

原著論文

人工林から自然林への復元技術の開発  
—日照条件からみた人工林の伐採幅の検討—

朱宮丈晴<sup>1</sup>・伊藤彰伸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>公益財団法人日本自然保護協会 : 〒104-0033 東京都中央区新川1-16-10ミトヨビル2F  
(chosa2@nacsj.or.jp)

<sup>2</sup>赤谷森林ふれあい推進センター : 〒378-0018 群馬県沼田市鍛冶町3923-1

**要旨:** 本研究は、人工林を伐採し効果的に自然林に復元する手法を把握するため、伐採幅の異なる帯状伐採後の初期遷移群落と光環境との関係を明らかにすることを目的とした。調査地は群馬県みなかみ町の赤谷プロジェクトエリア内の冷温帯下部のスギ人工林間伐試験地（伐採幅4m, 6m）及びカラマツ人工林漸伐試験地（伐採幅20m, 30m, 40m）に設置した。漸伐試験地では、伐採後、伐採幅によらず再生群落の樹高は時間の経過とともに高くなり、幹数密度は急激に増加しその後は減少した。南側の植栽木による被陰の影響を考慮して4月から9月までの着葉期における伐採幅ごとの積算日照時間の推移モデルを構築し、拡張相対成長式から推定された上限樹高を比較したところ、積算日照時間と樹高はよく対応することがわかった。本研究により、東西の列状伐採による自然林への復元を考える場合、南側の林分の被陰による影響を考慮する必要があることが示唆された。

**キーワード:** 伐採幅, 光条件, 自然林復元, 赤谷プロジェクト, 人工林, 積算日照時間

Development of technology for restoration of planted forests to natural forests: An examination of the cutting width of planted forests in relation to sunlight conditions

SHUMIYA Takeharu<sup>1</sup> and ITO Akinobu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Nature Conservation Society of Japan: 1-16-10, Mitoyobiru 2F, Shinkawa, Chuo-ku, Tokyo 104-0033, Japan  
(chosa2@nacsj.or.jp)

<sup>2</sup>Akaya Forest Fureai Promotion Center: 3923-1, Kaji-cho, Numata-shi, Gunma 378-0018, Japan

**Abstract:** The purpose of this study was to clarify the relationship between the light environment and the early successional communities after strip cutting at different cutting widths in order to develop the method of effectively restoring the natural forest after cutting artificial forests. In this study, we investigated the relationship between the light environment and the early successional communities after cutting at different widths. The number of trunks in the regenerating community after the thinning treatment increased rapidly and then decreased, and the tree height increased at a constant rate, regardless of the cutting width. We constructed a model of the changes in the total sunshine hours for each cutting width during the leaf emergence period from April to September, taking into account the effect of shade from trees planted on the south side. When considering the restoration of natural forest by thinning, it is necessary to take into account the effect of shade from the southern part of the forest.

**Key Words:** Cutting width, light conditions, natural forest restoration, Akaya project, plantation forest, accumulated sunshine hours

はじめに

群馬県みなかみ町新治地区の赤谷の森で2004年から官民協働で自然林復元の取り組みを進める赤谷プロジェクトでは、自然林を復元するための基本的な方針として、できるだけ人の手によらず、人工林を間伐などの手法を用いて伐採し、空間を確保することで周辺にある自然林からの種子

の供給や林床に残る前生樹を活かして復元を進めている（関東森林管理局, 2007; 2009）。伐採後の自然林復元を効果的に進めていくために、人工林の伐採幅、自然林からの距離、施業履歴、広葉樹保残の影響を比較することにより更新に与える影響を把握する必要がある。

一般的に、伐採後の森林の復元には、地形、種子散布、母樹からの距離、種子散布者、土壌、微気象、他種との競

争, 土地利用前歴, 施業履歴, 作業道の敷設などの影響が知られている (Yamagawa et al., 2006など). 針葉樹人工林の伐採後は, 前生樹の萌芽及び生残, 埋土種子及び伐採後に散布される種子によって更新する (Yamagawa et al., 2010) が, 散布種子からの更新は, 周辺の環境や母樹の分布に左右されることから短期間での確実性は低いとされる. また, 埋土種子を形成するのはほとんど先駆種であることから, 耐陰性の高い極相的な樹種から構成される森林への再生のためには, 埋土種子に期待するのは難しく, 伐採前から生育する前生樹の存在の有無が最も重要であるとされる (小谷, 2005; Sakai et al., 2006). 間伐による光環境の変化は, 下層植生の組成や構造に与える主要な要因の一つとして知られている (清野, 1990; Thomas et al., 1999). カラマツ人工林において天然更新の可能性を高めるために帯状伐採試験を行った研究によれば, 伐採幅10mでは伐採後2年目には, 以前下層に生育していた広葉樹の30%が枯死し, 伐採幅20mで地拵えを行っても低木や草本類により成長が阻害されることが報告されており, 光条件をよくすると, 目的とする樹種の天然更新が進まないこともあるため, 管理方法が課題となっている (森林総合研究所四国支所, 2012).

本研究では, スギとカラマツの人工林を伐採し効果的に自然林に復元する手法を把握するため, 伐採幅を変えた帯状伐採後の初期遷移群落の組成や構造の変化を調査し, 更にそこでの光条件を日照時間として評価した上で, 両者の関係を明らかにすることを目的とした. なお, 本研究で使用する用語として「間伐」は林小班内の伐採率が35%以内であり, 既に成立している立木の生育を促すのが目的であるのに対して, 「漸伐」は伐採率が70%以内であり, これから成立してくる稚樹の生育を促すことを目的とする伐採方法であり, どちらも列状に伐採しているが国有林施業上区別して用いているため分けて表現した.

## 方法

### 調査地の自然環境

赤谷プロジェクトエリアは, みなかみ町の南西部に位置し新潟県との県境にまたがる谷川連峰に属している. 標高は赤谷湖の縁の545mから仙ノ倉山2,026mまで, 標高差は約1,500mである. 気候は冬季多雪の日本海側気候に属し, 最深積雪は赤谷湖周辺で0.5m程度であるが, 県境付近では3m以上になる. 年間降水量は約1,800mmであり, 冬季の多雪環境を反映した冬季多雨型である. 川古温泉付近(697m)に設置された温度計によれば, 年平均気温は

10.6°C, 最低気温-11.5°C, 最高気温は31.9°Cとなっており, 10月~4月にかけて冬季の季節風の影響を受け最低気温が氷点下となる. 年間の積算温度から計算された川古温泉付近の温量指数(WI)は78.6°C月であり, 寒さの指数(CI)は-11.9°C月である. 年間の標高別の気温データの解析から標高約900mに位置するスギ人工林の間伐試験地は冷温帯, 標高約780mに位置するカラマツ人工林漸伐試験地は冷温帯下部に属すると考えられる (関東森林管理局, 2021).

赤谷プロジェクトエリアは, 新生代新第三紀中新世中期の赤谷層とよばれる泥岩からなり, 海底火山の噴出物で凝灰岩が混じることが知られている (新治村村史編さん委員会, 2000). また, 同じ新第三紀中新世中期にあたる三峰山層の凝灰岩・凝灰角礫岩も見られ, 小出俣川の上には谷川岳鮮新世深成岩体が見られる (新治村村史編さん委員会, 2000).

### 赤谷プロジェクト

「赤谷プロジェクト」は, 正式名称を三国山地/赤谷川・生物多様性復元計画といい, 対象地域である赤谷の森の生物多様性の復元と持続的な地域づくりを実現することを目的とした事業である. プロジェクトの対象地域である通称「赤谷の森」は, 利根川の源流部にあたる群馬県利根郡みなかみ町新治地区に位置する国有林(利根上流森林計画区相俣)で, その面積は約1万ヘクタールに及ぶ. 2004年に林野庁関東森林管理局・財団法人日本自然保護協会(現公益財団法人)・赤谷プロジェクト地域協議会(地元地域住民からなる任意組織)の3者による「三国山地/赤谷川・生物多様性復元計画推進のための協定」が締結された. このプロジェクトの基本方針は, 「生物多様性と生態系機能の向上・復元」「自然資源の管理・活用を通じた持続的な地域づくりへの貢献」「科学的な知見に基づく順応的管理」の3つが掲げられている(赤谷プロジェクト, 2020).

### 試験地のデザイン

試験地は, 東西方向に帯状に伐採を行ったスギ人工林の間伐試験地(相俣国有林244林班へ3小班)とカラマツ人工林の漸伐試験地(相俣国有林241林班つ小班)に設定した(図1). 標高の平均は前者が902.1m, 後者778.5m, 斜面方位は前者が平均でS49°E(130.4°), 後者はN54°W(306.4°)であり異なっていたが, 伐採方向は南東から北西方向と同じであった. 傾斜は前者が平均18.0°, 後者は20.6°であり, 共に緩斜面であった. 同様の斜面傾斜であることから斜面方位による日照時間の違いはないものとみなす. 伐採

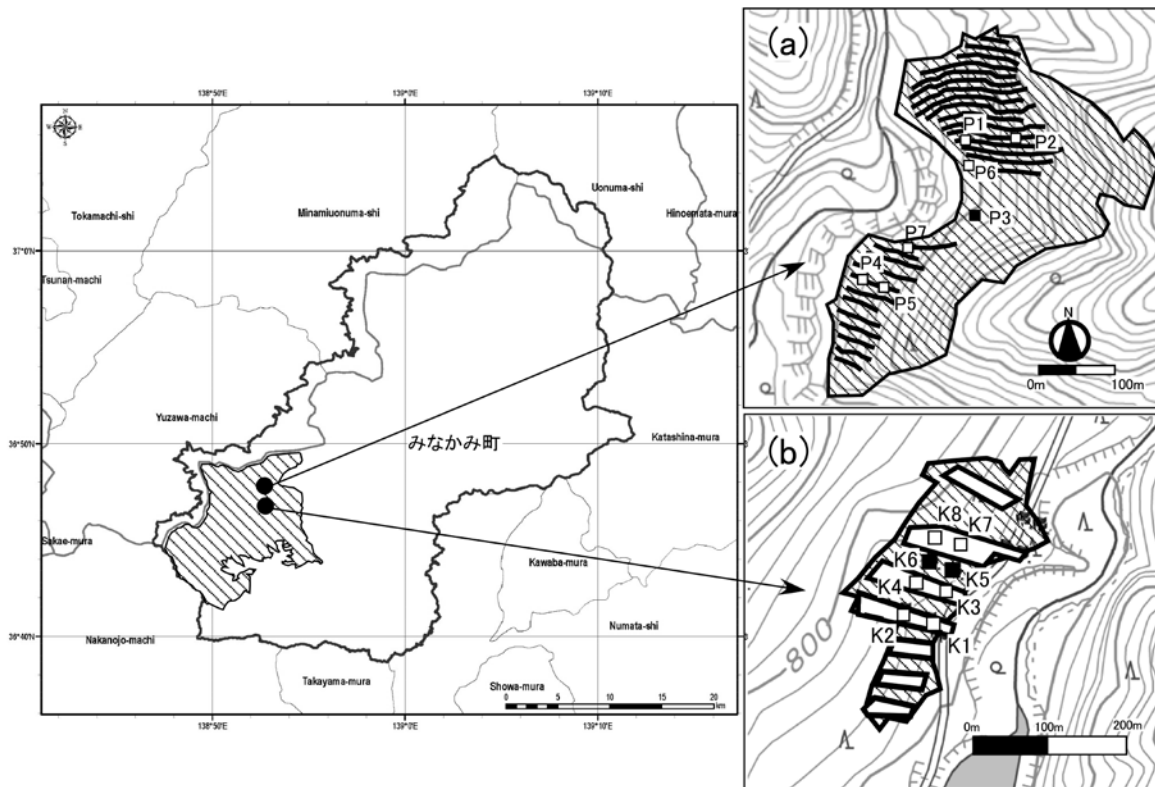


図1. みなかみ町の中の赤谷プロジェクト位置図と自然林復元試験地。

(a) スギ人工林間伐試験地 (241林班つ小班), (b) カラマツ人工林漸伐試験地 (244林班へ3小班) の位置および試験地配置。

木はすべて搬出した。スギ人工林の間伐試験地では、伐採木を残置した調査区があるが、本論文では除外している。

調査区の概要を表1に示す。スギ人工林の間伐試験地が設定された244林班へ3小班は面積が9.7haあり、伐採時28年生であり、樹高約15mであった。管理履歴によると、1975年に既存の自然林を皆伐して植林された1代目人工林である(関東森林管理局, 2008)。1977年に地拵えが行われ、スギ3年生実生苗が植付けされた。その後、1978年から1981年まで毎年下刈り、1985年に下刈り、1988年に除伐、1992年につる切りが行われた。林冠はスギによって閉鎖されていた。

カラマツ人工林の漸伐試験地が設定された241林班つ小班は、面積が2.94haあり、48年生、樹高30m。林小班の管理履歴は記録が無いので、最寄りのカラマツ林の管理履歴を参照すると、過去40年間は下刈りや除伐が行われていないことがわかる。土地利用履歴をみると、過去に草地として利用されていたが、その後1代目でスギ(49年生)、2代目でカラマツ(48年生)を植栽した。

スギ人工林の間伐試験地は、2伐4残(伐採幅4m)と3伐6残(伐採幅6m)の間伐を行った場所に2箇所ずつ調査区

を設置した。P1(4m×16m)とP2(4m×16m)は2伐4残で間伐した。P4(6m×15m)とP5(6m×17m)は3伐6残(伐採幅6m)で間伐した。P3(15m×15m)は対照区である。

カラマツ人工林の漸伐試験地は、伐採地に2箇所ずつの調査区(20m幅: K01・K02, 30m幅: K03・K04, 40m幅: K07・K08)を設け、カラマツ林内に対照区として2箇所(調査区: K05・K06)を設けた。調査区の面積は10m×10mで伐採地の中央部に設置した。

人工林の平均樹高はスギ人工林が20.0m、カラマツ人工林が28.4m、植林は前者が1代目、後者が2代目、自然林からの水平距離の平均は前者が60.0m、後者が118.8mである。

### 植生調査と解析

植生調査は10m×10mのコドラートを設定して実施した。スギ人工林の間伐試験地は伐採幅が4mと6mで不整形であるため、面積を100㎡に換算して解析に用いることとした。伐採後の初期段階からの構成種の組成や構造を明らかにするため、個体のサイズによって稚樹と成木に分けて記録した。稚樹は、高さ30cm以上で胸高直径(DBH)3cm未満の樹種を対象とし、5m×5mのサブコドラートを設置

表1. 試験区の概要.

調査区	林小班	樹種	施業区分	残材処理	伐採方法	履歴	調査面積 (㎡)	標高 (m)	傾斜 (°)	斜面方位 (°)	自然林からの距離(m)
P1	244へ3	スギ	列状間伐	搬出	2m帯状伐採 (2伐4残)	1代目	64	918.4	12	318	34
P2	244へ3	スギ	列状間伐	搬出	2m帯状伐採 (2伐4残)	1代目	64	922.5	30	290	91
P4	244へ3	スギ	列状間伐	搬出	6m帯状伐採 (3伐6残)	1代目	90	871.8	16	312	52
P5	244へ3	スギ	列状間伐	搬出	6m帯状伐採 (3伐6残)	1代目	102	890.4	25	307	73
P3	244へ3	スギ	対照区			1代目	225	907.4	20	305	50
K1	241つ	カラマツ	帯状漸伐	搬出	20m帯状伐採	2代目	100	771.5	23	114	110
K2	241つ	カラマツ	帯状漸伐	搬出	20m帯状伐採	2代目	100	777.1	18	114	132
K3	241つ	カラマツ	帯状漸伐	搬出	30m帯状伐採	2代目	100	774.9	25	114	113
K4	241つ	カラマツ	帯状漸伐	搬出	30m帯状伐採	2代目	100	780.8	12	114	134
K7	241つ	カラマツ	帯状漸伐	搬出	40m帯状伐採	2代目	100	777.6	15	144	108
K8	241つ	カラマツ	帯状漸伐	搬出	40m帯状伐採	2代目	100	784.2	13	160	138
K5	241つ	カラマツ	対照区			2代目	100	778.9	23	120	88
K6	241つ	カラマツ	対照区			2代目	100	783.1	15	163	127

し調査を行った。同一個体内の萌芽枝も稚樹長30cm以上のものをすべて対象とし、自然高 (cm) と傾斜長 (cm) を測定した。記録項目は、個体ID、樹種名、樹高 (cm)、被食の有無、生死を記録した。ササがある場合、ササの種名と被度・最大高・平均高を記録した。成木調査は、高さ30cm以上DBH3cm以上を対象とし、10m×10mのコドラート内で実施した。4つのサブコドラート (A～D) 毎に分けて記録した。調査対象は、DBH3cm以上 (胸高周囲長で9.3cm以上) の生立木とし、同一個体内の萌芽枝も含めDBH3cm以上のものをすべて計測した。記録項目は、個体ID、樹種名、胸高周囲長 (cm)、樹高 (m) を記録した。植生調査のデータは関東森林管理局 (2020; 2021) を用いた。

DBH (cm) と樹高 (m) の関係を表すのに拡張相対成長式、(2) を適用した (小川, 1969)。両変数の対数を取りDBHを独立変数とみなして非線形最小二乗法により定数を求めた。

$$H=ADh \quad (1)$$

$$1/H=1/ADh+H^* \quad (2)$$

ここで、定数A (m, cm<sup>-1</sup>)、h (無次元)、H\* (m) は回帰係数である。式 (2) はアロメトリック式 (1) から導かれたもので、相対成長は限界H\* (潜在樹高) までHとともに直線的に減少する。hの値は経験的に成熟林ではh=1と定義され (小川, 1969)、コナラ・クヌギ林ではh=2.4となるなど1より大きくなることが知られていることから2.4とした。そこで、各伐採区ごとに拡張相対成長式を当てはめ、上限樹高 (H\*) を推定した (h=1)。

優占種については、相対優占度 (RBA) から計算される優占種判定法を用いて判定した (Ohsawa, 1984)。種多様性は、相対優占度としてRBA (%) を用いてShannon-WienerのH'を用いた (Pielou, 1969)。均等度はPielouのJ'を用いた (Pielou, 1969)。伐採幅ごとの平均群落高は、一元配置分散分析を行い有意差検定を行った。

#### 積算日照時間の算出

ある場所の日照時間は、対象地域の緯度における季節ごとの太陽の軌道上の位置と角度から計算される (カシオ計算機 web-site)。南側に遮蔽物があった場合、遮蔽物の高さや距離によって被陰されるため日照時間は異なる。この関係を、南側の遮蔽物を人工林の植栽木の高さとし、そこからの距離を伐採幅に見立てて日照時間として算出した。日照時間は4月から9月の主な落葉広葉樹の着葉期に関して1日ごとに算出し積算した。伐採幅は4mと6m, 10m, 15m, 20m, 30m, 40m幅ごとに算出した。

## 結果

#### 伐採後の初期遷移群落の組成

伐採後15年目のスギ人工林の間伐試験地と伐採後14年目のカラマツ人工林の漸伐試験地の再生初期遷移群落の組成を示す (表2)。群落の組成はDBHが3cm以上の個体について算出した胸高断面積 (BA, cm<sup>2</sup>) を種ごとに合計して相対値にした相対優占度 (%) で示した。スギ人工林の間伐試験地では、最大樹高が3.0m (P4) から4.6m (P1) と

表2. スギ人工林とカラマツ人工林の伐採後の初期遷移群落の組成.

種名	スギ人工林の間伐試験地					カラマツ人工林の漸伐試験地									
	4m		6m		対照区	20m		30m		40m		対照区			
	P1	P2	P4	P5		K01	K02	K03	K04	K07	K08	K05	K06		
個体数(本/100㎡)	a	132.2	60.3	179.6	97.8	32.2	37	19	15	22	29	23	21	14	
幹数密度(本/100㎡)	b	133.9	71.8	179.6	114.0	32.2	38	23	73	49	53	79	27	19	
萌芽率(%)	(b-a)/b*100	1.3	16.1	0.0	14.2	0.0	2.6	17.4	79.5	55.1	45.3	70.9	22.2	26.3	
種数		8	6	5	7	4	13	6	4	4	7	7	10	11	
Max DBH (cm)		4.0	4.0	2.2	3.0	42.6	14.6	10.1	19.1	16.2	11.8	11.5	13.2	12.5	
MaxH (m)		4.6	3.3	3.0	3.4	20.0	8.0	12.0	15.0	16.0	15.0	14.0	35.0	25.0	
BA (㎡)/ha		0.8	0.7	0.0	0.8	52.4	113.3	7.6	26.4	20.8	16.3	21.6	63.1	49.9	
Evenness (J')		0.444	0.361	0.327	0.772	40.9	0.762	0.573	0.741	0.928	0.671	0.762	0.46	0.497	
Shannon's (H')		0.924	0.647	0.526	1.243	43.8	1.953	1.026	1.027	1.287	1.305	1.483	1.06	1.191	
種名	生活形	散布型 <sup>†1</sup>	幹数変動 <sup>†2</sup>	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	RBA(%)	
スギ	常緑針葉高木	風		87.0 *											
カラマツ	落葉針葉高木	風											68.3 *	68.6 *	
テツカエデ	落葉高木	風		50.6 *	12.8										
アズキナシ	落葉高木	周食		1.8											
アオダモ	落葉高木	風	100 以上	0.6	0.5			10.5		2.4					
ヤマモミジ	落葉高木	風	100 以上	0.2	6.0								1.7	0.5	
ミズキ	落葉高木	周食		0.1				0.8		0.3			1.1	3.8	
ブナ	落葉高木	貯食			80.4 *	86.3 *									
ウリハダカエデ	落葉高木	風			3.0			0.6	1.5						
ハクウンボク	落葉高木	周食				9.0									
マルバアオダモ	落葉高木	風				0.0									
キハダ	落葉高木	鳥					11.8								
オヒョウ	落葉高木	風					1.1								
クリ	落葉高木	貯食						36.6 *	0.1	28.8 *	43.9 *	6.7		11.8	
ウワミズザクラ	落葉高木	周食	100 以上					16.9 *	10.1	18.6 *	22.6 *	56.7 *	33.2 *		
アオハダ	落葉高木	周食						9.6 *							
ハルニレ	落葉高木	風						2.7						5.5	
カスミザクラ	落葉高木	周食						2.7						16.4	
ミズナラ	落葉高木	貯食						1.9			21.2 *		8.9	0.2	
アカシデ	落葉高木	風						1.0							
エゴノキ	落葉高木	周食	100 以上						68.1 *	52.4 *	20.6 *	7.3	15.8 *	0.6	
クマシデ	落葉高木	風							9.7					0.8	
ホオノキ	落葉高木	周食									12.9 *				
ヒトツバカエデ	落葉高木	風	100 以上									1.1	0.4	0.1	
ケヤキ	落葉高木	風	100 以上										10.4		
エゾエノキ	落葉高木	周食												1.6	
コハウチワカエデ	落葉高木	風												4.6	
キブシ	落葉小高木	周食		0.2											
リョウブ	落葉小高木	風	100 以上			1.6	3.6						2.1	0.5	
ヌルデ	落葉小高木	周食						3.3						1.2	
ヤマウルシ	落葉小高木	周食						14.5 *							
オオバアサガラ	落葉小高木	周食						3.1							
アブラチャン	落葉低木	周食	100 以上	44.4 *	0.1	8.9	55.2 *	0.0				4.7	3.6	0.8	
オオバクロモジ	落葉低木	周食		2.2	0.1	0.2	19.9 *								
タニウツギ	落葉低木	風					12.2								
ムラサキシキブ	落葉低木	周食					0.0								
総計				100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

\*優占種: (Ohsawa, 1984)

†1:生活形分類, 種子散布型は日本の野生植物木本 I, II (佐竹ほか編, 1989) によった.

†2:幹数変動: (最大値-最小値)/期間 100個体以上を示した.

なり群落高は低かった. カラマツ人工林の漸伐試験地では, 最大樹高が8.0m (K01) から16.0m (K04) であった. 2つの試験地に出現した木本種の種数は36種であり, 常緑針葉高木2種, 落葉高木25種, 落葉小高木4種, 落葉低木4種であった. スギ人工林の間伐試験地には18種, カラマツ人工林の漸伐試験地には23種が見られ, 共通種は6種であった.

スギ人工林の間伐試験地の優占種は, 落葉高木がテツカエデ (P1), ブナ (P2, P4), 落葉低木がアブラチャン (P1, P5), オオバクロモジ (P5) であった. カラマツ人工林の漸伐試験地の優占種は, 落葉高木がクリ (K01, K03, K04), ウワミズザクラ (K01, K03, K04, K07, K08), アオハダ (K01), ミズナラ (K07), エゴノキ (K02, K03, K04, K08), ホオノキ (K04), 落葉小高木がヌルデ (K01), オ

オバアサガラ (K08) であった. スギ人工林の間伐試験地とカラマツ人工林の漸伐試験地の群落組成は, 共通種が少なく優占種が異なっていた.

### 伐採後の幹数密度と樹高の変化

伐採後の初期遷移群落の構造変化について幹数密度 (DBH $\geq$ 3cm) と樹高に注目した. 幹数密度は萌芽幹も含めた幹数密度である. スギ人工林の間伐試験地では, 伐採後の幹数密度は, 緩やかに増加したが, カラマツ人工林の漸伐試験地では伐採後急激に増加し, その後, 急速に減少した (図2). スギ人工林の間伐試験地におけるP1 (4m伐採幅) では伐採後9年目で最大幹数密度174.6本/100㎡を示し, P2 (4m伐採幅) では伐採後6年目で142.3本/100㎡を示した. 同様に, P4 (6m伐採幅) では15年目で最大179.6本

/100m<sup>2</sup>, P5 (6m伐採幅)では9年目で最大98.9本/100m<sup>2</sup>であった。一方、カラマツ人工林の漸伐試験地におけるK01とK02 (20m伐採幅)では共に4年目に408本と414本/100m<sup>2</sup>となり、K03とK04 (30m伐採幅)も4年目に最大の153本と226本となった。K07 (40m伐採幅)では2年目に最大の179本、K08 (40m伐採幅)では5年目に163本となり、スギ人工林の間伐試験地に比べて幹数密度の最大値に達するまでの年数が速かった。カラマツ人工林の漸伐試験地において幹数が急激に増加したのは伐採後2年～5年目であった。伐採後にどちらの人工林においても幹数密度の増加が見られたが、伐採幅が大きければ幹数密度が高くなるわけではなかった。この間に幹数密度が各プロットで100 (本/100m<sup>2</sup>)を超えたのは、落葉高木種のアオダモ (223本)、ヤマモミジ (207本)、ウワミズザクラ (117本)、エゴノキ (172本)、ヒトツバカエデ (212本)、ケヤキ (106本)、落葉小高木のリュウブ (780本)、落葉低木のアブラチャン (161本)であった。

また、スギ人工林の間伐試験地では、最大幹数密度に到達した後に緩やかに減少あるいは変化のないまま15年目まで幹数密度が維持されたのに対して、カラマツ人工林の漸伐試験地では、最大幹数密度に到達した後9年目には急激に減少し、その後は緩やかに減少あるいは増加し14年目まで幹数密度が維持された。

伐採後に侵入した個体群や林床にあった前生樹は伐採による光環境の変化により群落の高さが増加した (図3)。スギ人工林の間伐試験地は、すべてのプロットで緩やかに群落の高さが増加し、最大高はP1における4.6m (伐採後15年目)であった。15年目における平均群落高は0.7m±0.3 (P4)～1.3m±0.9 (P1)の範囲で低いままになっていた。

一方、カラマツ人工林の漸伐試験地では、20m伐採幅のK01では最大高が7.0m (伐採後9年目)であり、30m伐採幅のK03とK04では最大高が15m (伐採後14年目)に達し、40m伐採幅でも14年目に最大の14.0mに達した。平均群落高は20m伐採幅で3.9±2.3m、30m伐採幅で4.8±5.5m、40m伐採幅で7.1m±4.6mだった。

### 伐採後のDBH—樹高関係

DBHと樹高の関係は群落の遷移系列の位置を示すとされることから伐採後の再生群落のDBHと樹高関係を拡張相対成長式に当てはめて検証した (図4)。相関係数 (R<sup>2</sup>)からこの初期遷移群落では $h=2.4$ で比較的よく説明できた。上限樹高 (H\*)はDBHを無限大にしたときの樹高のとりうる上限値を示している。4m伐採幅では実測値の最大樹高は4.6mでH\*が8.8m、6m伐採幅では実測値の最大樹高は3.4mでH\*が7.3mであった。20m伐採幅のうちK01では最大樹高は8.0mでH\*が10.8m、K02では最大樹高は12.0m、H\*が14.6mと同じ伐採幅でもプロットにより上限樹高は異なった。30m伐採幅のうちK03で最大樹高15.0m、H\*が24.0m、K04では16.0m、H\*が22.9m、40m伐採幅のうちK07では15.0m、H\*が21.9m、K08では14.0m、H\*が26.6mとなった。20mよりも小さい伐採幅においては、DBHに対して樹高成長が相対的に低く抑えられていた。

### 積算日照時間

伐採地の日照時間は季節ごとの太陽の南中高度に応じて変化し、広葉樹の着葉期間では6月に最も長くなり、4月や9月に短くなる。日ごとの日照時間を南側の植栽木による被陰を加味して積算した月別積算日照時間の推移を示す

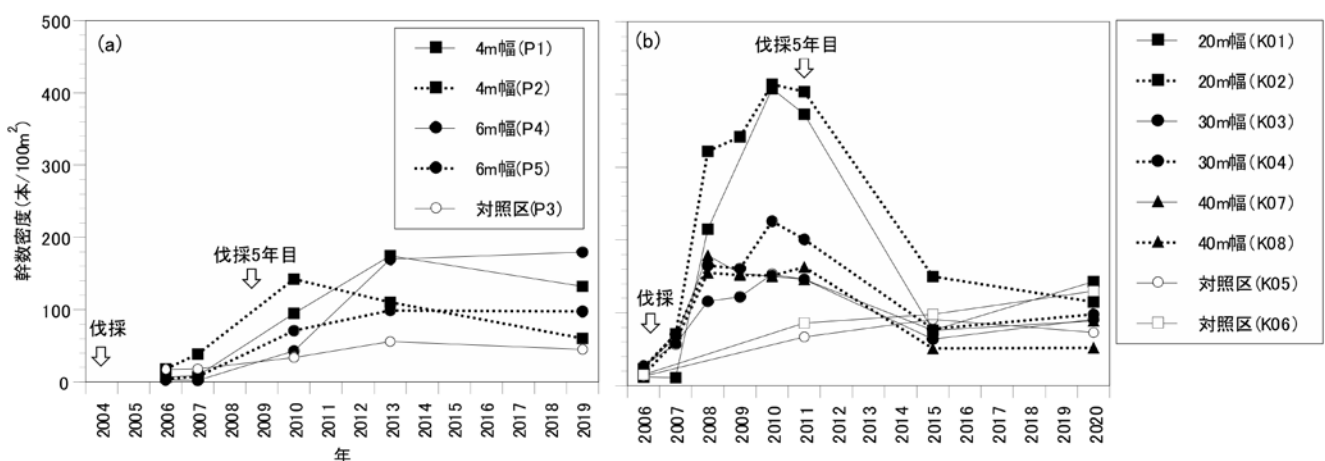


図2. スギ人工林の間伐試験地 (a) とカラマツ人工林の漸伐試験地 (b) の伐採後の幹数密度の変化。

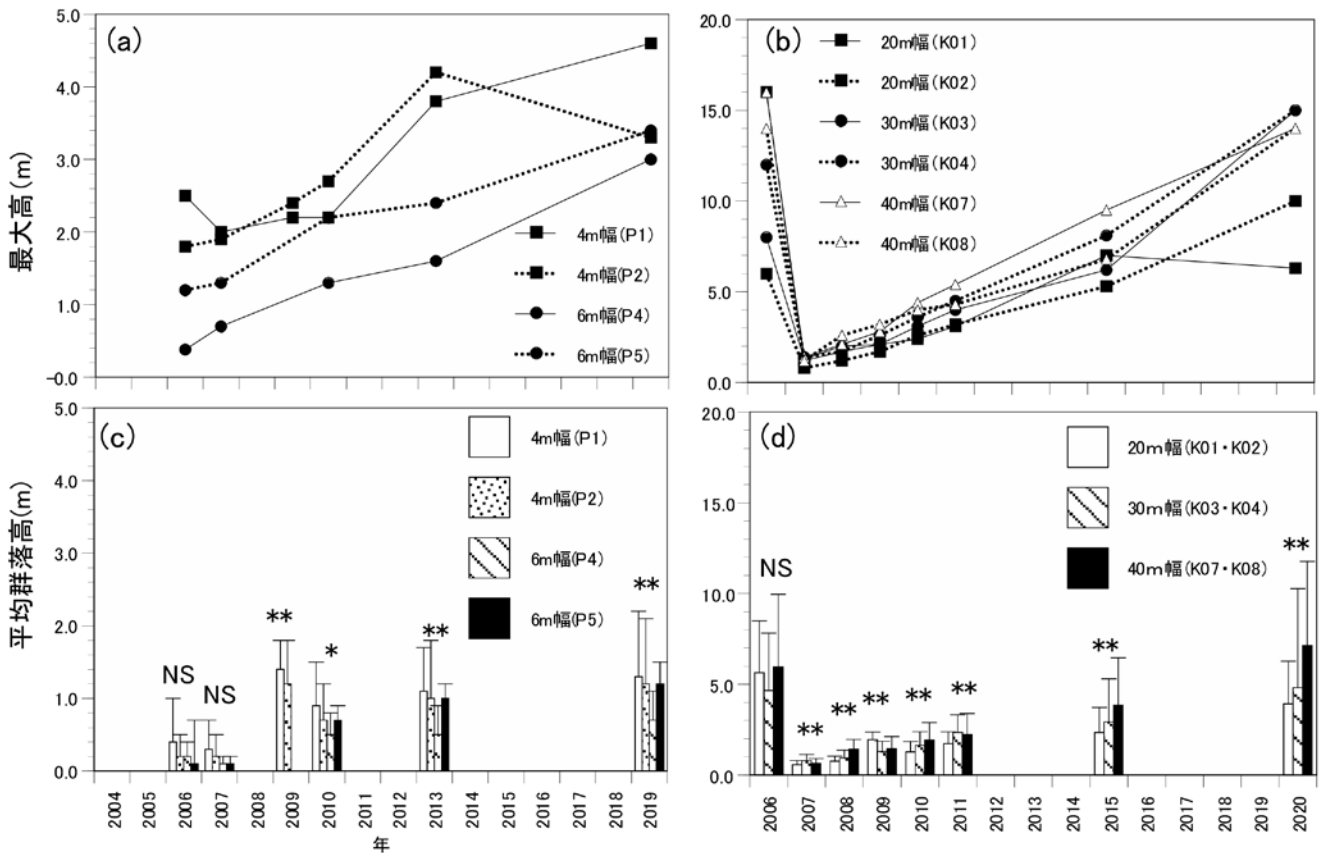


図3. スギ人工林の間伐試験地とカラマツ人工林の漸伐試験地の伐採後の群落高の変化。

スギ人工林の間伐試験地の最大高 (a) と平均群落高±標準偏差 (c)、カラマツ人工林の漸伐試験地の最大高 (b) と平均群落高±標準偏差 (d) (同じ伐採幅のプロットの平均) (ANOVA, \*\* $p<0.01$ , \* $p<0.05$ ).

(図5). 南側の植栽木の高さが20mと30mそれぞれについて南側の植栽木から4m, 6m, 10m, 15m, 20m, 30m, 40m離れた場所 (伐採幅に近似) の月別積算日照時間を示した. 南側の植栽木の高さが30mの場合, 植栽木からの距離が4mでは南側の植栽木による被陰の影響で積算日照時間が各月で短くなった (1037.3時間). 植栽木からの距離が10mでは, 4月 (162.5時間), 5月 (398.3時間), 8月 (248.5時間), 9月 (50.0時間) に積算日照時間が短くなった. 植栽木からの距離が15mでは, 4月 (305.0時間), 9月 (87.3時間) に積算日照時間が短くなった. 植栽木からの距離が20mでは, 9月 (214.3時間) に積算日照時間が短くなった. 植栽木からの距離が30mと40mでは, 積算日照時間の減少は見られなかった.

南側の植栽木の高さが20mの場合, 植栽木からの距離が4mでは南側の植栽木による被陰の影響で積算日照時間が各月で短くなった (1220.3時間). 植栽木からの距離が10mでは, 4月 (305.0時間), 9月 (87.3時間) に積算日照時間

が短くなった. 植栽木からの距離が20m, 30m, 40mでは積算日照時間の減少は見られなかった.

## 考察

### 伐採後の初期遷移群落への光制限の影響

人工林伐採後の再生群落への光条件の影響を検証するため伐採幅を変えた試験地を設定して群落の再生状況を種組成, 幹数密度, 樹高, DBH-樹高関係に注目して解析を行った. 光条件に関しては, 4月から9月の構成する落葉広葉樹の着葉期における日照時間に注目した. 伐採幅の違いが日照時間を反映するように東西方向 (実際には北西~南東) に带状伐採を行ったスギ人工林の間伐試験地 (伐採幅4mと6m) とカラマツ人工林の漸伐試験地 (20m, 30m, 40m) を並べて示したが, 自然林からの距離, 伐採履歴や他の環境条件 (標高, 斜面方位) が違うため, 带状伐採の方向は同じであるが伐採後に再生する構成種は異なっていた. す

なわち、スギ人工林の間伐試験地では、ブナやテツカエデ、アブラチャンを優占種とする冷温帯落葉広葉樹林の構成種群からなり、カラマツ人工林の漸伐試験地では、クリ、ウワミズザクラ、アオハダ、ミズナラ、エゴノキ、ホオノキ、ヌルデ、オオバアサガラを優占種とする冷温帯下部の構成種群からなっていた。そこで、光条件の違いによる比較を行う際には、主にカラマツ人工林の漸伐試験地における伐採幅と日照時間の対応関係に注目して解析を行い、さらに伐採幅を小さくした場合の初期遷移群落の反応をスギ人工林の間伐試験地において参照した。

伐採後、スギ人工林の間伐試験地とカラマツ人工林の漸伐試験地において幹数密度は増加したが、前者では増加した幹数密度が高止まりのまま維持され、後者では伐採後2～5年で急激に増加し、その後減少したため最終的には両者であり変わらない幹数密度となった。また、30mと40m伐採幅と比較して20m伐採幅において幹数密度が最大になったことから伐採幅が大きくなれば幹数密度が増加することはなかった。カラマツ人工林の漸伐試験地に限ってみれば、自然林からの距離は平均118mとあまり変化がなかったことや履歴が異なること、伐採幅が大きくなることでヌルデなど先駆種が多く侵入したわけではないことから伐採前の前生樹の種類や密度を反映している可能性がある（長池ほか、2010など）。一方、群落高に関しては、伐採後スギ人工林の間伐試験地とカラマツ人工林の漸伐試験地においていずれも経年経過とともに増加したが、平均群落高は伐採幅ごとに有意差があった。

そこで、伐採幅に応じた日照時間の違いを詳しくみていくことにした。日照時間の積算については対象とする緯度における日照時間を南側の遮蔽物、すなわち植栽木の高さに応じた日照時間の減少だけを仮定したため斜面傾斜、斜面方位、伐採地内の調査区的位置関係、透過光や散乱光、反射光など光特性や光の質を考慮していない。只木ほか（1994）によれば、長野県的美ヶ原におけるカラマツの開葉と落葉のフェノロジー（1980～1990年）は、標高800m付近では4月4日から展葉が始まり、5月4日に完全に開葉した。また、11月5日に黄葉が始まり、11月19日に完全に落葉したと記録されている。したがって、4月は透過光や散乱光、反射光が伐採地内に入るため、実際にはカラマツ漸伐試験地において積算日照時間は推移モデルより多くなる可能性がある。

4月から9月の着葉期の日照時間は6月の夏至に南中高度が最も高くなるため、日照時間が長くなり秋分の9月に最も短くなるため月別の日照時間をみると6月に最大値を示した（図5）。また、伐採幅を大きくして南側の植栽木による被陰の影響が及ばない場合には日照時間はその時期における最大のまま一定となった。例えば、南側に高さ20mの植栽木がある場合の5月～7月の日照時間は伐採幅が20m、30m、40mでも約440時間で変化がなかった（図5）。伐採幅を小さくしていくと9月に最初に減少が見られ、次に4月や8月に被陰の影響が見られた。ここでは、南側の植栽木が20mと30mの場合に分けて4月から9月までの半年間の積算日照時間の推移モデルを示した（図6）。南側に高さ30mの

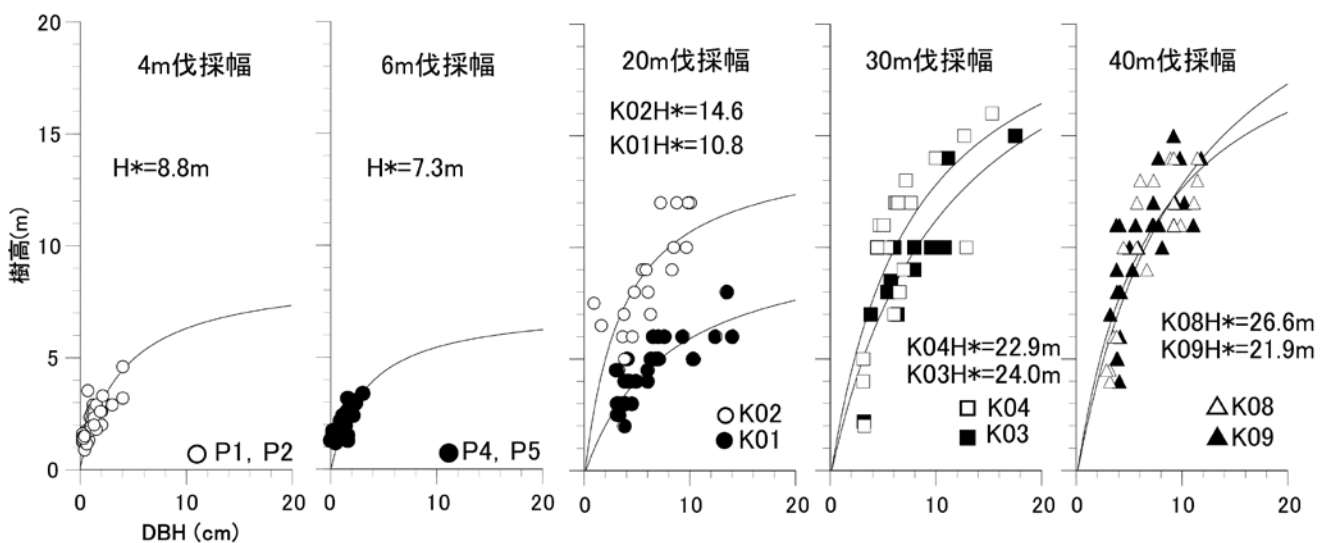


図4. 伐採幅ごとの胸高直径－樹高関係。



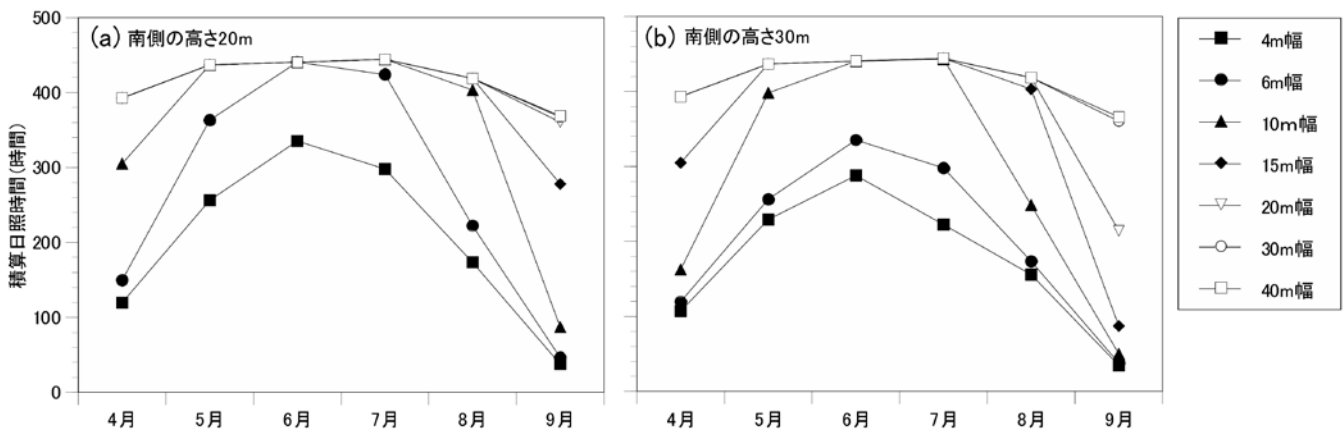


図5. 月別積算日照時間の推移 (4月～9月).

南側に高さ20m (a), 30m (b) の植栽木があった場合、植栽木から4m, 6m, 10m, 15m, 20m, 30m, 40m離れた場所の日照時間を示す。

植栽木がある場合、伐採幅が30mより小さくなると積算日照時間 (2500時間) が減少した。伐採幅の減少に伴い指数関数的に減少し、積算日照時間の半減は伐採幅5mであった。

カラマツ人工林の漸伐試験地における伐採幅ごとのDBH-樹高関係から伐採幅が30mでは上限樹高 ( $H^*$ ) は、22.9m～24.0mであり、伐採幅が40mでは21.9m～26.0mであり違いがなかったが、伐採幅が20mでは上限樹高が10.8mと14.6mとなり低くなった。20m伐採地で最大DBH (14.6cm) を示したのはクリであり、伐採前からの残存個体であると推察されたが、光制限により樹高が低く抑えられていた。参考値ではあるが、伐採幅が4mと6mであったスギ人工林の間伐試験地では、上限樹高が8.8m, 7.3mとさらに低く、環境条件の違いもあるものの伐採幅が5mで日照時間は半減することから光制限を受けていたと推察された。これらから、南側に高さ30mの植栽木がある場合、伐採幅30mから積算日照時間が減少するのにもない、伐採幅20mでは伐採幅30mや40mと比較して樹高が減少することが観察されたことから、南側にある植栽木の被陰による光制限を受けて樹高成長が抑制されたと考えられた。ただし、伐採幅20mにおいてプロットにより樹高成長が異なる要因は、カラマツが落葉樹であるため展葉期の透過光や散乱光、反射光の違いを反映したと推定される。

#### 光制限を活用した効果的な自然林復元

残存する植栽木の被陰による影響は、自然林と伐採地の

位置関係でも認められると予想された。赤谷プロジェクトエリアの試験地ごとに対象となる自然林と伐採地の配置を見てみると、特に南側に自然林が配置されていた場合、水平距離は近くても広葉樹の侵入や成長が抑制されるといった光条件の制約を受けると考えられる。皆伐試験地においても南側の自然林に隣接する部分は、他に比べヌルデやクサギなどの先駆種の侵入が見られず、前生樹の成長が悪いことが観察された (朱宮, 私信) ことから、他の試験地においても一般的にみられる現象であると推察された。ブナ科種子の散布は種子供給源となる母樹から30m程度までであるという報告 (Masaki et al., 2019) や赤谷プロジェクトエリアの皆伐地での観察からもミズナラの実生の散布範囲が母樹から30m程度であったこと (関東森林管理局, 2021) から、復元を進める際に伐採地と種子供給源とする自然林との位置関係は重要な要素といえる。

伐採幅を大きくした場合、ヌルデやヤマウルシなどの先駆種の侵入や前生樹のうちヤマモミジ、ウワミズザクラ、エゴノキ、ヒトツバカエデ、リョウブ、アブラチャンのように萌芽幹を多数のばし更新する種群により占有されてしまうため目的とする樹種の定着が遅れることも報告されている (森林総合研究所四国支所, 2012)。また、伐採幅が小さい場合、日照時間が極度に抑制され新規加入個体の侵入や樹高成長が抑制され、形状比 (樹高/DBH\*100) の大きな個体は生存率が低くなる可能性が指摘されている (森林総合研究所四国支所, 2012)。さらには、伐採幅が小さい場合数年ごとに間伐を繰り返すことになるため伐採費用

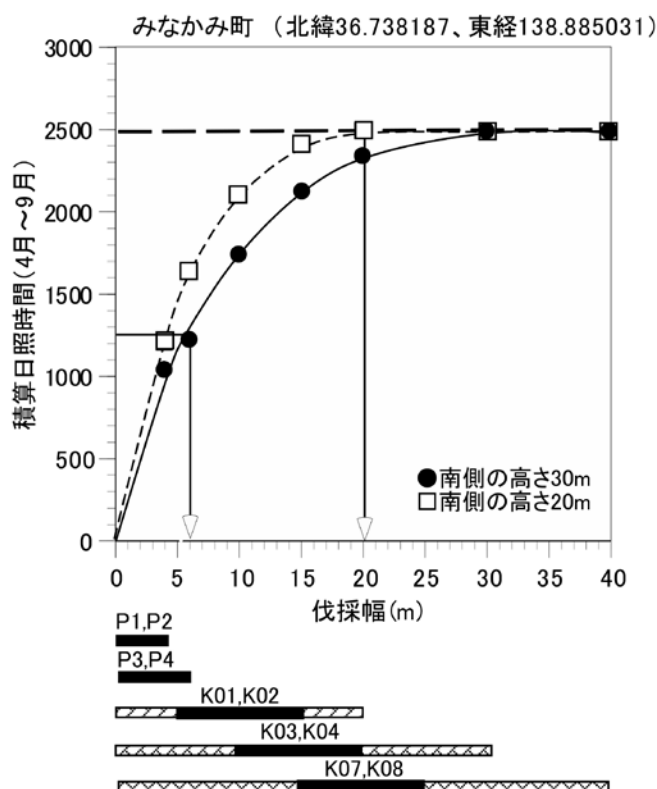


図6. 伐採幅ごとに推定される積算日照時間の推移モデル。

みなかみ町 (北緯36.738187, 東経138.885031) の緯度経度において、南側に高さ30m, 20mの人工林がある場合を想定して積算した。調査プロットの配置 (黒) と伐採地の関係を下記に示した。

がかかり、伐採に伴う作業道の敷設などインパクト (Yamagawa and Ito, 2006) も想定されるため、できるだけ大きく伐採する必要も想定される。赤谷プロジェクトの発足した2004年にはほとんど見られなかった二ホンジカの出現頻度が増加していることが報告されており、小出俣エリアでは、近年オスに加えてメスや仔が確認され周辺で繁殖している可能性も示唆されている (関東森林管理局, 2021; 中野, 2021)。今回の結果は、二ホンジカ低密度下における伐採後の初期遷移の動態を把握した記録として今後の自然林復元に向けた指標となりうる。

本研究から自然林を効果的に復元するために伐採幅を調整する場合、いずれも新規個体の侵入を誘導できるが、伐採地と自然林の位置関係、伐採後の初期遷移の特性 (先駆種の侵入や前生樹の萌芽再生) により初期遷移群落の組成や構造が異なる可能性がある。例えば光制限が想定される伐採幅で施業を行うことで林床への先駆種の侵入や前生樹の萌芽再生がある程度抑制され、目標とする樹種の成長を最大限に促すことができる可能性が示唆された。

## 謝辞

本稿を作成するにあたり赤谷プロジェクトの植生管理WGのメンバーの亀山章氏、田中浩氏、酒井武氏、長池卓男氏、西村尚之氏に助言をいただいた。関東森林管理局、利根沼田森林管理署、赤谷森林ふれあい推進センターには現地調査を進めるにあたりお世話になった。15年以上にわたりモニタリング調査を継続した赤谷プロジェクト関係者の方々、日本自然保護協会の出島誠一氏と藤田卓氏の貢献がなくては継続は困難であった。現地調査に際しては阿部利夫氏、松井睦子氏、種の同定の際には大森威宏氏、谷川岳エコツーリズムガイドの方々、みなかみ町、GISデータの作成に際しては、遠藤慧氏、データ入力については富永千智氏、二ホンジカの出現状況については中野恵氏にお世話になった。

## 引用文献

- 赤谷プロジェクト (2020) : 赤谷の森・基本構想2020. 林野庁関東森林管理局, 公益財団法人日本自然保護協会, 赤谷プロジェクト地域協議会, 48pp.
- Igarashi, T. and Kiyono, Y. (2008) : The potential of hinoki (*Chamaesparis obtuse* [Sieb. et Zucc.] Endlicher) plantation forests for the restoration of the original plant community in Japan. *Forest Ecology and Management*, 255 : 83-192.
- 関東森林管理局 (2007) : 平成18年度自然再生推進モデル事業報告書. 業務受託財団法人日本自然保護協会, 関東森林管理局, 324pp.
- 関東森林管理局 (2008) : 平成19年度自然再生推進モデル事業報告書. 業務受託財団法人日本自然保護協会, 関東森林管理局, 277pp.
- 関東森林管理局 (2009) : 平成20年度自然再生推進モデル事業報告書. 業務受託財団法人日本自然保護協会, 関東森林管理局, 348pp.
- 関東森林管理局 (2020) : 平成31年度三国山地/赤谷川/生物多様性復元計画 (赤谷プロジェクト) 推進事業報告書. 業務受託財団法人日本自然保護協会, 関東森林管理局, 300pp.
- 関東森林管理局 (2021) : 令和2年度三国山地/赤谷川/生物多様性復元計画 (赤谷プロジェクト) 推進事業報告書. 業務受託財団法人日本自然保護協会, 関東森林管理局.
- カシオ計算機 : 日照計算 (経緯度選択). <https://keisan.casio.jp/exec/system/1176871247>, (閲覧日2021-11-20).
- 清野嘉之 (1990) : ヒノキ人工林における下層植物群落の動態と制御に関する研究. 森林総合研究所研究報告, 359 : 1-122.
- 小谷二郎 (2005) : スギ人工林の伐採跡地の更新に対する埋土種子由来の樹木群集の役割. 日本森林学会大会発表データベース, 116 : 490.
- Masaki, T., Nakashizuka, T., Niiyama, K., Tanaka, H., Iida, S. m Bullock, J. M. and Naoe, S. (2019) : Impact of the spatial uncertainty of seed dispersal on tree colonization dynamics in a temperate forest. *Oikos*, 10.1111/06236.
- 長池卓男 (2000) : 人工林生態系における植物多様性. 日本林学会誌, 82 : 407-416.
- 長池卓男・藤田 卓・出島誠一・茅野恒秀・松崎誠二・高野瀬洋一郎・高橋一秋 (2010) : スギ人工林に天然更新した広葉樹の種組成に保

- 残帯からの距離と土地利用前歴が及ぼす影響. 公益財団法人日本自然保護協会(編)「三国山地/赤谷川・生物多様性復元計画(赤谷プロジェクト)推進事業平成21年度報告書, 関東森林管理局, p.74-101.
- 中野恵(2021): センサーカメラは見た! みなかみBR・赤谷の森の哺乳類相調査報告. 自然保護, (582): 26-27.
- 新治村村史編さん委員会(2000): 新治村史通史編. 第2節地質. みなかみ町, 群馬, p.897-910.
- 小川房人(1969): 樹高・胸高直径関係による林型区分の試み. *JIBP-PT-F*, 43: 3-17.
- Ohsawa, M. (1984): Differentiation zones and species strategies in the subalpine region of Mt. Fuji. *Vegetatio*, 57: 15-52.
- Pielou, E. C. (1969): An introduction to Mathematical Ecology. Wiley-Interscience, New York, 286pp.
- Sakai, A., Hirayama, T., Oshioka, S. and Hirata, Y. (2006): Effects of elevation and postharvest disturbance on the composition of vegetation established after the clear-cut harvest of conifer plantations in southern Shikoku, Japan. *Journal of Forest Research*, 11: 253-265.
- 佐竹義輔・原 寛・亘理俊次・富成忠雄(編, 1989): 日本の野生植物 木本 I, II, 平凡社, 東京, 321+305pp.
- 森林総合研究所四国支所(2012): 広葉樹林化ハンドブック2012—人工林を広葉樹林へと誘導するために—. 森林総合研究所四国支所, 高知, 48pp.
- 只木良也・北村秀夫・蟹江清丞・佐野弘美・重松明子・大津慎一(1994) 標高に伴うカラマツの葉の開葉と落葉の挙動. 日本生態学会誌, 44: 305-314.
- Thomas, S. C., Halpern, C. B., Falk, D. A., Liguori, D. A. and Austin, K. A. (1999): Plant diversity in managed forests: understory responses to thinning and fertilization. *Ecological Application*, 9: 864-879.
- Yamagawa, H. and Ito, S. (2006): The role of different sources of tree regeneration in the initial stages of natural forest recovery after logging of conifer plantation in a warm-temperate region. *Journal of Forest Research*, 11: 455-460.
- Yamagawa, H., Ito, S. and Nakao, T. (2007): Edge effects from a natural evergreen broadleaved forest patch on advanced regeneration and natural forest recovery after clear-cutting of a sugi (*Cryptomeria japonica*) plantation. 森林立地学会誌 森林立地, 49(2): 111-122.
- Yamagawa, H., Ito, S. and Nakao, T. (2010): Restoration of semi-natural forest after clearcutting of conifer plantations in Japan. *Landscape and Ecological Engineering*, 6: 109-117.

