

山岳地の渓流水質形成に及ぼす流域平均傾斜の影響

田中 基樹^{*1}・鈴木 啓助^{*1,*2}

Relationship between stream water quality and mean basin angle in mountainous drainage basins

Motoki TANAKA ^{*1} and Keisuke SUZUKI ^{*1,*2}

Abstract

The relationship between the stream water quality and mean basin slope was examined in the mountainous region of the Azusa River and Tama River basin. The ionic compositions of stream water are of Ca-HCO₃ type and of Ca·Na-HCO₃ type. The HCO₃⁻, Ca²⁺ and Na⁺ concentrations in stream water exhibit a negative correlation with the mean slope angle in the mountainous watersheds of the Tama River. In contrast, the HCO₃⁻ and Ca²⁺ concentrations in stream water are correlated to the mean slope angle in the mountainous watersheds of the Azusa River, and the Na⁺ concentrations are not correlated with the mean slope angle. The Na⁺/Ca²⁺ ratio in stream water has a negative correlation with the mean slope in the mountainous watersheds of both the Azusa River and Tama River. It is proposed that the depth of groundwater flow coupled with the basin slope is one of the factors influencing the stream water quality.

Key words: mountainous area, stream water quality, mean basin slope
キーワード: 山岳地域, 渓流水質, 流域平均傾斜

はじめに

渓流水質はその流域への沈着物, 土壌中の微生物活動, 植物や土壌および岩石などと水との接触によって形成される。このような渓流水質形成の要因が複雑に絡み合い, 流域ごとに固有の渓流水質を形成している。このため, 現在のところ渓流水質を一意的に決めるための確立された手法はない。

渓流水質の形成に影響する要因のうち, 最も重要なものは, その流域を構成している地質と流域への沈着物である。河川水質と地質との関係については, 多くの研究がなされている(森井ほか,

1993; 尾方ほか, 1995 など)。金井ほか(1999)は, 渓流水や湧水などの地表水中の溶存成分濃度は, 流域を構成する地質によることを明らかにした。また, 渓流水中の Cl⁻, NO₃⁻ 濃度などは, 流域への沈着物に依存するといわれている(Murdoch and Stoddard, 1992; Jeffries *et al.*, 1995; Gi-Tak *et al.*, 2004 など)。

本研究では, 渓流水質を形成する要因として, 流域平均傾斜角に焦点をあてた。関(1998)は, 流域の起伏量や傾斜などの地形の違いによって渓流水質が異なる可能性があることを示唆している。流域傾斜とその流域の水の溶存成分濃度との間に相関があることを見いだしたのは, D'Arcy and

* 1 信州大学理学部物質循環学科 Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University
* 2 信州大学山岳科学総合研究所 Institute of Mountain Science, Shinshu University

Carignan(1997)が最初である。D'Arcy and Carignan (1997)は、カナダにおける湖水中の Ca^{2+} 濃度と Mg^{2+} 濃度とその流域の平均傾斜と負の相関があることを示した。また、田中・鈴木(2005)は、多摩川水系上流域において、渓流水中の HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 濃度と流域平均傾斜角は、いずれも負の相関があることを述べている。しかし、渓流水中の溶存成分濃度と流域平均傾斜角の関係について研究事例は少ない。また、渓流水質組成と流域平均傾斜角との関係について、議論された研究はない。

そこで、本研究では、梓川水系源流域と多摩川水系源流域のふたつの源流域における渓流水質の空間的な変化を示すことで、渓流水質形成に及ぼす流域平均傾斜角の影響を明らかにする。

2. 研究方法

1. 対象流域の概要

研究対象流域は、長野県の西縁にあたり北アル

プス南部に位置する梓川水系源流域と、山梨県東縁から東京都にかけて流下する多摩川水系の源流域である (Fig. 1)。なお、両源流域には、人為起源物質の流入はほとんど存在しない。

梓川水系源流域における流域面積は 18.15 km^2 であり、標高は $1,705 \text{ m}$ から $2,912 \text{ m}$ である。多摩川水系源流域における流域面積は 30.55 km^2 であり、標高は $1,080 \text{ m}$ から $2,109 \text{ m}$ である。

梓川水系源流域の植生分布は、高山帯および亜高山帯に属する。標高が $2,500 \text{ m}$ 以上の森林限界地域には高山帯が分布する。多摩川水系源流域の大部分は針葉樹林と広葉樹林に覆われている。

梓川水系源流域の地質は主に白亜紀後期～古第三紀初期の花崗岩で構成されており、流域の東側上部には部分的にジュラ紀の堆積岩類が分布している (山田ほか, 1989)。多摩川水系源流域の地質は主に新第三紀中期の花崗閃緑岩で構成されており、流域の西端で白亜紀後期の堆積岩類が分布している (尾崎ほか, 2002)。このように、渓流水質に大きな影響を与えると思われる流域の地質は、

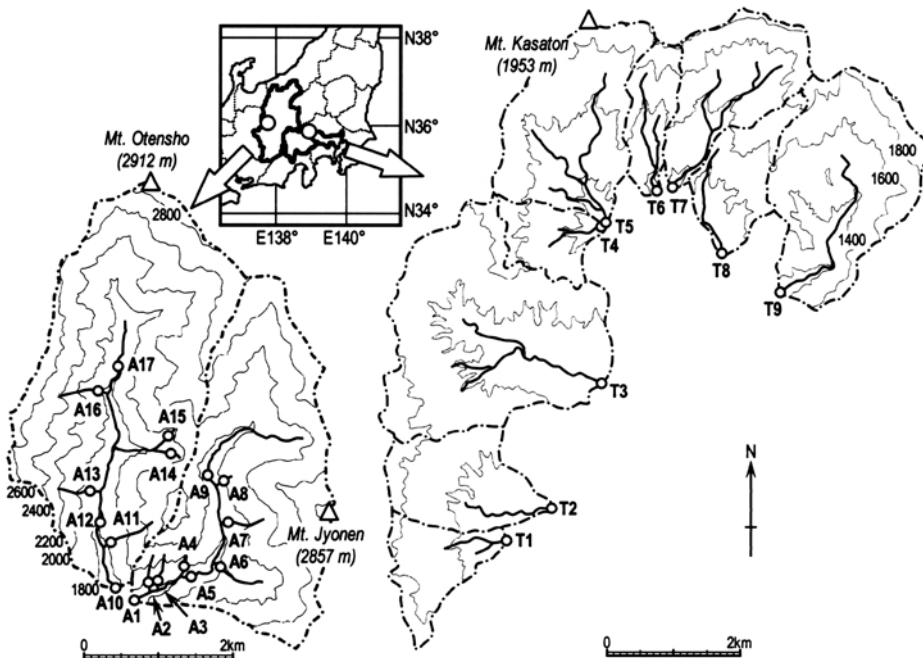


Fig. 1 Location of the study areas. The circles (A1-A17 and T1-T9) indicate sampling points of stream water.

各流域で比較的均一な分布を示す。

2. 試料の採取と分析

渓流水の採取は Fig. 1 に示す計 26 地点で行い、梓川水系源流域での A1 ~ A17 の 17 地点、多摩川水系源流域での T1 ~ T9 の 9 地点である。採取地点は一次河川に対応する渓流に位置し、それぞれ 0 次谷を含む源頭部をもつ。つまり採取地点ではその上流域にサブ流域をもつことになる。梓川水系源流域における渓流水の採取は 2004 年 8 月 7 日に行った。また、多摩川水系源流域における渓流水の採取は、2001 年 5 月 2 日から 2003 年 10 月 30 日まで 1 ヶ月または 2 ヶ月に 1 度の頻度で採取を行った。渓流水質は降雨によって大きく変動するので、渓流水の採取はいずれも降雨の影響の少ない平水時に行った。

渓流水は流心部から採取した。現地においては気温と渓流水の水温、pH、電気伝導度を測定した。渓流水をポリエチレンビンに入れ、実験室に持ち帰り分析に供した。採取した渓流水は濾過した後、pH および電気伝導度を測定し、イオンクロマトグラフ (DIONEX-2020i/SP) によって主要溶存成分濃度 (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) を測定した。また、硫酸滴定法により HCO₃⁻ 濃度を測定した。

3. 流域の平均傾斜角の算出

各流域の平均傾斜角は、以下に示すホートン法を用いて算出した。いま、地形図の等高線間隔を h 、隣り合う等高線間の水平距離を x とすると、傾斜角 θ は、

$$\theta = \tan^{-1}(h/x) \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。

いま、地形図上で任意の直線と等高線が交わる角度を α とすると、 $\sin\alpha$ の平均 $\overline{\sin\alpha}$ は、次式で与えられる。

$$\overline{\sin\alpha} = 2/\pi \int_0^{\pi/2} \sin\alpha \, d\alpha = 2/\pi$$

したがって、長さ l の線分を横切る等高線の交点

数を N とすると、

$$x = (l/N) \overline{\sin\alpha} = 2l/(N\pi)$$

よって、(1) 式より求める平均傾斜角 θ は、

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta h/\Delta x) = \tan^{-1}[(\pi/2) \cdot (hN/l)]$$

で与えられる。

測定対象流域において 1:25,000 地形図上で一辺 5 mm (実距離 125 m, 面積 15,625 m²) の方眼を掛けた。方眼線の 4 辺の全長を $l = 500$ m とし、方眼線と等高線との交点総数とから方眼内の平均傾斜角 θ を求めた。流域平均傾斜角は、方眼内の平均傾斜を算術平均した値を採用した。

結果と考察

1. 渓流水質組成の空間分布

Fig. 2 に全地点における渓流水質組成を示す。梓川水系源流域と多摩川水系源流域のほとんどの流域において、渓流水質組成は Ca-HCO₃ 型を示す。A1, A5 ~ A9 地点や T1 ~ T5 地点における渓流水質組成は、Na⁺ の割合が相対的に大きく、Ca·Na-HCO₃ 型あるいはそれに近いタイプを示す。A10, A12, A16, A17, T9 地点の一部には堆積岩が分布しているが、梓川と多摩川における研究対象流域の地質はそれぞれ主に花崗岩と花崗閃緑岩で構成されている。そのため、地質の違いによって渓流水質に差異が生じているとは考えにくい。

花崗岩の主要鉱物で最も風化しやすい斜長石は、Na 長石の溶解速度は遅く、Ca 長石の溶解速度は速いことが知られている (Goldich, 1938)。地下浅部では、選択的に溶出された Ca²⁺ と Ca²⁺ の溶出に消費された H⁺ によって HCO₃⁻ が生成され、地下水の水質は Ca-HCO₃ 型となる。地下のより深部に浸透した水は、さらに水と斜長石の反応が起こす。地下深部では水の流れは非常に遅く、滞留時間が長いので、斜長石はカオリナイトに変質する。この際、水中の Ca²⁺ 濃度と Na⁺ 濃度が増加し、水質は Ca·Na-HCO₃ 型になる。斜長石からモンモリロナイトが生成されると、Ca²⁺ と Na⁺ と

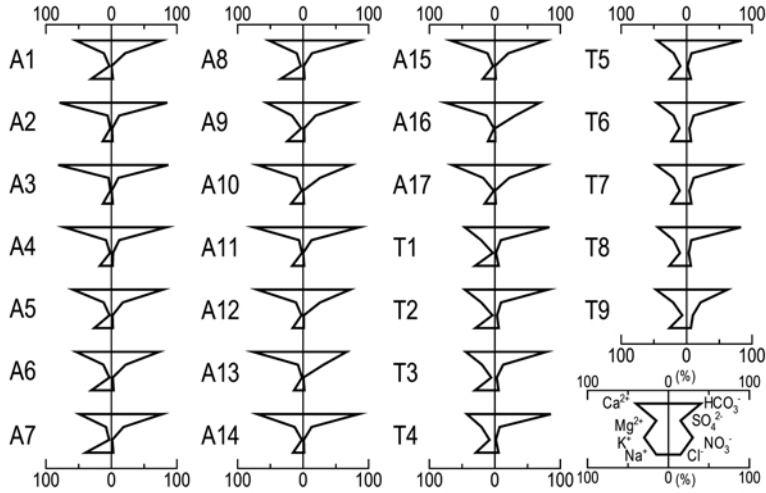


Fig. 2 Ionic compositions of stream water at all the sampling points (A1-A17 and T1-T9).

の間で陽イオン交換が起こり、水質は Na-HCO_3 型になる(佐々木, 2004)。つまり、花崗岩へ流入した地表水は、地下浅部では Ca-HCO_3 型の水質を示し、深部へ向かって $\text{Ca}\cdot\text{Na-HCO}_3$ 型を経て、 Na-HCO_3 型の水質へと変化する傾向がある(瀬尾・清水, 1992; 金井ほか, 1998 など)。このことから、研究対象流域における渓流水質組成の違いは、各流域に賦存している深度の異なる地下水の渓流水への寄与の違いによると予想される。本研究では、渓流水中の Ca^{2+} 濃度と Na^+ 濃度の変化から渓流水質の形成過程と流域平均傾斜角との関係について検討する。

2. 渓流水中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比と流域平均傾斜角の関係

渓流水中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比と流域平均傾斜角の関係を Fig. 3 に示す。梓川水系源流域と多摩川水系源流域の両流域において、渓流水中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比と流域平均傾斜角は有意な負の相関(それぞれ $r = -0.78, -0.78$)を示す。田中(2007)は、本研究対象流域である梓川水系源流域において、渓流水質と流域の花崗岩に含まれる斜長石の化学組成から、渓流に流出する地下水の相対的な深度を推定した。その結果、急傾斜の流域に比べて、緩傾斜の流域は渓流水の化学組成は斜長石の化学組成に

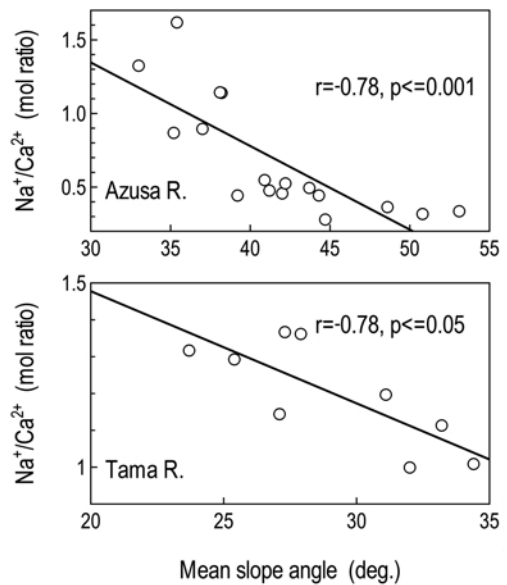


Fig. 3 Relationship between the mean basin slope angle and $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ratio for the stream water at the points of A1-A17 and T1-T9.

近づく傾向がみられ、渓流に流出してくる地下水経路の深度はより深くなることを示唆した。これらのことから、渓流水中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比と流域平均傾斜角との関係について考察する。斜面において、地下浅部を流動する斜面に水平方向の水と地下深部へ浸透する斜面に垂直方向の水の流れを考

えた場合、これら2方向の水の流動は、地表面の傾斜に依存すると考えられる(宮崎, 2000)。平均傾斜角の大きな流域での地下水は、地下浅部を流動する水が支配的である。傾斜の大きな流域では、地下水の多くが地下浅部に流路を持つために、地下浅部に特徴されるCa-HCO₃型の渓流水質をなし、Na⁺/Ca²⁺比は小さな値を示す。それに対して、傾斜の小さな流域では、傾斜の大きな流域に比べ、斜面と水平方向の水の流れは少なく、より多くの水が地下深部へと浸透する。そのため、傾斜の小さな流域での渓流水は地下深部の地下水質を反映した水質となり、Na⁺/Ca²⁺比は大きな値を示すものと考えられる。つまり、流域平均傾斜角は、渓流水を構成する地下浅部からの地下水と地下深部からの地下水との混合の割合を制

御し、渓流水質の形成に影響を与えているものと推測される。これらのことから、流域平均傾斜角と渓流水中のNa⁺/Ca²⁺比は、渓流に流出してくる地下水の相対的な深度を知る有力な指標になると考えられる。

3. 渓流水中の溶存成分濃度と流域平均傾斜角の関係

Fig. 4 に梓川水系源流域と多摩川水系源流域における渓流水中のHCO₃⁻、Ca²⁺、Na⁺濃度と流域平均傾斜角との関係を示す。多摩川水系源流域における渓流水中のHCO₃⁻、Ca²⁺、Na⁺濃度は流域平均傾斜角と有意な負の相関(相関係数r = -0.83 ~ -0.76)を示す。このことは、湖水中の溶存成分濃度と流域傾斜との関係を議論した過去の研究

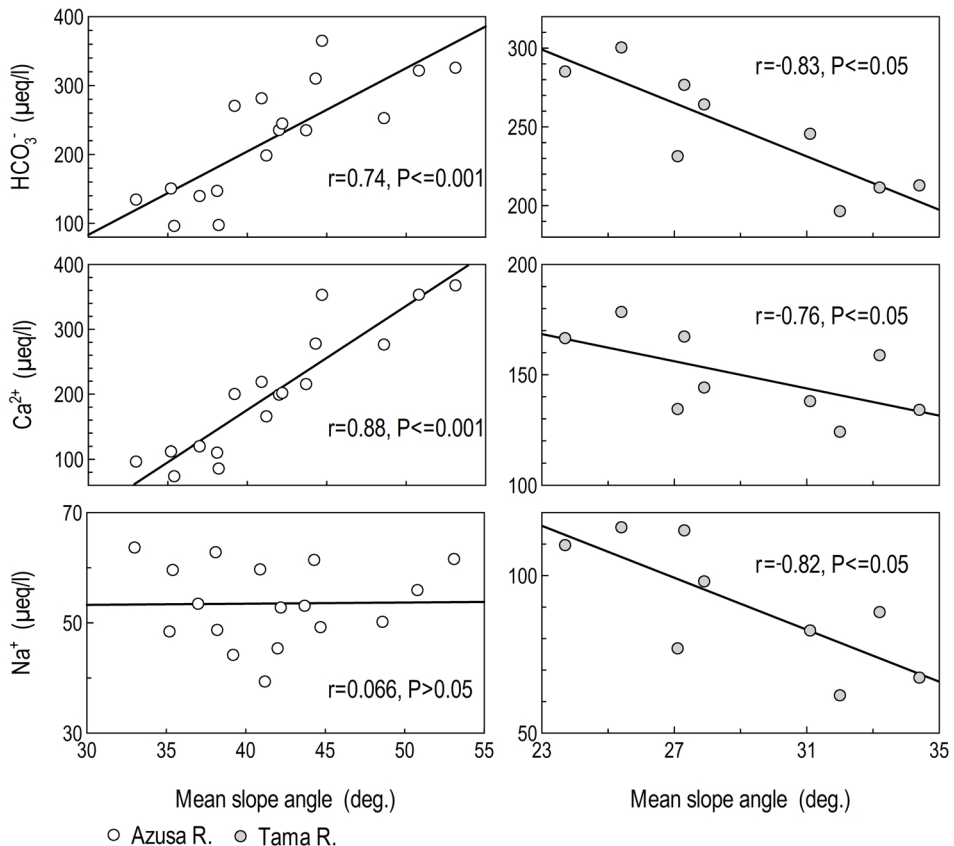


Fig. 4 Relationship between the mean basin slope angle and the stream water quality at the points of A1-A17 and T1-T9.

(D'Arcy and Carignan, 1997) と合致している。岩石と水との接触時間は、地表水の水質に影響を与えていることが知られている(金井ほか, 1998)。地表面の傾斜が大きい所では、地下水面の勾配も大きくなる。このような所では、動水勾配が大きくなり、それに比例して比流束も増加する。したがって、水と岩石との接触する時間は短くなるため、渓流水中の HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ 濃度は相対的に減少するものと考えられている(D'Arcy and Carignan, 1997; 田中・鈴木, 2005)。

梓川水系源流域における渓流水中の溶存成分と流域平均傾斜角との関係は、多摩川水系源流域の場合とは異なる。梓川水系源流域における渓流水中の HCO_3^- , Ca^{2+} 濃度は流域平均傾斜角と有意な正の相関(それぞれ $r = 0.74, 0.88$)を示すが、 Na^+ 濃度は流域平均傾斜角との間にばらつきが大きく、ほとんど相関がない。梓川水系源流域における渓流水中の溶存成分濃度と流域平均傾斜角との関係からは、水と岩石との接触時間の違いが渓流水質に影響を与えているとはいえない。流域平均傾斜角の大きな流域ほど、地下浅部の地下水に特徴される Ca-HCO_3 型の水が選択的に渓流に流出しているようにみられる。流域平均傾斜角が渓流水中の溶存成分濃度に影響を与える原因は、従来からいわれている水と岩石との接触時間の違いだけでなく、渓流に流出してくる地下水の深度の違いである可能性がある。しかしながら、これらふたつの原因が何によって選択されているのかを明らかにすることはできなかった。このことを解明するためには、より多くの流域における流域平均傾斜角と渓流水中の溶存成分濃度との関係を検討する必要がある。

まとめ

梓川水系源流域と多摩川水系源流域において、渓流水質と流域平均傾斜との関係を調べた。本研究で明らかになった点を以下に示す。

- 1) 梓川水系源流域と多摩川水系源流域における渓流水質は、 Ca-HCO_3 型と $\text{Ca}\cdot\text{Na-HCO}_3$ 型のふ

たつのタイプが存在する。

- 2) 梓川水系源流域と多摩川水系源流域において、渓流水中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比と流域平均傾斜角は負の相関を示す。
- 3) 多摩川水系源流域における渓流水中の HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ 濃度は流域平均傾斜角と負の相関を示す。それに対し、梓川水系源流域における渓流水中の HCO_3^- 濃度と Ca^{2+} 濃度は流域平均傾斜角と正の相関を示し、 Na^+ 濃度は流域平均傾斜角と相関を持たない。

梓川水系源流域と多摩川水系源流域において、流域平均傾斜角の大きな流域ほど渓流に流出する地下水の深度はより浅いと考えられる。流域平均傾斜角と渓流水中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比は、渓流に流出してくる地下水の相対的な深度を知る指標となる可能性がある。流域平均傾斜と渓流水質との関係は、現在のところほとんど研究されておらず未知な部分が多い。本研究で明らかになった知見が、特異な現象なのか一般的なものであるのかを検討するためには、さらに多くの流域で調査する必要がある。

謝辞

匿名の2名の査読者には、有益なコメントをいただきました。ここに記して感謝の意を示します。

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(No. 17310007)および環境省地球環境研究総合推進費(C-6, C-052)の支援により実施しました。

引用文献

- 金井 豊・上岡 晃・金沢康夫・関 陽児・濱崎 聡志・月村勝宏・中嶋輝允(1999): 茨城県中部域の源流部における浅層地下水・地表水の水質変動。地質調査所月報, 50, 591-610。
- 金井 豊・関 陽児・上岡 晃・金沢康夫・月村勝宏・濱崎聡志・中嶋輝允(1998): 水と表層物質の相互作用による水質について 福島・茨城

- 県における湧水・地表水の調査例 . 地質調査所月報, **49**, 425-438 .
- 尾方伸久・若松尚利・梅田浩治・柳沢孝一 (1995): 河川水の流量および水質による表層部の地下水挙動の推定 . 応用地質, **36**, 2-13 .
- 尾崎正紀・牧本 博・鈴木雄一・三村弘二・酒井 彰・久保和也・加藤碩一・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久 (2002): 1/20 万地質図幅「甲府」, 産業技術総合研究所地質調査総合センター .
- 宮崎 毅 (2000): 環境地水学, 東京大学出版会, 208p .
- 森井ふじ・松村竹子・田中 好 (1993): 琵琶湖流入河川の水質と水源地地質との関連 . 陸水学雑誌, **54**, 3-10 .
- 佐々木宗建 (2004): 花崗岩地域の地下水の地化学的特徴 . 地質調査研究報告, **55**, 439-446 .
- 関 陽次 (1998): 土壌・風化帯の形成と水質変化 . 地質調査所月報, **49**, 639-667 .
- 瀬尾俊弘・清水和彦 (1992): 我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析 . 動燃技術報告, PNC-TN7410 92-017 .
- 田中基樹 (2007): 山岳地域における水循環の基礎的研究 . 信州大学大学院博士論文, 68-76 .
- 田中基樹・鈴木啓助 (2005): 溪流水質に影響を与える流域特性について . 日本水文科学会誌, **35**, 3-14 .
- 山田直利・野沢 保・原山 智・滝沢文教・加藤碩一・広島俊男・駒澤正夫 (1989): 1/20 万地質図「高山」, 工業技術院地質調査所 .
- D'Arcy, P., and Carignan, R. (1997): Influence of catchment topography on water chemistry in southeastern Quebec Shield Lakes. *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, **54**, 2215-2227.
- Gi-Tak, C., Seong-Taek, Y., Ki-Hyun, K., Pyeong-Koo, L., and Byoung-Young, C. (2004): Atmospheric versus lithogenic contribution to the composition of first- and second-order stream waters in Seoul and its vicinity. *Environmental International*, **30**, 73-85.
- Goldich, S. S. (1938): A study in rock weathering. *Journal of Geology*, **46**, 17-58.
- Jeffries, D. S., Clair, T. A., Dillon, P. J., Papineau, M., and Stainton, M. P. (1995): Trends in surface water acidification at ecological monitoring sites in southeastern Canada (1981-1993). *Water Air Soil Pollut.*, **85**, 577-582.
- Murdoch, P. S., and Stoddard, J. L. (1992): The role of nitrate in acidification of streams in the Catskill Mountains of New York. *Water Resources Research*, **28**, 2707-2720.
- (受付 : 2007年 3月 8日)
(受理 : 2007年 7月 20日)
-
- この論文に対する「討論」を2008年2月29日まで受け付けます。