鉛直管を用いた窪地埋戻し工によって発生する 濁水塊の周辺海域への流出条件に関する検討

A Study on Outflow Condition from a Dredged Trench of Turbid Water Induced by Backfill using 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 turbidity flow induced by backfill using a vertical pipe, a numerical model has been developed. As a result of analysis on outflow condition from a dredged trench of the turbid water by the developed model, turbid water spreads out of a dredged trench when its thickness in front of the wall is more than 80 percent of height of the wall. Further, water including sulfide and oxygen-poor water in a dredged trench outflow anytime turbidity mass outflows from a dredged trench. In addition, it is figured out that impact to surrounding sea areas by the backfill can be controlled by the sediment dumping time interval.

1. はじめに

開発の進んだ内湾には、沿岸の埋立地造成のために海底土砂を採取した浚渫窪地が点在している。このような窪地は、硫化物や貧酸素水塊の発生など、湾スケールの生態系に深刻な影響を及ぼす水質問題の原因となっておりとの指摘があり、近年では、沿岸環境の改善のため窪地を埋め戻す取り組みがなされ始めている（国土交通省近畿地方整備局，2007）。

窪地の埋め戻しの際には、誘起される流動によって、窪地内部に存在すると考えられる有害な硫化物・貧酸素水塊が、周辺海域へと極力流出しないように配慮することが求められており、その対策のひとつとして、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ることがある。鉛直管を用いた土砂投入に伴う濁水塊の流動を予測するモデルは、著者らが開発を進めており、その流動特性について検討を行っている（平野ら，2010，2012）。一方で、それらの研究は、水平床部での濁水塊の基本的な流動特性を検討するに留まっており、濁水塊の窪地壁周辺部での流動を検討したものではなかった。そこで、本研究では、鉛直管を用いた窪地埋戻し工によって発生する濁水塊の流動を予測できる数値モデルを開発し、開発したモデルを用いて、濁水塊が窪地壁を乗り越える条件について検討することを目的とする。

2. 基礎方程式

(1) 流動モデル

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、Boussinesq近似を施したNavier-Stokes式、スカラー変数 ϕ の移流拡散方程式、および、水温 T 、塩分 S 、濁度 C からなる密度 ρ の構成式である。

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

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

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\bar{u}_i' \bar{\phi}' + D_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{\rho} = f(\bar{T}, \bar{S}, \bar{C}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\bar{\quad}$ および $\bar{\quad}'$ は、それぞれ、GS（Grid Scale）成分、SGS（Sub Grid Scale）成分を表し、 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（ $=1/2 (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$ ）、 D_ϕ はスカラー変数の分子拡散係数である。また、初期濁度 C_{ini} は、投入土砂の土粒子密度 ρ_s および含水比を用いて算出した。なお、本研究で開発したモデルでは、スカラー変数として濁度・水温・塩分・DO・硫化水素を扱うことができる。また、乱流モデルとしてLES（Large Eddy Simulation）を導入し、渦動粘性係数のモデル化には重枝ら（2008）による修正Smagorinskyモデルを用いている。詳細は、平野ら（2010，2012）を参照されたい。

(2) 硫化水素およびDO動態モデル

硫化水素は還元物質であり、DOが存在すれば容易に酸化反応を起こすことが知られている。よって、硫化水

1 正会員 修(工) 日立造船株式会社 機械・インフラ本部
2 正会員 博(工) 大阪市立大学教授 工学研究科都市系専攻
3 正会員 博(工) 東洋建設(株)鳴尾研究所

素とDOの動態を計算するためには、両者の相互作用をモデル化する必要がある。田中ら(2011)は、慢性的な貧酸素化が確認される河川の水(感潮河川を対象としているため、淡水ではなく海水である)を用いた室内実験を行い、硫化水素の減少は酸化反応のみに依存すると仮定した上で、硫化水素およびDO動態を以下のように定式化している。

$$\frac{\partial C_{H_2S}}{\partial t} = -\alpha_1 K_{H_2S} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_1 = 1 + A_1 \times (T - 20) / K_{H_2S} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = -\alpha_1 \beta K_{H_2S} - \alpha_2 (1 - \gamma) K_W \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\alpha_2 = 1 + A_2 \times (T - 20) / K_W \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 C_{H_2S} は硫化水素濃度、 C_{DO} は溶存酸素濃度、 K_{H_2S} は硫化水素減少速度、 K_W は水のDO消費速度、 $\alpha_1 \cdot \alpha_2$ は温度補正係数、 β は硫化水素とDOの反応比、 γ は硫化水素の存在による水のDO消費抑制係数である。また、硫化水素濃度によって硫化水素減少速度およびDO消費速度が変化すると仮定し、水中の硫化水素濃度を、(1) $C_{H_2S} = 0 \text{mg/l}$, (2) $0 \text{mg/l} \leq C_{H_2S} \leq 0.2 \text{mg/l}$, (3) $0.2 \text{mg/l} \leq C_{H_2S} \leq 0.5 \text{mg/l}$, (4) $0.5 \text{mg/l} \leq C_{H_2S}$ の4段階に場合分けして K_{H_2S} と K_W を設定している。本モデルでは、この田中ら(2011)の定式化に倣って、硫化水素およびDOの動態を計算している。

3. 濁水塊の流動特性

本研究で開発したモデルを用いて、鉛直管を用いた窪地埋戻し工によって発生する濁水塊の流動特性を検討し、濁水塊が窪地から流出する条件について検討を行った。

なお、本検討では、濁水塊の拡がり特性および窪地流出条件の基本特性を把握することを目的として、鉛直2次元計算を行っている。また、円筒座標系は用いていない。

(1) 計算条件

計算条件は、図-1のように設定した。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 軸を取った。現象の対称性を考慮して x 軸の正領域のみを計算の対象とした。 x, z 方向の計算領域を $\ell_x = 128 \text{m}$, $\ell_z = 19.2 \text{m}$, x, z 方向の格子間隔を $\Delta x = \Delta z =$

表-1 計算条件

x_d [m]	h_d [m]	θ [°]
25	2	60
50	4	90
75	6	-

0.2m, x, z 方向の計算メッシュ数を $n_x = 640$, $n_z = 96$ とした。水深 h は16m, 鉛直管の管径 d は2m, 鉛直管下端部と水底とのクリアランス h_c は3mとし、計算のタイムステップは $\Delta t = 10^{-2} \text{s}$ 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、初期濁度 $C_{ini} = 534 \text{kg/m}^3$ ($\rho_1 = 1334 \text{kg/m}^3$)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。濁質を構成するのは、粒径 $d_1 = 5.0 \times 10^{-6} \text{m}$, $d_2 = 4.0 \times 10^{-5} \text{m}$, $d_3 = 1.0 \times 10^{-3} \text{m}$ の3種類の粒子で、それぞれ、4%, 35%, 61%の割合で混合されているものとした。塩分 S および水温 T は、全計算領域でそれぞれ、32psu, 25°C を一定値として与えた。また、窪地の埋戻し工事を想定し、硫化水素およびDOの輸送を計算した。田中ら(2011)を参考に、硫化水素およびDOはそれぞれ、 $0 \leq z \leq h_d$ で 3mg/l , 0.5mg/l , $h_d \leq z \leq h$ で 0mg/l , 5mg/l を与えた。なお、境界条件として、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、水面で自由液面境界条件を課するとともに、鉛直管壁面でNo-Slip条件を課した。

本研究で扱う現象に影響を及ぼすと考えられる要因として、初期濁度 C_{ini} 、投入位置と窪地壁面との距離 x_d 、窪地深さ h_d 、窪地壁面傾斜角 θ などが考えられるが、ここでは、表-1に示すように条件を変えて、合計18ケースの計算を行った。

(2) 計算結果

まず、図-2、図-3、図-4に、鉛直管と窪地壁との距離 $x_d = 50 \text{m}$, 窪地深さ $h_d = 2 \text{m}$, 窪地傾斜角 $\theta = 60^\circ$ の場合における、濁度 C , 硫化水素 C_{H_2S} , 溶存酸素 C_{DO} の分布を示す。図-2によれば、 x 軸正方向へと底面を這うように移動する濁水塊が窪地壁に到達すると、窪地壁を越えて周辺海域へ流出する濁水塊と、窪地壁によって反射されて x 軸負の方向へと進行していく濁水塊があることがわかる。図-3および図-4によれば、このような濁水塊の流動に伴って、硫化水素や低酸素濃度の水塊が窪地から流出することが分かる。本計算条件下では、硫化水素を含む水塊および低酸素濃度水塊が窪地外へ流出するときには、かならず、濁質が窪地外へ流出していることを確認した。すなわち、鉛直管を用いた窪地埋戻し工事を実施するにあたっては、工事に伴って発生する濁水塊の流動を可能な限り正確に予測しながら工事を実施し、周辺環

図-1 計算概要

図-2 濁度 C の分布 図-3 硫化水素 CH_{2S} の分布 図-4 溶存酸素 C_{DO} の分布 図-5 土砂堆積量 B^* の分布

境への影響を考慮する必要があると言える。

図-5に、上記の条件において、計算開始1000秒後の土砂堆積量の分布を示す。図には、土砂堆積量 B を投入濁質量 t_{ini} で除した無次元堆積量 B^* として示している。同図によれば、 $d_2=4 \times 10^{-5}m$ および $d_3=1 \times 10^{-3}m$ の粒径の大きな粒子は、鉛直管付近で堆積量のピーク値を取る一方で、 $d_1=5 \times 10^{-6}m$ の粒径の小さな粒子は、鉛直管よりやや離れた地点で堆積量のピーク値を取ることが分かる。すなわち、窪地から流出する濁水塊は微細粒子で構成されており、したがって、微細粒子で構成される濁水塊の流動特性を正確に把握する必要があることが分かる。なお、 $x=50m$ の地点で d_1 および d_2 の粒子の堆積量が急減するのは、窪地壁の影響である。本研究で構築したプログラムにおいて、濁水塊の移動速度は、濁質を構成する土粒子濃度に基づいて計算される密度差を起動力とするので、上記のような粒子の堆積過程が濁水塊の流動に影響を及ぼす。平野ら (2012) は、水平床を対象としてパラメトリック解析を行い、濁水塊の最大水平流速 u_{max} と鉛直管からの距離との関係を、図-6のように整理している。なお、同図では、最大水平流速 u_{max} を $((\rho_s - \rho_f) gh / \rho_s)^{1/2}$ (ρ_f : 水の密度) で除した無次元量 u^*_{max} で評価している。同図によれば、濁水塊の最大水平流速は、鉛直管近傍で最大値を取り、鉛直管から離れるとともに指数関数的に減少する傾向にあることがわかる。

図-6 濁水塊の最大水平流速の分布

図-7、図-8、図-9は、窪地深さ $h_d=4m$ 、窪地傾斜角 $\theta=60^\circ$ の条件で、鉛直管と窪地壁との距離 x_d が25, 50, 75mの場合について、窪地壁に到達したときの濁水塊の挙動を表したものである。 $x_d=25m$ の場合には、窪地壁に到達した濁水塊は壁面上を上昇するものの、窪地より流出することなく窪地壁面から反射するように x の負方向に進んでいく。一方、 $x_d=50, 75m$ の場合には、 $x_d=25m$ の場合と同様に壁面上を上昇し、その後、窪地より流出していく様子が計算されている。なお、 $x_d=50m$ の場合と比較して $x_d=75m$ の場合の方が窪地上面での濁水塊の流動は大きいことが分かる。前述の鉛直管からの距離と濁水塊の水平速度の関係を考慮すれば、 x_d が小さいほど窪地壁に到達する際の濁水塊の移動速度は速いと判断されるが、窪地から流出するのは x_d が大きい場合である。すなわち、濁水塊の水平速度は、窪地からの流出の判定指標としては適切ではないことがわかる。

前述のように、粒径が比較的大きな土粒子は早い段階で水底に堆積するので、濁水塊はその濃度を低下させながら水底上を進行することになる。その一方で、平野ら

図-7 濁水塊の流動

(x_d = 25m, h_d = 4m, θ = 60[deg.])

図-8 濁水塊の流動

(x_d = 50m, h_d = 4m, θ = 60[deg.])

図-9 濁水塊の流動

(x_d = 75m, h_d = 4m, θ = 60[deg.])

図-10 水平運動量M*の経時変化

図-11 x_d=5mでの無次元最大水平運動量M*_{fmax}および無次元最大厚さh_{fmax}/h_dとx_d+2mでの無次元最大水平運動量M*_{tmax}との関係

(2012)は、本モデルによれば、濁水塊の先端部の厚さ h_t は進行とともに増加する傾向を示すことを報告している。任意の x における濁水塊の水平運動量は、

$$M = \int_0^h C u dz \quad \dots\dots\dots (9)$$

と表される。

図-10は、図-2に示した場合の濁質の水平運動量 M を、 $((\rho_s - \rho_f) gh / \rho_s)^{1/2}$ と初期濁質総量 t_{uni} で除して無次元化して示したものである。図中には、 $x=25$ 、 x_d-5 、 x_d+2 mにおける無次元水平運動量 M^* を示している。図-7、図-8、図-9に示したように、窪地壁面位置 x_d における水平速度を検討しても濁質の流出の有無の検討には直接結びつかなかったで、ここでは、 $x=x_d-5$ 、 x_d+2 mの位置における M^* を示している。同図より、 $x=25$ mにおける M^* のピーク値よりも $x=x_d-5$ mにおけるピーク値が低くなっており、濁水塊の運動量は進行とともに減少していることがわかる。 $x=x_d+2$ mにおける運動量 M^* が正の値を有していることより、濁水塊が窪地壁を越えて周辺水域に流出していることがわかる。

図-11に、 $x=x_d-5$ mでの無次元最大水平運動量 M_{fmax}^* を横軸に、同位置における最大厚さ h_{fmax} を窪地壁高 h_d で除した無次元最大厚さ h_{fmax}/h_d を縦軸にとり、 $x=x_d+2$ mにおける無次元最大水平運動量 M_{tmax}^* との関係を示す。ここに、 M_f および h_f はそれぞれ $x=x_d-5$ mでの濁水塊の水平

運動量、厚さを表す。なお、上記の条件に加えて、クリアランス $h_c=2$ m、窪地傾斜角 $\theta=90^\circ$ の条件で、鉛直管と窪地壁との距離が $x_d=25, 50$ m、窪地深さが $h_d=2, 4$ mの条件でも計算を行っている。同図において、円の大きさは M_{tmax}^* の大きさを表しており、中抜き円は $M_{tmax}^*=0$ であることを、すなわち、濁水塊は窪地から流出しなかったことを意味している。図-11によれば、 $h_{fmax}/h_d < 0.8$ であれば中抜き円となっていることが分かる。すなわち、窪地壁前面 $x=x_d-5$ mにおける最大運動量 M_{fmax}^* に関わらず、 $h_{fmax}/h_d > 0.8$ になれば濁水塊が窪地壁を越えて周辺水域に流出する濁水の運動量 M_{tmax}^* は、 M_{fmax}^* が大きいほど大きくなる傾向があることが分かる。

実工事では、バックホウ等で鉛直管に土砂を連続的に投入する場合があると考えられる。そこで、土砂の投入時間間隔が現象に及ぼす影響について検討した。鉛直管と窪地壁面との距離 $x_d=75$ m、窪地深さ $h_d=4$ m、窪地傾斜角 $\theta=60^\circ$ の条件下で、投入間隔 ΔT を変えて土砂を三連続投入した場合の計算を行った。図-12、図-13、図-14は、それぞれ、 $\Delta T=40$ 秒、200秒、400秒として計算した場合の、濁度 C の空間分布を表している。図-12に示すように、比較的投入間隔が短い $\Delta T=40$ 秒の場合には、1投目と2投

図-14 濁度 C の空間分布 ($\Delta T = 400$ s) 図-15 投入間隔による M_t^* の経時変化の相違

目による濁水塊は鉛直管内部でひとかたまりとなって勢よく鉛直管から流出した後に水底上を進行し、窪地壁面を越えていくことが分かる。第3投目による濁水塊がその後を追いかけるように窪地壁面に向かっていく様子もわかる。 $\Delta T=200$ 秒の場合には、1投目と2投目による濁水塊はそれぞれ分離して鉛直管から流出するが、窪地壁面に第1投目による濁水塊の先端が到達する際には、第2投目による濁水塊がすぐ背後に迫る状態となっており、1投目の濁水塊を2投目のそれが押し上げるようになっていくことがわかる（図-13参照）。 $\Delta T=400$ 秒の場合には、それぞれの投入による濁水塊は個別に窪地壁面に到達している様子が、図-14より見て取ることができる。

図-15は、 ΔT を上記のように変えて計算を行った場合の、 $x_d + 2$ mにおける無次元水平運動量 M_t^* の経時変化を示したものである。同図によれば、投入間隔が最も短い $\Delta T=40$ 秒のケースでは、他のケースに比べて M_t^* の第1ピーク値が最も大きな値を取るが、第3投目の影響による流出はないことが確認される。一方、 $\Delta T=200$ 秒および400秒の場合には、流出の第1ピークおよび第2ピークの出現時間およびその大きさに大きな差はないが、第3ピークには大きな相違が見られる。これらのことは、投入間隔を制御することによって周辺海域への影響を抑制できる可能性を示唆するとともに、連続的に投入する場合にはそれぞれの投入によって発生する濁水塊が互いに干渉し合いながら水底上を移動し、その結果として、窪

地壁面に到達する際の状況を予測することの困難さも示唆しているものと考えられる。

4. 結論

本研究では、鉛直管を用いた窪地埋戻し工によって発生する濁水塊の流動を計算できる数値モデルを開発し、濁水塊が窪地壁を越えて周辺水域に流出する条件について検討した。結果を要約すると以下のものである。

- (1) 濁水塊が窪地から周辺水域に流出する場合には、硫化物・低酸素水塊も流出する。
- (2) 濁水塊が窪地壁面に到達するときの水平速度で窪地からの流出の有無を判定することはできない。
- (3) 窪地壁前面5mにおいて、窪地深さに対する最大濁水塊厚さの比が0.8以上になれば、濁水塊が窪地壁より流出する。
- (4) 連続的に土砂を投入する際に、投入時間間隔が現象に及ぼす影響を検討した結果、投入時間間隔を制御することによって周辺海域への影響を抑制できる可能性が示唆された。

参考文献

- 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。
- 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。
- 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。
- 平野辰昇，重松孝昌，金澤 剛（2010）：鉛直管を用いた水域に投入される濁水塊の流動予測手法の開発，海岸工学論文集，Vol.66，pp.751-755。
- 平野辰昇，重松孝昌，金澤 剛（2012）：鉛直管を用いた土砂投入に伴う濁水塊の流動特性に関するパラメトリック解析，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.68，（印刷中）。