

(9) 乗鞍岳湖沼群における酸の供給と消費機構

THE PROCESSES OF ACID SUPPLY AND CONSUMPTION IN ACIDIFIED LAKES IN MT. NORIKURA

川上 智規*

Tomonori KAWAKAMI*

ABSTRACT; The processes of acid supply and consumption were investigated in several lakes in Mt. Norikura alpine area which were susceptible to acid rain. With regard to acid consumption processes, we measured exchangeable cations of soil from the watershed of the lakes and those of sediments from the lakes themselves. This results of the measurement show Norikura lakes have a small acid-neutralizing capacity as 1/100 that of Lake Nawagaiké, which has a normal pH value. With regard to acid supply processes, we observed two types of sulfate ion release from snow particles into the lake water. The first type is a sulfate ion release from snow particles immersed in the lake water at 0°C, which was observed at Lake Kiezuike when snow fell on the lake water at the beginning of June. The second is a sulfate ion release from snow jam, which was observed at Lake Tsurugaiké during the snow melting period. At the end of May, the concentration of ion in the lake water was estimated to have increased by 9% by this process. However, it was found that the ion concentration can increase as far as 250%.

KEYWORDS; ACID RAIN, EXCHANGEABLE CATIONS, MT. NORIKURA, SULFATE ION, SNOW JAM

1. はじめに

著者らは酸性雨に対する緩衝能の極めて小さい湖沼として乗鞍岳山頂付近の湖沼群を対象に調査を行っている。1992年度はそれらの湖沼群のうち、鶴ヶ池、不消池、丘ノ池および権現池の4湖沼において、湖水中のイオン成分を中心に分析し、湖水の酸性雨に対する緩衝能等を調査し、1985年7月および8月の環境庁の調査¹⁾に比較してpHが低下傾向にあること、これらの湖沼はいずれもアルカリ度や溶存イオン濃度が極端に小さく酸性雨の影響を極めて受けやすい水質であることなどを報告した²⁾。本研究では乗鞍岳山頂付近の湖沼群のうち92年度に未調査であったその他の3湖沼についても調査を行い、それらの湖沼においても1985年に比較するとpHが低下傾向にあることを確認した。このように乗鞍岳山頂付近の湖沼群が酸性雨に対して緩衝能が極めて小さく、pHが低下傾向にあるのは、酸性物質の消費あるいは塩基性物質の供給プロセスが欠如しているためと考えられる。そのようなプロセスとしては、集水域内の塩基性の土壌層によるアルカリ成分の供給³⁾、底泥との陽イオン交換、生物学的な陰イオンの消費が考えられており⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾、乗鞍岳山頂付近の各湖沼においても、底泥ならびに集水域の土壌による陽イオン交換能ならびに湖内での陰イオンの消費について検討を行った。比較の対象として、十分なアルカリ度を有し、酸性雨の影響を受けにくいと考えられる富山県の細ヶ池を、また、乗鞍岳山頂付近の湖沼同様にイオン濃度やアルカリ度が小さく、pHが酸性であるとい

* 富山県立大学短期大学部環境工学科

Department of Environmental Technology, Toyama Prefectural University

う特徴を有する酸性腐植栄養湖の例として乗鞍岳山麓の牛留池をとりあげた。

また、乗鞍岳山頂付近の湖沼群のような高山湖においては、湖水への酸性物質の供給プロセスとして、降雨によるものの他に特殊な例として積雪の融雪時におけるイオン成分の濃縮の影響がある。既報では鶴ヶ池において、1993年5月から6月にかけて、融雪初期の水質特性を調査し、積雪の融雪時におけるイオン成分の濃縮の影響を評価し報告したが²⁾、同時期に不消池においても融雪によるイオン成分の濃縮がみられ、さらに、不消池では山下らの指摘した0℃の湖水に降雪があった際の雪粒子から湖水へのイオン成分の放出現象⁸⁾が観測された。また冬期間積雪に埋もれる高山湖においては春期の湖水の形成時期には積雪が水中に懸垂して存在し、スノージャムと呼ばれているが⁹⁾、スノージャムからのイオン成分の湖沼への放出の可能性も検討した。

2. 調査内容

2.1 調査地点の状況

調査対象とした湖沼の位置をFig. 1に、各湖沼の諸元¹⁾¹⁰⁾¹¹⁾をTable 1に示す。鶴ヶ池、不消池、五ノ池および権現池は乗鞍岳山頂付近の標高2700m付近に位置する高山湖である。五ノ池は点在する五湖沼の総称であるが、各々には定まった名称はなく、東より順に五ノ池(1)～(5)とした。五ノ池(5)からは赤川が流れ出している。その他の湖沼には流入河川および流出河川は無いが、降雨量が多いときには五ノ池(1)から五ノ池(2)を経て、五ノ池(5)に至る流れができる。これらの湖沼の湖岸の植生は乏しく、わずかにハイマツが生育している程度である。湖水は無色透明で湖底の腐植質は見あたらない。牛留池は乗鞍岳の裾野に広がる乗鞍高原の標高1590mに存在する酸性腐植栄養湖であり、成因は溶岩原の窪地に水が落ちた溶岩原間窪池である。周囲の植生はダケカンバやシラビソであり、水面にはミツガシワが多い。湖底には腐植質が多量に堆積しており、湖水は薄い黄色を呈している。細ヶ池は富山県城端町の東南、高清水山の西側山麓の標高800mに位置しており、高清水山の山腹を流下する池川が山くずれによって堰き止められてできた湖である。池の周辺には水バショウが群生する。水の流入口は東南側、流出口は北側にあり、流入量と流出量はほぼ均衡している。湖沼型は貧栄養湖に近い中栄養湖である¹¹⁾。

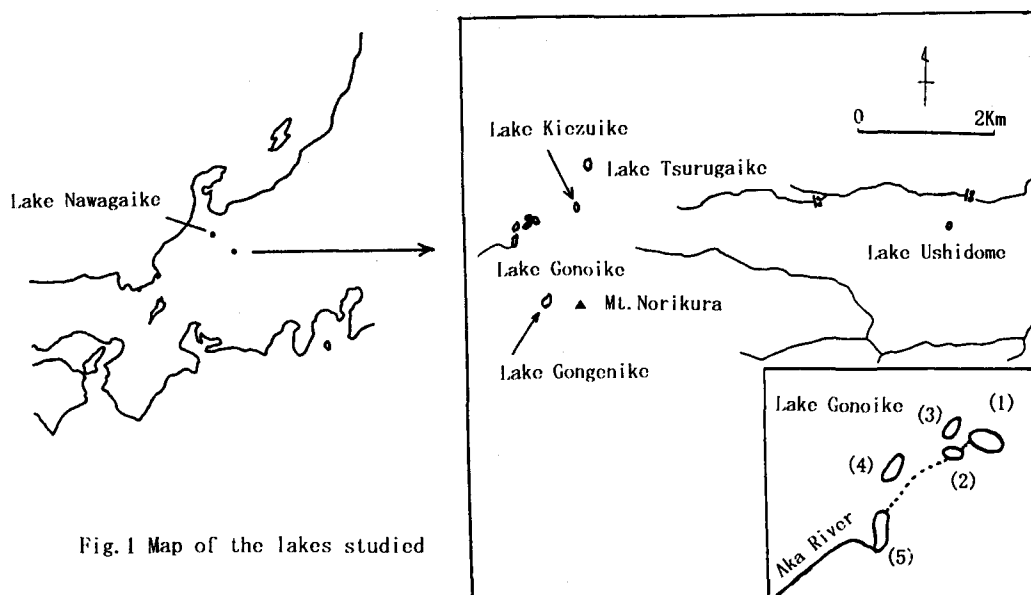


Fig. 1 Map of the lakes studied

Table 1. Characteristics of lakes studied

	Classification	Type	Altitude(m)	Area(km ²)	Max. Depth(m)	Ave. Depth(m)
Tsurugaike	Caldera	Oligotrophic	2700	0.01153	4.0	1.51
Kiezuike	Crater	Oligotrophic	2730	0.00529	2.8	1.82
Gonoike-1	Dammed	Oligotrophic	2690	0.00596	1.9	0.88
Gonoike-3	Dammed	Oligotrophic	2690	0.00554	0.9	0.54
Gonoike-4	Dammed	Oligotrophic	2690	0.00811	1.3	0.60
Gonoike-5	Dammed	Oligotrophic	2690	0.00974	1.4	0.52
Gongenike	Crater	Oligotrophic	2810	0.04026	5.0	3.25
Ushidomeike	Hollow	Dystrophic	1590	0.0028	-	-
Nawagaike	Dammed	Mesotrophic	800	0.0217	9.4	-

2.2 調査方法

鶴ヶ池、不消池、五ノ池(1)および権現池においては約1週間毎に経時的に採水を行った。採水時刻は午前11~12時頃に統一した。鶴ヶ池においては93年5月17日より、不消池は5月26日より、権現池および五ノ池は7月28日より採水を開始し、93年10月2日まで継続した。開始時期が各湖沼により異なるのは、各湖沼により融雪時期が異なり、湖面の出現時期が異なるためである。なお、五ノ池(3)(4)(5)は93年9月23日、牛留池は93年9月6日、縄が池は92年の10月16日に採水した。五ノ池(4)は93年10月2日にも採水を行った。採水は縄が池以外ではすべて湖岸より行い表層水を採取した。縄が池は流入水、流出水に加え、湖心付近において深さ方向に何点か採水を行った。降雨はポリプロピレン製の容器の上部に直径17.5cmのポリエチレン製のロートを接続した採取装置を鶴ヶ池付近に設置し、鶴ヶ池の採水時に回収した。降水の変質を避けるため、十分に洗浄したポリプロピレン製のスポンジを用いてロート部でろ過を行う様にし、ポリプロピレン製の容器には光を通さないものを用いた。pHおよび電気伝導度は現地で測定し、その他の項目はサンプルを実験室に持ち帰り、直ちに0.45μmのメンブランフィルターによりろ過した後、分析に供した。分析方法はTable 2にまとめた。湖水のアルカリ度は次の式を用いて蒸留水のpHを4.8まで低下させるために必要な酸の量を補正した。

$$ALK(net) = ALK(obs.) - (10^{-4.8} - 10^{-pH})$$

ALK(net) : アルカリ度補正值

ALK(obs.) : アルカリ度測定値

pH : 試料のpH

一方、土壌や底泥による中和能力を知る目的で各湖沼の集水域ならびに湖底より土壌試料を採取し、交換性陽イオンを分析した。土壌試料の採取は乗鞍岳山頂付近の湖沼群では植生の無い任意の一地点を選び表層土を採取した。縄ヶ池と牛留池においては任意の一地点の表層の落葉を除いた下層の土壌を採取した。分析方法はいずれの項目も、土壌標準分析・測定法¹²⁾によった。

スノージャムは93年5月31日に鶴ヶ池よりステンレス製のパイプを用いて採取し、含水率は結合熱量計型積雪含水率計を用い現地で測定した。溶存イオン成分や粒子径はプラスチック容器に採取したサンプルを、湿り雪を詰めて0℃に保ったクーラーボックスに入れた状態で実験室に持ち帰った後直ちに測定した。粒子径は、対馬の方法¹³⁾と同様に、雪粒子をあらかじめ0℃に冷却したシャーレにとり、同じく0℃に冷却したガラス板

Table 2. Analysis method

pH	: glass electrode method
EC	: electrical conductivity meter
SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , NH ₄ ⁺	: ion chromatography
Ca ²⁺ , Mg ²⁺	: flame atomic absorption
Alkalinity	: titration by 0.005N H ₂ SO ₄ to an end point of pH=4.8

を上から押し当てて単層の雪を作って顕微鏡写真に撮り、約400個の粒子のFeret径を測定した。

3. 結果と考察

3.1 鶴ヶ池、不消池、五ノ池および権現池のpHの経年変化

1985年、1992年および1993年における鶴ヶ池、不消池、五ノ池および権現池のpHをTable 3に示す。空欄は欠測である。既報では、鶴ヶ池、不消池、五ノ池(1)および権現池においてpHの低下を指摘したが、今回の調査では五ノ池(3) (4) (5)においても1985年に比較するとpHの低下傾向が見られる。

Table 3. pH observed in 1985, 1992 and 1993

	JUL. 1985	AUG. 1985	OCT. 1992	JUL. 1993	AUG. 1993	SEP. 1993	OCT. 1993
Tsurugaike	6.3	6.4	5.5	5.5	5.7	5.9	6.1
Kiezuike	6.3	6.8	6.4	5.9	5.7	6.3	6.2
Gonoike(1)	6.7	6.9	6.1	5.6	5.9	6.0	6.0
Gonoike(3)	6.3	6.0				5.5	
Gonoike(4)	5.7	6.1				5.4	5.7
Gonoike(5)	6.9	6.1				6.2	
Gongenike	6.2	6.1	5.6	5.4	5.3	5.3	5.3

3.2 各湖沼の溶存イオン

鶴ヶ池、不消池、五ノ池、権現池、牛留池ならびに縄ヶ池の溶存イオンをTable 4に示す。鶴ヶ池、不消池、五ノ池、権現池は93年9月23日採水、牛留池は93年9月6日採水、縄ヶ池は92年10月16日採水のものである。

Table 4. Physicochemical analyses of the lakes

	pH	EC (μ S/cm)	Na ⁺ (μ eq/l)	K ⁺ (μ eq/l)	NH ₄ ⁺ (μ eq/l)	Ca ²⁺ (μ eq/l)	Mg ²⁺ (μ eq/l)	Cl ⁻ (μ eq/l)	NO ₃ ⁻ (μ eq/l)	SO ₄ ²⁻ (μ eq/l)	Alkalinity (μ eq/l)
Tsurugaike	5.9	3.5	2.1	1.5	0.0	18.2	2.1	1.6	4.3	13.1	7
Kiezuike	6.3	4.2	10.3	3.0	0.0	20.3	4.4	2.9	1.6	10.1	19
Gonoike-1	6.0	3.9	8.6	1.7	0.0	18.5	2.8	2.9	2.7	14.3	9
Gonoike-3	5.5	2.8	3.4	1.6	0.0	9.0	1.4	3.1	0.0	9.4	4
Gonoike-4	5.4	3.0	3.7	0.7	0.0	8.4	1.3	1.8	2.0	10.2	2
Gonoike-5	6.2	3.8	8.7	1.6	0.0	18.4	2.8	2.9	2.4	14.2	8
Gongenike	5.3	3.4	3.7	0.9	0.0	7.7	1.4	3.1	3.4	11.2	1
Ushidomeike	5.4	9.3	8.3	6.1	0.1	64.7	9.5	9.0	0.0	15.8	20
Nawagaike	7.4	54	152	9.2	2.5	278	91	83.6	6.4	21.9	485

このように乗鞍岳山頂付近の湖沼群はいずれの湖沼もイオン濃度が極めて低く、酸性降下物質に対する緩衝能力の指標の一つであるアルカリ度も極めて小さい。

一方、牛留池はイオン濃度が低く、電気伝導度が小さいという腐植栄養湖の特徴を示しており¹⁴⁾、これらはまた乗鞍岳山頂付近の湖沼群の水質特性であるため、両者の溶存イオン成分は一見近似している。しかしながら、陰イオンと陽イオンの総和を比較してみると、Fig. 2に示す様に乗鞍岳山頂付近の湖沼群においては両者がバランスしているのに対し、牛留池では陽イオンの方が過多である。これはTable 4に示されたイオ

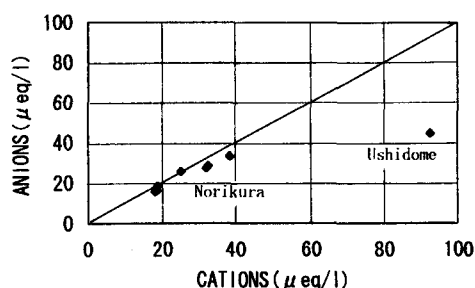


Fig. 2 Ion balance of Norikura lakes and Lake Ushidome

ン種以外に陰イオンとして腐植物質の存在を示唆するものである。このように高山に位置する貧栄養湖と腐植栄養湖はそのイオンバランスによって明確に区別することができる。

3.3 各湖沼のイオン濃度の経時変化

鶴ヶ池、不消池、五ノ池(1)、権現池に関しては経時的に採水を行った。各湖沼の Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、アルカリ度の変化をFig. 3, 4, 5に示す。 Ca^{2+} は権現池以外は7月下旬以降はほぼ同様の濃度で推移し、その起源が同一であることが推定される。一方、権現池の Ca^{2+} は常に低い濃度で推移した。この期間の降雨中の各イオン成分を降雨量で重み付けした平均値をTable 5に示すが、降雨中の Ca^{2+} 濃度の平均は $13 \mu\text{eq/l}$ であり、権現池の Ca^{2+} 濃度は降雨中のそれを下まわっているが原因は不明である。 Ca^{2+} は権現池以外は7月下旬までは減少したが、その後は上昇に転じた。アルカリ度もほぼ同様の傾向であった。 SO_4^{2-} は7月まで減少し、その後はわずかに上昇した。また、これら4湖沼の全観測値に関して Ca^{2+} とアルカリ度にはFig. 6に示す様に相関関係がみられ次の回帰式が得られた。

$$ALK = -1 + 0.72Ca \cdots (1)$$

ALK: アルカリ度 ($\mu\text{eq/l}$)

Ca: カルシウムイオン濃度 ($\mu\text{eq/l}$)

同様の関係が、酸性雨に対して感受性が高いと考えられているノルウェーやカナダオンタリオ州の実験湖沼領域(ELA)における湖沼においても見られ、それぞれ

$$ALK = -29 + 1.32Ca \cdots (2)$$

$$ALK = -32 + 1.42Ca \cdots (3)$$

なる回帰式が得られている¹⁵⁾。式(1)と比較すると切片が負であり、傾きが大きい。切片が負である点は、例えばカナダのELAにおいては湖水中の SO_4^{2-} 濃度が $62 \mu\text{eq/l}$ と高く¹⁶⁾アルカリ度を既に消費している部分が多いことが考えられ、また式(1)の傾きが小さい点は、乗鞍岳の湖沼群では Ca^{2+} は土壌や底泥からの供給が少なく、アルカリ度の供給を伴わない降雨から供給されている割合が多い点の原因と考えられる。

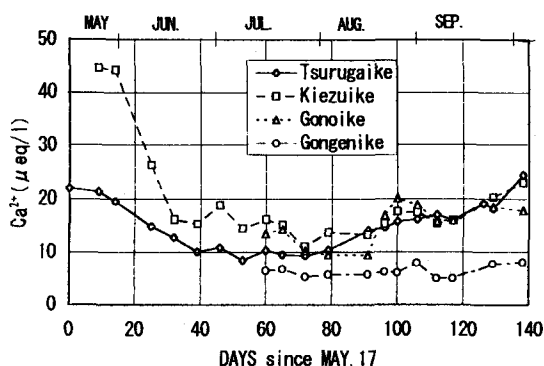


Fig. 3 Changes of Ca^{2+} since May. 17

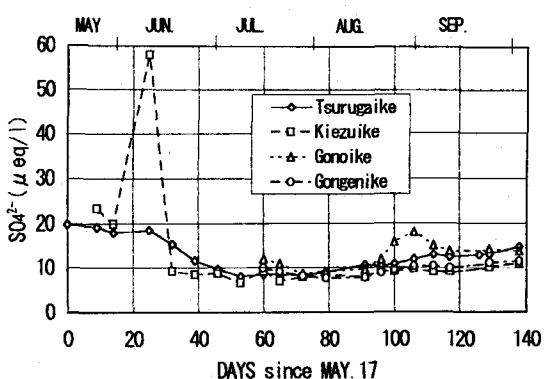


Fig. 4 Changes of SO_4^{2-} since May. 17

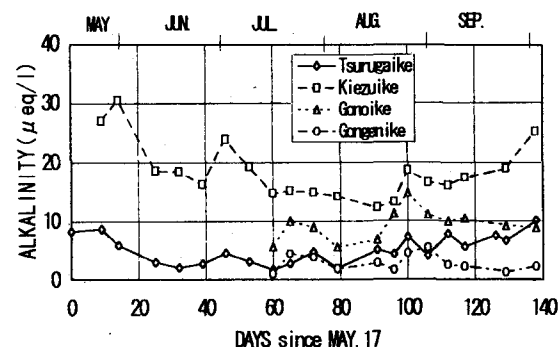


Fig. 5 Changes of alkalinity since May. 17

Table 5. Physicochemical analyses of the rain water

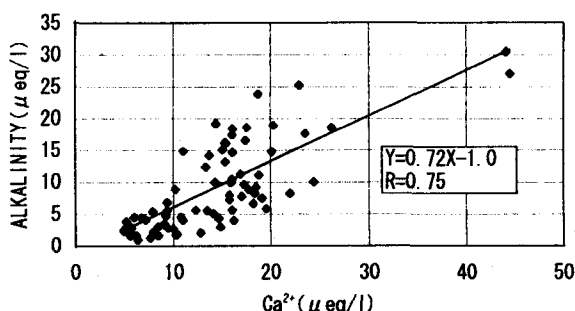
pH	EC	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	(μ S/cm)	(μ eq/l)	(μ eq/l)	(μ eq/l)	(μ eq/l)	(μ eq/l)	(μ eq/l)	(μ eq/l)	(μ eq/l)
5.6	5.5	2.0	1.1	3.4	12.6	1.7	1.4	4.4	8.7

3.4 土壌や底泥による酸の消費

集水域内の土壌や底泥による酸の消費プロセスとしては交換性陽イオンによる酸中和機構が考えられる。そこで各湖沼の底泥と集水域内の表面土壌を採取し、交換性陽イオンを測定した。結果をTable 6に示す。ただし供試した試料は一地点のみの採取であるため、集水域全体あるいは湖底の底泥全体を代表するものかどうかは検討していない。乗鞍岳山頂付近の湖沼群はいずれも交換性陽イオン量が小さく、交換性カルシウムを細ヶ池と比較すると百分の一あるいはそれ以下である。また、乗鞍岳山頂付近の湖沼群の集水域の土壌と底泥を比較すると集水域の土壌の交換性塩基量が小さく溶脱が進行している事がわかる。このように乗鞍岳山頂付近の湖沼群では集水域の土壌と底泥からの塩基の供給が乏しいため、陽イオン濃度が降雨程度に低く、酸性雨に対して緩衝能力が乏しいものと考えられる。一方、牛留池においては湖水中のイオン濃度は乗鞍岳山頂付近の湖沼群程度に小さかったが、交換性陽イオンは比較的大きな値を示した。牛留池においては流入したイオンは腐植質に吸着することにより除去されるため湖水中の陽イオンならびに陰イオン濃度が低く保たれているのであろう。

3.5 生物による酸の消費

細ヶ池の流入水と流出水の水質をTable 7に示す。92年10月16日の採水であるが、この時には湖心における深さ方向の水質の変化はほとんど無かったため、湖内は秋期の循環により十分混合されていたものと考えられる。流出水は流入水に比較してNO₃⁻とSO₄²⁻の減少がみられ、生物による摂取あるいは還元があったものと推定できる。生物によるNO₃⁻とSO₄²⁻の摂取あるいは還元による陰イオンの消費は、底泥による化学的中和作用とならんで湖内の主要な酸の消費プロセスと考えられているが、底泥による化学的中和作用がその能力に限りのあるのに対して、生物によるNO₃⁻とSO₄²⁻の摂取あるいは還元による酸の消費プロセスは半永久的に働くものと考えられるため重要である。細ヶ池ではNO₃⁻とSO₄²⁻の減少量は合計で30 μ eq/lに達しており、これは

Fig.6 Alkalinity vs. Ca²⁺Table 6. Exchangeable cations of soil and sediments (μ eq/100g)

		Na	K	Ca	Mg
Tsurugaik	soil	7	34	91	8
Tsurugaik	sediments	9	39	160	19
Kiezuike	soil	3	61	39	23
Kiezuike	sediments	11	42	220	34
Gonoike(l)	soil	2	17	10	0
Gonoike(l)	sediments	6	36	52	12
Gongenike	soil	29	100	50	5
Gongenike	sediments	12	58	80	6
Ushidomeike	soil	3	459	11000	1400
Ushidomeike	sediments	64	151	3600	210
Nawagaik	soil	270	840	16000	5200
Nawagaik	sediments	300	320	22000	3900

pH4.5の雨が降り続いて中和可能な量である。一方、乗鞍岳山頂付近の湖沼群においては93年9月23日採水の五ノ池(1)と五ノ池(5)の水質をTable 7に併記した。五ノ池(5)での採水は流出口で行った。9月23日は小雨であったが、前日には23mmの降雨が有り¹⁷⁾、五ノ池(1)から溢流した水は五ノ池(2)を経て、五ノ池(5)に達していた。これらを比較すると五ノ池(1)から五ノ池(5)に至るまで陽イオンの変化も陰イオンの変化もみられない。五ノ池(1)からの流出水量が0.02m³/secに対し、五ノ池(5)からの流出水量が0.08m³/secであったので、必ずしも押し出し流れになっているわけではないが、NO₃⁻とSO₄²⁻が降雨より供給されていて、五ノ池(1)以外から五ノ池(5)に流入する水中の濃度も五ノ池(1)に近いものと考え、NO₃⁻とSO₄²⁻の消費がほとんど無いことを示している。

Table 7. Comparison of water quality between inflow and outflow
of Lake Nawagaiké and Lake Gonoike

		pH	Na ⁺ (μeq/l)	K ⁺ (μeq/l)	NH ₄ ⁺ (μeq/l)	Ca ²⁺ (μeq/l)	Mg ²⁺ (μeq/l)	Cl ⁻ (μeq/l)	NO ₃ ⁻ (μeq/l)	SO ₄ ²⁻ (μeq/l)	ALKALINITY (μeq/l)
Nawagaiké	inflow	7.7	187	8	1	322	90	86	28	29	506
Nawagaiké	outflow	7.4	152	9	2	278	90	82	6	21	451
Gonoike(1)		6.0	8.6	1.7	0	19	2.8	2.9	2.7	14.3	9
Gonoike(5)	outflow	6.2	8.7	1.6	0	18	2.8	2.9	2.4	14.2	8

3.6 湖水に浸った雪からのイオンの放出

不消池においてはFig. 4に見られるように6月11日に急激なSO₄²⁻の上昇がみられた。この時期、不消池全体はまだ2mを超える積雪に覆われており、その積雪のひび割れた間からわずかに水面が現れていたところに降雪があったが、湖水水温が0℃であったことから降雪は融解せずに湖水に浸った形で水面近くに留まった。山下からは0℃の水に浸った雪粒子から10分以内に硫酸イオンが90%以上も水側に放出される現象を報告しており⁸⁾、不消池においても同様のプロセスによりイオン成分が雪粒子から放出され、高濃度のSO₄²⁻が検出されるに至ったものと考えられる。このように0℃の湖水に降雪があった場合には、雪は融解しないにもかかわらず、イオンの大部分を湖水に放出するため高濃度のイオンが検出される可能性があり、湖水の水質に与える影響が非常に大きいのがこのプロセスの特徴である。HAGENらはノルウェーでの湖沼の水質調査から、水面近くの氷の層に挟まれた水と雪の混合相からサンプリングした湖水は深層水に比較してpHが低く、電気伝導度も高かったと報告している¹⁸⁾。水と雪の混合相の生成要因については、湖面の氷上に降雪があり、その重みで湖水が浸出してきた後その表面が凍結したものであると推定しているが、この場合、浸出してきた湖水は0℃であったと推定されることから、上記のプロセスによって降雪からイオンが溶出し、高濃度のイオンが検出されたものであると考えられる。

3.7 鶴ヶ池におけるスノージャムからのイオンの放出

前述したように0℃の湖水に降雪があった場合には、雪は融解しないにもかかわらずイオンの大部分を放出するプロセスが存在し、乗鞍岳の湖沼群に代表されるアルカリ度や溶存イオン濃度が極めて小さく酸性雨の影響を受けやすい湖沼においては湖水の表層の水質に与える影響が非常に大きい。しかしながらFig. 4にも示されている通り、表層に留まった雪が気温の上昇あるいは日射により融解した後は高濃度に濃縮されたイオンも希釈され湖水全体に拡散するため、短期的な現象と考えられる。HAGENらの場合にも融雪とともにイオンの濃縮は解消している。

一方、乗鞍岳山頂付近の湖沼群の様に積雪が多い湖沼では、結氷した湖沼の上に積もった雪がその重みで沈降し水中に懸垂する場合があります³⁾。乗鞍岳山頂付近の湖沼群ではスノージャムは鶴ヶ池において1993年5月17日から5月31日まで観測することができた。この間、湖水の水温は0℃であり、

池の周辺部に積雪が約1.5mの厚さのスノージャムとして湖水面から湖底にまで達していた。さらに池の中央部には積雪により形成された島が浮遊していた。また、スノージャムに覆われた池の周辺部から中央部にかけては厚さは不明であるが、部分的に積雪が湖底に沈んでおり、湖底が白く見えた。比重が水より軽い雪粒子が、湖底に沈んでいる理由は不明である。スノージャムは湖水に浸った状態で存在するため、前述の不消池で観測された0℃の湖水に降雪があり表層に留まってイオンを放出するプロセスと同様に湖水中にイオンを放出すると考えられる。ただし、スノージャムは表層だけではなく、表層から湖底に達するまで、あるいは湖底に存在するため、長期にわたって存在し、湖水に与える影響は大きいものと考えられる。93年5月31日にスノージャムを採取し、スノージャム中の雪粒子について平均粒子径やイオン成分について調べた結果をTable 8に示す。スノージャム中の個々の雪粒子の形状はFig. 7に示すように球形に近く、平均粒子径は1.12mmとかなり大粒で、雪粒子の粗大化が進んだものと考えられる¹³⁾。イオン成分に関し

Table 8. Characteristics of snow particles in snow jam

Average dia. (mm)	1.12
pH	6.3
EC (μ S/cm)	0.9
Ca ²⁺ (μ eq/l)	6.6
SO ₄ ²⁻ (μ eq/l)	0.0

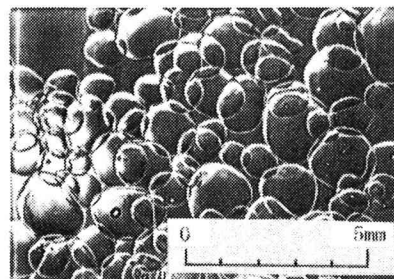


Fig.7 Spherical snow particles in snow jam

ては、Ca²⁺は雪粒子中にある程度残存しているが、SO₄²⁻は雪粒子から完全に湖水に移行している。また、鶴ヶ池周辺部の各所でスノージャムの厚さを測定しスノージャムの量を3,000m³と推定した。雪密度は0.57g/cm³で、スノージャム内の雪粒子のしめる体積比は62vol%であった。これは尾瀬沼における藤岡らの観測による0.58g/cm³、63vol%¹⁹⁾とほぼ同じ値であった。スノージャム内の雪粒子は1,700tonとなり、湖水全体の容積19,000m³の約9%を占める。SO₄²⁻はスノージャムから湖水中に完全に放出されているため、この時期の鶴ヶ池のSO₄²⁻は9%濃縮されていたことになる。この計算では池の中心部に浮遊していた雪の島や、湖底に沈んでいたスノージャムの量を考慮していないため実際にはもう少し大きな値となるであろう。また5月31日の時点では、融雪がかなり進んでおり影響は小さいが、融雪開始直後の湖水が形成される時期には、スノージャム内の雪粒子からのイオンの放出によりかなりの濃縮が考えられる。雪密度は0.57g/cm³であることからスノージャムの含水率を40wt%とすると、最大2.5倍の濃縮があり得ることになる。鶴ヶ池や不消池において、5月頃に湖水中のイオン濃度が高い値を示すのは、融雪初期の濃縮現象とスノージャム内の雪粒子からのイオンの放出により濃縮された結果であるものと思われる。

4. まとめ

乗鞍岳山頂付近の湖沼群の水質、土壌、底泥、スノージャムを調査し、次のことが明らかとなった。

- (1) 1993年度に乗鞍岳山頂付近の湖沼群の水質を調査した結果、1992年度に未調査であった五ノ池(3)、(4)、(5)においてもpHは低下傾向にあった。
- (2) 腐植栄養湖である牛留池の水質も乗鞍岳山頂付近の湖沼群同様に、イオン濃度が小さくpHは酸性でアルカリ度が小さいという特徴を有するが、両者はイオンバランスにより容易に区別できる。
- (3) 交換性陽イオンによる集水域の土壌や底泥の酸消費能力は乗鞍岳山頂付近の湖沼群においては極めて小さく、交換性カルシウムは縄ヶ池の百分の一程度であった。腐植栄養湖である牛留池は湖水中のイオン濃度は小さいものの、集水域の土壌や底泥の交換性陽イオンは縄ヶ池と同等あるいは数分の一程度であり、湖水中のイオンが腐植に吸着しているものと考えられる。

- (4) 縄ヶ池では湖内での NO_3^- と SO_4^{2-} の消費が $30 \mu \text{eq/l}$ に達していたが、五ノ池(1)(2)(5)内では陽イオンの増加や陰イオンの減少は見られなかった。
- (5) 不消池においては6月初旬に降雪があり 0°C の湖水中に留まった雪粒子から湖水中に SO_4^{2-} が放出され濃縮される現象が見られた。
- (6) 鶴ヶ池では5月中旬から下旬にかけてスノージャムが観測された。スノージャム中の雪粒子からのイオンの放出は5月31日時点で、9%の湖水の SO_4^{2-} 濃度の増加をもたらしたものと推定される。

おわりに

本研究の実施に当たり岐阜県道路公社殿ならびに久々野高山営林署殿には多大な御協力を頂きました。深く感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 環境庁: 第3回自然環境保全基礎調査, 湖沼調査報告書 東海・近畿版, pp. (211)-(2146), 1987
- 2) 川上智規: 乗鞍岳湖沼群の水質に対する降雨の影響, 環境工学研究論文集, 第30巻, pp73-80, 1993
- 3) 環境庁: 平成2年度地球環境推進費研究成果報告 pp. 590-595, 1991
- 4) C. A. Kelly, John W. M. Rudd, R. B. Cook and D. W. Schindler: The potential importance of bacterial processes in regulating rate of lake acidification, *Limnol. Oceanogr.*, 27(5), pp868-882, 1982
- 5) R. B. Cook, C. A. Kelly, D. W. Schindler and M. A. Turner: Mechanisms of hydrogen ion neutralization in an experimentally acidified lake, *Limnol. Oceanogr.*, 31(1), pp134-148, 1986
- 6) John W. M. Rudd, C. A. Kelly, Vincent St. Louis, R. H. Hesslein, A. Furutani and M. H. Holoka: Microbial consumption of nitric and sulfuric acids in acidified north temperate lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 31(6), pp1267-1280, 1986
- 7) D. W. Schindler, M. A. Turner, M. P. Stainton and G. A. Linsey: Natural Sources of Acid Neutralizing Capacity in Low Alkalinity Lakes of the Precambrian Shield, *SCIENCE*, VOL.232, pp844-847, 1986
- 8) 山下久美子、川上智規: 水に浸った雪粒子からのイオン成分の放出過程, 土木学会第49回年次学術講演会, pp. 926-927, 1994
- 9) 河島克久ら: 大雪山ヒサゴ沼のスノージャム調査, 低温科学物理編, pp. 39-41, 1987
- 10) 清水建美編著: 乗鞍の自然, 信濃毎日新聞社
- 11) 高倉盛安、安田郁子: 富山県内における天然湖沼の水質とプランクトン, 富山県立技術短期大学研究報告 第22巻, pp26-41, 1988
- 12) 日本土壤肥科学会監修: 土壤標準分析・測定法, 博友社
- 13) 対馬勝年: 水に浸った雪の粗大化, 雪氷, 40巻4号, pp. 1-11, 1978
- 14) 吉村信吉: 湖沼学, 生産技術センター, 1979
- 15) A. HENRIKSEN: A simple approach for identifying and measuring acidification of freshwater, *Nature*, Vol. 278, pp542-545, 1979
- 16) P. J. DILLON, N. D. YAN, W. A. SCHIEDER and N. CONROY: Acidic lakes in Ontario, Canada: characterization, extent and responses to base and nutrient additions, *Arch. Hydrobiol. Beih.*, 13, pp317-336, 1979
- 17) 岐阜県気象月報
- 18) A. HAGEN and A. LANGELAND: POLLUTED SNOW IN SOUTHERN NORWAY AND THE EFFECT OF THE MELTWATER ON FRESHWATER AND AQUATIC ORGANISMS, *Environ. Pollut.*, 5, pp. 45-57, 1973
- 19) 藤岡敏夫、田畑忠司、木下誠一: 尾瀬沼スノージャム調査, 低温科学 物理編, 第21号, pp. 95-115, 1963