

針葉樹人工林流域における窒素負荷と窒素流亡の関係

稲垣善之 (森林総研)・稲垣昌宏 (森林総研九州)・三浦覚・小林政広・伊藤優子(森林総研)
吉永秀一郎 (森林総研九州)・戸田浩人 (東京農工大)・福島慶太郎・館野隆之輔・徳地直子 (京都大)

要旨：人為起源の窒素が降水などによって森林生態系に負荷されると、窒素流出の増加や水質の悪化などの悪影響が懸念される。本研究では、関東と近畿地域の7か所のスギ人工林を含む森林流域の窒素収支と窒素循環を比較した。林内雨による窒素供給は $7.4\text{--}20.0\text{ kg N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ であり、渓流水からの窒素流出量は $1.5\text{--}13.5\text{ kg N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ であった。すべての流域において林内雨による窒素供給量よりも渓流水からの窒素流出量は小さかった。林内雨による窒素負荷量とリターフール窒素量、土壌の窒素無機化量には有意な相関関係は認められなかった。渓流水からの窒素流出は、林内雨による窒素負荷量と窒素無機化量を変数とする重回帰式によって予測できた。以上の結果、針葉樹人工林流域において、林内雨による窒素供給量と土壌の窒素無機化量は、渓流水からの窒素流出を決定する重要な要因であると考えられた。

キーワード：スギ、窒素流出、窒素負荷、窒素無機化、窒素飽和

Abstract: Nitrogen deposition by anthropogenic activity may cause an increase in nitrogen loss from the forested ecosystem and a decline in water quality. The input-output balance of nitrogen and nitrogen cycling were investigated for 7 forested catchments including Japanese cedar plantation in Kanto and Kinki districts. Nitrogen load by throughfall ranged from 7.4 to 20.0 kg N ha⁻¹ y⁻¹ while nitrogen loss by stream ranged from 1.5 to 13.5 kg N ha⁻¹ y⁻¹. The nitrogen loss by stream was smaller than nitrogen input by throughfall in all catchments while the nitrogen load by throughfall did not significantly affect the litterfall nitrogen or soil nitrogen mineralization. Multiple regression analysis has shown that nitrogen loss by stream was predicted by throughfall nitrogen input and soil nitrogen mineralization. This finding suggests that nitrogen input by throughfall and soil nitrogen mineralization are important factors determining nitrogen loss in coniferous plantation forests.

Key words: Japanese cedar, nitrogen loss, nitrogen load, nitrogen mineralization, nitrogen saturation

I はじめに

近年、人為影響で森林に負荷される窒素量が增大している。樹木が吸収できる能力以上に生態系に窒素が負荷された場合、土壌中の硝化活性が増加し、土壌の酸性化、樹木の衰退、渓流水からの窒素流出の増加などの悪影響が懸念されている。これらの現象は窒素飽和と呼ばれている(1,4)。関東地方の都市近郊の森林流域では、渓流からの窒素流亡が大きく窒素飽和の状態にあることが指摘されている(9,13)。森林に負荷される窒素が増大すると、窒素吸収や窒素無機化の増加が予想されるが、日本の森林生態系では情報が少ない。本研究では、関東、近畿地方のスギ人工林を含む7流域を比較し、林内雨による窒素負荷量、窒素無機化量、渓流からの窒素流出量の関係を明らかにした。

II 調査方法

調査対象としたのは、群馬県大谷山試験地(OYS)、茨城県筑波試験地(TKB)、茨城県桂試験地(KTR)、奈良県護国寺試験地(GEF1-4)である(表-1)。OYS, TKB, KTRでは1流域を選定し、GEFでは林齢の異なる4流域を対象とした。これらの流域の主な植生はスギ人工林であるが、斜面上部にヒノキ人工林(KTR以外の流域)や、広葉樹林(KTR)を含んでいる。これらの流域において、林内雨による窒素負荷量、リターフール窒素量、土壌の窒素無機化量、窒素流出量の文献値を集めた(表-1)。林内雨窒素量、リターフール窒素量、土壌の窒素無機化量は、流域内の数地点で計測されている。これらの流域では、測定

YOSHIYUKI INAGAKI (Forestry and Forest Products Research Institute, Tukuba 305-8687, Japan), MASAHIRO INAGAKI (Kyushu Research Center, FFPRI, Kumamoto 860-0862), SATORU MIURA, MASAHIRO KOBAYASHI YUKO ITOU (FFPRI), SHUICHIRO YOSHINAGA (Kyushu Research Center, FFPRI), HIROTO TODA (Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183-8509), KEITARO FUKUSHIMA, RYUNOSUKE TATENO, NAOKO TOKUCHI, (Kyoto University, Kyoto, 606-8502)

値の平均値を流域の代表値として扱った。したがって、OYS と TKB ではスギ林とヒノキ林の平均値、KTR ではスギ林と広葉樹林の平均値を流域の代表値とした。TKB のスギ林のリターフォール窒素量は未発表であるが、同流域内のヒノキ林と同様の方法 (8) で測定した。窒素無機化量については、土壌の深さが 0-30cm の値を基本としたが、OYS では、0-30cm のデータが得られなかったため、深さ 0-20cm の値を利用した。林内雨窒素負荷量に対する窒素流出量の割合を窒素流出率 (%) として算出した。特性間の相関関係をピアソン相関係数によって解析した。窒素流出量を重回帰分析によって解析した。

III 結果と考察

1. 窒素収支

林内雨による窒素供給は $7.4-20.0 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、OYS と TKB で大きかった。渓流水からの窒素流出量は $1.5-13.5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり OYS と TKB で大きかった。窒素流出率 (Nout/Ntf) は 10.8-69.0% であり、OYS と TKB で高く (66-69%)、他の流域では 25% 以下と低かった。Fang et al (2) は、中国の森林において、平均の窒素流出率が 22% であることを明らかにした。OYS と TKB の窒素流出率は日本や中国の森林と比較しても大きく、窒素飽和に近い状態にあると考えられた。

2. 内部循環特性

リターフォール窒素量と土壌の窒素無機化量はそれぞれ $26.0-53.0 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。窒素無機化量は $17.4-105.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。窒素負荷が大きい OYS と TKB における窒素無機化量は $51.5, 59.7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であり、やや大きい値を示した。一方、KTR における窒素無機化量は $105.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であり、7 林分の中で最も大きかった。

7 林分についてリターフォール窒素量と土壌窒素無機化量には有意な相関関係は認められなかった ($r = 0.55, p > 0.05$, 表-2)。北米の森林においても、本研究の結果同様にリターフォール窒素と窒素無機化量には明瞭な関係は認められていない (17)。一方で、リターフォールのリグニン/窒素比と土壌の窒素無機化量との間に強い相関関係が認められている (7, 17)。これらの知見より、土壌の窒素無機化量は、リターフォール窒素量との関係は明瞭でなく、他の要因の影響が大きいことが示唆された。

林内雨窒素量とリターフォール窒素量には有意な相関関係は認められなかった ($r = 0.37, p > 0.05$)。この傾向は、北米の森林において、窒素施肥実験によってリターフォール窒素量も増加する傾向とは異なっている (12, 16)。有意

な影響が認められなかった要因として、林齢の影響が考えられる (3)。すなわち、スギ人工林では、植栽初期にはリターフォールが少なく、30-40 年生にかけてリターフォールが増大する。80 年生を超えるとリターフォールは低下する。また、窒素濃度の高い下層植生の割合も林齢に伴って変動するためにリターフォール窒素量に影響を及ぼす (3)。このように林齢に対する変動が大きいために、林内雨窒素量の影響が認められない可能性がある。

林内雨窒素量と土壌窒素無機化量には有意な相関関係は認められなかった ($r = -0.39, p > 0.05$)。KTR では林内雨窒素量が 7 流域で最も小さかったが、窒素無機化量は最も大きかった。Takebayashi et al の研究 (20) では、東京～長野県のヒノキ林において、窒素負荷量と窒素無機化量に明瞭な正の相関は認められなかった。全国の森林を比較した研究 (18) では、窒素負荷、窒素流出の大きい地域で窒素無機化量が大きい傾向は認められなかった。これらの知見より、日本の窒素負荷の多い地域で土壌の窒素無機化量が顕著に増加する傾向は認められない。

3. 窒素流出を決定する要因

窒素流出は、林内雨窒素量と有意な正の相関関係を示した ($r = 0.83, p = 0.02$, 表-2)。林内雨窒素量と窒素流出との間に強い相関関係が認められる傾向は欧米や中国の森林でも報告されている (2, 4)。したがって、林内雨による窒素負荷が森林生態系からの窒素流出を予測する上で重要な要因であるといえる。

窒素流出は、林内雨による窒素供給量と土壌の窒素無機化量を変数とする重回帰式によって予測できた (図-2)。林内雨窒素量と窒素無機化量の標準偏回帰係数 (有意水準) はそれぞれ、1.04 (0.001), 0.57 (0.005) であった。窒素無機化量の影響は、単相関では有意ではなかったが、重回帰分析において有意な説明変数となった。以上の結果より、窒素流出量には、林内雨による窒素負荷量と土壌の窒素無機化量が重要な要因であることが示唆された。窒素無機化量には、気象条件 (19)、林齢 (3, 7) などの多くの要因が影響を及ぼす。森林管理によって窒素無機化量がどのように変動するかを明らかにすれば、窒素流出を削減するための基礎的な情報になる。リターフォール窒素量と窒素無機化量の関係は明瞭でなく、窒素無機化量の変動要因についてさらに情報を集めることが必要である。

謝辞

本研究の一部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」、科学研究費補助金 22580167 の補助を受けて

表-1. 針葉樹人工林流域における林内雨室素量 (Ntf) , リターフォール室素量(Nlitter), 窒素無機化量 (Nmin) , 窒素流出量 (Nout)

Table 1 Throughfall N input, litterfall N input, N mineralization and N loss in catchments including coniferous plantation forests.

Catchment	Prefecture	Forest age (yr)	Ntf*	Nlitter*	Soil depth (cm)	Nmin*	Nout*	Nout/Ntf (%)
OYS	Gunma	85	20.0 (15)	41.8 (14)	0-20	51.5 (15)	13.8 (15)	69.0
TKB	Ibaraki	55	16.9 (11)	53.0 **	0-25	59.7 (6)	11.1 (11)	65.7
KTR	Ibaraki	40	7.8 (11)	41.0 (10)	0-30	105.1 (5)	1.9 (11)	24.5
GEF1	Nara	16	11.6 (3)	26.0 (3)	0-30	37.1 (3)	1.8 (21)	15.5
GEF2	Nara	31	13.9 (3)	33.5 (3)	0-30	20.1 (3)	1.5 (21)	10.8
GEF3	Nara	42	13.9 (3)	31.8 (3)	0-30	17.4 (3)	2.6 (21)	18.7
GEF4	Nara	89	13.9 (3)	29.4 (3)	0-30	42.0 (3)	2.6 (21)	18.7

*, kg N ha⁻¹ yr⁻¹

かっこは文献番号を示す。The reference number is indicated in parentheses.

** , 稲垣ら (未発表)

表-2. 要因間の相関係数

Table 2 Pearson correlation coefficients

	Ntf	Nlitter	Nmin	Nout
Nlitter	0.37			
Nmin	-0.39	0.52		
Nout	0.83*	0.72 †	0.16	
Nout/Ntf	0.72 †	0.82*	0.31	0.98**

** p < 0.01, *p < 0.05, † p < 0.10

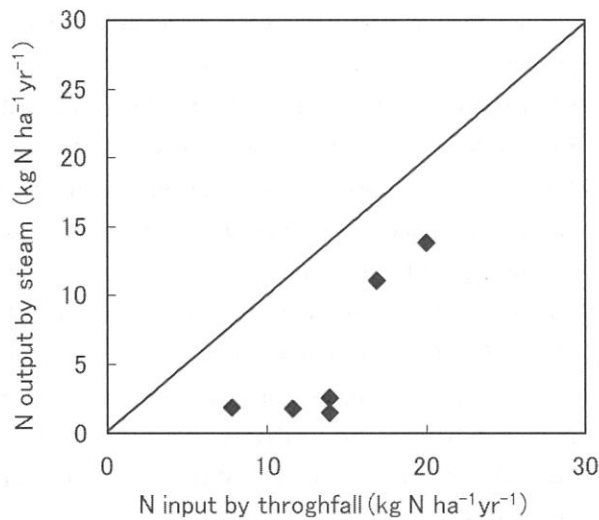


図-1. 林内雨室素量と窒素流出量の関係
Fig. 1 Relationship between nitrogen input by throughfall and nitrogen output by stream water

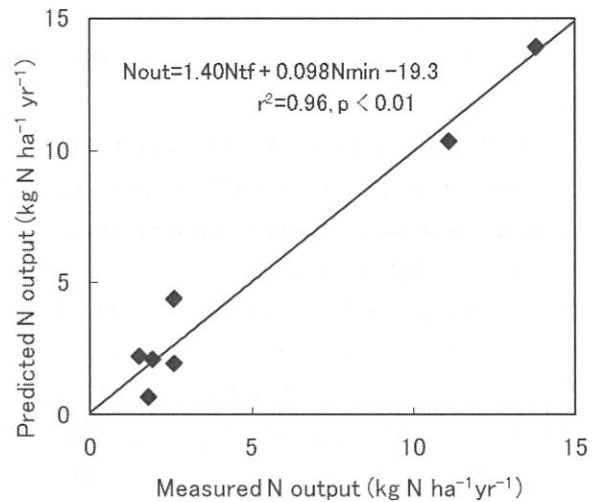


図-2. 重回帰によって予測した窒素流出量と実測値の関係
Fig. 2 Relationship between measured and predicted nitrogen output by multiple regression analysis

実施した。

引用文献

- (1) ABER JD, NADELHOFFER KJ, STEUDLER P, MELILLO JM (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* **39**: 378-386
- (2) FANG YT, GUNDERSEN P, VOGT RD, KOBAYASHI K, CHEN F, CHEN XY, YOH M (2011) Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems. *J For Res* **15**: 341-350
- (3) FUKUSHIMA K, TATENO R, TOKUCHI N (2011) Soil nitrogen dynamics during stand development after clear-cutting of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations. *J For Res* **16**: 394-404
- (4) GUNDERSEN P, SCHMIDT IK, RAULUND-RASMUSSEN K (2006) Leaching of nitrate from temperate forests-effects of air pollution and forest management. *Environ Rev* **14**: 1-57
- (5) 平井敬三・野口享太郎・溝口岳男・金子真司・高橋正通 (2007) 森林土壌の現地窒素無機化における下層土および季節別の寄与. *森林立地* **49**: 51-59
- (6) 稲垣昌宏・稲垣善之・古澤仁美・小林政広・伊藤優子・吉永秀一郎・鶴川信・金子真司・三浦覚 (2012) 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. *関東森林研究* **63**: 101-104
- (7) INAGAKI Y, MIURA S, KOHZU A (2004) Effects of forest type and stand age on litterfall quality and soil N dynamics in Shikoku district, southern Japan. *For Ecol Manage* **202**: 107-117
- (8) 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**: 175-179
- (9) 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_3^- 濃度の分布. *日林誌* **86**: 275-278
- (10) 金子真司・稲垣昌宏・平井敬三・野口享太郎 (2011) 北関東低山地の森林におけるリターフォールによる養分供給量. *関東森林研究* **62**: 187-190
- (11) 小林政広・吉永秀一郎・伊藤優子・坪山良夫・玉井幸治・壁谷直紀・清水貴範 (2011) 茨城県内の2つの森林流域における水移動に伴う窒素流出. *日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集* AHW026-12
- (12) MAGILL AH, ABER JD, CURRIE WS, NADELHOFFER KJ, MARTIN ME, McDOWELL WH, MELILLO JM, STEUDLER P (2004) Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA. *For Ecol Manage* **196**: 7-28
- (13) MITCHELL MJ, IWATSUBO G, OHRUI K, NAKAGAWA Y (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. *For Ecol Manage* **97**: 39-51
- (14) 小柳信宏・千原麻由・生原喜久雄・戸田浩人 (2002a) 分解程度の異なる樹種別リターの炭素および窒素無機化特性. *土肥誌* **73**: 363-372
- (15) 小柳信宏・戸田浩人・久保井喬・生原喜久雄 (2004) 北関東地方の高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域における炭素と窒素の動態特性. *日林誌* **86**: 134-143
- (16) PREGITZER KS, BURTON AJ, ZAK RD, TALHELM AF (2008) Simulated chronic deposition increases carbon storage in Northern Temperate forests. *Glob Change Biol* **14**: 142-153
- (17) SCOTT NA, BINKLEY D (1997) Foliage litter quality and annual net N mineralization: comparisons across North American forest sites. *Oecologia* **111**: 151-159
- (18) SHIBATA H, KURAJI K, TODA H, SASA K (2001) Regional comparison of nitrogen export to Japanese forest streams. *Scientific World* **1**: 572-580
- (19) SHIBATA H, URAKAWA R, TODA H, INAGAKI Y, TATENO R, KOBAYASHI K, NAKANISHI A, FUKUZAWA K, YAMASAKI A (2011) Changes of soil nitrogen transformations in forest ecosystem under the climate gradient in Japanese archipelago. *J For Res* **16**: 374-385
- (20) TAKEBAYASHI Y, KOBAYASHI K, SASAKI Y, FANG YT, YOH M (2010) The natural abundance of ^{15}N in plant and soil-available N indicates a shift of main plant N resources to NO_3^- from NH_4^+ along the N leaching gradient. *Rapid Commun Mass Spectrom* **24**: 1001-1008
- (21) TOBARI Y, KOBAYASHI K, FUKUSHIMA K, TOKUCHI N, OHTE N, TATENO R, TOYODA S, YOSHIOKA T, YOSHIDA N (2010) Contribution of atmospheric nitrate to stream-water nitrate in Japanese coniferous forests revealed by the oxygen isotope ratio of nitrate. *Rapid Commun Mass Spectrom* **24**: 1281-1286