

同位体組成を指標とした土壌水・地下水移行の検討

Field study of migration of soilwater and groundwater by isotope composition

池田英史*、大隅多加志**、宮永洋一***

By Hideshi IKEDA, Takashi OHSUMI and Yoichi MIYANAGA

In order to evaluate the buffer capacity of watershed to acid deposition, it is necessary to know both the pathway of pre-cipitated water and the accompanying chemical change of the water. We observed temporal variations in the chemistry and isotope composition of the groundwater and streamwater in a mountainous basin during a storm. Based on these results, we divided streamwater into 3 components; preicpitated water, soil water and groundwater. It was found that soil water run-off through aquifer was an important component in stream discharge and streamwater chemistry in this basin during a storm.

Keywords: Acid deposition, Streamwater chemistry, Soil water, Runoff components

1. はじめに

近年、欧米の湖沼では酸性雨（酸性降下物）によると考えられるpHの低下（酸性化）が生じている。現在の日本ではこれらの現象は報告されていないが¹⁾、今後の水質変化を予測するためには、この酸性化のメカニズムを明らかにする必要がある。酸性降下物が河川水質に及ぼす影響は、①流域内に落下した降水がどのような経路を流れ、②流下する際にどのような化学作用を受けているか、という水文特性および化学特性により決定される²⁾。また降雨時に地下水質が変化する現象も報告されており³⁾、地下水もこの①、②の影響を受けていると考えられる。ここでは山地流域において1年間実施した降水、土壌水、地下水、河川水の水質調査結果、および降雨時に観測された河川水の水質および同位体組成の変化より推定される土壌水、地下水の移行経路について検討する。

2. 調査の方法

2.1 流域の概要

試験流域の地形および観測地点を図-1に、地下水観測地点であるW1-W3断面を図-2に示す。試験

* 正会員 電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 環境水理研究室
(〒270-11 千葉県 我孫子市 我孫子 1646)

** 理博 電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 環境水理研究室

*** 正会員 工博 電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 環境水理研究室長

流域は本州中部の内陸に位置し、その流域面積は約3.2 km²、表層土壌の大部分は花崗閃緑岩が風化したマサ土であり、透水係数は地下水面付近で約1×10⁻⁴ cm/s である。また植生はスギ、マツ、コナラ、ミズナラである。

2. 2 年間水質調査

降水が流域内を流下する際の水質変化および水質の年間変化を明らかにするため、降水、土壌水、地下水、河川水の水質を1年間にわたり調査した。観測および採水の方法を表-1に示す。分析項目はいずれも水温、pH、pH4.87N/カ度(以下7N/カ度)、イオン組成(Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻)である。

2. 3 降雨時水質調査

降雨時の河川水流出経路の推定(流出成分の分離)については従来よりタンクモデルに代表される多くのモデルが提案されてきた。前報ではSklash and Farvolden⁴⁾の手法を用いて、河川水の安定同位体組成を指標として河川水を①対象とする降水が河川へ流出する成分(Event Water)、②対象とする降雨以前に流域内に貯留されていた成分(Pre Event Water)、の2成分に分離した²⁾。分離に用いた同位体組成保存式を以下に示す。

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \tag{1}$$

$$Q_0 R_0 = Q_1 R_1 + Q_2 R_2 \tag{2}$$

ここにQは流量、Rは同位体組成を示し、添字0、1、2はそれぞれ河川水、Event Water、Pre Event Waterである。また、河川水の化学組成を指標としてこの結果を検証した。しかし、この手法では土壌水と地下水とを一括してPre Event Waterとして扱っており、土壌水と地下水とで濃度の異なるCa²⁺やSO₄²⁻などのイオン種については河川水中の濃度を再現できなかった。ここでは¹⁸Oを用いて河川水をEvent Water、Pre Event Waterの2成分に分離した後に、¹⁸Oと独立な同位体指標である³Hを用いPre Event Waterを土壌水が流出した成分、地下水が流出した成分に分離し、降水(Event Water)とあわせ3成分に分離する。分離に用いた同位体組成保存式を以下に示す。

$$Q_0 = Q_e + Q_v + Q_g \tag{3}$$

$$Q_0 T_0 = Q_e T_e + Q_v T_v + Q_g T_g \tag{4}$$

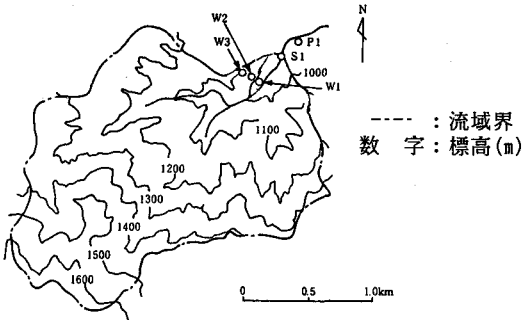


図-1 試験流域の地形および観測・採水地点

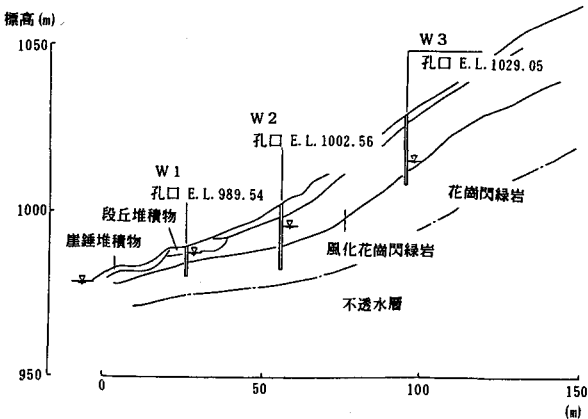


図-2 流域断面図(W1-W3断面)

表-1 観測・採水方法

		観測項目・採水試料	観測・採水地点	観測・採水頻度
水文	年間	降水量 河川流量	P 1 S 1	連続観測 連続観測
	年間	降水 土壌水 地下水 河川水	P 1 W 2 (10深度) W 2 S 1	2日毎 月1回 月1回 月1回
水質	年間	降水 土壌水 地下水 河川水	P 1 W 2 (2~3深度) W 1, W 2, W 3 S 1	1~2時間毎 降雨直前に1回 3時間毎 1時間毎
	年間	降水 土壌水 地下水 河川水	P 1 W 2 (2~3深度) W 1, W 2, W 3 S 1	1~2時間毎 降雨直前に1回 3時間毎 1時間毎

ここにTは³H濃度、e、v、gはそれぞれ降水、 土壤水、地下水である。

以上の分離結果を河川水の化学組成により検証する。また降水量、河川流量、地下水位の観測結果とあわせ土壤水、地下水の挙動についても明らかにする。

3. 調査結果

3. 1 年間水質調査

平成元年10月より2年9月にかけて実施した水質調査の結果(pH、7ℓ加度、1ℓ濃度)を図-3に示す。これよりpH、7ℓ加度や7ℓ加性元素であるCa²⁺、Mg²⁺濃度が深度とともに上昇しており、土壤が酸性降下物を中和している、言い替えば流域が酸性降下物に対する緩衝能を持っていることがわかる。しかしこの河川水の7ℓ加度0.14 meq/lは中部地方の河川の平均値である0.49 meq/l⁵⁾に比べて小さく、この流域は酸性降下物に対する緩衝能が小さいと考えられる。さらに地下水質と河川水質を比較した場合河川水の方が7ℓ加度等が小さく、地下水が河川に流出する際に水質が変化したか、土壤水が地下水層を経由せず直接河川に流出していると考えられる。

3. 2 降雨時水質調査

対象とした降雨は平成2年9月19日から20日にかけての降雨であり、降水量は140mmであった。降水量、河川流量および地下水位の変化を図-4に示す。19日午後よりふりだした降雨により河川流量は増加しはじめ、最大時には4m³/sに達し、その後20日、21日にかけて減少している。この期間の降水、河川水、地下水のpHを図-5に、河川水のイオン組成を図-6に示す。これより降水が河川に流入することにより河川水が希釈されていると考えられる。また地下水位についてはW2、W3地点に比べ地下水位が浅いW1地点は降水に反応して地下水位が上昇していることがわかる。

3. 3 安定同位体組成による河川流量の2成分分離

考察の対象とした降雨の降水、河川水、地下水(W1)の同位体組成($\delta^{18}\text{O}$)の時間変化を図-7に示す。また降雨前の同位体組成の鉛直分布を図-8に示す。図-8より土壤水と地下水の $\delta^{18}\text{O}$ はほぼ等しく、これらが Pre Event Water として河川に流出した場合、Pre Event Water中に占める両者の比率が変化してもPre Event Waterの $\delta^{18}\text{O}$ は変化しないと考えられる。よって図-7に示した降雨前の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ を Pre Event Waterの $\delta^{18}\text{O}$ とし、河川水、降水の $\delta^{18}\text{O}$ は実測値を用いることにより、河川流量を Event Water (降水)と Pre Event Water (土壤水+地下水)の2成分に分離することができる。

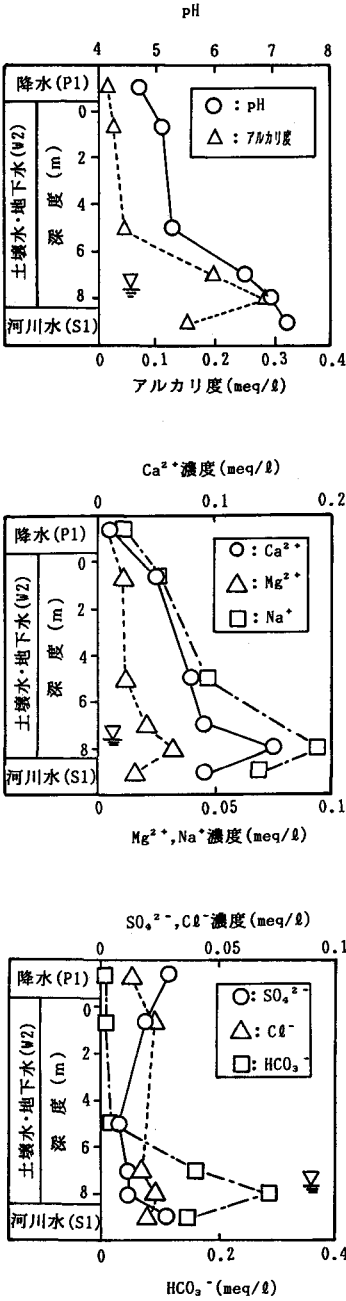


図-3 流域内の年平均水質
(上段より pH・アルカリ度、
陽イオン、陰イオン)

3. 4 ^3H によるPre Event Waterの分離

次にPre Event Waterを土壤水が流出した成分と地下水が流出した成分に分離する。考察の対象とした降雨の降水、河川水の ^3H 濃度の時間変化を図-9に、鉛直分布を図-8に示す。図-8より明らかなように土壤水と地下水では ^3H 濃度が異なるため、図-9に示した降水、河川水の実測値および3. 3の結果をあわせると、河川流量を降水、土壤水、地下水による3成分に分離することが可能となる。分離した結果を図-10に示す。これより河川流量が最大となる9月20日0時には河川流量の約10%が降水の直接流出により占められている。また土壤水の比率は河川流量が減少するにつれ増加し、9月20日6時には河川流量の約50%を占めている。

3. 5 化学組成による検討

河川中に多く含まれる Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- を指標として河川流量の分離結果を検証する。検証に用いる計算式を以下に示す。

2成分モデルによる計算式

$$C_0 Q_0 = C_1 Q_1 + C_2 Q_2 \quad (5)$$

3成分モデルによる計算式

$$C_0 Q_0 = C_e Q_e + C_v Q_v + C_g Q_g \quad (6)$$

ここに C_0 は河川水中濃度の計算値、 C_1 、 C_e は降水中濃度の実測値、 C_v は降雨直前に採水した土壤水中濃度（実測値）、 C_2 、 C_g はPre event waterおよび地下水流出成分の濃度であり降雨開始前の河川水濃度に等しいとおく。

図-11に河川水中の Cl^- 濃度実測値と2成分による計算値、3成分による計算値を示す。これより流域内での保存性が高い、言い替えれば大部分が気からの降下物（降水、乾性降下物）に含まれ流域内を流下する際に供給されないため土壤水中、地下水中、河川水中の濃度がほぼ等しい Cl^- は2成分モデル、3成分モデルのいずれを用いても河川水の実測値を再現できた。一方、 SO_4^{2-} については3成分モデルを用いた方が2成分モデルより河川水濃度の再現性がよかった。また Na^+ についても3成分モデルを用いることでより正確に実測値を再現できた。以上より、河川流量を3成分に分離して河川水質変化を説明しうることが示された。ただし、3成分のうち土壤水の水質は流域内の河道に近いW2地点での測定値を用いているため、流域全体の土壤水の水質を代表しうるかと言うことが問題点として残る。水質再現結果から見ると、 SO_4^{2-} 、 Cl^- は流域内の分布が比較的均一であるのに対し、 Ca^{2+} はW2地点の測定値が流域平均より高すぎるものと考えられる。また土壤水や地下水が河道に流出する際には、 CO_2 の脱気による水質の変化も考えられる。これらの点については、今後さら

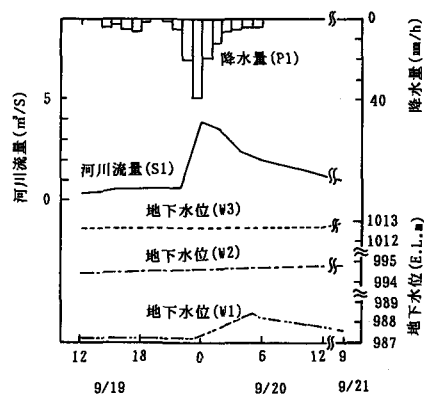


図-4 降水量、河川流量、地下水位の経時変化

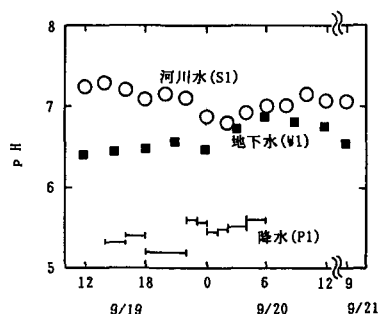


図-5 降水、河川水、地下水 pH の経時変化

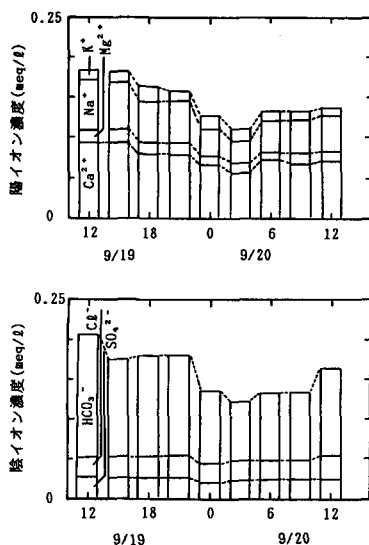


図-6 河川水イオン組成の経時変化

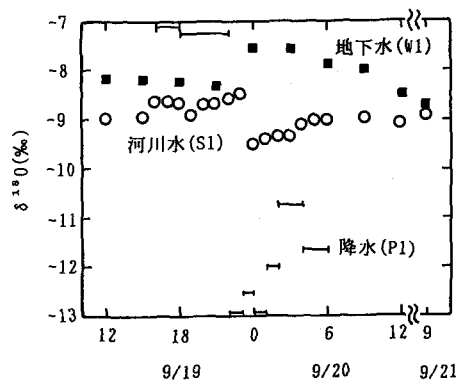


図-7 同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$) の経時変化

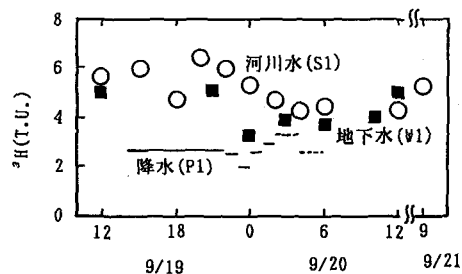


図-9 同位体組成 (^3H 濃度) の経時変化
(降水の破線は表示値未滿を示す)

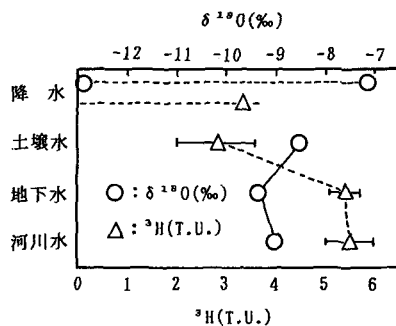


図-8 同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$ 、 ^3H 濃度) の鉛直分布

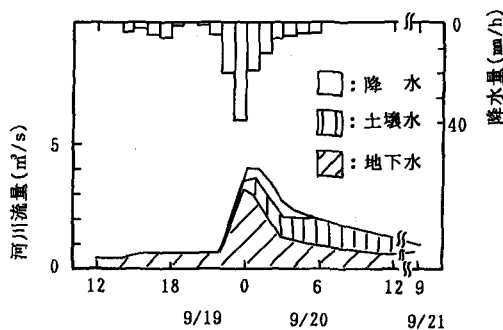


図-10 河川流量の3成分分離結果

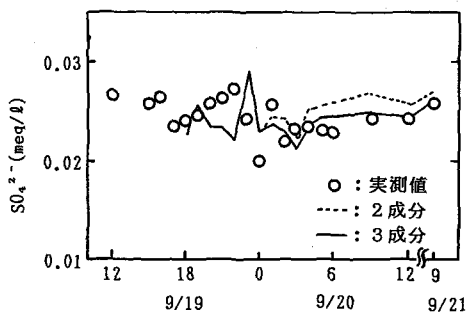
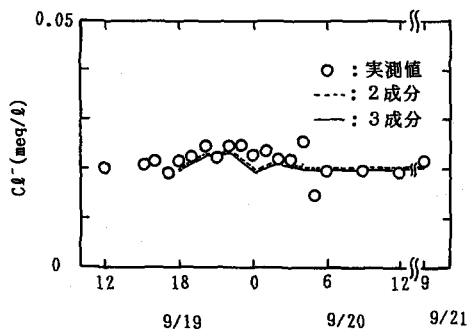
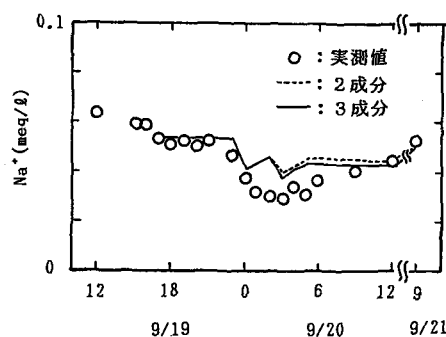
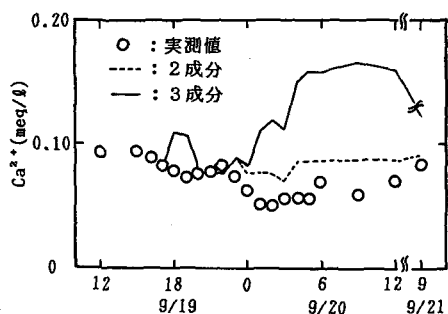


図-11 河川流量分離結果の検証
(上段左: Ca^{2+} 上段右: Na^{+}
下段左: Cl^{-} 下段右: SO_4^{2-})

に詳細な観測と検討が必要である。

3. 6 地下水の分離

地下水についても同様の成分分離を行い、降水、土壌水がどのような経路で河川へ流下するかを考察する。ここでは地下水観測地点のうち最も水位変動の大きかったW1地点を対象とする。成分分離は河川水と同様に図-7~9に示す $\delta^{18}\text{O}$ および ^3H 濃度を指標として行う。分離した結果および Na^+ による検証結果を図-12および13に示す。これより降水が地下水層に流入しているのは降雨強度の強い時間帯のみであり、それ以降は土壌水の流入により地下水位が上昇していることがわかる。しかし地下水位の上昇幅より、この土壌水全部がW1地点の不飽和層に貯留されていたものとは考えられず、W1地点より山側の不飽和層から流出した土壌水も含まれていると考えられる。また図-10および12より、W1地点の地下水位および地下水中の土壌水の比率が上昇したのちに河川水中の土壌水の比率が増加していることから、降水に押し出された土壌水がW1地点のある河川近傍の地下水層に流入したのち河川に流出していると考えられる。

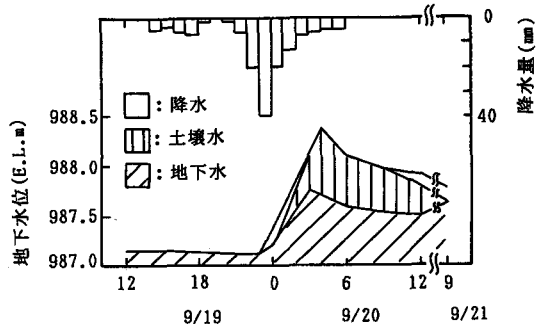


図-12 地下水の3成分分離結果

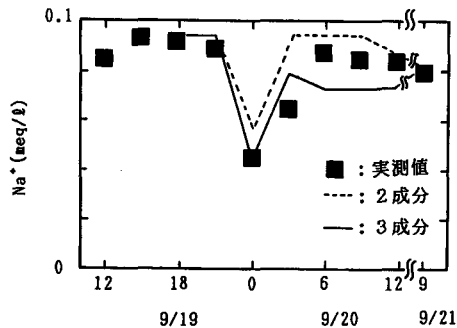


図-13 地下水分離結果の検証

4. まとめ

(1) 面積約 3.2 km^2 の山地流域における降雨時の河川流量を $\delta^{18}\text{O}$ および ^3H 濃度を指標として降水流出成分、土壌水流出成分、地下水流出成分の3成分に分離した。その結果、河川流量中の降雨流出成分の比率は最大時で約10%、土壌水流出成分の比率は最大で約50%であった。

(2) (1)で求めた3成分の比率を用いて河川水中の SO_4^{2-} 、 Cl^- 濃度を再現することができた。それに対して Ca^{2+} は計算値が実測値を上回った。これは Ca^{2+} は SO_4^{2-} 、 Cl^- と比べて流域内での濃度のばらつきが大きいため、今回のように1地点のみでの土壌水採水では流域全体の土壌水中 Ca^{2+} 濃度を代表できなかったためと考えられる。

(3) 降水に押し出された山腹斜面の土壌水は河川近傍の地下水層に流入し、河川へ流出すると考えられる。

参考文献

- 1) 清野通康、石川雄介；電中研調査報告 484016 pp.15-18, 1985
- 2) 池田英史、大隅多加志、宮永洋一；降雨時の河川流出成分と河川水質との関係、水工学論文集 第35巻 pp.567-572, 1991
- 3) 糸山東一；降水による地下水水質の変動、地球化学 No.17 pp.1-9, 1983
- 4) Sklash M.G. and Farvolden R.N.；The role of Groundwater in storm runoff, J. Hydrology 43 pp.45-65, 1979
- 5) 建設産業調査会；地下水ハンドブック p.132 1979