

## 山地森林流域源頭部における湧水の水質特性

瀧澤英紀<sup>1</sup>・鈴木峻平<sup>2</sup>・小坂泉<sup>1</sup>

1 日本大学大学院生物資源科学研究科

2 日本大学生物資源科学部

**要旨**：山体内の地下水が渓流水質形成に与える影響を明らかにするため、8カ所の湧水の $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、Si濃度を継続的に測定して安定性を調べた。比較的濃度が一定で季節変化が小さい湧水もあるが、いくつかの湧水は3、4月の融雪期に最も低濃度となり、8、9月に最も高濃度となる緩やかな季節変化を示した。湧水の水質は基岩地質由来の長石の化学風化による溶存物質の供給により、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 濃度、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度とSi濃度が調和して流出していた。8カ所の湧水では、Siと $\text{HCO}_3^-$ 濃度の変動が少ない湧水と、両者の濃度変化に比例関係があるもの、不規則に変化するものとあった。地下水は両者の濃度が高く一定とすると、地下水の湧水の他に、雨水や融雪水が土壌浸透過程で混合し、さらにその程度が変化する湧水があることが分かった。

**キーワード**：湧水、ケイ酸塩、重炭酸、融雪、溶存イオン

### Water chemistry of spring waters in the uppermost area of forest catchment

Hideki TAKIZAWA<sup>1</sup>, Ryouhei SUZUKI<sup>2</sup> and Izimi KOSAKA<sup>1</sup>

Graduate School of Bioresource Sci. Nihon Univ., Fujisawa 252-0880 1

Coll. Bioresource Sci. Nihon Univ. 2

**Abstract**: To clarify the role of groundwater in the process of stream water quality, the variation of  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  and Si concentrations were investigated in eight springs. These water concentrations in some springs were relatively stable and the seasonal changes were small, while other springs had the lowest concentration during the snowmelt season in March and April, and the highest concentration in August and September. Due to the chemical weathering of Na-Ca feldspar from the base rock geology, the water quality of the spring discharged out in harmony with the  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  and Si concentration. There were springs with stable concentrations of Si and  $\text{HCO}_3^-$ , those with a proportional relationship between them, and those with irregular changes. Assuming that the concentration of deep groundwater was constant, it was found that there were springs whose concentration decreases due to mixing of variable rainwater or snowmelt water in the soil layer.

**Key-word**: spring water, Silicate, Bicarbonate concentration, melting water and ion concentration.

### I はじめに

山地森林流域からの流出過程について、渓流水の溶存イオンの形成過程と共に研究が進むと、山体内や斜面土壌の物質動態などを渓流水質によって推測できる。一般に、渓流水は斜面土壌からの中間流と山体内の地下水流の混合と考えられる。湧水は溪床の堆積物などによる水質負荷の影響が極めて少ない。富士山規模の降水から湧水の流出過程では滞留時間は数十年との報告もあるが(12)、本調査では稜線から最大で300m程度の斜面下部に出現する湧水なので、それより滞留時間の短い現象を対象としている。渓流水の流出成分を分離する場合、比較的滞留時間の長い山体内の地下水、表層の土壌水、降

雨や地表流成分がエンドメンバーとして考えられる(10)。本研究では、湧水は山体内の地下水成分を多く含むと考え、溪流の最上流部などの複数の湧水点の溶存イオンなどを継続的に測定して湧水の濃度分布を調べた。

一般に、山体内の地下水あるいは深く浸透した地下水は、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度や $\text{HCO}_3^-$ 濃度などが高い水とされ、 $\text{SiO}_2$ 濃度は流出プロセスと共に表層土壌から徐々に濃度が上昇する傾向がある(2, 5, 9)。また、渓流水の流下方向の $\text{Ca}^{2+}$ 濃度変化や電気伝導度変化を測定して、深層の地下水の流入を調べ、深層崩壊発生場の探査の試みなど水質が利用されている(1, 3, 4)。そこで、本研究では湧水の陽イオンおよび重炭酸イオンとSi濃度を長期間測

定し、濃度が高く変動の少ない安定した地下水水質の特徴や、濃度変動がある湧水の特性を調べた。

## II 材料と方法

**1. 調査地** 調査対象地は群馬県利根郡みなかみ町の日本大学演習林（面積 158ha、標高 650~985m）内の三つ又沢流域 13.7ha とすのこ沢であり、そのうち標高 700~850m に出現する湧水 8 地点を対象とした。図-1 に調査地および採取した湧水地点を示す。図中には通称で湧水を示し、流域界の稜線も示した。地質は、新第三紀デイサイト流紋岩と黒色泥岩、新第三紀栗沢礫岩層を主体とし、ローム堆積域も確認される。調査地周辺の年平均降水量、平均最深積雪深はそれぞれ 1755mm、2.1m である（7, 8）。植生は落葉広葉樹林が主体で、ブナ・ミズナラ・コナラ林が約 7 割、カラマツ・スギ人工林が約 3 割分布する。

**2. 調査項目** 湧水 5 地点（崖下、そのべ、山小屋、岩清水、山ひだ）に関しては 2019 年 1~9 月にかけて毎月 1~2 回の湧水を採水した。それ以外の湧水 3 地点（すのこ沢上、すのこ沢下、三つ又）は 8 月のみ採取した。測定項目は  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  イオン濃度および Si 濃度である。

**3. 分析方法**  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  の濃度について、イオンクロマトグラフィー（883、メトローム社）を用いて測定した。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、Si 濃度はマルチタイプ発光分光分析装置（ICPE-9000、島津製作所）により測定した。 $\text{HCO}_3^-$  濃度は硫酸滴定により測定した。

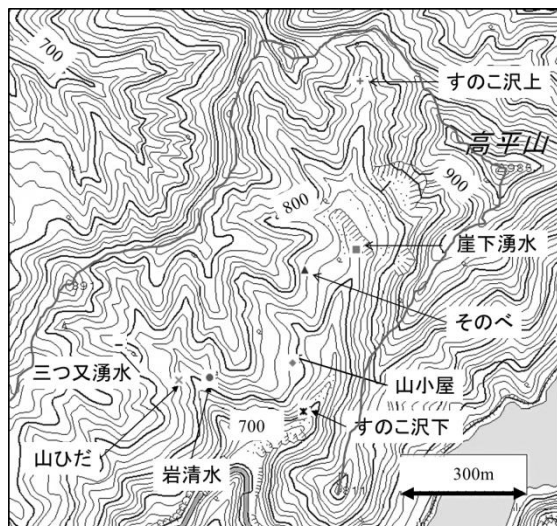


図-1. 三つ又・すのこ沢流域の 8 カ所の湧水地点  
Fig.1 The location of the eight springs in the Mitsumata and Sunokozawa watershed

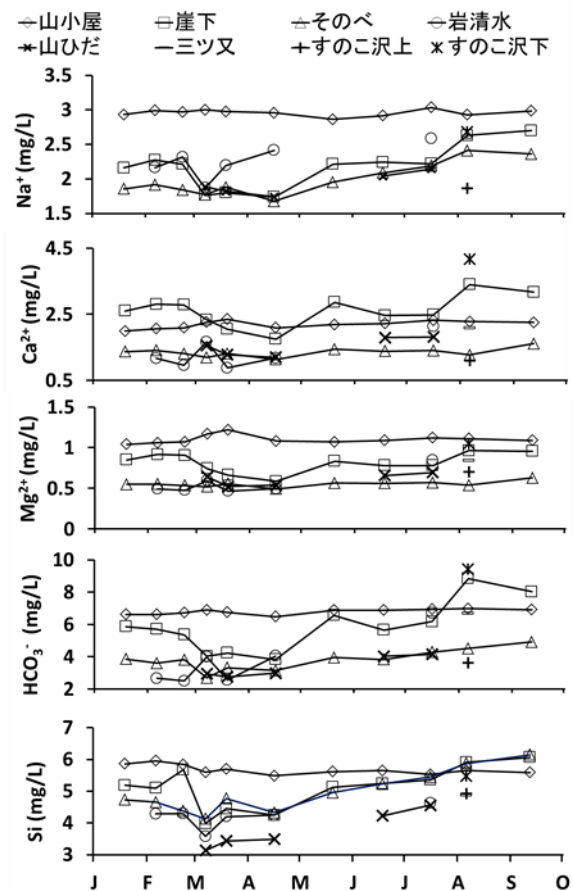


図-2.  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、Si 濃度の経時変化  
Fig.2 Variations of  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  and Si concentration

## III 結果

図-2 に  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、Si 濃度の測定結果を示す。連続的に採水が行われた 5 つの地点の中で山小屋湧水は比較的安定しているものの、他の 4 つの湧水点の水質は 3、4 月の融雪期に最も低濃度となり、8、9 月に最も高濃度となる緩やかながら季節変化を示している。山小屋湧水は  $\text{Na}^+$  濃度が高く、 $\text{HCO}_3^-$ 、Si 濃度も比較的高かった。一方、 $\text{Ca}^{2+}$  イオンは崖下湧水とすのこ沢下湧水で高く、8、9 月の  $\text{HCO}_3^-$  イオン濃度は山小屋湧水よりも崖下およびすのこ沢下湧水の方が大きな値となった。

## IV 考察

$\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  の流出は山体基岩地質あるいは土壌の母材として、長石の化学風化あるいは火山噴出物の化学風化に大きく起因している。図-3 に  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  濃度と Si 濃度の関係を示す。両者には大まかに比例関係が

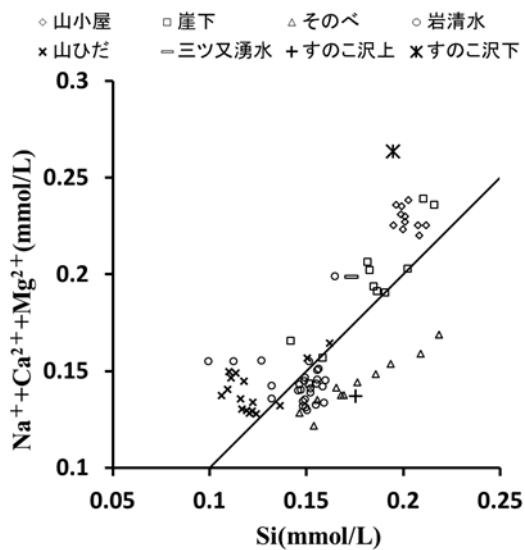


図-3. 湧水の Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>濃度と Si 濃度の関係

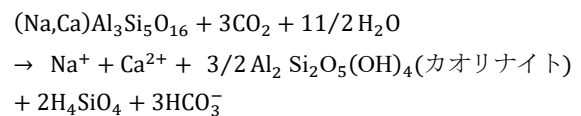
Fig.3 Relationship between Na<sup>+</sup>+Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> concentration and Si concentration in spring water

あることがわかる。Na<sup>+</sup>イオンの流出に関しては、みなかみは温暖雪域で年間降水の 30-40%は冬季に供給され、海塩由来の Na や Cl も降水降雪に相当量含まれるものと考えられる。そこで、溶存する Cl イオンは全て Na と共に降水によりもたらされたものと仮定し、Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>濃度と Si+Cl<sup>-</sup>濃度の関係を比較した(図-4(a)。図には 1 : 1 の直線も示した。海塩由来の Na 分について X 軸

に Cl<sup>-</sup>濃度を足すことによって見積るとほぼ 1 : 1 関係より下に出現し、縦軸の陽イオンはケイ酸塩鉱物の風化由来として説明できる。しかし、湧水 8 地点全体では湧水ごとで若干異なるが X 切片を持つ 1 : 1 の直線的な比例関係が残る。X 切片を持つ意味として、その分の Si は単独(例えば、SiO<sub>2</sub>)で流出したと考えられ、湧水ごとに 1 : 1 の直線的な比例関係があることに関しては、Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>と Si が 1 mol/L ずつの組み合わせで流出していたと考えられる。

次に Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>濃度と HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>濃度の和との関係を比較した(図-4(b)。Si 濃度との関係に比べて直線性が極めて高いことがわかり、重炭酸イオンは Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>イオンとバランスを取って流出していることがわかる。2価のイオンである Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>の 1 mol/L は、1 価の重炭酸イオン 2 mol/L とバランスをとるので、縦軸の陽イオンの約半分は重炭酸イオンと流出していると考えられる。

ここで流紋岩の構成鉱物の例を示すと Na・Ca - 長石の溶解反応は以下の式となる(6)。



すなわち、Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 1 mol/L ずつに対してオルトケイ酸 2 mol/L, 重炭酸 3 mol/L となり図-4 はケイ酸塩鉱物の溶解を測定していることがわかる。海塩由来の Na 推定精度をさらに上げる必要があると考えるが、本試験地

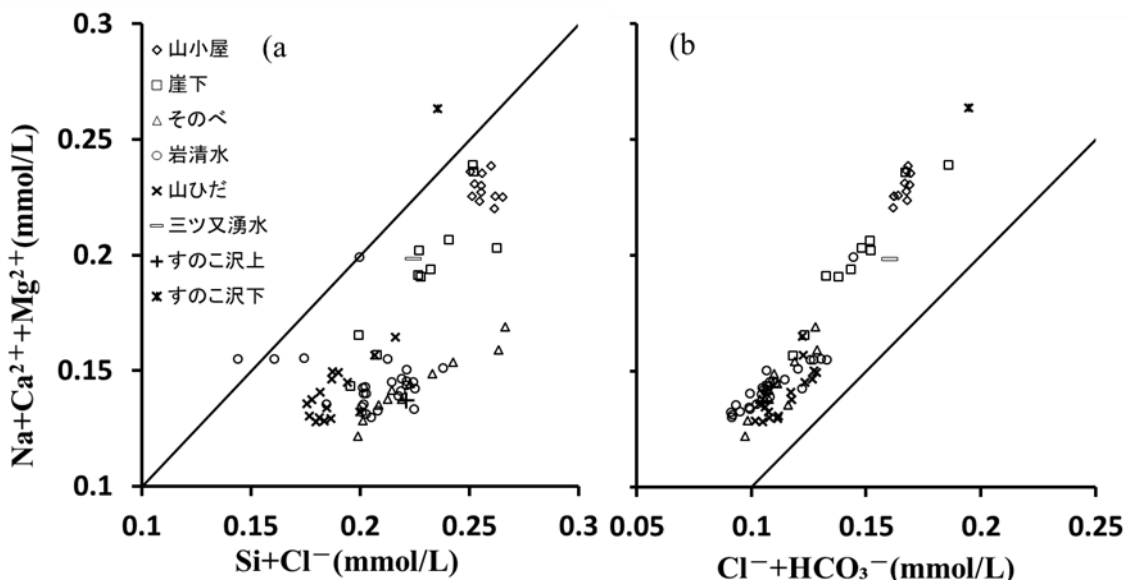


図-4. 湧水の Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>濃度と Si, Cl<sup>-</sup>濃度の関係(a および Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の関係(b)

Fig.4 Relationship between Na<sup>+</sup>+Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> concentration and Si+Cl<sup>-</sup> concentration in spring water (fig.(a) and relationship between Na<sup>+</sup>+Ca<sup>2+</sup>+ Mg<sup>2+</sup> concentration and Cl<sup>-</sup>+ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration (fig.(b)

では降水降雪による溶存物質も測定しており、海塩由来

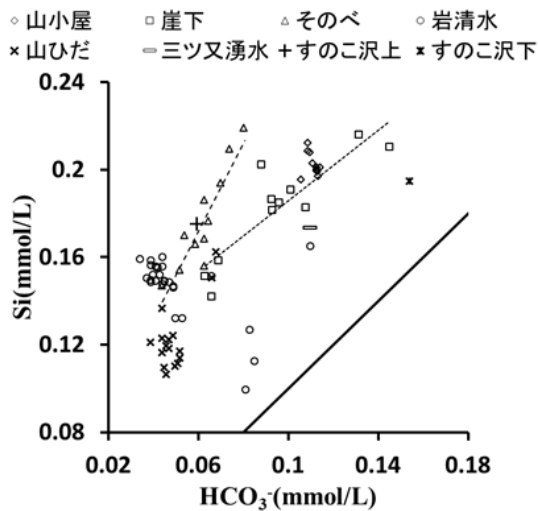


図-5. 湧水の Si 濃度と  $\text{HCO}_3^-$  濃度の関係  
Fig.5 Relationship between Si concentration and  $\text{HCO}_3^-$  concentration in springs

の Na と Cl 供給量についても議論が進むものとする。

図-5に湧水の Si 濃度と  $\text{HCO}_3^-$  濃度の関係を示す。図には 1 : 1 直線 (実線) の他にそのべおよび崖下湧水それぞれの近似直線も示した。Si 濃度と  $\text{HCO}_3^-$  濃度ともに滞留時間の長いあるいは深部浸透した地下水で濃度高くなる物質である (2, 5, 9)。山小屋湧水は濃度が高く変動が少なく、そのべと崖下湧水は両者濃度変化に比例関係があり、岩清水湧水は不規則に変化しているように見える。両者濃度に比例関係を持つ 2 つの湧水は y 切片を持ち、図-4 でみられた Si 単独で流出している関係がみられ、さらにはそれぞれの比例関係は若干異なるが、例えばそのべはおよそ 2 の傾きを示す。これは Si と  $\text{HCO}_3^-$  濃度が一定の比率 2 : 1 で増減していると考えられる。図-3, 4, 5 の様に  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Si が比例関係に流出しているということは、おおまかには長石の様なケイ酸塩鉱物の化学風化溶解物が温度や降水量などの気候値として規則的に一定量流出している (11) ことを示していると考えられる。風化層の風化速度が一定で濃度に上限値を持つような地下水流に濃度が薄い降雨や融雪水の様なものが混合すると考えると、それぞれ決まった比率で希釈されていると考えられる。すなわち、溶存物質濃度高く一定の湧水や混合比率が変化する湧水が同じ流域の中に混在し、混合比率が変化する湧水は集水域が変化し、降雨などが混ざる過程が変化すると考えられる。

#### IV まとめ

日本大学みなかみ演習林内の 8 つの湧水の  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Si 濃度を連続的に調べ、それぞれの相互関係を調べた。

濃度変動が少ない山小屋湧水と、濃度変化に比例関係があるもの (そのべ, 崖下), 不規則に変化するものとあった。風化層の風化速度が一定で安定的な深い地下水があるとすると、集水域が一定の湧水, 集水域が変化して雨水や融雪水が混合する湧水があることが分かった。Si 濃度,  $\text{HCO}_3^-$  濃度,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  濃度などが地下水を表すエンドメンバーとなるか検証が必要である。

#### 引用文献

- (1) ハフィザクター・正留誉恵・寺本行芳・下川悦郎 (2010) 南九州における深層崩壊地の地下水水質の特徴. 雨水資源化学会誌. 16(1): 9-12
- (2) 生原喜久雄 (1994) 渓流水の水質形成に及ぼすプロトン ( $\text{H}^+$ ) の影響. 水文・水資源学会誌 7(4): 325-331
- (3) 地頭園隆・下川悦郎・寺本行芳 (2006) 深層崩壊発生場の予測法の提案—鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして—. 砂防学会誌 59(2): 5-12
- (4) 地頭園隆 (2014) 渓流水の電気伝導度を用いた深層崩壊発生場の予測. 砂防学会誌 66(6): 56-59
- (5) Muraoka, K., Hirata, T. (1988) Stream water chemistry during rainfall events in a forest basin. *J. Hydrol.*, 102: 235-253
- (6) 鹿園直建 (2002) 化学風化作用の河川水水質, 特に溶存シリカ濃度に与える影響. 地学雑誌 111(1): 55-65
- (7) 玉乃井梓・豊泉恭平・瀧澤英紀・小坂泉 (2017) 多雪森林小流域における 2 年間の溶存イオンの流出過程について, 関東森林研究 68(2): 177-180
- (8) 豊泉恭平・前島健人・大類和希・小坂泉・長坂貞郎・瀧澤英紀 (2016) 奥利根源流部の多雪地森林小流域における融雪期の水質形成について, 関東森林研究 67(1): 93-96
- (9) 辻村真貴・恩田裕一・小松陽介・清水卓弘・村松和也・服部重明・中川有里・松井孝子 (2001) 礫層および風化花崗岩からなる丘陵地源流域における流出・水質特性. 水文・水資源学会誌 14(3): 229-238
- (10) Sklash, M.G., Farvolden, R.N. (1979) The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.* 43:45-65
- (11) White, A.F., Blum, A.E., (1995) Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1729-1747
- (12) 吉岡龍馬・北岡豪一・小泉尚嗣 (1993) 同位体組成から推定される地下水の流動系について—三島市及びその周辺地域を例にして—, 地下水学会誌 35(4): 271-285