

の位置図をFig. 1に示した。以下に各地点の概要を記す。

No. 1「銅沼」は磐梯山北側斜面の中腹にある沼で、標高1,119 m付近の湖岸で採水した。銅沼は季節や年によって水位変化が生じており、特に雪解けの季節である4～5月頃に水位が高くなることが多い。また水位の変化に伴いECや溶存成分にもある程度の変化が認められるため、降水イベントに伴う地下水涵養、融雪水の沼への流入などの影響を受けていると考えられる。周辺の斜面では磐梯山の火山性ガスが噴出しており、こうした火山起源の成分が

水中に溶け込み、一部は沈殿して、沼の中の岩や湖底が赤褐色に着色している。なお、2013年～2015年の銅沼の水質については、先行研究⁴⁾⁵⁾⁸⁾で報告している。No. 2「スキー場湧水1」は磐梯山北麓のスキー場構内にある湧水で、銅沼の下流方向に位置する。斜面の下から水が湧いており、雪解けの季節には湧出量が相対的に多くなる。調査時の湧出量は約2 L/secであった。また、春先にはスキー場内でもほかにも湧水が湧き出ているため、本地点を湧水1として記した。No. 3～No. 5は株式会社ニチレイの私有地にある湖沼で、桧原湖の東岸の近くに位置

Table 1 Information of sampling site and values of EC, pH, water temperature (WT), ORP, and discharge.

Site No	sampling site	date	time	type	altitude m	EC mS/m	pH	WT ℃	ORP mV	discharge L/sec
1	Aka-numa 銅沼	2017/ 8 /19	11:55	L	1119	171.3	3.36	20.8	489	
2	spring in Urabandai Ski Resort スキー場湧水1	2017/ 8 /19	13:15	Sp	937	152.9	3.96	14.1	409	2.0
3	N 1 (pond in Nichirei site 1) N 1 (ニチレイ敷地内湖沼)	2017/ 8 /20	10:17	L	826	2.5	7.26	22.8	215	
3'	〃	2018/10/28	9:45	L	826	3.7	6.32	11.8	215	
4	N 2 (pond in Nichirei site 2) N 2 (ニチレイ敷地内湖沼)	2017/ 8 /20	10:47	L	833	2.2	6.07	20.7	212	
4'	〃	2018/10/28	9:15	L	833	3.0	5.54	9.7	210	
5	N 3 (pond in Nichirei site 3) N 3 (ニチレイ敷地内湖沼)	2017/ 8 /20	11:34	L	832	1.0	5.90	23.7	190	
5'	〃	2018/10/28	10:25	L	832	1.0	5.89	11.4	226	
6	Kawakami-aonuma 川上青沼	2017/ 8 /20	14:40	L	731	141.4	7.60	25.1	108	
7	Kawakami-yunuma 川上湯沼	2017/ 8 /20	15:15	L	747	159.3	8.54	28.6	-250	
8	Bisyamon-numa 毘沙門沼	2017/ 8 /20	17:30	L	791	60.2	7.89	21.0	161	
9	runoff from Nakase-numa 中瀬沼からの流出水	2017/10/22	11:25	L	817	4.9	8.26	13.7	208	
10	Hime-numa 姫沼	2017/10/22	11:51	L	818	5.4	8.27	13.1	210	
11	Renge-numa レンゲ沼	2017/10/22	12:22	L	821	5.9	7.90	13.2	201	
11'	〃	2018/10/28	15:45	L	821	6.2	6.53	13.9	215	
12	spring inflow into Benten-numa 弁天沼への流入湧水	2017/10/22	13:50	Sp	814	107.8	4.89	14.6	326	1.0
13	Ruri-numa 瑠璃沼	2017/10/22	14:20	L	826	103.6	5.16	15.0	283	
14	pond near the Syosuke campsite 庄助キャンプ場前の沼	2018/10/28	12:45	L	801	7.2	6.48	11.0	204	
15	Magarisawa-numa 曲沢沼	2018/10/28	13:55	L	829	5.2	6.75	12.9	69	
16	Sohara-ko 曾原湖	2018/10/28	14:35	L	824	3.7	8.46	13.9	142	

L : lake
Sp : spring

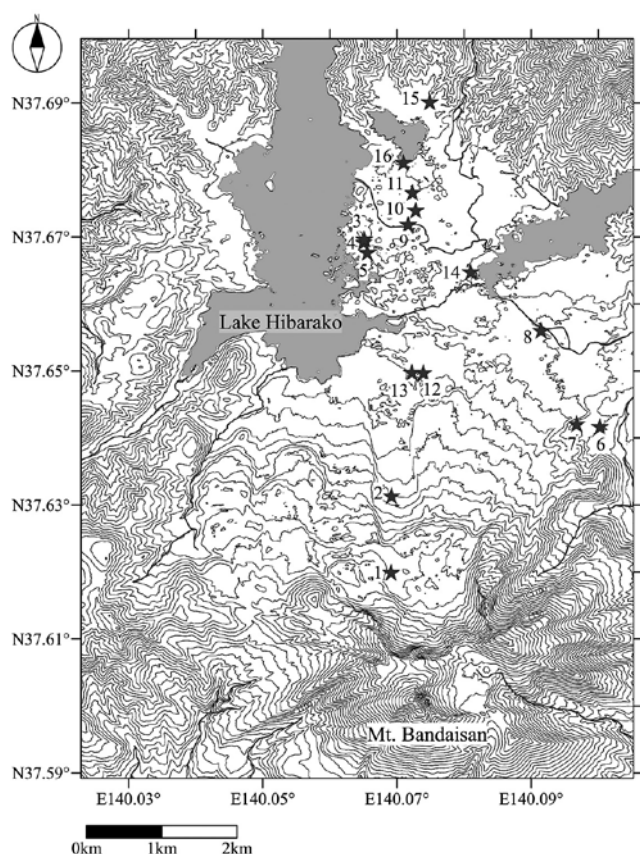


Fig.1 Location of observation sites.

する。同社有地では、周辺の自然環境の調査と、それに基づく環境や生物多様性の保全活動への支援が行われている。社有地内のNo. 3～No. 5の湖沼付近には一般向けの散策道などが整備されておらず立ち入りが制限されていることから、生態系への人為的な攪乱の影響は小さく、水生植物や水生動物の外来種は裏磐梯の他の地域と比べて少ないという特徴を有する⁶⁾⁷⁾。社有地内の立ち入りと調査の許可を頂き、2017年と2018年にほぼ同じ地点で調査と採水を行った。3つの湖沼は比較的狭い範囲に分布しており、北側からNo. 3「N1」(Photo 1)、No. 4「N2」(Photo 2)、No. 5「N3」(Photo 3)と仮称されている。3湖沼ともに流入、流出河川は存在せず、湖沼の水は降水および比較的浅部の地下水による涵養が大半を占めていると推定される。特に、No. 3とNo. 4の距離は50 m程度と近く、両湖沼の標高はほぼ等しく、湖沼間はヨシとミズゴケからなる平坦な湿地である。そのため、湖沼の水が地下を通じて移動しやすくなっている可能性がある。一方、No. 5はNo. 3, 4から少し離れた位置にあり、両者の間は比高10 mほどの堆積物で遮られている



Photo 1 N1 on Oct. 28, 2018.



Photo 2 N2 on Oct. 28, 2018.



Photo 3 N3 on Oct. 28, 2018.

ため、No. 5とNo. 3, 4の湖沼の水が直接的に混合する可能性は低いと考えられる。先行研究⁶⁾および遠藤ほか(未発表)によると、No. 3の水生植物

の種類は14種確認されており、上記3湖沼の中では水生植物の種類が一番多い。また、No. 3とNo. 5の水はほぼ無色透明であるが、No. 4の水は僅かに薄茶色に着色しており、要因としてタンニンの影響が考えられるが、仔細についてはさらに検討が必要である。No. 6「川上青沼」は磐梯山の北東側の山麓に位置する湖沼で、No. 7「川上湯沼」はその上流側の山間部にある湖沼である。No. 6には周囲の温泉が流入し、No. 7では温泉が沼内で湧出しており、こうした影響が両湖沼の水質にもあらわれていると考えられる。また、No. 6は水生外来動物の影響が大きいことも指摘されている（遠藤ほか 未発表）。No. 7では採水時に還元的な臭い（硫化水素臭）を若干感じており、湖底では嫌気的な条件が発生している可能性が高い。No. 8「毘沙門沼」では五色沼自然探勝路沿いにしばらく進んだ場所で調査を行った。No. 9「中瀬沼からの流出水」では、中瀬沼展望台近くの中瀬沼探勝路沿いで採取した。No.10「姫沼」では、同じく中瀬沼探勝路沿いで調査・採水を行った。No.11「レンゲ沼」では、レンゲ沼探勝路の北側駐車場からの入口付近で調査を行った。No.12「弁天沼への流入湧水」は、五色沼自然探勝路の弁天沼展望台の後ろの斜面から湧出する湧水で、湧出地点から5mほど先で弁天沼に流入している。調査時の湧出量は約1 L/secで、湧水が流れる水路の石は赤褐色に染まっており、湧水には鉄などが多く含まれていると予想される。No.13「瑠璃沼」は弁天沼の近くに位置する湖で、同じく五色沼自然探勝路沿いで調査を行った。No.14「庄助キャンプ場前の沼」(Photo 4)は小野川湖の近くにある比較的小規模の沼で、水生植生相が豊富である。また、この沼には生態系被害防止外来種リスト (<https://www.env.go.jp/press/100775.html>, 2019年7月16日閲覧)掲載種である沈水植物コカナダモなどの外来植物も多く存在している。No.15「曲沢沼」(Photo 5)は曾原湖の少し北側に位置する沼で、近年、コカナダモが侵入し、湖底に繁茂して問題となっている⁹⁾。コカナダモは、生育時は水中の窒素やリンなどの栄養塩類を吸収するため水質の浄化に寄与するが、枯れると湖底に沈み、吸収した栄養塩類が水中に溶出するため、水質汚濁の原因にもなる。過去に生活排水流入に伴う人為的な汚染が生じたが、現在では水質は改善されたという（遠藤ほか 未発表）。過去にソウギョが放流されていた。また、紅葉時期には風景写真の撮影などに多くの観

光客が訪れる場所である。No.16「曾原湖」(Photo 6)では、南側の湖岸で調査をおこなった。2, 3年ほど前から湖底にコカナダモが繁茂しており、今



Photo 4 pond near the Syosuke campsite.



Photo 5 Magarisawa-numa.



Photo 6 Sohara-ko.

後の湖沼の生態系や水質への影響を注視する必要がある。No.15と同様に、近年までソウギョの影響を強く受けていた⁹⁾。

2.2 現地調査の項目

現地では、水温、EC（電気伝導率）、pH、ORP（酸化還元電位）、湧水については湧出量を計測した。水温はTFX 420（ebro）、ECとpHはポータブルメーター D-74（HORIBA）、ORPはパーソナルpH/ORPメータ PH72（YOKOGAWA）を用いて計測した。分析用の試料採取はポリプロピレン製の容器を用い、一般溶存成分の分析用として100 mL、微量元素分析用として50 mL採取した。採水した水試料は、採水後速やかに0.22 μmのディスパーザブルシリンジフィルターでろ過を行った。また、微量元素分析用の試料（50 mL容器）には、重金属等の容器壁面への吸着や懸濁物の発生防止のため、濃硝酸を採水試料に対して約1%濃度となるように添加した。採取した各試料はろ過後、5℃の冷蔵庫で保管した。

2.3 分析項目

分析に関して、無機溶存成分はイオンクロマトグラフ（ICS-3000, Dionex）を用いた。HCO₃⁻はpH4.8アルカリ度滴定法により定量し、Siはモリブデン黄法による前処理を行った後、分光光度計で測定した。微量元素（51元素）については、ICP-MS（7500cx, Agilent）を用いて測定を行った。ICP-MSでは、ほとんどの元素の検出下限値がpptからppqオーダーである。酸素と水素の安定同位体比は、CRDS法（L2130-i, Picarro）により分析を実施した。また、安定同位体比はSMOW（標準平均海水）からの千分率偏差（‰）として表示した。

2.4 湖底堆積物の採取と水溶出試験について

湖沼の水質形成には湖底堆積物が関わっていることが予想され、湖沼の水質形成過程を把握するためには湖底堆積物の化学特性を把握することが重要であると考えられる。本研究では、湖底堆積物と湖沼の水質の関係を把握するため、2018年10月の調査の折に、数地点において湖底堆積物の採取を行った。堆積物を採取したのは、No. 3（N1）、No. 4（N2）、No. 5（N3）、No.14（庄助キャンプ場前の沼）、No.15（曲沢沼）、No.16（曾原湖）の6地点である。本来は、研究目的に合わせて、湖底堆積物を採取す

る位置や地点数、採取する堆積物の深度などを検討した上で試料採取を行う必要があるが、上記の湖沼についてはこれまで湖沼堆積物の調査は殆ど行われていないため、今回は予備的な調査として、各湖沼の湖底堆積物の大まかな状況を把握することを目的として、湖沼水の調査・採水を行った地点の近傍の1地点で湖底堆積物を採取した。いずれの地点も胴長を着用して入れる程度の比較的浅い水深であったため、水面から柄杓を利用して湖底堆積物を採取した。No.15（曲沢沼）やNo.16（曾原湖）では湖底堆積物は比較的多く堆積していたが、No. 3（N1）、No. 4（N2）、No. 5（N3）では植物の葉や根、小礫等が多く、砂やシルト、粘土のような堆積物は少なく、湖沼によって特徴は異なっていた。採取した湖底堆積物は厚手のビニール袋に入れて密封して実験室に持ち帰り、作業を行うまでの数日間、5℃の冷蔵庫で保管した。

実験の作業として、まず採取した湖底堆積物をよく混合した後、パットの上に広げて数日間、風乾させた。この時、確認用として、堆積物と共に採取していた水（堆積物中の水）を容器に採取・保管した。風乾後、湖底堆積物中の土塊を乳鉢と乳棒を利用して押しつぶしてから、直径2 mmのふるいにかけて試料を調整した。ふるいにかけた風乾試料20 gをポリプロピレン製の100 mLの容器に入れ、超純水50 mLを加え（堆積物1：超純水2.5の割合）、振とう機を用いて30分間、振とうさせ、抽出水のpHを測定した。また、風乾試料10 gに超純水50 mLを加え（堆積物1：超純水5の割合）、同じく振とう機で60分間振とうさせ、抽出液のECを測定した。さらに、湖底堆積物の化学特性を把握するため、公定法（環境省告示台18号試験 土壤溶出量調査に係る測定方法を定める件¹⁰⁾）に準じて、水溶出試験¹¹⁾を実施した。風乾後の試料をポリプロピレン製の容器に3 g入れ、超純水30 mLを加えて、振とう機で6時間振とうさせ（振とう回数200 rpm、振とう幅40 mm）、遠心機で3,000 rpm、20分間の遠心分離を行った後、上澄み液を0.22 μmのシリンジフィルターでろ過して、溶液を容器に保管した。また、ICP-MS分析用の試料には、濃硝酸を約1%濃度となるように少量添加した上で保管した。抽出した試料について、無機溶存成分（ICS-3000, Dionex）、および微量元素（ICP-MS 7500cx, Agilent）の分析を実施した。

3. 結果, 考察

3.1 湖沼と湧水のEC, pH, 水温, ORPの特徴

各調査地点で測定したEC, pH, 水温 (WT), ORPの計測値, および湧水量について, Table 1に示した。ECは1.0 mS/m (No. 5) ~ 171.3 mS/m (No. 1) で値の範囲は広いが, No. 8 (毘沙門沼)を除くと, 100 mS/m以上の高い地点と, 10 mS/m以下の低い地点に二分される。前者 (EC高い) にはNo. 1, 2, 6, 7, 12, 13が含まれており, 磐梯山の中腹および山麓の湧水, 湖沼に相当する。一方, 後者 (EC低い) にはNo. 3, 4, 5, 9, 10, 11, 14, 15, 16が含まれており, 桧原湖付近に分布する湖沼に相当している。No. 8 (毘沙門沼) のECは2グループの中間にあり, 磐梯山山頂よりやや距離が離れた場所に位置している。これまでに行われた調査で指摘されているように, 前者は磐梯山の火山ガス等の影響を受けた湖沼や湧水で, 後者はその影響が少ない湖沼として区分することができる。また, 2017年と2018年の2回調査を行ったNo. 3, 4, 5, 11のECはそれぞれほぼ同じ値を示しており, 溶存成分濃度は時期を問わず比較的一致していると言える。pHは3.36 (No. 1) ~ 8.54 (No. 7) で, 強酸性から塩基性まで広い範囲を示している。No. 1, 2では4以下の低い値, No. 12, 13でも5前後の値を示しており, ECの高い磐梯山系の湧水, 湖沼のpHは低い特徴を示す。一方, No. 6, 7ではECは高いが, pHは7.60, 8.54と塩基性の高い値を示しており, 他の4地点とは特徴が異なる。No. 6, 7は温泉水が混入しているため, pHが高い温泉の影響を反映しているものと考えられる。水温はNo. 2と12の湧水で調査時期は8月と10月で異なるが, それぞれ14.1℃と14.6℃でほぼ一致している。他の湖沼については, 9.7℃ (No. 4の2018年10月) ~ 28.6℃ (No. 7) で範囲が広い。湖沼は大気に触れているため気温の影響を受けやすく, 調査時期によって値が異なっている。たとえば, No. 3 ~ 5は8月と10月に調査を実施しており, 3地点とも10月のほうが11℃程低くなっている。一方, No. 11は2017年と2018年の2回調査を行ったが, いずれも10月後半に測定しており, 水温は13.2℃と13.9℃で概ね一致している。このことより, 湖沼の水温は, 例年, 同じような季節変化を示すことが予想される。No. 6と7の水温は, 25.1℃, 28.6℃で, 同

時期に測定した他の湖沼 (20℃前後) よりも高い値を示しており, これは温泉の混入の影響があらわれていると考えられる。ORPは-250 mV (No. 7) ~ 489 mV (No. 1) で, No. 1, 2で400 mV以上の高い値を示す。また磐梯山山麓の湧水 (No. 12) やNo. 13でも326 mV, 283 mVと相対的に高い値を示すことから, 磐梯山系の湧水, 湖沼では高い値を示すことが確認された。一方, No. 6, 7ではORPは相対的に低く, 特にNo. 7は-250 mVと負の値を示す。この地点では湖沼の採水時に硫化水素臭がしたことから, 嫌気的な条件下にあると予想されており, ORPの測定結果においてもこの結果を示唆している。その他の湖沼では200 mV前後の値を示しているが, No. 15 (曲沢沼) では69 mVと低い値を示している。念のため2回計測を行ったが, いずれも同じ値であったため, 計測機器の問題ではない。採水地点の状況を見る限り, 特筆するような特徴は確認できておらず, この地点のORPが低い値を示す要因については不明であるが, 湖底堆積物の影響が考えられる。今後の調査によってさらに検討を進める予定である。

3.2 湖沼と湧水の無機イオン濃度の特徴

調査を行った湖沼および湧水の無機イオン成分の分析結果をTable 2に示した。2017年と2018年の2回調査を行った地点については, 2018年のSite Noに「'」をつけてある (以下のTableでも同様)。陰イオン8成分 (F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , HCO_3^-), 陽イオン6成分 (Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), および SiO_2 (Siの測定から換算した値) の分析値を記載している。このうち, NO_2^- , PO_4^{3-} , Li^+ はいずれの地点においても濃度が非常に低い。一方, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} 濃度は比較的高く, 特に SO_4^{2-} はNo. 1, 2で1,000 mg/L以上, No. 6, 7, 12, 13で400 ~ 530 mg/Lと高い濃度を示している。これらの6地点は前述したように磐梯山系の火山ガス等の影響を受けた湧水, 湖沼水であり, 火山ガス起源の硫化水素が水に溶けて硫酸イオンとなったことが高濃度の要因と考えられる。また, No. 6, 7では Cl^- と Na^+ 濃度が他の地点に比べて高く, 温泉成分の水質が反映されていると予想される。 SiO_2 は降水には含まれておらず, 地質から供給される。従って, 地中での滞留時間が長い水では相対的に濃度が高くなる特徴がある。また, 火山起源の岩石にもSiが多量に含まれ

Table 2 Concentration of inorganic ions in water samples.

Site No	F ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	Br ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Li ⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	SiO ₂ mg/L
1	1.17	1.58	0.00	0.00	1243.20	0.68	0.00	0.00	0.00	25.66	0.37	4.11	31.18	222.10	109.04
2	1.14	1.61	0.00	0.00	1009.66	0.00	0.00	0.00	0.00	29.40	0.00	3.81	35.62	232.23	103.81
3	0.02	1.15	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	13.12	0.00	1.57	0.01	0.52	0.54	2.68	6.04
3'	0.03	1.67	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	18.61	0.00	2.22	0.00	1.19	0.85	3.74	16.05
4	0.01	0.34	0.00	0.00	1.06	0.00	0.00	7.63	0.00	0.97	0.11	0.39	0.39	1.93	11.78
4'	0.05	1.06	0.00	0.00	1.24	0.00	0.00	14.95	0.00	2.62	0.00	1.10	0.50	3.10	27.55
5	0.01	0.84	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	1.22	0.00	0.65	0.00	0.40	0.11	0.35	0.91
5'	0.00	1.39	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.80	0.00	0.90	0.00	0.41	0.12	0.33	0.72
6	0.13	175.17	0.00	0.17	417.91	0.21	0.00	70.47	0.07	165.88	0.00	28.16	27.12	92.04	91.10
7	0.14	202.09	0.00	0.21	470.99	0.00	0.20	75.04	0.09	189.13	0.00	31.90	30.30	102.98	102.07
8	0.20	46.44	0.00	0.04	215.71	0.00	0.00	15.56	0.01	41.65	0.00	7.16	14.08	56.00	40.03
9	0.02	4.26	0.00	0.00	5.33	0.00	0.00	15.56	0.00	3.93	0.00	1.47	0.93	3.49	8.79
10	0.02	1.64	0.00	0.00	1.80	0.00	0.00	27.45	0.00	2.52	0.00	1.86	1.50	5.30	18.69
11	0.02	1.58	0.00	0.00	1.88	0.00	0.00	31.12	0.00	1.99	0.00	1.17	1.41	7.40	11.80
11'	0.03	1.70	0.00	0.00	1.71	0.00	0.00	35.08	0.00	2.58	0.02	1.06	1.56	8.42	22.27
12	0.51	29.87	0.00	0.00	528.57	0.00	0.00	0.00	0.00	42.95	0.00	9.18	26.28	140.31	68.76
13	0.44	47.00	0.00	0.00	501.02	0.00	0.00	0.92	0.01	53.34	0.18	8.97	25.96	135.80	66.61
14	0.04	2.26	0.00	0.00	1.82	0.00	0.00	40.57	0.00	2.99	0.01	1.62	1.79	9.88	32.92
15	0.01	1.97	0.00	0.01	2.85	0.05	0.00	26.23	0.00	2.83	0.01	0.68	1.93	4.93	15.53
16	0.01	1.67	0.00	0.01	2.69	0.00	0.00	14.64	0.00	2.30	0.01	0.13	1.11	3.35	14.37

ているため、こうした岩石の分布する地点の水はSiO₂濃度が高くなる傾向が認められる。No. 1, 2, 12, 13の磐梯山系のSiO₂濃度は相対的に高く、火山起源の岩石の影響を受けていることがこの結果においても示唆される。温泉が流入しているNo. 6, 7でもSiO₂濃度は高く、温泉成分にSiが多く含まれていることを示唆している。一方、ニチレイ社有地内の湖沼では、No. 3, 4では10~30 mg/Lほど含まれているのに対し、No. 5では殆ど0であるため、No. 5は地質起源の成分が少なく、近接するNo. 3, 4の湖沼水との交流はないことが、水質の結果からも把握できる。

No. 1~No.16の水質の特徴把握や複数地点の比較を行うため、無機イオン濃度の結果を利用して水質組成図を作成した。Fig. 2にStiff diagram (シュティフダイアグラム)、Fig. 3にTrilinear diagram (トリリニアダイアグラム)を示した。Fig. 2では濃度の高い地点は縮小して表示しており、縮尺率をダイアグラムの傍に表示している。Stiff diagramは主要溶存8成分のミリ当量を六角形の図として示したもので、中央の線を0として、左側に陽イオン成分の濃度を、右側に陰イオン成分の濃度をプロットし、左右各点までの距離が長いと濃度が高くなる、

即ち形が大きいと濃度が高いことになる。各地点の溶存成分量の大小や水質組成の特徴を一目で把握でき、他の地点との比較もしやすいという利点がある。Trilinear diagramは多数の地点の成分濃度を同じグラフにプロットするため、複数地点の水質の区分をする際に便利な図で、大まかな水質のグループ分けと水質の特徴を把握することができる。

Fig. 2のStiff diagramより、水質組成は多様性があるが、幾つかのグループに大別することができる。No. 1, 2, 12, 13はCa-SO₄型を示し、溶存成分量は非常に多い。No. 1と2, No.12と13はそれぞれほぼ同じ水質組成および溶存成分量を示しているため、同じ水系の水であると言える。No. 8も上記4地点と同じくCa-SO₄型であるが、Cl⁻も比較的多く含まれており、また溶存成分量は4地点と比べると低いことから、4地点とは異なる水質の特徴を有している。No. 6, 7はNa-(Cl+SO₄)型で、溶存成分量は多い。No. 6, 7の近傍には川上温泉があり、この源泉については化学分析を行っていないが、泉質は「ナトリウム・カルシウム-硫酸塩・塩化物温泉」と表示されているため、川上温泉も両湖沼と同様の水質組成を示すと予想される。その他の地点はCa-HCO₃型 (No. 9はNa-HCO₃型)を示し、

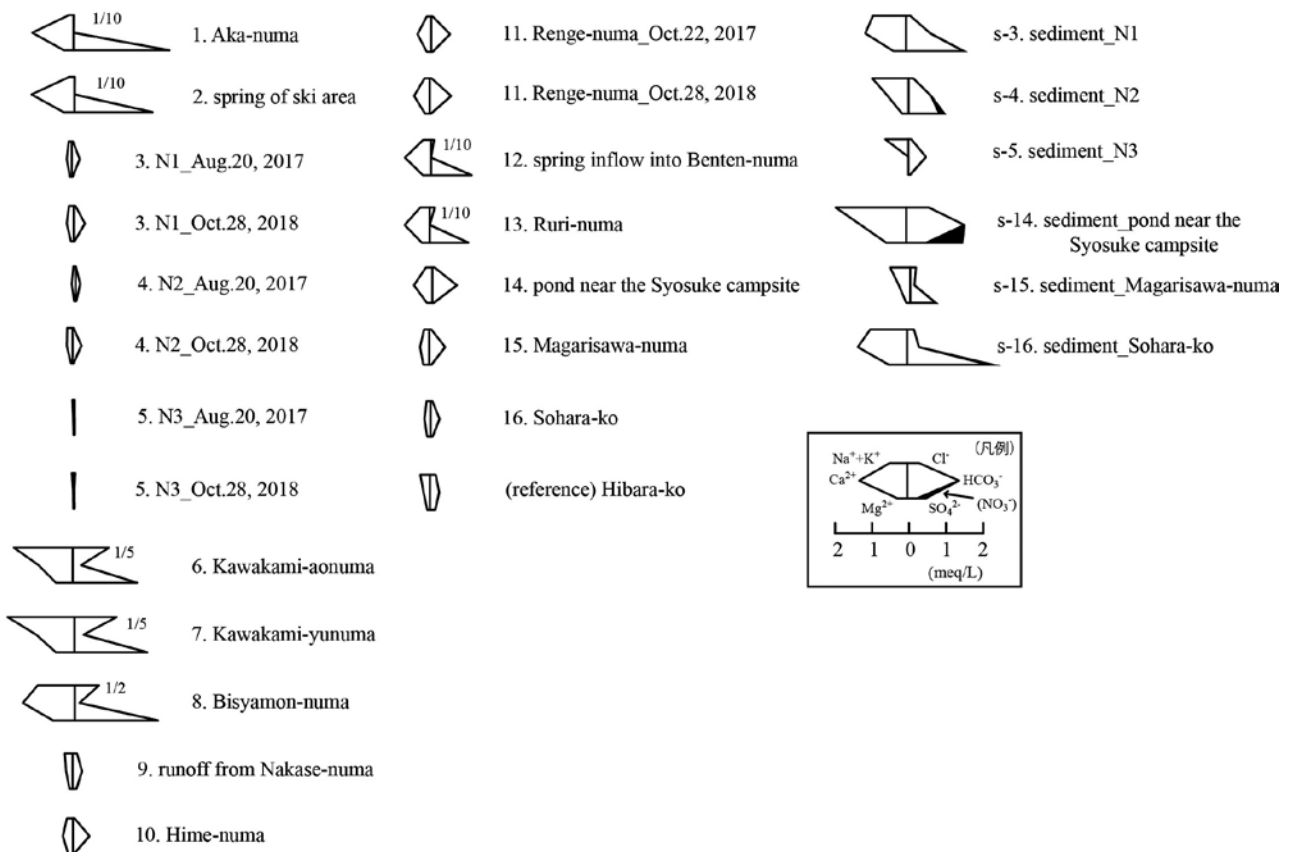


Fig.2 Stiff diagram of lake water, spring water, and sediment samples.

溶存濃度は低く、磐梯山の中腹や山麓の湧水、湖沼とは明らかに水質の特徴が異なっている。また、No. 9（中瀬沼からの流出水）は参考値としてFig. 2に示した桧原湖の水質組成（Na-HCO₃型）と近似している。中瀬沼は桧原湖よりも標高が低く、桧原湖からの水が流入しているため、ほぼ同じ水質を示していると考えられる。一方、調査地点の内、桧原湖に最も近いNo. 3, 4, 5の水質組成は桧原湖の水質組成とはやや異なっている。これら3湖沼は桧原湖よりも4, 5 mほど標高の高い位置に分布しているため、桧原湖の流入の影響は少ないと考えられる。

Fig. 3のTrilinear diagramでは、2017年の調査地点は△、2018年の調査地点は○で示している。湖沼や湧水は、I（アルカリ土類炭酸塩型）と、III（アルカリ土類非炭酸塩型）およびIV（アルカリ非炭酸塩型）の大きく2グループに大別できる。前者は溶存成分量が少ないCa-HCO₃型の水質組成を示す地点であり、後者は溶存濃度の高い磐梯山系の火山の影響を受けた地点が大半を占めている。Iは滞留時間が比較的短い流動性の水に多く見られる性質を示し、IIIやIVは温泉水や化石水、海水、火山地域の水

や鉱山排水などに多くみられる特徴を有しており、Fig. 3の結果はECやpH、Stiff diagram等から導いた水質の特徴とほぼ矛盾が無い。

3.3 湖沼と湧水の微量元素濃度の特徴

湖沼や湧水の微量元素の濃度について、Table 3に示した。ICP-MSで測定したのは51元素であるが、その内濃度が殆ど含まれていない（検出限界以下の）元素を除いた45元素について、表に記している。なお、検出限界以下の項目については「N.D.」（Not detected）と示している。Table 3より、多くの元素では濃度が0.1 μg/L以下と低いが、一部元素で濃度が高くなっている。濃度が比較的高い元素として、L, B, Al, Mn, Fe, Zn, Rb, Sr, Baが挙げられるが、全ての地点で高いと言う訳ではなく、幾つかの地点で特定の元素が高くなっている。たとえば、温泉が流入しているNo. 6, 7ではL, B, Rb, Srの濃度が高く、他の地点とは特徴が異なっている。No. 1, 2, 12, 13ではAl, Mn, Feが高く、火山起源の成分を反映していると考えられる。

各地点の微量成分の特徴を把握するため、上記

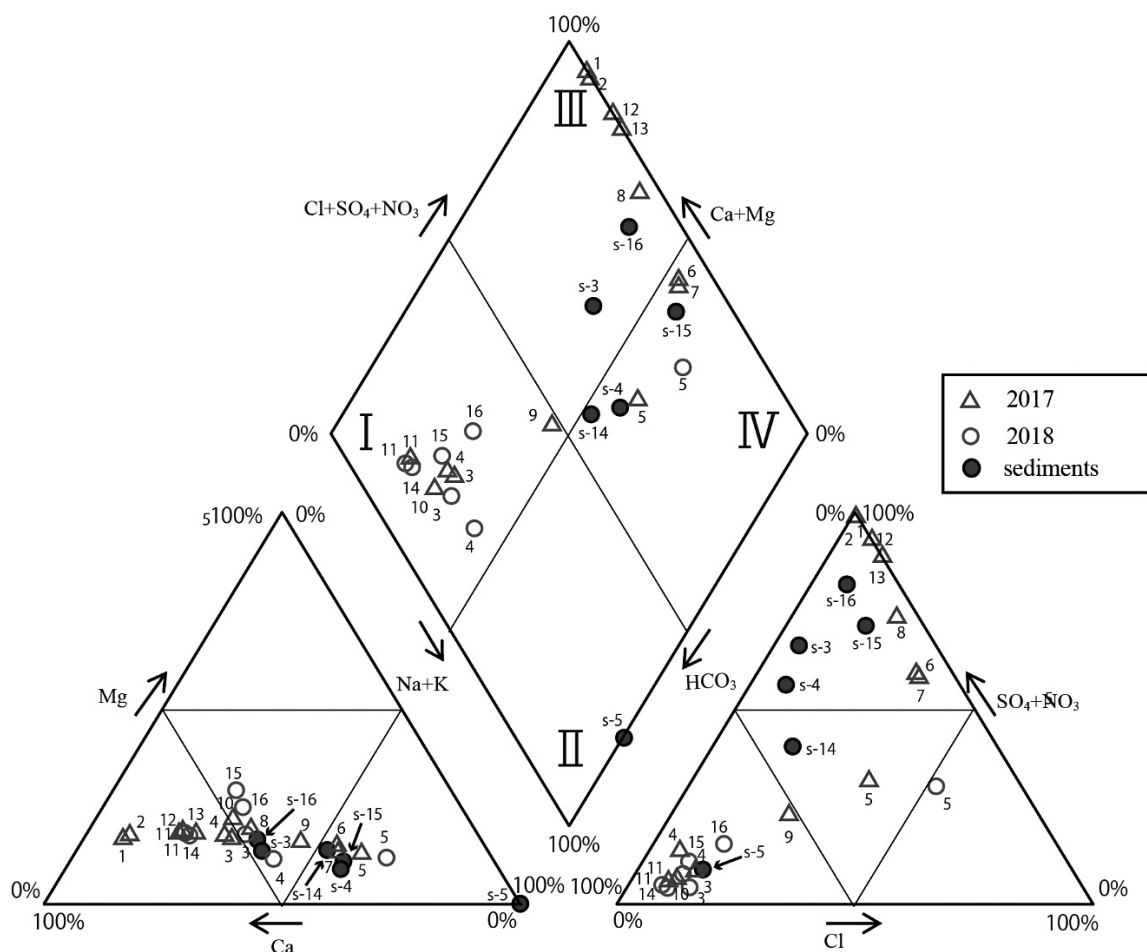


Fig.3 Trilinear diagram of lake water, spring water, and sediment samples.

Table 3 Concentration of trace elements in water samples. (N.D. is not detected.)

Site No	7 L ug/L	11 B ug/L	27 Al ug/L	45 Sc ug/L	47 Ti ug/L	51 V ug/L	52 Cr ug/L	55 Mn ug/L	56 Fe ug/L	59 Co ug/L	60 Ni ug/L	63 Cu ug/L	66 Zn ug/L	71 Ga ug/L	72 Ge ug/L
1	16.021	27.725	77156.765	2.788	6.139	0.065	0.887	4412.733	4613.027	88.431	81.145	5.971	199.314	0.174	0.289
2	19.076	26.882	22682.253	1.169	4.761	0.056	0.072	5257.713	43.091	57.236	38.775	4.083	147.506	0.204	0.301
3	0.217	4.857	4.130	0.039	0.382	0.266	0.017	1.173	59.627	N.D.	N.D.	0.151	2.480	0.001	0.003
3'	0.266	14.493	4.348	0.033	0.476	0.172	0.017	0.752	95.390	0.012	N.D.	0.123	14.859	N.D.	N.D.
4	0.485	4.194	41.330	0.081	1.242	0.295	0.039	45.178	641.443	N.D.	0.071	0.250	27.804	0.005	N.D.
4'	0.621	39.341	48.700	0.100	1.535	0.286	0.198	22.538	642.161	0.073	0.201	0.376	166.371	0.005	0.009
5	0.144	2.881	12.902	0.017	0.134	0.324	0.028	11.007	38.182	N.D.	0.072	0.058	2.930	0.002	0.003
5'	0.210	3.255	19.804	N.D.	0.142	0.425	0.026	5.691	23.601	0.015	N.D.	0.191	1.304	N.D.	N.D.
6	111.704	1498.974	12.490	0.492	5.072	5.293	0.047	23.962	18.570	N.D.	0.097	0.354	2.266	0.004	0.284
7	126.615	1724.605	5.816	0.592	5.881	7.122	0.042	23.193	32.064	N.D.	0.129	4.283	3.350	0.004	0.207
8	17.768	422.854	12.412	0.212	1.862	0.195	0.016	592.484	9.930	0.223	0.500	0.080	7.408	0.002	0.017
9	0.961	25.571	4.114	0.047	0.575	0.120	0.027	6.036	55.696	0.007	0.050	0.480	1.195	0.002	0.013
10	0.679	6.680	19.803	0.109	1.512	0.182	0.027	5.386	274.157	0.020	0.081	0.711	1.494	0.003	0.003
11	0.365	3.704	5.192	0.068	0.827	0.060	0.028	14.870	307.696	0.028	0.047	0.042	0.583	0.001	N.D.
11'	0.418	22.812	7.970	0.058	0.849	0.083	0.135	3.217	455.968	0.030	0.044	0.133	100.720	0.002	N.D.
12	28.541	314.337	2931.460	0.493	4.341	0.025	0.018	2244.050	474.832	4.027	5.564	0.420	22.128	0.107	0.173
13	36.033	422.587	1769.510	0.427	4.148	0.200	0.021	1543.053	39.841	1.965	6.875	0.950	21.890	0.072	0.152
14	0.811	4.311	3.199	0.083	1.013	0.176	0.045	2.361	679.003	0.038	0.035	0.100	1.048	N.D.	0.009
15	0.094	2.552	3.113	0.041	0.468	0.193	0.070	70.584	623.144	0.021	0.051	0.141	0.501	0.003	0.005
16	0.097	2.586	5.538	0.028	0.388	0.124	0.029	0.506	24.575	N.D.	N.D.	0.229	0.265	0.006	N.D.

Table 3 (Continued)

Site No	75 As ug/L	78 Se ug/L	85 Rb ug/L	88 Sr ug/L	89 Y ug/L	90 Zr ug/L	95 Mo ug/L	107 Ag ug/L	111 Cd ug/L	118 Sn ug/L	121 Sb ug/L	133 Cs ug/L	137 Ba ug/L	139 La ug/L	140 Ce ug/L
1	0.990	0.134	9.232	466.204	57.547	0.041	0.029	0.003	0.516	0.004	0.004	0.149	6.450	16.347	45.787
2	1.217	0.105	18.598	481.981	83.567	0.028	0.019	N.D.	0.492	0.003	0.005	0.201	8.759	23.108	67.159
3	0.207	0.018	1.987	12.637	0.019	0.038	0.030	N.D.	0.003	0.099	0.026	0.058	1.086	0.004	0.005
3'	0.197	0.014	3.608	18.771	0.027	0.013	0.040	N.D.	0.001	0.047	0.018	0.062	14.747	0.008	0.009
4	0.175	0.030	1.543	9.617	0.230	0.227	0.026	N.D.	0.039	0.011	0.030	0.023	1.795	0.026	0.081
4'	0.254	0.032	1.249	14.666	0.222	0.292	0.044	N.D.	0.022	0.590	0.035	0.007	212.766	0.029	0.071
5	0.171	0.026	1.793	2.762	0.017	0.041	0.020	N.D.	0.009	0.020	0.038	0.041	1.006	0.005	0.010
5'	0.140	0.030	1.682	2.914	0.023	0.025	0.013	0.001	0.007	0.129	0.041	0.031	1.216	0.005	0.016
6	1.273	0.021	114.170	426.669	0.167	0.027	1.576	N.D.	0.012	0.008	0.021	8.581	17.765	0.022	0.022
7	1.973	0.055	136.592	495.094	0.371	0.025	1.487	0.004	0.025	0.007	0.020	11.718	7.688	0.048	0.067
8	0.072	0.015	19.658	176.724	0.811	0.011	0.113	N.D.	0.041	0.003	0.017	0.576	6.486	0.269	0.296
9	0.239	0.025	3.998	18.283	0.046	0.032	0.137	N.D.	0.002	0.003	0.023	0.058	3.585	0.011	0.017
10	0.135	0.019	6.019	27.143	0.143	0.169	0.067	N.D.	0.003	0.007	0.016	0.129	2.195	0.021	0.061
11	0.241	0.019	2.908	29.821	0.035	0.035	0.033	N.D.	0.002	0.004	0.016	0.019	2.857	0.009	0.019
11'	0.345	0.020	1.393	28.871	0.039	0.039	0.031	N.D.	0.001	0.199	0.021	0.008	121.027	0.010	0.014
12	0.606	0.053	35.782	377.607	41.144	0.037	0.018	N.D.	0.144	0.003	0.005	1.359	11.656	13.154	30.860
13	0.545	0.060	33.000	295.309	29.029	0.016	0.316	N.D.	0.133	0.002	0.013	2.495	8.542	10.153	22.104
14	0.173	0.011	3.123	41.273	0.052	0.032	0.070	N.D.	0.001	0.269	0.026	0.013	5.207	0.007	0.014
15	0.913	0.016	1.397	21.632	0.028	N.D.	0.047	N.D.	0.002	0.078	0.022	0.011	5.665	0.011	0.020
16	0.264	0.024	1.009	17.001	0.005	N.D.	0.064	N.D.	0.001	0.032	0.026	0.010	0.644	0.003	0.003

Site No	141 Pr ug/L	146 Nd ug/L	147 Sm ug/L	153 Eu ug/L	157 Gd ug/L	159 Tb ug/L	163 Dy ug/L	165 Ho ug/L	166 Er ug/L	169 Tm ug/L	172 Yb ug/L	175 Lu ug/L	182 W ug/L	208 Pb ug/L	238 U ug/L
1	6.848	36.080	10.230	2.220	12.759	1.804	11.060	1.981	5.559	0.651	4.130	0.605	N.D.	0.055	0.142
2	9.252	47.232	12.866	1.950	16.300	2.327	14.714	2.734	7.965	0.965	6.241	0.936	N.D.	0.041	0.165
3	0.002	0.010	0.004	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.003	0.001	0.005	0.001	N.D.	0.017	0.001
3'	0.002	0.010	0.005	0.003	0.004	0.001	0.004	0.001	0.003	0.001	0.003	0.001	0.027	0.019	N.D.
4	0.013	0.070	0.021	0.004	0.028	0.004	0.030	0.007	0.024	0.004	0.025	0.005	N.D.	0.158	0.001
4'	0.012	0.062	0.019	0.034	0.027	0.004	0.027	0.006	0.021	0.003	0.024	0.004	0.030	0.134	0.001
5	0.002	0.011	0.004	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.004	0.001	0.004	0.001	N.D.	0.037	0.001
5'	0.002	0.009	0.003	0.001	0.003	0.001	0.004	0.001	0.002	0.000	0.003	0.001	0.018	0.051	N.D.
6	0.006	0.031	0.010	0.005	0.016	0.003	0.017	0.004	0.014	0.002	0.013	0.003	N.D.	0.029	0.033
7	0.011	0.053	0.017	0.005	0.028	0.004	0.030	0.007	0.024	0.003	0.022	0.005	N.D.	0.029	0.034
8	0.048	0.222	0.050	0.008	0.079	0.011	0.065	0.013	0.042	0.005	0.028	0.005	N.D.	0.010	0.003
9	0.003	0.016	0.004	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.004	0.001	0.004	0.001	0.037	0.029	0.001
10	0.009	0.047	0.013	0.004	0.016	0.003	0.018	0.004	0.014	0.002	0.016	0.003	0.029	0.121	0.001
11	0.003	0.015	0.003	0.001	0.004	0.001	0.005	0.001	0.004	0.001	0.004	0.001	0.034	0.036	N.D.
11'	0.003	0.014	0.005	0.017	0.006	0.001	0.005	0.001	0.004	0.001	0.004	0.001	0.015	0.063	N.D.
12	4.303	19.601	4.862	0.669	6.366	0.992	6.007	1.265	3.497	0.458	2.706	0.416	0.040	0.038	0.050
13	3.448	15.755	3.934	0.515	4.997	0.766	4.522	0.925	2.490	0.317	1.842	0.271	0.030	0.030	0.033
14	0.002	0.015	0.005	0.002	0.006	0.001	0.006	0.002	0.006	0.001	0.014	0.003	0.017	0.052	N.D.
15	0.003	0.016	0.005	0.002	0.005	0.001	0.004	0.001	0.003	0.001	0.004	0.001	0.019	0.024	N.D.
16	0.001	0.003	0.002	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	N.D.	0.001	0.001	0.030	0.012	N.D.

元素の内, B, Zn, Rb, Ba, Mn, Fe, Alの7成分の濃度についてFig. 4に示した。Alが高いのはNo. 1, 2, 12, 13の磐梯山系の湖沼, 湧水で, 特にNo. 1では77,000 $\mu\text{g/L}$ を越えており, 非常に濃度が高いが, 少し下流側のNo. 2の湧水では22,000 $\mu\text{g/L}$ 程度まで減少しており, 地下水流動の過程において酸化的・還元的な条件の影響を受けて, アルミニウムは水酸化物と結合して $\text{Al}(\text{OH})_3$ のような無機化合物として沈殿し, 水中の濃度が減少している可能性が考えられる。MnはNo. 1, 2, 12, 13の磐梯山系の湖沼, 湧水で2,000 $\mu\text{g/L}$ 以上の値を示

すが, No. 8 (毘沙門沼)でも比較的高い値を示し, 磐梯山系の水の流入が想定される。FeはNo. 1では4,600 $\mu\text{g/L}$ 以上と高いが, No. 2では約40 $\mu\text{g/L}$ と低くなり, 地下水流動に伴い, Alと同様に水酸化物と結合して $\text{Fe}(\text{OH})_3$ として沈殿し¹²⁾, 濃度減少が生じていると考えられる。また, Feは磐梯山系以外でも濃度の高い地点があり, No. 4, 10, 14, 15が相当する。特にNo. 4 (N2)は無機イオン成分の濃度は低い, 2017年, 2018年の調査結果ともにFeは約640 $\mu\text{g/L}$ の濃度を示している。また, 近接するNo. 3やNo. 5ではFe濃度は100 $\mu\text{g/L}$

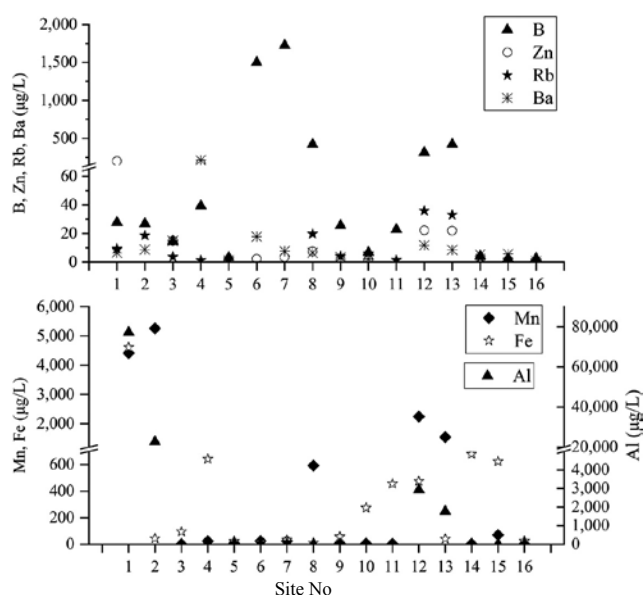


Fig.4 Concentration of B, Zn, Rb, Ba, Mn, Fe, and Al of water samples.

L以下でNo. 4とは特徴が異なる。No. 4はBa, ZnもNo. 3, 5と比べて濃度が高く, Bにもそのような傾向があることから, 何らかの原因によりこれらの特定の微量元素が多く含まれていることになる。要因として湖底の堆積物や水生植物の影響などが考えられるが, 更なる検討が必要である。一方, No.10, 14, 15ではFe濃度は比較的高いが, BaやZnなどの他の元素の濃度は低い為, No. 4とは状況が異なっている。MnはNo. 1, 2, 12, 13, および8の磐梯山系の湖沼, 湧水で相対的に濃度が高くなっている。ZnもNo. 1, 2, 12, 13で相対的に高濃度となっている。Bは少し特徴が異なっており, No. 6, 7で非常に濃度が高く, 温泉に含まれるBの影響を受けて, 湖沼の濃度も高くなっていると考えられる。また, No. 8, 12, 13の五色沼湖沼群の湖沼, 湧水でも, 相対的に多く含まれている。以上の結果より, 微量成分の特徴も磐梯山系とそれ以外の湖沼に大別することができ, 磐梯山系の湖沼, 湧水ではMn, Fe, Al, Znが高く, 火山起源の成分により濃度が上昇していることが示された。一方, BやBaでは磐梯山系以外の湖沼でも濃度が高い地点が認められ, 無機溶存成分の特徴は同じでも微量元素の濃度が異なる地点があることが把握できた。湖沼堆積物や水生植物などの影響により水質の特徴が異なっている可能性があり, 今後の調査でデータを蓄積し, 検討を進めることで詳細な水質形成の要因について示すことができると考えられる。

3. 4 湖沼と湧水の安定同位体比の特徴

調査地点の湖沼水, 湧水の酸素と水素の安定同位体比の特徴を把握するため, $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の測定値をTable 4に, $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の関係を示した δ -diagramをFig. 5に, それぞれ示した。なお, Fig. 5では, 2017年と2018年の2回調査を行った地点については, 2018年の同位体比のNoに「'」を入

Table 4 Stable isotopes of oxygen and hydrogen in water samples.

Site No	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	d-excess ‰
1	-10.96	-69.6	18.14
2	-11.33	-71.0	19.63
3	-8.85	-59.2	11.60
3'	-8.06	-55.1	9.34
4	-9.19	-61.1	12.44
4'	-9.02	-60.7	11.47
5	-7.82	-56.3	6.31
5'	-6.11	-49.0	-0.14
6	-10.46	-68.0	15.68
7	-10.37	-67.9	15.05
8	-10.54	-67.5	16.88
9	-10.93	-70.8	16.64
10	-9.87	-65.2	13.78
11	-9.76	-66.8	11.32
11'	-8.11	-57.7	7.21
12	-10.90	-68.9	18.32
13	-11.38	-73.3	17.81
14	-9.31	-60.1	14.39
15	-10.20	-64.9	16.68
16	-8.65	-58.2	10.93

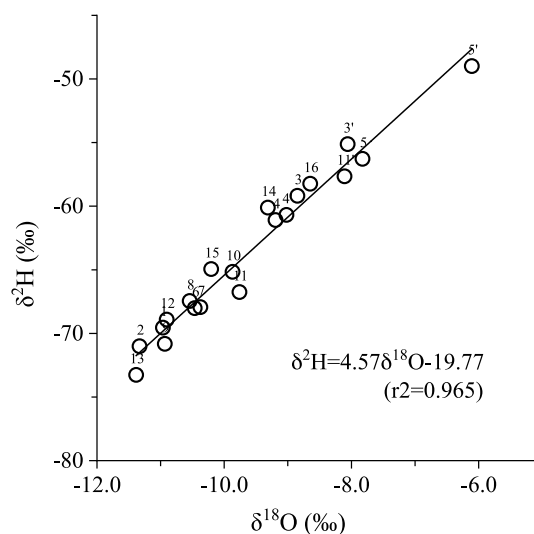


Fig.5 Relation between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of water samples.

れて表示した。d-excessは $\delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ の式により算出した値である。回帰線(天水線)は $\delta^2\text{H} = 4.57 \delta^{18}\text{O} - 19.77$ ($r^2 = 0.965$)で、調査地点のデータは概ね回帰線上にプロットされている。 $\delta^{18}\text{O}$ は -11.38% (No.13) $\sim -6.11\%$ (No. 5の2018年10月)、 $\delta^2\text{H}$ は -73.3% (No.13) $\sim -49.0\%$ (No. 5の2018年10月)で地点による差が大きく、磐梯山中腹や山麓に位置する湧水および湖沼で相対的に同位体比は低くなる傾向が認められる。酸素と水素との安定同位体比には幾つの特徴があるが、その一つに標高が高いと同位体比は低くなる(標高と負の相関を示す)高度効果があり¹³⁾、磐梯山の標高の高い地域で涵養された水が地下に浸透し、湧水や湖沼に湧出することにより、同位体比が相対的に低い値を示していると考えられる。また、蒸発が生じると $\delta^{18}\text{O}$ や $\delta^2\text{H}$ は高くなり、d-excess値は低い値を示す特徴があるため、例えばNo. 3やNo. 5, No.11の湖沼(特にNo. 5の2018年10月)では蒸発の影響が強くと及んでいると思われる。2回調査を行ったNo. 3, 4, 5, 11の同位体比をみると、いずれの地点も2018年のデータの方が相対的に高い同位体比を示しており、季節的な変化が大きいことが伺える。一方で、同位体比の相対的な関係は「No. 5 > No. 3 > No. 4 > No.11」で、2017年と2018年でほぼ変化していない。同位体比は基本的に涵養域の同位体比を反映するとされる。それぞれの湖沼の同位体比自体は降水や蒸発の影響を受けることにより変化が生じるが、涵養域は一定しているため、相対的な同位体比の関係は維持されていると考えられる。

次に、安定同位体比の平面分布図(Fig. 6)をみると、同位体比は磐梯山系の湖沼や湧水で相対的に低く、桧原湖周辺の湖沼で相対的に高い値を示しており、大まかには2つに区分することができる。しかし、桧原湖周辺の湖沼でも一部地点(たとえばNo. 9やNo.15)で相対的に低い同位体比を示しており、また地点間による同位体比の差も比較的大きいことから、局所的な地下水涵養の存在や涵養域の違いなどが湖沼の同位体比に反映されていると予想される。こうしたことから、水循環の点からみると裏磐梯地域の隣接した湖沼でも比較複雑な表流水や地下水の流動系が存在していると考えられる。今後、より多くの湖沼の水質や同位体比を詳細に観測することで、こうした流動系の解明に繋がると期待される。

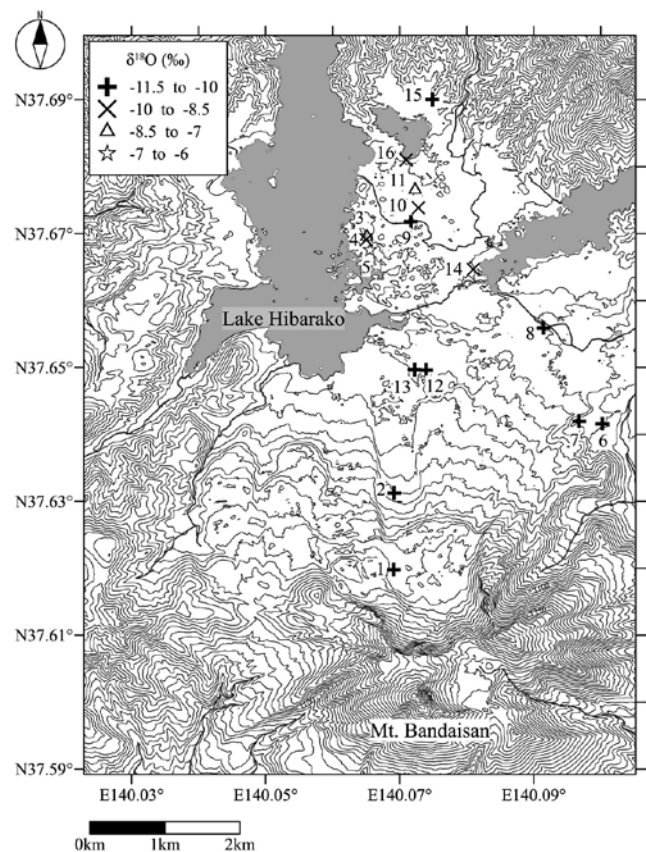


Fig.6 Distribution map of $\delta^{18}\text{O}$ in water samples.

3.5 統計解析を用いた湖沼、湧水の区分

これまで示した湖沼、湧水の水質、安定同位体比の特徴から、概ね2つのグループに大別できることが把握できた。この推定をより明確にするために、統計解析(多変量解析)の手法を用いて検証した。ここでは、無機イオン成分の濃度と酸素・水素安定同位体比の値を用いて、主成分分析と階層的クラスター分析を実施した。主成分分析の結果をFig. 7に、階層的クラスター分析の結果をFig. 8にそれぞれ示した。これらの結果から、今回実施した調査地点は(1)No. 1, 2, 12, 13, (2)No. 6, 7, (3)No. 8, (4)No. 3, 4, 5, 9, 10, 11, 14, 15, 16の4グループに区分され、それぞれの特徴として、以下のようにまとめることができた。(1)はCa-SO₄型の水質組成で、溶存成分量は多く、安定同位体比はとても低い。(2)はNa-(Cl+SO₄)型の水質組成で、溶存成分量は多く、安定同位体比は低い。(3)はCa-SO₄型の水質組成で、溶存成分量は中程度、安定同位体比は低い。(4)はCa-HCO₃型(No. 9はNa-HCO₃型)の水質組成で、溶存成分量は少なく、安定同位体比は中~高い。このうち、(1)~(3)は磐梯山

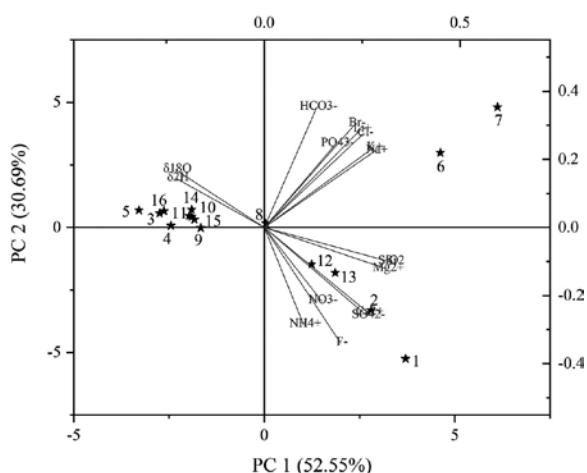


Fig. 7 Result of a principal component analysis using the inorganic ion concentration and stable isotope ratios of oxygen and hydrogen.

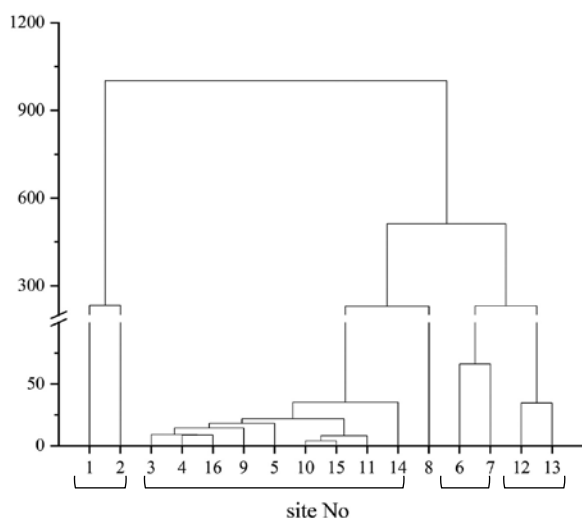


Fig. 8 Result of a cluster analysis using the inorganic ion concentration and stable isotope ratios of oxygen and hydrogen.

周辺で涵養された湖沼，湧水であり，これまで大きく磐梯山系と区分していた湖沼，湧水でも，水質や安定同位体比などの複数の項目を用いて解析することによりある程度詳細に区分することができた。一方で，桧原湖周辺の湖沼については無機イオン成分ではほぼ同じ特徴を有するため今回の解析の結果ではあまり明瞭な差は認められなかったが，安定同位体比や微量元素に違いを有する地点があり，調査地点の追加や統計解析に用いる成分を変更することでより詳細に区分できる可能性があるが，これは今後の課題としたい。

3. 6 湖底堆積物の化学成分の特徴

湖水の水質形成の要因の一つに，湖底堆積物の影響が考えられる。ここでは，湖底堆積物の化学特性を把握するため，採取した湖底堆積物から水溶出試験により抽出した水試料の分析結果について報告する。2. 4 で示した方法により，桧原湖周辺の湖沼 6 地点で採取した湖底堆積物の EC，pH の測定を行い，湖底堆積物に吸着する成分を抽出してそれらの水質分析を実施した。

湖底堆積物の採取地点と EC，pH の測定値を Table 5 に示した。EC は殆どの地点で湖沼水の値よりも湖底堆積物のほうが高く，特に No. 14 や 16 で顕著である。一方，No. 5 では湖底堆積物の EC は 1.1 mS/m と低く，同地点の湖沼水の値とほぼ同じである。No. 5 では粘土やシルト成分を多く含むような湖底堆積物が少なく，砂礫が多く含まれていたため，堆積物に吸着する成分が少ないことに起因すると思われる。pH については，殆どの地点で湖底堆積物のほうが同地点の湖沼水よりも低くなっているが，No. 5 では概ね同じ値を示している。

湖底堆積物の水溶出試験により得られた試料の無機溶存成分の分析結果を Table 6 に，微量元素の

Table 5 Values of EC and pH in lake sediment and water samples.

Site No	sampling site	date	sediments		water	
			EC mS/m	pH	EC mS/m	pH
3	N1 (pond in Nichirei site 1)	2018/10/28	19.6	4.82	3.7	6.32
4	N2 (pond in Nichirei site 2)	2018/10/28	14.6	4.82	3.0	5.54
5	N3 (pond in Nichirei site 3)	2018/10/28	1.1	5.55	1.0	5.89
14	pond near the Syosuke campsite	2018/10/28	31.0	6.19	7.2	6.48
15	Magarisawa-numa	2018/10/28	9.8	5.12	5.2	6.75
16	Sohara-ko	2018/10/28	28.0	5.02	3.7	8.46

Table 6 Concentration of inorganic ions in lake sediment samples.

Site No	F ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	Br ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Li ⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L
3	0.49	4.08	0.19	0.04	74.45	0.20	0.13	40.18	0.00	18.53	1.60	3.36	4.15	21.93
4	0.11	4.55	0.12	0.03	40.00	8.31	0.60	37.24	0.00	17.16	3.22	9.00	2.07	11.21
5	0.19	2.87	0.20	0.00	2.62	0.52	0.13	29.07	0.00	14.24	0.00	0.06	0.00	0.00
14	0.05	21.37	0.60	0.07	26.08	59.84	11.78	95.46	0.00	29.80	4.43	23.91	6.62	24.53
15	0.01	5.54	0.10	0.09	32.98	0.08	0.48	6.90	0.00	10.29	1.67	3.76	1.32	6.11
16	0.80	6.63	0.29	0.13	104.79	7.44	0.10	19.61	0.00	17.05	3.72	9.71	6.00	26.60

Table 7 Concentration of trace elements in lake sediment samples. (N.D. is not detected.)

Site No	7 L ug/L	11 B ug/L	27 Al ug/L	45 Sc ug/L	47 Ti ug/L	51 V ug/L	52 Cr ug/L	55 Mn ug/L	56 Fe ug/L	59 Co ug/L	60 Ni ug/L	63 Cu ug/L	66 Zn ug/L	71 Ga ug/L	72 Ge ug/L
3	2.131	590.065	20.555	0.153	3.325	2.330	0.779	613.440	60.455	1.541	1.912	1.233	401.752	0.016	0.081
4	0.139	47.418	15.466	0.043	0.802	0.328	0.061	6.476	25.525	0.054	0.318	0.181	31.721	0.003	0.005
5	0.389	54.108	52.281	0.090	4.356	0.565	0.113	50.004	23.277	0.567	1.563	0.436	25.845	0.015	0.019
14	1.618	70.995	13.258	0.310	4.518	1.154	0.316	568.712	1706.653	1.287	3.075	0.769	92.293	0.011	0.044
15	0.403	71.062	12.022	0.215	2.560	0.062	0.141	1415.030	37.841	19.422	1.962	0.292	87.189	0.004	0.042
16	0.502	85.142	4.004	0.180	2.422	0.338	0.176	3291.936	1125.020	1.643	0.609	0.602	114.467	0.009	0.047

Site No	75 As ug/L	78 Se ug/L	85 Rb ug/L	88 Sr ug/L	89 Y ug/L	90 Zr ug/L	95 Mo ug/L	107 Ag ug/L	111 Cd ug/L	118 Sn ug/L	121 Sb ug/L	133 Cs ug/L	137 Ba ug/L	139 La ug/L	140 Ce ug/L
3	0.508	0.030	13.373	106.174	0.133	0.160	2.212	0.011	0.139	0.176	3.475	0.118	973.185	0.033	0.070
4	0.153	0.013	4.002	1.620	0.055	0.113	0.140	0.002	0.003	0.025	0.254	0.023	18.270	0.011	0.025
5	0.183	0.029	1.644	15.400	0.136	0.197	0.255	0.002	0.030	0.030	0.382	0.012	117.399	0.022	0.062
14	3.345	0.140	16.265	315.073	0.292	0.188	2.069	0.004	0.006	0.095	0.803	0.020	205.535	0.075	0.152
15	3.444	0.053	10.012	66.328	0.052	0.017	0.152	<0.00043	0.541	0.025	0.383	0.181	122.283	0.016	0.033
16	2.551	0.134	22.365	87.161	0.059	0.074	0.539	0.002	0.013	0.058	0.711	0.149	141.596	0.021	0.042

Site No	141 Pr ug/L	146 Nd ug/L	147 Sm ug/L	153 Eu ug/L	157 Gd ug/L	159 Tb ug/L	163 Dy ug/L	165 Ho ug/L	166 Er ug/L	169 Tm ug/L	172 Yb ug/L	175 Lu ug/L	182 W ug/L	208 Pb ug/L	238 U ug/L
3	0.013	0.065	0.028	0.115	0.031	0.004	0.025	0.006	0.021	0.003	0.024	0.005	0.325	0.475	N.D.
4	0.004	0.018	0.006	0.003	0.007	0.001	0.007	0.002	0.006	0.001	0.006	0.001	0.024	0.049	N.D.
5	0.008	0.042	0.014	0.016	0.017	0.002	0.019	0.005	0.016	0.002	0.020	0.003	0.035	0.210	0.002
14	0.020	0.100	0.026	0.028	0.031	0.004	0.031	0.008	0.027	0.004	0.033	0.007	0.097	0.261	0.025
15	0.004	0.022	0.006	0.014	0.008	0.001	0.007	0.002	0.006	0.001	0.007	0.001	0.027	0.031	0.001
16	0.005	0.025	0.007	0.018	0.009	0.001	0.008	0.002	0.006	0.001	0.006	0.001	0.076	0.476	0.008

分析結果を Table 7 に示した。また、無機溶存成分の結果を利用して作成した Stiff diagram を Fig. 2 に、Trilinear diagram を Fig. 3 に併せて示した。無機溶存成分の結果より、水質組成は No. 3 は Ca-SO₄型、No. 4 は Na-SO₄型、No. 5 は Na-HCO₃型、No. 14 は Na-HCO₃型、No. 15 は Na-SO₄型、No. 16 は Ca-SO₄型で、水質組成および溶存成分量は地点ごとに異なる特徴を有している。また、No. 14 では NO₃⁻濃度が 59.8 mg/L と高くなっており、同地点の湖沼水の濃度 (0 mg/L) と比べて大きく上昇している。一方、上記 6 地点の湖沼の水質組成ははず

れも Ca-HCO₃型で、溶存成分量は多少の違いがあるものの比較的少なく、湖底堆積物の抽出水は湖沼の場合とは大きく異なる特徴を有することが明らかとなった。この違いは Trilinear diagram (Fig. 3) でも明瞭である。

湖底堆積物の抽出水の微量元素について、濃度が高く特徴的な 7 元素 (B, Al, Mn, Fe, Zn, Rb, Ba) を選定して、湖沼と湖底堆積物の抽出水の濃度を比較した図を Fig. 9 に示した。ほとんど全ての地点、元素において、湖底堆積物の抽出水のほうが濃度は高くなっている。Al や Fe, Ba では湖

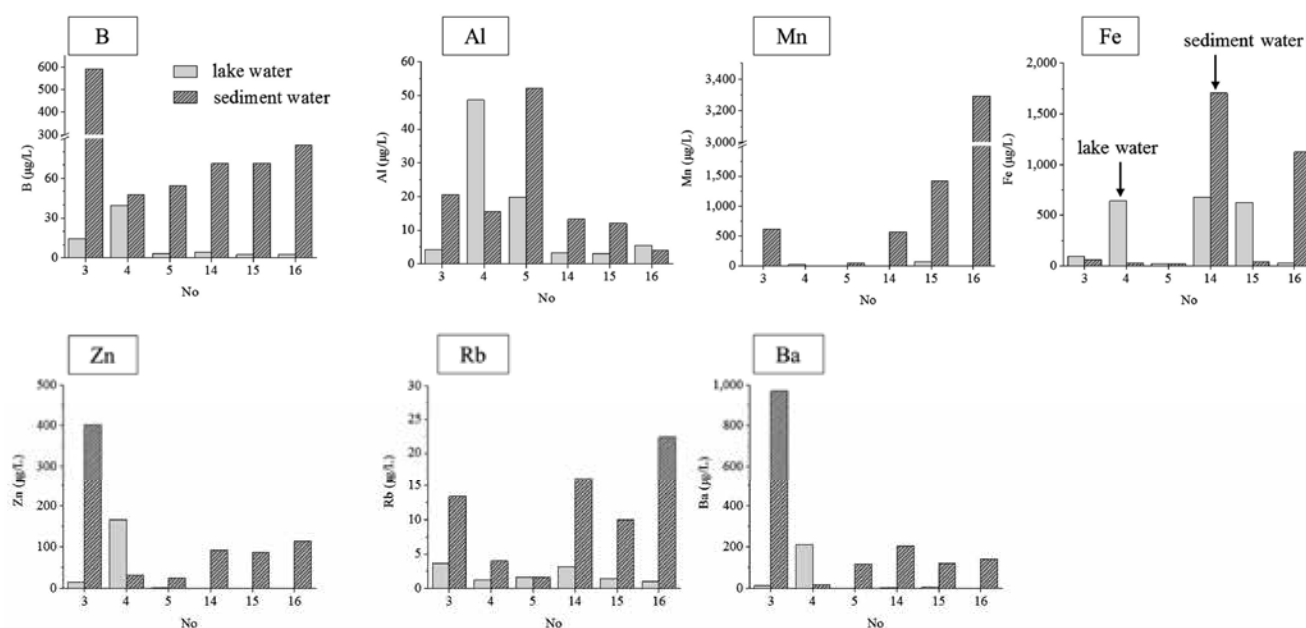


Fig.9 Comparison of chemical characterization between lake water and sediment water.

沼の方が濃度は高くなっている地点が認められるが、これは限定的である。湖底堆積物の抽出水で濃度が高い要因として、水生植物や地質の影響、火山灰堆積物の有無などが想定される。たとえば、植物の葉に含まれる元素として、N, P, K, Ca, Mg, Naの他に、Fe, Mn, Zn, Alなども多く含まれており、湖沼の水生植物が枯れて湖底に堆積した後こうした元素が湖底に蓄積されることにより濃度が高くなる可能性がある。また、Alについては火山灰にも多く含まれており、磐梯山の噴火により直接、あるいは運搬等により湖底に堆積した火山灰起源のAlが存在することも予想される。以上の結果、湖沼と湖底堆積物の無機溶存成分や微量元素には大きな違いがあることが明らかとなった。しかしながら、今回は湖沼のある1地点で堆積物の表層のみ採取したため、この結果が各湖沼の堆積物の全体的な特徴を反映していると断言することは難しい。今後、湖沼内の複数地点での湖底堆積物採取や、他の湖沼の湖底堆積物を採取するなど、継続した調査を行うことにより、より明瞭な特徴を示すことができ、湖沼の水質形成への関わりについても把握することができると考えられる。こちらについても、今後の検討課題としたい。

4. まとめ、今後の課題

裏磐梯地域において2017年と2018年に実施した湖沼と湧水の調査、および6地点で採取した湖底堆積物の分析の結果から、以下の事柄を把握することができた。

1. 調査地点のEC, pH, ORPの特徴から、磐梯山系の湖沼・湧水と、桧原湖周辺の湖沼で大きく2つに区分できた。
2. Stiff diagramより、水質組成は幾つかのグループに大別することができた。No. 1, 2, 12, 13はCa-SO₄型を示し、溶存成分量は非常に多い。No. 8も上記4地点と同じくCa-SO₄型であるが、Cl⁻も比較的多く含まれており、また溶存成分量は4地点と比べると低いことから、4地点とは異なる水質の特徴を有している。No. 6, 7はNa-(Cl+SO₄)型で、溶存成分量は多い。No. 6, 7の近傍には川上温泉があり、温泉の水質の影響があらわれていると考えられる。桧原湖周辺の地点はCa-HCO₃型 (No. 9はNa-HCO₃型)を示し、溶存成分濃度は低く、磐梯山の中腹や山麓の湧水、湖沼とは明らかに水質の特徴が異なっている。このように裏磐梯地域の湖沼の水質組成には多様性が認められ、本地域の特色の一つであると言える。
3. 湖沼の微量元素では、B, Zn, Rb, Ba, Mn, Fe, Alの7成分の濃度が比較的高くなっているが、

地点によって特徴が異なる。磐梯山系とそれ以外の湖沼に大別することができ、磐梯山系の湖沼、湧水ではMn, Fe, Al, Znが高く、火山起源の成分により濃度が上昇していることが示された。

4. 酸素と水素の安定同位体比は高度効果の影響が認められ、比較的標高の高い地点で涵養された水が起源になっていると予想される磐梯山系の湖沼・湧水では、同位体比は相対的に低い値を示している。また、桧原湖周辺の湖沼の同位体比は磐梯山系と比較すると高い値を示しているが、近接した湖沼でも同位体比が異なる場合があり、複雑な流動システムの存在が予想された。
5. 無機溶存成分と安定同位体の結果を用いた多変量解析（主成分分析、階層的クラスター分析）の結果、調査地点は4グループに区分することができた。それぞれの特徴として、(1)Ca-SO₄型の水質組成で、溶存分量は多く、安定同位体比はとても低い、(2)Na-(Cl+SO₄)型の水質組成で、溶存分量は多く、安定同位体比は低い、(3)Ca-SO₄型の水質組成で、溶存分量は中程度、安定同位体比は低い、(4)Ca-HCO₃型（一部、Na-HCO₃型）の水質組成で、溶存分量は少なく、安定同位体比は中～高いことが示せた。このうち、(1)～(3)は磐梯山周辺で涵養された湖沼、湧水であり、これまで磐梯山系とした湖沼や湧水について、水質や安定同位体比などの複数の項目を用いて解析することにより詳細に区分することができた。
6. 6地点の湖沼で採取した湖底堆積物の水溶出実験

を行った結果、湖沼と湖底堆積物の抽出水のEC, pH, 無機溶存成分や微量元素には大きな違いがあることが明らかとなった。地点や元素による違いはあるが、殆どの場合、湖底堆積物の抽出水のほうが溶存成分濃度は高く、水質組成も湖沼水とは異なっている。湖沼と湖底堆積物の抽出水の水質の違いの要因として、水生植物や地質の影響、火山灰堆積物の有無などが大きく関与していると考えられるが、明確に示すためには更なる調査の実施と検討を行う必要がある。

最後に、調査地点の水質の特徴と、水生植物との関係をもとめ、Table 8に示した。今回は、各湖沼の水質の特徴と、一部湖沼の湖底堆積物（抽出水）の化学特性について示すにとどまり、水質と水生植物との関連について詳細な考察を行うまでには至っていないが、今後継続的な調査を行い、検討を進めてゆくことで両者の関係を見出すことができると考えている。今回の調査結果が、裏磐梯地域の他の研究において、少しでもお役に立てれば幸いである。

謝 辞

本調査の一部は、「平成30年度株式会社ニチレイ研究助成」の援助を受けて実施しました。また同社にはニチレイ社有地内の調査実施についてもご協力いただきました。ここに記して、深く御礼申し上げます。

Table 8 Characteristics of water quality and diversity of aquatic plants in lakes

Site No	sampling site	water quality	EC	pH	No. of aquatic plant species*	Alien aquatic plant	Note for aquatic plant
1	Aka-numa	Ca-SO ₄	high	acid	0 ¹⁶⁾	absent ¹⁶⁾	
2	spring in Urabandai Ski Resort	Ca-SO ₄	high	acid	—	—	—
3	N1	Ca-HCO ₃	low	neutral	8 ⁶⁾	absent ⁶⁾	referring unpublished data by Endo
4	N2	Ca-HCO ₃	low	acid	6 ⁶⁾	absent ⁶⁾	referring unpublished data by Endo
5	N3	Na-Cl	low	acid	2 ⁶⁾	absent ⁶⁾	referring unpublished data by Endo
6	Kawakami-aonuma	Na-(Cl+SO ₄)	high	alkaline	2	absent	unpublished data by Endo
7	Kawakami-yunuma	Na-(Cl+SO ₄)	high	alkaline	1	absent	unpublished data by Endo
8	Bisyamon-numa	Ca-SO ₄	medium	alkaline	5 ¹⁵⁾	absent ¹⁵⁾	unpublished data by Endo
9	runoff from Nakase-numa	Na-HCO ₃	low	alkaline	—	—	—
10	Hime-numa	Ca-HCO ₃	low	alkaline	no reference	no reference	
11	Renge-numa	Ca-HCO ₃	low	neutral	11 ¹⁴⁾	absent ¹⁴⁾	
12	spring inflow into Benten-numa	Ca-SO ₄	high	acid	—	—	—
13	Ruri-numa	Ca-SO ₄	high	acid	1 ¹⁵⁾	absent ¹⁵⁾	
14	pond near the Syosuke campsite	Ca-HCO ₃	low	acid	6	present	unpublished data by Endo
15	Magarisawa-numa	Ca-HCO ₃	low	neutral	2	present	unpublished data by Endo
16	Sohara-ko	Ca-HCO ₃	low	alkaline	no reference	present	unpublished data by Kurosawa

*submerged, floating-leaved, and floating plant

参考文献

- 1) 日本陸水学会編 (2006) : 「陸水の事典」. 講談社, 578p.
- 2) 櫻村利道(1988) : 裏磐梯五色沼の植生. 地学雑誌, 97(4), 120-125.
- 3) 千葉 茂・朝倉誠司・松本仁志 (1986) : 裏磐梯五色沼の水質とその成因について. 福島大学教育学部論集理科報告, 38, 19-30.
- 4) 藪崎志穂 (2015) : 磐梯山北部斜面における表流水と地下水の水質からみた地下水流動に関する予察. 福島大学理工学群共生システム理工学類 共生のシステム, 15, 105-112.
- 5) 藪崎志穂 (2016) : 磐梯山とその周辺地域の地下水, 湧水の水質の特徴. 塘 忠顕編「裏磐梯・猪苗代地域の環境学」. 福島民報社, 95-106p.
- 6) 遠藤優年・首藤光太郎・黒沢高秀 (2015) : 裏磐梯桧原湖東部の非植林地帯における泥流上の植物相. 福島大学理工学群共生システム理工学類 共生のシステム, 15, 241-250.
- 7) 塘 忠顕・増淵翔太・大平 創 (2016) : 裏磐梯地域に生息する底生動物. 塘 忠顕編「裏磐梯・猪苗代地域の環境学」. 福島民報社, 151-161p.
- 8) 藪崎志穂・安原正也・浅井和由・鈴木裕一・高橋 浩・稲村明彦 (2013) : 磐梯山とその周辺の水質, 同位体特性について. 福島大学理工学群共生システム理工学類 共生のシステム, 13, 58-75.
- 9) 黒沢高秀・塘 忠顕 (2016) : 裏磐梯・猪苗代地域の生物多様性とその保全. 塘 忠顕編「裏磐梯・猪苗代地域の環境学」. 福島民報社, 237-258p.
- 10) 環境省 水・大気環境局 土壤環境課 (2012) : 汚染土壌の処理業に関するガイドライン (改訂第2版). Appendix-1. 土壤溶出量調査に係る測定方法. http://www.env.go.jp/water/dojo/gl_disp-cs/. (2019年7月1日閲覧)
- 11) 土屋範芳・井上千弘・山田亮一・山崎慎一・平野伸夫・岡本 敦・小川泰正・渡邊隆広・奈良郁子・渡邊則昭・東北地方津波堆積物研究グループ(2012) : 東北地方太平洋沖地震による岩手, 宮城, 福島県沿岸域の津波堆積物のヒ素に関するリスク評価. 地質学雑誌, 118(7), 419-430.
- 12) 夏池真史・菊地哲郎・Lee Ying Ping, 伊藤紘晃・藤井 学・吉村千洋・渡部 徹 (2016) : 自然水中における鉄の化学種と生物利用性 — 鉄と有機物の動態からみる森・川・海のつながり —. 水環境学会誌, 39(6), 197-210.
- 13) Clark, I. and Fritz, P. (1997) : Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, 328p.
- 14) 首藤光太郎・黒沢高秀 (2015) : レンゲ沼と柳沼の水生植物相追記. 福島大学理工学群共生システム理工学類 共生のシステム, 15, 251-254.
- 15) 首藤光太郎・森 康裕・黒沢高秀 (2012) : 福島県裏磐梯五色沼湖沼群の水生植物相とその変化. 水草研究会誌, 98, 1-21.
- 16) 首藤光太郎・佐藤 公・黒沢高秀 (2016) : 酸性湖沼裏磐梯銅沼に初めて定着した水生維管束植物と分布拡大時期の推定. 水草研究会誌, 103, 20-27.

「原稿受付 (2019年7月17日), 査読なし」