

森林内外の降水中の養分量について (III)*

流亡水中の養分量について

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 (III)

On the Amount of Plant Nutrients Contained in Run-off Water

Goro IWATSUBO and Toshio TSUTSUMI

目 次

要 旨	140	2-2 地表流と地中流	
はじめに	141	2-2-1 地表流量	
1. 実験場所と実験方法	141	2-2-2 地表流・地中流の養分濃度	
1-1 林外雨・林内雨・樹幹流の測定		2-2-3 地表流・地中流に含まれる養分量	
1-2 地表流・地中流の測定		2-3 降水にともなう養分の森林での垂直的变化	
1-3 溪流流出量の測定		2-3-1 養分濃度の垂直的变化	
2. 結果と考察	142	2-3-2 養分量の垂直的变化	
2-1 溪流に含まれる養分について		引用文献	155
2-1-1 溪流の流出量		Résumé	155
2-1-2 溪流の養分濃度			
2-1-3 溪流に含まれる養分量			

要 旨

1 第1・2報において、林外降水・林内降水・樹幹流に含まれる養分濃度・量・その季節的变化・1年間合計量などを測定した結果を報告した。

2. 第3報は、林外降水・林内降水・樹幹流とともに、地表流・地中流・溪流流出水に含まれる養分濃度・量を測定し、(ただし、地中流は養分濃度のみ、溪流流出水に関するデータは広葉樹林についてのみ)、森林生態系における水溶性養分の動態を考察した結果の報告である。分析した養分は第1・2報と同じくカリウム・カルシウム・マグネシウム・リン・硝酸態チッ素・アンモニア態チッ素である。

3. 溪流流出水の養分濃度は林内降水+樹幹流の濃度に較べてひくく、かつ季節的な動きもすくなかった。溪流流出水に含まれる養分量も林内雨+樹幹流に較べてちいさかった。溪流の養分量を規制する最大の因子は林外降水量と一次の関係をもつ溪流流出量であった。溪流の養分量と林外降水量はほぼ一次の関係をもっていた。

4. 秋・冬期には降水量がすくない上に、溶脱を受けやすい新鮮な落葉があるので、地表流・地中流の濃度がたかくなる傾向があり、とくに広葉樹林地表流にこの傾向が著しかった。一般にカリウム・カルシウム・マグネシウムでは地中流の濃度が地表流よりたかいことが多く、リン・硝酸態チッ素・アンモニア態チッ素では、その逆のばあいがおおかった。

5. 林外雨から溪流にいたるまで、森林生態系の各部分を通過するときの降水の流水に含まれる各養分の年平均濃度値を求め、垂直的な変化を考察した。リンを除いて、各養分濃度は林床に達したときにはさうとうたかくなった。カリウム・カルシウム・マグネシウムは地表流・地中流とその濃度をたかめ、逆にリン・硝酸態一・アンモニア態一チッ素は濃度が低くなる傾向があった。地中流から溪流にいたるあいだに広葉樹林における各養分濃度はひじょうにちいさくなった。林外降水の濃度と溪流の濃度を比較すると、カリウム・カルシウム・マグネシウムでは、林外降水より溪流の濃度がたかく、逆に他の三養分では林外降水のほうがたかかった。

6. 森林生態系にとって収入である林外雨の養分量と、支出である溪流流出水の養分量を広葉樹林について比較すると、カリウム85%、カルシウム57%、マグネシウム180%、リン26%、硝酸態チッ素18%、アンモニア態チッ素8%で、マグネシウム以外は収入が支出よりおおきかった。

はじめに

第1・2報¹⁾²⁾において、筆者らは、裸地の降水（林外降水）・林内雨・樹幹流に含まれる養分濃度・量を測定し、その季節的变化・降水量との関係、1年間合計量などを求めた。

これより、森林生態系にとって外部からの収入である林外降水に含まれる養分量が、森林の生長にとって無視しえないほどの量にのぼり、また植物体から溶脱される養分を含む、林内雨・樹幹流の養分量は森林での物質循環において重要な意味をもっていることを指摘した。

林内雨・樹幹流として林床に達した降水は、蒸発散によりその量を減じつつ、地表流・地中流として流下し、最後に渓流水として森林生態系外に流出する。この渓流水に含まれる系外へ流出する養分量は森林にとって支出である。

本報告すなわち第3報においては、前述した林外雨・林内雨・樹幹流とともに、量水堰堤において溪流の流出水量とそれに含まれる養分濃度・量を測定した。さらに測定年度は異なるが、林内の地表及び地下10cmを流れる水の養分濃度を測定した結果を報告する。これらのデータより、水に含まれる養分量の森林各部における動態と森林生態系としての収支を推定しようとするものである。

本研究の実施にあたり、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、試験区の設置、試料の採取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。また同試験地内に設置された溪流の量水堰堤の水位記録ならびにその検量表の使用を快諾して下さった、京都大学農学部農業工学教室土地改良学及び農地造成学研究室のご厚意に深く感謝する。

1. 実験場所と実験方法

1.1 林外雨・林内雨・樹幹流の測定。

第1・2報におけると全く同じ、京都大学演習林上賀茂試験地の気象観測用露場と、ヒノキ林、常緑落葉混交広葉樹林において実験をおこなった。試料の採取・分析方法も、前報におけると同じである。

1.2 地表流・地中流の測定。

1辺50cm、深さ10cmの正六角形の合成樹脂製ワクを林床に埋め、その下端より合成樹脂製チューブで、地表を流下する水を受け、採取・分析した。このワクをヒノキ林に5コ、広葉樹林に3コ設

置した。

深さ 10cm 長さ 360cm の合成樹脂製角樋を、樋の中に礫をつめ、上縁が地下 10cm になるように埋めて、これに入る水を採取・分析した。これをヒノキ林・広葉樹林に各 2 コづつ設置した。試料は毎月 1~2 度採取し、ひと月毎にまとめて分析した。これらによって集められる水を、いわゆる地表流・地中流とみなすべきか否かについては問題があるが、これについては後述する。

1.3 溪流の流出量の測定。

量水堰堤の設置されている溪流は流域面積 4.39ha を有し、流路延長 250m 流域平均幅 136.5m、流域形状係数 0.42、流域平均山腹長 33m、流域平均勾配 28°30' の流域特性値をもつものである³⁾。流域の一部に各種のマツ類の植林があるが、大部分は、本実験に用いた常緑落葉混交広葉林におおわれている。母岩は秩生古生層に属する粘板岩である。

量水堰堤は刃形円形堰 (内径 10cm) および刃形短形堰 (越流幅 200cm) を複合した鉄製堰板よりできている。試料はこの堰堤より越流したものを 5 リットル、合成樹脂製ビンに採取し、分析した。試料を採取した間隔は毎日のばあいから、1 週間に 1 度のばあいまでである。流出量は、前述したように京都大学農学部農業工学教室より、実験期間の流出水位記録を借用して計算した。

分析した養分元素は第 1・第 2 報にのけると同じく、林外雨・林内雨・樹幹流・地表流・地中流・溪流流出水を通じて、カリウム・カルシウム・マグネシウム・リン・硝酸態一・アンモニア態一チ素であり、分析方法も同じである。

2. 結果と考察

2.1 溪流に含まれる養分について

2.1.1 溪流の流出量

溪流の水に含まれる養分濃度の分析は 1961 年 7 月より 1963 年 4 月まで行なった。しかしこの実験期間中、1 年間連続して流出量のデータが得られたのは、1962 年 5 月より翌年 4 月までの期間のみであるので、本報告ではこの期間の溪流水の養分濃度・量について報告する。なお溪流水の分析は行っていないが 1966 年 5 月から翌年 4 月までの各月の流出量を比較に用いた。Table 1。なお流出量は降水量との比較のため流出体積を流出面積で除し、mm

で表現した。

62 年 5 月から 63 年 4 月の年間降水量 1462.6mm は上賀茂試験地の平均年降水量 1666.2mm に較べ、そうとう、すくない。平均降水量より大であった 66 年 5 月から翌年 4 月に較べ、62 年 5 月~63 年 4 月の流出量はちいさく、また流出率もちいさい。しかし蒸発散による消失量は、62 年度、63 年度とも殆んど同量でむしろ 62 年度が大であった。もっとも乾燥した月でも土壌含有水量が零にならないと考えられるこの地域では⁴⁾、むしろ降水量がちいさい年のほうが晴天日数がおおく、蒸発散による消失量が

Table 1. Gross precipitation and stream discharge for watershed of the broadleaved forest

	1962 ~ 1963		1966 ~ 1967	
	Gross precipitation	Stream discharge	Gross precipitation	Stream discharge
May	148.3mm	83.6mm	218.2mm	113.9mm
Jun.	380.3	284.5	192.1	124.9
Jul.	239.3	184.2	267.8	198.9
Aug.	117.0	33.0	145.9	57.8
Sep.	43.9	9.5	211.6	146.1
Oct.	63.6	6.3	75.0	51.8
Nov.	48.7	4.0	70.9	26.7
Dec.	49.1	5.7	73.8	28.5
Jan.	83.1	13.9	97.9	51.1
Feb.	46.3	16.0	33.5	32.0
Mar.	104.2	31.9	157.8	110.1
Apr.	138.8	77.0	251.0	196.4
Total	1,462.6	749.6	1,795.5	1,138.2
	$P - D = 713.0\text{mm}$ $\frac{D}{P} \times 100 = 51.3\%$		$P - D = 657.3\text{mm}$ $\frac{D}{P} \times 100 = 63.4\%$	

おおきくなる可能性があると考えられる。この傾向は武田⁵⁾ Likens⁶⁾らの報告にも認められる。また四手井⁷⁾は夏半年の釜淵・高島両理水試験地のデータより、消失率は降水量の増加にともない、直線的に減少することを示している。

林外降水量と溪流流出量を各月ごとにまとめて、プロットしたものが Fig. 1である。この関係は一般に $y=x-\alpha$ を下限の漸近線とする指数関数によってあらわされるといわれるが⁸⁾、本実験ではバラッキがおおきいので、回帰式は求めなかった。養分量は養分濃度に、水位記録より計算した流出量を乗じて求めた。

2.1.2 溪流の養分濃度

1回の降雨にともなって溪流の流出量は時間的に変化していく。このような降雨にともなう流出量の変化に応じて養分濃度はどのように変わるであろうか。Fig. 2は降水量、流出量および濃度の時間的な変化の状態を数日にわたって図示したものである。1日30mmをこえるような林外降水量の際に

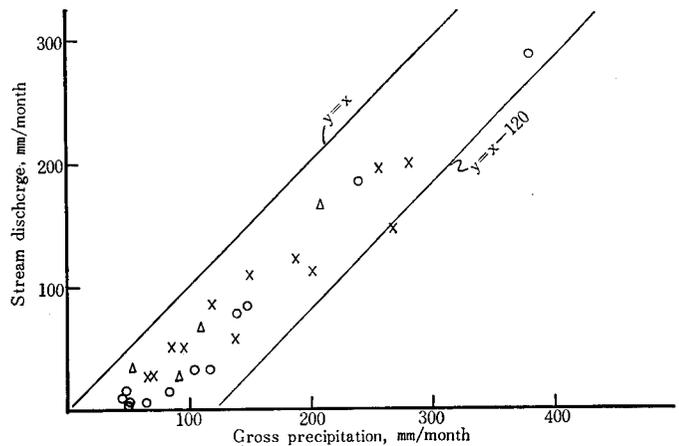


Fig. 1. Relationships between gross precipitation and stream discharge. × : May '66~Apr. '67, ○ : May '62~Apr. '63, Δ : Jul. '61~Dec. '61

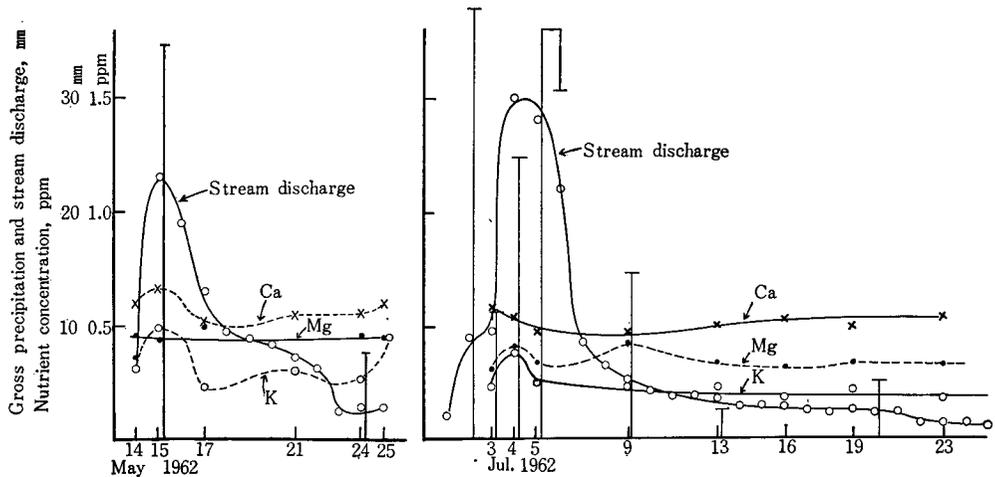


Fig. 2. Relationships among gross precipitation (vertical solid line), stream discharge and nutrient concentration.

は、溪流流出量も急増し、それともなう、林内雨・樹幹流などのばあいとは逆に、溪流流出水の濃度はややピークを示すようであった。Fig. 2. おおきいピークではないにしても、養分量は濃度に流出水に乗じたものであるから、養分量の変化にすれば、そうとう顕著なものとなるであろう。これは溪流流出水における養分の動きの特徴というべきで、地表流・地中流の急増にともなう、土壌中の溶脱が促進されるのが原因と考えられる。

ある数日間の降水量・流出量・濃度の変化を考察したが、つぎに範囲を拡げて、1年間のデータについて、1日あたりの溪流流出量 (mm/day) とその日の溪流水の養分濃度の1年を通じての関係を考察してみよう。Fig. 3. 各元素のとり濃度値の範囲は、カルシウムが全般にいちばんたかく、0.5~1.0ppm、

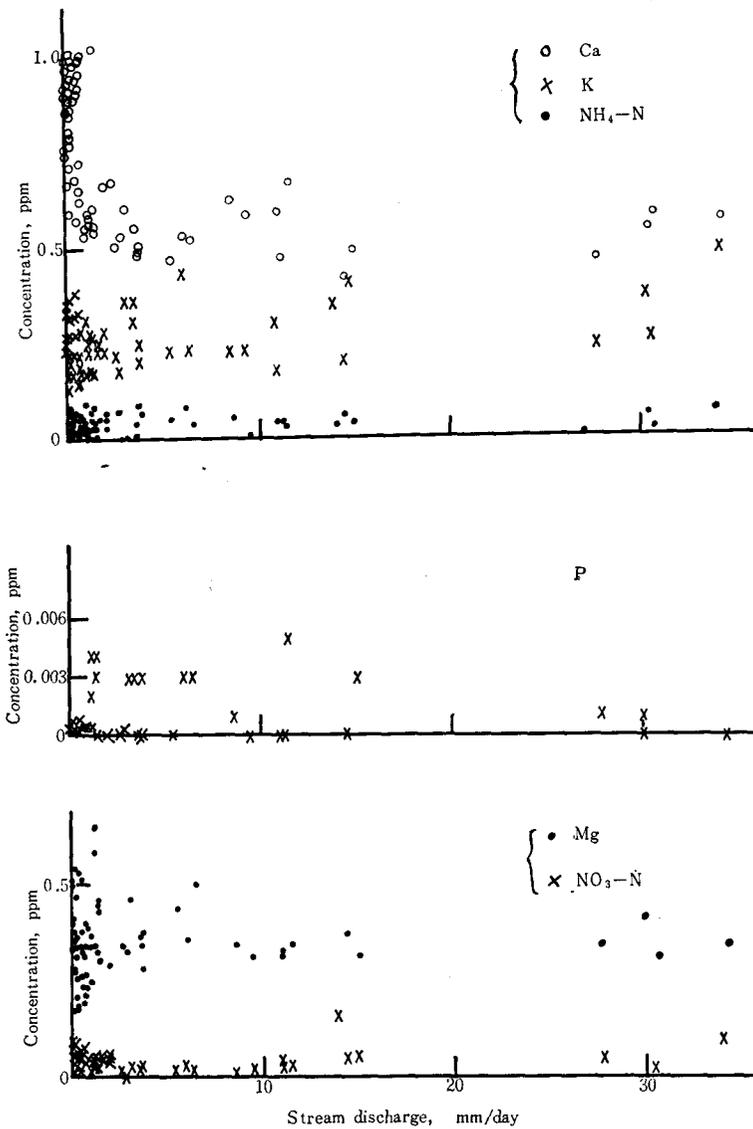


Fig. 3. Relationships between nutrient concentration and stream discharge.

に殆んど一定である。とくにカリウムのばあい、林内雨+樹幹流は11月の落葉期に突出したピークを示したが、渓流水はその影響を殆んど受けなかった。三者共通して濃度のひくい、リン・硝酸態一アンモニア態一チッ素のばあい、林外雨の養分濃度の動きが、林内雨+樹幹流の濃度とともにそうとおおきい。とくにリンのばあい、林外雨濃度の動きが林内雨+樹幹流の濃度の動きよりはるかにおおきい。このようなばあいでも、渓流水の濃度は1年を通じてひじょうに動きがすくなく安定であった。

これらのことから林内雨+樹幹流が林床に到達してのち、溪流にいたるまでの通路である森林土壌は、そこを通過する流水の養分に対してひじょうにおおきな、安定した緩衝剤・バッファとしての機能をもっているといえるであろう。

河川の水質、養分濃度は多くの地球化学者によって計測されている。しかし、これらは本実験に較べればはるかに下流のデータであって、耕地、工場などの人間の影響を多分にうけているだろう。たとえば松原⁹⁾の四国地方の河川での調査のデータと比較すると、カルシウム 0.7~3.9 (0.15~0.50)、

カリウム・マグネシウム 0.15~0.5ppm, リン0.000~0.004であった。このような1年間についての流出量と養分濃度の関係といった観点からみれば、前述したような日ごとの濃度変化の関係は殆んどめだたなくなってしまう。流出量のすくない冬期にカルシウムでややたかい濃度が現われただけで、全般的にみれば、渓流水の濃度値は、流出量と殆んど無関係に上記の範囲に現われたといえるだろう。

実験をおこなったヒノキ林はこの溪流の流域に含まれていないので、これを除外し、広葉樹林について溪流流出水の毎月の平均濃度変化を林外雨、林内雨+樹幹流の月平均濃度変化と比較してみよう。Fig. 4. この三者のうち、渓流水の濃度はその変化の差がもっともちいさく安定している。カリウム・カルシウム・マグネシウムでは、林内雨+樹幹流の濃度はかなり幅ひろい動きを示したが、林外雨と渓流水はそれと無関係

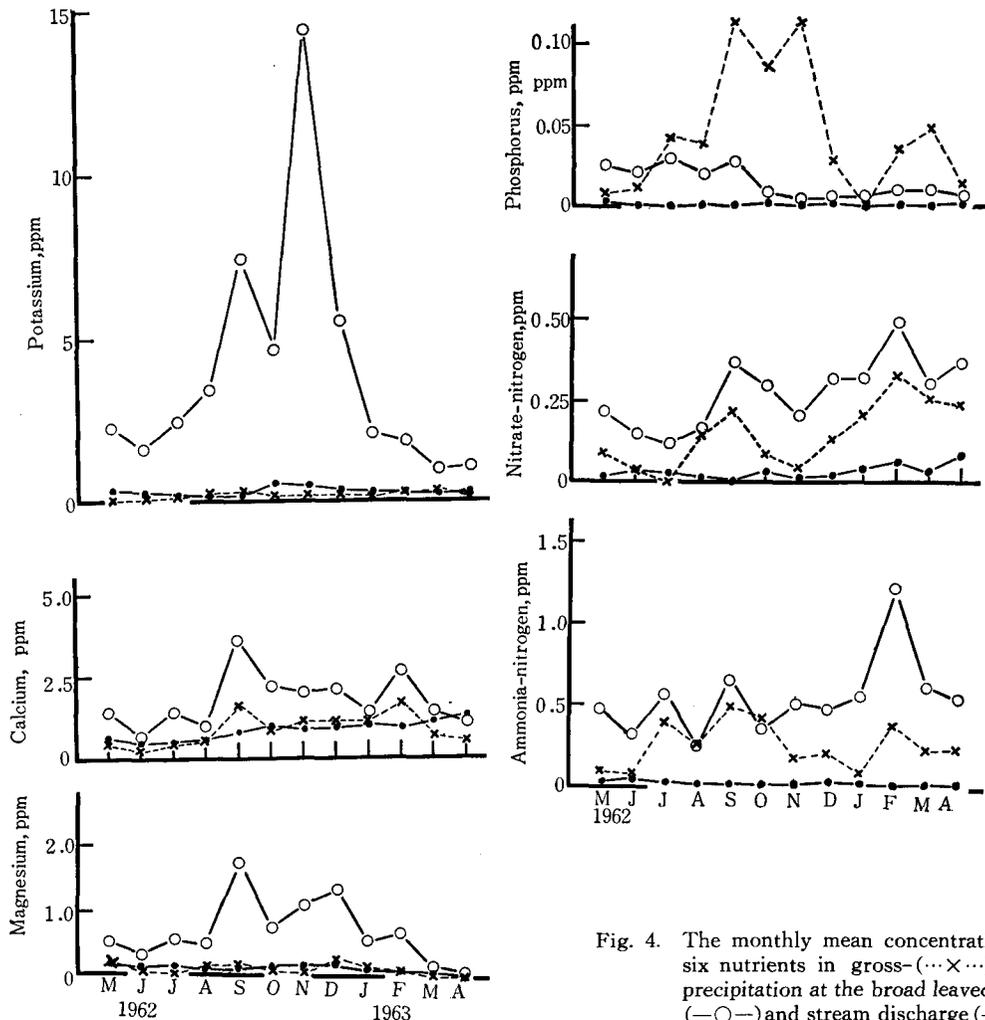


Fig. 4. The monthly mean concentrations of six nutrients in gross- $(\dots\times\dots)$, net-precipitation at the broad leaved forest $(\text{---}\circ\text{---})$ and stream discharge $(\text{---}\bullet\text{---})$.

アンモニア態一、硝酸態一チッ素 $0.00\sim 0.64$ ($0.000\sim 0.100$), リン $0.000\sim 0.003\text{ppm}$ ($0.000\sim 0.004$ ppm), である, ()内は本実験のデータ。カルシウム・マグネシウム・カリウム, とくにカルシウムは, 松原のデータは圧倒的にたかい値を示している。この問題について具体的な調査のデータはすくないが, 武藤¹⁰⁾は河川の塩分組成は上流に至るほど雨水の成分組成に近づき, その水源地附近では殆んど雨水そのものの成分組成であると述べている。したがって, 同じ河川の水質または養分量を測定するばあいでも, その対象とする系の範囲にしたがって, 養分などの収支は全く変わってくるであろう。

2.1.3 溪流に含まれる養分量

溪流の流出量に養分濃度を乗じて, 養分量を求めた。これをひと月ごとにまとめて, 同じ月の林外雨+樹幹流に含まれる養分量と比較しつつ季節変化を調べた。Fig. 5. 溪流の流出量は1年間合計のばあい, 林外降水量の約半分になる。したがって, 両者の養分濃度が同じであったとしても, 養分量にすると溪流水の養分量は林外雨の約半分になるはずである。

カリウムのばあい, 濃度におけると同じく林内雨+樹幹流の養分量が1年を通じて, 林外雨, 溪流の養分量より圧倒的におおきかった。また11月の落葉期には林内雨+樹幹流でおおきくたかまったのに対し, 林外雨, 溪流ではこのようなたかまりはみられなかった。カルシウム・マグネシウムのばあ

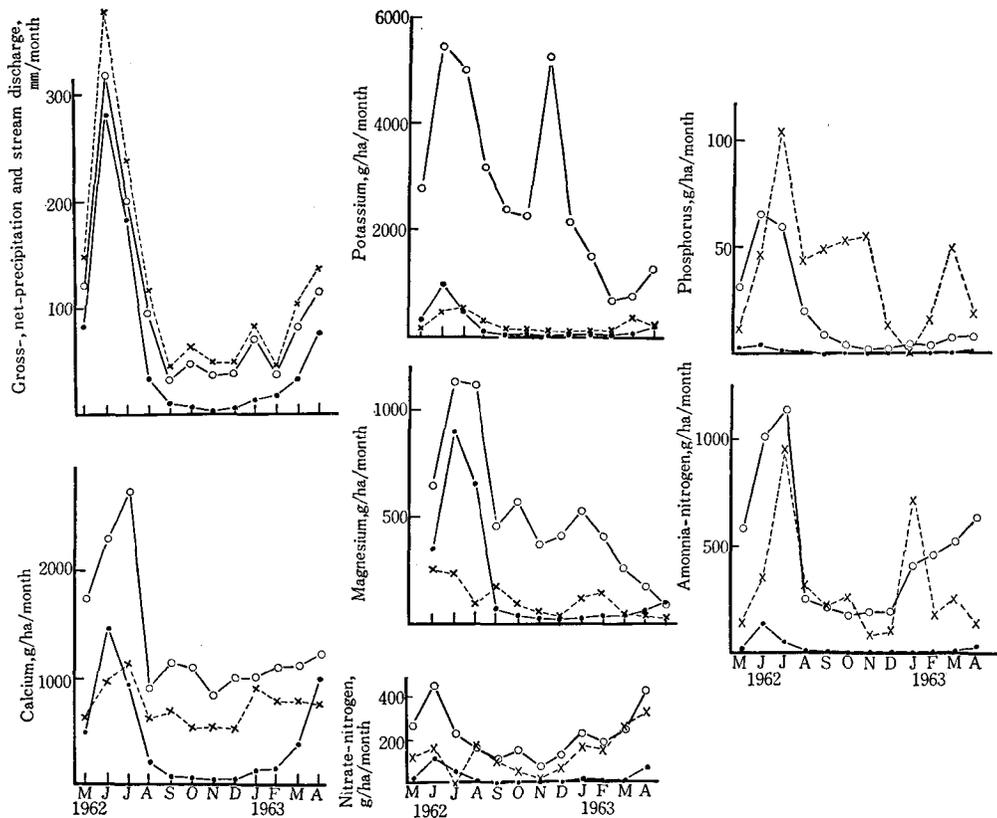


Fig. 5. The top on the left shows the monthly amount of gross- $(\cdots \times \cdots)$, net- $(-\circ-)$ precipitation at the broadleaved forest and stream discharge $(-\bullet-)$. The others show the monthly amount of six nutrients in each water.

いも1年を通じて林内雨+樹幹流の養分量がもっともたかいが、カリウムのばあいほど圧倒的ではない。カリウム・カルシウム・マグネシウムを通じて共通にみられる傾向は、降水量のおおきい、したがって流出量もおおきい月には、渓流水の養分量は林外雨の養分よりもおおきいばあいがおおかった。これは前述したように、多量の流水によって、土壤中の養分の流出または溶脱が促進された結果と考えられる。

リンのばあい、林外雨に含まれる養分量が林内雨+樹幹流の養分量よりもおおきいことがおおく、渓流の養分量は前2者に較べはるかにちいさかった。硝酸態チッ素、アンモニア態チッ素のばあい、林外雨と林内雨+樹幹流に含まれる養分量は余りかわらず、林外雨のほうがおおきいばあいもあった。しかし渓流の養分量はリンと同じく、他の両者に較べてずっとひくい値を示した。森林生態系の養分収支の立場からみれば、リン・硝酸態チッ素・アンモニア態チッ素に関しては、森林は雨水による養分の補給によって、蓄積を続けているといえる可能性がある。

月ごとにまとめた林外雨の降水量と、月ごとの林外雨・林内雨+樹幹流・渓流水に含まれる養分量の関係を図示した。Fig. 6. 林外雨や林内雨+樹幹流の養分濃度は、その濃度値の上限をとれば、林外降水量が小のとき濃度大となる傾向があり、また林内+樹幹流のばあい季節的な植物体の影響もあるから、林外降水量と養分量の関係をみるばあい、わりあいバラッキがおおきい。これに対して渓流水の養分濃度は前述したように、1年間を通じてみれば、流出量と余り関係なく一定であるので、流出量がおおきくなるにしたがって、すなわち林外降水量がおおきくなるにしたがって渓流水に含ま

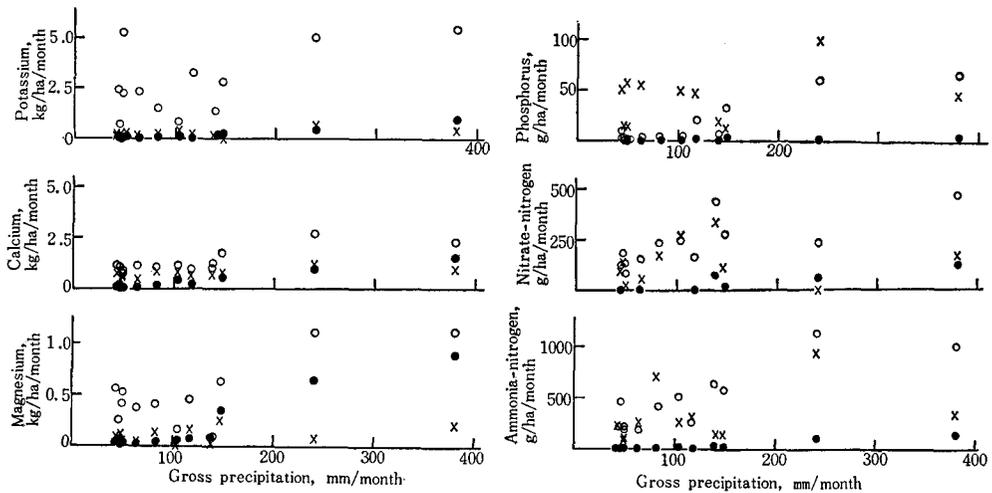


Fig. 6. Relationships between monthly gross-precipitation and the monthly amount of six nutrients contained in gross-precipitation : x, net-precipitation at the broadleaved forest : o, and stream discharge : ●.

れる養分量もおおくなる傾向が認められた。

このことから、この溪流では養分量を支配するものは、降水量・流量であって、季節的・生理的因子は本実験のような測定レベルでは殆んど影響をもたないといえるであろう。

2.2 地表流と地中流

地表流、地中流などは、林床に到達した雨水が溪流となって森林外に流出するまでの間、森林土壌内での移動の各形態に対して名づけられた名称であり、その移動はそうとう複雑であるから定義を明確にしておく必要がある。

野口¹¹⁾によれば、流域内に降った雨水は、地表を流れ河道を通過して流出するもの（河道に直接降った雨を含む）、すなわち表面流出量（Surface runoff）と、一旦地表下に浸透し、土層や岩石孔隙内を通過した後再び河道に現われるもの、すなわち地下水流出量（Ground water runoff, baseflow）に大別することができる、という。本実験において測定した地表流、地中流がそのまま溪流に流れ込むのであれば、それらは野口のいう表面流出、地下水流出にあたるが、本実験での測定は流域内の一小部分でおこなわれたにすぎないから、これらが溪流に至るまでに経路の変化をしないという保証はない。したがって、本実験における地表流・地中流はあくまで、ヒノキ林・広葉樹林の斜面の一部における地表流、ならびに地中 10cm での地中流と限定し、量水堰堤における量水曲線を分析してえられる表面流出量、基底流量とは区別しておくことが必要とおもわれる。以後、地表流・地中流はこの限定された意味に用いる。

本実験期間は1965年1月～12月で、この期間中林外雨、林内雨、樹幹流、溪流の測定はおこなっていないので、それらを同時に比較することはできなかった。

2.2.1 地表流量

林床における地表流の流路は、林床植物、地形、土壌状態などに影響されるから、林内雨に較べ極めて均一性を欠いている。しかしヒノキ林に5コ、広葉樹林に3コ埋め込んだ一辺 50cm の正六角形ライシメータの個々の集水量と林外降水量は一次の関係をもった。Fig. 7。それぞれのプロットについて、林外降水量との関係の回帰式を求め、集水ビンの容量をこえて溢れたばあいはその回帰式より推定値を求めた。この結果、年林外降水量 2238.3mm/year に対し、各プロットの地表流量は、ヒノキ林でそれぞれ3.4, 4.4, 6.0, 15.3, 26.6%, 広葉樹林で9.5, 10.2, 18.7%であった。ヒノキ林で

はバラツキがおおきかったが、このていどのおおきさのライシメータのばあい、当然おこると考え、とびはなれた値も棄却はしなかった。すなわちヒノキ林で5コ、広葉樹林で3コ分の面積をもったライシメータを各1コずつ設置したとして、傾斜による集水面積を考慮して平均値を求めた。これによれば林外降水量に対して1年間にヒノキ林で11.0%広葉樹林で12.8%が地表流として流れたことになる。前報に述べたように林内雨+樹幹流として林床に到着する水量はヒノキ林で林外降水量の約74%、広葉樹林で80%であったからヒノキ林では林外降水量の約63%、広葉樹林では約67%にあたる部分が地中流になるか、または地表流、地中流からの蒸発散によって林地から失われるか、することになる。

2.2.2 地表流・地中流の養分濃度

プロットによって集水量に差があるととも、それに含まれる養分濃度にも差が認められた。Fig. 8に

1965年3・6・9・12月について、集水量と濃度の関係を示した。集水量のおおきいプロットでは養分濃度がちいさいという傾向が認められるばあいもあるが、あまり明瞭ではなく、逆のばあいや、集水量に関係なく養分濃度はほぼ一定といったばあいも多く認められた。これらの事情によりヒノキ林、広葉樹林の地表流、平均養分濃度・量をつぎのように算出した。すなわち各プロットの集水量(L)に各プロットの養分濃度(ppm)を乗じて養分量を求め、その合計量を各プロットを合計した集水面積で除して、haあたり養分量を求めた。これが平均養分量である。これを集水量合計を集水面積合計で除して求めた単位面積あたり集水量(mm)で除し、平均濃度を求めた。

ヒノキ林・広葉樹林に2コずつ、地中10cmにトユを埋め、一種の地中流を集め、養分濃度を測定した。このばあい、集水面積を規定することができないのと、2プロットの濃度差が、地表流に較べてちいさいので、養分濃度をそのまま算術平均した。

地表流・地中流の養分濃度変化に影響を与える因子として、降水量・リター量・リターの分解に影響を与える気温などが考えられる。また養分元素の性質によって、リターから溶脱されやすいもの、土壤中を流動しやすいもの、しにくいものなどがある。リター量も季節変化をもち、ヒノキ・リョウブなどは11月に落葉が多いのに対し、ソヨゴの落葉のピークは6月にある。

これらを考慮しつつ、地表流・地中流の濃度変化について考察する。Fig. 9. カリウムについてみると、降水量のちいさい冬期にたかい濃度を示しており、とくに広葉樹林地表流に著しい。これは月降水量の少ないのが、ちょうど秋から冬へかけての落葉期にあたり、新鮮な落葉からの溶脱と、降水量のおおきいばあいのように養分濃度がうすめられるといった現象がおこらないという、ふたつの原

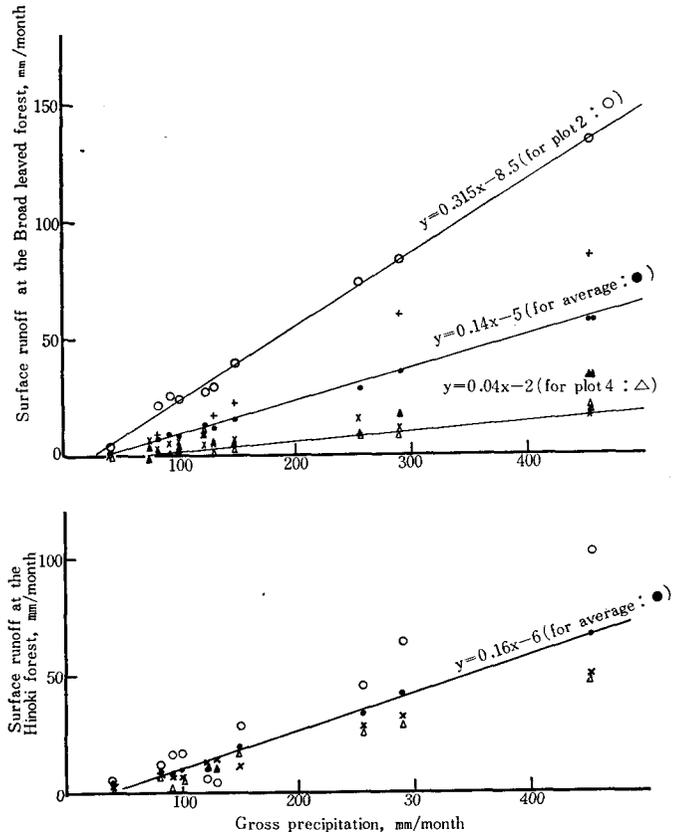


Fig. 7. Relationships between gross precipitation and surface runoff at the Hinoki and the broad leaved forest.

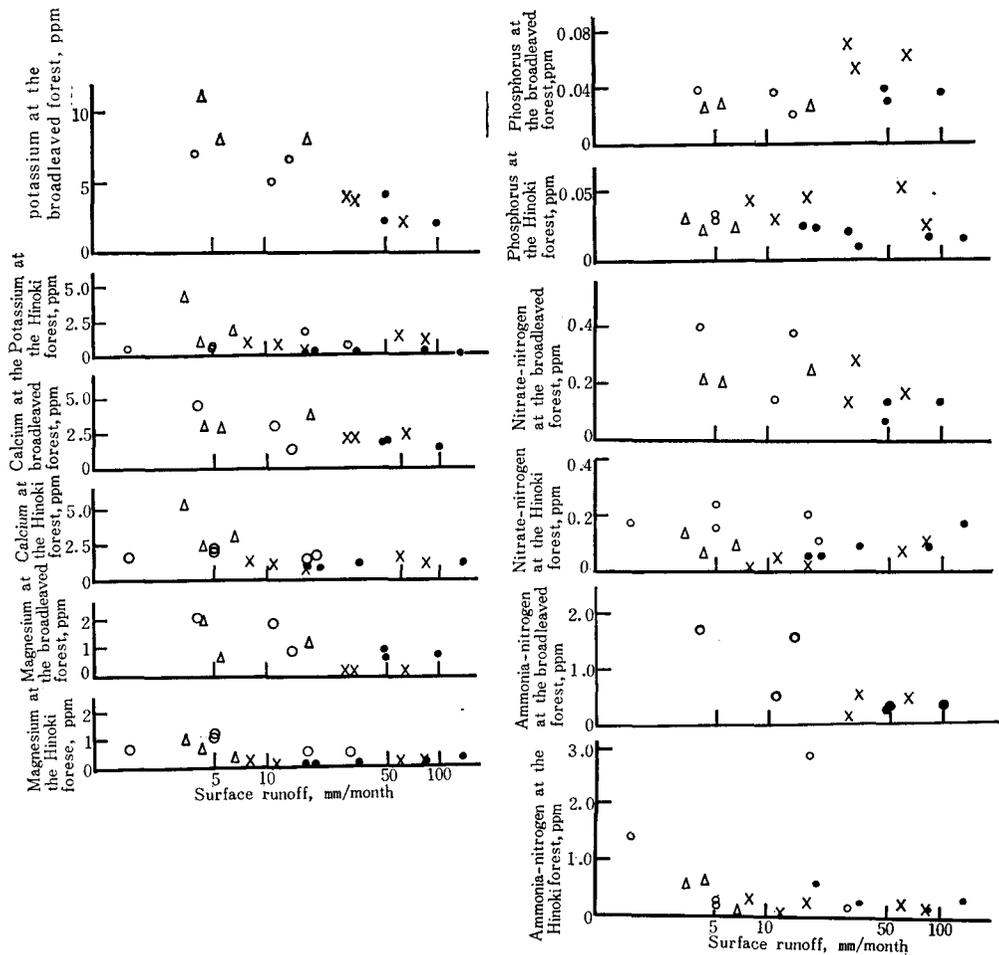


Fig. 8. Variation of nutrient concentrations and surface runoff among plots. Same kind of marks shows the data at same month.

因がかさなりあったものと考えられる。さらにカリウムは落葉広葉樹の落葉から容易に溶脱されるのでとくに広葉樹林地表流において濃度の動きがおおきかったのであろう。カリウムで、とくに広葉樹林地表流にみられた冬期に濃度がたかいという傾向は、カルシウム・マグネシウムではみられなかったが、地中流の濃度が地表流に較べおおきく、この傾向は広葉樹林で著しかった。これはカルシウム・マグネシウムがカリウムに較べ、植物体からの溶脱はおこりにくく、土壌中では動きやすい性質を持っているためではないかとおもわれる。

リンのはあい、濃度が他の元素に較べ非常にちいさいこと、各月間のバラツキがおおきいことなどのために一定の傾向はみられなかった。ただ地中流がつねに対応する地表流よりちいさかったことは、リンは土壌中でただちに不溶性の化合物をつくり、極めて動きにくいという説に合致している。

硝酸態・アンモニア態チッ素の地表流における8月のたかまりには、降水量がちいさい上に、気温がたかく、したがってリターの分解量がおおきいことが影響しているのかもしれない。アンモニア態チッ素が3月におおきい濃度を示した原因は不明である。

2.2.3 地表流・地中流に含まれる養分量

元素によって、地表流に含まれる量におおきな差があるが、月別の変化はおおむね林外降水量の変

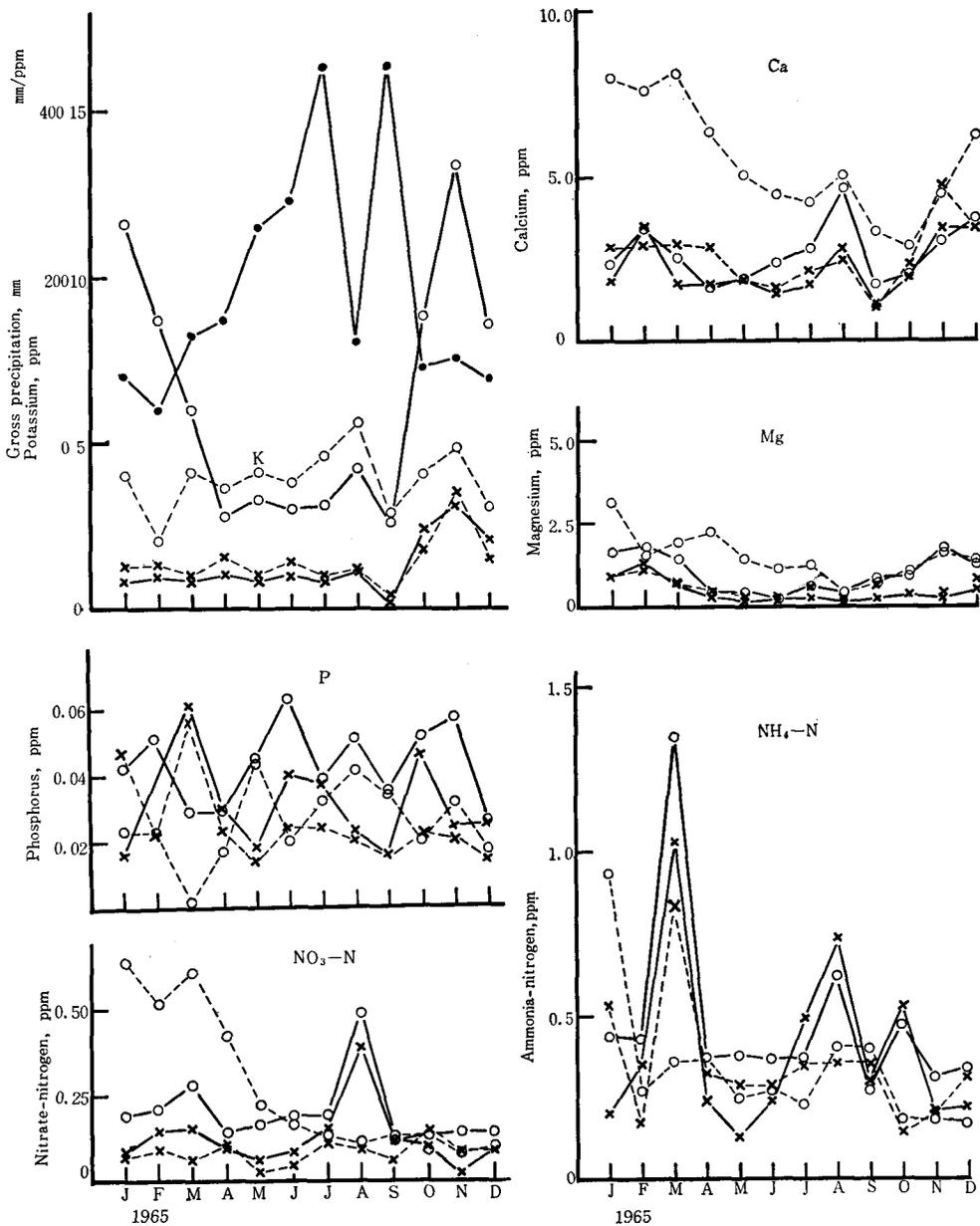


Fig. 9. Monthly averaged nutrient concentrations in surface runoff at the Hinoki (—x—), and the broadleaved forest (—○—), and in underground runoff at the Hinoki (···x···) and the broadleaved forest (···○···).

化にしたがうようであった。Fig. 10. とくに広葉樹林地表流のカリウム、広葉樹林・ヒノキ林地表流のカルシウム・硝酸態チッ素にこの傾向がみられた。土壤中で動きやすいといわれるカルシウム・硝酸態チッ素にこの傾向がみられたことは、それを裏づけるものとして興味ぶかい。

しかしもし、養分量が降水量と完全に一次の関係をもつならば、濃度はつねに一定でなければならない。したがって現実的には、リター量、リターの分解の状態・気温・降水のふり方などいろいろの因子の作用よりも、降水量の変化がおおきいので、全体としては降水量のおおきいときに、地表流養分量もおおきいといった傾向が現れるのであろう。ただし Fig. 9にみられるように、広葉樹林地表流

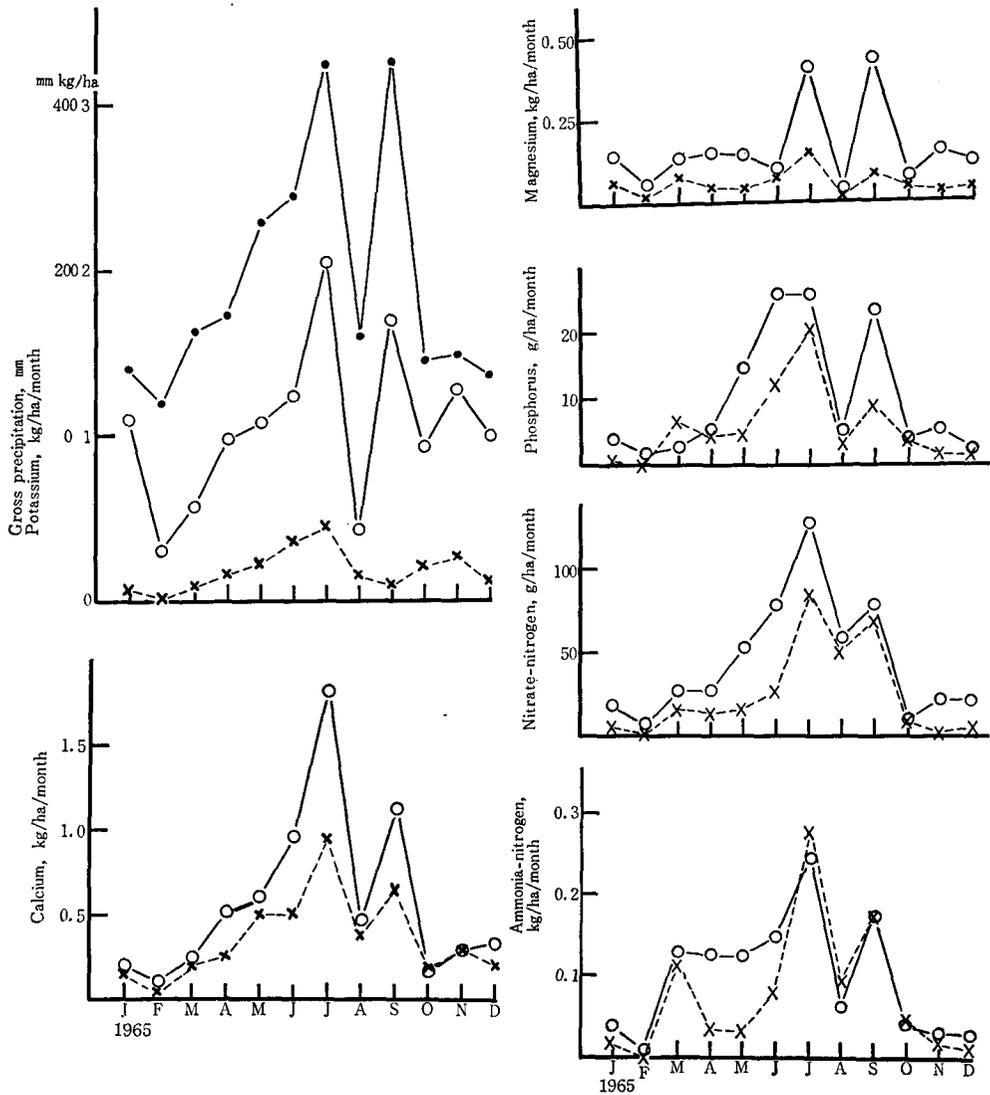


Fig. 10. Monthly averaged amounts of nutrients in the surface runoff at the Hinoki (---x---) and the broadleaved (—o—) forests.

のカリウムでは、10・11・12・1月の養分濃度が他の月に較べて著しくたかい、このために降水量のわりには、養分量がとびぬけて多かった。これは新鮮な落葉からの溶脱がそうとう影響していると考えられる。

前述したように、地表流の各プロット間の集水量、養分濃度にはそうとうな差がみられ、両者は常に相殺的な関係にあるわけではなかったから、養分量についても、プロットごとの違いがおおきい。しかし各プロットごとの養分量の季節変化にはだいたい同じような傾向がみられた。Table 2 に各プロットの1年間合計量を示した。なお平均値は前述したようにライシメータの傾斜による集水面積の違いを考慮しているので、各プロットの値の算術平均値とはやや異なる。

地中流についてはすでに述べたように、集水面積の測定ができないので、haあたりの養分量を算出することはできなかった。しかし集水瓶にたまった水量は林外降水量とほぼ一次の関係をもっていたから、地下10cmを流れる水量も林外降水量とほぼ一次の関係をもつと考えられる。今、かりに林内

雨・樹幹流として林床に達した水が、蒸発散することなしに、すべて地表流となるか、あるいは地下10cmを通過するとすれば、この量は林外雨量と、林内雨量・樹幹流量・地表流量の回帰式をつかって求められる。これより地中流量を求めて、養分量を計算すると、年間 ha あたり、ヒノキ林・広葉樹林でそれぞれカリウム 17.5, 62.4, カルシウム 32.6, 75.6, マグネシウム 7.8, 21.2, リン 0.35, 0.45, 硝酸態チッ素 1.1, 3.4, アンモニア態チッ素 5.3, 5.0 kg/ha/year, 流量 1530, 1590 mm/year となる。流量が地表流に較べヒノキ林で 6.2 倍, 広葉樹林で 5.6 倍であるから、地表流に較べ濃度のたかいカリウム・カルシウム・マグネシウムでは養分量はさらにおおきくなった。しかし地表に達した水が地下 10cm にいたるまでまったく蒸発散しないとの仮定はきわめて根拠のうすいものであり、現実には地中流養分量は前記の値よりそうとう小さいものとおもわれる。

2.3 降水にともなう養分の森林での垂直的变化
森林植物は、炭素を除いて、水溶性の養分物質を吸収して生長する。したがって森林各部において、降水とともに動く水溶性物質の濃度・量の動態を知ることが、森林での物質循環の動態を把握するうえに極めて重要な問題と考えられる。

したがってここでは、今までに述べた林外雨・林内雨+樹幹流・地表流・地中流・溪流に含まれる養分濃度・量を一貫して比較検討し、これらの動態について考案する。

2.3.1 養分濃度の垂直的变化
森林にふった雨水(林外雨)は、クローネからの蒸発により、その量をやや減じて林床に達する(林内雨+樹幹流)。これは蒸発散によりさらにその量を減じつつ、地表・地中を通り(地表流・地中流)溪流となって、森林外部に流亡する。

その間、水に溶けている養分は極めて複雑な動きを呈する。林外雨に含まれる養分はクローネに付着している養分を洗いながし、さらに植物体から養分を溶脱して増加するが、一方直接クローネに吸収される養分もある。地表に流下してから、リターや土壌に含まれている養分を溶脱するが、また一方、植物体に根から

Table 2. Annual nutrient amounts in surface runoff at each plot

	plot	K	Ca	Mg	P	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Rum off
Hinoki forest	1	1.1	1.5	0.3	0.03	0.1	0.1	98.2mm
	2	4.7	10.2	1.7	0.13	1.0	2.0	594.8
	3	0.8	2.0	0.3	0.03	0.1	0.4	133.8
	4	0.6	1.2	0.1	0.03	0.1	0.4	77.1
	5	3.9	6.5	1.0	0.14	0.3	1.3	343.5
	Averaged	2.2	4.2	0.7	0.07	0.3	0.9	246.6
Broadleaved forest	1	12.3	5.0	1.4	0.10	0.6	1.3	229.1mm
	2	15.0	10.1	2.9	0.17	0.8	1.5	419.6
	3	7.6	4.5	1.6	0.09	0.2	0.5	213.7
	Averaged	11.8	6.7	2.0	0.13	0.5	1.1	286.1

kg/ha/year.

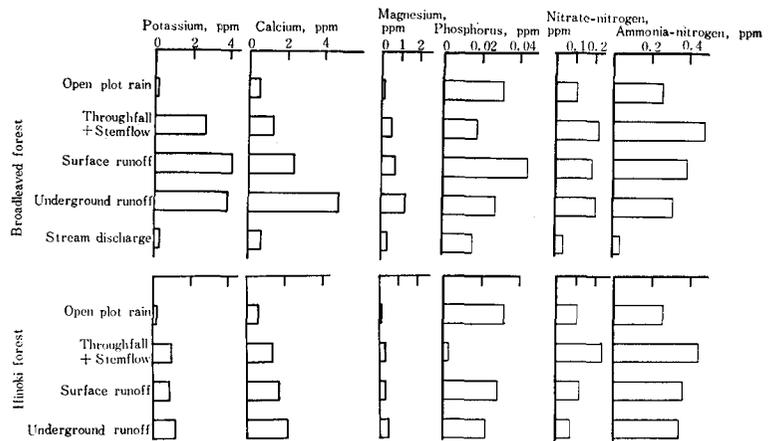


Fig. 11. Annual averaged nutrient concentrations in the waters at successive layers at the broadleaved and the Hinoki forests.

吸収されたり、土壌のもつイオン置換作用その他の保蓄作用によって土壌に吸着されたりする経過ののち、渓流水として流出する。

Fig. 11は1962年5月から翌年4月まで1年間のヒノキ林・広葉樹林の各部分における、水に含まれる平均養分濃度の垂直的变化を現わしている。濃度は年合計養分量を水量で除して平均を求めた。ヒノキ林における変化図には、溪流のデータはない。地表流・地中流は前述のように、ことなつた年(1965年1月~12月)のデータで降水量もことなつている。1962年5月~63年4月の降水量は1462.2mmで、1965年1月~12月は223.8mmであった。しかし地中流・地表流の濃度は降水量の増大に応じて、同じ季節ではやや減少するか、もしくは余り変化しないから、図示したものよりおおきい可能性はあるが、一応比較に耐えるであろう。

垂直的变化の型として、6種類の養分をふたつにわけられるだろう。すなわち、カリウム・カルシウム・マグネシウムの変化の型、K・Ca・Mg型とリン・硝酸態チッ素・アンモニア態チッ素の変化の型、P・N・N型である。前者はすべてカチオンである。後者はリン・硝酸態チッ素はアニオンで、アンモニア態チッ素はカチオンである。

まずK・Ca・Mg型は林内雨+樹幹流・地表流・地中流の三層、すなわち森林内部では、P・N・N型に較べ濃度がたかい。さらにこの三層において、K・Ca・Mg型は下層ほど濃度がたかくなる傾向があるのに対して、P・N・N型は逆に低くなる傾向が認められた。稲川ら¹⁴⁾の箱型ライシメータによる地表流と地中50cmの浸透水の濃度測定においても、この傾向が認められる。ただし、林内雨+樹幹流のリンの濃度は広葉樹林・ヒノキ林ともに林外雨よりはるかに低く、この部分だけは分析した6種類の養分を通じて例外であった。また広葉樹林で林外雨の濃度と溪流の濃度を比較すると、K・Ca・Mg型では溪流の濃度がたかいのに対し、P・N・N型ではひくくなった。

地下10cmの流水の濃度、すなわち本実験での地中流濃度は渓流水になるまでに非常にひくくなつている。この現象は6種類の養分に共通してみられた。本実験ではこの間の状態についてのデータは全くないが、斜面上部・下部でそれぞれ地中10cm・30cm・50cmにおいて土壌水の養分濃度・量を測定した有光ら¹²⁾も下層になるほど養分濃度が低下したことを報告している。

2.3.2 養分量の垂直的变化

1962年5月から翌年4月までの実験期間において、林外降水量は1463.2mmであった。このうち広葉樹林のクローネを通り、林内雨・樹幹流として林床に達したのは1,200mmで、8%が蒸発によって失われた。これがさらに地表流・地中流として流下し、下方の量水堰堤に達したときには750mmで林外降水量の51.3%であった。Fig. 12

分析した養分元素が林外雨・林内雨+樹幹流・溪流に1年

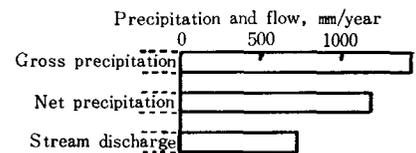


Fig. 12. Annual gross-, net-precipitation and stream discharge at the broadleaved forest.

Table 3. Budgets of water soluble nutrients for the broadleaved forest ecosystem

	K	Ca	Mg	P	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Water amount
Gross precipitation (A) kg/ha/year	2.7	8.8	1.3	0.47	1.7	3.8	1462.6mm
Net precipitation (B) kg/ha/year	32.6	15.8	6.1	0.22	2.7	5.8	1200.0mm
Stream discharge (C) kg/ha/year	2.3	5.0	2.3	0.12	0.3	0.3	749.5mm
(A)-(C) kg/ha/year	0.4	3.8	-1.0	0.35	1.4	3.5	713.1mm
(C)/(A)×100%	85.2	56.8	176.9	25.5	17.6	7.9	51.2
(C)/(B)×100%	7.1	31.6	37.7	54.5	11.1	5.2	62.5

May 1962~Apr. 1963

間に含まれた量は Table 3, Figs. 13~15 のとおりである。

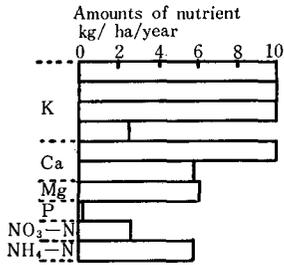


Fig. 13. Annual amount of nutrients in open plot rain.

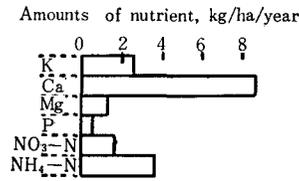


Fig. 14. Annual amount of nutrients in net precipitation (through fall + stem flow) at the broad leaved forest.

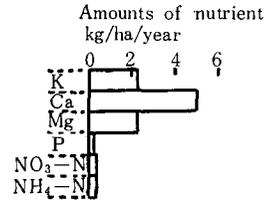


Fig. 15. Annual amount of nutrients in stream discharge.

林外雨に含まれる養分量は森林にとって収入である。林内雨+樹幹流に含まれる量は、前記収入量と、植物体から溶脱された養分量と、直接植物体の地上部に吸収された量との合計量である。したがって林内雨+樹幹流に含まれる養分量には、森林内部の物質循環がおおきく関係している。溪流に含まれる養分量は森林にとって支出である。

森林の養分収支を考えるばあい、林外雨と溪流に含まれる養分量だけで、かんたんに計算するには、いろいろの問題がある。たとえば、チッ素のように土壤中のチッ素固定菌により直接空中チッ素がとり入れられるばあいや、逆に酸素の供給状態のよくない土壌では脱チッ現象がみられるばあいもあるだろう。またエアロゾルがクローネに付着して林内雨に溶ける量や、母岩物質からの風化による収入量や、リターや土砂の形で流亡する支出量も測定されていない。

しかし前記のうち、リターや土砂の形で流亡するもの以外は、現状では殆んど測定不可能である。

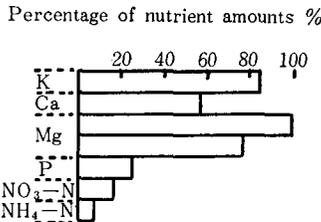


Fig. 16. Percentage of the nutrients amounts in stream discharge relative to those in open plot.

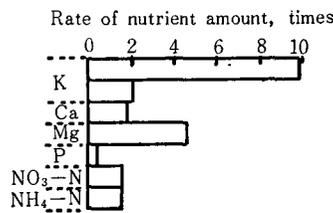


Fig. 17. Nutrient amounts in net precipitation to those in open plot.

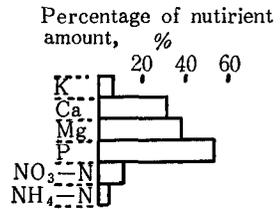


Fig. 18. Percentage of the nutrient amounts in stream discharge to those in net precipitation.

したがって今回はただ、水に溶けた養分量の垂直的变化のみについて考察した。

収入と支出、すなわち林外雨と溪流に含まれる養分量を比較すると、マグネシウムが約180%と支出のほうがおおきくなっただけで、他はカリウム85%、カルシウム57%、リン26%、硝酸態チッ素18%、アンモニア態チッ素8%と、収入のほうがおおきい結果がでた。すなわち、水溶性養分の収支としては、マグネシウム以外は毎年森林に蓄積されていることになる。Fig. 16.

林外雨に含まれていた養分量は林床に達したときにはリンを除いて、1.5倍からカリウムでは約12倍に増加する。Fig. 17。これは土壌層をとおっているあいだに減少して、渓流水となったときには、林床に達したときと比較すると、減少率のもっともひくかったリンでさえ、55%にすぎなくなる。Fig. 18。

フィンランド全土について水溶性養分の収支を求めた Viro¹⁹⁾によれば、チッ素だけは収入がおおきく、他のリン・カリウム・カルシウム・マグネシウムについては、支出がおおきい。チッ素以外につ

いては、日本における河川の水質調査からみても、下流で調査すれば、当然このような結果がえられるであろう。この報告はチッ素がいかに土壤に吸着されやすいかを示していると考えられよう。北アメリカの水源地でカリウム・カルシウム・マグネシウム・ナトリウムについて収支計算をおこなった Likens⁶⁾ らによれば、カリウムのみ収入が多く、他はやや支出がおおきいようである。稲川ら¹⁴⁾の実験では、アンモニア態チッ素は明瞭に収入がおおきく、カリウムとカルシウムは支出がおおきかったという。しかしこれは深さ 50cm の底つきのライシメータであり、さらに深くなれば、あるいはカリウム・カルシウムも収入が大となるかもしれない。10cm・30cm・50cmの地中流の養分量を測定した有光ら¹²⁾のデータでは養分量はマグネシウムを除き、おおむね下層ほど小さいようである。

水溶性養分物質の収支は土壤、植生、降水、母岩などの性質により、いろいろことなるようである。しかし大洪水や山崩れによって、表層土の異常な流出がおこらないかぎり、養分の流出はそれほどおおきくなく、森林における養分収支はわりあい安定しているといえるのではないだろうか。

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) 岩坪五郎・堤利夫: 森林内外の降水中の養分量について (第2報), 京大演報, 39, 110~124, (1967)
- 3) 富士岡義一, 手島三二: 傾斜地の流出機構に関する基礎的研究(IV). 農土木研, 別冊4, 19~23 (1962)
- 4) 堤利夫: せき恵林地とその改良, 「アカマツ林の造成」, 四手井綱英編, p.304, 地球出版, 東京, 1963
- 5) 武田繁後: 宝川森林治水試験第2回報告, 34~40, 前橋営林局, 前橋 (1950)
- 6) Likens, G. E., F. H. Bormann, N. M. Johnson and R. S. Pierce: The calcium, magnesium, potassium, and sodium budgets for a small forested ecosystem, *Ecol.*, 48, 5, 772~785, (1967)
- 7) 四手井綱英: アカマツ林生態系の物質生産機構, 「アカマツ林の造成」, 四手井綱英編, p.108 前出。
- 8) 荻原貞夫: 日雨量とその対応流出量, 水利科学, 11, 2, 1~11, (1967)
- 9) 杉原健: 四国地方河川の研究 (第2報), 日化誌, 72, 3, 287~289, (1951)
- 10) 武藤寛: 礫素の地球化学的研究 (第7報) 普通河川の流程による組成成分の変化について(4), 日化誌, 74・7, 576~578,
- 11) 野口陽一: 森林の影響, p.100 地球出版, 東京, (1963)
- 12) 有光一登, 松井光瑤, 簡易なテンションライシメーターによる土壌水分の動的研究(1), 日林誌, 46, 12, 208~213, (1964)
- 13) Viro, P. J.: Loss of nutrients and the nutrient balance of the soil in Finland, *Comm. Inst. Forest. Fenn.*, 42:1~50, (1953)
- 14) 稲川悟一・伊藤悦夫・金田次弘: 地表植生の有無及び種類が土壌中の主な肥料成分の流亡に及ぼす影響—簡易ライシメーターによる一試験, 静大農研報15: 87~105, (1965)

Résumé

1) The results of the studies carried out at the Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) and the broadleaved forest in the Kyoto University Kamigamo Experimental Forest Station, on the following items have been already submitted in a first and second report. The items consisted of the nutrient concentration and the amount contained in open rain fall, through-fall, and stem-flow in two forests, their seasonal fluctuations, and the total amount of nutrients per ha annum.

2) In the the present report an investigation on the movement of water soluble nutrients in the forest ecosystems was carried out, by examining the nutrient contents in surface-, underground(-10cm depth) and stream-runoff as well as in open rain, through-fall and stem-flow. Because the Hinoki stand was not in the watershed of the stream, no data was available for stream runoff in this case. The nutrients analysed and studied were of following: potassium, calcium, magnesium, phosphorus, nitrate- and ammonia-nitrogen which are the same as in the first and second reports.

3) The six nutrient concentrations in stream discharge were much smaller than those in the through-fall plus stem-flow (net-precipitation), and their seasonal fluctuations were smaller as well. (Fig. 4) The most

efficient factor for the amount of nutrients in stream discharge was the amount of stream discharge itself, consequently the nutrient amounts in stream discharge were almost proportional to the amounts of stream discharge and the gross precipitation (open rain fall). (Fig. 6)

4) In autumn and winter, the surface- and underground- runoff water in most cases increased their nutrient concentrations because of low precipitation and the existence of new litter fall from which nutrients could be leached easily. The increase was especially remarkable in the case of potassium contained in the broadleaved forest. In most months, the nutrient concentrations of potassium, calcium, and magnesium contained in underground runoff were higher than those in surface runoff, and those of phosphorus, nitrate- and ammonia-nitrogen contained there, were smaller. (Fig. 9)

5) The water passes through the each layer of the forest ecosystem, i.e. the net precipitation, surface-, underground-runoff, and then into a stream. The nutrient concentrations contained in the waters of successive layers were analysed and their fluctuations studied vertically. Upon reaching the forest floor as net precipitation, the nutrient concentrations increased with one exception of phosphorus. In the surface and the underground layer, nutrient concentrations changed as mentioned above. In the flow from the underground layer to the stream, the water decreased its nutrient concentrations remarkably. In the case of potassium, calcium, and magnesium, the nutrient concentrations in the stream discharge were higher than in the open rain water and it was lower in the cases of phosphorus, nitrogen. (Fig. 11)

6) The nutrient amount in gross precipitation is the income and that in the stream discharge is the output for the forest ecosystem. The budget of the amounts of water soluble nutrients of the broadleaved forest ecosystem were estimated. (Figs. 12, 14) The percentages of potassium, calcium, magnesium, phosphorus, nitrate- and ammonia- nitrogen of the output to the income were 85, 57, 180, 26, 18 and 8% respectively. It can be said that the forest ecosystem accumulates water soluble nutrients except for magnesium. (Fig. 15, Table 3)