

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

稻垣善之・橋本徹・金子真司・三浦覚・稻垣昌宏（森林総研）・中西麻美（京大フィールド研）

要旨：近年、人為影響で森林に負荷される窒素量が増大している。筑波共同試験地は関東都市部の北東に位置し、窒素負荷量が多い森林である。本研究では筑波共同試験地のヒノキ人工林において、リターフォール窒素量を明らかにし、既往の研究と比較した。筑波共同試験地のヒノキ人工林のリターフォールおよびヒノキ落葉の窒素濃度は、既往の報告（26-28林分）の平均値よりも高かった。また、リターフォールとヒノキ落葉の量および窒素量は、既往の研究の中でも大きい値を示した。ヒノキ落葉量と窒素量の関係には有意な直線関係が認められた。筑波共同試験地のヒノキ落葉の窒素濃度は、回帰による予測よりもわずかに大きい値を示した。筑波共同試験地のヒノキ林ではリターフォール量は多いものの、窒素濃度は顕著に高いとはいせず、窒素負荷の悪影響は認められなかった。

キーワード：ヒノキ、リターフォール、窒素飽和

Iはじめに

近年、人為影響で森林に負荷される窒素量が増大している。樹木が吸収できる能力以上に生態系に窒素が供給された場合、土壤中における硝化が促進され、土壤の酸性化、樹木の衰退、溪流水の硝酸態窒素濃度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)。一方で、森林への窒素負荷によって、樹木の生長促進、土壤炭素の増加も報告されている(2,3)。このように窒素が森林生態系に及ぼす影響は多様である。生態系への影響を明らかにする際には、土壤の変化だけでなく、土壤窒素資源の増加に対する樹木の窒素吸収量の反応、リターフォールによる窒素供給を明らかにすることが重要である。窒素飽和で樹木が衰退した場合、樹木の窒素吸収に対する一次生産量の増加が小さいと考えられる。リターフォール量は地上部一次生産の主要な部分であるため、窒素飽和が顕著であれば、リターフォール量が少ないにも関わらずリターフォール窒素濃度が高い傾向が予想される。

関東地方では、都市近郊で溪流水の硝酸態窒素濃度が高い傾向が報告されており(4,5,6)，窒素飽和の兆候が認められる。したがって、都市近郊の森林ではリターフォールによる窒素濃度が高い傾向が予測される。本研究では、関東都市部の北東に位置する筑波共同試験地のヒノキ人工林においてリターフォールによる窒素供給量を明らかにした。リターフォール量、窒素量、窒素濃度をこれまでのヒノキ林の結果と比較した。

II調査方法

茨城県石岡市の森林総合研究所筑波共同試験地（以下筑波と示す）を調査地とした。斜面上部に位置するヒノキ人工林を対象とした。2007年における林齢は40年生であった。2007年9月に開口面積0.5m²のリタートラップを8基設置し、月に一度リターフォールを回収した。回収したリターフォールを葉、枝、繁殖器官などに分別し、乾燥重量を測定した。分別した試料の窒素濃度をNCアライザ（住化分析センターNC22F）で測定した。落葉については月別に分析し、他の器官については観測期間をまとめて窒素濃度を分析した。リターフォールは2007年10月から2008年6月までと2008年7月から2009年6月までの期間について合計した。2007年は7-9月までのリターを回収していないが、翌年の同じ期間におけるリターフォー

ル量は少ないため（年間量の4.3%）、年間量の過小評価は小さいと考えた。

筑波のリターフォールの結果を既往の研究と比較した。リター全体については28林分、ヒノキ落葉については26林分を対象とした。これらは、主に関東、近畿、四国地方における研究成果であり、様々な気象条件、立地条件の林分を含んでいる。対数変換したリターフォール量とリターフォール窒素量の関係、対数変換した落葉量と落葉窒素量の関係についてRMA回帰（Reduced Major Axis regression）を行った(7)。統計解析はフリーソフトSMATR version 2を用いた。回帰直線の傾きが1より大きい場合には、生産量が大きくなるにつれて窒素濃度が増加する傾向を示す(8)。したがって、リターフォールの生産量を考慮しながら窒素濃度を比較することができる。筑波の窒素量と回帰の予測を比較して、窒素飽和の影響を評価した。

III結果と考察

筑波ヒノキ林におけるリターフォール量は2年間の平均で491g m⁻²であった（表-1）。ヒノキ落葉は384g m⁻²であり、78%を占めた。窒素濃度はリター全体で8.28mg g⁻¹、ヒノキ落葉では8.67mg g⁻¹であった。落葉窒素濃度は2年間でほぼ同じ値を示した。

表-1 筑波共同試験地におけるリターフォールの器官別重量と窒素特性

	葉	枝	繁殖	その他	合計
重量(g m⁻²)					
2007.10-8.6	410	86	6	16	519
2008.7-9.6	357	53	27	25	462
平均	384	70	17	20	491
窒素量(g m⁻²)					
2007.10-8.6	3.52	0.50	0.05	0.14	4.22
2008.7-9.6	3.10	0.31	0.24	0.23	3.88
平均	3.31	0.40	0.15	0.19	4.05
窒素濃度(mg g⁻¹)					
2007.10-8.6	8.57	5.79	8.15	9.17	8.12
2008.7-9.6	8.76	5.79	8.86	9.16	8.45
平均	8.67	5.79	8.51	9.16	8.28

Yoshiyuki INAGAKI, Toru HASHIMOTO, Shinji KANEKO, Satoru MIURA, Masahiro INAGAKI (Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tukuba 305-8687, Japan) and Asami NAKANISHI (Kamigamo Experimental Forest, Field Science Education and Research Center, Kyoto University, 2 Motoyama Kamikamo, Kyoto 603-8047, Japan)
Nitrogen input by litterfall in a hinoki cypress plantation at Tsukuba Experimental Forest.

これまでに報告されているヒノキ林のリターフォール特性の結果を表-2に示す。大谷山では同一林分で2回調査が実施されているため(10,11), 2つの研究の平均値を求めた。筑波のリターフォール量は平均値よりも大きく、28林分の中で8番目に高い値を示した。筑波の落葉量は26林分の中で3番目に高い値を示した。また、他の林分と比較してヒノキ落葉の割合が高く、落葉の生産量が大きい傾向が認められた。

筑波のリターフォールの窒素濃度(8.28 mg g^{-1})は、28林分の平均値(7.30 mg g^{-1})よりも高かった。ヒノキ落葉の窒素濃度(8.67 mg g^{-1})は、26林分の平均値(7.18 mg g^{-1})よりも高かった。

対数変換したリターフォール量(loglitter)とリターフォール窒素量(loglitterN)の関係をRMA回帰で解析した結果、次の有意な式が得られた。

$$(\text{LoglitterN}) = 1.167 (\text{loglitter}) - 2.576 \\ (r^2 = 0.704, p < 0.0001, n = 28)$$

回帰直線の傾きは1よりも有意に大きいとは言えなかった。したがって、リターフォール全体の窒素濃度は、リターフォール生産量に関わらず、ほぼ一定の値を示すと考えられた。一方、落葉量(Logleaf)と窒素量(LogleafN)の関係をRMA回帰で解析した結果、以下の式が得られた(図-1)。

$$(\text{LogleafN}) = 1.369 (\text{loglitter}) - 3.047 \\ (r^2 = 0.791, p < 0.0001, n = 26)$$

回帰直線の傾きは有意に1よりも大きく、落葉量が大きいほど窒素濃度が増加する傾向を示した。回帰直線の傾きはリターフォール全体と落葉では異なっていた。McGroddyらは(8), 世界のリターフォールデータについて生産量と窒素量の関係を検討し、針葉樹の傾きは、リターフォール全体で1.07、落葉で1.57であり、本研究と同様の傾向を示した。樹木が吸収する窒素量が大きいほど一次生産が大きく、落葉の窒素濃度が高いことが示唆される。一方、リターフォール全体では、生産量の増加に伴って窒素濃度が増加しない理由としては、リターフォール生産の多い林分で、枝などの枯死材の割合が高いことが影響していると考えられる。枯死材の窒素濃度は低いため、リターフォール全体の窒素濃度が低下すると考えられた。

落葉生産量と窒素濃度の関係を図-2に示す。RMA回帰によって予測される窒素濃度を曲線で示す。回帰の予測とそれぞれの林分の窒素濃度を比較すると、いくつかの特徴が認められる。

群馬県の大谷山では(10,11), 落葉の窒素濃度(9.26 mg g^{-1})は、RMA回帰の予測(6.84 mg g^{-1})よりも高い値を示した(図-2)。大谷山では溪流水の硝酸態窒素濃度が高く、窒素飽和状態であると考えられている(4, 19)。大谷山ではヒノキ落葉の生産量が少なく窒素濃度が高いため、土壤中の窒素資源の増加によって落葉の窒素濃度が増加した可能性がある。しかし、大谷山ではリターフォール全体の中でヒノキ落葉の占める割合が51%と小さかった。大谷山のリターフォール全体の窒素濃度(7.94 mg g^{-1})は、ヒノキ落葉の窒素濃度(9.26 mg g^{-1})よりも低かった。また、リターフォール全体の窒素濃度は、RMA回帰のリターフォール窒素濃度の予測(7.41 mg g^{-1})よりも顕著に高いとは言えなかった。したがって、大谷山ではヒノキ落葉の生産は少ないものの、枝や広葉樹などの割合が高く、リターフォー

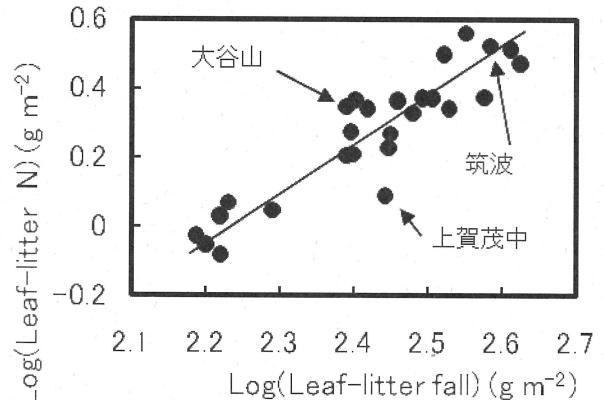


図-1 ヒノキ落葉量と窒素量の関係

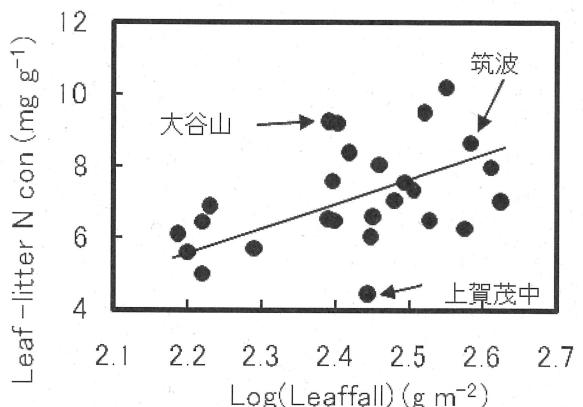


図-2 ヒノキ落葉量と窒素濃度の関係
曲線はRMA解析の結果を示す。

ルの窒素濃度は顕著に高いとは言えなかった。

京都の上賀茂試験地の斜面中部の落葉窒素濃度(4.44 mg g^{-1})はRMA回帰の予測(7.14 mg g^{-1})よりも顕著に低かった(16)。上賀茂では酸性土壌で貧栄養な立地環境である。ここでは、落葉の生産量は同一斜面の斜面上部から下部にかけて増加する傾向があるが、窒素濃度は斜面中部で最も低かった。本研究の結果より、全国のヒノキ林と比較した場合でも、上賀茂の斜面中部では落葉生産量に対して顕著に窒素濃度が低いことが裏付けられた。

本研究では、全国のヒノキ林におけるリターフォールデータを集めることによってヒノキの落葉生産量と落葉窒素量について一般的な関係を得ることができた。この関係は、個別のリターフォールの研究にとっても重要な情報となる。斜面系列などの環境傾度に対する落葉量と窒素量の変化を明らかにする場合に、ヒノキの一般的な落葉量—落葉窒素量関係と比較することによって、対象とするヒノキ林において窒素資源や他の環境要因が一次生産にどのように影響を及ぼすかを評価することが可能になる。

筑波の落葉窒素濃度(8.67 mg g^{-1})はRMA回帰の予測(8.06 mg g^{-1})よりもやや高かった。しかし、図-2の散布図から判断すると、落葉量から期待される窒素濃度に比較的近い値である。リターフォール全体でも、窒素濃度が顕著に高い傾向は認められなかった。落葉量が増加するにつれて窒素濃度が上昇する傾向が認められるため、平均値を比較するよりも、RMA回帰の予測と窒素濃度を比較するほうが有効であると考えられた。本研究の結果、筑波において窒素負荷の影響を受けて落葉の窒素濃度が顕著に増

表-2 ヒノキ林のリターフォールの比較

府県	調査地	MAT (°C)	MAP (mm)	落葉 N濃度 (mg g ⁻¹)	落葉 量 (g m ⁻²)	落葉 N量 (g m ⁻²)	リターフォ ールN濃度 (mg g ⁻¹)	リターフ オール量 (g m ⁻²)	リターフォ ールN量 (g m ⁻²)	文献
茨城	笠間	12.7	1506	8.06	288	2.32	7.82	400	3:13	1
群馬	大谷山	9.4	1500	9.26	246	2.23	7.94	483	3.81	2, 3
群馬	草木	9.0	1470	-	-	-	7.40	221	1.63	4
滋賀	日野	13.5	1600	7.07	302	2.13	7.10	397	2.45	5
滋賀	栗太	10.9	1712	6.62	282	1.87	4.99	524	2.61	5
滋賀	比叡山	14.0	1900	-	-	-	7.11	370	2.63	6
滋賀	比叡山1	13.7	1930	10.20	356	3.63	9.25	424	3.92	7
滋賀	比叡山2	13.6	1930	9.20	253	2.32	9.10	297	2.70	7
滋賀	比叡山3	13.5	1930	8.40	262	2.20	8.10	302	2.45	7
滋賀	比叡山4	13.3	1930	6.55	245	1.61	6.65	271	1.81	7
京都	上賀茂上	14.2	1769	4.99	166	0.83	5.91	278	1.64	8, 9
京都	上賀茂中	14.4	1769	4.44	277	1.23	5.13	413	2.11	8, 9
京都	上賀茂下	14.6	1769	6.28	377	2.37	7.22	545	3.94	8, 9
京都	大江	11.5	2205	7.60	249	1.89	8.35	558	4.66	9, 10
京都	綾部	13.8	1980	6.13	154	0.94	8.11	486	3.94	9, 10
京都	綾部	13.8	1980	5.61	159	0.89	7.56	329	2.49	9, 10
京都	舞鶴	12.8	2505	6.91	170	1.17	8.50	240	2.04	9, 10
高知	大豊121	10.7	2655	7.56	311	2.35	6.68	484	3.23	11
高知	大豊141	10.7	2655	6.52	338	2.20	6.50	395	2.57	12
高知	大豊311	13.0	2866	6.04	280	1.69	5.89	505	2.97	11
高知	大豊401	12.0	2781	7.35	321	2.36	7.33	361	2.64	12
高知	大豊441	12.0	2781	7.04	421	2.97	6.51	554	3.90	12
高知	天狗	9.6	3137	9.50	332	3.16	10.39	544	5.66	10, 13
高知	旧宮	13.1	3271	5.71	195	1.11	5.97	309	1.85	10, 13
高知	大正	13.0	2871	6.46	409	3.26	6.47	491	3.18	10, 13
高知	梼原	13.7	2962	7.98	166	1.07	7.57	353	2.68	10, 13
高知	朝倉	16.7	2510	6.50	250	1.63	6.68	505	3.34	10, 13
茨城	筑波	12.6	1431	8.67	384	3.31	8.28	491	4.05	14
林分数				26	26	26	28	28	28	
最小				4.44	154	0.83	4.99	221	1.63	
平均				7.18	277	2.03	7.30	412	3.00	
最大				10.20	421	3.63	10.39	558	5.66	

MATは年平均気温、MAPは年平均降水量を示す。

文献 1 小林ら (1987) (9), 2 生原・相場(1982)(10), 3 戸田ら(1991)(11), 4 戸田(2000)(12), 5 河原(1971)(13), 6 Yamashita et al (2004)(14), 7 Tsutsumi et al (1983)(15), 8 Nakanishi et al (2009)(16), 9 中西ら(未発表), 10 Inagaki et al(2010)(17), 11 Inagaki et al (2004)(18), 12 稲垣ら(2005)(19), 13 稲垣ら(未発表), 14 本研究

加する傾向は認められなかった。また、ヒノキ落葉量はこれまでの報告でも高い値を示し、ヒノキの一次生産は高いことが示唆された。したがって、窒素負荷によって森林の一次生産が低下する悪影響は認められなかった。

本研究の結果、筑波でヒノキの落葉量が大きい傾向が認められた。筑波では窒素負荷がヒノキの一次生産と落葉生産を促進した可能性がある。しかし、この林分では立地条件が良好であるために生産性が高い可能性も否定できず、窒素負荷の影響のみを分離して評価することはできない。

過去の研究事例では、窒素の添加試験によってリターフォール量の増加が顕著に認められない事例 (3), 増加するものの構成樹種が大きく変動する事例 (20) が報告されており、窒素によってある樹種のリターフォール量が顕著に増加するとは限らない。

生態系のリターフォールによる窒素循環では、長期的には樹種の入れ替わりが重要である。ヒノキの人工林のリターフォールでは、若齢林から壮齢林にかけて、下層植生の寄与が大きくなるため(20,21), リターフォール全体の中で

ヒノキの重要性は次第に低下していくことが予想される。全国のヒノキ林を比較した結果、筑波のヒノキ落葉量は全國の中でも大きな値を示した。本来、ヒノキは貧栄養な環境に適応した樹種であり、リターフォールによる窒素の循環量はスギや広葉樹よりも小さい(17)。リターフォール窒素量は樹木の窒素吸収量を示す指標であるが、ヒノキが吸収することのできる窒素量に樹種特性として限界があるとすれば、筑波のヒノキは能力の限界に近い窒素を吸収していると考えられる。この林分は調査時点では林齢が40年生であり、生長が旺盛であるために高い窒素吸収能力を発揮したと考えられる。今後、長期的にわたってヒノキが高い生長と窒素吸収を維持できるとは考えにくい。この林分では、溪流水の硝酸態窒素濃度が高い傾向が認められており(吉永秀一郎氏 私信), ヒノキは高い窒素吸収能力を発揮しても土壤中の窒素をすべて吸収できないことが示唆される。また、土壤中の硝酸態窒素現存量は、20-25cmの深さで大きく、樹木が十分に窒素を吸収できないことが示唆される(23)。本研究の結果や他の研究との比較より、ヒノキの窒素吸収にはある程度の限界があることが示唆される。ヒノキ人工林の窒素吸収能力を維持するためには、適切な間伐を実施することによって、窒素吸収能力の高い下層植生を導入することが重要であると考えられる。

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」の補助を受けて実施した。

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) Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis PG, Kolari P, Kowalski AS, Lankreijer H, Law BE, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff JB, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J (2007) The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. Nature 447: 848-850.
- (3) 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.
- (4) Mitchell MJ, Iwatsubo G, Ohru K, Nakagawa Y (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. For Ecol Manage 97: 39-51.
- (5) Ohru K, Mitchell MJ (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. Ecol Appl 7: 391-401
- (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溪流水中のNO₃-濃度の分布. 日林誌 86: 275-278.
- (7) Warton DI, Wright IJ, Falster DS, Westoby M (2006) Bivariate line-fitting methods for allometry. Biol Rev 81: 259-291.
- (8) McGroddy ME, Daufresnse T, Hedin L (2004) Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios. Ecology 85: 2390-2401.
- (9) 小林繁男・荒木誠・加藤正樹・有光一登 (1987) 間伐による炭素・窒素の動態の変化. 好適生産環境の作出: 耕地, 林地, 河川. グリーエナジー計画成果シリーズ III 系 2:112-125, 農林水産技術会議事務局.
- (10) 生原喜久雄・相場芳憲 (1982) スギ・ヒノキ壮齡林小流域における養分の循環とその収支. 日林誌 64: 8-14.
- (11) 戸田浩人・生原喜久雄・新井雅夫 (1991) スギおよびヒノキ壮齡林小流域の養分循環. 東京農工大演報 28: 1-22.
- (12) 戸田浩人 (2000) 森林土壤における窒素無機化特性に関する研究. 森林環境資源科学 38: 1-95.
- (13) 河原輝彦 (1971) Litter fall による養分還元量について (II) 有機物量および養分還元量. 日林誌 53: 231-238.
- (14) Yamashita T, Kasuya N, Nishimura S, Takeda H (2004) Comparison of two coniferous plantations in central Japan with respect to forest productivity, growth phenology and soil nitrogen dynamics. For Ecol Manage 200: 215-226.
- (15) Tsutsumi T, Nishitani Y, Kirimura Y (1983) On the effects of soil fertility on the rate and the nutrient element concentrations of litterfall in a forest. Jpn J Ecol 33: 313-322.
- (16) Nakanishi A, Inagaki Y, Shibata S, Osawa N, Hirata K (2009) Effects patch cutting on leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) at different elevations along a slope. J For Res 14: 388-393.
- (17) Inagaki Y, Okuda S, Sakai A, Nakanishi A, Shibata S, Fukata H (2010) Leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress forests in relation to the time of leaf-fall under different climatic conditions in Japan. Ecol Res 25: 429-438.
- (18) 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.
- (19) 稲垣善之・深田英久・倉本恵生・三浦覚 (2005) 四国地域のヒノキ林における落葉の季節性と窒素利用の関係. 森林応用研究 14: 69-76.
- (20) Magill AH, Aber JD, Currie WS, Nadelhoffer KJ, Martin ME, McDowell WH, Mellilo 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.
- (21) 三浦覚 (2000) 表層土壤における雨滴侵食保護の観点からみた林床被覆の定義とこれに基づく林床被覆率の実態評価. 日林誌 82: 132-140.
- (22) 市川貴大・高橋輝昌・浅野義人 (2006) スギ人工林とヒノキ人工林の林齢による有機物動態の変化の比較. 日林誌 88: 525-533.
- (23) 稲垣昌宏・橋本徹・古澤仁美・稻垣善之・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無機態窒素生成. 関東森林研究 61: 179-182.