

## 4-3 里山（都市近郊林）流域圏における生態系機能のモデル化に関する技術開発

田中庸央・中村建次・佐野方昂・青山 幹・森谷 昭・服部嘉治・川崎邦博・  
西沢きみ子・岡田 登・大沼淳一・高田文子・酒井祥亘・山野内隆英・伊藤賢次・  
吉田恭司・坂井田稔・鈴井恵美子・岩田杉夫・小川敏幸・丹羽智子  
（愛知県環境調査センター）

### 1. 研究の目的と概要

多様な環境問題が取り上げられる中で、近年のキーワードのひとつに水系の「流域管理」があげられている。これは水循環を森林、農地、都市、沿岸域といった集水域というスケールでとらえ、持続可能な良好な水環境を管理しようとするものである。流域の視点から水循環を考える場合、我が国で重要な場を占めるのは森林と水田と都市であり、河川はこれを連ねる生態軸として水源地域から内湾に至る物質輸送系としての役割を果たしている。

最近、新たな地球環境問題として注目されている大気経由の窒素負荷の増加に伴う森林生態系の窒素飽和 (Nitrogen saturation)、ダム湖、ゴルフ場、宅地開発などの大規模開発に伴う河川から海域へのケイ素補給の減少 (シリカ欠損)、大都市域におけるヒートアイランド現象などは、都市域からの人間活動由来の物質が森林域へ輸送される過程で森林内外で化学的変質をもたらしたり、逆に森林域からこうした物質が都市域に輸送されることにより、最終受水域である湖沼や内湾における食物連鎖構造に対して生態系変質をもたらす可能性が指摘されている。このように、都市と森林は物質の流れを介して有機的に繋がっており、流域がもともと有していた様々な環境緩和機能の低下に関わる環境変化について、森林、農地、都市、沿岸域の生態系を統合する視点からの集水域研究に熱い視線が向けられている。

里山生態系は本来、二次林、水辺、谷津田、葦草地など、二次的自然から成り立ち、物質の流れを介して相互に密接に関わっている。そこで本プロジェクトでは集水域研究の第一歩として、里山をフィールド研究の対象として選択した。愛知県の里山は、多くが都市と奥山の境界域を分断するように南北に幅広く分布し、県土面積の 9.9 %、森林面積の 22.9 % を占めるなど重要な集水域である。

里山と都市との相互関係を水循環ダイナミックスの面から定量的に明らかにするには、同一地域内で、大気（降雨） - 二次林（里山） - 土壌 - 渓流系について森林水文学、陸水学、地球化学、酸性雨化学、森林生態学といった研究分野の連係のもとで研究を進める必要がある。同時に、温帯落葉広葉樹林の物質循環の特徴は、秋に落葉、春夏に分解・生長という季節変化をもち、休止期（冬）の存在、リターフォールの最大期と分解・生長の最大期とに位相差があるという性質を持つことから、周年にわたる現地観測体制で臨む必要がある。

本研究では、都市近郊の落葉広葉樹二次林として豊田市南東部に位置するトヨタフォレストヒルズ内に 1.47 ha の試験流域を設置して、水文素過程における水収支や物質循環および土壌表層での炭素動態にかかわる長期・連続的観測を通じて里山（都市近郊林）流域圏における生態系機能を明らかにし、持続可能な里山生態系管理手法の開発をめざす。

本研究の全体計画は、主として次のような内容で構成される。

降水から渓流水までの水文過程（水循環）に関わる一斉観測

降雨イベント時の流出ハイドログラフに応じた水質成分の流出過程の定量的解析

都市近郊林における大気降水物の供給様式に関するモデル化研究

降水から渓流水に至る水質形成機構や里山林の汚濁物質浄化作用などの定量化

土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスと森林環境要因（温度、土壌水分、植生等）の相互関係

里山林における土壌表層の炭素動態の解明

## 2. フェーズ の成果

### 2 - 1 . 目的及び目標

フェーズ 1 では、試験流域での降雨から渓流水に至る水質形成メカニズムを解明するための第一段階として、林外雨、林内雨、樹幹流および渓流水の水質のレベルと変動を把握することを目的に調査を実施した。同様に、試験流域の土壌からの  $\text{CO}_2$  フラックスの変動をバッチ方式で測定し、その変動幅と変動要因についても調査した。さらに、都市域から大気を経由して近郊林に物質が供給される状況を大気化学の観点から把握することを目的とした。

### 2 - 2 . 方法及び結果

#### 2 - 2 - 1 調査地点の概要

調査は愛知県豊田市中心部より南東約 6 km に位置するトヨタフォレストヒルズ内の試験流域で実施した（図 1）。試験流域は北緯  $35^{\circ} 02' 00''$ 、東経  $137^{\circ} 11' 27''$  に位置し、標高 40 ~ 105 m の南東斜面で、集水域面積は 1.47 ha である。流域の末端に量水堰を設置し渓流水流出量を連続測定した。調査地点一帯の土壌は風化の進んだ花崗岩を母材とした砂礫の多い堆積物から構成されている。豊田のアメダス気象観測点における 1992 年から 2002 年までの 11 年間の年平均気温は  $14.5^{\circ}\text{C}$ 、年平均降水量は 1366 mm である。流域内はコナラ、アベマキ、タカノツメなどが優占する落葉広葉樹二次林であり、一部にマツ枯れによって衰退したアカマツが見られる。

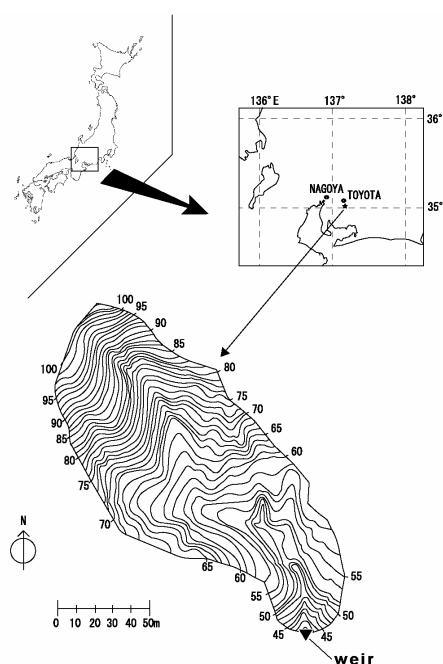


図 1 試験流域

#### 2 - 2 - 2 各水文過程での水質特性

図 2 は森林における降雨流出過程を示す。森林に流入する降雨の一部は樹冠層で遮断され蒸発するが、多くは葉や枝を通過して林内に降下し（林内雨）、また一部は樹幹に集められ（樹幹流）林床土壌に到達する。林床に到達した降雨の大部分は即座に森林土壌中に浸透し、中間流または地下水流となる。そして最終的には渓流水として森林から流出する。一般的に降雨と渓流水の水質は大きく異なるが、これは水の移動に伴いさまざまな生物地球化学的な作用を受けて渓流水の水質が形成されるためにほかならない。これまで、主に水源涵養の観点から調査した森林地帯での渓流水水質に関しては数多くの報告があるが、都市近郊における研究事例は比較的少ない。

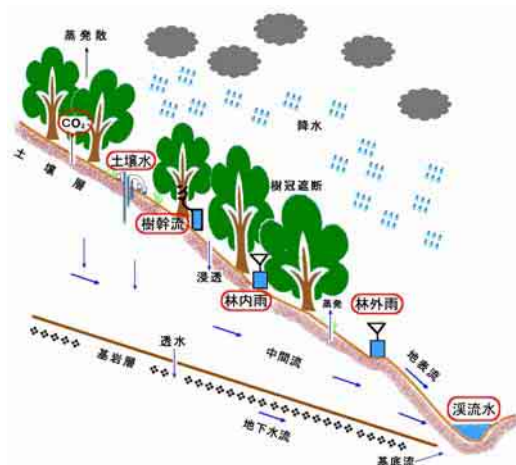
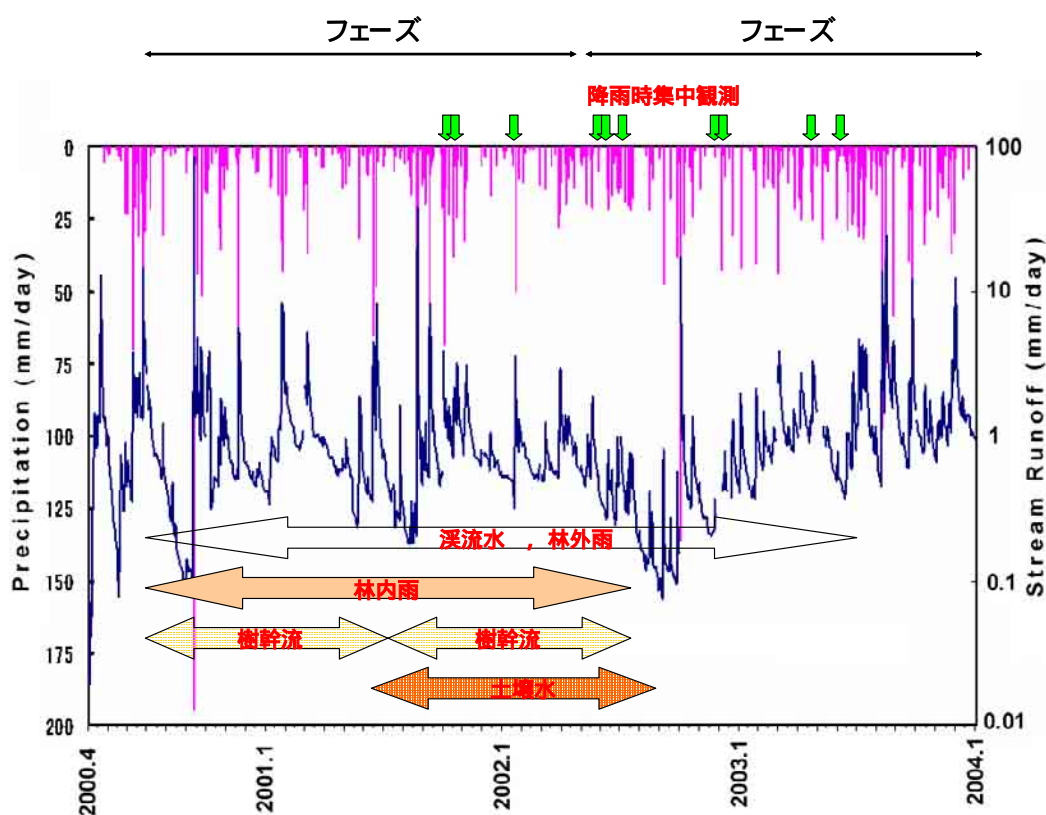


図 2 降雨から渓流水に至る水文過程

林外雨は、周辺上部に遮蔽物がない平坦な場所で、地上 1.5 m の位置に 2 L ポリ瓶を 1 個設置し降雨を採取した。林内雨については、流域の林分を代表するような試験区を設定し、試験区内に同様に 3 個の採取容器を設置した。林外雨、林内雨ともポリ瓶の開口部にステンレス製の網をかぶせ、リターや虫などの混入を防いだ。まとまった降雨があった後に、採取容器を新たな物と交換し、試料の入ったポリ瓶を実験室に持ち帰った。樹幹流は代表試験区内に 12 本の樹木を選び、樹幹にウレタンフォームを巻き付けて、流下する樹幹流を 20 L のポリタンクに集めた。まとまった降雨があった後に採取量を計量し、その一部を分取して実験室に持ち帰った。渓流水は量水堰の直上流部でポリ瓶に採取した。渓流水については、降雨に関係なく頻度を上げて採取した。さらに、試験流域内の斜面において土壌水を採取した。

実験室に持ち帰った試水は、ただちに一部を分取して pH (堀場 F-8 型ガラス電極 pH 計) および導電率 (EC、堀場 DS-15 型導電率計) を測定した後、一部は溶存物質測定用にガラス繊維濾紙 (Whatman GF/C) を用いて濾過した。濾液のイオン成分はイオンクロマトグラフ (日本ダイオネクス DX-500) で、Al および SiO<sub>2</sub> については ICP 発光分析装置 (セイコー電子 SPS 1200A または VISTA MPX) でそれぞれ分析した。また有機炭素 (TOC、DOC) については全有機炭素計 (島津 TOC-500 または TOC-V) で、全窒素 (TN) および全リン (TP) はそれぞれ未濾過試水をペルオキシ二硫酸カリウムで湿式分解後、常法に従い分析した。

現地観測は 2000 年 6 月より開始し、**図 3** に示すようなスケジュールで観測を実施した。フェーズとフェーズを合わせて、合計で林外雨 108、林内雨 163、樹幹流 349、土壌水 7 層 × 32、および渓流水 160 試料を採取し水質分析に供した。



**図 3** 試験流域のハイドログラフと水質観測

以下に各水文過程での水質の特性について述べる。

(林外雨)

林外雨中のイオン成分等について試料採取期間中の降雨量で重み付けした加重平均値と範囲を表 1 に示す。ただし採取試料量が 5 ml 程度の場合は溶存成分濃度が極端に高い場合があったので、それらのデータは除外した。雨水の pH は 3.6 ~ 6.4 の範囲で変動し、3 年間の平均 pH は 4.61 で観測値の半数以上が pH 5.0 を下回っており、いわゆる酸性雨が降下していたことがわかる。この値は愛知県内の近年の平均的な降雨 pH とほぼ同様である。イオン組成をモル比でみると、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  が主要成分を占め、ついで  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  の順に多く存在していた。表の下段に示した全国調査の値と比較すると、イオン成分は海塩由来と考えられる  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  を除いては、全国平均値を上回る値を示している。特に  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  などの人為由来成分の濃度が高く、都市近郊の降雨水質特性を示しているものと考えられる。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  濃度が全国平均よりも低いのは試験流域が比較的内陸部に位置するためと思われる。イオン成分等の濃度は降雨イベントごとに大きく変動し、降雨量が少ない時には含まれる物質が多く、逆に降雨量が多い時には物質濃度が低い傾向にあった。

表 1 試験流域における林外雨の平均水質と変動幅

	pH	EC	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	Cl	$\text{NO}_3^-$	TN	TP	DOC
		(μS/cm)			(μmol/L)								
平均値 (2000.6.30 ~ 2003.7.3)	4.61	16.9	19.4	27.7	7.6	9.5	4.1	30.0	27.1	28.1	50.9	1.4	127
最大	6.48	121	240	297	106	188	51	215	220	244	413	31	1417
最小	3.66	3.5	1.7	1.1	0.8	0.7	0.8	2.6	0.6	1.0	4.1	0.10	9
第3次酸性雨全国調査平均値	4.67	22.7	54.9	21.1	2.6	7.5	7.1	21.1	63.7	17.8	-	-	-
1999.4 ~ 2002.3 の 3 年間の平均値													

(林内雨)

降雨が森林の樹冠に達すると、一部は遮断され蒸発するが、残りは林内雨と樹幹流に分かれて土壌表面に到達する。この際、降雨は樹木に付着した乾性沈着物質を洗脱したり、植物体から物質が溶脱するため、一般的に林内雨は林外雨に比べて溶存物質濃度が高くなる。表 2 に林内雨の主要溶存物質の採取量で重み付けした加重平均濃度を示す。林内雨は 2 期に分けて合計 5 地点でサンプリングしたが、物質によっては 2 倍以上の濃度差を示す場合もあった。林内雨の pH は林外雨に比べると若干上昇し pH 5.0 ~ 5.3 を示した。これに関して柴田 (1999) は降水中の  $\text{H}^+$  が葉面において主に  $\text{K}^+$  と交換されることによって酸中和機構が生ずるためとしており、針葉樹林よりも広葉樹林でそれがより顕著であると述べている。その他、林外雨の水質と比較するとすべての物質で溶存濃度が増加しているが、特に  $\text{K}^+$  と DOC で濃度上昇が顕著であった。また TN に占める有機態窒素の割合は林外雨が約 4 % であるのに対し、林内雨では約 40 % にまで増加しており、有機態成分の溶脱が明らかであった。

表 2 試験流域における林内雨の平均水質

採取期間	pH	EC	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	Cl	$\text{NO}_3^-$	TN	TP	DOC
		(μS/cm)			(μmol/L)								
No1	5.27	25.0	28.4	26.3	79.8	13.2	12.3	28.1	41.4	15.9	109	3.5	-
No2	5.21	51.1	26.1	46.5	70.0	19.1	13.9	29.3	45.6	21.4	99	3.2	-
No3	5.07	52.3	31.9	56.8	80.4	20.9	18.2	37.9	61.2	33.5	107	3.1	-
No1	5.31	33.9	29.7	34.1	108	13.6	12.4	32.6	49.5	31.3	135	3.7	668
No4	5.14	48.2	40.3	43.6	110	46.2	27.0	44.1	126.0	64.9	178	3.2	1231
No5	5.10	31.0	32.9	30.1	95.1	21.0	15.1	41.6	52.5	40.9	104	1.4	636
平均値 (2000.6.30 ~ 2001.7.3)	5.19	42.8	28.8	43.2	76.7	17.7	14.8	31.8	49.4	23.6	105	3.3	-
平均値 (2001.7.3 ~ 2002.7.2)	5.18	37.7	34.3	35.9	105	26.9	18.2	39.4	76.0	45.7	139	2.7	845
標準偏差	0.10	11.7	4.9	11.5	16.5	12.2	5.6	6.6	31.7	17.3	30.0	0.83	335

(樹幹流)

樹幹流については 2 期に分けて合計 12 本 ( 9 樹種) について水質を測定した。表 3 に採取量で重み付けした加重平均値を示す。樹幹流の水質は樹種により pH や溶存成分組成に違いが認められたが、概して各溶存成分濃度は林内雨よりも若干低い値を示す傾向にあった。pH に着目して樹種別に比較すると、コナラでは林内雨よりもさらに上昇し、リョウブも林外雨に比べて高い pH を示した。一方、アカマツやソヨゴ、イヌツゲ、アラカシなどの常緑樹では林外雨や林内雨よりも低い pH を示す傾向にあった。ただし、落葉樹であってもタカノツメ、ヤマザクラ、アベマキは林外雨と同等かそれ以下の pH を示した。溶存成分に関しては、林内雨と同様に K<sup>+</sup> と DOC で濃度上昇が顕著であったが、TP 濃度は逆に減少した。樹種別にみると、タカノツメ、アラカシはほとんどの項目で溶存物質濃度が高く、次いでソヨゴとコナラが比較的高い値を示した。逆にリョウブはイオン成分、DOC と濃度が低かった。表 4 には林外雨と樹幹流の pH について、既往の報告と本研究の結果を取りまとめた。樹幹流の pH は立木の根本付近の土壌に対して強い化学的な影響を及ぼすと考えられるが、常緑針葉樹の樹幹流の pH は概して林外雨より低くなる傾向にあり、逆に落葉広葉樹では酸性を緩和する働きがあることが分かる。

表 3 樹幹流の平均水質

採取期間	pH	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TN	TP	DOC
2000/6/30 ~ 2001/7/3													
No1 コナラ	5.77	22.3	18.0	18.2	75.2	17.8	19.0	33.3	34.4	25.3	61.5	0.47	564
No2 アカマツ	4.78	25.2	22.4	20.3	46.2	19.5	12.2	30.5	43.9	27.7	69.7	0.80	935
No3 タカノツメ	4.52	38.9	37.5	69.4	32.5	22.8	10.2	38.9	80.2	63.5	146	0.57	959
No4 リョウブ	5.13	14.7	12.4	11.6	44.8	5.2	3.6	18.7	21.5	9.6	34.4	0.44	351
No5 ソヨゴ	4.64	34.5	24.5	46.2	45.7	25.1	10.3	43.4	62.5	45.8	119	1.80	511
No6 タカノツメ	4.61	28.8	30.0	44.1	30.6	17.4	8.1	30.3	55.3	40.1	97.4	0.55	605
No7 コナラ	5.38	27.8	24.8	16.7	82.5	26.2	19.5	40.5	47.5	31.2	72.7	0.62	618
No8 リョウブ	5.04	16.1	12.0	15.0	40.0	9.6	5.9	21.4	23.7	13.2	37.3	0.47	380
平均値 (2000.6.30 ~ 2001.7.3)	4.98	26.0	22.7	30.2	49.7	18.0	11.1	32.1	46.1	32.1	79.8	0.72	615
2001/7/3 ~ 2002/7/2													
NoA ヤマザクラ	4.56	25.7	24.8	10.1	20	22.1	7.4	24.9	39.8	27.1	65.9	0.38	732
NoB イヌツゲ	4.43	40.9	27.5	16.9	24	13.9	7.9	18.2	45.0	27.3	57.7	0.52	309
NoE アラカシ	5.03	35.8	30.0	25.1	68	41.1	14.0	43.4	67.6	50.3	113	1.31	655
NoH アベマキ	4.42	29.0	20.2	14.5	28.0	14.9	7.9	25.5	33.1	23.7	62.7	0.62	719
平均値 (2001.7.3 ~ 2002.7.2)	4.61	32.8	25.6	16.6	35.0	23.0	9.3	28.0	46.4	32.1	74.9	0.71	604

表 4 樹幹流と林外雨の pH

樹種	樹幹流	林外雨	出典	樹種	樹幹流	林外雨	出典	樹種	樹幹流	林外雨	出典
<b>常緑針葉樹</b>			<b>常緑広葉樹</b>			<b>落葉広葉樹</b>					
スギ	4.1 < 4.8	松浦 (1992)	コジイ	4.89 > 4.67	森 (1990)	ブナ	6.72 >> 4.82	塚原ら (1994)			
	4.47 < 5.27	岩井 (1993)		4.5 = 4.5	酒井ら (1994)		5.71 < 5.79	竹中ら (1998)			
	4.01 << 5.17	岩井 (1993)	スダジイ	5.42 > 5.21	斉藤 (1994)	ミズナラ	5.29 >> 4.55	真田ら (1993)			
	3.84 << 5.37	岩井 (1993)	アラカシ	5.98 > 5.21	斉藤 (1994)		6.25 >> 4.82	塚原ら (1994)			
	3.93 < 4.87	松尾ら (1993)		4.9 = 5.0	只木ら (1994)		5.79 = 5.79	竹中ら (1998)			
	3.71 < 4.68	松尾ら (1993)	ヤマモモ	5.03 > 4.60	トヨタフォレスト (2001)	シナノキ	4.97 > 4.55	真田ら (1993)			
	3.56 << 4.78	松尾ら (1993)		5.31 < 5.37	藤本 (1994)	イタヤカエデ	5.18 > 4.55	真田ら (1993)			
	3.8 < 4.5	酒井ら (1994)		5.40 > 5.21	斉藤 (1994)	ホオノキ	5.58 > 4.55	真田ら (1993)			
	3.21 << 5.55	藤本ら (1994)	ミズバイ	5.53 > 5.21	斉藤 (1994)		5.77 = 5.79	竹中ら (1998)			
	3.45 << 4.82	塚原ら (1994)	クロバイ	5.85 > 5.21	斉藤 (1994)	アオギリ	5.9 > 5.0	只木ら (1994)			
	3.64 << 5.29	竹中ら (1995)	クスノキ	6.13 > 5.21	斉藤 (1994)	カスミザクラ	5.17 > 4.82	塚原ら (1994)			
ヒノキ	3.94 < 4.77	矢本ら (1992)	ヤブニッケイ	4.6 < 5.2	森 (1994)	オニグルミ	6.45 >> 4.82	塚原ら (1994)			
	3.9 < 4.5	酒井ら (1994)		4.3 < 4.9	森 (1994)	キハダ	5.34 > 4.82	塚原ら (1994)			
	3.5 << 5.2	森山 (1994)	ソヨゴ	4.64 < 4.72	トヨタフォレスト (2000)	ヤチダモ	6.35 >> 4.82	塚原ら (1994)			
	3.2 << 4.9	森山 (1994)	イヌツゲ	4.43 < 4.60	トヨタフォレスト (2001)	クリ	5.56 > 4.82	塚原ら (1994)			
	4.21 << 5.37	藤本 (1994)					5.61 < 5.79	竹中ら (1998)			
アカマツ	4.76 < 5.37	藤本 (1996)				ウダイカンバ	5.20 > 4.54	真田ら (1992)			
	3.8 << 5.2	森山 (1994)				ミズメ	5.85 > 5.79	竹中ら (1998)			
	3.5 << 4.9	森山 (1994)				ケヤキ	5.1 = 5.0	只木ら (1994)			
	4.78 = 4.72	トヨタフォレスト (2000)					4.27 < 5.55	藤本ら (1994)			
トドマツ	4.78 > 4.60	真田ら (1991)				コナラ	4.9 < 5.2	森山 (1994)			
	4.98 > 4.54	真田ら (1992)					4.5 < 4.9	森山 (1994)			
エゾマツ	5.50 > 4.60	真田ら (1991)					5.77 > 4.72	トヨタフォレスト (2000)			
	5.77 > 4.54	真田ら (1992)					5.38 > 4.72	トヨタフォレスト (2000)			
							4.42 < 4.60	トヨタフォレスト (2001)			
<b>落葉針葉樹</b>											
カラマツ	4.33 < 4.54	真田ら (1992)				アベマキ	4.42 < 4.60	トヨタフォレスト (2001)			
	4.28 < 4.82	塚原ら (1994)				ソメイヨシノ	4.6 < 5.0	只木ら (1994)			
						ヤマザクラ	4.66 < 5.37	藤本 (1994)			
							4.56 = 4.60	トヨタフォレスト (2001)			
						リョウブ	5.13 > 4.72	トヨタフォレスト (2000)			
							5.04 > 4.72	トヨタフォレスト (2000)			
						タカノツメ	4.52 < 4.72	トヨタフォレスト (2000)			
							4.61 < 4.72	トヨタフォレスト (2000)			
						モウソウチク	5.3 > 5.0	只木ら (1994)			
						マダケ	4.83 < 5.29	竹中ら (1995)			



(土壌水)

試験流域内の斜面に、7 深度 (10, 20, 40, 60, 100, 150, 200 cm) 別に石英製ポラスカップを先端に取り付けた採取管を埋設し、採取管とテフロンチューブで連結した耐圧ガラス容器内を減圧する方法 (図 4) で土壌水を採取した。初期吸引圧を -80 kPa (約 -60 mmHg) とし、1 ~ 2 週間おきに容器を交換して回収し、水質を測定した。

図 5 に示すように、 $K^+$ 、 $NO_3^-$ 、DOC 等は土壌表層において比較的高濃度で存在するが、土壌深度が深まるにつれて減少し、渓流水の濃度に近づいた。反対に  $Na^+$  や  $SiO_2$  は深度が深まるにつれて濃度が上昇し、100 cm 以深では渓流水の濃度よりも若干高い値を示した。一般に、林内雨や樹幹流として林床に到達した水は有機物が集積している  $A_0$  層から A 層へ浸透する過程で、物質の溶脱、イオン交換、植物の根による吸収などが起こる。その間に水質成分濃度は物質ごとに大きく変化し、さらに深部へ浸透すると地下水として鉱質母材と長期間接触することにより  $Na^+$  や  $SiO_2$  などの成分が溶出してくることが知られており、本流域においても同様な傾向が見られている。また、土壌表層の窒素成分や DOC 濃度は夏季に比較的高く冬季に低い傾向が認められた。これは、気温上昇に伴い土壌表層での有機物分解や硝化作用が活発になったためであると思われる。まとまった降雨の後には、表層に蓄積された成分は濃度が低下する傾向にあった。

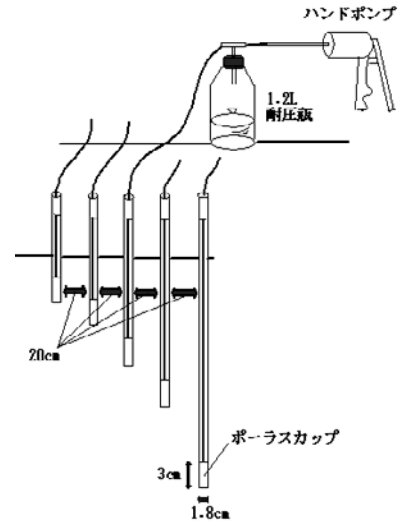


図 4 土壌水の採取方法

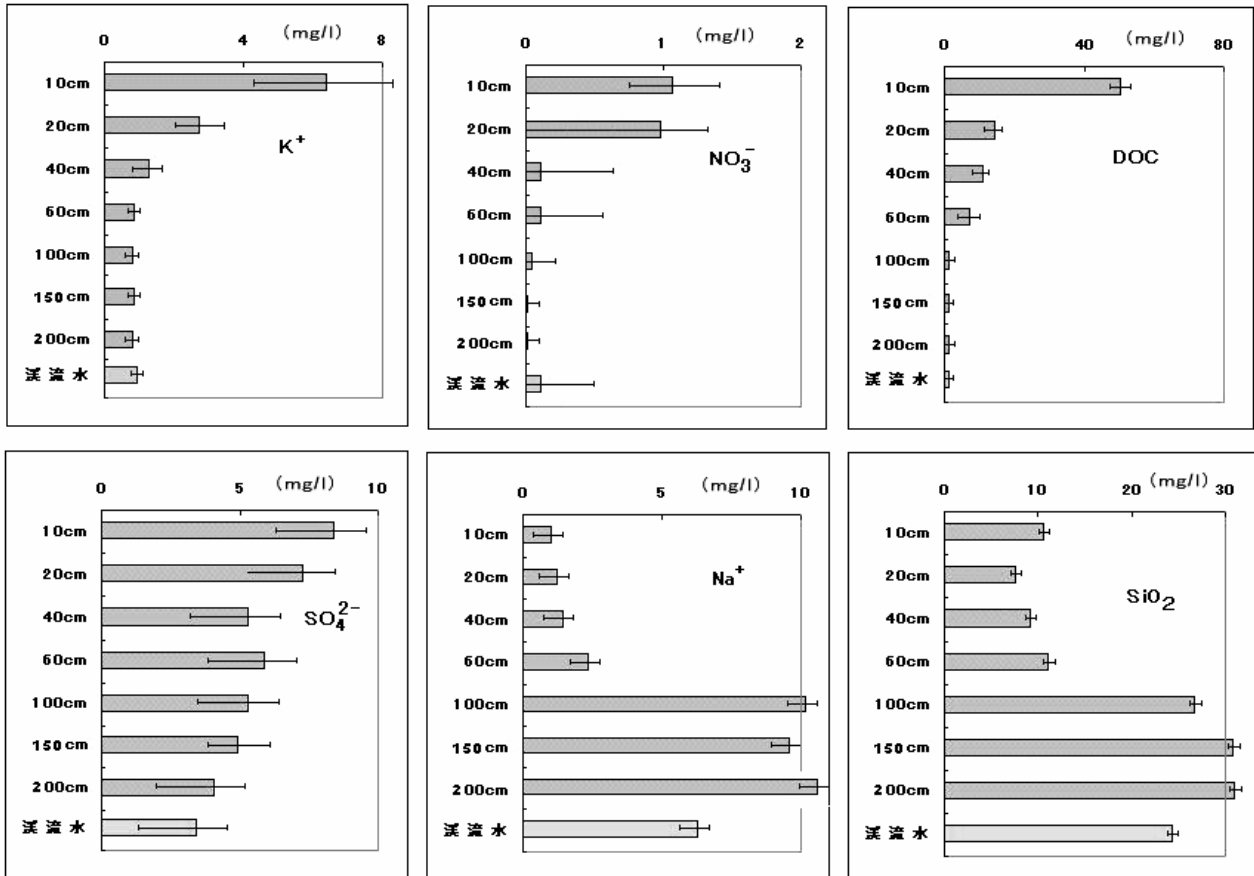


図 5 土壌水の溶存元素の垂直分布と渓流水の比較

( 渓流水 )

表 5 に 渓流水 の 水質 を まと め、 図 6 に は ハイドログラフ と とも に 約 3 年 間 の 渓流水 質 の 変動 を 示 した。 渓流水 の pH は 降雨 直 後 に は 若 干 の 低 下 が み ら れ た が、 平均 6.74 と ほぼ 中 性 で 明 確 な 季 節 変動 が なく 年 間 を 通 して 非 常 に 安 定 し て いた。 EC も 平均 38  $\mu\text{S/cm}$  前 後 で 比 較 的 安 定 な 値 を 示 した が、 大 き な 降 雨 の 直 後 に は 低 下 し た。 主 要 溶 存 物 質 の う ち  $\text{Na}^+$ 、  $\text{Cl}^-$ 、  $\text{SO}_4^{2-}$ 、  $\text{Mg}^{2+}$ 、  $\text{SiO}_2$  お よ び  $\text{HCO}_3^-$  は 比 較 的 変動 係 数 が 小 さ く 季 節 的 な 周 期 変動 は み ら れ な かつ た。  $\text{NO}_3^-$ 、 TN、 TP、 DOC は 夏 季 に 濃 度 が 上 昇 し、 冬 季 か ら 春 先 に かけ て 濃 度 が 低 下 す る 季 節 変動 を 示 す と とも に、 降 雨 直 後 に は 鋭 い ピーク も 生 じ た。 こ の ほ か 降 雨 の 影 響 が 鋭 敏 に 現 れ る 物 質 は、 Al と  $\text{Ca}^{2+}$  で あり 濃 度 変動 幅 も 大 き く な っ た。 な お、  $\text{NH}_4^+$  や  $\text{NO}_2^-$  は ほと ん ど が 定 量 下 限 値 未 満 で あ っ た。

表 5 試 験 流 域 の 渓流水 の 平均 水 質 と そ の 変動 幅

	pH	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	Cl	$\text{NO}_3^-$
平均値 (2000.6.30~2003.7.3)	6.74	38.6	274	2.4	22.2	12.2	7.4	35.4	114	5.3
最大	7.02	49.7	357	11.1	50.9	24.9	13.2	56.2	159	34.4
最小	6.07	30.6	193	ND	10.7	4.0	3.6	20.7	89.7	ND
標準偏差	0.15	3.3	27	1.3	4.5	4.4	1.9	6.4	15.2	4.32
変動係数 (%)	2	9	10	56	20	36	25	18	13	81

	SiO <sub>2</sub>	Al	$\text{HCO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	TN	TP	DOC
平均値 (2000.6.30~2003.7.3)	411	53.7	160	0.051	17.6	0.30	107
最大	596	191	244	0.77	109	1.39	613
最小	333	14.1	73	ND	4.3	ND	44.2
標準偏差	49	27	24	0.12	13.1	0.18	66.4
変動係数 (%)	12	51	12	246	74	59	62

平均値は算術平均値 (n=160)

本 試 験 流 域 に お け る 渓流水 の 水質 は、 広瀬 ら (1988) お よ び 戸 田 ら (2000) が まと め て いる 全 国 の 渓流水 質 と 比 較 す る と、 図 7 に 示 す よ う に pH、  $\text{Na}^+$ 、  $\text{NH}_4^+$ 、  $\text{K}^+$ 、  $\text{Cl}^-$ 、  $\text{NO}_3^-$  に つ い て は、 全 国 の ほぼ 平均 的 な レベル に あ る こ と が 分 かる。 EC お よ び  $\text{Mg}^{2+}$ 、  $\text{SO}_4^{2-}$  は 全 国 の 平均 値 よ り も 若 干 低 い が、 本 試 験 流 域 で 特 徴 的 な こ と は  $\text{Ca}^{2+}$  濃 度 が 相 当 低 い 部 類 に 入 る こ と で あ る。 近 畿 地 方 の 花 崗 岩 帯 で は  $\text{Ca}^{2+}$  濃 度 が 低 い 傾 向 に あ る が、 そ れ と 比 較 し て も 低 い と い える。 ま た、 本 流 域 の 渓流水 質 で 特 異 的 な こ と と し て、 溶 存 態 Al 濃 度 が 非 常 に 高 い 点 が あ げ ら れ る。 渓流水 中 の Al 濃 度 を 測定 し た 例 は さ ほど 多 く ない が、 こ れ ま で に 報 告 さ れ て いる 値 と 比 較 す る と 2 桁 ほど 高 い 濃 度 で 検 出 さ れ た。 Al は 地 殻 に 最 も 多 く 含 ま れ る 元 素 で あり、 そ の ほと ん ど が Si と とも に アル ミ ノ ケ イ 酸 塩 と し て 存在 し、 ま た Al の 水 酸 化 物 の 溶 解 度 積 が 極 め て 小 さ い た め、 一 般 的 に は 渓流水 等 の 天 然 水 に は 溶 存 し ない と い わ れ て いる。 し かし、 土 壌 の 酸 性 化 が 進 行 す る と Al が 可 溶 化 し、 森 林 衰 退 を 招 い た り 河 川 や 湖 沼 に 流 れ て 水 生 生 物 に 打 撃 を 与 え る 等 の 被害 が 懸 念 さ れ る。 本 試 験 流 域 に お け る 渓流水 中 の Al 濃 度 が 高 い 原因 に つ い て は 明 ら か で は ない が、 土 壌 表 層 水 の pH は 5 を 下 回 っ て お り、 酸 性 雨 に よ る 土 壌 の 酸 性 化 が 進 行 し て いる 可 能 性 も 否 め ない。

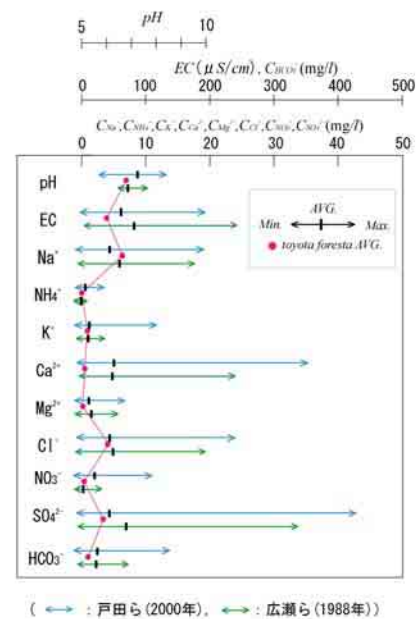


図 7 全 国 の 渓流水 質 と の 比 較

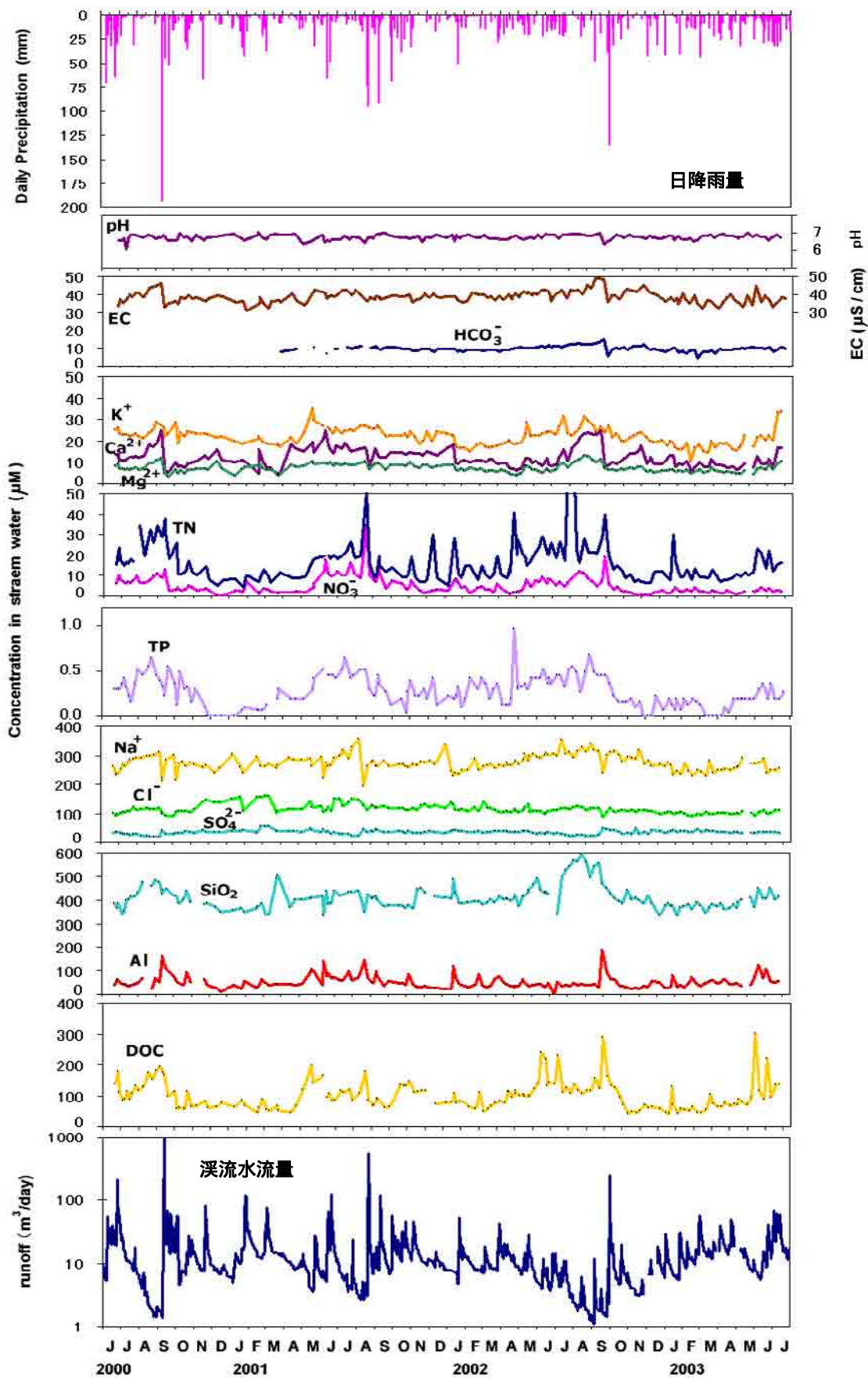
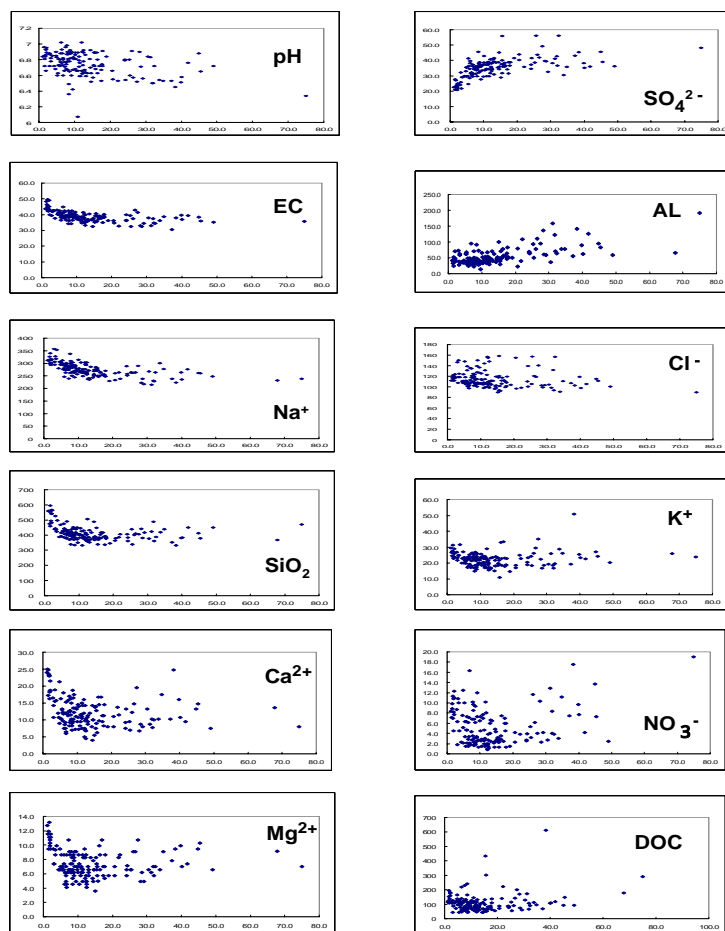


図 6 試験流域のハイドログラフと渓流水質の経時変化



次に、日流量を横軸に、濃度を縦軸にとり主要項目の長期流出過程における特性を調べた(図8)。流量との関係を見ると、pH、EC、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SiO}_2$  は流量増加に伴い低下( $\text{H}^+$ としては増加)する流出様式を示し、反対に $\text{SO}_4^{2-}$  およびAlは濃度上昇型の流出様式を示した。一方、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  は流量低下とともに一旦濃度が減少するが、日流量20  $\text{m}^3/\text{day}$  付近を境にして再び濃度が上昇するといったV字型の変動傾向が認められた。 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  およびDOCに関しては、長期的には流量との関係は明瞭ではなかった。



日流量 ( $\text{m}^3/\text{day}$ )

図8 長期流出過程に見る流量と物質濃度との関係

### 2-2-3 土壤呼吸 $\text{CO}_2$ フラックス

里山(都市近郊林)の二酸化炭素吸収能を評価するためには、樹木の吸収に加えて樹下の土壤呼吸によって放出される量の把握が必要である。フェーズにおいては、試験流域の土壤呼吸量を年間にわたって観測し、その季節変化と呼吸量に影響を及ぼす諸因子を求めるとを目的とした。

図9に示すように試験流域内の8地点において、チャンバー法を用いて土壌から放出される二酸化炭素量を月1回の頻度で観測した。同一地点で地温の自動連続測定を行った。結果は、図10に示すように、 $\text{CO}_2$  フラックスは強い温度依存性を示した。

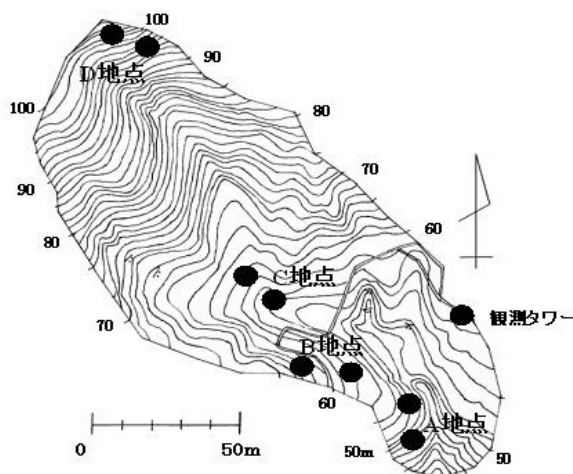


図9 土壤呼吸量測定地点

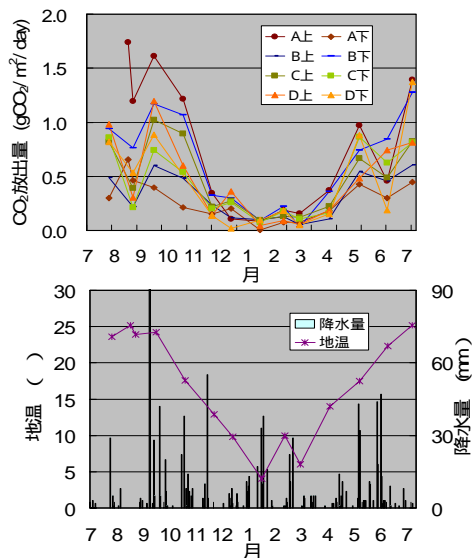


図10  $\text{CO}_2$  放出量と地温、降水量の変動

そこで、両者の関係式を求めて地温の連続測定値から二酸化炭素放出量の年間値を算出した。測定地点の平均放出量は年間  $3.85 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$  ( $1.05 \text{ kgC}/\text{m}^2/\text{yr}$ ) という値が得られた (表 6)。

表 6 各調査地点における土壌からの年間  $\text{CO}_2$  放出量

調査地点	(単位 $\text{kgCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$ )			
	a	b	c	d
斜面上部	6.22	2.64	3.27	3.91
斜面下部	2.26	6.01	3.28	3.19
	平均			3.85

#### 2 - 2 - 4 大気降水物の供給様式

樹木は樹下の地表面の数倍におよぶ面積の葉を広げており、大気中の物質を捕捉するフィルターとして機能する。このことは、別の見方をすれば、林地に大気汚染物質が集積することを表し、林地生態系への影響が懸念される。本研究では、大気を経由して都市近郊林に供給される物質を、その供給様式毎に求め、その特性を把握してモデル化への足掛かりをつかむことを目的とした。

調査地域近郊の豊田地域に都市中心部、周辺の農業地域ならびに林地に調査地点を 5 地点設け (図 11)、乾性降水物とそれに降雨を合わせた全降水物を採取した。調査回数は夏季と冬季にそれぞれ 2 回ずつ行った。

測定項目は主要イオン 8 成分

と大気中オゾン濃度を測定し、この他に愛知県および豊田市の大気汚染測定局のオキシダント、風向・風速等のデータを収集した。

風向は夏季と冬季で明らかに異なり、夏季には矢作川の谷に沿った北東、南風が卓越し、冬季には北北西の季節風が卓越した (図 12)。

大気中のオゾン、オキシダント濃度は、都市中心部での濃度変動にわずかに遅れて林地にも濃度ピークが現れた。しかも、その濃度は林地の方が都市中心部よりもむしろ高

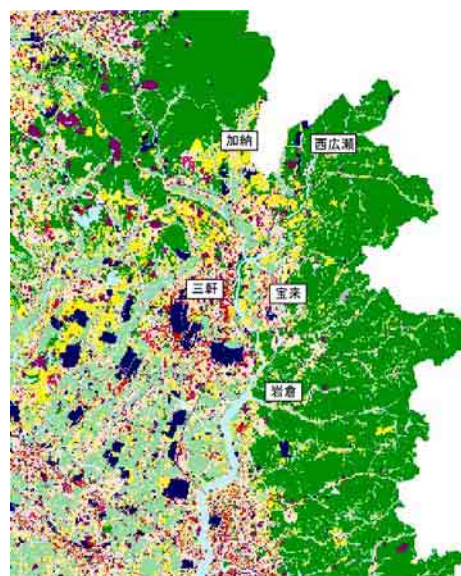


図 11 調査地点と周辺の土地利用状況

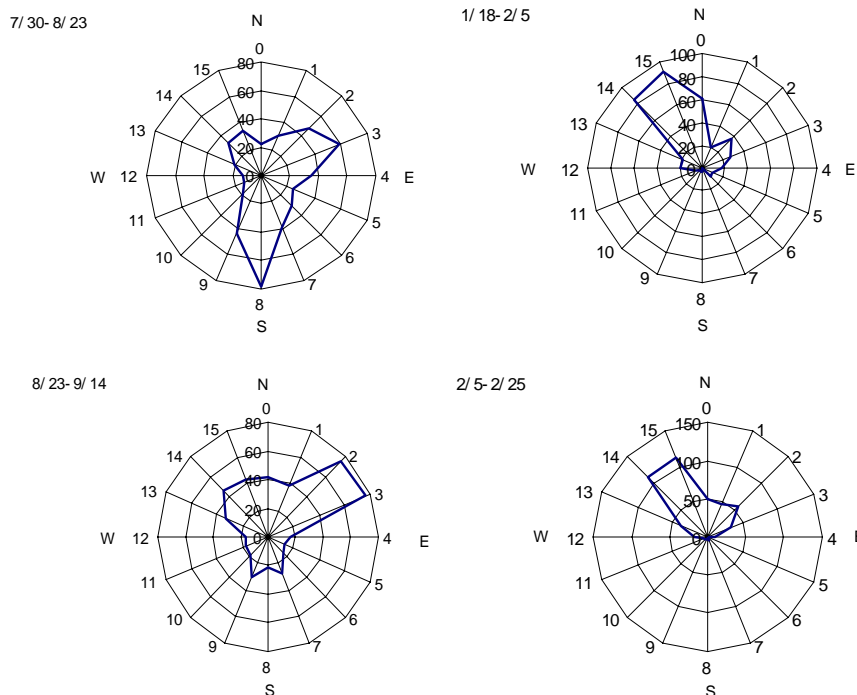


図 12 調査地域の夏季および冬季における風向分布

かった(図 13)。林地にはオゾンを生成する原料物質の発生源がほとんど無いので、この結果は都市中心部の気塊が移流する間にオゾンを生成しながら林地に到達したことを表すと考えられる。大気降水物中の主要イオン組成を解析した結果、夏季にはナトリウムと塩化物イオンの比が海塩比よりも塩化物イオンに乏しかったが、冬季には両者の比がほぼ等しかった。硝酸イオンおよび硫酸イオンについては、夏季には大きな値を示したが、冬季には比較的小さな値であった。硝酸イオンと塩化物イオンの比( $\text{NO}_3^- / \text{Cl}^-$ 重量比)は夏季に 3 から 25 と大きく、値の小さい地点ほど、すなわち、都市域から離れるほど大きくなる傾向にあった。一方、冬季には比は 1 から 3 と小さな値であった(図 14)。これらの結果は都市域よりも近郊の林地で光化学反応の進行した気塊が存在することを表していると考えられる。

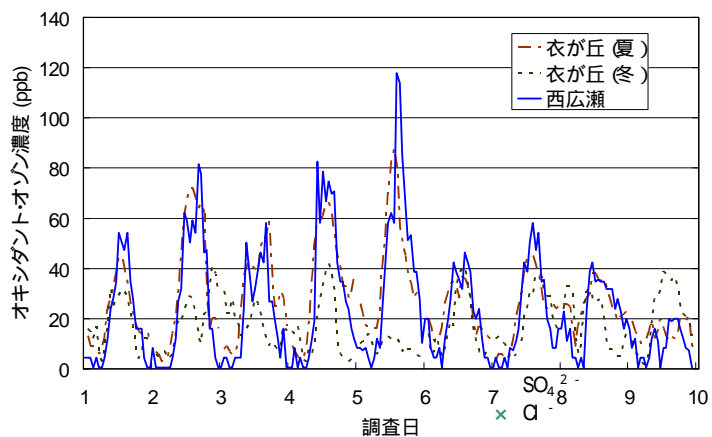


図 13 都市域(衣が丘)と林地(西広瀬)におけるオキシダント・オゾンの大気中濃度変動

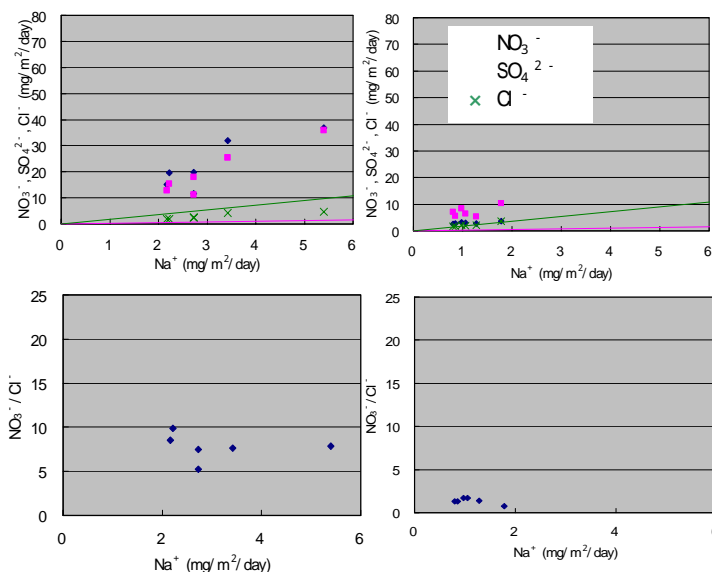


図 14 全降水物の夏季(左)と冬季(右)におけるイオン組成

### 2 - 2 - 5 毎木調査による試験流域の現存量推定

調査対象としているトヨタフォレストヒルズ流域については、(株)プレック研究所等により詳細な植生調査が実施されており、試験流域内においても  $10 \times 10 \text{ m}$  の調査区を 2 地点設けて継続調査している。水循環や熱収支、 $\text{CO}_2$  動態を理解するためには、試験流域(1.47 ha)全体の林分構造の把握も必要であると考え、大～中経木の毎木調査を実施し、樹種構成を明らかにすると共に現存量を推定した。毎木調査は 2001 年 11 月から 12 月にかけて実施した。胸高直径 4.5 cm 以上の樹木について、メジャーを用いて胸高(1.2 m)の幹周り長を測定し樹種名とともに記録した。主要な樹種については、各樹種とも最低 20 本以上の樹高を測定した。

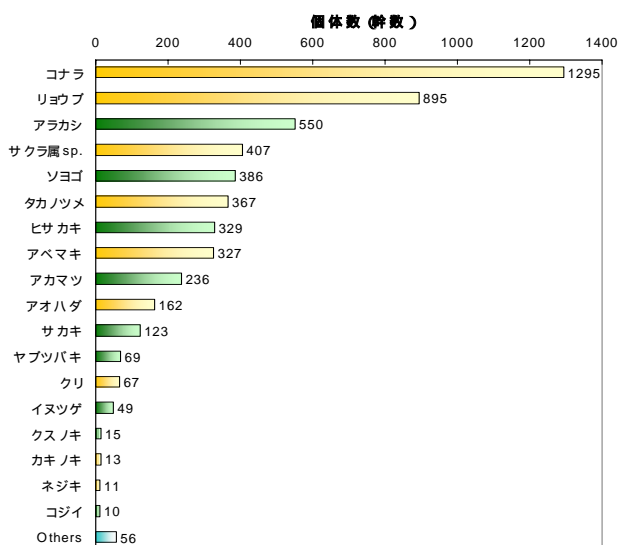


図 15 試験流域全体の樹種別出現個体数(幹数)

試験流域全体で胸高直径 4.5 cm 以上の樹木は、同定可能なものが 34 種、約 5400 本生育していた。樹木の胸高断面積合計は 44.4 m<sup>2</sup> で流域面積 (1.47 ha) に占める割合は 0.3 %であった。樹種別の個体数 (幹数) を 図 15 に示す。個体数ではコナラが 1295 本 (全体の 24 %) と圧倒的に多く、ついでリョウブ (17 %)、アラカシ (10 %)、サクラ属 sp. (8 %)、ソヨゴ (7 %)、タカノツメ (7 %)、ヒサカキ (6 %)、アベマキ (6 %) の順となり、かつて優占していたと思われるアカマツは枯死個体が目立ち全体の 4 %程度であった。個体数では落葉樹と常緑樹の比率は 2 : 1 であった。また萌芽 (株立ち) 個体率は約 20 %となり、薪炭林として繰り返し伐採されてきたことを物語る。樹高を測定した樹木の胸高直径と樹高の関係式から、樹高を測定していない個体の樹高を推定し、石井・只木 (2000) 等の落葉広葉樹林の相対生長式を用いて試験流域の現存量を推定したところ、現存量は 113 ~ 125 ton/ha と推定された。

## 2 - 3 . 考察及びフェーズ のまとめ

### 2 - 3 - 1 各水文過程での水質特性

各水文過程での水質特性について、フェーズ で得られた結果をまとめると以下のようである。

林外雨の多くは pH5 以下の酸性であるのに対し、渓流水の pH は 6 ~ 7 で安定していた。これは主に土壌中での酸中和機構が働いていたためと考えられるが、林外雨が樹冠を通過する際に既に pH は上昇する傾向にあり、樹幹流では樹種によってその程度が明らかに異なるなど興味ある知見が得られた。

降水は葉や枝、幹などに付着したエアロゾル成分の洗脱や植物体からの溶脱プロセスを経て林床に到達するため、水質成分の多くは林外雨 < 樹幹流 < 林内雨の順に濃度が増加した。特に樹幹流や林内雨中の K<sup>+</sup> および DOC の増加が顕著であった。

渓流水水質に関しては、年間を通じて変動が小さいもの (pH、EC、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SiO<sub>2</sub> および HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、降雨イベントによる流量の変化によって濃度が大きく変動するもの (Al、Ca<sup>2+</sup>)、明瞭な季節変化が認められるもの (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、TN、TP、DOC) があつた。

渓流水流量と水質項目の長期傾向をみたところ、Na<sup>+</sup>、SiO<sub>2</sub> は流量増加に伴い濃度低下型の流出様式を示し、反対に SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> および Al は濃度上昇型の流出様式を示した。Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> および DOC に関しては、流量との長期的な関係は明瞭ではなかった。

図 16 に試験流域内の各水文過程での物質ごとの平均濃度を示した。繰り返して述べると、降水は樹冠を通過し植物体と接触することで最初の水質変化を生じる。林地に達した水は、有機物が豊富な土壌の A<sub>0</sub> 層を通過し、さらに地下に浸透して物質の溶出、吸着、イオン交換、さらに生物作用などを受ける。一部は基岩部まで浸透して岩石と長時間接触しながら基底流として溪流に流出する。図 16 に示したように、物質または項目ごとに各水文過程でかなり特徴が見受けられた。すなわち、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> は林外雨、林内雨および樹幹流中に多く含まれ、土壌表層で高濃度に蓄積されたあと、土壌下層にも検出されるのに対し、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> および有機態窒素は林外雨、林内雨および樹幹流中で多いが、土壌表層以深では濃度が低くなるタイプである。DOC も後者の窒素成分の挙動に近い。Cl<sup>-</sup> は各水文過程であまり濃度変化しない。Na<sup>+</sup>、SiO<sub>2</sub> は地上部ではあまり多くないが、土壌下層で急激に濃度が上昇する物質であった。



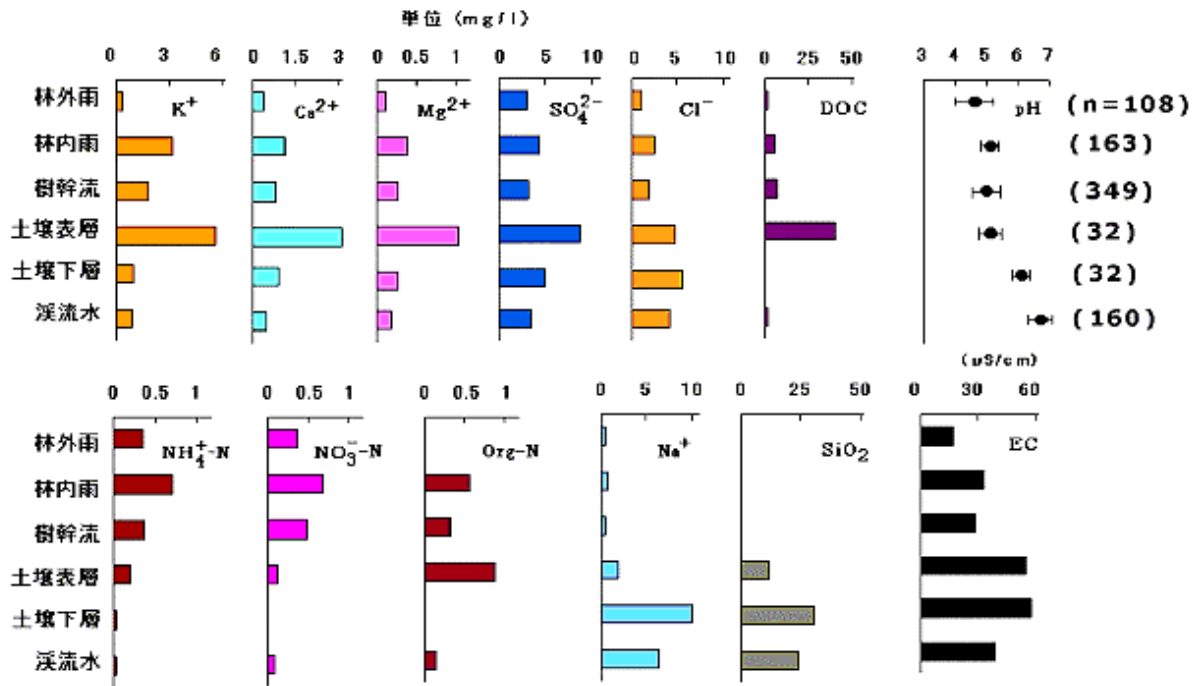


図 16 トヨタフォレストヒルズ試験流域における各水文過程の水質濃度比較

### 2 - 3 - 2 土壤呼吸 $\text{CO}_2$ フラックス

落葉広葉樹土壤からの  $\text{CO}_2$  フラックスと地温との関係式を導き出すことができ、一次近似的にモデル化が可能となった。測定地点の平均放出量は年間  $3.85 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$  ( $1.05 \text{ kgC}/\text{m}^2/\text{yr}$ ) という値が得られた。 $\text{CO}_2$  フラックスは温度の他に土壤水分、土壤の化学組成等によっても値が変化することが推定された。

### 2 - 3 - 3 都市域からの大気降水物の供給様式

大気中のオゾン、オキシダント濃度の観測から、都市域の気塊が近郊林に到達していることが示され、しかも、大気降水物中の主要イオン組成からも判るように、移流の過程で光化学反応が進行してガス態からエアロゾル態への形態の変化を生じていることが推定される。ガス態と比較してエアロゾル態の物質は大気中から降下しやすく、そのような物質が、奥山よりも近郊に降下する量が多くなり、都市近郊林の被る影響が大であると言えよう。風向の観測結果から、対象とした調査地域には夏季に南方の都市域から大気降水物の多くがもたらされるものと推定された。

## 3 . フェーズ の成果

### 3 - 1 . 目的及び目標

フェーズ で得られた多くの知見と観測手法をもとに、フェーズ では、

降水から渓流水に至る水質形成機構や里山林の汚濁物質浄化作用などを定量的に明らかにする。

里山林における土壤表層の炭素動態を明らかにする。

樹木の有無による大気を経由して供給される物質の量的、質的な違いを把握し、林地にもたらされる近郊都市域からの移流物質を分離定量する。

里山（都市近郊林）流域圏における生態系機能を総合的に解析する。

を最終目的として取り組んだ。

### 3 - 2 . 方法及び結果

#### 3 - 2 - 1 降雨出水時集中観測

一般的に、降雨出水時には渓流水流量の急激な増大とともに、その水質も変化することが知られている。そのため年間の流出負荷量を正しく評価するためには、降雨出水時の連続した観測が不可欠であり、溶存物質の変動特性の違いや平水時との比較から渓流水形成メカニズムや流出特性を解明するという側面からも有効である。

降雨出水時の渓流水試料採取は、雨量計付き自動採水器 (ISCO6700) を用いた。これまでのハイドログラフ解析により、積算降雨が 20 mm を超えた付近から渓流水流量が急増し、降雨量にもよるが、降雨終了後およそ 48 時間から 72 時間後には降雨前の流量に戻るということが分かった。従って、自動採水はまず時間 1 mm 以上の降雨でスタートし、以後 4 時間おきに 48 時間後まで採水するパートと、時間あたり 10 mm 以上の降雨を感知すると、30 分から 1 時間毎に採水するパートを併用した 2 パートプログラムで実施した。採水状況は携帯電話システムで確認することができる。

降雨出水時集中観測は 2001 年 9 月、2002 年 1 月、6 月、7 月、12 月、2003 年 4 月、5 月に合計 10 回実施した (表 7)。降雨量は 7 ~ 82 mm の範囲であった。

表 7 降雨出水時集中観測の概要

	観測期間	降雨総量 (mm)	最大降雨 (mm/h)	持続時間 (h)	先行降雨 (day)	先行降雨 (mm)
Event 1	2001/9/3 ~ 5	25.0	9	14	2	30
Event 2	2001/9/10 ~ 16	81.5	12.5	28	5	25
Event 3	2002/1/21 ~ 23	50.0	17	11	3	6.5
Event 4	2002/6/10 ~ 13	36.0	10	29	13	8.5
Event 5	2002/6/30 ~ 7/2	32.5	13.5	16	1	5.5
Event 6	2002/7/16 ~ 17	29.5	15	11	1	20.5
Event 7	2002/12/4 ~ 6	42.5	11.5	11	9	4
Event 8	2002/12/16 ~ 18	7.0	3.5	10	7	7
Event 9	2003/4/23 ~ 25	36.5	5	37	2	20
Event 10	2003/5/30 ~ 6/1	30.0	7	28	4	1

図 17 に観測結果の一例を示す。この例では比較的ハイドログラフに沿った採水ができたが、降雨パターンによっては、特に流量増加時の採水が欠落する場合もあった。いずれの降雨イベントにおいても、流量が増加するのに伴い、pH、EC、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  および  $\text{SiO}_2$  濃度は減少し、流量ピーク後から再び上昇する傾向にあった。反対に Al、 $\text{NO}_3^-$  および DOC は流量とともに単調に上昇する傾向にあった。また図には示していないが、SS はピーク時には最大で降雨前の 500 倍に増大する場合があり、同時に大量の懸濁態 N、P の流出がみられた。その他の溶存イオン ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ) については、流量増加に追隨して上昇する場合もあれば、減少する場合もあり一様ではなかった。本試験流域における降水時の流量変化に伴う、物質毎の変動パターンをまとめると図 18 のとおりである。平田ら (1988) が筑波山のスギ・ヒノキ人工林で実施した類似の調査では、渓流水中の溶存成分は流量増加に伴って一斉に濃度が減少し、流量ピーク後に濃度が上昇する傾向にあった。大類 (1992) も群馬県内のスギ・ヒノキ人工林で同様の調査を実施し、総雨量が 100 mm を超えるような場合には、流量の増加時には EC や  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  濃度が上昇し、pH や  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  および  $\text{SiO}_2$  は逆の傾向が見られたと報告している。熊谷ら (2000) は千葉県内のモミ・ツガ天然林において、3 回の降雨イベント観測から  $\text{NO}_3^-$  は流量と正の相関が、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  は流量と負の相関があり、

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup> は降雨イベントによってことなる挙動を示したとしている。これらのことは、降雨に伴って渓流水の水質は大きく変動するが、対象流域（植生・地形・地質・土壌構造）や降雨強度によって水質の応答様式が異なっていることを示唆している。

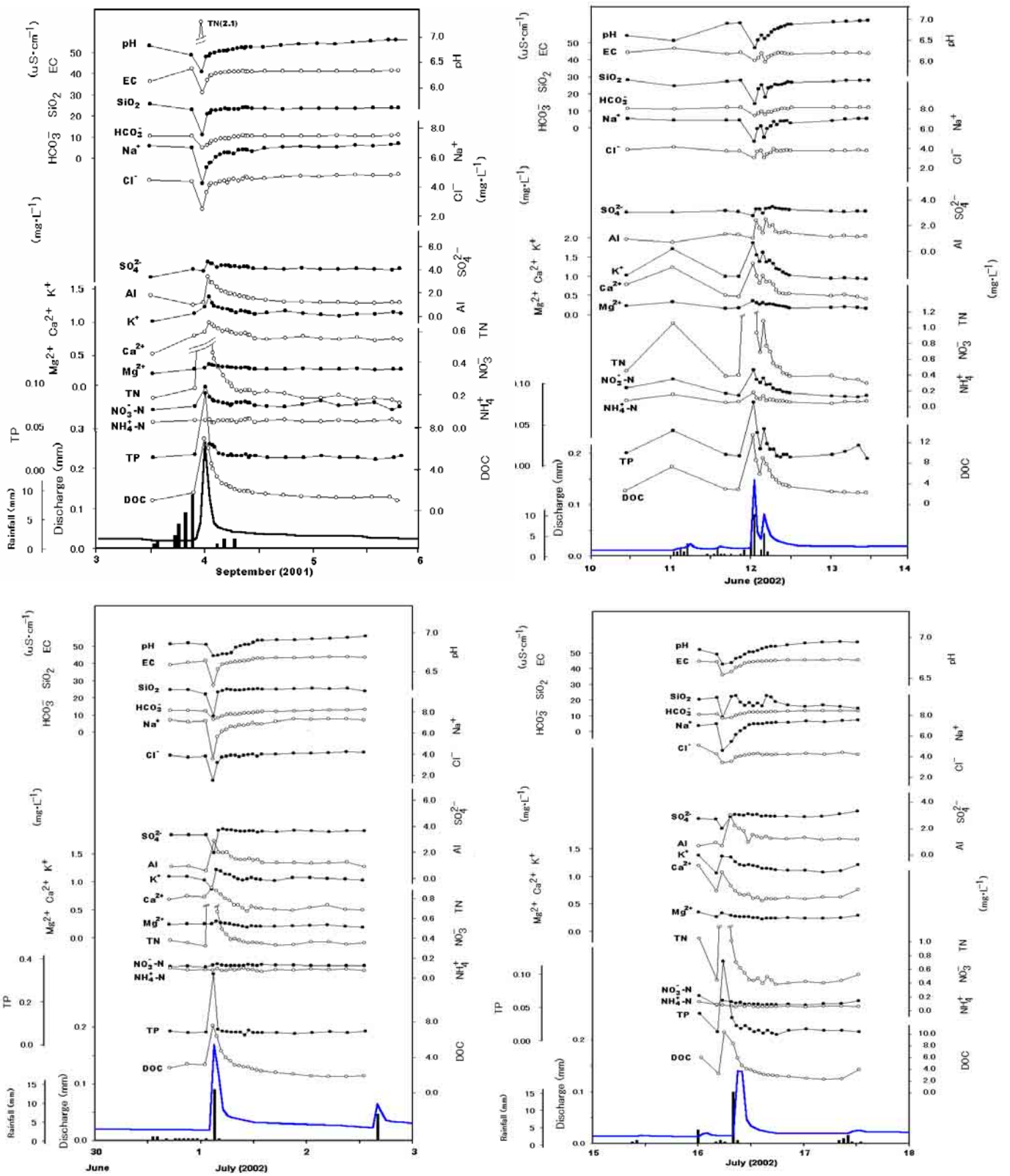


図 17 降雨イベント時における渓流水質の変化

渓流水質は地下水、林外雨、林内雨、土壌水などの混合によって形成されるため、物質によって降雨時の渓流水の変動パターンが異なる原因については、これら森林内の構成要素の水質特性 (図 16) から定性的に説明することができる。すなわち、降雨前の渓流水が土壌下層～地下水帯の水 (基底流) から成り、大気 (林内雨や樹幹流も含む) からもたらされる物質が比較的少ない事を考慮すると、例えば主に土壌下層に大量に存在する  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  および  $\text{SiO}_2$  は、降雨の直接流入や表面流出によって希釈され、流量の増加に伴って渓流水中の濃度が減少するものと説明できる。pH の低下

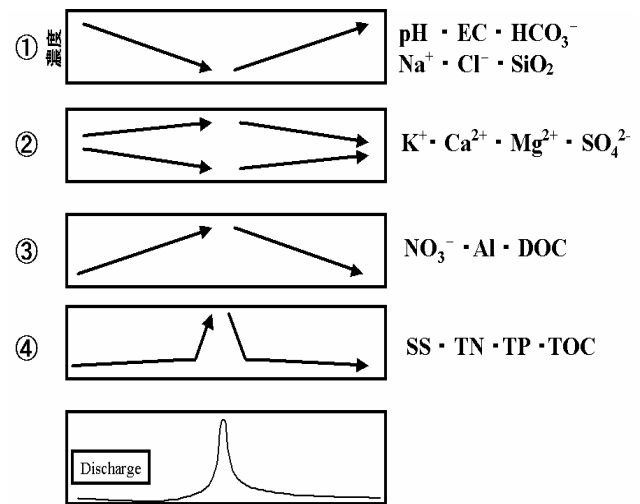


図 18 降雨イベント時における変動パターンの分類

は、降雨や土壌表層水の混合による  $\text{H}^+$  の増加と考えられる。逆に、降雨出水時における  $\text{Al}$ 、 $\text{NO}_3^-$  および  $\text{DOC}$  の増加は、降雨中から供給されたり、土壌表層に高濃度に蓄積されていたものが降雨によって流出することにより、渓流水中の濃度を急激に増加させるためと考えることができる。一方、降雨出水時の変動パターンが一様でない  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  については、林内雨、樹幹流を含む降雨や土壌表層～下層にも比較的存在するため、その時々々の降雨イベントによって、混合バランスの違いにより渓流水中の濃度が上昇したり下降したりしたものと考えられる。SS 成分の流量ピークでの急激な流出は、表層土壌や河道堆積物の攪乱・掃流によるものと思われる。

一方、定量的にはエンドメンバー法 (EMMA: End Members Mixing Analysis) と呼ばれる手法によって、渓流水の形成機構を類推することが可能である。EMMA は渓流水質が、流域に存在する土壌水や地下水などエンドメンバーと呼ばれるものの混合によって形成され、その混合割合によって降雨イベント時の渓流水の水質が変化するという仮定で渓流水質の形成機構を解析する手法である。図 19 に示したように、各エンドメンバーおよび渓流水中の 2 種類の物質濃度を同一座標軸にプロットし、渓流水がエンドメンバー同士を結んだ三角形の内部に含まれるようにエンドメンバーを決定する。図 19 では土壌表層水、地下水、林外雨をエンドメンバーとした。解析に用いられる溶存物質には、解析対象期間中にエンドメンバー内で濃度変化しないこと、混合によって化学変化を起こさず、各エンドメンバー間に十分な濃度差があることが必要である。この例では溶存物質として  $\text{Na}^+$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  を選択した。エンドメンバーを決定したら、ベクトルの内分点を求める要領で、各エンドメンバーの渓流水質への寄与割合の経時変化を連立方程式で求める。つまり、

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1$$

$$Q[a]_1 f_1 + Q[a]_2 f_2 + Q[a]_3 f_3 = Q[a]_{st}$$

$$Q[b]_1 f_1 + Q[b]_2 f_2 + Q[b]_3 f_3 = Q[b]_{st}$$

ここで、 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  は各エンドメンバーの寄与率 (%)、 $Q[a]_{1-3}$  は各エンドメンバーの物質 a の濃度、 $Q[b]_{1-3}$  は物質 b の濃度、 $Q[a]_{st}$  および  $Q[b]_{st}$  はそれぞれ渓流水の物質 a、b の濃度である。

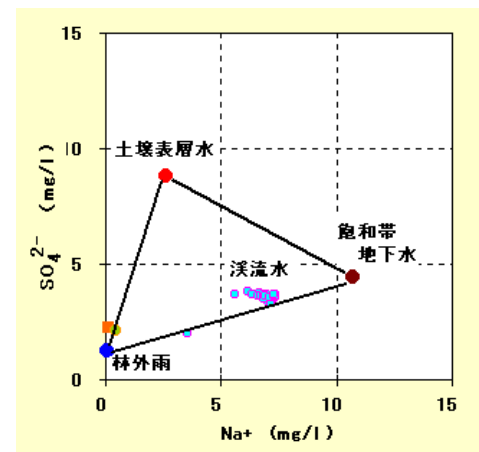


図 19 エンドメンバーダイアグラム

EVENT5 (2002.6.30~7.2)  
 土壌水・地下水は降雨イベント直前のデータ  
 林外雨・林内雨・樹幹流は降雨イベント終了時のデータ  
 渓流水は降雨イベント中のデータ



図 20 は、2002 年 6 月 30 日から 7 月 2 日にかけての EMA の結果である。この例の場合、渓流水に占める林外雨と土壌表層水の割合が徐々に増加して、流量ピーク時には地下水、林外雨、土壌表層水の混合比が 2 : 1 : 4 程度で構成されることになった。当然のことながらエンドメンバーの混合比から求めた  $\text{Na}^+$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  の予測値は実測値とよく一致した。DOC に関しては、流量ピーク後については渓流水中の濃度変化をよく再現しているといえる。ただし、 $\text{K}^+$  や  $\text{NO}_3^-$  に関しては、変動傾向は似ているものの予測値が実測値を常に下回る結果となるため別のエンドメンバーが関与している可能性が示唆される。あるいは、特に  $\text{NO}_3^-$  では降雨の降り始めと降雨後半で降水中の濃度が大きく異なると予想されることや、土壌中でも生物活動によって容易に変化するため、EMA の前提条件である、解析期間中でエンドメンバー内で濃度変化しないという仮定が成立していない可能性もある。そのため保存的混合の仮定に基づく EMA モデルではその変動を再現することは困難なのかもしれない。

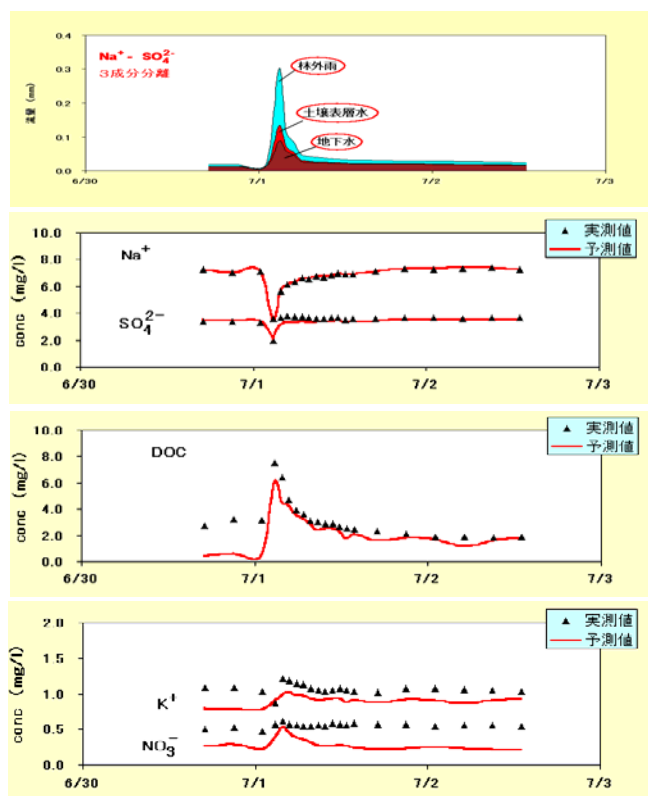


図 20 EMA による渓流水の混合割合と物質濃度の予測値と実測値の比較

最後に、降雨イベント時における流出負荷量について検討する。図 21 は主要な溶存物質について、横軸に時間流量を、縦軸に濃度を取り、経年データと降雨出水時データをもとにプロットしたものである。経年データの時間流量は渓流水を採取した日の正午の流量を用いた。降雨出水時データは、イベントごとに物質濃度がかかなり異なるため、濃度が時間流量を一定の範囲でブロック分けし、その範囲の中での物質濃度を平均することで平準化した。物質ごとにみると、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SiO}_2$  はこれまでに述べたとおり、経年的にも降雨出水時にも、流量増加に伴い濃度低下型の様式を示した。しかも、時間流量に対する濃度は、経年データも降雨出水時データもほぼ同一直線上にプロットできる。反対に  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{Al}$  は経年的にも降雨出水時にも、流量増加に伴い濃度上昇型の様式を示したが、これらも時間流量に対する濃度は経年値と降雨出水時との間に大きな差は認められなかった。これに対して、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$ 、 $\text{NO}_3^-$  および  $\text{DOC}$  は経年的には明瞭な関係が認められず、降雨出水時には濃度が上昇する傾向があるものの、同じ流量であっても降雨出水時の濃度が明らかに高い。これらのことは、年間の流出負荷量を算定する場合にあっては、降雨出水時の流出を考慮しなければならない物質とそうでない物質があることを意味している。

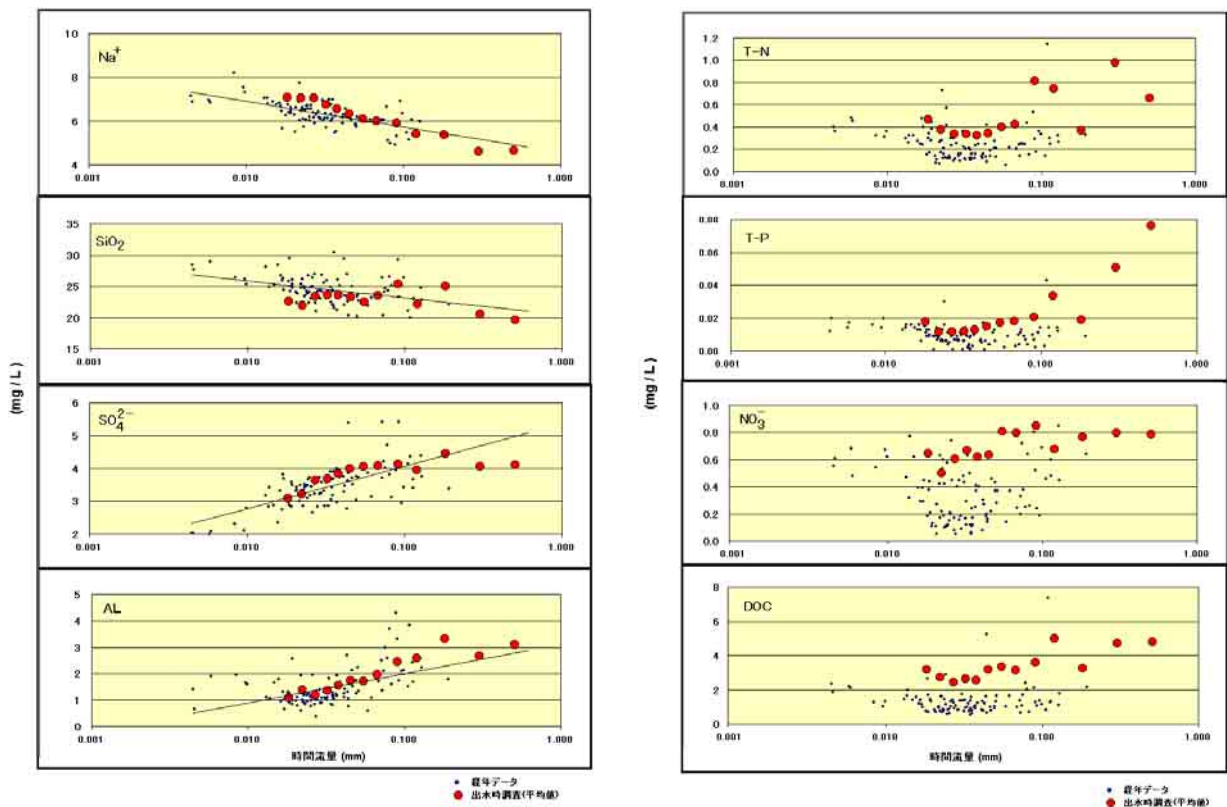


図 21 経年データと降雨出水時の比較でみる時間流量と物質濃度の関係

### 3 - 2 - 2 里山林の汚濁物質浄化作用

森林の水源涵養機能のうち、水質浄化機能については流域における物質収支で評価されることが多い。ここでは、森林内での物質循環をブラックボックスとして扱い、降雨による物質流入と渓流水としての流出を推定して本試験流域における水質浄化機能を評価する。表 8 に試験流域で観測された雨量と渓流水流出量を示す。豊田アメダス観測点で観測された 1992 年～2002 年までの 11 年間における年平均降水量は 1366 mm であり、2001 年はほぼ平年並み、2002 年は平年値より 200 mm 程度少なく、2003 年は逆に平年より 200 mm 程度多い年となった。年間を通した渓流水の流出量は降雨量に対して 30 数パーセントであり、本地域が花崗岩地帯であることを考えると流出率が少なく、本試験流域の特徴とも言える。流出量については、2002 年 11 月から 2003 年 5 月にかけて合計 535 時間の欠測があった。

表 8 トヨタフォレストヒルズ試験流域の雨量と流出量

年/月	月雨量 (mm)	月流出量 (mm)	年雨量 (mm)	年流出量 (mm)	備考
2007/4			44.3		Q 連続2欠測
2007/5	720	13.0			
2007/6	2765	69.5			
2007/7	620	27.2			
2007/8	165	6.6			
2007/9	4700	122.7			Q 連続3欠測
2007/10	1260	35.7			Q 連続2欠測
2007/11	905	33.9			
2007/12	255	16.2	1139	369	
2001/1	1450	46.7			
2001/2	485	33.8			
2001/3	760	45.4			
2001/4	280	20.3			
2001/5	1000	19.8			
2001/6	1875	44.6			
2001/7	242	13.8			
2001/8	2410	54.9			
2001/9	1732	36.1			
2001/10	1952	45.0			
2001/11	690	32.8			
2001/12	315	21.6	1319	415	
2002/1	870	25.3			
2002/2	310	18.0			
2002/3	1015	24.3			
2002/4	740	27.7			
2002/5	1100	21.2			
2002/6	1170	12.0			
2002/7	1095	13.1			
2002/8	500	4.6			
2002/9	1235	4.9			
2002/10	2335	41.0			
2002/11	240	7.1			Q 連続2欠測
2002/12	1030	13.5	1164	213	Q 連続113欠測+連続2欠測
2003/1	952	24.2			
2003/2	745	23.8			
2003/3	1010	40.7			
2003/4	1282	45.9			Q 連続33欠測+1欠測
2003/5	872	17.9			Q 連続20欠測
2003/6	1485	24.4			
2003/7	2240	57.0			
2003/8	3285	110.6			
2003/9	740	55.6			
2003/10	935	35.0			
2003/11	1793	55.8			
2003/12	284	53.3	1562	544	

Q 流出量

(降下負荷量)

大気からの降下物は乾性降下物と湿性降下物に大別されるが、本調査において林外雨と位置づけたものは、乾性・湿性を区別しない、いわゆるバルク（全大気降下物）試料である。降下負荷量は、採取された林外雨試料中の各物質濃度に採取期間内の降水量を乗じ、それを加算して年間の降下負荷量を算出した。主要イオンおよび TN、TP、TOC の降下負荷量を表 9 に示す。降下負荷量はその年の降水量に大きく左右されるので、降水量が比較的一致するように期間を区切った。

表 9 の下段には全国環境研究所協議会が 1999 年 4 月から 2002 年 3 月まで実施した第 3 次酸性雨全国調査の結果を示す。これによれば、主として海塩成分である  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  を除き全国レベルとほぼ同等の降下負荷量を示している。一方 TN、TP、TOC は面源の汚濁負荷解析に関する研究で報告されている値と比較すると、その範囲に近いものであった。

表 9 試験流域における降水量と年間の降雨負荷

期間	降水量 (mm)	試験流域 (mmol/m <sup>2</sup> /year)										全国調査 (mg/m <sup>2</sup> /year)		
		H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TN	TP	TOC	
2000.6.30 ~ 2001.6.22	1428	30.6	39.8	66.5	15.8	24.0	8.5	77.7	57.6	64.7	-	-	-	
2001.6.22 ~ 2002.6.28	1413	42.2	23.1	24.9	9.0	9.9	4.8	33.7	32.9	29.1	1066	70	2156	
2002.6.28 ~ 2003.7.03	1480	27.2	21.9	29.1	8.4	8.0	4.6	20.1	27.6	27.9	989	50	2348	
<b>3年間の平均値</b>	<b>1440</b>	<b>33.3</b>	<b>28.3</b>	<b>40.2</b>	<b>11.1</b>	<b>13.9</b>	<b>6.0</b>	<b>43.9</b>	<b>39.4</b>	<b>40.6</b>	<b>1028</b>	<b>60</b>	<b>2252</b>	
第3次酸性雨全国調査														
田園地域 (n=16)	1780	37.3	87.1	30.8	5.0	10.5	10.9	33.1	100	28.1	-	-	-	
都市域 (n=35)	1644	35.6	95.2	37.7	4.2	13.6	12.4	36.9	111	31.2	-	-	-	
1999.4.1 ~ 2002.3.31の3年間の平均値														

(流出負荷量)

渓流水として流域から流出する物質量を正確に推定することは、降下負荷量を求める場合と比較して大変困難である。もし物質濃度が年間を通じてほぼ一定であれば、(濃度) × (流出水量) で年間の流出負荷量を算定できるが、これまで述べてきたように渓流水中の物質濃度は降雨イベント時や季節によって常に変動しているため単純には求められない。流出負荷量を求める場合には、一般的に区間代表法および L-Q 法が用いられる。区間代表法は試料採取時の水質と流量データからその日の流出負荷量を求め、その前後の試料採取日の負荷量の平均値（あるいは按分値）を年間にわたって積算していくものであるが、試料採取間に降雨があって流量や水質が変化する場合には流出負荷量を過小に評価することが多い。年間にわたって流出水量が測定されている場合には、試料採取日の流量 Q と流出負荷量 L をグラフ上にプロットし、L-Q の関係式から毎日の L を求め評価期間内の流出負荷量を算出する L-Q 法が有効である。図 22 に本試験流域における L-Q プロットの一例を示す。

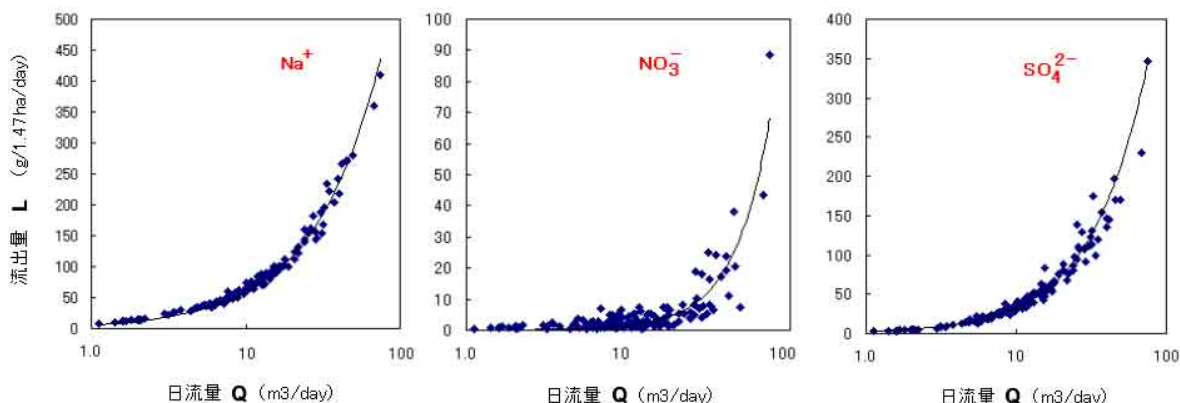


図 22 日流量 (Q) と日流出量 (L) の関係

ただし、降雨出水時には数時間単位で流量と水質が大きく変動することが分かっており、日流量を単位とした L-Q 法であっても流出負荷量の過小評価は免れない。従って、降雨出水時の流出負荷量については降雨時集中観測結果から別途算定すべきであるが、とりあえず本報告では日流量と日流出負荷量の関係式から年間の流出負荷量を求めた。その結果を、表 10 に示す。降下負荷量と対比させるため、期間は表 9 と同一とした。

表 10 試験流域における年間の流出負荷量

期間	流出量 (mm)	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TN	TP	TOC
		(mm o <sub>l</sub> m <sup>2</sup> /year)										(mg/ m <sup>2</sup> / year)	
2000.6.30 ~ 2001.6.22	440	0.40	111.8	-	10.0	4.9	3.3	20.3	48.0	21.9	124	6.2	577
2001.6.22 ~ 2002.6.28	343	0.13	87.2	-	7.8	3.8	2.6	13.8	37.4	5.4	96	4.3	454
2002.6.28 ~ 2003.7.03	282	0.06	71.5	-	6.4	3.1	2.1	10.7	30.7	1.9	79	2.5	374
<b>3年間の平均値</b>	<b>355</b>	<b>0.20</b>	<b>90.2</b>	<b>-</b>	<b>8.1</b>	<b>3.9</b>	<b>2.7</b>	<b>15.0</b>	<b>38.7</b>	<b>9.7</b>	<b>100</b>	<b>4.35</b>	<b>468</b>

渓流水中の NH<sub>4</sub><sup>+</sup> は定量下限値付近の場合が多く、L-Q の関係が導き出せなかったため年間流出量は算出できなかった。またどの項目についても 2002 年 6 月から 2003 年 7 月までの流出量が最も少なくなっているが、これはこの間に日流量の欠測が 26 日間存在することによる。逆に 2000 年 6 月から 2001 年 6 月までの流出負荷量が大きくなっているのは、2000 年 9 月の東海豪雨の影響が大きく反映されている。

#### (試験流域における物質収支)

ここでは集中豪雨や流量欠測のなかった、2001 年 6 月から 2002 年 6 月までの 1 年間の例に試験流域の物質収支を考察する。物質収支は通常 (kg/ ha/ year) の単位で表されることが多く、ここでも物質量をそれに換算して収支を表 11 に示した。

表 11 試験流域における物質収支

期間	水量 (mm)	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP	TOC	
		(kg/ ha/ year)										(kg/ ha/ year)	
2001.6.22 ~ 2002.6.28	流入	1413	5.32	3.49	3.50	3.95	1.17	32.4	11.7	4.07	10.7	0.70	21.6
	流出	343	20.1	-	3.06	1.52	0.63	13.3	13.3	0.76	0.96	0.04	4.54
	<b>収支</b>	<b>1070</b>	<b>-14.7</b>	<b>-</b>	<b>0.44</b>	<b>2.43</b>	<b>0.53</b>	<b>19.1</b>	<b>-1.61</b>	<b>3.31</b>	<b>9.70</b>	<b>0.66</b>	<b>17.0</b>

Na<sup>+</sup> と Cl<sup>-</sup> を除くすべての項目で流入量が流出量を上回る結果となった。大気から流入した物質は窒素成分のように植物体に吸収利用されたり、あるいは土壤中に蓄積されているものと考えられる。通常、Ca<sup>2+</sup> や Mg<sup>2+</sup> のようなミネラル成分は土壌風化に伴い流出量が流入量を上回ることが多いとされているが、本調査では流出量の方が小さい結果となった。これは本試験流域では渓流水中の Ca<sup>2+</sup> や Mg<sup>2+</sup> 濃度が全国の平均値に比べて 1 ~ 2 桁低いことに起因するものと考えられる。

次に、TN TP について既往の報告と比較したものが表 12 である。本調査によって求められた流出負荷量は、他の流域で報告されている値と比較するとかなり低い部類に入る。これは、本流域の渓流水質が比較的低濃度であることと、本試験流域は蒸発散量が大きく水量流出率が 32 %程度であることに起因すると思われる。加えて、TN TP、TOC などの懸濁態成分を主体とした汚濁物質は降雨時に短時間で飛躍的に流出することが集中観測によって明らかになっており、上記の流出量の推定値は相当過小評価されていると思われる。これについては今後さらに検討を加える必要があるが、それを加味しても、本試験流域では降雨による流入に対して流出が下回り、窒素やリンなどの汚濁負荷に関して浄化機能を有しているものと言える。



表 12 森林の汚濁負荷収支

単位 (kg/ ha/ year)

調査流域	T-N		T-P		出典
	流入	流出	流入	流出	
滋賀 若女	6.92	1.83	0.37	0.13	堤 (1987)
滋賀 竜王山	11.9	4.20	0.31	0.23	"
滋賀 油日岳N	12.8	5.62	0.57	0.18	國松ら (1997)
滋賀 朽木R	16.8	1.22	0.86	0.10	"
滋賀 妙光寺山	13.3	2.65	1.13	0.08	"
群馬 勢多	11.4	13.8	-	-	小柳ら (2002)
福岡 大藪	15.9	11.8~22.1	-	-	佐々木ら (2002)
福岡 御手洗	-	-	0.11	0.34	井出ら (2003)
兵庫 黒岩谷	13.6	20.9	-	-	駒井ら (2004)
愛知 豊田	10.7	0.96	0.70	0.04	本研究

3 - 2 - 3 里山林における土壌表層の炭素動態

土壌から放出される二酸化炭素量は地温以外に土壌水分にも影響されるが、これは短時間内に大きく変動するため、フェーズ で用いたバッチ式の月 1 回観測では正確な関係が得られない。そこで、あらたに自動開閉式のチャンバーを開発して CO<sub>2</sub> フラックスの連続測定をおこない、3 者の関係を求めることを目標とした。この他に土壌の化学分析を行い、二酸化炭素放出に關与する他の因子の解析を試みた。さらに、土壌にリター（落葉、落枝）として供給される有機物量を測定し、表層土壌の有機炭素の動態を求めた。

調査地域の一地点に自動開閉式のチャンバー（横 1 m × 縦 0.5 m × 高さ 0.25 m）を設置した。二酸化炭素濃度の測定は CO<sub>2</sub> 分析計 LI - 800 (LI - OOR 社) を使用した。チャンバーはタイマーによって自動的に開閉し、上蓋が開いている時間を 45 分間、閉じている時間を 15 分間にセットし、後半の 15 分間に 3 分おきにチャンバー内の二酸化炭素濃度を測定して、その変化量から CO<sub>2</sub> フラックスを算出した。地表面温度は 30 分毎にチャンバー内外で連続観測した。また TDR (PC208W Campbell 社) でチャンバー内外の深度 5 cm で土壌含水率を 1 時間ごとに測定した。これによって、同時に観測した地温、土壌水分との関係の詳細が明らかとなった (図 23)。

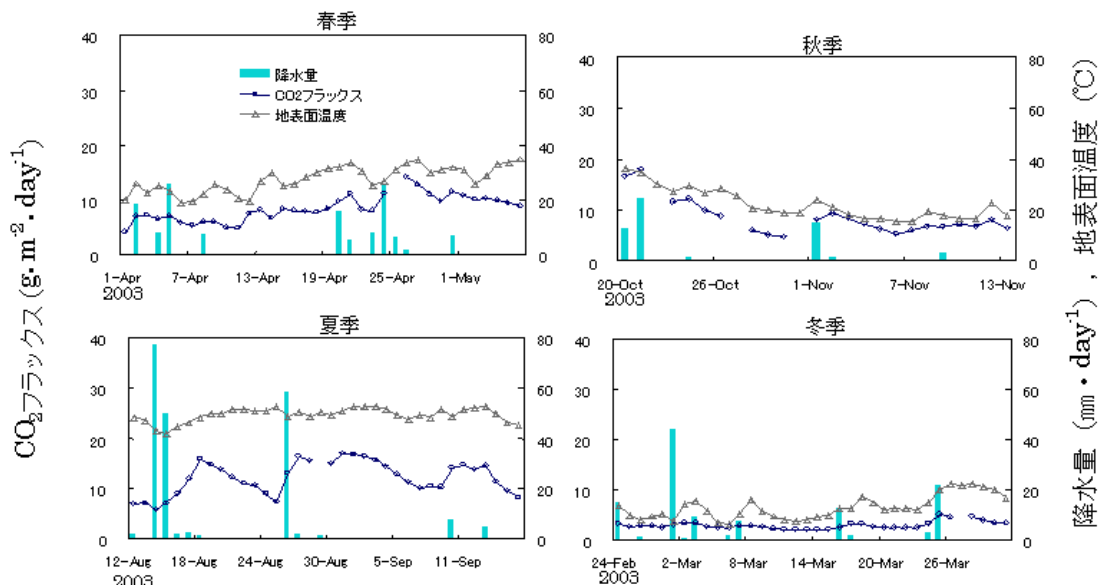


図 23 各季節における CO<sub>2</sub> フラックスの変動と地温、降雨との関係

土壌の化学分析は、フェーズ で二酸化炭素放出量を測定した 8 地点においてそれぞれ土壌を 4 試料ずつ採取し、それらを混合して含水率、溶存態有機炭素、溶存態全窒素の分析を行った。その結果と二酸化炭素放出量との関係を 図 24 に示した。根の乾重との関係から、根の呼吸による二酸化炭素放出量は  $0.101 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{hr}$  であり、その他の土壌微生物の呼吸および有機物の分解に起因する二酸化炭素放出量は  $0.322 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{hr}$  となり、根の呼吸が全放出量の 4 分の 1 程度であると推測された。土壌の化学組成との関係を見ると、土壌含水率、溶存態有機炭素が類似した弱い正の相関関係が認められ、溶存態全窒素との関係では 2 グループに分かれるような弱い正の相関関係であった。その他の項目には相関関係が認められなかった。

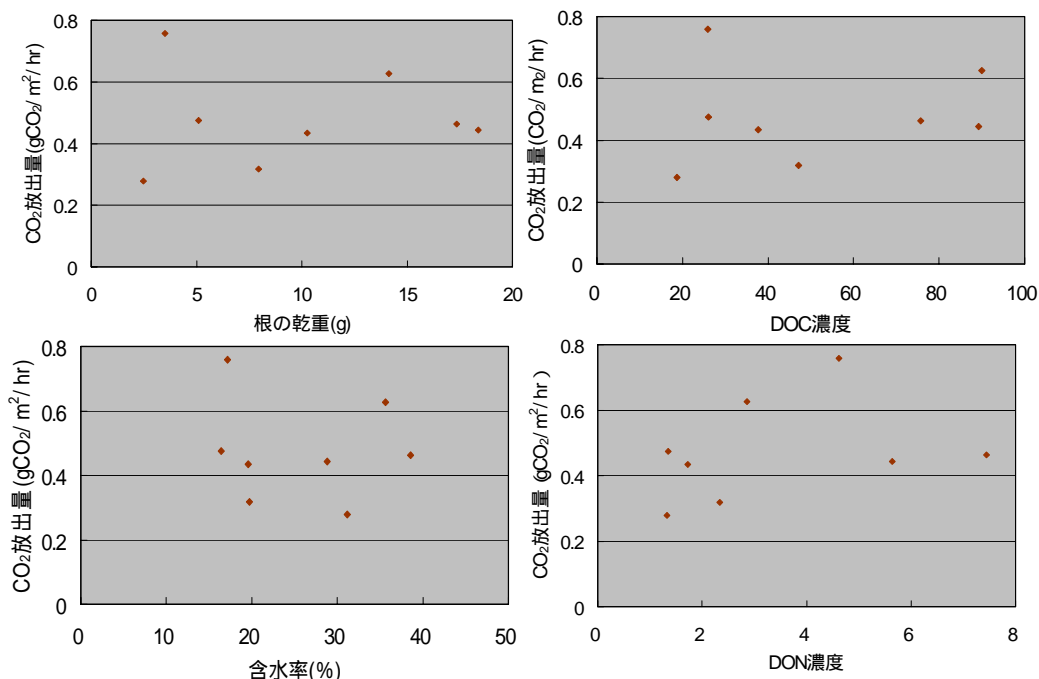


図 24 土壌の組成とCO<sub>2</sub>放出量との関係

リター（落葉・落枝）量は調査地域の 10 地点において月 1 回の頻度で 20 ヶ月間にわたって測定し、平均値として  $0.259 \text{ kgC}/\text{m}^2/\text{yr}$  が得られた。前に求めた二酸化炭素の放出量は  $1.05 \text{ kgC}/\text{m}^2/\text{yr}$  であり、落葉・枝量の約 4 倍に相当する。この支出超過の結果には、倒木、枯死根による供給や根の呼吸による二酸化炭素の放出が影響を及ぼしているものと推定された。表層土壌（10 cm 深）の有機炭素の測定は上記 8 地点で行い、その平均値は  $37.3 \text{ kgC}/\text{m}^2$  であった。前に求めた二酸化炭素の放出量  $1.05 \text{ kgC}/\text{m}^2/\text{yr}$  から落葉・枝量を差し引いた値を表層土壌の有機炭素の変化量とすると、全ての有機炭素を無機化するのに要する時間（滞留時間）は 47.2 年におよび、樹木のみならず林地土壌が炭素のシンクとして機能していることを表した（図 25）。

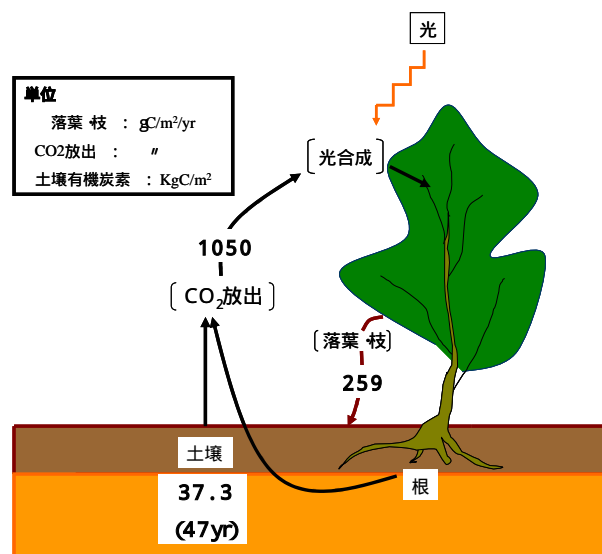


図 25 土壌表層の炭素収支

### 3 - 2 - 4 大気を経由した都市域から近郊林への物質供給

トヨタフォレスタヒルズ調査地域内の常緑広葉樹林内、落葉広葉樹林内並びに林外において乾性降水物と全降水物を採取し、樹木の有無による大気を経由して供給される物質の量的、質的な違いを把握し、調査地域の林地にもたらされる近郊都市域からの移流物質を分離定量することを目的とした。

調査地域の常緑広葉樹林内、落葉広葉樹林内並びに林外において乾性降水物と全降水物を月 1 回の頻度で 1 カ年にわたり採取した。測定項目は主要イオン 8 成分である。林内における乾性降水物量は林外の約 80 % であり、しかも物質の種類によらずほぼ同じ割合であった (図 26)。ここで得られた乾性降水物量は用いた捕集器に捕捉される量であり全量を表すものではないが、この結果は乾性降水物が樹木に付着したことを表すと考えられる。

林外降水物はバルクの採取であるので林外の乾性降水物と湿性 (降雨) 降水物をたし合わせた値である。湿性降水物は元来雨水に含まれる (レインアウト) 物質と雨滴が大気中を降下する間に取り込まれる (ウォッシュアウト) 物質とに分けることができる。後者は降雨時に雨水に取り込まれた乾性降水物とも考えられる。したがって、林外降水物を元来雨水に含まれる物質と無降雨時・降雨時の乾性降水物とに分類することができよう。ここで、無降雨時・降雨時の乾性降水物の起源は林外雨採取地点近傍の大気中に存在する物質であり、林内を起源とする物質は一部の物質を除いて少ないことから、都市域から移流してきた物質がその大部分を占めていると考えられる。そこで、本調査の目的とする都市域の影響をみるためには林外降水物からレインアウト部分を差し引けばよいことになる。レインアウト部分の求め方は、図 27 に示す降水量と物質濃度との関係図で、降水量が十分に多ければ、それに含まれる物質の大部分はレインアウト部分であるとみなし、その濃度と全降水量とを掛け合わせた値をレインアウトとしての降水物とする。

次に、林内降水物に含まれる物質を区分すると、林外降水物に加えて大気を経由して樹体に付着した物質、樹体に吸収された物質ならびに樹体から分泌された物質に分けられる。ここで求めたいのは都市域から大気を経由して樹体に付着した物質である。この物質は乾性降水物と同じものであると考えられることから、乾性降水物採取器で捕集した物質と組成が同じである

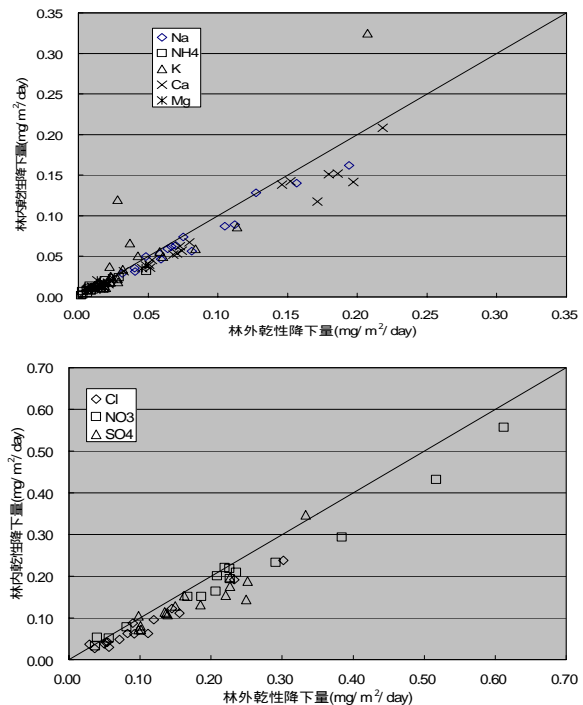


図 26 林内・林外における乾性降水物量の比較

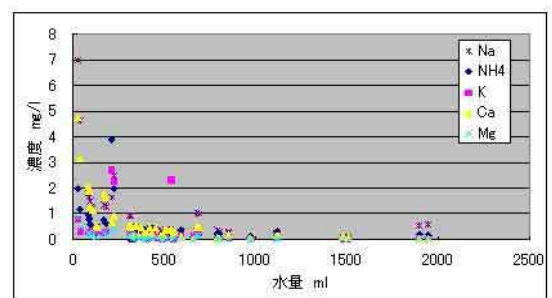
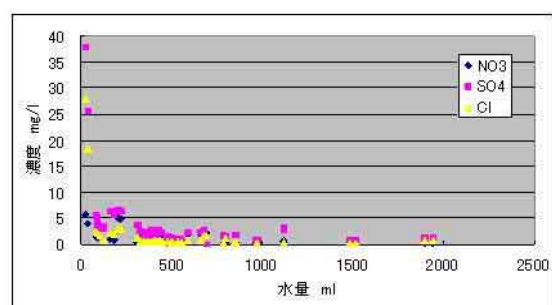


図 27 林外降水物と降水量との関係

が検討した。図 28 に、乾性降下物採取器で捕集した物質、林外降下物からレインアウト成分を差し引いた物質ならびに林内降下物から林外降下物を差し引いた物質それぞれの  $\text{Na}^+$  に対する比を示した。 $\text{Na}^+$  に対する比を採用したのは、林外降下物と林内降下物とを比較したとき最も直線性が認められ、樹体に吸収あるいは樹体から分泌されにくい物質であると判断されたからである。この図から、乾性降下物の組成を示す直線上にほぼ乗っているのは林外降下物からレインアウト成分を差し引いた物質であり、これが樹体に付着した物質の組成を表すと考えられる。これを用いて林内降下物を各成分に分離すると表 13 のようになった。この結果から、 $\text{K}^+$  分泌量が極めて多いことが判る。硫酸 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) は樹木からの分泌がほとんどない物質であるとされているが、それとは異なる結果となっている。これについては、雨で濡れた樹木の表面に溶入するガス態の硫酸が分泌した部分に含まれてしまったためであると推定される。

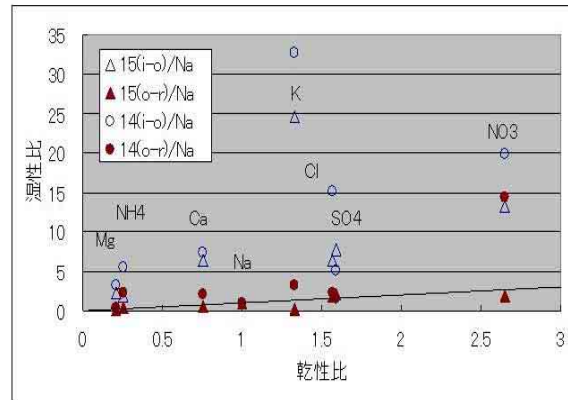


図 28 乾性降下物採取器で捕集した物質（直線）、林外降下物からレインアウト成分を差し引いた物質（o-r）ならびに林内降下物から林外降下物を差し引いた物質（i-o）それぞれのナトリウムに対する比

表 13 林内降下物の分離

		(単位 g/ m <sup>2</sup> / year)							
区分		$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
林外	レインアウト	135	79	25	54	14	219	185	797
	林外-レインアウト	124	39	16	68	16	234	223	267
落葉樹	林内付着	108	34	14	59	14	205	196	234
	林内分泌吸収	0	7	1301	190	70	151	441	211
常緑樹	林内付着	206	65	27	113	27	389	371	444
	林内分泌吸収	0	128	2006	480	175	374	946	456

### 3 - 3 . 考察及びフェーズ のまとめ

#### 3 - 3 - 1 降水から渓流水に至る水質形成機構

フェーズ で得られた知見と降雨出水時の集中観測結果より、

降雨時の流量変化に伴う水質成分ごとの変動パターンを明らかにした。例えば、流量が増加するに伴い、pH、 $\text{EC}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  および  $\text{SiO}_2$  濃度は減少し、反対に  $\text{Al}$ 、 $\text{NO}_3^-$  および  $\text{DOC}$  は流量とともに上昇する傾向にあった。

エンドメンバー法によって、降雨出水時の渓流水質の形成プロセスをある程度類推できた。

渓流水流量と濃度の関係を見た場合、降雨出水時の流出様式が長期流出過程のそれと類似する物質と、降雨出水時に比較的高濃度で流出する物質があることが分かった。

#### 3 - 3 - 2 里山林の汚濁物質浄化作用

降雨による試験流域への流入量と渓流水による流出量を算出し、流域での年間物質収支を求めたところ  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  を除くすべての項目で流入量が流出量を上回る結果となり、窒素やリンなどの汚濁負荷に関して浄化機能を有していることが分かった。

### 3 - 3 - 3 里山林における土壌表層の炭素動態

土壌水分量と二酸化炭素の放出量との関係は複雑であり、定式化には到らなかった。おそらく、土壌生物群集の活性を考慮した観測が必要であると思われる。

土壌の化学組成との関係は、決定的に二酸化炭素の放出量に影響する成分が認められなく、更に解析する必要がある。

表層土壌の有機炭素収支から、調査した林地土壌には炭素のシンクとしての働きがあることを定量的に示すことができた。

### 3 - 3 - 4 大気を経由した都市域から近郊林への物質供給

樹木の存在により大気を経由した物質の供給量は2倍以上となることが示された。このことは、物質の種類によっては林地生態系に多大の影響を及ぼす可能性を示唆している。

## 4 . 成果の達成度

トヨタフォレストヒルズに設定した試験流域において、3年以上にわたり降水から渓流水に至る水文過程の水量・水質を観測し、里山森林系における水質形成に関してその特性や機能が明らかとなった。また、大気を経由した都市域から近郊林への物質の供給経路について、大まかではあるが定量的な把握ができた。これによって都市が近郊林に与える影響、あるいは、近郊林の浄化機能の一端をモデルに組み込むことができると期待される。さらに、森林土壌表層における炭素動態に関して、連続土壌呼吸量測定装置を開発して周年にわたり観測するなど、当初に設定した目標は十分達成されたとと言える。

## 5 . 今後の課題

森林は面源負荷の中では単位面積あたりの負荷量（原単位）が最も小さいと考えられてきた。先に示したように、本試験流域においても流出負荷量は大気からの流入負荷量を下回り、現在のところは水質浄化の場として機能していることが分かる。しかしながら、近年日本各地で流入負荷量を上回る流出負荷量が観測されている例も報告されており、森林からの汚濁負荷については見直しの機運が高まっている。水質保全の観点から見れば、林冠が閉塞して林内の下層植生が貧弱となり地表面が露出した状態になると、降雨に伴う表土の流亡による汚濁負荷の増大につながり、また土壌の酸性化はアルミニウム等の有害金属の流出を招く。その対策としては、適度な間伐による光の林内導入によって林床植生を活性化させ、土壌劣化を防止することが必要不可欠と考えられる。また、スギやヒノキなどの針葉樹林、あるいは常緑広葉樹林は、酸性雨に対する緩衝能力が比較的低いと考えられるため、それらの森林に落葉広葉樹を混生させて土壌劣化を抑制することも水質浄化機能からみた望ましい森林管理であろうと思われる。ただしこれらを実証するためには、大きな労力と数十年単位の長期間にわたる観測が必要であり、森林管理手法と水質影響についての報告例はごく限られているのが実情である。自然を対象にした調査研究は、その時々々の気象条件によって結果が大きく左右されることが多く、年平均値を求める場合であっても、数年間の観測だけでは十分とは言えない場合もあり、本調査の結果だけで里山（都市近郊林）流域圏における生態系機能を把握することはできないことも事実である。また本研究では、フィールドの制約や時間的な制限から、実際に森林への施業に伴う里山生態系機能や環境調整機能の変化を捉えることができなかったため、今後は本研究で得られた多くの知見やノウハウを生かして新たな調査研究へと発展させる必要がある。



(謝辞)

現地調査および試料採取にあたっては、(財)科学技術交流財団の朴昊澤氏ならびに名古屋大学大学院の学生、柴田邦善、出口愛子、長谷川三記、牧野太紀、岩田直子、前田賢治、金ミン植の諸氏に多大なるご協力を得た。記して感謝申し上げます。

#### 【主要参考文献】

- 広瀬顕・岩坪五郎・堤利夫：森林流出水についての広域的考察( )、京大演報 60、162-173 (1988)
- 戸田浩人ほか：全国大学演習林における渓流水質、日林誌 82、308-312 (2000)
- 勝山正則ほか：降雨流出過程の相違が渓流水質形成機構に与える影響、水文・水資源会誌 13(3)、203-239 (2000)
- 大類清和ほか：降雨イベントでの渓流水の溶存物質の流出特性と流出成分の分離、日林誌 74(3)、203-212 (1992)
- 平田建正・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 399、131-140 (1988)
- 熊谷明子ほか：山地小流域における渓流水水質の変動特性、東大演報 103、1-20 (2000)
- 柴田英昭：森林生態系の物質循環と酸中和機構、「酸性環境の生態学」(佐竹研一編 愛智出版) 105-119 (1999)
- 堤利夫：森林の物質循環、東大出版会 pp122 (1987)
- 加藤正樹ら：森林と渓流水質 - その形成メカニズムと実態 -、林業科学技術振興所、pp98 (1999)
- 梅本諭・駒井幸雄・井上隆信：都市域、山林域における湿性降水物および全大気降水物による窒素、リンの負荷量、水環境学会誌 24(5)、300-307 (2001)
- 佐竹研一ほか：酸性雨研究と環境試料分析、愛智出版、pp291 (2000)
- 全国環境研協議会 酸性雨調査研究部会：第3次酸性雨全国調査報告書、全国環境研会誌 28(3)、126-196 (2003)
- 石井洋・只木良也：名古屋大学構内広葉樹二次林の構造と現存量、名大森林 19、197-206 (2000)
- 長谷川三記：落葉広葉樹二次林における渓流水の水質形成 - 土壌水の水質特性を中心として -、名古屋大学農学部卒業論文、pp73 (2002)
- 牧野太紀：落葉広葉樹二次林における土壌呼吸の季節変化の実態解析、名古屋大学大学院生命農学研究科修士論文、pp120 (2004)
- 愛知県環境部：平成12年度大気汚染調査報告 第39報、(2001)