

筑波森林試験地における水および物質の移動について

Migration of Water and Chemical Constituents in the
Tsukuba Experimental Forested Basin

平田 健正*・村岡 浩爾**

By Tatemasa HIRATA and Kohji MURAOKA

During the vertical water migration from rainwater to throughfall and stemflow, almost all of the chemical constituents raised their concentrations, and the most marked substance is the potassium, of which concentration in the stemflow takes the value of more than twenty times higher than the rainwater. In the meantime of passing through the soil zone, the solute chemistries get drastically changed to be stabilized and consequently the variation range of stream solute concentrations becomes far below those of rainwater, throughfall and stemflow. In addition the element budget in the Tsukuba forested basin showed that the cycling amount of the essential elements available for forest plant growth becomes ten times as high as the input by rainwater and output by streamwater.

Keywords: forest ecosystem, water cycle, rainwater, throughfall, stemflow, streamwater, element budget

1. はじめに

森林内では水分や養分が植物体や土壌を介して常に循環しており、林外雨（降雨）から森林生態系を経て溪流に流出するまでの間に、水はさまざまな生物・化学的作用を受けて量・質ともに大きく変化する。入力としての林外雨は樹冠で一部遮断され、残りの部分が林内雨や樹幹流あるいは直達雨量として林床に届く。その過程で、林内雨や樹幹流は樹体に付着した大気降下物・エアロゾルなどを洗脱し、さらには樹体からの溶出を加えて物質濃度を高める。林外雨、林内雨や樹幹流に含まれる物質量は、林外雨量や先行降雨の有無など気象要素に大きく依存し、濃度のばらつきも大きい。ところが、土壌中では微生物による有機物の無機化やイオン交換など、土壌の持つ膨大な緩衝能に接して水質が調整され、その結果、溪流水質は林外雨などの水質に比べて穏やかな季節変化を描くことになる¹⁾。

著者らは、植物体の栄養塩類の吸収や生長に伴う固定、リターや林内雨・樹幹流による林床への還元と言った森林内の物質循環特性に着目し、土壌水質の形成や土壌水質の流出から降雨時に見られる溪流水質の変化や季節変化を説明してきた²⁾。また森林内の物質循環量は、一般には林外雨でもたらされる森林への流入負荷量や溪流水で搬出される流出負荷量よりはるかに大きく、この受け皿としての大きさが土壌水質や溪流

* 正会員 工博 国立環境研究所主任研究員 地域環境研究グループ

(〒305 茨城県つくば市小野川16-2)

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

(〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)

水質の形成を支配し、流域の水質調節機能を果たすことになる。こうした森林域の特性を明確にするには、森林生態系での水移動とそれに伴う水質変化から物質移動量を求め、物質収支を明らかにする必要がある。そこで本研究では、筑波森林試験地で観測された林外雨、林内雨、樹幹流や渓流水など水循環に係わる諸量と物質濃度の関連を調べ、森林生態系における水移動と水質変化、及び物質循環量を明らかにする。

2. 筑波森林試験地の植生と現地観測

森林試験地の流域面積は87.5haで、全域に植林が施されている。図-1は植生区分図を示しているが、沢沿いを中心にスギ林、尾根部周辺にヒノキ林とアカマツ林が広がる。植林面積はスギ林53%、ヒノキ林18%、アカマツ林14%で、これら3種で全流域の85%を占める。このような植林形態は筑波地域に限ったことではなく、わが国の植林地域で普通に見られる。一般にスギは水分や栄養状態の良い場所を好み、ヒノキはスギほど水分を欲しないほか、アカマツは尾根部など表層土が薄く、貧養地でも生育できるからである。これらの特徴に加えて、わが国ではスギ植林地面積の大きいことから、スギは渓流水質に最も影響を及ぼす要因の一つと考えられる。こうした背景から、著者らはスギ林地で森林内の物質循環に係わる諸量を観測してきた。

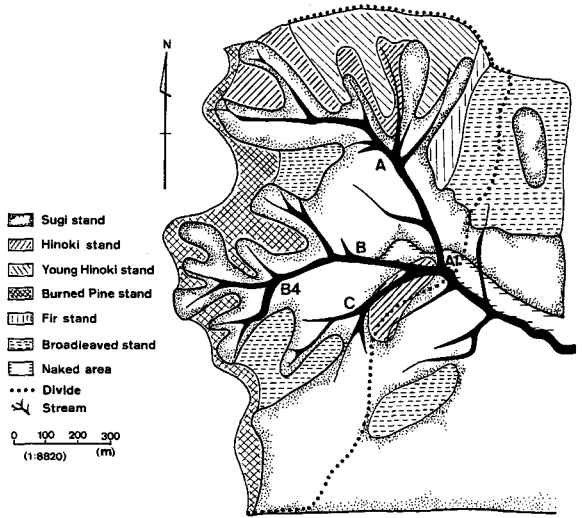


図-1 筑波森林試験地の植生区分

林外雨と渓流水は3溪流合流点の下流A1で、林内雨・樹幹流・リター・土壤水はB沢のスギ林内B4で測定した。林外雨と渓流水は1985年4月から観測が継続されており、林内雨・樹幹流・リターは1987年4月から1989年3月までの2ヶ年、土壤水は1986年4月から1989年3月までの3ヶ年観測された。

3. 林外雨量と水質

林外雨はエアロゾルなど大気中に漂うさまざまな物質を取り込むため、水質は無降雨時日数、総雨量や季節によって大きく変化する。また大気中に十分に供給可能な物質があれば、その濃度は雨量には関係せず一定となるし、限りがあれば雨量の増加に従って濃度減少すると予想される。そこで最初に林外雨量と物質濃度の関係を調べることにする。

1985年4月からの2ヶ年は1降雨に対応する物質濃度を捉えるため、A1地点で内径20cmのポット型雨量計に集水された林外雨を1降雨毎か週1回の割合で回収・分析した³⁾。2ヶ年に採取された76試料の内、1降雨に対応する33試料を見ると、ばらつきは大きいものの、物質濃度は林外雨量の増加に伴って減少するものが多い。そこで濃度Cと林外雨量 Q_r の関係を

$$C = a Q_r^b \quad (1)$$

で整理した(a , b は定数)。相関係数の高い順に無機態窒素($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ 、相関係数 $= -0.895$)、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (-0.882)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (-0.834)、電気伝導度(-0.786)、 Na^+ (-0.748)、 K^+ (-0.711)、 SO_4^{2-} (-0.678)、 Mg^{2+} (-0.653)、 SiO_2 (-0.630)、 Cl^- (-0.630)となる。この内、両者の相関が高い $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、また相関の認められない $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ とpHについて、濃度と林外雨量の関係を相関係数 γ とともに図-2に示した。林外雨に含まれる窒素酸化物は、植物遺体、排ガス、土壌飛沫などに由来するが、図に見るように $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と $\text{NO}_3^- - \text{N}$ は両対数上で林外雨と線形関係にあると言える。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と林外雨の関係は、京都上賀茂試験地でも観測されている⁴⁾。

リンについても同様の関係を認めているが、筑波試験地では観測されていない。pHについては、林外雨は大気中の炭酸ガスを取り込み、弱酸である炭酸を生成するため、もともと酸性よりの値を取る。筑波試験地の2年間の実測値ではpHは3.6～7.1の範囲にあり、平均は5.0であった。

一方、林外雨による流入負荷量（濃度×林外雨量）にすると、筑波試験地では窒素酸化物を始め、他の物質もb>-1.0の値を取ることから、流入負荷量は林外雨量とともに大きくなる。

4. 林内雨量・樹幹流量と水質

1987年4月から1989年3月までの林外雨量とスギ林内の林内雨量及び樹幹流量の関係を直線近似し、この関係式と相関係数を図-3に示す。林内雨は林外雨と同様、ポット型雨量計を用いてB4スギプロット内の7地点で集水した。樹幹流は樹皮を剥ぎ、チューブを巻き付けて集水した。観測対象とするスギ林は30年生であり、ほぼ平均的な胸高直径のスギ林2本（胸高直径は20.1cmと18.5cm）を選び樹幹流量を測定しているが、それぞれの樹幹流の集水面積は、20m×20mコロラード内の総胸高断面面積と対象木の胸高断面面積の比から算出した。

図示のように、樹幹流量のばらつきは大きい、林内雨については林外雨との相関も高く、林外雨とほぼ線形関係にあると言える。さらに樹冠貯留量が一定と考えれば、林外雨量が増える程、林内雨量の割合は高まるはずであるが、林外雨量が200mmを超える場合

でも、線形関係が保たれている。この関係は岩坪・堤⁴⁾も報告している。図-3に記した直線関係式を見る限り、林内雨は林外雨の77.8%、樹幹流は4.87%であり、全体として林外雨の82.7%が林床に届くことになる。また、林内雨は林外雨量5.6mm以上で、樹幹流は11.2mm以上で発生することになる。

林内雨量・樹幹流量と水質についても、林外雨と同様に水量の増加に伴って濃度減少する物質が多い。ただ林外雨に比べて濃度の変動はさらに増幅されることも事実であり、これは図-4に描いた林内雨量と物質濃度

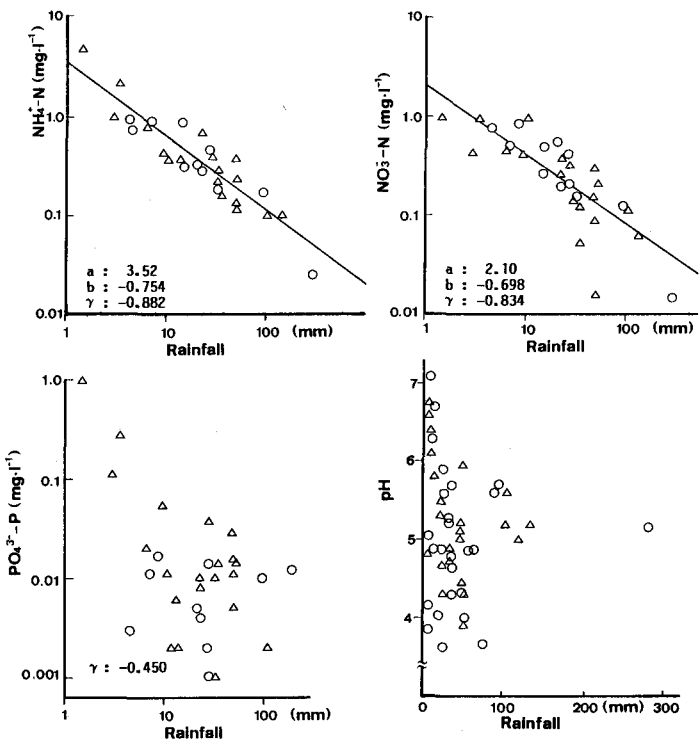


図-2 1 降雨に含まれる物質濃度と林外雨量の関係
(△:1985年4月-1986年3月、○:1986年4月-1987年3月)

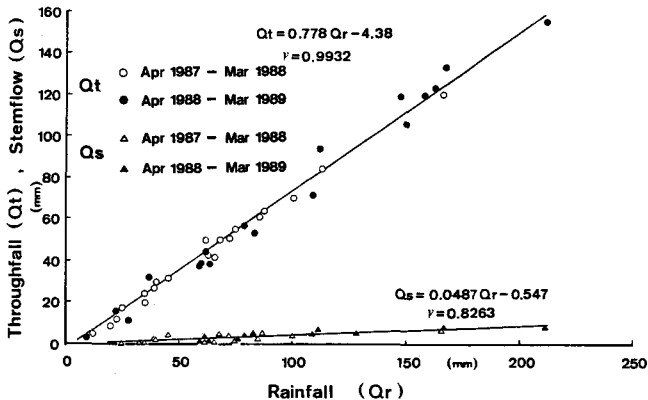


図-3 林外雨量と林内雨量・樹幹流量の関係

の関係に見る通りである。また、表-1には4月から翌年3月までを1水文年として求めた林外雨、林内雨、樹幹流と溪流水の年平均濃度及び負荷量を整理した。2ヶ年について林外雨から林内雨・樹幹流への鉛直水移動の過程で最も濃度変化率の大きい物質は K^+ 、続いて SO_4^{2-} となっている。

1987年度では K^+ の林内雨濃度は林外雨濃度の24.3倍、樹幹流では36倍、 SO_4^{2-} については林内雨で3.87倍、樹幹流で19.7倍にも上る。特に、 K^+ は植物体から溶出しやすいことが知られており、確かに樹体からも溶出していることが理解できる。ところが、 SiO_2 や Cl^- についても林内雨や樹幹流でかなりの濃度の高まりが認められることから、これには樹

体に付着したエアロゾルなどの洗脱が寄与していることも間違いない。これらに加えて、樹幹流の1987年度のpHは3.2、1988年度で3.6と林外雨に比べてかなり低く、スギ林の特徴が表れている。

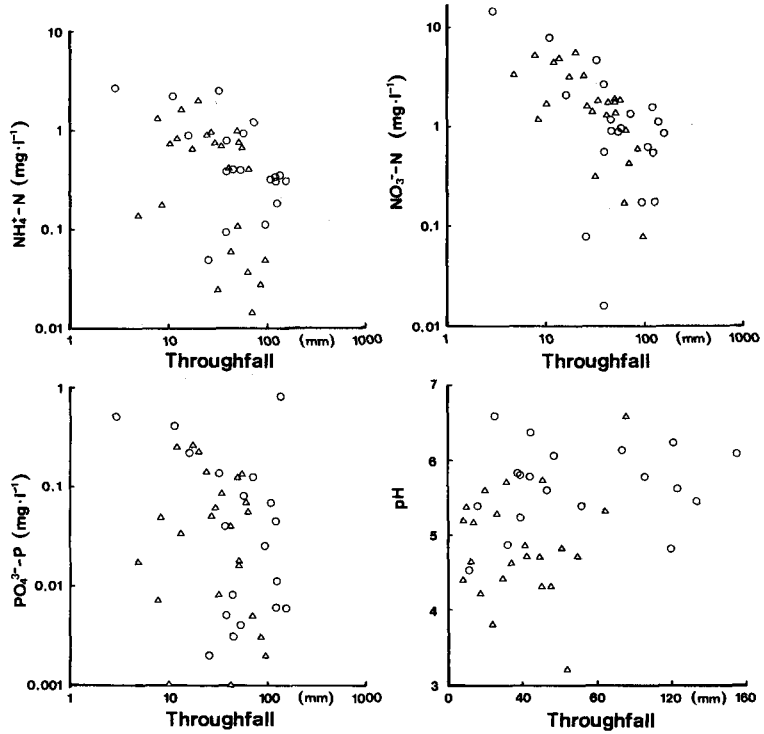


図-4 林内雨量と物質濃度の関係
(○：1987年4月－1988年3月、△：1988年4月－1989年3月)

表-1 森林生態系における鉛直水移動と物質濃度の変化

	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ -N	PO ₄ ³⁻ -P	SiO ₂	Cl	SO ₄	Na	K	Hg	Ca	pH	SC(μS/cm)
1987年4月-1988年3月													
林外雨	水量 (mm) 1293.0												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.255	0.004	0.313	0.006	0.164	1.39	1.21	0.517	0.213	0.242	4.6	19.1
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	3.30	0.042	4.04	0.075	2.11	18.0	15.6	8.68	2.75	3.13	8.67	
林内雨	水量 (mm) 900.1												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.415	0.027	1.34	0.053	0.360	4.88	4.68	1.35	5.18	0.902	1.98	59.2
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	3.73	0.244	12.1	0.480	3.24	43.9	42.1	12.1	48.8	8.12	17.9	
樹幹流	水量 (mm) 45.6												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.914	0.005	1.70	0.125	2.29	10.8	23.8	2.74	7.66	1.03	2.55	3.2
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	0.417	0.003	0.776	0.057	1.04	4.95	10.8	1.25	3.49	0.471	1.16	197
溪流水	流出水量 (mm) 363.3												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.025	0.003	1.40	0.008	21.7	5.78	3.12	5.53	0.676	1.62	3.39	79.2
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	0.090	0.012	5.09	0.030	78.7	21.0	11.3	20.1	2.46	5.88	12.3	
1988年4月-1989年3月													
林外雨	水量 (mm) 1927.0												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.272	0.010	0.288	0.017	0.315	1.46	1.66	0.532	0.328	0.391	1.33	18.5
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	5.25	0.191	5.55	0.334	6.06	28.2	32.0	10.2	6.31	7.54	25.7	
林内雨	水量 (mm) 1415.4												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.451	0.015	1.02	0.115	0.403	3.92	4.58	1.29	3.94	0.845	2.11	41.5
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	6.39	0.214	14.4	1.62	5.71	55.5	64.8	18.2	55.7	12.0	29.8	
樹幹流	水量 (mm) 104.2												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.276	0.010	0.777	0.030	1.05	6.36	14.1	1.70	2.70	0.839	3.06	3.6
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	0.288	0.010	0.810	0.031	1.10	6.63	14.7	1.77	2.82	0.874	3.19	127
溪流水	水量 (mm) 1075.4												
	平均濃度 (mg·l ⁻¹)	0.069	0.010	1.94	0.006	21.4	6.32	3.72	5.63	1.02	1.90	3.75	75.3
	負荷量 (kg·ha ⁻¹)	0.745	0.104	20.9	0.061	231	67.9	40.0	60.5	10.9	20.4	40.3	

林内雨と樹幹流を比較すると、ほとんどの物質で樹幹流は林内雨の濃度を上回るが、負荷量にすると樹幹流量は林内雨量の1/15程度であることから、林内雨の方が大きい。

5. 溪流水量と水質

溪流水の水質は、森林生態系の物質循環特性を反映しており、その変化は物質の起源や水の移動経路を知る重要な情報を含んでいる。これまでの一連の調査から、物質循環に組み込まれた循環量の多い物質（Type IIの物質で、 NO_3^- -N、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} が属す）は、表層土壌に多量に蓄積される傾向があり、従って表層土壌水で濃度が高まり、降雨時の流量増減時には降雨前のベース濃度を上回る性質を持つ。一方循環量の少ない物質（Type Iで、 SiO_2 、 Na^+ 、 Cl^- が属す）は、表層土壌水で濃度が低く、降雨時の流量増減時にはほぼベース濃度に戻る流出挙動が明らかにされている²⁾。これらの流出特性を持つことから、単純に物質濃度と溪流水量を対比すると、Type Iの物質では水量の増加とともに濃度減少を示すか、それほど変化しないのに対して、Type IIの物質では流量増加に従って濃度も高まることが予想される。

そこで、1985年から2週に一度の定期調査で得られた4年間のデータから、図-5に採水時の水量と濃度の関係を描いた。図には4年間の平均濃度も載せている。まずType Iの SiO_2 について、水量が30L/secを超えると濃度の減少傾向が読み取れる。全体として、ばらつきが大きいように見えるが、これは濃度軸を拡大して描いているためである。4年間に観測された最高濃度は23.2mg/L、最小濃度は18.0mg/Lであり、平均値21.5mg/Lの24%に当たるわずか5.2mg/Lの濃度区間に、全てのデータが分布する。林外雨濃度が雨量に対して2桁も変動することを考えると、森林生態系はかなりの水質調節機能を持つことになる。 Na^+ については、さらにデータがまとまっており、Type Iの性質がよく表れている。また、濃度変動幅が小さいことから、水量の安定した冬季の溪流濃度を年平均値に近似できることも分かる。

表-1に示した物質の中で、水量に対して最も敏感に応答するのは NO_3^- -Nであり、水量増加とともに濃度も

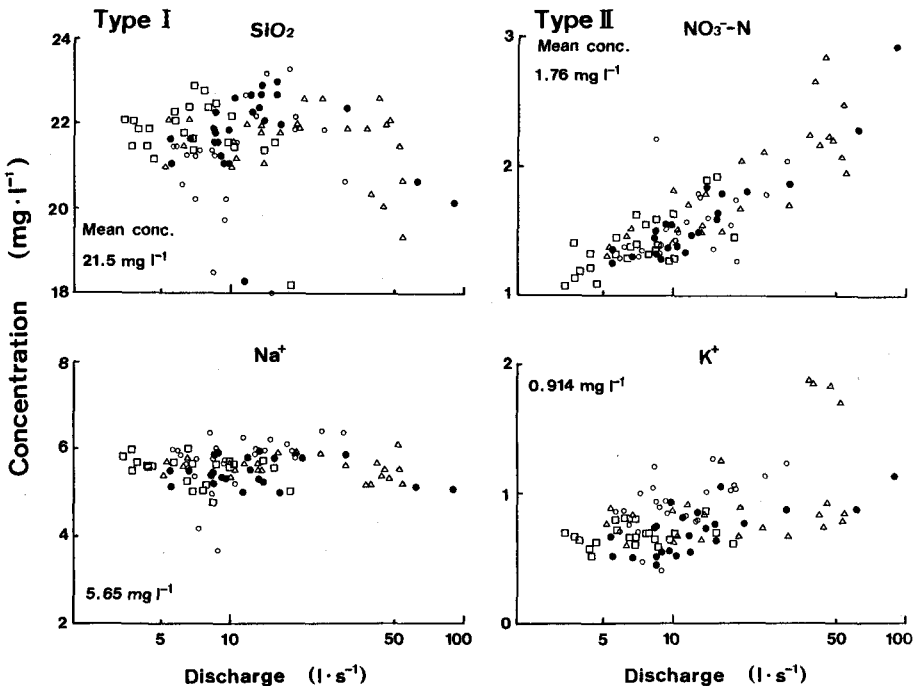


図-5 溪流水量と物質濃度の関係（○：1985年4月－1986年3月、●：1986年4月－1987年3月
□：1987年4月－1988年3月、△：1988年4月－1989年3月）

上昇している。夏季には表層土壤中では有機物分解が進み、 NO_3^- -N濃度が高まること、さらに多量の降雨によって表層土壤中の NO_3^- -Nが流出すること、に起因すると考えられる。ただ濃度上昇するとは言っても、高々3倍以内であり、これも林外雨などに比べて変動幅ははるかに小さくなっている。 NO_3^- -Nの流出挙動に比べると弱いものであるが、 K^+ 濃度も水量との間に正の相関が認められる。したがって、TypeIIの物質の年流出負荷量を推定するには、季節変動の描ける程度に十分な観測値が必要となる。

6. 鉛直水移動と物質移動量

水分移動について、1985年度からの年林外雨量は、それぞれ1576.5、1552.5、1293.0、1927.0mm、年流出水量は733.7、711.4、383.3、1075.4mmであり、これらの値から年蒸発散量は842.8、841.1、929.7、851.6mmと計算される。観測期間中で最も林外雨の少なかった1987年度を除けば、年蒸発散量は850mm程度で安定している。

次に、図-6はTypeIIの物質も含め植物体の必須元素について、1987年4月から1989年3月までの筑波森林

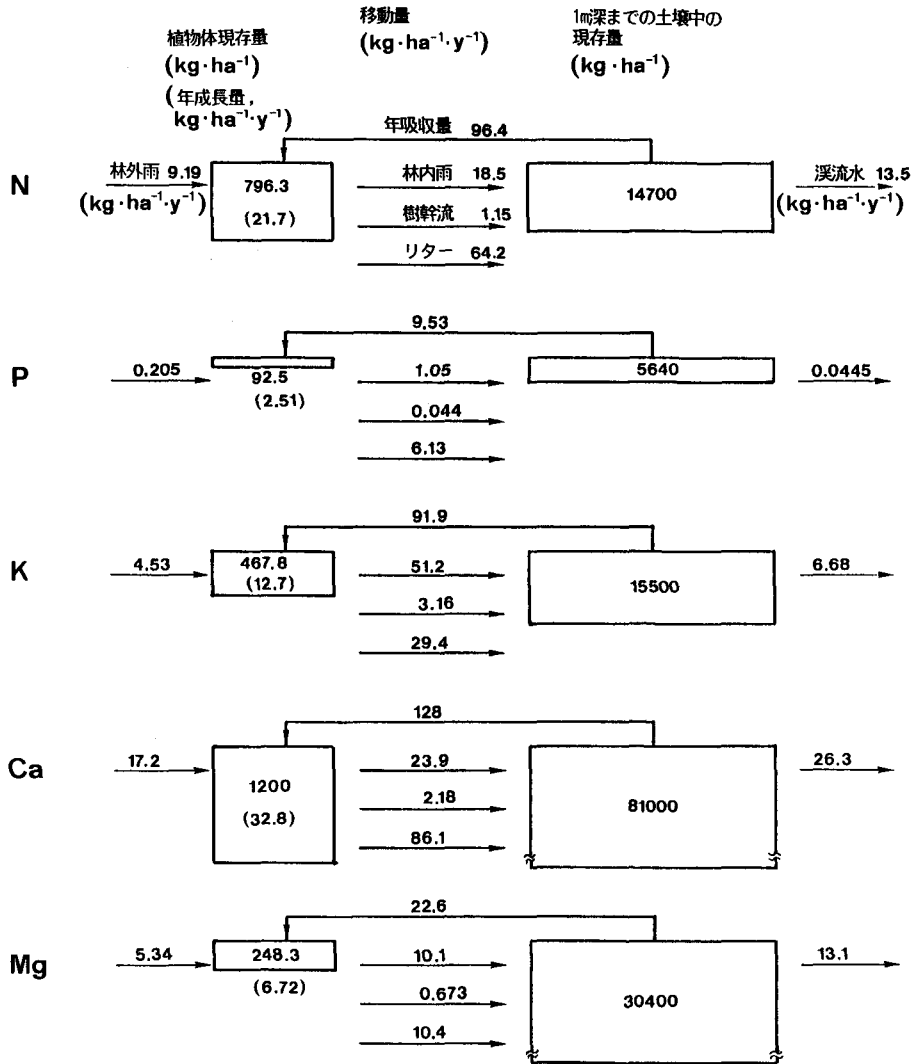


図-6 森林生態系における物質循環量（2年間の平均値）

試験地スギ林内の物質移動量を整理した結果である。単位は植物体の現存量³⁾と土壌中の物質現存量⁵⁾はkg/haであり、これ以外は全てkg/ha/yに統一している。植物体の生長量は1984年2月と1985年10月に実施した現存量調査から推定した値であり、土壌中の現存量は森林土壌を1m深まで採取し、全量分析した値から求めている。図中の年吸収量は(林内雨+樹幹流+リター+年生長量³⁾)から林外雨による流入負荷量を差し引いた値である。年吸収量を森林内の物質循環量と見なせば、物質循環量は図-6に載せた全ての物質で林外雨のもたらす流入量や溪流による流出量より1桁かそれ以上大きく、これが森林土壌水質や渓流水質を決定する本質である。

P、K、CaとMgは土壌起源の物質であり、当然のことながら土壌中にはかなりの量が蓄えられている。ところが、大気起源の物質のNも森林の発生・発達により14.7t/haも土壌中に蓄積されており、これは林外雨による流入量の1600倍、年生長量の約700倍にも上る。また、流入負荷量と流出負荷量を比較すると、Pについては土壌に吸着されやすいため、流入量は流出量を上回る。Nについては流入量は流出量より少なく、厳密な意味で収支が取れていない。その最大の理由は、実際の林床への供給量は林外雨では評価できないからであろう。すなわち、樹体には大気降水物やエアロゾルなどが付着しており、この物質量が欠如しているからである。これらを運搬するのは林内雨と樹幹流であり、この合計値を見れば、Nについても流入量は流出量を上回っている。ただし、林内雨や樹幹流には樹体からの溶出量が含まれており、現状では両者を区別することができない。厳密に森林内の物質収支を明らかにするには、林内雨や樹幹流の生成機構や含有する物質の起源を解明する必要がある。

7. おわりに

本研究では森林生態系における鉛直水移動とそれに伴う水質変化から、森林内の物質移動量を明らかにした。図-6に描いたように、森林生態系での物質循環量は系外からの流入量や系外への流出量よりはるかに大きく、この受け皿としての大きさが流域へのインパクトを和らげることになる。

厳密に森林内の物質収支を調べるには、質・量の両面から林内雨と樹幹流の生成機構を解明する必要がある。林床に到達する水分は林内雨と樹幹流であり、さらに両者の発生する林外雨量は異なるから、詳細な観測は降雨流出機構に新たな知見をもたらす可能性がある。水質面からは針葉樹、中でもスギ林は葉面に多量のワックスを保持しており、このワックス内にエアロゾルなどが捕捉される現象が最近になって注目されている。こうした葉面への付着や溶脱現象の解明は、より正確な森林生態系における水や物質の移動機構究明に役立つと期待される。

最後に、本研究の一部は平成2年度日本生命財団研究助成(研究代表者・大阪大学教授・村岡浩爾)を得て行われたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 平田健正・村岡浩爾：筑波森林試験地における土壌水質および渓流水質の季節変化について、水工学論文集、第35巻、pp.105-110、1991。
- 2) 平田健正・村岡浩爾：森林域における物質循環特性の渓流水質に及ぼす影響、土木学会論文集、第399号、pp.131-149、1988。
- 3) 村岡浩爾・平田健正：渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究(第4報)、国立公害研究所研究報告、第116号、pp.75-97、1988。
- 4) 岩坪五郎・堤 利夫：森林内外の降水中の養分量について、京都大学演習林報、第39巻、pp.110-124、1987。
- 5) Hirata, T. and Muraoka, K.: Runoff of dissolved materials in Tsukuba experimental forested basin, Proc. of 6th APD-IAHR Congress, Kyoto, Environmental Hydraulics, 113-120, 1988。