

短 報

全国大学演習林における渓流水質*

戸田浩人^{*1}・笹賀一郎²・佐藤冬樹²・柴田英昭²・野村 睦²・市川 一²
 藤戸永志²・鷹西俊和²・清和研二³・塚原初男⁴・飯田俊彰⁴・谷口憲男⁵
 中田 誠⁵・桑原 繁¹・内田武次¹・春田泰次⁶・井上 淳⁶・八木久義⁶
 塚越剛史⁶・蔵治光一郎⁷・二田美穂⁸・小野 裕⁹・鈴木道代¹⁰・今泉保二¹⁰
 山口法雄¹⁰・竹中千里¹¹・万木 豊¹²・川那辺三郎¹³・安藤 信¹⁴・中西麻美¹⁴
 西村和雄¹⁴・山崎理正¹⁴・長山泰秀¹⁵・土肥奈都子¹⁵・片桐成夫¹⁵・小藤隆一¹⁵
 新村義昭¹⁶・井上章二¹⁷・江崎次夫¹⁸・河野修一¹⁸・藤久正文¹⁸・岩松 功¹⁹
 今安清光¹⁹・中村誠司¹⁹・塚本次郎¹⁹・野上寛五郎²⁰・榎木 勉²¹

戸田浩人・笹賀一郎・佐藤冬樹・柴田英昭・野村 睦・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・川那辺三郎・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：全国大学演習林における渓流水質 日林誌 82：308~312, 2000 森林地域における渓流水質の広域比較は、環境変化による森林生態系への影響把握に重要な情報となる。全国大学演習林において、1998年6月の1カ月間、渓流水の水質調査を実施した。調査した渓流数は45カ所である。pHは、平均で7.1(最大8.1, 最小6.1)とほぼ中性であった。電気伝導度(EC)は、平均で64(最大178, 最小19) $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、沖縄・佐渡という島部で海塩のためECが大きかった。島部を除いたECは、pH、陽イオンの当量合計およびアルカリ度(主に HCO_3^-)と正の相関がみられた。これは、炭酸風化による陽イオンの放出の多い渓流ではECが大きく、プロトン(H^+)を消費するためpHも高いことを示唆している。 NO_3^- 濃度は、関東山地の調査渓流で高かった。群馬県の調査渓流では、 NO_3^- と Ca^{2+} 濃度に強い正の相関がみられ、土壌の表層において硝化作用で生成した H^+ による交換性 Ca^{2+} の溶出が示唆された。
 キーワード：渓流水, 森林流域, 水質, 大学演習林, プロトン

Toda, H., Sasa, K., Sato, F., Shibata, H., Nomura, M., Ichikawa, K., Fujito, E., Takanishi, T., Seiwa, K., Tsukahara, H., Iida, T., Taniguchi, N., Nakata, M., Kuwabara, S., Uchida, T., Haruta, Y., Inoue, M., Yagi, H., Tsukagoshi, T., Kuraji, K., Futada, M., Ono, H., Suzuki, M., Imaizumi, Y., Yamaguchi, N., Takenaka, C., Yurugi, Y., Kawanabe, S., Ando, M., Nakanishi, A., Nishimura, K., Yamasaki, M., Nagayama, Y., Doi, N., Katagiri, S., Kofuji, R., Shinmura, Y., Inoue, S., Ezaki, T., Kohno, S., Fujihisa, M., Iwamatsu, I., Imayasu, K., Nakamura, S., Tsukamoto, J., Nogami, K., and Enoki, T.: **Stream water chemistry of university forests over Japan. J. Jpn. For. Soc. 82: 308~312, 2000** Extensive research on forest stream water chemistry gives important information in understanding the effects of environmental changes in forest ecosystems. The chemical properties of stream water from 45 forested watersheds in university forests over Japan were investigated in June, 1998. The average pH was 7.1 (maximum 8.1, minimum 6.1). The average electric conductivity (EC) was 64 (maximum 178, minimum 19) $\mu\text{S}/\text{cm}$. The EC of stream water in Okinawa and Sado Island sites tended to be high because of the effects of sea salt. Except for the island sites, EC had a positive correlation with pH, summation of cation and alkalinity (mostly HCO_3^-). This suggests that the water showed a high EC value and a high pH value caused by the consumption of proton (H^+) in streams where carbonate weathering brings a high cation concentration. The NO_3^- concentration in the Kanto mountainous region sites was high compared with the concentration of other sites. In Gunma sites, the relationships between NO_3^- and Ca^{2+} concentration had a close positive correlation. It was considered that exchangeable Ca^{2+} in the surface soil was discharged due to the increase of H^+ produced by nitrification.

Key words: forested watershed, proton, stream water, university forest, water chemistry

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: todah@cc.tuat.ac.jp

¹東京農工大学農学部 (183-8509 東京都府中市幸町3-5-8) Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan, ²北海道大学農学部附属演習林 Hokkaido Univ. For., ³東北大学大学院農学研究科 Grad. Sch. of Agric., Tohoku Univ., ⁴山形大学農学部 Fac. of Agric., Yamagata Univ., ⁵新潟大学農学部 Fac. of Agric., Niigata Univ., ⁶東京大学農学部附属演習林 The Tokyo Univ. For., ⁷東京工業大学大学院総合理工学研究科 Interdiscipl. Grad. Sch. Sci. Eng., Tokyo Inst. Tech., ⁸筑波大学農林技術センター Agric. and Forestry Res. Ctr. Univ. of Tsukuba, ⁹信州大学農学部 Fac. of Agric., Shinshu Univ., ¹⁰名古屋大学農学部生命農学研究科技術部 Tech. Off., Sch. of Agric. Sci., Grad. Sch. of Bioagr. Sci., Nagoya Univ., ¹¹名古屋大学大学院生命農学研究科 Grad. Sch. of Bioagr. Sci., Nagoya Univ., ¹²三重大学生物資源学部附属演習林 Mie Univ. For., ¹³京都大学大学院農学研究科 Grad. Sch. of Agric., Kyoto Univ., ¹⁴京都大学大学院農学研究科附属演習林 Kyoto Univ. For., ¹⁵島根大学生物資源科学部 Life Env. Sci. (LES), Shimane Univ., ¹⁶島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター ERCBR, LES, Shimane Univ., ¹⁷愛媛大学農学部 Coll. of Agric., Ehime Univ., ¹⁸愛媛大学農学部附属演習林 Ehime Univ. For., ¹⁹高知大学農学部附属演習林 Kochi Univ. For., ²⁰宮崎大学農学部附属演習林 Miyazaki Univ. For., ²¹琉球大学演習林 Ryukyus Univ. For.

I. はじめに

森林流域からの溪流流出水は、森林生態系における物質流出の主要な経路である。流出水の水質調査によって、伐採や林地開発など森林の取り扱いに対する反応が評価できる (Bormann and Likens, 1967)。同様に、大気汚染、酸性降水物など環境変化に対する、森林生態系への影響を溪流水質 (あるいは物質収支) の変化によって把握できると考えられる。

溪流水質は、森林植生による吸収、土壌における有機物の分解・無機化、有機物質・粘土鉱物による吸着・溶脱、土壌・母材の風化などによって形成される。したがって、さまざまな立地環境にある森林流域における溪流水質を比較研究することは重要である。しかしながら、同時期に採取した溪流水質について、このような研究例はほとんどみられない (岩坪ら, 1997)。

全国大学演習林では、1998年6月の1カ月間、溪流水と同時に林外雨 (一部、林内雨・樹幹流・大気降水物等) の水質調査を一斉に実施した。本報告は、森林流域における物質収支の広域比較の基礎となる溪流水質をとりまとめたものである。

II. 調査方法

溪流水採取地の位置を図-1、概況を表-1に示す。採取地は16大学の22演習林に及び、採取した溪流数は45カ所である。調査地の地質を大別すると、砂岩・頁岩等 (堆積岩の碎屑岩) が19カ所、火山灰等 (堆積岩の火山碎屑岩) が4カ所、石灰岩 (堆積岩の化学沈殿岩) が1カ所、花崗岩等 (火成岩の深成岩) が13カ所、安山岩等 (火成岩の火山岩) が8カ所である。流域内の主たる植生は、針葉樹が28カ所、広葉樹が17カ所である。採取は、1998年6月の1カ月間に、1~2週間隔もしくは降雨ごとに行なった。

採取した試料のpHはガラス電極法、電気伝導度 (EC) は導電率計を用いて、陽イオンの Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} は原子吸光法またはイオンクロマト法、 NH_4^+ および陰イオンの Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} はイオンクロマト法で測定した。また、アルカリ度 (Alk) を陽イオンと陰イオンの当量濃度の差として求めた。

III. 結果と考察

図-2に各溪流におけるpHおよびECを示す。数回採取した場所については、単純平均値と範囲 (最大, 最小) を示した。また、図-3に各溪流における陽イオンおよび陰イオン濃度を示す。pHは、平均7.1 (最大8.1, 最小6.1) と中性に近い値であり、流域の主たる植生が針葉樹の溪流で7.0 (± 0.4 (SD)), 広葉樹の溪流で7.1 (± 0.4) とほとんど差がなかった。ECは、19~178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と値の範囲が広がった。ECの特に大きな場所は、沖縄・佐渡という島部の演習林であった。この二つの溪流では

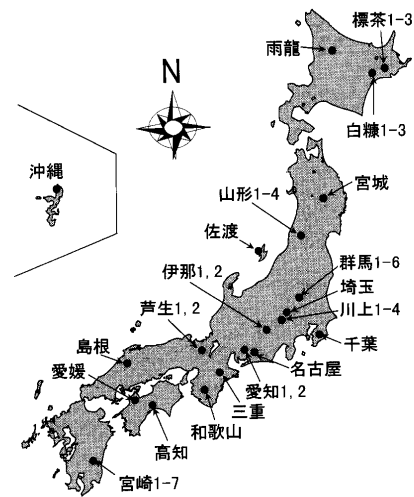


図-1. 調査溪流の位置

雨龍: 北海道大学・雨龍地方演習林, 標茶: 京都大学・北海道演習林標茶区, 白糠: 京都大学・北海道演習林白糠区, 宮城: 東北大学附属農場, 山形: 山形大学・上名川演習林, 佐渡: 新潟大学・佐渡演習林, 群馬 1-3: 東京農工大学・草木演習林, 群馬 4-6: 東京農工大学・大谷山演習林, 埼玉: 東京農工大学・埼玉演習林, 千葉: 東京大学・千葉演習林, 川上: 筑波大学・川上演習林, 伊那: 信州大学・手良沢山演習林, 愛知: 東京大学・愛知演習林, 名古屋: 名古屋大学・稲武演習林, 三重: 三重大学・平倉演習林, 和歌山: 京都大学・和歌山演習林, 芦生: 京都大学・芦生演習林, 島根: 島根大学・三瓶演習林, 愛媛: 愛媛大学・米野々演習林, 高知: 高知大学・嶺北演習林, 宮崎: 宮崎大学・田野演習林, 沖縄: 琉球大学・与那演習林。

Na^+ および Cl^- の濃度が他の調査地と比べて高く、海塩の影響が溪流にもおよび EC を高くしていると推察される。海塩の影響が著しい沖縄と佐渡を除くと、各溪流の pH と EC の間には、正の相関がみられた ($r=0.572, p<0.001$) (図省略)。Nakagawa and Iwatsubo (1999) は、東アジアにおける 12 溪流の水質を調査し、同様の傾向を報告している。

沖縄と佐渡を除いた EC は、本報告で調査した陽イオンの当量合計と正の相関がみられ ($r=0.875, p<0.001$)、Alk とも正の相関がみられた ($r=0.879, p<0.001$) (図省略)。本報告の溪流水の pH がすべて 5.0 以上であることから、これらの Alk の主体は重碳酸イオン (HCO_3^-) であると考えられる (生原, 1994; Ohte *et al.*, 1995)。

Cl^- と Na^+ 濃度の間には、正の相関がみられた ($r=0.896, p<0.001$) (図-4 a)。海塩の濃度比 $[\text{Na}^+]: [\text{Cl}^-]=1: 1.16$ と比べて Na^+ 濃度が高く、 Na^+ は海塩以外の由来のもの (nss- Na^+) が含まれている。 Cl^- の全てが海塩由来で、溪流水に至る過程で $[\text{Na}^+]: [\text{Cl}^-]$ の濃度比が変化しないと仮定すると、nss- Na^+ は 0.02~0.21 mmol/L となる。主な陽イオンである Ca^{2+} と nss- Na^+ 濃度の合計に対して、Alk (HCO_3^-) 濃度は正の相関がみられ ($r=0.865, p<0.001$)、1:1 の関係に近かった (図-4 b)。この関係は母材の鉱物 (方解石や長石など) から炭酸風化して Ca^{2+} や Na^+ が溶出したことを示唆している (生原, 1994; Ohte *et al.*, 1995)。

以上のことから、流出までに炭酸風化による陽イオンの

表-1. 渓流水採取地の概況

溪流名称	降水量 (mm/年)	年平均気温 (°C)	流域面積 (ha)	標高 (m)	主な地質	林況 (該当面積%)	過去10年間の施業
雨龍	1375	2.5	130	285~535	Ad	ト・エ・落広混天 (100)	なし
標茶1	1185	5.8	241	50~140	Va	落広壮 (70), カ・ト・エ中 (30)	伐採
標茶2	1185	5.8	16	70~140	Va	落広壮 (100)	なし
標茶3	1185	5.8	93	70~140	Va	落広壮 (100)	なし
白糠1	1504	8.0	113	75~138	Sd, Cy	ト・落広混中・壮 (100)	なし
白糠2	1504	8.0	40	70~80	Sd, Cy	ト・落広混中・壮 (100)	なし
白糠3	1504	8.0	37	80~100	Sd, Cy	落広中・壮 (90), ト・エ幼 (10)	伐採, 植栽, 下刈
宮城	2072	8.2	380	880~1500	Vm	ブ天 (100)	なし
山形1	1880	9.6	108	300~840	Gr	ブ中・壮 (94), ス幼・壮 (6)	伐採, 植栽, 下刈
山形2	1880	9.6	12	260~550	Gr	ブナ中・壮 (72), ス中・壮 (28)	除伐, 枝打
山形3	1880	9.6	145	250~840	Ad	ブ中・壮 (83), ス幼・壮 (17)	五種*
山形4	1880	9.6	—	—	Ad	…山形3内の湧水	なし
佐渡	1563	11.7	4	270~460	Ad	ス中壮 (80), 針広混天 (20)	なし
群馬1	1686	9.2	9	910~1120	Gd, Hf	ス・ヒ中 (60), 落広壮 (40)	なし
群馬2	1686	9.2	8	910~1110	Gd, Hf	落広壮 (100)	なし
群馬3	1742	9.1	30	830~1120	Gd, Hf	ス・ヒ・ア中 (100)	なし
群馬4	1348	9.8	1	770~830	Sd, Cy	ス・ヒ中 (100)	間伐 (全域)
群馬5	1348	9.8	3	730~830	Sd, Cy	ス・ヒ中 (100)	間伐 (全域)
群馬6	1348	9.8	2	750~820	Sd, Cy	ス・ヒ壮 (100)	なし
埼玉	1039	10.0	107	730~1460	Li	ス・ヒ全 (60), 落広壮 (40)	伐採, 植栽, 下刈
千葉	2454	14.1	1	160~250	Sd, Md	モ・ツ壮 (100)	なし
川上1	955	6.7	37	1440~1790	Ad	カ・ア中 (57), ミ中 (43)	除伐, 間伐
川上2	955	6.7	14	1510~1720	Ad	ミ・シ中 (52), カ中 (48)	間伐
川上3	955	6.7	39	1440~1730	Ad	カ中 (66), ミ・シ中 (34)	なし
川上4	955	6.7	1	1570~1710	Ad	ミ・ブ中 (100)	なし
伊那1	1364	8.1	1	1020~1110	QDr, Gd	ス・ヒ壮 (100)	間伐
伊那2	1364	8.1	36	1000~1250	QDr, Gd	ス・ヒ・カ壮 (65), ヒ幼 (25), ア・広壮 (10)	五種*
愛知1	2095	13.1	88	300~630	BGr, Gd	広壮 (85), ア・針壮 (15)	なし
愛知2	2095	13.1	1	320~360	BGr, Gd	広壮 (77), ア・針壮 (23)	なし
名古屋	2190	8.6	72	920~1230	BHGr	ス・ヒ壮 (55), ス・ヒ中 (45)	間伐, 下刈
三重	2481	12.3	31	420~1000	BHGd	ス・ヒ壮 (50), 広壮 (50)	間伐
和歌山	2622	12.4	9	540~850	Sd, Sh	ス・ヒ中 (100)	なし
芦生1	2333	13.1	3450	360~960	Sd, Sh, Ch	ス・落広混中・壮 (95), ス中・壮 (5)	なし
芦生2	2333	13.1	740	360~790	Sd, Sh, Ch	ス・落広混全 (88), ス全 (12)	なし
島根	2471	12.1	15	380~580	BGr, Dr	ス・ヒ中 (70), 広壮 (30)	枝打, 間伐
愛媛	1863	12.3	5	540~700	Gr	ス・ヒ壮 (80), ス幼 (10), 広壮 (10)	下刈, 除伐
高知	2870	12.0	9	710~910	Ch, Md, Cy	ス中 (100)	除伐, 間伐
宮崎1	2800	16.0	3	170~220	Sd, Sh	ヒ壮 (60), ス中 (40)	間伐
宮崎2	2800	16.0	5	210~290	Gv	ス・ヒ中 (60), 広壮 (40)	なし
宮崎3	2800	16.0	25	120~290	Sd, Sh	ス中 (70), 広壮 (30)	枝打
宮崎4	2800	16.0	4	170~260	Sd, Sh	ス中壮 (70), 広壮 (30)	伐採, 植栽, 下刈
宮崎5	2800	16.0	18	155~290	Sd, Md	ヒ幼 (90), 広壮 (10)	伐採, 植栽, 下刈
宮崎6	2800	16.0	32	115~220	Cy, Sh	ス・ヒ全 (70), 広壮 (30)	枝打
宮崎7	2800	16.0	7	115~170	A, S	ヒ壮 (80), ス中壮 (20)	伐採
沖縄	2681	21.7	1	50~140	Sd, Cy	広中 (70), ス中 (30)	なし

地質: Ad, 安山岩; Gr, 花崗岩; Gd, 花崗閃緑岩; Dr, 閃緑岩; B, 黒雲母; H, 角閃石; Q, 石英; Va, 火山灰; Vm, 火山泥流; Sd, 砂岩; Gv, 礫岩; Cy, 粘版岩; Sh, 頁岩; Md, 泥岩; Ch, チャート; Li, 石灰岩; Hf, 接触変成岩; A, 沖積層; S, シラス層。林況: ト, トドマツ林; エ, アカエゾマツ林; カ, カラマツ林; ス, スギ林; ヒ, ヒノキ林; モ, モミ林; ツ, ツガ林; ア, アカマツ林; 針, その他針葉樹林; 広, 広葉樹林; 落広, 落葉広葉樹林; ブ, ブナ主体の落広; ミ, ミズナラ主体の落広; シ, シラカバ主体の落広; 混, 混交林。林齢: 幼, I~III齡級; 中, III~VIII齡級; 壮, IX齡級以上; 全, 幼~壮全て含; 天, 林齢不明の天然林。施業はことわりの無い限り流域の一部。*伐採, 植栽, 下刈, 枝打, 間(除)伐の五種の施業。溪流名称は図-1を参照。

放出の多い溪流ではECが大きく, プロトン (H⁺) を消費するためpHも高いということが予測される (Nakagawa and Iwatsubo, 1999)。

NO₃⁻濃度は, 群馬県の六つの調査地で24~151 μmol/L, 関東山地の最西端に位置する長野県南佐久郡川上村の四つの調査地で64~78 μmol/Lと他の渓流水 (平

均10 μmol/L)にくらべて高かった (図-3)。これらの調査地では, 林外雨および林内雨におけるNH₄⁺またはNO₃⁻濃度が高く (井倉・中尾, 1999), 渓流水に反映していると考えられる。これら10の調査地では過去10年間に, 4流域で除間伐を実施, 6流域が無施業である (表-1)。群馬6の調査地において Ohruai and Mitchell (1997)

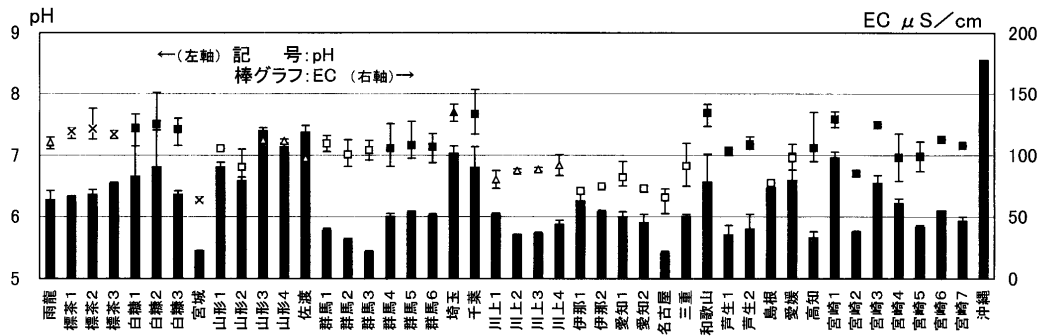


図-2. 各溪流における pH および EC

地質の記号：■，砂岩・頁岩等（堆積岩の碎屑岩）；×，火山灰等（堆積岩の火山碎屑岩）；▲，石灰岩（堆積岩の化学沈殿岩）；□，花崗岩等（火成岩の深成岩）；△，安山岩等（火成岩の火山岩）。各溪流の名称は図-1を参照。

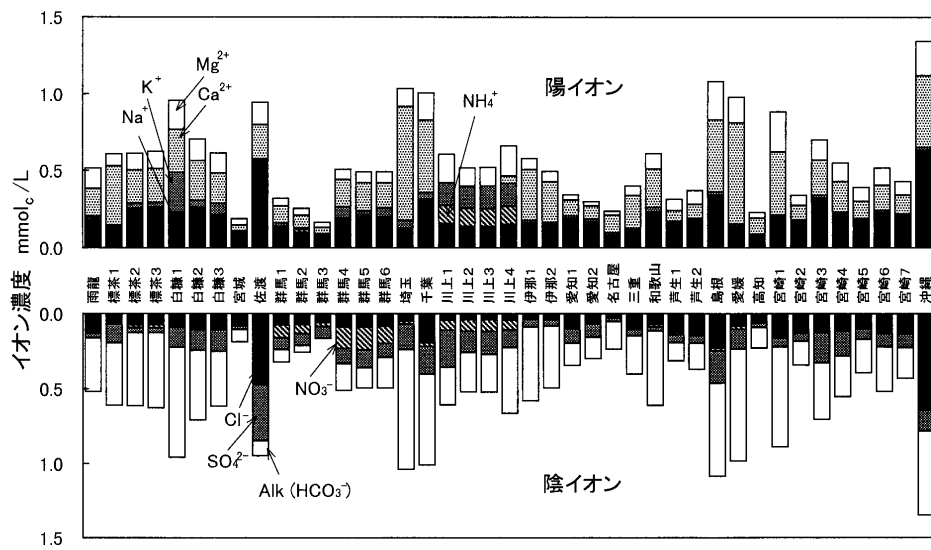


図-3. 各溪流における陽イオンおよび陰イオン濃度

Alk：アルカリ度=Σ [陽イオン]-Σ [陰イオン]。各溪流の名称は図-1を参照。

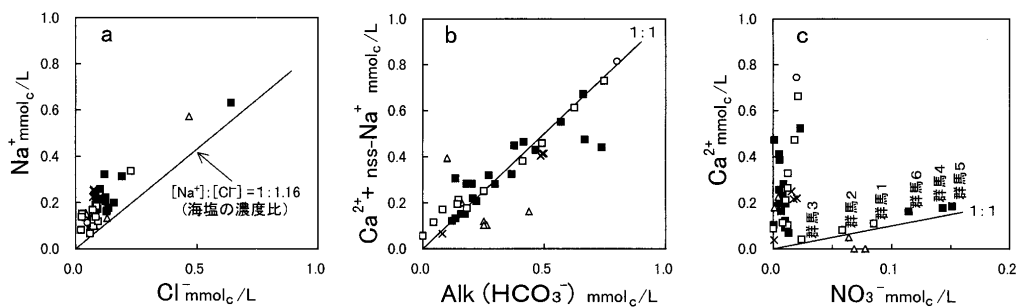


図-4. 渓流水におけるイオン濃度間の関係

(a) Cl^- 濃度と Na^+ 濃度との関係，(b) アルカリ度 (Alk) と $Ca^{2+} + nss-Na^+$ 濃度との関係，(c) NO_3^- 濃度と Ca^{2+} 濃度との関係。nss- Na^+ ：非海塩性 Na^+ 濃度。地質の記号は図-2と同じ。

は、無機態窒素の渓流水による年間流出量が林外雨（バルク）による収入量を上回る窒素飽和（Nitrogen Saturation）現象を報告している。また、Mitchell *et al.* (1997) は、日本の 24 箇所の森林流域において渓流水を調査し、温暖湿潤な気候で窒素無機化速度の速い日本では、林木による吸収の多い生育期においても NO_3^- 濃度が高く、欧

米と窒素飽和の評価法が異なることを報告している。日本における窒素飽和現象は、単に林外雨の窒素含有量の増加のみによってもたらされるものではなく、森林生態系が植生・土壌ともに十分成熟した肥沃な安定した状態で生じ（岩坪ら，1997），土壌における活発な窒素無機化および硝化作用によって助長される（大類，1997）。したがって、

森林地域における窒素飽和現象を明らかにするためには、渓流水質だけでなく流域レベルで窒素動態を把握する必要がある。

群馬県の六つの調査地においては他の渓流水と異なり、 NO_3^- と Ca^{2+} 濃度に強い正の相関がみられ ($r=0.992$, $p < 0.001$) (図-4c), 肥沃な表層土壌における窒素の無機化および硝化作用で生成した H^+ にとまなう土壌の交換性 Ca^{2+} の溶出が示唆される (生原, 1994)。群馬4および群馬5の調査地において呉ら (1998) は、スギ林土壌 (pH 4.9) で NO_3^- の生成によって最も多く増加した水溶性陽イオンが Ca^{2+} であることを報告している。

以上のように、窒素飽和現象および随伴する陽イオンの流出は、大気汚染物質や酸性降下物の負荷ばかりでなく、森林生態系内での生物化学的な要因に影響を受けていると考えられる。今後、森林の生育期だけでなく成長休止期の渓流水を調査し、森林流域における樹木フェノロジーや土壌の窒素無機化特性などとの関係も明らかにする必要がある。また、林外雨および乾性降下物によって負荷される窒素は、 NH_4^+ および NO_3^- のような無機態窒素だけでなく有機態窒素も含まれており、今後これらの量も調査する必要がある。

IV. おわりに

本報告では、地形区分や土壌の物理化学的性質、気温・降水量などの気象環境の変化、樹木フェノロジーおよび流出水量などによる渓流水質の解析まで至らなかった。しかしながら、本報告の渓流水には pH, EC およびイオン濃度間に一定の関係がみられ、森林流域における水質形成は共通の要因に影響をうけているといえる。この主要な水質の形成要因は土壌や母材の無機化および風化と推察され、全国各地の渓流水といった環境の差異に対して安定した機構 (高い緩衝能力) であることを示唆している。したがって、渓流水質を定期的に全国演習林のレベルで広域比較すれば、森林生態系の環境変化に対する緩衝能力や影響を評価できると考えられる。

本報告は、文部省科学研究費 No.08506001, No.11356005

および No.11760111 によって行った。本報告の野外調査・化学分析およびとりまとめに際し、山形大学演習林の上野清隆氏、佐藤八重治氏、上野 斉氏、阿部新一氏、新潟大学演習林の矢部茂明氏、箕口秀夫博士、東京農工大学演習林の金子喜一郎氏、桑原 誠氏、木下浩幸氏、東京農工大学農学部の生原喜久雄博士、宝田将尚氏、竹部道代氏、筑波大学農林技術センターの内田煌二博士、京都大学農学部の神垣秀樹氏、佐藤修一氏、細見純嗣氏、馬渡和則氏、大池航史氏、大橋健太氏、柳本 順氏、島根大学演習林の川上誠一氏、寺田和雄氏、三浦恒雄氏、森山勲氏、後長正行氏、島根大学農学部の中谷佳記氏、宮崎大学演習林の佐藤盛樹氏、村本康治氏、川口秀義氏にご協力いただきました。記して御礼申し上げます。

引用文献

- Bormann, F. H. and Likens, G. E. (1967) Nutrient cycling. *Science* 155: 424-429.
- 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.
- 井倉洋二・中尾登志雄 (1999) 全国一斉集中観測結果, 林外雨とスギの林内雨および樹幹流. (森林地域における酸性降下物流出の広域比較. 研究代表者 川那辺三郎, 552 pp, 平成8~10年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書). 515-522.
- 岩坪五郎・徳地直子・中川泰則 (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, 降水と流出水にとま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: 63-71.
- Michell, M. J., Iwatsubo, G., Ohrui, Y., and Nakagawa, Y. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: An evaluation. *For. Ecol. Manage.* 97: 39-51.
- Nakagawa, Y. and Iwatsubo, G. (1999) Extensive study on forest runoff water chemistry over East Asia. *J. For. Res.* 4: 115-123.
- 大類清和 (1997) 森林生態系での "Nitrogen saturation" —日本での現状—. *森林立地* 39: 1-9.
- Ohrui, K. and Mitchell, M. J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecol. Appl.* 7: 391-401.
- 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 Resour. Res.* 31: 2823-2834.
- 呉 国南・戸田浩人・生原喜久雄・相場芳憲 (1998) 森林土壌の窒素無機化が水溶性イオン量に及ぼす影響. *日林誌* 80: 21-26.

(1999年9月27日受付, 2000年4月7日受理)