戦-76 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 研究期間:平成18年度〜平成22年度 担当チーム:水環境保全チーム 寒地技術推進室 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,桃枝英幸

【要旨】北海道では広大な土地に,水流が滞留する閉鎖性の強い水域(旧川,ダムを含む湖沼)が数多く存在する.これらの水滞留域は北海道らしい景観形成の重要な要素であるとともに,親水空間や農業用水,漁業での利用等,人間生活の場としても重要である.一方,水滞流域の中には,過剰な汚濁負荷流入による富栄養化の進行により,水質汚濁が問題となっている箇所も見られる.本研究では,石狩川下流の感潮区間にある代表的な旧川で,水質汚濁の改善策が進行中である茨戸川を研究対象として,汚濁負荷の主たる供給源である底質の挙動を把握した.また旧川の水質変動について,底質の挙動特性を考慮した水質シミュレーションモデルで評価した.

キーワード:閉鎖性水域,感潮区間,底質巻上げ・沈降量,水質予測

1. はじめに

寒冷地域である北海道は、年間降水量の半分程度 を降雪が占めており、融雪時の流出機構が河川環境 に与える影響は大きい.また北海道では広大な土地 に、水流が滞留する閉鎖性の強い水域(旧川,ダム を含む湖沼)が数多く存在する.これらの水滞留域 は北海道らしい景観形成の重要な要素であるととも に、親水空間や農業用水、漁業での利用等、人間生 活の場としても重要である.一方、水滞流域の中に は、過剰な汚濁負荷流入による富栄養化の進行によ り、水質汚濁が問題となっている箇所も見られる.

水環境改善が求められている水滞流域を対象とし た水質改善策の検討やその効果推定に当たっては, 限られたデータをもとに,現況の水質特性や将来的 な水質変動を適切に把握することが必要となる.水 質予測シミュレーションは,これらの検討に要する 基礎データを提供し,水滞流域を含む河川環境の保 全や改善を検討する上で不可欠なツールである.本 研究は水滞流域のうち,北海道に多く見られる旧川

(河跡湖)の水質予測手法構築を目指すものである. 本研究では、内水面漁業が営まれ、親水空間として の利用も盛んである石狩川下流を代表する旧川の1 つである茨戸川を調査フィールドに選定した.

ところで水滞流域をはじめとした閉鎖性水域の水 質は、風による底質巻上げで連行される汚濁負荷の 再供給に大きく影響を受けることが知られている. 閉鎖性水域のうち湖沼については、風による底質巻 上げ現象について数多くの現地観測や3次元数値解 析が行われ,その特徴が概ね明らかになっている^{1),2)}. 旧川を対象とした研究事例では,茨戸川上部湖盆に おいて底質巻上げ量と風速に相関がみられることが, 橘らの観測で確認されている³⁾.また茨戸川の水質 変動について,1次元モデル⁴⁾及び2次元鉛直モデ ル⁵⁾による計算が行われ,現地水質を概ね再現して いるとともに,水質改善策の効果予測等にも用いら れている.

ところで旧川はかつての蛇行低水路の一部であり、 一般的な湖沼に比べると、風速・風向の影響は複雑 になると推定される.また下流部の感潮区間にある 旧川では、風に加えて潮汐の影響も無視できない. ゆえに旧川では平面及び鉛直方向に3次元的に複雑 な流況が生じる可能性があり、流動特性及び底質挙 動の双方を考慮した水質予測手法の構築が必要とな る.しかし前述した水質予測計算^{4,5)}は、底質巻上げ 量は一定値で評価しており、風による影響は考慮し ていない.近年、旧川を利用した自然再生事業の事 例も見られる中、現地で生じている現象の特徴を考 慮した水質予測モデルの構築が求められる.

本研究では、茨戸川における底質挙動と現地の水 質変動の関係について、より一般性のある手法で評 価するとともに、水質予測モデルへの反映を試みた. 本研究の研究成果は、水滞流域を含む河川の良好な 水環境保全の検討・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



図-1 茨戸川平面図及び観測位置



図-2 茨戸川最深河床縦断 (2006 年度国土交通省測量 結果より作成)



ている.

2. 調査研究対象地の概要

2.1 河道及び気象特性

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.

我一· 3.2600,950 0.900 文				
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,A1a, A2,A2a, 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	

表-1 現地観測項目の概要

※濁度連続観測は、国土交通省が実施

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⁴⁾,上部湖 盆での閉鎖性が強いことが特徴である.

図-2 は茨戸川の最深河床縦断形である.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水深が大きい傾向 にあり,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 でみると蛇 行部の頂部にあたる.

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、下部湖盆の主な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⁴⁾.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出入である⁴⁾.

本川である石狩川への塩水遡上は、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^の.ま た茨戸川への塩水浸入は、石狩川本川から志美運河 を経由して遡上する.しかし志美運河の河床高が高 いため、塩水浸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⁷⁾. 寒地土木 研究所での既往観測結果でも、上部湖盆及び中部湖 盆への塩水浸入はみられない.下部湖盆と中部湖盆 を隔てる狭窄部(観音橋)の河床高は-2m前後と高 いことから、中部湖盆より上流側への塩水浸入は生 じていないと考えても支障ないといえる.

図-3 は、本研究の予測計算対象期間である 2006 年7月から9月までの、気象庁石狩気象観測所にお ける毎時の風速風向と気温である⁸⁾.風向は北西方 向と南東方向に卓越している.対象期間中の平均気 温は19.9度である.

2.2 現地観測概要

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,寒地土木研究所,国土交通 省及びその他の関係機関による現地調査が実施され ている.本研究では一連の調査データのうち,**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. なお濁度連続観測は,国土交通省北海道開発局で行 った結果である⁹.

3. 底質挙動の把握

茨戸川の主たる汚濁負荷供給源は底質巻上げであ り、例えば藻類増殖と関連の深い総リンの7割が底 質巻上げに由来することが濱原らにより示されてい る⁴. 底質巻上げの主たる駆動力は風である一方, 茨戸川は感潮区間であり、底質挙動は風以外に潮汐 の影響も受ける.そのため底質巻上げ量の評価には, 風による影響のほか,風と潮汐のバランスも考慮す る必要がある.

また底質から巻上げられた懸濁粒子は、細粒分が 主体で有機物も多く含んでおり、沈降する過程にお いて凝集も顕著である.これらの懸濁粒子は、土粒 子を想定した Stokes 則よりも遅い速度で沈降するこ とが知られている.

本章では底質巻上げと沈降過程について,現地観 測及び室内試験を行い,現地特性を考慮しつつ,よ り定量的な評価を目指す.また計算モデルへの導入 を念頭に,モデル化を行う.

3.1 底質の特性

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



(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)

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、75µm 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. 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¹⁰⁾.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といえる.

3.2 底質巻上げ量

茨戸川における底質巻上げ量と現地風速の関係を 整理する.底質巻上げ量は、セジメントトラップを 水中に設置し、福島らの方法によりトラップ内の捕 集沈降物量から底質巻上げ量を算定した¹¹⁾.

図-4は2001年から2007年にかけて実施したセジ メントトラップ調査から算定した底質巻上げ量と風 速の相関である.図-4で示す風速は、セジメントト ラップ設置期間中の気象庁石狩観測所における毎時 風速を平均した値である⁸.

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 は橘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 r²を示したものである. St.A1, A2, A3 の順に r²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.すなわち下流に向かうに従って、 底質巻上げ量に対する風速の影響が小さくなる.

この一因として、茨戸川の主たる流出入は下流部 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と推測される.一方、図 -2 に示すとおり、St.A3 は水深が 10m 以上であり、 水深が 4~5m である St.A1、A2 に比べて深い.その ため St.A3 では、底質巻上げに風が及ぼす影響が St.A1、A2 と異なると考えられる.これらの現象の 詳細については、さらなる検証が必要である.

3.2 懸濁物沈降速度

次いで水中懸濁粒子の沈降量(沈降速度)につい て検証する.水質予測計算モデルに組みこむ沈降速 度については、これまでの検討の結果から、底質に よる沈降試験で得られる値を用いることとしている. 以下に、底質沈降試験結果の概略と沈降速度の算 定・モデル化を説明する.

(1)沈降試験の概要

高さ2m, 内径20cmのアクリル製円筒に, 試料を 注入, 静置する(図-5 参照). 試験対象の試料作成 であるが, 底質を脱イオン水と撹拌して高濃度濁水 を作成して注入している. 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)



図-4 底質巻上げ量と風速の関係

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

(g.: 底質巻出げ量(g/m²/day), W:石狩アメダス風速(m/s))



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¹²⁾.

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

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*_i:*t*時間後の水柱の負荷量,*h*: 水柱の高さである.

(2)沈降速度の評価

実際の濁水中には、多数の懸濁粒子が様々な形状、 粒径、密度で存在している. 堀田ら¹³は、細粒分が 多い条件での濁度変化は、粒径別での沈降形態を考 慮する必要があることを示しており、梅田ら¹⁴は粒 径 10µm 以下の成分の沈降は、Stokes 則に従わない ことを示している.

懸濁物総体での沈降速度を Stokes 則で評価するに は、各試料を代表する粒径を定める必要がある.本 研究では、採水試料の粒度分布の中央値 d₅₀ を代表 粒径と考え、検討を進める.

図-6 は底質沈降試験から算定した沈降速度と試料の d_{50} との関係を示したものである.ここでは比較のため、粒子の密度が土粒子と同じでかつ球形を想定した場合の Stokes 則による沈降速度も示す.

底質の沈降速度は、試料採取場所による傾向の違いはみられず、St.B1、B2、B3 いずれの地点も沈降速度と d_{50} の関係はほぼ同一であった.この時の沈降速度 $w_f \ge d_{50}$ の相関は以下の式(2)で表現される.

$$w_f = 0.0001 d_{50}^{-3.59} \tag{2}$$

なお砂とシルトを区分する粒径である 75 μ m の場合,式(2)による沈降速度と,土粒子の密度を想定した Stokes 則による沈降速度はほぼ同じとなる.すなわち d_{50} が 75 μ m 以上では,底質の沈降速度は土粒子を想定した Stokes 則で評価して問題ないといえる.

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. 懸濁 粒子の見かけの密度は大半が 1200kg/m³以下である. 1500kg/m³を超えるケースは、沈降試験開始直後の 採水試料であり、 d_{50} も大きい一方、SS も短時間で 急減して沈降速度も大きい. そのため見かけの密度 も大きくなる傾向にある.

図-7より, d₅₀が 10µm 以上の場合は見かけの密度 と粒径の間には相関が窺える.一方 10µm 以下では, 見かけの密度は水とほぼ同じであり,沈降しないで 浮遊を続けている状態に近い.今回の沈降試験の結 果からは,懸濁成分の d₅₀が 10µm を境にして, d₅₀ がそれより大きい場合は Stokes 則に従って沈降する 成分,小さい場合は Stokes 則に従わず長期間浮遊を する成分に分けて考えることができることを示唆す る.これは梅田らの既往検討¹⁴と同様の結果である.

4. 水質予測モデルの構築

前章までの底質挙動の把握と考察を踏まえ,旧川 を対象とした水質予測モデルを構築する.またモデ ルの精度検証のため,現地水質変動の再現計算を行 った.本研究での再現計算対象域は,茨戸川のうち 閉鎖性が強い水域にあたる上部湖盆,中部湖盆とし







図-7 見かけの密度とd₅₀の関係

た.計算対象期間は2006年7月1日から9月30日 までの3か月間である.

再現計算に適用するモデルは、水質の鉛直分布が 表現できること、横断形状もある程度考慮可能なこ とが必要となる.また旧川内の流れは非常に緩やか であることから、流動は静水圧近似が可能といえる. 本研究では、土木研究所で開発されたダム貯水池を 対象とした鉛直2次元静水圧モデル¹⁵⁾、岩佐らによ る平面多層モデルをベースとした3次元モデルを用 いる¹⁶⁾.なお3次元モデルは、蛇行旧河道の平面形 状を少ない格子分割でより適切に表現するため、平 面座標は清水による直交曲線座標系に変換した¹⁷⁾. 底質挙動については2次元、3次元両モデルで、藻 類増殖や栄養塩動態等の生物モデルは2次元モデル に組入れている.

4.1 底質巻上げ及び沈降のモデル化

(1)底質巻上げ・沈降と粒径の関係

再現計算対象区間である上部湖盆と中部湖盆の底 質巻上げ量と沈降速度の特性について,前節までの 結果を再度まとめると,以下のとおりである.

・ 底質巻上げ量は上部湖盆、中部湖盆ともに風速
 とある程度の相関がある.ただし回帰式は各湖

戦-76 寒冷水滞留域の再生、保持に関する研究

盆で大きく異なる.

- 沈降速度は粒径と明瞭な相関があり、両湖盆で
 同一の回帰式で表現できる.
- d₅₀が 10µm 以上の濁質成分の沈降速度は, 適切 に密度を設定すると Stokes 則で評価できる.
 さらに, d₅₀が 75µm 以上の濁質成分の沈降速度 は、土粒子を想定した Stokes 則で評価できる.
- d₅₀ が 10µm 以下の濁質成分は沈降速度が非常に遅く、見かけの密度は水とほぼ同じである.
 すなわち浮遊状態に近い.

底質挙動に関する、これらの結果及び考察を踏ま え、底質巻上げ及び沈降速度は以下のとおりモデル 化した. 堀田らの研究¹³⁾により、細粒分の多い閉鎖 性水域の濁質を適切な予測には、粒径を区分する必 要があることが示されている.本研究でも、底質巻 上げ、沈降速度の評価は粒度分布を考慮する.

本研究の濁質計算における粒径区分の設定は,茨 戸川で採取した底質表層 20cm の粒度分布(レーザ ー回析・散乱法)で与えている(表-3).浮遊状態で ある10µm 未満の成分,及び土粒子を想定した Stokes 則で沈降する 75µm 以上の成分については,それぞ れ1区分でまとめている.10~75µm の成分の粒径区 分は,粒径を対数変換し,等幅に5分割した.

(2) 底質巻上げのモデル化

- ・ 底質巻上げ量は表-2 に示された回帰式で, 湖盆 ごとに設定する.ただし風速によって巻上げ量 が負になる場合は,巻上げ量=0 に補正した.
- 巻上げ成分の粒度分布は、表-3に示す底質表層
 部の粒度分布の分布頻度に比例させる.

$$Q_{S_i} = p_i \times Q_S \tag{3}$$

ここで Q_{si}: 粒径区分 i での底質巻上げ量, p_i: 粒径区分 i での粒径頻度, Q_s: 底質巻上げ量の 全量である.

・ 10µm 以下の粒径区分(表-3 では区分番号 i=1) に該当する成分は現地では浮遊状態に近い.ゆ えにこの粒径区分の巻上げ成分は SS の時間変 動には影響しないと考え,この粒径区分の底質 巻上げは0に設定した.

(3)沈降速度のモデル化

沈降速度については,沈降試験結果をもとに以下 のとおり設定する.

・ 粒径10µm以上の成分の沈降はStokes則に従う.

粒径 10~75μm の成分は粒径に応じて密度を設 定し, 粒径 75μm 以上の成分(表-3 では区分番 号 i=7)は, 土粒子とほぼ同じ沈降形態として取 り扱う. 粒子の密度ρ_s (kg/m³)と懸濁成分の d₅₀(μm)の関係は, 図-7 の結果をもとに以下の式 (4a), (4b)で与えた.

$$\rho_s = 345 d_{50}^{0.47} \qquad (10 \le d_{50} \le 75\,\mu m)$$
 (4a)

$$\rho_s = 2650 \qquad (d_{50} > 75\,\mu m) \qquad (4b)$$

粒径 10µm 以下の成分は、浮遊状態に近いことから、SS 基底値(有機物や微細粒子等、浮遊を続ける成分)に寄与すると考える.すなわち、10µm 以下の成分は巻上げ・沈降ともに計算からは除外することとなる.

4.2 栄養塩挙動のモデル化

栄養塩等の挙動を含む水質予測モデルは、様々な 手法が存在する.本研究では、杉原らが茨戸川水質 解析時に構築している鉛直2次元モデルに示されて いる栄養塩収支の基礎式に基づいて行う⁵.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \phi$$
(5)

ここで C: 各物質の濃度, φ: 単位体積当たりの各 物質の生成・消滅を示す項である.

生成・消滅項φは、杉原ら⁵の考え方に基づいて いる.ただし各栄養塩の項目中で、底質からの巻上 げに由来成分は、杉原らはセジメントトラップによ る現地観測結果に基づく一定値で付与している¹⁸. しかし本研究では T-N, T-P, COD についても、底 質に含まれる各項目の含有率に比例して巻上げられ ると仮定し算出した.

$$Q_N = \gamma_N \times Q_S \tag{6a}$$

$$Q_P = \gamma_P \times Q_S \tag{6b}$$

$$Q_{COD} = \gamma_{COD} \times Q_S \tag{6c}$$

ここで Q_N, Q_P, Q_{COD}: 底質からの T-N, T-P, COD の巻上げ量, Q_s: 水質予測計算で算出される底質巻 上げ量, γ_N, γ_P, γ_{COD}: 底質中に含まれる単位重量 当たり栄養塩量である.本研究では 2006 年に St.1a (上部湖盆)において 7~9 月にかけて採取した底質

区分	粒径区分(μm)	d ₅₀ (µm)	頻度(%)
番号i			p_i
1	~10.00	5.00	5.9
2	10.00~14.96	12.23	4.7
3	14.96~22.38	18.30	7.5
4	22.38~33.49	27.38	9.5
5	33.49~50.12	40.98	10.9
6	50.12~75.00	61.31	13.1
7	75.00~	75.00	48.4

表-3 計算で設定した底質粒度分布と区分

表-4 底質に含まれる栄養塩含有量

項目	各成分の底質への含有量	
T-N	$\gamma_{\rm N}$ =1.83(mg-N/g-SS)	
T-P	$\gamma_{\rm P}=0.632({\rm mg-P/g-SS})$	
COD	$\gamma_{\text{COD}}=21.6(\text{mg-COD/g-SS})$	



※再爆気は表層セルのみ ※巻上げ・溶出は底面に接する箇所のみ

表-5 鉛直2次元・3次元計算の拡散係数

	水平方向	横断方向	鉛直方向
	(m^2/s)	(m^2/s)	(m^2/s)
運動式	20.0	1.0	0.001
SS 計算	20.0	1.0	0.001
水温計算	20.0	1.0	0.0001
その他水質項目	20.0	1.0	0.001

[※]横断方向は3次元のみ※その他水質項目は鉛直2次元のみ

表層試料の分析値の平均値(表-4)を用いた.

今回の生物モデルの概要を図-8に示す. 杉原らは 藻類を珪藻,緑藻,藍藻の3種類に分類し,各藻類 でパラメータを設定している¹⁸⁾が,本研究では藻類 全体の動向を把握することが目的のため,藻類は分 類せずに総量で変遷を評価した. 杉原らは BOD を モデルにとり入れた計算を行っている^{5),18)}が,本モ



図-10 2次元鉛直モデルによる水温予測計算結果

デルでは COD を有機物の指標として計算を行った. また各物質の沈降速度,栄養塩溶出速度等のパラメ ータの一部は,現地での水質変動の再現性を向上さ せるため,試行計算を繰り返して同定している.

なお3次元モデルでは、生物モデルは組み入れず、 水質計算は水温・SS のみの計算とした. これは、3 次元モデルに生物モデルを組み入れると計算負荷が 非常に大きくなること、現地 SS と栄養塩にはある 程度の相関があるため、SS 計算結果から栄養塩等の 物質動態についてある程度把握できると考えたため である.計算モデルの基礎式における拡散係数は乱 流モデルをはじめとして様々な考え方があるが、今 回は一定値とした.諸元は**表-5**に示すとおりである.

5. 計算結果

5.1 鉛直2次元モデル

まず鉛直2次元モデルによる水質変動の再現性に ついて検証する.図-9に、今回の計算に用いた格子 を示す.計算格子は水平方向に100m間隔(81分割), 鉛直方向には0.5m間隔(26分割)で分割をした. なお表層部のセルは、現地水面の変動を表現できる よう、格子の鉛直方向幅は固定していない.

計算結果との比較に用いる実測値は,水温,SS, クロロフィル a は多項目水質計の観測結果(国土交 通省実施),その他は水質分析による結果である.な

図-8 生物モデルの概要(杉原ら⁵⁾の図を一部改変)

お SS は濁度出力値(カオリン換算),クロロフィル a はクロロフィル出力値(ウラニン換算)を現地水 質により検量線を作成して変換した結果である¹⁹⁾. 境界条件であるが,上流端は行き止まり(2006年当 時)のため流入量 0,下流端は近傍である茨戸水位 観測所の毎時水位データ²⁰⁾を補間して与えた.その 他計算手法・条件の詳細は参考文献²¹⁾に示している.

(1)水温計算結果

図-10 は表層部における水温の比較結果である. 計算値は、概ね実測水温を再現している. なお実測 値は計算値に比べて日変動が大きい. これは水温計 測に用いている多項目水質計が、水面下 0.2m と浅 い水深に設置してある一方,計算の鉛直分割が 0.5m であり、計算格子がやや粗いことも一因と考えられ る. また St.A1, St.A2 ともに7月中旬に計算値が実 測値よりも水温が約 2℃低くなっているが、この原 因は不明である.

(2)SS 計算結果

図-11は表層部におけるSS計算結果と実測値の比較である.計算については、風速に応じた底質巻上 げ量設定によるSS再現精度の改善について検証す るため、表-2に示す風速に応じて底質巻上げ量が増 加する手法(以下、「風速考慮モデル」と記す)と、 実測から得られた底質巻上げ量の平均値を両湖盆に 与える手法(以下、「巻上げ一定モデル」と記す)の 異なる2手法について比較する.以降、地点・時期 別に計算結果を検証する.

上部湖盆である St.A1 では、7~8 月上旬にかけ強 風時に SS 実測値が上昇する傾向が見られ、変動幅 も他の時期に比べると大きい.風速考慮モデルでは、 この期間の現地 SS の上昇、下降過程ならびにピー ク値をほぼ再現している.一方巻上げ一定モデルで は、全体的に SS の変動幅は小さく、時折パルス状 の上昇がみられており、この期間の現地 SS 変動過 程、ピーク値ともに十分に再現していない.

一方,8月中旬以降,現地SSの変動幅はそれ以前 に比べて小さくなる.計算値は風速考慮モデル,巻 上げ一定モデルともに全体的に現地SSより過大で あるが,風速考慮モデルがやや大きめに評価する傾 向がある.一方,SS変動傾向については,風速考慮 モデルが巻上げ一定モデルに比べてやや再現性はよ いように思われる.

なお St.A2 では、全期間にわたり SS の変動幅は小 さい.計算結果は、風速考慮モデル、巻上げ一定モ デルともに大きな違いはなく、現地 SS をいずれの



手法でも概ね再現している.

以上の結果より,閉鎖性が強い水域になるほど, SS 変動予測において底質巻上げ量を風速に応じて 設定することの必要性を確認できた.

(3) 生物モデル計算結果

図-12 に、クロロフィル、T-N、T-P、COD 及び DO の計算結果を示す. 藻類増殖を示すクロロフィ ル a は、現地観測で得られたクロロフィル a は日変 動が非常に大きいが、一部の時期を除き St.A1、St.A2 ともに概ね現地の変動傾向を再現している.

T-N は St.A1 において全体的に高い値で推移する 等,現地水質と若干の違いがあるものの,その他は 概ね現地水質を再現している. T-P, COD 及び DO は, St.A1, St.A2 ともに現地水質をほぼ再現できて いる. DO については,貧酸素状態が課題となるの は下層部であるため,今後鉛直方向の変動再現性を 十分検討していく必要がある.

(4)計算結果まとめ

今回の計算結果により,底質の現地粒径分布を考 慮して混合粒径で設定することにより,SSの再現性 向上がみられた.栄養塩についても,底質巻上げに 応じた汚濁負荷供給機構を入れたモデルは,現地水 質を概ね再現した.なお一般に閉鎖性水域ではリン が藻類増殖の制限因子となるケースが多い²⁰.茨戸



図-12 2次元鉛直モデルによる水質各項目予測計算結果

川におけるリン供給源は、底質巻上げが主たる原因 であることも確認されている⁴⁾. SS の再現性向上は 栄養塩項目の再現性向上にも関係するため、今後と も検討が必要である.



図-13 3次元モデルの計算格子



図-14 3次元モデルによる流速流向計算結果



5.2 静水圧3次元モデル

続いて静水圧3次元モデルによる水質シミュレー ション結果を示す.前述した鉛直2次元モデルによ り流動,水温,SSが良好に再現できることにより藻 類増殖,栄養塩についても十分な精度で予測可能な ことが示されている.そのため3次元モデルでは, 水質予測モデルでの計算項目は,水温,流動,粒径 別SSとした.計算範囲は,特に閉鎖性が強い水域 であり、風による流れと底質巻上げの影響が大きい ことが鉛直2次元モデルからも示唆された上部湖盆 を抽出した.図-13 は今回計算に用いた計算格子で ある.計算の詳細や各条件等については、参考文献 に示す.以下に結果を示す.

(1) 流速流向計算結果

図-14 は、St.A1 における流速流向の深度別計算 結果である.比較参照のため、石狩アメダスによる 毎時風速風向も示している.表層部である水面下 1m では、計算による流速流向は実測値と流向がやや異 なっているものの、流速の絶対値はほぼ一致してお り、流況をほぼ再現しているといえる.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 が比較的よい.しかし北向きの風の時には、計算値 の流速はほぼ0 に対し、実測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.計算格子の設定等、付与する計算条件の問 題とも考えられるが、検証中である.

風による底面への流動の影響は,底面せん断の評価精度にも重要であるため,今後改善を進めたい.

(2)SS 計算結果

図-15は、St.A1 における7月1日から31日までの1か月間のSS 変動を示す.SS計算値は、表層部(水面下概ね1m),中層部(5割水深),下層部(底面上1m)の3深度の値である.SS計算値(表層部)は、7月上旬の数日間を除いて実測値(表層部)とほぼ一致しており、現地濁度変遷過程を概ね再現しているといえる.

また SS 計算値について, 鉛直方向での違いをみ ると, 各層間での値の違いはあまり大きくない.本 研究での3次元モデルでは, 鉛直方向の拡散係数を 一定としているが,風の強弱により鉛直方向の混合 形態は変化するとも考えられる. 今後,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,今後実測データをもとにした検討が必要 である.

6. おわりに

本研究では、閉鎖性が強く、底質巻上げが顕著な 旧川である石狩川下流域の茨戸川を対象に、水質予 測モデル構築を試みた.主要な研究成果を以下にま とめる.

水質予測モデルにおいて重要なパラメータである底質巻上げ量と、巻上げ後の懸濁粒子の沈降速度についてモデル化を行った。

戦-76 寒冷水滞留域の再生、保持に関する研究

- ・ 底質巻上げ量は閉鎖性が強いほど風との相関 が明瞭であるため、風速との1次関数で表現す るとともに、閉鎖性の違いにより異なる回帰式 で表現した。
- 沈降速度については水域間で大きな違いはなく、代表粒径である d₅₀を指標として、粒径に応じた定量化が行うことができた。
- ・ 底質巻上げが顕著な閉鎖性衰期の水質動態評価には、横断・鉛直方向の水質変化が重要であることから、2次元鉛直モデル及び3次元モデルによる水質再現を行った。
- 前述した底質動態のモデル化を取り入れた鉛 直2次元計算結果は、現地のSS変動をより適 切に表現していることを確認した.またSS計 算の改良を組入れた生物モデルについても現 地水質を良好に再現することを確認した.
- 3次元計算についても、現地流速流向、濁度を ほぼ再現しており、3次元性の強い流れが生じ る閉鎖性水域において、改良モデルが有効であ ることを示すことができた。

今後は、本研究では検討に至らなかった課題であ る融雪期の汚濁負荷の閉鎖性水域内での動態等、寒 冷地特有の事象が水質にもたらす影響について、水 質シミュレーションによる感度分析や現地再現計算 による検証等により、検討を進める必要がある.

謝辞:本研究の実施に当たり,国土交通省北海道開 発局札幌開発建設部より調査データを提供いただい た.計算格子の作成,計算結果の可視化等には,北 海道河川財団(旧:(財)北海道河川防災研究センタ ー)により開発された,河川シミュレーション支援 ソフト Ric-Nays を利用した.ここに記して謝意を表 する.

参考文献

- 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
- 2) 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
- 3) 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
- 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

- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 気象庁ホームページ:http://www.jma.go.jp/
- 9) 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
- 10) 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
- 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 梅田信,富岡誠司:ダム貯水池における洪水時濁水 シミュレーションモデルの開発,平成14年度ダム 水源地環境技術研究所所報,3-17,2003
- 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 杉原幸樹,濱原能成,加藤晃司,中津川誠:茨戸川の富栄養化に関する総合的解析その2-負荷収支の 推定と生態系モデルによる水質シミュレーション-, 北海道開発土木研究所月報No.615号,2004
- 19) 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
- 20) 国 土 交 通 省 水 文 水 質 デ ー タ ベ ー ス : http://wwwl.river.go.jp/
- 21) 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
- 22) 岩佐義朗:湖沼工学,山海堂, 1990
- 23) 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
- 24)横山洋,村瀬竜也,中村茂樹:有機懸濁物の多い旧川の濁質予測手法に関する研究,応用力学論文集,第 13巻,2010