

研究紹介

スギ人工林の斜面に沿った
土壌窒素動態の空間的変動

廣 部 宗
(生態系保全学講座)

Spatial Variability of Soil Nitrogen Dynamics
along a Slope in a *Cryptomeria japonica*
D. Don Plantation

Muneto Hirobe
(Department of Ecosystem Management)

Spatial variability of soil nitrogen (N) dynamics was examined along a slope in a 45-year-old *Cryptomeria japonica* D. Don plantation in the southeastern part of Shiga Prefecture. Net N mineralization showed no clear gradient along the slope, while net nitrification and percent nitrification were high at lower positions, and very low at upper positions of the slope. Principal component (PC) analysis showed soil properties were divided into three groups which were PC1 (water content and extractable organic C and N), PC2 (C/N ratio and pH), and PC3 (total C and N). Regressions of net soil N transformations against PCs scores suggested net N mineralization was mainly regulated by PC3, while net nitrification and percent nitrification were mainly regulated by PC1 and PC2. The difference in the main form of inorganic N was expected to affect soil N availability for plants through the difference in the mobility in negatively charged forest soil. We evaluated the soil N availability that reflected the ion mobility factors by ion exchange resins and found that greater mobility of nitrate lead to greater soil N availability at lower positions of the slope. In addition, gross N transformations were directly measured using ¹⁵N isotope dilution, and the influence of microbial carbon (C) availability on the internal soil N cycles were examined by long-term laboratory incubation. Gross nitrification was detected in both soils taken at upper and lower positions on the slope, suggesting that nitrification was also an important process at upper positions where almost no net nitrification was detected. Changes in net and gross N transformations, the organic C and N pools, and microbial respiration suggested that the start of rapid net nitrification might be affected not only by

the availability of C for microbial biomass, but also by the relative availability of C and N.

Key words : forest slope, net and gross soil nitrogen transformations, nitrification, nitrogen mineralization, spatial variability

はじめに

窒素は大気約80%を窒素分子として占めているが、窒素分子は反応性が低く、生物地球化学的に活性が高い化合態窒素に変換するには多くのエネルギーを必要とする。そのため、自然状態では雷や微生物活動による窒素固定を通じて生成される化合態窒素は大気中に存在する窒素分子の限られた部分であり、陸上生態系における窒素固定速度は90から140 Tg-N/yr程度と見積もられている²¹。また、森林生態系内に存在する化合態窒素の内訳をみると、多くの森林生態系では90%以上が土壌有機物中に固定された有機態窒素であり、それ以外の化合態窒素のほとんどは植物体に含まれるバイオマス窒素である^{12,22}。植物が最も吸収しやすいとされるアンモニア態や硝酸態などの無機態窒素の存在割合は、森林生態系をはじめとする陸上の自然生態系では系内に存在する化合態窒素量の2%を越えることは稀であり、窒素はさまざまな養分元素の中でも森林生態系の一次生産力を制限する要因となることが多い²⁰。さらに、アンモニア態はカチオンであり通常負に帯電している森林土壌に吸着、保持されるのに対し、硝酸態はアニオンであるため森林土壌に吸着、保持されず溶脱されやすいという特徴を有している。そのため、土壌において生成される無機態窒素の形態や量の把握は、森林生態系における窒素循環を考える際に重要な情報である。

これまでに行われた多くの研究により、森林土壌における窒素無機化過程はさまざまな空間規模で大きな変動を示すことが知られている^{6,13,19,24}。対象とする空間が大地理的規模 (global scale) である場合、緯度に沿った気候条件の違いにより、森林土壌における窒素無機化過程の空間的変動が生じる¹⁹。気候帯が均質とみなせる地域規模 (regional scale) の空間を対象とした場合は、土壌や植生のタイプの違いが重要となる^{13,24}。また、気候条件に加え、土壌や植生のタイプも均質とみなせる景観規模 (landscape scale) あるいはそれ以下では、地形や土壌条件によって生じる局所的な環境条件の違いが大きな影響を与える^{6,14}。このような窒素無機化過程の空間的変動を把握し、その決定要因を明らかとすることは、生態系を総体として保全しつつ、持続的に利用していく農林業

には必要不可欠である。日本に存在する森林の大部分は急峻な地形にあり、地形による森林土壌における窒素無機化過程の空間的変動が顕著である^{17,18,23)}。本研究では、スギ人工林内の一斜面を対象とすることにより林冠構成種の影響を排除して、地形による土壌窒素動態の空間的変動を明らかにすることを目的とした。

同一斜面に沿った土壌の窒素無機化特性の空間的変動とその決定要因⁹⁾

滋賀県東南部にある45年生スギ人工林内の南向き一斜面(斜距離135m, 平均傾斜39度)を調査対象とした。斜面に沿った多数の地点で鉬物質土壌表層(0~5cm)を採取し、実験室培養により見かけの窒素無機化特性(net soil N transformations)を測定した。その結果、見かけの窒素無機化速度(net N mineralization rate)については、斜面に沿った一定の傾向が見られなかった。一方、見かけの硝化速度(net nitrification rate)は斜面の最下部から斜面の中部までは高く、見かけの窒素無機化速度とはほぼ同じ値を示すのに対し、斜面中部のある地点より斜面の上部では非常に低いか全く検出されなかった。このため、土壌で生成される無機態窒素の形態が斜面の下部側ではほとんどが硝酸態、斜面の上部側ではほとんどがアンモニア態であり、優占する無機態窒素の形態は斜面中部の斜距離15m以内という狭い空間スケールで急激に変化することがわかった。

得られた見かけの窒素無機化特性の空間的変動パターンは、斜面に沿って変化するpH、水分条件、炭素・窒素の蓄積量とその存在比など様々な土壌条件により決定されると考えられた。しかし、これらの土壌条件を分析したところ、見かけの窒素無機化特性と同様な斜面中部での急激な変化を示すものではなく、斜面に沿った見かけの窒素無機化特性の空間変動は単一の要因により決定されていないことが示唆された。様々な土壌条件が斜面に沿った見かけの窒素無機化特性の空間変動に与える影響を相対的に評価するため、まず、主成分分析により様々な土壌条件をいくつかの主成分に整理した。その結果、様々な土壌条件は土壌水分条件と強い相関を示す第一主成分、炭素/窒素比およびpH、と強い相関を示す第二主成分、全炭素・全窒素濃度と強い相関を示す第三主成分の3つの主成分に分けられた。得られた3つの主成分を説明変量、見かけの窒素無機化特性を目的変量として重回帰分析を行った結果、見かけの窒素無機化速度は主に第三主成分によって決定されるのに対し、見かけの硝化速度および硝酸態窒素の生成率は主に第一・第二主成分によって決定されることがわかった。

同一斜面に沿った土壌窒素利用可能性の空間的変動¹⁰⁾

実験室培養による見かけの窒素無機化速度は、植物に利用可能な窒素量の指標の一つとされている²⁾。本研究が

対象とした一斜面では実験室培養による見かけの窒素無機化速度には斜面に沿った傾向が見られなかったが、生成される無機態窒素の形態は斜面の下部と上部で大きく異なった⁹⁾。土壌において無機態窒素は拡散とマスフローにより植物根に供給され¹⁾、通常負に帯電している森林土壌ではどのような土壌水分状態であっても硝酸態はアンモニア態に比べ1オーダー以上可動性が高い³⁾。これらのことから、見かけの無機化速度に差がみられない場合でも、生成される無機態窒素形態の違いにより植物に利用可能な窒素量は異なると考えられた。そこで、野外での温度・湿度変動に加え、土壌中でのイオンの可動性を反映した植物に利用可能な窒素量を測定するため、イオン交換樹脂を用いた^{2,7)}。イオン交換樹脂を斜面に沿った多数の地点で一定期間土壌中に埋設し、吸着された無機態窒素量を測定した。その結果、イオン交換樹脂に吸着された無機態窒素量は斜面の下部ほど多かった。また、イオン交換樹脂に吸着された無機態窒素の形態は、斜面上の位置に関わらず硝酸態が優占していた。これらのことから、森林土壌において高い可動性を持つ硝酸態が主に生成される斜面下部の方が、可動性が低いアンモニア態を生成する斜面上部に比べてスギに対する窒素利用可能性が高いことが示唆された。

同一斜面の上部および下部における土壌内窒素循環の長期実験室培養による比較¹¹⁾

実験室培養により測定した見かけの窒素無機化特性は、一定期間における無機態窒素プールの変化量であり、生成あるいは消費の速度そのものではない。そのため、斜面の上部において見かけの硝化速度が非常に低いことが、硝化過程そのものが非常に不活性であることによるのか、あるいは生成された硝酸態が速やかに微生物に利用される(不動化: immobilization)ことによるのかを明らかにする必要がある。また、土壌内窒素循環と微生物にたいする炭素の利用可能性に密接な関係があることが示されてきている。そこで、斜面の上部および下部で採取した鉬物質土壌(0~5cm)を300日間の実験室培養を行った。外部からの炭素供給を遮断した状態で長期間培養することにより、微生物にたいする炭素の利用可能性に勾配を設けるとともに、¹⁵Nトレーサーを用いた真の窒素無機化特性(gross N transformations)を含む炭素、窒素動態の経時変化を測定した。その結果、見かけの窒素無機化速度には斜面上の位置による大きな差がなかったが、真の窒素無機化特性は特に培養初期では斜面の下部で斜面の上部に比べて非常に高いことがわかった。真の硝化速度(gross nitrification rate)は、見かけの硝化速度が高い斜面の下部だけでなく、見かけの硝化速度が非常に低いか全く検出されない斜面の上部でも、土壌内窒素循環過程として無視できないことも明らかになった。このことから、斜面の上部の土壌において見かけの硝化速度が

非常に低いか全く検出されない原因は、硝化過程そのものが非常に不活性であるからではなく、生成された硝酸態が速やかに微生物に不動化されるためと推察された^{5,8,16)}。また、培養の後期において、斜面の下部・上部の土壌とも硝酸態プールの増大（見かけの硝化）がみられた。この現象は、外部からの炭素供給を遮断して土壌を長期間培養すると、微生物に利用可能な炭素資源が枯渇してアンモニア態の不動化が減少し、独立栄養性の硝化菌が活発に活動しはじめるというこれまでの解釈が適用できる¹⁹⁾。しかしながら、斜面の下部の土壌では、高い呼吸速度に示されるように微生物にたいする炭素の利用可能性が高い培養初期でも硝酸態プールの増大がみられた。そこで、土壌における硝酸態プールの増大は、単純に微生物にたいする炭素の利用可能性のみにより決定されているのではなく、炭素と窒素の相対的な利用可能性により決定されているのではないかと推察した^{4,15)}。すなわち、相対的に炭素資源（エネルギー）が豊富にあり、窒素資源（養分）が不足している際は、不足する窒素を補うために無機態窒素の不動化が活発に行われ、可動性の高い硝酸態は生成されると速やかに消費される。一方、相対的に炭素資源が不足し、窒素資源が豊富にある際は、無機態窒素の不動化は抑制され、硝酸態プールの増大が生じる可能性がある。このことを検証するため、土壌の0.5M K₂SO₄抽出液に含まれる有機態炭素/有機態窒素比の変化と硝酸態プールの変化を比較したが、両者には強い相関関係はみられなかった。0.5M K₂SO₄抽出液に含まれる有機態炭素・有機態窒素濃度が微生物に利用可能な炭素資源・窒素資源の最も良い指標ではないことが影響していると思われる¹⁵⁾、さらなる検討が必要である。

引用文献

- 1) Barber, S. A. : A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.*, **93**, 39-49 (1962)
- 2) Binkley, D. and S. C. Hart : The components of nitrogen availability assessments in forest soils. *Adv. Soil Sci.*, **10**, 57-112 (1989)
- 3) Clark, E. L. and K. P. Barley : The uptake of nitrogen from soils in relation to solute diffusion. *Aust. J. Soil Res.*, **6**, 75-92 (1968)
- 4) Clein, J. S. and J. P. Schimel : Nitrogen turnover and availability during succession from alder to poplar in Alaskan taiga forests. *Soil Biol. Biochem.*, **27**, 743-752 (1995)
- 5) Davidson, E. A., S. C. Hart and M. K. Firestone : Internal cycling of nitrate in soils of a mature coniferous forest. *Ecology*, **73**, 1148-1156 (1992)
- 6) Garten, C. T., M. A. Huston and C. A. Thoms : Topographic variation of soil nitrogen dynamics at Walker Branch Watershed, Tennessee. *For. Sci.*, **40**, 497-512 (1994)
- 7) Hart, S. C. and M. K. Firestone : Evaluation of three in situ soil nitrogen availability assays. *Can. J. For. Res.*, **19**, 185-191 (1989)
- 8) Hart, S. C., G. E. Nason, D. D. Myrold and D. A. Perry : Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest : the carbon connection. *Ecology*, **75**, 880-891 (1994)
- 9) Hirobe, M., N. Tokuchi and G. Iwatsubo : Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *Eur. J. Soil Biol.*, **34**, 123-131 (1998)
- 10) Hirobe, M., N. Tokuchi and G. Iwatsubo : Spatial and vertical differences in *in-situ* soil nitrogen availability along a slope in a conifer plantation forest. *Appl. For. Sci.*, **10**(2), 19-25 (2001)
- 11) Hirobe, M., K. Koba and N. Tokuchi : Dynamics of the internal soil nitrogen cycles under moder and mull forest floor types on a slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *Ecol. Res.*, **18**, 53-64 (2003)
- 12) Melillo, J. M. : Nitrogen cycling in deciduous forests. *In Terrestrial Nitrogen Cycles*. (F. E. Clark and T. Rosswall eds.), *Ecol. Bull.*, **33**, 427-442 (1981)
- 13) Pastor, J., J. D. Aber, C. A. McLaugherty and J. M. Melillo : Geology, soils and vegetation of Blackhawk Island, Wisconsin. *Am. Midl. Nat.*, **108**, 266-277 (1982)
- 14) Roy, S. and J. S. Singh : Seasonal and spatial dynamics of plant-available N and P pools and N-mineralization in relation to fine roots in a dry tropical forest habitat. *Soil Biol. Biochem.*, **27**, 33-40 (1995)
- 15) Scott, N. A., R. L. Parfitt, D. J. Ross and G. J. Salt : Carbon and nitrogen transformations on New Zealand plantation forest soils from sites with different N status. *Can. J. For. Res.*, **28**, 967-976 (1998)
- 16) Stark, J. M. and S. C. Hart : High rates of nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forests. *Nature*, **385**, 61-64 (1997)
- 17) 戸田浩人・生原喜久雄 : 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 (1994)
- 18) Tokuchi, N., H. Takeda, K. Yoshida and G. Iwatsubo : Topographical variations in a plant-soil system along a slope on Mt. Ryuoh, Japan. *Ecol. Res.*, **14**, 361-369 (1999)
- 19) Vitousek, P. M., J. R. Gosz, C. C. Grier, J. M. Melillo and W. A. Reiners : A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems. *Ecol. Monogr.*, **52**, 155-177 (1982)
- 20) Vitousek, P. M. and R. W. Howarth : Nitrogen limitation on land and in the sea : how can it occur? *Biogeochemistry*, **13**, 87-115 (1991)
- 21) Vitousek, P. M., J. D. Aber, R. W. Howarth, G. E. Likens, P. A. Matson, D. W. Schindler, W. H. Schlesinger and D. G. Tilman : Human alteration of the global nitrogen cycle : sources and consequences. *Ecol. Applic.*, **7**, 737-750 (1997)
- 22) Woodmansee, R. G., I. Vallis and J. J. Mott : Grassland nitrogen. *In Terrestrial Nitrogen Cycles*. (F. E. Clark and T. Rosswall eds.), *Ecol. Bull.*, **33**, 443-462 (1981)
- 23) 吉田重明・春田泰次・仁王以智夫 : 森林土壌中の窒素の動態(I)土壌型の異なる2種の天然林土壌中の窒素の無機化と硝化活性. *日林誌*, **62**, 230-233 (1980)
- 24) Zak, D. R., K. S. Pregitzer and G. E. Host : Landscape variation in nitrogen mineralization and nitrification. *Can. J. For. Res.*, **16**, 1258-1263 (1986)