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 および溪流の水質に及ぼす影響

浦川梨恵子^{*1}・戸田浩人²・生原喜久雄²

浦川梨恵子・戸田浩人・生原喜久雄：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溪流の水質に及ぼす影響 日林誌 87: 471~478, 2005 高齢のスギ・ヒノキ人工林小流域 (99 年生) における流域面積の約 20% の斜面下部の伐採が、養分動態に与える影響を明らかにするため、伐採の前後で渓流水量および土壌水分量の測定、土壌水、湧水および渓流水の水質分析を行った。伐採後、表層土壌 (0~10 cm) では土壌水分が減少し、下層 (30~60 cm) は湿潤状態であった。また、溪流からの流出量は年間約 100 mm 増加した。表層土壌水 (5 cm) の NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および K^+ 濃度は伐採 1, 2 年目の夏季に 3~7 倍に上昇したが、3 年目には伐採前の水準に戻った。渓流水でも夏季に NO_3^- 、 Ca^{2+} および Mg^{2+} 濃度が、伐採前同時期の約 1.5 倍に上昇し、分析を行ったすべてのイオンで濃度の季節変動が大きくなった。伐採後の土壌水中の NO_3^- -N 量は、30 cm 以深における増加が顕著で、伐採 3 年目でも伐採前の 4 倍以上を維持していた。伐採後、 NO_3^- -N 流出量は $4.0\sim 5.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 増加したが、土壌水中の NO_3^- -N の増加量と比較すると少ないことから、土壌中で生成した無機態窒素のすべてが溪流へ流出するわけではなく、土壌中での窒素の蓄積および消費が示唆された。

キーワード：渓流水質、森林小流域、人工林の高齢化、土壌水質、伐採実施

Urakawa, R., Toda, H., and Haibara, K.: Effects of Forest Cutting in a Lower Slope on Soil Water and Stream Water Chemistry in a Watershed of Old Japanese Cedar and Cypress Stands. J. Jpn. For. Soc. 87: 471~478, 2005 The effects of forest cutting on nutrient dynamics, soil water content and chemistry, and stream water discharge rates and chemistry were examined for three years after the partial (lower slope; 20% of total area) forest cutting of a watershed composed of artificial stands of old (99 years) Japanese cedar and cypress in Gunma prefecture, Japan. After the forest cutting, the soil water content in the surface soil layer (0~10 cm) decreased, although it increased in a deeper layer (30~60 cm). The annual stream water discharge increased by about 100 mm after forest cutting. Compared to the period before cutting, the concentrations of NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and K^+ in surface soil water (5 cm) also increased during the summers of the first two years by about 3~7 times. However, three years after forest cutting, the concentrations decreased to the same levels as those in the period before cutting. Similarly, the stream water concentrations of NO_3^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} increased 1.5 times. Seasonal changes in the concentrations of all analyzed ions in stream water increased in comparison with those before cutting. After forest cutting, the amount of NO_3^- -N in the 30~60 cm layer increased by four times the amount before cutting. Furthermore, this large amount persisted during the three consecutive years after the forest cutting. The NO_3^- -N export to stream water increased up to $4.0\sim 5.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ after cutting. However, the increase in the amount of NO_3^- -N leaching to stream was smaller than that in soil water; this indicates the great potential of soil as a medium for NO_3^- -N export. A higher amount of NO_3^- -N in deeper soil (>30 cm) suggests retention and/or consumption of this ion in the soil even after the forest cutting. **Key words:** aging of artificial forest, forest cutting, small forested watershed, soil water chemistry, stream water chemistry

I. はじめに

多面的な機能をもつ森林は人間生活にとって、必要不可欠な存在である。森林の機能を持続的に発揮していくため、森林の施業と養分動態の関係を明らかにしておく必要がある。

伐採は生態系への影響が最も大きい森林施業であり、北米を中心に各地で渓流水質および養分流出量への影響が報告され、多くの流域で NO_3^- -N をはじめとする溶存成分の濃度上昇および流出量増加が明らかにされている (Likens *et al.*, 1970; Corbett *et al.*, 1978; Martin *et al.*, 1985; Tiedemann *et al.*, 1988; Swank *et al.*, 2001)。しかし、そ

の程度は調査流域によって大きく異なっている。

Vitousek and Mellilo (1979) は、伐採後の地温上昇等で多量に生成された無機態窒素は溪流への流亡以外にも、アンモニア揮散や脱窒による大気中への放出、微生物バイオマスへの取り込み、土壌コロイドの吸着などさまざまな動態があり、これらの要因のバランスによって渓流水質が左右されるとしている。このため、伐採施業が森林生態系に与える影響を知るためには、渓流水質だけでなく、表層土壌から溪流までの一連の養分動態を把握する必要がある。これまで土壌水から渓流水までの水質変化をとらえた研究には、ライシメーターを用いた北米での例があり、皆伐後、土壌浸透水中の NO_3^- 濃度が急激に高まるが土壌層

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

¹ 東京農工大学大学院連合農学研究科 (183-8509 府中市幸町 3-5-8)

United School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu 183-8509, Japan.

² 東京農工大学大学院共生科学技術研究所 (183-8509 府中市幸町 3-5-8)

Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183-8509, Japan.

(2005 年 2 月 24 日受付; 2005 年 7 月 22 日受理)

位によって差があること (Sollins and McCorison, 1981), 硝化の促進により土壌の酸性化が進行し, 土壌水中の Al^{3+} 濃度が上昇すること (Dahlgren and Driscoll, 1994) などが明らかにされている。しかし, 欧米とは気候や母材が大きく異なるわが国における報告事例は非常に少ない。

わが国における森林土壌中の窒素動態に関する研究の多くは, 山地の斜面位置との関係に注目しており, 斜面位置によって窒素の循環様式が異なることが明らかにされている。一般に土層が薄く乾燥状態にある斜面上部では, 表層に C/N 比の高い堆積腐植層が発達し, 微生物によって分解された窒素を微生物が再び同化するため, 無機態窒素は土壌中に放出されにくい (武田, 1994)。また無機化の形態はアンモニア化成作用が主であり (徳地, 1996), 生成したアンモニア態窒素が土壌コロイドに吸着されるため, 無機態窒素の根系外への流亡は少ない。

一方, 水分の潤沢な斜面下部では窒素無機化が活発で (戸田・生原, 1994; 小柳ら, 2004), 硝化がその大部分を占めているため (徳地, 1996; 市川ら, 2003), アニオンである硝酸が土壌水に溶けて系外へ流出しやすい (小柳ら, 2004)。したがって, 急峻な山地に成立しているわが国の多くの人工林では, 伐採位置によって森林の養分動態および渓流水質への影響が異なり, 特に斜面下部の窒素動態の変化は渓流水質に強く影響すると考えられる。

樹木の成長と養分吸収の関係をみると, 一般に若齢期では林齢とともに樹体の現存量が増加するため, 樹体に固定される養分量が増加するが, 高齢林ではその増加量が少なくなり, 新たに樹体へ固定される養分量は減少していく (大島, 1996)。一方スギ林の土壌において, 有機物の分解で生じた塩基成分は林齢の増加とともに土壌中に蓄積すること (澤田・加藤, 1991) や, 窒素無機化量は, 林分が高齢化しても減少しないこと (小柳ら, 2004) が示されており, スギ高齢林の土壌中の養分量は若齢林に比較して多くなると考えられる。このことから, 土壌養分の豊富な高齢化したスギ林流域を伐採すると, 裸地化による地温の上昇で有機物の無機化が活発になり, 中・壮齢林での伐採と比較してより多量の養分が流出するおそれがある。

今日のわが国では木材価格が低迷しているため, 木質系資源の生産よりも森林のもつ水源のかん養や土砂の流出・崩壊の防止等の公益的機能が期待されている。このことから今後, 人工林では, 相対的に育林コストの低い長伐期施業へ移行し, 伐採方法は大面積伐採から小面積伐採あるいは択伐に, 更新方法は単純一斉林から複層林や混交林に移行していくものと思われる (林野庁, 2003)。以上のことから, 高齢人工林における伐採方法や流域内の伐採位置の違いによる養分動態および渓流水質への影響を把握しておく必要がある。

本研究では, 北関東に位置する東京農工大学フィールドミュージアム (FM) 大谷山において, 高齢化したスギ・ヒノキ人工林流域下部の伐採が水収支および土壌水, 湧水, 渓流水の水質に及ぼす影響について調査した。

図-1. 調査地の概況
Topography of study site.

---, Boundary of cedar stand and cypress stand; —, Boundary of cutting area and reserved cedar stand. Soil water sampling profile: ○, Before and after cutting; ●, After cutting only; ×, Spring water sampling point.

II. 調査地の概況および調査方法

調査地は群馬県勢多郡の東京農工大学 FM 大谷山内の 1.80 ha 人工林小流域である。図-1 に調査地の概況を示す。斜面上部にヒノキ (0.76 ha), 中部と下部にスギ (1.04 ha) が植栽されており, 林齢は 99 年 (2005 年現在) である。ヒノキおよびスギ林分の立木密度はそれぞれ 645, 487 本 ha^{-1} , 平均樹高は 25, 29 m, 平均胸高直径は 33.5, 38.5 cm, 胸高断面積合計は 59.2, 59.9 $m^2 ha^{-1}$ で, 母材は秩父中古生層の砂岩・粘板岩, 土壌型はスギ林が B_0 型, ヒノキ林が $B_{D(d)}$ である。2000 年 11 月に流域下部のスギ林 0.33 ha (流域面積の 18%), 流域全体の胸高断面積合計の 18% にあたる林分を伐採し, 樹幹のみ流域外に搬出した。枝条は翌年の春に, 伐採地内の約 50 カ所に幅約 4 m 高さ約 80 cm に積み上げ, 横条地ごしらえを行い, 2001 年 5 月にスギを再植林した。

土壌水は, ポーラスセラミックカップ (直径 1.8 cm, 長さ 5 cm) を用いた自作の簡易採水器 (戸田ら, 1985) を土壌断面の深さ 5, 15, 50 cm に横向きに挿入し, ポンプで -40 cm Hg ($-5.3 \cdot 10^4$ Pa 相当) に減圧し, 1~2 日吸引することにより採水した。土壌水採取のための土壌断面を, 伐採前は 4 断面作成した (1999 年 7 月) が, 伐採および木材の搬出に伴う林地の攪乱により, 場所による測定値のばらつきが大きくなると考えられたため, 伐採後は 12 断面作成した (2001 年 4 月)。化学分析に必要な水量を得るため, 隣り合う 2 断面の土壌水を混合して 1 試料とした。土壌水の採水は伐採前 2 年間 (1999 年 7 月~2000 年 8

月), 伐採後3年間(2001年4月~2003年11月)にわたり土壌が凍結する冬季を除き, 原則として月1回行った。土壌水の採取を行った日に, 湧水の採水も行った。湧水はポリ瓶に直接採水した。流域最下端に設置したVノッチ式量水堰にて, 自記記録式の水位計を用いた流出水量の測定と, 原則として週1回の渓流水の採水を行った。降水量は調査地近傍の転倒式雨量計で測定した。水質分析用の降水試料は露場に設置した直径30 cmのプラスチック製ローでポリバケツに集水し, 週1回採取した。

土壌中の水分状態を把握するため, 毎月の土壌水採取日に土壌水採取地点の近くで5, 15, 50 cm深の土壌を採取し, 含水比を測定した。また, 伐採前は1999年9月, 伐採後は2004年5月に, 5, 15, 50 cm深から100 mL採土円筒試料を採取し, 遠心法によって初期しおれ点に相当するpF 3.8時の体積水分率を求めた。同時に400 mL採土円筒試料を採取し, 細土量の測定も行った。毎月測定している含水比を細土量から体積含水率に換算し, さらにpF 3.8体積含水率を差し引くことで, 土壌中で移動, または植生に利用されやすい水分量を求めた。この際, 5 cm深を0~10 cm, 15 cm深を10~30 cm, 50 cmを30~60 cmの層位にあてはめ, haあたりの水分量を算出した。この水分量に土壌水濃度を乗じ, 土壌水中に含まれる溶存イオン量として, 伐採前後の比較を行った。

全ての水質分析用試料は採水後すみやかにガラス電極法(東亜電波工業 HM-60S)でpHの測定を行い, 5°C以下の冷蔵庫で保存した。各溶存イオン濃度の分析方法は, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 濃度は5B濾紙で濾過を行い, 濃度が1,000 mgSr L^{-1} になるように SrCl_2 を添加したのち原子吸光法(日立170-10)で, または0.20 μm のシリンジフィルターで濾過後, イオンクロマト法(島津 HIC-6A)で分析を行った。 NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 濃度は0.20 μm のシリンジフィルターで濾過後, イオンクロマト法で測定した。また, HCO_3^- 濃度はpH 4.8アルカリ度より推定した(半谷・小倉, 1995)。

本調査流域では長期にわたり降水量, 流出水量および渓流水質の調査が継続されており, これらのデータを用いて, 伐採前後の流出水量および溶存イオン流出量の比較を行った。年間の降水量および流出水量は1979年から2003年までのデータを用い, 1979年11月~1987年10月を生原(1992), 1987年11月~1993年10月までをOhrui and

Mitchell(1997)から引用した。年間の溶存イオン流出量は1987年から2003年までのデータを用い, 1987年11月~1993年10月を大類(1995)から引用した。水量や水質の測定に欠測や異常のある年を除外したため, 流出水量は伐採前20年分, 伐採後3年分, 溶存イオン流出量では伐採前9年分, 伐採後3年分のデータで比較を行った。

III. 結果および考察

1. 流域の土壌水分に及ぼす伐採の影響

本流域は夏季に降水が多く, 樹木の生育期である5~10月の半年間に年間降水量の約80%が集中する。伐採前(1979年11月~2000年10月)と伐採後(2000年11月~2003年10月)の平均の年間水収支(表-1)をみると, 年間の降水量に対する流出水量の割合(年流出率)は, 伐採前の50%から伐採後の59%と有意な増加がみられた。また, 伐採前約20年間の年間の降水量と流出量の関係式から, 伐採がなかったと仮定したときの流出水量を推定すると, 伐採によって80~150 mm流出水量が増加した。わが国の森林では皆伐を行うと翌年には年間流出量がおおむね100~300 mm増加するといわれている(服部, 1993)。本調査における伐採比率は20%弱であるにもかかわらず, 3年間の平均で年間100 mm近くの流出増加がみられ, 流域下部の伐採が流出水量に大きな影響を及ぼしたといえる。

図-2に土壌におけるpF 3.8までの体積含水率の月変化を示す。伐採前後とも季節変化は明らかではないが, 伐採による影響が深さ別の含水率の違いにあらわれた。0~10 cm深では伐採前年の2000年には $0.35 \sim 0.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の含水率が伐採後は $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以下になった。一方, 30~60 cm深では伐採前の $0.1 \sim 0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ から伐採後は $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上になり, わずかではあるが年々上昇していく傾向がみられた。10~30 cm深では伐採後に含水率の低下がみられたが, 30~60 cm深と同様にその後上昇し, 30~60 cm深とほぼ同じ含水率の期間もあった。このことは, 表層土壌では直射日光の増加にともなう地温の上昇によって地表面蒸発が増加したこと, また有機物の急激な分解や, 直接降

表-1. 伐採前後の水収支

Annual water budgets before and after cutting.

	Annual precipitation (mm yr ⁻¹)	Annual discharge (mm yr ⁻¹)	Annual runoff ratio (%)
Before cutting	1611 ± 318 ^a	830 ± 265 ^a	50.4 ± 7.5 ^a
After cutting	1660 ± 92 ^a	972 ± 55 ^b	58.6 ± 1.1 ^b

Sampling period: Before cutting, Nov. 1979~Oct. 2000, except Nov. 1993~Oct. 1994, 20 years; After cutting, Nov. 2000~Oct. 2003, 3 years. $\pm$, SD. Means followed by different letters are significantly different (Welch's test, $p < 0.05$).

図-2. 土壌体積含水率の季節変化 (pF 3.8 まで)
Seasonal change of volume water content in soil
(under pF 3.8).

●, 0~10 cm; ◐, 10~30 cm; ○, 30~60 cm in soil.

図-3. 土壌水および渓流水の溶存イオン濃度の季節変化

Seasonal changes of dissolved ion concentration in soil water and stream water.

●, 5 cm; ◐, 15 cm; ○, 50 cm in soil water; -△-, Stream water.

雨にともなう雨滴浸食により土壌構造の破壊が起こり (小林, 1982), pF 3.8 までの保水性が低下し, 表層土壌の含水率が低下したことが原因と考えられる。一方, 下層土壌では蒸散を担っていた樹木が伐採されたため余剰の水分が保持されているものと考えられる。以上のように, 伐採の及ぼす土壌の水分状態への影響が表層と下層で大きく異なることがわかった。

2. 土壌および渓流水の水質に及ぼす伐採の影響

土壌水および渓流水の溶存イオン濃度の伐採前後の季節変化を図-3 に示す。渓流水の NO_3^- および Ca^{2+} の濃度変化はスケールを拡大して図-4 にも示した。伐採前の土壌水の pH は, 5 cm 深で pH 5.1~5.8, 15 cm および 50 cm 深では pH 4.5~5.2 の間で推移していたが, 伐採後, 1 年目の 6~8 月に 5 cm 深では 5.0 以下に低下した。後述するが, このことは伐採初期の表層土壌で硝化が盛んになり, H^+ 生成が活発化したことを示している。しかし伐採 3 年目になると, すべての深度で pH が上昇し, 伐採前よりも高くなった。渓流水の pH は, 伐採前は 6.3~6.8 の間で推移してい

図-4. 渓流水の NO_3^- および Ca^{2+} 濃度の季節変化
Seasonal changes of NO_3^- and Ca^{2+} concentration in stream water.

—□—, NO_3^- ; —■—, Ca^{2+} .

たが, 伐採後は pH 6.0~7.2 と変動の幅が大きくなった。しかし, 土壌水よりも pH 値がおおよそ 1 以上高く, 表層土壌で生成された H^+ は伐採後も土壌水の浸透過程で中和されていた。

土壌水の NO_3^- および Ca^{2+} 濃度は, 伐採 1 年目の 5 cm 深で夏季の濃度上昇が顕著にみられ, 伐採前年の同時期の 3.5 倍に, 15 および 50 cm 深でも 1.5 および 3 倍に上昇した。伐採 2 年目の夏季の NO_3^- および Ca^{2+} 濃度は 1 年目よりも低くなり, 伐採 3 年目ではほぼ伐採前の水準に戻った。このように, 土壌水の NO_3^- および Ca^{2+} 濃度は伐採後 2 年間の夏季に高く, 特に表層で顕著だった。

渓流水の NO_3^- および Ca^{2+} 濃度は土壌水よりも低く, 伐採後の濃度上昇も土壌水に比較して小さいが, 土壌水の NO_3^- , Ca^{2+} 濃度が伐採前の水準に戻った伐採 3 年目においても, 渓流水の夏季の濃度は伐採前よりも高くなった (図-4)。一方で, 伐採 1~2 年目の冬季の濃度は伐採前よりも低かった。

土壌水の Mg^{2+} 濃度も NO_3^- や Ca^{2+} と同様に, 伐採 1 年目の夏季には伐採前の 2~4 倍になり, 渓流水の濃度よりも高くなった。しかし, 伐採 3 年目には濃度が低下し, 伐採前と同様に, 渓流水の濃度よりも低くなった。渓流水における Mg^{2+} 濃度の伐採 1 年目の夏季の上昇は明瞭ではないが, 2 年目以降の夏季では伐採前よりも 10% 程度上昇した。

5 cm 深の土壌水の夏季の K^+ 濃度は伐採 1 年目に伐採前年の 4 倍に上昇したが, NO_3^- , Ca^{2+} および Mg^{2+} と同様, 年々濃度は低下し, 伐採 3 年目には伐採前年の水準に戻った。渓流水の K^+ 濃度に伐採による影響はみられなかった。

土壌水の Na^+ 濃度は 50 cm 深で伐採 1 年目に約 1.5 倍に上昇する一方, 5 cm 深では低下した。渓流水の Na^+ 濃度は伐採後低下したが, 特に冬季に顕著な低下がみられた。

土壌水の Cl^- 濃度は, 伐採 1 年目の春にすべての深度で濃度上昇がみられ, その後次第に低下し, 伐採 2 年目には伐採前よりも低くなった。渓流水の Cl^- 濃度は伐採 2 年目および 3 年目の冬季に低下した。渓流水の SO_4^{2-} 濃度も

図-5. 伐採前後の溶存イオン濃度の垂直変化 (8月)
Vertical changes of major ion concentration before and after cutting (August).

Cl⁻と同様に、伐採後は冬季のみ濃度低下がみられた。土壤水のSO₄²⁻濃度の伐採による影響は明瞭ではなかった。

以上のように伐採後のNO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺およびK⁺濃度は、土壤水で夏季に大きく上昇し、伐採後に有機物の無機化が促進したことを強く反映していると考えられる。渓流水でも土壤水ほど明瞭ではないが、NO₃⁻、Ca²⁺およびMg²⁺濃度が夏季に上昇する傾向がみられ、濃度上昇は、土壤水で濃度が低下した伐採3年目も継続していた。一方、図-3で示したすべての渓流水の溶存イオンでみられた伐採後冬季の濃度低下は、林地の裸地化による地温の低下や、表層土壌の乾燥・凍結・積雪などの環境により、冬季の微生物の活動が伐採前よりも抑制されたためと考えられる。また、湧水が河道で融雪による希釈を受けたことも要因として挙げられる。

微生物が年間で最も活発に活動する8月の、伐採前2000年と伐採後2001年の土壤水から渓流水までの溶存イオン濃度の垂直的变化を図-5に示す。伐採前後とも、どの深度でもカチオンとアニオンのバランスはおおむねとれていた。土壤水の主要カチオンはCa²⁺、主要アニオンはNO₃⁻で、Ca²⁺はカチオン合計の60~80%、NO₃⁻はアニオン合計の60~90%を占めていた。湧水および渓流水の主要カチオン、主要アニオンはそれぞれNa⁺、HCO₃⁻で、両イオンともカチオン合計またはアニオン合計の約50%を占めていた。

伐採前の溶存イオン濃度の垂直変化をみると、合計濃度は15cm深が最も高いが、50cm深ではその1/2程度に低下した。湧水、渓流水のNO₃⁻およびCa²⁺濃度は土壤水よりも低い、土壤深部で母材の化学風化により生成されたHCO₃⁻とNa⁺(大類ら, 1993)の濃度が上昇したため、溶存イオンの合計濃度が再び上昇した。

伐採後の濃度の垂直変化は、表層土壤水の合計濃度がもっとも高く、深くなるにつれ合計濃度が順次減少した。土壤水のNO₃⁻およびCa²⁺濃度が伐採前と比較して全深度で2~3倍に上昇し、また全体に占める割合は小さいも

図-6. 土壤水、湧水および渓流水中のNO₃⁻濃度とpHの関係
Relationships between NO₃⁻ and pH in soil water, spring water and stream water.

Relationships between NO₃⁻ and pH in soil water, spring water and stream water.

Before cutting : ●, 5 cm ; ▲, 15 cm ; ■, 50 cm in soil water ; ×, Spring water ; ◆, Stream water. After cutting : ○, 5 cm ; △, 15 cm ; □, 50 cm in soil water ; ■, Spring water ; ◇, Stream water.

の、Mg²⁺およびK⁺濃度もそれぞれ1.5~3倍、2~7倍に上昇したため、土壤水のアニオンおよびカチオンの合計濃度は伐採前の2~3倍となった。湧水および渓流水のNO₃⁻およびCa²⁺濃度は伐採前の1.5~2倍になる一方で、Na⁺濃度が10~20%減少したため、アニオンおよびカチオンの合計濃度の変化は明らかではなかった。伐採によってアニオンではNO₃⁻、カチオンではCa²⁺、Mg²⁺およびK⁺濃度が土壤水で大きく上昇したものの、湧水および渓流水でのこれらのイオンの濃度上昇は土壤水と比較して小さかった。

図-6に伐採前年(2000年)と、伐採1年後(2001年)の土壤水、湧水および渓流水のNO₃⁻濃度とpHの関係を示す。土壤水では伐採後、NO₃⁻濃度が0.5 mmol/L以上に上昇するとpHが5以下になる傾向がみられたが、伐採前ではNO₃⁻濃度が0.5 mmol/L以下でもpH 5以下の場合があり、pHの最低値は伐採前後で変わらなかった。一方、渓流水および湧水のNO₃⁻濃度およびpHは変化の幅が小さく、伐採前後で違いはみられなかった。

図-7にNO₃⁻濃度とCa²⁺、Mg²⁺、K⁺およびNa⁺濃度の合計との関係を示す。土壤水、湧水、渓流水とも伐採前後を通じておおむね1:1ラインよりも上部にあり、有機物の分解で生成されたNO₃⁻が土壤水中に溶出しても、それと同量以上の塩基が放出されていた。このことは、伐採後、土壌中の硝化作用で生成したH⁺の多くが、交換性塩基の放出によって中和されるため、NO₃⁻濃度の上昇にともなってpHが一様に低下するわけではないことを示している。また、土壤水中のCa²⁺、Mg²⁺、K⁺およびNa⁺濃度の合計とCa²⁺濃度の間には直線関係が認められ($y = 0.74x$, $r^2 = 0.98$, $p < 0.005$)、このことから、放出される塩基イオ

1.5 kg ha⁻¹ yr⁻¹ 増加した。一方、Na⁺ および Cl⁻ 流出量の伐採による影響は明らかではなかった。

以上のように、伐採後の NO₃⁻-N 流出量は年間 4.0~5.0 kg ha⁻¹ yr⁻¹ の増加がみられた。一方、今回の伐採で林地に残された枝条に含まれる窒素量は 220 kg ha⁻¹ (戸田ら, 1991 より算出) で、伐採前から堆積していた A₀ 層に含まれる窒素量 (小柳, 2002) と合わせると、710 kg ha⁻¹ もの有機態窒素が伐採直後の林床に堆積しており、さらに伐採後の 1 年間でこの枝条から放出された窒素量は 120 kg ha⁻¹ と算出されている (未発表)。しかし、この窒素量と比較すると、溪流からの窒素流出の増加は著しく少ない。近年、酸性雨等による大気からの窒素負荷の増加が森林生態系や溪流水質に与える影響を明らかにするため、¹⁵NH₄⁺ や ¹⁵NO₃⁻ を林床に添加する実験が行われている。それによれば、添加された N のうち植生に吸収される部分は少なく、その大部分が有機物層や鉱質土壌層に保持されることが明らかにされている (Nadelhoffer *et al.*, 1999; 若松ら, 2004)。本流域での伐採によって流域外に持ち出されたのは幹のみであり、C/N 比の高い枝条が多量に林地に残されたため、微生物による窒素の不動化 (有機化) (武田, 1994) が進行する。また、森林流域下部の平地等、水の移動が少ない立地では還元状態になりやすく、脱窒作用が起こりやすい (木平ら, 1997) といわれており、伐採後の 50 cm 深の土壌水で NO₃⁻ 濃度および含水率の上昇がみられることから、脱窒活性が高まった可能性もある。さらに、SO₄²⁻ と比較するとわずかではあるが、土壌の陰イオン交換基が NO₃⁻ を吸着 (今井・岡島, 1980) し、土壌中での移動を遅らせる (Kowalenko and Yu, 1996) との報告もある。以上のことから本流域では、伐採後に生成された NO₃⁻ がただちに流域外へ流出することではなく、上記のような生物学的および化学的な作用を受け、下方への浸透および系外への流出が減少または遅延していると考えられる。

本研究において土壌水の採水方法として用いたポーラスカップ法では溶存イオンの移動量を把握することができないため、今後はイオン交換樹脂やテンションフリーライシメーター等を用いた土壌中での NO₃⁻-N をはじめとする溶存イオンの移動量の調査や、表層土壌における窒素無機化速度の調査を行い、土壌中での NO₃⁻-N の動態と渓流水からの溶存イオンの流出との関係を明らかにする必要がある。

IV. ま と め

高齢化したスギ・ヒノキ林小流域の斜面下部のスギ林を流域面積の 20% 弱を伐採した結果、伐採後 2 年間の夏季に、土壌中で硝化が活発に行われていることを反映して、土壌水の NO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ および K⁺ 濃度が表層を中心に 3~7 倍上昇し、表層土壌で pH の低下がみられた。しかし、伐採 3 年目には土壌水の溶存イオン濃度は伐採前の水準に戻った。伐採によって表層では地表面蒸発量の増加や保水性の低下により土壌水分が減少する一方、下層では湿

図-9. 年間降水量と溶存イオン流出量の関係

Relationships between annual precipitation and output of dissolved nutrients.

Data used for before cutting is from Nov. 1987 to Oct. 1993, Nov. 1994 to Oct. 1995, and Nov. 1998 to Oct. 2000. Data used for after cutting is from Nov. 2000 to Oct. 2003. Each regression line is derived from the data before the cutting ($n=9$). Close, Before cutting; Open, After cutting.

潤状態になっていることが明らかになった。土壌水中の濃度と土壌含水率から求めた 0~60 cm 深の土壌水中 NO₃⁻-N 量は伐採後、伐採前の 2 倍以上となり、特に 30~60 cm 深での増加が顕著で、伐採 3 年目でも伐採前の 4 倍以上の NO₃⁻-N 量が存在していた。以上のことから、伐採にともない伐採直後は表層で硝化が活発になるが、時間の経過とともに表層での硝化は減少し、下層土壌では養分吸収を担う植生の根の分布がないために、NO₃⁻-N 量が増加していると考えられる。

渓流水の NO₃⁻ 濃度および NO₃⁻-N 流出量は、表層の土壌水で NO₃⁻ 濃度の低下がみられた伐採 3 年目でも、引き続き濃度上昇や流出増加がみられた (図-3, 図-9) ことから、渓流水からの NO₃⁻-N 流出は土壌下層 (30~60 cm) に保持されている NO₃⁻-N の影響を受けていると考えられる。また、NO₃⁻ 以外にも、渓流水における Ca²⁺ や Mg²⁺ 濃度の上昇、流出水量の増加、および土壌含水率の土壌下層での上昇は伐採 3 年目もみられたことから、今後も伐採の影響が持続していくものと考えられる。これからの調査を継続し、伐採の影響のおよぶ期間や、その後の植生の回復による養分動態の変化を明らかにしていく必要がある。

本研究の一部は科学研究費 (14360083) によって行った。本研究を進めるにあたり、東京農工大学 FM 大谷山の桑原繁枝官をはじめとする職員の方々には試料採取や気象観測、現地調査等に多大なご協力をいただきました。また、(財) 新潟県環境衛生研究所の小柳信宏博士には、貴重なデータの提供ならびにご助言をいただき、東京農工大学の

澤野 裕君, 宍戸はるかさんには現地調査と試料分析に協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Corbett, E.S., Lynch, J.A., and Sopper, W.E. (1978) Timber harvesting practices and water quality in the Eastern United States. *J. For.* 76: 484-488.
- Dahlgren, R.A. and Driscoll, C.T. (1994) The effects of whole-tree clear-cutting on soil processes at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA. *Plant Soil* 158: 239-262.
- 生原喜久雄 (1992) 森林流域における渓流水質の形成. (現代の林学・6 森林水文学. 塚本良則編, 319 pp, 文永堂, 東京). 215-237.
- 生原喜久雄 (2000) 森林土壌生態系での無機成分の動態. 土壌の物理性 85: 51-63.
- 半谷高久・小倉紀雄 (1995) 第3版 水質調査法. 335 pp, 丸善, 東京.
- 服部重昭 (1993) 森林と蒸発散. (砂防学講座第2巻 土砂の生成・水の流出と森林の影響. 砂防学会監修, 348 pp, 山海堂, 東京). 171-193.
- 市川貴大・高橋輝昌・浅野義人 (2003) 同一斜面に隣接するスギおよびヒノキ人工林における生態系内の養分動態の比較. *日林誌* 85: 222-233.
- 今井弘樹・岡島秀夫 (1980) 土壌の養分保持能に関する研究 (第3報) NO_3^- 吸着について. *土肥誌* 51: 102-106.
- 小林繁男 (1982) 森林の皆伐に伴う土壌の変化. *ペドロジスト* 26: 150-163.
- 木平英一・楊 宗興・戸田任重・八木一行・窪田順平・塚本良則 (1997) 森林流域谷底部土壌の脱窒作用— NO_3^- -N 窒素安定同位対比による解析—. *日林誌* 79: 83-88.
- Kowalenko, C. G. and Yu, S. (1996) Assessment of nitrate adsorption in soils by extraction, equilibration and column-leaching methods. *Can. J. Soil Sci.* 76: 49-57.
- 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. *Ecol. Monogr.* 40: 23-47.
- Martin, C.W., Noel, D.S., and Federer, C.A. (1985) Clearcutting and the biogeochemistry of streamwater in New England. *J. For.* 83: 686-689.
- Nadelhoffer, K.J., Emmett, B.A., Gundersen, P., Kjnaas, O.J., Koopmans, C.J., Schleppi, P., Tietema, A., and Wright, R.F. (1999) Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature* 398: 145-148.
- 大畠誠一 (1996) 森林の物質生産機構. (森林生態学. 岩坪五郎編, 306 pp, 文永堂, 東京). 84-114.
- 大類清和 (1995) 森林小流域での渓流水質の形成機構に関する研究. 平成6年度東京農工大学博士論文.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲 (1993) 森林集水域での土壌から溪流への水質変化. *日林誌* 75: 389-397.
- Ohrui, K. and Mitchell, M.J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecol. Appl.* 7: 391-401.
- 小柳信宏 (2002) 森林小流域における土壌系での炭素および窒素の動態バランスに関する研究. 平成13年度東京農工大学博士論文.
- 小柳信宏・戸田浩人・久保井喬・生原喜久雄 (2004) 北関東地方の高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域における炭素と窒素の動態特性. *日林誌* 86: 134-143.
- 林野庁編 (2003) 図説 森林・林業白書 平成14年度. 284 pp, 日本林業協会, 東京.
- 澤田智志・加藤秀正 (1991) スギおよびヒノキ林の林齢と土壌中の塩基の蓄積との関係. *日土肥誌* 62: 49-58.
- Sollins, P. and McCorison, F.M. (1981) Nitrogen and carbon solution chemistry of an old growth coniferous forest watershed before and after cutting. *Water Resour. Res.* 17: 1409-1418.
- Swank, W.T., Vose, J.M., and Elliott, K.J. (2001) Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *For. Ecol. Manage.* 143: 163-178.
- 武田博清 (1994) 森林生態系において植物-土壌系の相互作用が作り出す生物多様性. *日生態誌* 44: 211-222.
- Tiedemann, A.R., Quigley, T.M., and Anderson, T.D. (1988) Effects of timber harvest on stream chemistry and dissolved nutrient losses in Northern Oregon. *Forest Sci.* 34: 344-358.
- 戸田浩人・生原喜久雄 (1994) 森林土壌中における窒素無機化の反応速度論的解析 (I) 林齢・斜面位置・深さ別の窒素無機化特性. *日林誌* 76: 144-151.
- 戸田浩人・生原喜久雄・相場芳憲 (1985) 簡易採水器 (吸引報) で採水した土壌水の特性. 96回日林論: 253-256.
- 戸田浩人・生原喜久雄・新井雅夫 (1991) スギおよびヒノキ壮齢林小流域の養分循環. 農工大演報 28: 1-22.
- 徳地直子 (1996) 竜王山森林試験地の斜面上の異なる位置における窒素循環機構. 京大演報 68: 9-24.
- Vitousek, P.M. and Melillo, J.M. (1979) Nitrate losses from disturbed forests: patterns and mechanisms. *Forest Sci.* 25: 605-619.
- 若松孝志・高橋 章・佐藤一男・久保井喬・柴田英昭 (2004) 窒素安定同位体を用いた大気由来 NH_4^+ の森林土壌中における初期動態の解析. *日土肥誌* 75: 169-178.
- Weis, W., Huber, C., and Gttlein, A. (2001) Regeneration of mature Norway spruce stands: early effects of selective cutting and clear cutting on seepage water quality and soil fertility. *Sci. World* 1: 493-499.
- 図子光太郎・生原喜久雄・相場芳憲 (1992) 2種の陰イオンを付加した森林土壌溶液における陽イオンの動態. *日林誌* 74: 185-193.