

論文 (Original article)

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

野口享太郎¹⁾*, 平井敬三²⁾, 高橋正通³⁾, 相澤州平⁴⁾, 伊藤優子³⁾, 重永英年⁵⁾,
長倉淳子³⁾, 稲垣善之³⁾, 金子真司³⁾, 釣田竜也⁵⁾, 吉永秀一郎³⁾

Effects of thinning on aboveground carbon and nitrogen dynamics at a sugi (*Cryptomeria japonica*) plantation in northern Kanto region, eastern Japan

Kyotaro NOGUCHI¹⁾*, Keizo HIRAI²⁾, Masamichi TAKAHASHI³⁾, Shuhei AIZAWA⁴⁾,
Yuko ITOH³⁾, Hidetoshi SHIGENAGA⁵⁾, Junko NAGAKURA³⁾, Yoshiyuki INAGAKI³⁾,
Shinji KANEKO³⁾, Tatsuya TSURITA⁵⁾ and Shuichiro YOSHINAGA³⁾

Abstract

This study examined effects of thinning on aboveground carbon (C) and nitrogen (N) dynamics of a 40-year-old sugi (*Cryptomeria japonica*) plantation in Ibaraki prefecture, Japan. In this study, aboveground C and N storage and deposition of C and N through litterfall were estimated in 2003–2005. Allometric equations were established to estimate C and N storage in aboveground biomass using six sample trees. A thinning practice was conducted in December 2003, in which the aboveground biomass decreased by ~30%. In 2004–2005, Aboveground C and N storage in the thinned plots (~80 Mg C ha⁻¹ and ~360 kg N ha⁻¹) were ~70% of those in the unthinned control, whereas the increment of C and N storage in the thinned plots (~3.5 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ and ~14 kg N ha⁻¹ yr⁻¹) were similar to those in the unthinned control. Deposition of C and N through litterfall in the thinned plots (~1.6 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ and ~33 kg N ha⁻¹ yr⁻¹) was ~60% of those in the unthinned control. These results suggested that the thinning practice decreased aboveground C and N storage, and C and N deposition through litterfall, but the effects on C and N accumulation in the aboveground biomass was less evident in this study.

Key words : aboveground biomass, aboveground C and N storage, allometric equation, litterfall

要旨

地上部炭素・窒素動態に対する間伐の影響について明らかにするため、茨城県の40年生スギ人工林において、2003年から2005年にかけて地上部の炭素・窒素蓄積量およびその蓄積増加速度、リターフォールによる炭素・窒素還元速度について調査した。地上部炭素・窒素蓄積量を推定するために、試験地内のスギ6個体について伐倒調査を行い、アロメトリー式を作成した。2003年12月に間伐を行った結果、地上部現存量は間伐前と比較して30%減少した。2004年から2005年の間伐区における地上部炭素、窒素蓄積量はそれぞれ約80 Mg C ha⁻¹、360 kg N ha⁻¹で無間伐の対照区の約70%であったが、その蓄積増加速度(約3.5 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹、14 kg N ha⁻¹ yr⁻¹)は対照区と同様であった。間伐区のリターフォールによる炭素・窒素還元速度は約1.6 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹、33 kg N ha⁻¹ yr⁻¹で、対照区の約60%であった。これらの結果は、間伐により地上部炭素・窒素蓄積量やリターフォールによる炭素・窒素還元速度は減少するが、地上部炭素・窒素蓄積増加速度に対する間伐の影響は小さいことを示唆している。

キーワード : 地上部現存量、地上部炭素・窒素蓄積量、アロメトリー式、リターフォール

1. はじめに

陸域生態系において最も大きなバイオマスを持つ森林の樹木は、炭素動態についても重要な役割を持つと考えられ、森林の持つ炭素蓄積量や炭素固定機能を定量評価する試みが各地で行われている。IPCCの報告によれば、各気候帯における森林植生地上部の炭

素蓄積量は、熱帯林で71–146 Mg C ha⁻¹、温帯林で61–155 Mg C ha⁻¹、北方林で8–24 Mg C ha⁻¹と推定されている(reviewed by Keith et al., 2009)。それに対して、主に壮齡林、老齡林を対象とした最近の試算では、熱帯林で70–179 Mg C ha⁻¹、温帯林で147–377 Mg C ha⁻¹、北方林で59–64 Mg C ha⁻¹などの推定値が

原稿受付：平成21年3月17日 Received 17 March 2009 原稿受理：平成21年10月22日 Accepted 22 October 2009

1) 森林総合研究所四国支所 Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所東北支所 Tohoku Research Center, FFPRI

3) 森林総合研究所立地環境研究領域 Dept. Forest Site Environment, FFPRI

4) 森林総合研究所北海道支所 Hokkaido Research Center, FFPRI

5) 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, FFPRI

* 〒780-8077 高知県高知市朝倉西町2-915 森林総合研究所四国支所 E-Mail: kyotaro@affrc.go.jp

示されている (Keith et al. 2009)。日本においては、1995 年の国内全域のスギ人工林とヒノキ人工林の炭素蓄積量が、約 90 Mg C ha^{-1} (スギ) および 69 Mg C ha^{-1} (ヒノキ)、1990 – 1995 年の炭素固定速度が $2.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (スギ)、 $1.8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (ヒノキ) と算出されている (Fukuda et al., 2003)。

一方、都市部周辺では窒素濃度の高い降水がしばしば観測され、その生態系への影響が懸念されている (Ohnishi and Mitchell, 1997; 伊藤・加藤, 2003)。森林の樹木は、生育に必要な窒素を土壌から吸収して蓄積し、窒素流出を抑制する機能を持つ。北方林から温帯林にかけての計 32 林分の窒素動態を調べた例では、地上部の窒素蓄積量は $40 - 1071 \text{ kg N ha}^{-1}$ (平均 429 kg N ha^{-1})、窒素吸収量は $2.6 - 115 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (平均 $55 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) とされている (Cole & Rapp, 1981)。日本では、モミ林、ツガ林、常緑広葉樹林の地上部窒素蓄積量および吸収量が、 $860 - 940 \text{ kg N ha}^{-1}$ および $46 - 100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と報告されているほか (Ando et al., 1977; Katagiri et al., 1978)、スギ人工林については大分、吉野、秋田の 6 – 70 年生林分の地上部窒素蓄積量が約 $230 - 720 \text{ kg ha}^{-1}$ 、窒素吸収量が約 $50 - 120 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であったとの報告がある (四大学合同調査班, 1966)。

日本では、森林面積の 40% 以上を人工林が占めるが、木材価格の低下や林業就業者数の減少に伴い、間伐遅れなど、手入れ不足が問題となっている (大原, 2007)。一方、京都議定書の規定により、 CO_2 吸収源の対象となる森林は適切に管理されたものに限られるため、間伐など森林施業の促進が求められている (中島ら, 2007)。また、温暖化や大気由来の窒素沈着量の増加など、森林をとりまく環境が変動する中で、炭素・窒素蓄積機能など森林の多面的機能の発揮がますます期待されている。そのため、人工林の間伐が森林の炭素・窒素動態に及ぼす影響を定量的に評価することが重要である。スギ人工林については、10 年生林分において強度の異なる間伐を行い成長への影響を調査した例や (川那辺ら, 1975)、伐採対象木のサイズの違いが残存木の成長に与える影響を調査した例 (河原ら, 1989) など、成長影響については様々な報告があるが、間伐が炭素・窒素動態に与える影響について報告した例はほとんど無い。そこで本研究では、スギ人工林に対する間伐が、特に地上部の炭素・窒素動態に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 試験地

本研究では茨城森林管理署北山国有林 32 林班は小班 (茨城県東茨城郡城里町) の 40 年生スギ人工林 (2004 年時点) を調査地とした (桂試験地: 標高 210 – 270 m; 釣田ら, 2005; 平井ら, 2007)。桂試験地は那珂川に流入する皇都川の支流の源頭部に位置する約 2.3 ha の

小流域試験地と隣接するスギ人工林からなる。これらのスギ人工林は 1965 年に植栽され、1974 年、1977 年、1980 年に除伐が行われたが、本研究の実施まで間伐施業は行われていない。小流域試験地は斜面下部から中部の約 1 ha がスギ人工林、斜面上部はアカマツを交えた落葉広葉樹二次林により構成されている。本研究では、小流域試験地内のスギ林分において、2003 年 12 月に本数で 33%、材積で 25% の間伐を実施し (間伐区)、隣接するスギ人工林を無間伐の対照区とした。間伐はいわゆる切り捨て間伐とし、伐倒木は林内に放置した。試験地に最も近いアメダス観測地点 (小瀬観測所: $36^\circ 36.4' \text{ N}$, $140^\circ 19.5' \text{ E}$, 標高 95 m) における年平均気温は 12.5°C 、年降水量は 1338.5 mm であった (1979 年 – 2000 年; 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)。試験地内の土壌は褐色森林土で、地質は中古生層の堆積岩からなり、火山灰層が表面を覆っている (釣田ら, 2005)。

3. 調査方法

地上部現存量、炭素・窒素蓄積量推定のためのアロメトリー式の作成

2003 年 12 月に 6 本の試料木を伐倒し、幹、枝、葉、繁殖器官等部位別に分けた後、生重量を測定した。スギの場合、葉と枝の境界が曖昧だが、本研究では主に形態的な特徴から分類し、針葉がほとんど見られない枝を「褐色枝」、針葉に覆われている部分を「葉 (+ 小枝)」とし、緑色であっても形態的に枝の特徴の強いものは「緑枝」とした。また、試料の一部を研究室に持ち帰り、含水率を測定した後、各部位の生重量に乾燥係数 ($1 - \text{含水率}$) を乗じて伐倒試料木の乾燥重量を算出した。得られた試料木の乾燥重量データと胸高直径 (DBH) の関係から、スギ地上部現存量を推定するアロメトリー式を作成した。また、持ち帰った試料の一部を粉砕し、炭素・窒素含有率を NC アナライザー (スミグラフ NC22F、住化分析センター) により測定した。得られた炭素・窒素含有率と試料木の乾燥重量から試料木各個体の炭素・窒素含有量を算出し、DBH との関係からスギ地上部の炭素・窒素蓄積量を推定するためのアロメトリー式を作成した。なお、アロメトリー式作成に際し、枯死葉、枯死枝のデータは除外した。

地上部現存量および炭素・窒素蓄積量の推定

2003 年 3 月に小流域試験地内の間伐実施予定のスギ林分に 3 ケ所 (間伐区)、隣接する間伐を行わないスギ林分に 3 ケ所 (対照区) の $15 \times 15 \text{ m}$ の調査区を設置した。試験開始時における間伐区と対照区の立木密度はそれぞれ約 1850、2030 本 ha^{-1} で、間伐後の間伐区では約 890 本 ha^{-1} であった。調査区内に生育する個体の DBH を 2003 年 3 月および 11 月、2004 年 11 月、

2005 年 12 月に測定した。2003 年の調査では DBH とともに樹高の測定も行った。得られた DBH の値と上記のアロメトリー式を利用して各個体の乾燥重量、炭素・窒素含有量を算出し、単位面積当たりの地上部現存量、炭素・窒素蓄積量を推定した。

リターフォール量およびリターフォールによる炭素・窒素還元速度の推定

2003 年 3 月に上記調査区 1 ケ所につき 3 個のリタートラップ（開口部面積、0.5 m²）を設置した。これらのリタートラップに落下したリターフォールを 2003 年 3 月から 2006 年 6 月にかけて毎月 1～2 回の頻度で回収した。得られた試料を 60℃～70℃で 48 時間以上乾燥させた後、葉、枝、繁殖器官、その他に分別し、重量を測定した。リターフォールに含まれるスギの葉と枝の区分も曖昧であるが、本研究では針葉がほとんど見られない枝を「枝」とし、針葉に覆われている部分を「葉（+小枝）」とした。2003 年 3 月～2004 年 2 月の試料については、部位毎に全試料をまとめてその一部を粉碎し、炭素・窒素含有率を測定した。得られたリターフォール試料の炭素・窒素含有率とリターフォールの乾燥重量から、リターフォールによる炭素・窒素還元速度を推定した。なお、リターフォール量は 12 月～2 月に多く夏季に少なかったため（データ省略）、本研究では、7 月～翌年 6 月を 1 年としてリターフォール量とリターフォールによる炭素・窒素還元速度を計算した。以下、リターフォール量、リターフォ

ールによる炭素・窒素還元速度については、2003 年 7 月～2004 年 6 月、2004 年 7 月～2005 年 6 月、2005 年 7 月～2006 年 6 月の各期間を、それぞれ“2003 年”、“2004 年”、“2005 年”として扱う。

統計解析

間伐実施後（2004～2005 年）の地上部現存量、炭素・窒素蓄積量、地上部現存量増加速度、炭素・窒素蓄積増加速度について、処理区（対照区と間伐区）と時間（測定年）の効果の有無を、処理区内の各 15 × 15m 調査プロットを変量効果として指定し、2 元配置の分散分析により解析した。リターフォール（炭素・窒素）還元量については、2003～2005 年の 3 年間のデータに対し同様の解析を行った。また、地上部現存量増加速度、炭素・窒素蓄積増加速度の間伐による変化の有無を検証するために、間伐区のみを対象とし、2003～2005 年における時間の効果について 1 元配置の分散分析により解析した。この際、2003 年のデータから伐採対象木を除外し、各 15 × 15m 調査プロットを変量効果として指定して解析を行った。これらの各計算には統計ソフト（JMP 6.0, SAS Institute）を使用した。

4. 結果

地上部現存量、炭素・窒素蓄積量推定のためのアロメトリー式

伐倒調査で得られた 6 本の試料木の DBH は 4.8～24.8 cm、地上部乾重量は 4.2～201 kg であった（Table 1）。

Table 1. スギ伐倒試料各部位の胸高直径（DBH）と乾燥重量
Diameter at breast height (DBH) and dry weight of aboveground parts of sample trees.

個体番号 sample tree no.	1	2	3	4	5	6
DBH (cm)	24.8	17.3	13.4	11.6	7.9	4.8
樹高 (m) Tree height	23.1	17.4	16.3	15.1	9.6	6.8
幹 (kg) stem	191.5	78.2	46.0	38.9	10.5	3.4
当年葉（+小枝）(kg) current year needle and twig	1.64	0.25	0.10	0.50	0.11	0.04
旧葉（+小枝）(kg) older needle and twig	3.98	2.76	0.95	1.81	0.46	0.27
緑枝 (kg) green branch	0.36	0.17	0.06	0.14	0.04	0.01
褐色枝 (kg) brown branch	3.31	1.59	1.20	1.55	0.62	0.48
球果 (kg) cone	0.33	0.16	0.01	0.19	-	0.01
枯死葉（+小枝）(kg) dead needle and twig	0.07	0.01	0.02	0.09	0.05	0.01
枯死枝 (kg) dead branch	-	-	0.00	0.32	0.16	-
地上部* (kg) aboveground	201.1	83.2	48.3	43.1	11.7	4.2

*枯死葉と枯死枝は含まず Dead leaf and dead branch are not included.

部位別に見ると幹の割合が最も大きく、全体の 80%－95%を占めた。一方、当年葉と旧葉を合わせた緑葉の割合は 2.2%－7.4%であった。また、各部位の炭素含有率 (g g^{-1}) は 0.45－0.52 で、部位による差は小さかった。窒素含有率 (g kg^{-1}) は 1.2－19 で、葉で高く幹や枝で低い値を示した (Table 2)。各試料個体の地上部乾重量、地上部炭素・窒素含有量と DBH の関係をべき乗式で表し、Table 3 に示すアロメトリー式を得た。地上部現存量を推定するアロメトリー式では、DBH だけでなく樹高情報を含む D^2H (D は DBH、H は樹高) が変数として用いられることもある (例えば川那辺ら, 1975)。しかし、本研究では DBH のみを変数とした場合にも精度良く地上部現存量、地上部炭素・窒素蓄積量を推定できると考えられたことに加え (決定係数 $R^2 = 0.99$; Table 3)、DBH と比較すると樹高の成長量を毎木調査により精度良く検出することが難

しいと考えられた (2003 年 3 月～11 月における成長量の測定結果 (平均値±標準偏差、 $N=262$): DBH、 $0.25 \pm 0.20 \text{ cm}$; 樹高、 $0.40 \pm 1.14 \text{ m}$)。そのため、本研究では Table 3 に示した DBH のみを変数とする式を用いることにした。

調査区内における生木個体のサイズ分布

2003 年の間伐前における間伐区、対照区の平均 DBH はそれぞれ 18.2 cm ($N=125$)、17.7 cm ($N=139$) であった。2003 年 12 月に実施された間伐では主に小～中径木が伐採の対象となり、伐採対象木と残存木の平均 DBH はそれぞれ 14.4 cm と 22.4 cm、平均樹高はそれぞれ 15.5 m と 19.4 m であった。(Fig. 1)。このように、本研究で行われた間伐は下層間伐であり、間伐区では間伐により主にサイズの大きい個体が残された。

Table 2. 伐倒試料の部位別炭素・窒素含有率 (括弧内は平均値)
Carbon and nitrogen concentrations in aboveground parts of sample trees. Data shown are min-max (mean).

	炭素 (g g^{-1}) carbon	窒素 (g kg^{-1}) nitrogen
材 stem wood	0.46-0.48 (0.47)	1.2-3.0 (1.7)
樹皮 bark	0.45-0.49 (0.47)	4.6-8.6 (6.5)
当年葉 (+小枝) current year needle and twig	0.47-0.49 (0.48)	16-19 (17)
旧葉 (+小枝) older needle and twig	0.48-0.49 (0.49)	12-15 (13)
緑枝 green branch	0.47-0.48 (0.47)	6.1-7.8 (7.1)
褐色枝 brown branch	0.47-0.48 (0.48)	3.1-4.3 (3.6)
球果 cone	0.50-0.52 (0.51)	8.5-11 (10)
枯死葉 (+小枝) dead needle and twig	0.47-0.50 (0.49)	11-15 (13)
枯死枝 dead branch	0.47-0.48 (0.47)	2.8-8.8 (5.8)

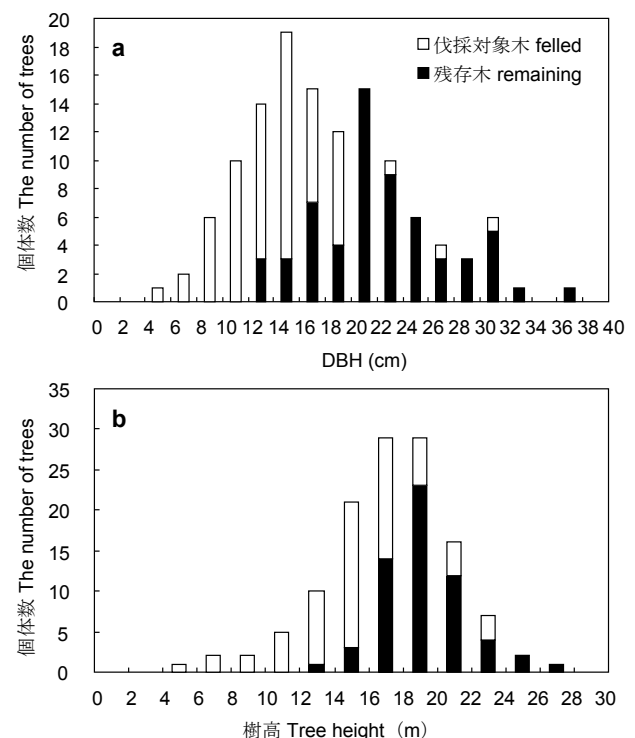


Fig. 1. 間伐区における間伐前 (2003 年 11 月) の伐採対象木と残存木の個体サイズ分布 (a, DBH; b, 樹高)
Size distribution of (a) DBH and (b) tree height in the thinned plots before thinning practice (November 2003); open and closed columns indicate trees felled and remaining, respectively, at the thinning practice.

Table 3. 桂試験地のスギ地上部現存量および炭素・窒素蓄積量推定式 ($N=6$)
Allometric equations to estimate aboveground biomass and aboveground carbon and nitrogen storage of sugi in the Katsura experimental watershed ($N=6$).

	a	b	R ²	P value
Biomass (kg) = a DBH ^b	0.0974	2.39	0.99	<0.0001
C content (kg) = a DBH ^b	0.0450	2.40	0.99	<0.0001
N content (g) = a DBH ^b	0.468	2.14	0.99	<0.0001

地上部現存量

2003 – 2005 年の地上部現存量をアロメトリー式により推定した。2003 年の間伐前における対照区、間伐区の地上部現存量は、それぞれ約 229 Mg ha^{-1} 、222 Mg ha^{-1} で、両区で同様であった (Fig. 2)。対照区の地上部現存量は年々増加し、2004 年には約 235 Mg ha^{-1} 、2005 年には約 242 Mg ha^{-1} となった。間伐区では、間伐直後の地上部現存量は間伐前の 70 % にあたる約 159 Mg ha^{-1} 、間伐 2 年後の 2005 年の地上部現存量は約 174 Mg ha^{-1} であった。2004 – 2005 年の地上部現存量に対する時間の効果は有意であったが、処理区および交互作用 (処理区 \times 時間) の効果は有意ではなかった (Table 4)。これらの結果は、この期間における対照区と間伐区の地上部現存量に大きな差がなく、両区ともに現存量が増加したことを示している。

また、これらの現存量推定値から地上部現存量増加速度 (当年の現存量 – 前年の現存量) を算出した結果、

対照区で $5.8 - 8.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった (Fig. 3)。間伐区では、間伐後の 2004 年における地上部現存量増加速度は 2003 年とほぼ同様であり、 $7.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。なお、間伐後の残存木のみを対象とすると、2003 年における間伐区の地上部現存量増加速度は約 $6.4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で、全体 ($7.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) の約 80 % であった。2004 – 2005 年における地上部現存量増加速度に対する処理区、時間、これらの交互作用の効果は有意ではなかった (Table 4)。この結果は、この期間における対照区と間伐区の地上部現存量増加速度には差がなく、経時変化も無かったことを示している。また、間伐後の残存木のみを解析対象として、2003 – 2005 年における間伐区の地上部現存量増加速度に対する時間の効果を検証した結果、有意な効果は認められなかった (One-way ANOVA: $F=2.4$, $p=0.21$)。この結果は、間伐前後における残存木の地上部現存量増加速度に差が無かったことを示している。

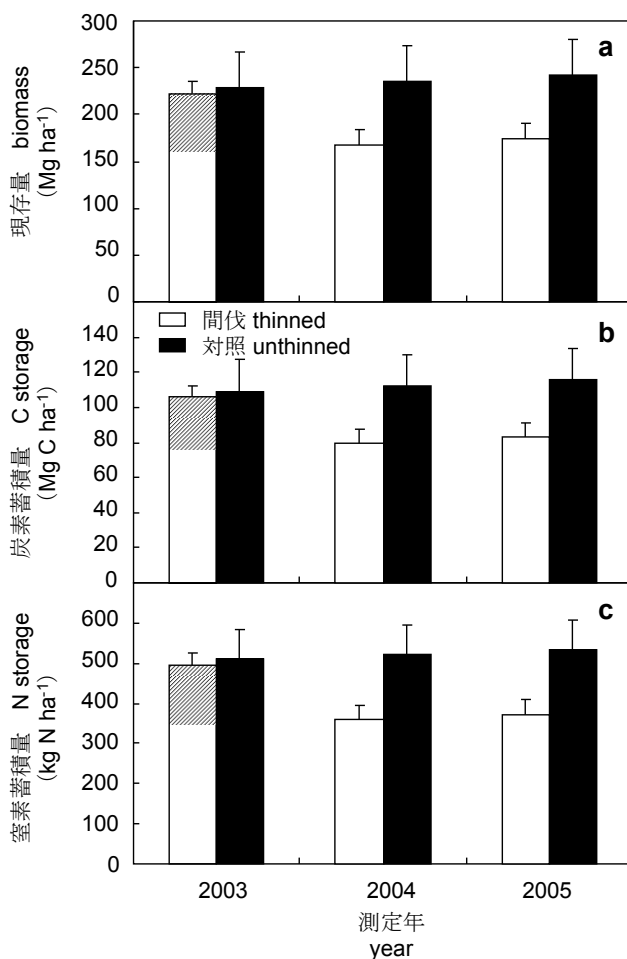


Fig. 2. 地上部現存量および炭素・窒素蓄積量 (斜線部は伐採対象木の現存量、蓄積量を示す) (平均 + 標準誤差, $N=3$) Aboveground (a) biomass, and (b) carbon and (c) nitrogen storage in the thinned (open column) and unthinned (closed column) plots. Hatched columns indicate fractions of felled trees. Data shown are Mean + SE ($N=3$).

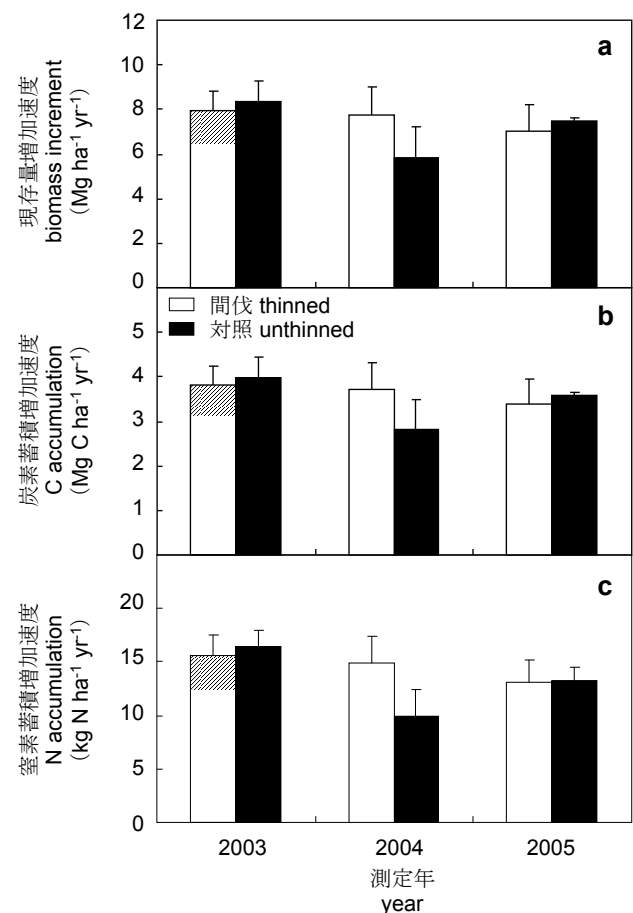


Fig. 3. 地上部現存量増加速度および炭素・窒素蓄積速度 (斜線部は伐採対象木の現存量・蓄積増加量を示す) (平均 + 標準誤差, $N=3$) Aboveground (a) biomass, and (b) carbon and (c) nitrogen storage in the thinned (open column) and unthinned (closed column) plots. Hatched columns indicate fractions of felled trees. Data shown are Mean + SE ($N=3$).

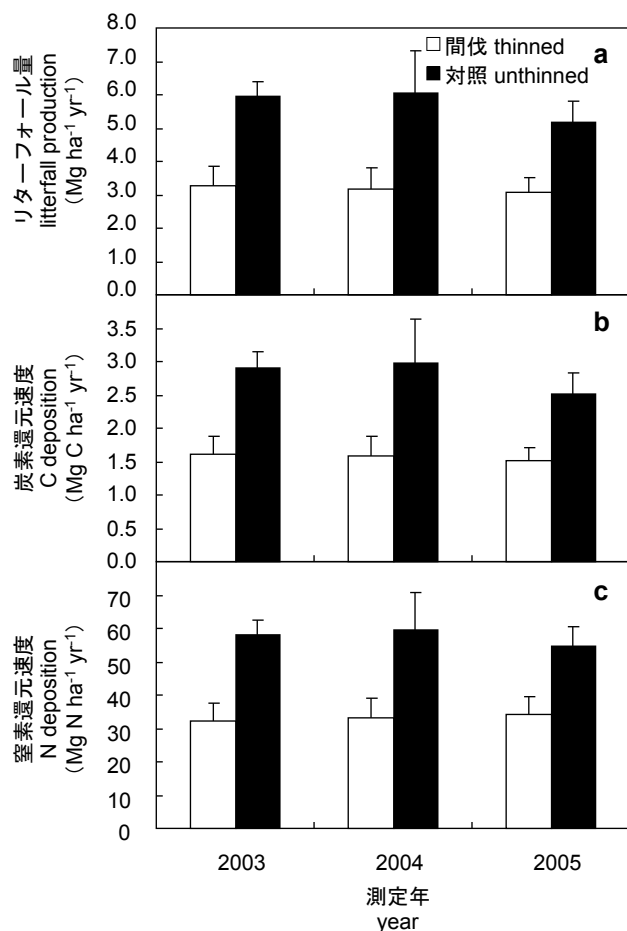


Fig. 4. 2003年－2005年（2003年7月－2006年6月）におけるリターフォール量およびリターフォールによる炭素・窒素還元速度（平均＋標準誤差、 $N=3$ ）

(a) Litterfall production, and (b) carbon and (c) nitrogen deposition rates through litterfall in the thinned (open column) and unthinned (closed column) plots in 2003–2005 (July 2003–June 2006). Data shown are Mean + SE ($N=3$).

地上部炭素・窒素蓄積量

2003年の対照区と間伐区における地上部炭素蓄積量は、それぞれ 109 Mg C ha^{-1} と 106 Mg C ha^{-1} 、地上部窒素蓄積量はそれぞれ 511 kg N ha^{-1} と 494 kg N ha^{-1} と推定された。対照区の地上部炭素・窒素蓄積量は増加傾向にあり、2005年にはそれぞれ 115 Mg C ha^{-1} 、 535 kg N ha^{-1} であったが、間伐区では間伐により減少し、2005年の炭素・窒素蓄積量は約 83 Mg C ha^{-1} 、 371 kg N ha^{-1} であった。地上部現存量に対する効果と同様に、2004－2005年の地上部炭素・窒素蓄積量に対する時間の効果は有意であったが、処理区および交互作用（処理区×時間）の効果は有意ではなかった（Table 4）。これらの結果は、この期間における間伐区の地上部炭素・窒素蓄積量は対照区と比較して大きな差がなく、両区ともに蓄積量が増加したことを示している。

対照区における地上部の炭素・窒素蓄積増加速度は、

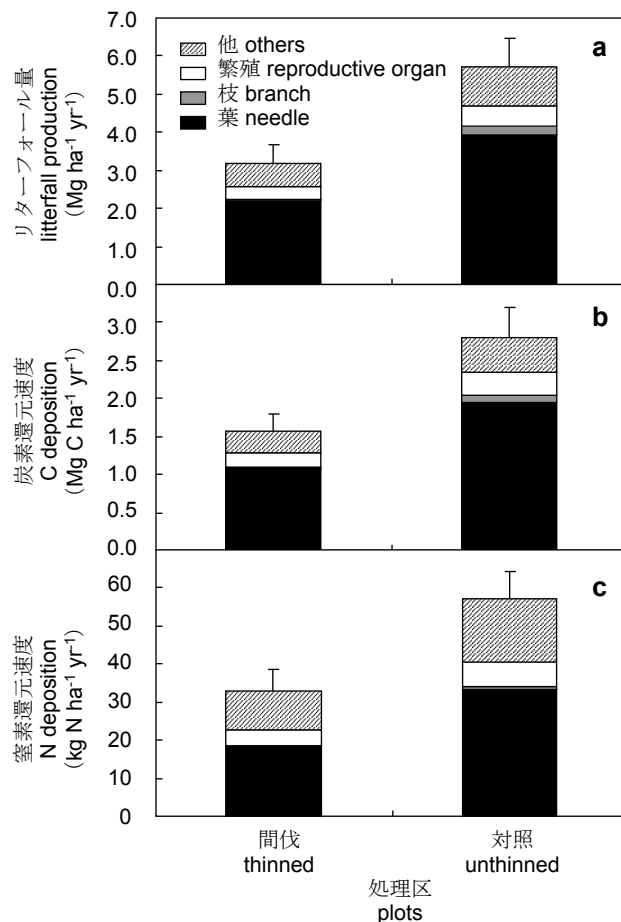


Fig. 5. 2003－2005年（2003年7月－2006年6月）におけるリターフォールによる炭素・窒素還元速度（年平均値；平均＋標準誤差、 $N=3$ ）

Mean annual (a) litterfall production, and (b) carbon and (c) nitrogen deposition rates through litterfall in the thinned and unthinned plots in 2003–2005 (July 2003–June 2006). Data shown are Mean + SE ($N=3$).

$2.8 - 4.0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ および $10 - 16 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と推定された（Fig. 3）。間伐後の2004年における炭素・窒素蓄積増加速度は、2003年とほぼ同レベルの約 $3.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ および $15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。2004－2005年の地上部炭素・窒素蓄積増加速度に対する処理区、時間、これらの交互作用の効果は有意ではなかった（Table 4）。この結果は、この期間における対照区と間伐区の地上部炭素・窒素蓄積増加速度に差が無く、経時変化も無かったことを示している。また、間伐後の残存木のみを解析対象として、2003－2005年における間伐区の地上部炭素・窒素蓄積増加速度に対する時間の効果を検証した結果、有意な効果は認められなかった（One-way ANOVA：炭素 $F=2.3$ 、 $p=0.21$ ；窒素 $F=2.8$ 、 $p=0.17$ ）。この結果は、間伐前後における残存木の地上部炭素・窒素蓄積増加速度に差がなかったことを示している。

Table 4. 間伐後（2004 – 2005 年）の地上部現存量、炭素・窒素蓄積量、地上部現存量増加速度、炭素・窒素蓄積増加速度、リターフォール量、リターフォールによる炭素・窒素還元速度に対する処理区（間伐）、時間（年）およびこれらの交互作用の効果（分割法による分散分析の F 値）
Effects of treatment (thinning), time (year) and treatment x time on aboveground biomass and its increment, aboveground C and N storage and their accumulation rates, litterfall production rates and carbon and nitrogen deposition rates through litterfall (F values of split-plot ANOVA).

	処理区 treatment	時間 time	処理区×時間 treatment x time
現存量 biomass	2.6 ^{NS}	152 ^{***}	0.1 ^{NS}
炭素蓄積量 carbon storage	2.6 ^{NS}	151 ^{***}	0.1 ^{NS}
窒素蓄積量 nitrogen storage	3.8 ^{NS}	127 ^{***}	0.0 ^{NS}
現存量増加速度 biomass increment	0.3 ^{NS}	0.4 ^{NS}	2.5 ^{NS}
炭素蓄積増加速度 carbon accumulation rate	0.3 ^{NS}	0.4 ^{NS}	2.5 ^{NS}
窒素蓄積増加速度 nitrogen accumulation rate	1.0 ^{NS}	0.2 ^{NS}	1.9 ^{NS}
リターフォール量 ^a litterfall production rate	7.7 ^{NS}	1.0 ^{NS}	0.5 ^{NS}
炭素還元速度 ^a carbon deposition rate through litterfall	7.5 ^{NS}	1.1 ^{NS}	0.5 ^{NS}
窒素還元速度 ^a nitrogen deposition rate through litterfall	7.3 ^{NS}	0.2 ^{NS}	0.5 ^{NS}

*** P<0.001、** P<0.01、* P<0.05、NS not significant

^a2003 年（2003 年 7 月 – 2004 年 6 月）のデータを含む Data for 2003 (July 2003-June 2004) is included.

リターフォールによる炭素・窒素還元速度

2003 – 2005 年のリターフォール量は、対照区で約 5.2 – 6.0 Mg ha⁻¹ yr⁻¹、間伐区で 3.1 – 3.3 Mg ha⁻¹ yr⁻¹であった (Fig. 4)。2003 年（2003 年 7 月 – 2004 年 6 月）における間伐区のリターフォール量も対照区よりも少ない傾向にあったが (Fig. 4)、これは、桂試験地のスギ人工林では 12 月から 2 月にかけてリターフォール量が最も多く、1 年間のリターフォールの約 90% が 12 月の間伐実施後に落下したものであるためと考えられる（データ省略）。統計解析の結果、リターフォール量に対する処理区、時間とその交互作用の効果は有意ではなかったが、わずかながら処理区の効果は表れていると考えられた (Table 4 : F=7.7, P=0.05)。この結果は、間伐後の間伐区におけるリターフォール量が対照区よりもやや少ないことを示している。

リターフォール試料の炭素含有率は 0.46 – 0.54 g g⁻¹ で、リターフォールの構成要素間の差は小さかった。窒素含有率は 3.2 – 17 g kg⁻¹ で、枝の窒素含有率が小さく、“その他”を除くと最も大きい値を示したのは繁殖器官であった (Table 5)。これらの値とリターフォール量から求めた 2003 – 2005 年のリターフォールに

よる炭素・窒素還元速度は、対照区ではそれぞれ 2.5 – 3.0 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ および 55 – 59 kg N ha⁻¹ yr⁻¹、間伐区では 1.5 – 1.6 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ および 32 – 34 kg N ha⁻¹ yr⁻¹であった (Fig. 4)。リターフォール量と同様に、炭素・窒素還元速度に対する処理区、時間とその交互作用の効果は有意ではなかったが、わずかながら処理区の効果は表れていると考えられた (Table 4 : 炭素 F=7.5, P=0.05 ; 窒素 F=7.3, P=0.05)。これらの結果は、間伐後の間伐区における炭素・窒素還元速度が対照区よりもやや小さいことを示唆している。

3 年間を平均すると間伐区のリターフォール量、炭素・窒素還元速度はそれぞれ約 3.2 Mg ha⁻¹ yr⁻¹、1.6 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹、33 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ で、対照区（約 5.7 Mg ha⁻¹ yr⁻¹、2.8 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹、57 kg N ha⁻¹ yr⁻¹）の約 60%であった (Fig. 4)。なお、間伐区では 2003 年 12 月の間伐の実施により無間伐林分（対照区）における 1 年間のリターフォールの 10 倍以上にあたる約 63 Mg ha⁻¹ の有機物が林地に供給された (Fig. 2)。また、間伐による炭素および窒素還元量は約 30 Mg C ha⁻¹ および 150 kg N ha⁻¹ で、無間伐林分（対照区）における 1 年間のリターフォールによる還元量と比較すると炭素で約 10 倍、窒素では約 2.5 倍であった (Fig. 2)。

Table 5. リターフォール試料の炭素・窒素含有率 (2003 年 4 月 - 2004 年 3 月採取試料)
Carbon and nitrogen concentrations in litterfall samples (sampled in April 2003-March 2004)

	葉 (+小枝) Needle and twig	枝 branch	繁殖 reproductive organ	その他 other
炭素 (g g ⁻¹) carbon	0.49	0.48	0.51-0.54	0.46
窒素 (g kg ⁻¹) nitrogen	8.4	3.2	11-12	17

5. 考察

桂試験地のスギ人工林における地上部炭素・窒素動態

桂試験地における間伐前のスギ人工林の地上部現存量は約 220 - 230 Mg ha⁻¹、間伐後の間伐区で約 170 Mg ha⁻¹ と推定された (Fig. 2)。過去に多数行われた調査のうち、桂試験地の林齢に近い 30 - 45 年生のスギ人工林については、秋田、吉野、熊本などを調査した例では約 120 - 280 Mg ha⁻¹ (14 林分、不成績造林地を除く)、別に吉野や宮崎を調査した例では約 130 - 240 Mg ha⁻¹ であった (四大学合同調査班, 1966; 安藤ら, 1968)。これらと比較すると、桂試験地のスギ人工林の地上部現存量は標準的な量と言える。

炭素蓄積量については本研究の対照区で約 110 Mg C ha⁻¹ であったが (Fig. 2)、林齢の近いスギ人工林の調査例を見ると、30 年生の林分で 115 - 142 Mg C ha⁻¹ (高宮, 2001)、37 年生の林分で 219 Mg C ha⁻¹ (渡邊・茂木, 2005)、40 年生林分で約 170 Mg C ha⁻¹ (片倉ら, 2002) などの報告がある。本研究の推定値はこれらの報告例と比較すると小さめであるが、上述のように、地上部現存量は四大学合同調査班 (1966) 等の調査と比較して標準的と考えられることや、一般に地上部各部位の炭素含有率は 0.5 g g⁻¹ 前後で、複数の報告間のばらつきも小さいことから (Table 2; 高宮, 2001; 渡邊・茂木, 2005)、桂試験地のスギ人工林は、炭素蓄積量においても標準的と考えられる。また、スギ人工林の地上部窒素蓄積量については 30 - 45 年生の林分で約 310 - 720 kg N ha⁻¹ との報告があるが (四大学合同調査班, 1966)、本研究の約 360 - 530 kg N ha⁻¹ もこの範囲内にあった。

対照区の地上部純一次生産速度 (NPP) を、2004 - 2005 年の地上部現存量増加速度と 2003 - 2005 年のリターフォール量 (葉+枝+繁殖器官) の平均値の和として求めると約 11 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ となる。林齢の近いスギ人工林の地上部 NPP については、四大学合同調査班 (1966) の 10 - 27 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ (林齢 30 - 45 年)、安藤ら (1968) の 11 - 15 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ (林齢 31 - 45 年) などがあるが、これらと比較すると桂試験地のスギ人工林の NPP は標準的、あるいはやや低めであると考えられる。同様に地上部炭素固定速度および窒素吸収速度をそれぞれの地上部蓄積量増加速度とリターフォール還元量の和として求めると、炭素固定速度が

5.5 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹、窒素吸収速度は 52 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ となる。前述のように樹体内の炭素含有率はばらつきが小さいことから、他の林分と比較した場合、桂試験地の対照区における炭素固定速度については、地上部 NPP と同様に低めであると推察される。窒素吸収速度については、大分の 68 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (35 年生)、吉野の 56 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (30 年生)、秋田の 83 - 121 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (33 - 37 年生) などが報告されており (四大学合同調査班, 1966)、これらと比較すると、桂試験地のスギ人工林では窒素吸収速度も低めと言える。

また、対照区のスギ由来のリターフォール (葉+枝+繁殖器官) による窒素還元速度は約 40 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ と推定されたが (Fig. 4)、この値は地上部窒素吸収速度の約 80% にあたる。また、最近の報告では、桂試験地の土壌中窒素無機化速度が斜面中部で約 177 kg N ha⁻¹ yr⁻¹、斜面下部で約 125 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ であると推定されている (平井ら, 2007)。したがって、桂試験地のスギによる窒素吸収速度はこれらの約 30% - 45%、リターフォールによる窒素還元速度は約 25% - 35% にあたることになり、地上部窒素動態と土壌中窒素無機化過程には量的に大きな隔たりがあるように見える。しかし、本研究では根系の生産や枯死脱落に伴う窒素動態についての測定を行っていないため、窒素吸収速度、土壌への窒素還元速度ともに過小評価になっている可能性がある。特に、純一次生産量の数十% を占めるとも言われる細根生産が森林の窒素動態に与える影響について解明することは、今後の重要な課題と考えられる (Noguchi et al., 2007)。

間伐の効果

間伐後の間伐区における地上部現存量、炭素・窒素蓄積量は対照区の約 70% であった。統計解析の結果、間伐区と対照区の差は有意ではなかったが、時間に伴う変化は有意であった。また、地上部現存量の増加速度は間伐区でやや大きい傾向が見られたが、統計的には有意な差ではなかった (Table 4)。一方、間伐区の残存木のみを解析対象として、間伐前後の地上部現存量、炭素・窒素蓄積増加速度に対する時間の効果を解析した結果、有意な効果は見られなかった。また、間伐区のリターフォール量およびリターフォールによる炭素・窒素還元速度は対照区の約 60% で、わずかでは

あるが間伐の効果があると考えられた (Table 4: リターフォール量 $F=7.7$, $P=0.05$; 炭素 $F=7.5$, $P=0.05$; 窒素 $F=7.3$, $P=0.05$)。これらの結果は、本研究で行われたような下層間伐が、間伐後 2 年程度の期間における林分の成長や炭素・窒素動態に大きな影響を与えないことを示唆している。しかし、統計的に有意ではないものの、傾向としては、リターフォールによる炭素・窒素還元速度の低下が一定期間継続する可能性もある。

また、間伐区の地上部純生産速度 (NPP) は $10.0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で対照区 ($11.4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) の約 90%、同様に間伐区の炭素固定速度は $4.8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で、対照区 (5.5 Mg C ha^{-1}) の約 90% と推定された。これは、NPP や炭素固定速度が間伐区と対照区の間に差が見られない地上部現存量増加速度を主に反映するためと考えられる。一方、間伐区の窒素吸収速度は $37 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で対照区 ($52 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) の約 70% であったが、幹材など比べると葉の窒素濃度が高いため、リターフォール量の小さい間伐区の窒素吸収速度が、対照区よりも低く見積もられたと考えられる。しかし、間伐直後には林内の光環境の改善により枝葉の枯れ上がりが進みにくくなるなど、残存木の成長動態が樹冠閉鎖時と異なる可能性がある。したがって、炭素固定速度や窒素吸収速度に対する間伐の影響を評価するためには、本研究のような伐採直後の調査だけでなく、年数が経過して林内環境や残存木の成長が比較的安定した段階での調査を行うことも重要と考えられる。

また、間伐によって林地に還元されたバイオマスおよび炭素還元量を対照区の年リターフォール量、リターフォールによる炭素還元量と比較すると約 9–10 倍強、窒素還元量については約 2.5 倍であった。間伐により還元される有機物の大部分は分解速度の遅い幹であるため、葉が約 7 割を占めるリターフォールと単純に比較することには問題がある (Table 1, Fig. 4)。しかし、本研究で行われたような切り捨て間伐では材や枝条を搬出しないため、総量として見た場合、人工林土壌への炭素・窒素供給への寄与は大きいと考えられる。

これまでの研究例では、間伐は残存木の地上部成長を促進させることが多い (玉井ら, 1983; 河原ら, 1989; Han et al., 2006)。一方、川那辺ら (1975) は、10 年生スギ林分で強度間伐 (本数率で約 65%) を行った結果、間伐後 3 年間は無間伐や弱度間伐区よりも成長量や純生産量が小さかったと報告している。また、河原ら (1989) はスギ、ヒノキ若齢林における小径木間伐では残存個体の直径成長に対する効果が小さいことを示している。これらに対し、本研究では間伐による明瞭な成長量の変化は見られなかった (Fig. 3)。

最近の報告によれば、50% 間伐を行ったヒノキ若齢

林では、間伐の数ヶ月後には葉の窒素濃度が特に樹冠内の中層、下層で無間伐の対照区よりも有意に高かったことが示されている (Han et al., 2006)。また、50% 間伐を行った別のヒノキ林において、間伐後 2 年間ににおける残存木の生葉の窒素濃度が無間伐の対照区と比較して有意に高かったことが報告されている (Inagaki et al., 2008)。本研究では、間伐前の 2003 年に作成したアロメトリー式を利用して地上部炭素・窒素蓄積量を推定しているが、間伐影響をより精度良く評価するためには、間伐前後における樹体内の窒素含有率の変化なども考慮する必要があるかもしれない。一方、間伐後長期間を経た森林の炭素・窒素動態については、間伐後 33 年を経過したトウヒ (*Picea abies*) 林の報告例がある。この研究では、65%、75% の強度間伐を行った試験区における樹木の現存量、炭素・窒素蓄積量が 35% 間伐区の約 80% 程度で、樹体への炭素・窒素蓄積増加速度は約 90%–95% であることが示されている (Nilsen & Strand, 2008)。これに対して本研究では、本数にして約 50% が伐採され、間伐後の地上部現存量や炭素・窒素蓄積量は対照区の 7 割程度であったが、炭素・窒素蓄積増加速度は対照区と同等であった。このように、環境条件や樹種、間伐強度、間伐後の年数経過など、諸条件により間伐の効果には差が出る可能性がある。特に、最近では強度の間伐による急激な環境変化が残存木にストレスを与える可能性も指摘されている (稲垣ら, 2008; 渡辺ら, 2008)。稲垣ら (2008) が指摘するように、森林の物質動態に対する間伐影響については研究例が少ないため、今後は研究事例をさらに増やすとともに、立地条件や生理的要因との関連性について解析を進めることも、樹木の成長や森林の炭素・窒素動態に対する間伐の効果をより深く理解する上で重要と考えられる。

6. 謝辞

本研究では、関東森林管理局茨城森林管理署の許可により、国有林を試験地として利用させていただいた。伐倒調査および間伐作業では、関東森林管理局森林技術センターならびに森林総合研究所企画部実験林室の方々に協力いただいた。また、本研究を行うにあたり、森林総合研究所立地環境研究領域の方々には野外調査や試料調製など、様々な面でご協力いただいた。本研究は農林水産技術会議の環境研究および森林総合研究所交付金プロジェクト「森林・農地・水域を通ずる自然循環機能の高度な利用技術の開発」(課題番号 200003)、文部科学省科学研究費補助金「スギ林「切り捨て間伐」が森林生態系の窒素動態に及ぼす影響の解明」(課題番号 18580156)、環境省地球環境保全試験研究費「環境変動と森林施業に伴う針葉樹人工林の CO_2 吸収量の変動評価に関する研究」により行われた。

7. 引用文献

- Ando, T., Chiba, K., Nishimura, T. and Tanimoto, T. (1977) "JIBP Synthesis: Primary productivity of Japanese forests: productivity of terrestrial communities", Shidei, T. and Kira, T. (eds.), University of Tokyo Press, Tokyo, 16, pp 213-245.
- 安藤貴・蜂屋欣二・土井恭次・片岡寛純・加藤善忠・坂口勝美 (1968) スギ林の保育形式に関する研究, 林試研報, 209, 1-76.
- Cole, D.W. and Rapp, M. (1981) Elemental Cycling in Forest Ecosystems. In Reichle D.E (ed) "International Biological Programme: Dynamic Properties of Forest Ecosystems", Cambridge University Press, Cambridge, 23, 341-409.
- Fukuda, M., Iehara, T. and Matsumoto, M. (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecol Manage*, 184, 1-16.
- Han, Q., Araki, M. and Chiba, Y. (2006) Acclimation to irradiance of leaf photosynthesis and associated nitrogen reallocation in photosynthetic apparatus in the year following thinning of a young stand of *Chamaecyparis obtusa*. *Photosynthetica*, 44, 523-529.
- 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.
- Inagaki, Y., Kuramoto, S., Torii, A., Shinomiya, Y. and 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 Manage*, 255, 1859-1867.
- 稲垣善之・篠宮佳樹・鳥居厚志 (2008) 間伐施業が土壌水分と窒素資源に及ぼす影響, 森林応用研究, 17, 37-40.
- 伊藤優子・加藤正樹 (2003) 関東地方の都市近郊平地林における降水中の成分濃度と負荷量ー森林総合研究所構内における降水の観測結果ー, 森林総研研報, 2, 149-155.
- Katagiri, S., Matsutani, S. and Tutsumi, T. (1978) "JIBP Synthesis: Biological Production in a Warm-Temperate Evergreen Oak Forest of Japan", Kira T., Ono Y. and Hosokawa T. (eds), University of Tokyo Press, Tokyo, 18, pp 276-285.
- 片倉正行・近藤道治・岡田充弘・古川仁・畠山竜哉 (2002) スギ人工林炭素貯留量の定量と細り表・材積表の調整, 長野県林業総合センター研究報告, 16, 71-73.
- 河原輝彦・加茂皓一・井鷲裕司・清野嘉之 (1989) スギ、ヒノキ若齢林の利用間伐試験, 森林総研研報, 356, 47-62.
- 川那辺三郎・斎藤秀樹・四手井綱英 (1975) 小径木間伐に関する研究 (V) 間伐後6年間のスギ林の林況および現存量の変化について, 日林誌, 57, 215-223.
- Keith, H., Mackey, B.G. and Lindenmayer, D.B. (2009) Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106, 11635-11640.
- 中島 徹・広嶋 卓也・白石 則彦 (2007) 京都議定書3条4項林面積の拡大を視野に入れた森林施業の実施面積に関する分析, 日林誌, 89, 167-173.
- Nilsen, P. and Strand, L.T. (2008) Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years. *Forest Ecol Manage*, 256, 201-208.
- Noguchi, K., Konôpka, B., Satomura, T., Kaneko, S. and Takahashi, M. (2007) Biomass and production of fine roots in Japanese forests. *J For Res*, 12, 83-95.
- 大原偉樹 (2007) スギ人工林の間伐にともなう林床植生の変化と水土保全機能に関する研究の必要性. 森林総研研報, 6, 127-134.
- Ohrui, K. and Mitchell, M.J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecol Appl*, 7, 391-401.
- 高宮立身 (2001) 間伐が森林の炭素貯留量に与える影響について (I) ースギ30年生林分の間伐区と無間伐区における貯留量の比較, 日林九支研論文集, 54, 163-164.
- 玉井重信・大久保泰志・堤利夫 (1983) 小径木間伐に関する研究 (VI) 間伐後12年間のスギ林の林況および現存量の変化について, 日林誌, 65, 372-381.
- 釣田竜也・吉永秀一郎・阿部俊夫 (2005) ポーラスプレート・テンションライシメーター法による土壌水の年移動量の推定, 土壌の物理性, 101, 51-56.
- 渡邊仁志・茂木靖和 (2005) 壮齢スギ、ヒノキ人工林における林分の炭素貯留量. 岐阜県森林研研報, 34, 11-16.
- 渡辺直史・深田英久・塚本次郎 (2008) ヒノキ強度間伐林分の残存木樹幹表面における樹脂流出と間伐強度および立地要因との関係, 森林立地, 50, 117-123.
- 四大学合同調査班 (1966) 森林の生産力に関する研究, 第III報 スギ人工林の物質生産について, 日本林業技術協会, 東京, pp. 1-63