

森林生態系からの窒素流出：安定同位体による解析

東京工業大学 戸張賀史、東京農工大学 木庭啓介

一般的に森林生態系においては、植物の生長は窒素の供給量に依存していると考えられている。窒素は大気中に、または土壌中にも大量に存在しているものの、植物や微生物が利用することができるような窒素（可給態窒素）は、土壌中にも実はごく少量しか存在しないからである。そのため、土壌と植物の間を、窒素は非常に速い速度で回転しており、窒素循環はいわゆるリサイクルが卓越した系であることが知られている。

土壌の分解に伴い、土壌窒素（有機態窒素）は、無機化されアンモニウムになり、その一部は硝化細菌によって硝酸まで酸化される。このアンモニウムと硝酸は微生物や植物によって再び吸収同化され、結果として、窒素は森林生態系から失われずに、森林内部で循環することになる。しかし、一部の窒素はこの内部循環から「もれ」出してくる。負に帯電している土壌と反発するため、硝酸態窒素（硝酸イオン）が主な窒素化合物として渓流水中に漏れ出てくるが、その量は通常ごくわずかである。しかし、ひとたび伐採、または酸性雨などの攪乱を受けると、この硝酸態窒素の流出が多くなることが知られている。

しかし、このような攪乱を受けた森林で、実際にどのような窒素循環が駆動しているかについては未だによくわかっていない。また、伐採などの攪乱を与えた際に、どのようなメカニズムでどれくらいの時間をかけて窒素循環が回復してゆくか、についての統一的な見解も未だ得られてないのが現状である。人間活動の環境へのインパクトを考える際に、森林伐採によって、どのように窒素循環が変化し、どのように窒素循環が回復してゆくかを理解することは、環境への人間のインパクトを考える際に、また、健全な森林の維持、育成にとっても、大変重要である。

ところで硝酸には窒素と酸素が含まれており、近年、この両者について自然安定同位体存在比 ($\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 値) を測定することが可能になってきた (Casciotti et al. 2002)。降水に含まれる硝酸は、特異的に高い $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つことが知られており、Durka et al. (1994) は、酸性雨の被害を受けているドイツの森林において、硝酸の $\delta^{15}\text{N}$ 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定し、降水で供給された硝酸が、森林内部で植物や微生物に利用されることなく、直接渓流水へと流出されていることを示した。本研究では、和歌山県の護摩壇山実験林において、渓流水中に含まれる硝酸の窒素酸素同位体比測定を行い、林齢に伴って、森林から流出してくる硝酸の性質がどのように変化しているのかを考察した。

図 1 は、護摩壇山実験林付近の降水および実験林で採取された渓流水の $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{18}\text{O}$ 値である。 δ 値は、国際標準物質（窒素は大気中の窒素、酸素は、平均的な海水）との差を千分率で表したものであり、 δ 値が高ければ、 ^{15}N または ^{18}O という同位体が ^{14}N または ^{16}O と比較して多く存在することをあらわしている。

降水硝酸は、これまで報告されているように、比較的高い $\delta^{18}\text{O}$ 値をとっていた（平均 59‰）。これは降水中の硝酸が、オゾンの持つ高い $\delta^{18}\text{O}$ 値を反映していることの表れで

ある。一方で、渓流水硝酸の $\delta^{18}\text{O}$ 値は $-16\sim+38\%$ と広い幅をとっていた。

護摩壇山実験林では、林齢とともに、渓流水中の硝酸濃度が急激に減少することが報告されており (Fukushima and Tokuchi 2009)、渓流水中の硝酸の起源が林齢大きく変化していることが考えられる。そこで、降水の $\delta^{18}\text{O}$ エンドメンバー (-59%) と土壌中で生産される硝酸の $\delta^{18}\text{O}$ エンドメンバー (-8% : 降水の H_2O の $\delta^{18}\text{O}$ と等しい) を仮定し、渓流水中の硝酸が降水硝酸と土壌硝酸の混合で形成されるとすると、図 2 のような、集水域の林齢と降水由来の硝酸の割合についての結果が得られた。つまり、森林が成熟してゆくに従って、渓流水に含まれる硝酸の多くが、降水から直接混合しているものであるという結果であり、これまでの窒素循環の知見とは異なる結果である。これまで、成熟した森林では窒素が極めて欠乏しているため、降水で供給される窒素のほとんどは、森林の内部窒素循環に組み込まれ、渓流水へと流出することはないと考えられてきた。しかし、今回の結果は全く逆の傾向である。護摩壇山実験林の傾斜がきわめて急であることが、降水由来の硝酸の森林生態系からの流出を促進して、植物や微生物に使われる前に流出してしまうという現象が強く示唆される。また、林齢の高い森林の渓流水には低濃度の硝酸しか含まれておらず (Fukushima and Tokuchi 2009)、相対的に、降水硝酸の直接流出の割合が高くなっていることも事実であろう。このような、降水の直接的な渓流水水質への大きな貢献は、PnET モデルなどにより森林水文学的な要素を入れる必要性を示すものであり、Fukushima and Tokuchi (2009)でも明らかにされたように、渓流水位水質の形成プロセスにおいて、これまで以上に地形的要因を考慮する必要があることが強く示唆された。

文献

Aber et al. (1989) Bioscience, 39, 378, Casciotti et al. (2002) Analytical Chemistry, 74, 4905, Durka et al. (1994) Nature, 372, 765, Fukushima and Tokuchi (2009) Hydrological Processes, 23, 259

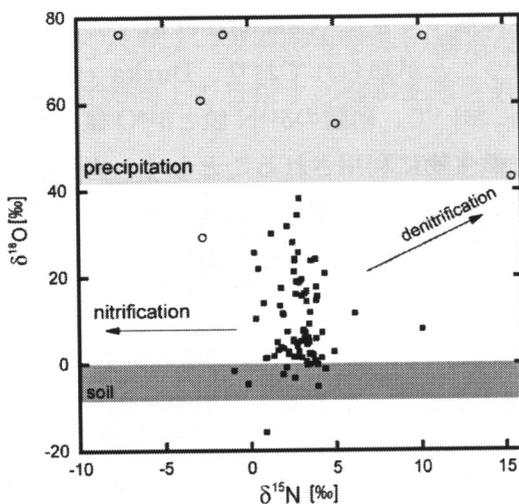


図 1 降水 (○) および渓流水 (■) 硝酸の $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{18}\text{O}$ 値 (Tobari et al. in preparation)

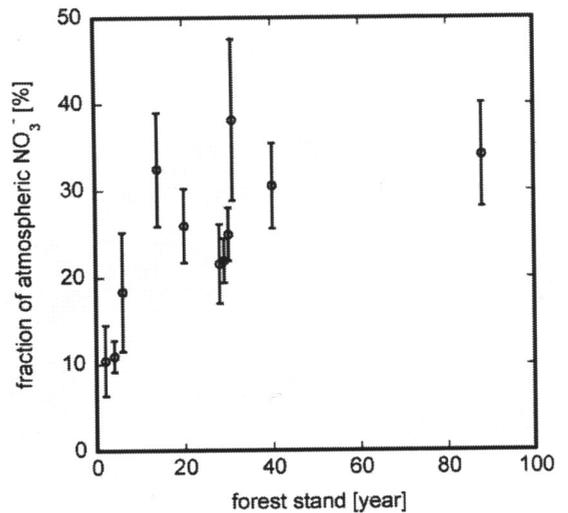


図 2 林齢と降水硝酸の渓流水硝酸への寄与割合の関係 (Tobari et al. in preparation)