

汽水湖における濁度動態モニタリングに関する考察

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○横山 洋
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 道北支所 渡邊 尚宏
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 矢部 浩規

湖沼をはじめとした閉鎖性水域では、流入する濁質の動態把握が水質保全策の検討上重要である。本研究では汽水湖である網走湖を研究対象域として、超音波多層式流速計を用いた湖内の濁度動態モニタリングを行い、同手法の精度及び適用性を検討した。その結果、網走湖では水域の閉鎖性及び塩分濃度により、濁度再現精度に違いがあることを確認した。また流入濁質の湖内での輸送・拡散について数値シミュレーションにより予測し、出水時や平水時の濁度動態について検討を行った。

キーワード：汽水湖、濁度、モニタリング

1. はじめに

湖沼等の閉鎖性水域では、有機物や栄養塩類を多く含む底質が形成される。これらの汚濁負荷を多量に含む底質からは、風による巻上げあるいは溶出によって栄養塩類が湖水に再供給され、水質に大きく影響を及ぼすことが知られている¹⁾。ゆえに水質保全には底質環境の適切な管理が重要であり、底質の性状把握が必要となってくる。これら水質・底質性状を把握するためには、流入する懸濁物の沈積過程の把握が重要である。そのためには、濁度の時空間分布を把握することが基礎データとして不可欠である。

著者らは、閉鎖性水域・感潮域における流速と濁度鉛直分布データの同時取得技術の開発を目的として、超音波多層式流速計（以下、「ADCP」と呼ぶ）を用いた濁度の時空間分布推定を行ってきた²⁾。ADCPを用いた流速・濁度の同時推定は、濁度挙動に大きく影響を及ぼす流れ場の状況を同時に把握可能な手法として、河川^{3,4)}や湖沼⁵⁾、海域⁶⁾で数多く試みられている。

本研究は、汽水湖である網走湖の中でも閉鎖性の強い内湾域である女満別湾の濁質動態の特性把握を目指している。今年度は昨年度に引き続きADCP観測結果から濁度鉛直分布の時系列変化を算出して、濁度動態とその影響因子（流況・気象条件、観測位置）の関係を検討した。

また、出水時の流入河川水による濁質の湖内輸送や拡散状況、ならびに湾内への影響を推定するため、濁水流入予測計算を行い、その特性を検討した。

2. 現地概要

本研究で対象としている網走湖は網走川の河口から約7km上流に位置する、面積32.3km²、最大水深16.1mの汽水湖である¹⁾。網走湖の上流端で網走川の流入口付近に位置する女満別湾は、最深部で水深3m前後の浅い水域である。また、女満別湾は内湾のため、網走湖において閉鎖性の強い水域であり、栄養塩を多く含む底質が堆積し、湖内の水環境に影響を及ぼすことが懸念されている。

そこで網走湖内の水質・底質環境を把握するため、2011年及び2012年の2か年にかけて、湖内で定点連続観測（流速流向・水質）、移動観測（流速流向・水質）及を実施した。調査実施地点は図-1に示すとおりである。以下、実施内容の概略について示す。

(1) 定点連続観測

定点連続観測は、網走湖上流の内湾である女満別湾の入り口にあたるSt.A2で実施した。図-2に定点連続観測における観測機器の設置状況を示す。

ADCP（RD Instruments 製Workhorse Sentinel 1200kHz）を湖底より上向きに設置し、流速流向連続観測を行った。ADCPによる観測期間は、2011年6月30日～11月8日、2012年5月30日～10月31日である。設置地点の水深は平水時において概ね3mであった。

観測期間中は10分間隔でデータ収集（1分計測（60データ平均値）・9分休止）しており、鉛直方向測定間隔は0.2mである。

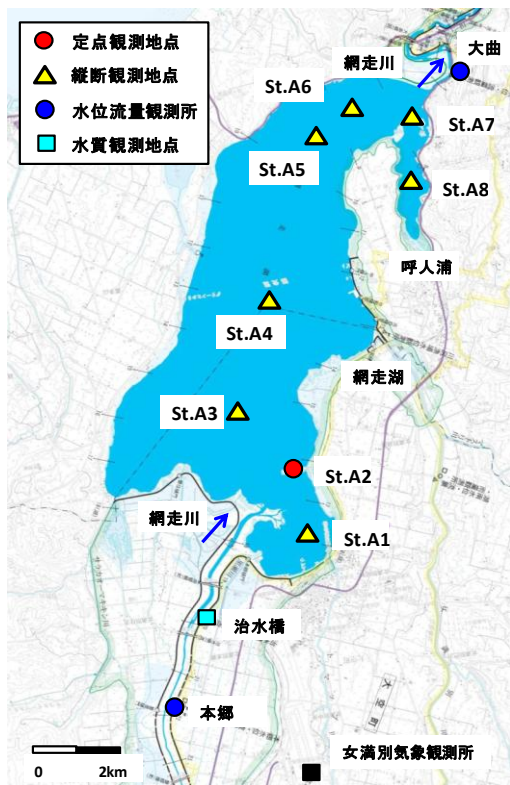


図-1 網走湖女満別湾調査位置

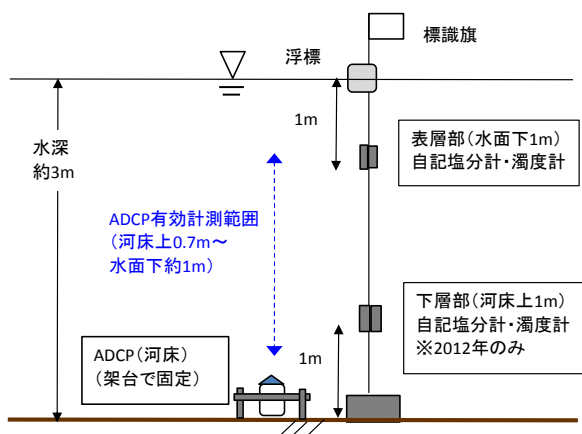


図-2 観測機器の設置状況

また計測地点の水質特性把握及び後述するADCP反射強度データからの濁度推定を目的として、ADCP設置期間中の水温・塩分（アレック電子Compact-CT）、濁度・クロロフィル（2011年：アレック電子製Compact-CLW、2012年：JFEアドバンテック製Infinity-CLW）の連続計測を行った。両観測機器は、2011年は水面下約1mの1層、2012年は水面下約1m及び河床上約1mの2層に設置した。

観測期間中には、2011年は概ね半月に1回、2012年は概ね2ヶ月に1回の頻度で、多項目水質計（JFEアレック製AAQ-1182）による水質鉛直観測を行い、現地水質の把握のほか、後述するADCPからの濁度算出のための較正データ取得を進めた。

(2)縦断観測

網走湖内全域での流動特性の把握ならびに濁度推定のためのデータ収集を目的として、縦断観測を行った。観測は、2011年10月15日・10月24日の計2回行っている。

観測では、作業船にADCP（RDI Workhorse sentinel 1200kHz）を下向きに設置している。観測は、網走湖上流端の女満別湾に位置するSt.A1を起点、下流部の呼人浦に位置するSt.A8を終点とし、概ね1ノット以下の低速で移動しながら観測した。ADCPでの測定層厚は鉛直方向に0.2m間隔とし、概ね10秒間隔でデータ取得を継続して行うように設定した。途中、St.A1～St.A8の計8地点においては、船を5～10分間程度ほぼ停止させ、その間に多項目水質計による水質鉛直観測（2011年：JFEアレック製AAQ-1182、2012年：ハイドロラボDS-5）を行った。

3. 濁度の時空間分布推定

(1)手法概要

まず、現地観測結果から濁度を算出し、現地での濁質の時空間変化を把握する手法の概要を説明する。

計測機器から水中に発射された超音波が水中懸濁物に反射することで得られる反射強度と懸濁物濃度の間には、一定の相関があることが知られている。代表的な相関はソナー方程式により記述され、前述した既往手法もこの方程式に基づいた分析が行われている³⁻⁶⁾。

観測によるADCPデータは、昨年度までの研究と同様、新井らの提案した濁度算定手法⁹⁾に基づいた専用ソフトウェア（ハイドロシステム開発：Visual ADCP Tools ver3）を用いて濁度算出を行った。具体的な手法は、橘田らによる報告⁸⁾を参照いただきたい。

(2)定点観測

次いで、女満別湾口であるSt.A2に設置したADCP観測データによる超音波濁度の算出結果を示し、考察を行う。

図-3は、St.A2に設置した2012年7月1日から31日までの1か月間におけるADCP観測結果から算出した超音波濁度である。図-3には現象考察のため、St.A2に最も近い気象庁観測所である女満別での風速風向⁹⁾、流入河川である網走川本郷地点の水位¹⁰⁾、ADCPによる水面下約1m、河床上約1mの流速流向、自記式濁度計による同深度での濁度観測結果も併せて示す。

図-3から、2012年7月には、期間内に顕著な濁度上昇が前半（6～8日）と後半（19～21日）の2回確認される。前半の濁度上昇は、その前日に本郷地点の水位が上昇していることから、出水による濁質流入と考えられる。一方、後半の濁度上昇では、本郷地区の水位は上昇していないこと、吹送距離の長い風向きである北風が2日にわたり継続していることから、風による底質の巻き上げが一因と推測される。また実測濁度をみると、濁度上昇時以

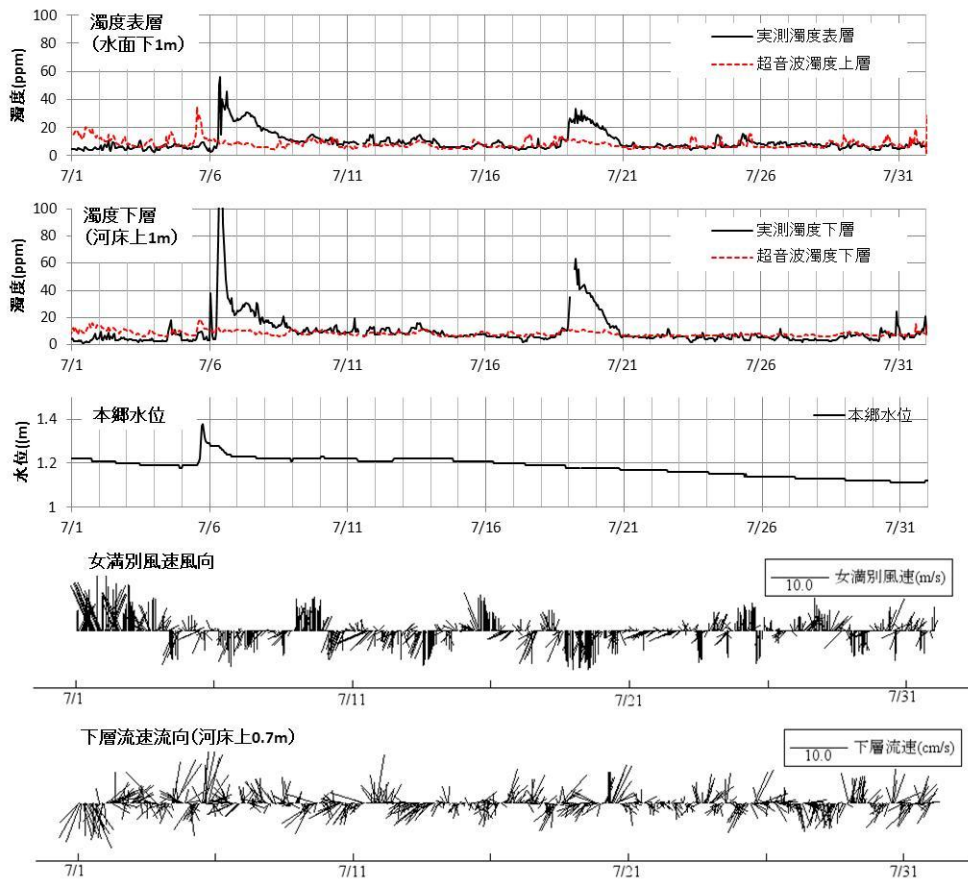


図-3 定点観測による超音波濁度算出結果 (2012年7月)

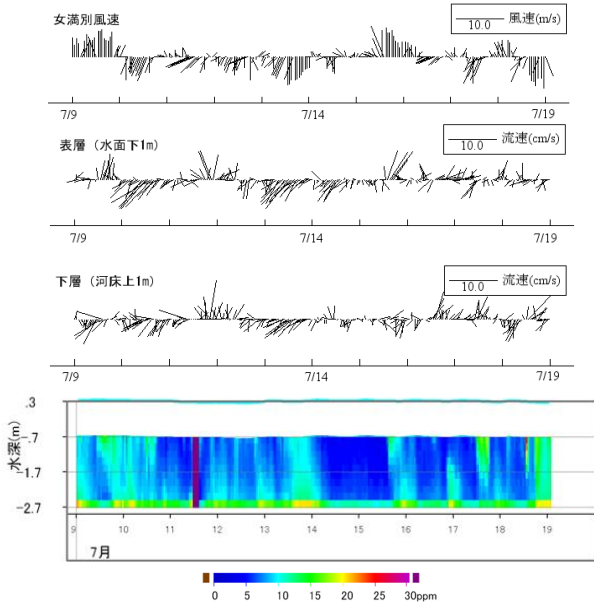


図-4 定点観測による超音波濁度の鉛直分布 (2012年7月11~18日)

外には表層と下層に大きな差はないことがわかる。

図-3をみると、7月の超音波濁度は、前述した2回の顕著な濁度上昇期間を除くと、ほぼ実測濁度と適合している。また超音波濁度は、低濁度時の実測値の変動に対し

でも良好に追従していることがわかる。

図-4は、2回の濁度上昇の合間にあたる7月9日から18日までの濁度鉛直分布を示したものである。7月14日から16日にかけては風速が小さいために流速も低減し、濁度が全層にわたって低下している。また7月10日、13日のように北向きの風が一定以上の風速を保ち1日以上継続している場合には、底面付近でも濁度が若干増加している。なお、正午から夕方にかけての数時間に表層部の濁度上昇がみられる日が散見されるが、これは表層部での藻類増殖による影響も可能性として考えられる。

一方、実測濁度が上昇している7月の超音波濁度の再現性は、十分ではない。昨年度も実測濁度が短期間に変動する場合には、超音波濁度は実測濁度をほとんど再現できておらず、今年度も同様の状況が確認された。

そこで、実測濁度が急激に変化する期間中における超音波濁度の算出の元データとなるADCP反射強度の特性について、改めて検証した。

図-5は、実測濁度の急速な変動期である7月6~7日及び7月19~20日のADCP反射強度と濁度連続観測から得られた実測濁度をプロットしたものである。両ケースについて反射強度と実測濁度の相関をみると、その特徴には差がみられることがわかる。

まず風による巻上げで濁度が上昇していると推測される7月19~20日については、表層及び下層ともに反射強

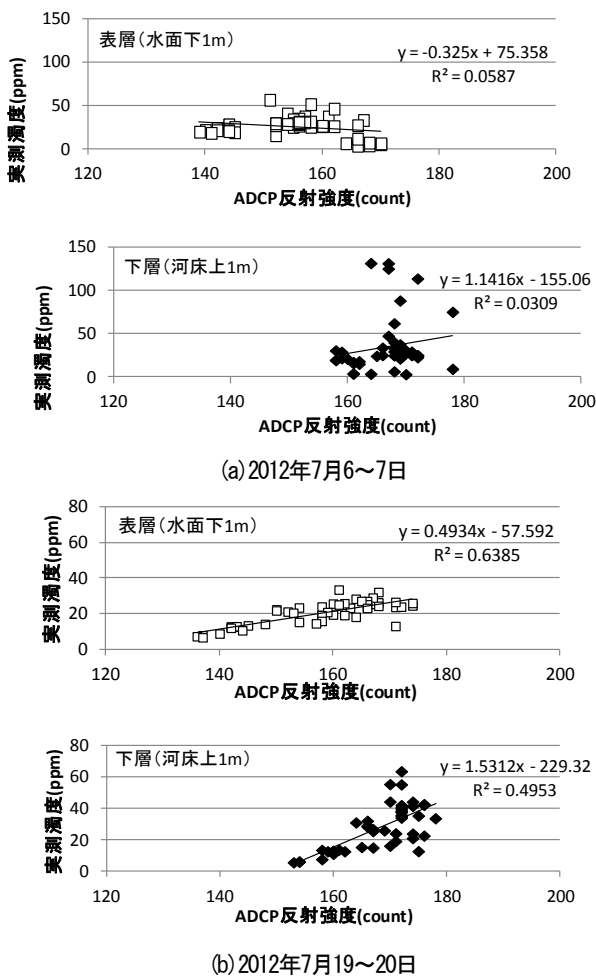


図-5 定点観測による濁度急変時の反射強度と実測濁度の関係

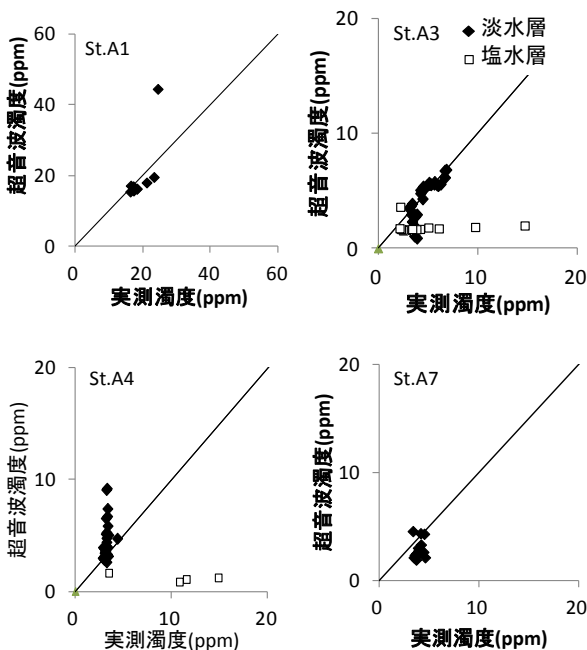


図-6 移動観測による超音波濁度再現性の比較

度と実測濁度に正の相関が確認できる。同様の現象は、石狩川において濁度が10~20ppm前後でのADCP観測に

おいても確認できている。この場合には、実測濁度が取得できていれば、実測濁度と反射強度の間で回帰式を作成し、濁度を推定することが可能となる。

一方、出水による濁度上昇である7月6~7日については、7月19~20日のケースと比べて濁度ピークは2倍以上である。表層では、反射強度と実測濁度の間に、非常に弱いものの負の相関がうかがえる。これは、表層部は超音波の発射部から距離が離れており、濁度が高くなると超音波の水中での減衰が顕著となり、反射強度が濁度上昇とともに低下しているためと考えられる。なお同様の特徴をもつ現象が、二瓶らがH-ADCPを用いて河道断面内の濁度分布を推定する際にも発生している¹¹⁾。なお、下層では反射強度と実測濁度の間には相関はほとんどみられない。さらに実測濁度が80ppm以上になると、反射強度は逆に低下している。よって、この場合には前述したような回帰式からの推定も困難である。

ここまでの結果をまとめると、平水時の濁度については、現地自記式濁度計を複数層入れることにより、連続で再現精度を向上させることが可能なことが示唆された。また濁度上昇時についても、濁度が数十ppmまでであれば、実測濁度と反射強度の間で直接相関をとることで、濁度変動特性を推測することも手法の1つになりうる。

高濁度の超音波濁度の再現性向上には、今回の定点観測での濁度上昇時にみられたADCP反射強度~実測濁度の相関が普遍的な現象であるか否か、確認作業が必要である。これについては現在室内実験で検討しているところであり、機会を改めて報告したい。

(3) 移動観測

ここまで定点における超音波濁度の鉛直分布の時系列変化を算出し、再現性の検証を行ってきた。本節では網走湖内全域で計測したADCP観測データを対象に超音波濁度を算出し、本手法が湖内全体での濁度の平面的分布をどの程度再現可能か検証する。

図-6は、2011年10月24日に観測を行った超音波濁度の算出結果である。場所によって、超音波濁度の再現性に明らかな差がみられる。閉鎖性の強い女満別湾に位置するSt.A1では超音波濁度と実測濁度はほぼ適合しており、縦断観測において最も良好な再現性が得られている。St.A3（水深約8m：うち上層約6mが淡水層、下層2mが塩水層）については、淡水層では超音波濁度は実測濁度を概ね再現してものの、塩水層ではほとんど再現していない。最深部であるSt.A4（水深16m：うち上層約6mが淡水層、下層10mが塩水層）では、超音波濁度は淡水層、塩水層ともに実測濁度をほとんど再現できていない。流出部に近いSt.A7では、超音波濁度は実測濁度に近い値を再度示している。

これらの結果をまとめると、淡水層における超音波濁度の再現性は、流入河川に近い場所では再現性は高いが、湖心に近くなると低下する。また塩水層では、超音

波濁度は実測濁度と完全に乖離している。

この原因の1つに、網走湖の懸濁物の性状が縦断的に一様ではないことが考えられる。流出入河川に近い地点は水深も浅いため、懸濁物中に河川あるいは底質からの再懸濁成分が多く含まれる一方、湖中心部では自生性のものがより高い割合となることも推測される。今後、この仮説が妥当かどうか、今後懸濁物の由来の分析により明らかにする必要がある。

5. 流入河川水動態予測

(1) 計算手法及び条件

前節までにおいて、網走湖内の濁度モニタリング手法について述べてきた。しかしながら、流入する濁質が湖内の水環境に及ぼす影響を検証するには、流入濁質の輸送・拡散ならびに沈降過程を把握する必要がある。そのため、水質予測モデルによりその特性を検証することを以下で試みる。

まず計算モデルの精度検証の対象とする期間を設定する。計算は、出水時の流入河川からの濁質輸送・拡散過程を対象とすることから、流入河川に近い場所の濁度連続観測データが得られており、かつ洪水規模の大きいものを選定することが望ましい。ここでは、一連の網走湖観測期間中では最大規模の洪水である2011年9月2日～5日の出水を対象に選定した。

次いで計算モデルを選定する。今回の計算では、平面及び鉛直の両方向への輸送・拡散現象の把握が必要である。そこで、静水圧近似による3次元流動・物質輸送拡散を計算できるMECモデル¹²⁾を採用した。ただし土砂輸送に関する部分は修正している。図-7 は今回の流動計算に用いた地形データである。計算は東西・南北各50m四方で、鉛直方向には1m間隔で計算格子を分割した。

網走川の流出入流量は、網走開発建設部による水位流量曲線（暫定値）から算出している（図-8）。流入懸濁物量は、2009年及び2010年の平水時・出水時の治水橋におけるSS濃度と同時刻の本郷流量について相関式を作成して付与した（図-9）。

水温・塩分の条件は以下のとおり考えて設定した。網走湖の過去の塩淡境界層動態をみると、融雪後から秋季にかけて強固な塩分成層が存在する。塩淡境界層の位置は若干の変動はあるものの、大規模な出水でも消失することはない。塩淡境界層では濁質の沈降が非常に遅くなり、そのために濁度の高い層が形成されることが確認されている。以上から、今回の計算では水温・塩分分布は計算期間中は変化しないものとして仮定した。

SSの沈降速度は、他の富栄養化湖沼の事例も参考に、淡水中は3m/dayとした。塩淡境界層以深は沈降速度を0.1m/dayとし、塩水層はほとんど沈降しない設定とした。

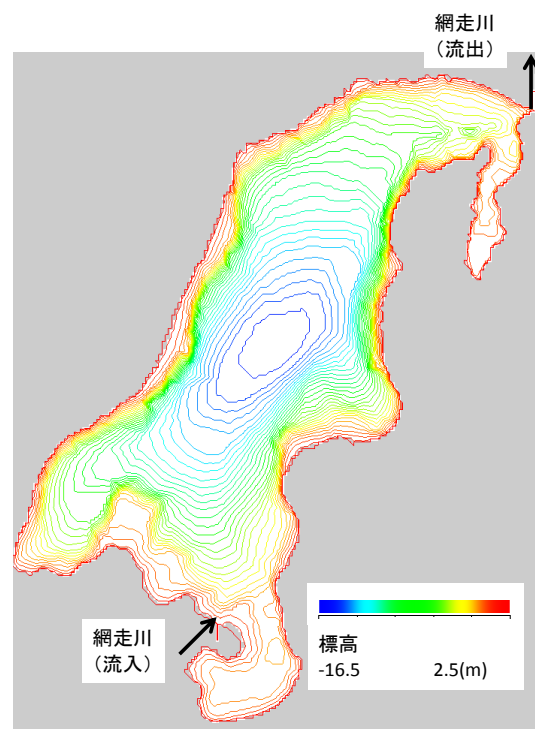


図-7 計算地形図
(網走開発建設部の測量結果をもとに作成)

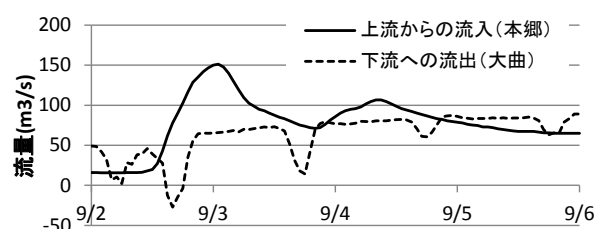


図-8 網走湖の流入及び流出量
(大曲流量の負値は逆流を示す)

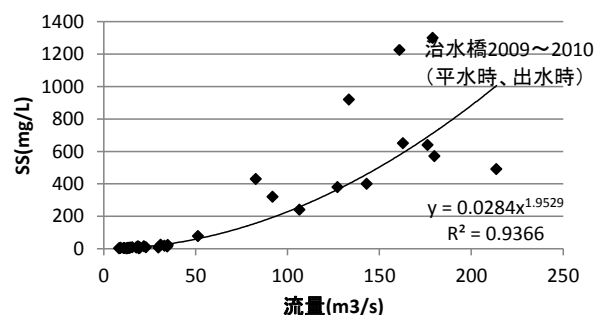


図-9 SS・流量相関式（流入河川）

(2) 予測結果

図-10は、定点観測地点であるSt.A2の水面下1mに設置された自記式濁度計によるSS濃度の実測値と計算値の比較である。流入河川流量はピークが2つあり、懸濁物濃度の実測値についても同様の変動傾向がみられる。計算値では、実測に比べるとSS濃度は小さいものの、増減傾向については実測値とほぼ同様の傾向が得られている。なお、今回の沈降速度は仮値であるため、現地観測

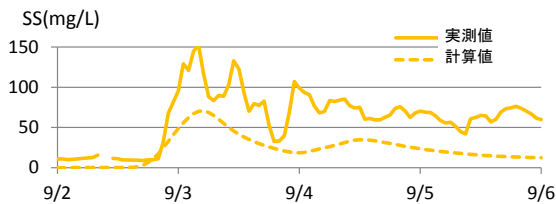


図-10 SS濃度 (St. A2) の計算値・実測値比較

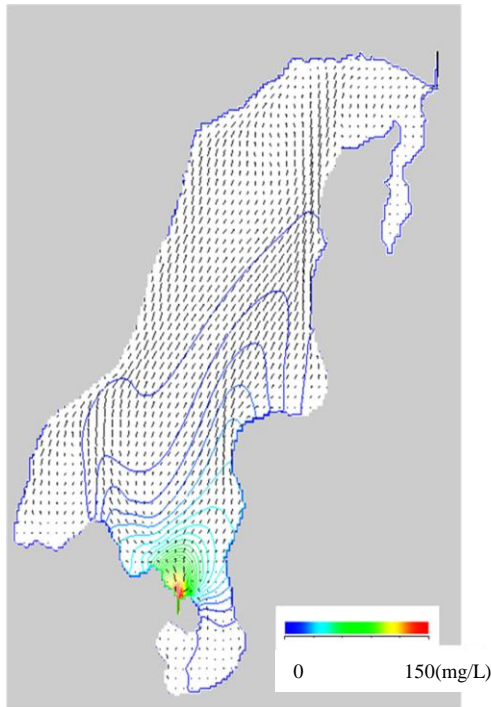


図-11 出水ピーク時 (2011年9月3日0時) の表層 (水面下1m) SS濃度計算値

等により適切な値に設定することで、現地の懸濁物輸送や拡散、沈積過程をより良好に再現できると考えられる。

図-11は、出水ピーク時である9月3日0時前後の表層セルでの推定濁度分布について、計算で推測される空間分布を示したものである。河川から流出した濁度は、湖の右岸沿いに沿い、下流に輸送されている様子がみられる。

現時点では、計算モデルの感度分析の段階であり、本格的な現地濁質の状況を再現するには至っていない。また計算で推測された濁度拡散状況や沈積過程の妥当性は、現地水質・底質調査結果と照合する作業が必要である。またSt.A2ではADCPを用いた超音波濁度の鉛直分布推定も試みたが、前述したとおり出水期間中の超音波濁度の再現性は十分確保できていないため、今回の計算値検証データは超音波濁度を採用できなかった。これについては、出水時の超音波濁度の再現を今後進めたい。

6. まとめ

(1) ADCP反射強度による濁度推定

- ・ソナー方程式の関係式に基づいて、ADCP反射強度か

ら濁度鉛直分布の時系列変化あるいは空間方向の特性変化を推定した。

- ・定点観測においては、濁度が大きく変動しない平水時は実測濁度をほぼ良好に再現できた。しかしながら濁度が急激に増加する場合の再現性は前年度までの検討と同様、再現は困難な状況がみられた。

- ・濁度が高い条件において、反射強度の特性を検討した。その結果、ある程度の濁度（本検討では数十ppm）までは反射強度と濁度の間で回帰式が作成可能であった。それを上回る濁質濃度では、回帰式の作成は困難であった。
- ・移動観測では、空間方向に超音波濁度の算出精度に違いがみられた。内湾部では超音波濁度の再現性は良好である一方、湖心付近や塩水層では実測濁度をほとんど再現不可能であった。これは濁質の性状が場所等により変化することが一因と推測された。

(2) 網走川流入濁質の拡散状況について

- ・上流から流入する濁質の拡散、輸送形態の特性を解析可能な3次元モデルを作成した。モデルは、実測SS濃度の変動傾向をほぼ再現できた。

参考文献

- 1) 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) 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
- 3) 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
- 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, pp.1411-1416, 2009
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 横山洋, 渋谷直生, 安田裕一: 網走湖女満別湾におけるADCPを用いた濁度時空間分布の推定について, 第53回北海道開発技術研究発表会, 2012
- 8) 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
- 9) 気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp>)
- 10) 水文学質データベース (<http://www1.river.go.jp/>)
- 11) 二瓶泰雄, 北山秀飛, 木水啓, 原田靖生: H-ADCP計測と数値解析を組み合わせた浮遊土砂輸送量計測システムの提案, 河川技術論文集, 第13巻, 2007
- 12) MECモデル (<http://mee.ku-tokyo.ac.jp/mec/model/ug/>)