

〈研究発表〉

滋賀県西の湖における水質の変動要因の分析とアオコ発生への影響

檜田 健生¹⁾, 佐藤 圭輔²⁾, 川上 奈津子³⁾¹⁾立命館大学大学院 理工学研究科 修士2回生
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail: ce0019xp@ed.ritsumei.ac.jp)²⁾立命館大学 理工学部 准教授
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail: k-sato@fc.ritsumei.ac.jp)³⁾㈱日吉 分析検査部 課長代理
(〒523-8555 滋賀県近江八幡市北之庄町908 E-mail: n.mine@hiyoshi-es.co.jp)

概要

本研究では西の湖流域の水質形成の特徴を捉えることを目的として研究を行った。流出入河川の調査や湖内の船上調査など現地調査に加え、汚濁の主因となっている窒素・リンの測定を行い、得られた結果から西の湖内部での形態変化や琵琶湖に流出する汚濁負荷の季節変動について考察した。また、近年問題となっているアオコについて、Chl-aを中心とする多変量解析を行うことで、アオコ発生への影響要因を捉えることを試みた。その結果、夏季の湖水における窒素形態の変化や、底泥によるリン供給能が確認され、アオコ発生への影響が推測された。

キーワード：琵琶湖内湖、水質、底質、季節変化、流入河川

原稿受付 2024.7.31

EICA: 29(2・3) 139-142

1. はじめに

西の湖（面積約2.8 km²、平均水深約1.5 mの淡水湖）は滋賀県近江八幡市に位置する琵琶湖内湖の一つであり、現存する内湖の中で最大規模の水域である。ラムサール条約湿地としてヨシ群落の保全地域に指定されており、深刻化している水質汚濁問題への対応が求められている。特に、近年問題視されている富栄養化（TN: 約2.2 mg/L, TP: 約0.18 mg/L, 2022）¹⁾ や、アオコの発生への対応が求められており、このような水質汚濁に対処すべく、汚濁の特徴や原因を把握することは効果的な改善方法²⁾の提案につながり重要である。

以上のような背景を踏まえて、本研究では西の湖流域の水質形成の特徴を捉えることを目的として研究を行った。具体的には、流出入河川の調査や湖内の船上調査などの現地調査に加え、汚濁の主因となっている窒素・リンの測定を行い、得られた結果をもとに形態別の構成割合を算出し、西の湖内部での形態変化や琵琶湖に流出する汚濁負荷の季節変動について考察した。また、既往調査¹⁾による約30年の水質データを用いて西の湖の水質変動とその要因を捉えるとともに、近年問題となっているアオコについて、Chl-aと水文気象特性との関係性や、高Chl-aとなる水質の特徴を分析することで、アオコ発生への影響要因を捉えることを試みた。

2. 方法

2.1 西の湖流域概要・現地調査及び水質測定方法

西の湖およびその流出入河川の調査地点は、既往調査³⁾を参考に設定した（Fig. 1）。流入河川は北から時計回りに小中排水路（R1）、安土川（R2）、山本川（R3）、蛇砂川（R4）の4河川であり、西側（白王橋：R5-1）より流出し、八幡堀からの水路と合流して長命寺川（R5-2）から琵琶湖へと流出する。各流入河川の流量構成比は、小中排水路5%、安土川26%、山本川34%、蛇砂川35%となっており⁴⁾、滞留時間（HRT）は19日程度である³⁾。なお、R5-2付近には、渡会堰が設置されており西の湖の低水位が制御されている。

調査は、春季（2023年4月19日、5月2日、5月16日）、夏季（2023年8月9日）、および秋季（2023

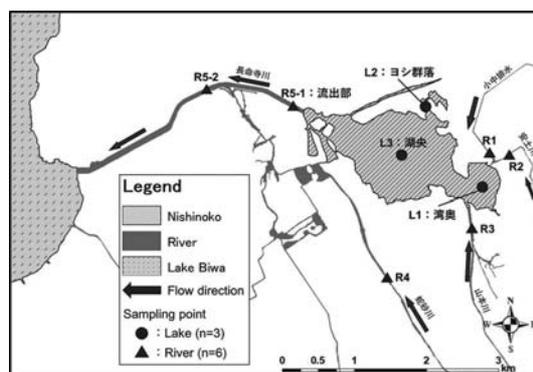


Fig. 1 Distribution of sampling points in lake and river water, Nishinoko Basin

年11月8日)に行った。河川ではそれぞれに架かる橋から表層水の採水を、湖沼では船上から水深ごとの採水と採泥を行うとともに、水質(水温、濁度、EC、pH、DO、ORP)鉛直プロファイルの現地計測を行った。底泥からは遠心分離にて上澄液を回収し、ろ過($\phi 1 \mu\text{m}$)することで間隙水を抽出した⁵⁾。環境水と底泥間隙水を対象に、オートアナライザ(QuAAtro2-HR)を利用して形態別栄養塩類(TN, TP, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$)を測定した。

2.2 データ解析方法

本研究の調査結果に基づき、西の湖における栄養塩類の季節変化を分析し、農地排水などの外部負荷と湖底泥からの内部負荷が与える影響を考察した。次に、1990年度から2021年度における調査結果(滋賀県)¹⁾を用いて、アオコ発生(Chl-aの増加)に与える湖水の水質と気象条件の影響を解析した。対象地点は湖心(L3)、各年4季節(5月、8月、11月、2月)からなる水質データ(Chl-a、水温、pH、TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、COD、BOD、SS)と彦根地方気象台の気象データ(GSR:全天日射量)の計13指標を利用し、統計解析にはバリマックス回転法による主成分分析(SPSS Statistics)を用いた。なお、アオコの発生状況が大きく変化している過去(1990-2005)と近年(2006-2021)に分けて比較分析を行った

3. 結果及び考察

3.1 西の湖の水質特性

(1) 湖水の窒素・リン濃度の季節変化

西の湖湖水の窒素・リンの形態別濃度を Fig. 2 に示す。TN、TPともに夏季で高い濃度が観測されたが、他方で $\text{NO}_3\text{-N}$ の枯渇と、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の増加も確認された。調査当日の湖水が緑色であったことに加え、湖上では特徴的なカビ臭を放っていたことから水中微生物の増殖がTN、TPの上昇や $\text{NO}_3\text{-N}$ の枯渇に影響

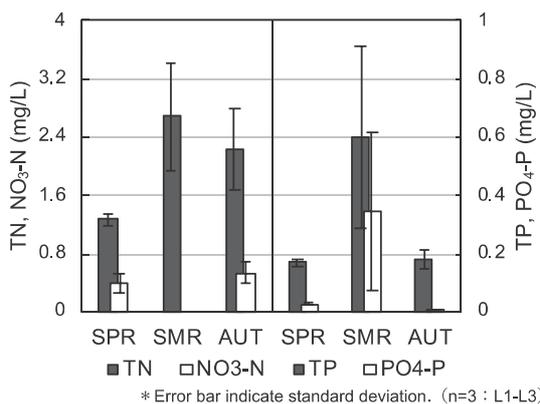


Fig. 2 Seasonal changes of concentration of N, P forms in lake

したと推測される⁶⁾。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が高かった理由は、底層DO、ORPが低い値(DO: $0.028 \pm 0.017 \text{ mg/L}$, ORP: $-223 \pm 7 \text{ mV}$)であったことから、貧酸素化した底泥からの高い $\text{PO}_4\text{-P}$ 溶出供給能が影響したと推測される。

(2) 夏季・西の湖における水深別リン濃度と内部負荷の影響

夏季の西の湖湖水におけるリン濃度の鉛直分布を Fig. 3 に示す。湖水における $\text{PO}_4\text{-P}$ は、地点差はあるものの、地点ごとの水深方向の濃度変化が小さく、概ね鉛直混合していると考えられた。また、各地点における間隙水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、湖水のそれに比べて5-6倍程度高く、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の大きな供給源となっている可能性が示唆された。特に、間隙水-湖水間で $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度比が地点によらず一定になっていることは興味深い結果である。一方、TPの変化にはSSの混入が多く影響し、底層で特に高かった理由は、底泥混入の影響と考えられる。

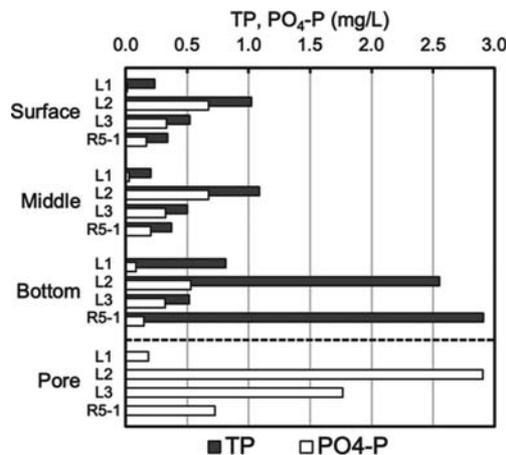


Fig. 3 Vertical distribution of phosphorus in summer lake water (2023. 8/9)

(3) 春季・代掻き期間におけるリン負荷

春季・代掻き期間における西の湖湖水のリン濃度を Fig. 4 に示す。右縦軸に濁度を併記した。代掻き期間には農地からの高濁度排水が流入するため、代掻き中期である5月2日では西の湖湖水の濁度上昇にも影響を与えたと考えられる。このため、湖水ではTPも高

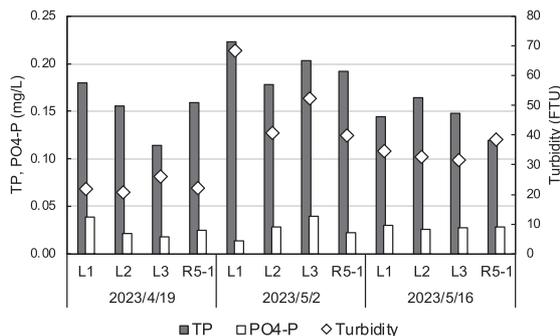


Fig. 4 Temporal load of TP in lake water during the plowing period

くなっていたと考えられる。特に高濁度流入が見られた湾奥部 (L1) ではその影響を大きく受けたものの、流出部である R5-1 では濁度が低下していることから、琵琶湖に対する内湖としての汚濁緩和効果が確認された。一方で、西の湖底泥に残留した栄養塩類を含む SS は、将来の内部負荷源となりうることも懸念される。

3.2 各種水質・気象特性が Chl-a の変動に及ぼす影響

西の湖湖心における Chl-a と各水質項目の移動相関 (8 年移動相関) を Table 1 に示した。高い Chl-a が問題視されている近年にかけて、pH、COD、BOD および全天日射量 (GSR) などと Chl-a との正相関が、また、無機窒素化合物 (NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N) と Chl-a との負相関がそれぞれ確認され、いずれもアオコの発生 (Chl-a の上昇) の直接的な関連性を示す結果が得られた。一方、PO₄-P と Chl-a との関係が正相関へと変化していることは、特に夏季において藻類等の消費を上回る PO₄-P 供給がさらに増加していることを示している。この理由としては、湖水鉛直混合の促進や水生植物による固定能の低下、あるいは流入水量変化による湖水滞留性の変化が考えられる。

Table 1 Rolling correlation of water quality items with Chl-a

Period	Correlation coefficient with Chl-a			
	1990-1997	1998-2005	2006-2013	2014-2021
Chl-a	1.00	1.00	1.00	1.00
W.T.	0.03	-0.17	-0.09	0.56
pH	0.12	0.40	0.41	0.82
TN	0.24	0.21	-0.16	0.40
TP	0.40	0.33	0.47	0.83
NH ₄ -N	-0.20	-0.34	-0.32	-0.46
NO ₂ -N	-0.13	-0.05	-0.04	-0.55
NO ₃ -N	-0.01	0.02	-0.23	-0.67
PO ₄ -P	-0.08	-0.21	-0.39	0.27
COD	0.43	0.48	0.64	0.87
BOD	0.67	0.72	0.55	0.87
SS	0.11	0.36	0.31	0.30
GSR	-0.22	-0.24	0.03	0.37

3.3 気象特性が Chl-a の変動に及ぼす影響

Chl-a を含む 13 指標を用いて実施された主成分分析の結果について、各主成分の寄与率を Table 2 に、年月ごとの第 1 主成分および第 2 主成分の得点を、入力データの固有ベクトルとともに Fig. 5 に示す。これらの結果から、第 1 主成分の寄与率が約 40% (回転後 31%)、第 2 主成分の寄与率が約 19% (回転後 22%) で、第 4 主成分までの累積寄与率は約 80% となった。また、第 1 主成分は Chl-a、pH、COD、BOD など藻類関連指標が統合されていたことから「アオコ関連指標」、第 2 主成分は水温、日射量、TN、NO₃-N、PO₄-P が統合され、季節によって明瞭な違

Table 2 Summary of explained variance in each principal component

Component	Initial Eigenvalues		Rotation Sums of Squared Loadings	
	% of Variance	Cumulative %	% of Variance	Cumulative %
1	40.3	40.3	30.9	30.9
2	18.7	59.0	21.7	52.6
3	11.7	70.7	16.6	69.2
4	10.2	80.9	11.6	80.9

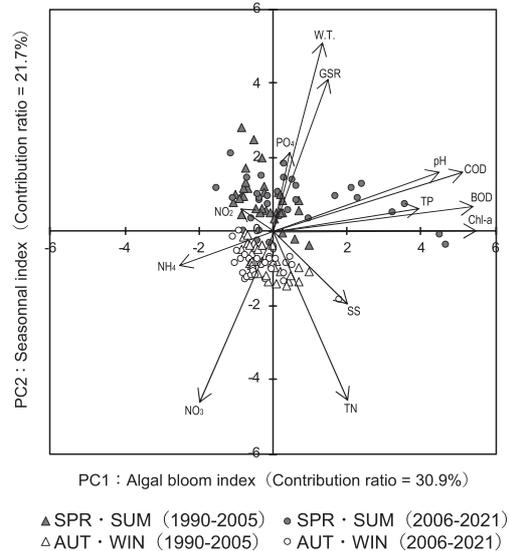


Fig. 5 Principal component Score Plot

いを示していたことから「季節関連指標」と解釈された。第 1 主成分はアオコの増減そのものを捉えており、特に近年の春・夏に高いスコアとなっていること、また、NO₃-N や PO₄-P などの無機栄養塩類が藻類に同化されて変化する傾向 (第 1 主成分スコアの増加) が捉えられていたが、これら無機栄養塩類の変化はむしろ第 2 主成分の主要指標となっていた。つまり第 2 主成分である季節関連指標にはアオコ増減とは別の機構が働いていると考えられ、水温上昇に伴う夏季の PO₄-P 上昇や NO₃-N 低下は、底泥からの内部負荷や脱窒活性上昇の影響を大きく受けているのでは無いかと推察された。

近年においてアオコが発生しやすくなった理由については、2005 年度に水草の刈り取りが行われたことで、底泥の巻き上げや鉛直混合の促進が影響している可能性、栄養塩類消費の競合関係にあった水草と藻類の関係が、藻類に有利な環境へと変化した³⁾可能性が考えられる。西の湖の環境改善と琵琶湖に対する影響の両面を考慮し、水・物質収支を捉えるための継続調査や内部負荷源の詳細調査、先行する天候 (降雨時期) の影響の解析を行うとともに、水流改善や底泥改善によってどのような効果が見込めるかを評価していきたい。

参考文献

- 1) 滋賀県：令和5年度版環境白書, pp.148-153 (2023)
- 2) 谷田清史, 藤井健嗣, 松野裕, 八丁信正, 越智士郎：西の湖の窒素・リン収支および人工湿地における水質浄化機能の解明, 近畿大学資源再生研究所報告, No.8, pp.39-45 (2010)
- 3) 滋賀県：西の湖の水環境改善対策, pp.11-27, 52-57 (2022)
- 4) 榎田健生, 佐藤圭輔, 川上奈津子：滋賀県西の湖流域を対象にした水質モニタリングによる汚濁負荷構成の特徴と季節変動の分析, 環境システム計測制御学会誌, Vol.28, No.2/3 (2023)
- 5) 宮原亮介, 佐藤圭輔, 柘植幹哉, 榎田健生：湖沼底質中のリン存在形態と底層水に与える影響の分析, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会講演概要集 (2024)
- 6) 築山直弘, 阪井俊夫, 吉田和弘, 横山幹朗, 一瀬諭：西の湖における植物プランクトンと栄養塩類等の関係性, 日本水処理生物学会誌別巻, No.41, p.23 (2021)