

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)

Runoff of Dissolved Matters in Small Mountainous Watershed (2)

国立公害研究所 正員 平 田 健 正

国立公害研究所 正員 村 岡 浩 爾

1. はじめに

降雨流出は河川水量の変化と共に、水質の変化をもたらす。この水質変化は降雨流出成分発現の場の物質濃度を反映しており、逆に降雨時の水質変化を利用して、降雨流出成分を分離する試みも活発になされている。1)、2) 森林域は土地利用形態が単純であり、施肥でもしなければ人為的な負荷はなく、降雨流出特性を調べるには適している。著者等も筑波山系に森林試験流域(67.5ha)を設け、降雨、渓流水、森林地下水等を観測してきた。3) この試験地で1984年9月からの観測開始以来、梅雨期から夏季にかけて4回の降雨流出資料が得られている。観測資料から降雨時の渓流水質を概観すると次の様である。すなわち、水質濃度は水量増加時に減少し、ピーク水量時付近で最小となり、逓減時に増加する。そして降雨に対する水質の応答特性の違いは降雨終了後に現れ、降雨前の濃度レベルに回復するものと降雨前の値を上回るものに大別される。4) 前者をType-1、後者をType-2と呼ぶことにすれば、Type-1に属する水質として SiO_2 や電気伝導度SCが挙げられる。NaやClもこれに近い。Type-2の代表的な物質として $\text{NO}_3\text{-N}$ があり、K、Mg、Caも $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出特性に近い。もちろん細かく見れば、NaやCl濃度は降雨流出初期に高まる傾向があり、SCも逓減時にわずかではあるが降雨前の値より大きくなる特徴を持つが、大略上に述べた2つの流出パターンに分類できると考えている。

水量逓減時に見られる水質の流出パターンの違いは、逓減時の主たる構成成分である中間流出成分発現の場、すなわち地中水に含まれる物質濃度に求められる。Type-1に属する SiO_2 やSCであれば、地中水において鉛直方向に濃度値がほぼ一様か、土壌表層付近で深部の値よりも小さいことが予想される。一方Type-2の $\text{NO}_3\text{-N}$ について言えば、表層付近の土壌水にかなり高濃度で存在すると考えられる。こうした土壌水質の鉛直分布を調べるため、鉛直方向に多地点で土壌水を採取した。5) また降雨時の渓流水質資料と併せて降雨流出の前後でも土壌水を採取した。分析項目は栄養塩類、ミネラル、SC、pH等である。この内、本研究では $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 SiO_2 、SCを中心に、土壌水質と渓流水質の関連について考察する。

2. 土壌水質

2.1 観測：土壌水はスギ林内の2地点で採取した(参考文献4)、図1中のA4及びB4地点)。土壌水の採取には、直径2cm、長さ5cmの素焼きのボラスカップをポリエチレンロッドの先端に取付けた装置を用いた。この装置をリター層を取り除いた地表面から所定の深度まで押し込む。採取深度は10、20、30、50、75(または95)、125、175cmの7深度である。ボラスカップに接続したチューブを三角フラスコにつなぎ、フラスコ内にサクシオンをかけて土壌水を吸引する。そうすることによって約24時間で100~150mlの土壌水を得ることができる。調査は1986年2月から開始した。土壌水の採取とは別に、降雨、渓流水、森林地下水の調査も継続している。これらについては参考文献4)に詳しい。

2.2 鉛直分布：図1は2月13日にB4地点で得られた土壌水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ と SiO_2 の鉛直分布である。冬季には降雨は少なく、このケースでも観測前1ヶ月の総雨量は2mmである。したがって、図1にある鉛直分布は降雨流出を経験する以前の初期状態と考えられる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度について言えば土壌表層付近の10cm深では17.9mg/lと極めて高濃度であり、同図下部に示した渓流濃度1.31mg/lの14倍となっている。一方 SiO_2 濃度は深度20cmから50cmにかけて深層の濃度値よりわずかに小さいが、全体として17.7~20.3mg/lの範囲にあり、鉛直分布に極立った変化は認められない。またこれらの濃度値は渓流水質濃度20.2mg/lに

近い。図1にある鉛直分布は、既述したType-1と2の降雨流出特性の違いから推察された結果とほぼ合致する。なお、電気伝導度SCについては、採取量が少なかったため、このケースでは測定されていない。

図2と図3は降雨流出の前後で得られた土壌水質の鉛直分布を描いている。降雨流出時の渓流水質も同時に観測しているが、これについては後述する。図2は総雨量26.5mm、図3は291mm時に得られた鉛直分布である。いずれの図にも対象降雨に含まれる濃度値と地下水、及び流域最下流端の溪流濃度を記している。

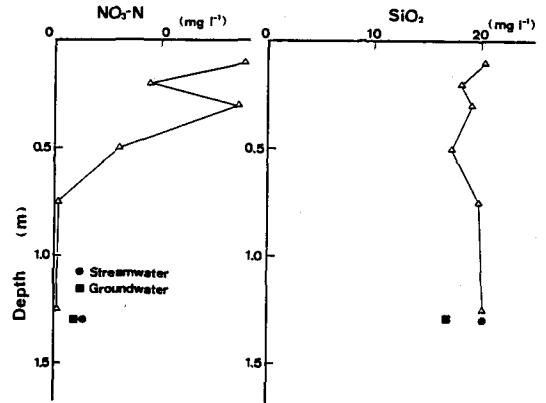


図1 土壌水質の鉛直分布 (1986年2月13日)

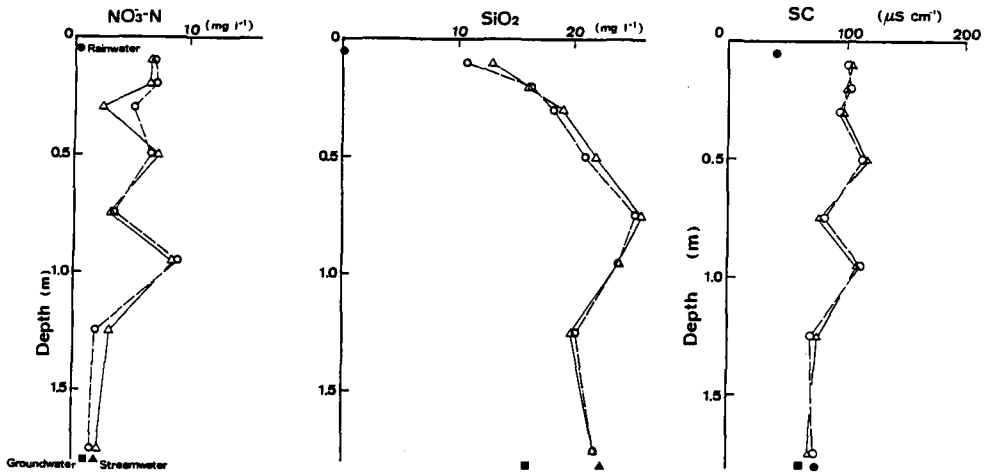


図2 総雨量26.5mmの前後で採取された土壌水質の鉛直分布 (△: 6月23日~24日 (降雨前)、○: 6月25日~26日 (降雨後)、1986年)

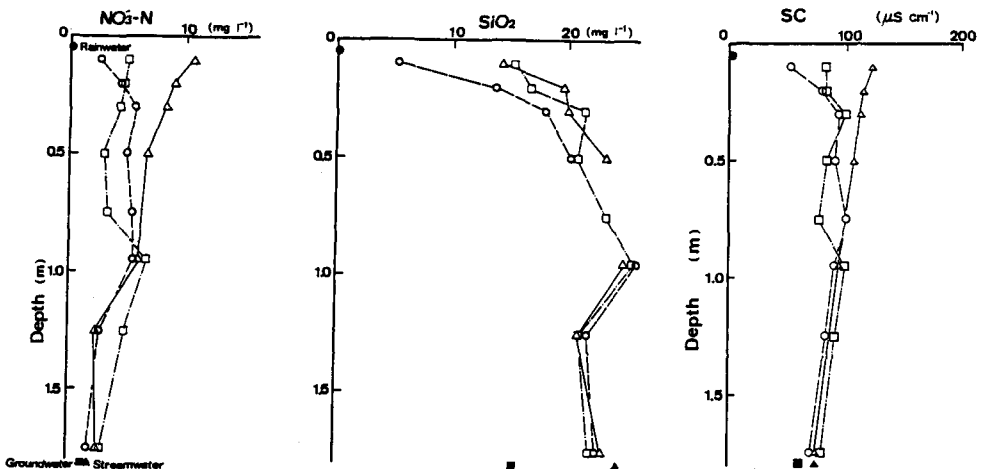


図3 総雨量291mmの前後で採取された土壌水質の鉛直分布 (△: 7月31日~8月1日 (降雨前)、○: 8月5日~6日 (降雨後)、□: 8月15日~16日 (降雨後)、1986年)

図2の資料は梅雨末期の6月23日と25日に観測され、観測前10日以内の先行降雨量も76mmである。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 SiO_2 及びSC共に、深度175cmの濃度値は渓流水質とほぼ等しい。 $\text{NO}_3\text{-N}$ について、深度10cmの濃度は6.7mg/lであり、図1と比較して減少しているが、依然として高濃度を維持している。 SiO_2 については、先行降雨による洗い出しもあって、50cm以浅では減少している。SCの鉛直分布は、全体として深さと共に減少傾向にある。しかし深部より土壌表層で高いと言っても変動幅は $33\mu\text{S/cm}$ 、率にして47%程度におさまっている。この値は $\text{NO}_3\text{-N}$ の変動幅に比べて1桁以上に小さい。また総雨量26mm程度では降雨の前後で土壌水質の鉛直分布に大きな変化は現れていない。

総雨量291mmは台風8610号によってもたらされた。資料は降雨前の7月31日、降雨終了直後の8月5日、と降雨終了後10日経過した8月15日に採取された。降雨前の鉛直分布については、濃度値に違いはあっても、分布パターンは図2と同様である。ただ台風8610号の降雨強度は最大40mm/hrにも上り、そのため降雨終了直後に得られた土壌水質は、いずれも深度50cm以浅で減少している。

2.3 季節変化：図4から図6はそれぞれ土壌水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 SiO_2 及びSCの季節変化を描いている。図化したのはB4地点表層の10、30、50cm深、及び深層の125、175cm深であり、各図共上段に日雨量、下段に渓流水質と降雨水質を載せた。降雨水質について6月25日と8月5日は1降雨時の資料であり、それ以外は1週あるいは隔週毎に回収して得られた分析値である。

図4から10cm及び20cm深の $\text{NO}_3\text{-N}$ には明瞭な季節変化が認められる。すなわち、2月から5月にかけて減少し、その後上昇に転じる。6月以降、降雨の溶脱による一時的な濃度低下はあるものの、増加の傾向に変わりはなく、9月に最大となる。一方、125cm及び175cm深の濃度は2月以降漸増の傾向にあり、また8月以降減少し、11月にはほぼ2月の濃度レベルに戻っている。前者の濃度変動幅は16.6mg/lと極めて大きく、これに比べ後者のそれは3.0mg/lと小さい。

3月から7月までの月降雨量はそれぞれ196.5、121、187、158、132mmであり、特に多寡があったわけではない。にもかかわらず、表層付近の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は2月から5月にかけて減少し、その後上昇している。ここで $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給源を考えてみよう。これには降雨・降下塵、リターを含めた有機物の分解と窒素固定がある。ただ最後に掲げた窒素固定は不明な点が多い。降雨でもたらされる窒素も森林域にとって重要な収入源であるが、図4に示した通り濃度は1mg/lを超えない。

$\text{Inorg-N}(\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N})$ で見ても最大1.9mg/l程度であり、表層近くの土壌水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加を説明するには、10倍の濃縮過程が必要とされる。一方、リター等に含まれる有機物分解は温度が 10°C 上昇すればその分解速度は2倍になることが知られている。窒素について言えば、有機態から $\text{NH}_4\text{-N}$ への無機化であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は硝化作用によって $\text{NO}_3\text{-N}$ へと変化する。自然林地での観測結果によると、有機物分解によって生ずる CO_2 発生量は気温と同様な

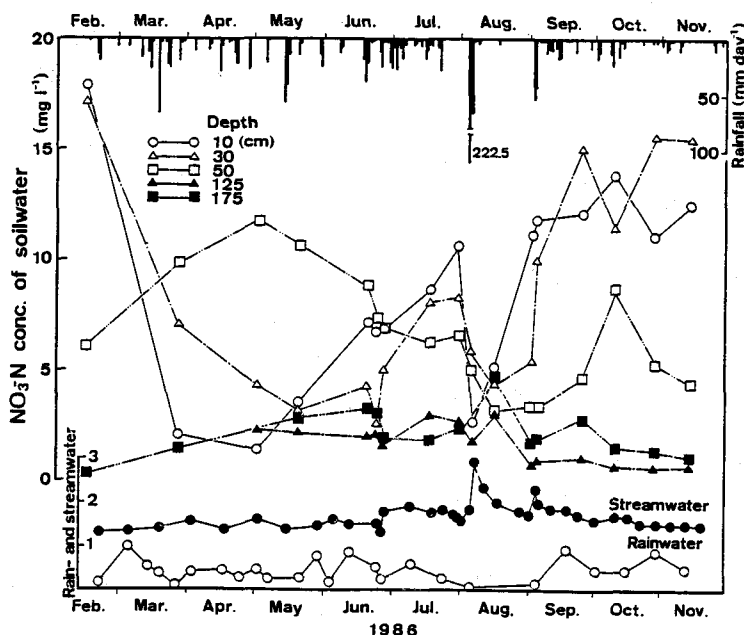


図4 土壌水質の季節変化 ($\text{NO}_3\text{-N}$)

変動パターンを示すことが報告されている。6) 筑波地方の月平均気温は1月が最も低く1.8℃、2月2.7℃であり、最高は8月の24.5℃である。3) その差は約22℃であり、8月は冬季の4倍以上分解が進むことになる。以上から、断定はできないが6月以降9月までの表層土壌中の $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加は、降雨による洗い出し効果より、分解による供給の方が大きかった可能性が高い。11月以降は分解速度は低下するが、降雨流出も少なく高濃度を維持していると推察される。2月から5月にかけては濃度上昇期とは逆の現象が生じ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は減少すると考えられる。

著者等は降雨流出通減時の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の高まりは土壌表層付近に存在する高濃度の $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出に起因すると考えている。もちろん時間の経過に伴って、高まった $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は降雨前のレベルに戻る。ただ降雨流出の影響の残存している状態で、新たな降雨流出が始まると、濃度が高まった状態から出発するため、降雨終了後には $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はさらに上昇することになる。6月から8月にかけて降雨量も多く、加えて土壌表層付近の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度も上昇期に当たるため、渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は高まる。この様子は図4下段の渓流水質に見ることができる。

SiO_2 は降雨にはほとんど含まれず、図5では降雨水質を描いていない。したがって渓流水中の SiO_2 は土壌・岩石起源と考えられる。すなわち、水分の土壌との接触時間が長い程、濃度は高まることになる。図5に示した通り、深度125cmと175cmの SiO_2 濃度は観測期間中18.9~25.4mg/lの範囲にあり、変動は少ない。一方10cmと30cmの資料は、図2と図3の鉛直分布に見られたように、降雨浸透の影響を受けて濃度変動が大きくなっている。

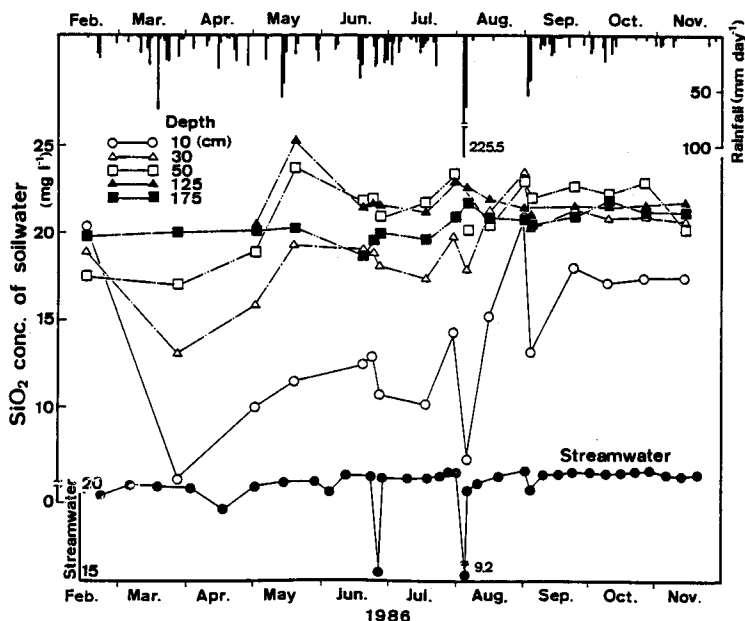


図5 土壌水質の季節変化 (SiO_2)

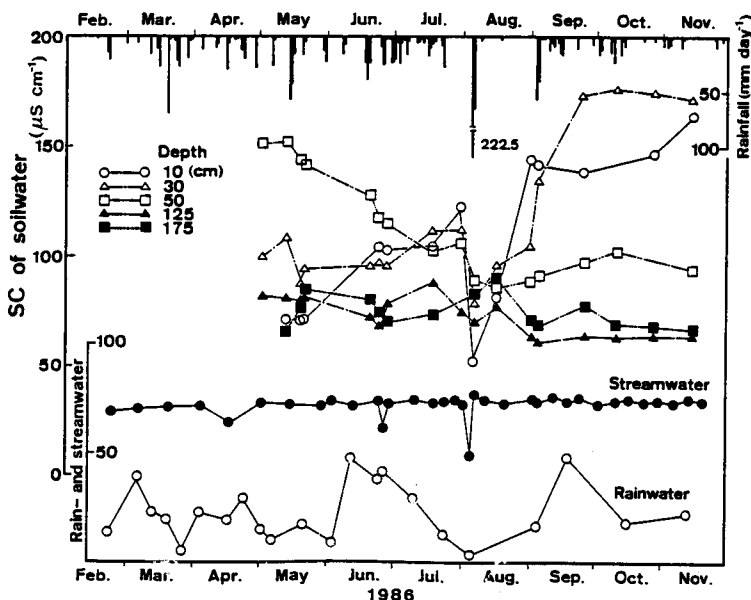


図6 土壌水質の季節変化 (電気伝導度SC)

電気伝導度SCはイオン状態に溶解した物質濃度を反映しているため、物理・化学的意味はあいまいであるが、分析が容易であるため有用なトレーサとなっている。125cmと175cm深のSCはSiO₂と同様目立った変化は認め難い。ただSiO₂との相違は、雨水中にも観測されることである。降雨毎の変動が大きく、ここでは3.6～47.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲にあり、渓流水質70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ に匹敵するような降雨もある。降雨との対応を見ても、8月上旬に観測された総雨量291mm時には表層土壌水でSC値は減少しているが、これを別にすると、降雨浸透による際立ったSC値の減少は現れていない。概して、表層土壌水のSC値は深部より高く、この傾向は9月以降より明瞭になっている。しかし、表層土壌で高いと言っても、9月以降の10cm深でも175 cm深の2倍程度であり、NO₃-N濃度の14倍に比べれば小さい。

以上は全てB4地点で得られた資料である。A4地点について言えば、濃度値に違いはあっても、NO₃-NとSiO₂はB4とほぼ同様な挙動を示す。SCについて、2月から8月にかけて表層土壌で深層より小さくなるが、9月以降はB4地点と同様、表層土壌で深層より高まっている。

3. 降雨時の渓流水質

図7から図10に総雨量26.5mm及び291mm時に得られた渓流水のNO₃-N、SiO₂、SCの経時変化を示している。総雨量26.5mm時のNO₃-Nについて（図7）、水量ピーク時に最小濃度となり、水量逓減時に増加する。この降雨の前後で観測された土壌水質は図2の通りである。そして逓減時に現れる最大濃度は降雨前の濃度を上回り、Type-2の特性を有していることが分かる。一方、SiO₂とSCは水量逓減時にほぼ降雨前のレベルに回復している。この流出特性はType-1に属する。さらにSiO₂とSCをトレーサとし、mass balance法を用いて降雨流出量に占める地中水の割合を求めると、それぞれ91.3と91.8%となり、両者にほとんど差はない。

総雨量291mm時のNO₃-N（図9）についても水量逓減時に最大濃度が現れ、依然としてType-2の流出特性を示している。その後濃度は徐々に低下するが、降雨終了後10日経過しても渓流水濃度は2.1mg/lであり、降雨前の1.6mg/lを上回っている。SiO₂とSCはこのケースでもType-1の流出特性に属するが、降雨前のレベルを回復するまでに要する時間が異なる。すなわち、SCは降雨終了後、速やかに元に復するのに対し、SiO₂は降雨終了後5日経過して降雨前の濃度値を回復する。これは図3にある土壌水質の鉛直分布を反映した結果と考えられ、土壌表層付近の希釈が大きかった分、渓流水のSiO₂の回復に長時間要したと推察される。さらに

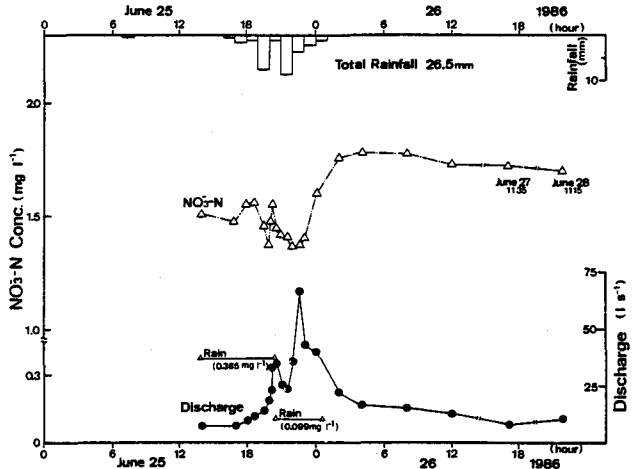


図7 NO₃-Nの降雨流出特性（1986年6月25日～26日）

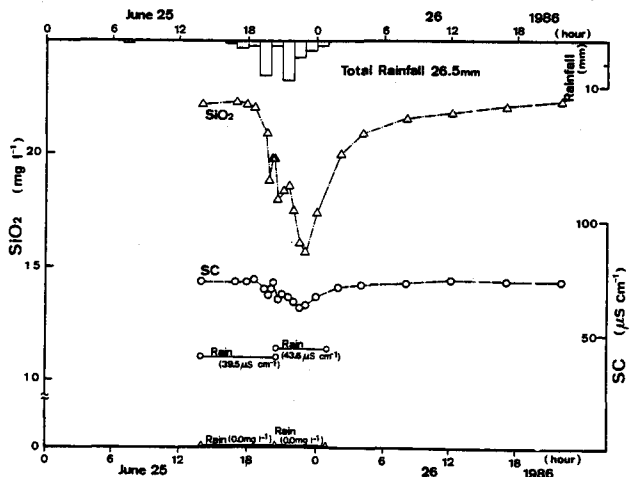


図8 SiO₂とSCの降雨流出特性（1986年6月25日～26日）

上と同様 mass balance 法から降雨流出量に占める地中水の流出量を計算すると、図10の水質時系列を反映して、 SiO_2 で67.1%、SCで88.8%となり、両者にかなりの差が生じることになる。

4. おわりに

降雨時に観測された渓流水質から、溶存物質の降雨流出形態は大略2つのパターン、すなわち水量逓減時にほぼ降雨前の濃度レベルに回復するType-1と降雨前のそれを上回るType-2に分類できることを指摘してきた。Type-1の代表的な水質に SiO_2 と電気伝導度があり、Type-2には $\text{NO}_3\text{-N}$ がある。著者等は水量逓減時の水質濃度の違いは地中水の流出に由来すると考え、土壌水質の鉛直分布を調べた。

土壌水質の鉛直分布と季節変化から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ については土壌表層付近に高濃度で存在すること、また降雨の少ない秋季以降冬季にかけて、その値は深層の10倍以上であることが明らかにされた。 SiO_2 については、冬季には鉛直方向にほぼ一様であり、また雨の多い季節には降雨浸透による希釈もあって、表層付近の SiO_2 は深層より減少している。電気伝導度は概して表層付近で高くなる傾向があるが、鉛直方向の変動幅は6月で47%程度、また表層と深層の差の大きくなる秋季以降で2倍程度におさまっている。この鉛直方向の変動幅は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ に比べてかなり小さい。水量逓減時には土壌表層近くの地中水が流出していると考えれば、上に述べた土壌水質から定性的にはType-1とType-2の流出パターンの違いを説明できる。しかし、土壌水質は先行降雨の有無、対象降雨の総雨量や強度によって変動し、加えて土壌水質自体季節変化を示す。今後も土壌水質と渓流水質の観測例を増し、森林域からの溶存物質の流出機構を調べて行きたい。

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し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹内・坂本・本郷 (1984) : 第28回水理講演会論文集, 557-565.
- 2) Hino, M. and M. Hasebe (1986) : J. Hydrol., 85, 251-264.
- 3) 村岡・平田 (1986) : 国公研研究報告, 95, 21-35.
- 4) 平田・村岡 (1986) : 第30回水理講演会論文集, 43-48.
- 5) 平田・村岡 (1986) : 第41回土木学会年講, 33-34.
- 6) 河原 (1976) : 日本林学会誌, 58(10), 353-359.

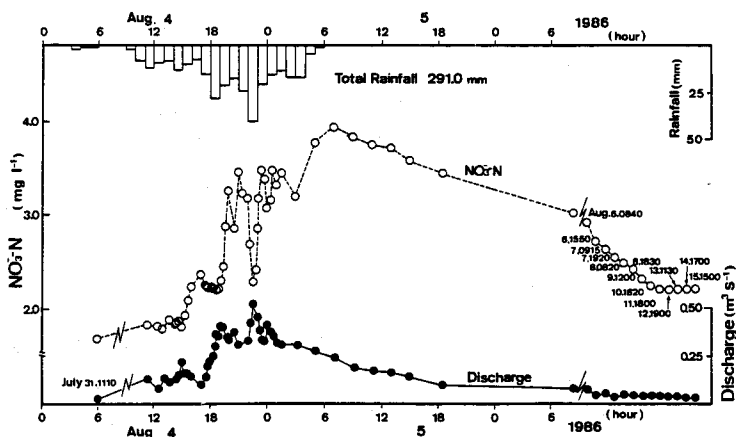


図9 $\text{NO}_3\text{-N}$ の降雨流出特性 (1986年8月4日～5日)

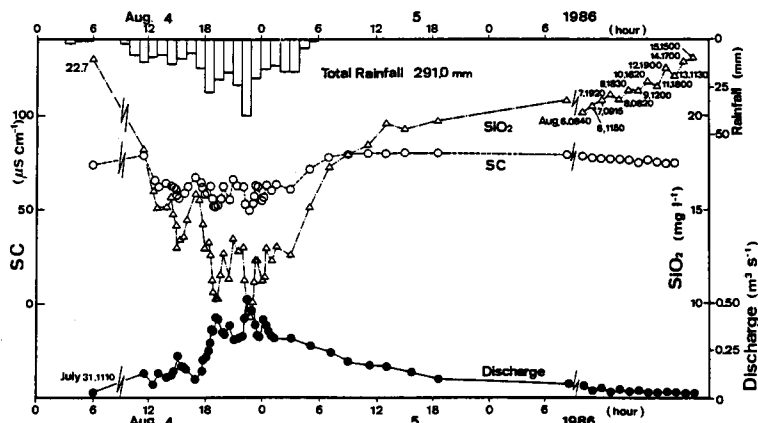


図10 SiO_2 とSCの降雨流出特性 (1986年8月4日～5日)