

# 森林樹木と土壤間における雨水の挙動：現地測定と 漫出・透過実験

著者	田崎 和江, 山内 順公, 犬飼 将成, 中山 和正, 犬塚 俊裕, 森井 一誠, 片桐 有由未, 糸野 妙子
著者別表示	Tazaki Kazue, Yamauchi Yoritaka, Inukai Masanari, Nakayama Kazumasa, Inuzuka Toshihiro, Morii Issei, Katagiri Ayumi, Itono Taeko
雑誌名	地球科学
巻	58
号	6
ページ	389-405
発行年	2004-11-25
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00061693">http://doi.org/10.24517/00061693</a>

doi: 10.15080/agcjchikyukagaku.58.6\_389



森林樹木と土壌間における雨水の挙動  
—現地測定と浸出・透過実験田崎和江<sup>\*,\*\*</sup>・山内順公<sup>\*</sup>・犬飼将成<sup>\*</sup>・中山和正<sup>\*</sup>・犬塚俊裕<sup>\*</sup>・森井一誠<sup>\*</sup>・  
片桐有由未<sup>\*</sup>・糸野妙子<sup>\*</sup>Behavior of rainfall between stem flow and soils in the woods ;  
Field study and laboratory tests of leaching and absorption elementsTAZAKI Kazue<sup>\*,\*\*</sup>, YAMAUCHI Yoritaka<sup>\*</sup>, INUKAI Masanari<sup>\*</sup>, NAKAYAMA Kazumasa<sup>\*</sup>,  
INUZUKA Toshihiro<sup>\*</sup>, MORII Issei<sup>\*</sup>, KATAGIRI Ayumi<sup>\*</sup> and ITONO Taeko<sup>\*</sup>

**Abstract** Field and laboratory studies were conducted to investigate the successive changes in the chemical and physical characteristics of rainwater through stemflow as well as soil in three different forest ecosystems. That is, Sugi (*Cryptomeria japonica*), Konara (*Quercus serrata*), and Mousoutiku (*Phyllostachys heterocycla*) forests which are located in the Kakuma campus of Kanazawa University, Ishikawa Prefecture, Japan. Rainwater outside those forests was also sampled as control precipitation. For field investigation, the rainwater samples as throughfall and stemflow were collected from February 25 to March 18, 2004. For laboratory investigation, the batch leaching experiment using control rainwater was performed over a period of one week, and the continuous filtration experiment using downflow soil bed system with the stemflow of those trees was undertaken as well. XRD analyses of bulk soil and  $< 2 \mu\text{m}$  fraction of soil samples collected from those forests showed similar mineral compositions composed of quartz, feldspars, cristobalite, gibbsite, chlorite, vermiculite, and kaolin minerals. The leaching experimental data showed similar mineral decreases in the rainwater pH of Sugi forest (pH ~ 4), while little change in the rainwater pH of Konara forest was observed. Conversely, the rainwater pH of Mousoutiku forest tended to increase. These pH changes may be the result of dissolution of K and Ca contained in the bark of those trees in agreement with the experimental data of chemical composition of rainwater analyzed by ED-XRF. Scanning electron microscopic observations of tree bark showed that the surfaces of bark after leaching became smoother than those before leaching, and their EDX spectra showed that there were decreases in the K and Ca contents after leaching. The continuous filtration experiment demonstrated that there were significant changes in the pH, EC, and Eh of the effluent rainwater after filtering through a soil filter bed with several kinds of minerals, indicating that minerals serve as a natural buffer. These results indicate that the type of plants and mineralogical composition of soils in forest ecosystems have effects on the successive changes in the chemical and physical characteristics of rainwater.

*Key Words* : precipitation, through fall, stem flow, *Cryptomeria japonica*, *Quercus serrata*, *Phyllostachys heterocycla*, soil, tree bark, clay, ion exchange capacity

## はじめに

日本の国土の半分以上は森林である。森林は太陽光線や熱を吸収するため、気象条件を緩和し、温度や湿度をコントロールする。また、森林には防風作用・防霧作用があり、農作物への風害や冷害を防いでいる(国立天文台 2004)。我々はこれらの木々を得るために植林し、その生産性を高めてきた。その結果、日本におけるスギの植林面積は 450 万 ha に

もなっている。しかし、人工的に植林したことによって従来の森林の環境は変化しているのではないだろうか。現在の森林の樹木による物質の循環を解明することは将来的な森林環境の保全の面からも極めて重要である。

森林において、物質の移動を促しているものの一つは雨水である。雨水は近年、大気環境汚染により酸性化している。酸性雨の被害の拡大は、化石燃料の燃焼により汚染物質が大気に広まることに起因している。ドイツ・スウェーデン・ノル

2004 年 6 月 16 日受付。2004 年 10 月 7 日受理。

\* 金沢大学理学部, 〒920-1192 石川県金沢市角間町。

Faculty of Science, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, 920-1192, Japan.

\*\* 北陸支部, E-mail : kazueta@kenroku.kanazawa-u.ac.jp

ウェーの他、北米の五大湖周辺、さらに中国の重慶市で酸性雨の影響が深刻化している。酸性雨による森林の枯死や湖沼の酸性化のために起こった生態系の破壊も報告されている (Carnan 1984; Rinallo et al. 1986; 地球環境研究会 2003)。ある種の植物は大気汚染に対して感受性が高く、硫酸化物や窒素酸化物に数時間暴露を受けただけで葉に斑点が現れる。一般に草木は抵抗性が弱く、樹木ではやや強いと言われている (鈴木 1993)。

このように酸性雨や酸性土壌に囲まれて生育している樹木はどのような影響を受け、逆に環境にどのような影響を与えているのだろうか。森林生態系にとって、雨水は水分の供給源や土壌への物質供給源の一つとして重要な役割を担っている。雨水中の溶存成分は、樹冠を通過することによって大きく組成が変化し、その変化は樹種によって異なることが知られている (Riding and Percy 1985; Grill et al. 1987; Sauter and Voss 1988; 佐藤ほか 1997; 糸野ほか 2004)。林冠に降った雨水は樹幹流または林内雨として土壌に注ぐが、このとき葉または幹などに付着している浮遊物質 (N, Si) の洗脱、葉からのイオン (Na, K, Ca) の溶脱、さらに、これらの物質およびイオンを吸収することが報告されている (Carnan 1984; 菊沢 1999)。このように樹木により影響を受けた雨水は土壌に降り注ぎ、再度樹木に吸収される。また、雨水を吸収して成長した葉は落葉し、再び土壌にかえる。スギの樹幹流については林外雨と比較して pH が低くなることが報告されている (佐藤ほか 1997)。一方、他の樹木に関してはどのような傾向が認められるのであろうか。スギ以外の樹木に関する雨水の挙動や特徴については報告例が少なく不明な点が多く残されている。

本研究では我々の生活に身近で、かつ、密接に関係するスギ (*Cryptomeria japonica*)、コナラ (*Quercus serrata*)、モウソウチク (*Phyllostachys heterocycla*) の林外雨、林内雨、樹幹流、土壌について、野外観測と室内実験により、含まれるイオンの挙動を検討した。その結果、周辺の樹木の影響を受けない、基準値とするための雨水 (林外雨: precipitation)、葉や枝の間を通過してくる雨水 (林内雨: through fall)、また、幹に沿って流れ落ちる雨水 (樹幹流: stem flow) の間には大きな差異が認められたので報告する。なお、これらの雨の名称は佐竹 (2000) に従った。

## 調査地域

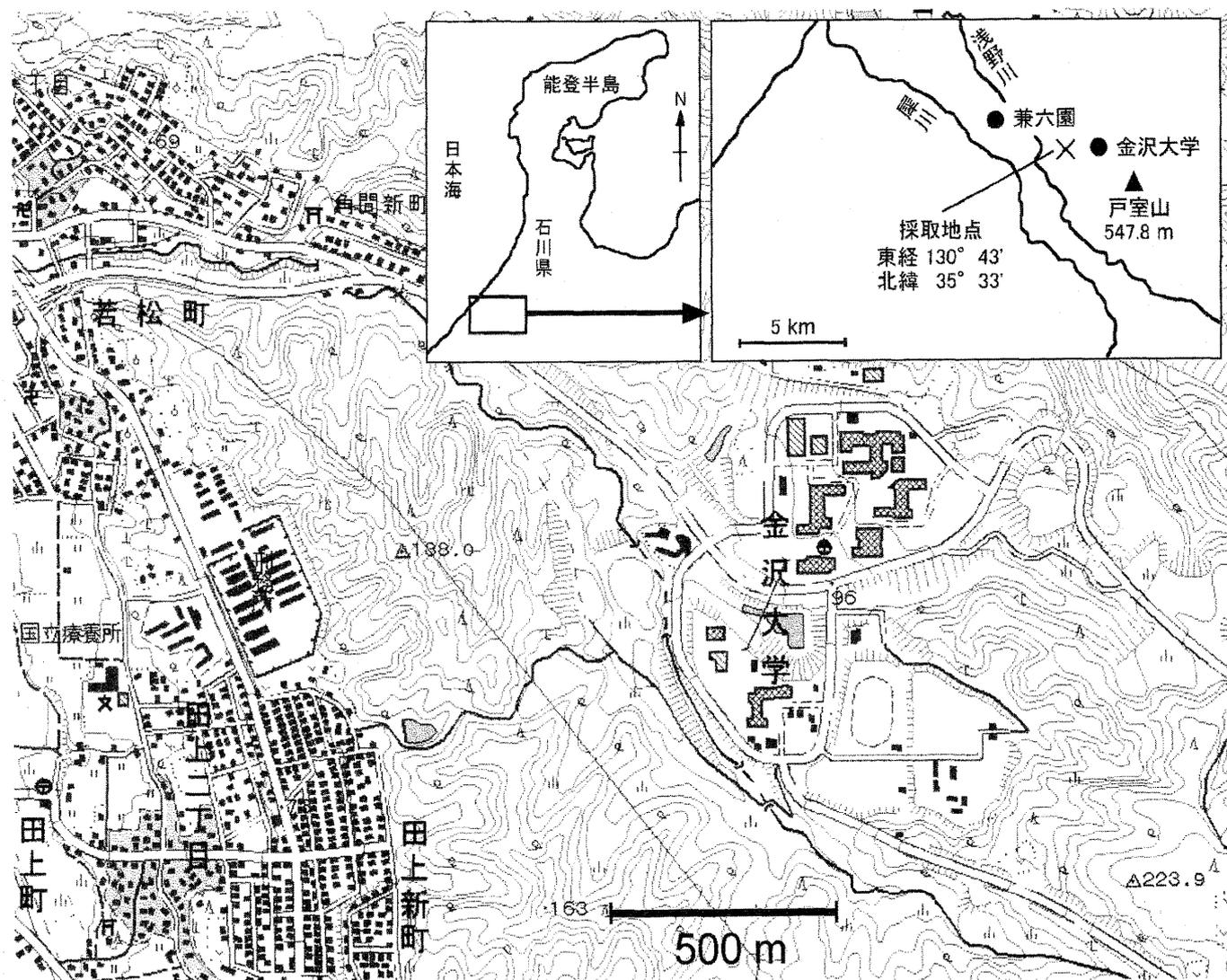
本研究における試料採取地点である金沢大学は、1992年に金沢市中心部から移転し、現在、角間キャンパスは、周囲を小高い山々に囲まれた標高 200 m の自然林の中にある。周囲 5 km 以内には未だに工場、大規模な商業施設、交通の激しい幹線道路など大気環境に影響を与える環境は存在しない (第 1 図)。また、金沢大学角間キャンパスには露場気象連続自動測定システムが 1998 年に導入され、角間キャンパスにおける気象観測が連続して行われている。角間キャンパス内の気

象データは、しばしば金沢地方気象台のデータと大きく異なる。例えば、1998 年 8 月と 1999 年 1 月の同期間中の降水量は金沢地方気象台の観測値と比べ約 4 倍であった (横山・田崎 1999)。この結果は加賀、能登地域において標高が高くなるにつれて降水量が増えるという報告と合致している (皆巳 2004)。なお、金沢大学角間キャンパス周辺には、第四紀更新世の浅海性の砂岩を主とした、最大層厚約 250 m の大桑層が広く堆積している。本研究で観察したスギ、コナラ、モウソウチクの樹木は、いずれも、この大桑層の上に生育している。

## 試料

金沢大学角間キャンパス周辺における試料採取地点と樹幹流を採取した様子を第 2 図に示す。高さ約 20 m、直径 0.3 m のスギの木に、半分に切ったビニールホースを巻きつけ樹幹流を採取した (A)。このスギ林には人の手が入り、下枝が払われ、木は間引きされてそれぞれの間隔は 2 m 近い。林冠は葉が茂っているものの、上空が見える程度である。また、高さ約 11 m、直径 0.3 m のコナラの木に、スギと同様にビニールホースを巻きつけた (B)。この時期、コナラは落葉しており、林冠は開けている。さらに、高さ約 13 m、直径 0.16 m のモウソウチクに、同様にビニールホースを巻きつけて樹幹流を採取した (C)。この竹林も間引きが行われており、モウソウチク同士の間隔は 1 m 以上開いている。しかし、林冠には葉が生い茂っており、上空は見えない。なお、スギ、コナラにおけるビニールホースの長さは樹木の周囲とほぼ同じであり、モウソウチクについては約 0.5 m である。当日に採取した雨水 (5~10 リットル) は、実験室に持ち帰り、水質を測定した後、種々の実験に用いた。

本研究は、2004 年 2 月 25 日から 2004 年 3 月 18 日に石川県金沢市角間町にある金沢大学角間キャンパスの自然林で実験と観察を行った (第 1, 2 図)。そこに生育するスギ、コナラ、モウソウチクの 3 種の樹木についてそれぞれ 1 本ずつ雨水、土壌、樹皮の分析を行った。ここで、雨水については林外雨、林内雨、樹幹流の 3 種を分取した。さらに、それらの雨水の水質測定および化学組成の分析を行った。なお、林外雨、林内雨、樹幹流の採取は 2004 年 2 月 25 日から 2004 年 3 月 18 日まで連続して行った。採取容器にはビニールをかぶせ蒸発をふせいでいる以下の試料を採取した (第 2 図)。  
林外雨 (precipitation): 基準値となる試料として周辺の樹木の影響を受けない雨水。  
林内雨 (through fall): それぞれの樹木が生い茂る林内で、幹を伝わらない雨水。  
樹幹流 (stem flow): それぞれの樹木に第 2 図に示すように 2 つに切ったビニールホースを巻きつけ、幹を伝う雨水。  
土壌 (soils): それぞれの樹木から約 1 m 離れた場所の表層土。  
樹皮 (tree bark): それぞれの樹木の根元から約 1.5 m の高さの樹皮を採取した。



第1図. 試料採取地点の位置図.

Fig. 1. Map of the study area and sampling stations in the Kakuma campus of Kanazawa University, Ishikawa Prefecture, Japan.

## 分析方法および実験方法

### 水質測定法

採取した雨水は実験室に持ち帰り、水素イオン濃度 (pH)、電気伝導度 (EC)、酸化還元電位 (Eh)、溶存酸素量 (DO)、水温 (WT) を測定した。pHはHORIBAカスタンニーATC pHメーターD-12、ECはHORIBAカスタンニーATC導電率メーターES-12、EhはHORIBAカスタンニーATC pHメーターD-13、DOおよびWTについてはHORIBAハンディ溶存酸素メーターOM-12を用いて測定した。

### エネルギー分散型蛍光X線分析

採取した土壌や樹皮の試料は室温乾燥させた後、乳鉢で粉碎し、それらの粉末をマイラーフィルムにのせ、エネルギー分散型蛍光X線分析装置 (ED-XRF; 日本電子製JSM-3201) を用い、化学組成を分析した。測定はロジウム (Rh) 管球を使用し、加速電圧は30kV、真空雰囲気中で行い、測定時間

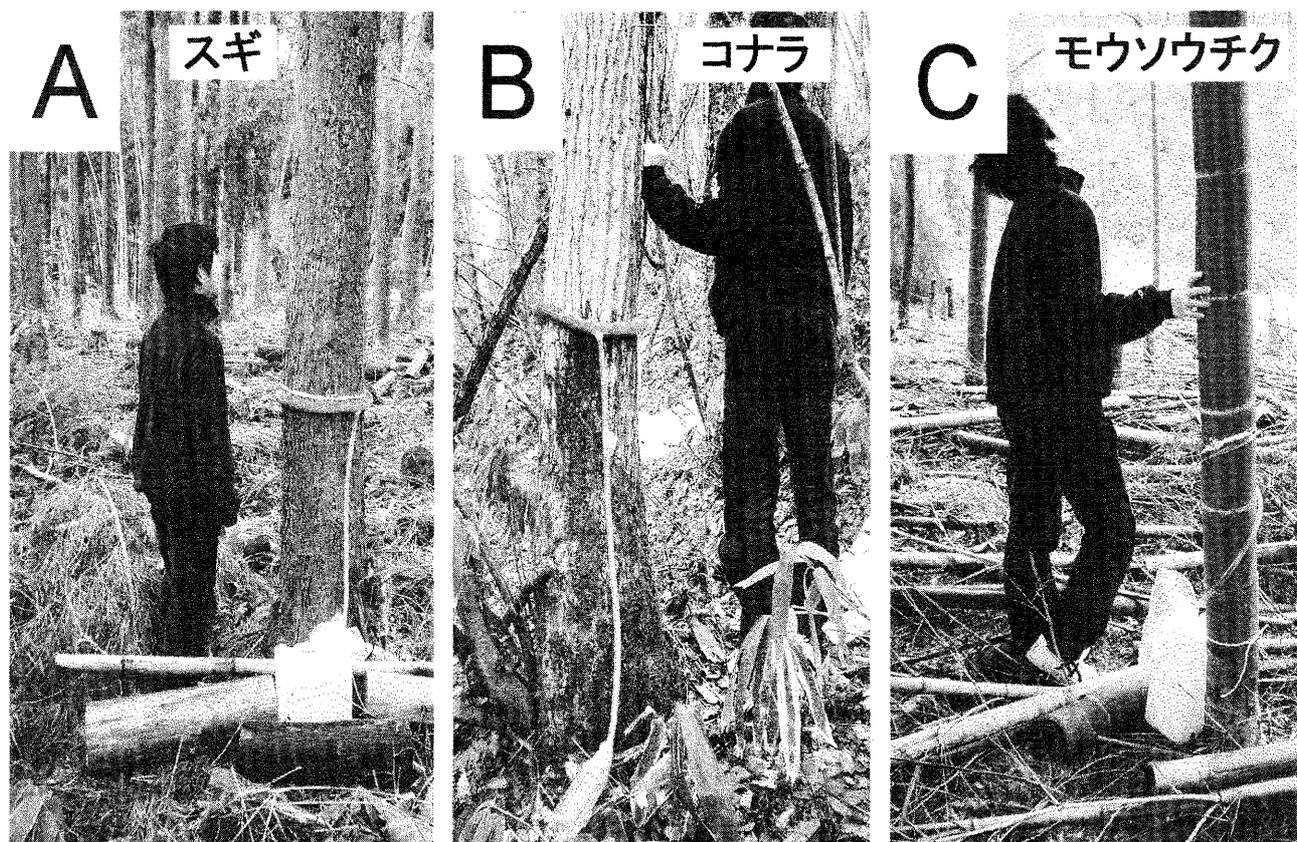
は600秒、ファンダメンタルパラメーター法 (FP法) によって半定量分析を行った。

### X線粉末回折分析

採取した土壌の全試料と、遠心分離によって粒径 $2\mu\text{m}$ 以下を集めたものを、X線粉末回折分析 (XRD; 理学電機製RINT1200型) を用いて、鉱物組成と粘土鉱物組成を分析した。測定はCuK $\alpha$ 、電圧40kV、電流30mAで行った。

### 走査型電子顕微鏡観察およびエネルギー分散分析

採取した樹皮はより微細な形態を観察するために走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察を行った。また、エネルギー分散分析 (EDX分析) 装置を用いて試料の化学組成を分析した。SEMは日本電子製低真空走査型電子顕微鏡 (JSM-5200LV) を使用し、加速電圧15-20kVで観察した。EDX分析装置は、SEMに取り付けられたフィリップス社製EDAX-PV9800STD型エネルギー分散型X線分析装置を用いた。



第2図. 試料採取地点の様子 (2004年2月26日撮影).

Fig. 2. View of the study area and sampling method of tree bark.

(A) Sugi (*Cryptomeria japonica*) forest, (B) Konara (*Quercus serrata*) forest, and (C) Mousoutiku (*Phyllostachys heterocycla*) forest.

#### 樹皮の浸出実験

降雨によって樹皮から溶出するイオンの種類や量をみるために、下記の実験を行った。各地点で採取した樹皮を林外雨に浸し、室温で静置し、6日間その経時変化を見て、浸出液のpH, Eh, EC, DOを測定した。さらに、浸出液をメンブランフィルターでろ過した後、ろ液についてもED-XRF分析を行った。一方、林外雨に樹皮を浸す前と後の化学組成の変化をED-XRFを用いて明らかにした。なお、粉碎しない樹皮(5g)を林内雨250mlに浸し、さらに、コントロールとして樹皮を入れていない林外雨も実験し比較検討した。実験は2004年2月25日から2004年3月18日まで連続して採取した林外雨について行った。

#### 土壌の透過実験

降雨によって樹皮から溶出したイオンが土壌に浸透する変化を明らかにするために、各地点で採取した樹幹流を土壌に透過させる実験を行った。実験の前と後で樹幹流のpH, Eh, EC, DO, WTを測定した。さらに、実験前後の樹幹流の化学組成の変化をみるためED-XRF分析を行った。なお、樹幹流200mlに対して土壌100gを用い、土壌は森林から採取した状態で乾燥せずに実験に供した。土壌の透過実験装置を第3図に示す。樹幹流の土壌透過実験は、500mlのペットボトルの上半分を切り取り、2つを重ねた装置で行った。上部

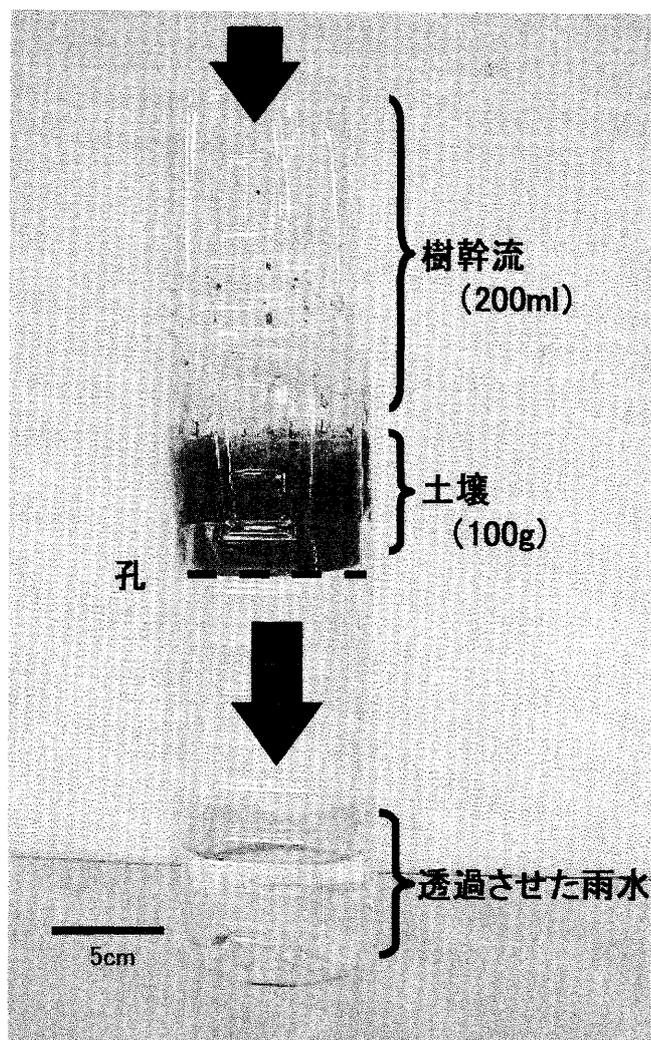
のペットボトルの底には約1mmの孔を約30個あけ、土壌を透過した雨水が下部のペットボトルに集まるようにした(第3図)。

## 結果

#### 林外雨, 林内雨, 樹幹流の水質測定結果

林外雨および3種の樹木における林内雨, 樹幹流の水質測定結果を第1表に示す。なお、雨水の測定は2004年2月25日から3月18日まで、23日間連続して行ったが、第1表には3月17日-18日の値のみを示している。林外雨のpHは5.4, ECは $29 \mu\text{S}/\text{cm}$ , Ehは318mV, DOは7mg/lであり、酸性かつ酸化状態を示した。なお、一般的に清浄な雨水のpHは5.6位であるので、角間キャンパス内の雨も清浄な範囲に入っている。一方、林内雨については、いずれの樹木においてもpHは6.1-7.3とほぼ中性を示した。また、スギおよびモウソウチクのECは82と63  $\mu\text{S}/\text{cm}$ で大きな値を示したのに対し、コナラは林外雨とほぼ同じ値の28  $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、林外雨と比較するといずれも小さい値を示した。さらに、Ehは282-297mV, DOは6-7mg/lを示し、大きな差は認められない。

また、3種の樹幹流のpH(3.5, 5.2, 6.2), Eh(329, 282, 296mV)はそれぞれ異なる値を示した。樹幹流のpHはス



第3図. 樹幹流が土壌を透過する実験装置.

Fig. 3. Photograph of the soil-beddown flow filter used for the continuous filtration experiment.

ギで強酸性の3.5を示したのに対し、コナラは5.2、モウソウチクは弱酸性の6.2を示した。ECは、スギでは $309 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、コナラは $171 \mu\text{S}/\text{cm}$ と大きな値を示したが、モウソウチクのみがあまり変化しなかった。さらに、樹幹流のEhとDOは林外雨と比較して大きな変化は認められない。すなわち、樹幹流のECの上昇は林内雨より顕著であり、植物の作用と付着物質による幹からのイオンの溶脱が多いことが示唆される。林外雨、林内雨、樹幹流のED-XRF分析結果

第1表で示した林外雨、林内雨、樹幹流のED-XRF分析による化学組成の結果を第2表に示す。林外雨中にはSi, Mg, Caが主に検出された。一方、スギの林内雨は林外雨と比較してAl, Ca, Mgが増加し、Siの増加は認められなかった。特にCaは林外雨より約4倍大きい値を示した。また、スギの樹幹流からは林内雨では認められなかったNaが大量に検出され、林内雨で多かったCaは逆に約1/7まで減少した。次いで、コナラの林内雨は林外雨と比較して顕著な変化が見られない。しかし、コナラの樹幹流からは林内雨では認められな

かったNa, Kが多量に検出された。さらに、モウソウチクの林内雨は林外雨と比較してMg, Al, K, Caが増加した。特に、Caは林外雨より約5倍大きい値を示した。モウソウチクの樹幹流では林内雨と比較してSi, Caが減少し、特にCaは約1/4まで減少した。また3種の樹幹流を比較すると、コナラのみにKが多いことが特徴である。また、モウソウチクには林内雨、樹幹流ともNaが認められなかった。すなわち、3種類の樹木の間で、林内雨、樹幹流ともに溶脱するイオンの種類や量が異なることを示している。

#### 林内土壌のED-XRFおよびXRD分析結果

スギ、コナラ、モウソウチクの林内土壌における主成分および微量元素のED-XRF分析による化学組成の結果を第3表に示す。いずれの土壌もSi, Fe, Alを主成分とし、K, Ca, Tiを少量含んでおり、Mg, Mn, Pも少量認められた。一方、微量元素としてZn, Sr, Zrも検出された。全ての試料において化学組成は類似した傾向が認められる。

上記のED-XRF分析に用いた同様の土壌試料のXRD分析結果を第3表および第4図に示す。全試料においてはスギ、コナラ、モウソウチクの全ての試料において石英(3.34 Å)、長石類(3.19 Å)、クリストバライト(4.05 Å)が顕著であり、コナラの土壌のみにギブサイト(4.84 Å)が検出された。

一方、 $2 \mu\text{m}$ 以下の粒子のX線回折分析結果を第4図に示す。スギ、コナラ、モウソウチクとも14.1-14.8 Åにかけてブロードな反射が認められる。それぞれのエチレングリコール処理の結果、スギでは14.8 Åが一部16.4 Åにシフトし、一部は残存することから、スメクタイトが含有し、かつ、クロライトとパーミキュライトの存在が考えられる。コナラとモウソウチクでは14.1-14.6 Åの反射が、エチレングリコール処理では明確にはシフトが認められないことからスメクタイトの含有は認められず、クロライトまたはパーミキュライトの可能性はある。なお、これらの3種の土壌の14 Åの反射および(060)の反射は400-450°Cの加熱処理ではほとんど消失し、クロライトとパーミキュライトの区別は不可能であった。一方、スギとモウソウチクでは比較的明確な7.17-7.19 Åの反射が認められカオリン鉱物と判定したが、コナラは弱くブロードな7.07 Åの反射を示し、カオリン鉱物かクロライトかの判定は困難であった。なお、不定方位試料の(060)の反射はブロードで、かつ、弱く、いずれも判定基準に用いるのは不可能であった。さらに、3種の土壌の $2 \mu\text{m}$ 以下の粒子の中には明確な10 Åの粘土鉱物は認められない。

#### 樹皮の浸出実験結果

酸性の雨水が森林の葉や樹皮に接触することで何らかの反応を生じ、雨水の化学的な性質が変化すると考えられている。そこで、3種の樹皮を雨水(林外雨)に浸けた実験を行った。その結果を下記に示す。

#### 水質測定結果

2004年2月25日と3月5日に採取した林外雨(コントロー

		pH	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	Eh (mV)	DO (mg/l)	WT ( $^{\circ}\text{C}$ )
林外雨		5.4	29	318	7	10.8
スギ	林内雨	7.3	82	282	6	12.3
	樹幹流	3.5	309	329	6	11.1
コナラ	林内雨	6.1	28	292	6	12.4
	樹幹流	5.2	171	282	7	9.7
モウソウチク	林内雨	7.0	63	297	6	13.3
	樹幹流	6.2	36	296	6	11.3

2004年3月17日～2004年3月18日

第1表. 林外雨, 林内雨および樹幹流の水質測定結果.

Table 1. Physical characteristics of rainwater as precipitation, throughfall and stemflow in three forests [i.e., Sugi (*Cryptomeria japonica*), Konara (*Quercus serrata*), and Mousoutiku (*Phyllostachys heterocycla*) forests] sampled on March 17~18, 2004.

		Na	Si	Mg	Ca	Al	K
林外雨		n.d.	7653	268	885	n.d.	n.d.
スギ	林内雨	n.d.	7623	521	3655	229	n.d.
	樹幹流	2321	8181	544	557	185	n.d.
コナラ	林内雨	n.d.	6780	n.d.	803	n.d.	n.d.
	樹幹流	2725	7548	789	1269	n.d.	4284
モウソウチク	林内雨	n.d.	9954	396	4317	307	547
	樹幹流	n.d.	7137	395	1142	231	n.d.

(単位; C.P.S)

n.d.; not detected

第2表. 林外雨, 林内雨, 樹幹流のED-XRF分析結果.

Table 2. Energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopic analyses of rainwater as precipitation, throughfall, and stemflow.

## 林内土壌のED-XRF分析結果(化学組成)

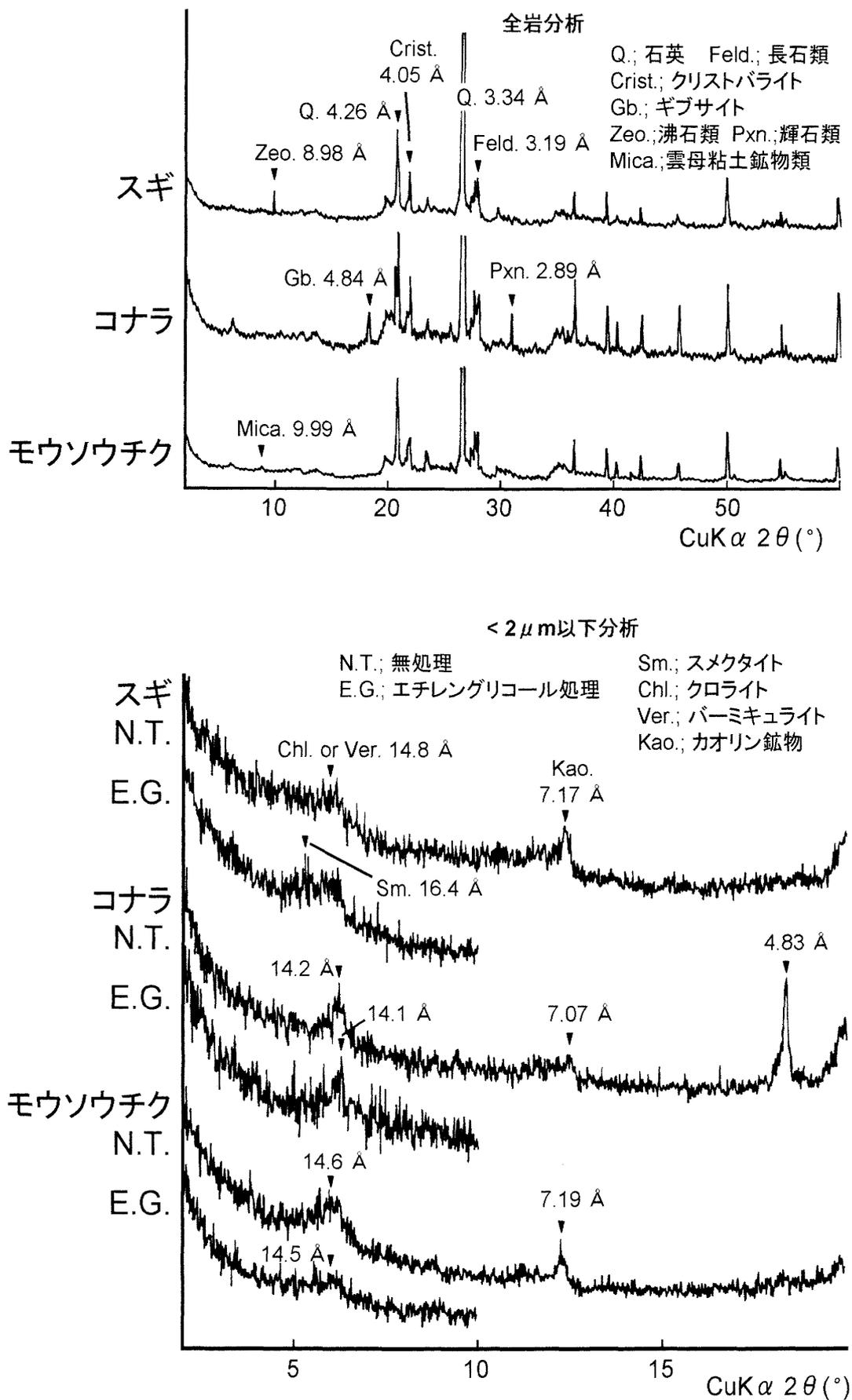
	主成分	微量成分
スギ	Si>>>Fe>>Al>K, Ca>Ti>Mg, Mn, P	Zn, Sr, Zr
コナラ	Si>>>Fe>>Al>K>Ti, Ca>Mg, Mn, P	Zn, Sr, Zr
モウソウチク	Si>>>Fe>Al>K>Ca, Ti>Mg, Mn, P	Zn, Sr, Zr

## 林内土壌のXRD分析結果(鉱物組成)

	全岩分析	<2 $\mu\text{m}$ 分析
スギ	Q.>Feld.,Crist.	Sm., Chl. or Ver., Kao.
コナラ	Q.>Feld.,Crist.,Gb.	Chl. or Ver., Kao.
モウソウチク	Q.>Feld.,Crist.	Chl. or Ver., Kao.

Q.; 石英, Feld.; 長石類, Crist.; クリストバライト, Gb.; ギブサイト  
; スメクタイト, Chl.; クロライト, Ver.; バーミュキュライト, Kao.; カオリン鉱物

第3表. 林内土壌のED-XRF分析による化学組成とXRD分析による鉱物組成(全岩, 2  $\mu\text{m}$ 以下).Table 3. Energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopic analyses and X-ray powder diffraction analyses of soils collected from three forests [i.e., Sugi (*Cryptomeria japonica*), Konara (*Quercus serrata*), and Mousoutiku (*Phyllostachys heterocycla*) forests].



第4図. 林内土壤のXRD分析結果 (上; 全岩, 下; 2 μm以下).

Fig. 4. X-ray powder diffraction analyses of bulk soil and < 2 μm fraction of soil samples collected from three forests (i.e., Sugi, Konara, and Mousoutiku forests).

浸出実験のpH(2004.2.25採取の林外雨)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	5.3	5.3	5.3	5.3
1日後	5.2	4.3	5.0	5.6
2日後	5.7	4.2	4.9	6.0
3日後	6.1	4.1	4.9	6.1
4日後	6.0	4.0	4.8	6.1
5日後	5.7	3.9	4.7	6.0
6日後	6.0	4.0	4.7	6.2

浸出実験のpH(2004.3.5採取の林外雨)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	4.7	4.7	4.7	4.7
1日後	4.8	3.9	4.5	6.0
2日後	4.8	3.9	4.7	6.1
3日後	4.9	3.9	4.8	6.3
4日後	5.0	3.9	4.9	6.4
5日後	5.0	3.8	4.8	6.4
6日後	5.1	3.9	4.8	6.5

EC ( $\mu$  S/cm)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	91	91	91	91
1日後	49	39	78	51
2日後	66	56	48	74
3日後	122	200	52	97
4日後	213	71	55	107
5日後	80	76	56	106
6日後	84	105	98	102

EC ( $\mu$  S/cm)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	71	71	71	71
1日後	70	94	89	150
2日後	70	103	87	140
3日後	82	97	84	147
4日後	99	96	82	148
5日後	81	103	82	161
6日後	76	96	87	169

Eh (mV)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	275	275	275	275
1日後	283	267	241	253
2日後	245	308	255	190
3日後	245	313	260	158
4日後	242	317	265	230
5日後	315	362	304	247
6日後	272	318	269	234

Eh (mV)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	291	291	291	291
1日後	308	318	279	263
2日後	295	344	303	177
3日後	313	333	304	169
4日後	311	384	306	161
5日後	332	386	323	192
6日後	315	368	309	148

DO (mg/l)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	10	10	10	10
1日後	8	7	8	7
2日後	6	5	5	2
3日後	7	5	4	4
4日後	5	5	4	4
5日後	6	5	4	4
6日後	5	5	5	4

DO (mg/l)

	コントロール	スギ	コナラ	モウソウチク
実験前	8	8	8	8
1日後	5	5	3	4
2日後	5	5	2	2
3日後	5	5	2	3
4日後	5	4	2	2
5日後	5	4	2	2
6日後	5	4	2	2

第4表. 浸出実験の一週間の水質変化.

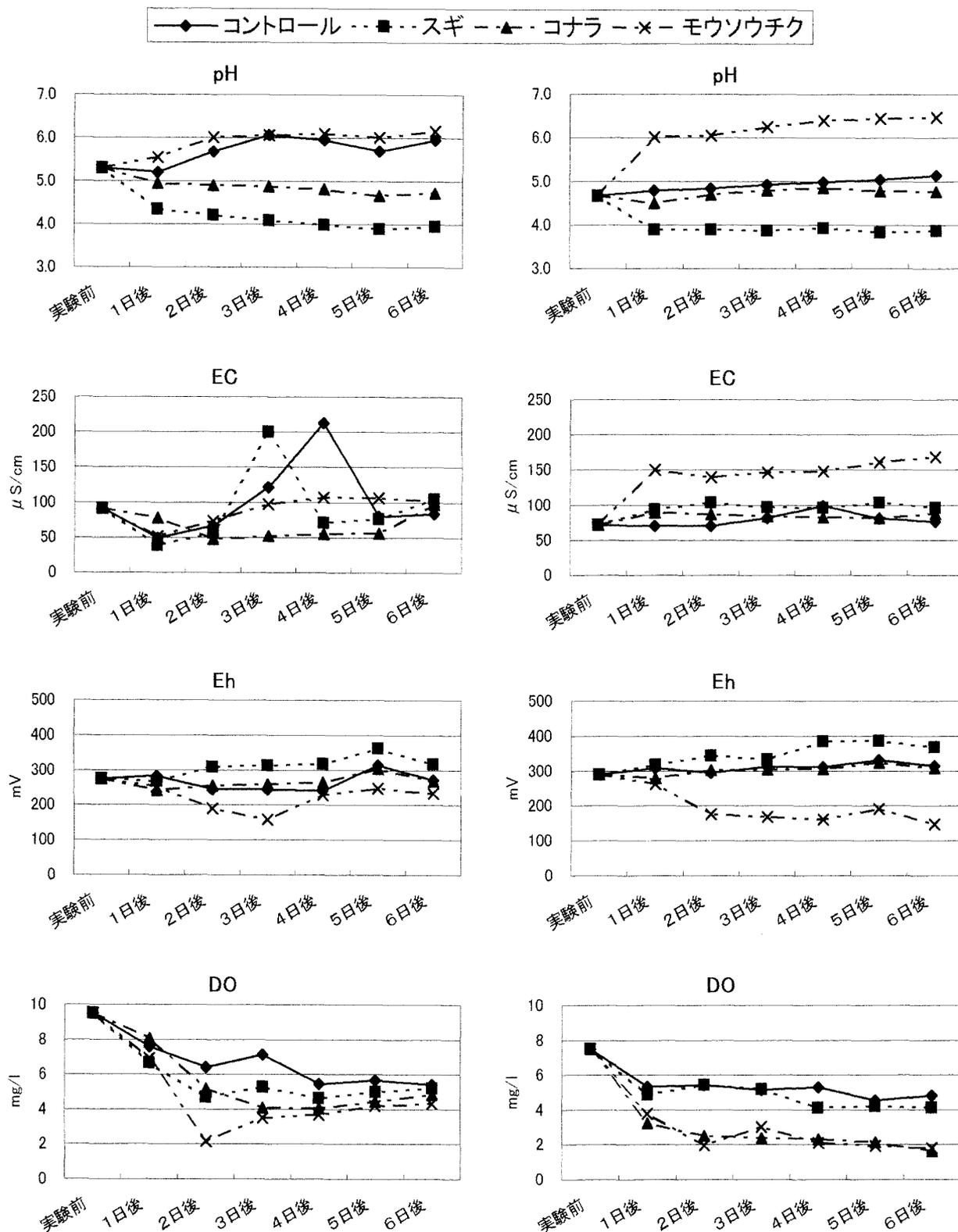
左側: 2004年2月25日に採取した林外雨を実験に使用, 右側: 2004年3月5日に採取した林外雨を実験に使用.

Table 4. Physical characteristics (pH, EC, Eh, and DO) of rainwater as throughfall and stemflow (collected on February 25, 2004 and on March 5, 2004) in the leaching experiment over a period of one week.

ル)を用い, スギ, コナラ, モウソウチクの樹皮をそこにを入れて, 浸出による水質の変化を1週間観察した. 2回の浸出実験結果を第4表と第5図に示す. 実験開始後スギとコナラの雨水は, 無色透明から黄色に変化した, モウソウチクは実験の開始前と後とでは, 雨水の色に変化は認められなかつ

た. なお, 2回の実験結果はほぼ同様の傾向が見られたが一時期ECの値が大きく変化した日があったが翌日にはもとに戻った.

スギのpHは浸出実験1日後には1.0下降し, pHが4.3となったが, 2日以降顕著な変化もなくpH4に安定した. 逆に,



第5図. 浸出実験中の水質変化.

左側：2004年2月25日に採取した林外雨を用いた実験，右側：2004年3月2日に採取した林外雨を用いた実験.

Fig. 5. Physical characteristics (pH, EC, Eh, and DO) of rainwater as throughfall and stemflow (collected on February 25, 2004 and on March 2, 2004) in the leaching experiment over a period of one week.

## 浸出液のED-XRF分析による化学組成

	Na	Mg	Al	Si	P	K	Fe
コントロール	n.d.	370	660	8689	n.d.	8801	466
スギ	n.d.	n.d.	615	7714	n.d.	8852	398
コナラ	n.d.	n.d.	677	8369	n.d.	3555	370
モウソウチク	813	529	697	10314	3376	25109	534

## 実験前の樹皮のED-XRF分析による化学組成

	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr
スギ	150	925	11376	3385	7104	25118	568	n.d.	4978	n.d.	n.d.
コナラ	n.d.	1671	12329	2676	5241	200972	1536	2210	11104	580	1474
モウソウチク	126	2918	38266	4612	66961	11544	2329	n.d.	42764	n.d.	n.d.

## 実験後の樹皮のED-XRF分析による化学組成

	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Mn	Fe
スギ	n.d.	1381	12585	3438	11531	33297	n.d.	2943
コナラ	n.d.	1001	10727	2171	6048	146377	999	2321
モウソウチク	n.d.	2949	45125	2688	17473	3134	858	4594

(単位; C.P.S)

n.d.; not detected

第5表. 浸出液および樹皮のED-XRF分析結果.

Table 5. Energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopic analyses of rainwater in the leaching experiment (after and before leaching).

モウソウチクは1日後にpHが0.3-1.3上昇して2日以降pH6に安定した。また、コントロールとコナラは実験開始から6日後までpH6およびpH5の安定した値を示した。

林外雨(コントロール)のECは一部上昇が見られる時期があるがすぐにもどり、2回ともほぼ同じような傾向が見られた。スギおよびコナラは80~100  $\mu$  S/cmと大きな変化は認められなかった。一方、モウソウチクのみが実験開始後徐々に上昇し、6日後には170  $\mu$  S/cm近くまで達した。

また、Ehはスギ、コナラともに実験開始時の約300mVから日を追うごとに徐々に上昇し、6日後には約380mV付近に達した。逆に、モウソウチクは実験開始後1-2日後には大きく下降し、6日後には約半分の148mVに減少した。DOについてはすべての試料が1-2日後には下降したが3日以降には安定した値を保った。スギは1-2日後4-5mg/lで安定したが、コナラとモウソウチクは2-4 mg/lまで下降したのちに安定した。

## 浸出液および樹皮自体のED-XRF分析結果

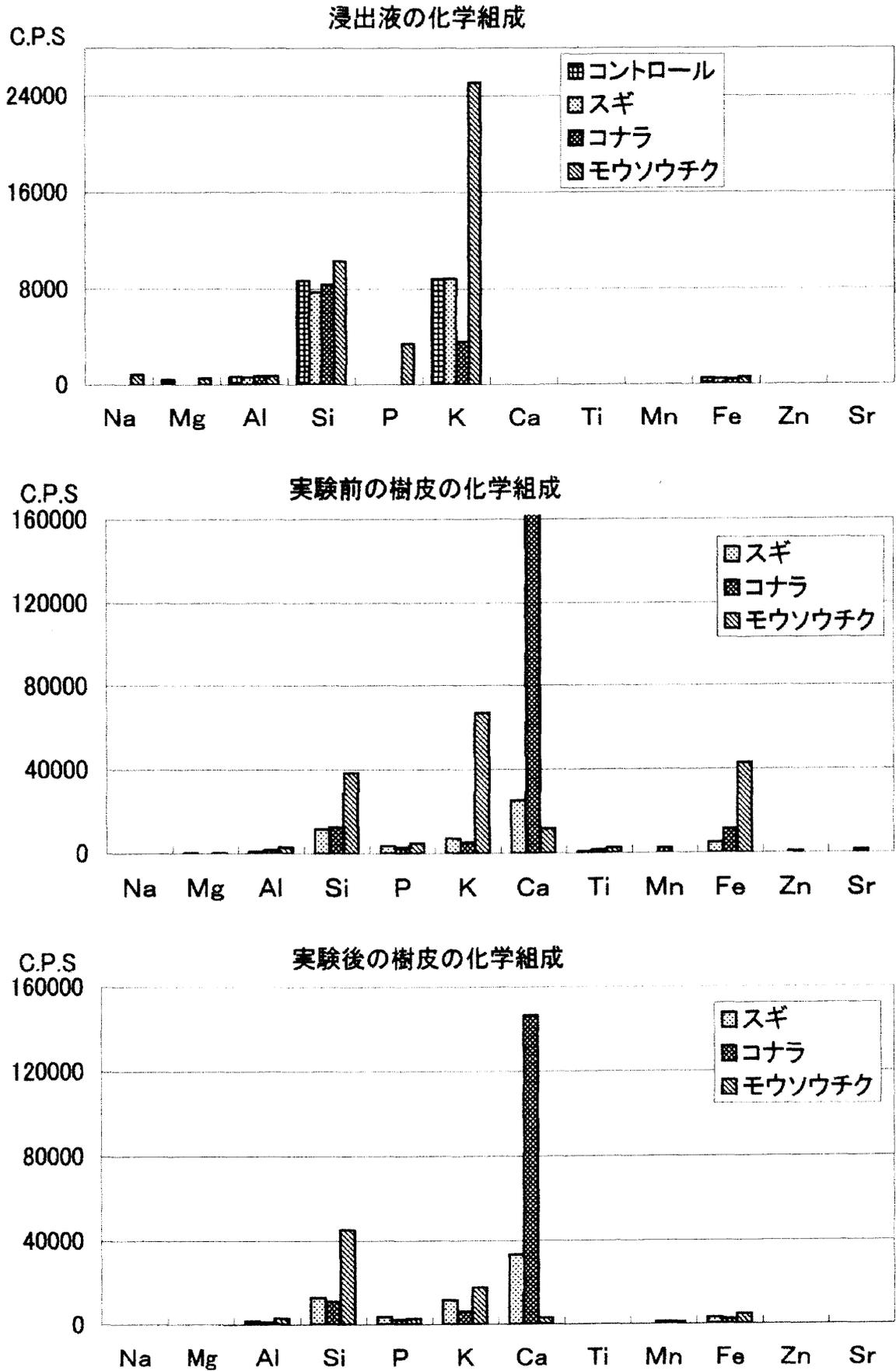
浸出液および浸出実験前後の樹皮について、ED-XRF分析による化学変化の結果を第5表と第6図に示す。林外雨(コントロール)の主成分はSiとKである。コントロールと比較してスギの浸出液には大きな違いは見られないが、コントロールで検出したMgがスギでは検出限界以下であった。コ

ナラの浸出液ではKがコントロールの1/2以下まで減少したが、その他の元素では大きな変化が見られなかった。また、モウソウチクの浸出液では他の浸出液では検出されなかったNa, Pが顕著に検出され、SiとKもコントロールよりも一桁多い値が検出された。特にKはコントロールの約3倍の値を示した。

実験前の3種の樹皮の主成分はいずれもSi, K, Ca, Feを主成分とするが、含有量に差異が認められる。浸出実験後の樹皮の化学組成は実験前のものと比較すると、スギはK, Caが実験前のものより5,000-10,000 c.p.s. 近く積分強度が増加している。コナラはFeが約1/5に減少し、Caの減少も顕著である。モウソウチクは、実験前のものより実験後の樹皮のほうが、わずかにSiが増加し、一方、P, K, Ca, Feは2-10倍、大幅に減少した。なお、モウソウチク中のMnは浸出実験後のみに検出された。

## 樹皮の浸出実験前後のSEM-EDX分析による変化の比較

浸出実験前と実験後の樹皮のSEM写真による微細形態の変化およびEDX分析による化学組成の変化を比較した(第7図)。スギの樹皮は、浸出実験前は凹凸が顕著であったが、実験後、樹皮の表面は一部平滑になった(A)。前述のED-XRF分析結果ではRh管球の影響で検出できなかったSが、SEM-EDX分析法では明らかに検出された。すなわち、スギの樹

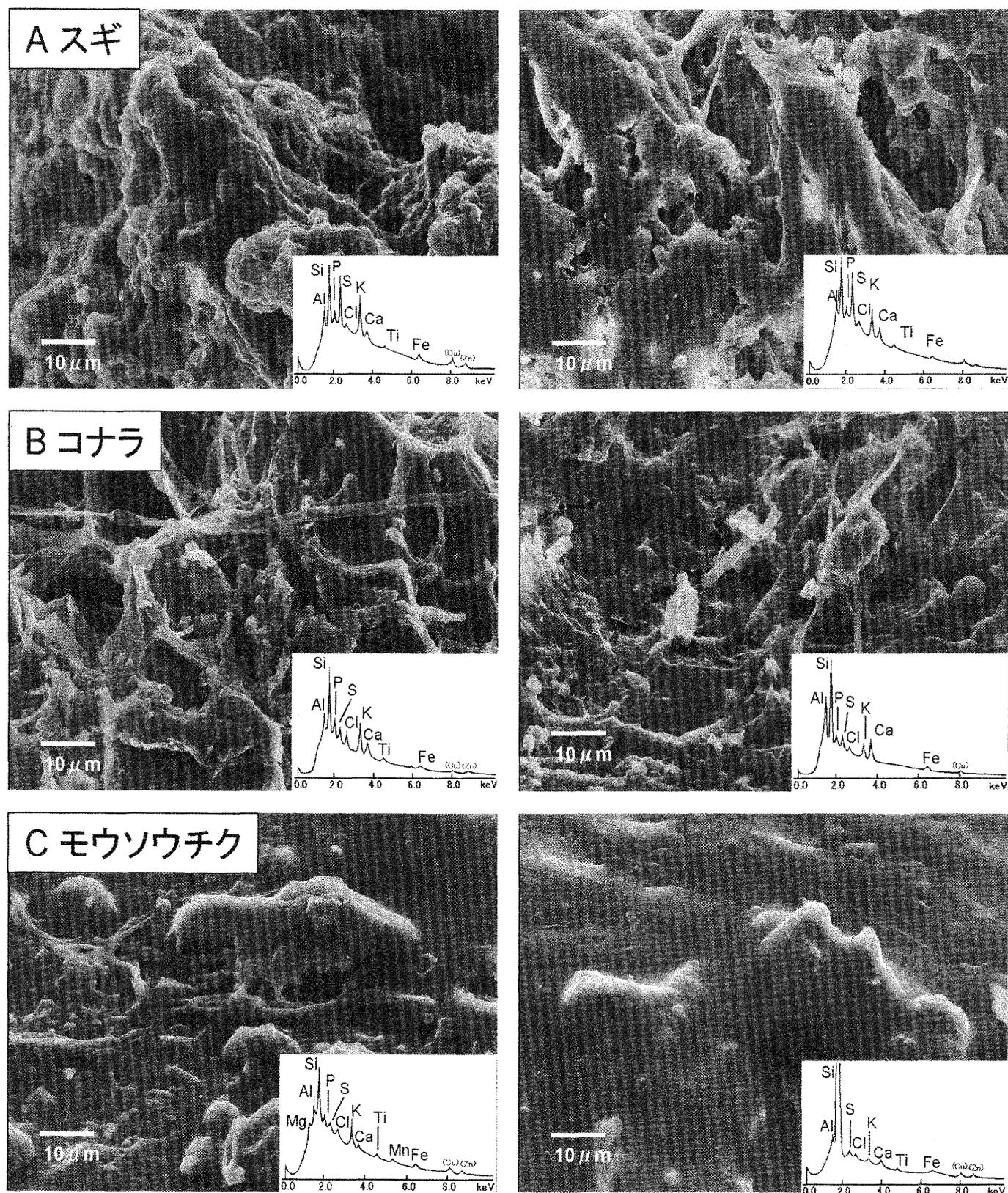


第6図. 浸出液および実験前後の樹皮のED-XRF化学分析結果.

Fig. 6. Energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopic analyses of rainwater in the leaching experiment (after and before leaching).

## 浸出実験前

## 浸出実験後



第7図. 樹皮の浸出実験前後のSEM-EDX分析結果. CuとZnのピークはSEMの試料台によるものである.

**Fig. 7.** Scanning electron micrographs and energy dispersive X-ray analyses of tree bark of Sugi (*Cryptomeria japonica*), Konara (*Quercus serrata*), and Mousoutiku (*Phyllostachys heterocycla*) in the leaching experiment (before and after leaching). Cu and Zn peaks are from brazen SEM stub.

皮には、KのみならずSも樹皮から溶出することが示唆される。また、コナラの樹皮は、実験前の表面には繊維状の組織が顕著に見られたが、実験後はスギと同様に比較的平滑になった(B)。コナラのEDX分析結果は、前に述べたED-XRF分析結果ではあまり顕著に現れなかったKの溶出をより明白に見ることができる。また、Pが実験前に比べて実験後の樹皮では減少していることが確認された。モウソウチクの樹皮は、実験前は平滑な部分と凹凸部分がともに認められたが、実験後は、全体的により平滑な部分が多くなった(C)。EDX分析結果より、モウソウチクの樹皮の主成分はSiであり、実験前は有機物が多かったことに対し、実験後はバックグラウンドの高さの減少により、有機物量が減少したことが確認された。さらにP、S、K、Caのピークも低くなり、これらの元素が溶液中に溶出したことが明らかである。一方、実験後の表面のSiの含有量が極端に増加している。

### 土壤透過実験結果

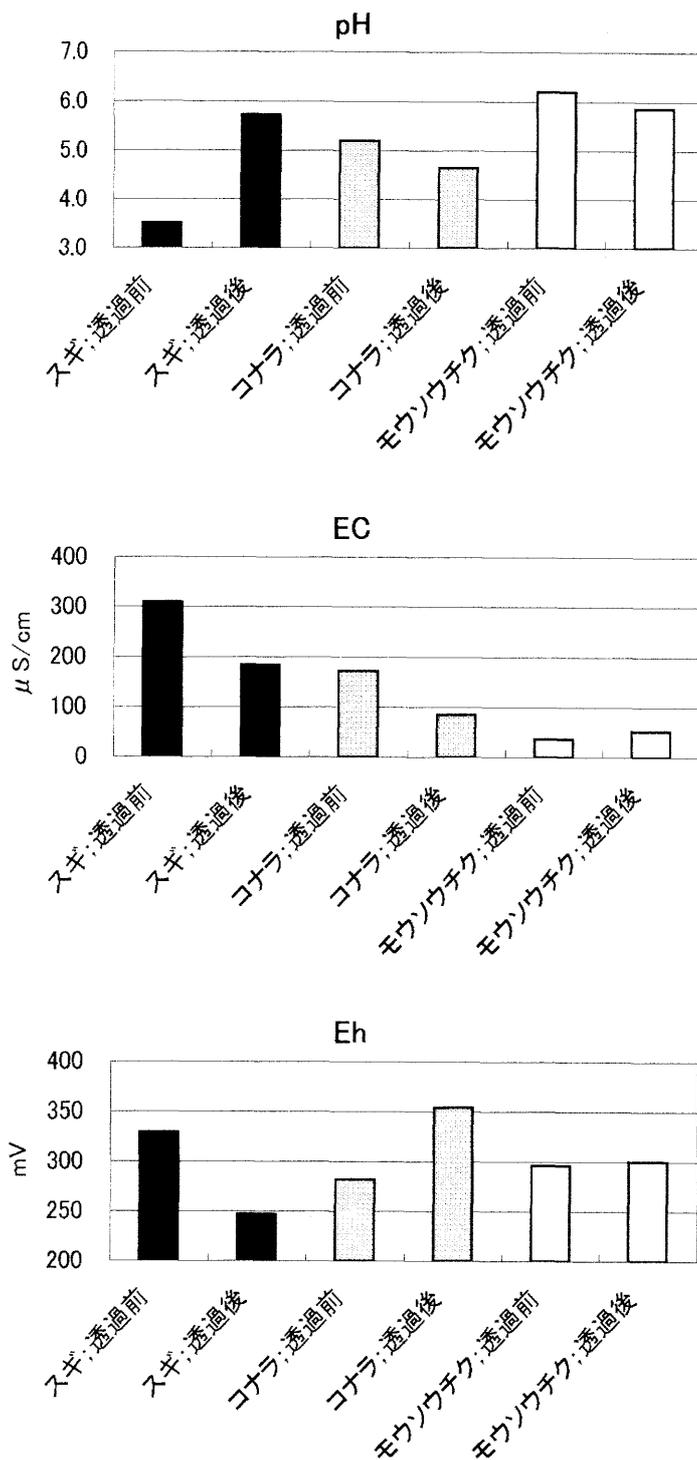
樹木を伝わった雨水が土壤にどのような影響を及ぼすかを知らるために、森林土壤に樹幹流を透過する室内実験を行い、その化学組成の変化を観察した。その化学変化の結果を下記に示す。

#### 水質測定結果

この土壤透過実験のろ液の水質変化を第8図及び第6表に示す。実験前の樹幹流の色はスギとコナラは黄色を呈し、モウソウチクは無色透明であった。樹幹流を土壤に通過させたことによる色の変化は3種の樹木とも見られなかった。スギのpHは3.5から5.7に上昇したが、コナラは逆に5.2から4.6に下降し、モウソウチクも同様に6.2から5.9にわずかに下降した。ECはスギとコナラが約100  $\mu$  S/cm下降したが、モウソウチクは逆に約20  $\mu$  S/cm上昇した。スギのEhは329 mVから247mVに下降したのに対して、コナラは282mVから354mVに上昇したが、モウソウチクは透過前と後とはほとんど変化が認められなかった。また、DOはスギが約3mg/l下降したが、コナラとモウソウチクには大きな変化が見られなかった。なお、水温は透過後、いずれも5-7°C上昇した。

#### ED-XRF分析結果

土壤を用いた樹幹流の透過実験の前と透過後の雨水のED-XRF分析による化学変化を第6表(下)に示す。スギの透過前後ではAl、Siに大きな変化はないが、Na、Mg、Caは透過後2-8倍に増加した。特に、Caは約8倍増加し3種の中で最も顕著であった。また、S、K、Feは透過後のみに検出され、特にSが約25,000 c.p.s.と顕著に高い値を示し、これはpHの低下にともなう化学変化を示唆している。コナラはNa、Mg、Si、K、Caがともに透過後に高い値を示し、特にNaは透過前の約2倍増加した。さらに、Alは透過後のみに検出され3種の中で一番多いが、これは前述のXRD分析により、ギブサイトがコナラの土壤のみに認められたことと相



第8図. 樹幹流を土壤に透過した実験結果。

Fig. 8. Physical characteristics (pH, EC, and Eh) of rainwater in the continuous filtration experiment (before and after filtration).

関している。一方、S、Feはともに検出限界以下であった。そして、モウソウチクはAlが透過前と後でほぼ同じ値を示したのに対して、Mg、Si、Caは透過前より後のほうが約2倍高い値を示した。また、Kは透過後のみに検出され、Na、S、Feは透過前と透過後ともに検出限界以下であった。

### 土壌の透過実験の水質測定結果

		pH	EC( $\mu$ S/cm)	Eh(mV)	DO(mg/l)	WT( $^{\circ}$ C)
スギ	透過前	3.5	309	329	6	11.1
	透過後	5.7	182	247	3	16.5
コナラ	透過前	5.2	171	282	7	9.7
	透過後	4.6	84	354	6	16.8
モウソウチク	透過前	6.2	36	296	6	11.3
	透過後	5.9	52	300	6	16.7

※透過後のデータは透過実験の後1日経過したものを測定

### 土壌の透過実験のED-XRF分析結果

		Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
スギ	透過前	2321	544	185	8181	n.d.	n.d.	557	n.d.
	透過後	4943	1138	243	8732	24985	1202	4189	241
コナラ	透過前	2725	789	n.d.	7548	n.d.	4284	1269	n.d.
	透過後	5465	1081	592	9819	n.d.	6309	2122	n.d.
モウソウチク	透過前	n.d.	395	231	7137	n.d.	n.d.	1142	n.d.
	透過後	n.d.	833	166	10544	n.d.	2366	2465	n.d.

(単位; C.P.S)

n.d.; not detected

第6表. 土壌の透過実験前後の水質測定およびED-XRF分析結果.

Table 6. Physical characteristics and chemical compositions of rainwater in the continuous filtration experiment (before and after filtration).

## 考 察

本研究は、3種の樹木と土壌間における雨水の挙動について林外雨、林内雨及び樹幹流の3つの水質の変化と化学組成の変化について検討した結果、スギ、コナラ、モウソウチクの間にはイオンの挙動に大きな違いが認められた。また、3者の水質は大きく異なり、それを反映するように化学組成も変化し、雨水と森林の間における物質の移動が顕著に観察された。以下に、林外雨による樹皮からのイオンの溶脱と土壌透過によるイオンの挙動について考察する。

### 樹幹流による物質の移動と水質変化

酸性の雨や雪が樹木に触れる事で、葉の表面から植物に含まれる成分が溶け出すことはよく知られている。これは酸性雨により、葉の表面を保護しているワックスやクチクラ層と呼ばれる表層部分が破壊され、表面からK, Ca, Mgの構成成分が溶け出すからであり、しばしば樹木の衰退をまねく(Riding and Percy 1985; Grill et al. 1987; Sauter and Voss 1988; 島山 2003)。また、林内雨のpHの上昇は多量のカリウムイオン(K<sup>+</sup>)が溶出することと密接な関係があるが、葉の表面のワックスやクチクラ層を痛めるのは酸性雨そ

のものよりオゾンや他の酸性ガスによる効果の方が強いという指摘もある(Carnan 1984; 佐竹 2002)。さらに、カラマツ林内の林内雨および樹幹流の化学成分の違いについて、岡元ほか(2000)が報告している。それによると、樹幹流のイオン濃度は、林内雨のそれよりも高い。カラマツにおいて林外雨と比較して林内雨ではNH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>およびCa<sup>2+</sup>が、樹幹流ではK<sup>+</sup>およびCa<sup>2+</sup>が増加し、イオンの溶出が認められ、中でもK<sup>+</sup>の溶出が顕著であった。

本研究では、樹幹流のpHはスギが強酸性、コナラが弱酸性、モウソウチクが中性であったが、ECと照合すると、林外雨と樹幹流の化学成分の違い、特にNa, K, Caは樹皮からの溶脱が原因であると考えられる。樹皮の浸出実験(第5表)によると、スギの樹皮は実験後にはCa, Al, Si, Kが約10,000 c.p.s. 増加したが、コナラ、モウソウチクでは50,000 c.p.s., 8,000 c.p.s. 減少している。これらの事は、Caがスギの樹皮では取り込まれ、コナラ、モウソウチクでは溶脱することを示している。その結果、第2表に示した様に、林外雨中のCaが885 c.p.s. に対して、スギの林内雨はその4-5倍の値を示している。Ca<sup>2+</sup>イオンが取り込まれるか、溶脱するかはpHの違いのみならず大気中のNO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>など

の存在量 (Tazaki et al. 2004) や樹皮表面の化学組成にも起因すると考えられる。

樹皮中の K の量の変化は浸出液の ED-XRF 分析結果および SEM-EDX 分析結果からも Ca イオンと同様の挙動を示している。モウソウチクの浸出液が実験 6 日後には、ほかの 2 種が強く酸性化したのに比較して、モウソウチクは pH 6.2 の弱酸性を示し、浸出液中には K が 25,109 c.p.s. とコントロールの 3 倍になった (第 4, 5 表)。このような現象には、(1)  $H^+$  とアルカリ・アルカリ土類金属イオンとの交換反応あるいは、(2) アルカリ・アルカリ土類金属イオンの樹幹からの有機酸塩あるいは炭酸塩などの溶け出し (中和機構) が関与していると考えられている (Carnan 1984)。植物の細胞壁は主としてセルロース、ヘミセルロース、ペクチン質などから成っているが、このうち、ペクチン質が最も多くの金属イオンを吸着することが知られている (Adams et al. 1990; Turunen and Huttunen 1990; 鈴木 1993)。すなわち、細胞壁にペクチン質が多い植物ほど金属耐性があることになる。本研究の浸出実験により、3 種の樹木のうち、モウソウチクの K と Fe が極端に浸出して約 1/10 に減少したことは細胞壁の成分であるペクチン、炭化水素化合物、過酸化物 (RCOO, RCOOO)、脂質、過酸化脂質などに由来したと考えられる。ペクチンは糖が重合したもので、金属イオンを無毒化するが、細胞壁にペクチン質が多い植物ほど金属耐性があるかどうかはまだ不明な点が多い。

3 種の樹幹流の間でイオンの挙動に違いが認められることは、前述したように樹木を構成する元素の違いの他に、樹幹流の酸化還元電位の違いも考えられる。例えば、Fe の溶脱は酸化還元電位を左右する。なぜならば、Fe は植物体内では  $Fe^{2+}$  で存在しており植物体外に出ることにより  $Fe^{3+}$  に変化する (鈴木 1993)。つまり Fe が多く溶け出せばそれだけ周りの環境を還元的にすることになる。このことを考慮すると、樹皮の Fe の減少と浸出液の酸化還元電位の上昇はよく対応している。すなわち、Fe の溶脱が酸化還元電位の変化を引き起こしていると考えられる。雨水の水質変化は、植物中の脂質を酸化させ過酸化脂質の量を増やすことになる (鈴木 1993)。金属イオンに対する植物の抵抗の差は細胞液中のタンパク質、アミノ酸、有機酸などの金属イオンと結合する物質の差を示しているのであるが、細胞中の金属に対する解毒のしくみはまだ不明な点が多く残されている。

樹幹流が土壤中の成分の変化を引き起こす

土壤に含まれる  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  などの陽イオンは、雨水に含まれる酸性物質を吸収し中和する性質がある。また、森林地帯の地表では落葉などが厚く堆積して腐植土層が形成されるが、この層は有機物に富み軟らかく隙間が多いため、雨水をよく浸透させる。さらに、土壤は生化学的に活性度が高いため、中和作用や有機汚染物質を除去する働きもある (畠山 2003)。以上のことを考慮して、本研究で用いた土壤の特徴を以下に述べる。

はじめに、スギの葉が  $Ca^{2+}$  に富んでいるということは先行研究でも明らかになっているが (浅井ほか 2004)、落葉した葉は土壤に堆積するため、当然スギ林の土壤は一般に他の土壤よりも  $Ca^{2+}$  に富んでくるであろう。本研究結果でも第 6 表に示すように、樹幹流が土壤を透過することによって、 $Ca^{2+}$  の量が 557 c.p.s. から 4,189 c.p.s. と約 8 倍に増加した。スギは  $Ca^{2+}$  に富んだ土壤中の水を根から吸収し、再び葉に濃集すると考えられる。また、幹から溶脱されている Na が土壤透過後に 2 倍になっていることから、 $Na^+$  も  $Ca^{2+}$  と同様な挙動をされると考えられる。すなわち、スギの土壤は、土壤を透過する樹幹流中の  $Ca^{2+}$  や  $Na^+$  イオンをよく溶出する特徴があると考えられる。一方、コナラの樹幹流には K がよく溶脱されていることが報告されている (堤 1987; 井倉ほか 1994; 佐藤ほか 1997) が、本研究においても土壤透過後に K は 1.5 倍に増加している。しかし、本研究の SEM-EDX 観察では浸出実験前の 3 種の樹皮から K、Ca のみならず、S も顕著に検出された (第 7 図)。一般的に  $SO_4^{2-}$  は、トレーサー実験で植物体からの溶脱が少ないことから非溶脱物質とされてきた (小林ほか 1995)。しかし、大気中のイオウ酸化物が増えることで当然樹幹にも沈積し、強いてはイオウ成分が雨水により土壤へ移行するであろう。

本研究結果は、モウソウチクにおいて林内雨による Si、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  の溶脱が生じていることを示した。また、土壤透過後の雨水の化学組成の変化は、他の元素と比較して特に Si と K イオンにおいて大きいことを明らかにした。これらのイオンはモウソウチクの葉を構成する重要な元素である (糸野ほか 2004)。佐竹 (2002) によれば、ササは失われた塩基を根から吸収して補充し、ササ群落は土壤の酸性化を抑制するのに有効である。スギの植林地にモウソウチクが侵入し、スギを駆逐させる現象が各地で問題になっているが、林内雨が酸性化したスギ林の土壤に加え、これらの元素の移動がモウソウチクを侵入しやすくする原因をつくっているのかもしれない。

以上 3 種の樹木の土壤に共通する点は、葉や幹から溶脱したイオンは土壤に蓄積され、土壤は植生・代謝活動によってこれらのイオンを循環させる。そのイオンの種類や量は樹木種ごとに異なることを示した。したがって、同じ地質や土壤環境であっても将来の植林や森林環境の保全を考える上で、イオンの挙動を十分考慮する必要がある。

一方、森林における落葉や落枝によるイオンの供給経路以外に、土壤に含まれる粘土鉱物も物質の循環に寄与している。本研究では、それぞれの土壤に含まれる粘土鉱物は、結晶度の低いスメクタイト、クロライトまたはパーミキュライト、カオリン鉱物であることが明らかになった。特にスギ林の土壤中にはイオン交換能、膨潤性、吸着性などの様々な性質があるスメクタイトが含有していた。また、コナラの土壤にはギブサイトが認められたが、いずれの土壤にもカリウムイオンをもつ 10 Å の雲母類粘土鉱物は認められなかった。しかし、粘土鉱物は、陰イオン交換性も有し、pH や陰イオン濃

度によっても挙動が変化する(須藤談話会 2000)。陰イオンの中でもリン酸、ヒ酸などはいったん粘土に吸着するとなかなか交換しないイオンである。これらのイオンの示す強い吸着性は、土壌の性質や環境を反映する重要な要素である。本研究において、樹幹流に含まれるイオンが土壌を通過することで減少している事実は、土壌中の粘土鉱物にイオンを蓄積させ、pHの緩衝能力があることも示唆している。

自然界でのイオンの交換能は、粘土鉱物が雨などから、取り込んだイオンを微生物や植物に提供し、ゆっくりと物質循環を維持していく。しかし、酸性雨による物質循環速度が大きい場合(急性害)や慢性的に暴露している場合(慢性害)のいずれもが、土壌の緩衝能力の限界を超え、森林生態系に影響を与え樹木の枯死を招くことが考えられる。大気環境の変化による森林生態系の変化を予測する上でも降雨-樹木-土壌の3者の関係を理解することは重要である。

## まとめ

石川県金沢市角間町にある金沢大学の角間キャンパス周辺のスギ、コナラ、モウソウチクの森林において、林外雨、林内雨、樹幹流の水質および化学組成がどのように変化するかを観察・実験した。また、それぞれの土壌中の鉱物組成と化学組成の変化も比較検討した。さらに、樹皮を林外雨に1週間浸し、その化学的経時変化をとらえた。

本研究により下記のことが明らかになった。スギ林において林外雨がpH5.4の時、林内雨はpH7.3を示し、かつ、樹幹流は強い酸性pH3.5を示した。同様にコナラ、モウソウチクとも林内雨はほぼ中性を示したのに対して樹幹流は酸性-弱酸性を示した。林内雨や樹幹流のpHの変化は $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ などのイオンの溶脱や吸着によって引き起こされる。スギおよびコナラの樹幹流のイオン濃度(EC)は、林内雨のそれよりも高く、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ および $\text{Ca}^{2+}$ が増加している。樹皮からのイオンの溶脱実験ではモウソウチクのFeと $\text{K}^+$ の溶出が顕著であった。また、樹皮表面のSEM-EDX観察・分析結果は、雨水によるイオンの溶出による微細形態の変化を顕著に示した。さらに、スギ林の土壌にはスメクタイトを含有するため緩衝能力は高いことが示唆される。以上の結果は森林の保全には雨水-樹木-土壌の関係を把握することが重要であることを示している。

謝辞 本研究を行うにあたり、金沢大学理学部地球学科田崎研究室の皆様には調査、実験にご協力いただいた。厚く感謝申し上げます。

## 文献

浅井篤史・犬飼将成・犬塚俊裕・橋本直樹・森井一誠・山内順公・田崎和江(2004) 杉による雨水の変化。環境の保全と緑化に関する資料・技術研究会要旨集, 20p.  
Adams CM, Caporn SJM and Hutchinson TH (1990) Crystal occurrence and wax disruption on leaf surface of cabbage treated with

simulated acid rain. *New Phytol*, 114: 147-158.  
Carnan CS (1984) Biochemical responses of forest canopies to acid precipitation. Butter worth Publishers, 65-79.  
Grill D, Pfeifhofer H, Halbawachs G and Waltinger H (1987) Investigations on epicuticular waxes of differently damaged spruce needles. *Eur Jour Forest Pathol*, 17: 246-255.  
畠山史郎(2003) シリーズ酸性雨 地球と環境を考える '03, 誰が森林を傷めているのか? 日本評論社, 120-122.  
井倉洋二・吉村和久・久保田勝義・中尾登志雄・荒上和利(1994) 九州山地における降水および樹幹流のpHと溶存成分. 九大演報, 71: 1-12.  
糸野妙子・井上 茜・片桐有由未・近藤恵美・武内美佑紀・田崎和江(2004) 蛍光X線分析を用いた竹の考察. 環境の保全と緑化に関する資料・技術研究会要旨集, 18p.  
菊沢喜八郎(1999) 新・生態学への招待, 森林の生態. 共立出版, 198p.  
小林善樹・中側吉弘・玉置元則・平木隆年・正賀 充(1995) 森林樹幹への酸性沈着の影響評価. 環境科学会誌, 8(1): 25-24.  
国立天文台(2004) 理科年表第77版2004. 丸善株式会社, 164-165.  
皆已幸也(2004) 能登半島における大気微量成分の沈着量の標高に対する依存性の評価. 特定領域研究(A) 研究成果報告書, 23.  
岡元満美・菅原 泉・牛久保明邦(2000) 奥多摩演習林における林内・林外雨ならびに樹幹流の化学組成. 東農大農学集報, 44(4): 227-234.  
Riding RT and Percy KE (1985) Effects of  $\text{SO}_2$  and other air pollutants on morphology of epicuticular waxes on needles of *Pinus strobes* and *Pinus banksiana*. *Eur Jour Forest Pathol*, 99: 555-563.  
Rinallo C, Raddi P, Gellini R and Lonardo V (1986) Effects of simulated acid deposition on surface structure of Norway spruce and silver fir needles. *Eur Forest Pathol*, 16: 440-446.  
佐竹研一(2000) 酸性雨研究と環境試料分析 - 環境試料の採取・分析の実際 -. 愛智出版, 291p.  
佐竹研一(2002) 酸性環境の生態学 - 酸汚染と自然生態系を科学する - 第二版. 愛智出版, 243p.  
佐藤嘉展・井倉洋二・大橋 進・杉原真司・小川 滋(1997) 樹幹形態の異なる樹種における林内雨および樹幹流中の水質の変化. 九大演報, 77: 13-24.  
Sauter JJ and Voss JU (1988) SEN-observations on the structural degradation of epistomatal waxes in *Picea abies* (L.) Krast. and its possible role in the 'Fichtensterben'. *Eur Jour Forest Pathol*, 16: 408-423.  
須藤談話会(2000) 粘土科学への招待 - 粘土の素顔と魅力 -. 三共出版, 292p.  
鈴木静夫(1993) 大気環境科学. 内田老確圃, 273p.  
Tazaki K, Wakimoto R, Minami Y, Yamamoto M, Miyata K and Watanabe T (2004) Transport of carbon-bearing dusts from Iraq to Japan during Iraq's War. *Atmospheric Environment*, 38: 2091-2109.  
Turunen M and Huttunen S (1990) A review of the response of epicuticular waxes of conifer needles to air pollution. *Jour Environ Qual*, 19: 35-45.  
堤 利夫(1987) 森林の物質循環. 東京大学出版会, 124p.  
横山精士・田崎和江(1999) 金沢大学植物園と金沢地方気象台に於ける気象要素の比較検討. 金沢大学理学部附属植物園年報, 22: 43-52.

田崎和江・山内順公・犬飼将成・中山和正・犬塚俊裕・森井一誠・片桐有由未・糸野妙子. 2004. 森林樹木と土壤間における雨水の挙動—現地測定と浸出・透過実験. 地球科学, 58, 389-405.

TAZAKI Kazue, YAMAUCHI Yoritaka, INUKAI Masanari, NAKAYAMA Kazumasa, INUZUKA Toshihiro, MORII Issei, KATAGIRI Ayumi and ITONO Taeko. 2004. Behavior of rainfall between stem flow and soils in the woods ; Field study and laboratory tests of leaching and absorption elements. Earth Science (Chikyu Kagaku), 58, 389-405.

#### 要 旨

雨水が樹冠を通過することにより水質がどのように変化するかを明らかにするため、スギ、コナラ、モウソウチクの林外雨、林内雨および樹幹流の水質測定と溶存イオンをED-XRFにより分析した。雨水の採取や測定は2004年2-3月金沢大学角間キャンパスで行った。また、雨水が森林の樹木を伝わり土壤に行く物質循環を明らかにするため、スギ、コナラ、モウソウチクの樹皮の浸出実験と土壤の透過実験を行った。

その結果、スギ、コナラの樹皮の浸出液のpHは酸性化し、モウソウチクは弱酸性化した。このpHの変化は溶出したK, Caなどのイオンによって生じる。樹皮の浸出実験の前と後をSEM-EDXで観察したところ、浸出後の表面は平滑になっていた。また、3種の樹木の樹幹流を土壤に透過させるとpHは4-6の一定の値に収束した。これは土壤中に存在する粘土鉱物のイオン交換能を示唆している。さらに、土壤は植生によって溶脱するイオンの種類と量が異なる。以上の結果は、雨水が樹幹を伝わることにより大きく水質および化学成分を変化させることを明らかにした。この結果は森林環境保全を行う上で重要である。