

桂沢ダム貯水池における超音波流速計を用いた濁度鉛直分布の推定

(独)土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○横山 洋
渡邊 和好
札幌開発建設部 岩見沢河川事務所 桂沢ダム管理支所 吉良 達也

ダム貯水池の濁度鉛直分布を時系列で把握することは、ダムの適切な管理・運用に重要である。本研究では、桂沢ダム貯水池内で超音波流速計（ADCP）による高濁度時観測及び秋季連続観測を行い、流速と同時に取得される超音波反射強度から、濁度鉛直分布の時間連続変化を推定した。濁度推定結果について、出水等の濁度変動因子や、計測期間中の濁度鉛直分布の時系列変化の再現性について検証した。

キーワード：ADCP、濁度、時空間分布

1. はじめに

ダム貯水池に出水等により流入した土砂は、湖内で輸送・拡散されながら沈降する。ダムの適切な管理・運用には、これらの懸濁土砂の動態把握が必要であり、そのためにはダム湖内での流動のほかに濁度の時空間分布を把握することが不可欠である。近年の水文観測技術の発展により、流向流速の時空間分布は超音波流速計（以下ADCP）等により容易かつ精度よく計測することが可能である。一方、濁度計や採水等による、点による濁度計測は、時空間分布を把握することは多大な労力を要し、困難である。近年ではADCPでの流速計測時に発射される超音波が水中土砂粒子に反射強度と懸濁土砂濃度にある程度の相関があることを利用し、懸濁土砂濃度の時空間分布を推定する手法が、河川¹⁾や湖沼²⁾で検討されてきている。

ADCPを用いた濁度推定手法は研究段階であり、実用化に向けてダムや河川で出水等の高濁度時ならびに長期間設置時の再現性を検証していく必要がある。

そこで本研究では、桂沢ダム貯水池内で超音波流速計（ADCP）による高濁度時観測（融雪期、夏季出水期）及び秋季の定点連続観測を行い、流速と同時に得られる超音波反射強度から、濁度鉛直分布の時間連続変化を推定した。推定濁度について、出水と濁度上昇の関係、計測期間中の濁度鉛直分布の時系列変化の再現性について検証した。

2. 現地濁度特性

(1) 現地概要

Hiroshi Yokoyama, Kazuyoshi Watanabe, Tatsuya Kira

研究対象とした桂沢ダムは、石狩川支川の幾春別川に建設された多目的ダムである。図-1に本研究で計測を行った地点を示す。各地点での水深はダム貯水位変動に応じて変化し、ダムサイトでは概ね25～45m、湖心では概ね20～40m、上流では概ね10～30mで推移している。

(2) 採水によるSSの年間変動特性

桂沢ダム湖内の浮遊土砂濃度の採水による調査結果に基づく季節変動を示す。図-2は2010年度から2013年度までのダム湖心におけるSS変動値（速報値含む）である。表層は水面下0.5m、中層は5割水深、下層は湖底上1mで採水した結果である。SS最大値は年によって異なるが、降雨量やダム流入量とSS濃度増加に明瞭な関係は確認できなかった。ただしSSの年間変動の傾向はいずれの年も同様で、融雪時にSSは上昇し、融雪終了後の6月に

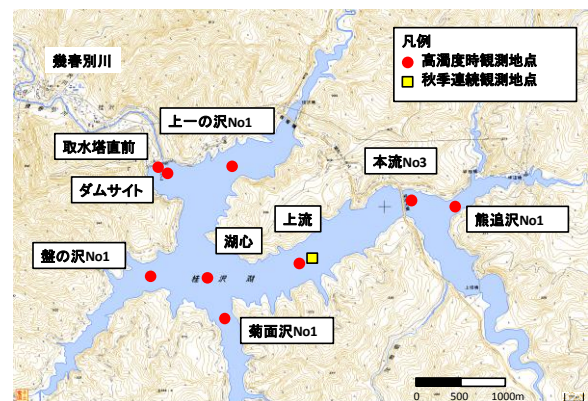


図-1 桂沢ダム調査箇所図
(国土地理院電子国土 Web システムから配信された背景地図に加筆)

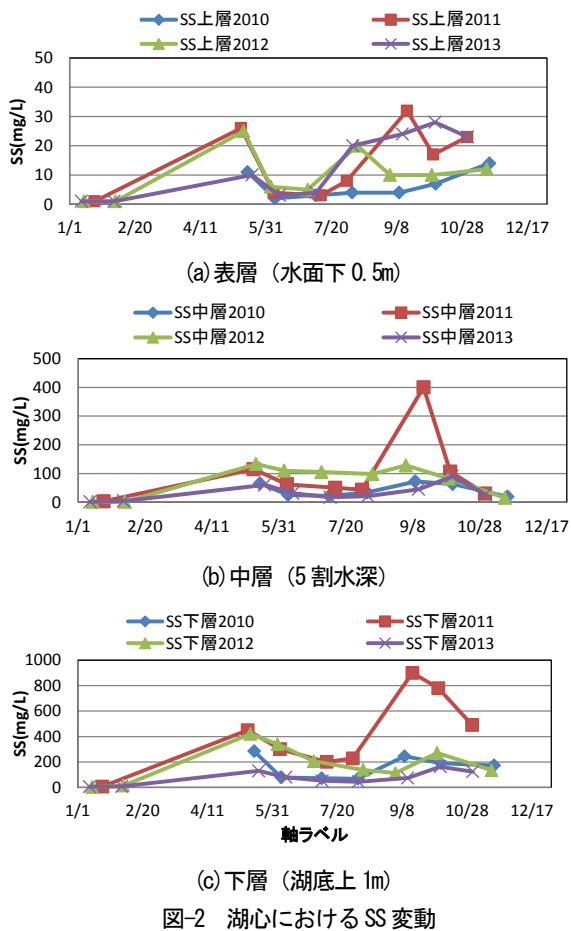


図-2 湖心におけるSS変動

一旦低下する。7月以降SSは再度上昇して8~9月にピークとなり、10月以降は再び低下している。

3. 観測概要

(1) 検討対象時期の選定

前述したSS濃度の年間変化より、土砂濃度が高いのは融雪出水中である5月ならびに夏季出水期である7~9月である。出水期を想定した濁度の推定精度検証には、この時期を対象とするのが望ましい。一方、10月以降はSS濃度は緩やかな低減傾向であり、平水期の長期的な計測精度検証はこの時期を対象とするのが望ましい。

そこで本研究では、融雪・夏季出水による濁度上昇時のダム貯水池内での曳航観測（以下「高濁度時観測」と称する）、ならびに10月以降の濁度安定期を対象とした定点連続観測（以下「秋季連続観測」と称する）の2種類の観測を行った。

(2) 観測手法

a) 高濁度時観測

観測は、融雪期後半にあたる2012年5月15日、夏季出水期である同年8月23日の計2回行った。動力船にADCP (RD Instrument Workhorse 600kHz) を取り付けて曳航観測

を行うとともに、貯水池内の複数地点で多項目水質計 (JFEアレック Compact-CTD) を用いて水温・濁度鉛直分布計測 (0.1m間隔) を行った。

b) 秋季連続観測

図-1ダム上流地点において、ADCP2基 (RD Instrument Workhorse 1200kHz) をそれぞれ水面から下向き及び底面から上向きに設置し、1分間隔で連続観測を行った。観測期間は、湖底に設置したADCPは2013年10月10日から同年10月17日までの約1週間、水面に設置したADCPは10月10日から10月28日までの約3週間である。観測期間中は概ね1週間に1回、多項目水質計 (JFEアレック Compact-CTD) を用いてADCP設置地点の水温、濁度鉛直分布を0.1m間隔で測定した。

4. 濁度推定手法

ADCPでは各層の流向流速測定と同時に、トランスデューサー (ADCP先端の超音波発射部) から発射された超音波が懸濁物に反射する強度 (反射強度) を計測している。反射強度は懸濁物の濃度に比例することが知られるが、一般に超音波は水中伝搬中に減衰を生じる。そのため、懸濁物濃度と反射強度の相関は超音波の水中伝搬を考慮した以下のソナー方程式により表現される³⁾。

$$\log_{10} C = S(K_c I + 20 \log_{10} r + 2\alpha r) + K_s \quad (1)$$

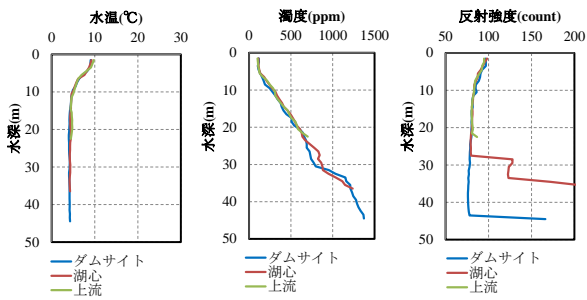
ここでC: 濁質濃度 (ppm)、S: 後方散乱係数、 K_c : ADCPの反射強度(count)を音圧(dB)に変化する定数、I: ADCP反射強度(count)、r: ADCPトランスデューサーからの距離(m)、 α : 超音波の水中伝搬による減衰係数、 K_s : 機器による定数である。

K_s は既往研究により、0.43~0.45程度の間をとるとされており⁴⁾、本研究では0.43を用いる。減衰係数 α は、河川や湖沼での研究事例では実測値を良好に再現できる値として1~6程度の値を与えることが多い²⁾。本研究でも減衰係数 α を0~6まで複数設定し、最も実測濁度を再現できる値を採用した。ADCPを表層から下向きに観測 (高濁度時観測及び秋季連続観測のうち表層設置) の場合は $\alpha = 1$ 、湖底から上向きに観測 (秋季連続観測のうち湖底設置) の場合は $\alpha = 0$ とした。

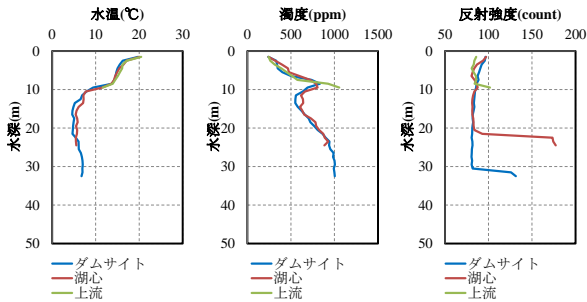
後方散乱係数S、機器による定数 K_s は観測結果をもとに設定が必要である。本研究は、以下の手順で算出した・後方散乱強度dB'を式(2)から算出する。

$$dB' = K_c I + 20 \log_{10} r + 2\alpha r \quad (2)$$

・多項目水質計で測定した実測濁度の常用対数 $\log_{10} C$ と後方散乱強度dB'の線形回帰分析を行う。得られた線形回帰式の傾きをS、切片を K_s に設定する。

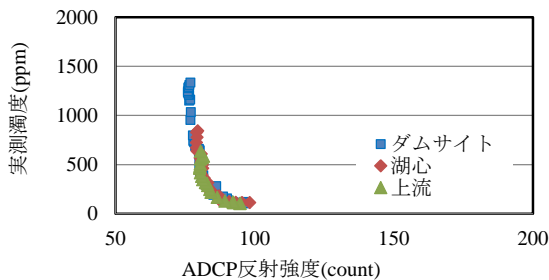


(a) 5月16日

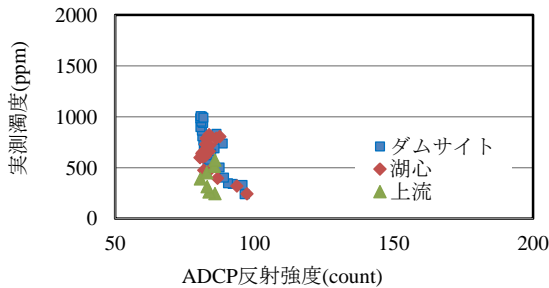


(b) 8月23日

図-3 水温・濁度・反射強度鉛直分布（高濁度時観測）



(a) 5月16日



(b) 8月23日

図-4 ADCP 反射強度と濁度の相関（高濁度時観測）

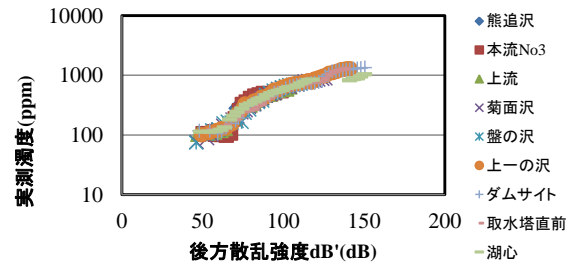
5. 結果及び考察

5.1 高濁度時観測

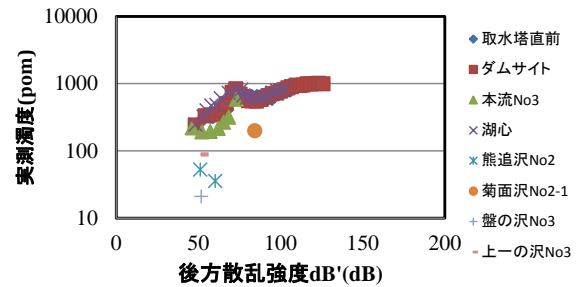
a) 現地水質・ADCP観測結果

図-3は、高濁度時観測による各観測点の水温、濁度、ADCP反射強度の鉛直分布を示している。

5月の観測結果をみると、濁度は表層から下層に向けて単調増加している。水温は表層近傍は10℃だが、下層

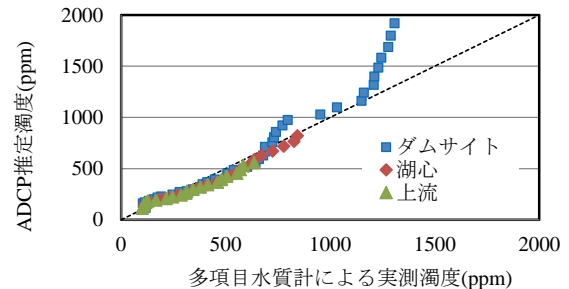


(a) 5月16日

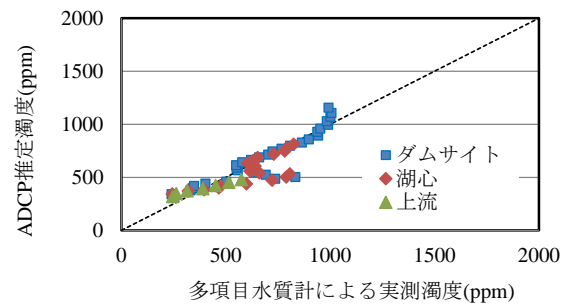


(b) 8月23日

図-5 実測濁度と散乱強度 dB' の相関（高濁度時）



(a) 5月16日



(b) 8月23日

図-6 実測濁度と推定濁度の比較（高濁度時）

に向かって水温は低下し、水深10m以深では概ね4℃前後で一様となる。ADCP反射強度は、表層付近で100countであり、下層に向かい徐々に低下する。湖心で水深28m以深で反射強度が急増しているが、原因は不明である。なお観測地点による水温、濁度、反射強度の鉛直分布形には大きな差はみられない。

8月の観測結果をみると、濁度は表層から下層に向けて一旦増加し水面下約8~10mで極大値をとったのち、いったん低下する。その後再び下層に向かうに従い、濁度は増加していく。水温は表層部は20℃を超えているが、

水深8～10m付近で成層が形成され、15m以深は概ね5℃程度となっている。

b) ADCPからの濁度推定

図-4はダム貯水池内のうち代表的な3地点（ダムサイト、湖心、上流）におけるADCP反射強度と濁度実測値の比較である。濁度上昇とともに、反射強度が指数関数的に減衰する傾向がみられる。5月の観測時はすべての観測地点の反射強度と濁度の相関が1つの式で表現できそうである。一方、8月の観測結果はダムサイト・湖心は同一の関係式上に並びそうだが、上流地点は異なる関係式になりそうである。この原因として、いくつかの因子が推測される。例えばダム貯水池の水深の違い（5月は約30mだが、8月は約15mまで低下）、河川からの流入濁質性状（粒径等）の影響などが考えられるが、これらは今後の検討課題である。

図-5に式(2)で算出した後方散乱強度 dB' と実測濁度（対数値）の相関を示す。5月、8月ともに dB' と実測濁度には全体として正の相関がみられる。式(1)による濁度推定の精度は、複数の観測地点の dB' と実測濁度が同一直線上に並ぶほど、再現性がよい結果となる。

5月観測結果をみると、ダムサイト・湖心のほか、流入河川部に当たる上部や各沢の観測地点も、 dB' と実測濁度は概ね1つの指数関数式で表現できそうである。8月はダムサイト・湖心といった水深の大きい観測地点では、 dB' と実測濁度は1つの関数式で表現できそうである。一方、8月の各沢や上流部での dB' と実測濁度の相関はこれらとは異なり、1つの関数で表現できない。これは5月は水位が高い状態であり、沢も含めて水深が大きいのに対し、8月は水位が低く、沢や上流部では水深が小さく、ダム湖水と濁質性状が異なる流入河川水の影響が観測結果に反映されていることが原因と推測される。

以上の結果から、実測濁度と dB' の関係式は、5月についてはダムサイト・湖心・上流の3地点の観測結果から式(3a)で、8月についてはダムサイト・湖心の観測結果から(3b)のように導出した。

$$\log_{10} C = 0.0122dB' + 1.48 \quad (R^2 = 0.937) \quad (3a)$$

$$\log_{10} C = 0.0068dB' + 2.22 \quad (R^2 = 0.746) \quad (3b)$$

図-6は式(3a)、(3b)から算出した濁度推定値である。なお推定精度検証のため、濁度実測値と比較している。5月において実測濁度が1200ppm以上では過大評価となっているが、概ね実測濁度と推定濁度は一致している。すなわちダム湖内で水深が十分大きい地点では、ADCPによる曳航観測と較正用の濁度実測鉛直分布から、式(1)により季節別に濁度を面的に推定可能なことが示された。

なお1200ppm以上の高濁度時で推定濁度が過大評価と

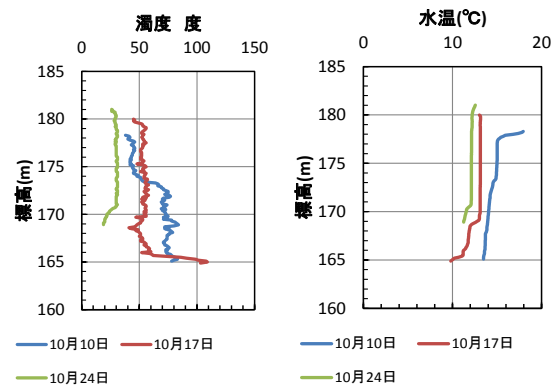


図-7 水温・濁度・反射強度鉛直分布（秋季連続観測）

なること、水位低下時に流入河川部で再現性が低い点については、次年度以降もデータ集積を行い、原因解明と課題解決を進めたい。

5.2 秋季連続観測

a) 現地水質・ADCP観測結果

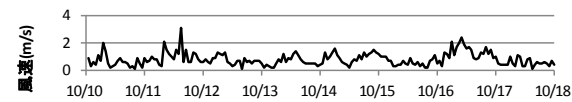
図-7は観測期間中の水温、濁度、ADCP反射強度（表層設置、下層設置）の鉛直分布である。観測開始時である10月10日は水温は15℃前後である。濁度は表層では50ppmでほぼ一様であり、水温低下が始まる標高173m以深では75ppmでほぼ一様となっている。10月17日の濁度は湖底近傍以外は50ppmでほぼ一様である。湖底近傍で濁度は100ppmに上昇し、水温も底層で低下している。この底面近傍の水質の差は、前日までの降雨とそれによる流入の影響が示唆される。10月24日は、水温は若干低下するとともに鉛直方向にほぼ一様であり、濁度も全層で20ppm程度まで低下している。全体として、濁度は鉛直方向に対する変化はあまり大きくなく、一様な分布が多い。

図-8は、10月10日から17日までの表層及び下層設置ADCPによる反射強度鉛直分布の観測データである。ADCP観測結果に影響を及ぼす因子として、現地風速、ダム流域の降雨量、ダムへの流入量が考えられるため、各データも同時に掲載し、考察に用いる。

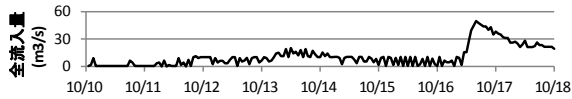
図-8より、表層ADCPでは機器から12～13m離れた層から下層側で、底面の影響による反射強度の乱れが生じている。また下層設置ADCPでも、機器から12～13m離れた層から上層側で、水面からの影響による反射強度の乱れが生じている。これら境界面の影響を受ける層のデータは、濁度推定のための回帰式作成から除外した。

図-8より、反射強度は表層、下層ADCPともに、ADCPの近傍では高い値を示し、ADCPから離れるに従い減衰する傾向にある。ゆえに、反射強度の水深方向の分布形は表層ADCPと下層ADCPでは逆になる。

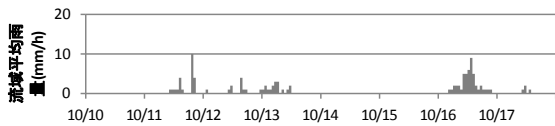
反射強度の時間変化をみると、12日午後と16日に特徴的な変化がみられる。表層設置ADCPでは、12日午後



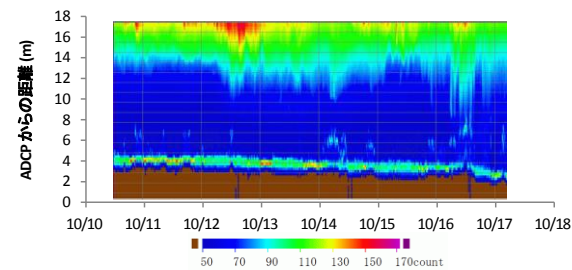
(a) ダムサイト風速 (毎時平均)



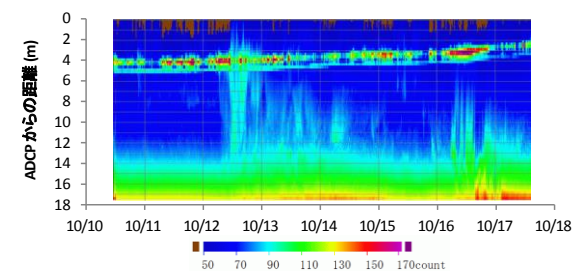
(b) 全流入量



(c) 流域平均雨量



(e) 表層設置 ADCP による反射強度 (count)

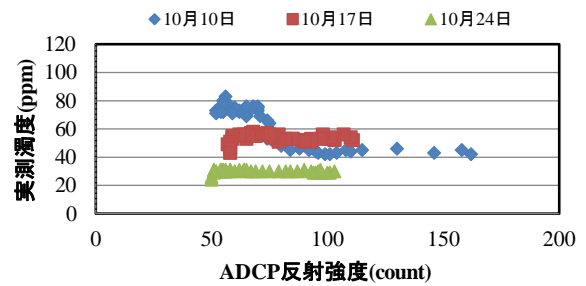


(f) 下層設置 ADCP による反射強度 (count)

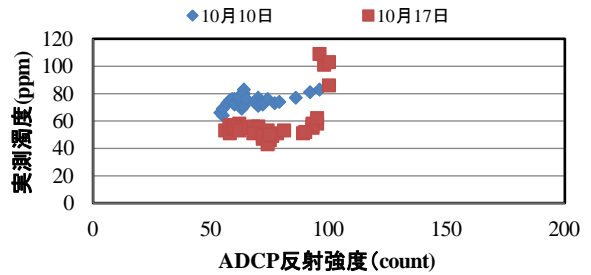
図-8 2013年10月10～17日のADCP観測値・ダム諸量

表層近傍で反射強度が急激に増加している。また16日午後にも反射強度が比較的深い層まで増加している。この時の下層設置ADCPの反射強度変化をみると、12日午後には表層から中層部にわたって反射強度が増加している。また16日午後には中層から下層部の反射強度が増加している。すなわち、表層と下層では反射強度の変化が生じるタイミングは同じだが、変化が顕著に生じる深度が両ケースでは異なっている。

反射強度の時間変化が生じた原因であるが、16日の変化は、ダム流域の降雨による流入量増加が同時に確認でき、流入が影響を及ぼしたためと考えられる。一方、12日午後の変化であるが、ダム流入量がわずかに増加したが、16日に比べるとその規模は非常に小さい。風速の影響だが、12日の反射強度増加時はむしろ風速が小さい時

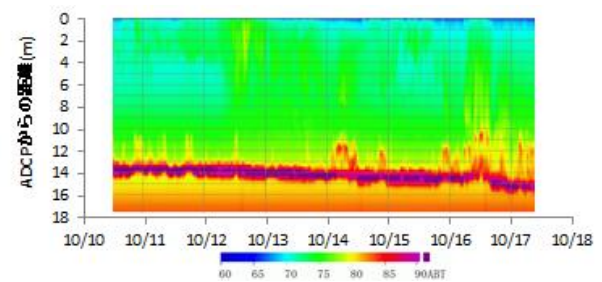


(a) 表層設置 ADCP

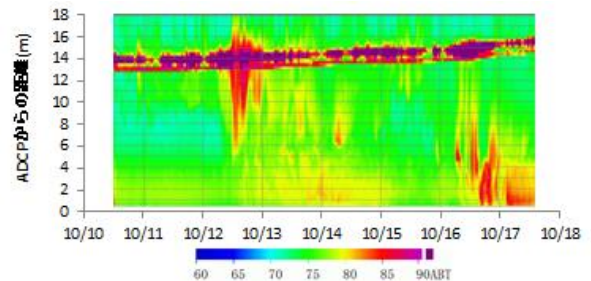


(b) 底層設置 ADCP

図-9 ADCP 反射強度と濁度の相関 (秋季連続観測)



(a) 表層 ADCP



(b) 底層 ADCP

図-10 濁度連続推定結果 (秋季連続観測)

期に当たるため、風による影響も考えにくい。

このような非降雨時やダム流入の影響がない場合に反射強度の変動が大きい場合、濁度再現性にも影響する。今回の研究では反射強度の変化と濁度変動の関係を把握できなかったため、反射強度の変動特性や原因把握、実測濁度の変動との相関を検討していく予定である。

b) ADCPからの濁度推定

図-9に10月10日、17日、24日の表層及び下層設置ADCPの反射強度と、多項目水質計による実測濁度の関係を示す。表層ADCPによる結果をみると、10月10日の

観測値では、高濁度時(図-4)と同じく、濁度と反射強度には指数関数的な相関がみられるが、他の観測日ではこのような傾向はみられず、反射強度に関わらず濁度は一様である。底層設置ADCPでは、10月10日は緩やかながら反射強度と濁度に正の相関がうかがえるが、17日は反射強度と濁度の相関はみられず、反射強度に関わらず濁度は一様となる。

式(1)による濁度推定手法は、濁度が鉛直方向に一様となる場合には相関式が作成できないので不適である。そこで、秋季連続観測時の濁度推定対象期間は、10月10日から17日までの1週間とし、また10月10日の観測結果をもとに、表層ADCPは式(4a)、下層ADCPは式(4b)に示す換算式で濁度連続推定を行うこととした。

$$\log_{10} C = 0.0027dB' + 1.70 \quad (R^2 = 0.127) \quad (4a)$$

$$\log_{10} C = 0.0053dB' + 1.61 \quad (R^2 = 0.283) \quad (4b)$$

図-10は10月10日から17日までの、表層・下層設置ADCPによる濁度推定結果である。いずれの観測結果ともに10月16日~17日にかけて底層部の濁度上昇傾向を示しており、降雨やダム流入量の増加による影響とみられる現象を捉えている。12日の表層部で濁度推定値は上昇しているが、これは反射強度の上昇に応じたものであり、実際にこのような現象が生じたかは不明である。

今回は2基のADCPを表層から下向き、底層から上向きで同時計測し、どちらの手法がより現地現象を精度よく観測できるかを比較することを試みた。しかし式(4a)、(4b)の相関式の決定係数がいずれも小さく、各手法の再現性自体、不十分な結果となった。これは、濁度推定の回帰式を作成するために収集した濁度の変動幅が小さいことが主な原因である。連続観測時は、採水のほかに、自記濁度計等により、より広いレンジで実測濁度を収集することを試みたい。

6. まとめ

本研究ではADCPから発射される超音波反射強度を用い、濁度の時空間変化の推定を行った。以下に得られた主な結果を示す。

(1)融雪期及び夏季出水時などの高濁度時において、ADCP曳航観測による反射強度データから、濁度鉛直分

布の空間分布を推定した。水深が十分に大きい箇所では観測期に応じた較正式により、濁度鉛直分布を精度よく推定可能であり、高濁度時の空間的な濁度把握を効率よく把握可能である。

(2)ADCP定点連続観測により、濁度鉛直分布の連続観測を行った。その結果、出水等による濁度変動現象を捉える可能性は示すことができた。ただし今回の研究では収集した実測濁度のレンジが狭いため、濁度推定式の精度が十分でなく、導出した濁度の再現性は十分検証できなかった。

今後の課題は以下のとおりである。

- ・高濁度時は、1000ppmを超過する濁度発生時の濁度推定精度の向上を図る。また水位低下時の流入河川水が濁度に面的に与える影響を良好に再現できるよう、データ収集を進める。

- ・連続観測では、較正用の濁度の収集レンジをより広い範囲に広げて濁度推定式の再現性を向上させるとともに、表層設置と下層設置でどちらがより現地現象を再現できるか、分析を進める。

謝辞：ADCPによる現地観測、濁度推定にあたり、(株) 福田水文センターの橋場氏ならびに(株) ハイドロシステム開発の橋田氏からは、有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば横山勝英, 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, 1411-1416, 2011
- 2) 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, 55-60, 2008
- 3) 橋田 隆史, 岡田 将治, 新井 励, 熊田 康邦: ADCPを用いた新しい濁度観測システムの開発, 土木学会第61回年次学術講演会, 2-220, 2006
- 4) Kim, Y. H., Voulgaris, G.,: Estimation Of Suspended Sediment Concentration In Estuarine Environments Using Acoustic Backscatter From An ADCP, Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments 2003, 2003
- 5) 西敬浩, 郷原慎一郎, Charles Lemckert, 外村隆臣, 山本浩一, 濱田孝治, 山田文彦: ラグランジュ・ブイを用いた潮間帯での渦動粘性係数・渦拡散係数の時空間分布推定: 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol. 66, No.1, 1386-1390, 2010