

# 森林域における物質循環特性の溪流水質に及ぼす影響

## EFFECT OF ELEMENT CYCLE ON STREAMWATER CHEMISTRY IN FORESTED BASIN

平田 健正\*・村岡 浩爾\*\*

By Tatemasa HIRATA and Kohji MURAOKA

Two types of the chemical changes of streamwater during storm runoff were found : Type I which recovers approximately the same concentration in the recession limb as the baseflow level prior to the runoff event ; Type II which overshoots the baseflow level. Main solute belonging to Type I is  $\text{SiO}_2$ , and that to Type II is  $\text{NO}_3^-$ -N.

To relate the element cycle in forest ecosystem to the streamwater chemistry, element content in forest soil was analyzed. This proves that silicon content in forest surface soil is somewhat lower than in deeper soil, while nitrogen becomes greatly enriched in surface soil. Besides, the difference between element contents in soil makes a change of vertical soilwater chemistry in  $\text{SiO}_2$  and  $\text{NO}_3^-$ -N concentrations, and consequently generates the chemical changes of streamwater through soilwater leaching.

**Keywords :** storm runoff, streamwater chemistry, soilwater chemistry, element content in soil, forest ecosystem

### 1. 緒 論

降雨時の河川水は流量に加えて水質も変化するが、この水質変動時系列から降雨流出成分を分離する試みがなされている。水温 (Kobayashi (1985)<sup>1)</sup>), 電気伝導度 (Pilgrim et al. (1979)<sup>2)</sup>, 田中ら (1984)<sup>3)</sup>,  $\text{NO}_3^-$  (海老瀬ら (1979)<sup>4)</sup>, Takeuchi・Sakamoto (1986)<sup>5)</sup>、環境同位体 (Sklash・Farvolden (1979)<sup>6)</sup>, Hino・Hasebe (1986)<sup>7)</sup>、など追跡子は違っても、その根拠は河川水を構成する表面、中間、地下水の各流出成分に含まれる物質濃度が異なることによっている。したがって成分分離に水質情報を用いる場合、流出成分とそれらの発生の場の物質濃度との関係を明確にしておかねばならない。

著者らも筑波山系に設けた流域面積 67.5 ha の森林試験地で、降雨・林内雨・土壤水・地下水・溪流水の水質季節変化と降雨時の溪流水質変化を観測してきた<sup>8)</sup>。森林域からの物質の流出機構を対象とするとき、森林生態系における物質移動特性にも注意を払う必要がある。入力としての降雨は樹木と接触することによって林内雨や

樹幹流となり、質・量ともに変化して林床に届く。さらに養分物質であれば表層土壤から植物体に吸収され、その半量は生長量として植物体に固定され、残りの半量は落葉・枝条や林内雨・樹幹流に溶脱されて林床に還元される<sup>9)</sup>。したがって森林生態系での物質循環に組み込まれた養分物質は生態系内を循環しやすく、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もつと考えられる。こうした循環特性は最終的に森林土壤中の物質存在量や鉛直分布、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。これらの考察を踏まえて、Muraoka・Hirata<sup>10)</sup>は森林表層土壤を中間流出発生の場と考え、土壤水質の鉛直分布と降雨時の溪流水質変化との関連について検討した。ただ、物質ごとの流出特性の違いを説明するには水質調査はもちろん、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。

本研究では最初に降雨時の溪流水質変化から溶存物質の流出特性をパターン分類し、その流出特性と土壤水質の鉛直分布や季節変化とを対応付けることによって、森林域からの溶存物質の流出機構が検討される。既述のように、森林域からの流出現象は物質固有の循環特性に強く依存していると思われるが、安定した生態系を完成するのにきわめて長い時間を必要とする森林の性質からみて、短時日に物質循環特性や循環量を調べることは難し

\* 正会員 工博 国立公害研究所主任研究員 水質土壤環境部 (〒305 茨城県つくば市小野川16-2)

\*\* 正会員 工博 国立公害研究所部長 水質土壤環境部 (同上)

い。そこで、森林生態系における物質循環を森林土壤に含まれる物質量やその鉛直分布の違いをもって評価し、土壤水質の起源や土壤水の流出の溪流水質に及ぼす影響を明らかにする。

## 2. 筑波森林試験地と現地観測

### (1) 森林試験地の概要

森林試験地は茨城県新治郡八郷町中山地先にあり、筑波山南東斜面に位置する。Fig. 1 にみるように流域は扇形に展開しており、面積は 67.5 ha である。流域内には北から A, B, C の 3 本の渓流が流れ、流域出口の A 1 地点上流で合流している。標高は A 1 地点で 200 m、最高点は A 沢最上流の 380 m であり、平均斜度は 15 度である。地質は B 沢より北側で花崗岩、南側で黒雲母片麻岩となっている。また観測井 W 1 と W 2 の掘削時に GL-10 m 付近に基岩が現われ、さらに A 1 地点の下流に基岩の露出が確認できることから、流域内の水はほぼ A 1 地点に向かって集水されると判断した。

試験地内はほぼ全域にわたって植林が施されている。沢沿にスギ（流域の 53 %）、尾根部にヒノキ（18 %）とアカマツ（14 %）が広がり、これら 3 種で全流域の 85 % を占める。残りはスギとアカマツの植林に囲まれて局在するクヌギ～コナラを中心とした落葉広葉樹とモミ林である。施肥は行われておらず、試験地は自然状態にある。これらの流域特性は村岡・平田（1986）<sup>11)</sup>に詳しい。

### (2) 観測

筑波試験地は降雨・林内雨・土壤水・地下水・溪流水の順に鉛直水移動に伴う水質変化が観測できるよう設計されている。降雨は A 1 地点近くの裸地に転倒マス型雨量計を設け、10 分降雨強度を測定する。これとは別にポット型雨量計（内径 18 cm、深さ 30 cm のガラス円筒）も設置し、水質分析用の降水も集める。落葉・落枝や林内雨は本論文では扱わないが、Fig. 1 中のヒノキ①、スギ②、落葉・広葉樹③の 3 プロットで観測している。

土壤水はスギ林内の A 4 と B 4 の 2 地点で採取した。スギ林内は光環境が悪く、両地点とも林床植物はみられない。採取地点はいずれも渓流から約 9 m、水面から 1.4 m の高さにある。直径 2 cm、長さ 5 cm の素焼きのポーラスカップをポリエチレンロッドの先端に取り付け、所定の深度まで押し込む。採取深度はリター層を取り除いた地表面から測定して、10, 20, 30, 50, 75 (または 95), 125, 175 cm の 7 深度である。そしてポーラスカップ内にサクションをかけ、土壤水を吸引する。地下水は W 1 と W 2 の 2 地点で採取し、水位も自記記録される。

溪流水は流域出口の A 1 地点も含め、Fig. 1 に●で示

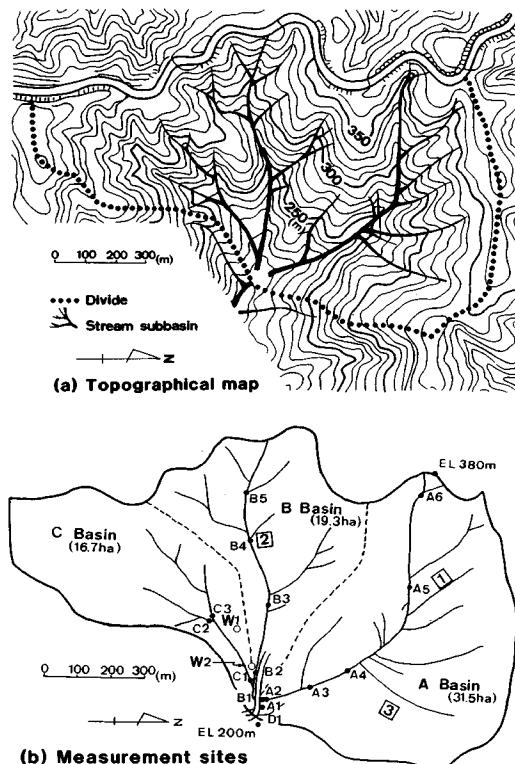


Fig. 1 Outline of Tsukuba experimental forested basin.

された 15 地点で採取しているが、本論文での溪流水質は以後、特に断らない限り、A 1 地点の分析値である。また流量は A 1 地点に自記水位計を設置しており、観測水位から算出している。

水質分析用の降水は毎週もしくは 1 雨ごとに回収するが、これ以外の試料はすべて 2 週に 1 度採取した。これらの定期調査に加え、降雨に対する溶存物質の応答特性を調べるために、A 1 地点で降雨時の溪流水質と流量の連続観測も実施した。水質分析項目は栄養塩類、金属元素、SS、pH、電気伝導度 (SC) である<sup>11)</sup>。降雨、林内雨、地下水、溪流水の観測は 1984 年 9 月から、土壤水は 1986 年 2 月から継続されている。

以上の観測に加えて、森林土壤中の物質存在量を調べるため、1987 年 3 月 20 日に A 4 と B 4 の 2 地点で森林土壤を採取した。両地点とも、土壤水採取地点と同一斜面で 5 m 離し、標高もほぼ等しい位置を選んだ。採取深度は 30 cm 深までは 5 cm 間隔、それ以深は適当に間隔を広げ、1 m 深まで断面を切った。土壤の鉛直分布特性や元素分析法については後述する。

## 3. 降雨時の溪流水質変化

観測開始以来、これまでに 4 つの降雨流出資料が得られている。観測日時の順に、総雨量 48.0 mm (Event 1

: 1985年6月13日～14日), 136.5 mm (Event 2 : 1985年6月30日～7月1日), 26.5 mm (Event 3 : 1986年6月25日～26日) と 291.0 mm (Event 4 : 1986年8月4日～5日) の4ケースであり, このうち Event 2 と Event 4 は台風 8506 および 8610 によってもたらされた。ここでは降雨が数回に分かれている Event 2 と単一降雨である Event 3 の結果を紹介する (Fig. 2 (a) と (b))。

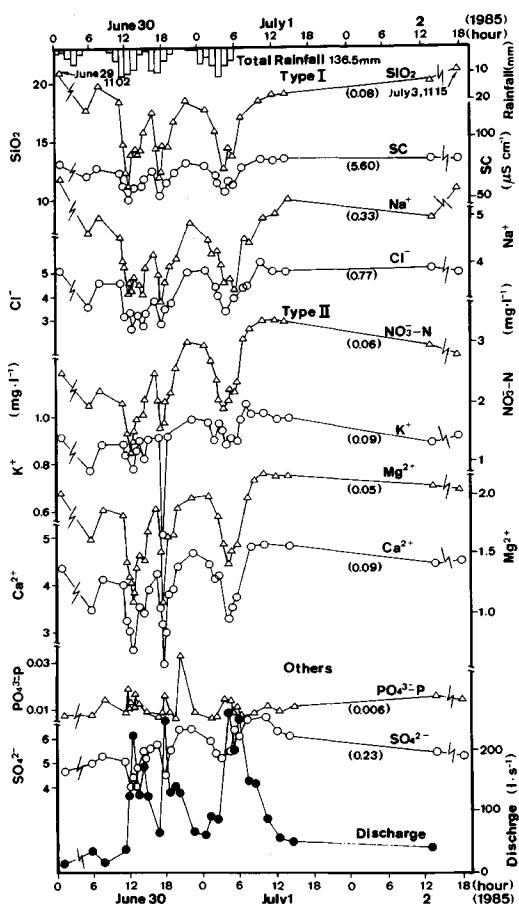
Event 2 と Event 3 の水文条件は次のとおりである。

Event 2 : 降雨パターンは4つに分かれ, 最大時間雨量は時間経過の順に 6.5, 12.0, 10.5, 12.5 mm/h である。先行降雨は6月28日に48 mm, 29日に1 mm である。また観測は第1番目の降雨終了時から始まっている。そのため降雨前の水質として6月29日の資料を図中に載せている。

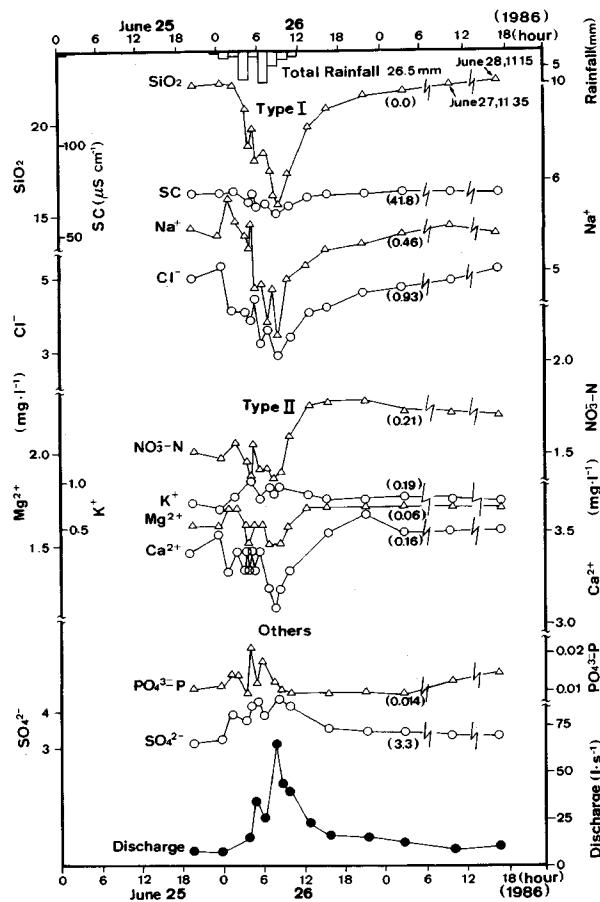
Event 3 : 総降雨量は 26.5 mm と 4 回の観測値の中で最も小さい。しかし降雨継続時間は 9 時間と比較的短く、最大時間雨量は 8.5 mm/h となっている。先行降

雨は6月21日に 1.0 mm, 24日に 7.0 mm である。

Fig. 2 より、降雨時の溪流水濃度は流量増加時に減少し、ピーク流量時付近で最小となり、通減時に増加する。降雨パターンが複雑で、流量の増減が繰り返されても (Fig. 2 (a)), また単一降雨の場合においても (Fig. 2 (b)), 溪流水濃度は流量時系列と逆位相の関係を保っている。そして、降雨に対する溶存物質の応答特性の違いは、通減時に現われ、濃度が降雨前のベース値に回復する物質とこれを上回る物質に大別される。前者を Type I, 後者を Type II とよぶことにすれば、Type I の代表的な物質に溶存珪酸 ( $\text{SiO}_2$ ), Type II に硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3^-$ -N) がある。これ以外にも電気伝導度 (SC),  $\text{Na}^+$  や  $\text{Cl}^-$  は Type I,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  と  $\text{Ca}^{2+}$  は Type II の流出特性を示す。ただ  $\text{SO}_4^{2-}$  や  $\text{PO}_4^{3-}$ -P は降雨強度や降雨パターンによって変化し、どちらとも分類し難い。もちろん細かくみれば  $\text{Na}^+$  や  $\text{Cl}^-$  濃度などは降雨流出初期に高まる傾向があり (Fig. 2 (b)), 電気伝導度も通減時にわずかではあるがベース値より大きくなる特徴をも



(a) Event 2 (Jun. 13-14, 1985)



(b) Event 3 (Jun. 25-26, 1986)

Fig. 2 Changes of streamwater chemistry during storm runoffs of Event 2 and Event 3.

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<sup>8)</sup>。またFig.2はType IとType II別に降雨時の溪流水質変化を描いたものである。

著者らはType IのSiO<sub>2</sub>、Type IIのNO<sub>3</sub>-Nの流出特性は森林域からの物質の流出機構を解明する重要な手掛りになるとを考えている。SiO<sub>2</sub>は降水には含まれない物質であり、植物体の代謝に多量には必要とされず、他方NO<sub>3</sub>-Nは降水にも含まれ、養分物質であるから森林内の循環量も多い物質と考えられるからである。以後、本論文ではSiO<sub>2</sub>とNO<sub>3</sub>-Nを中心に考察を加える。

Event 2とEvent 3について、溪流水のSiO<sub>2</sub>およびNO<sub>3</sub>-N濃度Cと流量Qの関係を示すとFig.3(a), (b)のようである。濃度Cと流量Qはそれぞれの降雨前のベース値C<sub>b</sub>とQ<sub>b</sub>で除して無次元表示している。また降雨停止時刻を図中に矢印で示した。Event 2では流量の増減が繰り返されるが、SiO<sub>2</sub>とNO<sub>3</sub>-Nとともにそれぞれの流量増加時に濃度が減少し、通減時に増加することがわかる。降雨流出時のSiO<sub>2</sub>濃度は、ベース値より常に小さく( $C/C_b < 1.0$ )、希釈される一方である。これに対して、NO<sub>3</sub>-N濃度は降雨停止後にベース値を上回り( $C/C_b > 1.0$ )、その後に最大値をとる。Event 3についても、SiO<sub>2</sub>濃度は常にベース値より小さく、NO<sub>3</sub>-N濃度はほぼ降雨停止時刻にベース値を超えている。

本論文では、水質的には降雨と等しく、土壤中には浸透せずに地表面を流れる成分を表面流出成分、また比較的早く表層土壤から流出する成分を中間流出成分と定義する。対象降雨に含まれる物質濃度はFig.2にあるそれぞれの溪流水質時系列に()内数字で添えている。単位は電気伝導度でμS/cmである以外、すべてmg/lである。これより降水に含まれる物質濃度は溪流水のベース値よりかなり小さいこと、またFig.3にあるように、SiO<sub>2</sub>とNO<sub>3</sub>-Nの溪流水濃度は流出特性に違いはあるが、流量に対して反時計回りのループを描くことから、Type IとType IIの物質について、次のことが推論できる。

- 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) 降雨停止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るなければならない。

以上の考察から、表層土壤を中間流出発生の場と捉え、

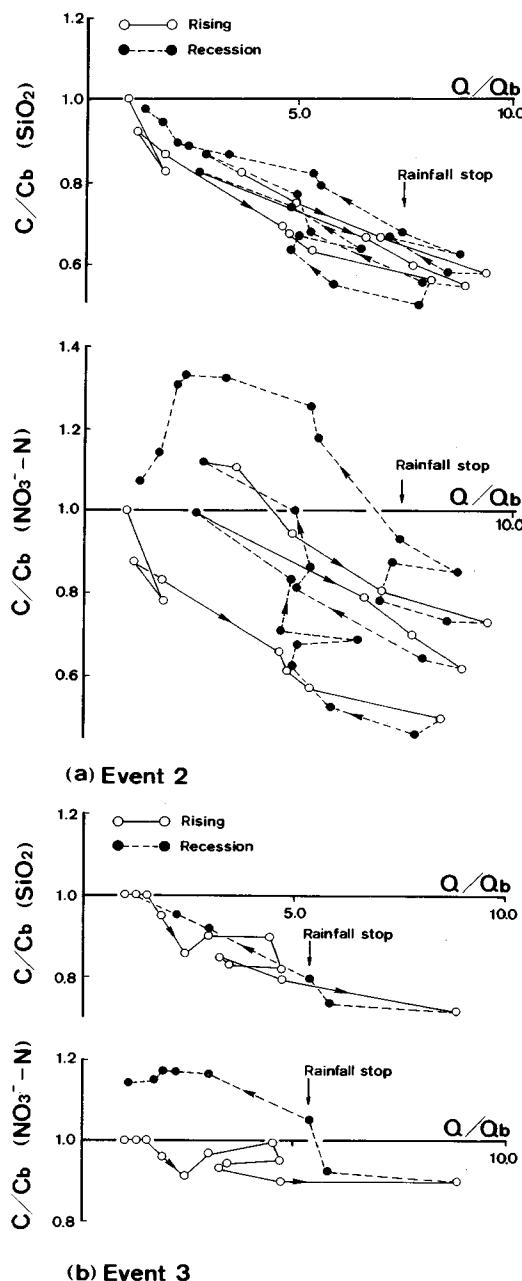


Fig.3 Changes of SiO<sub>2</sub> and NO<sub>3</sub>-N concentrations in streamwater against stream discharge during storm runoffs.

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た。

#### 4. 土 壤 水 質

##### (1) 鉛直分布特性

Fig.4は1986年2月13日にスギ植林地のB4地点で得られた土壤水に含まれるSiO<sub>2</sub>とNO<sub>3</sub>-N濃度の鉛直

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か月の総雨量は2mmである。 $\text{SiO}_2$ 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、鉛直分布に際立った変化は認められない。またこれらの濃度値は同図下部に示した溪流水濃度20.2mg/lに近い。これは深層土壤水は浸透して地下水となり、地下水流出を介してベース状態の溪流水と結び付いていることを示唆している。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度についていえば、土壤表層付近の10cm深では17.9mg/lときわめて高濃度であり、溪流水濃度1.31mg/lの14倍にもなる。

次にEvent 3の降雨流出の前後で得られた土壤水質の鉛直分布をFig.5に描いている。同図にはEvent 3の降雨、地下水と溪流水のベース値も記した。 $\text{SiO}_2$ 濃度については先行降雨の洗い出しあって、深度50cm以浅では深層に比べて減少している。表層近くの $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度はFig.4と比較して減少してはいるが、10cm深の濃度は6.7mg/lと依然として高濃度を維持している。また総雨量26.5mm程度では降雨の前後で土壤水質に

大きな変化はみられない。強制的に採取した土壤水と降雨時に流出する土壤水が同じであるという保証はないが、Fig.4とFig.5は表層土壤水と深層土壤水に含まれる物質濃度の相対的な違いは表現していると考えられる。これらの結果は前節で述べた溶存物質の降雨流出特性から予想された土壤水質の鉛直分布とはほぼ整合する。

## (2) 季節変化

ここでは土壤水質の季節変化について考察する。Fig.6はB4地点表層の10, 30, 50cm深、および深層の125, 175cm深の $\text{SiO}_2$ 濃度を図化したものである。データは1986年2月から1987年4月までを使用し、図中上段に日雨量、下段に溪流水濃度を描いている。後述するように、 $\text{SiO}_2$ は土壤母材を起源としており、したがって水分の土壤との接触時間が長いほど、濃度は高まることになる。Fig.6にあるように、深層(125cmと175cm)と浅層(10cmと30cm)の濃度値を比べると、深層の土壤水ほど、濃度は高まっている。また10cm深の値は降雨の影響が大きく、中でも総雨量291.0mmのEvent 4(1986年8月4日~5日)で著しい濃度減少がみられる。1986年4月から1987年3月までの1年間を対象にすると10cm深の $\text{SiO}_2$ 濃度は7.2から21.0mg/lの範囲にあるのに対し、175cm深のそれは20.3から25.4mg/lの間にあり、変動幅も小さい。年平均値にすると、10cm深で14.0mg/lになるのに対し、175cm深では21.9mg/lである。

次に、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度(B4地点)の季節変化を描くとFig.7となる。同図には日雨量と溪流水濃度に加えて、日平均気温<sup>12)</sup>と降水に含まれる $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度も記載した。Fig.7より、10cmと30cm深で明瞭な季節変化が認められる。すなわち、1986年2月から5月にかけて減少し、その後上昇に転じる。6月以後、降雨の溶脱による一時的な濃度低下、特にEvent 4による減少は大きいが、増加の傾向には変わりなく、9月から10月にかけて最大となる。その後1987年1月までは高濃度を維持している。1986年3月から7月までの月雨量をみると、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、2月から5月にかけて濃度は減少し、その後上昇している。こうした変動に降水も関与しているが、降雨流出による $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の溶脱だけでは表層土壤水に含まれる $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の季節変化は説明できない。また表層で濃度変動の大きいことは $\text{SiO}_2$ と同じであるが、Fig.4で述べたように表層土壤水で濃度が高まるところに $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の特徴がある。1986年4月から1987年3月までの1年間を例にとると、10cm深で1.34から13.8mg/lの範囲にあるのに対し175cm深では0.57から2.99mg/lと変動幅は小さい。年平均値にするとそれぞれ8.30, 1.42mg/l

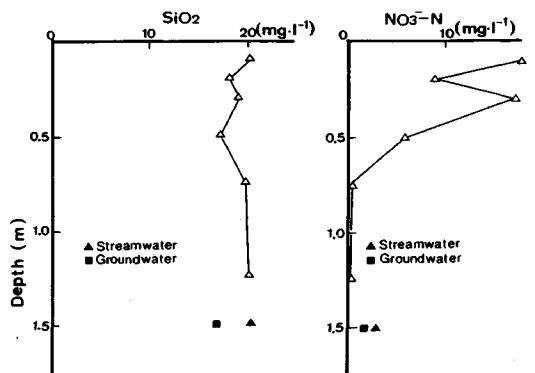


Fig.4 Vertical profile of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentrations in soilwater observed on Feb. 13, 1986.

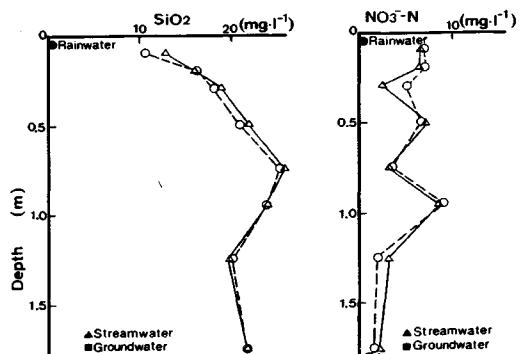


Fig.5 Vertical profile of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentrations in soilwater before and after Event 3. Symbols refer to sampling times, △: 1100 on 23rd-1100 on 24th, June and ○: 1800 on 25th-0900 on 26th, June 1986.

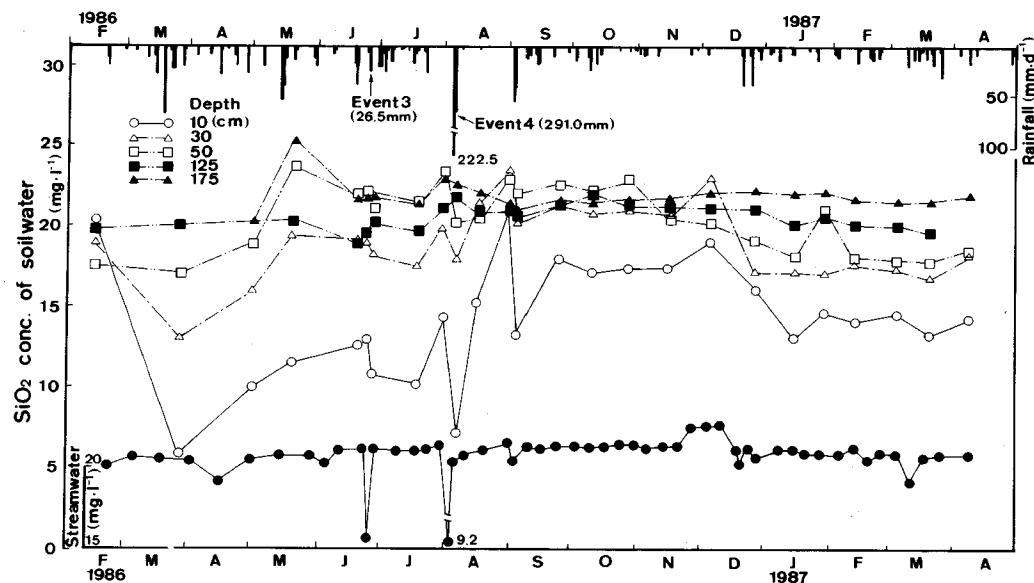


Fig. 6 Seasonal changes of  $\text{SiO}_2$  concentration in soilwater at various depths from Feb. 1986 to Apr. 1987.

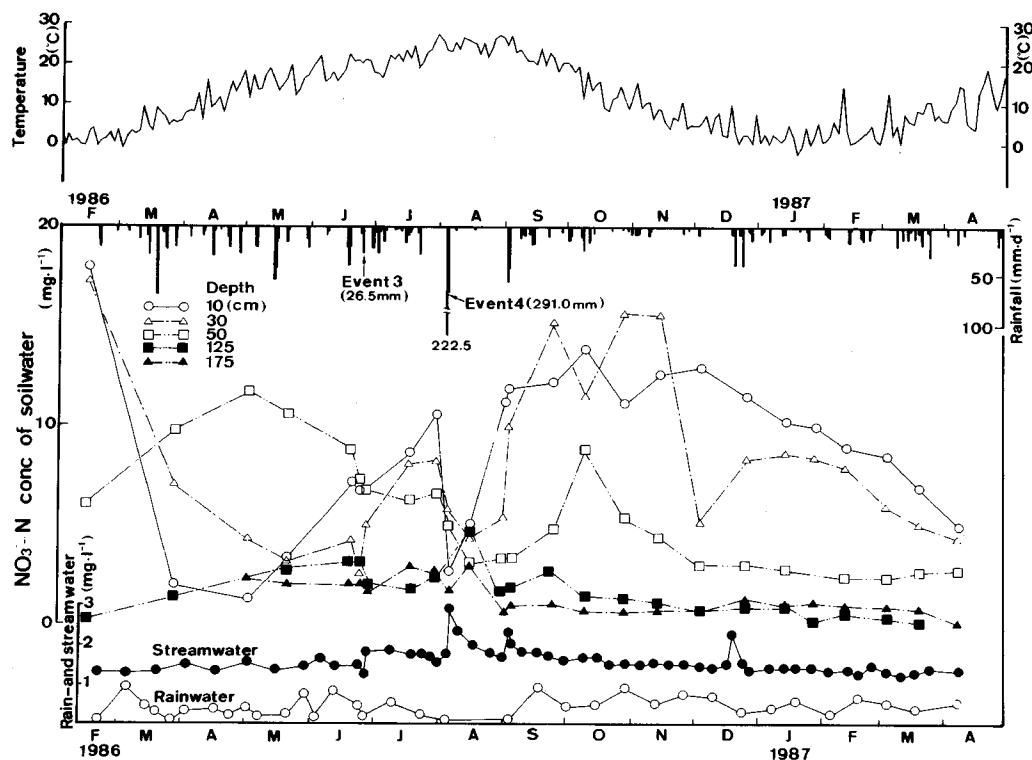


Fig. 7 Seasonal changes of  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in soilwater at various depths from Feb. 1986 to Apr. 1987.

となり、表層土壤水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は深層の 5.8 倍にもなっている。

$\text{NO}_3\text{-N}$  は降水にも含まれる物質である。1986 年 4 月から翌年 3 月までの 1 年間について平均すると、降水中

の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は  $0.36 \text{ mg/l}$  であり、無機態窒素 ( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ) の合計でみても  $0.65 \text{ mg/l}$  にしかならない<sup>13)</sup>。さらに無機態窒素のすべてが硝化され、 $\text{NO}_3\text{-N}$  になったとしても、表層土壤水にある  $\text{NO}_3\text{-N}$  の起源を

降水にのみ求めるならば、表層土壤中で 12.8 倍にも濃度が高まる必要がある。

$\text{SiO}_2$  も含め土壤水中の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を説明するには、これらの物質の森林域での循環特性に加え、森林土壤中の存在量やその起源を明らかにしなければならない。

## 5. 森林生態系における物質循環と土壤水質

### (1) 土壌断面の特性と元素分析

森林生態系における物質循環と土壤中の物質存在量を関係付けるため、1987年3月20日に森林土壤を採取した。土壤を採取した A4 と B4 地点はともに約 1.7 m 間隔で整然とスギ（樹齢 30 年）が植林されている。採取地点も含めその周辺で、 $A_0$  層は 1 cm 程度か、それ以下であった。また表層土壤は黒味を帯びた褐色森林土壤で、樹木の毛根が多い。2 地点ともに 25 cm 深位から色調が変化し始め、30 cm 深で灰色がかった小石混じりの土壤となる。1 m 深まで断面を切ったが、土壤の母材となる礫類は出なかったことから、地表面から 30 cm 深までは A 層、それ以下は B 層と考えられる。これらの断面特性を考慮して、 $A_0$  層を除いた地表面から 30 cm 深までは 5 cm 間隔、それ以降は 95 cm 深まで適当に間隔を広げ、不攪乱試料と元素分析用試料を採取した。

元素分析用の土壤は 40°C で 1 昼夜乾燥させ、毛根などの植物遺体をできるだけ除去した後、乳鉢で粉碎する。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、土壤試料の含水比は 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是行っていない。土壤中の珪素量は白金るつばを用いて試料を炭酸カルシウムとほう酸の混合物でアルカリ熔融し<sup>14)</sup>、熔融物を 1:1 の塩酸で溶解した後、その試水を原子吸光法（島津 AA-640-12）で定量した。窒素量は CN コーダー（Yanaco MT 500）で分析した。

### (2) 森林土壤中の珪素と窒素の存在量

森林土壤の珪素(Si)と窒素(N)の含有率を Fig. 8 に、

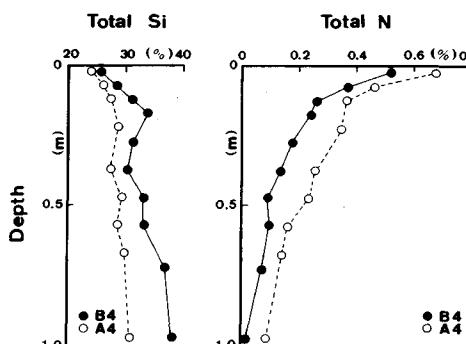


Fig. 8 Vertical profile of silicon and nitrogen contents in forest soil.

また有機物量の目安として炭素(C)と強熱減量(IL)を Fig. 9 に示す。ここに含有率は土壤乾重に対する割合であり、炭素量は窒素と同じ CN コーダーで分析した。

Fig. 8 より珪素の含有率は、B4 地点の方が A4 地点より高い。こうした地域的な違いはあるものの、1) 20 cm 以浅で珪素の含有率は低く、腐植物の多い A 層の特徴を示し、2) B4 地点の含有率は 20 cm から 50 cm 深にかけてわずかに減少するが、これを別にすれば深さ方向に漸増する性質は両者に共通して認められる。また筑波森林試験地の珪素の含有率は 23.9% から 38.1% の範囲にあり ( $\text{SiO}_2$  にすれば 51.5~81.5%)、一般に土壤に含まれる珪素量 25~41%<sup>15)</sup> に収まっている。

窒素について、その含有率は表層土壤で高く、深さとともに指数関数的に減少している。B4 地点についていえば、表層 5 cm 深で 0.52% の含有率が 95 cm 深で 0.017% となり、1/30 にまで減少する。A4 と B4 地点を比較すると、珪素の含有率の高いほど、窒素の含有率は低くなっている。また炭素量と強熱減量(600°C で 2 時間加熱したときの重量減少率)<sup>16)</sup> は有機物量の目安とされているが、いずれも窒素と同様表層土壤で高く、深さ方向に減少する。特に 5 cm から 15 cm 深にかけての減少率が大きく、土壤のごく表層に多量の有機物が蓄えられていることが理解される。そして有機物量の多いほど珪素の含有率は低く、森林土壤の形成過程もうかがえる。

### (3) 硅素と窒素の起源

溶存珪酸( $\text{SiO}_2$ )と硝酸態窒素( $\text{NO}_3\text{-N}$ )濃度は降雨時の溪流水質時系列において、また土壤水質の鉛直分布でも際立った違いをみせる。さらに森林生態系での移動特性や起源においても対照的な性質をもち、その違いを土壤水質や土壤中の物質存在量をもって表現するところに本論文の主眼がある。

珪素は火成岩の主成分であり、 $\text{SiO}_2$  の形で火成岩の 40~75% を占める物質である<sup>17)</sup>。降雨にはほとんど含

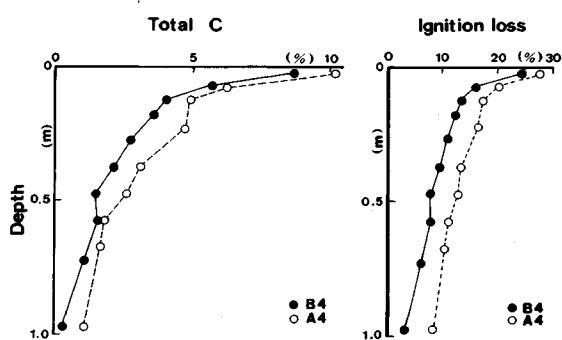


Fig. 9 Vertical profile of carbon content and ignition loss in forest soil.

まれず、その意味で純粹に土壤・岩石起源の物質といえる。事実、筑波森林試験地でも、1986年4月から翌年3月までの降水濃度を平均すれば $0.17 \text{ mg/l}$ となる。この値は溪流水の平均値 $21.7 \text{ mg/l}$ の $1/125$ にすぎない。加えて植物体の代謝に必要とされず、生態系内の循環量も窒素に比べて少ない。その結果、森林土壤の形成過程で植物遺体等の有機物が混入することによって、土壤表層で珪素の含有率がしだいに低下することになる。この様子が土壤の珪素含有率の鉛直分布としてFig. 8に描かれている。

珪素とは対照的に、窒素は降水にも含まれ、養分物質であるから植物吸収、林内雨・樹幹流や落葉・落枝に伴って森林生態系を循環する物質でもある。さらに特徴的なことは、窒素は本来土壤や岩石に含まれない物質であり、火成岩の成分をみても窒素の項目は掲げられていない<sup>17)</sup>。にもかかわらず、Fig. 8にみられるとおり表層土壤に多量の窒素が蓄えられているが、その起源は土壤微生物による大気中の窒素ガスの固定に始まる。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、落葉・落枝による林床への還元等の物質循環に伴って、多量の窒素が表層土壤中に蓄積されたと考えられている<sup>18)</sup>。Fig. 8より深度1mまでの窒素の存在量を求めるときB4地点で $10.2 \text{ t/ha}$ 、A4地点で $19.1 \text{ t/ha}$ であり、平均すると $14.7 \text{ t/ha}$ となる。ちなみに降雨によって森林試験地にもたらされる窒素( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ )は年間 $10.6 \text{ kg/ha}$ 、生長に伴って植物体に固定される量は $21.7 \text{ kg/ha}$ 、溪流水によって搬出される量は $12.7 \text{ kg/ha}$ である<sup>13)</sup>。植物体に固定される窒素量を基準にすれば、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。

#### (4) 硅素および窒素の存在量と土壤水質

筑波森林試験地の基岩は花崗岩と黒雲母片麻岩から構成されており、また珪素の分析値も既往の範囲に収まっていることから、 $\text{SiO}_2$ の起源は土壤母材と考えられる。Fig. 8にみるように、珪素の存在量は表層土壤で少なく、降雨流出による溶脱も加わって、表層土壤水の $\text{SiO}_2$ 濃度は減少しがちになるとみられる。

他方、窒素は表層土壤に多量に蓄積されているが、大部分は有機態であり、そのままでは水に溶けない。水に溶解した $\text{NO}_3^-\text{-N}$ になるには土壤微生物の硝化作用を待たねばならない。一般に有機態窒素からアンモニア態、亜硝酸態を経て硝酸態窒素にまで無機化される硝化速度は、温度が $10^\circ\text{C}$ 上昇するごとに2倍になることが知られている<sup>19)</sup>。Fig. 7上段に気象庁柿岡地磁気観測所(試

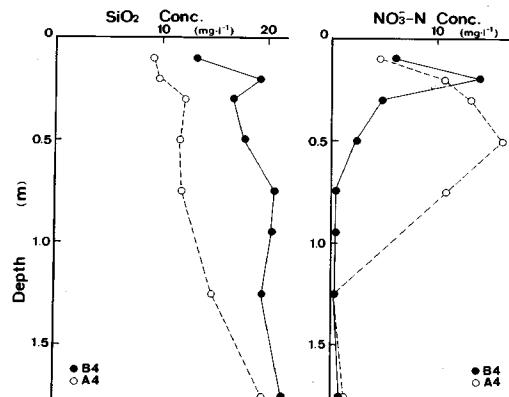


Fig. 10 Vertical profile of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentrations in soilwater observed on Mar. 20, 1987 with forest soil sampling.

験地から北東に $6.3 \text{ km}$ で記録された日平均気温<sup>12)</sup>を示しているが、筑波地方の月平均気温は1月が最も低く $1.8^\circ\text{C}$ 、2月 $2.7^\circ\text{C}$ で、最高は8月の $24.5^\circ\text{C}$ である。その差は約 $22^\circ\text{C}$ であり、8月は冬季の4倍以上有機態窒素の微生物分解が促進されることになる。これより、6月以降10月までの表層土壤水の $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の上昇は、降雨による溶脱より有機物分解による供給の方が勝っていたと考えられる。10月以降硝化速度は低下するが、降雨も少なく高濃度を維持する。12月から4月にかけては硝化は進まず、降雨流出があれば表層土壤水の $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は減少する一方となる。こうした季節変化をFig. 7にみることができる。

Fig. 10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 $\text{SiO}_2$ 濃度と $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度である。 $\text{SiO}_2$ 濃度はA4、B4地点とも深さ方向に増加傾向にあり、 $175 \text{ cm}$ 深でそれぞれ $19.7$ 、 $21.6 \text{ mg/l}$ となる。全体的にB4地点の $\text{SiO}_2$ 濃度はA4地点より高いが、これはFig. 8にある珪素の存在量の差が反映された結果と考えられる。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は鉛直分布に差はあっても、いずれも表層土壤水で高濃度を維持している。

土壤中の物質の存在量や鉛直分布形は、ただちに土壤水質と結びつくものではない。珪素にしてもすべてが溶存珪酸( $\text{SiO}_2$ )ではなく、窒素については大部分が有機態である。さらに、水と土壤との接触時間や微生物の介在といった定量困難で、しかも環境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。Fig. 8にある土壤中の珪素と窒素の存在量は土壤水質の鉛直分布を説明し得る結果である。

#### 6. 結語

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月以来筑波森林試験地において、降雨・林内雨・土壤水・地下水・溪流水といった水移動に伴う水質変化を観測してきた。特に降雨時の溪流水質変化から

- 1) 溶存物質の流出パターンには、流量減時にほぼ降雨前のベース値に回復するType Iと、これを上回るType IIのあること、
- 2) Type Iの代表的な物質に $\text{SiO}_2$ 、Type IIには $\text{NO}_3^-$ -Nがあること、また $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、電気伝導度はType Iに、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ はType IIに属すること、

が明らかにされた。

こうした降雨時の水質変化は降雨流出成分を分離する有用な情報となるが、森林域からの物質の流出機構を調べるとき、森林生態系固有の物質移動にも留意する必要がある。物質循環に組み込まれた物質と外れた物質とでは移動特性が大きく異なるからである。その意味で、Type Iの $\text{SiO}_2$ とType IIの $\text{NO}_3^-$ -Nの挙動は、水分も含めた物質の流出機構を解明するうえで重要な手掛りになると考えている。この2つの物質は起源において、また生態系内の移動特性でも際立った違いをみせる。すなわち、 $\text{SiO}_2$ は降水にはほとんど含まれず、純粹に土壤母材を起源とし、植物体の代謝に多量には必要とされない物質である。 $\text{SiO}_2$ とは対照的に $\text{NO}_3^-$ -Nは降水に含まれ、養分物質として生態系内の循環量も多い物質である。実際に森林土壤中の珪素と窒素の存在量を調べると、

- 1) 土壤の珪素含有率は表層で小さく、深さとともに増加すること、
- 2) 土壤の窒素含有率は表層で高く、深さとともに減少すること、

が確認された。これは5.(3)に述べたように、生態系における物質固有の循環特性が土壤中の物質存在量に反映された結果と考えられる。土壤中の珪素および窒素の存在量とその鉛直分布形は土壤水質を支配しており、表層土壤水についていえば $\text{SiO}_2$ では濃度が低く、 $\text{NO}_3^-$ -Nでは高濃度の水質鉛直分布を作り出すことになる。さらに、降雨時の溪流水質にみられたType IとType IIの違いは、濃度の異なる物質を溶解した表層土壤水の流出で説明できる。

$\text{SiO}_2$ や $\text{NO}_3^-$ -N以外の物質についても、その流出特性は森林生態系での物質循環に強く依存している。Type Iに分類された物質は、 $\text{SiO}_2$ も含めて $\text{Na}^+$ のように植物体の必須元素でない物質か、 $\text{Cl}^-$ のように必須ではあっても微量必須元素に属する。一方、Type IIに分類された物質はすべて多量必須元素に属する<sup>10)</sup>。Type IIの物質は森林生態系の物質循環に組み込まれることによって、表層土壤中に濃縮されたと考えられる。 $\text{SiO}_2$ や $\text{NO}_3^-$ -Nと同様、これらの物質についても、土壤中の

存在量や鉛直分布形は森林生態系での循環特性を反映していると予想される。

謝 辞：森林土壤断面や土壤の採取について当研究所・水質土壤環境部主任研究員袴田共之氏、土壤の元素分析については当研究所・水質土壤環境部室長高松武次郎氏、同主任研究員向井 哲氏、同久保井徹氏から多くのご教示をいただいた。陽イオンのICP-AES分析は、当研究所・計測技術部西川雅高氏によるものである。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Kobayashi, D. : Separation of snowmelt hydrograph by stream temperature, *J. Hydrol.*, Vol. 76, pp. 155~162, 1985.
- 2) Pilgrim, D. H., Huff, D. D. and Steele, T. D. : Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff, *Water Resour. Res.*, Vol. 2, No. 2, pp. 329~339, 1979.
- 3) 田中 正・安原正也・丸井敦尚：多摩丘陵源流域における流出機構、地理学評論、Vol. 57, No. 1, pp. 1~19, 1984.
- 4) 海老瀬潜一・宗宮 功・平野良雄：タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析、用水と廃水、Vol. 12, pp. 1422~1432, 1979.
- 5) Takeuchi, K. and Sakamoto, Y. : Hydrograph separation using  $\text{NO}_3^-$  for identifying the interaction between surface and subsurface waters in a small mountainous basin, *Conjunctive Water Use, IAHS, Publi. No. 156*, pp. 199~209, 1986.
- 6) Sklash, M. G. and Farvolden, R. N. : The role of the groundwater in storm runoff, *J. Hydrol.*, Vol. 43, pp. 45~65, 1979.
- 7) Hino, M. and Hasebe, M. : Separation of a storm hydrograph into runoff components by both filter-separation AR method and environmental isotope tracers, *J. Hydrol.*, Vol. 85, pp. 251~264, 1986.
- 8) たとえば、平田健正・村岡浩爾：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回水理講演会論文集，pp. 59~64, 1987.
- 9) 岩坪五郎：森林生態系での植物養分物質の循環、山岳・森林・生態学、今西錦司博士古稀記念論文集、中央公論社、東京、pp. 313~360, 1976.
- 10) Muraoka, K. and Hirata, T. : Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin, *J. Hydrol.* (in press)
- 11) 村岡浩爾・平田健正：溪流水質から見た森林の浄化機能に関する研究(第1報)，国公研報告、第95号、pp. 21~35, 1986.
- 12) 気象庁柿岡地磁気観測所資料、1986~1987.
- 13) 村岡浩爾・平田健正：溪流水質から見た森林の浄化機能に関する研究(第4報)，国公研報告、第116号、pp. 75~97, 1988.
- 14) 渋谷政夫・小山雄生・渡辺久男：重金属測定法、博友社、

pp. 17~19, 1978.

- 15) Bowen, H. J. M. : Environmental Chemistry of the Elements, Academic Press, pp. 60~61, 1979.
  - 16) 日本水質汚濁研究協会編：湖沼調査指針，公害対策技術同友会, p. 151, 1982.
  - 17) 牛来正夫：地殻・岩石・鉱物, 共立出版, 地球科学講座 7, pp. 65~99, 1968.
  - 18) 大政正隆：土の科学, NHK ブックス, pp. 48~64, 1977.
  - 19) たとえば, 河原 輝: リターの分解(IV) 土壌呼吸量中の根の呼吸量の推定, 日本林学会誌, Vol. 58, No. 10, pp. 353~359. (1988.1.22・受付)
-