

## 筑波共同試験地スギ・ヒノキ人工林における窒素無機化プロセスと年間無機態窒素生成量

稲垣昌宏 (森林総研九州)・稲垣善之・古澤仁美・小林政広・伊藤優子 (森林総研)・吉永秀一郎 (森林総研九州)・鶴川信・金子真司・三浦覚 (森林総研)

**要旨:** 関東平野周辺部では、森林生態系内の窒素収支が支出過多となる窒素飽和現象が起こっている可能性が指摘されている。森林総研筑波共同試験地における土壌中の無機態窒素現存量と窒素無機化データを2年間測定し、無機態窒素現存量の月変化と年間窒素無機化量を算出した。スギ、ヒノキ両林分とも夏期に硝酸態窒素が卓越したが、10月から6月末までは値が低く、春から夏の間は地温変化と一致していなかった。鉍質土壌0-50cmまでの年平均無機態窒素生成量(±95%信頼区間)は、スギ林で $51.0 \pm 33.7 \text{ kg N ha}^{-1}$ 、ヒノキ林で $75.0 \pm 74.8 \text{ kg N ha}^{-1}$ であり、窒素降下物の影響が少ないとされる地域と比べ、高い傾向は見られなかった。これは、最表層(0-5cm)以深の土壌で無機態窒素の生成が少ないことと春から夏の間は硝酸態窒素の生成が少ないためであった。季節変化と、現地無機態窒素生成量は各年とも同様の傾向にあった。本試験地は土壌下層での無機態窒素フラックスが大きく、渓流水での流出量が多いことが明らかにされているが、レジンコア法による無機化量の測定で上側のレジンによって捕捉された無機態窒素量が大きかったことから、乾性沈着もしくは $A_0$ 層中で生成した無機態窒素が、窒素流出へ影響している可能性が示唆された。

**キーワード:** 窒素飽和, 硝酸態窒素, アンモニア態窒素, レジンコア法, 年間窒素無機化量

**Abstract:** Some researchers alerted that the “nitrogen saturation phenomenon” can occur around the border area of the Kanto plain. We monitored soil N concentrations and *in situ* net nitrogen mineralization in sugi cedar and hinoki cypress plots at the Tsukuba Experimental Station, FFPRI over two years in order to investigate the seasonal changes and annual inorganic N productions. Although nitrate was prominent foam during summer in the both plots, inorganic N concentrations were low during spring to summer in spite of higher soil temperature. Annual net inorganic N productions (mean ± 95 % CI) were  $51.0 \pm 33.7$  and  $75.0 \pm 74.8 \text{ kg N ha}^{-1}$  at the sugi and hinoki plots, respectively. These values are not higher than that in the remote area, due to the lower N production at the deeper soil horizons and during spring to summer. The seasonal changes in soil N concentrations and the inorganic N productions were similar in each year. Our previous research revealed that the inorganic N flux at the deeper soil horizon and runoff is extremely large. Because the inorganic N flux at the soil surface using the resin core method was equal to or larger than the soil N productions, our findings suggested that dry N depositions or inorganic N mineralized at the forest floor can contribute to such a large N loss from the ecosystem.

**Keywords:** nitrogen saturation, nitrate N, ammonium N, resin core method, anthropogenic pollutants

## I はじめに

窒素の無機化プロセスは可給態窒素の供給という点で、窒素の移動量(9)、土壌の無機化過程(7)について継続的に森林生態系の生産性を決定する主要な要因である。通常、調査している。当該試験地は、林内雨による窒素流入量温帯林では窒素が生産性の制限要因となるが(12)、都市近郊では人為的な汚染物質のかたちで流入した過剰な窒素が生態系外に流出する「窒素飽和現象」が起こっており、流出水の富栄養化と森林衰退の要因として危惧されている(1)。国内においては関東平野周辺部の渓流水で硝酸態窒素濃度が高いことが報告されており、窒素飽和現象の兆候がみられている(6)。

著者らは、関東平野辺縁部にある窒素飽和現象が疑われる人工林試験地において、降雨と渓流水による窒素の流

入と流出(10)、リターフォールを指標とする森林の生産と、が場所によっては年間  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  を超え、窒素流出量も年間  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  以上と都心から  $100 \text{ km}$  以上離れた試験地と比べると非常に大きいことがわかっている(10)。一方で、試験林分であるヒノキ人工林は旺盛な成長を示している(1)。国内においては関東平野周辺部の渓流水で硝酸態窒素濃度が高いことが報告されており、窒素飽和現象の兆候は見られず(9)、土壌中の窒素の無機化速度は夏期の最表層以外は大きくないことが明らかになっている(7)。

本研究では、無機態窒素の生成パターンを複数年で比較し、年間の無機態窒素生成量を求め過去の研究例との

Masahiro INAGAKI (Kyushu Res. Ctr., For. and Forest Prod. Res. Inst. Kumamoto 860-0862), Yoshiyuki INAGAKI, Hitomi FURUSAWA, Masahiro KOBAYASHI, Yuko ITOH (For. and Forest Prod. Res. Inst. Ibaraki 305-8687), Shuichiro YOSHINAGA (Kyushu Res. Ctr., FFPRI), Shin UGAWA, Shinji KANEKO, Satoru MIURA (For. and Forest Prod. Res. Inst.) Processes of net nitrogen mineralization and annual net inorganic nitrogen production in soils under *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations at the Tsukuba Experimental Station

比較を行った。土壌中の無機態窒素の現存量については、から、他の深さの値を外挿して求めた。標準偏差が大きく、さらに春から夏にかけての生成が少ないという特異的な傾向が見られたため(7)、サンプリング頻度を多くし、2年間の傾向の類似性と春から夏までの変化を詳細に検討した。

## II 調査地概要と調査方法

試験は既報(7,9,10)と同じく森林総合研究所筑波共同試験地(北緯 36° 10′, 東経 140° 10′, 標高約 320・390m)で行った。同試験地の年平均降水量は約 1400mm, 気温は 14.1°Cである(7)。試験地全体の平均傾斜は約 25° である。

2007年時点で55年生スギ(*Cryptomeria japonica*)林および、40年生ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)林にそれぞれプロットを設置した。試験地内の土壌型は尾根に近いヒノキ林区で B<sub>D</sub>(d)型, 斜面中腹にあるスギ林区で B<sub>D</sub>型である。それぞれのプロットから6地点ずつ、0-5cm と 20-25cm 深から、採土円筒を用いて土壌の採取を行った。また、円筒内の有機物画分を測定した。冬期以外は、初年度は約3ヶ月、2年目は約1ヶ月半の頻度で2007年10月末から2009年10月末までサンプリングを行なった。

さらに、レジソコア法(3,4,5)を用いて、0-5cm と 20-25cm 深の土壌中の窒素無機化速度の測定を現地温度で行なった。円筒の上下に、イオン交換樹脂を詰めた円筒を取り付け、上方からの水の移動を遮らない一方で無機態窒素の外部からの侵入を防ぎ、コア中に生成した分と下方に流出した分を足し合わせた無機態窒素を測定した。レジソコア法による窒素無機化量の測定は、冬期は6ヶ月間、それ以外は3ヶ月間毎に測定を行なった。コアの容量等は、平井ら(4)と同一の条件で行なった。また、それぞれの試験区でレジソコアを設置した深さで、データロガーを用いて地温を測定した。

サンプリング土壌およびレジソコアによる現地培養土壌とも採取日当日に2NのKCl溶液を用いて、乾重あたり約1:10の割合で無機態窒素を抽出した。イオン交換樹脂(IR120B(H)及びIRA410(OH)もしくはMB-1, オルガノ)の処理も平井ら(4)と同一の条件で行なった。

分析はフローインジェクション装置(TN-30NN および TN-50, 三菱化学アナリテック)を用いて定法で定量した。

0-50cm までを積算した年間窒素無機化量は、土壌断面から深さ10cmごとに土壌を採取し、室内培養による無機化ポテンシャルを求め、0-5 および 20-25cm の現地無機化速度の年間値と無機化ポテンシャルとの比

## III 結果

土壌から抽出した無機態窒素濃度は、両林分とも2年間とも同じような季節変化を示した(図-1)。硝酸態窒素は、夏に表層土壌で濃度が高く、秋以降に減少した。両林分とも2009年6月25日のサンプルまで、前年10月からの低い傾向が継続され、7月末に急速に濃度が上昇した。スギ区では、夏期以外は0-5cm と 20-25cm での硝酸態窒素濃度がほぼ等しく、ヒノキ区では夏期以外は20-25cmの方が、0-5cmより濃度が高い測定回が多く見られた。アンモニウム態窒素はほとんどの月で低い状態が保たれたが、1年目の4月30日と2年目の7月30日に若干のピークが見られた。

採取試料中の有機物量は、スギ区では0-5cm と 20-25cm でほぼ等しかったが、ヒノキ区では0-5cm が 20-25cm に比べて倍以上存在していた測定回が大半であった(図-2)。

土壌中の無機化速度は、土壌から抽出した無機態窒素濃度と同様、ヒノキ区の夏から秋における値を除いて2年間とも同じような傾向を示した(図-3)。両林分とも、平均すると夏から秋がもっとも無機化速度が大きかった。地温から5°Cを引いた値の積算値を測定期間毎に比較すると、春から夏までと夏から秋までは両林分とも0-5cm で約2300 とほぼ等しく、秋から春までは約700であった。両林分とも春から夏までの無機態窒素の生成速度は積算地温と対応せず、その他の期間と比較して低かった。

0-50cm までの年間の無機態窒素生成量(平均±95%信頼区間)は、スギ区で 51.0 ±33.7 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, ヒノキ区で 75.0 ±74.8 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>であった(表-1)。一方、0-5cm に設置したレジソコア上部で捕捉された無機態窒素量は、スギ区で 34.0 ±25.2 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, ヒノキ区で 109 ±146 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>であった。いずれの値も誤差範囲が非常に大きかったが、土壌中における生成量と比較して相当量の無機態窒素が土壌表面から流入していた。

## IV 考察

土壌中の無機態窒素濃度は、2年目の測定においても1年目同様に春から夏に低い傾向を示した。特に、気温が高くなる5月から6月にかけても低い濃度が維持されていた。これは土壌中における無機態窒素の生成が少ないこと(図-3)と、春から夏にかけての植物成長に伴う吸収が大きかったことの両方が影響していたと考えら

れる。とくにヒノキ区においては 0-5cm よりも 20-25cm の硝酸態窒素濃度が秋から6月末まで高い傾向が見られた(図-1)。ヒノキ区はスギ区よりも表層 0-5cm の有機物量が大きく、観察からこの大半が細根由来のものであったことから、ヒノキ区では特に表層での無機態窒素吸収が卓越していたものと考えられた。2年間とも春から夏の期間の無機態窒素の生成が少なかった結果は他の研究例の結果と異なっていた(4,11)。その理由は不明なままであるが、本試験地の特徴である樹木成長が盛んなことが、春先に無機化に関わる微生物相の分布に何らかの影響を与えているかもしれない。

0-50cm の範囲での年間の平均無機態窒素生成量は、都心から 100km 以上離れた茨城県城里町の桂試験地における、レジソコア法による測定例(斜面中部のスギ林で 176.6 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>)、および埋設バッグ法による測定例(スギ林で 130-300 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>)と比較してかなり少なかった(2,4)。彼らの測定例と比較すると、前述した春から夏の生成量が少ないことと、深さ 20cm 以下での生成量がかなり少ないことが結果に影響していた。しかし、関東平野周辺域を含む他の調査事例の集約結果(5,8,11)と比較して、特別低いと言えなかった。以上をまとめると、窒素飽和の兆候が見られる本試験地で土壌中の無機化量が大きい傾向は見られなかった。

一方で、レジソコア上面のイオン交換樹脂に捕集される無機態窒素、すなわち土壌最表層に流入する無機態窒素量は、土壌中での生成量に匹敵していた。林内雨中の無機態窒素はスギ区で約 11 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>、ヒノキ区で約 22 kg N ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>であった(10)。これに、乾性降水物の一部と、A<sub>0</sub>層中で生成した無機態窒素量が変わって、土壌表面のレジソコア上部で捕捉された無機態窒素量になったと考えられる。本試験地における土壌下層および渓流水中の無機態窒素フラックスは、都心から離れた桂試験地と比較して非常に大きく(10)、土壌中の窒素無機化による寄与と同等かそれ以上に表層から流入する無機態窒素が寄与していたものと考えられた。

謝辞

本研究は環境省地球環境保全等試験研究費「大都市圏の森林における窒素飽和による硝酸態窒素流出に関する研究」によってとり行われた。本研究の一部は、独立行政法人森林総合研究所エンカレッジモデルによる研究支援を受けた。

V 引用文献

(1) ABER, J.D., NADELHOFFER, K.J., STEUDLER,

P., MELILLO, J.M. (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* 39 : 378-386.

(2) 相澤州平・吉永秀一郎 (2009) 森林小流域における深さ 50cm までの窒素無機化量の推定 日本森林学会大会講演要旨集 120 : 132.

(3) DISTEFANO, J.F., GHOLTS, H.L. (1986) A proposed use of ion exchange resins to measure nitrogen mineralization and nitrification in intact soil cores. *Commun in Soil Sci Plant Anal* 17 : 989-998.

(4) 平井敬三・野口享太郎・溝口岳男・金子真司・高橋正通 (2007a) 森林土壌の現地窒素無機化における下層土及び季節別の寄与 森林立地 49 : 51-59.

(5) 平井敬三・森貞和仁 (2007b) レジソコア法を適用した森林土壌における現地窒素無機化の定量 東北森林学会誌 12(1) : 12-20.

(6) 伊藤優子・三浦覚・加藤正樹・吉永秀一郎 (2004) 関東・中部地方の森林流域における渓流水中の NO<sub>3</sub>濃度の分布 日本森林学会誌 86 : 275-278.

(7) 稲垣昌宏・橋本徹・古澤仁美・稲垣善之・鶴川信・長倉淳子・金子真司・三浦覚 (2010) 筑波共同試験地スギ・ヒノキ人工林における 関東森林研究 61 : 179-182.

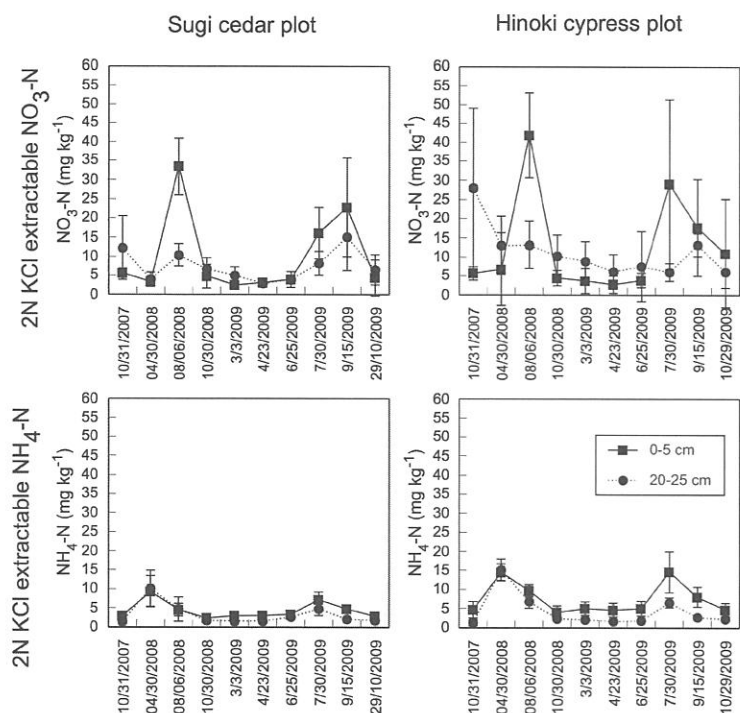
(8) 稲垣善之・稲垣昌宏・三浦覚・小林政広・伊藤優子・吉永秀一郎・戸田浩人・福島慶太郎・館野隆之輔・徳地直子 針葉樹人工林流域における窒素負荷と窒素流亡の関係 関東森林研究 63 : 97-100.

(9) 稲垣善之・橋本徹・金子真司・三浦覚・稲垣昌宏・中西麻美 (2010) 筑波共同試験地ヒノキ人工林におけるリターフォール窒素量 関東森林研究 61 : 175-178.

(10) 小林政広・吉永秀一郎・伊藤優子・稲垣昌宏・稲垣善之・坪山良夫・玉井幸治・壁谷直記・清水貴範 (2011) 窒素流入量の異なる2つの森林流域における硝酸態窒素流出. 日本陸水学会講演要旨集 76 : 45.

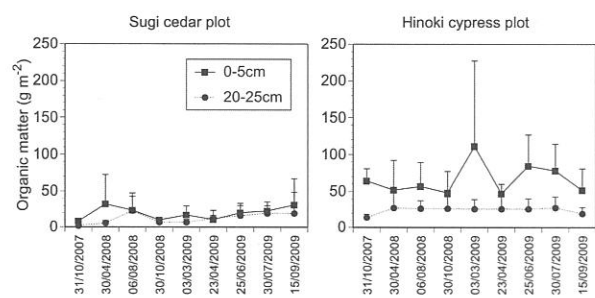
(11) 館野隆之輔・鈴木寿仁・濱田肇次・日高謙太 (2010) 南九州のスギ人工林における斜面位置の違いが土壌窒素無機化特性に与える影響 鹿大演研報 37 : 129-136.

(12) VITOUSEK, P.M., HOWARTH, R.W. (1991) Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry* 13: 87-115.

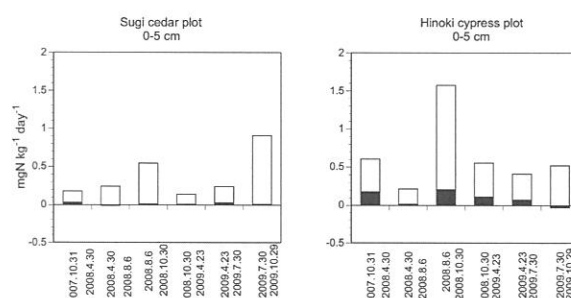


図・1. 2調査区の塩化カリウム抽出による無機態窒素濃度

Fig. 1. Inorganic N concentrations by 2N KCl extraction in the soils under the two plots over two years



図・2. 2調査区の土壌中の有機物画分量  
Fig. 2. Organic matter fraction in the soils under the two plots



図・3. 2調査区の表層土壌(0.5 cm)における期間毎の窒素無機化速度 黒塗部分は NH<sub>4</sub>-N 生成量, 白抜き部分は NO<sub>3</sub>-N 生成量を表す  
Fig. 3. Periodical net N mineralization rate in the top soils (0-5 cm) under the two plots over two years  
The closed bar indicates NH<sub>4</sub>-N production and the open bar indicates NO<sub>3</sub>-N production.

表-1. 2プロットにおける2年間の年平均無機態窒素生成量  
Table 1. Annual net soil N mineralization in the two plots over 2 years

	Sugi cedar plot			Hinoki cypress plot		
	Mean (kg N ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	SD (n=6)	95% CI	Mean (kg N ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	SD (n=6)	95% CI
0-10 cm	31.2	29.3		52.7	68.1	
10-20 cm	10.8	10.2		15.0	19.4	
20-30 cm	4.8	8.2		4.7	7.6	
30-40 cm	2.3	2.1		2.3	3.0	
40-50 cm	1.8	1.7		0.2	0.3	
0-50 cm total	51.0	32.1	33.7	75.0	71.2	74.8