

# 森林生態系における溶存物質濃度・量の垂直的变化(1)

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壌水の垂直的移動

|       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------|
| 誌名    | 日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society |
| ISSN  | 0021485X                                          |
| 著者名   | 徳地,直子<br>黒田,幸夫<br>岩坪,五郎                           |
| 発行元   | 日本林學會                                             |
| 巻/号   | 73巻2号                                             |
| 巻号補足  |                                                   |
| 掲載ページ | p. 135-144                                        |
| 発行年月  | 1991年3月                                           |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 論 文

# 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壌水の 垂直的移动

徳地直子\*・黒田幸夫\*\*・岩坪五郎\*

徳地直子・黒田幸夫・岩坪五郎：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壌水の垂直的移动 日林誌 73: 135~144, 1991 スギ人工林を主とする小集水域試験地において、鉛直方向の水の流れに沿って降水・林内雨水・土壌水・湧水・渓流水の質的・量的な変動を測定した。森林土壌に7種類の長さをもつパイプを垂直に挿入して低部からの流出水を土壌水として3年間継続的に採取した。冬季節風の影響で、降水・林内雨でCl<sup>-</sup>濃度が上昇した。スペクトル解析によりCl<sup>-</sup>濃度の変動の土壌下層への移動が確かめられ、各層における濃度変動の時間的ずれから求められたCl<sup>-</sup>の移動速度は0.15~0.39 cm/dayであった。土壌下層ほどCl<sup>-</sup>濃度のやまは低くなり、やまのすそは広がった。Cl<sup>-</sup>の移動速度と濃度変動が移動する期間の流出土壌水量より求めた土壌水の平均移動速度は0.28~1.06 cm/dayでCl<sup>-</sup>より速かった。Na<sup>+</sup>はCl<sup>-</sup>とともに林地に供給され、Na<sup>+</sup>濃度も表層では季節変動を示したが、下層では土壌コロイドへの吸着や溶脱のため季節変動は不明瞭になった。渓流水では、流出経路の異なる成分が混ざり合うため、季節変動は不明瞭であった。

TOKUCHI, Naoko, KURODA, Yukio, and IWATSUBO, Goro: **Vertical changes of water-chemicals in a forest ecosystem (I) Vertical movement of Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> and soil water in a sugi forest** J. Jpn. For. Soc. 73: 135~144, 1991 On a small forested watershed of sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON), the qualitative and quantitative vertical changes in water-chemicals were investigated in regard to precipitation, throughfall, soil water in seven layers, spring water, and stream run-off water, over a period of three years. Soil water was sampled using column lysimeters containing undisturbed soil. The precipitation, caused by the northwestern winter winds, contained much Cl<sup>-</sup>, reaching a yearly peak concentration in precipitation and throughfall. By means of spectrum analyses, it was confirmed that the seasonal Cl<sup>-</sup> concentration peaks in the soil water were caused by the downward movement of the peak in each upper layer with water infiltration. The height of the peak concentration became lower, and the range at the base of the peak became wider as the infiltration moved downward. The downward velocity of Cl<sup>-</sup> was calculated to be 0.15~0.39 cm/day through the time lag of the Cl<sup>-</sup> peak appearance in each layer. The real downward water velocity, which was calculated based on the Cl<sup>-</sup> peak velocity and the amount of run-off water through the lysimeters, was 0.28~1.06 cm/day more than that of Cl<sup>-</sup>. The same seasonal trend for Na<sup>+</sup> as that for Cl<sup>-</sup> was observed only on the surface and in the soil water in the shallow layers. The seasonal trend disappeared in the deeper layers because of the effect of Na<sup>+</sup> adsorption into the soil and its leaching from the soil. In run-off stream water, such seasonal trend did not appear because of the mixing of the water components, which passed along different run-off pathways.

## I. は じ め に

水に伴う溶存物質の土壌の鉛直方向への移動は、森林生態系における物質循環の主要な経路の一つである。森林を通過する水の量と質の変化過程の追跡は、

森林生態系内部の物質循環系の機構解明とともに、森林の自然浄化機能など外部環境系に及ぼす影響の把握にも重要である。

これまで行われてきた土壌中の物質移動に関する研究の多くは、均一な土層を用い定常流の条件下で行っ

\* 京都大学農学部 Fac. of Agric., Kyoto Univ., Kyoto 606

\*\* 現勤務先 日本気象協会 Jpn. Weather Assoc., Osaka 357

た実験であるため(3, 7, 8, 20), 得られた物理モデルには不均一な現実の土壌における現象との適合性が十分とはいえない場合が生じている。そこで, 非攪乱の土層を用いた室内実験も行われ(9, 10), 不均一な系における土壌中の物質移動に関する研究が進められている。今後は, 自然条件下における不規則な降水による物質移動の解明のためにも, 野外での研究がぜひとも必要である。また, 降水が溪流に至るまでの研究(1, 2, 6, 12, 14, 21)の多くは, 短期に行われた質的な研究であり, 生育期単位の長期研究や量的な面を考慮した研究(22)が望まれている。

そこで, 自然状態の森林土壌を用い3年間にわたって現地調査を行った。試験には1983年から降水と溪流水の調査が続けられている集水域を選び(15), 林内雨と7層にわたる土壌水の調査を加え, 溶存物質の鉛直方向の動きを追った。この研究ではとくに, 土壌の攪乱を抑え, 自然状態で土壌水の採取が定量的かつ継続的に行えるように採取方法を工夫した。今回は溶存物質の移動様式解明の第1段階として, 生物学的・化学的に活性度の低い $\text{Cl}^-$ (塩素イオン)の土壌水中の濃度変動を通して土壌水の移動様式を考察した。また $\text{Cl}^-$ と $\text{Na}^+$ (ナトリウムイオン)との比較を行い, 土壌中での両イオンの挙動の違いを明らかにした。今後, 他の溶存物質についても移動特性を明らかにするとともに, さらに詳細な解析を進めていく予定である。

## II. 試験地の概要

試験は琵琶湖の東南部, 滋賀県と三重県の県境に連なる鈴鹿山系にある竜王山(滋賀県蒲生郡日野町)で行った。試験地は集水域面積12.61 haの集水域内で標高約710 m, 平均斜度30度の南向き斜面下部に位置する。流域の地質は, 二疊系-ジュラ系古生層丹波・美濃帯に属し, 砂岩, 泥岩, チャートのほか, 石灰岩も分布する。土壌は適潤性褐色森林土( $\text{B}_0$ 型), 0~30 cmがA層, 30~100 cmまでがB層である。土壌断面調査の概要を表-1に示す。

現地における調査期間中の日降水量を図-1に示す。6月~翌5月を1水年として年度と記すと, 1986年度(1986年6月~1987年5月)は1,791.0 mm, 1987年度(1987年6月~1988年5月)は1,669.5 mm, 1988年度(1988年6月~1989年5月)は2,567.6 mmであった。冬期には積雪がみられ, 積雪日数および積雪深は, 20~60日で数cm~40 cm程度であった。植生は40年生のスギ人工林で, 立木本数約1,200本/ha,

表-1. 土壌断面の概要

Soil profile description for the experimental site

| 層位<br>Horizons | 深さ<br>Depths<br>(cm) | 土色<br>Colors<br>(JIS<br>notation) | 土性<br>Textures | 腐植含量<br>Humus | 飽和透水係数<br>Saturated<br>permeabilities<br>(cm/s) |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|----------------|---------------|-------------------------------------------------|
| L              | 3~6                  |                                   |                |               |                                                 |
| A              | 0~30                 | 7.5 YR 3/3                        | Silty<br>loam  | 富む<br>high    | 0.168*                                          |
| B <sub>1</sub> | 30~70                | 10 YR 4/4                         | Silty<br>loam  | 含む<br>medium  | 0.091*                                          |
| B <sub>2</sub> | 70~100               | 7.5 YR 4/3                        | Silty<br>loam  | 含む<br>medium  | —                                               |
| C              | 100~                 |                                   |                |               | —                                               |

JIS, Japan Industrial Standard.

\* 大手ら(17) OTE *et al.* (1987).

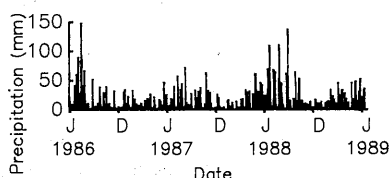


図-1. 調査期間の日降水量

Precipitation during the experimental period

J, June; D, December.

平均胸高直径24.7 cm, 樹冠はほぼ閉鎖している。下層植生にはタンナサワフタギ・コバノガマズミ・ムラサキマユミなどがみられる。

## III. 実験方法

土壌水の採取は, 内径19.5 cmの塩化ビニール製の円筒に受け皿を付けたマイクロライシメータで行った(図-2)。以下, ライシメータと記す。ライシメータは, 円筒部を採土円筒を使用する時のように周囲の根を包丁で切りながら林地に差し込み, 土壌カラムを得, このカラムに受け皿を付け, 林地に埋め戻したものである。ライシメータを通った土壌水を30 l容のポリエチレン容器に集めて採取した。この方法によれば, 従来のテンションライシメータ法のように減圧することなく土壌水を採取でき, 土壌水の溶存物質量を単位面積当たりの量に換算することが可能である。欠点は, 設置の際に植物の根を切ってしまうことである。

ライシメータは, リターのみを入れたものと円筒部が5, 10, 20, 30, 50, 70 cmのものを用意し, リターのみ, 20, 50 cmのものは2個ずつ設置した。ただし, とりまとめにあたっては繰返しによるライシメータの

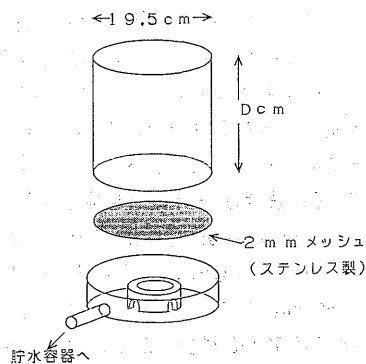


図-2. マイクロライシメータの構造

Outline of the lysimeter apparatus

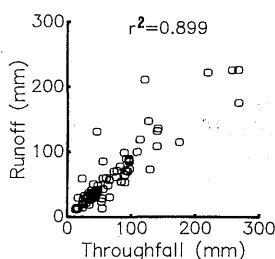
 $D=5, 10, 20, 30, 50, 70$ 

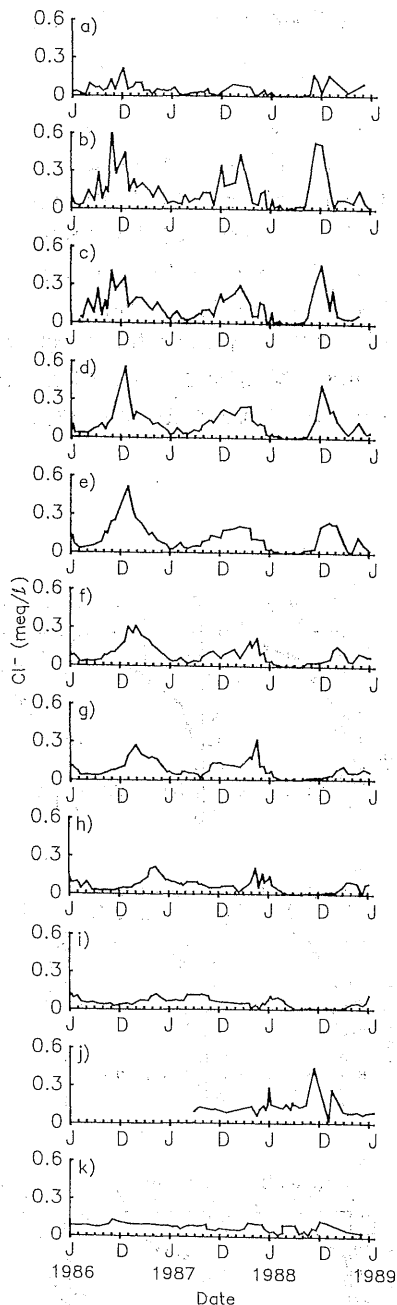
図-3. 林内雨量と70 cm マイクロライシメータの流出水量の関係

Relationship between the amounts of throughfall and discharge in a 70 cm deep lysimeter

濃度・採水量間に有意な差はみられなかったため、貯水器の転倒等による欠測の少ないものを用いた。これらは約  $2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$  の範囲に設置した。設置後はリター等の添加は行わず、自然の状態を保った。ポリエチレン容器に集まった土壌水を週1回（冬期は2週間に1回）計量後、持ち帰り分析に供した。土壌水と同時に、降水・林内雨水・溪流水も採取した。林内雨は試験地に設置した口径20.5 cmの雨量計により採集した。林外雨は試験地より100 mほど離れた地点で同様に採取した。1987年6月からは、試験地から5 mほど下部の湧水も採取した。

$\text{Cl}^-$ の分析はイオンクロマトグラフィー法、 $\text{Na}^+$ は炎光光度法によって行った。

土壌試料はライシメータから等高線沿いに5 mほど離れた地点で採取した。土壌の分析は2 mmの円孔篩を通過した細土について、置換態の $\text{Na}^+$ はpH 7.0に調整した1 N 酢酸アンモニウム溶液による抽出液、 $\text{Cl}^-$ は水抽出液について行った。土壌の $\text{Na}^+$ 総量は、

図-4.  $\text{Cl}^-$ 濃度の経時変動 $\text{Cl}^-$  concentration fluctuation over time

a), 降水 ; b), 林内雨 ; c), リター層 ; d), 5 cm 層 ; e), 10 cm 層 ; f), 20 cm 層 ; g), 30 cm 層 ; h), 50 cm 層 ; i), 70 cm 層 ; j), 湧水 ; k), 溪流水。J, 6月 ; D, 12月。

a), Precipitation ; b), Throughfall ; c), Litter layer ; d), 5 cm depth ; e), 10 cm depth ; f), 20 cm depth ; g), 30 cm depth ; h), 50 cm depth ; i), 70 cm depth ; j), Spring ; k), Stream. J, June ; D, December.

細土をフッ化水素酸で分解した後、同様に測定した。

#### IV. 結 果

採水期間ごとの降水量と林内雨量の間には、降水量が少ないときには林内雨量は降水量よりやや少なく、降水が 200 mm を超すと林内雨量が降水量を上回る関係がみられたが、林内雨量は降水量に直線ではほぼ近似された ( $r^2 > 0.8$ )。各ライシメータからの流出水量は、林内雨に対して 0.9~1.3 倍の範囲にあった。すべてのライシメータで流出水量は林内雨量と強い相関をもった ( $r^2 > 0.8$ )。採水期間ごとの林内雨量と 70 cm のライシメータからの流出水量の関係を例として図-3 に示す。

実験期間の降水、林内雨、リター層を通過した水、各層土壤水、湧水および渓流水の  $\text{Cl}^-$  濃度の変動を図-4 に示す。湧水の採水回数が他より少ないのは、降水の少ない時期には水が渴れたためである。

降水・林内雨・リター層・すべての層における土壤水において、 $\text{Cl}^-$  濃度は一山型の明瞭な季節変動を示した。濃度の上昇した時期は各段階でそれぞれ異なり、上層ほど早い傾向があった。すなわち、降水では 11~1 月頃、林内雨・リター層では 11 月~2 月頃、5 cm 層・10 cm 層では 12~3 月頃、20 cm 層・30 cm 層では 1~4 月頃、50 cm 層・70 cm 層では 3~6 月頃上昇した。なお、5 cm 層とは地表面から 5 cm を通過した土壤水のことである。

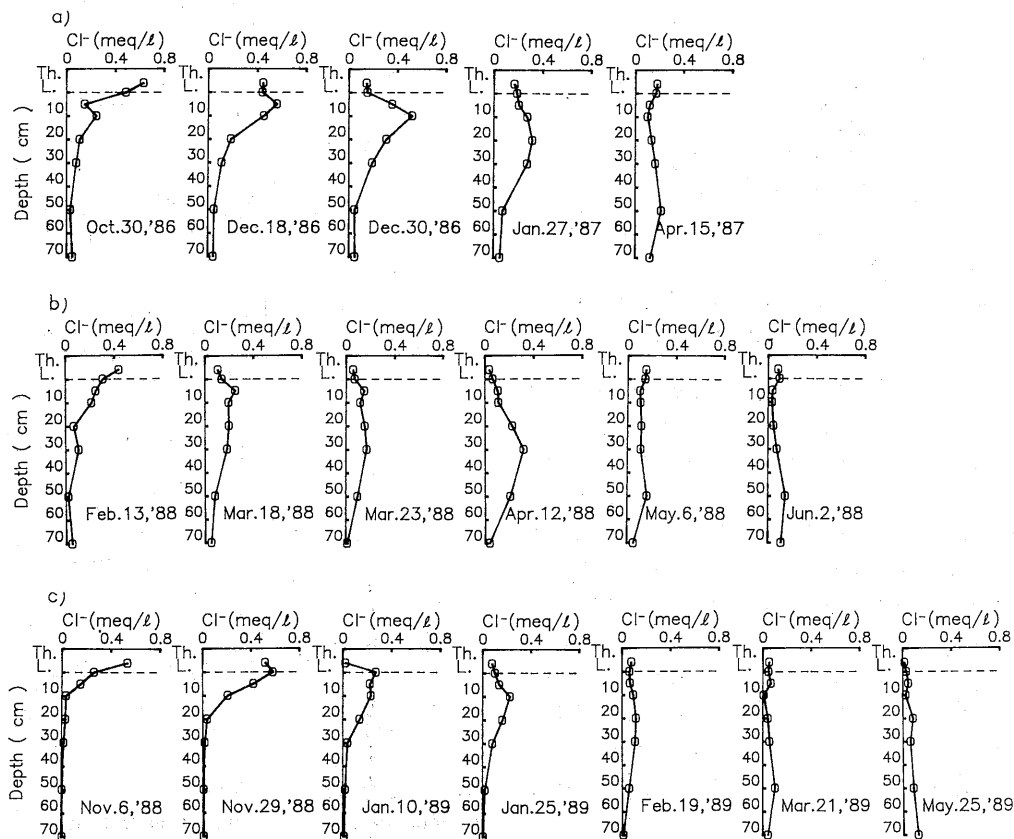
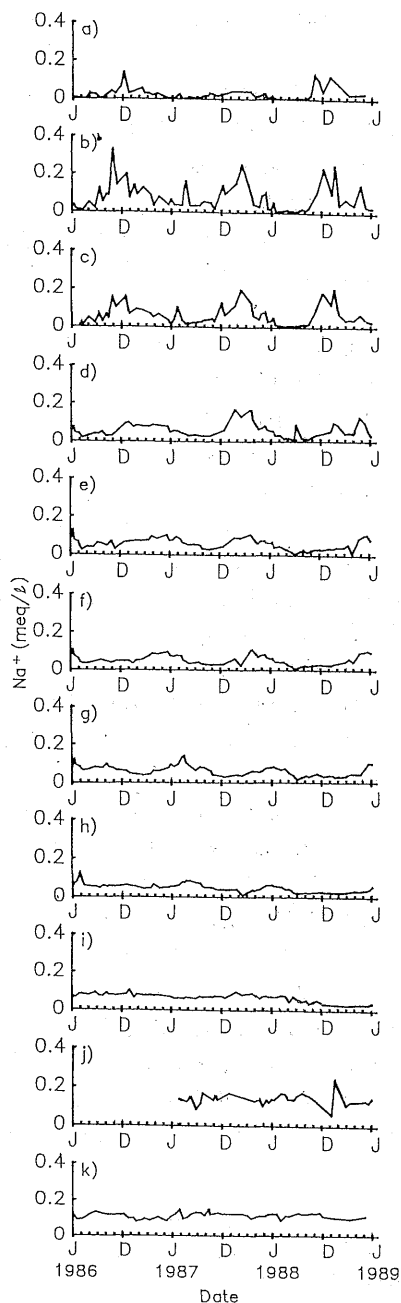


図-5.  $\text{Cl}^-$  濃度の鉛直分布

Vertical distribution of  $\text{Cl}^-$  concentration in each layer

a), 1986 年度 ; b), 1987 年度 ; c), 1988 年度. Th., 林内雨 ; L., リター層。

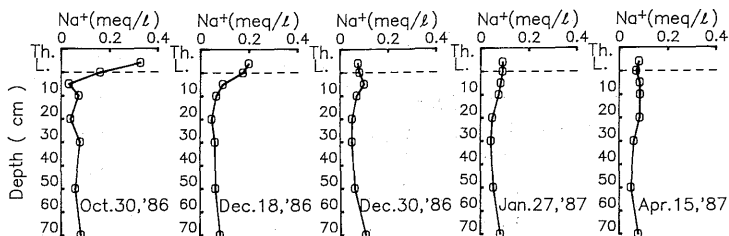
a), From June, 1986 to May, 1987 ; b), From June, 1987 to May, 1988 ; c), From June, 1988 to May, 1989. Th., Throughfall ; L., Litter layer.

図-6.  $\text{Na}^+$ 濃度の経時変動 $\text{Na}^+$  concentration fluctuation over time

凡例は図-4を参照。

Legends are the same as in Fig.4.

図-5に各層で $\text{Cl}^-$ の最高濃度がみられた日の $\text{Cl}^-$ 濃度の鉛直分布を示す。1986年度には、林内雨・リター層では10月30日、5cm層では林内雨より1ヵ月半遅

図-7.  $\text{Na}^+$ 濃度の鉛直分布Vertical distribution of  $\text{Na}^+$  concentration in each layer

1986年度。凡例は図-5を参照。

From June, 1986 to May, 1987. Legends are the same as in Fig.5.

れた12月18日、10cm層ではさらに2週間ほど遅れ12月30日、以下20cm層では翌年の1月27日、50cm層では4月15日に最高に達し、 $\text{Cl}^-$ 濃度のやまが上層から順に現れる傾向がみられた(図-5 a)。1987年度・1988年度にも同様の傾向が認められた(図-5 b, c)。

湧水の $\text{Cl}^-$ 濃度は、1987年度と1988年度で上昇した時期が異なり、季節的な変動とはいいがたかった(図-4 j)。

溪流水の $\text{Cl}^-$ 濃度は、1986年度と1988年度には降水や林内雨と同時期にやまがみられた。やまの濃度は、土壤水などより低いにもかかわらず、逓減には土壤水と同じ程度の期間を要した(図-4 k)。

$\text{Cl}^-$ 濃度は1986年10月30日には、0.13 meq/lであった降水が林内雨で0.63 meq/lと全層を通じて最高になるなど、林内雨で著しく上昇した(図-5 a)。土壤水の最高濃度は下層ほど低く、1986年度では5cm層で0.56 meq/l、10cm層で0.52 meq/l、20cm層で0.31 meq/l、30cm層で0.27 meq/l、50cm層で0.22 meq/l、70cm層で0.12 meq/lであった。1987年度に30cm層が20cm層を上回る例外はあったものの、他の年もほぼ同様の傾向が得られた(図-5 b, c)。鉛直方向の $\text{Cl}^-$ 濃度のやまは、時間の経過に伴い広がった。

降水から溪流水に至る各段階の $\text{Na}^+$ 濃度の変動を図-6に示す。 $\text{Na}^+$ 濃度も降水・林内雨・50cm層までの土壤水において、一山型の明瞭な季節変動パターンを示した。70cm層や湧水・溪流水では季節変動は明らかでなかった。 $\text{Na}^+$ 濃度のやまは、降水・林内雨・土壤水の5cm層までは $\text{Cl}^-$ の場合とほぼ同じ時期に現れ、10~50cm層では $\text{Cl}^-$ の場合より3~5ヵ月遅く、10cm層で3月以降、20cm層では4月以降、30cm

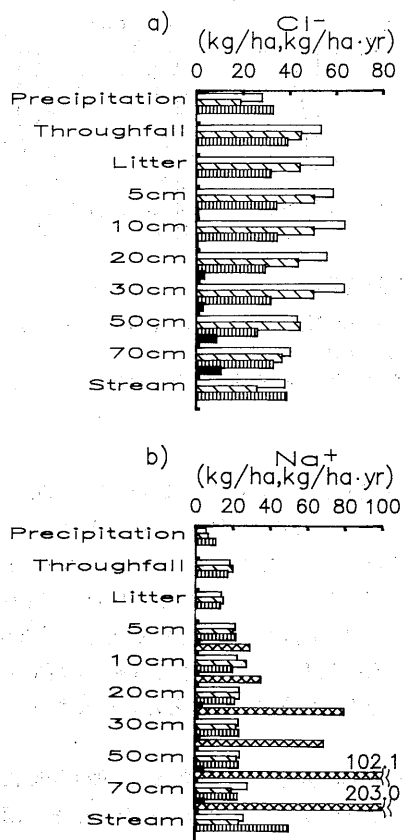


図-8. 土壌水と共に移動する物質質量および土壌中に含まれる物質質量

Amounts moving in soil water and that contained in soil

□, 1986 年度; ▨, 1987 年度; ▩, 1988 年度; ■, 水抽出  $\text{Cl}^-$  量, 可給態  $\text{Na}^+$  量; ▤,  $\text{Na}$  総量。  
□, From June, 1986 to May, 1987; ▨, From June, 1987 to May, 1988; ▩, From June, 1988 to May, 1989; ■, Water extractive  $\text{Cl}^-$ , available  $\text{Na}^+$ ; ▤, Total  $\text{Na}$ .

層では 6 月以降, 50 cm 層では 7 月以降に現れた。

図-7 に図-5 a に対応する採水日の  $\text{Na}^+$  濃度の鉛直分布を示す。 $\text{Na}^+$  濃度も, 林内雨において上昇した。たとえば, 1986 年で林内雨の最高濃度  $0.35 \text{ meq/l}$  のとき, 降水は  $0.04 \text{ meq/l}$  であった。土壌水の最高濃度は 5 cm 層で  $0.10 \text{ meq/l}$  と急激に上昇した後は, 10 ~ 30 cm 層で  $0.10 \text{ meq/l}$ , 50 cm 層で  $0.09 \text{ meq/l}$ , 70 cm 層で  $0.10 \text{ meq/l}$  であり, 層間で大きな違いはみられなかった。土壌水の  $\text{Cl}^-$  濃度は上昇時と低下時で 10 倍以上の違いを生じることがあるが,  $\text{Na}^+$  では 3 倍程度の違いにすぎなかった。 $\text{Na}^+$  濃度のやまは,  $\text{Cl}^-$

の場合に比べて早い時期にすそが広がり, 不明瞭になった。

図-8 に  $\text{Cl}^-$  と  $\text{Na}^+$  の各土壌層ごとの現存量 ( $\text{kg/ha}$ ) と 1 年間に土壌水とともに移動する量 ( $\text{kg/ha}\cdot\text{yr}$ ) を示す。 $\text{Cl}^-$  量は, 林内雨で降水中の 1.2 ~ 2.4 倍に増加した (図-8)。1 年間に土壌水とともに移動する量には, 深さに伴う増減の傾向はみられなかった。土壌水とともに移動する  $\text{Cl}^-$  量は, 層間における相違が最大  $30.7 \text{ kg/ha}$  であるのに対し, 同一層における年ごとの相違は最大  $40.1 \text{ kg/ha}$  で, 年ごとの変動の方が大きかった。水抽出による現存量は 0 ~ 5 cm の土壌層で  $1.2 \text{ kg/ha}$ , 10 ~ 20 cm で  $3.7 \text{ kg/ha}$ , 50 ~ 70 cm で  $11.0 \text{ kg/ha}$  と下層に向かって増加する傾向がみられたが, 土壌水とともに移動する量の 9.1 ~ 25.4 % にすぎなかった。集水域における  $\text{Cl}^-$  の収支は, 1986 年度と 1987 年度には林内雨による流入量が渓流水による流出量を上回ったが, 1988 年度には両者はほぼつりあい, 3 年間を通して一定の傾向はみられなかった。

$\text{Na}^+$  量も, 林内雨で降水の 1.6 ~ 3.2 倍と急激に増加した (図-8)。1 年間に土壌水とともに移動する量は, 深さ 70 cm まで層位・年度にかかわらず  $17 \sim 26 \text{ kg/ha}\cdot\text{yr}$  の範囲にありほぼ等しかった。置換態  $\text{Na}^+$  量も 0 ~ 5 cm の土壌層で  $2.7 \text{ kg/ha}$ , 10 ~ 20 cm で  $4.2 \text{ kg/ha}$ , 50 ~ 70 cm で  $5.7 \text{ kg/ha}$  であり, 単位土壌厚でみればどの層においてもほぼ等しかった。 $\text{Na}$  総量は 0 ~ 5 cm の土壌層で  $29.4 \text{ kg/ha}$ , 30 ~ 50 cm で  $102.1 \text{ kg/ha}$ , 50 ~ 70 cm で  $203.0 \text{ kg/ha}$  と土壌下層ほど多い傾向がみられた。土壌水とともに移動する量は全層を通じて置換態量の 4 倍以上, 総量に比較すると 30 cm 層まではほぼ等しいものの, それより下層では総量の 1/3 以下にすぎなかった。集水域における  $\text{Na}^+$  の収支は, 3 年間の実験期間を通してつねに流出量が流入量を上回った。

## V. 考 察

### 1. 土壌水のみかけの動き

降雨前にはライシメータからの流出水はみられず, 降雨開始後しばらくして流出がはじまり, 降雨後の採水時には林内雨量にほぼ等しい流出水量が得られるといった事例が観察された (図-3)。後述するように, 地表面に与えられた  $\text{Cl}^-$  濃度のやまが下層で現れるまでに数カ月を要することから, 降雨中にライシメータから流出した土壌水は, 地表面から浸入した降水と同じものではないことがわかる。したがって, 降雨に対応

して起こった土壤水の流出は、降水が地表面から浸入することにより圧力が伝播し、土壤中に貯えられていた土壤水が流出したもので、土壤水のみかけの動きであるといえる。

## 2. $\text{Cl}^-$ と土壤水の移動様式

### 1) 降水および林内雨における $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ 濃度の季節変動

試験地では、冬期に日本海側からの季節風の影響で海塩の供給を受ける。降水・林内雨およびリター層にみられた秋～冬の  $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ 濃度の上昇は(図-4, 6), この海塩によると考えられる。とくに、樹冠層を通過することによって  $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ 濃度は著しく上昇した。林内雨における溶存物質濃度の上昇に関する報告は多く(5, 13), PARKER (18) の記述のように,  $\text{Cl}^-$ は葉中の含有率が低く溶脱も起こりにくいので, 林内雨でみられた  $\text{Cl}^-$ 濃度の上昇は, 葉面などに付着したドライフォールアウトが降水により洗脱したものと考えられる。 $\text{Na}^+$ についても同様であろう。降水と林内雨で最高濃度の日が一致しないのは, 林内雨の濃度が降水濃度だけで決定されるのではなく, ドライフォールアウトの供給量や降水量・降水間隔により変動するためである。

### 2) $\text{Cl}^-$ 濃度からみた土壤水の移動様式

$\text{Cl}^-$ 濃度の季節変動は, 降水・林内雨・リター層だけでなく土壤水においても観察された(図-4)。この変動をスペクトル解析した(11)。図-9に林内雨および調査したすべての層の土壤水の  $\text{Cl}^-$ 濃度の変動のスペク

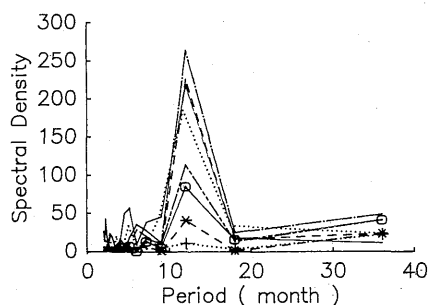


図-9.  $\text{Cl}^-$ 濃度のスペクトル密度

#### Spectral density of $\text{Cl}^-$ concentration

スペクトル密度は推定量を示す。

—, 林内雨; ---, リター層; ····, 5 cm 層; - · - ·, 10 cm 層; - - - -, 20 cm 層; ○—, 30 cm 層; - \* -, 50 cm 層; - + -, 70 cm 層。

The spectral density is the estimated value.

—, Throughfall; ---, Litter layer; ····, 5 cm depth; - · - ·, 10 cm depth; - - - -, 20 cm depth; ○—, 30 cm depth; - \* -, 50 cm depth; - + -, 70 cm depth.

トル密度の推定値を示す。林内雨, リター層, 50 cm 層までの土壤水ともに 12 カ月周期の成分のスペクトル密度が大きく, これらの  $\text{Cl}^-$ 濃度の変動は 12 カ月周期の変動が卓越していること, つまり, 50 cm 層までの土壤水の  $\text{Cl}^-$ 濃度の変動も林内雨同様の季節変動であることが確かめられた。

土壤の水抽出を行った結果から(図-8), 土壤中に保持されている  $\text{Cl}^-$ 量は少ないので, 各層における土壤水の  $\text{Cl}^-$ 濃度のやまが土壤から溶脱されて生じたとは考えにくい。また, 試験集水域で  $\text{Cl}^-$ の収支が一定の傾向をもたなかったことから,  $\text{Cl}^-$ は後述の  $\text{Na}^+$ などのカチオンに較べて土壤コロイドによる吸着・溶脱の影響の少ない物質であると考えられる(4, 23)。これらのことから, 土壤水における  $\text{Cl}^-$ 濃度のやまは, 林内雨の  $\text{Cl}^-$ 濃度のやまと同じものであり, 林内雨の  $\text{Cl}^-$ 濃度の変動が下層へ移動する過程で現れたものと考えられる。

さらに 12 カ月周期における各層の変動間の相互相

表-2. 各層における土壤水の  $\text{Cl}^-$ 濃度の変動パターン  
の相関と位相

Correlations and phases of the fluctuation patterns  
of soil water  $\text{Cl}^-$  concentration in each layer

#### a) 相関係数 Correlation coefficients

| 深さ<br>Soil depths | 林内雨<br>Throughfall | 5     | 10    | 20    | 30    | 50    |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5                 | 0.934              |       |       |       |       |       |
| 10                | 0.783              | 0.923 |       |       |       |       |
| 20                | 0.650              | 0.818 | 0.927 |       |       |       |
| 30                | 0.510              | 0.675 | 0.726 | 0.855 |       |       |
| 50                | 0.548              | 0.587 | 0.572 | 0.713 | 0.675 |       |
| 70                | 0.399              | 0.283 | 0.209 | 0.231 | 0.135 | 0.613 |

#### b) 位相 Phases

| 深さ<br>Soil depths | 林内雨<br>Throughfall | 5     | 10    | 20   | 30   | 50   |
|-------------------|--------------------|-------|-------|------|------|------|
| 5                 | 21.3               |       |       |      |      |      |
| 10                | 31.4               | 9.7   |       |      |      |      |
| 20                | 57.6               | 36.3  | 26.3  |      |      |      |
| 30                | 69.5               | 49.3  | 40.7  | 15.9 |      |      |
| 50                | 133.8              | 111.6 | 98.3  | 67.1 | 45.2 |      |
| 70                | 188.5              | 164.6 | 142.2 | 98.7 | 68.0 | 30.8 |

土壤の深さの単位は cm。相関係数は 12 カ月の周期帯成分の相互相関係数を示す。位相は上層の濃度変動の先行日数で示す。

Notes: Soil depth is in cm. The correlation coefficients are shown by the cross correlation with the 12-months period band. The phases are shown by the precedent days in the upper layer.

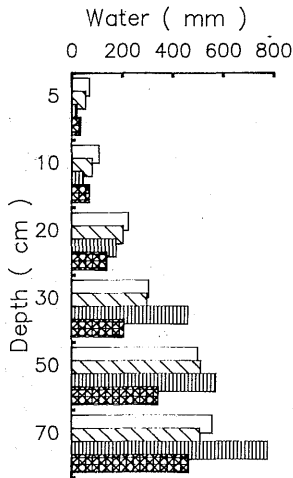


図-10. 積算流出水量と最大容水量

Accumulated discharge and maximum water content

積算流出水量とは、林内雨で最高濃度がみられてから各層で最高濃度が現れるまでに流出した水量。

□, 1986 年度; ▨, 1987 年度; ▩, 1988 年度; ■, 最大容水量。

The accumulated discharge is the total discharge from when the concentration of throughfall in maximum until it's maximum in each lysimeter.

□, From June, 1986 to May, 1987; ▨, From June, 1987 to May, 1988; ▩, From June, 1988 to May, 1989; ■, Maximum water content.

関係数と位相を求めた(表-2)。互いに近接する2層の相互相関係数( $r$ )は0.61~0.93と高く、位相は12カ月の周期帯で正の値をとり、上層の変動は下層の変動に先行していた。これより、下層における $\text{Cl}^-$ 濃度の変動は上層の変動が移動したものであることが確かめられた。

$\text{Cl}^-$ が上層から下層へ濃度の変動パターンを保ったまま移動することから、土壌水には地表面から新しく浸入した降水が、既存の土壌水を押し出すように移動するピストン流的成分の存在が推察される。

### 3) 積算流出水量からみた土壌水の移動様式

林内雨で $\text{Cl}^-$ 濃度が年度最高を示してからライシメータからの流出水が年度最高濃度を示すまでの積算流出水量を図-10に示す。図には各ライシメータの最大容水量も示す。ほとんどの場合で積算流出水量が、最大容水量を越えていたことから、ライシメータ内の土壌水がすべて入れ替わった後でも、なお、林内雨でみられた濃度のやまはライシメータ下端に達していないことがわかる。このことは、土壌水の移動がピスト

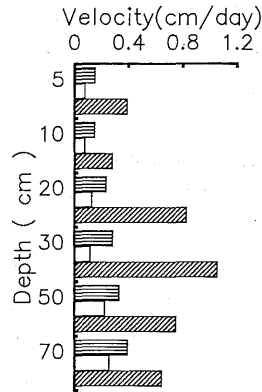


図-11.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , 土壌水の移動速度  
Velocity of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , and soil water

▨,  $\text{Cl}^-$ ; ▩, 土壌水; □,  $\text{Na}^+$ .  
▨,  $\text{Cl}^-$ ; ▩, Soil water; □,  $\text{Na}^+$ .

ン流的成分のみではないことを示唆している。森林土壌はさまざまな径の孔隙を含むため、非毛管孔隙においてバイパス効果が生じたと考えられる。

$\text{Cl}^-$ 濃度の変動パターンが土壌中で保たれたことから、 $\text{Cl}^-$ はおもにピストン流的成分によって移動しており、バイパス効果は小さく、両者の混合割合は低いことが示唆される。

### 3. $\text{Cl}^-$ と土壌水の移動速度

図-11に $\text{Cl}^-$ の移動速度を示す。移動速度は、林内雨で最高濃度を示してから各層で最高濃度がみられるまでの平均日数から算出した。

$\text{Cl}^-$ の移動速度は、長いライシメータほど速くなる傾向があった。3年間の平均移動速度は5 cmのライシメータで0.152 cm/day, 10 cmで0.151 cm/day, 20 cmで0.235 cm/day, 30 cmで0.285 cm/day, 50 cmで0.332 cm/day, 70 cmで0.392 cm/dayであった。土壌下層では土壌含水率が高く、 $\text{Cl}^-$ の移動が容易になると考えられる。スペクトル解析による $\text{Cl}^-$ の移動速度も0.23~0.43 cm/dayの範囲にあった(表-2)。移動速度と、年間降水量や流出水量の間に明確な関係はみられなかった。

図-10に示した積算流出水量と最大容水量の比は、土壌水の移動速度の $\text{Cl}^-$ の移動速度に対する比とみなすことができる。そこで、これらを用い土壌水の移動速度を求めた(図-11)。積算流出水量は、最大容水量の0.6~2.2倍の範囲にあり、土壌水の3年間の平均移動速度は、5 cmのライシメータで0.390 cm/day, 10

cm で 0.280 cm/day, 20 cm で 0.827 cm/day, 30 cm で 1.06 cm/day, 50 cm で 0.751 cm/day, 70 cm で 0.645 cm/day であった。この速度はバイパス効果を加味した土壌水の移動速度であるといえる。

#### 4. $\text{Na}^+$ と $\text{Cl}^-$ の濃度の変動の比較

前述のように林地に同時に供給される  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  であるが、10~50 cm 層では、 $\text{Na}^+$  濃度と  $\text{Cl}^-$  濃度のやまの時期は異なっていた。同一深で  $\text{Na}^+$  濃度の上昇が遅れたことから、 $\text{Na}^+$  は  $\text{Cl}^-$  に比べて動きにくいと考えられる。 $\text{Na}^+$  は  $\text{Cl}^-$  と異なりカチオンであるため、負に帯電している土壌コロイドに吸着される。しかし、1年間に土壌水とともに移動する  $\text{Na}^+$  量は、0~70 cm の土壌層間でほとんど違いがなかったことから (図-8)、吸着は一時的なものであり、 $\text{Na}^+$  は吸着と溶脱を繰り返しながら移動していると考えられる。吸着と溶脱の繰返しにより、 $\text{Na}^+$  濃度の季節変動は下層で不明瞭になり (図-7)、さらに渓流水では流出経路の異なる成分が混合した結果、年間を通じてほぼ一定の濃度になったものと推察される (図-6)。70 cm まではほぼ等しい量の  $\text{Na}^+$  が土壌水とともに移動していたが、渓流流出量は林内雨による流入量よりも多いことから、70 cm 以下では溶脱が吸着を上回ると考えられる。

$\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  の土壌中での挙動をスペクトル解析を用いて比較した。 $\text{Na}^+$  濃度と  $\text{Cl}^-$  濃度の変動は土壌表層では強い相関を示したが、30 cm 層以下では相互相関

表-3. 同一層における  $\text{Cl}^-$  濃度と  $\text{Na}^+$  濃度の変動パターンの相関

Correlations between the fluctuation patterns of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  concentrations in the same layers

| 深さ<br>Soil depths  | 林内雨<br>Throughfall | 5           | 10          | 20          | 30           | 50          | 70          |
|--------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 林内雨<br>Throughfall | 0.871(20.5)        |             |             |             |              |             |             |
| 5                  |                    | 0.700(47.5) |             |             |              |             |             |
| 10                 |                    |             | 0.475(81.1) |             |              |             |             |
| 20                 |                    |             |             | 0.499(67.3) |              |             |             |
| 30                 |                    |             |             |             | 0.248(144.4) |             |             |
| 50                 |                    |             |             |             |              | 0.404(45.2) |             |
| 70                 |                    |             |             |             |              |             | 0.292(39.0) |

土壌の深さの単位は cm。相関係数は 12 カ月周期帯の成分の相互相関係数を示す。位相は ( ) 内に  $\text{Cl}^-$  の濃度変動の先行日数で示す。

Notes: Soil depth is in cm. The correlation coefficients are shown by the cross correlation with the 12-months period band. The phases shown by the precedent days of the  $\text{Cl}^-$  concentration fluctuation patterns are in parentheses.

係数 ( $r$ ) は 0.5 を下回った (表-3)。海塩として同時に供給された  $\text{Cl}^-$  と  $\text{Na}^+$  の濃度の変動は、下層に向かって徐々に異なっていくことがわかる。このことも、 $\text{Na}^+$  は  $\text{Cl}^-$  と異なり、土壌との吸着や溶脱の影響が大きく、土壌水の  $\text{Na}^+$  濃度は  $\text{Na}^+$  の移動だけで決定されているのではないことを示している。

$\text{Cl}^-$  と同様にして  $\text{Na}^+$  の移動速度を算出した (図-11)。 $\text{Na}^+$  の移動速度は吸着と溶脱を繰り返しながら移動する速度であるため、 $\text{Na}^+$  の移動速度は全体に  $\text{Cl}^-$  より遅かった。とくに、表層の 30 cm までは  $\text{Cl}^-$  濃度の変動と相関をもっているにもかかわらず、平均移動速度は 0.08~0.14 cm/day で  $\text{Cl}^-$  の 1/2 にすぎなかった。30 cm より長いライシメータで移動速度は 0.23~0.26 cm/day と  $\text{Cl}^-$  の値に近くなり、これらの層では吸着と溶脱が平衡している可能性が示唆された。

#### 5. $\text{Cl}^-$ 濃度からみた渓流水の水質

$\text{Cl}^-$  濃度は、降水・林内雨では夏期 (6~8 月) の 0.01~0.03 meq/l が冬期には 0.20~0.50 meq/l に高まり、土壌水濃度 (5~70 cm 層) も冬期には 0.15~0.50 meq/l と夏期の 4 倍以上に高まったのに対して、渓流水では夏期でも約 0.09 meq/l と同時期の降水・土壌水に比べて高く、冬期にも 0.13 meq/l にしか上昇しなかった (図-4)。また、渓流水の冬期のやまは土壌水より小さいにもかかわらず、遞減には同程度の日数を要し、ゆるやかに起こった。土壌各層で濃度上昇時期が異なることからわかるように、各流出成分が季節によって異なる割合で渓流水を構成するため、それぞれに生じた濃度のやまが重なり、渓流水の濃度の変動は緩やかになったと考えられる。 $\text{Cl}^-$  をトレーサーとして流出成分の分離を試みた NEAL ら (16) も、渓流水の  $\text{Cl}^-$  濃度は降水に比べて変動が小さいと述べ、この原因を渓流水はさまざまな流出成分の混合により構成されるためだと考察している。

渓流水の  $\text{Cl}^-$  濃度に冬期にやまがみられたことは、冬期に濃度の上昇した降水・林内雨・表層土壌水等の直接流出成分の影響があることを示している。また夏期には、濃度の低い降水が多量に供給されるにもかかわらず、渓流水濃度が降水や土壌水に比べ高かったことから、この時期の基底流出成分が高い渓流水濃度を維持していると考えられる。

解析には、京都大学大型計算機センターの統計解析システム (SAS) を利用した (19)。

本研究を遂行するにあたり、京都大学名誉教授堤利夫博士をはじめ、京都大学農学部福嶋義宏博士、鈴木雅一博士、東京農工大学農学部窪田順平博士、京都大学農学部大手信人氏に有益かつ適切なご指導を賜った。ここにこれらの方々に対して、心から感謝の意を表する。

### 引用文献

- (1) 有光一登：森林土壌の水動態に関する研究（第2報）。林試研報 318：1～77, 1982
- (2) BINKLEY, D., KIMMINS, J.P., and FELLER, M.C.: Water chemistry profiles in an early-and mid-successional forest in coastal British Columbia. Can. J. For. Res. 12: 240～248, 1982
- (3) DE JONG, E.: The movement of sewage effluent through soil columns; The major ions (Na, Ca, Mg, Cl, and SO<sub>4</sub>). J. Environ. Qual. 7: 133～137, 1978
- (4) 土質試験法改訂編集委員会編：土質試験法, 757 pp, 土質工学会, 東京, 1979
- (5) EATON, J.S., LIKENS, G.E., and BORMANN, F.H.: Throughfall and stem-flow chemistry in a northern hardwood forest. J. Ecol. 61: 495～508, 1973
- (6) FELLER, M.C.: Nutrient movement through western hemlock-western redcedar ecosystems in southwestern British Columbia. Ecology 58: 1269～1283, 1977
- (7) 波多野隆介・飯塚文男・岡島秀夫：畑土壌における水分と無機塩類の挙動（第1報）カラム中の水と塩素イオンの移動。土肥誌 46：126～132, 1975
- (8) ————：同上（第2報）イオン交換をともなう流出過程の検討。土肥誌 47：470～476, 1976
- (9) ————：メチレンブルー法による水みちの分布状態。土肥誌 54：490～498, 1983
- (10) ————・江 耀宋・斉藤英樹・佐久間敏夫・岡島秀夫：水と溶存イオンの移動に関する畑土壌粒団の source-sink 効果—D<sub>2</sub>O を水のトレーサーとして—。土肥誌 59：253～259, 1988
- (11) 日野幹雄：スペクトル解析, 300 pp, 朝倉書店, 東京, 1977
- (12) 平田健正・村岡浩爾：森林域における物質循環性の溪流水質に及ぼす影響。土木学会論文集 399：131～140, 1988
- (13) 岩坪五郎・堤 利夫：森林内外の降水中の養分量について（II）。京大演報 39：110～124, 1967
- (14) ————：同上（III）。流亡水中の養分量について。京大演報 40：140～156, 1968
- (15) 黒田幸夫：山地小流域における降水と流出水の水質に関する研究。京都大学修士論文, 1989
- (16) NEAL, C., CHRISTOPHERSEN, N., NEALE, R., SMITH, C.J., WHITEHEAD, P.G., and REYNOLDS, B.: Chloride in precipitation and streamwater for the upland catchment of river severn, mid-Wales; Some consequences for hydrochemical models. Hydrol. Pro. 2: 155～165, 1988
- (17) 大手信人・鈴木雅一・窪田順平：非攪乱サンプルを用いる森林土壌の土壌水分特性の測定。98 回日林論：551～554, 1987
- (18) PARKER, G.G.: Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. Adv. Ecol. Res. 13: 58～135, 1983
- (19) SAS INSTITUTE: SAS user's guide. Cary, North Carolina, USA, 1982
- (20) SMITH, S.J.: Relative rate of chloride movement in leaching of surface soils. Soil Sci. 114: 259～263, 1972
- (21) SOLLINS, P., and MCCORISON, F.M.: Nitrogen and carbon solution chemistry of an old growth coniferous forest watershed before and after cutting. Water Resour. Res. 17: 1409～1418, 1981
- (22) STEVENS, P.A., HORTUNG, M., and HUGHES, S.: Solute concentrations, fluxes and major nutrient cycles in a mature Sitka Spruce plantation in Beddgelert Forest, North Wales. For. Ecol. Manage. 27: 1～20, 1989
- (23) VITOUSEK, P.M.: The regulation of element concentrations in mountain streams in the northeastern united states. Ecol. Monogr. 47: 65～87, 1977

(1990年5月21日受理)