

学 位 論 文 題 名

Study on hydrochemical processes of subsurface water
in the nival watershed

（多雪山地流域における地中水の水質形成と流出過程）

学位論文内容の要旨

流域における水・化学物質循環の研究は、人為起源の汚染や環境変化が将来的に流域へ及ぼす影響を予測する上で重要である。特にこの分野では、山地流域における降雨・融雪時の水の流出過程と水質形成機構を解明することが主要な研究課題の一つとされている。本研究の観測対象である寒冷多雪山地流域では、冬季間に降る雪が解けることなく流域内に積雪として大量に貯留され、融雪期入ると降雨流出に比べ流出量が非常に大きく、その継続期間も非常に長い融雪流出が生じる。このような融雪流出における河川水の水質は、河川に流出する融雪水と地下水それぞれの水量と水質によって決まる。これまでに河川水を new water（融雪水起源）と old water（地下水起源）の2成分に分離する2成分分離法を用いることで流出過程を調べる研究が多くなされてきた。しかし、降雨流出の研究に比べて融雪流出の研究は、流域が積雪に覆われていることによる観測の困難さから、融雪流出時の地中における水の流出経路や水質形成に関して直接観測を行い議論した研究例はほとんどない。そこで本研究では、多雪山地流域の融雪期において、地中水の水質形成と河川への流出メカニズム、それに伴う河川水の水質形成メカニズムについて明らかにすることを目的とした。

観測は北海道北部に位置する母子里試験流域（1.2km²）で行った。降水量、積雪下面からの融雪流出量、河川流量が観測され、降水、融雪水、地中水、湧水、河川水が採水され水質データが得られた。このうち地中水は地表面から深さ50cm～200cmの範囲で河川近傍、斜面域、湧水そばなど様々な地点で採水された。ここで使われる地中水とは土壌水と地下水の両方を含む言葉である。また、河川近傍、斜面域、湧水そばにおいて、テンシオメータによる地中水流動の直接観測を行った。観測は2000年の融雪期から2004年の融雪期までの5回の融雪期を中心に夏期も含めた様々な期間で行われた。

地中において化学変化が起こらないトレーサーである酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）と塩化物イオン（ Cl^- ）の湧水・地中水の濃度変化を調べた結果、流域内に $\delta^{18}\text{O}$ と Cl^- 濃度の安定した地下水が存在することが分かった。そして融雪水の $\delta^{18}\text{O}$ と Cl^- 濃度がそれぞれ一定値となる期間において2成分分離を行った結果、河川水に占める old water の割合は融雪期間中、60-90%の間を日変化し、日平均値にすると約80%で安定して推移することが明らかとなった。この結果は、水質の安定した old water を大量に河川へ流出させるだけの大きな地下水のリザーバーが存在することを示唆する。

融雪期間中の大量の地下水がどこからどのように河川に流出しているかを調べるために、テンシオメータによる地中水流動観測を行った。河川近傍では地下水帯が存在し、地下水の流動は夏

期の降雨時に河道方向への横向きの流動が起こるのに対し、融雪期には鉛直上向き成分が非常に大きくなり、地下水の流動量も夏期の4倍になった。また、融雪流出が増加するにつれて、新たに水が湧き出し始めた谷頭部においても地下水流出の寄与が大きかった。逆に流域内の大部分を占める斜面域においては、夏期降雨時だけでなく融雪期においても融雪水や降雨の影響を受けた地中水が地下へ降下浸透していることが明らかになった。融雪初期から融雪最盛期にかけて河川水に占める地下水の割合が常に約80%を占めるのは、斜面域で融雪水が地下に浸透し、その浸透量に対応するだけの地下水量が河川近傍や新たに水が湧き出し始めた谷頭部において河川に流出するためと考えられた。

河川水の大部分を占める old water をより詳しく調べるために、地中において風化による化学変化が起こるケイ酸塩(SiO_2)濃度を用いる。まず、深さ50cm~200cmで採水された地中水の SiO_2 濃度を調べた結果、 SiO_2 濃度がほぼ0 mg/Lである融雪水や降雨が土壤に浸透すると、地中での滞留時間の増加とともに濃度が増加し、最終的に SiO_2 濃度が15 mg/Lまで上昇し一定値を示すことが分かった。この SiO_2 濃度が15 mg/Lである地中水の $\delta^{18}\text{O}$ は観測期間中ほとんど変化しなかったことから、この地中水は地下水の濃度を示していると考えられる。採水深度が200cmまでなので、この地下水を‘浅い地下水’と名づけた。‘浅い地下水’の SiO_2 濃度は場所によらず15 mg/Lで安定した値を示した。そこで、‘浅い地下水’の SiO_2 濃度を河川水・湧水の SiO_2 濃度と比較した。その結果、水呑み湧水の SiO_2 濃度は15 mg/Lで一年中安定した値を示したことから、水呑み湧水は‘浅い地下水’を起源とする地下水が流出していることが分かった。一方、河川水・谷局湧水・源流3湧水は、流出量が少ない夏季に SiO_2 濃度が15 mg/Lを超え、最大25 mg/Lまで上昇した。融雪期に入って流出量が増加すると、河川水の濃度は15 mg/L以下に、湧水の濃度は15 mg/L前後まで低下していた。この結果から、流域内に25 mg/L前後の SiO_2 濃度を持つ地下水が存在することが示唆された。この地下水は15 mg/Lの SiO_2 濃度を持つ‘浅い地下水’に対し相対的に深い地下に存在すると推測されるため、‘深い地下水’と名づけられた。融雪期において谷局湧水・源流3湧水の $\delta^{18}\text{O}$ とCl濃度は一定値を示すことから、この2つの湧水への融雪水の混入はないと考えられる。そのため湧水の SiO_2 濃度低下は、流出量の増加とともに SiO_2 濃度が高い‘深い地下水’から SiO_2 濃度の低い‘浅い地下水’からの流出に切り替わったことを示唆する。湧水の SiO_2 濃度が融雪期に変化するので、河川に流出する地下水(old water)の SiO_2 濃度も変化すると推測される。そこで $\delta^{18}\text{O}$ とCl濃度を用いて行われた2成分分離の結果からold waterとnew waterの流出量を使い、old waterの SiO_2 濃度を見積もった。この時、new waterの SiO_2 濃度は3 mg/Lとおいた。その結果、融雪期間における河川水の SiO_2 濃度低下の大部分は、old waterの SiO_2 濃度低下によって引き起こされていることが明らかとなった。また、old waterの SiO_2 濃度はold waterの流出量の増加に伴い濃度が低下し、流出量が $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えると SiO_2 濃度は14.5 mg/Lで安定した値になることが分かった。すなわち、河川に流出する地下水(old water)の起源においても、流出量の増加に伴い‘深い地下水’から‘浅い地下水’へ切り替わることが明らかになった。

大出水時に‘浅い地下水’が河川水の水質に大きな影響を与えるという水文化学プロセスは、本研究サイトのような多雪地域の融雪流出を研究することで初めて明らかになった重要な結果である。多くの流域における水・化学物質循環を解明する上で、‘深い地下水’と‘浅い地下水’という2種類の地下水と河川水の水質との関係を調べる、という新しい着目点を本研究は提示したと言える。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 石 川 信 敬

副 査 教 授 福 田 正 巳

副 査 教 授 杉 本 敦 子

副 査 教 授 鈴 木 啓 助 (信州大学理学部)

学 位 論 文 題 名

Study on hydrochemical processes of subsurface water in the nival watershed

(多雪山地流域における地中水の水質形成と流出過程)

流域における水・化学物質循環の研究は、人為起源の汚染や環境変化が将来的に流域へ及ぼす影響を予測する上で重要である。特にこの分野では山地流域における降雨・融雪時の水の流出過程と水質形成機構を解明することが主要な研究課題の一つとされている。これまでは融雪水流出の研究は、河川水を new water (融雪水起源)、と old water (地下水起源) の2成分に分離することが主であり、融雪水の地中における水質形成や流出経路に関する研究はほとんどない。本研究では多雪山地流域の融雪期において、地中水の水質形成と河川への流出メカニズム、それに伴う河川水の水質形成メカニズムについて明らかにすることを目的としている。

観測対象流域に北海道北部母子里試験流域 (1.2km²) を選び、2000 年～2004 年の 5 融雪期を中心に、降水量、河川流量、融雪水量の連続測定と降水、融雪水、地中水、湧水、河川水の水質解析を行った。なおここで使われる地中水とは土壌水と地下水の両方を含む言葉である。まず河川水の精度良い成分分離のためのトレーサー探しを行い、融雪前期には酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$)、融雪最盛期には塩化物イオン (Cl^-) が指標になる事を見出した。また流域内には $\delta^{18}\text{O}$ と Cl^- 濃度の安定した地下水が存在すること、及び河川水に占める old water の割合は日平均値で約 80% であり、この値は融雪期を通して安定して推移することを明らかにした。これは水質の安定した old water を大量に河川へ流出させるだけの大きな地下水のリザーバーが存在することを示唆する。さらにテンシオメータによる地中水の流動観測から地下水の流出経路を調べ、夏期の降雨時には地下水は河道方向に対して横向きの流れであるが、融雪期には鉛直上向きの流動となり地下水の流量は降雨時の 4 倍になることを示した。一方、流域斜面域においては、夏期降雨時と同様に融雪水は地下へ降下浸透していることが明らかにした。

次に地中において化学変化が生じるケイ酸塩 (SiO_2) 濃度を用いて old water の挙動を調べた。深さ 50cm～200cm における地中水の SiO_2 濃度変化から、 SiO_2 濃度がほぼ 0 mg/L である融雪水が地中浸透した後、地中水の SiO_2 濃度は増加し最終的に 15 mg/L の一定値

を示すことが分かった。 SiO_2 濃度が 15 mg/L である地中水の $\delta^{18}\text{O}$ が、融雪期間中ほとんど変化しなかったことから、この地中水は地下水と考えられ、採水深度が 200cm までと浅いのでこの地下水を‘浅い地下水’と名づけた。‘浅い地下水’の SiO_2 濃度と湧水の SiO_2 濃度の比較すると、谷頭湧水では SiO_2 濃度が 15 mg/L で一年中安定した値を示したことから‘浅い地下水’を起源とする地下水流出であることが分る。一方、河川水、河川近傍湧水、源流湧水では、流出量が少ない夏季に SiO_2 濃度が 15 mg/L を超え最大 25 mg/L まで上昇したことから、流域内に 25 mg/L 前後の SiO_2 濃度を持つ地下水が存在することが示唆された。この地下水は 15 mg/L の SiO_2 濃度を持つ‘浅い地下水’に対し、相対的に深い地下に存在すると推測されるため‘深い地下水’と名づけられた。融雪期に流出量が増加すると河川水の濃度は 15 mg/L 以下に、河川近傍湧水や源流湧水の濃度も 15 mg/L 前後まで低下した。しかし融雪期においても湧水の $\delta^{18}\text{O}$ と Cl 濃度は一定値を示すことから、この湧水への融雪水の混入はないと考えられる。そこで河川近傍湧水や源流湧水の SiO_2 濃度低下は、流出量の増加とともに、 SiO_2 濃度の高い‘深い地下水’から、濃度の低い‘浅い地下水’の流出に切り替わったと推測した。次に 2 成分分離の結果を用いて old water の SiO_2 濃度を見積もると、old water の SiO_2 濃度は old water の流出量の増加に伴い低下し、流出量が 0.08 m³/s を超えると 14.5 mg/L で安定した値になることが分かった。すなわち、河川に流出する地下水 (old water) の起源においても流出量の増加に伴い‘深い地下水’から‘浅い地下水’へ切り替わることが明らかになった。本研究は‘浅い地下水’が河川水の水質に大きな影響を与えるという、融雪水の河川流出に関する水文化学プロセスを初めて明らかにしたものであり、多くの流域における水・化学物質循環を解明する上で、‘深い地下水’と‘浅い地下水’という 2 種類の地下水と河川水の水質との関係を調べるという新しい着目点を提示した。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や取得単位などもあわせ、申請者が博士 (地球環境科学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。