# 旧川における水中懸濁物の挙動と 底質巻上げ量の推定

STUDY ON MOVEMENT OF SUSPENDED SOLID AND ESTIMATION OF SEDIMENT RESUSPENSION IN AN OXBOW LAKE

## 横山 洋<sup>1</sup>・山下 彰司<sup>2</sup> Hiroshi YOKOYAMA and Shoji YAMASHITA

<sup>1</sup>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 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3) <sup>2</sup>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 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)

Field observation of turbidity, chlorophyll and current velocity was conducted in the Barato River, which is the oxbow lake in the Ishikari River. In this oxbow lake resuspension of the sediment is main factor of water pollutant. In this survey, relationship among sediment resuspension, wind speed and current velocity were investigated. And the rate of sediment resuspesion was estimated by using observation results.

Clear relationship exists between wind speed and turbidity when the wind speed was larger than certain level in each survey point. We tried to estimate the rate of sediment resupension by the methods in our study. The estimated value was generally adjusted to observed results in 2005; however, considerable difference was found in 2006.

*Key Words : semi-closed water area, resuspension of sediment, circulation flow, fall velocity, continuous observation of water quality* 

## 1. はじめに

わが国では治水及び土地利用の促進を目的として河道 の直線化が進められ、かつての蛇行河道が旧川として残 された箇所が多く見られる.これらの旧川の一部は近年 親水空間として水辺の利用が進む一方、流れの停滞や栄 養塩の流入により富栄養化が進行し環境の悪化が見られ る水域も多く、水質の改善が課題となっている個所も多 い.本研究で対象としている茨戸川も、1933年に石狩川 の捷水路工事により形成された旧川に周辺都市域から汚 濁負荷が流入し、富栄養化した水域である.

閉鎖性の強い水域では、栄養塩を多く含む底質の巻上 げが汚濁負荷の主たる供給源であることが知られている. 茨戸川においても、リンは7割以上が風による底質巻上 げで供給されることが報告されている<sup>1)</sup>. 底質の巻上げ 現象については、数多くの研究が行われてきた. 例えば、 大坪は底泥の沈降過程や巻上げについて室内試験により 力学的な検証を行っている<sup>2)</sup>. 天野らは風波による底質 巻上げを組み入れた水質予測モデルを構築するとともに、 水生植物の巻上げ抑制効果を検証している<sup>3)</sup>. 茨戸川に おいても、現地観測による底質の挙動把握や巻上げ量, 沈降速度の算出が行われており<sup>1),4</sup>, 1次元モデルによる 水質予測計算も行われている<sup>1)</sup>.しかし茨戸川は感潮区 間であり、また全長約20kmにわたり蛇行している(図-1参照)ことから、風が河川流動や底質巻上げに及ぼす 影響が縦断方向に変化し、複雑な流況が生じると考えら れる.そのため茨戸川の水質変動機構の解明には、底質 巻上げと外力(風,流速)の関係を定量的に評価した3 次元水質解析モデルによる検証が最終的に必要である.

本研究はモデル構築の初期段階として,現地観測結果 を行い,茨戸川の底質巻上げ量の把握を試みた.巻上げ は現地風速風向やそれに伴う流動の変化により時々刻々 変化する.本研究は風による巻上げ量の変化を考慮した 水質解析につなげるため,より簡易な手法で時系列変化 の把握を試みた.また巻上げ量と風,底面流速の関係に ついて,現地風速,流速データをもとに検証した.

## 2. 現地概要及び観測方法

図-1に茨戸川の平面形状を示す.茨戸川は全長約 20km,平均川幅約200mの河跡湖である.茨戸川には狭 窄部が2箇所あり,そこを境界に流れの特性が異なる上 部湖盆,中部湖盆,下部湖盆の3区間に分類される.平 水時の下部湖盆は下流端の運河(川幅約40m)を通じて



図-2 茨戸川最深河床縦断形(2002年国土交通省測量結果



石狩川本川と接続しており、潮汐の影響により本川と茨 戸川の間に日周期で流量交換が生じている.下部湖盆へ の平常時における流入は、他に札幌市街地から流入する 伏籠川と、茨戸処理場からの処理水がある.下部湖盆と 中部湖盆は特に川幅が狭い狭窄部(幅5m)を通じて接 続している.また上部湖盆と中部湖盆も川幅20m程度の 狭窄部で接続しており、上流に向かうに従い閉鎖性が強 くなる傾向にある.なお中部湖盆、上部湖盆には主な流 入・流出河川は見られない.図-2は茨戸川の最深河床高 の縦断変化である.本研究で調査対象としている上部湖 盆及び中部湖盆の水深は概ね5m~10mである.下部湖盆 は水深10m以下の区間が多い.今回の調査地点は茨戸川 の中で比較的水深が浅い地点である.

本研究における調査地点は図-1に示すとおりである. 上部湖盆A観測点は2005年及び2006年に、中部湖盆A観 測点では2005年にセジメントトラップによるSS沈降物 捕集を行った.セジメントトラップは概ね8割水深(上 部湖盆Aでは2005年:河床上0.5m,2006年:河床上0.8m、 中部湖盆Aでは河床上0.8m)に設置している.設置期間 の平均値は2005年が12.6日、2006年は8.8日である.また 両湖盆での流況を把握するため、セジメントトラップ設 置点でADCP(RDI Workhorse 2400kHz,層厚0.25mに設 定)による流速観測を同時に行った.設置方法を図-3に 示す.ADCPの計測可能範囲は河床付近1mの不感帯及び 表層1m付近のビーム散乱域を除く範囲である.

なお上部湖盆Aから約400m上流にある上部湖盆B,中 部湖盆Aから約400m下流である中部湖盆Bの両観測点で, 国土交通省による多項目水質計を用いた濁度・クロロ フィル水質連続観測(アレック電子Compact-CLW:水 面下0.2mに設置)及び採水による水質分析が行われてい る.また調査地点近傍では,国土交通省による風向・風 速観測が行われている.本研究ではこれらの観測データ を用いて底質券上げ量について考察を行った.

## 3. 底質巻上げ量の計算方法

茨戸川の底質巻上げ量は、沈降懸濁物をセジメントト ラップで捕集し、底質巻上げに由来する量を、クロロ フィルaを指標として分離<sup>9</sup>し算出してきた<sup>1),4</sup>.しかし セジメントトラップによる計測結果は、設置期間中の沈 降量の積分値であり、風や河川流動の変動による巻上げ 量の時系列変化の把握は困難である.そこで、多項目水 質計による連続観測(以下「水質機器観測」と称する) 結果から、巻上げ量の時系列変化の推定を試みた.

過去の観測結果から、SS及びクロロフィルaの水深方 向濃度分布は一様に近いことが多いことが確認されてい る.その場合、SS濃度 C と巻上げ量 E には以下の関係 が成り立つと考えられる<sup>6</sup>.

$$h\frac{\partial C}{\partial t} = E - w_s \left(C - C_{bg}\right) \tag{1}$$

ここでh:水深, $C_{bg}$ :SSの基底値(静水状態にあっても沈降せず浮遊する濁質によるSS濃度), $w_s$ :SSの沈降速度である.

続いて式(1)による巻上げ量算出手法について説明する. 茨戸川のSSは底質巻上げにより生じる無機態と,主と して植物プランクトンとその残滓である有機態に分離さ れる. 無機態SSと有機態SSの合計値は,水質機器観測 による濁度測定値に対応し,有機態SSは水質機器観測に よるクロロフィル測定値に対応すると考えられる.式(1) による巻上げ量算出にあたり,水質観測機器での出力値

表-1 現地水質と水質機器観測出力値の回帰式

①現地SS~機器 濁度	現地SS(mg/L)=0.623×機器濁度(ppm)+4.79(05年) (注定逐漸 <sup>p2</sup> -0.773)
间又	現地SS(mg/L)=0.701×機器濁度(ppm)+4.66(06年)
	(決定係数R <sup>2</sup> =0.751)
	※上部湖盆B及び中部湖盆B観測結果から算出
②現地クロロ	現地Chl-a(µg/L)=4.05×機器Chl-a(ppb)+43.8(05年)
フィルa~機器	(決定係数R <sup>2</sup> =0.901)
クロロフィルa	現地Chl-a(µg/L)=6.67×機器Chl-a(ppb)+72.2(06年)
	(決定係数R <sup>2</sup> =0.539)
	※上部湖盆B及び中部湖盆B観測結果から算出
③現地VSS~現	現地VSS(mg/L)=0.0522×現地Chl-a(µg/L)+3.87(05年)
地クロロフィル	(決定係数R <sup>2</sup> =0.499)
a+フェオフィ	現地VSS(mg/L)=0.0274×現地Chl-a(µg/L)+4.21(06年)
チン	(決定係数R <sup>2</sup> =0.436)
	※上部湖盆A及び中部湖盆A観測結果から算出

を現地の水質に換算する必要がある.そこで水質分析に よるSS,VSS(SSの強熱減量,有機態SSと等しい), クロロフィルa(単波長)とフェオフィチン(単波長) の合計値と,水質機器観測による濁度,クロロフィルa 出力値の回帰式を作成し,水質機器観測値から現地の水 質変遷を推定した.表-1に各成分の回帰式と回帰係数を 示す.なお水質機器観測地点である上部湖盆B及び中部 湖盆BではVSSの水質分析を行っていない.そこでクロ ロフィルaとフェオフィチンの合計値との相関は,各地 点の近傍である上部湖盆A及び中部湖盆Aでの水質分析 の結果から推定した. $C_{bg}$ の値は,表-1の回帰式から算 出したVSSの基底値と考え,検討対象期間である毎年7 ~9月までの最低値を用いた.

式(1)に用いる沈降速度*w<sub>s</sub>*は,セジメントトラップによる観測結果をもとに,以下の式で算出した.

$$w_s = q_s / C_s \tag{2}$$

ここで $q_s$ :セジメントトラップの総沈降量, $C_s$ :ト ラップ設置箇所の河川水SS濃度(セジメントトラップ設 置時・回収時のSSの平均値で定義)である.

図-4に式(2)で算出した沈降速度と、トラップ捕集沈降物のd<sub>50</sub>の関係を示す. 粒度分布はコールターカウンターで計測した. d<sub>50</sub>は多くが25~30µmに分布している.また粒度分布はいずれの捕集沈降物もシルトが主成分であった.式(2)で得られた沈降速度は1.0~5.5m/dayであり、d<sub>50</sub>粒径単一土粒子の場合におけるStokes則と比較して1~2オーダー小さい. 茨戸川の懸濁物には植物プランクトンやその残滓が含まれることから、密度が土粒子よりも小さいこと、これらの粒子が沈降しながら凝集することによる影響が考えられる.

沈降速度w<sub>s</sub>は、2005年上部湖盆で2.7m/day(3回観測 平均値),同年中部湖盆で3.3m/day(3回観測平均値), 2006年上部湖盆で4.2m/day(6回観測平均値)である。 2006年の中部湖盆では沈降物捕集を行っていないため, 実測の沈降速度データはない.しかし過去の観測結果で は上部湖盆と中部湖盆で沈降速度に大きな違いはないこ



図-4 沈降物捕集観測から得られた沈降速度

とが確認されている.そこで2006年中部湖盆の $w_s$ は上 部湖盆と同じく4.2m/dayとして巻上げ量を算出する.

水深hは、機器設置箇所の河床高及び茨戸水位観測所の毎時水位から算出した.また式(1)で算出した E が負の場合は、E=0に補正した.

#### 4. 底質巻上げ量の計算結果及び考察

#### (1)SS及びVSS推定結果

まず式(1)に用いるSSの変動特性を示す. 図−5は,表-1に示す回帰式から算出した上部湖盆B及び中部湖盆Bに おける毎時のSS, VSSである. SSの巻上げと風の関係を 検証するため,図−5には毎時の風速絶対値も示した.

時系列でSSの変動と風の関係を検証する.2005年7月 の上部湖盆では、風速が概ね6m/sに達した時もしくはそ の直後にSSの上昇がみられる.一方同年7月の中部湖盆 では風速に対するSSの上昇は明瞭でない、上部湖盆、中 部湖盆ともに、2005年8月以降は風速に対するSSの反応 は鈍く、強風時である9月8日に明瞭なSS上昇が見られる 程度である.2006年は7月上旬から8月上旬にかけ、上部 湖盆、中部湖盆ともに風速6m/sを超えるとSSの上昇が見 られる.2006年8月中旬以降、上部湖盆、中部湖盆とも にSSは低下し、風によるSSの上昇も明瞭ではない。例 えば2006年9月20日には10m/s以上の風が吹いたが、SSは 上昇していない.

SSは両年ともに7月から8月上旬にかけて高い傾向にあ るが、2005年と2006年で特徴は異なる。2005年は概ね15 ~20mg/Lで短い周期で変動している。一方2006年は概 ね20~30mg/Lであり、2005年に比べ高い値を示す。ま た2006年は2005年に比べ風が強い時期が数日間にわたり 継続する。風速の増加に対応してSSも上昇し、7月中に3 回のピークが生じている。またSSの上昇開始から下降の 終了までは約7~10日間であり、巻上げの時間スケール が長い。

なおSSの有機態であるVSSは2005年,2006年ともに 10mg/L前後であり、ほぼ一定の値をとっている.VSSは 植物プランクトンやその残滓に由来する成分が大半であ り、沈降が非常に遅いためと考えられる.



図-6 式(1)による底質巻上げ量計算値と風速日平均値の時系列(上段:2005年,下段:2006年)

## (2) 底質巻上げと風の関係

図-6に、式(1)で計算した底質巻上げ量と風速絶対値の 日平均を示す.巻上げ量平均値は、2005年上部湖盆Bで 45.2g/m<sup>2</sup>/day、中部湖盆Bで33.9g/m<sup>2</sup>/day、2006年上部湖 盆Bで62.1g/m<sup>2</sup>/day、中部湖盆Bで39.0g/m<sup>2</sup>/dayである.上 部湖盆の巻上げ量平均値は、2006年は2005年の約1.5倍 である.中部湖盆の巻上げ量平均値も、2006年が2005年 に比べてやや大きい値を示している.

巻上げ量の時系列での変動幅は、両年とも上部湖盆が 中部湖盆に比べて大きい.特に2006年の上部湖盆は7月 から8月上旬にかけて風速の変化に伴う巻上げ量の変動 が顕著である.全体的にみると、巻上げ量と風速にはあ る程度の比例関係があり、観測年及び観測地点でその特 性に違いがあるものと推測される.

そこで巻上げ量と風速の関係を整理した.図-7(a)は 式(1)から算出した底質巻上げ量を風速の絶対値別に平均 した結果である.上部湖盆では両年とも風が強くなると ともに巻上げ量が増加する傾向が明らかに見られる.上 部湖盆の巻上げ量は2005年と2006年でその特性が異なる. 2006年は風速が小さい場合でも巻上げ量はある程度大き い.中部湖盆でも風速の増加とともに巻上げ量は若干増 加している.しかし上部湖盆と比べて風と巻上げ量の相 関は明瞭には見られなかった.

上部湖盆と中部湖盆では河道の流下方向が異なっており、風による影響も変化することが考えられる.そこで 風速の河道流下方向成分(河道の順流方向を正とする) と式(1)から算出した底質巻上げ量との関係を図-7(b)に 示す.上部湖盆では両年ともに巻上げ量と風速の河道流 下方向成分に相関が見られた.なお逆流方向の風速増加 に対しても、巻上げ量は増加している.中部湖盆では、 両年ともに巻上げ量と風速の相関は明瞭ではない.

図-7(a),(b)の結果から、巻上げ量は風速の河道流下 成分とともに、風速の絶対値にも大きく影響を受けてい る.この一因として茨戸川は川幅が200mと広く、いず れの方角の風でも吹送流が形成され、底質巻上げを生じ ている可能性も考えられる.ただしこれらの論は推測の 域を出ておらず、今後の検証と確認が必要である.

#### (3) 茨戸川の流況と風の関係

茨戸川では季節風により生じる吹送流に起因する底面

![](_page_4_Figure_0.jpeg)

(0)風速の流下方向成示(順流方向が正)と巻上け重 図-7 風速と底質巻上げ量の関係

せん断力が,巻上げの主たる外力と推定されている.そこで既報<sup>77</sup>で著者らが整理した上部湖盆,中部湖盆の風速と流速より,底質巻上げ時の流況を検証する.図-8は2005年7月及び2006年7月の上部湖盆A及び中部湖盆Aにおける上層(水面下概ね1m)及び下層(河床上概ね1m)での流速及び風速ベクトルである.また潮汐の影響を検証するため,流下方向の流速成分を鉛直平均した値も示した.

2005年は上部湖盆,中部湖盆ともに上層と下層の流速 ベクトルが逆方向であることが多いが,いずれも上層の 流速と風速の相関は見られない.そこでADCPによる水 面近傍の流向と風向の関係を検証した.本稿では図は省 略するが,上部湖盆では流向と風向が同方向に変動傾向 にある一方,中部湖盆では流向と風向の関連は見られな かった.以上より,2005年は上部湖盆で吹送流が発生し ていたものと推定される.なお水面付近でのADCP計測 値はビーム散乱域であり,安定した計測値は得られてい ない.よってあくまでも参考値としての検証結果である.

流下方向平均流速は、中部湖盆は上部湖盆に比べて値 が大きく、かつ日周期での変動も明瞭である.また弱風 時の大潮期と小潮期を比較すると、上部湖盆では流速ベ クトルに大きな違いはない一方、中部湖盆では大潮時の 流速ベクトルの変動が顕著である.よって中部湖盆はよ り潮汐の影響を強く受けているといえる.

![](_page_4_Figure_5.jpeg)

2006年は2005年に比べ南南東方向の風がより卓越する とともに、南南東方向の強風が数日間にわたり継続して いる.2006年の上部湖盆Aにおける流速は上層及び下層 で風向と逆方向に加速されており、その期間も数日間に わたっている.以上から2006年には循環流が長期にわた り形成されたと考えられる.なお2006年上部湖盆では、 順流方向の風に対して上層の流速も逆流方向に増加して いる.この一因として上部湖盆Aは湾曲部に位置してお り、吹送流が対岸に衝突した際の反流が常時計測された 可能性も考えられる.

![](_page_5_Figure_0.jpeg)

図-9 式(1)による計算値と観測値の比較

## (4) 底質巻上げ推算量の妥当性の検証

図-9にセジメントトラップによる懸濁物捕集沈降量から求めた底質巻上げ量(以下「観測値」と称する)と,式(1)から算出した底質巻上げ量(以下「計算値」と称する)の比較結果を示す.2005年の上部湖盆における計算値は観測値に比べて7月は過大である一方,8月は過小である.なお同年9月の上部湖盆及び同年7~9月の中部湖盆では,計算値は観測値と概ね一致している.一方2006年の計算値は観測値に比べて小さい傾向にある.特に7月21日~8月1日の計算値は観測値の約1/2であり,差が最も顕著にみられた.

そこで観測値と計算値の差の原因について考察する. 式(1)の計算過程から想定される原因として,次の2点が 挙げられる.

- ① 沈降速度が過小または過大評価された可能性
- ② 吹送流が発達して茨戸川河床付近の巻上げがより顕 著になり、SSが鉛直方向に一様でなくなった可能性 まず①について検証する.式(1)で計算される巻上げ量 は、沈降速度に比例して増加する.また図-4にも示すと

おり、観測された沈降速度はある程度ばらつきがある. 2006年の巻上げ量の計算値は、仮に沈降速度が2倍の 8.4m/dayでは、7~8月は観測値とほぼ一致する.

また沈降速度は式(2)に示すとおり,捕集沈降物量と河 川水SS濃度から決定する.ここで河川水SS濃度はセジ メントトラップ設置時と回収時の平均値を用いている. 強風時にはSSが一時的に変動すると考えられるが,本稿 の方法は観測期間中のSSの時系列変化の履歴は考慮され ない.トラップ設置水深のSSを時系列で把握する等,沈 降速度をより厳密に評価することで計算量の精度が向上 する可能性は考えられる.

続いて②について検討する.式(1)は鉛直方向のSS濃 度が一様な場合に成り立つ.本稿では省略するが,上部 湖盆観測点付近では,2005年8月上旬に下層のSSが一時 的に上昇したことが確認されている.これが上部湖盆に おいて同年8月の巻上げ量観測値が増加した一因とも考 えられる.しかし2006年は上部湖盆河床付近では顕著な SSの上昇は見られておらず,②の仮定による巻上げ量増 加は考えにくい. なおこれらの論は、現時点では推定の域を出ない、現 地観測及び数値実験による底面せん断力の評価及び巻上 げ量の定量化を図り、さらなる検証が必要である.

## 5. まとめ

以下に本研究で得られた主な結果をまとめる.

- (1) SSは7月から8月上旬にかけて高い傾向にあった. またこの時期に風速絶対値が概ね6m/sを超えると, SSの上昇が見られた.一方VSSはいずれの観測年, 観測地点ともほぼ一定の値で推移した.
- (2) 本稿の手法により計算した底質巻上げ量は、風速と 比例関係が見られた.風がより強い2006年にその傾 向が明瞭に見られた.
- (3) 底質巻上げ量の計算値と観測値を比較したところ, 2005年は比較的良好な結果を得られた.一方風がよ り強い2006年の計算値は観測値に比べ過小となった. 今後河床付近に設置した水質観測機器データも含め, 考察を進めていく.また茨戸川での循環流発生及び底面 せん断力を数値シミュレーションにより評価し,底質巻 上げ機構との関係を考察する.最終段階では藻類増殖モ デルと組み合わせ,茨戸川で課題となっている底面付近 のDO低下等の水質悪化現象のメカニズム解明を目指す.

謝辞:国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部には, 現地観測データ等を提供していただいた.ここに記して 謝意を表す.

#### 参考文献

- 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
- 2) 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 立公害研究所報告第42号,1983
- 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
- 4) 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, pp.163-171, 1996
- 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, 51, pp.73-87,1984
- 6)関智弥,福島武彦,今井章雄,松重一夫:霞ヶ浦の濁度上昇 と底泥巻き上げ現象,土木学会論文集No.811/VII-38,149-161,2006
- 7)横山洋,山下彰司:旧川における風と河川流動,底泥巻上げ に関する考察,土木学会第62回年次学術講演会概要集,2-61, 2007