

湯ノ湖の湧水に関する研究

水環境部

人見 敬一¹ 前田 涼也 小林 奈央
尾形 将臣 千野根 純子 福田 悦子²

(¹ 現県南環境森林事務所) (² 前保健環境センター)

1 はじめに

湯ノ湖は流入水量における地下水である湧水の割合が大きいため、湧水の栄養塩類等の濃度が低くても湖沼水質に与える影響が相対的に大きい^{1),2)}と試算した。また、湧水と湖水との水温差が水温躍層の形成や酸素循環など湖内環境の形成に大きな影響を及ぼすと考えている。

しかし、流入位置が水中であること、流入範囲が広範であると想定されること等から、その水質や量の正確な把握は困難であり、これまでは湖岸に露出している湧水を調べ、湧出水の水質を把握してきた。

近年、湯ノ湖の水質が改善しており、水質形成を知る上で湧水を詳細に把握することは重要になりつつある。これまで湧水の存在が確認されている湯ノ湖の北西岸を対象に湧水調査³⁾を行ったが、今回、さらに通年で観測が可能な北東及び南岸湧水の流入位置を特定し、その水質を調査したので報告する。

2 方法等

2.1 採水方法

北西及び南岸湧水は湖岸表層のクラックから湧出しており、直接容器へ採水した。北東湾の湖底から湧出している北東湧水と湖水については、船上からバンドーン採水器により採水した。

2.2 湧水調査

地 点：北西、北東及び南岸湧水 (図1)

採水日：令和3 (2021) 年8月、9月、10月及び11月
令和4 (2022) 年2月、3月、4月、6月、
7月、8月、10月及び11月

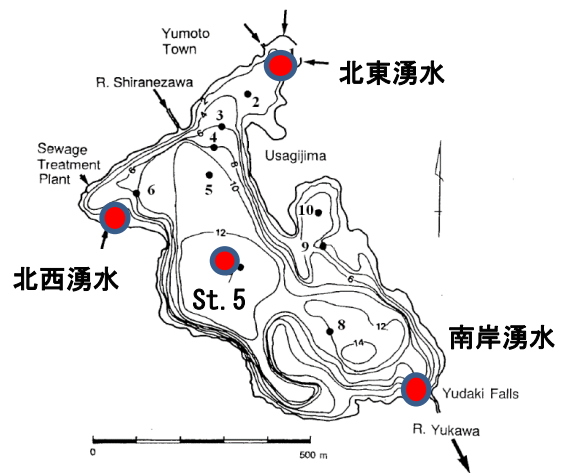
項 目：pH、電気伝導度 (EC)、無機イオン、栄養塩類、
鉄 (Fe) 及びマンガン (Mn) 等

2.3 湖水調査

地 点：湯ノ湖 St.5 (図1)

採水日：令和4 (2022) 年6月

項 目：水温、水深、pH、無機イオン、栄養塩類、
鉄及びマンガン等



国立研究開発法人 国立環境研究所
提供資料

図1 採水地点

3 結果

3.1 湖水と比較した各湧水の水質特性

湯ノ湖湖岸を踏査し、年間を通じて採水可能と判断した北西、北東及び南岸湧水を対象に分析した。その結果を表1から3に示し、湖水 (St.5 表層) の結果を表4に示す。また、令和4 (2022) 年6月に採水した湖水 (St.5 表層) の栄養塩類等の濃度で、各湧水の濃度を除した比率 (以下、「評価値」という。) を求め、湖水に対する各湧水の相対的な評価を行った。特に評価が高い項目を図2から4に示す。なお、佐々木ら²⁾は湯ノ湖の湖水水質が一地点で代表することができるとしており、今回、St.5 表層の濃度を湖水濃度とした。

各湧水と湖水を比べると、北西湧水はリン酸イオン (PO_4^{3-}) の年平均濃度が湖水の 8.8 倍であり、北東湧水は湖水の 9.6 倍であった。また、南岸湧水は、リン酸イオン濃度が湖水の 96 倍、アンモニウムイオン (NH_4^+) 濃度が湖水の 40 倍、Mn 濃度が湖水の 17 倍、全リン (TP) 濃度が湖水の 8.5 倍であった。

一方、北西湧水では令和3 (2021) 年10月にアンモニウムイオンが高濃度 (0.36mg/L) となったが、翌年の令和4 (2022) 年10月をはじめ、その他の採取月の試料においてもアンモニウムイオンは検出しなかった。

3.2 主な水質測定項目による各湧水の比較

各湧水の水質を比較するため、主な水質測定項目として EC、ナトリウムイオン (Na^+)、カリウムイオン (K^+)、マグネシウムイオン (Mg^{2+})、カルシウムイオン (Ca^{2+})、塩化物イオン (Cl^-)、硝酸イオン (NO_3^-)、硫酸イオ

ン (SO_4^{2-})、全窒素 (TN) 及び全リン (TP) の評価値を図5に示す。北西湧水は硝酸イオン濃度が高く、北東湧水は全リンと硝酸イオン、南岸湧水は、全リンが高かった。

4 考察

4.1 各湧水地点の地質と水質の関係

湯ノ湖の湧出地点における地質の状況⁴⁾から、北西湧水付近の地質は古い地層である鬼怒川流紋岩類の上に表土が覆っており、表土由来の成分が溶け込んでいると推測する。北東湧水付近の地質は新しい地層である三岳噴火による火山岩であり火山岩のクラックから湧出しており、その水質は火山岩による影響を受けていると考える。南岸湧水付近の地質は、鬼怒川流紋岩類の地層に三岳噴火による火山岩が巻き込まれているが、南岸湧水の水質は植物プランクトン等の地質以外の要因も水質に影響を与えていると考える。

4.2 湧水水質の特徴について

表1から4により南岸湧水の全リン濃度が高く、表5から北西湧水の全窒素/全リン (N/P) 比が高い。

若松ら⁵⁾は堆積岩が分布する集水域を有する河川で溶存無機リンが高いことを報告している。一方、木塚ら⁶⁾は火成岩である湖成堆積物と溶存無機リンの関連、特に湖成堆積物から地下水への溶存無機リンの供給を考察しており、リン酸イオンをはじめとする溶存無機リンが地質由来から供給されることが知られている。また、湖沼においては、溶存無機リンは植物プランクトンに取り込まれ懸濁態リンとなり、有機リンとして湖沼中に存在⁷⁾すると考えられている。

一方、湖沼で富栄養化が進行する場合、全窒素や全リン濃度が高まり N/P 比が低くなる⁸⁾。中島ら⁹⁾は湯ノ湖の N/P 比の経年変化については、平成4 (1992) 年から実施したしゅんせつ後に高くなったと報告している。また、表6から、湯ノ湖の N/P 比は年々高くなる傾向があり、TP は年々低くなっている。

このことをふまえると、北西湧水において全リンが湖水よりも濃度が低く、リン酸イオン濃度が高い理由は、湧出箇所では植物プランクトンの増殖が抑えられ懸濁態リンが少ない一方、リン酸イオンは地質由来から供給されていると推測される。また、北西湧水で、高濃度のアンモニウムイオンが検出されたことについては、植物プランクトンや沈水植物由来、火山岩等や大気中の窒素酸化物による沈着及び森林飽和¹⁰⁾等が考えられるが、さらに調査を継続したい。

また、北東湧水は、湧出状況から火山岩の影響を受けた水質であると考えられるが、懸濁態リンをはじめとした有機リンの有無を調べるため、今後、植物プランクトンの増殖を確認する必要がある。

さらに、南岸湧水は、他の湧水と比べ、全リン及びリン酸イオン、アンモニウムイオン濃度が高く、硫酸イオン及び硝酸イオン濃度が低い。全リン及びリン酸イオン濃度が高い理由は、植物プランクトン繁殖及び地質由来の両者が考えられるが、表5から、南岸湧水の N/P 比は低く植物プランクトン繁殖の可能性がある。硫酸イオン濃度が低い理由は温泉水の湧出地点や温泉排水口から、南岸湧水の湧出地点が離れているため温泉水の影響が小さくなっていることが考えられるが、硝酸イオン濃度が低くアンモニウムイオン濃度が高い理由について、湖底の還元環境下や湖底下の帯水層を経由したことに関連するのではないかと考える。

5 まとめ

湧水の影響が大きい湯ノ湖の水質について、通年観測可能な湧水(北西、北東及び南岸湧水)を対象に把握した。その結果、湧出地点周辺の地質影響により、それぞれの水質が異なる可能性が示唆された。

今後、自然負荷源である湧水の他に、流出入水の水質を把握することにより、湧水が湯ノ湖の湖水の水質に与える影響を明らかにできる可能性があると考えられる。特に、湯ノ湖におけるリン及び窒素類の成分については今後も注視したい。

6 謝辞

本研究にあたり、国立研究開発法人 国立環境研究所 河川湖沼研究室長 高津文人氏、客員研究員 三浦真吾氏、研究員 土屋健司氏、栃木県立博物館 主任研究員 河野重範氏におかれましては、採水、分析及び地質に関する知見等で御協力いただき深謝いたします。また、全国内水面漁業協同組合連合会 日光支所長 遠藤祐二氏、一般社団法人 自然公園財団日光支部 所長 桑名満氏におかれましては、操船及び採水拠点設営に御尽力いただき、厚く御礼申し上げます。

7 参考文献

- 1) 福田悦子他、湯ノ湖水環境保全調査 (湯ノ湖流出入水調査編)、栃木県保健環境センター年報第18号、

- 69-73、2013.
- 2) 佐々木貞幸他、新環境基準項目(底層D0等)のモニタリング手法および評価手法の構築に関する研究(第3報)、栃木県保健環境センター年報第25号、46-48、2020.
 - 3) 佐々木貞幸他、湖沼への地下水を介した流入フラックスの定量化に関する研究(第1報)、栃木県保健環境センター年報第26号、62-65、2021.
 - 4) 栃木県シームレス地質図 国立研究開発法人 産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページ.
 - 5) 若松孝志他、わが国における渓流水のリン酸態リン濃度とその規定要因、水環境学会誌、679-686、2006.
 - 6) 木塚俊和他、北海道東部の森林流域河川の溶存無機リン(DIP)濃度を左右する地質特性、陸水学雑誌、37-52、2023.
 - 7) 篠原隆一郎他、湖沼におけるリンの動態に関する近年の動向、地球化学、159-170、2017.
 - 8) 藤本尚志他、全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子との関係、水環境学会誌、901-908、1995.
 - 9) 中島孝他、湯ノ湖の湖沼環境の現状と保全にむけての問題点、国立環境研究所研究報告、150-172、2000.
 - 10) 飯泉佳子他、奥日光山岳河川(外山沢・五色沢)における水質特性と酸性沈着の影響評価、陸水学雑誌、153-164、2005.

表1 北西湧水の水質測定結果

項目 採取年月	pH	アルカリ度 meq/L	EC mS/m	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	TOC mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	TN mg/L	TP mg/L
R3.8	—	—	—	6.7	0.89	<0.02	2.2	11	1.4	<0.02	2.2	24	—	—	—	—	—	—	—
R3.9	—	—	—	6.7	0.92	<0.02	2.4	12	1.3	<0.05	2.7	26	—	—	—	—	—	—	—
R3.10	—	—	—	7.5	1.2	0.36	2.6	14	2.1	<0.02	3.3	28	—	—	—	—	—	—	—
R3.11	—	—	—	7.4	0.85	<0.02	2.5	13	1.5	<0.02	2.0	27	—	—	—	—	—	—	—
R4.2	7.2	—	17	12	1.8	<0.02	2.0	15	7.5	<0.02	1.4	33	—	—	—	—	—	—	—
R4.3	—	—	—	9.0	1.1	<0.02	2.6	14	2.6	<0.02	2.2	28	—	—	—	—	—	—	—
R4.4	—	—	—	6.7	0.77	<0.02	1.5	8.8	1.6	<0.02	2.5	19	0.043	—	—	—	—	—	—
R4.6	7.0	0.37	10	6.2	0.77	<0.02	1.7	9.5	1.4	<0.02	2.4	19	0.050	0.1	<0.01	<0.01	0.001	0.53	0.016
R4.7	7.1	0.52	12	7.1	0.92	<0.02	2.2	12	1.6	<0.02	2.4	24	0.043	<0.1	<0.01	<0.01	0.001	0.64	0.014
R4.8	7.0	0.38	9	5.9	0.73	<0.02	1.6	9.0	1.5	<0.02	2.2	19	0.035	<0.1	<0.01	<0.01	0.002	0.61	0.017
R4.10	7.0	0.41	10	6.5	0.79	<0.02	1.8	9.5	1.6	<0.02	2.7	21	0.047	<0.1	<0.01	<0.01	0.001	0.52	0.015
R4.11	7.0	0.51	12	7.4	0.89	<0.02	2.1	11	2	<0.02	2.3	19	0.043	<0.1	<0.01	<0.01	0.002	0.47	0.018

表2 北東湧水の水質測定結果

項目 採取年月	pH	アルカリ度 meq/L	EC mS/m	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	TOC mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	TN mg/L	TP mg/L
R4.2	7.3	—	7.0	5.3	1.0	<0.02	1.3	6.8	2.1	<0.02	1.1	8.2	—	—	—	—	—	—	—
R4.4	—	—	—	9.9	1.7	0.03	1.2	9.7	6.0	<0.02	1.3	16	0.074	—	—	—	—	—	—
R4.6	7.2	0.36	7.0	5.3	1.1	<0.02	1.0	6.1	2.3	<0.02	1.4	8.6	0.059	0.1	<0.01	0.01	0.005	0.35	0.033
R4.7	7.6	0.67	15	11	1.8	<0.02	2.0	14	6.4	<0.02	0.2	26	0.023	0.7	<0.01	0.01	0.010	0.54	0.039
R4.8	7.4	0.54	12	8.9	1.5	<0.02	1.6	10	5.2	<0.02	1.0	20	0.019	0.3	0.02	0.04	0.009	0.70	0.033
R4.10	7.2	0.39	8.4	6.2	1.2	<0.02	1.2	7.4	3.2	<0.02	1.3	11	0.056	0.2	<0.01	0.02	0.006	0.36	0.024
R4.11	7.2	0.38	7.0	5.0	1.0	<0.02	1.1	6.1	2.2	<0.02	1.4	8.9	0.055	0.2	<0.01	<0.01	0.005	0.29	0.023

表3 南岸湧水の水質測定結果

項目 採取年月	pH	アルカリ度 meq/L	EC mS/m	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	TOC mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	TN mg/L	TP mg/L
R4.4	—	—	—	7.9	1.7	0.39	4.2	9.7	4.9	<0.02	0.1	1.5	0.50	—	—	—	—	—	—
R4.6	7.5	1.0	12	7.6	1.6	0.43	4.2	9.6	4.9	<0.02	<0.02	0.99	0.46	0.4	0.18	0.34	0.005	0.42	0.179
R4.7	7.5	1.1	12	8	1.7	0.42	4.4	9.9	5.0	<0.02	0.02	0.85	0.45	0.3	0.15	0.35	0.005	0.42	0.157
R4.8	7.5	1.1	13	7.6	1.6	0.40	4.5	10	5.1	<0.02	0.04	1.2	0.44	0.3	0.15	0.36	0.006	0.71	0.160
R4.10	7.5	1.0	13	7.7	1.7	0.40	4.4	10	5.0	<0.02	<0.02	2.3	0.53	0.7	0.15	0.32	0.006	0.29	0.170
R4.11	7.6	1.0	13	7.6	1.6	0.38	4.2	9.7	4.1	<0.02	<0.02	3.0	0.49	0.3	0.20	0.32	0.007	0.41	0.180

表4 湖水(St.5 表層)の測定結果

項目 採取年月	pH	アルカリ度 meq/L	EC mS/m	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	TOC mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	TN mg/L	TP mg/L
R4.6	7.5	0.73	16	11	1.6	0.01	2.5	16	6.3	<0.02	0.90	27	0.005	0.4	0.01	0.02	0.006	0.37	0.02

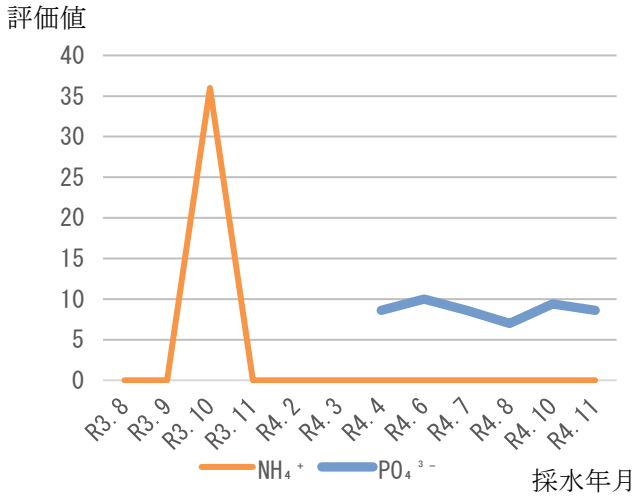


図2 北西湧水の高評価項目について

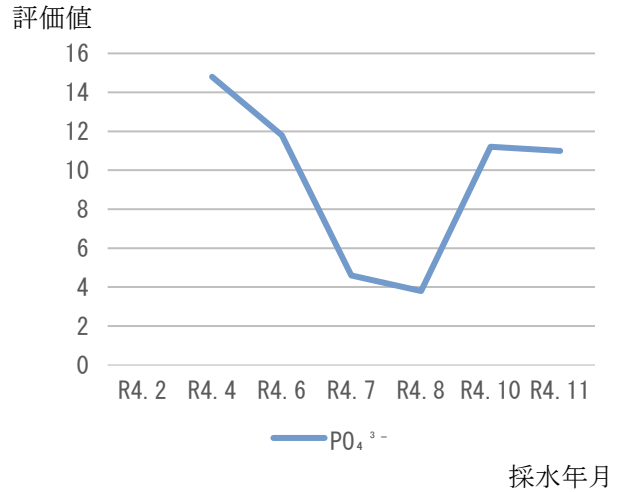


図3 北東湧水の高評価項目について

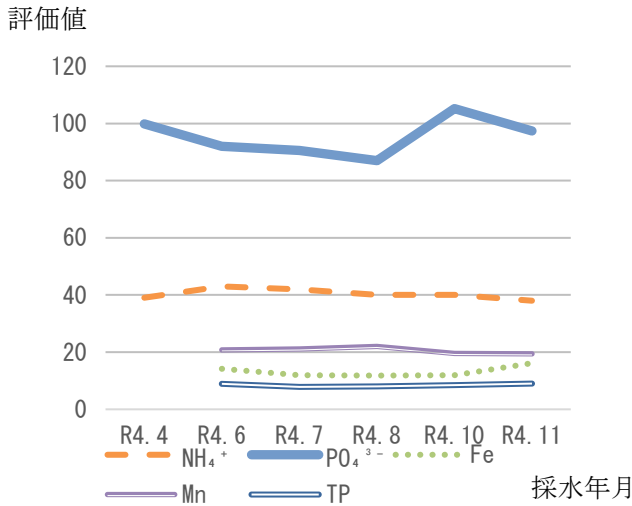


図4 南岸湧水の高評価項目について

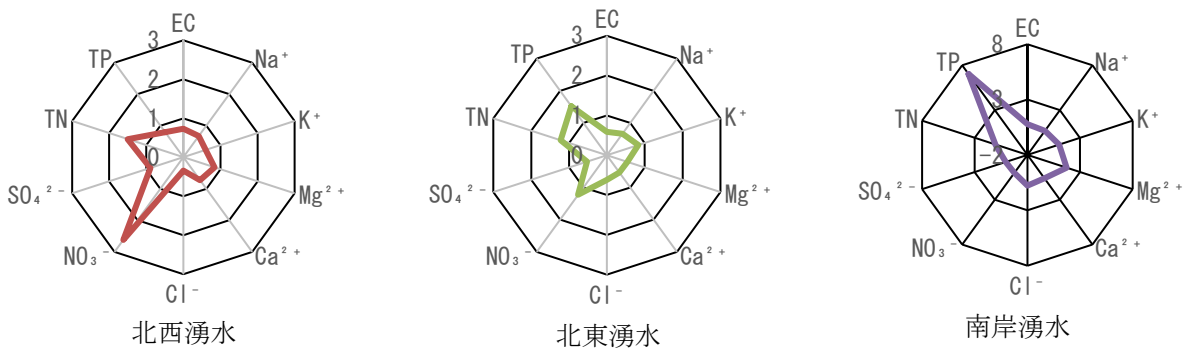


図5 主な水質項目による各湧水の評価値比較

表5 各地点でのN/P比

	N/P比
北西湧水	34
北東湧水	15
南岸湧水	3
湖水	19

表6 湯ノ湖の全窒素及び全リン

	TN mg/L	TP mg/L	N/P比
第一期 (昭和53~57年度)	0.29	0.039	7
第二期 (昭和61~平成2年度)	0.39	0.027	14
第三期 (平成10~12年度)	0.41	0.022	19
第四期 (平成18年度)	0.42	0.020	21
第五期 (平成23年度)	0.33	0.014	24