

グラブ浚渫で発生する流れに関する研究

RESEARCH ON FLOW GENERATED BY GRAB DREDGING

松田 信彦¹・五明 美智男²・松原 雄平³・檜谷 治⁴・黒岩 正光⁵

Nobuhiko MATSUDA, Michio GOMYO, Yuhei MATSUBARA,

Osamu HINOKIDANI, Masamitsu KUROIWA

¹正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1丁目3)

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

³正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

⁴正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

⁵正会員 博(工) 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

Recently, it is found that the bottom sediments of many harbors of Japan are contaminated with the dioxin. Extremely fine material such as clay and silt adsorbs the dioxin, and has a tendency to quickly go into suspension during the dredging process. Therefore, sediment resuspension largely depends on the dredging technique adopted. In the grab dredging, the operation of a bucket controls the dispersion of dredged material.

The purpose of this research is to make the numerical model that is considered the resuspension mechanism, and to reduce the sediment resuspension of the grab dredging. As the first step, the flow of the bucket was reproduced by using the moving boundary model.

Key Words : dioxin, sediment resuspension, grab dredging, moving boundary model

1. はじめに

近年、ダイオキシン類による水底の底質の汚染に係る環境基準が新たに施行され、底質ダイオキシン類対策が緊急の課題となっている。ダイオキシン類は粒径の細かい土粒子に付着しやすい性質があることから、底質ダイオキシン類対策工事では、二次汚染を防止するために濁りを極力抑える必要がある。しかし、工事に伴う濁りの挙動は複雑で、特に発生源での低減化に関する研究はあまり進んでいない。

従来の研究では一般水域への濁りの影響を少なくすることを目的としていることから、汚濁防止膜に関する研究^{1)~5)}や数値シミュレーションによる汚濁拡散予測⁶⁾が中心である。また、濁りの低減化に関する研究として、小岩⁷⁾らは密閉グラブ浚渫の運転条件を変えて濁りへ及ぼす影響について調べている。バケットの巻上げスピードと一回当たりのつかみ土量の積による濁りの評価から、濁りが最小になる運転条件があるとしている。しかし、バケットの巻上げスピードが、どのようにして濁りの発

生に関係しているのかについては、十分な検討を行っていない。

著者らはダイオキシン類対策工法の一つであるグラブ浚渫について、濁りの低減化を目的とした研究を続けている。グラブ浚渫はバケットの動きによって、濁りの発生原因が異なり、図-1のように浚渫サイクルを7個の動作(①巻下げ、②着底、③掘削、④地切り、⑤巻上げ、⑥旋回、⑦土捨て)に分割して考えることができる。

前報で報告した現地実験⁸⁾では、グラブ浚渫時の濁りの特性として下層の濁度が高く、バケット着底時の落下速度が下層の濁度に影響していることが明らかになった。

本報では、はじめに浚渫サイクル中の汚濁発生要因の中で特に重要と考えられる、バケット着底時の流況について模型実験を行い詳しく調べた。また、濁りの低減化を検討する上で必要になる、汚濁発生機構を考慮した数値解析モデルを開発するために、バケット着底時に発生する流れの再現計算を試みた。

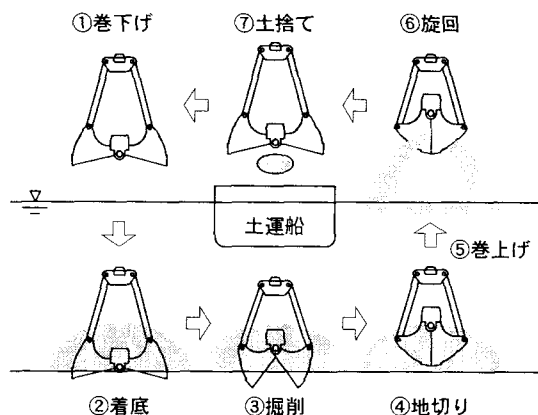


図-1 浚渫サイクルと汚濁発生要因

2. 実験の概要

図-2は現場実験で使用したバケットの1/10模型である。密閉バケットは図中の斜線部分が密閉部になり、普通バケットは内板を外して実験を行った。バケットは図-2のように口が開いた状態で自由落下させ、バケットに取り付けた重りを調整することによってバケットの落下速度を3段階に変化させた。また、水中にバケットを入れた時に、バケット内に空気が入っていると、空気の浮力で落下速度が一定にならないので、バケットに小さな穴を開けて、バケットの内の空気が完全に抜けるようにした。

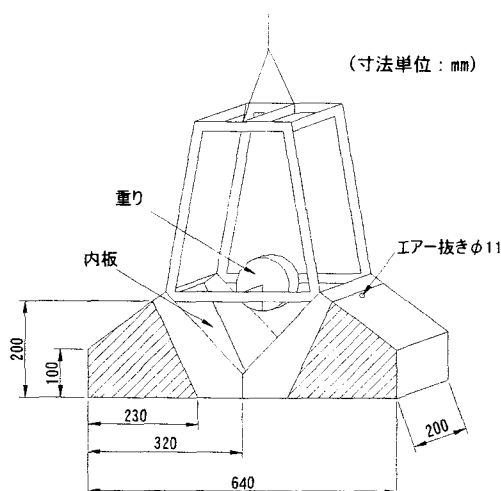


図-2 バケット模型

実験に使った水槽は、長さ3.5m×幅3.5m×高さ2.5mのガラス2面張りの大型水槽で、水槽側面からビデオ撮影を行った。水槽の底面には10cm×10cm格子状に線を引いた、薄いゴムマットを敷き固定床として実験を行った。水深は現地実験の水深を考慮して1.0mとした。バケットの落下高さについては、密閉バケットの内部の空

気が完全に抜けた状態で落下するように、底面から0.8mの高さから落下させた。

実験は表-1の示す通りで、密閉バケットと普通バケットの重さ変えた6ケースで行った。流速の測定については、図-3のように流速計2台を底面から0.1mと0.5mの高さでアングルに固定し、バケットの中心からの距離(0.5m, 0.7m, 0.9m)を変えて、鉛直2次元流速を測定した。以下、流速の計測位置については①～⑥を用いて説明する。測定による誤差を小さくするために、各ケース5回ずつ測定し平均値を用いることにした。

また、バケットの着底時の底面からの濁りの発生状況を見るために、7号硅砂(土粒子密度 $\rho_s=2.635$, $D_{50}=0.127\text{mm}$)を水槽の底面に敷いて実験を行った。

表-1 実験ケース

	密閉バケット			普通バケット		
実験ケース	W1	W2	W3	O1	O2	O3
バケット重量 (kg)	11.0	16.0	20.1	10.1	15.2	19.2
落下時間 (s)	2.0	1.5	1.3	2.0	1.4	1.2
平均落下速度 (m/s)	0.40	0.55	0.64	0.41	0.58	0.68

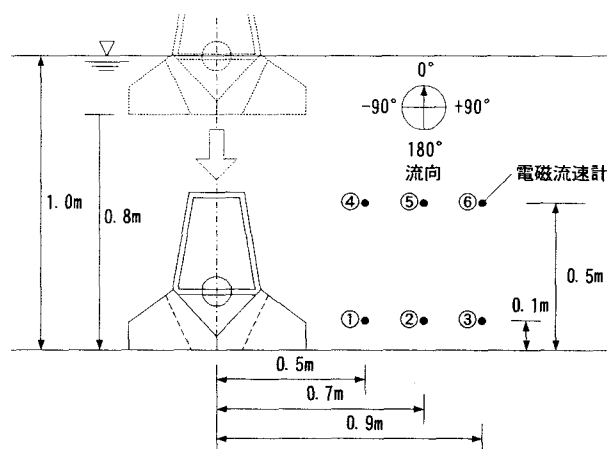


図-3 電磁流速計の設置位置

3. 実験結果

写真-1は、密閉バケットを用いた実験ケースW3の写真で、バケット落下開始から1.5秒後の様子である。

バケットは落下開始から1.3秒で着底し、バケットの着底によって水槽の底面に敷いた硅砂を巻き上げながら、底面に沿うようにして四方に広がり拡散する。現地実験で下層の濁度が高かったのは、このような底面に沿った濁りの拡散によるものであると考えられる。

図-5は実験ケースW3とO3において、バケット中心から

0.5m離れた下層①と中層④で計測した流速から、バケットの落下速度と最大流速の関係を調べたものである。下層0.1mと中層0.5mで最大流速が、バケットの落下速度に比例して増加している。現地実験で濁度がバケットの落下速度に比例して増加していたことを考慮すると、濁度の発生要因に最大流速が影響していると考えられる。また、密閉バケットと普通バケットを比較すると、生じる最大流速は同程度である。

図-6は実験ケースW3とO3において、バケット中心からの距離と最大流速の関係について調べたものである。中層に比べて下層の流速が大きく、中心から離れるにつれて減衰する。

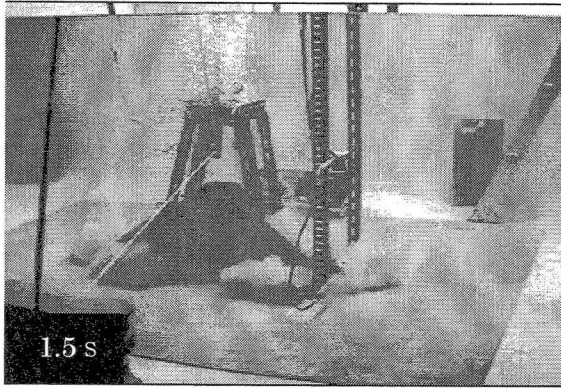


図-4 実験状況 (W3) 1.5秒後

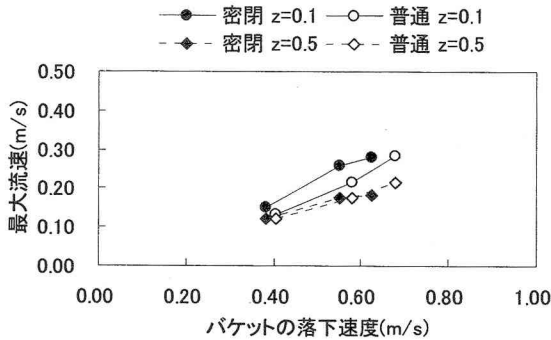


図-5 バケットの落下速度と最大流速 (W3, O3) 計測位置①, ④

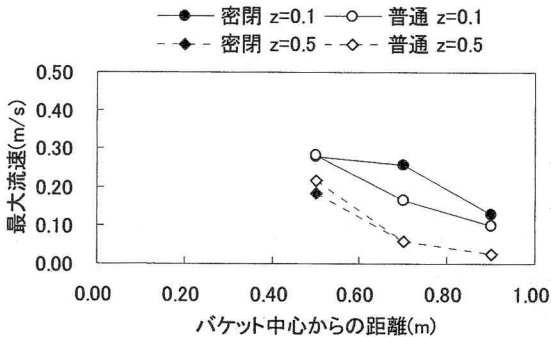


図-6 バケット中心距離と最大流速 (W3, O3)

4. 数値解析の概要

(1) 基礎方程式

流れの基礎式は三次元のデカルト座標系における運動方程式と連続式である。渦動粘性係数はSmagorinsky定数モデルにより算出した。基礎方程式の離散化は、HSMAC (Highly Simplified MAC) 法に基づいて行った。

運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u_i u_j} \right) + g_i \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (i=1-3) \quad (1)$$

連続式

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$-\overline{u_i u_j} = \varepsilon \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \varepsilon = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

ここに、 u_i は i 方向の流速成分、 x_i は i 方向の座標軸、 p は圧力、 ρ は混相流体密度、 $\Delta \rho$ は密度差、 ε はSGS応力の渦動粘性係数、 C_s はSmagorinsky定数 (=0.2)、 ν は動粘性係数 ($=1.0 \times 10^{-6}$) m^2/s 、 Δ はフィルター幅、 g_i は i 方向の重力加速度である。

(2) 移動境界モデル

図-7はバケットの移動境界モデルを図示したものである。バケットの体積は変化しなく、落下速度は一定である。バケットの移動境界は、バケットの底面積とほぼ同じ面積の厚さがセル一個分の薄い「板状セル」でモデル化した。なお、バケットと板状セルの容積が違ふことから、バケット中の水の運動量と板状セル内の水の運動量が等しくなるように次式で調整した。

$$\rho_w V_b u_b - \rho_w V_c u_c = 0 \quad (3)$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 V_b, V_c はバケットとセルの容積、 u_b, u_c はバケットとセルの移動速度。

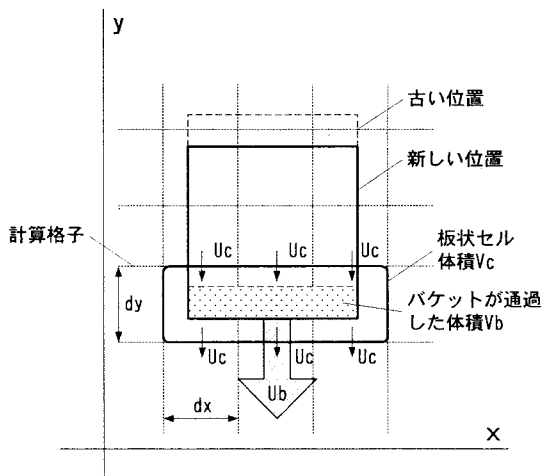


図-7 バケットの移動境界モデル

表-2 計算ケース

計算ケース	C1	C2	C3
バケットの落下速度 (m/s)	0.40	0.55	0.64

(3) 計算条件

計算は実験と同じ条件の水槽で、バケット部分をモデル化した板状セルを移動させてバケット着底時の流れを再現する。図-7でモデル化した板状セルを、高さ0.8mから底面まで等速に落下させる。

室内実験の格子間隔は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05$ m、計算時間間隔 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$ secである。

計算ケースは表-2に示す3ケースで、グラブの落下速度は室内実験で行った密閉グラブの実験ケースの値に近い値を用いている。

側壁、底面および水面の境界条件は、下記にします通り側壁はnon-slip条件、底面と水表面はslip条件とした。また、水表面については下層の現象を取り扱うことから影響が少ないと考え、水面変動の影響については考慮していない。

5. 計算結果

図-8は計算ケースC3の計算結果で、バケット落下開始から2秒間の様子である。バケット周辺の流速変化が分かるように、水槽中央部の鉛直水平断面の流速ベクトルを示した図である。二つの板状セルが下に移動しながら流れを起こしている様子がわかる。落下時の渦はバケットと共に移動しているのに対して、着底後はバケットから遠ざかっている。また、着底後の渦の流速ベクトルから、底質を巻き上げながら移動していることが分かる。

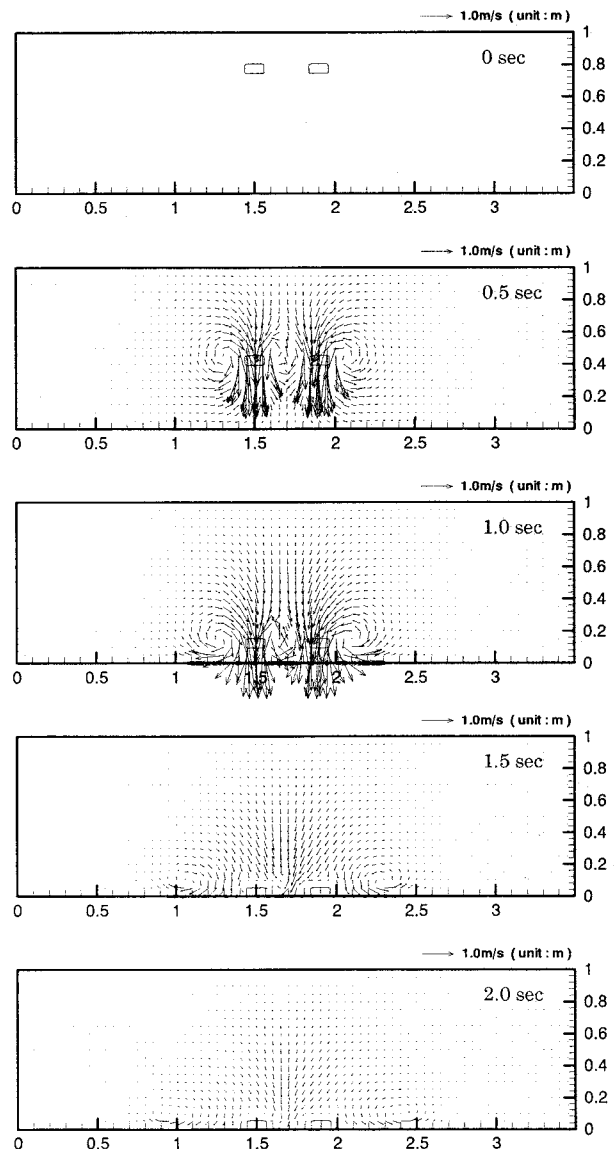


図-8 バケットによる周辺流速 計算結果 (C3)

図-9・10は、バケット周辺流速の時間変化を実験結果 (W3) と計算結果 (C3) で比較したものである。比較した場所は、バケット中心から0.5m離れた中層④と下層①で、それぞれ図-9と図-10に対応している。図中の波線はバケットが着底した1.3秒を示している。また、流向は図-3の図中に示す通りで、上向きを 0° として外向きを正としている。

図-10の実験では、写真-1のような下層に沿って移動する濁りフロントが、流速計を通過する時に最大流速が生じ、流向が大きく変化する現象が見られた。このことから、濁りフロント内部に渦が生じていることが考えられる。

計算結果からも実験と同様な流速変化が見られる。バ

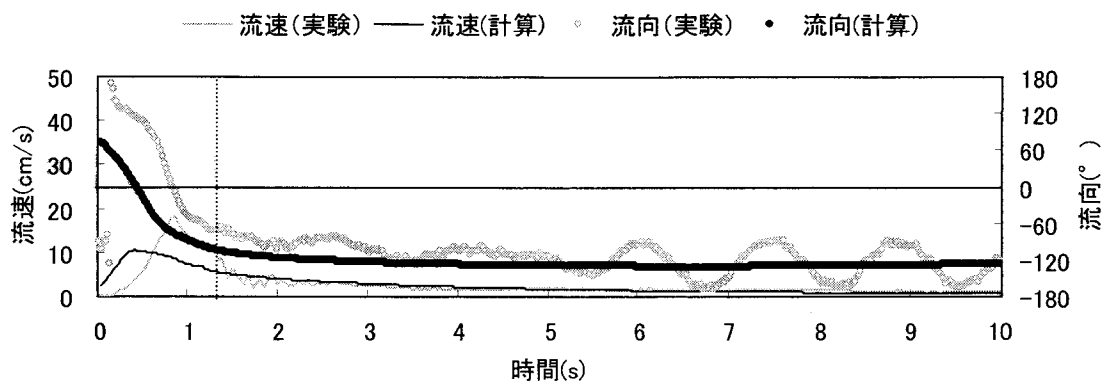


図-9 バケット周辺流速の時間変化④
実験 (W3) と計算 (C3) の比較

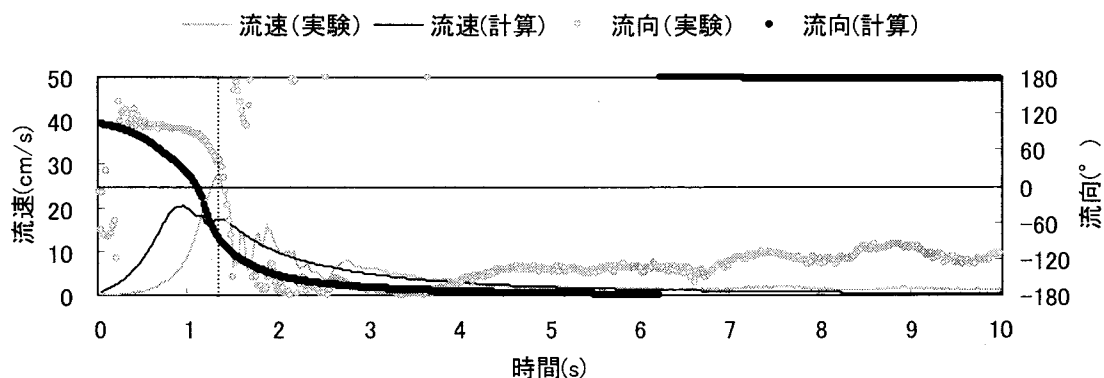


図-10 バケット周辺流速の時間変化①
実験 (W3) と計算 (C3) の比較

ケットの運動量を合わせるために、バケットの移動速度よりも大きい流速を移動セルに与えているため、実験値よりも少し早い時間に、流速の最大値が発生しているが、定性的には良く再現できていると思われる。計算結果の最大流速が少し小さいのは、本モデルではバケット自体の運動量を無視している為であると考えられる。

バケットの着底時に生じる流れは、短時間に大きな流れが発生し汚濁発生の重要な要因の一つであると考えられることから、バケットの着底時に生じる最大流速について検討する。

図-11は、バケット中心から0.5m離れた下層①におけるバケットの落下速度と最大流速の関係を調べたものである。実験値については図-5で示したとおり、密閉バケットと普通バケットで大きな相違が見られなかったことからすべて表示している。計算値は実験値と比べて最大流速が小さいが、バケット落下速度と最大流速の相関性が良く、実験結果の特性と一致している。

図-12は下層 ($z=0.1\text{m}$) における最大流速と距離による減衰効果を示したものである。ここでも、実験値については図-6で示したとおり、密閉バケットと普通バケ

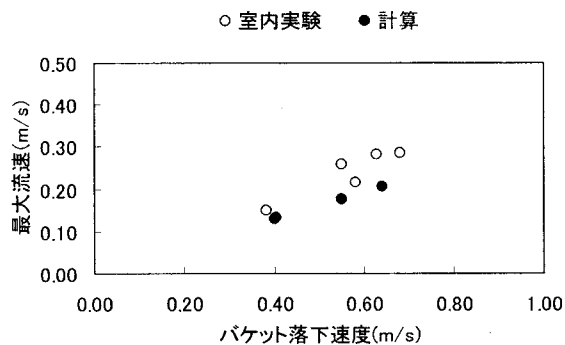


図-11 バケットの落下速度と最大流速
実験と計算の比較①

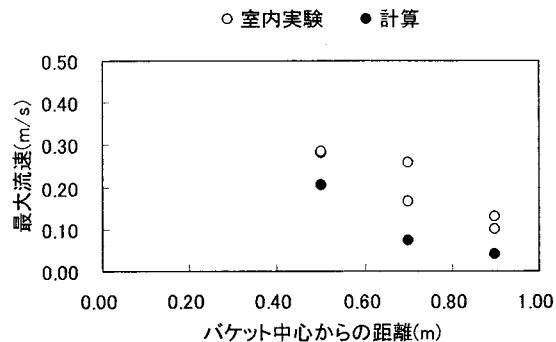


図-12 バケット中心からの距離と最大流速
実験と計算の比較 (W3) $z=0.1\text{m}$

トで大きな相違が見られなかったことからすべて表示している。計算の最大流速の大きさがやや小さいが、バケット中心から遠ざかるにつれて最大流速が低下する傾向があり、数値計算でもその傾向が再現されている。

5. おわりに

本研究はグラブ浚渫の作業サイクルの中でも、特に重要なバケット着底時の流動特性について検討を行った結果以下のことが明らかになった。

- (1) 実験からバケット着底時に発生する周辺の流速は、バケットの落下速度に比例して最大流速が増加した。現地実験で濁度がバケットの落下速度に比例して増加していたことを考慮すると、底質の巻き上げに最大流速が影響していると考えられる。また、密閉バケットと普通バケットを比較すると、生じる最大流速は同程度であった。
- (2) 珪砂を敷いた実験では、バケットの着底によって発生した濁りは底面に沿って移動し、濁りフロントが流速計を通過するときに流速が最大になり流向が大きく変化する現象が見られた。これは数値解析から、濁りフロント内部に渦が生じていることが明らかになった。
- (3) 簡易的な移動境界モデルを用いた数値解析で、バケット着底時の周辺流速を再現することができた。

参考文献

- 1) 小田一紀・重松孝昌：汚濁拡散防止膜の効果に関する研究、海岸工学論文集、第37巻、pp.843-847、1990。
- 2) 小田一紀・重松孝昌：汚濁拡散防止膜周囲の鉛直2次元流れ

に関する実験的研究、海岸工学論文集、第38巻、pp.876-880、1991。

- 3) 小田一紀・重松孝昌：垂下膜・自立膜の近傍における沈降物質の拡散に関する鉛直2次元実験、海岸工学論文集、第40巻、pp.976-980、1993。
- 4) 小田一紀・重松孝昌：汚濁防止膜周辺の物質拡散の高精度予測手法に関する研究、海岸工学論文集、第43巻、pp.1151-1155、1996。
- 5) 鶴谷広一・村上和男：汚濁防止膜周辺の土砂拡散機構に関する現地観測、海岸工学論文集、第43巻、pp.1146-1150、1996。
- 6) 稲垣聡・田中昌宏：日々の工事管理を目的とした流れ・濁り予測システム、海洋開発論文集、第19巻、pp.767-772、2003。
- 7) 小岩・宮崎・大友：グラブ浚渫船の運転条件が濁りに及ぼす影響、港湾技研資料、No.257、pp.1-29、1977。Ferziger, Joel H, Peric, Milovan：コンピュータによる流体力学、シュプリンガー・フェアラーク東京、2003。
- 8) 松田信彦・五明美智男：密閉グラブ浚渫で発生する濁りの現地実験、海洋開発論文集、第20巻、pp.917-922、2004。
- 9) 運輸省第四港湾建設局海域整備課：しゅんせつ埋立による濁り等の影響の事前予測マニュアル、pp.1-271、1982。
- 10) 国土交通省港湾局：港湾における底質ダイオキシン類対策技術指針（改訂版）、2003。
- 11) 国土交通省港湾局：港湾工事における濁り影響予測の手引き、2004。
- 12) 数値流体力学編集委員会：移動境界流れ解析 数値流体力学シリーズ4、東京大学出版会、1995。
- 13) 数値流体力学編集委員会：乱流解析 数値流体力学シリーズ3、東京大学出版会、1995。
- 14) 日本機械学会：流れの数値シミュレーション、コロナ社、1988。
- 15) 日本埋立浚渫協会 環境部会：港湾工事環境保全技術マニュアル Doctor of the Sea(改訂第2版)、1998。
- 16) 平野博之：流れの数値計算と可視化-Tecplotで視る流体力学、丸善株式会社、2001。