\mu$ は魚礁の密度による有意な差はなく、平均で $\mu = 0.45$



引張試験による砂面上での角型魚礁模型の摩擦力測定結果の例

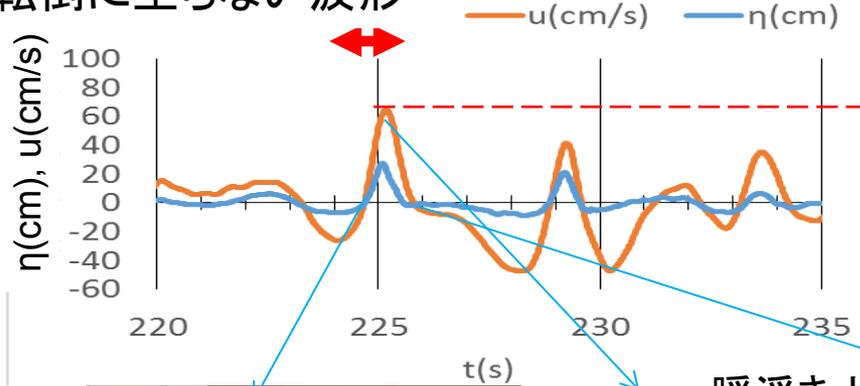


静止摩擦係数の測定結果

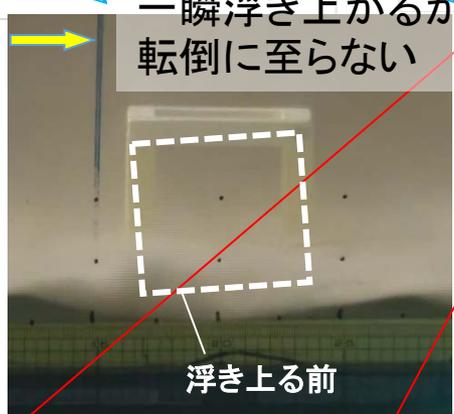
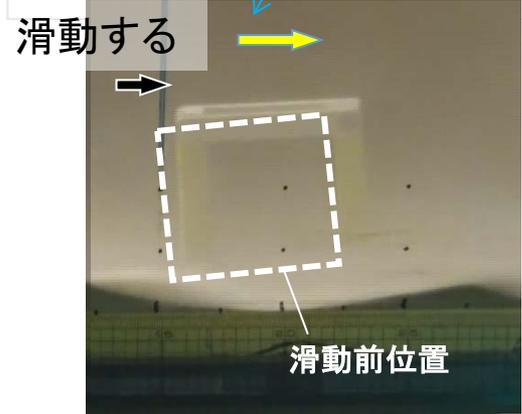
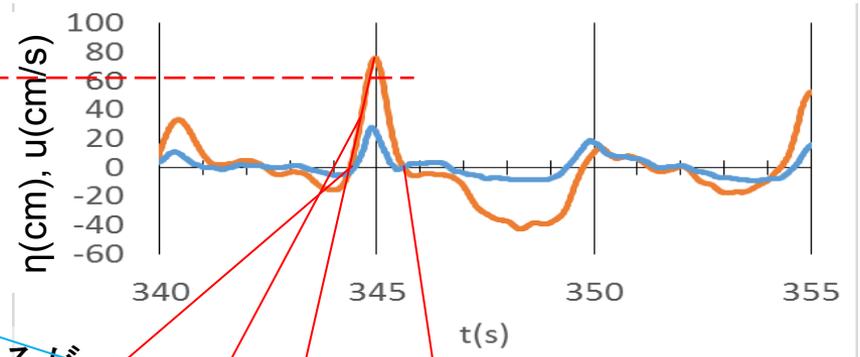
# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討④

(実験結果：沈設魚礁の挙動、模型Nの場合)

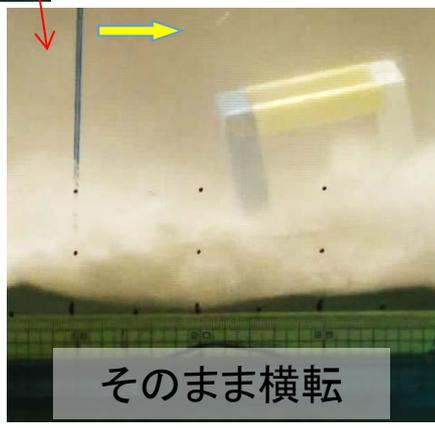
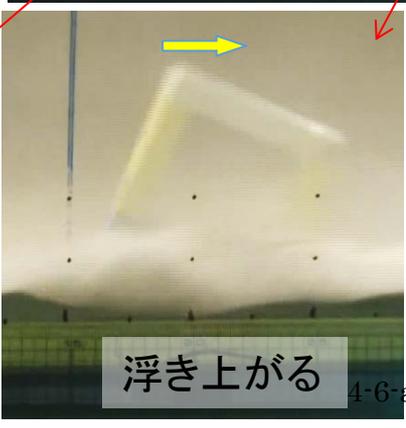
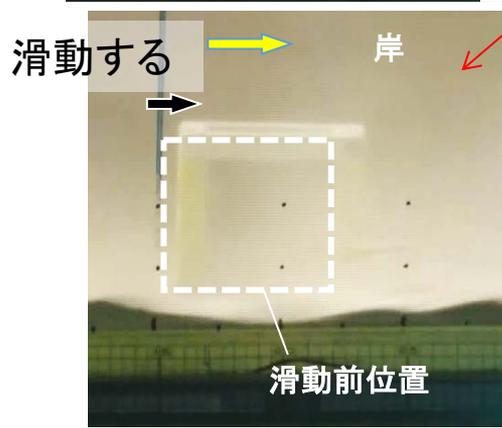
転倒に至らない波形



転倒に至る波形

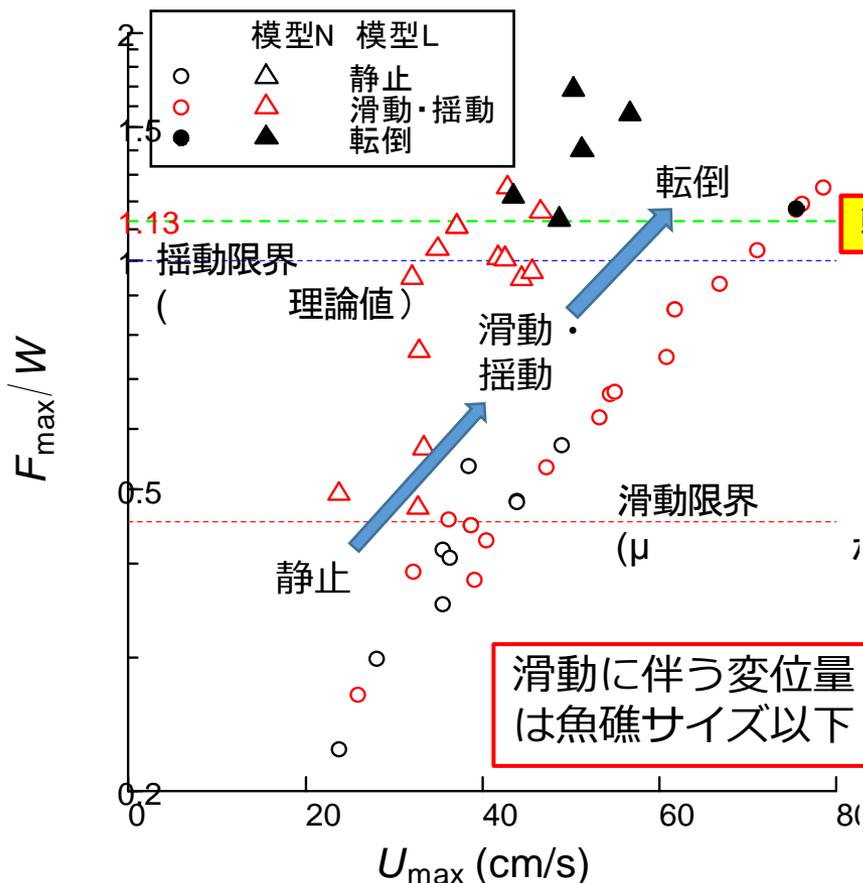
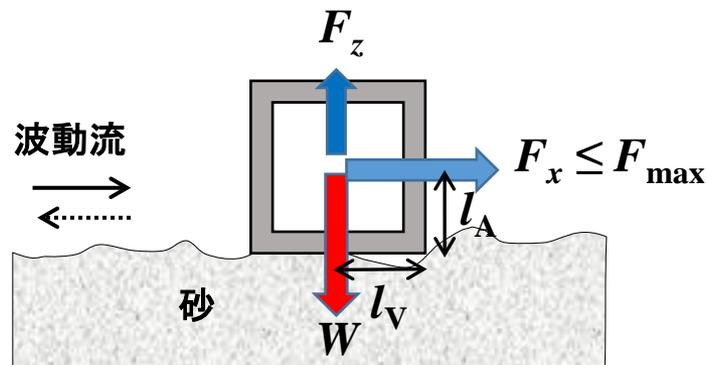


転倒しない限り、  
有意な（魚礁1  
個分以上の）移  
動は起こらない



# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討④ (実験結果：水平流体力と各種挙動限界との関係)

鉛直流体力（揚力） $F_z$ の影響は無視できると仮定した場合（従来の場合）



$F_z = 0$ の場合、角型魚礁の転倒は少なくとも

$$\frac{F_{\max} l_A}{W l_V} \approx \frac{F_{\max}}{W} > 1 \quad (\because l_A \approx l_V)$$

とならない限り発生しない

$F_{\max}/W > 1$ で転倒が発生

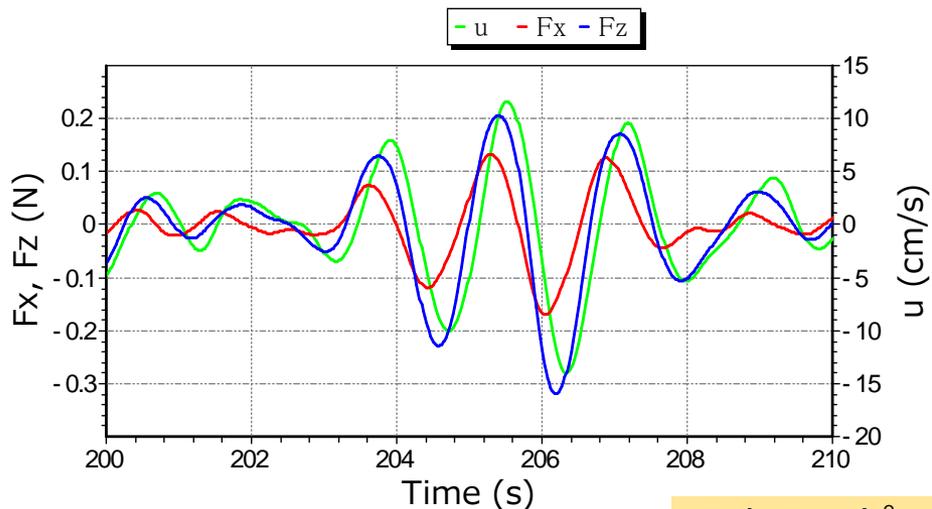
$F_z$ は無視できる？

$U_{\max}$ ：不規則波中の水平最大流速、  
 $F_{\max}$ ：不規則波中の最大流速振幅から $K_{C2}$ により求められる最大流体力  
 $W$ ：水中重量、 $\mu$ ：静止摩擦係数 (=0.454)

# 沈設魚礁の砂質底上での安全性に関する実験的検討④

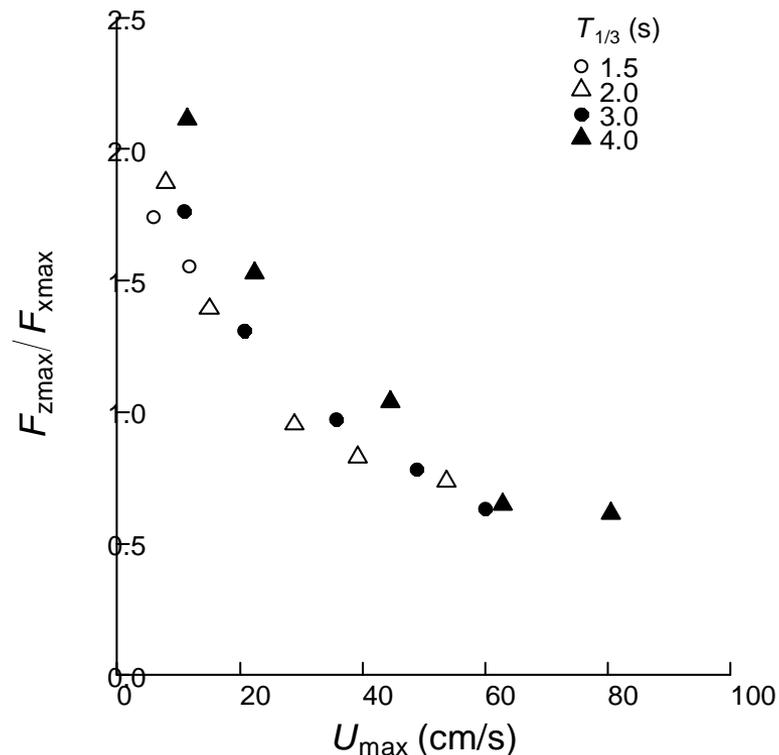
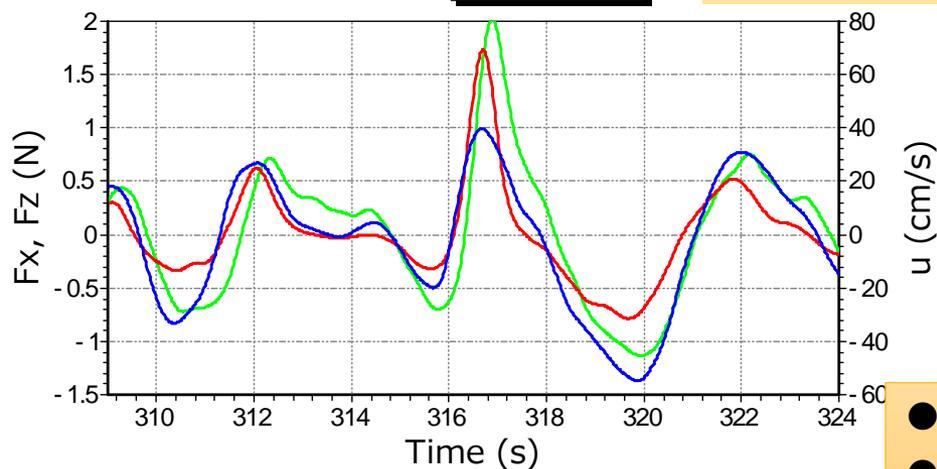
(実験結果：鉛直流体力（揚力）と水平流体力)

B151001I\_reg2.sdf



B404001I\_reg2.sdf

$F_x$ と $F_z$ のピーク  
はほぼ同位相



不規則波群中の水平最大流速と角型魚礁の鉛直・水平最大流体力比との関係

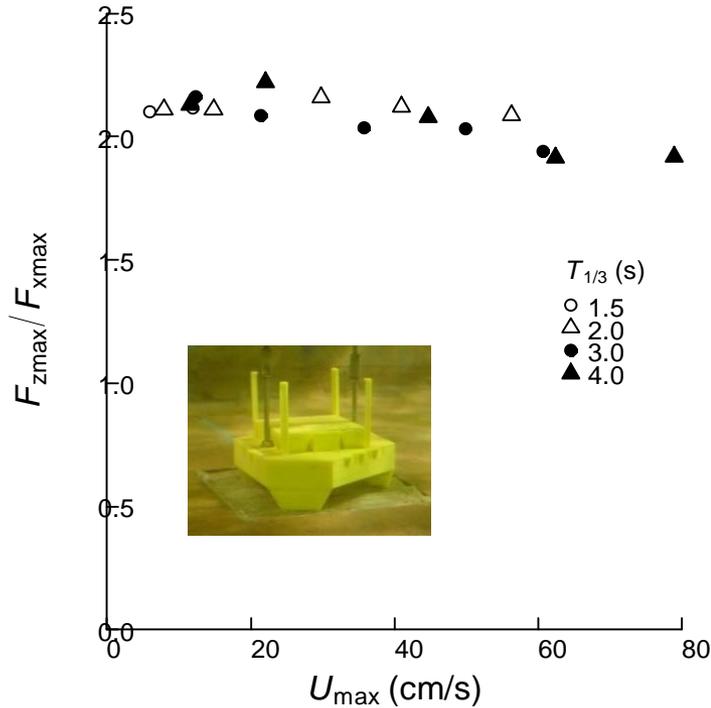
※ この流体力測定位置の水深(56cm)と移動実験場所の水深(64cm)は異なることに注意

- 角型魚礁の揚力は無視できないほど大きい。
- $F_{zmax}/F_{xmax}$  は波動流速の増加に伴い減少。

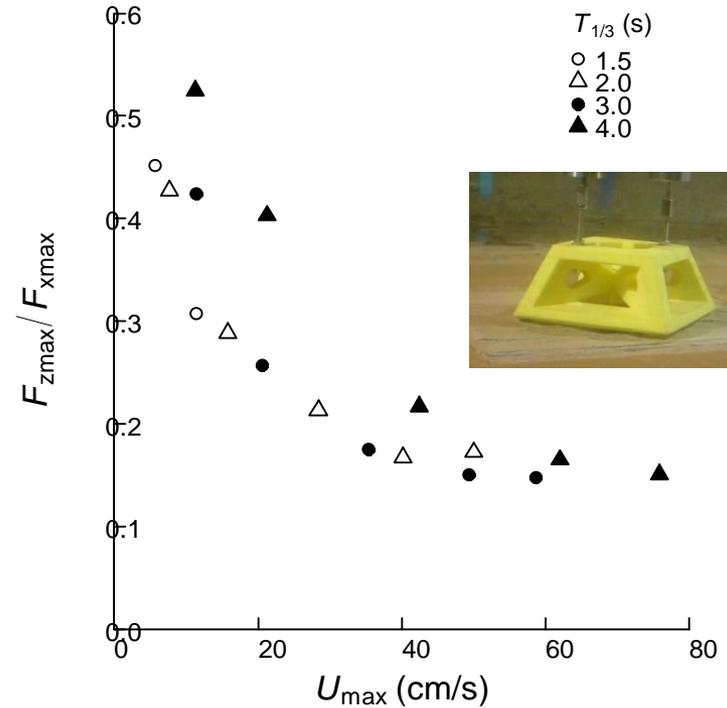
不規則波中の水平流速(u)と角型魚礁の水平・鉛直流体力( $F_x, F_z$ )との測定例

# (参考) 他の構造物の不規則波群中の鉛直／水平流体力の比

## 模型Aの場合



## 模型B(迎角45°)の場合



不規則波群中の水平最大流速( $U_{max}$ )と角型魚礁の最大揚力と水平最大流体力との比( $F_{zmax}/F_{xmax}$ )との関係

揚力の相対的大きさは構造物の形状によっても異なる。  
揚力と水平流体力との位相差も構造物の形状によって変わる (図省略)。

# 検討のまとめ

- モリソン式は不規則波による水平流体力を全体的に精度良く推定できるが、波群中の最大力については過小評価する傾向がある（⇒何らかの補正が必要）。
- これに対して、 $C_{F_{\max}}$ の式はKC数の適切な定義（ $K_{C2}$ を提案）により波群中の水平最大流体力を比較的精度良く推定できる。
- 被災事例の解析結果から、少なくとも従来法が流体力を過小評価すると判断できる。
- 砂質底上の回転対称形魚礁（角型魚礁）では洗掘等に伴う滑動抵抗の増加により、転倒しない限り有意な移動（魚礁1個分以上）は起こらないことが不規則波実験でも確認された。
- 角型魚礁の転倒限界は、揚力を無視した、水平流体力と水中重量とのモーメント比から推定される揺動限界にほぼ一致したが、流体力の測定結果は揚力が重要になることを示唆した。なお、従来検討してきた高層魚礁の流体力では揚力の影響は小さく、無視できると判断された<sup>注1</sup>。

**注1** 平成26年度までの調査で検討対象としてきた高層魚礁では、

- 揚力は水平流体力に比べて小さく、水平流体力が最大に達したときにほとんどゼロになる
  - 高層魚礁の滑動が「水平流体力の計算値 > 摩擦力」で推定できることが実験的に確認された
- ことから揚力は考慮しなくてよいと判断されている。

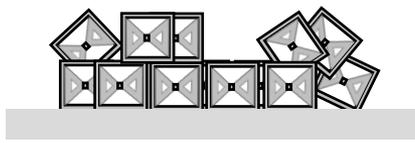
# 残された課題

1. 新たに明らかになった揚力の影響の可能性について、まず
  - どのような形状の魚礁で揚力の評価が要／不要になるかの検討
  - 揚力の評価手法の確立を行う必要がある。これらの検討を経て、再度①被災事例の検証と②砂質底上での被災（転倒）限界を予測する手法の確立を行い、沈設魚礁の安全性の照査法を検討し直す必要がある。
2. 沈設魚礁の安全性の照査法については、見直し根拠となる被災事例がまだ少ない。事例の蓄積のため、今回被災が新たに確認された事例についても波浪予測に基づく詳細な解析を行う必要がある。
3. 波動流速の非対称性を考慮した $U_q$ の算出法の確立が必要がある。
4. 波・流れ共存場での流体力算定手法の提案式については、模型実験または現地調査による検証がなされていない。

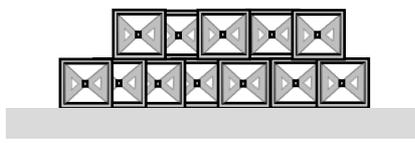
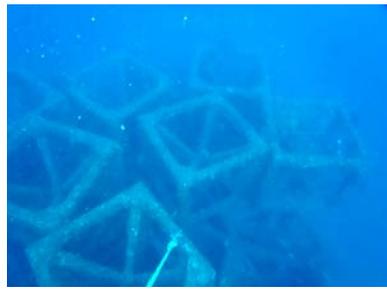
# <参考> 落下が確認できた層積み魚礁の事例

## 千葉県館山沖

被災工区(水深16.8m)  
平成20または21年施工

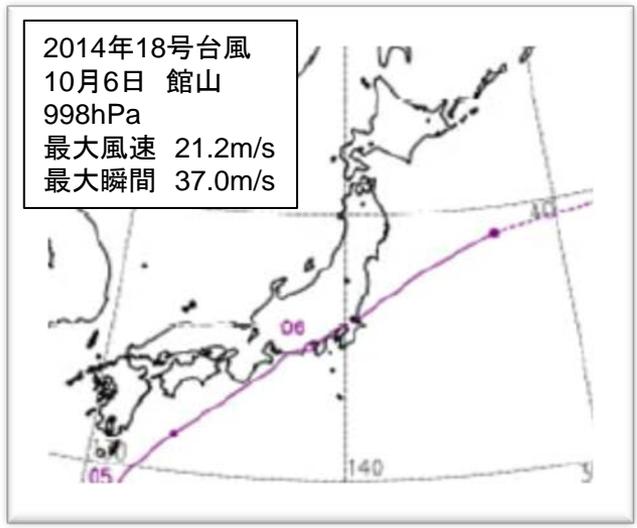


非被災工区(水深23.5m)  
平成22年施工



層積み魚礁が被災(落下)した工区  
としていない工区が隣接

被災時(2014年10月6日)の波浪を把握し、  
魚礁の安定性を検討する必要がある。

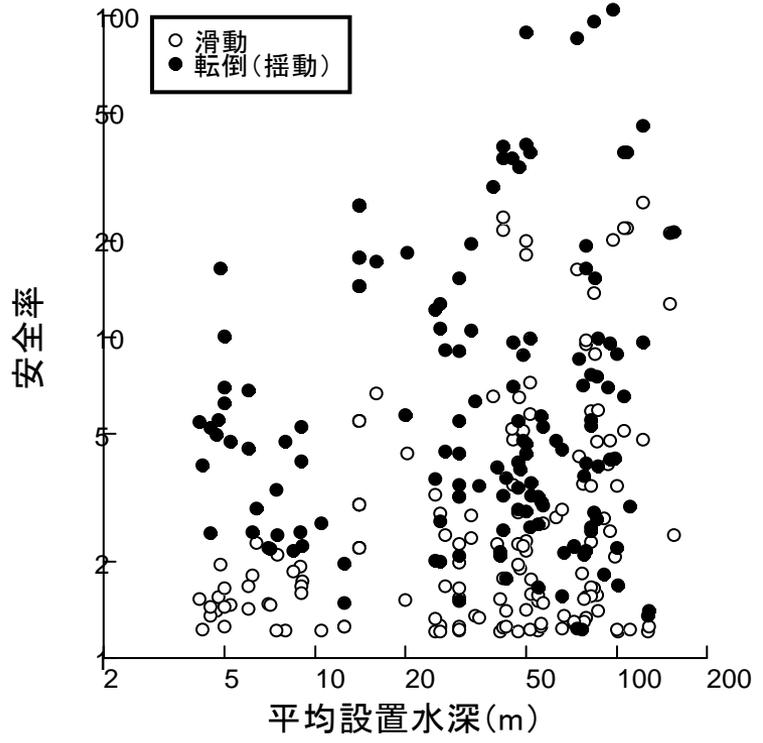


2008年以降、館山で観測された極大風速(m/s)

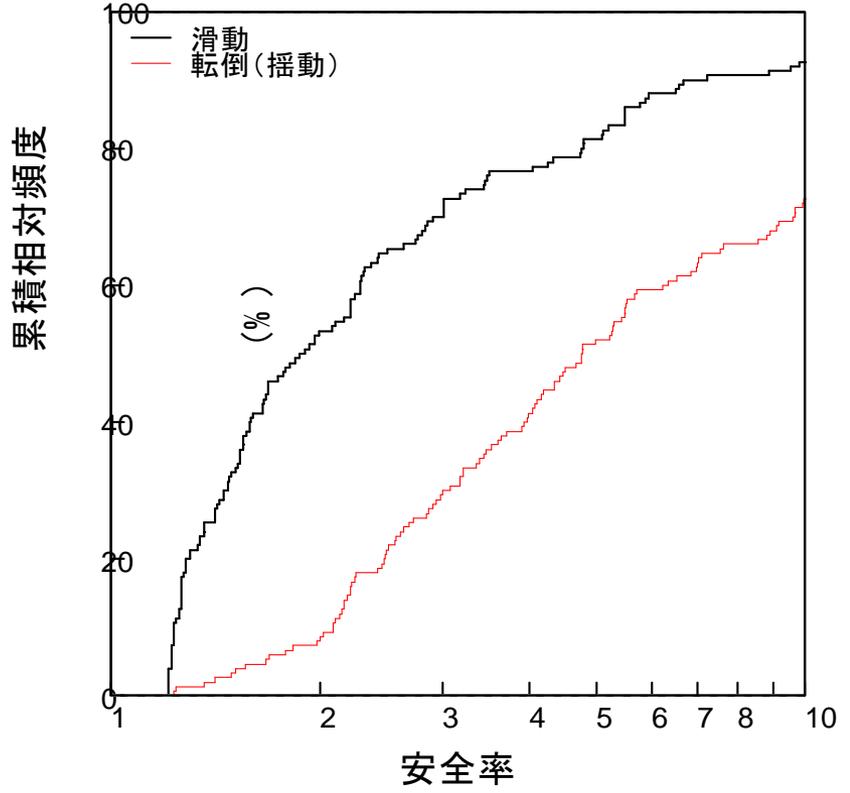
	日最大風速・風向	日最大瞬間風速・風向
1	21.2 南西 2014/10/6	38.5 北 2013/10/16
2	20.1 北北西 2013/10/16	37.0 南南西 2014/10/6
3	13.7 南西 2016/10/6	28.2 南南西 2009/10/8

# <参考> 沈設魚礁の安全率

漁場施設（浮魚礁を除く）に関する全国の安定計算表（平成24～25年度）より



設置水深と安全率との関係



安全率の累積頻度

# 沈設魚礁の流体力係数の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所  
国際気象海洋(株)

# 沈設魚礁の流体力係数の決定方法

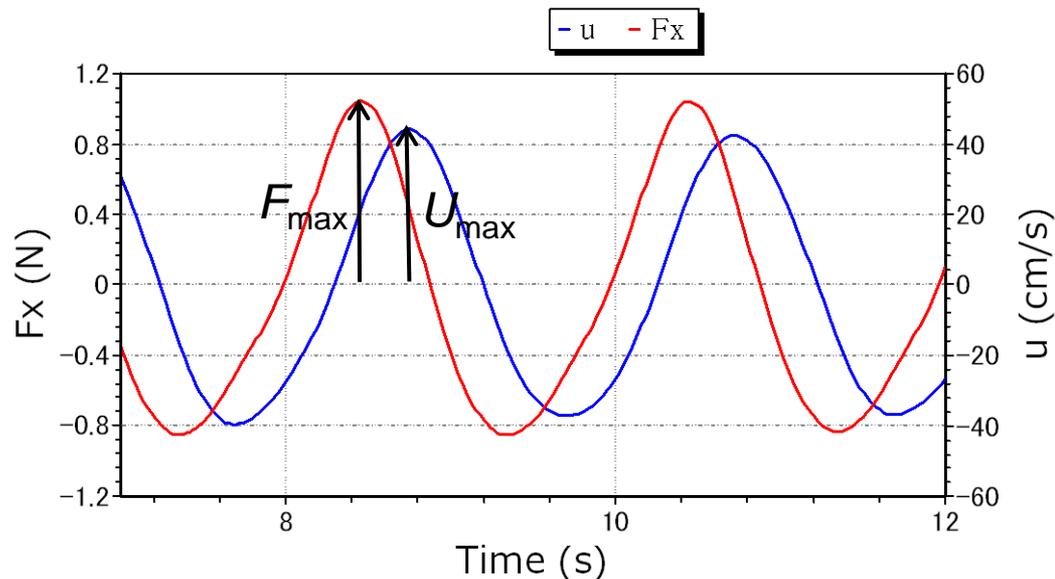
## モリソン式の $C_D$ と $C_M$ の決定

規則波実験によって得られた水平流体力 $F_x$ と水平流速 $u$ の時系列データより、 $F_x$ の推定値と測定値の最小2乗和が最小になるよう決定（最小二乗法により推定される次式の係数 $a$ と $b$ から求める）。

$$F_x = au^2 + b \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$C_D = \frac{2a}{\rho A}, \quad C_M = \frac{b}{\rho V}$$

ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $A$ ：模型の基準面積、 $V$ ：模型の基準体積（実容積）



規則波中での水平流速 $u$ と水平流体力 $F_x$ の測定例

## $C_{Fmax}$ の決定

規則波実験によって得られた水平最大流体力 $F_{max}$ と水平最大流速 $U_{max}$ より次式で計算。

$$C_{Fmax} = \frac{F_{max}}{\frac{1}{2} \rho A U_{max}^2}$$

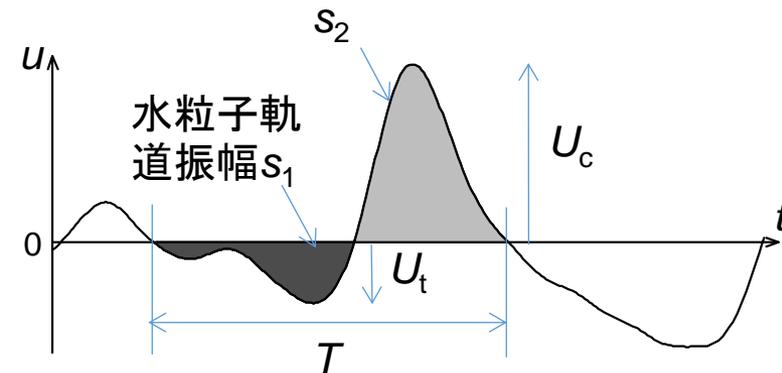
# 不規則波中での最大流体力を算定する際の課題

流体力係数はKC数との関係式（規則波実験による）から求められる。しかし、不規則波の場合のKC数の妥当な定義が明らかでない。

KC数を以下の4つの方法で算出し、KC数と流体力係数の実験式から不規則波実験における流体力を求め、妥当性を比較検討。

方法	KC数の算出方法
cal1	個々波（ゼロダウncロス法による）内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = U_a T / D$ より計算。ここに、 $U_a = (U_c - U_t) / 2$ 。
cal2	個々波内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = K_{Cex}$ より計算。
cal3	波群内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = u_{rms} T_z / D$ より計算※1。ここに、 $u_{rms}$ は流速のrms値、 $T_z$ は流速スペクトルから求められる平均周期。
cal4	波群内で流体力係数は一定と仮定し、 $K_C = U_{rms} T_z / D$ より計算。ここに、 $U_{rms}$ は流速振幅のrms値（ $= \sqrt{2} u_{rms}$ ）。

※1 Chakrabarti (1988)による方法



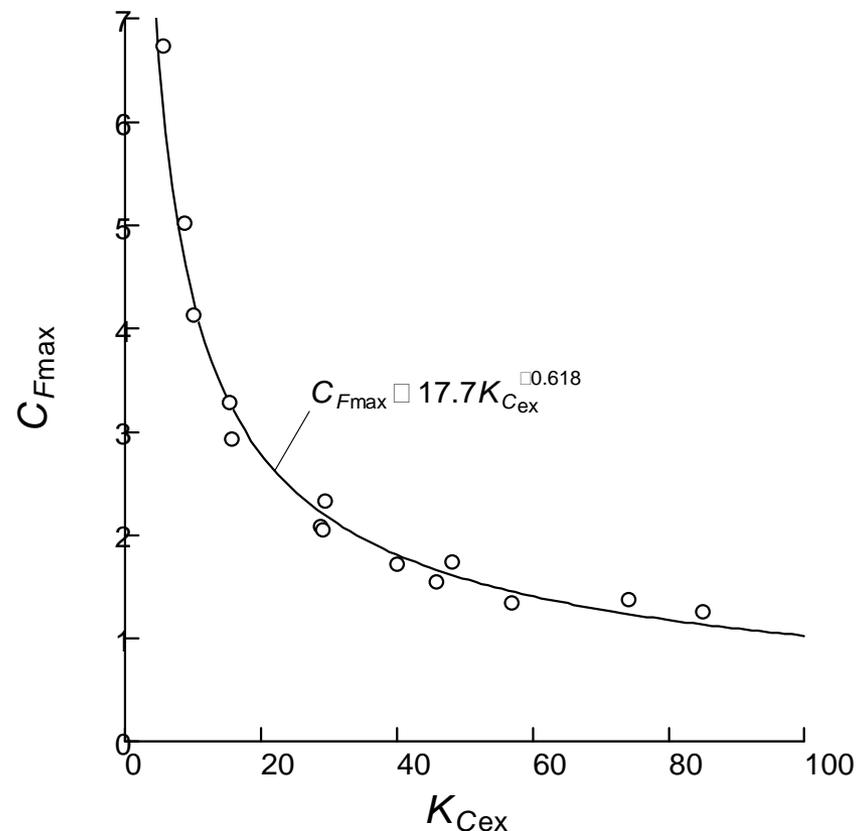
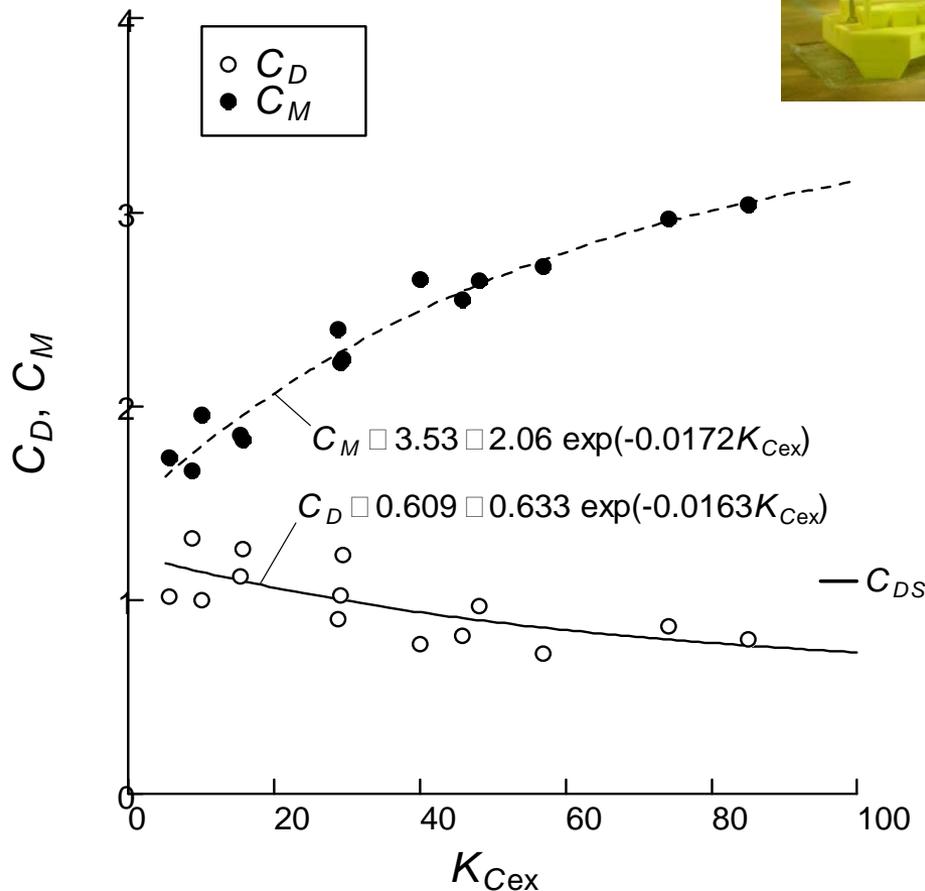
記号の定義

流速波形の非線形性の影響を考慮したKC数（拡張KC数）を次式で定義

$$K_{Cex} \equiv \frac{\pi s}{D}$$

ここに、 $s = (|s_1| + s_2) / 2$ 。

# 対象施設(模型A)の流体力係数の測定結果

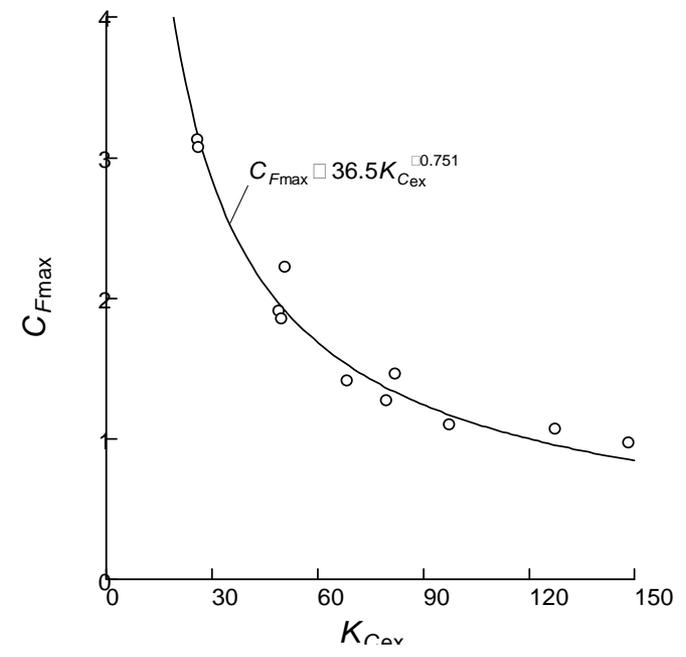
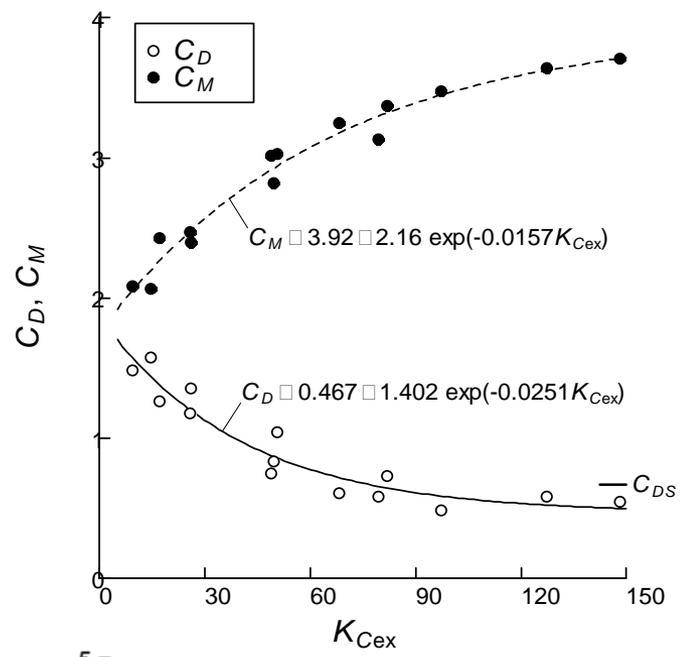
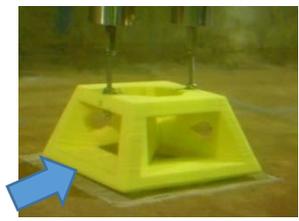


注1 図中の $C_{DS}$ の値は手引きに記載された抗力係数の表から算出された設計値（定常流中での実験値ではなく、おそらく $C_{DS}$ としては過大であることに注意）

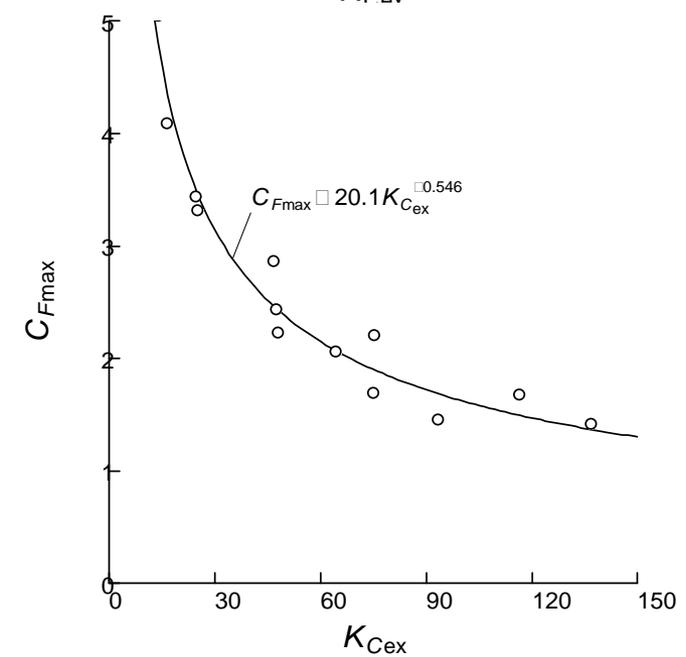
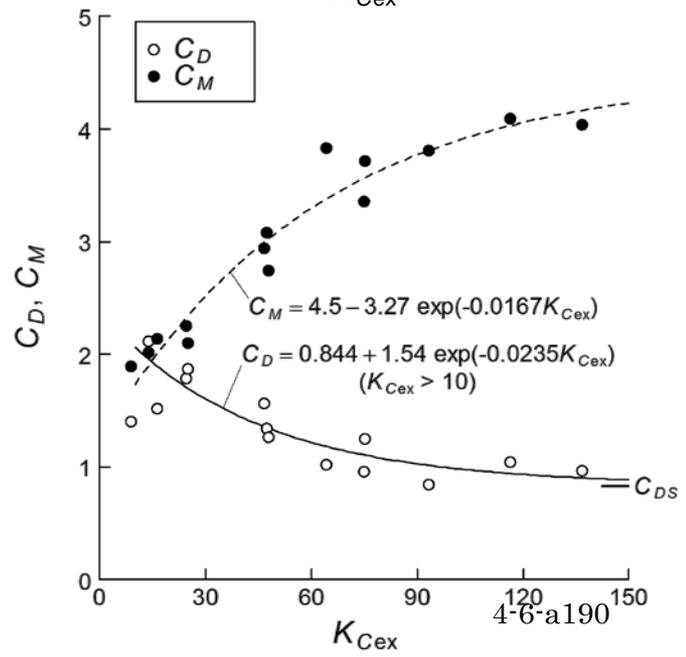
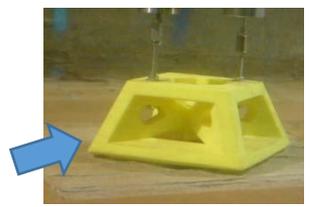
注2 流速波形に多少非対称性がみられたため、KC数に拡張KC数 $K_{Cex}$ を用いた。

# 対象施設(模型B)の流体力係数の測定結果

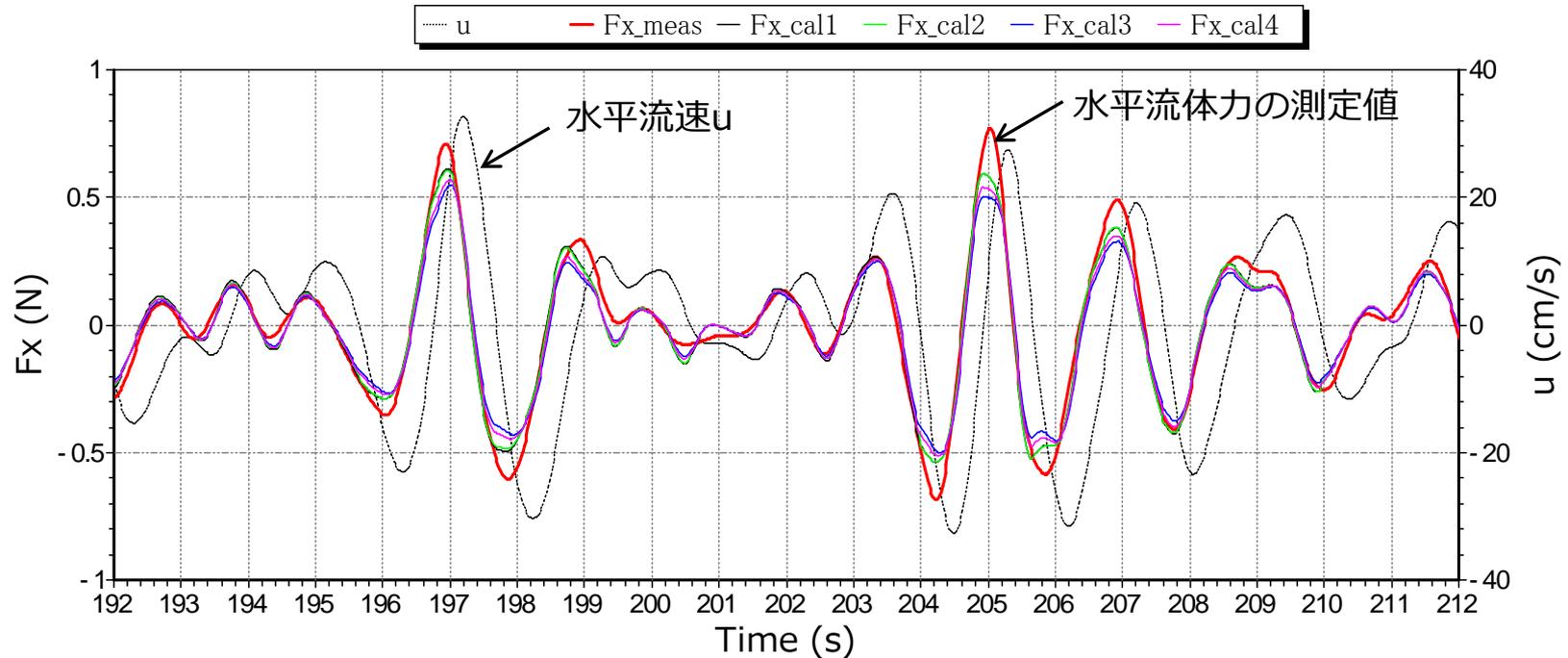
迎角0° のとき



迎角45° のとき



# 不規則波中での流体力のモリソン式による推定の妥当性 KC数の算定方法の比較(流体力の推定波形)



不規則波での魚礁（模型A）の水平流体力 $F_x$ の測定値（ $F_{x\_meas}$ ）とモリソン式による計算値の例. 計算値（ $F_{x\_cal1}$ 、 $F_{x\_cal2}$ 、 $F_{x\_cal3}$ 、 $F_{x\_cal4}$ ）は4つの方法によるKC数から求められた $C_D$ と $C_M$ を用いて算出



流体力の推定波形は全体的によく一致しているが、大きい波のピーク値が測定値に比べて少し低い。

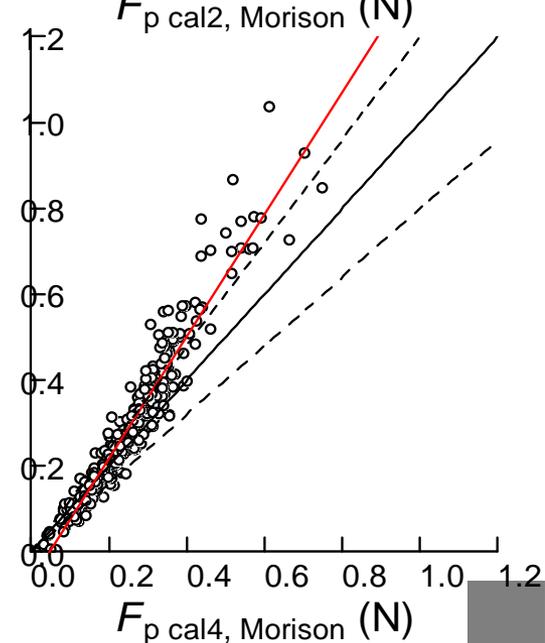
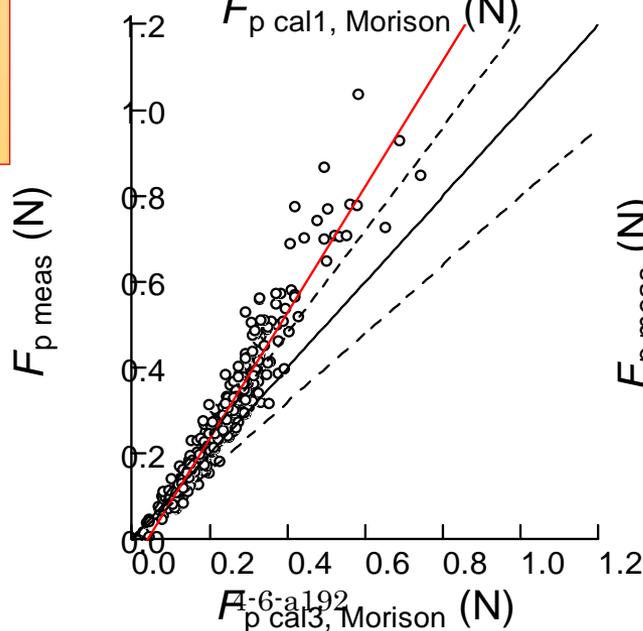
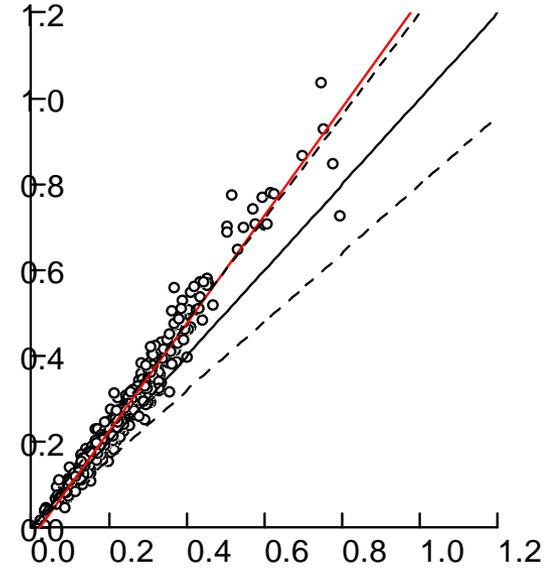
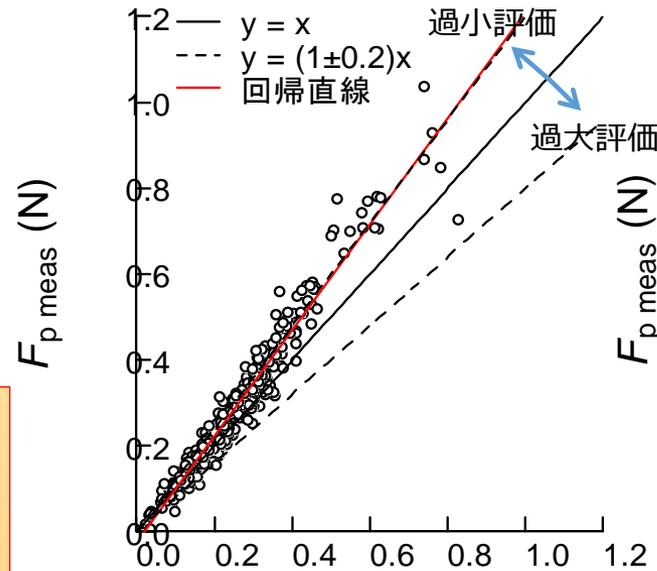
個々波毎の最大流体力 $F_p$ を比較

# 不規則波中での流体力のモリソン式による推定の妥当性

## KC数の算定方法の比較(個々波の最大流体力)

不規則波の個々波毎の最大流体力 $F_p$  : **モリソン式による計算値**と測定値 $F_{p\text{ meas}}$ との比較例 (模型A ;  $T_{1/3}=2\text{s}$ で最も波高の大きい条件の不規則波)

個々波毎の推定 (cal1とcal2) では誤差が比較的小さくなっているが、モリソン式はいずれのKC数の定義を用いても最大流体力 $F_p$ を過小評価する傾向がある。



# 不規則波中での流体力の $C_{Fmax}$ の式による推定の妥当性

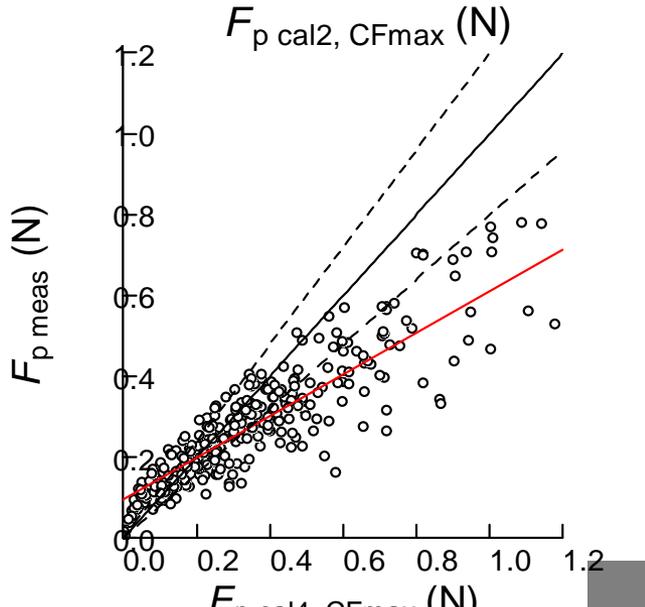
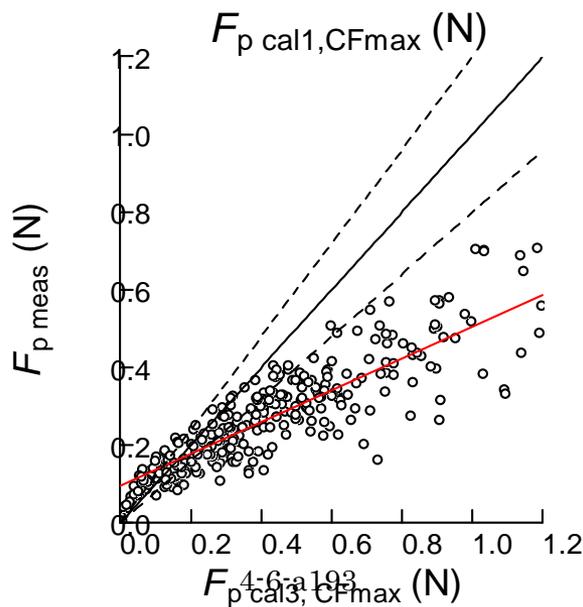
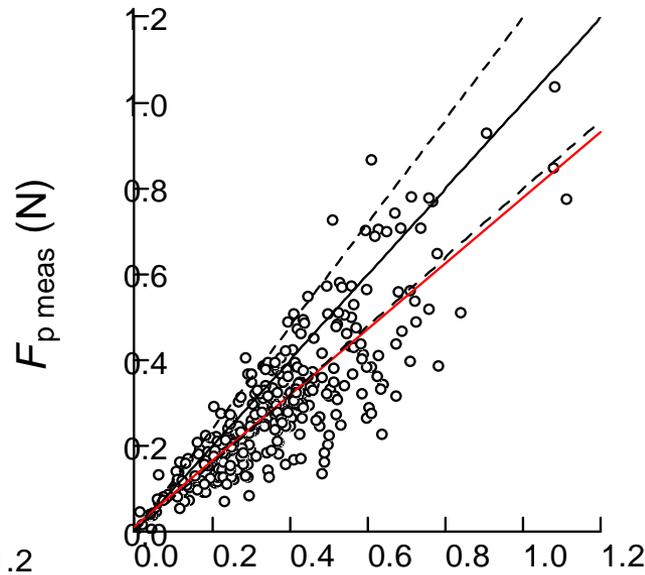
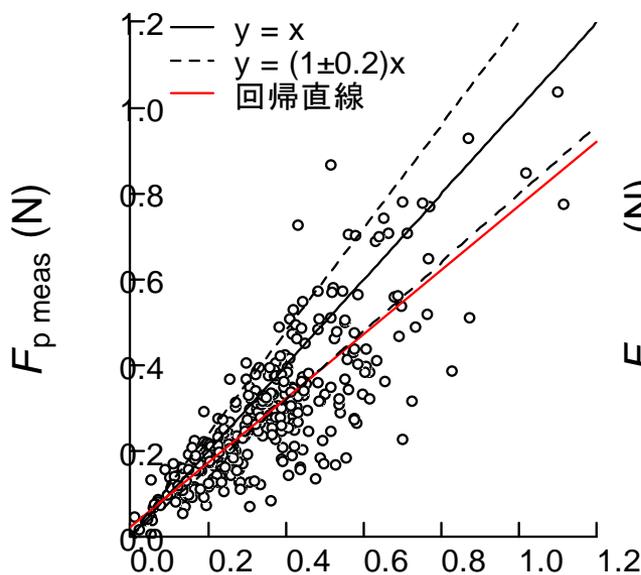
## KC数の算定方法の比較(個々波の最大流体力)

不規則波における個々波の最大流体力 $F_p$ の $C_{Fmax}$ の式による計算値と測定値との比較

すべての方法で過大評価。特に、一定のKC数を仮定する方法(cal3とcal4)ではその程度が著しい。



KC数の算出方法が重要



# 不規則波中での最大流体力の $C_{Fmax}$ の式による推定方法の検討

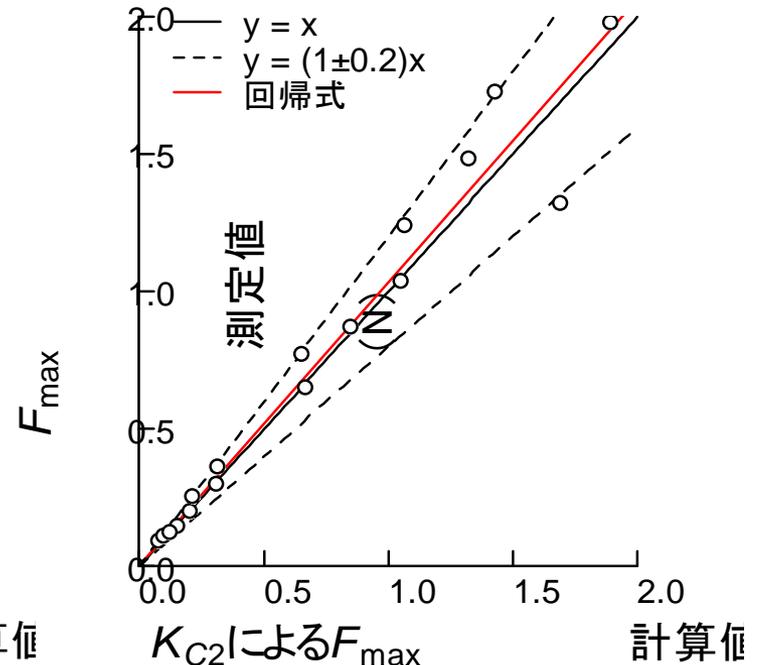
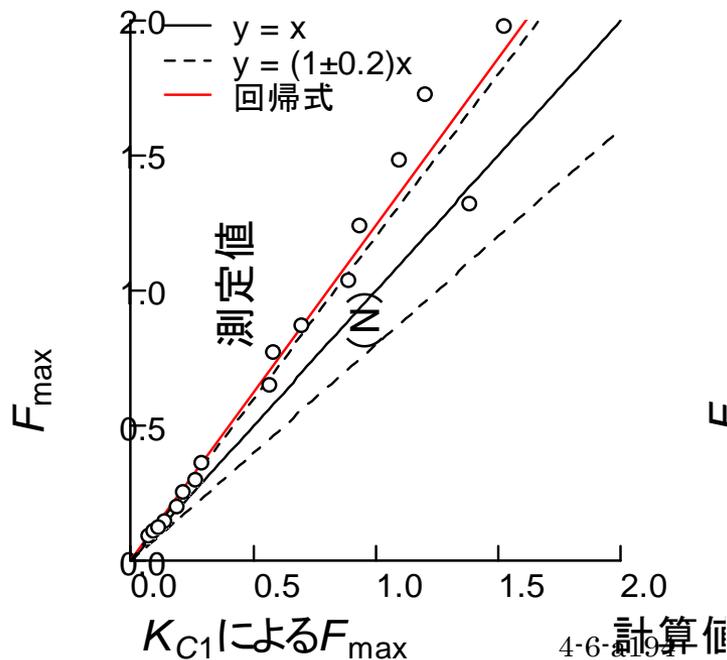
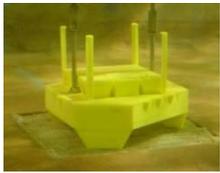
不規則波の波群中の最大流体力 $F_{max}$ を $C_{Fmax}$ の式で求める際に用いるKC数を以下の2式で比較検討

$$K_{C1} = \frac{U_{max} T_{1/3}}{D} \quad K_{C2} = \frac{U_a T_{1/3}}{D}$$

ここに、 $D$ : 魚礁の代表幅、 $T_{1/3}$ : 波動流速の有義波周期  
 $U_{max}$ : 最大波動流速、 $U_a = (U_{max} - U_{min})/2$ 、  
 $U_{min}$ :  $U_{max}$ の発生直前の極小流速

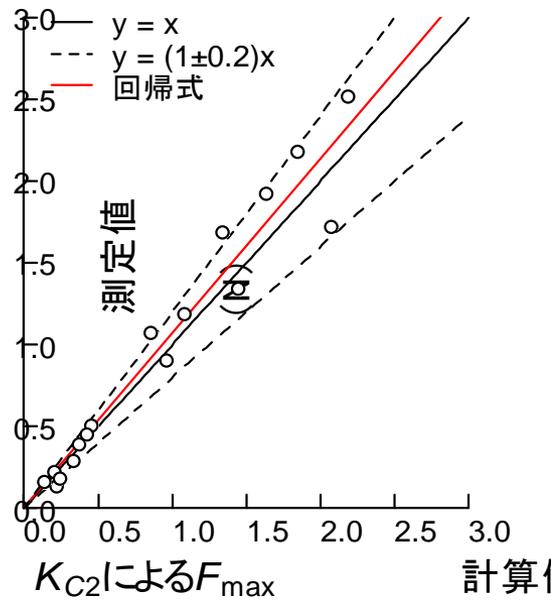
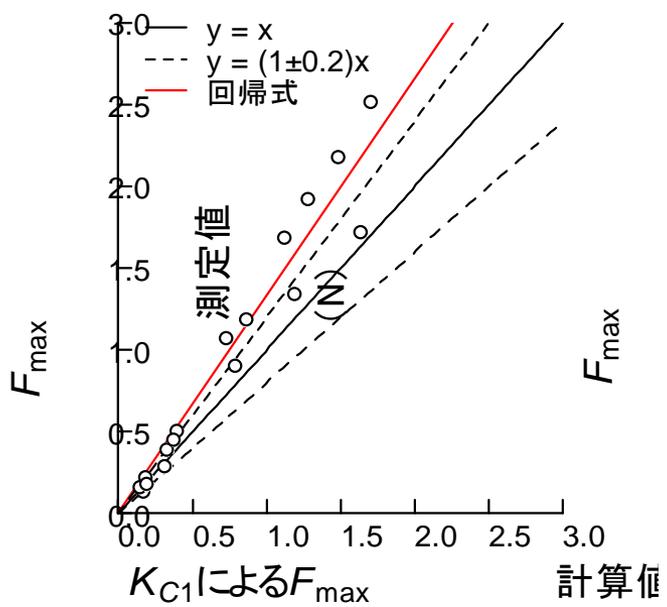
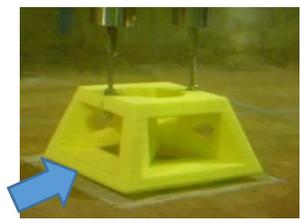
$$F_{max} = \frac{1}{2} C_{Fmax} A U_{max}^2$$

## KC数の算定方法による比較結果 (模型Aの場合)

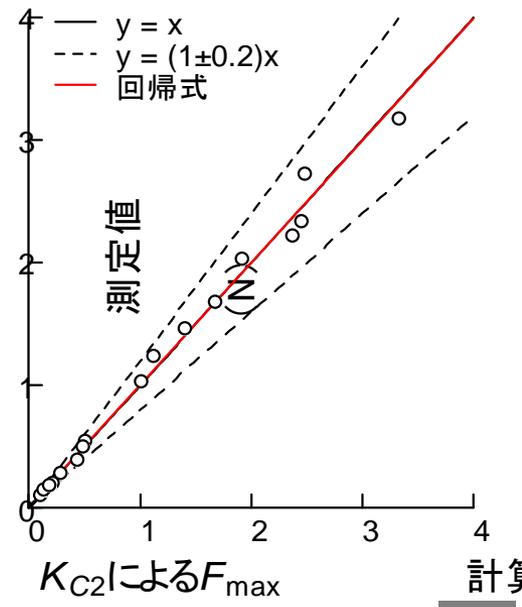
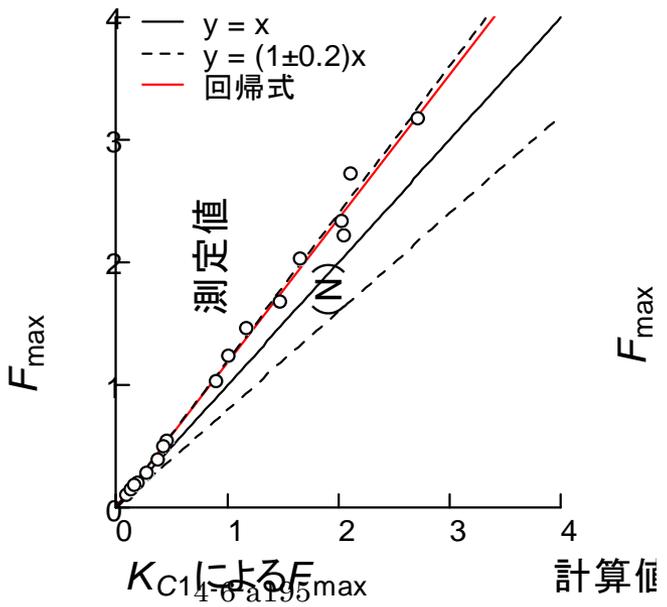
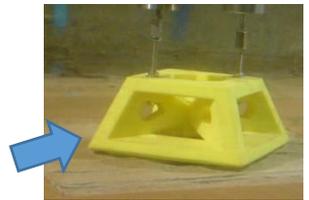


# KC数の算定方法による比較結果 (模型Bの場合)

迎角0° の場合



迎角45° の場合



$C_{F_{max}}$  の式による波群中の最大流体力の推定は比較的良好。その推定誤差はKC数の算定法に依存するが、 $K_{C2}$  では概ね20%以下を期待できる。

# 着定基質の安定質量算定式の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所  
国際気象海洋(株)

# 着定基質（石材）の安定質量算定法の検討

## これまでの提案式

$$M = \alpha \rho_s \left[ \frac{K_m}{2\mu g(\rho_s / \rho - 1)} \right]^3 U^6$$

$M$ : 石材の安定質量(t)

$\mu$ : 静止摩擦係数

$\rho_s, \rho$ : 石材と海水の密度(t/m<sup>3</sup>)

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{単体で設置} \\ 0.2 & \text{敷き詰め密度75\%以上の群で設置} \\ 0.04 & \text{囲い礁を設けて敷詰め密度75\%以上の群で設置} \end{cases}$$

$$K_m = \begin{cases} 3.5 & \text{波の場} \\ 2.3 & \text{流れの場} \end{cases}$$

$$U = \begin{cases} U_{\max} & \text{波の場 (} U_{\max} \text{: 最大波動流速)} \\ U_c & \text{流れの場 (} U_c \text{: 底面から石の高さまでの2乗平均流速)} \end{cases}$$

## 問題点

- 現地試験の結果は、提案式がまだかなり過大な安定質量を算出する（安定質量算定値は現行式で46t、提案式で15t、実際は約2t）ことを示唆。
- $\mu$ と $\rho_s$ の一定の条件下でも、被害率は必ずしも最大流速 $U_{\max}$ のみで評価できない（周期による系統的差異がみられることがある）。
- 非対称な流速波形の影響の評価やより高いKC数の場合（振動流水槽実験の場合）への適用性が検討されていない。

提案式の汎用性がまだ十分でない

（参考）KC数は水粒子軌道と石のサイズとの比であるが、以下の抗力と慣性力の比でもある。

$$K_C = \frac{\text{抗力}}{\text{慣性力}} = \frac{\rho U_{\max}^2 D^2}{\rho a_{\max} D^3} = \frac{U_{\max}^2}{a_{\max} D} \propto \frac{U_{\max}^2}{(U_{\max} / T_{zp}) D} = \frac{U_{\max} T_{zp}}{D}$$



# 算定法の再検討

これまでの提案式の仮定：石の不安定性は以下の無次元量で表示できる

$$\frac{\text{流体力}F}{\text{摩擦力}R} \propto \frac{\rho U^2 D^2}{\mu(\rho_s - \rho) g D^3} = \frac{U^2}{\mu s g D}$$

ここに、 $s \equiv (\rho_s - \rho) / \rho$ 、

$D$ は石の代表長さで、 $D \equiv (M / \rho_s)^{1/3}$

## 再検討の方法

**検討1** 波の影響を表す最も妥当な物理量の検討 ( $U_{\max}$ と $U_a$ 、 $a_{\max}$ との比較)

**検討2** 高KC数と非対称振動流速に関する実験データの補強 (振動流水槽実験の追加実施)

**検討3** 仮定“ $U^2/(\mu s g D) = \text{定数}$ ”の妥当性の確認。定数と見なせない場合は補正の検討。

**追加検討** モルタル底上の摩擦係数※1を造波水槽の試験床からサンプルを切り出して再測定。この結果に基づき、新提案式の係数を修正。

※1 これまでの解析に用いてきた値は、試作したモルタル板での実験値



# 検討 1 流速の評価方法

被害率の変化を最もよく説明できる物理量を  $U_{\max}$  と  $U_a$ 、 $a_{\max}$  との比較により明らかにする。ここに、

$$U_a \equiv (U_{\max} + |U_{\min}|) / 2$$

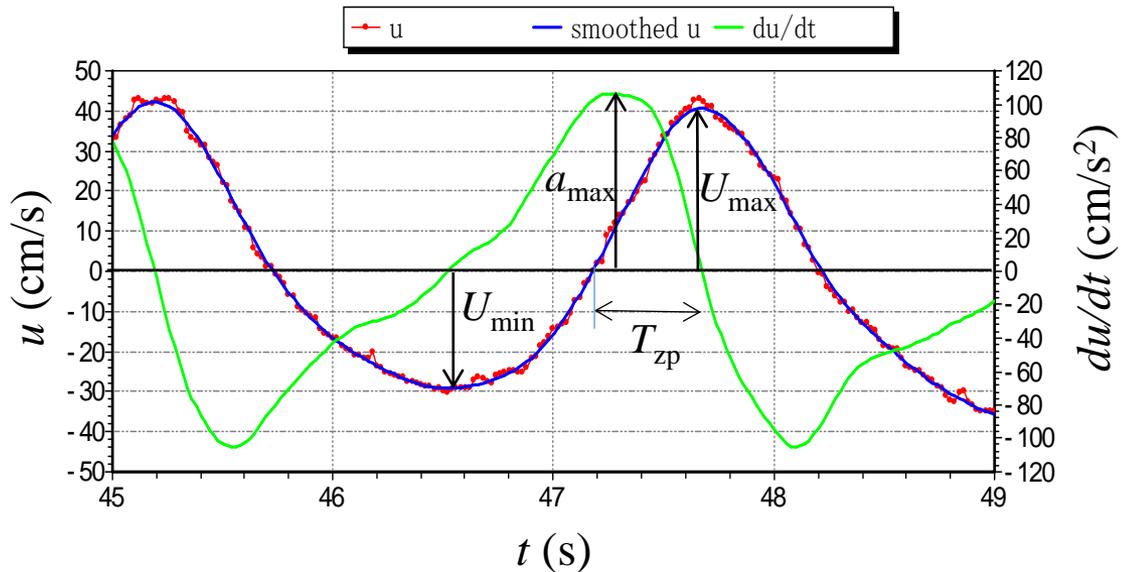
$a_{\max}$  は最大加速度で

$$a_{\max} = r_1 \frac{U_{\max}}{T_{zp}}$$

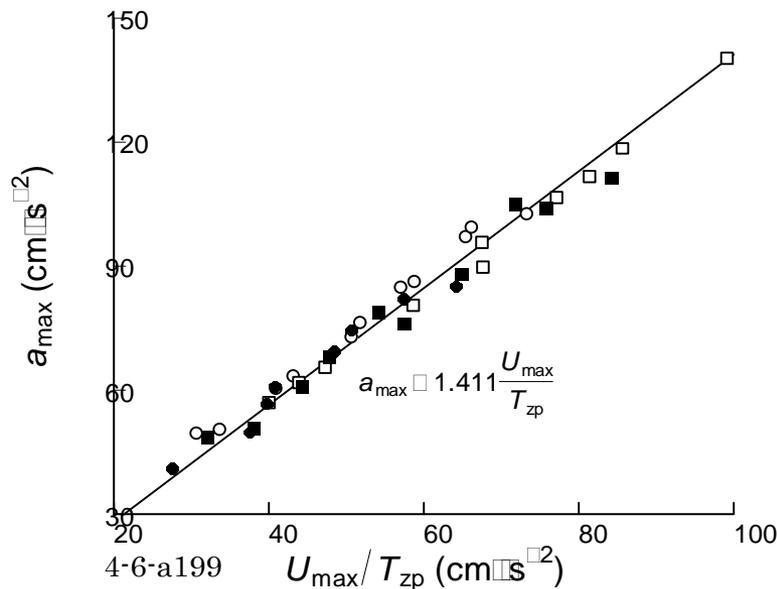
で近似できる。正弦波の場合は

$$r_1 = \pi/2 = 1.57$$

となるが、造波水槽実験（右図）では、 $r_1 = 1.411$ であった。



## 流速の測定例と記号の定義



# 検討 2 振動流中での玉砂利底上の碎石 実験方法

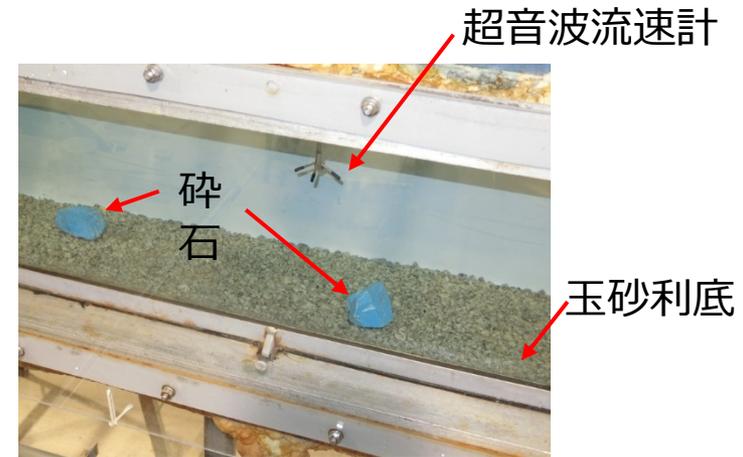
- 縦型循環式回流水槽（試験区0.4×0.4×3m）を用いる
- 従来の試験と同じ碎石100個を用いて、玉砂利底上に単体で碎石を設置し、周期10sで、流速振幅が徐々に増加する振動流を与えて、移動限界流速を調べる。

発生させた振動流は以下の2種類

Case O10SG1 対称振動流 ( $U_{max} \approx |U_{min}|$ )

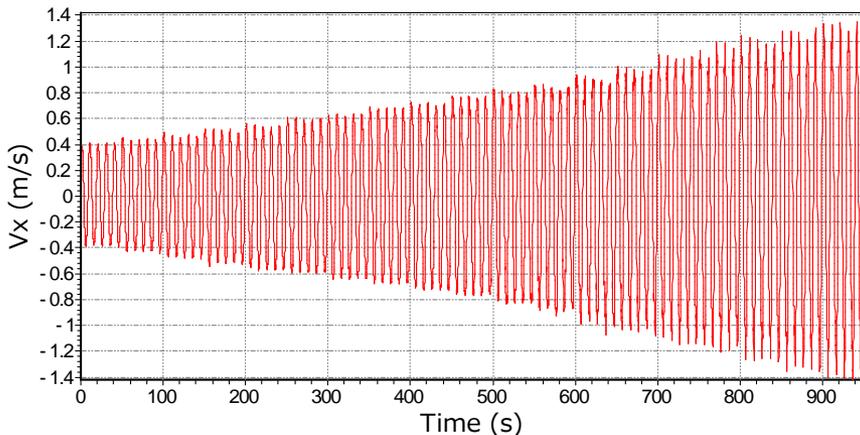
Case O10AG1 非対称振動流 ( $U_{max} \approx 2|U_{min}|$ )

- 静止摩擦係数を引張試験と摩擦角試験により測定

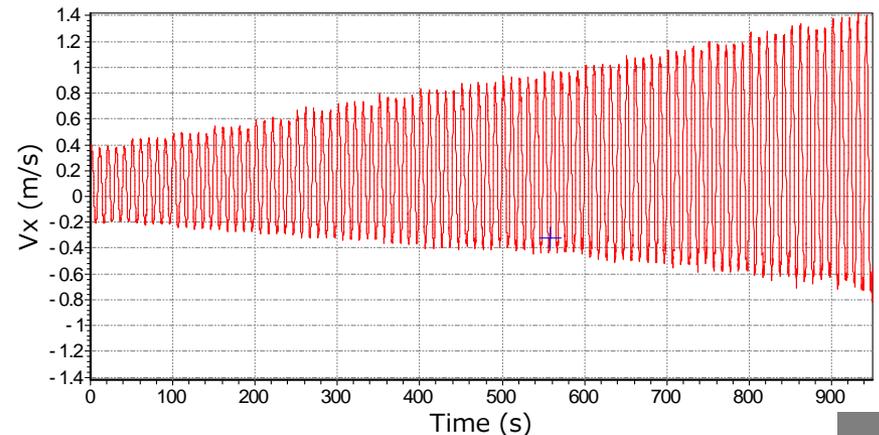


振動流水槽での試験の様子

Case O10SG1



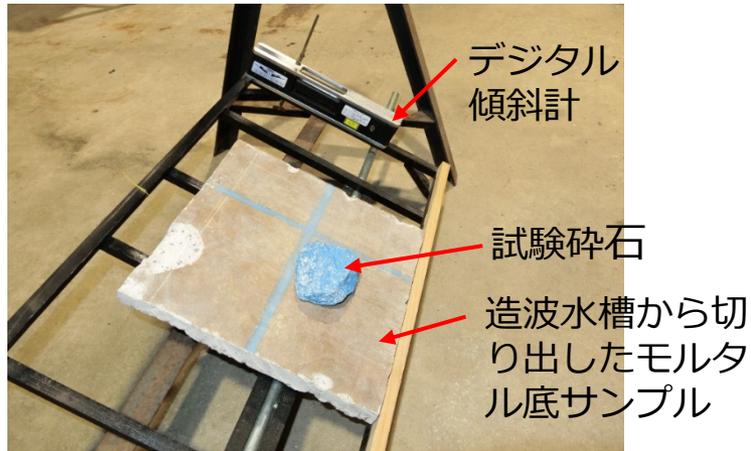
Case O10AG1



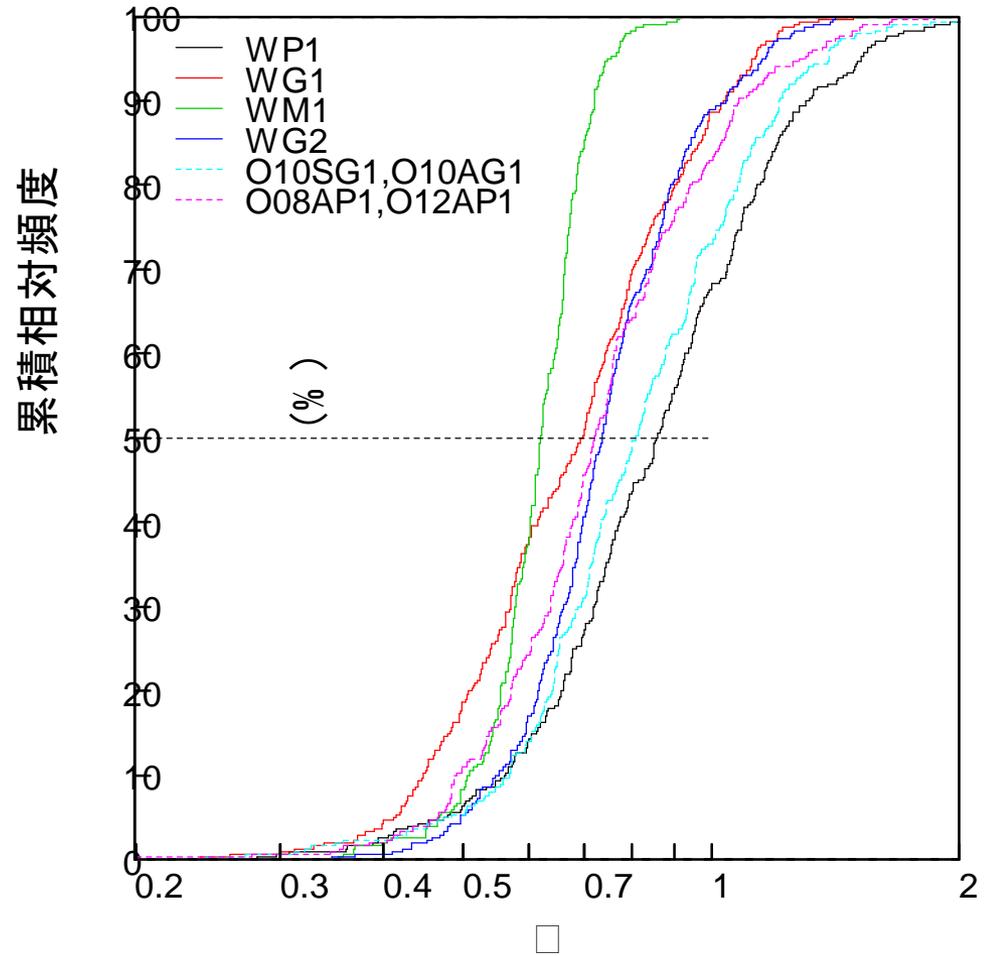
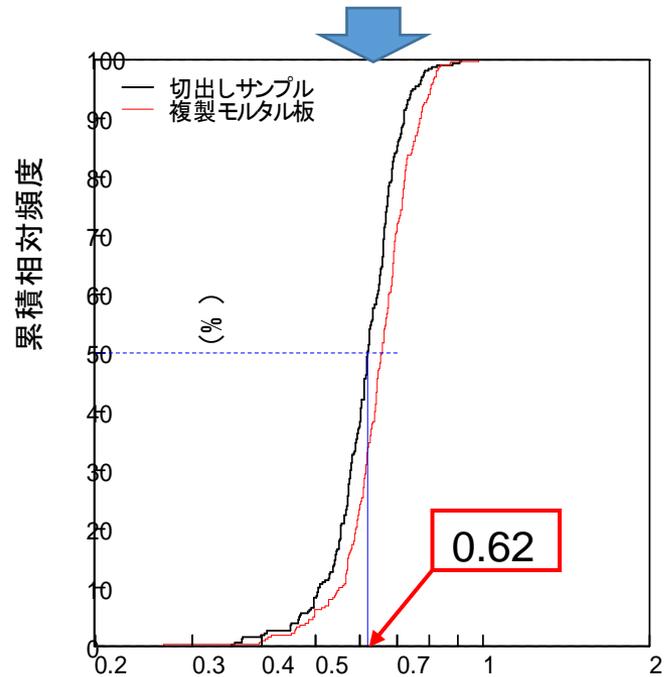
発生させた振動流の流速の時間変化



# 追加検討 造波水槽実験でのモルタル底上の碎石の摩擦係数



100個の碎石について滑り出しの直前の傾斜角（摩擦角）を場所を変えて3回測定



全実験ケースにおける摩擦係数の累積相対頻度



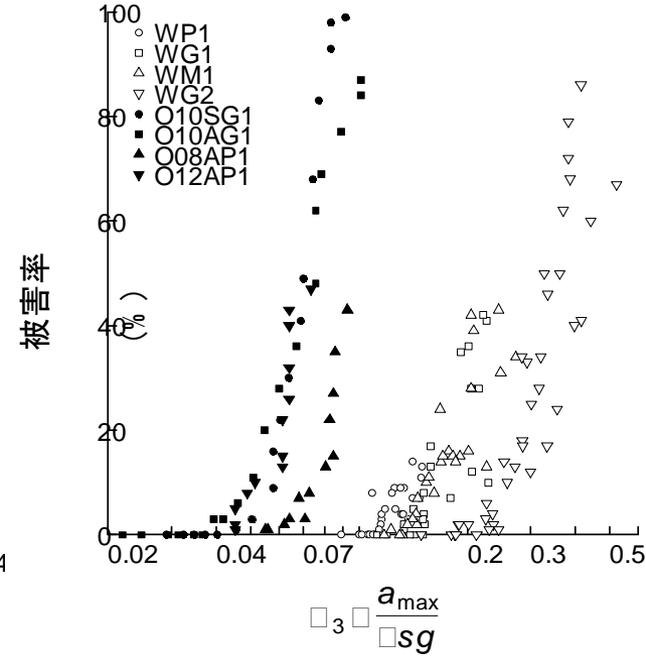
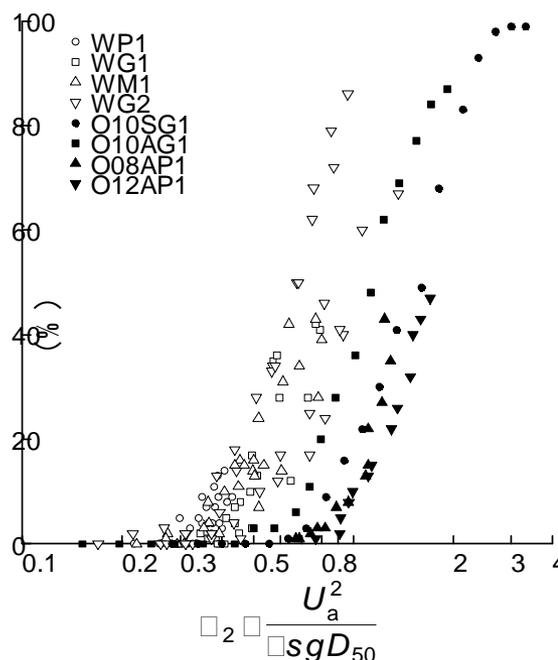
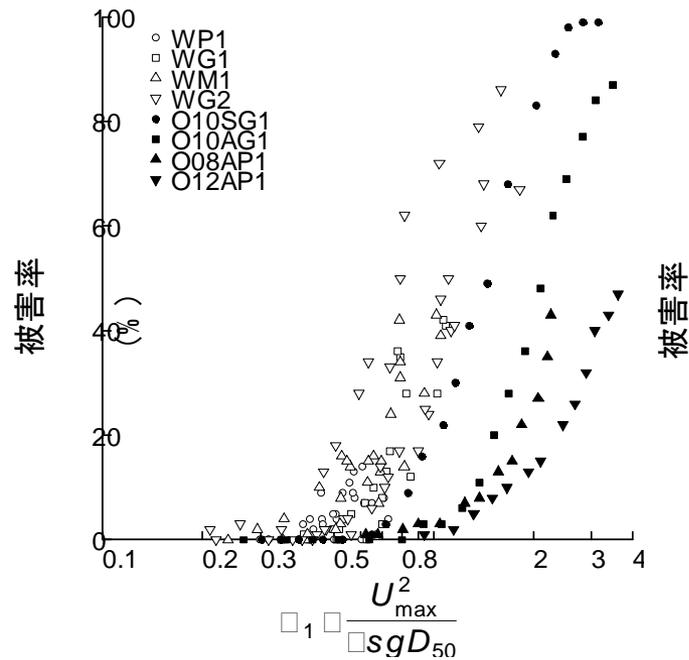
# 検討3 被害率の説明変数としての無次元量

石の可動性の指標:

$$\psi_1 = \frac{\rho U_{\max}^2 D_{50}^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD_{50}^3} = \frac{U_{\max}^2}{\mu s g D_{50}}, \quad \psi_2 = \frac{\rho U_a^2 D_{50}^2}{\mu(\rho_s - \rho)gD_{50}^3} = \frac{U_a^2}{\mu s g D_{50}}, \quad \psi_3 = \frac{\rho a_{\max} D_{50}^3}{\mu(\rho_s - \rho)gD_{50}^3} = \frac{a_{\max}}{\mu s g}$$

ここに、 $D_{50} \equiv (M_{50} / \rho_s)^{1/3}$        $s \equiv (\rho_s - \rho) / \rho$

従来の提案式は波浪中の被害率が $\psi_1$ のみで説明できると仮定



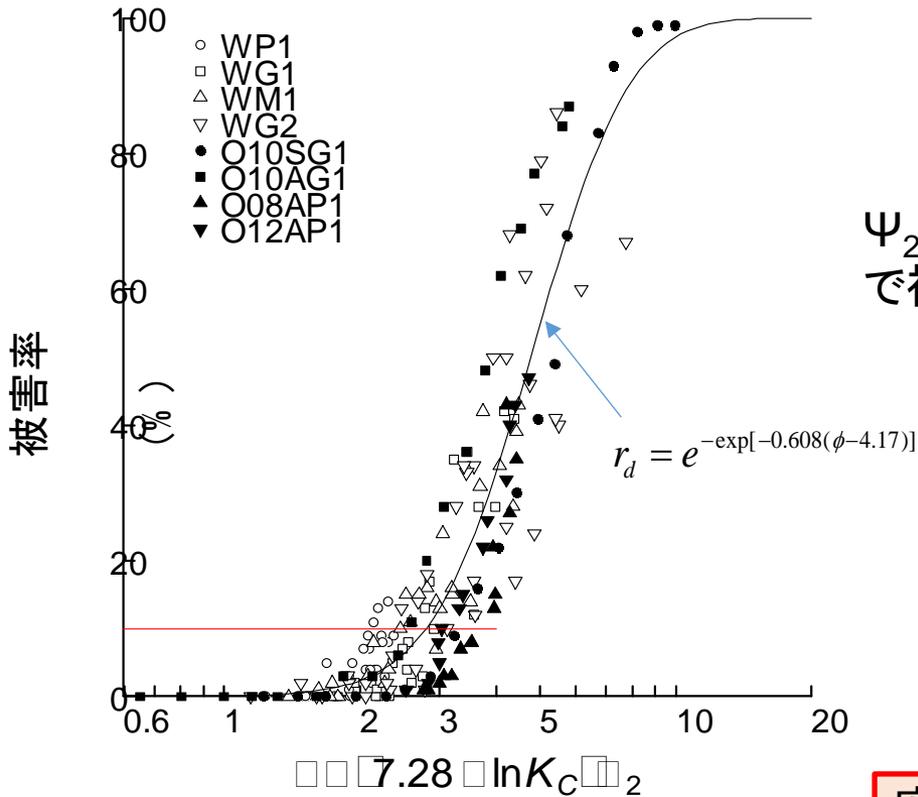
O08AP1: 周期8sの非対称振動流中での玉石底上の碎石 (H26年実験)  
 O12AP1: 周期12sの非対称振動流中での玉石底上の碎石 (H26年実験)



# 検討3 新算定式の構築

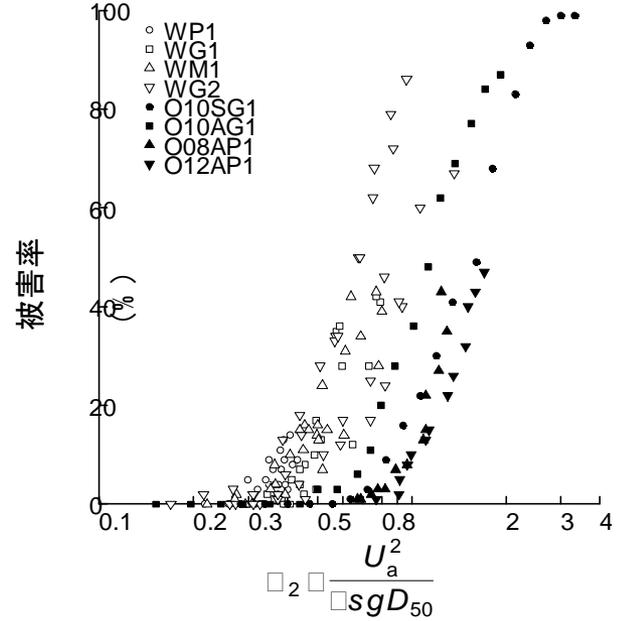
## 算定式の考え方

$C_{Fmax}$  の式を援用し、最大流体力 =  $C \times \rho U_a^2 D_{50}^2$  で表す。ここに、係数  $C$  は  $K_C$  数の関数。

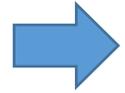


被災限界の指標としては  $\psi_2$  でもまだばらつきが大過ぎる

$\psi_2$  を  $K_C$  数の関数で補正



被害率  $r_d = 0.1$  のとき  
 $\phi \equiv \phi_{cr} = 2.80$



安定質量  $M_{50} = \rho_s D_{50}^3$  は次式から繰り返し計算により求めた  $D$  に基づき算出する。

$$\left( a - \ln \frac{U_{\max} T_{zp}}{D_{50}} \right) \frac{U_a^2}{\mu sg D_{50}} = \phi_{cr}$$

ここに、 $a = 7.28$ 、 $\phi_{cr} = 2.8$

4-6-a203

# 検討3 新算定式の現地試験結果への適用 (参考) 試験結果の概要 (H27年度実施)



試験地 (志和岐) の位置



調査開始前に横転していた割石

- 調査開始前 (台風11号襲来した7/16) に割石は被災限界相当量移動 (⇒移動により安定化)
- 8/22~23にわずか(9cm以下)に移動

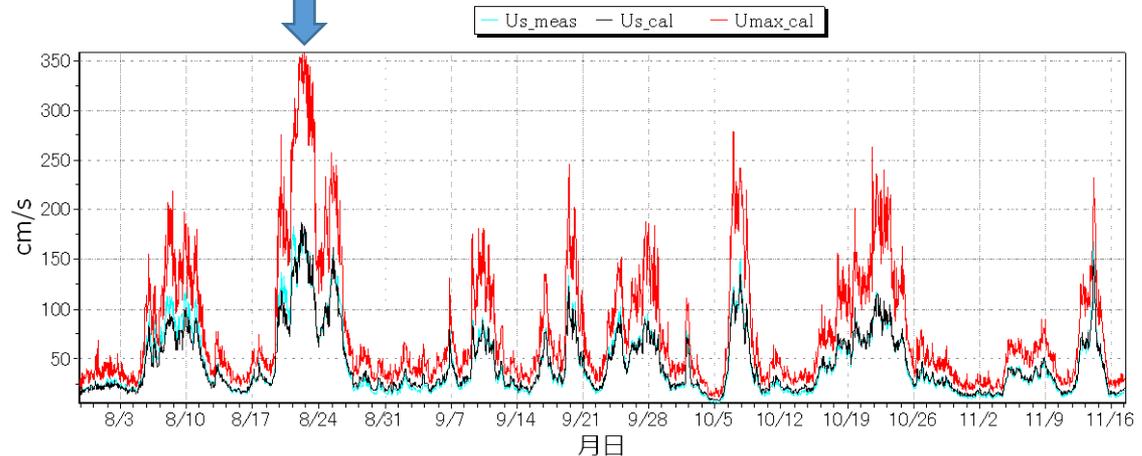


被災限界相当の流速が再度発生したと推察



2~3tクラス (1.16~3.01t ;  $M_{50}=2.04t$ ) の割石10個を設置。設置時の割石 (吊り下げ金具は上側)

被災限界流速に近いと推定

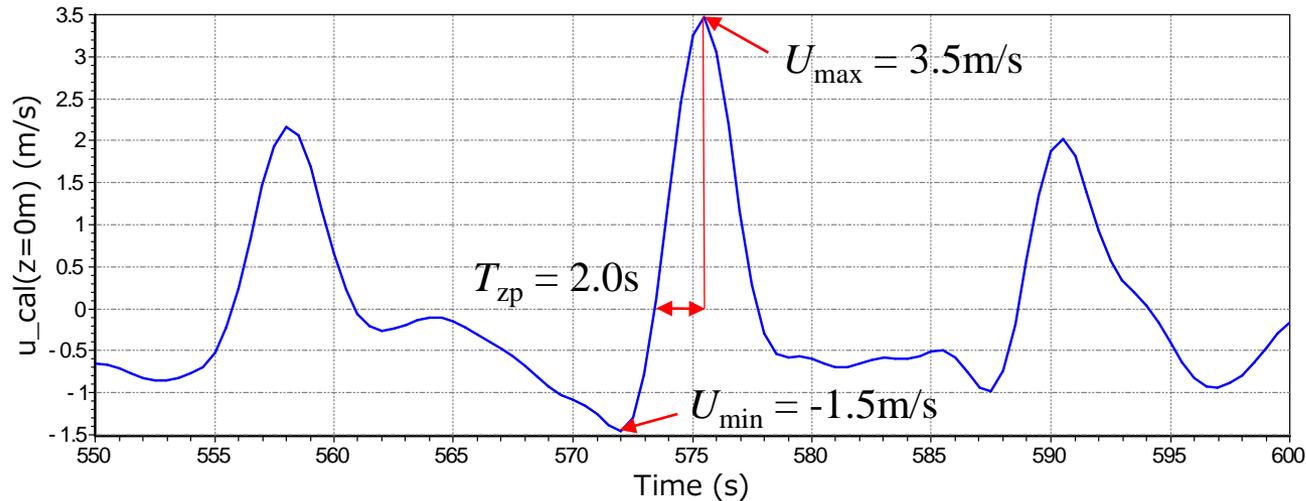


$U_{max,cal}$ : 水圧からの最大波動流速の推定値



# 検討3 新算定式の現地試験結果への適用結果

## 最大流速発生時における流速波形



2015年8月22～23日、志和岐地区で観測された最大流速発生時の流速波形（水圧からの推定値）の例

$\rho_s = 2.59\text{ t/m}^3$ ,  $\rho = 1.025\text{ t/m}^3$ ,  
 $\mu = 0.8$ ,  $U_{max} = 3.5\text{m/s}$ ,  
 $U_{min} = -1.5\text{m/s}$ ,  $T_{zp} = 2.0\text{s}$

従来の提案式による  
 安定質量  $M_{50} = 15.0\text{ t}$

かなり過大

新算定式による  
 $D_{50} = 0.985\text{ m}$   
 安定質量  $M_{50} = 1.0\text{ t}$

実際の質量  
 $M_{50} = 2.0\text{ t}$

ほぼ妥当？

# 新提案式のまとめ

石材の安定質量：  $M_{50} = \alpha \rho_s D_{50}^3$

ここに、 $\alpha$ ：設置方法の効果を表す係数（以下の値）、 $\rho_s$ ：石材の密度、

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{単体で設置} \\ 0.2 & \text{敷き詰め密度75\%以上の群で設置} \\ 0.04 & \text{囲い礁を設けて敷詰め密度75\%以上の群で設置} \end{cases}$$

$D_{50}$ ：石材の立方体相当径で波の場と流れの場で異なり、以下により求められる。

波の場：  $\left( a - \ln \frac{U_{\max} T_{zp}}{D_{50}} \right) \frac{U_a^2}{\mu(\rho_s / \rho - 1)g D_{50}} = \phi_{cr}$  流れが共存する場合でもある程度適用できるが、適用限界は検討要

$$U_a = (U_{\max} + |U_{\min}|) / 2 \quad (\text{または } U_a = (U_{\max} - U_{\min}) / 2)$$

流れの場：  $D_{50} = \frac{K_m U_c^2}{\mu(\rho_s / \rho - 1)g}$

適用限界に関わる課題

ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $a = 7.28$ 、 $\mu$ ：静止摩擦係数、 $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 、 $T_{zp}$ ：底面軌道流速の最大値、最小値及び流速ゼロから最大流速までの時間、 $\phi_{cr}$ ：10%被害率における被災限界係数（= 2.8）、 $g$ ：重力加速度、 $K_m = 2.3$ 、 $U_c$ ：流速分布を考慮した底面から石材の天端までの二乗平均流速で、べき乗則を仮定して次式で算定してもよい。

$$u(z) = U_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^n \quad U_c = \sqrt{\frac{1}{b} \int_0^b u^2(z) dz} = \frac{1}{\sqrt{2n+1}} \left( \frac{b}{z_0} \right)^n U_0$$

ここに、 $z$ ：底面からの高さ、 $b$ ：石材の比高、 $U_0$ ： $z = z_0$ における流速、 $n = 1/7$



# 残された課題

1. 非対称的な波動流速の特性値 ( $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 、 $T_{zp}$ ) の算出手法の確立  
既往文献と水槽実験に基づき、実用的な手法の確立が必要
2. 算定式の現地検証
  - 現地では試験割石の大きな移動はまだ確認できていない。確実に検証データが得られるよう、より小さい割石を用いた現地実験が必要。
  - 新提案式から、石の安定性に波周期が影響することが予想される。これまでの現地実験地（徳島県沿岸）では周期が非常に長いうねりが卓越していたが、周期の短い風波が被災の主因となる海域（北海道日本海沿岸など）でも割石を用いた事業は盛んに実施されており、現地実験が必要。
3. 波の場と流れの場の算定式の適用限界の決定

# 海洋モデルの利用による流れに関する 設計条件の検討

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所

# 海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討

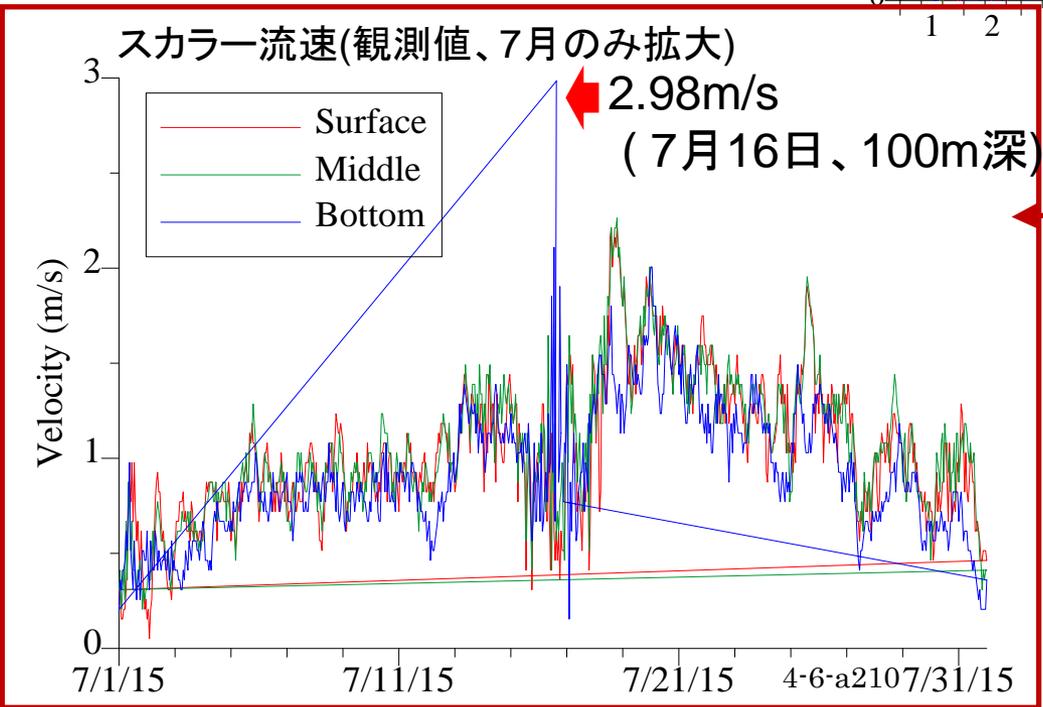
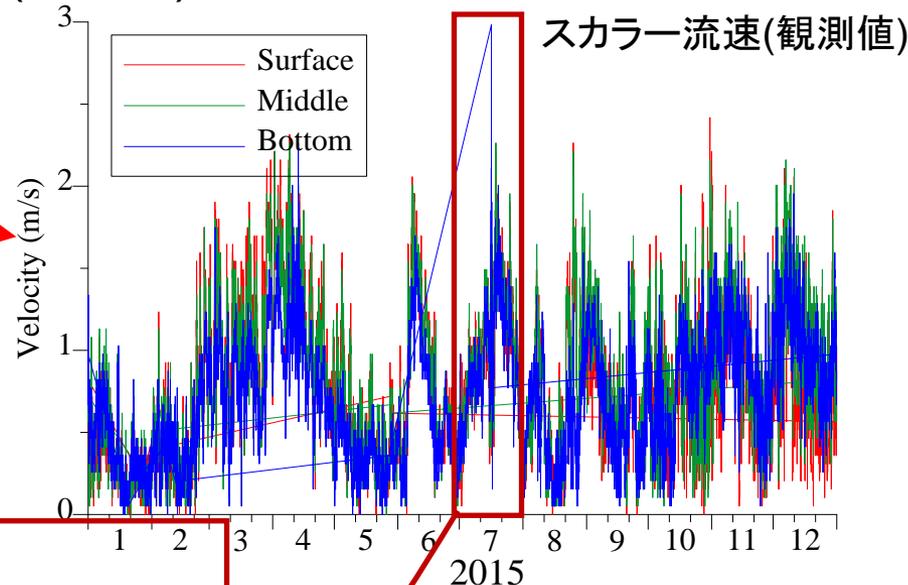
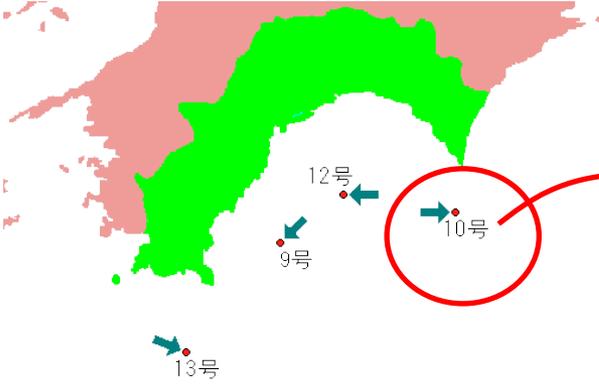
## ● 事例の蓄積

海域によって外力等の条件が異なるため、事例の積み重ねる。

- 福島県沖に加えて、長期流速観測と海洋モデルによる数値計算を行っている茨城沖、島根県沖を事例海域として検討する。
- さらに表層型浮魚礁での流速観測データ（高知沖と宮崎沖）を収集し、深海域での海洋モデルの予測値（但し、日平均化データ）との比較を行う。

# 事例の蓄積1(1)

データ例：高知県沖、黒潮牧場10号ブイ(2015年)



○数ヶ月周期で流速の変動が見られる  
→ 黒潮の影響

○最大流速は  
7月16日、100m深の  
2.98m/s

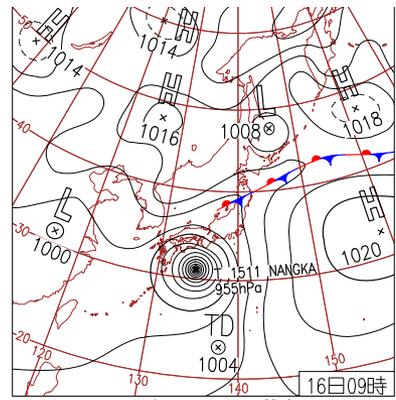
# 事例の蓄積1(2)

モデルとの比較 (外洋モデル：JCOPE2.1 vs 黒潮牧場10号ブイ)

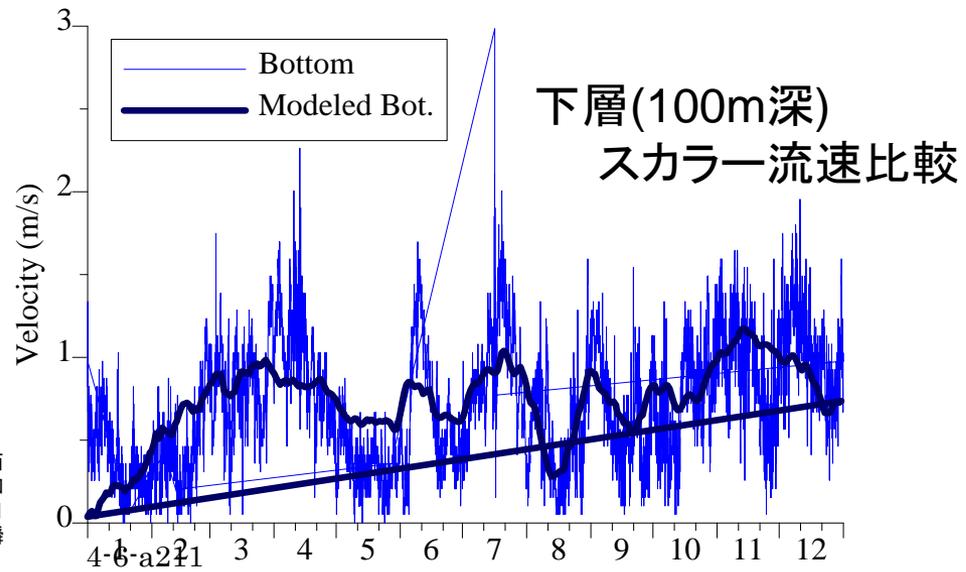
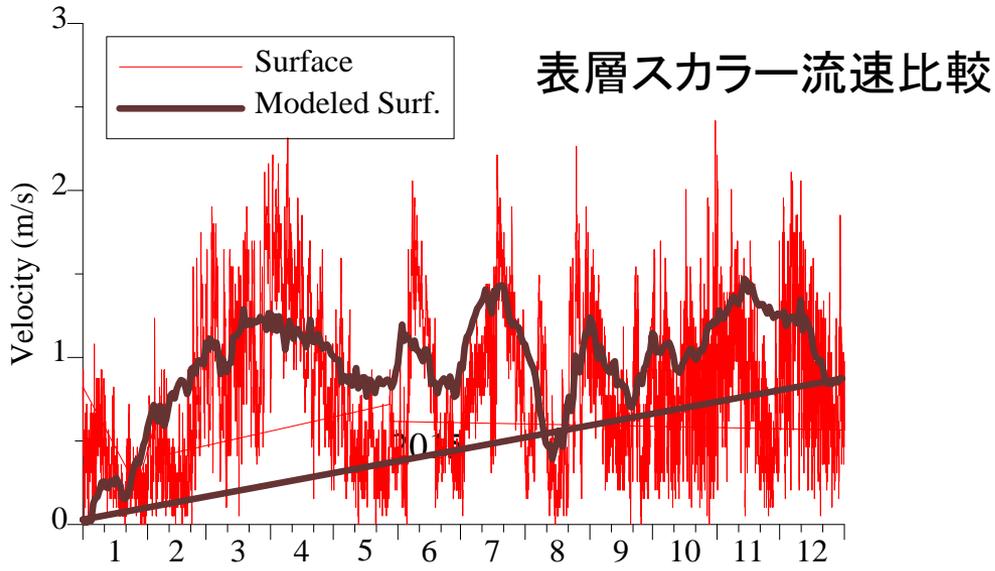
- 数ヶ月周期で  
流速の変動が見られる  
→ 黒潮の影響
- 平均的な流速場は  
非常に良く一致している
- 7月16日の100m深における  
最大流速2.98m/sは  
外洋モデルでは  
表現できていない  
(モデル上0.90m/s)



最大流速が発生した要因は定かではないが、台風通過に原因があるものと考えられる (外洋モデルでは表現不可能)



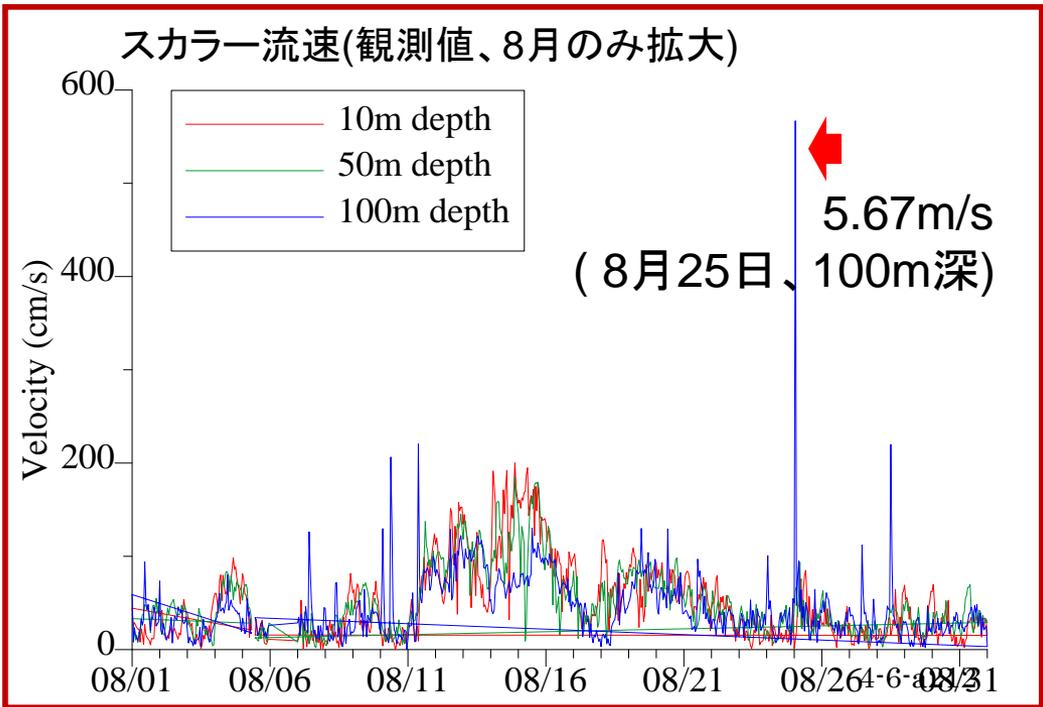
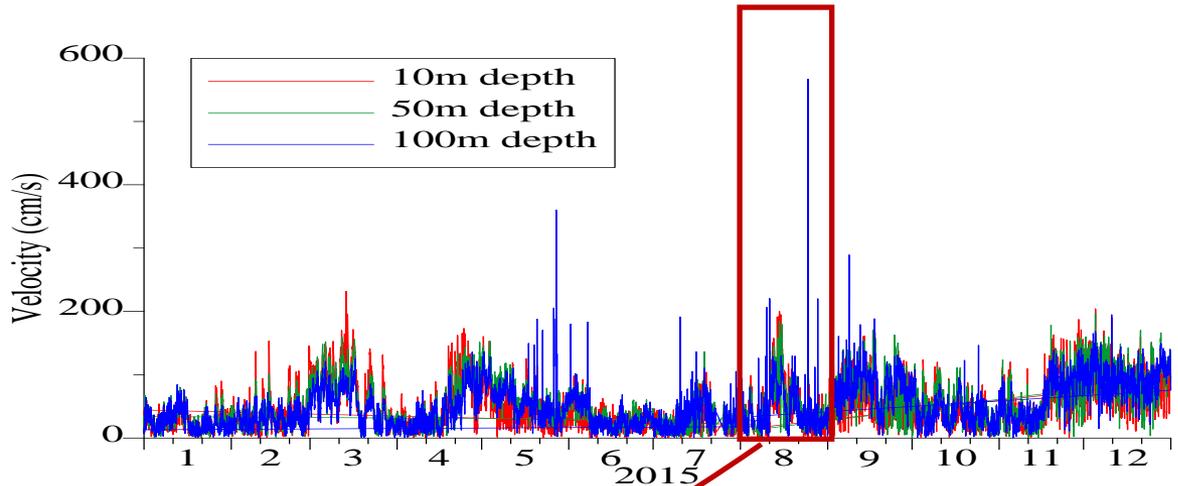
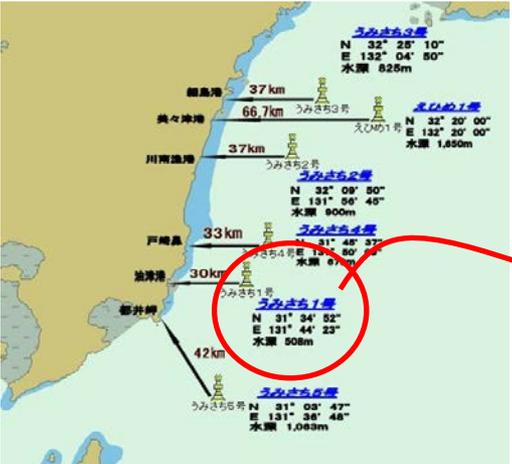
16日(木)四国を中心に大荒れ  
台風第11号が四国上陸。湿った気流で西～北日本の各地で非常に激しい雨。高知県魚梁瀬87.5mm/1h、奈良県上北山で日降水量521.5mm、高知県室戸岬で最大瞬間風速42.6m/s。



# 事例の蓄積2 (1)

データ例：宮崎県沖、うみさち1号(2015年)

スカラー流速(観測値)

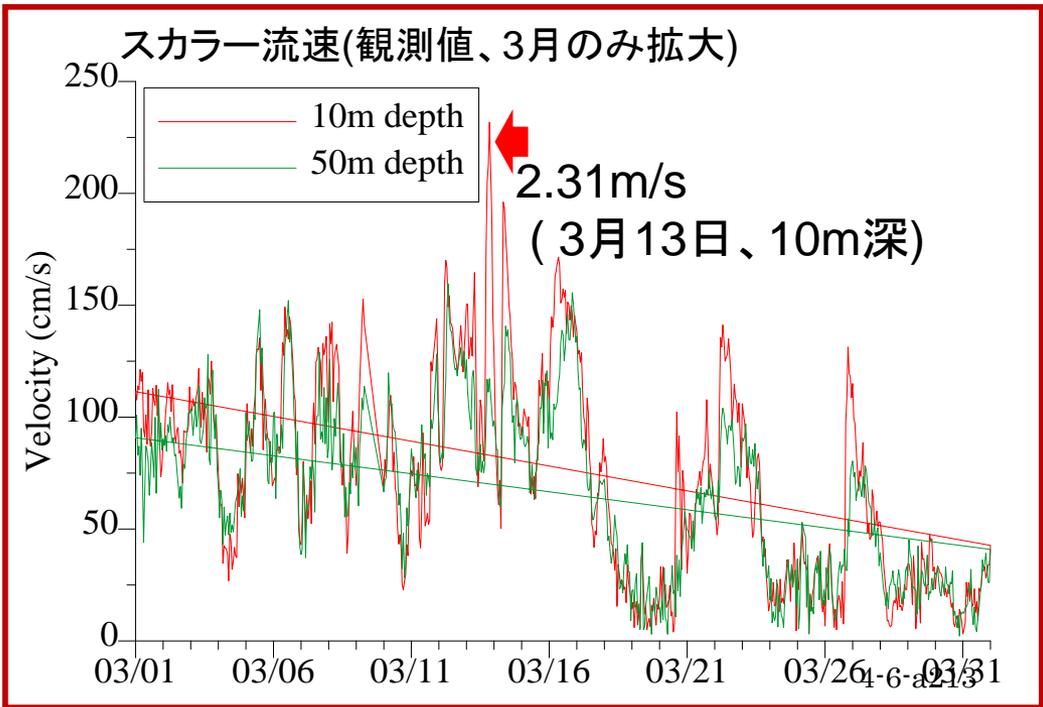
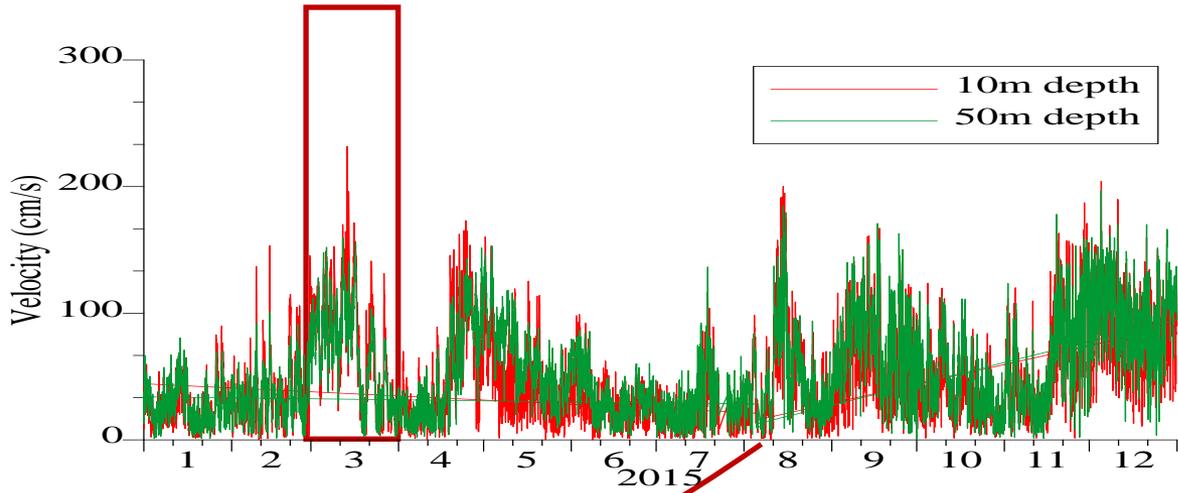
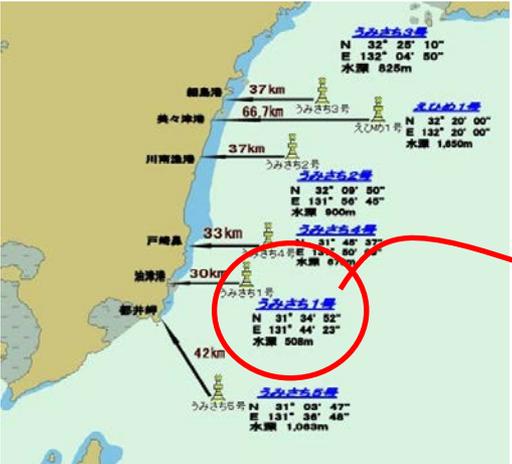


- 数ヶ月周期で流速の変動が見られる  
→ 黒潮の影響
- 最大流速は8月25日(台風直撃時)、100m深でありえない流速値5.67m/sが記録(浮魚礁の動揺に伴う異常値と考えられる)  
**データの品質チェックが必要**

# 事例の蓄積2 (2)

データ例：宮崎県沖、うみさち1号(2015年, **100m深カット**)

スカラー流速(観測値)

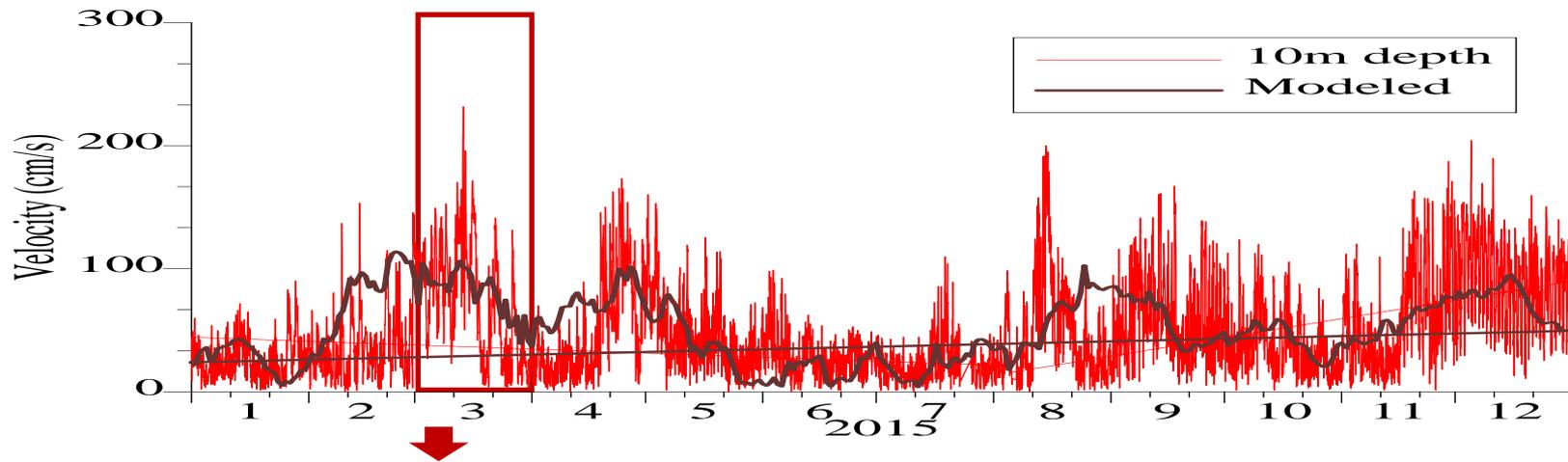


- 数ヶ月周期で流速が変動  
→ 黒潮の影響
- 最大流速は  
3月13日、10m深の2.31m/s  
→ ・気圧の谷通過  
・小潮期 (潮汐では無い)  
・風速のデータと関係が？  
(風向との関係も検証必要)

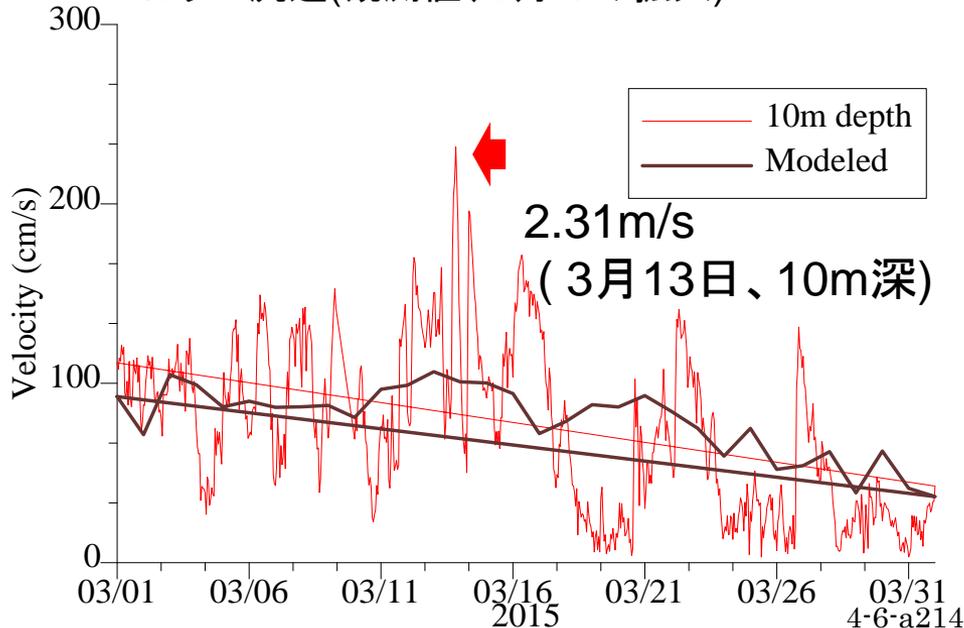
# 事例の蓄積2 (3)

モデルとの比較：JCOPE2.1 × 宮崎県沖(2015年, 10m深)

スカラー流速(観測値)



スカラー流速(観測値、8月のみ拡大)



○数ヶ月周期で流速の変動が見られる  
→ 黒潮の影響

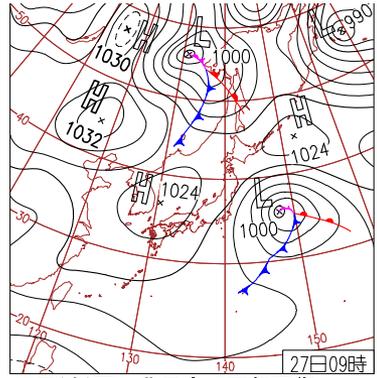
○最大流速は  
3月13日、10m深の2.31m/s  
→ ・モデル上は表現されていない

# 事例の蓄積 3 鹿島灘沖

モデルとの比較：外洋モデル(JCOPE2.1) vs 鹿島沖観測値 (2014-2015年)

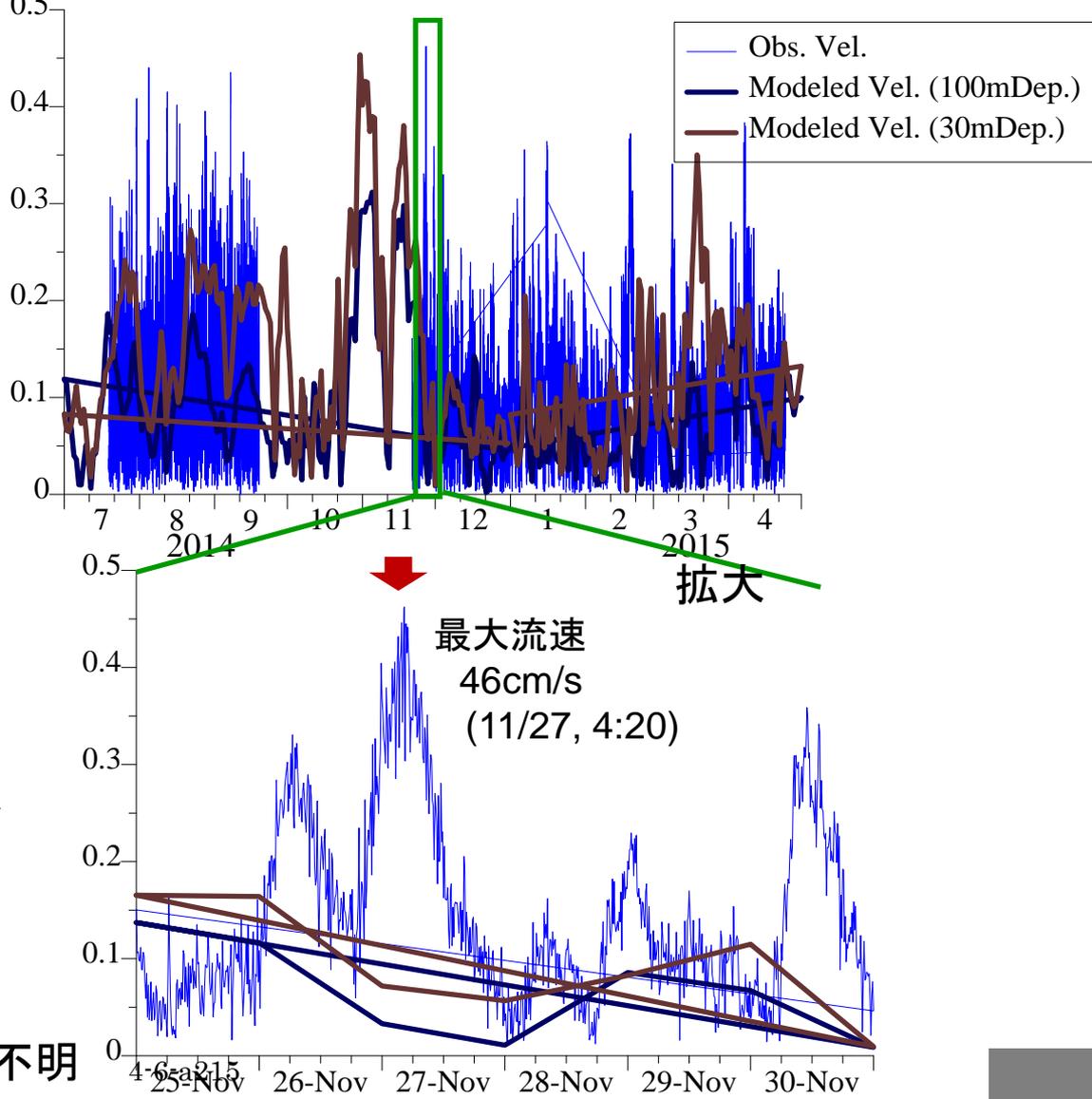
- 観測水深: 41m  
モデル上の水深: 154m  
水深に差異あり!

- 最大値 46cm/s  
(2014年11月27日)  
台風通過に伴うものと考えられる  
(モデル上は表現されていない)



27日(木)西～北日本は天気回復  
沖縄・奄美は気圧の谷の影響で曇りや雨、  
沖縄県与那国空港、石垣市伊原間で  
76mm/1h。西～北日本は、低気圧が去り  
一部雨の所も次第に晴れに。大阪市など  
でカエデ紅葉。

スカラー流速比較(モデル:水面下30, 100m、観測値:海底上1m)



- 2014年10月から11月にかけて  
モデル上では40cm/sを超える  
流速が現れるが、観測値は欠損で不明

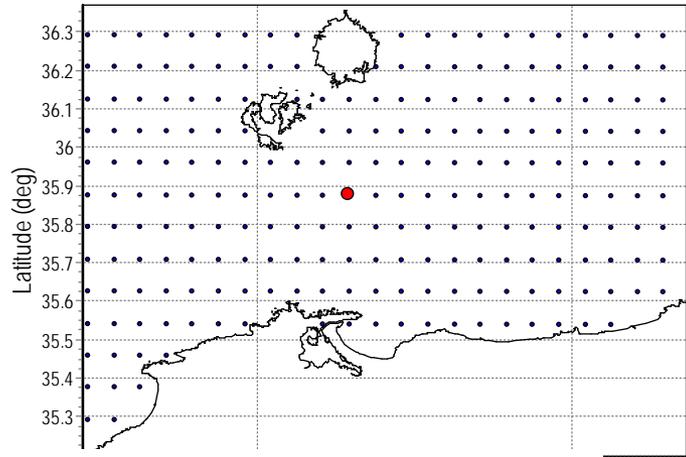
# 事例の蓄積 4 (1) 隠岐沖

2008/8/9~8/28      2014年度検討資料再検証

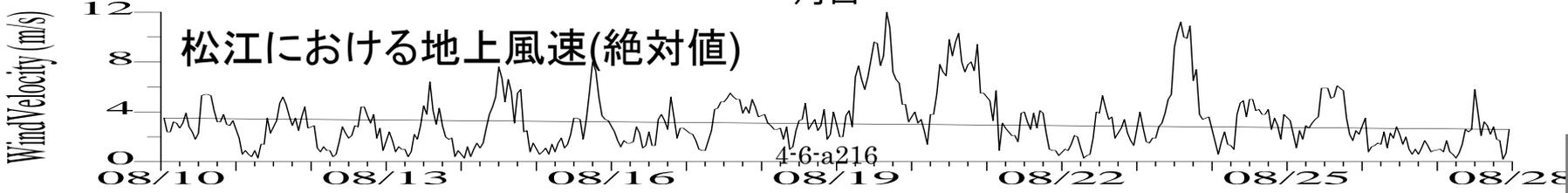
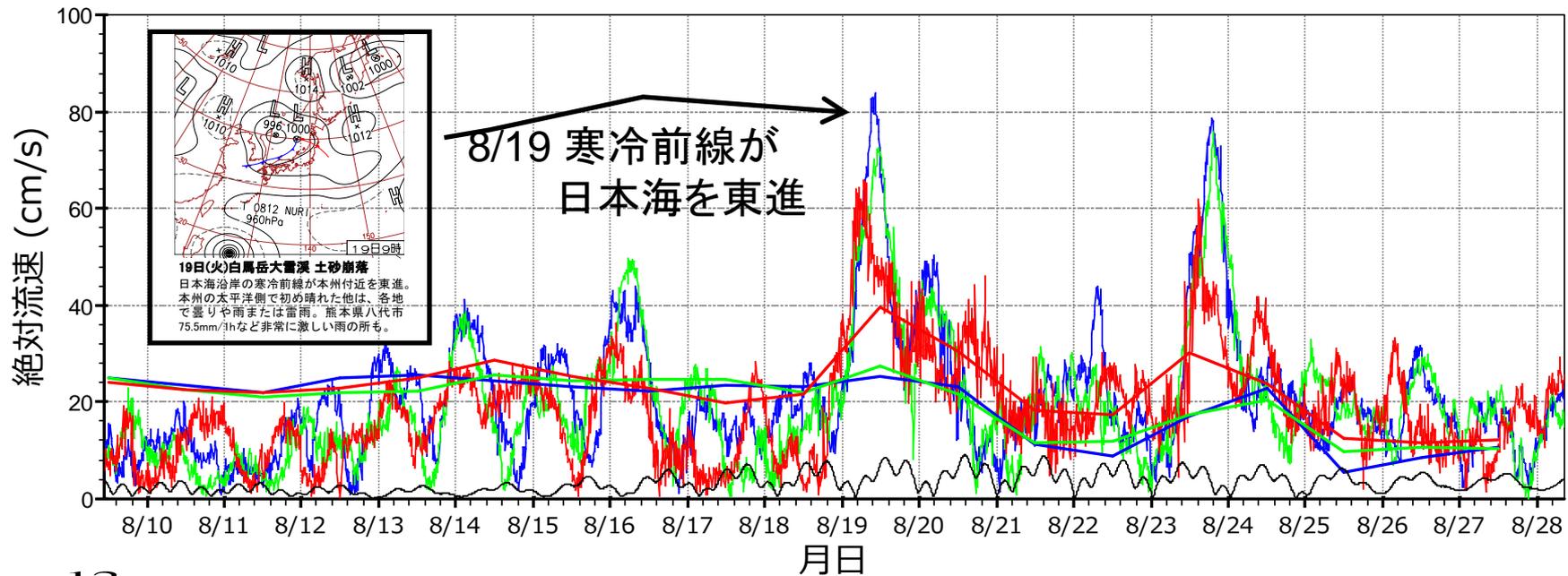
水深:約80m (FRA-JCOPE2での水深78.1m;  
**モデル上の水深とほぼ一致**)

ADCP:ADCPによる10分間隔、2分間平均流速  
 FJ:FRA-JCOPE2による日平均流速  
 nao:NAO.99Jbの分潮流の調和定数からの計算値

隠岐\_ADCP+FRA-JCOPE2+nao99bJ.sdf



— ADCP(z=10m) — ADCP(z=20m) — ADCP(z=74m) — FJ(z=10.2m) — FJ(z=19.9m) — FJ(z=74.6m) — nao



# 事例の蓄積 4 (2) 隠岐沖

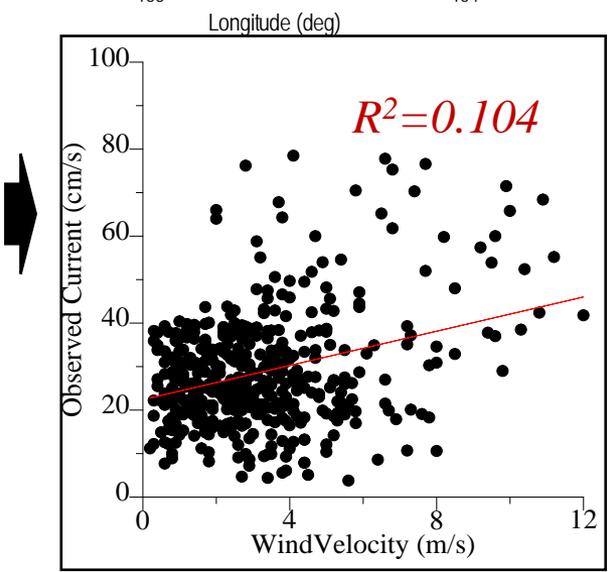
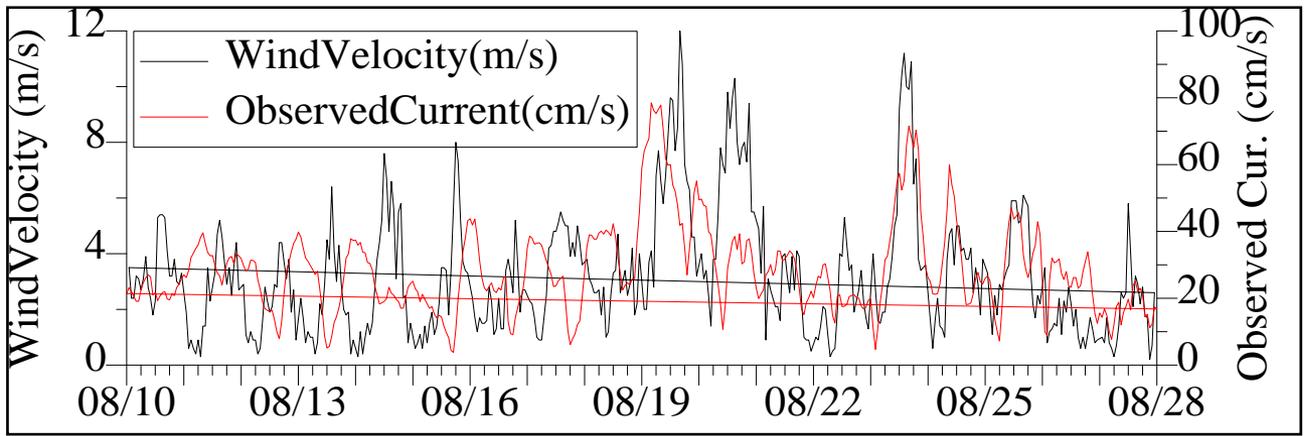
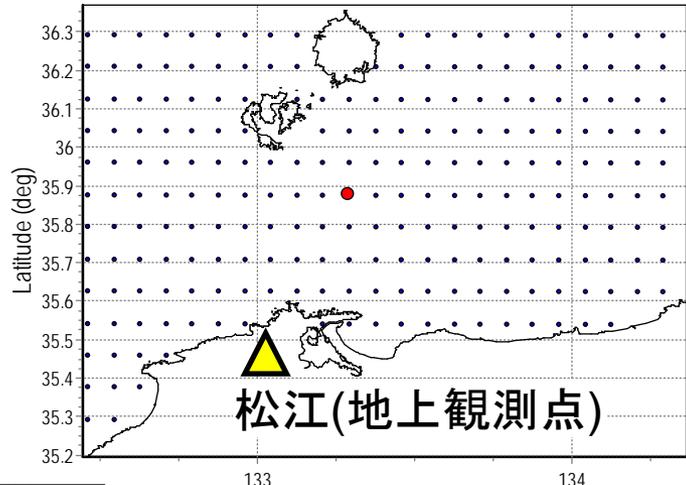
2008/8/9~8/28

2014年度検討資料再検証

水深:約80m

流速データ:ADCPによる10分間隔、2分間平均流速  
→ 1時間の平均流速(表面下およそ10m)

風速データ: 松江における地上観測(1時間)



- ・松江の風速(絶対値)だけでは説明できない
- ・他に考えられる要因:風向、気圧、他地点の気象データ、(潮流)、(外洋の流動)

# 事例の蓄積 4 (3) 隠岐沖

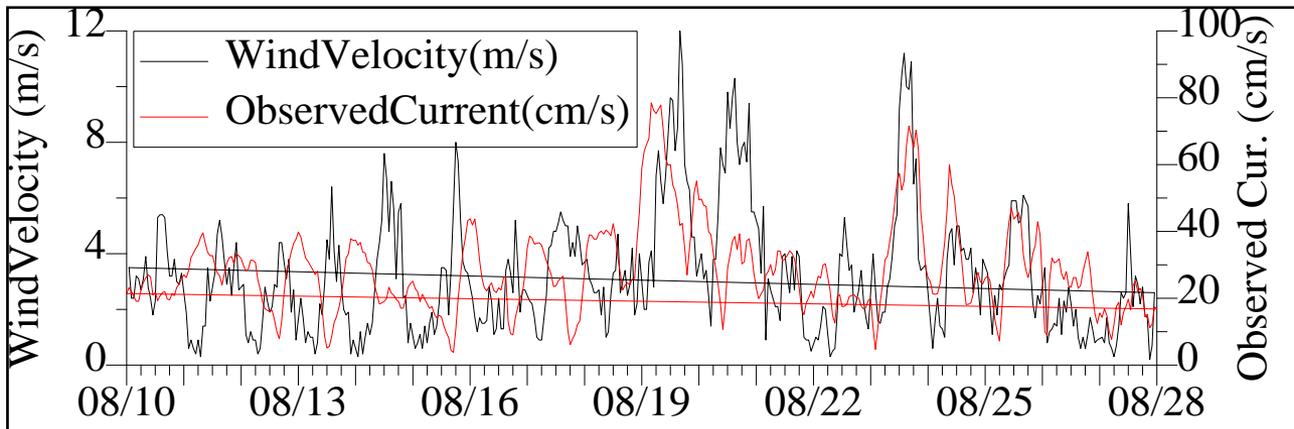
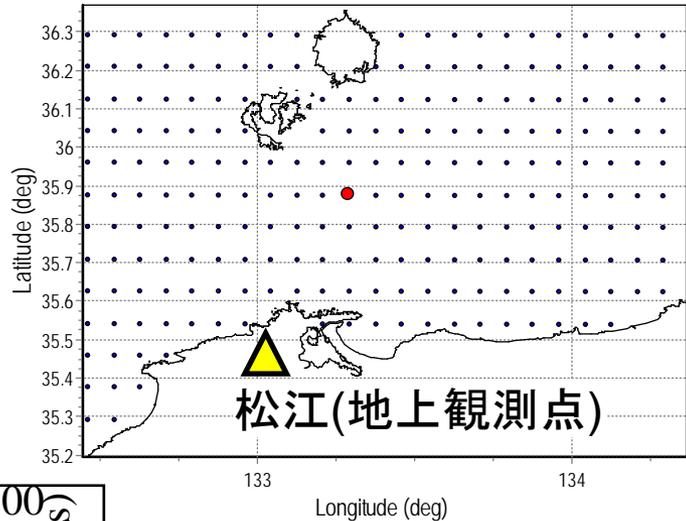
2008/8/9~8/28

2014年度検討資料再検証

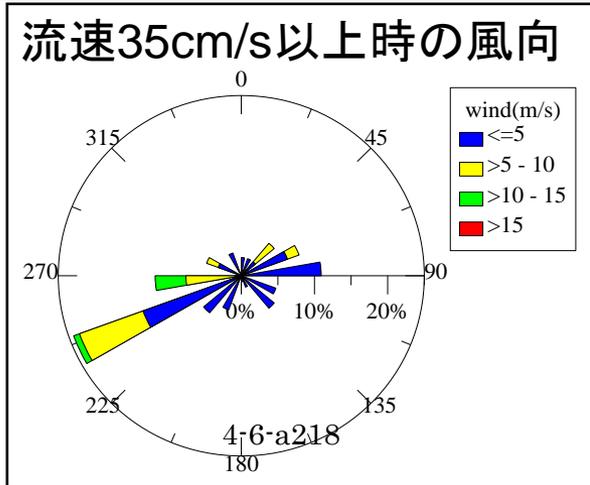
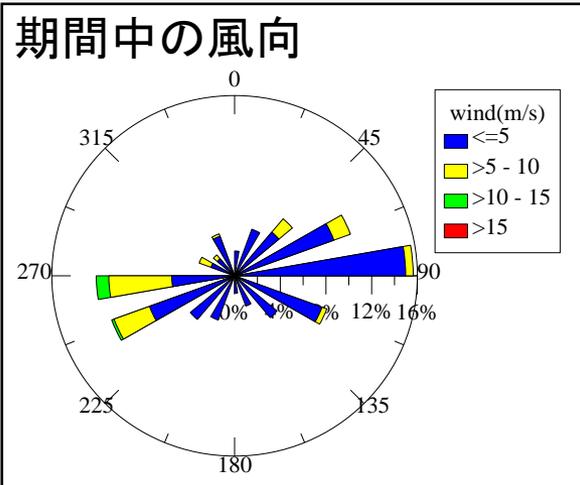
水深:約80m

流速データ:ADCPによる10分間隔、2分間平均流速  
→ 1時間の平均流速(表面下およそ10m)

風速データ: 松江における地上観測(1時間)



- ・観測時、風向は東西成分が卓越
- ・流速が大きいとき、西よりの風が強いことが多い

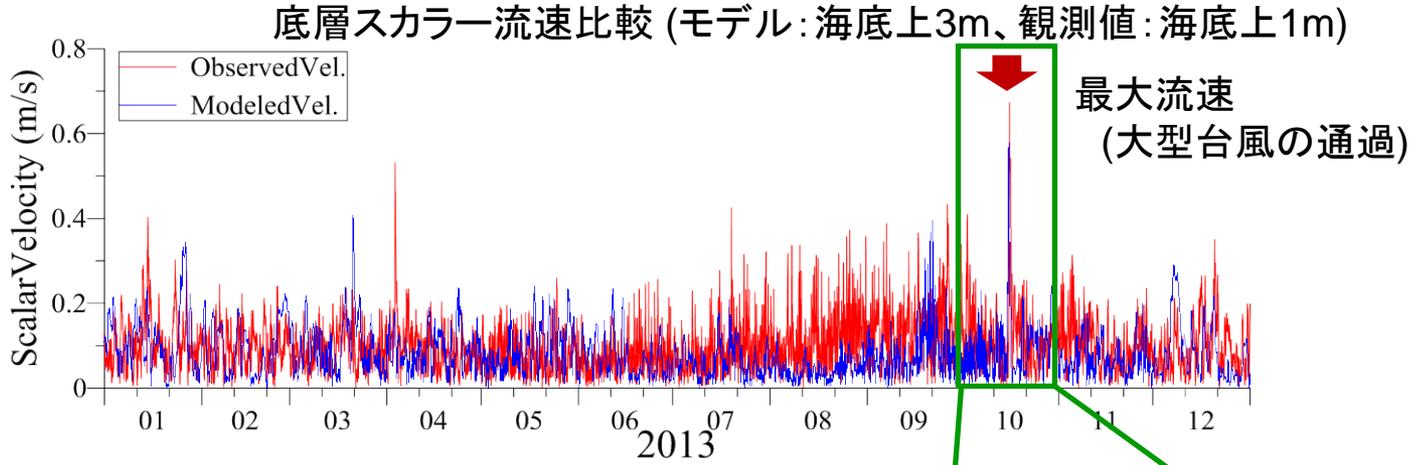
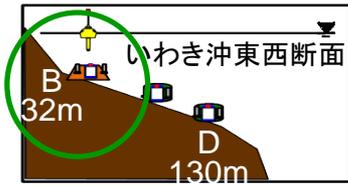


- ・今後やるとすれば、他の因子も入れた重回帰分析、ニューラルネットワーク、ディープラーニングなど

# 事例の蓄積 5

福島沖沿岸モデル × 観測値 (2013年) : モデル結果がよく一致する場合の検証

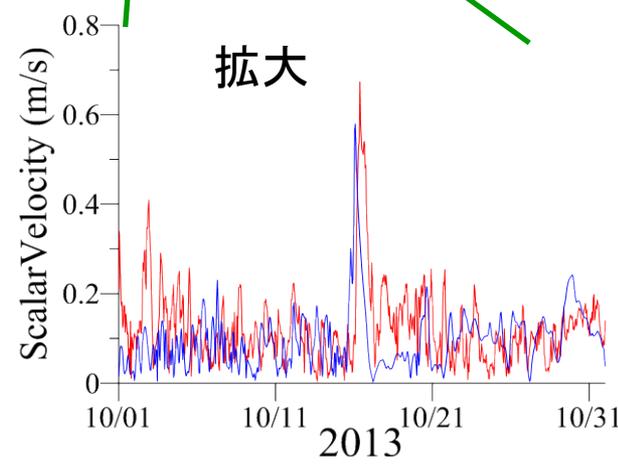
モデル結果比較, 岸側, Sta.B



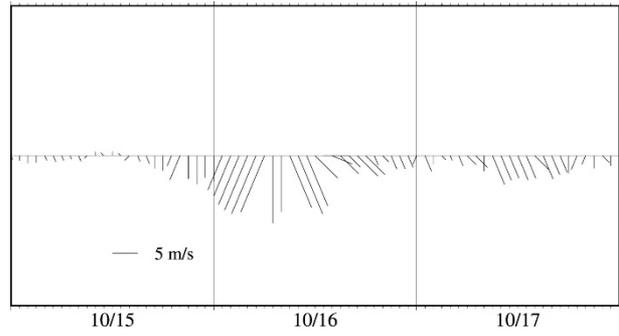
観測値 0.67m/s  
(2013/10/16 09:00)  
計算値 0.58m/s  
(2013/10/16 02:00)  
時間にずれがあるものの、  
ピーク値はよく一致



南向きの風(10m/s以上)で、  
観測値とモデル結果がよく  
一致



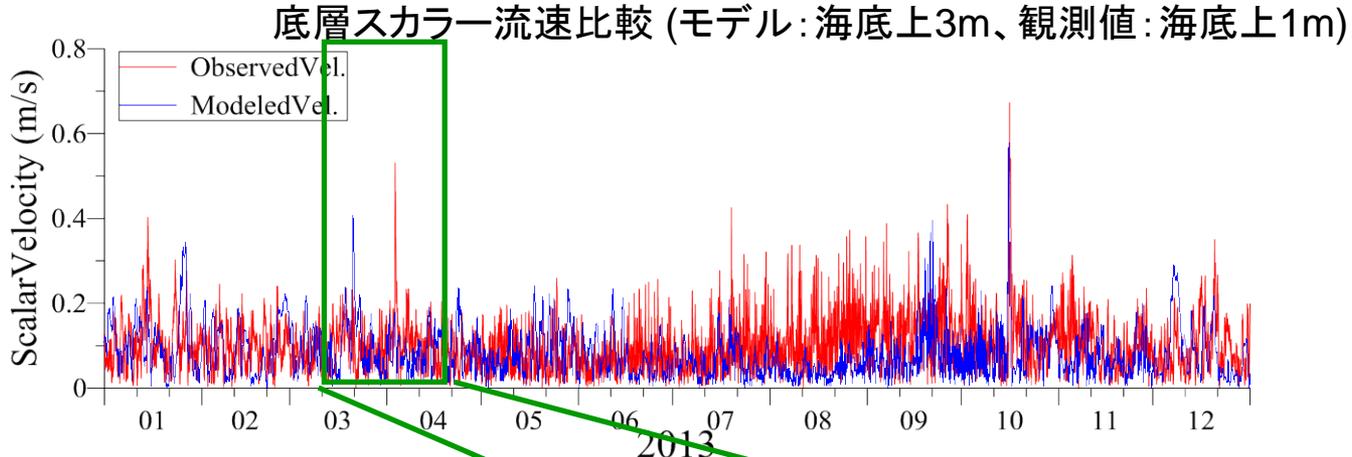
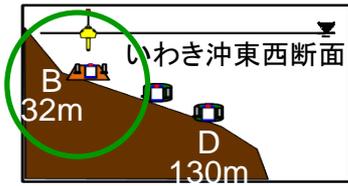
最大流速が発生した日時の  
風速ベクトル (小名浜)



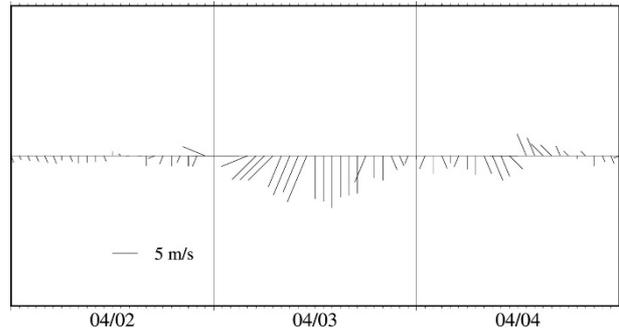
# 事例の蓄積6

福島沖沿岸モデル × 観測値 (2013年) : モデル結果と一致しない場合

モデル結果比較, 岸側, Sta.B



最大流速が発生した日時  
の風速ベクトル (小名浜)

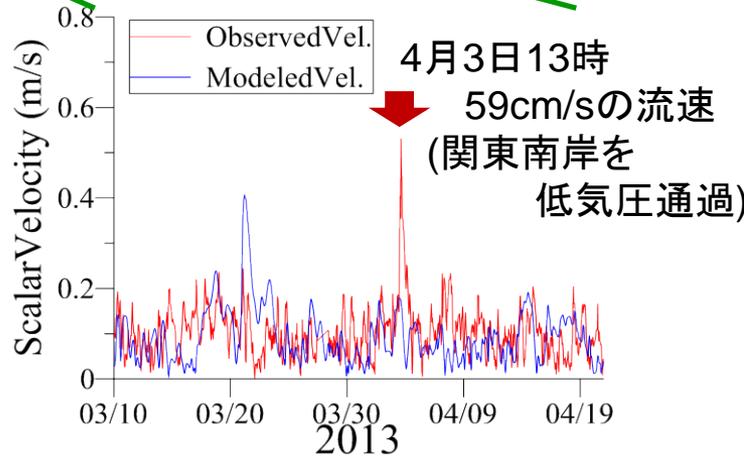


2013年4月3日に大  
きい流速 (59cm/s)  
が観測されたが、モ  
デルでは表現できて  
いない



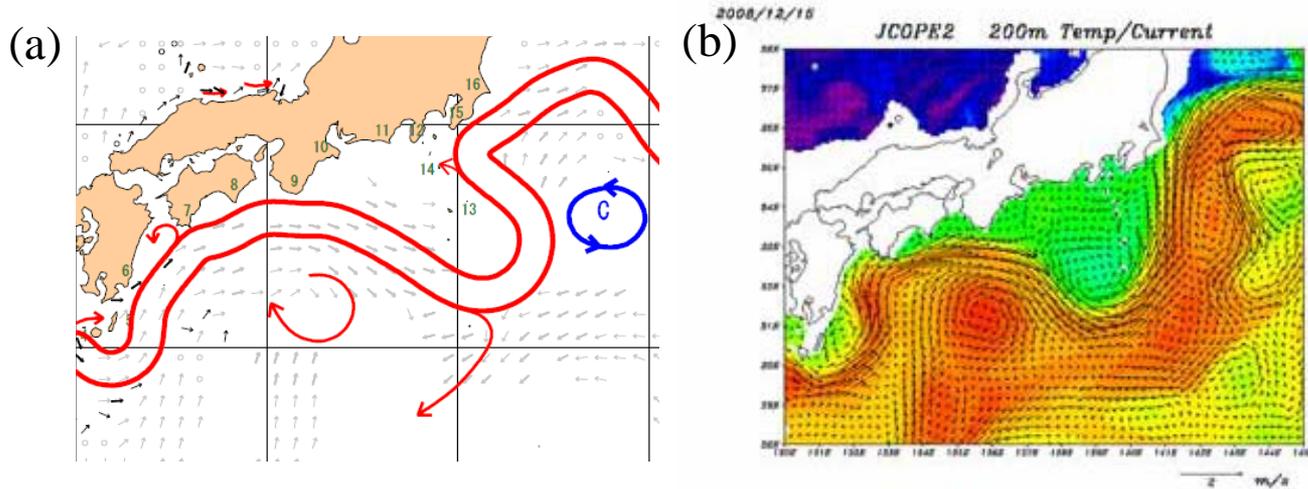
一致する場合と同じ  
く北風ではあるが、  
モデルで表現できず、  
原因は不明

拡大



# 海洋モデル(FRA-JCOPE等)で表現できるもの、できないもの

○黒潮流路等、外洋の平均的な流れはよく再現される

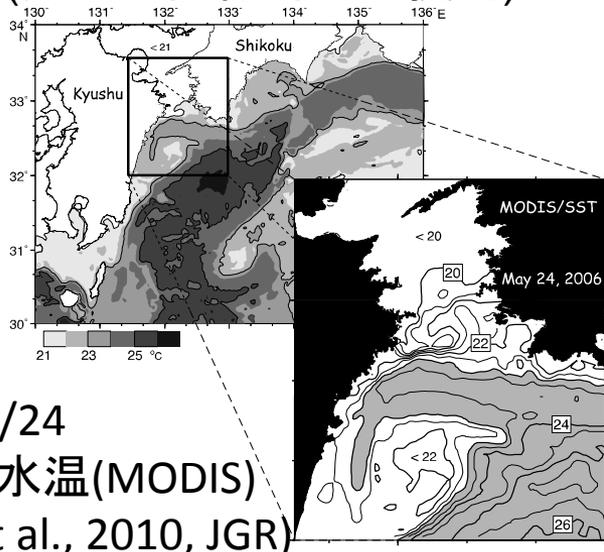


(社)日本深海技術協会  
会報2009年1号  
より抜粋

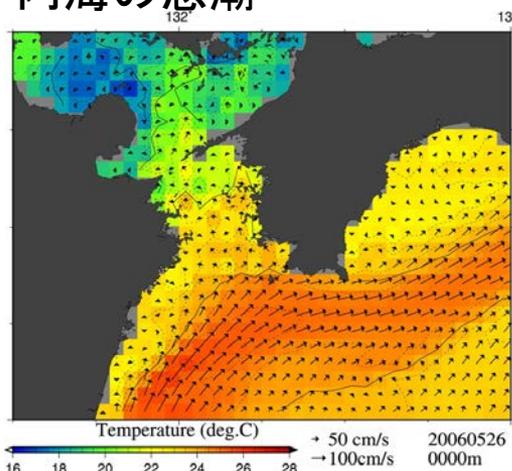
図3. 2008年12月15日の黒潮流路  
(a) 海洋速報(海上保安庁海洋情報部)  
(b) 図2bの状態を初期状態として予報した  
200m深の水温と流れ。

○局所的な変動は苦手

・解像度の不足に起因: (例) 黒潮前線波動  
(黒潮の前線周辺の擾乱) ≒ 瀬戸内海の急潮



2006/05/24  
表層水温(MODIS)  
(Isobe et al., 2010, JGR)



2006/05/24 表層水温  
・流速ベクトル(FRA-JCOPE)

・外力の不足に起因  
(例)低気圧の通過など、  
気象擾乱に伴うもの  
(JCOPEで与えている  
気象場は、1/2°メッ  
シュであり、低気圧の  
スケール(10数キロ)を  
表現できない)

# まとめ

## 事例の蓄積

- 1) 福島県沖に加えて、茨城県沖、島根県沖の事例を検討  
島根県沖の観測データでは地上風の風向との関係が示唆
- 2) 表層型浮魚礁での流速データを高知県沖および宮崎県沖で入手し、事例を検討
  - 非常に大きい流速(高知沖で2.9m/s、宮崎沖で5m/s超)が記録 ⇒ データの品質チェックや今後の解析の必要性が示唆
  - 外洋モデルと流速データとの比較 ⇒ 平均流速はよく一致するが、最大流速は表現されていない
  - 外洋モデルでは十分な精度での表現が難しい外力(風など)の検討が必要
- 3) 沿岸モデルの適用例として福島沖の事例を検討  
最大流速が再現できる場合とできない場合がある ⇒ 風向との関係は認められず、さらなる検証の必要性が示唆

## 今後の課題

- 1) 大水深域での最大流速の要因の把握  
表層型浮魚礁データが蓄積されている宮崎沖～高知沖周辺海域において、大きい流速(>2m/s)の発生メカニズム(発生の同時性や伝播方向、または局所性、周辺気象データとの関係など)の解析
- 2) 沿岸域での最大流速の要因の把握と波浪との関連性(同時性や向き)の検討  
観測データの蓄積と沿岸モデルが構築されている福島沖を対象に、
  - ① 気象擾乱通過時の流れの発生または伝播過程の解析
  - ② 極大波との同時性と向きの関係の検討
- 3) 流れに関する設計条件の決定に関する留意事項の整理

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第 2 回検討委員会

議 事 抄 録

日時：平成 28 年 12 月 12 日（月） 15:00～17:00

開催場所：エッサム神田ホール 1 号館 601 会議室

## 1.開会

### ◎事務局(漁村総研 伊藤部長):

ただ今より第 2 回委員会を始めさせていただきます。第 2 回ということで第 1 回委員会の報告から取りまとめの方針について、事務局で議論してきました。今日本日はその方向性についてご審議賜りたくよろしくお願いたします。

## 2.議事

### (1)平成 28 年度第 1 回委員会の指摘と対応

#### ◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 1:(省略)

#### ◎質問・意見:

特になし。

### (2)沈設魚礁の安定性の照査方法の検討について

#### ◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 3:(省略)

#### ◎質問・意見:

#### ◎田島委員:

従来法と提案法の比較について、その差異は  $H_{max}$  を使うことによるのか、式を変えたことによるのかわからない。従来法で  $H_{max}$  を使うとどうなるのか。

#### ◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

抗力係数  $CD$  が定常流での値と近いので、 $H_{max}$  を使ってもあまり変わらないと考えられる。ただし、高層魚礁のように  $CD$  が異なってくると  $H_{max}$  に変えた差異が出てくると思う。

#### ◎田島委員:

従来法との違いでどのように変化するのか確認すべきである。

◎事務局:(水工研 中山部長)

CD の変化で追跡できると思うが確認する。

◎大竹委員長:

H1/3 から Hmax に変えれば良いとも言えるのか?

◎事務局:(水工研 中山部長)

CD が変わるので、そうとも言えない。

◎田島委員:

そこを確認してほしい。

◎事務局:(水工研 中山部長)

確認する。流体力の評価としては安全側になると考えられる。

◎大竹委員長:

そこはもう少し事例が必要ではないか?

◎事務局:(水工研 中山部長)

大変だろうが、メーカーにも実験するよう働きかけている。

◎岡安委員:

p.21 の検証について、従来法の CD、CM、Cfmax は何を使っているか?

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

CD、CM は定常流の値を使っている。Cfmax は p.21 のとおり。

◎岡安委員:

ならば、従来法と提案法の比較と CD および CM と Cfmax の比較がごちゃ混ぜになっているのでは  
ないか。注意すべき。なお、今後提案法に切り替えるのか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

モリソン式と Cfmax 式両方を使えることとする。ただし、その際の CD、CM は KC 数の関数とする。

◎岡安委員:

だとすると、CFmax は、CD、CM をフィッティングさせたものにとらえてよいか?

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

そのとおり。

◎岡安委員:

非線形性がある Um の出し方は?

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

微小振幅波理論による。

◎岡安委員:

仕方ないと思うが、Um の二乗で流体力を算出するので誤差が大きくなることもある。そこも含めて安全率を検討すべき。例えば Hmax を使うなら安全率は 1 でも良いなど。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

魚礁の安全率は 2 以上が多く、Hmax を用いたからといって安全率が 1.2 未満になることは少ないと思う。

論点 1.①について

◎大竹委員長:

流体力算定に提案式を用いることで良いか。

◎田島委員:

良いが、Umax 算出する水深をどのように定義するか。底層の値を使っているか。

◎事務局:(水工研 中山部長)

その辺整理する。

◎岡安委員:

p.9 の波浪推算制度が悪い部分の原因は?

◎事務局:(国際気象 門 GL)

うねりが入ってきていることによる。

◎大竹委員長:

層積み、乱積みでは流体力をどのように決めるのか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

まとめて単位魚礁として考えるしかないと考える。層積みの方が不安定なので、そちらで考えることとしたい。Um は図心の値とする、

◎大竹委員長:

魚礁のトップとするか図心とするか、決め方を検討してほしい。

◎岡安委員:

流体力の算定式は提案式が良いが、Cfmax をどのように求めるか。KC 数が適当な範囲で収まるなら簡略化できるのではないか。また、高層魚礁とブロック魚礁は分けて考えるべきか検討してほしい。

## 論点 1.②について

◎田島委員:

固有振動数が揺動に効いてくる。周期についてももう少し検討すべきではないか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

今後の課題として検討する。

## (3)着底基質の安定質量算定式の検討について

◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 4:(省略)

◎質問・意見:

◎田島委員:

検討 3 にて、振動流の波形はどのような形になるか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

定常流を含む振動流となる。

◎田島委員:

φ2 では前傾する加速度が入らないのではないかと。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

p.4 に示す  $T_{ZP}$  で考慮することとなる。 $T_{ZP}$  が非対称な波形を考慮した周期となる。

◎田島委員:

$U_{min} > 0$  だと  $U_a$  をどのように決めるか。φ1 と φ3 だけで検討するのか。また、 $U_m$  と  $a$  は異なるが、これらを同じような式に入れ込むことに矛盾が生じないか。

◎大竹委員長:

実験式なので、何らかの適用範囲があるのではないかと。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

検討するが、一通り安定質量を説明はできている。

◎大竹委員長:

この方法で進めることで良いか。→岡安委員、田島委員合意。

(4)海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討について

◎事務局(水工研 杉松研究員):資料 5:(省略)

◎質問・意見:

◎大竹委員長:

海域ごとに流速データを入手することは可能か。

◎事務局:(水工研 杉松研究員)

数値解析と比較検証するなら 1 年間位のデータが必要だが、そのようなデータは手持ちのものしかない。

◎大竹委員長:

JCOPE で同化しているので、何らかのデータがあるのではないかと。

◎事務局:(水工研 杉松研究員)

以上潮位のデータを国内全域で集めたことはあったようだが、流速は無い。

**◎岡安委員:**

今後どのように活用していくかが問題。リアルタイム予測か？設計に使うのか？設計に使うなら最大値や最大期待値が必要になるが計算自体はもう少し簡略化できると思う。

**◎事務局:(水工研 杉松研究員)**

後者になる。そのため、沿岸モデルをもう少し進めるべきと考える。

**◎田島委員:**

台風モデルは細かく考慮できるのか。

**◎事務局:(水工研 杉松研究員)**

細かくは考慮できない。あくまで平均風速としての考慮となる。

### 3.閉会

**◎事務局(漁村総研 伊藤部長)**

以上いただいた意見を基に検討を進める。委員の皆様におかれては、今後もよろしくご指導を賜りたい。

## 第3回検討委員会での論点

### 1. 沈設魚礁の安全性の照査方法の検討

- 不規則波の波群中での最大流体力の算定方法について、提案方法 ( $K_{C2}$  を用いた  $C_{Fmax}$  の式) も含めて追加すべき検討事項や課題はないか。
- 被災事例の検証手法や結果の解釈に問題はないか。従来法の問題点を明らかにするために対象波のみを  $H_{1/3} \Rightarrow H_{max}$  に変更する方法 (修正法a) を検討したが、その方法と結果の解釈は妥当か。
- 砂質底上での沈設魚礁の安定性について、実験手法や結果の解釈に問題はないか。揚力の問題の解釈は妥当か。
- 流体力算定の提案式の妥当性について、揚力以外に検討すべき事項はあるか。
- 残された課題の整理は妥当か。追加すべき事項はないか。

### 2. 着定基質の安定質量算定式の検討

- 次年度検討すべき課題は妥当か。
- 追加で検討すべき課題はあるか。

### 3. 海洋モデルの利用による流れの設計条件の決定に関する検討

- 事例の分析手法、結果の解釈に問題はないか。
- 今後の課題は適切か。加えて検討すべき事例等はないか。

平成 28 年度

漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

第 3 回検討委員会議事抄録

平成 28 年度

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会  
議 事 抄 録

日時：平成 29 年 2 月 20 日（月） 10:00～12:00

開催場所：エッサム神田ホール 1 号館 601 会議室

## 1.開会

### ◎事務局(漁村総研 伊藤部長):

ただ今より第 3 回委員会を始めさせていただきます。今回は新任の水産庁整備課課長山本様がお見えですのでご挨拶をお願いいたします。

### ◎水産庁(山本整備課長):

本調査は 5 年計画の 4 年目となっており、沈設魚礁や着底基質の挙動が明らかとなってきました。来年度末の成果を基に設計図書の改訂等を行い、周知を図る考えです。次年度から時期の漁港漁場整備長期計画が始まりますが、資源水準が厳しいなか、漁場整備はますます重要となってきます。今年度最後の委員会ということで、来年度を見据えてまとめてください。

### ◎大竹委員長:

海の中のものは、他の機関はあまり扱っていない。水深-40～50m のことは、40 年以上研究が進められてきても、やはり課題が多く思いが先行している。難しい問題を扱っていることを認識してまとめたいと考えます。

## 2.議事

### (1)平成 28 年度第 2 回委員会の指摘と対応

◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 1:(省略)

◎質問・意見:

特になし。

### (2)沈設魚礁の安定性の照査方法の検討について

◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 2、資料 2-1:(省略)

◎質問・意見:

◎田島委員:

P17、P.19 の  $C_{fmax}$  は実験値か。 $C_{fmax}$  は合わせこんで、モリソン式の  $CD$ 、 $CM$  は合わせこんでいないなら、比較としてフェアではない。モリソン式の  $CD$ 、 $CM$  は実験値か。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

規則波実験による実験値である。不規則波実験で実際の流速波形を用いてモリソン式で計算した最大流体力は過小評価となったのに対して、今回は流速波形の情報がなくとも適用できる  $CF_{max}$  の式を用いて計算した。モリソン式で最大流体力を求めるためには流速波形の情報が必要であるが、その情報が得られていても、過小評価になるため、今回は適用しなかった。

◎田島委員:

$C_{fmax}$ 、モリソン式は併用とするか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

そう考えている。ただし、モリソン式は波群中の最大流体力を過小評価する可能性があり、最後のまとめに記載したように、何らかの補正が必要であると考えられるというのが今年度の結論である。

◎田島委員:

$H_{max}$  を使えばよいのではないか。また、p.17 では両手法に安全率の差が小さいが、p.19 では大きいのはなぜか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

p.19 に示すように、それでも安全率が 1 を超えてしまう。P.17、P.19 の安全率の差は用いている  $CD$  の違いによる。

◎田島委員:

$CM=2.0$  の根拠は。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

円柱の場合の理論値である。抗力に対して慣性力は相対的に重要でないとは当時考えたものと推察される。

◎岡安委員:

資料-2.1、P.4 のグラフで  $CM$  が  $KC$  数とともに大きくなっている。しかし、 $KC$  数が大きくなって定常

流に近くなると CM はゼロに漸近するのではないか。その状況で CD は KC 数とともに下がっているが、これでよいのか。

**◎事務局:(水工研 川俣 G 長)**

他の実験でもそうになっていない。

**◎岡安委員:**

CD、CM は流速の履歴で変化する。これを考えると、 $C_{fmax}$  を KC 数の関数とするのは問題ないだろう。

**◎大竹委員長:**

P.17、P.19 の論点は二つある。①被災時の最大波による現象を再現できているか、②流体力計算方法の確認、である。波の設定は良いか。

**◎田島委員:**

A 工区は合田のモデル、B 工区は  $H1/3 \times 1.8$  を使っている。

**◎大竹委員長:**

P.16 の KC1、KC2 両方とも大きくずれているのはなぜか。もう少し大きなスケールの実験が必要と感じた。

**◎事務局:(水工研 川俣 G 長)**

回帰式が示すように、実験値と推定値との比は一定で、誤差は全体的に  $\pm 20\%$  の範囲に入っており、許容範囲と考える。

**◎田島委員:**

KC1、KC2 はそれぞれでフィッティングしているが、規則波なら同じ値となり、非線形効果が出ると変化が出てくるという考えで良いか。

**◎事務局:(水工研 川俣 G 長)**

規則波実験で得られた KC 数と  $C_{fmax}$  との関係式を用いており、KC1 と KC2 でフィッティングしている訳ではない。

**◎田島委員:**

P.16 の  $U_{max}$ 、 $U_{min}$  をつかって KC1、KC2 を定義しているが、その  $U_{max}$ 、 $U_{min}$  の定義は。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

Umax は時系列中最大、Umin はその直前の最小値である。

◎田島委員:

その Umax、Umin を不規則波としてどのように求めるのか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

そこは今後の課題である。

◎田島委員:

P.16 で KC1 は過小評価側となっているが、P.17、P.19 で KC1 を使っているのはなぜか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

説明したように、波動流速の非対称性がわからないので KC1 を使わざるを得なかった。

◎大竹委員長:

計算に用いる各種パラメータの性格と使い方を丁寧かつ明確化すること。

◎田島委員:

P.26 のグラフは実測か。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

そのとおり。

◎岡安委員:

模型と床板の状況はどうなっているか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

床板はスポンジとして、模型と軽く触れている。

◎田島委員:

経験上、わずかでも触れると反力が発生すると思う。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

それなので、柔らかいスポンジを使用した。

◎大竹委員長:

魚礁は様々な形があるが、揚力をどのように組み込むのか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

揚力は一般には揚力係数で評価されているが、もう少し実用的な観点から、例えば図に示したように水平力との比率が  $U_{max}$  との関数になることから、無次元数によってのその比を評価するといった簡便な方法で考える方がよいと考えている。

◎田島委員:

揚力が正負両方の値を持つことに違和感がある。モーメントを拾っていないか。

◎岡安委員:

振動流場なら、揚力は流れが左右どちらから来ても正の値となるはず。

◎大竹委員長:

実験データを確認するとともに、もう少し詳細に提示すること。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

結果を精査する。

◎山本課長:

揚力がこのように大きくなると、施設の安定性が非常に心配になる。

(3)着底基質の安定質量算定式の検討について

◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 3:(省略)

◎質問・意見:

◎田島委員:

P.11 の  $U_a$  をどのように設定するか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

今後の課題である。

◎大竹委員長:

設計時の設定としては波の場で良いか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

津軽海峡、瀬戸内海のような潮流が卓越する場もある。

◎大竹委員長:

他の現地検証は行う予定があるか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

北海道の日本海沖で行う計画がある。

#### (4)海洋モデルの利用による流れに関する設計条件の検討について

◎事務局(水工研 川俣 G 長):資料 4:(省略)

◎質問・意見:

◎大竹委員長:

前回委員会で岡安委員が指摘した海洋モデルと沿岸モデルの適用について、何か回答はあるか。

◎事務局:(水工研 川俣 G 長)

沿岸モデルは精度面で問題を小さくできるが、外洋のモデルは表現できない部分が多々ある。それを風で表現できないか考えている。

◎大竹委員長:

設計にどう反映させるかが非常に難しい。

◎不動専門官:

水産庁としては、海洋モデルの活用については次年度末までの結論にこだわらない。

### 3.閉会

◎大竹委員長:

沈設魚礁の検討部分で不足したデータがあったことも勘案して、各委員に改めて指摘部分を説明し、その指導を反映させて取りまとめること。また、委員は今回の委員会で言いそびれたことがあったら事務局にメールしてください。

**◎事務局(漁村総研 伊藤部長)**

以上いただいた意見を基に検討を進める。委員の皆様におかれては、今後もよろしくご指導を賜りたい。

漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査漁場の施設の設計手法高度化技術検討委員会

平成 28 年度第 3 回委員会の指摘と対応（案）

指摘者	指摘事項	対応
岡安委員	<p>【(2) 沈設魚礁の安定性の照査方法の検討について】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>資料-2. 1、P. 4 のグラフで CM が KC 数とともに大きくなっている。しかし、KC 数が大きくなって定常流に近くなると CM はゼロに漸近するのではないか。その状況で CD は KC 数とともに下がっているが、これでよいのか。</li> </ul>	他の部材（例えば、円柱や平板）でも CM は KC 数が大きい領域でも一定値に漸近せず KC 数の増加に伴い増加する傾向が示されており、特異な結果ではないと考えている。
田島委員	<p>【(2) 沈設魚礁の安定性の照査方法の検討について】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>P. 16 の <math>U_{max}</math>、<math>U_{min}</math> をつかって KC1、KC2 を定義しているが、その <math>U_{max}</math>、<math>U_{min}</math> をどのようにもとめるか</li> </ul>	今後の課題として検討する。
大竹委員長	<p>【(2) 沈設魚礁の安定性の照査方法の検討について】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>計算に用いる各種パラメータの性格と使い方を丁寧かつ明確化すること。</li> </ul>	
岡安委員 田島委員	<p>【(2) 沈設魚礁の安定性の照査方法の検討について】</p> <p>揚力が正負両方の値を持つことに違和感がある。モーメントを拾っていないか。振動流場なら、揚力は流れが左右どちらから来ても正の値となるはず。</p>	追加資料で測定値をチェックした結果を報告する。
田島委員	<p>【(3) 着底基質の安定質量算定式の検討について】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>P. 11 の <math>U_a</math> をどのように設定するか。</li> </ul>	今後の課題として検討する。
大竹委員長	<p>【全体について】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>沈設魚礁の検討部分で不足したデータがあったことも勘案して、各委員に改めて指摘部分を説明し、その指導を反映させて取りまとめること。</li> </ul>	指摘事項に対する説明も含めて報告書にとりまとめて報告する。



#### 4.6.2 中層浮魚礁の流出軽減技術検討委員会

##### (1) 委員の選定

的確かつ効率的な技術的助言・指導を得て研究成果の向上を実現するため、平成28年度の検討項目を踏まえ、以下の委員を選定した。

##### ●委員会メンバー

	氏名	所属・役職
委員	上北 征男	福井県立大学名誉教授
〃	大竹 臣哉	福井県立大学海洋生物資源学部 教授
〃	横山 純	長崎県水産部 参事監

##### (2) 検討委員会の開催

###### ・第1回検討委員会

日時：平成28年7月19日（火） 14:30～17:00

場所：(一社)マリノフォーラム 21 会議室

###### ・第2回検討委員会

日時：平成28年11月22日（火） 13:30～16:00

場所：(一社)マリノフォーラム 21 会議室

###### ・第3回検討委員会

日時：平成29年2月17日（金） 13:30～16:00

場所：(一社)マリノフォーラム 21 会議室

##### (3) 委員会資料

委員会資料は、以降にまとめて添付した。

平成 28 年度水産基盤整備調査委託事業  
「漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査」

## 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討

### 実施計画書（案）

平成 28 年 7 月

一般社団法人マリノフォーラム 2 1

## 目次

1. 調査目的	1
2. 調査概要（2か年全体計画）	1
3. 28年度の調査内容	3
3.1 流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討	3
3.1.1 実海域試験	3
3.1.2 温湿度促進試験	7
3.1.3 加速劣化試験	7
3.2 流出軽減技術の検討	7
3.2.1 流出事故の検証	7
3.2.2 係留索の擦れ磨耗試験	8
3.3 既存中層浮魚礁の部材劣化試験	8
3.3.1 係留索	8
3.3.2 浮体	8
4. 検討委員会の設置	9
4.1 委員の構成	9
4.2 検討委員会の開催	9
5. その他	9
5.1 水産庁との協議	9
5.2 年度末報告会	9

1. 調査目的

中層浮魚礁は、水産基盤整備事業において平成13年度以降各地方自治体にてのべ342基（平成27年度末まで）が設置され、事業継続中である。一方で現在（平成27年度調査）までに流出事故としては14件の報告がある。

流出事故の原因は、係留索の経年劣化や波浪・潮流ではなく、人為的な要因であることが示唆されている。また、実証試験（平成25～27年度）で流出警報発信機を引上げて機器の機能や部材劣化などについて調査した結果、防水性や耐久性に課題が残されていることが示唆された。そこで、本事業では流出事故の防止・軽減を図ることと流出警報発信機の機能向上を目的として、流出軽減技術の検討と流出警報発信機の防水性・耐久性の検討を行うことを目的とする。

2. 調査概要（2か年全体計画）

【初年度：平成28年度】

- ① 流出警報発信機の防水性能・耐久性能の検討
  - ・環境促進試験：実機の温湿度促進試験、加速劣化試験を行う。
  - ・実海域試験：実機を実海域に設置し、防水性能・耐久性能を把握する。  
なお、設置した実機の回収は次年度（約1年経過後）とする。
- ② 流出軽減技術の検討
  - ・過去の流出事故に関する情報整理を行い、事故原因と有効な対策方法の検討を行う。
  - ・係留部材を対象としたデータ収集を行うとともに、必要な室内試験（摩耗試験、擦れ試験等）を行い、対策方法の効果を検討する。
- ③ 既存中層浮魚礁の部材劣化試験
  - ・設置後約7年と8年を経過して流出した中層浮魚礁の係留部の強度試験を実施し、残存強度の把握を行う。また、後者事故の流出警報発信機、礁体等の調査も行う。

【2年目：平成29年度】

- ① 流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討
  - 前年度に設置した流出警報発信機を回収して防水性・耐久性の検証を行う。
- ② 流出軽減技術の検討
  - 前年度に引き続き、流出事故に対する有効な対策方法の検討を行う。

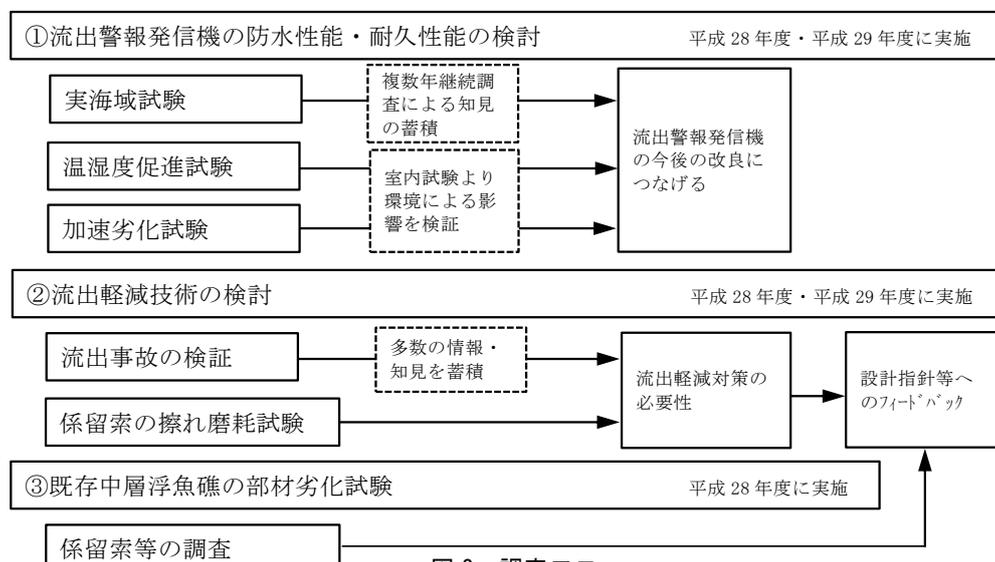


図2 調査フロー

表 2-1 平成 28 年度計画

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
計画準備	←→											
①流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討												
実機の実海域試験						設置	←→					
環境促進試験					←→							
② 流出軽減技術の検討				←→								
③既存中層浮魚礁の部材劣化試験				←→			→					
検討委員会				↔				↔			↔	
とりまとめ											←→	→

表 2-2 平成 29 年度計画

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
計画準備	←→											
①流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討												
実機の実海域試験	←	→				←	回収	分析	→			
③ 流出軽減技術の検討			←	→								
検討委員会			↔					↔			↔	
とりまとめ											←→	→

3. 28年度の調査内容

3.1 流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討

3.1.1 実海域試験

長崎県が平成25年度に設置した中層浮魚礁に流出警報発信機を設置し、次年度(約12ヶ月後)に回収して、防水性能・耐久性について調査・検討を行う。

(1) 調査対象

工事名 : 25 漁港浮第 3-2 号 対馬西部地区浮魚礁整備工事 (厳原阿連北西工区)

設置地区 : 対馬市厳原阿連北西 No1 (図 3-1)

礁体タイプ : 剛体タイプ (図 3-2)

設置水深 : 礁体ヘッド位置海面下 40m (設置位置の水深 84m)

設置時期 : 平成 26 年 3 月



図 3-1 中層浮魚礁設置地区

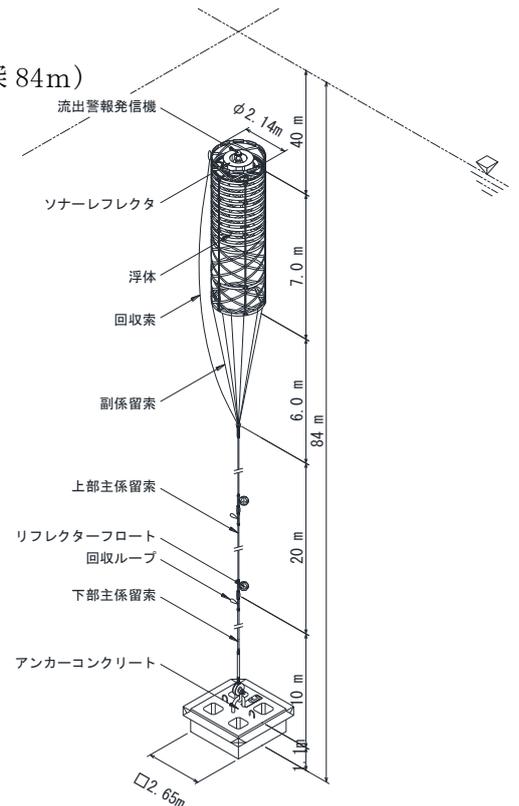


図 3-2 浮魚礁の概要

(2) 調査方法

【回収予定時期】 平成 29 年 9 月 (設置後約 12 か月)

表 3-1 流出警報発信機の調査予定時期

	供試体	設置時期	回収時期	経過月数
調査①	流出警報発信機 1 基 タイプ① (新型)	平成 28 年 9 月	平成 29 年 9 月	12 か月
調査②	流出警報発信機 1 基 タイプ② (従来改良型)	平成 28 年 9 月	平成 29 年 9 月	12 か月

【調査内容】

中層浮魚礁に配置された流出警報発信機を翌年潜水作業によって回収し、以下の内容について調査を実施する。

(ア) 流出警報発信機の作動確認

(イ) 流出警報発信機の付着物状況、外観状況

各部材の腐食状況や装置内の乾湿状況を把握する。把握項目と評価方法は図 3-3 および表 3-2 を参考とする。

タイプ①（新型）仕様書

環境条件	使用海域	イリジウム衛星通信圏内	
	外気温度	-20℃ ～ +60℃	
警報発信	浮上時	2 時間間隔 <sup>1)</sup>	
通信諸元	通信方式	イリジウム S B D 通信方式（衛星通信）	
	通信方向	浮上時は双方向可能 <sup>2)</sup> （魚礁⇄陸上局）	
	送信先アドレス数	最大 5 電子メールアドレス	
	送信データ	時間情報、緯度経度、電源電圧	
	通信アンテナ	基板型送受信アンテナ	
	浮上後の警報通信間隔	10 分,20 分,30 分,1 時間,2 時間,3 時間に、(電池の残量等により)変更可能 <sup>2)</sup>	
位置測定	測位状態	イリジウム衛星測位	単独 G P S 測位
	精度／測地系	通信品質による / WGS84	15m 2DRMS / WGS84
	分解能	1° / 100000 (約 1.1m)	1' / 10000 (約 0.18m)
	測位間隔	通信間隔に同期	
電源諸元	電源種類	アルカリ乾電池式	
	電池寿命	10 年 + (約 20 日) <sup>3)</sup>	
標体諸元	寸法	φ 550 × 545	
	空中重量	約 45kg	
	主要材質	SUS316 , ABS 樹脂	

- 1) 電源起動から 24 時間経過後に、海中において 2 時間間隔で警報発信を開始する。(海中からの警報は受信できない。)
- 2) 浮上後の警報発信間隔を遠隔変更することが可能である。
- 3) 設置 10 年後に浮上した場合(流出した場合)でも、警報発信間隔が 2 時間間隔の場合、20 日間警報発信できる電池容量とする。(通信間隔により残日数が異なる。)



表 3-2 各部材の把握項目と評価方法（参考：従来改良型の場合）

No.	内容		検査方法	評価方法
1	外観試験			経年変化の観察
1-1	レドーム			
		付着物確認	目視及び新品写真比較	異類他付着物の記載と付着程度の観察
		損傷確認	目視及び新品写真比較	損傷程度の記載
		塗装効果確認	目視及び新品写真比較	塗装剥がれ程度の観察
		浸水確認	目視及び新品写真比較	
1-2	ドラム1アッシー（下部筐体のこと）			本項目は試験ユニット1のみ実施
		付着物確認	目視及び新品写真比較	異類他付着物の記載と付着程度の観察
		損傷確認	目視及び新品写真比較	損傷程度の記載
		塗装効果確認	目視及び新品写真比較	塗装剥がれの程度観察
		腐食確認	目視及び新品写真比較	すきま腐食・孔食の有無確認
2	分解個体試験			高劣化予測主要部位の経年変化観察
2-1	ドラム1アッシーフランジ			
	洗浄前	腐食状況確認	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ボルト穴腐食確認	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ねじ山の損傷	目視及び新品写真比較	欠け、つぶれの程度観察
	洗浄後	腐食状況確認	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ボルト穴腐食確認	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ねじ山の損傷	目視及び新品写真比較	欠け、つぶれの程度観察
2-2	フランジ用ボルト			
	洗浄前	腐食状況確認	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ヘッド腐食確認(ネジ山)	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ねじ山の腐食損傷	目視及び新品写真比較	欠け、つぶれの程度観察
	洗浄後	腐食状況確認	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ヘッド腐食確認(ネジ山)	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		ねじ山の腐食損傷	目視及び新品写真比較	欠け、つぶれの程度観察
2-3	スクリュウキャップ（ボルト用キャップのこと）			
	洗浄前	付着物確認	目視及び新品写真比較	程度観察
		損傷状況確認	目視及び新品写真比較	程度観察
	洗浄後	付着物確認	目視及び新品写真比較	程度観察
		損傷状況確認	目視及び新品写真比較	程度観察
2-4	フロートスイッチ			
		腐食状況確認(φ'ド部)	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		腐食状況確認(φ'イ'部)	目視及び新品写真比較	腐食程度観察
		腐食状況確認(浮玉部)	目視及び新品写真比較	浸水含む観察 浮玉=マグネットケース
		腐食状況確認(浮玉部2)	目視及び新品写真比較	マグネットの腐食状況確認
		浮力確認	水没させ確認	浮いた場合には正常動作
	★	動作確認	テスター	リードスイッチに近づけて距離比較
3	その他の経年観察試験			
3-1	生物付着防止布袋			袋内部/袋外部の状況を確認
		外面付着物確認	目視及び新品写真比較	異類他付着物の記載と付着程度の観察
		内面付着物確認	目視及び新品写真比較	異類他付着物の記載と付着程度の観察
		効果確認	目視及び新品写真比較	効果を確認
3-1	パッキン			パッキンの性能確認
		劣化状況確認	目視及び新品写真比較	異類他付着物の記載と付着程度の観察
		外傷(キズ)確認	目視及び新品写真比較	キズ原因調査
	★	硬度確認	プレッシャーゲージ	新品当時との硬度比較
4	電気性能（試験ユニット1のみ）			
		電氣的総合動作	流出警報発信にて確認	警報発信にて確認
	★	電池残量調査	警報データにて確認	電圧確認
		機械的総合動作	流出警報発信にて確認	警報発信にて確認
		★数値比較可能		
5	総合評価報告			
	評価試験1～4の内容を比較写真とともにデータまとめる			
	浸水が確認された場合にはパッキンの性能調査を別途実施する。			
	前回（初回なら新品）評価との比較検証において、以後の経年変化予測を行う。			
	その他の検討試験（費用面度外視のとき）			
		腐食調査専門機関での調査		
		高速多点レーザ照査による表面凹凸調査		

### 3.1.2 温湿度促進試験

JIS C60068-2-38（環境試験方法-電気・電子）湿温度組合せ（サイクル）試験方法に準じた、(財)日本航路標識協会「海上標識用灯器 JANA01-2009」の規格認定試験を行い評価する。

試験状態は常温（20±15C）で行い、JIS C60068-2-38 の試験方法 6.3.1.1 を上限温度 55±2C に変更して行う。試験サイクル数は2サイクルとする。低温サブサイクルは2サイクル内の1サイクルにおいて適用する。その他については、JIS C60068-2-38 による。

**【判定基準】** ①機能（通信等）になんらかの異常がないこと  
②部品に損傷がないこと

### 3.1.3 加速劣化試験

実装状態で3方向（x, y, z）について、JIS C60068-2-6（環境試験方法-電気・電子・正弦波振動試験方法）に準じた(財)日本航路標識協会「海上標識用灯器 JANA01-2009」の規格認定試験を行い評価する。

振動数範囲は10～150Hz、加速度は（20m/s<sup>2</sup>）各軸のサイクル数は10回、時間は1回1時間15分とする。

**【判定基準】** ①機能（通信等）になんらかの異常がないこと  
②部品に損傷がないこと  
③ビス、ナット等にゆるみがないこと

## 3.2 流出軽減技術の検討

### 3.2.1 流出事故の検証

下記項目を調査し、適正な係留索の保護範囲を照査する。

表 3-3 調査項目

調査項目	調査場所	内容	調査方法
漁具対策の適用範囲	事業実施県	各地区の漁具対策の適用範囲を調査し、漁具対策の範囲を把握する。	アンケート
設置地区における主要な漁法	事業実施県	各地区の漁法を調査し、漁具対策の効果を把握する。	アンケート
流出した係留索の破断位置	—	破断位置を把握する。	資料整理
流出事故の実績	—	平成 26 年度までの実績表に平成 28 年度前期までの事故を追加整理する。	資料整理

### 3.2.2 係留索の擦れ磨耗試験

ロープメーカー各社から既存データの提供を受け、整理するとともに、新たな素材等、必要な試験がある場合は実施する。

また、切断されにくい中層浮魚礁の係留索構造(素材そのもの、あるいは水深帯による適切な素材等)について、検討する。

### 3.3 既存中層浮魚礁の部材劣化試験

#### 3.3.1 係留索

引張強度試験を JIS 規格に準じた方法<sup>注1</sup>で行い、回収された係留索の劣化状況について把握する。

(注1)：J I S 規格の方法

- a) 試料の調整 (有効長)：ロープの呼称太さの 30 倍以上とする。ただし、その長さが 0.5m を超えるものについては、0.5m にとどめることができる。
- b) 試験機のつかみの速度：ロープの規定引張強さの 50% までは 300mm/min 以内 とし、それ以上は 150mm/min 以内とする。

(注2)：残存強度の計算

係留索の低減率は年 10% のため、10 年後の残存強度  $T_q$  は下式で算出される。

$$T_q = T_M \times (1 - 0.1)^{10} \quad T_M: \text{初期引張強度}$$

表 3-4 劣化調査結果整理表の例

単位：kN

	中層浮魚礁 ○○号		
	上部主係留索 下部端末部	上部主係留索 直線部	上部主係留索 直線部
係留索の初期強度	○○○	○○○	○○○
10 年後の強度 (計算値)	○○○	○○○	○○○
回収した係留索の 引張強度測定結果	○○○	○○○	○○○
保持率*1 (%)	○○	○○	○○

※1：保持率 = 測定結果 / 初期強度 × 100 (%)

#### 3.3.2 浮体

浮体形状を保持している FRP 蛇籠の強度試験を「JIS K7017 繊維強化プラスチック 曲げ特性の求め方」に準じた方法で行う。

表 3-5 劣化調査結果整理表の例

試験片 NO.	幅 b (mm)	厚み h (mm)	荷重 F (N)	$F'' - F'$ $\Delta F$ (N)	曲げ強度 $\sigma_{fm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ弾性率 $E_f$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	○○○	○○○	○○○	○○○	○○○	○○○
2	○○○	○○○	○○○	○○○	○○○	○○○
3	○○○	○○○	○○○	○○○	○○○	○○○
基準値	----	----	----	----	≥ 400	≥ 1.4 × 10 <sup>4</sup>

#### 4. 検討委員会の設置

上記の調査を円滑かつ効率的に実施するために、学識経験者等からなる検討委員会を設置し、指導、助言を得ながら、事業の運営および議論の取りまとめを行う。

##### 4.1 委員の構成

検討委員は、専門分野の知見を有する下記3名の学識経験者とする。

上北征男 福井県立大学名誉教授

大竹臣哉 福井県立大学海洋生物資源学部 教授

横山 純 長崎県水産部 参事監

また、本事業内容に関連する下記の当会会員企業にも委員会へのオブザーバー参加を呼びかけるとともに、適宜必要な情報収集等を行う。

岡部株式会社

サカイオーベックス株式会社

株式会社テザック

東京製網繊維ロープ株式会社

##### 4.2 検討委員会の開催

平成28年度の検討委員会は、調査計画の指導・調整、中間報告検討、調査結果の総括を目的に計3回開催する。開催時期は、平成28年度：7月(計画検討)、11月(中間検討)、2月(年度末検討)とする。

#### 5. その他

##### 5.1 水産庁との協議

調査着手前、中間報告、調査取りまとめ時の計3回その他、必要に応じて適宜、水産庁増殖推進部研究指導課海洋技術室資源増殖技術班と協議を行う。

##### 5.2 年度末報告会

水産基盤整備調査委託事業の報告会で調査結果を発表し、有識者から意見を聞く。

平成 28 年度水産基盤整備調査委託事業  
「漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査」

## 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討

### 第 2 回検討委員会 資料

平成 28 年 11 月

一般社団法人マリノフォーラム 2 1

## 1. 調査目的

中層浮魚礁は、水産基盤整備事業において平成13年度以降各地方自治体にてのべ342基(平成27年度末まで)が設置され、事業継続中である。一方で現在(平成27年度調査)までに流出事故としては16件の報告がある。

流出事故の原因は、係留索の経年劣化や波浪・潮流ではなく、人為的な要因であることが示唆されている。また、実証試験(平成25～27年度)で流出警報発信機を引上げて機器の機能や部材劣化などについて調査した結果、防水性や耐久性に課題が残されていることが示唆された。そこで、本事業では流出事故の防止・軽減を図ることと流出警報発信機の機能向上を目的として、流出軽減技術の検討と流出警報発信機の防水性・耐久性の検討を行うことを目的とする。

## 2. 調査概要(今年度計画と進捗)

### 2.1 流出警報発信機の防水性能・耐久性能の検討

- ・環境促進試験：実機の温湿度促進試験、加速劣化試験を行う。→加圧試験に変更し、行った。
- ・実海域試験：実機を実海域に設置し、防水性能・耐久性能を把握する。→9月23日に設置した。

なお、設置した実機の回収は次年度(約1年経過後)とする。

### 2.2 流出軽減技術の検討

- ・過去の流出事故に関する情報整理を行い、事故原因と有効な対策方法の検討を行う。→情報整理を行い、流出軽減策を検討中。
- ・係留部材を対象としたデータ収集を行うとともに、必要な室内試験(摩耗試験、擦れ試験等)を行い、対策方法の効果を検討する。→ロープメーカーから社内試験結果の提供を受け、流出軽減策の検討の参考とした。

### 2.3 既存中層浮魚礁の部材劣化試験

- ・設置後約7年と8年を経過して流出した中層浮魚礁の係留部の強度試験を実施し、残存強度の把握を行う。また、後者事故の流出警報発信機、礁体等の調査も行う。→残存強度試験を実施し、既存のデータとともに解析した。また、後者事故の調査も行った。

## 3. 28年度の調査結果(中間報告)

### 3.1 流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討

#### 3.1.1 環境促進試験内容の変更

当初は、温湿度促進試験と加速劣化試験を実施した後に実海域に設置する計画であったが、下記の理由により、第1回委員会後、水産庁、委員のご了解を得て、加圧試験を実施した後に実海域に設置した。

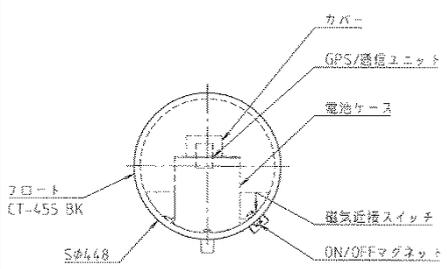
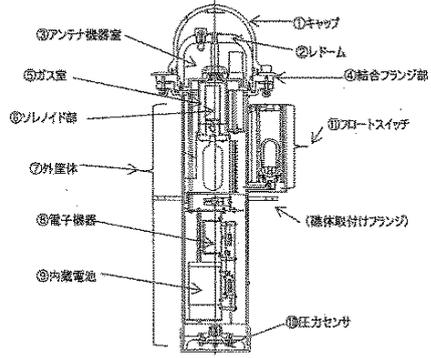
- ・当初計画していた温湿度促進試験と加速劣化試験は、JIS規格(環境試験方法-電気・電子・正弦波振動試験方法)に準じた(一財)日本航路標識協会「海上標識用灯器 JANA01-2009」の規格認定試験の方法であり、他に適当な試験方法が見つからなかったため計画したが、風雨・太陽光・波浪の振動に常にさらされる海上標識と中層浮魚礁流出警報発信機の使用条件はかなり異なるため、耐久性試験としては適していない。

- ・規格認定試験である温湿度促進試験、加速劣化試験は、壊れないかを確認するかなり過酷な条件での試験であり、供試した同じ装置を試験後実海域に設置することは耐久性の点でふさわしくないとされた。
- ・対馬に設置する流出警報発信機(特に従来改良型)に使用する部品は、組み立て前に、ヒートサイクル試験(比較的初期に継時的に出てくる不良を排除するために、期間を早める方法)を行っているので、不良部品(部品の不具合)は、かなりの高確率で排除できていると考えられた。
- ・以上を踏まえ、環境促進試験として、流出警報発信機の仕様である耐水深 300m(30 気圧)の加圧試験を行ってから、実海域(対馬)に設置することに変更した。(従来型の不具合の半分ぐらいは浸水・漏水が原因なので、初期の防水性能の確認を行う。)
- ・従来改良型は、加圧試験後、分解して漏水の有無を確認後、再組立を行って、対馬に設置する。再組立の際、装置内に乾燥剤を入れるスペースがあるなら、乾燥剤を入れる。(設置水温による結露を防ぐため。上北先生の提案)
- ・新型は、加圧試験後、正常に通信することを確認できたら、分解による漏水確認はせず、そのまま対馬に設置する。(新型は、装置部分が従来の耐圧フロートに封入されているので、一旦フロートを切断して再溶接したら、加圧試験を行った意味がなくなる為)
- ・加圧試験をパスし、実海域設置 1 年後の正常作動が確認された場合、来年回収後に 2 機種ともに加速劣化試験(海上標識用の型式認定の為に J I S 試験法等)を行い、耐久性を確認し、もし不具合が発生したら、そこがその装置の弱点であるから、その知見を改良に役立てる。(横山委員の提案)

### 3.1.2 流出警報発信機の概要

表 流出警報発信機の概要

項目	(新型)	(従来改良型)
使用海域	イリジウム衛星通信圏内	イリジウム衛星通信圏内
耐圧	30 気圧(水深 300m)	30 気圧(水深 300m)
耐温度	-20℃ ~ +60℃	0℃ ~ +40℃
通信情報	時刻、緯度経度、電源電圧	時刻、緯度経度、電源電圧
通信間隔(浮上後)	1 回/1 時間(変更可能)	1 回/1 時間(変更可能)
電源	アルカリ電池	リチウム電池
電池寿命	海中で最長 10 年間の通信動作が可能。10 年経過時に浮上した場合、2 時間間隔で約 20 日間の通信動作が可能。	浮上後、1 回/1 時間の通信間隔の場合、約 200 時間以上の通信動作が可能。
構造特徴	多くの実績を有する耐圧フロートの内部に通信機器を封入ことで水密性を確保している。 耐圧フロートは破壊圧試験、気密	金属部品の組立製品であるため、最新の防食設計により水密性を高めている。

		試験で品質管理されている。	
	起動	沈設前に起動させ、海中において2時間毎の通信動作をしている。浮上後は1時間毎に通信動作が起動する。	海中において起動しない。 浮上後、圧力センサーまたはフロートスイッチの何れかで起動する。安全性を高めるため2重の起動方法である。
諸元		主要材質：ABS樹脂 寸法：φ448mm 全重量：約20kg+取付金具 	主要材質：SUS316 寸法：φ270mm×720mm 全重量：約27kg 

### 3.1.3 加圧試験

#### (1) 目的

実海域の中層浮魚礁に取り付けるにあたり、初期の防水性能の確認のため、高圧実験水槽による加圧試験を行った。

#### (2) 試験日

従来改良型：平成28年8月24日

新型：平成28年9月9日

#### (3) 試験場所

日油技研工業株式会社 川越工場内高圧実験水槽(埼玉県川越市)

#### (4) 試験条件

加圧値は、流出警報発信機の耐圧水深300m仕様から3MPaとした。

加圧方法は旧太洋無線型の開発段階での条件を踏襲し、下記の2方法で試験を行った。

A, B試験から防水性能を評価した。

A 試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無負荷から1MPaごとに5分保持し、3MPaまで加圧</li> <li>・3MPaで15分保持</li> <li>・試験水槽から取り出して目視確認、通信試験</li> </ul>
B 試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無負荷から3MPaのサイクル試験15回(無負荷と3MPaで5分保持)</li> <li>・試験水槽から取り出し目視確認、通信試験</li> </ul>

#### (5) 高圧実験水槽

内容積：0.53m<sup>3</sup>，設計圧力：98.07 MPa，耐圧試験圧力：107.88 MPa



高压実験水槽（密閉作業中）



高压実験水槽（開放状態）

(6) 試験状況



組込状況（新型）



組込状況（従来改良型）



計測状況



3MPa 負荷状況



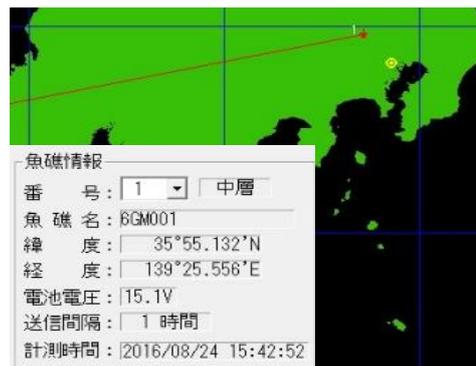
目視確認（新型）



目視確認（従来改良型）



通信確認(新型)



通信確認(従来改良型)

(6) 試験結果

(新型)	(従来改良型)
<p>A 試験、B 試験とも目視確認には問題無く、正常に通信したことを確認。 製造時に気密試験を行い内部から空気漏洩がないことを確認済み。 加圧試験で通信確認できたことで止水が保たれていると判断し、実海域試験へ使用した。従来改良型同様、乾燥剤を内蔵している。</p> <div data-bbox="363 1218 849 1559" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="491 1570 667 1606">気密試験状況</p>	<p>A 試験、B 試験とも目視確認には問題無く、正常に通信したことを確認。 後日工場へ持ち帰り、分解、漏水確認を行ったところ、電子機器室への止水が保たれていることを確認できたため、乾燥剤を入れて再組立をし、所定の部分を接着シールし、実海域試験へ使用した。</p> <div data-bbox="903 1187 1356 1527" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="1023 1527 1166 1559">再組立状況</p>

3.1.4 実海域試験(設置)

長崎県が平成 25 年度(26 年 3 月)に設置した中層浮魚礁に 2 機種(従来改良型と新型)を平成 28 年 9 月 23 日に設置した。

(次年度(約 12 ヶ月後)に回収して、防水性能・耐久性について調査・検討を行う。)

(1) 設置した中層浮魚礁と場所

設置地区：対馬市巖原阿連北西 No 2

礁体タイプ：剛体タイプ

設置水深：礁体ヘッド位置海面下 40m(設置位置の水深 86m)



図 中層浮魚礁設置地区

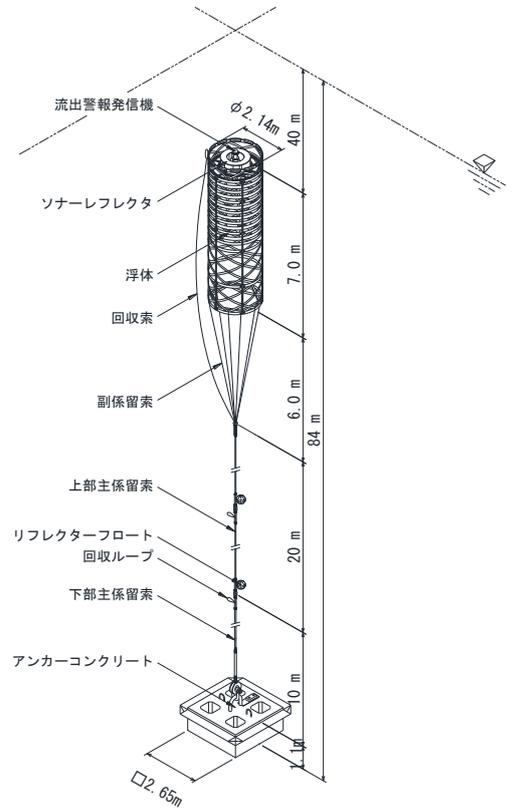


図 浮魚礁の概要

(2) 潜水取付作業

a) 作業日 平成 28 年 9 月 23 日 (金) 天候：晴れ、気温：22.5°

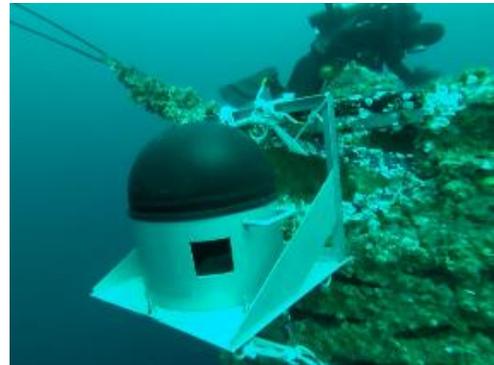
水温：22°C (50m) 水面 24°C、最大風速：NNE 4.1m/s

波高：0.5m~1.5m、流速：0.3~0.8kn、 流向：N

b) 流出警報発信機の取付状況



従来改良型



新型



設置当初からの発信機

### 3.2 流出軽減技術の検討

#### 3.2.1 流出事故の検証

過去の流出事例を以下にまとめた。16 事例のうち 9 例が人為的と推定されている。また、切断箇所に規則性は見いだせなかった。

表 流出事故事例 (1)

事例	設置日 流出日 回収日	設置水深 /切断カ所	係留索仕様	切断状況	原因調査/結論	写真
A	H20.3	172m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ 38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 65mm	切断したヤ ンの長さが 揃っている	アンカーが何かで引っ張ら れ、横方向に強い力を受け、浮 魚礁全体が移動。更にアンカー が転倒し、アンカーフィンが下 部索と接触したことにより切断。 /人為的破断	
	H20.3	下部主係留 索の下端か ら1.4m				
	H20.3					
B	H20.3	172m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ 38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 65mm	切断部の 被覆部及び 芯繊維の 切り口が直 線状	角のある物体によりせん断、 加圧を受け切断。切断部に鉄 イオン反応有り。 /人為的破断	
	H20.3	上部主係留 索の上端か ら47m				
	H20.3					
C	H20.3	178m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ 38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 65mm	切断部及び 上部索の 外層皮膜に ずれ、蛇腹 状の皺	上部係留索の端末部に 引っかかった状態で横 方向に引っ張られ、浮魚 礁全体が移動。その際に 被覆のずれが生じ、接 点で屈曲、加圧を受け切 断。 /人為的破断	
	H20.3	上部主係留 索の上端か ら117m				
	H20.3					
D	H20.3	水深81～97m	主係留索: ワイヤー外装ホリエ レン Φ 30mm	複雑な切断 面。ワイ ヤーがズ タズタに切 れている	横向きに何らかの強い 力が加わり切断。 /切断面を見る限り、自 然の力によるものではない。	
	H20.12	アンカーとの連 結部から 15.8m				
	H20.12					
E	H20.3	水深81～97m	主係留索: ワイヤー外装ホリエ レン Φ 30mm	ちぎれたよ うな切断 面。鋭利な ものではない	切断部分に何かが巻き ついて捻られながら切 断。 /何が巻きついたのか、 原因の特定はできず。	
	H21.4	主係留索の 上端から 2.6m				
	H21.4					
F	H21.6	水深84～100m	主係留索: ワイヤー外装ホリエ レン Φ 32mm 副係留索: ワイヤー外装ホリエ レン Φ 35mm	係留索の 途中で切 断されて いる	鋭利なもので切断。 /人的行為に起因すると 推定。	
	H21.11					
	H22.2	副係留索				
G	H15.6	1327m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ 30mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 40mm	切断面が 揃っている	切断面は鋭利なものに よるせん断に酷似。繊維 間融着無し。 /人為的破断	
	H22.11	上部主係留 索の上端か ら54m				
	H22.11					
H	H16.7	1188m	上部主係留索: ワイヤー外装ホリアリ レート Φ 30mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 40mm	40cm毎に 外装が剥 離。切断面 が揃ってい る	剥離は回転体巻付に酷 似。切断面は鋭利なもの によるせん断に酷似。繊 維間融着なし。流出7日 後250km離れた位置で 通信、翌月設置場所近く で回収	
	H19.1	上部主係留 索の上端か ら390m				
	H20.2					

表 流出事故事例 (2)

事例	設置日 流出日 回収日	設置水深 /切断カ所	係留索仕様	切断状況	原因調査/結論	写真
I	H18.3	798m	上部主係留索: ワイヤ-外装ホリアリ レート Φ 32mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 36mm	切断面が 揃っている	切断面は鋭利なものに よるせん断に酷似。繊維 間融着なし。 /人為的破断	 
	H22.8	下部主係留 索の下端か ら388m				
	H22.8					
J	H15.12	74-86m	主係留索: ワイヤ-外装ホリエチ レン Φ 39mm	切断面が 揃っている	切断面は鋭利な外的要 因によるもの	
	H17.9	礁体から3m 付近				
	H17.9					
K	H15.12	74-86m	主係留索: ワイヤ-外装ホリエチ レン Φ 39mm	-	-	
	不明	-				
	H21.6					
L	H15.2	1264-1287m	上部主係留索: ワイヤ-外装ホリアリ レート Φ 30mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 40mm	係留索の 断面の約 半分が揃っ ている	係留索の断面の約半分 が鋭利なもので切断され た形跡あり /人為的破断	 
	H22.9	下部主係留 索の上端か ら200m				
	H22.9					
M	H20.3	155m	上部主係留索: ワイヤ-外装ホリアリ レート Φ 38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 65mm	係留索の 切断面が 揃っている	・切断部の直上は十分 な強度が残っている。 ・切断面が鋭利なエッジま たはナイフによる切断面と 類似している。 /人為的破断	 
	-	下部主係留 索の下端か ら1.7m				
	H27.8					
N	H23.5	1634m	上部主係留索: ワイヤ-外装ホリアリ レート Φ 30mm	(不明)	・流出回収時に上部索を 切断(下写真)したことか ら、流出原因は不明。 ・残存している副係留索 は十分な強度が残って いる。	 
	-	(不明)				
	H27.7					
O	H20.3	156m	上部主係留索: ワイヤ-外装ホリアリ レート Φ 38mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 65mm	過荷重によ る撚りや繊 維の乱れも 軽度で繊維 端が概ね 揃っている	・十分な強度が残ってい る。 ・切断面は鋭利なエッ ジまたはナイフによる切 断面に類似している。 /人為的破断	 
	-	上部主係留 索の下端か ら42m				
	H28.5					
P	H25.3	200m	上部主係留索: ワイヤ-外装ホリアリ レート Φ 36mm 下部主係留索: ポリエステル8打ち Φ 50mm	(不明)	何らかの物体と接触し、 浮体下部が欠損し上部 のみ流出した。又は係留 索の切断により流出し、 漂流中何らかの物体と 衝突し、浮体上部のみ漂 着した。	 
	-	(不明)				
	H28.5					

### 3.2.2 既存の流出軽減方法

#### (1) 目的

中層浮魚礁を設置している都道府県が、どのような流出軽減技術を用いているか、現状を把握する。

#### (2) 方法

中層浮魚礁を設置している 8 都県に対しアンケート調査票を郵送し、採用している流出軽減技術について FAX での回答を依頼した。

#### (3) 結果

全 8 都県で流出軽減技術を採用しており、その種類は係留索の補強であった。外装ロープの長さは、浅海タイプについてはすべて、深海タイプについては礁体下部から 200~600m で、漁具による擦れ損傷の軽減を理由としていた。予想される漁法としては、延縄、まき網、曳縄、旗流し、ソデイカ漁が挙げられた。

表 既存の流出軽減方法

都県	水深区分	措置の有無	流出軽減措置の種類	軽減措置を講じる理由	予想される漁法	ワイヤー外装ロープの長さ	自由意見
A	深海	有	樹脂被覆ロープ	地理的条件から安全を見込んで	-	礁体下部から 600m	-
B	深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	延縄	礁体下部から 330m まで	-
C	浅海 深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	-	礁体下部から 300m	-
D	浅海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	まき網、延縄、曳縄など	全てワイヤー外装ロープ	本県の中層型浮魚礁の流出事例では人為的な要因による切断と考えられる事例が多くみられた。
E	浅海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	-	全てワイヤー外装ロープ	-
F	深海	有	ワイヤー外装ロープ	漁具による擦れ、損傷の軽減	-	礁体下部から 200m まで	-

G	深海	有	ワイヤー外装 ロープ	漁具による 擦れ、損傷の 軽減	旗流し、 延縄	礁体下部か ら 550m	特になし
H	深海	有	ワイヤー外装 ロープ	漁具による 擦れ、損傷の 軽減	ソデ釣漁	礁体下部か ら 500m	-

### 3.2.3 係留索の擦れ摩耗試験

ワイヤー外装ロープについては、ロープメーカー 2 社が擦れ摩耗試験を行っている。その結果の提供を受け、以下にまとめた。ワイヤー外装することにより、被覆の無いロープより擦れ摩耗性能が向上している。

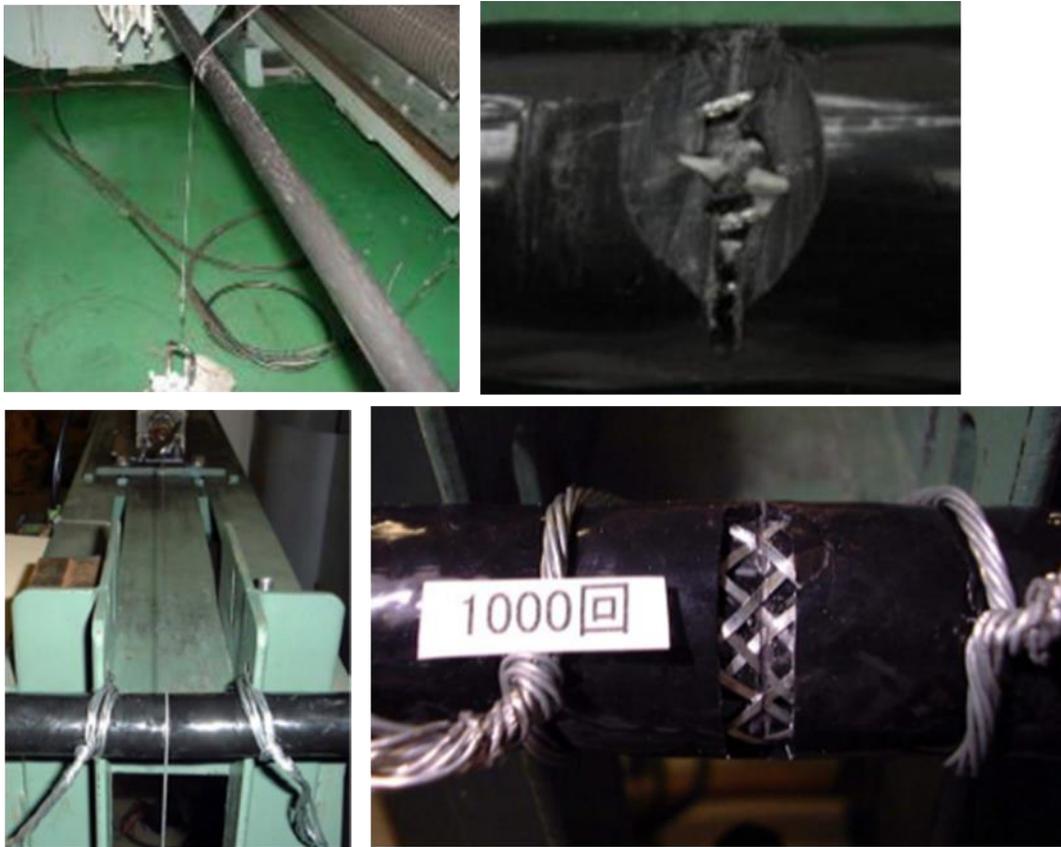


写真 擦れ摩耗試験の状況

表 擦れ摩耗試験結果

No.	試験ロープ仕様				接触ワイヤ仕様		結果
	ロープ径 /外径 (mm)	ロープ素材	ワイヤ種	被覆樹脂	荷重 (kg)	ストローク (mm) /往復回数	
1	30 /38	ポリエステル 8打ち	SUSワイヤロープ Φ1 mm12本 約 75g/m	ポリエチレン	40	300 /50	ワイヤロープは健在
2	30	ポリエステル 8打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ 0.5mm	ポリエチレン	40	300 /50	鉄線は未切断。但し被 覆損傷有
3	40	ポリエステル 8打ち	-	-	40	300 /50	ヤーンの折損有り
4	22	ポリアリレート 12打ち	-	-	7.5	150 /300	切断無
5	22	ポリアリレート 12打ち	-	-	7.5	150 /1000	表面のフィラメントに毛羽 立ちが発生
6	22	ポリアリレート 12打ち	-	-	7.5	150 /1200	表面のフィラメントがわず かに切れ始める
7	22	ポリアリレート 12打ち	-	-	7.5	150 /2000	最外層ヤーンの半分が切 れる
8	22 /30	ポリアリレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ 0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /500	被覆表面に軽度の傷 が発生
9	22 /30	ポリアリレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ 0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /1000	外装被覆が破れ、ワイ ヤ編組へ達する
10	22 /30	ポリアリレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ 0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /2000	ワイヤの一部に断線発 生
11	22 /30	ポリアリレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ 0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /2500	一対(左右)の編組が 切断し、直下の被覆に 深く傷が入る

試験はすべて乾燥状態で実施。接触ワイヤは#29 1×7 約0.9mm

### 3.2.4 流出軽減策の検討

以上を踏まえ、さらに流出軽減を図るための対応策を検討中。

#### (1) 係留システムの改良

流出したものの中には、被覆していない部分で切断したものもあり、より強靱な係留システムとするため、以下のような対策が考えられる。

- ① ワイヤー外装係留索の延長
- ② ワイヤー、チェーンによる係留
- ③ 連結作業上外装を剥がした部分への保護カバーの装着

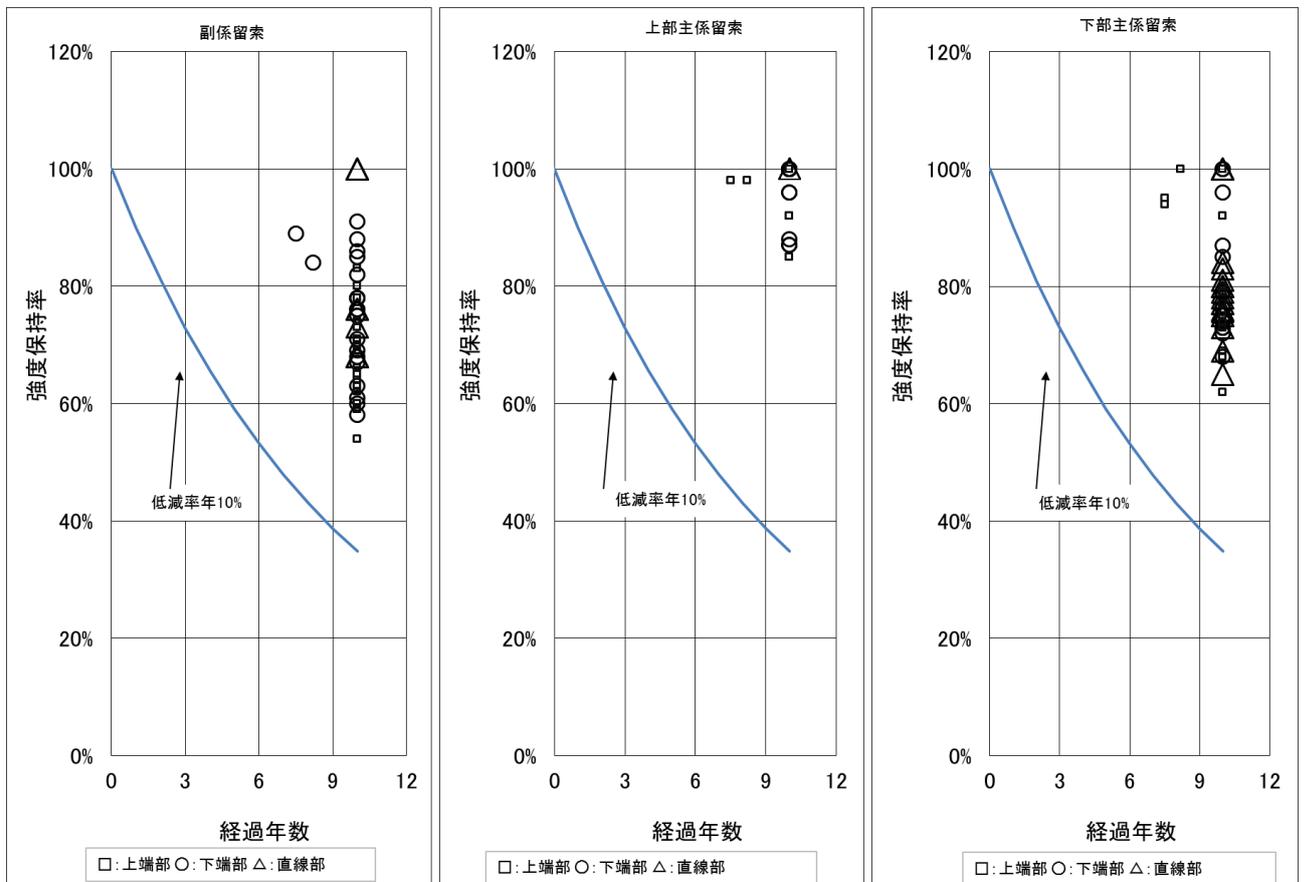
#### (2) 周知・啓蒙の徹底

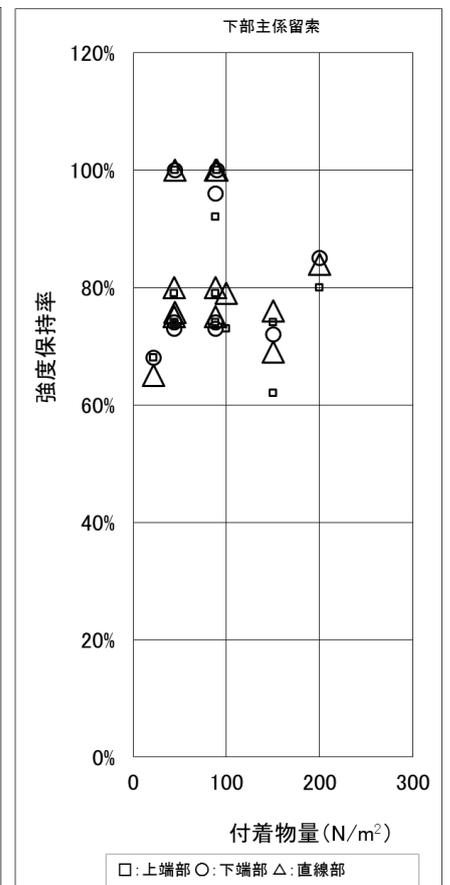
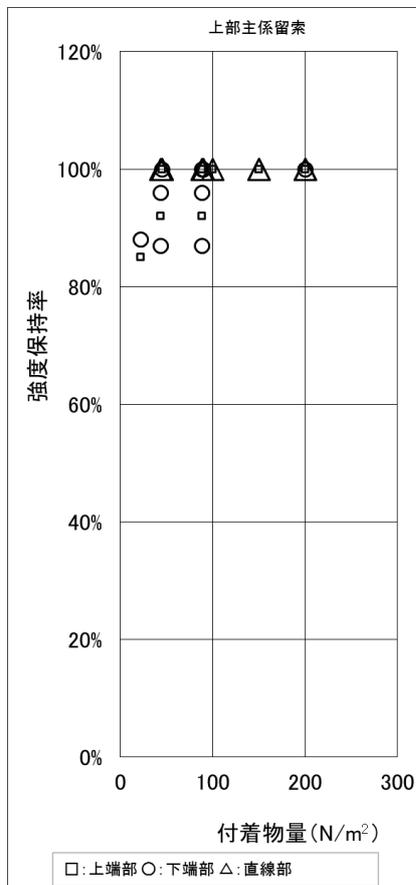
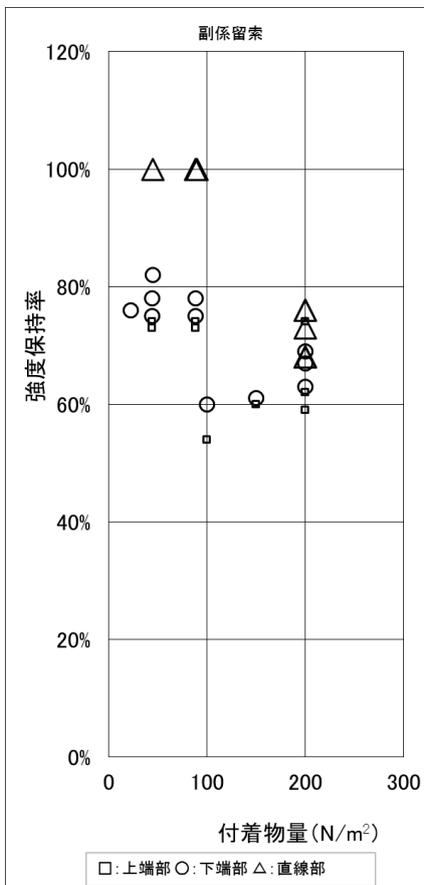
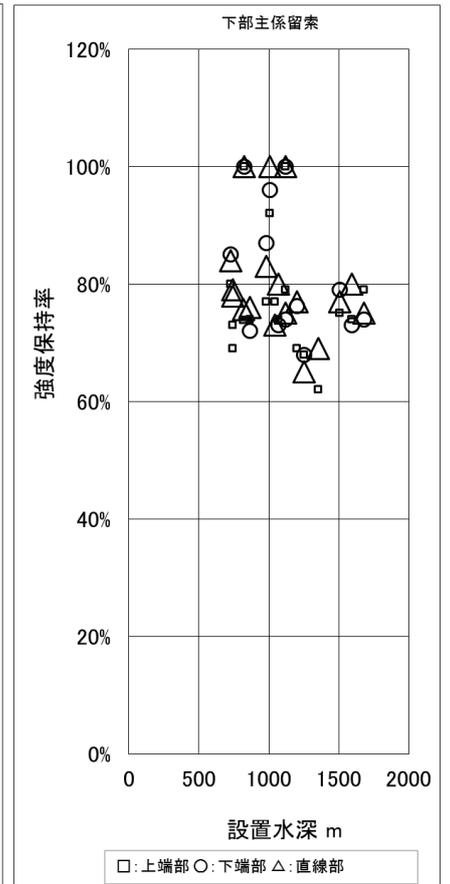
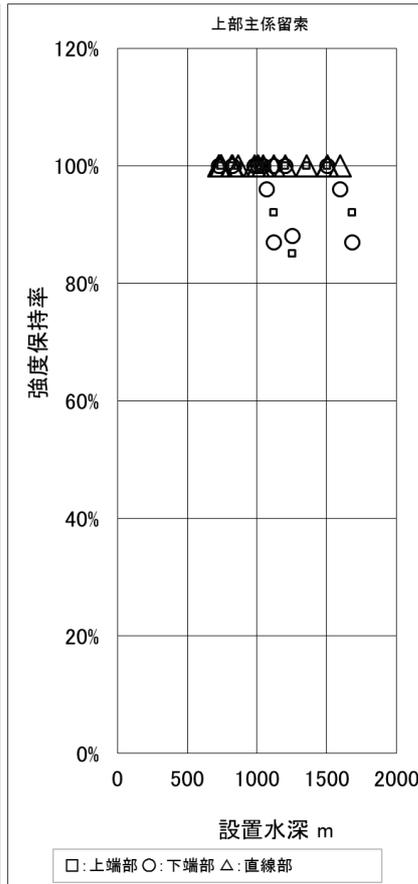
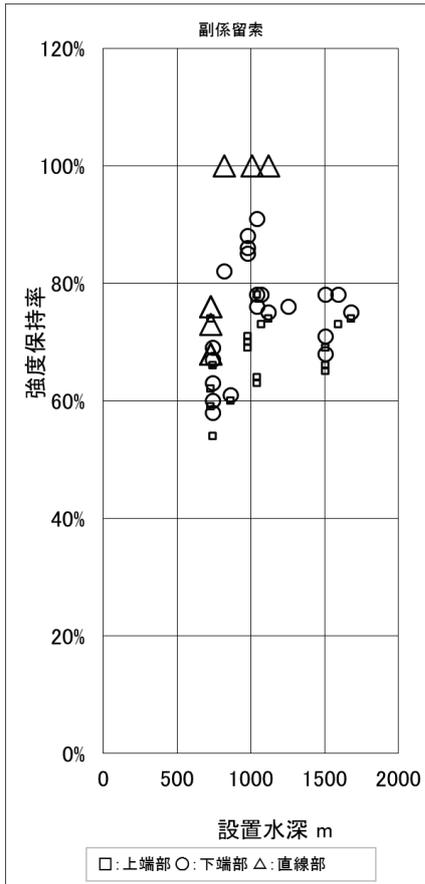
流出した礁体や係留索には、漁具の引掛け、絡まりや漁具による破損箇所が散見されることから、漁業者への情報提供、使用方法の啓蒙が重要である。

### 3.3 既存中層浮魚礁の部材劣化試験

#### 3.3.1 係留索

長崎県が設置して7年目と8年目の中層浮魚礁が流出した際の回収係留索を提供いただき、残存強度を測定した。

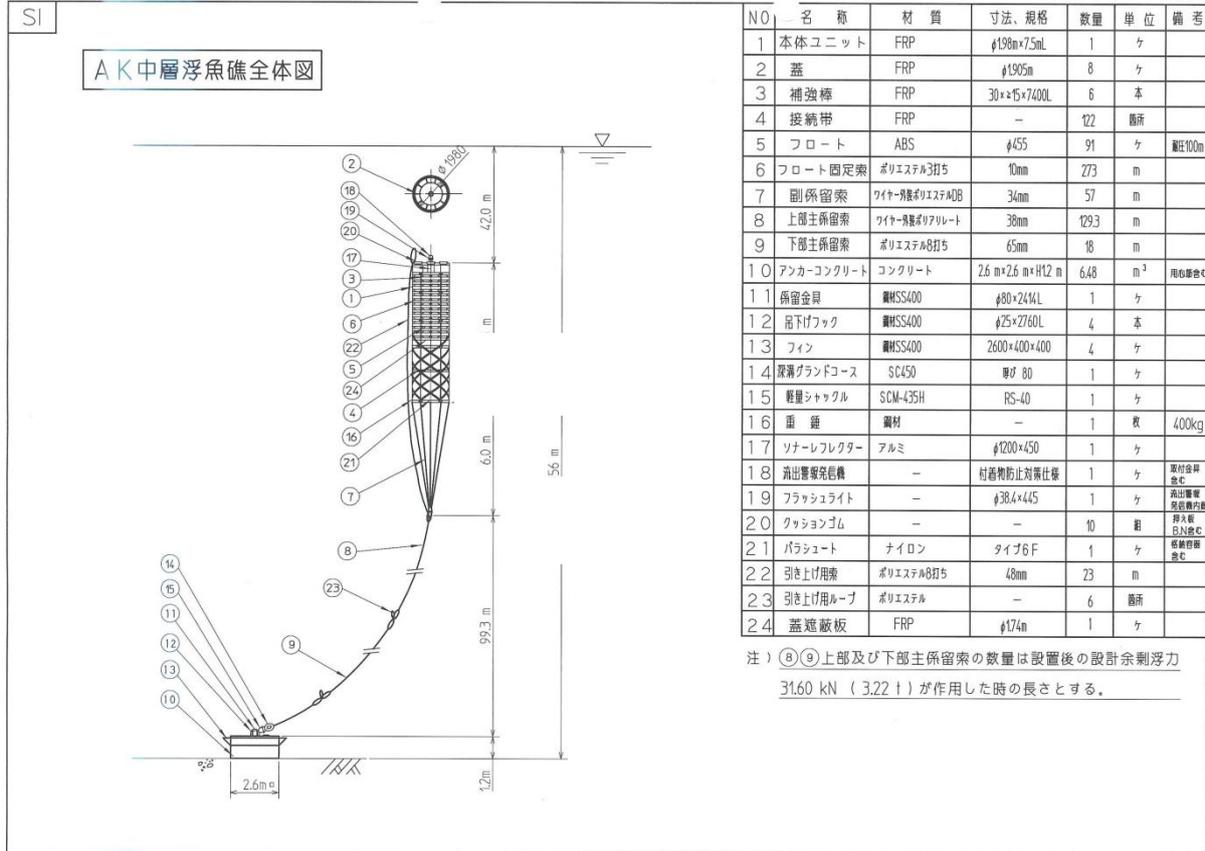




3.3.2 対馬沖中層浮魚礁No.5 流出事故原因調査(長崎県への報告書 概要)

1. 当該中層浮魚礁の概要

- ①工事年度 : 平成 19 年
- ②工事名 : 対馬地区広域漁場整備工事(上県田ノ浜西工区)
- ③工事番号 : 19 漁整中第 2-2 号
- ④機種 : AK 中層浮魚礁 M-2 型 (遮蔽タイプ)



⑤設置日 : 2008 年 3 月 14 日

⑥設計条件 :

水深 : 156m、波高 : 13.55m、周期 14.9s、波長 346.3m、海面流速 1.18m、

喫水高さ : 2m (付着物有・上部主係留索付) ~ 3m (付着物無・係留索無)

⑦設計位置 : N 34° 32' 38.40" E 129° 06' 44.96" (世界測地)

⑧設置位置 : No.5



## 2. 流出直後の状況確認

### 2.1. 流出連絡の経緯

- ・対馬市上県町沖合で海上保安庁が漂流している浮魚礁を発見（2016年5月1日）
- ・上県町漁業協同組合が近傍港（鹿見港）に曳航
- ・浮魚礁の名盤から長崎県が設置した対馬沖 No.5 であることが判明
- ・仁田港に曳航して陸揚げ回収（5月26日）
- ・回収された中層浮魚礁の状態（表 2-1）

### 2.2. 長崎県の現品確認

- ①実施日 : 2016年5月30日
- ②実施場所 : 岡部株式会社 小江工場
- ③実施者 : 長崎県水産部漁港漁場課 中ノ瀬課長補佐、阪口主任技師
- ④内容 : 対馬より輸送された中層浮魚礁の保管状況の確認

### 2.3. MF21の現品調査

- ①調査日 : 2016年6月16日
- ②調査場所 : 岡部株式会社 小江工場
- ③調査者 : MF21 福井県立大学海洋生物資源学部 教授 大竹臣哉  
長崎県水産部 横山参事監  
長崎県水産部漁港漁場課 中ノ瀬課長補佐、阪口主任技師、和田技師  
岡部株式会社 海洋事業部 志賀氏  
株式会社テザック 西氏
- ④調査内容 : 浮体の外観、係留索の状態確認、原因調査内容についての検討

表 2-1 回収時中層浮魚礁の状態

部材	項目	状況
浮体	浮体の外観	大きな損傷・破損は確認されなかった。 付着物は多量に付着していた。 急浮上対策用パラシュートは格納されたままだった。
	付着物	主生物：ササギ、カキ、ヒウギカキ、フジツボ、カイメン 水中重量：3.9 ～ 8.3 kg/m <sup>2</sup> ,付着物厚さ 10～15cm
係留索	係留索の外観	上部主係留索で切断されていた。 残存係留索には特に大きな損傷は確認されなかった。 上部索（ワイヤー外装部）の切り口は鋭利に斜めに切断されていた。
搭載機器	流出警報発信機	頭部カバーが付いた状態で回収されていた。 大きな損傷は確認されなかった。 流出時の発信は確認されていない。

	フラッシュライト	外観上は大きな損傷はなかった。 回収時の点灯は不明であった。
--	----------	-----------------------------------



写真 2-1 鹿見港での保管状況 (5/12)



写真 2-2 名盤「対馬-No5」(5/12)



写真 2-5 鹿見港からの撤去 (5/26)



写真 2-6 仁田港への陸揚げ (5/26)

### 3. 調査結果

#### 3.1. 浮体

##### (1) 外観状況(写真 3-1-1)

- 浮体の組立に用いられた部材数量に異常は確認されなかった。
- 浮体の組立状況に異常は確認されなかった。
- FRP 補強棒に破損や異常は確認されなかった。
- 浮体頂部のクッションゴムに裂傷が確認された。
- パラシュートの作動は認められなかった。

##### (2) FRP 部材の物性試験結果 (表 3-1-1)

試体として FRP 補強棒から 18 検体を抜き取り、曲げ強度について JIS に準じた試験を行った結果、全ての供試体において設計基準値を満足した。

##### (3) 所見

体には破損や損傷は認められないが、再利用については、メーカー品質保証がされない。

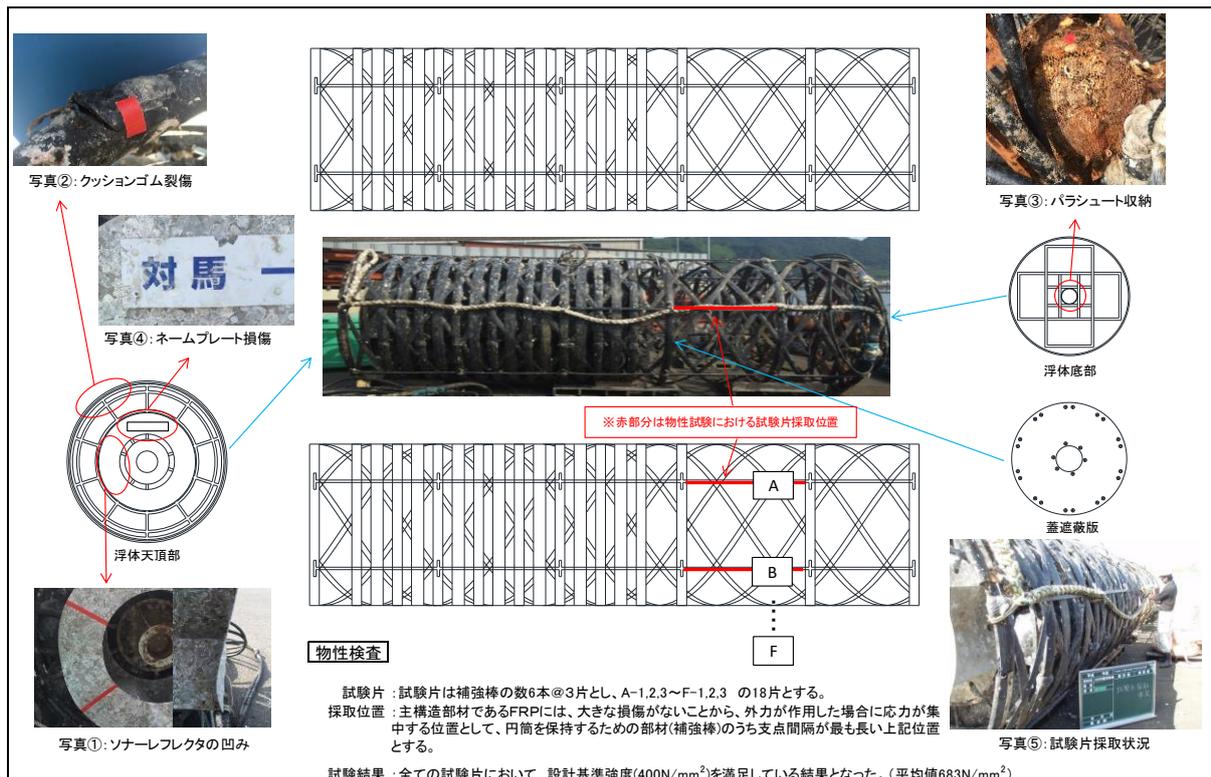


写真 3-1-1 浮体部の外観状況

表 3-1-2 FRP 補強棒の強度試験結果

(N/mm<sup>2</sup>)

NO.	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3
試験結果	579	608	737	810	773	688	789	682	700
設計基準	≥ 400								
NO.	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2	F-3
試験結果	709	768	657	648	639	651	558	631	671
設計基準	≥ 400								

### 3.2. 係留索

#### 3.2.1. 外観状況

係留索の外観状況の観察結果を表 3-2-1 に示す。

表 3-2-1 外観状況観察結果

係留索 名称		観察結果
副係留索	No	目立つ損傷は認められない
回収索		一部に著しい摩耗が生じている(写真 3-2-2) 陸揚げまでの期間、礁体の下敷きになっていたことによるものと推測される
上部索	1	ロープ表面に軽微な擦過痕がみられるものの、目立った損傷などは認められない
上部索	2	下端側末端部のセキ巻ロープがアンカー方向にズレが生じているが、原因については不明である(写真 3-2-3)
上部索	3	切断部から 500mm の位置に著しい損傷が認められる また、上端側の連結部に損傷が認められる(写真 3-2-4) 強固な物体が引っかかり、引っ張ったような現象が推測される
切断面		切断面の繊維長が揃っている部分と不揃いの部分が混在する(写真 3-2-5) 切断面の被服部は押し切られたような形跡が見られる (写真 3-2-6)



写真 3-2-1 回収係留索



写真 3-2-2 回収索



写真 3-2-3 上部索 3 の下端側



写真 3-2-4 切断部から 500mm



写真 3-2-5 切断部



写真 3-2-6 切断部



### 3.2.2. 室内試験

回収された係留索を供試体として切断面のマクロ及びミクロ調査と残存強度試験を実施した。

#### 1) マクロ調査結果

- ロープを形成している 12 本のストランドのうち、10 本が同じ位置で切断して短く（写真 4-8）、且つ切断面が揃っており（写真 4-10）、さらに端部の形状に乱れは見られない（写真 4-9）
- 中程度の長さのストランドも形状の乱れはない（写真 4-11）
- 最も長いストランドは端部に撚糸の乱れが生じている（写真 4-12）
- 切断部付近の外装被覆ワイヤに腐食が生じているが、流出後から調査までの期間に腐食したものと思われる



写真 3-2-7 切断部

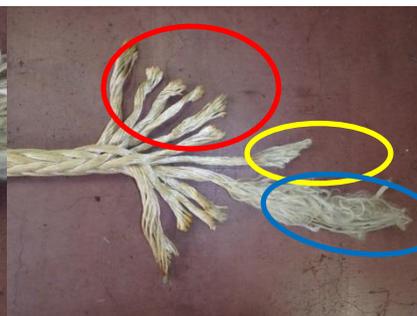


写真 3-2-8 切断部  
(ストランドを分解・展開)



写真 3-2-9 短いストランド  
(写真 3-2-8 の赤丸部分拡大)



写真 3-2-10 ストランドの拡大  
(写真 3-2-9 拡大)

写真 3-2-11 ストランドの拡大  
(写真 3-2-8 の黄色部分拡大)

写真 3-2-12 ストランドの拡大  
(写真 3-2-8 の青色部分拡大)

### 3.2.3. ミクロ調査結果 資料 2-2 写真 13-29

切断面が揃っているストランドの繊維と不揃いなストランドの繊維を採取して顕微鏡観察を行い、①鋭利なエッジによる切断面、②ナイフによる切断面、③荷重による切断面との比較を行った。

- 切断面が揃っているストランドは、鋭い切断面となっている単糸が目立つ (写真 3-2-13)
- 切断面が不揃いなストランドは、鋭い断面となっている単糸はほとんど見られない (写真 3-2-14)
- 切断面の比較においては、揃っているストランドの切断面は比較的ナイフによる切断状況と類似しており、不揃いなストランドは引張荷重またはエッジによる摩耗切断に比較的類似している



写真 3-2-13 切断面が揃っているストランド (左：ストランド、右：拡大)



写真 3-2-14 切断面が不揃いのストランド (左：ストランド、右：拡大)



写真 3-2-15 エッジにて摩耗切断させた係留索と同材料のヤーン

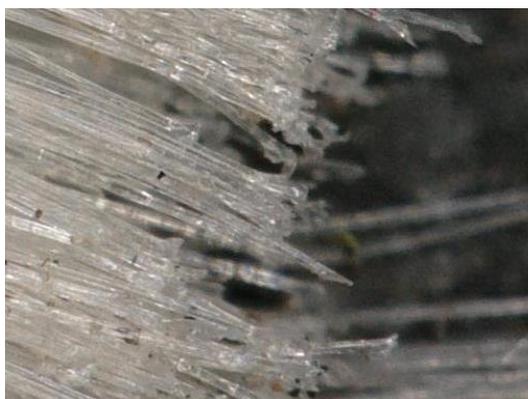


写真 3-2-16 ナイフにて切断させた係留索と同材料

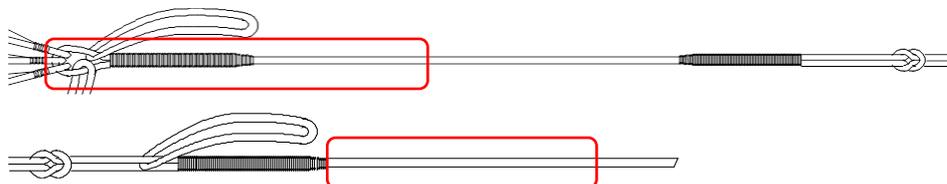


写真 3-2-17 引張荷重により破断した係留索と同材料

### 3.2.4. 残存強度試験

#### ① 上部主係留索

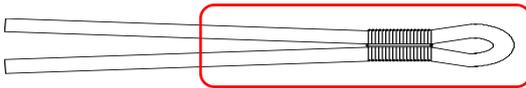
上部索 No.1 の礁体側既存アイを含む端末部分及び切断した上部索 No.3 の本体部より試料を採取し、引張試験を実施した。



	上部索 No.1	上部索 No.3
規格強度	460kN	460kN
破断強度	452kN	484kN
破断箇所	既存アイス°ライズェント°	アイス°ライズェント°
強度保持率	98.3%	105%

## ② 副係留索

上部索との連結部分を中央として試料を採取し、引張試験を実施した。



	副係留索
規格強度	202kN
破断強度	169kN
破断箇所	中央部
強度保持率	83.7%

### 3.2.5. 所見

残存強度試験より切断部直近から採取した上部主係留索 No.3 は規格値に対し 100%以上の強度を有しており、経年による強度低下に起因する切断ではないと考えらる。

回収品調査及び切断部調査では切断部と切断部付近に多数の擦過痕が認められた事から今回の切断は何らかの物体との接触によって繊維に損傷が生じたために破断したものと推測される。

## 3.3. 搭載機器

流出時に流出警報は発信されなかった。

### 3.3.1. 流出警報発信機の状況

- キャップは外れていなかった
- キャップ内部への海水の浸水と汚泥の蓄積を確認
- キャップと外筐フランジの間に隙間を確認
- 機器内部（ガスボンベ室、電子機器室）への海水の浸水・腐食および乳白色の液体（海水とアルミニウムの化学反応により生成）を確認
- 機器内部部材（ソレノイド、ガスボンベ室、電子機器）の腐食を確認

### 3.3.2. フラッシュライト

- 外観に目立つ損傷は認められなかった
- 機器内部への浸水はみられず、損傷も認められなかった
- 電池電圧は消費されていなかった（夜間点滅していなかった）
- 室内にて圧力センサ、光センサ、フラッシュライトの駆動回路について検査した結果、全て正常であったが、ランプは点灯しなかった

上記の結果、フラッシュライトの内部機器は正常であったが電池電圧が消費されていなかったことから、光源（キセノンランプ）の故障（ガス抜け）によって作動しなかったものと思われる。

#### 4. 切断原因の推定

今回の切断は経年による強度劣化に起因する破断では無く、何らかの物体との接触によって繊維に損傷が生じて破断したものと推測された。

- 係留索の強度試験の結果、上部主係留索は初期規格強度の98%（端部）・100%以上（直線部）、副係留索は84%を保持していた。
- また、切断部はスプライスエンドでは無く直線部で、切断面は過荷重による破断の際に生じる撚りや繊維の乱れも軽度で繊維端が概ね揃っていた。
- ミクロ調査による係留索の切断面は鋭利なエッジまたはナイフによる切断面に類似していた。

#### 5. 今回の調査からの課題

今回の流出事故およびその原因調査結果から、以下の課題が考えられる。

- 切断しにくい係留システムの検討

今回の流出事故の切断箇所は下部主係留索の下端部付近である。下部主係留索はポリエステル製の裸ロープで、上部主係留索のようなワイヤー外装加工が施されていないロープである。下部索も上部主係留索のような加工を施したロープを使用するか、せん断に強い係留方法とすることで切断事故が軽減されると思われる。

- 漁業者への中層浮魚礁設置の周知と啓蒙

残存した係留索には破損箇所が多数みられる。この破損は漁具のようなものでひっかけられ、引っ張られたことによるものと思われる。これらの行為を軽減するためには中層浮魚礁を利用する漁業者への情報提供と使用方法の啓蒙が重要であると思われる。

- 安全対策の検討

今回の流出事故では流出事故を知らせる警報システムが作動しなかった。一方、流出時夜間安全対策として設置されたフラッシュライトは作動していたと推測された。また、急浮上防止対策として設置されているパラシュートは、収納容器内外に付着生物がたくさん付着しており、開いていなかった。これらの安全対策が機能を発揮するために、警報システムについては「流出警報発信機の適正な保守管理の実施」、パラシュートについては「付着物がつきにくい処理や浮上時より多くの力がパラシュートにかかる構造」が必要と思われる。

平成 28 年度水産基盤整備調査委託事業  
「漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査」

## 中層浮魚礁の流出軽減技術の検討

第 3 回検討委員会 資料

(報告書案)

平成 29 年 2 月

一般社団法人マリノフォーラム 2 1

## 目次

1. 調査目的.....	- 1 -
2. 調査概要.....	- 1 -
2.1. 流出警報発信機の防水性能・耐久性能の検討.....	- 1 -
2.2. 流出軽減技術の検討.....	- 1 -
2.3. 既存中層浮魚礁の部材劣化試験.....	- 1 -
3. 28年度の調査結果.....	- 2 -
3.1 流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討.....	- 2 -
3.1.1 環境促進試験内容の変更.....	- 2 -
3.1.2 流出警報発信機の概要.....	- 3 -
3.1.3 加圧試験.....	- 5 -
3.1.4 実海域試験（設置）.....	- 8 -
3.1.5 通信試験(付着生物の影響試験).....	- 11 -
3.2 流出軽減技術の検討.....	- 12 -
3.2.1 流出事故の検証.....	- 12 -
3.2.2 既存の流出軽減方法.....	- 16 -
3.2.3 係留索の擦れ摩耗試験.....	- 17 -
3.2.4 流出軽減策の検討.....	- 19 -
3.3 既存中層浮魚礁の部材劣化試験.....	- 22 -
3.3.1 係留索.....	- 22 -
3.3.1 対馬沖中層浮魚礁№5 流出事故原因調査(長崎県への報告書 概要).....	- 24 -

## 1. 調査目的

中層浮魚礁は、水産基盤整備事業において平成13年度以降各地方自治体にてのべ342基(平成27年度末まで)が設置され、事業継続中である。一方で現在(平成27年度調査)までに流出事故としては16件の報告がある。

流出事故の原因は、係留索の経年劣化や波浪・潮流ではなく、人為的な要因であることが示唆されている。また、実証試験(平成25～27年度)で流出警報発信機を引上げて機器の機能や部材劣化などについて調査した結果、防水性や耐久性に課題が残されていることが示唆された。そこで、本事業では流出警報発信機による確実な警報システムの構築と流出事故の軽減技術について検討することを目的とする。

## 2. 調査概要

### 2.1. 流出警報発信機の防水性能・耐久性能の検討

- ・環境促進試験：実機の温湿度促進試験、加速劣化試験を行う。→加圧試験に変更し、行った。
- ・実海域試験：実機を実海域に設置し、防水性能・耐久性能を把握する。→9月23日に設置した。

なお、設置した実機の回収は次年度(約1年経過後)とする。

### 2.2. 流出軽減技術の検討

- ・既往知見を整理し、流出軽減技術の検討を行う。
- ・過去の流出事故に関する情報整理を行い、事故原因と有効な対策方法の検討を行う。→情報整理を行い、流出軽減策を検討中。
- ・設置都県に採用している流出軽減技術のアンケート調査を行い現状把握する。→流出軽減技術はすべて係留索の外装で、都県により外装長は異なった。
- ・係留部材を対象としたデータ収集を行うとともに、必要な室内試験(摩耗試験、擦れ試験等)を行い、対策方法の効果を検討する。→ロープメーカーから社内試験結果の提供を受け、流出軽減策の検討の参考とした。

### 2.3. 既存中層浮魚礁の部材劣化試験

- ・設置後約7年と8年を経過して流出した中層浮魚礁の係留部の強度試験を実施し、残存強度の把握を行う。また、8年を経過した流出警報発信機、礁体等の調査も行う。→残存強度試験を実施し、既存のデータとともに解析した。また、8年を経過して流出した中層浮魚礁の事故調査も行った。

### 3. 28年度の調査結果

#### 3.1 流出警報発信機の防水性能・耐久性の検討

従来の流出警報発信機を改良した「従来改良型」と新規に開発した「新型」の2機種により、流出警報発信機の機能を評価した。流出警報発信機は海中に10年設置することが必要条件であることから、防水性能と耐久性を評価基準とした。

- ・防水性能については、設計の耐圧水深300mを条件とし加圧試験を行い、浸水が無いことを確認した機器を実海域試験に設置した。(12ヶ月後に回収し再度、浸水の有無を確認する。)
- ・(耐久性については、実海域試験に使用した流出警報発信機を回収し、環境促進試験において負荷を与えることによる内部機器の破損や劣化を確認し10年後の状態を推定する。)

##### 3.1.1 環境促進試験内容の変更

当初は、温湿度促進試験と加速劣化試験を実施した後に実海域に設置する計画であったが、下記の理由により、第1回委員会後、水産庁、委員のご了解を得て、加圧試験を実施した後に実海域に設置した。(温湿度促進試験と加速劣化試験は来年度回収後に実施する。)

- ・規格認定試験である温湿度促進試験、加速劣化試験は、壊れないかを確認するかなり過酷な条件での試験であり、供試した同じ装置を試験後に実海域へ設置することは試験方法としてふさわしくないとされた。
- ・対馬に設置する流出警報発信機(特に従来改良型)に使用する部品は、組み立て前に、ヒートサイクル試験(比較的初期に継時的に出てくる不良を排除するために、期間を早める方法)を行っているので、不良部品(部品の不具合)は、かなりの高確率で排除できていると考えられた。
- ・以上を踏まえ、実海域へ設置する前の試験として、流出警報発信機の仕様である耐水深300m(30気圧)の加圧試験を行ってから、実海域(対馬)に設置することに変更した。(従来型の不具合の半分ぐらいは浸水・漏水が原因なので、初期の防水性能の確認を行った。)
- ・従来改良型は、加圧試験後、分解して漏水の有無を確認後、再組立を行って、対馬に設置した。再組立の際、装置内に乾燥剤を入れた。(設置水温による結露を防ぐため。)
- ・新型は、加圧試験後、正常に通信することを確認できたら、分解による漏水確認はせず、そのまま対馬に設置した。(新型は、装置部分が従来の耐圧フロートに封入されているので、一旦フロートを切断して再溶接したら、加圧試験を行った意味がなくなる為)
- ・加圧試験をパスし、実海域設置1年後の正常作動が確認された場合、来年回収後に2機種ともに加速劣化試験(海上標識用の型式認定の為にJIS試験法等)を行い、耐久性を確認し、もし不具合が発生したら、そこがその装置の弱点であるから、その知見を改良に役立てる。

### 3.1.2 流出警報発信機の概要

表 流出警報発信機の概要

名称		新型	従来改良型*1
特徴		多くの実績を有する耐圧フロートの内部に通信機器を配置することで水密性を確保している。	金属部品の組立製品であるため、最新の防食設計により水密性を高めている。
環境条件	使用海域	イリジウム衛星通信圏内	イリジウム衛星通信圏内
	耐圧	30 気圧(水深 300m)	30 気圧(水深 300m)
	耐温度	-20℃ ~ +60℃	0℃ ~ +40℃
制御	起動	沈設前に手動で起動させることで、海中で2時間毎の通信装置が動作する。浮上後は1時間毎(変更可能)に通信動作が起動する。	海中において起動しない。浮上後、圧力センサーまたはフロートスイッチの何れかで起動する。安全性を高めるため2重の起動方法である。
	記録	起動時から通信動作をロガーにて記録する。(試験機には未搭載)	圧力容器内への漏水を検知する水位ロガーを同封し記録する。(試験機には未搭載)
通信諸元	送信データ	時刻、緯度経度、電源電圧	時刻、緯度経度、電源電圧
	通信間隔(浮上後)	1回/1時間(変更可能)	1回/1時間(変更可能)
電源諸元	電池種類	アルカリ電池	リチウム電池
	電池寿命	10年経過後に浮上した場合、1回/1時間の通信間隔で約480時間(20日間)の通信動作が可能。	浮上後、1回/1時間の通信間隔の場合、約200時間以上の通信動作が可能。
標体諸元	寸法	φ448mm	φ270mm×720mm
	全質量	約20kg	約27kg
	主要材質	ABS樹脂	SUS316
	姿図		

※1 従来改良型について

従来型は漏水により電子機器が腐食し機能不全となった事例がある。漏水から時間の経過したものは、漏水経路を特定することが困難であるが、設置後短期間で引き上げた中には隙間腐食が確認されているものもある。漏水対策として以下の改良を行っている。

平成 27 年 2 月以前改良点

金属同士の直接接触部に隙間腐食が確認されたため、金属が直接接触する部分にガスケット（板状のパッキン）を挿入し隙間腐食発生を防止した。

平成 27 年 2 月以降改良点

上記改良点以外に考えられる点を改良した。漏水経路への O リング、水密栓の装着、およびシーンを施し、また、わずかな漏水に対して機能不全に陥らないよう、ガス室の樹脂化、電子機器の止水用ドレイン袋による保護を行っている。

### 3.1.3 加圧試験

#### (1) 目的

実海域の中層浮魚礁に取り付けるにあたり、初期の防水性能の確認のため、高圧実験水槽による加圧試験を行った。

#### (2) 試験日

従来改良型：平成 28 年 8 月 24 日

新型：平成 28 年 9 月 9 日

#### (3) 試験場所

日油技研工業株式会社 川越工場内高圧実験水槽(埼玉県川越市)

#### (4) 試験条件

加圧値は、流出警報発信機の耐圧水深 300m 仕様から 3MPa とした。

加圧方法は旧太洋無線型の開発段階での条件を踏襲し、下記の 2 方法で試験を行った。

A, B 試験から防水性能を評価した。

A 試験	<ul style="list-style-type: none"><li>・無負荷から 1MPa ごとに 5 分保持し、3MPa まで加圧</li><li>・3MPa で 15 分保持</li><li>・試験水槽から取り出して目視確認、通信試験</li></ul>
B 試験	<ul style="list-style-type: none"><li>・無負荷から 3MPa のサイクル試験 15 回 (無負荷と 3MPa で 5 分保持)</li><li>・試験水槽から取り出し目視確認、通信試験</li></ul>

#### (5) 高圧実験水槽

内容積：0.53m<sup>3</sup>，設計圧力：98.07 MPa，耐圧試験圧力：107.88 MPa



高圧実験水槽（密閉作業中）



高圧実験水槽（開放状態）

(6) 試験状況



組込状況 (新型)



組込状況 (従来改良型)



計測状況



3MPa 負荷状況



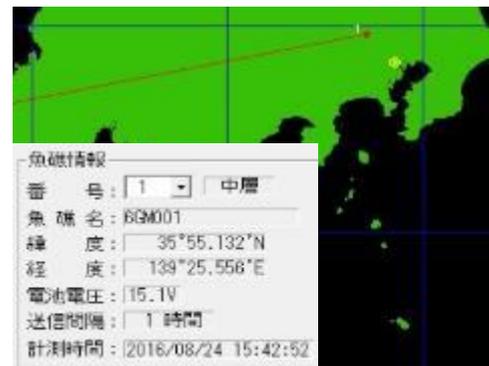
目視確認 (新型)



目視確認 (従来改良型)

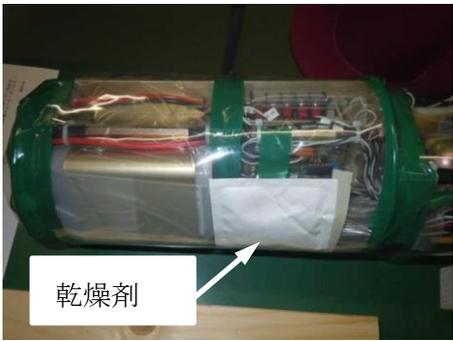


通信確認 (新型)



通信確認 (従来改良型)

(7) 試験結果

新 型	従来改良型
<p>A 試験、B 試験とも目視確認には問題無く、正常に通信したことを確認。</p> <p>製造時に気密試験を行い内部から空気漏洩がないことを確認済み。</p> <p>加圧試験で通信確認できたことで止水が保たれていると判断し、実海域試験へ使用した。従来改良型同様、乾燥剤を内蔵している。</p>	<p>A 試験、B 試験とも目視確認には問題無く、正常に通信したことを確認。</p> <p>後日工場へ持ち帰り、分解、漏水確認を行ったところ、電子機器室への止水が保たれていることを確認できたため、乾燥剤を入れて再組立をし、所定の部分を接着シールし、実海域試験へ使用した。</p>
	
気密試験状況	再組立状況

### 3.1.4 実海域試験（設置）

長崎県が平成 25 年度 (26 年 3 月) に設置した中層浮魚礁に 2 機種の流出警報発信機 (従来改良型と新型) を平成 28 年 9 月 23 日に設置した。

#### (1) 設置した中層浮魚礁と場所

設置地区：対馬市巖原阿連北西 No 2

礁体タイプ：剛体タイプ

設置水深：礁体ヘッド位置海面下 40m (設置位置の水深 86m)



図 中層浮魚礁設置地区

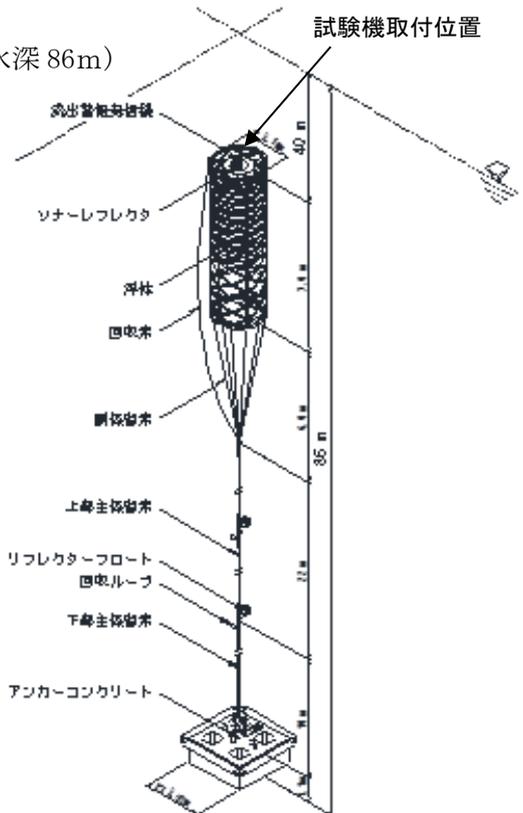


図 中層浮魚礁の概要

#### (2) 潜水取付作業

a) 作業日 平成 28 年 9 月 23 日 (金) 天候：晴れ、気温：22.5°

水温：22°C (50m) 水面 24°C、最大風速：NNE 4.1m/s

波高：0.5m~1.5m、流速：0.3~0.8kn、 流向：N

#### b) 流出警報発信機の取付状況



従来改良型



新型



設置当初からの発信機



作業状況

(3) 今後の調査予定

平成 29 年度（約 12 ヶ月後）に回収し、防水性・耐久性について調査を行う。

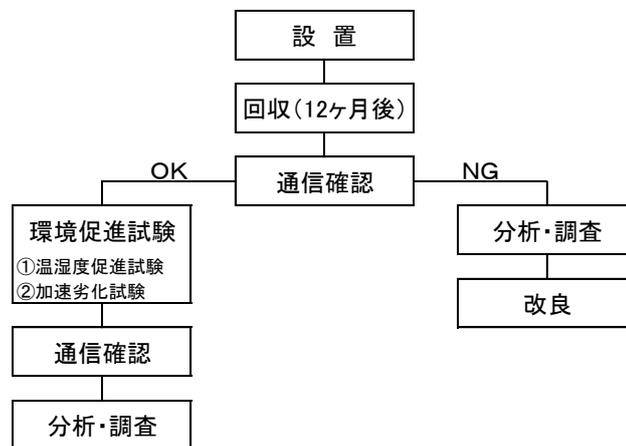


図 回収後の試験フロー

調査方法は回収直後に通信を確認し、受信した場合は環境促進試験を行うことで試験機に負荷を与え、再度通信を確認し分析する。回収直後に受信できなかった場合においても分析し、改良に役立つ。下表に調査項目を示す。

表 防水性・耐久性についての調査項目（新型）

No.	項目	検査方法	評価内容
1	外観		
	付着物	計測	被度による受信の有無
	損傷	目視及び計測	損傷状態による受信の有無
2	分解個体		
	浸水	計量	水密構造の妥当性
	カバー、電池ケースの状態	損傷・外れ等の観察	組立方法および選定部材の妥当性
	GPS/通信ユニットの腐食	腐食程度の観察	耐圧容器内の環境
	ネジ部の状態確認	ゆるみの観察	固定方法の妥当性
	配線の状態	損傷・結束の観察	配線位置の妥当性
3	電気性能		
	電氣的総合動作	起動	通信確認
	電池残量調査	計測	設計との比較、10年後の電池残量の予測

表 防水性・耐久性についての調査項目（従来改良型）

従来改良型はこれまで、隙間腐食による漏水や、付着物によるスイッチの不作動が確認されている。よって本試験においては、隙間腐食の状況、パッキン、Oリングによる止水状況を目視観察し、付着物の状況を観察しスイッチ類への影響を考察する。また、電気、機械的動作の確認および電池残量の確認を行い、腐食や電池残量については設計年数経過時の状況を予測する。

### 3.1.5 通信試験(付着生物の影響試験)

従来改良型は通信基盤部の外側を覆うキャップが浮上時に脱落する構造となっているため、付着生物も脱落し通信障害がでない対策を施している。しかし、新型は通信基盤部を覆う耐圧容器(ABS樹脂)に生物が付着した状態で浮上・漂流するため、付着生物による通信への影響を確認する必要がある。そこで、生物が付着した場合の新型の通信状態を以下の通り確認した。

- (1) 試験日 平成 29 年 2 月 2 日
- (2) 試験場所 宮崎県 宮崎港
- (3) 試験方法

耐用年数 10 年経過して回収された中層浮魚礁の耐圧フロート (ABS 樹脂・付着生物付) を入手し半割に加工した後、準備した流出警報発信機の上部へ被せて通信試験を行った。

通信試験の評価は、流出警報発信機が発信した流出情報を陸上局端末で受信できたかどうかで判定する (通信システムの流れ: 流出警報発信機→イリジウム衛星→陸上局→インターネット通信→陸上局端末)。なお、浮上・漂流時の状態を再現するため、付着物に海水をかけ湿潤状態にしてから流出警報発信機を起動し、通信間隔を 5 分間隔とし 30 分間の通信を確認した

#### (4) 試験結果

付着物(被度 95)に覆われた状態において、6 回の通信試験のうち 5 回の通信を確認した。未受信(1 回)については、イリジウム衛星の天空配置及び周辺環境の影響によるものと思われた。

表 通信結果と端末通信例

通信回数	受信時間	通信結果	端末への通信例
1 回目	10 : 52	○	
2 回目	10 : 57	○	
3 回目	11 : 02	○	
4 回目	11 : 08	○	
5 回目	11 : 13	×	
6 回目	11 : 18	○	



試験状況(左:回収された中層浮魚礁、右上:流出警報発信機、右下:付着物付試験機)

耐圧フロートへの付着生物は、主にカイメン類・ゴカイ類・フジツボ類であった。表面を覆うのは主にカイメン類であった。付着厚は最大で 3cm 程度のフジツボが確認された。付着量としては礁体表面に比べ少なかった。



耐圧フロートへの付着生物状況

## 3.2 流出軽減技術の検討

過去の流出事故、設置都県が採用している流出軽減技術、係留索の摩耗試験、擦れ試験等、既往知見を情報収集、整理し、流出軽減に有効な対策方法の検討を行った。

### 3.2.1 流出事故の検証

過去の流出事例を以下にまとめた(平成 26 年度水産基盤整備調査事業 中層浮魚礁の保守管理方法の開発で行った事業実施県への情報収集結果 14 事例にその後発生した 2 例を追加した)。過去の流出事例を設置水深、切断箇所、切断ロープ種別に整理し、効率的な流出軽減技術の検討を行った。

16 事例のうちロープが残存していない K,N,P 3 例を除き、判断の付く 13 例については、切断面が揃っているなど、自然条件での切断とは考えにくい痕跡があり、漁具による擦れ摩耗または人為的な切断と推定された。これらの中には、4 本の副係留索がほぼ同じ長さで切断しているものなど、漁具による擦れ摩耗とは考えにくいものも散見された。

また、切断した係留索の種類は副係留索が 1 例、上部係留索(ワイヤー外装ロープ)が 9 例、下部係留索(裸ロープ)が 3 例、不明が 3 例であり、切断箇所は上部係留索(ワイヤー外装ロープ)の上端、シンカー直上など様々で規則性は見いだせなかった。

後述する設置都県へのアンケート結果によると、漁具による擦れ摩耗を考慮し最も深く上部係留索(ワイヤー外装ロープ)を用いているのは礁体下部 550m までであった。ワイヤー外装ロープ長に天頂部水深、礁体長、副係留索長を考慮し、設置水深 600m で区分し、分類を試みた。事故頻度としては低いですが 600m 以浅で下部係留索(裸ロープ)が切断している事例が 4 例あり、上部係留索(ワイヤー外装ロープ)の延長、または保護カバーの導入により切断を抑制できる可能性も考えられた。

図 ロープ種別、設置水深別 切断水深

表 流出事故事例 (1)

表 流出事故事例 (2)

### 3.2.2 既存の流出軽減方法

#### (1) 目的

中層浮魚礁を設置している都道府県が、どのような流出軽減技術を用いているか、現状を把握する。

#### (2) 方法

中層浮魚礁を設置している 8 都県に対しアンケート調査票を郵送し、採用している流出軽減技術について FAX での回答を依頼した。

#### (3) 結果

全 8 都県で流出軽減技術を採用しており、その種類は係留索の補強であった。外装ロープの長さは、浅海タイプについてはすべて、深海タイプについては礁体下部から 200～600m で、漁具による擦れ損傷の軽減を理由としていた。予想される漁法としては、延縄、まき網、曳縄、旗流し、ソデイカ漁が挙げられた。

表 既存の流出軽減方法

### 3.2.3 係留索の擦れ摩耗試験

ワイヤー外装ロープについてはこれまで、ワイヤーの種類や量と擦れ摩耗耐性に関する知見が公開されていなかった。そこで擦れ摩耗試験を行っているロープメーカー2社から外装スペックと試験結果の提供を受け、以下にまとめた。ワイヤー外装により、被覆の無いロープより擦れ摩耗性能が向上しており、SUS ワイヤーロープ外装については 40k g 荷重 300mmストローク 50 往復（総接触長 30m）でワイヤーロープは健全、亜鉛メッキ鉄線外装については 7.5 k g 荷重 150mmストローク 1000 往復（総接触長 300m）でワイヤーは健全であり、偶発的な漁具との擦れ摩耗については十分な強度を持っていると考えられた。

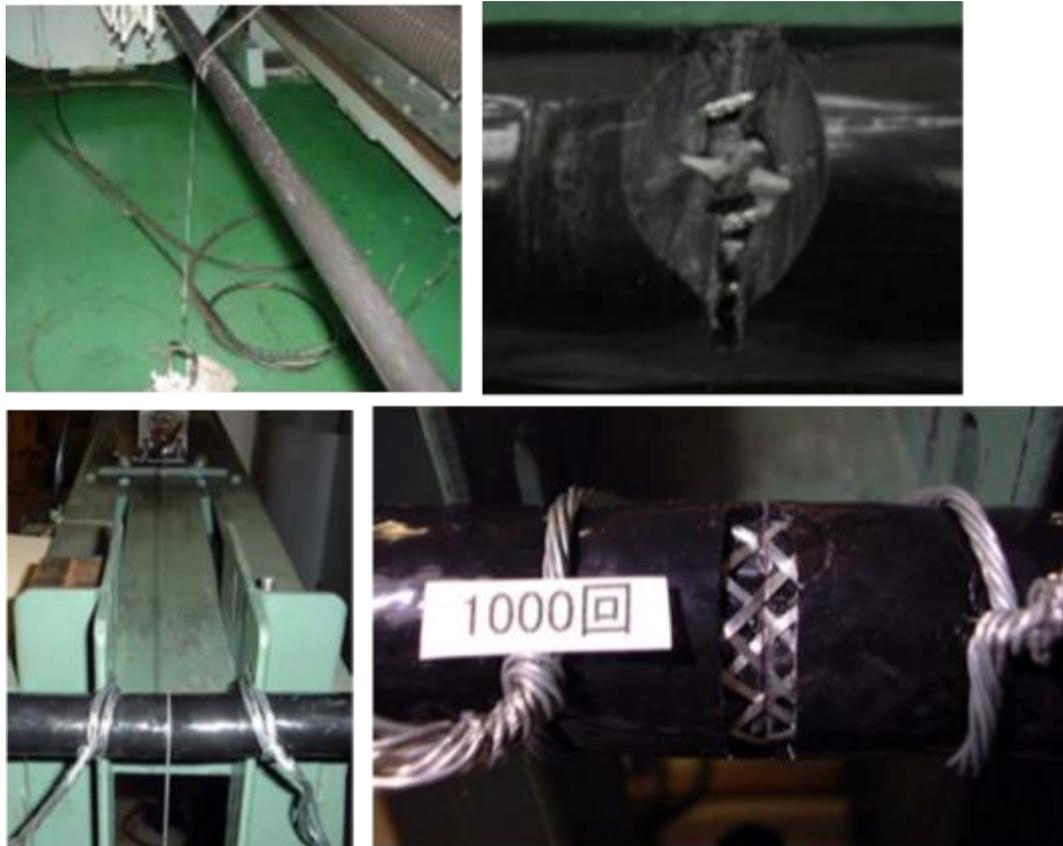


写真 擦れ摩耗試験の状況

表 擦れ摩耗試験結果

No.	試験ロープ仕様				接触ワイヤ仕様		結果	備考
	ロープ径 /外径 (mm)	ロープ素材	ワイヤ種	被覆樹 脂	荷重 (kg)	ストローク (mm) /往復回 数		
1	30 /38	ポリエステル 8打ち	SUSワイヤロープ Φ1mm12本 約75g/m	ポリエチレン	40	300 /50	ワイヤロープは健在	2種の保護加工と裸ロープの比較
2	30	ポリエステル 8打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.5mm	ポリエチレン	40	300 /50	鉄線は未切断。但し被覆損傷有	
3	40	ポリエステル 8打ち	-	-	40	300 /50	ヤーンの折損有り	
4	22	ポリアラレート 12打ち	-	-	7.5	150 /300	切断無	裸ロープの往復回数と劣化の関係
5	22	ポリアラレート 12打ち	-	-	7.5	150 /1000	表面のフィラメントに毛羽立ちが発生	
6	22	ポリアラレート 12打ち	-	-	7.5	150 /1200	表面のフィラメントがわずかに切れ始める	
7	22	ポリアラレート 12打ち	-	-	7.5	150 /2000	最外層ヤーンの半分が切れる	
8	22 /30	ポリアラレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /500	被覆表面に軽度の傷が発生	保護加工ロープの往復回数と劣化の関係
9	22 /30	ポリアラレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /1000	外装被覆が破れ、ワイヤ編組へ達する	
10	22 /30	ポリアラレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /2000	ワイヤの一部に断線発生	
11	22 /30	ポリアラレート 12打ち	亜鉛メッキ鉄線 Φ0.3mm編組 約80g/m	ポリウレタン樹脂	7.5	150 /2500	一対(左右)の編組が切断し、直下の被覆に深く傷が入る	

試験はすべて乾燥状態で実施。接触ワイヤは#29 1×7 約0.9mm

### 3.2.4 流出軽減策の検討

以上を踏まえ、さらに流出軽減を図るための対応策を検討した。

#### (1) 係留システムの改良

事件事例を切断水深、切断原因別に分類し、それぞれの係留システム改良案を示した。なお、既存の流出軽減方法アンケート調査回答によれば、漁具による擦れ摩耗を考慮しワイヤー外装ロープを採用している県のうち最長は550mであった。ワイヤー外装ロープ長に天頂部水深、礁体長、副係留索長を考慮し、設置水深600mで区分することとした。

切断水深が100mまでのものは5事例あるが、切断面もそろっており、故意による人為的な切断と推定された。切断は不可抗力であり、係留索の強度アップを図っても切断を免れることは困難であると考えられた。切断水深が100～600mでワイヤー外装ロープが切断したものは4事例あり、ワイヤー外装ロープの強度アップが対策として考えられた。一方、切断水深が100～600mで下部係留索（裸ロープ）での切断も4事例あり、ワイヤー外装ロープの延長や、施工上の理由で外装をはがされている部分への保護が有効と考えられた。切断水深が不明の2事例も設置水深は600m未満であり、流出事例16例のうち15例は水深600mまでで発生していた。現状では設置都県別にワイヤー外装ロープ長が異なるが、他県船籍船の操業も考えられることからワイヤー外装ロープ長を検討する際、事故頻度を考慮したうえで近隣のロープ長を参考にすることも対策の一つと考えられる。

表 切断水深、ロープ種別、切断原因、対策案





高知県

熊野灘沖 浮魚礁 データ連携

最新の情報

	日時	緯度	経度	水温[℃]	風速[m/s]	風向[°]
No.2	2017年02月14日 09時03分	N33°54.57'	E136°51.35'	17.8	---	---
No.3	2017年02月14日 09時58分	N33°45.16'	E136°34.41'	16.6	---	---

※最新情報は約1時間ごとに更新されます。ただし、ブイが沈み込んでいる時は更新されません。  
 ※浮魚礁の位置データは、上の表の魚礁番号をクリックして、各ページをご覧ください。

三重県

浮魚礁は大切な漁業施設です！

浮魚礁にはルアーを投げ込まない！

浮魚礁への係留・乗り込みの禁止！

神奈川県は漁業振興を目的とし、マクロ藻等回遊魚を集めたり、海洋情報を収集するため、相模湾内に浮魚礁を設置しています。



神奈川県

最新情報一覧

No.	名称	日時	緯度	経度	水温[℃]	風速[m/s]	風向[°]
No.1	江渡埼	2016/4/28 23:00	N33°12.99'	E135°31.85'	23.19	14.8	334
No.2	船早	2016/6/29 16:00	N33°28.16'	E135°46.99'	---	---	---

※最新情報は約1時間ごとに更新されます。  
 ※浮魚礁の位置データは、上記表の浮魚礁番号(No.X)をクリックし、ご覧ください。  
 ※観測データ欄の「空白」はデータ欠測を示します。  
 ※No.2 船早には、水温、風速、風向の観測値を掲載していません。  
 ※観測時には、観測時刻の位置のみを表示しています。

浮魚礁設置図



和歌山県

### 3.3 既存中層浮魚礁の部材劣化試験

#### 3.3.1 係留索

長崎県が設置後7年目と8年目に流出した中層浮魚礁の係留索を供試体とした強度試験を行い、初期規格強度に対する低減率として整理した結果を以下に取りまとめた。

$$\text{低減率} = \text{強度試験結果} \div \text{初期規格強度} \times 100 \quad \%$$

その結果、低減率に変動幅は見られるものの、全ての値が理論値（年率10%低減）以上であり、中層浮魚礁の係留索の安全性が確認された。

表 係留索の初期規格強度に対する低減率

調査年度	魚礁名	副係留索			上部主係留索			下部主係留索			備考
		上端側	下端側	直線部	上端側	下端側	直線部	上端側	下端側	直線部	
H23	M1		67%		100%		100%				水産H23
H23			63%								水産H23
H23			69%								水産H23
H23	M2	74%		68%		100%	100%	80%	85%	84%	水産H23
H23			62%		76%		100%				水産H23
H23			59%		73%						水産H23
H23					76%						水産H23
H23					68%						水産H23
H23					68%						水産H23
H24	K2										81% メーカー
H24	K4	78%	78%			100%	100%	77%			73% メーカー
H24			63%	91%							メーカー
H24	K5		64%	76%							メーカー
H24			69%	78%		100%	100%	100%	75%	79%	77% メーカー
H24				65%	71%			100%			メーカー
H24				66%	68%						メーカー
H24	K6		69%	86%			100%	100%	77%	87%	83% メーカー
H24				70%	88%						メーカー
H24				71%	85%						メーカー
H25	ON1			76%		85%	88%		68%	68%	65% メーカー
H25	ON2			73%		78%		96%	100%		74% 73% 80% メーカー
H25	ON3			74%		75%		92%	87%	79%	74% 75% 水産H25
H25	OH1				100%		100%	100%	100%		92% 96% 100% メーカー
H25	OH2			73%		78%		100%	96%		74% 73% 80% メーカー
H25	OH3			74%		75%		92%	87%		79% 74% 75% 水産H25
H25	K11			60%		61%		100%		100%	74% 72% 76% 水産H25
H25	M3			66%		58%		100%		100%	69% 78% メーカー
H25	M4			54%		60%		100%		100%	73% 79% 水産H25
H26	K10			59%				100%		100%	62% 69% 水産H26
H26	O13			80%		82%		100%		100%	74% 76% 水産H26
H26	OK1				100%			100%	100%	100%	100% 水産H26
H26	OY2				100%			100%	100%	100%	100% 水産H26
H27	K21			83%				100%	100%	100%	69% 76% 77% 水産H27
H27	N6										94% 水産H27
H28	N6			89%							95% 水産H28
H28	N5			84%							98% 100% 水産H28
	データ数	22	23	9	15	13	17	21	13	19	

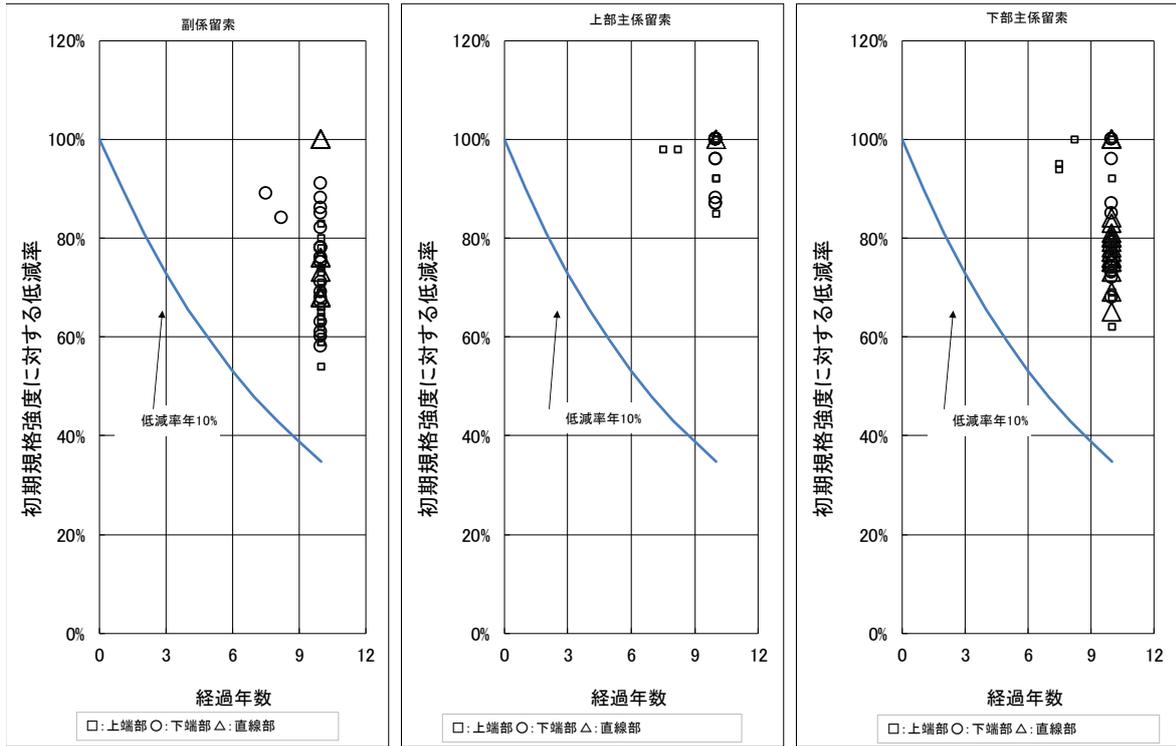
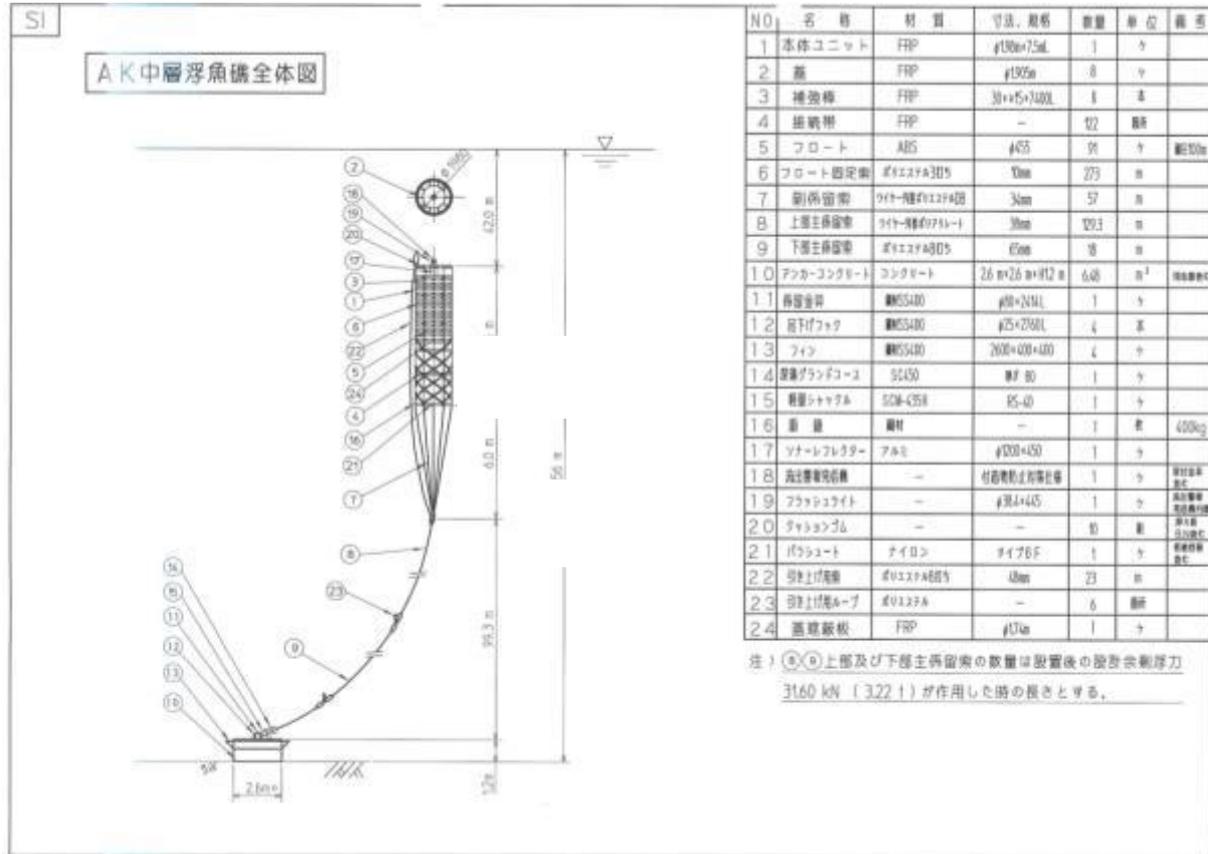


図 初期規格強に対する低減率

### 3.3.1 対馬沖中層浮魚礁No.5 流出事故原因調査(長崎県への報告書 概要)

#### 1. 当該中層浮魚礁の概要

- ①工事年度 : 平成 19 年
- ②工事名 : 対馬地区広域漁場整備工事(上県田ノ浜西工区)
- ③工事番号 : 19 漁整中第 2-2 号
- ④機種 : AK 中層浮魚礁 M-2 型 (遮蔽タイプ)



⑤設置日 : 2008 年 3 月 14 日

⑥設計条件 :

水深 : 156m、波高 : 13.55m、周期 14.9s、波長 346.3m、海面流速 1.18m、

喫水高さ : 2m (付着物有・上部主係留索付) ~ 3m (付着物無・係留索無)

⑦設計位置 : N 34° 32' 38.40" E 129° 06' 44.96" (世界測地)

⑧設置位置 : No.5



## 2. 流出直後の状況確認

### 2.1. 流出連絡の経緯

- ・対馬市上県町沖合で海上保安庁が漂流している浮魚礁を発見（2016年5月1日）
- ・上県町漁業協同組合が近傍港（鹿見港）に曳航
- ・浮魚礁の名盤から長崎県が設置した対馬沖 No.5 であることが判明
- ・仁田港に曳航して陸揚げ回収（5月26日）
- ・回収された中層浮魚礁の状態（表 2-1）

### 2.2. 長崎県の現品確認

- ①実施日 : 2016年5月30日
- ②実施場所 : 岡部株式会社 小江工場
- ③実施者 : 長崎県水産部漁港漁場課 中ノ瀬課長補佐、阪口主任技師
- ④内容 : 対馬より輸送された中層浮魚礁の保管状況の確認

### 2.3. MF21 の現品調査

- ①調査日 : 2016年6月16日
- ②調査場所 : 岡部株式会社 小江工場
- ③調査者 : MF21 福井県立大学海洋生物資源学部 教授 大竹臣哉  
長崎県水産部 横山参事監  
長崎県水産部漁港漁場課 中ノ瀬課長補佐、阪口主任技師、和田技師  
岡部株式会社 海洋事業部 志賀氏  
株式会社テザック 西氏
- ④調査内容 : 浮体の外観、係留索の状態確認、原因調査内容についての検討

表 2-1 回収時中層浮魚礁の状態

部材	項目	状況
浮体	浮体の外観	大きな損傷・破損は確認されなかった。 付着物は多量に付着していた。 急浮上対策用パラシュートは格納されたままだった。
	付着物	主生物：ササギ、イガイ、ヒウギガイ、フジツボ、カイメン 水中重量：3.9 ~ 8.3 kg/m <sup>2</sup> ,付着物厚さ 10~15cm
係留索	係留索の外観	上部主係留索で切断されていた。 残存係留索には特に大きな損傷は確認されなかった。 上部索（ワイヤー外装部）の切り口は鋭利に斜めに切断されていた。
搭載機器	流出警報発信機	頭部カバーが付いた状態で回収されていた。 大きな損傷は確認されなかった。 流出時の発信は確認されていない。
	フラッシュライト	外観上は大きな損傷はなかった。 回収時の点灯は不明であった。



写真 2-1 鹿見港での保管状況 (5/12)



写真 2-2 名盤「対馬-No5」(5/12)



写真 2-5 鹿見港からの撤去 (5/26)



写真 2-6 仁田港への陸揚げ (5/26)

### 3. 調査結果

#### 3.1. 浮体

##### (1) 外観状況(写真 3-1-1)

- 浮体の組立に用いられた部材数量に異常は確認されなかった。
- 浮体の組立状況に異常は確認されなかった。
- FRP 補強棒に破損や異常は確認されなかった。
- 浮体頂部のクッションゴムに裂傷が確認された。
- パラシュートの作動は認められなかった。

##### (2) FRP 部材の物性試験結果 (表 3-1-1)

試体として FRP 補強棒から 18 検体を抜き取り、曲げ強度について JIS に準じた試験を行った結果、全ての供試体において設計基準値を満足した。

##### (3) 所見

浮体には破損や損傷は認められないが、再利用については、メーカー品質保証がされない。

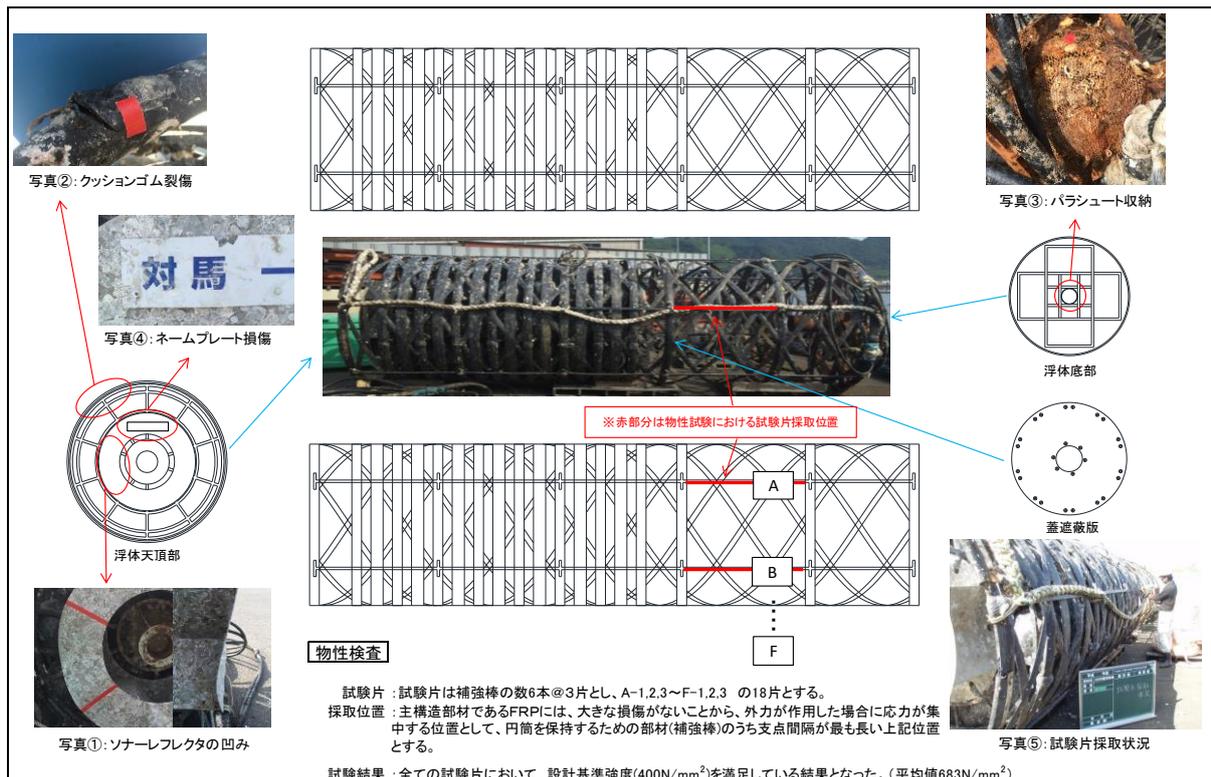


写真 3-1-1 浮体部の外観状況

表 3-1-2 FRP 補強棒の強度試験結果

(N/mm<sup>2</sup>)

NO.	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3
試験結果	579	608	737	810	773	688	789	682	700
設計基準	≥ 400								
NO.	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2	F-3
試験結果	709	768	657	648	639	651	558	631	671
設計基準	≥ 400								

### 3.2. 係留索

3.2.1 外観状況 係留索の外観状況の観察結果を表 3-2-1 に示す。

表 3-2-1 外観状況観察結果

係留索 名称		観察結果
副係留索	No	目立つ損傷は認められない
回収索		一部に著しい摩耗が生じている(写真 3-2-2) 陸揚げまでの期間、礁体の下敷きになっていたことによるものと推測される
上部索	1	ロープ表面に軽微な擦過痕がみられるものの、目立った損傷などは認められない
上部索	2	下端側末端部のセキ巻ロープがアンカー方向にズレが生じているが、原因については不明である(写真 3-2-3)
上部索	3	切断部から 500mm の位置に著しい損傷が認められる また、上端側の連結部に損傷が認められる(写真 3-2-4) 強固な物体が引っかかり、引っ張ったような現象が推測される
切断面		切断面の繊維長が揃っている部分と不揃いの部分が混在する(写真 3-2-5) 切断面の被服部は押し切られたような形跡が見られる (写真 3-2-6)



写真 3-2-1 回収係留索



写真 3-2-2 回収索



写真 3-2-3 上部索 3 の下端側



写真 3-2-4 切断部から 500mm



写真 3-2-5 切断部

写真 3-2-6 切断部

### 3.2.2. 室内試験

回収された係留索を供試体として切断面のマクロ及びミクロ調査と残存強度試験を実施した。

#### 1) マクロ調査結果

- ロープを形成している 12 本のストランドのうち、10 本が同じ位置で切断して短く（写真 3-2-7）、且つ切断面が揃っており（写真 3-2-8）、さらに端部の形状に乱れは見られない（写真 3-2-10）
- 中程度の長さのストランドも形状の乱れはない（写真 3-2-11）
- 最も長いストランドは端部に撚糸の乱れが生じている（写真 3-2-12）
- 切断部付近の外装被覆ワイヤに腐食が生じているが、流出後から調査までの期間に腐食したと思われる



写真 3-2-7 切断部

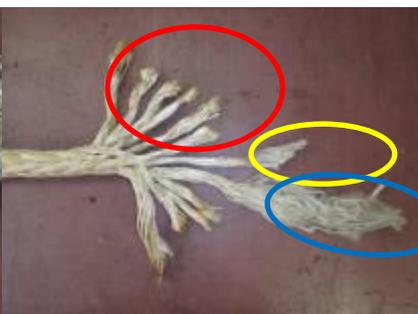


写真 3-2-8 切断部  
(ストランドを分解・展開)



写真 3-2-9 短いストランド  
(写真 3-2-8 の赤丸部分拡大)



写真 3-2-10 ストランドの拡大  
(写真 3-2-9 拡大)



写真 3-2-11 ストランドの拡大  
(写真 3-2-8 の黄色部分拡大)



写真 3-2-12 ストランドの拡大  
(写真 3-2-8 の青色部分拡大)

### 3.2.3. ミクロ調査結果 資料 2-2 写真 13-29

切断面が揃っているストランドの繊維と不揃いなストランドの繊維を採取して顕微鏡観察を行い、①鋭利なエッジによる切断面、②ナイフによる切断面、③荷重による切断面との比較を行った。

- 切断面が揃っているストランドは、鋭い切断面となっている単糸が目立つ（写真 3-2-13）
- 切断面が不揃いなストランドは、鋭い断面となっている単糸はほとんど見られない（写真 3-2-14）
- 切断面の比較においては、揃っているストランドの切断面は比較的ナイフによる切断状況と類似しており、不揃いなストランドは引張荷重またはエッジによる摩耗切断に比較的類似している



写真 3-2-13 切断面が揃っているストランド（左：ストランド、右：拡大）



写真 3-2-14 切断面が不揃いのストランド（左：ストランド、右：拡大）



写真 3-2-15 エッジにて摩耗切断させた係留索と同材料のヤーン



写真 3-2-16 ナイフにて切断させた係留索と同材料

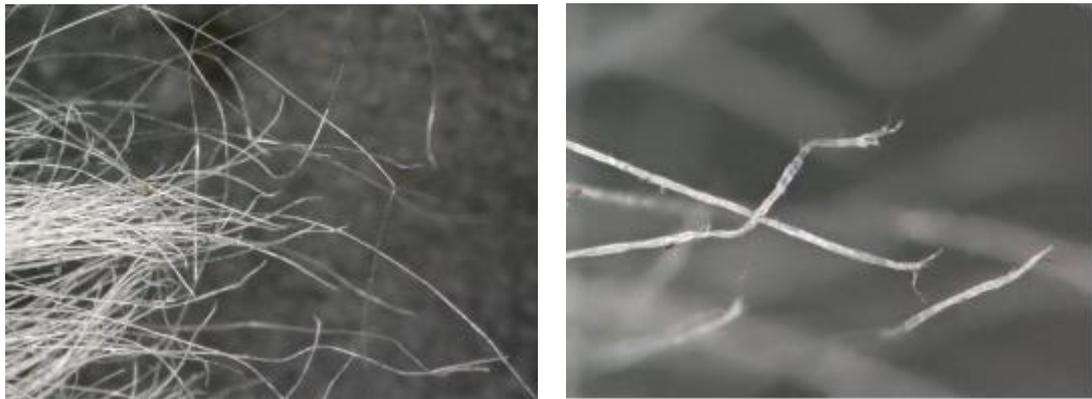


写真 3-2-17 引張荷重により破断した係留索と同材料

### 3.2.4. 残存強度試験

#### ① 上部主係留索

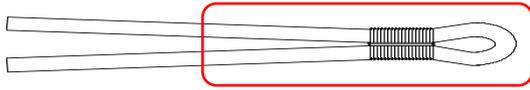
上部索 No.1 の礁体側既存アイを含む末端部分及び切断した上部索 No.3 の本体部より試料を採取し、引張試験を実施した。



	上部索 No.1	上部索 No.3
規格強度	460kN	460kN
破断強度	452kN	484kN
破断箇所	既存アイブライズェント <sup>®</sup>	アイブライズェント <sup>®</sup>
初期規格強度に対する 低減率	98.3%	105%

#### ② 副係留索

上部索との連結部分を中央として試料を採取し、引張試験を実施した。



	副係留索
規格強度	202kN
破断強度	169kN
破断箇所	中央部
初期規格強度に対する 低減率	83.7%

### 3.2.5. 所見

残存強度試験より切断部直近から採取した上部主係留索 No.3 は規格値に対し 100%以上の強度を有しており、経年による強度低下に起因する切断ではないと考えらる。

回収品調査及び切断部調査では切断部と切断部付近に多数の擦過痕が認められた事から今回の切断は何らかの物体との接触によって繊維に損傷が生じたために破断したものと推測される。

### 3.3. 搭載機器

流出時に流出警報は発信されなかった。

#### 3.3.1. 流出警報発信機の状況

- キャップは外れていなかった
- キャップ内部への海水の浸水と汚泥の蓄積を確認
- キャップと外筐フランジの間に隙間を確認
- 機器内部（ガスボンベ室、電子機器室）への海水の浸水・腐食および乳白色の液体（海水とアルミニウムの化学反応により生成）を確認
- 機器内部部材（ソレノイド、ガスボンベ室、電子機器）の腐食を確認

#### 3.3.2. フラッシュライト

- 外観に目立つ損傷は認められなかった
- 機器内部への浸水はみられず、損傷も認められなかった
- 電池電圧は消費されていなかった（夜間点滅していなかった）
- 室内にて圧力センサ、光センサ、フラッシュライトの駆動回路について検査した結果、全て正常であったが、ランプは点灯しなかった

上記の結果、フラッシュライトの内部機器は正常であったが電池電圧が消費されていなかったことから、光源（キセノンランプ）の故障（ガス抜け）によって作動しなかったものと思われる。

#### 4. 切断原因の推定

今回の係留索切断は経年による強度劣化に起因する破断では無く、鋭利なエッジまたはナイフによる人為的と思われる力（行為に至る経緯は不明）によって、繊維に損傷が生じて破断したものと推測された。以下にその根拠を示した。

- 係留索の強度試験の結果、上部主係留索は初期規格強度の98%（端部）・100%以上（直線部）、副係留索は84%を保持していた。
- また、切断部はスプライスエンドでは無く直線部で、切断面は過荷重による破断の際に生じる撚りや繊維の乱れも軽度で繊維端が概ね揃っていた。
- ミクロ調査による係留索の切断面は鋭利なエッジまたはナイフによる切断面に類似していた。

#### 5. 今回の調査からの課題

今回の流出事故調査結果から抽出される課題について整理して以下に示した。

##### ● 係留索切断に対する課題

今回の流出事故は、上部主係留索のワイヤー外装加工が施された部位における切断であり、不可抗力によるものと考えられることから有効且つ経済的な対策は困難であるが、現状の耐摩耗・耐切創性を向上させる技術（素材）について参考として以下に示した。

- ・ケブラ繊維：高強度、高耐熱・・・防弾チョッキなどの素材
- ・アラミド繊維重織物：高強度、高耐熱、高薬品・・・防弾チョッキなどの素材
- ・超高密度ポリエチレンファイバー：ナイフ等の突き刺しに強い
- ・その他：ワイヤー外装の厚み・太さを増す

##### ● 漁業者への中層浮魚礁設置の周知と啓蒙

係留索切断付近には漁具のようなものでひっかけられ、引っ張られたことによってついた損傷が見られた。これらの行為を軽減するためには中層浮魚礁を利用する漁業者や近傍で操業する漁業者への情報提供と使用方法の啓蒙が重要であると思われる。

##### ● 安全対策に対する課題

今回の流出事故では「流出事故を知らせる警報システム」及び「流出時夜間安全対策として設置されたフラッシュライト」は作動しなかった。また、急浮上防止対策として設置されているパラシュートは、収納容器内外に付着生物がたくさん付着した状態で開いていなかった。以下にそれぞれの安全対策が作動しなかった原因と今後設置される中層浮魚礁についての対策について示した。

警報システム：中層浮魚礁に設置された流出警報発信機内に海水が浸水（浸水時期不明）し、機器内の部材が腐食して流出警報発信機が作動しなかった。対策としては「流出警報発信機の適正な保守管理の実施」や「より信頼性の高い警報システムの採用」が有効な対策と思われる。

フラッシュライト：光源（キセノンランプ）の偶発的な故障が点滅しなかった原因であることが推察された。偶発的な故障であるため対策は困難と思われる。

パラシュート：パラシュートが開かなかった原因としては不明であるが、パラシュート収納部には付着物が多数付いていたことより、今後の対策としては付着物がつきにくい処理や急浮上により多くの抵抗がパラシュートにかかる構造の検討が必要と思われる。