

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

STUDY ON WATER QUALITY SIMULATION IN AN OXBOW LAKE CONSIDERING SEDIMENTATION AND FALL MECHANISM

横山 洋¹・山下彰司²

Hiroshi Yokoyama and Shoji Yamashita

1 正会員 工修 (独) 土木研究所 寒地土木研究所水環境保全チーム主任研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

2 正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所水環境保全チーム上席研究員 (同上)

We examined the process of sedimentation and fall velocity of sediments in an oxbow lake. Fall velocities were examined in two different methods; sedimentation experiment and tracing of particles. Fall velocity depends on the particle diameter. We modeled the sedimentation of particles by dividing three different rules: Particles over 75 μm follow Stokes law of soil particle. Other particles follow experimental law. The rest particles are treated as non sedimentation. Water quality simulation coupling with sedimentation model had been conducted. The simulation reproduces the long-term trend of turbidity. However, accuracy of short-term change of water quality should be improved.

Key Words: fall velocity, Stokes law, sedimentation experiment, water quality simulation

1. はじめに

旧川や湖沼等の閉鎖性の強い水域では、有機物や栄養塩を含む微細な土粒子が堆積し、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知られている。本研究で対象としている茨戸川も石狩川の旧川であり、季節風による底質の巻上げが栄養塩の主たる供給源であることが報告されている¹⁾(図-1 参照)。

これら閉鎖性が強い水域の水質予測については、従前から数多く研究がなされている。茨戸川においても1次元ボックスモデル¹⁾及び2次元鉛直モデル²⁾による水質計算が行われ、長期予測や水質改善事業の効果検討等、実現象の解析や機構解明に実用的に用いられている。

一方これらの水質予測モデルの精度は、底質の巻上げ及び沈降量の評価により大きく影響されるため、底質の巻上げ及び沈降現象の適切なモデル化が重要である。底質の浮上過程について、大坪らは力学的な詳細考察を行った³⁾。その結果、含水比、粘度、有機物含有量等の底質物性に着目した限界掃流力や巻上げ形態の違い等、先駆的な知見を多く得ている。しかし巻上げ沈降のモデル化にあたっては現地での底質挙動を支配する外力(風波等)や粒子の形状も考慮することが必要となる。

水質予測モデルについて、底質の巻上げ量は実測値をもとに一定値を与える方法のほか¹⁾、風波によるせん断力を関連付ける手法⁴⁾が実用的である。また沈降量については、

実測値をもとに懸濁粒子全体での沈降速度を求める手法⁵⁾、粒度分布を考慮し粒径に応じた沈降速度を設定する手法^{6),7),8)}も多く研究されている。

著者らは現地観測結果をもとに、茨戸川における底質巻上げ量の時系列変化を算定した⁹⁾。その結果、底質巻上げ量の算定精度は懸濁粒子の沈降速度に大きく影響を受けることがわかった。なお茨戸川の懸濁粒子の沈降速度は、土粒子を想定した Stokes 則と比べて非常に遅い(図-6 参照)。そのため懸濁粒子の沈降速度の評価には、土粒子を想定した Stokes 則と異なるアプローチが必要となる。



図-1 茨戸川位置図

本研究ではまず沈降試験を行い、土粒子を想定した Stokes 則に従わない懸濁粒子の沈降速度について、粒径を考慮したモデル化を試みた。また作成した沈降モデルを水質計算に組み入れ、その妥当性を検証した。本研究は旧川をはじめとした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の精度向上に資するものとする。

2. 沈降速度の算出及び考察

細粒分を多く含む土砂の沈降速度に関する研究は、貯水池の濁水現象の解析をはじめとして、現在までに数多くの研究がある。例えば中村らは土砂の沈降速度を一定ではなく、流入濁質の粒度変動を考慮して設定することにより、適切な濁度予測が可能となることを示した⁶⁾。堀田らはシルト・粘土のうち、濁水の長期化に関連する成分について粒径別の濁度計算を行うとともに、濁質の粒度組成が計算に及ぼす影響について検討した⁷⁾。梅田らは一定粒径以下の粒子（論文中では10 μm 以下）については沈降しない状態（浮遊状態）から何らかの確率的要因で沈降状態に移行すると仮定した濁度計算モデルを提案している⁸⁾。これらの研究成果を踏まえると、底質沈降速度モデル化のための考察には、粒径を指標とすることが妥当と考えられる。

ただし今回対象とする旧川の底質は一般的に富栄養化が進行し、微細な土粒子以外にも、植物プランクトンの残滓等の有機物が多く含まれている。これら細粒分を多く含む底質の沈降速度は、一般に用いられる土粒子の密度、球形を仮定した Stokes 則には従わないことは多くの既往研究により明らかにされている^{7,8)}。

そこで旧川河床表層部に堆積する底質が巻上げ後に沈降する状況を再現するため、SS 沈降試験を行った。また懸濁粒子個別の沈降軌跡を顕微鏡で撮影し、画像解析により粒子個別の沈降速度を求めた。さらに各試験から得られた懸濁粒子の沈降速度と粒径の関連を考察し、沈降形態のモデル化を試みた。

(1) SS 沈降試験

まず沈降筒による SS 沈降試験を行った。茨戸川では閉鎖性の強さが異なる 3 地点 (KP11.0, 14.0, 19.0) 及び流入河川である創成川と茨戸川の合流点にあたる耕北橋地点の計 4 地点において、底質表層部 20cm 程度を採取した。試料採取時期は、茨戸川については 2007 年 9 月、創成川は 2007 年 11 月である。

採取した底質の粒度分布は図-2 に示すとおりである。茨戸川の底質は 3 地点ともに大半が粒径 75 μm 以下の細粒分であり、粘土が約 2 割、シルトが 7~8 割を占める。特に KP11.0 は砂分が少なく、細粒分が占める率が高い。一方、流入河川である創成川の底質は砂分（細砂、中砂分が主体）が 8 割を占めている。

図-3 に試験装置の概要を示す。採取した底質は湿潤状態でふるい分けを行い、植物残滓や 2mm 以上の成分を除去した。その後 20 $^{\circ}\text{C}$ に保った脱イオン水で希釈し、沈降

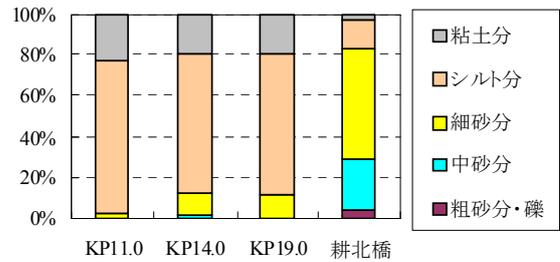


図-2 茨戸川及び流入河川の底質性状

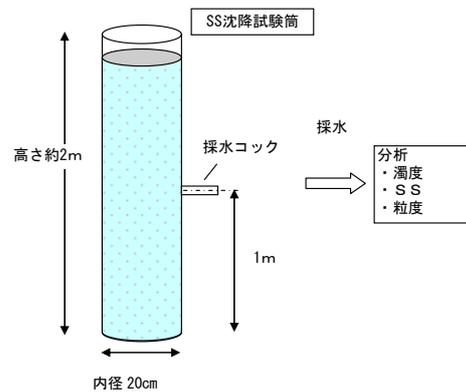


図-3 SS 沈降試験装置模式図

表-1 SS 沈降試験での採水時刻

試料	採水時刻
茨戸川 KP11.0, 14.0, 19.0	攪拌直後、1 時間後、2 時間後、4 時間後、 8 時間後、1 日後、2 日後、4 日後、8 日後、 16 日後
創成川	攪拌直後、1 分後、5 分後、10 分後、 30 分後、1 時間後、2 時間後、4 時間後、 8 時間後、24 時間後、76 時間後

試験用試料を作成した。試験期間は茨戸川試料で 384 時間（16 日）、創成川で 76 時間（約 3 日）である。沈降試験開始後、表-1 に示す所定時間に採水を行い、SS、濁度及びレーザー回折・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¹⁰⁾。

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

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) 画像解析による個別粒子の追跡沈降試験

SS 沈降試験で得られる沈降速度は、懸濁粒子全体の平均値であり、個別の沈降速度は把握できない。そこで画像解析により個別粒子の沈降過程を追跡し、粒子ごとの沈降速度の算出を行った。

対象とした試料は茨戸川 KP19.0 で採取した底質である。

試料は湿潤状態のまま 106 μm のふるいでふるい分けを行い、植物残渣や粒径の大きい砂分を除去した。その後 20 $^{\circ}\text{C}$ の脱イオン水に 24 時間浸漬してなじませた後攪拌し、撮影用の高濃度濁水を作成した。試験装置の概要は図-4 に示すとおりである。高濃度濁水を 20 $^{\circ}\text{C}$ に保った脱イオン水で満たした試験水槽に滴下し、顕微鏡を用いた画像撮影を行っている。撮影は 1 秒間隔で撮影を行い、PC に画像（サイズ 640 \times 480 ピクセル）として取り込んだ後、粒子の中心座標の移動距離から粒子の沈降速度を算出した。顕微鏡の撮影倍率は 12 倍（最小解像度 9.8 μm ）、32 倍（同 3.78 μm ）、及び 64 倍（同 1.94 μm ）である。

解析可能な粒径の範囲は、最大値はふるいを通過できる最大粒径である 106 μm である。また顕微鏡の最大倍率(64 倍)で撮影した画像 1 ピクセルが約 2 μm であることから、粒径の誤差が 20% となる 10 μm を解析可能な最小粒径に設定した。沈降速度の算定には、連続画像で 3 枚以上観察できたものを用いた。解析可能な速度範囲は、倍率 64 倍の場合 0 \sim 約 0.05cm/s、12 倍の場合 0 \sim 約 0.25cm/s である。

(3) SS 沈降試験の結果

図-5 は沈降速度の時系列変化である。茨戸川の SS 沈降速度は 3 期間に分類できる。第 1 期は試験開始 \sim 1 日後までである。この期間は SS が急速に沈降しており、沈降速度も急減する。第 2 期は 1 \sim 4 日後までで、減少を続けた沈降速度は一旦安定する。第 3 期は 4 日目以降であり、SS 及び平均粒径の変化は第 2 期間よりさらに小さくなるが、ほぼ一定値で変遷する。創成川については砂分が多く、試験初期で攪拌された砂分が急速に沈降するため、SS は急減する。しかし 1 日経過後の沈降速度のオーダーは茨戸川とほぼ同じ値となっており、ある程度時間が経過した後の沈降速度はほぼ同じ結果である。

続いて粒径別沈降状況を考察する。SS 濃度変遷を図-6 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。紙面の都合上、本稿では茨戸川 KP19.0 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-6 をみると、砂分に該当する 75 μm 以上の粒子は、試験開始後 8 時間程度でほぼ全て沈降している。シルトは指数関数的に低減しており、粒径の小さい成分ほど SS の低減速度も小さい。12.33 μm 未満の成分の濃度低下は非常に遅い。特に粘土にあたる 5 μm 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。

(4) 沈降速度と粒径、密度の関係

図-7 に SS 沈降試験、画像解析による個別粒子の沈降軌跡、現地沈降物捕集観測より得られた沈降速度を併せて示す。現地観測による沈降速度算出方法の詳細は、著者らの既報⁹⁾に示した。SS 沈降試験及び現地観測で得られた沈降速度は、粒径分布をもつ懸濁質総体に対する値である。画像解析で得られた個別粒子の沈降速度を比較するには、粒径について何らかの代表値を定める必要がある。そ

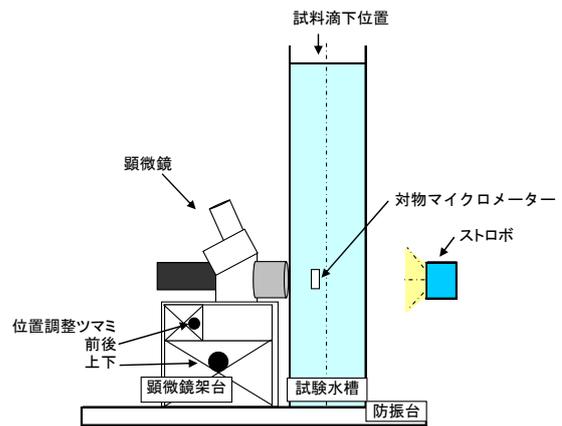
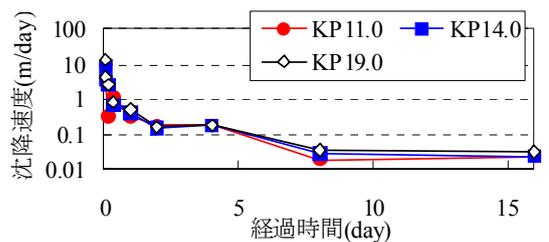
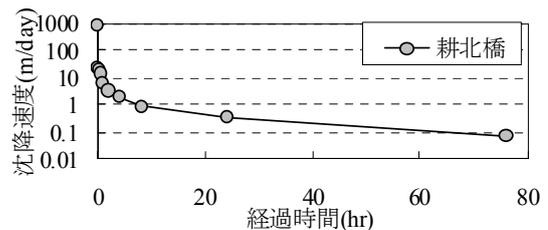


図-4 沈降画像撮影機器概要



(a) 茨戸川



(b) 創成川

図-5 SS 沈降試験による沈降速度の時系列変化

表-2 粒径別 SS 検証における粒径区分 (茨戸川 KP19.0)

粒径 (μm)	土質区分	攪拌直後の粒径別頻度 (%)
~ 5.0	粘土	8.0
5.0 \sim 12.33	シルト	13.1
12.33 \sim 30.41	同上	28.3
30.41 \sim 75.0	同上	29.2
75 \sim	砂	21.4

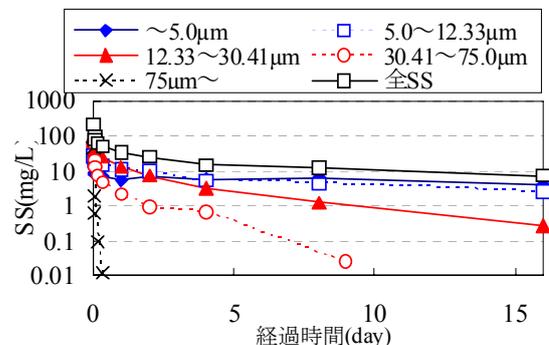


図-6 粒径別 SS の時系列変化 (茨戸川 KP19.0)

ここで SS 沈降試験及び現地観測については、粒度分析から得られた d_{50} を代表粒径とした。参考のため水温 20℃、比重 2.65（一般的な土粒子を想定）、形状を球形と仮定した場合の Stokes 則を実線で示している。

SS 沈降試験により得られた沈降速度 w_f (m/day) と SS の中央粒径 d_{50} (μm) の関係は以下のとおりである。

$$w_f = 0.0001d_{50}^{3.59} \quad (2)$$

SS 沈降試験から得られた沈降速度は、ほぼすべてが土粒子を想定した場合の Stokes 則よりも小さい値をとる。また代表粒径が小さくなるに従い、SS 沈降試験から得られた沈降速度と土粒子の Stokes 則の乖離は大きくなった。

次いで画像解析により算出した個別粒子沈降速度と粒径の関係式を求める。実際の粒子は球形ではないため、画像解析から得られた球相当径を小田らの方法に従い算出、換算した¹¹⁾。個別粒子の粒径 d (μm) と沈降速度 w_f (m/day) の関係は式(3) に示すとおりである。

$$w_f = 5.44d^{0.37} \quad (3)$$

SS 沈降試験による沈降速度と比較すると、画像解析から得られた沈降速度は、粒径との関係式におけるべき乗が小さい。粒径が小さくなるにつれ、粒子追跡で得られた沈降速度は土粒子を想定した Stokes 則に近付いている。

現地で捕集された沈降粒子の d_{50} は概ね 20~30 μm である。そこで代表粒径が 20~30 μm の範囲における沈降速度について、各方法で得られた沈降速度を比較した。現地観測で得られた値は、SS 沈降試験と比べると小さい。また SS 沈降試験と画像解析で得られた沈降速度を比較すると、両者は比較的近い値を示している。

続いて Stokes 則から算出した懸濁粒子の見かけの密度 ρ_s (g/cm^3) と粒径の関係を図-8 に示す。SS 沈降試験における ρ_s (g/cm^3) と中央粒径 d_{50} (μm) の関係を以下に示す。

$$\rho_s = 0.805d_{50}^{0.16} \quad (4)$$

また画像解析から得られた個別の懸濁粒子の ρ_s (g/cm^3) と粒径（球相当径） d (μm) の関係を以下に示す。

$$\rho_s = 31.37d^{-0.81} \quad (5)$$

SS 沈降試験から得られた粒子の密度は概ね 1.0~1.8 g/cm^3 に分布し、粒径が小さいほど水の密度に近い値となっている。一方、画像解析では、粒径が大きいほど粒子の密度は小さい値を示している。両試験から得られた密度と粒径の関係は、異なる傾向となった。図-7 でも示されているとおり、両試験では沈降速度に対する粒径のべき乗が異なり、それが密度と粒径の関係にも反映されている。

画像解析による沈降速度算出の課題点として、沈降速度が特定の範囲内に集中したことが挙げられる。試験では追跡しやすいう速度が 10~50m/day であり、その範囲に算定結果が集中した。この点は今後試験時の追跡粒子の抽出方法について改善が必要である。またフロック形成など沈降中の粒子の形状変遷や、物性（鉱物あるいは植物残渣かの判断）も現手法は把握が困難である。画像解析による沈降速

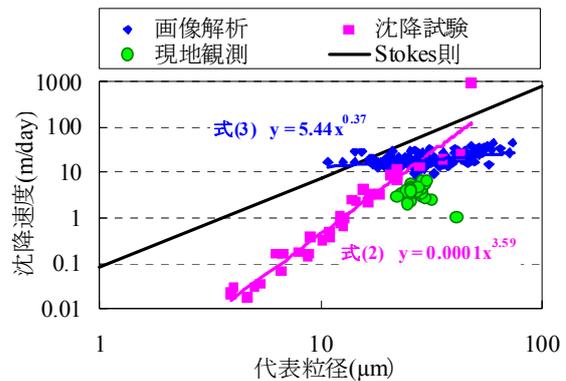


図-7 SS 沈降速度と粒径
(沈降試験、現地観測の粒径代表値は d_{50})

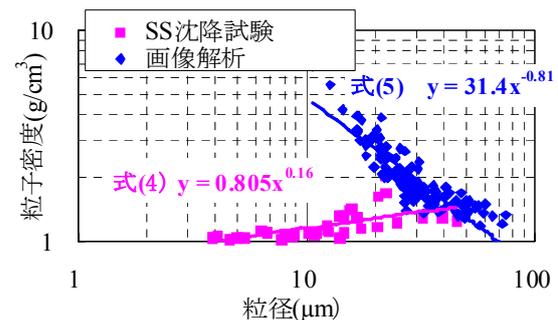


図-8 粒子密度と粒径の関係

度の解析精度向上には、これらの点も検証が必要である。

3. 沈降速度のモデル化

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を、粒径をもとに以下の3成分に区分して考えた。

- ① 土粒子を想定した Stokes 則に従い沈降する成分
- ② 土粒子を想定した Stokes 則よりも遅い速度で沈降する成分
- ③ ほとんど沈降せず、浮遊する成分

粒径区分は表-2 と同じ分類とする。図-6 より、SS 沈降試験で巻上げられた粒子のうち、砂分は6時間程度で沈降する。砂の最小粒径である 75 μm の土粒子を想定した Stokes の沈降速度は 453m/day であり、茨戸川の最深水深（約 10m）の場合、1時間未満で河床まで沈降する。なお Stokes 則の適用限界は概ね 100 μm だが、それより大きい粒径はさらに短時間で沈降する。以上から、75 μm 以上の粒子は、計算モデルでは全て①の成分として取り扱い、沈降速度は一律、粒径 75 μm における Stokes 則（453m/day）で与えて支障はないと考えた。

シルト以下の成分は、粒径により沈降特性が異なる。図-6 より、粒径区分 12.33~75 μm の成分では、SS は試験期間全体を通じて減少を続けている。以上から、計算モデル上では粒径 12.33~75 μm の粒子は②の成分として巻上げ・沈降を生じるものとした。②の成分の沈降速度は、粒子密度を式(4)で与えた Stokes 則で計算する。一方粒径

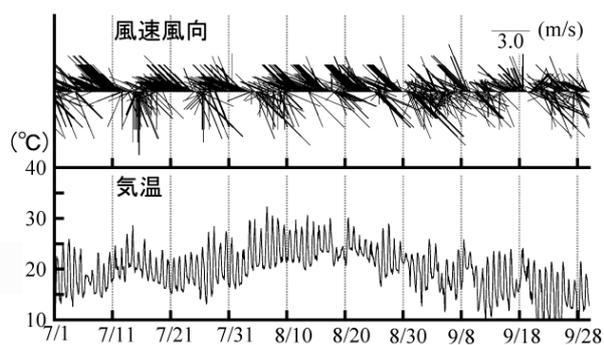


図-9 風速・気温 (2006/7/1~9/30 : 石狩アメダス)¹⁴⁾

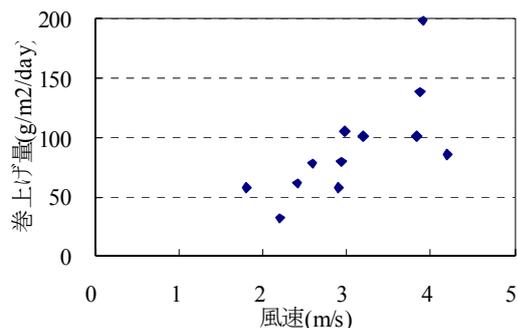


図-10 巻上げ量と現地風速の関係

表-3 計算モデルにおける巻上げ量の比率

粒径 (μm)	土質区分	沈降形態	粒度組成 (%)	代表粒径 (μm)
~5.0	粘土	③	-	-
5.0~12.33	シルト	③	-	-
12.33~30.41	同上	②	50	19.34
30.41~75.0	同上	②	25	47.75
75~	砂	①	25	75.0

表-4 計算で設定した拡散係数

	水平方向 (m²/s)	鉛直方向 (m²/s)
運動式	20.0	0.001
SS 計算	20.0	0.001
水温計算	20.0	0.0001

12.33μm 未満の成分は、試験期間中の SS は非常に遅い。よって粒径 12.33μm 未満の粒子は巻上げ・沈降ともに生じず、③の成分として水中に浮遊するものとした。

なお茨戸川の SS には基底値 (概ね 10mg/L) が存在し、さらに底質巻上げによるものと思われる濃度変動が生じている。SS の基底値は③の成分が寄与しており、SS の時系列変動分には①及び②の成分が巻上げ・沈降するものとした。表-3 に粒径区分とその取り扱いをまとめた。

4. 水質予測

(1) 計算モデル及び設定条件

茨戸川を対象として、河川流動, SS, 水温について計算

を行った。計算対象期間は2006年7月1日~9月30日である。計算は土木研究所による静水圧2次元鉛直モデルを参考にして行った¹²⁾。

計算対象領域は流出入河川がない茨戸川上部湖盆及び中部湖盆を対象とした (図-1 参照)。上流端では流入はないものとし、下流端は茨戸観測所の水位データ¹⁵⁾を与えて計算を行った。降雨等の流入の影響は今回考慮しない。

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¹⁴⁾ (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。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。拡散係数は表-4 に示すとおり、今回は一定値とした。

底質巻上げ量については、橘らの研究により、風速と巻上げ量に比例関係が見られることが指摘されている¹³⁾。図-10 は2006年夏季現地沈降物捕集から算出した底質巻上げ量と、捕集期間中の平均風速である。橘らと同様、底質巻上げ量と風速の間には良好な相関が見られる。本研究では図-10 から底質巻上げ量と風速の間に相関式を作成し、それを水質予測計算にも用いることとした。

$$q_s = 40.9W - 34.1 \quad (6)$$

ここで q_s : 底質巻上げ量 (g/m²/day), W : 石狩アメダスによる毎時風速 (m/s) である。粒径別の巻上げ量の比率は2006年夏季の現地調査による底質表層の粒度分析結果をもとに、表-3 のとおり設定した。

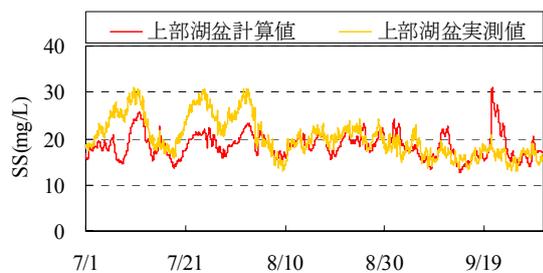
(2) 計算結果及び考察

続いて計算結果を示す。ここでは国土交通省が実施した多項目水質計による連続観測結果¹⁶⁾と比較する。なお機器計測結果については現地水質分析結果から検量線を作成し、機器出力値と SS, クロロフィル a の変換を行った。

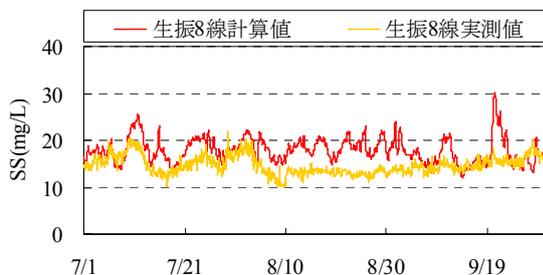
なお水温は概ね現地変動を再現しており、また本論文の論点は懸濁粒子の沈降モデル検証であることから、本稿では水温計算結果は省略した。図-11 に SS の計算結果を示す。長期的な変動傾向はある程度再現している。しかし巻上げによる SS 上昇時の再現性はよくない。上部湖盆の SS は8月以降ある程度再現している一方、7月は SS 上昇を十分捉えられていない。中部湖盆については、7月の SS 上昇時の計算値が過大評価となっている。

図-12 に計算期間中のクロロフィル a 連続観測結果を示す。7月を中心に上部湖盆で植物プランクトンが増殖したことが SS の変動に影響し、さらに計算精度に影響していると考えられる。今後植物プランクトンが SS 増減に及ぼす影響についても検討することが必要である。

今回の計算は試行段階であり、沈降速度の設定以外にも様々な改善点が残されている。しかし旧川において懸濁粒子を粒径に応じた挙動で区分し、濁質の濃度を予測する本計算手法の妥当性について確認できた。



(a) 上部湖盆



(b) 中部湖盆

図-11 SS 計算結果

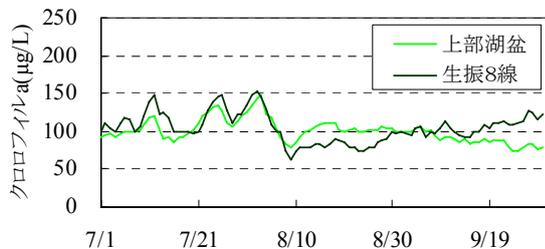


図-12 クロロフィルa 観測値 (日平均値)

5. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- SS 沈降試験及び画像解析による個別粒子追跡により沈降速度及び見かけの密度を算出した。沈降速度、密度ともに粒径と相関が見られるが、試験法によりその特性は異なる。
 - 粒子沈降速度のモデル化を行った。粒径別に土粒子の Stokes 則に従う砂分以上の粒子、土粒子の Stokes 則より遅く沈降するシルト成分、沈降せず浮遊するシルト・粘土成分の3種類に粒子を分類した。
 - 上記沈降モデルを用いた水質計算を行った。長期的な SS 変動は概ね再現できた。一方クロロフィルが高い7月は、SS 変動が十分捉えられなかった。
- 今後の課題や改善点として、以下の内容が挙げられる。
- 茨戸川の懸濁粒子は粘土・シルトが主であり、フロックが形成されることで粒径を過大評価する可能性がある。安定した粒度分析結果を得るため、例えば梅田ら¹⁷⁾は超音波分散の前処理を提案している。これらの手法を参考とし、粒度分析の精度向上を図る。
 - 画像解析による沈降速度算出では、沈降速度の幅を

より広くとる必要である。特に遅い沈降をする粒子を追跡する方法を改善したい。

- 7月の底質巻上げ時の再現精度向上については、濱原ら¹⁾のように、植物プランクトンの増殖メカニズムと SS への変換を組み入れる必要がある。

謝辞: 本研究の一部は国土交通省北海道開発局による受託研究費の補助を受けて行ったものである。同局石狩川開発建設部からは、現地観測データを提供いただいた。本研究の実施に当っては、北海道大学清水康行教授から様々なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

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) 大坪国順: 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告第42号, 1983
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 中村俊六, 足立昭平: 濁水化貯水池における濁質粒度の変動, 土木学会論文報告集第279号, 61-68, 1978
- 7) 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
- 8) 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年度ダム水源環境技術研究所所報, 3-17, 2003
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 小田一紀, 宋元平, 芝村圭, 農元充: 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として—, 海岸工学論文集, 第46巻, 981-985, 1999
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/>
- 15) 川の防災情報: <http://www.river.go.jp/>
- 16) 平成18年度茨戸川外水環境調査試験業務報告書, 国土交通省石狩川開発建設部, 2007
- 17) 梅田信, 盛谷明弘: 貯水池の濁質粒度分析手法に冠する検討, 水工学論文集, 第52巻, 1231-1236, 2008

(2008年9月30日 受付)