

陸域生態系における窒素循環

Nitrogen Cycles in Terrestrial Ecosystems

木庭啓介*

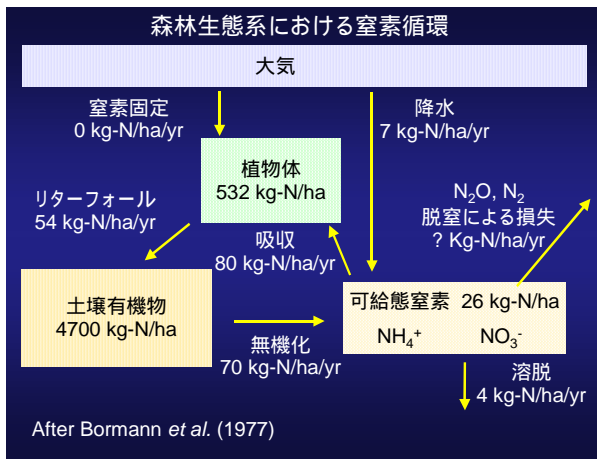
Keisuke Koba

はじめに

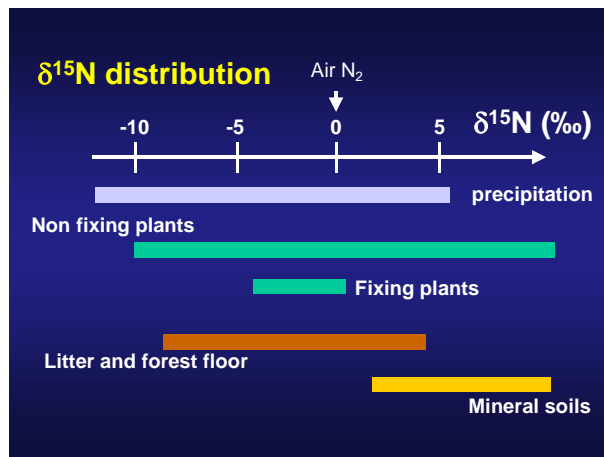
窒素は生物に必須の元素であり、生物活動とともに、地球上の様々な生態系を行き来している。窒素は大気約 80% を占めており、土壤中にも大量の窒素が蓄積されているものの、実際のところ、森林生態系を例にして考えると、植物や土壤微生物に利用できる形（可給性窒素）は、土壤全体の窒素の 1% にも満たないことが多い（第 1 図）。植物や土壤微生物は、無機態（アンモニウムや硝酸）あるいは低分子の有機態（たとえばアミノ酸）のような形態にまで有機物が分解されなければ、利用できないと考えられている。そのため、マスとして大量に存在するにも拘わらず、陸上生態系の生産性は窒素の供給が制限していると考えられている（Vitousek and Howarth 1991）。

そして、第 1 図にあるように、この可給性窒素は、プールとして存在する量と比較して、フローとして流れる量（吸収、無機化）が大きい、つまり回転率が非常に高いといった特徴がある（Stark and Hart 1997）。このような高い回転率を持つ物質の挙動を表すためには、単なるプールとしてどれだけ存在しているか、という情報だけでなく、どれだけのフローがあるのか、といった情報を得ることが重要であり、安定同位体の情報は、現場でのフロー情報を与えるツールとして期待されている（Ostrom *et al.* 2002）。

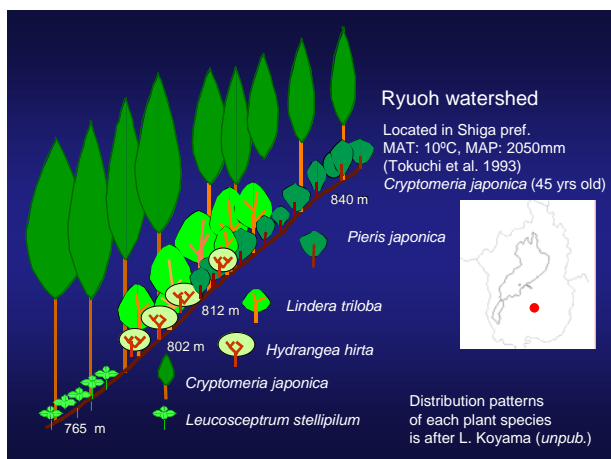
窒素自然安定同位体存在比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）を森林生態系の各コンパートメントについてまとめてみると第 2 図のようになる。窒素固定を行う植物は一般に大気に近い値に集中するが、一方、多くの非窒素固定植物の値は大きなレンジを持つ（Handley *et al.* 1999）。



第 1 図 陸上生態系における窒素循環の模式図



第 2 図 森林生態系の ^{15}N 分布



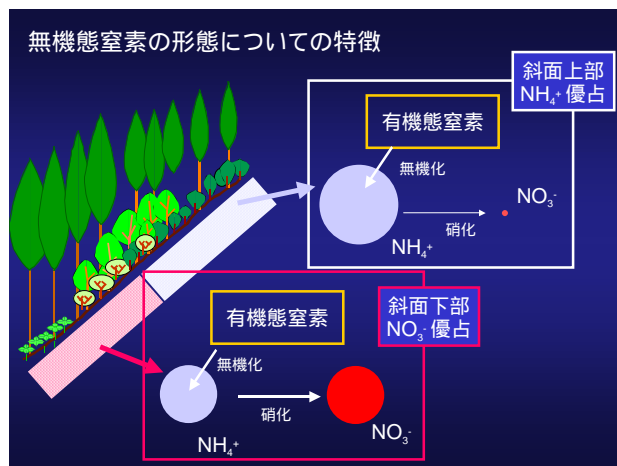
第3図 竜王調査地の概略図

このレンジをもたらす要因は様々なものがあるが (Högberg 1997) ここでは、可給性窒素の2つの主な形態である、アンモニウムと硝酸の吸収度合いが異なることが、植物の $\delta^{15}\text{N}$ 値を決定しているという可能性について考察した結果について報告する。

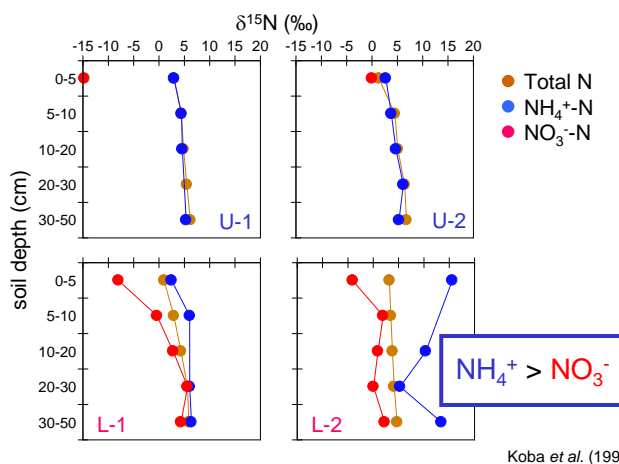
調査地の特徴について

調査は、滋賀県東部の竜王山にあるスギ人工林で行った(第3図)。下層植生として、斜面上部にはアセビ、下部にはミカエリソウ、中部にシロモジとコアジサイが分布している(小山、未発表)。

このサイトでは、非常に特徴的な窒素循環が明らかになっており、斜面上部の土壌では、アンモニウムが多く、硝酸がほとんど検出されないのに対し、斜面下部の土壌では、硝酸が多く存在する(第4図)。これは、斜面下部の土壌が、大きな総硝化速度を持ち、硝酸不動化速度を上回ることによって、硝酸プールがのこっているのに対し、斜面下部では、総硝化速度が存在するものの、とても小さく、さらに硝酸不動化速度が硝化速度に匹敵した大きさで存在していることに起因する(Hirobe *et al.* 1998, 2003; Tokuchi *et al.* 1999, 2000)。また、下層植生も、土壌中の無機態窒素がアンモニウムか硝酸か、という特徴に対応した窒素吸収能を発揮していると考えられている(Koyama and Tokuchi 2003)。



第4図 竜王調査地の窒素循環の特徴



Koba *et al.* (1998)

第5図 斜面上部(U)と下部(L)での同位体土壌プロファイル。常にアンモニウムが硝酸と比較して高い値をとっている

この試験地の土壌を用い、アンモニウムと硝酸の $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定したところ、斜面上部と下部とは異なるプロファイルとなるものの、アンモニウムは硝酸と比べて高い $\delta^{15}\text{N}$ 値をとることが示された(第5図 Koba *et al.* 1998)。そこで斜面上部の植物は、多く存在しているアンモニウムを、斜面下部の植物は硝酸を吸収していれば、植物の $\delta^{15}\text{N}$ 値に反映されるという仮説を立て、植物の $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定した。

植物体の $\delta^{15}\text{N}$ 値

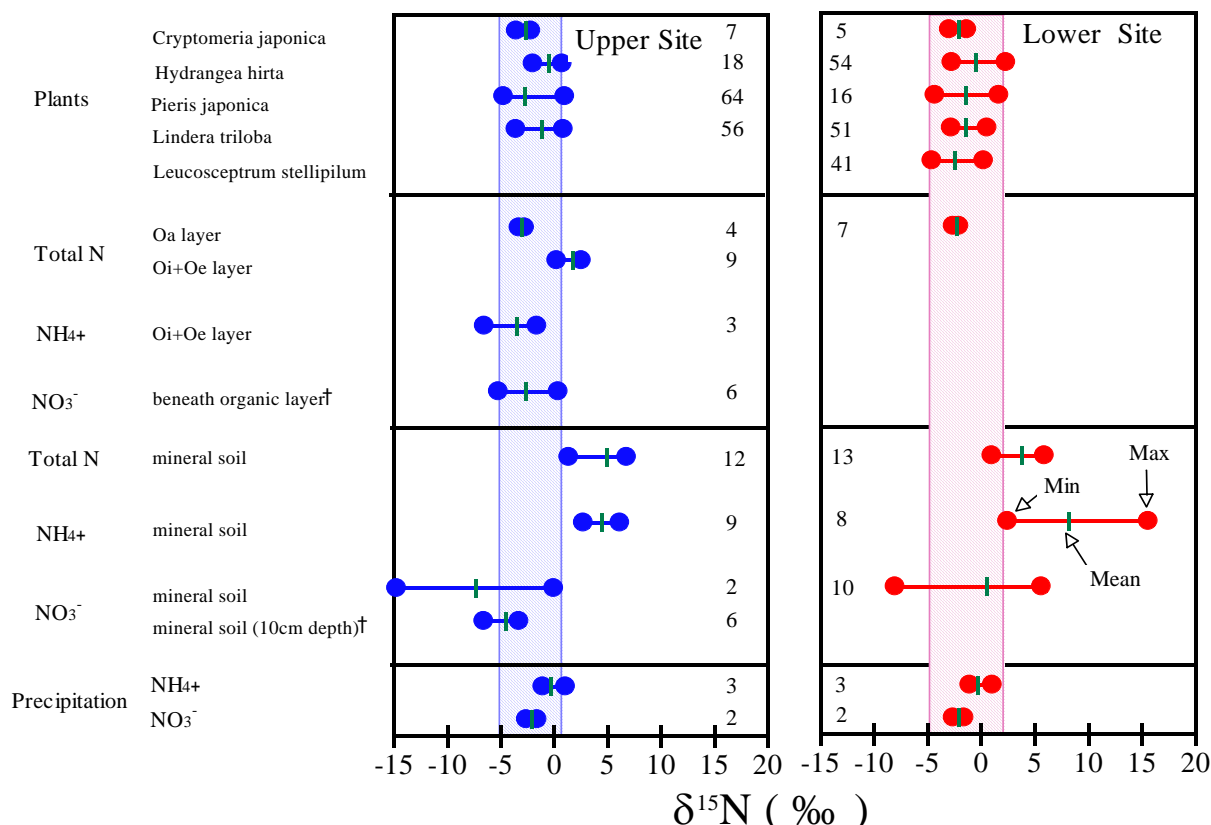
竜王山の植物および様々な深度での土壌、無機態窒素がとる $\delta^{15}\text{N}$ 値をまとめたものが第6図である

(Koba *et al.* 2003 より改変)。植物の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、調査機関 3 年間を通じて大きな変動はなく、全体として非常に狭いレンジに収まっていた。そして、斜面上部と下部で $\delta^{15}\text{N}$ 値の差は顕著ではなかった(アセビのみ有意な差が認められた)。

なぜ、仮説の通り、斜面上部の植物は高い $\delta^{15}\text{N}$ 値をとり、斜面下部の植物は低い $\delta^{15}\text{N}$ 値を取らなかったのか? その原因は、土壤中の無機態窒素が取る、広い $\delta^{15}\text{N}$ 値のレンジにある(第 6 図)。第 5 図でも分かるように、土壌深度を経ると共に、全窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値は上昇し、そこから生成されるアンモニウム、そしてアンモニウムから生成される硝酸も深い深度の土壌で高い $\delta^{15}\text{N}$ 値を取る。これは Nadelhoffer and Fry (1994)でも予想されていたことであるが、ここで問題となってしまったのは、その深度方向への $\delta^{15}\text{N}$ 変化が、硝化の際の同位体分別(または単純にアンモニウムと硝酸の $\delta^{15}\text{N}$ の差)を打ち消してしまっているという事実である。第 6 図の斜面下部では、確かに植物の $\delta^{15}\text{N}$ の範囲は土壌中の硝酸の範囲

とよい一致を見ており、斜面下部の土壌中には硝酸が多いことを考えると、斜面下部の植生は硝酸に依存していることと結論づけることが出来る。しかし、同様に斜面上部を見てみると、植物の $\delta^{15}\text{N}$ と一致する窒素源として、有機物層中のアンモニウムと硝酸、鉍質土壌中の硝酸というように、単純にアンモニウムだけ、ということとは出来ず、硝酸の寄与が否定できなかった。

では、斜面上部も本当に硝酸は植物にとって重要な窒素源となり得るのか? 詳しい議論は Koba *et al.* (2003)に譲るが、結局、プールサイズで窒素の可給性を議論してきた窒素循環研究であったが、特に硝酸のような回転速度の高い物質については、濃度の高低と、可給性がパラレルではないということに帰着すると考えられる。河川や湖沼におけるリン酸濃度あるいはアンモニウム濃度のように、非常に低い(または検出限界以下)濃度であるが、その役割が非常に重要であるという物質が、今回の研究の場合、硝酸であったと考えられる。事実、硝酸の回転



第 6 図 竜王山の $\delta^{15}\text{N}$ 値分布 (Koba *et al.* 2003 より改変)。左が斜面上部(アンモニウム多)、右が斜面下部(硝酸多)。 $\delta^{15}\text{N}$ のレンジと平均値を表した。数字はサンプル数である。

速度は ^{15}N トレーサーを用いて計算するとかなり早く、また斜面上部でも硝酸は生成していることが確かめられており (Hirobe *et al.* 2003) 重要であるだけに、その物質を捉えることが困難である、という物質である硝酸が果たしている役割の一端を $\delta^{15}\text{N}$ が示唆したものだと考えている。

引用文献

- F. H. Bormann *et al.* 1977 *Science* 196: 981–983.
- J. M. Stark and S. C. Hart (1997) *Nature* 385:61-64
- N. E. Ostrom *et al.* (2002) *Ecological Applications* 12:1027-1043
- P. M. Vitousek and R. W. Howarth (1991) *Biogeochemistry* 13:87-115
- L. L. Handley *et al.* (1999) *Australian Journal of Plant Physiology* 26:185-199
- P. Höglberg 1997 *New Phytologist* 137:179-203
- M. Hirobe *et al.* 1998 *European Journal of Soil Biology* 34:123-131
- M. Hirobe *et al.* 2003 *Ecological Research* 18:53-64
- N. Tokuchi *et al.* 2000 *Journal of Forest Research* 5:13-19
- N. Tokuchi *et al.* 1999 *Ecological Research* 14:361-369
- L. Koyama and N. Tokuchi 2003 *Tree Physiology* 23:281-288
- K. Koba *et al.* 1998 *Soil Science Society of America Journal* 62:778-781
- K. J. Nadelhoffer and B. Fry 1994 In: Lajtha K, Michener RJ, editors. *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Blackwell Scientific Publications. p 22–44.