

戦-52 寒冷水滞留域環境の再生、保持に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平成 18 年度～平成 22 年度

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全）

技術開発調整監（道央支所）

研究担当者：横山 洋、森田茂雄、鳥谷部寿人

水垣 滋、石谷隆始、村瀬竜也

【要旨】

北海道の河川には、大正期以降の捷水路工事等で人為的に形成されたものも含め、多くの河跡湖（旧川）が現在まで残っている。旧川等の閉鎖性水域では、細粒分が多い底質が形成されやすい。旧川の中には、流域からの汚濁負荷流入により、河床に多くの有機質や栄養塩が含まれた底質が形成され、風等の外力で巻き上げられた濁質により、栄養塩が再供給され水質が悪化する現象も見られている。本研究では、水質予測モデル水質に影響を及ぼす重要な因子の 1 つである水中懸濁質（SS）の挙動について、沈降試験結果により沈降過程を把握するとともに、粒径分布及び粒子密度を考慮した濁質予測モデルを作成し、現地現象の再現性向上を検討した。

キーワード：閉鎖性水域、底質巻上げ量、SS 沈降速度、混合粒径、濁質予測計算

1. はじめに

北海道の河川は、明治以降の開拓事業開始により、築堤や河道掘削をはじめとした河川改修工事が急速に進められた。それらの中で、農地開発のための地下水位の低下や、洪水流下能力の向上を目的に、蛇行河道を直線化する捷水路工事が、大正時代以降、各地で進められた。蛇行旧河道は河跡湖（旧川）として、道内各地に数多くその形跡を残している。これら旧川の中には、過大な汚濁負荷の流入により水質悪化が進行している水域も見られ、水質改善に向けて取り組みが進められている。

閉鎖性水域における水質改善策の効果検討や、水質の中長期的変動の予測に当り、水質シミュレーションが様々な箇所で行われ、水質改善手法の策定に当り重要な役割を果たしている¹⁾²⁾³⁾。一方、閉鎖性の強い水域では、粒径が細かく、有機物や栄養塩が多く含まれる底質が形成され、風などの外力による巻上げが、栄養塩の主たる供給源となっている¹⁾。底質の挙動解明に向け、現在までに様々な研究が進められているが、底質の巻上げ及び沈降プロセスは十分解明されていない部分も多い。底質挙動を把握し、水質シミュレーションに反映させることは、水質予測技術の向上において重要な要素である。

本研究では、石狩川下流域の代表的旧川である茨戸川を対象に、底質及び濁質挙動特性を考慮した水

質シミュレーションモデル開発に向けた調査検討を行っている。本研究は、旧川をはじめとして、有機物を多く含む底質が堆積した閉鎖性水域において、水質汚濁の機構の解明、水質予測手法の精度向上に当り、基礎的な知見を与えるものである。また北海道において、旧川は農業利水、漁業資源など、生活の場としての利用とともに、北海道らしい景観の構成要素にもなっている。本研究は良好な河川環境保全の検討・効果検証において、河川工学面からの技術向上に、重要な役割を果たすものと考えられる。

2. 調査手法の概要

まず本研究の対象領域である茨戸川の概要について述べる（図-1 参照）。茨戸川は、上流端は石狩川と分断されている。下流端は樋門を通じて石狩川と接続している。茨戸川は感潮区間であり、平水時は樋門が開放されているため、石狩川との間で日周期の流量交換が生じる。また茨戸川全体では 2 箇所の狭窄部があり、上流に向かうほど閉鎖性が強くなる。

図-1 に、現地調査実施地点及び内容を示す。水質は国土交通省で St.A1, A2 において水面下 20cm で多項目自記水質計（JFE アレック製 Compact-CLW）を設置し、濁度（カオリン換算）、クロロフィル a（ウラニン換算）、水温の連続自記観測を行っている⁴⁾。多項目水質計の機器出力値から水質への変換は、水



図-1 茨戸川調査地点

質分析結果との回帰式を作成して行った。詳細は参考文献 5) を参照されたい。

St.B1, B2, B3 では底質採取を行っている。ダイバーが目視で表層から 20cm まで底質を乱さないように柱状採泥を行った。採取試料は、土の粒度試験（ふるい分け、75 μm 以下は沈降試験）及び密度を分析した。

また底質の巻上げ量及び沈降速度の算定のため、2001 年から 2007 年にかけて、St.C1, C2, C3 にセジメントトラップを設置し、懸濁物を捕集し沈降量を計測している。捕集沈降物量からの底質巻上げの算定は、福島らの方法⁶⁾により行った。

図-2 及び図-3 は 2008 年に採取した底質の粒度分布（7~10 月までの 4 回採取分の平均値）、含水比及び密度である。茨戸川の底質は大半が 75 μm 以下のシルト及び粘土に該当する成分である。含水比はいずれの観測時期、箇所でも 350% を超えており、特に St.B3 は 800% に達するものも見られた。底質密度は 2.2~2.4 g/cm^3 であり、一般的な土の密度である 2.65 g/cm^3 に比べて小さい。特に St.B3 は他の地点に比べ含水比が高く、密度が小さいことがわかる。

本稿では省略したが、底質の強熱減量はいずれの地点も 15% 前後であり、有機物を多く含んでいる。

採取した底質は、植物残滓を取り除いた底質を脱イオン水と十分攪拌したものを沈降筒に注水、静置して沈降試験を行った。沈降試験装置の模式図を、図-4 に示す。試験中は定期的に沈降筒から採水し、SS、濁度及び粒度分布を分析した。粒度分布はレーザーカウンター（島津製作所 SALD-3000）で分析を行っている。沈降速度は時間の経過に伴う SS 濃度の減少から算定した⁷⁾。またセジメントトラップに

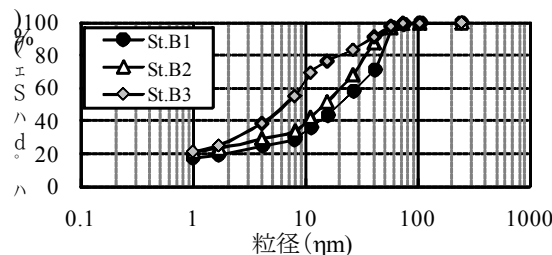


図-2 茨戸川の底質粒径曲線

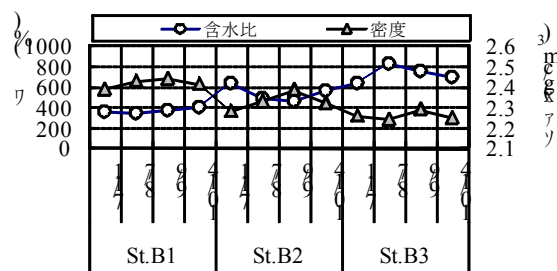


図-3 茨戸川底質の含水比と密度

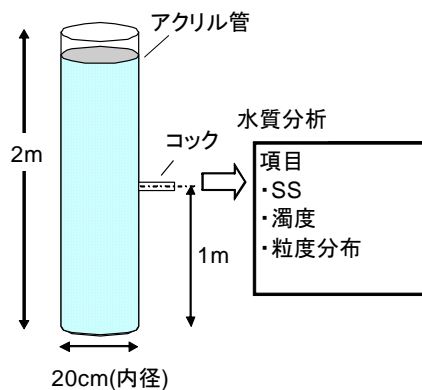


図-4 沈降試験装置の概略

よる捕集沈降物量及び河川の SS 濃度から見かけの沈降速度を算出している。

3. 底質巻上げ及び沈降現象の結果と考察

3.1 底質巻上げ量

図-5 にセジメントトラップによる捕集沈降物から算定した底質巻上げ量と、トラップ設置期間中の石狩アメダス⁸⁾の風速平均値の関係を示す。巻上げ量は福島らと同様、巻上がった底質は全水深でほぼ一様に分布するものと仮定して算定している⁶⁾。なお過去の茨戸川水質観測で、濁度は鉛直方向に概ね一様な分布であることを確認している。

茨戸川上流側である St.C1 は、橘らの既往研究⁹⁾

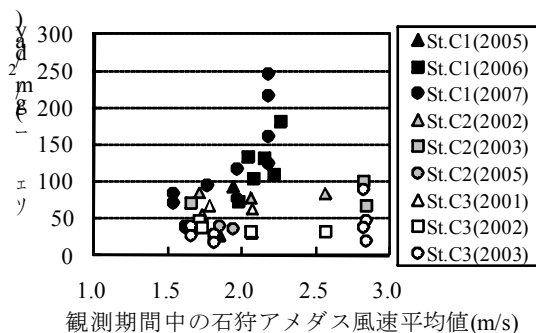


図-5 懸濁物捕集調査から算定した底質巻上げ量と風速の関係

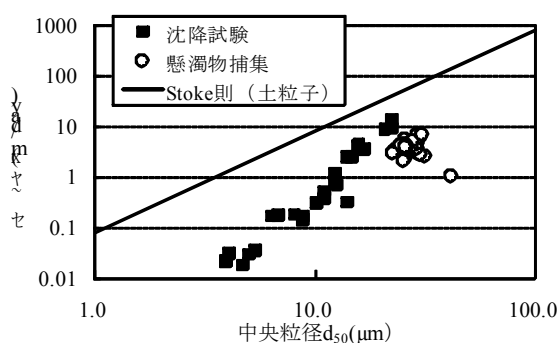


図-6 粒子の沈降速度と中央粒径 d_{50} の関係

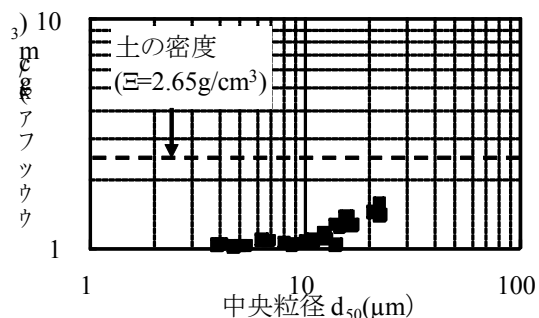


図-7 粒子の見かけの密度と中央粒径 d_{50} の関係

で観測されたのと同様、風速と巻上げ量に相関が窺える。一方 St.C2, St.C3 では、風速と巻上げ量の間に明瞭な相関は見られない。茨戸川の中・下流部では、風によるせん断力以外にも巻上げ量に影響する因子がある可能性もあるが、この点は今後確認する必要がある。

ここまでの整理の結果、茨戸川の巻上げ量モデル化にあたっては、場所等に応じた巻上げのモデル化が必要なことが示唆された。

計算に当たっては、St.C1 及び St.C2 の底質巻上げ量と風速の関係から以下の回帰式を得た。

$$q_s = 140W - 179 \quad (1)$$

ここで q_s : 底質巻上げ量($\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$), W : 石狩アメダスによる毎時の風速(m/s)である。

3.2 SS 沈降速度

図-6 に、底質沈降速度と代表粒径の関係を示す。代表粒径には、採水時の懸濁物粒度分析から得られた中央粒径 d_{50} を用いる。また底質沈降試験から算定された沈降速度の特性を考察するため、以下の 2 つの値と比較する。

- ・ 05~07年のセジメントトラップによる懸濁物捕集観測結果から得られた沈降速度（現地懸濁物の正味の沈降速度）
- ・ 一般的な土粒子（密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ）を想定した Stokes 則

沈降試験による沈降速度は、明らかに一般の土粒子を想定した Stokes 則より小さい。これは代表粒径が細くなるに従い顕著になる。例えば d_{50} が $10\mu\text{m}$ では、底質の沈降速度は土粒子を想定した Stokes 則に比べて 1 オーダー以上小さい値である。

懸濁物捕集調査による沈降速度は、 d_{50} との相関は窺えない。また懸濁物捕集調査による沈降速度は、底質沈降試験による沈降速度と比べると、総じて小さい傾向にある。底質沈降試験では、底質表層から 20cm まで採取した試料を攪拌して沈降させている。そのため現地河川水の懸濁物の粒度分布に比べ、より大きい粒径の粒子が底質沈降試験の試料中に含まれている可能性も考えられる。

なお図-6 より、底質の沈降速度 $w_f(\text{m}/\text{day})$ と $d_{50}(\mu\text{m})$ には、以下の相関式が成り立つ。

$$w_f = 0.0001d_{50}^{3.62} \quad (2)$$

Stokes の沈降則による見かけの粒子密度を、図-7 に示す。密度は d_{50} が細くなるに従って小さくなり、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子はほぼ水の密度と変わらない値を示した。以下に $d_{50}(\mu\text{m})$ と見かけの密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ の関係を示す。

$$\rho = 0.749d_{50}^{0.19} \quad (3)$$

3.3 粒径別沈降形態の比較

粒径別沈降形態を考察する。SS 濃度変遷を図-8

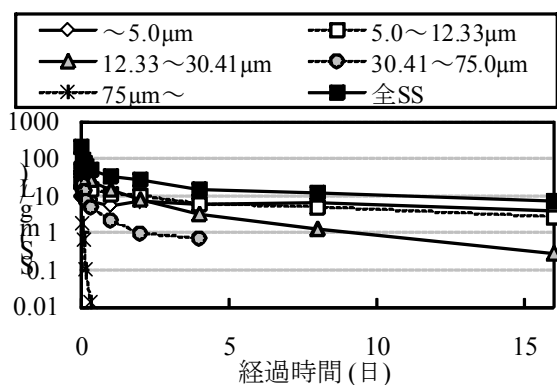


図-8 粒径別 SS 沈降形態 (St. B1)

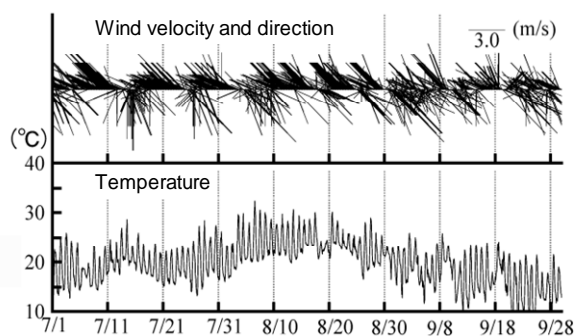


図-9 2006年7~9月石狩アメダスの気温及び風速風向

表-2 粒径区分

粒径区分 (μm)	土質区分	沈降形態	配分 (%)	粒径代表値 (μm)
~5.0	粘土	③	-	-
5.0~12.33	シルト	③	-	-
12.33~30.41	シルト	②	20	19.34
30.41~75.0	シルト	②	20	47.75
75~	砂	①	60	75.0

に示す。粒径別の SS 濃度は、粒径区分別の頻度に比例すると仮定して配分した。ここでは St.B1 で採取した底質を用いた沈降試験時の結果を代表例として示す。底質材料はシルトが主体であることから、粒径区分は表-2 に示すとおり 5 区分した。シルトは対数グラフ上で等幅になるように 3 分割した。

図-8 から、砂分に該当する 75μm 以上の粒子は、試験開始から 8 時間でほぼ全て沈降した。シルトは指数関数的に低減しており、粒径の細かい成分ほど SS の低減速度も小さい。12.33μm 未満の成分の濃度低下は非常に遅い。特に粘土にあたる 5μm 未満の

成分は、試験開始から 8 日経過後もほとんど濃度は変化していないことがわかる。

4. 静水圧 2 次元水質シミュレーション

4.1 計算モデル及び計算条件

底質挙動を混合粒径モデルにすることの効果を確認するため、まず土木研究所による静水圧 2 次元鉛直モデル¹⁰⁾をベースに、混合粒径の挙動を組み入れ改良したモデルで検証した¹¹⁾。計算対象領域は主要な流入河川がない区間として、茨戸川上流端から流入河川手前の狭窄部までとした (図-1 参照)。境界条件として上流端は流入がないこと、下流端は茨戸観測所の水位データ¹²⁾を与えている。降雨の影響は考慮しない。計算対象期間は 2006 年 7 月 1 日~9 月 30 日とした。

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。付与する気象条件についてはアメダスデータ⁸⁾ (風速, 気温, 日照時間については石狩観測所, 相対湿度, 日射量については近傍の札幌観測所)を用いた。現地風速と気温は、図-9 に示すとおりである。計算の時間刻みは 10 秒である。拡散係数は一定値とした。

沈降速度を水質シミュレーションモデルに組み込むため、沈降形態のモデル化を行う。まず懸濁粒子の沈降形態は、粒径を指標に以下の 3 成分に区分できる。

- ① 土粒子 (Stokes 則に従い沈降する)
- ② 土粒子より密度の小さい粒子 (Stokes 則に従い沈降する)
- ③ ほとんど沈降せず浮遊する成分

図-8 の底質沈降試験結果で示すとおり、砂にあたる 75 μm 以上の粒子は数時間以内で全て沈降している。ゆえに上記①の成分に該当する。また粒径 12.33 ~ 75 μm の成分は、試験期間全体を通じてゆっくり沈降を続けており、上記②の成分に該当する。

ここで Fig.7 に示した粒子の見かけの密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$ と $d_{50}(\mu\text{m})$ の関係について、粒径 12.33μm 以上のものについて再整理したところ、以下の式(4)が得られた。

$$\rho = 0.345d_{50}^{0.47} \quad (4)$$

なお式(4)による密度は粒径 75μm で概ね 2.65(g/cm³)となる。

ゆえに 12.33 μm 以上の粒子は Stokes 則に従い沈降し、その密度は d_{50} が 75μm 未満の場合は式(4)、75μm 以上では土粒子と同じく 2.65 g/cm³として取り

扱うこととする。

一方粒径 12.33 μm 未満の粒子はほとんど沈降せず、浮遊状態を維持しており、上記③の成分に該当する。

茨戸川の SS には基底値（期間中の SS 最低値：概ね 10mg/L）が存在する。本研究の底質巻上げ、沈降のモデル化にあたり、SS の基底値分には③の浮遊成分が該当し、SS の時系列変動分には①及び②の成分の巻上げ・沈降によるものと考えた。底質の粒径区分とその挙動の分類は、底質表層部の分析結果をもとに、表-2 に示すとおりである。

4.2 計算結果

St.A1 及び A2 の実測 SS（国土交通省の水質機器観測濁度を、現地水質から作成した検量線で変換⁵⁾）と計算値の比較を図-10 に示す。気象条件及び植物プランクトン増殖との関係を検証するため、図-11 に風速絶対値（石狩アメダス）、図-12 に実測クロロフィル-a（国土交通省の水質機器観測濁度を、現地水質から作成した検量線で変換⁵⁾）を示す。なお本稿では水温の計算結果は省略した。

SS の長期的変動は概ね表現できていることがわかる。St.A2 については計算期間全体でほぼ良好な再現性を確保できている。St.A1 については7~8月は過小傾向にあるが、9月以降はほぼ現象を再現している。一方短期の再現性については、数日単位で評価すると、St.A1 における7月のSS上昇及び下降は計算では過小傾向にある。図-12を見ると、7月はクロロフィル-aが高濃度であり、これがSS変動に影響している可能性が十分考えられる。一方9月の強風時には計算ではSSが突如上昇するが、現地では同様の現象は見られない。これは式(1)のとおり巻上げ量を風速の1次関数で表現したゆえの問題点と思われる。また底質の粒度構成の設定で計算結果は大きく異なる。現状では計算精度に影響する様々なパラメータがあり、同定しきれていないものも多い。本モデルの今後の課題として残るものである。

5 静水圧3次元計算モデル

5.1 3次元モデルによる解析の必要性

図-13 は茨戸川上流部の河道形状である。茨戸川は石狩川の蛇行旧河道であるため、河床高は外岸側で低く、内岸側は浅い等、蛇行水路の特徴が明確である。また河道の主流方向は流下方向に従って変化する。そのため湖内流動が風から受ける影響は、平

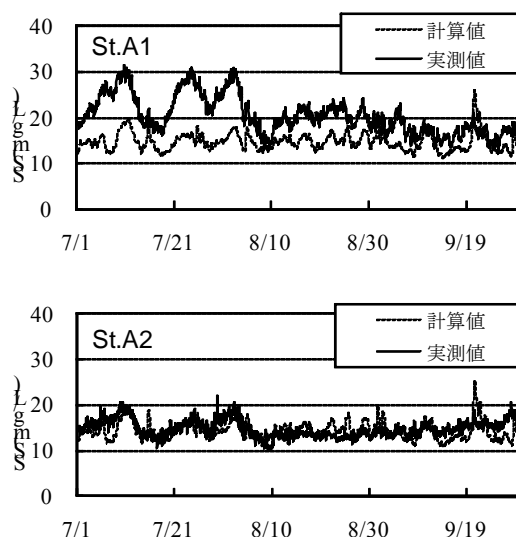


図-10 SSの計算値と実測値の比較（2006年）

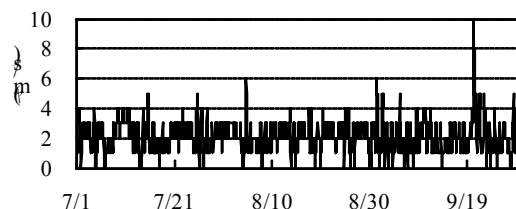


図-11 石狩アメダスの風速（2006年）

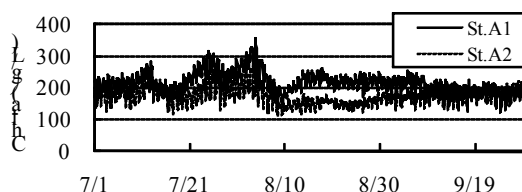


図-12 クロロフィル a 実測値（2006年）

面及び横断形状により局所的に異なる。さらに茨戸川は感潮区間であり、平水時における主たる流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、1次元あるいは2次元鉛直モデルでは流れ場の再現性は十分ではない懸念があり、3次元モデルによる検討が必要といえる。

5.2 計算条件概要

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。計算モ

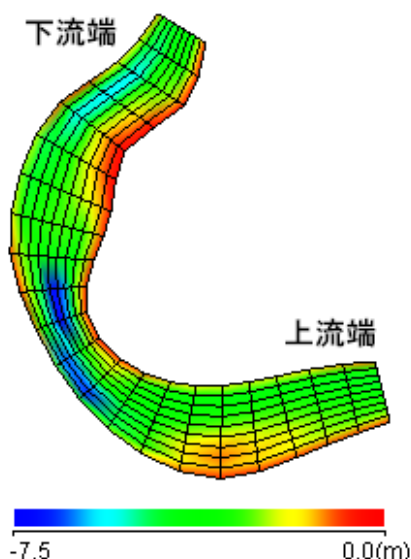


図-13 3次元静水圧計算対象域（茨戸川上流部）の河床高及び平面格子分割

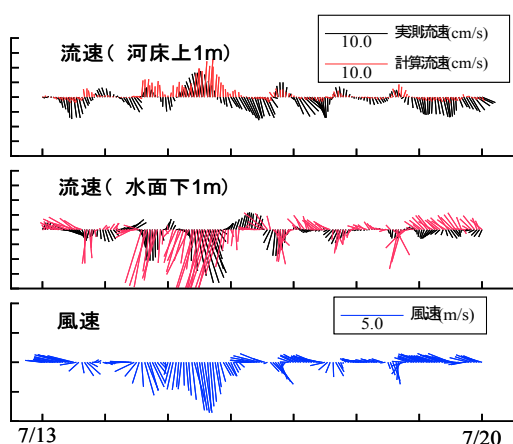


図-14 流速流向ベクトル計算値と実測値の比較

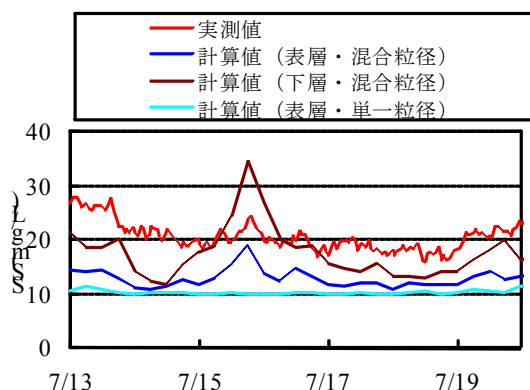


図-15 SS実測と計算値（混合及び単一粒径）比較

デルは岩佐らによる平面・多層モデルを採用した¹³⁾. なお蛇行旧河道の形状を取り入れるため、平面方向

の座標は、清水による直交曲線座標系を採用した¹⁴⁾.

計算対象域は、茨戸川の最上流端にあたる上部湖盆部分（流下方向延長約2,400m、平均川幅約200m）である。図-13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、鉛直方向分割間隔は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位を用いている⁴⁾。

表層部での熱交換の条件、河床からの底質巻上げ、懸濁物沈降モデルは、前述した2次元静水圧モデルと同様である。その他計算モデルの詳細条件については参考文献15)を参照いただきたい。

5.3 計算結果

(1) 流速流向

図-14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。

また本稿では載せていないが、感度分析を行ったところ、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している。現段階では試行計算のため、拡散係数を一定値に固定しているが、今後混合の影響等を取り込む仕組み検討が必要である。

(2) 濁質

図-15にSS計算結果を示す。実測値は鉛直2次元計算時と同様、多項目水質計による濁度連続観測値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、2006年の底質表層部の粒度分析結果から得られた中央粒径平均値(30 μ m)で計算した。

全期間において、計算によるSSは過大となった。これは式(1)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と考えられる。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みられる。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。今後計算において最適な粒度分

布について検証を進める必要がある。

6. まとめ

本研究で得られた結果及び今後の課題を以下にまとめ。

- ・ 底質巻上げ量は、潮汐の影響が小さい上流側では橋の研究でも確認された傾向と同じく⁹⁾、風速との相関がみられた。一方、下流部では風速に関係なく、ほぼ一定の範囲内で変動する結果となった。以上から、場所等に応じた巻上げのモデル化が必要なことが示唆された。
- ・ 底質沈降試験から、粒径と沈降形態の関係を検証するとともに、粒径によるモデル化を行った。本研究の試験結果からは、以下のとおり挙動が3区分された。(a)砂に該当する粒径が75 μm 以上のものは速やかに沈降した。(b)粒径が概ね10 μm 以下のものは、ほとんど沈降しない状態が続いた。(c)10~75 μm の見かけの密度は、粒径のべき乗関数として設定できた。
- ・ 鉛直2次元計算において、粒度分布を考慮した濁質計算を行った。長期的な水質変動は再現している。一方短期的な水質変動の再現性は改善すべき点も残された。
- ・ 3次元静水圧モデルによる計算を行った。表層部では流れの加速等、風向の影響を計算で反映できた。一方、底面付近の流速再現性は十分とはいえ、今後の課題である。

謝辞

本研究の実施に当たり、国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部(当時)より、現地観測データを提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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) 例えば天野邦彦, 安田佳哉, 鈴木宏幸: 浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング, 水工学論文集第46巻, 1085-1090, 2002
- 4) 平成18年度茨戸川外水環境調査試験業務報告書, 国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部, 2007
- 5) 横山洋, 山下彰司: 旧川における水中懸濁物の挙動と底質巻上げ量の推定, 水工学論文集第52巻, 2008
- 6) 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
- 7) 松尾友矩, 大垣真一郎, 浅野孝, 宗宮功, 丹保憲仁, 村上健監訳: 水質環境工学—下水の処理・処分・再利用—, 技法堂出版, 174, 1993
- 8) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/>
- 9) 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
- 10) 森北佳昭, 天野邦彦: 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, 第182号-1, 1991
- 11) 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
- 12) 国土交通省水文水質データベース: <http://www1.river.go.jp/>
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 横山洋, 村瀬竜也, 山下彰司: 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, 土木学会北海道支部平成21年度年次技術研究発表会論文報告集, 2010

Study on environment conservation and restoration in a closed water area in cold region

Grant: Administration from government

Study duration: From April 2006 to March 2011

Attending team: Watershed Environmental Engineering Research Team, Central Hokkaido brunch division

Attending Member: Hiroshi Yokoyama, Shigeo Morita, Toshihito Toyabe, Shigeru Mizugaki, Takashi Ishiya and Tatsuya Murase

Summary

We have been conducted the study of sediment movement and turbidity simulation in an oxbow lake. We investigated the resuspension rate and fall velocity with focusing on sedimentation process. Turbidity simulation model in considering with sediment characteristics, such as resuspension, deposition, particle size distribution and net density are rebuilt. However, accuracy of the foregoing simulation depended on locations. More improvement of the simulation accuracy was needed. Modified resuspension and sedimentation model was combined in the simulation. Some improvement of simulation accuracy was confirmed. Next step we need to check the seasonal change of sediment property.

Keywords: Closed water area, Resuspension and deposition rate of sediment, Size distribution of sediment, Turbidity simulation model