

地球温暖化が湖の水質に与える影響

— 霞ヶ浦と琵琶湖の約30年間の水質データの統計解析 —

北村友一* 南山瑞彦**

1. はじめに

大気中の温室効果ガス濃度の上昇による気温の上昇が報告され、日本においても、平均気温が1898年以降100年あたり約1.1℃の割合で上昇している¹⁾。琵琶湖や霞ヶ浦においても気温の上昇に追従した湖水温の上昇が報告されている^{2),3)}。気温の上昇は、物理・生態環境の変化を通じて河川や湖の水質に影響を及ぼすことが懸念されている。湖の水質に対する影響要因は、気温の他、流域の人口増加、土地利用の変化、下水道の整備などがあり、気候変動と水質の関係を解明するのは困難であり、その関係は必ずしも明らかでない。

地球温暖化が湖の水質に及ぼす影響を明らかにするためには、これまでに蓄積された基礎データを詳細に解析することが重要である。本報文では、既存の湖水質調査結果をもとに、約30年間の気温と湖の水質の変化の傾向を統計解析した。

2. 解析対象データ

霞ヶ浦（西浦）と琵琶湖（北湖）を解析対象とした。図-1は、霞ヶ浦と琵琶湖の諸元と解析対象地点である。霞ヶ浦は平均水深約4mと浅いが、琵琶湖（北湖）は平均水深約43mと深く、対照的である。霞ヶ浦の水質は、霞ヶ浦河川事務所から発表されている水質データ⁴⁾のうち、1973～2009年の西浦湖心表層のデータ、琵琶湖の水質

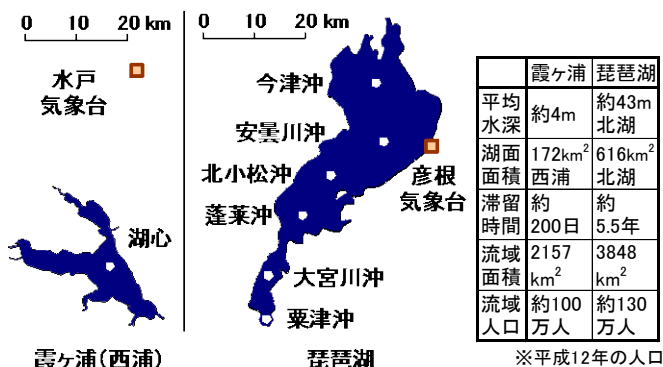


図-1 霞ヶ浦と琵琶湖の諸元と解析対象地点

は、琵琶湖環境科学研究センターから発表されている水質データ⁵⁾のうち、1980～2007年の琵琶湖表層6地点のデータおよび今津沖の水深別データを用いた。気象データは霞ヶ浦の解析では水戸、琵琶湖では彦根気象台の観測結果を用いた。データの統計解析はMicrosoft® Excel2002を用いた。

3. 解析結果

3.1 湖表層の水温・水質の変化

図-2は1973～2009年の水戸の月平均気温と霞ヶ浦湖心の各月の表層水温の関係、1980～2007年の彦根の月平均気温と琵琶湖安曇川沖の各月の表層水温の関係である。霞ヶ浦と琵琶湖のどちらも、湖水表層の水温は気温と高い相関を示し、気温が1℃上昇すると水温も約1℃上昇することがわかる。水深が60m近くある琵琶湖安曇川沖では、気温が経月的に上昇する4～6月は、気温10℃以上から、水温が急上昇する傾向を示し、気温が経月的に低下する10～12月は、気温の低下とともに水温が低下した。水深の浅い霞ヶ

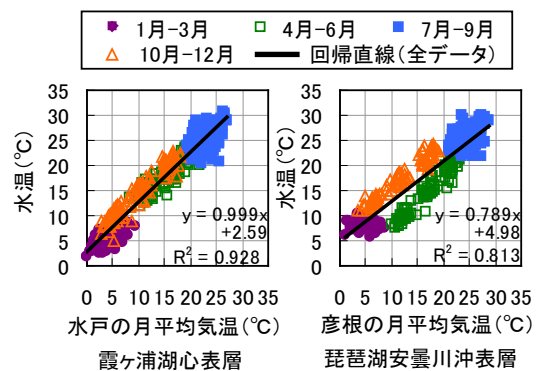


図-2 月別の気温と水温の関係

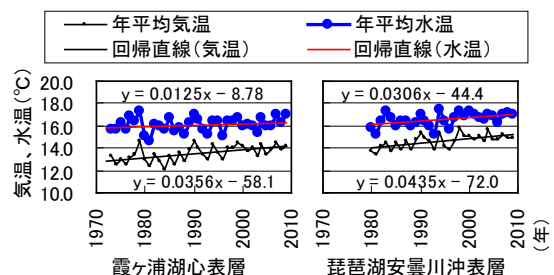


図-3 年平均気温と年平均水温の経年変化

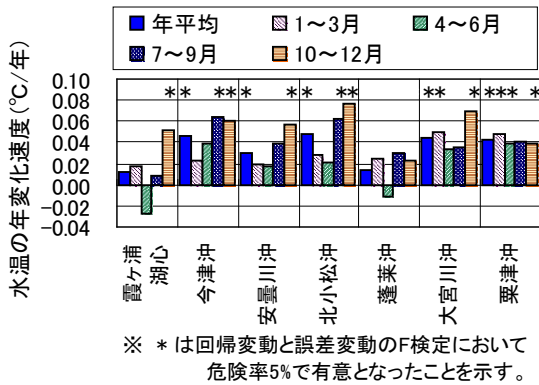


図-4 年平均および各季節の水温の年変化速度

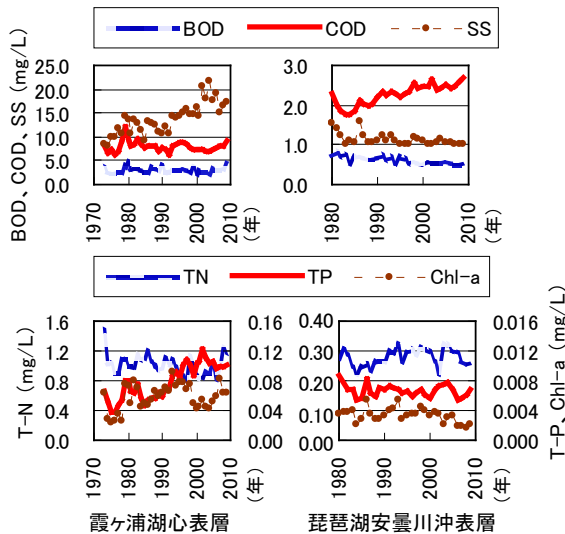


図-5 霞ヶ浦と琵琶湖の表層における主な水質項目の年平均値の経年変化

浦と琵琶湖南湖（図は割愛）ではこのような現象はみられなかったことから、安曇川沖表層の水温は水温躍層形成の影響を受け、水温躍層形成前は水温の上昇が小さく、水温躍層形成後に水温の上昇が大きくなると考えられる。

図-3 は、霞ヶ浦湖心と琵琶湖安曇川沖表層の年平均気温と年平均水温の経年変化である。霞ヶ浦と琵琶湖のどちらも、年平均水温は若干の上昇傾向を示した。年平均水温の変化速度を回帰直線

の傾きから求めると、霞ヶ浦は $0.012^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、琵琶湖は $0.031^{\circ}\text{C}/\text{年}$ となった。琵琶湖については、中室らによる表層水温の変化速度²⁾（安曇川沖で $0.028^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ）と同様の結果が得られた。年平均水温の変化速度は、年平均気温の変化速度と比較すると小さいことがわかった。

季節ごとの水温変化速度を把握するため、1～3月、4～6月、7～9月、10～12月に分けて水温の平均値を求め、経年に対する回帰直線の傾きを算出した。そして、回帰変動と誤差変動を用いたF検定から変動傾向が統計的に有意か否かを危険率5%で判定した。図-4は、霞ヶ浦と琵琶湖表層6地点における、各季節の平均水温の年変化速度である。霞ヶ浦では10～12月の平均水温の変化速度が他の季節と比較すると大きく、 $0.052^{\circ}\text{C}/\text{年}$ であった。琵琶湖では、表層5地点で年平均水温の増加傾向が統計的に有意となったことから、表層全域で水温が増加していると考えられる。季節ごとの平均水温の増加速度は地点によって異なり、今津沖、安曇川沖、北小松沖で7～9月と10～12月の平均水温の増加速度が他の時期と比較して大きかった。南湖の大宮川沖では、1～3月と10～12月の平均水温の増加速度が他の時期より大きかった。

図-5は、霞ヶ浦湖心と琵琶湖安曇川沖の主な水質項目の年平均値の経年変化である。霞ヶ浦湖心ではSS、T-Pが増加し、BOD、CODは横ばいであった。Chl-aは1999～2004年頃に一時減少したが、全体としては増加傾向であった。琵琶湖では、SS、BODが減少し、CODが増加していた。これらの水質の経年変化は、水温上昇によるものか、流域の土地利用の変化、人口増加、下水道普及率などの流域環境の長期的変化が影響し

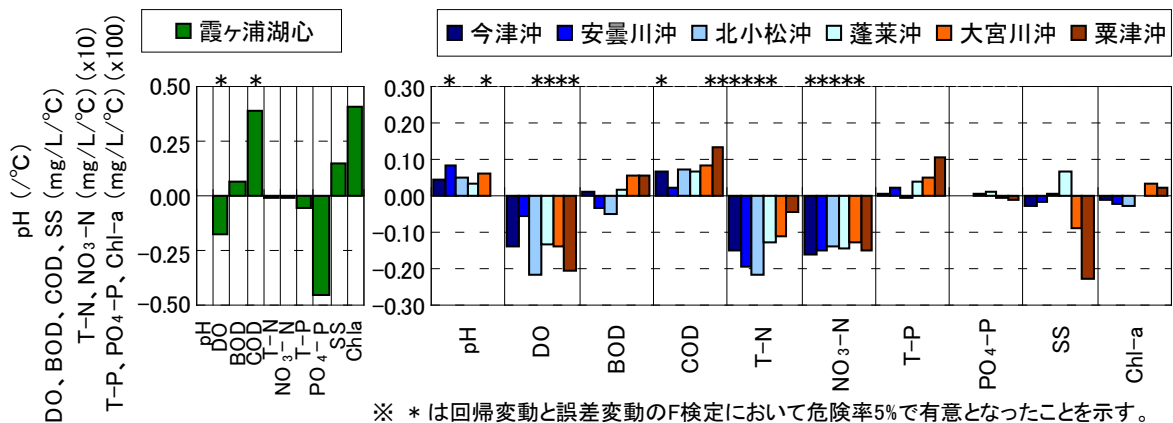


図-6 霞ヶ浦と琵琶湖表層における水温上昇に対する主な水質項目の変化値

ているのかは明らかではない。そこで、流域環境の長期変化の影響を排除し、水温と水質の関係を明確にするために、年ごとに年平均水温・水質について前年との差を求める隣接年比較法³⁾での解析を試みた。図-6は、隣接年比較法により算出した霞ヶ浦湖心と琵琶湖表層6地点の主な水質項目の水温1℃あたりの変化値である。霞ヶ浦では、水温とDO、CODが危険率5%で有意な相関を示した。BOD、SS、Chl-aの相関は良くないものの水温に対し上昇傾向であった。

琵琶湖では、2地点でpHが増加傾向を、4地点でDO、T-Nの濃度が、また、5地点でNO₃-N濃度が減少傾向を示した。DOの減少は、水温の上昇が飽和DO濃度を低下させたため、pHの増加とNO₃-N濃度の減少は、水温の上昇によって表層の藻類の増殖が促進されたためと考えられる。CODは今津沖、大宮川沖、粟津沖で有意な増加傾向を示した。Chl-aは有意な変化を示さなかった。このように霞ヶ浦と琵琶湖では、水温変化に対する各水質項目の応答が異なることがわかった。

3.2 琵琶湖水深別の水温・水質の変化

図-7は、今津沖（水深約90m）の各水深の水温、DO、NO₃-N濃度の各季節（1～3月、4～6月、7～9月、10～12月）の平均値の変化である。

特徴的な傾向を記述すると、水温は、今津沖では1～3月に湖水の循環のため水深によらず一定になった。7～9月の夏季の底層の水温は1～3月と概ね等しかった。DOは、水深80mと湖底上1.0mで4～6月に最も高く、7月から12月にかけて減少する変化をしていた。NO₃-N濃度は、表層から10mまでは、夏季の表層の藻類によるNO₃-Nの消費を反映し、7～9月に減少していた。1

～3月の水質の経年変化に着目すると、水深80mと湖底1.0mのDOが1988年、1993年、1998年、2007年に大きく低下し、それに伴いNO₃-N濃度が増大していた。底層のNO₃-Nの発生源は、底泥からの溶出と考えられ、NO₃-Nの溶出量は底層DOと関係があることがわかる。

水温変化と他の水質項目の変化の関係を解析するため、3.1と同様に隣接年比較法で解析した。図-8は、各水深における、主な水質項目の水温1℃あたりの変化値である。水温の上昇とともに表層では、pHとCODが増加し、NO₃-N、SiO₂濃度が減少した。表層0.5mにおけるCOD値の変化は+0.074 mg/L/℃であった。表層では水温の上昇によって藻類による一次生産が増加していると考えられる。Chl-aは、水温との相関は良くないものの、表層0.5mよりも、5～20mで増加が大きかった。

底層では、水温の上昇とともにpH、DO、COD、SS、Chl-aが減少し、SiO₂濃度が増加した。DOは、水深20m以上で水温上昇に対して有意な減少を示した。DO値の減少は水深80mが最も大きく、-0.97mg/L/℃であった。NO₃-N、PO₄-P濃度は、水温との相関は良くないものの、水温上昇とともに底層側で増加した。気温の上

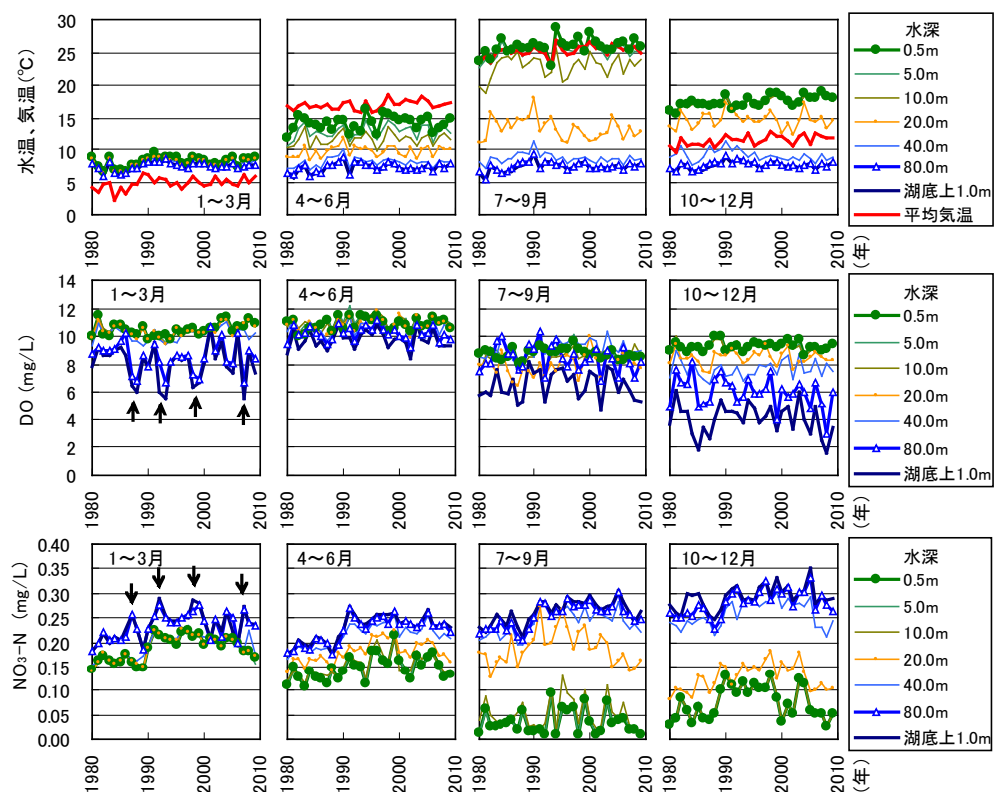


図-7 今津沖の各水深における主な水質項目の各季節平均値の経年変化

昇によって琵琶湖の水温が上昇すると、水深 20m 以上で DO が減少し、底泥からの栄養塩の溶出が増加すると考えられる。

このように、水温変化に対する各水質項目の応答は、水深によって異なることがわかった。

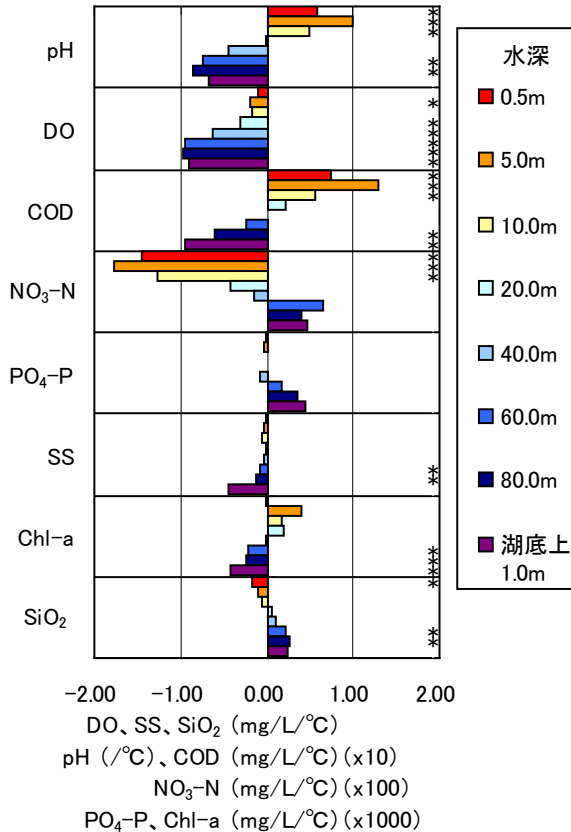


図-8 今津沖の各水深における水温上昇に対する主な水質項目の変化値

4. おわりに

地球温暖化が湖の水質に及ぼす影響を明らかにするため、霞ヶ浦と琵琶湖の既存の水質調査結果をもとに、約 30 年間の気温と水質変化の傾向を隣接年比較法より解析した。主要な知見を以下に示す。

- (1) 湖水表層の水温は気温と強い相関を示し、気温が 1°C 上昇すると水温も約 1°C 上昇した。
- (2) 霞ヶ浦と琵琶湖の年平均水温はそれぞれ 0.012°C/年、0.031°C/年で上昇していた。
- (3) 琵琶湖では、表層 5 地点で年平均水温の増加傾向が統計的に有意となったことから、表層全域で水温が増加傾向にあると考えられる。
- (4) 各水質項目の経年変化は、霞ヶ浦では SS、T-P、Chl-a が増加傾向を示した。琵琶湖では表

層全域で SS、Chl-a、BOD が減少傾向、COD が増加傾向を示した。

(5) 隣接年比較法から、水温の上昇に対する水質の変化を解析すると、霞ヶ浦では COD が増加傾向、DO が減少傾向を示した。琵琶湖の表層では、pH が増加傾向、DO と NO₃-N 濃度が減少傾向を示した。

(6) 琵琶湖水深別水質の隣接年比較法による解析では、水温の上昇とともに表層で、pH と COD が増加し、NO₃-N、SiO₂ 濃度が減少した。底層では、水温の上昇とともに pH、DO、COD、SS、Chl-a が減少し、SiO₂ 濃度が増加した。

(7) 霞ヶ浦と琵琶湖、琵琶湖の水深によって水温変化に対する水質の応答は異なることがわかった。

水温上昇による湖水質の変化は、湖によって異なることから、地球温暖化による湖の水質変化を予測するためには、引き続き、各湖での水質モニタリングが重要である。

参考文献

- 1) 文部科学省、気象庁、環境省：温暖化の観測・予測及び影響評価レポート「日本の気候変動とその影響」、2009.
- 2) 中室克彦、奥野智史、前澤希、坂崎文俊、田口寛、福永勲、西海暢展、加賀城直哉、服部幸和：琵琶湖における水温上昇の実態把握とその要因解析、水環境学会誌、Vol.31、pp.713～718、2008.
- 3) 福島武彦、上西弘晃、松重一夫、原沢英夫：浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響、水環境学会誌、Vol.21、pp.180～187、1998.
- 4) 水質調査データ、国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所
<http://www.ktr.mlit.go.jp/kasumi/suisitu/suishitsu.htm>
- 5) 水質モニタリング調査結果、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター
<http://www.lberi.jp/root/jp/22db/bkjindex.htm>

北村友一*



独立行政法人土木研究所
 つくば中央研究所水環境
 研究グループ水質チーム
 主任研究員、博士(工学)
 Dr. Tomokazu KITAMURA

南山瑞彦**



独立行政法人土木研究所
 つくば中央研究所水環境
 研究グループ水質チーム
 上席研究員
 Mizuhiko MINAMIYAMA