

Grab浚渫に伴う流れの予測手法に関する研究

古牧 大樹¹・金山 進²

¹五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:daiki.furumaki@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:susumu.kanayama@mail.penta-ocean.co.jp

浚渫による濁り影響予測計算は、広域的な範囲を対象としたものが主流であり、濁りの発生という素過程について直接的に取り扱われる例は少なく、類似した工種・仕様の事例に基づく汚濁発生源単位に基づくことが多い。環境負荷の軽減されたGrabや工法が登場する中、汚濁の発生自体を物理モデルで取り扱う手法への期待は大きい。本研究は、このための第一段階に取り組んだものであり、非格子を特徴としたSPH法を使用してGrab形状、挙動を正確に再現することで、Grab浚渫に伴う流れを清水のみを対象として確認し、汚濁発生機構に及ぼす影響について検討した。

既往の室内実験の再現計算を行ったところ、本手法は再現性が良いことが確認された。下降～掘削～上昇まで、Grabを一連の動作で計算することで、より現実的な流れの予測計算を行える可能性が示された。

Key Words : grab, dredging, flow, pollution, SPH, standard units of turbidity

1. はじめに

浚渫工事による濁りの影響予測は、周辺海域への影響に配慮する上で不可欠であり、数値解析による手法(例えば堀江¹⁾)が重要な役割を担っている。これらは濁りの空間的な拡がり数を $m \sim$ 数十 m 程度の分解能で予測する場合が殆どで、濁りの発生という詳細な素過程については直接的に扱われることは少なく、類似した工種・仕様の事例に基づく汚濁発生源単位(国土交通省港湾局²⁾)に基づくことが多い。しかし、環境負荷の軽減されたGrabや工法が登場する中、汚濁発生源単位のデータを更新・蓄積していくことは容易ではなく、汚濁の発生という現象自体を物理モデルで評価する手法への期待は大きく、例えば、松田ら^{3,4)}はGrab浚渫で発生する流れを3次元非静水圧モデルによって解析している。ただし、計算格子に基づく簡易的な移動境界モデルを用いており、Grabの複雑な形状や挙動の再現に課題を残していると考えられる。本研究では、Grab挙動による濁りの予測計算を行う前段階として、清水のみ対象として、Grab挙動による流れ予測手法を提案する。計算は、Grabの複雑な形状や挙動を容易に再現することが可能であり、将来的に土粒子挙動を再現すること等からSPH法を使用して、松田ら³⁾の室内実験と比較して解析の有用性を検証する。更にGrab挙動により発生する流れが、浚渫時の汚濁発生機構に及ぼす影響について検討する。

2. 数値計算方法の概要

計算はSPHysics3D.ver.2.2⁵⁾を用いて3次元計算を行った。SPHysics3Dにおける、リーマン問題を考慮した保存型支配方程式は式(1)、(2)の通りであり、式(1)は質量保存方程式、式(2)は運動方程式を示している。

$$\frac{d}{dt} (\omega_i \rho_i) + \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j 2 \rho_a (v_{a,ij} - v^0(x_{ij}, t)) \cdot \nabla_i W_{ij} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} (\omega_i \rho_i v_i) + \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j [2P_a + \rho_a v_{a,ij} \otimes (v_{a,ij} - v^0(x_{ij}, t))] \cdot \nabla_i W_{ij} = \omega_i S_i \quad (2)$$

ここで、 ω : 体積, ρ : 密度, v : 速度, W : カーネル関数, S : 外力, a : 近似リーマン解, P : 圧力, 0 : オイラー座標系, ij : 粒子 ij , \otimes : テンソル積を示している。これらの計算方法の詳細については、Vila⁶⁾を参照されたい。

カーネル関数は式(3)のQuintic型(Wendland⁷⁾)を使用した。

$$W(r, h) = \alpha_D (1 - \frac{q}{2})^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_D : 7/(4\pi h^2)$, $q : r/h$, r : 粒子間距離, h : スムー

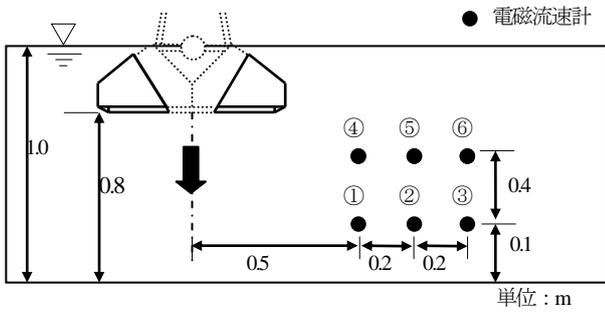


図-1 実験概要図 (松田ら³⁾)

表-1 再現計算条件

グラフ落下速度	CASE1 0.40 m/s
	CASE2 0.55 m/s
	CASE3 0.64 m/s
総粒子数	188,526 個
グラフ粒子数	2,582 個
粒子サイズ	0.04 m
水粒子密度	1,000 kg/m ³
計算範囲	3.5 m×3.5 m×1.1 m

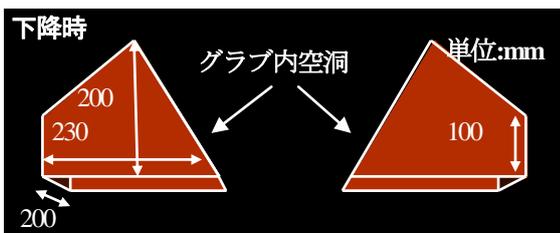


図-2 グラブ構造図 (下降)

ジング長である。水位表面や境界付近では、隣接粒子が存在しないことにより、カーネル関数の整合性が確保できなくなるため、Bonet and Lok⁷⁾の方法を用いてカーネル関数を修正した。境界条件は Monaghan⁸⁾が提唱した、粒子間の距離に応じて反力を与える方法を使用した。

3. 再現計算

(1) 再現計算概要

松田ら³⁾は図-1 のように 9m³ 密閉グラフバケットの 1/10 模型を使用して、グラフ下面が水深 0.8m に静止した状態からグラフを自由落下させ、電磁流速計によりグラフ周辺①～⑥の水平・鉛直方向の合成流速を測定した。計算は表-1 のように 3 ケースの異なるグラフ落下速度で行い、粒子サイズは流体・境界粒子共に 0.04m とした。

(2) グラブのモデル化

SPHysics3D.ver.2.2⁹⁾では、グラフのモデル化や移動の設定は不可能であるため、本計算コードの改良を行った。グラフは剛体の境界粒子として水からの抵抗は考慮せず、

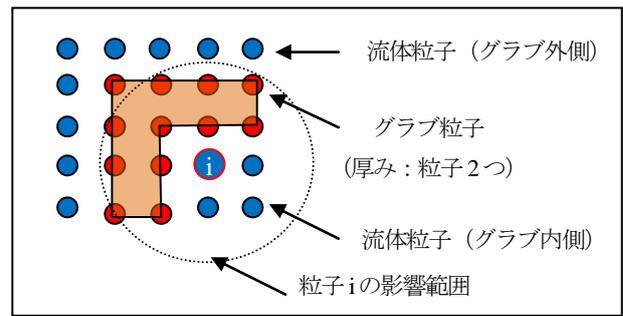


図-3 グラブのモデル化

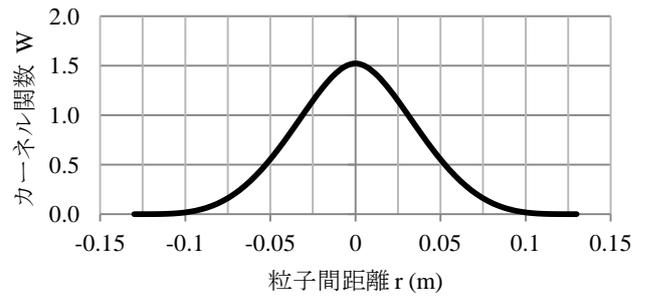


図-4 粒子間距離とカーネル関数の関係

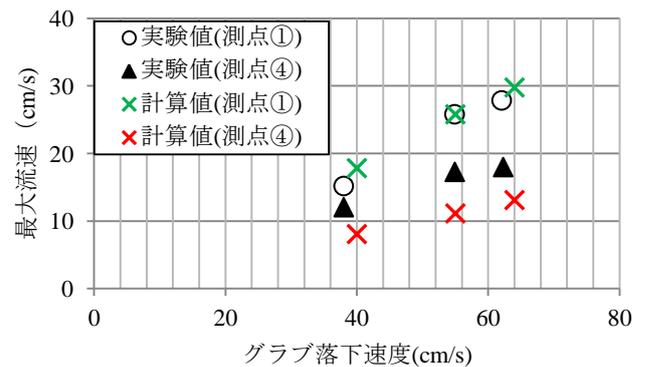


図-5 グラブ落下速度と最大流速の関係

強制的に移動させた。グラフは図-1 の実線が密閉部となっている。重りやフレームは諸元が不明なため再現計算では図-2 のように密閉部のみ境界粒子とし、等速度で鉛直下向きに移動させた。グラフ内部は空洞であるため、グラフ内部の水粒子の動きがグラフ外側の水粒子に影響を与えないように、図-3 のようにグラフの厚さは粒子 2 個分とした。本研究で設定した粒子間距離とカーネル関数の関係は図-4 となるため、上記のようにグラフの厚さを設定すれば、グラフ内側の流体粒子の影響範囲内にグラフ外側の流体粒子は存在しなくなる。

(3) 再現計算結果

図-5 にグラフ落下速度と測点①、測点④における実験値と計測値の最大流速値を示す。実験値と同様にグラフ落下速度の増加に伴って最大流速も増加しており、測点④は実験値より流速がわずかに小さいものの、最大流速の再現性は良い。

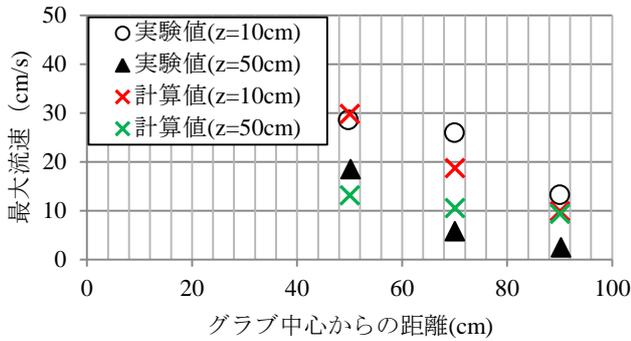


図-6 グラブ中心からの距離と最大流速の関係

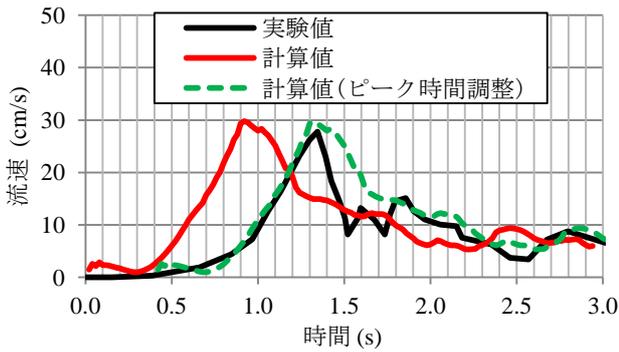


図-7 流速時刻暦 (CASE3 測点①)

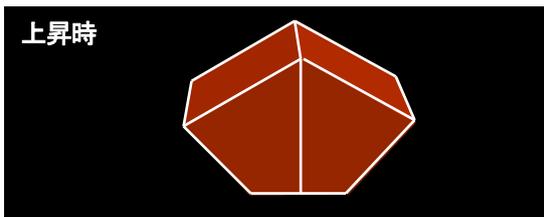


図-8 グラブ構造図 (上昇)

図-6に底面から10cm, 50cmの測点における最大流速値と, グラブ中心からの位置関係を示す. 底面から10cmの測点における最大流速は, グラブからの距離が離れると計算値より過小であり, 底面から50cmの測点ではグラブからの距離が離れると過大である傾向はあるが, 全般的にグラブから離れると最大流速が減少する様子を捉えられている.

図-7はCASE3における測点①の流速時刻暦である. 計算では最大流速のピーク出現時間が実験と比較して早い. これは実験ではグラブを自由落下させた一方で, 計算ではグラブを等速度で移動させたことが影響していると考えられる. 比較のため計算値と実験値のピーク出現時間が一致するように計算値の時刻を調整すると, 計算では実験の流速変化を良く再現できている.

以上のように既往の実験と比較した結果, SPH法を用いたグラブ移動による流れの予測手法は, グラブの落下速度による最大流速, グラブからの距離に応じた最大流速, グラブ周辺における流速時刻暦等の再現性が良く, 有効な手法であることが確認された.

表-2 流速場計算条件

グラブ落下・上昇速度	CASE1 0.40 m/s CASE2 0.64 m/s
総粒子数	100,872 個
グラブ粒子数	2,582 個
粒子サイズ	0.04 m
計算範囲	2.5 m×2.5 m×1.5 m

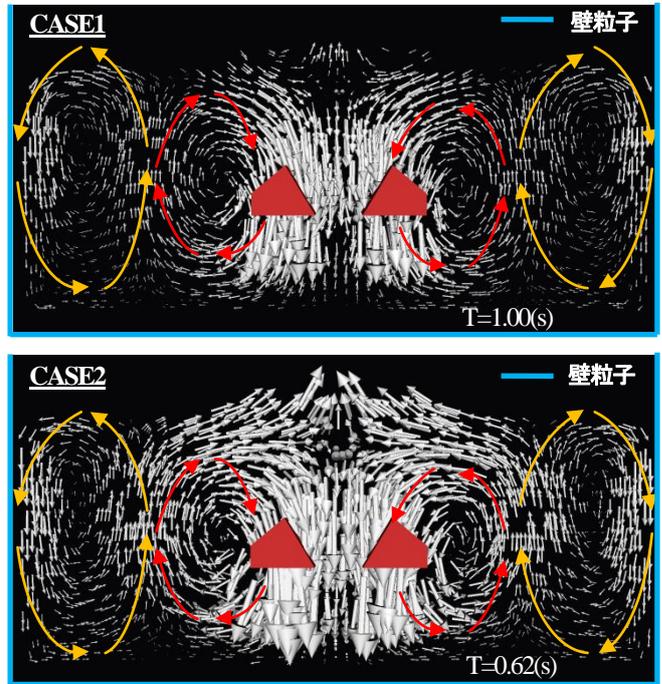


図-9 グラブ下降時の流速ベクトル
(上図: CASE1, 下図: CASE2)

4. 流れ場と濁水の挙動

(1) グラブ挙動による流れ場の確認

前章の計算諸元を基本として, グラブ下降時と上昇時における流速場の状況を確認した. 表-2のようにグラブの移動速度は2ケースとし, 計算の負荷を考慮して計算範囲は2.5m×2.5m×1.5mに変更した. なお計算範囲は, 浚渫工事における汚濁防止柵の1/10倍程度である.

グラブ下降は前章と同様の方法で行い, 上昇は図-8のようにグラブを閉じた状態で水底面より上昇させた. 流速場はグラブ移動時における流速ベクトルを図示することで確認した. なお図示の対象は, グラブ中心から奥行き方向10cm以内の範囲に位置する粒子とした.

a) グラブ下降時の流速場

図-9は, グラブ下面が底面から40cmに位置した瞬間の流速ベクトルを示している. 検討を行った2ケースの速度では, グラブ下面でグラブ外側へ向かう下降流が発生し, 上面でグラブ内側に向かう下降流が発生した. また, グラブ下降によりグラブ周辺に渦が発生し, 更にそ

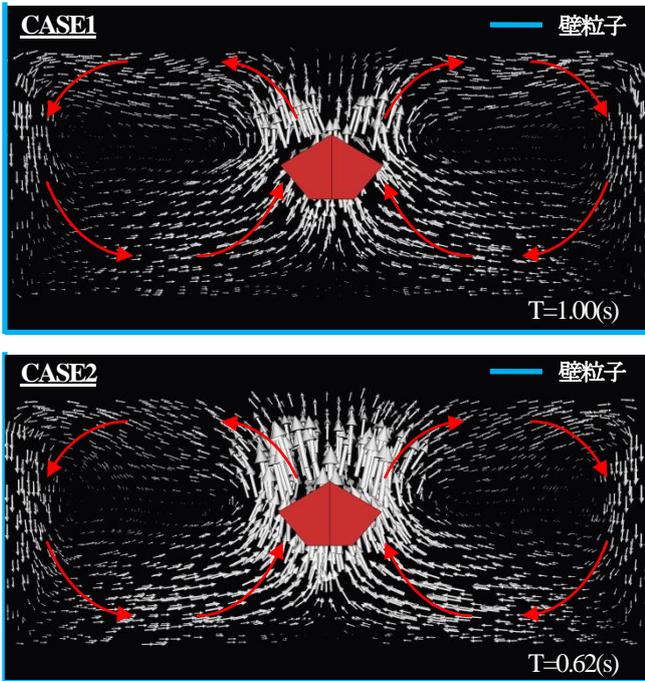


図-10 グラブ上昇時の流速ベクトル
(上図: CASE1, 下図: CASE2)

の外側にグラブ周辺の渦を補間するように、側面壁境界まで達するもう1つの渦が発生した。グラブ落下速度が増加することで周辺の流速は増加したが、渦の位置や流れの方向等には大きな差異が見られなかった。2つの渦が発生する状況は、時間的変化が見られなかった。

b) グラブ上昇時の流速場

図-10は、グラブ下面が底面から40cmに位置した瞬間の流速ベクトルを示している。グラブ下面にグラブ内側へ向かう上昇流が発生し、上面にグラブ外側に向かう上昇流が発生しており、グラブ下降時とは逆の傾向である。下降時は計算領域内に渦が2つ見られたが、上昇時は側面壁境界まで達する大きな渦が1つのみ形成された。グラブ下降時と同様で上昇速度増加に伴い、周辺の流速は増加したが、渦の位置等には大きな差異が見られなかった。1つの渦が発生する状況は、時間的変化が見られなかった。

c) グラブ下降時と上昇時の流速場比較

グラブ下降時と上昇時において、渦の発生状況が異なったため、下降時にグラブを閉じた状態で同様の計算を行った。結果はグラブを開いた状態の流速場とほぼ状況が一致しており、下降時と上昇時で渦の発生状況が異なる理由は、グラブ形状の差異が原因とは考えられない。下降時は自由表面付近からグラブが移動するため、急激な水面変動が発生する一方で、上昇時は水底面から移動するため、自由表面の動きが緩やかであったことや、グラブが連行した流れが下降時と上昇時では底面の固定境界、水面の自由境界と異なる境界に向かうこと等が、その原因として考えられる。

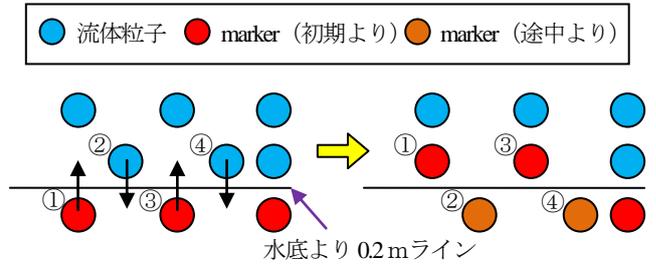


図-11 マーカーの定義

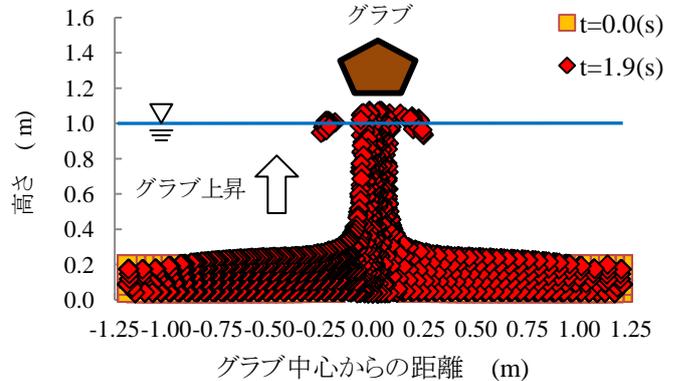
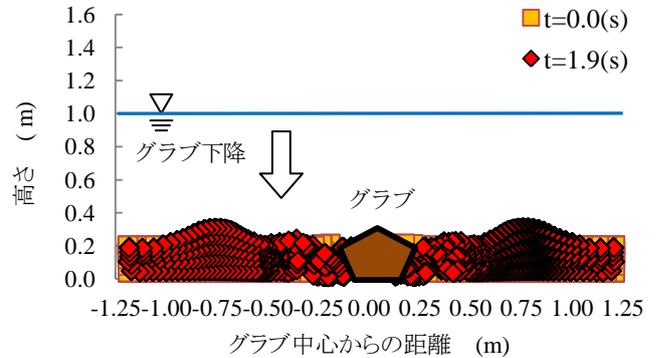


図-12 グラブ移動時のマーカー粒子位置
(上図: グラブ下降時, 下図: グラブ上昇時)

(2) グラブ移動による濁水の挙動

グラブ移動による濁水の移流を簡易的に観察するため、海底面付近に濁水が停滞していると仮定し、図-11のように初期状態及び計算途中で水底面より0.2m以内に移動した流体粒子をマーカーとして、グラブ移動によりマーカーが移動する様子を表現した。マーカーとなる粒子は、通常の流体粒子であって密度や粒子サイズ等の条件は、変化させていない。計算条件は前節と同様であるが、グラブ移動速度による有意な差が見られなかったため、CASE2のみを対象とした。

図-12はグラブ下降後、上昇後におけるマーカー粒子の配置を表したものである。図ではグラブ中心から奥行き方向10cm以内に位置している粒子を表示している。

グラブ下降時には、グラブから0.75m~1.00m位置でマーカーが上昇している。これは前節において、2つの渦が重なる位置であり、この位置では流れが上向きであったためであると考えられる。

グラブ上昇時には、グラブの軌跡に沿ってマーカーが上昇し、水面付近で水面に沿ってマーカーが移動する。これは前節において、グラブ下面に上昇流があり、更に水面付近では水面に沿う流れがあったためであると考えられる。

5. グラブ連続挙動による流れ

(1) 計算方法

グラブ下降～掘削～上昇までの浚渫作業における一連のグラブ挙動を再現し、流れ場を確認した。表-3のようにグラブ下面が水底面より0.80mの位置から下降を開始し、グラブ下面が水底面より0.15mの位置で1.5秒かけて掘削(回転)させ、掘削完了後に上昇させた。前章と同様に初期条件及び計算途中で水底面より0.20m以内に移動した流体粒子をマーカーとして、濁水挙動を観察した。また、一連の動作を複数回行った際の濁水挙動を確認するため、一連の動作で移動したマーカーを初期状態とし、再び同じ流れ場が発生するとして、マーカーの追跡を行った。一連の動作終了後の個々のマーカー位置に対して、最も近い初期配置の粒子をマーカーとすることで、次の動作に前の動作で移動したマーカーを反映させた。

表-3 グラブ一連挙動計算条件

グラブ開始位置	グラブ下面 0.80(m)
掘削開始位置	グラブ下面 0.15(m)
落下・上昇速度	0.64 (m/s)
掘削時間	1.5 (s)

(2) グラブ連続挙動による計算結果

図-13に浚渫回数とマーカーの移動の関係を示す。まず図-14のように浚渫一連作業①～⑥を行うと、下降時に底面でグラブと側方壁境界の中間付近で上昇流が起き、マーカーが上昇する。次に上昇時はグラブの上昇に伴いマーカーが上昇する。なお掘削時は流れに関しては影響が少ない。このように、浚渫一連作業を行うと、前章における下降時と上昇時のマーカー配置を合わせたような結果となることが改めて確認された。

浚渫一連作業を複数回行う場合、回数を重ねるごとにマーカー範囲は増大する。下降時における上昇流と、上昇時における水面に沿った流れにより、3回続けて浚渫を行うとマーカー範囲は水面付近まで増大する。

以上のように、本検討は流体粒子をマーカーとした簡易的な濁水追跡方法であり、実験等との比較による定量的な検証を経たものではないが、浚渫一連作業を再現することにより、より現実的な濁りの挙動予測を行える可能性が示された。

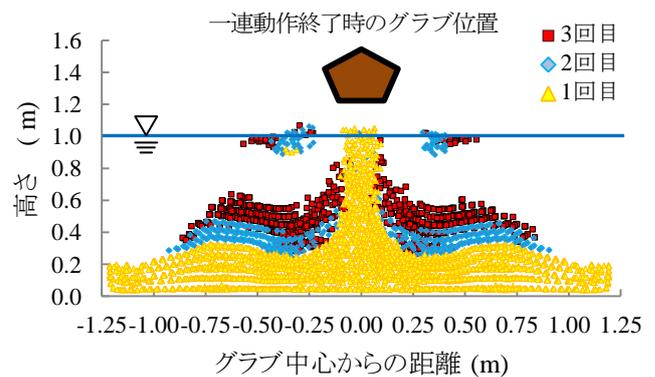


図-13 浚渫回数とマーカーの移動の関係

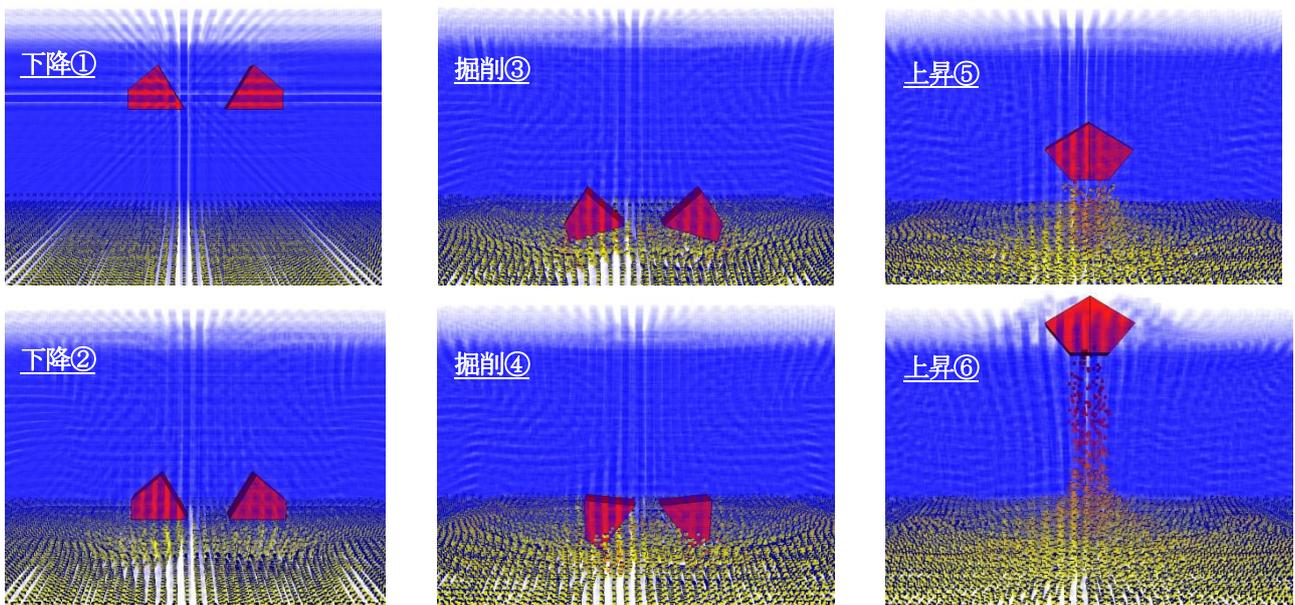


図-14 グラブ一連動作における濁水挙動 (下降～掘削～上昇 青色粒子：流体粒子 黄色～赤色粒子：マーカー粒子)

6. まとめ

本研究は、SPH法を用いてグラブ浚渫における一連の動作やグラブ形状を正確に再現して、清水のみを対象とし、グラブ浚渫作業に伴う流れの予測を行った。主要な結論を以下に示す。

- ・松田ら³⁾が実施した室内実験の再現計算を行い、本手法による流れの計算は再現性が良いことを確認した。
- ・本手法のようにグラブ形状を正確に再現することで、グラブ下降時と上昇時における流れ場の状態を明確にすることができた。
- ・グラブの一連の動作を再現することで、実験等との比較による定量的な検証を経たものではないが、より現実的な流れの計算を行える可能性が示された。

今後、より精度良くグラブによる濁りの影響予測をするための課題を以下に示す。

- ・本計算では、清水のみを対象とした水の流れしか考慮していないため、汚濁の拡散・沈降等を考慮した計算を行う必要がある。
- ・グラブに付随するフレームや重り等を正確に再現し、より現実的な流れの解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 堀江毅：海上工事に伴う濁り予測モデルと濁り監視への適用性について，港湾技術研究所報告，Vol.26, No.2(1), pp.253-295, 1987.
- 2) 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.
- 3) 松田信彦，五明美智男，松原雄平，檜谷治，黒岩正光：グラブ浚渫で発生する流れに関する研究，海洋開発論文集，第21巻，pp.331-336, 2005.
- 4) 松田信彦，五明美智男，松原雄平，檜谷治，黒岩正光：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.
- 5) Gomez-Gesteira M., Rogers B.D, Dalrymple R.A., Crespo, A.J.C., Narayanaswamy M. : *User Guide for the SPHysics code*, 2010.
- 6) Vila, J. -P. : On particle weighted methods and Smooth Particle Hydrodynamics, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 9(2), pp.161-209, 1999.
- 7) Wendland, H. : Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in computational Mathematics*, 4(1), pp. 389-396, 1995.
- 8) Bonet J. , T. - S. L. Lok : Variational and momentum preservation aspects of Smoothed Particle Hydrodynamic formulations, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 180, pp. 97-115, 1999 .
- 9) Monaghan, J. J. : Simulating free surface flows with SPH, *Journal Computational Physics*, 159, pp.399 - 406, 1994.

A NUMERICAL ANALYSIS OF GENERATED FLOW IN GRAB DREDGING

Daiki FURUMAKI and Susumu KANAYAMA

The standard units of turbidity generation by dredging operations, which play the important roll in predicting the environmental influence to the water around, are usually estimated empirically from accumulated data of similar cases. Near future, deterministic estimation method of the turbidity generation by dredging is expected to be required. For the first step of this approach, a numerical trial is made by the smoothed-particle hydrodynamics (SPH) method. The generated flow by grab operation was reproduced well by detailed discription of the shape and movement of grab with particles.