

水温の連続測定から見た十和田湖の水温の季節変動

花石 竜治 三上 一 野澤 直史 成田 俊 松尾 章

十和田湖において2002年10月から2004年10月まで、0～85mの8層で水温を連続測定した。その結果、0～30mの変化は気温に大きく依存していた。30m以深では4～5℃で一定であった。一方、冬季および春季において循環期が認められ、湖底からの栄養塩の湧昇に寄与していると考えられた。

Key words : Lake Towada, temperature of lake water, mictic period

1. 緒 言

近年、わが国の湖沼は、人間の活動による水質悪化や生態系の劣化が認められている。

湖を特徴付ける要因は物理学的、化学的、生物学的要素であり、これらは互いに密接に関係している。このうち、化学的側面に関しては、CODやDO、窒素、リンなどが調査されてきている。また、生物学的側面については、プランクトンや魚類などの生態系調査が行われている。

物理学的な要因は光、熱、水の動きであり、わけても水温は湖における熱の挙動の結果として現れ、端的には水の動きを決定し、その他に化学的、生物学的なさまざまな要素に関わる。最終的には生態系を規定する一要因となり、湖の特徴のうち最も基本的なものである。十和田湖の水温の鉛直構造に関しては、湖心などで年に数回行った調査の報告¹⁻⁴⁾がある。十和田湖は温帯の中でも比較的冷涼な位置にあり、ほとんどの温帯湖は二循環と言われ、年に春と秋の2回、鉛直方向で湖水が混合すると言われている^{5), 6)}。これまで北海道の湖沼において冬季の水温の鉛直分布や循環期について調査報告があり^{7), 8)}、また琵琶湖における鉛直方向の水温の季節変動の調査があった⁶⁾。その他、近年では福島県の桧原湖での調査¹⁰⁾がある。しかし、わが国において比較的冷涼な地域の湖沼で深部も含めて長期にわたり水温を連続測定した例はなかった。本報文では、十和田湖の0～85mまでの各層での水温の連続測定を2002年10月から2004年10月まで行った結果、およびそのデータ解析結果について報告

する。

2. 十和田湖研究の概況

十和田湖は、青森・秋田両県に跨る湖面積61km²、集水域67km²、最大水深327.0m、平均水深71.0m、湖容積4.2×10⁹m³、滞留時間8.5年の二重式カルデラ湖である。

十和田湖における水温の鉛直構造に関する研究は、最も深い中湖（図1参照）における吉村によるもの^{1), 2)}に端を発し、その後、水質の化学的調査も含めて庄司らによって行われている³⁾。

十和田湖の水質は1986年以降、環境基準（湖沼AA類型：COD 1 mg/L以下）を達成できない状況が続いており、透明度の低下やヒメマス漁獲高の減少が問題となっている。

青森県では、水質改善・保全を目指して、これらの現象の要因を解明するために、1995年から2000年に国立環境研究所などと共同研究を行った。これらの共同研究の結果、透明度などの水質や動植物プランクトン群集の種と構造に対しては、ヒメマスやワカサギなどの魚類の影響が大きく、生態系管理の重要性が明らかになった¹¹⁻¹⁸⁾。

これを受けて、2001年8月に秋田県と共同で「十和田湖水質・生態系改善行動指針」を策定し、水質や生態系の調査研究を継続している。この他に、周辺の事業場排水の調査¹⁹⁾や十和田湖周辺部にあった鉾山の廃水、下水道処理の影響の研究も行われてきた^{20), 21)}。したがって、十和田湖の化学的、生物学的研究は近年、盛んに行われてきた感があるが、一方で、物理

学的要素である水温の鉛直構造の連続測定については研究が行われていなかった。前述のように、水温の鉛直構造は湖を特徴付ける基本的要素であり、近年の電子技術の発達により、これを簡易なシステムにより連続測定することが容易になった。水温の連続測定により、その鉛直構造の解明をすることが、本報文の意図である。

3. 調査方法

調査は、十和田湖調査の定点で行った。図1にその位置を示す。定点にブイを設置し、このブイから垂らしたロープに耐圧型の水温計を装着した。水深は0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 85mとした。耐圧型の水温計はOnset社のStowAway TidbiTであり、計測範囲が-4~37℃で、精度として0.2℃が保証されており、耐圧水深が300m、記憶容量32520点、電池内蔵型で寿命が5年間のものであった。浸水前にパーソナルコンピュータ(以下、PCと呼ぶ。)から光通信により1時間ごとのデータ取り込みを指示し、PCから切り離して、2002年10月18日に浸水した。調査の途中経過を知るために2003年10月16日に水温計を一旦引き上げ、PCと接続してデータ読み込みを行い、2003年10月22日に再浸水して、2004年10月12日に引き上げ、データを読み込んだ。ただし、2003年10月22日から2004年10月12日までの水深0mの水温計は不調のため、データを取り込めなかった。

水温は1時間毎に測定したが、気温と比較して日内変動が少ないためと、データの大きさの都合とから、一日の24個のデータを平均して解析に供した。なお、データが膨大な量であるため、平均化はMicrosoft社Excelのマクロ機能を利用して行った。また、解析で気温との相互相関解析を行ったが、これはフリーソフト²²⁾で算出した。また、気温のデータは十和田湖畔の休屋でのアメダスのデータを用い、2002年アメダス年報²³⁾および2003年速報値²⁴⁾を参照した。このデータ集の中で気温は一時間値であるが、これも、Excelマクロ機能により一日平均値を算出して解析を行った。

等温線図および等密度線図は、各水層での水温や密度を自作プログラムでスプライン補間することによって描画した。

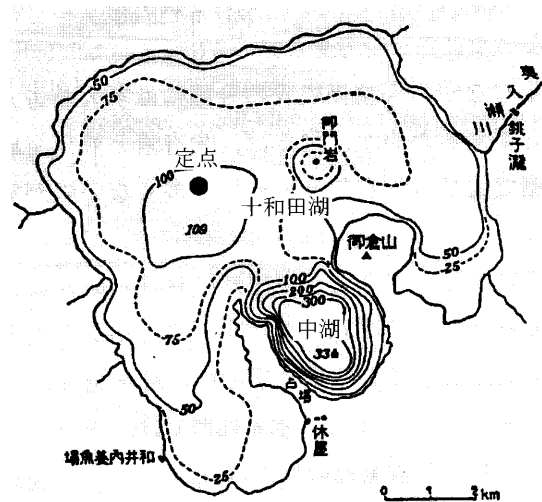


図1：十和田湖の調査地点の定点(●)と中湖

4. 結果と考察

4.1 水温の各層での経日変化

図2に十和田湖の水温と気温の一日平均値の測定結果を示した。図2で気温は2004年のデータがまだ公表されていないので、2003年のものまでを表示している。大雑把に気温の変動よりも遅れて水温が変動し、その変動は水深が浅いほど大きかった。30m以深では水温は冬季に低くなるものの、それ以外の季節ではほぼ一定であった。一方、それよりも浅い層では、水温が気温に大きく影響されていた。11月から12月にかけては、水深20m以浅では水温が各層で同じになり、晩秋から初冬にかけて水温躍層が発達していたと考えられる。また、12月から5月にかけては、各層でほとんど同じ水温が観測されたが、各層で微妙な水温の差異があり、循環期が認められた。このデータを詳細に検討した結果については後述する。

また、2003年と2004年の夏季の水温を比較すると、後者のほうで水温が高くなっていた。2004年の気温のデータは本報告では示せなかったが、これは2004年が猛暑であったからと考えられる。

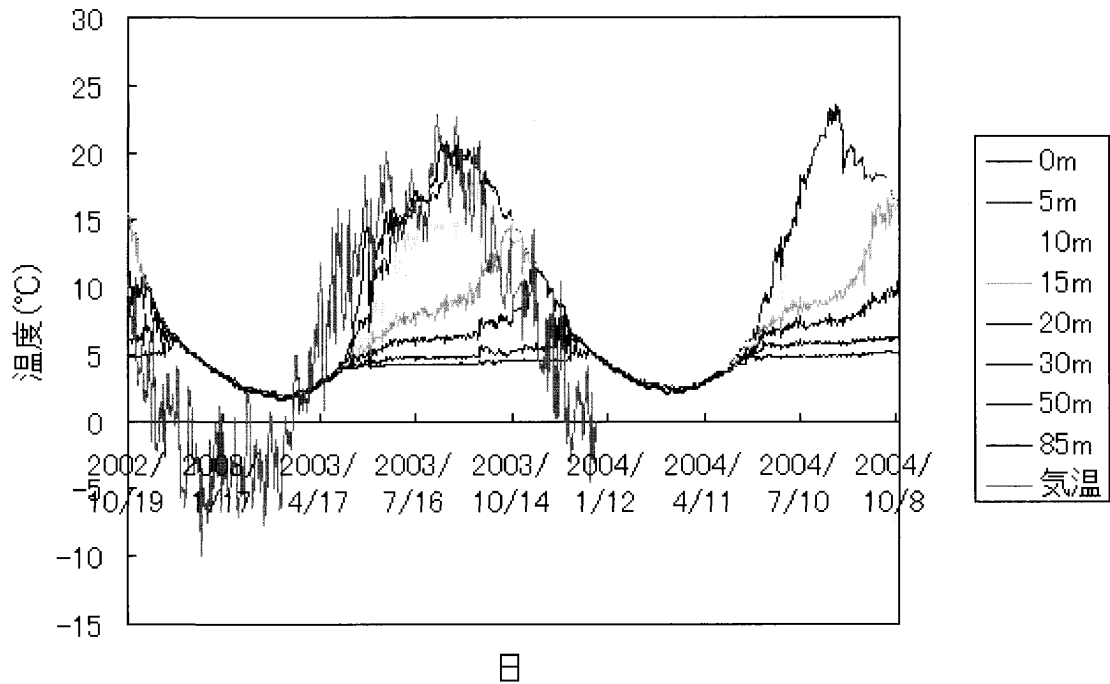


図2：十和田湖定点における各層の水温と湖畔での気温の経日変化

4.2 水温と気温の相互相関

相互相関とは、二つの時系列データがあった場合に、時間をずらしたデータの相関を取り、相関係数の大きさをグラフに表したものである。図3に2002年10月から2003年10月までの水深別の水温と気温との相互相関を示した。水深が浅ければ浅いほど気温との相関

が高く、また、表層に近いほど気温の影響を早くに受けることがわかった。湖底の85m層でも少しではあるが気温の影響を遅くになって受けていることがわかった。なお、相互相関は1%の危険率でも、日差100日まで、すべての水温に関して有意であった。

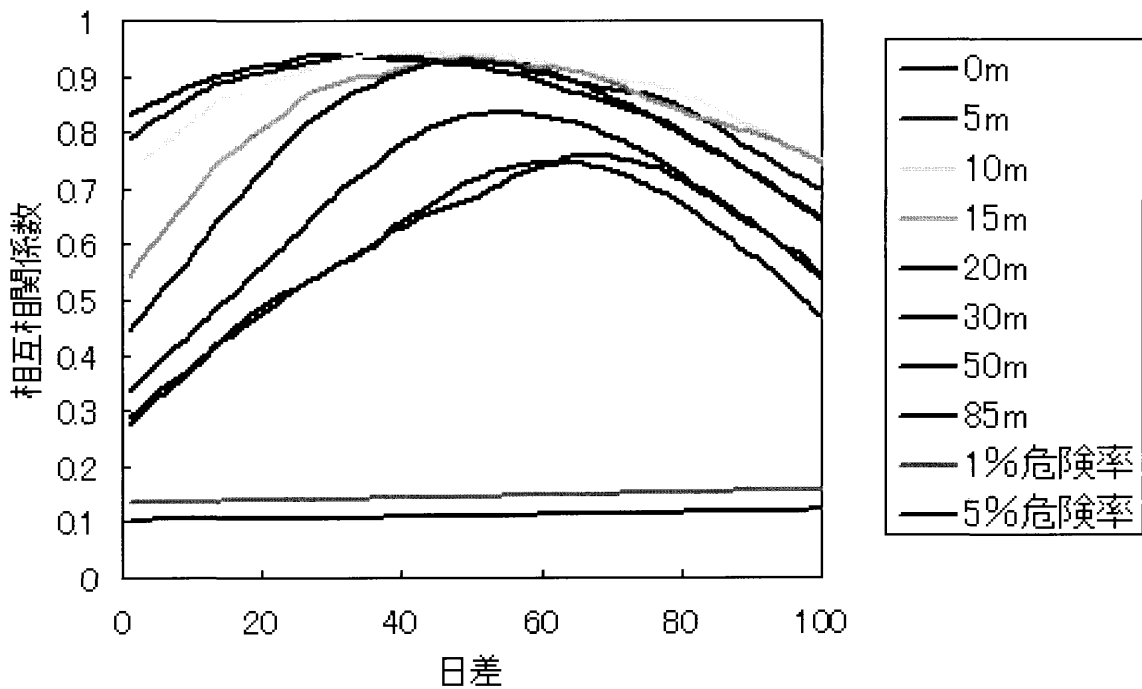


図3：十和田湖定点における各層の水温と湖畔での気温の相互相関（2002年10月～2003年10月）。

4.3 湖水の密度の経日変化

各層での水温から、湖水が純水であると仮定して、各層の密度の経時変化を知ることができる。温度と純水の密度との関係は、0℃から25℃までの0.1℃ごとの文献値²⁵⁾を3次式で補間することによって得た。使用した3次式は次のとおりである：

$$y = 5.53 \times 10^{-8}x^3 - 8.44 \times 10^{-6}x^2 + 6.45 \times 10^{-5}x + 0.99984$$

ここで、 x は水温(℃)、 y は密度(g/cm³)である。

図4に各層の密度の経日変化を示した。春季から冬季にかけて、水深の浅いところで密度が小さく、したがって浅いほど湖水が軽く、成層期であった。そして、厳冬期から春季にかけてはわずかながら、水深が浅いほど水の密度が小さくなっており、冬季停滞期であった。これは浅いところで水温が4℃を下回ったため、水温が低くなると4℃を境としてまた密度が小さくな

るためと考えられる。

それでは、循環期はどうかという問題が生じてくる。これは図4からははっきりとはわからないが、これを拡大した図5を見ると明らかである。すなわち、図5で赤色の矢印で示した1月中旬と5月上旬とに、湖の各層で湖水の密度が同じになっているのである。この時期が循環期と考えられ、今回の調査によって、十和田湖における循環期が年に2回あることが判明した。循環期には、各層で密度が同じになり、湖底からの栄養塩類の湧昇があると考えられ、十和田湖での表層方向への栄養塩類の供給があると考えられる。

温帯の湖沼はほとんどが二循環であると言われ、秋と春に循環期が認められる^{5), 6)}。十和田湖の場合、循環期は1月中旬と5月上旬との2回であった。水深が深く容積が大きいことや、温帯の中でも比較的冷涼な位置にあることなどが、この原因と考えられる。

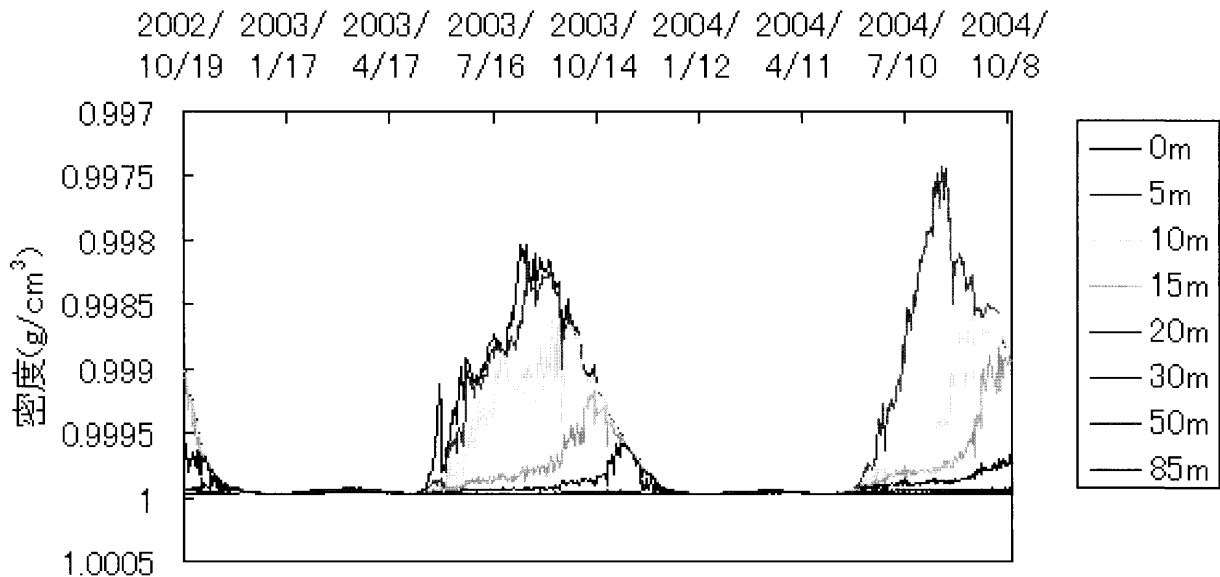


図4：十和田湖定点における各層の湖水の密度の経日変化

2002/ 2003/ 2003/ 2003/ 2003/ 2004/ 2004/ 2004/ 2004/
 10/19 1/17 4/17 7/16 10/14 1/12 4/11 7/10 10/8

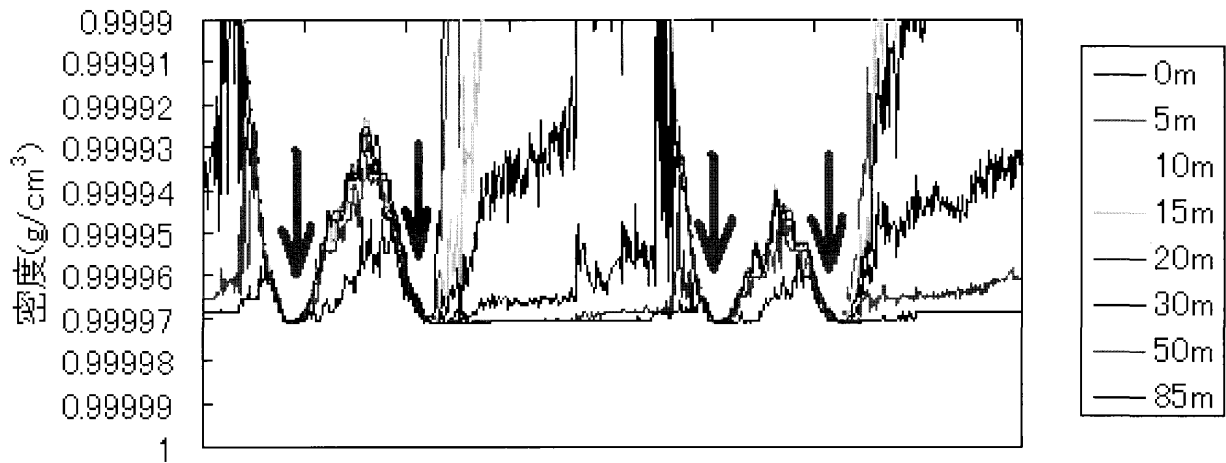


図5：図4の拡大表示。循環期を矢印で示した。

4.4 湖水の等温線図および等密度線図

図6に湖水の等温線図，図7に等密度線図を示した。

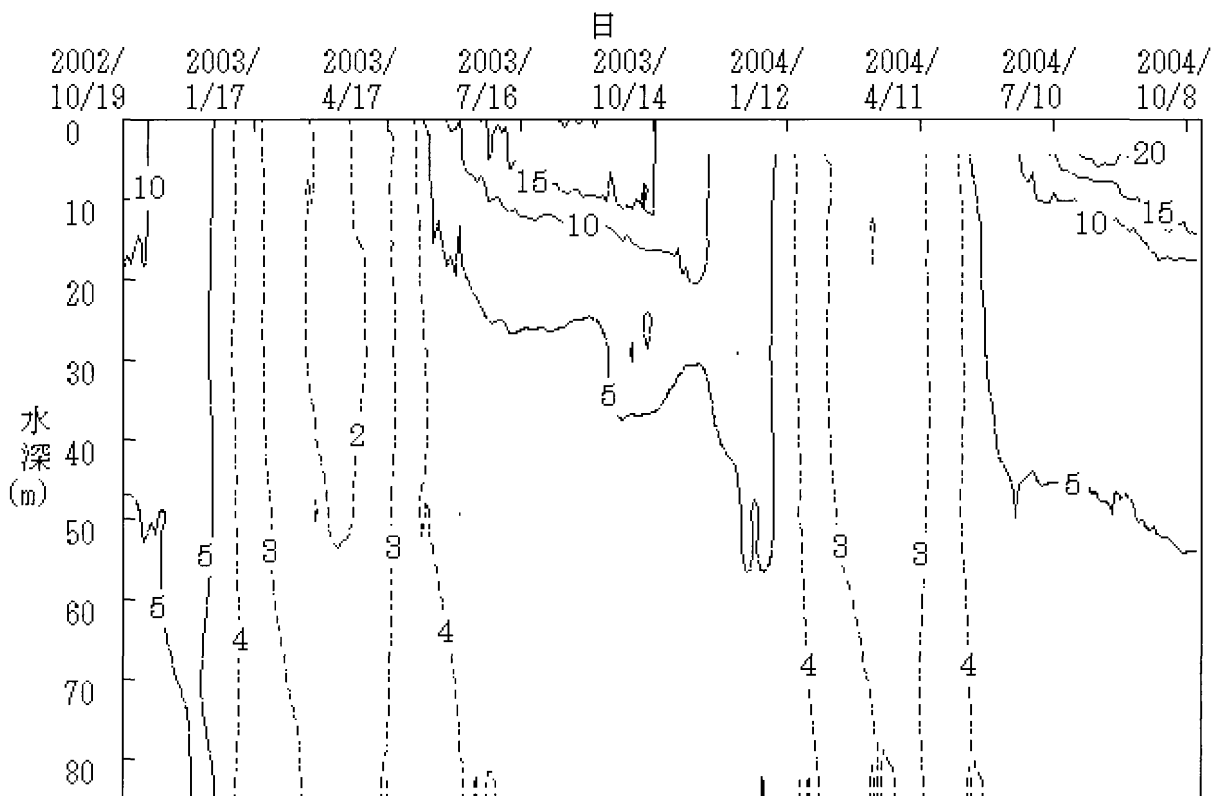


図6：十和田湖定点における湖水の等温線図。図中の数字は水温（℃）。

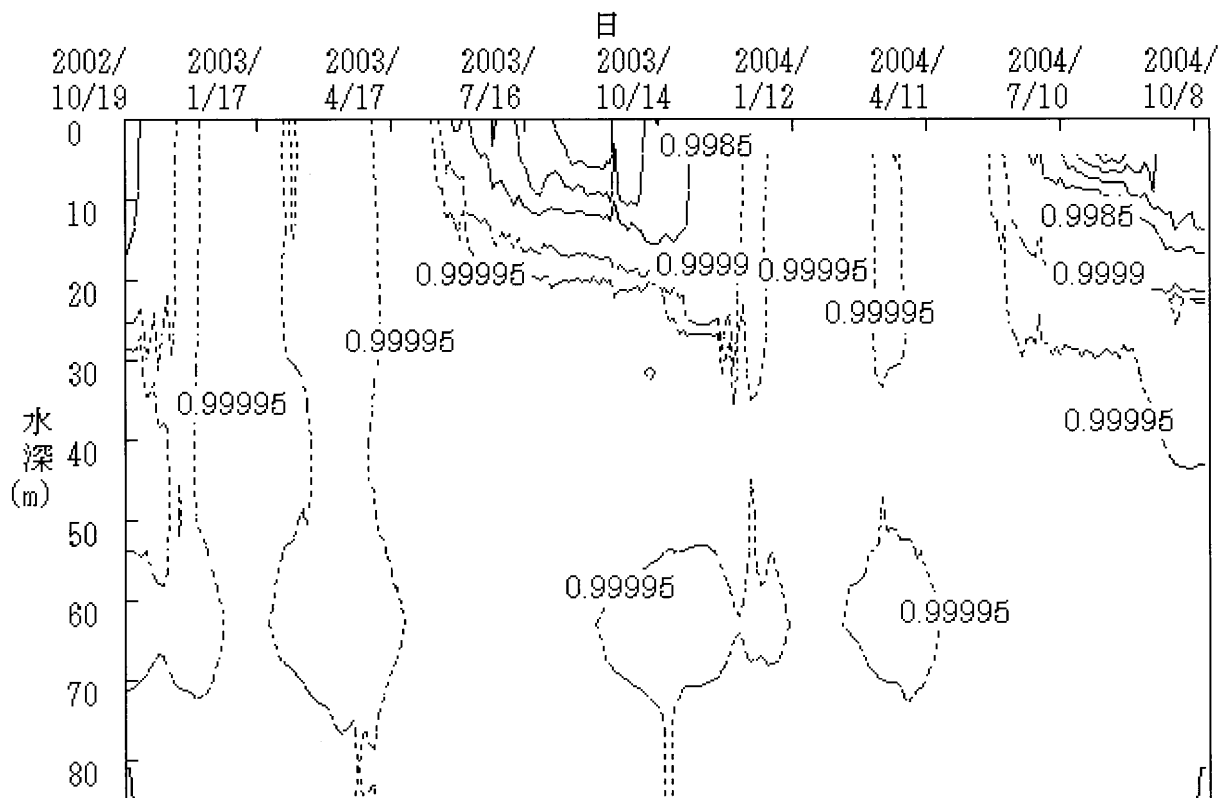


図7：十和田湖定点における湖水の等密度線図。図中の数字は密度 (g/cm³)。

図6で、前述のように、1月中旬と5月上旬に水温が各層で一定となっていることがわかり、循環期であることが明瞭である。また、この水温より算出した図7を見ても、これら循環期に各層で密度が等しくなっていることがわかる。

もうひとつ注意すべき点は、測定期間中の夏と冬の水温、密度の挙動である。図6をみると、まず夏のほうでは、2003年よりも2004年のほうが表層近くで水温が高くなっており、また、5℃のコンターラインも深いところにある。これは前に述べたように、2004年に猛暑だったことが原因と考えられる。そして、冬であるが、2002年から2003年にかけての冬は水温2℃のコンターラインに囲まれた範囲が広いのに対して、2003年から2004年にかけての冬は、2℃以下の範囲はほとんど存在しなかった。これは前者の冬が、後者の冬に比べて湖水の温度が低かったことを示す。このことは図7の等密度線図にも反映している。すなわち、前者の冬で密度0.99995g/cm³の線が深部まで広く囲んでいるのに対して、後者の冬では途切れており、囲んでいる範囲も狭い。これら等高線図はスプライン補間により描いたものであり、実測した水深幅の深いところで

は補間が難しいことも考えられる。この点に関しては、等間隔で水温計を設置するなどの対応が考えられ、今後の課題である。

5. 結 論

十和田湖調査定点の8層で水温を連続測定した。その結果、

- (1) 水深30m以下の浅いところでは、気温の影響を大きく受けていた。30m以深では、気温の影響は小さかった。
- (2) 気温と水温との相互相関を取ると、浅いところほど気温の影響を大きく、早く受けることがわかった。
- (3) 湖水の密度の季節変動から、十和田湖が二循環湖であることが判明し、それは1月中旬と5月上旬であった。これらの期間に湖底からの栄養塩類が湧昇する可能性が示唆された。

十和田湖における水温の連続測定は初めて行ったものであり、循環期の時期などの詳細な情報が得られた。現在も水温調査を続行している。

十和田湖ではCOD、窒素、リン、さらには動植物プランクトン、漁獲高についてのモニタリング調査を行っている。琵琶湖では、物理学的、化学的、

生物学的関連についての統括的な調査研究がなされてきている²⁶⁾。今後は、十和田湖においても、同様の検討を行うことが必要である。

文 献

- 1) 吉村信吉：深い温帯期の深層水温，海と空，423-439，1930.
- 2) 吉村信吉：湖沼学増補版，p.142，1976年，生産技術センター.
- 3) 庄司博光他：十和田湖の水環境－鉛直構造－，青森県公害センター所報，7，90-94，1985.
- 4) 奥田節夫他編：理科年表読本空からみる日本の湖沼，1991，丸善.
- 5) A. J. ホーン，C. R. ゴールドマン著，手塚泰彦訳：陸水学，1999，京都大学学術出版会.
- 6) 西條八束，三田村緒佐武：新編湖沼調査法，1995，講談社.
- 7) 福山龍次他：冬期間における春採湖の水理特性，北海道環境科学研究センター所報，25，31-36，1998.
- 8) 三上英敏他：豊似湖の陸水学的特徴，北海道環境科学研究センター所報，26，43-49，1999.
- 9) 蛭田真史他：松原湖水質自動モニタリングシステムによる湖水のpHの推移について，第37回日本水環境学会年会講演集，p252，2003.
- 10) 高村典子他：ワカサギの導入に伴う十和田湖の生態系の変化について，国立環境研究所研究報告，146，1-15，1999.
- 11) 高村典子他：ワカサギからヒメマスへ，1980年代と逆の優占魚種の変化がプランクトン群集と水質に及ぼした影響について－1995年-1997年の調査結果から，国立環境研究所研究報告，146，16-26，1999.
- 12) 三上一他：十和田湖における透明度と生物群集の変遷，青森県環境保健センター研究報告，8，15-26，1997.
- 13) 三上一他：十和田湖の透明度に及ぼす魚類の影響（1995-97），青森県環境保健センター研究報告，10，31-44，1999.
- 14) 婦山雅英：十和田湖のヒメマス資源管理，国立環境研究所研究報告，146，27-35，1999.
- 15) 鈴木俊哉他：十和田湖におけるヒメマスとワカサギの個体数変動，国立環境研究所研究報告，146，17-26，1999.
- 16) 東奥日報新聞（2000）十和田湖にまた脅威の親外來魚－ブラウントラウト確認，11月23日付け。
- 17) 三上一他：十和田湖の水位と流入河川の負荷量（1998），国立環境研究所研究報告，146，114-25，1999.
- 18) 三上一他：十和田湖の負荷量調査（1999-2000），青森県環境保健センター研究報告，11，21-36，2000.
- 19) 根岸勝信他：十和田湖周辺事業場の排水調査，青森県公害センター所報，8，98-104，1987.
- 20) 吉田毅他：十和田湖における鉾山廃水，下水道処理による水質の将来予測，青森県環境保健センター研究報告，13，32-46，2002.
- 21) 鉾山活動による十和田湖の水質変化（1970），青森県環境保健センター研究報告，13，70-76，2002.
- 22) <http://www.jomon.ne.jp/~hayakari/>参照。ユーザー登録すると入手できる。
- 23) 気象庁編集：アメダス年報2002年，（財）気象業務支援センター発行.
- 24) 気象庁編集：アメダス時日別資料2003年速報版・CSV形式，（財）気象業務支援センター発行.
- 25) 日本化学会編集：化学便覧基礎編p.432，1966年，丸善.
- 26) 宗宮功編著：琵琶湖－その環境と水質形成，2000年，技報堂出版.

Abstract

Water temperature in Lake Towada investigated by means of the continuous measurements

Ryuji Hanaishi, Hajime Mikami, Naofumi Nozawa, Shun Narita, and Akira Matsuo

Thorough October in 2002 to October in 2004, measurements of temperatures were continuously carried out at 8 layers, whose depths were from 0 m to 85 m, in Lake Towada. The temperatures of layers from 0 to 30 m depended highly on the air temperature, and on the contrary that of layers deeper than 30 m were almost independent of the air temperature and ca. from 4 to 5 °C. In winter and spring, on the other hand, mictic periods existed, and therefore the presences of the periods were considered to contribute to flow up of nutrient salts from the lake bottom.

Key words: Lake Towada, temperature of Lake water, mictic period