

湧水が湯ノ湖水質形成に与える影響に関する研究

水環境部

桐原 広成¹ 前田 涼也² 小林 奈央³
尾形 将臣⁴ 千野根 純子 大門 麻里子

(¹現化学部) (²現環境保全課) (³現医薬・生活衛生課) (⁴前保健環境センター)

1 はじめに

これまで、湯ノ湖は流入水量における湧水量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)}と報告した。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、湧水の位置が湖底等であること及び広範囲に分布していることから、その水質や量の正確な把握は困難であり、これまで湖岸に露出している湧水（北西湧水）のみを湧水の水質としてきた。

今回、これまでの北西湧水に加え、新たに北東湧水及び南岸湧水の水質を調査し、各水質を把握するため解析を行い、併せて汚濁負荷量を試算したので報告する。

2 方法等

2.1 採水方法

北西湧水、南岸湧水、St. 8、処理場放流水、白根沢、大どぶ、温泉排水及び温泉水は直接、容器へ採水し、北東湧水と湖水は船上からバンドーン採水器により採水した。

2.2 調査

地点 湧水：北西、北東及び南岸湧水
湖水：湯ノ湖 St. 4、St. 5、St. 6
流出水：湯ノ湖 St. 8
流入水：処理場放流水、白根沢、大どぶ、温泉排水及び温泉水

採水日：令和5（2023）年6月19日、8月2日、10月25日及び12月7日

項目：水素イオン濃度指数（pH）、電気伝導度（EC）、アルカリ度、無機イオン、栄養塩類、鉄及びマンガン等、化学的酸素要求量（COD）、全有機体炭素（TOC）

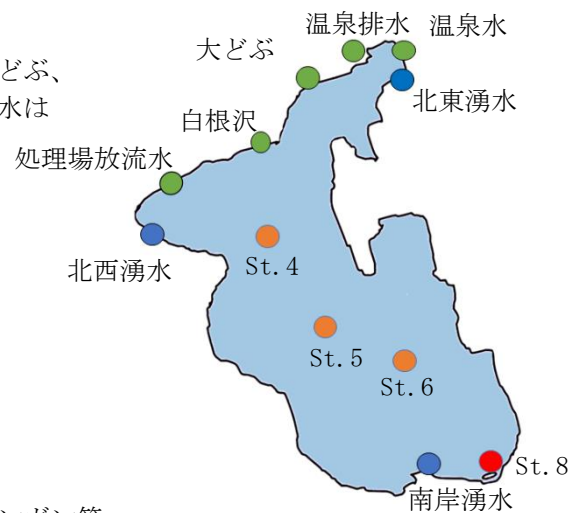


図1 採水地点

2.3 解析

ヘキサダイアグラムは、ナトリウムイオン、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオン及び炭酸水素イオンのイオン当量を求めた。

クラスター解析は、ナトリウムイオン、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオン及び炭酸水素イオンの各無機イオン、全リン、全窒素及びヒ素の濃度を用いて、ウォード法による階層クラスターを作成した。

汚濁負荷量は、福田らの報告¹⁾の各地点の流量を使用し、測定で得られた全窒素、全リン、化学的酸素要求量及び全有機体炭素濃度を乗じ、1日当たりの負荷量（kg）を求めた。ただし、処理場放流水の流量は、日光市下水道課からの聞き取りにより得られた流量を使用した。なお、処理場放流水、白根沢、大どぶ、温泉水及び湧水の各負荷量を求め合計値を流入負荷量とし、St. 8の流出負荷量との差から、流入負荷量が流出負荷量を上回る場合は湖内保持、流入負荷量が流出負荷量を下回る場合は湖内生産とした。

3 結果

3.1 各地点における水質分析結果

表1から表4に各地点における6月、8月、10月及び12月の水質分析結果を示す。各地点を比較すると、北西湧水は硝酸イオン濃度が高く、南岸湧水はリン酸イオン濃度が高い傾向にあった。また、8月の大どぶのCOD濃度が非常に高かった。

表1 6月における水質分析結果

採取場所	pH	EC mS/m	HCO ³⁻ mg/L	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	TN mg/L	TP mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	COD mg/L	TOC mg/L
St4 表層	7.6	18	46	12.5	1.9	<0.02	2.3	16	7.4	<0.02	0.69	31	0.01	0.25	0.02	<0.10	0.01	0.009		0.7
St4 底層	7.2	15	56	11	1.6	<0.02	2.5	16	5.6	<0.02	1.2	30	0.02	0.32	0.02	<0.10	0.02	0.007		0.4
St5 表層	7.7	17	46	12	1.7	<0.02	2.3	16	7.4	<0.02	0.61	30	0.01	0.22	0.02	<0.10	<0.01	0.009		0.7
St5 底層	6.9	20	57	15	1.9	0.56	2.4	18	9.5	<0.02	0.53	31	0.04	0.76	0.06	<0.10	0.33	0.008		0.5
St6 表層	7.6	17	46	13	1.8	<0.02	2.3	16	7.3	<0.02	0.62	30	0.01	0.46	0.01	<0.10	<0.01	0.009		0.8
St6 底層	7.1	18	55	13	1.9	0.90	2.3	16	7.7	<0.02	0.23	28	0.15	0.93	0.17	<0.10	0.53	0.020		0.6
北東湧水	7.2	13	34	9.9	1.6	<0.02	1.6	11	5.8	<0.02	1.1	21	0.04	0.42	0.02	<0.10	0.04	0.009		0.3
北西湧水	6.9	13	34	7.3	0.97	<0.02	2.4	13	1.8	<0.02	2.5	26	0.03	0.50	0.01	<0.10	<0.01	0.001		<0.1
南岸湧水	7.4	12	63	7.6	1.7	0.36	4.2	10	5.2	<0.02	0.1	1.4	0.42	0.35	0.11	<0.10	0.32	0.006		0.3
St8	7.7	17	46	12	2	0.029	2.4	16	7.2	<0.02	0.63	30	0.01	0.35	0.01	<0.10	<0.01	0.009		0.8
温泉排水	6.8	170	323	287	25	0.70	4.4	209	180	<0.02	<0.02	493	0.57	0.80	0.44	<0.10	2.2	0.45		0.9
温泉水	6.5	80	147	93	11	0.18	2.9	60	82	<0.02	<0.02	191	0.29	0.70	0.13	<0.10	0.80	0.10		0.5
大どぶ	7.5	37	66	29	4.2	0.11	1.9	36	21	<0.02	1.3	78	0.10	0.86	0.08	<0.10	0.32	0.060		0.6
白根沢	8.3	24	112	7.6	0.84	<0.02	7.6	30	0.82	<0.02	1.1	30	0.03	0.13	0.01	<0.10	<0.01	<0.001		0.1
処理場放流水	7.8	96	110	102	13	<0.02	3.2	95	88	<0.02	7	370	0.24	1.8	0.14	<0.10	<0.01	0.11		1.2

表2 8月における水質分析結果

採取場所	pH	EC mS/m	HCO ³⁻ mg/L	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	TN mg/L	TP mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	COD mg/L	TOC mg/L
St4 表層	7.5	18	43	13	1.9	0.066	2.1	16	8.0	<0.02	0.66	34	0.02	0.22	0.02	<0.10	0.02	0.010		0.7
St4 底層	6.7	21	60	15	2.0	0.65	2.5	18	10	0.03	0.29	31	0.02	0.56	0.07	<0.10	0.26	0.006		0.6
St5 表層	7.7	16	41	12	1.7	0.051	2.1	15	7.2	<0.02	0.54	32	0.02	0.20	0.01	<0.10	0.01	0.010	1.9	0.7
St5 底層	6.7	21	62	16	2.0	0.85	2.5	19	11	<0.02	0.06	31	0.02	0.57	0.11	<0.10	0.29	0.004	2.2	0.6
St6 表層	7.6	16	41	12	1.7	0.046	2.1	14	7.1	<0.02	0.52	31	0.01	0.15	0.01	<0.10	0.01	0.009		0.7
St6 底層	6.9	18	59	12	2.0	1.8	2.3	16	7.8	<0.02	<0.02	26	0.33	1.2	0.37	<0.10	0.42	0.025		0.7
北東湧水	7.2	22	47	18	2.5	0.11	2.1	18	12	<0.02	0.58	41	0.03	0.26	0.03	<0.10	0.10	0.015	1.9	0.8
北西湧水	6.9	14	35	7.4	0.99	<0.02	2.5	13	1.8	<0.02	2.5	29	0.05	0.47	0.01	<0.10	<0.01	0.001	0.1	<0.1
南岸湧水	7.4	13	65	7.7	1.7	0.53	4.2	9.7	5.6	<0.02	<0.02	1.4	0.49	0.27	0.17	0.11	0.35	0.006	0.5	0.3
St8	7.5	16	40	11	1.7	0.048	2.1	14	7.0	<0.02	0.51	31	0.02	0.21	0.01	<0.10	<0.01	0.009	1.6	0.7
温泉排水	6.6	110	69	148	16	0.81	4.1	90	130	0.12	0.05	386	0.04	1.2	0.53	0.68	1.2	0.170	41	2.8
温泉水	6.5	65	84	81	8.7	0.23	2.9	48	66	<0.02	0.22	133	0.20	0.31	0.10	<0.10	0.62	0.050	5.5	0.7
大どぶ	7.1	24	31	19	3.5	0.29	0.86	22	13	0.03	1.2	58	0.06	3.8	0.42	<0.10	0.27	0.029	65	3.8
白根沢	7.9	18	78	5.4	0.97	<0.02	5.2	21	0.85	<0.02	0.73	24	0.03	0.48	0.07	<0.10	<0.01	0.001	7.6	1.9
処理場放流水	7.6	97	98	113	14	<0.02	3.7	95	80	<0.02	13	335	0.31	2.3	0.13	<0.10	<0.01	0.075	2.7	1.3

表3 10月における水質分析結果

採取場所	pH	EC mS/m	HCO ³⁻ mg/L	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	TN mg/L	TP mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	COD mg/L	TOC mg/L
St4 表層	7.5	17	43	12	1.9	<0.02	2.1	15	7.6	<0.02	0.91	30	0.01	0.42	0.02	<0.10	<0.01	0.008		0.6
St4 底層	7.3	17	43	12	1.8	0.03	2.2	16	7.3	<0.02	1.1	31	0.02	0.38	0.004	<0.10	<0.01	0.007		0.5
St5 表層	7.6	17	43	12	1.8	0.02	2.1	15	7.4	<0.02	0.83	30	0.01	0.46	0.02	<0.10	<0.01	0.008	1.9	0.6
St5 底層	7.4	17	43	12	1.8	0.07	2.4	16	7.0	<0.02	1.1	31	0.01	0.70	0.10	<0.10	0.06	0.007	2.9	0.6
St6 表層	7.6	16	41	12	1.8	0.03	2.1	15	7.3	<0.02	0.82	29	0.01	0.56	0.03	<0.10	<0.01	0.008	2.0	0.6
St6 底層	7.5	17	43	12	1.8	0.03	2.1	15	7.3	<0.02	0.77	29	0.01	0.34	0.02	<0.10	<0.01	0.008	2.0	0.6
北東湧水	7.2	8	23	6.2	1.2	<0.02	1.0	6.5	3.1	<0.02	1.4	10	0.07	0.27	0.02	<0.10	0.02	0.006	0.2	0.1
北西湧水	6.9	14	36	7.3	1.0	<0.02	2.7	13	1.6	<0.02	2.3	29	0.03	0.59	0.01	<0.10	<0.01	0.001	0.3	<0.1
南岸湧水	7.4	12	62	8.0	1.8	0.36	4.3	9.7	5.7	<0.02	0.1	3.7	0.47	0.26	0.18	0.15	0.31	0.007	0.8	0.3
St8	7.6	16	43	12	1.8	<0.02	2.1	15	7.3	<0.02	0.82	29	0.01	0.38	0.02	<0.10	<0.01	0.008	1.9	0.7
温泉排水	6.7	110	307	230	24	0.62	5.3	140	190	<0.02	0.07	390	0.22	0.48	0.33	0.11	1.8	0.18	23	1.7
温泉水	6.4	68	109	83	9.6	0.14	2.9	53	69	<0.02	0.23	130	0.17	0.34	0.06	0.13	0.63	0.058	5.1	0.5
大どぶ	7.4	46	76	38	6.8	0.07	2.1	48	27	<0.02	0.89	110	0.20	0.39	0.24	0.18	0.50	0.12	8.6	4.5
白根沢	8.1	28	123	8.0	1.6	<0.02	8.0	33	1.4	<0.02	0.70	35	0.01	0.19	0.004	<0.10	<0.01	0.001	1.7	1.5
処理場放流水	7.6	100	115	130	15	<0.02	4.2	130	84	<0.02	12	350	0.11	2.8	0.08	<0.10	<0.01	0.035	2.7	1.1

表4 12月における水質分析結果

採取場所	pH	EC mS/m	HCO ³⁻ mg/L	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	TN mg/L	TP mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	As mg/L	COD mg/L	TOC mg/L	
St4 表層	7.3	16	41	11	1.7	0.04	2.3	16	6.2	<0.02	1.2	31	0.004	0.38	0.02	<0.10	<0.01	0.006		0.4	
St4 底層	7.4	22	46	16	2.5	0.04	2.3	20	10	<0.02	1.3	44	0.004	0.40	0.02	<0.10	0.01	0.008		0.5	
St5 表層	7.5	19	41	12	1.9	0.03	2.1	16	7.3	<0.02	1.0	31	<0.003	0.34	0.02	<0.10	<0.01	0.007	1.2	0.5	
St5 底層	7.5	19	43	14	2.2	0.03	2.2	18	8.8	<0.02	1.2	38	0.012	0.42	0.02	<0.10	<0.01	0.007	1.2	0.5	
St6 表層	7.5	17	41	12	1.9	0.03	2.1	16	7.2	<0.02	1.0	31	<0.003	0.32	0.03	<0.10	<0.01	0.007	0.8	0.5	
St6 底層	7.4	17	41	12	1.9	0.03	2.1	16	7.3	<0.02	1.0	31	<0.003	0.37	0.04	<0.10	<0.01	0.007	1.9	0.5	
北東湧水													0.034								0.4
北西湧水	7.1	14	35	7.6	1.0	<0.02	2.6	14	1.7	<0.02	2.3	29	0.027	0.43	0.01	<0.10	<0.01	0.001	0.05	<0.1	
南岸湧水	7.4	13	62	8.1	1.8	0.42	4.4	10	5.6	<0.02	<0.02	3.2	0.481	0.28	0.17	0.19	0.35	0.006	0.9	0.3	
St8	7.5	17	41	12	1.9	0.04	2.1	16	7.3	<0.02	1.0	31	<0.003	0.32	0.02	<0.10	<0.01	0.007	1.2	0.5	
温泉排水	7.4	110	149	200	18	0.68	5.3	110	200	<0.02	<0.02	330	0.075	1.3	0.24	0.57	1.2	0.10	12	1.7	
温泉水	6.6	78	100	100	11	0.07	3.3	62	79	<0.02	0.03	160	0.231	0.40	0.11	<0.10	0.70	0.081	4.7	0.6	
大どぶ	7.7	63	100	71	7.7	0.07	2.9	64	49	<0.02	0.86	150	0.103	0.34	0.12	<0.10	0.57	0.10	4.0	1.1	
白根沢	8.1	28	130	8.7	0.89	<															

3.2 ヘキサダイアグラムによる水質比較

図2に、湖心であるSt.5、流出水、湧水3箇所及び流入水における水質のヘキサダイアグラムを示す。なお、湖水は、各地点において、同様の相対比を示していた。湖水(St.4、St.5、St.6)と流出水の相対比が類似し、湧水各地点はそれぞれ特徴的な相対比を示していた。また、流入水のうち処理場放流水、大どぶ、温泉排水及び温泉水の相対比が類似していた。

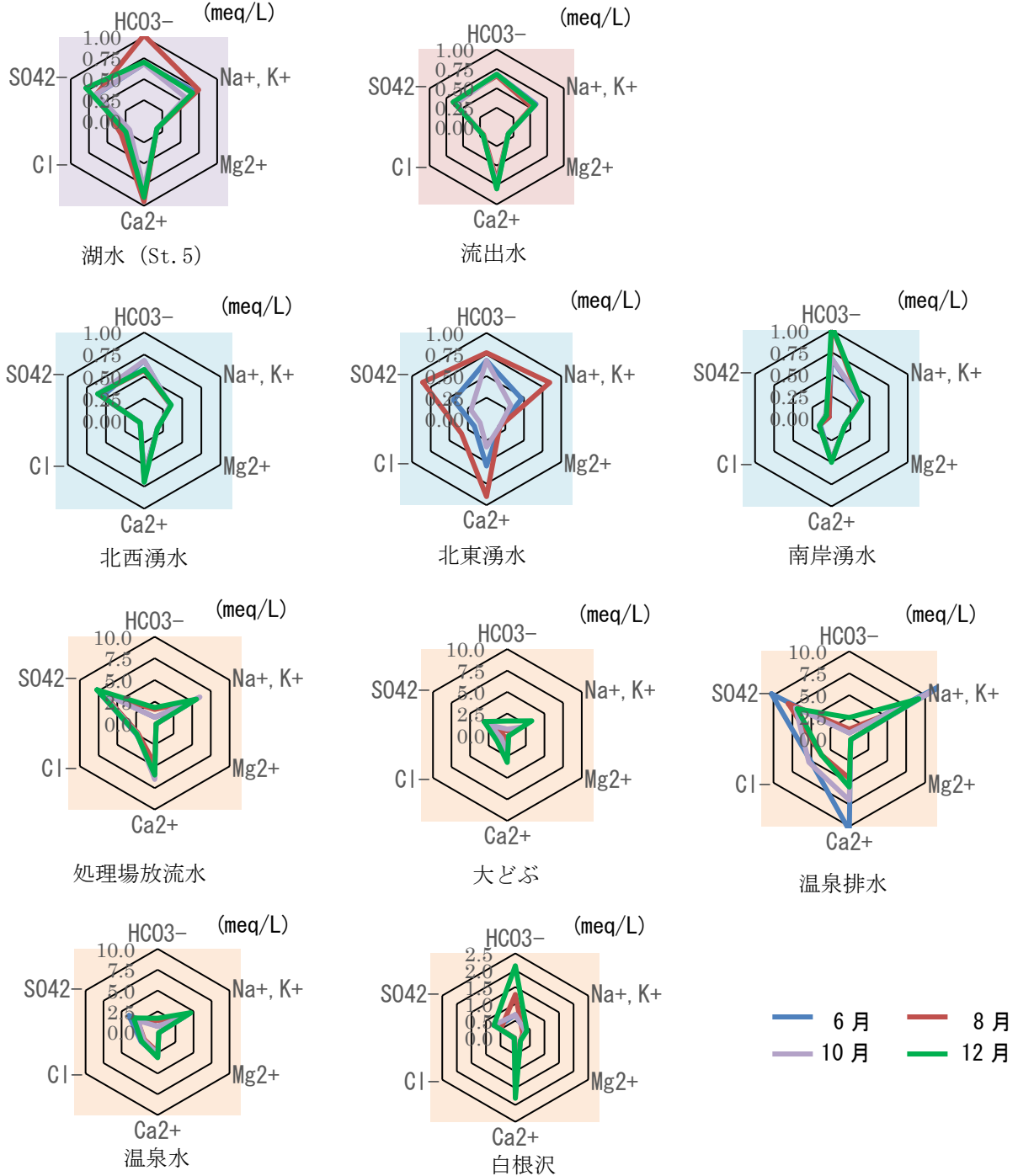


図2 各地点における水質のヘキサダイアグラム

3.3 クラスタ解析による水質比較

3.1で使用した各無機イオン濃度並びに全窒素、全リン及びヒ素濃度で、クラスタ解析を行った。図3に、8月(成層期)及び12月(循環期)における水質のデンドログラムを示す。湖水の各地点と流出水は互いに関係性が比較的高く、湧水各地点は湖水の各地点及び流出水と関係性が比較的高かった。流入水は湖

水の各地点と流出水及び湧水各地点とは関係性が低かった。

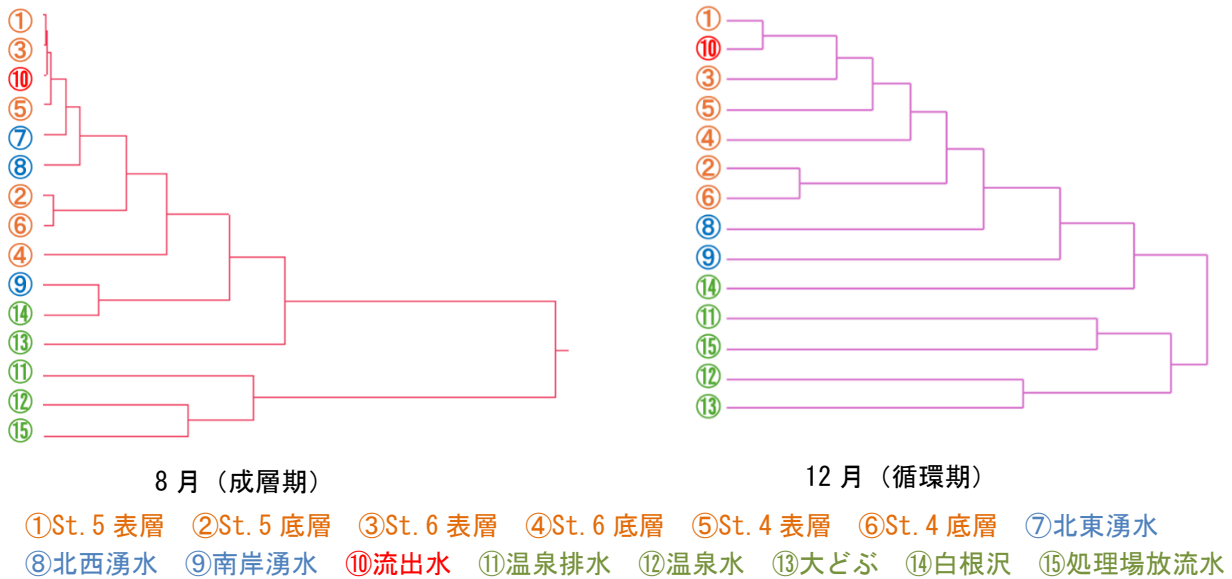


図3 各地点におけるクラスター解析による水質のデンドログラム

3.4 汚濁負荷量収支について

図4から図7に、全窒素、全リン、COD及びTOCの汚濁負荷量を示す。全窒素及び全リンはいずれの時期においても流入負荷量が流出負荷量を上回り湖内保持の結果となった。一方、CODは8月で流入負荷量が流出負荷量を上回り湖内保持し、10月と12月は流出負荷量が流入負荷量を上回り湖内生産の結果となった。TOCはいずれの時期においても流出負荷量が流入負荷量を上回り湖内生産の結果となった。図8に、湧水汚濁負荷量割合の年間変動を示す。4回の採取時期のいずれも、全窒素と全リンの湧水汚濁負荷割合が高く、8月が他に比べ湧水汚濁負荷割合が低かった。TOCは8月及び12月に湧水汚濁負荷割合が高かった。

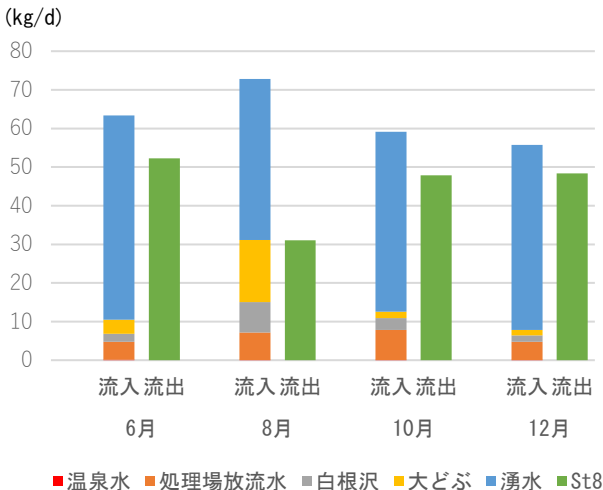


図4 全窒素の汚濁負荷量

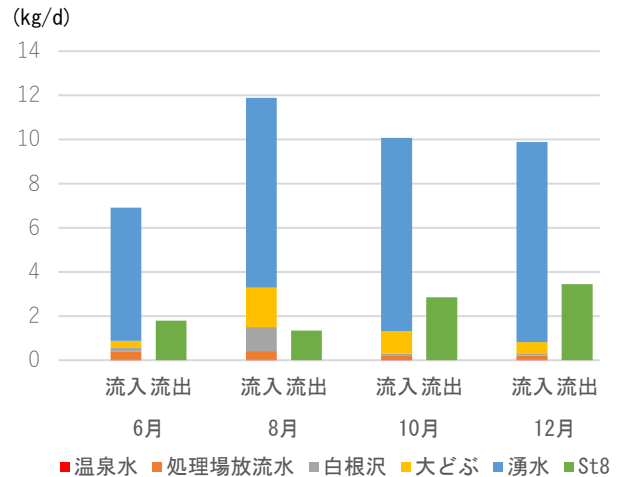


図5 全リンの汚濁負荷量

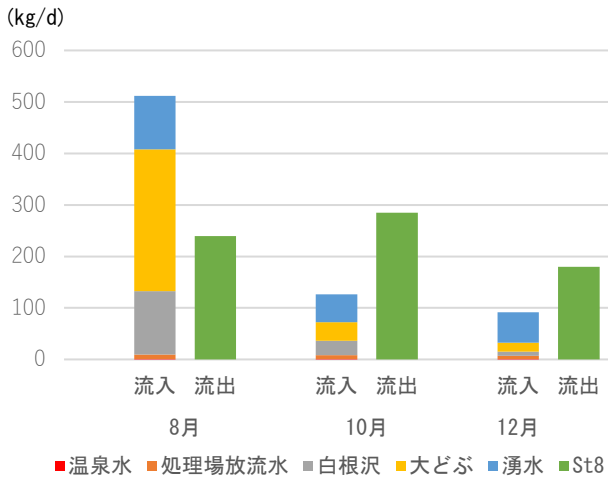


図6 CODの汚濁負荷量

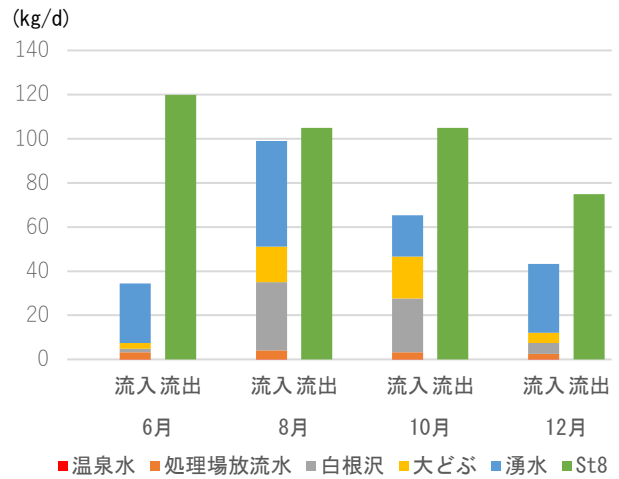


図7 TOCの汚濁負荷量

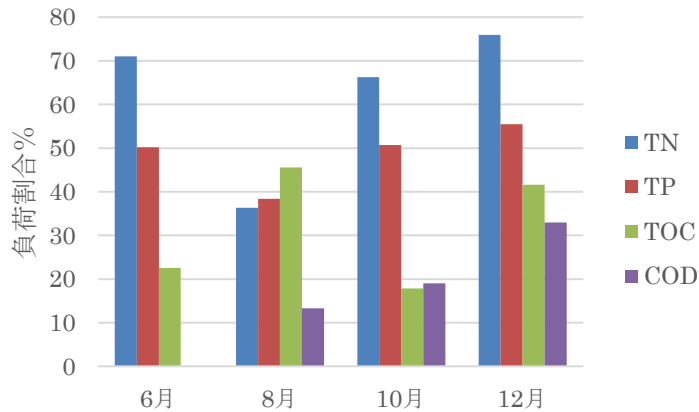


図8 湧水汚濁負荷割合年間変動

4 考察

4.1 ヘキサダイアグラムによる水質比較

湖水はいずれの地点においても、相対比に大きな違いはなく、4回の採水毎の変動は大きくなかった。

湧水は3箇所では採水しているが、このうち北東湧水の水質の変動が大きい。これまで北東湧水の存在は水中カメラ等での映像で確認しているが、採水時に水流等を確認しておらず、水温やECの鉛直方向の変化で判断して採水している。このため、変動原因が降水等によって湧水水質が変化しているものなのか、湧水を十分採取できていないからなのか判断できていない。一方、波紋を確認して採水している北西湧水及び南岸湧水は、岩等のクラックから採取しており、4回の採取毎の変動は小さかった。

流入水のうち、処理場放流水、大どぶ、温泉排水及び温泉水は相対比が類似していることから、これらの水質はすべて温泉水の水質が影響を及ぼしていると考えられる。

4.2 クラスタ解析による水質比較

ヘキサダイアグラムの項目を網羅し、湖沼の汚濁に影響を与える栄養塩類とヒ素を加えて温泉水の流入の影響を考慮することを目的としてクラスタ解析を実施したところ、湖水水質への湧水の影響が大きいこと及び流入水の影響が限定的であることが示唆され、ヘキサダイアグラムによる水質比較を支持する結果となった。

4.3 汚濁負荷量収支等

全窒素は、6月、10月及び12月においては各湧水、処理場放流水の順で、8月においては各湧水、大どぶの順で湖内への供給量が多く、湖内生息の生物による吸収や底質での吸着等で湖内保持が行われていた。

この結果は福田ら¹⁾の報告と一致している。

全リンは、6月においては各湧水、処理場放流水の順で、8月、10月及び12月においては各湧水、大どぶの順で湖内への供給量が多く、全窒素と同様に、湖内生息の生物による吸収や底質での吸着等で湖内保持が行われていた。

CODは8月では湖内保持が行われ、大どぶ、白根沢及び各湧水の順で湖内への供給量が多かった。10月及び12月では湖内生産が行われ、各湧水、大どぶ及び白根沢の順で湖内への供給量が多かった。8月の大どぶ及び白根沢のCODは、採取時に降水があったことがCODの値が高くなった原因と考えられる。

TOCは4回すべての結果で湖内生産が行われていることが示唆された。8月においては降水の影響により流入負荷量が高かったことから湖内生産が少なくなったと考えられる。

湧水の負荷割合は、全窒素及び全リンで大きく、湖水の水質に影響を与えていると考えられる。8月の湧水の負荷割合が低い原因としては、降水による大どぶや白根沢の負荷が大きかったことが考えられる。

5 まとめ

湧水量が多い湯ノ湖の水質について汚濁負荷量を求めたところ、全窒素と全リンにおいては湧水の影響が大きいと考えられた。また、CODとTOCにおいては湖内生産の影響が大きいことが示唆されたが、季節的変動や気象等の影響を考慮する必要があるため、引き続き調査を継続していく。

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、同客員研究員三浦真吾氏、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におかれましては、操船等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.