

森林内外の降水中の養分量について (第2報)*

岩 坪 五 郎・堤 利 夫

On the Amount of Plant Nutrients Supplied to the Ground by Rainwater in Adjacent Open Plot and Forests (2)

Goro IWATSUBO and Toshio TSUTSUMI

目 次

要 旨	110	変 化	
はじめに	111	2-2-1 降水中の養分の濃度変化	
1. 実験場所と実験方法	111	2-2-2 降水中の養分量の変化	
2. 結果と考察	111	2-3 1年間に降水に含まれる養分量	
2-1 樹幹流量と林内雨量		引用文献	122
2-2 樹幹流・林内雨の養分濃度・量の		Résumé	123

要 旨

1. 1961年6月より、京大演習林上賀茂試験地で、林外地の雨、ヒノキ林および常緑・落葉混交広葉樹林の林内雨をあつめ、カリウム・マグネシウム・リン・硝酸態・アンモニア態・窒素の濃度と量を測定した。1963年5月までの実験については、すでに第1報に報告した。

2. 1962年12月より、林内雨に樹幹流を加え、林床に到着する全雨水について、1964年5月まで測定した。

3. ヒノキ林・広葉樹林の林内雨量・樹幹流量と林外地降水量の関係について、一次の回帰式をえた。広葉樹林では生育期と生育休止期にわけて回帰式を求める必要があった。これによる1年間(1963年6月~1964年5月)の各プロットの降水量は、林外地1793.0mm, ヒノキ林内雨1231.4mm, 同樹幹流103.8mm, 広葉樹林内雨1015.0mm, 同樹幹流417.6mmであった。

4. 養分物質によりそれぞれ特徴があるが、概して、林外雨量の大きいときには養分濃度は小さく、林外雨量が小さいときには養分濃度が大きくなり、そのさい林外雨、林内雨に較べ樹幹流の濃度が高まる傾向が認められた。林外雨量が大きいときには、林外雨・林内雨・樹幹流の養分濃度の差は明らかではなかった。

5. 1年間(1963年6月~1964年5月)に林外降水に含まれた養分量は、カリウム4.5, カルシウム10.6, マグネシウム1.1, リン0.24, 硝酸態窒素1.4, アンモニア態窒素 2.1kg/ha であった。

6. ヒノキ林内雨・樹幹流中の養分合計量はそれぞれ14.7(1.6), 18.3(1.7), 4.6(0.4), 0.14(0.02), 2.1(0.2), 4.9(0.5)kg/ha で、広葉樹林ではそれぞれ48.4(9.3), 17.7(4.6), 4.8(1.1), 0.48(0.06), 2.0(0.4), 5.4(1.3)kg/ha であった。なお()内は樹幹流に含まれた養分量である。

7. 現在まで推定された葉による養分物質の林地還元量と比較すると、カリウムに関しては本実験の林内雨・樹幹流に含まれる養分量のほうが大きいばあいが多かった。このことは森林の物質循環に

* Contributions from JIBP-PT No. 5

において、雨水のもつ量的な意味が大きいこと示していると考えられる。

はじめに

森林に降った雨水は次の4通りに分けられるであろう。1. クローネの隙間をとって直接林床に到達する。2. 葉・枝・幹などに捉えられ、そのまま林床に到達することなく蒸発してしまう。3. 葉・枝などの保水量をこえたものは、そこから林地に滴下する。4. 幹をつたって流下し林床に達する。このうち2. に相当する雨量を直接はかるのは困難であるが、林内雨とよばれる1. と3. の合計と樹幹流すなわち4. は直接はかることができる。そして林外雨と林内雨・樹幹流合計の差から2. を推定できる。

すでに2年間にわたって、林外地の雨量、それに含まれるカリウム・カルシウム・マグネシウム・リン・硝酸態窒素・アンモニア態窒素について濃度、量、季節的变化、雨量と養分濃度の関係を調べた。同時にヒノキ林・広葉樹林における林内雨量とそれに含まれる前述の養分濃度、量およびその季節的变化、林外地養分量との関係などについて調べた。その結果は第1報において述べた。

本報告すなわち第2報では、第1報で欠けていた、樹幹流の量、それに含まれる養分の濃度、量を加えての実験の報告である。樹幹流を加えることによって、林床に達する全雨水量とそれに含まれる植物養分の濃度、量および、その変動などの諸性質を知ることができる。

本研究の実施に当たり、ご指導をうけた京都大学四手井綱英教授、1963年11月まで共同研究者であった林業試験場丸山明雄技官、試験区設置、採水などにご配慮をいただいた京都大学演習林上賀茂試験地の各位に厚く御礼申しあげる。

1. 実験場所と実験方法

第1報で述べた実験の継続として、同じ京都大学演習林上賀茂試験地内の、林外地・ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 林・常緑落葉混交広葉樹林の3プロットを使用した。林外雨・林内雨の測定・採取は、第1報におけると同じ合成樹脂製雨樋を用いた。

樹幹流の測定・採取には林内雨の測定に用いたヒノキ林・広葉樹林のプロットの中に、おのおの5m×5mのプロットを設けた。その中の全立木(ヒノキ林で8本、広葉樹林で、ソヨゴ *Ilex pedunculosa* 11本、ツバキ *Camellia japonica* 1本、クリ *Castanea crenata* 1本、リョウブ *Clethra barbinervis* 2本計15本)の地上高約1mに、樹脂製カラーをとりつけ、そこに集まる樹幹流を樹脂製パイプを通じて、樹脂製瓶に受けた。

雨水は少くとも1カ月に2回採取し、1カ月分をまとめて分析した。分析した養分物質の種類、分析方法は第1報のものと同じである。

2. 結果と考察

2-1 樹幹流量と林内雨量

樹幹流に含まれている植物養分量を求めるためには、その濃度と樹幹流量を求めることが必要である。樹幹流に含まれる植物養分量についての報告はこれまで殆んど発表されていないが、樹幹流量のみについては、いくつかの報告がある。^{2,3,4)}

各試験木の樹幹流量と隣接する林外地の降水量(林外雨)との間には、ヒノキおよび常緑広葉樹のソヨゴについては、各季節を通じて一次の比例関係が求められた。しかし落葉広葉樹に関しては生育期(leaf period 4月~10月)と生育休止期(leafless period 11月~3月)の間に明瞭な差が認め

られた。すなわち生育休止期には樹幹流量の割合は減少する。しかし、このばあいでも林外雨量との間にほぼ一次の関係をもつことが認められた。

各試験木の樹幹流量と胸高直径の間には、ヒノキに関しては、一定な関係は認められなかった。すなわち胸高直径の大きいものほど樹幹流量が大きいというような傾向は認められなかった。一方、広

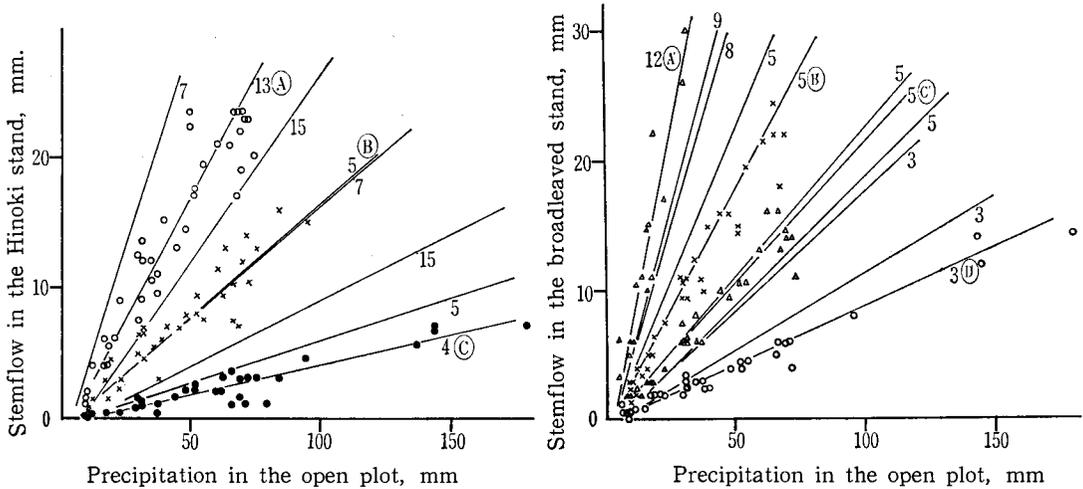


Fig. 1 The relationships between the precipitation in the open plot and the stemflow of each sample tree. Data of only three samples in the Hinoki stand and only four in the broadleaved stand are plotted in the figures, the rest is simply given by presenting regression lines. DBH in cm is given attached to each regression lines. A, B, and C on the left, A', B', C', and D' on the right show the regression lines drawn from the mark, O, X, and Δ, on the left X, Δ, and O on the right respectively.

葉樹林のプロットに含まれる立木15本のうち、11本をしめるソヨゴに関しては胸高直径が大きいほど、樹幹流量が大きい傾向が明瞭に現れた。Fig. 1.

このヒノキとソヨゴにおける差異についてはいろいろ理由が考えられる。胸高直径と樹幹流量が一定の関係をもつためには、胸高直径と各供試木の集水面積、すなわち、クローネの表面積あるいは平均枝張り直径などが一定の関係をもつ必要がある。これは同一林分の同一樹種では、おおむね満足される⁵⁾としても、枝の伸び方が問題となる。もしどの枝も一定角度に上向きであれば、集水面積→枝張り直径→胸高直径→樹幹流量の間に一定した関係を期待できるであろう。その他、樹種による葉の形の⁶⁾違い、たとえば針葉樹の葉の間には水がたまりやすく、平滑な広葉樹の葉ではたまりにくい、などは樹幹流量に影響するであろう。さらに樹皮が平滑であるか、数多くの小片に分れており、それが巻きあがっている⁷⁾ばあいなどは幹を伝って流下する雨水の下方への伝えられ方に影響し、胸高のあたりで採取、測定する樹幹流量に大きな影響を与えるであろう。このような条件によって樹幹流量が小さい⁸⁾ばあい、たとえ同一の樹形をもった同一樹種であっても、樹幹流の流れやすい樹種に比べ、各林木間の樹幹流量と胸高直径との間の関係はバラツキが大きくなると考えられる。

本実験での試験木であるソヨゴは前述した樹幹流の諸条件に対し、流量が大となり胸高直径と一定の関係をもつ条件をヒノキに較べはるかによく満たしている。すなわち、葉は平滑、枝は上向きで、樹皮も小片に分れず連続的である。

一方で kittredge は樹高の特に大のものと小のものは樹幹流量が大であったと述べている。このことはクローネの垂直的な構造、配置がそれぞれ各林木の樹幹流量に密接に関係していることを示している。ヒノキ林では樹高は余り揃わず、クローネの構造が不揃いであったことのほか、その枝はク

ローネの上部では上向きであるが、下部になるにつれ、水平から下向きになってくる。さらに樹皮は小片に分れ、巻きあがっているものが多い。また葉のリン片の間に細い隙間が多い。これらの条件が重なってヒノキではソゴのばあいと異なって、胸高直径と樹幹流量の間に一定の関係が現われなかったものと考えられる。

プロット内の各試験林木の樹幹流量を合計し、林外雨量と樹幹流としての雨量との関係式を求め、これと林外雨、林内雨の関係式を合計して、ヒノキ林の降水量について次の式を得た。Fig. 2.

$$\text{ヒノキ林樹幹流} \quad S=0.066x-0.32$$

$$\text{ヒノキ林林内雨} \quad T=0.741x-0.76$$

$$\text{計} \quad Y=0.807x-1.08 \quad \text{但し } x > 9.0$$

S : 樹幹流量, T : 林内雨量, Y : SとTの合計量

x : 林外雨量, 単位mm

落葉樹の樹幹流量は葉のついていないときは、葉のついていないときに比べ、そうとう減少することは前述した。これは葉がなくなって、クローネの集水面積が小さくなるためと思われる。したがって当然、その期間の林内降水量は増加するであろう。このため林外降水量と樹幹流量との関係は生育期(4月~10月)と生育休止期(11月~3月)にわけて、それぞれの回帰式を求めた。しかしこの林分全体としては、常緑広葉樹であるソゴが大部分をしめるので、生育休止期の樹幹流量は生育期の約80%に減少しただけであった。林内雨についても、第1報では1年を通じてひとつの回帰式を求めたが、前述の理由により、生育期、生育休止期に分けて林外雨量との関係を求めた。その結果 Fig. 2 (下図) のように生育休止期の林内雨量についても生育期より約20%増加する回帰式をえた。

広葉樹林の林内雨量、樹幹流量ならびにその合計量と林外雨量の関係式は次のとおりである。

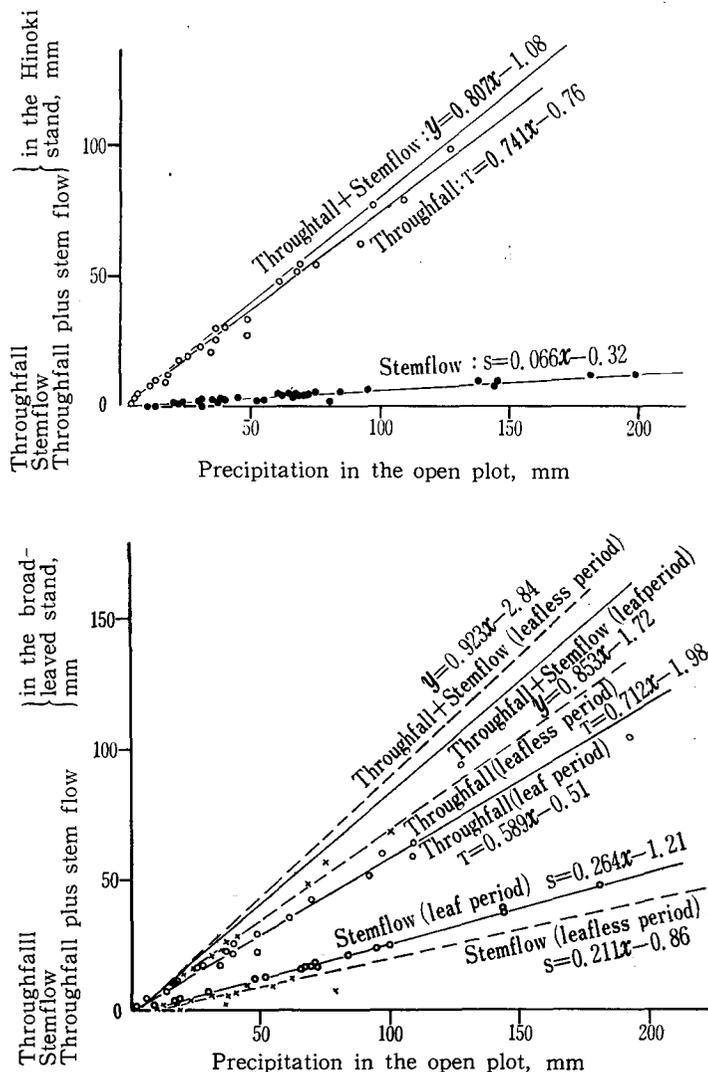


Fig. 2 The relationships between 1) throughfall and open precipitation, 2) stemflow and open precipitation, and 3) throughfall plus throughfall and open precipitation.

生育期

広葉樹林樹幹流 $S = 0.264x - 1.21$

広葉樹林林内雨 $T = 0.589x - 0.51$

計 $Y = 0.853x - 1.72$ 但し, $x > 8.5$

生育休止期

広葉樹林樹幹流 $S = 0.211x - 0.86$

広葉樹林林内雨 $T = 0.712x - 1.98$

計 $Y = 0.923x - 2.86$ 但し $x > 11.6$

S : 樹幹流量, T : 林内雨量, Y : SとTの合計量, x : 林外雨量, 単位mm

ヒノキ林では1年を通じて林外雨量の約7%が樹幹流となり, 林内雨と合せて約80%が林床に到達する。広葉樹林では, 林内雨量は生育期で林外雨量の59%休止期71%で, ヒノキ林内雨より少ない。しかし樹幹流は生育期で林外雨量の26%休止期21%とヒノキ林よりはるかに大きく, また広葉樹林の林内雨の生育期で45%, 休止期で30%に相当する量が樹幹流として林床に達する。広葉樹林の林内雨・樹幹流合計量は生育期で林外雨量の85%, 休止期では92%となり, 林内雨量はヒノキ林内雨量より小さいのに, 樹幹流量をあわせると, ヒノキ林の林内雨量・樹幹流量合計の81%より大きい値を示した。

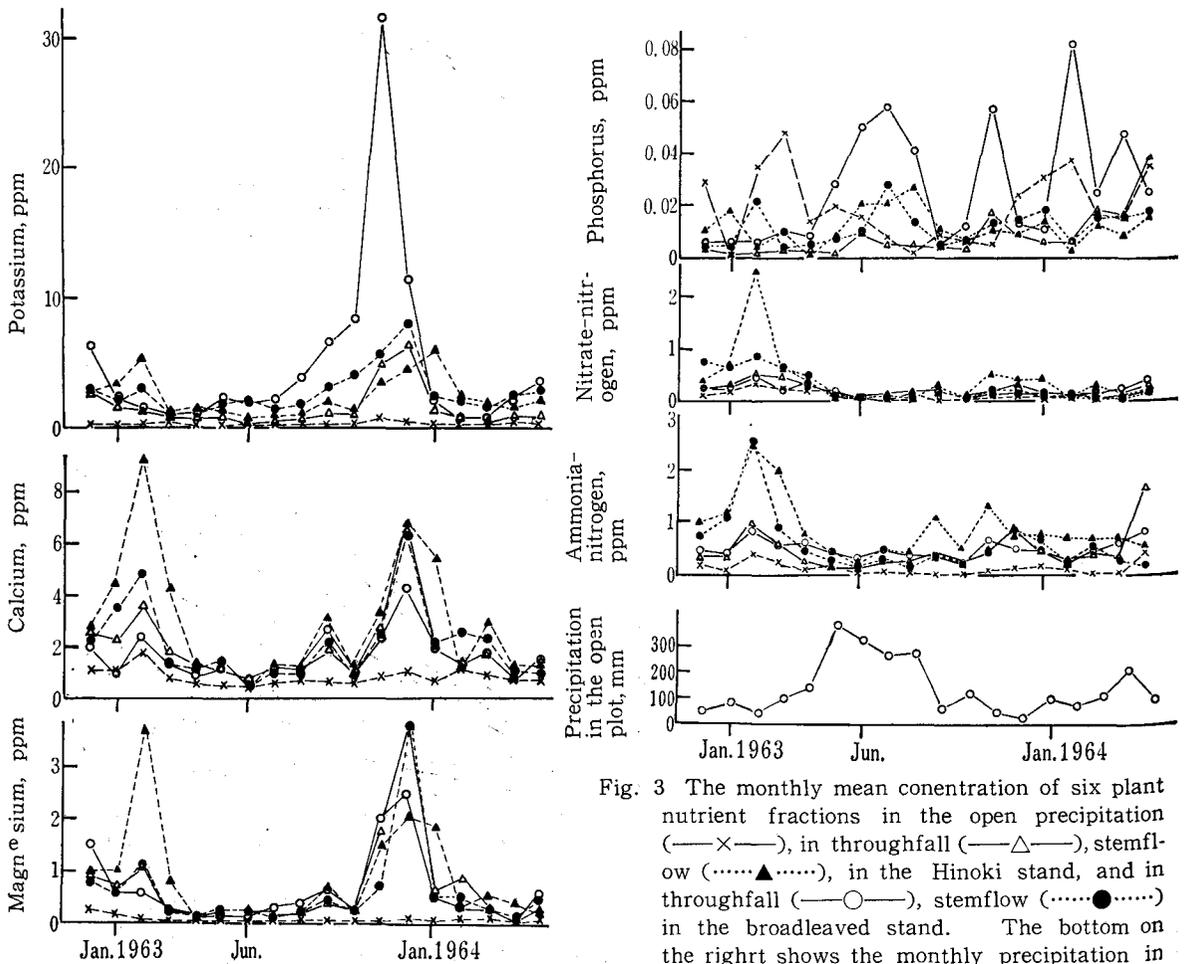


Fig. 3 The monthly mean concentration of six plant nutrient fractions in the open precipitation (—x—), in throughfall (—△—), stemflow (.....▲.....), in the Hinoki stand, and in throughfall (—○—), stemflow (.....●.....) in the broadleaved stand. The bottom on the right shows the monthly precipitation in the open plot.

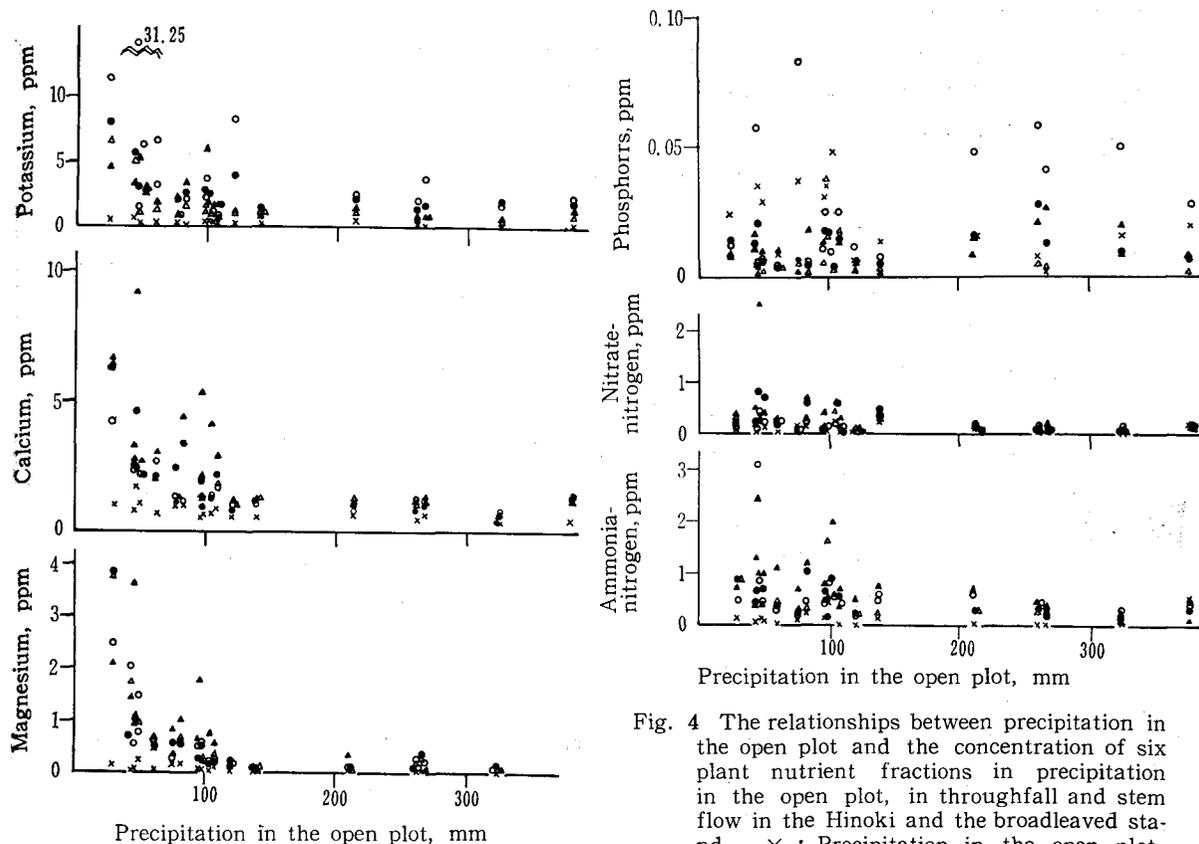


Fig. 4 The relationships between precipitation in the open plot and the concentration of six plant nutrient fractions in precipitation in the open plot, in throughfall and stem flow in the Hinoki and the broadleaved stand. \times : Precipitation in the open plot, \triangle : Throughfall in the Hinoki stand, \blacktriangle : Stemflow in the Hinoki stand, \circ : Throughfall in the broadleaved stand, \bullet : Stemflow in the broadleaved stand.

Tab. 1 Precipitation in the open plot, mm

Dec. 1962	Jan. 1963	Feb.	Mar	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.
49.1	83.1	46.3	104.2	138.8	377.3	324.3	259.7	266.5
Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan. 1964	Feb.	Mar.	Apr.	May
60.9	120.6	44.6	27.2	96.7	75.6	107.5	211.8	97.6

一般に針葉樹の樹幹流量は広葉樹のそれに較べて小さく、また広葉樹でも、樹種によりすなわち樹皮の性状などにより、樹幹流量は異なるといわれている。³⁷⁾⁸⁾

2-2 樹幹流・林内雨の養分濃度・量の変化

すでに述べたように、林内雨に含まれる養分について調べた報告はいくつかあるが、樹幹流に含まれる養分をあわせ調査したものは Pozdnyakov¹⁵⁾ が樹幹流の酸度、灰分量について報告したもの以外例をみない。Madgiwick & Ovington⁹⁾ は樹幹流は樹体との接触面積が大きいから、それに含まれる養分濃度はたぶん林内雨より大きいだろうと想像している。

1962年12月より64年5月までの18カ月間、林外雨と共にヒノキ林、広葉樹林の林内雨と樹幹流の養分濃度を1カ月毎にまとめて測定した。ヒノキ林ではプロット内8本の林木の樹幹流を、その流量に

比例して混合し、分析を行なった。広葉樹林では、常緑広葉樹（ソヨゴ、ツバキ）と落葉広葉樹（リョウブ、クリ）にわけ、ヒノキ林のように流量に比例して採取、分析した。そうしてえた養分濃度に、前述の式よりえた各プロットの降水量を乗じて、各養分物質の量を求めた。

2-2-1 降水中の養分の濃度変化

各養分物質により、それぞれ特有の性質をもっているようであるが、全体としてみれば、雨量の多かった月は養分濃度が低く、逆に雨量の少なかった月は養分濃度は高かった。これは林外雨・樹幹流に共通して認められ、またヒノキ林・広葉樹林の両プロットにおいても同様であった。Fig. 3, Fig. 4.

林外雨の月毎または降水量に応じての養分濃度の変動に較べると、樹幹流、林内雨中の養分濃度の変動ははるかに大きかった。もっとも極端な例をとれば、林外雨のカリウム濃度の最大・最小値の比は 0.70 : 0.16ppm で4.4倍であるに対し、広葉林内雨では31.25 : 0.83ppm で37.7倍に達した。

次に樹幹流と林内雨の濃度変化を Fig. 4 について考察する。これについてももちろん各養分物質により、それぞれの特徴があるが概観的には、林外雨量が1カ月200mmをこえるようなばあいには、全体に濃度が小さくなり、樹幹流・林内雨・林外雨の差は殆んどなくなってしまう。しかし雨量が少ないばあいは、樹幹流の濃度が林内雨の濃度より高くなることがしばしば認められた。

樹幹流量は林内雨量に較べ小さい。したがって林外雨量そのものが小さい時には、量の少ない樹幹流が葉・枝・幹を伝うことにより、それらに付着していた養分を洗い、すでに枯死した樹皮から養分を溶脱し、さらに水分は途中である程度蒸発して、養分濃度は林内雨より高くなったのであろう。要するに樹幹流は林内雨よりも樹体との接触面積が大きく、その影響が、月雨量100mm以下のようなばあいには大きくでて、林内雨より濃度が大きくなったと考えられる。

樹幹流と林内雨の養分濃度の変化については、雨量との関係のみでなく、季節的变化や、各養分の性質などについても検討する必要がある。

広葉樹林内雨のカリウムは1963年の10・11月・12月に大きい濃度を示した。Fig. 3. このうち10月特に11月は Fig. 4 においても、他の月に較べ著しくとびはなれている。これはカリウムは樹体内においても動きやすく、また溶脱をうけやすい養分物質であり、さらに枯死しかけた葉からの水による溶脱は生葉に較べはるかに大きいために現われた現象であろうと考えられる。^{16,17)}

雨量が少ないときには、樹幹流の濃度が林内雨より大となる傾向があると述べた。しかし今回の実験期間中、雨量の大きかったのは、4～8月であり、これに対し冬季すなわち植物の生育休止期に雨量の少ないことが多かった。この期間には葉がなく、常緑樹の葉の生理的な活動も小さくなっていると考えてよい。また冬季は雨水の温度は夏季よりも低く、したがって物質の抽出能も当然変ってくるものと考えられる。Fig. 4 に示した雨量と降水の養分濃度との関係にはこのような条件の違いが同時に含まれていることを考慮しておく必要がある。これらの条件が、前述の理由と相まって、1963年2月、64年12月・1月などに樹幹流の濃度が林内雨に較べ、大きくなるという現象をおこさせたものと考えられる。

なお、リンと硝酸態窒素では、林外雨の濃度が、林内雨・樹幹流の養分濃度より高いという現象が、とくに雨量の少ないときにしばしばみられた。これ

Tab. 2 Annual mean concentration, ppm (June, 1963—May, 1964)

		K	Ca	Mg	P	NO ₃ -N	NH ₃ -N
Hinoki stand	Throughfall	1.07	1.35	0.34	0.010	0.15	0.36
	Stemflow	1.51	1.65	0.37	0.016	0.15	0.51
Broad-leaved stand	Throughfall	3.85	1.29	0.37	0.041	0.15	0.41
	Stemflow	2.23	1.09	0.27	0.015	0.08	0.30
Open plot	Precipitation	0.25	0.59	0.06	0.014	0.08	0.12

については次節で考察する。

Tab. 2 は1963年6月から1964年5月までの各プロットの各養分物質の合計量を、各プロットの雨量合計で除して求めた年平均濃度である。ヒノキ樹幹流の各養分濃度は林内雨のそれにほぼ等しいか、または高いが、広葉樹林では逆に林内雨の養分濃度が高い。これはヒノキ林に比べ広葉樹林では、樹幹流量が大きかったことが影響していると考えられる。

2-2-2 降水中の養分量の変化

さきに述べた養分物質の濃度に、降水量を乗じて各月の雨水中の養分量を求めた。

樹幹流の各養分濃度は、林内雨のそれと殆んど匹敵したが、樹幹流としての降水量はヒノキ林で林内雨量の8.4%、林外雨量の5.8% (1962年6月~1964年5月の合計量の比)、広葉樹林で林内雨量の41.1%、林外雨量の29.1%であった。したがってヒノキ林樹幹流に含まれる養分量は小さく、各養分とも林外雨中に含まれる養分量よりさらに小さいことが多かった。また季節的な変動も林内雨中のそれに比べ殆んど認められなかった。したがって樹幹流量の小さい森林では、林床に到達する雨水中の養分量を推定するばあい、樹幹流に含まれるものについては余り問題にする必要はないであろう。しかし広葉樹林の樹幹流量はヒノキ林樹幹流量の約5倍に達し、そこに含まれる養分量も多く、カリウム・カルシウムでは殆んど毎月林外雨中の養分量よりも大きい値を示した。Fig. 5

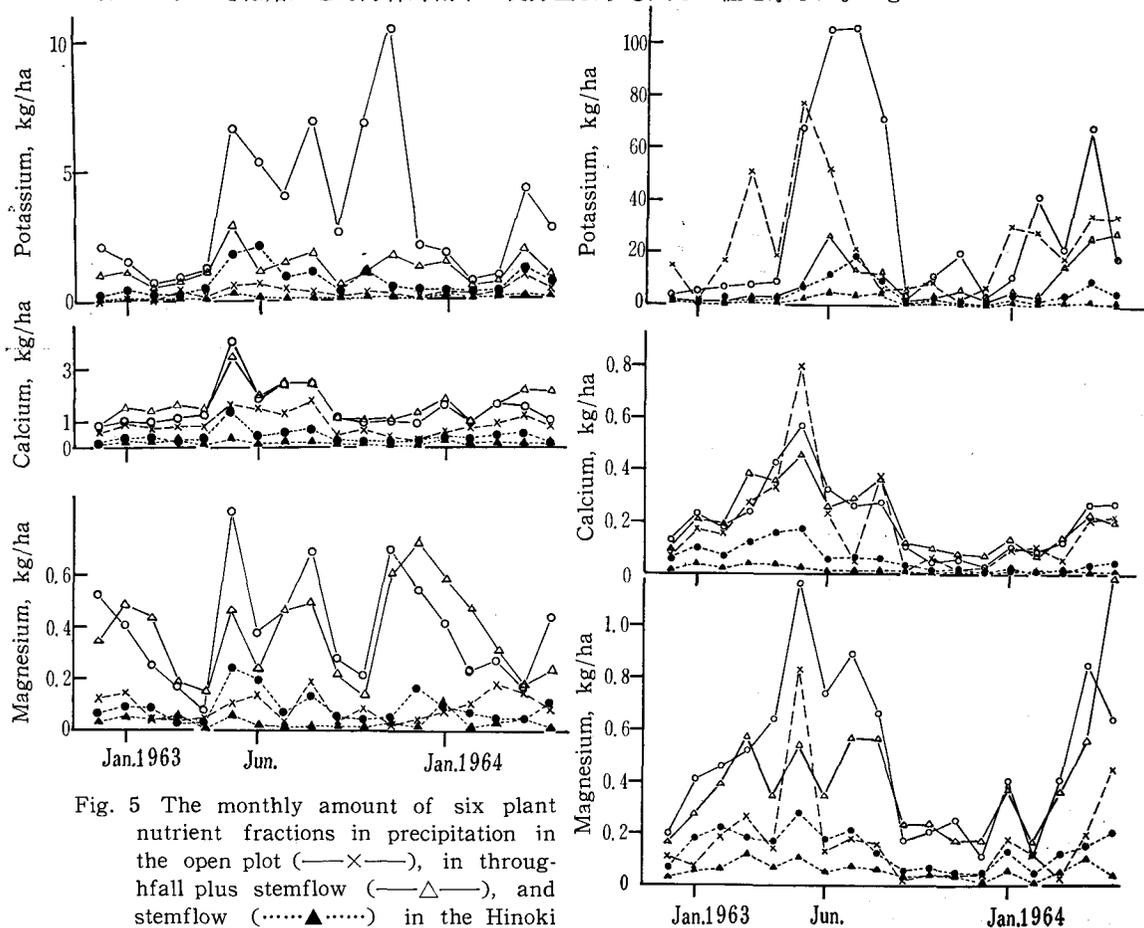


Fig. 5 The monthly amount of six plant nutrient fractions in precipitation in the open plot (—×—), in throughfall plus stemflow (—△—), and stemflow (……▲……) in the Hinoki stand, and in throughfall plus stemflow (—○—), stemflow (……●……) in the broadleaved stand.

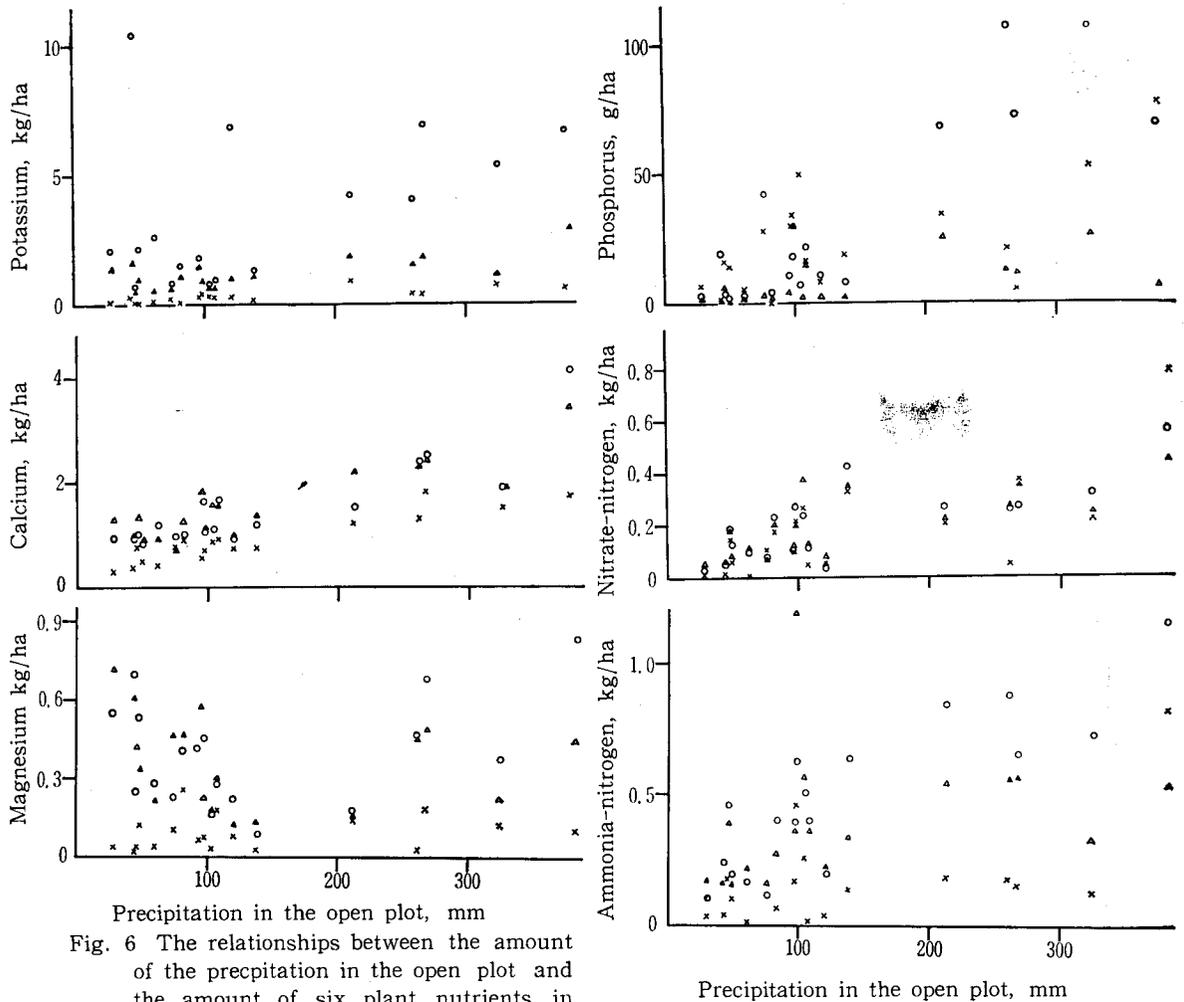


Fig. 6 The relationships between the amount of the precipitation in the open plot and the amount of six plant nutrients in precipitation in the open plot (×), in throughfall plus stemflow in the Hinoki stand (Δ), and throughfall plus stemflow in the broadleaved stand (○).

前節において林外雨・林内雨・樹幹流とも一般に雨量の大きい月は養分濃度小さく、逆に雨量の小さい月は濃度が大きくなる傾向があると述べた。しかし Fig. 6 に示したように、雨量と養分濃度を乗じて養分量を求め、これと林外雨量の関係をみたばあい、大きい濃度と小さい雨量が消しあって養分量が一定になるといった傾向より、むしろ雨量の影響のほうが強く、林外雨量が大きいときには養分量も大きくなる傾向を示した。しかしこれも簡単な関係ではなく、養分物質の性質、季節とこれに応じた植物の生理的狀態などが強く養分量の増減に影響しているようである。

林外雨中の養分量の変化は林内雨・樹幹流に較べてもっともバラツキが小さく、雨量と比例した動きをしているが、やはりそれぞれの養分物質により異っている。たとえばカリウム、マグネシウム、リン、アンモニア態窒素では、雨量が増加しても林外雨中の養分量はあまり増加しないが、カルシウムと硝酸態窒素では雨量の増加と共に物質量の増加が認められた。Fig. 6。これらの原因については、各養分物質の起源、すなわち海水起源とか陸上起源¹⁸⁾¹⁹⁾の問題、また降水をもたせられた気団の径路などの条件が複雑にからみあっているものと考えられる。

林内雨・樹幹流は森林の葉・枝・幹などに接触することによって、林外雨とは異なった養分濃度・量をもっている。これは前報に述べたように、樹体からの溶脱とエアロゾルの形で付着した養分物質が洗い流されるのが養分物質増加の原因であり、またあるいは樹体による養分の吸収もあるかもしれない。

林内雨・樹幹流に含まれる養分物質の合計量の変化を林外雨量ならびにその養分量と比較すると、ヒノキ林・広葉樹林・林外雨を通じてその動きがもっとも似かよったのはカルシウムであった。Fig. 6。これに対して広葉樹林の林内雨・樹幹流合計に含まれるカリウム量は、雨量が増加したばあい、林外雨中のカリウム量増加よりはるかに大きい増加をしめした。さらに1963年の10月・11月には林外雨のカリウム量は小さいのに林内雨樹幹流合計カリウム量はとびはなれて大きい値を示した。しかしヒノキ林では10月・11月にも余り大きな値は示さなかった。Fig. 5, Fig. 6。これらのことから広葉樹の葉に含まれるカリウムは雨水により溶脱しやすく、とくに秋の落葉期には樹体とくに葉からの溶脱が明瞭に認められるといえるであろう。

カルシウムは林内雨・樹幹流に含まれる量と林外雨中の量の動きが相ともなっているからといって、溶脱をうけにくいと断定することは必ずしもできない。なぜなら1年間の林外雨と林内雨・樹幹流に含まれるカルシウム量の差はヒノキ林、広葉林でそれぞれ7.8, 7.1kg/ha. でカリウムのそれぞれ10.2, 43.9kg/ha に較べると少ないが、マグネシウムの3.5, 3.7kg/ha よりは多量が、森林の存在によって林床に到達している。また筆者らのユリノキの葉の浸漬実験、Tukey らのアイソトープによるマメ、カボチャの葉からの溶脱実験でも、カリウム、カルシウム、マグネシウムの順に、溶脱がおこりやすかった。

マグネシウムに関しては、季節変化を示した Fig. 5 ではややカリウムに似かよっており、秋の落葉期に林内雨・樹幹流中に溶脱量が増加するのではないかと思われるが、林外雨量との関係を示した Fig. 6 ではカリウムにおけるような、明瞭な落葉期の増加は認められない。

林外雨に含まれるアンモニア態窒素は林外雨量が増加しても余り増加しない。ヒノキ林・広葉樹林の林内雨・樹幹流に含まれているアンモニア態窒素量は林外雨のものに較べ増加が大きく、その傾向は広葉樹林においてより顕著である Fig. 6。

リンならびに硝酸態窒素の養分量の変化でもっとも特徴的であることは、濃度についても述べたように、林内雨・樹幹流合計の養分量が、林外雨中の養分量より小さいばあいがしばしば認められたことである。Fig. 5, Fig. 6。

リンと硝酸態窒素におけるこの現象については、英国ランカーシャで *Quercus petraea* の林内雨の養分量を測定した Carlisle¹⁹⁾ らも報告している。彼ら是有機態—無機態窒素について、林外雨・林内雨の養分量を測定し、林内雨では有機態窒素は林外雨より多いが、無機態窒素は逆に少なくなったと報告している。これは葉や着生植物による吸収または吸着によって無機態窒素が減少し、植物体からの溶脱によって、有機態窒素が増加したのであろう。また冬期にリンの量が林外雨より減少したのも着生植物や枝・幹の吸収・吸着によるものであろうと述べている。

ラジオアイソトープを使っての葉面撒布または葉面塗布の実験により、無機態—有機態窒素やリンが葉面より吸収されるとの報告は多いが、これらの殆んどは肥料試験のため3%の硝安、1%の尿素など高濃度のものを使用している。年平均濃度硝酸態窒素0.08ppm、リン0.014ppmといった低濃度の雨水からも、このような吸収、吸着がおこりうるかどうか筆者らには断定できない。林内雨、樹幹流の合計養分量が林外雨養分量より小さくなる現象がしばしばおこるリンと硝酸態窒素は、他の4つの養分元素と異なり、陰イオンであるから、この両イオンのみ、他の陽イオンに較べ吸着がおこりやすいというようなことがあるのかもしれない。

リン、硝酸態一、アンモニア態窒素に関しては、広葉樹林では11月に林外雨中のこれら物質の養分量は減少しているのに、林内雨・樹幹流中の養分合計量はやや増加し、あるていど落葉からの養分溶脱が考えられるが、絶対的な量は林外雨量の多かった63年5月～8月、64年2月～5月のほうがはる

かに大であった。ヒノキ林では、秋期のこれら林内雨養分量の増加は殆んどみられなかった。Fig. 5。

本実験より林内雨・樹幹流に含まれる養分物質の傾向として次のようなことがいえるであろう。

樹体に付着したエアロゾルや葉から溢出した養分など、溶けやすい養分が雨水に洗いだされるため、雨量の少ないばあいほど養分濃度は高くなる傾向があり、したがって養分量も雨量のわりに大である。雨量の少ない月は、秋・冬季に多く、雨水の温度は低いが、ちょうどこの時期は溶脱をうけやすい樹体の枯死部分が多くなるので、雨量の少ないばあいほど養分濃度が高くなる傾向は助長されようである。

一方林外雨量が月 200mm をこえるようなばあいには、エアロゾルや溢出した養分などが洗いだされる他に、ラジオアイソトープを使っての実験によって証明されたように、クチクルの非連結部分や細胞間隙から、養分物質の強制的な溶脱がおこるのであろう。このばあい大きい雨量のために林内雨・樹幹流の養分濃度は低くなるが、養分物質の絶対量としては、雨量が大となるほど大となる傾向が認められた。

さらに広葉樹林では黄・落葉期の葉からの養分の溶脱が、とくにカリウムに最も顕著に現れた。この林分は常緑広葉樹であるソヨゴが主で、それにリュウブ・クリなどのまじった常緑落葉混交林である。もしこれが落葉広葉樹のみからなる林分であれば、筆者らの苗畑のイイギリの苗木による実験の¹⁶⁾ように、さらに大きいカリウム量が、林内雨水中に認められたであろう。

2-3 1年間に雨水に含まれる養分量

林外雨に含まれる養分量は、当然森林にも同量が降水と共に加えられるから、そのうちのどれほどが林地から流れさるかは別として、一応森林生態系にとっては外部からの収入といえる。第1報において筆者らは²³⁾1961年6月～1963年5月の2年間に林外雨に含まれていた養分量の年平均値を55倍して、Ovington²³⁾による55年生ヨーロッパアカマツの幹材に含まれる養分量と比較した。その結果は測定した全養分物質について、降水中の量のほうが幹材に含まれるものより大であることを述べた。

上述の値は林外雨に含まれる養分量を基礎としたものである。しかし森林は広葉樹で2.2～7.9(片面)、針葉樹(両面)では3～28に達する葉面積指数をもっている。²⁴⁾森林はその大きな葉面積のために、エアロゾルの形で浮遊する養分物質を、裸地に較べそうとう多く吸着または付着するものと考えられる。これらが雨に洗い流されることが、林内雨に含まれる養分量が林外雨のそれよりも大きくなる原因のひとつとなっているであろう。この間の問題を調べるため筆者らはモデル実験をおこなった。

すなわち 50cm×50cm、深さ5cmのステンレススティール製の容器に雨水をうけ、これをコントロールとした。同時に同じ形状の容器の上に50cm×50cmのステンレススティールのネット10枚を約10cm間隔で重ね荷電を防ぐため、コントロール区も共にアースして雨水を受け、コントロール区の雨水の養分量と比較した。このネットは直径0.28mm長さ約50cmのステンレススティール線970本でできており、メッシュは0.78mmであった。

コントロール区と試験区の雨水中の養分量の比は、1回の降水をとったばあい、雨量の大きさや降水までの晴天日数などにより変動するので、それぞれ連続した9回分と6回分の降水中の養分量を合計して、第1ブロックと第2ブロックにわけて対比した。試験区では雨量は84%、94%と減少したが、逆にカリウム、カルシウム、マグネシウムではそれぞれTab. 2のように、第1、第2ブロック共、似かよった割合で増加した。リンでは養分量比は2ブロック共変化せず、第2ブロックの硝酸態一、アンモニア態窒素は雨水採取後、日数がたちすぎたので分析しなかった。

この実験のばあい、森林におけるような溶脱、吸収による養分量の増加、減少は考えられないから、コントロール区に対する養分量の増加は、浮遊するエアロゾルがネットに付着したために生じたものと考えられる。

この試験区のもつ表面積が、森林の葉面積指数にすればどれほどにあたるかは、葉とは排列の仕方

Tab. 3 The increase of plant nutrients caught with stainless steel screen by aerosol adsorption, mg/m²

	plot	Precipitation	Numbers of Shower	K	Ca	Mg	P	NO ₃ -N	NH ₄ -N
I	A) Control plot	158.9mm	9	45.5	199.5	93.8	4.72	19.0	40.4
	B) Screen plot(A/B)	133.2(0.84)	9	79.2(1.7)	413.2(2.1)	159.4(1.7)	3.62(0.8)	82.0(4.3)	107.8(2.7)
II	A) Control plot	131.6	6	36.2	129.3	34.8	3.18	—	—
	B) Screen plot(A/B)	122.2(0.93)	6	58.6(1.6)	293.3(2.3)	86.4(2.5)	3.56(1.1)	—	—

が異なるから、直接比較することはできないが、ネット1枚あたりは約0.8の葉面積指数となる。葉面積指数の大きい森林では、この実験におけるように何回かの降水を集めて林外雨の養分量と比較したばあい、カリウム、カルシウム、マグネシウム、で約2倍ほどが、無機態窒素ではそれ以上が、外部から森林に加えられている可能性は充分考えられるであろう。

次に林内雨と樹幹流に含まれる養分量について考察する。Tab. 4。すでに述べたように、林内雨

Tab. 4 Annual amount of plant nutrients in rainfall, kg/ha. (Jun., 1963~May, 1964)

plot		Precipitation	K	Ca	Mg	P	NO ₃ -N	NH ₄ -N
Hinoki stand	throughfall (A)	1231.4mm	13.1	16.6	4.2	0.12	1.9	4.4
	stemflow (B)	103.8	1.6	1.7	0.4	0.02	0.2	0.5
	(A)+(B)	1335.2	14.7	18.3	4.6	0.14	2.1	4.9
	difference between(A)+(B) and open plot	-457.8	10.2	7.7	3.5	-0.10	0.7	2.8
Broadleaved stand	throughfall (A')	1015.0mm	39.1	13.1	3.7	0.42	1.6	4.1
	stemflow (B')	417.6	9.3	4.6	1.1	0.06	0.4	1.3
	(A')+(B')	1432.6	48.4	17.7	4.8	0.48	2.0	5.4
	difference between(A')+(B') and open plot	-360.4	43.9	7.1	3.7	0.24	0.6	3.3
open plot		1793.0	4.5	10.6	1.1	0.24	1.4	2.1

・樹幹流と林外雨との養分量の差は、エアロゾルの付着、樹体からの溶脱、あるいは樹体または着生植物による吸収が原因と考えられる。このうちエアロゾルの付着による養分の増加分は森林への外部からの収入であるが、樹体からの溶脱分には、他の立場から検討を加える必要がある。

生きた樹体、主に葉・枝は雨水により養分の溶脱をうけるが、そのまま養分が減少し落葉・落枝に至るならば、樹体地上部の養分量の林地への還元量は1年間で最も養分量の大きい時期に伐倒分析して養分量を測定することにより、少なくとも葉の中の養分の還元量を推定することができる。しかしアイソトープによる1年生植物の幼苗でのカルシウムについての Mecklenburg²²⁾らの実験結果のように、キリの吹きつけによって養分の溶脱がおこり、それを補充するために根から新たに養分が吸いあげられるとすると、物質循環の量と速度は、今まで考えられていたものより大きくなるであろう。

上賀茂試験地におけるヒノキ林、広葉樹林の林内雨・樹幹流合計に含まれる年間カリウム量の林外雨中のカリウム量に対する増加量はそれぞれ、10.2, 43.9 kg/haであった。また苗畑における3年生イイギリ¹⁸⁾、カンレンボク²⁵⁾の生育期間での同様に処理した雨水中のカリウム量はそれぞれ55.7, 26.6kg/haであった。Madgwick¹⁹⁾らは針葉樹林・広葉樹林で12~58kg/ha、伊藤¹⁴⁾らはスギ52.0、テーダマツ18.5、モリシマアカシヤ67.6kg/haとそれぞれの林内雨の林外雨に対するカリウム増加量を報告している。

生育期間中（主として7～8月）に伐倒分析したデータより推定した最近1年間の葉の生長量中のカリウム量（これが落葉として毎年林地に還元されると考えられている）はスギ9.2～38.3, トドマツ22.7～38.9, アカマツ12.5～26.0, カラマツ24.0～41.3, コジイ12.7～35.9, ツバキ22.0～28.2, シラカンバ²⁸⁾ 29.4kg/haであった。

さきに述べたステンレススティール・ネットからの実験によっても、エアロゾルの付着による林内雨・樹幹流中のカリウム量の増加はせいぜい年間9～15kg/ha程度と思われる。これを差しひいても、なお前述した各林分の葉のカリウム含有量と同程度またはそれ以上が林内雨・樹幹流中に含まれていることになる。林分も樹種もまた測定した時期も異なるから、これら雨水中のカリウム量と葉に含まれるカリウム量を直接比較することはできない。しかし実験に供された落葉広葉樹やスギのようにカリウムの溶脱がきわめて大きいと考えられる樹種の林分のばあい、ただ1回の伐倒測定によって、その林分の葉による年間の還元量を算出することは、そうとう過小評価をくだす可能性が充分にあるといえるだろう。

すなわち Meclenburg²²⁾らの実験結果のごとく、溶脱された養分を補充するために、他の部分からの養分物質の移動あるいは根からの吸収といったことがおこり、養分循環量とその速度は、今まで考えられていたよりもはるかに大きいのではなからうか。

したがってこれらの実験から、降水が森林の物質循環におよぼす影響はとうてい無視しえないと考えられるから、物質循環量とくに地上部の樹体から林地への年間還元量を計測するためには、リター量と共に降水中の養分量を計測することが、ぜひとも必要であると考えられる。

引用文献

- 1) 丸山明雄・岩坪五郎・堤利夫：森林内外の降水中の養分量について（第1報），京大演報36：25～39，1965
- 2) Kittredge, J., Loughhead, H. J. & Mazurak, A.: Interception and stem-flow in a pine plantation. J. For. 39: 505-522, 1941.
- 3) Leonard, R. E.: Interception of precipitation by northern hardwoods, Station paper No. 159, Northeastern Forest Experimental Station. 1961.
- 4) Rutter, A. J.: Studies in the water relation of *Pinus sylvestris* in plantation conditions, I. Measurements of rainfall and interception, Jr. Ecol. 51: 191-203, 1963.
- 5) 戸田良吉：枝張りの程度のあらわし方—キリシマアカマツでしらべた一例—，日林誌35：385—388，1953.
- 6) Beall H. W.: The penetration of rainfall through hardwood and softwood forest canopy, Ecol. 15: 412-415, 1934.
- 7) 原田泰：森林気象学：230—237，朝倉書店，東京 1951
- 8) Kittredge, J.: Forest influences, Mc. Graw Hill, Newyork, 1948.
- 9) Madgwick, H. A. I. & J. D. Ovington: The chemical composition of precipitation in adjacent forest and open plot, Forestry, 32: 14-22, 1959
- 10) Ingham, G.: The mineral content of air and rain and importance to agriculture, J. Agri. Sci. 40: 55—61, 1950.
- 11) Nye, P. H.: Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest, Plant and Soil, 13: 333-346, 1961.
- 12) Tamm, C. O.: Removal of plant nutrient from tree crowns by rain, Phys. Plant. 4: 184—188, 1951.
- 13) Carlisle, A., A. H. F. Brown and E. J. White: The organic matter and nutrient elements in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea*) canopy, J. Ecol. 54: 87—98, 1966.
- 14) 伊藤悦夫・稲川悟一・佐敷修：林内雨の養分循環に果たす役割，静大農研報14：182—202，1964.
- 15) Pozdnyakov, L. K.: The role of rain penetrating beneath the forest canopy in the process of exchange of material between forest and soil, Soils and Fertilizers, 19, Abstr. No. 1820, 1956.
- 16) 正垣幸造・岩坪五郎・堤利夫：森林内外の降水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—，日林講76：110—112，1965.
- 17) Stenlid, G.: Salt losses and redistribution of salts in higher plants, Encyclopedia of plant physiology, 4: 615-637 Springer Verlag, Berlin, 1958.

- 18) Tamm, C. O. : The atmosphere, Encyclopedia of plant physiology, 4 ; 233—242, Spring Verlag, Berlin, 1958.
- 19) 三宅泰雄「降水の化学」地人書館 東京, 1955
- 20) Tukey, H. B., Jr. H. B. Tukey and S. H. Wittwer : Loss of nutrients by foliar leaching as determined by radioisotopes, Proc. Am. Soc. Hort. Sci. 71 : 486—506, 1958.
- 21) Throne, G. : Nutrient uptake from leaf spray by crops, Field Crops Abst. 8 No. 3 : 147—152, 1955.
- 22) Mecklenburg, R. A. & H. B. Tukey, Jr. : Influence of foliar leaching on root uptake and translocation of Calcium-45 to the stems and foliage of *Panicum vulgare*, Pl. Phys., 39 : 533—535, 1964.
- 23) Ovington, J. D. : The circulation of minerals in plantations of *Pinus sylvestris* L., Ann. Bot. N. S., 23 (9) : 229—239, 1959.
- 24) 四手井綱英編 : アカマツ林の造成—基礎と実際—, 67—69. 地球出版, 東京, 1963.
- 25) 西村武二・カンレンボク模型林分における物質収支について, 京大農卒論, 未発表,
- 26) 河原輝彦 : 森林生態系における物質循環について, 京大修論, 未発表

Résumé

1. Since June, 1961, rainwater has been collected at the Kamigamo Experimental Forest Station of Kyoto University in Kyoto in three types of plots : an open plot, the throughfall (rainwater which has passed through the forest canopy) in a Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) stand and in a broadleaved evergreen and deciduous mixed stand. The plant nutrient fractions of Potassium, Calcium, Magnesium, Phosphorus, Nitrate-nitrogen, and Ammonia-nitrogen were analysed and studied from these collections. The results of the experiment until May, 1963 have already been submitted in the first report.

2. From December, 1963 to May, 1964, by the addition of the estimation of the stemflow (rainwater which flows down along the stem surface) to the throughfall, all kinds of water which arrived at the forest floor were collected and analysed monthly.

3. It was necessary to divide the year into a leaf period and a leafless period when considering the throughfall and stemflow in the broadleaved stand. Linear regressions were found in each of the relationships between the precipitation in the open plot and the amount of throughfall and stemflow in the two forest stands. By these regressions, the amounts of rainwater in a one-year period (June, 1963–May, 1964) were calculated as follows : (figures in mm), Open plot 1793.0, Hinoki stand-throughfall 1231.4, -stemflow 103.8, broadleaved stand-throughfall 1015.0, -stemflow 417.6.

4. Though each nutrient has its own characteristics which could be described in detail, generally speaking, the plant nutrient concentration was found to decrease as the precipitation increased. In many cases of precipitation of less than 100 mm per month in the open plot, the nutrient concentration of the stemflow in the two stands was higher than that of the throughfall. In cases of precipitation of more than 200 mm, the differences of nutrient concentration between the open plot and the throughfall and stemflow in the two stands were not always clear.

5. In the open plot, the annual fall (i. e., June, 1963–May, 1964) of the plant nutrients brought about by rainwater were estimated as follows : Potassium, 4.5kg/ha; Calcium, 10.6; Magnesium, 1.1; Phosphorus, 0.24; Nitrate-nitrogen, 1.4; Ammonia-nitrogen, 2.1.

6. In the Hinoki stand, the annual fall of those plant nutrients brought about by the throughfall plus stemflow were estimated at 14.7 (1.6), 18.3 (1.7), 4.6 (1.4), 0.14 (0.02), 2.1 (0.2), and 4.9 (0.5) kg/ha, and in the broadleaved stand at 48.4 (9.3), 17.7 (4.6), 4.8 (1.1), 0.48 (0.06), 2.0 (0.4), and 5.4 (1.3) kg/ha respectively. Figures in brackets are the amount of plant

nutrients by stemflow.

7. Comparison of the amount of plant nutrients, especially of Potassium, brought about by litterfall obtained by estimations through the researching of forest biomass in other forests, in many cases, the amounts brought by throughfall and stemflow were greater than that by litterfall. This would indicate the importance of throughfall and stemflow in the mineral circulation of the forest ecosystem.