

総説 (Review)

森林における窒素成分の動態および森林管理と渓流水質

森田剛史, 相原敬次, 石綿進一
(企画部, 環境保全部)

Origin and behavior of nitrogenous components in forest stream water and effect of forest management

Takeshi MORITA, Keiji AIHARA, Shin-ichi ISHIWATA
(Planning Division, Environmental Conservation Division)

キーワード: 窒素, 動態, 渓流水, 森林管理

1 はじめに

森林は、木材生産としての機能の他に土砂流出防止、水源涵養、水質浄化および野生動植物の生息地などの公益的機能が注目されるようになってきている。このため、森林管理（森林整備）と溪流（河川）水質との関係、とりわけ窒素成分との関係は、水道水の安全性や良好な生態系の保全などの点から重要な課題となっている。

ここでは、森林内における窒素成分の動態について解説するとともに森林管理と渓流水の硝酸性窒素に関する文献を総説する。

2 森林における窒素の動態

2.1 窒素の動態

森林への窒素成分の主な供給源は、微生物（窒素固定菌）による大気中の窒素の固定と降水（林外雨、林内雨、樹冠流）である。微生物による有機態窒素の無機化は主に土壌表層部で行われ、アンモニア態、亜硝酸態、硝酸態へと変化（硝酸化）する。陽イオンのアンモニア態窒素はマイナスに荷電している土粒子表面に吸着されて移動しにくい。一方、陰イオンの硝酸態窒素（硝酸性窒素）は水に溶存して移動しやすい。そのため森林の土壌溶液や渓流水に含まれる無機態窒素の多くは硝酸性窒素であり、アンモニア態窒素は非常に低濃度である。

窒素固定菌は共生と非共生に大別され、共生の窒素固定菌はマメ科植物の根粒菌として森林の遷移初期には窒素の供給に大きな寄与を示すが、成熟した森林での寄与は小さい。非共生の固定菌による固定速度は年間で数 kg/ha から 20 ~ 30kg/ha 程度である。この固定速度は温度依存性が高く、温度の上昇に伴い速くなる。

2.2 窒素の供給

降水による供給量は、京都周辺での堤（1987）の調査によれば無機態の窒素で 2 ~ 9kg/ha/yr、有機態の窒素で 5 ~ 8 kg/ha/yr、合計 10kg/ha/yr 程度である。また、河田（1989）が降水を林外雨、林内雨、樹冠流別に分けて調査した結果によれば、無機態（アンモニア態および硝酸態）の窒素供給は、林外雨としては 3.6 ~ 6.9kg/ha/yr で、林内雨になると 3.8 ~ 25.1kg/ha/yr、樹冠流では 0.3 ~ 1.7kg/ha/yr で林内雨も降雨と同じ程度かそれ以上の値である。

岩坪・堤（1968）は降雨が森林を通過し河川に流出することによる成分濃度の変化を調べた。その結果、窒素成分については林内雨、地表流、地中流（土壌水）、林外雨、溪流の順に濃度が低くなっており、降雨とともに森林へ供給された窒素成分は森林で変化していることを示している。

塚本（1992）は北関東地方の森林で土壌水の溶存元素濃度の垂直分布と渓流水の溶存濃度を 1 年間にわたって調べた。その結果、土壌表層で 1.2 mg/L 程度の硝酸性窒素の濃度は深さ 80cm の土壌では 0.8mg/L 程度になるが、渓流水の濃度は 1.4 mg/L とほぼ表層に近い土壌水と同程度になっていることを認めた。このことから土壌に入ってから窒素濃度の垂直変化は比較的小さいものと考えられる。

2.3 降雨にともなう流出と水質

森林に降った雨は、様々な経路をたどって渓流水となって流出する。森林は空間的に多層な構造と草本からなる下層植生から構成されている。

雨水は森林の表面を形成する樹冠へ到達する。2 ~ 3mm 程度の降雨では、林地に到達することなく保持され蒸発する。樹冠を通過した降水は、

林内雨，樹幹流となって，林床に到達する。この際，葉や幹に付着した降下物質や溶出成分を取り込み，濃度を高めたり化学変化を受ける。降水量に対する林内雨，樹幹流の割合は，それぞれ 60～70%，5～20% であるという（荒木，1995；川畑，1973；服部ら，1982）。林内雨は樹冠から落下した後も様々な植物との接触を繰り返しながら，濃度や成分を変化させながら林床に達することになる。森の土には落ち葉の層があり，裸地になった畑の土のように雨によって土がつぶれることが少なく，雨が土によく浸透する。森林では地表被覆物（植生）が雨滴の浸食作用を和らげる。また地表面粗度を大きくして表面流の発生の防止や地表流速を抑制することにより，土砂流出防止に役立つ。森林に降った雨水は木々を伝わり，あるいは地中へ浸透しゆっくり流出し，河川の流量を安定に保っており，水源涵養の面から森林の重要な機能の一つといえる。

村井・岩崎（1975）は林地，伐採跡地，草生地および裸地における地被別の雨水の浸透し易さ（浸透機能）の指標である最終浸透レートについて調べた。その結果，林地の平均が 258.2mm/hr，伐採地跡地の平均が 158.0mm/hr，草生地の平均が 127.7mm/hr，裸地の平均が 79.2mm/hr と林地は草地や裸地と比較して雨水の浸透機能が大きいことを確認した。

林地における雨水の浸透機能が大きい要因の一つとして腐植層がある。早瀬ら（1993）は実際に降雨のあった日の雨量と流出量の経時変化を調べ，腐植層の有無によって流出量が緩和されることをハイドログラフで端的に示した。

平田・村岡（1988）は降雨開始から降雨終了後にわたる連続した渓流水の成分を調べ，降雨前後でその成分が顕著に変化していることを認めた。硝酸性窒素に限ってみると，降雨中の時間帯での濃度は低減するものの，降雨終了後は再び上昇し降雨前よりも濃度が高くなる状況が確認されている。また大類（1994）は渓流水の流量と濃度との関係について流量の増加時，減少時でヒステリシス現象があり，表面流出，中間（表層土壌）流出，地下水流出といった異なる各流出成分の構成比の変化が，水質の変化となって現れていると述べている。これについては，Sklash and Farvolden（1979）が行った安定同位体元素を用いた研究を引用し，安池・宮永（1998）が次のように述べている。すなわち，流出のピークを構成する成分には地中に貯蔵されている水の寄与がきわめて大きく，渓流水の水質は保水量とその分布などの特性によって大きく影響されるとしている。

降水は渓流水となって流出するまで，様々な経

路をたどるため濃度や成分は流域の特徴を反映して変化する。従って，林相（樹種，林齢，密度など），森林管理（伐採，間伐，枝打ち，下刈り，施肥など），森林に生息する動物，土壌，土壌中の動物，微生物，地形，地質の影響などが複雑に影響している。

3 森林管理と渓流水質

3.1 伐採後の硝酸性窒素の濃度変化

森林の伐採の影響が最も明瞭に表れるのが渓流水質の硝酸性窒素であり，伐採による環境改変の指標として有用と考えられる。以下はその事例である。

安池・宮永（1998）は，皆伐後の河川水の硝酸性窒素のモニタリング結果を総説している。この中で，Vitousek and Mellio（1979）による米国での結果を紹介し，約 30 流域の皆伐の結果，伐採後 1 年で硝酸性窒素濃度は最高で 5mg/L 前後に上昇するとしている。しかし，1981 年以降の安池・宮永（1998）がまとめた約 16 流域の皆伐結果のデータにおいては，ほとんどが 2mg/L 以下の数値であるとしている。一方，長期的なモニタリング結果（8 流域の皆伐結果）では，皆伐から 0～1 年後に増加し始め，1～2 年後に最大値をとるという例が多く，3～6 年で通常のレベルに戻るとしている。

我が国の事例では，浜端（2000）が琵琶湖周辺の渓流河川で皆伐地に杉の若木を植林し，硝酸性窒素の経年変化を報告している。硝酸性窒素濃度は，伐採半年後に増加傾向を示し，2～3 年後には 10 倍程度に増加し，5 年後には 2.8 倍となり以後減少傾向を示すとした。

また，加藤ら（1999）は宝川理水試験地における実験結果を総説している。この地域は，1987 年にブナを中心とした広葉樹林帯を 50% 伐採し，1995 年に残りを伐採した 6.5ha の小流域である。これによると 1995 年の伐採後 1～2 年に最高値で約 1.5mg/L の数値を記録している。1987 年の伐採直後の水質の記録が記されていないが，先の安池・宮永（1998）の総説から引用すると，皆伐後 3～6 年で通常レベルに回復することから，1995 年の伐採直前の硝酸性窒素の濃度 0.07mg/L が平常濃度であると考えられる。このことから通常の濃度の 20 倍程度の硝酸性窒素が河川に流出したことになる。

Bosch and Hewlett（1982）は，針葉樹，広葉樹，低木類等の林相における森林伐採等による影響を比較した。その結果，現存していた植生の減少割合が増えるに従い，その林相からの年流出量も直線的に増加することを示し，とりわけ針葉樹の林相において顕著であるとしている。

以上のように伐採の結果、いずれの報告も伐採後に森林内の窒素が植物に吸収されず森林外に流出することを示している。

また、水質のみならず水生動物への影響について言及した例がある。Martin et al. (1981) は、伐採森林地河川と非伐採森林地河川の 15 ヶ所の 56 河川水で、水質、藻類、無脊椎動物を比較した結果、4 ヶ所で、伐採地区の河川水では藻類、無脊椎動物の密度が大きく変化したという。そして、伐採を部分的にとどめ、広範囲な緩衝帯を設けることによって、化学的・生物学的変化を最小限とどめることができると結論した。

3.2 間伐遅れなど不十分な森林管理の影響

我が国の国土面積の約 7 割を占める森林のうち約 4 割が人工林であり、そのうちの 7 割が保育・間伐期にあるといわれる。しかし社会情勢の変化により、実際には間伐対象林の人工林のうち間伐の実施割合が約 5 割と試算されている(林野庁, 1998)。人工林の管理には、下刈り、枝打ち、間伐などがあげられるが、この中で最も重大な問題であると認識されているものの一つに間伐遅れが指摘され、管理の行き届かない人工林に対する今日的な重要課題ともいわれている。

武田(2002a, 2002b, 2002c)は、この点に着目し、「間伐遅れが原因で下層植生が貧弱な地域」(第一流域)と対照的に「植生が旺盛な水域」(第二流域)の 2 水域で流量、水質などを調べた。その結果、降水時における流量は、第一流域においては降雨に対して鋭敏に反応するが第二流域のそれは緩慢に反応する傾向を示した。さらに窒素など水質汚濁物質の水質濃度の上昇も第一流域の方が上回るとし、人工林の間伐の遅れなど不十分な森林管理が汚濁負荷流出の増大につながっているといる。

平井・石塚(1998)は、コナラ、シデ類の落葉広葉樹を対象に皆伐により発生する多量の枝条が分解したとき発生する窒素の放出量と表層土壌中の有機物から放出される窒素量を調べた。すなわち、林地で伐採した枝条の除去区、伐採した枝条の棚積区および非伐採区からの窒素放出量および表層土壌中の有機物から放出される窒素量を比較した。その結果、枝条の除去区は非伐採区や棚積区と比較して窒素の放出量が多いことが判明した。森林伐採後、林地に残される枝条を棚積みすることで、有機物の急激な分解を抑制し、植生の回復、溪流への窒素の流入制御に有効であるとしている。

3.3 森林の樹齢との関係

広瀬ら(1988)は若齢の森林では老齢の森林に比べ渓流水の硝酸態窒素濃度が低いことを確認している。また、浅野ら(1996)は裸地と比較し林齢の最も高い地域の渓流水の硝酸態窒素濃度が高いとしている。

以上の結果は、渓流水の硝酸イオンは森林の生長に伴い増加することを示している。この理由として、加藤ら(1999)は若い森林は成長期にあり、植物による養分吸収率が老齢林より高いためであるとしている。しかし、硝酸態窒素の流出は、林齢に伴って反対に減少するという佐々木ら(1991)の結果や樹齢との関係は明らかでないという大類(1994)の結果もある。

以上のことから、樹齢と窒素に関する研究については一定の傾向を見いだすことができない。これは安池・宮永(1998)も述べているように、森林の生長に伴う生態系内部の窒素の収支バランスの変化は、流域間の地質、植生等の影響による差が時系列的に無視出来ないこととしている。

3.4 林相(天然林,人工林)による違い

江角・古井戸(1981)は多摩川上流域での調査結果から、渓流水中の硝酸態窒素濃度は落葉広葉樹林で低いが、スギ・ヒノキ植林面積比が大きい程、高くなる傾向が認められているとしている。これに反して、広瀬ら(1988)や徳地(1991)はスギ、ヒノキの人工林と天然林との水質の違いは不明瞭であるとしている。また、一般的に河畔林等は川岸を保護する意味で重要な役割を果たすといわれているが、金指・服部(1999)が河畔林の人工林化による溪流生態系の影響を検討した結果、二つの河畔林(落葉広葉樹林及びカラマツ林)では、リター供給量、窒素含有率に違いはなかったとしている。この場合、落葉広葉樹林の河畔林ではリター分解速度の異なる樹種が存在していることから、持続的な養分供給ができると考察している。

また、森貞・平井(1995)は林相(天然生林,スギ林,ヒノキ林)による水質の違いは明確でなく、天然林内において溪流による水質が異なるのは、土壌や岩屑の堆積状態によるとしている。さらに、加藤ら(1999)は茨城県北部のスギ、ヒノキの人工林からの湧水の水質(pH,EC,硝酸態窒素,塩素イオン,ナトリウムイオン,カリウムイオン,硫酸態硫黄)を調べた結果、表層地質の違いによって湧水の水質が異なっていることを認めた。しかし窒素成分(硝酸態)についてみれば0.40~0.80mg/Lで表層地質による特徴は認められない傾向があったとした。

いずれにしても、林相の違いが渓流水質に与える影響については不明確な点が多く残されている。

3.5 その他(斜面等の影響)

一般に、安定した森林では斜面上での表面流が起こる頻度はきわめて少なく、崩壊などに伴う土石流の流失は少ない。しかし、豪雨に伴い浸食堆積物の流失する場合があります、多くの養分が流失すると考えられる。福島・松重(1995)は雨天時における硝酸性窒素の流出量は流域の崩壊面積と正の相関があることを認め、降雨時における環境負荷の的確な観測が必要であるとしている。また、大類(1994)は硝酸性窒素の濃度は溪流の平均勾配にも影響を受け、勾配が緩いほど濃度が低い傾向が見られるとしている。

溪流の硝酸性窒素の濃度は、これまで述べてきたような、伐採などの有無、樹齢や森林の組成の違いだけでなく、地形的違いによる脱窒作用の起こりやすさの違いあるいは土壌の持つ硝化能の違いなども影響すると考えられる。

さらに最近では、戸田(2002)が指摘しているように、肥沃な土壌に成立しながら経済的理由で長期間間伐することがなく、老齢化している日本のスギ林では、過剰な窒素が流出する窒素飽和現象がみられるという。また、近年、活発化する人間活動によって自然界に過剰な窒素が負荷され、さまざまな問題が生じている。過剰な窒素は汚染源の一つとして取り上げられるようになり、硝酸性窒素の濃度が高い渓流水は、関東平野における汚染大気の前線と一致するという報告もある(Yoh and Konohira, 2001; 杉山・楊宗, 2002; 宮下・三村, 2003)。

4 まとめ

森林及びその周辺における窒素の収支を明らかにすることのみでは、森林の動態を十分に把握したとは言い難い。大気からの窒素供給と森林生態系における窒素保持のバランスが、流域からの硝酸性窒素を制御していると考えられ、森林機能の解明に関する詳細な調査が、今後とも必要である。

また、近年、伐採などの人為的な環境変化に加えて、窒素飽和、大気汚染などにもとづく影響が注目されるようになり、溪流や森林の管理の課題として大きくクローズアップされ、新たな対応が求められている。

謝辞

本総説を書くにあたって、高橋正通(農林水産省林野庁森林総合研究所)、越地正(神奈川県自然環境保全センター)及び横山尚秀環境技術部長から、貴重なご意見をいただきました。これらの方々に感謝します。

参考文献

- 荒木眞之(1995): 森林気象. 川島書店, 東京, 202pp.
- 浅野友子・大手信人・小橋澄治(1996): 森林の成立過程における水質形成機構の変化 - 植生の発育段階の異なる流域における水質・水文観測 -. 京大演, 68: 25-42.
- Aubertin G. M. and Patric J. H. (1974): Water quality after clearcutting a small watershed in West Virginia. J. Environ. Quality, 3: 243-349.
- Bosch J. M. and Hewlett J. D. (1982): A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, 55 (1): 3-23
- 江角比出郎・古井戸良雄(1981): 栄養塩及び有機物の動態に関する研究 - 多摩川上流域の硝酸態窒素. 文部省「環境科学」研究報告集, B74-R12-4: 227-234.
- Feller M. C. and Kimmins J. P. (1984): Effect of clearcutting and slash burning on streamwater chemistry and watershed nutrient budgets in southwestern British Columbia. Water Resour. Res., 20: 29-40.
- 浜端悦治(2000): 森林の回復過程が渓流水に及ぼす影響 森林伐採プロジェクトのまとめに向けて 滋賀県琵琶湖研究所所報, 18: 54-59.
- 服部重昭・近嵐弘栄・竹内信治(1982): ヒノキ林における樹冠遮断量測定とその微気象学的解析. 林試研報, 318: 79-102.
- 福島武彦・松重一夫(1995): 山地河川における流域特性と水質の関係について. 水環境学会誌, 18: 909-916.
- 早瀬吉雄・大場信(1993): 森林山地小流域における腐食層と流出機構のモデル化, 水文・水資源学会誌, 6(1), 47-54
- 平井敬三・石塚成宏(1998): 落葉広葉樹における伐採後の枝条処理による窒素供給の制御 森林生態系における立地環境及び植物群落の特性と機能の解明. 森林総合研究所研究成果選集, 1998: 2-3.
- 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. 土木学会論集, 3: 71-74.
- 広瀬頭・岩坪五郎・堤利夫(1988): 森林流出水についての広域的考察(1). 京大演報, 60: 162-173.
- 岩坪五郎・堤利夫(1968): 森林内外の降水水中の養分量について(第3報) 流亡水中の養分量について. 京都大学農演報, 40: 140-156.
- 金指努・服部重昭(1999): 渓畔域からのリター供給とその分解過程. 中部森林研究, 47: 55-58.
- 加藤正樹他(1999): 森林と渓流水質 - その形成メカニズムと実践 -, わかりやすい林業研究解説シリーズ107 (財) 林業科学技術振興所
- 川畑幸夫(1973): 水文気象学. 地人書館, 268pp
- 河田弘(1989): 森林土壌学概論. 博友社, 東京, 399pp.

- Martin C. W., Noel D. S., and Federer C. A. (1981) :
The effect of forest clearcutting in New
England on stream-water chemistry and
biology. New Hampshire Univ. PB Re: 87.
- 宮下雄次・三村春雄(2004): 相模川上流域における
河川水及び降水中の窒素負荷量について .
第 38 回日本水環境学会年会講演集 : 4.
- 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: 55-58.
- 村井宏・岩崎勇作 (1975): 林地の水および土壌保
全機能に関する研究 (第 1 報) 森林状態
の差異が地表流下, 浸透及び浸食に及ぼ
す影響. 森林研報, 274: 23-84.
- O'Loughlin C. L., Rowe L. K., and Pearce A. J. (1980)
: Sediment yield and water quality responses to
clearfelling of evergreen mixed forests in
Wertern New Zealand. IAHS/AISH Publ., 130:
285-295.
- 大類清和 (1994): 森林流出水の水質研究と森林の
水質浄化機能を把握する上での課題. 森林
科学, 12: 34-41.
- 林野庁 (1998): 林業白書. 農林統計協会 .
- 佐々木重行・高木潤治・西尾敏 (1991) : 降水と溪
流水に関する研究(VI) - 小域の林況と成
分濃度 - . 日林九支研論集 44: 175-176.
- Sklash M. G. and Farvolden R. N. (1979): The role of
grand water in strorm runoff. J. of hydro, 43:
45-65.
- 杉山浩史・楊宗興 (2002): 多摩川流域渓流水質
からみた都市近郊の森林の窒素飽和およ
び酸性化. 日本陸水学会大会講演要旨集,
67: 93.
- 武田育郎 (2002a): 針葉樹人工林の間伐遅れが面
源からの汚濁負荷量に与える影響(I) 水
利科学, 46 (2) : 1-22.
- 武田育郎 (2002b): 針葉樹人工林の間伐遅れが面
源からの汚濁負荷量に与える影響 (II)
水利科学, 46 (3) : 47-71.
- 武田育郎 (2002c): 針葉樹人工林の間伐遅れが面
源からの汚濁負荷量に与える影響 (III)
水利科学, 46 (4) : 63-84.
- 戸田浩人 (2002): 陸上生態系の物質循環からみた
窒素飽和による汚染の構図. 資源環境対策,
30 (11) : 13-18.
- 徳地直子 (1991): 山地小流域における降水と流出
水の水質. 京大演, 63: 60-68 .
- 塚本良則 (1992): 森林水文学. 文永同出版, 319pp.
- 堤利夫 (1987): 森林の物質循環. 東京大学出版会
- 安池慎治・宮永洋一 (1998): 河川水の水質に及ぼ
す森林の影響に関する文献調査. 電力中央
研究所我孫子研究所報告, U98008:
1-20+i-iv.
- Vitousek P. M. and Melillo J. M. (1979): Nitrate losses
from disturbed forests, patterns and
mechanisms. Forest Science, 4: 608-619.
- Yoh M. and Konohira E. (2001) : Regional distribution
of natural stream nitrate in central Japan.
Water, Air and Soil Pollution, 130 1/4 (2) :
655-660.