

底泥の巻き上げ特性を考慮した3次元温度密度流解析について

Three dimensional analysis of temperature density considering the rolling up of the bottom mud

水工事業本部 水工第1部 濱木 道大



概要 (Abstract)

高度成長期以降、我が国では産業や経済の発展に伴い流域の開発が進み、湖沼や旧川跡などの閉鎖性水域(霞ヶ浦、印旛沼など)では水質・底質の悪化が深刻な問題となっている。

本論文では、北海道の閉鎖性水域となっている旧川跡において、水質改善を目的とした導水事業における導流水の拡散状況と底泥の巻き上げ状況について検討した。導流水の拡散状況は、3次元温度密度流解析を用いて予測し、底泥の巻き上げ特性(巻き上げ限界流速)は、既往の研究結果を参考に設定した。また、解析結果より、巻き上げ対策に必要な施設形状や範囲等を検討した。

1. はじめに

高度成長期以降、我が国では産業や経済の発展に伴い流域の開発が進み、河川や湖沼の富栄養化が進んでいる。特に湖沼や旧川跡などの閉鎖性水域(霞ヶ浦、印旛沼など)では水質・底質の悪化が深刻な問題となっており、大規模な導水計画や、底泥対策、流入土砂対策などの水質浄化対策が行われている。

霞ヶ浦の導水事業は、那珂川下流部、霞ヶ浦および利根川下流部をつなぐ地下トンネルを建設し、相互に水をやりとりすることで、それぞれの河川に必要な水量を補間しあい、流域全体で水質浄化、安定した水資源の確保を目的としている。導水に際しては、既に堆積しているヘドロなどの底泥から有機塩類の拡散を防止するために、巻き上げ対策が検討されている。

北海道においても、治水安全度の向上のために河川のショートカットなどの河川整備が行われ、旧川跡が閉鎖性水域として残り、水質悪化が進んでいる。

本論文では、北海道の閉鎖性水域となっている旧川跡において、水質改善を目的とした導水事業における、導流水の拡散状況と底泥の巻き上げ状況について検討した。導流水の拡散状況は、3次元温度密度流解析を用いて予測し、底泥の巻き上げ特性(巻き上げ限界流速)は、既往の研究結果を参考に設定した。解析結果より、巻き上

げ対策に必要な施設形状や範囲等を検討した。

2. 温度密度流解析モデル

一般に閉鎖性水域では、河川水などと比べ、日射量により水温が上昇しやすい。そこに水温の低い河川水を導水すると、水温の低い導流水が底層に潜り込みながら水平方向に拡散することで、旧川跡に堆積した底泥などを巻き上げる恐れがある。このような、導流水の挙動を予測するためには、3次元温度密度流解析を用いる必要がある。

本論文では、導流水の挙動を予測するモデルとして、3次元のレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式に、温度密度流を考慮した $k-\epsilon$ 乱流モデル(各種定数は一般的な値)を用いた。¹⁾²⁾

2.1 3次元流れの基礎式

3次元流れの連続式を(1)式、運動方程式を(2)~(4)、熱収支式を(5)式で与える。図-1に基礎式の座標系を示す。

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u^2) + \frac{\partial}{\partial y} (uv) + \frac{\partial}{\partial z} (uw) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(vw) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_T \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(2v_T \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_T \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uw) + \frac{\partial}{\partial y}(vw) + \frac{\partial}{\partial z}(w^2) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_T \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v_T \left\{ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(2v_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (5)$$

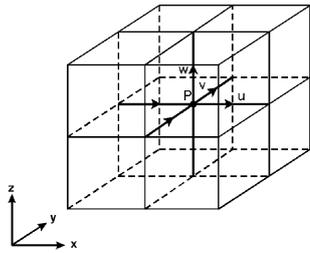


図-1 座標系

ただし、 ρ は流体の密度、 c_s は水中での音速、 t は時間、 P は圧力、 x, y, z はデカルト座標系の座標軸、 u, v, w は x, y, z 方向の流速、 v_T は渦動粘性係数、 k は乱れエネルギー、 g は重力加速度、 T は温度、 D_h, D_v は水平・鉛直方向の拡散係数である。

2.2 k-ε乱流モデル

$k-\varepsilon$ 乱流モデル¹⁾²⁾³⁾は、乱流によるレイノルズ応力の変化を渦動粘性係数 v_T の変化で表現し、 v_T を乱れエネルギー k と乱れエネルギーの逸散率 ε で表現する手法である。

ここで、 v_T は(6)式で、 k, ε の保存式は(7)、(8)式で与える。

$$v_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P_t + B - \varepsilon \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P_t - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \dots\dots\dots (8)$$

$$P_t = v_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (9)$$

$$B = \frac{g}{\rho} \frac{v_T}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial z} \dots\dots\dots (10)$$

$$(F_k, F_\varepsilon) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $c_\mu, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, \sigma_t, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ は経験定数であり、表-1 に示す値を一般的な値として使用している。

表-1 k-ε乱流モデルの定数

c_μ	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	σ_t	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	0.9	1.0	1.3

2.3 流速分布

流速分布は対数分布則で仮定し、(12)式で与える。²⁾

$$\frac{u(z_b)}{u_*} = \left(8.5 + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z_b}{k_s} \right) \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 z_b は河床面からの高さ、 $u(z_b)$ は z_b における x 方向の流速、 u_* は摩擦速度、 κ はカルマン定数、 k_s は相当粗度である。

相当粗度 k_s をマニングの粗度係数 n から換算するにはマニングストリッカーの式より導かれた(13)式で与える。⁴⁾

$$n \approx \frac{k_s^{1/6}}{24} \dots\dots\dots (13)$$

3. 底泥の巻き上げ発生条件

底泥の巻き上げ限界、洗掘速度等については、霞ヶ浦導水事業関連の検討や研究において、多くの成果が報告されている。検討対象旧川跡の底泥と霞ヶ浦底泥の物性値がほぼ同等であったため、両者は同様な洗掘特性をもっていると仮定し、旧川跡の底泥の巻き上げ限界を推定した。梅田ら⁵⁾は、既往の研究結果に加え、霞ヶ浦底泥を用いた室内実験より底泥の洗掘速度を次のように定式化している。

$$E = 9.2 \times 10^1 (\tau - 0.7\tau_y)^{1.0} (\rho_s' - \rho_w)^{-1.2} \dots\dots\dots (14)$$

$$\rho_s' = \frac{\rho_w \rho_s (W + 100)}{\rho_s W + 100 \rho_w} \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 E は洗掘速度[mm/min]、 τ は底面せん断応力、 τ_y は降伏応力、 ρ_s 'は底泥の見かけ密度、 ρ_s は底泥の密度、 ρ_w は水の密度、 u は流速[m/s]、 W は含水比[%]である。

この関係式は、現場での実用性を考慮して洗掘速度を含水比と流速の関数としているため、温度密度流解析により底面付近の流速を求めることで、巻き上げが発生する範囲を特定することが可能となる。また、 E が0以下となる含水比と流速の組み合わせであれば、底泥の巻き上げ(洗掘・侵食)が発生しない条件となる。

底泥の洗掘速度式(14)式を用いて、旧川跡の底泥の含水比から底泥の巻き上げ限界流速(洗掘速度が0となる流速)を求めると、図-2のように0.3~0.45m/sの範囲にある。

地点Cの含水比を用いれば、巻き上げ限界流速は0.45m/s程度と推定されるが、局所的な含水比の違いなどを考慮して、安全側の条件となる地点Aの最大含水比829%による底泥の巻き上げ限界流速0.3m/sを旧川跡の底泥の巻き上げ限界流速として設定した。

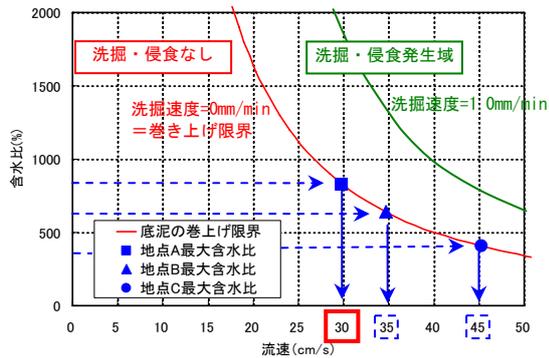


図-2 底泥の洗掘速度と流速・含水比との関係

4. 予測計算結果

4.1 計算条件

計算条件は、表-2 に示すように導水量と対策の有無について感度分析を行うように設定し、その他の条件は表-3、図-3 のように設定した。

表-2 密度流に関する感度分析ケース一覧表

導水流量	対策なし	対策あり ^{注)}
5m ³ /s	Case1-1	-
10m ³ /s	Case1-2	-
15m ³ /s(最大)	Case1-3	Case2-3

注)対策工の形状や範囲はトライアルにより設定

表-3 計算条件一覧表

計算条件	設定内容
初期条件	初期水位:0.30m ※平水位の10年平均 初期水温:20℃ ※6~9月頃を想定 相当粗度:マニング粗度係数より換算※(13)式
境界条件(下流端境界)	下流端境界は、導水地点から約1km先 水位:0.30m(一定) ※初期条件から変化しない 水温:20℃(一定) ※初期条件から変化しない
導水条件	流量と対策ありなしによる違い(表-2) 水温 16℃(一定) ※観測値の最大水温差
河道条件	平面形状:H15年度改修計画平面図 河床形状:H15年度横断データ ※浮泥高 H19年度導水箇所測量データ
計算格子点	水平方向:18m 間隔(42×70点)、6m(67×67点)、 2m(115×65点)の複合計算メッシュ 水深方向:1m 間隔
巻き上げ限界流速	巻き上げ限界流速:0.3m/s(図-2)
計算時間	30分程度 静水状態(流速0)から、ほぼ定常状態となる時間

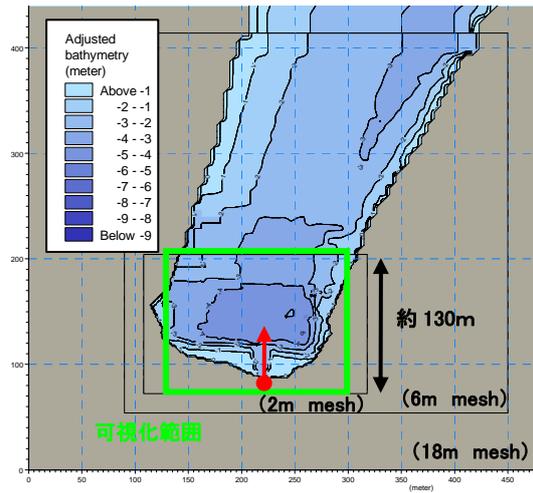


図-3 河床コンター図

4.2 計算結果

各ケースの流速コンター図を平面的に示したものを図-4に、流速コンター・流速ベクトル図を深さ方向に階層表示したものを図-5に示した。

これらによると、導水量 10m³/s 以下では、底泥付近の流速は、ほとんどの範囲で0.3m/s以下となり、底泥巻き上げ限界流速を下回るが、導水量 15m³/s では、直進方向に広範囲にわたり巻き上げ限界を超える流速が発生することがわかった。

また、対策工による巻き上げ対策としては、杭や水制等を設置することにより、流水の直進性を阻害して、流速を減速し、拡散させる方法が、底泥の巻き上げ抑制に有効であることがわかった。

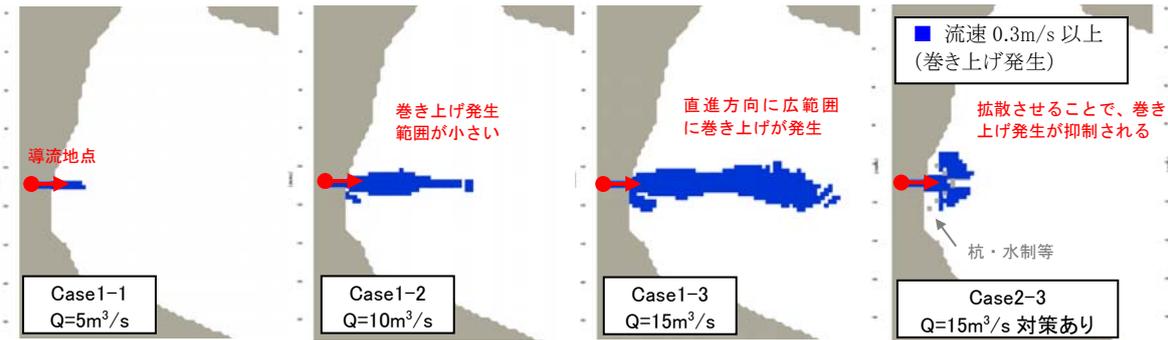


図-4 流速コンター図(水深 1.0m~4.0m 各層の流速 0.3m/s 以上のみを重ね合わせたもの)

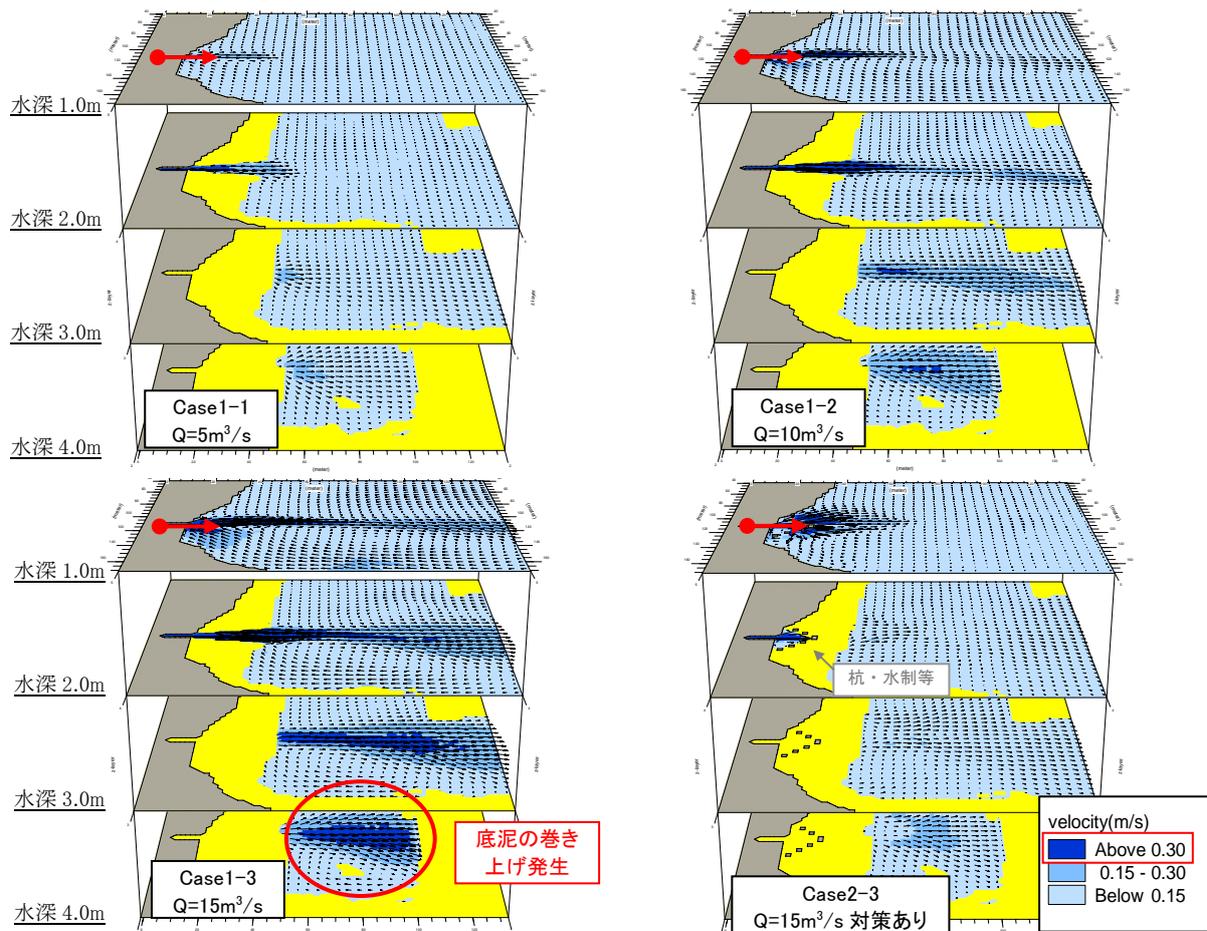


図-5 流速コンター&流速ベクトル図(水深 1.0m~4.0m の各層を階層表示)

5. まとめと今後の課題

以上より、効果的・効率的な底泥の巻き上げ対策案は以下のとおりである。

拡散案: 導水吐口から半径 15m 程度の範囲に、杭や水制のような対策工を設置し、流水の直進性を阻害

取水制限案: 導水流量を $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下に制限して、底泥付近の流速を限界流速以下に抑制

今後は、旧川跡の底泥を用いた洗掘限界の把握や、試験導水のモニタリング等により再現検証を行い、予測精度向上を図る必要がある。

また、下水処理水の温排水やダム湖等の水質問題、感潮域での塩水遡上問題等への本手法の応用が期待される。

1) MIKE 3 FLOW MODEL Hydrodynamic Module Scientific Documentation, DHI, 2008

2) 水理公式集[平成 11 年度版], (社)土木学会, 1999.11

3) 中山頭・桑原不二朗・許国良: 熱流体力学, pp.75-97, 2002.2

4) 荒木正夫・椿東一郎: 水理学演習, pp.8, 1962.5

5) 梅田信, 高峰一, 石川忠晴, 大滝諭, 市山誠: 霞ヶ浦底泥の洗掘仮定に関する実験的研究, 土木学会論文集 No740/II-64, pp63-73, 2003.8