

## 間伐がスギ人工林におけるリターフォール供給と土壌の炭素窒素蓄積量に及ぼす影響

稲垣善之・篠宮佳樹・野口享太郎・平井敬三・金子真司（森林総研）

要旨：茨城県北部のスギ人工林において、間伐8年後のリターフォールと堆積有機物層、表層土壌の炭素・窒素量を明らかにした。対照区と間伐区を比較すると、リターフォールの炭素量、有機物層および土壌の炭素蓄積量に有意な差は認められなかった。下層植生落葉の窒素量は間伐区で対照区よりも有意に少なく、リターフォール全体の窒素量、土壌の窒素量には有意差は認められなかった。下層植生落葉の C/N 比は間伐区で有意に高く、0-5cm 深土壌の C/N 比は間伐区で有意に低かった。以上の結果より、間伐は有機物層と表層土壌の炭素蓄積量、窒素蓄積量には明確な影響を及ぼさないこと、土壌微生物と下層植生の窒素利用様式に影響を及ぼすことが示唆された。

キーワード：スギ人工林、リターフォール、堆積有機物、間伐、下層植生

**Abstract:** Effects of thinning after 8 years on carbon and nitrogen content in litterfall and organic horizon and mineral soil were evaluated for Japanese cedar plantations in northern Ibaraki prefecture. Carbon input by litterfall, and carbon content in the organic horizon and mineral soil did not differ between the thinned and control plots. Nitrogen input by leaves of understory vegetation was significantly lower in the thinned plots but nitrogen input by total litterfall and nitrogen content in the organic horizon and mineral soil did not differ between the thinned and control plots. The C/N ratio in the leaf-litter of understory vegetation was significantly higher in the thinned plot while that in the surface soil at 0-5cm was lower in the thinned plot. These results suggest thinning does not affect carbon and nitrogen content in organic horizon and surface soil but significantly affects the nitrogen use traits of microbial biomass and understory vegetation.

**Key words:** Japanese cedar plantation, litterfall, organic horizon, thinning, understory vegetation

## I はじめに

森林において、間伐をすると、生態系の炭素・窒素循環速度、土壌の炭素窒素蓄積量に影響を及ぼす(1, 4, 5, 7, 8)。間伐後にはリターフォール量の変化(1, 10, 12)、有機物層における分解速度の変化が予想される(1, 12)。また窒素濃度の高い広葉樹が下層植生として発達することによって生態系の窒素循環速度が増加し(11)、残存するスギの窒素吸収が増加することも期待される。しかし、スギ林においてこれらの要因を長期的に評価した研究事例は認められない。

本研究では、茨城県北部のスギ林において、対照区と間伐区を設定し、間伐8年後のリターフォール炭素量、窒素量、有機物層と表層土壌の炭素量、窒素蓄積量の変化を明らかにすることを目的とした。間伐後の下層植生の発達によって生態系の窒素循環速度が増加し、残存するスギ落葉の窒素濃度が増加すると仮説を立てて検証をした。

## II 調査方法

## 1. 調査地

本研究は茨城県北部の桂試験地で実施した(北緯 36° 30′, 東経 140° 18′)。試験地付近の観測所における年平均気温は 12.5°C、年降水量は 1340mm であった。流域は 1965 年に植栽されたスギ人工林であり、15m×15m の間伐区と対照区をそれぞれ 3 か所 2002 年生育期終了後に設定した。2002 年時における樹高と胸高直径の平均値は、それぞれ 18m, 19.5cm であった(6)。主な下層植生は、アオキ、ハナイカダであった。2003 年 11 月に間伐区では、材積の割合で 20-35% の間伐を実施し、対照区は無間伐とした。伐採したスギは、搬出せず林内に放置した。間伐直後の幹成長、リターフォールの変動の詳細については既に報告した(6,10)。

## 2. 方法

リターフォール：開口面積 0.5m<sup>2</sup> のリタートラップを各

YOSHIYUKI INAGAKI, YOSHIKI SHINOMIYA, KYOTARO NOGUCHI, KEIZO HIRAI, SHINJI KANEKO (Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan)

Effects of thinning on litterfall and soil carbon and nitrogen content in a Japanese cedar plantation.

調査区に3器ずつ設置した。2008年7月から、2011年6月までの3年間、月に一度リターフォールを回収した。回収したリターを調査区ごとに一つにまとめ、スギ葉、雄花、球果、広葉樹等に分別し、それぞれの乾燥重量を求めた。分別した試料の炭素、窒素濃度をNCアナライザー（住化分析センターNC-22F）で分析した。7月から翌年6月までを1年として、年間量を算出した。

土壌の採取：2011年10月に採取した。堆積有機物層については、25cm×25cmの方形区から採取した。深さ0-5cm、5-10cmの土壌を100mLの円筒で採取した。それぞれの調査区から2繰り返して採取し、プロット毎に一つにまとめた。土壌を105℃で乾燥し、レキの重量を差し引いて容積重を算出した。細土の炭素、窒素濃度をNCアナライザーで分析した。堆積有機物の炭素量、窒素量をリターフォールの炭素量、窒素量で割って炭素、窒素滞留時間を算出した。

統計解析：リターフォールの性質については、間伐の有無と調査年を要因とし、処理区内の各調査区を变量効果とする分散分析で解析した。土壌の性質については間伐区と対照区の平均値をt検定で比較した。

### III 結果と考察

#### 1. リターフォール

間伐してから6-8年経過後のスギ落葉炭素量は、間伐区で対照区の0.70倍の値を示した（表-1）。スギ落葉炭素量は、測定年によって有意な差が認められたが、間伐の影響は有意でなかった。下層植生の落葉量は、間伐区で対照区の0.71倍であるが、有意差は認められなかった。窒素については、下層植生の落葉窒素量が間伐区で対照区の0.54倍であり、有意に小さかった（ $p=0.02$ ）。C/N比はスギ葉、リターフォール全体で、観測年と間伐の相互作用が有意になった。2008年には間伐区でスギ落葉とリターフォール全体のC/N比が高かったが、2009年、10年には、対照区と間伐区の差は小さかった。間伐の影響は年によって異なっているが、違いをもたらす要因は明らかでない。当初、間伐後樹木の窒素吸収が増加し、落葉のC/N比が低下することを予想したが、そのような傾向は認められなかった。ヒノキ林における研究では、間伐区におけるヒノキ落葉の窒素濃度の変化は小さかった（4, 5, 9）。ドイツトウヒでも、間伐区で窒素濃度が低下する傾向が認められた（7）。これらの知見より、針葉樹林において間伐をした場合には落葉の窒素濃度は増加しない事例が多いといえる（C/N比は低下しない）。

下層植生については間伐区で落葉量が減少し、C/N比が増加した。この結果は、間伐後に下層植生が発達し、落葉

量が増加するという当初の予想と異なる結果である。対照区では、間伐はしないものの、下層植生にとっての十分な光環境が確保されており、落葉量が多く維持されたと考えられる。下層植生落葉のC/N比は間伐区で高かった。間伐区では光環境が改善するために、C/N比が高くなると考えられた。これまでも光条件の良い環境で窒素引き戻し率が高く、落葉窒素濃度が低い傾向が報告されている（14）。以上の結果より、本研究の調査地において、間伐区で下層植生が発達することによって窒素循環速度が増加する傾向は認められなかった。本調査地においては、無間伐であってもある程度下層植生が維持される条件であったために、間伐後の下層植生による窒素循環の促進効果が顕著でないと考えられた。

#### 2. 土壌炭素

有機物層の炭素、窒素蓄積は間伐区で対照区のそれぞれ0.90倍、0.80倍の値を示し、有意な差は認められなかった（表-2）。堆積有機物層のC/N比は間伐区でやや高いが、有意差は認められなかった。間伐区の炭素、窒素の滞留時間は、対照区のそれぞれ1.20倍、1.17倍の値を示したが、有意差は認められなかった。ヒノキ林における研究では、強度な間伐をした林分で、堆積有機物層の炭素蓄積、窒素蓄積が低下する傾向が認められた（5）。また、温帯の森林では、間伐区で堆積有機物層の重量が低下する傾向が認められた（1, 7, 8）。本研究の結果は、これらの研究事例とは異なっている。本研究で明確な差が認められなかったひとつの要因として、対照区の分解速度が速やかであったことがあげられる。本研究の対照区の堆積有機物炭素量は、 $0.36\text{kgC m}^{-2}$ であり、日本の634地点の平均値 $0.52\text{kgC m}^{-2}$ （13）よりも低い。また、対照区における有機物層の炭素滞留時間は、1.68年であり、これまでの報告の値（2.0-4.4年）（2, 3）よりも短い。したがって、対照区における分解速度が高い条件であるため、間伐による分解の促進効果が顕著でないと考えられた。

0-5cm深の土壌では、炭素窒素蓄積量に有意な変化は認められないが、C/N比が低下する傾向が認められた（ $p=0.01$ ）。C/N比の低下は、間伐区で炭素の放出が進み窒素が保持されることを示している。これまでのヒノキ林の研究でも間伐区で土壌のC/N比は有意に低下する傾向が認められ本研究と同様の傾向を示した（5）。一方、5-10cm深の土壌では土壌特性の比は1に近い値を示し、対照区と間伐区の差は小さかった。この結果は、間伐の影響は土壌表層に顕著に認められることを示している。これまでの研究では間伐が土壌炭素蓄積、窒素蓄積に及ぼす影響は明らかでなく（8）、本研究の結果と整合的である。しかし、表

表一. リターフォールの炭素量, 窒素量 太字は 5%の水準で有意であることを示す。

Carbon and nitrogen input by litterfall Bold letters indicate significance at  $p < 0.05$

	対照区 Control		間伐区 Thinning		Thinning /control	P(ANOVA)		
	Mean	(SD)	Mean	(SD)		Year	Thinning	interaction
スギ落葉 Leaf-litter of Japanese cedar								
Carbon content (kg m <sup>-2</sup> )	0.140	(0.041)	0.099	(0.010)	0.70	<b>0.01</b>	0.37	0.51
Nitrogen content(g m <sup>-2</sup> )	1.75	(0.70)	1.18	(0.17)	0.68	<b>0.01</b>	0.30	0.99
C/N ratio	81.78	(7.72)	85.27	(3.10)	1.04	0.21	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>
下層植生落葉 Leaf-litter of understory vegetation								
Carbon content (kg m <sup>-2</sup> )	0.021	(0.008)	0.015	(0.005)	0.71	0.65	0.16	0.45
Nitrogen content(g m <sup>-2</sup> )	0.75	(0.23)	0.40	(0.12)	0.54	0.73	<b>0.02</b>	0.31
C/N ratio	27.26	(2.34)	36.24	(1.14)	1.33	0.84	<b>0.01</b>	0.09
リターフォール全体 Total litterfall								
Carbon content (kg m <sup>-2</sup> )	0.214	(0.050)	0.160	(0.015)	0.75	<b>0.01</b>	0.25	0.90
Nitrogen content(g m <sup>-2</sup> )	3.47	(1.00)	2.43	(0.24)	0.70	<b>0.02</b>	0.14	0.91
C/N ratio	62.33	(4.49)	65.90	(1.45)	1.06	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>

表二. 有機物層と土壌における炭素, 窒素量および有機物層炭素, 窒素平均滞留時間 Carbon and N content in organic horizon and mineral soil and mean residence time of C and N in the organic horizon

	対照区 Control		間伐区 Thinning		Thinning /control	P(t-test)
	Mean	(SD)	Mean	(SD)		
有機物層 Organic horizon						
Carbon content (kg m <sup>-2</sup> )	0.363	(0.119)	0.326	(0.085)	0.90	0.54
Nitrogen content(g m <sup>-2</sup> )	6.00	(2.79)	4.81	(1.32)	0.80	0.73
C/N ratio	64.1	(21.5)	71.0	(23.5)	1.11	0.13
N mean residence time (yr)	1.68	(0.30)	1.96	(0.37)	1.17	0.37
C mean residence time (yr)	1.68	(0.39)	2.03	(0.43)	1.20	0.36
土壌 Soil (0-5cm)						
Carbon content (kg m <sup>-2</sup> )	1.78	(0.22)	1.63	(0.18)	0.92	0.43
Nitrogen content(g m <sup>-2</sup> )	102.2	(15.6)	104.5	(14.6)	1.02	0.86
C/N ratio	17.44	(0.48)	15.68	(0.56)	0.90	<b>0.01</b>
土壌 Soil (5-10cm)						
Carbon content (kg m <sup>-2</sup> )	1.52	(0.06)	1.47	(0.15)	0.96	0.58
Nitrogen content(g m <sup>-2</sup> )	100.8	(3.4)	100.3	(11.1)	0.99	0.94
C/N ratio	15.11	(0.87)	14.62	(0.26)	0.97	0.41
Organic horizon + Surface soil						
Carbon content (kg m <sup>-2</sup> )	3.66	(0.19)	3.43	(0.16)	0.94	0.17
Nitrogen content(g m <sup>-2</sup> )	209.0	(14.2)	209.7	(19.6)	1.00	0.97
C/N ratio	17.53	(0.50)	16.39	(0.81)	0.93	0.11

層 0-5cm における C/N 比が有意に低下する傾向は、間伐によって微生物の窒素代謝や窒素無機化速度、根の生産速度などが変化する可能性を示しており、さらなる検討が必要である。

#### IV 結論

茨城県のスギ林において間伐を実施すると、間伐は有機物層と表層土壌の炭素蓄積量、窒素蓄積量には明確な影響を及ぼさないこと、土壌微生物と下層植生の窒素利用様式に影響を及ぼすことが示唆された。本研究の結果は、炭素蓄積量、窒素蓄積量では明瞭な変動は認められなくても、生態系の様々なコンパートメントで C/N 比を比較することによって、物質循環の変動を検出できる可能性を示している。

#### 謝辞

茨城森林管理署の協力により間伐試験を実施した。本研究の一部は、科学研究費補助金 23580205, 25450224 の補助を受けて実施した。

#### 引用文献

- (1) CAMPBELL J, ALBERTI G, MARTIN J, LAW BE (2009) Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecol Manag* :257, pp.453-463
- (2) 市川貴大・高橋輝昌・浅野義人 (2003) 同一斜面に隣接するスギおよびヒノキ人工林における生態系内の養分動態の比較. *日林誌*: 85, pp.222-233
- (3) INAGAKI Y, INAGAKI M, HASHIMOTO T, KOBAYASHI M, ITOH Y, SHINOMIYA Y, FUJII K, KANEKO S, YOSHINAGA S (2012) Aboveground production and nitrogen utilization in nitrogen-saturated coniferous plantation forests on the periphery of the Kanto Plain. *Bull. Forestry Forest Prod. Res. Inst.* :11, pp.161-173
- (4) INAGAKI Y, KURAMOTO S, TORII A, SHINOMIYA Y, FUKATA H (2008) Effects of thinning on leaf-fall and leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantation stands in Japan. *Forest Ecol Manag*: 255, pp.1859-1867
- (5) INAGAKI Y, NAKANISHI A, FUKATA H (2011) Soil properties and nitrogen utilization of hinoki cypress

as affected by strong thinning under different climatic conditions in the Shikoku and Kinki districts in Japan. *J Forest Res* :16, pp.405-413

- (6) 稲垣善之・野口享太郎・金子真司・橋本徹・三浦覚 (2011) 立木密度の異なるスギ人工林における葉、幹、繁殖器官の分配率. *森林立地* 53: 23-29.
- (7) JONARD M, MISSON L, PONETTE Q (2006) Long-term thinning effects on the forest floor and the foliar nutrient status of Norway spruce stands in the Belgian Ardennes. *Can J Forest Res*:36, pp.2684-2695
- (8) JURGENSEN M, TARPEY R, PICKENS J, KOLKA R, PALIK B (2012) Long-term Effect of Silvicultural Thinnings on Soil Carbon and Nitrogen Pools. *Soil Sci Soc Am J* :76, pp.1418-1425
- (9) NAKANISHI A, INAGAKI Y, OSAWA N, SHIBATA S, HIRATA K (2009) Effects of patch cutting on leaf nitrogen nutrition in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) at different elevations along a slope in Japan. *J Forest Res* :14, pp.388-393
- (10) 野口享太郎・平井敬三・高橋正通・相澤州平・伊藤優子・重永英年・長倉淳子・稲垣善之・金子真司・釣田竜也・吉永秀一郎 (2009) 北関東のスギ人工林における地上部炭素・窒素動態に対する間伐の影響. *森林総研研報*: 8, pp. 205-214
- (11) RICHARDS, A. E., FORRESTER, D. I., BAUHUS, J., & SCHERER-LORENZEN, M. (2010). The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. *Tree Physiol.*: 30, pp.1192-1208
- (12) SLODICAK M, NOVAK J, SKOVSGAARD JP (2005) Wood production, litter fall and humus accumulation in a Czech thinning experiment in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecol Manag*: 209, pp.157-166
- (13) TAKAHASHI M, ISHIZUKA S, UGAWA S, SAKAI Y, SAKAI H, ONO K, HASHIMOTO S, MATSUURA Y, MORISADA K (2010) Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan's forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils. *Soil Sci Plant Nutri*: 56, pp.19-30
- (14) TATENO R, KAWAGUCHI H (2002) Differences in nitrogen use efficiency between leaves from canopy and subcanopy trees. *Ecol. Res.* :17, pp. 695-704