

筑波森林試験地における渓流水質の長期変動

Long-term variation of streamwater chemistries in the Tsukuba experimental forest

平田 健正*・唐 常源**・村岡 浩爾***

By Tatemasa HIRATA, Changyuan TANG and Kohji MURAOKA

The hydrochemistry of the Tsukuba experimental forest(67.5ha) has been observed since 1985, including rainfall, throughfall, stemflow, soilwater, groundwater and streamwater. The annual water input by rainfall and output by streamwater averaged during 7-year water cycles were estimated to be 1656mm and 849.7mm, which gives the rainwater runoff rate to be 51.3%.

As to the streamsolute, the nitrate concentration tended to be raised with increasing streamwater discharge and temperature in summer season every year, and such coincidence in the rise of concentration and discharge produces a large amount of runoff loading in summer. Contrary to this, the dissolved silicate of streamwater reduced the concentration in summer. The difference between both streamsolute behaviors is reasoned to be driven by the runoff of soilwater, which keeps the nitrate concentration higher and the silicate lower near surface due to the element cycle in the forest ecosystem.

Keywords: streamwater chemistry, long-term trend, forest ecosystem, element cycle

1. はじめに

森林域に到達した降雨（林外雨）は、樹体と接することにより量・質ともに大きく変化する。林外雨の一部は樹冠に貯留され、残りの部分が林内雨・樹幹流となって林床に届くが、これらの森林内降雨には樹体のトラップしたエアロゾルなどが溶解するため、林外雨に比べて溶存物質濃度は高まっている。さらに土壤中では有機物質の分解やイオン交換などの生物・化学反応により、森林域特有の土壤水質が形成されていく。

こうした森林内における水循環と水質変化を筑波森林試験地で観測し、森林生態系での物質循環特性と関連付けた解析を行ってきた¹⁾。その結果、溶存物質の挙動は大きく2つに分類できることを見い出した。すなわち森林生態系の物質循環に組み込まれた循環量の多い栄養物質と物質循環から外れた循環量の少ない物質の2つの流出形態である。前者の栄養物質は森林の生長に伴って次第に土壤中に蓄積されていくのに対して、後者は落葉・落枝などの植物遺体が混入して土壤含量が減少する。しかも森林土壤の物質含有量は土壤水質を形成する重要な要素であり、この土壤水の降下浸透は地下水質や渓流水質のベースを構成するとともに、降雨時の土壤水の流出は渓流水質変化をもたらす。つまり森林生態系における物質循環は、森林土壤の物質含有量や土壤水質を介して

* 正会員 工博 国立環境研究所総合研究官 地域環境研究グループ
(〒305 茨城県つくば市小野川 16-2)

** 理博 千葉大学助手 大学院自然科学研究科 (中国・中山大学助教授 地理系)
(〒260 千葉県千葉市稲毛区弥生 1-33)

*** 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)

渓流水質を形成することになる。

土壌水質の形成は、基本的には水分量に支配されるが、温度に依存する微生物活性にも影響される。結果として土壌水質や渓流水質は気象要因に大きく依存し、季節的な変動を描くことになる²⁾。土壌水質や渓流水質は地質や植生などの多くの流域情報を含むため、降雨流出成分の分離にも利用されているが^{3), 4)}、これにしても対象とする降雨流出がどのようなレベルで変動しているのか、明らかにしておく必要がある。ベース値が違ってれば、同じ流域であっても溶存物質の流出挙動や流出負荷量が大きく異なるからである。

筑波森林試験地での観測は1985年4月に始まり、この間、渓流水質については2週に1度の資料が蓄積されている。さらに、林外雨や林内雨、樹幹流などの観測資料も整っている。本論文では、特に渓流水質の長期変動を基に、森林生態系における水循環と物質移動量など、渓流水質の形成過程を考察する。

2. 森林試験地と現地観測の概要

筑波森林試験地は筑波山の東側斜面に位置し、流域面積67.5haの扇形に近い形状を持つ(図1)。標高はおおよそ200mから380mの範囲にあり、平均斜度は15度である。流域内にはスギ(流域面積の53%)、ヒノキ(18%)、アカマツ(14%)が植林されており、特にスギ林は水を好む性質があるため渓流沿いに広がっている。この森林試験地の出口A1地点で、林外雨と渓流水を観測している。林外雨は転倒マス型雨量計を用いて10分間強度をメモリーバックに記録し、ほぼ同じ地点でポット型雨量計を利用して水質分析用試料を採取する。渓流水もA1地点で採水と水位計による流量観測を実施した。これらの定期観測は、一部欠測期間(1990年2月から同年9月)はあるが、1985年4月を起点に2週に1度の割合で継続されている。

さらに、林内雨、樹幹流、落葉・落枝や土壌水質などの森林内物質循環に関係する諸量は、スギ林内のB4地点で観測した。林内雨、樹幹流、落葉・落枝は1987年4月から1989年3月までの2年間、土壌水質の鉛直分布と地下水質は1986年4月から1989年3月までの3年間観測した。これらの観測頻度も2週に1度である。また、森林植物体は日平均気温が10度で生長を始めるが、この時期は筑波地域では4月になるため、本論文では4月から翌年3月までを1水文年とした。

3. 林外雨量と渓流流出水量

1985年から1993年までの欠測期間を除いた年林外雨量と年流出水量を表1にまとめている。表1には、林外雨および渓流水の年平均溶存物質濃度と負荷量も整理した。7年間の観測で、最大年林外雨量は1991年度の2120mm、最小は1987年度の1293mmであり、年流出水量はそれぞれの水文年に対応して最大は1396mm、最小は363.3mmとなっている。7年間の平均年林外雨量は1656mm、平均年流出水量は849.7mmとなり、平均流出率は51.3%である。

図2には年林外雨量と年流出水量の関係を描いた。両者の直線近似式も載せているが、流出水量(y)は林外雨量(x)に対して、ほぼ傾き1で増加している。

このことは年蒸発散量は緯度や気温には影響されるが、林外雨量の多寡にはあまり関係せず、地域によってほぼ一定値を取ることを表している⁵⁾。図2には年林外雨量から年流出水量を差し引いた年蒸発散量も記しており、林外雨量が増加すると年蒸発散量はわずかに減少傾向にはあるが、大きな変化のないことが分かる。またHamon式⁶⁾から筑波森林試験地の可能蒸発散量を見積もると750mm程度となり、これは平均年林外雨量と平均年流出水量の差から求めた平均年蒸発散量806.7mmとまずまずの対応を見せる。

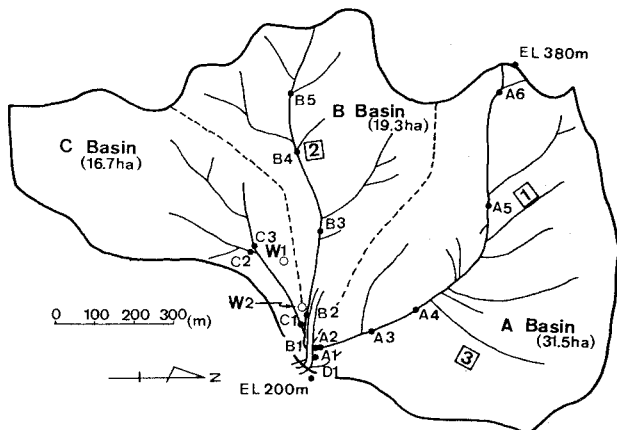


図1 筑波森林試験地の流域区分と観測地点

表1 1985年4月から1994年3月までの筑波森林試験地における水移動と物質移動

		NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	PO ₄ -P	SiO ₂	Cl	SO ₄	Na	K	Mg	Ca	pH	SC(μScm ⁻¹)
1985年4月-1986年3月														
林外雨	水量 (mm)	1576.5												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.389	0.007	0.310	0.015	0.177	1.66	1.47	0.634	0.271	0.195	0.314	5.1	14.9
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	4.57	0.110	3.04	0.955	2.20	10.1	6.45	3.65	3.58	1.08	1.80	2.8	67.1
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	6.13	0.113	4.89	0.241	2.79	26.2	23.2	10.0	4.28	3.08	4.93		
渓流水	流出水量 (mm)	669.7												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.037	0.003	1.64	0.010	21.1	5.83	3.73	5.81	0.983	1.67	3.55	7.03	73.1
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.073	0.008	0.943	0.023	5.2	2.30	2.10	2.75	0.870	0.310	1.16	0.60	8.40
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	0.249	0.023	11.0	0.068	141	39.0	25.0	38.9	6.59	11.2	23.8		
1986年4月-1987年3月														
林外雨	水量 (mm)	1552.5												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.294	0.004	0.355	0.008	0.174	1.70	1.50	0.660	0.313	0.223	0.586	5.0	14.6
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	1.53	0.035	1.77	0.130	2.00	4.19	5.00	2.70	2.34	0.700	1.80	3.5	57.9
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	4.56	0.067	5.51	0.116	2.70	26.2	22.7	10.2	4.87	3.46	9.09		
渓流水	流出水量 (mm)	665.8												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.034	0.003	1.74	0.007	21.7	5.83	3.43	5.48	0.778	1.65	3.59	6.7	74.4
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.079	0.005	1.66	0.014	4.6	1.20	3.50	0.97	0.690	0.40	1.10	1.58	18.8
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	0.224	0.021	11.6	0.045	145	38.8	22.8	36.5	5.18	11.0	23.9		
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	0.671	4.6	19.1
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	1.63	0.018	0.971	0.029	0.400	3.70	3.60	3.39	0.640	0.410	3.26	2.2	58.5
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	2.64	0.042	4.04	0.075	2.11	18.0	15.6	6.68	2.75	3.13	8.67		
渓流水	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	6.6	79.2
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.104	0.018	0.845	0.078	4.6	1.20	2.10	1.25	0.340	0.30	0.70	1.2	29.0
	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	5.7	18.5
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	3.68	0.105	1.64	0.210	1.00	4.44	6.32	2.48	1.63	0.750	2.27	2.4	70.0
	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		
渓流水	流出水量 (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	7.1	75.3
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.205	0.014	1.54	0.027	3.2	1.59	2.10	0.93	1.26	0.74	2.12	0.9	48.4
	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		
1991年4月-1992年3月														
林外雨	水量 (mm)	2120.0												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.265	0.126	0.262	0.006	0.194	1.12	1.82	0.37	0.369	0.150	0.874	5.42	20.8
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	1.334	2.50	2.68	0.015	1.70	3.3	7.83	2.61	3.15	0.550	1.70	1.45	24.5
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	5.61	2.67	5.56	0.127	4.11	23.8	38.5	7.85	7.83	3.19	18.5		
渓流水	流出水量 (mm)	1396.2												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.012	0.016	2.3	0.004	19.9	5.03	3.15	5.30	0.90	1.46	4.77	6.84	66.7
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.051	0.315	1.82	0.007	2.5	1.5	1.9	1.29	1.12	0.35	1.4	0.65	52.3
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	0.166	0.217	32.1	0.053	278	70.2	43.9	73.9	12.6	20.4	66.6		
1992年4月-1993年3月														
林外雨	水量 (mm)	1438.0												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.273	0.003	0.365	0.005	0.247	1.2	1.46	0.438	0.472	0.240	0.570	5.52	23.6
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.806	0.010	0.699	0.022	1.6	1.9	5.4	1.06	2.31	0.41	2.5	1.77	50.2
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	3.93	0.044	5.26	0.075	3.55	17.3	21.0	6.29	6.79	3.45	8.2		
渓流水	流出水量 (mm)	771.6												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.038	0.010	1.75	0.006	20.4	5.03	3.18	4.46	0.857	1.34	4.83	7.25	61.8
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.086	0.12	0.591	0.021	2.2	0.6	1.7	1.12	0.409	0.17	1.3	1	60.1
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	0.295	0.078	13.5	0.048	157	38.8	24.5	34.4	6.61	10.3	37.3		
1993年4月-1994年3月														
林外雨	水量 (mm)	1688.0												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.517	0.004	0.335	0.006	0.14	0.87	1.02	0.52	0.292	0.098	0.346	5.88	46.4
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	1.905	0.012	0.685	0.111	0.22	1.73	2.72	1.09	3.11	0.16	1.04	2.08	522
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	8.72	0.061	5.66	0.106	2.29	14.7	17.2	8.78	4.92	1.65	5.83		
渓流水	流出水量 (mm)	1005.8												
	平均濃度 (mg・l ⁻¹)	0.027	0.008	1.76	0.002	20.3	5.1	3.04	5.22	0.670	1.33	4.97	7.52	65.6
	濃度変動幅 (mg・l ⁻¹)	0.069	0.167	0.684	0.017	2.0	1.14	0.73	0.61	0.405	0.2	0.69	0.88	43.3
	負荷量 (kg・ha ⁻¹)	0.269	0.080	17.7	0.016	203	51.3	30.6	52.5	6.74	13.3	50.0		

4. 渓流水質の長期変動

森林生態系では不断に様々な物質が循環している。このうち循環量の多い栄養物質は、主に落葉・落枝や毛根遺体などが混入して、表層土壤中に蓄積されていく。これとは逆に、物質循環から外れた循環量の少ない物質は、表層土壤の物質含有率が減少する。こうした物質循環に伴う分別は、土壌含量や土壌水質、ひいては土壌水の流

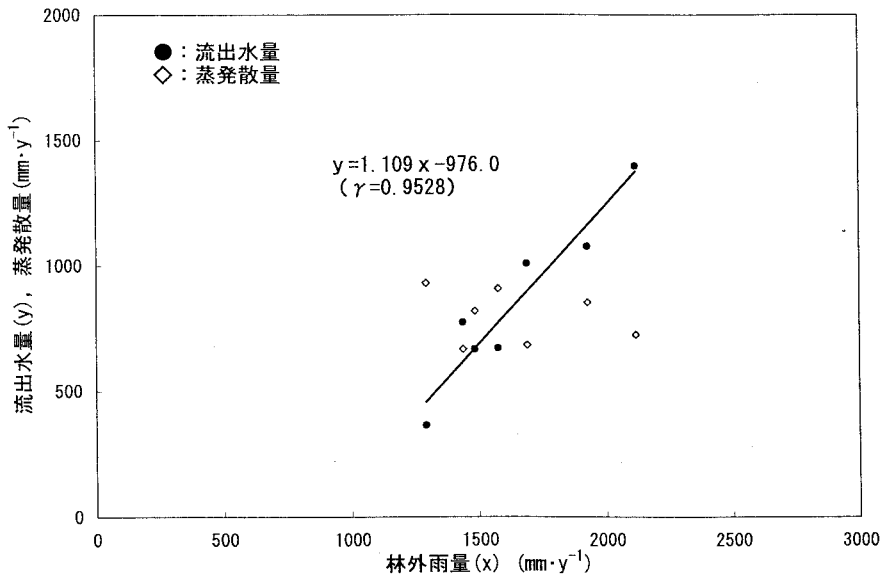


図2 林外雨量と渓流水量および蒸発散量の関係

出によって渓流水質を変化させる。

土壌水に含まれる窒素などの無機栄養物質は土壌中の有機物が分解され溶出するが、この無機化過程は微生物活性に依存するため、土壌水濃度は土壌水分や温度と密接な関係を持つ。特に留意しなければならないことは、わが国では温度の高まる夏季に降水量が多く、土壌水分量も高まることである。したがって、夏季の森林土壌では両者が相乗して表層土壌水の栄養物質濃度を上昇させる。一方、物質循環量の少ない溶存珪酸などは表層土壌水で濃度が減少する。これらの特徴を持つ土壌水の流出は、降雨流出事象における水量通減時の渓流水濃度に変化をもたらすことになる。すなわち、表層土壌水で濃度の高まっている $\text{NO}_3\text{-N}$ などの栄養物質濃度 (Type II) は降雨後の水量通減時に降雨前のベース値を上回るのに対して、 SiO_2 などの循環量の少ない物質濃度 (Type I) はほぼベース値に戻る流出現象である¹⁾。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 以外にもType IIにはK、CaとMg、Type IにはNaとClがある。一方、水量上昇時には地表面流出成分による希釈効果が卓越して、大抵の溶存物質濃度は低下している。

溶存物質の流出挙動は、降雨流出時に加えて季節的にも渓流水質に変動を引き起こしていると考えられる。そこで、1985年4月1日を起点に、半月 (5日間) 単位で林外雨量、流出水量と渓流水濃度を整理し、図3に示した。横軸の1年はいずれも4月から翌3月までを1水文年としている。流出水量については、林外雨のパターンに対応してハイドログラフは増減を繰り返し、特に台風8506号や8610号に応答して鋭いピークを描く。

溶存物質濃度は、先述したType IとType IIに分けて時系列を示した。Type Iに属する物質濃度には明瞭な季節変化は認められず、概して濃度変動幅は小さい。例えば SiO_2 濃度をみると、台風8506号など降雨流出の影響を受けた資料ではスパイク状の明瞭な濃度減少を示すが、それでも観測期間中の最小値は16.7mg/lである。また最大値は23.2mg/lであり、その変動幅6.5mg/lは観測期間中の平均濃度20.8mg/lの30%程度でしかない。NaやCl濃度についても SiO_2 濃度とよく似た時系列を描く。

一方、Type IIに分類された物質の中で $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が最も顕著な季節変動を示し、いずれの観測年においても水量増加とともに濃度上昇が認められる。この理由として、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は降雨流出の水量通減時に濃度が上昇すること、濃度の高まった状態に新たな降雨流出事象が生起するとさらに濃度上昇が生じること、が挙げられる。したがって、梅雨期や台風など多量の降雨がもたらされる夏季に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上昇したと考えられる。また観測期間中の最小値は0.912mg/l、最大値は3.25mg/lであり、変動幅2.34mg/lは平均濃度1.90mg/lの120%にも上る。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度ほど明瞭ではないが、Kにも夏季に濃度上昇が認められる。

ここで渓流水の代表的な溶存物質として、 SiO_2 と $\text{NO}_3\text{-N}$ の流出挙動を比較してみよう。珪素は土壌や岩石起源

の物質であり、表1にあるように林外雨にはほとんど含まれていない。一方、自然状態にある水環境中の窒素化合物の生成は微生物による大気中の窒素ガスの固定に始まり、植物体はこの窒素を利用して生長する。また大気中に飛び散った植物遺体などを溶解するため、林外雨にも窒素酸化物が $\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$ として含まれている。もちろん森林の発生・発達に伴って、森林の表層土壤中に蓄積されていく。こうした物質の起源が、溶存物質それぞれの流出挙動を支配していると言える。特に、 SiO_2 濃度には顕著な季節変動が認められず、また降雨流出時に減

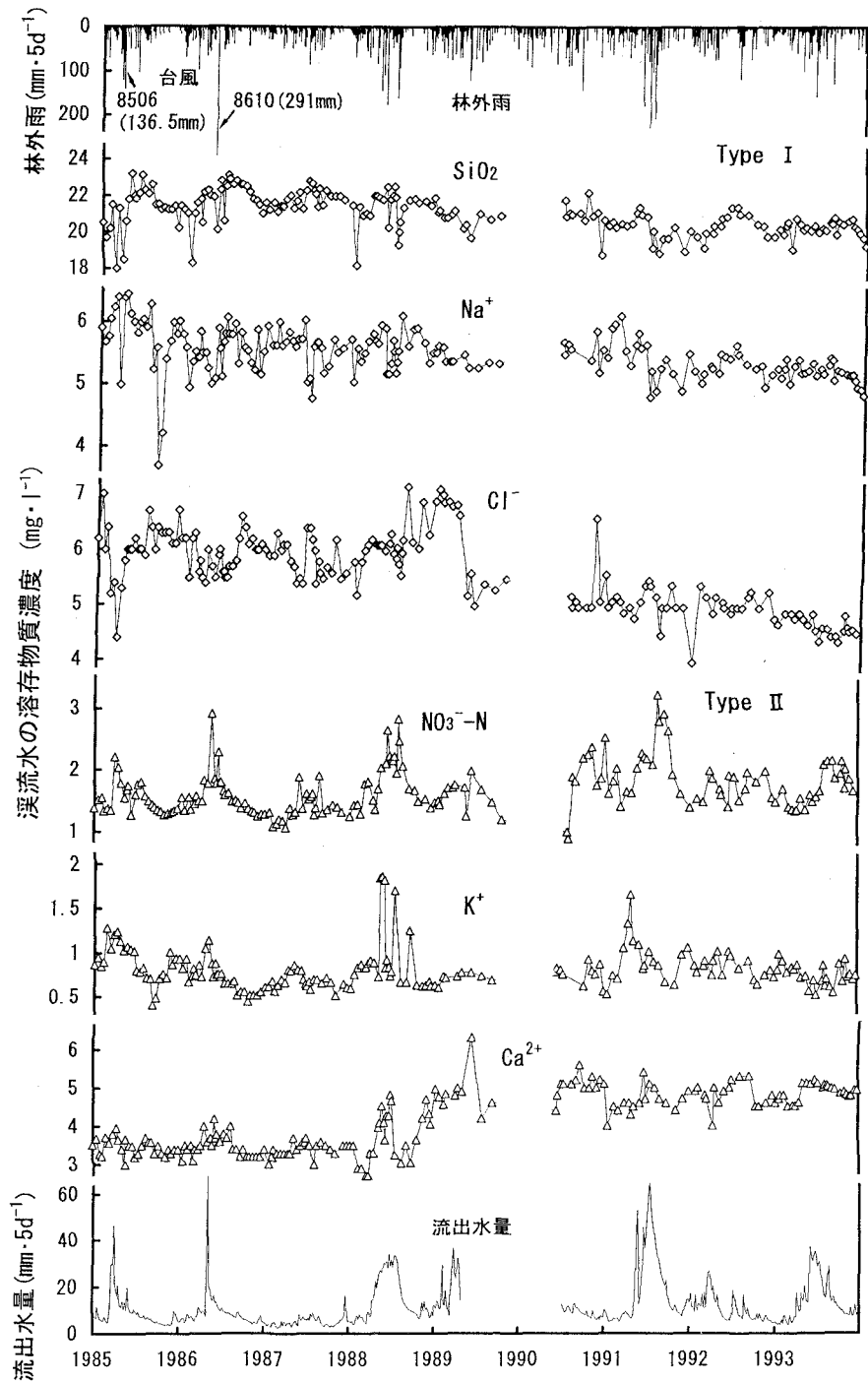


図3 1985年4月から1994年3月までの林外雨量、溪流量と溪流水質の経時変化

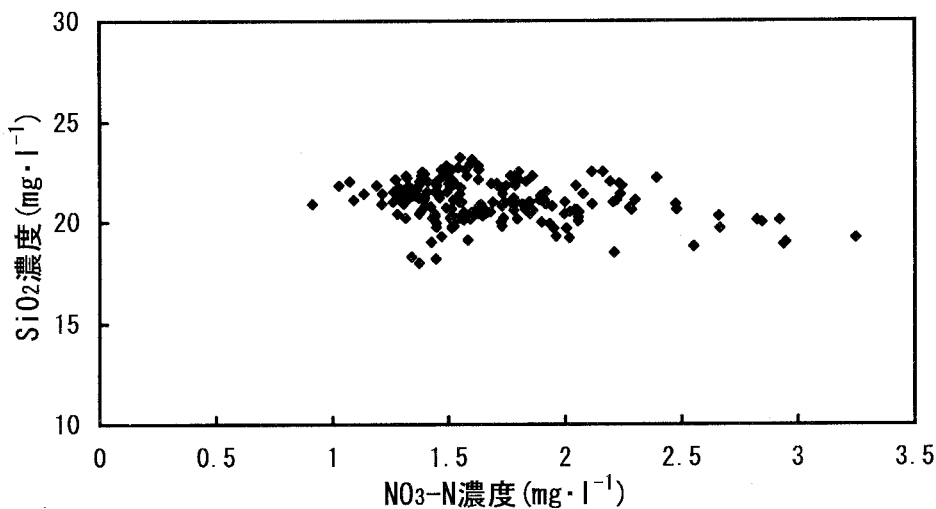


図4 渓流水中のSiO₂濃度とNO₃-N濃度の関係

少する性質がある。逆にNO₃-N濃度は、図3に見るように渓流水量との間には強い正の相関がある。そこで、定期観測値190個のSiO₂濃度とNO₃-N濃度の散布図を描くと図4となる。環境水の濃度であり、かなりのばらつきはあるが、両者には流出特性の違いを反映して負の相関が認められる。さらに、両物質の年平均濃度と年流出水量の関係を図5に示しているが、SiO₂濃度は流出水量の増加とともに減少するのに対して、NO₃-N濃度は明瞭な上昇を示す。これらの結果は、Type I とType II に分類された他の物質にも認められており、特にType II の栄養物質については水量増加と濃度上昇の効果が相乗するため、水量増加は多量の流出負荷を発生させることになる。

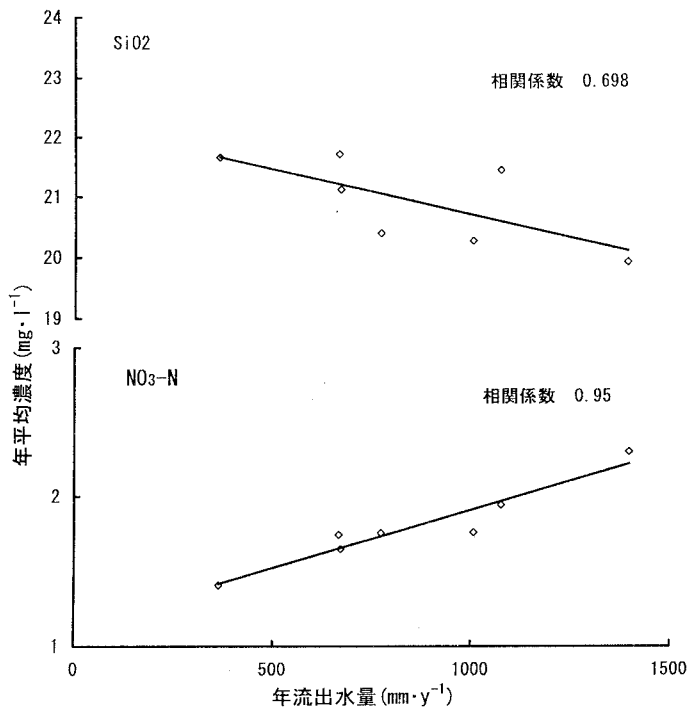


図5 渓流水の年流出水量と年平均濃度の関係

5. おわりに

森林に限らず生態系を含む場の現象は有機的雰囲気であり、そこでの水も含めた物質移動は水分量や温度などの気象要因に大きく影響される。渓流水質の変動レベルを捉えるにしても、林外雨量の多寡を考慮すれば少なくとも数年間の観測は必要とされるし、水収支や物質収支に至っては連続した1年間の観測で1つのデータしか得られない。その意味で、1985年から継続してきた筑波森林試験地での観測結果から、物質循環に伴う物質の分別とその結果生じる土壌含量の変化や土壌水質の形成、さらには土壌水の流出による渓流水質の変化について、一応の成果は得られたと考えている。

最後に、林外雨、林内雨、樹幹流、土壌水、地下水、渓流水の順に、森林生態系における鉛直水移動に伴う水

質変化を図6に描き、本論文のまとめとしたい。データは1987年4月から1989年3月までの2年間の平均値である。これらの成分の中で、林外雨に含まれる溶存物質濃度が最も低く、林内雨、樹幹流へと移行するに従って、濃度を高める。特に、Kは樹体にトラップされたエアロゾルなどの溶脱に加えて、樹体自体からも溶出しやすいため、かなりの濃度上昇が認められる。土壌水質について、SiO₂は土壌起源の物質ではあるが、深層に比べて表層土壌水で濃度が低く、深層土壌水や地下水へと水と土壌との接触時間が長くなるに伴って濃度を高めていく。一方、NO₃-N濃度は表層土壌に蓄積された有機物の無機化に由来するため、表層土壌水で濃度が高まり、この傾向は他のType IIの物質についても言える。これらの土壌水質の特徴は、降雨時のみならず、渓流水質の季節変化にも反映されている。さらに年平均値にしても、流出水量が増加するほどSiO₂濃度は減少するのに対して、NO₃-N濃度は上昇するなど、森林生態系における物質循環特性は平均的な水質環境にも影響することが明らかになった。

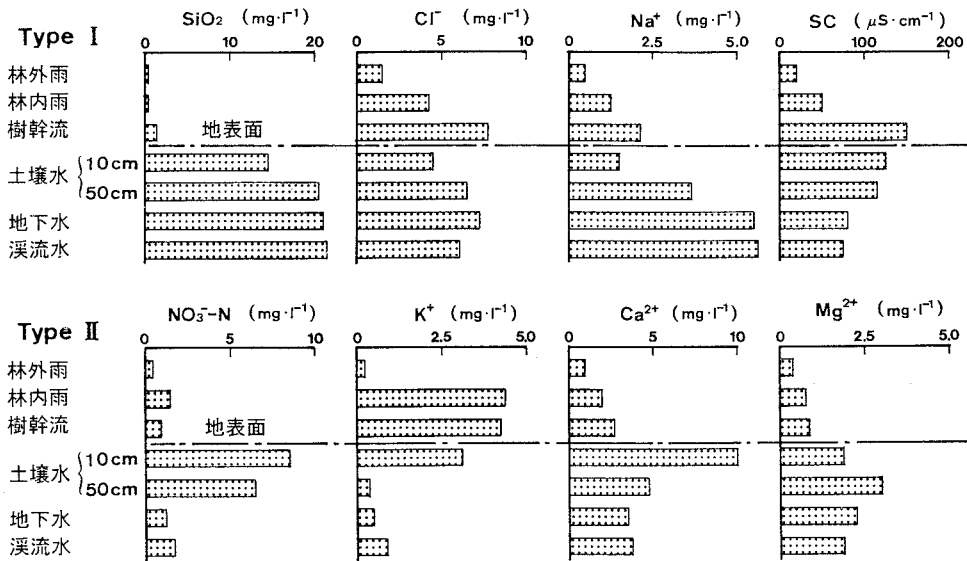


図6 森林生態系における鉛直水移動と水質変化

参考文献

- 1) 平田健正・村岡浩爾(1988)：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，131-140.
- 2) 平田健正・村岡浩爾(1991)：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，105-110.
- 3) 池田英史・大隅多加志・宮永洋一(1993)：同位体組成を指標とした河川流出成分分離手法の適用性．電力中央研究所報告，U92056，37p.
- 4) Takeuchi, K. and Y. Sakamoto(1986):Hydrograph separation using NO₃⁻ for identifying the interaction between surface and subsurface waters in a small mountainous basin. IAHS Publ. No. 156, 199-209.
- 5) 福嶋義宏・鈴木雅一(1986)：山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10年連続日・時間記録への適用．京大演習林報告，57，162-185.
- 6) Hamon, W.R.(1961):Estimating potential evapotranspiration. Proc. ASCE(HY 3), 107-120.