

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

寒地土木研究所 道央支所 ○村瀬 竜也
水環境保全チーム 山下 彰司
水環境保全チーム 横山 洋

旧川をはじめとした閉鎖性の強い水域の水質予測計算において、底質巻上げ及び沈降量は解析精度に大きな影響を及ぼす重要なパラメータである。著者らは旧川における底質巻上げ及び沈降量の算定精度は、懸濁粒子の沈降速度に大きく影響されることを既報で示した。しかし、旧川に堆積した底質は細粒分が多いこと、有機質含有量が多く、密度が小さいことから沈降速度は非常に遅く、沈降現象の評価で一般に広く用いられる土粒子を想定したストークス則による評価やモデル化は非常に困難である。本研究では、水質モデル構築に当たり重要な基礎データである沈降過程を詳細に考察した。また、試験結果を踏まえ沈降速度のモデルを行った。

キーワード：旧川、懸濁粒子、巻上げ、沈降

1. はじめに

本研究の対象である茨戸川は、札幌市北部に位置し、石狩川のショートカットによって形成された旧川である。閉鎖性の強い水域であり、流域の開発に伴う汚濁負荷の流入により富栄養化が進行した。茨戸川の水質を改善するべく各関係機関において、様々な事業等が展開され、水質は改善されてきている。

このような閉鎖性の強い水域における水質改善策の検討及び予測では、水質予測モデルを用いる事例が多い。茨戸川でも、杉原ら¹⁾が導水を実施した場合の水質について変動予測及び改善効果を検討している。

ところで閉鎖性水域では底質からの巻上げがSS、栄養塩が主たる供給源であることが知られている。茨戸川も、藻類増殖因子である総リンの7割が底質からの巻上げで供給されていることが濱原ら²⁾によって報告されている。そこで著者らは、底質巻上げ量及び沈降量について、ある程度定量的な評価が可能な手法の構築を試みている。その中で底質巻上げ量の適切な算定には、沈降速度を精度よく評価することが重要であることを示した。現在のところ、閉鎖性水域の水中懸濁物の沈降速度の定量的評価は困難な点が多い。これは、堆積物の大半が細粒分であること、有機質含有量が多く粒子密度が小さいことから沈降速度が非常に遅く、土粒子を仮定したStokes則では沈降現象を評価できないことも、大きな要因である。

本研究では、まず、2005～2009年に実施した現地観測、河川水及び底質の室内沈降試験から、懸濁粒子の沈降過程における粒径分布の変化、粒径と沈降速度、密度につ

- セジメントトラップ (H17～19, 21)
- ▲ SS沈降試験試料採取地点 (H18, 20, 21)
- ▲ 河川水採取地点 (H18, 20, 21)

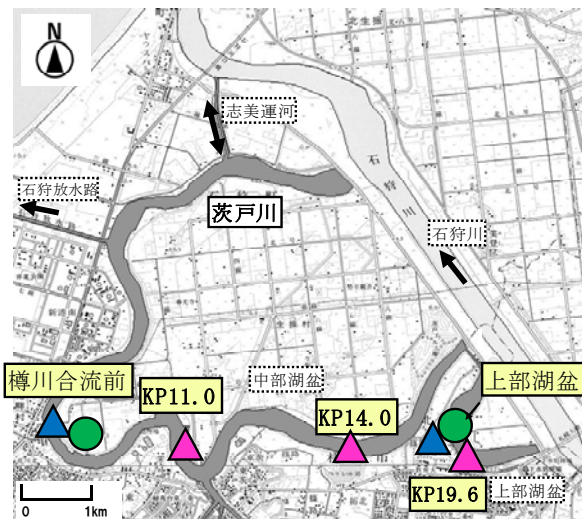


図-1 調査位置図

いて考察を行った。次いで沈降速度の定量評価を目指し、沈降速度のモデル構築を試みた。最後に既往二次元モデル内に本研究で作成した沈降モデルを組み入れ、モデルの妥当性や適用性を検証した。

2. 現地試料採取方法の概要

茨戸川上部湖盆 (KP 19.6) 及び樽川合流前の河床より2割水深と5割水深において、図-2のようなトラッ

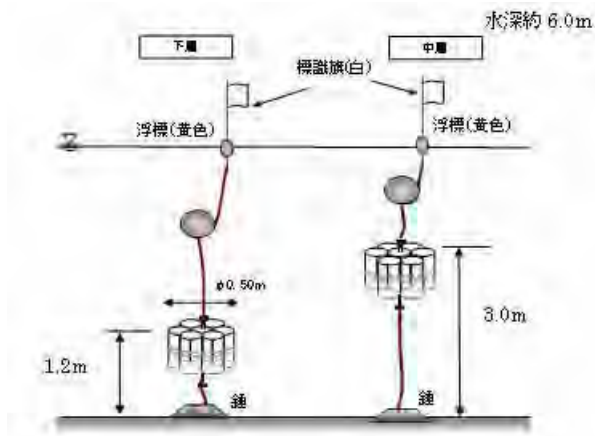


図-2 セジメントトラップ

ブを設置し、水中懸濁粒子の沈降物捕集調査を実施した。
 また、SS沈降試験に使用する茨戸川3地点 (KP 11.0、KP 14.0、KP 19.6) の底質採取 (底泥表面から約20cm) 及び河川水採水 (06年 上部湖盆³⁾ 出水時及び平水時、H08年 樽川合流前・09年 KP 19.6 平水時のみ) も併せて実施した。

3. 沈降速度・密度の算出

沈降速度は、現地観測 (セジメントトラップ) から求めた底質巻上げ量と現地河川水のSSから算出する方法⁴⁾ と、SS沈降試験により沈降速度を算出する方法⁵⁾ (図-3) の2つの試験方法を実施した。

また、両手法から得られた沈降速度からStokes則により粒子の密度を算出した。

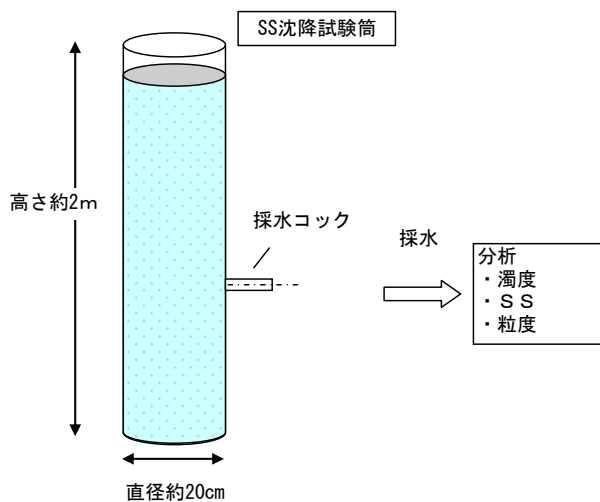


図-3 SS沈降試験筒

4. SS沈降試験の条件と目的

閉鎖性水域における堆積物 (底質) 及び懸濁粒子の存

在状況を下層から水面に向かって考えると、最下層は過去より堆積し締固まった底質層 (河床部)、底質と河川水が混合した浮泥層、その上部には河川水が存在する。そこで下記の5つの設定条件で試験を実施した。

- ① 底質と脱イオン水で攪拌した濁水 (以下: 底質)
- ② ①から底部付近に沈積する浮泥を抽出し脱イオン水で攪拌した試料 (以下: 浮泥)
- ③ セジメントトラップで捕集した沈降物を脱イオン水で攪拌した試料 (以下: 捕集沈降物)
- ④ 底質直上河川水
- ⑤ 河川水

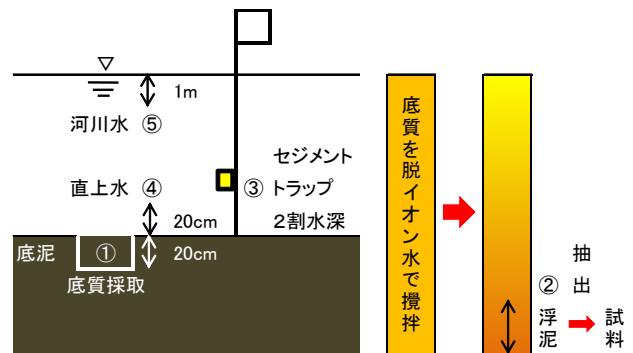


図-4 試料採取位置及び試験方法概略図

①は強風で底質がかなり巻き上げられた状況を想定したものである。一方平常時は風による巻き上げはあまり深い層まで及ばず、底質表層付近は巻き上げられた細粒分と沈降した細粒分が平衡状態で混在していると考えた。そこで②の条件を設定している。③は水中にある程度の期間浮遊した粒子がどのような沈降特性を示すかを検証するものである。④、⑤については、同じ河川水でも底質直上と上層部の河川水では、底質由来生分の濃度に違いがあると考えられる。

5. 粒径別SS濃度の考察

粒径別の沈降状況を把握するため、SS濃度を粒度区分に比例すると仮定し、SS濃度の変遷をKP 19.6 (H21 ①底質、②浮泥、③捕集沈降物、④底質直上水、⑤河川水) を代表例として図-5~9に示した。

土粒子判定により砂に相当する $75\mu\text{m}$ 以上の粒子は24時間以内に急激な濃度低下がみられ、数日後には完全に沈降した。本稿では省略しているが他地点でも同様の結果を確認している。

底質、浮泥、捕集沈降物の粒子については、1~4日後にかけて、各粒径とも緩やかに沈降しており、4日後以降については、沈降状況が鈍りもしくは、停滞の傾向が確認された。また、粒径が小規模になるほど濃度変化が小さく、特に粘土に相当する $5\mu\text{m}$ 未満の粒子については初期状態から濃度変化がみられず、沈降せずに浮遊していると推察される。

④、⑤の河川水については、濁水と比較すると、SS濃度の初期値が小さいため、24時間後の沈降率に違いが発生するが、4日後以降の数値を対比するとほぼ同一であり、沈降特性には相違がないと推測されることが確認出来た。

一方、図-10の樽川合流前 (H20 河川水) については、粒径の大きい75 μm 以上のものを除くと、初期段階より沈降の変化がみられない状況である。これは、採水位置の違いによって河川水中の粒子構成に相違があり、粒径は大きくとも密度は小さいものと推測される。

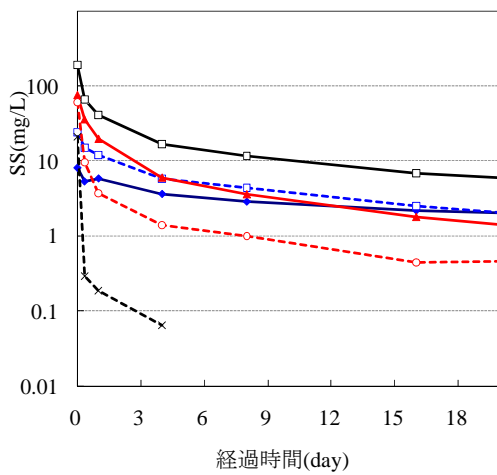
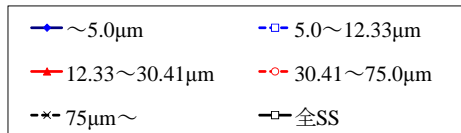


図-5 粒径別 SS 濃度 底質

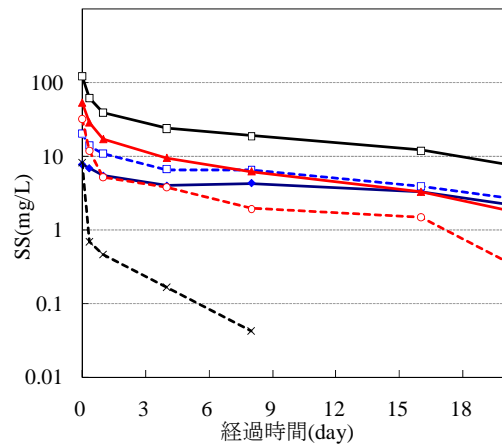


図-7 粒径別 SS 濃度 捕集沈降物

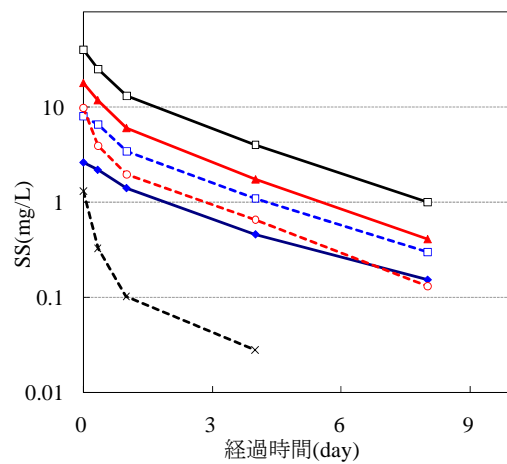


図-8 粒径別 SS 濃度 直上河川水

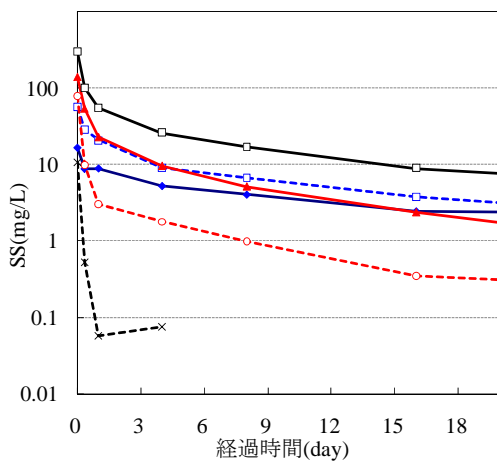


図-6 粒径別 SS 濃度 浮泥

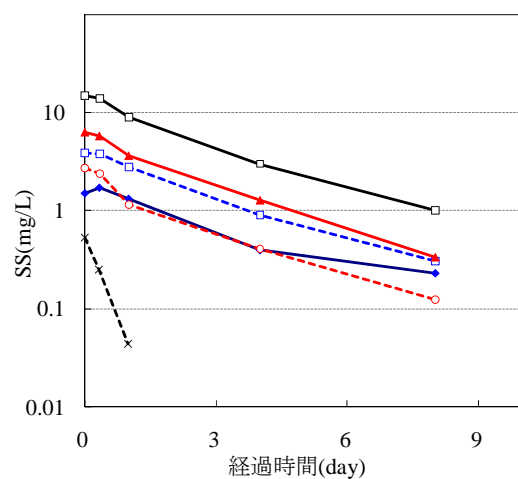


図-9 粒径別 SS 濃度 河川水

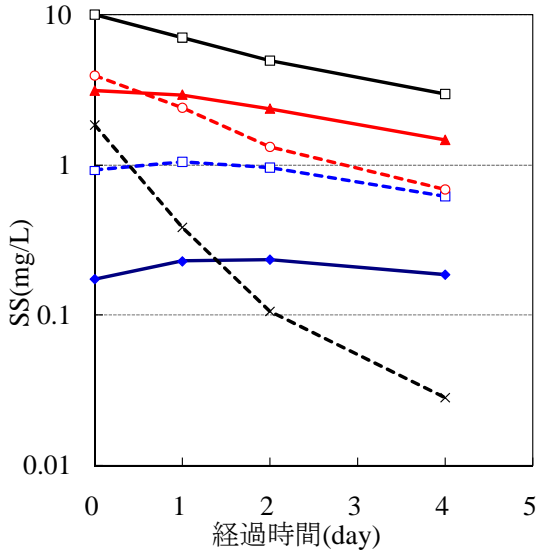


図-10 粒径別 SS 濃度 樽川合流前 河川水

6. 沈降速度から密度の考察

粒径と粒子密度の分布を図-11、12に示す。SS沈降試験の開始直後（攪拌直後）を除けば、粒径の大小や試験の条件に関わらず密度は、1.0～1.2 g/cm³であった。

水の密度が1.0 g/cm³であることを考えれば、粒子の密度1.0～1.2 g/cm³は非常に軽い。ゆえに懸濁している粒子は砂やシルト等の土粒子ではなく、植物プランクトン等の有機物が主たる構成と推測される。また、75 μm以上の粒子は、図-5～9で示すとおり実験初期段階で沈降しており、密度が重い粒子が急速に沈降したと考えられる。しかし、これについては、底質試料を攪拌することで現地では、巻き上がりにくい粒径・密度の大きい粒子である可能性もある。

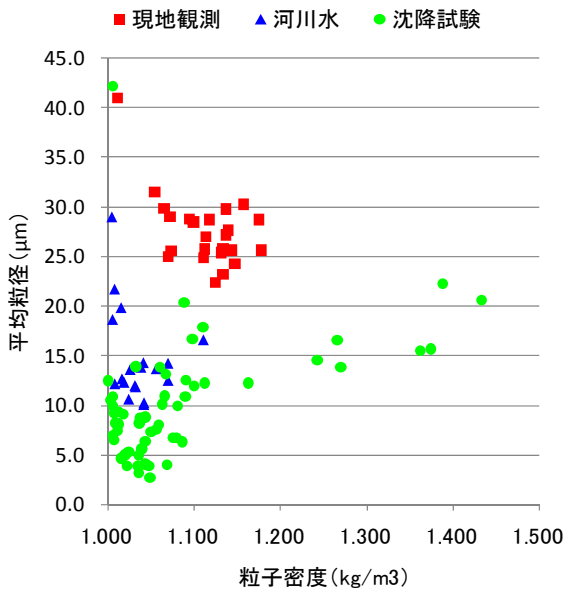


図-11 粒径と密度

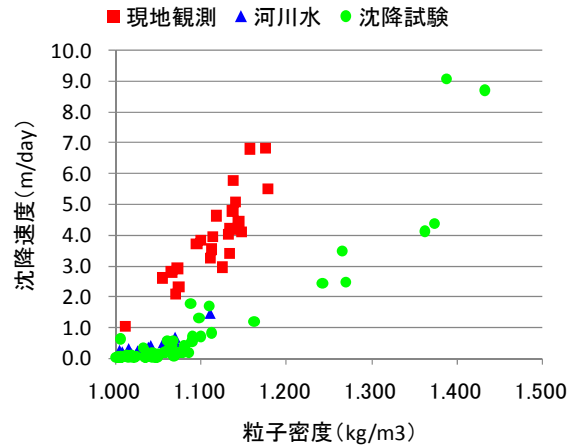


図-12 沈降速度と密度

7. 巻上げ及び沈降過程のモデル化と計算事例

(1) モデル化

まず底質巻上げ量をモデル化する。橋らにより、底質巻上げ量は風速に比例することが示されている⁶⁾。著者らの現地観測でも、上部湖盆では比例関係が成り立つことを確認している。そこで2005～2007年の上部湖盆における沈降物捕集から、福島らの方法で分離した底質巻上げ量⁴⁾と風速の相関式を以下の通り作成した。

$$q_{si} = (140W - 180)p_i \quad (W \geq 1.3 \text{ m/s}) \quad (1a)$$

$$q_{si} = 0 \quad (W < 1.3 \text{ m/s}) \quad (1b)$$

ここで、 q_{si} ：粒径区分 i における底質巻上げ量 (g/m²/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である。

巻上げ成分の粒径分布は、2006年7月から9月の間に6回実施したセジメントトラップ沈降物捕集調査により採取された捕集物の粒径分布の平均値を与えた。表-1に粒径分布及び各区分の代表粒径として中央粒径を示す。粒径分布の下限値は1 μm、上限値はStokes則の適用限界とされる100 μmとした。巻上げは水深2m以上で生じるものとした。

次いで沈降過程のモデル化をする。前章までの沈降試験により、茨戸川の懸濁粒子には2種類の沈降形態がある。1つは常時水中に存在するSS成分（基底値）であり、沈降試験では4日以降も沈降せず、ほぼ同一濃度で浮遊する成分に該当する。ここでは2006年7月～9月の実測SSの最小値とした。もう1つは風や流動により、底質から再浮上及び沈降することで変動する成分である。計算では、表-1に示す粒径区分のうち、網掛けしている中央粒径が概ね10 μm以下の成分は、SS計算では巻上げ、沈降ともに生じないものとし、計算期間中常に一辺値（ここでは、10mg/L）とした。中央粒径が10 μm以上のものは、巻上げ量は式(1)、沈降速度はStokesの沈降則に従

うものとし、その密度 ρ (g/cm³) は、沈降試験から得られた以下の式を用いる。

$$\rho_s = 0.345d_{50}^{0.47} \quad (10 \leq d_{50} \leq 75 \mu\text{m}) \quad (2a)$$

$$\rho_s = 2.65 \quad (d_{50} > 75 \mu\text{m}) \quad (2b)$$

ここで d_{50} : 表-1 で示した中央粒径 (μm) である。

表-1 巻上げ粒径成分

粒径 (μm)	区分番号	分類	構成比 p_i (%)	中央粒径 d_{50} (μm)
1.0~12.94	1	粘土・シルト	20	6.45
12.94~22.05	2	シルト	20	17.50
22.05~32.73	3	シルト	20	27.39
32.73~53.48	4	シルト	20	43.11
53.48~100	5	シルト・砂	20	76.74

(2) 計算結果

計算結果を事例に示す。ここでは2006年7月1日から9月30日までの上部及び中部湖盆のSS変動について示す。計算の諸条件は参考文献⁷⁾ のとおりである。

図-13は多項目水質計による水質連続観測⁸⁾ (著者らにより作成した校正式で、濁度計測値からSSに換算) と、SS計算値の比較である。計算では上部湖盆の7月のSS変動が過小であるものの、その他の部分については概ね傾向を捉えている。図-14は今回の計算における、上部湖盆での各粒径分でのSS変動を示したものである。計算においては、粒径区分では小さい方から2番目にあたる12~20 μm の成分がSS変動に大きく寄与していること

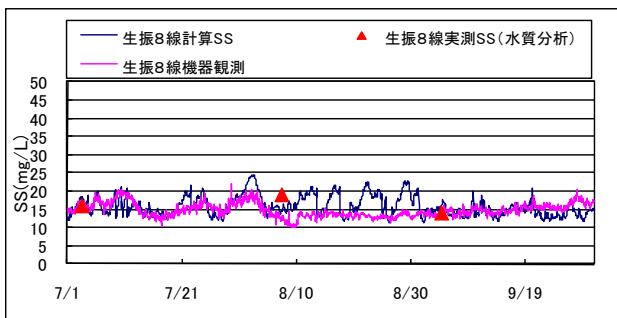
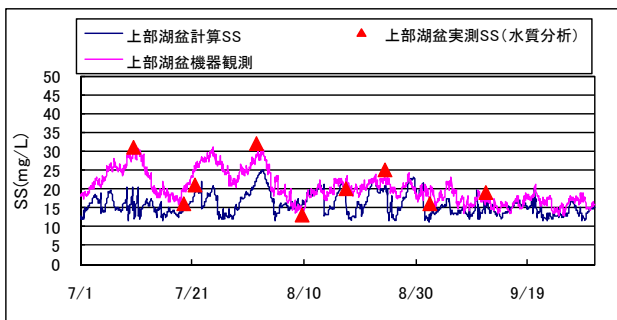


図-13 SS 観測値 (多項目水質計) との計算値比較

がわかる。なお、粒径全体での中央粒径は41 μm であるが、これに該当する成分 (k=4) は非常に早く沈降しており、実現象でみられる緩やかなSS減少には寄与していないことがわかる。仮に単一粒径でSS沈降現象を計算する場合、代表粒径の設定には少なくとも中央粒径は妥当ではない。なお、どのような代表粒径が妥当かを設定することは、現地条件で異なると想定される。

以上から、密度が小さい細粒分が堆積した閉鎖性水域の濁質計算においては、混合粒径を設定して計算することが重要といえる。

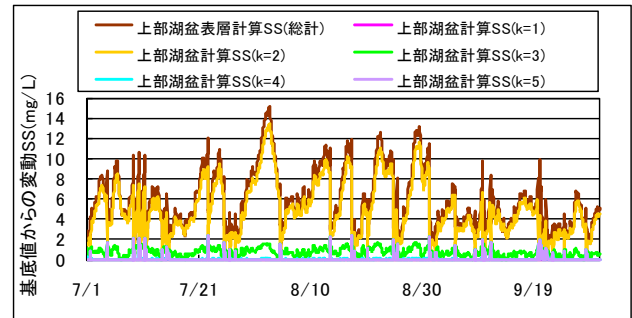


図-14 粒径別 SS 計算値 (基底値からの変動分)

8. まとめ

今回の調査から得られた結果を以下にまとめる。

- ・底質の沈降過程が3段階に分類されている。
- ・懸濁粒子は粒子密度の数値より有機物を多く含み、フロックが形成されていると思われる。
- ・懸濁粒子は、粒子密度が非常に小さく沈降までに非常に時間を要する。そのため河床に沈降する前に再巻上げが発生し、浮遊している状態が推測される。
- ・閉鎖性水域の濁質計算は、沈降過程の違いを検討した上で、混合粒径分布を考慮して計算を行う重要性が確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり国土交通省 北海道開発局 石狩川開発建設部からは貴重な観測データを提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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
- 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、1435-1440、2004
- 3) 国土交通省 北海道開発局 石狩川開発建設部：平成19年度 茨戸川外水環境調査業務 報告書、2008

- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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、163-171、1996
- 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 年次技術研究発表会、論文報告集、2010（投稿中）
- 8) 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