

森里海を繋ぐ森林からの流出水

—森林の水質形成—

徳地直子*

〔キーワード〕：森林生態系，水質形成，窒素，攪乱，窒素

1. はじめに

我が国において，森林からの流出水あるいは森林土壌を浸透して形成された流出水（地下水を含む）は，陸域，海域の安定した主要な水源であるだけではない．森林からの流出水の水質は窒素やリンなどの栄養塩濃度が低く，ミネラルの含有濃度は降水より上昇しており，良質かつ安定的なものである．私たちは降水が森林生態系を通過した際に生じる水質形成作用を森林の水質浄化機能と呼び，森林から流出する“おいしい（良質の）水”に依存してきた．栄養塩濃度の低い水は下流に至って富栄養化に寄与しないなど森から川・海に至るあらゆる生態系の存在の基盤となっており，良質の水に依存しているのは私たちだけではない．

しかし産業革命以降，化石燃料の燃焼により放出される大気中の窒素化合物などの増加により降水に含まれる窒素化合物が増加し，大気から森林に大量の窒素などが負荷されるようになった．負荷された窒素化合物は森林の水質浄化機能を上回り，森林からの流出水の水質を悪化させることがある（徳地2020）．さらに近年では，シカによる過食害が森林の状態を変え，森林からの流出水の水質に影響を及ぼしていることも指摘されている．ここでは，森林からの流出水の水質，特に窒素に着目して紹介し，現状と今後の課題を整理したい．

2. 森林の水質形成機能

森林生態系の水質形成を追ってみよう．森林に降った降水は樹冠に達し，一部が葉面で蒸発し，残りは樹冠に付着した乾性降下物を捕捉し，さらに樹幹をつたい，そこでも乾性降下物などを捕捉し，土壌に到達する．土壌に到達した降水は土壌中を浸透

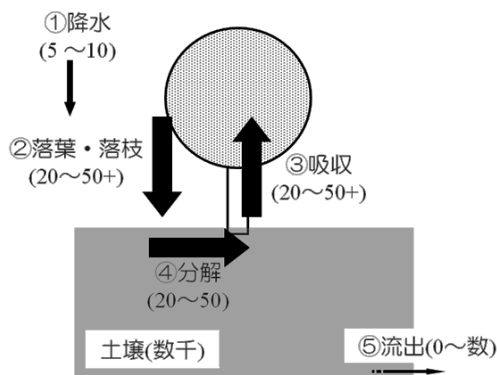


図1 森林生態系における窒素の循環の概要
単位：N kg ha⁻¹ year⁻¹．

し，途中で植生に吸収され，あるいは土壌中で分解された有機物から放出されたアンモニアイオンなどを加え，あるいは土壌とのイオン交換などによりミネラル類を加え，さらに浸透を続け地下水になり，河川へ流出する．図1は窒素について，わが国の森林での主要な経路における循環量を示したものである．森林生態系での窒素循環量は大気などからの系外の加入量（①）や河川への流出量（⑤）に比べ，生態系内部（②・③・④）での動きが大きい．このことから，森林生態系の窒素の循環は閉鎖的といわれ，窒素循環においては森林生態系内部の状態，樹木-土壌の状態が重要であることがわかる．つまり，樹木や土壌になんらかの変化が生じると窒素の循環も変化し，結果として河川水質に影響が及ぶ．

3. 森林のかく乱と河川水への影響

森林のかく乱はおおまかには自然によるものと人為のもの2つにわけることができるだろう．自然のかく乱としては，病虫害によるものや気象によるものがある．人為によるものとしては，森林の木材を利用するためなどに行われる森林伐採や，近年では大気からの窒素の負荷などが挙げられる．

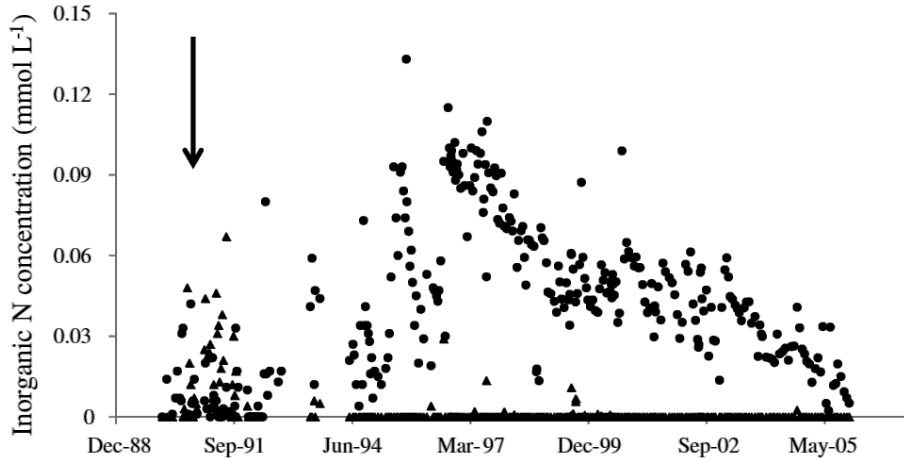


図2 マツ枯れに伴う河川水中の無機態窒素濃度の変化 (Tokuchi et al. 2013)
→は立ち枯れていたマツが台風によって倒れた時期を示す。

3-1. 自然かく乱

自然のかく乱として、マツ枯れやナラ枯れなどの病虫害や近年ではシカによる植生の過食害が問題となっている。京都周辺ではマツ枯れは1980年代より多くのマツを枯死に至らしめた。大津市の桐生試験地では1990年に入って甚大な被害を受け、多くのマツが立ち枯れた。台風によりこれらのマツが倒れ、年間の落葉落枝量の4-5倍(約177kg N)の有機物が林床に供給された。これらの有機物の無機化・硝化が促進されて河川の無機態窒素濃度が高まった(図2, Tokuchi et al. 2013)。マツ枯れによる水質への影響は13年程度継続し、その間の河川からのNの流出量は約25kg Nと推定された。これはマツ枯れで供給された有機物中の窒素量の1/7に過ぎなかった。その原因として、マツ枯れが生じた森林が二次林とヒノキ人工林であり、マツが枯死した後も他の樹種で森林が維持されていたためと考えられた。

近年では、カシノナガキクイムシによるナラ枯れが同様の被害を及ぼしていると考えられるとともに、シカの過食害による植生の衰退による影響が指摘されている(福島ら 2014)。シカによる食害は下層植生や実生・若木など樹高の低いものに集中する。これまで、森林のかく乱においてその影響が大きいと考えられてきた高木ではなく、バイオマスの小さい下層植生の損失が河川水質に影響を及ぼしていることは注目に値する。

3-2. 人為攪乱

3-2-1. 森林伐採

森林伐採は、人間が木材を用いるためには欠かせない行為であるが、森林生態系の主要な構成要素である樹木を収奪してしまい、森林生態系への影響は大きい。特に、窒素の循環においては、主要な吸収源である樹木がなくなってしまうので図1-④の吸収が行われなくなり、窒素が河川から流出する。図3は集水域を単位として皆伐を繰り返した流域において、皆伐からの時間が異なる集水域の水質を比較したものである(Tokuchi & Fukushima 2009)。森林

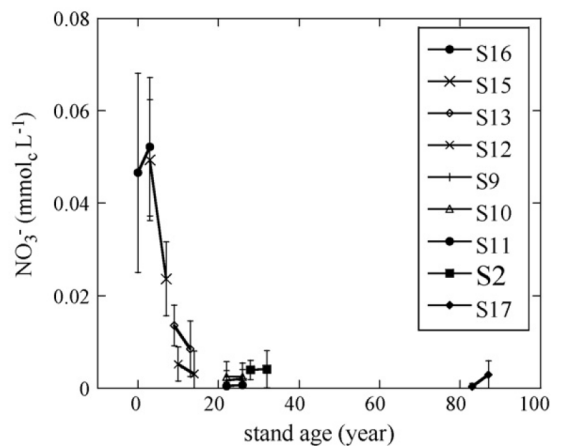


図3 皆伐後からの時間が異なる集水域の河川水中の硝酸態窒素濃度を並べたもの (Tokuchi et al. 2009)
S#は集水域番号。

伐採後の河川水質への影響は伐採数年後に顕著になり、植栽を行った場合、その濃度はほぼ15-20年程度で伐採前に戻ることがわかった。森林伐採後、河川水中の窒素濃度が上昇することは古くから知られており、伐採に伴う河川水の劣化を抑えるため、大面積の皆伐を避ける、また、主に硝酸態の形態で流出する窒素成分を脱窒により河川から流出させない、加えて粒子状の物質なども捕捉するよう溪畔部分に森林帯を残す施業などが推奨される(徳地ら2011)。

3-2-2. 大気降下物

上記のような地域的な森林へのかく乱だけでなく、近年の地球規模での環境変動があらゆる森林生態系に大きな影響を及ぼしている(徳地2020)。気温の上昇や物質循環、特に窒素の循環はすでにプラネタリーバウンダリー(planetary boundary; 回復可能な境界)を超えたという指摘もある(Rockström et al. 2009)。その主な原因は、人口増加に対応する食料増産のための肥料の施用と、化石燃料の燃焼に伴う大気中への窒素の放出が挙げられる。大気中に放出された成分は発生源周辺にとどまらず、地球上のあらゆる場所に運ばれ降水や乾性沈着物として供給される。我が国でも、第二次世界大戦後の経済成長に伴って化石燃料の使用が急速に増加し、1970年代には酸性雨と呼ばれる大気汚染が顕在化した。この大気汚染は主に硫黄成分に由来しており、その後の脱硫装置などの技術開発などで影響がほぼ抑えられている。しかし一方、周辺諸国の経済発展に伴って汚染物質が越境輸送される問題が生じている。

大気からの窒素負荷は施肥効果として樹木の成長を促進する場合もあるが、継続することで植生の窒素要求量を上回り、さらには生態系全体の窒素要求量を超えてしまう。この状態を窒素飽和(nitrogen saturation)と呼び、過剰となった窒素が河川から流出することが知られている(Aber et al. 1998)。それぞれの森林は植生や土壌のタイプやかく乱や土地利用の履歴などが異なるため生態系の窒素要求量が異なり、どの森林でいつ窒素飽和に至るかは明らかにすることは非常に難しい(牧野ら2017)。加えて、大気から窒素がどのような状況で負荷されるかも重要である。例えば降雪イベントでは多量の雪と

ともに多量の窒素も負荷されるが、窒素は雪の中で春を迎え、融雪期に森林生態系に取り込まれることなくそのまま流出してしまうことがある。このように窒素負荷は地球上のあらゆる場所で生じているが、窒素の負荷のされ方、そして、森林生態系の生物的・気象的・地質的様々な特性が複雑に関係しており、河川水への影響を予測することは非常に難しい。

4. 森林との付き合い方

これまで森林は、良質の安定した水質の水を河川に供給してきた。しかし現在、さまざまな要因により、富栄養化した水が森林から流出する可能性が高まっている。一方、森林へは木材生産はじめ、バイオマス燃料などさらなる供給サービスへの期待や、地球温暖化を抑制する調整サービスへの期待、そして人々を癒してくれる文化的サービスへの期待など多様な期待が寄せられている。これらの期待に応えるために、私たちはこれから森林とどのように付き合い合っていけばよいのだろうか。

これまで見てきたように、森林の植生や物質循環へのかく乱への影響は窒素の流出に鋭敏に現れる。硝酸態窒素濃度は森林生態系の状態を示す指標の一つとなり、河川水質は尿検査のように用いることができるだろう。また、硝酸態窒素を構成する酸素分子の同位体比を用いれば、河川水中にある硝酸について大気由来の割合を推定することができる(徳地2020)。そこで、森林からの流出水中の硝酸態窒素濃度をモニタリングするとともに、同位体なども用い、直接的なかく乱がない場合にも注意を払っていくことが必要だろう。

マツ枯れやナラ枯れは病虫害なので自然かく乱と考えられる一方、これまで被害のなかった地域に新たにこのような病虫害が広がったことについて、人間による物流や温暖化などの地球規模での環境変動の影響があることは否めない。硝酸態窒素をはじめとする指標を用いて森林の状態を注意深くモニタリングしつつ、地球規模での環境問題への取り組みが不可欠である。

引用文献

- 1) Aber, J., McDowell, W., Nadelhoffer, K., Magill, A., Berntson, G., Kamakea, M., McNulty, S., Currie, W.,

- Rustad, L., Fernander, I. (1998) Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. Hypotheses revisited. *BioScience* 48: 921-934.
- 2) 福島慶太郎・阪口翔太・井上みずき・藤木大介・徳地直子・西岡裕平・長谷川敦史・藤井弘明・山崎理正・高柳敦 (2014) シカによる下層植生の過採食が森林の土壌窒素動態に与える影響. *日本緑化工学会誌* 39, 360-367.
 - 3) 牧野奏佳香・徳地直子・福島慶太郎・川上智規 (2017) 富山平野において近接する窒素飽和・非飽和落葉広葉樹林の窒素動態の比較. *日林誌* 99 : 120-128.
 - 4) Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
 - 5) 徳地直子・金子有子・福島慶太郎 (2011) 森林の伐採ならびに窒素負荷に伴う河川水質への影響を軽減するための施業法に関する考察. *水利科学* 321 : 23-36.
 - 6) Tokuchi N, Fukushima K. (2009) Long-term influence of stream water chemistry in Japanese cedar plantation after clear-cutting using the forest rotation in central Japan. *Forest Ecology and Management*. 257: 1768-1775.
 - 7) Tokuchi N, Ohte N, Osaka K, Katsuyama M. (2013) Separate estimation of N export into baseline N leakage without disturbance and N loss due to insect defoliation in a pine forest watershed in central Japan. *Environmental Monitoring and Assessment* 185: 855-863, doi: 10.1007/s10661-012-2596-y.
 - 8) 徳地直子 (2020) 森林生態系における窒素飽和現象. 「大気環境と植物」伊豆田猛編著. 朝倉書店.