

結氷する汽水湖の冬期水質挙動の研究

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○杉原 幸樹
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 新目 竜一

塩淡境界をもつ汽水湖において、結氷下の水質観測を実施した。結氷期間中に連続観測、鉛直分布観測、水質分析を行った。結氷中は塩分躍層が破壊され、水温と塩分は連続的な勾配を持つ分布となる。一方で、溶存酸素(DO)は躍層分布を維持し、躍層位置に高濃度の濁度層が観測された。それらの位置は塩分濃度が11PSUの標高と一致していた。水質分析の結果から栄養塩の分布はDO躍層位置に依存して大きく変化しており、結氷下においてはDO躍層を通過する化学種の拡散が非常に小さいことが明らかとなった。このことから結氷下の汽水湖では塩水層に栄養を蓄え、淡水層にほとんど影響を与えないことが推察される。湖内の栄養塩循環においては解氷期のDO躍層の攪乱が重要であると示唆された。

キーワード：汽水湖、結氷、水質、塩淡境界

1. はじめに

汽水湖は特殊な環境のため、生物生息環境として重要な水域である。特に内水面漁業においてはサケ、マス、ヤマトシジミなど2014年の約3万tの漁獲量の内、汽水域の漁獲量割合は約70%を占めている¹⁾。このなかで、二枚貝であるヤマトシジミ(以下、シジミと略す)漁獲量は1970年の5.6万トンピークに減少を続け、2012年では0.7万トンにまで減少している¹⁾。シジミ漁獲量のうち約60%は北海道と青森県で漁獲されており、その漁場はいずれも結氷する汽水湖である。シジミの生息や再生産のためには、塩分濃度、水温、溶存酸素、底質粒度組成が重要であることが知られている²⁾。しかし、既往研究においては主に夏期の挙動について検討されている。例えば、池永ら³⁾⁵⁾は北海道の網走湖での塩淡境界について多くの成果を示している。

一方、結氷下の水質挙動については観測例も少なく、不明な点が多い。結氷下の水質挙動については、冬季に目立った水質障害が起らないこと、結氷により観測自体が困難となることなどから、断続的な鉛直機器観測もしくは採水分析による水質調査が行われているのみで観測例⁶⁾⁸⁾が非常に少ない。これらの結果からは底層に貧酸素水塊が形成され、栄養塩の溶出が進行することを示している。結氷期には水温躍層に起因する夏期の水質形成メカニズムとは異なり、杉原⁹⁾は富栄養化した淡水湖において結氷下の連続水質挙動を明らかにしたが、密度躍層を有する水域での結氷下の連続水質挙動について連続的な水質挙動は不明である。

塩淡境界を持つ汽水湖の結氷下の水質挙動は、通年で

の水質変化を考慮するうえで極めて重要である。そこで、本研究は塩淡境界を持つ網走湖において結氷下の水質挙動を明らかにすることを目的とした。結氷から解氷に至る期間で水質調査を実施し、水質挙動を検討した。

2. 現地観測

2. 1 対象水域

対象水域の網走湖(図-1参照)は北海道北東部に位置し、面積32.3km²、最大水深16.1m、平均水深6.1m、貯水量約2億3千万m³の海跡湖である。主な流入河川は網走川と女満別川であり、網走川が流入河川水量の約97%を占めている。平均水位はT.P.0.39m(1971~2013年の網走湖観測所平均)であり、1971年から大きな変化はない。また、下流部では網走川を通じてオホーツク海に接続し、海水が遡上して湖内では塩水と淡水の二層構造を形成している。塩水層では貧酸素化が進行し、水質汚濁が顕著であった。

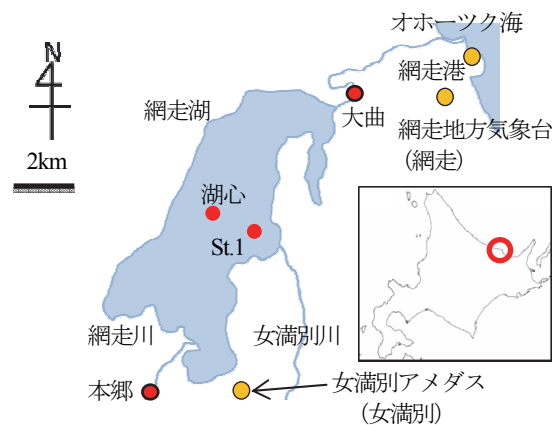


図-1 調査位置図

塩水遡上制御を目的に大曲地点(図-1参照)に可動式の塩水調整ゲートが建設されている。また、網走湖では内水面漁業が重要な産業となっており、ワカサギ、シラウオ、シジミなど国内でも有数の漁獲量である。加えて、網走湖は例年12月～3月まで湖面が全面結氷する。

2. 2 観測方法

St.1(図-1参照)において、連続機器観測、鉛直機器観測、採水水質調査を行った。結氷期の網走湖では、広範囲で氷下引網漁が行われるため、地元漁業協同組合と協議し、操業範囲から十分離れた漁業区外の水深を確保できる地点を選定した。

a) 連続機器観測

St.1(機器設置時全水深7.4m)において鉛直方向3層に観測機器を係留してデータを取得した。図-2に係留の模式図を示す。EL-1.5m、EL-3.0m、EL-5.5mに塩分水温計(以下CTと略す)、光学式溶存酸素計(以下ADOと略す)、クロロフィル濁度計(以下ACLWと略す)を係留し、EL-2.5mに圧力式水位計を設置した。観測期間は2014年12月13日～2015年6月4日において1時間間隔でデータを取得した。なお、目視による結氷状況確認では、2014年12月20日～2015年3月13日まで全面結氷していた。

b) 鉛直機器観測

St.1において2014年12月13日～2015年6月29日の間に氷上穿孔もしくは船上作業で約2週間毎に多項目水質計を用いて、水温、塩分、濁度、DO、クロロフィルa(Chl-a)の鉛直分布を鉛直方向0.1m間隔で計測した。なお、12月と4月の薄氷時期は安全確保のため、月1回の観測とした。

c) 採水水質調査

鉛直機器観測と同一日に図-2に示す連続機器観測の機器設置標高毎に採水し、室内分析を行った。分析項目は化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、アンモニウム態窒素(NH₄-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、全リン(T-P)、オルトリン酸態リン(PO₄-P)、全有機炭素(TOC)、溶存態有機炭素(DOC)とした。

d) その他

網走開発建設部より、観測期間に対応する網走川の水位、流量、塩分データ(大曲観測所、本郷観測所(図-1参照))を提供いただいた。なお、流量データは暫定値である。また、気象庁webサイトより網走港潮位データ、網走地方気象台および女満別アメダス地点(図-1参照)の気温、降雨量の毎正時データを入手した。

3. 観測結果

3. 1 連続機器観測

図-3に連続機器観測結果を示す。全ての項目でEL-5.5と他2層で挙動が大きく異なっていた。水温は観測開始から4月17日まではEL-5.5の水温が高く、結氷下において逆転水温層を形成している。4月17日以降、特に5月5日以

降のEL-5.5において、EL-3.0とEL-1.5の水温まで上下動する挙動が見られた。EL-3.0とEL-1.5の水温を見ると、1月13日まではほぼ同水温で推移した後、EL-1.5の水温が低下して、逆転水温勾配を形成した。3月8日にEL-1.5の水温がEL-3.0の水温より上昇している。4月17日以降はEL-1.5とEL-3.0の水温はほぼ同水温となっていた。

塩分は、EL-5.5では観測開始から上昇し、一定値となった後、4月3日以降は0～15PSUの間の値で上下動していた。EL-3.0は4月3日まで緩やかに上昇し、その後1PSU以下となった。EL-1.5は1月13日以降でゼロとなった後、4月5日から上昇して4月17日以降はEL-3.0と同程度

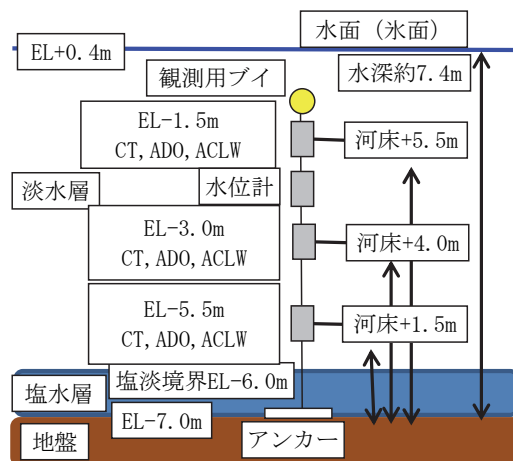


図-2 観測模式図

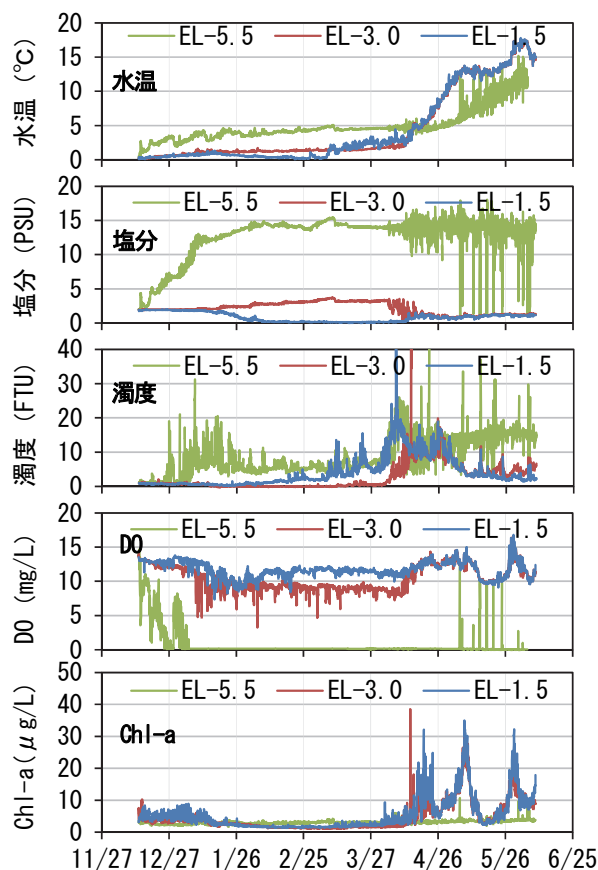


図-3 連続機器観測結果

の値で推移している。

濁度は、EL-5.5では12月27日～1月26日、4月3日にピークがみられる。観測期間中は緩やかな上昇傾向を示していた。EL-3.0では4月17日、4月30日に濁度の上昇が観測された。EL-1.5では3月8日、3月23日、4月3日、4月30日に濁度の上昇が観測された。

DOをみると、EL-5.5では観測開始後から減少し、1月3日に無酸素となった。5月5日以降にEL-3.0とEL-1.5の値と無酸素の間を上下動する挙動が観測された。EL-3.0では観測開始から低下傾向を示し、4月3日に8mg/Lから上昇に転じた後、10mg/L以上で推移している。EL-1.5では1月13日にやや低下したが、4月3日まではほぼ一定値で推移した。その後はEL-3.0と同程度で推移している。

Chl-aをみると、EL-5.5では観測開始から、ほぼ一定値で推移している。解氷後はやや増加傾向もみられるが大きな変化は見られない。EL-3.0とEL-1.5はほぼ同様の挙動を示している。結氷前はEL-5.5より高い値で推移したが、結氷後にはEL-5.5よりも低い値となった。解氷後は4月20日、5月10日、6月1日にピークがみられ、濁度のピーク後2週間前後で水温の上昇にあわせてピークがみられた。

次に潮位、水位、流量、塩分、気温、降雨量データを図-4に示す。なお、流量データの負値は逆流(海から湖への流入)を示す。St.1水位をみると12月18日～1月15日に0.2mほど増加した。このとき、大曲地点のデータから海水が逆流している。1月15日～3月13日まではほぼ横ばいで推移し、3月13日から上昇し始めていた。4月5日にピーク値0.95mとなった後に平水位である0.4mとなった。潮位データをみると、12月～2月にかけて湖水位よりも潮位が高くなる頻度が多くなっており、湖内に海水の逆流が起りやすい状況であった。河川流量をみると大曲では12月～1月に逆流量が増加し、塩分も高頻度で検出されている。4月3日以降は大曲、本郷ともに同程度の流量で順流量が増加していた。気象データをみると、今回の観測期間においては降雪となるため、降雨はほとんどなかった。網走気温は3月10日以降に0℃以上の気温で推移し、女満別気温も4月3日以降は0℃以上となっている。

次に潮位、水位、流量、塩分、気温、降雨量データから得られる知見をまとめる。12月～2月にかけて湖水位よりも潮位が高くなる頻度が上がり、特に12月18日～1月15日に海水が湖内に逆流していた。3月13日から融雪が始まり、4月5日にピークとなるが、4月3日以降は大曲、本郷ともに同程度の流量で順流量が卓越した。気象データをみると、網走気温では3月10日以降は0℃以上の気温で推移し、女満別気温も4月3日以降は0℃以上であった。

これらの結果から、結氷初期の12月20日前後に海水が流入してEL-5.5は塩水となっている。3月10日前後に解氷し、融雪出水によって淡水が流入する。そのため融雪ピークの4月5日以降において、EL-5.5は塩水と淡水が交互に入れ替わる状況となった。

3. 2 鉛直機器観測

図-5に2014年12月13日、2015年2月9日、4月22日の鉛直機器観測結果を示す。各観測日の氷厚は2cm、74cm、0cmであった。12月13日にはChl-a以外の項目で標高-6mに明瞭な躍層がみられる。淡水域となる標高0～-6mにおいては、各々の項目が鉛直方向に均一に分布していた。

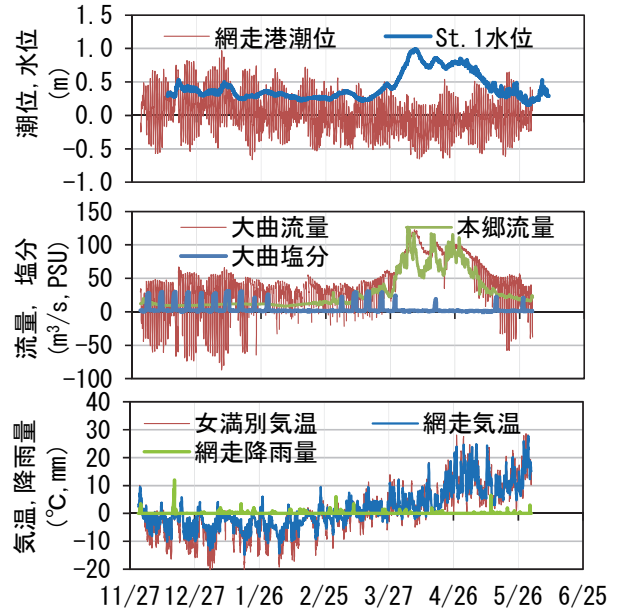


図-4 潮位、水位、流量、気象データ

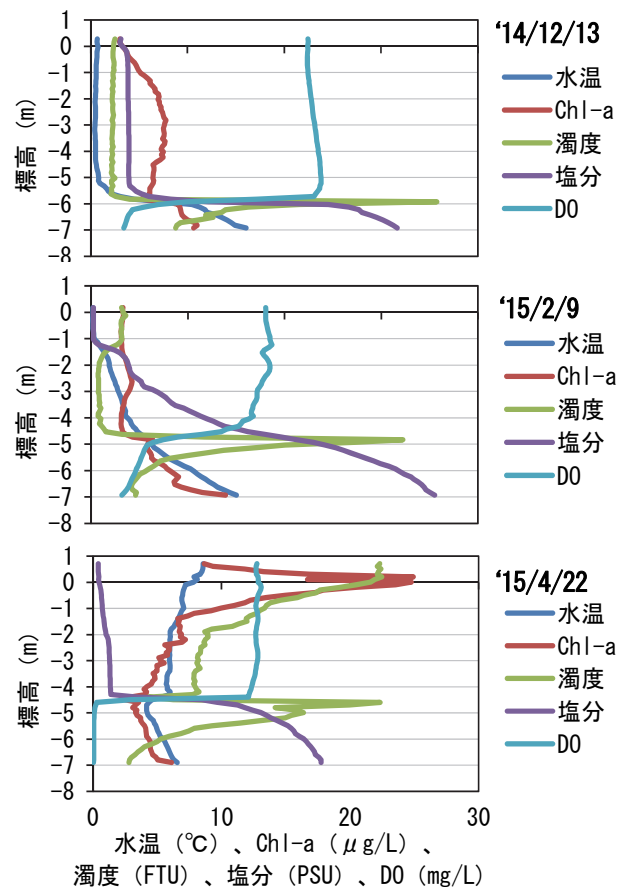


図-5 鉛直機器観測データ

標高-6m以下の貧酸素塩水は水温が8°Cほどあり、躍層位置の標高-6m付近に濁度のピークが観測された。Chl-aは淡水域では標高-3m付近に極値をもつ山型に分布し、塩淡水境界面で不連続となり、標高-6m以深では下層ほど濃度が高くなる分布であった。2月9日には水温と塩分は連続的な勾配を有する分布となっている。このとき、12月13日と比べて下層の水温はほぼ変化しないが、塩分値は26PSUまで増加していた。一方で、濁度とDOは標高-5m付近にピークと躍層を形成していた。このとき、標高0～-5mのDOは12月13日の結氷初期と比較すると12mg/Lから8mg/Lへと減少していた。Chl-aは12月13日と同様に淡水層と塩水層で挙動が異なっていたが、分布形状は12月とほぼ同じであった。

解氷後の4月22日には標高-4.5m付近に塩分とDOの躍層、濁度のピークが観測された。このとき塩水層のDOはゼロとなっている。水温は標高0～-4.5mでは水深とともに温度が低くなり、標高-4.5m以下では水深とともに温度が高くなっていった。また、濁度は水面近傍と標高-4.5m付近に極大値を持つ分布となり、Chl-aは水面付近で極大値を持つ分布となっていた。このとき下層の塩分値は結氷中よりも低下して19PSUとなっていた。

ここで結氷から解氷にかけての標高-7mの数値をみると解氷時に塩分とDOに若干の差が見られるが、それ以外の項目はほぼ同程度の値となっている。またDO躍層付近の濁度のピーク値もほぼ同じであった。これらの挙動から、結氷下では塩分が拡散するが、濁りと酸素は拡散しないこと、融雪出水によって淡水と濁りが供給され、一次的に塩水層の塩分は低下するが他の項目にほぼ影響しないことが明らかとなった。

3. 3 水質分析結果

図-6にCOD、TOC、DOCの分析結果を時系列で示す。なお、CODは過マンガン酸カリウムを酸化剤とした結果であり、EL-5.5の結果は右軸を目盛りとする。CODの結果から、EL-1.5、EL-3.0では結氷下(1月～3月)において4mg/Lほどの一定値で推移し、解氷後の4月以降に増加して5mg/L前後で推移する。一方で、EL-5.5では12月調査時は5mg/Lであり、結氷中かつ無酸素状態の1月13日には19mg/Lまで増加し、その後は緩やかに増加傾向を示した。解氷後の3月16日には13mg/Lに減少したが、融雪出水後の4月22日には34mg/Lまで増加した。その後は20mg/Lほどで推移した。これまでの観測結果から、EL-5.5はDO躍層付近に位置し、無酸素層に入ったときにEL-1.5やEL-3.0の水質挙動との相違がみられる。

次に、TOCはEL-1.5、EL-3.0では3～4mg/Lで推移している。EL-5.5では1月13日に6mg/Lと高い値となるが、結氷下では4mg/Lで推移し、4月以降は4mg/L～6mg/Lへ増加する傾向を示した。DOCはTOCに追従する傾向を示していた。観測期間中の各層のTOCに占める溶存有機炭素(DOC/TOC)は75～100%で平均86%となり、ほぼ同一構

成比であった。また、TOCやDOCはEL-5.5が無酸素層となっても、深度別に大差がない結果であった。

図-7にT-PとPO₄-Pの分析結果を示す。なお、EL-5.5については右軸を目盛りとする。T-Pは12月13日には全層で0.06mg/Lであり、EL-1.5とEL-3.0は0.04～0.06mg/Lの間で変動している。一方で、EL-5.5では無酸素層となった1月13日以降はEL-1.5、EL-3.0と比べて濃度が10倍以上高くなり、解氷した後も継続的に増加する傾向であった。次に、EL-1.5、EL-3.0のPO₄-Pをみると、結氷期間中(1月13日～3月13日の観測結果)では濃度の増加を続けていた。解氷後の4月22日には急激に濃度が低下し、6月以降はゼロで推移していた。一方、EL-5.5では解氷を含めて観測期間中は増加傾向を示している。

図-8にT-N、NO₃-N、NH₄-Nの分析結果を示す。亜硝酸態窒素は濃度が非常に小さいために割愛し、NH₄-NについてEL-5.5の結果は右軸を目盛りとする。EL-5.5のT-Nは解氷前後となる3月13日に大きく減少するが、観測期間全体としては時間とともに増加する傾向がみられる。EL-3.0では結氷下から解氷後の4月22日まで増加し、以降は減少に転じていた。EL-1.5では結氷初期となる1月13日及

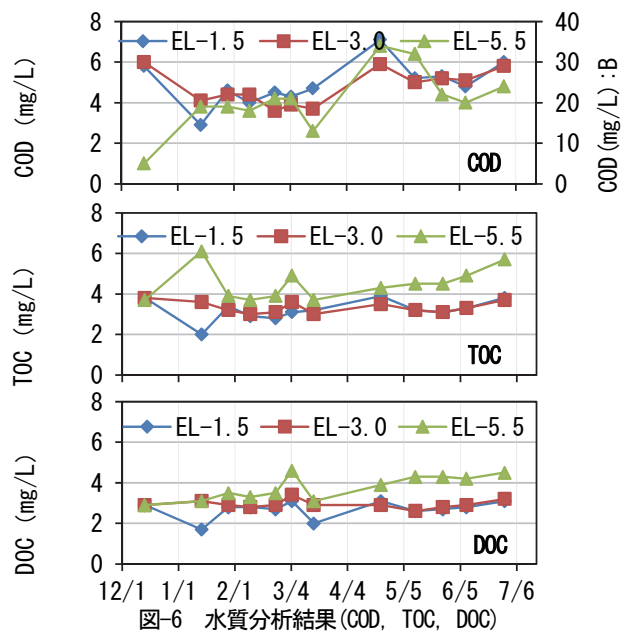


図-6 水質分析結果(COD, TOC, DOC)

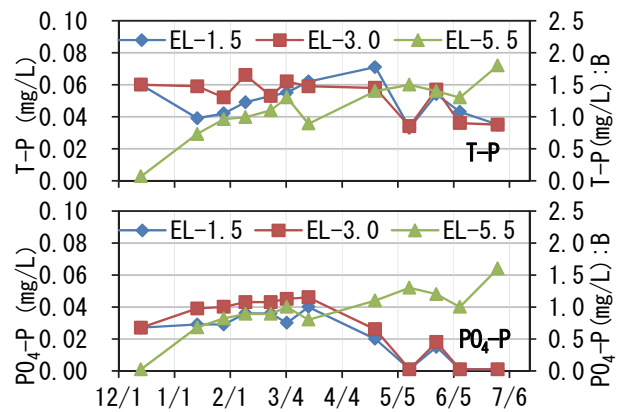


図-7 水質分析結果(T-P, PO₄-P)

び解氷初期となる3月13日に3mg/Lとやや高い値が観測されたが、その他の期間はEL-3.0と同様の傾向を示した。EL-5.5のNO₃-Nは1月13日以降ではほぼ検出されない。EL-1.5とEL-3.0ではT-Nと同様の挙動を示すが、T-Nに対する比(NO₃-N/T-N)は、結氷中(1月13日～3月4日の観測データ)で異なっていた。EL-1.5では平均0.60(0.35～0.75の変動幅)であり、EL-3.0では平均0.25(0.12～0.36の変動幅)となり、標高が低いほど硝酸態の割合が減少していた。次に、EL-5.5のNH₄-NはT-Nと同様の挙動を示し、継続的に増加する傾向が見られる。EL-3.0の結氷中(1月13日～3月4日の観測データ)は単一増加傾向を示す。しかし、3月13日以降は急激に濃度が減少した。3月13日および4月22日はNO₃-Nが増加したことから、解氷によって速やかに酸化されたと推察される。EL-1.5では2月9日に最大値となり、以降は減少を続けていた。EL-3.0に比べて、解氷よりも早い段階で硝酸へと形態変換されていることが推察されるが、詳細は不明である。また、結氷中の全窒素中の無機態窒素比((NH₄-N+NO₃-N)/T-N)は、EL-1.5とEL-3.0ともに平均0.65(変動幅0.5～0.7)であり、解氷以降は0.1まで減少していた。このことからEL-1.5とEL-3.0では無機態窒素が均一に分布し、解氷後は有機態へと変換されている結果であった。

4. 水質挙動の考察

本研究で得られた観測結果から、網走湖における結氷から解氷にかけての水質挙動を考察する。現地調査時の目視から結氷期間は2014年12月20日～2015年3月13日である。観測された挙動を模式的に図-9に示す。観測開始時の塩淡境界はEL-6.0mであったが、結氷直後に海水が逆流して塩淡境界標高はEL-5.0m以上となった。結氷期間中は淡水流入が少ないため、結氷下ではEL-5.0mでも塩分濃度が10PSU以上とやや高い値を維持していた。また、結氷下では水温と塩分濃度は躍層が破壊され、連続的な鉛直勾配を有する分布となった。しかし、DOは躍層を維持し、塩分値11PSUとなる標高に高濁度水塊が存在して

いた。ここで、結氷下においては鉛直方向の流速が小さいため、拡散係数を比較すると温度 $1.4 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 、塩分 $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ 、酸素分子 $2.1 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ であり、塩分と酸素は同程度の拡散分布を示すはずであるが、観測結果ではDOは躍層を維持していた。さらに、濁度のピーク標高とDO躍層標高はよく一致しており、DOの鉛直分布は濁度に依存していると推察される。結氷下では河川流入量が減少し、濁質供給の影響がほぼない。また、水面を氷が覆うことで風速など水面での応力影響も排除される。そのため、高濁度水塊は湖内内部での生成、無氷期の流入濁質の残存、逆流海水による供給などが考えられる。3月8日前後に川岸が解氷し、塩水層に大気中から酸素が供給される。4月17日前後は完全解氷となり、融雪流入によって塩淡境界面は低下する。しかし、高濁度水塊は結氷下においても常に存在し、融雪流入によって流出する等の挙動は見られなかった。

次にDOの鉛直分布から、底層の無酸素域と上層の有酸素域に区別して呼称する。底層の栄養塩濃度の変化速

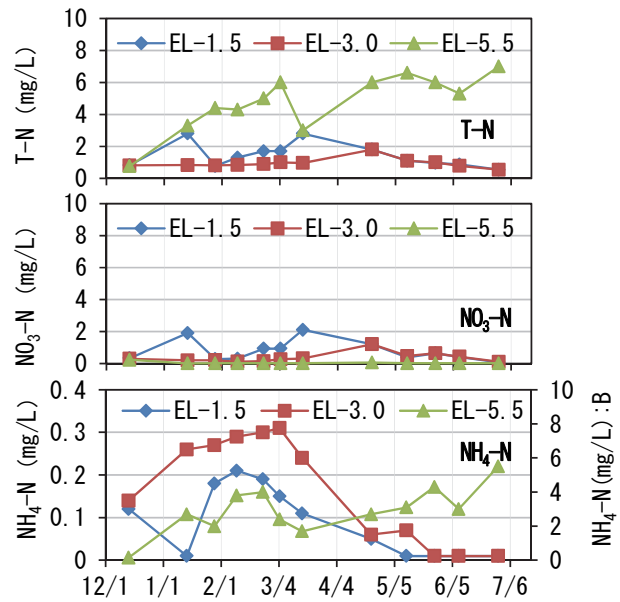


図-8 水質分析結果(T-N, NO₃-N, NH₄-N)

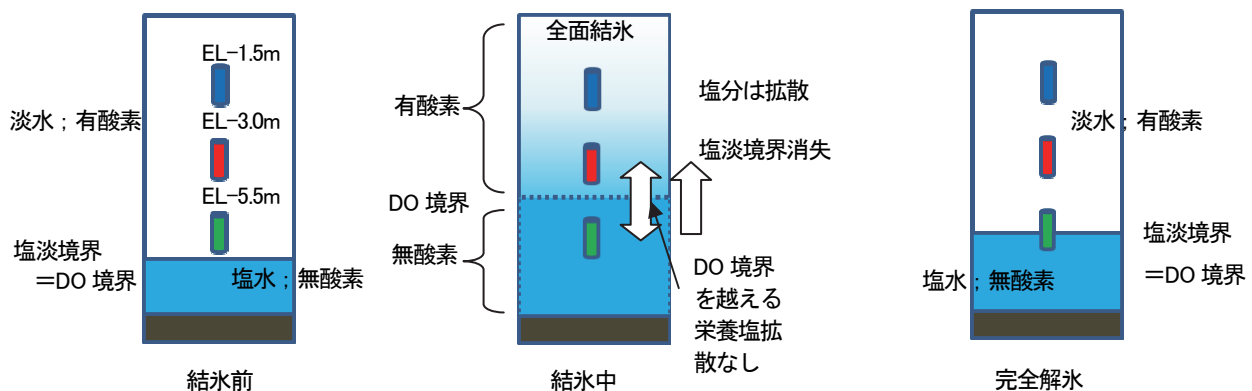


図-9 結氷下水質挙動の模式図

度はEL-5.5の結果より $\text{PO}_4\text{-P}$ で $3.9 \times 10^3 \text{ mg/L/day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $1.1 \times 10^2 \text{ mg/L/day}$ となる。湖水容量 $2.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、底面積 $3.2 \times 10^7 \text{ m}^2$ とし、溶出速度を概算すると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で $27.7 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $74.1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となる。結氷する淡水停滞性水域である茨戸川の結氷下の溶出速度⁹⁾は $\text{PO}_4\text{-P}$ で $1.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $38.4 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であり、網走湖の栄養塩溶出速度が高くなっていた。

次に、結氷下の上層の栄養塩濃度変化速度はEL-3.0の結果から $\text{PO}_4\text{-P}$ で $1.0 \times 10^4 \text{ mg/L/day}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $1.9 \times 10^3 \text{ mg/L/day}$ となる。底層の濃度変化速度と比較すると、結氷下の外力影響が少ない場合には、底層から上層への栄養塩の供給が少ないことがわかる。このことは、水面付近への栄養塩供給には、DO躍層の攪乱が必要であることを示唆している。また、図-7の結果より底層のCODは上層に比べ10倍ほど高いが、結氷期のTOCやDOCは底層も上層も大差ない。通常CODの分析上、アンモニアや鉄、硫化物など還元性の物質によって数値が上昇する。そこで図-7、9の2月23日のEL-5.5の結果から、CODより酸素、TOCより炭素、 $\text{NH}_4\text{-N}$ より窒素の物質量を概算するとO : C : N = 1.3 : 0.3 : 0.3(mol)となる。窒素の酸化に酸素3原子が必要と仮定すると、CODの約70%が $\text{NH}_4\text{-N}$ に由来すると推察される。

既往報告^{3)~5)}より、夏期の網走湖では塩分、DOはEL-6.0に躍層を形成している。このときの濁度分布をみると、塩淡境界面に濁度のピークがみられ、本観測結果とあわせると通年で塩淡またはDO境界面に高濁度水塊が存在している。また、通年で塩水躍層の標高変動は以下の機構が推察される。結氷後に海水の逆流が卓越して、躍層位置は上昇すると同時に塩分は水面に向かい拡散する。池永ら⁹⁾は、出水によって塩分が連行されること、内部セイシュによって塩分が吸い上げ流出することを報告しており、これにより躍層位置が低下する。このため結氷期に上昇、無氷期に下降を繰り返し、長期的に躍層位置が安定すると考えられる。また、池永ら⁹⁾は内部セイシュによって岸際で塩水が弱混合から強混合になるため、青潮が発生することを報告している。本研究結果から結氷下では、栄養塩は無酸素域に蓄積され、有酸素域に供給されづらい傾向であること、融雪出水によって塩分躍層が破壊されないこと、解氷後には融雪出水の流入に加え、淡水層内のみで鉛直混合が起こっていることがわかった。これらから、通年での湖内の栄養塩循環は結氷下の無酸素域で栄養塩を蓄積し、解氷後に内部セイシュによって水面付近に供給されると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

網走湖において、結氷下の水温と塩分の鉛直分布は躍層が破壊されて連続的分布となる。一方で、DOは躍層を維持していた。濁度はDO躍層と同一標高に高濁度層を有

し、上層では酸素がほぼ消費されず高DOを維持していた。また、解氷によって淡水層内では鉛直混合が起こるが、塩水層は結氷期間を含めて鉛直混合しないことが観測された。解氷後には水温、塩分、濁度、DOの鉛直分布は同一標高に躍層を有する分布となった。結氷下における栄養塩の鉛直分布から、DO躍層の下層から上層への栄養塩の移動は少ないことが明らかとなり、汽水湖における栄養塩の鉛直循環はセイシュなど強制的なDO躍層の混合が必要であることが推察される。また、結氷中では有酸素の塩水域が形成され、無酸素層から有酸素層への栄養塩の拡散も少ないことがわかった。このことから汽水湖においても水質形成の主要因はDO躍層であることが推察される。

結氷下では水温や塩分躍層とDO躍層は必ずしも一致せず、DO躍層と高濁度層が水質挙動に影響することが示唆される。今後は高濁度水塊を形成する物質を特定し、その集積機構を解明して、水質改善策の一助としたい。

参考文献

- 1) 農林水産省：内水面漁業生産統計調査、http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/naisui_gyosei/index.html
- 2) 中村幹雄：宍道湖におけるヤマトシジミ *Corbicula japonica* PRIMEと環境との相互関係に関する生理生態学研究、島根県水産試験場研究報告 第9号、1998.
- 3) 池永均、向山公人、大島伸介、吉本健太郎、山田正：網走湖における青潮発生に関する現地観測と数値解析の比較、土木学会論文集、No.775/II-69、pp.11-27、2004.
- 4) 池永均、向山公人、大島伸介、山田正：塩淡二成層を形成する汽水湖沼の長期的な界面変動予測手法の開発、土木学会論文集、No.628/II-48、pp.77-96、1999.
- 5) 池永均、山田正、向山公人、大島伸介、内島邦秀：網走湖の塩水化の機構と塩淡二成層の長期変動特性に関する研究、土木学会論文集、No.600/II-44、pp.85-104、1998.
- 6) 知北和久、福山龍次、坂本博明、中路晃平：閉鎖性汽水湖における死水の挙動特性；釧路市・春採湖での結氷観測から、北海道大学地球物理学研究報告、Vol. 60、pp. 13-28、1997.
- 7) 中村優子、青井孝夫、黒木宗尚：網走湖の植物プランクトンの季節的消長、北海道大学大学院環境科学研究科紀要、No.3 (1)、pp. 35-46、1980.
- 8) 大高明史、神山智行、長尾文孝、工藤貴史、小笠原高輝、井上栄壮：津軽十二湖湖沼群・越口の池湖群における湖水循環と底生動物の深度分布、陸水学会誌、No. 71、pp. 113-128、2010.
- 9) 杉原幸樹、中津川誠：富栄養化した停滞性水域の結氷下の水質挙動と気候変動による影響、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.69、No.1、pp.44-59、2013.