

山地小流域における渓流水質の変動特性

熊谷明子*・塚越剛史**・田中友理*・蔵治光一郎*

Changes of Stream Chemical Characteristics of Stream Water in Small Mountainous Watersheds

Akiko KUMAGAE*, Takeshi TSUKAGOSHI**, Yuri TANAKA* and Koichiro KURAJI*

I. はじめに

山地、特に森林域は河川の源流域であり、降雨から渓流水への水質形成過程において重要な役割を果たしている。森林が水質浄化機能、酸緩衝機能をもつことは広く知られている。このような機能を評価するためにも、森林域から渓流水に溶存して流出する主要溶存イオンの負荷量の推定が必要となる。流出負荷量を正確に推定するには、渓流水中の主要溶存イオン濃度が流量とどのような関係にあるかを把握する必要がある。そこで、本研究では千葉県南部に位置する東京大学農学部附属千葉演習林に設けた堂沢試験地において水質観測を行った。この試験地は人為の影響の少ない天然林であり、日本の2次林の多くが今後長い期間放置され天然林に近づいていくであろうことを考えると、天然林での観測は重要であると思われる。降雨時に溪流の流量および水質が大きく変動することに着目し、観測は降雨イベント時とその前後に対して行った。

II. 研究の背景

これまで、降雨イベントに伴う流量変動時の渓流水質の研究において、その変動特性の違いから溶存イオンのグループ分けが為されてきた。例えば、EDWARDS (1973) は、流出水量と濃度を両対数上で直線近似式を用いて表し、その傾きから次のような4つのグループに分けた。

- I. NO_3^- , SO_4^{2-} : 流量増加時に常に濃度上昇する。
- II. Mg^{2+} , HCO_3^- , PO_4^{3-} : 流量増加時に常に濃度低下する。
- III. Na^+ , K^+ , Cl^- : 前の2つの中間的な変動特性を示す。 K^+ は流量増加の初期に濃度増加が起きる。 Na^+ と K^+ は Cl^- とともに流出する。
- IV. Ca^{2+} , SiO_2 : 流量との相関はみられない。

Edwardsはこの関係が鉱物の溶解度と、その鉱物が流域堆積物のどの深さに存在するのか、との組み合わせから説明されると述べている。

平田・村岡(1988)は降雨終了後の流量遞減時の濃度に着目し、次の2グループに分けた。

- I. SiO_2 , Na^+ , Cl^- : 遞減時にほぼ降雨前の濃度レベルに回復する。
- II. NO_3^- -N, Ca^{2+} , K^+ : 遞減時に降雨前の値を上回る。

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻

* Department of Environment Science and Engineering, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology.

** 東京大学農学部附属演習林千葉演習林

** University Forest in Chiba, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo.

そして、この違いを降雨時に流出する中間流出成分の違いから説明した。基底流に比べ中間流出成分、つまり表層土壌で相対的に濃度の高い主要溶存イオンがIIであり、そうでない物質がIになる。そして、この土壌中の主要溶存イオン濃度の鉛直分布が森林での生物活動による物質循環と関わりがあると述べている。

OHRUI and MITCHELL (1998) は流量と濃度の相関でグループ分けした。

I. Ca^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} : 流量と正の相関

II. Na^+ , HCO_3^- , SiO_2 : 流量と負の相関

Iのグループでは SO_4^{2-} 以外の主要溶存イオンは土壌水中の濃度が渓流水中の濃度より高く、IIのグループでは土壌水中の濃度が渓流水中の濃度より低い値を示した。そのため、降雨時の渓流水中の濃度変動は土壌水が流出し、渓流水と混合した結果であると述べている。

3つの研究例を挙げたが、流量との関係が流域によって同じ主要溶存イオン、異なる主要溶存イオンがあった。これは、渓流の水質がその流域の地質や生物活動などの影響を受けており、流域による差が現れたためである。しかし、概して、降雨時の渓流水の濃度変動は主に①平水時の渓流水(深部の飽和地下水帯からの流出)、②中間流出水(降雨によって飽和帯が拡大して生じる表層土壌部からの流出)、および③河道へ直接流入する降雨、の混合によって起きるといえる。

III. 試験地と研究方法

3-1. 試験地の概要

観測は千葉県南部に位置する東京大学農学部附属千葉演習林内の小流域、堂沢試験地にて行った。試験地流域の位置を図1、地形図および観測位置を図2に示した。試験地の流域面積は1.37 ha、標高159~253 m、植生は林齢300年以上のモミ・ツガ天然林である。同試験地の地質は新第三紀鮮新世の安野互層である。

3-2. 研究方法

同試験地において1998年6月、7月、10月の3回の降雨イベント時と、その前後に林外雨、林内雨(6月降雨イベント除く)、渓流水の採水を行った。

林外雨, 林外雨量: 試験地内が森林に覆われているため、南に約200 m離れた露場にバルクサンプラーを設置した。バルクサンプラーはポリエチレンボトル(10リットル)の頭頂部に漏斗(直径21 cm)を取り付けたものである。これは、塗装によって遮光処理をしている。降雨イベント前にこのバルクサンプラーを設置し、降雨終了後に、貯留された雨水の水量を測った後に採水した。この水量を設置期間中の林外雨量とした。また、林外雨観測地点付近に設置した転倒マス雨量計による林外雨量のデータも用いた。

林内雨, 林内雨量: 林外雨と同じくバルクサンプラーを用いて観測を行なった。頭上の林冠は亜高木層がサカキおよびヒサカキ、高木層がツガである。尚、6月の降雨イベントでは林内雨の観測は行わなかった。

渓流水: 試験流域最下点に設置した量水堰の上流部にて採水した。

渓流水の流量: 圧力式自記水位計(コーナーステム株式会社製KADEC-MIZU)を用いて、三角量水堰の越流水位を5分ごとに自動記録した。これを実測水位によって補正した。また、流量の実測によって水位-流量換算式を導出し、自動記録した水位データを流量に換算した。尚、量水堰設置地点では基岩が露出しており、堰の下を通る顕著な浸透流はないと思われる。

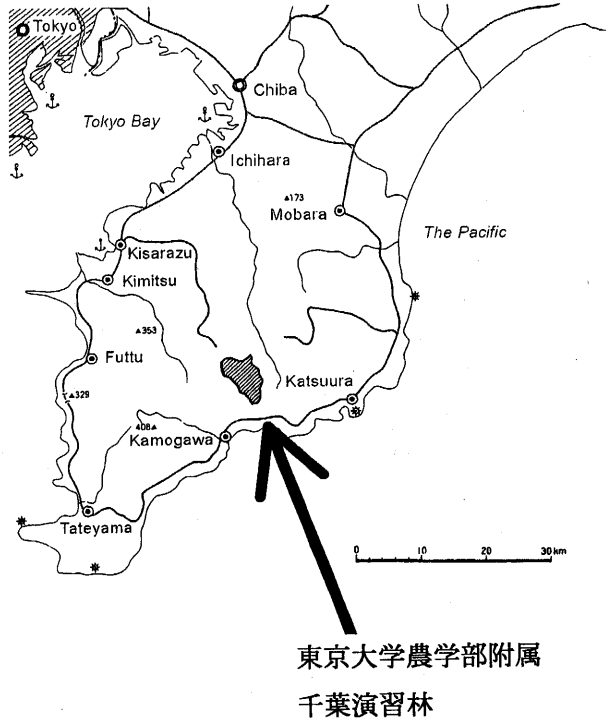


図1 対象流域

Fig. 1. Location of study area.

採水したサンプルは全て現地で水量（林外雨，林内雨），EC，pH，水温を測定し，100 ml 容のポリエステル容器いっぱい採水して持ち帰った。その後実験室にて孔径 $0.2 \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過した後，イオンクロマトグラフ（島津 PIA-1000）を用いて主要溶存イオン濃度を分析した。分析した主要溶存イオンは以下の通りである。

カチオン… Na^+ ， K^+ ， Mg^{2+} ， Ca^{2+}

アニオン… Cl^- ， NO_3^- ， SO_4^{2-}

IV. 結 果

4-1. 降雨イベントの特徴

観測した降雨イベントの特徴について述べる。各イベントの降雨と流量との関係を図3，図4，図5に示した。また，9月の降雨が10月の降雨イベントに影響を及ぼしたと考えられるため，9月の降雨状況についても述べる。

6月降雨イベント観測

観測期間1998年6月3～4日で総降雨量45.5 mm，最大降雨強度6 mm/hourであった。降雨開始から1～3 mm/hour程度の降雨が続き，流量は階段状に上昇したが，最後の降雨ピーク時に流量もピークを示し，降雨終了後には緩やかに低下していった。流量の変動は約6～340 l/s/km²であった。イベント前は5日前に42 mm，7日前に103.5 mmの降雨があり流域は湿潤

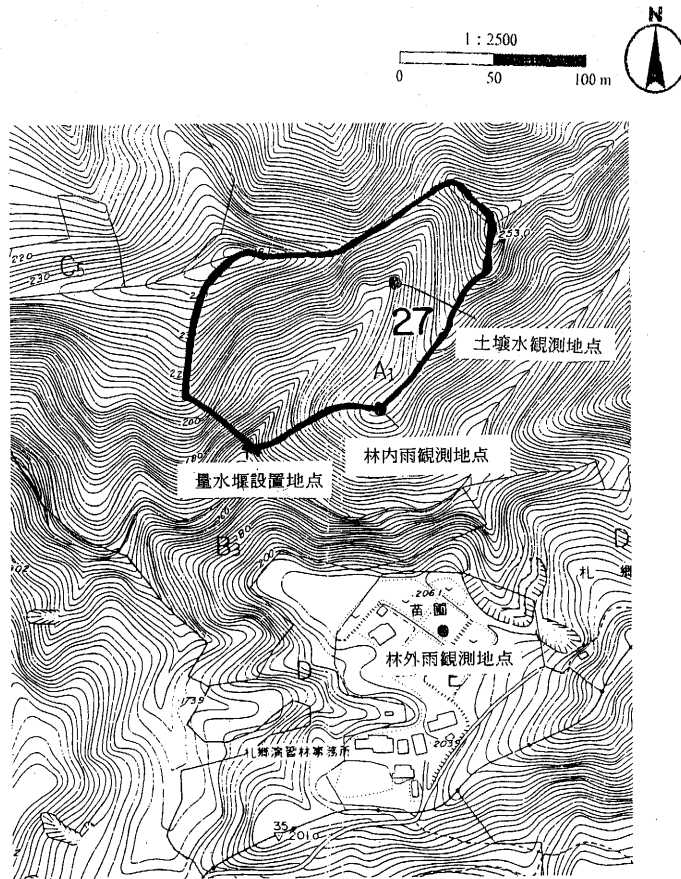


図2 観測サイト位置図

Fig. 2. Location of measurement sites.

な状態であった。

7月降雨イベント

観測期間 1998年7月15日から7月18日、総降雨量162 mm、最大降雨強度38 mm/hourであった。降雨開始後2時間で58 mmもの降雨があり、雨量、流量ともにピークに達した。その後、降雨強度の減少とともに流量も減少した。この降雨開始から12時間のあいだに流量は約1-4700-180 l/s/km²と非常に大きく変動し、鋭い流量ピークを形成した。その後の降雨に対しても流量の増加は起きたが、全体としては緩やかに変化した。そして、降雨開始から40時間後に緩やかな2番目のピークが現れた。イベント前は23日間も目立った降雨がなく、流域は非常に乾燥した状態であり、基底流のみが流出していたと考えられる。

10月降雨イベント

観測期間 1998年10月16日から20日、総降雨量38 mm、最大降雨強度6 mm/hourであった。降雨初期に強度の強い降雨が間隔を空けて降ったために、2こぶの形をしたピークをもつ。その後、降雨開始から32時間後に3番目の流量ピークが現れた。総降雨量の最も少ないイベン

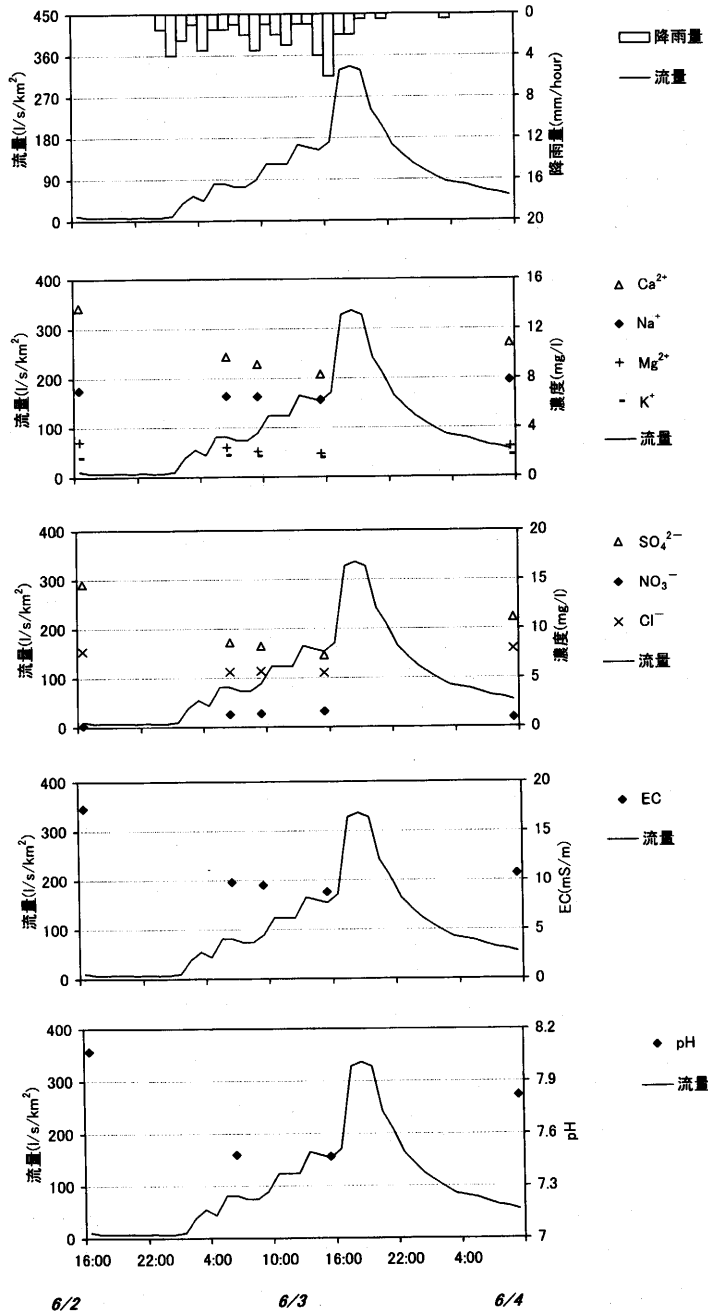


図3 降雨イベントにおける渓流水の濃度変動—6月

Fig. 3. Time series of solute concentrations in streamwater in June rainfall event.

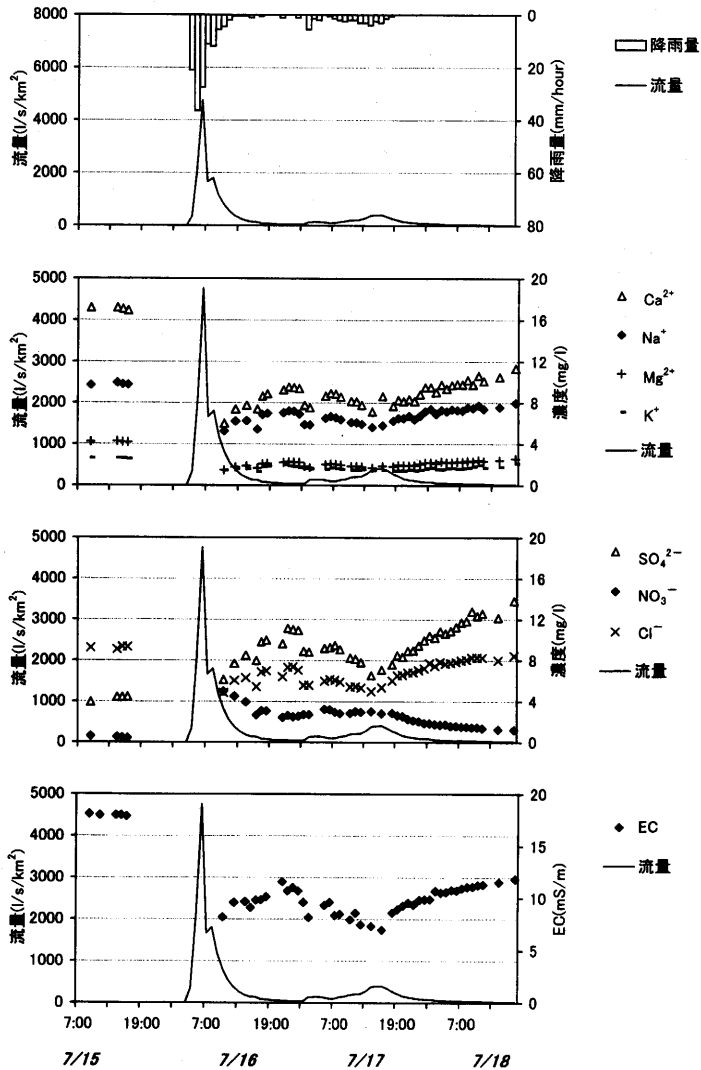


図4 降雨イベントにおける渓流水の濃度変動—7月

Fig. 4. Time series of solute concentrations in streamwater in July rainfall event.

トであるためか、流量の変動も $1.5 \sim 140 \text{ l/s/km}^2$ と3降雨イベント中最も少なかった。その1ヶ月前から台風が何度かあったが、イベント前の目立った降雨は15日前の65.5 mmの降雨であった。しかし、3日前に11 mmの降雨があり、流域は乾燥はしていなかった。以上をまとめると表1のようになる。

9月の降雨

台風による降雨が4回（降雨量19.5, 113.0, 13.5, 43.5, 34.5 mm）、低気圧による降雨が1回（降雨量54.5 mm）、秋雨前線による降雨が1回（降雨量29.0 mm）と、1ヶ月で300 mm以上の降雨があった。

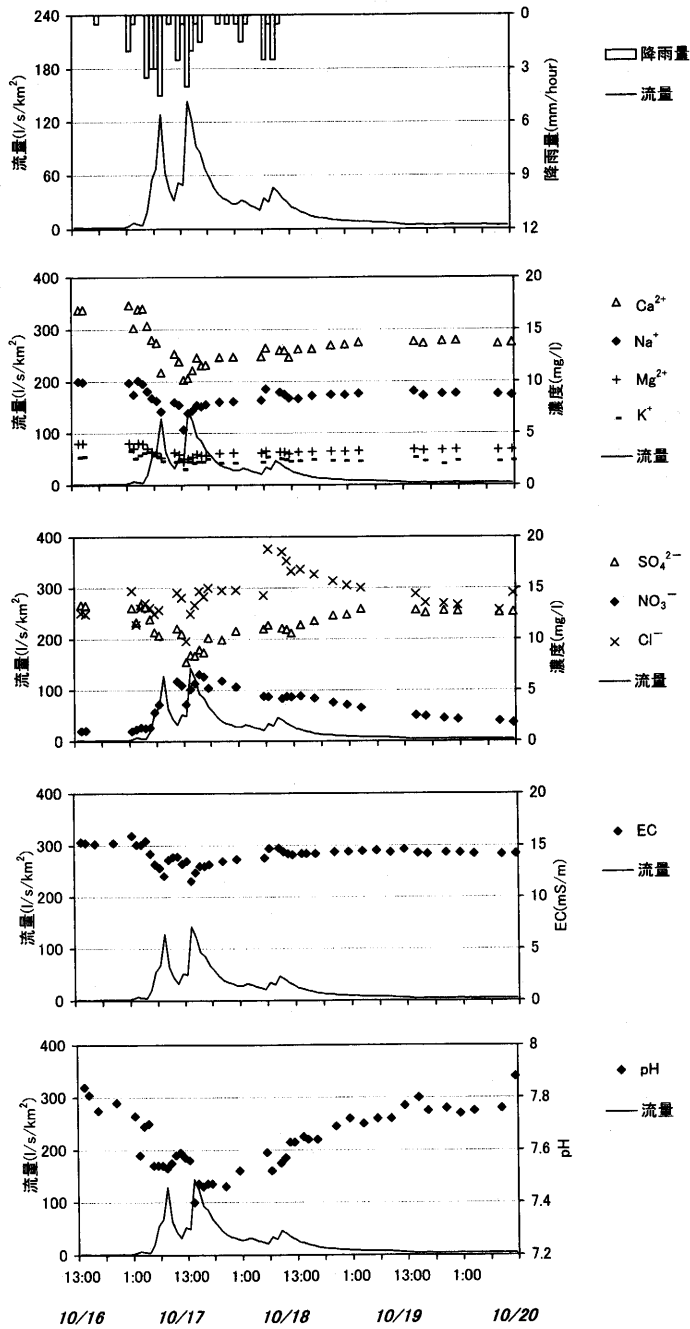


図5 降雨イベントにおける渓流水の濃度変動—10月

Fig. 5. Time series of solute concentrations in streamwater in October rainfall event.

表1 降雨イベントの特徴

Table 1. Characteristics of rainfall events

降雨イベント	観測期間	種類	降雨			溪流	林外雨水質			林内雨水質		
			総降雨量 (mm)	最大強度 (mm/hour)	持続時間 (hour)	降雨直前流量 (l/s/km ²)	pH	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	pH	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)
6月	1998/6/3,4	低気圧	45.5	6	19	11	5.05	0.8	0.6	—	—	—
7月	1998/7/15-18	梅雨前線	162.0	38	40	1	4.84	0.5	0.4	4.68	1.5	2.8
10月	1998/10/12-20	台風の前線	38.0	5	33	2	4.77	4.2	8.0	5.93	15.0	30.8

4-2. 降雨イベントにおける渓流水の濃度変動

各降雨イベントごとに渓流水の時系列変動に着目した結果を示す。

6月イベント

降雨イベント時の渓流水中の主要溶存イオン濃度、EC および pH の変動を図3に示す。

Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻: 流量が増加するとともに濃度は減少し、降雨終了後、濃度は回復していった。濃度変動（降雨前-濃度最小値-降雨終了14時間後 mg/l）は Na⁺（7-6-8 mg/l）、Mg²⁺（2.8-1.9-2.5 mg/l）、Ca²⁺（14-8-11 mg/l）、Cl⁻（8-6-8 mg/l）、SO₄²⁻（15-7-11 mg/l）となった。なお、濃度最小値は降雨開始後15時間後の、最後の流量ピーク前の観測時であった。

K⁺: 明確な変動は表れなかった。

NO₃⁻: 流量の増加とともに濃度が上昇したが約0.5~1.8 mg/lと変動は少なかった。

EC: 流量の増加とともに減少した。変動は（17-9-11 mS/m）であった。

7月イベント

降雨イベント時における濃度、EC の変動を図4に示す。

Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻: 流量増加にあわせて濃度減少、流量減少にあわせて濃度増加、という流量と逆位相の関係を示した。濃度の最小値は最初の流量ピーク時であると思われるが、観測できなかったため、濃度最小値は降雨開始から6時間後の観測時のものであった。また、2番目の流量ピーク時の濃度の値も低く、濃度最小値とほぼ同じ値を示した。濃度の変動はそれぞれ（降雨前-濃度最小値-降雨終了22時間後）で Na⁺（9.7-6-7.9 mg/l）、K⁺（2.7-1.5-2.1 mg/l）、Mg²⁺（4.2-1.5-2.6 mg/l）、Ca²⁺（17.2-6.0-11.3 mg/l）、Cl⁻（9.2-4.9-8.5 mg/l）となった。Cl⁻は最も濃度回復が早かった。反対に濃度回復の遅いものは Mg²⁺ と Ca²⁺ であり、流量に対する変動も大きかった。

NO₃⁻: おおむね流量の増加に対し濃度は上昇していた。濃度最大値は同じく降雨開始から6時間後で、濃度変動は（0.6-5.0-1.2 mg/l）であった。

SO₄²⁻: 流量の増加時には濃度減少するものの、流量の逡減時には常に流量ピーク前の濃度より高くなっていった。よって濃度最小値は降雨前の値3.9 mg/lであった。濃度最大値は降雨終了から22時間後、最後の観測時で13.9 mg/lと、降雨前の3倍以上の値をとった。

EC: 流量の増加にもなって減少している。最小値は2番目の降雨ピーク時である。ECの変動は（18.1-7.0-11.8 mS/m）であり、回復も遅かった。これは主に Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ などのミネラル類の変動が影響していると思われる。

pH: pHは測定機器の故障により、正確な観測をすることができなかった。

表2 使用データ一覧
Table 2. List of using data

名称	内容	観測日
6月	6月降雨イベント	1998/6/3, 4
7月降雨前	7月降雨イベントの前	1998/7/6-15
7月	7月降雨イベント	1998/7/15/18
9月	週一回観測したデータ	1998/9/9, 16, 22, 30
10月降雨前	10月降雨イベント前	1998/10/6-9
10月	10月降雨イベント	1998/10/12-20

10月イベント

降雨イベント時の濃度、EC、pHの変動を図5に示す。降雨量が少ないこともあり、7月ほど明確な変化はなかった。

Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} : 流量と逆位相の濃度変動をしていた。濃度最小値は2番目の流量ピーク時のものである。観測は降雨終了49時間後まで行なった。濃度変動(降雨前-濃度最小値-降雨終了49時間後)はそれぞれ Na^+ (10-5-9 mg/l), K^+ (2.7-1.5-2.2 mg/l), Mg^{2+} (4-2-3.5 mg/l), Ca^{2+} (17-10-14 mg/l), SO_4^{2-} (13-8-13 mg/l)である。濃度の回復の遅いものは Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} であった。 SO_4^{2-} は回復は極めて早く、7月と異なりイベントの前後での濃度変動はなかった。

NO_3^- : 流量と位相のずれはあるものの、おおむね流量の増加に対し濃度も上昇していた。濃度が最高値を示したのは2番目の流量ピーク時の2時間後であった。濃度変動は(1-6-2 mg/l)と他の主要溶存イオンに比べ、それほど回復は早くなかった。

Cl^- : 7月のイベントとは異なる。降雨前の濃度は12 mg/lであった。しかし、降雨時に一時的に濃度が低下するものの全体としては濃度は上昇しており、最後の降雨ピーク時に最大値19 mg/lとなった。降雨が終了すると約24時間で13 mg/lまで減少した。

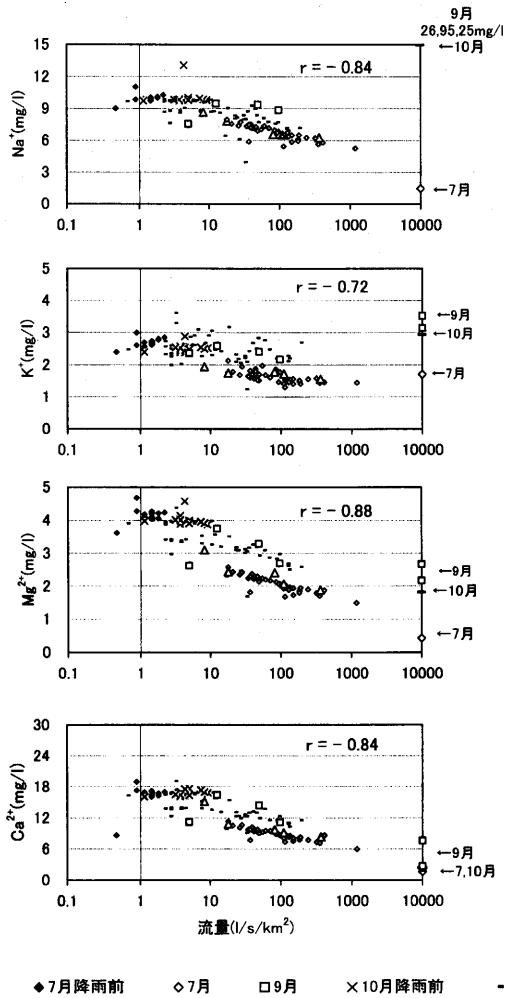
EC, pH: どちらも流量に対して逆位相の変動を示した。ECの変動は(15-12-14 mS/m)である。しかし、3番目の流量ピーク時にECでは正のピーク、pHでは負のピークが現れた。どの主要溶存イオン濃度もこのときに正のピークを示しているが、その中でも Cl^- の濃度上昇が大きく、この影響がpHに現れていると考えられる。他に、この時濃度が上昇したのは Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} であった。これらの主要溶存イオンの、このイベントでの林内雨中の濃度は Ca^{2+} を除いて通常より高く、海塩を含んでいたと思われる。3番目のピーク時にはこのような海塩を含む土壌水もしくは林内雨の影響が現れていたと考えられる。

4-3. 流量と溶存イオン濃度の関係

前節では降雨イベント時における物質の時系列変動についての結果を示した。この結果、それぞれ物質ごとに流量に対してある傾向が表れた。そこで、それぞれの物質の濃度と流量の関係に着目した。図6, 7, 8に結果を示す。また、グラフ中に相関係数 r の値を示した。右の軸にはそれぞれ観測時の林内雨の濃度を渓流水と同じマーカーで表した。(6月を除く)

使用したデータの一覧を表2に示す。

Na^+ : 相関係数は $r = -0.84$ と流量と負の相関が高かった。ばらつきは少なく、流量変動に対す



- 1) 図中のrは相関係数を表す。
- 2) 右軸には林内雨の濃度をプロットしている。

図6 流量と濃度の関係

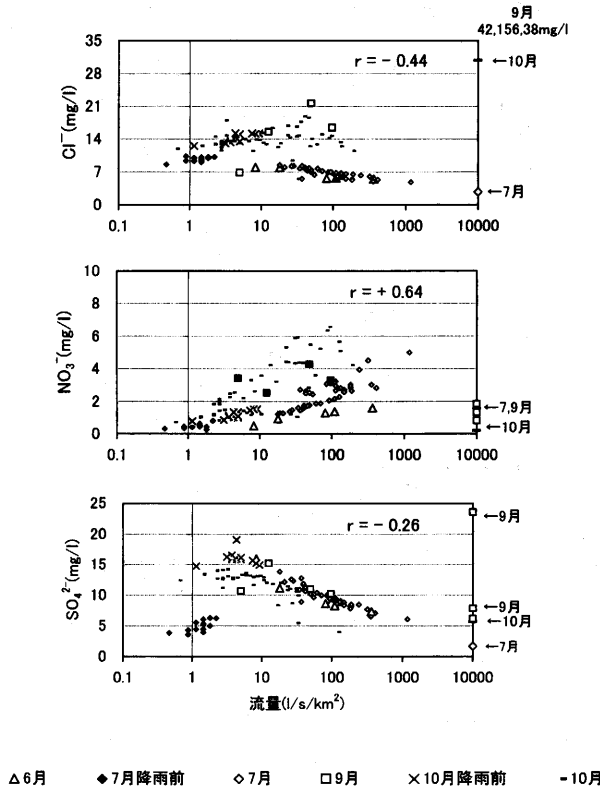
Fig. 6. Relationships between discharge and concentration of stream.

る傾きも緩やかであった。9, 10月の林内雨の濃度は15~96 mg/lと、渓流水の濃度4~13 mg/lに比べ高濃度であったが、渓流水の濃度が特に高くなるということとはなかった。

K⁺: 相関係数は $r = -0.72$ と流量と負の相関がみられるもののばらつきがとても大きい。また変動幅も小さい。高流量で濃度の底打ちが起きている。

Mg²⁺, Ca²⁺: Mg²⁺とCa²⁺は流量との関係が非常に似ていた。相関係数はそれぞれ $r = -0.88$, $r = -0.84$ と負の相関が高かった。Ca²⁺の方が変動幅は大きい。

Cl⁻: 全体では相関はなかった。しかし、6, 7月と9, 10月に分けてそれぞれ相関をとると、相関係数は6, 7月では $r = -0.91$ と非常に負の相関が高かったが、9, 10月では $r = 0.12$ と正の値



- 1) 図中のrは相関係数を表す。
- 2) 右軸には林内雨の濃度をプロットしている。

図7 流量と濃度の関係

Fig. 7. Relationships between discharge and concentration of stream.

をとった。9, 10月は台風の運んだ海塩の影響で林内雨の濃度が非常に高くなっていた。10月で流量との相関が正の値を示したのは、この林内雨の影響を受けていると考えられる。

NO₃⁻: 相関係数 $r=0.64$ であり流量と正の相関がみられるが、7月よりも10月は傾きが大きかった。そこで、6, 7月と9, 10月とでそれぞれ相関をとると6, 7月が $r=0.87$, 9, 10月が $r=0.78$ となった。9, 10月ではばらつきが多いためか若干低い相関を示した。

SO₄²⁻: 他の主要溶存イオンとは全く異なる関係を示し、2つの部分に分けることができた。一方は、観測データの大半部分で流量との間に負の相関があった。もう一方は7月の降雨前のもので $0.5\sim 2.2$ (l/s/km²)の低流量時に、濃度が $3\sim 7$ mg/lと低い部分である。相関係数をとると全体では $r=-0.26$ と低い相関であるが、上記の2部分に分けると前者では $r=-0.82$ と高い負の相関を示し、後者では $r=0.66$ と正の相関を示した。

ANC: 本論文ではANC (Acid Neutralization Capacity) を、分析した主要溶存イオンのカチオン合計濃度からアニオン合計濃度を差し引いたものとする。本試験地の渓流水のpHはおおむね $7\sim 8$ で、H⁺, OH⁻の濃度は小さいため、ANCは近似的にHCO₃⁻の濃度を表す。HCO₃⁻は地中でCO₂が水に溶けることにより生成する。そのため、溶存HCO₃⁻イオン濃度が高いほどその

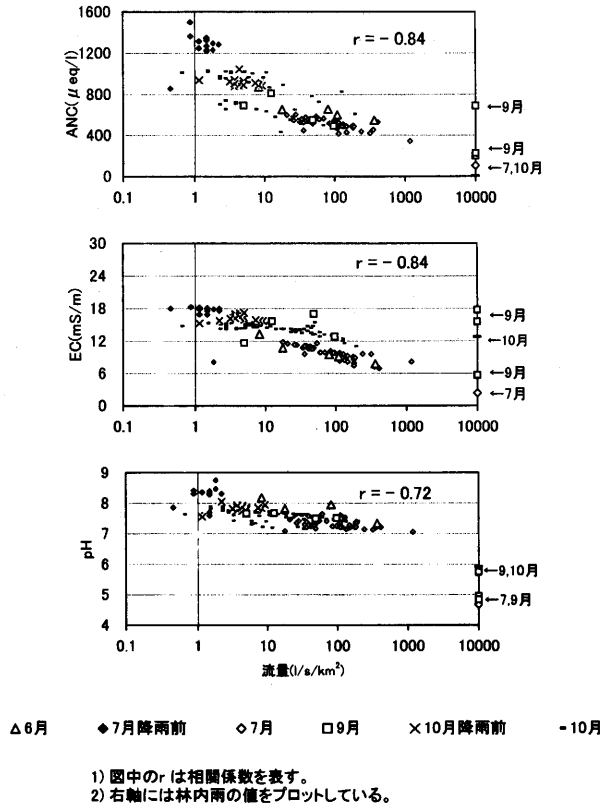


図8 流量と ANC, EC, pH の関係
Fig. 8. Relationships between discharge and ANC, EC, pH of stream.

水の地中での滞留時間も長いと考えられる。流量との関係をみると相関係数 $r = -0.84$ と負の相関を示しており、高流量時には地中での滞留時間の短い水や、地中を通らない水が溪流に流入していることがわかる。

EC: 流量との間に $r = -0.84$ と高い負の相関があった。9月、10月の林内雨の EC は 6, 7月の 1~3 (mS/m) に対し、13~18 (mS/m) と高い値を示したがその影響はあまり現れてはいなかった。

pH: 流量に対し $r = -0.72$ と負の相関を示した。林内雨の pH 値が 4.5~6.0 なのに対し、渓流水の pH 値は 7.1~8.9 であった。渓流水中の主要溶存イオンの濃度が高流量時に林内雨の濃度レベルに低下するのに対し、渓流水の pH は降雨時にもあまり変動しないといえる。このことから、森林域に効果的な酸の緩衝機能があることがわかる。

V. 考 察

第2章にて述べたように、主要溶存イオンを降雨時の渓流水濃度変動の違いからグループに分けるという研究がいくつか報告されている。そこで本研究においても流量に対する渓流水の濃度変動の違いから4つのグループに分類した。そして他の研究のグループ分けとの比較をおこなっ

表3 流量と濃度の関係による溶存イオンのグループ分け

Table 3. Groups devided by the relation between discharge concentration of stream chemistry

流域	I 流量と正の相関	II 流量と負の相関	III 中間的	IV 降雨によって異なる	V 相関なし	文献
堂沢	NO ₃ ⁻	Na ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺	K ⁺ ¹⁾	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	—	本研究
Norfolk, England	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻	Na ⁺ , K ⁺ , Cl ⁻	—	Ca ²⁺ , SiO ₂	EDWARDS (1973)
北川	—	—	K ⁺ ¹⁾	—	Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻²⁾	國松 (1986)
からみ谷	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	—	—	K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺³⁾	國松 (1986)
麻生川	NO ₃ ⁻	Mg ²⁺ , Ca ²⁺	—	—	K ⁺ , Cl ⁻²⁾	國松 (1986)
大谷山	K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , NO ₃ -N	Na ⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻	—	—	—	OHRUI and MITCHELL (1998)
筑波	SO ₄ ²⁻ -S, H ⁺ K ⁺ , Ca ²⁺ , NO ₃ -N ⁴⁾	SiO ₂ Na ⁺ , Cl ⁻ , SiO ₂ ⁵⁾	—	—	—	平田・村岡(1988)

1) 濃度の変動が小さく、やや負の相関。

2) ばらついている。Cl⁻ は安定。

3) ばらついている。

4) 遞減時に濃度上昇。

5) 遞減時に濃度減少。

た。(表3)

また、考察に当たり各水文過程での主要溶存イオンの濃度を比較するため、7月と10月の降雨イベントそれぞれに対し林外雨、林内雨、土壌水、渓流水の濃度分布を表す図を図9、図10に示す。

これらの図中の土壌水データは別の目的で測定されたもので、東京農工大学大学院岡崎研究室の齊藤隆氏から生データを頂いた。このデータは1997.8.19~1997.8.31の間に月一回、10, 20, 30, 50 cm 深の土壌水を観測したものである。ここでは、深さ別の年間平均値を使用した。観測期間が異なるが参考のために使用した。尚、渓流水の括弧内の値は堰の越流水深(mm)であり、表記の簡略化のために用いた。「渓流水(0-20)」は越流水深が0~20 mm であるときの渓流水を表す。

I. NO₃⁻: 流量と正の相関

NO₃⁻ は流量の増加に伴って渓流水中の濃度が上昇した。平水時の渓流水中の濃度および林内雨中の濃度が低く、降雨時の濃度上昇は土壌からの流出によって起きていると推察される。窒素は有機物の分解・硝化・脱窒・植物による吸収など生物活動に利用されており、その関わりは強い。そのため、渓流水への流出は少なく、土壌中にNO₂⁻ やNO₃⁻ などの形態で多く蓄積している。よって、降雨によって飽和帯が拡大し、表層土壌部からの流出が起きると大量に流出してくるため渓流水の濃度が上昇すると考えられる。

表2からわかるように、他の流域でもNO₃⁻ が流量と正の相関を示すという報告は多くある。平岡・村田(1988)は土壌水の濃度および褐色森林土壌の窒素含有量の鉛直分布を観測した結果、どちらも表層付近で高い値をとった。また、NO₃⁻ の流出に関する研究では、木平ら(1997)が降雨に伴う渓流水のNO₃⁻ 濃度とδ¹⁵N 値の変動を測定している。渓流水濃度は流量と正の相関をもつが、濃度上昇期と低下期でδ¹⁵N 値が異なったことから、濃度上昇期は降雨に伴い表層土壌中のNO₃-N が溪流へ流出し、濃度低下期で降雨によって形成された飽和帯内で脱窒が起きていると

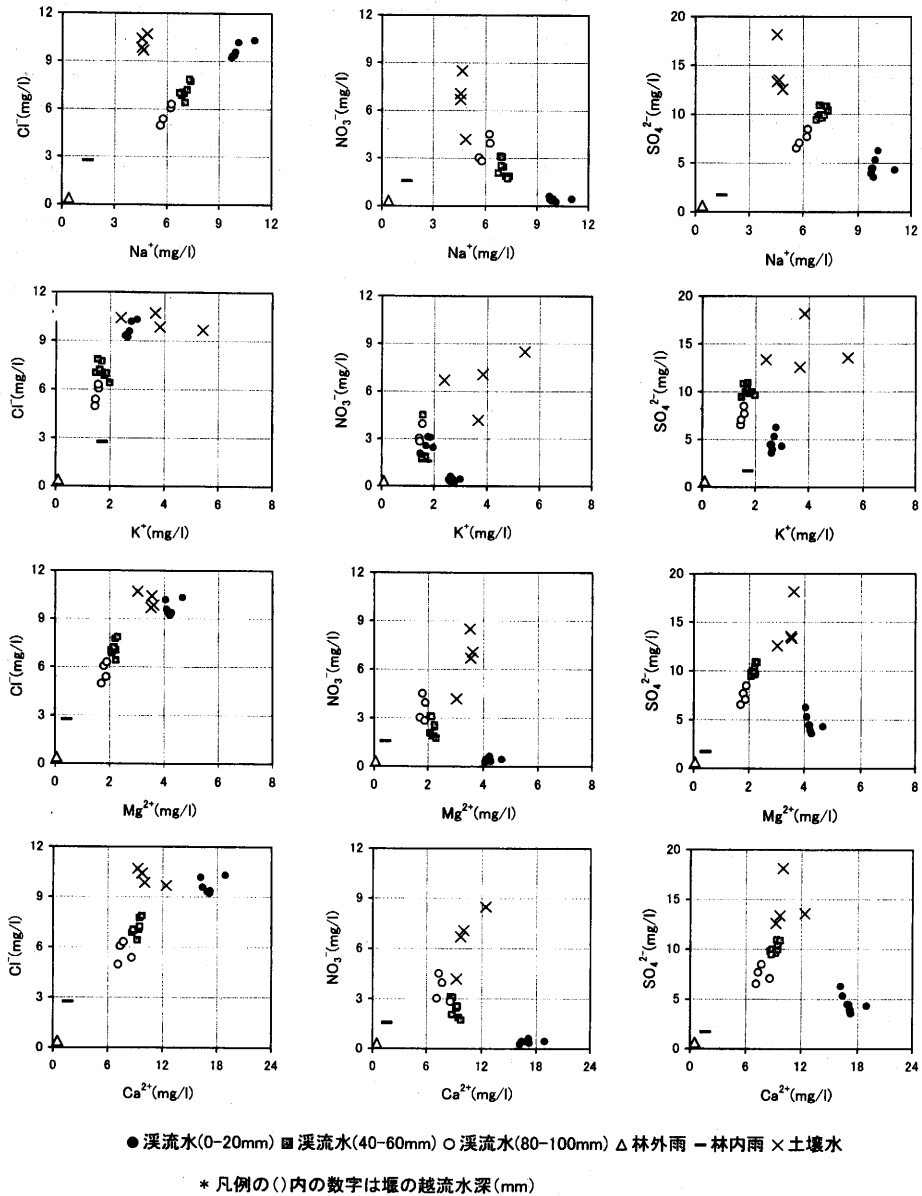
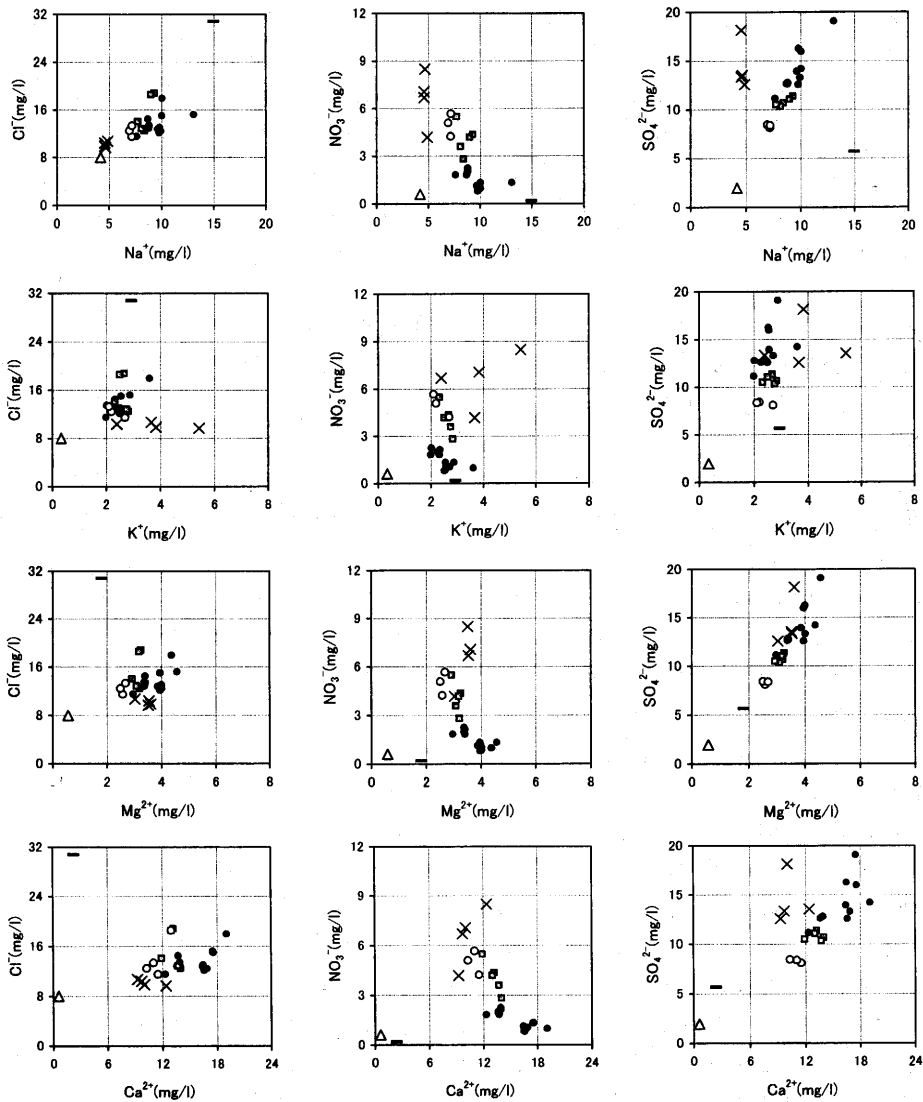


図9 林外雨・林内雨・土壌水・渓流水の濃度分布—7月降雨イベント

Fig. 9. Distribution of concentrations in rainfall, throughfall, streamwater—rainfall event in July.

説明した。

また、本研究では6,7月と9,10月の観測で相関係数および、流量変動に対する濃度変動の傾きが異なった。NO₃⁻は生物活動に強く影響される物質であり、夏季に土壌水濃度が高まることが知られている。黒田・田淵ら(1989)はL-Q式が季節によって変化し、秋季に傾きb,切片a共に最も高い値をとることを示した。このような、NO₃⁻の季節変化の影響であることが考えられ



● 渓流水(0-20mm) ■ 渓流水(40-50mm) ○ 渓流水(60-80mm) △ 林外雨 - 林内雨 × 土壤水

* 凡例の()内の数字は堰の越流水深

図 10 林外雨・林内雨・土壤水・渓流水の濃度分布—10月降雨イベント

Fig. 10. Distribution of concentrations in rainfall, throughfall, streamwater—rainfall event in October.

る。また、10月の降雨イベント前は7月の降雨イベント前に比べ流域が湿潤な状態であったため、より表層土壌部からの流出が起きやすかった、ということも考えられる。このように、季節変化および流域の湿潤条件の影響が示唆された。

II. Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} : 流量と負の相関

これらの物質は基岩の風化を起源にもっている。生原(1994)は、生態系にとって最も良く知られた化学的風化の機構として炭酸風化を挙げている。炭酸風化は土壤中に炭酸が形成されることによって起き、石灰岩からは Ca^{2+} と HCO_3^- が、ケイ素岩石からは Na^+ と HCO_3^- を放出するなど、鉱物の構成元素と HCO_3^- を放出する反応である。そのため、 HCO_3^- イオン濃度は化学風化の度合いを示す指標となる。前章で ANC は流量と負の相関がみられ、流量が高いほど風化の度合いの少ない低濃度の水(中間流出+表面流出)が流出していることがわかる。この水によって希釈を受け渓流水の濃度が低下すると考えられた。

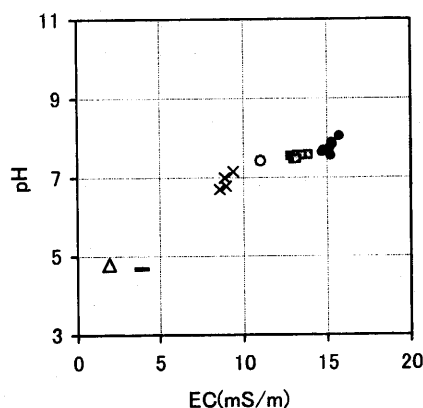
他の流域と比較すると、 Na^+ が流量に対し負の相関をもつという例は多い。それに対し、 Mg^{2+} , Ca^{2+} は流域によって異なる報告がされている。例えば、大類(1992)は K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NO_3^- などは樹体に吸収されたり、微生物による無機化作用によって生成されるプロトンとイオン交換反応によって流出するなど生物的活動に影響されやすく、生物活動の最もさかんに行われている表層土壌においてより多く存在するため、渓流水よりも土壌水の方が高濃度である。このために降雨によって生じる表層土壌部からの流出によって渓流水中の濃度が上昇する、と説明した。また、リターの無機化も起源にもつなど、 Mg^{2+} , Ca^{2+} には“土壌より深部での基岩の風化という起源”と“表層土壌部での生物活動に関わる起源”と主要な起源を表層土壌部と土壌より深部の部分と両方にもつ。このため、流域による生物活動や基岩の違いが影響し、これらのバランスにより渓流水と土壌水の濃度の高低が決まると考えられる。そのため、流域によって流量に対して異なる変動を示すと考えられる。本研究では、流量と負の相関をとるという観測結果になったが、 Mg^{2+} , Ca^{2+} の土壌水中の濃度は季節変動が大きいと予想され、季節によって異なる変動を示す可能性がある。

III. K^+ : 流量に対する相関が小さい

林外雨から林内雨での濃度の上昇が大きく樹体からの溶脱や樹体に補足された物質の洗脱の影響が示唆される。その後、渓流水への濃度の変化は小さい。 K^+ も生物学的な、放出・吸収反応の影響が大きい主要溶存イオンである。 NO_3^- ほど土壌水、渓流水、林内雨の濃度の差が小さいため、降雨時に大きな濃度変動はないと考えられる。実際、渓流水の濃度は林内雨レベルの濃度まで低下すると底打ちになっていた(図6)。また、渓流水の流量に対する濃度のばらつきは土壌水中の濃度のばらつきを反映しているものと思われる。他の地域でも流量に対して大きな変動はみられないという報告がされている。また、流量と正の相関をもつという報告もあり、その地域の生物活動や基岩の違いなどが反映されていると考えられる。

IV. Cl^- , SO_4^{2-} : 降雨イベントによって異なる

Cl^- : 先に6,7月についてのみ考察する。図9, 図10より、7月は林外雨から林内雨で約1~3 mg/l とやや濃度の上昇がみられる。海塩のような乾性沈着物の影響の多い地域では、樹体に補足された物質の洗脱の影響が考えられる(大類ら, 1995)。 Cl^- は土壌から溪流への過程で生物的、化学的变化をほとんど受けないため、渓流水への濃度上昇は水分蒸発による濃縮であると考えられる(大類ら, 1992)。しかし、本試験地の地質は堆積岩であり、 Cl^- の流出源になっている可能性がある。いずれにしても、流量と強い負の相関をとっており、降雨時には低濃度の降雨などによって薄められたと考えられる。EDWARDS(1973)では、流量に対する変動はほとんどないが、気候の違いや、海塩を含んだ雨や雪の影響があると思われる。



● 渓流水(0-20mm) □ 渓流水(40-50mm) □ 渓流水(60-80mm) △ 林外雨 - 林内雨 × 土壌水

* 凡例の()内の数字は堰の越流水深(mm)

図 11 林外雨・林内雨・土壌水・渓流水の EC, pH 分布—10 月降雨イベント

Fig. 11. Distribution of EC, pH in rainfall, throughfall, streamwater—rainfall event in October.

10月の降雨イベントは台風10号の前線の雨であって海塩を多く含んでおり、 Cl^- の林外雨の濃度は7月が1 mg/lなのに対し8 mg/lと高かった。さらに林内雨中の濃度は31 mg/lと林外雨の約4倍、10月前半の渓流水中の濃度(13~15 mg/l)に比べると2倍近く、非常に高濃度であった。(図9, 図10)。 Na^+ も同様に林内雨中で高い濃度を示していた。その他に K^+ , Mg^{2+} も林内雨の濃度は高かった(図9, 図10)。この原因は、この年の9月に台風が多く、大量の海塩が運ばれ樹体に多く付着していたためと考えられる。それが降雨によって洗脱したため林内雨が極めて高い濃度になったのであろう。 Cl^- は土壤中で生物的・化学的変化をほとんど受けなため、高濃度の水が土壤中に滞留していたと思われる。この土壌水の流出と高濃度の林内雨により流量との相関は正の値を示した。

これに対し Na^+ では渓流水に海塩の影響は表れなかった。徳地ら(1991)は Na^+ はカチオンであり、負に帯電している土壤コロイドに吸着され、吸着と溶脱を繰り返すので土壤中の鉛直移動速度が Cl^- より遅く表層での濃度のピークが下層では不明瞭になると述べている。このために、林内雨の濃度が通常より高くともその影響が渓流水に現れなかったと思われる。

SO_4^{2-} : 他のイオンとは全く違う関係がみられた。大部分は流量と高い負の相関を示したが、低流量時に極めて低濃度を示す部分が現れた(図7)。この部分は7月観測の降雨イベント前のもので、この時流域は非常に乾燥していた。この試験地の周辺に硫黄成分の高い鉱泉が沸いていることから、この試験地内に濃度の高い SO_4^{2-} 源となる湧き出しがあるのではないかと推察した。つまり、非常に乾燥した状態になるとこの湧き出しから本流への流れが途切れ、濃度が低下するのではないかと考えた。これを証明するため、採水場所の上流部へ流入する傍流の採水を試みたが、渇水のためにこのような傍流はほとんど枯れており証明することができなかった。温鉱泉から河川への塩分寄与に関しては長沢・山抱(1981)の研究があり、温鉱泉からの塩化物の河川への寄与などを明らかにしている。また、表2より流量に対して正の相関があるという報告もあるが、

EDWARDS (1973) は、溶性の硫化鈹物（おそらく CaSO_4 ）の存在とその鈹物の土壌での鉛直分布の結果だと述べており、試験地の地質状態の違いを反映していると思われる。

EC, pH

図 11 より林外雨→渓流水への過程で EC, pH ともに上昇しており、森林域において物質が付加されること、および酸が効果的に緩衝されることが示唆された。特に、林内雨→渓流水という地中での変化が大きかった。これは、濃縮の作用の他に土壌中でのプロトンと、 Ca^{2+} , Mg^{2+} のようなカチオンとの交換反応、また基岩の風化などが大きく作用していると思われる。このように土壌中での水質形成過程は重要な役割を占めており、今後の土壌に関する観測の重要性が示唆された。

VI. おわりに

本研究では、山地小流域である堂沢試験地において 6 月、7 月、10 月の降雨イベント時に渓流水質の濃度変動を定量的に観測した。降雨時の渓流水の濃度変動は主に表層土壌部からの流出や河道へ直接流入する降雨によって支配されていると考えられるが、渓流水の流量と濃度の関係を整理した結果、分析対象とした主要溶存イオンは次のような 4 つのグループに分けられた。

また、このようなグループ分けを他流域のものと比較した。

I. NO_3^- : 流量と正の相関をもつ。

生物活動に強く関わる主要溶存イオンであり、林内雨、渓流水中の濃度が低く、表層土壌部からの流出によって濃度が上昇したとことがわかる。

II. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} : 流量と負の相関をもつ。

基岩の風化などを起源にもつためか、渓流水中の濃度が高く、流量の増加に伴って濃度は低下した。特に、 Ca^{2+} , Mg^{2+} は生物活動やリターの無機化などの起源もつため流域によって挙動が異なった。10 月降雨イベントの林内雨には海塩が含まれていたが、その影響は渓流水には現れなかった。

III. K^+ : やや負の相関をもつが、ばらつきが大きい。

IV. Cl^- , SO_4^{2-} : 降雨イベントによって異なる挙動を示す。

Cl^- は 7 月降雨イベント時に流量と負の相関をとった。地中で生物的、化学的作用をあまり受けないことが知られており、表層土壌部の土壌水の濃度は渓流水中のそれに比べ低いと考えられる。10 月降雨イベントでは、雨に伴って運ばれた海塩の影響が渓流水中の変動に現れていた。

SO_4^{2-} の挙動は、まだまだ不明なこともあり、さらなる観測によって事例を増やす必要がある。

このように、降雨時の渓流水質の変動特性は主要溶存イオンによって異なり、それぞれの流出経路や流域の違いが反映されていたと考えられる。それを明らかにするためにも、今回行なっていなかった土壌部に関する観測の必要性が示唆された。

また、流量変動に対する渓流水の濃度変動の観測データが得られたことから流量-負荷量換算式である $L-Q$ 式を決定することができる。この $L-Q$ 式によって年間の流量データから各物質の流出量を概算することが可能となる。しかし、物質によって降雨の種類や季節によって流量に対する応答が異なるため、単一の $L-Q$ 式から負荷量のある程度推定できる物質と、それが困難である物質が存在することがわかった。

謝 辞

本研究を行うに当たり、東京工業大学石川研究室の方々には有益な御助言や現地調査の援助など、様々な面で助けて頂きました。東京農工大学大学院岡崎研究室の齊藤 隆氏からは土壌水質のデータを頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

要 旨

千葉県南部に位置する東京大学千葉演習林内の山地小集水域において渓流水の水質を降雨イベント時に観測し、流量の変動に伴う水質の変動を検討した。渓流水の流量と濃度の関係を整理した結果、分析対象とした主要溶存イオンは次のような4つのグループに分けられた。

NO_3^- は、流量と正の相関をもつ。平水時の渓流水濃度、林内雨濃度が低いことから土壌に多く存在していると考えられる。 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} は、流量と負の相関をもつ。主に基岩の風化を起源にするために、土壌水中より渓流水中で濃度が高く、流量の増大に伴い濃度が減少したと考えられる。 K^+ は、やや負の相関をもつが、ばらつきが大きい。林内雨、土壌水、渓流水中の濃度差が少ないために流量に対する渓流水中の濃度変動は現れなかった。 Cl^- 、 SO_4^{2-} は、降雨イベントによって異なる挙動を示す。 Cl^- は10月の降雨イベントにおいて、台風によって輸送された海塩の影響が現れていた。 SO_4^{2-} は流量と負の相関をもつが、7月降雨イベント前のみ低い値であった。

このように渓流水質の各イオン変動特性の違いは各イオンの流出経路やその特性を反映していると考えられる。

キーワード：降雨イベント、渓流水質、山地小流域

引用・参考文献

- A. M. C. EDWARDS (1973) THE VARIATION OF DISSOLVED CONSTITUENTS WITH DISCHARGE IN SOME NORFOLK RIVER. *J. Hydrol.* 18, 219-242.
- 飯田俊彰・上木勝司・塚原初男 (1998) 多雪山地小流域における陰イオンの収支解析. *農業土木学会論文集* 195, 77-84.
- 勝山正則・大手信人・浅野友子・小橋澄治 (1998) 森林流域からの流出水質に降雨イベントが影響を与えるメカニズム. *京大演報* 69, 26-37.
- Kiyokazu OHRUI and Myron J. MITCHELL (1998) Stream water chemistry in Japanese forested watersheds and its variability on a small regional scale. *Water Resour. Res.* 34(6), 1553-1561.
- 平田建正・村岡浩爾 (1988) 森林域における物質循環特性の渓流水質に及ぼす影響. *土木学会論文集* 399, 131-140.
- 木平英一・楊 宗興・八木一行・窪田順平 (1997) 降雨に伴う渓流水の NO_3^- -N 窒素安定同位体比の変動. *水文・水資源学会誌* 10(4), 360-366.
- 木平英一・楊 宗興・戸田任重・八木一行・窪田順平・塚本良則 (1997) 森林流域谷底部土壌の脱窒作用— NO_3^- -N 窒素安定同位体比による解析. *日林誌* 79(2), 83-88.
- 木平英一・窪田順平・塚本良則 (1997) 降雨に伴う谷部飽和帯の拡大と渓流水の NO_3^- -N 濃度の変動. *水文・水資源学会誌* 10(2), 154-160.
- 國松孝男・島田佳津比古・橋本康子 (1986) 山林河川 (滋賀県北西部) の水質と2次処理水の影響. *山林文化研究* 7, 217-239.
- 黒田久雄・田淵俊雄・菊地英樹・鈴木正道・茂手木 知 (1989) 森林小集水域の水質環境に関する研究. *農業土木学会要旨集*.

- 黒田久雄・田淵俊雄(1993) 森林地区の $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量の推定—流出負荷予測タンクモデルに関する研究(I). 農業土木学会論文集 168, 31-36.
- 中川千枝・丁子哲治・平井英二(1993) 酸性降雨の土壤による中和反応機構に関する化学平衡論的解析. 水環境学会誌 16(2), 114-121.
- 長沢幹雄・山抱喜好(1981) 鉱泉によって溶存塩分を増加する河川. 水処理技術 22(1), 29-37.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲(1992) 降雨イベントでの渓流水の溶存物質の流出特性と流出成分の分離. 日林誌 74(3), 203-212.
- 大類清和・相場芳憲・生原喜久雄(1992) 森林小集水域での水質変化の過程. 水文・水資源学会誌 8(4), 367-381.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲(1993) 森林集水域での土壤から溪流への水質変化. 日林誌 75(5), 389-397.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲(1994) 森林小集水域における渓流水質に及ぼす諸因子の影響. 日林誌 76(5), 383-392.
- 徳地直子・黒田幸夫・岩坪五郎(1991) 森林生態系における溶存物質濃度・量の垂直的变化(I) スギ人工林における塩素イオンとナトリウムイオンと土壤水の垂直的移動. 日林誌 73, 135-144.
- 山口高志・吉川勝秀・興石 洋(1980) 河川の水質・負荷量に関する水文学的研究. 土木学会論文報告集 293, 49-63.

(1999年 4月30日受付)

(2000年 1月17日受理)

Summary

In order to examine the relation between the stream discharge and water quality of small mountainous watershed, we intensively sampled the forest stream water during and after several rain events. This study was conducted in the University Forest in Chiba, the University of Tokyo in the south of Chiba prefecture. The effects of rapid stream discharge increase on the ion concentrations was divided into four groups.

NO_3^- increases in concentration. Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} were diluted. K^+ showed no much significant correlation with discharge. Cl^- and SO_4^{2-} showed different responses depend on rain events. This results suggest that the differences between groups reflect the different distribution of sources and generation processes of the ions.

Key words: rainfall event, stream chemistry, mountainous watershed

Abstract

Changes of Stream Chemical Characteristics of Stream Water in Small Mountainous Watersheds

Akiko KUMAGAE, Takeshi TSUKAGOSHI, Yuri TANAKA and Koichiro KURAJI

In order to examine the relation between stream discharge and chemistry of small mountainous watershed, we sampled intensively the forest stream water in rainfall events. The study was conducted on the Experimental Forest of Tokyo University in the south of Chiba. The effect of increases in stream discharge on the constituents analysed can be divided into four groups.

- I. NO_3^- : which increase in concentration.
- II. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} : which is diluted.
- III. K^+ : which show no much significant correlation with discharge.
- IV. Cl^- , SO_4^{2-} : which show different response to different rainfall events.

The Formation Process of the Kofu City Forest for Water Supply Conservation

Keiko IZUMI

The Kofu City Forest has been managed since 1947 in order to conserve water resources. This paper is intended to clarify the process of the formation of Kofu City Forest. First, the formation of Kofu City Forest was one of the steps in settling the conflict between Arakawa headwater areas and Kofu City. Second, the change of land tenure of the forest brought about further conflicts between Arakawa headwater area and Kofu City. Third, in 1939, a paper manufacturer proposed a forest management plan based on a clear cutting system, but Kofu City did not accept it.