

# 【報文】 尾瀬の夏は暑くなっているか？

田子 博

## The summer of Oze, is it getting hot?

Hiroshi TAGO

尾瀬沼における 46 年間（1976～2021 年）の気温、水温および透明度の測定値を使って、それらのトレンドを解析した。その結果、気温と水温については上昇、透明度については低下のそれぞれ有意なトレンドが確認された。ただし、これらのトレンドは 20 世紀後半にはっきり認められたが、21 世紀に限ると有意ではなかった。データが年 1 回と限定されていたため、今回の解析結果が実情を反映しているかは議論の余地が大いにあるが、公共用水域のデータ解析にあたり、気候変動を念頭に置くことの重要性が示された。

Key words : 気候変動 Climate change, Mann-Kendall 傾向検定 Mann-Kendall trend test, Sen の推定量 Sen's slope estimator, 時系列分析 Time series analysis

### 1. はじめに

2018 年に気候変動適応法が施行され、その中に地域における気候変動に対する適応の強化が盛り込まれた。地域の気候変動の影響および適応に関する情報の収集及び提供等を行う拠点（地域気候変動適応センター）の確保が各都道府県、市町村に求められ、群馬県も 2021 年に群馬県気候変動適応センターを開設し、当所もその一端を担うこととなった。

環境研究に関しても、「気候変動」というキーワードは非常に重要視されるようになり、例えば 2021 年度に環境研究総合推進費による 40 件の研究成果がプレスリリースされているが、うち 25 件は気候変動が関係しているテーマである（環境再生保全機構、2022）。また、地方環境研究所においても特に大都市部を含む自治体を中心に気候変動に関する研究が行われており、様々な切り口から多くの成果（例えば、今井、2007；秋山と中嶋、2018；油座ら、2019；原ら、2020；木村ら、2021）が発表されている。

このように、これからの地方環境研究所においては行政、研究の両面ともに気候変動に関する取

り組みは必須となりつつある一方、当所においては気候変動を扱う部門がないこともあり、過去の気候変動に関わる解析事例は、中曽根と田子（2019）が県内の気温変化の解析の一例を、坂本ら（2022）が気温とオキシダント濃度の関係を示した程度である。そこで今回は、全国的にも知名度が高い尾瀬沼を取り上げ、群馬県が今までに測定してきた気温や水温等のデータを元に長期的な傾向の解析を試みた。ただし、利用可能なデータが限られているため、得られた結果が現状を正しく反映していない恐れが十分に考えられる。しかしながら、本報告は気候変動を意識した基本的な解析であり、今後の当所における研究の一助になると考えられるため、報告するものである。

### 2. 方法

#### 2.1. 調査地点

調査地点の尾瀬沼は、群馬県片品村と福島県檜枝岐村にまたがり、標高約 1660 m に位置する（図 1）。面積約 1.8 km<sup>2</sup>、最大水深 9.5 m、平均水深 5.8 m（矢島ら、2001、影山ら、2004）の比較的浅い天然山岳湖沼である。尾瀬沼を含む尾瀬



図1 尾瀬沼  
国土地理院地図を元に作成

地域は古くから日光国立公園の一部であったが、2007年に新たに尾瀬国立公園として独立し、特別天然記念物にも指定されている。こうしたことから、人為的な改変が厳しく禁じられている地域である。

その一方で、全国的な観光地でもある尾瀬には年間（通常5～10月）多くの観光客（入山者）が訪れ、その数は記録が確認できた1950年代後半の年間約5万人から1990年代前半には50万人程度に達し、入山者の増加による尾瀬沼の水質悪化が懸念されていた（矢島ら、1996）。その後1996年の約64万人をピークに入山者の減少が始まり、2019年には約25万人まで減少した（環境省、2022）。2020年からは環境省が入山者の把握方法を変更したため、公表された入山者数は激減し、2021年度の年間入山者数は約11万人と公表されている（環境省、2022）。

尾瀬沼の水質悪化対策のため、1990年代後半から2000年代前半にかけて下水道の整備が行われ、観光客のトイレ等の排水はほぼ全量が系外の河川に直接排出されるようになったため、尾瀬沼への排水の流入はなくなった。以上から尾瀬は、少なくとも2000年以降は人間活動に伴う環境負荷の増大は考えにくい。

## 2.2. 使用データ

群馬県は福島県と協力して尾瀬沼の水質監視を継続して行っており、筆者が入手可能であった資料は1976年のデータが最も古い。そこで、今回の解析では群馬県が測定した1976～2021年の46年間の気温、水温（表層）および透明度を解析対象とした。データの出典は1976～1979年および2015～2021年は群馬県衛生環境研究所年報、1980～2014年は群馬県が発行している公共用水

域水質測定結果である。

調査地点、時期および年間の調査回数は時代の推移とともに変化しており、当時から現在まで継続して各種測定値が存在していたのは湖心（図1参照、N36.925°，E139.306°）における夏（7月下旬～8月上旬）の調査結果のみであった。したがって、今回の解析はわずか年1回の測定値をその年の代表値として扱っており、加えて測定時刻も異なっているため、一般的に行われている気候変動に関する解析（年平均値を用いる、毎日のデータを用いる等）よりも結果の精度は大きく劣る点に注意を要する。

## 2.3. 統計解析

時系列の測定値について統計解析の手法はいくつかあるが、ここでは簡便な移動平均法に加えて、気象学や水文学の分野で広く用いられているMann-Kendall傾向検定（MKT）、Senの推定量（SSE）を用いる。また検定における有意水準は全て5%とした。

### 2.3.1. 移動平均

何年かの移動平均を求めて視覚的に判断する方法は簡便であり、トレンドの概要を知るには有用である。本報告においては、気象庁が気温や降水量のトレンドを見る際に使用している5年移動平均を適用する。

### 2.3.2. Mann-Kendall傾向検定

移動平均値は簡便であるが、客観性に劣るといふ欠点がある。これを補うための手法の一つにMann-Kendall傾向検定（MKT）があり、これは時系列データのトレンド判定に広く用いられている（吉澤、2017；上村と宮本、2018；Mishra et al., 2014；Atilgan et al., 2017；Alemu and Dioha, 2020；Sam et al., 2022）。具体的な計算方法や適用する際の注意点は上記文献の他、西岡と寶（2003）でも述べられているため、ここではその詳細は省略する。実際の計算はフィンランド気象研究所（FMI）が提供しているMicrosoft® Excelマクロをベースにした自動計算ソフトMAKESENS（FMI, 2002）を用いて行った。また、Zaiontz（2021）がWeb上に公開しているMicrosoft® Excelをベースにした手計算（MKTの定義に従って同ソフトの関数を利用して計算するもの）も併用し、両者の値が一致することを確かめた。

### 2.3.3. Senの推定量

MKT はトレンドの有無についての情報は与えるが、その大きさについての情報はない。このため、トレンド分析の主目的の一つである将来予測（本報告は将来予測が主目的ではない）を行う場合には別の手法を組み合わせる必要がある。当然ながら、以下の手法は MKT でトレンドがあると判定された場合にのみ適用する。

一般的にはトレンドは一次回帰で表され、回帰直線の傾きから将来予測を行う。一次回帰直線を求めるにはパラメトリック手法である最小二乗法が用いられることが多い。ただし、この手法は外れ値に対してロバスト（頑健）ではないという欠点があるため、ノンパラメトリック手法が採用される場合も少なくない。どちらの手法を用いるかは研究者の裁量に委ねられる部分が多く、同じ気温のトレンド分析でも文献によって両方の手法が混在している。今回はトレンド検定にノンパラメトリック手法である MKT を採用したこと、1回/年のデータで変動が大きいことを考慮して、傾きの推定についてもノンパラメトリック法の Sen の推定量（SSE）を採用した（Gocic and Trajkovic, 2013; Mishra et al., 2014; Alemu and Dioha, 2020）。SSE の計算も MKT と同様のツールを用いて行った。

なお、用いるデータに自己相関があると、ノンパラメトリック検定は誤った結果になる場合がある。今回使用したデータの質から自己相関はないと思われ、実際に検定を行っても自己相関は認められなかった。したがって、データに対して白色化などの前処理は行わずに、各種統計量の計算を実行している。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 移動平均によるトレンド

図2に尾瀬沼における気温、水温および透明度の5年移動平均を示す。気温は1990年代中頃までは明らかに上昇している。その後はゆっくりとした低下傾向を示し、最近数年になって再び上昇するという動きを示しているが、調査期間全体を通しては上昇傾向と言える。

水温に関しては、気温と比較すると各年の温度変動が小さく、調査期間を通してゆっくりだが一貫した上昇傾向を示している。尾瀬では都市部と違い人為的影響がないため（Zeleňáková et al.,

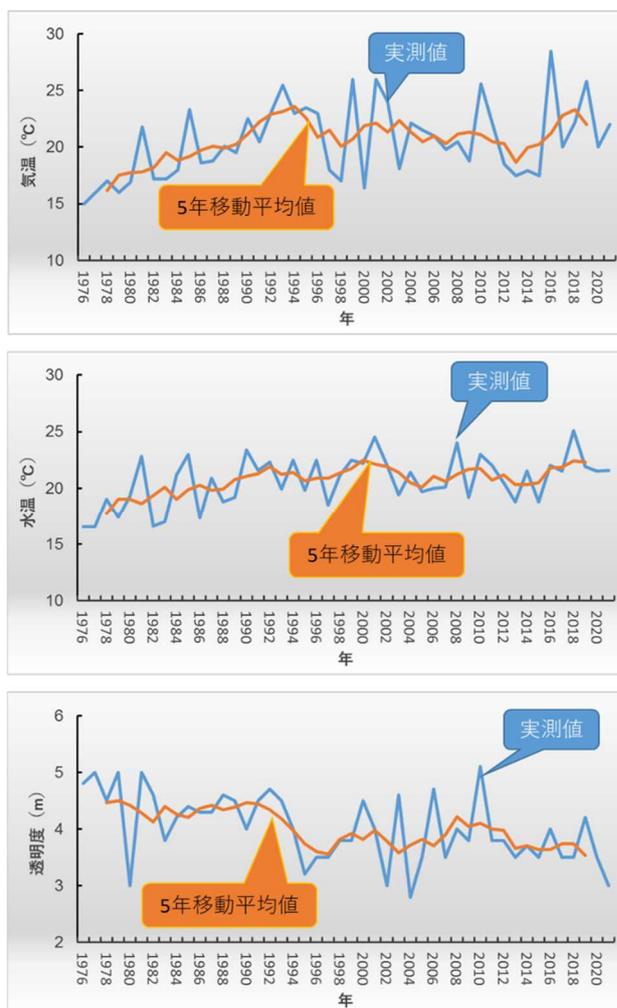


図2 尾瀬沼における気温（上）、水温（中）、透明度（下）の経年変化

2015; Sun et al., 2016)、水温の上昇は温室効果ガスによる気温の上昇を反映している可能性が高い。

透明度は気温や水温とは逆に緩やかな低下傾向を示した。一般的には透明度が高いと良好な水質であるため、水質は悪化傾向にあることになる。特に1990年代前半における低下が著しく、その後も横ばいしないし低下傾向であることから、排水が系外排出されても、水質の改善までには至っていない。あるいは、湖水温上昇による水質の低下（Jane et al., 2021）が排水の系外排出の効果を相殺している可能性がある。

#### 3.2. Mann-Kendall 傾向検定と Sen の推定量

MKT および SSE の計算結果を表1に示した。MKT から算出される統計量  $Z$  について、 $Z > 0$  かつ  $p < \alpha$  ( $\alpha$ は有意水準=0.05) の場合は上昇トレンド、 $Z < 0$  かつ  $p < \alpha$  の場合は下降トレンドがあると判定できる。いずれも有意なトレンドが検出され、気温および水温については上昇トレンドが、透明度については下降トレンドが認められた。こ

表 1 Mann-Kendall 傾向検定と Sen の推定量計算結果

n はデータ数、Q はトレンド回帰直線の傾きを示す。

	n	Z	p	トレンド	Q
気温	46	2.57	0.010	上昇	0.093
水温	46	2.50	0.012	上昇	0.071
透明度	46	-3.56	0.004	下降	-0.025

これらの結果は図 2 に示した移動平均の挙動と概ね一致している。

SSE から回帰直線の傾き Q が求まり、そこから回帰直線の式を決定し、実測値とともに図 3 に示した。1976～2021 年においては、気温は  $0.093^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、水温は  $0.071^{\circ}\text{C}/\text{年}$  上昇している。文部科学省ら (2013) の報告では日本全体の年間平均気温の上昇は  $1.15^{\circ}\text{C}/100 \text{年}$ 、すなわち  $0.0115^{\circ}\text{C}/\text{年}$  であるから、気温に関して今回の計算結果は非常に大きかった。これは前述したようにデータの質の問題があり、実情を反映しているとは言えないだろう。水温については、湖の個性によりトレンドは大きく異なり、新井 (2009) がとりまとめた世界各地の湖沼水温の変化傾向は  $0.0035\sim 0.09^{\circ}\text{C}/\text{年}$  であった。

また、透明度は  $2.5 \text{ cm}/\text{年}$  低下していることがわかった。矢島ら (1996) は、1965～1990 年の 25 年間の尾瀬沼の透明度を解析し、 $6.3 \text{ cm}/\text{年}$  の低下が認められたと報告している。この報告は夏季以外のデータも使用し、解析方法の詳細が不明であるため今回の結果と単純比較はできないが、透明度の低下速度が遅くなってきた可能性がある。排水の系外排出で水質の改善には至らないまでも、その効果の一部が現れ始めたのかもしれない。

1976～2021 年までの 46 年間においては、気温、水温および透明度の全てで有意なトレンドがあることがわかった。しかしながら、図 2 において、それぞれの変化を解析期間の前半 (1976～2000 年) と後半 (2000～2021 年) に区切ってみると、特に気温と透明度においては後半のトレンドが明確ではない。そこで、前半と後半に分けて MKT をそれぞれ行くと、全ての項目で前半では有意なトレンドが認められたが、後半では有意なトレンドは認められなかった。つまりは、解析期間全体で認められたトレンドは主として 20 世紀中のことであり、21 世紀になってからは横ばいで推移しているというのが、今回使用したデータからの

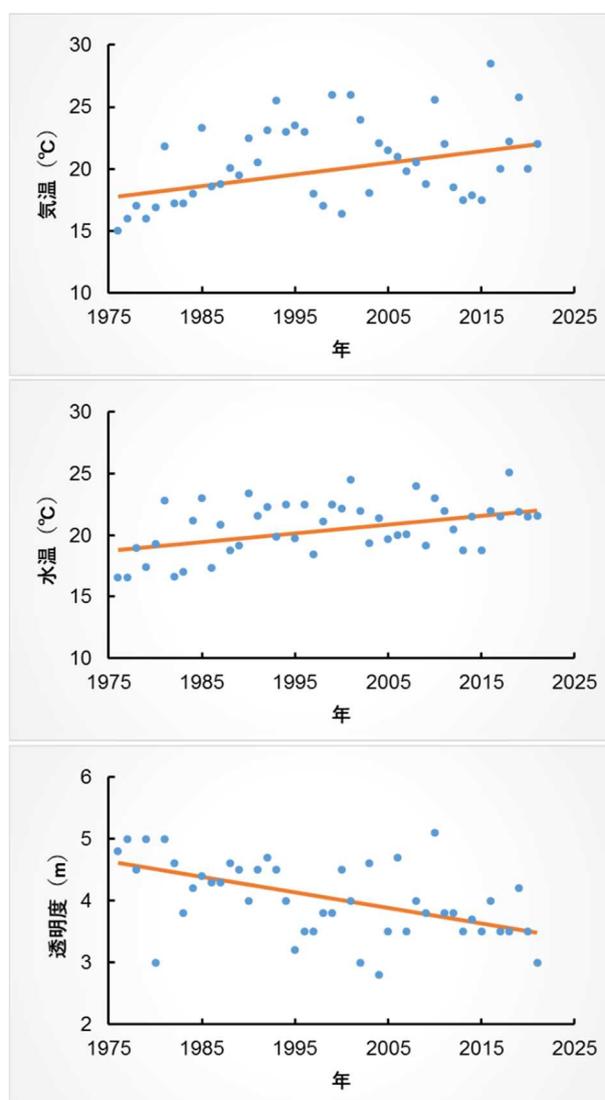


図 3 尾瀬沼における気温 (上)、水温 (中)、透明度 (下) のトレンド解析結果

解析結果である。このように解析対象期間によって統計解析結果が変わることがあるため、移動平均法による視覚的結果を参照しながら MKT による解析をすることが重要である。

### 3.3. 気温と水温の関係

湖の表層水温は周辺の気温の影響を強く受けることが多く (Yu et al., 2021; Xie et al., 2022)、特に霞ヶ浦 (北村と南山、2012) や児島湖 (野上、2013) のような面積に比較して水深が浅い湖 (面積、平均水深それぞれ約  $220 \text{ km}^2$ ,  $4 \text{ m}$ 、 $11 \text{ km}^2$ ,  $2 \text{ m}$ ) においては、表層水温 ( $y$ ) と気温 ( $x$ ) との間には非常に強い相関関係があるばかりでなく、それぞれ、 $y = 0.999x + 2.59$  ( $R^2 = 0.928$ )、 $y = 0.918x + 0.87$  ( $R^2 = 0.9523$ ) と、傾きが 1、切片が 0 に近い回帰直線 (つまり、表層水温と気温の差が小さい) が得られている。今回取得したデータを

使って、尾瀬沼について両者の相関を求めると、有意な相関ではあるものの、回帰式は  $y = 0.441x + 11.6$  ( $R^2 = 0.438$ ) と、傾きが小さく、切片が大きいのに加え決定係数も小さい。したがって、尾瀬沼については霞ヶ浦や児島湖ほど周辺の気温が表層水温に強く影響を与えていない結果となった。

これは一つには尾瀬沼がこれらの湖よりは深く、周辺の気温が水温へ影響するのにタイムラグが存在する（有泉と吉澤、2004、花石ら、2004）ことが考えられるが、前述したように使用したデータが1回/年のピンポイントの測定データであることが大きな原因と思われる。

#### 4. おわりに

尾瀬沼において、46年間（1976～2021年）の気温、水温および透明度のデータを使ってそれらのトレンドを解析した。その結果、気温と水温については上昇、透明度については低下のそれぞれ有意なトレンドが確認された。したがって、尾瀬の夏は暑くなっていると考えられる。ただし、これらの変化は主として20世紀後半に起きていた。使用したデータが夏季の年1回という非常に限定されたものであったことも考慮すると、これらのトレンドが今後継続するのかは、今回の解析から予測することはできない。しかしながら、質の高い（時間分解能の高い）データを入手できれば、今回示した手法を使って十分な精度の将来予測は可能であると思われる。

湖は気温を含む環境の変化に鋭敏に反応し（Thompson et al., 2005; Adrian et al., 2009）、その生態系や水質が変化することがある。尾瀬沼でもそのようなことが起こる可能性は十分に考えられ、水質だけでなくそこに棲む生物のモニタリングを続けていく必要があるだろう。また、水道水源になっているダム湖などでは、例えば水温の上昇に伴いシアノバクテリアが増殖し（Savadova et al., 2018; Paerl et al., 2020; Smucker et al., 2021）、人間が利用するのに好ましくない水質になることも考えられる。こうしたことに適応するためにも、Paerl et al. (2020) や篠原 (2020) が指摘しているように、気候変動（気温の上昇に限らず）を念頭に置いて公共用水域のデータを解析し、適応策を検討することが必要不可欠になってくるだろう。

## 謝 辞

本調査において、一部年度のデータが欠損しており、群馬県環境保全課から当該データの補填を受けた。関係各位に御礼申し上げます。

## 文 献

- Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H., Baines S. B., Hessen D. O., Keller W., Livingstone D. M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G. A., Winder M. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, **54(6)**: 2283–2297.
- 秋山諭, 中嶋昌紀. 2018. 不等間隔の月例観測データから見る大阪湾表層水温の経時的諸特性. *水環境学会誌*, **41(4)**: 83-90.
- Alemu Z.A., Dioha M.O. 2020. Climate change and trend analysis of temperature: the case of Addis Ababa, Ethiopia, *Environ Syst Res* **9**: 27.
- 新井正. 2009. 気候変動と陸水の温度および氷況の変化, *陸水学雑誌*, **70(2)**: 99-116.
- 有泉和紀, 吉澤一家. 2004. 富士五湖の水温について. *山梨県衛生公害研究所年報*, **48**: 67-71.
- Atilgan A., Tanriverdi C., Yucel A., Oz H., Degirmenci H. 2017. Analysis of Long-Term Temperature Data using Mann-Kendall Trend Test and Linear Regression Methods: The Case of The Southeastern Anatolia Region. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, **Vol. LX**: 455-462.
- FMI. 2002. <https://en.ilmati.tieteentaitois.fi/makesens> (2022年6月30日アクセス)
- Gocic M., Trajkovic S. 2013. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, **100**: 172-182.
- 花石竜治, 三上一, 野津直史, 成田俊, 松尾章. 2004. 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**: 23 -30.
- 原政之, 栗原諒至, 井出浩一, 嶋田知英. 2020. 気候変動適応への取り組み—暑熱環境対策を中心とした事例—. *保健医療科学*, **69 (5)**: 444-

- 452.
- 今井長兵衛. 2007. 大阪市における19世紀以降の夏季8月気候変化. *生活衛生*, **51(3)**: 160-171.
- Jane S.F., Hansen G.J.A., Kraemer B.M., Leavitt P.R., Mincer J.L., North R.L., Pilla R.M., Stetler J.T., Williamson C.E., Woolway R.I., Arvola L., Chandra S., DeGasperi C.L., Diemer L., Dunalska J., Erina O., Flaim G., Grossart H.P., Hambright K.D., Hein C., Hejzlar J., Janus L.L., Jenny J.P., Jones J.R., Knoll L.B., Leoni B., Mackay E., Matsuzaki S., McBride C., Müller-Navarra D.C., Paterson A.M., Pierson D., Rogora M., Rusak J.A., Sadro S., Saulnier-Talbot E., Schmid M., Sommaruga R., Thiery W., Verburg P., Weathers K.C., Weyhenmeyer G.A., Yokota K., Rose K.C. 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, **594**: 66–70.
- 影山志保, 角野猛, 諸岡信久. 2004. 尾瀬沼の水質に及ぼす人為汚染の影響. *陸水学雑誌*, **65**: 93-98.
- 上村晃平, 宮本仁志. 2018. Mann-Kendall 検定による日本での年平均平衡水温の長期経年変化の傾向分析. *土木学会論文集 B1*, **74(4)**: 577-582.
- 環境再生保全機構. 2022. [https://www.erca.go.jp/suishinhi/kenkyuseika/kenkyuseika\\_1\\_r03.html](https://www.erca.go.jp/suishinhi/kenkyuseika/kenkyuseika_1_r03.html) (2022年6月28日アクセス)
- 環境省. 2022. [https://www.env.go.jp/park/oze/oze\\_nyuzan\\_R3.pdf](https://www.env.go.jp/park/oze/oze_nyuzan_R3.pdf) (2022年6月29日アクセス)
- 木村道徳, 岩見麻子, 河瀬玲奈, 金再奎, 馬場健司. 2021. 地域社会まちづくりステークホルダーにおける気候変動適応と地域課題の関係構造の把握—滋賀県高島市の事例—. *環境科学会誌*, **34(2)**: 80-93.
- 北村友一, 南山瑞彦. 2012. 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—. *土木技術資料*, **54-3**: 6-9.
- Mishra N., Khare D., Shukla R., Kumar K. 2014. Trend Analysis of Air Temperature Time Series by Mann Kendall Test - A Case Study of Upper Ganga Canal Command (1901-2002). *British Journal of Applied Science & Technology*, **4(28)**: 4066-4082.
- 文部科学省, 気象庁, 環境省. 2013. 日本の気候変動とその影響
- 中曽根佑一, 田子博. 2019. 群馬県の気候変動に関する解析の一例. *群馬県衛生研究所年報*, **51**: 33-37.
- 西岡昌秋, 寶馨. 2003. Mann-Kendall 検定による水文時系列の傾向変動. *京都大学防災研究所年報*, **46B**: 181-192.
- 野上祐作. 2013. 気候変動が児島湖の表層水温に及ぼす影響. *岡山理科大学紀要*, **49A**: 19-27.
- Paerl H. W., Havens K. E., Hall N. S., Otten T. G., Zhu, M., Xu, H., Zhu G., Qin, B. 2020. Mitigating a global expansion of toxic cyanobacterial blooms: confounding effects and challenges posed by climate change. *Marine and Freshwater Research*, **71(5)**: 579-592.
- 坂本祥一, 熊谷貴美代, 田子博, 菅田誠治. 2022. 関東平野部における気象要因を考慮した近年の光化学オキシダント濃度変化の解析. *大気環境学会誌*, **57(5)**: 109-118.
- Sam M. G., Nwaogazie I. L., Ikebude, C. 2022. Climate Change and Trend Analysis of 24-Hourly Annual Maximum Series Using Mann-Kendall and Sen Slope Methods for Rainfall IDF Modeling. *International Journal of Environment and Climate Change*, **12(2)**: 44-60.
- Savadova K., Mazur-Marzec H., Karosienė J., Kasperovičienė J., Vitonytė I., Toruńska-Sitarz A., Koreivienė J. 2018. Effect of increased temperature on native and alien nuisance cyanobacteria from temperate lakes: an experimental approach. *Toxins*, **10(11)**, 445.
- 篠原隆一郎. 2020. 浅い湖沼における富栄養化研究のこれまでと将来展開. *陸水学雑誌*, **81(1)**, 19-31.
- Smucker N. J., Beaulieu J. J., Nietch C. T., Young J. L. 2021. Increasingly severe cyanobacterial blooms and deep water hypoxia coincide with warming water temperatures in reservoirs. *Global Change Biology*, **27(11)**, 2507-2519.
- Sun Y., Zhang X., Ren, G., Zwiers F.W., Hul T. 2016. Contribution of urbanization to warming in China. *Nature Clim Change* **6**: 706–709.
- Thompson R., Kamenik C., Schmidt R. 2005. Ultra-sensitive Alpine lakes and climate change. *Journal of Limnology*, **64(2)**: 139.
- Xie C., Zhang X., Zhuang L. Zhu R., Guoet J. 2022.

- Analysis of surface temperature variation of lakes in China using MODIS land surface temperature data. *Sci Rep*, **12**: 2415.
- 矢島久美子, 林治稔, 樋口洋一郎, 原善彦. 1996. 尾瀬沼の長期的水質変化について. 群馬県衛生研究所年報, **28**: 105-109.
- 矢島久美子, 山田昌彦, 藤波洋征, 吉田岳史, 茂木修一. 2001. 山岳湖沼の水質評価. 群馬県衛生研究所年報, **33**: 140-144.
- 吉澤一家. 2017. 山梨県内河川の水温、pH の長期変動. 山梨衛環研年報, **61**: 57-62.
- Yu S.J., Ryu I.G., Park M.J., Im J.K. 2021. Long-term relationship between air and water temperatures in Lake Paldang, South Korea. *Environ Eng Res*, **26(4)**: 200177.
- 油座郁美, 米屋由理, 原美由紀. 2019. 川崎市内における気温分布の推移傾向調査結果. 川崎市環境総合研究所, **7**: 16-24.
- Zaiontz C. 2021. REAL STATISTICS USING EXCEL, <https://www.real-statistics.com/> (2022年6月30日アクセス)
- Zeleňáková M., Purcz P., Hlavatá H., Blišťan P. 2015. Climate Change in Urban Versus Rural Areas. *Procedia Engineering*, **119**: 1171-1180.