

降雨時の河川流出成分と河川水質との関係

Relationship between Runoff Components and Streamwater Chemistry during Storm

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 make clear both the pathway of precipitated water and the accompanying chemical change of the water. We observed temporal variations in the chemistry and ^{18}O content of the streamwater during a storm and divided the discharge into baseflow and precipitated water. The streamwater chemistry is explained by assuming the temporal variation of baseflow chemistry. The following 2 mechanisms are supposed: (1) soilwater, which has different chemistry and buffer capacity from groundwater, is the source of storm runoff. (2) soilwater and/or groundwater chemistry changes in the pathway to stream.

Keywords: Acid deposition, Streamwater chemistry, Buffer capacity, Runoff components

1. はじめに

近年、欧米の湖沼の一部において酸性雨によるpHの低下、魚類等の減少が顕在化している。現在の日本ではこれらの現象は確認されていないが¹⁾、酸性雨の陸水水質への影響のメカニズムは解明が不充分であり、現在の酸性物質沈着量が継続した場合、陸水水質が将来どのように変化するか、言い替えれば河川流域が酸性降下物に対してどの程度の緩衝能をもつかは不明である。酸性雨が陸水水質、特に河川水質に及ぼす影響の程度は、①流域内に落下した雨水(酸性雨)がどのような経路を流れ、②流域内で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。流域内の雨水および酸性物質の流れを図-1に示す。ここでは山地流域において実施した1年間の水文・水質調査およ

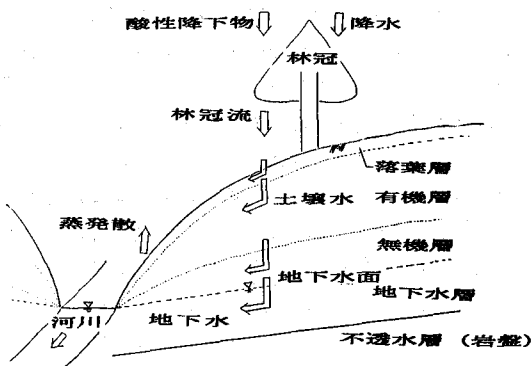


図-1 流域内の水・酸性物質の流れ

* 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

び降雨時に実施した河川水水質・同位体調査の結果を用いて流域の水文特性・化学特性と河川水質の関係について考察する。

2. 調査方法

2.1 流域の概要

試験流域の地形および観測地点を図-2に示す。試験流域は日本海側の山地に位置し、その流域面積は約0.5km²、表層土壌の大部分は褐色森林土、植生はスギ、ブナ、ナラである²⁾。

2.2 水質調査

流域内の雨水、土壌水、地下水、河川水の水質調査を実施した。調査は月1回の採水、分析を1年間継続した年間水質調査と降雨時に集中的に実施した降雨時調査よりなる。また降水量、河川流量についても観測した。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、EC、pH4.8アルカリ度（以下アルカリ度）、イオン組成（Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻）である。

2.3 降雨時同位体調査

Sklash and Farvoldenは安定同位体を利用して降雨時の河川水の成分分離を試みた³⁾。以下にその手法の概要を示す。

降雨時の河川流量を、①対象とする降雨(event water)が河川に流出する成分(以下、雨水成分)、②対象とする降雨以前に流域内に貯留されている水(pre-event water)が河川に流出する成分(以下基底流出成分)、の2成分に分離する。その際、“雨水成分の同位体組成が基底流出成分の同位体組成と異なる降雨を対象とする”ことが必要である。さらに以下の仮定を用いる。

- ①雨水成分の同位体組成は基底流出成分との混合に際して保存される。
- ②土壌水と地下水の同位体組成は等しい。
- ③地表面での雨水貯留は河川流出に影響しない。

以上の仮定より河川水と2成分の間に以下の収支式が成立する。なおここでは雨水成分の流下時間等の時間遅れは考慮していない。

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

$$Q_0 R_0 = Q_1 R_1 + Q_2 R_2 \quad (2)$$

ここに、 Q_0, Q_1, Q_2 ：河川流量、基底流出成分、雨水成分

R_0, R_1, R_2 ：河川水、基底流出成分、雨水成分の安定同位体組成

このうち河川流量、河川水および雨水成分の同位体組成は降雨時に実測する。また基底流出成分中の同位体組成が降雨前、降雨時で変化しないと仮定すると、降雨前の河川水の同位体組成が基底流出成分の同位体

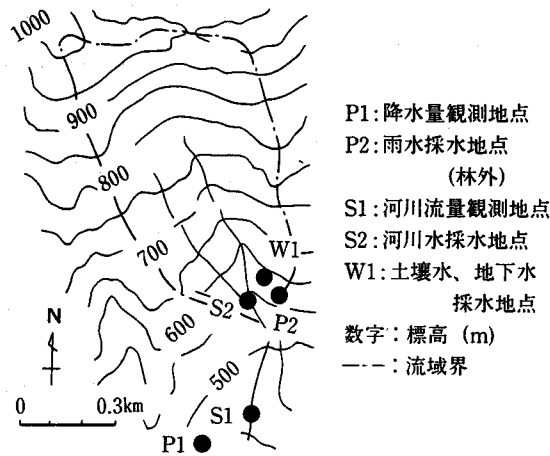


図-2 流域の地形および観測・採水地点

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 質	年 間	降 水 量	P 1	連 続 観 測
		河 川 流 量	S 1	連 続 観 測
		雨 水	P 1	連 続 観 測 (pH, ECのみ)
		土 壌 水	W 1	月 1 回
	降 雨 時	地 下 水	W 1	月 1 回
		河 川 水	S 2	月 1 回
		雨 水	P 2	2 ~ 3 時間
		河 川 水	S 2	1 5 分

組成となる。以上より河川流量の雨水成分、基底流出成分の比が求められる。河川流量の分離の指標としては D と ^{18}O が用いられるが、対象とした降雨の雨水成分と基底流出成分との差がより大きい ^{18}O を用いた。20℃の条件下で試料を二酸化炭素と同位体交換平衡にさせたのち、気相の二酸化炭素を分離し、質量分析装置 (Finnigan Mat 社, delta E) により計測した。組成の表示は標準平均海水 (SMOW) からの千分偏差値 ($\delta^{18}O$) で行う。測定精度は、標準偏差で示して0.05‰である。

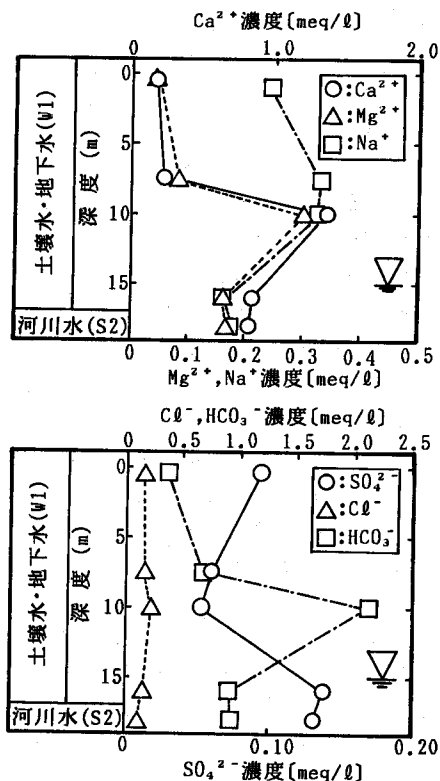
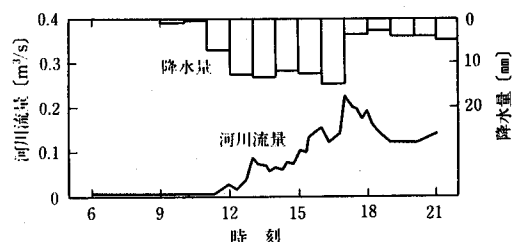
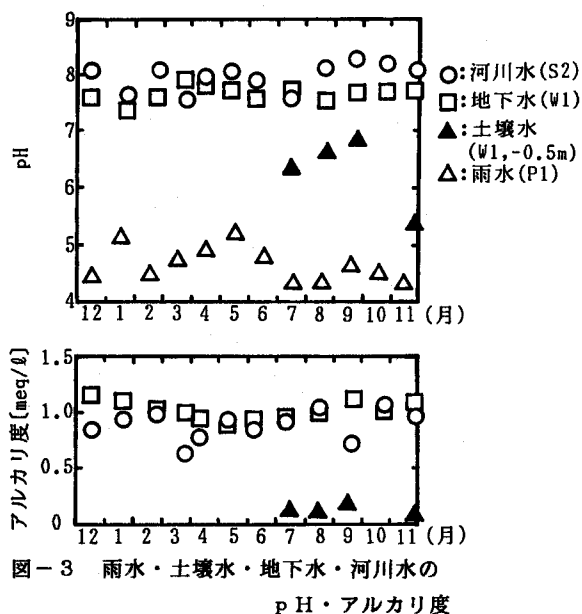
3. 調査結果

3.1 年間水質調査

昭和62年12月より63年11月にかけて実施した年間水質調査の結果(pH、アルカリ度)を図-3に示す。これより雨水が土壌、地下水層を経て河川へ流出する間にpHが上昇し、アルカリ度も増加しており、流域が酸性雨に対する緩衝能を持っていることがわかる。次に土壌水、地下水、河川水のイオン濃度の鉛直分布を図-4に示す。これより地下水は土壌水に比べ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- の濃度が高く、雨水が土壌層を流下する際にこれらの濃度が上昇していると考えられる。また各イオンとも地下水濃度と河川水濃度とがほぼ等しく、河川水の大部分は地下水が流出したものであると考えられる。

3.2 降雨時水質調査

対象としたのは昭和63年7月10日の降雨であり日降水量は103.5mmであった。降水量および河川流量の変化を図-5に示す。11時頃から10mm/hをこえる降雨があり、降雨前は約0.003m³/sであった河川流量が17時に



は約0.22m³/s にまで増加している。次に河川水の pH、イオン組成の変化を図-6、7 に示す。なお、HCO₃⁻ はアルカリ度より換算した。降雨により河川流量が増加すると河川水の pH、イオン濃度、アルカリ度 (HCO₃⁻) は低下する。

3.3 安定同位体組成による河川流量の分離

考察の対象とした降雨の雨水、河川水の同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$) の時間変化を図-8 に示す。河川水の $\delta^{18}\text{O}$ は降雨がない11時までにはほぼ一定である。降雨がない時間の河川水は降雨開始前から流域内に貯留されている pre-event water による基底流出成分のみよりなると考えられる。よって基底流出成分の $\delta^{18}\text{O}$ (R_1) は7時から11時までの河川水の平均値 -9.72[‰] で与えられる。この値と河川水、雨水の $\delta^{18}\text{O}$ の実測値 R_0 、 R_2 および河川流量の実測値 Q_0 を (1)、(2) 式に与えると河川流量を基底流出成分 Q_1 、雨水成分 Q_2 に分離できる。分離した結果を図-9 に示す。降雨強度が強くなるにつれ雨水成分、基底流出成分双方が増加し、17時には基底流出成分が河川流量の 64% (0.142m³/s)、雨水成分が 36% (0.081m³/s) となっている。

3.4 化学組成による検討

次に流域内で採水した雨水、土壌水、地下水、河川水試料のイオン組成を指標として水の移行およびそれに伴う水質変化を検討する。安定同位体組成と同様に流域内を流下し、混合する間にイオン組成が保存されると仮定すると (2) 式と同様に次式が成立する。

$$Q_0 C_0 = Q_1 C_1 + Q_2 C_2 \quad (3)$$

ここに C_0 : 河川水のイオン組成 (濃度)

C_1 : 基底流出成分のイオン組成 (濃度)

C_2 : 雨水成分のイオン組成 (濃度)

対象としたイオンは河川水中に比較的多く含まれる Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- の5種である。図-7 より明らかなように降雨前の河川水のイオン組成は $\delta^{18}\text{O}$ と同様にほぼ一定であり、これが基底流出成分のイオン組成であると考えられる。以上の値、雨水のイオン組成実測値および3.3で求めた基底流出成分、雨水成分を (3) 式に代入して河川水イオン濃度の計算値 C_0 を求め、実測値と比較した結果を図-10~14 に示す。図中の誤

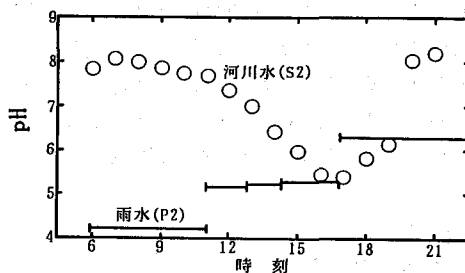


図-6 雨水・河川水 pH の経時変化

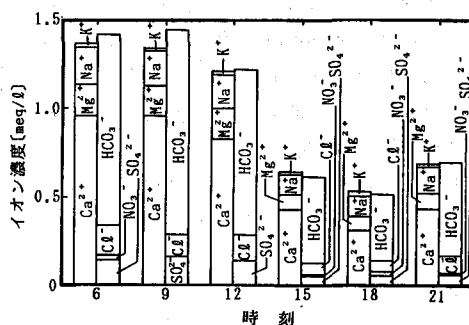


図-7 河川水イオン組成の経時変化

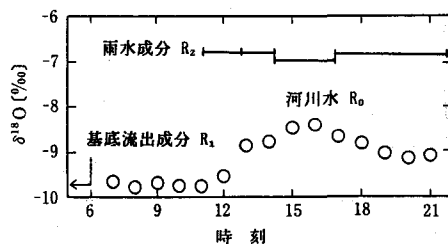


図-8 雨水・河川水同位体組成の経時変化

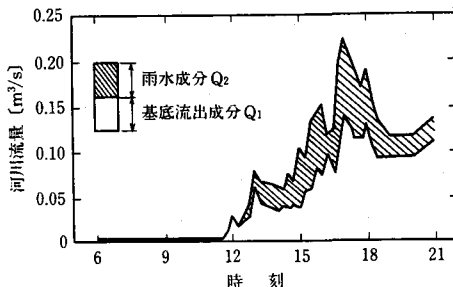


図-9 河川水の2成分分離結果

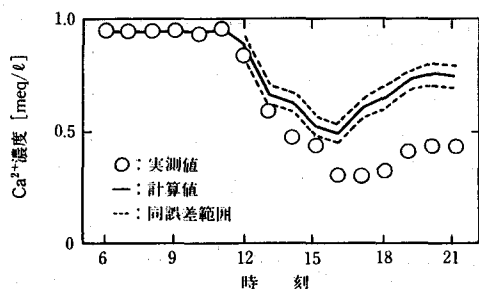


図-10 河川水 Ca^{2+} 濃度の実測値
および計算値

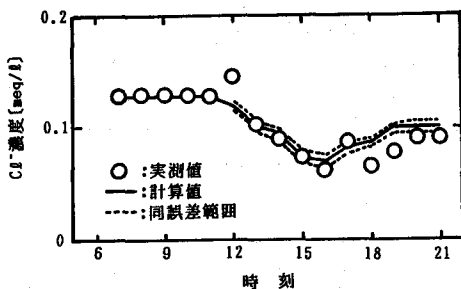


図-12 河川水 Cl^- 濃度の実測値
および計算値

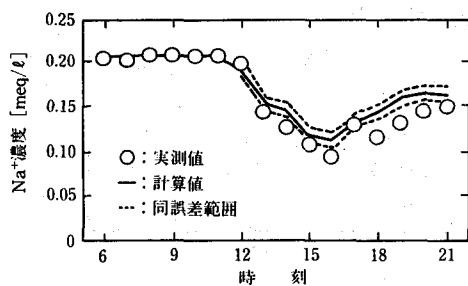


図-11 河川水 Na^+ 濃度の実測値
および計算値

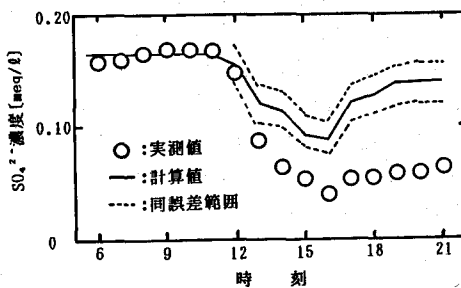


図-13 河川水 SO_4^{2-} 濃度の実測値
および計算値

差範囲とは同位体組成およびイオン組成の測定誤差により生じる計算値の幅を示す。その結果、 Na^+ 、 Cl^- は計算値と実測値がほぼ一致するが Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- はいずれも実測値が計算値を下回った。

3.5 基底流出成分の濃度変化についての考察

(3)式の変数のうち実測値は雨水成分のイオン濃度のみである。基底流出成分のイオン濃度は降雨前の河川水濃度より求め、降雨時にも変化しないと仮定している。基底流出成分は降雨前に流域内に貯留されていた水が流出するものであり、土壌水と地下水がある比率で混合したものと考えられる。

Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- の場合、図-4 に示すように土壌水濃度は地下水濃度にくらべて低く、基底流出成分中の土壌水と地下水の比率が変化すれば濃度も変化する。一方、 Na^+ 、 Cl^- は土壌水、地下水の濃度がほぼ均一であり、土壌水と地下水の比率が降雨時に変化しても濃度変化は小さい。従って降雨時に基底流出成分中の土壌水と地下水の比率が変化すると仮定すれば Na^+ 、 Cl^- については計算値と実測値が一致し、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- については一致しないことが説明できる。そこで基底流出成分の一部を土壌水に置き換えた場合の Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 濃度の計算値と実測値の比較を図-15-17 に示す。図中の土壌水比率は基底流出成分に対する割合である。また土壌水濃度は深度0.1m-1.0mの平均を用いた。図-15、17 より Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度を再現するためには降雨時の基底流出成分中の土壌水の比率が50%程度まで増加すると仮定すればよい。

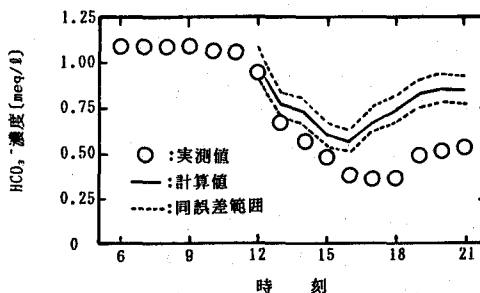


図-14 河川水 HCO_3^- 濃度の実測値
および計算値

しかし河川水の SO_4^{2-} 濃度は図-16 に示すように基底流出成分を全て土壤水で置き換えた場合でも十分に再現できず、またその場合には Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度の計算値が実測値を下回る。これより基底流出成分中の土壤水の比率をどのようにとつても河川水の Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 濃度を全て再現することは不可能であり、土壤水が河川へ流出する際には Ca^{2+} 、 HCO_3^- 濃度の上昇や SO_4^{2-} 濃度の低下などが生じていると考えられる。以上より降雨時の基底流出成分の濃度変化の原因として、① 土壤水が基底流出成分中に占める比率が増加する、② 河川に流出する際の土壤水イオン組成が変化する、が考えられる。このうち図-3 に示すように地下水に比べ酸緩衝能(アルカリ度)の小さい土壤水が河川へ流出することは降雨時の河川水の酸緩衝能の低下につながる。

4. まとめ

(1)面積 約0.5 km^2 の山地流域における降雨時の河川流量を 10^6 を指標として成分分離した。その結果、流量最大時の河川水の36%が雨水流出によるものであり、残り64%が降雨前に流域内に貯留されていた土壤水、地下水が流出したものと推定された。

(2)無降雨時の河川水の大部分は地下水の流出による。降雨時には土壤水の比率が増加し、雨水流出とともに河川水のイオン濃度および酸緩衝能低下の原因となっている。

(3)降雨時に河川へ流出する土壤水、地下水の Na^+ 、 Cl^- 濃度は流出時に変化しない。それに対して河川へ流出する土壤水、地下水の Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 濃度は流出時に変化していると考えられる。

これより河川水質および流域内の酸緩衝能は流域の化学条件と同時に降雨時の土壤水、地下水の流出を左右する水文条件(地形、植生、土壌の厚さ、透水性、保水性)の影響も受けると考えられる。

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, 下垣久, 宮永洋一, 大隅多加志; 電中研研究報告 U88079 pp.2-3, 1989
- 3) Sklash M.G. and Farvolden R.N.; The role of groundwater in storm runoff
J. Hydrology 43 pp.45-65, 1979

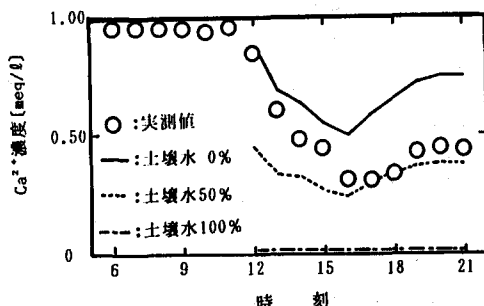


図-15 土壤水が流出した場合の
河川水 Ca^{2+} 濃度

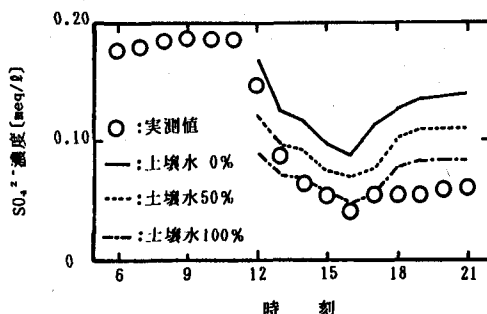


図-16 土壤水が流出した場合の
河川水 SO_4^{2-} 濃度

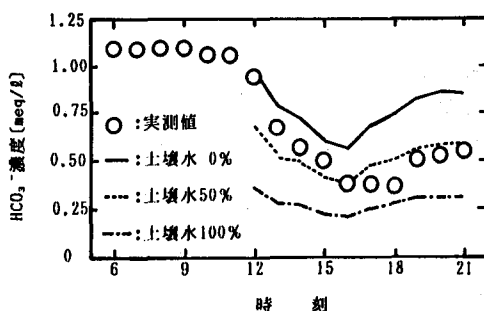


図-17 土壤水が流出した場合の
河川水 HCO_3^- 濃度