

## 森林流域における酸素安定同位体組成と 主要成分濃度の変化について

一柳錦平\*・加藤喜久雄\*\*

### 要 旨

森林流域における水循環および物質循環を解明するために、降水から河川水までの各素過程の水質特性と変化要因を明らかにした。測定項目はpH および主要成分濃度と、酸素安定同位体組成 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) である。また、流域面積の違う2流域(大流域A, 小流域B)において流量観測を行い、降雨流出時における流出特性と流出成分の違いを明らかにした。結果は以下のとおりである。

河川水のpHは中性の7付近と高く、主要成分濃度は非常に安定しており変動は極めて小さい。また、岩石の風化作用によって供給される $\text{Na}^+\cdot\text{Ca}^{2+}\cdot\text{HCO}_3^-$ の濃度が高く、流域内での滞留時間が長いことを示す。林外雨には $\text{SO}_4^{2-}$ と $\text{NO}_3^-$ が多く含まれており、ほとんどが酸性雨である。とくにスギの樹幹流はpHが低い。樹冠内では樹体器官からの溶脱よりも、乾性物質の洗脱によって主要成分濃度が増加すると推察される。土壌水は $\text{Ca}^{2+}$ と $\text{NO}_3^-$ の濃度が顕著に増加しており、硝化作用により $\text{NO}_3^-$ の濃度が増大し、土壌コロイドに吸着されていた $\text{Ca}^{2+}$ が溶出したと推察される。また斜面上部では呼吸作用が、斜面中部、下部では硝化作用がそれぞれ卓越している。

降雨流出時における小流域Bの流量変化はピークが早く変動が大きい。大流域Aでは降雨終了後にピークが現れており、変動幅が小さく減衰はゆるやかである。これらの流量変化は $\delta^{18}\text{O}$ の変化と一致しており、流量の増加は降水による直接流出成分の増加に起因していることが明らかとなった。

キーワード：森林流域, pH, 水質,  $\delta^{18}\text{O}$

### I. はじめに

近年は地球環境において酸性雨が深刻な問題となっており、とくにカナダや北欧・東欧では酸性雨によって森林は壊滅的な打撃を受けている。わが国においても、pH年平均値が4.5~5.2の酸性雨が各地で観測されており(玉置ほか, 1991)、森林に対する被害も報告されている(環境庁酸性雨土壌植生影響研究会, 1990)。このような酸性雨による森林への影響を明

---

\*名古屋大学大気水圏科学研究所

Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-01.  
(即科学技術庁 防災科学技術研究所)

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba 305.

\*\*名古屋大学大気水圏科学研究所

Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-01.

(受理：1996年12月6日)

らかにするため、森林流域における物質循環を解明する研究が多く行われている（例えば、DAVIES *et al.*, 1992; DEWALLE and SWISTOCK, 1994; SOULSBY and REYNOLDS, 1993; SOULSBY, 1995）。降水が樹冠を通過する際に溶存物質が変化する要因としては、遮断蒸発、乾性沈着物の洗脱と樹体器官からの溶脱、それに微生物による吸収と葉からの吸収などが考えられる（塚本, 1992）。土壌中での溶存物質の変化としては、岩石風化などの地球化学的要因と、樹木の根からの吸収や微生物活動などの生物化学的要因がある。このように森林流域における物質循環には非常に多くの要因が複雑に絡むので、未解明の部分が多い。

そこで本研究では、降水から河川水までの素過程ごとに採水を行い、森林流域における水質変化の実態を明らかにした。また、流出成分の分離にトレーサーとしてよく用いられる（例えば、HOOPER and SHOEMAKER, 1986; SKLASH *et al.*, 1986） $\delta^{18}\text{O}$  を測定し、降雨イベント中の流出成分の変動について考察を行った。

## II. 調査地域および方法

調査地は名古屋大学農学部附属演習林の月ヶ平地区にある、野入川源流部である（図-1）。標高は920 m から1230 m であり、地質は花崗岩である。林況は、カラマツ・スギ・ヒノキの人工林であり、広葉樹は沢や尾根ぞいに若干残るのみである。

流量観測および河川水の採水は、観測堰のある大流域（A：流域面積 53.4 ha）と隣接した小流域（B：流域面積 1.6 ha）の2ヶ所で行った。採水は1994年7月8日から9月13日まで、ほぼ1週間ごとに行った。降水については、標高950 m の小流域内の西向き斜面において、林外雨（1カ所）・林内雨（1カ所）およびスギの樹幹流（3カ所）の採水器を設置して採水した。 $\delta^{18}\text{O}$  を測定するために、これらの採水器にはピンポン球を使って、貯留水からの蒸発を防止するための工夫を加えた。さらに斜面の上部・中部・下部の3ヶ所に、ポラス

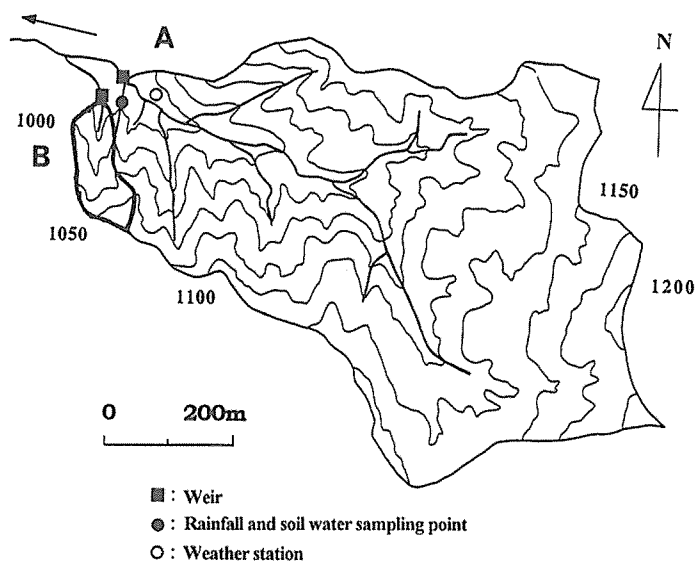


図-1. 調査地域の概要

Fig. 1. Geographical map of the study site.

カップを使った土壌水採水器を地表面から深度 30 cm に埋設し、減圧吸引して土壌水の採水を行った。降水については、7 月 30 日から 9 月 13 日まで、土壌水については 8 月 19 日から 9 月 13 日まで、ほぼ 1 週間ごとに採水を行った。また、9 月 13 日に発生した総降水量 4 mm の小規模な降雨イベントを対象として、降雨開始から終了後まで 1 時間ごとに河川水を採水した。

測定項目は pH・電気伝導度・陽イオン ( $\text{Na}^+$ ・ $\text{K}^+$ ・ $\text{Mg}^{2+}$ ・ $\text{Ca}^{2+}$ )・陰イオン ( $\text{Cl}^-$ ・ $\text{NO}_3^-$ ・ $\text{SO}_4^{2-}$ ・ $\text{HCO}_3^-$ ) および水の  $\delta^{18}\text{O}$  である。 $\text{HCO}_3^-$  は 0.1 N の HCl で滴定し、Gran Alkalinity を測定した。それ以外のイオン濃度はイオンクロマトグラフィーで、 $\delta^{18}\text{O}$  は  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  同位体平衡法により、同位体質量分析計を用いて測定した。 $\delta^{18}\text{O}$  は、標準海水 (SMOW) の同位体比からの差として、以下の式で表される。

$$\delta^{18}\text{O} = (R_{\text{SAMPLE}}/R_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000 \quad (\text{unit ; } \text{‰})$$

### III. 結果および考察

#### 1. pH および主要成分濃度の変化

全サンプルの pH および主要成分濃度の分析結果を、河川水 (大流域 A・小流域 B)、降水 (林外雨・林内雨・樹幹流)、土壌水 (斜面上部・中部・下部) の各素過程に分け、それぞれを表-1 (a)(b)(c) に示す。河川水の pH は大流域 A では 6.8~7.6、小流域 B では 5.8~7.3 と中性に近く、電気伝導度は流域 A、B とも  $20 \mu\text{S}/\text{cm}$  と低い。その他の主要成分濃度は降水や土壌水に比べて時間的な変動が小さく、非常に安定している。日本では、林外雨のほとんどすべては pH 5.4 以下の酸性雨であるが (塚本, 1992)、本調査では 9 月 9 日は pH 3.87 と非常に低い。林内雨は林外雨に比べて pH は高いが、逆にスギの樹幹流は林外雨よりも低い傾向がある。とくにスギの樹幹流は 3 回とも非常に pH が低く、大類ほか (1995) の調査結果と同じ傾向を示す。土壌水の pH および主要成分濃度は、斜面上部から下部にかけて大きく変化する。斜面上部、中部は時間的な変動が大きいが、下部ではあまり変動しない。

まず降水から河川水までの各素過程について、pH と電気伝導度の関係を図-2 に示す。ただし、樹幹流については採水日ごとの平均値で示した。全体的に見ると負の相関があり、河川水から土壌水、降水の順に pH 値が低くなり、河川水から降水、土壌水の順に電気伝導度が高くなる傾向が認められる。また、降水と土壌水については、それぞれに負の相関が認められる。斜面上部の土壌水は河川水に近いが、後述するイオン組成は大きく異なる。

次に各素過程についてイオンごとに平均し、それらの濃度変化を図-3 に示す。また、イオン組成については陽イオン・陰イオンに分けて、図-4 に示す。図-3 より林外雨と林内雨、および林外雨と樹幹流をそれぞれ比較すると、ほとんどのイオンで後者の濃度が高くなっている。これらは樹冠に付着していた乾性物質の洗脱や、樹体器官からの溶脱によって増加するためと推察される。樹体器官からの溶脱に起因する陽イオンの変化は、他のイオンに比べて  $\text{K}^+$  の増加が著しいはずであるが (塚本, 1992)、図-4 より陽イオン組成を見ると、林外雨に比べて林内雨と樹幹流は  $\text{K}^+$  の占める割合が少なくなっている。また図-3 より林外雨と林内雨、および林外雨と樹幹流の間の  $\text{K}^+$  の増加量は、 $\text{Mg}^{2+}$ ・ $\text{Ca}^{2+}$  とほぼ同じであることから、溶脱よりはむしろ洗脱が主要因であると推定できる。また、林外雨には酸性物質である  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{NO}_3^-$  が多く含まれており、そのために pH が低い。逆に炭酸物質である  $\text{HCO}_3^-$  は pH が低

表-1. 河川水(a), 降水(b), 土壌水(c)の pH および主要成分濃度の変化  
 Table 1. Change of pH values, electric conductivity and concentrations of dissolved substances through stream water (a), rain water (b), and soil water (c).

| (a) Stream water A and B |          |      |                                   |                            |                           |                             |                             |                            |   |  |  |
|--------------------------|----------|------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---|--|--|
| Date                     | Sample   | pH   | EC<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Na <sup>+</sup><br>(meq/l) | K <sup>+</sup><br>(meq/l) | Mg <sup>2+</sup><br>(meq/l) | Ca <sup>2+</sup><br>(meq/l) | Cl <sup>-</sup><br>(meq/l) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(meq/l) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(meq/l) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(meq/l) |
| 22 July                  | Stream A | 7.58 | 20                                | 0.087                      | 0.024                     | 0.022                       | 0.105                       | 0.032                      | 0.007                                   | 0.028                                    | 0.171                                    |
|                          | Stream B | 7.25 | 20                                | 0.098                      | 0.025                     | 0.013                       | 0.120                       | 0.028                      | 0.005                                   | 0.032                                    | 0.191                                    |
| 30 July                  | Stream A | 6.93 | 20                                | 0.089                      | 0.026                     | 0.002                       | 0.107                       | 0.032                      | 0.007                                   | 0.030                                    | 0.175                                    |
|                          | Stream B | 6.56 | 20                                | 0.097                      | 0.024                     | 0.012                       | 0.111                       | 0.029                      | 0.006                                   | 0.033                                    | 0.176                                    |
| 5 Aug.                   | Stream A | 7.20 | 20                                | 0.090                      | 0.026                     | 0.021                       | 0.103                       | 0.032                      | 0.006                                   | 0.028                                    | 0.173                                    |
|                          | Stream B | 6.73 | 20                                | 0.095                      | 0.023                     | 0.012                       | 0.109                       | 0.029                      | 0.006                                   | 0.032                                    | 0.171                                    |
| 11 Aug.                  | Stream A | 7.18 | 20                                | 0.109                      | 0.029                     | 0.022                       | 0.106                       | 0.049                      | 0.006                                   | 0.029                                    | 0.182                                    |
|                          | Stream B | 6.74 | 20                                | 0.094                      | 0.023                     | 0.012                       | 0.111                       | 0.029                      | 0.006                                   | 0.032                                    | 0.172                                    |
| 19 Aug.                  | Stream A | 6.86 | 20                                | 0.090                      | 0.024                     | 0.021                       | 0.104                       | 0.032                      | 0.004                                   | 0.028                                    | 0.176                                    |
|                          | Stream B | 5.77 | 20                                | 0.094                      | 0.024                     | 0.011                       | 0.110                       | 0.029                      | 0.007                                   | 0.032                                    | 0.172                                    |
| 26 Aug.                  | Stream A | 6.84 | 20                                | 0.089                      | 0.026                     | 0.023                       | 0.110                       | 0.032                      | 0.006                                   | 0.027                                    | 0.183                                    |
|                          | Stream B | 6.99 | 20                                | 0.094                      | 0.024                     | 0.012                       | 0.112                       | 0.029                      | 0.007                                   | 0.031                                    | 0.176                                    |
| 3 Sept.                  | Stream A | 6.94 | 20                                | 0.088                      | 0.025                     | 0.022                       | 0.108                       | 0.031                      | 0.005                                   | 0.028                                    | 0.180                                    |
|                          | Stream B | 6.47 | 20                                | 0.095                      | 0.024                     | 0.012                       | 0.110                       | 0.030                      | 0.009                                   | 0.034                                    | 0.168                                    |
| 9 Sept.                  | Stream A | 7.06 | 20                                | 0.096                      | 0.027                     | 0.022                       | 0.106                       | 0.037                      | 0.004                                   | 0.027                                    | 0.182                                    |
|                          | Stream B | 5.95 | 20                                | 0.093                      | 0.023                     | 0.011                       | 0.109                       | 0.031                      | 0.008                                   | 0.033                                    | 0.165                                    |
| 13 Sept.                 | Stream A | 7.19 | 20                                | 0.086                      | 0.025                     | 0.021                       | 0.104                       | 0.033                      | 0.008                                   | 0.030                                    | 0.165                                    |
|                          | Stream B | 7.07 | 20                                | 0.094                      | 0.021                     | 0.008                       | 0.096                       | 0.023                      | 0.003                                   | 0.025                                    | 0.168                                    |

| (b) Rainfall, throughfall and stemflow |             |      |                                   |                            |                           |                             |                             |                            |   |  |  |
|--|-------------|------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---|--|--|
| Date                                   | Sample      | pH   | EC<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Na <sup>+</sup><br>(meq/l) | K <sup>+</sup><br>(meq/l) | Mg <sup>2+</sup><br>(meq/l) | Ca <sup>2+</sup><br>(meq/l) | Cl <sup>-</sup><br>(meq/l) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(meq/l) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(meq/l) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(meq/l) |
| 30 July                                | Rainfall    | 5.66 | 30                                | 0.008                      | 0.034                     | 0.004                       | 0.009                       | 0.021                      | 0.054                                   | 0.068                                    | 0.000                                    |
| 11 Aug.                                | Rainfall    | 4.25 | 40                                | 0.010                      | 0.004                     | 0.000                       | 0.010                       | 0.015                      | 0.054                                   | 0.125                                    | 0.000                                    |
|  | Throughfall | 5.01 | 50                                | 0.026                      | 0.048                     | 0.033                       | 0.132                       | 0.050                      | 0.114                                   | 0.138                                    | 0.000                                    |
| 19 Aug.                                | Rainfall    | 5.68 | 10                                | 0.034                      | 0.003                     | 0.003                       | 0.001                       | 0.040                      | 0.008                                   | 0.022                                    | 0.000                                    |
|  | Throughfall | 6.17 | 40                                | 0.067                      | 0.088                     | 0.038                       | 0.124                       | 0.147                      | 0.034                                   | 0.053                                    | 0.083                                    |
|  | Stemflow    | 3.40 | 160                               | 0.066                      | 0.109                     | 0.091                       | 0.234                       | 0.355                      | 0.010                                   | 0.232                                    | 0.000                                    |
| 26 Aug.                                | Rainfall    | 4.63 | 30                                | 0.003                      | 0.001                     | 0.000                       | 0.000                       | 0.008                      | 0.027                                   | 0.055                                    | 0.000                                    |
|  | Throughfall | 6.50 | 30                                | 0.017                      | 0.032                     | 0.010                       | 0.049                       | 0.035                      | 0.033                                   | 0.035                                    | 0.005                                    |
|  | Stemflow    | 4.22 | 70                                | 0.101                      | 0.083                     | 0.069                       | 0.046                       | 0.078                      | 0.025                                   | 0.102                                    | 0.127                                    |
| 3 Sept.                                | Rainfall    | 4.32 | 30                                | 0.003                      | 0.002                     | 0.000                       | 0.002                       | 0.010                      | 0.02                                    | 0.107                                    | 0.000                                    |
|  | Throughfall | 5.03 | 30                                | 0.009                      | 0.055                     | 0.020                       | 0.079                       | 0.028                      | 0.069                                   | 0.074                                    | 0.000                                    |
|  | Stemflow    | 3.84 | 90                                | 0.055                      | 0.080                     | 0.038                       | 0.067                       | 0.070                      | 0.025                                   | 0.139                                    | 0.029                                    |
| 9 Sept.                                | Rainfall    | 3.87 | 120                               | 0.033                      | 0.097                     | 0.017                       | 0.061                       | 0.114                      | 0.129                                   | 0.355                                    | 0.000                                    |
| 13 Sept.                               | Rainfall    | 4.36 | 40                                | 0.022                      | 0.008                     | 0.006                       | 0.030                       | 0.023                      | 0.050                                   | 0.106                                    | 0.000                                    |
|  | Stemflow    | 3.66 | 160                               | 0.056                      | 0.161                     | 0.112                       | 0.206                       | 0.267                      | 0.064                                   | 0.335                                    | 0.000                                    |

| (c) Soil water |        |      |                                   |                            |                           |                             |                             |                            |   |  |  |
|----------------|--------|------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---|--|--|
| Date           | Sample | pH   | EC<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Na <sup>+</sup><br>(meq/l) | K <sup>+</sup><br>(meq/l) | Mg <sup>2+</sup><br>(meq/l) | Ca <sup>2+</sup><br>(meq/l) | Cl <sup>-</sup><br>(meq/l) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(meq/l) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(meq/l) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(meq/l) |
| 3 Sept.        | Upper  | 6.54 | 20                                | 0.044                      | 0.003                     | 0.021                       | 0.128                       | 0.036                      | 0.000                                   | 0.064                                    | 0.095                                    |
|                | Middle | 6.13 | 50                                | 0.055                      | 0.010                     | 0.061                       | 0.294                       | 0.032                      | 0.301                                   | 0.076                                    | 0.012                                    |
|                | Lower  | 5.76 | 100                               | 0.091                      | 0.007                     | 0.106                       | 0.428                       | 0.067                      | 0.554                                   | 0.058                                    | 0.000                                    |
| 9 Sept.        | Upper  | 6.45 | 70                                | 0.035                      | 0.002                     | 0.018                       | 0.115                       | 0.036                      | 0.004                                   | 0.064                                    | 0.070                                    |
|                | Middle | 5.79 | 60                                | 0.042                      | 0.009                     | 0.052                       | 0.271                       | 0.028                      | 0.280                                   | 0.069                                    | 0.000                                    |
|                | Lower  | 5.40 | 90                                | 0.073                      | 0.006                     | 0.084                       | 0.407                       | 0.064                      | 0.519                                   | 0.059                                    | 0.000                                    |
| 13 Sept.       | Upper  | 7.10 | 20                                | 0.029                      | 0.002                     | 0.013                       | 0.100                       | 0.030                      | 0.001                                   | 0.060                                    | 0.053                                    |
|                | Middle | 6.54 | 50                                | 0.037                      | 0.008                     | 0.044                       | 0.254                       | 0.026                      | 0.263                                   | 0.063                                    | 0.000                                    |
|                | Lower  | 5.54 | 90                                | 0.064                      | 0.006                     | 0.074                       | 0.395                       | 0.061                      | 0.516                                   | 0.049                                    | 0.000                                    |

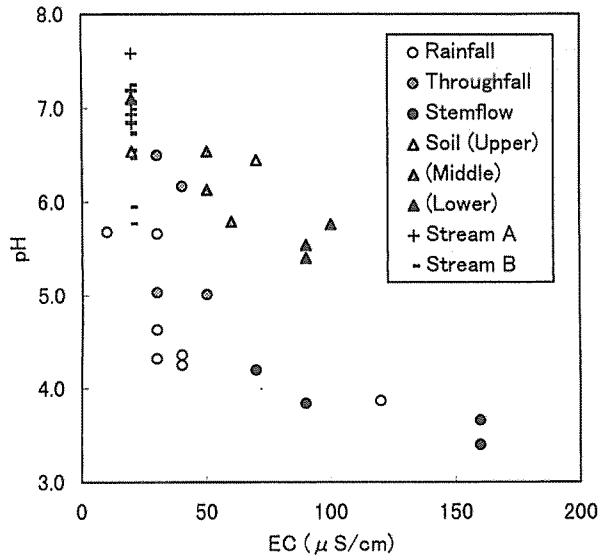


図-2. pH と電気伝導度の関係

Fig. 2. Relationships between pH values and electric conductivities.

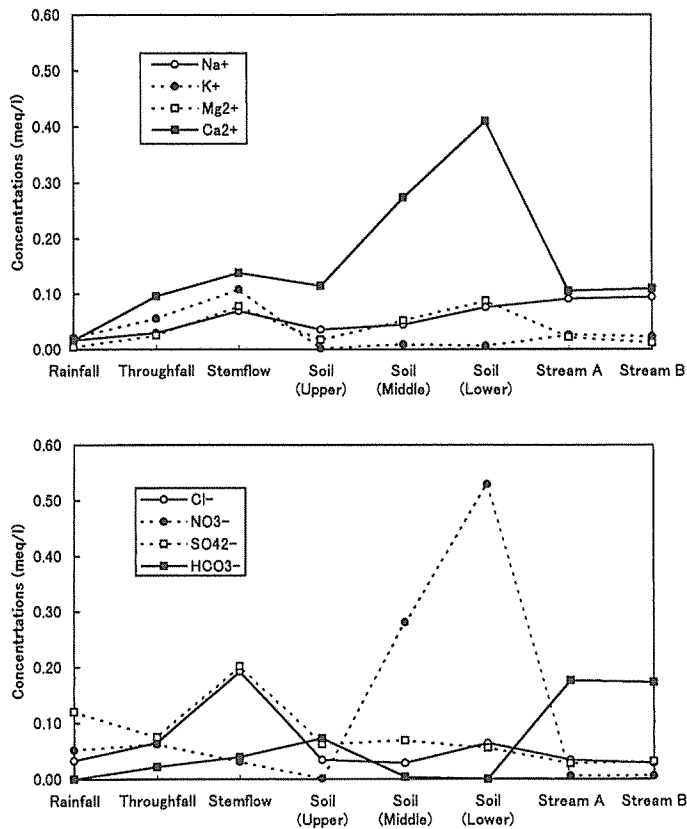


図-3. 主要成分濃度の変化

Fig. 3. Average concentrations of dissolved substances through rainfall to stream water.

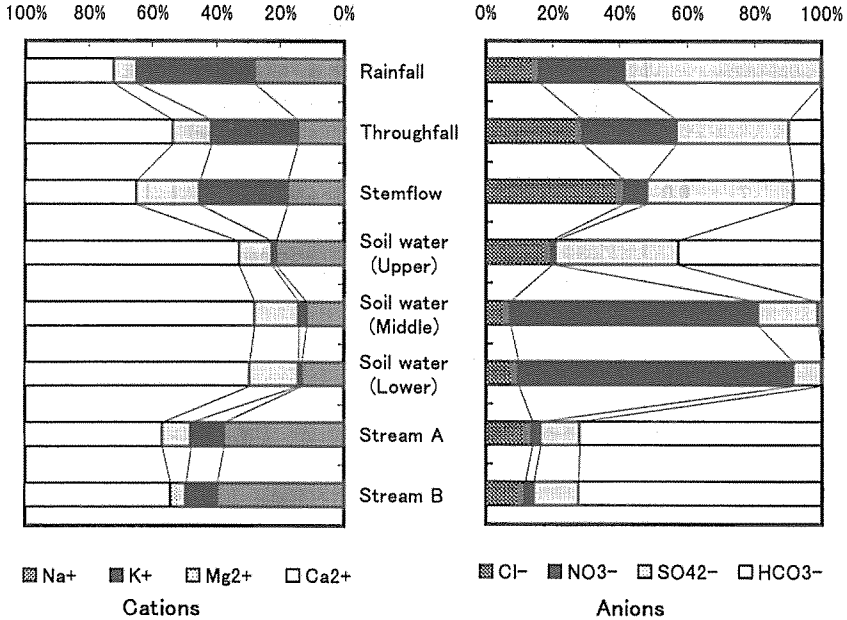


図-4. イオン組成の変化

Fig. 4. Average of chemical compositions through rainfall to stream water.

いと存在できないため(半谷・小倉, 1985), 林外雨には含まれていない。図-4より, 陰イオン組成を見ると林外雨と林内雨, および林外雨と樹幹流を比較すると, Cl<sup>-</sup>の占める割合が増加しており, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>は減少している。Cl<sup>-</sup>は酸化還元をほとんど行わず土壌に吸着される量も少ないので(半谷・小倉, 1985), 樹冠に付着していた乾性物質の洗脱による供給と推察され, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の減少は樹体表面の微生物による吸収に起因すると推察される。

図-3において, 斜面上部, 中部, 下部の土壌水を降水と比較すると, Ca<sup>2+</sup>とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度が顕著に増加しているのが注目される。これは, 土壌中の硝化作用によりNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度が増大し, そのために土壌コロイドに吸着されていたCa<sup>2+</sup>が溶出したと推察される。同様に, Mg<sup>2+</sup>も溶出して濃度が高くなっている。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度変化とは逆に, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>は斜面上部の土壌水において濃度が高いが, 斜面中部, 下部にはほとんど含まれていない。つまり斜面上部では, 土壌水中の植物プランクトンの呼吸作用によりCO<sub>2</sub>が放出され, そのCO<sub>2</sub>が岩石土壌と反応してHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>が供給されていることを示し, 斜面中部, 下部では硝化作用によりNO<sub>3</sub><sup>-</sup>が供給されていることを示す。

河川水は流域A, BともにNa<sup>+</sup>・Ca<sup>2+</sup>・HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度が高い。これは岩石との接触時間が長く, 風化作用の影響を強く受けることに起因すると推察される。また, 酸性物質であるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>を含む残りのイオンは非常に濃度が低く, 土壌への吸着や植物・微生物などの吸収により減少すると推察される。

## 2. δ<sup>18</sup>Oの変化

8月26日から9月13日まで, 降水から河川水までの各成分ごとのδ<sup>18</sup>Oの変化を, 図-5に示す。河川水は-8.60~-9.00の間で, 斜面上部・中部の土壌水は-7.00程度で安定してい

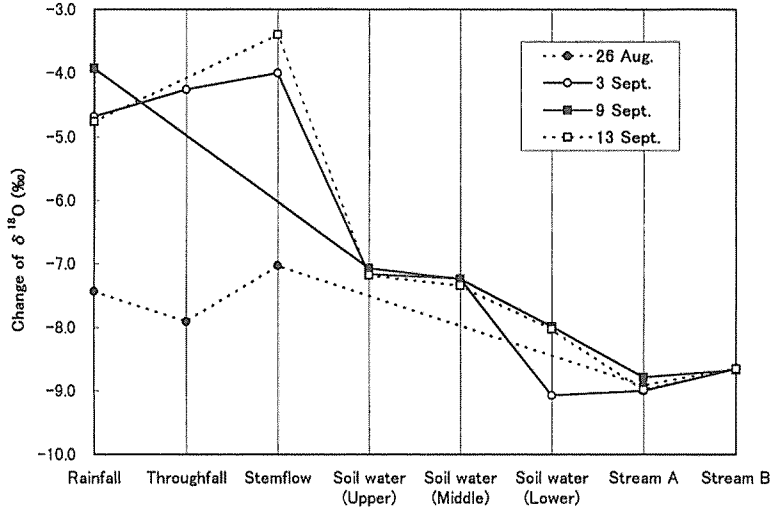


図-5. 酸素同位体組成の変化

Fig. 5. Change of  $\delta^{18}\text{O}$  through rainfall to stream water.

る。斜面下部の土壌水は $-8.00 \sim -9.00$ の間であり、河川水と斜面上部・中部の土壌水の中間の値をとる。土壌中での $\delta^{18}\text{O}$ を変化させる要因としては、蒸発に伴う同位体分別と他の同位体比を持つ水との混合が挙げられるが、この場合は小さい（0から遠ざかる）方向に変化しており、蒸発に伴う同位体分別では説明できない。つまり斜面下部の土壌水は、斜面上部・中部の土壌水とそれよりも同位体比の低い、河川水の基底流を形成している古い土壌水が混合していると推察される。

降水成分については一降雨ごとの変動が大きいですが、林外雨と林内雨、および林外雨と樹幹流を比較すると3回とも大きい（0に近づく）方向に変化しており、これは林冠の遮断蒸発によって同位体組成が変化することを示している（一柳・加藤, 1996）。

### 3. 降雨流出時の変化

9月13日の8時から12時まで、総降水量4mmの小規模な降水が発生した。降水に対する流量と水質変化を明らかにするために、8時30分から14時30分まで1時間ごとに採水を行った。pHおよび水質の変化を表-2に、流量および $\delta^{18}\text{O}$ の変化を図-6に示す。表-2より、pHは降水開始時よりも終了後の方が高いが、それ以外の水質成分はほとんど変化していない。図-6より、流域Bの流量変化は流域Aに比べてピークが早く変化量大きい。これは流域面積の違いに起因すると推察され、小流域であるBの方が降雨に対する反応が早いのである。

降水の $\delta^{18}\text{O}$ は図-5に示したように $-4.76$ 、8時30分に採水した流域A、Bの河川水は図-6に示したようにそれぞれ $-8.65$ と $-8.98$ であり、降水による直接流出成分が多ければ $\delta^{18}\text{O}$ は大きい方向に変化することになる。大流域Aでは、降雨イベント終了後も $\delta^{18}\text{O}$ は大きい方向に変化しており、直接流出成分が遅くまで流出している。それに対して小流域Bでは、降雨発生後すぐに $\delta^{18}\text{O}$ はピークになり、それ以降ほとんど変化していない。両河川ともに、

$\delta^{18}\text{O}$  の変化は流量の変化と一致しておりピークも等しい。つまり両河川ともに、流量の変化は直接流出成分の増減に起因していることが明らかとなった。

表-2. 降雨流出時における河川水の pH および水質の変化

Table 2. Time series of pH values, electric conductivity and concentrations of dissolved substances in storm runoff.

| Time  | Sample   | pH       | EC<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | $\text{Na}^+$<br>(meq/l) | $\text{K}^+$<br>(meq/l) | $\text{Mg}^{2+}$<br>(meq/l) | $\text{Ca}^{2+}$<br>(meq/l) | $\text{Cl}^-$<br>(meq/l) | $\text{NO}_3^-$<br>(meq/l) | $\text{SO}_4^{2-}$<br>(meq/l) | $\text{HCO}_3^-$<br>(meq/l) |
|-------|----------|----------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 8:30  | Stream A | 6.88     | 30                                | 0.089                    | 0.025                   | 0.021                       | 0.108                       | 0.030                    | 0.002                      | 0.033                         | 0.177                       |
| 9:30  |          | 7.00     | 30                                | 0.087                    | 0.024                   | 0.021                       | 0.107                       | 0.030                    | 0.004                      | 0.027                         | 0.178                       |
| 10:30 |          | 7.10     | 30                                | 0.086                    | 0.025                   | 0.021                       | 0.106                       | 0.033                    | 0.008                      | 0.029                         | 0.169                       |
| 11:30 |          | 7.08     | 30                                | 0.087                    | 0.026                   | 0.021                       | 0.106                       | 0.033                    | 0.009                      | 0.030                         | 0.169                       |
| 12:30 |          | 7.17     | 30                                | 0.083                    | 0.024                   | 0.020                       | 0.102                       | 0.034                    | 0.009                      | 0.030                         | 0.157                       |
| 13:30 |          | 7.10     | 30                                | 0.086                    | 0.024                   | 0.021                       | 0.105                       | 0.033                    | 0.008                      | 0.029                         | 0.166                       |
| 14:30 |          | 7.15     | 30                                | 0.086                    | 0.025                   | 0.021                       | 0.104                       | 0.033                    | 0.008                      | 0.030                         | 0.165                       |
| 8:30  |          | Stream B | 5.83                              | 30                       | 0.094                   | 0.022                       | 0.010                       | 0.101                    | 0.028                      | 0.006                         | 0.032                       |
| 9:30  | 6.68     |          | 30                                | 0.104                    | 0.025                   | 0.009                       | 0.100                       | 0.027                    | 0.008                      | 0.031                         | 0.172                       |
| 10:30 | 6.64     |          | 30                                | 0.102                    | 0.024                   | 0.009                       | 0.099                       | 0.026                    | 0.006                      | 0.031                         | 0.171                       |
| 11:30 | 6.65     |          | 30                                | 0.105                    | 0.024                   | 0.009                       | 0.100                       | 0.024                    | 0.003                      | 0.028                         | 0.182                       |
| 12:30 | 6.48     |          | 30                                | 0.099                    | 0.023                   | 0.009                       | 0.098                       | 0.024                    | 0.002                      | 0.027                         | 0.175                       |
| 13:30 | 7.08     |          | 30                                | 0.096                    | 0.021                   | 0.008                       | 0.097                       | 0.022                    | 0.002                      | 0.025                         | 0.172                       |
| 14:30 | 7.07     |          | 30                                | 0.094                    | 0.021                   | 0.008                       | 0.096                       | 0.023                    | 0.003                      | 0.025                         | 0.168                       |

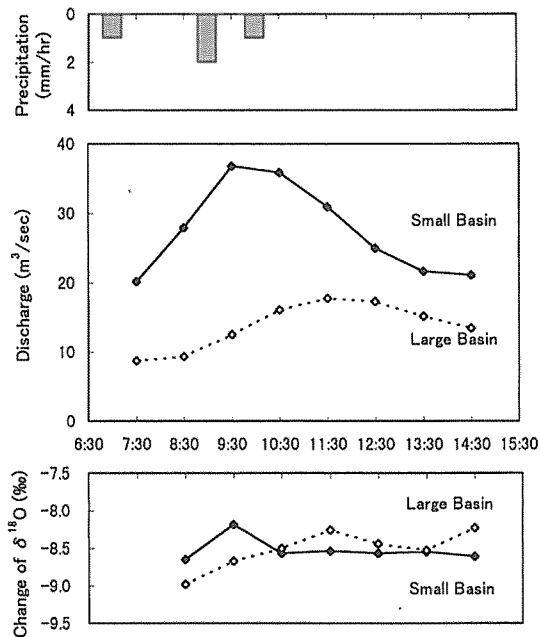


図-6. 降雨流出時における河川水の流量および  $\delta^{18}\text{O}$  の変化

Fig. 6. Time series of through precipitation, discharge and  $\delta^{18}\text{O}$  in storm runoff.



#### IV. ま と め

河川水の pH は中性付近で、主要成分濃度は変動が小さく安定している。林外雨はほとんどが酸性雨であり、とくにスギの樹幹流は pH が低い。林内雨と樹幹流は乾性物質の洗脱が、斜面上部の土壤水は植物プランクトンの呼吸作用が、斜面中部、下部の土壤水は硝化作用が、河川水は岩石の風化作用がそれぞれ卓越している。降雨流出時における小流域の流量変化はピークが早く変動が大きいが、大流域では降雨終了後にピークが現れており、変動幅が小さく減衰はゆるやかである。このような流量の変化は  $\delta^{18}\text{O}$  の変化と一致しており、降水による直接流出成分の変化に起因していることが明らかとなった。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、名古屋大学大気水圏科学研究所の吉岡崇仁助手には適切なアドバイスを頂きました。農学部附属演習林長・只木良也教授をはじめ演習林の方々、ならびに農学研究科の大学院生・酒井佳美さんにはフィールド調査において御協力いただきました。また、岐阜大学農学部の戸松 修教授から流量データを提供して頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 引用文献

- DAVIES, T. D., TRANTER, M., WIGINGTON, Jr., P. J. and ESHLEMAN, K. N. (1992) 'Acidic episodes' in surface waters in Europe. *J. Hydrol.* **132** : 25-69.
- DEWALLE, D. R. and SWISTOCK, B. R. (1994) Causes of episodic acidification in five Pennsylvania streams on the northern Appalachian Plateau. *Water Resour. Res.* **30** : 1955-1963.
- HOOPER R. P. and SHOEMAKER C. A. (1986) A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resour. Res.* **22** : 1444-1454.
- 一柳錦平・加藤喜久雄 (1996) 林地における林内外雨の酸素同位体組成と主要成分濃度の変動. *日林論* **107** : 355-358.
- 環境庁酸性雨土壤植生影響研究会 (1990) 酸性雨：土壤・植生への影響. 198pp. 公害対策研究センター, 東京.
- 半谷高久・小倉紀雄 (1985) 水質調査法. 378pp. 丸善, 東京.
- 大類清和・相場芳憲・生原喜久雄 (1995) 森林小流域での水質変化の過程. *水文・水資源学会誌* **8** : 367-381.
- SAXENA, R. K. (1986) Estimation of canopy reservoir capacity and oxygen-18 fractionation in throughfall in a Pine forest. *Nordic Hydrol.* **17** : 251-260.
- SOULSBY, C. and REYNOLDS, B. (1993) Influence of soil hydrological pathways on stream aluminum chemistry at Llyn Brianne, Mid-Wales. *Environ. Pollut.* **81** : 51-61.
- SOULSBY, C. (1995) Influence of sea salt on stream water chemistry in an upland afforested catchment. *Hydrol. Process.* **9** : 183-196.
- 玉置元則・加藤拓紀・関口恭一・北村守次・田口圭介・大原真由美・森 淳子・若松伸司・

村野健太郎・大喜多敏一・山中芳夫・原 宏 (1991) 日本の酸性雨の化学. 日本化学会誌 1991 : 667-674.

塚本良則 (1992) 森林水文学. 319pp. 文永堂出版, 東京.

## Change of $\delta^{18}\text{O}$ and chemical compositions in a forested catchment

Kimpei ICHIYANAGI and Kikuo KATO

Both the chemical and isotopic compositions from rainfall to stream water were determined in both large and small forested catchments. Stream water quality was stable and had little variation, and pH was always near 7.00. Rainfall contained large proportions of both  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ , and the pH was always below 5.40. Stemflow showed a lower pH than that of rainfall. It was suggested that the chemical compositions in both throughfall and stemflow were mainly caused by the wash-off of dry deposition. Soil water has large proportions of both  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ , which were caused by nitrification and base cation exchange. Stream water has large proportions of both  $\text{Na}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  caused by chemical weathering. The time lag from rainfall to discharge peak in a small catchment was much quicker than that of a large one, and it was suggested to control system of discharge in large catchment. A time series of both discharge and  $\delta^{18}\text{O}$  had the same changes as in the storm runoff. It showed that the increase in discharge was caused by the increase in the direct runoff component in both catchments.

**Keywords :** forested catchment, pH, water quality,  $\delta^{18}\text{O}$