

山地小流域における降水と流出水の水質

徳地 直子・辻 明子・岩坪 五郎

Study on Precipitation and Run-off Water Chemistry in Forested Watersheds

Naoko TOKUCHI, Akiko TSUJI and Goro IWATSUBO

要 旨

工業生産活動などの影響の少ない由良川源流域に位置する芦生演習林において、降水と渓流水の水質を調査した。渓流水の溶存物質濃度は、ミネラル類については降水より高く、蒸発散による濃縮と土壌からの溶脱が示唆された。一方、窒素成分は渓流水で濃度が低下しており、土壌への吸着と植物による吸収が考えられた。母材起源の成分については、同樹種同齢林の隣接する集水域においても有意な違いがみられることがあった。生物起源の窒素・リンに関して、集水域間での違いはみられなかった。

1. はじめに

現在まで、小流域を一つの安定した系とみなし、その系における物質の収支および量的集積を明らかにしようとする小流域モデルに基づき、山地小流域において、森林の物質循環に関する研究や、伐採が水収支および物質収支に及ぼす影響の研究などが行われ、これらの研究により、森林は流域の水収支および流出水の水質形成に影響を持つことが明らかにされつつある（1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9）。

しかし、わが国においては、人為の加わっていない水源流域で行われたバックグラウンドといえるデータの集積は充分であるとは言い難い。近年、天然林の人工林化や森林の伐採が進み、それに伴い渓流水の水質に何らかの変化が生じることが予想され、今日、バックグラウンドデータの収集は急務であるといえるだろう。

そこで、京都府北東部の由良川上流に位置する京都大学附属芦生演習林に試験流域を設け、降水および流出水の水質を調査した。芦生演習林には、あまり人為が加えられず天然生林と呼ぶことのできる森林とスギを主とする植栽林があり、わが国の森林流出水のバックグラウンドデータとして重要なものになると考えた。さらに、当研究では流出水の水質に及ぼす森林の影響を明らかにするため、異なる植生をもつ試験流域を設け生育期間を通じて森林流出水の調査を行った。

2. 調査地の概要

試験流域は、京都大学付属芦生演習林（京都府北桑田郡美山町）内に9カ所、演習林近傍の民



図-1 試験流域の位置
 Fig 1 Location of study site
 ●：雨量計
 ●：rainfall gauge

有地（タロガ谷）に2カ所の計11カ所を設定し、最低標高地点で採水した。図-1に採水流域と流域界を示した。芦生演習林は日本海に注ぐ由良川の上流に位置し、冬期に降雪の多い日本海気候である。標高はおよそ450～950m、年平均気温および降水量は演習林事務所（標高400m）付近で11.0℃、2370mm、長次谷（標高636m）で9.0℃、2770mmである。降水量は3地点で測定し、調査期間（1990年4月20日～12月29日）の平均降水量は1844mm、平均気温18.1℃であった。地質は秩父古生層上・中部に属し、基岩は粘板岩、珪岩が多く、他に砂岩、硬砂岩、角岩などである。各集水域の植生等の概要を以下に記す。

タロガ谷-1：流域面積6.8ha、標高430～700m。35年生のスギ人工林。尾根部にヒノキの植栽部をもつ。

タロガ谷-2：流域面積1.0ha、標高430～550m。右岸はスギ人工林、左岸は1988年植栽地。尾根付近には天然落葉広葉樹林がある。

内杉谷-1：流域面積8.2ha、標高475～740m。天然落葉広葉樹林。1925年に天然林更新が行われた。

内杉谷-2：流域面積1.3ha、標高525～680m。同上。

内杉谷-3：流域面積11.0ha、標高550～790m。19年生のスギ人工林。1971年植栽、1972年と1973年に雪起し、1972～79年の毎年下刈り、1984年に除伐、1985年に枝打ちといった保育作業が行われた。尾根付近に約1haの落葉広葉樹林を含む。

内杉谷-4：流域面積2.3ha、標高555～770m。19年生のスギ人工林。同上。

内杉谷-5：流域面積2.1ha、標高580～770m。20年生スギ人工林。1970年植栽、1971～74年の毎年雪起し、1971～79年の毎年下刈り、1983年に除伐、1984年枝打ちといった保育作業が行われた。

カツラ谷：流域面積1.3ha、標高690～800m。15～19年生のスギ人工林。1971年植栽、1972～79年の毎年雪起し、1972～77年の毎年下刈り。1982年除伐および枝打ち。1973年植栽、1974～81年下刈り。1975年植栽、1976～82年下刈り。

サワ谷：流域面積0.6ha、標高660～745m。55年生のスギ人工林。1936年植栽、1937～42年の

毎年雪起しおよび下刈り、1964年除伐、1965年枝打ち。中・下層部に落葉広葉樹がかなり入っている。

上谷：流域面積529ha、標高630～825m。約28haの8～58年生人工林（スギ主体、長治谷作業所付近）と約23haの落葉広葉樹林（1968～76年伐）、約428haの天然落葉広葉樹林などからなる。

下谷：流域面積324ha、標高630～935m。約87haの15～61年生のスギ・ヒノキ人工林と約105haの落葉広葉樹林（1960～70年に択伐）。約106haの天然落葉広葉樹林などからなる。

3. 調査方法

(1) 降水量の測定

降水中の溶存物質濃度を測定するため林内雨の混入しない林地外3ヶ所に雨量計を設置した。この雨量計は10cm×100cm×10cmの塩化ビニール製の角型雨ドイを受水口とし、70ℓ容のポリエチレン製のふた付きボトルを貯水部としたものである。なおトイは地上部より約50cmの高さに保った。雨量計にたまった降水の量をメスシリンダーで測定し前回の採取日からの期間の降水量とした。

(2) 降水および流出水の採取

降水および流出水を1990年4月20日～12月20日の8ヶ月にわたって約2週間毎にポリボトルに採取して持ち帰り分析試料に供した。降水は前述の雨量計より、流出水は各調査地の最低標高点で採取した。

(3) 分析方法

分析項目および分析方法は以下の通りである。pHは複合形ガラス電極、導伝率（以下、ECと記す）は電気伝導度計、全窒素は触媒酸化吸光法による住友化学社製N-200、アンモニア態窒素（以下、 NH_4^+ ）は住友化学ガスクロマトグラフ、硝酸態窒素（ NO_3^- ）・硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）・塩素イオン（ Cl^- ）は島津イオンクロマトグラフ、全リンは住友化学社製P-2000、ナトリウム（ Na^+ ）・カリウム（ K^+ ）は炎光光度法、マグネシウム（ Mg^{2+} ）・カルシウム（ Ca^{2+} ）は原子吸光光度法、有機態窒素は全窒素濃度より NH_4^+ および NO_3^- 濃度を減じて算出した。

4. 結果と考察

(1) 降水と渓流水の濃度

降水の溶存物質濃度は、幽仙橋で K^+ が $0.009 \pm 0.008 \text{meq}/\ell$ （平均値±標準偏差）でケヤキ坂で $0.004 \pm 0.015 \text{meq}/\ell$ や長次谷で $0.004 \pm 0.005 \text{meq}/\ell$ の約2倍の平均値を示した以外は、地点間で大きな違いはみられず、3地点の平均値±標準偏差は、pHは 4.77 ± 0.45 、ECは $20.52 \pm 14.29 \mu\text{S}/\ell$ 、全窒素は $0.27 \pm 0.12 \text{mg}/\ell$ 、有機態窒素は $0.18 \pm 0.09 \text{mg}/\ell$ 、 NO_3^- は $0.004 \pm 0.003 \text{meq}/\ell$ 、 NH_4^+ は $0.003 \pm 0.004 \text{meq}/\ell$ 、 Cl^- は $0.063 \pm 0.086 \text{meq}/\ell$ 、 SO_4^{2-} は $0.029 \pm 0.018 \text{meq}/\ell$ 、 Ca^{2+} は $0.007 \pm 0.006 \text{meq}/\ell$ 、 Mg^{2+} は $0.011 \pm 0.014 \text{meq}/\ell$ 、 K^+ は $0.006 \pm 0.006 \text{meq}/\ell$ 、 Na^+ は $0.038 \pm 0.059 \text{meq}/\ell$ 、全リンは $0.0000 \pm 0.0002 \text{mg}/\ell$ であった。

集水域毎の渓流水濃度は、後述した内杉谷-5で他よりやや高かった他は顕著な違いはみられず、全集水域の平均値±標準偏差は、pHは 6.78 ± 0.29 、ECは $39.73 \pm 9.65 \mu\text{S}/\ell$ 、全窒素は $0.25 \pm 0.10 \text{mg}/\ell$ 、有機態窒素は $0.17 \pm 0.07 \text{mg}/\ell$ 、 NO_3^- は $0.005 \pm 0.005 \text{meq}/\ell$ 、 NH_4^+ は 0.001

$\pm 0.003\text{meq}/\ell$, Cl^- は $0.149 \pm 0.026\text{meq}/\ell$, SO_4^{2-} は $0.076 \pm 0.048\text{meq}/\ell$, Ca^{2+} は $0.069 \pm 0.046\text{meq}/\ell$, Mg^{2+} は $0.095 \pm 0.061\text{meq}/\ell$, K^+ は $0.016 \pm 0.005\text{meq}/\ell$, Na^+ は $0.148 \pm 0.017\text{meq}/\ell$, 全リンは $0.0000 \pm 0.0001\text{mg}/\ell$ であった。

渓流水濃度と降水濃度を比較すると、物質によって濃度の高低は異なり全てに共通する傾向はみられなかった。しかし、イオン総量の指標となる EC について、降水の $20.5 \mu\text{S}/\ell$ に対して渓流水で $39.7 \mu\text{S}/\ell$ と約 2 倍になっており、渓流水では全体として濃度は上昇しているといえる。渓流水では pH やミネラル類で値が上昇し、2~10 倍を示した。また、全リンは降水中ではみられず、渓流水では $0.0003\text{mg}/\ell$ 検出された。一方、窒素濃度の高低は窒素の形態毎に異なった。降水、渓流水共にほぼ 2/3 を有機態が占め、残りの 1/3 程度は NO_3^- , NH_4^+ はどちらにもほとんど含まれていなかった。このうち、有機態窒素は降水で多く、 NO_3^- は溪流で高かった。窒素の総量を示す全窒素でみれば、渓流水中より降水中で $0.03\text{mg}/\ell$ 高かった。

渓流水での濃度の上昇は、流出水が蒸発散による濃縮を受けたことが原因の 1 つと考えられる。芦生演習林の年間平均降水量を 2500mm と仮定し、本演習林に近い滋賀県朽木村の年間蒸発散量が約 $700\sim 750\text{mm}$ であることを用いると (10)、流出水の濃縮率は降水の約 $1.39\sim 1.43$ 倍であると考えられる。図-2 に採水毎の平均降水濃度に対応する各集水域の濃度の関係と、降水：渓流水の濃度がそれぞれ 1 : 1, 1 : 1.43 である直線を示す。窒素に関しては流出水濃度は図中 1 : 1.43 の直線の下部に分布するものが多くみられ、濃縮率を考慮した降水濃度を下回ることが多いことがわかる。一方、 SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ などのミネラル類は 1 : 1.43 の直線の上部に多く分布し、流出水濃度が濃縮された降水濃度をも上回っていることが示される。

図-2 において、EC, Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} で降水濃度が渓流水を上回ったのは 12 月 20 日である。後述するが、これらは海塩に含まれ冬期に日本海からの季節風によって供給される。そのため、降水中でこれらの濃度は冬期に顕著に上昇するが、渓流水には降水だけでなく地下水も含まれており、濃度の上昇が降水ほど顕著でないため濃度の関係も変わったと考えられる。

このように溶存物質濃度には季節変動を示すものがあり、流出水濃度は調査期間以前の降水の影響も受けているので単純な比較は困難であるが、おおまかには窒素は森林を通過する過程で土壌への吸着や植物体による吸収が起こっていると考えられる。

(2) 降水・渓流水濃度の経時変化

降水では pH, EC, Ca^{2+} , 全リン, 全窒素, NO_3^- , NH_4^+ , 有機態窒素などが年間を通じてほぼ一定の濃度を示した。降水中の Cl^- , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} は 11~12 月に 3~5 倍程度急激に上昇した。一方、渓流水では K^+ と Cl^- 以外の物質濃度は年間を通じてほぼ一定であり、 Cl^- や K^+ の 11~12 月の濃度の上昇も降水に較べるとゆるやかで、 Cl^- 濃度は降水と同じ 11, 12 月に $0.14\text{meq}/\ell$ から $0.19\text{meq}/\ell$ に、 K^+ 濃度は 10~11 月に $0.014\text{meq}/\ell$ から $0.02\text{meq}/\ell$ になった。図-3 に経時変動のみられた物質について月毎の平均値と標準偏差を、降水と渓流水にまとめて示す。

短期の今回の研究だけではこれらの変動が季節性とはいえないが、日本海を通る北西季節風の影響はすでに多くの報告があり (11, 12, 13), 今回の場合も季節風の影響と考えられ、季節性が示唆される。降水では 10 月から 11 月、さらに 12 月へと徐々に濃度は上昇したが、渓流水では 11 月の上昇は明らかであるが、12 月は Na^+ は 10 月と同程度にもどり、 Cl^- も頭打ちをみせた。これは、11 月 10 日の初雪以来、12 月以降降水の多くは雪の形で供給され、芦生演習林では根雪となるため高濃度の Na^+ や Cl^- を含む降雪の影響が渓流水に現れていないためと考えられる。今後、融雪期の調査が必要である。

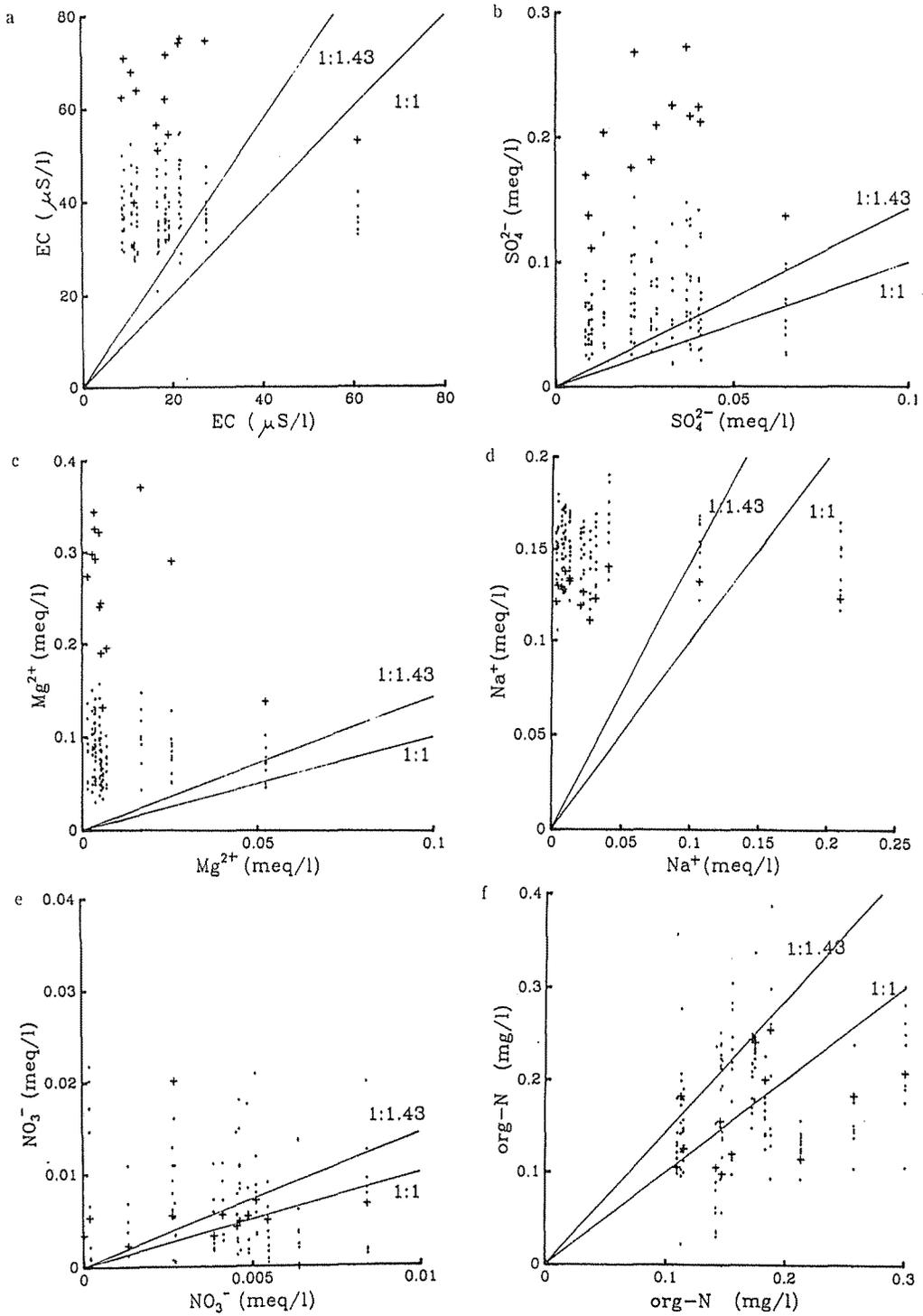


図-2 降水と渓流水濃度の関係

Fig 2 The relations of concentrations between precipitation and run-off water

- + : 内杉谷 - 5
- : その他の集水域
- + : Naisugitani - 5
- : The other watersheds

横軸は降水濃度、縦軸は渓流水濃度。
The horizontal axis shows the concentration of precipitation, the vertical axis is the concentration of run-off.

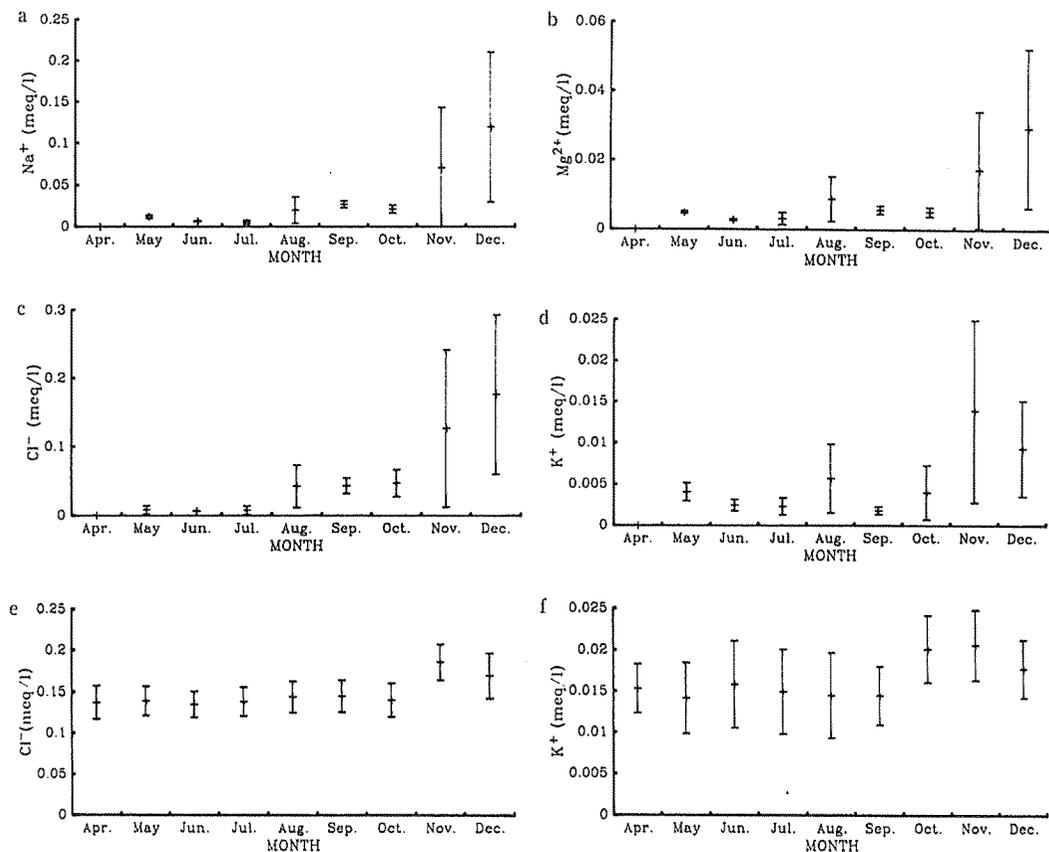


図-3 濃度の経時変動

Fig 3 The concentration fluctuations over time

平均値と標準偏差

The average and standard deviation

a ~ d : 降水 a ~ d : precipitation

e, f : 渓流水 e, f : run-off water

本研究は植物の生育期間を通じて行われており、植物活動の流出水質への影響が期待された。10~11月にみられた K^+ 濃度の上昇は、落葉前後の老化した葉からの溶脱の影響と考えられる。一方、無機態、有機態共に窒素濃度には生育期間を通じてほとんど違いがみられなかった。夏期の成長最盛期には土壌中の有機態窒素の無機化もさかんになっていると考えられる。言い替えれば、芦生演習林においては窒素は植物の成長の制限要因にはなっていないことを示唆しているといえるだろう。このことは、林齢が異なり窒素の要求量が異なると考えられる森林集水域間でも無機態・有機態窒素濃度に違いがみられないことから推察される。

(3) 集水域毎の渓流水濃度

今回の実験の目的の1つは、地質的にはほぼ等しいと考えられる複数の集水域を設け、植生が森林流出水の水質にどのような影響を及ぼすかを検討することである。植生の影響を評価するに先だって、実際の地質的影響を考えておく必要がある。そこで、同樹種ではほぼ同齢の隣接する3流域、内杉谷-3~5について考察する。

これらの集水域では SO_4^{2-} と Ca^{2+} ・ Mg^{2+} 濃度が内杉谷-3より4、4より5と上昇してい

た。図-2-bからもわかるように、内杉谷-5の SO_4^{2-} 濃度は $0.190 \pm 0.043 \text{ meq/l}$ で、他の集水域 ($0.028 \pm 0.005 \sim 0.109 \pm 0.027 \text{ meq/l}$) より高く、この違いは有意であった ($p < 0.05$)。内杉谷-5では、pH (7.06 ± 0.35) や EC ($61.78 \pm 9.58 \mu\text{S/l}$)、 Ca^{2+} ($0.179 \pm 0.044 \text{ meq/l}$)、 Mg^{2+} ($0.251 \pm 0.069 \text{ meq/l}$) も他の流域の pH ($6.39 \pm 0.19 \sim 6.98 \pm 0.30$)、EC ($30.16 \pm 1.45 \sim 46.36 \pm 7.03 \mu\text{S/l}$)、 Ca^{2+} ($0.025 \pm 0.003 \sim 0.102 \pm 0.024 \text{ meq/l}$)、 Mg^{2+} ($0.048 \pm 0.016 \sim 0.119 \pm 0.025 \text{ meq/l}$) より高かった。

内杉谷-5はサワ沿いに明らかに崩壊しており、このことが原因の1つとなって風化の程度がことなっていると考えられる。このように、隣接し植生がほぼ等しい集水域においても、 SO_4^{2-} や $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ といった母材起源の物質には違いのみられる場合があることがわかった。

(4) 植生の異なる集水域間の比較

人工林としてタロガ谷-1、タロガ谷-2、内杉谷-3~5、カツラ谷、サワ谷を、天然林として内杉谷-1と2をまとめた。人工林と天然林の全窒素は $0.25 \pm 0.09 \text{ mg/l}$ と $0.22 \pm 0.09 \text{ mg/l}$ 、 Mg^{2+} は $0.103 \pm 0.074 \text{ meq/l}$ と $0.083 \pm 0.020 \text{ meq/l}$ 、 K^+ は $0.016 \pm 0.006 \text{ meq/l}$ と $0.018 \pm 0.003 \text{ meq/l}$ であり、生物的起源、母材起源のどちらの物質についてもほとんど違いはなかった。

さらに、窒素濃度について、植生の影響を樹種と樹齢の2因子を組み合わせて集水域毎に考察した。今回の実験では以下のような組合せで比較可能である。

同樹種(スギ)で異齢：タロガ谷-2(4年生)とサワ谷(55年生)

内杉-3(19年生)とタロガ谷-1(35年生)

天然林と人工林：カツラ谷(スギ)と内杉-2(天然林)

タロガ谷-1(スギ)と内杉-1(天然林)

しかし、全窒素に関しては、同種で異齢であるタロガ谷-2 ($0.21 \pm 0.07 \text{ mg/l}$) とサワ谷 ($0.18 \pm 0.05 \text{ mg/l}$)、内杉-3 ($0.26 \pm 0.06 \text{ mg/l}$) とタロガ谷-1 ($0.34 \pm 0.09 \text{ mg/l}$) でも、樹種の異なるカツラ谷 ($0.36 \pm 0.06 \text{ mg/l}$) と内杉谷-2 ($0.24 \pm 0.11 \text{ mg/l}$)、タロガ谷-1 と内杉谷-1 ($0.20 \pm 0.07 \text{ mg/l}$) の間にもほとんど違いがみられなかった。広瀬ら(14)は、ヒノキの新植地と61年生の林地において、61年生で常に新植地より NO_3^- 濃度の高いことを報告し、窒素循環の様式の違いを指摘している。今回そのような違いがみられなかったのは、窒素要求量が多いと考えられる若齢林の林地で土壌中の窒素含有量が多かったせいかもしれない。あるいは、土壌中の無機態・有機態窒素保持量や窒素供給速度が植物の窒素吸収量・速度を上回り、そのため窒素吸収量の差が明らかにならなかったとも考えられる。この点については土壌調査などさらに詳しい研究が必要であろう。

6. ま と め

- ① 芦生演習林に複数の試験流域を設け、降水と森林流出水の水質を調査した。
- ② 蒸発散を考慮した流出水濃度は、窒素に関しては降水濃度より低く、 SO_4^{2-} や $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ といったミネラル類は降水濃度より高かった。
- ③ このことから、窒素成分は森林を通過する過程で植物により吸収されていること、ミネラル類 ($\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+$) は土壌から溶脱していることが示唆された。
- ④ 冬期に降水中の $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ 濃度が上昇し、北西季節風の影響と考えられた。
- ⑤ 渓流水中では11月に $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ 濃度が上昇したが、12月には降水ほど顕著でなく雪で供給され、根雪となっていることが原因と考えられた。

- ⑥ 隣接し同種同齡の植生をもつ集水域間の流出水には、窒素濃度に関しては顕著な差はみられなかったが、 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ に有意な差が存在する場合があります、風化の程度が集水域毎に異なっていることが示された。
- ⑦ スギ人工林と落葉広葉樹を主体とする天然林の流出水の窒素濃度には、有意な違いはみられなかった。

7. 謝 辞

本研究の実施にあたり、京都大学芦生演習林の大畠誠一博士、中島皇博士、山中典和博士をはじめ多くの教官・技官・事務官の方に協力をいただいた。また、森林生態学研究室の皆様にも御助言・御尽力いただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 1) Likens, G.E., Bormann, F.H., Johnson, N.M., Fisher, D.W. & Piece, R.S.: Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecol. Monogr.* 40. 24-47, 1970
- 2) Johnson, P.L. & Swank, W.T.: Studies of cation budgets in the southern appalachians on four experimental watersheds with contrasting vegetation. *Ecology* 54. 70-80, 1973
- 3) 西村武二: 山地小流域における養分物質の動き. *日林誌.* 55. 323-333, 1973
- 4) Elwood, J.W. & Henderson, G.S.: Hydrologic and Chemical Budgets at Oak Ridge, Tennessee. *Ecological Studies.* 10. pp. 31-51, Springer-Verlag. New York, 1975
- 5) Feller, M.C.: Nutrient movement through western hemlock-western red-cedar ecosystems in southwestern British Columbia. *Ecology* 58. 1269-1283, 1977
- 6) 堤利夫・福嶋義宏: 森林の水循環と水質に与える影響. 森林の環境調節作用 1. *環境科学研報.* B104-R12-6: 17-22. 1981
- 7) 升方ひろみ・小川房人: 河川の水質に対する植生の影響. 森林の環境調節作用 2. *環境科学研報.* B152-R12-8: 41-44. 1982
- 8) 黒田幸夫: 山地小流域における降水と流出水に関する研究. 京都大学修士論文. 1986
- 9) 岩坪五郎: 森林流出水に含まれる養分物質の濃度・量に影響を及ぼす要因について. *科研報告書(一般C)* 61560166. 1988
- 10) 堤利夫・福嶋義宏: 森林の水収支と流出水質に与える影響. 森林の環境調節作用 3. *環境科学研報.* B172-R12-7: 15-20. 1983
- 11) Parker, G.G.: Throughfall and stemflow in the forest nutrients cycle. *Adv. Ecol. Res.* 13. 58-135, 1983
- 12) 志水俊男・坪山良夫: 宝川流域における融雪流出水の水質特性. *日林誌.* 72. 171-174, 1990
- 13) 徳地直子・黒田幸夫・岩坪五郎: 森林生態系における溶存物質濃度・量の垂直的変化 (i) スギ人工林における塩素イオンとナトリウムイオンと土壌水の垂直的移動. *日林誌.* 73. 135-144, 1991
- 14) 広瀬顕・岩坪五郎・堤利夫: 森林流出水についての広域的考察 (1). *京大演報.* 60. 162-173, 1988

Résumé

Chemistry of precipitation and run-off water was studied in Kyoto University Forest of Ashiu. The effects of industrial pollution is negligible in this area. The mineral concentrations of run-off water were higher than precipitation, it suggests that they are concentrated by evapotranspiration and leached from soil. The concentration of nitrogen in run-off water were lower than precipitation, it is thought that nitrogen was taken by trees and adsorbed to soil.

At the adjacent watersheds, it differs significantly between the concentrations of mineral. Nitrogen and phosphorus concentrations do not differ between the watersheds.