

## 過密なスギ壮齡人工林における間伐効果 —樹冠長と胸高直径成長量に基づく分析—

國崎 貴嗣<sup>\*、1</sup>・白旗 学<sup>1</sup>・松木佐和子<sup>1</sup>

最近 (2011 年または 2012 年) に間伐された過密壮齡林 2 林分を対象に、本数率 30% 前後の強度が中庸な下層間伐が樹冠長の 7 年間の変化および 4 年間の胸高直径成長に及ぼす影響を調べた。いずれの間伐林でも平均樹冠長は時間とともに増加した。間伐林における樹高の成長速度は 0.2 m/年前後であるのに対し、生枝下高の上昇速度はほぼ 0.0 m/年であった。間伐林の平均胸高直径成長量は、放置林のそれより有意に高かった。また、期首胸高直径と胸高直径成長量の関係では、期首胸高直径が大きな立木ほど間伐林と放置林の胸高直径成長量の差が大きくなった。本研究は、中庸な下層間伐によって、過密壮齡林における樹冠底部の生枝の枯れ上がりが停止した事例を報告した。ただし、樹冠競合で相対的に劣勢な立木ほど、胸高直径成長促進の効果が低くなると考えられる。

キーワード：過密壮齡林、間伐、胸高直径成長量、樹冠長

Takashi Kunisaki,<sup>\*、1</sup> Manabu Shirahata,<sup>1</sup> Sawako Matsuki<sup>1</sup> (2022) Thinning Effects on Changes in Crown Length and the Increment in Diameter at Breast Height of Japanese Cedar Trees in Overcrowded Mature Plantations. *J Jpn For Soc* 104: 223-228  
The effects of moderate low thinning of around 30% in number ratio on changes in crown length for seven years and DBH growth for four years were investigated in overcrowded mature plantations of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). Mean crown length increased with time in the thinned stands. In the thinned stands, mean height increment was approximately 0.2 m/year, while the rising rate of crown base was nearly 0.0 m/year. Mean DBH increment in the thinned stands was significantly higher than that in the unthinned stand. As for the relationship between initial DBH and DBH increment, the greater the initial DBH, the greater the difference in the increment between the thinned stands and the unthinned stand. There are cases in which the rise of crown base in overcrowded mature stand can be stopped even by moderate low thinning. However, thinning effect on DBH growth would decrease, as the trees which are comparatively suppressed among inter-tree competition.

**Key words:** crown length, DBH increment, overcrowded mature plantation, thinning

### I. はじめに

37 府県における独自超過課税による森林整備の導入や森林経営管理制度の施行 (林野庁 2019) に反映されるように、間伐遅れの過密人工林の整備は現在も大きな課題である (吉田ら 2018)。林齢 51 年以上の人工林が人工林面積の半数を占める現在 (林野庁 2021)、過密な壮齡・高齢人工林の間伐するか、それとも主伐するかを適確に経営判断するには (福島 2010)、その基礎として、過密人工林における胸高直径成長や樹冠サイズへの間伐効果の発現パターンを明らかにしておく必要がある (正木ら 2011; 渡邊ら 2015)。なお、本研究では、過密という用語を、スギ人工林で自己間引きが発生しやすい相対幹距 15% 以下 (國崎 2013; 吉田ら 2018) という意味で用いる。

林齢 80 年以上の過密なスギ高齢・老齡人工林に関しては、間伐後の胸高直径成長が促進されるという報告がいくつかある (例えば、吉田ら 2002; 國崎・山崎 2021)。一方、標準伐期齢を超えた林齢 45 年から 80 年頃までの過密なスギ壮齡人工林 (以下、過密壮齡林とする) では、間伐後の胸高直径成長の促進が認められる事例 (内村 2016) と認められない事例 (大矢・近藤 2013) の双方が見受けられる。過密壮齡林と一口に言っても、一度も間伐されていない無間伐林もあれば、若齡段階まで密度管理された後に放置されて過密化した林分もある。このため、間伐効果の発現パ

ターンを解明するにあたっては、地位級や育林履歴、間伐直前の混み合い度、間伐方式と関連づけながら研究することが重要である (鈴木ら 2009; 正木 2018)。加えて、胸高直径成長量だけでなく、幹成長に密接に関係する樹冠サイズの変化量も合わせて調べることが間伐効果を理解する上で重要である (藤森 2003; 千葉 2009; 正木ら 2011; 大矢・近藤 2013)。樹冠長は人工林における樹冠競合の実用的指標であり (Hasenauer 2006; Burkhart and Tome 2012; 國崎ら 2021)、樹冠長の変化については樹高成長 (樹高の変化) と樹冠底部を構成する生枝の枯れ上がり (生枝下高の変化) に分けて理解できる (稲垣ら 2018)。スギ無間伐人工林では、林冠閉鎖以降、樹高成長と生枝下高の上昇がつり合い、平均樹冠長は 6 m 前後ではほぼ一定となる (橋本・玉泉 1995; 竹内ら 1997)。また、國崎・白旗 (2014) は、スギ過密壮齡林の平均樹冠長が林冠閉鎖以降の無間伐若齡林のそれに比べて顕著に長いとは言えず、過密林における上層木樹高 (m) の増加に対する平均樹冠長 (m) の増加比率 (以下、樹冠長増加比とする) は 0.09 と極めて低いことを線形モデルで予測した。間伐により生枝下高の上昇を止める、もしくは生枝下高の上昇を樹高成長より緩やかにできれば、樹冠長増加比は 0.09 より顕著に高い値を示すはずである。

本研究では、林齢 50 年未満の段階に本数密度が 900 本/ha 未満に調整された後、25 年以上間伐されずに過密化し

\*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: kunisaki@iwate-u.ac.jp  <https://orcid.org/0000-0002-5605-5356>

<sup>1</sup> 岩手大学農学部 〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8 (Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan) (2021 年 11 月 4 日受付; 2022 年 4 月 18 日受理)

©2022 一般社団法人日本森林学会: この著作はクリエイティブ・コモンズのライセンス CC BY-NC-ND (引用を表示し、改変せず、非営利目的に限定) の条件の元で再配布・二次利用が可能なオープンアクセスです。 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.jp>

た地位級1, 2等の過密壮齡林2林分を対象に, 本数率30%前後の強度が中庸な下層間伐が樹冠長の変化および胸高直径成長に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

## II. 調査地と方法

### 1. 調査地と調査方法

調査地は, 岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センター滝沢演習林 (39°47'N, 141°10'E) である。調査林分から0.5~1.0 km離れた位置 (標高210 m) の気象観測資料 (2002~2015年) によれば, 年平均気温9.7度, 暖かさの指数80.1, 年平均降水量1,278 mmである。最深積雪深は約40 cmであり, 調査地は少雪地域に相当する。調査林分は過密壮齡林3林分 (間伐林2林分と対照としての放置林) であり (表-1), 同一林班内の東向き斜面 (平均傾斜度9~12度) 上にある。標高は200 m前後である。

間伐林1 (林分面積0.942 ha) は, 岩手県林業水産部 (1983) に基づくと, 地位級1である。林齢67年 (2012年) に下層間伐が施され, 林齢68年に0.093 haの固定試験地を設定した。林齢68, 72, 75年の成長休止期に, 全生立木の胸高直径をスチール製直径巻尺により0.1 cm単位で, 樹高と生枝下高をVertex IIIにより0.1 m単位で測定した。藤森 (2010) の定義に従い, 生枝下高を, 樹冠を形成しているとは言い難い生枝を無視し, 斜面上部側における樹冠最下部の枝と斜面下部側におけるその中間の高さと定義した。固定試験地調査による伐根の数と残存木の数から, 間伐林1における林齢67年の間伐前の本数密度は837本/haであり, 間伐後のそれは516本/haであったことから本数間伐率は38%であった。また, 林齢41年より前に施された密度管理により, 林齢41年における林分全体の調査に基づく本数密度は858本/haであった (杉田ら1990)。このときの相対幹距と収量比数はそれぞれ18.9%, 0.54であった。間伐林1における間伐前の林齢67年での相対幹距 (と収量比数) は11.3% (0.89) であり, 過密状態であった。間伐後の相対幹距 (と収量比数) は, 林齢68年で14.9% (0.69), 林齢72年で14.5% (0.71), 林齢75年で14.2% (0.74) と15%以下で推移した。

間伐林2 (林分面積0.555 ha) は地位級2である。林齢73年 (2011年) に下層間伐が施され, 林齢75年に0.090 haの固定試験地を設定した。林齢75, 79, 82年の成長休止期に, 間伐林1と同じ方法で胸高直径, 樹高, 生枝下高を測定した。固定試験地調査による伐根の数と残存木の数から, 間伐林2における林齢73年の間伐前の本数密度は

736本/haであり, 間伐後のそれは533本/haであったことから本数間伐率は28%であった。また, 林齢48年より前に施された密度管理により, 間伐林2における林齢48年の林分全体の調査に基づく本数密度は676本/haであった (杉田ら1990)。このときの相対幹距と収量比数はそれぞれ16.6%, 0.59であった。間伐林2における間伐前の林齢73年での相対幹距 (と収量比数) は12.3% (0.85) であり, 過密状態であった。間伐後の相対幹距 (と収量比数) は, 林齢75年で14.6% (0.68), 林齢79年で14.3% (0.72), 林齢82年で14.0% (0.73) と15%以下で推移した。

放置林 (林分面積1.713 ha) は地位級2である。林齢77年 (2013年) に0.157 haの標準地を設定し, 間伐林1と同じ方法で胸高直径, 樹高, 生枝下高を測定した。しかし, 2013年以降の調査継続を計画できず, その後の樹冠長の変化や胸高直径成長量を把握できなかった。そのため, 過去の胸高直径や胸高直径成長量を推定する目的で, 2013年秋に標準地内の全生立木から長さ約15 cmの木片を成長錐を用いて採取した。採取にあたり, 斜面上側の胸高位置から幹の中心を目指して垂直・水平に成長錐を差し込んだ。木片を研究室に持ち帰り, 年輪幅を0.01 cm単位で読み取った。心材部に多くみられる腐朽による圧縮や木片採取後の乾燥による収縮の影響のため, 成長錐の年輪データから計算した胸高直径や断面積成長量は実測値より過小であるとの報告が多い (例えば, Biondi 1999; Lockwood *et al.* 2021)。一方, クロマツ海岸林における2年間の胸高半径成長量を再測と成長錐による木片の計測と比較した結果, 有意差は認められなかったとの報告 (白旗ら2016) もある。本研究では, 腐朽がみられない外周部の年輪幅を測定しており, 白旗ら (2016) と同様に, 木片採取直後に台木に木工ボンドで木片を固定し, 研磨の後, 絶乾させずに年輪幅を計測した。放置林では林齢51年に本数率20%の下層間伐が施され, このときの林分全体の調査に基づく本数密度は586本/haであった (杉田ら1990)。また, このときの相対幹距と収量比数はそれぞれ19.1%, 0.54であった。放置林の相対幹距 (と収量比数) はその後減少 (増加) し, 林齢77年で14.4% (0.70) となった。なお, 2013年秋に伐倒した準優勢木 (樹高28.1 m) 1本の樹幹解析から推定された, 直近10年間の連年樹高成長量は0.2~0.25 m/年の範囲にあった (西城2014)。直近10年間, 自然枯死がなかったと仮定し, 準優勢木の樹高成長量, 林齢77年の上層木樹高28.9 mと本数密度579本/haを用いて相対幹距を推定すると, 林齢71年または72年に15.0%以下に達したと推定された。

表-1. 調査林分における2013年時点の林分構成値

林分	調査面積 (ha)	本数	標高 (m)	林齢 (年)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	本数密度 (本/ha)	相対幹距 (%)	平均樹冠長率 (%)
間伐林1	0.093	48	188~195	68	39.2	29.5	516	14.9	29.2
間伐林2	0.090	48	195~200	75	38.2	29.7	533	14.6	26.6
放置林	0.157	91	190~206	77	37.5	28.0	579	14.4	29.0

間伐林1では, 林齢67年 (2012年, 間伐直前の相対幹距11.3%) に本数率38%の下層間伐が施された。間伐林2では, 林齢73年 (2011年, 間伐直前の相対幹距12.3%) に本数率28%の下層間伐が施された。放置林では, 林齢51年 (1987年) に本数率20%の下層間伐が施された後, 放置されている。

つまり、過密壮齡林3林分の最近の林分構成値は似ているものの(表-1)、間伐林1, 2は25年以上間伐されずに長期間過密状態に置かれた後に中庸な下層間伐が施された林分である。これらに対し、放置林は標準地調査の26年前に弱度の下層間伐が施された後に放置され、標準地調査の5, 6年前から過密状態になった林分である。

## 2. データ解析

立木の樹冠長を樹高から生枝下高を引いて求めた。間伐林における平均樹冠長、平均樹高、平均生枝下高、平均胸高直径、平均形状比の経年変化特性を把握するため、まず、有意水準をHolm法で補正した対応のある $t$ 検定で調べた。次に、過密壮齡林の平均樹冠長に関する過去の研究(國崎・白旗 2014)にて線形モデルで推定した樹冠長増加比0.09を、最近間伐されていない過密林の基準値とした。そして、この値に比べて、間伐林の7年間における樹冠長増加比が顕著に高くなったかを確認するため、林分ごとに樹冠長増加比の母平均に関するベイズ推定を行った。確率分布を正規分布とし、母数の事前分布については母平均を $[-1,000, 1,000]$ の一様分布、母標準偏差を $[0, 100]$ の一様分布とした。マルコフ連鎖モンテカルロ法(以下、MCMCとする)サンプルに関して、松浦(2016)を参考に、21,000ステップを5チェーン分抽出し、バーンインを1,000とした上で、事後分布の収束指標である $\hat{R}$ が1.05以下であることを確認した。そして、樹冠長増加比の母平均が取り得る値の範囲や確率を事後分布から計算した。上層木樹高については、Inoue(1999)に基づき、樹高上位67%の平均樹高として求めた。さらに、林分ごとに樹高、生枝下高を応答変数、林齢を固定効果、個体を変量効果とする線形混合モデルの係数の事後分布をベイズ推定した。MCMCサンプルに関して、松浦(2016)を参考に、21,000ステップを10チェーン分抽出し、バーンインを1,000、間引きを2とした上で、事後分布の収束指標である $\hat{R}$ が1.05以下であることを確認した。

直近での間伐の有無が過密壮齡林の平均胸高直径成長量に及ぼす影響を把握するため、まず、4年間の平均胸高直径成長量の林分間差について、有意水準をHolm法で補正したWelchの $t$ 検定で調べた。期首は、間伐林1では林齢68年、間伐林2では75年、放置林では73年である。次に、立木の期首胸高直径と4年間の平均胸高直径成長量との関係を共分散分析で解析し、間伐林と放置林での回帰直線の傾きの違いについて確認した。放置林の期首胸高直径については、林齢77年の実測値から成長錐により得られた直近4年間の定期胸高直径成長量を減じて求めた。さらに、期首胸高直径の立木間差を競合の観点から理解するために、間伐林における期首の胸高直径と樹高、および胸高直径と樹冠長との相関の有無を、Pearsonの積率相関係数を用いて調べた。加えて、期末(期首から4年後)の立木サイズの林分間差を把握するために、各林分における胸高直径と樹冠長との関係を共分散分析で解析した。

すべての統計解析にR version 4.0.3 (R Core Team 2020)、RStudio version 1.4.1103を用いた。ベイズ推定にはRStan version 2.21.1 (Stan Development Team 2020) および

glmmstan (清水 2015) パッケージを用いた。

## III. 結 果

間伐林における平均樹冠長、平均樹高、平均生枝下高、平均胸高直径、平均形状比の変化を図-1に示す。両林分とも平均樹冠長、平均樹高、平均胸高直径は時間とともに増加した(Holm法で補正した対応のある $t$ 検定、いずれも $p < 0.001$ )。平均生枝下高については、間伐林1で林齢68年から72年まで増加し、林齢72年から75年まで減少した(Holm法で補正した対応のある $t$ 検定、 $p < 0.05$ )。一方、間伐林2では変化が認められなかった(対応のある $t$ 検定、 $p = 0.16, 0.19$ )。平均形状比については、間伐林1で時間とともに減少した(Holm法で補正した対応のある $t$ 検定、いずれも $p < 0.001$ )。一方、間伐林2では林齢75年から79年まで減少し(Holm法で補正した対応のある $t$ 検定、 $p < 0.001$ )、林齢79年から82年までは変化が認められなかった(対応のある $t$ 検定、 $p = 0.10$ )。

樹冠長増加比の母平均については(表-2)、推定された事後分布の0%点が0.56, 0.57であり、最近間伐されていない過密林から推定された0.09(國崎・白旗 2014)より顕著に高かった。

樹高、生枝下高を応答変数とする線形混合モデルの林齢の係数を表-3に示す。樹高での係数の平均値(事後平均)は0.23, 0.18 m/年と、0.2 m/年前後の樹高成長速度であった。これに対し、生枝下高では0.00, -0.03 m/年であり、生枝下高はほとんど変化しなかった。

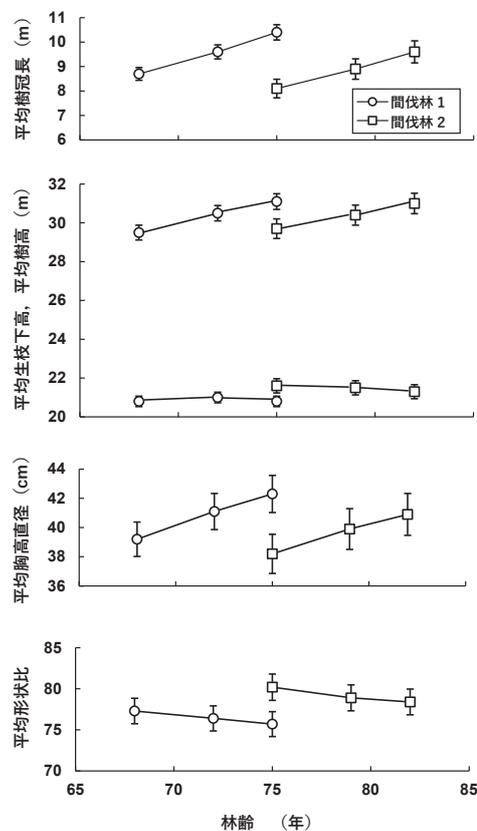


図-1. 間伐林における平均樹冠長、平均樹高、平均生枝下高、平均胸高直径、平均形状比の変化

シンボルは算術平均を、エラーバーは標準誤差を示す。

表-2. 間伐林における樹冠長増加比に関する母平均の事後分布の％点

林分	0%	2.5%	50%	97.5%	$\hat{R}$
間伐林 1	0.56	0.75	0.91	1.06	1.00
間伐林 2	0.57	0.78	0.95	1.11	1.00

表-3. 樹高、生枝下高を応答変数とする線形混合モデルの林齢の係数

林分	応答変数	林齢の係数		$\hat{R}$
		平均	95%信用区間	
間伐林 1	樹高	0.23	[ 0.21, 0.26]	1.00
	生枝下高	0.00	[-0.03, 0.03]	1.00
間伐林 2	樹高	0.18	[ 0.13, 0.23]	1.00
	生枝下高	-0.03	[-0.06, -0.01]	1.00

間伐林 1, 2 の平均胸高直径成長量は、放置林のそれより有意に高かった (Holm 法で補正した Welch の  $t$  検定, いずれも  $p < 0.001$ )。一方で、間伐林 1 と間伐林 2 の平均胸高直径成長量の間有意差は認められなかった (Welch の  $t$  検定,  $p = 0.14$ )。

立木の平均胸高直径成長量を応答変数、期首胸高直径、林分、これらの交互作用を説明変数とする共分散分析の結果を表-4 に示す。切片 (放置林)、共変量である期首胸高直径の傾き (放置林)、交互作用 (放置林の傾きとの差) はいずれも有意であった (切片  $p < 0.01$ , 傾きと交互作用  $p < 0.001$ )。回帰直線を比較すると (図-2)、期首胸高直径 20 cm 付近での平均胸高直径成長量には林分間であまり差がないものの、期首胸高直径が大きいくほど間伐林と放置林の平均胸高直径成長量の差が大きくなった。

間伐林 1, 2 とも、期首における胸高直径と樹高、および胸高直径と樹冠長との間に有意な正の相関 (間伐林 1 の樹高:  $r = 0.74$ , 間伐林 2 の樹高:  $r = 0.86$ , 間伐林 1 の樹冠長:  $r = 0.86$ , 間伐林 2 の樹冠長:  $r = 0.85$ ; いずれも  $p < 0.001$ ) が認められた。

期首から 4 年後の期末における各林分の胸高直径と樹冠長との間に有意な正の関係が認められた (図-3; 共分散分析, 共変量の傾き  $p < 0.001$ )。一方、放置林の切片との差は、いずれの間伐林でも有意でなかった (共分散分析, 間伐林 1:  $p = 0.16$ , 間伐林 2:  $p = 0.63$ )。

#### IV. 考 察

##### 1. 間伐による樹冠長の変化

混み合い度指標の一つである平均形状比 (藤森 2010; 正木 2018) は、本研究の間伐林 1, 2 では期首から 4 年後にかけて減少し (図-1)、混み合い度の改善が認められた。また、樹冠長増加比は過去に推定された過密林の 0.09 (國崎・白旗 2014) という基準値より顕著に高くなり (表-2)、50% 点が 0.91, 0.95 と (表-2)、上層木樹高の増加量の 9 割に相当する樹冠長増加を達成した。その結果、平均樹冠長は 7 年間で 1.7, 1.5 m 増加した (図-1)。このように本研究では、本数率 38, 28% の中庸な下層間伐でも、過密壮齢林の平均樹冠長増加に寄与したという事例を示したことになる。

表-4. 4 年間の平均胸高直径成長量を応答変数、期首胸高直径を共変量とする共分散分析の結果

	係数	標準誤差	$t$ 値
切片 (放置林)	-0.18	0.06	-2.80**
傾き (放置林)	0.01	0.00	6.40***
切片との差 (間伐林 1)	-0.20	0.11	-1.90
切片との差 (間伐林 2)	-0.26	0.10	-2.64**
交互作用 (間伐林 1)	0.01	0.00	3.96***
交互作用 (間伐林 2)	0.01	0.00	4.35***

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ ; \*\*\* $p < 0.001$  である。切片は放置林のそれであり、傾きは放置林の期首胸高直径のそれを示す。また、切片との差は放置林の切片との差を、交互作用は放置林の傾きとの差を示す。

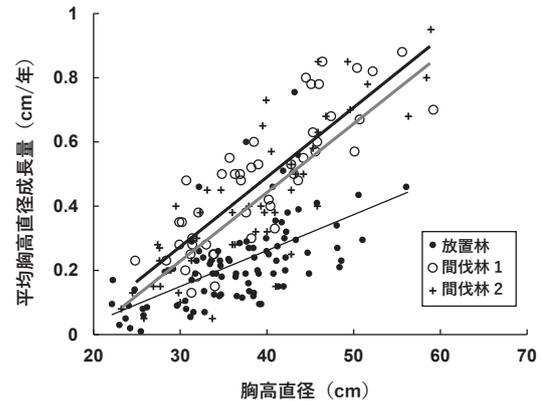


図-2. 3 林分における期首の胸高直径と 4 年間の平均胸高直径成長量との関係

黒の太線は間伐林 1、灰色のそれは間伐林 2 の回帰直線である。

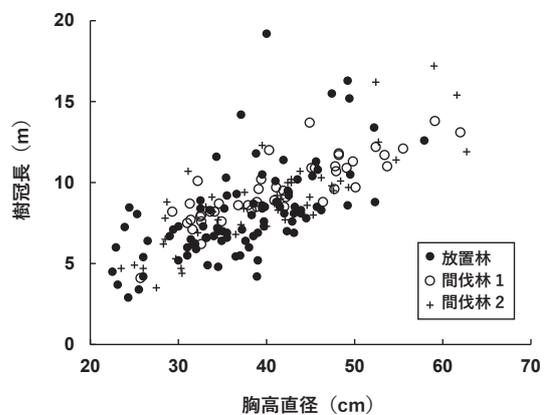


図-3. 3 林分における期末の胸高直径と樹冠長との関係

期末は期首から 4 年後を指す。

大矢・近藤 (2013) は長野県内の林齢 43, 46 年のスギ過密壮齢林 2 林分に対し、本数率 54.5, 60.2% の強度間伐区と本数率 32.9, 40.5% の弱度間伐区を設定し、3~4 年間の樹冠長増加量を無間伐区と比較した。その結果、両林分とも無間伐区と間伐区との間で樹冠長増加量に有意差は認められなかった。これは、一方の林分 (46 年) では樹高成長と同時に樹冠底部の生枝の枯れ上がりが進んだのに対し、他方 (43 年) では間伐により樹高成長量が低下したためである。枯れ上がりが進んだ 46 年生林分について、林分構成値から計算した相対幹距は無間伐区で 9.1%, 弱度間伐区で 10.3% であり、これは林分密度管理図の最多密度曲線に達した状態に等しい (國崎 2013)。また、本数率

60.2%の強度間伐区でも間伐後の相対幹距は13.4%であり、過密の基準値15%（國崎 2013；吉田ら 2018）はもちろんのこと、本研究における間伐林の14.6、14.9%より低かった。つまり、46年生林分は超過密林であり、本数率40.5、60.2%の間伐でも過密を解消できず、枯れ上がりが進んだと考えられる。一方、43年生林分の相対幹距は、無間伐区で10.3%と46年生林分の無間伐区に近いものの、弱度間伐区で15.5%、強度間伐区で18.3%と過密の基準値15%を超えて過密が解消された。つまり、急激な疎開が thinning shock（Harrington and Reukema 1983；重永・川崎 2010；正木ら 2013）を引き起こし、樹高成長量を低下させたと考えられる。

これらに対し、本研究の間伐林では、間伐1、2年後から調査したため、thinning shockを検出できなかった可能性は残るものの、樹高成長速度は0.2m/年前後で持続した。また、生枝下高の上昇速度は、ほぼ0.0m/年であり、枯れ上がりはほとんど生じなかった（図-1、表-3）。スギ林における樹冠底部の相対照度は林床の相対照度と概ね等しいとされている（橋本・須崎 1983）。間伐林1、2における期首時点における地上高1.8mでの林内相対量子束密度は13、15%であった（國崎ら 2015）。これらの値はMuraoka *et al.* (2001)のモデルで換算すると、相対照度13、16%に相当する。スギ林では、相対照度5%以下になる光条件で枝の枯死が新たに発生すると予想されていることから（重永・川崎 2010）、本数率30%前後の中庸な下層間伐で樹冠底部の相対照度が15%前後に誘導され、生枝の枯れ上がりを停止させることができたと推察される。中庸な下層間伐で枯れ上がりを7年間停止させられたことについては、林齢41、48年より前に本数密度を858、676本/ha（杉田ら 1990）まで減少させ、相対幹距を19、17%以上に高めた、過去の間伐履歴が寄与したと予想される。しかし、過去の間伐による林冠構造の変化がどのように作用して本研究の結果に至ったのかについては考察できなかった。

## 2. 胸高直径成長に対する間伐履歴の影響

林分間で平均胸高直径成長量を比較する場合、まず期首胸高直径の範囲が概ね等しいこと、および地位級が影響していないかを確認する必要がある（大隅 1987）。期首胸高直径の範囲は、間伐林1で25～59cm、間伐林2で23～59cm、放置林で22～56cmとほぼ等しかった（図-2）。そして、期首から4年間の平均胸高直径成長量は、地位級2の放置林より地位級1、2の間伐林で有意に高い一方で、地位級1の間伐林1と地位級2の間伐林2の間で有意差は認められなかった。このことから地位級の違いが胸高直径成長に与えた影響は大きくないと考えられる。次に、間伐林と放置林では、胸高直径成長を調べた期間（間伐林では2013～2017年、放置林では2009～2013年）と測定手法（間伐林では再測、放置林では成長錐）が異なっており、これらが胸高直径成長量に影響している可能性がある。期間の違いについては、両期間で年平均気温（2009～2013年：10.5～11.0度、2013～2017年：10.6～11.6度）、暖かさの指数（2009～2013年：84.9～94.4、2013～2017年：86.5～91.9）、年降水量（2009～2013年：1,030～1,643mm、2013～

2017年：1,094～1,643mm）はいずれも極端に異なっており、気象条件の違いが胸高直径成長に与えた影響は大きくないと推察される。また、測定手法の違いについて、本研究では再測と成長錐による木片の計測で有意差が認められなかった白旗ら（2016）と同じ手法を採用した。成長錐で採取した木片のわずかな収縮は否定できないものの、目視上、収縮は認められず、測定手法の違いは本研究の結果に大きな影響を及ぼすものではないと推察される。これらこのことを踏まえると、直近の間伐の有無で胸高直径成長量に差が生じていると考えられる。

立木の期首胸高直径と平均胸高直径成長量との関係では、回帰直線の傾きが林分間で有意に異なり（表-4）、最近間伐された間伐林と最近間伐されていない放置林の平均胸高直径成長量の差は、期首胸高直径20cm付近では小さいものの、期首胸高直径が大きな立木ほど大きくなった（図-2）。期末における胸高直径と樹冠長との関係に林分間差は認められず（図-3）、樹冠サイズはこの回帰直線の傾きの違いにあまり影響していないことから、間伐履歴の違いに由来する受光状態が大きく影響したと考えられる。

間伐により林冠に空隙が生じることで（水永 1992）、残存木の受光状態が改善される（橋本 1986；重永・川崎 2010）。下層間伐が施されると、優勢木、準優勢木における樹冠下部の受光状態が改善されやすい（橋本 1986）。本研究の間伐林1、2では、期首の胸高直径と樹高、および胸高直径と樹冠長との間に有意な正の相関が認められ、胸高直径が大きな立木は優勢木や準優勢木に該当する。こうした優勢木や準優勢木の受光状態が間伐後に改善することで、胸高直径成長が促進されたと考えられる。しかし、最近間伐される直前の相対幹距が11.3、12.3%と超過密であり、間伐直後の相対幹距も14.6、14.9%と完全には過密を解消できなかったため、優勢木や準優勢木の下層に位置する介在木や劣勢木の受光状態はあまり改善しなかったと考えられる。特に、胸高直径の小さな立木、すなわち劣勢木の樹冠長は4～5mと極めて短く（図-3）、これは胸高直径成長が停止・減退した放置林における劣勢木（國崎ら 2021）と同じであるため、間伐による胸高直径成長促進の効果が低くなったと推察される。

一方、本研究の放置林では、期首より22年前に本数率20%の下層間伐が施され、間伐直後には相対幹距で19.1%、収量比数で0.54と林冠が疎開した状態だった。しかし、間伐後のスギ林では時間の経過とともに残存木の樹冠が拡大し（安藤ら 1983；重永・川崎 2010）、林冠の空隙が急速に小さくなる（水永 1992）。間伐後22年という長期間が経過した期首時点では、放置林における林冠の空隙は少なく、かつ小さかったと考えられる。加えて、期首より22年前の林齢51年時の下層間伐で、本数密度を586本/haと収穫予想表（地位級2、植栽本数3,000本、伐期齢60年、間伐回数5回）における林齢50年時の512本/ha（岩手県林業水産部 1983）に近い本数まで調整したにもかかわらず、期首から4年後の期末では、優勢木や準優勢木から被圧される介在木が立木本数全体の35%、介在木からも被圧される劣勢木が立木本数全体の12%を占める状態

であった(西城 2014)。これらのことは、放置林では時間とともに樹冠競合が激しくなり、多くの立木で期首時点の受光状態が悪化していたことを示唆する。このため、期首胸高直径と平均胸高直径成長量に関する回帰直線の傾きが、間伐林に比べて相対的に緩やかになったと推察される。

## V. おわりに

本研究では、本数率 30%前後の中庸な下層間伐によって、過密壮齡林における樹冠底部の生枝の枯れ上がりが停止した事例を報告した。ただし、樹冠競合で相対的に劣勢な立木ほど、胸高直径成長促進の効果が低くなると考えられる。樹冠競合をできるだけ緩和するために過密壮齡林に下層間伐を施す場合、少なくとも本数率 40%以上の強度間伐を選択するのが望ましいであろう。

本研究では、地位級 1, 2 各 1 林分での間伐効果の発現事例を示したに過ぎず、過密壮齡林の枯れ上がりを 10 年程度停止させられる間伐設計(國崎・白旗 2014)については、引き続き検討が必要である。また、強度間伐により thinning shock が発生したとしても、その期間は数年(荒木ら 2010)と予想され、間伐後 10 年経過した段階では、枯れ上がりの停止と樹高成長により、樹冠長が増加している可能性が高い。このため、間伐後 10 年あるいはそれ以上調査を継続しながら、間伐効果の発現パターンを解明していくことも重要と考えられる。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、編集委員と 3 名の査読者から有益なご助言を多数頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する。

本研究では、開示すべき利益相反はない。

## 引用文献

- 安藤 貴・宮本倫仁・桜井尚武・竹内郁雄・谷本丈夫(1983) 人工林の複層林施業に関する研究 (II) 林内の光環境の変動—二段林の光環境の経年変化—。林試研報 323: 65-73
- 荒木真岳・重永英年・奥田史郎(2010) スギ人工林における強度間伐が残存木の成長に与える影響。九州森林研究 63: 60-63
- Biondi F (1999) Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools. *Ecol Appl* 9: 216-227
- Burkhardt H, Tome M (2012) Modeling forest trees and stands. Springer
- 千葉幸弘(2009) 長伐期化への道筋を考える (II) 樹冠長を目安とした高齡林の管理。森林技術 802: 11-17
- 藤森隆郎(2003) 新たな森林管理—持続可能な社会に向けて—。全国林業改良普及協会
- 藤森隆郎(2010) 間伐と目標林型を考える。全国林業改良普及協会
- 福島成樹(2010) サンプスギ間伐手選れ林分管理指針の作成。森林科学 59: 31-34
- Harrington CA, Reukema DL (1983) Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation. *For Sci* 29: 33-46
- Hasenauer H (ed) (2006) Sustainable forest management. Springer
- 橋本良二(1986) スギ人工林の間伐と光環境 (III) 種々の間伐による林冠構造と平均葉面相対照度の変化。日林誌 68: 261-270
- 橋本良二・玉泉幸一郎(1995) スギ林における林冠の発達過程と個体の器官成長様式。日林誌 77: 153-162
- 橋本良二・須崎民雄(1983) スギ人工林の光合成生産機構に関する研究 (III) 樹冠内相対照度。日林誌 65: 327-334
- 稲垣善之・深田英久・野口享太郎・倉本恵生・中西麻美(2018) 高知県のヒノキ人工林における間伐後の樹冠葉量の変化。森林応用研究 27: 1-9
- Inoue A (1999) Statistical analysis of the relationship between upper- and mean-tree heights using discriminant analysis method. *J For Plann* 5: 73-76
- 岩手県林業水産部(1983) 岩手県民有林スギ収穫予想表等作成に関する基礎調査書
- 國崎貴嗣(2013) 粗放的に管理されたスギ若齡人工林の簡便な密度管理指標の探索。岩大演報 44: 1-18
- 國崎貴嗣・蓮沼友紀子・上石有吾(2015) 岩手県内のスギ人工林における林内光量と林床植生被度の関係。岩大演報 46: 11-20
- 國崎貴嗣・白旗 学(2014) 過密なスギ壮齡人工林における平均樹冠長。日林誌 96: 234-237
- 國崎貴嗣・白旗 学・松木佐和子(2021) 過密なスギ人工林における樹冠長と直近 5 年間の胸高直径成長量との関係。日林誌 103: 401-404
- 國崎貴嗣・山崎 遥(2021) 過密なスギ老齡人工林における 41 年間の林分成長経過。日林誌 103: 285-290
- Lockwood BR, Maxwell JT, Robeson SM, Au TF (2021) Assessing bias in diameter at breast height estimated from tree rings and its effects on basal area increment and biomass. *Dendrochronologia* 67: 125844
- 正木 隆(2018) 森づくりの原理・原則。全国林業改良普及協会
- 正木 隆・櫃間 岳・八木橋勉・野口麻穂子・柴田鏡江・高田克彦(2013) スギ林における壮齡時の間伐は樹高の長期的な成長にどのように影響するか?。日林誌 95: 227-233
- 正木 隆・森 茂太・梶本卓也・相澤周平・池田重人・八木橋勉・柴田鏡江・櫃間 岳(2011) 高齡・高密度のアカマツ林の間伐は個体の成長を改善するか。日林誌 93: 48-57
- 松浦健太郎(2016) Stan と R でベイズ統計モデリング。共立出版
- 水永博己(1992) 林冠動態モデルによる間伐効果予測 (I) 間伐後の林冠表面形状の動態。日林誌 74: 314-324
- Muraoka H, Hirota H, Matsumoto J, Nishimura S, Tang Y, Koizumi H, Washitani I (2001) On the convertibility of different microsite light availability indices, relative illuminance and relative photon flux density. *Funct Ecol* 15: 798-803
- 大隅真一編(1987) 森林計測学講義。養賢堂
- 大矢信次郎・近藤道治(2013) 過密人工林管理技術の開発。長野県林総セ研報 27: 1-24
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/> (2020 年 12 月 10 日参照)
- 林野庁編(2019) 令和元年版 森林・林業白書。全国林業改良普及協会
- 林野庁編(2021) 令和 3 年版 森林・林業白書。全国林業改良普及協会
- 西城孝太(2014) スギ高齡人工林における介在木の樹冠構造と個体成長。岩手大学大学院農学研究科修士論文
- 重永英年・川崎達郎(2010) スギ人工林における林冠疎開後の枝の伸長と樹冠の発達。九州森林研究 63: 68-70
- 清水裕士(2015) glmmstan パッケージ。 <https://norimune.net/2675> (2020 年 12 月 10 日参照)
- 白旗 学・國崎貴嗣・野堀嘉裕(2016) 岩手県吉浜地区クロマツ海岸林における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波被害前後の成長—地上 LiDAR による樹形測定および肥大成長の変化—。海岸林学会誌 15: 15-20
- Stan Development Team (2020) RStan: the R interface to Stan. R package version 2.21.1. <http://mc-stan.org/> (2020 年 12 月 10 日参照)
- 鈴木和次郎・池田 伸・平野辰典・須崎智応・和佐英二・石神智生(2009) 高齡級ヒノキ人工林の林分構造にみる間伐履歴の影響。日林誌 91: 9-14
- 杉田久志・熊谷國夫・伊藤 勲・川村 勇・斉藤 誠(1990) 滝沢演習林におけるスギ、アカマツ、カラマツ、ヒノキ人工林およびアカマツ天然生林の収量比数。岩大演業務資料 12: 4-13
- 竹内郁雄・川崎達郎・森 茂太(1997) ヒノキ若齡人工林における形状比の変化。日林誌 79: 137-142
- 内村慶彦(2016) 間伐遅れのスギ過密壮齡林における施業方針判定フローの検討。鹿児島県森林技術総合七研報 18: 1-13
- 渡邊仁志・茂木靖和・大洞智宏(2015) 間伐が高齡級ヒノキ過密林の林分構造と成長に及ぼす影響。日林誌 97: 182-185
- 吉田茂二郎・安元岳玄・溝上展也・今田盛生・寺岡行雄(2002) 白鹿岳間伐試験地におけるスギ高齡林の間伐効果について—相対幹距比を基礎にした分析—。九大演報 83: 53-61
- 吉田茂二郎・田中 文・太田徹志・溝上展也・福本桂子(2018) 密度管理されたスギ高齡人工林における 4 密度管理指標間の関係と過密林分での基準値の評価。日林誌 100: 77-80