

ISSN-0289-4033

大分県林試研報. 第 12 号

数種の樹種における樹幹流の化学的性状と季節変動

諫 本 信 義
森 崎 澄 江

CHEMICAL CHARACTERISTIC OF THE STEMFLOW AS TO
TREES OF SEVERAL KINDS AND THEIR
SEASONAL CHANGE

Nobuyoshi ISAMOTO

Sumie MORISAKI

Bull. Oita Pref. For. Exp. Sta., No. 12

大 分 県 林 業 試 験 場

大分県日田市有田

平成6年3月

OITA PREFECTURAL
FOREST EXPERIMENT STATION

Arita, Hita, Oita, Japan

March, 1994

数種の樹種における樹幹流の
化学的性状と季節変動

Chemical characteristics of the stemflow as to
trees of several kinds and their
seasonal change

Nobuyoshi ISAMOTO
Sumie MORISAKI

諫 本 信 義

森 崎 澄 江

1 9 9 4

数種の樹種における樹幹流の 化学的性状と季節変動

諫 本 信 義

森 崎 澄 江⁽¹⁾

ISAMOTO, Nobuyoshi and MORISAKI Sumie : Chemical
characteristics of the stemflow as to trees of
several kinds and their seasonal change

要 旨：1992年4月から1993年3月の1ケ年にわたり、大分県林業試験場（大分県日田市大字有田）構内に生育するイチョウ、スギ（アヤスギ）、クヌギ、クスノキの4樹種を対象に、一週間ごとの樹幹流を捕集し、酸度（pH）、電気伝導度（EC）及び各イオン成分濃度を定量した。雨水についても同様の調査を実施した。

一週間ごとに採取された平均樹幹流量は、イチョウ8.6ℓ、スギ4.2ℓ、クヌギ7.2ℓ、クスノキ6.1ℓで樹種により捕集流量に差が認められた。この期間における雨水のpHは 4.51 ± 0.45 （平均値±標準偏差）で、回収試料39検体中、pH5.60をこえた非酸性雨はわずか1例のみであり、残りはすべて酸性雨であった。

供試4樹種の樹幹流pHは、雨水のpHや雨量とは直接関係なく、それぞれ固有の領域に収束し、また季節変動も特に生じなかった。この現象は佐々ら（1991）の報告と同様の傾向を示し、それぞれの樹種のもつ固有の特性反応と考えられた。各樹種の樹幹流pHは次のとおりであった。イチョウ（ 5.84 ± 0.32 ）、スギ（ 3.11 ± 0.34 ）、クヌギ（ 4.31 ± 0.29 ）、クスノキ（ 5.52 ± 0.23 ）。

電気伝導度（EC）は、スギ樹幹流で最も大きく、とくに8月以降から冬期にかけて急増した。Cl⁻、Ca²⁺、Na⁺イオン等の濃度増加による影響と推察された。イチョウ、クヌギ、クスノキのECは、スギの約20～30%と小さかったが8月以降に増加する季節変動はスギと同様であった。雨水のECと比較すれば年平均値でイチョウ4.9倍、スギ25.4倍、クヌギ7.6倍、クスノキ5.7倍で、樹体内よりの溶出及び付着物質の洗い流しが、スギで突出し、

(1)大分県衛生環境研究センター， Oita Prefectural Institute of Health and Environment, Magari, Oita 870

他の樹種でも高いことがわかった。

各樹種の樹幹流の化学的性状についてアニオン類 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^-) 及びカチオン類 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+) の両イオン当量濃度より検討した。この結果、組成濃度において樹種間に、またスギ、クヌギ、クスノキにおいて季節変動のあることが認められた。季節変動は大略4～8月までの生育期(前期と略す)とそれ以降の生育休止期(後期と略す)とに区分され、後期におけるイオン当量濃度の増加が著しく、特にカチオン類及び Cl^- イオンで顕著であった。樹種別の成分特性は次のようであった。

- イチョウ：イオン当量濃度は、各樹種中最も小さく、季節変動は認められない。但し K^+ イオンのみは雨水の161倍という最も高い当量濃度を示し、樹体からの溶出量が突出していることが認められる。
- スギ：イオン当量濃度の極めて高い樹種で、明白な季節変動があり、後期では前期の約4倍増の当量濃度を示した。特に H^+ イオン及び Cl^- イオン濃度は4樹種中最も高い値を示した。
- クヌギ： Mg^{2+} イオン当量濃度の最も高い樹種で雨水に比し前期で44倍後期で63倍と高い値を示した。 K^+ 、 Cl^- イオンも相対的に高い当量濃度を示した。
- クスノキ：カチオン類の当量濃度が一般的に高く、 Ca^{2+} 、 Na^+ もスギに次いで多い。 SO_4^{2-} 、 K^+ も高い濃度を示し、溶質比の高い樹幹流となっている。

雨水に対する濃度比は、各樹種ともアニオン類で小さくカチオン類で大きかった。また前期で小さく後期で急増した。全樹種における濃度比の加重平均値はアニオン類で9.6倍であるに比し、カチオン類は18.6倍と大きかった。

季節変動(イチョウを除く)においては、アニオン類が5.3倍から17.1倍へ、カチオン類が12.4倍から29.7倍へと前期から後期にかけて大きく増加した。濃度比の大きかったカチオン類では、 K^+ イオンの値が大きく、イチョウの161倍を筆頭に、クヌギ後期の137倍等カチオンの中でも突出した値を示し、樹体からの溶出が容易でしかも溶出量の多い成分であることが把握された。 Cl^- イオンはスギ後期で65倍という高い濃度比を示したが、これは秋～冬にかけて雨水濃度を増す海塩粒子の直接的影響ではなく、スギの持つ固有の溶出反応と推測された。 Mg^{2+} はクヌギにおいて、 Ca^{2+} はスギ及びクスノキ後期でそれぞれ高い濃度比を示し、各樹種の樹幹流は、雨水以外の影響によって成分的に大きく支配されていることが把握された。

樹幹流のpH決定に関して、成分組成濃度や捕水量、雨水pHの要因項目を用い、重回帰分析を行ない、樹種ごとに回帰式を求めた。回帰分析の結果、いずれの樹種においても1～5%水準で有意差が認められた。しかしながら、要因項目間に相関関係の高いものが、多数認められ、樹幹流pHは、単一要因より複合的な要因の作用による可能性の強いことが示唆された。今後更に

詳細な検討が必要とされる。

樹幹流量に差異はあるものの、樹幹流 pH が樹種ごとに固有の領域を有すること、成分組成濃度に樹種間差異や季節変動が認められることなど、樹木を介在して生起する降雨成分の変化は、今後の森林造成や維持管理にとって、きわめて重要な役割りをはたすものとして注目される。

目 次

I	はじめに	4
II	調査及び分析方法	4
	1. 調査対象木	4
	2. 樹幹流の採取及び期間	4
	3. 回収試料数及び分析方法	5
	4. 解析方法	5
III	調査結果及び考察	5
	1. 雨水調査	5
	2. 樹幹流の採取量、酸度 (pH) 及び電気伝導度 (EC) と季節変動	7
	1) 樹幹流の採取量	7
	2) 樹幹流 pH と季節変動	7
	3) 樹幹流 EC と季節変動	9
	3. 樹幹流の成分性状と pH	11
	1) 樹種別樹幹流のイオン当量濃度と季節変動	11
	2) 雨水成分に対する樹幹流の濃度比	16
	4. 重回帰分析による樹幹流 pH の要因解析	17
	1) イチョウ	17
	2) スギ (前期)	19
	3) スギ (後期)	20
	4) クヌギ (前期)	21
	5) クヌギ (後期)	22
	6) クスノキ (前期)	23
	7) クスノキ (後期)	24
IV	総合考察	26
V	おわりに	29
VI	摘 要	30
	引用文献	33
	Résumé	36
	付 表	39

I はじめに

樹幹流が樹種ごとに固有のpHを有すること(佐々ら1991、野呂ら1992など)や樹冠雨の緩衝効果(脇ら1990、井上ら1993など)など、降雨の酸性化にともない、土壌を含め森林生態系に及ぼす影響についての研究が活発となってきており、森林の環境形成に降雨が重要なかわりを有していることが明らかになりつつある。しかしながらこの分野の研究は、端を発して間もないことから、まだ未解明の点が多く残されており、今後各方面からの現象解明が望まれている。

筆者らは、1992年4月から、大分県林業試験場構内において、スギ、ヒノキ等13種の樹木を対象に、樹幹流及び雨水の調査を実施しているが、今回そのうちの代表的な4樹種について、樹幹流の性状や季節変動について総括的な検討を試み、若干の知見を得たので、その結果を報告する。

II 調査及び分析方法

1. 調査対象木

樹幹流の採取対象とした樹木は、大分県林業試験場(大分県日田市大字有田字佐寺原、標高160m、台状地、BD(d)型土壌)構内に自生または植栽されたもので、スギ(アヤスギ)、イチョウ、クスギ、クスノキの4種である。対象樹木は、試験場の本館建物を中心とした半径100m以内に生育している。表-1に対象樹木の概要を示した。

表-1 樹幹流採取木の概要

対 象 樹 木	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	備 考
ス ギ	30.0	13.0	植栽木20年生(アヤスギ)
イチ ョウ	30.0	10.8	"
ク ス ギ	31.0	18.0	自 生
ク ス ノ キ	53.0	16.0	"

2. 樹幹流及び雨水の採取及び期間

樹幹流の採取は、佐々ら(1991)が考案した綿製網体(ガーゼ)巻き付け法「樹幹流採取に関する森林総研・東北支所方式」によった。採取は、週単位とし、毎週月曜日、採取試料の有無にかかわらず、採取装置及び容器を取り替えた。採取容器は10ℓ容のポリタンク(最大12ℓ採取可能)を用いた。

1992年3月30日に最初の設定を行い、以降1993年3月29日までの1ケ年間調査を継続した。雨水試料の採取は、試験場本館(2階建)の屋上に設置した「環境庁方式ろ過式採雨器」を用いて樹幹流と同様、毎週月曜日に回収を行った。

樹幹流試料については、樹種や降水状況によって、容器容量が限定されていたため、溢流する場合が多々生じた。従って、この場合の分析試料は、容器満了時点までの樹幹流であることをおことわりしておきたい。

3. 回収試料数及び分析方法

期間内で計52回の回収を行ったが、このうち試料として有効な採取回数は、雨水で39回、樹幹流ではスギで32回、イチョウ、クスギ、クスノキでそれぞれ34回であった。樹幹流では、降雨がみられても採取に至らない場合や、装着が万全でなかったため採取できなかった場合が生じ、雨水試料と一致していない。樹幹流については、採取されたもののうち、200mlに達しないものは、分析対象から除いた。雨水は、回収試料のすべてについて各種分析を実施した。樹幹流については、pH及びECの計測は、200 ml以上のすべての回収試料について実施したが、アニオン、カチオン類の成分分析は、一部の試料については実施していない。表-2に雨水及び樹幹流試料における分析数を示した。

表-2 回収試料と分析数

項 目	雨 水	樹 幹 流			
		イチョウ	ス ギ	ク ス ギ	ク ス ノ キ
回 収 数	39	31	32	34	34
pH及びEC計測	39	31	32	34	34
成 分 分 析	39	18	24	24	23

pH及びECは、採取直後にpH計及び導電率計で測定し、他の成分は、冷蔵保存し、NH⁺をインドフェノール法（雨水のみ）で、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻をイオンクロマト法、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺は原子吸光法で定量した。

4. 解析方法

雨水及び樹幹流の化学的性状把握のため、多変量解析（主成分分析及び重回帰分析）により検討を行った。解析は現代数学社（京都）による統計解析プログラム「HALBAU」を用いて実施した。

雨水及び樹幹流の代表的なイオン成分構成について非海塩粒子由来の寄与を下式により算出した。

$$nss[SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - 0.119 \cdot [Na^+] \dots\dots\dots (1)$$

$$nss[Cl^-] = [Cl^-] - 1.166 \cdot [Na^+] \dots\dots\dots (2)$$

$$nss[Ca^{2+}] = [Ca^{2+}] - 0.043 \cdot [Na^+] \dots\dots\dots (3)$$

$$nss[K^+] = [K^+] - 0.021 \cdot [Na^+] \dots\dots\dots (4)$$

上記(1)~(4)式において、nss[A]：成分Aにおける非海塩性のイオン当量値

III 調査結果及び考察

1. 雨水調査

1992年3月30日を開始日とし、1993年3月29日を期限とした1ケ年の降雨量は、1,170 mmであった。この間における一週間ごとの雨水回収数は39回であり、1回収時における採取量は、最少で42ml（1.3 mm）、最大で4,249 ml（135.3 mm）、平均で1,034 ml（33.0 mm）であり、変動係数は83.2%と大きかった。

年降水量は、日田測候所のデータ（1987）では、年平均値が1,840 mmとなっていることから、今回の調査時における降雨量は、平年の約64%であり、降雨の少ない年となっている。

雨水成分の性状について表-3に示した。参考のため環境庁第一次酸性雨対策調査(1991b)における結果を併せて転載した。

雨水の年平均pHは4.51±0.45（平均値±標準偏差）を示し、測定年度は異なるも、全国値より強い酸性を示した。pHの最少値は3.95、最大は5.99で春季、冬季に低く、夏季に高い山型の季節変動をもつことが認められた。

表-3 調査地（日田市）^{*1)}における雨水の性状と全国値の比較

項	目	日田(A)	全国(B)*2)	A/B
pH		4.51	4.70	0.96
EC	(mS/cm)	23.7	—	—
SO ₄ ²⁻	($\mu\text{eq/ml}$)	0.0516	0.0549	0.94
Cl ⁻	(")	0.0350	0.1079	0.32
NO ₃ ⁻	(")	0.0154	0.0271	0.57
NH ₄ ⁺	(")	0.0133	0.0216	0.61
Ca ²⁺	(")	0.0209	0.0259	0.81
Mg ²⁺	(")	0.0074	0.0213	0.35
Na ⁺	(")	0.0230	0.0856	0.27
K ⁺	(")	0.0028	0.0046	0.60
H ⁺	(")	0.0310	0.0200	1.55
アニオン計	(")	0.984	1.899	0.54
カチオン計	(")	1.020	1.790	0.55
総量	(")	2.004	3.689	0.54
nss*3) Cl ⁻	(")	0.0081(23.4%)*4)	0.0081(7.5%)	1.00
nss K ⁺	(")	0.0023(82.1%)	0.0028(60.9%)	0.82
nss Ca ²⁺	(")	0.0199(95.2%)	0.0222(85.7%)	0.89
nss SO ₄ ²⁻	(")	0.0489(94.7%)	0.0447(81.4%)	1.09

*1) 期間(1992.4~1993.3)

*2) 環境庁第一次酸性雨対策調査(1984.4~1986.3)によるデータ

*3) 非海塩性

*4) 各イオン全量に対する比率

成分濃度について検討をしてみると、アニオン類(SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻)のイオン当量の総和は0.984 $\mu\text{eq ml}^{-1}$ で最大成分はSO₄²⁻であった。カチオン類(NH₄⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、H⁺)の総和は、1.020 $\mu\text{eq ml}^{-1}$ でアニオンとのバランスは均衡していた。カチオンにおける最多成分はH⁺で次いでNa⁺、Ca²⁺であり、K⁺が最も少なかった。

全国値と比較した場合、 H^+ が1.55倍であったほかは、いずれのイオン成分は、全国値よりも少なく、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- の各イオンにおいては全国値の40%以下で特に少なかった。イオン当量の総和が示すように、この調査地における雨水への成分溶存度は、全国値の約2分の1程度と少なく、雨水としては、比較的清浄度の高いものとみなされた。これは、当調査地が、内陸の盆地に位置し、海塩粒子の影響が少ないことが一つの原因と推察される。

玉置(1991a)は、日本における清浄地方の降水成分の溶存量の推定を行っているが、この推定値と比較した場合、この調査地では、各イオン成分とも2倍以上の値を示すことよりいわゆる清浄地にくらべれば、やや清浄度の劣るところといえるようである。

2. 樹幹流の採取量、酸度(pH)及び電気伝導度(EC)と季節変動

1) 樹幹流の採取量

同一の降雨にあっても、樹幹流量には、樹種や生育状況で相違のあることが報告されており(岩坪ら1967、脇ら1990、真田ら1991)、一般に針葉樹に少なく広葉樹に多いことが知られている。また玉置ら(1992a,b)は、採取法によって差があり、シャンプーハット型が最も優れるとし、ガーゼを用いた方法は、降水条件や樹木の状態によって捕集効率が極端に悪くなるため、取り扱いに慎重性を要するとしている。今回、安価で取り扱いが容易ということで、ガーゼ法を採用して調査を実行したが、数回にわたり装着不備のため、回収に失敗した事例が生じたが、全体的な傾向把握のためには、特に支障とならなかった。ただ最大容量が12ℓであったため、増量にもなう成分変化の可能性追求には、限界があったことは否定できない。

さて、樹種別の採取樹幹流量は、イチョウで最も多くスギで最も少なかった。採取された樹種別の樹幹流量(ℓ)は次のとおりである(平均値±標準偏差)。

イチョウ(8.6±3.17)、スギ(4.2±3.54)、クスノキ(7.2±3.95)、クスノキ(6.1±3.71)。

梨本(1989)は、スギ樹幹流は、降雨量10mm以上になって始めて開始されることを報告しているが、イチョウでは、5mm程度の降雨でも樹幹流の採取が可能であった。これは、雨滴の遮断層としての樹冠の繁茂の状況、樹葉の形態、樹皮の形態等の差異が樹幹流量を規制していると考えられる。いずれにせよ、既存の報告のとおり、ここでも、スギに少なく広葉樹に多いという樹幹流量の量的差異は、ここでも同様に認められた。

2) 樹幹流pHと季節変動

樹幹流のpH値は、降雨水のpHや量とは直接関係なく、樹種ごとに固有の領域へ収束するという注目すべき報告が佐々ら(1991)によって行なわれたが、この現象について、その後、いくつもの機関で追跡調査が行なわれ、多くの樹種についての樹幹流pH特性が明らかになりつつある(野呂ら1992、井上ら1993、真田ら1991b、1991c、中島ら1992、脇ら1991など)。そしてこの一般的な傾向として、スギ、ヒノキなどの針葉樹類は、広葉樹類にくらべ酸性が強いことが見出されているが、ケヤキでは、必ずしも一定しない例(諫本ら1993)や、同じスギでも地域や樹齢によって、かなり差異のあること(佐々ら1991、近藤1992)なども指摘され、樹幹流pHについては、まだ未解の点も多い。

今回スギをはじめ4樹種を対象に1年間追跡調査を実施したが、各樹種の樹幹流は、雨水のpHの影響や季節性も特になく、それぞれ固有の領域へ収束した。(図-1)

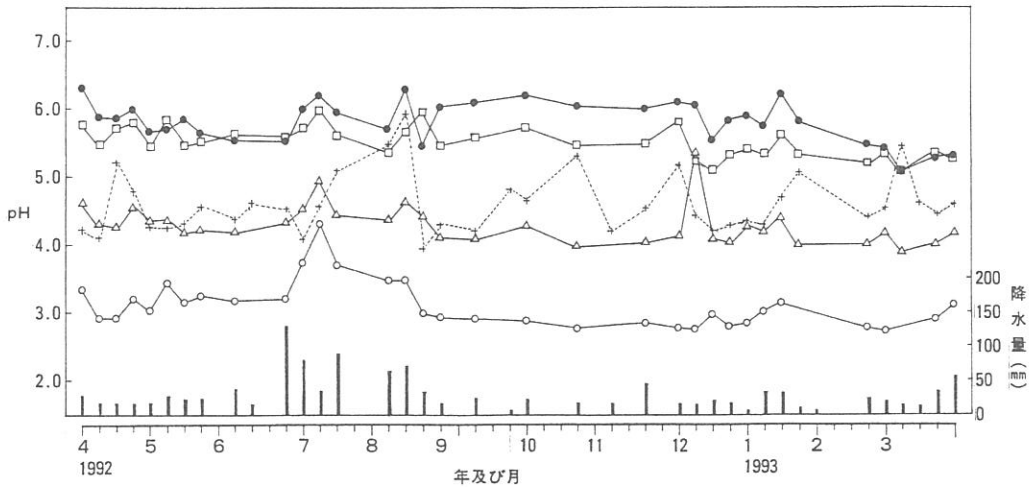


図-1 雨水及び樹幹流pHの季節変動と降水量

—●— イチョウ —○— スギ —△— クヌギ —□— クスノキ …+… 雨水

樹種ごとの樹幹流pH(平均値±標準偏差)を示すと、イチョウ(5.84 ± 0.32)、スギ(3.11 ± 0.34)、クヌギ(4.31 ± 0.29)、クスノキ(5.52 ± 0.23)の順となり、スギが最も強い酸性を示し、イチョウが最も弱い酸性を示す。スギとイチョウの酸度差は同一降雨条件にありながら2.73という高い値を生じている。クヌギは、スギほど顕著ではないが、雨水より平均的に強い酸性を示している。クスノキは、イチョウに次いで酸性度は弱く、雨水に比べほとんどの場合、中性側で推移している。

樹幹流pHの変化量について変動係数にて検討するに、イチョウ5.47%、スギ10.3%、クヌギ6.72%、クスノキ4.16%となっている。スギにおいてやや高い値を示すが、これは平均値の絶対値が小さいこともあり、全体的に変動は、ごく小さいと見てよく、樹幹流pHの年を通じた安定性がうかがわれる。

樹幹流 pH のいま一つの特性として、雨水 pH 及び雨量との独立性があげられる（佐々ら1990、岩井ら1993、尾岸ら1992）。これは今回の調査においても同様の傾向であった。雨水 pH と樹種ごとの樹幹流 pH との相関係数を求めると次のように算出される。

イチョウ ($r=0.091$)、スギ ($r=0.059$)、クヌギ ($r=0.063$)、クスノキ ($r=-0.067$) といずれも相関は認められなかった。

次に降水の量との相関を求めたところ次のような相関係数が得られた。イチョウ ($r=-0.079$)、スギ ($r=0.432$)、クヌギ ($r=0.163$)、クスノキ ($r=0.147$)。

検定結果、スギ樹幹流との間に 5%水準で有意差が認められたが、他の樹種との関連はきわめて小さく、樹幹流 pH に対し、雨水の pH 及び雨水の量は直接的な影響を及ぼしていないと考えられた。

3) 樹幹流 EC と季節変動

樹幹流の電気伝導度 (EC) は、スギで最も高く、次いでクヌギ、クスノキ、イチョウの順となっており、雨水の EC と比較すると、スギで 25.4 倍、クヌギ 7.6 倍、クスノキ 5.7 倍、イチョウ 4.9 倍でスギの値がとびぬけて大きかった。いずれも 8 月以降の生育後期～生育休止期にその値の高まることが認められた (図-2)。

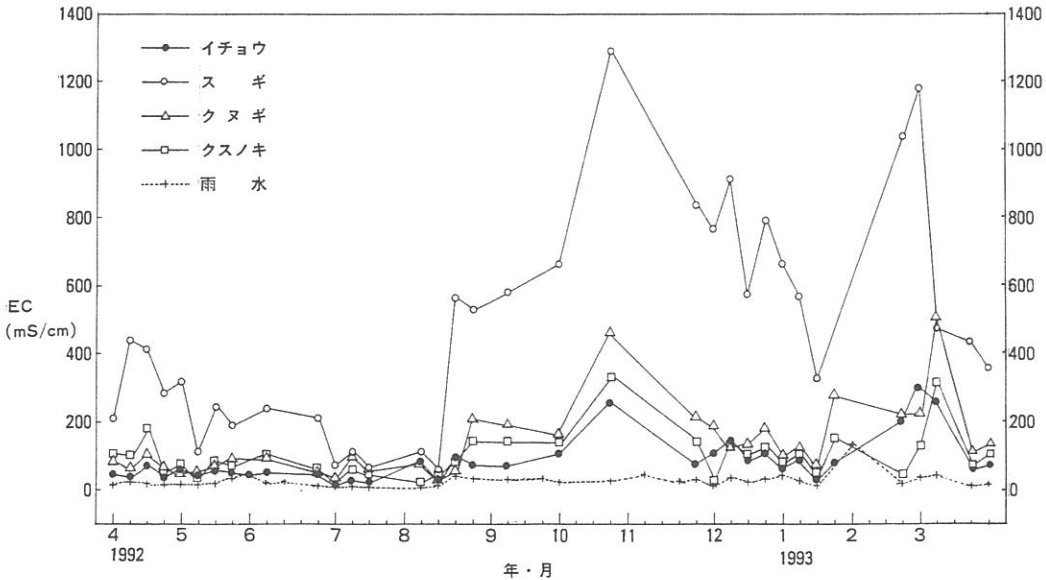


図-2 雨水及び4樹種の樹幹流 EC と季節変動

真田ら(1991b、1992)は、トドマツ、エゾマツの樹幹流ECに季節変動を認め、春の開葉期と秋の落葉前に高いという結果を報告しているが、今回も、明瞭ではないが同様の傾向を示した。尾岸ら(1992)は、スギ樹幹流のECについて、雨量の多かった8～9月に低下し、冬期に増加したと報告しているが、今回の結果も雨量の多かった6月下旬～8月上旬に最も低く、雨量の少ない冬期に高いという同様の傾向を示した。樹幹流のECの値は、溶存物質の量によって支配されていることより、雨量の多い夏期には、溶質比が相対的に低下することから、ECの値は、小さくなり、冬期では、雨量も相対的に少ないことから、樹体からの溶出量や付着物質の洗脱による溶存物質の増加が生じ、ECの値を増大させているものと推察される。

雨水のECは、 $18.7 \pm 11.6 \text{ mS cm}^{-1}$ (平均値±標準偏差)と年を通じて低い水準で推移しており、樹幹流にくらべ安定性が高い。

一般にpHとECは関連が強いとされている。そこで、雨水及び樹幹流を対象にその関係について検討した。この結果、関連が明瞭な場合と、そうでない場合の二つのパターンに分けられた(図-3)。

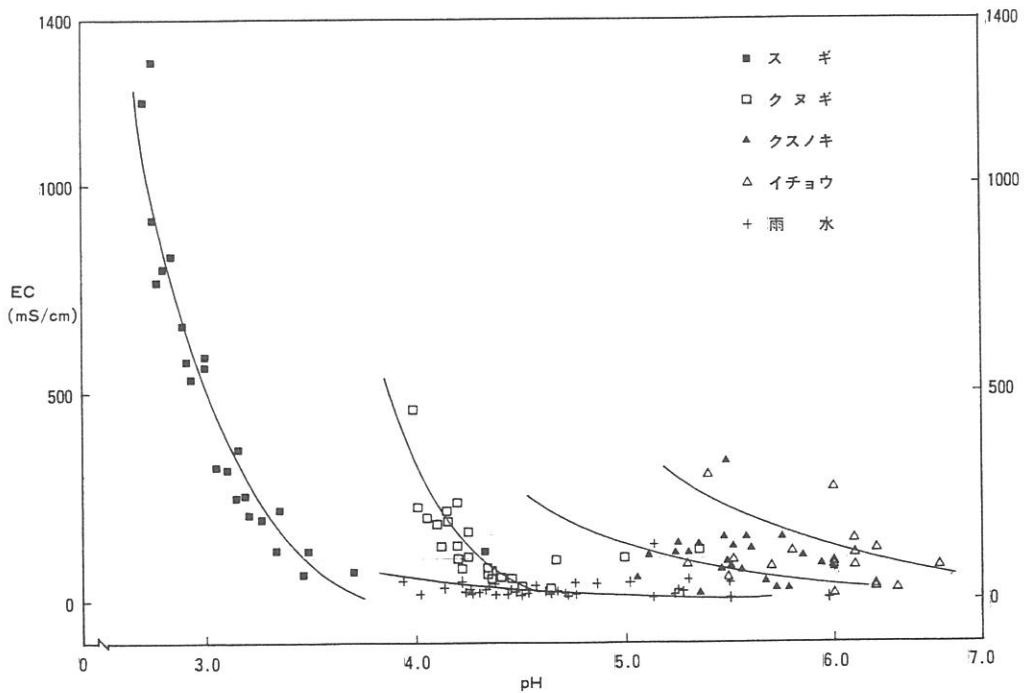


図-3 雨水及び樹幹流pHとECとの関係
(回帰線はフリーハンドによる推定線)

スギ、クスギの場合、その関連はかなり密接で、pHとECの間には、それぞれ1%水準で負の相関関係が認められた(スギ: $r = -0.7876$ 、クスギ: $r = -0.5315$)。一方、クスノキ、イチョウ及び雨水では、その関連は明瞭ではなかったが、その関連はスギ、クスギと同様、負の相関傾向を示した。尾岸ら(1992)の報告でも、スギにおいて同様の傾向のあることが指摘されている。

樹幹流及び雨水のpHとECは、以上のように樹種ごとに異なった関係を示すが、一般にpHが低くなるほどECは増加する傾向があり、この傾向は酸性の低い側でより鋭敏にあらわれることが認められる。

3. 樹幹流の成分性状とpH

樹幹流のpH及びECについては、樹種により差異のあることが認められ、これが雨水のpHや雨量とは、特に密接な関連が見出せないことより、この差異は、樹幹流を構成する成分組成濃度の違いに起因する現象ではないかという立場から各種樹幹流の成分分析が行なわれ(岩坪ら1967、佐々ら1990、1991、真田ら1991c、1992、中島ら1992、尾岸ら1992、井上ら1993、野呂ら1992など)、 K^+ イオンや Ca^{2+} イオンの溶出量が一般に大きく、特に広葉樹類ではカチオン類の溶容量が高く、pHを高くしている等の知見が得られつつある。また金子ら(1992)は、パーク浸出液を用いて、検証を行っている。

ここでは、樹種別に樹幹流の構成イオンについてその成分特性及び季節変動について検討する。

1) 樹種別樹幹流のイオン当量濃度と季節変動

pH及びアニオン(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^-)、カチオン(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)のイオン当量濃度値を用いて、樹種ごとに主成分分析を行ない、集団の均一性について検討した。表-4~7に、各樹種の主成分因子負荷量を示した。いずれも第1、第2主成分の固有値が大きく、比率も高いため、この第1、第2主成分を利用して散布図を作成した(図-4~7)。

表-4 主成分の因子負荷量(イチョウ)

変 量	主 成 分		
	第 1	第 2	第 3
pH	-0.242	0.235	0.693
SO_4^{2-}	0.344	0.464	-0.017
NO_3^-	0.100	0.596	-0.508
Cl^-	0.432	-0.225	0.125
Ca^{2+}	0.453	0.050	0.028
Mg^{2+}	0.448	-0.117	0.021
K^+	0.251	0.421	0.487
Na^+	0.399	-0.358	0.078
固 有 値	4.708	1.749	0.984
比 率 (%)	58.8	21.8	12.3
累積比率(%)	58.8	80.7	93.0

表-5 主成分の因子負荷量(スギ)

変 量	主 成 分		
	第 1	第 2	第 3
pH	-0.294	0.149	0.900
SO_4^{2-}	0.377	0.110	0.131
NO_3^-	0.256	0.743	0.051
Cl^-	0.385	-0.258	0.034
Ca^{2+}	0.383	-0.269	0.110
Mg^{2+}	0.399	-0.079	0.098
K^+	0.355	-0.292	0.375
Na^+	0.351	0.426	-0.092
固 有 値	6.028	1.027	0.549
比 率 (%)	75.3	12.8	6.8
累積比率(%)	75.3	88.2	95.0

表-6 主成分の因子負荷量(クスギ)

変 量	主 成 分		
	第 1	第 2	第 3
pH	-0.141	0.289	0.861
SO ₄ ²⁻	0.417	-0.134	0.175
NO ₃ ⁻	0.360	-0.274	0.213
Cl ⁻	0.414	0.327	0.134
Ca ²⁺	0.411	-0.269	-0.027
Mg ²⁺	0.323	0.376	-0.371
K ⁺	0.422	-0.239	0.146
Na ⁺	0.227	0.666	-0.065
固有値	4.397	1.525	0.975
比率(%)	54.9	19.0	12.1
累積比率(%)	54.9	73.9	86.2

表-7 主成分の因子負荷量(クスノキ)

変 量	主 成 分		
	第 1	第 2	第 3
pH	-0.0932	0.709	0.333
SO ₄ ²⁻	0.4136	0.042	-0.276
NO ₃ ⁻	0.3982	-0.036	-0.096
Cl ⁻	0.3628	-0.166	-0.450
Ca ²⁺	0.3964	0.251	0.255
Mg ²⁺	0.4090	0.162	0.204
K ⁺	0.4113	0.168	0.070
Na ⁺	0.1904	-0.589	0.699
固有値	5.069	1.445	0.545
比率(%)	63.36	18.07	6.82
累積比率(%)	63.36	81.43	88.25

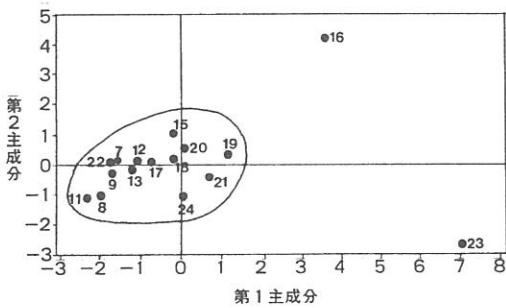


図-4 第1-2主成分の散布図(イチョウ)

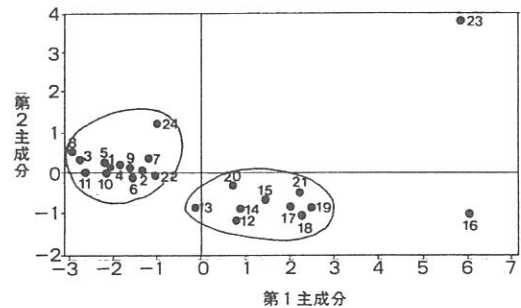


図-5 第1-2主成分の散布図(スギ)

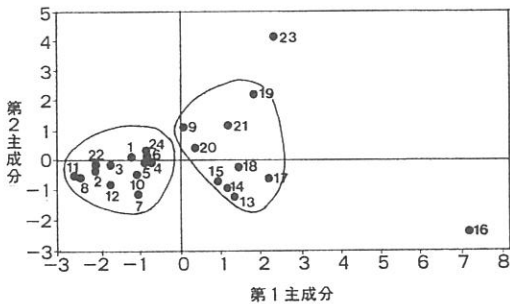


図-6 第1-2主成分の散布図(クスギ)

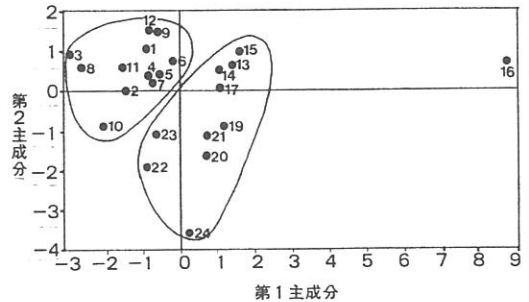


図-7 第1-2主成分の散布図(クスノキ)

各散布図における数字は、樹幹流の回収番号を示す。但しイチョウでは、成分分析開始の時期が6月下旬と遅れたため、他の樹種より試料数は少ない。各図にみられるとおり、それぞれの樹種で散布状態に違いがみられるが、イチョウを除いて、大略二つのグループに分けられること、№16がすべての樹種で、また№23がクスノキを除いて集団より大きく離散していることが認められる。二つのグループを形成するスギ、クヌギ、クスノキの各樹種においては、多少の入りみだれはみられるものの、大略№11~№13までを一団とするグループと、それ以降を一団とするグループで構成されていることが把握される。№12は8月17日に回収の試料であることから、樹幹流の成分濃度は、この頃をさかいとして内容を異にしてくる。すなわち季節変動の生じていることを示している。従って、スギは№11、クヌギ、クスノキでは№12までの回収試料を生育期（前期と略す）、それ以降を生育休止期（後期と略す）として区分することとした。季節的には、前期が春~夏、後期が秋~冬におおむね該当する。イチョウは特に区分する必要は認められず、年を通じて同一集団として取り扱った。この主成分分析にもとづく区分によって、樹種ごとのイオン当量濃度について加重平均値を求め図-8に示した。また巻末付表-1~2に、イオン組成成分の平均値及び分析値を一覧した。

なお、NH₄⁺イオンについては、雨水試料について実施したのみで、樹幹流試料では分析を実施していない。しかしながら、樹幹流特性の把握や樹種間比較においては、特に重大な支障はないと考えられた。以下各樹種の樹幹流成分の特性について検討を加える。

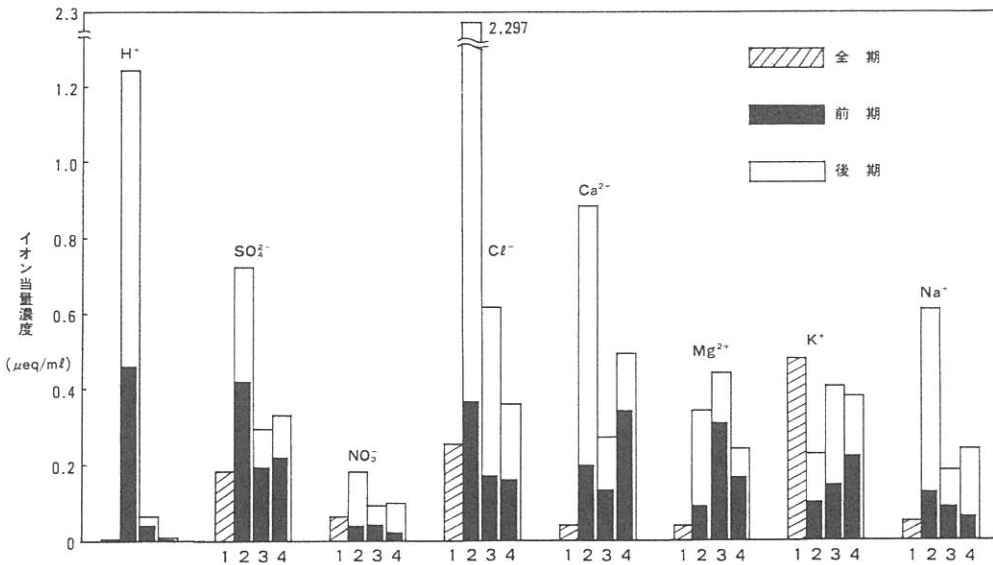


図-8 樹種別樹幹流のイオン当量濃度
1:イチョウ、2:スギ、3:クヌギ、4:クスノキ

イチョウは、図にみられるように、 K^+ を除いて、各イオンとも当量濃度が低く、また季節変動も認められない。溶質比の比較的低い樹幹流をもつ樹種といえるようである。 K^+ イオンのみは、突出した当量濃度を示し、カチオン総量の約80%、イオン総量の約40%を占め、この K^+ イオンの溶存がイチョウのpHを規制している可能性が高い。この K^+ イオンの当量濃度は、他のどの樹種の値より大きい。この現象は野呂ら(1992)の報告と同様であり、イチョウの樹幹流のもつ成分的な大きな特性といえるようである。

スギは、イオン当量濃度の最も高い樹種とされた。また、季節変動も明白で、後期にイオン成分濃度は、前期比3.6倍と大巾に増加した。イオン当量総量で比較した場合、前期では、クスギの1.6倍、クスノキの1.5倍、後期ではクスギの2.7倍、クスノキの3.0倍を示し、スギ樹幹流における溶質比の高さが把握され、これは後期で著るしい。

この溶質比を高めている主要なイオン成分は、 H^+ 、 Cl^- 及び SO_4^{2-} の各イオンで、前期では H^+ イオンが、後期では Cl^- イオンが優先していた。とくに H^+ イオン濃度の絶対量は、前期、後期ともに他の三樹種にくらべ圧倒的に多く、例えばスギ後期の量は、クスノキ後期の244倍、イチョウ全期の実に1,134倍という高い当量濃度を示した。

スギ樹幹流は、後期で著るしく当量濃度を増す。後期において相対的に増加比の大きいものは、 Cl^- を筆頭に、 Na^+ 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 等があげられ、 K^+ 、 SO_4^{2-} の増加比は小さかった。

スギ樹幹流の季節性について、イオン成分の面から検討した例はまだ少ないが、12~1月に Ca^{2+} 濃度が高まった報告(平井ら1990)や成分的に Ca^{2+} が優先していた事例(尾岸ら1992、中島ら1992)があり、これらの事例から類推して、スギでは Ca^{2+} の溶脱が比較的大きく、それも冬期で増大する特性をもつ樹種と考えられた。

スギ樹幹流の成分組成でみられたもう一つの特徴は、カチオン/アニオンのイオンバランスで、比較的均衡がとれていることである。前期で1.17、後期で1.04といった比を示す。これに対して、クスギ、ケヤキでは、前期、後期を通じて、カチオン量が明らかに優先しイオンバランスにおいて、スギは他の三樹種と若干異なる傾向をもつことがうかがえる。

樹幹流のイオンバランスについて解析した例は少ないが、近藤(1992)の調査結果を用いて計算するに調査地吉岡ではその比が0.96、榛東では1.28となった。同様に井上ら(1993)のブナ林、ヒノキ林における林外酸性雨の場合の比は、ブナ樹幹流で1.59、ヒノキで1.49といずれもカチオンが優先した。しかしながら、スギを含め、樹幹流のイオンバランスは、データの的にまだ十分でなく、今後の検討課題としたい。

スギ樹幹流において、最も特徴とされたことは、後期における Cl^- イオンの急増である。一般に、降雨の成分は秋から冬にかけて高まりをみせ、とくに SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ などはその傾向が顕著であり、この原因は、冬型の気圧配置より生じる季節風によって、海塩粒子の影響が強まるためであると報告されている(安田1993、徳地1991、中島ら1992)。

そこで海塩粒子の関与の影響を把握するため、 Cl^- イオンについて、検討してみた。図-9は、スギ樹幹流及び降雨中の全 Cl^- 量と海塩粒子由来の推定 Cl^- 量を示したものである。8月中旬以降降雨水及び樹幹流ともに、濃度が増加し、樹幹流は11月をピークに、雨水は12月と2月にピークをもって、秋~冬にかけて Cl^- 濃度の上昇が明瞭に認められ

る。濃度の変化のみられた8月中旬をさかいに、海塩由来の Cl^- イオンの比率を求めると、雨水では、前期で48.6%、後期で74.1%と、後期では海塩粒子の関与が大きくなる。スギ樹幹流は、前期で40.1%、後期で36.9%とほぼ一定し、スギ樹幹流後期における Cl^- の濃度の大幅な増加は、絶体量としては、増加しているものの、相対的には年を通じて一定しており、海塩粒子の関与が特に増大するというのではなく、樹体及び付着量の増大によるものが寄与していると考えられた。

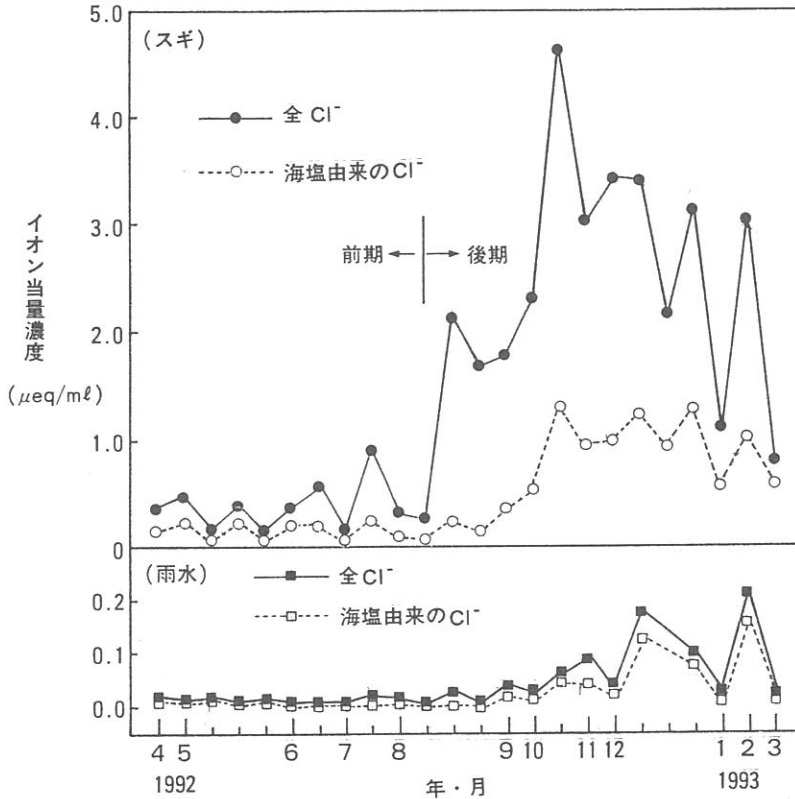


図-9 スギ及び雨水における全 Cl^- と海塩寄与 Cl^- の季節変動

クスギ樹幹流における特性の一つは、 Mg^{2+} の当量濃度が前期、後期を通じて各樹種中最も大きいことであった。カチオンに占める Mg^{2+} の割合は、前期で43%、後期で32%と高かった。イチョウで約6%、スギで10%前後、クスノキで20%前後であるので、 Mg^{2+} の当量濃度の大きさは、クスギの樹幹流を特徴づける指標成分として認識される。野呂ら(1992)の報告でも、クスギにおいて Mg^{2+} の当量濃度の高いことが見出されているが、カチオンに占める比率では16.0%となっており、今回調査とかなり異なっている。野呂らの調査は6~7月の2ヶ月間の限定値であり、又地域性や個体差等の影響が考えられる。クスギのイオンバランスは、前期で1.77、後期で1.37とカチオンが優先している。前期は Mg^{2+} がカチオン比を高めるに大きく作用しているが、後期ではカチオン量が約2倍程度増加したにもかかわらずカチオン比は、低下した。これは、 Cl^- の濃度が前期にくらべ3.6倍と高くなったことが大きく影響しているようである。

クスノキの樹幹流は特徴としてカチオン類の優先度の相対的に大きいことがあげられる。カチオン／アニオン比は前期で1.95、後期で1.93を示し、他の樹種より明らかに大きかった。カチオンのうちCa²⁺及びK⁺の当量濃度が高かった。このことは金子ら(1992)のバーク浸出液による実験でも確かめられており、クスノキ樹幹流のもつ一つの特性といえるようである。後期に濃度が高くなる季節性は、クスノキにおいても明瞭に認められる。

以上のことを総括するに、スギ、クヌギ、クスノキの樹幹流のイオン当量濃度は、季節性があり、秋～冬期にかけて著しく増加し、その増加量は、イオン総量でみた場合、スギで3.6倍、クヌギで1.9倍、クスノキで1.8倍と増加し、スギで特に急増した。この原因については、まだ十分に解明されていないが、雨水成分濃度に特に季節性がないことから、樹種の固有の生理的特性にもとづく可能性が高い。しかし、乾性付着物質の動向や、大気汚染の地域性の相違など、関与要因は多面的であり、今後、その成分特性については、更に検討を要すると考えられる。

またカチオン類がアニオン類に優先する傾向の強いことがクスノキ、クヌギの広葉樹で認められた。カチオンのうちクスノキではCa²⁺、K⁺が、クヌギではMg²⁺、K⁺が高い当量濃度を示し、樹種の特性を示している。

イチヨウは、特異的な樹幹流を示し、各イオン当量濃度は、極めて低いが、K⁺イオンのみは、突出した高い濃度を示し注目された。

2) 雨水成分に対する樹幹流の濃度比

雨水成分を基準とした濃度比による評価は、樹幹流の樹種特性を相対的に把握する上で有効な方法と考えられる。表-8に樹種ごと、成分ごとの濃度比を示した。

表-8 雨水に対する樹幹流イオン成分の濃度比

樹種	期別	試料数	イオン成分								アニオン	カチオン	総量
			H ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺			
イチヨウ	全期	16	0.03	3.6	4.0	7.4	1.9	5.1	161.0	2.3	5.0	6.9	5.9
スギ	前期	11	13.3	8.2	2.6	7.9	9.5	13.2	33.6	5.6	8.2	11.1	9.6
	後期	11	35.9	14.0	11.9	65.8	42.2	48.8	77.3	26.6	31.4	37.4	34.2
クヌギ	前期	12	1.1	3.8	2.7	4.9	6.3	44.2	49.6	3.9	4.0	8.1	5.9
	後期	10	1.9	5.7	6.0	17.7	13.0	63.2	136.6	8.0	9.9	15.5	12.5
クスノキ	前期	12	0.07	4.4	1.4	4.7	16.2	24.0	74.6	2.8	4.0	9.0	6.3
	後期	9	0.14	6.5	6.5	10.2	23.6	34.7	127.0	10.6	7.8	15.4	11.3
全平均		81	6.5	6.4	4.8	16.2	15.0	31.2	96.2	8.0	9.6	14.1	11.7
前期(A)(イチヨウを除く)		35	4.6	6.1	2.5	6.5	12.1	34.3	60.0	4.6	5.3	9.4	8.4
後期(B)(")		30	12.3	9.0	8.3	33.1	26.9	49.4	112.0	15.6	17.1	23.5	20.1
B/A		-	2.7	1.5	3.3	5.1	2.2	1.4	1.9	3.4	3.2	2.5	2.4

イチョウ及びクスノキの H^+ イオンのみは雨水成分より低い値を示したが、他の成分はいずれも雨水より高い濃度を示した。濃度比は各樹種ともアニオン類で小さく、カチオン類で大きかった。全樹種における濃度比の加重平均値はアニオン類で9.6倍であるに比し、カチオン類は14.1倍と大きかった。イチョウを除いて季節変動があり、アニオン類では5.3倍から17.1倍へ、カチオン類では9.4倍から23.5倍へと前期から後期にかけて大きく増加した。成分項目別では、 NO_3^- の濃度比が4.8で最も小さく、 K^+ が96.2倍ときわだてて大きかった。特に K^+ はイチョウで161倍と突出した値を示し、クスギ後期、クスノキ後期も極めて高い濃度比を示し、樹体からの溶出が容易でしかも溶出量がきわだてて多い成分であることが把握された。 K^+ は樹体内において動きやすく、また溶脱を受けやすいため、樹幹流や林内雨で高い濃度を示すことが、既に多くの研究で実証されている(岩坪ら1967、佐々ら1991、真田ら1991a, b, c、井上ら1993など)。また K^+ 濃度は、針葉樹より広葉樹で大きく、また落葉期に高くなるという傾向は、今回の調査結果と一致していた。

Cl^- イオンはスギ後期で65倍という高い濃度比を示すが、これは秋~冬にかけて雨水濃度を増す海塩粒子の直接的影響でなく、スギ固有の樹種特性と推測された。 Mg^{2+} はクスギにおいて、 Ca^{2+} はスギ、クスノキ後期でそれぞれ高い濃度比を示し、各樹種の樹幹流は雨水以外の影響によって成分的に大きく支配されていることが把握される。

4. 重回帰分析による樹幹流pHの要因解析

樹幹流のpHは、樹種により固有の領域に収束する特性傾向をもつことは、注目すべき現象であるが、このpHを規定する要因の解明はまだ十分でない。真田ら(1991c)は、エゾマツ及びトドマツを対象に、この要因解明を試み、K濃度が弱いながら樹幹流pHと正の相関関係のあることを認め、pH上昇には、K溶出の関与を推測したが、他の塩基類については、特定の傾向が見出せないとし、また、有機酸等の酸性物質の関与を示唆している。

今回、それぞれの樹種における樹幹流pHに関して、これを規定する要因把握のため、各イオン当量濃度や、採水量及び雨水pHを変動因として、重回帰分析を行ない検討してみた。この場合の目的変数は、樹幹流pHであり、説明変数は、各イオン成分(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)の当量値、採水量及び雨水pHの9要因項目とした。重回帰分析は、変数増減法によって探索した。

1) イチョウ

樹幹流pHと、要因項目間の相互関連を表-9に示した。表にみられるようにイオン成分間には、関連の強いものが多く認められた。 NO_3^- を除いて、各イオン成分間には、1~5%水準で有意差のあることが認められ、イオン成分間の関連は、きわめて密接であった。しかしながら、各イオン成分と、雨水pH、採水量及び樹幹流pH間の相互関連は、小さかった。特徴的な傾向として、各イオン成分量と、採水量とは負の相関傾向があり、採水の量的増大が溶存成分を稀釈していると推測された。

重回帰分析の結果、F値は、1%水準で有意であり、重相関係数は0.8134であった。(表-10)

表-9 相関行列表(イチョウ)

変数	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Y
	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	雨水pH	採水量	pH
SO ₄ ²⁻	-	0.170	0.719**	0.644**	0.685**	0.516*	0.594*	-0.203	-0.238	-0.258
NO ₃ ⁻		-	-0.214	0.171	0.129	-0.223	-0.313	-0.223	0.046	-0.379
Cl ⁻			-	0.747**	0.781**	0.623**	0.912**	0.140	-0.208	-0.338
Ca ²⁺				-	0.963**	0.711**	0.635**	0.121	-0.476	-0.438
Mg ²⁺					-	0.595*	0.732**	0.063	-0.380	-0.515
K ⁺						-	0.422	0.140	-0.473	0.125
Na ⁺							-	0.015	-0.102	-0.485
雨水pH								-	-0.156	0.160
採水量									-	-0.291

** : 1%水準で有意、* : 5%水準で有意

表-10 分散分析表(イチョウ)

変動因	自由度(f)	平方和(S)	平均平方(V)	F	重相関係数(寄与率)
全体(T)	15	1.5943			
回帰(R)	3	1.1013	0.3671	8.95**	
誤差(e)	12	0.493	0.0410		
					0.8314 (0.6912)

** : 1%水準で有意

変数増減法による探索の結果、次の回帰式が得られた。

$$Y(\text{Gb}) = 6.497 - 12.579 X_5 + 0.611 X_6 - 0.039 X_8 \dots\dots (5)$$

(5)式において Y(Gb) : イチョウの樹幹流 pH 予測値

X₅ : Mg²⁺ のイオン当量濃度 (μeq ml⁻¹)

X₆ : K⁺ の ”

X₈ : 採水量 (ℓ)

この場合の標準回帰係数は、X₅、X₆、X₈ でそれぞれ -0.978、0.507、-0.422 であった。回帰係数の検定結果、X₅ が 1%水準で、X₆、X₈ が 5%水準で有意であった。このことからイチョウの樹幹流は成分的に Mg²⁺、K⁺ イオンの影響を受け、また採水量と弱い相関関係のあることが見出された。Mg²⁺ とは負の相関を示し、Mg²⁺ の当量濃度の高さが pH を酸性側に規定することを示している。しかしながら、Mg²⁺ は、pH の決定に関しては、酸性を中和する側の物質として作用することから、解析は矛盾した結果を算出したことになる。この原因は、前記相関行列において、Mg²⁺ は、アニオンである SO₄²⁻ 及び Cl⁻ と相関が高いことから、これらのアニオン類を代替した形で Mg²⁺ が抽出されたものと考えられる。その面では、Mg²⁺ は pH を指標するインジケータとしての役割りとしてとらえるのが適切かもしれない。

K⁺とpHは、正の相関関係にある。イチヨウは、樹幹流の溶存成分として、K⁺の含有量はアニオンの約80%を占めており、pHの規定に関与が高いと考えられる。

Mg²⁺は、Ca²⁺、Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻と相関が強く、K⁺もCl⁻、Ca²⁺と密接に関連しあっていることから、(5)式においては、Mg²⁺、K⁺のかわりにCa²⁺、Na⁺等を用いても推定可能なことを示している。このことは、イチヨウの樹幹流pHの規定には、成分的には、NO₃⁻を除く各イオン成分が相互に影響しあっているといつてよく、(5)式で検索されたMg²⁺、K⁺は、他のイオンを代表する形で顕在化しているものと解される。

③ スギ(前期)

スギ前期における樹幹流pHと各要因項目間の相関行列を表-11に示した。Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺のイオン間では、相関係数が0.90を超え、密接な関連下にあることを示している。Cl⁻は各イオンと相関関係が高い。採水量とCa²⁺、Mg²⁺、Na⁺のカチオン間では負の相関がみられる。採水量が多くなれば、それによって稀釈され濃度を減じるという傾向が比較的はっきりしているイオン成分と考えられる。

表-11 相関行列表(スギ-前期)

変数	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Y
	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	雨水pH	採水量	pH
SO ₄ ²⁻	—	0.597	0.668*	0.669*	0.690	0.258	0.741**	-0.633*	-0.352	-0.096
NO ₃ ⁻		—	0.442	-0.021	0.018	0.478	0.024	-0.168	0.395	0.149
Cl ⁻			—	0.780**	0.765**	0.718*	0.695*	-0.131	-0.459	0.472
Ca ²⁺				—	0.977	0.297	0.922**	-0.380	-0.809**	0.092
Mg ²⁺					—	0.301	0.929**	-0.344	-0.801**	-0.011
K ⁺						—	0.146	0.403	-0.070	0.615
Na ⁺							—	-0.527	-0.730*	-0.061
雨水pH								—	0.197	0.168
採水量									—	-0.051

** : 1%水準で有意、* : 5%水準で有意

スギ前期におけるスギ樹幹流pHの規定要因把握のため、重回帰による分析を行ったところ、F値は5%水準で有意であり、重相関係数は0.6157を示した(表-12)。精度的には信頼度が十分高いとはいえなかったが、傾向把握にとっては支障ないと考えられた。変数増減法による計算結果、次の重回帰式が得られた。

表-12 分散分析表(スギ-前期)

変動因	自由度(f)	平方和(S)	平均平方(V)	F	重相関係数(寄与率)
全体(T)	10	1.2508			
回帰(R)	1	0.4742	0.4742	5.50 *	
誤差(e)	9	0.7766	0.0862		

0.6157(0.3791)

* : 5%水準で有意

$$Y(cj-1) = 3.054 + 3.654 X_6 \dots\dots\dots (6)$$

(6)式において、Y(cj-1)：スギ樹幹流（前期）のpH予測値
 X_6 ：K⁺のイオン当量濃度 ($\mu e q ml^{-1}$)

この場合、 X_6 の標準回帰係数は、0.6157であり、検定結果5%水準で有意であった。スギ樹幹流のpHは(6)式にみられるとおり、K⁺のみの単回帰式によって求められた。K⁺は表-11にみられるように、Cl⁻との相関が強いことから、Cl⁻の値によってもpHは大きく影響を受けていると推察される。

3) スギ（後期）

スギ後期における樹幹流pHと各要因項目との相関行列を表-13に示す。単相関係数で0.90以上の高い値をとる要因項目が多く認められる。Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺のカチオン類、樹幹流pHとCl⁻、Mg²⁺等である。全体的に各イオン間で相互関連が高い樹幹流である。

表-13 相関行列表（スギ-後期）

変数	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Y
	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	雨水pH	捕水量	pH
SO ₄ ²⁻	-	-0.306	0.871**	0.705*	0.784**	0.731*	0.729*	0.146	-0.093	-0.861**
NO ₃ ⁻		-	-0.387	-0.426	-0.435	-0.459	0.047	0.157	0.316	0.451
Cl ⁻			-	0.879**	0.889**	0.782**	0.708*	0.331	-0.133	-0.943**
Ca ²⁺				-	0.972**	0.912**	0.345	0.104	-0.218	-0.887**
Mg ²⁺					-	0.906**	0.364	-0.021	-0.304	-0.901**
K ⁺						-	0.291	-0.064	-0.244	-0.807**
Na ⁺							-	0.547	0.200	-0.588
雨水pH								-	0.426	-0.245
捕水量									-	0.264

**：1%水準で有意、*：5%水準で有意

樹幹流pHに対する規定要因把握のため、重回帰分析を行った。この結果、F値は1%水準で有意であり、重相関係数は、0.9438と高い信頼度を示した（表-14）。

変数増減法による計算結果次の重回帰式が求められた。

表-14 分散分析表（スギ-後期）

変動因	自由度(f)	平方和(S)	平均平方(V)	F	重相関係数(寄与率)
全体(T)	10	0.1557			
回帰(R)	1	0.1386	0.1386	72.94**	
誤差(e)	9	0.0171	0.0019		
					0.9438(0.8908)

**：1%水準で有意

$$Y(cj-2) = 3.221 - 0.1317 X_3 \dots\dots\dots (7)$$

(7)式において、Y(cj-2): スギ樹幹流(後期)のpH予測値
 X_3 : Cl⁻イオン当量濃度(μeqml⁻¹)

この場合 X_3 の標準回帰係数は-0.9438で検定結果1%水準で高い有意性を示した。(7)式からスギ樹幹流(後期)pHは、Cl⁻の成分濃度のみの単回帰式によって高い精度で推定可能なことが認められ、pHの規定にCl⁻が負の相関下で強い影響を及ぼしていることが推察された。このCl⁻はSO₄²⁻及び他のカチオン類と高い相関関係を示すことから、これらイオン成分の量からも推定可能なことを示している。

4) クヌギ(前期)

クヌギ前期における樹幹流pHと各要因項目との相関行列を表-15に示した。SO₄²⁻とCa²⁺、Mg²⁺及びNa⁺のカチオン間で0.8台の比較的高い相関関係が認められたが、他の項目間では、特に目立つ相関関係は見出せなかった。

表-15 相関行列表(クヌギ-前期)

変数	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Y
	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	雨水pH	捕水量	pH
SO ₄ ²⁻	-	0.020	0.670*	0.149	0.625*	0.383	0.875**	-0.251	-0.672*	0.312
NO ₃ ⁻		-	0.202	-0.381	-0.197	-0.080	-0.301	-0.281	0.080	0.140
Cl ⁻			-	0.180	0.621*	0.451	0.540	0.010	-0.421	0.582*
Ca ²⁺				-	0.839**	0.628*	0.550	0.030	-0.329	-0.327
Mg ²⁺					-	0.629*	0.667*	0.029	-0.425	-0.084
K ⁺						-	0.283	0.261	-0.611**	0.175
Na ⁺							-	-0.317	-0.606*	0.195
雨水pH								-	0.260	0.182
捕水量									-	-0.359

** : 1%水準で有意、* : 5%水準で有意

クヌギ前期の樹幹流pHに対する要因効果把握のため重回帰による分析を行った。この結果、F値は1%水準で有意であり、重相関係数は0.8678を示した(表-16)。

変数増減法による計算結果、次の重回帰式が得られた。

表-16 分散分析表(クヌギ-前期)

変動因	自由度(f)	平方和(S)	平均平方(V)	F	重相関係数(寄与率)
全体(T)	11	0.5517			
回帰(R)	3	0.4153	0.1384	8.14**	
誤差(e)	8	0.1364	0.0170		
					0.8678(0.7532)

** : 1%水準で有意

$$Y(Qa-1) = 4.485 + 2.346X_3 + 3.487X_4 - 2.933X_5 \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)式において、 $Y(Qa-1)$: クヌギ樹幹流(前期)のpH予測値

X_3 : Cl^- のイオン当量濃度 ($\mu eq ml^{-1}$)

X_4 : Ca^{2+} "

X_5 : Mg^{2+} "

この場合、 X_3 、 X_4 、 X_5 の標準回帰係数は、それぞれ 1.548、0.924、-1.824 であり、検定結果、 X_3 が 1%水準で、 X_5 が 5%水準で有意であった。

(8)式で示されるように、クヌギ前期の樹幹流 pH は、 Cl^- の当量濃度と関連が深く、次いで、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} によって変化することが認められた。pH と Cl^- 及び Ca^{2+} との間には、正の相関が、 Mg^{2+} とは負の相関関係が成立している。 Mg^{2+} と pH との関係は、前述イチョウの項と同様、 SO_4^{2-} 及び Cl^- の連動のもとに抽出されたと考えられる。

5) クヌギ(後期)

クヌギ後期における樹幹流 pH と各要因項目間の相関行列を表-17に示す。

表-17 相関行列表(クヌギ-後期)

変数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	Y
	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	雨水 pH	採水量	pH
SO_4^{2-}	-	0.155	0.372	0.470	0.549	0.429	0.247	-0.526	-0.464	0.161
NO_3^-		-	0.512	0.150	0.353	0.466	0.013	0.462	-0.319	-0.108
Cl^-			-	0.024	0.524	0.409	0.779**	0.390	-0.162	0.510
Ca^{2+}				-	0.440	0.804**	-0.237	-0.293	-0.870**	-0.065
Mg^{2+}					-	0.437	0.215	-0.289	-0.695*	-0.114
K^+						-	-0.022	0.056	-0.749*	0.155
Na^+							-	0.317	0.149	0.706*
雨水 pH								-	0.182	0.353
採水量									-	0.114

** : 1%水準で有意、* : 5%水準で有意

Ca^{2+} と K^+ 及び採水量間に、また、 Cl^- と Na^+ 間に 1%水準で有意差が、また採水量と Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ の各カチオンと、樹幹流 pH と Na^+ 間にそれぞれ 5%水準で有意差が認められた。

クヌギ後期の樹幹流 pH に対する規定要因把握のため、重回帰分析により解析した。解析結果、F 値は 1%水準で有意であり、重相関係数は 0.7065 を示した(表-18)。

変数増減法による計算結果、次の重回帰式が得られた。

$$Y(Qa-2) = 3.734 + 2.981X_7 \quad \dots\dots\dots (9)$$

表-18 分散分析表(クスギ-後期)

変 動 因	自由度 (f)	平方和 (S)	平均平方 (V)	F	重相関係数(寄与率)
全 体 (T)	9	1.3752			
回 帰 (R)	1	0.6864	0.6864	7.97**	
誤 差 (e)	8	0.6888	0.0861		

0.7065(0.4992)

** : 1%水準で有意

(9)式において、Y(Qa-2): クスギ樹幹流(後期)のpH予測値

 X_7 : Na⁺イオンの当量濃度 ($\mu\text{eq ml}^{-1}$)

この場合、 X_7 の標準回帰係数は、0.7066で検定結果5%水準で有意であった。クスギ樹幹流は(9)式で示されるように、Na⁺のみの単回帰式で推定可能なことが認められNa⁺成分濃度と正の相関下で連動しつつ変化していることがうかがわれた。Na⁺はCl⁻と密接な相関関係のあることから、Cl⁻の値によっても推定可能なことを示している。採水量及び雨水pHの影響は認められなかった。

6) クスノキ(前期)

クスノキ前期における樹幹流pHと各要因項目間の相関行列を表-19に示す。採水量とCa²⁺、Mg²⁺、K⁺の各アニオンとの間に1~5%水準で負の相関が認められ、採水の増加にともない、これらアニオン類の当量濃度は低くなることが把握される。Mg²⁺は、Ca²⁺及びK⁺の両イオンと強い相関関係が認められ、連動した動きをしていることがうかがわれる。

Mg²⁺はこのほかSO₄²⁻と弱いながら正の相関を示している。また、雨水のpHとNa⁺との間にも5%水準で正の相関関係のあることが認められる。

表-19 相関行列表(クスノキ-前期)

変 数	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Y
	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	雨水pH	採水量	pH
SO ₄ ²⁻	-	-0.094	0.496	0.404	0.579*	0.561	-0.199	-0.435	-0.158	-0.217
NO ₃ ⁻		-	0.443	-0.001	-0.297	-0.061	0.031	-0.066	0.021	0.401
Cl ⁻			-	0.462	0.373	0.436	0.014	-0.068	-0.306	0.272
Ca ²⁺				-	0.902**	0.838**	0.247	-0.062	-0.839**	0.165
Mg ²⁺					-	0.862**	0.174	-0.191	-0.653*	-0.055
K ⁺						-	0.174	-0.026	-0.616*	-0.117
Na ⁺							-	0.675*	-0.204	-0.411
雨水pH								-	-0.083	-0.276
採水量									-	-0.324

** : 1%水準で有意、* : 5%水準で有意

クスノキ前期の樹幹流pHに対する要因効果把握のため、重回帰による分析を行った。この結果、F値は、3.36と小さかったが、検定結果5%水準で有意とされた。重相関係数は、0.8116を示した(表-20)

表-20 分散分析表(クスノキ- 前期)

変 動 因	自由度 (f)	平方和 (S)	平均平方 (V)	F	重相関係数(寄与率)
全 体 (T)	11	0.4467			
回 帰 (R)	4	0.2938	0.0734	3.36*	
誤 差 (e)	7	0.1529	0.0218		
					0.8116(0.6586)

*: 5%水準で有意

変数増減法による計算結果、次の回帰式が得られた。

$$Y(Cc-1) = 6.222 - 0.675 X_1 + 2.936 X_2 - 4.735 X_7 - 0.025 X_8 \dots\dots (10)$$

(10)式において、 $Y(Cc-1)$: クスノキ樹幹流(前期)のpH予測値

- X_1 : SO_4^{2-} イオンの当量濃度 ($\mu eq ml^{-1}$)
- X_2 : NO_3^- "
- X_7 : Na^+ "
- X_8 : 採水量 (ℓ)

この場合、 X_1 、 X_2 、 X_7 及び X_8 の標準回帰係数は、それぞれ -0.382、0.395、-0.606、-0.517 で、検定結果 X_7 のみが 5%水準で有意であった。(10)式において、樹幹流 pH に最も強い影響を及ぼすものは Na^+ の当量濃度と判定された。pH とは負の相関を示す。次いで採水量の影響が大きい。採水量の増加により pH は低下する。採水量は、 Ca^{2+} 、 K^+ などのカチオン類と負の有意な相関関係にあることから、採水量の増加は、これらカチオン類の溶存濃度を低下させ、これが結果として pH の低下に結びついていると考えられる。 SO_4^{2-} の増加は、pH の酸性化を促進し、 NO_3^- の増加は、pH の酸性化を抑制する方向で作用していることが認められる。

7) クスノキ(後期)

クスノキ後期における樹幹流 pH と各要因項目間の相関行列を表-21に示す。 Ca^{2+} 、 K^+ 及び採水量の相互間に 1%水準で有意差が認められ、採水量と両カチオン間は負の相関、両イオン間では正の相関がみられる。このほか SO_4^{2-} と Cl^- 間に、 K^+ と Mg^{2+} 及び樹幹流 pH 間、 Ca^{2+} と樹幹流 pH 間にそれぞれ 5%水準で有意差が認められ、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ のカチオン類と採水量が樹幹流 pH を大きく規制していることが推測される。

このため、クスノキ樹幹流 pH に対する規定要因把握のため、重回帰による分析を行った。この場合 F 値は 1%水準で有意であり、重相関係数は、0.7517 を示した(表-22)。

変数増減法による計算結果、次の回帰式が得られた。

$$Y(Cc-2) = 5.681 - 0.0412 X_8 \dots\dots\dots (11)$$

(11)式において、 $Y(Cc-2)$: クスノキ樹幹流(後期)のpH予測値

- X_8 : 採水量 (ℓ)

表-21 相関行列表(クスノキ-後期)

変数	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Y
	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	雨水pH	採水量	pH
SO ₄ ²⁻	-	0.492	0.767*	0.421	0.135	0.633	-0.491	-0.167	-0.479	0.537
NO ₃ ⁻		-	0.488	-0.177	-0.095	0.112	-0.332	0.575	-0.263	0.315
Cl ⁻			-	-0.114	-0.491	0.120	-0.066	0.229	0.120	0.081
Ca ²⁺				-	0.812**	0.807**	-0.325	-0.598	-0.802**	0.715*
Mg ²⁺					-	0.711	-0.562	-0.399	-0.765*	0.609
K ⁺						-	-0.686	-0.519	-0.798**	0.736*
Na ⁺							-	0.105	0.512	-0.306
雨水pH								-	0.369	-0.424
採水量									-	-0.751*

** : 1%水準で有意、* : 5%水準で有意

表-22 分散分析表(クスノキ-後期)

変動因	自由度(f)	平方和(S)	平均平方(V)	F	重相関係数(寄与率)
全体(T)	8	0.4182			
回帰(R)	1	0.2363	0.2363	9.12**	
誤差(e)	7	0.1819	0.0259		
					0.7517(0.5647)

** : 1%水準で有意

この場合、X₈の標準回帰係数は、-0.7517で検定結果5%水準で有意であった。クスノキ後期における樹幹流は(11)式で示されるように、採水量と連動した動きを示すことが認められ、その値が負であることから、採水量の増加によってpH値の低下がもたらされることが把握された。採水量は、Ca²⁺、K⁺の両イオンと強い相関関係があることから、採水量の増加は、相対的に樹幹流中におけるカチオン類の減少をもたらし、これがpHの低下に作用していると推定され、潜在的には、Ca²⁺、K⁺の両カチオンの溶容量がクスノキの樹幹流pHを規定している大きな要因と考えられた。

常識的には、樹幹流pHは、それを構成している成分組成において、溶存率の高い成分の作用によって規定されると考えられるが、この面から検討してみることにする。

イチョウは、K⁺の溶容量が圧倒的に大きかった。しかし解析結果では、K⁺の影響も抽出されたが、それ以上にMg²⁺の影響が強くあらわれた。成分含量の点では、Mg²⁺はK⁺にくらべれば13分の1以下と少なくpHの規定に決定的な作用を及ぼしているとは考えにくい。Mg²⁺は、SO₄²⁻、Cl⁻、Ca²⁺等其他の組成成分と極めて密接な連動性を有していることより、pHの決定は、Mg²⁺を含め、これら成分が同等の作用をしていることが推測される。従って、ここで抽出されたMg²⁺の関与の大きさは、他の成分の関与を潜在的に荷ったみかけの上の指標成分と位置づけられ、基本的には、イチョウ樹幹流pHの決定は、かなり複合的であることがうかがわれる。

スギ（前期）では、 SO_4^{2-} と Cl^- のアニオン類の溶存が優先したが、解析結果、 K^+ が有意な成分として抽出された。 K^+ は Cl^- と密接に関連しており、間接的ながら Cl^- の影響は、抽出されている。

スギ（後期）は Cl^- が突出した値をとったが、重回帰分析においても、 Cl^- の影響の大きさが抽出され、予想どおりの結果が得られた。

クスギは前期では Mg^{2+} が、後期では Cl^- 、 Mg^{2+} が高い溶存量を示した。重回帰分析の結果、前期では、 Mg^{2+} も規定関与要因として抽出されたが、 Cl^- の方が寄与度としては大きかった。後期では、 Na^+ が抽出された。 Na^+ は Cl^- と密接に関連しているため、 Cl^- の関与も間接的ながら抽出されたことになる。

クスノキは Ca^{2+} 及び K^+ のカチオン類がやや高い溶存量を示していたが、解析結果、前期では、溶存量の少ない Na^+ が、後期では、イオン成分ではなく採水量が有意な要因項目として抽出された。 Na^+ は Ca^{2+} 、 K^+ と相関が低く、前期における重回帰分析結果は、その解釈に検討の余地を残した。後期における採水量は、 Ca^{2+} 、 K^+ の当量濃度と負の相関下で密接に関連しており、間接的であるが、 Ca^{2+} 、 K^+ の規定関与を表現した結果となっている。

以上の点から、いくつかの検討余地はあるものの、樹幹流 pH は、基本的には、溶存成分の主要な構成成分の作用の影響を受けていることは、大略察知されるが、単一成分が主動的に作用している場合は少なく、多くは、複合的に作用していると考えられた。

IV 総合考察

同一の降雨条件下にありながら、樹幹流 pH が、樹種ごとに固有の領域をもって推移収束するという現象は、まだ多くの樹種について普遍化するまでに至っていないものの、きわめて注目に値する。樹幹流 pH は、何故一定の領域に収束するのか、そしてその領域を規定するものは、一体何なのか、樹幹流をめぐる問題のうちでもこれは最大の関心事とされ、樹幹に沈着する乾性降水物の影響、あるいは、樹皮より溶出する成分の影響では等々さまざまな角度から、この現象解明にむけて多くの研究がなされているが、まだ十分納得の得られる答は出されていない。

佐々ら（1991a）は、スギ、カラマツ、ヒノキ等7樹種について、樹幹流 pH に関する決定要因をイオン成分濃度の面より検討している。いずれの樹種も、決定要因は見出されず、各種成分の複合的作用によるものと結論しているが、このうちアルカリ金属、アルカリ土類金属および有機態炭素の相対的濃度比率の関与を示唆している。また同じく佐々ら（1991b）は、雨水の樹幹流化における変質を、樹木の生命活動の一環としてとらえ、スギおよびアカマツの枯死木を利用した調査より、枯死木では無機態 N、Ca、Mg および Na が減少し、 P_2O_5 や K が増加したことを報告しているが、生命現象との関連性については、課題を残している。真田ら（1991c）は樹幹流 pH に関して塩基濃度より検討を加えているが、特に pH の規定要因の抽出には至らず、有機態等の酸性物質の関与を示唆している。北原ら（1992）は、樺及び楠の樹幹流において、酢酸、プロピオン酸等の有機酸が多く含まれていることを報告したが、pH との関連については触れていない。しかし、樹幹流中の有機酸については、pH との関連について、今後検討が必要と考えられる。

金子ら(1992)は、樹幹流のpHはバーク(樹皮)表面あるいはバーク中より溶出する成分に関係しているのではないかという仮定のもとに、スギ、ヒノキ等5種類のバーク浸出液pHとカチオン濃度の関係を調査し、pHの高い場合、K、Ca、Mgとの関連があり、Naは関係がなかったと報告している。

今回、イチョウ、スギ、クヌギ及びクスノキの4樹種を対象に、1ケ年にわたり追跡した樹幹流pHは、スギの場合3.11という強い酸性領域を中心に推移し、逆にイチョウは、5.84という弱酸性の領域を中心に推移し、また、クヌギ、クスノキもこれらの間にあってそれぞれ固有の領域をもって推移し、樹種ごとに特有のpH特性を示した。しかしながら樹幹流を構成する各イオンの当量濃度やECは、イチョウを除いて、明らかな季節変動を示し、秋期~冬期にかけて著しい濃度増加が認められた。この著しい溶存成分の増加は、樹幹流pHに、何らかの影響をもたらすものと推測されたが現実には、樹幹流pHは前述の如く、いずれも比較的変動の少ない領域において収束推移した。溶存分量の変化にかかわらず、樹種ごとに固有のpH領域を維持するこの現象は、樹幹流内における溶存成分間に一定のバランスが保たれている結果でないかと推測された。

スギ樹幹流では、イオン総量は、前期から後期にかけて3.57倍と急増した。pHはこの間0.43ほど低下し、酸性が強化された。酸性度の規定に影響の大きいアニオン類のイオン総量に対する比率は、濃度変化にかかわらず45.9%から49.0%と若干増加したにすぎず、そのバランスは、ほぼ一定であることが認められた。クヌギでは36.0%が42.2%とアニオン比率が増加した。これに従って樹幹流pHは4.40から4.18とやや酸性を増し、よく照応していた。アニオン比率は、前期にくらべて約6%の増加を示しており、クヌギの場合、イオンバランスの上で、やや一定性を欠くところがみられたが、特に指摘するほどの大きさではないと考えられた。

クスノキ樹幹流におけるアニオン比率は、前期33.7%、後期で36.5%と後期に若干アニオン比率が増加したが、樹幹流pHも少し酸性を増しており、化学的性状の面からよく照応していることが認められた。

以上のように、樹幹流pHを規定すると考えられるアニオンの比率から、スギ、クヌギ及びクスノキ樹幹流について検討したが、クヌギにおいて、やや変化がみられたものの、イオンバランスは、濃度変化にかかわらず、前期、後期ともほぼ一定しており、これが基本的に樹種別の樹幹流pHを規定づけていると考えられた。そして、この各樹種におけるイオンバランスの安定性は、樹種のもつ固有の特性(溶出特性)の可能性が強く、樹体に付着する乾性降下物の影響は、相対的に小さいのではと推測された。その理由は、同一の乾性降下物の影響下にあるならば、各樹種のイオンバランスは、近似してくるはずであるがそれが樹種ごとに明らかに異なり、また樹種ごとに特定のイオンバランスを持つことに求められる。勿論、乾性降下物の付着は、樹種や樹皮、樹葉の形態、樹形等によって異なるであろう。しかし、このことも考慮しても、樹幹流pHの樹種特性による影響の強さは、否定できないと考えられる。

pHは、 H^+ イオン濃度の逆数の対数であり、pHが1減じるとその濃度は10倍増加する。従って、pHが低くなればなるほど H^+ イオンの濃度は、指数比例的に増加すること

になる。とくに低いpHを示す樹幹流では、わずかな値の変化でも H^+ イオン濃度の変化は、想像以上に大きい。各樹幹流のpHは、前述のように、特に季節変動とされるほどの大きな変化は認められなかった。しかしながらpHを H^+ イオン濃度に置きかえてみるとpHの場合とかなり状況を異にすることが見出される。例えば最もpHの低かったスギ樹幹流では、前期から後期にかけてpHは0.43ほど変化した。前期の値に対して12.9%ほどpHを変化させたことになる。これを H^+ イオン濃度($\mu eq\ ml^{-1}$)でみると、前期で0.463であったものが後期ではその2.7倍にあたる1.248と著るしく増加している。 H^+ イオン濃度でみた場合、スギ樹幹流には明らかに季節性が認められる。

クスノキの樹幹流もスギと同様、pHは季節変動は小さく、その平均値は前期で5.64、後期で5.29であり、後期にやや酸性が強まる傾向があった。変化量は0.35で前期の値に対し6.2%の減であり、変化比率としては小さかった。これを H^+ イオン当量濃度より検討してみると、前期で $0.0023\ \mu eq\ ml^{-1}$ であったものが後期では $0.0051\ \mu eq\ ml^{-1}$ と2倍強に増加した。しかしながら H^+ イオンの絶対量は、スギの樹幹流にくらべて1/200分以下と小さかった。このことからクスノキ樹幹流では H^+ イオン濃度でみる限り、相対的には後期に大きく増加するものの、絶対値からみた場合、その値は、きわめて小さく、季節変動というほどの大きさではない。クスノキ樹幹流については、スギとクスノキの中間的な位置にあり、pHでは変化は小さいが H^+ イオン濃度では、スギほど明瞭ではないが、後期に増加するという季節性が認められる。

このように樹幹流pHは、年を通じて比較的変動の小さい領域で推移したが、このpHを直接規定する H^+ イオン濃度は、前期から後期にかけて、イチョウを除く各樹種で明らかな増加がみられる。しかし絶対値でみれば、pHの低いスギ、クスノキで大きく、pHの高いクスノキでは、その値はきわめて小さく、季節変動があるとはいいがたい。

pHの低い樹幹流では、 H^+ イオン濃度が高いため、わずかのpH変化でも H^+ イオン濃度は大きく変化する。逆にpHの高い領域をもつ樹幹流では、pHがかなり変化しても H^+ イオン濃度の絶対量変化は小さい。このことから、樹幹流pHについて検討する場合pHのとり領域を十分考慮した吟味が必要とされるようである。

このほか、今回の調査、解析を通じて、いくつかの未消化部分が残った。列記して今後の課題としたい。

1. 樹幹流pHの規定要因把握のため、重回帰分析を実施した。この場合、目的変数を相対値であるpHを用いて算出した。pHは逆対数の相対値であり、説明変数は整数絶対値であるため、目的変数と説明変数間に尺度の違いが生じた。この尺度の違いが、絶対値 H^+ イオン濃度を目的変数とした場合にくらべて、どのような差異をもたらすのかの検定が今回は出来なかった。pHと H^+ イオン濃度は、片対数的に連動しているのに、どちらを用いても結果的には、同様の傾向が見出されると考えられたが、詳細は、不明である。

2. H^+ イオン濃度を目的変数とした解析の必要性も考えられたが、今回は、次のような理由で実施しなかった。それは、樹幹流中における溶存イオン量の変化巾と、 H^+ イオン濃度の変化巾が同一尺度(当量濃度)でありながら、差異が大きく、運動性に欠けること及びクスノキ樹幹流では、 H^+ イオンの絶対量がきわめて小さいこと等、 H^+ イオン濃

度を目的変数に使用するには、問題があると考えられたためである。ちなみに、例をあげれば、 H^+ イオン濃度は、スギの場合、前期でクスノキの201倍、後期で245倍という著るしく高い値をとるが、 H^+ イオンを規制するとされるアニオン量は、スギ前期でクスノキの約2倍、後期で約4倍となっており、 H^+ イオンの規定に関与する溶存イオンとの関連性が把握しにくい状況がみられる。

3. アニオン類がカチオン類に優先すれば、 H^+ イオン濃度は相対的に増加し、pHは、酸性傾向を強める。逆にカチオン類がアニオン類に優先すれば、 H^+ イオンは相対的に減少し、 OH^- イオンが増加するため、pHは中性～アルカリ傾向を強める。

しかしながら、今回調査した樹幹流の成分組成濃度においては、スギの場合、前期、後期ともわずかにカチオン類が優先しているにも拘らず、pHは強い酸性を示し、多量の H^+ イオンの溶存が確かめられた。このことは、アニオン類以外からの多量の H^+ イオンの遊離のあることを示唆しており、その化合物の究明が今後の課題となっている。

またカチオン類の優先が卓越するクスノキ、その優先が大きいクスギの両樹種においても、pHは酸性を示し、 H^+ イオンの相対量が多い。このことは、スギと同様、クスノキ、クスギにおいても、アニオン類以外に H^+ イオンを遊離する化合物のあることが推察され、スギと同様その究明が必要となっている。

V おわりに

樹幹流による降下量は、樹種や樹形、林分密度等によって差異が大きい、大略針葉樹類で林外雨の1～13%、落葉広葉樹で6～18%（井上ら1993）とされ、流入量としての相対値は、小さいが、その成分濃度が林外雨にくらべて著るしく高いことから、降雨の酸性化とからんで、森林土壌を含め、森林生態系に及ぼす影響が緊急性の高い課題として提起されている。林内雨を含めて、樹幹流の組成についての研究は、京都大学において先駆的に行なわれてきた（堤ら1962、正垣ら1965、丸山ら1965、岩坪ら1967など）。

これら研究は、降雨現象を通しての森林生態系における物質循環の仕組みの総合的な解明に主眼がおかれ、この分野において多大の貢献をなしてきた。しかしながら、近年、降雨の酸性化にともなって、降雨現象は、森林環境において物質の循環という役割りということよりも、酸性物質の負荷という認識でとらえられることが多くなってきた。このような背景にあって、森林生態系における個々の樹種が、それぞれの特有の樹幹流をもち、そのpHは一定の領域に収束する可能性のあることを見出した佐々ら（1991）の報告は、酸性雨と森林環境にかかわる諸問題の解明に大きな活路を拓いたものとして評価に値する。

筆者らは、今回、この佐々らの調査を踏襲し、さらに成分項目を増やし、季節性を考慮するなど樹幹流のもつ特性について総合的な解明を試みてみた。一降雨ごとの回収ではなく一週間ごとの回収であり、また採水量も最大12ℓということで、実験手法にまだ問題は残しているが、大方の傾向は、支障なく把握しえたと判断している。今回の調査においてそれぞれの樹種のもつ樹幹流のpH値、成分特性、雨水に対する濃度比の大きさ等いくつかの知見が得られたが、樹幹流pHを決定する要因についての解明は、まだ十分でなく、今後に残された大きな課題である。樹幹流は、流下量、流下速度といった量的な要因と、

樹皮の形態、表面積量、葉の形態、付着状況等化学性に質的な影響を与える要因との相互関連について、解明をはかる必要があり、更にこれが森林土壌や、生態系に与える影響についての究明も推進されねばならないと考えられる。

樹幹流量に、差異は認められるものの、樹幹流 pH が樹種ごとに固有の領域を有すること、樹種間に成分組成濃度に差異がみられ季節性があることなど、樹木を介して生起する降雨現象の変化は、今後の森林造成や維持管理あるいは公益的な機能の増進にとって、きわめて重要な役割りを果たすものとして注目される。

Ⅵ 摘 要

- 1992年4月から1993年3月の1ケ年にわたり、大分県林業試験場構内（大分県日田市大字有田字佐寺原）に生育するイチョウ、スギ（アヤスギ）、クスギ、クスノキの4樹種について、一週間ごとの樹幹流を捕集し、水素イオン濃度（pH）、電気伝導度（EC）を計測すると共に、可能な限り、成分濃度（ SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ ）の分析を行った。雨水についても同様の調査分析を実施した。
- この期間における年降水量は、1,170 mmで平年値の約64%と少なかった。雨水のpHは 4.51 ± 0.45 （平均値±標準偏差）で回収試料39検体中、pH5.60をこえた非酸性雨はわずか1例のみであり、残りはすべて酸性雨であった。雨水の成分は、アニオンでは、 SO_4^{2-} 、カチオンでは H^+ が優先していた。イオン当量の総量値は、 $2.004 \mu\text{eq ml}^{-1}$ で、全国平均の約2分の1程度であり、pHは低い成分的には、溶存量の少ない雨水とされた。
- 一週間ごとに回収された樹幹流の採取量（最大12ℓ）は、樹種ごとに差異がみられ、スギに少なくイチョウで最も多かった。樹種ごとの採取量（平均値±標準偏差、ℓ）は次のとおりであった。イチョウ（ 8.6 ± 3.17 ）、スギ（ 4.2 ± 3.54 ）、クスギ（ 7.2 ± 3.95 ）、クスノキ（ 6.1 ± 3.71 ）。
- 供試4樹種の樹幹流pHは、雨水のpHや降雨量とは、直接かかわりなく、それぞれ固有の領域に収束し、季節性も特に認められなかった。樹幹流pHはスギにおいて最も強い酸性を示し、イチョウが最も弱い酸性度を有した。クスギは、雨水によく近似したpHを示し、クスノキは、イチョウに次いで酸性度は弱かった。各樹種の樹幹流pH（平均値±標準偏差）は次のとおりであった。イチョウ（ 5.84 ± 0.32 ）、スギ（ 3.11 ± 0.34 ）、クスギ（ 4.31 ± 0.29 ）、クスノキ（ 5.52 ± 0.23 ）。
- 電気伝導度（EC）は、スギ樹幹流できわめて大きな値を示し、とくに8月以降より冬期にかけて著しく増加した。他の3樹種は、スギの約20～30%程度の値を示し、クスギ>クスノキ>イチョウという順序であった。これら3樹種も季節性があり、8月に降上昇した。雨水のECを1とした場合の濃度比は、スギ25.4、クスギ7.6、クスノキ5.7、イチョウ4.9であり、スギの値が突出して大きかった。

樹幹流 pH と EC との関連は、pH の低いスギ、クヌギで相関が比較的高く（スギ： $r = -0.7876$ 、クヌギ： $r = -0.5315$ ）、pH の高いクスノキ、イチ ヨウでは、相関係数が小さく有意性は認められなかった。

6. 各樹種の樹幹流の化学的性状について分析し検討を行った。この結果、組成濃度において樹種間に、またスギ、クヌギ、クスノキの3樹種においては、季節変動のあることが認められた。季節変動は、主成分分析の結果、大略4～8月までの生育期（前期と略す）とそれ以降の生長休止期（後期と略す）とに区分され、後期におけるイオン当量濃度の増加が著しく、特にカチオン類及び Cl^- イオンで顕著であった。樹種別の成分特性は次のとおりであった。

イチ ヨウ：イオン当量の総量は、 $1.120 \mu eq ml^{-1}$ で4樹種中、最も低い値をとり、これは、最も高い当量濃度を示すスギ（後期）の約6分の1の値であり、溶質比の低い樹幹流であることが認められる。しかし K^+ イオンのみは、イオン総量の43%を占めるという突出した当量濃度を示し、この値は、他のどの樹種の値より大きい。イチ ヨウ樹幹流のもつ成分的な大きな特性といえよう。

スギ：供試4樹種中、最もイオン当量濃度の高い樹種とされ、明白な季節変動があり、8月以降冬期にかけて、著しい成分濃度の増加がみられ、前期の3.6倍量を示した。特に Cl^- イオンの増加が著しかった。このほか、後期において増加率の多かった成分は Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 Na^+ 等があげられた。

Cl^- のイオン当量濃度が後期に著しく急増したことから、海塩粒子の影響の可能性について検討したが、絶体量の増加は認められたが、相対量は、変化がみられず、スギ樹体の有する樹種の特性反応の影響が大きいと判断された。

スギ樹幹流でみられた特徴の一つは、 H^+ イオン濃度が、他の樹種にくらべて著しく高いことで、スギ後期の絶体量は、イチ ヨウ（前期）の実に1,134倍、クスノキ（後期）の244倍に達した。イオンバランスが均衡していることから、アニオン以外からの多量の H^+ イオンの遊離があるものと考えられた。

クヌギ： Mg^{2+} の当量濃度の高い樹幹流をもつ樹種で、カチオンに占める比率は、前期で43%、後期で32%と優先している。イオンバランスは、前期で1.77後期で1.37とカチオンが優先している。

クスノキ：カチオン類の優先度の大きいことが特徴である。イオンバランスは、前期で1.95、後期で1.93とカチオンが大きく優先している。カチオンのうち、 Ca^{2+} 及び K^+ の当量濃度が高い値を示した。一般的に溶質比の高い樹幹流となっている。

7. 雨水成分に対する濃度比（雨水の各イオン成分の当量濃度を1としたときの比数）では、アニオン類で小さく、カチオン類で大きな値を示した。また前期で小さく、後期で急増する傾向がみられた。 Cl^- イオンは、スギ後期で65.8倍という高い値を示したが、これは、冬期、季節風によりもたらされる海塩粒子の直接的な影響ではなく、スギの有

する樹種特性の反応のあらわれと推測された。

カチオン類では、 K^+ イオンが各樹種に共通して高い濃度比を示し、樹体からの溶出が容易で、しかも溶出量の多い成分であることが認められた。 Mg^{2+} はクスギにおいて Ca^{2+} はスギ及びクスノキ後期で高い濃度比を示し、各樹種の樹幹流は、雨水以外の影響によって成分的に大きく支配されていることが推察された。

8. 樹幹流 pH を規定する要因把握のため、各イオン成分濃度や採水量等を要因項目とした重回帰分析により検討した。解析結果、樹種ごとに次の回帰式が得られた。

(イチ ヨウ)

$$Y G b = 6.497 - 12.579 X_5 + 0.611 X_6 - 0.039 X_8 \quad \dots\dots (5)$$

(スギ・前期)

$$Y C j-1 = 3.054 + 3.654 X_6 \quad \dots\dots (6)$$

(スギ・後期)

$$Y C j-2 = 3.221 - 0.1317 X_3 \quad \dots\dots (7)$$

(クスギ・前期)

$$Y Q a-1 = 4.485 + 2.346 X_3 + 3.487 X_4 - 2.933 X_5 \quad \dots\dots (8)$$

(クスギ・後期)

$$Y Q a-2 = 3.734 + 2.981 X_7 \quad \dots\dots (9)$$

(クスノキ・前期)

$$Y C c-1 = 6.222 - 0.675 X_1 + 2.936 X_2 \quad \dots\dots (10)$$

(クスノキ・後期)

$$Y C c-2 = 5.681 - 0.0412 X_8 \quad \dots\dots (11)$$

上式(5)～(11)式において、Y : 樹種別、時期別の樹幹流 pH の予測値

X_1 : SO_4^{2-} イオンの当量濃度 ($\mu eq ml^{-1}$)

X_2 : NO_3^- " "

X_3 : Cl^- " "

X_4 : Ca^{2+} " "

X_5 : Mg^{2+} " "

X_6 : K^+ " "

X_7 : Na^+ " "

X_8 : 採水量 (l)

以上のように、樹幹流 pH の決定に関して、樹種ごとに関与項目が抽出され、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等のイオン成分や、採水量が影響を及ぼしていることが把握された。しかしながら、内部相関行列において、相関の高い要因項目が多数見出され、樹幹流 pH は、単一要因よりも、複合的な要因の作用により規定されている場合が多いと考えられ、今後更に詳細な検討が必要とされた。

9. 採水容量に12 l という限定はあったものの、イチ ヨウほか3樹種の樹幹流は、樹種ご

とに固有の領域をもち、その成分濃度に樹種差があり、また季節性が認められるなど、樹木を介して生起する降雨現象の変化は、森林土壌や生態系に大きな影響をもつものとして認識され、この変化の解明は、今後の森林造成や維持管理など森林の有する諸機能の増進にとって重要な役割りを果たすものとして注目される。

引用文献

- (1) 平井敬三・加藤正樹・岩川雄幸・吉田桂子(1990)樹幹流が林地土壌に与える影響(Ⅱ)スギ、ヒノキ林における林外雨、林内雨、樹幹流、土壌水のpH、101回日林論：243-245.
- (2) 堀田 庸(1991)酸性雨と関東地方のスギの衰退(総説)、森林科学Ⅵ1：11~18.
- (3) 井上克弘・横田紀雄・村井 弘・熊谷直敏・望月 純(1993)富士山麓におけるブナ林、ヒノキ林の雨水および土壌浸透水の水質とブナの酸性中和機能、土肥誌64：265~274.
- (4) 諫本信義・森崎澄江(1993)森林環境に対する酸性雨の影響(Ⅰ)スギ、ケヤキにおける樹幹流の化学的特性について、第47回日本林学会九州支部研究論文投稿中.
- (5) 岩井宏寿(1993)千葉県のスギの衰退地と非衰退地における雨水の実態及び土壌の酸性化、千葉県林試研報7：26~35.
- (6) 岩坪五郎・堤 利夫(1967)森林内外の降水量の養分量について(第2報)、京大演報39：110~124.
- (7) 金子真司・鳥居厚志(1992)バーク浸出液のpHとカチオン濃度、日林関西支論1：95~96.
- (8) 加藤正樹・平井敬三・岩川雄幸・吉田桂子(1990a)樹幹流が林地土壌に与える影響(Ⅰ)スギ、ヒノキ樹幹流による表層土壌の移動、101回日林論：239~241.
- (9) 加藤正樹・平井敬三・岩川雄幸・吉田桂子(1990b)樹幹流が林地土壌に与える影響(Ⅱ)スギ、ヒノキ林における林外雨、林内雨、樹幹流土壌水のpH、101回日林論：243~245.
- (10) 加藤善徳・矢本てるみ(1992)都市域における林内雨・樹幹流(Ⅱ)樹木内におけるNO₃⁻、SO₄²⁻ 降下量の季節変化、第33回大気汚染学会：553.
- (11) 河野吉久(1992a)スギ衰退の分布とその特徴、第33回大気汚染学会：501.
- (12) 河野吉久・藤田慎一(1992b)スギ衰退の分布とその要因の推定、第33回大気汚染学会：502.
- (13) 北原滝男・渡辺哲男・高野二郎(1992)樺、楠の樹幹流、樹冠雨に含まれる有機酸、第33回大気汚染学会：537.
- (14) 近藤次雄(1992)スギ林に流入する酸性降下物の形態と量、群馬県林試研報1：27~34.
- (15) 丸山明雄・岩坪五郎・堤 利夫(1965)森林内外の降水量の養分量について(第1報)、京大演報36：25~39.
- (16) 松本利恵・小川和雄・高野利一(1991)杉平地林の衰退に関する研究(第2報)局地的な杉の衰退状況について、第32回大気汚染学会：274.

- (17) 松浦陽次郎・堀田 庸・荒木 誠(1991) 関東地方におけるスギ林表層土壌のpH低下. 森林立地32(2):65~69.
- (18) 森貞和仁・河室公庸・川添 強・長友忠行(1990) コジイ林における土壌の化学的性質に及ぼす樹幹流の影響. 101回日林論:247~248.
- (19) 中島泰公・田辺紘毅(1992) 酸性雨による森林への影響調査—林外雨、林内雨、樹幹流の成分濃度—. 日林関西支論1:81~84.
- (20) 梨本 真(1989) スギ弧立木における樹幹流・樹冠雨の基礎特性. 100回日林論:215~218.
- (21) 野呂忠幸・佐々朋幸(1992) 主な落葉広葉樹樹幹流の酸性度比較. 日林東北誌44:137~140.
- (22) 小川和雄・松本利恵・高野利一(1991) 杉平地林の衰退に関する研究(第1報) 埼玉県下の杉の衰退実態について. 第32回大気汚染学会:273.
- (23) 尾岸諒一・越地 正・鈴木 清(1992) 神奈川県のスギ林における林外雨、林内雨、樹幹流のpHと数種の溶存成分調査. 神奈川県林試研報19:1~22.
- (24) 日本気象学会大分支部(1987) 大分の気象百年. 大分地方気象台編:216pp. 7大分.
- (25) 大原真由美(1991) 林内雨の化学組成. 第32回大気汚染学会:401.
- (26) 真田悦子・太田誠一・真田 勝・大友玲子(1992) 林内雨、樹幹流が表層土壌の化学性に及ぼす影響. 103回日林論:255~256.
- (27) 真田 勝(1991a) 羊ヶ丘における降水のpHと土壌、酸性降下物と森林環境問題研究報告(6). 北方林業43(2):24~26.
- (28) 真田 勝・太田誠一・大友玲子・真田悦子(1991b) トドマツ・エゾマツ人工林における樹幹流および林内雨の塩基特性. 102回日林論:341~342.
- (29) 真田 勝・太田誠一・大友玲子・真田悦子(1991c) 札幌近郊におけるトドマツ、エゾマツ人工林の樹幹流・林内雨および林内雨について. 森林立地33(1):8~15.
- (30) 真田 勝・大友玲子・真田悦子・太田誠一(1992) 札幌近郊の造林地における林内外雨の樹種特性について. 103回日林論:257~258.
- (31) 佐々朋幸・後藤和秋・池田重人(1990) 森林総研・展示林内の外国産針葉樹6種にみられる樹幹流下水の酸性度と溶存成分. 日林東北支誌42:262~263.
- (32) 佐々朋幸・後藤和秋・長谷川浩一・池田重人(1991) 盛岡市周辺の代表的森林における林外雨、林内雨樹幹流の酸性度ならびにその溶存成分—樹種による樹幹流のpH固有値—. 森林立地32(2):43~58.
- (33) 佐々朋幸・長谷川浩一(1992) 特定樹種の樹幹流による土壌の酸性化抑制作用—ユリノキの場合—. 日林誌74(5):437~440.
- (34) 佐々朋幸・高橋忠幸・長谷川浩一(1993) 特定樹種の樹幹流による土壌の酸性化抑制作用—センノキ、オニグルミについて—. 日林誌75(4):321~330.
- (35) 杉浦公昭(1992) 関東平野の杉はなぜ衰退するのか. 第33回大気汚染学会:492.
- (36) 正垣幸造・岩坪五郎・堤 利夫(1965) 森林内外の降水中に含まれる養分量について(III) 葉からの養分溶脱についての実験. 76回日林講:110~111.
- (37) 玉置元則・小山 功(1991a) 地上から見た日本の酸性雨—酸性雨調査・研究で

- 得られた成果と今後の課題一、大気汚染学会誌26：1～22.
- (38) 玉置元則・加藤拓紀・関口恭一ほか(1991b)日本の酸性雨の化学. 日本化学会誌 65：667～674.
- (39) 玉置元則・平木隆年・正賀 充ほか(1992a)酸性雨調査における樹幹流採取法の比較. 第33回大気汚染学会：525.
- (40) 玉置元則・平木隆年・正賀 充ほか(1992b)酸性雨調査における樹幹流採取法の比較. 兵庫公研研報24：1～9.
- (41) 徳地直子・黒田幸夫・岩坪五郎(1990)森林生態系における溶存物質濃度・量の鉛直的变化(Ⅰ)塩化物イオン濃度の変動と土壤水の動き. 101回日林論：257～258.
- (42) 徳地直子・黒田幸夫・岩坪五郎(1991)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壤水の垂直的移動. 日林誌73(2)：135～144.
- (43) 鳥居厚志(1990)表層土壤の樹幹周囲での酸性化について. 41回日林関西支講：201～202.
- (44) 鳥居厚志・清野嘉之(1991)近畿地方のスギの衰退と表層土壤の酸性度. 第32回大気汚染学会：275.
- (45) 鳥居厚志・清野嘉之(1992)近畿地方の平地におけるスギ根元周囲の表層土壤のpH低下. 大気汚染学会誌27(6)：325～328.
- (46) 堤 利夫・丸山明雄・岩坪五郎(1962)森林内外の降水量の養分量について(第1報). 72回日林講：175～177.
- (47) 脇 孝介・車戸憲二・松橋達也(1990)山地地域における雨水の酸性化の実態について. 101回日林論：253～254.
- (48) 脇 孝介・車戸憲二・松橋達也(1991)中部山地地域における降雨の酸性度特性について. 102回日林論：351～352.
- (49) 渡辺哲男・高野二郎(1991)酸性雨の林木への影響. 第32回大気汚染学会：393.
- (50) 渡辺浩一郎・岡本玲子・大嶋秀雄・藤井周博・嶋田典司(1993)筑波における樹冠雨の化学的性状と樹種間差. 大肥誌64(4)：402～407.
- (51) 矢本てるみ・加藤善徳(1992)都市域における林内雨・樹幹流(Ⅰ)樹木内外雨の成分組成と年間降下量. 第33回大気汚染学会：552.
- (52) 安田 洋(1982)環境変化によるスギの衰退調査. 富山県林試研報8：47～54.
- (53) 安田 洋(1993)どんな雨が降っているのか—酸性雨の現状と地域性—. 土肥誌64(4)：448～455.

Chemical characteristics of the stemflow as to trees of several kinds and their seasonal change

ISAMOTO, Nobuyoshi⁽¹⁾ and MORISAKI, Sumie⁽²⁾

Résumé

During one year (from Apr.1992 to Mar.1993), as to four kinds of growing trees in the premises of the Oita prefectural forest institute (Arita, Hita-city, Oita pref.), the stemflow was collected once every week to determine its pH, electric conductivity (EC), and concentration of several ions.

Adopted trees were as flowing: japanese cedar, *Cryptomeria japonica* (abbr. *Cj*); maidenhair tree, *Ginkgo biloba* (abbr. *Gb*); Sawshaped oak, *Quercus acutissima* (abbr. *Qa*), and camphor tree, *Cinnamomum camphore* (abbr. *Cc*). At the same time, rain water was also collected in order to estimate the same items.

The pH value of the rain water during this period was 4.51 ± 0.45 (average value \pm standard deviation). Only one sample within collected 39 materials showed pH 5.6, while all of other samples were acidic rain. The collecting amount of flowing rain at every time was 4.2 ℓ (at *Cj*), 6.1 ℓ (at *Cc*), 7.2 ℓ (at *Qa*), and 8.6 ℓ (at *Gb*) respectively. Namely it was the smallest amount at *Cj*.

As for 4 kinds of trees, pH value of the stemflow was independent on pH of rain water and its amount, and converged to the value of proper ranges respectively, furthermore, it did not show any seasonal change. It is thought that this fact may be due to the proper, characteristic response being inherent in trees, consistent with that of Sassa et al. report (1991).

The pH value of the stemflow as to different kinds of trees was as follows; 3.11 ± 0.34 in *Cj*; 4.31 ± 0.29 in *Qa*; 5.52 ± 0.21 in *Cc*; and 5.84 ± 0.32 in *Gb*.

The value of EC in the stemflow was greatest in that of *Cj*, especially increased much more during from Aug. to winter season.

(1) Silviculture division.

(2) Oita prefectural Institute of Health and Environment, Magari, Oita 870.

This fact is probably attributable to increasing concentration of Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , and other ions. The EC value of the stemflow as to *Qa*, *Cc*, and *Gb* was estimated as about 20~30% of that of *Cj*. However, the seasonal change observed after Aug. It was the same pattern as that of *Cj*. Comparing with rain water, the EC value of the stemflow at an annual average was 25.4 times (at *Cj*), 7.6 times (at *Qa*), 5.7 times (at *Cc*), and 4.9 times (at *Gb*), respectively.

As for the stemflow of different kinds of trees, their chemical characteristics were scrutinized from standpoint of equivalent concentration of anions (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) and cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

As a result, it was recognized that ionic composition of the stemflow fluctuated among kinds of trees, and that this item of the stemflow in *Cj*, *Qa*, *Cc* changed seasonally.

The seasonal change of trees is practically divided into a growing period (from Apr. to Aug.; former period) and a growth-resting period (after Aug.; latter period). In the latter period, equivalent concentration of ions increased evidently, especially those of cations and Cl^- ion were notable. Component characteristics of the stemflow due to the kind of trees were as follows:

- Ga*: Equivalent concentration of ions was smallest and its seasonal change was not observed. However, K^+ ion alone was the highest equivalent concentration.
- Cj*: Equivalent concentration of ions was highest and evidently changed seasonally. Namely, in the latter period, ion concentration was about 4 times greater than that of the former period, especially increasing of Cl^- was prominent.
- Qa*: Equivalent concentration of Mg^{2+} was highest among the stemflow tested. That of K^+ and Cl^- showed also a tendency to increase.
- Cc*: Equivalent concentration of cations was high on the whole, namely, concentration of Ca^{2+} , Na^+ was high flowing *Cj*; concentration of SO_4^{2-} , K^+ was also high, so that the stemflow constituted a flow containing much solute in a higher ratio.

Concerning the ratio of components of the stemflow to those of rain water, the ratio of anions was little, while that of cations was much. In the former period it was little, but increased markedly in the latter period. In the latter period, for example, the ratio of Cl^- concentration in the stemflow of

Cj to that of rain water was 65:1. This fact might be ascribed not to direct effects caused by sea salt particles, but to a proper response of *Cj*.

The concentration ratio of K^+ ion among cations was high in common with every kind of trees, suggesting that K^+ ion is easy to elute from the trunk body. The concentration ratio of Mg^{2+} was high in the stemflow of *Qa*, while that of Ca^{2+} was high in the stemflow of *Cj*, and in the stemflow of *Cc* in the latter period. Therefore, it is evident that the components of the stemflow of every tree are affected by other factors than rain water.

On the determination of pH value of the stemflow, the double regression analysis was performed, adopting dominant items such as composition of constituents, amount of collected rain, and the regression equation was calculated for every kind of trees. In consequence of the regression analysis, a significant difference was recognized within a level of 1~5% in all cases. However, there were a lot of high correlation between the dominant items. Hence it is inferred that pH value of the stemflow probably depends on complicated items rather than one. Hereafter, further detailed consideration on this subject may be required.

It is true that the amount of the stemflow is different according to kind of trees, but pH value of the stemflow shows the proper range in all cases, and concentration of constituents of the stemflow is different among kind of trees and changes seasonally. Such changing of composition of rainfall caused by an intervention of trees as mentioned above is a noteworthy phenomenon which might play an important role for the future forest construction and administration.

(1994. 2. 8)

付表-1 樹幹流のイオン成分濃度一覧表(回収試料中、成分分析を実施したもののみ)

樹期 種別数	試料 採取 水量 (PH) (1)	成 分 (μeq/ml)								イオン当量 (μeq/ml)		PH				
		H ⁺⁺	SO ₄ ⁻⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	ANION	KATION		B/A 総			
イ チ ウ	M.V.*2	4.64	9.49	0.0011	0.185	0.062	0.258	0.040	0.036	0.484	0.054	0.505	0.615	1.22	1.120	5.96
	S.D.*3	0.56	3.53	0.0009	0.080	0.054	0.196	0.025	0.025	0.027	0.045					0.33
ス	M.V.	4.55	6.47	0.463	0.423	0.040	0.377	0.200	0.093	0.101	0.129	0.840	0.986	1.17	1.826	3.42
	S.D.	0.628	4.74	0.243	0.243	0.070	0.223	0.116	0.050	0.059	0.055					0.353
ギ	M.V.	4.57	4.15	1.248	0.725	0.184	2.297	0.887	0.342	0.232	0.614	3.206	3.323	1.04	6.529	2.91
	S.D.	0.345	2.64	0.339	0.211	0.239	0.893	0.325	0.125	0.066	0.336					0.124
ク	M.V.	4.50	7.72	0.0397	0.195	0.041	0.172	0.133	0.310	0.149	0.090	0.408	0.722	1.77	1.130	4.44
	S.D.	0.624	4.39	0.0164	0.112	0.067	0.147	0.059	0.139	0.057	0.049					0.223
ヌ	M.V.	4.63	6.40	0.0667	0.296	0.093	0.618	0.273	0.444	0.410	0.185	1.007	1.378	1.37	2.385	4.28
	S.D.	0.293	3.51	0.0284	0.114	0.048	0.353	0.160	0.137	0.206	0.092					0.390
ギ	M.V.	4.50	6.00	0.0023	0.226	0.021	0.163	0.341	0.168	0.224	0.065	0.410	0.800	1.95	1.210	5.66
	S.D.	0.624	4.15	0.0010	0.114	0.027	0.088	0.138	0.083	0.086	0.025					0.201
ク ス ノ キ	M.V.	4.56	7.54	0.0051	0.335	0.100	0.356	0.495	0.243	0.381	0.244	0.791	1.368	1.93	2.159	5.37
	S.D.	0.216	4.17	0.0022	0.079	0.044	0.133	0.244	0.059	0.120	0.203					0.228

*1) 全期(1992年4~1993年3月), 前期(スギ4/6~8/17, クヌギ, クスノキ4/16~8/24), 後期(~3/24まで)
 *2) 平均 *3) 標準偏差 *4) PH値より算出

付表-2 雨水*1及び各樹幹流のpH、EC及び成分組成一覽

1. 雨水		雨水*1											備考	
回収	回収	雨量	EC	pH	H ⁺ *2)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ²⁺	NH ₄ ⁺	
月日	番号	(mm)	(μ s/cm)		μ eq/ml									
4. 6	1	26.1	20.4	4.22	0.0602	0.062	0.017	0.028	0.032	0.004	0.001	0.006	0.25	
5. 1	2	16.8	22.2	4.27	0.0537	0.077	0.018	0.016	0.036	0.008	0.002	0.001	0.26	
5. 11	3	23.4	17.5	4.25	0.0562	0.042	0.007	0.020	0.020	0.005	0.001	0.010	0.01	
6. 18	4	22.8	21.1	4.30	0.0501	0.058	0.020	0.011	0.023	0.005	0.001	0.003	0.01	
6. 25	5	22.7	38.7	4.61	0.0245	0.195	0.062	0.019	0.052	0.004	0.002	0.052	2.72	
6. 29	6	36.5	16.5	4.38	0.0416	0.061	0.047	0.015	0.015	0.002	0.001	0.008	0.12	
7. 6	7	135.3	11.9	4.50	0.0316	0.038	0.007	0.011	0.011	0.001	0.001	0.001	0.00	
7. 13	8	84.2	15.9	4.08	0.0831	0.047	0.007	0.011	0.006	0.001	0.001	0.002	0.00	
8. 10	9	27.5	11.1	4.59	0.0257	0.028	0.010	0.021	0.010	0.002	0.002	0.001	0.18	
8. 16	10	64.4	5.5	5.49	0.0032	0.013	0.016	0.017	0.016	0.003	0.002	0.013	0.00	
9. 24	11	72.1	5.8	5.99	0.0010	0.011	0.012	0.011	0.007	0.003	0.006	0.005	0.00	
10. 1	12	33.2	47.9	3.95	0.1122	0.108	0.051	0.029	0.029	0.029	0.002	0.004	0.60	
10. 14	13	17.5	25.4	4.34	0.0457	0.046	0.012	0.006	0.005	0.001	0.001	0.002	0.00	
10. 26	14	23.1	26.1	4.22	0.0602	0.056	0.001	0.048	0.038	0.011	0.001	0.026	0.00	
11. 5	15	24.4	20.5	4.68	0.0298	0.052	0.018	0.030	0.021	0.006	0.002	0.017	0.11	
11. 24	16	13.5	22.4	5.28	0.0052	0.084	0.001	0.067	0.059	0.018	0.056	0.052	0.00	
12. 7	17	44.5	26.5	4.56	0.0275	0.090	0.023	0.089	0.019	0.013	0.002	0.048	0.15	
12. 14	18	17.3	12.5	5.23	0.0059	0.039	0.009	0.033	0.027	0.008	0.001	0.020	0.01	
12. 21	19	17.0	39.9	4.86	0.0130	0.116	0.022	0.182	0.041	0.035	0.009	0.136	0.68	
1. 18	20	18.8	19.4	4.71	0.0457	0.085	0.027	0.103	0.034	0.025	0.003	0.086	0.35	
3. 1	21	16.9	31.6	4.34	0.0186	0.039	0.006	0.030	0.012	0.007	0.001	0.018	0.01	
3. 28	22	27.5	11.8	4.73	0.0093	0.053	0.013	0.216	0.020	0.003	0.006	0.165	0.37	
3. 28	23	28.8	41.5	5.03	0.0223	0.040	0.015	0.026	0.018	0.006	0.001	0.017	0.24	
3. 28	24	54.3	18.8	4.65	0.0223	0.040	0.015	0.026	0.018	0.006	0.001	0.017	0.24	

2. イチヨウ

回収 月日	回収 番号	探水量 (l)	E C (μs/cm)	pH	H ⁺ * 2)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ²⁺	備考
μ eq/ml													
6.29	7	11.76	50	5.5	0.0031	0.310	0.199	0.203	0.048	0.049	0.176	0.043	
7. 6	8	11.68	18	6.0	0.0010	0.118	0.032	0.050	0.004	0.008	0.069	0.030	
7.13	9	7.06	28	6.2	0.0006	0.114	0.093	0.143	0.024	0.016	0.148	0.017	
8.10	10	4.61	87	5.7	0.0019	0.181	0.130	0.256	0.077	0.065	0.716	0.033	
8.16	11	12.00	25	6.3	0.0005	0.041	0.001	0.056	0.009	0.008	0.202	0.015	
8.24	12	12.00	91	6.0	0.0010	0.081	0.082	0.090	0.038	0.024	0.639	0.028	
9.14	13	3.78	80	6.5	0.0003	0.191	0.004	0.053	0.024	0.016	0.537	0.023	
9.14	14	9.89	89	6.1	0.0007	0.143	0.043	0.155	0.029	0.024	0.537	0.023	
10. 5	15	7.42	118	6.2	0.0006	0.260	0.103	0.265	0.058	0.049	0.767	0.038	
10.26	16	3.58	268	6.0	0.0010	0.680	0.311	0.637	0.199	0.148	1.176	0.081	*
11.24	17	12.00	89	6.0	0.0010	0.222	0.037	0.242	0.029	0.024	0.639	0.035	
12. 7	18	12.00	107	6.1	0.0008	0.239	0.040	0.451	0.053	0.041	0.716	0.063	
12.14	19	1.40	148	6.1	0.0008	0.303	0.017	0.699	0.087	0.082	0.997	0.143	
21	20	12.00	92	5.5	0.0031	0.210	0.022	0.479	0.038	0.032	0.460	0.127	
28	21	12.00	114	5.8	0.0016	0.295	0.017	0.575	0.062	0.074	0.639	0.143	
1.18	22	12.00	33	6.2	0.0006	0.145	0.108	0.129	0.004	0.001	0.222	0.017	*
3. 1	23	12.00	300	5.4	0.0039	0.356	0.024	2.132	0.256	0.337	0.639	0.690	*
28	24	10.32	86	5.3	0.0005	0.147	0.074	0.290	0.062	0.065	0.281	0.094	

3. スギ

月日	回数	採水量 (1)	E C (μ s/cm)	pH	H ⁺ 2)							Na ²⁺	備考
					SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ²⁺		
μ eq/ml													
4. 6	1	0.78	212	3.36	0.435	0.414	0.001	0.375	0.261	0.131	0.051	0.144	
5. 1	2	2.32	321	3.05	0.891	0.607	0.001	0.493	0.314	0.156	0.081	0.217	
11	3	11.59	119	3.44	0.363	0.179	0.001	0.197	0.130	0.049	0.028	0.090	
18	4	4.65	243	3.16	0.691	0.464	0.001	0.366	0.261	0.115	0.058	0.181	
25	5	2.72	192	3.27	0.537	0.399	0.001	0.174	0.159	0.074	0.066	0.117	
6. 8	6	3.94	249	3.18	0.660	0.543	0.001	0.358	0.300	0.131	0.112	0.144	
29	7	11.61	202	3.21	0.616	0.911	0.233	0.555	0.193	0.098	0.127	0.140	
7. 6	8	11.63	71	3.71	0.194	0.289	0.038	0.132	0.033	0.016	0.066	0.072	
13	9	0.56	120	4.33	0.046	0.641	0.080	0.925	0.397	0.164	0.230	0.199	
8.10	10	11.61	117	3.48	0.331	0.197	0.067	0.313	0.096	0.065	0.173	0.081	
16	11	9.80	65	3.47	0.338	0.068	0.019	0.262	0.058	0.032	0.120	0.040	
24	12	0.79	561	2.99	1.023	0.607	0.085	2.216	1.017	0.411	0.276	0.185	
31	13	0.78	526	2.93	1.174	0.524	0.001	1.686	0.804	0.312	0.176	0.113	
9.14	14	3.92	584	2.91	1.230	0.705	0.124	1.796	0.901	0.345	0.291	0.325	
10. 5	15	4.41	658	2.90	1.258	0.841	0.299	2.330	1.056	0.394	0.268	0.525	*
26	16	1.23	1293	2.76	1.737	1.715	0.862	4.654	2.441	0.921	0.401	1.140	*
11.24	17	8.86	832	2.85	1.412	0.857	0.167	3.012	1.201	0.460	0.263	0.787	
12. 7	18	5.28	771	2.78	1.659	0.864	0.132	3.475	0.225	0.444	0.289	0.851	
14	19	1.06	912	2.75	1.778	0.876	0.133	3.464	1.225	0.468	0.276	1.059	
21	20	5.65	580	2.96	1.096	0.655	0.132	2.186	0.809	0.263	0.225	0.810	
28	21	2.38	795	2.80	1.584	1.136	0.082	3.159	0.906	0.419	0.260	1.109	
1.18	22	6.45	312	3.10	0.794	0.489	0.008	1.170	0.334	0.131	0.132	0.434	*
3. 1	23	0.71	1196	2.70	1.995	1.632	0.325	3.102	1.298	0.740	0.291	2.580	*
3.28	24	6.06	360	3.14	0.724	0.426	0.224	0.866	0.281	0.115	0.102	0.561	

4. クヌギ

月日	回取番号 (1)	採水量 (μs/cm)	EC	pH	μeq/ml										備考
					H ⁺⁺²)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺			
4. 6	1	2.98	91	4.67	0.0213	0.322	0.001	0.143	0.179	0.279	0.196	0.149			
5. 1	2	9.10	63	4.34	0.0457	0.164	0.001	0.112	0.072	0.197	0.112	0.086			
11	3	11.62	69	4.37	0.0426	0.131	0.001	0.183	0.130	0.296	0.122	0.095			
18	4	9.91	93	4.20	0.0630	0.164	0.001	0.138	0.237	0.501	0.153	0.126			
25	5	2.56	89	4.22	0.0602	0.303	0.001	0.078	0.188	0.411	0.173	0.131			
6. 8	6	6.54	98	4.24	0.0575	0.270	0.001	0.222	0.179	0.435	0.156	0.122			
29	7	11.61	58	4.36	0.0436	0.201	0.233	0.166	0.077	0.203	0.104	0.055			
7. 6	8	11.58	39	4.52	0.0301	0.132	0.038	0.056	0.051	0.126	0.016	0.062			
13	9	0.82	103	4.96	0.0109	0.420	0.080	0.612	0.138	0.526	0.213	0.171			
8.10	10	11.61	76	4.34	0.0457	0.131	0.045	0.191	0.179	0.393	0.220	0.028			
16	11	12.00	33	4.65	0.0223	0.036	0.012	0.071	0.068	0.137	0.128	0.028			
24	12	2.31	59	4.47	0.0338	0.073	0.085	0.098	0.106	0.221	0.197	0.035			
31	13	0.23	212	4.15	0.0707	0.351	0.043	0.188	0.605	0.481	0.565	0.116			
9.14	14	6.61	198	4.05	0.0891	0.312	0.067	0.480	0.371	0.475	0.585	0.091			
10. 5	15	4.29	164	4.26	0.0549	0.305	0.156	0.461	0.277	0.476	0.470	0.096	*		
26	16	0.87	469	3.98	0.1047	1.109	0.396	1.576	0.818	0.476	1.086	0.212	*		
11.24	17	5.36	234	4.08	0.0831	0.487	0.156	0.829	0.369	0.466	0.562	0.169			
12. 7	18	4.68	197	4.15	0.0707	0.118	0.161	0.896	0.320	0.473	0.578	0.172			
14	19	6.32	137	5.36	0.0043	0.398	0.088	1.281	0.300	0.474	0.590	0.392			
21	20	7.33	132	4.11	0.0776	0.270	0.083	0.657	0.130	0.435	0.350	0.238			
28	21	5.26	180	4.10	0.0794	0.370	0.079	0.834	0.203	0.699	0.219	0.238			
1.18	22	12.00	56	4.40	0.0398	0.151	0.022	0.110	0.058	0.164	0.097	0.113	*		
3. 1	23	12.00	234	4.20	0.0630	0.297	0.072	1.478	0.193	0.690	0.186	0.778	*		
28	24	12.00	126	4.20	0.0630	0.206	0.077	0.445	0.101	0.304	0.086	0.226			

5. クスノキ

回収月日	回収番号	採水量 (l)	E C (μs/cm)	pH	H ⁺ (μeq/ml)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	備考
4. 6	1	2.93	103	5.77	0.0017	0.326	0.001	0.132	0.460	0.246	0.207	0.072	
5. 1	2	2.76	76	5.47	0.0033	0.251	0.001	0.115	0.314	0.156	0.194	0.063	
11	3	10.34	31	5.88	0.0013	0.072	0.001	0.059	0.130	0.057	0.081	0.045	
18	4	7.40	90	5.49	0.0032	0.212	0.001	0.188	0.455	0.271	0.271	0.081	
25	5	3.83	84	5.51	0.0031	0.254	0.001	0.084	0.455	0.230	0.329	0.072	
6. 8	6	3.29	120	5.61	0.0024	0.358	0.001	0.205	0.450	0.296	0.375	0.072	
29	7	11.16	71	5.57	0.0027	0.468	0.035	0.290	0.266	0.148	0.240	0.031	
7. 6	8	11.58	33	5.73	0.0018	0.127	0.024	0.059	0.130	0.057	0.115	0.022	
13	9	1.41	77	4.59	0.0010	0.210	0.048	0.344	0.450	0.189	0.232	0.067	
8. 10	10	12.00	18	5.37	0.0043	0.131	0.045	0.124	0.150	0.049	0.127	0.122	
16	11	2.78	49	5.68	0.0021	0.118	0.012	0.166	0.377	0.148	0.250	0.081	
24	12	2.55	80	5.95	0.0011	0.191	0.085	0.200	0.465	0.172	0.273	0.063	
31	13	2.02	147	5.46	0.0034	0.335	0.043	0.211	0.988	0.353	0.498	0.158	
9. 14	14	4.86	149	5.59	0.0057	0.333	0.067	0.299	0.678	0.279	0.552	0.185	
10. 5	15	5.76	149	5.75	0.0018	0.395	0.156	0.423	0.644	0.296	0.462	0.131	*
26	16	1.12	333	5.49	0.0032	0.951	0.396	0.908	1.458	0.797	0.910	0.362	*
11. 24	17	2.31	131	5.53	0.0029	0.397	0.156	0.369	0.484	0.246	0.406	0.144	
12. 7	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	19	6.26	139	5.27	0.0054	0.376	0.161	0.473	0.431	0.222	0.406	0.158	
21	20	12.00	104	5.11	0.0077	0.374	0.088	0.519	0.319	0.189	0.355	0.172	
28	21	10.66	116	5.31	0.0049	0.391	0.083	0.459	0.421	0.197	0.350	0.238	
1. 18	22	12.00	51	5.06	0.0087	0.164	0.079	0.104	0.155	0.246	0.219	0.238	
3. 1	23	12.00	138	5.36	0.0043	0.306	0.022	0.629	0.343	0.074	0.097	0.113	*
28	24	12.00	108	5.25	0.0056	0.251	0.072	0.355	0.343	0.164	0.186	0.778	*

*1) 樹幹流について成分分析を行った時のデータ ** 棄却データ
*2) pH値よりの算出値

