

報告

排他的経済水域における湧昇マウンド礁造成技術
Introduction of Advanced Technologies
for Construction of Artificial Upwelling Rock-Mound Reefs
in Exclusive Economic Zone

城戸誠司*・高原裕一**・浅見能章**・松本 弘**・栗原史良*・稲田 勉*
Seiji KIDO and Yuichi TAKAHARA and Yoshiaki ASAMI
Hiroshi MATSUMOTO and Shiro KURIHARA and Tsutomu INADA

要旨：沖合海域を最大限活用し、積極的な水産資源の回復・増大を図るため、我が国排他的経済水域を対象に国自らが漁場整備を実施する「直轄漁場整備事業」が創設され、長崎県の沖合の日本国排他的経済水域に、石材（1 t内外/個程度の割石）16,900m³を投入し、湧昇マウンド礁を造成する工事が水産庁より発注された。

その工事海域は、石材の積み出し港から約40 km離れ、しかも、水深は約150mと大水深であり、気象海象も厳しい環境である。そのような環境の中においても、バージを目標位置に短時間で誘導・保持しながら、所定の位置に石材を投入することができた。また、投入位置とバージの入船方向をシミュレーションにより決定し、その結果を使って施工することにより、想定通りの円錐状の山を築くことができた。これらの技術は、今後、湧昇マウンド礁を完成形として仕上げてゆく際に有効であると考えている。本報告はその概要を紹介したものである。

キーワード：排他的経済水域、湧昇マウンド礁、大水深、施工管理システム、石材

1. はじめに

近年、我が国においては漁獲量の低迷が続いており、その原因として水産資源の低下が考えられる。一方、食糧自給率の低下や食の安全の観点から、国内での水産資源の確保がますます重要となっている。沖合海域を最大限活用し、積極的な水産資源の回復・増大を図るため、漁港漁場整備法が改正され、我が国排他的経済水域を対象に国自らが漁場整備を実施する「直轄漁場整備事業」が創設された。

沖合海域における事業の展開を図る上で近年注

目されてきたのが湧昇マウンド礁（人工海底山脈）である。排他的経済水域の海底にマウンドを造成することで、人工的に湧昇流を発生させ、底層にある栄養塩類を有光層内に供給することによって基礎生産力を向上させるものである。そして、食物連鎖の形成によってプランクトン食性生物（カタクチイワシ、アジ等）及びこれらを捕食する大型魚類の増殖等が期待されるものである。¹⁾

これまで長崎県（生月島沖、五島西等）、鹿児島（阿久根沖）等で造成されており、主に水深80m程度の海域で、ブロックや石材を投入し、湧昇マ

* 賛助会員 東洋建設 株式会社、** 非会員 水産庁漁港漁場整備部

ウンド礁を造成してきた。水深 80m 程度では、これまでに確立モデルや物理モデルによるシミュレーション技術が活用され、精度よくマウンドが造成されていることから、一定の技術が確立されているといえる。

ところが、今回対象としている水域における事業は約 150m と未経験な水深で実施するものである。確立モデルによるシミュレーションは、解析用パラメータを室内実験や、実海域に受ける実証実験により事前に設定する必要がある。

一方、物理モデルを利用したシミュレーションでは、実際に投入する石材やブロックの水中での運動を解析することから、これまでに施工経験のない水深における解析にも対応できると考えられている。本レポートは、未経験な水域において、物理モデルを用いたシミュレーションと施工管理システムを駆使し、所定の出来型を満足する施工ができたのでその報告をするものである。

2. 従来の施工事例

2. 1 施工水深・海域・材料・施工年度

水産庁の補助事業によって、平成 9 年度から 18 年度までの間、湧昇マウンド礁の造成が行われてきたのは、長崎県（生月島沖、宇久北対馬沖、五島西）、鹿児島（阿久根沖）である。海域は領海内にあり、その水深は主に 80m 程度であり、材料は、軽量コンクリートブロックと割石であった。

表 1 主な湧昇マウンド礁の事例

地区名	長崎県 生月島 沖	長崎県 宇久北 対馬沖	長崎県 五島西	鹿児島 県・阿久 根沖
海域	領海内	領海内	領海内	領海内
水深	約 82m	宇久北 約 85m 対馬沖 約 89m	約 85m	約 63m
材料	軽量コン クリート ブロック	軽量コン クリート ブロック	割石	割石
施工年 度	H9～ H12	H15 ～ H17	H17 ～ H18	H16 ～ H17

3. 湧昇マウンド礁造成技術の開発

3. 1 大水深捨石投入施工管理システム²⁾

大水深海域に捨石等でマウンドを築造する場合には、潜水作業が困難であることから底開式バージ（以後、バージと略称）による直接投入が多く用いられる。バージの直接投入では、大量で急速に施工ができる反面、計画断面との差異が大きくなりやすいため、捨石材等の堆積形状を予測した投入計画に基づいて効率的な施工が重要になる。

捨石等の堆積形状予測には、確率論的な手法が主に用いられているが、パラメータの設定に実測値の蓄積データを必要とするため、前例のない施工条件では予測精度が課題となる。また、沖合でかつ大水深において波浪や潮流などの海象条件が変化するなか、決められた位置にバージを誘導し捨石等を投入するためには、リアルタイムの高精度な施工管理が必要になる。

このような大水深海域において捨石等でマウンドを高い精度で効率よく築造できる「大水深捨石投入施工管理システム」を開発した。

図 1 に示すように、本システムは、主に堆積形状予測サブシステム、投入計画支援サブシステム、施工管理サブシステムの各サブシステムから構成されている。以下にその概要を示す。

① 積形状予測サブシステム

本システムで用いる捨石堆積形状の予測手法には、バージから海中に投入された捨石が相互に衝突しながら落下していき、海底に堆積する現象を直接表現する力学モデル^{3) 4)}（個別要素法を用いた三次元固液混相流モデル：大阪市立大学と東洋建設の共同研究により開発）を用いた数値シミュレーション手法を採用している。この手法では、水深、バージ形状、捨石の重量などの諸条件を解析条件として直接考慮できるため、経験則や蓄積データが利用できない場合でも、現場条件に合わせた捨石の堆積形状の予測が可能である。

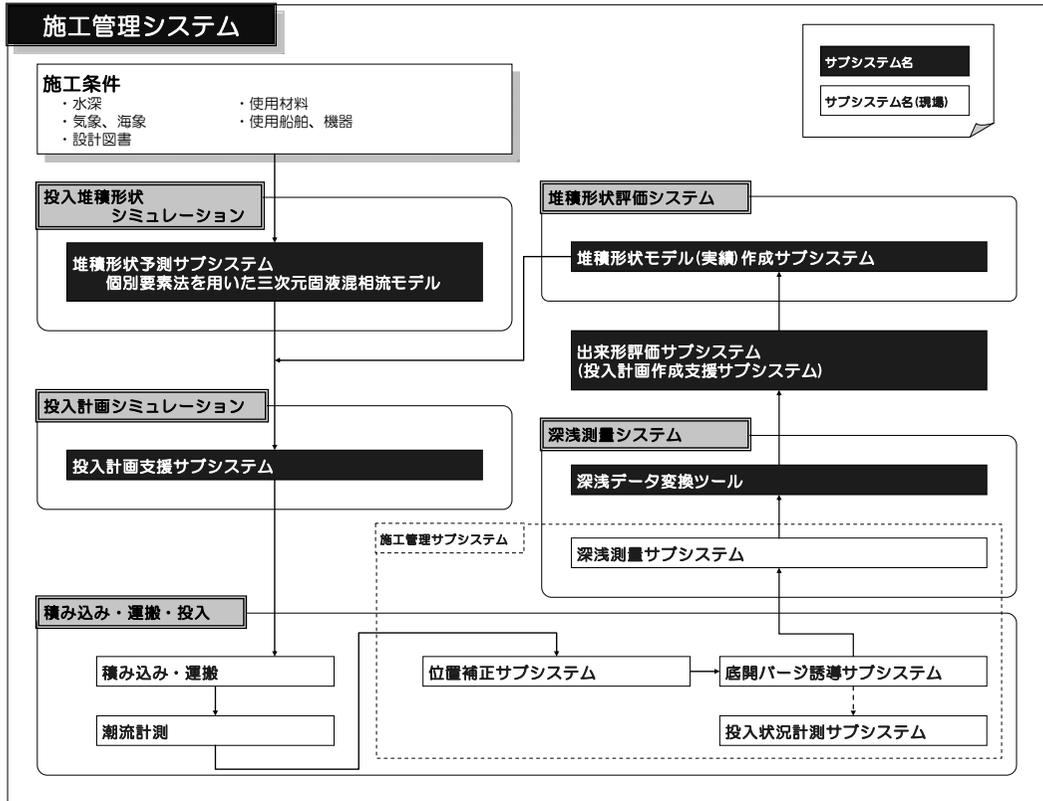


図-1 大水深捨石投入施工管理システム

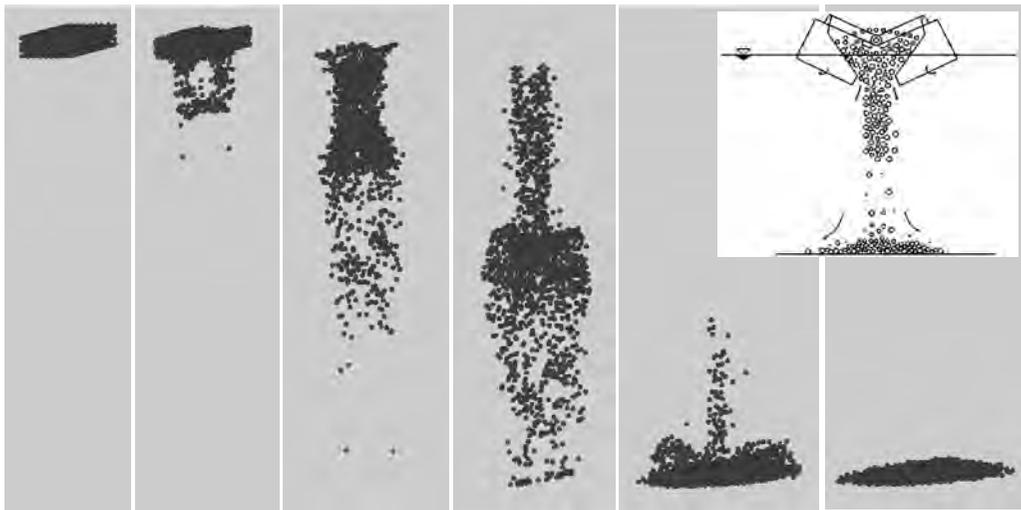


図-2 個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルを用いた石材の堆積形状予測結果の例 ²⁾

本シミュレーションは、バージが開扉され、落下する捨石等が、沈降に伴って誘起された流体力の影響を受けながら拡散・沈降している様子や、着底した捨石等が堆積する様子、さらに、法面を捨石が転がり落ちる様子も確認できる。

②投入計画支援サブシステム

本システムは、堆積形状予測サブシステムで作成した複数の堆積形状モデルを重ね合わせることで、計画断面を効率的に築造する投入計画の立案を支援するシステムである。また、実際の投入で実測した堆積形状をデータベースとして蓄積する機能も併せ持っている。

③施工管理サブシステム

本システムは、以下の施工管理サブシステムにより高精度な施工管理を可能としている。

表-2 施工管理システムの概要

	概要
投入位置補正サブシステム	潮流による投入位置と堆積位置のずれを事前に予測し、投入位置を補正する。
底開バージ誘導サブシステム	各作業船の位置情報を無線LANで共有化・可視化し、迅速で正確に誘導する。
投入状況計測サブシステム	バージの軌跡や開扉の状況などを計測管理し、投入方法を検証する。
深浅測量サブシステム	ナローマルチビームによる堆積形状の取得により、出来形管理と堆積形状を検証する。

4. 排他的経済水域における湧礁マウンド礁造成工事

4.1 工事の概要

本工事は、マアジ、マサバ、マイワシを対象とした漁場を整備するため、水深約150mの海底に、16,900m³の石材を投入し、湧昇マウンド礁を造成するものである。施工海域を図-3に示す。

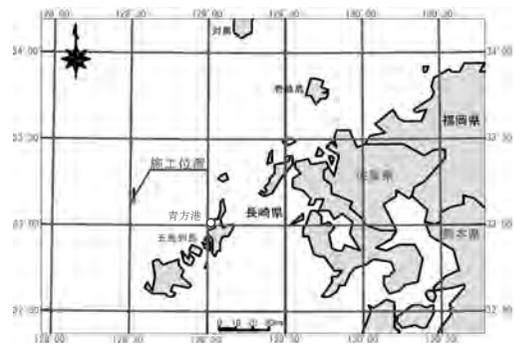


図-3 施工位置

造成位置は、石材の積み込み港である青方港から北西西方向に約40km航行したところにある。

施工位置平面を図-4に示す。水深153m~154mの海底は比較的なだらかである。

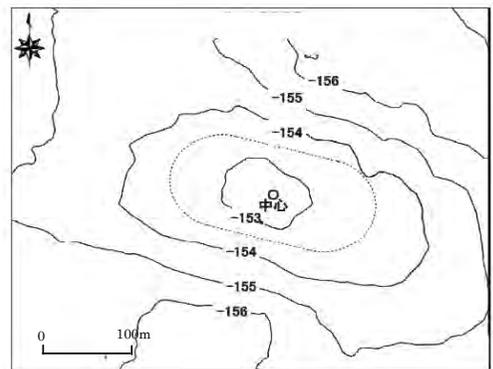


図-4 施工位置平面図

本工事は、水産庁が発注する直轄漁場整備事業であり、工事概要と工事内容を表-3と表-4に示す。

1 t 内外/個程度の割石を 16,900m³ を投入するとともに、投入作業状況も調査するものである。押航開閉式鋼 1,500m³ 積の土運船と押船、そして、2 隻の引船が主要な船舶である。主要船舶機械を表-5 に示す。

表-3 工事概要

工事名	平成 23 年度 五島西方沖地区湧昇マウンド礁石材投入工事
発注者	水産庁 漁港漁場整備部整備課
工事場所	長崎県南松浦郡新上五島町相河郷地先・長崎県の沖合の日本国排他的経済水域
工期	自：平成 23 年 9 月 10 日～ 至：平成 23 年 12 月 21 日

表-4 工事内容

工種名称	規格・形状寸法	数量
石材投入工 割石投入	割石(1 t 内外/個程度)	16,900m ³
投入作業状況調査	石材状況調査	1 式

表-5 主要船舶機械

名称	規格	用途
土運船(全開式バージ)	押航開閉式鋼 1,500m ³ 積	割石運搬・投入
押船	鋼 D3,600PS	割石運搬・投入位置誘導
引船(補助船)	鋼 D1,640PS	投入位置誘導の補助 石材状況調査
引船(補助船)	鋼 D1,000PS	投入位置誘導の補助
ガット船	499 t 級	割石搬入
測量船	200PS	測量業務
安全監視船		安全監視業務
投入確認機器	ナローマルチビーム	深淺測量 割石投入前後
潮流測定機器	流向・流速計	流向・流速測定 (投入位置誘導)
船舶位置誘導機器	GPS 測位システム	投入位置誘導
堆積形状予測管理機器	堆積形状予測管理システム	投入管理

4.2 施工状況

大水深捨石投入施工管理システムを適用し、水深約 150m の海底に、16,900m³ の石材を投入した。その際の投入回数は 13 回であった。

青方港において石材をガット船により、バージに積み込んだ。積込前にガット船上で割石検収を行い、割石の数量、質量、扁平率を測定した。積み込み状況を写真-1 に示す。



写真-1 石材の積み込み状況

バージを押船にて施工現場まで海上運搬し、所定の位置に作業船を配置した。作業船の配置状況を写真-2 に示す。真ん中がバージ、両側に引船が配置されている。



写真-2 作業船の配置状況

施工位置に到着後、投入場所近辺において ADCP により潮流(流向・流速)を観測し、投入位置補正システムにより投入位置の補正量を決定し、投入位置を修正した。その後、風向を考慮し、補正した投入位置へ誘導システムにより土運船を導入させた。

引船と土運船を連結させた後、位置誘導システムを使用し、各船の船長がモニターで各船の位置を視覚的に判断しながら、全開式バージを所定の

位置に誘導した。投入位置が確定すれば、全開し、割石を投入した。

バージの誘導状況を図-5に、誘導画面を写真-3に、操船状況を写真-4に示す。

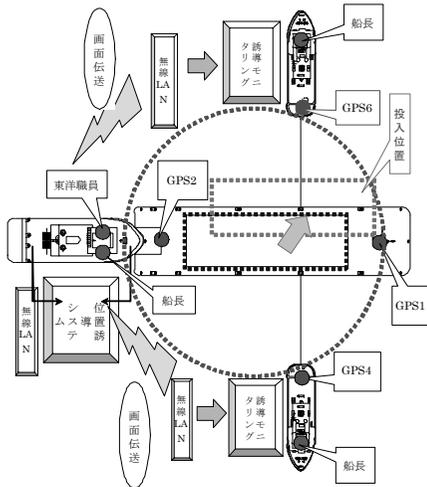


図-5 バージの誘導状況

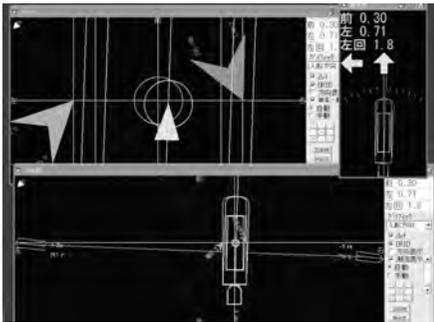


写真-3 誘導画面



写真-4 操船状況

本工事における投入は13投であった。その内、1~4投目は、円錐形の山の周辺部に堆積形状の確認をおこない、5~13投目の投入で円錐形の山の形成を行った。5~13投目における気象・海象状況は図-6のようであった。

表-6 気象・海象状況

投入NO.	風向方位	風速 m/s	波高 m	周期 秒	流速 m/s	流向方位
5	北	5.0	0.5	4	0.2	北東
6	北	3.0	0.7	7	0.2	東
7	東	7.0	0.9	6	0.4	東
8	北	4.0	0.6	5	0.3	東
9	北	5.0	0.5	4	0.3	東
10	北	7.0	0.7	5	0.3	南東
11	北東	3.0	0.7	5	0.3	東
12	北東	8.0	0.8	6	0.4	北東
13	東	4.0	0.7	6	0.2	南東

*気象・海象の観測位置は、石材投入中心である。

投入状況を写真-5と写真-6に示す。



写真-5 投入状況 (投入前)



写真-6 投入状況 (投入中)

4.3 バージの軌跡

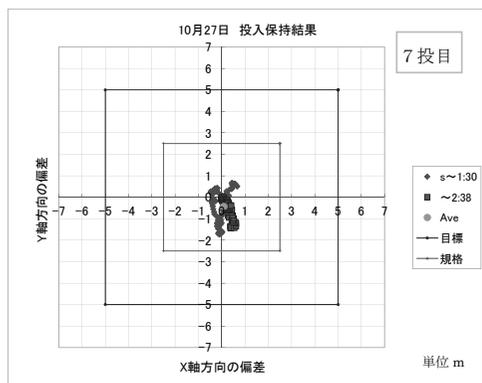
投入開始から終了までの所用時間は3～5分である。その間、波浪や潮流の影響を受けたバージは、サージング、スウィング、ヒービング、ヨーイング等により動揺する。動揺しているバージを目標位置でいかに保持させるかがポイントである。

バージを誘導するのは、施工管理システムの中の底開バージ誘導システムである。操船室では写真-3に示す誘導画面と、バージの軌跡を示す画面を見ながら、目標とする位置に誘導・保持しながら、所定の位置に石材を投入する指示を出した。

本工事期間で波高が最も高かったケース(0.9m)は7投目であり、その際のバージの軌跡を図-6に示す。また、風速が最も強かったケース(8.0m/s)は12投目であり、その際のバージの軌跡を図-7に示す。7投目の投入時間は2分38秒、12投目は3分38秒、最終の13投目は3分18秒であった。

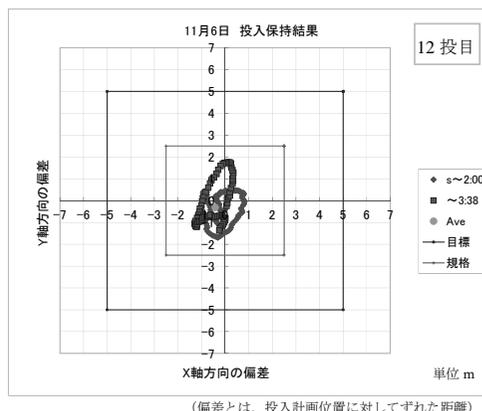
波高 0.9m、風速 8.0m/s 等の過酷な条件にも拘わらず、バージの船位は制御でき、所定の投入を行うことができた。

以上より、バージを目標位置に短時間で誘導・保持しながら、所定の位置に石材を投入するのに、施工管理システムが有効であることを確認した。



(偏差とは、投入計画位置に対してずれた距離)

図-6 バージの軌跡 (7投目)



(偏差とは、投入計画位置に対してずれた距離)

図-7 バージの軌跡 (12投目)

4.4 マウンドの堆積形状

船倉が細長いことより堆積形状は楕円形となる。このようなことより、マウンドの頂点や稜線から、一方方向で入船し、投入し続けると、楕円形が積み上がったマウンド形状となりやすい。

今回の工事はマウンドの造成の初期段階であり、出来型形状に関する特段の条件はなかったが、マウンドが完成に近づけば、楕円形を積み上げる投入方法では出来型条件を満足しにくくなると判断し、本工事では、投入位置とバージ入船方向をシミュレーションにより決定した後、それを使用して施工することにした。

バージ入船方向角が0度で石材一投あたりのシミュレーション結果を図-8に示す。

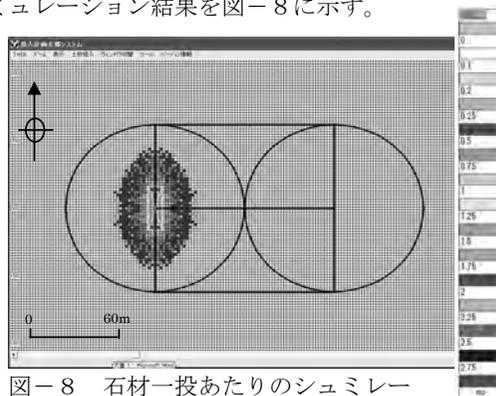


図-8 石材一投あたりのシミュレーション結果 (バージの入船方向角が0度)

ここでバージ方向角0度とは、ローカル座標で船主が北向きのケースを指している。

バージの入船方向角の変化が堆積形状に及ぼす影響を把握するため、2つのパターンを検討した。

パターン1	現状地盤にバージ方向角0度で6投すべてを投入
パターン2	現状地盤にバージ方向角を変化させながら6投を順次投入

パターン1の投入方法では、山の底面が縦100m、横70mの楕円形となっている。パターン2の投入は縦横約80mの円形となった。

パターン2のシミュレーション結果を図-10に示す。予想していた通りマウンドが円錐状となっていることが確認できる。

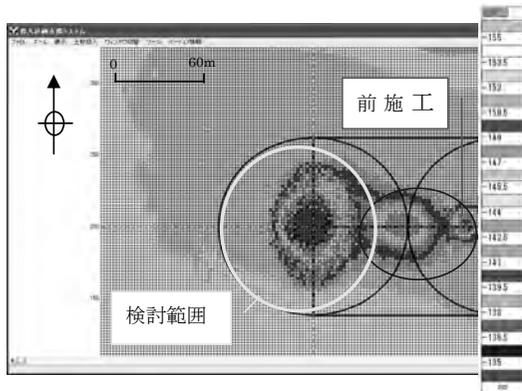


図-9 パターン1のシミュレーション結果
(バージの入船方向角がすべて0度)

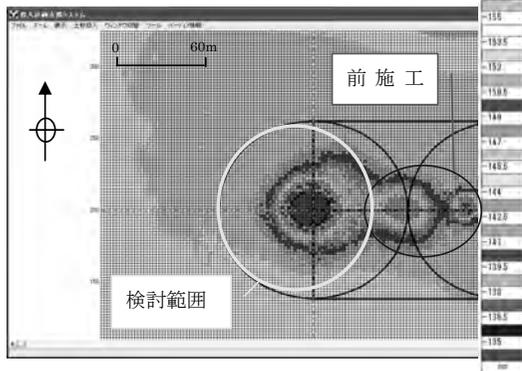


図-10 パターン2のシミュレーション結果
(バージの入船方向角を変化)

以上のシミュレーション結果を受け、バージを多方向から入船・保持しながら、石材を投入した深度別色分布図を図-11に示す。シミュレーション通りに綺麗な円錐状のマウンドが築くことができた。なお、図中の造成範囲は、5～13投で造成した範囲を、試験範囲は1～4投で形状試験を実施した範囲である。

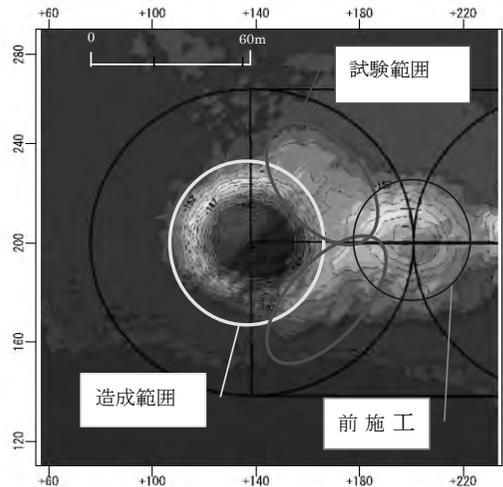


図-11 深度別色分布図(13投目)

5. おわりに

長崎県沖合の日本国排他的経済水域の水深約150mの海域に、石材(1t内外/個程度の割石)16,900m³を投入し、湧昇マウンド礁を造成する工事が完了した。

未経験な排他的経済水域において、物理モデルを用いたシミュレーションと施工管理システムを駆使することによりバージを目標位置に短時間で誘導・保持しながら、所定の位置に石材を投入することができた。

また、投入位置とバージの入船方向をシミュレーションにより決定し、その結果を使って施工することにより、想定通りの円錐状の山を築くことができた。これらの技術は、今後、湧昇マウンド礁を完成形として仕上げてゆく際に有効であると

考えている。

今回、得られた成果は石材を対象にしたものである。今後、石炭灰ブロックによる湧昇マウンド礁造成も予定されている。これらに対応できるよう、施工管理システムと施工方法の改善を図っていく必要がある。

【参考文献】

- 1) 中村隆・岡貞行・山本竜太郎（水産庁）他：沖合漁場整備の政策的意義と技術的課題、水産庁ホームページ、pp. 1-3、2008
- 2) 加藤直幸・長山英樹（東洋建設）：人工海底山脈築造の施工管理システムについて、社団法人日本深海技術協会会報、通巻60号、pp. 20-24、2009
- 3) 重松孝昌・小田一紀・田野雅彦・鹿瀬真由：個別要素法による水中沈降粒子群の3次元挙動に関する研究、海岸工学論文集、第47巻、pp. 996-1000、2000
- 4) 小田一紀・重松孝昌・菅野寛：粒子群の沈降・分散挙動に及ぼす流れの影響に関する数値実験、海岸工学論文集、第42巻、pp. 1271-1275、1995

著者紹介



城戸誠司（賛助会員）

東洋建設株式会社 九州支店土木部
（福岡市中央区薬院 3-3-31）
昭和63年3月 日本大学生産工学部
土木工学科卒業



高原裕一（非会員）

水産庁漁港漁場整備部整備課（東京都千代田区霞が関 1-2-1）
平成8年3月 日本大学大学院理工学研究科修了、同年4月農林水産省入省、平成21年4月水産庁漁港漁場整備部整備課課長補佐



浅見能章（非会員）

水産庁漁港漁場整備部整備課（東京都千代田区霞が関 1-2-1）
平成3年3月 東洋大学工学部土木工学科卒業、同年4月北海道開発局入局
平成23年4月水産庁漁港漁場整備部整備課地域整備係長



松本 弘（非会員）

水産庁漁港漁場整備部整備課（東京都千代田区霞が関 1-2-1）
平成12年3月 筑波大学大学院工学研究科中退、同年4月農林水産省入省、平成21年7月水産庁漁港漁場整備部整備課広域整備係長



栗原史良（賛助会員）

東洋建設株式会社 九州支店土木部
（福岡市中央区薬院 3-3-31）
平成6年3月 大阪工業大学土木工学科卒業



稲田 勉（賛助会員）

東洋建設株式会社 土木事業本部営業第一部（東京都江東区青海 2-43）
昭和54年3月 徳島大学大学院修士課程卒業
環境カウンセラー、日本沿岸域学会企画運営委員

Introduction of Advanced Technologies for Construction of Artificial Upwelling Rock-Mound Reefs in Exclusive Economic Zone

ABSTRACT : As per a national government strategy to revive and grow fishery resources by improving and developing deep-sea fishery environment in the exclusive economic zone (EEZ) around Japan, Fisheries Agency of Japan ordered a project to build artificial upwelling rock-mound reefs in the 150m-deep sea, offshore of Nagasaki Prefecture. The construction was done by dumping 16,900m³ of rocks (1t/pc) from barges under severe weather and rough marine circumstances.

In this project, a series of barge navigational guide systems were used to set quickly and keep steadily a barge in the target position to dump rocks accurately to the designated position on the 150m-deep seabed even under such severe conditions. Furthermore, a series of simulation systems to determine optimal approaching directions and dumping points for the barge were also used in order to build the rock-mound reefs accurately in an expected. These technologies introduced herein are effective and contribute to the construction of artificial upwelling rock-mound reefs in the deep sea.

KEYWORDS : *Exclusive economic zone, artificial upwelling mound reefs, deep sea, construction management system, rock mound*