

鉛直管を用いた窪地埋め戻しによる 環境影響予測モデルの開発

環境水域工学分野 平野 辰昇

Abstract

窪地の埋め戻し工事を実施する際には、土砂投入に伴う流動によって、窪地内部の無酸素・硫化物水塊が周辺水域へと流出しないように配慮する必要がある。その対策の一つとして、鉛直管を用いて土砂を投入するトレミー工法が採用されている。本研究では鉛直管を用いた土砂投入に伴う流動および濁りの輸送を計算可能な数値モデルを開発した。開発したモデルを用いて、水平床および窪地の崖を想定した段差部での濁水塊の流動特性を検討した。その結果、窪地段差前面5mでの濁水塊の厚さが段差高の約8割以上であるときに、濁水塊の一部は段差を乗り越えることがわかった。また、濁水塊の厚さを制御するには鉛直管下端と水底との距離を短くすることが最も有効であることが示唆された。

1 研究背景

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、大規模な埋め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、浚渫窪地として、現在もなお点在している。周辺の海底に比べて掘り下げられているために、窪地内部では流速が減少し、水塊の停留や海水交換の悪化、懸濁物の沈降・集積傾向の増加の影響が生じる。また、窪地が富栄養化した海域にある場合は、貧酸素化や硫化物の発生といった顕著な水質の悪化が生じやすい。佐々木¹⁾は、東京湾湾奥で水質調査を行い、窪地内部では、青潮の発生因子である硫化物を含む水塊が恒常的にかつ高濃度で存在することを報告している。さらに、中村²⁾はそのような水塊は窪地内部にとどまらず、強風や潮流の影響を受けて、周辺の生物生産性の高い干潟や藻場にも移動し、深刻な生態的被害をもたらしている。

以上のような状況に鑑み、近年では、窪地を起源とする貧酸素・硫化物水塊の発生を抑制し、沿岸環境改善につなげることを目的に、泊地や航路、河口部堆積土砂の浚渫と連動して、窪地の埋め戻しが行われている³⁾。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部の貧酸素・硫化物水塊が急激に攪拌されて周辺海域へと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、図-1に示すような鉛直管内に土砂を投入するトレミー工法の採用が挙げられる⁴⁾。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伴う流動および濁りの輸送を計算可能な数値モデルを開発し、開発されたモデルを用いて、パラメトリック解析を行い、水平床および窪地の崖を想定した段差部での濁水塊流動特性に関する知見を得ることを目的とする。

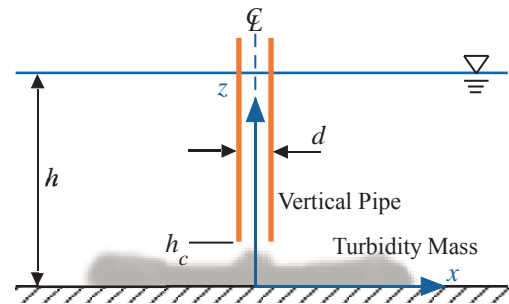


図-1 鉛直管を用いた土砂投入

2 開発した数値モデルの概要

2.1 基礎方程式

本研究で用いる基礎方程式は非圧縮性流体に対する連続の式(1)、Boussinesq近似を施したNavier-Stokes式(2)、密度関数 ϕ の移流方程式(4)、スカラー変数 $f(C)$;

濁度, S ; 塩分, T ; 水温, H_2S ; 硫化水素, DO ; 溶存酸素)の移流拡散方程式(3)である。流体密度 ρ は濁度・塩分・水温のみに依存するとし,濁水の密度の式およびKnudsenの式(5)より求める。なお,乱流モデルとしてLES(Large Eddy Simulation)を導入し,各方程式には格子スケール以上のGS(Grid Scale)成分とそれ以下のSGS(Sub Grid Scale)成分に分離するフィルター操作を施している。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho^*} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\bar{u}_i' \bar{u}_j' + 2\nu \bar{D}_{ij} \right) - \frac{\rho}{\rho^*} g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\bar{u}_i' f_i' + D_f \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\bar{\rho} = f(\bar{S}, \bar{T}, \bar{C}) \quad (5)$$

ここに, $\bar{\cdot}$ はGS成分, \cdot' はSGS成分, u_i は各方向流速, ρ^* は基準密度, p は圧力, g_i は重力加速度, ν は動粘性係数, D_{ij} はひずみ速度テンソル($=1/2(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)$), ε は相対密度差($=\rho/\rho^*$), δ_{ij} はKroneckerのデルタ, D_f はスカラー量の分子拡散係数である。式(2),式(3)中の乱流応力 $-\bar{u}_i' \bar{u}_j'$, $-\bar{u}_i' f_i'$ はそれぞれ式(6)のように表せる。

$$-\bar{u}_i' \bar{u}_j' = 2\nu_t \bar{D}_{ij}, \quad -\bar{u}_i' f_i' = \frac{\nu_t}{S_c} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \quad (6)$$

ここに, ν_t は渦動粘性係数, S_c は乱流シュミット数($=1/1.2$)である。なお, ν_t の算出には,式(7)に示すように密度勾配が乱流応力に及ぼす効果を考慮した重枝ら⁵⁾による修正Smagorinskyモデルを用いた。

$$\nu_t = (C_s f_s \Delta)^2 \left(|\bar{D}|^2 + \frac{g_i}{\rho^* S_c} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ここに, Δ はフィルター幅, C_s はSmagorinsky定数($=0.173$), f_s は壁領域でのvan Driestの減衰関数である。また,式(7)中の $|\bar{D}|$ は式(8)のように定義される。

$$|\bar{D}| = \left(2\bar{D}_{ij} \bar{D}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

2.2 投入材料の粒径分布に応じた濁質輸送モデル

濁度の輸送を計算する際には,投入材料の粒径分布に応じた濁質の沈降を考慮するため,濁水を粒径別存在比により分別した粒径別濁水塊 $m(m=1, n_d)$ の重ね合わせとして,次式より解析する。なお, n_d は粒径別濁水塊の個数である。

$$\frac{\partial \bar{C}^m}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i + w_c^m \delta_{i3}) \bar{C}^m}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\bar{u}_i' C^m + D_c \frac{\partial \bar{C}^m}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

ここに, \bar{C}^m は粒径別濁度, w_c^m は土粒子の粒径別沈降速度, δ_{ij} はKroneckerのデルタ, D_c は濁度の分子拡散係数である。 \bar{C}^m は,次式により合成した濁度 \bar{C} に変換される。

$$\bar{C} = \sum_{m=1}^{n_d} \bar{C}^m \quad (10)$$

土粒子の粒径別沈降速度 w_c^m は,米山ら⁶⁾に倣い,次式のAllenによる実験式を用いた。

$$w_c^m = 0.223\nu^{\frac{1}{3}} \left\{ (\rho_s - \rho_f) \rho_f g \right\}^{\frac{2}{3}} d^m \quad (11)$$

ここに, d^m は土粒子の粒径, s は粒子の比重($=\rho_s/\rho_f$)である。

2.3 解析方法と数値計算の流れ

計算にはデカルト座標格子を用い,流速はスタッガード配置,スカラー量は計算セル中央に配置とし,基礎方程式の離散化については時間項を一次精度のオイラー陽解差分,移流項を二次精度の上流差分,拡散項を二次精度の中心差分とした。

本数値モデルの計算フローを図-2に示す。基礎方程式は,SMAC(Simplified Marker and Cell)法の手順で計算を行い,圧力に関するPoisson方程式の解法には多重格子法(Multi Grid Method)⁷⁾を用いた。水面変動は(4)を用いてHirtら⁸⁾によるVOF(Volume Of Fluid)法により解析した。また,スカラー変数の輸送計算においてもVOF法と同様にDonar-Acceptor法を用いて計算を行った。ただし,濁度の輸送計算においては,土粒子の沈降速度が作用するため,底面近傍セルでは土粒子の沈降速度分の濁質フラックスを底面への堆積とみなし,計算領域から取り除いた。硫化水素およびDOの計算においては,田中⁹⁾による還元物質の酸化速度モデルを導入し,計算を行った。

3 開発した数値モデルの検証

本研究で開発した数値モデルを用いて,鉛直管を用いた土砂投入に伴う流動の再現性を検証するために,金澤ら¹⁰⁾による室内実験緒元を参考に計算を行い,結果の比較を行った。

3.1 計算条件

図-3に計算条件を示す。鉛直管の中心軸と水底との交点に座標原点を取り,水平方向に x 軸を,鉛直上向きに z 軸を取り,現象の対称性を考慮して x 軸の正の領域のみを計算対象とした。 $x \cdot z$ 方向の計算領域を $lx=3.2m$, $lz=0.48m$, $x \cdot z$ 方向の格子間隔を $\Delta x = \Delta z = 0.005m$, $x \cdot z$ 方向の計算メッシュ数を $nx=640$, $nz=96$,鉛直管下端部

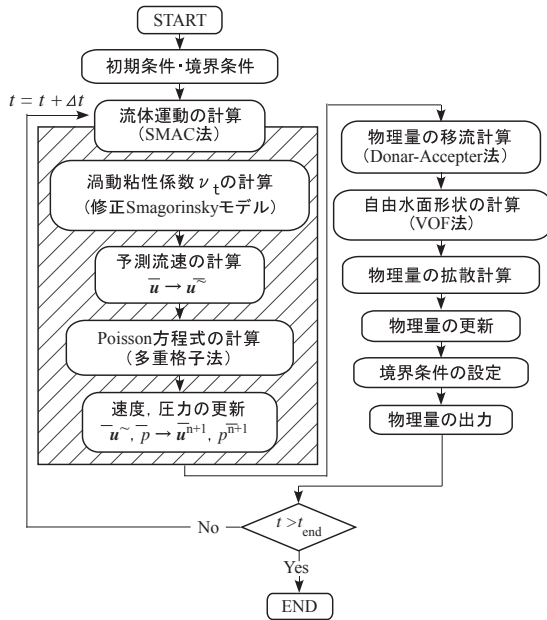


図-2 数値計算の流れ

と水底とのクリアランス h_c は 0.075m 、水深 h は 0.45m 、時間刻み間隔は $\Delta t = 10^{-3}\text{s}$ 、管径 d は 0.05m 、段差高 h_d は 0m 、段差角 θ は 0° とした。また、投入材として、領域左上端の水面下に位置する 5×8 メッシュで、初期濁度 $C_{ini} = 534\text{kg/m}^3$ ($\rho_1 = 1334\text{kg/m}^3$) を与え、その他領域に $\rho_2 = 1000\text{kg/m}^3$ の流体をそれぞれ配置した。ここで、投入材は室内実験での粒度試験結果を参考に、各粒径 $1.0375 \times 10^{-3}\text{m}$ 、 $4.0 \times 10^{-5}\text{m}$ 、 $5.0 \times 10^{-6}\text{m}$ で構成される粒径別濁水塊の重ね合わせとし、その割合はそれぞれ 4% 、 35% 、 61% とした。境界条件は、計算領域左端で Free-Slip 条件、右端で Sommerfeld 放射条件、下端で No-Slip 条件、そして自由液面においては自由液面境界条件を課した。

3.2 計算結果

図-4 は、鉛直管に投入された土砂が水底に衝突した後、濁水塊となって x 軸正方向に進行し、その先端部が $x = 1.25\text{m}$ に到達した時刻における濁度の空間分布を示している。同図によれば、計算結果は、実験結果にみられるような底面を層状に這うような濁水塊の流動を再現できていることがわかる。一方、両者の到達時刻を比較すれば、計算結果は実験結果に比べて、約 14 秒早く到達している。また、計算結果では、濁水塊先端部の厚さが比較的大きく計算されていることがわかる。

図-5 に、 $x = 0.325\text{m}$ 、 0.625m 、 1.25m 、 $z = 0.02\text{m}$ での水平方向流速 u の経時変化を示す。同図によれば、計算結果は、各測点で実験結果より約 $1.5 \sim 2$ 倍程度の最大値を取っていることがわかる。一方、鉛直管から x 軸正方向に進行する濁水塊の先端部が各測点に到達すると

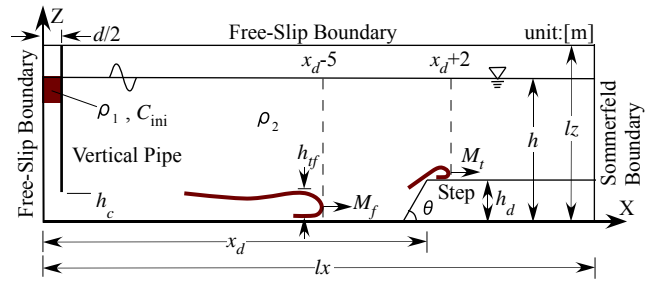
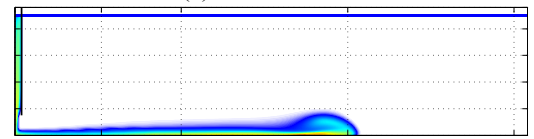


図-3 計算条件



(a) 実験 50 秒後



(b) 計算 36 秒後

図-4 $x = 1.25\text{m}$ 到達時刻における濁度の空間分布の比較

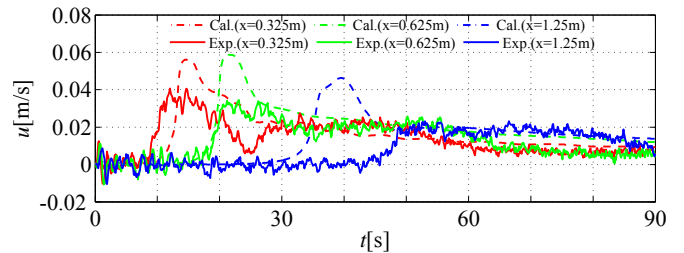


図-5 各測点での水平方向流速 u の経時変化の比較 ($z = 0.02\text{m}$)

同時に最大値を取り、その後、徐々に減衰していく傾向を再現できていることなどから、本数値モデルを用いて定性的に現象を再現可能であることが検証された。

4 鉛直管を用いた土砂投入に伴う水平床部での濁水塊流動特性

鉛直管を用いた土砂投入に伴う水平床部での濁水塊流動特性について、土砂投入量 C_{ini} 、クリアランス h_c を変化させて計算を行い、それぞれが濁水塊の流動特性に及ぼす影響について検討を行った。ここで、濁水塊の流動特性とは、濁水塊の水平運動量 M および濁水塊の厚さ h_t とした。ここに、濁水塊の水平運動量 M は、濁質量 tu (濁度 C と計算セル体積 V との積) と水平流速 u の積で表されるものとし、濁水塊の厚さ h_t は、重

枝ら⁵⁾に倣って、底面から連続的に $C = 0.483\text{kg/m}^3$ 以上の値をもつ位置までの距離とした。

4.1 計算条件

図-3 に計算条件を示す。 $x \cdot z$ 方向の計算領域を $l_x = 179.2\text{m}$, $l_z = 19.2\text{m}$, $x \cdot z$ 方向の格子間隔を $\Delta x = \Delta z = 0.2\text{m}$, $x \cdot z$ 方向の計算メッシュ数を $n_x = 896$, $n_z = 96$ とした。また、水深 h は 15m , 管径 d は 2m , 時間ステップ間隔 $\Delta t = 10^{-2}\text{s}$ とした。初期条件として、領域左上端の水面下に位置する 5×8 メッシュで、密度 ρ_1 (C_{ini} に依存) の流体, その他領域に $\rho_2 = 1000\text{kg/m}^3$ の流体をそれぞれ配置した。また、投入量 C_{ini} を 356kg/m^3 , 534kg/m^3 , 801kg/m^3 , クリアランス h_c を 2m , 3m , 5m と変更して、合計 9 ケースの計算を行った。境界条件は、左側面で Free-Slip 境界, 右側側面で Sommerfeld の放射流出条件, 底面で No-Slip 条件, 自由水面では自由液面境界条件を課した。

4.2 計算結果

図-6 に、無次元最大水平運動量 M_{max}^* の空間分布を示す。図中、横軸はクリアランス h_c で除した無次元水平距離 x/h_c である。縦軸は、 $x = 1\text{m}$, 25m , 50m , 75m , 100m での最大水平運動量 M_{max} を密度フルード数 $((\rho_s - \rho_f)/\rho_s \cdot gh)^{1/2}$ と初期濁質総量 tu_{ini} の積で除した無次元最大水平運動量 M_{max}^* を表している。同図によれば、いずれのケースも x/h_c が $0 \sim 5$ の間の鉛直管近くで最大値を取った後、指数関数的に減衰する傾向にあり、 x/h_c が 50 になると、ゼロに接近することが読み取れる。よって、鉛直管を用いた土砂投入に伴う有意な運動量の到達範囲は、 h_c の 50 倍程度の水平距離と推察される。また、同図中、投入量 C_{ini} が 801kg/m^3 の塗りつぶされたプロットがいずれの地点においても比較的大きな値を示していることから、水平運動量 M には、検討したパラメータの中で投入量が最も大きな影響を及ぼすパラメータであることがわかった。

図-7 に無次元最大濁水厚さ ht_{max}/h_c の空間分布を示す。図中、横軸はクリアランス h_c で除した無次元水平距離 x/h_c である。縦軸は $x = 1\text{m}$, 25m , 50m , 75m , 100m での最大濁水厚さ ht_{max} をクリアランス h_c で除した無次元最大濁水厚さ ht_{max}/h_c を表している。同図によれば、無次元最大濁水厚さ ht_{max}/h_c は、クリアランス h_c によって分類され、それぞれ一本の直線上に乗るように見える。また、鉛直管から水平方向に離れるに従って無次元最大濁水厚さ ht_{max}/h_c は線形的に増加することがわかる。これは、金澤ら¹⁰⁾による既往の見解と相反する傾向を示している。この要因としては、移流項差分精度や拡散項の計算手法に改善の余地があるものと考えられ、本数値モデルの課題として挙げられる。

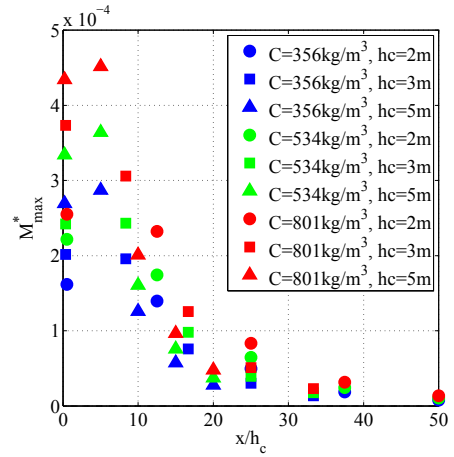


図-6 無次元最大水平運動量 M_{max}^* の空間分布

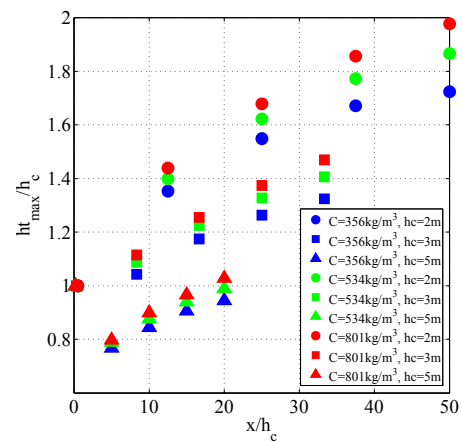


図-7 無次元最大濁水塊厚さ ht_{max}/h_c の空間分布

5 鉛直管を用いた土砂投入に伴う段差部での濁水塊流動特性

鉛直管を用いた土砂投入に伴う段差部での濁水塊の流動特性について、投入位置 x_d , 段差高 h_d , 段差角 θ を変化させて計算を行い、濁水塊が段差を乗り越えるかに注目して検討を行った。濁水塊が段差を乗り越えたかについては、段差端部より x 軸正方向に 2m ($x_d + 2\text{m}$) での濁水塊の水平運動量 M_t が有意な値を示すかどうかで判断した。

5.1 計算条件

図-3 に計算条件を示す。図中、各数値は大坂湾堺浜窪地の緒元を参考に決定した。 $x \cdot z$ 方向の計算領域を $l_x = 128\text{m}$, $l_z = 19.2\text{m}$, $x \cdot z$ 方向の格子間隔を $\Delta x = \Delta z = 0.2\text{m}$, $x \cdot z$ 方向の計算メッシュ数を $n_x = 640$, $n_z = 96$ とした。また、水深 h は 16m , 管径 d は 2m , 時間刻み間隔 $\Delta t = 10^{-2}\text{s}$, 計算時間は 1000s とした。初期条件として、領域左上端の水面下に位置する 5×8 メッシュに密

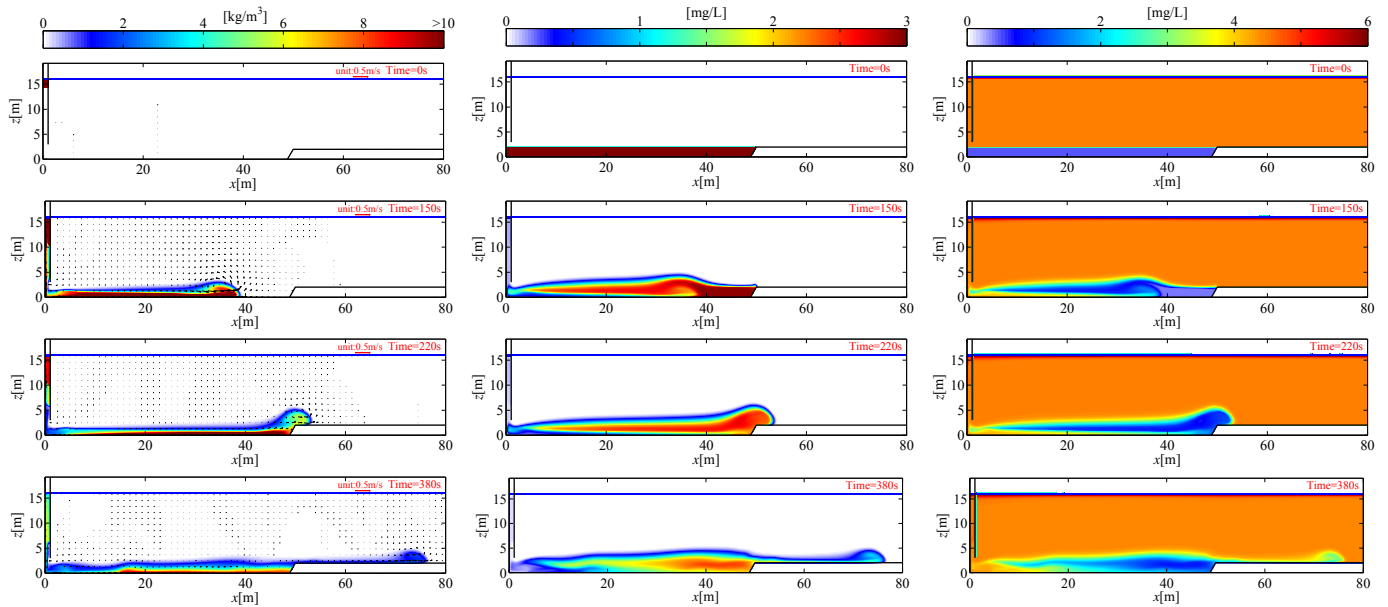


図-8 各時刻における濁度と流速ベクトルの空間分布

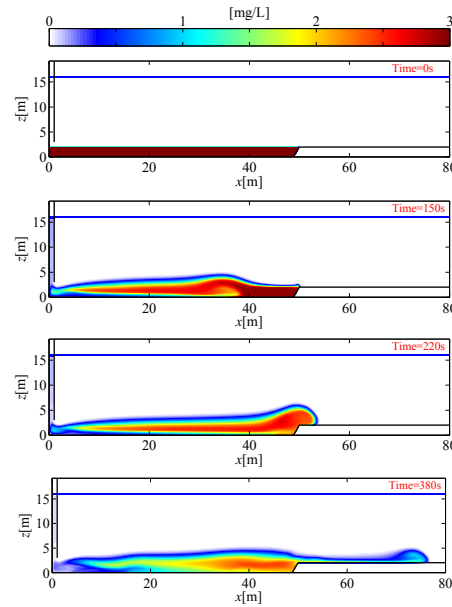


図-9 各時刻における硫化水素濃度の空間分布

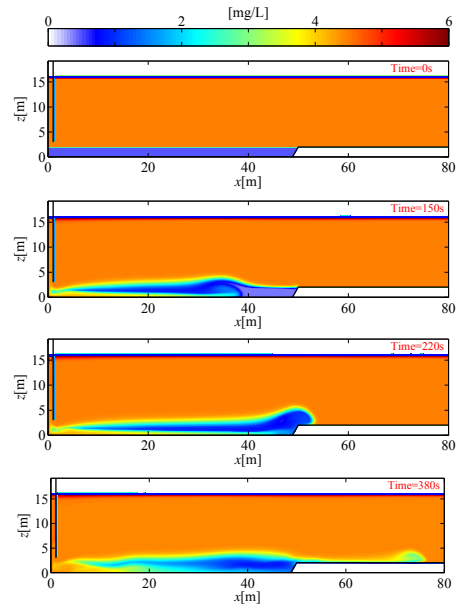


図-10 各時刻におけるDO濃度の空間分布

度 $\rho_1=1334\text{kg/m}^3$ ($C_{ini}=534\text{kg/m}^3$) の流体，その他領域に $\rho_2=1021\text{kg/m}^3$ の流体をそれぞれ配置した．また，投入位置 x_d を 25m, 50m, 75m, 段差高 h_d を 2m, 4m, 6m, 段差角 θ を $60^\circ, 90^\circ$ とそれぞれ変更して，合計 18 ケースの計算を行った．また，窪地の埋め戻し工事を想定し，硫化水素および DO 濃度の輸送を計算した．田中ら⁹⁾を参考に，硫化水素は，全水平領域にわたって水底から段差上面の範囲で 3mg/l の値を与え，その他領域で 0mg/l を与えた．また，DO 濃度は全水平領域にわたって水底から段差上面の範囲で 0.5mg/l ，その他領域で 5mg/l を与えた．なお，気液界面では，DO 濃度が飽和状態にあることを仮定し，水表面計算セル内にて，塩分濃度で補正した，飽和 DO 濃度を与えた．塩分および水温については，全計算領域で，32psu, 25 を一定として与えた．境界条件は，左側面で Free-Slip 境界，右側側面で Sommerfeld の放射条件，底面で No-Slip 条件，自由水面では自由液面境界条件を課した．

5.2 計算結果

投入位置 $x_d=50\text{m}$ ，段差高 $h_d=2\text{m}$ ，段差角 $\theta = 60^\circ$ の計算ケースにおける土砂投入開始 0 秒，150 秒，220 秒，380 秒後の濁度，硫化水素濃度，DO 濃度の空間分布を図-8，図-9，図-10 に示す．図-8 によれば，土砂投入開始 150 秒後に濁水塊の先端部が段差前 10m まで進行し，土砂投入開始 220 秒後には，濁水塊の先端部が段差を乗り越えようとしている様子が確認される．そして，土砂投入開始 380 秒後には，濁水塊の一部は段差上を層状に進行していき，また，段差を乗り越えられなかった濁水塊は，重力の影響で x 軸負の方向へと反射して

いくことが計算されている．図-9 および図-10 によれば，硫化水素濃度と DO 濃度は，濁水塊の流動に追従して輸送されている様子がみられ，土砂投入開始 380 秒後には濁水塊の一部の流動に引きずられ，段差の外へと流出していくことがわかる．

図-11 に投入位置 $x_d=50\text{m}$ ，段差高 $h_d=2\text{m}$ ，段差角 $\theta = 60^\circ$ の計算ケースにおける $x=25\text{m}$ ， $x_d-5\text{m}$ ， $x_d+2\text{m}$ での無次元水平運動量 M^* の経時変化を示す．同図，縦軸は濁水塊の水平運動量 M を密度フルード数 $((\rho_s - \rho_f)/\rho_s \cdot gh)^{1/2}$ と投入濁質量 tu_{ini} の積で除した無次元水平運動量 M^* を表す．同図によれば，濁水塊はその水平運動量を徐々に減衰させながら，段差に接近していく様子がわかる．そして，土砂投入開始約 220 秒後には，段差上 $x_d+2\text{m}$ で，段差前 $x_d-5\text{m}$ での約 0.4 倍程度の M^* の値を示しており，流動が段差を乗り越えていることがわかる．

図-12 に，段差前面 5m での濁水塊の無次元最大水平運動量 M_{fmax}^* および段差前面 5m での濁水塊の無次元最大厚さ h_{tfmax}/h_d と段差端部から x 軸正方向に 2m での濁水塊の無次元最大水平運動量 M_{imax}^* との関係を示す．図中，横軸は，段差前面 5m での濁水塊の最大水平運動量 M_{fmax} を密度フルード数 $((\rho_s - \rho_f)/\rho_s \cdot gh)^{1/2}$ と初期濁質総量 tu_{ini} の積で除した無次元最大水平運動量 M_{fmax}^* を表している．縦軸は，段差前面 5m での濁水塊の最大厚さ h_{tfmax} を段差高 h_d で除した無次元最大厚さ h_{tfmax}/h_d である．図中，プロットの大きさは，横軸と同様な手順で無次元化した段差端部から x 軸正方向に 2m での濁水塊の無次元最大水平運動量 M_{imax}^* の大きさを表している．なお，塗りつぶされたプロットは， M_{imax}^* が有意な値をもつ（濁水塊が段差を乗り越えている）ことを示しており，中抜きプロットは， M_{imax}^* がゼロ（濁水塊

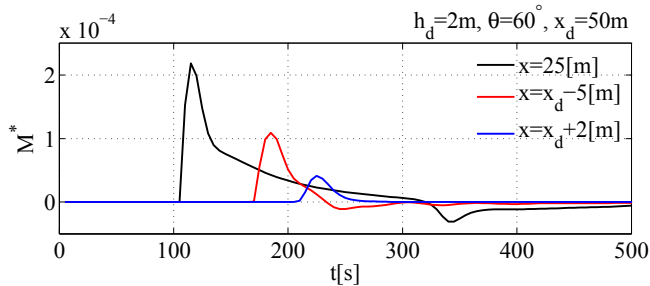


図-11 無次元水平運動量 M^* の経時変化

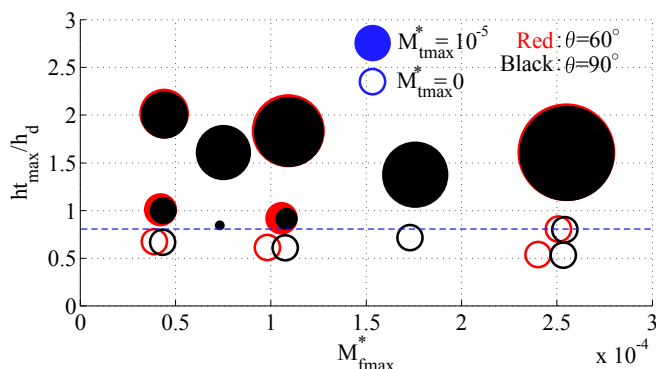


図-12 段差前面 5m での濁水塊の無次元最大水平運動量 M^*_{fmax} および段差前面 5m での濁水塊の無次元最大厚さ h_{tfmax}/h_d と段差端部から x 軸正方向に 2m での濁水塊の無次元最大水平運動量 M^*_{tmax} との関係

が段差を乗り越えていない)であることを示している。また、図中、赤いプロットは、段差角 θ が 60° のケースを、黒いプロットは、 θ が 90° のケースを表している。なお、同図作成にあたっては、クリアランス h_c を 2m、段差角 θ を 90° 、と一定とし、投入位置 x_d を $25m \cdot 50m$ 、段差高 h_p を $2m \cdot 4m$ と変更して、計 4 ケースの計算を追加で行っている。同図によれば、 h_{tfmax}/h_d が約 0.8 以上のとき、すなわち、窪地段差前面 5m での濁水塊の最大厚さ h_{tfmax} が段差高 h_d の約 8 割以上の大きさをもつときに濁水塊の流動は段差を乗り越えていることがわかる。また、濁水塊の流動が段差を乗り越えているケースについては、 M^*_{fmax} と h_{tfmax}/h_d が大きくなるにつれて、より大きな運動量をもった流動が段差を乗り越える傾向にあることが確認できる。また、計算ケースによって違いはあるものの、段差角 θ が 90° のケースに比べて、段差角 θ が 60° のケースの方が、比較的大きな流動が段差を乗り越えることが推算された。

6 結論

本研究で得られた結論を要約すると、以下のようである。

- 鉛直管を用いた土砂投入に伴う流動および濁りの輸送を計算可能な数値モデルを開発した。
- 開発した数値モデルを用いて、鉛直管を用いた土砂投入に伴う流動の再現性を検証した結果、既往の室内実験結果との定性的な一致を確認した。
- 鉛直管を用いた土砂投入に伴う水平床部での濁水塊流動特性について検討した結果、濁水塊の水平方向運動量の抑制に対しては、土砂の投入量（投入濁質量）が、また、濁水塊の厚さの抑制に対しては、クリアランスの制御が最も有効であることがわかった。
- 鉛直管を用いた土砂投入に伴う段差部での濁水塊流動特性について検討した結果、窪地段差前面 5m での濁水塊の厚さが段差高の約 8 割以上であるときに、濁水塊は段差を乗り越えることが推算された。

参考文献

- [1] 佐々木淳, 磯部雅彦, 渡辺晃, 五明美智男 (1996): 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, Vol.47, pp.1111-1115.
- [2] 中村由行 (2008). 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, Vol.9, pp.33-36.
- [3] 国土交通省近畿地方整備局 (2007): 大阪湾窪地対策に関する技術的検討業務報告書.
- [4] 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, Vol.49, pp.896-900.
- [5] 重枝未玲, 秋山壽一郎, 杉山誉 (2008): LES 乱流モデルを用いた水平流動する単一粒径・二粒径混合粒子サーマルの数値解析, 水工学論文集, Vol.52, pp.1249-1254.
- [6] 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, Vol.50, pp.733-738.
- [7] J.H. ファーツィガー, M. ペリッチ (2003): コンピュータによる流体力学, p.419.
- [8] C.W.Hirt and B.D.Nichols(1981): Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of computational physics*, pp.201-225.
- [9] 田中宏史, 重松孝昌, 遠藤徹 (2011): 還元物質の酸化速度を考慮した底層への酸素供給による環境改善効果に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.67, pp.1096-1100.
- [10] 金澤剛, 重松孝昌 (2010): 鉛直管を用いた土砂投入に伴う水塊流動の段差部での挙動について, 土木学会第 66 回年次学術講演会.

討議等

討議 [大島昭彦教授]

投入土砂を濁水塊として捉えることは妥当か？

回答：窪地の埋戻し工事では、投入材料として比較的粒径の小さな浚渫粘性土砂が主に用いられます。この浚渫粘性土砂は、含水率が比較的高く、流動性を有していることから濁水塊として捉えることは妥当であると考えています。

討議 [大島昭彦教授]

三次元ではなく二次元で検討を行った理由は？

回答：三次元的に水理模型実験を行う場合、流速や濁度などの諸量を計測することが難しいことから、二次元的に行われているのが現状です。したがって、本研究では、二次元数値モデルを用いて室内実験結果との比較を行い、その妥当性を検証した上で、濁水塊の流動について検討しました。

討議 [大島昭彦教授]

窪地を埋め戻す土砂を確保するために、海底土砂を掘削すれば、また別の窪地が形成されることとなり、堂々巡りにならないか？

回答：泊地や航路では、船舶が航行できるように十分な水深を確保する必要があります。しかし、流れによる海底での土粒子の輸送に伴って、泊地や航路には土砂が堆積するため、定期的に浚渫を行う必要があります。窪地の埋戻し工事において用いられる土砂は、主にこの泊地や航路の浚渫土砂であるため、新たに窪地を形成するということはありません。

討議 [重松孝昌教授]

鉛直管を用いた土砂投入に伴う段差部での濁水塊の流動特性の検討において、段差前面 5m での濁水塊の水平運動量およびその厚さと段差端部より x 軸正方向に 2m での濁水塊の水平運動量の関係性をみているが、この段差前 5m および段差端部より x 軸正方向に 2m の位置を選択した理由は？

回答：段差端部より x 軸正方向に 2m での濁水塊の水平運動量を計測した理由は、既存の水理模型実験において、現地換算で同位置における流速を計測し、濁水塊が段差を乗り越えたか否かの判断指標としていたため、それに倣って設定しました。また、濁水塊が段差を乗り越える条件を検討するにあたって、段差到達直前での濁水塊の最大厚さと段差高および段差角との関係を調べる際に、段差の影響を受けない状態で、濁水塊の最大厚さを検出するために、段差前面から 5m の間隔を設けて計測を行いました。

討議 [大島昭彦教授]

濁水塊の粒径分布は、実際には滑らかな曲線を描くが、数値計算において考慮可能か？

回答：計算負荷の問題はありますが、計算する粒径別濁水塊の輸送方程式を増やせば、実際の投入材料の粒径分布を考慮して解析を行うことは可能です。

討議 [水谷聡准教授]

硫化水素および DO は濁水塊と同じような原理で輸送されるのか？

回答：本研究では、硫化水素濃度および DO 濃度は窪地内部に存在する還元的な水塊として捉え、濁水塊と同様に流体现象としてその輸送を計算しています。

討議 [水谷聡准教授]

硫化水素および DO の輸送計算を行う際に、それらの化学的な反応は考慮しているか？

回答：硫化水素の酸化速度のモデル化に関する既往の研究を参考に、本数値モデルに硫化水素の酸化反応モデルおよび DO の消費モデルを導入し、両者の化学的な反応を考慮しています。