ADCPを用いた実河川・湖沼の 濁度時空間変化の推定 SPACE-TIME DISTRIBITION OF TURBIDITY WITH ADCP IN RIVERS AND LAKES

横山洋¹・渡邉和好²・杉原幸樹¹・橋場雅弘³ Hiroshi YOKOYAMA, Kazuyoshi WATANABE, Kouki SUGIHARA and Masahiro HASHIBA

¹正会員 博(工) (独) 土木研究所寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)
²正会員(独) 土木研究所寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)
³正会員 (株) 福田水文センター(〒062-8602 〒001-0024 札幌市北区北24条西15-2-5)

We have studied a method to understand the continuous temporal and spatial distribution of turbidity based on the acoustic backscatter obtained by ADCP observation in lakes and rivers. We examined the correlation of turbidity and backscatter intensity by towing observation and fixed-point observation in rivers and lakes. First, we showed improvement of accuracy in high-turbidity estimation due to use sonar equation by considering the attenuation of backscattering strength. Such as emitting depend on distance from sencer, the absorption of sound by water and the absorption of sound according to the turbidity. Next, we confirmed vertical distribution of turbidity estimation in the dam lake. We ware reproduced turbidity in high-turbidity layer over some hundred ppm at medium-to-lower depth of center lake, but in part of river inflow and surface of center lake where is low-turbidity below 100 ppm, the accuracy of turbidity reproduction was lower than high-turbidity case.

Key Words: Acoustic Backscatter, Sonar Equation, attenuation coefficients

1. はじめに

河道は流水とともに土砂や栄養塩等,様々な物質が流 下する.河川上流から供給される浮遊土砂は、中・下流 域において河道内に堆積するほか、湖沼や河口域、沿岸 の地形や底質形成にも大きく影響する.また湖沼等の滞 留域では、流入した浮遊土砂による濁水長期化のほか、 浅い水域における堆積土砂の巻上げ現象等、濁質の動態 把握には時間・空間変化を考慮する必要がある.

河川・湖沼の濁質の動態は流域全体の水環境に大きく 影響しており、濁度の時空間分布の連続計測は、土砂輸 送量の算出等、河川環境の把握において重要な基礎デー タである.しかし濁度の時空間分布の把握にあたり、採 水や濁度計による点での濁度計測は膨大な労力を要し、 実施が困難である.

近年、河川や湖沼での流速・流量観測において、超音 波流速計(ADCP)が多く用いられている.計測時に ADCPが発射する超音波が水中懸濁物に反射する際に得 られる反射強度データから、濁度の時空間分布を連続推 定する手法が数多く研究されている.川西ら¹⁾は,後方 散乱光式濁度計を併用して太田川河口域における懸濁物 の濃度や平均粒径の推定を行っている.豊田ら²⁾は,諏 訪湖を対象にADCPによる流速・濁度の同時観測を行い, 風による底質巻上げ機構を解明した.横山ら³⁾は筑後川 感潮域でADCPによる詳細な横断観測を行い,高濁度水 塊の河道内輸送状況や潮汐に応じた時間変化を把握して いる.新井ら⁴⁾は,濁度計による濁度鉛直分布計測値を 用い,機器特性の影響を受けにくい濁度推定法を提案し ている.

これらADCPによる河川・湖沼の濁度推定は、研究段 階では多くの事例がある.しかし実際の河川管理に用い るには、月~年単位での継続的な濁度変動、あるいは広 範囲の濁度空間分布の把握が必要とされる.そのような 条件下での濁度の推定精度、適用性とその限界の確認等 の検証が不十分で、実用化に向けて課題が残されている.

本研究では、実河川・湖沼でADCPによる出水時を含む連続観測ならびに広範囲での曳航観測を行い、現地適用を想定した時空間連続観測時の濁度推定精度を検証した.また得られた結果をもとに、実地に適用するに当

たっての課題と改善策を検討した.

2. 現地及び観測概要

ADCPにより濁度の時空間分布を連続的に推定する状況として、以下の2ケースを想定した.

・ある地点の濁度を継続的に算出するため、定点で ADCPを設置(定点連続観測)

・ある時間における濁度の空間分布を把握するため、 ADCPを船等で曳航して計測(曳航観測)

本研究では石狩川,天塩川においてADCP定点連続観 測を,桂沢ダム貯水池で曳航観測を実施した.以下に観 測箇所及び観測内容の概要を示す.

(1)石狩川(定点連続観測)

観測地点は、石狩川河口から27km上流の感潮区間に あたる石狩大橋右岸側である(図-1(a)).当該地点で は国土交通省によるADCP定点連続観測が行われており、 RD Instrument Workhorse Sentinel 1200kHzを河床から鉛直 上向きに設置している. ADCP設置地点の夏季平水時に おける水深は概ね4mである. ADCP計測の時間間隔は10 分、鉛直方向に0.25m間隔で計測している. 観測は通年 で行われているが、本研究では2009年8月~12月(期間 中最大SS濃度約50mg/L), 2013年3~4月(期間中最大 SS濃度約300mg/L)と観測結果を対象とした.

実測濁度は、投げ込み式多項目水質計(JFEアレック ASTD-687)及び採水分析値(国土交通省による採水結 果を含む)である.

(2)天塩川(定点連続観測)

観測地点は、天塩川河口から7.7km上流の塩水遡上区間にあたる河道内最深部である(図-1(b)). 石狩川と同様, ADCP(RD Instument Workhorse 1200kHz)を河床から鉛直上向きに設置した. 設置箇所の平水時水深は概ね6mであり、10分おきに鉛直方向に0.2m間隔で計測している. 観測期間は2011年7月22日から同年11月15日までであり、途中9月4日から10月1日にかけて出水による土砂堆積が原因とみられる約1か月間の欠測が生じた.

濁度較正用の実測濁度は,T.P.-2.5m(概ね5割水深) に自記濁度計(JFEアレックCompact-CLW)を設置し, ADCP計測期間中の濁度を10分間隔で連続計測した.

(3) 桂沢ダム貯水池(曳航観測)

桂沢ダムは、石狩川支川の幾春別川にあり、融雪期及 び夏季出水期には高濃度濁水が流入する. 図-1(c)に本 研究での観測地点ならびに経路を示す. 観測ではダムサ イトのほか、河川流入部も網羅するように曳航経路を設 定した. 各地点での水深はダム貯水位変動に応じて変化 し、最も深いダムサイトでは概ね25~45mで推移してい



(C)住バタム 図-1 調査箇所図 ヨーレルロンマテレカン西ゴランカたお見せのマラルが

(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)

る.また河川流入部に位置する各観測点は、出水時は 20m近い水深がある一方、渇水時は3~5m程度と浅くな ることもみられた.

使用したADCPはRD Instrument Workhorse Sentinel 600kHzである. 観測は2011年に1回(11月23日), 2012 年に2回(5月15日, 8月23日), 2013年に2回(8月, 11 月)の計5回行った. FRP船にADCP(RD Instrument Workhorse 600kHz)を取り付け,図-1(c)に示す経路で水 面から下向きにADCP曳航観測を行った. またダムサイ トのほか,河川流入部(5か所)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. 湖内濁度の最大値は,2012年5 月のダムサイトで約1500ppm(多項目水質計による観測 値)である.

3. ADCPによる濁度推定方法

ADCPでは鉛直方向に層別に3次元流向流速とともに、 超音波が水中懸濁物に反射する強度(反射強度)が取得 できる. 濁度と超音波の反射強度には比例関係が成り立 つとされる.ただしADCPから発射された超音波は水中 伝搬距離に応じた損失(発散損失)及び水中での音波吸 収による損失(吸収損失)が生じる.また数100ppmの 高濁度では濁度に応じた吸収損失を加味することが横山 ら⁵により報告されている.濁度算出では、反射強度か らこれらの損失を考慮した後方散乱強度に変換するソ ナー方程式により、後方散乱強度と濁度の相関を検討す ることとなる.ソナー方程式を用いた濁度推定にはいく つかの手法があり、本研究でも複数の手法で実施してき た^{6,7)}が、本研究では橘田ら⁸が提案するソナー方程式に おいて、横山ら⁵が提案する濁度による吸収損失を考慮 し、式(1)、式(2)で濁度推定を行う.

$$\log_{10} C = S \times dB' + K_s \tag{1}$$

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

ここでC: 濁度 (ppm), S: 後方散乱係数, K_s : 機器 による定数, dB': 後方散乱強度(dB), K_c : ADCPの反射 強度(count)を音圧(dB)に変化する定数(dB/count), I: 反 射強度(count), r: 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吸収係数(dB/m), β : 濁度に よる損失係数(dB/m)である.

濁度推定の手順は、式(2)により反射強度Iから後方散 乱強度dB'を算出する.次いでdB'と濁度(常用対数)の 間で回帰式を作成し、式(1)から推定濁度を算出する.

Keは既往研究により0.43~0.45程度の間をとる^{9),10)}とさ れており、本研究では0.43を用いる. 吸収係数αは、水 中伝搬する超音波の減衰に影響する係数であり、様々な 係数値が検討されてきた. Thorpら¹¹⁾は水温と塩分からα を決定する経験式を提案しているほか,Kimら⁹はSS最 大濃度が数100mg/Lとなる水域での観測結果をもとに、 *α*=0.48を与えている. また豊田ら²⁾は諏訪湖を対象とし て、αを1~6まで変化させ、実測値と最も適合するαを 設定する方法を示している、本研究では、ADCP周波数 が1200kHzの場合は、今回の現地濁度条件に近いKimら が算出したa=0.48を、周波数600kHzの場合は真水の場合 のThorpの式からa=0.11を採用する. 濁度による吸収係 数8は、横山らは多摩川での観測結果より8=0.004を提案 している.本研究ではこの結果をもとにβを現地濁度に 適合する値に調整し、両河川ではβ=0.005、湖沼では β=0.002を設定し、推定濁度と実測濁度の差を比較した. なお、式(2)を水中での吸収に関する項をまとめて整理す ると以下の式(3)のとおりであり、水の吸収係数が濁度増 加に伴い見かけ上増加するのと同じこととなる.

$$dB' = K_c I + 20 \log_{10} r + 2(\alpha + \beta C)r \qquad (3)$$

4. 濁度推定結果及び考察

(1) 定点連続観測(天塩川)

図-2は2011年8月26日から10月15日までの濁度(自記



図-3 濁度による後方散乱強度減衰を考慮した推定濁度
(天塩川:2011年8月26日~10月15日)

濁度計による時間平均値)と、式(2)から算出したADCP 後方散乱強度dBの関係を示したものである.濁度上昇 による超音波吸収を考慮することによる精度向上を検証 するため、濁度に応じた超音波吸収を考慮しない場合 (β =0)と考慮した場合(β =0.005)の場合を比較してい る.それぞれの β に対し、実測値から得られた濁度とdB' の回帰式は式(3a), (3b)である.得られた回帰式は図-2中 にも示した.

 $\log_{10} C = 0.0476 \times dB' - 2.31 \ (R^2 = 0.741): \beta = 0$ (4a)

 $\log_{10} C = 0.0424 \times dB' - 2.02 \ (R^2 = 0.745) : \beta = 0.005 \ (4b)$

βがいずれの場合も、超音波濁度とdB'に正の相関がみられる.回帰式に対する実測値のばらつきは、実測濁度が100ppm以上で顕著な差がみられる. β =0では回帰式上にプロットされないデータが多い一方、 β =0.005では実測値は回帰式上にほぼプロットされている.これは β =0.005では β =0の場合に比べ、高濁度下では濁度変化に対するdB'の変化幅が広いためである.

図-3は、式(4a)、(4b)から濁度推定を行った結果である. 濁度による超音波減衰を考慮しないβ=0では、実測濁度 が150ppm以上では推定値は実測値に対して過少評価と なっている.一方、濁度による減衰を考慮したβ=0.005 はほぼすべての濁度レンジで推定濁度が実測値をほぼ再 現できている.これは図-2にも示すとおり、β=0.005は 高濁度域でdB'の変化幅が大きく、回帰式上にもよく追 従しているためである.

以上から, 高濁度域での超音波吸収減衰を考慮するこ





とで、高濁度域で濁度の再現精度は向上する可能性が示 された.一方50ppm以下の低濁度域ではβの設定に関係 なく、再現性はほとんど変化していない.

(2) 定点連続観測(石狩川)

石狩川では複数年にわたりADCPによる定点連続観測 が行われている.そこで石狩川での定期採水によるSSと そのときに得られたADCP観測値をもとに、本手法で複 数年の長期間SS変化の推定値とその精度について検証を 行う.

図-4は2009年7月から2013年4月まで採水によるSS濃度 と,採水水深に最も近い層のADCP観測反射強度(毎時 平均)から式(1),(2)で算出した後方散乱強度dB'との関 係をプロットしたものである.国土交通省による定期採 水は出水による高濁度時は行っておらず,SS最大値が 100mg/L,データの大半は50mg/L以下である.そこで 2013年4月に融雪出水ピークを狙い採水を行い、SS濃度 200mg/L以降の3データを追加した.βは天塩川と同様, β=0.01としている.それぞれのβに対し,実測値から得 られた濁度とdB'の回帰式を作成し,濁度推定を行った. 得られた式はそれぞれ(5a), (5b)である.得られた回帰式 は図-4中に示した.

 $\log_{10} C = 0.0457 \times dB' - 2.64 \ (R^2 = 0.481): \beta = 0$ (5a)

 $\log_{10} C = 0.0414 \times dB' - 2.44 \ (R^2 = 0.452): \beta = 0.005 \ (5b)$

SS濃度とdB'の間には天塩川と同様、いずれの β でも全体として正の相関がみられる. β =0.005では β =0の場合に比べ、高濁度下では濁度変化に対するdB'の変化幅が広い.しかし回帰式に対するdB'の誤差は、いずれの β でもSSが100mg/L以上の高濃度で大きい.

図-5は式(5a)及び式(5b)から推定 した石狩川におけ る濁度推定値である. β=0.005の場合は, β=0場合に比べ てSSが100mg/L以上の場合で,実測値の再現精度はやや 向上している.ただし天塩川の場合と異なり,β=0.005 の場合でもSSが100mg/L以上では再現性は低い.

濁度の再現性が低い原因として、年別でdB'とSSの関係が異なることが考えられる.図-6に示すとおり、年別でもdB'とSSには正の相関があるが、年別でみるとプロットされる領域にはばらつきがある.またデータはSSが50mg/L以下に集中し、100mg/L以上の高濁度時採水データは少ない.天塩川の事例からも、高濁度時のデータが多いとSS濃度とdB'の相関はよくなることが期待できる.今後も出水時の採水データを追加取得することで、回帰式の精度向上の可能性がある.

(3) 曳航観測(桂沢ダム)

桂沢ダム貯水池で行ったADCP曳航観測から得られる 観測データをもとに、濁度の空間分布を推定する. なお 桂沢ダムでは、2011年から2013年にかけて計5回観測を 行っているが、湖内全域で濁度がほぼ一定であった2013 年8月の観測は検討対象外とする.

図-7はダムサイトと河川流入部に分けて、後方散乱強 度dB'と実測濁度の相関を示したものである。ダムサイ トでは、実測濁度が200pmを境にdB'と濁度の相関が大 きく変化している。濁度200ppm以上ではdB'と濁度には 明瞭に正の相関がみられる。濁度200ppm以下ではdB'と 濁度に必ずしも正の相関がみられない場合もあり、 100ppm以下では両者の相関はさらに不明瞭である。

河川流入部では, dB'と濁度の相関がダムサイトとは 異なることが多い. ダムサイトではdB'と濁度に正の相 関がみられるが,河川流入部はdB'と濁度の相関がみら れないことが多い. 濁度は変化する一方, dB'はほとん ど変化をしていない. 河川流入部とダムサイトでdB'と 濁度の相関がほぼ同一の式となる2012年5月は,融雪期 に当たり高濃度濁質が流入していること,河川流入部の 水深が10m以上と深いことが原因と考えられた. すなわ ち河川からの流入濁度が高くなく,貯水池水位が低い状 態では,河川流入部のADCP後方散乱強度からの濁度推 定は誤差が大きくなることが示唆される,



なおダムサイトで100ppm以下となるのは表層部が大 半であり、河川流入部も水深は数m程度と浅いことが多 い. 超音波のトランスデューサー近傍では、超音波の減 衰特性がその他の領域と異なり、その補正もより複雑に なる⁸. 本研究ではより少ないパラメータで濁度推定を 行うことが主旨であり、表層部の補正は本研究中では対 象としない.

図-8はダムサイトでの観測から得られた, 濁度 200pm以上でのdB'と濁度の相関から式(1), (2)に示す回 帰式を作成し, ダム湖の全地点に適用した場合の濁度推 定結果である.比較検討では, ダムサイトと河川流入部 のdB'と濁度の相関に特徴的な差があるケースとして, 2012年5月, 8月, 2013年6月の3ケースを選定した.

図-8(a)は2012年5月の濁度推定結果である.500~ 1400ppmの範囲内で推定濁度と実測濁度はほぼ合致している.1200ppm以上で推定濁度と実測濁度に差が生じているが、これは1200ppm前後でダムサイト濁度の鉛直分布に変曲点が存在するためである.500ppm以下では推定濁度の精度は著しく低下する.ダムサイトの実測濁度の最低値(表層)が約500ppmであることから、回帰式の適用範囲外であることがその原因と推測される.これらの問題は、濁度の変曲点で回帰式の係数を変えることで濁度推定の向上は可能であるが、本研究の主旨は限られた地点の濁度鉛直分布から広域の濁度推定を行う手法の適用性検討のため、全領域を同一回帰式で推定した.



図-9 ダムサイトでの濁度鉛直分布比較

図-8(b)は2012年8月の濁度推定結果である.ダムサイトの推定濁度は概ね実測濁度と合致するが、河川流入部の推定濁度は実測濁度が100ppm以下では過大評価となっている.これは2012年5月と同様、ダムサイトの実測濁度の最低値(表層)が約100ppmであることから、回帰式の適用範囲外であることがその原因と推測される.

図-8(c)は2013年6月の濁度推定結果である.実測濁度 が100ppm以上では,推定濁度は実測値と概ね適合して いる.一方濁度100ppm以下では,推定濁度は実測値と 異なる.ダムサイト表層の最低濁度は20ppmであり,表 層の低濁度付近の再現精度は低い. 以上から、濁度が200ppm以上でかつ濁度の鉛直変化 が明瞭なケースでは、ダム中心部の濁度は概ね良好に推 定できた.一方、濁度が200ppm以下では濁度推定精度 は低く、特に100ppm以下では実測値と比較して誤差が 大きい結果となった.

図-9は2012年5月の濁度鉛直分布の時空間分布を推定 したものである.ダムサイトから浅い層まで約6kmの濁 度変化を可視化している.湖底付近の高濁度層の滞留状 況や,空間的な濁度変化等,今後3次元的に推定してい くことが期待される.

(4) 濁度推定の課題

ここまで述べてきたADCPの後方散乱強度から式(1)に よる手法で実測濁度から濁度推定を行う方法では,適用 する場の濁度が時間的または空間的に幅広いレンジで変 化していることが精度確保に必要である.一方,桂沢ダ ム2013年8月観測では,実測濁度の値が一定のレンジに 集中し,後方散乱強度の変化に対して濁度変化が得られ ず,濁度推定自体が困難となった場合もあった.

実測濁度が200ppm以上では濁度と後方散乱強度のば らつきは小さく、濁度推定時にも誤差が小さくなる.一 方、実測濁度が100ppm以下では、濁度と後方散乱強度 の相関でばらつきが大きい.ゆえに低濁度時のみでなく、 100ppmレンジの高濁度時の濁度も含めて相関を検討す ることが必要である.

なお、今回は水中での音波吸収と濁度の関係を検証したため、式(3)中で実測濁度をもとに補正を行った。しかし実河川や湖沼での運用では濁度計測は鉛直方向に1層のみのことも多い。実際には式(3)の右辺第3項の係数に水中での吸収効果を全て加味した式(3)、の見かけ上の吸収係数α、の妥当な値を今後検討していく必要がある。

$$dB' = K_c I + 20 \log_{10} r + 2\alpha' r$$
 (3)'

適切な水中吸収係数ならびに濁度による吸収係数の変 化を分析は今後進めていきたい.

5. まとめ

本研究では、河川及びダム貯水池でADCP観測で得ら れた反射強度から濁度推定を行った.得られた成果を以 下にまとめる.

・濁度観測で得られたデータをもとに、濁度の時空間分 布を把握する手法を提案した.定点連続観測では、自記 濁度計を連続設置することで、洪水による濁度上昇時も 含めて精度よく濁度変遷を推定できた.また複数年の観 測でも、定期採水調査と出水時の濁度上昇時を不定期に とらえることで、濁度変動の全体的な動向をとらえるこ とができた.

・実測濁度が概ね100ppm以上の場合,ADCPの反射強度から算出した後方散乱強度と現地濁度には正の相関がみ

られた.一方,現地濁度が100ppm以下の場合,後方散 乱強度と実測濁度の相関はばらつきが大きくなり,濁度 推定精度も低下することが確認できた.

・濁度推定の元データとなる実測濁度は、濁度の時間・ 空間方向の変化を考慮し、幅広いレンジで計測しておく ことが必要なことを確認した.また取得した実測濁度の レンジ外を推定する場合は、精度が顕著に低下するケー スがあることに注意が必要である.

謝辞:本研究の実施に当たり,国土交通省北海道開発局 札幌開発建設部ならびに桂沢ダム管理支所より観測デー 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

- 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
- 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質濃度分布の推定, 応用測量論文集, Vol.19, pp.55-60, 2008
- 3) 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
- 4)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
- 5) 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, pp.937-942, 2001
- 6)横山洋,浜本聡: ADCPを用いた感潮域旧川における底質巻 上げ機構の検討,河川技術論文集第18巻,2012
- 7)横山洋,渡邊尚宏、矢部浩規,渡邉和好:超音波流速計による感潮河川・湖沼の濁度推定精度,寒地土木研究所月報723 号,pp.16-21,2013
- 8) 橘田 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
- 9) 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
- 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
- 11) Thorp, W.H.: Analytic description of the low frequency attenuation coefficient, J. Acoust. Soc. Am., 33, 334-340, 1961

(2014.4.3受付)