

融雪出水過程の解明に向けた積雪層内および融雪水の水質調査

福島大学共生システム理工学類 安藤 昌哉

福島大学共生システム理工学類 横尾 善之

1. はじめに

日本では冬期には国土の約 50%で積雪があり，そのような積雪寒冷地帯で生活する人々が多く存在する．そのような寒冷地を生活圏とする地域での，雪の存在は融雪洪水，雪崩，交通障害など自然災害要因としての側面が強い．その一方，寒冷地河川の年間総流出量の 50%以上を占めるとされる豊富な融雪水量は，流域涵養や灌漑用水の供給などのように健全な水循環系を支える貴重な天然資源となっている．小原・堺¹⁾が指摘するように，積雪・融雪現象に関する正確な予測情報を発信することで，雪が我々に与える負の働きを最小限に抑えるだけではなく，ダム操作との連携をとることなどで，融雪水のより効率的な管理・計画を実施できると考えている．また，地球温暖化現象に伴う，初冬期の融雪洪水や融雪時期の早期化による，灌漑期の取水障害などの危険性を踏まえ，今後，積雪・融雪現象の定量化や総合化に関するモデルの構築は大きな課題となっている．ここでは本研究は，融雪出水過程の適切な理解とモデル化に向けて，融雪期における積雪層内の物理化学的特性ならびに融雪出水時の水質の経時変化を調べた．寒冷積雪地帯では一般的に，冬期間の湿性・乾性降水物は積雪層内に保存され，後に融雪期を迎え流出する．山崎ら²⁾によると，その過程で融雪水の最初の 20%から 30%が流出する間に，積雪中に保存されていた化学物質の 70%から 80%が積雪から流出することが知られている．このように，融雪時期によっても水質が違ふことは知られているが，融雪時期，出水過程，出水起源などのトレーサーとしての可能性がある物質を示すことで，積雪・融雪現象を理解したい．

2. 方法

2.1. 対象流域

本研究は福島県の荒川支流の東鴉川流域を対象とした．図-1 は東鴉川流域の地図である．赤い直線は各尾根を結んだ線であり，その線で囲まれた赤い範囲は東鴉川流域を表している．年間の流量の変位は冬期間である 12 月から 3 月までは流量が少なく，融雪期の 4 月，5 月に流量が多い．月平均の値で見ても，この融雪期に流量が集中していることが，この流域の特徴となっている．



図-1 東鴉川流域

* Investigating physical and chemical profiles of snow cover and temporal variation of snowmelt water chemistry for understanding snowmelt processes by Masaya Ando, Yoshiyuki Yokoo

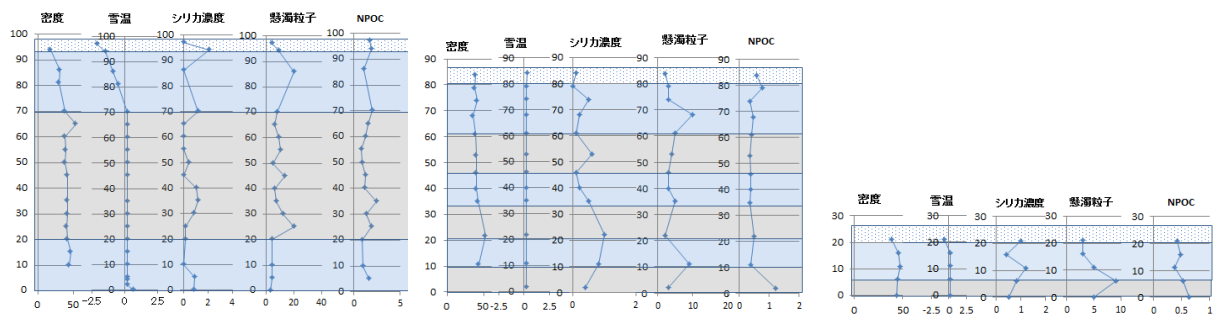


図-2 深度別，密度，雪温，シリカ濃度，懸濁粒子，有機炭素濃度（左から3月9日，4月2日，4月14日）

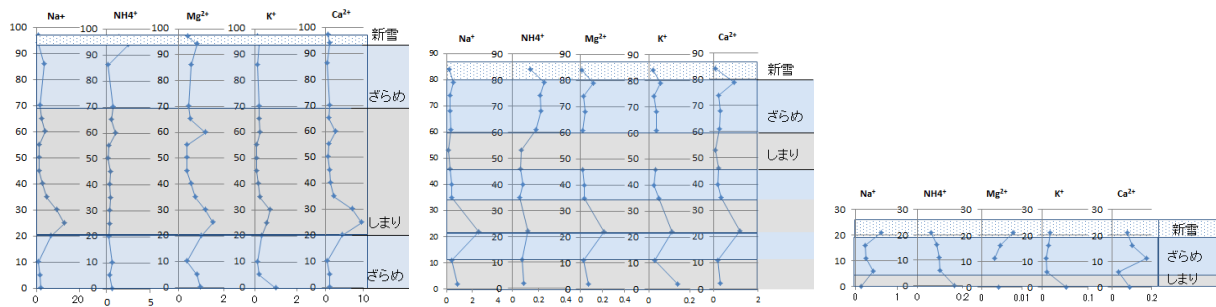


図-3 深度別，各種陽イオンの測定結果（左から3月9日，4月2日，4月14日）

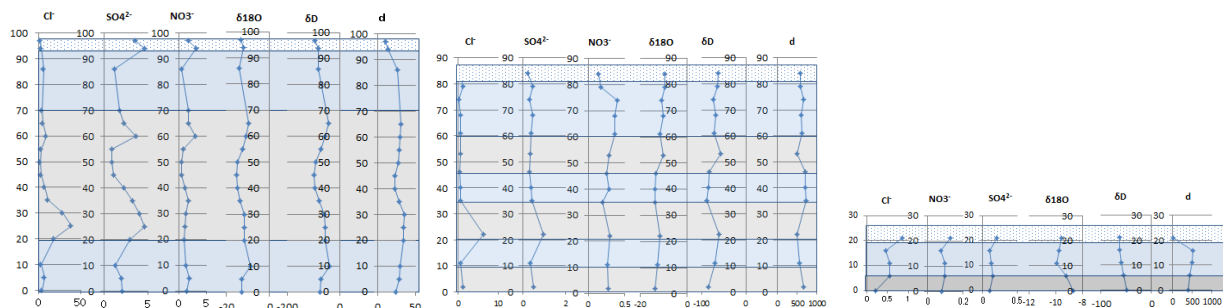


図-4 深度別，各種陰イオン，水素と酸素の同位体比の測定結果（左から3月9日，4月2日，4月14日）

2.2. 調査概要

図-1 に示す通り，東鴉川流域の中央付近で積雪層内の温度および密度分布を測定し，深度別サンプリングを実施した．また，最下流端である荒川との合流点直前において河川水サンプリングを行った．サンプルは研究室に持ち帰り，雪と河川の水についての水質測定を行った．測定項目は，各種の陽イオン・陰イオンの濃度，懸濁粒子濃度，シリカ濃度，不揮発性有機炭素濃度，水素および酸素の同位体比である．積雪調査およびサンプリングは平成22年3月9日，4月2日，4月14日の3回実施した．河川水のサンプリングは積雪調査中およびその後の降雨時に実施した．

3. 結果

3.1. 積雪調査および積雪サンプルの水質測定の結果

図-2 から図-4 は積雪調査および積雪サンプルの水質測定結果である．それぞれ左から順に平成

22年3月9日、4月2日、4月14日の積雪層内の水質の鉛直分布を示している。図-2から、積雪深度の増加に伴って雪温が安定することや、層構造による密度差が確認できることがわかる。また、シリカ・懸濁粒子・不揮発性有機炭素の濃度は層構造と関係があり、しまり雪層とざらめ雪層の境界付近にそれぞれピークがでる傾向が読み取れる。また、しまり雪層とざらめ雪層の境界部において各種水質項目の上昇が確認でき、そのピークが時間の経過とともに下降していることが確認できる。図-3、図-4に示す3月9日の各種イオン濃度に注目すると、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の濃度が地表面から25cm付近でピークをとっている。続いて、図-2、図-3の4月2日の各種陽イオン・陰イオン濃度も同じように、地表面から15cmから20cm付近で各項目がピークを迎えていることから、およそ1ヵ月間の期間に5cmから10cm程度の融雪があったと考えられる。このため、積雪層内の水質分析を通じて、融雪過程を知る手がかりを得ることができる可能性がある。図-2、図-3、図-4の積雪構造をみると4月2日から4月14日の期間に積雪深は70cm程減少している。さらにこの期間に降雪は観測されていないので、70cm程度の融雪が進んだことがわかる。この時期は、おもに降雨によって融雪が進んでおり、降雨と融雪の関係についてはより詳細な検討が必要である。

3.2. 河川水サンプルの測定結果

3.2.1. 平成22年4月13日～4月16日実施分の測定結果

図-5は4月13日18時から4月16日16時の期間に一時間ごとにサンプリングした水質調査結果である。この期間は流量が既にピークに達している状態から逓減する過程である。図-5は各種の陽・陰イオン濃度（図-5 右図）、不揮発性有機炭素濃度（NPOC）、懸濁粒子、シリカ濃度と流量の変位を表している。この図より、流量が逓減するにつれて、不揮発性有機炭素濃度（NPOC）が減少することがわかる。シリカ濃度は逆に増加していく傾向が見られた。懸濁粒子は流量が逓減する過程で数回ピークがあった。各種陽イオン、陰イオン濃度にもシリカ濃度ほどははっきりではないが、流量が逓減していくにつれて、増加する傾向にあることが見てとれた。一方、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- の濃度変化は、流量の逓減時に小さなピークが発生している。これは融雪水

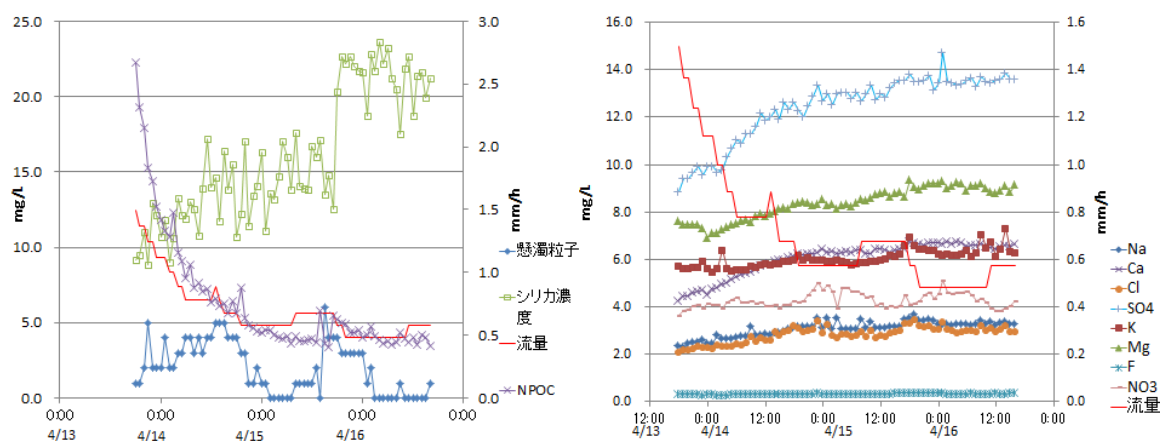


図-5 東鴉川流量と各測定項目の変位(4月13日～4月16日実施、左は懸濁粒子、シリカ、不揮発性有機炭素 NPOC の濃度経時変化、右は各種イオン濃度の経時変化)

によるピークではないかと考えられる。12日の降水イベントまで、過去1週間はまとまった降水は観測されていないことと、この期間で13日の平均流量が最大を観測したことから、積雪調査で明らかになった、4月2日から4月14日の期間においての、約70cm程度の融雪の多くがこの降雨イベントにより進んだことがわかる。このことから、この多量の融雪水が初期段階で観測されたのではないかと考えられる。観測を始めた、4月13日18:00にはすでに発生していた降雨は、12日3:00から降り続いていた。このピークを測定した時刻は14日2:00から4:00の間だったために、降雨による、融雪水が東鴉川に流出する時間は48時間前後を要すると推測できる。

3.2.2. 平成22年4月22日～4月23日実施分の測定結果

図-6は平成22年4月22日6:00から4月23日16:00の期間に採水した水の水質測定結果である。この期間は降雨によって流量が増加し、ピークに達するまでの過程にサンプリングを行った。今回もまた一時間ごとに採水を行った。結果は流量が上がると同時にシリカ濃度が減少している。懸濁粒子は流量が増加すると同時にピークを迎えたが、流量より早くピークを達し、すぐに減速していった。各種陽イオン、陰イオン濃度には流量とともに増加するものとししないものがあることがわかった。

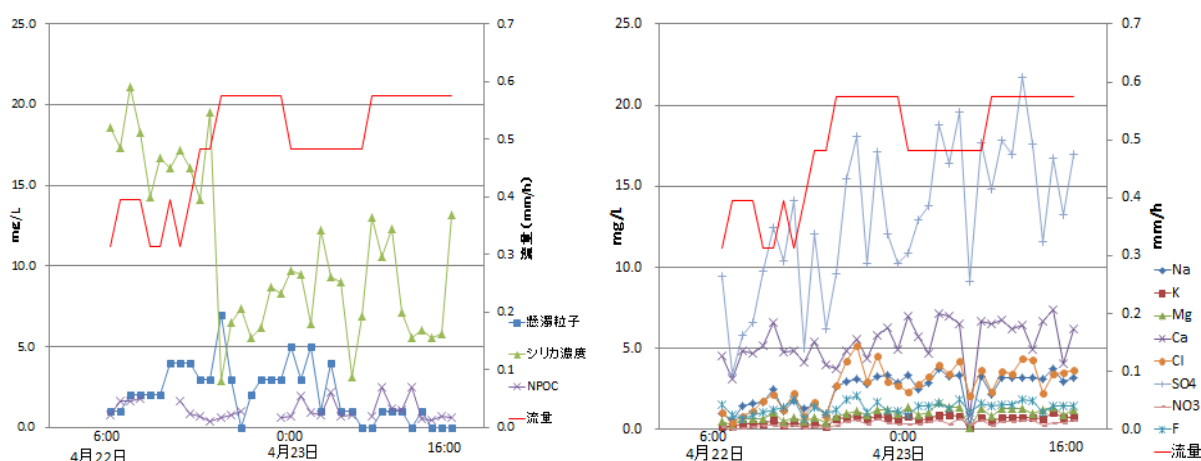


図-6 東鴉川流量と各測定項目の変位(4月22日～4月23日実施, 左は懸濁粒子, シリカ, 不揮発性有機炭素 NPOC の濃度経時変化, 右は各種イオン濃度の経時変化)

3.2.3. 平成22年4月27日～5月14日実施分の測定結果

図-7, 図-8は平成22年4月27日18:00から5月14日16:00までの水質調査結果である。この期間は各水質項目と流量の長期的関係を調べることを狙ったものである。この間、流量の増減を大きく分けて3回観測でき、流量の増減の全過程を通してサンプリングすることができた。測定項目のいくつかは流量との相関性が見てとれる。シリカ濃度は長期的に見ても流量とは負の相関性がある。懸濁粒子は流量と正の相関性があったが、流量増加の初期段階でピークを迎え、流量よりも早く減速していった。不揮発性有機炭素濃度は流量と正の相関が見られた。SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺濃度は流量と負の相関性があった。Cl⁻濃度は流量と正の相関性が見られた。よって、これらの水質項目は、融雪出水過程を説明するトレーサーとなり得る可能性があると言える。つまり、流量と

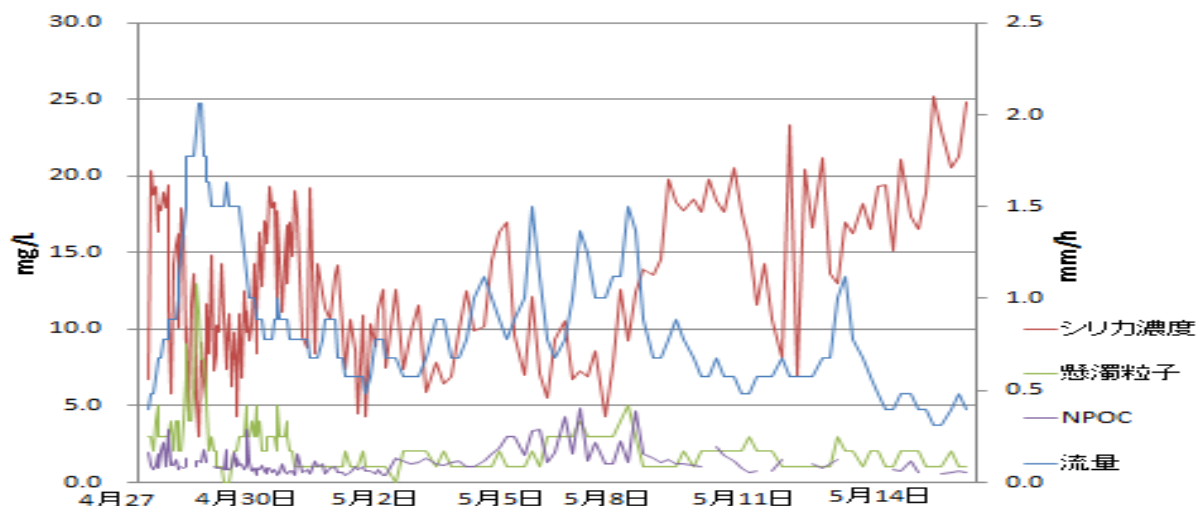


図-7 東鴉川流量と各測定項目の変位(4月27日～5月14日実施, 懸濁粒子, シリカ, 不揮発性

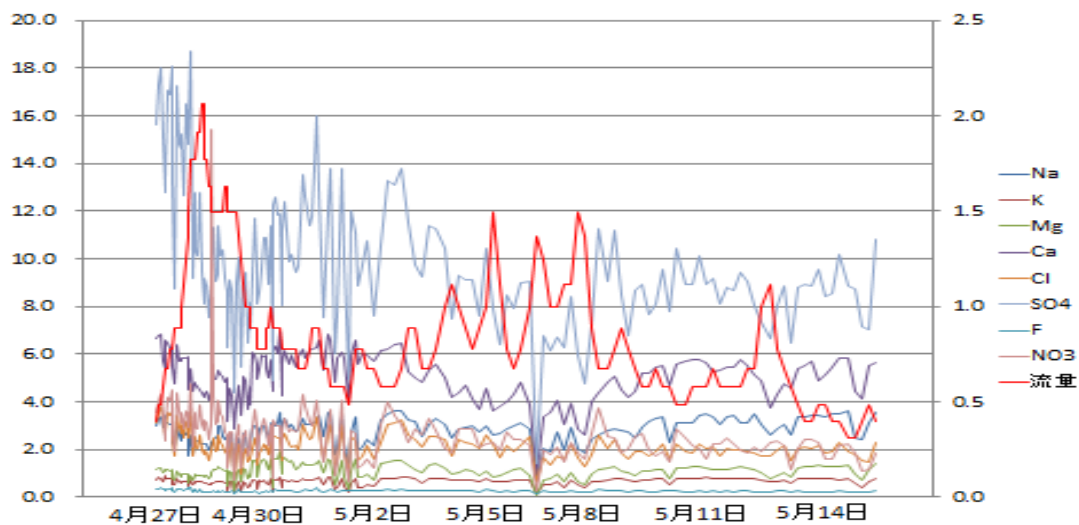


図-8 東鴉川流量と各測定項目の変位(4月27日～5月14日実施, 各種イオン濃度の経時変化)

正の相関がある懸濁粒子, 不揮発性有機炭素, Cl^- の濃度はそれぞれ地表面付近を流れて早く流出する流れのトレーサーになり得る. 一方, 流量と負の相関があるシリカ, SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ の各濃度は地中を流れてゆっくり流出する流れのトレーサーになり得る. これらのうち, 流量とシリカ, Ca^{2+} の関係には平田・村岡³⁾と同様であり, 一般的関係と言える可能性が高い. なぜそのような関係になるのかについての物理的説明はできないため, これらの成分が地表付近に存在するのか, 土壌中に存在するのか, 深層地質に存在するのかについて, 調査を行い検証する必要がある.

4. まとめ

本研究は積雪層内の雪が河川に流出プロセスの解明に向けて、積雪層の鉛直断面の調査、積雪層内および河川水の調査を行った。積雪層の鉛直断面の調査の結果、積雪層内のしまり層やざらめ層が積雪層内の水質に影響していることが確認された。

河川水の水質調査の結果、以下のことが明らかになった。

- ① シリカ濃度と流量は負の相関性を持つことがわかった。降雨・積雪中にはシリカ濃度はほとんど含まれないので、地中流のトレーサーになることが期待できる。
- ② 懸濁粒子は流量と正の相関性が見られたが、特に流量が増加する初期段階のトレーサーになることが期待できる。
- ③ 不揮発性有機炭素濃度と Cl^- 濃度は流量とは正の相関性があり、表面流のトレーサーになることが期待できる。
- ④ SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 濃度は流量と負の相関性があり、地中流のトレーサーになることが期待できる。

今後はこれらと積雪層内の水質変化の関係の調査し、塚本⁴⁾が示しているように流域の物理的、化学的、地理的条件を考慮しながらさらに詳しい分析を行い、対象流域の融雪出水過程の解明を目指す予定である。また、本研究が上記の水質項目が本当にトレーサーになり得るかどうかについて、実際に流出成分の成分分離（たとえば杉田・田中⁵⁾）に利用する予定である。

謝辞

東京大学総括プロジェクト機構「水の知」（サントリー）総括寄付講座、科学研究費補助金（若手研究 B, 21760381）、環境省環境研究総合推進費 S-8-1(4)、科学研究費補助金（基盤研究 B, 22360192、代表：風間聡）、福島大学自然共生再生プロジェクト「阿武隈川流域水循環系の健全化に関する研究」・「裏磐梯の人間－自然環境系に関する研究」の成果の一部である。本研究は国土交通省所管の水文水質データベースを活用した。ここに謝意を記す。なお、積雪調査については東北大学の朝岡助教に、水質測定については本学の高瀬特任准教授にご支援いただいた。心からお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 小林一哉・堺茂樹：降雪・積雪・融雪過程のモデル化と河川融雪流出予測への応用に関する研究，土木学会論文集 B，第 64 巻，第 1 号，pp.41-61，2008.
- 2) 山崎学・石井吉之・石川信敬：多雪山地流域の融雪期における河川水の水質形成過程，日本水文科学誌，第 37 巻，第 3 号，123-135，2007.
- 3) 平田健正・村岡浩爾：山地小流域における溶存物質の降雨流出特性について，第 30 回土木学会推理講演会論文集，pp.43-48，1986.
- 4) 塚本良則：森林水文学，文永堂出版，1992.
- 5) 杉田倫明・田中正：水文科学，共立出版，2009.