旧川を対象とした混合粒径モデルによる3次元濁質予測計算の試み

Trial Study on 3-D Turbidity Simulation in an Oxbow Lake with mixed-size particle movement model

(独)	土木研究所寒地土木研究所	○正員	横山	洋	(Hiroshi Yokoyama)
		正員	村瀬	竜也	(Tatsuya Murase)
		正員	山下	彰司	(Shoji Yamashita)

1. はじめに

著者らは石狩川の旧川である茨戸川をフィールドとし て旧川の水質予測モデル構築を進めている. 茨戸川を対 象とした水質予測は,現在までに濱原らによる1次元ボ ックスモデル¹⁾,杉原らによる2次元鉛直モデル²⁾によ る実施例がある.両モデルでは水質の再現や長期予測, 水質改善事業の効果検討も行われ,実用的なレベルに達 しているといえる.

一方,茨戸川には有機質や栄養塩を多く含む高含水比 の底質が堆積している.濱原らは茨戸川におけるリン供 給の7割が底質巻上げに由来すると報告している¹⁾.ゆ えに底質の巻上げ及び沈降量は水質予測のモデル精度に 大きく影響する.茨戸川の既往水質予測モデルにおいて, 底質の巻上げ,沈降は現地観測からパラメータを同定し ている.しかし現地の懸濁物はシルト,粘土に該当する 粒径成分が大半を占め,また有機物が多いため,水中で の挙動は複雑である.ゆえに底質からの巻上げ,沈降の 定量化検討には粒径の影響を考慮することが重要である.

底質の粒径を考慮した濁質予測の例には、堀田らによ るダム湖を対象としたもの³⁾、関らによる霞ヶ浦を対象 としたもの⁴⁾がある.梅田らはダム湖を対象に、一定粒 径以下の沈降は Stokes 則ではなく、確率的要素にも基 づくと仮定して検証を行っている⁵⁾、細粒分が濁質に大 きく影響する旧川の解析には、既往研究の視点からも底 質の粒径等を考慮したモデル化が必要といえる.

また流動計算の上でも1次元,2次元モデルには以下



図-1 茨戸川流域図

の課題が残っている. 茨戸川は石狩川の蛇行旧河道であ り, 平面形状, 横断面ともに蛇行低水路の特徴が残って いる. 湖内流動が風から受ける影響は, 平面及び横断形 状により局所的に異なる. また茨戸川は感潮区間であり, 平水時における主たる流出入は下流端での石狩川との流 量交換によるものである. 潮汐の影響は上流に向かうに 従い弱くなり, 閉鎖性が強くなる. これら複雑な流動が 生じる水域の水理現象の考察には, 従来の1次元あるい は2 次元鉛直モデルでは流況再現性は十分ではなく, 3 次元モデルによる解析が必要となる.3 次元モデルによ る水質予測及びそれを用いた水質改善策の検討例として, 天野らは印旛沼を対象に水質予測モデルを構築し, 水生 植物による底質巻上げ抑制効果についても検討を行って いる^の. このように3次元モデルによる解析も多くの閉 鎖性水域に適用され,実用化されつつある.

本研究では静水圧3次元かつ混合粒径を考慮した濁質 予測計算モデルの構築を試みている. 底質の巻上げ・沈 降は,著者らの既往研究⁷⁾をもとに,巻上げは風との関 係,沈降は粒径と密度の関数で表現した.本研究は旧川 をはじめ,有機物を多く含む底質が存在する閉鎖性水域 の水質予測の精度向上に資するものと考える.

2. 計算モデルの概説

計算モデルは静水圧3次元流れと水温,濁度の方程式 で構成される.現地観測では最大流速は概ね 10cm/s で あり,静水圧近似は妥当と考えた.計算座標系は,蛇行 旧河道を表現するため,平面方向は清水による直交曲線 座標系を採用した⁸⁾.鉛直方向は,格子間隔を一定にし た平面・多層モデルを採用した⁹⁾.以下に基礎式を示す. s方向運動方程式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s}$$
(1)
+ $\frac{\partial}{\partial s} \left(D_s \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(D_n \frac{\partial u}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$

n 方向運動方程式:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}$$
(2)
+ $\frac{\partial}{\partial s} \left(D_s \frac{\partial v}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(D_n \frac{\partial v}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)$

z 方向運動式:

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \tag{3}$$

水温収支の式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial s} + v \frac{\partial T}{\partial n} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial s} \left(D_s \frac{\partial T}{\partial s} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial n} \left(D_n \frac{\partial T}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{H}{\rho c_w}$$
(4)

SS 収支の式(粒径ごとに計算):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial s} + v \frac{\partial C}{\partial n} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial s} \left(D_s \frac{\partial C}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(D_n \frac{\partial C}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S$$
(5)

ここでs, n, z:河道の主流、法線及び鉛直方向の座標 軸,r:各格子の曲率半径,u, v, w: s, n, z方向の 流速成分, ρ :水の密度,p:圧力, $D_s, D_n, D_z: s,$ n, z方向の拡散係数,h:水深,T:水温,C:SS 濃度, c_w :水の比熱,H:日射によるエネルギー項, S:SS 生成及び消滅項である.

各水深における w は、計算セルの流量収支から以下 のとおり算出する.

$$w_{i,j,k} = w_{i,j,k-1} - \int_{z_b}^{z} \frac{\partial u}{\partial s} dz - \int_{z_b}^{z} \frac{\partial v}{\partial n} dz$$
(6)

ここで添字の *i,j,k* は計算格子の番号, ^Z_b:河床高, *Z*:格子番号*k*の河床高である.

水位 η は以下の式で算出している.

$$\eta^{n+1} = \eta^n + w_{i,i,ks} \Delta t \tag{7}$$

ここで Δt :計算ステップ, W_{i,j,k_s} :表層の鉛直方向流速, 添字のnは現時刻, n+1は Δt 後を示す.

式(5)の SS 生成及び消滅項 S は、各メッシュにおけ る底質の巻上げ、沈降の収支で表現される.

$$S_{i,j,k} = \frac{q_{s_{i,j}} + w_{f_{i,j,k}} C_{i,j,k+1} - w_{f_{i,j,k-1}} C_{i,j,k}}{\Delta z}$$
(8)

ここで $q_{si,j}$:格子点 ij における底質巻上げ量(底層に 当たる格子のみ), $w_{f_{i,j,k}}$:格子点 ij,k における SS の 沈降速度, $C_{i,j,k}$:当該メッシュの SS 濃度である.右 辺第2項は計算格子上部からの沈降物流入分,第3項は 格子下部から流出分にあたる.なお表層格子では右辺第 2項は当然ながら0である.

計算対象領域は茨戸川の最上流端にあたる上部湖盆部 分(図-1 参照:流下方向延長約 2,400m, 平均川幅約 200m)である. 図-2 に計算領域の河床高及び平面格子 分割を示す.格子間隔は流下方向が概ね 100m, 法線方 向は概ね 20m, 鉛直方向は 0.5m である.

計算対象期間は2006年7月13日0時より7月20日 0時までの1週間である.対象区間の上流端は流入なし, 下流端は山口橋(狭窄部)における国土交通省の観測水

表-1 水平及び鉛直方向拡散係数(単位:m²/s)

方程式	水平方向(s,n)	鉛直方向(z)
運動式:(1),(2)	10.0	0.00001
水温収支:(4)	10.0	0.00001
SS 収支:(5)	10.0	0.001

表-2 巻上げの粒径成分

粒径	分類	構成比	中央粒径
(μm)		p _i (%)	$d_{50} \ (\mu m)$
1.0~12.94	粘土・シルト	(20)	6.45
12.94~22.05	シルト	20	17.50
22.05 ~ 32.73	シルト	20	27.39
32.73 ~ 53.48	シルト	20	43.11
53.48 ~ 100	シルト・砂	20	76.74



位を与えた.下流端は自由端条件とし,流速,SS,水 温の流下方向勾配は0としている.

表層での熱量交換については,濱原らによる方法¹⁾を 用いた.また最下層では地下水と底質表層間の熱交換を 考慮した.付与した気象条件は気象庁アメダスデータ ¹⁰⁾(風速,気温,日照時間は石狩観測所,相対湿度,日 射量は石狩観測所の近傍である札幌観測所の測定値)を 用いている.降雨が水温に及ぼす影響は考慮しない.

初期水温及び SS は全領域で一定とし,2006 年 7 月 13 日 0 時の上部湖盆観測点における多項目水質計の計 測値¹¹⁾をもとに現地水質で作成した検量線で変化した ものを与えている.

流下方向,横断方向及び鉛直方向の拡散係数は,表-1 に示す定数で与えた.拡散係数は対象物理量の水平・鉛 直分布や流況に応じて変動するものであり,躍層の形成 状況に応じた手法¹²⁾や,乱流モデル¹³⁾によるもの等, 様々な手法が実用化されている.しかし本研究は沈降試 験から得られた粒子の沈降モデルが水質予測に妥当であ るかを検証することが主目的であり,拡散効果は簡便な 手法で評価する.

表層では運動式に風によるせん断応力が付加される. 風のせん断力 τ_w は,式(12)で表層セルに与え,それを S, n方向に分解している¹⁴⁾.

$$\tau_w = \rho_a C_d W^2 \tag{9}$$

 $C_d = (1.29 - 0.024W) \times 10^{-3} (W < 8m/s)$ (9a)

 $C_d = (0.581 + 0.063W) \times 10^{-3} (W \ge 8m / s)$ (9b)

ここで ρ_a :空気の密度(=1.2kg/m³), W:石狩アメダス データによる風速である.今回の対象期間中の風速は 5m/s以下のため,実際には(9a)式のみでの評価となる.

3. 底質巻上げ及び沈降のモデル化

底質巻上げ量については、橘らにより、風速と巻上げ 量に比例関係があることが指摘されている¹⁵⁾.著者ら の現地観測でも比例関係が成り立つことを確認した.そ こで本モデルでは、2005~2007年の上部湖盆における 沈降物捕集量から、福島らの方法で分離した底質巻上げ 量¹⁶⁾と風速の相関式を以下のとおり作成した.

$$q_{si} = (180W - 140)p_i \quad (W \ge 1m/s)$$
 (10a)
 $q_{si} = 0 \quad (W < 1m/s)$ (10b)

ここで q_{si} : 粒径区分 i における底質巻上げ量($g/m^2/day$), W:石狩アメダスによる風速絶対値(m/s), p_i : 各粒径 成分の占める割合($\mathbf{z}-2$ で後述)である. 巻上げは水 深 2m 以上のとき,最下層の格子で生じるものとした.

巻上げ成分の粒径分布は 2006 年 7~9 月にかけて 6 回 実施したセジメントトラップによる沈降物捕集調査で採 取された捕集物の粒度分布の平均値を与えた. 表-2 に 粒径分布と代表粒径(中央粒径)を示す. 粒径分布の下 限値は 1μm, 上限値は Stokes 則の適用限界とされる 100μm としている.

SS 粒子の密度 ρ_s (g/cm³)は著者らが 2 次元モデルで提案した以下の式を用いる ⁷⁾.

$$\rho_s = 0.345 d_{50}^{0.47} \quad \left(10 \le d_{50} \le 75\,\mu m\right) \tag{11a}$$

 $\rho_s = 2.65$ $(d_{50} > 75 \mu m)$ (11b)

ここで*d*₅₀:**表−2**で示した中央粒径(µm)である.

SS は 2 次元計算と同様, 沈降形態に応じ 2 種類に分離して考える. 1 つは基底値であり, ほぼ常時浮遊する 成分(ここでは 06 年夏季の SS 最小値として 10mg/L), もう 1 つはそこからの変動分(底質からの再浮上及び沈降により変動する成分)である. \mathbf{z} -2 で網掛けした d_{50} が 10 μ m 以下の成分は基底値として扱い,式(10)で 示す p_i は 0 として取り扱った.



図−3 計算区間下流端における流量実測値と計算値







図-5 SS 実測と計算値(混合粒径,単一粒径)の比較

4. 計算結果及び考察

(1) 流速流向

図-3 は山口橋における観測流量と本計算での下流端 流出入量である(下流向きが正).流量の極大・極小値 及び発生時はほぼ同じであることから,計算区間内への 流出入評価は妥当である.

図-4 に上部湖盆観測点(河床上 1m及び 3.5m: 概ね 2 割水深と8割水深に該当)における ADCP 実測流速ベ クトルと計算ベクトルを比較したものを示す.全体とし て計算値は実測に比べやや大きい値である.風が流れに 及ぼす影響については,表層付近では概ね再現している が,一部に風の影響が強すぎる部分(7/19~20 日等)が ある.下層部は全体として表層部と反対向きの流れが生じている.7/14~15 日にかけては現況をほぼ再現しているが,その他はまだ十分な再現性とはいえない.

本稿では省略するが,風による流れへの影響は鉛直方 向の拡散係数により大きく変化する.現段階では試行計 算のため,拡散係数は一定値に固定しているが,今後は 混合の影響等を取り込む仕組みが必要である.

(2) SS

図-7 に SS 計算結果を示す. ここで実測値は多項目水 質計による濁度連続観測値¹¹⁾を前述した現地水質との 検量線により SS に換算した値である. なお単一粒径に よる計算は, 表-2 に示した成分のうち 12.94µm 以下の 成分は除外した中央粒径(41.8µm)で計算した. 全期間に おいて,計算による SS は過大である. これは式(10)に 示すとおり,巻上げ量が風速に比例するように設定して いるためである. また時期によっては表層と下層の SS にかなりの濃度差がある. 風による拡散係数の変化を組 み入れることで,ある程度の改善は考えられる. また単 一粒径による計算では,沈降速度が遅い成分を考慮して いないため,さらに実測値と異なる結果となった. なお 計算において最適な粒度分布については今後検証を進め る.

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる.

- 風速風向の変化による巻上げ状況の変化が予測される旧川を対象フィールドとして、静水圧3次元水質 予測モデルを作成した。
- 3 次元モデルにより流況は一部の流れの特性はある 程度表現した.また底質挙動は土粒子の単一粒径で はなく、土より密度の小さい密度でかつ粒径分布を 考慮することがモデリングに必要であることを確認 した.
- しかし巻上げ量の算定,拡散係数の扱いをはじめ, 多くの改善点が残されており,パラメータの感度分 析等が必要である.

上記のとおり計算モデル自体は改善を要する点が多く 残る.しかし今回の考察から,旧河道の流況計算にあた り,河道平面形による水位勾配の発生など,今後留意を 要する点をある程度把握できた.今後の計算実施に当っ て知見を得ることができたと考えている. 当研究実施に当り、国土交通省北海道開発局石狩川開 発建設部からは、現地データを提供いただいた.計算結 果の可視化は、(財)北海道河川防災研究センターの作 成した河川シミュレーション支援ソフト RIC-Nays (<u>http://i-ric.org/nays/ja/index.html</u>:)を用いた.ここに記 して謝意を表する.

参考文献

- 濱原能成,中津川誠,加藤晃司:都市集水域をもつ閉 鎖性水域の総合的水質解析,水工学論文集第48巻, 435-1440,2004
- 杉原幸樹、中津川誠、秋山泰祐、坂井一浩、益塚芳 雄:茨戸川の水質改善に向けた導水効果の検証、河川 技術論文集第14巻,491-496,2008
- 3) 堀田哲夫,東海林光、山下芳浩,陳飛勇:貯水池濁水 予測における濁質粒径の取り扱いに関する一考察,水 工学論文集第49巻,1123-1128,2005
- 4) 関智弥,福島武彦,今井章雄,松重一夫:霞ヶ浦の濁 度上昇と底泥巻き上げ現象,土木学会論文集 No.811/ Ⅶ-38, 149-161, 2006
- 5) 梅田信,池上迅,石川忠晴,富岡誠司:ダム貯水池に おける洪水時濁水挙動に関する数値解析,水工学論文 集第48巻,1363-1368,2004
- 6) 天野邦彦,時岡利和:印旛沼における底泥巻き上げ, 湖底の光環境と水生植物との相互関係,水工学論文集 第 50 巻, 1321-1326, 2006
- 7) 横山洋,山下彰司:底質沈降形態を考慮した旧川の水 質予測手法に関する研究,水工学論文集第53巻,2009
- 8) 清水康行:沖積河川における流れと河床変動の予測手 法に関する研究,開発土木研究所報告 No.93, 1991
- 9) 岩佐義郎,井上和也,劉樹坤,阿部徹:琵琶湖湖流の 三次元的な解析,京都大学防災研究所,第26号 B-2, 1983

10)気象庁ホームページ: <u>http://www.jma.go.jp/</u>

- 11)国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部:平成 18 年度 茨戸川外水環境調査業務報告書,2007
- 12) 例えば岩佐義朗: 数値水理学, 丸善, 134-135, 1995
- 13)例えば MEC モデル, http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/

14)水理公式集平成 11 年版, 497-498, 1999

- 15)橘治国,井上孝信:浅い湖沼における沈降物量の評価, 陸水学雑誌第57巻2号,163-171,1996
- 16)福島武彦,相崎守弘,村岡浩爾:浅い湖における沈殿 量の測定方法とその起源,国立公害研究所報告,第51 号,73-87,1984

謝辞: