

東京大学5演習林8試験流域における渓流水質の特性

五名美江*1・蔵治光一郎*2・春田泰次*2,*7・鴨田重裕*3・小田智基*1・
堀田紀文*1・鈴木誠*4,*7・木村徳志*5・五十嵐勇治*6,*8・
大村和也*6,*9・渡邊良広*3

Characteristics of Stream Water Chemistry at 8 Experimental Watersheds in 5 University Forests, The University of Tokyo

Mie GOMYO*1, Koichiro KURAJI*2, Yasuji HARUTA*2,*7,
Shigehiro KAMODA*3, Tomoki ODA*1, Norifumi HOTTA*1,
Makoto SUZUKI*4,*7, Noriyuki KIMURA*5, Yuji IGARASHI*6,*8,
Kazuya OHMURA*6,*9 and Yoshihiro WATANABE*3

I. はじめに

渓流水質は、生態学、土壌学、水文学、気象学、地質学、環境科学など多くの分野で研究が行われている。これは、渓流水質の決定要因が多様であり、各学問分野の知見が必要なためである。これまでに、渓流水質を決定する要因についての研究は、単一流域を対象とした詳細な水・物質収支・循環、水質形成過程に関する研究（例えば、西村, 1973; 平田・村岡, 1988; 徳地ら, 1991; 徳地・大手, 1998; 大類ら, 1992; 1993; 1994; 1995, 大手ら, 1991; Ohte *et al.*, 1995）や、森林伐採の渓流水質への影響の評価（BORMANN and LIKENS, 1967）などが行われてきた。しかしながら水質形成には多様な要因が複雑に作用するため、単一流域によるケーススタディだけでは、「森林流域の水質形成」の一般論を語るができない。

一方、我が国で広域にわたる渓流水質を比較した研究には、広瀬ら（1988）、戸田ら（2000）

*1 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻森林理水及び砂防工学研究室（〒113-8657 文京区弥生 1-1-1）

*1 Laboratory of Forest Hydrology and Erosion Control Engineering, Department of Forest Science, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

*2 東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター愛知演習林（〒489-0031 愛知県瀬戸市五位塚町 11-44）

*2 University Forest in Aichi, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

*3 東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター樹芸演習林（〒415-0304 静岡県賀茂郡南伊豆町加納 457）

*3 Arbicultural Research Institute, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

*4 東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター千葉演習林（〒299-5503 千葉県鴨川市天津 770）

*4 University Forest in Chiba, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

*5 東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター北海道演習林（〒079-1561 北海道富良野市山部）

*5 University Forest in Hokkaido, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

*6 東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター秩父演習林（〒368-0034 埼玉県秩父市日野田町 1-1-49）

*6 University Forest in Chichibu, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

*7 元所属

*7 Former affiliation

*8 現所属:5)

*8 Present affiliation:5)

*9 現所属:東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター研究部

*9 Present affiliation: Research Division, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.



図-1 東京大学5演習林の位置

Fig. 1. Locations for 5 University Forests in The University of Tokyo.

などがある。広瀬ら（1988）は北海道から沖縄までの全国 34 箇所の森林流域で平水時の渓流水を毎月 1 回、11 か月間採取し、分析したデータの平均値をその流域の代表値として流域間比較を行い、戸田ら（2000）は、全国の大学演習林 45 箇所において 1 ヶ月間に 1～数回渓流水を採取、分析し、流域間比較を行った。これらの研究により、イオン濃度については、海からの距離が主に影響しており、寒冷で湿潤な地域のイオン濃度は低い傾向にあることが明らかになっている。しかし、いずれも観測期間が 1 年に満たず、季節変動が検討できないこと、流量が測定されていないこと、1 つの場所に 1 流域しかないために地域の代表性に乏しいことなどの方法論上の限界があった。単一流域研究、広域比較研究にはそれぞれ長所はあるが限界もあり、両者を補完するような研究、すなわち複数流域で 1 年以上にわたって観測を行い、より詳細な流域間比較を行う研究は、日本ではこれまでほとんど行われてこなかった。一方、海外においては複数流域で詳細な水・物質収支・循環、水質形成過程に関する研究（MOLDAN and ČERNÝ, 1992）や、アメリカの北から南、低地から高地までの 5 流域を選んで 5 年間の物質収支のデータから水質形成について論じた広域比較研究が行われてきている（PETERS *et al.*, 2006）。

東京大学 5 演習林（千葉、北海道、秩父、愛知、樹芸研究所（以下、樹芸））では、森林の水源涵養機能を調査する目的で、水文観測を行っている（図-1）。これらの溪流では、前述したような研究の現状をかんがみ、水文観測に加えて水質の分析のための採水を毎月特定の日に一斉に行なっている。

本研究では、東京大学 5 演習林内で量水観測を行っている 8 流域を対象に、同時に 2 年 8 か月間実施した渓流水質と流量観測の結果を示し、これまで比較されたことのなかった東京大学 5 演習林における各流域の渓流水質を整理・比較することで、今後各流域で渓流水質に関する研究を進めていく上での基礎情報を提示することを目的とする。また、流域間の水質の違いの決定要因や濃度と流量との関係についての考察も行う。

表-1 対象流域
Table 1. List of study watersheds

演習林名	流域名	緯度 (北緯)	経度 (東経)	面積 (ha)	海からの 距離 (km)	標高 (m)	植生	流域近傍地点 の長期平均年 降水量(mm, 観測期間)	年損失量 (mm, 観測期間)	流域近傍地点 の年平均気温 (℃, 観測期間)	流域の地質 (岩石の種類と地質時代)
千葉	袋山沢A	35°12'	140°06'	0.80	6.0	129~225	スギ, ヒノキ人工林	2,155 (1994-1998)	1,431 (2000-2002)	14.0 (1987-1996)	砂岩泥岩互層 (新第三紀)
千葉	袋山沢B	35°12'	140°06'	1.09	6.0	128~230	1991年1-4月スギ, ヒノキ人工林伐採 2000年3月スギ, ヒノキ植栽	2,155 (1994-1998)	1,189 (2000-200)	14.0 (1987-1996)	砂岩泥岩互層 (新第三紀)
北海道	丸山沢	43°14'	142°40'	220	83.7	415~810	冷温帯・亜寒帯性 沈針広混交林	1,221 (1-3月除く) (1998)	407 (2004)	5.3 (1998)	十勝溶結凝灰岩 (第四紀更新世)
秩父	トウバク沢	35°54'	138°48'	125	91.7	1,150~2,018	山地帯~亜高山帯 下部の天然生林	1,397 (1971-2000)	552 (1996-1997)	11.2 (1971-2000)	粘板岩, 綠色珪質板岩, 珪岩, 黑色千枚岩, 輝緑凝灰岩, 石灰岩 (中・古生代)
愛知	白坂南谷	35°12'	137°10'	1.40	24.0	315~363	暖温帯性落葉広葉樹 二次林	1,929 (1986-1990)	867 (2004)	13.1 (2002)	深層風化花崗岩 (中生代後期~古第三紀)
樹芸	1号沢	34°41'	138°50'	7.25	2.3	133~320	シイ, カシ天然生林	2,270 (1964-1993)		15.0 (1964-1993)	石英安山岩 (新第三紀中新世)
樹芸	2号沢	34°41'	138°50'	8.89	2.3	160~420	スギ, ヒノキ人工林	2,270 (1964-1993)		15.0 (1964-1993)	石英安山岩 (新第三紀中新世)
樹芸	3号沢	34°41'	138°50'	1.61	2.3	220~335	クスノキ人工林	2,270 (1964-1993)	1,060 (2004)	15.0 (1964-1993)	石英安山岩 (新第三紀中新世)

(注) 年損失量は, 千葉は真板(2005), 北海道, 愛知, 樹芸3号沢は2004年の数値データ(未発表), 秩父は東京大学農学部附属演習林(2000)より引用。

II. 方 法

本研究の対象流域（5演習林8流域）の諸元を表-1に示す。千葉はスギ・ヒノキ人工林の袋山沢A流域と、1999年1月から4月に伐採が行われ、2000年3月にスギ・ヒノキが植林された袋山沢B流域を、樹芸は、シイ・カシの天然林の1号沢、スギ・ヒノキ人工林の2号沢、クスノキ人工林の3号沢を対象流域とし、他の演習林（北海道、秩父、愛知）は各1流域を対象流域とし

表-2 測定項目および分析項目と使用機器
Table 2. Measurement parameters, analysis parameters and instruments

	測定項目と使用機器		分析項目と使用機器	
	pH	EC	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺
千葉	pH電子メータ (HANNA pHseq4)	コンパクトEC計 (HORIBA B-173)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)
北海道	pH計 (HANNA コンボ1 HI 98129)	EC計 (HANNA コンボ1 HI 98129)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)
秩父	pHメータ (HORIBA D-21)	コンパクトEC計 (HORIBA B-173)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)	原子吸光度計 (日立180-80)
愛知	pHメータ (HORIBA D-21)	コンパクトEC計 (HORIBA B-173)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)	原子吸光度計 (日立180-80)
樹芸	pH計 (ラコムテスター pHScanWP3)	EC計 (ラコムテスター ECTestr10 low ⁺)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)	イオンクロマトグラフ (島津HIC-6A)

た。採水は2003年8月から2006年3月の2年8ヶ月間、毎月1回、8流域一斉に行った。ただし、北海道演習林では冬季（12月から4月）の採水は行なっていない。千葉演習林袋山沢A流域では2003年9月、2004年1月から3月、7月から9月、12月、2005年12月、2006年3月は表流水が枯渇したので採水が行われていない。袋山沢B流域は2003年11,12月、2004年6,12月、2005年2,3,6,8月、2006年1,2月は欠測である。

千葉演習林の試料水は東京大学森林理水及び砂防工学研究室で、北海道演習林、樹芸研究所の試料水は北海道演習林実験室で、秩父演習林、愛知演習林の試料水は愛知演習林実験室において化学分析を実施した。測定、分析項目と使用機器は表-2のとおりである。

Ⅲ. 結 果

表-3に研究対象期間における電気伝導度とpHおよび溶存イオン濃度の平均値と標準偏差を示す。pHの観測結果を図-2に示す。樹芸3、樹芸1は樹芸2とその他の演習林よりもpHが顕著に低い。電気伝導度（EC）の観測結果を図-3に示す。千葉A,Bと樹芸1,2,3は北海道、秩父、愛知よりも高く、変動幅も大きい。

溶存イオン濃度の変動を図-4から図-10に示す。流域間の相対的な比較を行うため、図の縦軸はイオンごとに変えてあり、 SO_4^{2-} は最大 $1400 \mu\text{molcL}^{-1}$ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} は最大 $700 \mu\text{molcL}^{-1}$ 、 NO_3^- 、 K^+ は最大 $50 \mu\text{molcL}^{-1}$ としている。

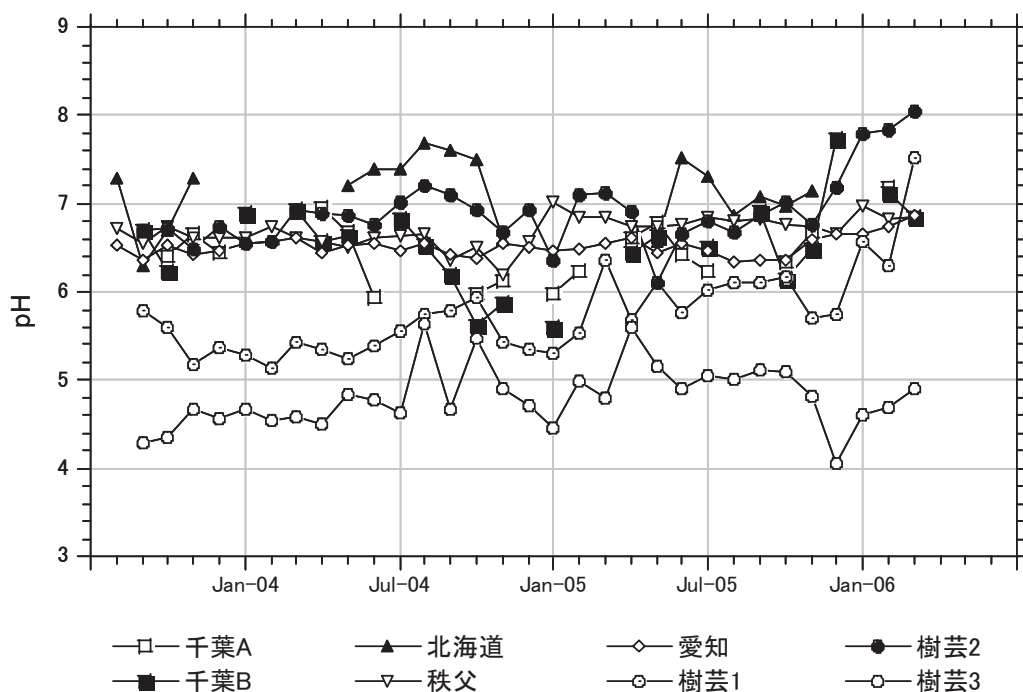


図-2 pHの変動
Fig. 2. Temporal variation in pH.

表-3 2003年8月から2006年3月までの水質の平均値(a)と標準偏差(b)
 Table 3. Mean value of stream water chemistry (a) and the standard deviation (b) from August, 2003 to March, 2006.

(a)														
演習林名	流域名	pH	EC	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ⁺	Σ anion	Σ cation
千葉	袋山沢A	6.5	129.0	289.8	7.6	207.9	0.0	344.4	22.3	247.3	552.8	0.5	505.4	1167.2
千葉	袋山沢B	6.5	100.5	114.0	13.3	119.9	0.0	264.3	18.7	197.6	453.3	0.5	247.1	934.4
北海道	丸山沢	7.1	37.3	64.4	1.4	51.3	0.1	150.8	18.8	69.9	135.8	0.1	117.2	375.5
秩父	トウバク沢	6.7	46.9	15.0	19.8	78.9	0.0	49.8	7.9	25.7	327.2	0.2	113.8	410.9
愛知	白坂南谷	6.5	46.2	83.4	7.0	96.2	0.0	223.9	23.7	42.9	160.5	0.3	186.6	451.4
樹芸	1号沢	5.8	190.8	315.6	11.2	1134.8	0.0	331.1	18.2	485.1	297.8	2.6	1461.6	1134.7
樹芸	2号沢	6.9	156.3	300.4	9.3	729.4	0.1	328.8	11.0	288.2	359.0	0.2	1039.1	987.3
樹芸	3号沢	4.8	174.0	330.3	0.1	936.0	0.0	327.8	10.1	365.4	166.5	18.9	1266.4	888.8

単位は、EC(μS/cm)、各溶解物質濃度(μmolL⁻¹)

注)Σ anion=Cl⁻+Na₃+SO₄²⁻+OH⁻, Σ cation=Na⁺+K⁺+Mg²⁺+H⁺

(b)														
演習林名	流域名	pH	EC	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺				
千葉	袋山沢A	0.3	17.6	28.6	5.9	36.1	36.8	5.0	30.3	72.7				
千葉	袋山沢B	0.7	21.2	15.2	10.5	16.4	25.6	5.6	31.2	76.9				
北海道	丸山沢	0.1	12.7	12.6	3.1	6.6	32.6	5.8	51.4	59.0				
秩父	トウバク沢	0.1	6.9	2.4	7.2	11.7	16.3	1.7	7.1	93.6				
愛知	白坂南谷	0.1	5.9	5.7	4.0	14.7	26.3	5.6	17.9	35.0				
樹芸	1号沢	2.0	31.9	33.5	9.9	190.0	108.0	6.4	116.8	80.7				
樹芸	2号沢	0.1	25.1	22.0	10.1	160.7	110.3	3.8	73.8	101.1				
樹芸	3号沢	16.8	39.0	29.2	0.6	219.1	113.6	4.7	108.5	56.8				

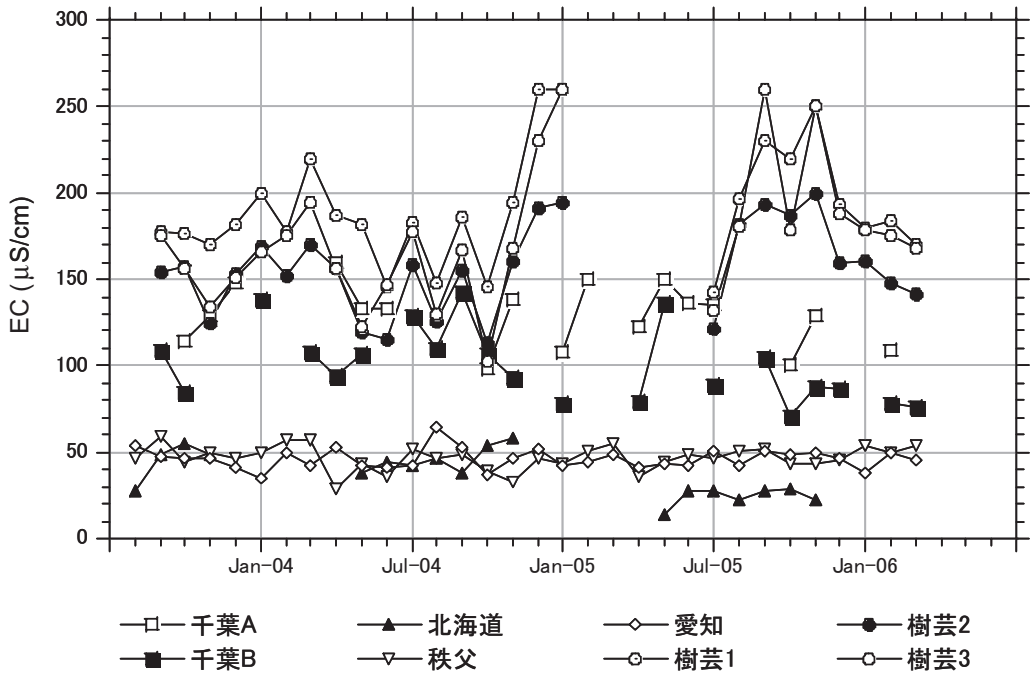


図-3 電気伝導度(EC)の変動
Fig. 3. Temporal variation in electric conductivity.

Cl⁻濃度は、千葉A、樹芸1,2,3は高く、秩父は低く、愛知、北海道は中間的な濃度である(図-4)。
 NO₃⁻濃度は北海道と樹芸3でほとんど検出されなかった(図-5)。
 SO₄²⁻濃度は樹芸1,2,3で平均900~1200 μmol/Lと非常に高く、その中でも特に高い樹芸1は樹芸2の2倍近い濃度を示すが、濃度変動は樹芸1,2,3で同期しており、冬から春にかけて上昇し、夏から秋にかけて低下する。千葉Aの平均値は200 μmol/L、その他は100 μmol/L程度である(図-6)。
 Na⁺濃度は千葉と樹芸で平均250~350 μmol/Lと高く、秩父では平均49.8 μmol/Lと低く、北海道と愛知は平均150~250 μmol/Lと中間的な濃度を示す(図-7)。
 K⁺濃度は千葉、北海道、愛知、樹芸1で大きく、他はその半分程度である(図-8)。
 Mg²⁺濃度は、樹芸1では平均値が450 μmol/L以上と高く、北海道、秩父、愛知では100 μmol/L以下と低かった。千葉と樹芸2,3は200~400 μmol/Lと中間的な値となっている(図-9)。
 Ca²⁺濃度は千葉、秩父で高く、北海道、愛知で低い。樹芸は両者の中間だが、3流域間に2倍近くの差がある(図-10)。

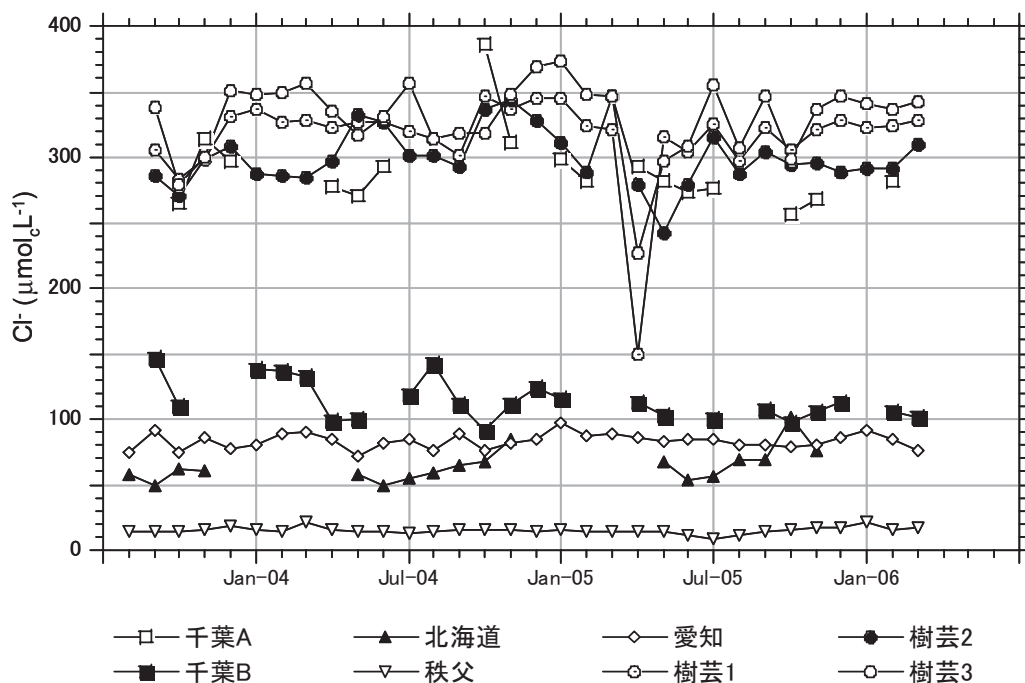


図-4 Cl⁻濃度の変動
Fig. 4. Temporal variation in the concentration of chlorine ion.

IV. 考 察

1) 5演習林における渓流水質の比較

演習林間で顕著な濃度の違いが見られたのはCl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, H⁺であった。

Cl⁻は、一般にほとんどが降雨によってもたらされ、土壤中、鉍物や有機物からの溶出やそれらへの吸収は無視できるほど小さい。また、海塩が主要な供給源であることが多い。そのため海に近い流域と日本海側の多雪地にある流域のCl⁻濃度が高いことが指摘されている(広瀬ら, 1988)。本研究で海からの距離が10km以内(表-1)の千葉と樹芸のCl⁻濃度が他の演習林と比べて高い傾向が得られたことは、この知見と整合している。表-4にこれまで長期にわたり溶存イオン濃度が測定されてきている千葉と愛知の降雨の長期平均の水質を示す。表-4より、千葉では愛知に比べてCl⁻濃度が顕著に高いことがわかる。これらのことは渓流水のCl⁻濃度は主に海からの距離により決定されているという仮説を支持している。

Na⁺は、Cl⁻と同様、千葉と樹芸で高い傾向が認められ、海塩に由来する割合が大きいと考えられたが、Cl⁻濃度ほど流域間の違いは明確でなかった(図-7)。千葉、樹芸の渓流水中のCl⁻濃度とNa⁺, Mg²⁺, Ca²⁺濃度との関係を図-11に示す。図-11より、Cl⁻とNa⁺の相関は、Cl⁻とMg²⁺, Ca²⁺の相関に比べて必ずしも高くない(図-11)。これは、Na⁺は造岩鉍物の化学的風化によって溶出し、渓流水中に流出する可能性のある物質である。また、森林土壤中に負に帯電し

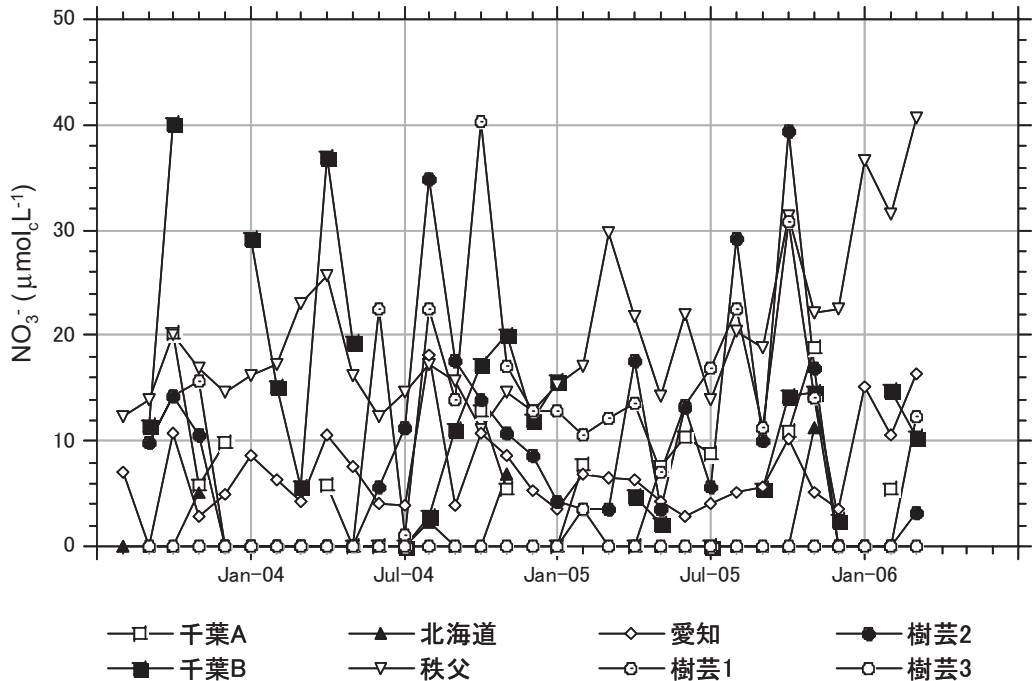


図-5 NO₃⁻濃度の変動
Fig. 5. Temporal variation in the concentration of nitrate ion.

ている土壤コロイドへの陽イオンの吸着力はNa⁺, Mg²⁺, Ca²⁺の順で弱く(生原, 1994), Na⁺は比較的流出し易いためと推測される。

NO₃⁻濃度は、千葉、愛知、秩父に比べて、北海道でほとんど検出されず、樹芸では流域により異なっていた。一般に我が国の森林渓流のNO₃⁻濃度はバラエティに富んでいるが(戸田ら, 2000), 高濃度のNO₃⁻流出については、窒素飽和現象が生じていると見られる例(岩坪ら, 1997; OHRUI and MITCHELL, 1997; 楊ら, 2004)や、都市近郊の森林で降水中のNO₃⁻濃度が高いため、渓流水のNO₃⁻濃度が高くなるという例(SHIBATA *et al.*, 2001; 新藤ら, 2005)が報告されている。一方、低濃度のNO₃⁻流出については、土壤水が渓流に移動する経路に嫌氣的な地下水帯が存在すると脱窒が起こり、NO₃⁻濃度が低下する可能性が指摘されている(KOBA *et al.*, 1997; 木平ら, 1997; OSAKA *et al.*, 2006)。北海道のNO₃⁻濃度が低い理由としては、都市から離れていてNO₃⁻のインプットが少ないこと、流域の平均勾配が緩やかなために地下水帯が存在し、脱窒が起こりやすいことが理由として考えられる。

SO₄²⁻濃度は、樹芸で他の流域と比べて非常に高い傾向が見られた(図-6)。降雨中のSO₄²⁻の起源は、大気中に供給された粒子状あるいはガス状の硫黄化合物にあり(佐竹, 2000), 人為起源、海水起源、土壤起源、火山由来が可能性として考えられる。海からの距離が近い千葉と遠い愛知で降雨中のSO₄²⁻濃度はほとんど変わらず他の要因にも大きな差がないことから、樹芸の降雨のSO₄²⁻濃度もこれらと大きな差はないと推察される。渓流水の濃度についての降水からの上昇分は、蒸発散による濃縮と、流域の内部での溶出によるものが考えられる。蒸発散の効果をま

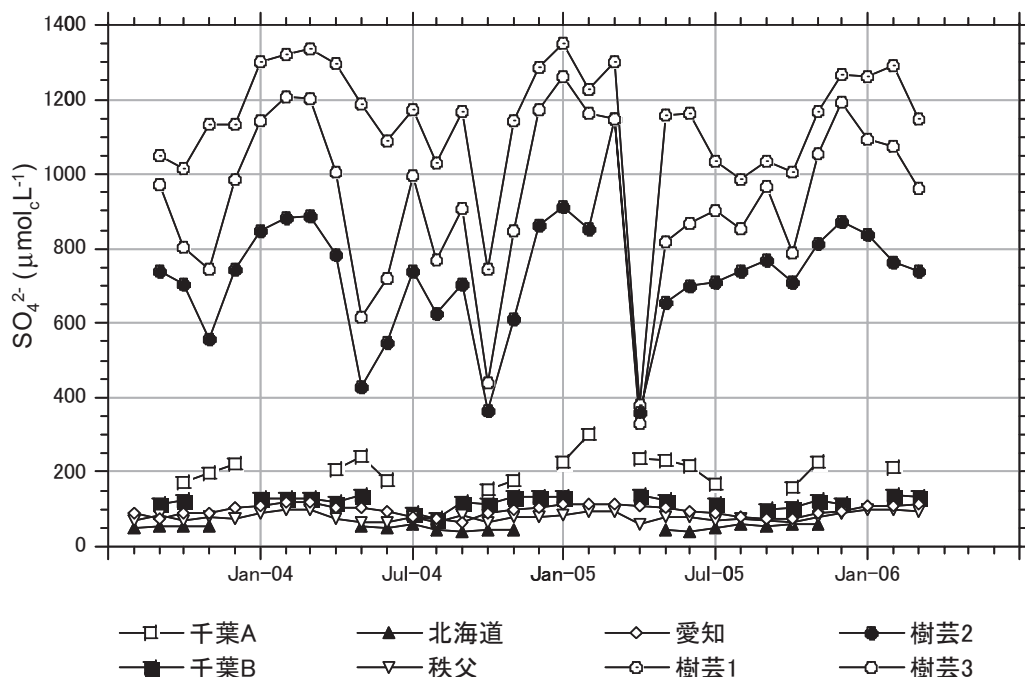


図-6 SO_4^{2-} 濃度の変動
Fig. 6. Temporal variation in the concentration of sulfate ion.

ず吟味する。同年の観測データではないためラフな推定ではあるが、表-1の年降水量と年損失量から概算した蒸発散濃縮率は、千葉Aは65%、千葉Bは55%、愛知は45%と、おおよそ50%程度である。従って、愛知の渓流水中の SO_4^{2-} 濃度は降雨中の SO_4^{2-} 濃度の蒸発散濃縮でおおよそ説明できる。一方、千葉Bの渓流水中の SO_4^{2-} 濃度は蒸発散濃縮でおおよそ説明できるが、千葉Aは蒸発散濃縮だけでは説明できず、降雨以外の起源に由来するものが含まれているものと推察される。樹芸では、表-4から推察される降雨の SO_4^{2-} 濃度よりはるかに高濃度の SO_4^{2-} が渓流水に流出しており（表-3）、蒸発散濃縮だけでは説明できない。このことは降雨以外の流域内部の起源に由来する SO_4^{2-} がかなりあることを示唆している。流域内の起源としては主に岩石の風化（硫化物の酸化）と有機態Sの無機化、酸化が考えられる（仲川，1995）。

樹芸の流域内では明治期から昭和30年代まで銅鉱山として銅の採掘が行われていた（東京大学附属演習林樹芸研究所，2003）。稲葉ら（2004）は樹芸研究所青野研究林内の坑道口付近2地点と支流が本流に合流するところ1地点、さらに下流1地点において、河川水、土壌、植物試料を採取し、元素分析を行った。坑道口付近で採取した河川水試料のpHは3.79および5.09と極端な酸性を示し、低pHほど SO_4^{2-} 濃度が高いこと、坑道口付近では微量のCuが検出されFe、Mn、Znも他の採水地点より高い値で検出されたとしている。鉱床では一般に単一の元素だけでなく、複数の元素が濃縮して、硫化物として存在する（鹿園，1997）。これらのことは樹芸の造岩鉱物中には他の流域に比べて金属硫化物が多く、土壌中や基岩から SO_4^{2-} が流出しやすい条件であることを示唆している。

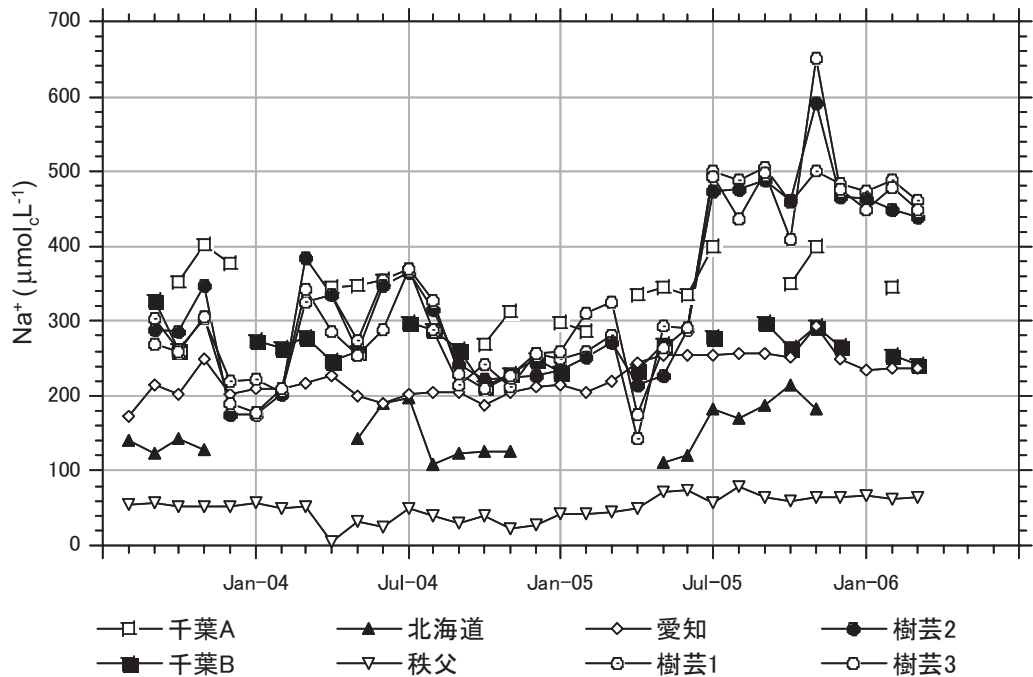


図-7 Na⁺濃度の変動
Fig. 7. Temporal variation in the concentration of sodium ion.

2) 同気候条件における異なる流域間の渓流水質の比較

次に、同じ演習林内で隣接する流域（樹芸 1,2,3 と千葉 A,B）において渓流水質に違いが生じる要因として考えられることについて検討する。

NO₃⁻濃度

樹芸 1,2,3 では、隣接する流域であるにもかかわらず、NO₃⁻、SO₄²⁻、H⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 濃度に顕著な違いが見られた（表-3）。

渓流水のNO₃⁻濃度は樹芸 3で平均0.1 μmol/L⁻¹とほとんど検出されなかった。樹芸 1,2,3は立地条件の植生および流域面積が異なる。植生の違いは土壌の理化学的性質および土壌中の生物活性と深く関係していることから（CAMPBELL *et al.*,1989；YIN *et al.*,1993）、森林土壌の違いが窒素の無機化に影響し、渓流水の無機態窒素の組成の差異に影響している可能性が考えられるが、メカニズムの詳細については今後のプロセス研究を待たねばならない。

SO₄²⁻濃度

3流域間のSO₄²⁻濃度の差の原因を検討するため、まず流量とSO₄²⁻の関係を調べた（図-12）。樹芸 1,2,3 において、流量が上昇するとSO₄²⁻濃度が低下する傾向があることがわかる。このことは、降雨のSO₄²⁻濃度が渓流水よりも低いため、流量が多いほど降水に希釈される割合が高いためと解釈できる。図-6に見られた、樹芸 1,2,3で同期したSO₄²⁻濃度の季節変化は、高濃度溶出するSO₄²⁻が、降水量の季節変動に応じて希釈された結果とも解釈できる。流量が最も低下し

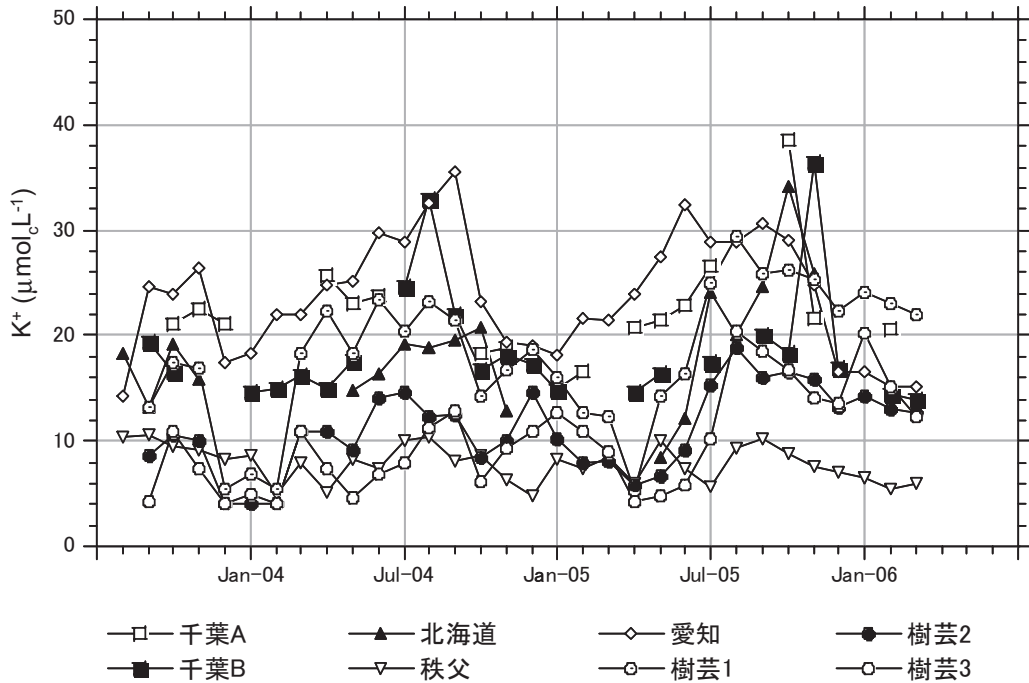


図-8 K⁺濃度の変動
Fig. 8. Temporal variation in the concentration of potassium ion.

たとき、地下水流出の割合が最も大きくなると考えられるが、樹芸2は他の二者に比べて濃度が低い。このことは、前節で述べた、土壌や基岩からの SO_4^{2-} の溶出強度が流域によって異なることを示唆している。

pHと塩基性陽イオン

つぎに、カウンターとなる陽イオンとの関係を他の流域と比較する。図-11に、千葉、樹芸の渓流水中の SO_4^{2-} 濃度と Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 濃度との関係を示す。 SO_4^{2-} 濃度と Na^+ 濃度の関係は千葉、樹芸ともにばらつきが大きく、関係は見られない。一方、樹芸では SO_4^{2-} 濃度と Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度に正の相関が見られ、 Mg^{2+} と SO_4^{2-} の濃度比は3流域間でそれほど差がないのに比べ、 Ca^{2+} と SO_4^{2-} の濃度比は3流域間で異なっている。樹芸1,2,3で SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 H^+ 濃度に違いが生じる要因としては、主に局所的な地質および土壌の理化学的性の違いによると考えられる。表-3を見ると、樹芸1,2,3で SO_4^{2-} 濃度が最も高いのは樹芸1、低いのは樹芸2である。一方、樹芸1,2,3でpHが最も低いのは樹芸3、高いのは樹芸2であり、 SO_4^{2-} 濃度が高ければpHが低いというわけではない。樹芸1,2,3の SO_4^{2-} 濃度に対する $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + \text{H}^+$ の割合は、樹芸1は100%、樹芸2は135%、樹芸3は95%である。樹芸3は、樹芸1,2に比べて流域面積が小さく、土壌水から地下水を経て渓流水に至る水文過程において土壌と水の接触時間が短いためカウンターとなる陽イオンの渓流水中への流出が少ないと考えられる。このため樹芸3は酸緩衝能が低く、溪流がやや酸性になっているものと推察される。一方、樹芸2は渓流水中への SO_4^{2-} の流出に対する塩基性陽イオンの流出が樹芸1,3に比べて多いため、pHが中性に保たれている。

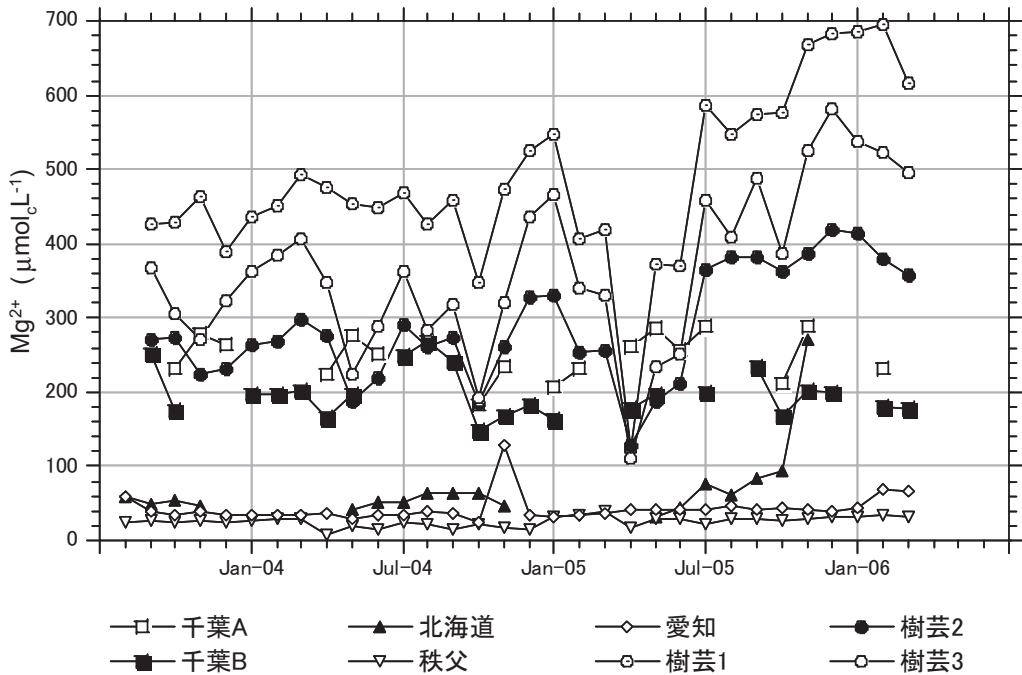


図-9 Mg²⁺濃度の変動
Fig. 9. Temporal variation in the concentration of magnesium ion.

森林伐採の影響

千葉では、森林伐採が流域の渓流水質に及ぼす影響を明らかにする目的で、2つの隣接する流域の一方(千葉B)が1999年に伐採された。その結果、1999年春期から伐採後約1年半の期間、千葉Bでは土壤水から地下水を経て渓流水に至る水文過程の全てにおいてNO₃⁻濃度が上昇し、半年後をピークに低下したことが報告されている(KURAJI, 2002)。特に降雨時には、伐採前の10倍以上にまで渓流水のNO₃⁻濃度は上昇している。森林伐採後にNO₃⁻濃度が増加することについては多くの報告があり(例えば, BOSCH and HEWLETT, 1982; CORBETT *et al.*, 1978; MARTIN *et al.*, 1985; VITOUSEK and MELIO, 1979)、千葉Bの結果はこれらと類似の結果である。また、伐採後のNO₃⁻濃度の急激な上昇に伴い、Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺濃度の増加も見られた(鈴木, 1999)。Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺濃度は伐採の翌年には伐採前の水準に戻っているが(小田, 2004)、NO₃⁻濃度は伐採後7年が経過した2006年までには伐採前の水準に戻っていない(武田, 2007)。

渓流水中のCl⁻濃度は千葉Bが千葉Aよりも低くなっている。もともと千葉Bは千葉Aと同程度のCl⁻濃度であったが、1999年の伐採後にCl⁻濃度が低下し、植栽後数年経過しても千葉AのCl⁻濃度と同じ程度まで回復していない(小田, 2006)。濃度低下の主な原因としては、蒸発散の低下に伴う濃縮効果の低下や、樹冠が除去されたことにより、乾性沈着物としてのCl⁻流入量が低下したことが指摘されている(小田, 2006)。

1) で述べたように千葉Bの渓流水中のSO₄²⁻濃度は蒸発散濃縮でおおよそ説明できるが、千葉Aでは蒸発散濃縮以外に流域内部にある硫黄に由来するものと推察された。森林伐採前

表-4 降雨の水質の平均値
Table 4. Mean value of rain water chemistry

期間	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
千葉 1998-2006	4.1	115.7	21.9	45.4	54.8	63.7	18.9	28.4
愛知 2000-2005	4.7	26.2	28.9	42.9	18.3	2.5	4.4	25.0

単位は、各溶存物質濃度(μmolL⁻¹)

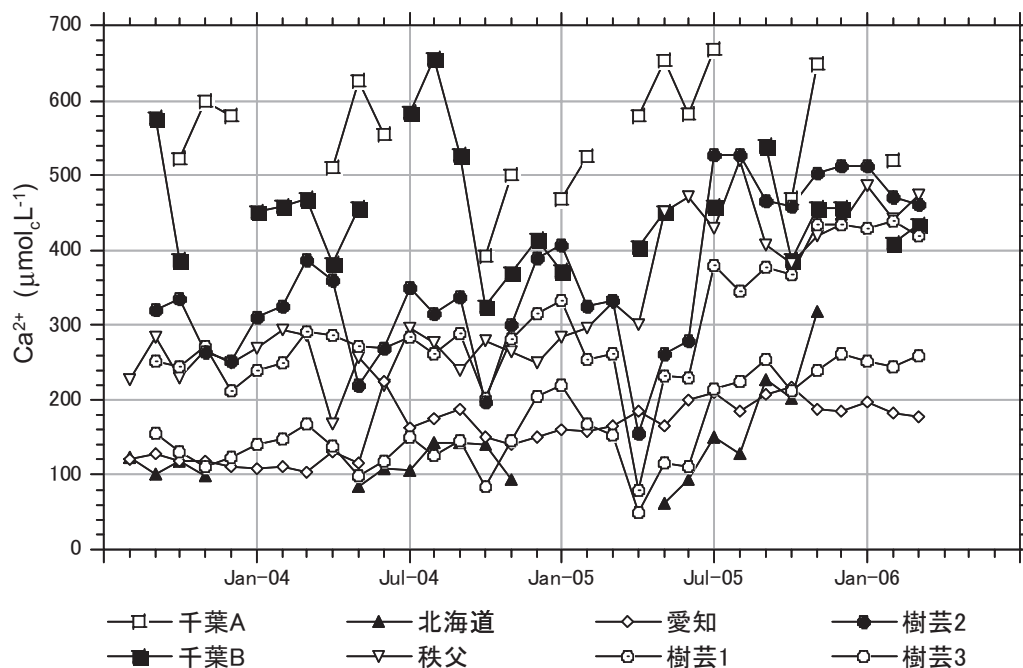


図-10 Ca²⁺濃度の変動
Fig. 10. Temporal variation in the concentration of calcium ion.

の渓流水中のSO₄²⁻濃度は千葉Aで千葉Bよりも高かったこと(鈴木, 1999), 森林伐採後の千葉Bの渓流水中のSO₄²⁻濃度はNO₃⁻濃度のような顕著な変化は見られなかったことから(東京大学千葉演習林袋山沢研究グループ, 2002), 千葉A,Bの渓流水のSO₄²⁻濃度の違いは、局所的な地質および土壌の理化学的性の違いを反映した結果である可能性が高いと推察される。

IV. 結 論

本研究では、東京大学の5演習林8流域を対象として、同時に3年近くにわたり渓流水の水質を計測し、それぞれの流域の渓流水イオン濃度について、季節変動を含めて示した。

5演習林における渓流水質の比較結果、流域間で顕著な濃度の違いが見られたのはCl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, H⁺であった。これらの違いが生じる要因について検討したところ、Cl⁻はおおむね海塩起源であり、地理的要因(海からの距離)によって決定されることが示された。SO₄²⁻

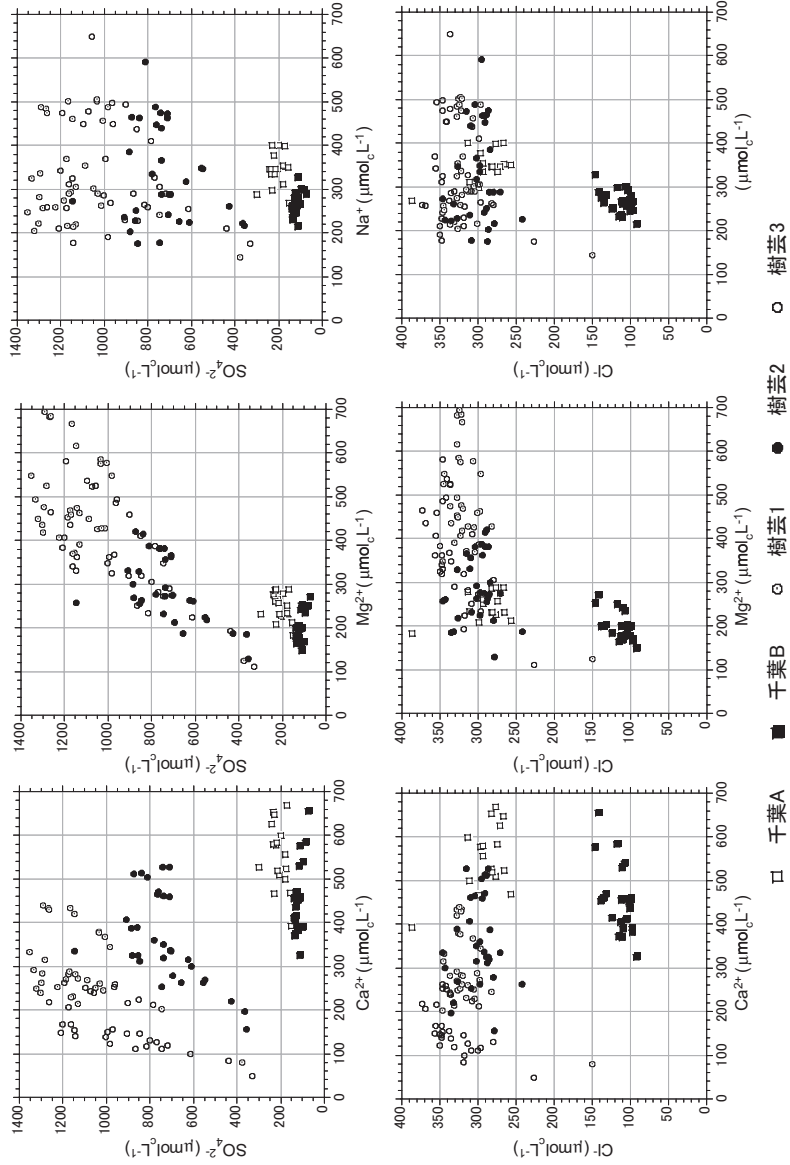


図-11 SO_4^{2-} 濃度と Ca^{2+} 濃度、 Mg^{2+} 濃度、 Na^+ 濃度の関係(上)および
 Cl^- 濃度と Ca^{2+} 濃度、 Mg^{2+} 濃度、 Na^+ 濃度の関係(下)
 Fig. 11. Relationship between sulfate ion and calcium ion, magnesium ion, sodium ion (upper) and
 relationship between chlorine ion and calcium ion, magnesium ion, sodium ion (below).

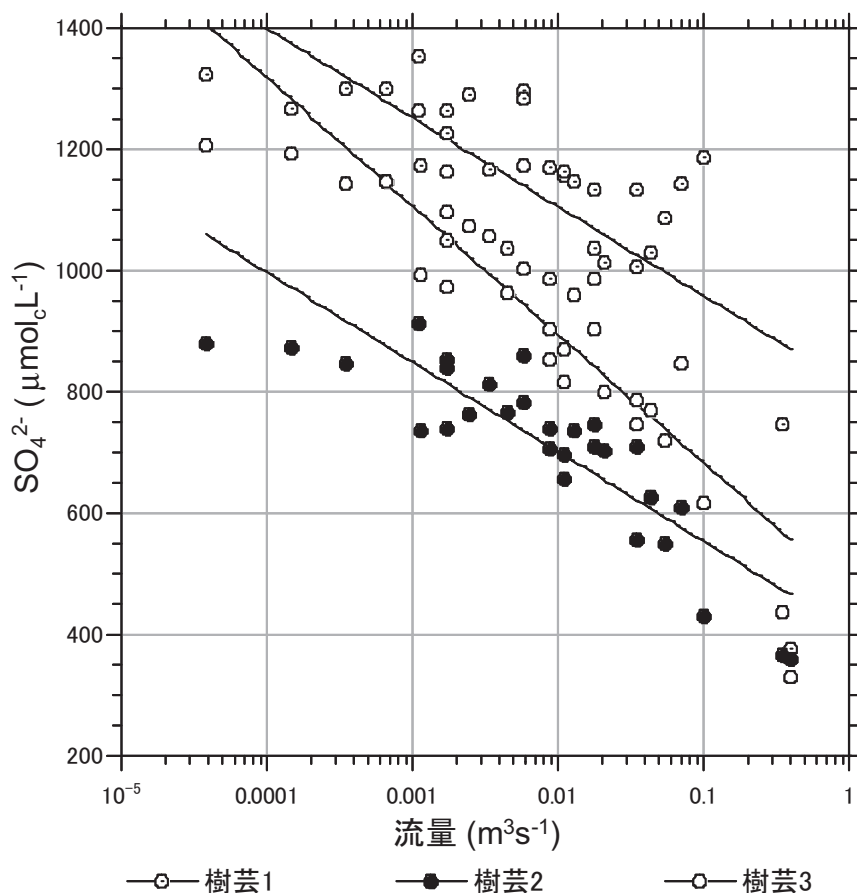


図-12 流量と SO_4^{2-} 濃度の関係
 Fig. 12. Relationship between discharge and sulfate ion concentration.

は、本研究対象流域のうち特に樹芸に関しては流域の基岩や土壌の造岩鉱物中の硫黄化合物を起源とする SO_4^{2-} が他に比べて多く流出していると推察された。このような流域では、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} などのカウンターとなる塩基性陽イオンの濃度が高くなるものの、pHは低くなる場合があることが示された。

同気候条件における異なる流域間の渓流水質を比較した結果、樹芸1,2,3では NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 H^+ 濃度に顕著な違いが見られた。樹芸1,2,3において、これらのイオン濃度に違いが生じる要因として、局所的な地質、土壌の理化学的性の違いが作用している可能性が推察されたが、現段階では細かなメカニズムを特定するに至っていない。

今後、各流域で降雨から渓流水に至るまでの過程を補完する観測を展開していくことで、単一流域研究と広域研究の長所が生かされ、森林流域の水質形成に関する理解の一般化が可能となるものと期待される。

謝 辞

本研究は科学研究費基盤研究 A「流域生態圏における水・熱・物質循環の長期変動モニタリングと広域比較研究」(代表：小川滋・九州大学特任教授) および科学研究費基盤研究 A「森林生態系における水・物質動態の流域特性の広域比較研究 (代表：丹下健・東京大学教授)」の支援を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

要 旨

本研究では、東京大学の5演習林8流域を対象として、同時に3年近くにわたり渓流水の水質を計測し、それぞれの流域の渓流水イオン濃度について、季節変動を含めて示した。

5演習林における渓流水質の比較結果、流域間で顕著な濃度の違いが見られたのは Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 H^+ であった。これらの違いが生じる要因について検討したところ、 Cl^- はおおむね海塩起源であり、地理的要因(海からの距離)によって決定されることが示された。 SO_4^{2-} は、本研究対象流域のうち特に樹芸に関しては流域の基岩や土壌の造岩鉱物中の硫黄化合物を起源とする SO_4^{2-} が他に比べて多く流出していると推察された。このような流域では、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} などのカウンターとなる塩基性陽イオンの濃度が高くなるものの、pHは低くなる場合があることが示された。

同気候条件における異なる流域間の渓流水質を比較した結果、樹芸1,2,3では NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 H^+ 濃度に顕著な違いが見られた。樹芸1,2,3において、これらのイオン濃度の違いが生じる要因として、局所的な地質、土壌の理化学的性の違いが作用している可能性が推察された。

キーワード： 渓流水質・流域間比較・水質と流量・地理的要因・地質的要因

引 用 文 献

- BORMANN, F.H. and LIKENS, G. E. (1967) Nutrient cycling. *Science* 155 : 424-429.
- BOSCH, J.M. and HEWLETT, J.D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55 : 3-23.
- CAMPBELL, D.J., KINNIBERG, D.G., and BECKETT, P.H.T. (1989) The soil solution chemistry of some Oxfordshire soils: Temporal and spatial variability. *European Journal of Soil Science* 40 : 321-339.
- CORBETT, E.S., LYNCH, J.A., and SOPPER, W.E. (1978) Timber harvesting practices and water quality in the Eastern United States. *Journal of Forestry* 76 : 484-488.
- 生原喜久雄 (1994) 渓流水の水質形成に及ぼすプロトン (H^+) の影響. *水文・水資源学会誌* 7 : 325-331.
- 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* 399 : 131-140.
- 広瀬 顕・岩坪五郎・堤 利夫 (1988) 森林流出水の水質についての広域的考察(1). *京大演報* 60 : 162-173.
- 稲葉尚子・久保田洋・齊藤陽子・竹中千里 (2004) 樹芸研究所内銅ズリ鉱堆積場における Cu の存在状態について. *東大演報* 111 : 85-97.
- 岩坪五郎・徳地直子・仲川泰則 (1997) 降水と森林流出水の水質-降水溶存元素量の30年間の変動, 降水と流出水にともなう溶存元素収支と森林流出水質の広域の変動. *森林立地* 39(2) : 63-71.
- KOBA, K., TOKUCHI, N., WADA, E., NAKAJIMA, T., and IWATSUBO, G. (1997) Intermittent denitrification: The application of a ^{15}N natural abundance method to a forested ecosystem. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 : 5043-5050.

- 木平英一・楊宗興・戸田任重・八木一行・窪田順平・塚本良則（1997）森林流域谷低部土壌の脱窒作用 - NO_3^- - N窒素安定同位体比による解析 - . 日林誌 79 : 83-88.
- KURAJI, K. (2002) Hydrological and hydrochemical characteristics of rainfall, throughfall, stemflow and streamwater in the University Forest in Chiba, the University of Tokyo. In *Hydrogen and Oxygen Isotopes in Hydrology*. Yoshida, N. (eds.), UNESCO-IHP and HyARC, Nagoya University.
- 真板英一（2005）千葉演習林袋山沢試験地における森林伐採が流出量に及ぼす影響に関する研究. 東京大学博士課程学位論文, 194pp.
- MARTIN, C.W., NOEL, D.S., and FEDERER, C.A. (1985) Clearcutting and the biogeochemistry of streamwater in New England. *Journal of Forestry* 83 : 686-689.
- MOLDAN, B., and ČERNÝ, J. (1992) *Biogeochemistry of Small Catchments*. 418pp, SCOPE, ICSU and UNEP.
- 仲川泰則・徳地直子・西村和雄・岩坪五郎（1995）森林流出水の水質特性に関する広域的比較. 京大演報 67 : 40-50.
- 西村武二（1973）山地小流域における養分物質の動き. 日林誌 55(11) : 323-333.
- 小田智基（2004）森林伐採による水質変化に基づく水収支・物質収支の推定. 東京大学卒業論文, 30pp.
- 小田智基（2006）新第三紀層流域における降雨流出プロセスのモデル化 - 袋山沢流域を対象に伐採に伴う Cl^- 濃度変化を用いた検討 - . 東京大学修士課程学位論文, 56pp.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲（1992）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.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲（1993）森林集水域での土壌から渓流水への水質変化. 日林誌 75(5) : 389-397.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲（1994）森林小集水域における渓流水質に及ぼす諸要因の影響. 日林誌 76(5) : 383-392.
- 大類清和・相場芳憲・生原喜久雄（1995）水域での水質変化の過程. 水文・水資源学会誌 8(4) : 67-381.
- Ohru, K., and Mitchell, M.J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Applications* 7(2) : 391-401.
- 大手信人・徳地直子・鈴木雅一（1991）森林流域内の水移動にともなう地中水・渓流水の水質変化. 京大演報 63 : 69-91.
- OHTE, N., TOKUCHI, N., and SUZUKI, M. (1995) Biogeochemical influences on the determination of water chemistry in a temperate forest basin: factors determining the pH value. *Water Resources Research* 31 : 2823-2834.
- OSAKA, K., OHTE, N., KOBAYASHI, K., KATSUYAMA, M., and NAKAJIMA, T. (2006) Hydrologic controls on nitrous oxide production and consumption in a forested head water catchment in central Japan. *Journal of Geophysical Research* 111 : G01013, doi : 10.1029/2005 JG000026.
- PETERS, N.E., SHANLEY, J.B., AULENBACH, B.T., WEBB, R.M., CAMPBELL, D.H., HUNT, R., LARSEN, M.C., STANLARD, R.F., TROESTER, J., WALKER, J.F. (2006) Water and solute mass balance of five small, relatively undisturbed watersheds in the U.S. *Sciences of the Total Environment* 358 : 221-242.
- 佐竹研一編（2000）酸性雨研究と環境試料分析 - 環境試料の採取・前処理・分析の実際 - . 愛智出版, 291pp.
- SHIBATA, H., KURAJI, K., TODA, H. and SASA, K. (2001) Regional comparison of nitrogen export to Japanese forest streams. *The Scientific World* 1 : 572-580.
- 鹿園直建（1997）地球システムの化学 環境・資源の解析と予測. 東京大学出版会, 66pp.
- 新藤純子・木平英一・吉岡崇仁・岡本勝男・川島博之（2005）我が国の窒素負荷量分布と全国渓流水水質の推定. 環境科学会誌 18 : 455-463.
- 鈴木広子（1999）東京大学千葉演習林袋山沢における森林伐採に伴う水質変化. 東京大学修士課程学位論文, 16pp.
- 武田圭史（2007）袋山沢における降雨出水時の渓流水 NO_3^- 濃度の形成について. 東京大学卒業論文, 26pp.
- 戸田浩人・笹賀一郎・佐藤冬樹・柴田英昭・野村 陸・市川 一・藤戸永志・鷹西俊和・清和研二・塚原初男・飯田俊彰・谷口憲男・中田 誠・桑原 繁・内田武次・春田泰次・井上 淳・八木久義・塚越剛史・蔵治光一郎・二田美穂・小野 裕・鈴木道代・今泉保二・山口法雄・竹中千里・万木 豊・川辺三郎・安藤 信・中西麻美・西村和雄・山崎理正・長山泰秀・土肥奈都子・片桐成夫・小藤隆一・新村義昭・井上章二・江崎次夫・河野修一・藤久正文・岩松 功・今安清光・中村誠司・塚本次郎・野上寛五郎・榎木 勉（2000）全国演習林における渓流水質. 日林誌 82(3) : 308-312.
- 徳地直子・大手信人（1998）森林生態系における H^+ 収支. 日本生態学会誌 48 : 287-296.

- 徳地直子・辻明子・岩坪五郎（1991）山地小流域における降水と流出水の水質. 京大演報 63 : 60-68.
- 東京大学千葉演習林袋山沢研究グループ（2002）東京大学千葉演習林袋山沢における総合対照流域調査に関する報告書. 260pp.
- 東京大学附属演習林樹芸研究所（2003）樹芸研究所第3期試験研究計画. 演習林（東大） 42 : 71-108.
- 東京大学農学部附属演習林（2000）関東地域の水文特性に関する調査.（秩父演習林自然環境調査報告書（平成11年度））.177-183.
- VITOUSEK,P.M.,and MELILLO,J.M.（1979）Nitrate losses from disturbed forests, patterns and mechanisms. *Forest Science*4 : 605-619.
- YIN,X.,FOSTER,N.W.,and ARP,P.A.（1993）Solution concentrations of nutrient ions below the rooting zone of a sugar maple sand: relations to soil moisture, temperature, and season. *Canadian Journal of Forest Research*23 : 617-624.
- 楊宗興・木平英一・竹重祐史・杉山浩史・三宅義則（2004）渓流水の NO_3^- 濃度と森林の窒素飽和. *地球環境* 9(1) : 29-40.

（2007年8月31日受付）

（2008年1月11日受理）

Summary

In the adjacent three watersheds, Jyugei 1, 2 and 3, the stream water nitrate, sulfate, hydrogen, magnesium and calcium concentration showed remarkable differences between the watersheds. It was suggested that these differences could be explained by differences in vegetation and local geology between watersheds. In the adjacent two watersheds, Chiba A and B, the stream water nitrate, chloride and sulfate concentration showed a difference between watersheds. In Chiba B clear-felling of man-made forests was undertaken in 1999, and the impact of this felling in terms of leaching, nitrification and dilution may explain the increase in nitrate and decrease in chloride ions in Chiba B, but the difference in sulfate ion concentration could only be explained by the local geological settings.

Key words: characteristics of stream water chemistry, comparison between site to site, water chemistry and discharge, geographical factor, geological factor