

## 裏磐梯毘沙門沼の水量・水質調査：

### 年間の水収支および融雪期の水量と水質の関係

藤元大季（福島大学・共生システム理工学類）

廣瀬将也（福島大学・共生システム理工学類）

渡辺泰世（福島大学大学院・共生システム理工学研究科）

三浦 淳（福島大学・共生システム理工学類）

横尾善之（福島大学・共生システム理工学類）

#### 要 旨

本調査は裏磐梯五色沼湖沼群の一つである毘沙門沼に流出入する表流量と地下水量を把握し五色沼地域の表流水の動態を明らかにすること、表流量と水質の関係から五色沼湖沼群の流出過程を推定することを目的としている。表流量の現地観測ならびに毎時の水位、水温および水質の連続的観測を行っている。水量に関しては、水位流量（HQ）曲線式を用いて流量を算出し、時期ごとの変化を見た。また水収支式を用いて地下水量を算出したところ、地下水流入量が地下水流出量を上回る結果となった。水質に関しては、融雪期（3月から6月）を対象に、流量とイオンの流出負荷量の相関を解析した。融雪期においてカルシウムイオン、塩化物イオン、カリウムイオンは表面流出のトレーサーとなることを説明した。

#### I.はじめに

「裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査中間報告書」（福島大学大学院共生システム理工学研究科研究プロジェクト型実践教育推進センター自然共生・再生プロジェクト部・裏磐梯の湖沼環境を考える会議，2012）において、裏磐梯五色沼湖沼群における周辺環境の悪化や水色の変化が指摘されている。また、裏磐梯五色沼湖沼群については以前から水質についての研究が行われているが、表流量については研究があまり行われておらず、データが不足している。よって、表流水の変化が裏磐梯五色沼湖沼群にどのような変化をもたらしているのか確認できていない。そこで、本研究では裏磐梯五色沼湖沼群の毘沙門沼での表流量を測定し、水位流量（HQ）曲線式か

ら流量を求め、また、求めた流量から水収支式を用いて地下水量を概算し、流量の動態を明らかにし、それが景観にどのような変化をもたらしているのかを調査することを目的とする。

また、このような水環境変化を理解するためには水が流域内のどこを流れているか、つまり流出過程を知ることが重要になってくる。流出過程の解明は水文学的課題であり、水中に存する物質をトレーサーとして用いて水量と水質の関係から流出過程を明らかにする研究が行われている。五色沼湖沼群では水量と水質の調査は行われているが、これらを組み合わせる流出過程を解明する研究は行われていない。さらに、裏磐梯は融雪出水が

卓越する地域であるが、融雪期を対象とした水質の連続観測や流出過程に関する研究は行われていない。融雪流出過程に関する研究としては、鈴木・小林(1987)の研究がある。融雪期間中の水質をトレーサーとして用い、地表や地中からの流出過程を説明している。五色沼湖沼群で融雪期の水質の連続観測を行うことでトレーサーを見つけ、流出過程を解明できると考えられる。そこで、融雪期の昆沙門沼へ流入する表流量と水質の関係から五色沼湖沼群の流出過程を明らかにすることを目的とする。

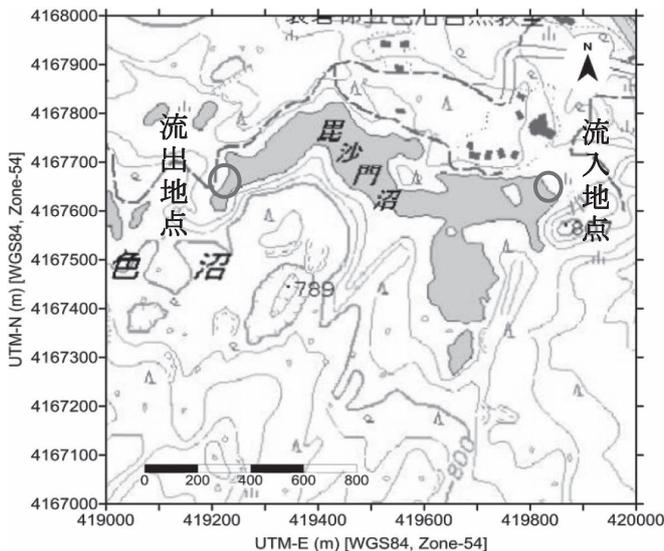


図1 昆沙門沼の地図と流入地点，流出地

## II. 年間の水収支

### 1. 方法

図1に昆沙門沼の地図と流入地点，流出地点を記載した。本研究は昆沙門沼の流入地点および流出地点において，毎月の表流量を電磁流速計によって現地観測するとともに，自記水位計（応用地質，S&DL MINI 5 m レンジ）を設置して水位と水温の連続観測を行った。また，観測データを用いて水位流量（HQ）曲線式より毎時の水量を算出し，そのデータをもとに水収支

式から地下水量を求めた。堰操作前の流入口の水位流量（HQ）曲線式と流出口の水位流量（HQ）曲線式に関しては（1）式に観測した水位と流量を当てはめることで求める。

$$Q = A(H + B)^2 \quad (1)$$

Q：流量[m<sup>3</sup>/s] H：水位[m]

A，B：定数[-]

また，堰操作後の流入口の水位流量（HQ）曲線式は（1）式では上手く求められず，n次式

$$Q = a(H + b)^n \quad (2)$$

Q：流量[m<sup>3</sup>/s] H：水位[m]

a，b，n：定数[-]

を用いて非線形最小二乗法で求めた。

また，求めた水位流量（HQ）曲線式と実測で得られた水位のデータより，毎時の流量が求められた。地下水流量については水収支式（3）をたてた。

$$ds/dt = P - E + Q_{in} + Q_G - Q_{out} \quad (3)$$

この式を変形して

$$Q_G = -ds/dt - P + E - Q_{in} + Q_{out} \quad (4)$$

Q<sub>G</sub>：地下水量[m<sup>3</sup>/s] Q<sub>out</sub>：流出量[m<sup>3</sup>/s]

E：湖面蒸発量[m<sup>3</sup>/s] Q<sub>in</sub>：流入量[m<sup>3</sup>/s]

ds/dt：水量変動[m<sup>3</sup>/s] P：降水量[m<sup>3</sup>/s]

を用いることによって算出した。

## 2. 結果

### 2.1 水位流量（HQ）曲線について

図2に堰操作前の流入口の水位流量（HQ）

曲線式を，図 3 に堰操作後の流入口の水位流量（HQ）曲線式を，図 4 に流出口の水位流量（HQ）曲線式を記載した．また，求めた水位流量（HQ）曲線式を式（5），（6），（7）にそれぞれ示す．

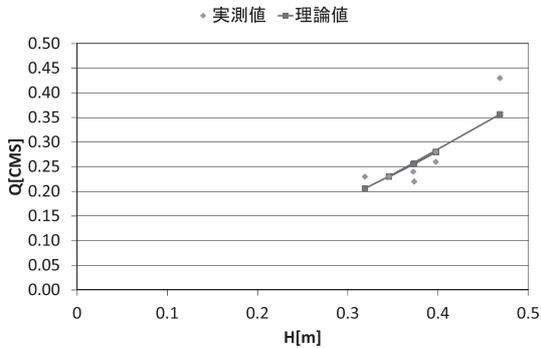


図 2 堰操作前の流入口の水位流量（HQ）曲線式

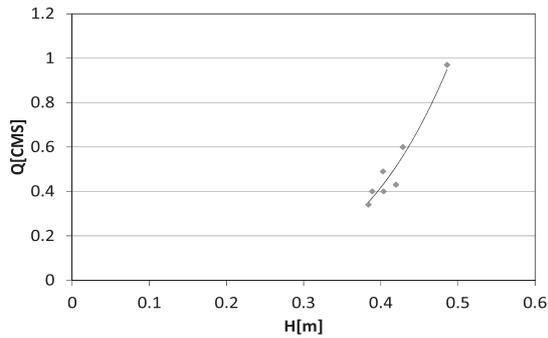


図 3 堰操作後の流入口の水位流量（HQ）曲線式

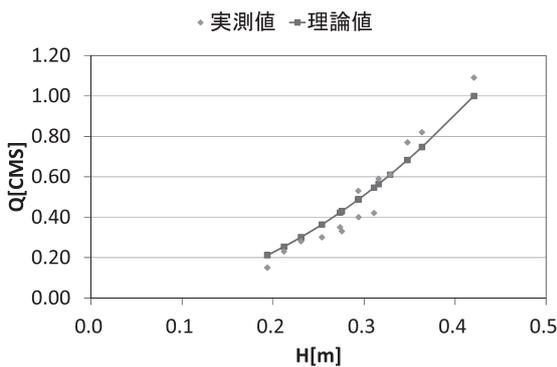


図 4 流出口の水位流量（HQ）曲線式

$$Q = 0.914414 (H + 0.15566)^2 \quad (5)$$

$$Q = 19.914 H^{4.2168} \quad (6)$$

$$Q = 5.646443H^2 \quad (7)$$

堰操作後の水位流量（HQ）曲線式を見

てみると堰操作前に比べて傾きが急になっていることが確認でき，流量の変化に対して，水位の変動が緩やかになったことが確認できる．

## 2.2 流量について

図 5 に毘沙門沼の水収支の年間値を，図 6 に毘沙門沼の地下水流入量の算出結果を示す．図 5 を見ると，降雪期になると降水量の減少により流量が徐々に減少していることが確認できる．また，2月中旬から3月中旬にかけては流入量と流出量の差がほとんどなくなり，流出量については算出結果の中でも最も低い 17823 m<sup>3</sup>/d という値を示している．融雪期になると積もった雪が溶け出し流量が大きく増加するのが確認できる．流量は徐々に増加し，わずかながらではあるが5月中旬をピークとする変動が確認できる．その時期を境に大きな変動はあまり確認できないが徐々に流量が減少している．夏季になると台風などの影響により集中豪雨が発生し，急激な流量の増加があり，流出量は普段の2倍以上，流入量は普段の3倍以上の値となり，流入量が流出量を大きく上回る結果となった．一年を通してみてみると，融雪期や集中豪雨時以外の時期では流入量流出量ともに大きな変動があまりないことが確認できる．

## 2.3 地下水流量について

地下水量は基本的に正の値を示していることや，図 6 の毘沙門沼の地下水流入量の算出結果からも地下水流入量が地下水流出量を上回っていることがわかる．

年間変化を見ると，流量と同じような変化を示しており，流量の変化に伴い地下水流量も大きな変動を示している．降雪期になると地下水流入量は減少し，融雪機になると大きく増加する．また，集中豪雨の際に地下水流出量が大幅に増加しているのが確認できる．

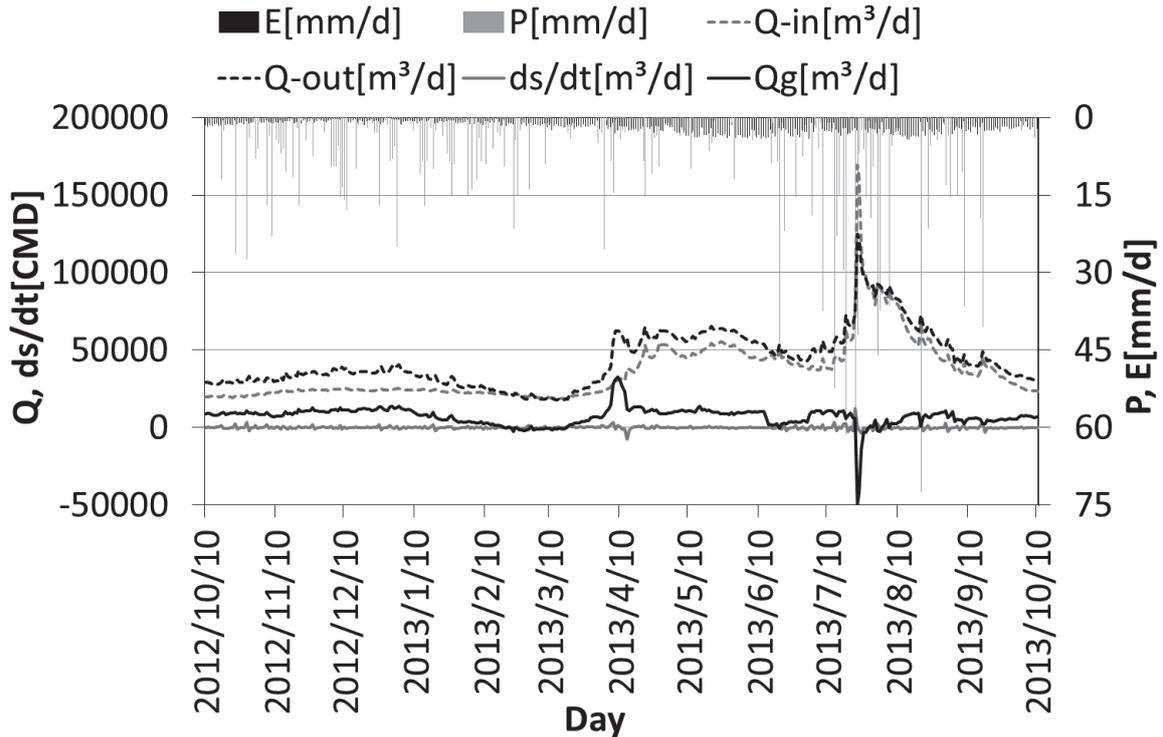


図 5 昆沙門沼の水収支の年間値

### 3.年間の水収支に関するまとめ

2月中旬から3月中旬にかけて流入量は大きく変動していないにもかかわらず、流出量だけが大きく減少した原因は地下水流入量の減少が原因だと考える。降雪期になり普段は降水として昆沙門沼に流入した周りの水量の分が雪として積雪してしまったことによって地下水流入量が減少し、このような結果となった。5月中旬をピークとする流量の変動が確認できた原因としては、山頂付近などの気温の低い地域での融雪がこの頃までであったからではないかと考えられる。また、流量は降水量の変化に対して敏感に反応していることが計測結果より読み取れるが、ほとんどが一時的なものである。しかし、今回の夏季に発生した集中豪雨は、長い間大雨を発生させたことから、流量が落ち着くまでに時間を要した。

地下水流量については、流出量が流入量より多く、流量に比べて湖面蒸発量もそれ

ほどないことから、地下水量として増加した水量のほとんどが流出量として流れ出ているために昆沙門沼全体の貯留量が安定していると考えられる。集中豪雨の際に、地下水流出量が大きく増加した原因としては、集中豪雨による降水量の増加と流入量の増加により昆沙門沼の水位が急激に上昇したために圧力がかかり、地下水流出という形で水が押し出されたと考えられる。そのほかにも現地調査に行った際、水があふれ出た跡を確認することができたのだが、(3)(4)式では昆沙門沼からあふれ出した分の流量は求められず、地下水流出量として計算しているため、実際には水位上昇によってあふれ出してしまった流出が主な原因だと考えられる。

今回まで得られた結果は、2013年4月13日に流入口で堰の操作が行われたことによって人工的に操作が加わったものである。これでは自然なデータではないので、もう一年観測を続けることにより自然な

流量のデータを回収できると考える。

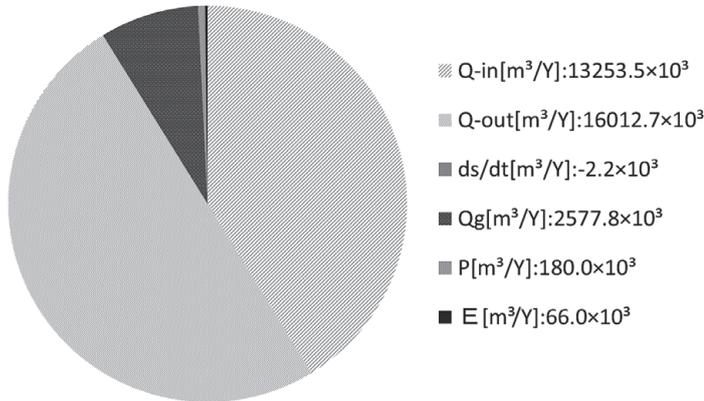


図6 毘沙門沼の地下水流入量の算出結果

### Ⅲ. 融雪期の水量と水質の関係

#### 1. 研究方法

##### 1.1 対象調査地点

本研究では福島県の裏磐梯地域にある五色沼湖沼群毘沙門沼の流入口（北緯 37°39′，東経 140°05′）で調査を行った（図-1）。流域面積は 10.54km<sup>2</sup> である。

##### 1.2 水質測定および使用データ

平成 25 年 3 月 4 日から 1 台の自記水質計（東亜ディーケーケー株式会社，WQC-24），平成 25 年 4 月 9 日からもう 1 台の自記水質計（ワイエスアイ・ナノテック株式会社，EXO-2）を設置し，毎時の水質の連続観測を行った。2 種類の水質計で共通している項目は，pH，溶存酸素（DO），電気伝導率（EC），濁度，総溶解固形分（TDS），塩分，水温である。カルシウムイオン，塩化物イオン，カリウムイオンは WQC-24 のみで測定した項目である。酸化還元電位（ORP），総懸濁物質（TSS），蛍光溶存有機物（fDOM）は EXO-2 のみで測定した。

また，流量は渡辺・横尾（2013）のデータを用いた。降水量は，気象庁の気象統計情報の桧原観測所（北緯 37°43′，東経

140°04′）のデータを用いた。

#### 1.3 解析方法

解析期間は平成 25 年 3 月 4 日から 7 月 3 日である。水質項目，流量，降水量の時系列変化，水質項目同士の相関関係，流量と水質項目の流出負荷量との相関関係から解析を行った。流出負荷量に関しては橋ら（1996）の方法を利用した。流出負荷量は濃度と流量の積から求められ，整理すると（8）式で表せる。 $L$ （mg/m<sup>2</sup>・h）は流出負荷量， $Q$ （mm/h）は流量， $C$ ， $n$  は定数である。

$$L = C \cdot Q^n \quad (8)$$

#### 2. 結果

##### 2.1 水質項目，流量，降水量の関係

特徴のあった項目として WQC-24 の水温，pH，電気伝導度，カルシウムイオン，塩化物イオン，カリウムイオン，EXO-2 の fDOM を図 7 としてまとめた。

水温は，3 月から 8 月までは上昇し，9 月を境に減少する傾向が見られた。裏磐梯は多雪の地域であるため，降雪の影響を受けやすく冬季の水温が 5 度近くまで低下している。pH は年間を通して 6.5~7.2 とほぼ一定の値を維持しているが，冬季に近づくにつれ減少傾向が見られる。EC については，3 月は突出して高い値を示し，6 月下旬まで急激に減少している。その後は緩やかに上昇している。fDOM は計測開始日から 9 月までは流量と似た変動をしている。カルシウムイオンは 4 月から 5 月にかけて高い値を示した。その後は 6 月の中旬まで減少し，7 月下旬まで上昇している。その後は減少している。カリウムイオンはカルシウムイオンと同様に 3 月までは上昇傾向している。4 月から減少し，7 月から緩やかな上昇を示した。塩化物イオンは 8 月

までカリウムイオンと似た変動を示している。他のイオンと同様に3月までは上昇し、4月以降は減少している。6月の中旬を境に緩やかな上昇傾向へと変化している。すべての水質項目で、7月下旬の流量が最大の時に、微小に水質変化を示している。

## 2.2 流量と各成分の相関解析

WQC-24は計測開始日の平成25年3月4日から平成25年7月3日までを融雪期とし表1にまとめ、それ以外を表2とした。また、EXO-2も同様に計測開始日の平成25年4月9日から7月3日までを表3とし、それ以外を表4とした。

表1 WQC-24  
(融雪期)

サンプル数 2913

	Q
EC	-0.566
水温	0.562
濁度	0.0616
DO	-0.768
pH	0.341
塩分	-0.711
TDS	-0.573
Ca <sup>2+</sup>	0.402
Cl <sup>-</sup>	-0.752
K <sup>+</sup>	-0.465

表2 WQC-24  
(それ以外)

サンプル数 3300

	Q
EC	-0.467
水温	0.323
濁度	-0.443
DO	0.546
pH	0.119
塩分	-0.161
TDS	-0.478
Ca <sup>2+</sup>	0.605
Cl <sup>-</sup>	-0.417
K <sup>+</sup>	0.537

表3 EXO-2  
(融雪期)

サンプル数 2048

	Q
EC	-0.114
水温	-0.0602
濁度	-0.507
DO	0.199
pH	0.400
塩分	-0.108
TDS	-0.209
ORP	0.278
fDOM	-0.194

表4 EXO-2  
(それ以外)

サンプル数 3300

	Q
EC	-0.464
水温	0.338
濁度	-0.370
DO	0.360
pH	-0.00288
塩分	-0.466
TDS	-0.457
ORP	-0.595
fDOM	0.231

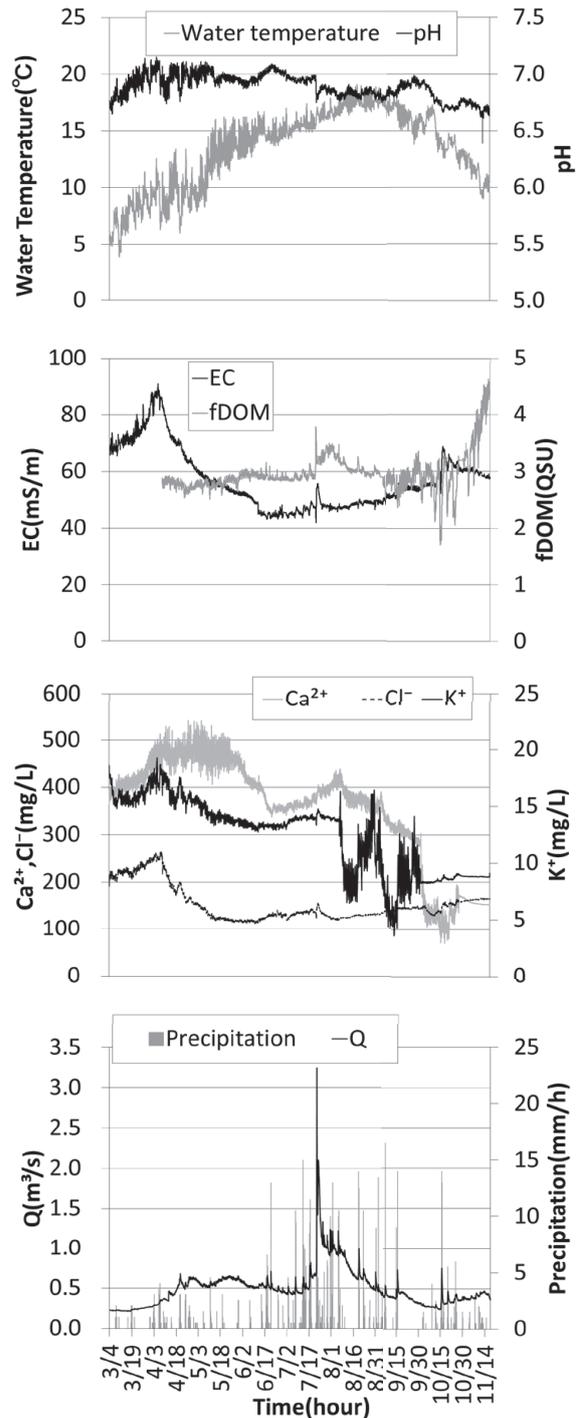


図7 流量・降水量と水質の関係

WQC-24では、ECとTDSは全期間を通して弱い負の相関が見られた。カルシウムイオンは全期間で弱い正の相関を示したが、融雪期よりもそれ以外の期間での相関が高い。塩化物イオンは融雪期で強い負の相関が見られたが、それ以外の期間では弱い負の相関となっている。

### 2.3 各イオンの流出負荷量と流量の関係

解析期間を区分し流量と各イオンの流出負荷量の関係を表したものを図8~10に、 $L$ と $Q$ についての相関係数 $R$ 、(8)式から得られた $n$ 、 $C$ を表5に示す。

橘ら(1996)によると $n>1$ の場合、流量の増大、すなわち雪解け水の流出とともに地表から洗い出されていることを示すとしている。また、 $n<1$ を示すこと、融雪が進むにつれて時計回りにデータが推移することは濃度が流量によって希釈されることを示すとしている。

カルシウムイオンの流出負荷量は、相関係数が0.835であり、流量とは正の相関が高いことがいえる。また、表5で示した $n$ の値は、 $n>1$ であった。図8より、6月10日までは、同じ傾向で推移していることが分かる。一方、塩化物イオンは相関係数が低く、 $n<1$ であった。期間ごとのデータは融雪が進むにつれ時計回りに推移していることが分かる。カリウムイオンも塩化物イオンと同様に相関が見られず、 $n<1$ 、また、期間ごとのデータの推移でも同様の傾向が見られた。各イオンの流出負荷量は、流量と関係があることが分かった。

### 3.考察

カルシウムイオンは、図8から流量と正の相関が見られた。また、 $n>1$ であった。結果で述べたように、流量の増大によって地表から流されてきたことを示すとされている。これからカルシウムイオンは、融雪出水とともに表層土壌から流されてきたのではないかと考えられる。鶴木ら(2002)は、地表面に達した融雪水は土壌が凍結していないとき地下に浸透し、土壌表層が凍結または飽和状態のときは地表面を流出するとしている。表層土壌の状態

表5 流量と流出負荷量の関係

$N$ :サンプル数  $R$ :相関係数  $n$ ,  $C$ :定数

項目	N	R	n	C
Ca <sup>2+</sup>	2913	0.835	1.34	424
Cl <sup>-</sup>	2913	0.00548	0.00498	26.4
K <sup>+</sup>	2913	0.273	0.345	1.45

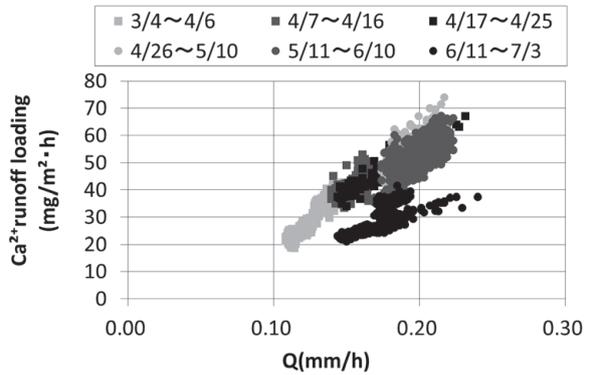


図8 Ca<sup>2+</sup>の流出負荷量と流量の関係

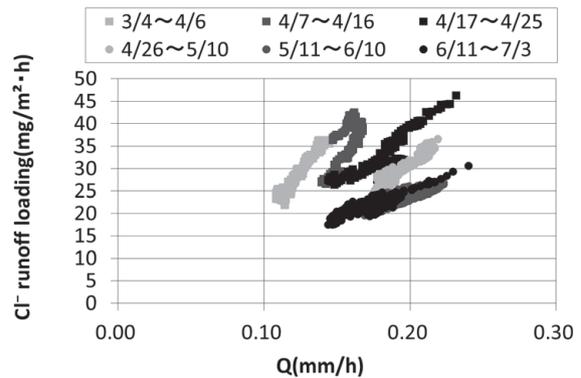


図9 Cl<sup>-</sup>の流出負荷量と流量の関係

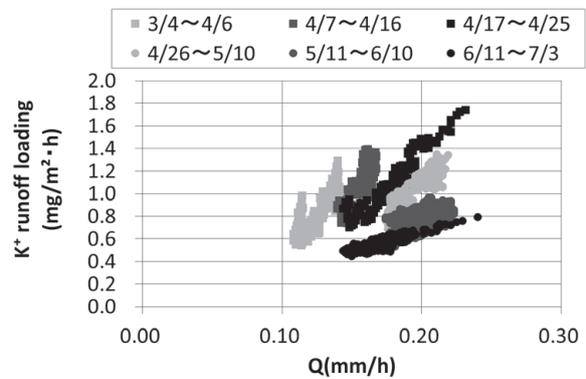


図10 K<sup>+</sup>の流出負荷量と流量の関係

についても考慮する必要がある。

塩化物イオンとカリウムイオンは、融雪開始時期から5月10日ごろまで流量と似た変動をしていた。しかし、カルシウムイオンとは違い、相関が見られないこと、4月上旬にピークをむかえていることが分かる。志知ら（2005）によれば、一般的に融雪が始まったころの水質は高濃度になることが知られている。これは、融雪期まで積雪中に蓄積し、それが濃縮して融雪出水とともに流出してきたことが原因であるとしている。その後、融雪が進むにつれて濃度が低下するが、これは積雪から低濃度の融雪水が負荷される希釈効果によるものであるとされている。また、図9、10から期間ごとのデータは融雪が進むにつれて時計回りに推移していたこと、表5から $n < 1$ であり、結果で述べたように濃度が希釈されていると考えられる。これらから各イオンをトレーサーとして用い、融雪水が表流水として直接流出していることを説明できると考える。しかし、地下水など基底流出によって運ばれてきた過程について説明するトレーサーをみつけられなかったため今後は今回観測しなかった水質項目についても考慮する必要がある。

また、上流から流入する水によって濃度の変動している可能性を挙げる。これは千葉ら（1986）が五色沼湖沼群の水質についてCa-SO<sub>4</sub>型とNa-Cl型の混合によって生成しているとしており、これが影響していると考えからである。カリウムイオンは前者の型の方には少なく、後者の方に多く含まれている。塩化物イオンは後者に非常に多く含まれている。カルシウムイオンはどちらの型にも多く含まれている。この2種の型の割合が融雪期に変化することで濃度の変動するのではないかと考えられる。また、國井ら（2013）によると昆沙門

沼に流入するのは深泥沼以外に赤沼というどの系にも属さない湖沼の可能性を挙げており、それらの湖沼の水質との比較や昆沙門沼への流入割合についても考慮し、各イオンがどのような過程で運ばれてきたかを検討する必要がある。

#### 4.融雪期の水量と水質の関係に関するまとめ

融雪期においてカルシウムイオン、塩化物イオン、カリウムイオンの濃度変動は流量との関係性が見られた。また、カリウムイオンと塩化物イオンの濃度には正の相関が見られた。塩化物イオンとカリウムイオンの流出負荷量と流量の関係から冬期間に大量に貯留されていたものが流出し、4月上旬にピークをむかえ、その後は流量の増加によって希釈されたことを説明できた。カルシウムイオンの流出荷量と流量には正の相関が見られ、融雪流出とともに洗い出されていることを説明できた。これらのイオンは融雪期のトレーサーになり、融雪水が直接流出する過程について説明できる。

流出過程についてより明確にするために基底流出を説明できるトレーサーを見つけることが課題であり、今回測定しなかった水質項目についても測定する必要がある。また、積雪中の成分、土壌、他の湖沼についても考慮に入れて検討する必要がある。今後も水質の連続観測をし、五色沼湖沼群の流出過程を解明していくことを考えている。

#### 謝辞

本研究は福島大学共生システム理工学研究所プロジェクト研究「遷移途中にある自然環境を自然遺産として良好に保全するための研究モデルの策定-磐梯朝日国立

公園の人間-自然環境系（生物多様性の保全）に関する研究-」[文部科学省特別経費（プロジェクト）採択事業]，科学研究費補助金（若手研究 B，24760388），東北大学災害科学国際研究所「特定プロジェクト研究（B-18）」，国立大学改革強化推進事業「環境放射能の動態と影響を解明する先端研究拠点の整備」の成果である．気象データには気象庁のデータを利用した．ここに謝意を表す．

### 参考文献

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），19-29.  
福島大学大学院共生システム理工学研究科研究プロジェクト型実践教育推進センター自然共生・再生プロジェクト部・裏磐梯の湖沼を考える会議（2012）裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査中間報告書，72p.  
國井芳彦・渡邊稔・佐久間智彦（2013）裏

磐梯五色沼湖沼群の湖水の化学的な成分に関する調査報告（第2報），磐梯朝日遷移プロジェクト裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査報告書，26-37.

志知幸治・橋本徹・三浦覚・相澤州平・池田重人（2005）東北地方内陸部の森林流域における年間および融雪期の溪流水質，日林誌，Vol.87，No.4，340-350.  
鈴木啓助・小林大二（1987）森林小流域における融雪流出の形成機構，地理学評論 Ser.A，Vol.60，No.11，702-724.  
橋治国・清水達雄・中川佳久（1996）石狩川の融雪期水質，水文・水資源学会誌，Vol.9，No.5，444-456.  
鵜木啓二・長澤徹明・井上京・山本忠男（2002）農業流域における融雪期の水質環境と土地利用，水文・水資源学会誌，Vol.15，No.4，391-398.  
渡辺泰世・横尾善之（2013）裏磐梯毘沙門沼の表流量調査の中間報告，磐梯朝日遷移プロジェクト裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査報告書，11-17.