

# ADCPを用いた石狩川感潮域の濁度推定と 変動メカニズム検討

寒地土木研究所

(株) 福田水文センター

(株) ハイドロシステム開発

○横山 洋

橋場 雅弘

橋田 隆史

濁質をはじめとした物質輸送の動態把握は、河川管理上重要である。しかし、河川感潮域では、潮汐や風、塩水浸入等の様々な因子によって濁度は複雑な挙動を示す。本研究では、リアルタイム流量観測のため国土交通省が石狩川石狩大橋地点に設置したADCPの観測データを用い、濁度鉛直分布の時間変化を測定した。また、得られた濁度推定結果と河川流動や風などの外的因子の関係を検証し、感潮域の濁質変動機構の把握を試みた。

キーワード：ADCP、超音波濁度、感潮域

## 1. はじめに

河道には流水とともに土砂や栄養塩等、様々な物質が流下する。特に上流から輸送された濁質は、緩勾配であり潮汐の影響を受ける感潮区間で堆積し、河口域の底質形成に重要な役割を担っている<sup>1)</sup>。ゆえに感潮区間における濁質の輸送量をはじめとした動態の把握は、河川管理上重要な課題といえる。

ところで濁質の輸送量を算出するには、流速と濁度を同時に計測する必要がある。流速はADCPによる時空間分布の計測技術が向上し、複雑な流況でも十分な精度で把握可能となってきた<sup>2)</sup>。一方、濁度は光学式濁度計や採水により精度よく計測できるが、これらの方法は点計測である。時空間分布の把握にこれらの手法を用いるのは、労力やコスト面から現実的ではないとの指摘もある<sup>3)</sup>。さらに感潮区間の濁度は潮汐の影響による変動も加わり、その挙動は一層複雑となる<sup>4)</sup>。

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等に用いられる超音波が懸濁粒子にあたって反射する散乱強度(Backscatter)が水中の懸濁物質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。この手法は流れと濁度の時空間分布を非接触で同時把握でき、多大な情報を1つの機器で得ることが可能になるとともに、モニタリングコストの縮減も期待できる。

本研究では、リアルタイム流量観測のため国土交通省が石狩川石狩大橋地点に設置したADCP観測データ<sup>5)</sup>を用い、濁度鉛直分布の時間変化を測定した。また得られた濁度推定結果と河川流動や風などの外的因子の関係を検証し、感潮域の濁質変動機構の把握を試みた。本研究の成果は、河口域の河川環境の保全について計

画・実施する際のモニタリング技術の向上と低コスト化に資することが期待されるものである。

## 2. ADCPによる濁度算定の既往研究と課題

ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)は超音波が懸濁物質に当たって反射する際に生じる位相を解析して流向流速を求めている。その際に、懸濁物質濃度の違いによって後方散乱(Backscatter)が生じる。反射強度は水中の懸濁物質濃度と相関があるといわれており、この性質を利用して水中の懸濁濃度を計測する手法が提案されてきた。

横山ら<sup>1)</sup>、川西ら<sup>6)</sup>は、水中の伝搬損失を水塊の発散損失と吸収損失の和で求めるソナー方程式を用いて、濁度の鉛直分布を時系列で算出している。しかしこれらの手法は現地での適用性の議論が中心であり、水中懸濁物質での減衰等、伝搬モデルへの理論的な踏み込みは十分にされていない。

Thoroneら<sup>7)</sup>、橋田ら<sup>2)</sup>は水中懸濁物質の吸収や散乱の影響を考慮した伝搬モデルを用いて鉛直分布計測を行っている。しかし感度に関するADCP特有の機器特性、懸濁態の粒径などのパラメータは、観測値をもとに現地でキャリブレーションする必要がある。

新井ら<sup>3)</sup>はADCPと光学式濁度計の計測値を統合的に用いることによって、機器特性や粒径に影響されずに鉛直分布を計測する手法を提案している。また、水面直下の音波散乱を物理モデルで示すことにより、ADCPの弱点であった水表面の精度を向上させている。

ところで前述した濁度の時空間分布推定手法では、対象とする連続期間は数日単位、長くても半月程度のものが大半である。ADCPによる濁度推定技術を河川管理で



図-1 調査位置

実用化するためには、より長期間（少なくとも月単位）での適用性を検討することが必要である。そこで、本研究は1ヶ月間と、従来の研究事例より長期間を対象として濁度推定を行い、現地への適用性を検討することに主眼を置くこととした。

### 3. 調査対象地及び計測手法の概要

調査地点は図-1 に示す石狩川下流感潮区間に位置する石狩大橋水位流量観測所（KP26.5）である。当地点と河口との水位差は 1m 以下であり、潮汐による影響が顕著である。

石狩大橋観測所では、図-2 に示すとおり、河床に ADCP1200kHz（Workhorse, Teledyne RD Instruments 社）を設置し、河床から水面までの流速鉛直分布の計測と同時に、リアルタイムで流量を算出するシステムが国土交通省により構築されている。ADCP で収集したデータは、10 分インターバルで水中モデムによる無線通信を介して現地観測局舎内のサーバに伝送され、その後光ファイバー網を通じて管理部署に送られる<sup>5)</sup>。表-1 に ADCP の設定条件を示す。ADCP で取得した反射強度の整理・解析には、専用ソフトウェアである WinRiver、WinADCP（共に Teledyne RD Instruments 社）を用いる。

検討対象期間は、2009 年 8 月 1 日から 31 日までの 1ヶ月間である。また、後述する濁質濃度のキャリブレーション用に、2009 年 8 月 11 日と 31 日に多項目水質計（Compact-CTD, JFE アレック(株)）を用いて、石狩大橋橋上より、水表面から河床まで毎秒約 1m で落下させて 0.10m 間隔で濁度データを採取した。計測の詳細条件は表-2 に示す。また水質計による計測と同時に採水を行い、濁度、懸濁物粒度分布（レーザー回折散乱法：SALD-3000, (株)島津製作所を使用）を計測している。

### 4. 超音波濁度の算出理論

超音波が懸濁物質に当たって反射する際に、懸濁物質濃度の違いによって後方散乱（Backscatter）が発生するが、後方散乱は、超音波が水中を通過する際に生じ

表-1 ADCP 諸元

項目	諸元
周波数	1200kHz
ピング数	60ピング/アンサンブル
層厚	0.25m
層数	40層
計測間隔	10分インターバル
ピング間隔	1ピング/秒

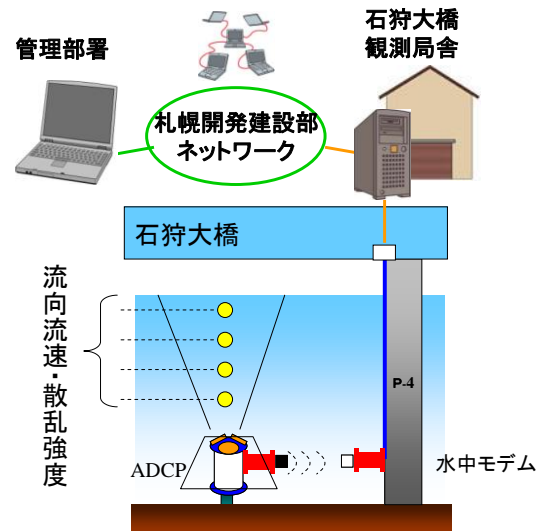


図-2 ADCP 流量観測システム概要（石狩大橋）<sup>5)</sup>

表-2 Compact-CTD 諸元

項目	タイプ	測定範囲
深度	半導体圧力センサ	0~600m
水温	サーミスタ	-5~40℃
塩分 (電導度)	実用塩分式 電磁誘導セル	0~40 0~60mS/cm
濁度	後方散乱光式	0~1000FTU (ホルマジン基準)

項目	分解能	精度
深度	0.01m	0.3%FS
水温	0.001℃	±0.02℃
塩分 (電導度)	0.001 0.001mS/cm	±0.03 ±0.05mS/cm
濁度	0.03FTU	±2% or ±0.3FTU

る水塊による発散損失と吸収損失、懸濁物質による吸収、超音波の拡散・距離減衰などの影響を、往復の伝播経路で受ける。また、濁質による発散損失は超音波伝播経路上の積分値として影響を受ける。

ADCP はこれらの影響を受けた結果として反射強度（Echo Intensity）が得られ、この反射強度から内部 CPU によって散乱強度（dB）に変換している。

よって、真の後方散乱強度は上記パラメータを補正して求める必要がある。

### (1) 散乱強度の伝搬損失

散乱強度はソナー方程式から、式(1)で表わされる。

$$EI = SL + SV + Const - 20 \log(R) - 2\alpha_w R \quad (1)$$

ここで  $EI$ : 散乱強度(dB)、 $SL$ : 発射強度(dB)、 $SV$ : 粒子の後方散乱、 $\alpha_w$ : 水の吸収係数(dB/m)、 $R$ : トランスデューサーからの距離(m)である。

### (2) 懸濁態濃度の算出

音響強度と懸濁態濃度の関係について、伝搬損失を考慮すると式(2)となる。ここでは懸濁物質の影響と ADCP トランスデューサーの感度調整パラメータも含む。

$$M(r) = (K \langle P_{ms} \rangle r)^2 \frac{\langle a_s \rangle \rho_s}{\langle f \rangle^2} e^{4r(\alpha_w + \alpha_s)} \quad (2)$$

ここで  $M(r)$ : トランスデューサーからの距離  $r$  における濃度、 $K$ : トランスデューサーに関する定数、 $P_{ms}$ : 後方散乱強度、 $a_s$ : 粒径、 $\rho_s$ : 粒子密度、 $\langle f \rangle$ : 粒子の関数、 $\alpha_w$ : 水の吸収係数、 $\alpha_s$ : 粒子の吸収係数である。

(2)式の両辺の対数をとると、

$$\begin{aligned} \log_{10} M(r) &= 2 \log_{10} (K \langle P_{ms} \rangle r) + \log_{10} (a_s \rho_s) \\ &\quad - 2 \log_{10} f + 4r(\alpha_w + \alpha_s) \log_{10} e \\ &= 2 \log_{10} \left( \frac{ra_s P_{ms}}{f} \right) + 4r(\alpha_w + \alpha_s) \log_{10} e \\ &\quad + \log_{10} (K^2 \rho_s) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= S \left\{ \log_e \left( \frac{ra_s P_{ms}}{f} \right) + 2r(\alpha_w + \alpha_s) \right\} + K_s \\ (\because S &= 2 \log_{10} e, K_s = 2 \log_{10} (K^2 \rho_s) = const) \\ &= S \{ dB + 2r(\alpha_w + \alpha_s) \} + K_s \end{aligned}$$

$$(\because dB = \log_e \left( \frac{ra_s P_{ms}}{f} \right))$$

ここで、 $S$ : 後方散乱係数、 $dB$ : 拡散補正後の後方散乱強度、 $K_s$ : トランスデューサー定数である。

### (3) 水の吸収係数

水塊による音波の減衰吸収のメカニズムは、水の粘性と熱伝導による作用と媒質中の分子による緩和作用があり、前者は無視できるレベルであるが、化学的な緩和作用は、塩水に含まれる少量の塩類により起こる吸収を考慮する必要がある。ここでは Shukin and Marsh<sup>10)</sup> および Liebmann<sup>11)</sup> の式を用いた。

$$\alpha_w = \frac{f}{91500} \left[ \frac{1.86 S f_T f}{(f_T^2 + f^2)} + \frac{2.86 f}{f_T} \right] \quad (4)$$

$$f_T = 21.9 \times 10^6 \left( 6 - \frac{1520}{273+T} \right) \quad (5)$$

ここで  $\alpha_w$ : 水の吸収係数、 $f$ : 周波数(MHz)、 $f_T$ : 緩和周波数(MHz)、 $S$ : 塩分(ppm)、 $T$ : 水温(°C)である。

### (4) 粒子による減衰係数

粒子による音波の減衰係数 (SAC) は拡散と吸収という2つの現象を考慮する必要がある。音波は粒子による拡散  $\alpha_1$  と吸収  $\alpha_2$  に影響され、式(6)で示される。

$$SAC = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (6)$$

#### ① 粒子による拡散係数

河川中に懸濁態物質が存在すると超音波散乱が生じる。

ADCPの発信周波数は1200kHz(1.2MHz)で、水中の音速1500m/sとすると、2009年8月11日および8月31日の平常時の浮遊砂  $d_{50}$  は0.04mm以下であり、近年の大きな出水である石狩大橋高水時(2002年9月12日6500m<sup>3</sup>/s)でも浮遊砂の最大粒径が0.4mm以下であることから<sup>12)</sup>、式(7)より  $\alpha \ll 1$  となりレイリー散乱の範囲内であることがわかる。

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} = \frac{\pi D f}{V_s} \quad (7)$$

ここで  $\lambda$ : 波長(m)、 $f$ : 周波数(MHz)、 $V_s$ : 音速(m/s)、

$\alpha \ll 1$ : レイリー散乱

$\alpha \approx 1$ : ミー散乱

$\alpha \gg 1$ : 幾何光学近似 である。

この条件を満たした単位粒子による減衰係数は Sheng and Hay<sup>13)</sup> の式(8)で示される。

$$\zeta_1 = \frac{K_a}{\rho_s} k^4 a_s^3 \quad (8)$$

ここで、 $\rho_s$ : 粒子密度(g/m<sup>3</sup>)、 $K_a$ : 粒子の圧縮性や密度に関する定数(=0.18)である。

以上より任意の濃度  $M_r$  下における減衰係数は式(9)で示される。

$$\alpha_1 = M_r \times \zeta_1 \quad (\text{Neper/m}) \quad (9)$$

#### ② 粒子による吸収係数

粒子による吸収は Urlick<sup>14)</sup> の式で求められる。

$$\alpha_2 = \frac{M_r k (\sigma - 1)^2}{2 \rho_s} \left[ \frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right]$$

$$\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{9}{(2\beta a_s)} \right] \quad (10)$$

$$s = \frac{9}{4\beta a_s} \left[ 1 + \frac{1}{\beta a_s} \right]$$

$$\beta = \left[ \frac{k V_s}{s \nu_w} \right]$$

ここでここで、 $\rho_s$ : 粒子密度、 $\rho_w$ : 水密度、 $V_w$ : 音速、 $\nu_w$ : 水中における粒子の運動速度である。

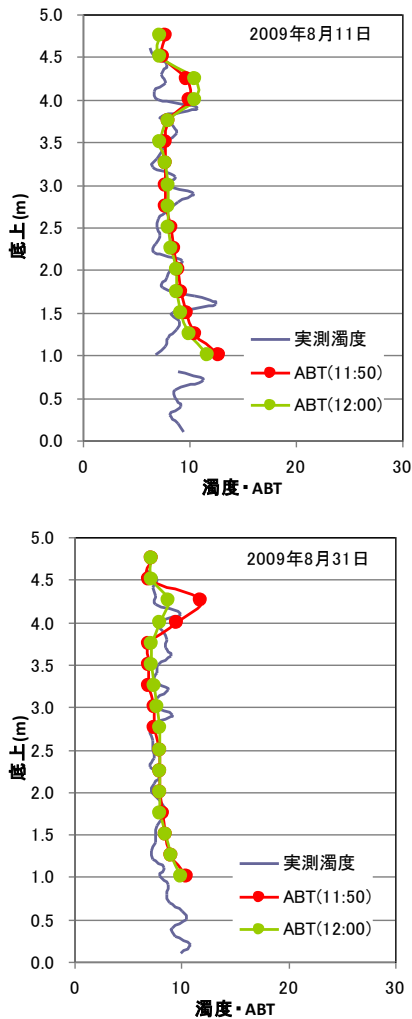


図-3 濁度推定結果検証

## 5. 濁度算出結果及び考察

続いて、前章の手法により2009年8月1日から31日までのADCP散乱強度を用いて濁度（以下、超音波濁度と記す）を算出する。

超音波濁度算出に際しては、光学式濁度計等により鉛直プロファイルの精度検証を行う必要がある。そこでまず多項目水質計による濁度と超音波濁度を比較する。

図-3は、8月11日と8月31日の濁度鉛直分布の実測値と超音波濁度である。実測は12時前後に行っており、超音波濁度は実測を行った前後である11時50分及び12時の2つのデータを示す。濁度は11日、31日ともに10度前後と比較的小さいが、超音波濁度は現地濁度の鉛直分布形を精度良く再現できている。なお超音波濁度が河床から1.0m程度プロットされていないが、これはADCPの不感帯（計測不能な領域）であり、超音波濁度算出に必要なADCPデータ収集が不可能なためである。

続いて、超音波濁度の鉛直分布時系列を検証する。図-4に降水量（江別）、風向風速、気圧（石狩）、潮位（小樽港）、塩分濃度（-1.1m、-1.6m、-2.0m、-2.4m、-2.8m、-3.2m、-3.6m、-4.0mに塩分計設置）、水位、ADCP

による流速（主流方向）と水位、流速（ADCP）、流量、超音波濁度を示す。石狩大橋の水位は潮汐の影響を強く受けている一方、塩水遡上はほとんど見られない。風はESE～S方向（河道に対し上流方向からの風：順流方向）が最も卓越し、次いでWNW～N方向（河道に対し下流方向からの風：逆流方向）の頻度が高い。

超音波濁度は底面近傍を除いて概ね10度以下で変遷している。底面近傍では風速の変化に伴う濁度変動が小刻みにみられるが、濁度の時空間分布全体に明確な影響を及ぼすのは、8月15～17日及び8月21～25日にかけての2時期である。そこで、この2時期を中心に、濁度変動状況を整理するとともに、影響因子を検討する。

8月15日～17日：

- 15日は主流方向の流速、流量が著しく減少している。これは前日である14日にWNW～N方向から風速5m/s以上の強風がほぼ1日続いており、風による応力が河川全層の流速に影響したことも一因と考えられる。流速・流量の減少に応じ、底質巻上げの駆動力である底面せん断力は低減し、底質巻上げ量も減少するため、濁度が低下したと考えられる。当然ながら、15日は濁質輸送量も減少する。
- 15日以降は風が弱くなる一方、周期的に流速が変化しており、潮汐の影響が強くみられるようになる。上げ潮時には流速、流量ともに減少し、底面からの濁質供給もみられないことから、濁質輸送量も減少する。一方下げ潮時には流速、流量ともに増加し、底面近傍の濁度が上昇して濁質が供給されるため、濁質輸送量も増加する。

8月21日～24日：

- 20日及び23日に比較的大ままとまった降雨がみられる。流量、流速は降雨から1～2日後の21日午後及び24日午前にピークとなり、標高-2m以深の下層部での濁度も流速と同傾向で上昇する。濁度上昇は当初は下層部のみであるが、流速・流量の急増とともに、-2mよりも上層にも拡散している。
- 流量、流速がピークを過ぎると、濁度も低減する。その過程は大きく2段階に分かれる。最初の1日は濁度は急減するが、その後低減速度は緩やかになり、特に河床付近の濁度は長期間残存している。これは出水ピーク直後の懸濁物は比較的早く沈降する成分が主であることに対し、時間が経過した後は非常に緩やかに沈降する成分が主となるためと推測される。これは今後現地の懸濁物データ（粒度分布等）を収集し、確認する必要がある。
- 出水時の濁度変動は流量による影響がほとんどであり、潮汐や風の影響はほとんどみられない。

## 6. データ精度の検証

本章では超音波濁度の個別データの精度を検証する。多項目水質計で得られた実測濁度と、ADCPによる超音

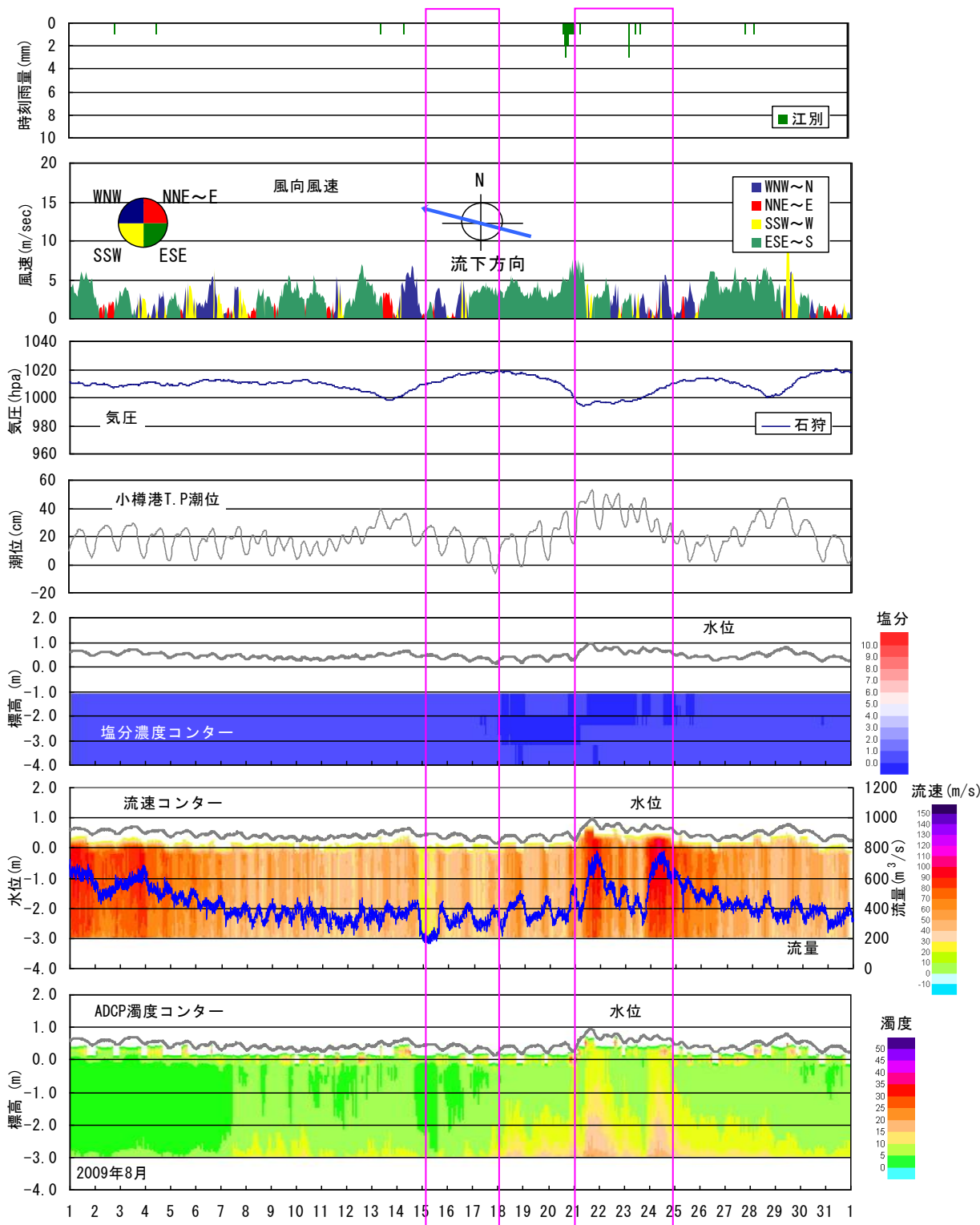


図-4 石狩川下流石狩大橋での超音波濁度と気象・流況の関係

波濁度の誤差を図-5に示す。いずれも誤差0を中心とした正規分布となっており、誤差±2度の中に90%以上が含まれる。誤差の絶対値が4度を超えるデータも散見されるものの、多項目水質計による濁度と超音波濁度の鉛直分布に大きな違いは確認できなかった。今後も特徴的な濁度分布が予測される時期を中心に、超音波濁度と実際

の計測濁度を比較検証を進め、誤差の傾向等についてデータ集積、整理を進める必要がある。

### 7. まとめ

本研究で得られた結果及び課題を以下にまとめる。

- ADCP 反射強度を用いた濁度推定を行った。濁度

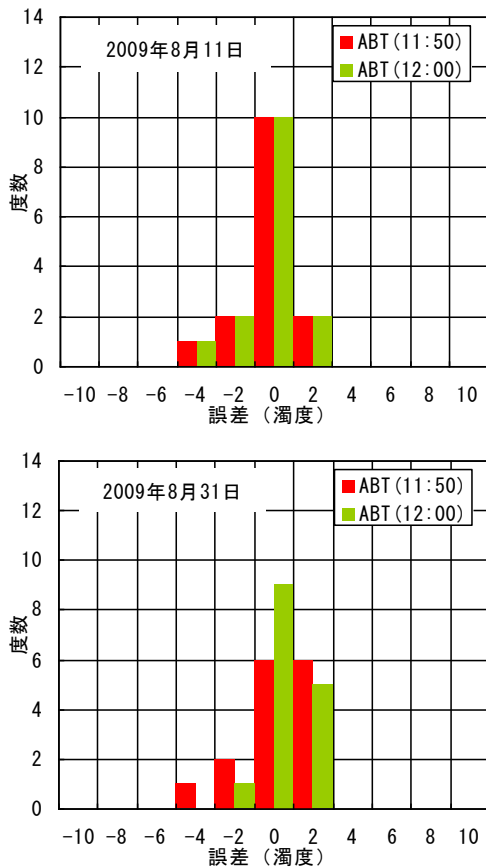


図-5 超音波濁度と実測濁度の誤差

計による計測結果と比較すると、超音波濁度は現地濁度を良好に再現できている。

- ・ 濁度鉛直分布の時系列データを推定した。平常時に流れ場が潮汐及び風の影響を受け、濁度分布及び濁質輸送もその影響を受ける様子を把握できた。
- ・ 出水時は濁質が流量変動とほぼ同位相で変化していることを確認した。また出水後の濁度低減過程を把握できた。

なお超音波濁度の精度自体は、光学式濁度計による計測を上回るものではない。しかし今回の観測に示すとおり、濁度の鉛直プロファイルを連続的に把握できること、また航走観測を行えば空間的にも把握できる利点は非常に大きい。濁度モニタリングやスクリーニングという用途には有効な手法である。また流動と濁度を同時に把握可能なことから、これまでは現象把握が困難であったダム貯水池等の湖沼における濁質の鉛直分布動態把握や、大河川での土砂輸送状況の把握等、様々な場への応用が考えられる。

また今回の研究では、超音波濁度算定は1ヶ月間を対象としているが、実河川に適用するにはさらなる長期間での検証が欠かせない。数ヶ月単位での観測結果からは濁度計による観測結果と整合しにくいという問題も確認しており、その一因として超音波濁度算定のアルゴリズム

ムが、水温変化をはじめ様々な外的因子の変化に追従しきれていないことが推測される。このため今後、水温を変数に利用したアルゴリズムの改良、塩分や濁質の粒度分布等による環境可変パラメータについても検討を進めていきたい。

## 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 ADCP 観測データをはじめ、各種現地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) 横山勝英, 藤田光一: 多摩川感潮区域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, 2001, pp.937-942
- 2) 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, 2006, pp.133-138
- 3) 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, 日本船舶海洋工学会論文集, (7), 2008, pp.23-30
- 4) 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, 2009, pp.1411-1416
- 5) 天野直哉, 大田見定, 館ヶ沢恵: 感潮区域における流量観測手法について -石狩大橋地点でのリアルタイム流量観測, 平成21年度北海道開発局技術研究発表会, 安全(安11治), 2010
- 6) 川西澄, 水野博史: 浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性, 水工学論文集, 第45巻, 2001, pp.1045-1050
- 7) P.D.Thorone, S.C.Campbell: Backscattering by a suspension of spheres The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 92, Issue 2, 1992, pp.978-986
- 8) P.D.Thorone, D.M.Hanes: A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes, Continental Shelf Research, 22, 2002, pp.603-632
- 9) 橋田隆史, 新井励, 南修平, 劉炳義: ADCP を応用した河川浮遊土砂フラックスのモニタリング手法の研究 (I), 第41回環境工学研究フォーラム講演集, 2004, pp.22-24
- 10) M.Shulkin and H.W.Marsh: Sound absorption in sea water, Journal of Acoustic Society of America, 34, 1962, pp.864-865
- 11) L.N.Liebemann: Origin of sound absorption in water and in sea water, Journal of Acoustic Society of America, 20, 1948, pp.868-873
- 12) 北海道測量事業協同組合: 石狩川本支流外流量調査業務報告書, 浮遊砂調査・流砂捕捉調査, 2001
- 13) J.Sheng, A.E.Hay: An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand, Journal of Acoustic Society of America, 83, 1988, pp.598-610
- 14) R.J.Urick: The absorption of sound in suspensions of irregular particles, Journal of Acoustic Society of America, 20(3), 1948, pp.283-289