

三大湖沼の水質生態系に係る調査研究

十和田湖中湖における鉛直方向の水質特性について

對馬就 生魚利治

1. 諸言

十和田湖は、秋田県及び青森県の山間部の県境にまたがる湖で、湖面標高 400 m、表面積 61.1 km²、平均水深 71.0 m、湖体積は 4.19 km³である。南岸に並ぶ三つの湾の中央に位置する中湖だけが、最大水深 326.8 m と特異的に深い地形を持つ二重カルデラ湖である（図 1）。

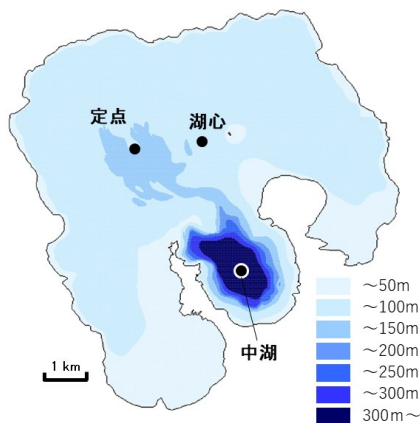


図 1 十和田湖 調査地点及び水深分布図

この中湖は、古くは明治時代から循環期に水深 100 m から 150 m の間において水温が約 4 °C から約 5 °C まで上昇する温度が逆転した躍層の存在¹⁾が知られている。純粋な水は、3.98 °C に密度が最大となる特性を持つことから、結氷する湖では、水温が表層水よりも湖底付近の方が高い逆列成層と呼ばれる層を形成する。一方、十和田湖は、冬期間においても全面結氷せず²⁾、また中湖に形成される水温が逆転した成層は、より深い層の水温が 3.98 °C よりも高い約 5 °C であることから、結氷する湖の逆列成層とは異なる機構で形成されており、湖底付近に湧水があること及びその影響を受けていることが推測³⁾されている。

また、十和田湖は、水質類型に湖沼 AA が当てはめられている貧栄養湖であるが、1986 年以降に COD75% 値が環境基準値である 1 mg/L を超過し、以降も増加傾向にあるなど、水質悪化が懸念されている。このため、秋田及び青森の

両県で、2001 年に「十和田湖水質・生態系改善行動指針（以下、指針という）」を策定し、指針に沿った様々な取り組みを実施してきた。この指針では、未解明の部分の調査研究として、湧水等の物質収支の影響を明らかにするとしている。

今回、湧水の存在が推測されている中湖の深層部の水が、湖全体の水質に及ぼす影響について検討するための基礎データとして、中湖における水温鉛直分布の経時的な変化及び深さ方向の水質の調査を実施したことから、この結果について報告する。

2. 調査方法

2.1 中湖の水温鉛直分布の経時変化

水温鉛直分布の調査は、中湖中央部の水深およそ 325 m の地点で、2024 年の 4 月 16 日、6 月 11 日及び 8 月 20 日に実施した。

水温データの採取は、水温深度計（JFE アドバンテック：ATD-HR）を用いた。水温深度計の設定は、1 秒間に 1 回のデータ採取とした。また、測定は、いずれの回も水深 250 m 程度までとした。

2.2 水質

8 月の調査時には、バンドーン採水器を用いて中湖中央部で、表水層（5 m）、躍層の上層（85 m）及び下層（253 m）から採水し、それぞれの水質を分析した。また、分析項目は、イオンクロマトグラフ法により、塩化物イオン濃度（Cl⁻）、硫酸イオン濃度（SO₄²⁻）、ナトリウムイオン濃度（Na⁺）、カリウムイオン濃度（K⁺）、カルシウムイオン濃度（Ca²⁺）、マグネシウムイオン濃度（Mg²⁺）を測定したほか、分光光度法により、全窒素濃度（T-N）及び全リン濃度（T-P）、連続流れ分析法により硝酸態窒素濃度（NO₃-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、アンモニア態窒素（NH₄-N）及びリン酸態リン濃度

($\text{PO}_4\text{-P}$) を測定した。また、50 mL 容のゲーリュサック型比重瓶を用いて水温 20 °C の密度を測定した。 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、T-N、T-P、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ については、指針に基づいて同日に水深約 100 m の定点で実施した水深毎の調査の値を検討に用いた。

3. 結果

3.1 水温鉛直分布の経時変化

中湖における、月別の水温の鉛直分布を図 2 に示す。4 月の水深 111 m から 128 m の間に、3.81 °C から 4.81 °C まで 1.00 °C 上昇する明確な躍層が確認された。水深 128 m を境に水温の変動幅は小さくなった（以降、より下層の水温変化がなくなる水深を本報告では「水温変化点」という。）が、観測した水深 250 m の 4.92 °C まで、緩やかではあるが水深が深くなるほど水温が上昇していた。6 月になると、躍層は大きく広がって不明瞭となり、水深 105 m から 181 m の 76 m 間に 4.49 °C から 4.99 °C まで上昇した。水温変化点となった 181 m 以深の水温は、水深 220 m まで 5.01 °C から 5.03 °C までの範囲にあり、4 月とは異なり水温変化点以深の水温上昇はみられなかった。8 月には、躍層は 6 月時よりも更に大きく広がり、水深 101 m から 187 m の 86 m の間で 4.69 °C から 5.08 °C まで上昇していた。また、水温変化点となった 187 m 以深の水温は、水深 253 m まで 5.06 °C から 5.09 °C の範囲にあり、6 月と同様に水温変化点以深の水温上昇はみられなかった。

各調査回の水深変化点以深である水温を比較すると、水深 200 m では、4 月 16 日は 4.83 °C、6 月 11 日は 5.01 °C、8 月 20 日は 5.08 °C であり、水深 250 m では、4 月 16 日は 4.92 °C、8 月 20 日は 5.06 °C と、いずれの水深も時間の経過とともに水温は上昇していた。

3.2 水質

8 月の中湖における各イオンの水深毎の濃度を図 3 に示す。全ての水深において、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の順に値が高い結果となった。また、全てのイオンで、水深の深い順に各濃度が高い結果となった。測定したイオンのうち比較的濃度が高かった Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- の水深 5 m 及び 253 m の濃度差は、それぞれ 8.4 mg/L、6.4 mg/L、

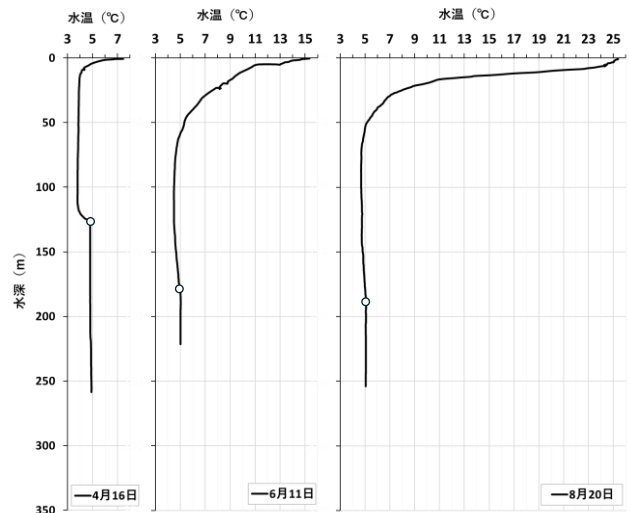


図 2 中湖における水温の鉛直分布
グラフ内の“○”は水温変化点を示す。

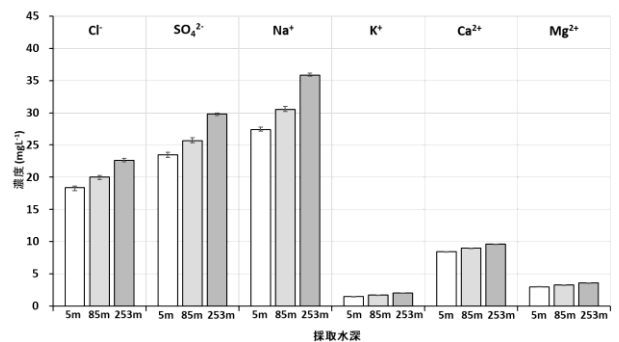


図 3 8 月の中湖における各水深の各イオン濃度

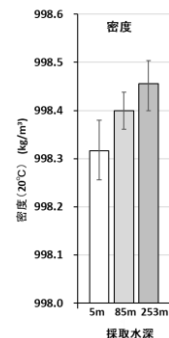


図 4 8 月の中湖における各水深の水の密度

4.2 mg/L であった。

8 月の中湖における各水深の水の密度を図 4 に示す。水深の深い順に密度が大きい結果となった。

8 月の中湖と定点の各水深の水質の比較について、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 及び Na^+ を図 5 に、T-N 及び $\text{NO}_3\text{-N}$ を図 6 に、T-P 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ を図 7 に示す。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 及び Na^+ では、中湖と定点の水深 85 m の水質に大きな差はなく、中湖の水深 253 m の値が、いずれの項目でも最も大きい値を示した。

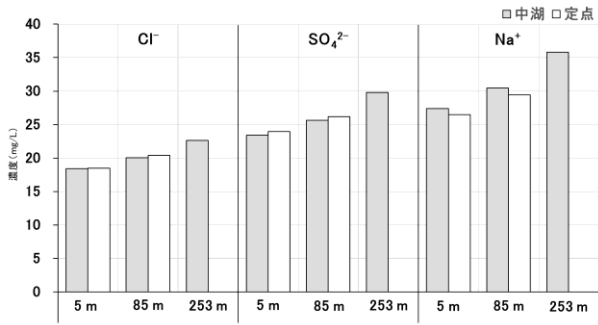


図5 Cl⁻、SO₄²⁻及びNa⁺の中湖及び定点の比較

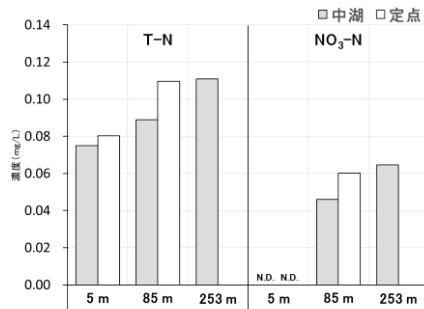


図6 T-N及びNO₃-Nの中湖及び定点の比較

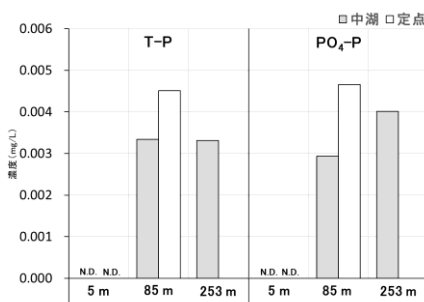


図7 T-P及びPO₄-Pの中湖及び定点の比較

一方で、T-N、NO₃-N、T-P及びPO₄-Pについては、定点及び中湖の85 mの各値を比較すると、定点の方が高い値を示し、定点の85 mと中湖の水深253 mの各値の比較では、T-N及びNO₃-Nはほぼ同等であり、T-P及びPO₄-Pは、定点の水深85 mの方が高い値を示した。なお、NO₂-N及びNH₄-Nは、全ての測定点で定量下限値未満（それぞれ0.003 mg/L、0.02 mg/L）であった。

4. 考察

4.1 中湖の水温鉛直分布について

中湖における4月の水温は、水深111 mの3.81℃から水深128 mの4.81℃まで上昇する明確な成層を形成し、より暖かい4.81℃の水が下層側に留まっていることから、水深111 m以浅の水より、128 m以深の水の密度の方が大きいことが

明らかである。水の密度は、溶存する物質によっても変動するが、8月の各水質は、特にNa⁺、SO₄²⁻及びCl⁻において、水深253 mの値が水深5 m及び85 mの値と比較して高く、20℃で測定した密度も水深253 mの値が大きいことから、各層の物質の濃度差が密度差をもたらし、躍層を形成していたと考える。湖沼内である物質が急速に変化する層は、化学躍層（chemocline）⁴⁾と呼ばれ、十和田の中湖に形成される水温が上下逆転した成層も化学躍層であると考えられる。

また、4月に観測された水深111 mから128 m間の明瞭な躍層が、6月の調査では大きく広がり不明瞭になったことは、十和田湖の全層循環の機構に関係すると考えられる。十和田湖周辺の地域は、亜寒帯湿潤気候に属し、冬期間は真冬日が連続するが、十和田湖は、表層水の水温が2℃台までの低下にとどまり全面結氷しないことから長い循環期を持つ年1回循環湖であると考えられる。循環期間は、既往の調査結果³⁾から1月上旬から5月上旬頃であると推測される。このことから、3回の調査のうち4月16日の調査は、循環期が終了する直前にあたる。4月の明瞭な躍層の上層側は、一般的な湖と同様に、気温の上昇と共に日射や大気との接触により表層が暖められ、水の密度が最大となる3.98℃までは、沈み込む方向の水流を生じさせながら上層側全体の水温及び密度が上昇する。この沈み込む方向の勢いに、化学躍層の上下層間に生じていた密度差が耐えきれなくなると、躍層が崩壊して水が混合し、6月の結果に見られた様に躍層が広がり不明瞭になるものと考えられる。

水温変化点より下層の水温は、4月から8月にかけて上昇傾向にあり、この期間の水温変化点の上層には常に水温のより低い層が存在していることから、調査した水深よりも下層からの熱の供給源があることが示唆された。また、中湖の水深253 mのNa⁺、SO₄²⁻及びCl⁻の値が、中湖及び定点の水深5 m及び85 mの各値と比較して高いことは、各イオン成分も、水温変化点以深から供給されていることを示唆するものである。熱及び各イオンが中湖の下層部からの供給が示唆されたことは、従前からの湖底付近からの湧水説を支持するものである。

4.2 中湖の窒素及びリン成分が十和田湖全体に及ぼす影響について

十和田湖は、窒素及びリン成分の挙動については一般的な貧栄養湖と同様に、夏期に有光層で植物プランクトンの生産活動により栄養塩類が消費され欠乏する一方で、無光層では、有光層で増殖した植物プランクトンのうち動物プランクトンに摂食されなかったものなどの有機物が沈降し、バクテリアによる分解活動により無機栄養塩として蓄積され、循環期に表層に供給されることが報告⁵⁾されている。8月の中湖では、水深が深くなるほど T-N、NO₃-N、T-P 及び PO₄-P の値が大きくなったものの、定点の水深 85 m の各値と比較して同程度かそれ以下であったことから、中湖の窒素及びリン成分は、Na⁺等で示唆されたような水温変化点以深からの供給はほとんどなく、十和田湖全体の物質収支に

与える影響も湖内のほかの地点と同程度であることが推測される。

参考文献

- 1) 田中阿歌磨：趣味の湖沼学，実業之日本社，1922, 194-216.
- 2) 徳井利信：十和田湖のヒメマスの研究（Ⅱ）気候並びに水文学的要因，北海道さけ・ますふ化場研究報告，**14**, 1959, 169-192.
- 3) 花石竜治他：水温の連続測定から見た十和田湖の水温の季節変動，青森県環境保健センター研究報告，**15**, 2004, 23-30.
- 4) アレキサンダー・J・ホーン，チャールス・R・ゴールドマン：陸水学，京都大学学術出版，1999, 23.
- 5) 生魚利治：水温から考える湖沼環境，秋田県健康環境センター年報，**20**, 2024, 62-63.