論文

巻き枯らし間伐がスギ若齢人工林の林内光環境と林床木本組成に及ぼす影響 —岩手県における事例—

國崎貴嗣^{1,*}

國崎貴嗣：巻き枯らし間伐がスギ若齢人工林の林内光環境と林床木本組成に及ぼす影響，森林計画誌46：67～74，2013 スギ無間伐若齢人工林1林分を対象に，巻き枯らし間伐（環状剥皮処理）の実施から5夏経過した段階での林内光環境と林床木本の繁茂状況を調査した。材積間伐率31～39%の処理区における相対光量子束密度は，時間とともに増加したものの，無処理区での増加傾向と顕著な違いは認められなかった。また，処理区における林床植生の被度と木本本数密度は微増したものの，無処理区での傾向と同様だった。この主な原因として，処理区の相対光量子束密度は最大値でも5.6%に過ぎず，林床植生の定着に必要な光量レベルより低いことが挙げられる。巻き枯らし間伐のみによる林内光環境の改善には，少なくとも材積間伐率50%以上の処理が必要と推測される。

Takashi Kunisaki: The effects of ring barking of trees on the within-stand light conditions and sapling composition in an unthinned plantation of young Sugi (*Cryptomeria japonica*) in Iwate Prefecture, northern Japan. Jpn. J. For. Plann. 46: 67~74, 2013 The 5-year changes in the relative photon flux density (rPFD) 1.3 m above the ground and the covers and abundance of ground vegetation were monitored in two blocks with ring barking of stems and one block without. The rPFD and cover and abundance of ground vegetation increased in the two treatment blocks with ring barking of the stems corresponding to 31-39% of stand volume during the 5-year period. Nevertheless, the increase in these variables in the treatment blocks did not clearly differ from that in the control block. It appears that 5.6% of the maximum rPFD in the treatment blocks was too low to maintain luxuriant ground vegetation. Barking treatment with an intensity of 50% or more of stand volume is probably needed to improve the within-stand light conditions and to maintain luxuriant ground vegetation in unthinned plantations of young Sugi (*Cryptomeria japonica*).

I. はじめに

近年，間伐遅れの針葉樹人工林が各地で見られるようになり，人工林の多面的な機能発揮の観点から，間伐の推進が求められている（林野庁 編，2008）。間伐遅れ人工林への間伐では，独自課税（森林環境税）による森林整備事業の目的（林野庁 編，2011）に代表されるように，特に水土保持機能の改善が重要である。間伐遅れ人工林の水土保持機能を改善するには，林内光環境を好転させ，林床植生の現存量または被度を増大させる必要がある（大原，2007；恩田，2008；山本・野々田，2008）。

林内光環境を好転させる上で，一般に，伐倒による強度間伐が有効である（深田ら，2009）。ただし，一

部の間伐遅れ人工林では立木の形状比が非常に高く，急激な林冠疎開による風雪害の発生増加が危惧される（大内，2002）。そこで，枯立木による生立木への支柱効果を期待して，巻き枯らし間伐（形成層の切断または除去による立ち枯らし処理）が注目されている（大内，2002；田中，2003）。巻き枯らし間伐については，適切な季節を選べば，ナタやノコギリ，ヘラなど軽量の道具で安全かつ迅速に処理できる（野下ら，1999；宮田ら，2005；國崎・小泉，2008）。そのため，遠隔地や林道から離れた地点，あるいは急傾斜地にある間伐遅れ人工林の水土保持機能の改善に，巻き枯らし間伐は適していると考えられている（宮田・深田，2009）。

巻き枯らし間伐が林内光環境と林床植生に及ぼす影

* 連絡・別刷請求先（Corresponding author）E-mail: kunisaki@iwate-u.ac.jp

1 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka 020-8550.

響については、広葉樹二次林（山瀬，2004）とヒノキ人工林（宮田・深田，2009）で詳細に検討されている。しかし、スギ人工林では目視の事例（倉田，2006b）があるのみで、相対光量（相対照度や相対光量子束密度）や林床植生を実測した例は見当たらない。スギとヒノキでは、巻き枯らし間伐後の枯死状況（枯死に要する期間や落葉状態）に違いが見られる（原，2008；宮田・深田，2009）。このため、間伐遅れのスギ人工林における調査事例は、巻き枯らし間伐の適用条件を明らかにする上で必要不可欠である。また、宮田・深田（2009）は、ヒノキ人工林を対象に、本数間伐率 25、50、75% という 3 つの処理区を設定し、巻き枯らし間伐後の相対光量を継続的に測定した。しかし、折れ線グラフのみが提示されたため、極めて強度な 75% 処理区を除くと、巻き枯らし間伐後の相対光量の増加傾向は視覚的には不明瞭である。やや強度（本数間伐率 30～50%）の巻き枯らし間伐により、スギ林内の相対光量が増加するのかを、統計学的手法で定量的に確認することも必要である。

育林履歴および過去の林分構造の明らかな、若齢のスギ無間伐人工林 1 林分を対象に、巻き枯らし間伐の実施から 5 夏経過した段階での相対光量と林床木本の繁茂状況を明らかにするのが本研究の目的である。

Ⅱ. 調査地と方法

1. 調査地

調査地は、岩手県滝沢村に所在する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（以下、演習林）内のスギ無間伐人工林 1 林分（以下、スギ林）である（図－1）。演習林の標高 210m 地点での気象観測データによれば、年平均気温 9.2 度、年平均降水量 1,219mm、最大積雪深は約 40cm であ

図－1 調査地の地形と調査区の配置

図中の数字は等高線（m）であり、黒丸は林内に設置した光量子センサーの位置を示す。

表－1 調査林分の2005年時の概要

調査区	面積 (ha)	本数密度 (本/ha)	胸高直径* (cm)	樹高* (m)	収量比数
無処理区	0.073	2836	14.4±3.8	11.8±3.8	0.84
12月処理区	0.032	2563	14.9±2.9	13.0±1.3	0.81
5月処理区	0.015	3333	13.2±3.3	10.6±2.0	0.84

*平均±標準偏差

表－2 巻き枯らし間伐の概要

調査区	実施時期	剥皮幅 (m)	本数間伐率 (%)	材積間伐率 (%)
12月処理区	2005.12.8	1.0	33	31
5月処理区	2006.5.16	1.0	42	39

る。このスギ林は 2005 年時に林齢 20 年生であり、標高 190～240m、平均傾斜 22 度の斜面に位置する。林分面積は 0.66ha である。周辺には広葉樹二次林や広葉樹の侵入したスギ壮齢人工林が隣接する。1986 年、広葉樹二次林の皆伐跡地に 3,500 本/ha の密度でスギ苗木が植栽され、その後、下刈り、除伐が実施された。1997 年（林齢 12 年時）以降には、除間伐などの育林作業は一切実施されていない。そのため、巻き枯らし間伐実施前の 2005 年におけるスギ林の収量比数は 0.81～0.84 と高かった（表－1）。なお、成長量試験のため、このスギ林では、1997 年から現在まで、毎木調査と樹高の標本木調査が毎年実施されている。

2. 巻き枯らし間伐

巻き枯らし間伐には、樹皮・形成層を剥ぐ方法、樹皮・形成層を削り取る方法、チェーンソーで形成層を切断する方法がある（倉田，2006a）。本研究では前 2 つの方法（以下、環状剥皮）を採用した。環状剥皮作業の詳細については、國崎・小泉（2008）を参照されたい。

スギ林内に 2 カ所の処理区（表－2）、1 カ所の無処理区を設定した（図－1）。処理区は、2005 年 12 月に本数間伐率 33%（材積間伐率 31%）で環状剥皮した区域（以下、12 月処理区）と、2006 年 5 月に本数間伐率 42%（材積間伐率 39%）で環状剥皮した区域（以下、5 月処理区）である。両処理区とも、胸高直径や樹高に関係なく、処理木ができるだけ全域に散らばるように選木した結果、本数間伐率と材積間伐率がほぼ同じ値になった。なお、岩手県では環状剥皮作業はほとんど実施されていないため、本研究で採用した選木方法は地域の一般的方法を反映した訳ではないことに注意されたい。

両処理区では、環状剥皮の実施から 1 夏を過ぎた 2007 年の春以降に処理木の枯死が急増した。5 夏を経過した 2010 年秋の枯死率は、12 月処理区で 96%、

図-2 各区域における環状剥皮処理木の枯死率

5月処理区で100%となり(図-2), 処理木のほぼすべてが枯死した。一方, 環状剥皮木以外にも, 自然間引きや雪害による枯死木が発生した(表-3)。無処理区では, 雪害や自然間引きにより, 立木の9.2%が調査期間に枯死し, 局所的に小さな林冠空隙が生じた。これに対し, 12月処理区では, 処理木以外に, 樹高8.7mの劣勢木(表-1)1本が自然間引きで枯死したのみであり, これによる林冠空隙の形成は認められなかった。また, 5月処理区では, 処理木以外の枯死木は発生しなかった。

3. 調査方法

2006~2010年の夏(6~8月)に, 無処理区, 12月処理区, 5月処理区において, 林内光量を調査した。各区域に杭を2本ずつ打ち(図-1), 杭の上1.3mの高さに光量子センサー(IKS-27, 小糸工業)を設置し, 1分間隔で3日間連続して測定した。また, 疎開部の光量として, スギ林の林冠表面に光量子センサーを1つ設置し, 林内光量と同じ期間に1分間隔で3日間連続して測定した。林冠表面における光量子束密度の3日間の積算値(PFDout)に対する林内の積算値(PFDin)の比率(%)を相対光量子束密度(rPFD)とした。

2006年8月に, 無処理区, 12月処理区, 5月処理区に2m²のコドラートを8つずつ設置し, コドラート内のリター層を除去した。そして, スギ立木を除

表-3 調査期間における自然間引き, または雪害による枯死率

調査区	本数密度 (本/ha)	枯死木本数密度 (本/ha)	枯死率 (%)
無処理区	2836	261	9.2
12月処理区	2563	32	1.9
5月処理区	3333	0	0

く植生の被度(林床植生被度)を目視により7段階(0, 被度0%; +, ごく少数; 1, 被度10%未満; 2, 被度10~25%; 3, 被度26~50%; 4, 被度51~75%; 5, 被度76~100%)で評価した。加えて, 林床木本の樹種名を記録し, コンベックスにより樹高を1cm単位で測定した。被度と林床木本の調査を2010年8月にも実施した。

4. 解析方法

時間と処理の違いがrPFDに及ぼす影響を, 一般化線形混合モデルを用いて解析した。PFDinを応答変数とし, 説明変数として2005年からの経過年数(T : 1~5), 区域(S : 1, 無処理区; 2, 12月処理区; 3, 5月処理区), 経過年数と区域の交互作用($T \times S$)の3つを用いた。PFDoutをオフセット項とし, 光量子センサーの設置地点(b : 1~6)をランダム効果として回帰モデルに組み込んだ。誤差構造を正規分布, リンク関数を対数変換とした。説明変数のすべての組合せについて回帰モデルを準備した上でデータをあてはめ, BIC(ベイズ情報量規準)が最小の回帰モデルを最良モデルとした。一般化線形混合モデルの適用にはR 2.8.1(R Development Core Team, 2008), lme4パッケージのlmerを用い, パラメータの推定には最尤法を用いた。

巻き枯らし間伐によるrPFDの変化を, 同じ間伐率で伐倒した場合のそれと比較するため, 相対照度を推定する河原(1988)の式と, 相対照度とrPFDの関係を示すMURAOKA *et al.* (2001)の式を用いて, 伐倒後の林内rPFDの変化を推定した。

$$I_t = I_0 \exp\{-0.008 \exp(1.609 \Delta h) t\} \quad (1)$$

$$I_0 = x / (1.82 - 0.0082 x) \quad (2)$$

$$I_t = 1.039 P_t \quad (3)$$

ここで, I_t は t 年後の相対照度(%), I_0 は間伐直後の相対照度(%), Δh はスギの5年間での樹高成長量(m/5年), t は間伐後の経過年数(年), x は断面積間伐率(%), P_t は t 年後のrPFD(%)である。式(1), (2)は, 河原(1988)が弱度間伐から強度間伐まで対応できるように作成したものである。式(1)と(2)で相対照度 I_t を推定し, 式(3)に代入することで, rPFDへ変換した。 Δh については2005年と2010年の林分調査データを, x については2005年の林分調査データを用いて推定した。なお, スギ人工林内のrPFDを推定するための式としては, 収量比数を説明変数とした小山ら(2009)の式がある。

$$P_t = 100 \exp(-3.4723 Y_t) \quad (4)$$

ここで, Y_t は t 年後の収量比数である。式(4)は収量比数のみでrPFDを推定できる点で簡便である。しかし, 同式推定のために用いられた散布図をみると,

表-4 最良回帰モデルの選択

Model	BIC
$\beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 S + \beta_3 T \times S + b$	1130997452
$\beta_0 + \beta_1 T + \beta_3 T \times S + b$	1130997454
$\beta_0 + \beta_2 S + \beta_3 T \times S + b$	1150435021
$\beta_0 + \beta_3 T \times S + b$	1150435022
$\beta_0 + \beta_1 T + b$	1258153683
$\beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 S + b$	1258153692
$\beta_0 + \beta_2 S + b$	2781938649

ただし、 T は2005年からの経過年数、 S は区域、 $T \times S$ は経過年数と区域の交互作用、 b はランダム効果である。

収量比数 0.10～0.60 では推定曲線とデータは良く一致しているものの、0.60 以上での rPFD のばらつきが大きい。そのため、今回のような、やや強度の間伐（収量比数 0.60 を下回らない間伐）事例には適していないと判断し、式（1）～（3）を用いる方法を用いた。

Ⅲ. 結果

回帰モデルの選択結果を表-4に示す。最良回帰モデルは2005年からの経過年数、区域、経過年数と区域の交互作用の3つすべてを説明変数とするモデルであった。また、2005年からの経過年数、経過年数と区域の交互作用の2つを説明変数に持つ回帰モデルのBICもほぼ同じ値で小さかった。これらのモデルでは、経過年数における回帰係数の符号は正であった。一方、区域のみを説明変数とする回帰モデルのBICは他のモデルのそれより顕著に大きかった。

rPFDの時間的推移を図-3に示す。無処理区のrPFDは1.5%前後で微増傾向にあった。一方、2つの処理区のrPFDは、環状剥皮実施から4夏を経過した2009年以降に増加した。調査期間におけるrPFD

表-5 同じ断面積間伐率の下層間伐が実施された場合の推定 rPFD (%)

	2006年	2010年
12月処理区	15.2	3.5
5月処理区	20.5	2.7

表-6 林床植生の侵入状況 (16m²当たり)

調査区	2006年8月		2010年8月	
	被度	木本(樹高)	被度	木本(樹高)
無処理区	0		+	オオバクロモジ (8cm) アオハダ (5cm)
12月処理区	0		+	ヤマグワ (9cm) エゴノキ (8cm)
5月処理区	0		+	オニグルミ (31cm) ムラサキシキブ (18cm)

の最大値は、12月処理区における2009年時の5.6%（2本の杭の平均値4.0%）であった。なお、12月処理区における2009年時の標準誤差が大きいのは、もう一方の杭のrPFDが2.3%と、5.6%に比べてかなり低かったためである。

式（1）～（3）で推定した林内rPFDを表-5に示す。今回の巻き枯らし間伐と同じ断面積間伐率で伐倒した場合、2006年におけるrPFDは15～21%と推定された。一方、2010年のそれは3～4%と推定され、巻き枯らし間伐の処理区における実測値（図-3）とほぼ同じだった。

林床植生の侵入状況を表-6に示す。2006年における林床植生被度の階級は0であり、2010年のそれは+であった。調査期間に侵入した木本は各区域とも16m²当たり2本であった。

Ⅳ. 考察

1. rPFDの時間的推移

一般化線形混合モデルによれば、rPFDのばらつきを良く説明するのは、2005年からの経過年数、経過年数と区域の交互作用を説明変数に持つ2つのモデルであった（表-4）。これらのモデルにおける経過年数の回帰係数の符号は正であることから、調査林分では時間の経過とともに林内rPFDが増加したことを意味する。2つの処理区では、2009年と2010年のrPFDが2006～2008年に比べて高かった（図-3）。また、無処理区では、雪害や自然間引きによる枯死により、平均rPFDが2007年の1.1%から2010年の1.6%へ、ごくわずかに増加した。こうした事実が、調査林分におけるrPFDの増加傾向に反映されたと考えられる。

経過年数と区域の交互作用を含む回帰モデルのBICは、交互作用を含まないモデルのそれより低かった（表

図-3 各区域におけるrPFDの推移

シンボル、エラーバーはそれぞれ2測定点の平均、標準誤差を示す。

－4)。一方、区域のみを説明変数とする回帰モデルのBICは、他のモデルよりも顕著に大きかった（表－4）。これらの結果は、区域によってrPFDの増加傾向に違いが見受けられるものの、その違いは小さいことを意味する。無処理区における平均rPFDの増加量（調査期間の最大値－最小値）は0.5%であるのに対し、12月処理区のそれは3.1%、5月処理区のそれは2.4%と若干異なった。しかし、同じ間伐率で伐倒した場合、rPFDは15～21%まで上昇すると推定されることから（表－5）、数%レベルでの平均rPFDの増加傾向については、区域間で大きな違いはないと考えられる。そして、これは宮田・深田（2009）が報告した、23年生ヒノキ人工林で実施された巻き枯らし間伐試験（本数間伐率25%、50%の処理区と無処理区）の結果（相対照度が4年間で数%しか増減せず、ほぼ一定だった結果）と同様であった。

このような弱度から強度（本数間伐率25～50%）の巻き枯らし間伐で林内相対光量（以下、相対光量）が顕著に増加しない要因として、処理木における落葉の緩やかな進行と生立木における着葉量増加のバランスが挙げられる。巻き枯らし間伐では、処理木が枯死してから落葉が終了するまでに数ヶ月から数年を要する（倉田, 2006b；原, 2008；宮田・深田, 2009）。このため、相対光量は、落葉の進行に伴い、緩やかに増加すると考えられる。一方で、枯死木により林冠に空隙が生じたとしても、その後、空隙に隣接する生立木の着葉量が増加し（水井ら, 1987）、空隙が縮小することで（森田, 1989）、相対光量は減少する（安藤ら, 1983；水井ら, 1987；金子, 1989）。弱度から強度の巻き枯らし間伐では、枯死木の落葉が徐々に進行するため、樹冠投影面積よりも小さな林冠空隙が局所的に形成される。この結果、空隙形成による相対光量の増加量は、伐倒間伐の場合に比べ、少なくなると考えられる。それに加え、若齢林の林冠に形成された小さな空隙は、隣接する生立木の着葉量増加により、数年で縮小・閉鎖される（水井ら, 1987；森田, 1989）。12月処理区の平均rPFDは2010年に微減しており（図－3）、林冠空隙の縮小を反映している可能性がある。このように、弱度から強度の巻き枯らし間伐で形成された小さな林冠空隙が、数年で縮小・閉鎖されることで、相対光量は緩やかに増加した後、減少すると考えられる。

2. 林床植生の侵入状況

コドラートにおける林床植生被度の階級は、区域に関係なく、2006年の0から2010年の+に増加した（表－6）。また、全区域で木本植物が2種ずつ侵入した（表－6）。こうした被度と種数の増加は、ヒノキ

人工林を対象とした事例（宮田・深田, 2009）と一致したものの、本研究における増加傾向は宮田・深田（2009）のそれより極めて緩やかであった。また、処理区と無処理区における被度と種数の増加傾向は同様であり（表－6）、巻き枯らし間伐による林床植生の導入効果は、処理後5夏を経過した段階では、ほとんど認められなかった。一般に、針葉樹人工林内への林床植生の導入には、近隣での種子供給源の確保、生存に必要な林内光量の確保、リター層の除去が重要と指摘されている（例えば、SMITH *et al.*, 1997；UTSUGI *et al.*, 2006；山本・野々田, 2008；國崎・小川, 2009）。本調査地には、広葉樹二次林や広葉樹の侵入したスギ壮齢人工林が隣接していることから（図－1）、木本や草本の種子供給源は周辺林分内に存在している。実際、調査地における雪害で生じた林冠空隙の真下（コドラート外の一部）には、様々な草本・木本植物が繁茂しているのを確認した。これらのことから、種子の散布制限がコドラート内の被度や木本本数密度の低さに影響しているとは考えにくい。一方で、本調査地では、林内光量不足やリター層の存在により、種子の発芽制限もしくは実生の定着制限が生じ、林床植生の繁茂が抑制された可能性が高い。一般に、相対照度が2%以下では林床植生はほとんど発生せず（複層林施業研究班, 1983）、耐陰性の高い木本でも、その実生の定着には相対照度5%以上の光量が必要とされている（千葉, 1981；石田, 2000）。なお、相対照度とrPFDの値はほぼ一致し（石田, 2000；MURAOKA *et al.*, 2001）、相対照度5%は、式（3）から、rPFD4.8%に相当する。本調査地で、調査期間にrPFDが最大となったのは、12月処理区における2009年時の5.6%であり、次いで12月処理区における2010年時の4.1%であった。このように、実生定着に必要な最低光量（rPFD4.8%）を超えたのは、20回分（2処理区×2杭×5年）の測定のうち、わずか1回のみであった。これらのことから、全区域の中で平均rPFDが最も高くなった12月処理区（図－3）であっても、実生定着に必要な最低光量を確保できていないと言える。さらに、観察によれば、2006年に除去したリター層は、2010年の調査時には、5cm前後の厚さで再び堆積し、鉍物質土壌はすべて被覆されていた。一般に、リターの堆積量の多い林内では、林床植生の種数や密度が低くなる（長池, 2000；UTSUGI *et al.*, 2006）。こうしたリターの堆積も、コドラート内の被度や木本本数密度の低さに影響している可能性がある。

3. 水土保持機能改善のための巻き枯らし間伐

林床植生乾重と土壌の浸透能との間には正の相関があり、高い浸透能を確保するには、被度4以上での林

床植生の繁茂が望ましいとされている（恩田，2008）。一方，本研究で明らかとなったように，材積間伐率 31～39%（本数間伐率 33～42%）の巻き枯らし間伐では，処理から 5 夏経過しても，実生定着に必要な最低光量を確保できず，スギ若齢林内の林床植生被度や木本本数密度は極めて低かった。被度 +（表 - 6）を被度 4 以上に高めるためには，相対光量をさらに高める必要がある。一般に，林床植生の繁茂や陽生木本の定着には相対照度 20% 以上が必要とされている（複層林施業研究班，1983；石田，2000；山本・野々田，2008）。

本調査地の場合，材積間伐率 31～39% で伐倒すれば，rPFD は伐倒直後に 15～21% まで上昇すると推定された（表 - 5）。このため，相対照度 20% 以上の光量を確保するためには，材積間伐率 40% 以上の伐倒間伐が必要である。しかし，先述したように，遠隔地や急傾斜地にある間伐遅れ人工林の場合，伐倒間伐よりも巻き枯らし間伐が実用的な場合もある。

巻き枯らし間伐主体でスギ若齢人工林内の光環境を改善し，林床植生被度 4 以上に高めるためには，二つの方法が考えられる。一つは，材積間伐率 50% 以上という極めて強度の巻き枯らし間伐を実施することである。宮田・深田（2009）は，23 年生ヒノキ人工林を対象に，本数間伐率 50% と 75% で巻き枯らし間伐を実施した。その結果，処理から 5 夏を経過した段階の相対照度は，50% 処理区で 15%，75% 処理区で 42% であった（宮田・深田，2009）。宮田・深田（2009）は材積間伐率を示していないものの，間伐前後の収量比数の変化から，材積間伐率は，50% 処理区で 28%，75% 処理区で 55% と推定される。このことから，ヒノキ若齢人工林では，材積間伐率 40% 以上（下層間伐なら本数間伐率 60%）の巻き枯らし間伐であれば，相対照度 20% 以上に達し，被度 4 以上での林床植生の繁茂が可能になると推測される。伐倒間伐では，材積間伐率とほぼ等しい値になる断面積間伐率と林内相対照度との関係は，スギ人工林とヒノキ人工林で分離しない（河原，1988）。一方，巻き枯らし間伐では，スギはヒノキに比べ，枯死した巻き枯らし間伐木の落葉完了により多くの時間を要する（原，2008；宮田・深田，2009）。この樹種間差を踏まえると，スギ若齢人工林において被度 4 以上で林床植生を繁茂させるには，少なくとも材積間伐率 50%（下層間伐なら本数間伐率 70%）以上という極めて強度の巻き枯らし間伐が必要になると推測される。一度も除間伐が実施されず，立木本数密度が 3,000 本/ha 前後の間伐遅れ人工林であれば，材積間伐率 50% 以上の巻き枯らし間伐を実施しても，生立木密度は 900 本/ha 前後となるので，針葉樹人工林として維持できる。

もう一つの方法として，弱度の伐倒間伐と強度の巻き枯らし間伐を併用する方法がある。鋸谷式の巻き枯らし間伐（大内，2002）では，生立木への支柱効果を期待できない先折れ木，かかり木，曲がり木，枯立木などを本数間伐率 15% 程度で伐倒するとともに，本数間伐率 50% 程度で下層木を主体に巻き枯らし処理する（倉田，2006b）。こうした併用により，処理後 5～10 年でスギ人工林内に林床植生が繁茂する（大内，2002）。林内では，葉のみならず，幹や枝による遮光効果も少なくないので（千葉，2011），本数率 15% と弱度であっても，伐倒することで間伐直後のスギ人工林内の相対光量は 5% 程度増加する（橋本，1985）と考えられる。これらのことから，弱度（先折れ木，かかり木，曲がり木，枯立木を対象に本数間伐率 15% 程度）の伐倒間伐と強度（下層木を主な対象に本数間伐率 50% 程度）の巻き枯らし間伐を併用することで，伐倒直後に実生定着に必要な最低相対光量を確保した上で，巻き枯らし処理木の枯死により，処理後 5 年程度で相対照度 20% 以上を確保できると推察される。

いずれの方法でも，本数で最低 65～70% を処理（巻き枯らしや伐倒）することになる。これは，処理によって形成される林冠空隙の割合を高めることで，処理後 5 年程度では林冠閉鎖されない状況を創出する必要があることを意味する。伐倒間伐での事例ではあるものの，SEIWA *et al.*（2012）はスギ若齢人工林の生態系機能（嶋田，2005）を高める上で，本数間伐率 67%（材積間伐率 61%）の間伐を実施し，種多様性の高い林床植生を確保することを推奨している。育林作業の実施が容易でない遠隔地や急傾斜地にある間伐遅れ人工林の水土保全機能を改善するためには，極めて強度の巻き枯らし間伐を実施する，あるいは弱度の伐倒間伐と強度の巻き枯らし間伐を併用することが必要になるであろう。

本研究を遂行するにあたり，安藤亮太さん，菊池香緒里さん，小泉恵理さん，菅原真司さん，齊藤龍平さんには調査を手伝って頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する。

引用文献

- （1）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。
- （2）千葉宗男（1981）天然更新。（In 堤利夫 他 13 名 共著「新版 造林学」234pp，朝倉書店，東京），130-155。

- (3) 千葉幸弘 (2011) 森林の物質生産. (In 正木隆・相場慎一郎 編著「森林生態学」, 293pp, 共立出版, 東京), 224-244.
- (4) 深田英久・渡辺直史・宮田弘明・山崎敏彦 (2009) 強度間伐が残存木の成長および材質等に与える影響. 高知森技研報 34 : 56-83.
- (5) 複層林施業研究班 (1983) 人工林の複層林施業に関する研究 (IV) 庇陰下における雑草木の再生量と下刈の要否. 林試研報 323 : 153-179.
- (6) 原勇治 (2008) 巻枯らし間伐による間伐木の枯損過程と残存木の成長について. 島根中山間セ研報 4 : 57-63.
- (7) 橋本良二 (1985) スギ人工林の間伐と光環境 (I) 林床相対照度の変化の検討. 日林誌 67 : 253-260.
- (8) 石田仁 (2000) 光環境が温帯林主要樹種の更新樹の布と伸長成長に及ぼす影響. 富山林技セ研報 13 : 1-96.
- (9) 金子智紀 (1989) 複層林施業における林内更新試験について. 日林東北支誌 41 : 135-138.
- (10) 河原輝彦 (1988) 複層林誘導のための林内照度のコントロール. 森林立地 30 : 10-13.
- (11) 小山浩正・林直哉・高橋教夫 (2009) スギ人工林の疎密度と林内の光環境の関係—人工林の混交林誘導のための目安として—. 森林計画誌 42 : 81-86.
- (12) 國崎貴嗣・小泉恵理 (2008) 岩手県内のスギ若齢無間伐人工林における巻き枯らし間伐試験—経過報告—. 東北森林誌 13 (2) : 5-8.
- (13) 國崎貴嗣・小川瑞樹 (2009) 強度間伐されたオウシュウトウヒ人工林におけるケヤキの混生状況—ケヤキ林縁からの距離と幼樹密度との対応関係—. 東北森林誌 14 : 43-49.
- (14) 倉田麻里 (2006a) 巻枯らしの方法—確実に枯らすために—. 現代林業 483 : 46-49.
- (15) 倉田麻里 (2006b) 巻枯らし間伐のその後—枯れ方と成長—. 現代林業 484 : 50-53.
- (16) 宮田弘明・吉井二郎・川島幹雄・貝川陽一 (2005) 巻き枯らしによる間伐の作業時期の検討. 高知森技研報 30 : 147-150.
- (17) 宮田弘明・深田英久 (2009) 巻き枯らし間伐木から発生する昆虫相および林内への影響調査. 高知森技研報 30 : 32-55.
- (18) 水井憲雄・菊沢喜八郎・浅井達弘・清和研二 (1987) トドマツ人工林の間伐試験 (I) 間伐後4年間の生長量と葉量の回復. 北海道林試研報 25 : 18-27.
- (19) 森田栄一 (1989) 山よみどりよ. 97pp, 退官記念自費出版.
- (20) MURAOKA, H., HIROTA, H., MATSUMOTO, J., NISHIMURA, S., TANG, Y., KOIZUMI, H. and WASHITANI, I. (2001) On the convertibility of different microsite light availability indices, relative illuminance and relative photon flux density. *Func. Ecol.* 15 : 798-803.
- (21) 長池卓男 (2000) 人工林生態系における植物種多様性. 日林誌 82 : 407-416.
- (22) 野下治巳・松元正美・井之上俊治・内原浩之・前田利盛・松野嘉昭・馬田英隆・井倉洋二 (1999) 環状剥皮によるスギ・ヒノキの密度管理試験. 鹿大演報 27 : 91-96.
- (23) 恩田裕一 (2008) 人工林管理においてなぜ下層植生が必要か. (In 恩田裕一 編著「人工林荒廃と水・土砂流出の実態」245pp, 岩波書店, 東京), 191-200.
- (24) 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 (通号 403) : 127-134.
- (25) 大内正伸 (2002) 鋸谷式 新聞伐マニュアル. 67pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- (26) R Development Core Team (2008) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- (27) 林野庁 編 (2008) 平成20年版 森林・林業白書. 172pp, 日本林業協会, 東京.
- (28) 林野庁 編 (2011) 平成23年版 森林・林業白書. 162pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- (29) SEIWA, K., ETOH, Y., HISITA, M., MASAKA, K., IMAJI, A., UENO, N., HASEGAWA, Y., KONNO, M., KANNO, H. and KIMURA, M. (2012) Role of thinning intensity in hardwood recruitment and diversity in a conifer, *Cryptomeria japonica* plantation: A 5-year demographic study. *For. Ecol. Manage.* 269 : 177-187.
- (30) 嶋田正和 (2005) 生物多様性と生態系機能. (In 嶋田正和 他3名 共著「動物生態学 新版」614pp, 海游社, 東京), 547-564.
- (31) SMITH, D.M., LARSON, B.C., KELTY, M.J. and ASHTON, P.M.S. (1997) The practice of silviculture 9th ed.. 537pp, John Wiley & Sons, New York.
- (32) 田中淳夫 (2003) 注目される間伐の新手法, 「巻き枯らし」. 農林経済 9517 : 2-6.
- (33) UTSUGI, E., KANNO, H., UENO, N., TOMITA, M.,

- SAITOH, T. KIMURA, M., KANOU, K. and SEIWA, K. (2006) Hardwood recruitment into conifer plantations in Japan: Effects of thinning and distance from neighboring hardwood forests. For. Ecol. Manage. 237 : 15-28.
- (34) 山本一清・野々田稔郎 (2008) 下層植生に配慮した森林管理の試み. (In 恩田裕一 編著「人工林荒廃と水・土砂流出の実態」245pp, 岩波書店, 東京), 183-191.
- (35) 山瀬敬太郎 (2004) 夏緑二次林における高木環状剥皮枯殺後の草本層植生の変化とコナラ稚樹の消長. ランドスケープ研究 67 : 55-58.
- (2012年5月7日受付)
- (2012年9月28日受理)