

人工湧昇流マウンド造成のための 捨石投入の管理と最適化

OPTIMAIZATION ON DUMPING METHOD OF RUBBLE FOR CONSTRUCTING ARTIFICIAL FISHING MOUND

五明美智男¹・松田信彦²・浅沼丈夫³・関根信寛⁴

Michio GOMYO, Nobuhiko Matsuda, Takeo Asanuma, Nobuhiro Sekine

¹フェロー 博(工) 東亜建設工業株式会社 土木事業本部エンジニアリング事業部
(〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

²正会員 博(工) 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター
(〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1丁目3)

³正会員 東亜建設工業株式会社 土木事業本部設計部
(〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁴正会員 東亜建設工業株式会社 九州支店
(〒812-0011 福岡市博多区博多駅前3-5-7 博多センタービル)

The dumping method of a large amount of rubble is investigated to optimize the construction works of artificial fishing mound for uplifting the eutrophied water with the upwelling current. In this method, bubble placed in a hopper is dumped by split barge. This paper presents the influence of time to open the split barge on deposition configuration of bubble and refers an acceptable dumping method in actual works. As a result, the new method with time control to open the split barge can develop a good deposition configuration.

Key Words : Dumping method, artificial fishing mound, rubble, deposition configuration

1. はじめに

四方を海に囲まれたわが国周辺には、今後の開発が期待される海洋資源が少なくない。例えば、自然の湧昇流漁場形成の源となる深層水については、取水利用とともに、栄養塩の豊富な深層水を海底に設けたマウンドにより人工的に湧昇させる事業が長崎県で推進されている。著者らは、長崎県宇久島沖10km、水深85mの地点において、フライアッシュクリートを材料とした1辺約1.6m、比重1.8のほぼ方形のブロックを底開式バージにより投入するマウンド造成工事に携わり、その際に開発したブロック投入管理システムと投入方法の最適化に関してすでに報告している(以下、第1報¹⁾、第2報²⁾)。

第1報では、ADCPを利用した流向流速計測技術、広域DPGSを適用した船位置誘導技術、堆積形状予測技術³⁾、ナローマルチビーム測深ソナーを用いた堆積形状計測技術を組み合わせた統合システムによっ

て、高い精度でマウンドが築造されることを示した。また第2報では、海面に突入し海中を落下するブロックの挙動および堆積特性から、写真-1に示すようなブロック投入段数がブロックの散乱に与える影響を明らかにし、ブロック投入技術を確立した。

こうした検討の一方で、マウンド基材として、ブロックとともに捨石の利用も検討が進められているが³⁾、ブロックの投入段数を主要因として投入方法

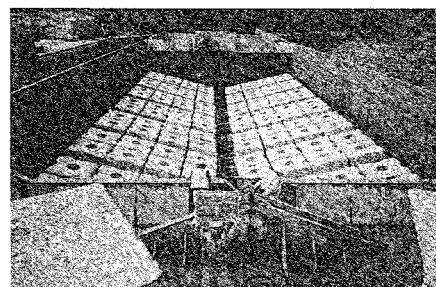


写真-1 ブロック積込状況(4段の場合)

を議論したように、捨石の投入方法を規定する要因が存在するものと考えられる。

そこで、本報では、捨石も含む土砂投入に関する従来の知見をふまえた上で、マウンド基材として捨石を用いた場合の適切な投入管理と投入方法の最適化について、3つのシリーズの水理実験および現地施工実績により検討する。

2. 捨石堆積形状の支配要因

投入水深の増加に伴って投入された土砂の堆積形状が一山型から台形円錐、二山型、平型へと変化することは良く知られている。図-1, 2は、武藤らにより実施された底開土運船による海底への衝撃圧と土砂拡散幅の実験結果であり⁴⁾、水深の増加に伴って衝撃圧と拡散幅が大きくなる一方で、土運船直下の堆積厚が小さくなっていることがわかる。

土砂塊を混合流体と仮定し海底に直角に衝突する定常噴流を考えれば、衝撃圧は海底衝突時の密度と速度に依存することが容易に理解される。投入水深の増加は、水中を落下する土砂群の加速距離を大きくし、速度を増大させるのに寄与する。一方、水深が一定の場合でも、土運船からの流出特性が変われば、海底衝突時の密度と速度も変化する。特に、粒径の均一な捨石を投入する時には、単一粒状体あるいは群体としての落下特性も観察されることから、流出特性を制御することで堆積形状を管理できる可能性がある。

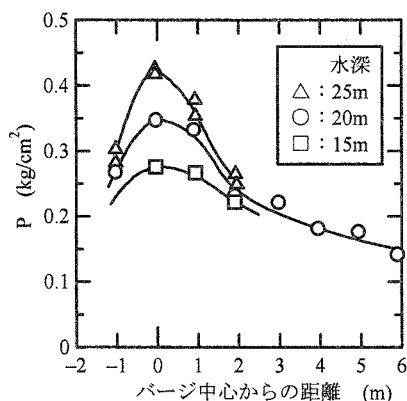


図-1 土砂投入時の衝撃圧の一例⁴⁾

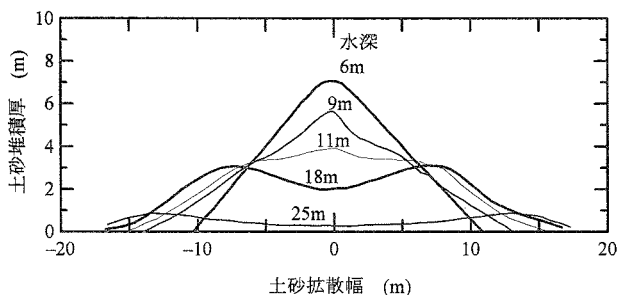


図-2 土砂投入時の堆積厚と拡散幅の一例⁴⁾

3. 土運船からの捨石流出特性

2.での考察をふまえ、開扉時間を制御できる全開式土運船の模型を用い、土運船からの捨石の流出特性を把握するための実験を行った。

(1) 実験方法

実験（以下、シリーズ1と呼ぶ）は、開口幅0.12m、開口部長さ0.23mを有する全開式の土運船模型を用い、図-3に示す装置によって落下して堆積する捨石質量の時間変化を分力計により計測するとともに、流出状況をビデオ撮影した。模型は電動式となり自由に関扉時間を調整することができるが、ここでは3段階の開扉速度を用いることとした。縮尺1/35とした実験条件は表-1に示すとおりであり、1tの捨石1800m³をバージ開扉時間118, 177, 237sで投入した場合に相当する。

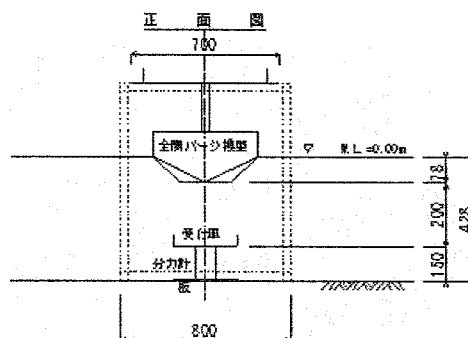


図-3 流出特性実験装置

表-1 シリーズ1の実験条件

縮尺1/35	現地量	模型量
開口幅	4.20m	0.12m
開口部長さ	8.05m	0.23m
開扉時間	118s	20s
	177s	30s
	237s	40s
捨石投入量	1800m³	9184cm³
捨石質量	1.0t	23.0g
水深	9.80m	0.28m

(2) 捨石流出量の経時変化

図-4は、横軸に開扉時間Tで無次元化した経過時間t/T、縦軸に時間刻みT/20毎の堆積量および累積堆積量を示したものである。

いずれのケースにおいても、少量ずつ流出する区間 (t/T=0~0.5)、短時間に大量に流出する区間 (t/T=0.5~0.7) および流出が終了し開扉のみ続く区間 (t/T=0.7~1.0) の3つに分類される。特に流出が大きい第2区間では、全体の20~30%の捨石の流出が続く時間帯が存在する。また、開扉時間の約20%の短時間に全投入量の約90%が流出している点も特徴的である。

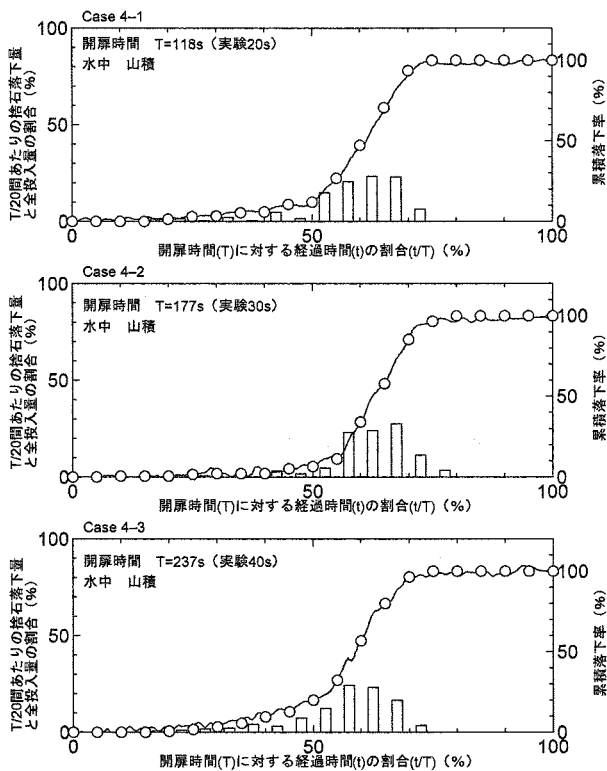


図-4 捨石流出量の時間変化

4. 捨石流出特性と堆積形状の関連性

(1) 実験方法

実験(以下、シリーズ2と呼ぶ)は、長さ5m、奥行き0.6m、高さ1.2mの水槽を用い、縮尺1/25での2次元断面で実施した。模型は、シリーズ1とは異なり開口幅0.19m、開口部長さ0.45mの全開式の土運船模型を用い、3段階の開扉速度を設定した。投入材料としては、群効果も見するためにシリーズ1よりも小さい碎石($d_{50}=8.4\text{mm}$)を用い、 $3000\text{cm}^3 \sim 18000\text{cm}^3$ の6種類の投入量で行った(表-2、写真-2)。堆積形状をポイントゲージにより測定するとともに、投入前から堆積後安定するまでの状況をビデオで撮影した。

表-2 シリーズ2の実験条件

縮尺1/25	現地量	模型量
開口幅	4.63m	0.19m
開口部長さ	11.25m	0.45m
開閉時間	47.5s	9.5s
	95s	19s
	190s	38s
捨石投入量	47-281 m^3	3000-18000 cm^3
捨石質量	256.0kg	1.7g
水深	21.25m	0.85m

(2) 捨石流出特性の指標

表-3は、投入量V、開扉に要する時間T、捨石を投入するのに要する時間T_{end}の実験値を示したものである。いずれの投入量においても開扉時間よりも短い時間で投入が終了する。しかしながら、シリーズ

1とは異なり、開扉時間に対して投入が終了するまでの時間がばらついている。こうした相違は、土運船の形状と開口幅、捨石径、船底勾配などに依存するものと考えられる。

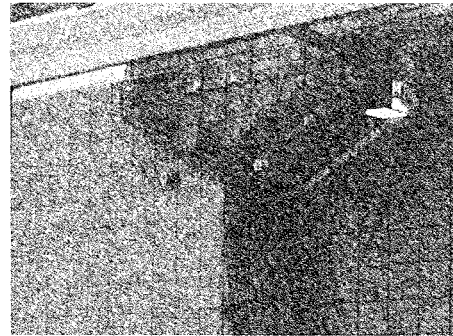


写真-2 捨石の流出状況

土運船の捨石流出特性を一般化するために、現地にて容易に測定可能な時間量を用い、以下のような指標を導入する。すなわち、T、T_{end}、Vを用い、計画流量Q_d、平均流量Q_aを次式のように定義する。

$$Q_d = V/T \quad (1)$$

$$Q_a = V/T_{end} \quad (2)$$

図-5は、計画流量と平均流量の関係を示したものであり、T_{end}<TであることからQ_a>Q_dとなる。また、図には後述のシリーズ3の実験条件もあわせて示しているが、開扉時間、投入量の違いにもかかわらず、同一船倉、同一開扉特性の土運船では、両者に相関があることがわかる。そこで、以下では、これらの流量を用いて解析を進めることとする。

表-3 投入量、開扉時間と捨石投入時間の関係

T \ V	9.5s	19s	38s
3000	4.9s (52%)	6.7s (35%)	11.8s (31%)
6000	5.3s (56%)	7.5s (39%)	12.4s (32%)
9000	5.7s (60%)	8.2s (43%)	13.5s (35%)
12000	6.2s (65%)	8.9s (47%)	14.5s (38%)
15000	6.9s (68%)	9.8s (52%)	15.4s (40%)

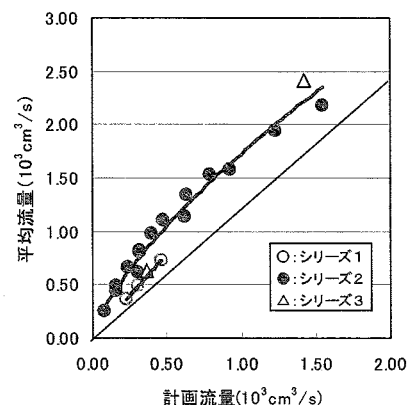


図-5 計画流量と平均流量の関係

(3) 捨石流出特性と堆積形状との関連性

水中を落下する均一な捨石群は、土運船の開口幅より若干拡がりつつ直下に落下する。衝突後から堆積が終了し静止するまでの状況は、以下のとおりである。

海底に衝突後、衝突前に持っていた運動量により捨石群は左右に拡がる。ここで、初期（投入開始から最初に衝突し衝突前の運動量により拡がり幅が決まるまで）における拡がり幅を S_0 と定義すれば、捨石は拡がり幅 S_0 の範囲に堆積し、原地盤上に堆積層が形成されていく。この間、拡がり幅 S_0 の範囲で概ね平坦な層が形成されていく。投入が続く場合には、さらに平坦な堆積層の上に次々と捨石が落下する。衝突後左右へ拡がろうとする運動量は持つものの、既に堆積している層との摩擦により拡がり幅が減少し、山状になっていく。勾配が大きくなると、捨石は衝突後斜面をころがり落ちるようになり、投入量によっては投入終了後の最終拡がり幅 S が S_0 を上回るようになる。図-6に示すように、投入を続けた場合、開扉時間9.7sの場合は一山型、38sの場合は台形円錐型の堆積形状となっていくことがわかる。

図-7は、平均流量、計画流量と最終拡がり幅 S の関係を示したものである。いずれの流量を指標としても、流量が大きいほど最終拡がり幅も大きくなる傾向がある。最終的な拡がり幅は、土運船開口幅の1.3～2倍程度である。

また、図-8は、直下堆積厚を最終拡がり幅で無次元化した平均的な堆積勾配と平均流量との関係を示したものである。同じ流量でも開扉時間によって堆積勾配が大きく異なっている。開扉時間が短いほど、また平均流量が大きいほど捨石は拡がりやすいことがわかる。

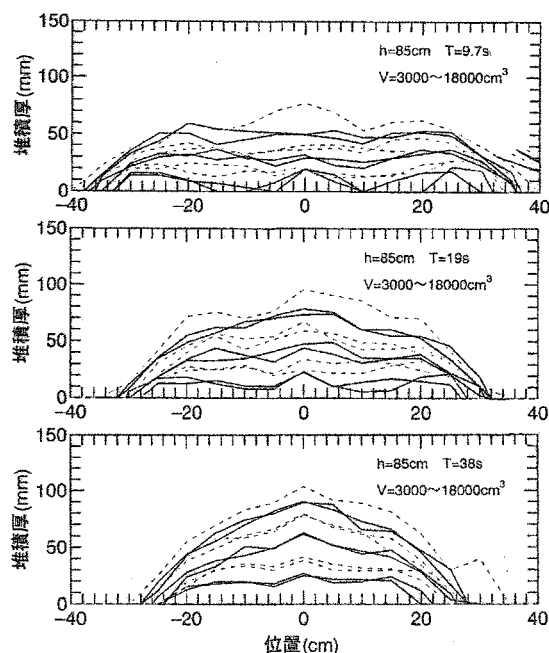


図-6 捨石の堆積形状

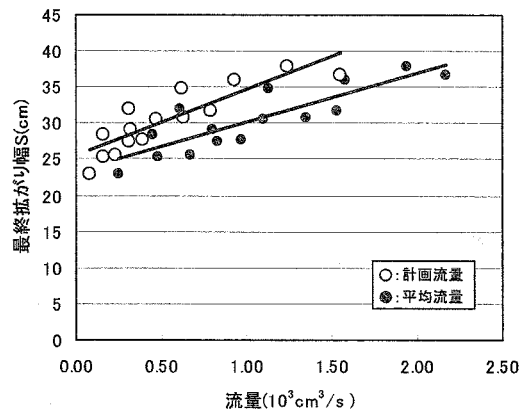


図-7 流量と最終拡がり幅の関係

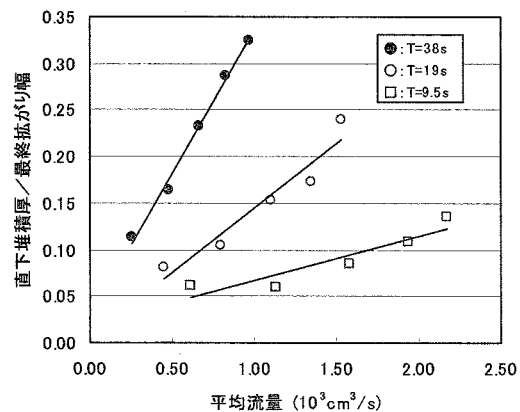


図-8 平均流量と平均堆積勾配の関係

5. 捨石平均流量と堆積形状の関係

前章までの考察から、全開式土運船を用いた捨石投入においては、流出特性としての平均流量を調節することによって、堆積形状が異なることが明らかとなった。そこで、大水深域において、こうした流量調整により堆積形状がどのように変化するかを確認するための検証実験を行った。

(1) 実験方法

実験（以下、シリーズ3と呼ぶ）は、大型環境水槽（3.5m×3.5m×2.5m）を用い、シリーズ2の土運船の開口幅を小さくした模型を使用して行った。実際の海底マウンドを造成する条件として、水深85m、捨石1tの1/40縮尺とした。実験条件は、表-4に示すとおりである。

開扉時間としては、図-5の計画流量の大小2点を代表するように2種類の時間を設定した。このときの計画流量、平均流量（単位 $10^3 \text{cm}^3/\text{s}$ ）は、それぞれ以下になっている。

$$T=7.1\text{s} : T_{\text{end}}=4.2\text{s}, Q_d=1.43, Q_a=2.42$$

$$T=27.7\text{s} : T_{\text{end}}=16.1\text{s}, Q_d=0.37, Q_a=0.63$$

こうした条件のもと、流出から海底に堆積するまでのビデオ撮影と堆積形状の写真撮影を行った。

表-4 シリーズ3の実験条件

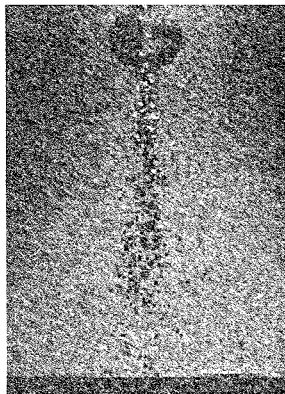
縮尺1/40	現地量	模型量
開口幅	5.0m	0.13m
開口部長さ	18m	0.45m
開閉時間	45.0s	7.1s
	175.0s	27.7s
捨石投入量	650.0m ³	10156cm ³
捨石質量	1.0t	45.6g
水深	85m	2.13m

(2) 落下状況の比較

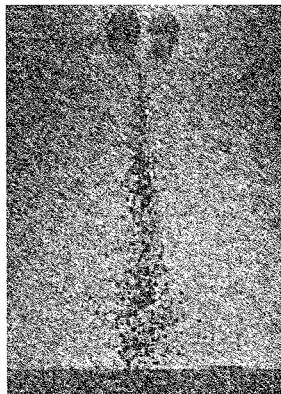
写真-3は、それぞれの流量条件に対し、落下する捨石群の先端が海底に到達した瞬間ならびに全ての捨石が流出し終えた瞬間の状況を示したものである。この間の所要時間は、それぞれ計画流量 $1.43 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$ で0.8s、計画流量 $0.37 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$ で4.3sとなっている。これらの写真から明らかなように、計画流量が大きい場合には捨石は群体として小さい場合には個々の粒子として落下しており、鉛直方向の捨石の連続性には大きな相違がある。

(3) 堆積状況の比較

上述した落下形態から両者の衝突時の運動量の相違は明らかである。その結果、写真-4に示すように、計画流量 $1.43 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$ の場合には、捨石が周囲へ

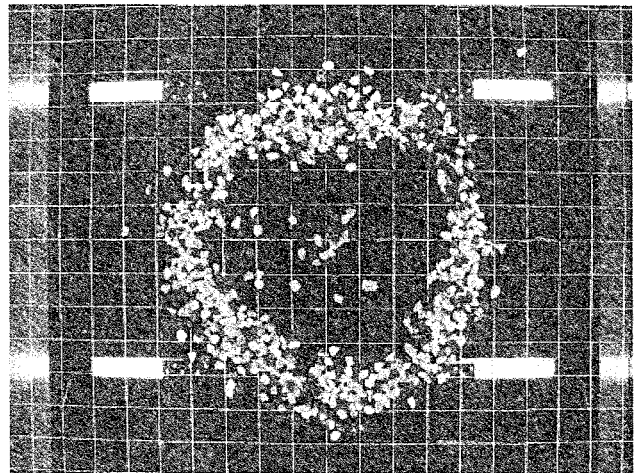


(a) 計画流量： $1.43 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$

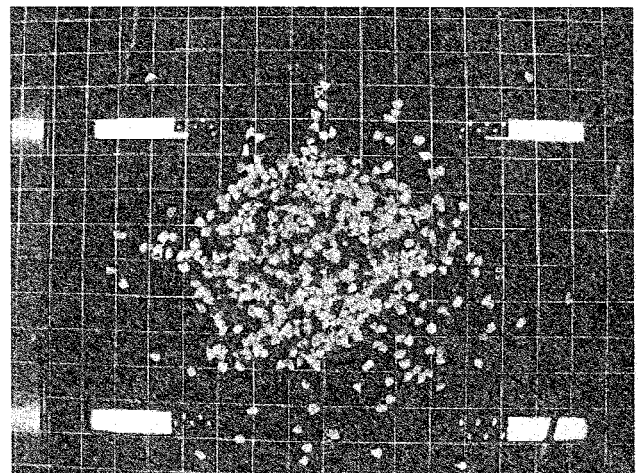


(b) 計画流量： $0.37 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$

写真-3 計画流量と落下状況の関係



(a) 計画流量： $1.43 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$



(b) 計画流量： $0.37 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$

写真-4 計画流量と堆積形状の関係 (10cm格子)

広がりドーナツ状の堆積形状を示す一方、計画流量 $0.37 \times 10^3 \text{cm}^3/\text{s}$ の場合には、直下の堆積厚が大きい一山型となっている。平均直径は前者で約45cm、後者で35cmである。

6. 実工事への適用

(1) 実験結果をふまえた投入管理

2006年の9月から12月の約3ヶ月にわたり、長崎県西部地区五島列島の久賀島北方にて捨石を用いたマウンド造成に携わる機会を得た。水深約85mの海底に、質量1tの捨石約55000m³を投入し、マウンドを造成する工事である。全44回の投入において、投入時間Tendは31s～180sまでと広い分布を示すが、基本的には平均投入時間が35sおよび139sの2つのピークを持つような時間管理を行っている。

図-9(a)は、7投目(Tend=35s, V=1300m³)の堆積形状を示したものである。すでに投入済みの捨石の影響があるものの、ドーナツ状の堆積形状となっている。マウンド下部を施工する21投目までは、こうした計画流量を大きくしての投入を行っている。一方、図-9(b)は、35投目(Tend=116s, V=1300m³)の堆積形

状である。施工終盤に近づきつつあることから、開扉時間を長くして一山型となるように制御している。こうした投入管理の結果、図-10に示すようなマウンドが造成されている。

(2) 施工上の留意点

上述のように、1つの工事において捨石の投入時間を大幅に変える試みを行っている。そのため、開扉時間を長く設定した場合には、風や複雑な流れのある沖合域において船位置を維持することが不可欠となる。そのため、今回の操船システムにおいては、押船と補助船で瞬時の情報を共有できるように、押船側と補助船側を無線LANでつなぎ、各船において共通の施工管理画面を表示させるシステムを採用した。これにより、各船を操作する船長および監督員の認識が統一され、的確な投入指示がなされている。図-9には、投入開始および投入終了時の船の位置もあわせて示している。

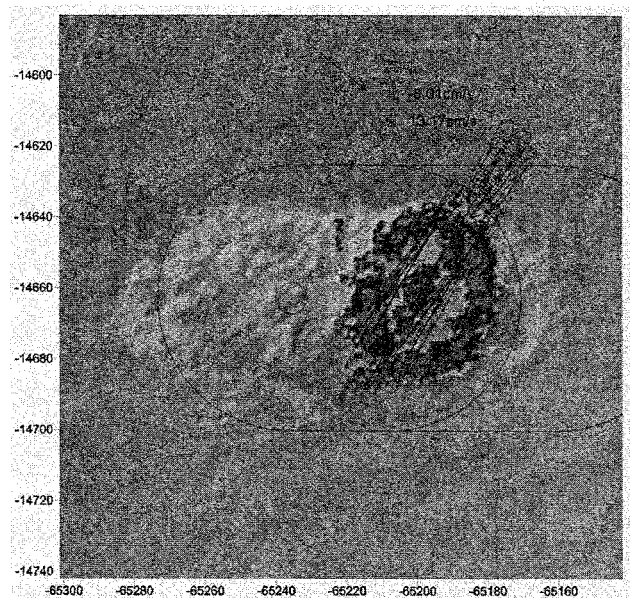
7. おわりに

捨石を基材とした湧昇流マウンド造成のためにお投入管理と最適化についてとりまとめた。前報で示したようにブロックの場合には、投入段数によって堆積形状を制御する方法を提案したのに対し、捨石の場合には、土運船からの捨石の流出特性によって制御できることを明らかにした。また、その指標として、現場で用意に測定可能な計画流量と平均流量を用い、実海域における適用例を紹介した。

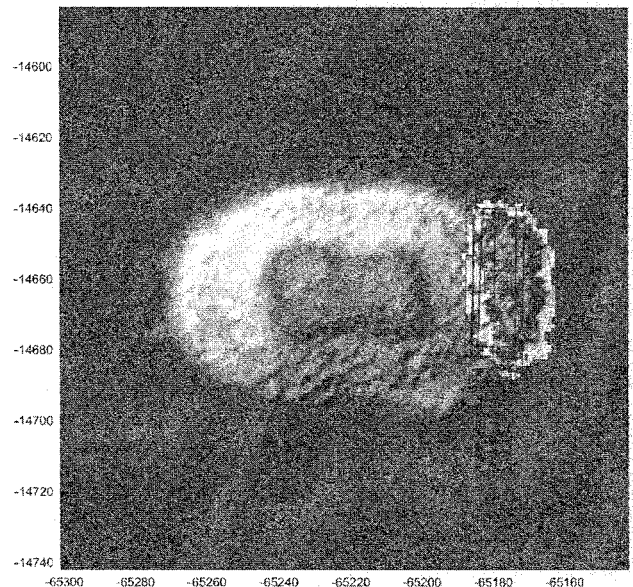
なお、本研究における実工事での適用事例は、長崎県西部地区広域漁場整備工事（五島西部工区）において投入管理部門を担当して施工を行ったものであり、関係された方々に謝辞を表する次第である。また、シリーズ2の実験の解析にあたって有益な助言をいただいた鳥取大学松見教授、千葉工業大学矢内教授に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 大野嘉典, 五明美智男, 浅沼丈夫, 川口毅, 平田賢治: 人工湧昇流マウンド造成のためのブロック投入管理, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 935-940, 2004.
- 2) 五明美智男, 志村豊彦, 大野嘉典, 松見吉晴: 人工湧昇マウンド基材の投入方法の最適化に関する研究, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 337-342, 2005.
- 3) 松見吉晴, 住谷圭一, 浅沼丈夫: 魚礁マウンド構築における投入工法管理システムの開発, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 343-348, 2005.
- 4) 武藤硯夫, 吉井総介, 石田勉: 大規模埋立用底開バージによる土砂落下の研究, 三菱重工技報, Vol. 11, No. 1, pp. 92-104, 1974.



(a) 開扉時間の短いケース (7 投目)



(b) 開扉時間の長いケース (35 投目)

図-9 実工事での適用例

鳥瞰図

視点方向 NE→SW

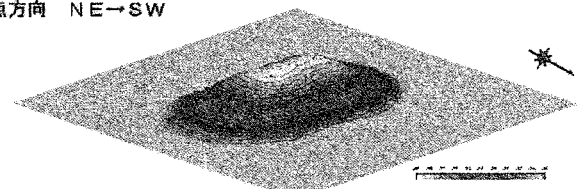


図-10 マウンド完成後の鳥瞰図