

山地小流域における溶存物質の降雨流出特性について (3)
Runoff of Dissolved Matters in Small Mountainous Watershed (3)

国立公害研究所 正員 平田健正 T. Hirata
国立公害研究所 正員 村岡浩爾 K. Muraoka

1. はじめに

筑波森林試験地(67.5ha)で観測された降雨流出時の渓流水質変化から、溶存物質の流出特性には2つのパターン、すなわち渓流水濃度について降雨終了後にほぼ降雨前のベース値に戻るType Iとベース値を上回るType IIのあることが明らかにされた。^{1), 2)} Type Iに属する代表的な物質にSiO₂、Type IIにはNO₃-Nがある。これらの物質の流出挙動の違いは中間流出成分、言い換えれば表層土壤水に含まれる物質濃度に由来すると考えられ、筑波試験地で土壤水を採取し、土壤水質を調べてきた。²⁾ これによると、Type IのSiO₂濃度については土壤-地下水圏でほぼ一様か、表層土壤水で小さく、Type IIのNO₃-N濃度は表層土壤水で高濃度で存在することが確認された。これらの結果は、概ね溶存物質の降雨流出特性から予測された土壤水質の鉛直分布と合致する。

他方、森林内では水分も含め物質は土壤-植物体を通して常に循環している。入力としての降雨は樹体と接触することによって林内雨や樹幹流となり、質・量共に変化して林床に到達する。さらに表層土壤から植物体に吸収された養分量の約半分は生長量として植物体に固定され、残りの半量がリターとして林床に還元される。³⁾ また林内雨や樹幹流によって樹体から溶脱されて林床に届く物質もある。したがって森林生態系における物質循環に組み込まれた養分物質は生態系内を循環し易く、一方物質循環から外れた物質は養分物質とは異なる移動特性を持つと考えられる。こうした物質移動は最終的に森林土壤中の物質現存量やその鉛直分布、ひいては土壤水質や地下水質に反映されると予想される。そこで森林生態系での物質循環と土壤水質との関連を調べるために森林土壤を採取し、元素分析を行った。この内、本研究ではケイ素と窒素を中心に、森林土壤中の存在量や鉛直分布特性を明らかにし、土壤水質やその流出の渓流水質に及ぼす影響について考察する。

2. 溶存物質の流出特性と土壤水質

2.1 流出特性：ここでは降雨時に得られた渓流水質資料から、溶存物質の流出特性をまとめる。図1は総雨量48mmの降雨時に得られた渓流水質の経時変化であり、Type IとType IIに区別して示す。同図下段に流量も描いている。大抵の物質は流量上昇期に濃度を減じ、逕減時に増加する。降雨流出の末期にほぼ降雨前のベースレベルに回復するType IにはSiO₂、Na⁺、Cl⁻、電気伝導度SCが、ベースレベ

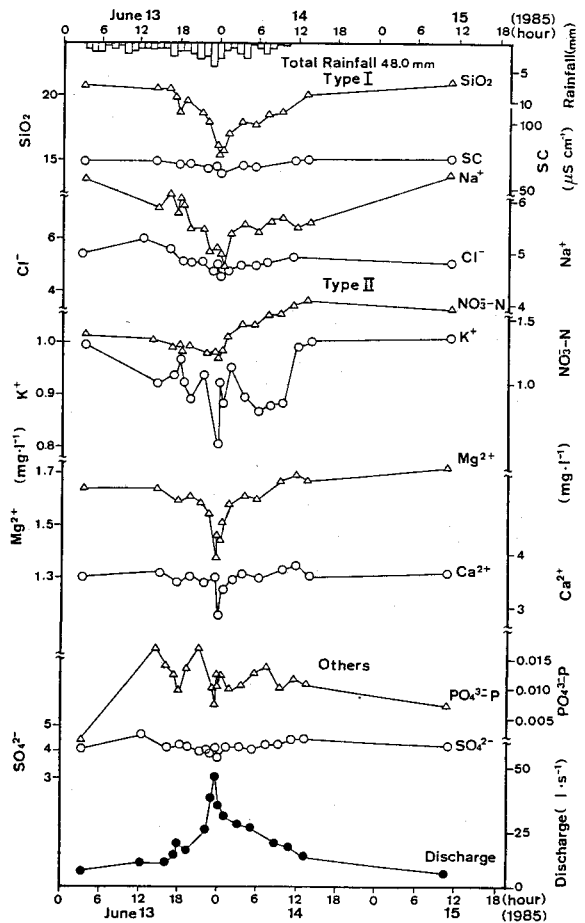


図1 溶存物質の降雨流出特性

ルを上回るType IIには $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} がある。ただし SO_4^{2-} と $\text{PO}_4\text{-P}$ は水文条件によって変化し、いずれとも分類し難い。こうした流出特性は図1以外の3つの降雨事象にも共通して認められた。⁴⁾ 降水に含まれる物質濃度は溪流水のベース値より小さいことから、図1から推論されることは

- 1) 流量上昇期の濃度減少は降雨成分に対応した表面流出成分による希釈効果である。
- 2) 降雨終了後の溪流水は中間流出成分と地下水流出成分で構成されており、降雨流出時に地下水濃度が変化しないならば、Type IとType IIの違いは中間流出成分と地下水に含まれる物質濃度に起因する。
- 3) Type Iの物質については、中間流出成分と地下水で濃度に大差ないか、少なくとも中間流出成分で濃度が小さく、他方Type IIでは中間流出成分で濃度が高まっていなければならない。

以上の考察から、表層土壌を中間流出の発現の場と捉え、森林試験地で土壤水を採取し、土壤水質の鉛直分布と季節変化を調べてきた。

2.2 土壤水質：土壤水は1986年2月から、ほぼ2週に一度の割合でスギ植林地内の2地点（引用文献1）内図1のA4とB4地点）で鉛直方向に多点で採取している。採取深度は地表面から10、20、30、50、75（または95）、125、175cmの7点である。ここではType Iの SiO_2 、Type IIの $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を取り上げ、各深度の季節変化を図2と図3に示す。両図とも下段に溪流水濃度を、また $\text{NO}_3\text{-N}$ については降水濃度も描いている。 SiO_2 は降水にほとんど含まれず、純粋に土壌・岩石起源であり、樹木の代謝には何ら必要とされない物質である。これに対し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は降水や降下塵によって森林域にもたらされ、植物体の生長に必要な多量必須元素であり、生態系内を循環し易い物質である。

SiO_2 は土壌母材を起源としており、したがって水の土壌との接触時間の長い程、濃度は高まることになる。図2にある様に、深層の土壤水程、 SiO_2 濃度は高まっている。濃度変動幅も降雨流出の影響を受けて、表層土壤水で大きくなっている。また1986年4月から1987年3月までの SiO_2 濃度の年平均値を見ると、10cm深で14.0mg/lであるのに対し175cm深では21.9mg/lであり、175cm深の値は溪流水の年平均値21.7mg/lに近い。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は SiO_2 濃度とは逆に、表層土壤水で高まっている。窒素は本来、土壌や岩石に含まれない物質であるが、土壌の形成過程でまず最初に大気中の窒素ガスが微生物によって土壌中に固定される。この有機態窒素は、他の微生物によって $\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$ といった植物の利用可能な形態にまで無機化される。そして植物群落の発生とその遷移過程で、先に述べた養分物質の吸収・リターによる還元等の物質循環に伴って、多量の窒素が表層土壌中に蓄積されたと考えられている。⁵⁾ 図3を見ても、10cmや30cm

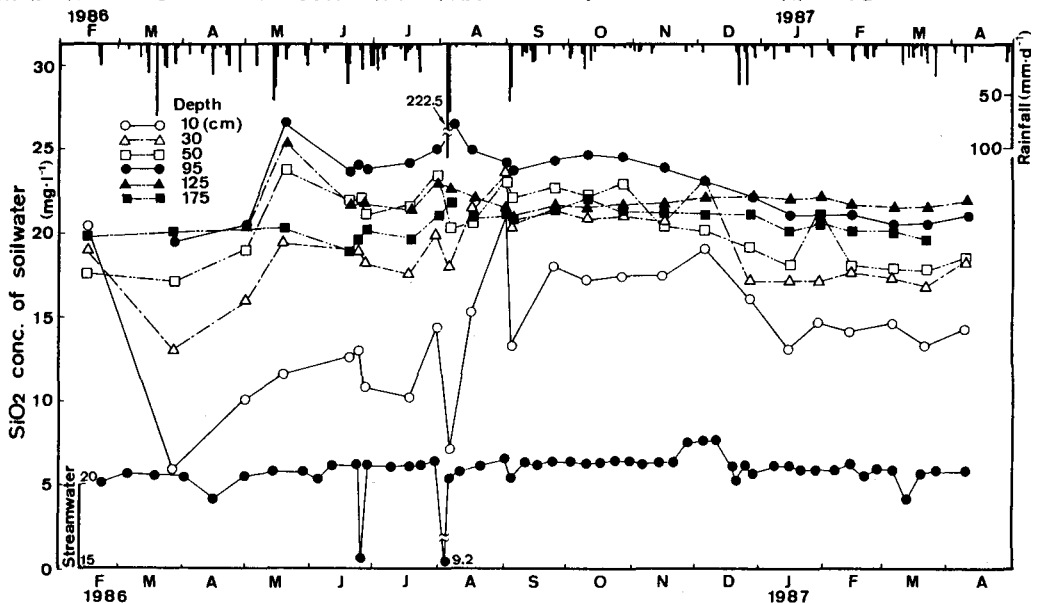


図2 土壤水に含まれる SiO_2 濃度の季節変化

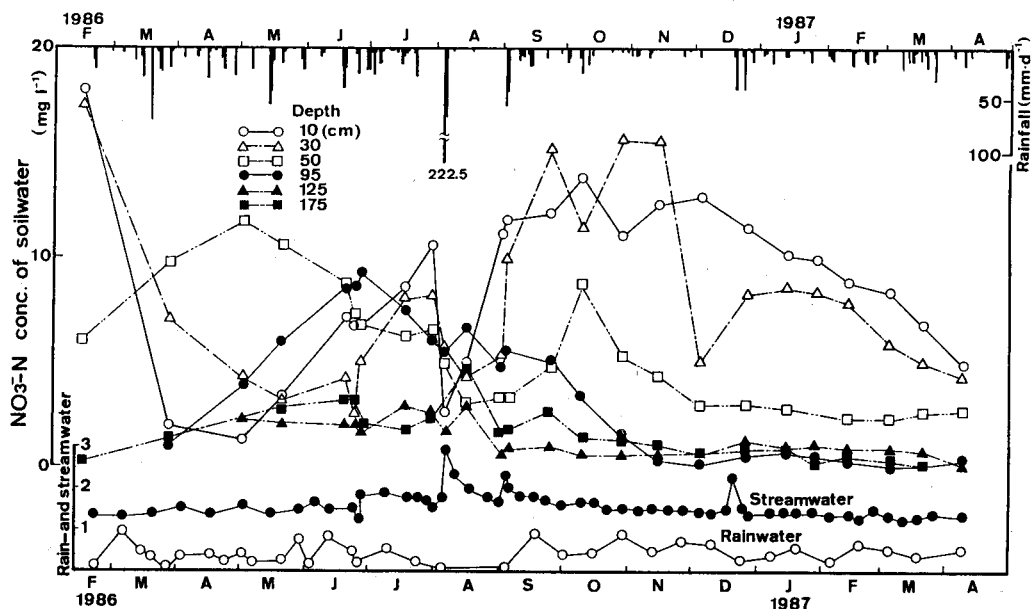


図3 土壌水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の季節変化

深の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は極めて大きく変動しており、降雨流出による表層土壌からの溶脱だけでは説明できない。1986年2月から5月にかけての $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の減少は降雨流出による溶脱であるにしても、5月から9月にかけて濃度は増加している。1986年8月に台風8610号（総雨量291mm）による一時的な濃度低下はあっても、依然として上昇傾向に変化はない。この春季から夏季にかけての表層土壌水の $\text{NO}_3\text{-N}$ の高まりは、温度上昇により、森林土壌に含まれる有機態窒素の微生物分解が促進された結果と考えられる。一般に温度が 10°C 上昇すると、分解速度は2倍になることが知られている。⁶⁾ 秋季から冬季にかけて高濃度を維持する。冬季から春季にかけて微生物分解が進まないことから、降雨流出があれば $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は減少する一方となる。これらの季節変化が図3に描かれている。また $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の年平均値を見ると、10cm深で 8.3mg/l 、175cm深で 1.42mg/l となり、前者は後者の5.8倍にもなる。また175cm深の値は溪流水の年平均値 1.77mg/l と大きく違わない。

3. 森林土壌中のケイ素と窒素の存在量

3.1 土壌の採取と分析：森林土壌中に存在する物質量を求めるため、1987年3月20日に筑波森林試験地内スギ植林地の2地点（A4とB4）で森林土壌を採取した。鉛直方向に多点で、不攪乱試料と元素分析用の攪乱試料である。採取地点も含めその周辺で、A層は1cm程度か、それ以下であった。また表層土壌は黒味を帯びた褐色森林土壌で、樹木の毛根が多い。2地点共に25cm深位から色調が変化し始め、30cm深で灰色がかった小石混じりの土壌となる。1m深まで断面を切ったが、土壌の母材となるレキ類は出なかったことから、地表面から30cm深まではA層、それ以下はB層と考えられる。

元素分析用の土壌は 40°C で1昼夜乾燥させ、毛根などの植物遺体を除去した後、乳鉢で粉砕する。その後に 40°C で再度4日間乾燥させる。そうすることによって、試料の含水比は1%以下となり、ここで述べる物質存在量については水分の補正は行っていない。土壌中のケイ素量は試料をアルカリ熔融し、⁷⁾ 1:1のHClで溶解した後、その試水を原子吸光法（島津AA-640-12）で定量した。窒素量はC Nコーダー（Yanaco MT500）で分析した。

3.2 ケイ素と窒素の存在量：土壌中のケイ素（Si）と窒素（N）の含有率を図4に、また有機物量の目安として炭素（C）と強熱減量を図5に示す。含有率は土壌乾重に対する割合である。

ケイ素について、2地点共表層で含有率は低下しており、腐植物の多いA層の特徴を示している。20cm以深で、B4地点でわずかに減少するものの、全体として深さ方向に漸増する様である。また筑波森

林試験地のケイ素の含有率は23.9%から38.1%の範囲にあり、一般に土壤に含まれるケイ素量25~41%⁸⁾におさまっており、ほぼ妥当な結果と言える。

窒素については、その含有率は明らかに深さ方向に減少している。B4地点について、表層5cm深で0.52%の含有率が95cm深で0.017%となり、1/30にまで減少する。またケイ素の含有率の高いB4地点で、窒素の含有率はA4地点に比べて小さくなっている。深度1mまでの窒素の存在量を求めるとB4地点で10.2ton/ha、A4地点で19.1ton/haであり、平均すると14.7ton/haとなる。因に降雨によって森林試験地にもたらされる窒素は年間12.7 kg/ha、生長に伴って植物体に固定される量は21.7 kg/haである。⁹⁾従って森林生態系を循環する窒素の約700倍にも上る膨大な量が、森林の表層土壤に蓄積されていることになる。

図5は土壤に含まれる有機物量の指標となる炭素の含有率と強熱減量を描いているが、いずれも窒素と同様表層土壤で高く、深さと共に減少する。特に15cm深までの減少率が大きく、極く表層に多量

の有機物の存在する事が理解できる。また有機物量の多いほど、ケイ素の含有率は低く、森林土壤の形成過程もうかがえる。

土壤中の物質の存在量や鉛直分布形は、直ちに土壤水質と結びつくものではない。ケイ素にしても全てが溶存ケイ酸(SiO_2)ではなく、窒素については大部分が有機態であり、そのままでは水に溶けない。さらに、水と土壤との接触時間や微生物の介在と言った定量困難で、しかも環境中で変動の大きい要素もある。しかしながら水が接している土壤中の物質存在量は、土壤水質を決定する最大の要因であることに違いはない。実際に、図4に描かれた森林土壤のケイ素と窒素の含有率の鉛直分布は、図2と図3にある土壤水の SiO_2 濃度及び $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の鉛直分布と矛盾しない。

さらに図6は森林土壤の採取と同じ1987年3月20日に得られた土壤水の SiO_2 濃度と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度である。 SiO_2 濃度について、B4地点では10cm深で濃度は低いものの、20cm以深で21mg/lのほぼ一定値を取っている。またA4地点では深さと共に増加傾向にあり、175cm深で20mg/lの値となる。両者の濃度値に違

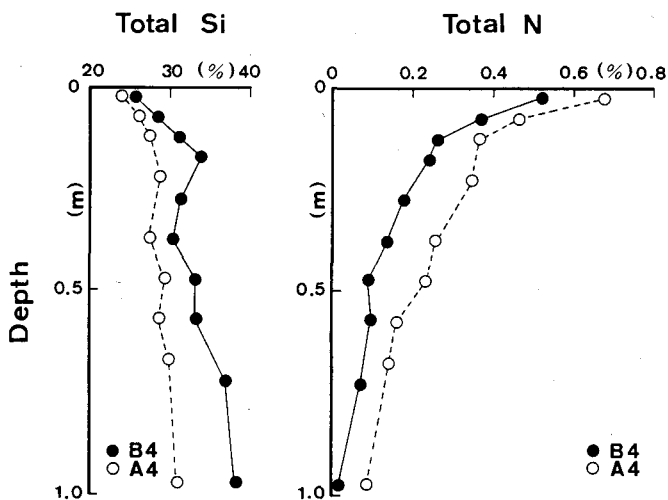


図4 森林土壤のケイ素と窒素の含有率

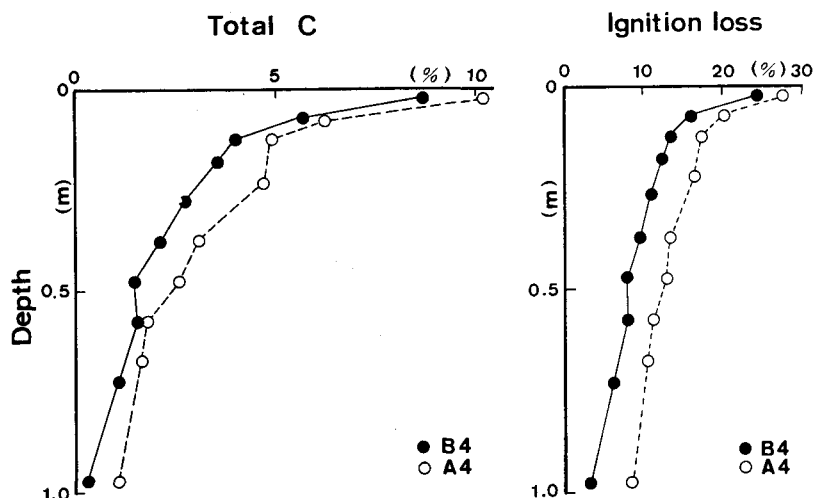


図5 森林土壤に含まれる有機物量

いが認められるが、これは図4にある土壤中のケイ素の存在量の差が反映された結果とみられる。NO₃-N濃度は鉛直分布に違いはあっても、50cm以浅で高濃度を維持している。

4. まとめ

森林域からの溶存物質の流出機構を調べる目的で、1984年9月以来筑波山系に設けた67.5haの森林試験地において、降雨・林内雨・土壌水・地下水・渓流水と言った水移動に伴う水質の変化を観測してきた。特に降雨時の渓流水質の変化から、溶存物質の流出パターンには2つのタイプのあることが見出された。降雨終

了後に降雨前のベース値に回復するType Iとベース値を上回るType IIである。こうした流出特性の違いは、降雨終了後の渓流水の構成成分から判断して、中間流出成分、言い換えれば表層土壌水の流出に由来すると考え、土壌水質の分布特性が調べられた。

中でも著者らはType Iに属するSiO₂とType IIのNO₃-Nの挙動は水分も含めた物質の流出機構を解明する上で、重要な手掛りになると考えている。既述の様に、両者は降雨時の水質時系列において、また土壌水質でも際立った違いを見せる。こうした差異を説明するには、水質そのものの観測は勿論、水質変化を引き起こす物質の起源にまで立ち入る必要がある。この時、SiO₂は降雨にはほとんど含まれず、純粹に土壌起源の物質であること、一方NO₃-Nは降水にも含まれ、また養分物質でもあるから森林内を循環する物質であることに注意を要する。すなわち、物質循環に組み込まれた物質と外れた物質とでは、森林生態系での移動特性が大きく異なるからである。事実、森林土壌中のケイ素と窒素の存在量を調べると、採取地点で鉛直分布に違いはあっても、1)土壌のケイ素含有率は表層で小さく、深さ方向に増加すること、2)森林表層土壌に極めて多量の窒素が蓄積されていること、が確認された。これは森林生態系における物質循環特性が土壌中の物質存在量に反映され、土壌水質、ひいてはその流出によって渓流水質の形成に大きく影響していることを表わしている。

図7は降雨、林内雨、土壌水、地下水、渓流水の順に、森林生態系での鉛直水移動に伴う水質変化を描いている。¹⁰⁾ 資料は1986年4月から1987年3月までの年平均値であり、溶存物質の流出特性から分類されたType IとType IIに区別して描いている。既述の様に、SiO₂は土壌岩石起源の物質であることから、降雨・林内雨にはほとんど含まれず、その濃度は土壌と接することによって著しく高まる。これ以外の物質についても、降雨・林内雨・土壌表層へと移行するに伴って濃度は高まり、中でも林内雨のK⁺は樹体からの溶出もあって濃度は大きく増加する。土壌表層から渓流水の間で、Type Iに分類される物質濃度は鉛直方向にほぼ一様か、土壌表層で小さく、Type IIの物質濃度は土壌表層で高濃度になっているものが多い。さらに特徴的なことは、NO₃-Nも含めてType IIに分類された物質は全て、植物体にとっての多量必須元素に属することである。森林生態系の物質循環に組み込まれることによって、これらの物質は表層土壌に多量に蓄積されたものと考えられる。一方Type Iに分類された物質はSiO₂やNa⁺の様に、植物の代謝には必要とされない物質か、Cl⁻の様に必須ではあっても微量元素に属する物質である。ケ

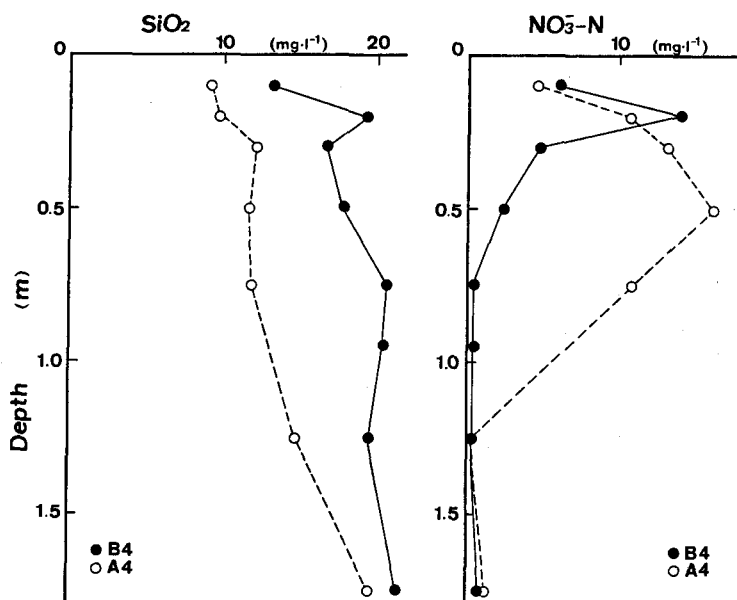


図6 土壌水のSiO₂とNO₃-N濃度の鉛直分布 (1987年3月20日)

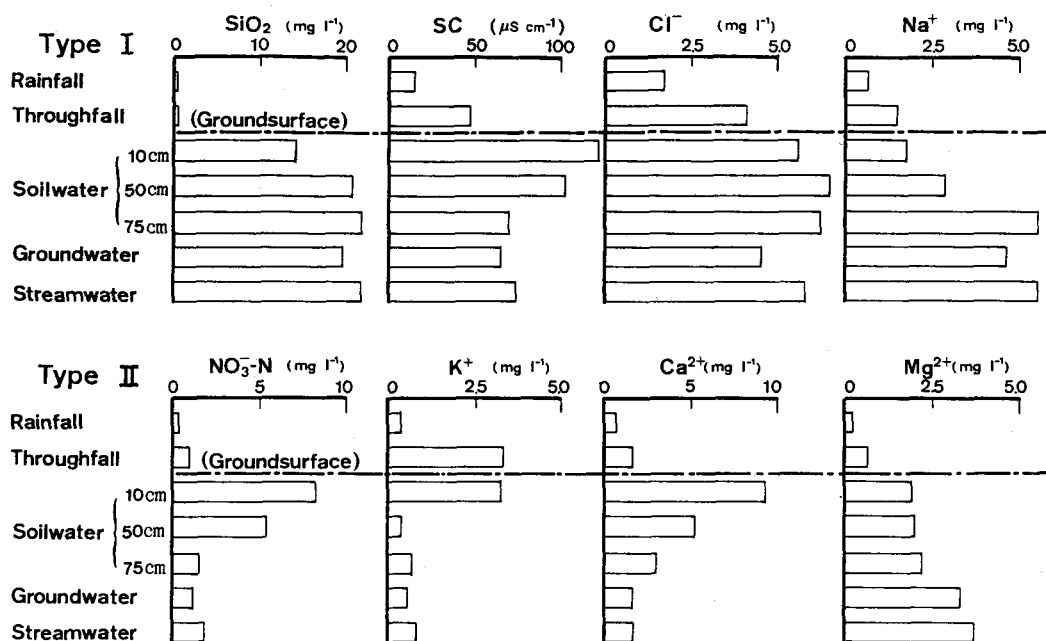


図7 水移動に伴う水質の変化

イ素や窒素以外の物質についても、土壤中の存在量やその鉛直分布形は、それぞれの物質の森林生態系における移動特性を反映していると予想される。森林生態系での物質循環は調査にかなりの困難を伴うが、水のみを対象とした時、欠如しがちであった流域特性について新たな知見が期待できる。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費・環境科学特別研究（代表者 滋賀県立短大助教授 国松孝男）の助成を得て行われたことを記す。

引用文献

- 1) 平田健正・村岡浩爾(1986): 山地小流域における溶存物質の降雨流出特性について。第30回水講演文集, 43-48.
- 2) 平田健正・村岡浩爾(1987): 山地小流域における溶存物質の降雨流出特性について(2)。第31回水講演文集, 59-64.
- 3) 岩坪五郎(1976): 森林生態系での植物養分物質の循環。山岳・森林・生態学, 今西綿司博士古稀記念論文集, 中央公論社, 313-360.
- 4) 平田健正・村岡浩爾(1988): 渓流水質からみた森林の浄化機能に関する研究(第3報) 溶存物質の流出機構。国公研報告。(印刷中)
- 5) 大政正隆著(1977): 土の科学。NHKブックス, 48-64.
- 6) 河原輝彦(1976): リターの分解(IV) 土壤呼吸量中の根の呼吸量の推定。日林誌, 58(10), 353-359.
- 7) 渋谷政夫・小山雄生・渡辺久男共著(1978): 重金属測定法。博友社, 17-19.
- 8) Bowen, H. J. M. (1979): Environmental Chemistry of The Elements. Academic Press, 60-61.
- 9) 村岡浩爾・平田健正(1988): 渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究(第4報)。水収支と物質収支, 国公研報告。(印刷中)
- 10) Muraoka, K. and T. Hirata (1988): Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin. J. Hydrology. (in press)