

鉛直管を用いて水域に投入される濁水塊の流動予測手法の開発

Development of a Numerical Model for Predicting Flow Induced by Sediment Dumped into a Vertical Pipe

平野辰昇¹・重松孝昌²・金澤 剛³

Tatsunori HIRANO, Takaaki SHIGEMATSU and Tsuyoshi KANAZAWA

In order to predict fluid motion induced by sediment dumped into a vertical pipe, a numerical model is developed. The numerical model is based on fundamental equation of incompressible fluid with the Boussinesq approximation and the Volume Of Fluid method is applied to trace water surface in a vertical pipe. According to comparison with laboratory experimental results, calculated results reasonably agree with experimental ones in qualitatively. The estimation results by the developed model on thickness and progressive velocity of turbidity mass on the bottom are presented with maximum ambient fluid velocity.

1. はじめに

高度経済成長期には、背後地の産業発展に伴う土地需要に対応するため、大規模な埋立て造成がなされた。その際に、大量に海底土砂を採取した跡地は、周辺の海底よりも深く掘り下げられた浚渫窪地として、現在もなお点在している。特に、富栄養化した海域に残存する浚渫窪地は、窪地内の貧・無酸素水が周辺の生態系に甚大な影響を及ぼす原因となる可能性があるとの指摘がなされ(中村, 2009)、沿岸環境の保全・改善のために、現存する浚渫窪地を埋め戻す事業が実施されている。

浚渫窪地の埋め戻し工事を実施する際には、埋め戻し材そのものに起因する濁りの発生を抑制するとともに、埋め戻し材の投入によって窪地内の貧・無酸素水や浮泥等の還元物質が急激に攪拌されて周辺海域へと拡散・流出しないように配慮することが求められる。その対策のひとつとして、海底近傍にまでその長さが達するような鉛直管内に土砂を投入するトレミー工法(図-1参照)の

採用が挙げられる。しかし、トレミー工法を用いて土砂投入を行う場合に誘起される流動や濁りの拡散過程を予測する手法には未解明な点が残されており、それゆえ、施工における改善の余地が残されていると考えられる。

本研究では、鉛直管を用いた土砂投入による誘起流動の予測手法を開発し、施工に起因する濁水塊の流動とその周辺水塊の流動予測シミュレーションモデルを開発することを目的とするものである。

2. 予測手法の概要

(1) 基礎方程式

既に実施された窪地埋め戻し工事で用いられている投入材の多くは浚渫土砂である。したがって、投入材の特性が計算に反映されることが望まれる。また、実務にあたっては、濁度を計測することによって施工管理にあたる人が多い。本研究では、土砂等の投入の効果を、流体密度の増加として捉えることにする。すなわち、鉛直管内に投入された濁水塊と周囲流体との密度差のみを起動力とする密度流として流動および濁水塊の輸送を計算する二次元流動モデルを構築する。基礎方程式はブシネスク近似を適用した非圧縮性流体の質量保存方程式と運動方程式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\rho}{\rho_f} g_i \dots (2)$$

ここに、 ρ_f は流体の基準密度、 ν は動粘性係数で、それぞれ、 10^3kg/m^3 および $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ と一定値を用いた。なお、 ν_t は渦動粘性係数であり、本研究では濁質を含むセルにおいてのみ $3 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ と一定値を与えた。式(2)中の濁水塊の密度 ρ は、次式で求めた。

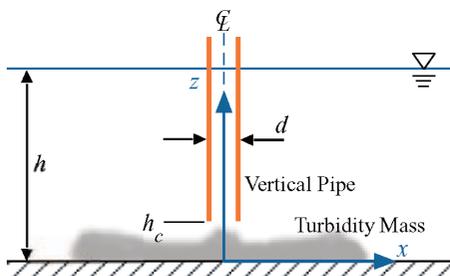


図-1 トレミー工法

1 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科
2 正会員 博(工) 大阪市立大学教授大学院工学研究科
3 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所

$$\rho = \rho_f \left\{ 1 + \frac{T_u}{1000} \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_s} \right) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ_s は粒子密度で $2.707 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ とした。式(3)中の濁度 T_u は、次式の輸送方程式を用いて求めた。

$$\frac{\partial T_u}{\partial t} + \frac{\partial \{ (u_j + \delta_{j3} w_0) T_u \}}{\partial x_j} = D_s \frac{\partial^2 T_u}{\partial x_j^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 δ_{jk} はKroneckerのデルタ関数、 D_s は濁質の拡散係数で $3 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ とした。式(4)中の粒子の沈降速度 w_0 は、次式のRubeyの沈降速度式を用いて計算した。

$$\frac{w_0}{\sqrt{(s-1)gd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36(\nu + \nu_t)^2}{(s-1)gd^3}} - \sqrt{\frac{36(\nu + \nu_t)^2}{(s-1)gd^3}} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 d は土粒子粒径、 s は土粒子の比重である。本研究では $d=5 \times 10^{-6} \text{m}$ とした。

(2) 計算概要

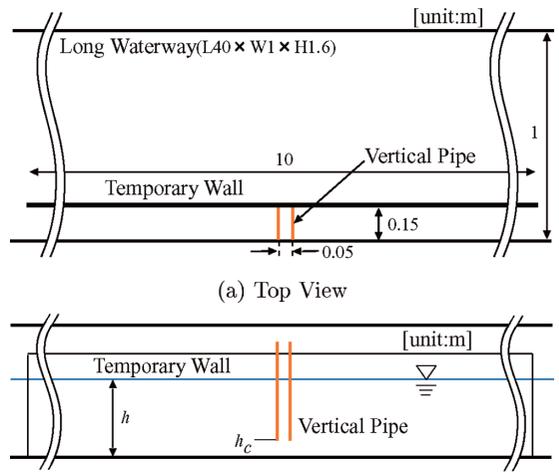
計算には直交座標を用い、流速値はスタッガード配置、それ以外の物理量はセル中心で定義した。基礎方程式の離散化には、時間項を一次精度の前進差分、移流項を二次精度の上流差分、拡散項には二次精度の中心差分とした。五明ら(2002)は、鉛直管に投入された土砂が濁水塊として管外へと流出していく過程に於いては、鉛直管内の流動、特に水面の振動が大きな影響を及ぼすと指摘している。すなわち、水面変動を計算することが不可欠である。そこで、本研究では水面の変動をVOF法(Volume Of Fluid)を用いて次式により解析した。

$$\frac{\partial F'}{\partial t} + u_j \frac{\partial F'}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 F' は各計算セルにおける液体充填率を表す。当初、式(4)と式(6)を独立して計算していたが、鉛直管内水面付近で、濁質の挙動が流体運動、特に水面変動と連動しないという課題が生じた。そこで、米山ら(2006)に倣い、濁度の輸送方程式中の移流項は式(6)と同様にドナーアクセプター法を用いて解き、その後で右辺の拡散項を計算することとした。ただし、底面では鉛直方向の流体速度成分 w が0であるが、土粒子には沈降速度 w_0 が作用するために、底面においては濁質のフラックスが発生する。本モデルでは底面での沈降速度による濁質のフラックスを底面への堆積とみなし、これを計算領域から取り除いた。

計算のフローを以下に示す。

- (1) 時刻 t ですべての物理量の値が既知とする。
- (2) Δt 後のVOF関数 F'^{n+1} を求める。
- (3) Δt 後の濁度 T_u^{n+1} を求める。
- (4) 濁度 T_u^{n+1} を用いて、 Δt 後の濁水の密度 ρ^{n+1} を求める。
- (5) SMAC法に基づき、運動方程式の離散化式から、 Δt 後の仮流速 \bar{u}_j^{n+1} を求める。
- (6) 圧力修正量 ϕ のポアソン方程式をSOR法によって解



(a) Top View

(b) Side View

図-2 実験概要



図-3 実験状況

き、仮流速 \bar{u}_j^{n+1} および圧力 p^n を補正し、 Δt 後の流速 $u_j^{n+1} \cdot \text{圧力} p^{n+1}$ を求めて、(2)に戻る。

3. 計算条件および計算結果

(1) 模型実験の概要

実験は、東洋建設株式会社鳴尾研究所内の長水路(長さ40m, 幅1m, 深さ1.6m)を用いて行われた。長水路内に水平床と仮設壁により長さ10m, 幅0.15mの狭い水路を作り、その中央に鉛直管を含む土砂投入装置を設置した(図-2参照)。土砂投入の諸元はフルードの相似則に従うものとし、現地施工事例を縮尺1/40でモデル化して、容積 10m^3 のバックホウで粘性土を直径が2mの単管タイプの鉛直管に投入することを想定されている。なお、鉛直管は、通常円筒形であるが、ここでは現象の3次元性を排除するために水路幅方向に等しい矩形断面 $0.05 \text{m} \times 0.15 \text{m}$ とし、投入土砂量も水路幅が管径の3倍であることを考慮している。投入材料は、シリンダー法によるフロー値が 180mm であった浚渫粘性土の投入事例を参考に、フロー値が同一となるよう含水比を調整したNSFカオリンを使用している。NSFカオリンは、底板が開閉する投入容器に所定量を入れ、瞬間的に底板を開放することによって鉛直管内に投入された(図-3参照)。なお、カオ

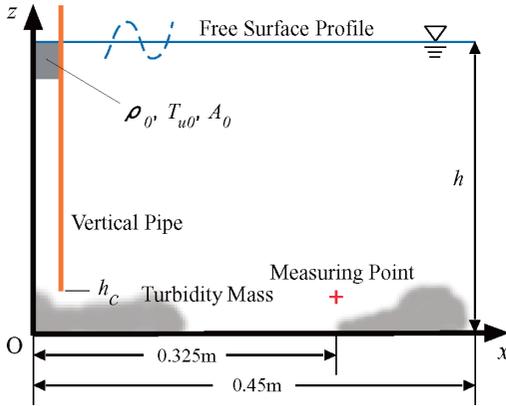


図-4 計算領域

表-1 計算条件

ρ_0 [kg/m ³]	T_{u0} [kg/m ³]	A_0 [m ²]	h [m]	h_c [m]
1335	534	0.001	0.45	0.025
				0.050
				0.075

リン投入後に鉛直管周辺に発生する流速は、特に水平方向流速に着目し、電磁流速計の底面からの設置高さを変えて計測された。

(2) 計算条件

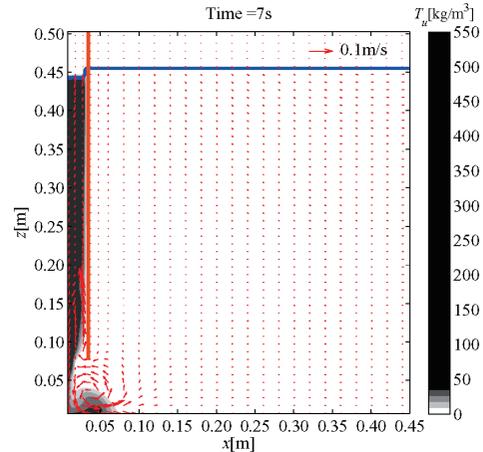
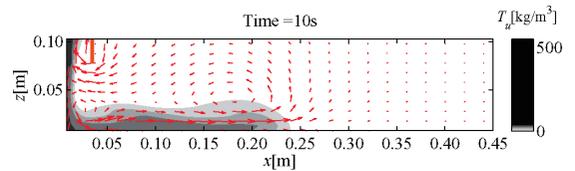
鉛直管の中心軸と水底との交点を座標原点を取り、水平方向に x 軸を、鉛直上向きに z 軸を取り、取り扱う現象の左右対称性を考慮して x 軸の正の領域のみを計算の対象とした(図-4参照)。計算領域は、水平方向に0.45m、鉛直方向に0.5mとし、水平方向には原点から0.05mでは領域幅を10分割($\Delta x_1=0.005$ m)、0.05mから0.45mでは領域幅を40分割($\Delta x_2=0.01$ m)の不等長格子を適用し、鉛直方向は等長格子で100分割($\Delta z=0.005$ m)とした。なお、投入土砂は、領域左上端の水面下に位置する 5×8 セル($=A_0$)で、初期密度 ρ_0 、初期濁度 T_{u0} の濁水を与えた(表-1参照)。

境界条件は、計算領域の左端ではFree-Slip条件、右端では自由流出条件を、また、下端ではNon-Slip条件、自由液面においては応力境界条件を適用している。

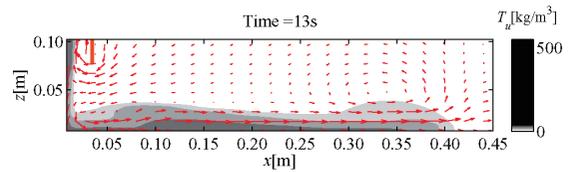
実験条件と照らし合わせて、計算における水深 h は0.45mで一定とし、鉛直管下端と水底とのクリアランス h_c を変えて計算を行った。

(3) 計算結果

水理模型実験との比較により、本研究で開発した数値モデルの妥当性を検証する。計算結果の一例を図-5および図-6に示す。これらの図は、クリアランス h_c が0.075mの場合に土砂投入7秒、10秒、13秒後の計算結果を示したものである。同図によれば、鉛直管に投入された濁水

図-5 計算結果の一例(7秒後, $h_c=0.075$ m)

(a) 10秒後

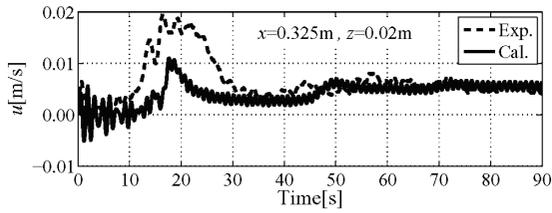


(b) 13秒後

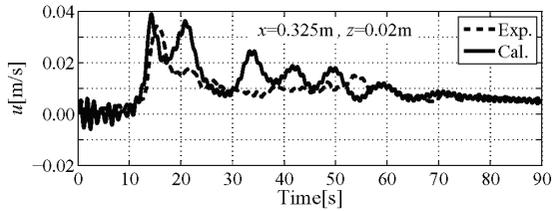
図-6 計算結果の一例($h_c=0.075$ m)

塊がその下端から流出した後に水底上を水平方向に移動してゆく様相が計算されていることがわかる。なお、実験状況を撮影したビデオ画像より、実験結果と比較すると本計算結果の方が、鉛直管を抜けて水底に到達する時間が遅くなっていることがわかった。これは、実験では水面上から土砂を落下させているのに対し、計算では土砂を水面下で静止状態として初期条件を与えているため、土砂の落下エネルギーを考慮できていないためである。

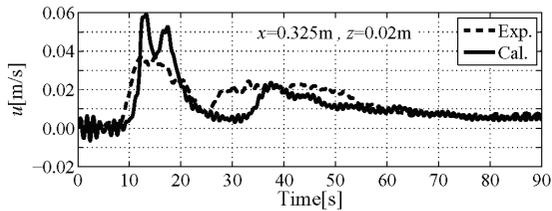
図-7および図-8は、それぞれクリアランス h_c が0.025m、0.050m、0.075mの場合の $x=0.325$ m、 $z=0.02$ mにおける流速値の時系列を示したものである。図-7は水平方向流速 u の時系列変化を、図-8は、鉛直方向流速 w の時系列変化を表している。なお、水平方向流速 u は鉛直管から離れる方向を正、鉛直方向流速 w は上向きを正とし、横軸は土砂投入後の経過時間である。図-7において、土砂投入直後にみられる流速の振動は、鉛直管内水面変動に起因するものであり、本計算結果はそれを概ね再現している。また、両図より、実験値と本手法による計算値のい



(a) $h_c = 0.025\text{m}$

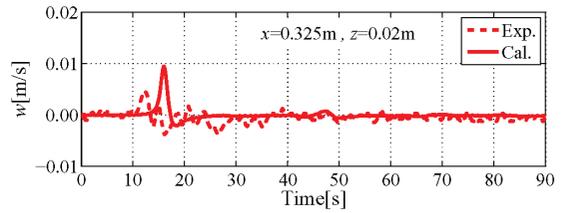


(b) $h_c = 0.050\text{m}$

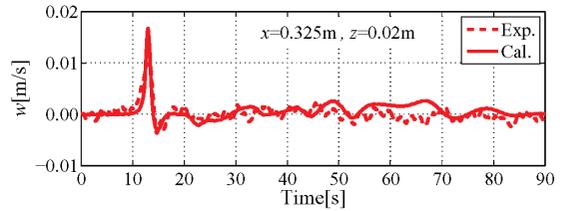


(c) $h_c = 0.075\text{m}$

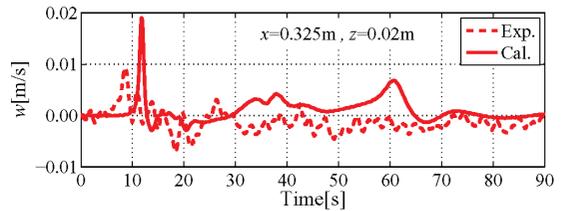
図-7 水平方向流速の時系列変化



(a) $h_c = 0.025\text{m}$



(b) $h_c = 0.050\text{m}$



(c) $h_c = 0.075\text{m}$

図-8 鉛直方向流速の時系列変化

ずれも、土砂投入後およそ12秒から18秒で u , w が最大値をとり、その後、同様に減衰してゆく様子がわかる。一方で、クリアランス $h_c=0.025\text{m}$ のケースにおける水平方向流速の最大値の実験結果と計算結果を比較すると、本研究で構築したモデルによる結果は実験結果よりも小さな値を示している。また、クリアランス $h_c=0.075\text{m}$ のケースにおいて水平および鉛直方向の最大流速値をみると、計算結果は実験結果よりも大きな値を示していることがわかる。

図-9は、 $x=0.325\text{m}$, $z=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05\text{m}$ における水平方向流速の最大値 u_{max} を示したものである。同図によれば、実験結果と本計算結果のいずれにおいても、水平方向流速最大値 u_{max} は鉛直管下のクリアランス h_c の違いによらず、底面から4cm程度の比較的狭い範囲で発生し、それよりも高い位置では流速が急激に減少しているのがわかる。また、いずれのケースも $z=0.05\text{m}$ では、水平方向流速の最大値 u_{max} は負の値を示すことから、濁水塊は底面から約0.04m程度の比較的狭い範囲で x 軸の正の方向に移動してゆくかと推測できる。

図-10は、計算開始後に濁水塊が鉛直管から流出し、底面上を水平に移動してゆく際の最大厚さ H の経時変化を示したものである。同図によれば、鉛直管下のクリア

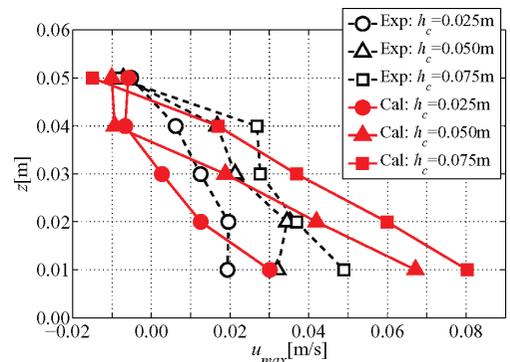


図-9 水平方向流速の最大値の鉛直分布

ランス h_c が大きいほど濁水塊の最大厚さは大きくなる傾向を示している。また、いずれのケースも、概ね、クリアランス h_c の半分程度の厚さで流動してゆく様子がわかる。なお、ここでは濁度 T_u が 5kg/m^3 以上を濁水塊と定義している。

図-11は、計算開始後の鉛直管内の水面変動の経時変化を示したものである。同図によれば、いずれのケースにおいても鉛直管内の水面は、濁水塊の投入直後に大きな変動を示した後、振動しながら徐々に初期水面位置に復元してゆくことがわかる。なお、クリアランス h_c が大

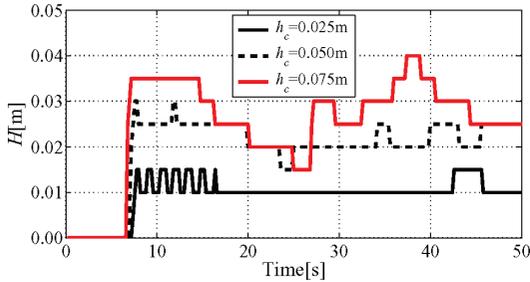


図-10 濁水塊の最大厚さの経時変化

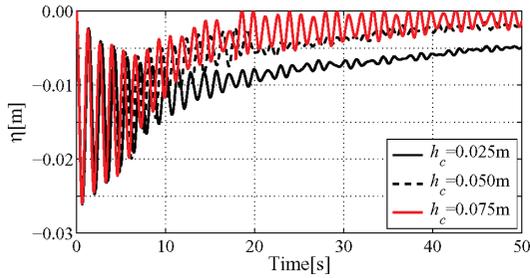


図-11 鉛直管内の水面変動の経時変化

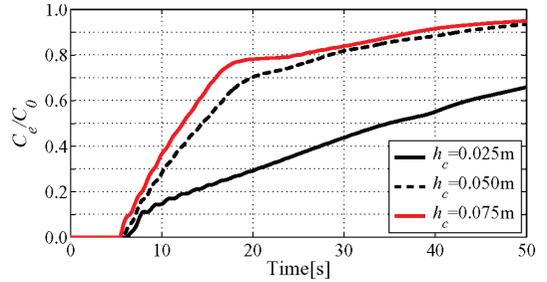


図-12 鉛直管からの濁質流出量の経時変化

4. 結論

本研究では、鉛直管を用いた土砂投入に誘起される流動の予測手法の開発を試みた。鉛直管を用いた土砂投入に関する実験結果との比較により、定量的な評価を行うためにはまだ改善の余地があるものの、本研究で開発したモデルを用いて濁水塊の流動を、概ね、定性的に再現できることが確認された。また、本モデルによる計算結果より、鉛直管下端と水底とのクリアランス h_c を制御することによって、濁水塊投入による誘起流動、濁水塊の輸送速度等の制御が可能であることが示唆され、施工に当たっての有益な知見が得られた。

参考文献

- 金澤 剛・重松孝昌 (2009)：鉛直管を用いた土砂投入に伴う水塊流動について，土木学会第64回年次学術講演。
- 五明美智男・栗原明夫・三村信男 (2002)：鉛直管に投入された土砂の水中落下挙動と管内水振動，海岸工学論文集，第49巻，pp. 896-900。
- 中村由行 (2009)：全国の浚渫窪地の現況と三河湾における埋め戻し修復，平成20年度日本水産工学会秋季シンポジウム，内湾における環境修復の方向性と新手法，講演要旨集，第9巻，pp.33-36。
- 米山 望・田中伸和・後藤孝臣・本多 毅 (2006)：放水路内高濃度濁質進入現象の数値解析，水工学論文集，第50巻，pp. 733-739。

きいほど早く初期水面位置に復元する傾向が見られる。この要因としては、クリアランス h_c が大きいかほど鉛直管内から濁質が早く流出し、管内水の高濃度状態が比較的早く解消されて、管内外の水頭差が小さくなってゆくためであると考えられる。

図-12は、計算開始後の鉛直管下端からの濁質の流出量 C_e の経時変化を初期濁質量 C_0 で無次元化して示したものである。同図によれば、クリアランス h_c が大きいかほど鉛直管下端からの濁質の流出は早くなる傾向を示している。なお、 $h_c=0.025\text{m}$ のケースでは、他のケースと比較して濁質の流出の遅れが顕著であることがわかる。