「森林総合研究所研究報告」(Bulletin of FFPRI) Vol.10 No.3 (No.420) 147 - 161 September 2011

論　文（Original article）

去川森林理水試験地における流出水の水質

吉永秀一郎[1)*]・稲垣善之[2)]・山田　毅[3)]・三浦　覚[2)]・
清水　晃[1)]・清水貴範[4)]・小川泰浩[4)]・宮縁育夫[5)]

Streamwater chemistry at the Sarukawa Experimental Watershed

Shuichiro YOSHINAGA[1)], Yoshiyuki INAGAKI[2)], Tsuyoshi YAMADA[3)],
Satoru MIURA[2)], Akira SHIMIZU[1)], Takanori SHIMIZU[4)],
Yasuhiro OGAWA[4)], and Yasuo MIYABUCHI[5)]

Abstract

Streamwater chemistry at the Sarukawa Experimental Watershed was observed to investigate its variation as a function of runoff rate and to evaluate annual nutrient runoff characteristics. The Sarukawa Experimental Watershed, located in Miyazaki Prefecture, southwestern Japan, consists of three forested watersheds that experience high annual precipitation of more than 2500 mm. Most precipitation fell during the summer and autumn, resulting in seasonal variations in the runoff rate, which was high during the summer and autumn and low during the winter. Most solute concentrations in the streamwater also showed seasonal variation, with a strong negative correlation with the runoff rate. The streamwater chemistry is thus influenced by variations in hydrological characteristics. Annual nutrient runoff rates of Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} and sulfur in the watersheds exceeded the annual atmospheric inputs observed at the Tano Station near the study watersheds, suggesting that most of these components are released from the soil and bedrock within the watershed by chemical weathering. On the other hand, annual nitrogen runoff rate at No.2 and No.3 watersheds from 1997 to 1999, and at No.1 watershed in 1997 and 1998, were lower than the annual atmospheric N input owing to retention by the plants within the watershed. However, at No.1 watershed in 1999, where annual precipitation reached 4375 mm, the annual N runoff rate exceeded the annual atmospheric nitrogen input, although streamwater nitrate concentrations in 1999 were similar to those in 1997 and 1998. This phenomenon is likely to be caused by rapid nitrate leaching from surface soils during a storm event, indicating that hydrological processes strongly affect nutrient budgets, particularly the nitrogen budget, within the watershed.

Key words : Sarukawa Experimental Watershed, streamwater chemistry, nutrient runoff rate, nitrogen budge

要旨

温暖多雨地帯に位置する去川森林理水試験地の 3 試験流域において、1997 年 4 月より 2000 年 3 月にかけて実施した流出水質の分析結果をもとに、日流出水量と流出水質との関係を明らかにした。去川森林理水試験地では日流出水量は夏期に多く、冬期に少ないという季節変動を示し、これに支配されて、多くの溶存成分濃度は夏期に低下し、冬期に上昇する季節変動を示した。さらに、去川森林理水試験地における年流出負荷量を近傍の田野における年流入負荷量と比較して溶存成分の収支を解析した。無機態窒素を除く多くの溶存成分の年流出負荷量は年流入負荷量を上回ることから、これらの溶存成分は流域内において土壌や岩石から風化によって生成され、流出していると考えられた。一方、無機態窒素は I 号沢では 1997 年ならびに 1998 年に、II 号沢ならびに III 号沢では 3 年間ともに年流入負荷量よりも年流出負荷量が少なく、植物による吸収・固定によって流域内に保持されていた。しかし、I 号沢では年降水量が著しく多かった 1999 年には NO_3^- 濃度は他の年と同等のレベルであったが、無機態窒素の年流出負荷量は年流入負荷量を超過した。これらのことから、去川森林理水試験地では平年には無機態窒素を流域内に保持する機能が働いているものの、平年を大きく上回る多雨の年には、土壌中の NO_3^- の雨水による流出によって突発的な無機態窒素の年流出負荷量の増加が起こることが示唆された。

キーワード：去川森林理水試験地、流出水質、年流出負荷量、窒素収支

原稿受付：平成 23 年 3 月 23 日 Received 23 March 2011　　原稿受理：平成 23 年 5 月 23 日 Accepted 23 May 2011

1) 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
2) 森林総合研究所立地環境研究領域 Department of Forest Site, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
3) 森林総合研究所東北支所 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
4) 森林総合研究所水土保全研究領域 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)
5) 熊本大学教育学部 Faculty of Education, Kumamoto University
* 森林総合研究所九州支所　〒 860-0862　熊本県熊本市黒髪 4 丁目 11 番 16 号 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Kurokami 4-11-16, Kumamoto 860-0862, Japan; e-mail: yoshinag@ffpri.affrc.go.jp

1．はじめに

流域の源流部に位置する森林に対しては、安全で安心な水を供給する水源かん養機能ならびに水質保全機能の発揮が求められている。これらの機能を評価するために、日本各地において森林流域の流出水の量を測定する量水試験が展開され、また、多くの森林流域で流出水の溶存成分濃度が測定されてきた。特に水質保全機能を適切に評価するためには、定性的な溶存成分濃度の測定に加えて、量水試験が実施されている森林流域において流出負荷量を定量的に評価することが望ましい。このような観点から、現在では、多くの量水試験が実施されている森林流域において流出負荷量を評価することが行われつつある（生原・相場、1982; Muraoka and Hirata, 1988; 浅野ら、2000; 金子ら、2002 など）。しかし、これらの研究で対象としている森林流域の大半は年降水量が 2000mm 以下にある。一方、西南日本太平洋側には梅雨前線や台風による豪雨によって年降水量が 2500mm を越す地域が広がる。このような多雨地域において量水試験と流出水質の測定が継続的に実施されている森林流域は少なく、流出負荷量の測定結果の蓄積が求められている。

本稿では、温暖多雨地帯における森林の水源かん養機能解明のために、林業試験場九州支場（現森林総合研究所九州支所）が 1957 年に宮崎県大淀川上流の高岡営林署（現宮崎森林管理署）管内の去川国有林内に設置した去川森林理水試験地において、1997 年 4 月より 2000 年 3 月にかけて実施した流出水の水質の分析結果を報告する。さらに、量水試験の結果と統合して解析することにより、日流出水量と流出水の水質との関係を明らかにするとともに、溶存成分の年流出負荷量を評価する。

2．研究手法

1）試験地の概要

去川森林理水試験地は宮崎県宮崎市高岡町宇和石の去川国有林 (北緯 31°51′、東経 131°13′) 内において 10 ha 以下の面積を有する 3 試験流域から構成されている (Fig. 1、清水ら、2008 など)。最近傍の海岸線までは約 25 km の内陸に位置する。3 試験流域はそれぞれⅠ号沢 (面積 : 6.56 ha、標高 : 260 ～ 370 m)、Ⅱ号沢 (面積 : 9.17 ha、標高 : 230 ～ 360 m)、Ⅲ号沢 (面積 : 8.18 ha、標高 200 ～ 290 m) と名付けられている。去川森林理水試験地の地質は中生界四万十層群からなり、頁岩が広く分布する (丸山ら、1960)。土壌は褐色森林土からなり、尾根部で乾性褐色森林土 (B_A) ならびに弱乾性褐色森林土 (B_C) が、谷沿いに沿って適潤性褐色森林土 (B_D) が分布する (白井ら、1965)。植生は 3 試験流域で植栽、施業履歴などが異なる (白井

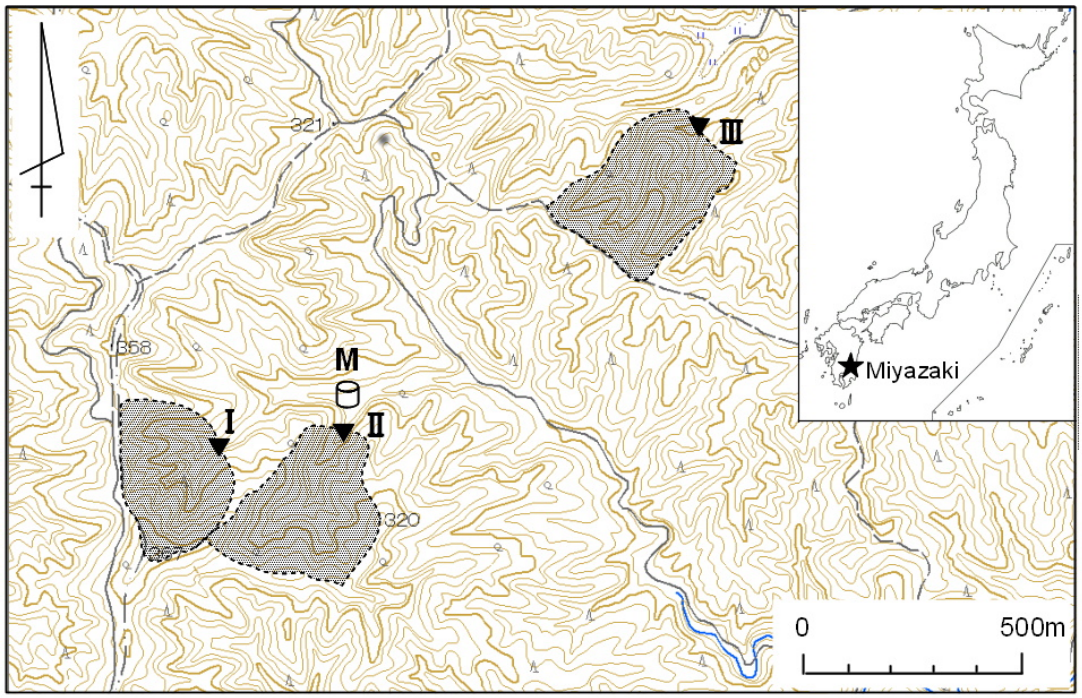

Fig. 1　去川森林理水試験地の位置と地形の概略
Ⅰ：Ⅰ号沢、Ⅱ：Ⅱ号沢、Ⅲ：Ⅲ号沢、M: 気象観測露場
国土地理院発行 1:25,000 地形図「有水」の一部を使用

Fig. 1　Location of the Sarukawa Experimental Watershed
Ⅰ: Watershed No. 1, Ⅱ: Watershed No. 2, Ⅲ: Watershed No. 3 and M: Meteorological station.
Part of “Arimizu” 1:25,000 topographic map published by the Geographical Survey Institute was used.

ら、1962)。Ⅰ号沢とⅡ号沢は 1920 年前後に皆伐され、天然下種更新もしくは萌芽更新が図られ、また、Ⅲ号沢は広葉樹粗放択伐残存林地にスギを植林したが、その後放置された。1960 年代における林況はⅠ号沢とⅡ号沢はシイ・カシ類を主とした常緑広葉樹林であり、Ⅲ号沢はスギを主林木とする針広混交林であった。その後、1965 年から 1966 年にかけてⅠ号沢とⅢ号沢を皆伐し、1967 年にⅠ号沢にはヒノキを、Ⅲ号沢にはスギを植栽した。したがって、本研究の調査開始期の 1997 年には樹齢はほぼ 30 年である。一方、Ⅱ号沢は標準区として無処理で残置されたが、1982 年に流域の中央部分 (43%) を部分伐採し、伐採後は植栽を行わず、萌芽・天然更新による植生の回復が行われた。清水ら (2008) によれば、Ⅰ号沢の 1996 年における林相は谷沿いに広葉樹の二次林が、山腹斜面・尾根部にはヒノキ植栽林が分布している。Ⅲ号沢の 1996 年の林相は、谷部には一部にスギ林が分布するものの、広葉樹二次林が広がっており、山腹斜面・尾根部にはスギ・ヒノキ混交林が分布している。これに対してⅡ号沢では 1992 年には流域の中央部では広葉樹萌芽林が広がり、それ以外には広葉樹二次林が分布している。

各試験流域には角度 60°、直高 2 m の V 型ノッチを用いた量水堰堤が設置され、水位が観測され、流出水量に変換されている。降水量はⅠ・Ⅱ号沢合流点近傍にある平坦地において転倒升型の雨量計によって計測されている。1987 年から 2000 年までの 14 年間における各試験流域における日流出水量ならびに日降水量は清水ら (2008) によって報告されている。この 14 年間における年降水量は最大 5710 mm (1993 年)、最小 1913 mm (1994 年) 、平均 3294 mm である。調査期間である 1997 年 4 月より 2000 年 3 月までの間の日流出水量の欠測は、Ⅰ号沢では 1997 年 3 月 19 日、3 月 29 日～ 4 月 3 日、11 月 18 日～ 12 月 5 日、2000 年 2 月 23 日以降、Ⅱ号沢では 1997 年 11 月 18 日～ 12 月 16 日、2000 年 2 月 23 日以降、Ⅲ号沢では 1997 年 11 月 18 日～ 12 月 4 日、1998 年 1 月 25 日～ 2 月 5 日、11 月 17 日、2000 年 2 月 23 日以降である。

2）試料の採取

水質分析用の試料は、各試験流域の量水堰堤の上流側に設置された沈砂地への流入口において、流水を 250 mL ポリ瓶を用いて採取した。採取は宮崎森林管理署高岡森林事務所に委託し、1997 年 4 月より 2000 年 3 月まで原則として毎月の第 1 週に行ったが、都合により前月の最終週に採取したこともある。3 試験流域の採取に要する時間は 2 時間程度であるが、この間に降雨が始まった採水日も含まれる。調査期間内における試料数は各試験流域ともに 36 である。採取した試料は冷蔵宅配便によって四国支所に送付した。四国支所では分析まで約 4 ℃で冷蔵保存した。

3）水質分析

水質試料は、電気伝導度 (EC) を白金電極法 (TOA 社、CM-40V) で、pH をガラス電極法 (TOA 社、HM-26S) により測定した。0.45 μm のフィルターでろ過した後、Na^+、NH_4^+、K^+、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-} 濃度をイオンクロマトグラフ法 (YOKOGAWA 社、IC7000D)、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Si 濃度を ICP 発光分光分析法 (PerkinElmer 社、Optima3000XL) により測定した。また、溶存無機炭素 (DIC) 濃度を 0.01 M - H_2SO_4 による滴定法で測定した pH 4.8 アルカリ度から推定した。なお、分析結果は EANET (2000) に従って精度を検証し、良好な結果が得られている。

4）年流出負荷量の算出

試験流域毎に流出水の各溶存成分濃度と採水日の日流出水量を用いて日流出水量と各溶存成分流出量の関係式 (L-Q 式) を作成した。各試験流域において欠測期間に該当する採水日がそれぞれ 2 日ずつあったため、L-Q 式は 34 試料の結果より作成した。次に作成された L-Q 式を用いて、日流出水量より各溶存成分の日流出負荷量を算出し、1 年分積算して 1997 年、1998 年、1999 年の年流出負荷量を算出した。日流出水量の欠測日は積算より除外した。なお、流出水の溶存有機態窒素は測定していないため、窒素に関しては溶存無機態窒素 (DIN) の年流出負荷量として算出した。

5）統計解析

試験流域間の溶存成分濃度の比較には、試験流域を要因とした一元配置の分散分析をおこない、平均値の違いを Tukey-Kramer の HSD 検定による多重比較法で解析した。また、流出水の各溶存成分濃度間の解析には相関分析 (Pearson の相関係数) を用いた。統計解析には JMP5.0.1J (SAS Institute Japan 株式会社) を用いた。

3．結果

1）水文特性

去川森林理水試験地における 1997 年、1998 年、1999 年の年降水量はそれぞれ 3169 mm、2859 mm、4375 mm であり、1999 年の年降水量は 1987 年から 2000 年までの 14 年間で 1993 年に次ぐ多雨の年であった (清水ら、2008)。一方、1997 年、1998 年は平均よりもやや少雨の年であった。Ⅰ号沢における 1997 年、1998 年、1999 年の年流出水量はそれぞれ 1565 mm、1672 mm、3371 mm、Ⅱ号沢における年流出水量はそれぞれ 1508 mm、1511 mm、3157 mm、Ⅲ号沢における年流出水量はそれぞれ 1611 mm、1753 mm、3008 mm であった (清水ら、2008) 。年流出水量については、1999 年は多雨の影響を受けて 3 試験流域ともに 3000 mm 以上の高い値を示した。1997 年ならびに 1998 年は 1500 ～ 1750 mm 程度であり、

1999 年の半分程度の年流出水量であった。各年における年流出水量の試験流域間の差は年降水量の 1 割以下と少ない。

降水は年間を通じて認められるが、1 月、2 月は少なく、これに対して、6 月～ 9 月の夏期には月降水量が 400 mm を越すことが多い (Fig.2、3、4)。ただし、1998 年 7 月、8 月は月降水量が 100 mm 以下と寡雨であった。このような降水量の季節変化の影響を受け、日流出水量も全体としてみれば 3 試験流域ともに夏期に高く、冬期に低い季節変化を示す。特に冬期は連続した降水も少ないため、日流出水量は 0.5 mm 以下で推移した。

年降水量と年流出水量の差である年消失水量については、1997 年は 1550 ～ 1650 mm と高い値を示したが、1998 年ならびに 1999 年は 1000 ～ 1300 mm 程度であった。鈴木 (1985) が短期水収支法によって推定した去川森林理水試験地における 1967 ～ 1976 年の平均年蒸発散量は 913 ～ 1121 mm であり、これと比較すると 1998 年ならびに 1999 年は同程度か若干大きく、1997 年は顕著に大きい値となった。なお、1997 年は 11 月から 12 月にかけて 20 日から 30 日程度の日流出水量の欠測日があるが、欠測期間中の降水量は 120 mm 程度であり、かりに降水量が全量流出したとしても年消失水量は 1998 年、1999 年に比べて大きい傾向を示す。

2）試験流域毎の各溶存成分濃度の差ならびに季節変動

各試験流域における pH、EC ならびに各溶存成分濃度の平均値を Table 1 に示す。pH は 3 試験流域ともに 7.3 程度であり、顕著な差は認められなかった。一方、EC は Ⅰ 号沢が 7.49 mS m^{-1}、Ⅱ 号沢が 6.97 mS m^{-1}、Ⅲ号沢が 6.83 mS m^{-1} であり、Ⅰ 号沢で高い傾向が認められた。溶存成分濃度について 3 試験流域を比較すると、Ⅰ 号沢で Mg^{2+}、Ca^{2+}、NO_3^-、SO_4^{2-} 濃度が高く、Si 濃度が低く、Ⅱ 号沢では Na^+、K^+、Cl^- 濃度が高い値を示した。Ⅲ号沢は全体的に溶存成分濃度が低い傾向を示し、特に、K^+、Cl^-、NO_3^- 濃度が 3 試験流域で最も低い傾向を示した。DIC 濃度については試験流域間の明瞭な差は認められなかった。

調査期間における溶存成分濃度の変化を Fig. 2 (Ⅰ 号沢)、Fig. 3 (Ⅱ 号沢)、Fig. 4 (Ⅲ号沢) に示した。3 試験流域において明瞭な季節変化が認められたのは、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、DIC、Si 濃度である。Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、DIC 濃度は同調して夏期に低下し、冬期に上昇する傾向を示した。これに対して、Si 濃度は夏期に上昇し、冬期に低下する傾向を示した。一方、K^+、Cl^-、NO_3^- 濃度については明瞭な季節変化は認められなかった。特に、K^+ は濃度の変化が少なく 0.01 ～ 0.02 mmol L^{-1} で推移し、また、Cl^- 濃度もスパイク状の急激な濃度の低下が認められるものの、Ⅰ 号沢では 0.10 ～ 0.12 mmol L^{-1}、Ⅱ 号沢では 0.11 ～ 0.13 mmol L^{-1}、Ⅲ号沢では 0.09 ～ 0.11 mmol L^{-1} で推移した。Cl^- 濃度が 3 試験流域ともに急激に低下したのは日降水量が 99.5 mm であった 1998 年 6 月 2 日、ならびに当日の降水量は 1.5 mm と少ないものの、7 月 25 日より 12 日間連続して降水が観測され、この期間の総降水量が 465 mm に達し、日流出水量が 100 mm を越す高水位であった 1999 年 8 月 5 日である。これらの日には Cl^- 濃度のみならず Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Si、DIC 濃度も低下していた。また、NO_3^- 濃度については、Ⅰ 号沢、Ⅱ 号沢ともに 1997 年 11 月 26 日、1998 年 10 月 2 日に顕著なスパイク状の濃度上昇が認められた。前者は前日に 42 mm、当日に 38 mm の降水量が観測された降水イベントであり、後者は、当日は無降雨であったが 9 月 29 日より前日までの 3 日間に 70 mm の降水が記録されていた。しかし、Ⅲ号沢では両日ともに顕著な濃度の上昇は認められなかった。

各試験流域における各溶存成分濃度の相関行列を Table 2、3、4 に示す。各試験流域ともに Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、DIC 濃度間の相関係数 r は 0.8 以上 (p<0.01) と極めて高く、また、これらの溶存成分濃度と Na^+ 濃度との相関係数 r も高い値を示した。NO_3^- 濃度は K^+ 濃度とⅠ号沢では弱い相関 (r=0.296、p<0.05)、Ⅱ号沢とⅢ号沢ではやや強い相関 (r=0.467、0.592、共に p<0.01) が認められた。また、Ⅱ号沢では NO_3^- 濃度と Si 濃度との間には弱い負の相関が認められたが、Ⅰ号沢ならびにⅢ号沢では相関が認められなかった。Si 濃度は Na^+、K^+、Cl^-、SO_4^{2-} 濃度と弱い相関が認められた。

3）日流出水量と溶存成分濃度との関係

Si、NO_3^- 濃度については、日流出水量の変化に伴う系統的な濃度の変化は認められなかった (Fig.5)。また、K^+ 濃度については調査期間を通じて低い濃度であり、かつ濃度の変動が小さい。このため、K^+ 濃度と日流出水量との間には明瞭な関係は認められなかった。Cl^- 濃度も変動は小さいが、Ⅰ 号沢とⅢ号沢では日流出水量の対数値 log (Q) との間に弱い負の相関が認められた。これに対して、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、DIC 濃度は 3 試験流域ともに日流出水量の対数値との間に強い負の相関が有意 (p<0.01) に認められ、日流出水量が増加するにつれて濃度が減少する傾向が認められた (Fig.5、Table 2、3、4)。

4）溶存成分の年流出負荷量

各試験流域において各溶存成分について作成した L-Q 式に基づいて算出した年流出負荷量を Table 5 に示す。各試験流域における年流出水量には大きな違いはないために、各溶存成分の年流出負荷量は、濃度の平均値の違いを反映したものとなった。その結果、DIN 以外の溶存成分はⅡ号沢で年流出負荷量が多く、Ⅰ号沢、Ⅲ号沢は同等の年流出負荷量を示した。なお、Si についてはⅡ号沢とⅢ号沢で年流出負荷量が多く、

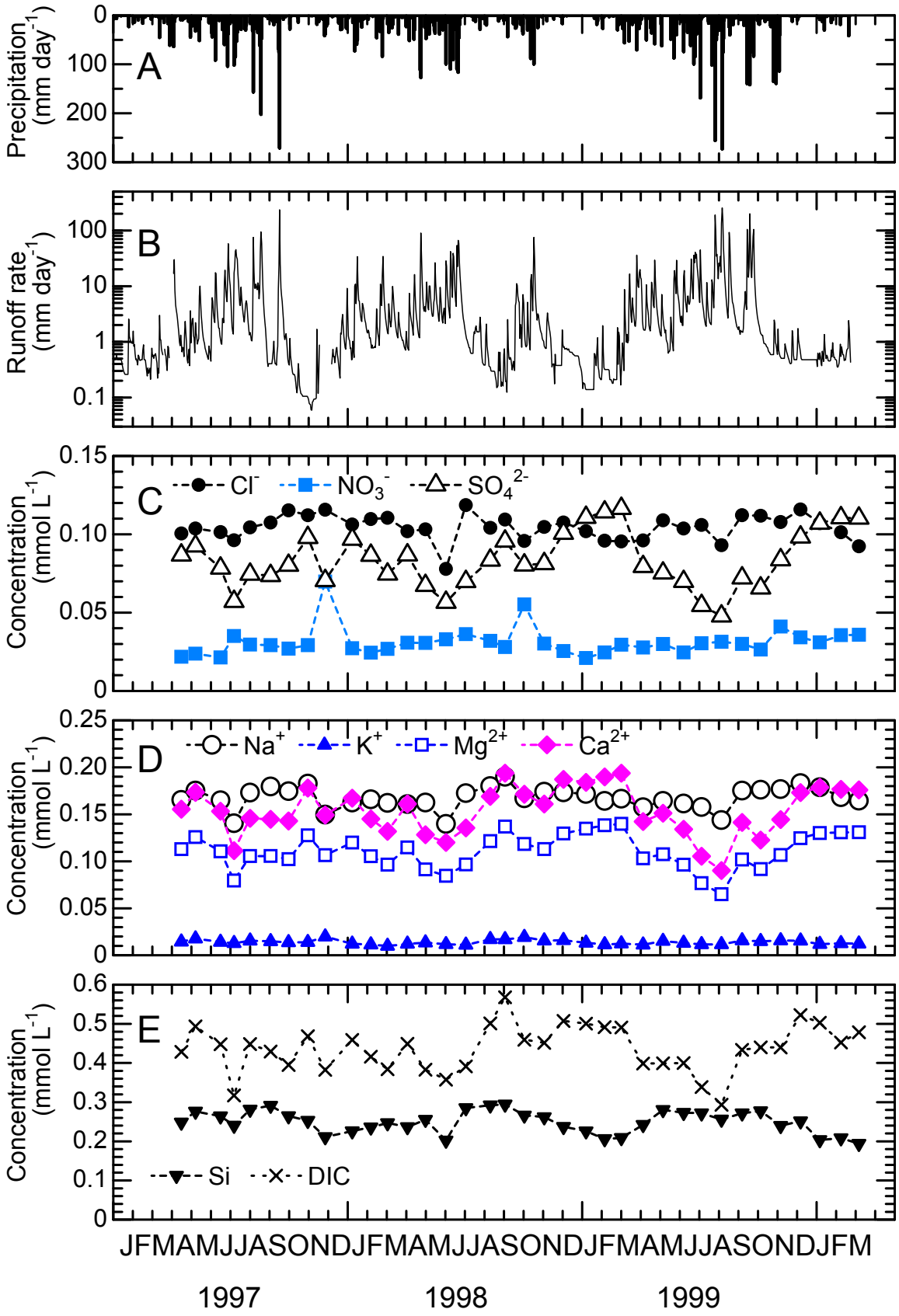

Fig. 2 Ⅰ号沢における (A) 日降水量、(B) 日流出水量、(C) Cl^-・NO_3^-・SO_4^{2-} 濃度、(D) Na^+・K^+・Mg^{2+}・Ca^{2+} 濃度、(E) Si・DIC 濃度の変化

Fig. 2 Variations of (A) daily precipitation, (B) daily runoff rate, (C) Cl^-, NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations, (D) Na^+, K^+, Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations and (E) Si and DIC concentrations at Watershed No. 1

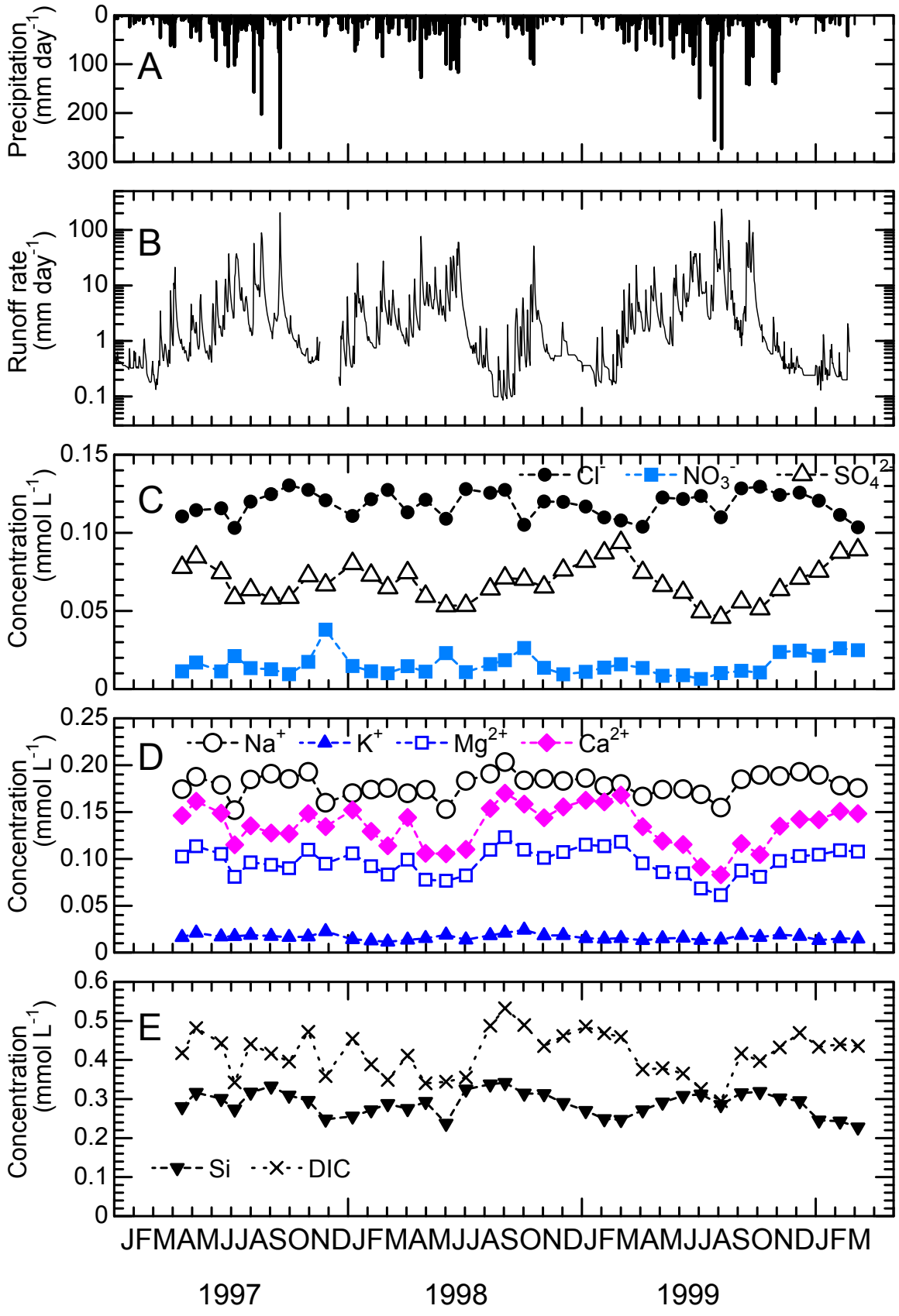

Fig. 3 Ⅱ号沢における (A) 日降水量、(B) 日流出水量、(C) Cl^-・NO_3^-・SO_4^{2-} 濃度、(D) Na^+・K^+・Mg^{2+}・Ca^{2+} 濃度、(E) Si・DIC 濃度の変化

Fig. 3 Variations of (A) daily precipitation, (B) daily runoff rate, (C) Cl^-, NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations, (D) Na^+, K^+, Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations and (E) Si and DIC concentrations at Watershed No. 2

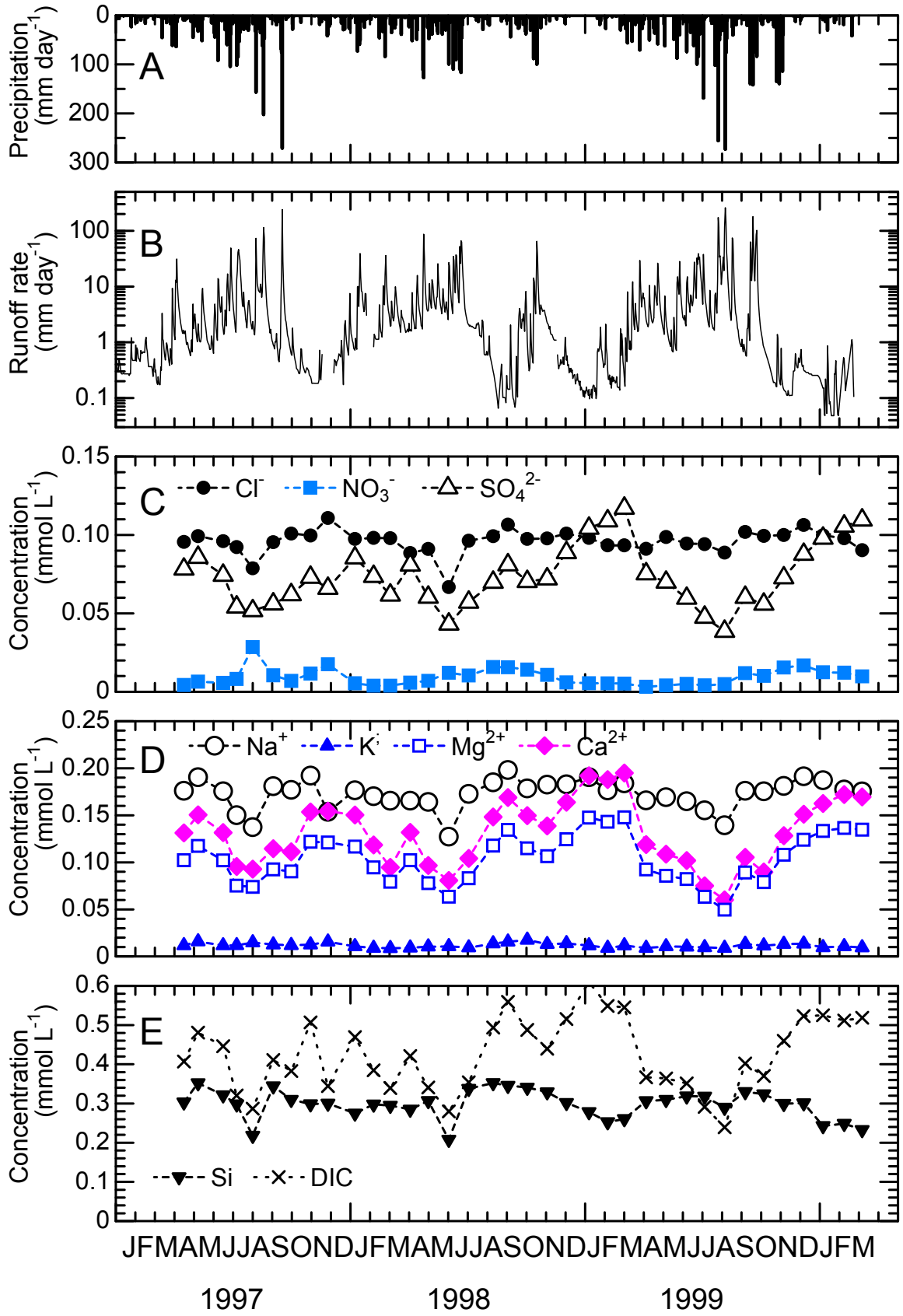

Fig. 4 Ⅲ号沢における (A) 日降水量、(B) 日流出水量、(C) Cl^-・NO_3^-・SO_4^{2-} 濃度、(D) Na^+・K^+・Mg^{2+}・Ca^{2+} 濃度、(E) Si・DIC 濃度の変化

Fig. 4 Variations of (A) daily precipitation, (B) daily runoff rate, (C) Cl^-, NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations, (D) Na^+, K^+, Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations and (E) Si and DIC concentrations at Watershed No. 3

Table 1 各試験流域における各溶存成分濃度
算出平均 (標準偏差) を示す (n=36)。異なるアルファベットは試験流域間で有意な違いがあることを示す
(Tukey-Kramer の HSD 検定、p<0.01)
Table 1 Solute concentrations for each watershed
Arithmetic means (standard deviations) are shown. Different letters show the significant difference (p<0.01)

Watershed	pH	EC	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Si	DIC
		(mS m^{-1})	(mmol L^{-1})								
No.1	7.38	7.49 ^{a}	0.1674 ^{b}	0.0139 ^{b}	0.1106 ^{a}	0.1536 ^{a}	0.1043 ^{b}	0.0311 ^{a}	0.0835 ^{a}	0.2495 ^{b}	0.4366 ^{a}
	(0.15)	(0.91)	(0.0115)	(0.0024)	(0.0185)	(0.0257)	(0.0081)	(0.0091)	(0.0178)	(0.0287)	(0.0595)
No.2	7.34	6.97 ^{ab}	0.1787 ^{a}	0.0165 ^{a}	0.0968 ^{a}	0.1350 ^{ab}	0.1182 ^{a}	0.0156 ^{b}	0.0687 ^{b}	0.2888 ^{a}	0.4165 ^{a}
	(0.15)	(0.77)	(0.0117)	(0.0029)	(0.0146)	(0.0221)	(0.0082)	(0.0067)	(0.0120)	(0.0305)	(0.0557)
No.3	7.33	6.83 ^{b}	0.1725 ^{ab}	0.0117 ^{c}	0.1036 ^{a}	0.1305 ^{b}	0.0959 ^{c}	0.0093 ^{c}	0.0737 ^{ab}	0.2981 ^{a}	0.4249 ^{a}
	(0.20)	(1.27)	(0.0159)	(0.0023)	(0.0257)	(0.0346)	(0.0076)	(0.0054)	(0.0195)	(0.0367)	(0.0922)

Table 2 Ⅰ号沢における日流出水量 (log(Q)) ならびに各溶存成分濃度の相関行列 (* は p<0.05、** は p<0.01 で有意な相関であることを示す)
Table 2 Correlation matrix for streamwater chemistry and runoff rate (log(Q)) at Watershed No. 1. Significant level: *p<0.05, **p<0.01
No.1

	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Si	DIC
K^+	0.541 *								
Mg^{2+}	0.627 **	0.313							
Ca^{2+}	0.615 **	0.349	0.995 **						
Cl^-	0.707 **	0.162	0.142	0.129					
NO_3^-	-0.046	0.296 *	-0.116	-0.082	-0.114				
SO_4^{2-}	0.516 **	0.089	0.954 **	0.933 **	0.128	-0.177			
Si	0.371 *	0.526 *	-0.267	-0.246	0.478 **	0.035	-0.471 **		
DIC	0.777 **	0.490 *	0.921 **	0.920 **	0.266	-0.112	0.818 **	-0.043	
log(Q)	-0.744 **	-0.201	-0.831 **	-0.809 **	-0.420 *	0.147	-0.811 **	0.111	-0.779 **

Table 3 Ⅱ号沢における日流出水量 (log(Q)) ならびに各溶存成分濃度の相関行列 (* は p<0.05、** は p<0.01 で有意な相関であることを示す)
Table 3 Correlation matrix for streamwater chemistry and runoff rate (log(Q)) at Watershed No. 2. Significant level: *p<0.05, **p<0.01
No.2

	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Si	DIC
K^+	0.396								
Mg^{2+}	0.605 **	0.367							
Ca^{2+}	0.526 **	0.365	0.991 **						
Cl^-	0.630 **	-0.011	-0.129	-0.213					
NO_3^-	0.120	0.467 **	0.389	0.374	-0.322				
SO_4^{2-}	0.230	-0.013	0.840 **	0.860 **	-0.403 **	0.275			
Si	0.531 **	0.466 *	-0.073	-0.107	0.612 **	-0.257 *	-0.479 **		
DIC	0.734 **	0.539 *	0.946 **	0.922 **	0.044	0.395	0.662 **	0.137	
log(Q)	-0.728 **	-0.139	-0.844 **	-0.802 **	-0.200	-0.315	-0.660 **	0.012	-0.831 **

Table 4 Ⅲ号沢における日流出水量 (log(Q)) ならびに各溶存成分濃度の相関行列 (* は p<0.05、** は p<0.01 で有意な相関であることを示す)
Table 4 Correlation matrix for streamwater chemistry and runoff rate (log(Q)) at Watershed No. 3. Significant level: *p<0.05, **p<0.01
No.3

	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Si	DIC
K^+	0.376								
Mg^{2+}	0.795 **	0.300							
Ca^{2+}	0.756 **	0.294	0.994 **						
Cl^-	0.846 **	0.260 *	0.489 **	0.433 *					
NO_3^-	-0.005	0.592 **	0.072	0.033	-0.092				
SO_4^{2-}	0.657 **	0.056	0.934 **	0.938 **	0.387	-0.131			
Si	0.460 *	0.354 *	-0.062	-0.078	0.608 *	-0.154	-0.219		
DIC	0.856 **	0.368	0.981 **	0.966 **	0.570 **	0.084	0.871 **	0.061	
log(Q)	-0.827 **	-0.317	-0.833 **	-0.786 **	-0.614 **	-0.255	-0.714 **	-0.048	-0.852 **

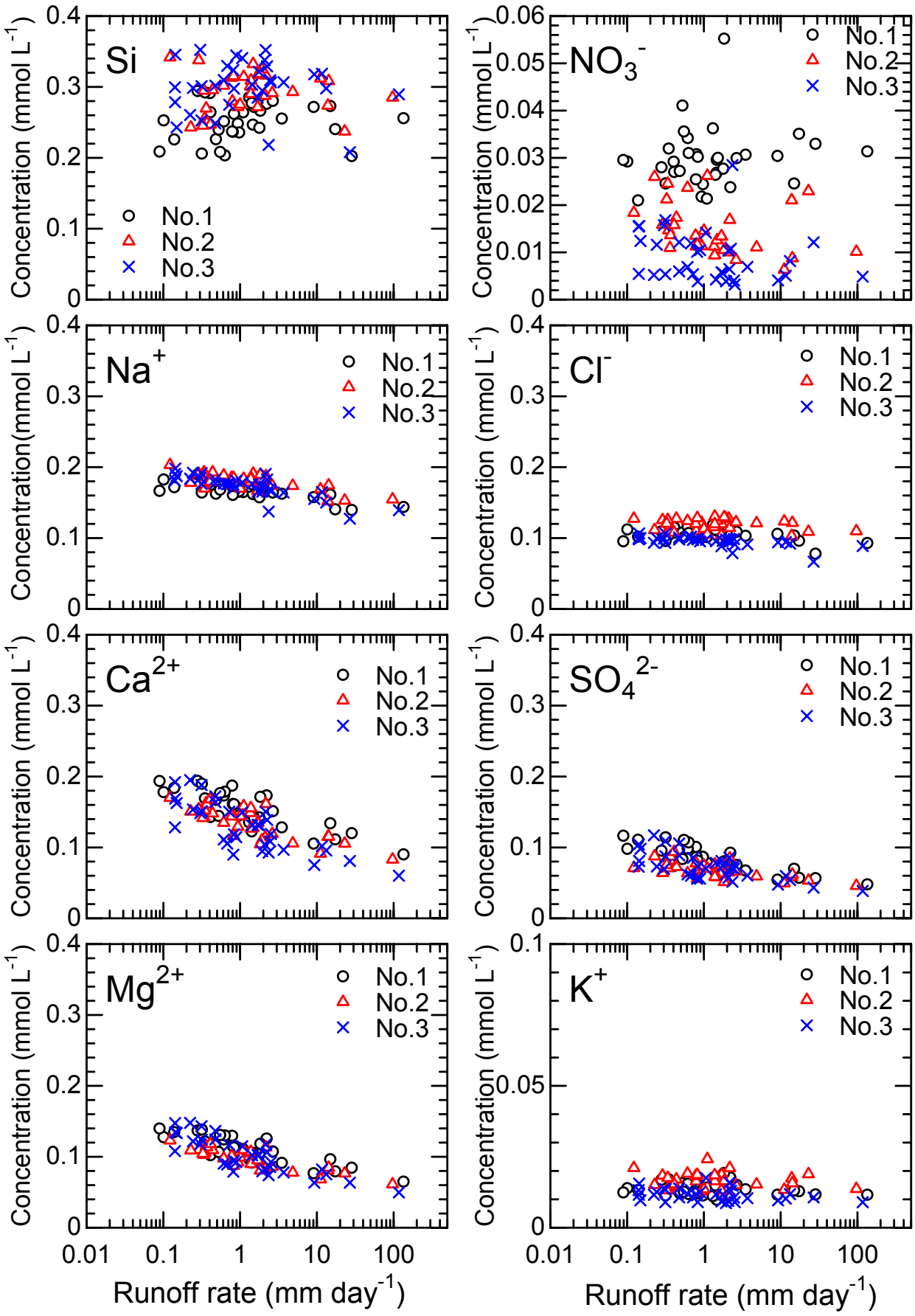

Fig. 5 溶存成分濃度と日流出水量との関係
Fig. 5 Relationship between solute concentrations and daily runoff rate

Table 5 各森林流域における溶存成分の年流出負荷量
宮崎県内における年流入負荷量ならびに日本各地における年流出負荷量も示す
*1: 高木・野上 (2001)、*2: 環境省・酸性雨対策検討会 (2002)、*3: 井倉ら (1994)、*4: 平田・村岡 (1991)、*5: Baba and Okazaki (1998)、*6: Ikeda and Miyanaga (2001)、*7: Kunimatsu et al. (2001)、*8: 浅野ら (2000)、*9: 国松ら (1992) による

Table 5 Nutrient runoff rates for each watershed.
Atmospheric input near the Sarukawa experiment watershed and results of nutrient runoff rates in other region in Japan were also shown.
*1: Takagi and Nogami (2001), *2: Committee of Acid Rain Monitoring Survey, Ministry of Environment (2002), *3: Inokura et al. (1994), *4: Hirata and Muraoka (1991), *5: Baba and Okazaki (1998), *6: Ikeda and Miyanaga (2001), *7: Kunimatsu et al. (2001), *8: Asano et al. (2000) and *9: Kunimatsu et al. (1992)

Site	Year	Precipitation	Runoff rate	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	DIN	S	Si	DIC
		mm	mm	kmol ha^{-1} y^{-1}								
Nutrient runoff at the Sarukawa												
No.1	1997	3169	1565	2.38	0.20	1.30	1.81	1.53	0.49	0.92	4.02	5.52
	1998	2859	1672	2.59	0.22	1.45	2.03	1.65	0.51	1.04	4.28	6.12
	1999	4375	3371	5.03	0.43	2.63	3.68	3.25	1.06	1.85	8.70	11.38
	mean	3468	2202	3.34	0.28	1.79	2.51	2.15	0.69	1.27	5.67	7.67
No.2	1997	3169	1508	3.47	0.33	1.59	2.19	2.44	0.23	1.16	6.16	7.16
	1998	2859	1511	3.53	0.33	1.66	2.29	2.45	0.24	1.20	6.16	7.41
	1999	4375	3157	7.11	0.68	3.12	4.28	5.07	0.46	2.29	12.91	14.18
	mean	3468	2059	4.70	0.45	2.13	2.92	3.32	0.31	1.55	8.41	9.58
No.3	1997	3169	1611	3.00	0.09	1.35	1.69	1.75	0.12	1.01	5.90	5.94
	1998	2859	1753	3.34	0.11	1.56	1.95	1.94	0.14	1.16	6.44	6.81
	1999	4375	3008	5.43	0.13	2.31	2.88	3.21	0.21	1.74	10.99	10.27
	mean	3468	2124	3.92	0.11	1.74	2.17	2.30	0.15	1.30	7.78	7.68
Atmospheric input near the Sarukawa												
Tano[*1]	1997-1999	3417		1.6	0.1	0.2	0.4	2.0	0.7	0.5		
Ebino[*2]	2000	2923		0.95	0.05	0.11	0.25	0.93	0.63	0.60		
Shiiba-A[*3]	1991	4537		0.61	0.04	0.07	0.18	0.71	0.23	0.43		
Shiiba-B[*3]	1991	5014		0.52	0.13	0.09	0.23	0.61	0.46	0.81		
Nutrient runoff in other regions												
Tsukuba (Ibaraki)[*4]	1985-1988		721	1.99	0.17	0.52	0.65	1.22	0.92	0.27	2.58	
Hakyuchi (Tokyo)[*5]	1995		410	0.70	0.02	0.57	0.56	0.75	0.95	0.26	1.60	
Jingahata (Yamanashi)[*6]	1990		1979	1.32	0.27	0.18	0.90	0.41	0.17	0.30	2.92	2.93
Chugu (Ishikawa)[*6]	1988		2518	4.41	0.62	2.08	9.47	3.22	0.94	1.63	3.13	21.10
Aburahi-N (Shiga)[*7]	1989-1991		1062	2.64	0.25	0.74	2.19	1.36	0.32	0.00	2.67	
Aburahi-S (Shiga)[*7]	1995-1998		772	1.94	0.09	0.52	1.09	1.31	0.21	0.17	1.87	
Myokoji (Shiga)[*7]	1991-1992		1265	2.24	0.25	0.23	0.21	0.90	0.19	0.21	2.73	
Kiryu (Shiga)[*8]	1995-1997		763	2.33	0.14	0.28	0.26	0.83	1.08	1.00	0.74	0.36
Jakujo (Shiga)[*8]	1995-1997		611	1.75	0.14	0.22	0.24	0.50	0.05	1.77	0.52	0.33
Rachidani (Shiga)[*8]	1995-1997		937	1.47	0.06	0.07	0.08	0.50	0.06	0.79	1.64	0.42
Asahinomori-R (Shiga)[*9]	1989		1636	2.80	0.13	0.46	0.29	2.46	0.09	0.29	1.75	
Asahinomori-L (Shiga)[*9]	1989		1140	1.75	0.05	0.37	0.27	1.59	0.06	0.19	1.08	
Higashidani (Kochi)[*6]	1994		1821	1.20	0.15	0.56	4.62	0.82	0.28	1.16	1.15	7.56

Ⅰ号沢で低い傾向を示した。一方、DIN の年流出負荷量はⅠ号沢が最も多く、次いでⅡ号沢、Ⅲ号沢の順となった。また、3 試験流域ともに 1999 年の年流出水量は 1997 年ならびに 1998 年の約 2 倍となっているため、その影響を受けて 1999 年の各溶存成分の年流出負荷量も 1997 年ならびに 1998 年の約 2 倍に増加した。

4．考察

1）西南日本太平洋側の他流域における溶存成分濃度との比較

西南日本太平洋側は秩父帯もしくは四万十帯の堆積岩から構成される急傾斜の山地が広がり、地質条件は類似している。この地域において森林流域の流出水の溶存成分濃度を継続して計測した流域としては、東から奈良県十津川村護摩壇山試験地 (福島・徳地、2008; Fukushima and Tokuchi, 2009)、高知県檮原町鷹取山試験地 (篠宮ら、2006a; 2006b)、高知県四万十町葛籠川流域市ノ又試験地 (森貞・平井、1995; 1996)、宮崎県田野町清武川流域宮崎大学農学部田野演習林 (現附属自然共生フィールド科学教育研究センター田野フィールド、以下田野と略する ; 野上ら、1998; 高木ら、2004) が挙げられる。なお、田野は去川森林理水試験地より約 10 km 南に位置し、地形、地質、気候条件は類似していると考えられる。これらの流域を比較す

ると、全体として溶存成分組成は類似しているが、海塩の影響を示す Cl^- 濃度は海からの距離を反映して田野で高く、去川森林理水試験地はそれに次ぐ高い濃度を示した。また、去川森林理水試験地の Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-} 濃度は田野よりは低いものの、護摩壇山試験地よりも高く、鷹取山試験地ならびに市ノ又試験地とは同等の値を示した。NO_3^- 濃度については、Ⅰ号沢が護摩壇山試験地の若齢林分の流域と同レベルである 0.03 mmol L^{-1} 程度の高い値を示したが、Ⅱ号沢とⅢ号沢は、それ以外の流域と同レベルの低い値を示した。さらに、去川森林理水試験地の結果は小林 (1961) による宮崎県内を流れる清武川、大淀川における溶存成分組成と類似した結果を示した。これらのことから、去川森林理水試験地における溶存成分組成は西南日本太平洋側の森林流域のそれと調和的であり、この地域の特徴を示していると考えられる。

2）溶存成分濃度の変動要因

従来、流出水に溶存する Cl^- 濃度は顕著な季節変化は認められず、降水イベント時に濃度が急激に低下する以外には年間を通じて濃度変化の少ない成分であることが知られている (たとえば、金子ら、2002; 志知ら、2005 など)。去川森林理水試験地における Cl^- 濃度も、これらの研究と同様に明瞭な季節変動を示さず、降水イベント時にスパイク状に低下した以外には濃度は安定している。Cl^- 濃度は日流出水量が増加しても単調に減少していない (Fig. 5)。このことは、降雨イベント時の急激な濃度低下は地下水や地中流などの中間流出成分の増加に起因するだけではなく、地表流の流入や河道内降水といった雨水による直接的な希釈の影響を受けたものと考えられる。

これに対して、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、DIC 濃度は夏期に低下し、冬期に上昇する明瞭な季節変動を示した (Fig. 2、3、4)。また、これらの溶存成分濃度は日流出水量の対数値と強い負の相関を示した。これらのことは、去川森林理水試験地におけるこれらの溶存成分濃度は、大局的に見れば水文特性の季節変動、すなわち日流出水量が夏期に多く、冬期に少ないという変動に支配されていることを示している。さらに、これらの溶存成分濃度は季節変動に加えて、降水イベント時に低下する傾向を示した。Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、DIC などの成分は流域内において風化によって基盤岩石や土壌から溶出し、渓流へと流出する。このため、これらの溶存成分濃度は降水、土壌水、地下水・流出水の順に濃度が上昇する (平田・村岡、1988 など)。したがって、日流出水量の増加にともなって、これらの溶存成分濃度が減少することは、基底流出を構成する地下水に比べて相対的に溶存成分濃度の低い土壌水や降水の混入の影響を示唆する。また、一般に流出水に含まれる SO_4^{2-} の起源としては、降水に溶存して供給されたものと、基盤岩石にもともと含まれている硫黄 (S) が酸化したもの、ならびに土壌に吸着されているものが想定される。堆積岩、特に海成の泥岩、頁岩には黄鉄鉱として硫黄が含まれていることが知られており (寺島ら、1981)、去川森林理水試験地に分布する基盤岩石にも硫黄が含まれていると考えられる。先に示したように、SO_4^{2-} 濃度は Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、DIC 濃度と同様の変化を示している。このことは去川森林理水試験地の流出水に含まれる SO_4^{2-} の主体は、降水によるものではなく、風化に伴って基盤岩石から Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+} とともに溶出したものである可能性が高い。

一方、Si も基盤岩石ならびに土壌から溶出され渓流に流出する。しかし、Si 濃度と Mg^{2+}、Ca^{2+}、DIC 濃度とは相関が認められず、季節変化も夏期に高く、冬期に低い逆位相の変化を示す。また、Si 濃度と日流出水量との間に明瞭な関係も認められない。一方、Si 濃度は Cl^- 濃度と同様に降水イベント時にスパイク状に濃度が低下し、Cl^- 濃度との間には弱い正の相関も認められる。これらのことは、Si の溶出過程が Mg^{2+}、Ca^{2+} と異なることを示唆する。Si 濃度に見られる夏期に高く、冬期に低い季節変化は、Si の溶出過程が一義的には温度条件に支配されていることを示唆している。Mg^{2+}、Ca^{2+} 濃度が Si 濃度と異なった季節変化を示すのは、Mg^{2+}、Ca^{2+} の流出には基盤岩石からの溶出のみならず、土壌におけるイオン交換や降水による供給の影響が関与しているためと推定され、今後、詳細な検討が必要であると考える。

NO_3^- は系統的な濃度の変化は少なく、降雨イベント時にスパイク状の濃度上昇が認められることもあった。また、日流出水量との関係も認められない。降雨イベントに伴って NO_3^- 濃度の急激な上昇が認められることは日本各地で認められており (Muraoka and Hirata, 1988; 勝山ら、2000、2004; Shibata et al, 2001; 篠宮ら、2006a、2006b など)、田野でも認められている (高木ら、2004)。これらの流域では降雨イベントの増水過程で NO_3^- 濃度の急激な上昇が起こるものの、減水過程では速やかに濃度は低下することが報告されている。去川森林理水試験地において降水量が認められた採取日の NO_3^- 濃度が必ずしも高い値を示さないのは、降雨による流出水位の変動傾向と採取した時間との関係によるものと考えられる。すなわち、降雨初期の増水過程に採取した試料では濃度の上昇が起こり、減水過程で採取した試料では平水時と同レベルまで濃度が低下したと推定される。このことは、NO_3^- 濃度の変動を解析するためには、時間や分単位の降水量、流出水量を用いた解析が必要になることを示している。

以上に記したように、去川森林理水試験地における流出水質は Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、DIC などの溶存成分濃度は日流出水量の季節変動に支配された変動を、Si は温度条件に支配された変動を示す。また、去

川森林理水試験地が位置する西南日本太平洋側では強度の強い降水イベントが頻繁に発生し、それに伴う流出水量の変動による希釈あるいは増水過程における洗い出しにより、上に掲げた成分に加えて、Cl^-、Si、NO_3^- などの成分濃度が変化すると考えられる。

3）試験流域間の流出水質の違いと植生との関係

植生の違いが流出水質に与える影響については多くの関心が寄せられ、古くより植生や林齢の影響 (Vitousek, 1977 など) や、森林伐採の影響 (Likens et al., 1970; Vitousek and Melillo, 1979 など) が調べられてきた。森林伐採については、植生の消長にともなう養分の吸収量の変化により、特に NO_3^- 濃度に影響が現れることが日本においても知られている (浜端、2005; 浦川ら、2005; 福島・徳地、2008 など)。本研究で対象とした 3 試験流域は近接しており、基盤地質・地形・土壌には大きな違いはないが、植生は異なる。Ⅰ号沢は谷沿いに広葉樹二次林が、山腹斜面・尾根部にはヒノキ植栽林が分布する。Ⅱ号沢は流域の中央部に広葉樹萌芽林が、それ以外には広葉樹二次林が分布する。Ⅲ号沢は、谷部の一部にスギ林が分布するものの、広葉樹二次林が広がっており、山腹斜面・尾根部にはスギ・ヒノキ混交林が分布している。一方、各試験流域における溶存成分組成は、Ⅰ号沢では EC ならびに Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-} 濃度がやや高く、Si 濃度がやや低い値を示し、Ⅲ号沢は全体的に溶存成分濃度が低く、Ⅱ号沢は両者の間の値を示す。植生の影響の違いを最も受けやすいと予想される NO_3^- 濃度もⅠ号沢で最も高く、Ⅲ号沢で低い傾向を示すが、3 試験流域における植生の違いから NO_3^- 濃度の差異の要因を示唆するような証拠は得られなかった。また、1996 年における 3 試験流域における植生の蓄積量はⅠ号沢の約 160 m^3ha^{-1}、Ⅲ号沢の約 140 m^3ha^{-1} に比べて、Ⅱ号沢は約 260 m^3ha^{-1} と倍近い値を示すが、1992 年から 1996 年にかけての蓄積の増加量は 3 試験流域ともに類似していた (清水ら、2008)。このことは、植物による養分の吸収量が 3 試験流域において同程度であることを意味する。このため、3 試験流域における各溶存成分濃度は、Fig.5 に示したように Si と NO_3^- 以外の溶存成分濃度には顕著な差が認められないのであろう。一方、3 試験流域の地質には大きな差がないにもかかわらず、Ⅰ号沢において Si 濃度が低いことは、地中における水の移動過程における土壌水・地下水と基盤岩石・土壌との反応時間が相対的に少なく、溶出量が少ないことを示している。Ⅰ号沢において NO_3^- 濃度が高い理由については不明であるが、降雨流出機構の違いが NO_3^- 濃度の差異に現れている可能性がある。Ⅰ号沢は形状係数がⅡ号沢、Ⅲ号沢より大きく、急激な出水が生じやすい地形であることも指摘されている (丸山ら、1960)。今後、土壌水の流出への寄与ならびに渓流内における脱窒などの影響も含めて、3 試験流域における溶存成分の形成機構の違いを詳細に検討する必要がある。

4）年流出負荷量の評価

去川森林理水試験地では本研究の調査期間中に降水の量は測定したが、その溶存成分組成は計測しなかった。そのため年流入負荷量が算出できず、流域としての個々の溶存成分の収支を評価することはできない。そこで、溶存成分の収支を評価するために、同時期に近隣で行われた観測結果の利用を検討した。

田野においては調査期間がほぼ同一の 1997 年～ 1999 年に年流入負荷量が計測されている (Table 5、野上ら、1998; 高木・野上、2001)。また、Table 5 には去川森林理水試験地より約 40 km 西に位置する「えびの」において、環境庁第 4 次酸性雨対策調査によって 2000 年～ 2001 年に計測された年流入負荷量 (環境省・酸性雨対策検討会、2002)、ならびに去川森林理水試験地より約 70 km 北の椎葉村に位置する九州大学宮崎演習林 (以下、椎葉と略する) において 1991 年に測定された年流入負荷量 (井倉ら、1994) も示した。

えびのと椎葉の年流入負荷量は、測定時期の違いはあるものの、より内陸の椎葉において海塩起源の Na^+ と Cl^-、ならびに DIN が低い傾向を示す以外は、類似した値を示す。これに対して、田野における各溶存成分の年流入負荷量は S と K^+ を除いてえびのと椎葉 B における年流入負荷量より多い。特に Na^+ と Cl^- の年流入負荷量が高い値を示していることは、田野では海岸線からの距離が 15 km と他の 2 地点よりも近いことによって海塩由来の成分の負荷の影響を強く受けているためであると考えられる。一方、DIN の年流入負荷量は田野では 0.5 kmol $ha^{-1}y^{-1}$ と環境庁第 4 次酸性雨対策調査における全国観測点の平均値である 0.52 kmol $ha^{-1}y^{-1}$ とほぼ同等である。また、えびのならびに椎葉では多少の違いはあるものの、全国観測点の値のばらつきの範囲に収まっている。これに対して S の年流入負荷量は環境庁第 4 次酸性雨対策調査における全国観測点の平均値である 0.29 kmol $ha^{-1}y^{-1}$ に比べて、いずれの地点においても高い値を示し、特に、えびのは環境庁第 4 次酸性雨対策調査における最大値を示していた。このように、田野における年流入負荷量はえびのならびに椎葉におけるそれとは大きな差異はなく、宮崎県中南部の値として妥当な年流入負荷量であると考えられる。また、田野における調査期間の年降水量の平均値は、同期間の去川における年降水量の平均値と同等である (Table 5)。これらのことから、田野における年流入負荷量を用いて、去川森林理水試験地における溶存成分の収支を検討した。

3 試験流域ともに 1997 ～ 1999 年の平均値で見た場合、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、S の年流出負荷量は田野における年流入負荷量より大きな値を示した。また、K^+ の

年流出負荷量はⅠ号沢、Ⅱ号沢では年流入負荷量よりも大きな値を示したが、Ⅲ号沢では年流入負荷量と同等であった。Cl^- の年流出負荷量はⅡ号沢では年流入負荷量より大きな値を示したが、Ⅰ号沢ならびにⅢ号沢では年流入負荷量と同等であった。これらに対して、DIN の年流出負荷量はⅠ号沢では年流入負荷量と同等であったが、Ⅱ号沢ならびにⅢ号沢では年流入負荷量よりも小さな値を示した。これらの結果から DIN ならびに Cl^- 以外の溶存成分は、流域内において土壌ならびに岩石から風化にともなって溶出し、流出していると推定される。一方、DIN については少なくともⅡ号沢ならびにⅢ号沢では植物による吸収・固定によって流域内に保持されていると考えられる。Cl^- については、もともと岩石ならびに土壌中にほとんど含まれてなく、風化によって生成されることがないということに加えて、土壌における吸脱着や植物による吸収の影響も大きくないと考えられるので、降水によって負荷された Cl^- は最終的にはすべて流出しているため、収支の差が少ないであろう。ただし、細かく見ると Cl^- は年流出負荷量の方が年流入負荷量に比べてやや高い傾向を示している。このことは、降水に溶存した形で流域に供給される Cl^- に加えて、海塩などの乾性沈着としての Cl^- の負荷も起こっていることを示唆している。

なお、上に記したようにⅡ号沢ならびにⅢ号沢における DIN の年流出負荷量は 0.1 ～ 0.5 kmol $ha^{-1}y^{-1}$ であり、窒素飽和現象の発現が指摘されている筑波 (Muraoka and Hirata, 1988) や東京都西部の東京農工大学波丘地利用実験実習施設 (現農学部附属広域都市圏・フィールドサイエンス教育研究センター、FM 多摩丘陵 ; Baba and Okazaki, 1998) などの流域を除けば、日本の多くの森林流域からの DIN 年流出負荷量と同程度に低い値を示している (Table 5)。これに対して、Ⅰ号沢では 1997 年、1998 年における DIN 年流出負荷量は 0.5 kmol $ha^{-1}y^{-1}$ 程度であったが、1999 年は 1.06 kmol $ha^{-1}y^{-1}$ と窒素飽和現象の発現が指摘されている流域と同程度の大きな値を示した。1999 年は降水量が 4375 mm と多く、そのため各試験流域の年流出水量も 3008 ～ 3371 mm と多くなり、1997 年、1998 年の年流出水量の約 2 倍に増加した。一方、各試験流域ともに 1999 年の流出水の NO_3^- 濃度は 1997 年、1998 年とほぼ同レベルの濃度を示した。このため、1999 年の DIN 年流出負荷量は年流出水量の増加の影響を受けて、1997 年、1998 年の約 2 倍に達した。先に述べたように、Ⅱ号沢ならびにⅢ号沢における NO_3^- 濃度と比べてⅠ号沢の NO_3^- 濃度が高い理由は不明であるが、Ⅰ号沢の NO_3^- 濃度の 3 年間の平均値である 0.03 mmol L^{-1} という値は決して高い値ではない。しかし、去川森林理水試験地では年降水量が多いため、Ⅰ号沢については年流出負荷量として算出した時に結果的に DIN 収支が均衡ないしは流出が超過した。ただし、Ⅰ号沢では 1997 年ならびに 1998 年の DIN 年流出負荷量は日本の他の森林流域と比べて比較的高い値を示すが、収支としてみれば年流入負荷量は年流出負荷量を上回っている。このことは、平年値程度の年降水量ならびに年流出水量が観測される年にはⅠ号沢でも試験流域内に DIN が保持されていることを示している。しかし、平年値を大きく上回る年降水量ならびに年流出水量が観測される年には、土壌中で硝化によって生成された NO_3^- が植物に吸収されるのと並行して雨水によって流亡し、結果として森林流域からの物質の流出が増加するのであろう。田野における年流入負荷量は 1997 ～ 1999 年の平均値であり、単年毎の値ではない。年降水量の多かった 1999 年の年流入負荷量が 1997 年ならびに 1998 年に比べて大きい可能性は残されているものの、このような降水量の変動によって収支の傾向が異なるといった現象が起こるのが、温暖かつ多雨地域の森林流域における溶存成分収支の特徴であると考えられる。

また、去川森林理水試験地の年流出負荷量を主溶存成分に加えて Si の年流出負荷量も報告されている 13 流域における結果 (Table 5) と比較すると、年流出水量の多い中宮ならびに東谷 (Ikeda and Miyanaga, 2001) 以外の流域に比べて、去川森林理水試験地ではほとんどの成分、なかでも Si と DIC の年流出負荷量が多いことが特徴的である。岩石の風化過程において、ケイ酸塩鉱物から Si や塩基を溶脱する過程で、これらの溶存成分の量に見合った DIC が流出する。したがって、去川森林理水試験地において Si と DIC の年流出負荷量が多いことは、多雨の影響を受けて流出水量が多いために、Si の流出をもたらす岩石、土壌からの風化による溶出量が増加し、それに付随して Ca^{2+} などの成分も溶出、流出も増加することを示唆している。このことも、多雨地域の森林流域における物質収支の特徴であると考えられる。流出水量と年流出負荷量の関係については、事例を増やして今後詳細に検討したい。

5．まとめ

年降水量が 2500 mm を越す多雨地域である西南日本太平洋岸における森林流域からの流出水質と日流出水量との関係ならびに年流出負荷量を明らかにするために、宮崎県の去川森林理水試験地において流出水質の測定を行った。去川森林理水試験地のⅠ号沢、Ⅱ号沢、Ⅲ号沢における流出水質は、それぞれの試験流域ごとに多少の違いが認められたものの、3 試験流域ともに、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、DIC 濃度は夏期に低下し、冬期に上昇する明瞭な季節変動を示した。さらに、これらの成分濃度は日流出水量の対数値と強い負の相関を示した。これらのことから、去川森林理水試験地における流出水質は、降水量ならびに日流出水量

が夏期に多く、冬期に少ないという水文特性の季節変動に支配されていることが明らかになった。

また、3 試験流域における年流出負荷量と去川森林理水試験地の近傍に位置し測定期間がほとんど重なって計測された田野における年流入負荷量と比較すると、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、S の年流出負荷量は年流入負荷量より大きな値を示した。このことはこれらの成分が土壌ならびに岩石から風化にともなって溶出し、流出していることを示唆している。一方、Ⅰ号沢では年降水量が著しく多かった 1999 年には NO_3^- 濃度に顕著な変化は認められなかったものの、結果的に DIN の流出が流入を超過した。しかし、1997 年ならびに 1998 年は年流入負荷量よりも年流出負荷量が少ない。また、Ⅱ号沢ならびにⅢ号沢でも DIN の年流入負荷量より年流出負荷量が少なく、植物による吸収・固定によって DIN は流域内に保持されていた。このように、温暖多雨地域においても森林は窒素を保持する機能を果たしている。しかし、平年を大きく上回る多雨の年には、土壌中の NO_3^- が雨水によって流亡して突発的に年流出負荷量が増加したと考えられた。

また、去川森林理水試験地では日本の他の森林流域と比較するとほとんどの溶存成分の年流出負荷量が多いという特徴を示した。これらのことは、ある森林流域における流出水量が多いほど、岩石、土壌からの風化による溶出量が増加し、溶存成分の年流出負荷量も増加することを示唆している。

謝辞

試料を採取し、四国支所に送付していただいた宮崎森林管理署高岡森林事務所に厚く御礼申し上げます。本研究は農林水産技術会議・総合的開発研究「農林水産業及び農林水産物貿易と資源・環境に関する総合研究」において実施した。

引用文献

浅野友子・大手信人・内田太郎・勝山正則 (2000) H^+ 収支を用いた森林植生が酸中和機構に与える影響の評価，日本林学会誌，82，20-27.

Baba, M. and Okazaki, M. (1998) Acidification in nitrogen-saturated forested catchment, Soil Science and Plant Nutrition, 44, 513-525.

EANET (2000) Quality Assurance/Quality Control (QA/QC) Program for Wet Deposition Monitoring in East Asia, 29pp., http://www.eanet.cc/product/qaqc/qaqcwet.pdf.

福島慶太郎・徳地直子 (2008) 皆伐・再造林施業が渓流水質に与える影響 ― 集水域単位で林齢の異なるスギ人工林を用いて―，日本森林学会誌，90，6-16.

Fukushima, K. and Tokuchi, N. (2009) Factors controlling the acid-neutralizing capacity of Japanese cedar forest watershed in stands of various ages and topographic characteristics, Hydrological Processes, 23, 259-271.

生原喜久雄・相場芳憲 (1982) スギ・ヒノキ壮齢林小流域における養分の循環とその収支，日本林学会誌，64，8-14.

浜端悦治 (2005) 森林伐採と渓流水―朽木における森林伐採実験から，滋賀県琵琶湖研究所所報，22，31-39.

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.

平田健正・村岡浩爾 (1991) 筑波森林試験地における土壌水質及び渓流水質の季節変化について，水工学論文集，35，105-110.

Ikeda, H. and Miyanaga, Y. (2001) Comparison of acid neutralization by chemical weathering between acidified and non-acidified watersheds, Water, Air, and Soil Pollution, 131, 407-436.

井倉洋二・吉村和久・久保田勝義・中尾登志雄・荒上和利 (1994) 九州山地中央部における降水および樹幹流の pH と溶存成分，九州大学演習林報告，71，1-12.

金子真司・服部重昭・後藤義明・玉井幸治 (2002) 竜の口山森林理水試験地の渓流水質，水文・水資源学会誌，15，472-485.

環境省・酸性雨対策検討会 (2002) 第 4 次酸性雨対策調査とりまとめ，114 pp，http:// www.acap.asia/acapjp/doc/4th_rain_measure_investigation.pdf.

勝山正則・大手信人・内田太郎・浅野友子・木本秋津 (2000) 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・水資源学会誌，13，227-239.

勝山正則・大手信人・小杉賢一朗 (2004) 風化花崗岩山地源流域の渓流水 NO_3^- 濃度形成に対する水文過程のコントロール，日本林学会誌，86，27-36.

小林　純 (1961) 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究，農学研究，48，63-106.

国松孝男・須戸　幹・島田佳津比古・海老沢秀夫 (1992) 朽木「朝日の森」落葉広葉樹二次林における水質形成機構に関する研究 (Ⅰ) 隣接する 2 試験流域から流出する渓流水の水質特性の比較，森林文化研究，13，81-94.

Kunimatsu, T., Hamabata, E., Sudo, M. and Hida, Y. (2001) Comparison of nutrient budgets between three forested mountain watersheds on granite bedrock, Water Science and Technology, 44, 129-140.

Likens, G. E., Bormann, F. H., Johnson, N. M.,

Fisher, D. W. and Pierce, R. S. (1970) Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem, Ecological Monographs, 40, 23-47.

丸山岩三・遠藤　尚・吉筋正二・浅田正朗 (1960) 去川理水試験第 1 回報告，去川試験地の地形と地質，林試研報，123，45-70.

森貞和仁・平井敬三 (1995) 市ノ又山国有林流域の渓流水質，日本林学会関西支部論文集，4，55-59.

森貞和仁・平井敬三 (1996) 高知県葛籠川流域における水質変動，日本林学会関西支部論文集，5，37-38

Muraoka, K. and Hirata, T. (1988) Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin, Journal of Hydrology, 235, 235-253.

野上寛五郎・佐藤盛樹・川口秀義・村本康治・仲川正勝・伊藤　哲・谷口義信 (1998) 宮崎大学農学部付属演習林における渓流水と雨水の溶存成分 － 1997 年のいくつかの渓流水と雨水の pH、EC と数種のイオン濃度－，日本林学会九州支部研究論文集，51，115-116.

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.

志知幸治・橋本徹・三浦覚・相澤州平・池田重人 (2005) 東北地方内陸部の森林流域における年間及び融雪期の渓流水質，日本森林学会誌，87，340-350.

清水　晃・宮縁育夫・清水貴範・小川泰浩・大丸裕武・佐藤　保・竹下　幸 (2008) 去川森林理水試験地観測報告（1987 年 1 月～ 2000 年 12 月），森林総合研究所研究報告，7，13-61.

篠宮佳樹・山田　毅・吉永秀一郎・鳥居厚志 (2006a) 四万十川源流部の森林における大雨時の渓流水の NO_3-N 濃度変動，水文・水資源学会誌，19，55-60.

篠宮佳樹・山田　毅・稲垣善之・鳥居厚志 (2006b) 四万十川源流部の森林における降雨時の硝酸態窒素流出特性，水環境学会誌，29，723-729.

白井純郎・岡　国夫・浅田正朗 (1962) 去川理水試験第２回報告，試験地の植生の概要について，林試研報，140，89-99.

白井純郎・浅田正朗・竹下　幸 (1965) 去川理水試験第３回報告，試験地の土壌の概要について，林試研報，176，89-99.

鈴木雅一 (1985) 短期水収支法による森林流域からの蒸発散量推定，日本林学会誌，67，115-125.

高木正博・野上寛五郎 (2001) 南九州地方におけるコジイ林とスギ論の酸中和能の比較，森林立地，43，53-58.

高木正博・野上寛五郎・仲川泰則 (2004) 南日本太平洋側の山地小流域における降水に伴う増水時の渓流水の成分濃度の変化，日本林学会誌，86，279-282.

寺島　滋・稲積章生・石原舜三 (1981) 中国・四国地方の泥質岩中の炭素と硫黄，地質調査書月報，32(3)，167-181.

浦川梨恵子・戸田浩人・生原喜久雄 (2005) 高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採が土壌および渓流の水質に及ぼす影響，日本森林学会誌，87，471-478.

Vitousek, P. M. (1977) The regulation of element concentrations in mountain streams in the northeastern United States, Ecological Monographs, 47, 65-87

Vitousek, P. M. and Melillo, J. M. (1979) Nitrate losses from disturbed forests: patterns and mechanisms, Forest Science, 25, 605-619