

森林内外の降水中の養分量について (第1報)

丸 山 明 雄*・岩 坪 五 郎**・堤 利 夫**

Akio MARUYAMA, Goro IWATSUBO and Toshio TSUTSUMI

On the Amount of Plant Nutrients Supplied to the Ground by Rainwater in Adjacent Open Plot and Forest (1)

要 旨

- 1 京大演習林上賀茂試験地で、1961年6月より2年間にわたり無林地の雨、ヒノキ林および広葉樹林の林内雨をあつめ、 $K \cdot Ca \cdot Mg \cdot P \cdot NO_3-N \cdot NH_3-N$ の濃度を測定した。
- 2 林外雨、林内雨の養分濃度は降雨のたびごとに異なっていたが、林内雨の濃度は概して林外雨のそれよりも高かった。
- 3 林外雨の濃度は降雨のたびごとに異なっていたが、概して1回の降雨の雨量が増すにつれ濃度は低くなる傾向があった。この傾向はPと NH_3-N でかなりはっきりしており、各降雨量における濃度の上限をとると降雨ごとの降雨量に養分濃度を乗じて求めた養分量が一定に近かいという傾向が認められた。これに対して、 NO_3-N では1回の降雨の雨量が増しても濃度の変化が前者に比べて比較的少なく、降雨ごとの養分降下量は雨量の増減とある程度相伴う傾向があった。
- 4 1年間に降る林外雨に含まれている養分量は、2年間平均で $K-2.80$, $Ca-10.35$, $Mg-2.15$, $P-0.56$, $NO_3-N-2.31$, $NH_3-N-4.11$ kg/ha であった。これらの値は森林の生長に対して決して無視できるほど小さな値ではない。
- 5 1年間に降る林内雨に含まれている養分量は、ヒノキ林において、 $K-10.72$, $Ca-15.80$, $Mg-4.07$, $NO_3-N-2.57$, $NH_3-N-5.60$ kg/ha 広葉樹林において、 $K-36.10$, $Ca-14.18$, $Mg-5.84$, $NO_3-N-2.45$, $NH_3-N-6.50$ kg/ha であった。このように林内雨には林外雨よりも多くの養分が含まれているが、このことの原因として、樹冠によるエアロゾルの吸着説と樹冠からの溶脱説とがある。どちらの考え方がより適切かは現在よく判らないが、少なくともKとMgとは樹冠からの溶脱説が有力なように思われる。

は じ め に

樹木は葉から大気中の CO_2 ガスを取り、根から地中の水と無機養分とを吸収し、光合成によって有機物をつくる。この有機物のある部分は樹体の生長に用いられるが、またある部分は呼吸により再び CO_2 ガスとして大気中にもどり、またある部分は落葉落枝として地上に落ちたのち、無機化して大気中あるいは地中に還元される。

森林では、このように樹木とその環境との間を養分元素がさかんに循環している。この物質循環にはいくつかの経路があるが、雨水による養分の流入もその一つだと考えられる。雨水が地表に運ぶ養

* 農林省林業試験場関西支場
Gov't Forest Exp. Sta. Kwansai Branch, Kyoto.
** 京都大学農学部
Fac. of Agr., Kyoto Univ., Kyoto.

分が植物の生育に役立つという考え方はかなり以前からあるが、これを定量的に説明した研究はこれまでに2・3を数えるのみである。この点についてさらに知見を得るために、筆者らは1961年6月より森林内外に降る雨水の定量とその養分の分析を行なって来た。この研究はまだ継続中であるが、筆者のうちの一人が最近この研究から離れることになったので、すでに発表した資料をあわせて1963年5月までの結果をとりまとめた。

なおこの研究を進めるにあたっていろいろとご指導をいただいた四手井教授、試験地の設定、試料の採取にご配慮をたまわった京大演習林上賀茂試験地の方々にあつく御礼申しあげる。

方 法

京大演習林上賀茂試験地内に無林地・ヒノキ林地・広葉樹林地の三つのプロットを設けた。無林地のプロットは気象観測のための露場をそのまま用い、巾と深さ約10 cm、長さ約3.5 mの角型ポリエチレン雨桶を3本、地表より約30 cmの高さに固定し、これが受ける雨水を容量15 lのポリエチレンバケツに集めた。このバケツ1杯は約30 mmの雨量に相当する。ヒノキ林は60~70年生と推定される人工造林地であるが、生長はあまり良くなく、平均胸高直径7.6 cm、平均樹高8 m、クローネの閉鎖は不完全と認められる。広葉樹林は天然性の常緑樹と落葉樹が入りまじったいわゆる雑木山で、上木の樹高は5~7 m、8割程度まではソヨゴであり、他にクリ・リュウブ・ゴンゼツなどから成る。林内雨を集めるには、約10 m×10 mのプロット内に無林地のプロットで用いた雨桶と同じものを4本同様に設置した。参照した2・3の研究においては、林内雨を集めるのにすべて雨量計を用い、1プロット内に2コ以上を設けて林内雨量のパラツキを平均するようにしていた。^{2,3,6)}しかし、林内雨は無林地の雨よりも場所による差が大きいと思われるから、よりよい平均値を得る目的で、この試験では雨桶を用いた。

分析した養分と方法はつぎの通りである。

K——炎光々度計により

Ca・Mg——EDTA滴定法により

P——モリブデン青法

NO₃-N——フェノール・ディ・スルホン酸を用いる比色法により

NH₃-N——ネスラー試薬を用いる比色法により

結 果 と 考 察

雨水に含まれる養分の濃度は、1回の降雨ごとに違う値を示し、また林外雨と林内雨の間にも差があった。プロット別に各養分の濃度の最小値・最大値を示すと第1表ようになる。林内雨は概して林外雨よりも濃度が高かった。すなわち雨水の養分濃度は、一般に樹冠を通過することにより高くなると思われる。この傾向は¹⁾INGHAM; ⁷⁾TAMM; ²⁾OVINGTON; ³⁾NYEらによっても認められている。しかしその高まり方は養分ごとに違ひ、樹種によっても異なるようである。どの程度濃度が高まるか、如何にして濃度が高まるかなどの点についてはのちに触れよう。

(1) 林外雨の含む養分について

林外雨についてみると、分析した6つの養分のうちもっとも多く含まれていたのはCaであり、0.4~1.0 ppm程度の濃度を示すことが多かった。もっとも少ないのはPであり、0.01~0.05 ppm程度であった。他の4つは、K—0.1~0.3, Mg—<0.3, NO₃-N—0.1~0.2, NH₃-N—0.05~0.4 ppm程度である。1回の降雨ごとの濃度の変化を各養分元素についてくらべてみると、Mg・P・NH₃-Nでは変化の巾が比較的大きく、最大最小の比がいずれも250~1000におよんだのに対し、K・Ca・NO₃-N

第1表 森林内外の雨の養分濃度 (ppm) (最小値と最大値)

Tab. 1 Nutrient concentrations in through fall rain and open plot rain.
(Max. & Min. value)

	林 外 雨 (Open plot)		林 内 雨 (Through fall rain)			
	min.	max.	ヒ ノ キ 林 (Hinoki stand)		広 葉 樹 林 (Broad leaved stand)	
			min.	max.	min.	max.
K	0.06	2.30	0.21	10.40	0.44	36.50
Ca	0.32	10.39	0.65	18.81	0.54	7.22
Mg	0.01>	2.52	0.01>	9.91	0.01>	5.29
P	0.001>	1.30	0.001>	0.009	0.001	0.053
NO ₃ -N	0.03	0.59	0.09	2.21	0.09	0.91
NH ₃ -N	0.01>	4.38	0.01>	5.57	0.12	3.45

註 林外雨以外のPは1962年12月27日以後の値

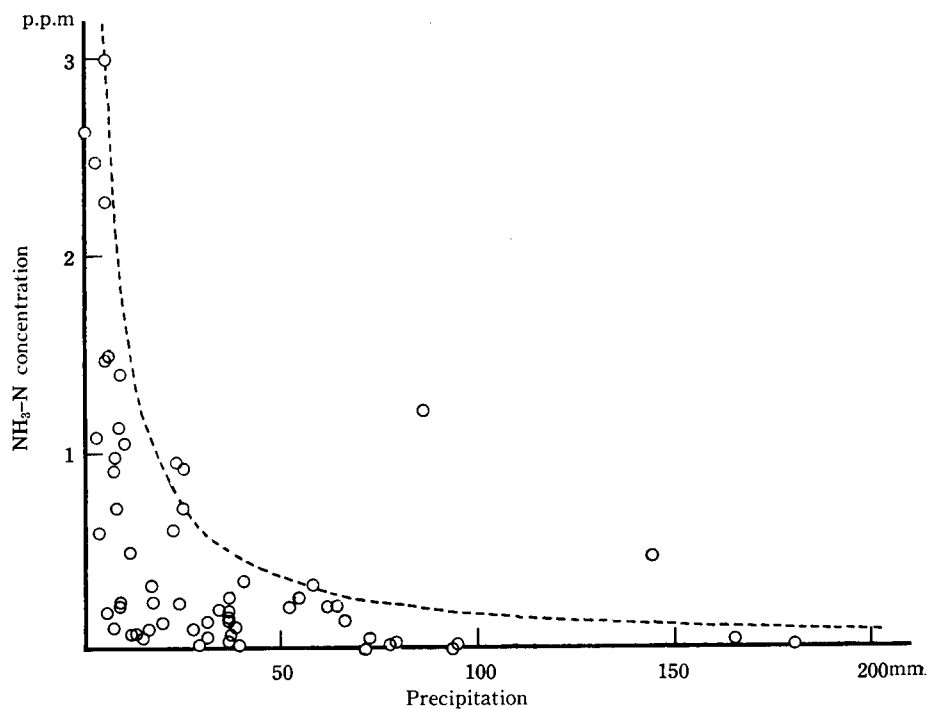
Note: P-concentrations of through fall rain were examined from samples collected after Dec. 27 1962.

ではこれが比較的小さく、最大最小の比はいずれも20~40程度であった。

雨水の養分濃度に関係する要因としては、雨量・強度・前降雨との間隔・雨をもたらず気団の種類などいくつかのものが考えられるが、このうち比較的たやすく吟味できるのは毎回の雨量と養分濃度との関係である。MILLER⁸⁾、菅原⁹⁾、松尾¹⁰⁾、三宅¹¹⁾らはClについて、ÅNGSTRÖM¹²⁾はNH₃-NとNO₃-Nについてこの両者の関係を数式で示しているが、いずれも降水中の化学成分の濃度は雨量の増加とともに減ることをあらわしている。また、OVINGTON²⁾はK・Na・Caの3元素について、5週間のうちに降った雨量とその平均濃度との間の関係をしらべ、KとCaとは濃度の高い値は雨量の少ない時期に現われる傾向があるが、Naは雨量と濃度の間に関係が認められないといっている。

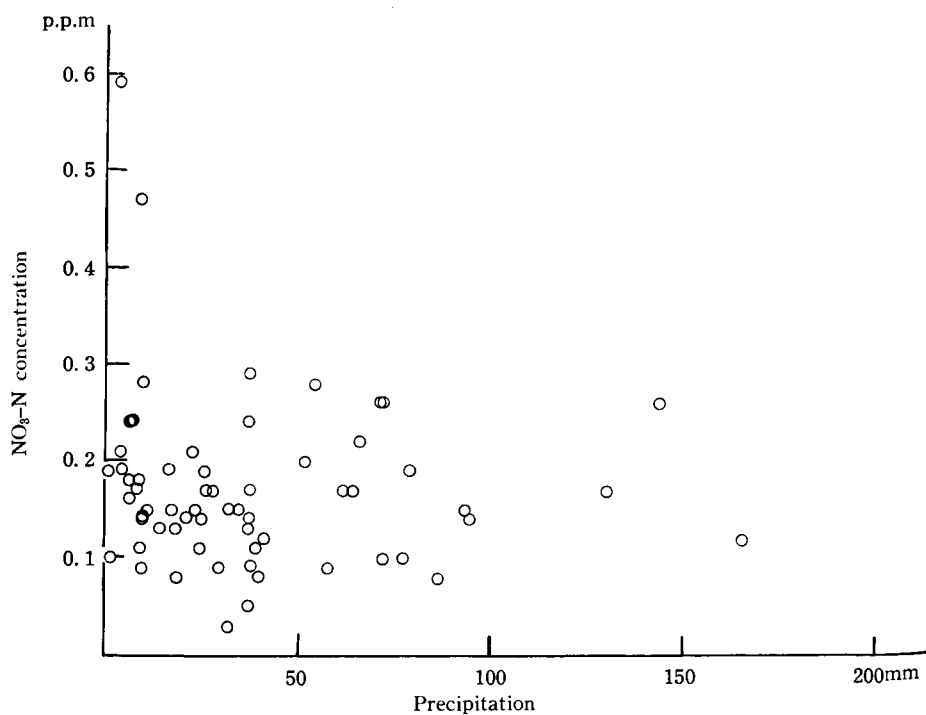
本分析結果では、雨水の養分濃度は同程度の雨量でもかなり大巾に変わり、雨量と養分濃度との間に一定したきれいな関係が成立するという傾向は見出しにくい。しかし各雨量における養分濃度の最大値に着目すると、やはり雨量が増すにつれて各雨量に対する最高濃度はだんだんに小さくなる傾向が見られた。そしてこの傾向は養分によってその度合に違いがある。雨量が増すほどに最高濃度が小さくなるという傾向がもっともはっきりしていたのはNH₃-NとPであり、 x 軸に雨量、 y 軸に濃度をとってプロットして見ると、ある雨量に対する最高濃度の点を結ぶ線は充分ではないが $xy=K$ なる双曲線で近似できるように思われる。第1図はNH₃-Nについてこのことを示したものである。ここに記入されている曲線は $xy=18$ という双曲線である。これに対して第2図に示したように、NO₃-Nは雨量が増えても最高濃度があまり小さくならない傾向をもち、雨量と濃度との関係が、PやNH₃-Nのそれに比べ、少ないように考えられる。他の3つの養分、すなわちK・Ca・Mgはこの両者の中間の傾向を示した。

1回の降雨の雨量と養分濃度との関係は上にのべたように、1回の降雨ごとに異なる一方、物質の性質によっても違うように思われる。このように物質の性質によって雨量とその濃度との関係が違うことにはいくつかの要因が関係しているのであろうが、その一つとして養分がどこからどのようにして雨滴の中へ取りこまれるかという問題がかなり重要な意味をもっているように思われる。もしもある養分の空中への供給量に一定の限度があり、一たん雨滴によって空中から除かれると容易に補給されないならば、一回の降雨のその養分の濃度はそのときの雨量の増加に応じて減少し、理想的な条件の下では雨量と濃度との積が一定となる筈である。これに対して、ある養分の空中への供給量に限りなく、雨滴によって空中から除かれても直ちに補給されるならば、一回の降雨のその養分の濃度は



第1図 林外雨の雨量と $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度との関係

Fig. 1 $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration and precipitation diagram at open plot.



第2図 林外雨の雨量と $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度との関係

Fig. 2 $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration and precipitation diagram at open plot.

そのときの雨量の多少とは関係がなく、理想的な条件の下では雨量の多少に無関係に濃度が一定であるという場合も考えられよう。

ここに分析した6つの養分のうち、前者にもっとも近い傾向を示したのは $\text{NH}_3\text{-N}$ と P であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は後者にもっとも近い傾向を示したといえるであろう。元素としては同じ「窒素」でありながら、 $\text{NH}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ とがこのような両極端ともいえる傾向を示したのは興味深い。ここでこの両者の起源について考えて見ると、 $\text{NH}_3\text{-N}$ はいろいろな点から見て地上の有機物の分解に主な源があると思われるのに対し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は低空にも高空にも一様に存在しており、空中にも源があることは確かであらう。このように両者の起源に違いがあることを考えると、さきに述べた空中への補給されやすさも両者の間に差があることが予想される。そしてこのことが $\text{NH}_3\text{-N}$ は雨量に無関係に養分降下量一定、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は雨量の増加とともに養分降下量漸増という傾向を示したこととかなり関係をもっているのではないかと考えられる。

しかしながら $\text{NH}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ とがこのように両極端ともいえる傾向を示すということは、一般にどこでも成立つことではないようである。¹³⁾ERIKSSON は世界中いろいろな場所について月単位の雨量とこれに含まれる窒素量との関係をしらべ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は $\text{NH}_3\text{-N}$ ほど季節の変動がなく、雨水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ の量は雨量の変化とよく一致するといっている。これに対して ¹²⁾ÅNGSTROM and HÖGBERG は Sweden での測定結果から、毎回の降雨を 2 mm おきの雨量階級別にまとめて 1 回の雨量と濃度との関係をしらべ、 $\text{NH}_3\text{-N}$ も $\text{NO}_3\text{-N}$ も雨が降り続くほどに濃度はだんだんにうすくなる¹⁴⁾といっている。また LARSEN and HETTICK が Illinois 州であつめた 1 回の降雨ごとの分析値を使って筆者らが雨量と濃度との関係をしらべたところでは、 $\text{NH}_3\text{-N}$ も $\text{NO}_3\text{-N}$ もともに雨量の増加するに従って濃度が低下し、その程度にもはっきりした差は見られなかった。

このように雨量と濃度との関係は、 $\text{NH}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ との二つだけをとって見てもところによってまちまちであり、一般的な傾向を求めるにはまだ検討の余地があると考えられる。

林外雨を集めるためのプロットは気象観測のための露場を利用したことはさきにのべた。したがってここには気象観測用の雨量計が設けられており、1 回の降雨ごとに雨量を直ちに知ることができ、そこで分析で求められた各養分の濃度と気象観測の結果得られた雨量とから 1 回の降雨ごとに地表に降ってくる養分量を求めた。そしてこれらの値を 1 年間にわたって積算すると第 2 表に示すような値が得られた。

第 2 表 1 年間に無林地に降る雨の含む養分量 (kg/ha)
Tab. 2 Annual nutrient amount brought by open plot rain. (kg/ha)

	雨 量 Precipitation mm	K	Ca	Mg	P	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_3\text{-N}$
Jun. 1961~May. 1962	1778.8	2.41	10.76	3.18	0.38	2.30	4.42
Jun. 1962~May. 1963	1693.2	3.19	9.93	1.12	0.73	2.31	3.80
平 均 Av.	1736.0	2.80	10.35	2.15	0.56	2.31	4.11

この表によると、雨水に含まれている養分の量は、たとえ毎回の降雨については少ないものであっても、1 年間について積算すると森林生態系の物質循環において無視できないほどの量になるのではないと思われる。たとえば ¹⁵⁾OVINGTON の推定によれば、あるヨーロッパアカマツ林が 1 年間の生長に必要とする養分量は、30 年生以後には平均して K—33, Ca—41, Mg—7, P—7, N—78 kg/ha 程度になるという。これらの値を第 2 表の値と比較すると K—8, Ca—25, Mg—31, P—8, N—8% 程度になる。

またこのヨーロッパアカマツ林を植栽後 55 年で伐採すると仮定すると、伐採の際に幹に含まれて

持ち出されて森林生態系から失われる養分量は、K—144, Ca—332, Mg—70, P—21, N—249 kg/ha 程度であるという。ところがこれに対して、55年間に雨水に含まれて森林生態系へ供給される養分量は、第2表に示した平均値だけの量が毎年降ると仮定すると、K—154, Ca—569, Mg—118, P—38, N—353 kg/ha におよぶ。これらの値はさきに示した55年生のヨーロッパアカマツ林の幹が含んでいる養分量に匹敵するものであるといえよう。

このように考えると、雨水の含んでいる養分は森林生態系にとっては意外に大きな意味をもっているようである。そして森林生態系における無機養分の循環は、これまでに考えられていたほど閉鎖的なものではなく、かなり開放性の強いものと考えられよう。

(2) 林内雨の含む養分について

一般に林内雨は林外雨より濃度が高かった(第1表)。Kはヒノキ林で0.5~3.0 ppm, 広葉樹林で1.0~6.0 ppm 程度の濃度を示すことが多く、これに対し林外雨では0.05~0.4 ppm の間に主に集中し林内雨が林外雨より濃度が高いという傾向がもっともいちぢるしい。そして濃度の順位はつねに、無林地<ヒノキ林地<広葉樹林地であった。Caはヒノキ林・広葉樹林とも1.0~2.5 ppm 程度で、樹種の違いによる濃度の違いは明らかではなかった。Mgはヒノキ林で0.2~1.0 ppm, 広葉樹林で0.2~2.0 ppm 程度であり、広葉樹林の方が多少濃度が高い場合が多かった。Pはヒノキ林では0.001~0.005 ppm, 広葉樹林では0.002~0.02 ppm 程度であったのに対し林外雨では0.005~0.08 ppm に主に集中し、どちらも他の養分と逆に林内雨の方が林外雨より濃度が小さい場合が多いことが判る。林内雨<林外雨となったり、林内雨>林外雨となったりする原因は未だ判らない。なお、Pは1962年11月以降の値のみを示した。NO₃-Nはヒノキ林・広葉樹林とも0.2~0.4 ppm 程度であったのに対し、林外雨では0.08~0.2 ppm 程度で、林内雨が林外雨より濃度が高いという傾向はあまり明瞭でなかった。NH₃-Nはヒノキ林で0.2~1.0 ppm, 広葉樹林で0.4~1.0 ppm 程度であった。概して、ヒノキ林<広葉樹林という場合が多いが、逆になる場合も稀ではなく、とくにはっきりした傾向は見られないといってよからう。

林内雨の含む養分を分析したデータはあまり多くない。INGHAM¹⁾は南アフリカ Natal の海岸で林外林内の雨の含む養分量を1年間にわたって測定し、各養分濃度の平均値は、林外雨においてK—1.6, Ca—6.2, P—0.074, NO₃-N—0.10, NH₃-N—0.86 ppm, 林内雨においてK—14.6, Ca—22.0, P—0.436, NO₃-N—0.10, NH₃-N—2.6 ppm であったといっている。林外雨の濃度は本分析結果とくらべると高いが、それでも林内雨が林外雨よりも濃度が高いという傾向においては、NO₃-Nを除けば同様であるといえる。

OVINGTON²⁾らは南東イングランドのBedgeburyで、1955年5月から1957年4月までの2年間、林外林内の雨の含むNa・K・Ca・Mg・Pの濃度を測定した。その結果によると各養分濃度の最小値・最大値は、林外雨についてNa—(0.3, 8.2), K—(0.05, 3.5), Ca—(0.2, 9.8), Mg—(0.5>, 0.9), P—(0.05>, 0.5) ppm, 林内雨についてNa—(0.6, 110.1), K—(0.2, 42.8), Ca—(1.0, 128.8), Mg—(0.5>, 12.5), P—(0.05>, 1.0) ppm であり、どの養分についても林内雨は林外雨より濃度が高かったという。本分析結果とくらべると、林内雨のCaの最大値がきわめて高いことが注意される。他の値はほぼ同じ程度の大きさを示していると見てよいであろう。

NYE³⁾は南アフリカのKadeで1959年1月から12月までの1年間、林外林内の雨の含むK・Ca・Mg・P・NO₃-N・NH₃-Nの濃度を測定した。各養分の濃度をやはり最小値と最大値という形で引用すると、林外雨についてK—(0.5, 2.3), Ca—(0.2, 3.8), Mg—(0.2, 1.2), P—(0.01, 0.04), NO₃-N—(0.0, 0.5), NH₃-N—(0.3, 1.9) ppm, 林内雨についてK—(10.0, 27.7), Ca—(1.6, 6.0), Mg—(1.1, 3.2), P—(0.17, 0.75), NO₃-N—(0.4, 1.9), NH₃-N—(0.6, 1.9) ppm であ

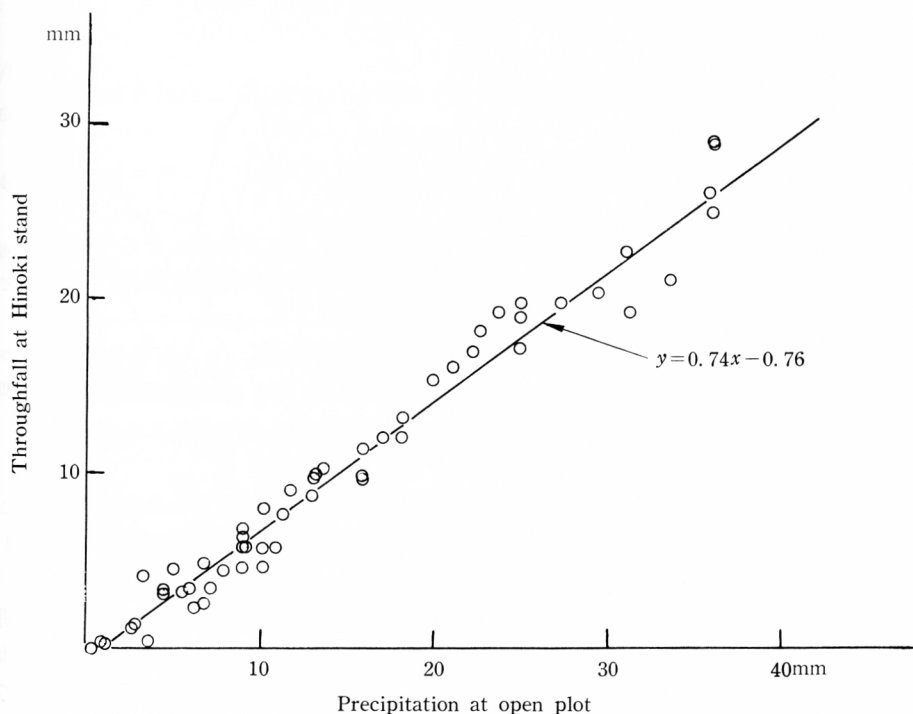
る。本分析結果とくらべると概して林内雨の最小値が大きく、林内雨のPの濃度がいちぢるしく高いが、その他はほぼ同じ程度の濃度を示し、またこの場合にも林内雨は林外雨より濃度が高かった。

TAMM はスウェーデンで林外林内の雨の含む Na・Ca を分析し、やはり林内雨の方が濃度が高かったといっている。

このように、林内雨の養分濃度は林外雨のそれよりも高くないのが普通であるように思われる。しかしその濃度の高かまり方は、養分によって違うばかりでなく、樹種によっても異なり、さらに季節的にも変化するなどさまざまな様相を呈する。ところがこの点について検討を加えるためには、林外林内の雨の濃度を直接に比較するのは適当でない。林内雨は一たん樹冠で遮られるために林外雨より量が少し減っており、しかもその減少量は毎回の降水量と関係しており、林外林内の雨の濃度差は降水量の多少によって影響されるからである。この点を避けるためには、林外林内の雨がもたらす単位面積あたりの養分量を計算して両者を比較すればよい。

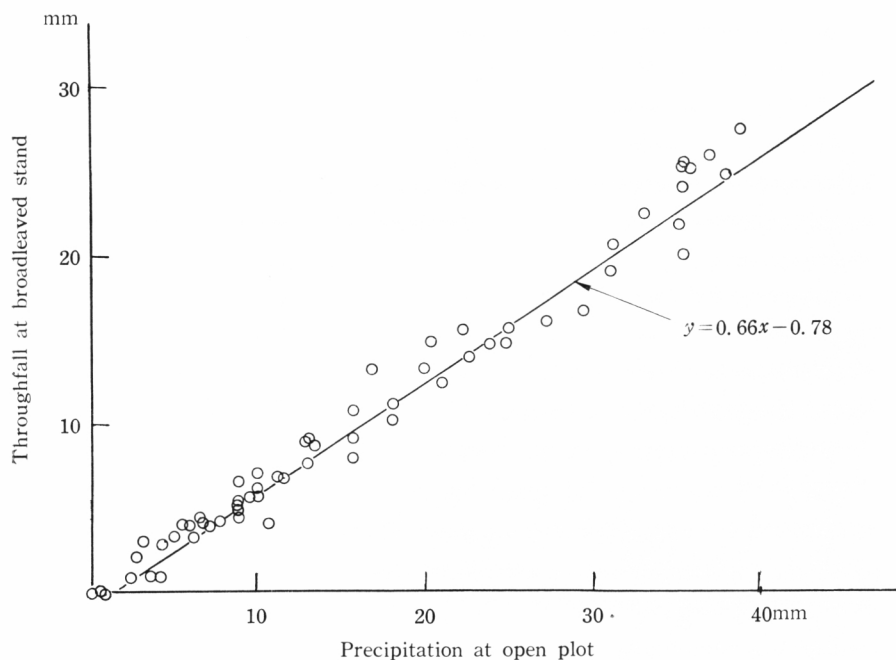
そのためにはまず林内雨量を求めなければならないが、一般に林外雨と林内雨との量の間には $y = Ax - B$ という1次の直線関係が成り立つことが多いようである。このことは ROWE¹⁶⁾; JOHNSON¹⁷⁾; NIEDERHOF and WILM¹⁷⁾らが述べたことから推察され、また藤井¹⁹⁾のヒノキ林についてのデータもこのことを示しているばかりでなく、LEONARD⁶⁾はブナ・カエデの混交林で両者の間に1次の直線式を求めている。

本測定結果について林外雨と林内雨の間の量的な関係をしらべ第3図を得た。図に明らかなように、両者の間には1回の降雨量が40 mm までの範囲内で1次の直線関係があることが明らかで、最小2乗法により両者の関係式を求めると、



第3図の1 林外雨量とヒノキ林内雨量の関係

Fig. 3-1 Relationship between precipitation at open plot and throughfall at Hinoki stand.



第3図の2 林外雨量と広葉樹林内雨量の関係

Fig. 3-2 Relationship between precipitation at open plot and throughfall at broad leaved stand.

ヒノキ林 $y_N = 0.74x - 0.76$

広葉樹林 $y_D = 0.66x - 0.78$

x : 林外雨量

y_N : ヒノキ林内雨量

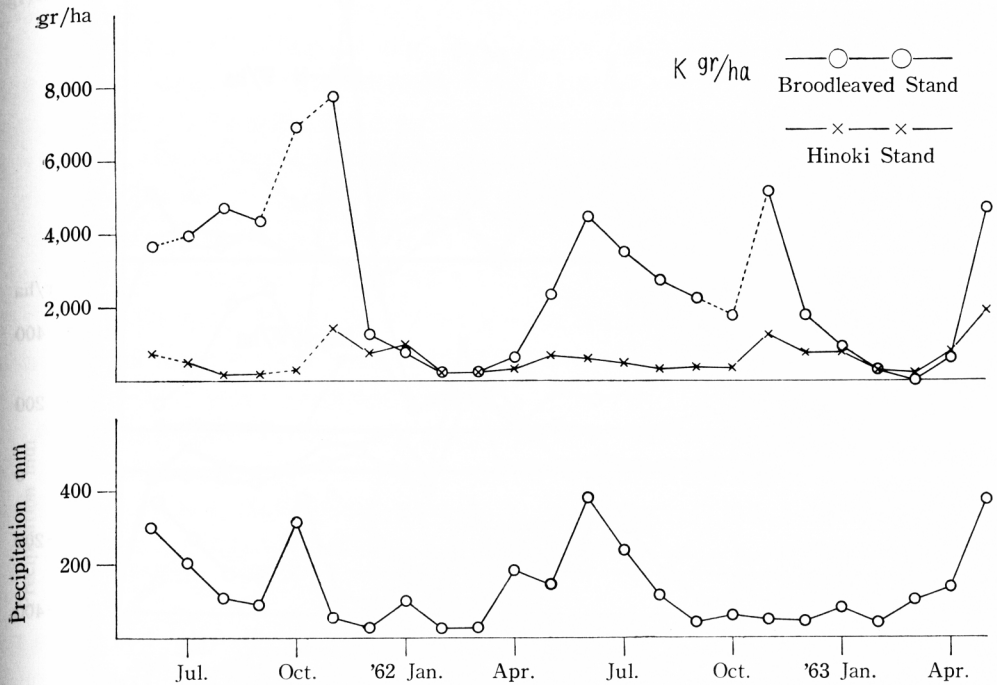
y_D : 広葉樹林内雨量

単位は mm

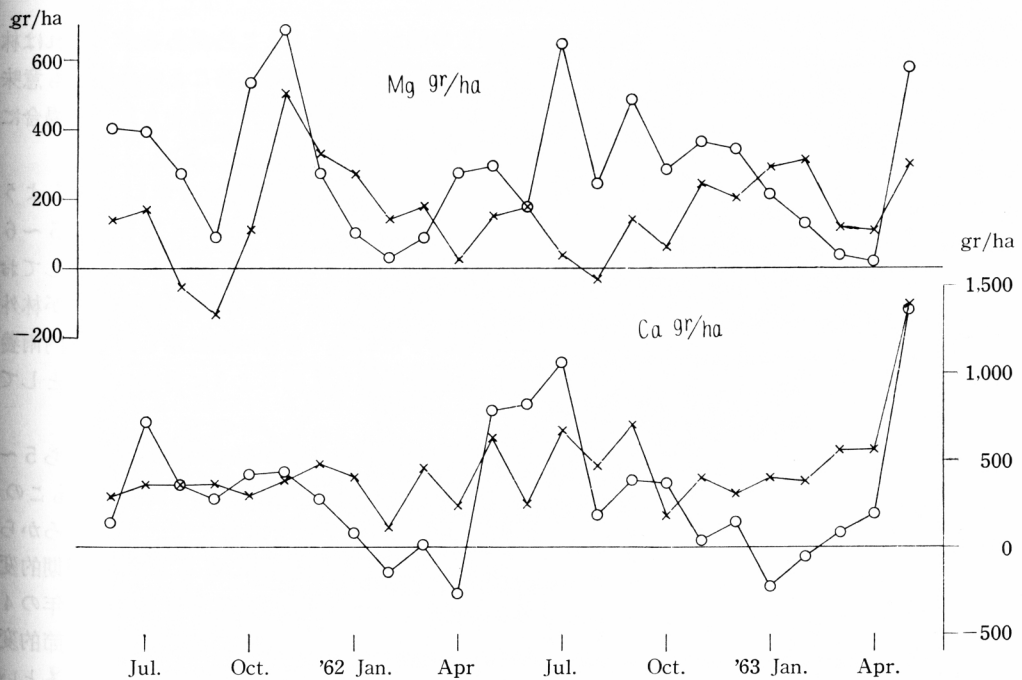
のようになった。第3図に記入してある直線はこの2つの式のグラフである。そこで今後は、無林地のプロットでの林外雨量の実測値とここで求めた関係式とを用いて林内雨量を計算し、議論を進めることにする。

なおわが国で測定された例によると、 y は x に対して、スギ林79%、ヒノキ林74%、アカマツ林91%、広葉樹林83%で、林内雨量は一般に針葉樹林の方が小さいという。本測定結果では、ヒノキ林はほぼこれと一致した値を示しているが、広葉樹林はかなり小さい値であることがわかる。しかし現在のところこの点については検討をしていない。

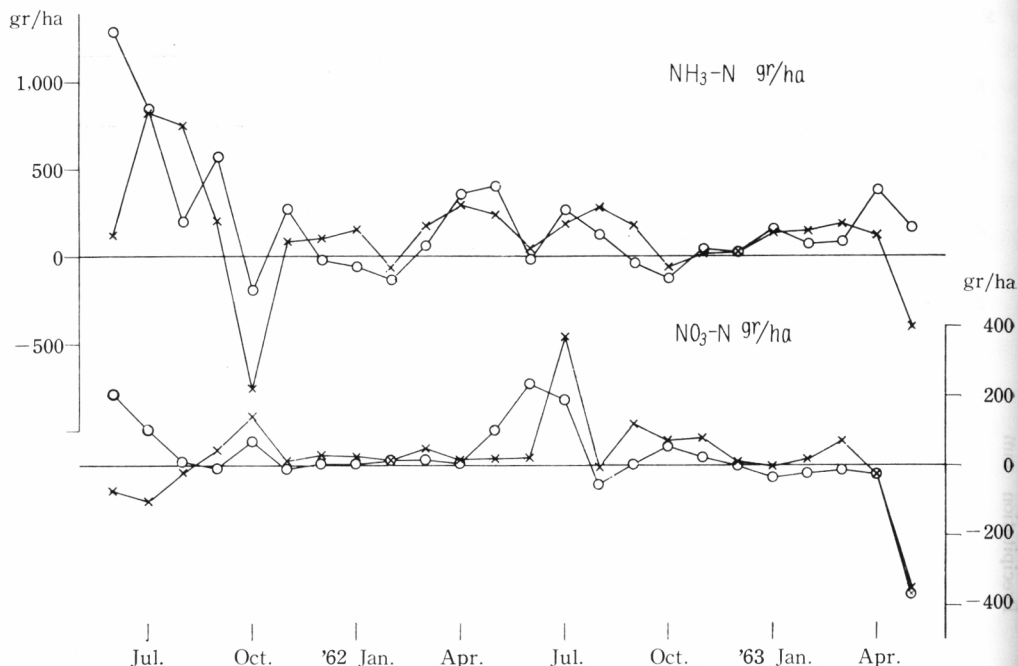
単位面積に降る森林内外の雨の含む養分量を計算し、この両者を比較するために差を求めた。全体の傾向を概観するためにそれらの値を月ごとにまとめ、月別の変化として図示したものが第4図である。Ca・Mg・NO₃-N・NH₃-Nの5種類の養分がそれぞれにさまざまな変化をしているが、とくにKに注目すると、ヒノキ林・広葉樹林とも11月と5～6月とに大小2つのピークのある周期的変化をしているのが認められる。Mgもまた、Kにくらべると不明瞭ではあるが、やはりヒノキ林・広葉樹林とも11月にピークが現われるようである。このように、KとMgとは2年くりかえしてほぼ同じところにピークが見られるので、この両者はともに季節的な変化をもち、その傾向がよく似ていると考えてよからう。これに対してCa・NO₃-N・NH₃-Nは、ヒノキ林・広葉樹林ともに、いくつかのピークが見られはするが2年間を通じて、同じような月別の変化が繰り返えられるという傾向は認め



第4図の1 林内雨養分量と林外雨養分量の差の月別変化
 Fig. 4-1 Monthly shift of the difference of nutrient amount contents
 between throughfall and open plot rainwater.



第4図の2 林内雨養分量と林外雨養分量の差の月別変化
 Fig. 4-2 Monthly shift of the difference of nutrient amount contents
 between throughfall and open plot rainwater.



第4図の3 林内雨養分量と林外雨養分量の差の月別変化

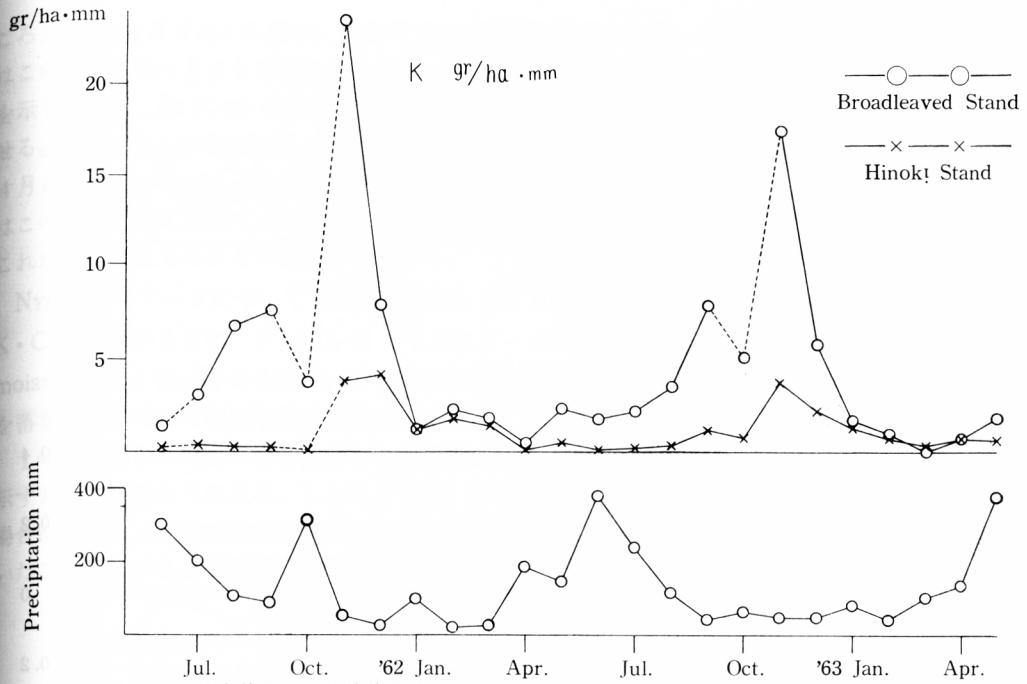
Fig. 4-3 Monthly shift of the difference of nutrient amount contents between throughfall and open plot rainwater.

られず、この3者は季節的变化をしているとは考えにくい。

なおとところどころに（林内雨養分量－林外雨養分量）の値が負になるところがあるが、これは林地に降る雨が樹冠を通り抜けるときに含んでいる養分を吸着あるいは吸収されることを必ずしも意味しない。というのは、ここでは樹幹流の含む養分量が全く考慮されておらず、これをも加えた場合に林内に降る養分がどれだけの量になるかは判っていないからである。

林内雨が林外雨よりも余計に含む養分量は、KとMgについて季節的变化を示しているように見えることをさきに述べたが、Kの場合に現われている二つのピークをさらによく見ると、5～6月のピークは雨量のピークと対応しているのに対して、11月のピークは雨量のピークに対応しておらず、この両者は少し性質のちがうものであることがわかる。そこで林内雨の養分濃度が林外雨のそれよりも高かまる度合を雨量の外少に無関係にあらわすために、さきの図に示した（林内雨養分量－林外雨養分量）という値をその月々の雨量で割った値を計算し、同じように月別の変化として図示してみた（第5図）。

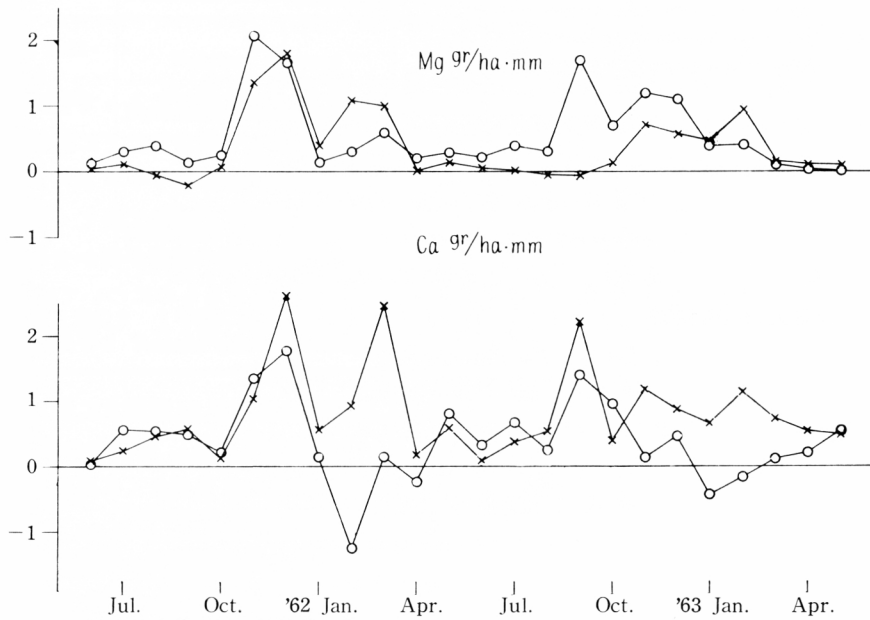
なおこの値は濃度と同じ元をもっている。このようにあらわすと、Kの二つのピークのうち5～6月のものはほとんど認められなくなり、11月のもののみがきわだって現われてきた。しかもこの11月のピークは、11月のみとその前後の月に関係なく高い値を示すのではなくて、7月ごろから次第に上りはじめ、11月にピークに達してのち次第に下って3～4月に最低になるという周期的変化をしていることが推察された。Mgの方はこれよりやや不明瞭であるが、やはり9月から翌年の4月にかけて値が高くなり、11～12月ごろにピークが現われる傾向が認められ、この両者は季節的变化とみなすことができよう。これに対してCa・NO₃-N・NH₃-Nは、ある月にピークが現われるという傾向がなく、またヒノキ林と広葉樹林とが互いにほとんど無関係に上り下りしており、これら三つはいずれも季節的变化とは認めがたい。



第5図の1 林内養分量-林外養分量の月別変化
林外雨量

Fig. 5-1 Monthly shift of E.V.R. (Excess Value Ratio). E.V.R. is calculated by $\frac{A-B}{C}$

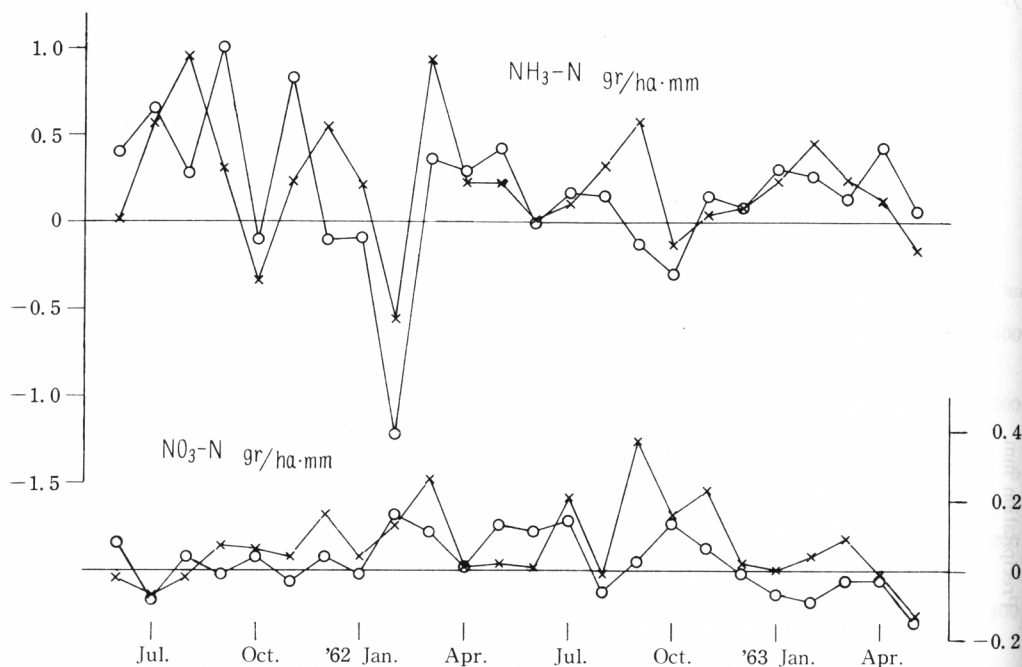
A : Nutrient amount contents in throughfall
B : Nutrient amount contents in open plot rainwater
C : Precipitation at open plot



第5図の2 林内養分量-林外養分量の月別変化
林外雨量

Fig. 5-2 Monthly shift of E.V.R. (Excess Value Ratio). E.V.R. is calculated by $\frac{A-B}{C}$

A : Nutrient amount contents in throughfall,
B : Nutrient amount contents in open plot rainwater.
C : Precipitation at open plot



第5図の3 林内養分量－林外養分量
林外雨量

Fig. 5-3 Monthly shift of E. V. R. (Excess Value Ratio). E. V. R. is calculated by $\frac{A-B}{C}$

A : Nutrient amount contents in throughfall.

B : Nutrient amount contents in open plot rainwater.

C : Precipitation at open plot

林内雨が林外雨よりも余計に含む養分量の月別の変化が、このように養分によってちがった型の変化を示すのは、一つには林内雨の濃度の高かまりの原因が養分によって異なることに関係があると思われる。林内雨の濃度の高かまりの原因としては、樹冠が吸着しているほこりやエアロゾルが雨水に洗い流されるという考えと、樹冠の組織の中に含まれている養分が雨水に溶けて出てくるといふ考えとがある。現在のところでは、どの養分がどちらの原因によって林内雨の濃度が高かまるのかを断定することはできないが、さきの K と Mg のように落葉期に濃度が高まるものについては、葉の組織がこわれるにつれて、葉の中に含まれていた K・Mg が水に溶けやすい形となって雨水に溶け出し、と考えるとよいのではなかろうか。

植物体内の K は一般に溶脱をうけやすい物質であり、広葉樹の落葉を 24 時間水に浸しておいたところ含んでいた K の全量のうちの約 80% が溶出したという報告さえある²⁵⁾。落葉中の K がこのように溶脱をうけやすいものであるとすれば、林内雨の K の濃度の高かまりがとくに落葉期の葉からの溶脱と密接に関係しているとする推定はさほど無理ではないと思われる。

Mg についても林内雨の濃度の高かまり方の季節的な変化は K とほぼ同様で、落葉期における葉からの溶脱が重要な関係をもつもののように思われる。しかし Mg については、葉から溶脱されるという傾向が K の場合ほど顕著でなく、濃度の高かまりの原因については今後なお検討する必要がある。

さきに示した Ovington らによるデータを同様に処理して $\frac{\text{林内雨養分量} - \text{林外雨養分量}}{\text{林外雨量}}$ という値の月別の変化を見ると、K は落葉樹林 (deciduous) の林内雨が我々の得た結果と同様に 6~7 月

ごろと 11~12 月ごろとに高い値を示すのが明瞭に認められる。常緑樹林 (evergreen) の林内雨ではこの傾向ははっきりとは認められない。Ca は落葉樹林の林内雨が 11~12 月ごろとくに高い値を示しており、Ca についても林内雨の濃度の高まりが葉からの溶脱と関係していることをうかがわせる。これは我々の得た結果と異なるものであり、さらに検討の必要があると思われる。なお 2 年目の 4 月ごろに K・Ca のいずれもが常緑樹林・落葉樹林ともに異常に高い値を示している。OVINGTON はこのことに全く触れていないが、1 年目の 4 月ごろには全くそのような傾向がないことから見て、これが季節的なものかどうかは不明である。

NYE によるデータについても同様な処理をしたところ、 $\frac{\text{林内雨養分量} - \text{林外雨養分量}}{\text{林外雨量}}$ なる値は K・Ca・Mg が 8 月に、P・NO₃-N が 2 月にピークに達するのが認められた。しかしこのデータは moist tropical forest のもので、ここでは落葉が 1 年中おこっている³⁾ので、林内雨の濃度の高まりを落葉と結びついて説明するのは無理がともなう。

1 年間に降る林内雨が含む養分の合計量およびこれと林外雨が含む養分の合計量との差を樹種別に示すと第 3 表のようになる。これによると、森林内外の雨水の含む養分量の差がもっとも小さい N の場合にも、ヒノキ林では林外雨の含む量の約 25%，広葉樹林では約 40% が余計に林内雨に含まれていたことがわかる。森林内外の差がもっとも大きい K の場合には、ヒノキ林で林外雨の含む量の約

第 3 表の 1 1 年間にヒノキ林内に降る雨の含む養分量 (kg/ha)

Tab. 3-1 Annual nutrient amount in through fall of Hinoki stand. (kg/ha)

		K	Ca	Mg	NO ₃ -N	NH ₃ -N
Jun. 1961	量 Nutrient Amount	9.63	15.29	5.04	2.47	6.50
May. 1962	林外雨との差 Differance from open plot	7.22	4.53	1.86	0.17	2.08
Jun. 1962	量 Nutrient Amount	1.81	16.21	3.09	2.67	4.70
May. 1963	林外雨との差 Differance from open plot	8.62	6.28	1.97	0.36	0.90
平 均 Av.	量 Nutrient Amount	10.72	15.80	4.07	2.57	5.60
	林外雨との差 Differance from open plot	7.92	5.41	1.92	0.27	1.49

第 3 表の 2 1 年間に広葉樹林内に降る雨の含む養分量 (kg/ha)

Tab. 3-2 Annual nutrient amount in through fall of broad leaved stand. (kg/ha)

		K	Ca	Mg	NO ₃ -N	NH ₃ -N
Jun. 1961	量 Nutrient Amount	40.52	14.03	6.60	2.62	8.00
May. 1962	林外雨との差 Differance from open plot	38.11	3.27	3.42	0.32	3.58
Jun. 1962	量 Nutrient Amount	31.67	14.33	5.07	2.28	5.00
May. 1963	林外雨との差 Differance from open plot	28.48	4.40	3.95	-0.03	1.20
平 均 Av.	量 Nutrient Amount	36.10	14.18	5.84	2.45	6.50
	林外雨との差 Differance from open plot	33.30	3.84	3.69	0.15	2.39

250%, 広葉樹林では約1200%もが余計に林内雨に含まれていた。

林内雨の濃度の高かまりの原因に二つの考え方があることはさきにのべた。ここでエアロゾルの吸着であるという考え方をとると、森林はこれだけの養分を空中からとり込んでいることになり、葉からの溶脱であるという説によれば、これだけの養分を樹葉から土壌へと返していることになる。いずれにしてもこれだけの養分が森林生態系の中で動いているということは、物質循環という観点から見てきわめて重要なことであると思われる。

引用文献

- 1) INGHAM, G.: J. Agr. Sci., Vol. 40, p. 55~61. (1950)
- 2) MADGWICK, H. A. I., and OVINGTON, J. D.: Forestry, Vol. 32, p. 14~22. (1959)
- 3) NYE, P. H.: Plant and Soil, Vol. 13, (4), p. 333~346. (1961)
- 4) 堤利夫ほか: 日林関西支講, No. 11, p. 16. (1961)
- 5) 堤利夫ほか: 日林講, No. 72, p. 175~177. (1962)
- 6) LEONARD, R. E.: Station Paper No. 159, Northeastern Forest Experiment Station. (1961)
- 7) TAMM, C. O.: Medd. Statens Skogsforskningsinst. Vol. 43, (1), p. 140, (1953) (cited from [22])
- 8) MILLER, N. H. J.: J. Agr. Sci., 1, p. 280~303. (1902) (三宅泰雄:「降水の化学」, 1955, 地人書館, 東京, p. 67による)
- 9) 菅原健 (三宅泰雄, 「降水の化学」, 1955, 地人書館, 東京, p. 67 による)
- 10) 松尾禎士 (三宅泰雄, 「降水の化学」, 1955, 地人書館, 東京, p. 67~68 による)
- 11) MIYAKE, T., and SUGIURA, Y.: Pap. Met. Geophys., 1, p. 222~226. (1950) 三宅泰雄, 「降水の化学」, 1955, 地人書館, 東京, p. 68 による)
- 12) ÅNGSTRÖM, A., and HÖGBERG, L.: Tellus, Vol. 4, (1), p. 31~42. (1952)
- 13) ERIKSSON, E.: Tellus, Vol. 4, (3), p. 215~232. (1952)
- 14) LARSEN, T. E., and HETTICK, I.: Tellus, Vol. 8, (2), p. 191~201. (1956)
- 15) OVINGTON, J. D.: Ann. Bot. N. S., Vol. 23, (9), p. 229~239. (1959)
- 16) ROWE, P. B.: Trans. Am. Geophys. Union, Part I, p. 90~100. (1941) (cited from KITTREDGE, J.: "Forest Influences" 1948, Mc Graw Hill, New York. p. 103)
- 17) JOHNSON, W. M.: Trans. Am. Geophys. Union, Part II, pp. 566~569. (1942) (cited from KITSREDGE, J.: "Forest Influences" 1948, Mc Graw Hill, New York. P. 103)
- 18) NIEDERHOF, C. H., and WILM, H. G.: J. Forestry, Vol. 41, p. 57~61. (1943) (cited from KITTREDGE, J.: "Forest Influences" 1948, Mc Graw Hill, New York. p. 103)
- 19) 藤井真一: 日林誌, Vol. 41, (7), p. 262~269. (1959)
- 20) 川口武雄: 森林気象学, p. 66~69, 地球出版, 東京, (1956)
- 21) TAMM, C. O.: Phys. Plant, Vol. 4, p. 184~188. (1951) (cited from [2])
- 22) TAMM, C. O., and TROEDSSON, T.: Oikos, Vol. 6, p. 61~70. (1955) (cited from [2])
- 23) ERIKSSON, E.: Tellus, Vol. 7, (2), p. 243~250. (1955)
- 24) MES, M. G.: S. Afr. Jour. Sci., 1, p. 167~172. (1954) (cited from [2])
- 25) NYKVIST, N.: Oikos, Vol. 10 (2), p. 190~211. (1959)

Résumé

1) Rainwater was collected in two forest stands and in an open plot as well, for two years since June 1961, at Kamigamo Experimental Forest Station of Kyoto Univ., in Kyoto. Plant nutrient fractions of K, Ca, Mg, P, $\text{NO}_3\text{-N}$, and $\text{NH}_3\text{-N}$ of the samples were analysed and studied.

2) Different plant nutrient contents were examined from different plots and storms. Rainwater collected from under forest canopies in most cases contained more plant nutrients than that from open plot.

3) Uppermost values of the plant nutrient concentration were found to decrease with the increase of precipitation of a shower. The trends were particularly seen in cases of P and $\text{NH}_3\text{-N}$ fractions. But the concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ fraction was examined rather unchanged regardless of the increase of precipitation.

4) In an open plot, the annual fall of plant nutrients of K, Ca, Mg, P, $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_3\text{-N}$ brought about by rainwater estimated at 2.8, 10.4, 2.2, 0.6, 2.3, and 4.1 kg/ha respectively.

Comparing with the nutrient amount that is necessary for forest plant growth, these figures are not able to be overlooked.

5) In the plots of Hinoki stand (*Chamaecyparis obtusa*), the annual fall of plant nutrients of K, Ca, Mg, and $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_3\text{-N}$ were estimated at 10.7, 15.8, 4.1, 2.6 and 5.6 kg/ha and in the plots of broad leaved mixed stand at 36.1, 14.2, 5.8, 2.5 and 6.5 kg/ha respectively.

6) Higher nutrient contents in the forest stands than those in an oplot would be caused by: 1) aerosol adsorption by forest canopies or 2) leaching of the nutrients from canopies.