

埋立工事等における汚濁拡散防止技術の開発 - 超大型汚濁防止枠船を用いた土砂投入工法 -

内山 一郎* 国栖 広志**

要 旨

汚濁防止枠船を用いた土砂投入工法は、施工海域に鋼製の堅固な枠（汚濁防止枠）を設置し、船内に土運船を誘導し土砂投入する工法である。本工法は、施工水深が大水深となる場所及び潮流が速い場所でも、土砂投入時に発生する濁りを抑制することを開発の目的とし、水理模型実験・数値シミュレーションにより性能確認・防止効果の改善を行ってきた。また昨年度は、汚濁防止枠船の性能確認を目的とした現地実験を行った。本報では、汚濁防止枠船を用いた土砂投入工法の概要と水理模型実験・数値シミュレーションならびに現地実験で得られた汚濁防止枠船の性能について報告する。

1. まえがき

航路や泊地の浚渫土の処分あるいは人工島の建設などの埋立工事等を行う際、底開式または全開式の土運船により土砂を直接海域に投入する工法が採用されてきた。しかしながら、土運船を用いて海洋に直接土砂投入する場合、落下する過程で濁りが発生する。通常、この濁りが周辺海域へ拡散するのを防ぐために工事区域の比較的広い範囲に汚濁防止膜を設置して対処しているが、水深が深い場合には膜の固定方法が困難になることや、潮流の早い海域では、膜が流されて十分な効果が得られない

といった問題が発生する。そこで、施工水深が大水深となる場所及び潮流が速い場所でも、土砂投入時に発生する濁りを抑制することを目的とし、汚濁防止枠船（写真 - 1 参照）を用いた土砂投入工法の開発を行った。本工法の開発にあたっては、水理模型実験および数値シミュレーションにより汚濁防止枠船の性能確認・防止効果の改善等を行い、現地にて性能確認のための現地実験を実施した。



写真 - 1 汚濁防止枠船（沈降時）

* 技術研究所 ** 土木設計部

2. 工法概要

本工法は、土砂投入時に発生する濁りの拡散及び海底に沿って広がる濁りを抑制するのが目的であり、汚濁防止枠船自身の噴水及び汚濁防止枠船から垂下したスリットカーテンにより、土砂投入に伴い発生する濁りの拡散を抑制することが可能である。防止枠船の噴水は、自船の浮力調整機能により8m～20mまで変化させることができる。また、スリットカーテンは6mの高さを有しており、海底面から防止枠船の底部までの種々の水深に変化させることができる。

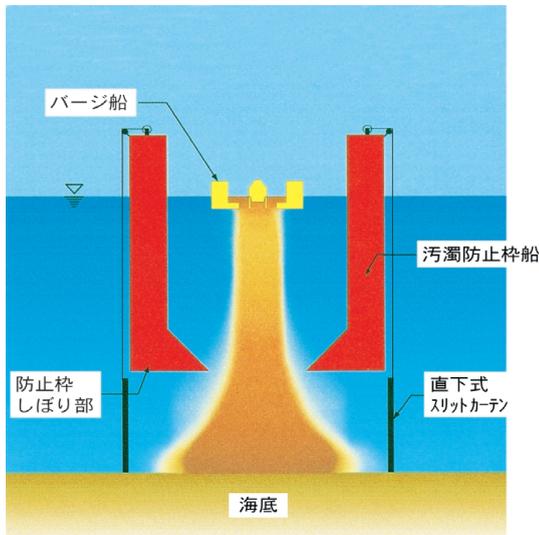


図 - 1 汚濁防止枠船による土砂投入工法の概念図

2.1 工法の特徴

本工法の主な特徴を整理すると、以下の通りである。濁りの影響範囲が汚濁防止枠船の周辺に限定され、施工範囲を狭くすることができる。したがって、通常船舶の航行も可能である。

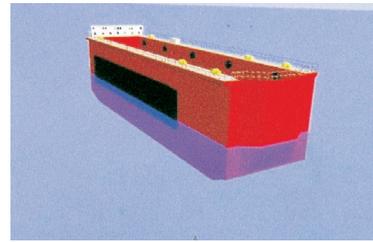
ある程度の外力(波浪・潮流)を受けても濁りの流出を抑制できる。建造時の設計条件は、潮流1.5ノット、風速55m/s、波高3mである。

本工法の作業限界は、主に土運船団の作業限界により規定され、高波浪時でも汚濁防止枠船は避泊しない。施工区域が広範囲で施工数量が多くなるほど(工期が比較的長い場合)濁りの防止対策として汚濁防止膜による方法と比較し、維持管理費が大幅に低減でき、経済的に有利となる。

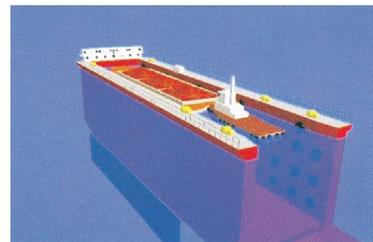
施工・品質管理としては、GPSによる船位測定装置および海底探査ソナーにより、自船の位置および投入出来形をディスプレイ上に表示し、記録することができる。

2.2 施工手順

本工法の施工手順を以下に示す。



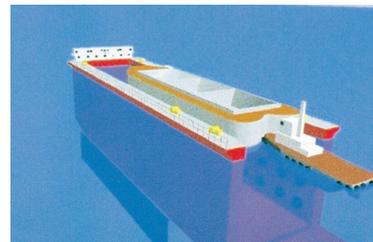
(1) 汚濁防止枠船の設置



(2) 土運船の入渠



(3) 土砂の投入



(4) 土運船の出渠

図 - 2 施工手順

3. 水理模型実験

3.1 水理模型実験の目的と概要

水理模型実験は、汚濁防止枠の防止効果の確認ならびに汚濁防止枠の改良による防止効果向上を目的として、平成7年度と平成9年度に行った。実験に用いた水槽の諸元・実験内容・計測項目等を以下に示す。

水槽諸元および模型縮尺

- ・水槽諸元：2.0m(B)×4.0m(L)×1.0m(H)
- ・模型縮尺：1/100(フルードの相似則による)

実験内容

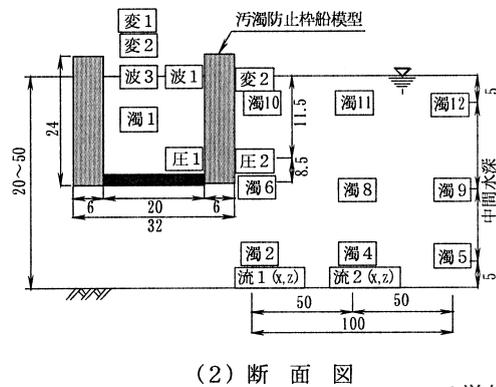
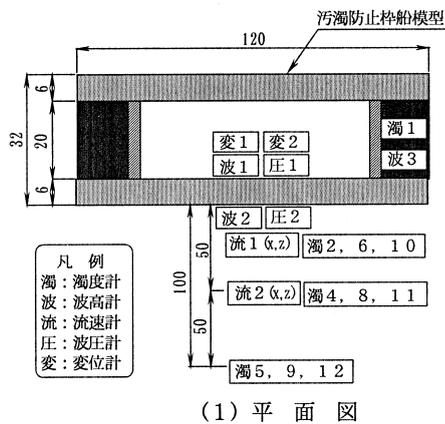
- ・汚濁防止柵の有無による濁りの比較
- ・汚濁防止柵内外の水位変動計測及び水位変動の抑制
- ・汚濁防止柵周辺の流速計測
- ・土運船の土砂投入時の挙動把握

計測項目および計測方法

- ・濁度：濁度計、カメラ、ビデオカメラ
- ・水位変動：波高計、ビデオカメラ
- ・流速：流速計
- ・側壁に作用する圧力：波圧計
- ・防止柵の変位：変位計

濁度計などの計器類の配置は、図 - 3 の通りであり、0.1s 間隔でデータを取得した。またカメラ・ビデオは水槽の前面・側面・上方に設置した。実験条件として、投入土砂は浚渫土(比重2.65、中央粒径10 μ m)を使用し、投入土砂量は1000cm³で一定とした。防止柵の喫水・構造ならびに実験水深を数通り変化させ、投入開始から静止状態になるまでの一連の過程を観測した。

実験の概略を示すため実験写真の抜粋を写真 - 2 および写真 - 3 に示す。なお、ここで示した写真は後の数値シミュレーション結果と対応する。



(単位: cm)

図 - 3 実験装置の概略図

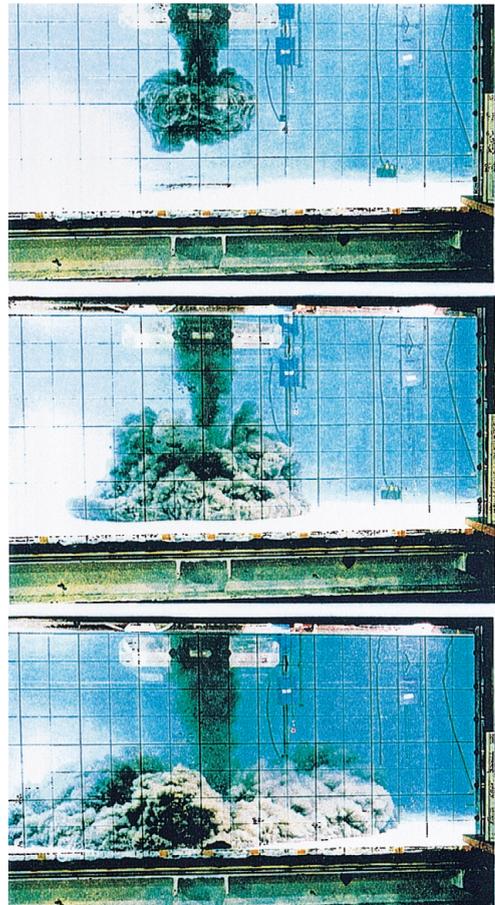


写真 - 2 投入土砂挙動の実験写真 (柵無し)

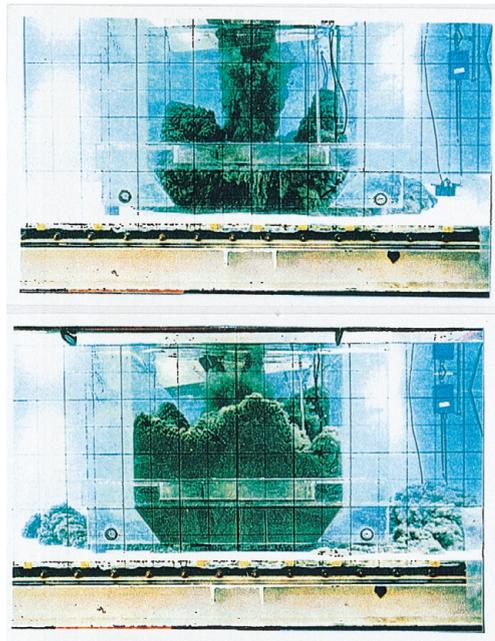


写真 - 3 投入土砂挙動の実験写真
(防止柵海底面から1m浮上)

3.2 水理模型実験結果

実験より得られた課題点・改善策および結論を以下に整理する。

(1) 投入土砂の海底面への衝突評価

海底シルト層の有無による実験を行った結果、シルト層の有無による土砂巻き上げに関して、顕著な差異は認められなかった。

(2) 土砂の水平方向への拡散防止対策

図-1の概念図に示したスリットカーテンを模擬し、防止枠底部にスカートを取り付けた実験を行った結果、濁りの防止効果が確認できた。なお、実験ではスリットカーテンは底面に固定した状態で観測を行ったが、実用上、スリットカーテンの位置を変えることが可能な構造を採用した。

(3) 汚濁防止枠内の濁りの排出促進対策

土砂投入により汚濁防止枠内に濁りが滞留することが実験により明らかになった。改善策として、鉛直下向きの水中ノズルを用いて滞留した濁りの排出促進を図ったが、大容量のポンプが必要となることがわかった。汚濁防止枠内の濁りの排出促進対策については、将来的に経済性も含めて検討する必要がある(図-4参照)。

(4) 土運船出入時の濁りの流出対策

汚濁防止枠内に滞留した濁りが、土運船の入出渠時に流出することがわかった。改善策として、防止枠の内側へ向かう水中ノズルを用いて、濁りの流出防止を図ったが、この場合も大容量のポンプが必要となった。この問題に関しても、将来的に経済性も含めて検討する必要がある(図-5参照)。

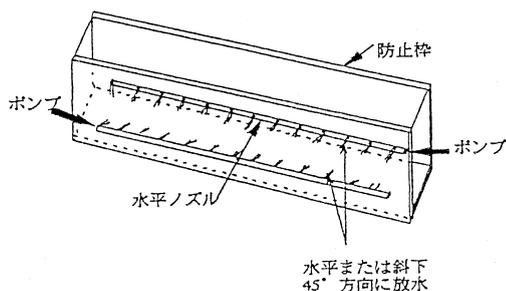


図-4 汚濁防止枠内の濁りの排出促進対策

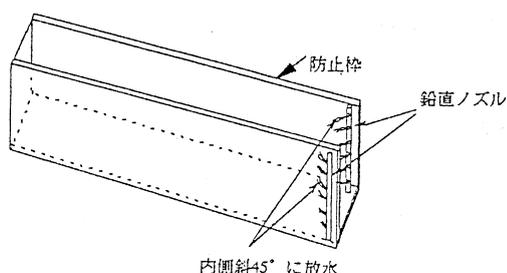


図-5 土運船出入時の濁りの流出対策

(5) 土砂の水中落下速度低減対策

土砂の水中落下速度を低減する目的で、汚濁防止枠の底面開口部を絞った場合あるいは底面開口部にチェーン等を取り付けた条件で実験を行った。設計および維持管理の観点から、図-1の概念図に示すように底面開口部を絞った形状に汚濁防止枠を改造する方が妥当と判断した。なお底面開口部の開口率は75%程度が最適という結論が得られた。

(6) 潜堤を併用した場合の濁りの防止効果

水深40mで天端水深30m・法勾配1:2の潜堤を併用した実験を行った結果、水平方向の濁りの拡散に対して防止効果が確認された。実際の工事でも、潜堤を併用する方が望ましいと判断した。

4. 数値シミュレーション

4.1 数値シミュレーションの概要

水理模型実験でも示した通り、浚渫土を大量に投入する場合、土砂の沈降に伴う浮遊懸濁物質の拡散は非常に顕著である。また水中を落下する土砂の挙動は、土砂粒子と周囲流体との複雑な相互作用が大きく、水と砂との二層混相流の問題と考えることができる。そこで数値シミュレーションモデルでは、浮遊懸濁物質の拡散過程を鉛直2次元の数値解析モデルで以下のように構築し、予測モデルの確立を図った。

(1) 基礎方程式

鉛直2次元の流れ場として、水と砂の混合流体の運動を表す連続式及び非定常圧縮流体のNavier-Stokesの運動方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho u}{\partial x} + v \frac{\partial \rho u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + u \frac{\partial \rho v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

ここに、 p は圧力、 u と v はそれぞれ水平 x 及び鉛直 z 方向の流速、 μ は水と砂の混合流体の粘性係数である。また、浮遊懸濁物質の拡散過程は次の物質輸送方程式を適用した。

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + u \frac{\partial \rho C}{\partial x} + v \frac{\partial \rho C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \omega_0 \frac{\partial \rho C}{\partial z} \quad (4)$$

ここに、 C は浮遊懸濁物質の濃度、 w_0 は浮遊粒子の沈降速度、 D_x 及び D_z はそれぞれ水平 x 及び鉛直 z 方向の拡散係数である。

以上の方程式の中で ρ は水と砂の混合流の密度であり、投入土砂の水中運動によって時間的・空間的に変化する。また、その勾配は周囲流体に流れを誘起する駆動力である。

(2) 境界条件

水理模型実験を対象として、物理座標での解析領域における u, v, p 及び C に対する境界条件は次のように与える。

まず、自由水面において、時間的に変動する水表面の位置は次の運動学及び力学的条件で定める。

$$v = \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5)$$

$$p = 0 \quad (6)$$

式中の $h(x, t)$ は全水深である。また、水表面での水平流速と懸濁物質の濃度は次式より求める。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

次に、底面では固定床上的の non-slip 条件を与える。

$$u = v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

側面境界においては、以下の固定壁条件を課す。

$$u = v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

数値計算に際しては、高濃度沈降粒子団と浮遊懸濁物質をそれぞれマーカー粒子及び初期濃度として所定の場所に配置して計算を始める。また自由水面の時間・空間的な変動を簡単に取り扱うため、物理座標(デカルト座標系)から計算座標(座標系)に座標変換し、計算を行った。

4.2 数値シミュレーション結果

(1) モデルの再現性の検証

直投土砂運動の解析モデルの妥当性を確認するため、表-1に示す条件のもとで、計算した流速及び濁り濃度の空間分布及び経時変化に対して、実験結果による検証を行った。

表-1 計算条件

水深(cm)	40.0
長さ(cm)	400.0
土砂量(cm ³)	1000.0
含水率(%)	145.0
体積比(%)	2.0
粒子数(個)	600

図-6は写真-2の実験写真と対応して、土砂投入により発生する誘起流れと濁り濃度の空間分布の計算結果を示したものである。また図-7には、P2, P3の位置での流速及び濁り濃度の経時変化の計算値と実測値を比較したものである。これらより、本モデルにより計算した流速及び濁り濃度は実験結果をよく再現しているものと考えられる。

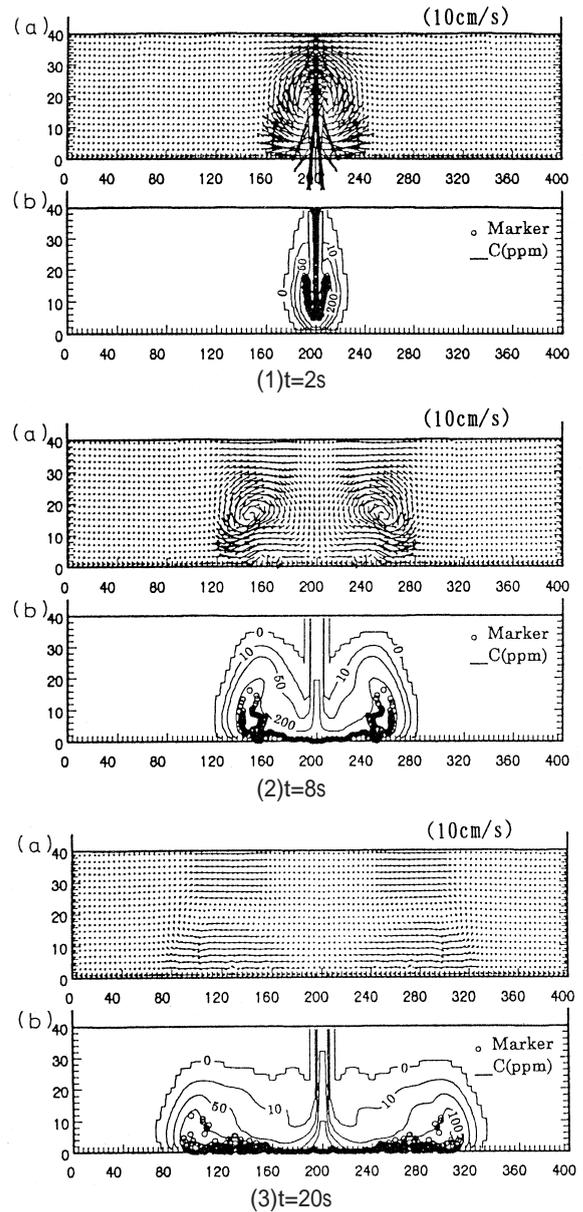
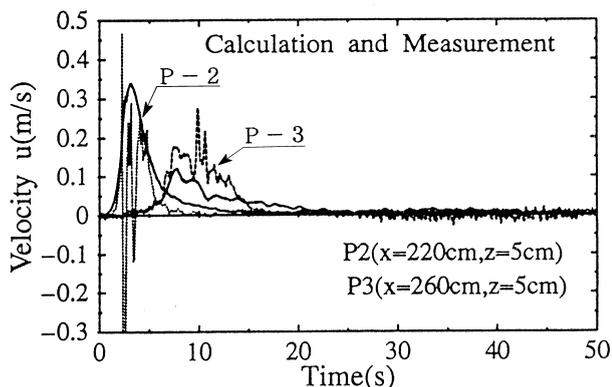
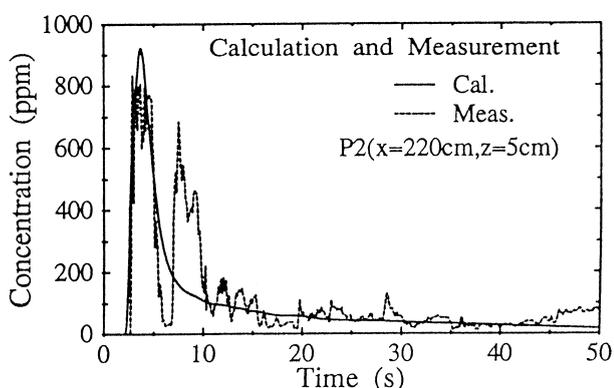


図-6 計算した流速および濁りの空間分布(枠無し)



(1)流速の比較



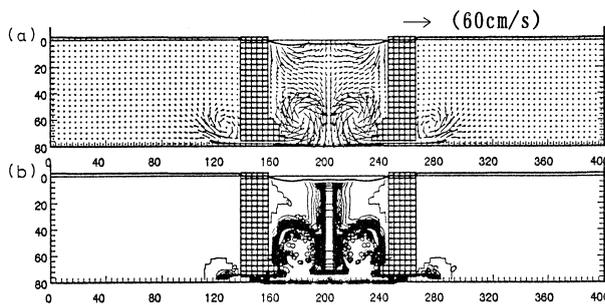
(2)濃度の比較

図 - 7 流速・濃度の計算値と実験値の比較 (枠無し)

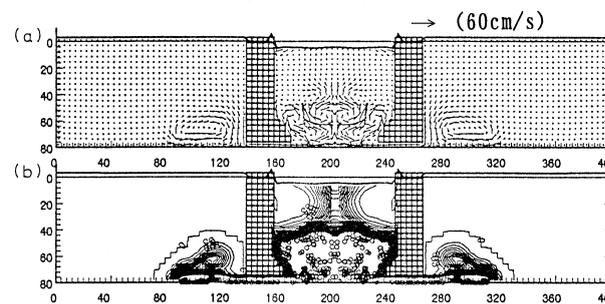
(2) 汚濁防止枠の効果の検証

図 - 8、図 - 9 は、汚濁防止枠が海底面より 1 m 浮上した場合、海底面より 5 m 浮上した場合の計算結果として、土砂投入により発生する誘起流れと濁り濃度の空間分布を示したものである。なお の計算結果は前出の写真 - 3 の実験写真と対応する。これらの計算結果より、汚濁防止枠がある場合も土砂投入により発生する濁りの挙動をよく再現していると判断できる。

今後、汚濁防止枠船を用いて土砂投入を行う際に、施工水深、土運船寸法、投入土砂の土質等の条件がわかれば、本モデルにより濁りの挙動を予測することが可能である。

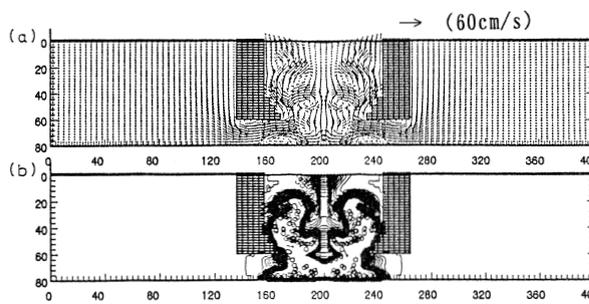


(1) t = 1.5 s

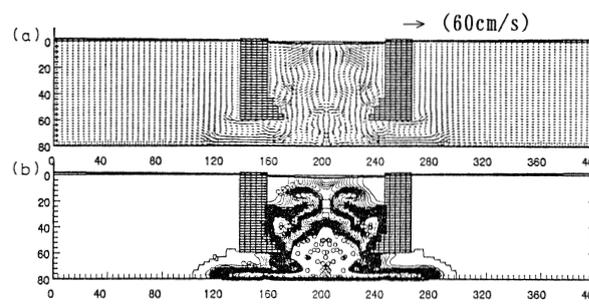


(2) t = 3.0 s

図 - 8 計算した流速および濁りの空間分布 (汚濁防止枠海底面より 1 m 浮上)



(1) t = 2.5 s



(2) t = 4.0 s

図 - 9 計算した流速および濁りの空間分布 (汚濁防止枠海底面より 5 m 浮上)

5. 現地実験

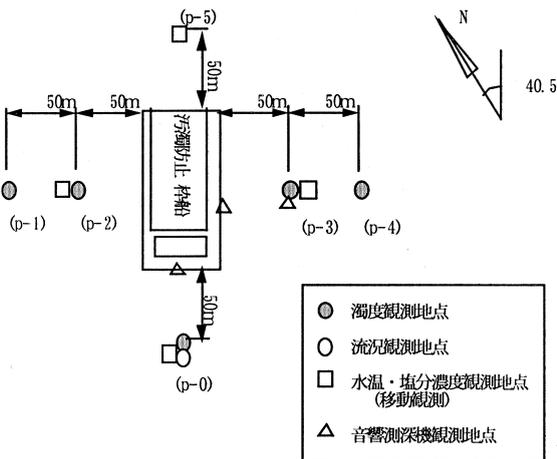
5.1 現地実験の目的と概要

横須賀市馬堀海岸沖で、汚濁防止柵船を用いた土砂投入工法により、現在人工漁場の建設が行われている。施工条件として、汚濁防止柵船の喫水25mに対して、水深が40m前後であるため、底層部における濁りの移流拡散は当然想定された。また、汚濁防止柵船の基本的な性能は、前述の水理模型実験でかなり明確になっていたが、実験自体は静水中で行った実験である。したがって、潮流等の影響があり、海底地形が急峻な馬堀海岸沖のような現地で、汚濁防止柵船が水理模型実験で得られたような性能を発揮できるか否かを確認する必要があった。

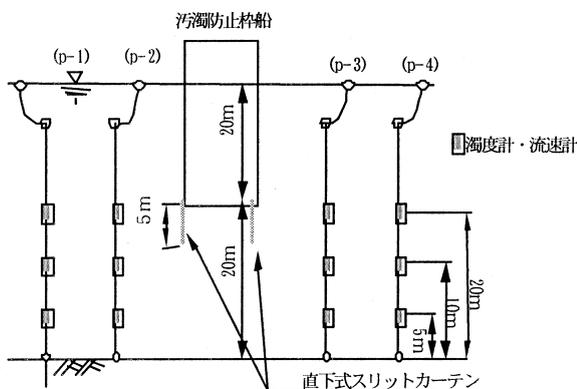
そこで、汚濁防止柵船の性能確認のための現地実験を平成10年9月に実施した。現地実験における計測器類の設置状況を図-10に示し、観測方法について表-2に示す。さらに、各観測地点における水深と投入土砂の土質条件を表-3および表-4に示す。なお投入土量は1,000m³程度である。

表-2 観測方法

流況・水温の定点観測	
測定間隔	2.0s 間隔で連続観測
使用計器	ACM-8M (アレック電子(株)製)
測定箇所	P-0, 鉛直方向に3深度(海底面上5m, 10m, 20m)
濁度の定点観測	
測定間隔	2分毎に10個のサンプリング(2s 間隔)
使用計器	MTB-16K (アレック電子(株)製)
測定箇所	P-0 ~ P-4の5地点で鉛直方向に3深度(海底面上5m, 10m, 20m)
水温・塩分濃度・濁度の移動観測	
測定間隔	土砂投入の前後
測定箇所	P-0, P-2, P-3, P-5の4地点で鉛直方向に5深度(海底面上5m, 10m, 20m, 水面下1m, 5m)
音響測深機による投入土砂の陰影観測	
測定間隔	土砂投入の前後
測定箇所	P-3および汚濁防止柵船の側壁部・船首部の3地点



(1) 平面図



(2) 断面図

図-10 計測器配置状況図

表-3 各観測地点における水深

観測地点	水深 (m)
P - 0	36.0
P - 1	39.0
P - 2	42.0
P - 3	45.5
P - 4	40.0

表-4 投入土砂の土質条件

土粒子比重	2.63
中央粒径 (mm)	0.15
含水比 (%)	113

5.2 現地実験結果

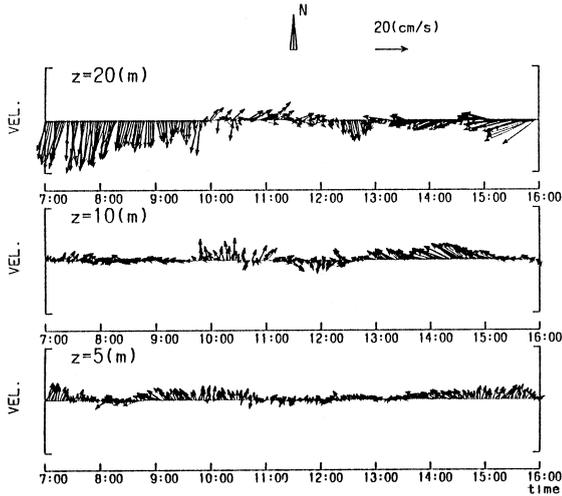
(1) 流況・濁度の現地観測結果

まず、現地実験で取得された流況・濁度の時系列を図-11、12に示す。流速は、海底面上20mの位置(z=20m)で最大40cm/s程度であり、水深が大きくなるにつれて小さくなる傾向にある。また流向については、海底面上20mと10mの位置で逆転している。これは、主として防止柵船の喫水が影響しているものと考えられる。水温の観測結果でも、温度が急変している密度成層等は観測されなかった。

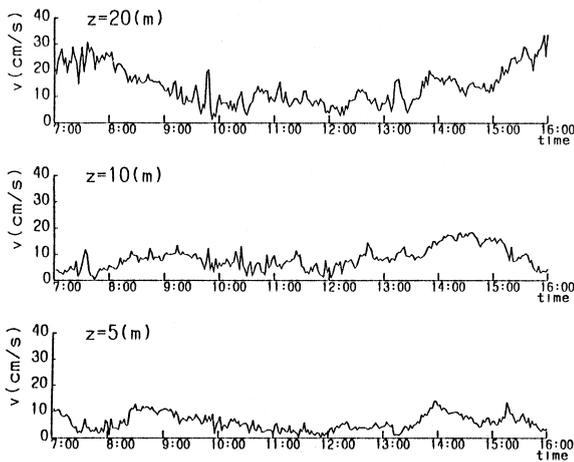
一方、図-12の濁度時系列より、濁度のバックグラウンドが0~20ppmであり、土砂投入に対応して海底面上5mと10mで濁度が大きく変化しているのがわかる。

しかし、海底面上20mでは土砂投入による濁りはほとんど観測されず、濁りの巻き上げ高さが10～20mであることがわかり、防止棹船の喫水による濁りの防止効果が確認できている。

なお調査当日の波浪条件は、有義波高で0.5m以下であった。



(1) 流速ベクトル図



(2) 流速値

図 - 1 1 現地実験で取得された流況の時系列

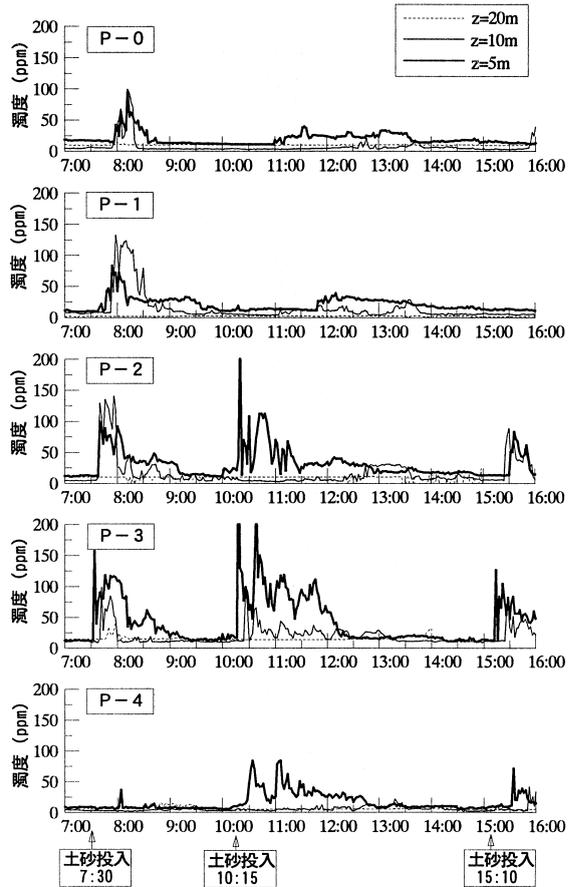


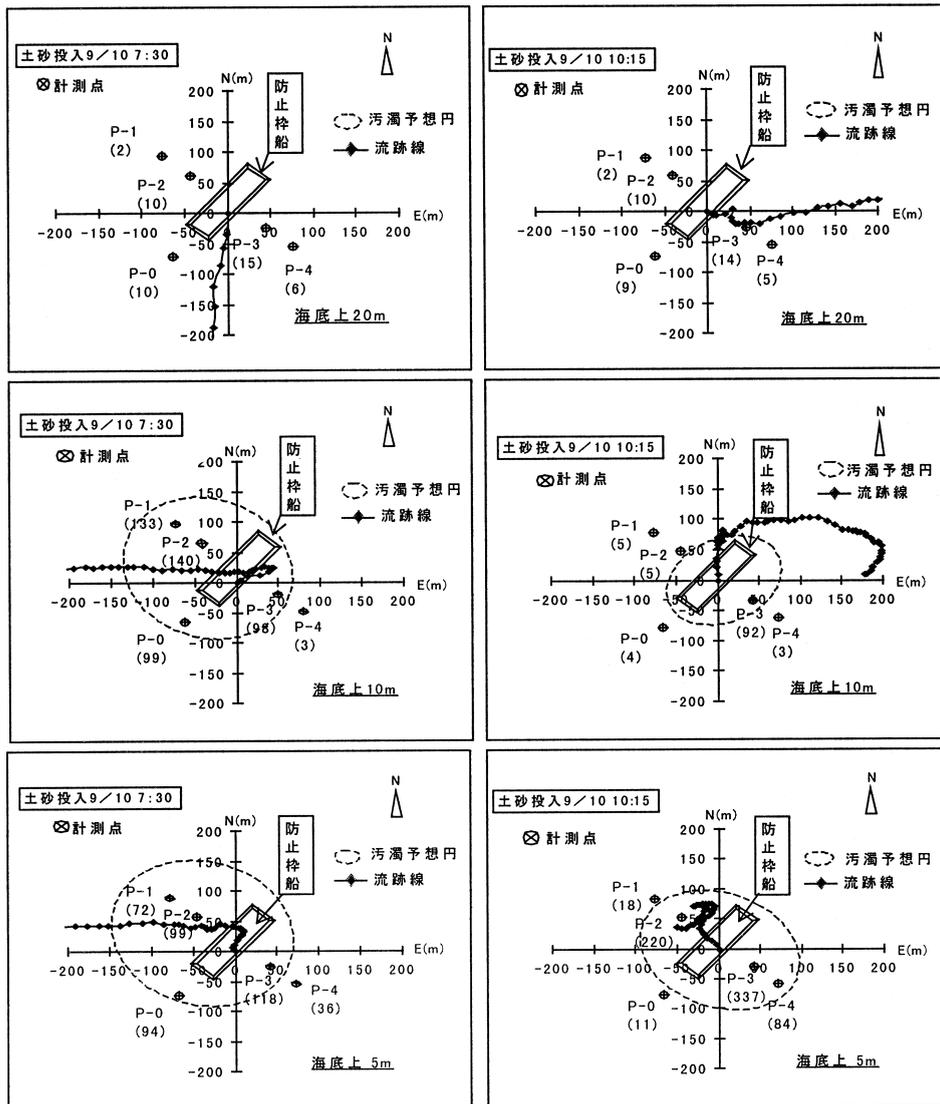
図 - 1 2 現地実験で取得された濁度の時系列

(2) 現地での汚濁発生状況

現地で取得された濁度と流況の時系列を基に、汚濁発生の予想円と流跡線とを整理した結果が、図 - 1 3 である。

図中の流跡線は、P - 0 で得られた流速値を施工区域の代表値とみなし、土砂投入時に棹船中央にあった水粒子の動きを追跡したものである。汚濁予想円は、濁度の時系列より濁りのピークが観測された地点を包括するように描いたものである。例えば、海底上20mで汚濁予想円が無いのは、濁りのピークが観測されなかったことを意味する。

濁りが潮流などの外力の影響を受けて輸送された場合、濁りの拡がり方は流跡線の方と一致するはずである。しかしながら、流跡線の方と濁りの拡がり方は一致しないため、土砂自身の投入に伴い発生する誘起流れにより濁りが広がっていると推測される。以上の結果から、現地での濁りの挙動は、むしろ水理模型実験で観測された濁りの挙動と類似していると考えられる。



() : ピーク濁度 (ppm)
 (1) 9/10 7:30 投入 (2) 9/10 10:15 投入

図 - 1 3 汚濁発生状況と流跡線

以上の結果を基に、現地での汚濁発生機構についてまとめると以下ようになる。

汚濁防止枠船の噴水より上層（海底面より20m上層）に、土砂投入に伴い発生する濁りの拡散・浮上は観測されず、汚濁防止枠船による濁りの防止効果が確認された。

現地での汚濁発生の主たる要因として、土砂投入に伴い発生する誘起流れと濁りの移流拡散が挙げられ、水理模型実験結果と類似している。

土砂投入に伴い発生する濁りの継続時間は1～2時間程度であり、投入後もほぼ投入前の濁度に落ち着いている。

濁りの影響範囲は、下層部でも半径150m～250mの範囲内にとどまっていると推定できる。

6. あとがき

本報で、汚濁防止枠船を用いた土砂投入工法の概要と水理模型実験・数値シミュレーションならびに現地実験で得られた汚濁防止枠船の性能について報告した。土砂の投入を汚濁防止枠船の中で行うことにより、濁りの拡散を抑制することは可能であり、大水深の海域に埋立工事等の施工を行う際には有効な工法であることが確認された。

しかしながら、汚濁防止枠船の性能自体になお改善の余

地があるのは否めない。一つの課題は、水理模型実験の章でも記したが、土砂投入により発生する汚濁防止柵船内の濁りの滞留対策である。図 - 4、図 - 5 に示した対策も考えられるが、今後、経済性も含めて検討する必要がある。

なお、本工法は大新土木(株)との共同研究である。

謝 辞

本工法の研究開発を行うに当たり、運輸省港湾技術研究所の蔣勤氏(前 五洋建設(株))と大新土木(株)の田村良和氏からは貴重な助言とご支援を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 蔣 勤・国栖広志・渡辺 晃: 土砂投入に伴う汚濁の拡散過程に関する数値シミュレーション、海岸工学論文集、第44巻、pp.1031 ~ 1035、1997
- 2) 鶴谷広一・村上和男・中川康之・安井章雄: 汚濁防止膜周辺の土砂投入機構に関する現地観測、海岸工学論文集、第43巻、pp.1146 ~ 1150、1996
- 3) 金山 進・田口 智・清水琢三・山田富朗・石井貴之・京谷 修: 沈降中の泥塊からの汚濁発生量について、海岸工学論文集、第41巻、pp.1001 ~ 1005、1994

- 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
- 5) 室田 明・中辻啓二・玉井昌宏・町田博紀: 海域での土砂投下における密度流現象、海岸工学講演会論文集、第35巻、pp.777 ~ 781、1988
- 6) 矢内英二・加藤 謙: 外洋投棄した底泥の拡散過程、海岸工学論文集、第37巻、pp.774 ~ 778、1990
- 7) 小川 元・竹内益雄: 土捨船による投棄土砂の分散、土木学会論文報告集、第161号、pp.39 ~ 49、1969
- 8) 市原正史・大村哲夫・福代倫男・野澤良一: 東京湾の潮流観測とシミュレーション、海岸工学論文集、第27巻、pp.448 ~ 452、1980
- 9) 村上和男・森川雅行: 東京湾の長周期流れの特性について、沿岸海洋研究ノート、第25巻、pp.146 ~ 155、1988
- 10) 蓮沼啓一: 東京湾における流動の特徴、沿岸海洋研究ノート、第16巻、pp.67 ~ 75、1979
- 11) 宇野木早苗: 日本全国沿岸海洋誌、東海大学出版会、第9章東京湾 物理、pp.344 ~ 361、1985
- 12) Johnson, B. H. et al.: Physical model tests of dredged material disposal from split-hull barge and multiple bin vessel, Technical Report DRP-93-1, US Army Engineering Waterway Experiment Station, Washington, DC. 1993