

論文 (Original article)

集約的に管理されたスギ高齢複層林における植栽木の成長の健全性評価

宮本 和樹^{1)*}、大谷 達也²⁾、酒井 敦²⁾³⁾、酒井 武¹⁾、奥田 史郎⁴⁾⁵⁾

要旨

本研究では、集約的な管理が行われた高齢複層林において植栽木が健全に生育可能であるかを明らかにするため、愛媛県の久万地方のスギ長期複層林試験地(上層木 100 年生以上、中層木と下層木が 30 ~ 52 年生)を対象として最近 16 年間の植栽木の成長経過を調べた。上層木と中層木の直径成長速度は、0.80 cm/年以上で同齢の単層林と同程度かそれ以上に良好であった一方、下層木では 0.25 cm/年と低かった。樹高成長については中層木が 0.50 m/年以上を示したものの、上層木では 0.13m/年と頭打ち傾向であり、下層木でも 0.22 m/年と低い水準であった。形状比は、上層木が概ね 60 以下であったのに対し、中層木では中央値が 70 ~ 120 の範囲に含まれ、特に下層木では中央値が 100 を超えていた。本研究の複層林は、長年にわたる密度管理により、上層木だけでなく中層木においても植栽木の成長が概ね健全な状態に保たれている数少ない事例といえる。しかし、形状比を考慮すると中層木の一部と下層木では気象害リスクが懸念される状態である上、下層木の成長速度が低いまま推移しており、集約的な管理をした複層林においても下層木を長期に健全に維持することは困難であることが示された。

キーワード：非皆伐施業、形状比、間伐、久万地方

1. はじめに

非皆伐施業のひとつである複層林施業は、更新の際に林床が裸地化しない、再造林費用および造林初期の育林費用を低減できる、上層木は大径材生産、下層木は年輪幅の詰まった良質材の生産が可能となる、更には森林の多面的機能の発揮の点で優れている、などと考えられてきた(近藤・今井 2009)。そのため、我が国では 1970 年代~1990 年代にかけて盛んに複層林が造成されてきた経緯がある(藤森 1992, 酒井 2017)。しかし、複層林における下層木は、上層木の被陰により肥大成長が抑制され形状比が高くなりやすくなること(河原 1983, 竹内 2004)、そのため冠雪害をはじめとする気象害を受けやすいこと(矢野ら 1990, 杉田ら 2014)、さらに上層木の伐採時に下層木への損傷がある程度避けられないこと(藤下ら 1996, 鈴木ら 1997, 谷山 2004)、施業が集約的になる(蜂屋・安藤 1982)といったデメリットが報告されている。また、同種他個体を垂直的に配置する林分構造は、スギ・ヒノキが自然界で同種他個体の樹冠下ではほとんど更新がみられないことから、生態学的観点からも不合理であるといった指摘がなされている(正木 2012)。

長期複層林では上層木による被陰下で下層木が生育

する期間が長いと、上層木の密度管理が重要となる。さらに下層木が成長していくと下層木自体の密度管理も必要となり、より高度な施業技術が求められることになる。過去に造成されて今日も残る複層林のなかには上層木樹齢が 100 年を超えるものもみられるが、今後は下層木も壮齢期を迎える。しかし、長く上層木の被陰下にある下層木の成長経過について、下層木が壮齢期に達した複層林を対象とした研究事例は、愛媛県久万地方のスギ・ヒノキ二段林下層木の 69 年生の事例(酒井ら 2003)を除き、ほとんどみられない。上層木と下層木で高齢-壮齢期を迎えた複層林は、長期モニタリングによる検証が十分になされないまま今後も適切に管理されない状態が続く恐れがある。

本研究では、上層木が 100 年生以上、中層木と下層木が 30 ~ 52 年生のスギ長期複層林試験地を対象として、主に 2000 年以降における 16 年間の植栽木の成長経過を報告する。この複層林は、優良大径材生産という明確な生産目標の下、植栽木の生育状況を丁寧に観察しながら集約的な管理が行われてきた複層林の事例のひとつである(安藤 1982, 安藤ら 1986a, b, 藤本ら 1991, 藤森 2010a)。このような集約的に管理されてきた高齢複層林において、植栽木が健全に生育可能かど

原稿受付：平成 31 年 3 月 18 日 原稿受理：令和元年 11 月 14 日

1) 森林総合研究所 森林植生研究領域

2) 森林総合研究所 四国支所

3) 森林総合研究所 東北支所

4) 森林総合研究所 関西支所

5) 森林総合研究所 植物生態研究領域

* 森林総合研究所 森林植生研究領域 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1

うかを明らかにすることを本研究の目的とした。本研究では植栽木の健全性を評価するため、複層林の階層の違いが直径・樹高成長速度および形状比や樹冠長率の変化といった個体の形質に及ぼす影響に着目した。

2. 調査地と方法

2.1 調査地

本研究の調査地は愛媛県上浮穴郡久万高原町（北緯 $33^{\circ}28'02''\sim 33^{\circ}45'30''$ 、東経 $132^{\circ}53'44''\sim 133^{\circ}09'30''$ ）の岡信一氏が所有するスギ複層林（標高約 600 m、一部ヒノキを含む）である。この地域の林業は久万林業として知られ、岡家は久万林業における先導的な役割を果たしてきた篤林家のひとつである。複層林造成の経緯は、明治 13 年頃に井部栄範翁より吉野地方由来のスギ苗木を譲り受け、立木密度 3000 本/ha で植栽したことに始まる。その後、植栽、枝打ち、間伐を順次進め、昭和 40 年（1965 年）にヤナセスギ、サンプスギ、地スギを植栽し二段林に移行した（安藤ら 1986a, b, 上浮穴林業振興会議 2012）。岡氏によれば、複層林は限られた面積の壮齢林を伐り尽さず、持続的に林業収入を得るための選択であったということである（岡 1992）。岡氏の複層林（本研究の複層林を含む）では、上層木の間伐を繰り返しながら残存木の優良大径材生産に主眼を置きつつ、上層木伐採後の空間に下層木を植栽し、優良小丸太も併せて生産することを目標としてきた（安藤 1982, 安藤ら 1986a, b）。岡氏の複層林では、材の経済的価値の向上と林内の光環境のコントロールを目的とした枝打ちや間伐、上層木の間伐時に中・下層木に極力損傷を与えないよう決められた方向への高度な伐倒など集約的な管理を行ってきた（藤本ら 1991, 藤森 2010a）。複層林造成当初は若い上層木の下に林齢差の少ない下層木の植栽を行った結果、林内の光環境が悪化し、下層木が枯損するなどの失敗も経験しながら試行錯誤を続けてきたそうである（岡 1992）。現在では労働力不足等の理由から所有林全体での集約的な管理はできないため、対象木を絞るなど岡氏個人が可能な範囲での管理を行っている。

2.2 調査方法

前述した岡家の複層林のうち上層木 50 年生以上の林分において、1967 年から 1972 年にかけて調査区が 7 つ設置され（安藤 1982）、現在まで継続して調査が実施されている KO-I、KO-II、KO-IV の 3 つを本研究の調査区とした。本研究の複層林試験地は、林業試験場四国支場（現 森林総合研究所四国支所）の安藤貴造林研究室長が中心となり設置されたもので、初回調査から 50 年が経過した（酒井 2017）。調査区の面積は、KO-I が 600 m^2 ($20\text{ m} \times 30\text{ m}$)、KO-II が 900 m^2 ($30\text{ m} \times 30\text{ m}$)、KO-IV が 500 m^2 ($20\text{ m} \times 25\text{ m}$) である。KO-I と KO-II は長期大径材生産の展示林の一部としても利用

されている。各調査区の 2000 年と 2016 年における林分概況を Table 1 に示す。1965 年（KO-I、KO-II）および 1968 年（KO-IV）に複層林に移行してからは、上層木では 8～10 年間隔で本数率 30% 前後の間伐、中層木では本数率 6～16% の間伐を行ってきた。KO-I と KO-II における初期の施業と成長経過については安藤ら（1986a, b）を参照されたい。KO-I、KO-II は上層木、中層木、下層木の三段林であり、下層木は上層木の択伐が行われる際に植栽されてきた。KO-II については各層の扱いがやや複雑である。本研究では、複層林の現況（樹齢と樹高）に基づいて、安藤ら（1986b）によって中層木として扱われていた個体を上層木に含めている。これらの個体については 2016 年時で 93～98 年生と他の上層木よりもやや若齢である（Table 1 のカッコ内の樹齢）。また、安藤ら（1986b）による 1983 年の毎木調査の時点で下層木であったものが中層木の扱いとなり、新たに植栽された個体を下層木としている。KO-IV は、上層木と下層木の二段林であり、下層木の追加植栽は行われていない。上記のような理由から植栽年は調査区内および調査区間で幅がある。2016 年生育期間終了後の樹齢は上層木で 112～137 年生（一部 93～98 年生）、中層木は 49～52 年生、下層木は 30～49 年生である。

これら 3 つの調査区に植栽された個体について、一時期を除き 1995 年～2016 年の間に 1～3 年程度の間隔で胸高直径の測定を行った。また、樹高と生枝下高の測定も可能な限り実施した。樹高、生枝下高の測定については、1995 年から 1999 年まではブルーメライス（カールライス社製）、2000 年以降は超音波樹高測定器（Vertex III、Vertex IV、Impulse、ハグロフ社製）を用いた。

2.3 データ解析

各形質の経年変化のパターンについては 1995 年以降のデータを用いた（補足電子資料 Fig. S1-S5）。一方、階層の違いによる各形質の成長速度・変化速度への影響の解析については、樹高や生枝下高の測定をブルーメライス以外の測器で行った 2000 年以降のデータを用いた。データ解析および図の描画には、フリーの統計ソフト R version 3.4.4（R core team 2018）を用いた。複層林では単層林と比べて階層構造が複雑で、特に下層木において光環境等の不均一性が高いことが考えられる。調査区の差を考慮した統計モデルを用いることで、各形質の階層間差やばらつきについて、より適切な評価が可能となる。本研究では複層林の上層木、中層木、下層木における植栽木について、応答変数に胸高直径・樹高の成長速度および形状比・樹冠長・樹冠長率の変化速度（期間の成長量・変化量を年で割ったもの）、説明変数に階層（固定効果）と調査区（変量効果）を用いて、線形混合効果モデルによる成長速度・

Table 1. 2000年および2016年測定時における複層林試験地の林分概況¹⁾

調査区・ 面積	階層	樹齢 (年)	立木密度 (本/ha)	平均胸高 直径 (cm)	平均樹高 (m)	林分材積 ²⁾ (m ³ /ha)
2000年 (他の計測年は以下に個別に示す)						
600 m ²	KO-I 上層木	121	67	92.2	41.7	597.8
	中層木	36	333	25.1	20.4	161.2
	下層木	14-25	1033	4.7	5.3	7.6
			(983/50)	(4.9/0.7)	(5.4/1.9)	(7.55/0.04)
900 m ²	KO-II 上層木	96-107	56	58.1	29	231.2
	(樹高は 1998年)	(一部77-82)	(34/22)	(59.8/55.5)	(29.0/29.0)	(171.5/59.7)
	中層木	33-36	333	14.9	15.6	47.3
	下層木	14-25 ³⁾	1889	5.8	5.5	13.1
			(1311/578)	(5.4/6.7)	(5.6/5.4)	(9.6/3.5)
500 m ²	KO-IV 上層木 (2002年)	115	80	52	29.4	197.5
	下層木 (2001年)	33	1740	13.2	14.9	207.5
			(1560/180)	(13.3/13.0)	(14.9/14.0)	(186.5/21.0)
2016年 (他の計測年は以下に個別に示す)						
600 m ²	KO-I 上層木	137	67	106.6	41.5	767
	中層木	52	150	42	30.1	258.3
	下層木	30-41	667	8.4	8.9	21.9
			(617/50)	(8.6/5.4)	(9.1/5.7)	(21.4/0.5)
900 m ²	KO-II 上層木	112-123	56	73.3	33.6	290.9
	(一部93-98)	(一部93-98)	(34/22)	(76.5/68.6)	(34.9/31.6)	(188.2/102.7)
	中層木	49-52	244	28.1	23.7	175.9
	下層木	30-41 ³⁾	667	10.5	10.4	47.8
			(478/189)	(9.7/12.3)	(9.7/12.0)	(30.8/17.0)
500 m ²	KO-IV 上層木 (2015年)	131	60	64.4	29.3	216.1
	下層木 (2015年)	49	1580	16.5	17.4	328.7
			(1460/120)	(16.6/15.5)	(17.6/15.0)	(308.3/20.4)

¹⁾ スギ林の一部にヒノキが混交している。カッコ内はスギ/ヒノキ別の値。

²⁾ KO-Iの上層木のうち、2000年時に胸高直径と樹高が欠測している個体があった。同様に、KO-IIの中層木で2016年の樹高が欠測していた。これらを除外すると林分材積が過小評価となるため、前後の測定年の胸高直径や樹高を用いて個体材積(9.4 m³、0.42 m³)を求め林分材積に加えた。代用した測定値は平均胸高直径と平均樹高の計算には含まれていない。

³⁾ 履歴不詳であるが隣接するKO-Iと同様の林齢を想定した。

変化速度の階層間差の解析を行った(応答変数はすべて正規分布を想定)。なお、同様の解析は、応答変数に胸高直径や樹高など個体の形質そのものを用いて、説明変数に時間(年)を含める形でも可能であるが、結果の解釈がやや複雑となる。本研究では結果の解釈を容易にするため、年の効果を成長速度や変化速度に集約した形での解析結果を用いることとした。また、期末(KO-IとKO-IIは2016年、KO-IVは2015年)における植栽木の形質の階層間差について、応答変数に、胸高直径・樹高・形状比・樹冠長および樹冠長率、説

明変数に階層、変量効果に調査区を用いて一般化線形混合効果モデルで解析した。胸高直径、樹高、樹冠長にはガンマ分布、形状比と樹冠長率には正規分布を想定した。さらに、上記の線形・一般化線形混合効果モデルに対応した多重比較(Tukeyの方法)により、階層の全ペア間の有意差を調べた。線形・一般化線形混合効果モデルの解析にはRのパッケージlme4およびlmerTestの下でlmer関数を用いた。また、多重比較にはRのパッケージmultcompのglht関数を用いた。

3. 結果

3.1 直径成長と樹高成長

胸高直径は上層木から下層木まで年とともに増加傾向がみられた (Figs. 1a, S1)。2000 年以降の各階層の直径成長速度は、上層木で 0.84 cm/年、中層木で 0.83 cm/年、下層木で 0.25 cm/年となり、下層木と比べて中層木と上層木と有意に高かった (Fig. 1a)。

樹高についてみると、KO-I と KO-II の上層木や中層木の一部では、2000 年前後で樹高が一時大きく増加あるいは減少し、ばらつきが大きくなったが、これは主に計測機器の違いによるものと考えられる (Fig. S2)。樹高成長速度は、下層木で 0.22 m/年、中層木で 0.52 m/年、上層木で 0.13 m/年であった。中層木は下層木よりも有意に高い樹高成長速度を示したが、上層木では下層木との有意差はみられず、中層木よりも有意に低い樹高成長速度となった (Fig. 1b)。

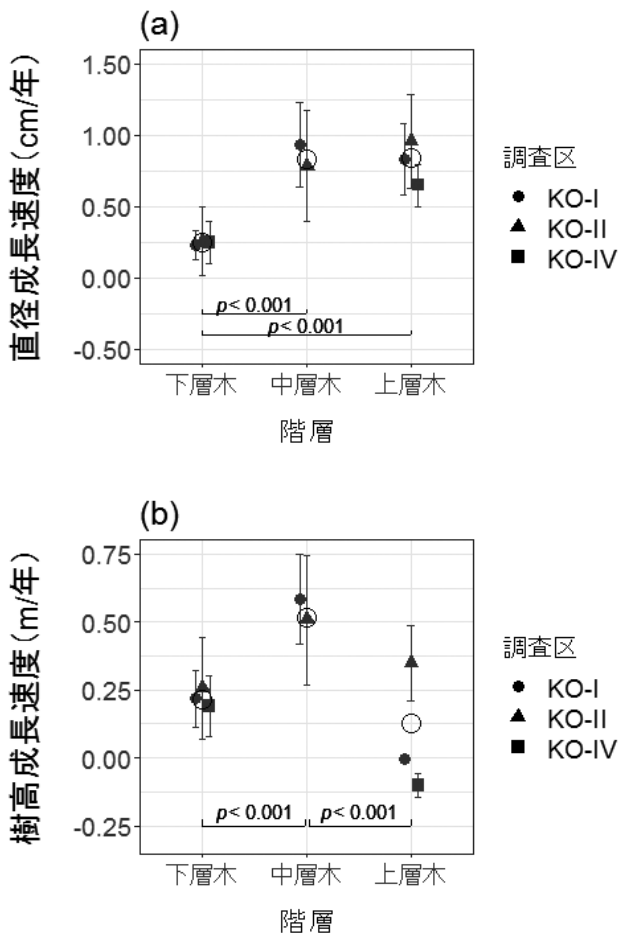


Fig. 1. 複層林調査区における各階層の (a) 直径成長速度および (b) 樹高成長速度の比較。

図中の黒色のシンボルは各調査区の平均値、エラーバーは標準偏差を示す。図中の白丸は3つの調査区を変数効果とした線形混合効果モデルに基づく各階層の推定値。推定値に有意差のある階層間を p 値と横線で示す (Tukey の多重比較)。

3.2 形状比

形状比は、外れ値として小径木のなかに極端に高い形状比を示すものが含まれ、結果に影響を与えていたことから、胸高直径 5 cm 以上の個体に限定した結果を示す (Fig. S3)。KO-II では下層木と中層木との間で形状比の範囲が重なっていたものの、いずれの調査区でも階層間の形状比には有意差がみられた。上層木では中央値で概ね 60 以下の低い値となっていたが、中層木では個体間のばらつきが大きくその中央値が 70 ~ 120 の範囲となっていた。下層木の形状比についても個体間のばらつきが大きかったが、中央値はいずれの調査区も 100 以上を示した (Fig. S3)。形状比の変化速度は、下層木と比べて中層木で有意に低く、負の値となったことから (中層木 -1.01 /年)、中層木では形状比が低下していく傾向が示された。一方、上層木の形状比の変化速度は下層木と有意差はなく (上層木 -0.41 /年、下層木 0.17 /年)、下層木の変化速度自体もゼロから有意に異なっていなかったことから (線形混合効果モデル $p > 0.05$)、上層木と下層木の形状比はほとんど変化していないことが示された (Figs. 2, S3)。

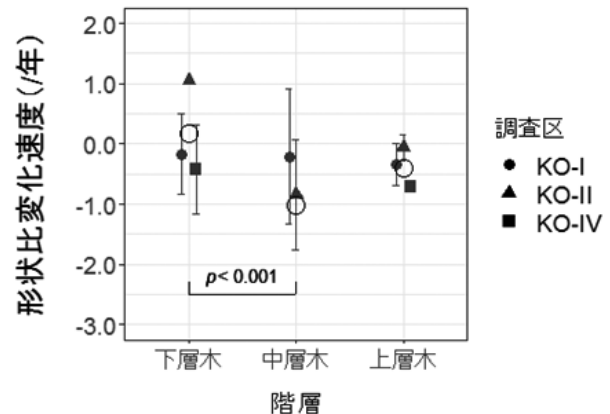


Fig. 2. 複層林調査区における各階層の形状比変化速度の比較。

図の見方は Fig. 1 に従う。

3.3 樹冠長と樹冠長率

樹冠長は樹高と類似した経時変化のパターンを示し、階層間のサイズの違いを反映して上の階層ほど樹冠長が有意に長かった (Fig. 4)。樹冠長変化速度は下層木で 0.11 m/年、中層木で 0.41 m/年、上層木で 0.37 m/年と推定され、下層木と比べて中層木と上層木で有意に樹冠長変化速度が高かった (Fig. 3a)。

樹冠長率は形状比と同様、外れ値として小径木のなかに極端に高い樹冠長率を示すものが含まれていたことから、胸高直径 5 cm 以上の個体に限定した結果を示す (Fig. S5)。樹冠長率は上層木と中層木で 40% 以上を示す個体が多かったが、下層木ではばらつきが大きく、40% を下回る個体もみられた (Fig. S5)。樹冠長率変化速度は下層木で 0.36/年、中層木で 0.50/年、上

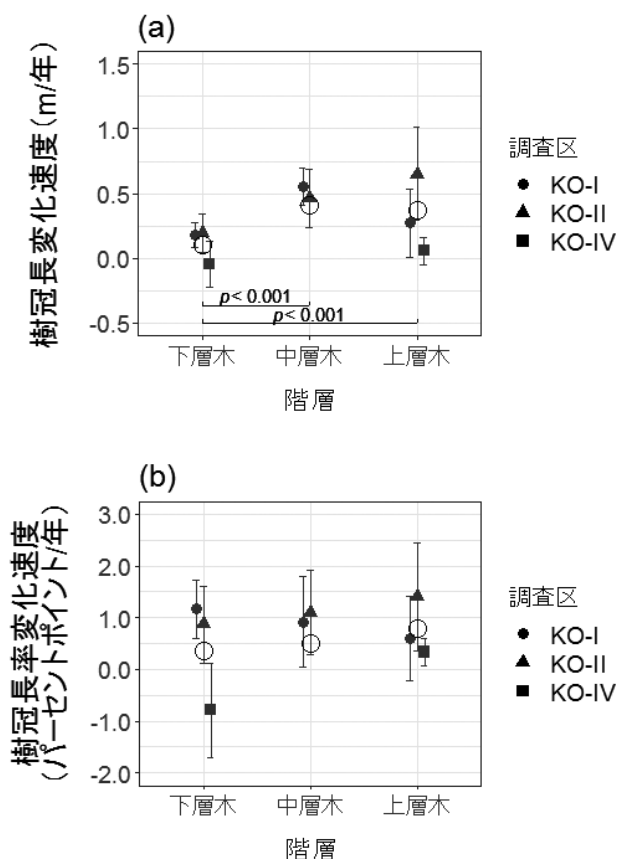


Fig. 3. 複層林調査区における各階層の (a) 樹冠長変化速度および (b) 樹冠長率変化速度の比較。図の見方は Fig. 1 に従う。

層木で 0.79/年であったが、階層間で有意差はみられなかった。また、下層木の樹冠長率変化速度はゼロから有意に異なっていなかったことから（線形混合効果モデル $p > 0.05$ ）、各階層の樹冠長率はほとんど変化していないことが示された (Fig. 3b)。

4. 考察

本研究の調査林分はいずれも上層木の樹齢が 100 年を超える高齢複層林である。上層木ではこれまでの択伐により立木密度が 80 本/ha 以下と低く保たれてきたため (Table 1)、上層木同士の競争の影響は緩和されていると考えられる。一方、中層木と下層木は、自身より上層の個体からの被陰を受けるうえ、特に KO-IV のように下層木だけで 1500 本/ha 以上という高い立木密度では下層木同士でも競争の影響が大きくなっていると考えられる。その結果、中層木の一部や下層木の形状比が 100 を超えて非常に高くなるなど負の影響を受けていると考えられる。本研究の複層林においても、やはり中層木、下層木を今後どのように管理していくかが課題である。

4.1 直径成長と樹高成長

高齢スギ人工林の直径成長の事例として、吉野地方

の約 100 ~ 230 年生までの高齢スギ単層林の事例では、0.21 ~ 0.37 cm/年の直径成長速度であったと報告されている (竹内 2005)。本研究と同じ愛媛県久万地方のスギヒノキ二段林を対象に 96 年生から 101 年生までの成長経過をみた事例によれば、上層木の直径成長速度は 0.31 ~ 0.57 cm/年であった (酒井ら 1996, 2003 および酒井ら未発表)。本研究の上層木の直径成長速度 (0.84 cm/年) はこれらの事例と比較しても良好であることがうかがえるが、本研究ではさらに中層木の直径成長速度も 0.83 cm/年と良好であった。中層木と同程度の林齢の単層林の事例では、高知県の 39 ~ 56 年生スギ人工林 10 林分の直径成長速度は 0.11 ~ 0.81 cm/年であったが、最大値の 1 林分を除くと 0.11 ~ 0.48 cm/年であった (深田ら 2011)。同じく高知県の 47 年生と 50 年生スギ人工林では、それぞれ 0.38, 0.33 cm/年と報告されている (宮本ら 2015)。このことから、本研究の中層木の直径成長速度はかなり高い値であるといえる。この背景としては、本研究の調査地では単層林から複層林への移行時期に上層木樹齢が 70 ~ 80 年生以上と高齢で、その立木密度も 300 本/ha 以下と低密度であったため (安藤ら 1986a, b)、林内の光環境の管理の点では有利であったことがあげられる。さらに最近では、KO-I、KO-II の上層木の立木密度が 56 ~ 67 本/ha とかなり低密度で推移してきたことと、間伐により中層木も立木密度を低下させたことで、光環境が良好で中層木の個体間競争も緩和されたことが影響していると考えられる。一方、本研究の複層林では下層木の年輪幅が 2.5 ~ 3 mm となるよう直径成長速度の目標を 0.5 ~ 0.6 cm/年としてきた (安藤 1982)。下層木の直径成長速度 (0.25 cm/年) はこの目標を下回っており、各階層の間伐を主体として林内の光環境のさらなる改善が必要な状況である。先述のスギヒノキ二段林の事例では、上層木を最初に強度に間伐するよりも間伐の繰り返して徐々に立木密度を下げていく方が下層木の直径成長速度が高まったことを報告している (酒井ら 2003)。これを本研究の KO-IV の二段林に適用するにはこれまでよりも間伐の頻度を高める必要がある。さらに、KO-I と KO-II は三段林であり、より複雑で集約的な密度管理が必要である。

樹高成長については、上層木に頭打ち傾向がみられるものの、中層木では直径成長と同様、良好な成長を示した (Fig. 2)。2017 年に実施された KO-I と KO-II における上層木択伐時のスギ伐倒木 9 個体の計測によると、最近 3 年間の梢端部における連年の伸長成長は平均で約 0.20 m/年程度であり、本研究の上層木の樹高成長速度 (0.13 m/年) よりもやや良好であった (酒井ら 未発表)。樹高成長速度が比較的高い KO-II の個体が伐倒木に含まれていることが影響していると考えられる (Fig. 2)。先述の 96 ~ 101 年生のスギヒノキ二段林の事例では、上層木の樹高成長速度は -0.33 ~ 0.17

m/年であった(酒井ら 2003, 酒井ら 未発表)。また、スギ複層林 74～79 年生の事例では、上層木のスギの樹高成長速度(林分の平均値に基づく)は 0.12～0.18 m/年であった(安藤 1982)。このように他の複層林上層木の結果も本研究と類似し、上層木の樹高成長速度には鈍化の傾向がみられる。また、中層木と同程度の林齢の単層林と比べると、先述の高知県における 39～56 年生のスギ単層林 10 林分の樹高成長速度は 0.11～0.43 m/年であった(深田ら 2011)。長野県の 43 年生と 46 年生のスギ単層林でも同程度の樹高成長速度(図からの読み取りで、約 0.10～0.40 m/年)が示されている(大矢・近藤 2013)。本研究の中層木の樹高成長速度(0.52 m/年)はこれら同齢の単層林の値を上回っていた。直径成長と同様、上層木の立木密度が複層林造成時から低かったことにより、中層木でも良好な樹高成長が可能となる光環境を維持できていると考えられる。一方、複層林で幹曲がりや梢端枯れなどを生じさせずに健全な下層木を育てるためには 0.20 m/年程度の樹高成長速度が必要と言われている(藤森 1992, 竹内 2004)。本研究の下層木の樹高成長速度は 0.20 m/年をやや上回っていた(Fig. 2b)。したがって、樹高成長についてはかろうじて健全な生育を維持しているといえるものの、直径成長や以下に述べる形状比、樹冠長率なども考慮すると、下層木の生育状況は全体として健全であるとは言い難い状況である。

4.2 形状比と樹冠長率

スギ林とヒノキ林において、林内の相対照度の低下にともなう樹下植栽木の相対樹高と相対直径(被陰のない状況下の樹高と直径に対する相対値)の低下パターンから(河原 1983)、林内の被陰下では樹高成長に比べて直径成長の低下が大きい傾向を読み取ることができる。これに基づき竹内(2004)は、被陰下では樹高成長に比べ直径成長の低下が大きい傾向にあるため、複層林の下層木は形状比が高くなりやすいことを指摘している。複層林における形状比と気象害の関係については、上層木は通常の単層林と同様、形状比が 70 以上で気象害が生じやすいと考えられる(石井ら 1983, 國崎ら 2002)。下層木では 110 以上になると冠雪害による幹折れや幹曲がりが生じやすくなるとの報告がある(落合ら 1987, 杉田ら 2014)。また、上層木と下層木の位置関係や上層木の樹冠構造、上層木の立木密度が低いことなどにより、下層木が上層木樹冠の庇護作用を十分に受けることができず、形状比の高い下層木が冠雪害を受けやすいことが指摘されている(和口ら 1992, 杉田ら 2014)。本研究の調査地である愛媛県久万地方の人工林でも冠雪害が発生している(落合ら 1987)。本研究の上層木の形状比は約 60 以下であり、上層木に対する気象害の危険性は比較的少ないと考えられる。一方、下層木の大部分と一部の中層木の形状

比は、いずれも 100 前後を示しており、下層木だけでなく中層木でも気象害の危険性が高いことが示唆された。また、形状比変化速度は多くの場合、減少傾向(負の値)を示したが、KO-II の下層木では増加傾向(正の値)を示したため(Fig. 2)、早急に光環境の改善が必要である。このように形状比の点では、いずれの調査区も中層木と下層木は気象害リスクが高い状態にあるといえる。

樹冠長率については、健全な単層林を造成するための基準として樹冠長率 40% 以上が必要で、60% 程度を目指すことが望ましいとされる(藤森 2010b)。本研究では、上層木と中層木における期末(2015～2016 年)の樹冠長率は概ね 40% 以上であった。しかし、下層木ではいずれの調査区も他の階層と比べ樹冠長率のばらつきが大きくなった(Fig. S5)。健全な単層林における樹冠長率の基準は、複層林の上層木には適用可能であるが、長期間被陰にさらされる下層木には適用できない可能性がある。下層木の高い形状比や低い直径成長速度を考慮すると、個体の健全な成長維持の点から樹冠長率 40% という基準があてはまらず、さらに高い樹冠長率が必要ながうかがえる。一方、上層木は低密度で推移しており、その下の中層木の直径成長は上層木と同程度であることから、本研究の調査地のように適切に管理され上層木が低密度の複層林では、中層木についても単層林と同じ樹冠長率の基準が適用可能であろう。したがって、葉量保持の点から本研究の複層林では上層木だけでなく中層木もある程度健全な状態を維持できていると考えられる。樹冠長についてみると、KO-I と KO-II の樹冠長の伸長は樹高成長と概ね同様のパターンを示した。上層木では樹高成長も樹冠の伸長も頭打ちになる一方、中層木と下層木では樹高成長と同程度に樹冠長も拡大するため、結果としていずれの階層も樹冠長率 40% 程度を維持していくものと考えられる。しかし、上述のように下層木については、個体の健全な成長維持の点から十分な葉量を保持しているとは言い難い。下層木のなかには、着葉量が少ない枝がまばらに分布する個体もみられた。さらに、KO-IV の下層木については、樹冠長変化速度が負の値となり樹冠長の拡大傾向がみられず(Fig. 3a)、これが上述の樹冠長率の低下傾向をもたらしているため、間伐による光環境の改善や競争の緩和が必要と考えられる。

4.3 複層林施業の問題点

本研究の複層林を先代とともに長年管理してきた岡信一氏は、下層木の損傷を最小限に抑えるための伐倒や枝打ちによる林内の光環境の改善など、高度な技術を駆使しながら可能な限り立木密度と林内の光環境に配慮した複層林の管理を行ってきた(藤本ら 1991, 藤森 2010a)。上層木だけでなく中層木についても成長が

比較的良好で、樹冠長率も概ね40%以上を維持していることはその成果であるといえる。しかし、下層木の生育状況や中層木の一部と下層木にみられた100を超える高い形状比については、今回の調査以前から同様の状態が長く続いており(安藤 1982, 安藤ら 1986a, b)、間伐を主体とする各層の密度管理をよほど集約的に行わなければ改善していくことは容易ではない。久万地方では、優良大径材生産とともに、均質な優良小丸太生産を目標のひとつとし、形状比が高くとも年輪幅の詰まった材に一定の価値をおいていた。このため、複層林下層木のような形状比の高い状態にもある程度の林業的な合理性があったと考えられる。しかしながら、優良小丸太需要も縮小した現在では、下層木のもつこのような形状や成長の特徴は、気象害リスクなど複層林において下層木の生育を維持する上でマイナス面になっている。

本研究で得られた結果をもとに、複層林施業・管理に関する要点をまとめてみる。まず、複層林中層木の直径成長と樹高成長が良好であった点について(Fig. 1)、その要因としては、上層木が高齢になった段階で複層林に移行し、低密度に維持してきたことが重要であったと考えられた(4.1 直径成長と樹高成長を参照)。藤森(2003)は複層林造成の失敗の原因として、若齢林分の段階で下層木を植栽し二段林へ移行するために、上層木の密度を低下させてもすぐに林冠が閉鎖し、下層木の維持が困難になる事例が多いことを指摘している。この点については岡氏も複層林造成初期に同様の失敗を経験しており、試行錯誤の末に現在の複層林を成立させた経緯がある(岡 1992)。しかし、本研究のKO-I、KO-IIの中層木の生育状況は部分的ではあるものの複層林における数少ない成功事例といえるであろう。一方、下層木の生育については、直径成長の不良や100を超える高い形状比(Figs. 1, S3)などで示されたように、いずれの調査区も健全な状態にあるとはいい難かった。そのため、複層林の植栽木の健全性を維持しようとするれば、上層木のみならず立木密度の高い下層木についても一本一本の環境条件に応じた個体管理を強いられ、極めて困難な施業となる。このように複層林施業は高度に集約的な施業であることがあらためてうかがえた。本研究の複層林については、所有者の高度な施業技術と長年の努力による集約的な管理をもってしても、下層木の健全性を維持するのは困難であることが示された。

複層林は一斉皆伐の反省に基づいた非皆伐の人工林として造成されてきたが、その管理には高度な技術を要するものであり、担い手不足の状況が続く日本の林業の現場にあって、今後積極的に造成していくことは望ましい状況であるとはいえない。竹内(2007)によれば、複層林の造成は、(1) 水土保全や景観保全の観点から裸地化が好ましくない場所、(2) 担い手が高度な伐

出技術を備えていること、(3) 施業が集約的となるため、林道近くや路網密度が高いなど伐出に有利な立地であること、(4) 気象害の心配が少ない場所、といった条件を満たす場合に限定すべきとしている。今後、複層林の造成や維持・管理の困難さについて注意を喚起していく必要がある。

謝 辞

本研究の調査地である複層林を管理し、先代の岡譲氏とともに長年調査にご協力いただいている岡信一氏に深く感謝申し上げる。元森林総合研究所の竹内郁雄氏と杉田久志氏には現地調査に同行していただき、岡氏を交え現地で複層林施業に関する議論をしていただいた。森林総合研究所四国支所の伊藤武治氏と同東北支所の野口麻穂子氏にも現地調査にご協力いただいた。最後に、安藤貴氏から続く林業試験場四国支場造林研究室(現 森林総合研究所四国支所森林生態系変動研究グループ)の歴代研究員による継続的な複層林試験地調査への尽力に感謝申し上げる。

引用文献

- 安藤 貴(1982) 愛媛県久万地方における事例. 日本林業技術協会編“複層林の施業技術”. 日本林業技術協会, 112-118.
- 安藤 貴・竹内 郁雄・落合 幸仁(1986a) スギ, ヒノキ複層林の施業と生長の経過(1) スギースギ二段林KO-Iの事例. 日林関西支講, 37, 175-178.
- 安藤 貴・竹内 郁雄・落合 幸仁(1986b) スギ, ヒノキ複層林の施業と生長の経過(2) スギースギ二段林KO-IIの事例. 日林関西支講, 37, 179-182.
- 藤森 隆郎(1992) 複層林マニュアルー施業と経営ー. 全国林業改良普及協会, 119pp.
- 藤森 隆郎(2003) 新たな森林管理ー持続可能な社会に向けて. 全国林業改良普及協会, 428pp.
- 藤森 隆郎(2010a) 藤森隆郎 現場の旅 新たな森林管理を求めて上巻. 全国林業改良普及協会, 264pp.
- 藤森 隆郎(2010b) 間伐と目標林型を考える. 全国林業改良普及協会, 191pp.
- 藤下 章男・大場 孝裕・鈴木 善郎(1996) スギースギ二段林の上木間伐に伴う下木の損傷事例. 日林中支論, 44, 95-96.
- 藤本 幸司・田中 正臣・山本 武(1991) スギ複層林下木の樹幹の形質. 日林誌, 73, 309-314.
- 深田 英久・宮田 弘明・山崎 敏彦(2011) 強度間伐施業等に対応した森林管理技術の開発. 高知県森技セ平成22年度研究成果報告書, 31-32.
- 蜂屋 欣二・安藤 貴(1982) 目的に対応した施業体系のあり方. 日本林業技術協会編“複層林の施業技術”. 日本林業技術協会, 111-112.
- 石井 弘・片桐 成夫・三宅 登(1983) 冠雪害をうけた

- スギ人工林の直径分布, 形状比分布と被害の関係. 日林誌, 65, 366-371.
- 上浮穴林材業振興会議 (2012) 久万林業. 上浮穴林材業振興会議, 18pp.
- 河原 輝彦 (1983) 人工被陰下の植栽木と樹下植栽木の生長比較. 林試研報, 323, 133-134.
- 國崎 貴嗣・齋藤 信人・劍持 直樹・比屋根 哲 (2002) 岩手県民有林で造成された複層林の林分構造と下木の樹高成長. 岩大演報, 33, 29-38.
- 近藤 道治・今井 信 (2009) 複層林に関する研究の現状について. 森林学誌, 24, 41-52.
- 正木 隆 (2012) 森林生態学からみた複層林施業. 山林, 1532, 6-13.
- 宮本 和樹・酒井 敦・大谷 達也・松岡 真如・山崎敏彦 (2015) 四国地方の高齢級スギ・ヒノキ人工林における個体間競争が植栽木の成長に及ぼす影響. 日林誌, 97, 171-181.
- 岡 信一 (1992) 我が家の林業と複層林—その問題点と利点—. 山林, 1294, 42-44.
- 落合 幸仁・竹内 郁雄・安藤 貴 (1987) 複層林下木の冠雪害—形状比を中心とする被害の解析—. 日林関西支講, 38, 267-270.
- 大矢 信次郎・近藤 道治 (2013) 過密人工林管理技術の開発. 長野県林総研報, 27, 1-24.
- R core team (2018) “R: A language and environment for statistical computing”. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>
- 酒井 武・川崎 達郎・田淵 隆一・竹内 郁雄 (1996) 長期2段林下木の成長経過—スギ96年生, ヒノキ64年生林分の事例—. 日林論, 107, 205-206.
- 酒井 武・倉本 恵生・酒井 敦・奥田 史郎 (2003) 下木成長から見た上木の密度管理. 四国情報, 30, 5-6.
- 酒井 敦 (2017) 久万複層林試験地に関する文献一覧. 森林総研四国支所年報, 58, 26-29.
- 杉田 久志・高橋 利彦・齋藤 誠・濱道 寿幸・藤田 泰崇 (2014) スギ - スギ複層林で発生した下木の冠雪害被害に対する形状比および上木樹冠との位置関係の影響. 日林誌, 96, 6-11.
- 鈴木 誠・村川 功雄・龍原 哲 (1997) ヒノキスギ二段林における上木の間伐に伴う下木への影響. 日林論, 108, 99-100.
- 竹内 郁雄 (2004) スギ・ヒノキ二段林施業と技術的課題. 森林科学, 41, 8-13.
- 竹内 郁雄 (2005) スギ高齢人工林における胸高直径成長と林分材積成長. 日林誌, 87, 394-401.
- 竹内 郁雄 (2007) 複層林施業. 森林施業研究会編 “主張する森林施業論”. 日本林業調査会, 157-164.
- 谷山 徹 (2004) 複層林伐出技術の高度化を目指して. 森林科学, 41, 35-41.
- 和口 美明・柴田 叡弑・米田 吉宏・隅 孝紀 (1992) スギスギ二段林の下木に発生した冠雪害. 日林誌, 74, 87-90.
- 矢野 進治・前田 雅量・榎谷 金治 (1990) 多雪地帯における複層林に関する研究 (I) —アカマツ・スギ, アカマツ・ヒノキが混交した複層林上木アカマツを伐採した後に発生した冠雪害—. 兵庫県林試研報, 37, 6-19.

補足電子資料

以下はオンライン版のみの掲載となります。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/453/index.html>

- Fig. S1.** 複層林調査区における各階層の胸高直径の推移。
- Fig. S2.** 複層林調査区における樹高の推移。
- Fig. S3.** 複層林調査区における形状比の推移 (胸高直径 5 cm 以上)。
- Fig. S4.** 複層林調査区における樹冠長の推移。
- Fig. S5.** 複層林調査区における樹冠長率の推移 (胸高直径 5 cm 以上)。

Evaluating the soundness of growth performance of planted trees in old-aged multi-storied plantations of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) under intensive forest management

Kazuki MIYAMOTO^{1)*}, Tatsuya OTANI²⁾, Atsushi SAKAI²⁾³⁾,
Takeshi SAKAI¹⁾ and Shiro OKUDA⁴⁾⁵⁾

Abstract

We examined growth performance of planted trees in the last 16 years in the multi-storied Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations with the upper story trees being over 100 years old and the mid and lower story trees being 30 to 52 years in Kuma district, Ehime prefecture, Shikoku, Japan, to clarify if planted trees can grow soundly in the old-aged multi-storied conifer plantation under intensive forest management. The diameter growth rate showed more than 0.80 cm/year for the upper- and mid-story trees, which was similar or higher than that of trees in a single-storied plantation. It was 0.25 cm/year for the lower-story trees, which was lower than that of trees for the upper- and mid-story trees. The height growth rate showed more than 0.5 m/year for the mid-story trees. However, it appeared to reach a plateau for the upper story trees, 0.13 m/year, for the upper-story trees and 0.22 m/year for the lower-story trees. The height/diameter ratio was lower than about 60 for the upper story trees, whereas it was from 70 to 120 for the mid-story trees. Median height/diameter ratio showed over 100 in the lower-story trees. This multi-storied plantation can be mentioned as a rare example of good practice in terms of its high growth rate in terms of upper- and mid-story trees, owing to a long-term intensive tree density management by the owner. However, the high values of height/diameter ratio for a part of the mid-trees and most of the lower-story trees and low growth performance of the lower-story trees suggest high risk of snow accretion damage and the difficulty of maintaining the multi-storied plantation sound for a long time even under intensive forest management.

Key words: Non-clearcutting system, Height-diameter ratio, Thinning, Kuma district

Received 18 March 2019, Accepted 14 November 2019

1) Department of Forest Vegetation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Shikoku Research Center, FFPRI

3) Tohoku Research Center, FFPRI

4) Kansai Research Center, FFPRI

5) Department of plant ecology, FFPRI

* Department of Forest Vegetation, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: mkazuki@affrc.go.jp