

# 水産基盤整備調査委託事業報告書

## I. 課題名

「漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」のうち  
(4) 魚礁の設計手法 (H24年度)  
漁場施設の設計手法 (H25～26年度)

## II. 実施機関名、部局名及び担当者名

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	川俣 茂 <sup>b</sup> 森口朗彦 <sup>b</sup> 桑原久実 <sup>b</sup>
	水産業システム研究センター	
	生産システム開発グループ	大村智宏 <sup>a</sup> 高木儀昌 <sup>a</sup>
国際気象海洋株式会社	技術部	小林 学 <sup>b</sup> 野路雅貴 <sup>b</sup>
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	東京本部	
	技術部	綿貫 啓 <sup>ab</sup> 奥野正洋 <sup>ab</sup>

<sup>a</sup> H24年度担当, <sup>b</sup>H25～26年度担当

## III. 調査実施年度

平成 24～26 年度

#### IV. 緒言

現在の漁場の施設の設計手法は、平成5年発行の「沿岸漁場整備開発事業設計指針」に体系化されたものを基本としており、2003年発行の「漁港・漁場の施設の設計の手引」<sup>1)</sup>（以下、手引と記す）では一部改訂されているが、流体力や安定質量の算定法などの設計の基本的部分は従来そのままとなっている。その中には、波の不規則性や流体力係数の周期依存性などが考慮されていない簡略的手法が含まれ、近年の科学的知見や国際規格 ISO などの一般的基準に整合していない部分、設計の実態に合わない部分、あるいは漁場の施設に対する最近のニーズに対応できなくなっている部分が出てきている。

本課題では、漁場の施設の重要な設計手法として、沈設魚礁の流体力算定法、着定基質（石材）の安定質量算定法、波動流速の算定法および浮魚礁の設計条件の4つの項目を取り上げ、それらの問題点を示すとともに修正案を検討した。

## V. 沈設魚礁の流体力算定法

### 1. 背景と目的

沈設魚礁の流体力算定は、手引には明記されていないが、流体力を流速の2乗に比例する抗力と流体の加速度に比例する慣性力の和で表す次のモリソン式<sup>2)</sup>に基づく。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| + \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5-1)$$

ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $C_D$ ：抗力係数、 $C_M$ ：慣性力係数（質量係数）、 $A$ ：部材の基準面積、 $V$ ：部材の基準体積、 $u$ ：波または流れによる水平流速。モリソン式は、元々は円柱状物体に働く波力を算定するための半経験式として示されたが、その後の多くの研究によって波の場、流れの場または波と流れの共存場での流体力を算定できる実用公式としてISO等の技術基準に広く採用されている。しかしながら、石油関連産業の沖合構造物や海底パイプラインなどの海洋施設のほとんどが円柱状の部材で構成されるのに対して、沈設魚礁の大部分は角柱、平板、L型アングルなどの円柱以外の部材で構成され、また沈設魚礁特有の経済的設計にも配慮して、モリソン式の適用に当たっては、表5-1に示す独自の簡略的手法が採用されてきた。ISO等の一般的設計基準との不整合に関しては、最近の高層魚礁に関する実験的検討<sup>3)</sup>によって問題が指摘されているが、全体的な見直し案の策定には至っていない。

沈設魚礁の流体力算定における問題点を表5-1に示す。

表5-1 沈設魚礁の流体力算定における現行の方法とその主な問題点

項目	現行の方法	問題点
$C_D$	条件によらず一定 定常流の模型実験値が採用	一般に $Re$ 、 $K_C$ 、相対粗度、 $U_c/U_m$ の関数である <sup>4)</sup> が、その記述も決定方法も示されていない。
$C_M$ と $V$	一律に $C_M=2$ 、 $V$ =実容積	一般に $Re$ 、 $K_C$ 、相対粗度、 $U_c/U_m$ の関数である <sup>4)</sup> が、その記述も決定方法も示されていない。 平板、L型アングルなどの円柱以外の形状の部材の $V$ の定義が不明。
波動流速 $U_m$	有義波からの算定値（非砕波領域）	不規則波の波群中の最大波で最大流体力が発生するため、波力が過小評価される。
流れの速度 $U_c$	表層での設計流速（=最大流速×1.6）から流速の鉛直分布に1/7乗則を仮定して推定	妥当性の検証がない。 海洋モデル、観測機器等の最新技術の利用についての記述がない。
波と流れの流速の合成	波と流れの向きが同じと仮定して両者の流速をベクトル合成	波と流れが交差する場合、多方向性の波の場合に流体力が過大評価される。

$C_D$ は波動流中と定常流中で変わらないと暗に仮定され、魚礁縮尺模型を用いた風洞または水槽での定常流実験による実験値、または魚礁部材と同じ形状の物体の定常流中での $C_D$ の文献値が設計に用いられている。一方、 $C_M$ にはポテンシャル流れを仮定した場合の円柱の理論値 $C_M=2$ （ $V$ =魚礁または部材の実容積）が一律に用いられている。 $C_M$ の決定では、その背景にある流体力学的モデルは重要である。慣性力は、一般に $V$ を物体の実容積として、フ

ルード・クリロフ力（非定常流が物体によって乱されないと仮定したときに、物体表面での圧力によって生じる力） $\rho V \partial u / \partial t$  と付加質量力（物体周辺のある量の流体があたかも物体とともに静止するかのように働く力） $\rho C_a V \partial u / \partial t$  の和で表される。そのため、次式が成り立つ。

$$C_M = 1 + C_a \quad (5-2)$$

ここに、 $C_a$  は付加質量係数。流体が遅く、物体表面に沿って流れる場合は、ポテンシャル流れを仮定して付加質量  $\rho C_a V$  を理論的に求めることができるが、式(5-2)は物体の形状によっては必ずしも適切な表現にならない。たとえば、ポテンシャル流れを仮定したときの迎角  $90^\circ$  の 2 次元平板（幅  $D \times$  スパン長さ  $l$ ;  $l \gg D$ ）の付加質量は、よく知られているように厚さ（すなわち実容積）には無関係で、幅  $D$  を直径とする円柱相当体積の流体質量  $\rho \pi D^2 b / 4$  に一致する<sup>5)</sup>。また、設計条件の速い流れの中では、一般に物体表面に沿う流れが剥離して後流渦 wake が発生するため、付加質量は理論値よりかなり大きくなる。しかし、この剥離はレイノルズ数  $Re$ 、クーリガン・カーペンター数（KC 数） $K_C$ 、相対粗度および流れ・波の流速比に依存した、予測が非常に難しい現象である。そのため、 $C_D$  と  $C_M$  は一般に実験によって得る必要がある<sup>6)</sup>。

レイノルズ数、KC 数または相対粗度と  $C_D$ 、 $C_M$  との関係については、円柱状物体に関する研究知見が数多くあるが、沈設魚礁の主要構成部材である角柱、平板、L 型アングルなどの円柱以外の部材では知見が非常に限られており、実験により知見の充実を図る必要がある。

複数の部材から構成される魚礁では、 $A$  と  $V$  の決め方も問題になる。式(5-1)において実験により直接決定できるのは  $C_D A$  と  $C_M V$  のみで、それらの実験値から  $C_D$  と  $C_M$  を求めるためには予め  $A$  と  $V$  を決めておく必要がある。それらの定義は本来、任意であるが、その定義の背景には抗力と慣性力の物理的モデルがある。それらを見捨てて  $A$  と  $V$  を任意に定義してしまうと、 $C_D$  と  $C_M$  も任意に変わってしまうため、他の構造物との比較や類似施設への応用が困難になる。このことは、魚礁のように形状や迎角（流れに対する向き）が異なる複数の部材から構成される構造物の場合は特に重要で、適切な定義が求められる。

式(5-1)における流速  $u$  は、手引では波と流れの向きが同じと仮定し、波動流速と流れの速度（平均流速）の合成流速として次式で与えている。

$$u = U_c + U_m \cos \theta \quad (5-3)$$

ここに、 $U_c$  は流れ（平均流）の速度、 $\theta$  は波の位相、 $U_m$  は波動流速振幅であるが、現行の設計では、有義波の諸元をもつ微小振幅波の値、すなわち次式より  $H = H_{1/3}$ 、 $T = T_{1/3}$ （ここに、 $H_{1/3}$ ：有義波高、 $T_{1/3}$ ：有義波周期）とにおいて求められる値としている。

$$U_m = \frac{\pi H \cosh kz}{T \sinh kh} \quad (5-4)$$

ここに、 $h$  は水深、 $z$  は底面からの高さ、 $k$  は波数（ $= 2\pi/L$ 、 $L$ ：波長）で、次の分散関係式により与えられる。

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (5-5)$$

ここに、 $\omega$ ：角周波数（ $= 2\pi/T$ ）。しかし、これまでの高層魚礁の波力に関する模型実験<sup>3)</sup>により、不規則波による最大流体力が波群中の最大波で発生し、有義波から算定される力の約  $(H_{\max}/H_{1/3})^2$  倍になることが示されている（ここに、 $H_{\max}$ ：最大波高）。しかしながら、沈設魚礁には正確には水平流体力だけでなく、鉛直流体力も作用し、また最大の水平流体力が静止摩擦力を瞬間的にわずかに超えただけでは有意な滑動は起こらない可能性もあり、見直しに当たっては、最大静止摩擦力と最大水平流体力との比のみで滑動に対する安全性を評価することの妥当性を実験で確かめておく必要がある。

レイノルズ数と KC 数は、一般に代表流速  $U$ 、物体の代表長さ  $D$ 、流体の動粘性係数  $\nu$ 、

振動流の流速振幅  $U_m$  と周期  $T$  を用いて、 $Re = UD/\nu$ 、 $K_C = U_m T/D$  で表される。沈設魚礁の場合も、 $C_D$ 、 $C_M$  を常に相似模型を用いた実験によって決めるのであれば、 $D$  を任意に決めることができる。しかし、 $C_D$ 、 $C_M$  の背景にある流体力学的モデルを無視して  $D$  を任意に決めてしまうと、魚礁の構造を海域によって多少修正する場合に実験がその都度必要になったり、他の実験値との比較ができなくなったりすることから、好ましくない。流体力学的モデルに適合するよう  $D$  を定義し、 $C_D$ 、 $C_M$  の汎用的な経験式を構築することが望まれる。

レイノルズ数は、縮尺模型実験の結果を実際の設計に用いる際に留意すべき要因として重要である。たとえば、円柱の  $C_D$  は、レイノルズ数  $Re$  の増加に伴い、次第に低下してからほぼ一定値を示し、 $Re$  がある値（臨界レイノルズ数  $Re_c$  という）を超えると、激減する（この領域を臨界域という）。ここで、 $C_D$  がレイノルズ数に対して次第に低下するのは、抗力に占める摩擦抗力の割合が次第に低下するためで、その後の  $C_D$  が一定値を示すのは、圧力抗力が支配的になって、円柱の表面から境界層が剥離して背後に剥離領域（後流渦域）が安定的に形成されるためである。しかし、臨界域では乱れの増加により、剥離が起りにくくなって剥離点が後方へ移動し、その結果、後流渦域が縮小し、 $C_D$  が低下する。 $C_D$  が最低になった後の超臨界域では、 $Re$  の増加に伴い、 $C_D$  は漸増し、 $C_D$  が一定になる領域（極超臨界域という）に至る。

石油関連産業の沖合構造物の ISO の基準では、 $C_D$  と  $C_M$  が典型的な設計値として表 5-2 の値が示されている。これらの値は、実物大模型実験を参考に決められたもので、実用的にレイノルズ数に独立であるとみなせ、亜臨界域での  $C_D$  (=1.0) よりも小さい極超臨界域の値である。波・流れが極度に激しい設計条件では、多くの場合は超臨界域または極超臨界域に入り、また実際の条件がより緩くて臨界域に入る場合でも表中の値は安全側の設計値であるとされている<sup>4)</sup>。

表 5-2 国際規格における流体力係数の典型的値<sup>4)</sup>

表面の状態	$C_D$	$C_M$
滑らかな面	0.65	1.6
粗い面	1.05	1.2

高流速中での抗力係数は、物体背面から境界層が剥がれて形成される後流渦域（剥離領域）に密接に関係する。円柱のような鈍い断面形状の物体では、剥離点の位置が変わりやすいため、後流渦域はレイノルズ数、KC 数、相対粗度や主流の乱れによっても顕著に変化する。しかし、稜角部を有する断面部材では、剥離点が変わらないため、流体力係数は実用的にはレイノルズ数に独立であるとされている<sup>4)</sup>。しかしながら、角型魚礁の大型模型（1×1×1m、部材断面 12.5×12.5cm）を用いた定常流中での実験で  $Re$  が  $1.3 \times 10^5$  ほどを超えると、 $C_D$  が激減することを示した例<sup>7)</sup>があり、このことに関して様々な条件での実験的検証が必要である。

KC 数は、波の場での“wake encounter”（後流渦の衝突）の影響を測る尺度として重要である<sup>4)</sup>。流れの中での物体の背後には、後流渦が形成される。振動流が反転すると、後流渦は速度が遅いので、周辺の乱されていない流体よりも早く戻ってきて、より速い速度で物体に衝突する。このため、波動流中での  $C_D$  は定常流中での  $C_D$  の値よりも大きくなる。高 KC 数では、後流渦はより遠くへ移動して物体に戻る前に壊れてしまい、さらに波が多方向的であったり、波と交差する流れの成分があったりすると、物体に衝突する可能性はさらに低下する<sup>4)</sup>。これらのことは、手引には記載がないが、ISO を始めとする多くの設計基準に記載されている重要な現象である。

沈設魚礁は並列または縦列する複数の部材から構成されるため、各部材に作用する流体力は、閉塞効果 blockage effect や遮蔽効果 shielding effect によって流れの中に単独に置かれた場合と異なる。ここで、閉塞効果とは、構造物全体による流れの遮蔽による影響をいい、遮蔽効果とは上流側の構成部材の背後での流れの減速による影響をいう。これまでの魚礁の設計では、礁全体の部材に作用する流体力は、遮蔽効果により単独部材の流体力の合計値よりも低下すると考えられてきた<sup>8)</sup>。単独部材の流体力の合計値として礁全体の流体力を算定する方法は大変便利であるが、複雑な形状の部材から構成される沈設魚礁についてはまだ十分に検討されておらず、閉塞効果により流体力が増加する可能性もある。より詳細な検討が必要である。

海洋構造物の表面は、時間の経過とともに、フジツボ、カキ、イガイなどの付着生物により覆われ、断面積だけでなく、表面の粗度も変化する。そのため、ISO 等の設計基準では、表 5-2 の例のように、付着生物に覆われた物体の表面は粗面とみなして、流体力係数に付着生物のない状態（滑面）と異なる値が用いられている。しかし、付着生物の被覆が流体力係数に及ぼす影響については、円柱以外の物体では知見がなく、また現在の沈設魚礁の設計では全く考慮されていない。沈設魚礁特有の部材についても、付着生物の影響を調べる必要がある。

モリソン式は、国際的に広く認められた流体力算定の実用式である。しかし、以下のような複雑な波・流れ条件の実海域への適用の問題や沈設魚礁特有の問題があり、モリソン式が必ずしも最良の方法ではない可能性がある。その最初の問題は、魚礁の多くが板状の部材を含む複雑な形状であるため、基準体積  $V$  を適切に決められないことである。また後述するように、平板や板材を主要部材とする鋼製魚礁では、 $C_M$  は KC 数が増加しても収束することなく、増加し続けるため、実験データから  $C_M$  の設計値を決め難いことも問題である。これらの問題に対しては、慣性力は抗力に対して相対的に小さいので、 $C_M$  にポテンシャル流れからの理論値を代用する方法が考えられる。しかし、このような扱いは、モリソン式における  $C_D$  と  $C_M$  の独立性の仮定に反し、一般に推奨されていない<sup>6)</sup>。また、この独立性については実際には両係数間には一方が増加すると他方が減少するという経験則<sup>6)</sup>があり、モリソン式が現象を正確に記述できていないことも示唆されている。さらに、先に述べたように、実海域では波の多方向性や波と流れの交差によって、後流渦の衝突による抗力増加は起こり難くなることから、同一方向の波と流れを仮定してモリソン式を適用することは、流体力を過大評価する可能性がある<sup>9)</sup>。このようなことから、本課題ではモリソン式に代わる手法として、最大力係数  $C_{Fmax}$  に基づく方法を提案し、その有効性と妥当性を検討した。

## 2. 基本部材の流体力係数

### 1) 方法

沈設魚礁の基本部材として、角柱、平板および L 型アングル（等辺山形鋼）を取り上げ、それらの KC 数と流体力係数との関係を、図 5-1 に示す造波水槽（長さ 100m×幅 1m×水深 2m）を用いた二次元断面実験により調べた。測定は、反射波の影響を避けるため、水槽中央付近で、造波開始後間もない時間帯における規則的進行波下で行った。用いた部材模型は、平板（幅 15mm 及び 30mm×厚さ 3mm）、等辺 L 型アングル（幅 15mm 及び 30mm×厚さ 3mm）、正方形角柱（辺長 15mm 及び 30mm）で、いずれも長さ 996mm のアルミ製である。これらの模型を、水路底面から 50cm の高さに鉛直に立ち上げた 2 本の二分力計（三計エンジニアリング、LV30-1K、直径 30mm の円筒形）の先端（径 3mm×45mm のステンレス製棒ねじ）部に、部材面が水路幅方向に平行になるよう、固定して、測定を行った。また、L 型アングルについては二次元断面を 45° 傾けた状態（迎角  $\alpha = 45^\circ$ ）でも同様の測定を行った。造波条件は、2、3、4、5 s の 4 通りの周期の各々に対して波高を 3、4 通りに変えた規則波の条件で、

水平力と、容量式波高計により測定断面での水面変位  $\eta$  を同時にサンプリング周波数 20Hz で計測した。また、模型に作用した水平力  $F_x$  は、同一の造波条件で部材模型のない状態で再測定した力を差し引いて求めた。

なお、水平力とともに鉛直力も同時計測したが、鉛直力は水平力に比べて小さく、ここではその結果は省略した。

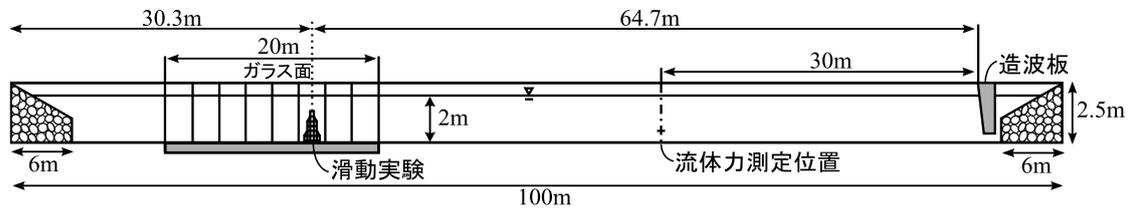


図 5-1 沈設魚礁の実験に用いた造波水槽

解析では、次式を模型高さでの水平流速  $u$  と  $F_x$  の時系列に当てはめ、最小二乗法により係数  $a$  と  $b$  を決定し、基準面積  $A$  と基準体積  $V$  から  $C_D$  と  $C_M$  を求めた。

$$F_x = au|u| + b \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5-6)$$

$$C_D = \frac{2a}{\rho A}, \quad C_M = \frac{b}{\rho V} \quad (5-7)$$

ここで、水平流速  $u$  は水面変動のフーリエ成分波の重ね合わせにより推定した。

## 2) 結果

角柱の  $K_C - C_D$  および  $K_C - C_M$  の関係を図 5-2 に示す。図中には参考に Heideman・Sarpkaya<sup>10)</sup> と岡島ら<sup>11)</sup> による振動流水槽実験の結果 (スプライン近似曲線) も合わせて示した。ここで、角柱の基準体積  $V$  は Det Norske Veritas (DNV)<sup>12)</sup> によって示された  $V = \pi D^2 l / 4$  で定義した。これにより、ポテンシャル理論による角柱の  $C_M$  の理論値は、付加質量の理論値  $1.51 \rho \pi D^2 l / 4$ <sup>12)</sup> から、

$$C_M = (D^2 l + 1.51 \pi D^2 l / 4) / (\pi D^2 l / 4) = 4/\pi + 1.51 = 2.78$$

となり、後述する L 型アングルや角柱の値に近くなる。

迎角  $90^\circ$  の平板の実験結果を、Keulegan・Carpenter<sup>13)</sup> による造波水槽実験と松本・岡島<sup>14)</sup> による振動流水槽実験での結果 (スプライン近似曲線) とともに図 5-3 に示す。角柱の場合と異なり、 $C_M$  が  $K_C$  の増加に対して収束せずに漸増している。

迎角  $90^\circ$  と  $45^\circ$  の L 型アングルの  $K_C - C_D$  と  $K_C - C_M$  の関係をそれぞれ図 5-4 と図 5-5 に示す。基準体積を、L 型アングルの一辺長さ  $b$  ではなく、波の方向に直交する方向の射影面積の幅  $D$  を直径とする円柱相当分の体積とすると、図に示すとおり、迎角によらず  $K_C$  と  $C_M$  はほぼ同じ関係となることがわかった。

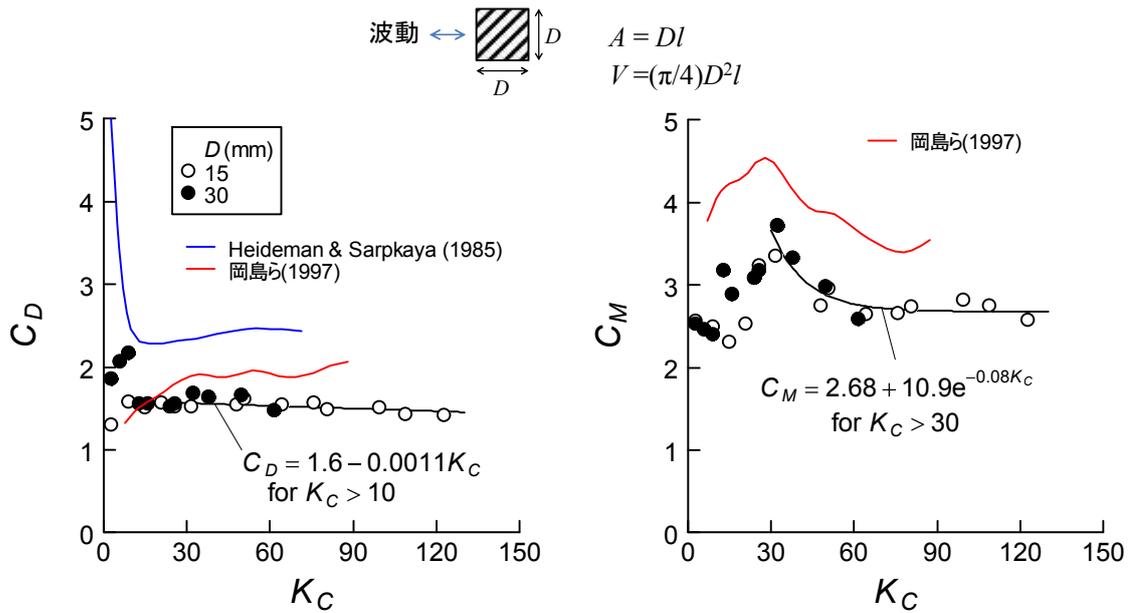


図 5-2 正方形角柱の  $K_C-C_D$  と  $K_C-C_M$  の関係  
 黒線：非線形最小二乗回帰による近似式

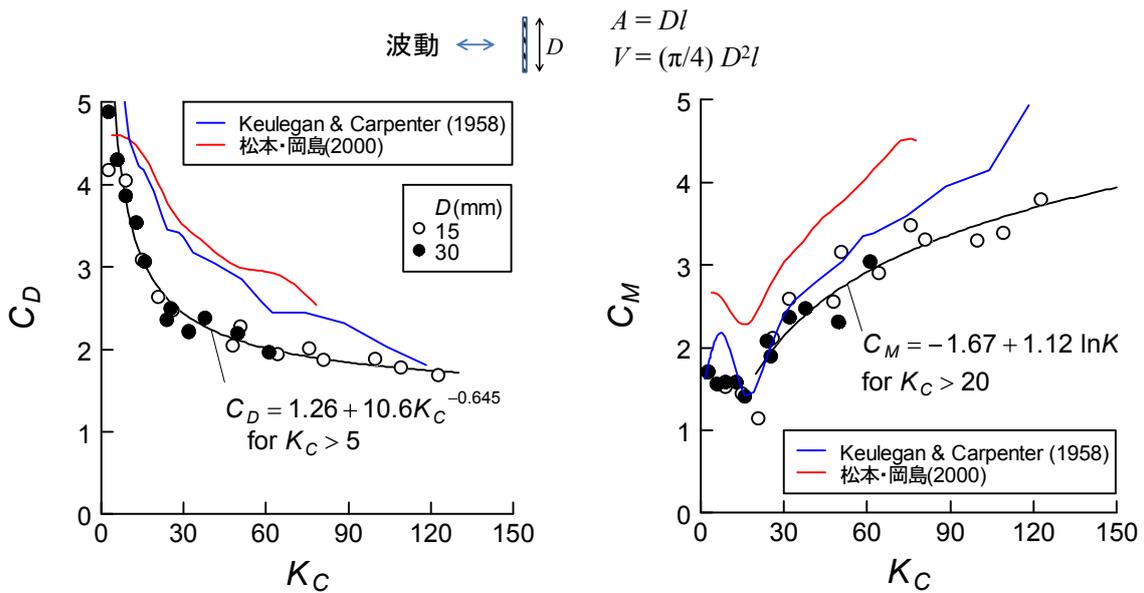


図 5-3 平板の  $K_C-C_D$  と  $K_C-C_M$  の関係  
 黒線：非線形最小二乗回帰による近似式

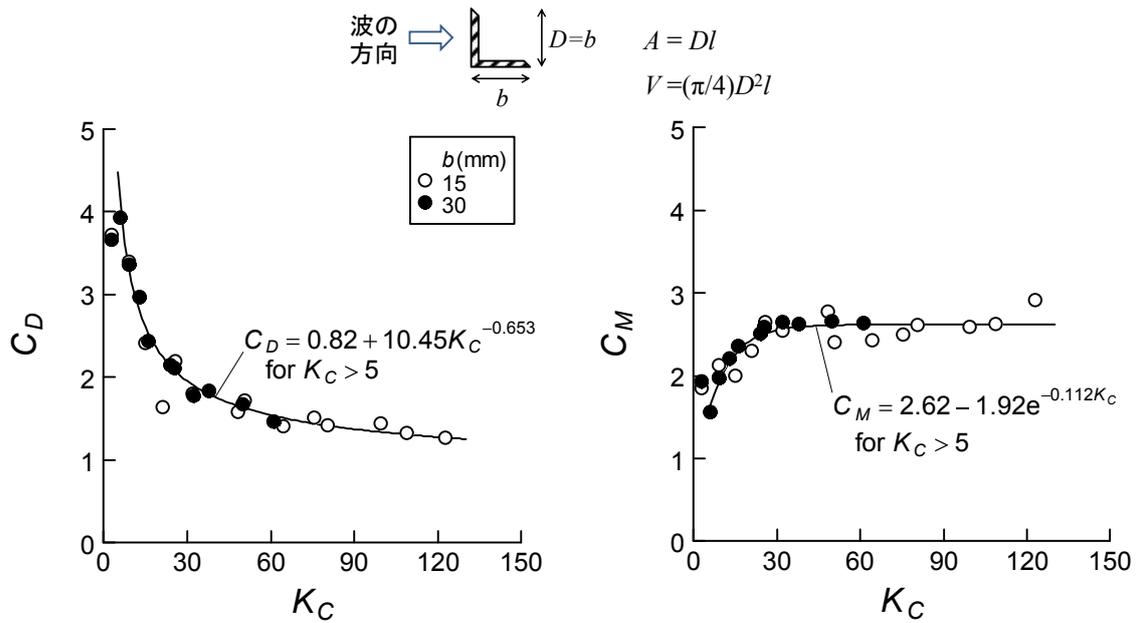


図 5-4 迎角  $90^\circ$  の L 型アングルの  $K_C-C_D$  と  $K_C-C_M$  の関係  
黒線：非線形最小二乗回帰による近似式

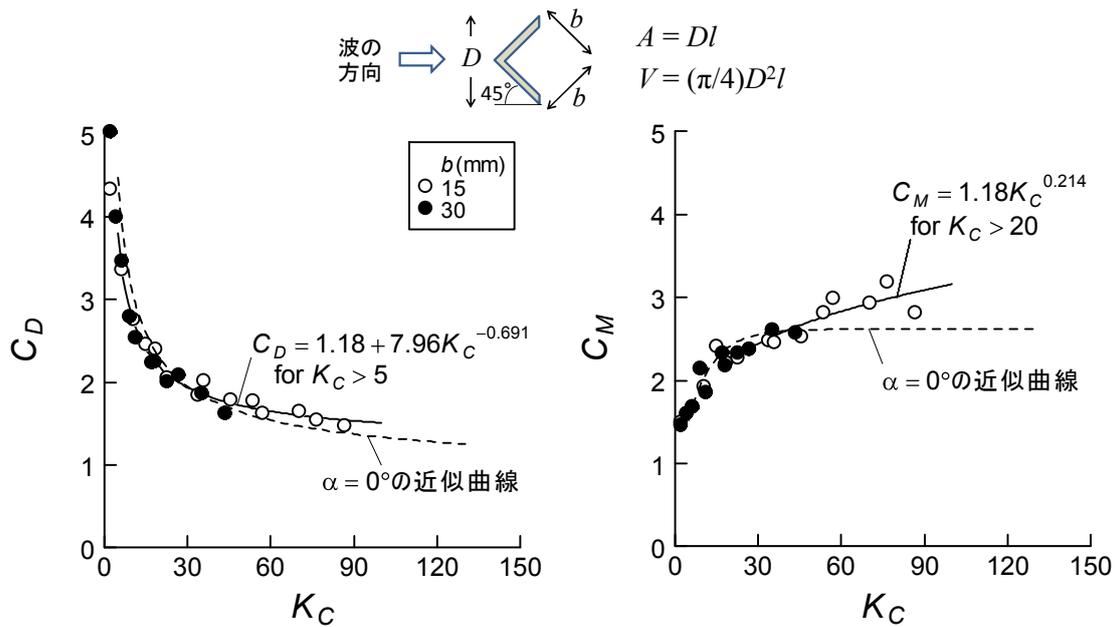


図 5-5 迎角  $45^\circ$  の L 型アングルの  $K_C-C_D$  と  $K_C-C_M$  の関係  
黒線：非線形最小二乗回帰による近似式

### 3. 魚礁全体の流体力算定法の妥当性の検討

#### 1) 方法

沈設魚礁の流体力算定法としては、可能性のある代替法を含めると、表 5-3 に示す 4 つの方法が考えられる。

表 5-3 沈設魚礁の流体力算定法

方法	$C_D$	$C_M$	基準体積 $V$	備考
従来法 1	定常流中での魚礁模型の値	2 (一定)	実容積	現在の一般的な方法
従来法 2	同上	同上	部材の基準体積*の合計	従来法 1 を微修正
全体模型法	造波水槽での魚礁模型の値	同上	同上	礁全体を一つの物体と考え、その流体力を図心高さでの流速から算定
部材流体力法	造波水槽での部材模型の値	同上	同上	魚礁全体の流体力を各部材の算定流体力の合計として算出

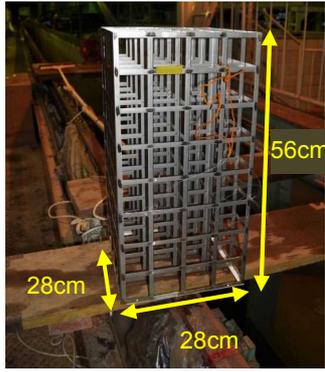
\* 板材の場合は、後述する新しい基準の値に変更  
基準面積は、部材の基準面積（射影面積）の合計

従来法 1 は、現在の設計で標準的に採用されている方法であるが、他の方法も含めて、波の場での外力評価としての妥当性は明らかになっていない。それらの妥当性を検証するため、造波水槽の中に設置した高層魚礁の縮尺模型に、滑動が起こり始める限界条件に近い波を与える滑動実験を行った。この実験により、流体力算定の妥当性は、流体力の予測値がちょうど摩擦力の実測値を超えたときに模型が滑動し始めることで判断できる。

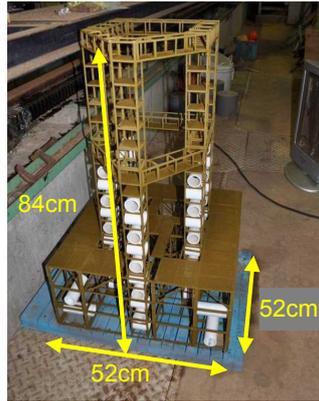
滑動実験には、前述した「基本部材の流体力係数」の測定と同じ造波水槽を用いたが、滑動状況の観察のため、側面がガラス面となっている観察区間(図 5-1)で行った。この区間の底面に鉄板を敷いて固定床とし、さらにその上の一部に、摩擦力をなるべく一定にするため、カッティングマット(オルファ(株)製、160B、表面軟質塩ビ製 90cm×62cm×2mm)を敷いて試験底面とした。

滑動実験に供した高層魚礁模型を図 5-6 に示す。これらは、部材間隔の狭いもの(CR-C)から広いもの(実機模型 B)まで、また構造の単純なものから複雑な実機模型までを含む。各模型に対しては、滑動実験とは別に、①試験底面上での最大静止摩擦力の測定、②定常流中での流体力測定による  $C_D$  の決定、③波の場での流体力測定からの  $C_D$ 、 $C_M$  の KC 数の関数としての定式化、を行った。①については、水中で模型を試験底面に設置して、張力計(三計エンジニアリング製、LT10-2、容量 2kg)でゆっくり引っ張って最大静止摩擦力を数回、測定し、その平均を求めた。②については、一様な定常流を発生できる別の大型回流水槽(観測部:長さ 7.5m×幅 2.8m×水深 1.4m)を用いて定常流中での抗力係数を測定した。③については、造波水槽中央付近(図 5-1 中の「流体力測定位置」)において規則的な進行波下で測定した水平流体力から  $C_D$  及び  $C_M$  と KC 数(後述する平均部材幅に基づく)との関係を調べ、当てはめのよい関数を選択し、最小二乗法による回帰式を求めた。

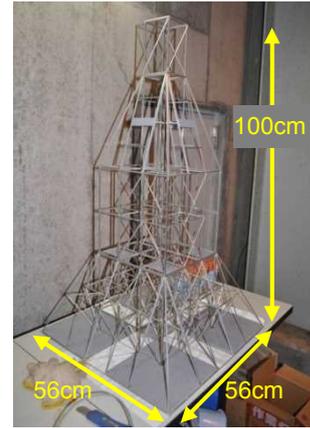
滑動実験では、魚礁模型を試験底面上に設置し、造波周期を 2.0s と 3.0s(ただし、2.0s は CR-C のみで実施)とし、各周期で規則波を与えて滑動がみられるまで、造波ストロークを段階的に増加させて滑動限界を調べた。また、実験中の魚礁模型設置断面における水面変動  $\eta$  と底上 70cm での二次元流速を、それぞれ容量式波高計と電磁流速計を用いて 20Hz で測定した。波動流速については、底面からの任意の高さ  $z(\text{cm})$  における水平流速を前述した水面変動のフーリエ成分波の重ね合わせによる方法で推定した。



**単純矩形枠模型 CR-C**  
(幅 1cm の平板とアングルから構成)



**実機模型 A**



**実機模型 B**

図 5-6 滑動実験に用いた高層魚礁模型

事前解析の結果、本実験水槽では戻り流れが滑動開始に影響することが判ったため、その影響を評価した。この戻り流れは、両端が閉じられている造波水路特有の現象で、電磁流速計の測定により底層から少なくとも 90cm 付近まではほぼ一様に起こることが示された。そのため、以下のように  $z = 70\text{cm}$  での電磁流速計の測定値から、戻り流れによる流速を推定し、全層にわたる波動流速に加えた。

戻り流れによる流速の算出では (図 5-7 参照)、まず、電磁流速計による過大な波動流速測定値  $u_{\text{EMC}}$  を、ゼロクロス法で個々の波に分解し、川俣・磯上<sup>15)</sup>の方法により電磁流速計のセンサー径の KC 数  $K_c (=U_m T/D; U_m: \text{流速振幅}, T: \text{個々波の周期}, D: \text{センサー径 } 0.8\text{cm})$  を用いて  $\beta \times u_{\text{EMC}}$  ( $\beta = \text{Min}(1 - 3.15/K_c, 0.8)$ ) として補正值  $u_{\text{EMC(補正)}}$  を求めた。この計算における  $U_m$  には水面波形からの計算値を用いた。 $u_{\text{EMC(補正)}}$  と水面変動からの計算値  $u_{\text{cal}}$  との差  $u_{\text{diff}} = u_{\text{EMC(補正)}} - u_{\text{cal}}$  が戻り流れを表すと考えられるが、図 5-7 で例示されているように、波周期で顕著に振動している。これは、おそらく電磁流速計のセンサー周りの渦による変動成分が残るため、これを除去するため、 $u_{\text{diff}}$  に 1 波周期の移動平均を再帰的に 2 度かけて、戻り流れの流速を求めた。

なお、実験では反射波の影響がみられたが、解析の単純化のため、造波開始から反射波の影響が大きくなる時間帯で滑動が起こった条件のみを解析対象とした。

解析では、滑動がみられた限界条件における流速時系列から、表 5-3 に記載した 4 つの方法によって流体力を算定した。流速値を与える計算上の高さは、部材流体力法では各部材の中心高さとし、またそれ以外の方法では図心 (基準面積の重心) の高さとした。魚礁全体の流体力係数を KC 数の関数化する際に必要となる部材幅には、次式で定義される、基準面積で重み付けした平均部材幅  $D_A$  を用いた。

$$D_A = \sum_i A_i D_i / A \quad (5-8)$$

ここに、 $A_i$  と  $D_i$  はそれぞれ第  $i$  部材の基準面積と部材幅、 $A$  は魚礁の基準面積：

$$A = \sum_i A_i \quad (5-9)$$

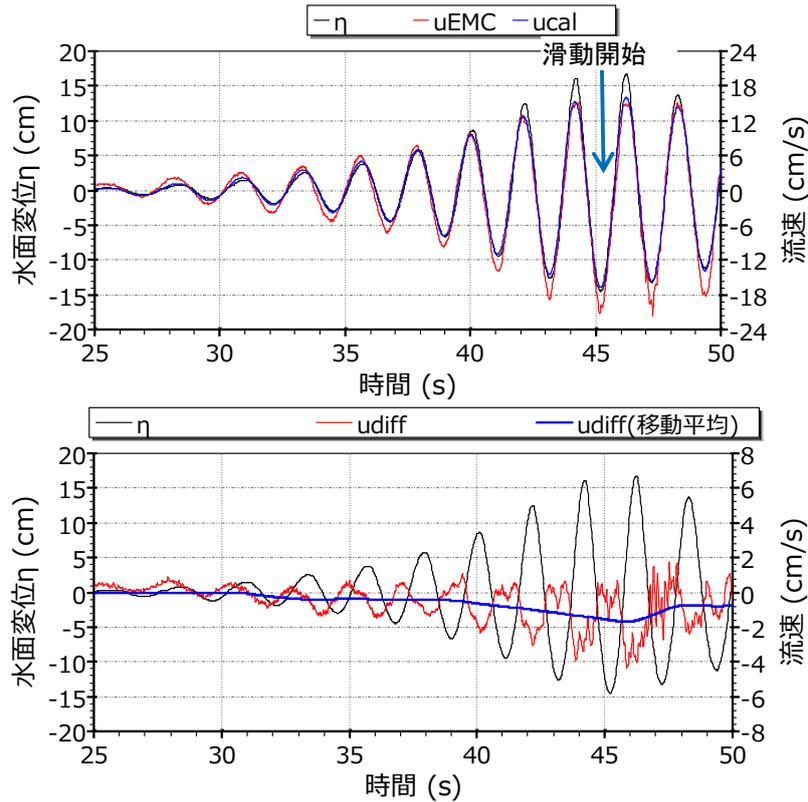


図 5-7 戻り流れ成分の算出例：水面変位  $\eta$ 、 $z = 70\text{cm}$  における水平波動流速の電磁流速計による測定値  $u_{\text{EMC}}$  と計算値  $u_{\text{cal}}$  (上図) と  $u_{\text{diff}}$  ( $= u_{\text{EMC(補正)}} - u_{\text{cal}}$ ) 及びその移動平均値 (下図)

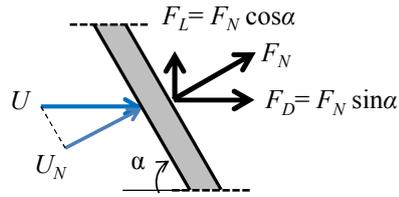
である。また、 $K_C$  数には、流体力係数の関数式が波と流れの共存場にも拡張適用できるよう、次式の拡張  $K_C$  数<sup>16)</sup>を用いた。

$$K_C = \pi s / D_A \quad (5-10)$$

ここに、 $s$ ：半周期での水粒子の水平移動距離。流速波形が正弦波で表される場合は、 $s = U_m T / \pi$  となるので、通常定義  $K_C = U_m T / D$  に一致する。 $K_C$  数を式(5-10)で再定義することにより、振動流中での  $K_C$  数と流体力係数との関係式が振動流と平均流の共存場でもそのまま適用できることが円柱の実験で確かめられている<sup>16)</sup>。流体力係数を  $K_C$  数の関数で表す全体模型法と部材流体力法では、流速波形をゼロクロス法で分割し、半周期毎の水粒子移動距離を求めて式(5-10)で定義される  $K_C$  を求めた。

また、魚礁模型の構成部材には前項で調べた部材以外のものも少なくなかった。これらの部材の基準面積、基準体積および流体力係数は、以下のようにして算出した。

- イ) 水平流速に対して迎角のある斜材の場合の水平流体力は、部材面の法線方向の流速成分  $U_n$  による流体力  $F_n$  の水平方向成分で近似され<sup>17)</sup>、部材面の接線方向の流速成分による流体力は小さく無視できる(図 5-8 左図)
- ロ) 十字状に組み合わせられた2本の L 型アングルは、1枚の平板とみなせる(図 5-8 右図)。
- ハ) チャンネル鋼は、角柱と同じとみなせる。
- ニ) それ以外の雑多な部材の抗力と慣性力はそれぞれ  $A$ =流れ方向の投影面積、 $C_D$ =定常流中の  $C_D$  の類推値からと  $V$ =実容積、 $C_M=2$  から求められる。



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

$$A_N = D l$$

$$A = A_N \sin \alpha$$

$$U_N = U \sin \alpha$$

$D$ :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

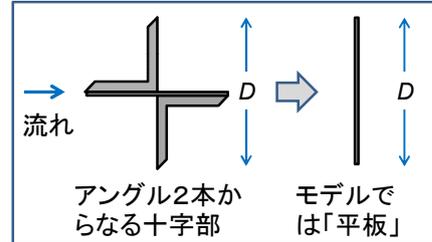


図 5-8 迎角のある細長い部材（左）と十字状に組み合わされたアン  
 グル（右）の流体力モデル

## 2) 結果

滑動実験に用いた高層魚礁模型の諸元と試験底面上での水中最大静止摩擦力を表 5-4 に記す。また、各模型の定常流中での抗力係数と波動流中での流体力係数 ( $C_D$ 、 $C_M$ ) を図 5-9～図 5-11 に示す。定常流中での抗力係数が  $Re$  数の増加に対してほぼ一定になった値（図中の値）を、従来法 1 と 2 で流体力を計算する際に用いた。また、全体模型法では、図中に示す波動流中での  $C_D$  と  $C_M$  の最小二乗回帰式を用いた。波動流中の  $KC$  数と  $C_D$  および  $C_M$  との関係は、実機模型 B において例外的に周期によって系統的に分かれた。その原因は不明であるが、定式化は滑動実験を実施した周期を含むデータを用いて回帰分析を行い、後述する流体力算定での問題を最小化した。

波動流中での抗力係数は、いずれの模型でも定常流中での値よりも大きく、先に述べた”後流渦の衝突”の影響が推察される。

表 5-4 滑動実験に用いた高層魚礁模型の諸元と最大静止摩擦力

項目	CR-C	実機模型 A	実機模型 B
基準面積* $A$ ( $\text{cm}^2$ )	2863.1	3339.2	1646.4
実容積 ( $\text{cm}^3$ )	292.3	1986.4	2260.4
基準体積* $V$ ( $\text{cm}^3$ )	3407.1	3831.5	2830.2
図心高さ (cm)	28.00	29.00	33.05
平均部材幅 $D_A$ (cm)	1.41	1.15	0.51
最大静止摩擦力(平均±標準誤差) (N)	8.46±0.38	8.26±0.19	7.31±0.27

\*前項「基本部材の流体力係数」に準じて求めた部材の基準面積と基準体積の合計

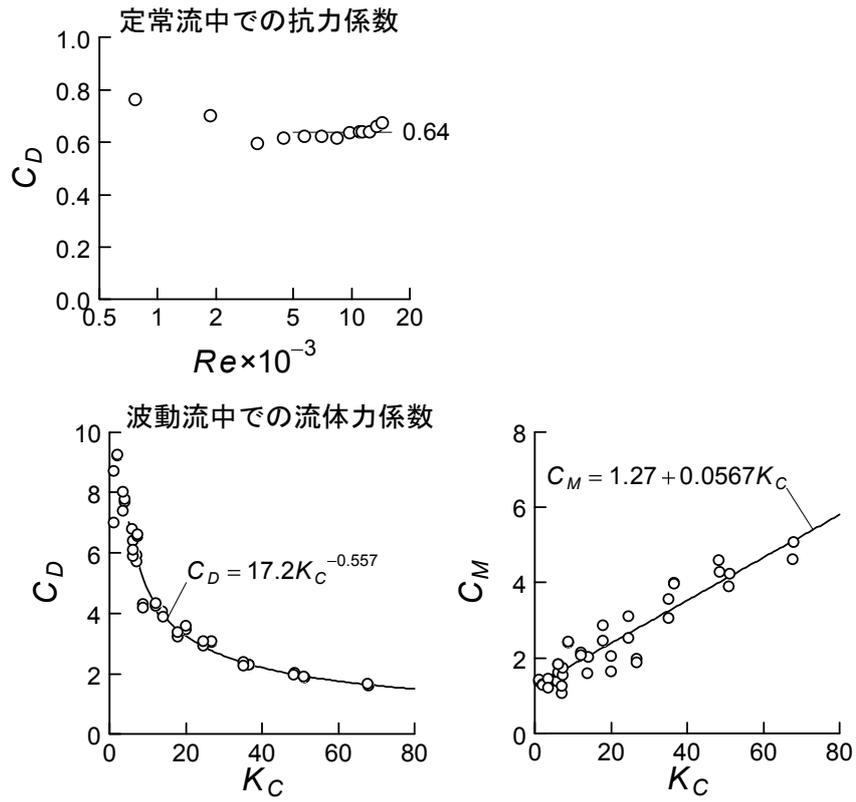


図 5-9 単純矩形枠模型 CR-C の流体力係数

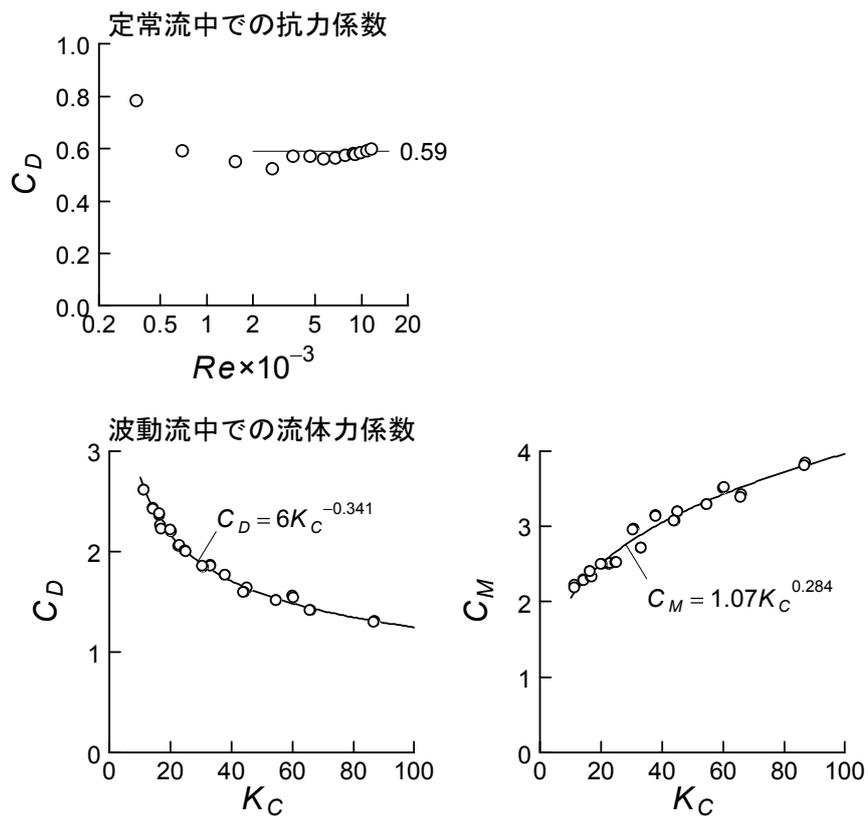


図 5-10 実機模型 A の流体力係数

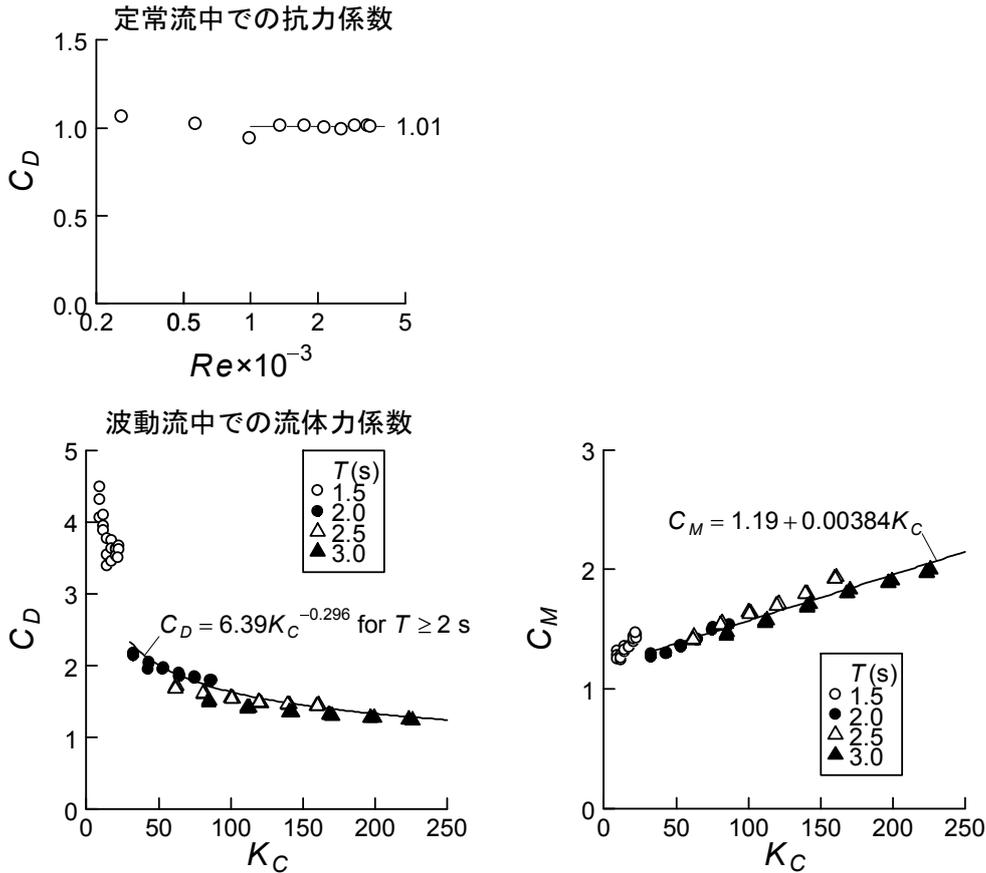


図 5-11 実機模型 B の流体力係数

以上の流体力係数に基づき、水平流体力を表 5-3 の 4 方法で計算した結果を、水面変位、波動流速と戻り流れによる流速とともに、図 5-12～図 5-15 に示す。

単純矩形枠模型 CR-C (図 5-12、図 5-13) では、静止摩擦力が 8.5N であったことから、滑動開始時に水平流体力がちょうど 8.5N を超えたと推定できる。このことから、周期 2s と 3s の場合とも、全体模型法と部材流体力が妥当な予測値を与えるが、従来法 1 と 2 では大幅な過小評価になるといえる。

実機模型 A (図 5-14) でも CR-C の場合と同様に、滑動開始時に水平流体力がちょうど静止摩擦力 8.3N を超えるという前提から、全体模型法は妥当な予測値を与えるが、部材流体力法は流体力を多少過小評価し、従来法 1 と 2 は大幅な過小評価になると判断される。

実機模型 B (図 5-15) では、少し状況が異なり、水平流体力と静止摩擦力 7.3N との比較より、全体模型法では、安全率を考慮すると、流体力の妥当な推定値を与えるといえる。しかし、他の 3 方法では過小評価となり、その程度は部材流体力法で最も大きく、従来法 1 と 2 では逆に小さくなった。従来法 1 と 2 が真値に近づいた原因は、明らかではないが、検討の結果、残された可能性として、この模型に特異的に多く存在する水平遮蔽板について組み込んだ流体力モデル ( $A$ =流れ方向の投影面積、 $V$ =実容積、松本・岡島<sup>14)</sup>の実験値を参考に決定した係数： $C_D=1.34$  と  $C_M=0.425+0.000477K_C$ ) が適切でなかったことが考えられる。

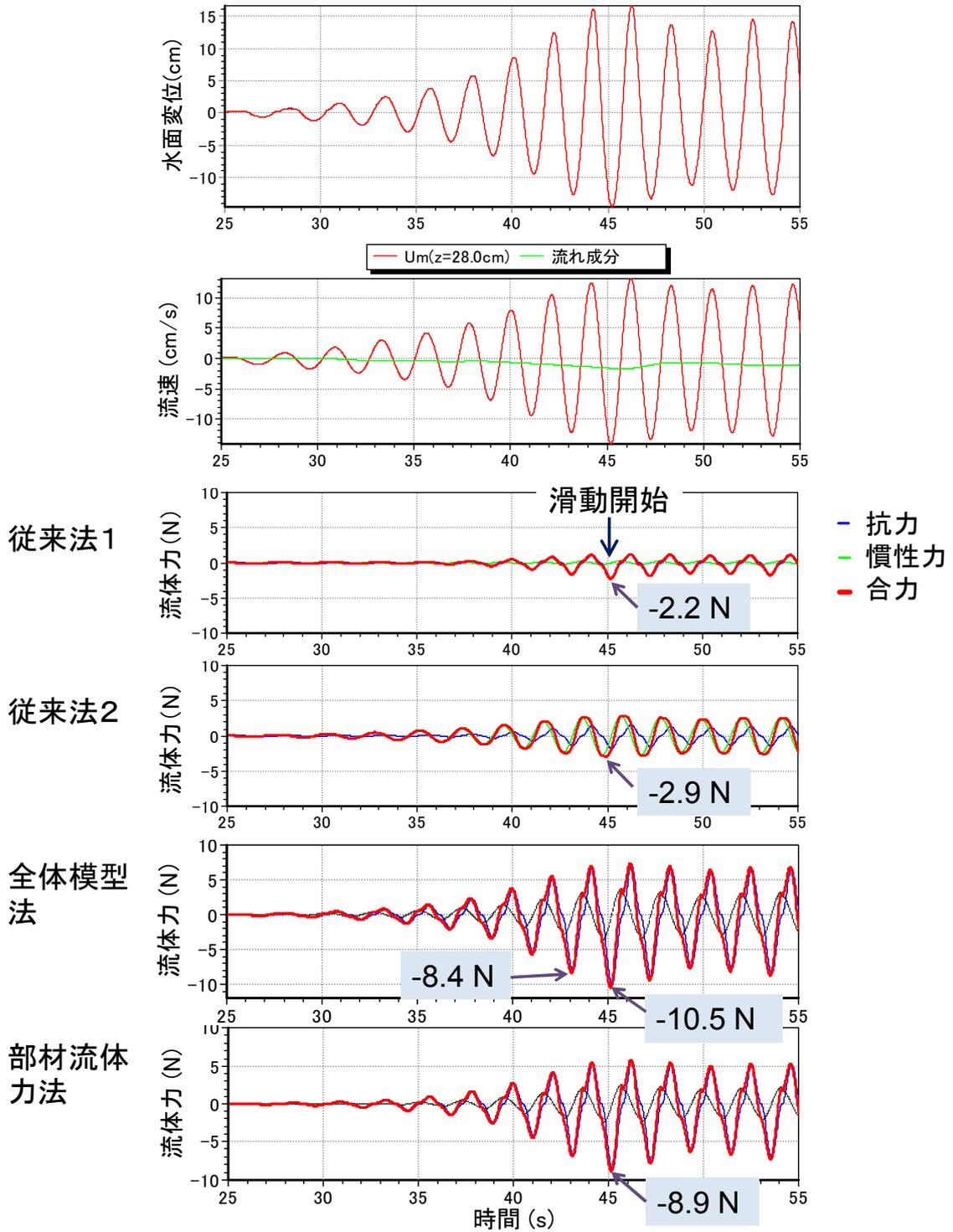


図 5-12 単純矩形枠模型 CR-C の滑動実験結果（周期 2 s の場合）：滑動限界付近の波高条件における水面変動、流速、及び 4 方法による予測流体力の時系列．波動流速  $U_m$  は図心高さにおける値のみを示す．

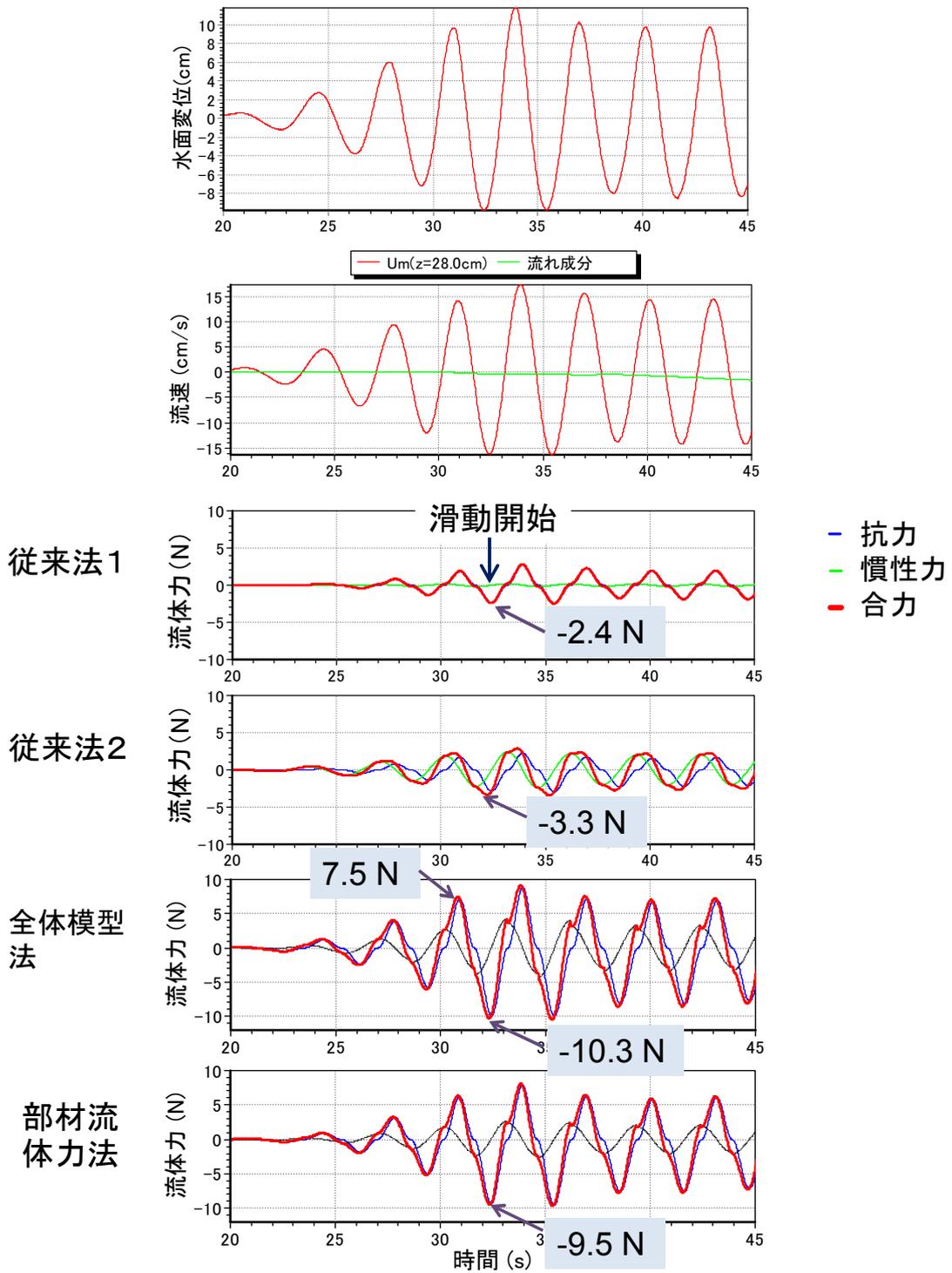


図 5-13 単純矩形枠模型 CR-C の滑动実験結果（周期 3 s の場合）：滑动限界付近の波高条件における水面変動、流速、及び 4 方法による予測流体力の時系列。波動流速  $U_m$  は図心高さにおける値のみを示す。

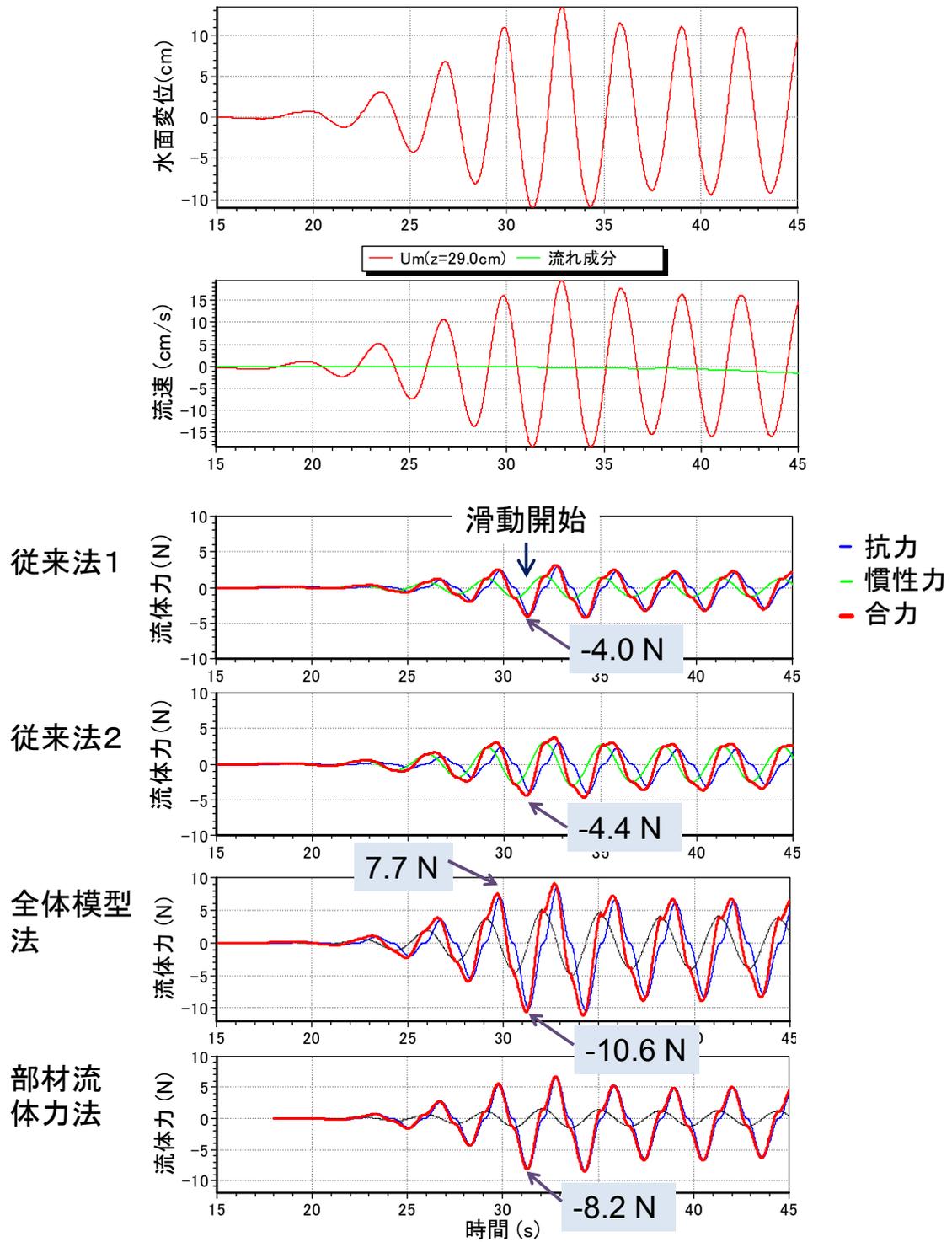


図 5-14 実機模型 A の滑動実験結果 (周期 3 s の場合) : 滑動限界付近の波高条件における水面変動、流速、及び 4 方法による予測流体力の時系列。波動流速  $U_m$  は図心高さにおける値のみを示す。

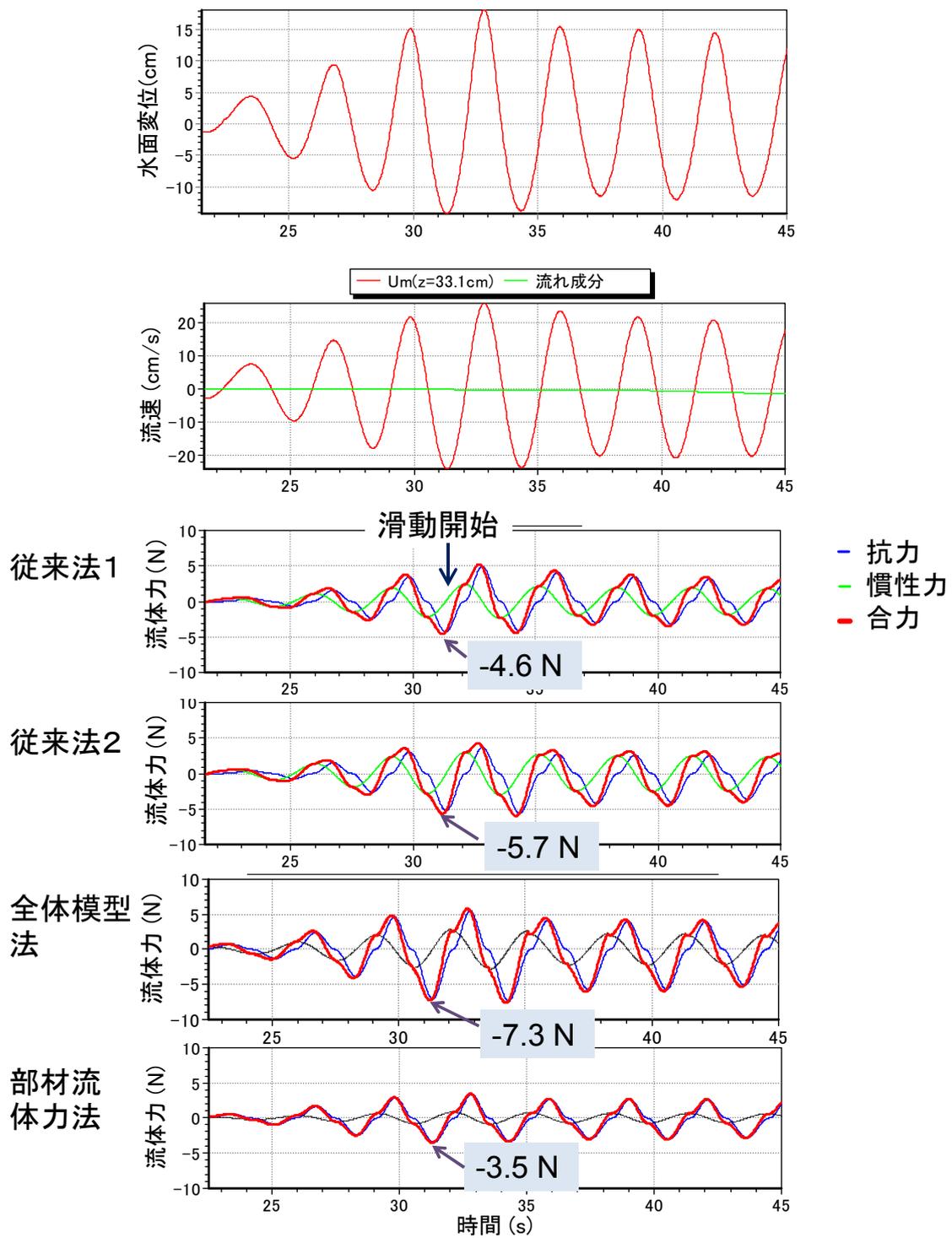


図 5-15 実機模型 B の滑動実験結果 (周期 3 s の場合) : 滑動限界付近の波高条件における水面変動、流速、及び 4 方法による予測流体力の時系列. 波動流速  $U_m$  は図心高さにおける値のみを示す.

以上の実験結果を総括すると、全体模型法による推定水平流体力と最大静止摩擦力と釣り合いのみから滑動開始を適切に予測できると結論される。またその際、用いる流速としては、図心の高さでの値のみで十分であるといえる。

部材流体力法は、実機模型 B を除いて、全体模型法よりも若干低いが、ほぼ妥当な推定値が得られた。複数の部材からなる魚礁では、これまで縦列部材による遮蔽効果により流体力は単独部材の合計値よりも低下すると考えられてきたが、むしろ逆に増加した。この原因については次項でより詳しく検討する。

定常流中での  $C_D$  値に基づく従来法では、波の場での流体力を過小評価する可能性が高いことが示唆された。また、従来法 1 と従来法 2 の比較より、板材が多い高層魚礁では、付加質量を適切に評価せず一律に  $V = \text{実容積}$  とすれば、流体力を約 10~20% 過小評価すると推察された。

#### 4. 礁全体の流体力係数

##### 1) 方法

部材間隔が異なる高層魚礁模型（図 5-17 参照）の流体力について、これまでに行った規則波実験のデータを、「3. 魚礁全体の流体力算定法の妥当性の検討 1) 方法」に記載した新しい方法で解析し直し、KC 数と流体力係数との関係を整理した。また図 5-6 に示した実機模型 A および B を含む全高層魚礁模型について、規則波実験で得られた最大水平流体力と部材流体力法による計算値を比較し、部材流体力法の適用性を検討した。

さらに、少数の部材から構成される小型魚礁への部材流体力法の適用性について、図 5-16 に示す直立部材模型と斜材模型の波動流中での流体力測定により検討した。後者の斜材模型では、頂部付近で部材間隔が密になり、閉塞効果により部材流体力法による予測値に対して流体力が相対的に増加することが考えられた。

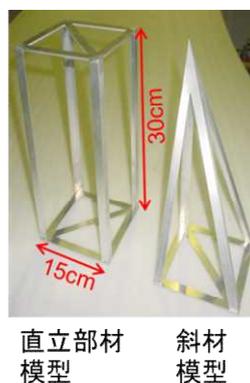


図 5-16 実験に用いた直立部材模型と斜材模型

I. 型アングル断面 15×15mm×厚さ 1.5mm. 平板断面・15×1.5mm

実験には、図 5-1 に示した造波水槽を用い、図中の「流体力測定位置」で測定を行った。模型は、底面から 40cm の高さに、水槽底面中央より鉛直に立ち上げた径 30mm の円柱の先端に取り付けた二分力計（SSK 製、LV30-1、定格容量 1kgf）の先端（径 4mm×10mm）にビス止めし、規則波（周期 2、3、4、5s；波高 3~4 通り）を発生させ、反射波の影響のない時間内の水平流体力（10 波ほどの平均）を 50Hz で測定した。流速については、容量式波高計（KENEK、CHT6-100 または CHT4-60）を用いて流体力と同時測定した水面波形のフーリエ成分波の重ね合わせから図心の高さにおける波動流速時系列を推定し、その時系列から部材流体力法により流体力を計算した。その際、斜材模型の角錐状先端部については、流体力

係数の知見がなかったため、平均的な幅の角柱（高さ 6cm×1.5cm×1.5cm）と仮定して計算を行った。

## 2) 結果

各模型の  $K_C$  数と流体力係数との関係を図 5-17 に示す。図中には、比較のため、二次元断面の平板と L 型アングルの近似式も示した。 $C_D$  と  $C_M$  はともに部材間隔が密になるほど増加し、閉塞効果が重要になることを示した。しかし、部材間隔による  $C_D$  の差は、 $K_C$  の増加に伴い縮小し、 $K_C > 約 70$  でほとんどなくなった。これに対して、 $C_M$  は  $K_C$  に対して直線的に増加し、部材間隔による差は広がった。また、部材間隔が最も粗い CR-K では、 $C_D$  の値は、主要構成部材の一つである L 型アングルの二次元断面の実験値に近い値を示したが、 $C_M$  は平板の実験値に近くなり、 $C_M$  の定式化の難しさを示唆した。

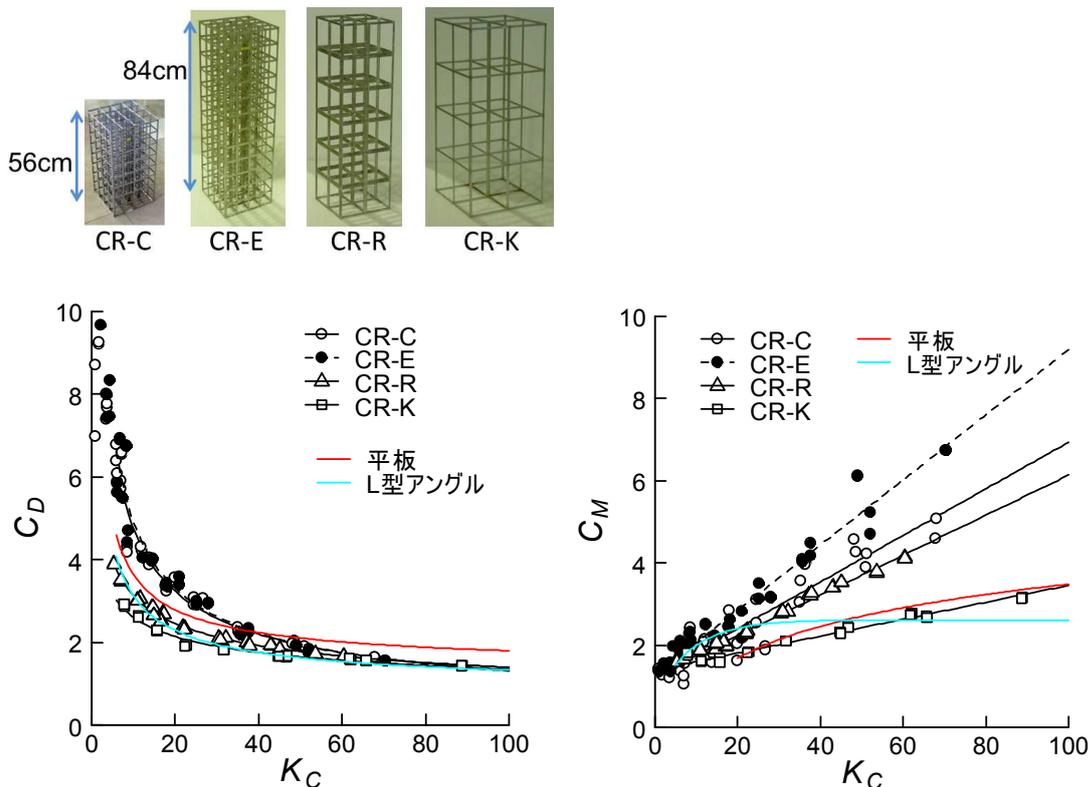


図 5-17 部材間隔の異なる高層魚礁模型の  $K_C$ - $C_D$  と  $K_C$ - $C_M$  の関係。

赤線と水色線：平板と L 型アングルの値（図 5-3 と図 5-4 中の近似式）

規則波下での高層魚礁模型の最大波力  $F_{max}$  について、部材流体力法による計算値と測定値を比較して図 5-18 に示した。部材間隔の最も粗い CR-K では、部材流体力法はほぼ妥当な推定値を与えたが、部材間隔がより密になると、過小評価となり、その誤差は 30% くらいに達した。ただし、実機模型 B では、波動流が強くなったときには誤差は 30% を超えて非線形的に増加した。この原因は明らかではないが、先に述べたように、実機模型 B に特異的に多い水平遮蔽板の影響が考えられる。

直立部材模型と斜材模型の最大波力  $F_{max}$  の実験値と部材流体力法による計算値との比較を図 5-19 に示す。斜材の  $F_{max}$  は、予想に反して直立部材の場合と同様に計算値よりも約 20% 小さくなった。

以上のことから、閉塞効果による流体力の増加は、高層魚礁のように広い空間にわたり部

材がある程度以上の密度で集合する場合に顕著になり、図 5-16 のように構成部材が少ない場合は、閉塞効果による流体力の増加は見かけ上起こらないと推察される。

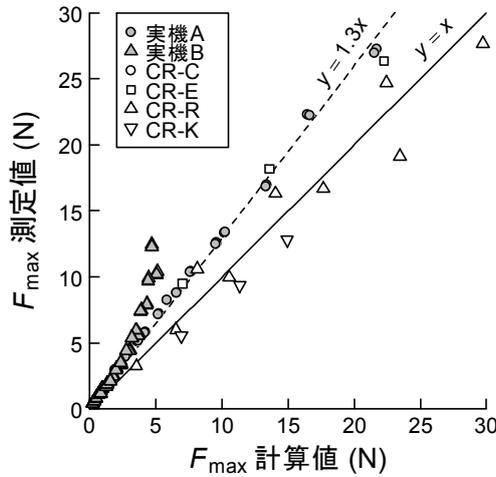


図 5-18 高層魚礁模型の最大波力の測定値と部材流体力法による計算値との比較

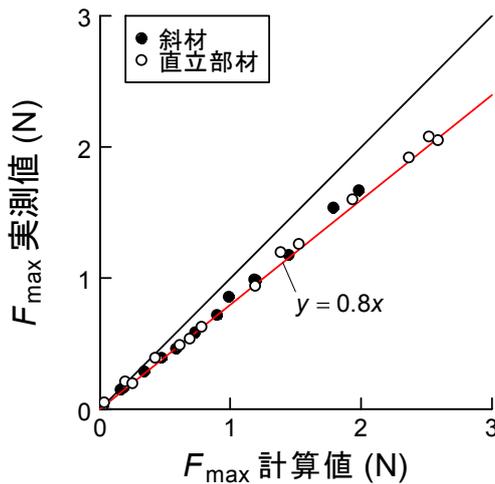


図 5-19 直立部材模型と斜材模型の最大波力の測定値と部材流体力法による計算値との比較

## 5. 最大力係数 $C_{Fmax}$ による方法

### 1) 方法

最大力係数  $C_{Fmax}$  は、モリソン式とは異なり、次元解析により導き出される最大波力  $F_{max}$  の無次元数 (図 5-20) を表し、ここでは次式で定義する。

$$C_{Fmax} = \frac{F_{max}}{(1/2)\rho U_m^2 A} \quad (5-11)$$

ここに、 $\rho$ : 海水の密度、 $U_m$ : 最大流速、 $A$ : 基準面積  
 最大力係数の定義では、式(5-11)のように分数の分母に 1/2 をつけないことも多いが、つけることで、 $C_{Fmax}$  が  $C_D$  の値に近くなり、両者の比較が容易になる。 $C_{Fmax}$  は次元解析より  $Re$ 、 $K_C$  などの無次元数の関数として表されるが、ここでは重要な無次元数として  $K_C$  のみの関数として定式化を検討した。

これまでの造波水槽実験で得られた高層魚礁模型と正方形角柱、迎角  $90^\circ$  の平板および L 型アングルの二次元部材の水平流体力に関するデータを再解析し、 $C_{Fmax}$  と  $K_C$  との関係を整理した。

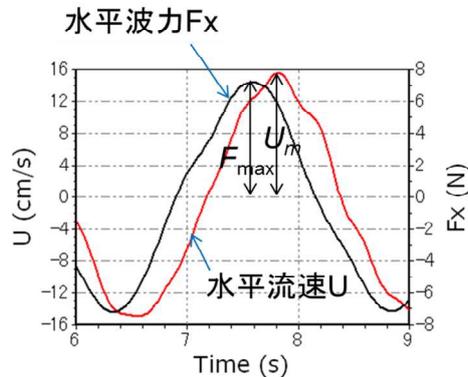


図 5-20 水平波力と水平流速の時間変化の例  
最大波力  $F_{max}$  と最大流速  $U_m$  の発生が同時でないことに注意

## 2) 結果

迎角  $90^\circ$  の正方形角柱、平板および L 型アングルの二次元部材の最大力係数  $C_{Fmax}$  と  $K_C$  数との関係を図 5-21 に示す。図中の曲線は非線形最小 2 乗回帰分析で得られた以下の近似式を表す。

$$C_{Fmax} = 1.49 + 41.5K_C^{-1.51} \quad (\text{迎角 } 90^\circ \text{ の正方形角柱}) \quad (5-12)$$

$$C_{Fmax} = 1.67 + 13.9K_C^{-0.82}, \quad (K_C > 5) \quad (\text{迎角 } 90^\circ \text{ の平板}) \quad (5-13)$$

$$C_{Fmax} = 1.09 + 13K_C^{-0.72} \quad (\text{迎角 } 90^\circ \text{ の L 型アングル}) \quad (5-14)$$

$C_{Fmax}$  はいずれの部材でも  $K_C$  の増加に対して単調に減少し、当てはまりのよい近似式が得られた。

図 5-22 にすべての高層魚礁模型の  $K_C$  と  $C_{Fmax}$  との関係を片対数グラフに示した。図中には式(5-13)と式(5-14)の平板と L 型アングルの近似式も合わせて示した。いずれの高層魚礁模型でも  $K_C$  と  $C_{Fmax}$  との関係にはばらつきが少ない単調減少の関数関係がみられた。高層魚礁模型の構造は三次元的であるが、その  $C_{Fmax}$  が  $K_C$  の増加に伴い、ある一定の値に収束する傾向がみられることは特筆すべき特徴である。特に、部材間隔の粗い高層魚礁模型 CR-R および CR-K の  $C_{Fmax}$  は  $K_C$  の全実験領域で、主要な構成部材である L 型アングルの  $C_{Fmax}$  にほぼ一致したことが注目される。また部材間隔が密なその他の模型の  $C_{Fmax}$  は、 $K_C$  数が低いときには L 型アングルの  $C_{Fmax}$  に比べてかなり大きいですが、 $K_C$  数の増加に伴い、その差は小さくなり、 $K_C > 60$  では L 型アングルの  $C_{Fmax}$  値にほぼ一致することも注目される。

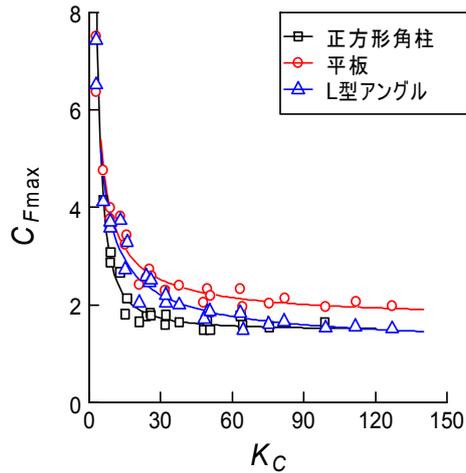


図 5-21 迎角  $90^\circ$  の正方形角柱、平板および L アングルの二次元部材の  $C_{Fmax}$  と  $K_C$  数との関係

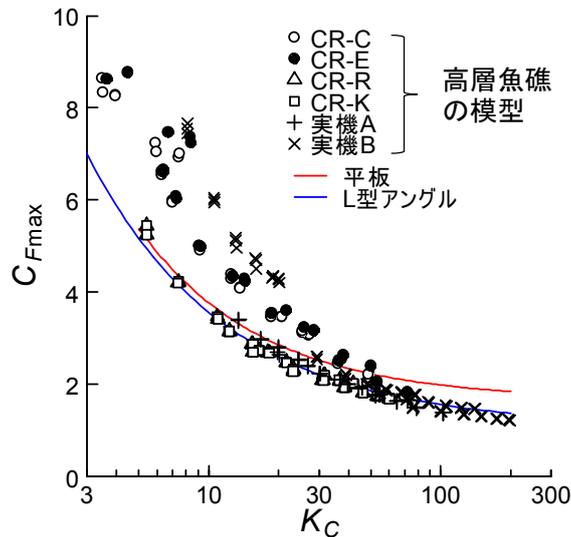


図 5-22 高層魚礁模型の  $C_{Fmax}$  と  $K_C$  数との関係

すべての模型で  $C_{Fmax}$  の値が  $K_C$  の増加に伴い、主要部材の L アングルの値に収束し、モリソン式における 2 つの係数 ( $C_D$  と  $C_M$ ) よりも設計値の設定をはるかに容易にできることから、 $C_{Fmax}$  による方法が実用性の高い代替法になると期待される。さらに、平板の  $C_{Fmax}$  値は、 $K_C$  数が高い領域 ( $K_C > 60$ ) に限れば、様々な魚礁模型の  $C_{Fmax}$  よりも高いことから、実験的知見がない場合での安全側の設計値として用いることができると考えられる。

## 6. 波と流れの共存場における流体力算定法の見直しの影響

### 1) 方法

沈設魚礁の流体力算定法の修正案では、波動流速算定の対象波を有義波から最大波へ変えることと、抗力係数を定常流中の値ではなく、流れの条件に応じて変えることが影響の大きい変更点となる。沈設魚礁の設置場所のほとんどは波と流れの共存場である。波と流れの共存場におけるモリソン式は次式で表される。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A (u + U_c) |u + U_c| + \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5-15)$$

ここに、 $U_c$ は流れ（定常流）の速度、 $u$ は波動流速である。沈設魚礁の従来の設計では、抗力係数  $C_D$  は流れの条件にかかわらず一定で定常流中の値が用いられてきたが、海洋構造物の設計に関する ISO<sup>4)</sup>、DNV<sup>12)</sup>、米国石油協会（American Petroleum Institute、API）<sup>18)</sup>等の一般の技術基準では、 $C_D$ は KC 数だけでなく、流れ・波の流速比  $U_c/U_m$ にも依存する係数とされている。しかしながら、波と流れの共存場における流体力係数を実験的に決めるのは現実的には難しく、また研究例もほとんどないため、モリソン式の修正が試みられている。その一つとして、二つの抗力係数を用いた次式<sup>19)</sup>が提案されている。

$$F = \frac{1}{2} \rho \bar{C}_D A u |u| + \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2 \quad (5-16)$$

$C_{DS}$  は定常流中の抗力係数である。また  $\bar{C}_D$  は厳密には波単独の場合の  $C_D$  と異なるが、これを波単独の場の  $C_D$  とみなすと、式(5-16)の右辺の第1項と第2項の和及び第3項はそれぞれ波浪による流体力の成分と定常流の抗力を表すこととなり、最大流体力は次式で与えられることになる。

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F\max} A U_m^2 + \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2 \quad (5-17)$$

式(5-15)における  $C_D$  は、流れ・波の流速比  $r = U_c/(U_m + U_c)$ （または  $U_c/U_m$ ）がゼロから増加すると、波動流中の値から低下して定常流中の値  $C_{DS}$  に漸近する。DNV の沖合構造物の設計に関する推奨基準<sup>5)</sup>では、流体力の算定は式(5-15)に基づき、 $r > 0.3$ （API<sup>6)</sup>では  $U_c/U_m > 0.4$ ）で  $C_D = C_{DS}$  としている。しかし、流速比  $r$  に対する抗力係数の変化は一般に不明である。そのため、その  $r$  の閾値の前後で抗力係数を波動流中の値から  $C_{DS}$  に切り換えることになり、算定流体力の不連続が生じる。

そこで、ここでは従来の方法（波動流速の算定対象波：有義波、 $C_D = C_{DS}$ ）を以下の3つの方法に変更した場合に、算定流体力が  $r$  に対して相対的にどの程度変化するかを比較し、提案式の妥当性を検討した。

修正案1：式(5-15)に基づき、算定対象波を最大波に変更

修正案2：式(5-15)に基づき、算定対象波を最大波に変更し、抗力係数を波動流中の  $C_D$  値に変える

修正案3： $\bar{C}_D =$ 波単独の場の  $C_D$  を仮定した式(5-16)または式(5-17)に基づき、算定対象波を最大波に変更

## 2) 結果

簡略化のため、流体力を抗力の最大値で近似し、修正案1、修正案2及び修正案3による流体力と従来法による流体力との比が、流速比  $r$  に対してどのように変化するかを以下の仮定の下、試算した。

仮定1：波動流速算定対象波を有義波から最大波へ見直すことによる流速増加率  $a$  は  $a=1.8$

仮定2：波動流中の抗力係数と定常流中の抗力係数の比  $\psi = C_D/C_{DS}$  については高層魚礁の模型実験での典型的値として  $\psi=2$

これらの仮定から、修正案 1、修正案 2 及び修正案 3 による流体力は、それぞれ以下で近似される。

$$\text{修正案 1 : } F_{\max,1} \approx \frac{1}{2} \rho (U_m / a + U_c)^2 C_{DS} A = \frac{1}{2} \rho U_m^2 \left( \frac{1}{a} + \frac{r}{1-r} \right)^2 C_{DS} A \quad (5-18)$$

$$\text{修正案 2 : } F_{\max,2} \approx \frac{1}{2} \rho (U_m + U_c)^2 C_D A = \frac{1}{2} \rho U_m^2 \left( \frac{r}{1-r} \right)^2 \psi C_{DS} A \quad (5-19)$$

$$\text{修正案 3 : } F_{\max,3} \approx \frac{1}{2} \rho U_m^2 C_D A + \frac{1}{2} \rho U_c^2 C_{DS} A = \frac{1}{2} \rho U_m^2 \left[ \left( \frac{r}{1-r} \right)^2 + \psi \right] C_{DS} A \quad (5-20)$$

式(5-18)で  $a=1.8$  とすると、従来法となる。したがって、これらの修正案による流体力と従来法による流体力との比はそれぞれ以下の 3 式で表される。

$$FR_{\text{案1}} = \frac{F_{\max,1}(a=1)}{F_{\max,1}(a=1.8)} = \frac{a^2}{(1-r+ar)^2} \quad (5-21)$$

$$FR_{\text{案2}} = \frac{F_{\max,2}}{F_{\max,1}(a=1.8)} = \frac{a^2 \psi}{(1-r+ar)^2} \quad (5-22)$$

$$FR_{\text{案3}} = \frac{F_{\max,3}}{F_{\max,1}(a=1.8)} = \frac{a^2(1-r)^2 \psi + a^2 r^2}{(1-r+ar)^2} \quad (5-23)$$

これらの流体力の比を  $r$  に対して図 5-23 に示した。算定法の見直しによる流体力の増加は、波単独 ( $r=0$ ) のとき最も大きく、流れ単独 ( $r=1$ ) の状態へ向けて低下し、その増加率は、修正案 2 (算定対象波を最大波に、また抗力係数を波動流中の値に変更) で最も大きく、修正案 1 で最も小さい。DNV や API の方法を採用すると、青色の破線が示すように、 $r=0.3$  で前者から後者へ乗り換えることになる。これに対して、本事業で提案する修正案 3 では、算定流体力が  $r$  の増加に対して前者から後者へ徐々に変化するように移り変わり、見かけ上、他の設計法よりも流体力を適切に算出できている。また、修正案 3 の流体力の比が 1 を下回るのは、 $r$  が 1 に近い極狭い領域で、しかも 1 からの減少は非常に小さく、流体力の過小評価の問題はほとんどないと考えられる。

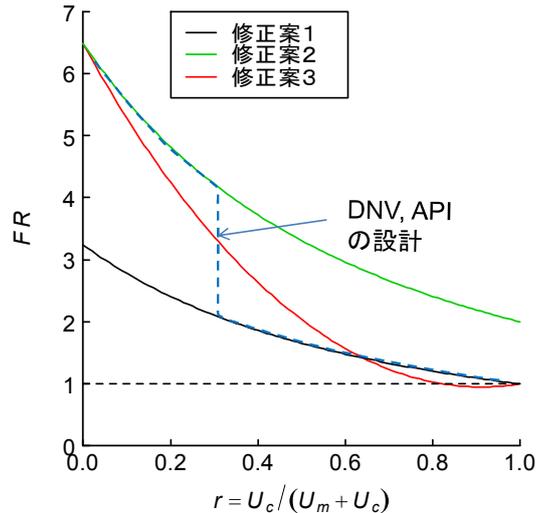


図 5-23 流体力算定法の各修正案と従来法による算定流体力の比と流速比  $r$  との関係

## 7. 実物大部材模型の流体力係数

### 1) 方法

実際の設計条件と同程度の速い流速を発生できる鉛直循環型回流水槽（図 5-24）を用い、定常流と振動流中での魚礁部材の実物大模型の流体力係数を調べた。ここでは、幅 100mm、厚さ 10mm の硬質塩化ビニル樹脂製の平板（幅 10cm×長さ 30×厚さ 1cm）を試験部材とした。試験部材は、観測部（3m×40cm×40cm）の中心に試験部材と同じ断面をもつ幅 48mm のダミー部材を水槽の両側面から固定した（図 5-24）。ここで、ダミー部材と試験部材との間の隙間は、スポンジを挟んで埋めた。試験部材の両端にはステンレス小板（44×10×3mm）を取り付けて、他のものには触れないようにして、一方では水槽側壁に固定したステンレス製治具に直接的に、もう一方では引張圧縮両用型小型ロードセル（共和電業、LUX-B-100N-ID）を介して間接的に固定した（図 5-24）。したがって、この装置により試験部材に働く水平力はロードセルに働く力の 2 倍として求められる。

流速測定は、超音波式三次元流速計 ADV（Nortek 社、Vectrino）を用い、試験部材より 1m 離れた（定常流の場合は 1m 上流側の）断面の中心で行った。式(5-1)における流速  $u$  については、試験部材の幅  $D$  と流路高さ  $B$  との比（閉塞比） $D/B$  の影響が大きく（図 5-25）、流体力係数の算出に測定値をそのまま用いることはできない。このような場合、次式により求められる縮流部の流速  $U_c$  を代用して、 $D/B = 0$  のときの抗力係数を精度良く推定できることが定常流中の実験で確認されている<sup>5)</sup>。

$$U_c/U = C/(1-D/B)^m \quad (0.05 \leq D/B \leq 0.33) \quad (5-24)$$

ここに、 $C$  と  $m$  は物体によって決まる実験定数である。本実験の場合は、 $D/B = 0.25$  で適用範囲内にあり、ここでは、その方法を援用して定常流中の抗力係数  $C_D$  と振動流中の最大力係数  $C_{Fmax}$  を推定した。平板の場合は  $C = 0.95$ 、 $m = 1.25$  という実験結果<sup>5)</sup>があり、本実験でもほぼ適合することが判ったため、それにより  $U_c$  を求めた。

実験条件は、定常流と周期 10、12、16s の振動流で、フラッタによる顕著な振動が発生するまで、またはロードセルの容量近くまで、流れを速くして測定を行った。

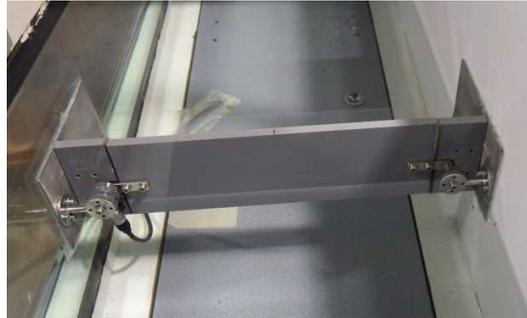
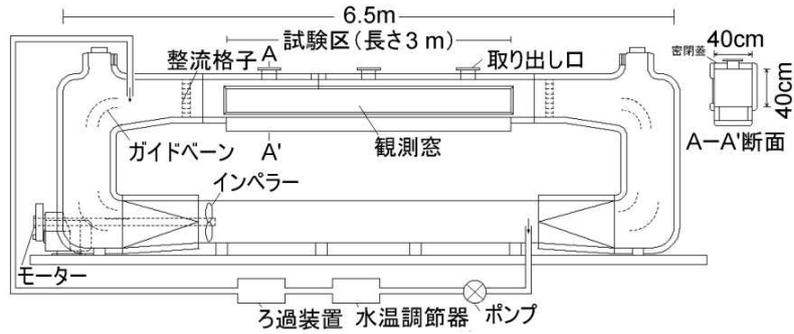


図 5-24 垂直循環型回流水槽（上）とロードセルを取り付けた試験部材（下）

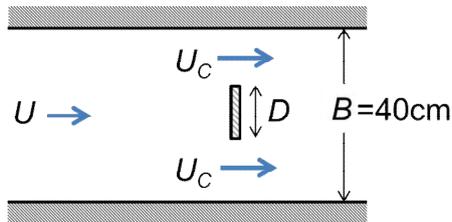


図 5-25 閉塞比が無視できない水路内の流れ

## 2) 結果

定常流中の平板の  $C_D$  とレイノルズ数  $Re(=UD/\nu; U$  は定常流速で、ここでは閉塞比の影響を考慮した  $U_c$ ) の関係を図 5-26 に示した。 $C_D$  は  $Re$  の増加に伴い  $Re=3\sim 5\times 10^4$  で多少低下したが、円柱で見られるような臨界域での極端な低下はみられなかった。この結果から、迎角  $90^\circ$  の平板の  $C_D$  では、高レイノルズ数になっても、少なくとも実験範囲では、円柱で見られているような激減はなく、既往知見 ( $Re=1\sim 4\times 10^5$  で 1.9 ほど)<sup>1)</sup> と大差のない値が維持されると考えられる。

振動流中での平板の  $C_{Fmax}$  と KC 数との関係を図 5-27 に示す。図中の  $\beta$  は  $Re/K_C = D^2/(\nu T)$  で定義されるストークス数である。この実験の  $C_{Fmax}$  は平均的には造波水槽実験での実験式 (5-13) に比べて全般的に少し高い値を示したが、その相対的な差異は 10% に留まり、近似式により実スケールでも概ね妥当な推定が得られるといえる。

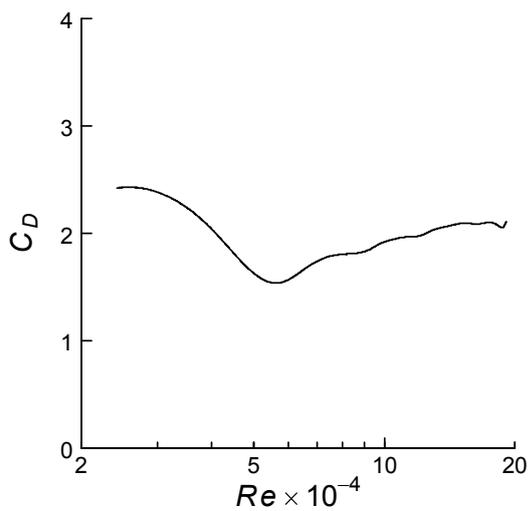


図 5-26 定常流中の平板の  $C_D$  とレイノルズ数との関係

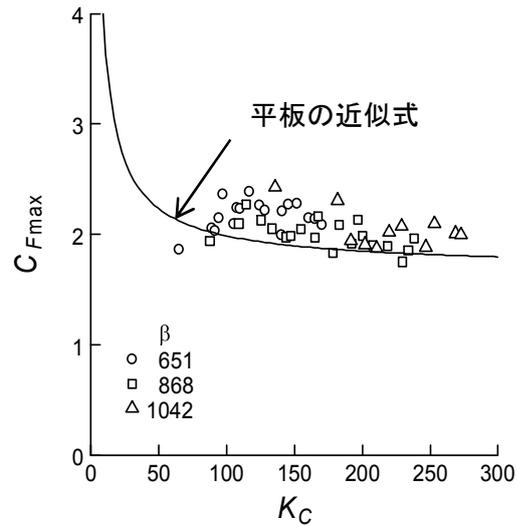


図 5-27 振動流中の平板の  $C_{Fmax}$  と  $K_C$  数との関係

## 8. 流体力係数に及ぼす付着生物の影響

### 1) 方法

鋼製魚礁の基本部材の実物大模型として、図 5-28 に示す断面の L 型アングルと平板を用い、それらが付着生物としてムラサキイガイ（以下、イガイという）に覆われた粗面の状態と全く覆われていない滑面の状態で、振動流中での流体力測定を行った。実験には、インペラーを周期的に順転・逆転させることで固有周期（12.5s）の波動を発生できる水平循環型回流水槽（図 5-28）を用いた。

イガイは、茨城県波崎漁港内の護岸で採取し、中身を取り出して閉じた状態にした貝殻を自然の付着状態をまねて、部材表面全体に密に瞬間接着剤で貼り付けた。また、その平均粗度高さを、以下の手順により測定した。①実験終了後、試験部材に接着させたイガイを無作為に 30 個抽出し、メスシリンダーにその貝殻を入れた後、細砂を注ぎ入れて間隙を埋めるようにして全体の体積を測定する。②貝殻を除いた細砂の体積を再度測定して、両者の差から貝殻の 1 個当たりの平均体積  $V_s$  を推定する。③試験部材全表面における平均粗度高さ ( $k$ ) を

$k = \text{試験部材のイガイの付着総数} \times V_s / \text{試験部材の表面積}$  により求める。これにより  $k = 1.07\text{cm}$  を得た。

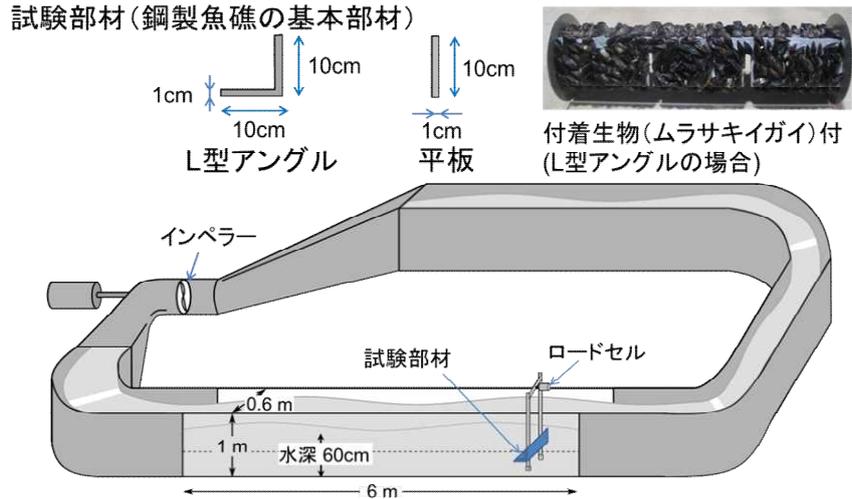


図 5-28 実物大部材模型と実験に用いた水平循環型回流水槽

試験部材の長さはエッジ効果を最小化するため、水槽幅に近い 59cm とし、両端に端板 end plate として直径 20cm の円盤を取り付けた (図 5-28 の右上の写真参照)。この試験部材は、底面から 15cm の高さに固定し、ロードセルで力を測定できるようにするため、流れに平行に間隔 30cm で配置された 2 枚のステンレス製フレーム (30mm×886mm×6mm) に取り付けた。このフレームの下端はヒンジを介して底面に固定され、他方の上端は板を介してロードセルに取り付けられた。試験区 (長さ 6m×幅 0.6m×高さ 1m) での水深を 60cm とし、発生限界に近い最大流速を含む 3 段階の流速振幅 (約 0.5、0.75、1.0m/s) の振動流を発生させて試験部材にかかる水平力  $F$  と流速  $u$  を測定し、そのデータに式(5-6)を当てはめ、 $A = DI$ 、 $V = \pi D^2 I / 4$  ( $D$ : 平板または L 型アングルの高さ) として  $C_D$  と  $C_M$  を求めた。 $F$  はロードセルによる計測値から同じ流動条件で試験部材を取り付けない状態での計測値を差し引いて、ヒンジ周りのモーメント比を考慮した一定比率を乗じて求めた。 $u$  は、試験部材の存在により通水断面面積が最も縮小した位置での断面平均流速で、水底と試験部材下端との間の 5 点と試験部材上端と水面下の間の 6 点で、ADV により流速を 50Hz で測定し、位相を合わせて求めた場所平均流速として求めた。

## 2) 結果

粗度 (イガイ) 高さを無視し、部材のみの高さ ( $D$ ) から算出した基準面積  $A = DI$  と基準体積  $V = \pi D^2 I / 4$  を用いて求めた L 型アングルと平板の  $C_D$  と  $C_M$  を図 5-29 に示した。平板では、イガイ付きの  $C_D$  と  $C_M$  はイガイなしの場合と大差はなく、粗度はあまり影響しなかった。これに対して、L 型アングルでは、イガイの付着により  $C_M$  は顕著に増加するとともに  $C_D$  もわずかに増加した。しかし、これらの増加は、 $A$  と  $V$  の不適切な定義によるもので、それらの修正により、イガイの有無に関わりなく、ほぼ一定値にできることが考えられた。そのことを確かめるため、 $A$  と  $V$  の算出基準の高さを  $D$  から  $D_c = D + 2k$  または  $D_c = D + k$  の二通りに変えて、 $C_D$  と  $C_M$  を再計算した (図 5-30)。 $D_c = D + 2k$  では、イガイ付きの  $C_D$ 、 $C_M$  がイガイなしの  $C_D$ 、 $C_M$  よりも共に小さくなり過ぎたが、 $D_c = D + k$  では両者の差はかなり縮小した。

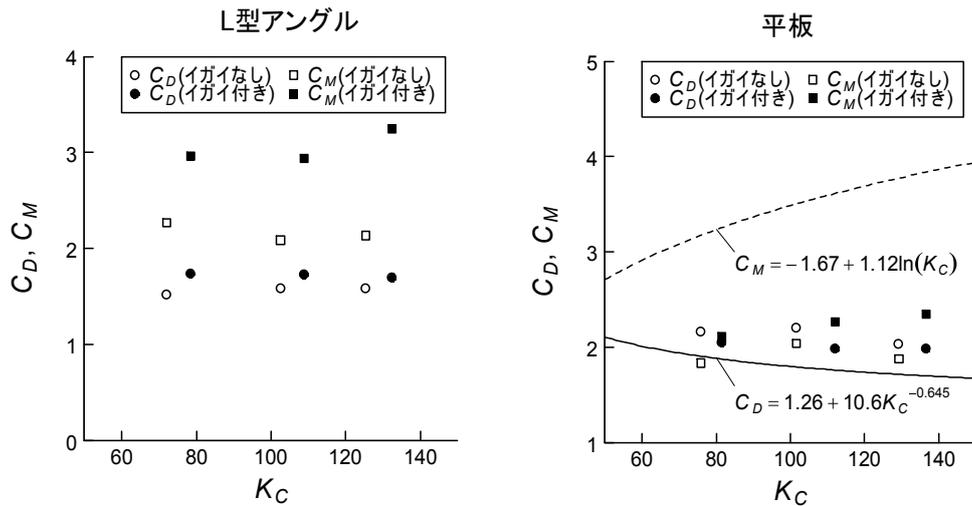


図 5-29 L型アンクルと平板の  $C_D$  と  $C_M$  に及ぼす粗度（イガイ）の影響

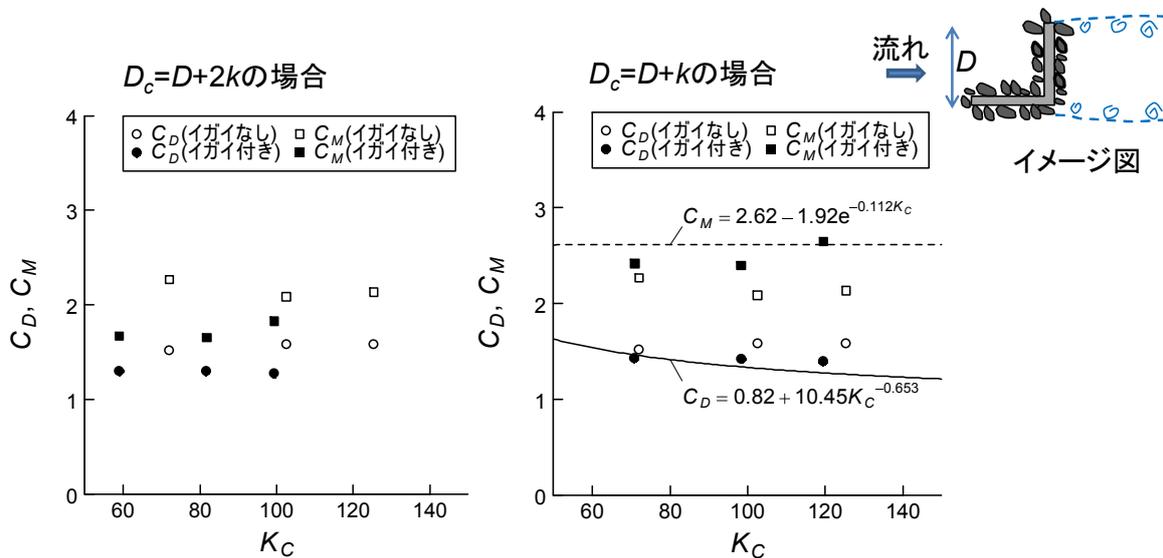


図 5-30 L型アンクルの  $C_D$  と  $C_M$  に及ぼす粗度（イガイ）の影響：基準面積と基準体積の算出基準の高さを2通りの  $D_c$  へ変えた場合

以上の結果は、図 5-30 のイメージ図から想像されるように、L 型アンクルの片側直立平板部の先端（イメージ図上の上端）では平板の両端と同様に幅が狭く、イガイが付着しても粗度高さが連続していなかったため、剥離領域（後流渦域）の増加にはあまり寄与しなかったのに対して、L 型アンクルの流れに平行する面（イメージ図の最下面）ではイガイがある幅にわたって層状に存在したため、剥離領域の高さを増加させたと解釈することができる。

また実物大模型の本実験の  $C_D$ 、 $C_M$  値を、縮尺模型の値（図 5-3 と図 5-4）と比較すると、平板では、 $C_D$  は縮尺模型の値（図 5-29 右図中の曲線）に比べて多少増加したが、 $C_M$  はかなり低下した。一方、L 型アンクルでは、 $C_D$  と  $C_M$  はほぼ模型実験の結果（図 5-30 右図中の曲線）に一致した。平板の  $C_D$  と  $C_M$  が実物大模型と縮尺模型とで異なった理由は明らかではないが、 $C_{Fmax}$ （結果は省略）で比較すると、両者には大差がなかったことから、 $C_M$  の値は式(5-6)の実験値への当てはめに大きく影響され、 $C_D$  の減少が  $C_M$  の増加に現れた可能性が考えられ

た。いずれにしても、平板やL型アングルの部材が今回の実験の程度に付着生物に被われた場合でも、平板では修正せずに、またL型アングルでは基準面積と基準体積を上述のように修正すれば、実用的にはすでに示した流体力係数の実験式(図5-3または図5-4)をそのまま用いることができると考えられる。

## 9. 考察

沈設魚礁の基本的部材として、正方形角柱、平板およびL型アングルの $C_D$ 、 $C_M$ のKC数を関数とする経験式(図5-2~図5-5)を得た。また、これらの部材の $A$ と $V$ の適切な定義を明らかにした。現在の手引には、基本部材の流体力係数としては定常流中での角柱、円柱および平板の $C_D$ しか記載されていない。これらの知見は設計の基礎資料として活用が期待される。

沈設魚礁の流体力算定で現在標準的に用いられている方法(従来法1、表5-3)は、波動流中での流体力を過小評価することが明らかになった。可能性のある流体力算定法の中では、全体模型法のみが常に妥当な推定値を示した。また、全体模型法の適用に際しては、礁高と水深の比0.28~0.50の高層魚礁であっても、礁の凶心高さでの水平流速から算定された流体力と摩擦力との釣り合いから滑動に対する安全性を適切に評価できることが示された。手引には、魚礁の高さが水深の1/10よりも高い場合は、流速を層状に分割した部位毎に与えることが記載されているが、上記の結果はその必要がないことを意味する。また、部材流体力法では、小型の魚礁の場合は、流体力がおそらく遮蔽効果や有限な部材長により減少するため、多少過大評価されるものの、ほぼ妥当な安全側の設計値が得られることが確認されたが、留意事項として、

- ① 密に配置された多数の部材からなる大型魚礁の場合は、流体力が閉塞効果により増加し、過小評価される可能性があること
- ② 水平遮蔽板の多い魚礁では、流体力の大幅な過小評価の可能性があり、詳細な検討により適切な流体力モデルを導入する必要があることが挙げられた。

$C_D$ 、 $C_M$ に及ぼす相対粗度の影響については、魚礁特有の部材である、稜角部を有する断面部材を対象として、平板とL型アングルがイガイに覆われた場合で実験を行った。その結果、 $A$ と $V$ の基準となる幅を適正に定めることにより(図5-29と図5-30)、イガイの被覆の有無にかかわらず同じ $C_D$ 、 $C_M$ 値を用いることができることが示された。

稜角部を有する断面部材の流体力係数では、一般にレイノルズ数の影響が実用的に無視できるとされている。このことは、迎角 $90^\circ$ の平板を用いた実験で追認された(図5-26、図5-27)。しかしながら、角型魚礁の大型模型を用いて臨界域での $C_D$ の激減を示した実験例<sup>7)</sup>があり、角柱やL型アングルなどの他の形状部材についても今後、検討が必要である。

モリソン式を魚礁の流体力算定に用いるためには、二つの流体力係数( $C_D$ 、 $C_M$ )を実験的に決定する必要がある。これらの係数は $K_C$ に対して大きく変化するため、実際の設計ではその定式化が必要になる。しかしながら、その適切な定式化は $V$ の適切な定義の問題と、二つの流体力係数、特に $C_M$ が $K_C$ の増加に対して定式化し難い場合が予想される。

このような問題のあるモリソン式に対して、ここで提案した $C_{Fmax}$ による方法では、① $C_{Fmax}$ が $K_C$ に対して単調減少するため、その定式化が容易になる、②モリソン式と異なり、問題の多い $V$ の決定が不要となる、および③多種多様な部材から構成される魚礁であっても、 $K_C$ と $C_{Fmax}$ の関係は同様に単調減少関数で近似され、しかもその関係が設計条件となる高KC数では、単独部材の関係に近似できる、という実用に適した利点があることが明らかになった。 $C_{Fmax}$ による方法を設計に用いるためには波と流れの共存場への適用が問題となるが、ここではその最も簡単な方法として、流体力を波力と流れによる抗力の和として表した式(5-17)を提

案した。波と流れの共存場、特に波と流れが交差する場合では、モリソン式においても適用には問題が指摘されており、信頼できる実用的方法が確立されていない。このような状況の中では、式(5-17)における簡略化に起因する問題は比較的小さく、むしろ「6. 波と流れの共存場における流体力算定法の見直しの影響」で示したように、式(5-17)は他の実際の設計法に比べて、全般的に妥当な推定値を与えることができ、しかも  $C_{Fmax}$  による方法の簡便さに由来する利点も大きいことから、沈設魚礁の設計の現状と現象の複雑さを考慮すれば、式(5-17)は流体力算定のための最も有望な実用的方法といえる。

提案方法には以上のように多くの利点があるが、見直しには、まだいくつかの課題が残されている。従来法では、「1. はじめに」に述べたように、現象が十分に明らかでない場合でも適用できよう、いくつかの要因が簡便な方法で見積もられてきた。それらの要因には、流体力の過小評価につながるものもあれば、過大評価につながるものもある。したがって、見直しに当たっては、各要因を個別に修正するのではなく、すべての要因をなるべくバランスよく見直し、全体として真値に近づくようにする必要がある。

流体力の過小評価要因としては、波動流速を算定するための対象波が挙げられる。不規則波による波力算定に用いる波は、理論的にも実験的にもこれまでの有義波から最大波に変更する必要がある。一般に最大波高  $H_{max}$  は有義波高  $H_{1/3}$  との比によって表し、最大波周期は有義波周期と等しいとされる<sup>4)</sup>。沈設魚礁の設置水深（概ね 50m 以深）では浅水・砕波変形による影響は無視できるため、 $H_{max}/H_{1/3}$  としてはレイリー分布を仮定した深海域での  $H_{1/250}/H_{1/3}=1.8$  が一つの目安になる。波高と波動流速とは比例し、また流体力はほぼ波動流速の2乗に比例する。したがって、単純計算すれば、この見直しにより算定流体力は  $1.8^2=3.24$  倍増加することになる。

一方、流体力の過大評価要因としては、波と流れの流速の合成方法が挙げられる。沈設魚礁が設置される場のほとんどが波と流れの共存場である。現行の流体力算定法では、波と流れが同じ向きで、両者の流速をベクトル合成したものが設計に用いられている。しかし沈設魚礁の設置海域は、風波の発達に必要な吹送距離の大きさに比べれば陸に近い領域にあり、波と流れが同じ向きになることはむしろ少ないと考えられる。特に異常高波は、その発達に長い吹送距離を要するため、ほとんどの場合、沿岸に沿う潮汐流などの海洋の流れと  $0^\circ$  より有意に大きい角度で交差し、現在の波と流れの合成方法は流速を過大評価していると考えられる。さらに、波と流れの交差は、「1. はじめに」に述べたように、“後流渦の衝突”の可能性を減少させ、その結果、二次元造波水槽での流体力係数の実験値を設計に用いると、流体力を過大評価する可能性が高くなる。さらに、波が多方向的であることも、実際の流体力が二次元造波実験からの予測よりも低下する要因になる。

これらの要因は複雑で、実験や調査による解明も容易ではない。流体力算定法の見直しには、最終的には現地での検証が必要であり、そのためには、魚礁の実物大模型を用いての現地実験が望まれる。しかし、そのような実験の実施には多額の経費を要し、困難が予想される。一方、これまでの設計法によって非常に多くの沈設魚礁が全国各地の沿岸に設置され、魚礁は移動していないとする意見は多い。したがって、これまでに設置されてきた多くの魚礁の追跡調査により、もしある型式の魚礁が動いていないという事実が確認できれば、現地での実際の流体力係数を推定する方法として、以下のような経験的推定法が考えられる。

魚礁に作用する流体力が式(5-17)で算定できることを前提にすれば、埋没も移動もしていない魚礁について、以下の関係式が成り立つ。

$$\mu W > \frac{1}{2} \rho C_{Fmax} A U_m^2 \quad (5-25)$$

ここに、 $U_m$ ：魚礁が遭遇した最大波動流速、 $\mu$ ：静止摩擦係数、 $W$ ：最大波動流速に遭遇したときの魚礁の水中重量。したがって、

$$C_{F_{\max}} < C_{F_{\max,UL}} \equiv \frac{\mu W}{(1/2)\rho A U_m^2} \quad (5-26)$$

となる。この方法で推定された  $C_{F_{\max}}$  の上限値  $C_{F_{\max,UL}}$  は同形同大の魚礁の安全側の設計値として用いることができる。 $C_{F_{\max,UL}}$  は、ある時点までの調査結果に基づく上限値であり、 $C_{F_{\max}}$  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  $C_{F_{\max,UL}}$  値が得られれば、その都度設計値を更新できる。

$C_{F_{\max}}$  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、安全側の設計値になると期待される。逆に、設計波動流速がより小さい場合は、 $C_{F_{\max}}$  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。

経験的推定法の確立のためには、魚礁が動いていないことをどのように確認するか、波動流速の推定方法、などの課題がある。

また、沈設魚礁の安全性の照査では、流体力の算定方法だけでなく、抵抗力の評価手法の見直しも必要であると思われる。沈設魚礁の多くは、砂地に設置され、ある程度の沈下、埋没があり、そのことによって滑動抵抗が増加している可能性がある。また、コンクリート魚礁では、群集設置により安定性が増加している可能性もある。それらは、手引では考慮されていない。

以上のことから、沈設魚礁の安全性照査の見直しに当たっては、今後は流体力算定法のほかに滑動抵抗の評価も含めた総合的な見直しが必要である。

## VI. 着定基質の安定質量算定法

### 1. 背景と目的

割石などの石材は、コンクリートブロックに比べて安価であり、藻場造成等の着定基質として最もよく利用される材料である。着定基質として使われる石材の安定質量は、手引では次式で算定される。

$$M = CU^6 \quad (6-1)$$

ここに、 $M$ : 石材の安定質量(kg)、 $C$ : 安定質量算定係数、 $U$ : 設計流速(m/s)。 $C$ は実験係数で、砕波領域と非砕波領域で異なり、以下で与えられる。

#### i) 砕波領域

$$C = \begin{cases} 25 & \text{単体で設置} \\ 5 & \text{敷き詰め密度 75\%以上の群で設置} \\ 1 & \text{囲い礁を設けて敷詰め 密度 75\%以上の群で設置} \end{cases}$$

#### ii) 非砕波領域

$$C = 0.04$$

砕波領域の  $C$  値は、造波水槽実験からの実験値<sup>20)</sup>であるが、非砕波領域の  $C$  値は球の抗力と摩擦力の釣り合いからの理論値で、実験による検証がなされていない。

藻場造成では、従来、石材の安定性を増すため異形ブロック等で囲った中に石材を投入して敷き詰める方式が採られてきたが、このような方法で形成された基質は、物理的攪乱が少ないため、最初は海藻が着生しても、やがてウニが優占する磯焼け状態や雑海藻の優占状態へ遷移する場合がある<sup>21)</sup>。このため、砂による適度の攪乱を利用するため、砂が薄く覆われた平坦な岩礁(冠砂域)に割石などを、間隔をあけて設置することが持続的な藻場造成手法として考えられる。しかし、現在の設計法を適用すると、藻場造成適地のほとんどは砕波領域に当たるため、 $C=25$  となり、その結果、安定質量は実現不可能な、非常に大きな値(たとえば、 $U=3\text{m/s}$  で約 18t)になる可能性が非常に高い。この  $C$  値の根拠となった実験<sup>20)</sup>は、丸い玉石をモルタル底面上に置いた非常に不安定な条件で行われたもので、その値はおそらく、石を投げ入れるといった施工方法や予測できない石の不安定な形状や海底の多様な形状にも適用できる極めて安全側の設計値になっていると考えられる。しかしながら、今後の藻場造成で想定される「冠砂域に、角張った割石を単体で、間隔をあけて丁寧に設置する」といった施工方法、底面の粗度(摩擦係数)または石の密度や形状の影響を考慮すれば、安定質量を大幅に小さくできる可能性は高い。また、現在の安定質量算定式にみられる砕波・非砕波領域の間で非常に大きなギャップがあることから、非砕波領域の値も同時に見直す必要がある。その際、現在の非砕波領域の安定質量算定式は、流れの場および波と流れの共存場にも適用できるとされているが、その妥当性も検討する必要がある。本課題では以上の観点からの見直し案を水槽での模型実験によって検討した。

### 2. 安定質量算定式の拡張

#### 1) 方法

##### (1) 拡張式の導出

一般に、海底に設置された構造物には流れ方向の抗力に加えて流れに垂直方向の揚力が作用する(図 6-1)。このとき、摩擦力と抗力の釣り合いより、次式が成り立つ。

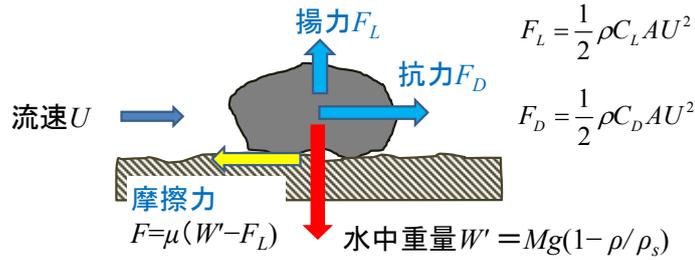


図 6-1 石材に作用する力

$$\frac{1}{2} \rho (C_D + \mu C_L) A U^2 = \mu M g \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (6-2)$$

ここに、 $\mu$ ：静止摩擦係数、 $A$ ：石材の基準面積、 $C_D$ ：石材の抗力係数、 $C_L$ ：石材の揚力係数、 $M$ ：石材の質量、 $\rho$ 、 $\rho_s$ ：海水と石材の密度

石材の代表長さを  $D$  として、その質量と基準面積をそれぞれ

$$M = \rho_s \alpha D^3, \quad A = \beta D^2 \quad (6-3)$$

で表せば、基準面積は次式で与えられる。

$$A = \frac{\beta}{\alpha^{2/3}} \left( \frac{M}{\rho_s} \right)^{2/3} \quad (6-4)$$

式(6-2)に式(6-4)を代入して整理すると、次式が得られる。

$$M = \frac{\beta^3}{\alpha^2} \frac{\rho_s C_F^3}{8 \mu^3 g^3 (\rho_s / \rho - 1)^3} U^6 \quad (6-5)$$

ここに、 $C_F$ は次式で定義される係数である。

$$C_F \equiv C_D + \mu C_L \quad (6-6)$$

さらに係数  $K_m$  を

$$K_m \equiv \frac{\beta}{\alpha^{2/3}} C_F \quad (6-7)$$

で定義すると、式(6-5)は次式に書き換えられる。

$$M = \rho_s \left[ \frac{K_m}{2 \mu g (\rho_s / \rho - 1)} \right]^3 U^6 \quad (6-8)$$

式(6-7)の右辺の係数  $\beta/\alpha^{2/3}$  は、球形の石で  $\beta/\alpha^{2/3} = (\pi/4)/(\pi/6)^{2/3} \approx 1.21$ 、また直方体  $D \times D \times 2D$  (流れに垂直な向きの断面面積が  $D \times 2D$ ) で  $\beta/\alpha^{2/3} \approx 1.26$  であり、石の形状によらず 1.2 程度になると推察される。 $C_F$ にも  $\mu$ が含まれているが、一般に  $C_L$ は  $C_D$ に比べて小さいと仮定できるので、式(6-8)では概ね、石材の形状と流動条件の違いが  $K_m$ により、また底面条件の違いが  $\mu$ により評価されると考えられる。

## (2) 拡張式の検証実験

拡張式(6-8)の妥当性を検証するため、波の場、流れの場及び波と流れの共存場に単体で設

置された割石を想定して、水理模型実験による被災限界流速の把握と静止摩擦係数の測定を行った。また、徳島県が徳島県沿岸に試験的に設置した割石を利用して現地検証実験を行った。

水理模型実験では、約 1 t の割石と縮尺 1/15 を想定して、平均質量 294g (標準偏差 33g、偏差の絶対値/平均 < 約 0.2) の角張った碎石 100 個 (図 6-2) を用いて、回流水槽実験と造波水槽実験を行い、被災限界流速を調べた。水中での重量と乾燥重量から推定された碎石の平均密度 (±標準偏差) は 2.62 (±0.04) g/cm<sup>3</sup> であった。被災限界流速  $U_{crit}$  は、現在の手引の根拠となった明田らの実験<sup>20)</sup>と同様に被害率 10%での流速で定義し、それより  $C$  と  $K_m$  の値を以下の二式で求めた。

$$C = M_{50} / U_{crit}^6 \quad (6-9)$$

$$K_m = 2\mu g \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \left( \frac{C}{\rho_s} \right)^{1/3} \quad (6-10)$$

ここに、 $C$  : 現在の手引の安定質量係数、 $M_{50}$  : 試験石材の質量の中央値(kg)、 $U_{crit}$  の単位は m/s

準定常流場での  $U_{crit}$  については、境界層の影響を考慮して流速の鉛直分布を対数分布に当てはめ、石の平均高さ ( $h_s$ ) の 1/2 の高さにおける流速と、次式で求められる底面から  $h_s$  までの二乗平均流速  $U_{rms}$  を代表流速とした。

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{h_s} \int_0^{h_s} u^2(z) dz} \quad (6-11)$$

ここに、 $u(z)$  : 底面からの高さ  $z$  における平均流速



図 6-2 水理模型実験に用いた碎石 100 個 (ノギスの全長:22.9cm)

#### i) 回流水槽実験

図 5-24 に示した回流水槽を用い、試験区 (長さ 3m、通水断面 0.4m×0.4m) の底面 (深さ 15cm 凹部付き) に玉石 (平均質量 24 g) を敷き詰めて試験床 (図 6-3) とした。予備実験の結果、砂の堆積条件下では、碎石が著しく安定化することがわかったため、実験は、安全側の値が得られるよう、砂のない条件で行った。

当回流水槽は定常流だけでなく、インペラーの順逆転を繰り返すことで振動流も発生できる。実験は、①波と流れの共存場を想定した周期 8 s、5 s 及び 12 s の非対称振動流、②波の場を想定した周期 12 s の対称振動流、③流れの場を想定した準定常流、の 5 ケースで、各条

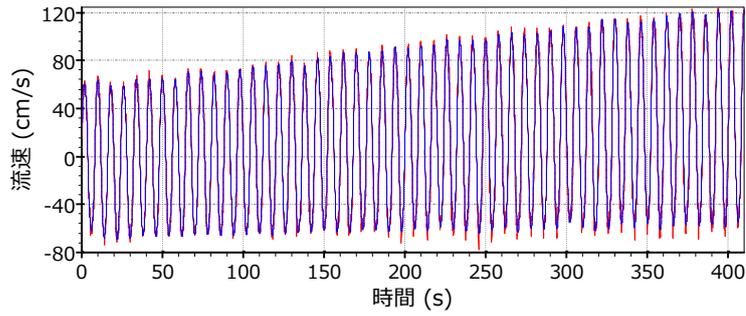
件の流れを、流速が次第に大きくなるように発生させた（図 6-4）。ここで、振動流の周期は、模型縮尺から 4 s 程度以下にする必要があったが、装置の特性上、碎石を動かすのに十分に強い振動流を短周期で発生できなかったため、やむを得ずこれらの周期で実験を行った。

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 毎に、水路幅方向に互い違いに 6 個ないし 4 個ずつ設置した（図 6-3）。その際、碎石は、最も大きい面を下に向け、石の側方投影面積が最大になる面を流れの向きに向けて設置し、またできるだけ底面条件が同じにならぬよう、設置場所を少しずつ変えた。碎石の設置後、試験区上面の密閉蓋を閉めて満水状態にして、所定の変動様式の流動を発生させ、観測者 2 名によって記録した碎石移動時の経過時間から移動時の流速を調べた。ただし、振動流の場合は、移動時の直前の最大流速（図 6-4 中のスプライン曲線の値）を移動時の流速  $U_m$  とした。上述の各ケースに対して、この操作を繰り返して 100 個の碎石から被害率（移動した碎石の総数 / 100 個）を求めた。

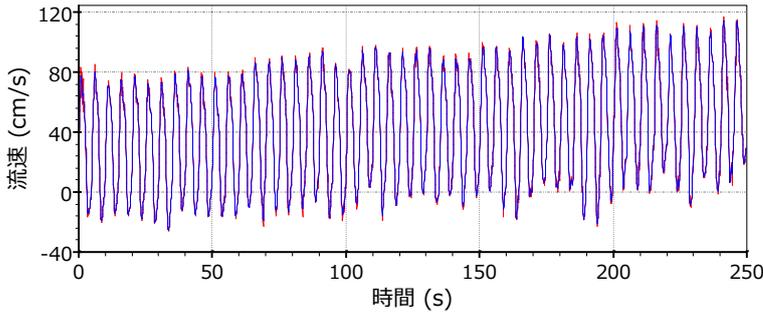
実験中の流速については、試験区中央の底上、10cm における流速を参照値として、ADV を用いて 10Hz で測定した。この測定位置は、すべてのケースで境界層外になった。振動流の場合は、境界層厚が薄くなることから、その流速値をそのまま解析に用いたが、境界層での流速低下が大きい準定常流（Case 5）の場合は、再度同じ条件で流れを発生させ、碎石の設置領域内の 7 カ所で、底面からの高さ  $z=2, 2.5, 4, 5, 7, 10\text{cm}$  で流速測定を行い、平均的な流速分布を求めた。



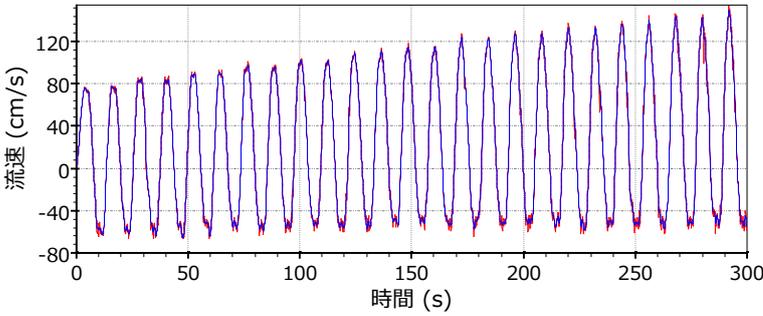
図 6-3 回流水槽の試験底面上に置かれた碎石の例



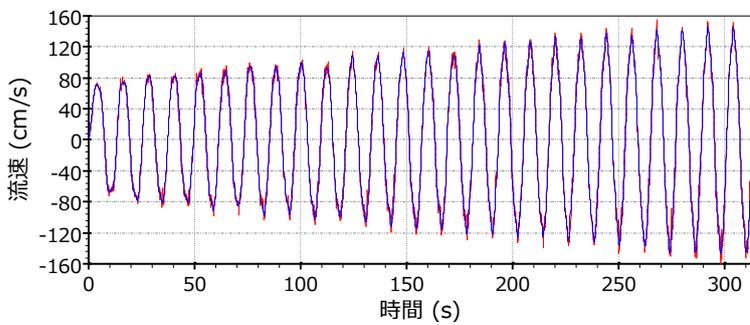
Case 1: 非対称振動流  
(周期 8 s)



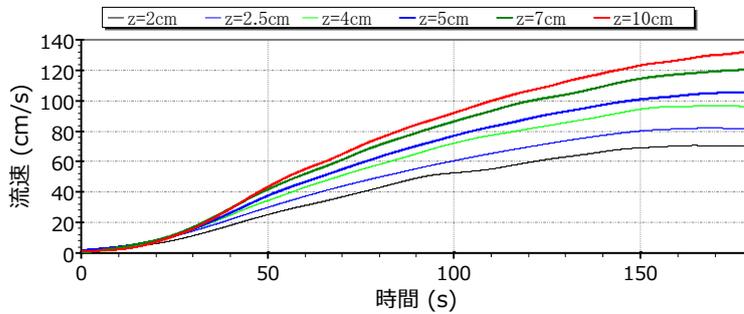
Case 2: 非対称振動流  
(周期 5 s)



Case 3: 非対称振動流  
(周期 12 s)



Case 4: 対称振動流(周期 12 s)



Case 5: 準定常流

図 6-4 回流水槽実験における各実験ケースの流速の時間変化  
Case 1~4 における赤線と青線は、それぞれ ADV による底上 10cm における測定値とそのスプライン曲線

## ii) 造波水槽実験

全長 70m×幅 0.7m×深さ 2.2m の造波水槽を用いた。水槽内の珪砂（粒径 0.12mm）から成る勾配 1/50 の斜面上に、塩ビ板（210cm×70cm）に玉石を 1 層敷き詰めるようにして貼り付けた試験床（玉石底という）を埋め込んだ。予備試験の結果、砂層厚が厚い場合は、碎石は砂に埋没して動かなくなることが判明したため、厳しい条件として、珪砂が玉石の間隙を埋める程度に薄く堆積した状態で実験を行った。実験時の試験床中央での水深は 56cm であった。

実験では、試験床上で側壁から 15cm 以上離れた領域に、10 個の碎石を互い違いに 1 個ずつ並べた（図 6-5）。設置方法は、上述した回流水槽実験の場合と同様にして、最も大きい面を下にして、石の側方投影面積が最大になる面を波の来る方向に向けて碎石を設置し、またできるだけ底面条件が同じにならぬよう、設置場所を少しずつ変えた。碎石の設置後、所定の周期と振幅で造波させた波を 10 波程度与えて、碎石が 1 個分移動した場合を「被災」と判断した（図 6-5）。この操作を 100 個の碎石すべて対して繰り返し、被害率を求めた。

造波条件は、周期を 2.0、2.5、3.0、3.5s の 4 通りとし、各周期に対して振幅を、碎石が全く動かない条件から 2cm 刻みで造波能力限界近くまで増加させた。

実験条件での流速を測定するため、試験床中央およびその前後 75cm の合計 3 カ所に、ADV を 1 台ずつ設置し、底面上 7cm の高さでの流速を 50Hz で測定した（図 6-6）。解析では、流速時系列データから計測ノイズを除去後、データに当てはめたスプライン曲線から各地点での岸向最大流速の平均として最大流速  $U_m$  を定義し、最大流速と被害率との関係を調べた。

なお、測定高さを底面から 1.25~8.0cm の範囲で変えた流速測定も行ったが、流速分布はほとんど同様であったことと、底面付近では渦や砂の影響を受けてノイズが発生しやすく、解析が難しくなったことから、上記の高さを選んだ。

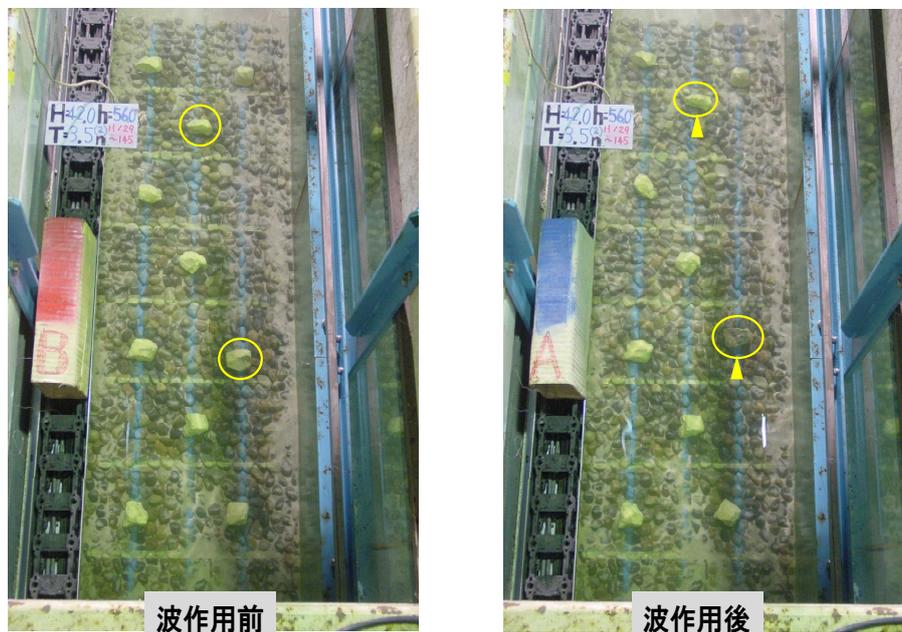


図 6-5 造波水槽実験（玉石底の場合）での碎石の設置状況（左）と波作用後の状況（右）の例。円で囲った碎石を「被災」と判断

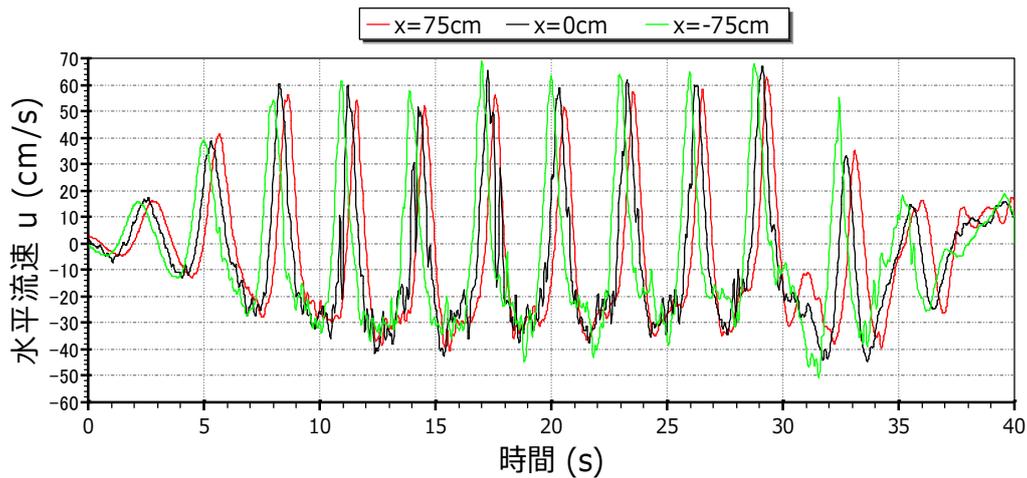


図 6-6 造波水槽実験での ADV による流速測定例  
x : 試験床中央から岸向距離

また、造波水槽実験では、玉石底に加えて、粗度（すなわち、静止摩擦係数）の異なる 2 種類の底面（モルタル底と玉砂利底）でも、同じ碎石 100 個を用いて同様の実験を実施し、最大流速と被害率との関係を調べた。

### iii) 静止摩擦係数の測定

各実験条件における静止摩擦係数  $\mu$  を、摩擦角  $\theta$  の測定により  $\mu = \tan\theta$  として求めた。摩擦角は、試験底面上に置かれた供試体が、その底面をゆっくりと傾けたときに滑り出す直前の角度として求められる。摩擦角の測定のため、実験底面（回流水槽実験の玉石底、造波水槽実験のモルタル底、玉砂利底および玉石底）と同様の試験板を製作し、試験に用いた碎石 100 個を各試験板上に 1 個ずつ置いてデジタル傾斜計（STS(株)、DL270LV）を用いて摩擦角を測定した。その際、造波水槽での移動実験と同じように、碎石はその長軸を板の傾斜方向に直角に向けて設置し、碎石 1 個について設置位置を無作為に変えて測定を 3 回繰り返した。

また、現在の設計法の根拠となっている明田らの実験<sup>7)</sup>における  $K_m$  値を得るため、その実験（石材の模型：64g の玉石、底面：モルタル）と同じ条件で 100 個の玉石（図 6-7）を用いて摩擦角を測定し、 $\mu$  を求めた。



図 6-7 静止摩擦係数の測定に使用した、明田らが試験した玉石とほぼ同形同大の玉石（質量約 60g）

### iv) 現地実験

現地実験に用いた割石 10 個は、徳島県が通常、藻場造成に用いている 2~3t クラスの花崗

岩の割石である。設置前に撮影された石の側方2直交方向写真の画像解析<sup>22)</sup>と石の密度測定より推定された割石の質量は、1.1~4.5t(中央値2.1t)であった。これらの割石は2012年11月22日、徳島県海部郡美波町田井ノ浜沖水深DL-6.6mに、砂(粗砂)が30cm程度堆積した冠砂域に一定間隔(1.5~2.0m)で設置された。各割石には、超小型3軸加速度ロガー(MSR145, MSR Electronics社製、61×20×14mm)1個をアクリル製円筒形防水ケース(長さ93mm×径30mm)に入れ、さらにその防水ケースごと、アンカーボルトで割石に固定したステンレス製円筒形カバーに収納して固定した。加速度ロガーは、割石が動いて閾値(±0.5Gに設定)を超える加速度が計測周波数(2Hzに設定)で検出されると、時刻と加速度が記録されるように設定された。またその近傍の海底付近に電磁式流速計付き水圧式波高計(アイオーテック、WH-302;計測モード:2hごとに2Hzで20分間計測)を同時に設置し、移動時の流速を調べられるようにした。加速度ロガーは、台風シーズン前の2013年7月30日に設置し、シーズン後の10月22日に回収した。

上記波高計による計測データについて、波動流速を電磁流速計から直接測定する方法と水圧のフーリエ成分から推定する方法<sup>2)</sup>で解析したが、両者の解析結果は最初よく一致するものの、前者はやがて出力が相対的に低下した(電磁流速センサー電極部での付着生物による被覆が原因)ため、解析には後者による推定値のみを用いた。

なお、この現地実験は、徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課(担当:棚田教生主任研究員)の協力を得て実施した。



図 6-8 徳島県試験地の冠砂域に設置された割石(左)とそれに固定した加速度ロガー(右)。左写真の枠:1×1m

## 2) 結果

### (1) 回流水槽実験

5ケースにおける流速と砕石の被害率との関係を図6-9に示す。準定常流(Case 5)における流速は、ここでは砕石の平均高さの半分の高さにおける値で示した。また、Case 5における被害率10%時点での流速の鉛直分布を図6-10に示すとともに、図6-9から読み取った被災限界流速 $U_{crit}$ とC値を表6-1に示した。

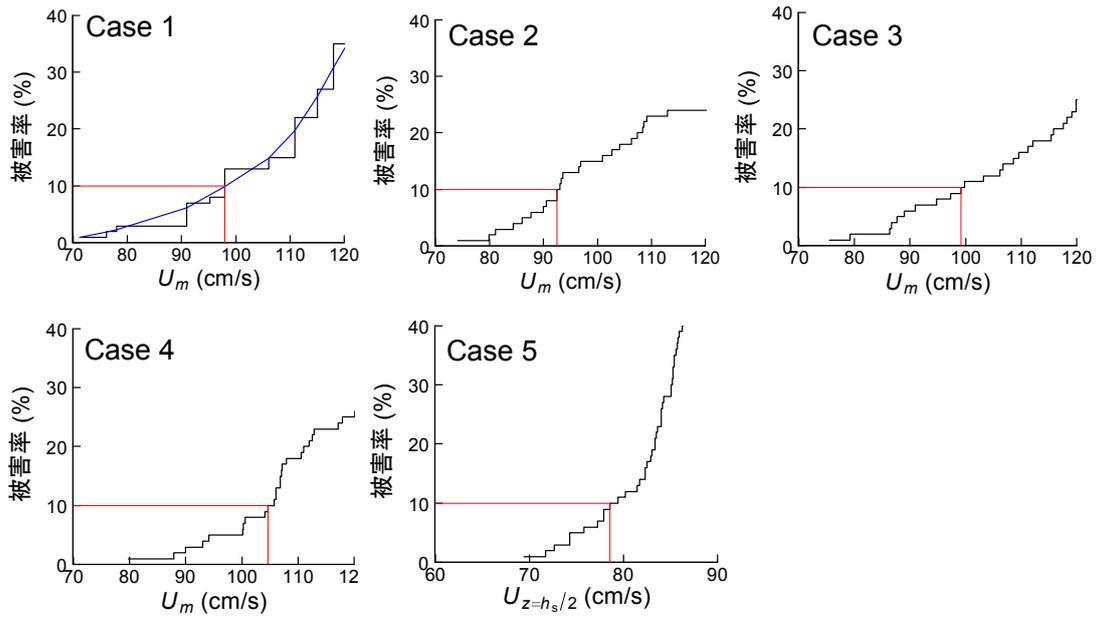


図 6-9 回流水槽実験での流速と碎石の被害率との関係

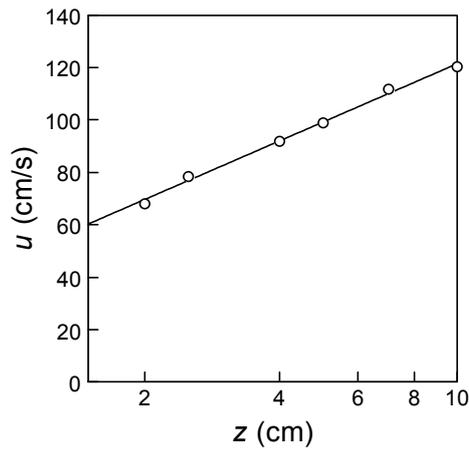


図 6-10 準定常流 (Case 5) における被害率 10%時点での平均流速分布 (7 点平均)  
 実線 :  $u = 47.2 + 32.3 \ln z$

表 6-1 回流水槽実験での被災限界流速  $U_{crit}$  と  $C$  値

Case	流れの条件	代表流速	$U_{crit}$ (cm/s)	$C$
1	非対称振動流(周期 8s)	主流流速	97.9	0.33
2	非対称振動流(周期 5s)	主流流速	92.5	0.47
3	非対称振動流(周期 12s)	主流流速	99.1	0.31
4	対称振動流(周期 12s)	主流流速	104.6	0.22
5	準定常流	$U_{z=h_s/2}$	78.5	1.25
		$U_{rms}$	73.6	1.85

準定常流 (Case 5) の  $U_{crit}$  が、振動流場または振動流と定常流との共存場での値に比べて明らかに大きくなった。また、振動流成分のある流動条件では、Case 4、Case 3、Case 1、Case 2 の順に、すなわち周期が短くなるほど、 $U_{crit}$  が低下した。これらのことは、同じ流速であっても、一方向流の定常流と振動流では抗力係数が異なり、前者の方が小さいこと、および振動流中では周期が短いほど、つまり KC 数が小さいほど、抗力係数が増加し、安定性が低下することを反映した結果と考えられる。ただし、本実験の振動流の周期は、波の縮尺模型としては長過ぎるため、その実験値をそのまま設計に用いることはできない（このため、振動流の周期をより短い適切な値にすれば、 $U_{crit}$  は準定常流の場合よりも小さくなると考えられる）。ここでは、準定常流での  $C$  値がこれらの条件の中で最も大きく、安全側の設計値になっていることから、この値を定常流中での被災限界として用いる。

定常流の場合は、境界層が発達するため、代表流速の取り方が問題になる。せん断流（境界層流れ）の中での抗力を見積もる際の代表流速としては、従来一般には物体の中心高さでの流速が用いられることが多い<sup>23,24)</sup>が、その物理的根拠は明確でない<sup>25)</sup>。それに比べて  $U_{rms}$  は物理的により適正で、かつより小さく（表 6-1）、安全側の値になっていることから、この値を設計値として採用することとした。

## (2) 造波水槽実験

造波水槽での碎石の被害率と最大流速  $U_m$  との関係を図 6-11 に示す。図中の黒い直線は、折れ線式への最小二乗回帰式を表す。また、実験条件は碎波と非碎波の条件を含むが、それらによる系統的な差異は全く認められなかったため、ここでは示していない。玉石底上の実験では、原因は明らかではないが、周期によって結果が分かれ、周期 3.0s のときの碎石の安定性が他の周期のときよりも増加した。そのような例外はあるが、各底面条件の被害率は、周期によらず  $U_m$  がある閾値を超えて増加すると、ほぼ直線的に増加し、その関係は回帰式によって概ね近似された。そこで、図中に示す回帰式に基づき、被災限界流速  $U_{crit}$ （被害率 10%における  $U_m$ ）を求めた。周期によって結果が分かれた玉石底上の実験結果については、安全側の設計値を得るため、 $U_m$  に対する被害率が低い方（周期 3.0s 以外）の結果から  $U_{crit}$  を求めた。その結果、得られた玉石底、モルタル底および玉砂利底上の  $U_{crit}$  はそれぞれ、61.0、51.7 および 59.5cm/s であった。

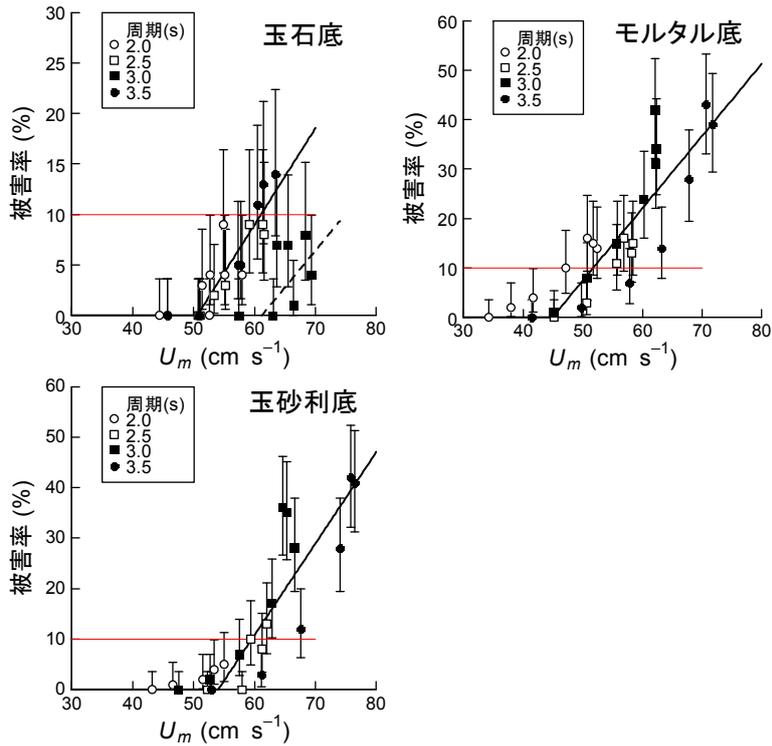


図 6-11 造波水槽実験での最大流速と碎石の被害率との関係  
エラーバー：95%信頼区間

### (3) 静止摩擦係数と $K_m$ 値

摩擦角の測定から得られた、各実験に用いた石と底面の各組み合わせ条件における静止摩擦係数  $\mu$  の累積相対頻度分布を図 6-12 に示す。 $\mu$  の代表値として中央値をとると、たとえば玉石底上の碎石の場合は、回流水槽実験で 0.81、造波水槽実験で 0.86 となり、岩礁に割石を設置した場合の標準的な静止摩擦係数 0.8 にほぼ一致する。このことから、設計標準値との整合性を考慮して静止摩擦係数の統計量を中央値で表した。すべての実験条件における  $\mu$  とすでに示した  $U_{crit}$  の実験値から式(6-9)と式(6-10)より求められる  $C$  値と  $K_m$  値をまとめて表 6-2 に示した。

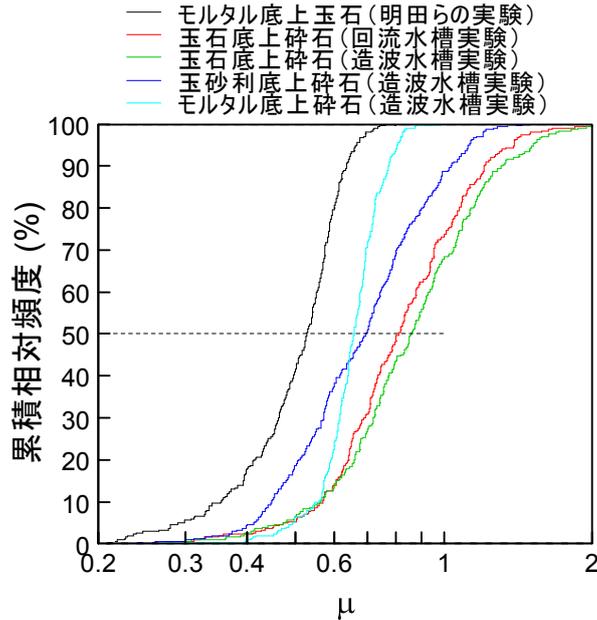


図 6-12 各実験条件における静止摩擦係数の累積相対頻度

表 6-2 各実験条件における  $C$  値、 $\mu$  の中央値および  $K_m$  値

波 / 流れ	実験条件	$C$	$\mu$ の中央値 (設計標準値)	$K_m$	
					平均
流れ	玉石底上の碎石 (回流水槽実験)	1.85	0.81 (0.8)	2.3	2.3
波	玉石底上の碎石 (造波水槽実験)	5.7	0.86 (0.8)	3.5	3.5
	玉砂利底上の碎石 (造波水槽実験)	6.6	0.70	3.0	
	モルタル底上の碎石 (造波水槽実験)	15.4	0.66 (0.5)	3.8	
	モルタル底上の玉石 (明田らの実験)	25	0.53 (0.5)	3.5	

$K_m$  値は、流れの場合 (定常流場) での値 2.3 に対して、波の場合では実験によって多少のばらつきはあるものの、それよりも大きく、平均値 3.5 に近い値となった。波の場合での  $K_m$  値が異なる海底条件でほぼ同じ値になったことから、式(6-8)が異なる条件にも適用できる拡張式になり得ると考えられる。

#### (4) 現地実験

観測期間において、割石の移動は全く認められなかった。20 分間の水圧データから推定された最大波高と岸向最大波動流速の経時変化を 6-13 に示す。台風の直撃はなかったものの、9 月 15 日以降、台風接近が 3 度あり、最大波高 4.5m と波動流速 2.6m/s が記録された。

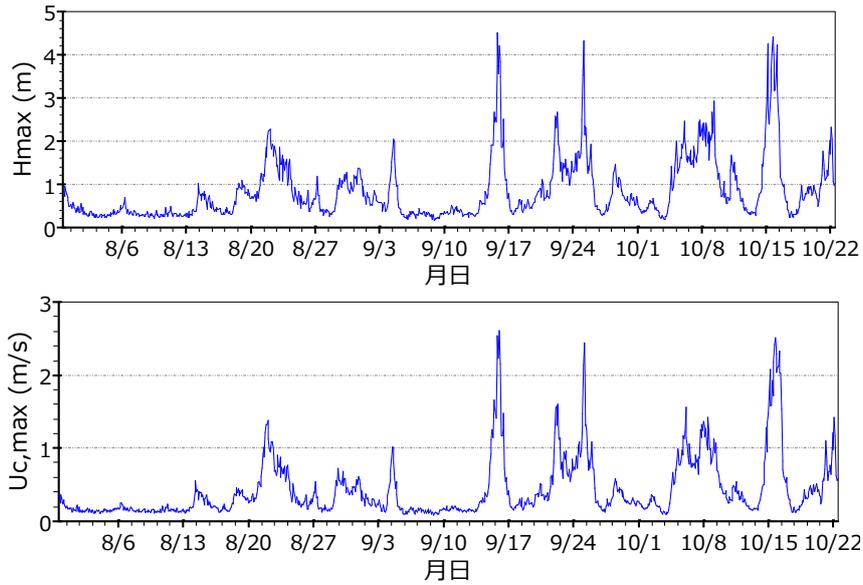


図 6-13 試験地における 20 分間の最大波高  $H_{\max}$  (上) と岸向最大波動流速  $U_{c,\max}$  (下)

### 3) 考察

石材の安定質量算定のための提案式(6-8)は、単体で設置した石材で水理模型実験を行い、構築したが、現在の手引では、単体だけでなく、群体で設置した場合と群体で設置し、さらに囲い礁で囲った場合の安定質量係数が示されている。しかし、それらの影響は、式(6-8)に新たな係数  $\alpha$  を導入して次式で評価することができる。

$$M = \alpha \rho_s \left[ \frac{K_m}{2\mu g(\rho_s / \rho - 1)} \right]^3 U^6 \quad (6-12)$$

ここに、

$\rho_s, \rho$  : 石材と海水の密度( $t/m^3$ )

$\mu$  : 静止摩擦係数

$K_m$  : 石材の形状に依存する質量算定係数。波の場及び流れの場での割石の場合はそれぞれ  $K_m=3.5$ 、 $K_m=2.3$  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。

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

$U$  : 設計流速(m/s)。流れの場では、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を用いる。実用的には流速分布に式(6-13)を表されるべき乗則を仮定し、式(6-14)で求められる  $U_c$  を用いることができる。

$$u(z) = U_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^n \quad (6-13)$$

$$U_c = \sqrt{\frac{1}{h_s} \int_0^{h_s} u^2(z) dz} = \frac{1}{\sqrt{2n+1}} \left( \frac{h_s}{z_0} \right)^n U_0 \quad (6-14)$$

ここに、

$z$  : 底面からの高さ

$h_s$  : 石材の高さ

$U_0$  :  $z = z_0$  における流速

$n = 1/7$

割石を砕波領域の岩礁に設置した場合、静止摩擦係数として標準値  $\mu=0.8$  を採れば、安定質量は現在の設計法の約 1/3 に軽減される。

提案式(6-12)は、従来の設計手法と矛盾することなく、本事業での実験結果を包括的に表すことができる。また、この式は、従来の算定式にある二つの問題、すなわち砕波領域で単体設置の石材に対して非常に大きい安定質量が算出されることと、安定質量の算定値に砕波領域と非砕波領域の境界での極端な差を、軽減または解消できる。前者の問題は、従来の手法の根拠となっている実験が、モルタル底上の玉石 ( $\mu=0.53$ ) という極めて厳しい条件で行われたため、実際には多くの場合で凹凸のある岩礁上の割石であることから石材の安定性はより高い。提案式によれば、その場合の  $\mu$  として標準値  $\mu=0.8$  をとれば、 $\rho_s=2.60\text{t/m}^3$ 、 $\rho=1.03\text{t/m}^3$ 、 $K_m=3.5$ 、 $\alpha=1$  より  $M=8.1U^6$ 、すなわち  $C=8.1$  となり、安定質量を現在よりも約 1/3 に軽減できることになる。徳島県での現地実験では、推定質量の中央値  $M_{50}=2.1 \times 10^3\text{kg}$  の割石が波動流速  $U=2.6\text{m/s}$  でも移動しなかったことから、 $C < M_{50}/U^6=6.8$  と推定され、8.1 よりも少し小さい。しかしこの程度の差は、サンプル数が少なかったこと、ばらつきの大きい試験割石の質量、実際の静止摩擦係数と標準値との差、縮尺効果のある模型実験との差、砂地への埋没の影響などを考慮すれば、明らかな矛盾ではない。一方、後者の問題については、本実験の結果で砕波と非砕波で被害率に差はみられず、被害率を概ね最大流速  $U_m$  のみで説明できたことから、砕波の有無で算定係数を変える必要はなく、式(6-12)の妥当性が支持される。

以上のように、提案式(6-12)は、従来の算定式に代わる妥当な拡張式としての利用が期待できる。しかし、提案式によれば、多くの場合、安定質量が小さくなることから、信頼性のより一層高い検証が求められる。そのため、

- ① 石材を群体で設置した場合と、さらに囲い礁で囲った場合の適用性
- ② 現地での適用性

に関する実験的検証が今後の課題として挙げられる。

## VII. 波動流速の算定法

### 1. 背景と目的

漁場の施設の安定計算に用いる波動流速の算定は、非砕波領域と砕波領域で異なり、非砕波領域では有義波を対象とした微小振幅波理論によるのに対して、砕波領域では次式による。

$$U_m = K\sqrt{gh} \quad (7-1)$$

ここに、 $U_m$ ：最大波動流速、 $g$ ：重力加速度、 $h$ ：水深、 $K$ ：水深・沖波波長比  $h/L_0$  の関数として図 7-1 によって与えられる係数。式(7-1)による波動流速は、その水深で発生し得る最大流速または最大波による岸向最大流速にほぼ等しく、非砕波領域での有義波による最大波動流速とは異なる。このため、非砕波領域と砕波領域との境界で算定流速が不連続になる。また  $K$  の算定図は、勾配 1/50 の斜面での規則波実験による値を示しているが、海底勾配の異なる場合での値は不明であり、また設計値として図中の破線とばらつきのある実験値のどこを読み取ればよいかも明示されていない。本課題では、以上の問題を解消し、不規則波による最大流速を沖から岸まで連続的に算定できる手法の開発を検討した。

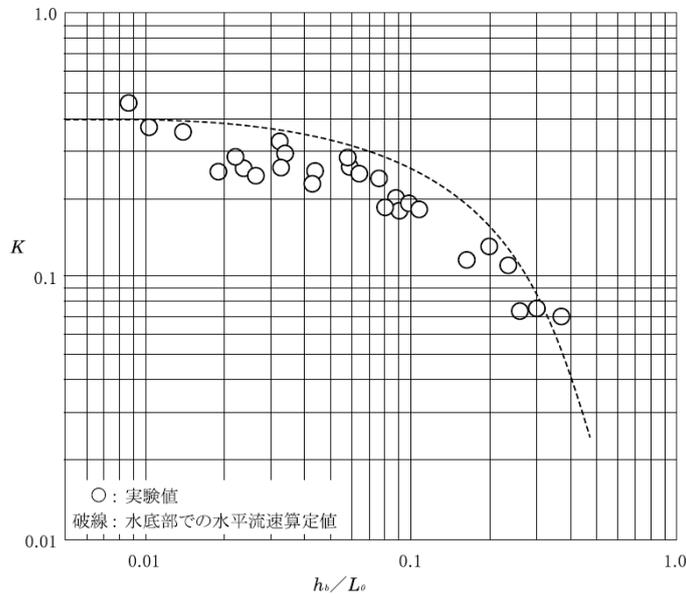


図 7-1 係数  $K$  の算定図 (手引<sup>1)</sup>の図 12-2-2)

### 2. 方法

#### 1) 算定法

波の不規則性を考慮して、波群中の最大流速を算定するための方法として、水深による波高変化を合田のモデル<sup>26,27)</sup>によって推算し、最大波の波高  $H_{\max}$  ( $=H_{1/250}$ ) と周期  $T_{\max}$  ( $=T_{1/3}$  を仮定) および実水深 (波による平均水位変化を考慮した実際的水深) より、最大流速  $U_m$  を以下の2つの方法で試算した。

**方法 1**：非砕波領域 (理論的砕波限界近くまで) はフーリエ近似法<sup>28)</sup>で計算し、それ以浅の適用範囲外では次式から求める。

$$U_m = K_u \sqrt{gH_{\max}} \quad (7-2)$$

ここに、 $K_u$  は係数。巻き波砕波では、海底勾配にかかわらず  $K_u$  がほぼ一定 (0.38~0.4) になることが実験的に示されている<sup>29)</sup>が、ここではフーリエ近似法の適用可能領域での値と連

続するよう、値を調整する。なお、非線形波理論にはいくつかの手法があるが、フーリエ近似法は其中最も適用範囲が広く優れている<sup>30)</sup>。

方法2：微小振幅波理論の次式により計算する。

$$U_m = \frac{\pi H_{\max}}{T_{\max} \sinh(2\pi h_b / L)} \quad (7-3)$$

ここに、 $h_b$ ：実水深、 $L$ ：微小振幅波の波長

## 2) 検証実験

検証実験には、全長70m×幅60cmの造波水槽(図7-2)を用いた。Bretschneider-光易スペクトルの不規則波を有義波周期2.0、2.5、3.0s、換算沖波波高10、15、20cmの全9通りの組み合わせ条件で発生させ、勾配1/50の斜面上に2.5m間隔で設けた6測定点において、ADVと容量式波高計を用いて底上4cmでの水平流速と水面変位を50Hzで測定した。この測定は、反射波の影響を受けて波が安定した状態に達した後(造波開始30s後)に開始し、有義波周期3sでも約250波の波を観測できる770s間行った。データ解析では、各水面変位時系列データからゼロダウンクロス法で最大波高を求めるとともに、各流速時系列データからはベイズ型スプライン回帰<sup>31)</sup>によりノイズを除去した後、最大流速を求めた。

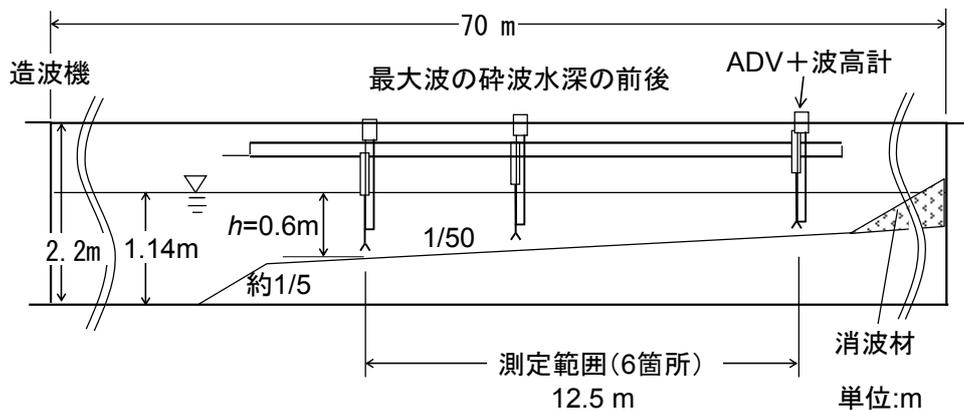


図7-2 造波水槽の断面と測定位置

## 3. 結果

最大波高の計算値と測定値の水深変化および両者の相関を図7-3に示す。計算値はほぼ測定値に一致し、合田のモデルによる予測が妥当であることを示した。最大流速の方法1による計算値と測定値の水深変化および両者の相関を図7-4に示す。方法1は、波周期の短い場合の水深の浅いところで最大流速をかなり過小評価した。これに対して方法2(図7-5)では、最大流速を多少過大評価する領域があるが、全般的に妥当な推定値が得られた。以上の結果より、合田のモデルで推定される最大波高と有義波周期から微小振幅波理論の式(7-3)により底面での最大波動流速の妥当な推定値が得られると結論される。

なお、本実験の範囲では、波による平均水位の変化量は3mm以下であり、ほとんど無視できる範囲にあった。

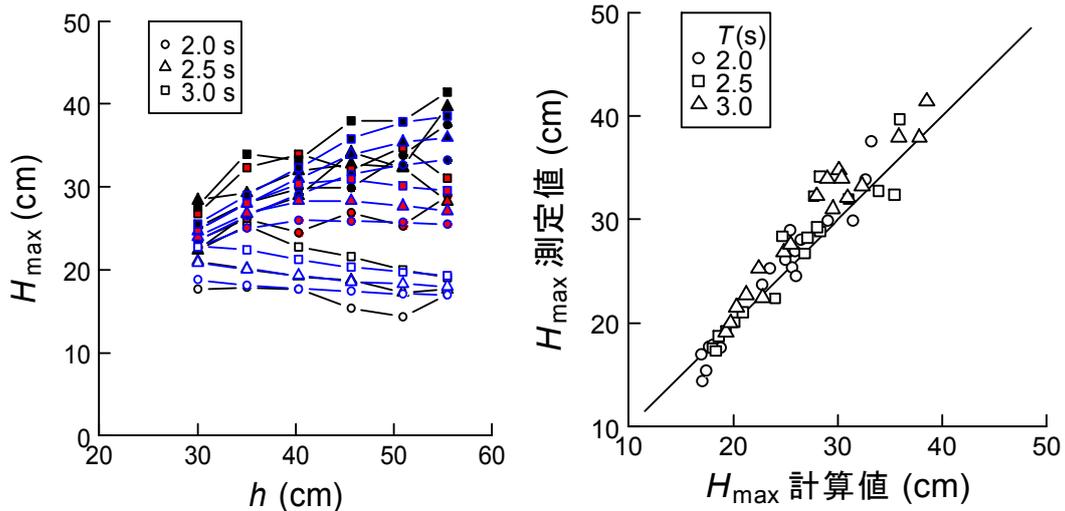


図 7-3 最大波高の計算値と測定値の水深変化（左）と両者の相関（右）

左図における黒線と青線は各々測定値と計算値

左図の白、赤および黒の記号は各々  $H_0' = 0.10\text{m}$ 、 $0.15\text{m}$ 、 $0.20\text{m}$

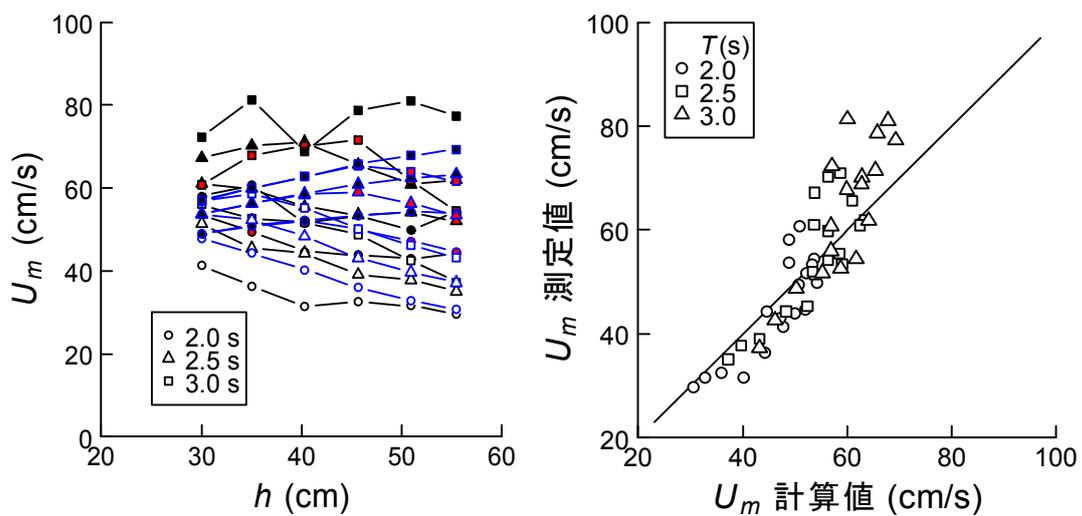


図 7-4 最大流速の方法 1 による計算値と測定値の水深変化（左）と両者の相関（右）

左図における黒線と青線は各々測定値と計算値

左図の白、赤および黒の記号は各々  $H_0' = 0.10\text{m}$ 、 $0.15\text{m}$ 、 $0.20\text{m}$

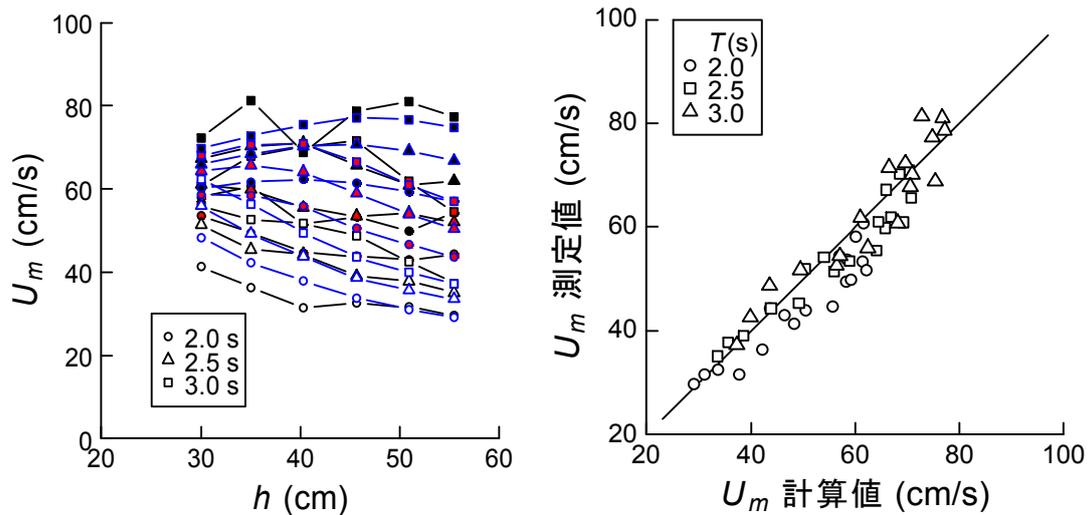


図 7-5 最大流速の方法 2 による計算値と測定値の水深変化 (左) と両者の相関 (右)

左図における黒線と青線は各々測定値と計算値

左図の白、赤および黒の記号は各々  $H_0 = 0.10\text{m}$ 、 $0.15\text{m}$ 、 $0.20\text{m}$

#### 4. 考察

本実験の結果は、不規則波による底面付近での最大流速が碎波の有無にかかわらず沖から岸まで微小振幅波理論によって妥当な推定値が得られることを示した。このことから、碎波領域内での最大波高は碎波限界波高にほぼ一致すると仮定できるので、現在の手引に記載されている碎波領域内の流速算定式(7-1)の  $K$  値は、以下に示す碎波限界波高式<sup>27)</sup>と微小振幅波理論の底面流速の式(7-5)より、式(7-6)で求められる。

$$H_b = A \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 11s^{4/3}) \right] \right\} L_0 \quad (7-4)$$

$$U_m = \frac{\pi H_b}{T \sinh(2\pi h_b / L)} \quad (7-5)$$

$$K = U_m / \sqrt{gh_b} \quad (7-6)$$

ここに、 $H_b$  : 碎波波高、 $A = 0.17$ 、 $h_b$  : 碎波水深、 $L_0$  : 沖波波長、 $s$  : 海底勾配  
 $h_b$  は正確には波による平均水位の変化を考慮した水深であるが、式(7-1)ではその変化量が微小で  $h = h_b$  が仮定されている。その仮定と式(7-4)、(7-5)、(7-6) および分散関係式

$$L = L_0 \tanh \frac{2\pi h_b}{L} \quad (7-7)$$

より、ある  $s$  に対して  $K$  は  $h/L_0$  の一価関数になっていることがわかる。図 7-6 は、 $s = 1/10$ 、 $1/20$  および  $1/50$  に対して描いた  $h/L_0$  と  $K$  の関係曲線である。 $s = 1/50$  の曲線は手引の図 (図 7-1) 中の曲線に、また  $s = 1/20$  の曲線は瀬戸・鎌田の実験結果<sup>32)</sup>にほぼ合致し、上述の方法が海底勾配を考慮できる拡張式として利用できることがわかる。

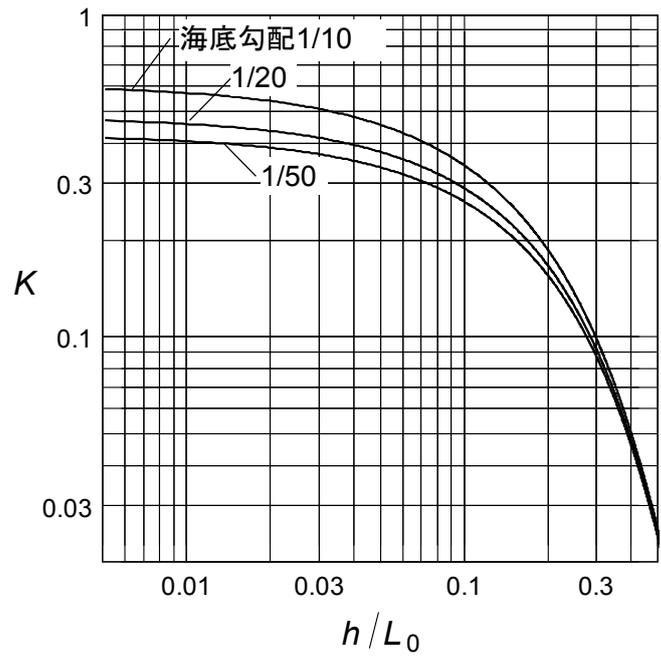


図 7-6  $h/L_0$  と  $K$  の関係

## Ⅷ. 浮魚礁の設計条件

### 1. 背景と目的

浮魚礁の設計について、手引きには表層型浮魚礁と中層型浮魚礁の設計法が記載されている。その手法は、30年確率波の有義波高  $H_{1/3}$  を設計波とし、流速振幅を算出し、潮流等の流速を加えて、浮体や係留に作用する流体力を求め、係留索の強度や係留基礎の所要質量を算定するものである。規則波に対する算定式の妥当性が検証されており、有義波高を規則波の波高と見なして、設計を行っている。設計に当たっては、手引きの内容を詳細に示した「MF21 浮魚礁設計・施工技術基準（平成4年3月）」も参考にされている。

近年では、表層型や中層型の中間的な浮魚礁として、静穏時には海面上に浮上し、流速が大きくなると海面下に沈降する浮沈式表層型浮魚礁が採用されるようになり、その実施例が増えている。また、浮魚礁の耐用年数は10年であるが、耐用年数を経過した浮魚礁は係留基礎まで含め全撤去が義務化されるようになった。一方、耐用年数に満たない浮魚礁の流失事故が報告され、その対応策が望まれている。

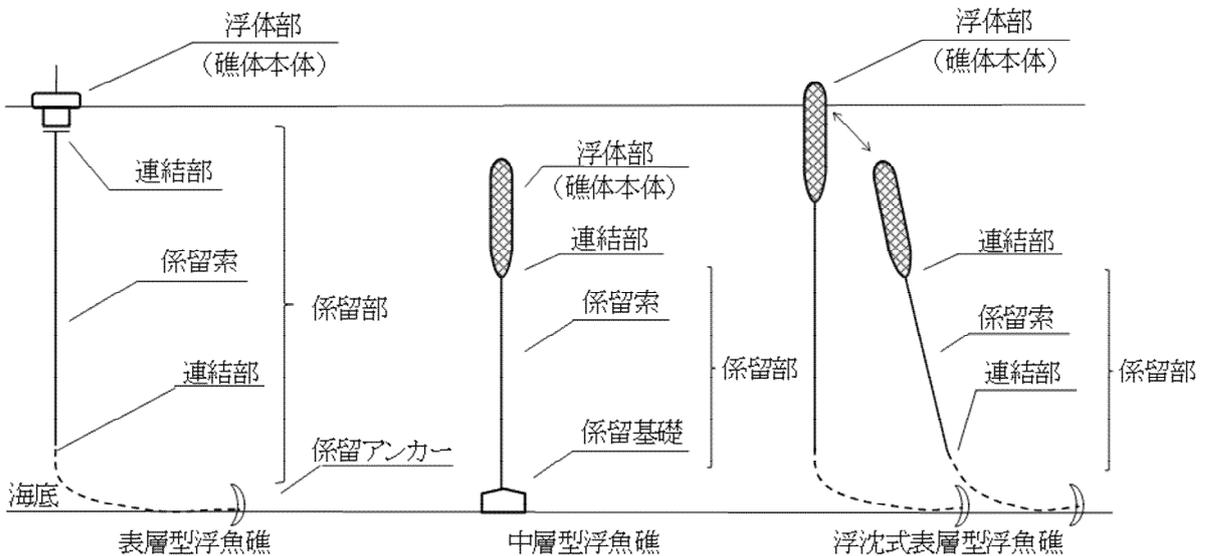


図 8-1 浮魚礁の構造形式

このような背景にあつて、設計上留意すべき事項を整理することとした。最初に浮魚礁の実態を把握するため、浮魚礁を設置している自治体の設計担当者にアンケートを実施した。次に、設計上の課題を把握するため、浮魚礁を販売している企業の設計担当者にヒアリングを行い、浮魚礁の設計上の課題を整理した。そして、既往の研究成果等を参考に設計上の配慮事項をまとめ、手引きの改訂案を作成した。

なお、今回の改訂では従来の設計法を踏襲し、設計波高は有義波高を使用した。一部の表層型浮魚礁では最大波高を使用していることもあり、今後、最大波高を用いた設計法に見直す検討が必要である。最初のステップとして、有義波高で設計を行っている中層型浮魚礁に対して、最大波高で設計した場合の感度分析を行った。一方、流速の鉛直分布は手引きでは1/7乗則が採用されているが、密度躍層が発達すると、流速分布が異なるため、今後は数値シミュレーションによる流速分布を利用することを検討する必要がある。そこで、表層型浮魚礁に取り付けられた流速計による計測値と数値シミュレーションによる流速値との比較を実施した。

## 2. 浮魚礁に関する浮魚礁の実態調査

### 1) アンケートの方法

平成 24 年度に漁場施設の設計上の課題を把握するため、都道府県および一部の市の設計担当者にアンケート調査を実施した。設問では、浮魚礁の設置の有無、係留索の劣化の状況、生物付着量、流出事故の原因と対策、浮魚礁回収時の課題とした。回答は 42 件あったが、浮魚礁を設置している県は四国や九州が多く、そのうち 5 県から回答があった。アンケートでは、係留索の劣化の状況に関する情報は得られなかった。4 県からは 31 件の浮魚礁の安定計算表を入手した。なお、本アンケートに未回答の県もあったため、以下の結果は、浮魚礁を設置している一部の県の回答である。

### 2) アンケート結果

#### (1) 浮魚礁の設計条件

アンケートの回答に添付された安定計算表から、主な設計条件を抽出した。

浮魚礁の設置水深帯は 535m～2,032m であった (図 8-2)。ある県では浮魚礁として、鋼製円盤型の表層型浮魚礁を設置しているが、その設置水深は 730～1,280m であった。水深 1,500m の頻度が高く、これは中層型浮魚礁の事例であった。最も設置水深が大きい例は表層型浮魚礁である。

底質分布は砂質底かシルトを含んだ砂泥底であり、岩礁上の設置はなかった。係留方法は表層型浮魚礁ではダウンホース型アンカーが採用され、中層型浮魚礁では方塊ブロックが採用されている。

中層型浮魚礁の天頂部水深は静水時に水深 20m 以深とすることが望ましいが、事例では天頂部水深が 34～45m の範囲が多かった。

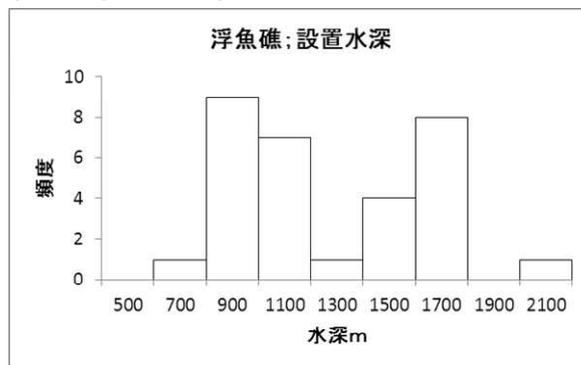


図 8-2 浮魚礁が設置された水深帯のヒストグラム

波浪条件では有義波高  $H_{1/3}$  は 11.3～16.0m の範囲で 12～13m の頻度が高い、周期は 13.0～17.2s の範囲で 16s の頻度が高い (図 8-3)。なお、設計流速 (海面での最大流速) は 1.95～2.88m/s であった。

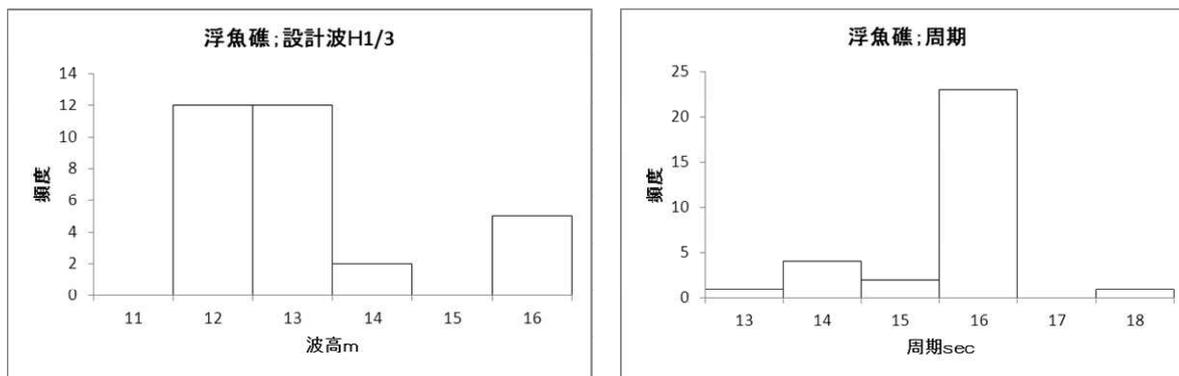


図 8-3 アンケートで入手した浮魚礁の設計波高と周期

## (2) 生物付着量

手引きでは浮魚礁への付着生物量を  $80\text{N}/\text{m}^2$  としている。しかしながら、浮魚礁を回収した際の付着生物の実測値は 3 県からそれぞれ、 $120\text{N}/\text{m}^2$ 、 $140\text{N}/\text{m}^2$ 、 $81\sim 840\text{N}/\text{m}^2$  との回答があった。手引きで示された生物付着量に比べて大きい。付着生物量は海域条件により大きく異なるため、さらに実測値を収集する必要がある。

## (3) 流失事故の原因と流失時の対策

浮魚礁の流失事故について、4 県から原因について回答があった。施工時のねじれの問題や船舶等との衝突も原因として上げられた。中層型浮魚礁の係留索は繊維ロープを使用しているが、ある事例では鋭利なもので切断されており、浮魚礁メーカーによるとテグス等の漁具による切断と推察している。対応策は擦れに強い特殊ロープを使用する必要がある。

流失事故後は流失警報装置（発信側）が作動し、魚礁の位置を陸上部に送信するようになっている。しかし、3 県から発信装置の水没の課題が回答され、対応策としてアンテナの折損による水没のない機器、水深  $200\text{m}$  まで礁体が没水しても水没しない機器が望まれた。特に、アンテナ部については、すでに平成 24 年度から内蔵タイプに変更しているとの回答もあった。

表 8-1 浮魚礁の流失事故で想定された原因

県名	表層型	中層型	浮沈式表層型
A	—	—	船舶との衝突と推測
B	施工時の係留索のねじれ	原因不明	—
C	係留索の疲労切断か不明	鋭利なもので切断	—
D	原因不明	原因不明	—

## (4) 浮魚礁の回収時の課題

浮魚礁は耐用年数 10 年を経過したら、アンカーや係留索を含めて全撤去を実施しなければならない。中層型浮魚礁については、マリノフォーラム 21 (2012) が中層型浮魚礁回収工事ガイドライン(案)や積算指針(案)を作成している。ただし、表層型浮魚礁の回収ガイドラインはこれまで作成されていない。

中層型浮魚礁の回収時の課題についての回答を表 8-2 に示した。B 県と C 県では、流速  $2.0$  ノット以上の海域では ROV による係留索回収金具の取り付けが困難であることを指摘している。現状では、憩流時に強力な推進力を有する ROV を使用することで対処しているもの

と推測される。

表 8-2 中層型浮魚礁の回収時の課題

県名	回収時の課題
A	回収方法や積算歩掛は、指針等で取りまとめてほしい
B	流速 2.0 ノット以上の海域での回収方法の検討（ROV が使用できないため）
C	回収する中層型浮魚礁の係留索に ROV で回収金具を取り付ける作業が、海域条件の厳しい外洋では非常に難しいとのことである

### 3) アンケートの結果の整理

自治体へのアンケート調査の結果、浮魚種への付着生物量は手引きの 80N/m<sup>2</sup>より大きい事例が観察された。付着生物量は海域による差があるため、さらにデータを収集する必要がある。この際、付着生物量のみならず、付着生物の厚さも把握する必要がある。

今回のアンケートは 5 県からの回答であったことと事例も少なかった。流失事故の原因について、さらに検討する必要がある。施工時の係留索のねじれについては、メーカーや施工業者への聞き取りが必要である。

### 4) 浮魚礁の設計上の課題に関する魚礁メーカーへのヒアリング調査

平成 25 年度は浮魚礁の設計に詳しい魚礁メーカーの設計担当者へヒアリングを実施し、設計上の課題を抽出することとした。それらの結果を踏まえて、浮魚礁を設置している自治体に対し、再度、設計上の課題についてアンケート調査を実施した。

#### (1) ヒアリング対象の魚礁メーカーとヒアリング方法

現在、浮魚礁を販売しているメーカーは 4 社である。そのうち表層型浮魚礁は 3 社、中層型浮魚礁は 2 社、浮沈式表層型浮魚礁は 1 社で扱っている。ヒアリングではこれらの 4 社の設計担当者に面談し、設計上の課題を抽出した。

#### (2) 浮魚礁メーカーへのヒアリング調査結果

##### i) 浮魚礁製品の動向についてのヒアリング結果

- ① 表層型浮魚礁では漁獲量が多く、漁業者が視認しやすいことから設置の要望が高い。しかしながら、表層型浮魚礁の流失事故が頻繁に発生したため、中層型浮魚礁へのニーズが高まった。ある県では表層型浮魚礁から中層型浮魚礁や浮沈式表層型浮魚礁の採用が主体となった。一方、他の県では表層型浮魚礁の効果が良いこともあり、施設の強度を高める対応を実施し、現在でも、表層型浮魚礁を主に採用している。
- ② 浮沈式表層型浮魚礁は平成 19 年頃から採用され始め、まだ耐用年数に至る魚礁はない。
- ③ 手引きでは浮魚礁が使用される範囲を水深 150m 以深としているが、高層魚礁に比較して安価であることから、最近では水深 150m 以浅での中層型浮魚礁のニーズがある。

##### ii) 流失事故の状況と原因および対応策についてのヒアリング結果

- ① 開発当初は経験が浅く、設置後に浮魚礁が流失することがあった。前回の手引きの出版後も係留索の合成繊維ロープやワイヤーの改善、チェーン等の摩耗量の見直し等が魚礁メーカーサイドで実施され、近年では流失事故がほとんど無くなってきた。
- ② ソデイカ漁業は水深 600m 位までワイヤー製の漁具を使用している。浮魚礁にはソデイカが蟄集するので、漁具により係留索を傷つける事故が多かった。対応策としては、ワイヤー外装したロ

- ープを使用し、擦れによる耐久性を向上させている。
- ③ レーダーのリフレクターを装備しているので以前に比べ流失事故は減少した。表層型浮魚礁は船舶の衝突による流失があった。
  - ④ 近年の表層型浮魚礁の流失事故は、係留索が海底から立ち上がる部分の係留索チェーンの摩耗によるチェーンの切断事故があった。対応策として、摩耗速度を大きくした設計と、係留索が海底から立ち上がる部分にはシャックル等の連結部は設けないようにした。
  - ⑤ 中層型浮魚礁では、潜水艦による衝突、漁具による係留索の切断、海底調査船による係留索の切断による流失があった。最近では、波や流れによる流体力による係留索の切断の報告はなく、流失事故の多くは船舶の衝突や漁具による係留索の切断と考えられる。
  - ⑥ 浮沈式表層型浮魚礁では、表層型浮魚礁と同様に船舶の衝突による流失事故が報告されている。特に、浮体部が沈みかけている際に視認しにくい。
  - ⑦ 表層型浮魚礁では流失事故の調査結果を踏まえて、鋼製円盤形の表層型浮魚礁の設計波高を  $H_{max}=2.0H_{1/3}$  としている県がある。また、手引きで示した摩耗量(1mm/年)より大きくして安全性を担保している。
  - ⑧ 施工方法の改善により係留索の切断が減少してきている。以前は浮魚礁を海面に投下して、順次係留索を延ばして施工し、最終的にアンカーを沈設した。しかし、この際に係留索にキンクが起きている可能性があり、現在では、係留索にフロートを付けて浮かせキンクしないように沈設している(図 8-4)。

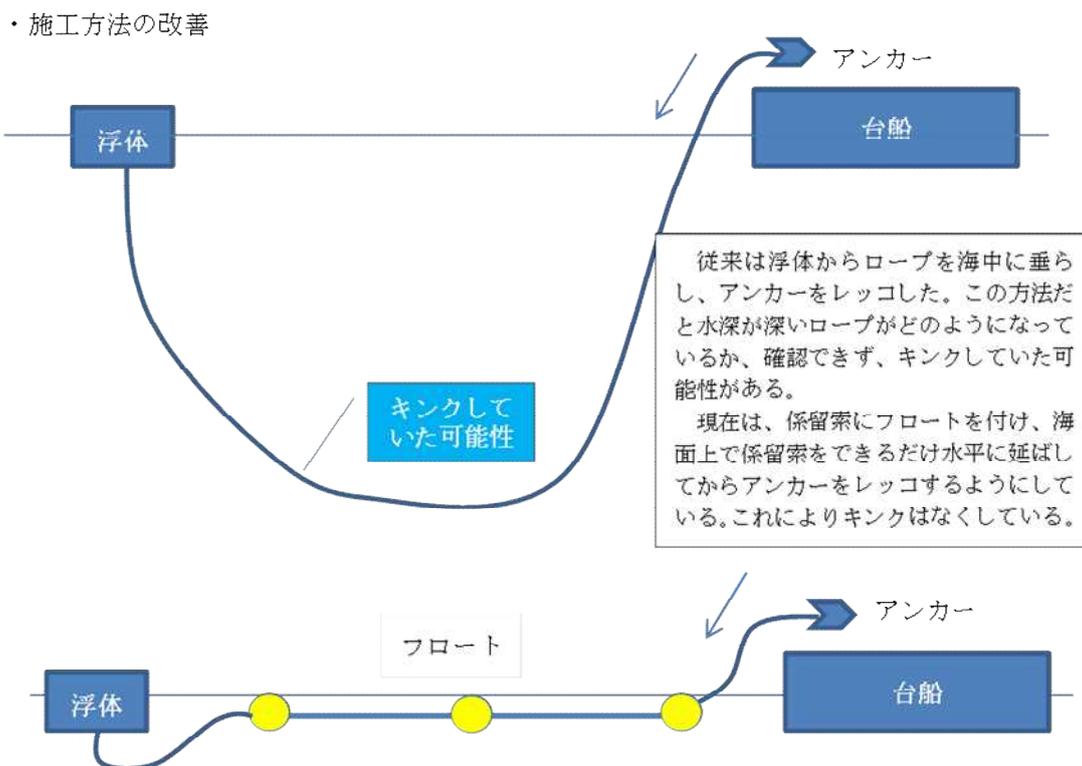


図 8-4 表層型浮魚礁の施工法の改善

### iii) 中層型浮魚礁・浮沈式表層型浮魚礁に関する設計波力についてのヒアリング結果

- ① 中層浮魚礁の設計は、手引きに従い、有義波高で設計している。流失事故の多くは、漁具や船舶による係留索の損傷が原因であり、有義波高  $H_{1/3}$  を用いても問題がないと考えられる。
- ② 浮沈式表層型浮魚礁の設計は、水面上に出た場合に表層型浮魚礁の設計方法に準じ、水没

状態では中層型浮魚礁の設計基準に準じて検討している。

- ③ 現行の浮体に働く波力(式 11-3-1)は固定した物体に働く波力であり、浮体に働く流体力より大きめの値を作用させている。設計上では安全側の値を採用していることになる。
- ④ 現状で係留索の切断による流失が多いならば波力を見直す必要があるが、近年は流失事故が少なくなってきており、すべての浮魚礁で外力に  $H_{max}$  を採用するということはない。

浮沈式表層型浮魚礁については、現行の手引きでは設計法が明記されていないため、上記②のように浮いている場合は表層型浮魚礁、没水時は中層型浮魚礁の設計法に従って設計している。現状では、そのような方法で特に問題はないようである。手引きには浮沈式浮魚礁の設計を別途設け、考え方を整理する必要がある。

#### iv) 流速算定方法に関するヒアリング結果

- ① 現行の手引きの流速分布(手引きの式 11-3-4、式 11-3-5)は水深 100m前後で流速分布が異なってしまうので、再検討が必要である。
- ② 現行の手引きの流速分布(式 11-3-6)では、水深 700m以深では流速が 0 となるが、実態としては流速が存在する。

手引きでは、設計流速の鉛直分布は1/7乗則(式11-3-4)等で設計することになっているが、実際の流速分布はそのような分布を示していなく、過大設計になっている可能性がある。正確な流速の鉛直分布を測定することが重要であるが、大水深における流速測定事例は少ない。海洋モデルによる数値計算で得られる流速の鉛直分布を実測値と照らし合わせ、数値計算による流速分布が採用できるか、検討が必要である。

#### v) 付着生物による荷重についてのヒアリング結果

- ① 現行の手引きでは、付着生物量は  $80\text{N}/\text{m}^2$ (水中)としているが、地域差が大きく、特に、日本海ではもっと大きい場所がある。見直すべきである。
- ② 現行の手引きでは付着生物厚さに関する記述がなく、MF21の設計基準(平成4年)にしたがって、7cmとしている。

マリノフォーラム 21の浮魚礁設計・施工技術基準に示された過去の調査結果によると、付着生物量は図 8-5 のように大きくばらつく。 $80\text{N}/\text{m}^2$ は平均値の値であり、大きい値では  $700\text{N}/\text{m}^2$ も見られる。平成 24 年度のアンケート結果でも、この県における表層型浮魚礁の付着生物量は  $81\sim 840\text{N}/\text{m}^2$ であった。手引きの変更では  $80\text{N}/\text{m}^2$ は平均的な値であり、設計にあたっては原則として実測値を参考にすることを明確にすべきである。

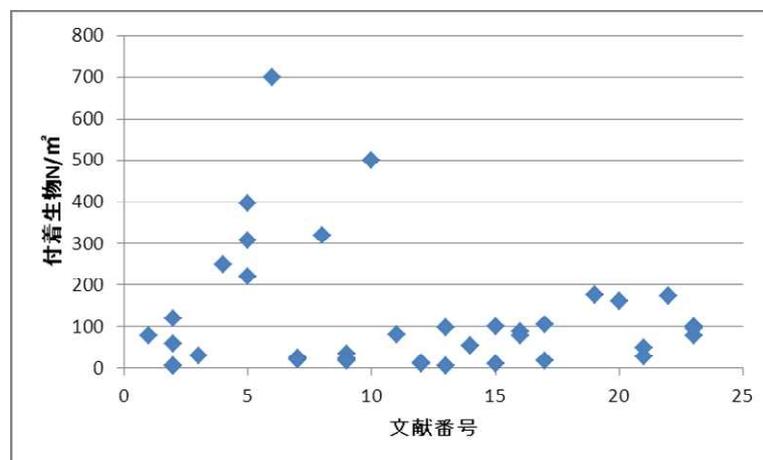


図 8-5 浮魚礁等への付着生物の重量(MF21 調査データより作成)

## 5) 浮魚礁の設計上の課題に関する自治体へのアンケート調査結果

前節の浮魚礁メーカーへのヒアリングの結果を踏まえ、浮魚礁を実施している7県を対象に、浮魚礁の設計に関するアンケート(H25.10~11)を実施した。アンケートの内容は、主に設計波、係留索の摩耗・腐食速度、付着生物量、最近の5年間における流失事故の有無と想定された原因、設計上の課題に焦点を絞った。なお、浮魚礁の設計書の送付も依頼した。以下に結果の概要を示す。

### i) 現在供用中の浮魚礁についてのアンケート結果

現在、供用中の浮魚礁は中層型浮魚礁 141 基で最も多い。表層型浮魚礁は魚礁効果が高いことから四国と九州の2県で20基が使用されている。浮沈式表層型浮魚礁は3県に23基が設置されている。

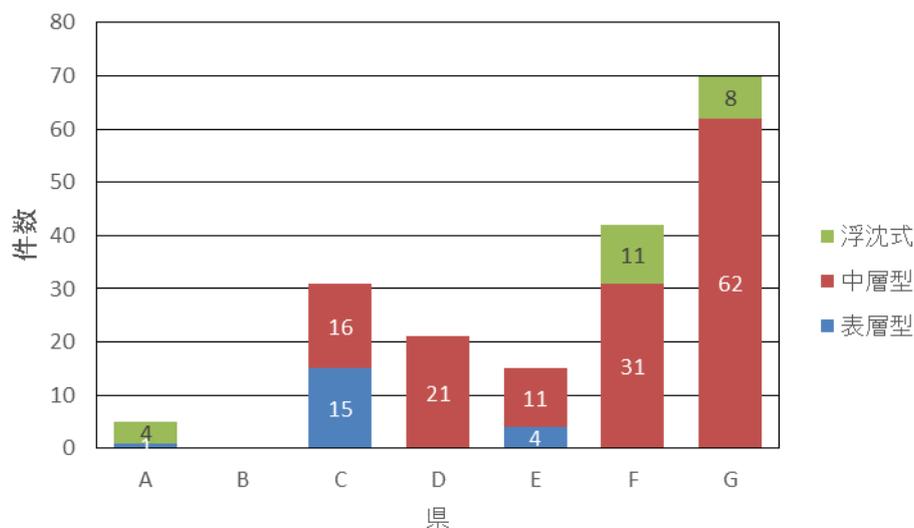


図 8-6 供用中の浮魚礁(設置後 10 年未満)

### ii) 設計波に関するアンケート調査結果

鋼製円盤計の表層型浮魚礁は、何回か流失事故があり、波高は安全側を見て  $H_{max}$  を使用し、部材や係留索の摩耗量を実測し、現行の設計に反映している。手引きでは 30 年確率波高を使うことと示されているので、耐用年数は 10 年でも 30 年確率波高を採用している。

### iii) 摩耗・腐食速度に関するアンケート調査結果

手引きに記載された摩耗速度 1mm/年に準拠している県と既往の調査結果から独自に決定している県がある。摩耗速度は 1mm/年より大きい場合が多く、手引きの改定では、実測値を参考に決定することを基本とすることが望ましい。

表 8-3 表層型浮魚礁の設計摩耗量の例(性能仕様書から転載)

設計摩耗量の一覧

項 目		設計摩耗量/10年	
係留環アイプレート		186	mm
係留環接続 アンカーシャックルピン		100	mm
係留環接続 特殊アンカーシャックルボディ		80	mm
上部チェーン	エンドリンク (上部)	119	mm
	スィベル	14	mm
	エンドリンク (下部)	51	mm
	アンカーシャックルボディ	51	mm
	一般部エンドリンク (上部)	17	mm
	一般部	10	mm
	一般部エンドリンク (下部)	10	mm
	下部補強チェーン (上部)	20	mm
	下部補強チェーン (中部)	58	mm
下部補強チェーン (下部)	20	mm	
下部チェーン 一般部	10	mm	

※ 項目名は既存黒牧で使用している部材名称。

※ 設計摩耗量は「漁港・漁場の施設の設計の手引」又は既存黒牧の実績による。

#### iv) 付着生物量に関するアンケート調査結果

過去の調査事例から  $78\text{N}/\text{m}^2$  を採用している県もあった。基本的認識として、 $80\text{N}/\text{m}^2$  より大きくなる可能性が大きく、前節で示したように、見直しが必要ある。

#### v) 最近の流失事故に関するアンケート調査結果

最近5年間の流失事故の件数を以下にまとめる。流失原因について、自治体の担当者に直接ヒアリングしたところ、波浪等によって流失したのではなく、潜水艦らしき船舶による切断、漁業活動による係留索の摩耗、チェーンの疲労による切断がほとんどであり、波や流れの流体力により係留索が切れるという現象ではないとの意見であった。

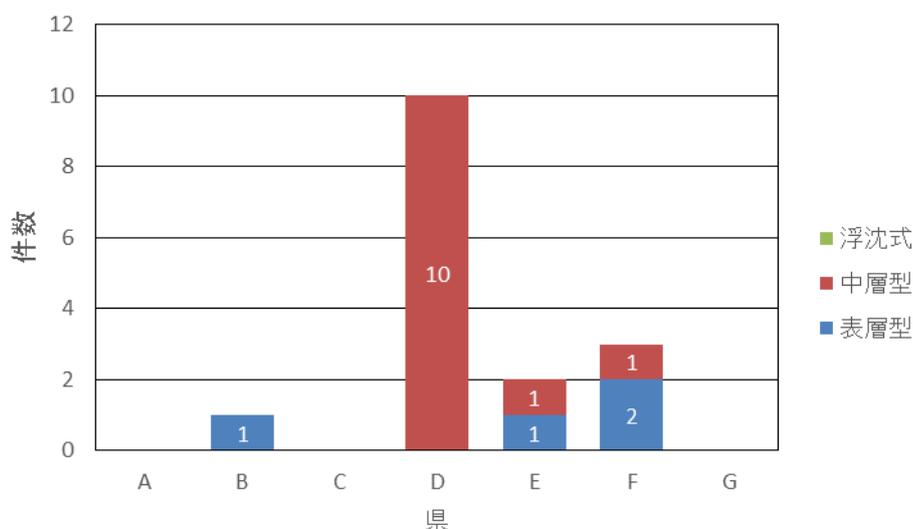


図 8-7 最近5年間で流失事故があった件数

vi) 浮魚礁を設置している自治体へのアンケート調査結果の整理

メーカーのヒアリングと同様な結果がアンケート調査でも得られた。

- ① 過去の浮魚礁の流失事故には、浮体や係留索の材料の耐久性の不足や波浪による影響が指摘されてきた。表層型浮魚礁を継続している県では、設計波高を  $H_{max}$  とし、鋼材の摩耗・腐食速度も実測値を使用して、安全性を確保している。メーカーは材料の耐久性に努力している。これらのことから、最近、施設の強度不足による流失事故は少なくなった。
- ② 最近の流失事故では、漁業による係留索の損傷や船舶の衝突およびチェーン・シャックルの海底との接点付近での摩耗・切断が指摘されている。

3. 浮魚礁に作用する流体力に関する検討

(1) 目的

鋼製の表層型浮魚礁では設計波としてすでに最大波高を採用している。ここでは、中層型浮魚礁の設計波として最大波高を用いた場合の感度分析を行うこととした。

一方、現行の手引きでは、流体力の算定に海図等に記された表層流速値をもとに、流速の鉛直分布を 1/7 乗則で近似している。外洋域の大水深域では計測が難しく、信頼できる数値シミュレーションの結果があれば設計し易くなる。そこで、数値シミュレーションで求めた結果と実測した流速値を比較し、今後の方針を検討することとした。

(2) 中層型浮魚礁の設計波を最大波高にした場合の安定性の低下

対象とする魚礁は平成 16 年漁港・漁場構造物設計計算例の中層魚礁(p.483 - 491)を参考にした。流速の鉛直分布は現行の設計の手引きに従い、付着生物は計算例に従い、 $80\text{N/m}^2$ とした。安定性の検討は無流速で波高が最大の場合と波、流れとも最大の場合で安定性の検討を行った。

【計算条件】

表 8-4 試計算の設計条件

以下の数値は付着物なしを示す。付着物ありは ( ) 内に示す。以下同様。			
① 礁体諸元		外形 1.98m×長さ 7m	
② 礁体材料		FRP、ABS	
③ 礁体質量	$W$	2.10 t	
④ 礁体部見かけ容積	$V_0$	9.24 m <sup>3</sup>	(11.08 m <sup>3</sup> )
⑤ 礁体部水平射影面積	$A_1$	10.4 m <sup>2</sup>	(11.2 m <sup>2</sup> )
⑥ 礁体部垂直射影面積	$A_2$	3.08 m <sup>2</sup>	( 3.53 m <sup>2</sup> )
⑦ 礁体部表面積 (付着面積)	$S$	74.5 m <sup>2</sup>	
⑧ 付着物重量 (海中重量)	$W_m$	0 kN	( 5.85 kN)
⑨ 余剰浮力	$N$	21.16 kN	(15.31 kN)
⑩ 礁体抗力係数 (水平,垂直)	$C_{D1}$	1.00	
⑪ 礁体仮想質量力係数	$C_M$	2.00	
⑫ 係留索抗力係数	$C_{D2}$	1.00	
⑬ 係留系 副係留索と主係留索 (上部)	には漁具摩擦対策特殊ロープを適用		

平成 16 年漁港・漁場構造物設計計算例より

- 副係留索；ワイヤー外装ポリエステルロープ  $\phi$  32mm、6m×6 本×1 重 初期強度 T01=137kN
- 主係留索 (上部)；ワイヤー外装ポリアリレートロープ  $\phi$  30mm、581m(つなぎ代なしの実長)、初期強度 T02=294kN
- 主係留索 (下部)；ポリエステル八打ち  $\phi$  40mm、355m (つなぎ代なしの実長)、初期強度 T03=287kN

表 8-5 設計波と流速の諸元

		設計条件 (最大条件)	操業条件
設置水深	$h$ (m)	1000	
波高	$H$ (m)	10.9	3.0
周期	$T$ (sec)	13.0	8.0
波長	$L_0$ (m)	263.6	99.8
海面流速	$V_0$ (m/sec)	1.70	1.00

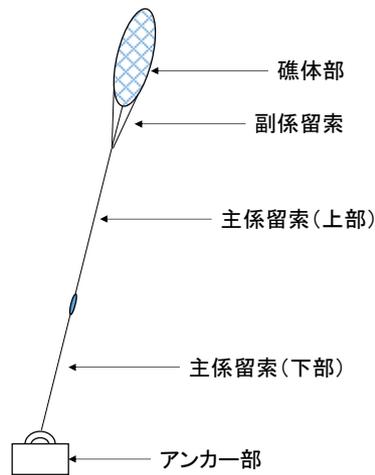


図 8-8 検討した中層型浮魚礁

最大波高は有義波高の 1.8~2.0 倍とされている。そこで、有義波高の 1.8 倍と 2.0 倍で安全率を計算した。結果を表 8-6 に示す。( ) 内は付着生物がある場合を示す。係留索の安全率は 3 以上が必要であるが、主係留索の安全率で無流速時に 3 未満となった。無流速時に安全率が低下するのは、中層型浮魚礁が鉛直に立つため、波浪の影響を受けやすくなることによる。また、付着生物が付いた場合、係留索の安全率が上がるのも付着生物により浮体の重量が大きくなり、余剰浮力が減少することによる。安全率を上げるには、初期強度の高いロープに変更するか、余剰浮力に余裕がある場合は、余剰浮力を減少させる工夫が必要となる。

表 8-6 各波高に対する安全率

項目		波高m		
		13.0	19.6	21.8
		H1/3	Hmax 1.8H1/3	Hmax 2.0H1/3
副係留索の 安全率	最大条件時	4.2(5.6)	4.2(5.6)	4.2(5.6)
	無流速時	3.8(4.4)	3.1(3.4)	3.0(3.3)
主係留索の 安全率	最大条件時	3.9(5.2)	3.9(5.2)	3.9(5.2)
	無流速時	3.5(4.1)	2.9(3.2)	2.8(3.0)
アンカー重量(t)	最大条件時	8.8(7.0)	8.9(7.0)	9.0(7.0)
	無流速時	5.2(4.4)	6.3(5.7)	6.6(6.1)

### (3) 実測流速と数値シミュレーションによる流速の比較

黒潮流域に設置された浮魚礁には、水深 10m、30m、100m の 3 層に流速計が設置してある。浮魚礁では 2013 年に 3 層の流速が計測されていた。その結果を使用して、数値シミュレーション (FRA-JCOPE2.1) の計算値と比較した。結果を図 8-9 に示す。また、図には同じ地点における FRA-JCOPE2.1 による計算結果を示す。上段の実測データでは、3 月に流速が大きい時期があるが、上層から下層まで流速が大きいため、計測異常によるものと推察される。

日平均流速を示す計算値は、実測値の平均的な値と同様な変動パターンを示し、実測値が最も大きい 8~9 月に計算値も最大になっていることから、海洋モデルの妥当性がうかがえる。また注目すべきこととして、実測値には 1 日以下の短周期の変動がかなりの割合で含まれていることが挙げられる。一般に、黒潮等の海流の速度と向きは、長期間、一定しているとされているが、以上のことは、設計流速を決める際により短い周期での流速変動も考慮する必要性を示唆している。

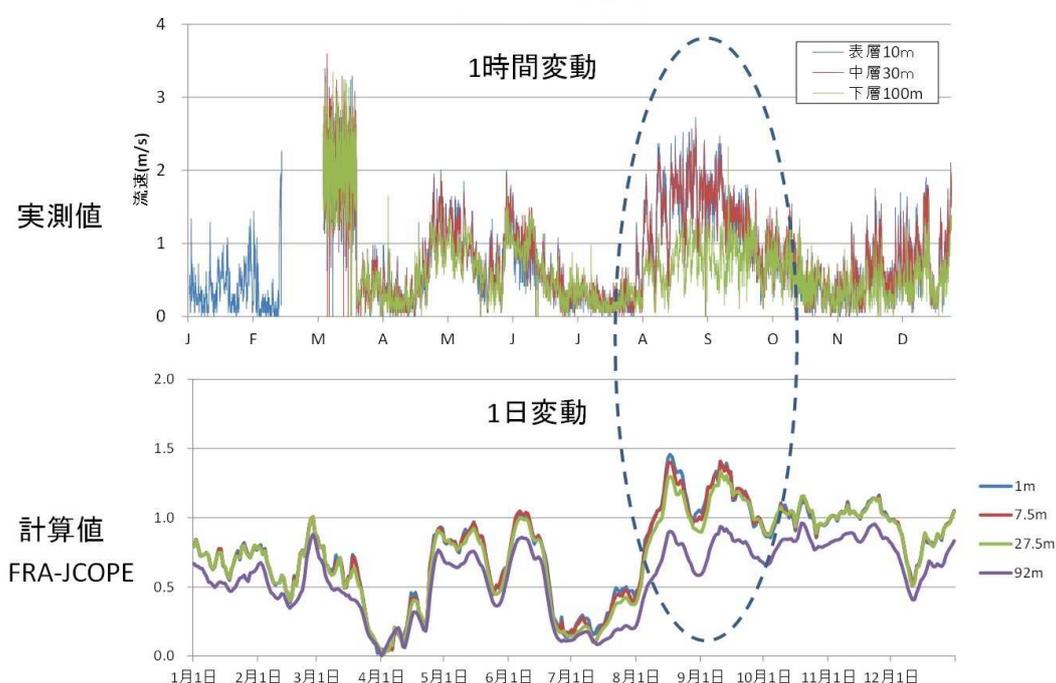


図 8-9 実測流速と計算流速

次に、流速の水深変化を、流速が大きかった 2013 年 8 月 17 日でみる (図 8-10)。図には設計の手引に示されている流速分布関数と FRA-JCOPE2.1 の計算値も合わせて示した。実測値は水深が 100m になると急速に減少した。計算値はその変化の様子を比較的よく表しているが、手引の流速分布は大幅に過大になっていることがわかる。

FRA-JCOPE2.1 の計算結果は 1 日の流速の平均値であるため、実測値のように 1 日以下の変動 (潮流など) を考慮することにより精度がさらに向上するものと考えられる。今回は黒潮の影響下における実測値で比較したが、この他に、環境の異なる海域で、数値シミュレーションによって、実際の計測値をどの程度精度良く求められるのか検討する必要がある。さらに詳細な検討により、モデルの予測値から設計流速を決める妥当な方法を示すことが今後の課題となる。

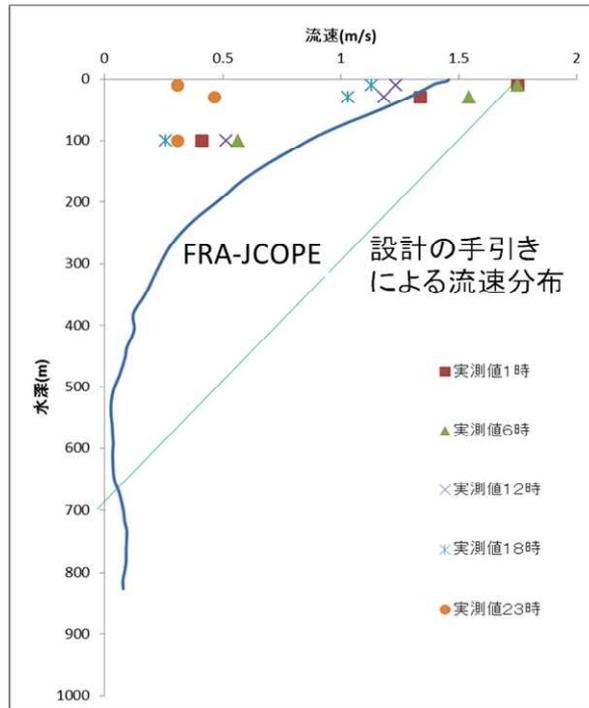


図 8-10 流速の鉛直分布

#### 4. 手引きの改訂事項

以上の浮魚礁の実態調査を踏まえて、手引きはこれらの情報を反映させることにした。すなわち、

- ① 浮魚礁は耐用年数が 10 年であり、10 年後は撤去することとなっている。したがって、撤去時でも撤去作業に必要な強度が必要であることを要求性能とした。
- ② 付着生物の着生量や付着厚さは基本的には実測値を参照して決定する。
- ③ チェーン・ワイヤーあるいはシャックル等の摩耗速度は実測値によることが望ましい。
- ④ 浮沈式表層型浮魚礁の設計を追加した。

#### 5. 今後の課題

浮魚礁に作用する最大の流体力は最大波の作用時に発生するものとして、鋼製の表層型浮魚礁ではすでに最大波高を採用されているが、中層型浮魚礁では、設計波は有義波となっている。今回の検討では中層型浮魚礁を対象にして設計波を最大波に変更した場合の影響を調べたが、必要な安全率はほぼ確保されることがわかった。しかしながら、他の施設と同様に、浮魚礁の設計においても、波群中の最大外力は最大波のときに発生していると考えられることから、理論的に設計対象波を最大波に見直すことが必要であるといえる。

## IX. 摘要

### 1. 沈設魚礁の流体力算定法

#### 1) 基本部材の流体力係数

- 波動流中での角柱、平板および L 型アングルの二次元部材の抗力係数  $C_D$ 、慣性力係数  $C_M$  を KC 数  $K_C$  の関数として定式化した (図 5-2~図 5-5)。また、それらの基準面積  $A$  と基準体積  $V$  の妥当な定義を示した。
- 稜角部を有する断面部材の  $C_D$  が高レイノルズ数の領域でも顕著に低下しないとする一般的仮定を、定常流中での迎角  $90^\circ$  の平板で確認したが、別の断面部材での検証が課題として残された。
- 相対粗度 (付着生物の被覆) が稜角部を有する断面部材の流体力係数に及ぼす影響について、適切な部材幅の定義を行うことにより、付着生物のない場合における流体力係数をそのまま適用できることを、平板と L 型アングルの場合で示した。

#### 2) 波動流中の魚礁全体の流体力算定

- 従来法 ( $C_D =$  定常流中での値、 $C_M = 2$ 、 $V =$  実容積) は、流速を適切に与えても流体力を過小評価する可能性があるため、波動流中での流体力係数を用いた全体模型法または部材流体力法に修正する必要がある。
- 全体模型法では、水深に対して礁高が高い魚礁であっても、図心の高さでの水平流速を代表流速として求められる水平流体力と摩擦力から滑動限界を精度よく予測できる。
- 部材流体力法は、小型または部材間隔が粗い魚礁では、多少安全側の流体力を算出するため、安全側の設計としてはそのまま利用できるが、部材間隔が密な大型魚礁では、流体力を過小評価する可能性がある。また、水平遮蔽板の多い魚礁では、流体力を過小評価する可能性があり、その流体力係数を適切に定式化する必要がある。

#### 3) 最大力係数 $C_{Fmax}$ による方法

- 沈設魚礁の流体力算定にモリソン式を用いる際に予想される問題点を整理した。
- モリソン式の代替法として、 $C_{Fmax}$  による方法を提案し、これまでに得られている実験データの再解析により、以下の事項が明らかになった。
  - ①  $C_{Fmax}$  による方法は、モリソン式のように  $V$  と二つの流体力係数を決めることなく、 $K_C$  の関数として表した  $C_{Fmax}$  のみで最大波力を精度よく予測できる。
  - ②  $C_{Fmax}$  は、いずれの形状の部材や魚礁模型であっても、 $K_C$  に対して単調減少し、定式化が容易である。
  - ③ 式(5-8)による平均部材幅  $D_A$  を代表長さとして  $K_C$  を適切に定義できれば、魚礁の  $C_{Fmax}$  は、 $K_C$  が高くなると、主要構成部材の  $C_{Fmax}$  にほぼ一致する。
  - ④ 迎角  $90^\circ$  の二次元平板の  $C_{Fmax}$  は、 $K_C > 60$  の領域では、様々な部材や構造物の中で最も高く、安全側の設計値として用いることができる。

#### 4) 波と流れの共存場での流体力算定の提案方法

- $C_{Fmax}$  による方法を波と流れの共存場に適用するための実用式として式(5-17)を提案し、当式が流れと波の流速比の変化に対して実用的に妥当な推定値を与えられることを示した。
- これまでに利用実績のある魚礁で移動していないことを確認できれば、提案式を応用して  $C_{Fmax}$  の設計値を経験的に決定する方法として式(5-26)を示した。
- 算定流体力がこれまでの設計と変わることから、今後の課題として既設の魚礁の現状把握により、見直しの必要性和提案方法の妥当性を検討する必要がある。
- 流体力算定に用いる流れの条件については、現在の簡略的方法の妥当性が明確でなく、

それに代わる妥当な実用的方法の確立が今後の課題として残された。

## 2. 着定基質の安定質量算定法

- 着定基質（石材）の安定質量算定の提案式(6-12)が、非砕波または砕波に関わりなく、異なる底面条件でもほぼ妥当な値を算定できることが、単体設置の砕石を用いた実験により明らかにされた。
- 砕波領域に割石を設置する場合、安定質量は従来の算定法に比べ、大幅（約 1/3）に軽減できることが試算され、現場でもそのことが追認された。
- 石材を群体で設置した場合と、さらに囲い礁付で設置した場合における提案式の実験的検証と、現地での検証データの補強が今後の課題として残された。

## 3. 波動流速の算定法

- 最大波動流速を非砕波領域と砕波領域の区別なく、沖から連続的計算する方法を提案し、その妥当性を実験的に検証した。
- 提案方法を応用し、従来の砕波領域での波動流速の算定法について、海底勾配の影響を考慮できる算定図へ改良するとともに、計算式を示した。

## 4. 浮魚礁の設計条件

- 自治体へのアンケートと魚礁メーカーへのヒアリングにより、浮魚礁の実態と課題を明らかにした。特に、近年の材料の耐久性の向上により、流失事故が減少してきている。係留索の切断は船舶による衝突、漁具による係留索の損傷が主な原因である。さらに流失後の警報装置の耐久性向上が必要である。
- チェーン等の摩耗速度や付着生物量は実測値と手引の値が異なることが判明し、手引の改訂では原則として実測値を参考に決定することが重要であることを示した。
- 浮沈式表層型浮魚礁は海面から礁体が露出している場合は表層型浮魚礁、没水している場合は中層型浮魚礁の設計方法に準じて、現状では問題が無い。
- 一部の表層型浮魚礁では設計波として最大波高を使用している。中層型浮魚礁の設計波高として、最大波高を使用した感度分析の結果、大きな安全率の低下にはならないことを示した。ただし、浮沈式表層型魚礁や表層型浮魚礁では安全率が大きく低下するものと予想される。設計波については、沈設魚礁と同様に、今後の課題である。
- 数値シミュレーションによる流速の変動は、実海域の流速変動の傾向を示すが、1 日以下の周期成分を考慮する必要がある。また、流動環境の異なる数地点での測定結果と比較して、精度を向上することが今後の課題である。

## X. 引用文献

- 1) 漁港・漁場の施設の設計の手引検討委員会, 2003: 漁港・漁場の施設の設計の手引, 全国漁港漁場協会, 東京, 1008p.
- 2) Morison, J.R., J.W. Johnson, and S.A. Schaaf, 1950: The force exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2(5), 149-154.
- 3) 社団法人マリノフォーラム 21, 国際気象海洋株式会社, and 独立行政法人水産総合研究センター, 2012: 水産基盤整備調査委託事業報告書: 大水深に設置する魚礁の設計基準等の構築.
- 4) ISO 19902:2007, 2007: Petroleum and Natural Gas Industries - Fixed Steel Offshore Structures, 1st Edition, International Organization Standardization.
- 5) 日本機械学会編, 2006: 機械工学便覧 基礎編  $\alpha$ 4 流体工学, 229p.
- 6) Sarpkaya, T., 2010: Wave forces on offshore structures, Cambridge University Press, New York.
- 7) 高木儀昌・明田定満・小泉文夫, 1991: 角型魚礁の設計法に関する研究(その2 角型魚礁の抗力係数). 日本水産工学会学術講演会講演論文集, 1, 45-46.
- 8) 上北征男・明田定満・田島 泰, 1985: 角型魚礁に作用する流体力の特性について 一 波と流れの共存場一. 海岸工学講演会論文集, 32, 643-646.
- 9) Stansby, P.K., 1983: Experimental study of forces on a cylinder in oscillatory flow with a cross current. *Applied Ocean Research*, 5, 195-203.
- 10) Heideman, J.C. and T. Sarpkaya, 1985: Hydrodynamic forces on dense arrays of cylinders. in *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas.
- 11) 岡島厚・松本達治・木村繁男, 1997: 振動流中の円柱および正方形柱に作用する流体力の測定と流れの可視化. 日本機械学会論文集(B編), 63(615), 58-66.
- 12) Det Norske Veritas, 2010: Recommended Practice DNV-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads.
- 13) Keulegan, G.H. and L.H. Carpenter, 1958: Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 60, 423-440.
- 14) 松本達治・岡島厚, 2000: 正弦振動流中の平板周りの流れ. 構造工学論文集, 46A, 1013-1022.
- 15) 川俣 茂・磯上孝太郎, 1999: 波動下におけるブロック型藻留施設の適用限界. 水産工学, 36, 11-19.
- 16) 青木友保・田中博喜・清水文雄, 2000: 渦法を用いた円柱まわりの振動流解析. 第14回数値流体力学シンポジウム, 1-6.
- 17) Sumer, B.M. and J. Fredsøe, 1997: Hydrodynamics around cylindrical structures, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- 18) American Petroleum Institute, 2000: Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design. API Recommended Practice 2A-WSD 21st ed.
- 19) Chakrabarti, S.K., 1987: Hydrodynamics of offshore structures, WIT Press, UK.
- 20) 明田定満・高木儀昌・田中一広, 1992: 石材の所要重量算定法に関する研究. 水工研技報水産土木, 14, 77-88.
- 21) 川俣 茂, 1994: 磯根漁場造成における物理的攪乱の重要性. 水産工学, 31, 103-110.
- 22) Kawamata, S. and N. Tanada, 2015: A new practical method for estimating the mass of quarried stones by analysis of orthogonal images. *Fisheries Engineering*, 51, 193-200.
- 23) Coleman, N.L., 1972: The drag coefficient of a stationary sphere on a boundary of similar

- spheres. *La Houille Blanche*, 1, 17-21.
- 24) Aksoy, S. Fluid force acting on a sphere near a solid boundary. in the 15th Congress, IAHR 1973. Istanbul, Turkey.
  - 25) 大貫博史・城 衛・吉川秀夫, 1985: 滑面水路床上の粒子に働く流体力. 土木学会論文集, 363, 253-256.
  - 26) 合田良実, 1975: 浅海域における波浪の砕波変形. 港湾技術研究所報告, 14(3), 59-106.
  - 27) Goda, Y., 2010: Reanalysis of regular and random breaking wave statistics. *Coastal Engineering Journal*, 52, 71-106.
  - 28) Fenton, J.D., 1988: The numerical solution of steady water wave problems. *Computers & Geosciences*, 14, 357-368.
  - 29) Hedges, T.S. and M.S. Kirkgöz, 1981: An experimental study of the transformation zone of plunging breakers. *Coastal Engineering*, 4, 319-333.
  - 30) US Army Corps of Engineers, 2002: *Coastal Engineering Manual*.
  - 31) 石黒真木夫・荒畑恵美子, 1982: ベイズ型スプライン回帰. 統計数理研究所彙報, 30, 29-36.
  - 32) 瀬戸雅文・鎌田昌弘, 1999: 急勾配水底下における石材の所要重量算定法に関する研究. 日本水産工学会学術講演会論文集, 89-92.
  - 33) マリノフォーラム 21 : 中層型浮魚礁回収工事ガイドラン(案),2012.
  - 34) マリノフォーラム 21 : 中層型浮魚礁回収工事の積算指針(案),2012.
  - 35) マリノフォーラム 21 : 浮魚礁設計・施工技術基準, MF21 技術資料, No.12, 1992.
  - 36) 全国漁港漁場協会 : 漁港・漁場構造物設計計算例, 2004.

付表 5-1 正方形角柱の流体力測定結果(図 5-2 の数値データ)

D (mm)	T (s)	$U_m$ (cm/s)	$C_D$	$C_M$	s (cm)	$K_C$
30	2.0	4.6	1.85	1.99	2.9	3.0
30	2.0	9.2	2.07	1.93	5.8	6.1
30	2.0	13.7	2.17	1.89	8.8	9.2
30	3.0	16.2	1.56	2.27	15.3	16.0
30	3.0	24.4	1.52	2.43	23.0	24.1
30	3.0	33.0	1.68	2.92	30.8	32.3
30	4.0	10.6	1.56	2.50	12.4	13.0
30	4.0	21.4	1.56	2.50	24.6	25.7
30	4.0	32.2	1.64	2.61	36.2	38.0
30	4.0	43.4	1.66	2.34	47.7	50.0
30	5.0	41.7	1.48	2.03	58.8	61.6
15	2.0	2.3	1.30	2.02	1.5	3.1
15	2.0	6.8	1.59	1.96	4.3	9.1
15	2.0	11.4	1.51	1.81	7.2	15.2
15	2.0	15.8	1.57	1.99	10.1	21.1
15	3.0	16.2	1.52	2.63	15.2	31.9
15	3.0	24.5	1.54	2.16	22.9	48.1
15	3.0	32.9	1.55	2.07	30.7	64.3
15	4.0	10.5	1.52	2.54	12.4	25.9
15	4.0	21.2	1.61	2.32	24.3	50.9
15	4.0	32.3	1.56	2.09	36.2	75.8
15	4.0	43.2	1.51	2.22	47.5	99.4
15	5.0	25.7	1.49	2.15	38.6	80.7
15	5.0	36.2	1.43	2.16	52.0	108.9
15	5.0	41.6	1.42	2.02	58.7	122.9

s:半周期の平均水粒子軌道振幅、 $K_C$ は式(5-10)による

付表 5-2 迎角  $90^\circ$  の平板の流体力測定結果(図 5-3 の数値データ)

D (mm)	T (s)	$U_m$ (cm/s)	$C_D$	$C_M$	s (cm)	$K_C$
30	2.0	4.7	4.88	1.71	3.1	3.1
30	2.0	9.2	4.30	1.56	6.1	6.1
30	2.0	13.8	3.86	1.58	9.2	9.2
30	3.0	16.3	3.07	1.40	16.0	16.0
30	3.0	24.6	2.36	2.07	24.1	24.1
30	3.0	33.1	2.22	2.37	32.2	32.2
30	4.0	10.7	3.54	1.59	13.2	13.2
30	4.0	21.2	2.50	1.89	25.5	25.5
30	4.0	32.3	2.38	2.47	38.0	38.0
30	4.0	43.3	2.20	2.31	49.9	49.9
30	5.0	41.6	1.96	3.04	61.3	61.3
15	2.0	2.3	4.17	1.69	3.1	3.1
15	2.0	6.9	4.05	1.52	9.1	9.1
15	2.0	11.3	3.08	1.45	15.1	15.1
15	2.0	15.8	2.63	1.14	21.0	21.0
15	3.0	16.2	2.20	2.59	32.0	32.0
15	3.0	24.5	2.05	2.55	48.0	48.0
15	3.0	33.0	1.94	2.89	64.3	64.3
15	4.0	10.7	2.47	2.11	26.3	26.3
15	4.0	21.2	2.27	3.15	51.0	51.0
15	4.0	32.2	2.01	3.48	75.7	75.7
15	4.0	43.2	1.88	3.29	99.7	99.7
15	5.0	25.7	1.87	3.30	81.1	81.1
15	5.0	36.4	1.78	3.39	109.3	109.3
15	5.0	41.7	1.69	3.79	122.9	122.9

s:半周期の平均水粒子軌道振幅、 $K_C$ は式(5-10)による

付表 5-3 迎角 90° の L 型アングルの流体力測定結果(図 5-4 の数値データ)

b (mm)	T (s)	$U_m$ (cm/s)	$C_D$	$C_M$	s (cm)	$K_C$
30	2.0	4.6	3.66	1.51	3.1	3.1
30	2.0	9.2	3.93	1.22	6.1	6.1
30	2.0	13.7	3.36	1.55	9.1	9.1
30	3.0	16.3	2.43	1.85	16.1	16.1
30	3.0	24.4	2.14	1.97	24.0	24.0
30	3.0	32.9	1.78	2.08	32.3	32.3
30	4.0	10.7	2.96	1.73	13.1	13.1
30	4.0	21.2	2.11	2.03	25.5	25.5
30	4.0	32.2	1.83	2.06	37.9	37.9
30	4.0	43.3	1.67	2.09	49.9	49.9
30	5.0	41.7	1.46	2.07	61.3	61.3
15	2.0	2.3	3.71	1.45	3.1	3.1
15	2.0	6.9	3.38	1.66	9.1	9.1
15	2.0	11.4	2.41	1.56	15.2	15.2
15	2.0	15.9	1.64	1.80	21.2	21.2
15	3.0	16.3	1.80	1.99	32.1	32.1
15	3.0	24.6	1.58	2.18	48.3	48.3
15	3.0	33.0	1.40	1.90	64.5	64.5
15	4.0	10.5	2.19	2.08	26.0	26.0
15	4.0	21.1	1.72	1.88	50.9	50.9
15	4.0	32.2	1.51	1.96	75.6	75.6
15	4.0	43.3	1.43	2.03	99.6	99.6
15	5.0	25.7	1.42	2.05	80.7	80.7
15	5.0	36.2	1.32	2.06	109.0	109.0
15	5.0	41.6	1.26	2.29	122.9	122.9

s: 半周期の平均水粒子軌道振幅、 $K_C$  は式(5-10)による

付表 5-4 迎角 45° の L 型アングルの流体力測定結果(図 5-5 の数値データ)

b (mm)	T (s)	$U_m$ (cm/s)	$C_D$	$C_M$	s (cm)	$K_C$
30	2.0	4.6	5.03	2.30	2.1	2.1
30	2.0	9.2	4.00	2.53	4.3	4.3
30	2.0	13.7	3.46	2.64	6.5	6.5
30	3.0	16.3	2.54	2.92	11.4	11.4
30	3.0	24.7	2.24	3.66	17.1	17.1
30	3.0	32.9	2.01	3.66	22.8	22.8
30	4.0	10.6	2.79	3.37	9.3	9.3
30	4.0	21.4	2.26	3.43	18.2	18.2
30	4.0	32.5	2.09	3.74	27.0	27.0
30	4.0	43.5	1.87	4.10	35.4	35.4
30	5.0	41.8	1.62	4.05	43.6	43.6
15	2.0	2.3	4.34	2.35	2.2	2.2
15	2.0	6.9	3.37	2.65	6.4	6.4
15	2.0	11.4	2.76	3.03	10.7	10.7
15	2.0	15.8	2.46	3.80	14.9	14.9
15	3.0	16.2	2.05	3.57	22.6	22.6
15	3.0	24.5	1.84	3.90	34.0	34.0
15	3.0	32.9	1.79	3.97	45.5	45.5
15	4.0	10.5	2.41	3.48	18.4	18.4
15	4.0	21.2	2.01	3.85	36.1	36.1
15	4.0	32.2	1.77	4.43	53.5	53.5
15	4.0	43.3	1.65	4.61	70.3	70.3
15	5.0	25.6	1.63	4.70	57.0	57.0
15	5.0	36.1	1.55	5.01	76.7	76.7
15	5.0	41.6	1.47	4.42	86.7	86.7

s:半周期の平均水粒子軌道振幅、 $K_C$ は式(5-10)による

付表 5-5 CR-C の定常流中での抗力係数  
(図 5-9 上図の数値データ)

$Re \times 10^{-4}$	$C_D$
0.041	2.298
0.077	0.761
0.189	0.702
0.329	0.595
0.449	0.616
0.575	0.622
0.707	0.621
0.846	0.615
0.977	0.634
1.106	0.639
1.141	0.639
1.240	0.640
1.351	0.660
1.449	0.673

付表 5-6 CR-C の波動流中での流体力係数  
(図 5-9 下図の数値データ)

T (s)	$U_m$ (cm/s)	$C_D$	$C_M$	$K_C$
1.5	0.9	8.71	1.38	1.0
1.5	0.9	6.98	1.43	1.0
1.5	1.8	9.21	1.31	2.0
1.5	1.8	9.25	1.28	2.0
1.5	3.6	7.68	1.44	3.9
1.5	3.6	7.76	1.42	3.9
1.5	5.5	6.79	1.38	6.0
1.5	5.6	6.40	1.62	6.0
1.5	6.8	6.54	1.55	7.3
1.5	6.8	6.59	1.74	7.4
2.0	2.5	7.38	1.44	3.6
2.0	2.5	8.00	1.22	3.5
2.0	5.0	5.91	1.06	7.0
2.0	5.0	5.71	1.25	7.1
2.0	9.8	4.05	1.58	13.9
2.0	9.8	3.87	2.03	13.9
2.0	14.0	3.46	2.04	19.9
2.0	14.1	3.57	1.63	20.0
2.0	18.9	3.04	1.97	26.8
2.0	18.9	3.06	1.89	26.7
2.5	3.5	5.89	1.83	6.1
2.5	3.5	6.09	1.82	6.1
2.5	6.8	4.22	2.14	12.0
2.5	6.8	4.32	2.08	12.0
2.5	13.8	2.92	3.11	24.6
2.5	13.8	3.08	2.54	24.5
2.5	20.6	2.29	4.00	36.5
2.5	20.6	2.28	3.95	36.5
2.5	27.4	2.03	4.28	48.5
2.5	27.2	1.97	4.58	48.2
3.0	4.1	4.31	2.41	8.7
3.0	4.1	4.18	2.43	8.7
3.0	8.4	3.23	2.85	17.9
3.0	8.4	3.37	2.45	17.9
3.0	16.5	2.37	3.06	35.1
3.0	16.6	2.25	3.56	35.2
3.0	24.1	1.86	4.24	51.2
3.0	24.0	1.90	3.90	51.0
3.0	32.0	1.61	5.08	68.0
3.0	31.8	1.65	4.61	67.7

付表 5-7 実機模型 A の定常流中での抗力係数  
(図 5-10 上図の数値データ)

$Re \times 10^{-4}$	$C_D$
0.035	0.78
0.070	0.59
0.153	0.55
0.267	0.52
0.361	0.57
0.466	0.57
0.576	0.56
0.681	0.56
0.784	0.57
0.888	0.58
0.916	0.58
0.994	0.58
1.088	0.59
1.167	0.60

付表 5-8 実機模型 A の波動流中での流体力係数  
(図 5-10 下図の数値データ)

T (s)	$U_m$ (cm/s)	$C_D$	$C_M$	$K_C$
1.8	7.2	2.61	2.22	11.3
1.8	7.2	2.61	2.19	11.3
1.8	9.0	2.43	2.29	14.1
1.8	9.0	2.42	2.28	14.1
1.8	10.7	2.26	2.33	16.7
1.8	10.8	2.22	2.33	17.0
1.8	14.5	2.06	2.50	22.7
1.8	14.5	2.06	2.51	22.8
2.0	9.5	2.36	2.40	16.5
2.0	9.4	2.37	2.40	16.4
2.0	11.6	2.20	2.49	20.1
2.0	11.5	2.21	2.50	20.0
2.0	14.3	2.00	2.53	24.8
2.0	14.3	2.00	2.53	24.9
2.0	19.0	1.86	2.71	33.0
2.0	19.0	1.86	2.71	33.0
2.5	14.1	1.85	2.96	30.5
2.5	14.0	1.85	2.95	30.5
2.5	17.5	1.77	3.14	38.0
2.5	17.5	1.77	3.13	37.9
2.5	20.7	1.63	3.19	45.1
2.5	20.8	1.64	3.19	45.1
2.5	27.7	1.56	3.51	60.0
2.5	27.7	1.54	3.52	60.3
3.0	16.9	1.59	3.08	44.1
3.0	16.9	1.59	3.08	44.0
3.0	20.9	1.51	3.29	54.6
3.0	20.9	1.52	3.28	54.5
3.0	25.3	1.41	3.42	65.9
3.0	25.3	1.41	3.39	65.9
3.0	33.4	1.30	3.83	86.9
3.0	33.3	1.30	3.80	86.6

付表 5-9 実機模型 B の定常流  
中での抗力係数  
(図 5-11 上図の数値データ)

$Re \times 10^{-4}$	$C_D$
0.026	1.07
0.056	1.02
0.099	0.94
0.135	1.02
0.175	1.01
0.215	1.00
0.256	1.00
0.295	1.01
0.335	1.01
0.345	1.01
0.376	1.54
0.412	1.56
0.442	1.57

付表 5-10 実機模型 B の波動流中での流体力係数  
(図 5-11 下図の数値データ)

T (s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	K <sub>C</sub>	T (s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	K <sub>C</sub>
1.5	2.7	4.31	1.32	8.9	2.5	11.4	1.72	1.44	62.2
1.5	2.7	4.06	1.29	8.9	2.5	11.3	1.70	1.41	61.5
1.5	2.7	4.49	1.26	8.9	2.5	11.4	1.68	1.42	61.7
1.5	3.6	3.94	1.29	11.6	2.5	15.0	1.63	1.56	81.5
1.5	3.6	3.88	1.25	11.6	2.5	14.9	1.61	1.53	80.9
1.5	3.5	4.09	1.26	11.5	2.5	14.9	1.61	1.54	80.8
1.5	4.4	3.54	1.36	14.3	2.5	18.7	1.54	1.64	101.5
1.5	4.4	3.39	1.31	14.5	2.5	18.5	1.56	1.65	100.3
1.5	4.4	3.77	1.33	14.4	2.5	18.5	1.55	1.63	100.4
1.5	5.3	3.74	1.36	17.4	2.5	22.2	1.47	1.72	120.7
1.5	5.4	3.63	1.36	17.5	2.5	22.0	1.49	1.70	119.3
1.5	5.4	3.45	1.35	17.6	2.5	22.0	1.49	1.70	119.3
1.5	6.3	3.63	1.45	20.8	2.5	25.9	1.46	1.79	140.6
1.5	6.3	3.62	1.40	20.8	2.5	25.7	1.46	1.80	139.5
1.5	6.3	3.53	1.42	20.6	2.5	25.7	1.46	1.80	139.4
1.5	6.7	3.66	1.46	22.1	2.5	29.6	1.45	1.94	160.9
1.5	6.8	3.62	1.43	22.3	2.5	29.3	1.44	1.92	159.2
1.5	6.7	3.51	1.47	21.9	2.5	29.4	1.45	1.92	159.8
2.0	7.5	2.17	1.30	32.5	3.0	13.1	1.51	1.48	85.2
2.0	7.5	2.14	1.29	32.4	3.0	13.0	1.52	1.44	84.6
2.0	7.4	2.18	1.27	32.4	3.0	13.0	1.49	1.46	84.6
2.0	9.9	2.03	1.31	43.0	3.0	17.3	1.42	1.58	112.7
2.0	9.9	2.05	1.30	43.0	3.0	17.2	1.40	1.55	111.6
2.0	9.8	1.95	1.30	42.7	3.0	17.1	1.42	1.57	111.3
2.0	12.3	1.97	1.36	53.5	3.0	21.9	1.35	1.71	142.4
2.0	12.3	1.96	1.36	53.6	3.0	21.6	1.35	1.68	140.6
2.0	12.2	1.95	1.37	53.0	3.0	21.6	1.36	1.69	140.7
2.0	14.9	1.87	1.42	64.8	3.0	26.1	1.30	1.83	170.0
2.0	14.8	1.85	1.42	64.2	3.0	25.8	1.32	1.80	167.9
2.0	14.8	1.89	1.41	64.1	3.0	25.8	1.32	1.80	168.2
2.0	17.4	1.84	1.52	75.5	3.0	30.6	1.28	1.91	199.2
2.0	17.3	1.86	1.50	75.0	3.0	30.2	1.27	1.89	196.4
2.0	17.3	1.82	1.50	75.0	3.0	30.3	1.28	1.89	196.7
2.0	19.9	1.79	1.54	86.6	3.0	34.7	1.24	2.00	225.7
2.0	19.7	1.80	1.53	85.5	3.0	34.3	1.25	1.98	223.2
2.0	19.7	1.78	1.54	85.9	3.0	34.4	1.25	1.97	223.4

付表 5-11 部材間隔の異なる魚礁模型の波動流中での流体力係数  
(図 5-17 の数値データ ; CR-C のデータは付表 5-6 に記載)

模型	T(s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	K <sub>C</sub>	模型	T(s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	K <sub>C</sub>
CR-E	1.5	1.1	11.75	1.39	1.1	CR-E	3.0	8.5	3.45	2.43	18.1
CR-E	1.5	1.0	11.00	1.37	1.1	CR-E	3.0	16.8	2.19	4.10	35.7
CR-E	1.5	2.1	10.12	1.45	2.2	CR-E	3.0	16.8	2.21	4.03	35.8
CR-E	1.5	2.1	9.66	1.55	2.2	CR-E	3.0	24.5	1.85	4.71	52.1
CR-E	1.5	4.1	7.45	1.98	4.4	CR-E	3.0	24.5	1.74	5.22	52.1
CR-E	1.5	4.1	8.34	1.52	4.5	CR-E	3.0	33.0	1.56	6.73	70.2
CR-E	1.5	6.3	6.94	1.73	6.8	CR-E	3.0	33.1	1.56	6.74	70.3
CR-E	1.5	6.3	6.89	1.79	6.8	CR-K	2.5	3.6	2.87	1.77	8.0
CR-E	1.5	7.8	6.77	2.02	8.4	CR-K	2.5	3.6	2.93	1.82	7.9
CR-E	1.5	7.7	6.73	2.29	8.4	CR-K	2.5	7.1	2.28	1.69	15.7
CR-E	2.0	2.6	7.43	1.58	3.7	CR-K	2.5	7.1	2.30	1.60	15.7
CR-E	2.0	2.6	7.97	1.37	3.7	CR-K	2.5	14.3	1.84	2.11	31.7
CR-E	2.0	5.2	5.51	1.68	7.4	CR-K	2.5	14.3	1.82	2.11	31.7
CR-E	2.0	5.2	5.49	1.67	7.4	CR-K	2.5	21.1	1.66	2.48	46.6
CR-E	2.0	10.3	3.96	2.24	14.6	CR-K	2.5	21.1	1.68	2.44	46.7
CR-E	2.0	10.4	4.03	2.03	14.8	CR-K	2.5	28.0	1.59	2.77	62.0
CR-E	2.0	14.8	3.59	2.17	21.0	CR-K	2.5	27.9	1.62	2.73	61.6
CR-E	2.0	14.8	3.40	2.82	21.0	CR-K	3.0	4.2	2.66	1.61	11.2
CR-E	2.0	19.8	2.95	3.15	28.1	CR-K	3.0	4.2	2.61	1.62	11.2
CR-E	2.0	19.8	2.94	3.19	28.1	CR-K	3.0	8.5	1.94	1.84	22.7
CR-E	2.5	3.6	5.62	2.10	6.3	CR-K	3.0	8.4	1.91	1.82	22.3
CR-E	2.5	3.5	5.85	1.96	6.3	CR-K	3.0	16.9	1.67	2.33	44.8
CR-E	2.5	7.0	4.05	2.53	12.3	CR-K	3.0	16.9	1.67	2.29	44.8
CR-E	2.5	7.0	4.06	2.51	12.3	CR-K	3.0	24.7	1.58	2.70	65.6
CR-E	2.5	14.2	3.01	3.13	25.2	CR-K	3.0	24.8	1.57	2.68	65.7
CR-E	2.5	14.2	2.91	3.50	25.2	CR-K	3.0	33.5	1.45	3.16	88.8
CR-E	2.5	21.2	2.34	4.18	37.6	CR-K	3.0	33.4	1.44	3.15	88.5
CR-E	2.5	21.2	2.24	4.49	37.6	CR-R	2.0	10.2	3.06	1.77	11.6
CR-E	2.5	27.7	1.94	6.12	49.1	CR-R	2.0	10.2	3.06	1.78	11.7
CR-E	2.5	27.7	1.94	6.11	49.1	CR-R	2.0	12.7	2.85	1.90	14.6
CR-E	3.0	4.1	4.42	2.33	8.7	CR-R	2.0	12.9	2.85	1.89	14.8
CR-E	3.0	4.1	4.71	2.14	8.8	CR-R	2.0	15.0	2.71	1.97	17.2
CR-E	3.0	8.6	3.36	2.64	18.2	CR-R	2.0	15.2	2.68	1.99	17.5

次頁へ続く

付表 5-11 続き

模型	T(s)	$U_m$ (cm/s)	$C_D$	$C_M$	$K_C$
CR-R	2.5	3.8	3.90	1.66	5.5
CR-R	2.5	3.8	3.89	1.60	5.5
CR-R	2.5	7.8	3.03	1.91	11.1
CR-R	2.5	7.8	3.01	1.88	11.1
CR-R	2.5	11.7	2.53	2.11	16.7
CR-R	2.5	11.6	2.51	2.09	16.6
CR-R	2.5	15.4	2.38	2.30	21.9
CR-R	2.5	15.4	2.37	2.27	21.9
CR-R	2.5	22.5	2.11	2.82	32.1
CR-R	2.5	22.6	2.11	2.82	32.2
CR-R	2.5	26.1	2.01	3.22	37.3
CR-R	2.5	26.1	2.02	3.23	37.1
CR-R	2.5	30.3	1.93	3.41	43.2
CR-R	2.5	30.1	1.93	3.40	42.9
CR-R	3.0	4.2	3.48	1.66	7.2
CR-R	3.0	4.1	3.51	1.65	7.1
CR-R	3.0	8.6	2.66	2.04	14.9
CR-R	3.0	8.6	2.66	2.05	14.9
CR-R	3.0	13.0	2.34	2.37	22.3
CR-R	3.0	12.9	2.32	2.31	22.2
CR-R	3.0	17.7	2.10	2.77	30.5
CR-R	3.0	17.9	2.07	2.81	30.9
CR-R	3.0	21.9	1.93	3.22	37.7
CR-R	3.0	22.0	1.93	3.27	37.9
CR-R	3.0	26.2	1.84	3.53	45.1
CR-R	3.0	26.2	1.84	3.53	45.1
CR-R	3.0	31.2	1.72	3.76	53.6
CR-R	3.0	31.2	1.72	3.79	53.6
CR-R	3.0	35.1	1.66	4.14	60.3
CR-R	3.0	35.1	1.66	4.11	60.4

付表 5-12 直立部材模型と斜材模型の流体力測定結果 (図 5-19 の数値データ)

模型	T (s)	$U_m$ (cm/s)	$F_{max}$ 測定値 (N)	$F_{max}$ 計算値 (N)
斜材	2.0	2.3	0.03	0.03
斜材	2.0	6.4	0.15	0.16
斜材	2.0	10.8	0.29	0.34
斜材	2.0	17.9	0.59	0.74
斜材	3.0	16.6	0.39	0.47
斜材	3.0	24.7	0.72	0.90
斜材	3.0	32.6	1.18	1.45
斜材	4.0	9.6	0.16	0.18
斜材	4.0	19.6	0.46	0.59
斜材	4.0	30.0	0.98	1.20
斜材	4.0	40.1	1.67	1.98
斜材	5.0	28.8	0.86	0.99
斜材	5.0	32.0	0.99	1.19
斜材	5.0	40.5	1.54	1.79
直立部材	2.0	2.3	0.05	0.04
直立部材	2.0	6.5	0.21	0.20
直立部材	2.0	10.9	0.39	0.43
直立部材	2.0	15.2	0.54	0.69
直立部材	3.0	16.8	0.49	0.62
直立部材	3.0	25.1	0.94	1.19
直立部材	3.0	33.2	1.60	1.93
直立部材	4.0	10.0	0.20	0.25
直立部材	4.0	20.0	0.63	0.78
直立部材	4.0	29.4	1.26	1.52
直立部材	4.0	39.8	2.05	2.59
直立部材	5.0	29.6	1.20	1.38
直立部材	5.0	40.0	1.92	2.36
直立部材	5.0	41.5	2.08	2.52

付表 5-13 基本部材の  $C_{Fmax}$  (図 5-21 の数値データ)

部材	D (cm)	T (s)	$F_{max}$ (N)	$U_m$ (cm/s)	$K_C$	$C_{Fmax}$
正方形角柱	3.0	2.0	0.26	4.6	3.0	8.33
正方形角柱	3.0	2.0	0.52	9.2	6.1	4.15
正方形角柱	3.0	2.0	0.87	13.7	9.1	3.09
正方形角柱	3.0	3.0	0.82	16.0	16.0	2.14
正方形角柱	3.0	3.0	1.54	24.1	24.1	1.77
正方形角柱	3.0	3.0	2.82	32.3	32.3	1.80
正方形角柱	3.0	4.0	0.38	9.8	13.1	2.67
正方形角柱	3.0	4.0	1.01	19.2	25.7	1.84
正方形角柱	3.0	4.0	1.96	28.2	37.8	1.65
正方形角柱	3.0	4.0	3.45	37.1	49.7	1.68
正方形角柱	3.0	5.0	3.85	38.0	63.5	1.78
正方形角柱	1.5	2.0	0.04	2.3	3.1	9.82
正方形角柱	1.5	2.0	0.10	6.8	9.1	2.87
正方形角柱	1.5	2.0	0.18	11.4	15.1	1.82
正方形角柱	1.5	2.0	0.31	15.8	21.2	1.66
正方形角柱	1.5	3.0	0.31	16.0	32.0	1.60
正方形角柱	1.5	3.0	0.65	24.1	48.1	1.49
正方形角柱	1.5	3.0	1.24	32.2	64.3	1.60
正方形角柱	1.5	4.0	0.13	9.7	26.0	1.79
正方形角柱	1.5	4.0	0.40	19.0	50.8	1.49
正方形角柱	1.5	4.0	0.92	28.2	75.6	1.54
正方形角柱	1.5	4.0	1.67	36.9	98.8	1.64
平板	3.0	2.0	0.21	4.6	3.1	6.36
平板	3.0	2.0	0.60	9.2	6.1	4.76
平板	3.0	2.0	1.07	13.8	9.1	3.77
平板	3.0	3.0	1.32	16.0	16.0	3.44
平板	3.0	3.0	2.23	24.1	24.1	2.56
平板	3.0	3.0	3.58	32.2	32.2	2.30
平板	3.0	4.0	0.55	9.8	13.2	3.82
平板	3.0	4.0	1.48	19.0	25.5	2.73
平板	3.0	4.0	2.87	28.2	37.8	2.40
平板	3.0	4.0	4.78	37.0	49.5	2.34
平板	3.0	5.0	5.03	37.9	63.4	2.34

次頁へ続く

付表 5-13 続き

部材	D (cm)	T (s)	F <sub>max</sub> (N)	U <sub>m</sub> (cm/s)	K <sub>C</sub>	C <sub>Fmax</sub>
平板	1.5	2.0	0.03	2.3	3.1	7.49
平板	1.5	2.0	0.14	6.9	9.1	3.99
平板	1.5	2.0	0.31	11.3	15.1	3.24
平板	1.5	2.0	0.45	15.8	21.0	2.42
平板	1.5	3.0	0.44	16.0	32.1	2.29
平板	1.5	3.0	0.89	24.1	48.1	2.06
平板	1.5	3.0	1.53	32.2	64.4	1.97
平板	1.5	4.0	0.19	9.8	26.2	2.59
平板	1.5	4.0	0.59	19.0	51.0	2.19
平板	1.5	4.0	1.21	28.2	75.5	2.04
平板	1.5	4.0	2.02	37.0	99.2	1.97
平板	1.5	5.0	0.97	24.5	81.9	2.15
平板	1.5	5.0	1.74	33.5	112.0	2.07
平板	1.5	5.0	2.14	38.0	126.9	1.98
L型アングル	3.0	2.0	0.21	4.6	3.0	6.51
L型アングル	3.0	2.0	0.52	9.2	6.1	4.12
L型アングル	3.0	2.0	1.00	13.7	9.1	3.58
L型アングル	3.0	3.0	1.27	16.1	16.1	3.28
L型アングル	3.0	3.0	2.23	24.0	24.0	2.58
L型アングル	3.0	3.0	3.20	32.3	32.3	2.05
L型アングル	3.0	4.0	0.54	9.8	13.2	3.74
L型アングル	3.0	4.0	1.33	19.0	25.4	2.46
L型アングル	3.0	4.0	2.38	28.2	37.8	2.00
L型アングル	3.0	4.0	3.81	37.0	49.6	1.86
L型アングル	3.0	5.0	3.95	37.9	63.3	1.84
L型アングル	1.5	2.0	0.03	2.3	3.1	7.43
L型アングル	1.5	2.0	0.13	6.9	9.1	3.70
L型アングル	1.5	2.0	0.27	11.4	15.1	2.73
L型アングル	1.5	2.0	0.39	15.9	21.1	2.05
L型アングル	1.5	3.0	0.43	16.1	32.1	2.20
L型アングル	1.5	3.0	0.75	24.2	48.4	1.72
L型アングル	1.5	3.0	1.16	32.3	64.5	1.49
L型アングル	1.5	4.0	0.18	9.7	26.0	2.51
L型アングル	1.5	4.0	0.50	18.9	50.7	1.87
L型アングル	1.5	4.0	0.95	28.1	75.3	1.61
L型アングル	1.5	4.0	1.57	37.0	99.1	1.53
L型アングル	1.5	5.0	0.75	24.5	81.8	1.66
L型アングル	1.5	5.0	1.30	33.4	111.6	1.56
L型アングル	1.5	5.0	1.64	38.0	126.8	1.52

付表 5-14 高層魚礁模型の  $C_{Fmax}$  (図 5-22 の数値データ)

模型	T(s)	$U_m$ (cm/s)	$K_C$	$C_{Fmax}$	模型	T(s)	$U_m$ (cm/s)	$K_C$	$C_{Fmax}$
CR-C	1.5	0.9	1.0	16.73	CR-E	2.5	28.2	49.9	2.41
CR-C	1.5	0.9	1.0	17.13	CR-E	2.5	28.1	49.9	2.40
CR-C	1.5	1.8	2.0	10.70	CR-E	3.0	33.7	71.8	1.83
CR-C	1.5	1.9	2.0	11.19	CR-E	3.0	33.7	71.7	1.84
CR-C	1.5	3.6	3.9	8.27	CR-E	1.5	1.1	1.1	16.39
CR-C	1.5	3.7	4.0	8.26	CR-E	1.5	1.1	1.2	15.88
CR-C	1.5	5.5	5.9	7.23	CR-E	1.5	2.1	2.3	11.52
CR-C	1.5	5.5	6.0	7.06	CR-E	1.5	2.1	2.2	11.37
CR-C	1.5	6.8	7.4	6.93	CR-E	1.5	4.2	4.5	8.78
CR-C	1.5	6.9	7.5	7.01	CR-E	1.5	4.2	4.5	8.75
CR-C	2.0	2.5	3.5	8.34	CR-E	1.5	6.2	6.7	7.47
CR-C	2.0	2.4	3.5	8.64	CR-E	1.5	6.2	6.7	7.47
CR-C	2.0	4.9	7.0	5.99	CR-E	1.5	7.8	8.4	7.25
CR-C	2.0	4.9	7.0	5.96	CR-E	1.5	7.7	8.3	7.37
CR-C	2.0	9.6	13.7	4.10	CR-E	2.0	2.6	3.6	8.62
CR-C	2.0	9.6	13.7	4.09	CR-E	2.0	2.6	3.7	8.62
CR-C	2.0	14.4	20.6	3.48	CR-E	2.0	5.1	7.3	6.09
CR-C	2.0	14.4	20.6	3.48	CR-E	2.0	5.1	7.3	6.03
CR-C	2.0	19.1	27.1	3.07	CR-E	2.0	10.1	14.3	4.30
CR-C	2.0	19.0	27.1	3.08	CR-E	2.0	10.2	14.5	4.24
CR-C	2.5	3.5	6.3	6.55	CR-E	2.0	15.2	21.6	3.61
CR-C	2.5	3.5	6.3	6.63	CR-E	2.0	15.2	21.6	3.60
CR-C	2.5	7.0	12.5	4.30	CR-E	2.0	20.0	28.3	3.17
CR-C	2.5	7.0	12.5	4.39	CR-E	2.0	20.0	28.4	3.17
CR-C	2.5	14.2	25.4	3.13	CR-E	2.5	3.6	6.4	6.61
CR-C	2.5	14.2	25.3	3.16	CR-E	2.5	3.6	6.4	6.66
CR-C	2.5	20.9	37.4	2.55	CR-E	2.5	7.2	12.7	4.35
CR-C	2.5	20.9	37.4	2.55	CR-E	2.5	7.2	12.7	4.34
CR-C	2.5	27.5	49.1	2.24	CR-E	2.5	14.5	25.7	3.24
CR-C	2.5	27.4	49.0	2.23	CR-E	2.5	14.5	25.8	3.23
CR-C	3.0	4.2	9.1	5.01	CR-E	2.5	21.5	38.1	2.64
CR-C	3.0	4.3	9.2	4.91	CR-E	2.5	21.5	38.2	2.63
CR-C	3.0	8.7	18.5	3.48	CR-E	3.0	4.3	9.1	5.01
CR-C	3.0	8.7	18.7	3.46	CR-E	3.0	4.3	9.2	5.00
CR-C	3.0	16.9	36.1	2.47	CR-E	3.0	8.8	18.7	3.55
CR-C	3.0	16.9	36.1	2.45	CR-E	3.0	8.7	18.6	3.56
CR-C	3.0	24.7	52.8	2.01	CR-E	3.0	17.1	36.3	2.53
CR-C	3.0	24.7	52.9	2.01	CR-E	3.0	17.2	36.5	2.51
CR-C	3.0	32.7	70.1	1.72	CR-E	3.0	25.1	53.4	2.07
CR-C	3.0	32.7	70.0	1.72	CR-E	3.0	25.1	53.4	2.05

次頁へ続く

付表 5-14 続き

模型	T(s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	K <sub>C</sub>	C <sub>Fmax</sub>	模型	T(s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	K <sub>C</sub>	C <sub>Fmax</sub>
CR-K	2.5	3.7	8.1	4.08	CR-R	3.0	4.2	7.4	4.23
CR-K	2.5	3.6	8.0	4.19	CR-R	3.0	4.1	7.4	4.21
CR-K	2.5	7.3	16.1	2.56	CR-R	3.0	8.7	15.5	2.70
CR-K	2.5	7.3	16.1	2.52	CR-R	3.0	8.7	15.5	2.70
CR-K	2.5	14.6	32.2	1.87	CR-R	3.0	17.2	30.7	2.11
CR-K	2.5	14.5	32.2	1.85	CR-R	3.0	17.5	31.2	2.09
CR-K	2.5	21.5	47.5	1.65	CR-R	3.0	26.0	46.3	1.82
CR-K	2.5	21.5	47.6	1.67	CR-R	3.0	26.0	46.3	1.82
CR-K	2.5	28.5	63.1	1.59	CR-R	3.0	33.8	60.0	1.70
CR-K	2.5	28.3	62.7	1.62	CR-R	3.0	33.8	60.1	1.69
CR-K	3.0	4.4	11.6	3.12	CR-R	3.0	13.1	23.3	2.33
CR-K	3.0	4.4	11.7	3.09	CR-R	3.0	13.0	23.1	2.29
CR-K	3.0	8.8	23.3	1.99	CR-R	3.0	30.0	53.4	1.74
CR-K	3.0	8.7	23.2	1.97	CR-R	3.0	30.0	53.4	1.76
CR-K	3.0	17.4	46.1	1.64	CR-R	3.0	21.5	38.3	1.94
CR-K	3.0	17.4	46.3	1.62	CR-R	3.0	21.6	38.5	1.95
CR-K	3.0	25.5	67.6	1.52	実機 A	1.8	7.3	13.5	3.41
CR-K	3.0	25.5	67.4	1.51	実機 A	1.8	7.2	13.4	3.39
CR-K	3.0	33.8	89.4	1.49	実機 A	1.8	10.7	19.8	2.71
CR-K	3.0	33.7	89.5	1.47	実機 A	1.8	10.8	20.2	2.65
CR-R	2.0	10.3	12.3	3.16	実機 A	1.8	14.4	26.7	2.40
CR-R	2.0	10.3	12.3	3.16	実機 A	1.8	14.4	26.8	2.41
CR-R	2.0	15.1	17.9	2.70	実機 A	1.8	9.0	16.8	2.99
CR-R	2.0	15.3	18.2	2.68	実機 A	1.8	9.0	16.7	2.98
CR-R	2.0	12.9	15.3	2.88	実機 A	2.0	9.7	20.0	2.79
CR-R	2.0	13.1	15.5	2.87	実機 A	2.0	9.7	19.9	2.82
CR-R	2.5	3.7	5.4	5.45	実機 A	2.0	14.6	30.1	2.24
CR-R	2.5	3.7	5.4	5.25	実機 A	2.0	14.6	30.1	2.24
CR-R	2.5	7.4	10.9	3.47	実機 A	2.0	19.3	39.8	2.02
CR-R	2.5	7.4	10.9	3.43	実機 A	2.0	19.4	39.9	2.01
CR-R	2.5	14.6	21.6	2.49	実機 A	2.0	11.8	24.4	2.54
CR-R	2.5	14.6	21.6	2.48	実機 A	2.0	11.8	24.3	2.54
CR-R	2.5	21.4	31.4	2.20	実機 A	2.5	14.4	37.0	2.11
CR-R	2.5	21.4	31.6	2.19	実機 A	2.5	14.3	36.9	2.11
CR-R	2.5	28.6	42.1	2.02	実機 A	2.5	21.1	54.3	1.78
CR-R	2.5	28.5	41.9	2.03	実機 A	2.5	21.2	54.5	1.78
CR-R	2.5	11.2	16.6	2.74	実機 A	2.5	27.9	71.8	1.66
CR-R	2.5	11.1	16.5	2.74	実機 A	2.5	28.0	72.1	1.65
CR-R	2.5	25.0	36.9	2.08	実機 A	2.5	17.8	46.0	1.95
CR-R	2.5	24.9	36.7	2.10	実機 A	2.5	17.8	45.9	1.94

次頁へ続く

付表 5-14 続き

模型	T(s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	K <sub>C</sub>	C <sub>Fmax</sub>	模型	T(s)	U <sub>m</sub> (cm/s)	K <sub>C</sub>	C <sub>Fmax</sub>
実機 A	3.0	17.0	52.3	1.77	実機 B	2.0	17.1	67.8	1.82
実機 A	3.0	16.9	52.2	1.77	実機 B	2.0	19.8	78.3	1.78
実機 A	3.0	25.5	78.5	1.50	実機 B	2.0	19.5	76.9	1.78
実機 A	3.0	25.5	78.5	1.50	実機 B	2.0	19.6	77.7	1.77
実機 A	3.0	33.3	102.8	1.39	実機 B	2.5	11.1	55.0	1.82
実機 A	3.0	33.1	102.0	1.39	実機 B	2.5	11.0	54.4	1.79
実機 A	3.0	21.1	65.0	1.64	実機 B	2.5	11.0	54.4	1.79
実機 A	3.0	21.1	64.9	1.64	実機 B	2.5	14.6	72.1	1.70
実機 B	1.5	2.7	8.1	7.66	実機 B	2.5	14.4	71.4	1.67
実機 B	1.5	2.7	8.1	7.44	実機 B	2.5	14.4	71.4	1.67
実機 B	1.5	2.7	8.1	7.55	実機 B	2.5	18.0	89.3	1.60
実機 B	1.5	3.6	10.6	6.01	実機 B	2.5	17.9	88.5	1.62
実機 B	1.5	3.6	10.6	5.96	実機 B	2.5	17.9	88.5	1.61
実機 B	1.5	3.5	10.5	6.04	実機 B	2.5	21.4	105.9	1.53
実機 B	1.5	4.4	13.1	5.18	実機 B	2.5	21.2	104.9	1.54
実機 B	1.5	4.4	13.2	4.96	実機 B	2.5	21.2	104.9	1.55
実機 B	1.5	4.4	13.1	5.12	実機 B	2.5	24.9	123.5	1.50
実機 B	1.5	5.3	15.8	4.74	実機 B	2.5	24.7	122.4	1.49
実機 B	1.5	5.4	16.0	4.70	実機 B	2.5	24.7	122.4	1.50
実機 B	1.5	5.4	16.0	4.52	実機 B	2.5	28.5	141.1	1.48
実機 B	1.5	6.4	19.0	4.36	実機 B	2.5	28.2	139.5	1.48
実機 B	1.5	6.4	18.9	4.34	実機 B	2.5	28.3	140.1	1.47
実機 B	1.5	6.3	18.8	4.32	実機 B	3.0	12.9	76.4	1.52
実機 B	1.5	6.7	20.0	4.30	実機 B	3.0	12.8	75.8	1.52
実機 B	1.5	6.8	20.2	4.21	実機 B	3.0	12.8	75.8	1.49
実機 B	1.5	6.7	20.1	4.28	実機 B	3.0	17.0	100.8	1.42
実機 B	2.0	7.4	29.4	2.61	実機 B	3.0	16.8	99.6	1.41
実機 B	2.0	7.4	29.3	2.55	実機 B	3.0	16.8	99.7	1.43
実機 B	2.0	7.4	29.3	2.61	実機 B	3.0	21.4	126.6	1.36
実機 B	2.0	9.8	39.0	2.22	実機 B	3.0	21.1	125.2	1.36
実機 B	2.0	9.9	39.0	2.20	実機 B	3.0	21.2	125.3	1.36
実機 B	2.0	9.8	38.7	2.13	実機 B	3.0	25.4	150.5	1.31
実機 B	2.0	12.3	48.6	2.03	実機 B	3.0	25.2	149.1	1.31
実機 B	2.0	12.3	48.6	2.03	実機 B	3.0	25.2	149.1	1.32
実機 B	2.0	12.1	48.1	2.00	実機 B	3.0	29.6	175.5	1.26
実機 B	2.0	14.8	58.6	1.87	実機 B	3.0	29.3	173.4	1.26
実機 B	2.0	14.7	58.1	1.87	実機 B	3.0	29.3	173.7	1.26
実機 B	2.0	14.7	57.8	1.90	実機 B	3.0	33.5	198.3	1.23
実機 B	2.0	17.3	68.4	1.84	実機 B	3.0	33.2	196.3	1.23
実機 B	2.0	17.1	67.9	1.85	実機 B	3.0	33.2	196.5	1.23

付表 5-15 迎角  $0^\circ$  の実物大平板模型の  $C_{Fmax}$  (図 5-27 の数値データ)

T(s)	U (cm/s)	U <sub>c</sub> (cm/s)	K <sub>C</sub>	C <sub>Fmax</sub>	$\beta$	T(s)	U (cm/s)	U <sub>c</sub> (cm/s)	K <sub>C</sub>	C <sub>Fmax</sub>	$\beta$
12	53.6	72.9	87.5	1.94	868	10	77.0	104.8	104.8	2.09	1042
12	66.6	90.6	108.8	2.10	868	10	79.1	107.6	107.6	2.24	1042
12	70.0	95.3	114.3	2.27	868	10	80.5	109.6	109.6	2.23	1042
12	76.7	104.5	125.4	2.13	868	10	85.5	116.4	116.4	2.39	1042
12	81.7	111.2	133.4	2.05	868	10	91.3	124.3	124.3	2.26	1042
12	88.0	119.7	143.7	1.98	868	10	94.3	128.3	128.3	2.22	1042
12	90.0	122.5	147.0	1.99	868	10	103.2	140.5	140.5	1.99	1042
12	94.6	128.7	154.5	2.05	868	10	103.3	140.6	140.6	2.22	1042
12	101.0	137.4	164.9	1.97	868	10	106.7	145.2	145.2	2.27	1042
12	102.3	139.3	167.1	2.17	868	10	111.6	151.8	151.8	2.28	1042
12	109.2	148.6	178.3	1.83	868	10	117.7	160.2	160.2	2.15	1042
12	111.8	152.2	182.7	2.09	868	10	121.3	165.2	165.2	2.14	1042
12	117.5	159.9	191.9	1.92	868	10	124.8	169.9	169.9	2.09	1042
12	120.5	163.9	196.7	2.13	868	16	62.4	84.9	135.8	2.43	651
12	122.5	166.7	200.0	1.99	868	16	83.4	113.5	181.6	2.31	651
12	127.1	173.0	207.5	1.90	868	16	88.0	119.8	191.6	1.94	651
12	133.8	182.2	218.6	1.90	868	16	92.8	126.3	202.0	1.91	651
12	140.4	191.1	229.4	1.75	868	16	96.7	131.7	210.6	1.88	651
12	143.1	194.7	233.7	1.86	868	16	100.8	137.2	219.5	2.02	651
12	145.9	198.5	238.2	1.96	868	16	105.2	143.2	229.1	2.07	651
10	47.6	64.7	64.7	1.87	1042	16	113.4	154.3	246.9	1.89	651
10	65.4	89.1	89.1	2.06	1042	16	116.3	158.3	253.3	2.10	651
10	67.0	91.3	91.3	2.04	1042	16	123.3	167.9	268.6	2.01	651
10	69.4	94.4	94.4	2.15	1042	16	125.3	170.5	272.8	2.00	651
10	71.4	97.1	97.1	2.37	1042						

付表 5-16 流体力係数に及ぼす付着生物の被覆の影響に関する実験結果  
 (図 5-29～図 5-30 の数値データ)

部材	イガイ	$D_C = D$			$D_C = D + 2k$			$D_C = D + k$		
		$K_C$	$C_D$	$C_M$	$K_{C1}$	$C_D$	$C_M$	$K_C$	$C_D$	$C_M$
平板	無	75.91	2.16	1.84						
		101.65	2.21	2.05						
		129.25	2.04	1.88						
	有	81.44	2.05	2.11						
		112.09	1.99	2.27						
		136.64	1.99	2.35						
L型ア ンゲル	無	72.06	1.52	2.27	72.06	1.52	2.27	72.06	1.52	2.27
		102.55	1.58	2.09	102.55	1.58	2.09	102.55	1.58	2.09
		125.33	1.58	2.14	125.33	1.58	2.14	125.33	1.58	2.14
	有	78.52	1.74	2.96	64.67	1.43	2.01	70.92	1.43	2.42
		108.83	1.73	2.94	89.62	1.43	1.99	98.30	1.43	2.40
		132.34	1.70	3.24	108.98	1.40	2.20	119.53	1.40	2.65

付表 6-1 碎石の移動限界流速に関する回流水槽実験結果  
(図 6-9 Case1 の実験データ)

碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)	碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)	碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)
3	164	95.2	61			125		
4			63	291	115.02	127		
5	83	78.07	64	268	110.9	129		
6			68			131	339	118.01
7			70			132		
8			74			134		
12	204	97.92	75			135	300	115.02
13	291	115.02	76	300	115.02	136	165	95.2
14			78			139	244	106
15			79			141		
16	379	123.19	80			143	412	
17	164	95.2	82			145	316	115.02
21	8	60.64	84			147		
22			85			148	356	123.19
24			91			154		
25	354	123.19	92	169	115.02	155	371	123.19
27			94			158		
28			96			159	235	106
33			97	299	115.02	162		
34	324	118.01	99			163		
38			100			164		
39			101			165	347	118.01
40			102			166		
41			104	227	106	167		
42	99	83.73	105			168		
43			108	268	110.9	169		
44			110	381	123.19	170	363	123.19
48	372	123.19	111	237	106	171		
49			113			180		
54			116			181		
55	227	106	117			182		
58	323	118.01	119	356	123.19	183		
59			122	293	115.02			
60			124	348	118.01			

付表 6-2 碎石の移動限界流速に関する回流水槽実験結果  
 (図 6-9 Case2 の実験データ)

碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)	碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)	碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)
3	94	90.02	61			125		
4			63	211	108.4	127		
5			64			129		
6			68			131	233	106.22
7	63	84.34	70			132	78	86
8			74			134	229	109.07
12	9	92.46	75			135		
13	10	92.46	76	237	112.92	136		
14			78	57	93.29	139		
15			79			141		
16			80			143	118	87.69
17	18	79.87	82			145	173	104.07
21			84			147		
22			85			148		
24			91	129	96.85	154		
25			92			155		
27			94			158		
28			96			159		
33			97			162		
34			99			163		
38			100	114	93	164		
39			101			165	98	74.08
40	57	81.15	102			166	72	90.49
41			104			167		
42			105			168		
43			108			169		
44			110			170		
48			111			171		
49			113			180		
54			116	246	108.6	181		
55	228	107.36	117			182		
58			119	226	93.56	183		
59	188	102.69	122	177	100.91			
60			124	182	96.53			

付表 6-3 砕石の移動限界流速に関する回流水槽実験結果

(図 6-9 Case3 の実験データ)

砕石 No.	移動時 間(s)	$U_m$ (cm/s)	砕石 No.	移動時 間(s)	$U_m$ (cm/s)	砕石 No.	移動時 間(s)	$U_m$ (cm/s)
3	30	79.2	61			125		
4	173	119.02	63	113	99.14	127		
5			64	257	136.07	129		
6			68	173	117.56	131	305	148.44
7			70			132	65	86.32
8			74			134	16	75.49
12			75	246	134.69	135	233	132.03
13	233	125.68	76			136		
14			78			139		
15	220	115.74	79	268	138.11	141		
16			80			143	172	99.8
17	256	128.3	82	245	140.59	145	185	119.85
21			84	149	109.5	147		
22	53	88.99	85			148		
24			91	100	94.75	154		
25	77	87.67	92	269	141.17	155	196	119.85
27			94	136	108.58	158		
28			96			159	65	86.68
33			97	172	111.2	162		
34	306	148.33	99			163	256	129.07
38	234	132.39	100			164	291	135.27
39			101			165	196	115.31
40	88	97.34	102			166	219	122.13
41	245	135.74	104			167	245	120.38
42	173	112.05	105			168		
43			108			169		
44			110	174	118.24	170	197	122.6
48			111	269	141.17	171	208	122.6
49			113			180	221	128.39
54	149	106.12	116			181		
55	77	91	117			182		
58	126	106.69	119	245	134.9	183		
59			122	137	103.22			
60	293	144.85	124					

付表 6-4 碎石の移動限界流速に関する回流水槽実験結果

(図 6-9 Case4 の実験データ)

碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)	碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)	碎石 No.	移動時間(s)	$U_m$ (cm/s)
3	239	124.65	61			125		
4	299	142.09	63	148	100.23	127	148	106.85
5	244	124.65	64	148	106.08	129	299	145.8
6	269	136.16	68			131	244	131.74
7	119	94.09	70	257	121.87	132	52	79.81
8			74			134	153	106.79
12	101	100.59	75	220	112.01	135	196	104.63
13	245	137.22	76	155	112.53	136		
14	287	135.15	78	291	130.74	139	255	139.19
15	293	145.81	79	281	130.74	141		
16	274	144.85	80	226	110.5	143	136	107.06
17	137	106.07	82			145	286	136.65
21	136	107.09	84	291	130.74	147		
22	201	127.63	85	267	123.65	148	268	131.49
24			91	275	130.54	154		
25	268	136.49	92			155		
27			94			158		
28	233	126.1	96			159		
33			97			162		
34			99	178	104.04	163		
38	101	100.13	100			164		
39	207	128.18	101	269	136.57	165	160	111
40	197	128.18	102			166	226	117.87
41	274	144.36	104			167	293	144.65
42	257	134.45	105	179	117.15	168		
43	285	141.79	108	240	128.02	169	142	93.05
44			110			170	268	132.74
48			111	124	89.93	171	196	105.68
49	268	134.45	113			180		
54	141	107.91	116	238	125.98	181	237	112.82
55			117			182		
58	89	87.87	119	203	121.24	183		
59	232	128.32	122	203	120.8			
60	189	120.02	124	304	145.8			

付表 6-5 碎石の移動限界流速に関する回流水槽実験結果

(図 6-9 Case5 の実験データ)

碎石 No.	移動時 間(s)	$U_{z=hs/2}$ (cm/s)	碎石 No.	移動時 間(s)	$U_{z=hs/2}$ (cm/s)	碎石 No.	移動時 間(s)	$U_{z=hs/2}$ (cm/s)
3	110	69.39	61			125		
4	144	81.44	63			127		
5	175	85.79	64			129		
6			68			131	161	84.28
7	145	81.67	70			132	159	84.01
8			74			134		
12	171	85.38	75			135		
13			76	136	79.4	136		
14	170	85.27	78	154	83.32	139		
15			79			141		
16			80			143	169	85.17
17			82	180	86.31	145	171	85.38
21	115	71.73	84			147		
22			85			148		
24			91	154	83.32	154		
25			92	148	82.3	155		
27	131	77.89	94			158		
28			96			159	133	78.52
33			97	176	85.89	162		
34	125	75.8	99			163	173	85.58
38			100			164		
39			101	179	86.21	165	117	72.61
40	131	77.89	102			166	159	84.01
41			104	168	85.07	167		
42	149	82.49	105			168	170	85.27
43			108	129	77.23	169	148	82.3
44			110			170	151	82.85
48	121	74.27	111	174	85.68	171	160	84.15
49			113			180	156	83.61
54			116			181	152	83.01
55			117			182		
58			119	139	80.21	183	155	83.46
59	121	74.27	122	159	84.01			
60	168	85.07	124					

付表 6-6 碎石の移動限界流速に関する造波水槽実験結果  
 (図 6-11 玉石底の実験データ)

設定 周期 (s)	設定 波高 (cm)	砕波/ 非砕波	平均 波高 (cm)	平均 周期 (s)	$U_m$ (cm/s)	試験 個数	移動 個数
2.0	28	非砕波	23.76	1.99	44.4	100	0
2.0	30	非砕波	25.32	1.99	45.7	100	0
2.0	34	非砕波	28.27	1.99	51.4	100	3
2.0	38	砕波	30.98	1.98	52.8	100	4
2.0	40	砕波	32.33	1.99	54.9	100	9
2.0	32	非砕波	26.83	1.99	52.6	100	0
2.0	36	砕波	29.63	1.99	55.1	100	4
2.0	42	砕波	33.71	1.98	57.9	100	4
2.5	30	非砕波	23.78	2.52	50.7	100	0
2.5	28	非砕波	22.23	2.52	51.1	100	0
2.5	32	非砕波	25.36	2.52	53.4	100	2
2.5	34	非砕波	26.88	2.51	55.2	100	3
2.5	40	砕波	31.41	2.52	59.2	100	9
2.5	36	非砕波	28.43	2.52	61.6	100	8
2.5	38	非砕波	29.95	2.52	61.3	100	9
3.0	28	非砕波	19.91	2.97	57.4	100	0
3.0	40	砕波	27.79	2.97	63.6	100	7
3.0	30	非砕波	21.27	2.97	63.0	100	0
3.0	32	非砕波	22.62	2.97	66.4	100	1
3.0	38	砕波	26.51	2.97	65.5	100	7
3.0	34	非砕波	23.92	2.97	69.3	100	4
3.0	36	砕波	25.25	2.97	68.3	100	8
3.5	28	非砕波	16.48	3.52	45.7	100	0
3.5	32	非砕波	18.83	3.52	50.8	100	0
3.5	30	非砕波	17.73	3.52	51.0	100	0
3.5	34	非砕波	20.12	3.52	57.7	100	5
3.5	36	非砕波	21.43	3.52	57.3	100	5
3.5	38	非砕波	22.7	3.52	60.5	100	11
3.5	40	非砕波	23.99	3.52	61.4	100	13
3.5	42	砕波	25.22	3.52	63.4	100	14

付表 6-7 砕石の安定質量に関する造波水槽実験結果  
 (図 6-11 モルタル底の実験データ)

設定 周期 (s)	設定 波高 (cm)	砕波/ 非砕波	平均 波高 (cm)	平均 周期 (s)	$U_m$ (cm/s)	試験 個数	移動 個数
2.0	26	非砕波	20.8	2.0	34.2	100	0
2.0	30	非砕波	23.9	2.0	37.9	100	2
2.0	34	非砕波	26.8	2.0	41.6	100	4
2.0	38	非砕波	29.4	2.0	47.1	100	10
2.0	42	非砕波	32.2	2.0	50.8	100	16
2.0	46	砕波	34.9	2.0	52.3	100	14
2.0	50	砕波	37.6	2.0	51.7	100	15
2.5	30	非砕波	22.4	2.5	45.1	100	0
2.5	34	非砕波	25.5	2.5	50.6	100	3
2.5	38	非砕波	28.3	2.5	55.7	100	11
2.5	42	砕波	31.4	2.5	58.4	100	15
2.5	46	砕波	34.1	2.5	58.1	100	13
2.5	50	砕波	36.5	2.5	56.9	100	16
3.0	26	非砕波	19.3	3.0	45.2	100	1
3.0	30	非砕波	22.0	3.0	50.7	100	8
3.0	34	非砕波	24.8	3.0	55.7	100	15
3.0	38	非砕波	27.3	3.0	60.2	100	24
3.0	42	非砕波	30.1	3.0	62.3	100	31
3.0	46	砕波	32.8	3.0	62.1	100	42
3.0	50	砕波	35.1	3.0	62.3	100	34
3.5	26	非砕波	16.9	3.5	41.5	100	0
3.5	30	非砕波	19.7	3.5	49.8	100	2
3.5	34	非砕波	22.5	3.5	57.8	100	7
3.5	38	非砕波	25.3	3.5	63.2	100	14
3.5	42	非砕波	28.2	3.5	67.8	100	28
3.5	46	砕波	30.5	3.5	71.7	100	39
3.5	50	砕波	32.8	3.5	70.6	100	43

付表 6-8 砕石の安定質量に関する造波水槽実験結果  
(図 6-11 玉砂利底の実験データ)

設定 周期 (s)	設定 波高 (cm)	砕波/ 非砕波	平均 波高 (cm)	平均 周期 (s)	$U_m$ (cm/s)	試験 個数	移動 個数
2.0	34	非砕波	26.7	2.0	43.2	100	0
2.0	38	非砕波	29.4	2.0	46.6	100	1
2.0	42	非砕波	32.1	2.0	51.5	100	2
2.0	46	砕波	34.9	2.0	55.0	100	5
2.0	50	砕波	37.6	2.0	53.4	100	4
2.5	34	非砕波	25.6	2.5	52.3	100	0
2.5	38	非砕波	28.3	2.5	57.9	100	0
2.5	42	砕波	31.2	2.5	61.2	100	8
2.5	46	砕波	33.4	2.5	62.0	100	13
2.5	50	砕波	36.1	2.5	59.3	100	10
3.0	26	非砕波	19.2	3.0	47.5	100	0
3.0	30	非砕波	22.1	3.0	52.7	100	2
3.0	34	非砕波	24.8	3.0	57.6	100	7
3.0	38	非砕波	27.4	3.0	62.8	100	17
3.0	42	非砕波	29.8	3.0	65.3	100	35
3.0	46	砕波	32.5	3.0	64.6	100	36
3.0	50	砕波	35.0	3.0	66.6	100	28
3.5	30	非砕波	19.7	3.5	52.9	100	0
3.5	34	非砕波	22.5	3.5	61.1	100	3
3.5	38	非砕波	25.3	3.5	67.6	100	12
3.5	42	非砕波	28.3	3.5	74.0	100	28
3.5	46	砕波	30.7	3.5	76.5	100	41
3.5	50	砕波	32.8	3.5	75.8	100	42

付表 6-9 各実験条件における碎石の摩擦角  $\theta$  (°)(図 6-12 のうちの碎石に関する実験データ；静止摩擦係数は  $\mu = \tan \theta$  で算出)

碎石 No	回流水槽玉石底上			造波水槽玉石底上			造波水槽玉砂利底上			造波水槽モルタル上		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
3	33.4	23.5	45.9	34.2	35.7	34.8	34.7	45.6	32.7	30.4	33.6	31.3
4	48.2	39.3	40.9	56.4	49.4	35	31.2	20.8	40.1	27.5	22.6	21.6
5	32.8	45.3	48.5	43.6	22.4	37.2	35	42.8	31.8	34.8	36.8	35.4
6	54.6	46.1	42.8	46.2	35.9	41.8	35.8	44.3	36.5	29.8	35.9	39.5
7	29.2	43.8	35.9	35.7	33.5	23.2	26.7	23	26.5	28.2	29.7	31.3
8	43.1	50.1	31.8	64.1	31.5	41.6	46.1	47.8	44.7	35.6	34.6	37.1
12	31.4	35.3	39.4	38.4	30.8	42.9	31	48.2	39.5	34.5	35.9	32.8
13	29.6	47.6	46.3	34.1	16.5	22.1	40.2	38.1	29.4	39.7	33.4	31.6
14	35.5	43.7	35.8	48.6	32.2	58.5	41.1	39.8	30.1	35.7	34.6	31
15	52.7	36.3	37.7	55.6	47.4	49.8	38.3	46.1	43.4	37.9	33.6	34.2
16	35.4	32.9	35.4	47.1	37.1	42.3	29.8	29.7	50.6	34.5	36.2	34.1
17	46.2	43.2	47.4	35.1	46.7	43.2	34.4	22.8	28.8	25.6	30.9	34.7
21	24.2	26.7	29.6	56.3	57.7	46.6	32.6	30.2	47.3	38.5	29.2	31.7
22	54.2	47.4	36.7	45.7	22.5	15.7	25.9	26.4	18.2	21.8	22.3	22.1
24	57.7	41.2	45.6	46.3	40.3	29.9	44.7	30.4	34.1	34.4	31.1	38.6
25	44.1	40.1	26.8	45	58.4	56.1	40.4	23.2	37.9	26.5	31.6	29.9
27	46.5	34.8	40.3	51.2	40.6	38.8	38.5	30.4	26.3	34.1	34.3	34.4
28	47.1	30.7	25.8	49.2	41.1	41.2	25.9	29.4	39.5	33.1	35.6	33.2
33	40.9	47.3	49.5	40.3	53.1	43.2	38.3	49.3	41.7	37.4	34.5	34.1
34	50.2	49.3	43.4	38.8	52.8	33.5	33.2	38.9	42.5	44.5	31	39.8
38	43.9	32.4	32.6	40.4	50.3	33.1	44.8	37.8	35	35.6	33.8	31.8
39	49.8	39.8	38.7	39.7	30.8	46.8	35.5	48.2	39	37.9	38.6	32.8
40	37.9	36.2	37.5	33.2	27.1	33.1	14.6	13.5	28.1	25.9	24.3	14.9
41	35.9	45.7	54.2	32.8	56.2	29.5	45.9	31	40.4	35.3	34.9	32.7
42	13.7	42.3	31.8	42.3	44.4	36.5	35.1	32.4	48.6	39.5	34.5	30.2
43	43	33.1	32.8	30.9	26.4	34.1	38.2	30.2	32	34.6	33.9	32.5
44	37.4	46.8	42.9	44.4	48.5	42.5	46.3	42	43.5	37.1	37.8	37.1
48	36.2	39.2	34.3	40.9	44.1	43.8	37.4	39.3	36.9	31.6	35.9	34.7
49	37.6	42.3	38.6	44.3	48.5	43.7	36.6	39.4	56.1	33.2	32.2	35.7
54	32.8	29.8	38.1	36	50.9	40	25.1	40.9	30.4	25.1	25.9	33.6
55	38.7	32.5	38.2	30	33.6	38.5	41.5	39.9	45.7	28.7	34	34.1
58	51.7	32.8	34.8	25.3	48.5	40.7	37.5	35.4	48.9	30.5	33.8	36.9
59	32.7	28.2	32.7	26.6	27	32.3	25.6	24.7	27.6	33.2	33.7	34.5
60	39.7	36.2	29.8	29	51	36.1	28.2	35.2	26.8	34.1	30	31.5
61	46.4	51.2	35.2	41.2	43.5	59.7	38.7	34.5	53.4	39.2	37.6	32.8
63	43.6	30.7	41	34.8	49.8	33.6	24.8	26.3	24.3	26.5	30.6	32.7
64	34.3	45.1	31.2	32.2	46.5	46.8	38.1	40	30.1	30.4	34.7	29.7
68	43.7	34.3	35.2	47.5	46.9	61.1	40.5	35.6	42.7	41.1	35.2	29.7
70	50.3	39	36.3	26.5	36	50.2	27.8	24.1	28.3	34.4	34	31.2

次頁へ続く

付表 6-9 続き

砕石 No	回流水槽玉石底上			造波水槽玉石底上			造波水槽玉砂利底上			造波水槽モルタル上		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
74	41.3	35.3	33	48.3	40.7	46.3	24.2	38.6	37.8	31.4	36.9	32.3
75	22.6	33.6	37.2	46.6	34.1	42	26.5	36.2	26.8	27.8	32.2	29.6
76	41.6	30.1	33.2	43.7	29.5	29.8	27.2	32.4	48.6	34.6	32.6	31.7
78	51.2	36.8	46	34.1	56.6	41.8	23.5	37	24.4	30.3	36.7	32.3
79	46.2	49.1	29.8	57.1	33.3	49.3	30.7	33.1	27.7	37.6	35.8	37.8
80	50	50.3	27.5	41.7	21.5	41.1	48.1	31.8	42.2	34.8	31.2	29.8
82	41.3	28.7	17.8	35.7	29.4	41	35.2	17.3	38.3	40	35.2	31.7
84	43.2	35.2	33.2	43.9	47	38.3	44.8	38.5	29.7	33.4	32.5	31.3
85	35.8	43.7	32.1	45	34	39.7	48.2	43.1	31.6	32.6	37.3	36.2
91	43.8	35.7	43.2	27.4	37	27.4	35.4	36.8	22.7	32.4	33.4	30.1
92	56.2	46	22.3	51.5	40.4	44.8	22.4	34.1	50.2	38	34.1	36.7
94	31.7	44.5	33.8	50.4	53.1	43.8	43.9	52	33.7	29.5	31.5	34.6
96	63.6	34.9	32.8	34.8	34.2	36.2	27.7	38.5	29.6	33.8	36	29.5
97	48.1	35.1	50.9	53	41.6	40.5	36.7	42.4	23.8	37.3	31.6	35.7
99	58.5	33.2	39.5	46.9	54.9	55.3	29.4	51.6	36.3	39.3	36.1	33.9
100	54.1	48.5	38.7	28.7	36	42.4	41.8	36.2	41.2	28.5	30.4	39.2
101	49.8	45.3	29.7	43.5	51.5	36.7	44.8	47.3	44.5	33.7	41.2	36.6
102	39.5	40.2	44.7	38.2	37.8	21.5	39.2	28.9	29.4	35.6	33.6	38.1
104	43.7	32.7	32.1	41.1	29.3	31	37.9	38.8	34	32.9	31.8	33.1
105	52.6	37.9	39.2	47.5	32.4	38.8	29.8	31.2	35.8	32.1	31.4	24.7
108	31.2	39.7	45.3	35	67	62.8	30.3	43.7	46.8	33.8	32.9	34.4
110	55.1	31.2	50.3	21.2	50	59.3	38.7	25.7	21.7	32.1	37.6	32.8
111	48.1	45.1	29.7	50.6	37.4	57.1	22.8	34.9	45.7	29.5	34.7	28.4
113	41.7	47.1	43.1	34.4	61.8	53.3	38.6	30.1	23.5	32.5	29.5	31
116	47.5	48.1	29	33.3	35.7	19.8	36.8	33.3	31	29.6	31.3	33.1
117	40.5	41.3	29.2	33.5	30.9	42.7	37.9	25.1	36.6	32.3	35.1	32.7
119	47.1	30.7	33	28.1	47.6	47.6	43.4	47.8	50.2	34.7	37.5	29.7
122	35.3	37.2	36.3	32.3	42.6	51.5	28.1	35.8	28.7	31.4	38.9	34.3
124	34.1	33.1	41.6	36.9	46.7	42.8	30.3	28.3	29.7	33.3	36.1	30.8
125	50.4	43.7	53.1	43.4	34.1	39.7	27.6	27.8	27.5	30.7	35.8	32.7
127	52.1	32.3	40.8	52.5	37.8	48.9	41.1	33.5	24.4	32.5	35	31.4
129	43.1	43.7	36.7	54.1	40.4	39.6	50.2	44.5	28.9	38.9	34.8	35.7
131	44.2	31.9	33.2	51.2	36.2	23.8	37.7	44.2	24	27.8	30.4	28.6
132	26.7	34.2	47.3	43.4	37.1	19.9	20.2	24.1	20.4	33.6	32.8	31.9
134	38.7	41.4	38.5	31.8	36.7	47.5	23.2	31.2	48.7	31.7	33.4	38.8
135	46.8	35.4	39.9	31.2	25.7	31.8	25.3	21.8	20.4	36	30.8	32.6
136	39.6	43.8	54.2	30.1	52	43.5	40.1	44	30.7	39.5	39.1	32.7
139	41.2	15.2	17.3	37.6	26.7	52	24.4	22.5	21.7	26.3	24.8	27.8
141	47.3	38.2	23.1	44.7	38.5	24.4	31.2	44.7	42.9	32.5	34.5	32.1
143	54.2	35.4	52.3	37.4	48.4	46.1	27.3	32.9	29.7	24.6	30.9	30.7

付表 6-9 続き

砕石 No	回流水槽玉石底上			造波水槽玉石底上			造波水槽玉砂利底上			造波水槽モルタル上		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
145	38.3	54.3	50.6	47.4	37.1	37.4	28.8	23.6	33.2	35	36	35.9
147	39.7	43.1	39.7	44.1	50.1	49.2	26.3	36	39.8	31.6	32.6	31.4
148	47.5	36.7	29.7	48.1	41.3	36.6	35.6	25.3	35.2	26.5	37.4	32.9
154	61.5	56.3	50.3	42.6	38.4	44.6	47.1	46.8	29.4	31.7	34.3	32.2
155	54.9	40.2	31.5	41.8	37	33.5	31.6	30	29.8	27.1	32.7	30.9
158	38.2	47.9	48.4	37.6	42.2	47.9	33.2	37.2	36.6	34	31.3	35.6
159	27.9	40.3	18.1	34.9	36.6	38.7	33.8	32.4	36.1	35.8	34.5	37.9
162	25.3	30.8	37.5	57.4	47.4	50.3	25.8	44.3	25.2	37.5	37.8	35.4
163	51.8	39.3	36.7	31.2	49.7	35.8	39.7	34.4	48.5	31.8	29.4	28.8
164	39.9	28.7	33	40.4	38.4	35.1	37.7	42.9	28.4	32.1	32.8	29.7
165	43.3	36.5	41.3	36	37.7	34.2	23.1	33.7	27.1	30.2	29.5	33.6
166	35.6	24.9	36	42	39.2	46.8	31.7	35.6	42.4	38.8	33	30.7
167	33.9	46.8	43.4	40.1	35.4	37.2	34.7	30	35.1	31.9	35.8	32.8
168	65.7	35.7	36.6	44	52.5	28.7	28.4	36.4	32.4	35.6	35	35.9
169	38.5	34.5	28	31.6	49.2	49.4	35.8	47.1	41.9	34.4	34.6	35.7
170	31.2	34.1	24.3	42.9	35.6	36.6	30.8	34.3	23.8	33.2	34.1	35
171	27.3	39	42.6	25.6	38.1	30	37.3	40.7	35.1	32.9	35.4	34.8
180	50.6	43	41.8	49.5	49.1	43.8	35.8	26.9	21.3	33.4	26.5	30.3
181	49.2	32.1	33	45.6	17.1	56.6	41.8	38.3	50.3	30.5	36.1	29.7
182	58.9	36.1	35.7	42.5	40.4	36.5	29.7	29.1	26.5	38.4	38.8	33.6
183	19.7	19.3	32	54.8	46.3	56.8	16.7	24.8	18.7	30.7	36.8	31.7

付表 6-10 明田らの実験条件における玉石の摩擦角  $\theta$  (°)

(図 6-12 のうちモルタル底上玉石に関する実験データ；静止摩擦係数は  $\mu = \tan \theta$  で算出)

No	1回目	2回目	3回目	No	1回目	2回目	3回目	No	1回目	2回目	3回目
1	21.7	20.9	20	35	29.8	32.8	28.7	69	32	31.5	28.8
2	18.3	34.8	30.4	36	27.5	34.1	24.5	70	22.3	11.9	18.7
3	33.3	31.1	29.7	37	29.9	32.4	27.6	71	24.4	23.2	24.9
4	31.3	32.3	38.6	38	30.3	36.5	29.3	72	22.3	19.8	18.5
5	28.9	28.3	23.4	39	29.3	29.1	28.6	73	19.7	12.8	13.2
6	18.5	15.6	19.5	40	32.9	36.3	31.1	74	18.7	23.6	27.1
7	25.8	24.6	20.3	41	25	29.6	23.4	75	18.2	13.4	15.6
8	20	16.1	21.8	42	26.6	27.6	24	76	17.1	22	16.6
9	28.3	29.5	26.6	43	33	30.7	28.4	77	17.3	12.3	15.5
10	30.4	31	27.7	44	31.7	28	26.7	78	32.4	32.9	29.9
11	27.6	26	28.9	45	25.7	32.4	30.6	79	30.6	28.8	26.7
12	23.6	28.3	27.3	46	24.4	26.4	25.5	80	31.3	30.2	28.5
13	23.7	22.6	21.4	47	28	23.8	27.7	81	21.4	20.7	21.5
14	28.4	29.2	26.1	48	34.7	27.3	31.5	82	34.5	33.5	32.7
15	24.9	18.5	21.4	49	20.2	33.4	32.7	83	30.6	30.5	25.6
16	29.5	28.8	25.1	50	26	18.1	21.7	84	14.8	12.9	24.2
17	26	25.1	21.5	51	29.4	30.3	29.7	85	23.3	29.2	28.4
18	24.8	26.3	24.7	52	33.7	34.1	31.5	86	23.2	20.9	24.7
19	27.6	31.9	26.5	53	29.6	29.8	21.6	87	25.2	22.7	24
20	30.4	28.1	30.7	54	29.4	29	26.9	88	27.5	35.8	27.7
21	25.4	24.9	25.3	55	26.7	31.9	23.2	89	22.4	20.3	21.5
22	35.5	27.6	35.7	56	16.6	12.2	22.3	90	26.4	33.7	26.5
23	25.4	24.8	25.6	57	31.2	31.2	29.1	91	30.4	31.5	33.6
24	26.3	30	28.9	58	31.4	29.4	25.4	92	32.5	34.1	24.5
25	28.4	29.5	27	59	28.6	29.9	26.9	93	23.3	24.9	28.9
26	29.6	30.7	25.7	60	30.9	30.4	33.4	94	27.8	26.4	28.5
27	31	29.9	30.5	61	18.2	21.9	17.4	95	21.5	23.8	29.6
28	27.8	29.3	29.2	62	29.9	29.6	26.9	96	27.8	30.7	28.8
29	23.1	31.4	24.4	63	26	31.4	25.9	97	30.2	29.9	27.9
30	31.5	31.8	28.3	64	27.9	32.8	30.2	98	15.6	31.5	30.3
31	32.4	29.9	30.4	65	13.8	25	19.6	99	28.5	31.9	32.1
32	31.9	31.6	34.7	66	24.3	26.9	30.3	100	30.2	21.7	24.5
33	28.3	31.2	30.4	67	19.4	29.7	12.7				
34	27.9	26.7	27.3	68	29.2	30	25.7				

付表 7-1 波動流速に関する造波水槽実験結果 (図 7-3～図 7-5 の数値データ)

周期 $T_0$ (s)	換算沖波波 高 $H_0$ (cm)	計測位 置 X(m)	水深 h(cm)	$H_{\max}$ 測 定値 (cm)	$T_{\max}$ 測 定値(s)	$U_m$ 測定値 (cm/s)	$H_{\max}$ 計 算値 (cm)	$U_m$ (方法 1) (cm/s)	$U_m$ (方法 2) (cm/s)
2.0	10.0	12.5	55.4	16.9	2.5	29.6	17.0	30.7	29.2
2.0	10.0	10.0	50.9	14.4	2.5	31.6	17.1	32.9	31.1
2.0	10.0	7.5	45.6	15.4	1.8	32.5	17.4	36.0	33.8
2.0	10.0	5.0	40.3	17.7	1.9	31.5	17.7	40.3	37.9
2.0	10.0	2.5	35.0	17.9	2.0	36.3	18.1	44.3	42.3
2.0	10.0	0.0	30.0	17.6	1.8	41.3	18.8	47.8	48.3
2.0	15.0	12.5	55.4	29.0	2.1	44.3	25.5	44.7	43.7
2.0	15.0	10.0	50.9	25.3	2.4	42.9	25.7	47.2	46.6
2.0	15.0	7.5	45.6	26.9	2.4	43.8	25.9	50.1	50.5
2.0	15.0	5.0	40.3	24.5	2.1	44.7	26.0	52.1	55.8
2.0	15.0	2.5	35.0	26.1	2.1	49.4	25.0	50.8	58.4
2.0	15.0	0.0	30.0	23.7	2.3	53.6	22.8	48.9	58.6
2.0	20.0	12.5	55.4	37.6	2.5	54.3	33.2	53.8	57.0
2.0	20.0	10.0	50.9	33.9	1.8	49.8	32.7	54.3	59.3
2.0	20.0	7.5	45.6	29.9	1.8	53.3	31.5	53.4	61.5
2.0	20.0	5.0	40.3	29.9	2.1	51.6	29.1	52.3	62.3
2.0	20.0	2.5	35.0	28.0	1.9	60.6	26.5	50.9	61.7
2.0	20.0	0.0	30.0	25.2	2.0	58	23.5	49.0	60.2
2.5	10.0	12.5	55.4	17.6	2.6	35.1	18.0	37.2	33.6
2.5	10.0	10.0	50.9	17.3	3.8	37.8	18.3	39.7	35.6
2.5	10.0	7.5	45.6	18.8	2.4	39.1	18.6	43.2	38.6
2.5	10.0	5.0	40.3	19.2	2.5	44.3	19.3	48.3	43.8
2.5	10.0	2.5	35.0	20.1	2.1	45.4	20.1	52.3	49.2
2.5	10.0	0.0	30.0	21.1	2.8	51.4	20.9	53.7	55.9
2.5	15.0	12.5	55.4	28.3	2.6	52	27.1	53.4	50.4
2.5	15.0	10.0	50.9	32.3	3.9	54.2	27.7	56.3	54.0
2.5	15.0	7.5	45.6	34.1	3.8	53.5	28.3	59.0	58.9
2.5	15.0	5.0	40.3	28.9	2.4	55.5	28.3	58.4	64.1
2.5	15.0	2.5	35.0	26.7	2.4	59.8	26.8	56.3	65.7
2.5	15.0	0.0	30.0	22.4	2.5	61	24.0	53.6	64.4
2.5	20.0	12.5	55.4	39.7	2.6	61.9	35.9	63.3	66.8
2.5	20.0	10.0	50.9	32.4	2.3	60.9	35.4	62.4	69.2
2.5	20.0	7.5	45.6	32.8	2.8	65.6	33.9	60.9	70.7
2.5	20.0	5.0	40.3	32.0	3.1	71	31.0	58.6	70.3
2.5	20.0	2.5	35.0	29.3	1.7	70.2	28.0	56.3	68.5
2.5	20.0	0.0	30.0	28.4	3.8	67.2	24.7	53.7	65.9
3.0	10.0	12.5	55.4	19.1	2.8	37.3	19.3	43.2	37.3
3.0	10.0	10.0	50.9	20.0	2.6	42.6	19.7	46.2	39.9
3.0	10.0	7.5	45.6	21.6	4.3	48.7	20.3	50.2	43.6
3.0	10.0	5.0	40.3	22.8	3.1	51.7	21.2	55.2	49.4
3.0	10.0	2.5	35.0	25.3	3.1	52.6	22.4	58.7	56.4
3.0	10.0	0.0	30.0	22.5	2.1	56	22.8	56.8	62.4
3.0	15.0	12.5	55.4	31.0	2.8	54.4	29.5	61.6	57.1
3.0	15.0	10.0	50.9	34.8	2.6	61.8	30.1	64.0	61.0
3.0	15.0	7.5	45.6	32.1	4.2	71.5	30.9	65.4	66.5
3.0	15.0	5.0	40.3	34.0	2.6	70.2	30.4	62.8	70.9
3.0	15.0	2.5	35.0	32.3	2.4	67.8	28.0	59.9	70.6
3.0	15.0	0.0	30.0	26.8	3.5	60.8	24.8	56.8	68.1
3.0	20.0	12.5	55.4	41.4	3.0	77.3	38.5	69.3	74.8
3.0	20.0	10.0	50.9	37.9	3.5	81	37.8	67.8	76.7
3.0	20.0	7.5	45.6	38.0	2.6	78.7	35.8	65.7	77.1
3.0	20.0	5.0	40.3	33.2	4.6	68.8	32.3	62.7	75.4
3.0	20.0	2.5	35.0	33.9	3.5	81.3	29.0	60.0	72.8
3.0	20.0	0.0	30.0	27.6	4.4	72.3	25.5	57.0	69.6

付表8-1 浮魚礁が設置された水深帯のヒストグラム  
 (図8-1 浮魚礁が設置された水深帯のヒストグラム)

データ区間	頻度
500	0
700	1
900	9
1100	7
1300	1
1500	4
1700	8
1900	0
2100	1
次の級	0

付表8-2 浮魚礁の設計条件(設計波高のヒストグラム)  
 (図8-2 アンケートで入手した浮魚礁の設計波高と周期)

データ区間	頻度
11	0
12	12
13	12
14	2
15	0
16	5
次の級	0

付表8-3 浮魚礁の設計条件(設計周期のヒストグラム)  
 (図8-2 アンケートで入手した浮魚礁の設計波高と周期)

データ区間	頻度
13	1
14	4
15	2
16	23
17	0
18	1
次の級	0

付表8-4 供用中の浮魚礁(設置後10年未満)  
(図8-6)

県	表層型	中層型	浮沈式
A	1		4
B			
C	15	16	
D		21	
E	4	11	
F		31	11
G		62	8
合計	20	141	23

付表8-5 最近5年間で流失事故があった件数  
(図8-7)

県	表層型	中層型	浮沈式
A			
B	1		
C			
D		10	
E	1	1	
F	2	1	
G			
合計	4	12	0