

ADCPを用いた感潮域旧川における 底質巻上げ機構の検討

RESUSPENSION MECHANISM OF SEDIMENT IN TIDAL OXBOW LAKE WITH ADCP OBSERVATION

横山 洋¹・浜本 聡¹

Hiroshi YOKOYAMA and Satoshi HAMAMOTO

¹正会員 (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条3丁目)

We conducted observation with acoustic Doppler current profilers (ADCP) in tidal oxbow lake and estimated vertical distribution of turbidity from acoustic backscatter of ADCP. The oxbow is connected to tidal section of the Ishikari River at downstream end. We investigated mechanism of sediment resuspension using estimated turbidity and observation data of ADCP. Accuracy of estimated turbidity is almost in good during this observation. Difference of resuspension mechanism which depends on balance of tide and wind induced flow is confirmed from observation data. In upstream section of the oxbow, resuspension rate has some correlation to wind velocity. However, in downstream section of the oxbow, sediment resuspension is affected by tide.

Key Words : Acoustic backscatter turbidity, ADCP, Tidal oxbow lake, Sediment resuspension

1. はじめに

旧川(河跡湖・三日月湖)は、蛇行した河道が人為的あるいは自然作用により短絡し、本川から分離された滞流域である。特に北海道では、流域の居住地や農地の開発を目的として、大正時代以降に捷水路工事による蛇行河道の直線化が急速に進められ、その名残として旧川が群となって残る。これらの旧川は、内水の一時貯留、農業用水、親水空間としての利用など、様々な機能を有する重要な水域である¹⁾。しかし旧川は閉鎖性が強い水域であり、一部の水域では汚濁負荷の過剰流入による水質悪化が進行し、水環境の改善策が求められている。

ところで旧川をはじめとした浅い閉鎖性水域では、底質巻上げが主な汚濁負荷供給源であること、底質巻上げの主な駆動力が風であることが知られている。本研究で対象とする石狩川下流域の旧川である茨戸川でも、既往の研究でこれらの現象が確認されている²⁾。また茨戸川では石狩川感潮区間の背水の影響が、水域全体の水理に強く影響することも確認されている³⁾。このように風や潮汐、本川の背水等、複数の外力が存在する旧川における底質巻上げ機構の解明には、流速と濁度の鉛直分布を同時かつ時系列で計測する手法が必要である。流速は近年ADCPをはじめとした計測技術の向上に伴い、精度よ

く時空間分布を測定する技術が確立されてきた⁴⁾。一方、濁度は光学式濁度計や採水による計測が一般的だが、これらの方法は点データ取得であり、時空間分布の把握には適していない。

近年、濁度の時空間分布把握の有力な手法の1つとして、ADCPに用いられる超音波の散乱強度(Acoustic Backscatter)が水中の懸濁物質量と相関が高いことに着目し、散乱強度から濁度を求める手法に関する研究が数多く行われている。ADCPを用いる手法は流れと濁度の時空間分布を同時に把握でき、多大な情報を1つの機器で効率的に取得可能な利点がある。

この手法の河川への先駆的な適用事例として、川西ら⁵⁾による太田川河口域の濁度推定が挙げられる。横山ら⁶⁾は高濁度が発生する筑後川の感潮域で適用し、断面内のSS輸送を把握している。湖沼での適用では、豊田ら⁷⁾による諏訪湖を対象とした現地観測による底質巻上げ現象の検証が挙げられる。新井ら⁸⁾は尼崎港においてADCPと光学式濁度計による計測値を統合的に用いることで、計測環境が変動しても精度よく濁度の鉛直分布を計測可能な手法を提案している。

本研究では、複雑な流況が生じると考えられる感潮域旧川の流れと濁度挙動を、ADCPによる観測により把握することを試みた。茨戸川に設置したADCP観測データを用い、濁度鉛直分布の時系列データの精度検証を行っ

ている。また推定した濁度と、流速流向や風などの外的因子の関係を検証し、感潮区間の閉鎖性水域における濁度の挙動特性を考察した。これらの調査研究結果は、潮汐の影響を受ける閉鎖性水域の底質・濁質挙動の把握にも資するものと考えられる。

2. 現地調査の概要

(1) 調査対象域

研究対象域である茨戸川の現況を図-1に示す。茨戸川は全長約20km、川幅約200～500mの石狩川の旧川（河跡湖）である。茨戸川には2箇所の狭窄部があり、それらを境界として、上流側から順に上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆の3領域に分かれている。

平水時の茨戸川への流出入のうち、規模が最も大きいのは、下流端の水路（志美運河：川幅約40m）を通じた石狩川との流出入である。茨戸川と石狩川の合流点には水門が設置してあり、平水時には水門は開いている。茨戸川は石狩川の背水の影響を受け、潮汐による水位変動に応じて、日周期で順逆流が生じている。

(2) 調査手法

現地調査は2010年6月1日から10月28日までの約5ヵ月間行った。流速流向連続観測は、上部湖盆に位置するSt.A1（平水時水深約6m）、下部湖盆に位置するSt.A3（平水時水深約10m）の2地点において、ADCP（RD Instruments Workhorse Sentinel 1200kHz）を河床上から上向きに設置して行った。観測インターバルは両地点で10分（観測1分、休止9分）、層厚はSt.A1は0.25m、St.A3は0.2mに設定している。

またADCP設置地点での水質の把握と超音波濁度算出時のキャリブレーションデータ取得のため、概ね半月に1回の頻度で多項目水質計（アレック電子ASTD-687）により、表層から10cm間隔で水質鉛直観測を行った。測定項目は水温、濁度（カオリン換算）、クロロフィル（ウラニン換算）、塩分の4項目である。また概ね1ヵ月毎に、表層（St.A1は水面下1m、St.A3は水面下2m）、5割水深、底層（St.A1は河床上1m、St.A3は河床上2m）の3層で採水及び水質分析を行った。分析項目は濁度、SS、粒度分布（レーザー回折を行った。風速は気象庁石狩観測所の毎時データ⁹⁾を、水位は国土交通省の茨戸水位観測所の毎時データ¹⁰⁾を用いている。

図-2に観測期間中の水温及び懸濁物の中央粒径 d_{50} （レーザー回折散乱法、分析は島津製作所SALD-3000を使用）を示す。 d_{50} は、観測期間中に15～40 μm の間で変動している。 d_{50} の季節変化はSt.A1がSt.A3に比べて大きい。両地点ともに8月下旬に d_{50} は最大となり、特にSt.A1では下層に行くに従い粒径が大きくなる傾向がみられた。水温は観測期間内で10℃から25℃まで変化して

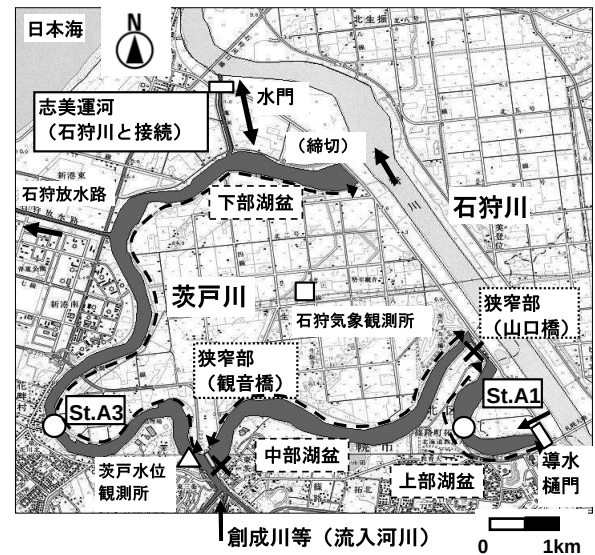
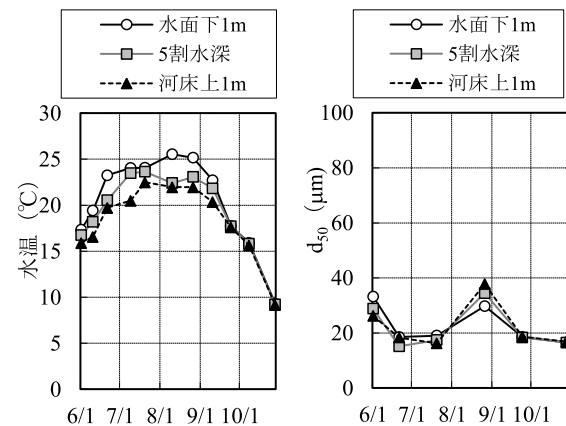
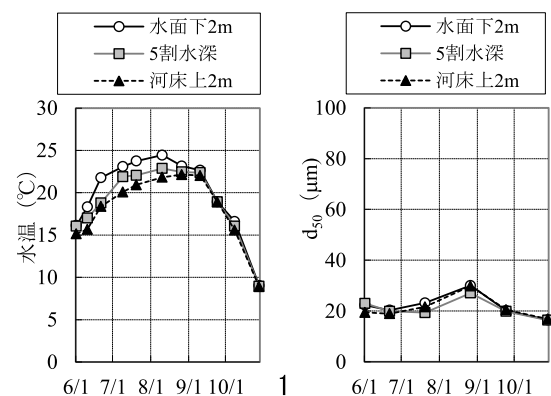


図-1 茨戸川概況及び調査位置図



(a) St. A1



(b) St. A3

図-2 水温及び懸濁物の d_{50}

いる。表層と下層の水温差は6月中旬からはじまり、8月下旬まで3～4℃程度の水温差が続く。9月以降は全層で水温は一樣となっている。塩分は10月8日の多項目水質計による観測時にSt.A3の底面付近において低濃度（1psu以下）の侵入が確認された以外は検出されておらず、ほぼ全期間・全領域で淡水状態であった。

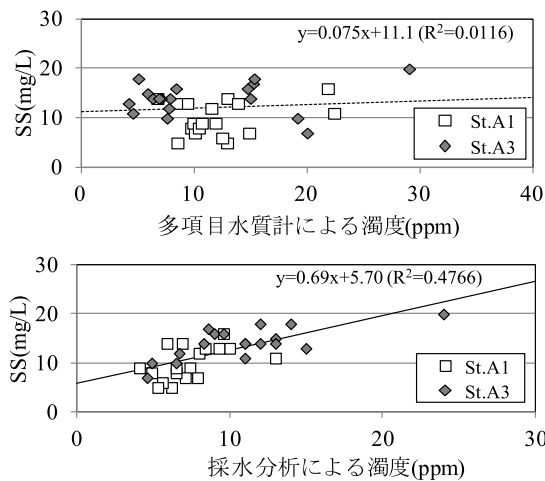


図-3 SSと濁度の相関

3. 超音波濁度の算出手法

(1) 算出の流れ

ADCPによる反射強度と懸濁物質濃度の間には、ソナー方程式による以下の式(1)が成り立つ⁸⁾。

$$\log M(r) = 0.1 \times \{K_c(E - E_r) + 2r\alpha + 20 \log \psi r\} - 2 \log k_s k_t \quad (1)$$

ここで $M(r)$: ADCPからの距離 r における浮遊懸濁物濃度, K_c : トランスデューサーに関する定数, E : ADCPの反射強度, E_r : 反射強度の参照値, α : 吸収に関する係数, ψ : 音源付近における音波伝搬の近距離補正係数, k_s, k_t : 懸濁物質や機器特性により決定するパラメータである。

本研究では、式(1)を基礎式としたADCPデータ解析ソフトウェア (Visual ADCP Tools Ver3 : (株) ハイドロシステム開発) を用い、ADCP反射強度から濁度を推定した。本稿では以下、ADCPデータから算出した濁度を「超音波濁度」と称する。超音波濁度の算出方法の詳細は橘田らにより述べられている¹¹⁾。そのためパラメータ設定等、算出の流れと概略を以下に述べる。

- まず観測期間全体で代表的な実測水質データでパラメータを設定する。本事例では水温の鉛直方向の差があまり小さくなく、濁度が平水時の平均的な値であるとみなせる6月の多項目水質計による3回の観測値をもとに設定した。
- 上記で設定したパラメータを用いて、上述した3回の観測時の超音波濁度を算出、観測した濁度とできるだけ近くなるようパラメータを補正する。
- 前段で補正したパラメータを用い、観測期間全体(6～10月)の超音波濁度を算出する。

(2) 濁度からSSへの換算

後述する底質巻上げ量の算出にあたり、濁度からSSへの変換式が必要である。そこでSSと濁度(採水分析及び

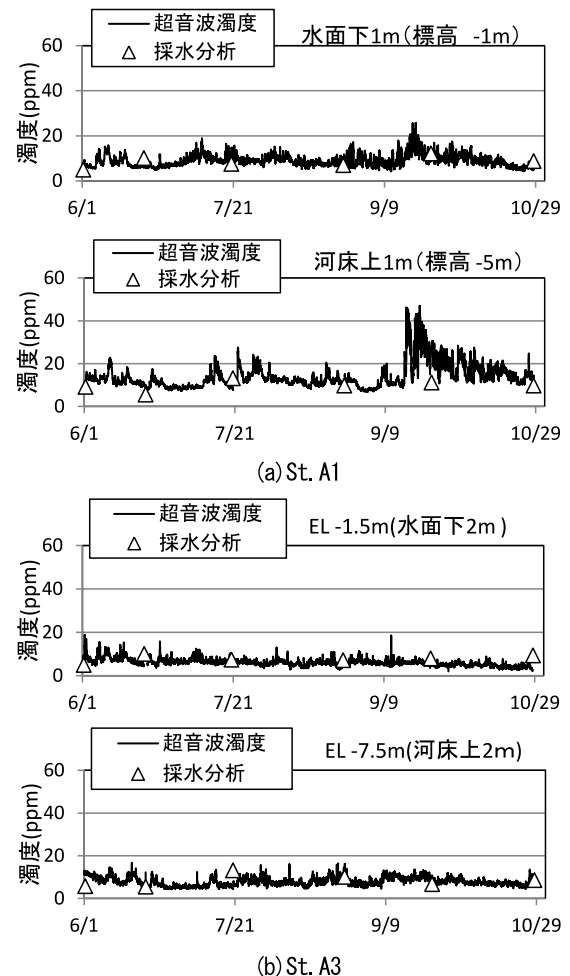


図-4 超音波濁度と実測濁度(採水分析)の比較

多項目水質計の観測値)の相関を検証した(図-3)。

まずSSと多項目水質計の濁度の相関はほとんど認められない。多項目水質計による濁度が、夏季に表層と下層の水温差が大きくなる時期を中心に採水濁度より大きいことが影響しているが、その原因は不明である。一方、SSと採水濁度の間には、St.A1, St.A3いずれの試料についてもある程度の相関が認められる。両地点での採水分析結果から得られた回帰式をSSの変換に用いる。

また本節の検討結果を踏まえ、次章での超音波濁度の精度検証では、実測濁度は採水分析による値を用いて議論を進める。

4. 超音波濁度の算出結果及び考察

(1) 超音波濁度の再現性

まず観測期間を通した超音波濁度の算出精度を確認する。図-4に、今回算定した超音波濁度と実測濁度について、表層部(St.A1は水面下約1m, St.A3は水面下約2m)と下層部(St.A1は河床上約1m, St.A3は河床上約2m)の2層で比較した結果を示す¹²⁾。

採水による実測濁度と超音波濁度は、St.A1、St.A3いずれの地点でも、全期間を通じて概ね一致しており、超音波濁度はこの期間内の濁度変動傾向を概ね再現している。平水時の濁度は、St.A1、St.A3ともに10ppm前後である。また濁度の変動幅は、St.A1の方がSt.A3に比べて大きい傾向があり、底層からの巻上げ現象はSt.A1でより顕著なことがうかがえる。

ところでSt.A1では、9月中旬から下旬にかけ、下層部を中心に超音波濁度が急激に上昇している。その発生原因は不明である。またこの期間は濁度上昇時の実測値がないため、超音波濁度によるこの現象の再現精度も確認できなかった。

(2) 底質巻上げ量の推定

底質巻上げ量は関ら¹³⁾の手法を参考にして、式(2)により算出する。

$$h \frac{\partial C}{\partial t} = E - w_s (C - C_{bg}) \quad (2)$$

ここで h : 水深, C : SS濃度, w_s : 懸濁物の沈降速度, C_{bg} : SS濃度の基底値である。

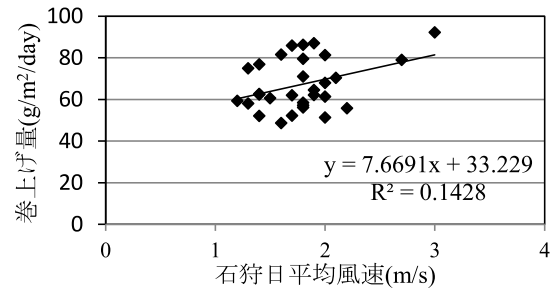
式(2)は、濁度が鉛直方向にほぼ一様な分布であると仮定した場合に成り立つ。過去の茨戸川の水質調査から、SSは底面近傍を除き鉛直方向にほぼ一様であることを確認しており、式(2)による算出は妥当と考えた。濁度からSSへの変化は、図-3に示す回帰式のとおりである。 w_s は既往の懸濁物捕集調査をもとに、沈降速度の平均的な値である4m/dayとした。 C_{bg} は検討対象期間中のSS最小値（ここでは10mg/L）とした。

図-5に、式(1)から算定した2010年8月1日から31日までの底質巻上げ量の日積算値と、石狩気象観測所の日平均風速の関係を示す。St.A1では底質巻上げ量と風速には、弱い正の相関がみられる。一方St.A3では、底質巻上げ量と風速にはほとんど相関がみられない。また期間を通じた底質巻上げ量の平均値はSt.A1で67.2g/m²/day、St.A3で24.2g/m²/dayであり、St.A1での巻上げがSt.A3に比べて顕著である。

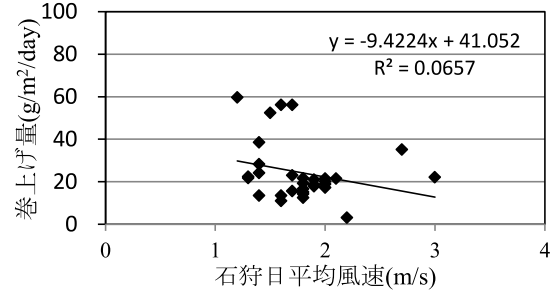
底質巻上げ量と風速の相関は、St.A1がSt.A3に比べてより強いことは、過去に茨戸川で行われたセジメントトラップによる底質巻上げ量の検証¹⁴⁾においても、同様の傾向がみられている。以上より、超音波濁度では底質挙動や巻上げ現象の特性を、概ね把握できるものと考えられる。

(3) 濁度変動と気象条件、流動との関係

茨戸川の底質巻上げに影響を及ぼすと考えられる因子は、風、降雨（下部湖盆への流入）、潮汐の影響が考えられる。なお浅い閉鎖性水域の底質巻上げは、流れのせん断力のほかに、風波によるせん断力の影響が強いこと



(a) St. A1



(b) St. A3

図-5 底質巻上げ量推定値と風速の関係

が示されている¹⁵⁾。そこで本研究でも、底面せん断力について、流れによる成分、風波による成分をそれぞれ算出する。

流れによる底面せん断力 $\tau_{b,s}$ は以下の式で表す¹⁶⁾。

$$\tau = \rho C_f U^2 \quad (3)$$

ここで C_f : 底面摩擦係数（ここでは0.0026に設定¹⁶⁾）、 U : ADCPによる最下層（底面から約0.7m上方）の平面流速絶対値である。

また風波によるせん断力 $\tau_{b,w}$ は、湖沼でも多く用いられている以下の式から算出する¹⁵⁾。

$$\tau_{b,w} = H \left[\rho \frac{(\nu \omega)^{1/2}}{2 \sinh kh} \right] \quad (4)$$

$$\frac{gH}{W_{10}^2} = 0.283 \tanh[\alpha] \tanh \left[\frac{\beta}{\tanh \alpha} \right] \quad (5)$$

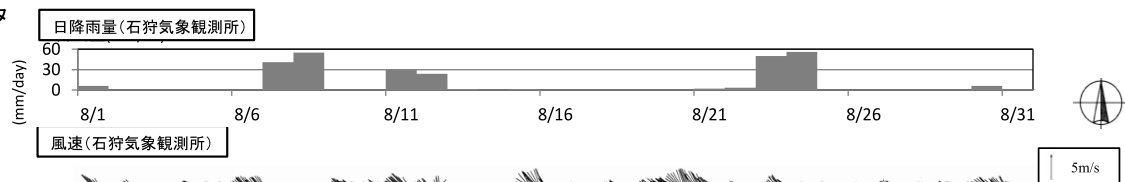
$$\frac{gT}{W_{10}^2} = 2.8\pi \tanh[\zeta] \tanh \left[\frac{\delta}{\tanh \zeta} \right] \quad (6)$$

$$\alpha = 0.530 \left(\frac{gh}{W_{10}} \right)^{0.75} \quad (7) \quad \beta = 0.833 \left(\frac{gh}{W_{10}} \right)^{0.375} \quad (8)$$

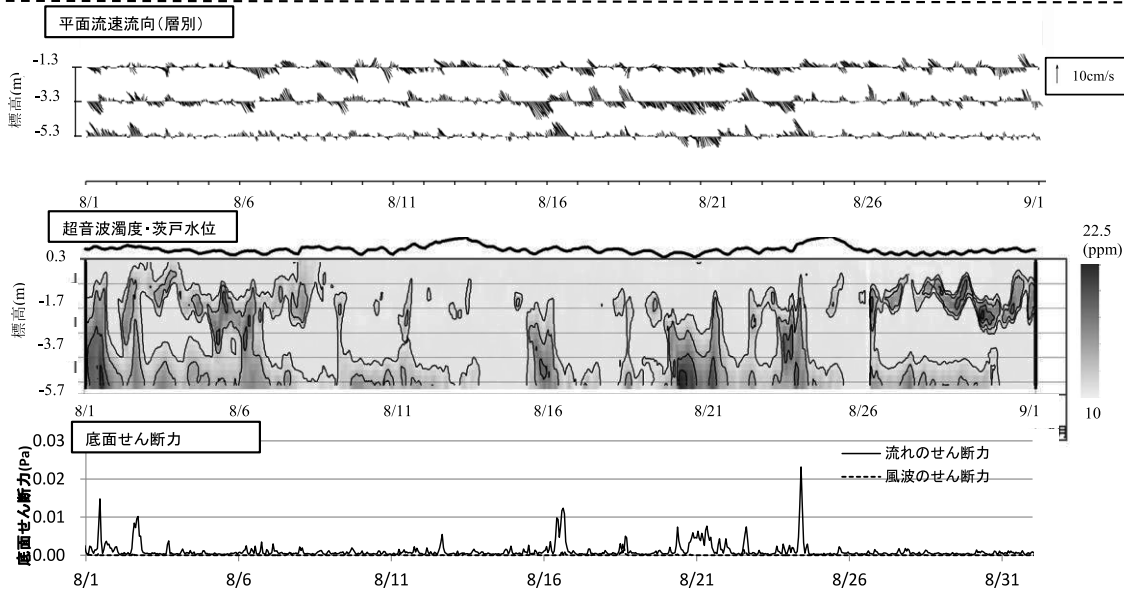
$$\delta = 0.077 \left(\frac{gF}{W_{10}} \right)^{0.25} \quad (9) \quad \zeta = 0.0125 \left(\frac{gF}{W_{10}} \right)^{0.42} \quad (10)$$

ここで H : 有義波高, T : 風波の周期, ρ : 水の密度, ν : 水の粘性係数, ω : 角振動数(=2 π /T), g : 重力加速度, W_{10} : 石狩気象観測所における上空10mの風速, h : 水深, F : 吹送距離である。

気象データ



St.A1



St.A3

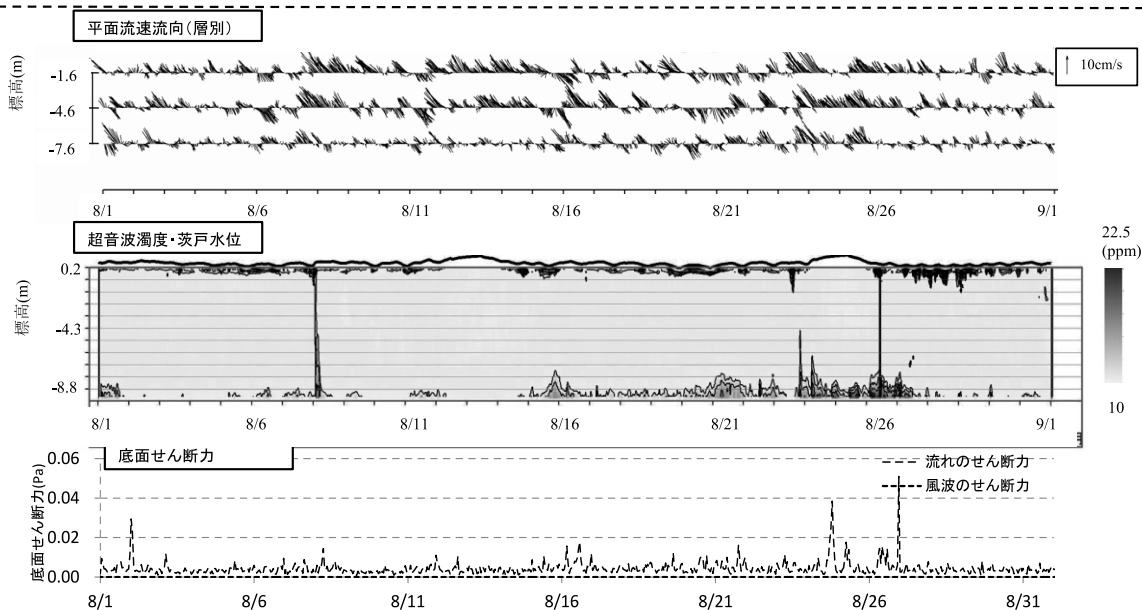


図-6 風速、流速、及び超音波濁度の時系列変化 (2010年8月)

図-6に、St.A1及びSt.A3における8月の超音波濁度と降雨量、風速（気象庁石狩観測所）、ADCPによる平面流速流向（表層部、5割水深、下層部）、茨戸観測所水位、底面せん断力を示す。なお底面せん断力はSt.A1、St.A3ともに、流れによるせん断力 $\tau_{b,s}$ が風波によるせん断力 $\tau_{b,w}$ に比べて全期間で卓越した。これは茨戸川の底面せん断力は風波の影響はほとんどなく、風により加速されて生じる流れによるせん断力が支配的であることを示す。続いて底質巻上げの影響因子を各地点別に考察する。

St.A1では河道の順流方向にあたる南東方向の風がほぼ1日以上継続し、かつ最大風速がほぼ4m/sを超える場合は、底面付近の流れが加速し、それと同時期に濁度上昇がみられる（例えば15～16日、20～22日、24日）。流速鉛直分布をみると、南東方向の風が吹くと、中層及び下層部の流れが加速される傾向がみられる。それ以外の時期では、日周期で流向が南東と北西方向に交互に反転する傾向がうかがえ、感潮域の流れの特徴がみられる。底面近傍の流速は期間全体を通じて2～3cm/s程度である

が、底質巻上げ時には最大10cm/s近い流速がみられる。

St.A3では、底面せん断力と風の関係はあまりみられない。底面せん断力が概ね0.01Paを超えると、巻上げが生じる傾向がみられる。全体的な流速流向は、いずれの層でも日周期で流向の交互反転がみられる。強風の流速流向への影響は、表層部では多少みられるが、下層に向かうに従い小さくなっており、周期的な流速変動が主たる動きとなっている。南東からの強風が卓越する時期に下層部流速は若干増加し、超音波濁度もわずかに上昇する。しかし巻上げはSt.A1ほど明瞭ではなく、巻上げ時の鉛直上方への濁度拡散範囲もSt.A1に比べて小さい傾向にある。

なお降雨による影響はSt.A1、St.A3ともに顕著にはみられなかった。またSt.A1でのみ、水面下1~3m前後で、相対的に濁度が高い層が存在する。この層は固定された標高では存在せず、日周期で変動している。多項目水質計による水温変化がみられる深度と超音波濁度が極大となる深度は概ね一致していた。今後、水温成層が濁度に影響についての検証が課題である。

5. まとめ

感潮域旧川における茨戸川で、ADCP反射強度から超音波濁度を算出し、底質巻上げ現象を考察した。以下に本調査研究で得られた結論をまとめる。

- ・ ADCP 反射強度から算出した超音波濁度は、期間全体を通じて現地濁度を概ね再現していることを確認した。
- ・ 超音波濁度から底質巻上げ量を推定し、風速の関係を考察した。水域の閉鎖性が強いと巻上げ量と風速の相関が強くなる結果となり、既往調査と同様の傾向が得られた。
- ・ 底質巻上げと底面せん断力との関係を考察した。閉鎖性の強い上流域では河道順流方向の風により加速された流れで底面せん断力が増加し、巻上げが生じている。一方潮汐の影響が強い水域では、底質巻上げと風の相関は弱い結果となった。

なお本研究で得られた超音波濁度の精度は、標準的な濁度計測手法で得られるデータと比較すると低い点に留意が必要である¹¹⁾。しかし本手法により、流れと濁度を多層で同時把握することが可能になり、底質巻上げ現象と影響因子の関係を時系列で捉えることが可能となる。今後の感潮区間の滞流域における濁質モニタリング技術の向上及び労力・コスト削減に資するよう、解析の手法・精度の改良に取り組んでいきたい。

謝辞： 茨戸川における現地調査は（株）北水エンジニアリングの協力を得て行った。またADCPによる濁度算出に当たっては、（株）ハイドロシステム開発の橋田隆

史氏から多くの助言をいただいた。ここに記して、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 草大輔, 山本忠男, 長澤徹明, 井上京: 治水機能からみた石狩川河跡湖の地域資源的評価, 農村計画論文集 第3集, pp.67-72, 2001
- 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) 福島久雄, 八鍬功, 高橋将, 大谷守正: 石狩川河口の旧川における感潮現象, 海岸工学論文集第19巻, pp.107-111, 1972
- 4) 例えば橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCP を用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 河川技術論文集第12巻, pp.133-138, 2006
- 5) 川西澄, 山本洋久, 余越正一郎: 超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度, 粒径, フラックスの測定, 水工学論文集第42巻, pp.559-564, 1998
- 6) 横山勝英, 金子祐, 長屋光彦, 山本浩一: 筑後川感潮河道の蛇行部横断面におけるSS粒子の挙動とフラックスに関する考察, 水工学論文集第53巻, pp.1411-1416, 2009
- 7) 豊田政史, 宮原一道, 疋田真, 宮原裕一: 超音波ドップラー流速計を用いた湖内懸濁物質濃度分布の推定, 応用測量論文集 Vol.19, pp.55-60, 2008
- 8) 新井励, 中谷直樹, 奥野武俊: 海域モニタリングに適したADCPを用いた濁度の鉛直分布計測手法, 日本船舶海洋工学論文集第7号, pp.23-30, 2008
- 9) 気象庁 HP (<http://www.jma.go.jp>)
- 10) 国土交通省水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp>)
- 11) 橋田隆史, 横山洋, 橋場雅弘, 新井励: ADCP の超音波反射強度を利用した濁度計測技術について, 河川流量観測の新時代第2巻, pp.49-56, 2011
- 12) 横山洋, 浜本聡: ADCP を用いた茨戸川の底質巻上げ現象の観測, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文報告集第68巻, 2012
- 13) 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, pp.149-161, 2006
- 14) 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
- 15) Luettich, Jr., R. A., Harleman, D. R. F. and Somlyódy, L., "Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events", Limnol., Oceanogr., 35, pp.1050-1067, 1990
- 16) 大西亮一, 白石英彦: 有明海の潮流解析について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.527-530, 1979

(2012.4.5受付)