

有機懸濁物の多い旧川の濁質予測手法に関する研究

Study of turbidity simulation in an oxbow lake containing much organic suspended sediment

横山 洋*・村瀬 竜也**・中村 茂樹***

Hiroshi Yokoyama, Tatsuya Murase and Shigeki Nakamura

* (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

** 国土交通省北海道開発局 室蘭開発建設部 (〒051-8524 室蘭市入江町1-14)

*** (株) 福田水文センター 調査部 (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目2-5)

We have been conducted the study of 3D turbidity simulation in an oxbow lake affected by tidal flow. We once made 2D turbidity simulation model in considering with sediment characteristics, such as resuspension, deposition, particle size distribution and net density. However, accuracy of the foregoing simulation depended on locations. More improvement of the simulation accuracy was needed. We investigated the resuspension rate and fall velocity with focusing on sedimentation process. The model of resuspension and deposition of bed material were investigated and rebuilt for each location of the oxbow. Modified turbidity simulation model was conducted. Some improvement of simulation accuracy was confirmed. Next step we need to check the seasonal change of sediment property.

Key Words: turbidity simulation, particle size distribution, organic material, sedimentation process

キーワード: 濁質予測計算, 粒径分布, 有機懸濁物, 沈降過程

1. はじめに

閉鎖性水域の河床には、有機物が多く含まれ、また非常に細かい粒径の堆積物（いわゆる底質）が形成される。本研究で対象としている茨戸川も、石狩川の改修工事で形成された旧川（河跡湖）であり、閉鎖性の強い水域である。これらの閉鎖性水域では、底質の粒子に栄養塩が吸着し、それらが風等の外力により巻き上がることで水質に影響を及ぼすことが、数多くの研究により知られている。茨戸川での研究例として、橋らは茨戸川上部湖盆（図-1参照）で現地観測を行い、風速と流速、風速と底質巻上げ量の間に関連があることを示している¹⁾。濱原らは、水域内の汚濁負荷の収支を検討し、底質からの巻上げが栄養塩の主たる供給源であることを示している²⁾。また、閉鎖性の強い湖沼を対象とした事例としては、梅田らは、霞ヶ浦において現地観測を行い、強風時で義波高が一定値を超えると濁度が急激に上昇することを示している³⁾。

閉鎖性水域における水質改善策の検討や効果の推定に当たり、限られたデータをもとに現在の水質の特性や、将来的な水質変動を適切に把握していかなければならない。その過程において、水質予測シミュレーションの計算結果は、大きな役割を果たしている。茨戸川を対象にした水質予測モデルに関する研究も従前から行われており、

濱原らによる1次元ボックスモデル²⁾、杉原らによる2次元鉛直モデル⁴⁾が例として挙げられる。これらのモデルによる計算結果は、長期の水質変動予測や水質改善事業の効果検討等、実務面にも用いられている。

ところで、著者らは過去数年間にわたり、茨戸川の底質挙動、特に懸濁粒子の沈降過程の把握と沈降速度の定

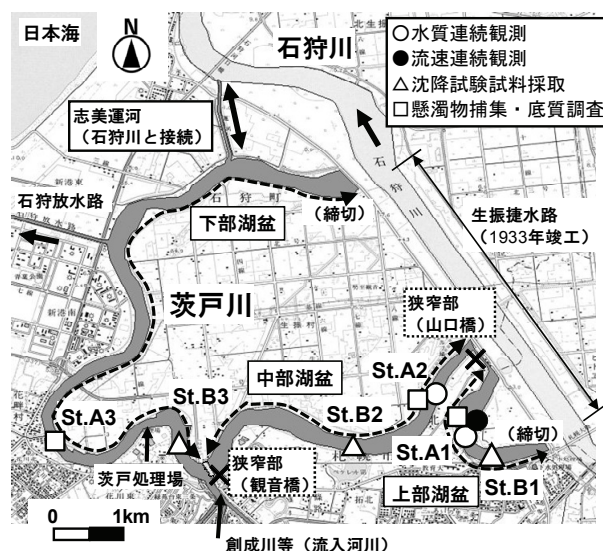


図-1 茨戸川平面形状及び観測位置

量評価に向け、沈降試験結果を積み重ねて検討を進めてきた。これは、底質巻上げ量の算出精度は、水中に浮遊する懸濁粒子の沈降速度に依拠するためである⁵⁾。著者らは、懸濁粒子の沈降過程を考慮した底質挙動モデルを組み入れた、水質予測シミュレーションを行った⁶⁾。このモデルでは、水中懸濁物の沈降現象は、単一の代表粒径ではなく混合粒径により考慮した。また粒子のサイズが沈降形態に及ぼす違いを、密度と粒径の相関式で表現することで、現象の再現性向上を図ってきた。

しかし、上記計算モデルでは、地点ごとの濁質変動特性の違いを十分表現できなかった。これは、底質挙動の特性が、茨戸川の中で縦断的に異なっていることが原因と推察されるため、本稿でその検証を行う。

著者らは同時に、濁質解析モデルの3次元化を進めている⁷⁾。第2章の現地概要で述べるが、茨戸川は感潮区間であるため、平水時の流動は潮汐に強く支配される。また茨戸川の平面形状は、図-1に示すとおり、蛇行旧河道そのものであり、風が茨戸川の流動に及ぼす影響は、流下方向、法線方向ともに、場所による変化が大きいと考えられる。そのため茨戸川では複雑な流れ場になることが想定され、水質現象の評価には、3次元流動モデルが必要と考えている。

3次元モデルによる水質解析は、現在までに多くの研究が重ねられており、一部のモデルはソースコードも含めて公開されている⁸⁾。また3次元水質モデルによる、閉鎖性水域の水質汚濁機構の検証や水質改善策の検討も行われており⁹⁾、実用化されつつある。しかし解析対象範囲は、面積の広い湖沼を対象としている事例が多く、旧川のような、より複雑な地形への適用事例はほとんど見当たらない。

本研究の目的は、複雑な地形でかつ底質挙動も場所により異なる茨戸川の水質解析の精度改善である。本論文では、まず既往の鉛直2次元モデルの計算結果⁶⁾の課題の1つである、縦断的な濁質変動特性の違いとその原因の整理を行う。その後、底質巻上げ量(巻上げフラックス)と風の関係、懸濁粒子の挙動について再考察を行い、底質挙動について茨戸川の領域別で評価するよう、モデルの修正を行った。最後に修正モデルによる精度改善について、鉛直2次元モデル及び3次元モデルで考察する。

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ける、水質予測手法の精度向上のための基礎的知見を得るものである。また北海道において、旧川は農業利水、漁業資源等、生活の場としての利用のみならず、北海道らしい景観という観光資源としての活用の可能性も考えられる。本研究は良好な河川環境保全の検討や効果検証の際の技術向上に、今後重要な役割を果たすものと期待できる。

2. 現地概況

2-1 茨戸川の河道特性

図-1に茨戸川の平面形状及び各種観測位置を示す。茨

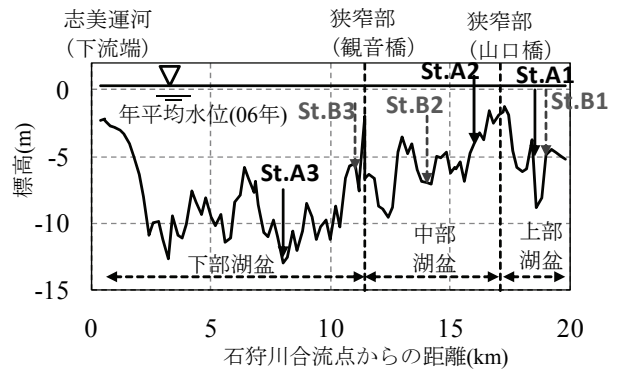


図-2 茨戸川最深河床縦断 (2006年度国土交通省測量結果より)

表-1 現地観測項目の概要

観測項目	観測手法	観測地点	観測時期
流速連続観測	ADCPによる連続観測(RD Instrument Workhorse 2400 kHz)	St.A1	2006年7~9月
濁度連続観測*	多項目水質計(アレック電子Compact-CLW) ※検量線作成のため、水質分析を定期的実施	St.A1, A2	2006年7~9月
懸濁物捕集調査	セジメントトラップ(水中設置期間は、約10~14日)	St.A1, A2, A3	2001~2007年
底質採取分析	表層から20cm採取土の粒度試験、密度、含水比、強熱減量	St.B1, B2, B3	2008年7~10月 月1回

※濁度連続観測は、国土交通省が実施

戸川は、1933年に竣工した石狩川の生振捷水路工事により本川から切り離された旧川である。茨戸川の全長は約20km、平均川幅は約200mである。茨戸川には狭窄部が2箇所あり、それぞれを境界として、河川流動特性が異なる上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆の3区間に分類される。下部湖盆と中部湖盆の間は、カルバート状の狭窄部(観音橋:幅約5m)を通じて接続している。上部湖盆と中部湖盆の間も、川幅約10mの狭窄部で接続している。各水域の滞留時間は、1997年から2001年のデータをもとに濱原らが算出した結果では、下部湖盆で約12日、中部湖盆で約10日、上流湖盆で約19日であり²⁾、上部湖盆での閉鎖性が強いことが特徴である。

図-2に茨戸川の最深河床縦断を示す。上部湖盆及び中部湖盆の河床高は、局所的に-9mまで深くなっている箇所もあるものの、概ね-5m前後で推移している。一方下部湖盆は全体的に深く、河床高が-10m以下の区間も多い。最深部はSt.A3付近(河床高-13m)であり、図-1に示すとおり蛇行部に位置している。

平水時の下部湖盆は、下流端の志美運河(川幅約20m)を通じて石狩川(河口部から約6km上流)と接続している。石狩川下流は緩勾配のため感潮区間が長く、河口から約27km上流にある石狩大橋でも、水位は潮汐の影響

を受けていることが確認されている¹⁰⁾。

茨戸川は全域が感潮区間であり、石狩川と茨戸川の間には日周期で水交換が生じている。濱原らによると、下部湖盆の主たる流入は、石狩川からの逆流の他、札幌市街地から流入する創成川等の流入河川、茨戸処理場からの処理水の流入である。また中部湖盆は上部湖盆・下部湖盆との水交換、上部湖盆は中部湖盆との水交換と地下水流入が主な流入である¹⁾。

なお塩水遡上は、石狩川は西田らの観測によると、渇水年であった1994年に、河口から約28km上流まで塩水楔の侵入が確認されている¹¹⁾。茨戸川については、志美運河の河床高が高いことから、石狩川からの塩水侵入は通常時にはほとんど認められず、渇水時に低濃度の塩水が局所的かつ一時的に存在することが、山口により報告されている¹²⁾。なお著者らの既往観測では、上部湖盆及び中部湖盆は、淡水域である。

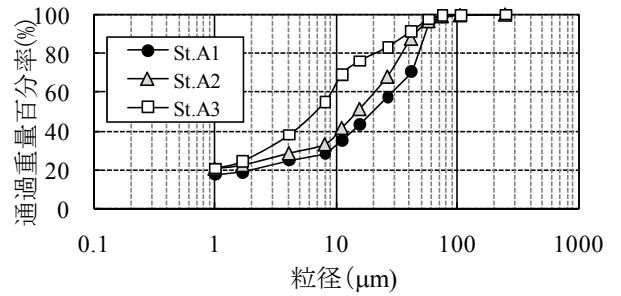
2-2 現地観測の概要

茨戸川では現地の底質挙動の把握、水質変動データの収集を目的として現地観測が実施されている。観測内容は水位、流速、底質、水質等、多岐にわたり、年により観測実施項目、箇所、期間が異なる。今回はそれらの中から、表-1に示す流速連続観測、濁度連続観測、懸濁物沈降捕集調査結果と、後述する底質沈降試験結果をもとに、現地底質挙動の把握と水質予測モデル検討を行った。

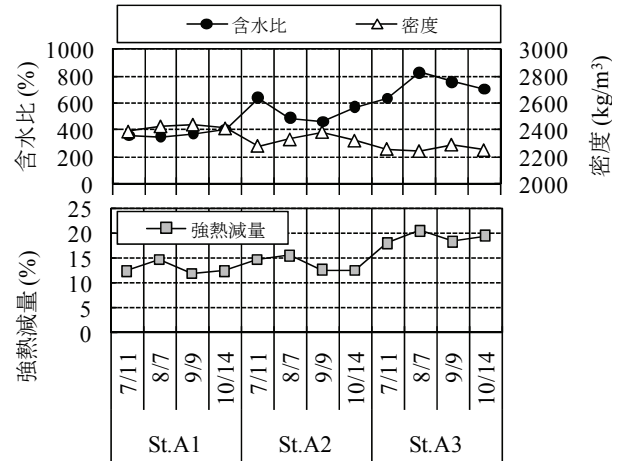
図-3は2008年7月から10月にかけて月1回採取した、表層から深さ20cmまでの底質分析結果（土の粒度試験、土の密度試験、含水比及び強熱減量）を示したものである。底質はできるだけ乱さないように採取するため、ダイバーがアクリル管(径4cm)を用いて柱状採泥を行い、底質表面から約20cmを分析用試料とした。粒度分布は4時期の分析結果を単純平均した値、その他は各調査時の値である。粒度分布はいずれの地点でも、75 μ m以下である細粒分が、8~9割を占める。St.A3は特に粒径が小さい成分が多い。含水比、強熱減量はSt.A3が15~20%と最も高く、A2、A1の順に低くなるが、いずれの地点も10%以上である。土の密度はSt.A1で最大であり、A2、A3の順に小さい値となる。なお含水比はいずれの時期、地点ともに350%以上であり、特にSt.A3は常に600%以上である。ところで底質の含水比がその性状に及ぼす影響について、日比野らは、広島湾の底泥に関する研究において、含水比が400%を超える層を浮泥層と定義して、堆積泥と区別をしている¹³⁾。これに従うと、茨戸川の底質は、全体として浮泥あるいはそれに近い状態で存在している。さらに全体として粒径が細かくかつ有機物量が多い。底質の巻上げ量評価については単に浮遊砂の浮上とは異なる挙動を示すことが示唆される。

3. 茨戸川における既往濁質予測モデルの課題

著者らは既報で、混合粒径における底質挙動を組み入



(a) 粒度分布（土の粒度試験法による）



(b) 含水比及び密度

図-3 底質表層部の分析結果（2008年7~10月）

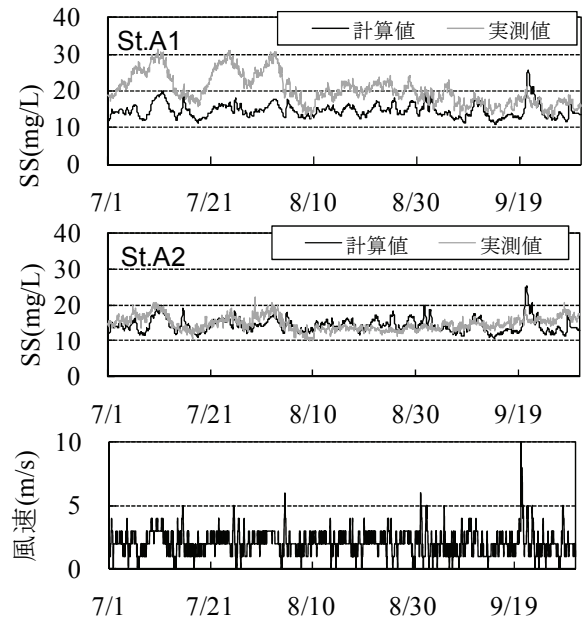


図-4 鉛直2次元モデルによる濁質変動計算結果¹⁰⁾

れた、鉛直2次元モデルによる濁質変動予測計算を行った⁹⁾。図-4はSt.A1及びSt.A2における、2006年7月1日から同年9月30日までの濁質予測計算の結果である。なお「実測値」とは、国土交通省で実施した多項目水質計（アレック電子製 Compact-CLW）による濁度出力値と、機器設置箇所近傍での採水によるSS分析値から検量線を

作成し、その回帰式を用いて水質計の濁度出力値を現地河川水のSS濃度に変換した値である。この手法のさらなる詳細については、参考文献5)を参照していただきたい。

図-4をみると、St.A2では概ねSS長期変動を再現している。しかしSt.A1では7月から8月までの期間、計算値は実測値に比べて絶対値、変動幅ともに小さい。9月中旬以降になり、St.A1でも計算値と実測値の差は小さくなる。

このように、場所によって計算の再現性に差が生じた原因の1つとして、既報のモデル⁶⁾では、底質巻上げ量と沈降速度を、全領域で同一の関係式で表現したことが挙げられる。底質の巻上げ量及び沈降速度の関係式を、場所あるいは時期により変化させることにより、計算精度は向上する可能性がある。

次章以降、底質巻上げ及び沈降現象のモデル化プロセスについて再検証し、併せて底質挙動モデルの改良について考察していくことにする。

4. 茨戸川の底質挙動特性の詳細考察

4.1 底質巻上げ量

図-5は2001年から2007年にかけて実施した、セジメントトラップによる沈降物捕集調査をもとに、福島らの方法¹⁴⁾により算出した底質巻上げ量である。図-5で示す風速は、セジメントトラップ設置期間中の石狩観測所におけるアメダスデータの毎時風速を平均した¹⁵⁾。なお風速2~3m/sでは底質巻上げを生じる駆動力として、力学的には不十分であると考えられる。しかしセジメントトラップによる観測では、トラップ設置期間における沈降物捕集量は積分値として把握可能だが、強風時の瞬間の巻上げ量は把握不可能である。本研究では、石狩気象観測所の風速値は、現地底質巻上げ量を決めるためのパラメータとして採用したものである。

観測地点別で比較すると、上部湖盆にあるSt.A1では、風速と底質巻上げ量に相関が見られる。これは橋らの現地観測と同様の結果である¹⁾。一方、中部湖盆であるSt.A2及び下部湖盆であるSt.A3では、底質巻上げ量と風速の間の相関は不明瞭である。

表-2は、各地点の底質巻上げ量と風速について、回帰式及び決定係数 r^2 を示したものである。St.A1, A2, A3の順に r^2 は小さくなる。特に下部湖盆では決定係数はほぼ0であり、巻上げ量と風速との相関はほとんどない。観測からは、下流部に向かうに従い、底質巻上げ量に対する風速の影響が小さくなる結果となった。

この一因として、茨戸川の主たる流入は下流部での石狩川との水交換である一方、上流端は行止りであることから、上流に向かうほど、潮汐よりも風の影響が相対的に強くなることも推測される。しかし、図-2の最深河床縦断面図に示すとおり、St.A3では水深が10m以上であり、St.A1及びA2に比べて深く、St.A3では、風による底質巻上げ自体が生じにくかったとも考えられる。現段

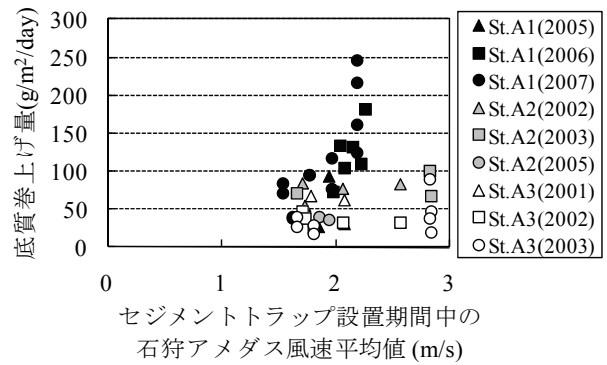


図-5 底質巻上げ量と石狩アメダス風速の関係

表-2 底質巻上げ量と風速の相関

観測 St	回帰式	決定係数 r^2
A1(上部湖盆)	$q_s=177W-236$	0.539
A2(中部湖盆)	$q_s=29.6W-1.8$	0.289
A3(下部湖盆)	$q_s=7.2W+25.3$	0.032

(q_s :底質巻上げ量($g/m^2/day$), W :石狩アメダス風速(m/s))

表-3 沈降速度検討対象とした試料及び採取条件

試料種類	採取地点・条件	採取時期
底質	St.B1, B2, B3: ダイバーにより表層から20cmまで乱さないように柱状採泥	2008年9月
水中懸濁物	St.A1: セジメントトラップで懸濁物捕集	2005年7-9月 2006年7-10月
	St.A2: セジメントトラップに懸濁物を捕集	2005年7-9月
河川水	St.A1: 水面下1m、河床上20cmの2層で採水	2009年8月
	St.A3: 表層付近で採水	2008年8月

階ではいずれも推論に過ぎず、現象の詳細については、今後さらなる検証が必要である。よって本稿では、観測による現象の指摘までに留める。

いずれにせよ、従来の著者らの濁質計算における底質巻上げ量は、上部湖盆と中部湖盆では同一の式により表現していた。これは、両者の値を合わせて作成した回帰式の決定係数が、上部・中部湖盆に区分して作成したそれぞれの回帰式の決定係数より、いずれも大きい値を示したためである。しかし本節での結果より、湖盆別に底質巻上げ量の関係式を導出することが、茨戸川の濁質予測の精度向上につながる事が示された。

4.2 SSの沈降速度及び密度

次いで水中懸濁粒子の沈降量(沈降速度)及び粒子密度の表現方法について検証する。試料は、底質、セジメ

ントラップによる捕集沈降物、河川水中の懸濁粒子である。表-3 に、今回試験対象とした試料及び採取条件等をまとめている。また沈降速度算定方法の概略を、試料別に以下にまとめている。各手法のさらなる詳細については、参考文献 16)を参照していただきたい。

(1) 底質 (SS 沈降試験により算定)

高さ 2m, 内径 20cm のアクリル製円筒に、底質を脱イオン水と攪拌して作成した高濃度濁水を注入、静置する。沈降筒の中間部 (底面から高さ 1m) に設けた採水コックから定期的に採水し、SS、レーザー回折・散乱法による粒度分析 (株) 島津製作所, SALD-3000S 使用) を実施した。SS 沈降試験による沈降速度の算出式は、式(1)に示すとおりである¹⁷⁾。

$$V = \left(1 - \frac{L_t}{L_0}\right) \times h \div t \quad (1)$$

ここで、 V : 沈降速度, t : 経過時間, L_0 : 前回測定時の水柱の負荷量, L_t : t 時間後の水柱の負荷量, h : 水柱の高さである。

(2) 捕集沈降物 (見かけの沈降速度を算定)

セジメントトラップで捕集した沈降物量と、トラップ設置水深の SS (設置時及び撤去時の平均値) から、以下の式(2)により、見かけの沈降速度を算出している。

$$V = q_{sed} / C \quad (2)$$

ここで、 V : 沈降速度, q_{sed} : セジメントトラップで捕集された沈降物 (乾燥重量), C : セジメントトラップ設置水深で採水した河川水 SS 濃度 (トラップ設置時と撤去時の分析値の平均) である。捕集沈降物の粒度は、レーザー回折・散乱法による粒度分析 (株) 島津製作所, SALD-3000S 使用) で計測した。

(3) 河川水 (SS 沈降試験により算定)

採取した河川水を静置し、時間経過による SS 濃度低下から沈降速度を算出する。なお使用した試験装置、試験及び分析方法、使用機器、沈降速度の算定式は、底質の時と同様である。

図-6 は、底質沈降試験、河川水沈降試験、懸濁物捕集調査の各結果から算定した、SS 沈降速度と、試料中の中央粒径 d_{50} との関係を示したものである。底質の沈降速度は、試料採取の場所による違いはほとんどなく、St.B1, B2, B3 いずれの地点でも、沈降速度と d_{50} の関係はほぼ同一といえる。捕集懸濁物の沈降速度は、底質に比べると小さいものの、一部のデータを除き、その違いは 1 オーダー以内である。また捕集懸濁物は、 d_{50} が 20~30 μm に集中するという特徴が見られる。河川水沈降試験から得られた沈降速度は、St.A1 では底質沈降試験と近い値をとる。一方、St.A3 では d_{50} との相関が明瞭ではなく、底質に比べると 1 オーダー以上小さいものもみられる。他の場所と比べて懸濁物個々の粒子の密度が小さいものと推察されるが、現時点では詳細な機構判明には至っていない。なお、河川水中懸濁物の d_{50} の範囲は捕集懸濁物より

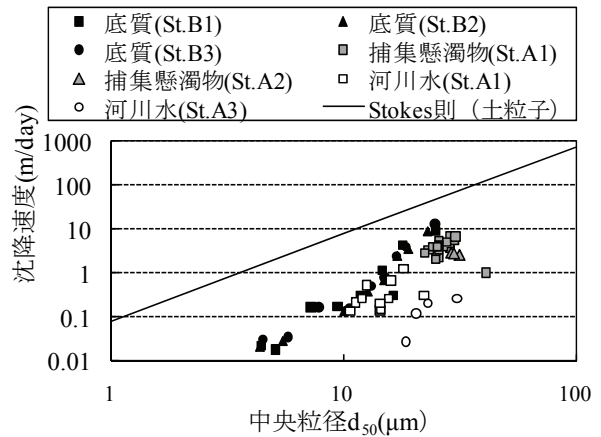


図-6 SS 沈降速度と中央粒径 d_{50} の関係

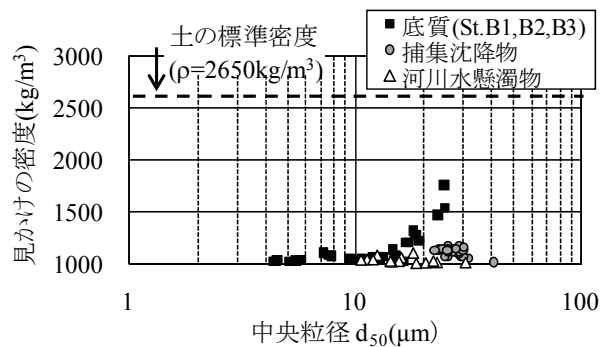


図-7 懸濁粒子の見かけの密度と中央粒径 d_{50} の関係

さらに細かく、10~20 μm に集中している。

既往計算モデルでは、St.B1, B2, B3 における底質沈降試験から導出した沈降速度と d_{50} の関係から、懸濁粒子の沈降速度をモデル化した。今回の再考察でも、底質沈降速度は場所による違いはほとんどない。セジメントトラップで捕集した懸濁物及び河川水の沈降速度も、底質の沈降速度と同オーダーの値を示すものが多いことから、既往モデルの式をそのまま用いることとする。

図-7 は、各試験から算定した沈降速度から、Stokes の沈降則で算出した、懸濁質の見かけの密度である。懸濁質の代表粒径は、各試料中の d_{50} とした。見かけの密度が 1500 kg/m^3 以上のものは、沈降試験初期の濁水である。この時期は、粒径の大きい粒子が水中に多く残存するため SS 濃度は急速に低下する。そのため、沈降速度が大きく算定され、見かけの密度も相対的に大きい。これらの例を除くと、懸濁粒子の見かけの密度は大半が 1200 kg/m^3 以下であった。河川水懸濁物についてはさらに密度は小さく、水とほぼ同密度 (1000~1100 kg/m^3) であった。

4.3 沈降試験過程における沈降速度、粒径の変化

図-8 は SS 沈降試験期間中の沈降速度ならびに中央粒径の変化である。対象試料は、底質 (高濃度濁水) が 3 検体 (St.B1, B2, B3), 河川水が 3 検体 (St.A1 表層付近、

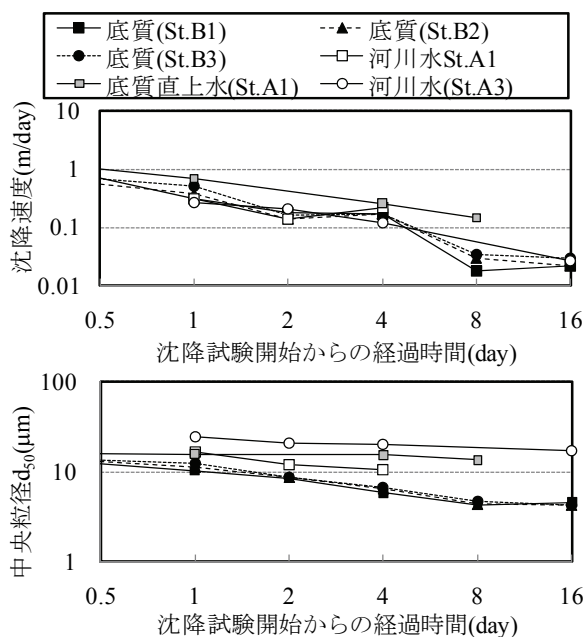


図-8 底質及び河川水沈降試験による沈降速度、中央粒径の変化

St.A1 河床付近, St.A3 表層付近) である。試験開始直後は、懸濁粒子の急速な沈降により、SS 濃度の低下が生じるため、SS 濃度低下がある程度落ち着くことが確認された 0.5 日後からのデータを用いて検証した。

当然のことながら、全試料において沈降速度は時間経過とともに遅くなる。試料別にみると、試験開始から 4 日までは、沈降速度の変遷は、底質、河川水（表層、底層直上）ともにほぼ同じ軌跡である。現地の濁質の細かい変動は、1 日以下の時間スケールで確認されている。これらの変動は巻上げられた比較的大きい懸濁粒子が沈降する過程と推測される。そのため、濁質変動予測モデルにおける粒子の沈降速度は、底質巻上げ試験から得られた結果を用いて支障ないと考えられる。

なお 4 日目以降は、沈降速度が 0.1m/day 以下になっている。前述したとおり最も閉鎖性の強い上部湖盆の滞留時間が 19 日である。一方、上部湖盆の水深は 4~5m 程度であり、表層に粒子があった場合、河床到達まで単純計算で 1 ヶ月以上かかることになる。この沈降速度のオーダーに達した粒子は、水中を浮遊した状態を保持したまま域外に流出すると考えて差し支えないといえる。

また底質、河川水沈降試験の各検体の 4 日目における d_{50} をみると、河川水の底層直上 (St.A1) 及び St.A3 を除いて、 $10\mu\text{m}$ 以下まで小さくなっている。このことから、水中の微細粒子は、粒径 $10\mu\text{m}$ を閾値として浮遊を継続する粒子として取り扱うものとする。これは既往モデルでの分別方法と同じ結論である。

ところで底質の沈降試験による d_{50} は河川水沈降試験に比べて小さく、細粒分が多い。これは底質沈降試験時には、採取した底質を攪拌するため、フロック等の粒径が大きい生成物が粉碎されるためと考えられる。底質の d_{50} は試験開始後次第に小さくなっていくが、河川水の d_{50} は

表-4 計算中の底質巻上げ量と風速の関係式

領域	底質巻上げ量
上部湖盆	$q_s = 177W - 236$ ($W \geq 1.33\text{m/s}$) $q_s = 0$ ($W < 1.33\text{m/s}$)
中部湖盆 (2D 計算のみ)	$q_s = 29.6W - 1.8$ ($W \geq 0.1\text{m/s}$) $q_s = 0$ ($W < 0.1\text{m/s}$)

(q_s : 底質巻上げ量($\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$), W : 石狩アメダスの毎時風速(m/s))

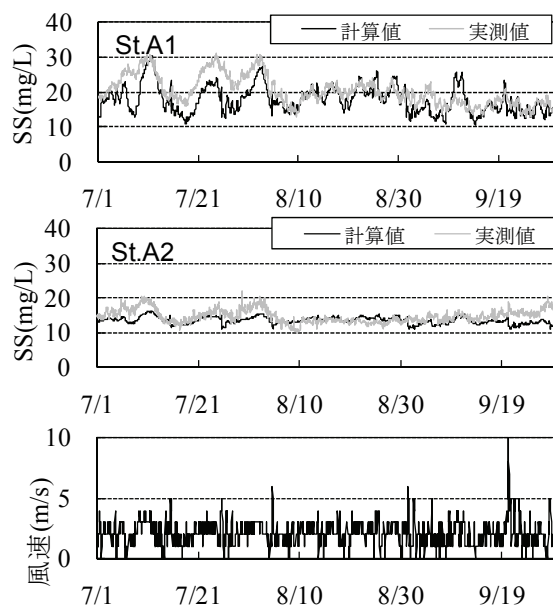


図-9 鉛直 2 次元モデルによる濁質変動予測 (巻上げ量修正後) (実測値は、図-4 に同じである)

あまり変化しない。底質の中央粒径は 3 試料ともにほぼ同じだが、河川水は採取地点により違いがある。特に St.A3 河川水の d_{50} は他の試料に比べて明らかに大きい。これらの現象については今後さらなる検討を進める予定である。

4.4 底質挙動モデルの修正

ここまでの考察をもとに、底質巻上げ量及び SS 沈降速度の修正を行う。

(1) 底質巻上げ量

計算対象である上部湖盆、中部湖盆はそれぞれ表-2 に示す回帰式に従い、表-4 に示す式で設定した。

(2) 懸濁物沈降速度

図-6 から、上部湖盆と中部湖盆では場所による底質及び河川水の沈降速度と粒径の関係には大きな違いはないことから、SS 粒子の密度 ρ_s (kg/m^3) は、既報⁹⁾の式を用いる。

$$\rho_s = 345d_{50}^{0.47} \quad (10 \leq d_{50} \leq 75\mu\text{m}) \quad (3a)$$

$$\rho_s = 2650 \quad (d_{50} > 75\mu\text{m}) \quad (3b)$$

ここで d_{50} : 計算で与える粒度分布の中央粒径(μm)である。

5. 計算結果及び考察

5.1 鉛直 2 次元計算による検証

まず、底質挙動モデルの精度改善を検討するため、鉛直 2 次元モデルの再計算を行った。計算対象領域は上部湖盆及び中部湖盆である。境界条件は既報と同じく、上流端は流出入 0、下流端では茨戸水位観測所の実測水位¹⁸⁾、水面での熱収支は濱原ら²⁾と同様、気象庁石狩気象観測所及び札幌気象観測所のデータ¹⁵⁾を用い計算した。巻上げ量式は表-2 の設定値に修正した。なお杉原らの計算手法にならない²⁾、一定以上の風速（本研究では 4m/s 以上）で混合が生じ、鉛直濃度分布が一様になるように設定した。なお再計算では水温は概ね良好な結果が得られており、本論文では濁度の計算結果から、底質巻上げ量の妥当性を検証する。

図-9 は、改良モデルで再計算した濁度である。図-4 に示す、従前のモデルによる計算結果と比べると、St.A1 では 7 月から 8 月上旬にかけての濁度上昇ピークの再現性が向上し、明らかな精度改善が確認できた。St.A2 でも、概ね妥当な計算結果が得られている。以上から、底質巻上げ量を場所ごとに評価した手法の妥当性を確認できた。

5.2 静水圧 3 次元モデルによる検証

続いて静水圧 3 次元モデルによる計算を行う。湖盆別に底質挙動を考慮することの妥当性は、前節の鉛直 2 次元モデルである程度解決したことから、本節の 3 次元計算の対象領域は、上部湖盆のみとした。なお狭窄部近傍では断面形状が急変しており、計算の不安定化の原因となったため、本研究では計算領域からこの部分は除いた。

計算は、岩佐らによる平面多層モデルをベースとしている¹⁹⁾。蛇行旧河道を表現するため、平面座標は清水による直交曲線座標系に変換した²⁰⁾。図-10 は今回の計算対象湖盆の河床形状及び平面格子分割である。河床形状をみると、外岸湾曲部の河床が深い一方、内岸側は浅い傾向にあり、計算領域全体にわたって、かつての石狩川蛇行低水路の一部であった特徴が、色濃く残る。計算期間は、2006 年 7 月 13 日 0 時から 20 日 0 時までの約 1 週間である。SS 基底値は、13 日 0 時の SS 濃度から、16mg/L に設定した。境界条件として、上流端は流出入なし、下流端は狭窄部（山口橋）での実測水位²¹⁾を与えた。水面での熱交換等は鉛直 2 次元計算と同様、条件である。計算モデルの基礎式等、さらなる詳細な説明は、著者らの文献を参照していただきたい⁷⁾。

図-11 は、St.A1 における流速流向と石狩アメダスによる毎時風速風向の関係である。表層部（水面下 1m）の計算値をみると、流向は実測値とやや方向が異なるものの、概ね流況を再現している。底面付近（河床上 1m）の流速は南方向からの風の時は再現性が比較的良好。しかし北方向の風の時には、計算値の流速はほぼ 0 にに対し、実測

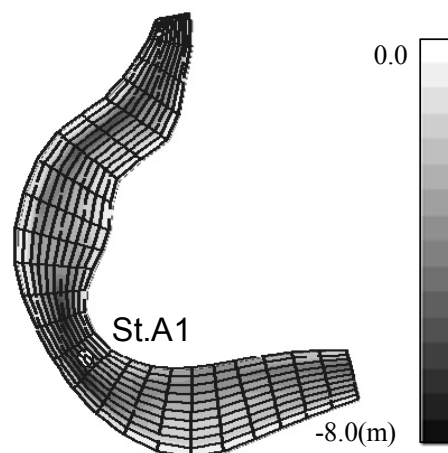


図-10 3次元計算対象域の河床高と計算格子分割

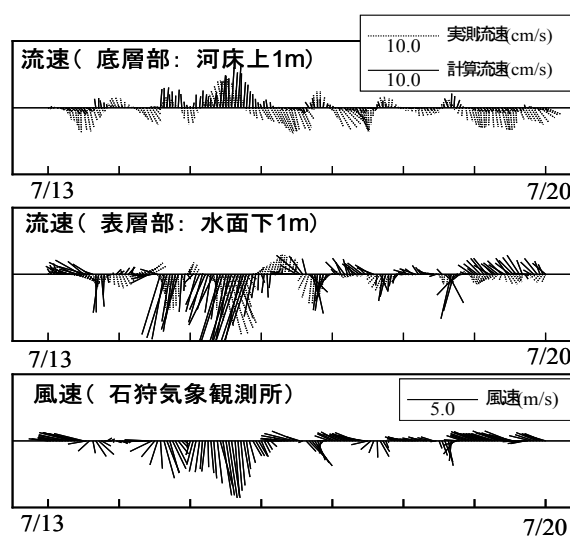


図-11 3次元計算による流速流況計算結果（参考文献7）を一部修正）

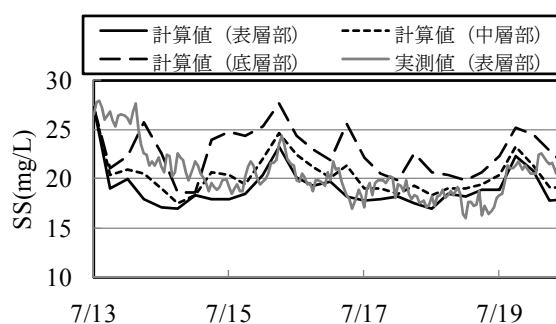


図-12 3次元計算による濁度変動計算結果

値では風の影響により、ある程度の流速が生じている等、再現精度は一様ではない。

図-12 に、St.A1 における SS 変動を示す。7 月 14 日の午後以降、SS 計算値（表層部）は実測値（表層部）を概ね再現している。また SS 計算値の鉛直変化をみると、表層部と中層部では違いはあまり大きくない。一方、底層

部は他の層に比べてSSの値、変動幅ともに大きい。なお底層部濁質の計算値と実測値の比較等、濁質鉛直分布の予測計算精度は、今後実測データを収集し、検証が必要である。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 茨戸川の各湖盆での底質巻上げ量と風速(巻上げの駆動力)の関係は、既往モデルでは場所に関係なく同一の式で表現していた。しかし、各場所の巻上げ量を精査した結果、異なる式で定量化することで精度向上が図れた。
- (2) 上部湖盆では底質巻上げ量と風速には相関が見られた。しかし下流に向かうに従い、底質巻上げ量と風速の相関は弱くなった。これが感潮域の流動とのバランスの影響か、水深等の地形に起因するものかは現時点では不明であり、今後の検証が必要である。
- (3) 底質の沈降速度について粒径との関係を再考察したが、各湖盆で相関式の違いはほとんど見られなかった。また沈降試験結果を再検証したが、既報で提案した沈降速度の式が妥当であることを再確認した。
- (4) (2)及び(3)での再考察をもとに、場所ごとの巻上げ量の違いを考慮した改良鉛直2次元モデルで再計算を行った。その結果、各湖盆の水質変動をより適切に再現することを確認した。
- (5) 3次元モデルによる濁質挙動計算を行った。表層部、底層部ともに流速流向が風の影響を受ける状況がある程度再現できた。濁質は基底SSの設定に注意を要するが、濁質変動傾向はある程度把握可能であった。ところで今回の検討では、一時的とはいえ局所的に塩水侵入が見られる下部湖盆については、鉛直2次元計算、3次元計算ともに、対象にしていない。塩水中の懸濁粒子の挙動が淡水と異なることは、既往研究により広く知られている²⁾。今後計算領域を汽水域まで拡大していくことを念頭に、塩水の混入による濁質沈降特性の変化についても、検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究の実施に当り、国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部(現:札幌開発建設部)より、現地データを提供いただいた。濁質予測計算において、計算格子形成等のプリプロセッサ処理及び各計算結果の図化には、(財)北海道防災研究センターによる、河川シミュレーション支援ソフトRIC-Naysを利用した。ここに記して関係各位に謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 橋治国, 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, pp.163-171, 1996
- 2) 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, pp.1435-1440,

2004

- 3) 梅田信, 長峯知徳, 長広遙, 石川忠晴, 宇多高明: 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, 水工学論文集第45巻, pp.1171-1176, 2001
- 4) 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, pp.491-496, 2008
- 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) 村瀬竜也, 山下彰司, 横山洋: 旧川における底質及び水中懸濁粒子の沈降試験及び粒子挙動に関する考察, 第53回北海道開発技術研究発表会(http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/giken/h21_pre_intra/pdf_files_h20/GT/GT-39.pdf), 2010
- 7) 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
- 8) 例えばMECモデル: <http://mec.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/>
- 9) 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, pp.1321-1326, 2006
- 10) 国土交通省河川局: 汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書, 第2章, 2-6, 2004
- 11) 西田修三, 吉田静男, 大谷守正, 中道陽文: 石狩川下流部の塩分拡散に関する現地観測, 水工学論文集第40巻, pp.487-492, 1996
- 12) 山口幹人: 石狩川下流域及び沿岸域に分布するシラウオの生態学的研究, 北海道立水産試験場研究報告第70号, pp.1-72, 2006
- 13) 日比野忠史, 松本英雄: 広島湾に分布する浮泥の特性と季節的な性状変化, 土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.348-359, 2006
- 14) 福島武彦ら: 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, 51, pp.73-87, 1984
- 15) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/>
- 16) 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52巻, 2009
- 17) 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, pp.174, 1993
- 18) 国土交通省水文水質データベース: <http://www.lriver.go.jp/>
- 19) 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, pp.531-542, 1983
- 20) 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
- 21) 国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部: 茨戸川外水環境調査業務報告書, 2007
- 22) 例えば小田一紀, 宋元平, 芝村圭, 農本充: 塩水中における微細土粒子の凝集, 沈降過程に関する研究—ベントナイトをモデルにして—, 海岸工学論文集第46巻, pp.981-985, 1999

(2010年3月9日 受付)