

平成 16 年度水産基盤整備調査事業（直轄調査）

1．調査課題名：平成 16 年度水産基盤整備新技術開発調査

「石材による人工海底山脈造成の可能性調査」

2．実施機関及び担当者名：(社)水産土木建設技術センター 研究部 中川 良文 石岡 昇 佐々木洋之

3．調査の狙い

本調査は、水産基盤整備事業による人工海底山脈（マウンド漁場）の造成において、マウンド漁場構造物を築造するための部材として「石材」を活用することについての可能性を検討することを目的とする。このため、既往知見の収集及びシミュレーションや別途必要に応じて実施される実験等の結果から、マウンド漁場造成の材質を石材とした場合の課題や問題点を抽出・整理し、これらの調査結果によりその可能性を検討するとともに、石材を用いる場合における設計・施工の基準化に資することとする。なお、調査は平成 15～16 年度の 2 カ年計画で実施している。

4．調査方法

4-1 本調査の流れ

本調査は平成 15 年～16 年の 2 カ年計画で実施されており、それぞれの年度についての調査概要を以下に示す。また、調査全体のフロー図を図-1 に示す。

4-2 平成 15 年度の調査

(1) 既往事業・知見の収集整理

既往事業や既往の研究により得られた知見を収集整理し、石材（捨石）による人工海底山脈築造の施工方法や施工後の堆積形状を予測する為の手法を検討する。

(2) 堆積形状予測シミュレーション

選定した堆積形状予測モデルによるシミュレーションを既往事業について行い、再現性を確認したうえで、人工海底山脈造成において想定される条件により堆積形状予測シミュレーションを実施する。

(3) 一般事項の確認

「マウンド漁場造成事業に係わる技術資料{ MF21 ,2001 } (以下、MF 資料と略)」に基づき、マウンド漁場造成素材に石材を用いる場合の一般事項の確認を行う。

(4) 課題の抽出・整理

上記検討結果より、捨石による人工海底山脈築造の可能性を検証し、次年度の調査を行うにあたっての課題等を抽出・整理する。

4-3 本年度の調査

(1) 投石試験の実施結果に基づく検討

水深 60m～90m の二箇所の海域において、測量試験調査により実施された投石試験のデータを用いて出来型と事前堆積形状予測結果との比較を行う。そして、その得られた結果を基に堆積形状予測モデルのパラメータの再設定をする。

(2) 堆積形状予測モデルの適用性の検証

再度行った堆積形状予測シミュレーション結果より、前年度の調査で選定をした堆積形状予測モデルの適用性を確認する。

(3) 最終堆積形状予測

投石試験結果より予測される人工海底山脈の最終堆積形状について検討する。

(4) 一般事項の確認

マウンド漁場造成素材に石材を用いる場合の一般事項について、投石試験の実績を踏まえた確認を行う。

(5) 課題の抽出・整理

今後の捨石による人工海底山脈築造工事を行うにあたっての課題等を抽出・整理し、将来の設計・施工の基準化の検討に資する。

【平成 15 年度】

既存事業の資料の収集整理

1.1 既往事業の条件整理
「マウンド漁場」「既往の石材を用いた事業」における、施工方法及び工事に使用した船舶等、事業に使用している石材の規格・品質等についての既往知見を収集・整理する。

堆積形状予測シミュレーション

2.1 既往の堆積形状予測シミュレーションや室内水理実験等の収集・整理
海面から石材を投入する場合の堆積形状シミュレーションについての、既往の研究や考え方を情報収集して整理する。

1.2 既往事業の堆積形状の把握
「マウンド漁場」「既往の石材を用いた事業」における、堆積形状(出来型)のデータを収集する。
釜石湾口防波堤(水深 60m)における捨石マウンドの堆積形状等

2.2 堆積形状予測シミュレーションの条件整理・再現確認
施工条件(石材の条件や、施工工事上の制限)等を考慮して、シミュレーションの項目・条件を整理する。
「1.2 既往事業の堆積形状」と対比させることにより、シミュレーションモデルの再現性の確認・検討を行う。
シミュレーションモデル：松見モデル

2.3 堆積形状予測シミュレーションの実施
・水中落下特性(拡散状況)の検討
・設置後の安定性の検討 等
シミュレーションモデル：松見モデル
条件：水深 60, 90, 120m
底開バージ船 300, 600, 1, 000m³
捨石規格 300kg 内外、1t 内外

一般事項の確認

3.1 一般事項の確認
MF21「マウンド漁場造成事業にかかわる技術資料(平成 13 年 4 月)」に基づき、マウンド漁場に石材を用いる場合の、一般事項についての確認を行う。

4. 調査結果の中間取りまとめ
課題・問題点の抽出・整理
「1.2 既往事業の堆積形状の把握」及び「2.3 堆積形状予測シミュレーション結果」等より、捨石によるマウンド漁場の施工の可能性の検討をおこなう。

【平成 16 年度】

堆積形状予測シミュレーションの実施
・投石試験の条件(水深、船舶、捨石規格等)での事前シミュレーション
・試験結果に基づくパラメータの設定
・誤差を含めたシミュレーションによる堆積形状予測

調査結果の取りまとめ
・石材により施工可能な堆積形状の検討
・素材に対する要求品質の確認
・安定性の検討、耐埋没特性
課題・問題点の整理
・石材を用いる場合の留意点について
・割増率の検討、検収方法の検討
・事業規模による実施(パイロット事業等)により実証が必要な事項

設計・施工の基準化への検討

「設計・施工の基準化」に向けての検討

「設計・施工の基準案」の作成

直轄調査

測量試験調査・造成事業・

造成事業の施工状況

マウンド造成事業
(長崎県(宇久・対馬))
マウンド材料=石炭灰コンクリートブロック

投石試験(測量試験費)

投石試験

鹿児島県 石材 500kg 内外
全開バージ船 1000m³ × 3 回

長崎県 石材 1t 内外
全開バージ船 800m³ × 5 回
ROV 調査

図-1 調査全体フロー

5 . 調査結果

5-1 投石試験の実施結果に基づく検討

(1) 投石試験概要

投石試験は、鹿児島県薩摩地区・長崎県西部地区において行った。概要は以下の通りである。

鹿児島県薩摩地区（以下、鹿児島と略）

場所：鹿児島県阿久根市沖（沖合 10km、水深約 63m）

投入石材：捨石 500 k g 内外（ $1000\text{m}^3 \times 3 \text{回} = 3,000\text{m}^3$ ）

土運船：1300 m^3 積み全開式（船倉サイズ 27 × 12m）

長崎県西部地区（以下、長崎と略）

場所：長崎県五島市福江島北沖（沖合 8km、水深約 85m）

投入石材：捨石 1t 内外（ $800\text{m}^3 \times 5 \text{回} = 4,000\text{m}^3$ ）

土運船：1800 m^3 積み全開式（船倉サイズ 36 × 12m）

(2) 施工方法

施工は下図に示す様に、投入位置への誘導を高精度 GPS により行う。また流速計による観測を別途行い、測定結果から流れによる移動量を計算し、投入位置を補正する事で正確な場所へ投入をする事が出来る。

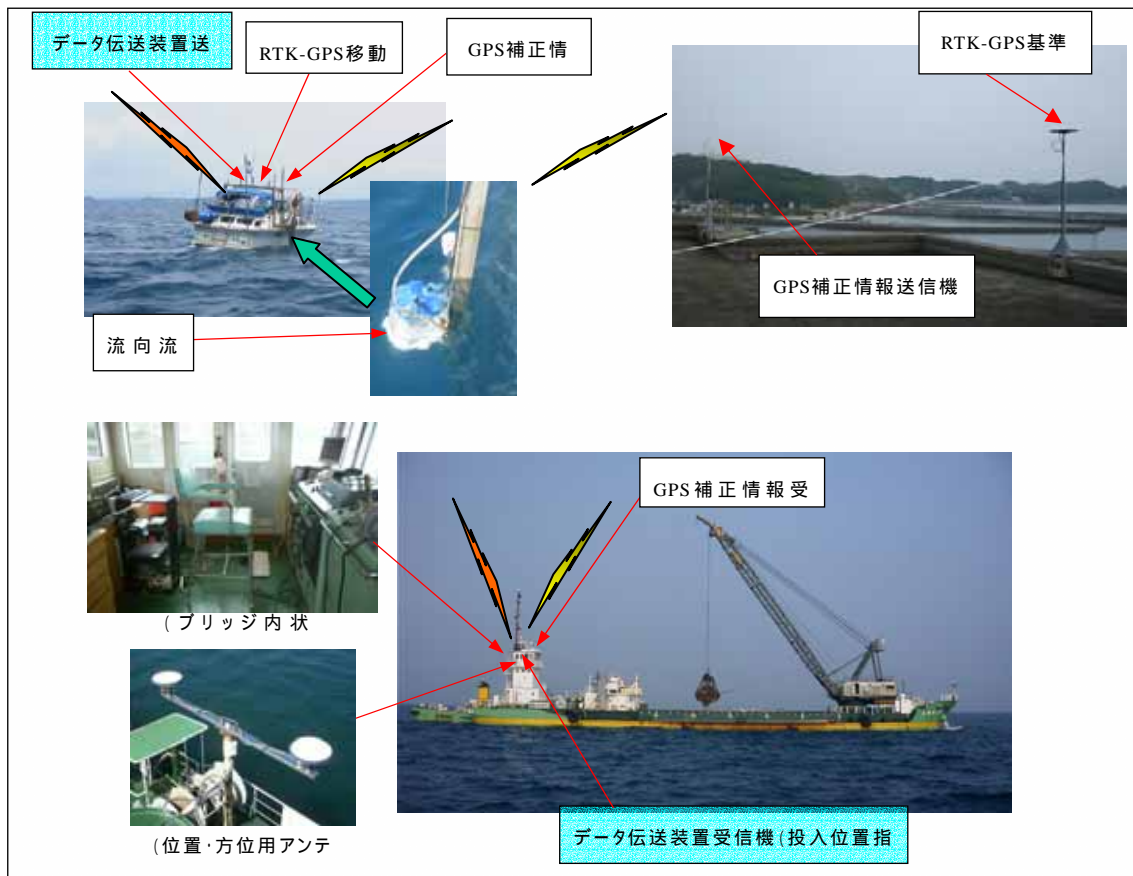


図-2 投入位置誘導システム概要図

投入位置誘導システムについては鹿児島・長崎ともほぼ同じ内容であるが、位置誘導後の投入までの土運船を静止させる方法が異なり、次の方法をそれぞれ用いている。

- ・鹿児島 土運船アンカー（船尾2丁+船首1丁）+スラスタ方式
- ・長崎 引船（補助船）2隻による土運船側面からの引っ張り+押船

鹿児島の場合、水深が63mと比較的浅かった事からアンカーを用いて船を静止させることが出来たが、長崎の場合は水深が85mある事からアンカーを用いる事は困難であり、引船2隻による静止方法を用いた。その為、長崎での試験施工の方が鹿児島よりも投入時における移動誤差が大きくなった。

(3) 試験結果と事前予測結果との比較

鹿児島・長崎それぞれについて、試験結果と事前予測結果との比較図を示す。事前予測計算におけるパラメータ設定は過去の実績を参考にした。なお、投入試験後の出来型は、ナローマルチビームによる高精度GPSを用いた深浅測量により行っている。

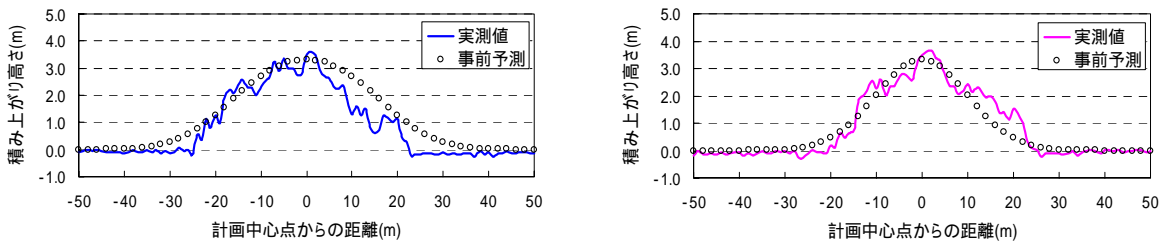


図-3 事前予測結果との比較図 - 鹿児島（左：船首尾方向 右：船幅方向）

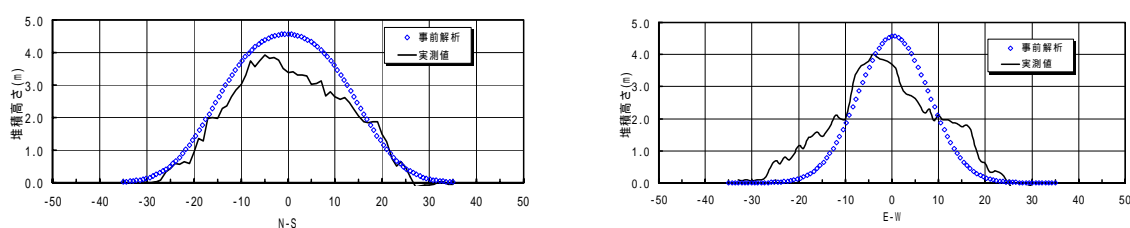


図-4 事前予測結果との比較図 - 長崎（左：船首尾方向 右：船幅方向）

(4) パラメータの再設定および再計算

1) 鹿児島における計算

鹿児島においては、投石試験結果を基に堆積形状予測モデル()の中の拡散係数について次の様に再設定を行った。

表-1 パラメータの再設定

	事前予測時	試験施工後
拡散係数 (標準偏差)	4.00	3.50

() 堆積形状予測モデルとしては、前年度の調査で検討をした松見(1990)により提案され

た正規分布による堆積形状を仮定したモデル（以下、松見モデル）を用いる。

$$f\left(\frac{x}{d}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma/d)} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right\}$$

$$f\left(\frac{y}{d}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma/d)} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma}\right)^2\right\}$$

ここに、 f ：確率密度関数（分布関数）、 d ：粒径もしくは捨石辺長、 σ ：拡散係数

表-1 に示したパラメータで再度計算を行った結果を図-5 に示す。なお、堆積時の空隙率は、実測結果をもとに設定した。

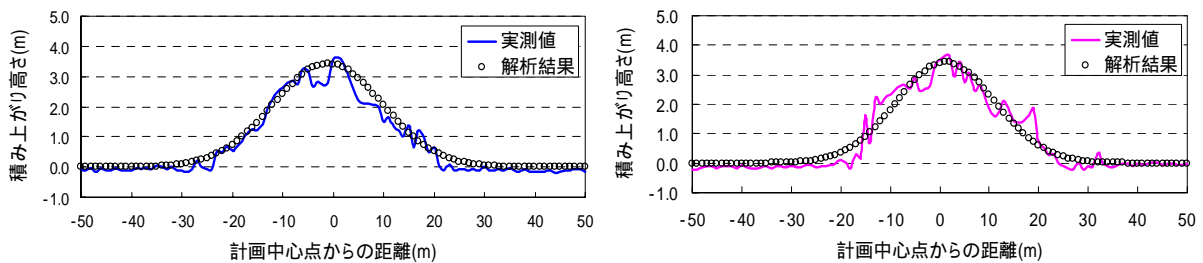


図-5 再計算結果（左：船首尾方向 右：船幅方向）

2) 長崎における計算

長崎においては、事前予測時における式-1 のパラメータ σ として $\sigma = 3.2$ () としていた。事前予測は、捨石の投入位置が全て同じである条件下で行っており、実際の投入試験では、計 5 回 $\times 800\text{m}^3$ の投入において下図の様な軌跡を描いていた。

() について、鹿児島とは水深ピッチが異なり、鹿児島は鉛直方向に 6m 間隔なのに対し長崎は 10m 間隔の為、オーダーが異なる。

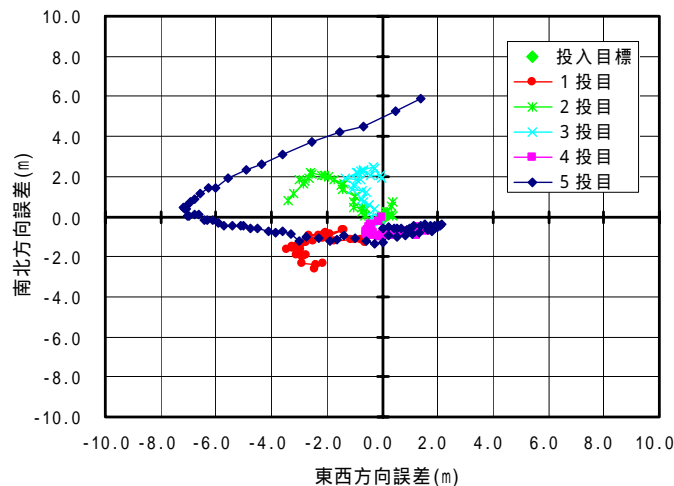


図-6 土運船の投入時における軌跡

長崎の試験投入では、鹿児島のようにアンカー固定をしていなかった事から投入時の移動量

が大きく、パラメータの再設定を行う為には上図の様な移動を考慮する必要がある。

以上より、長崎においては下図の様に2つのケースを想定し、パラメータの設定を行った。

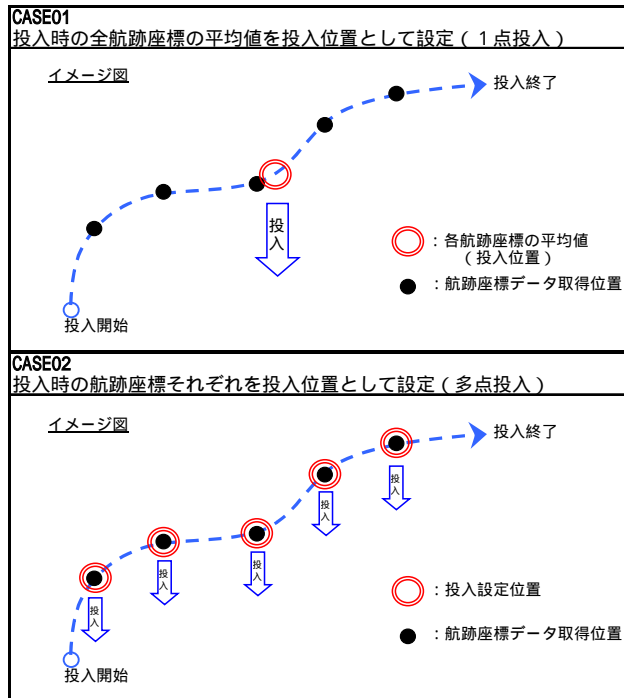


図-7 投入時の移動を考慮したパラメータ設定のイメージ図

表-2 パラメータの再設定

	CASE01	CASE02
拡散係数 (標準偏差)	3.70	3.65

表-2のパラメータにより再計算を行った結果を下図に示す。なお、投入による体積変化率は、実測結果をもとに設定した。

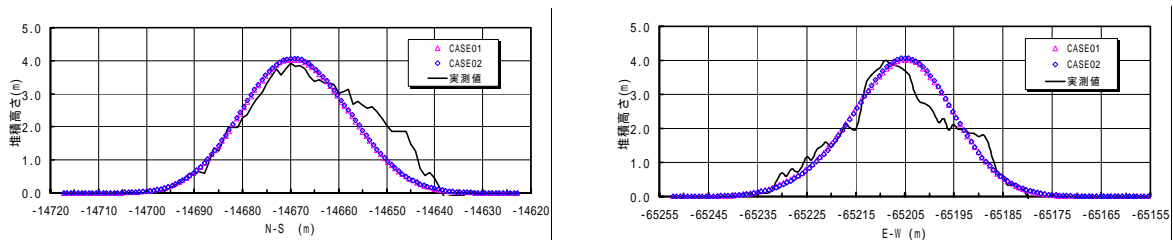


図-8 再計算結果 (左: 船首尾方向 右: 船幅方向)

5-2 松見モデルの適用性について

図-5 および図-8 より、投石試験結果を取り入れたパラメータ設定を行う事で、再現計算結果と試験結果は概ね良い一致を示すことが分かった。また図-8 からは、CASE01 と CASE02 とほぼ一緒の結果となっており、投入中の移動を考慮した多点投入による解析を行わなくとも移動平均値を用いれば、一点からの投入による予測で良好な再現が出来る事が分かった。

これらより、流れや投入時の船の静止方法による影響を大きく受けるような条件下でも、パラメータの設定を適切に行えば、松見モデルで良好な堆積形状予測が出来ることが示された。

5-3 最終堆積形状予測について

(1) 施工による誤差を考慮した堆積形状予測

5.1 での検討より、試験結果より求められたパラメータを用いて、松見モデルによる堆積形状予測が出来ることが示された。しかし、5.1 での再現計算結果は試験投入時の諸条件で行った場合であり、今後実際に捨石の投入を多数回行っていく際には諸条件のバラつきを考慮する必要がある。

土運船による捨石投入の作業中に生じる誤差は、主に以下の4つが考えられる。

- 土運船（全開式バージ船）投入目標に対する誘導誤差
- 捨石投入中の土運船の移動誤差
- 抵抗係数の Cd 値のバラつきに起因する沈降速度の誤差
- 水平方向、鉛直方向の流れに関する誤差

上記で、 Δx は投入開始時における土運船の座標と投入目標座標とのずれ、 Δy は投入開始後（投入中）の土運船の移動による誤差であり、投入完了までの目標地点に対する誤差である。また、 Δd は捨石の粒径のバラつきに起因する誤差、 Δv は投入中の捨石の落下挙動を予測する為に計測した流速と実投入時の流速の違いによる誤差であり、捨石沈降速度及び流れに関する誤差である。

投入試験結果を基に上記の誤差に関して検討を行い、鹿児島・長崎それぞれについて表-3 に示すケースにより最終堆積形状予測を行う事とした。

表-3-1 鹿児島における解析条件

検討ケース	計画堆積高さ	目標地点に対する 誤差	捨石沈降速度及び 流れに関する誤差
CASE 1-1	12m	-	-
CASE 1-2		半径 3.0m	-
CASE 1-3			± 2.4m
CASE 1-4		半径 5.0m	-
CASE 1-5			± 2.4m
CASE 2-1	15m	-	-
CASE 2-2		半径 3.0m	-
CASE 2-3			± 2.4m
CASE 2-4		半径 5.0m	-
CASE 2-5			± 2.4m

表-3-2 長崎における解析条件

検討ケース	計画堆積高さ	目標地点に対する 誤差	捨石沈降速度及び 流れに関する誤差
CASE 00	15m	-	-
CASE 01		半径 4.0m	± 3.4m
CASE 02		半径 7.0m	
CASE 03		半径 10.0m	

捨石沈降速度及び流れに関する誤差は、水深 10m につき ± 40cm の水平移動量を考慮。

(2) 解析結果

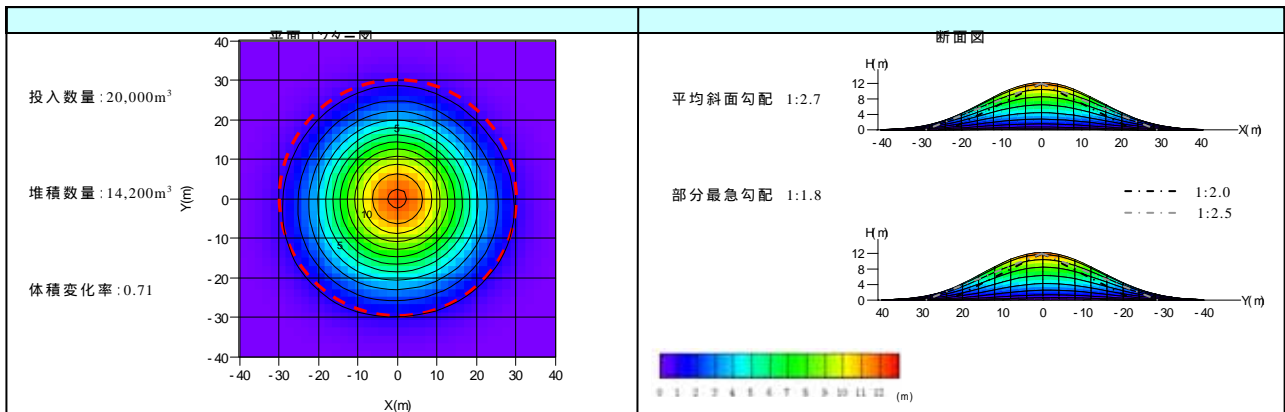
1) 鹿児島における最終堆積形状予測結果

表-3-1 に示したケースの内、CASE1-5 および CASE2-5 について結果を示す。また、解析条件を表-4 に示す。

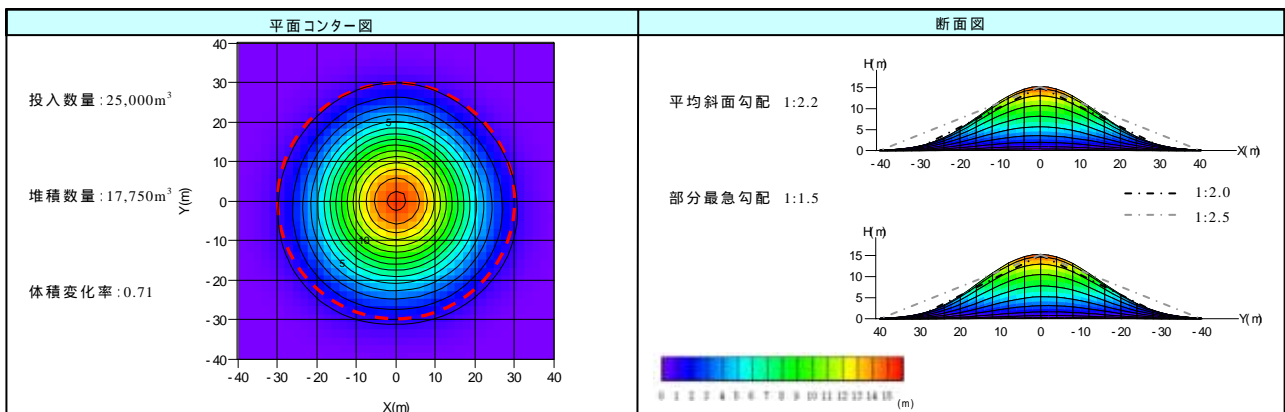
表-4 解析条件

水深	-60m
捨石規格	500kg/個
捨石代表長	0.57m
土運船開口部寸法	L=27.0m , B=5.0m
体積変化率	0.71 (長崎での試験結果を基に設定)
拡散係数	3.50
投入数量	1000m ³ /回

Case.1-5: 誘導誤差:半径5.0m、沈降速度+流速の誤差:2.4m(計画堆積高さ:12m、捨石:500kg/個)



Case.2-5: 誘導誤差:半径5.0m、沈降速度+流速の誤差:2.4m(計画堆積高さ:15m、捨石:500kg/個)



平均斜面勾配は、予測形状の約98%の体積に相当する等価三角形の勾配(等価勾配)のことを表す。

図-9 最終堆積形状予測結果

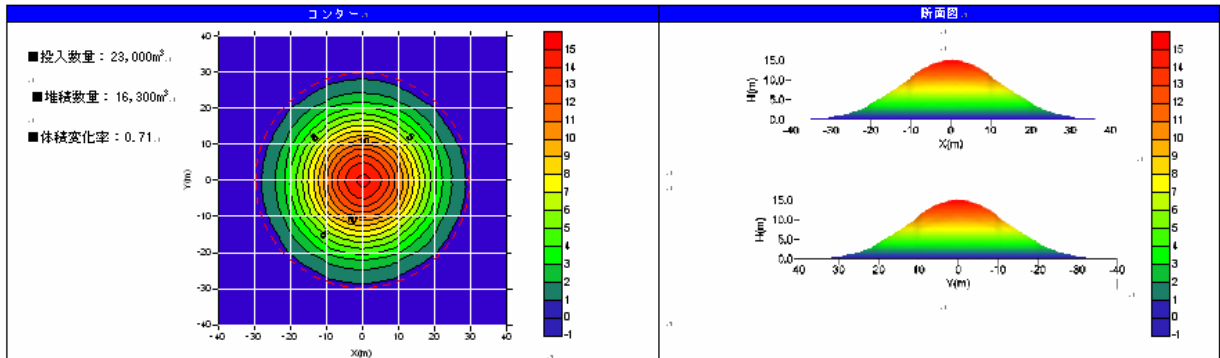
2) 長崎における最終堆積形状予測結果

表-3-1に示したケースの内、CASE02およびCASE03について図-10に解析結果を、図-11に解析結果と斜面勾配の比較図を示す。また、解析条件を表-5に示す。

表-5 解析条件

水深	-85m
捨石規格	1000kg/個
捨石代表長	0.75m
土運船開口部寸法	L=30.5m, B=4.0m
体積変化率	0.71(長崎での試験結果を基に設定)
拡散係数	3.65
投入数量	1000m³/回

CASE02 (誘導誤差: 7.00m、沈降速度+流速の誤差: 3.40m)



CASE03 (誘導誤差: 10.00m、沈降速度+流速の誤差: 3.40m)

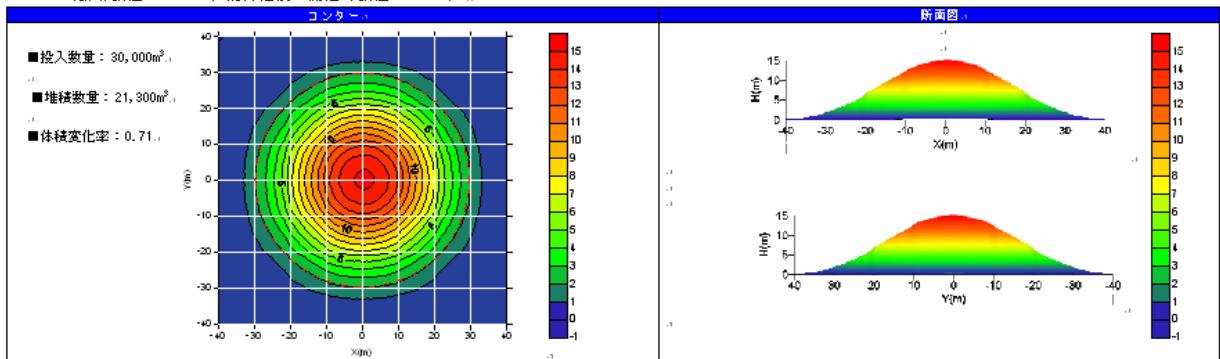
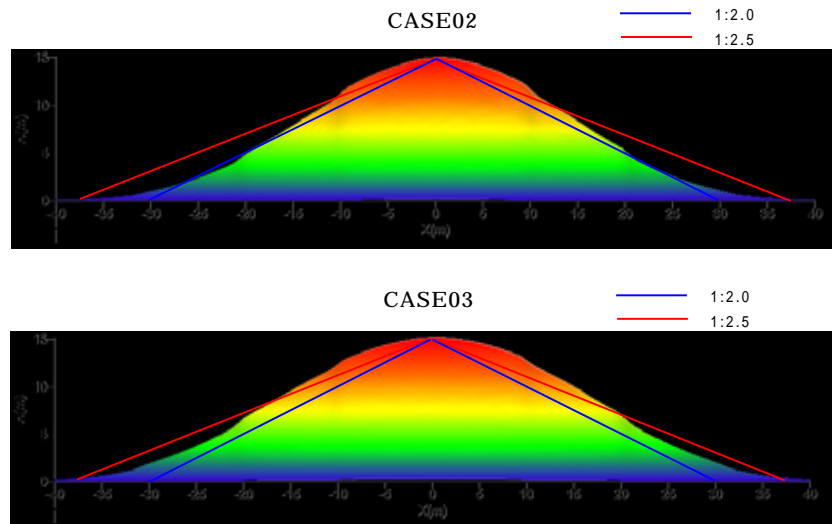


図-10 最終堆積形状予測結果



(3) 造成可能斜面勾配について 図-11 解析結果と斜面勾配の比較

鹿児島・長崎での捨石投入における諸条件を考慮して解析を行った結果、(2)で示されたような結果が得られた。これらより、捨石による人工海底山脈を造成する事が可能な斜面勾配は1:2.0~1:2.5位であると予測が出来る。この勾配は、過去に大水深の海域で行われた釜石港湾口防波堤の基礎捨石マウンド築造工事において確保したとされる1:2.0~1:2.5の斜面勾配と比較しても概ね一致している。

しかし図-9に示されている様に、人工海底山脈は部分的に急な勾配になる箇所があり、そこでの安定を長期的に満たす事が出来なくなり、実際はより緩やかな形状になる事も考えられる。

以上の検討より、1:2.5の斜面勾配であれば造成が可能であると考えられた。

5-4 一般事項の確認

MF資料では、マウンド漁場造成素材に対する要求品質をまとめており、本調査では更に今回の投石試験での実績を付記した。マウンド漁場造成素材に対する要求品質についての実績を踏まえた確認を表-6に示す。

表-6 マウンド漁場造成素材に対する要求品質

要求品質	素 材	石炭灰 コンクリート	普通 コンクリート	石 材	投石試験での実績 上段:長崎、下段鹿兒島
水中落下特性	海底での散乱の最小化	対応可能	対応可能	選択必要	落下特性、分布範囲等を把握
寸法、体積	小さいと散乱し易い	1~10m ³ /個	1~10m ³ /個	1~10m ³ /個	約0.37m ³ /個(=1t/2.68) 約0.19m ³ /個(=500kg/2.66)
形状	立方体で一定形状が有利	対応可能	対応可能	扁平は不可	細長比1.4, 扁平比0.8 細長比1.2, 扁平比0.8
落下衝撃特性	海底着底時に破損しない				ROVにより破損なしを確認(長崎)
寸法、体積	大き過ぎると破損し易い	1~10m ³ /個	1~10m ³ /個	1~10m ³ /個	約0.37m ³ /個(=1t/2.68) 約0.19m ³ /個(=500kg/2.66)

形状	突起部があると欠け易い	対応可能	対応可能	扁平は不適	細長比1.4,扁平比0.8 細長比1.2,扁平比0.8
比重	小さいと着底速度が低下	1.7~1.9	2.2~2.4	2.2~3.3	2.68 長崎 2.66 鹿児島
強度	破損しない強度が必要	15N/mm ² 以上 (確認済)	21N/mm ² 以上 (要確認)	29N/mm ² 以上 (要確認)	205N/mm ² 長崎 78N/mm ² 鹿児島
用心鉄筋	破損しない強度が必要	用心鉄筋必要	用心鉄筋必要		
設置後の安定性	波浪、潮流に対して安定				捨石マウンドの安定計算の考え方を準用して確認
寸法、体積	大きい方が安定性で有利	1~10m ³ /個	1~10m ³ /個	1~10m ³ /個	約0.37m ³ /個(=1t/2.68) 約0.19m ³ /個(=500kg/2.66)
形状	勘合性のある形状が有利	対応可能	対応可能	選択必要	細長比1.4,扁平比0.8 細長比1.2,扁平比0.8
比重	大きい方が安定性で有利	1.7~1.9	2.2~2.4	2.2~3.3	2.68 長崎 2.66 鹿児島
耐埋没特性	比重が小さい方が有利	1.7~1.9	2.2~2.4	2.2~3.3	ボーリング柱状図などの必要データ取得により検討可能。 ROVにより約30cmの海底へのめり込みを確認(長崎)
湧昇流発生特性	空隙率は40%程度が有利	対応可能	対応可能	対応可能	ブロックとの差異は不明
生物付着特性	表面積は大きい方が有利	対応可能	対応可能 (要確認)	対応可能 (要確認)	ブロックとの差異は不明
蝸集特性	適度な間隙が必要	対応可能	対応可能 (要確認)	対応可能 (要確認)	ブロックとの差異は不明
安全性	有害物の溶出がない	確認済	確認済	選択必要	既往事業で利用されており問題はない。
耐久性	耐海水性が必要	確認済	確認済	選択必要	"
環境配慮	リサイクル製品が望ましい	リサイクル製品	配慮必要	配慮必要	環境負荷が無いこと及び供給体制・品質を確認

(注)

- ・表中の普通コンクリート、石材に関しては、施工実績がないため、数値には参考値(要確認)を示してある。実際の使用にあたっては、現場試験や調査等による品質確認作業を行うことを原則とする。
- ・石炭灰コンクリートは、「設計指針」において魚礁への使用が認められている材料である。

6.まとめ

前年度では、捨石による人工海底山脈築造の可能性を検証し、今年度の調査を行うにあたっての課題等を抽出・整理した。今年度は投石試験を鹿児島、長崎の二箇所で行い、投石試験結果を取り入れた堆積形状予測シミュレーション、松見モデルの適用性の検証、そして最終堆積形状予測を行った。その結果、1:2.5の斜面勾配であれば捨石で人工海底山脈を築造出来ると考えられた。

今後はこの1:2.5の斜面勾配を基準に人工海底山脈築造工事を行い、そこで得られた結果をフィードバックする事で設計基準のバージョンアップを図っていく事が望まれる。