

強度間伐地における森林管理手法の開発（第1報）

2014年度～2018年度

江口則和

要旨

低コスト林業のために広まりつつある強度間伐が、林内環境や残存木の生理活性等に与える影響を明らかにし、強度間伐地における適切な森林管理手法を開発することを目的とした。あいち森と緑づくり税を活用した人工林の森林整備事業31箇所を実態調査を行ったところ、強度間伐による光環境の改善効果によって、林床植生の植被率が間伐後3年目以降著しく高くなる傾向が認められた。一方、強度間伐が原因で、ニホンジカ被害や風倒被害が増加するといったことは認められなかった。また、新城市上吉田に設置した強度間伐モニタリング調査地において、残存木（ヒノキ）の生理活性を調べたところ、強度間伐による光環境改善の結果、樹木全体で受光できるようになり、生枝位置においても炭素固定能力が高まることが認められた。強度間伐後2年目までは顕著な成長促進効果は認められなかったが、強度間伐によって樹木全体の炭素固定量が増加すると考えられるため、強度間伐後3年目以降に成長促進や樹勢の向上の可能性が期待できる。今後調査を継続することにより、強度間伐地における適切な森林管理手法を解明する。

I はじめに

林業経営コストの低減などを目的として、国内各地で強度間伐施業を選択する森林が増加している(島田2006、小谷2009、山下ら2014)。強度間伐を実施すれば、林床の光環境が改善し(山下ら2014)、広葉樹が侵入しやすくなると言われるため(島田2006、小谷2009、山下ら2014)、針広混交林化や複層林化にとって効果的であると考えられる。一方、強度間伐施業にはデメリットも考えられる。まず、残存木は形状比が高いまま強風にさらされることになるため、気象害の増加等が懸念される(山下ら2014)。また、下層植生の回復によるニホンジカ(以下、シカ)の食害増加など、新たな森林被害も懸念される(島田・野々田2009、中西・小林2012、山下ら2014)。

現在愛知県でも、あいち森と緑づくり税を活用した人工林の森林整備事業(あいち森と緑づくり事業)によって、強度間伐に取り組む森林が増加している(中西・小林2012、石田ら2014)。上

述のとおり、強度間伐施業には長所と短所が混在しているため、強度間伐を実施した施業地で健全で持続的な森林を継続するためにも、強度間伐の長所を伸ばし短所を抑えるための施業技術を開発する必要がある。

そこで本研究では、強度間伐による人工林への影響をメリットとデメリットの両面から明らかにするとともに、強度間伐地における適切な森林管理手法を開発することを目的とする。

II 方法

1. 伐採効果のモニタリング

強度間伐施業地の実態を明らかにするため、強度間伐(原則、本数間伐率40%以上)を行った人工林整備事業施業地(以下、事業地)31か所(表-1、図-1)で、立地環境と植生の調査を行った。調査は各事業地で数年毎に1~2回繰り返した。事業による環境変化について、光環境の指標となる開空率を全天空写真により調べた。植生について、

林床の植被率を目視で調べた。

整備の効果は、一般化線形混合モデル(GLMM)

表-1 調査地詳細

No	整備年	事業地	主要樹種	標高m	土壌型
1	2009	設楽町津具	スギ	886	BD
2	2009	東栄町振草	スギ	500	BD
3	2009	新城市宮島	ヒノキ	373	BD(d)
4	2009	新城市宮島	スギ	220	BD
5	2009	新城市上吉田	ヒノキ	430	BD(d)
6	2009	新城市中島	ヒノキ	380	BD(d)
7	2010	岡崎市淀野	ヒノキ	232	BD(d)
8	2010	豊田市大多賀	ヒノキ	930	BB
9	2010	豊田市大多賀	ヒノキ	752	BD(d)
10	2010	豊田市大多賀	ヒノキ	696	BD(d)
11	2010	豊根村坂宇場	スギ	740	BD
12	2010	豊根村坂宇場	スギ	602	BD
13	2010	新城市中島	ヒノキ	425	BC
14	2011	岡崎市井沢町	ヒノキ	340	BD(d)
15	2011	豊田市花沢町	スギ	430	BD
16	2011	設楽町津具	スギ	742	BD
17	2012	豊根村上黒川	ヒノキ	500	BC
18	2012	新城市作手保永	スギ	410	BD
19	2013	豊田市花沢町	ヒノキ	430	BD
20	2014	岡崎市桜形町	スギ	210	BD
21	2014	豊根村上黒川	ヒノキ	500	BD(d)
22	2014	新城市作手保永	ヒノキ	380	BD(d)
23	2014	新城市乗本	スギ	95	BD(d)
24	2015	岡崎市井沢町	ヒノキ	340	BD(d)
25	2015	岡崎市桜形町	スギ	150	BD
26	2015	豊田市花沢町	ヒノキ	420	BD
27	2015	豊田市花沢町	ヒノキ	420	BD
28	2015	新城市下吉田	スギ	140	BD(d)
29	2015	新城市下吉田	スギ	130	BD(d)
30	2015	新城市海老	スギ	256	BD
31	2015	新城市富保	スギ	247	BD(d)



図-1 調査地位置図

●は事業地、★はモニタリング調査地を示す。

を作成し、Wald 検定を行うことで評価した。応答変数は「開空率」、「植被率」とし、分布はガンマ分布(リンク関数は log)を仮定した。説明変数について、固定効果は「整備後の年数」、ランダム効果は「事業地」とした。解析には統計解析ソフト R (R project 2014 ver. 3.1.0) 及び パッケージ lme4(ver. 1.17) と car(ver.2.0-25)を用いた。

2. 残存木の生理特性の評価

新城市上吉田の森林・林業技術センター試験林のヒノキ林(北緯 34.87°、東経 137.61°、標高 430m、土壌型 BC)において、モニタリング調査地を設けた(図-1)。対象としたヒノキ林は、平均樹齢 48 年生、平均樹高 15.7m、平均生枝下高 8.9m、平均胸高直径(DBH)23.5cm であった。強度間伐区と無間伐区をそれぞれ 0.1ha ずつ設け、強度間伐区は 2014 年 1 月に胸高断面積率 45%で間伐を実施した。

立地環境として光環境の測定を行った。間伐直前と、間伐後毎年 5 月の曇天時に開空率を調べた。また、強度間伐区と無間伐区にそれぞれ設置した観測タワー(約 20m)によって、林冠上部、生枝下位置、胸高位置の照度を調べた。照度の測定には、照度ロガー(HOBO ペンダントロガー、Onset、USA)を 1 つずつ用いた。照度の調査は 2016 年 6 月~8 月とし、1 時間ごとにデータを収集した。得られたデータから、直射日光照射時(40,000Lux 以上)及び夜間時(0Lux)のデータを除いて解析を行った。

残存木の生理特性を調べるために、炭素固定特性、水分生理特性、成長特性を調べた。炭素固定特性及び水分生理特性について、2016 年 8 月~9 月に、光合成蒸散測定装置(Li-6400 Li-Cor, NE)により測定した。強度間伐区、無間伐区それぞれにおいて、林冠上部及び生枝下位置それぞれ 5 シュートを対象とした。光-光合成曲線(光合成有効放射束密度を 0、50、100、150、300、600、1200、1500µmol

$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ と変化させたときの光合成速度、測定時の CO_2 濃度は 400ppm、温度は 25°C 、大気飽差は $1\text{-}2\text{g m}^{-3}$ 及び A/C_i 曲線 (CO_2 濃度を 0、50、100、200、400、800、1200、1500 ppm と変化させたときの光合成速度、測定時の光合成有効放射束密度は $1500\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、温度は 25°C 、大気飽差は $1\text{-}2\text{g m}^{-3}$) を作成し、光利用能力の指標となる「量子収率」及び「暗呼吸速度」、 CO_2 固定能力の指標となる「光飽和時の最大光合成速度 (P_{max})」、「最大カルボキシル化速度 (V_{cmax})」、「最大電子伝達速度 (J_{max})」、「光及び CO_2 飽和時の最大光合成速度 (A_{max})」、水利用特性の指標となる「気孔コンダクタンス」、「蒸散速度」(これらは P_{max} と同時に測定) (Farquhar *et al.* 1980、Thornley and Johnson 1990、Lambers *et al.* 2008) を算出した。また成長特性について、2014～2016年の5月にモニタリング調査地における全ヒノキの DBH を測定した。これらの DBH を用いて、処理後1年目及び2年目における肥大成長の相対成長率を算出した。

強度間伐による光環境への影響は、GLMM を作成し、Wald 検定を行うことで評価した。開空率について、ガンマ分布 (リンク関数は log) を仮定し、説明変数の固定効果は「整備有無 (強度間伐、無間伐)」、ランダム効果は「経過年」とした。照度について、ガンマ分布 (リンク関数は log) を仮定し、説明変数の固定効果は「整備有無 (強度間伐、無間伐)」及び「測定位置 (林冠上部、生枝下位置、胸高位置)」、ランダム効果は「調査月」とした。強度間伐による炭素固定特性及び水分生理特性への影響は、一般化線形モデル (GLM) を作成し、尤度比検定を行うことで評価した。炭素固定特性及び水分生理特性のすべてのパラメータについて、ガンマ分布 (リンク関数は log) を仮定し、説明変数の固定効果は「整備有無 (強度間伐、無間伐)」及び「測定位置 (林冠上部、生枝下位置)」とした。強度間伐による成長特性への影響は、GLMM を作成し、Wald 検定を行うことで評価した。

相対成長率について、ガンマ分布 (リンク関数は log) を仮定し、説明変数の固定効果は「整備有無 (強度間伐、無間伐)」、ランダム効果は「経過年」とした。解析には統計解析ソフト R 及びパッケージ lme4 と car を用いた。

3. 森林被害の解明

強度間伐に伴う森林被害への影響を明らかにするため、事業地 31 か所 (表-1、図-1) の高木種 50 本で、シカによる森林被害 (植生被害、樹皮剥ぎ被害) の有無と、風倒木の有無を調べた。

整備の効果は、GLMM を作成し、Wald 検定を行うことで評価した。これらの森林被害パラメータについて、分布は二項分布 (リンク関数は logit) を仮定した。説明変数について、固定効果は「整備の有無」、ランダム効果は「事業地」とした。解析には統計解析ソフト R 及びパッケージ lme4 と car を用いた。

III 結果

1. 伐採効果のモニタリング

事業地における開空率の結果を図-2 に示す。整備を行うことで開空率が増加し ($P<0.001$)、その増加は整備後4年程度持続した。植被率の結果を図-3 に示す。整備後2年目までは顕著な変化は認められなかったものの、3年目以降著しく増加した ($P<0.001$)。植被率の増加は整備7年後も維持された。

2. 残存木の生理特性の評価

モニタリング調査地の開空率の変化を図-4 に示す。強度間伐によって開空率が顕著に増加した ($P<0.001$)。経過年とともに開空率は減少傾向にあるものの、処理2年目でも開空率の増加は維持された。

モニタリング調査地の照度を図-5 に示す。無間伐区では生枝下位置ですでに著しい照度の低下が認められたが、強度間伐区では胸高位置でも照度の著しい低下は認められなかった (整備有無:

$P < 0.001$ 、測定位置: $P < 0.001$)

強度間伐による残存木の炭素固定特性及び水分生理特性への影響結果を表-2 に示す。強度間伐によって有意な変化が認められたものは、炭素固定特性(暗呼吸速度と P_{max})であった。暗呼吸速度と P_{max} について、林冠上部では強度間伐区と無間伐区とで違いは小さかったが、生枝下位置では強度間伐区のほうが大きかった。一方、強度間伐

に伴う水分生理特性への影響は顕著ではなかった。

強度間伐による残存木の成長特性への影響を図-6 に示す。間伐後2年間は、強度間伐によるDBHの成長促進効果は顕著ではなかった ($P=0.34$)。

3. 森林被害の解明

強度間伐による森林被害への影響を表-3 に示す。強度間伐によるシカによる被害、風倒被害への影響は小さかった。

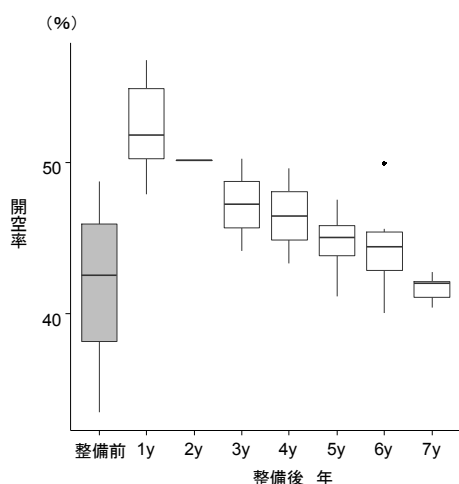


図-2 事業地における開空率

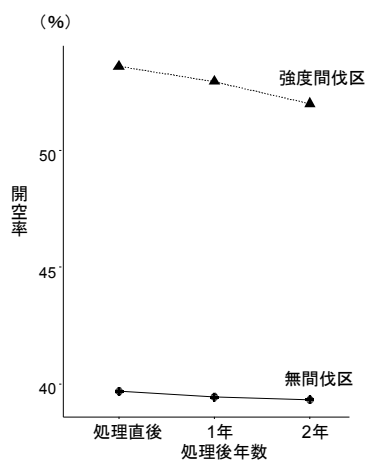


図-4 モニタリング調査地における開空率

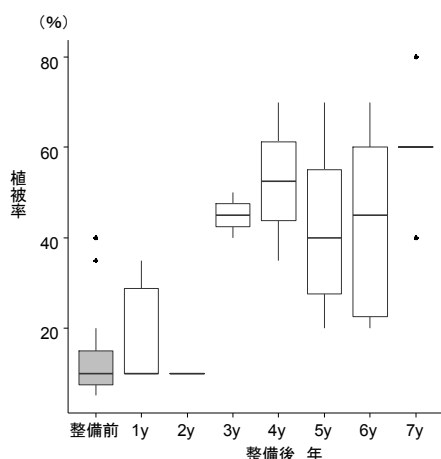


図-3 事業地における林床植物の植被率

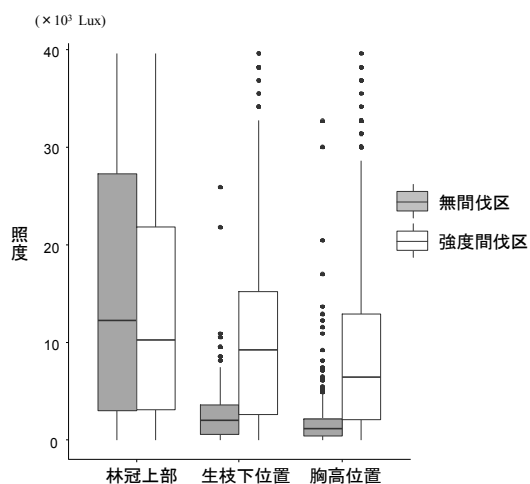


図-5 モニタリング調査地における照度

表-2 モニタリング調査地における残存木の炭素固定特性及び水分生理特性

値は中央値±四分位偏差、n=5

パラメータ	林冠上部		生枝下位置		P値	
	無間伐区	強度間伐区	無間伐区	強度間伐区	葉位置	間伐の有無
量子収率 (mol CO ₂ mol ⁻¹ quanta)	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.99	0.35
暗呼吸速度 (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	0.71 ± 0.41	0.65 ± 0.52	0.21 ± 0.14	0.52 ± 0.19	<0.001	<0.01
P _{max} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	3.52 ± 0.9	3.65 ± 2.83	2.53 ± 1.65	3.54 ± 1.29	<0.05	<0.05
V _{cmax} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	26.79 ± 1.41	24.89 ± 1.68	27.41 ± 6.55	27.41 ± 4.46	0.54	0.99
J _{max} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	145.58 ± 10.91	134.76 ± 8.31	128.15 ± 38.98	146.06 ± 42.99	0.64	0.69
A _{max} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	11.08 ± 1.69	9.19 ± 1.55	6.42 ± 5.42	10.88 ± 6.6	0.55	0.41
気孔コンダクタンス (mol m ⁻² s ⁻¹)	0.05 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.04	0.06 ± 0.04	0.63	0.34
蒸散速度 (mmol m ⁻² s ⁻¹)	0.71 ± 0.28	0.78 ± 0.07	0.68 ± 0.53	0.78 ± 0.42	0.70	0.41

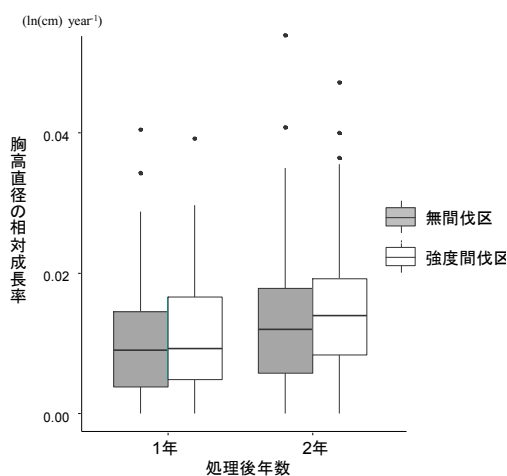


図-6 モニタリング調査地における残存木の成長特性

無間伐区：n=147、強度間伐区：n=79

表-3 事業地における森林被害箇所率

森林被害パラメータ	整備前	整備後	P値
シカ植生被害箇所率(%)	86.67	65.38	0.97
シカ樹皮剥ぎ箇所率(%)	6.67	15.38	0.80
風倒被害箇所率(%)	20.00	19.23	0.90

IV 考察

まず、本研究で認められた強度間伐によるメリットについて考察する。一般的に、強度間伐によって光環境が改善するため、林床の植物種が増え、残存木の成長促進効果があることが知られている (D' Alessandro *et al.* 2006、山下ら 2014)。しか

しながら、林冠は時間とともに閉鎖するため(山下ら 2014)、強度間伐による光改善効果がどの程度影響を与え続けるのかについては不明な点が多い。本研究の結果、強度間伐直後に著しい光環境改善効果が起こり、その効果は林冠の閉鎖とともに年々小さくなったものの (図-2、4)、伐採後 4 年程度は効果が持続するということが認められた (図-2)。光環境の改善に伴う植生への影響は、間伐時から少し時間をあけて認められるようになり、林床の被植率は間伐後 7 年目でも高い状態を維持していた。本事業地ではササ等単一種による林床の被覆はほとんど起こっていなかった点、事業地では植被率の増加と合わせて下層の植物種数が増加する傾向がある点から(中西・小林 2012、石田ら 2014)、強度間伐によって林内の植物種多様性も増加していると考えられた。強度間伐を実施した森林では、林冠閉鎖後も林床植生への影響が継続するといえた。

次に、強度間伐での残存木へのメリットに着目したところ、生枝下位置において、強度間伐による暗呼吸速度及び P_{max} の増加が認められた (表-2)。これらの変化は、一般的に知られている葉の強光環境への順化と同様であった (Taylor 1976、Zanngh *et al.* 1995、Pugnaire and Valladares 2007)。強度間伐によって、林床と同程度の明るさだった

生枝下位置に光が差し込むようになったため(図-5)、生枝下位置の葉が強光環境に順化したと考えられた。強光環境へ順化すると、強光環境下での炭素固定能力が高まるため(Thornley and Johnson 1990)、強度間伐で林冠下層まで光が差し込むことにより、樹木全体としての炭素固定量が増加すると考えられる。すなわち、強度間伐によって成長や樹勢の向上が期待できる。しかしながら、モニタリング試験地では、間伐後2年目までは顕著な成長増加は認められなかった(図-6)。強度間伐による成長促進効果は間伐数年後から認められるという報告もあるため(山下ら2014)、今後、成長増加の可能性が考えられる。

強度間伐によるデメリットとして、林床植生の増加に伴うシカ食害の増加(島田・野々田2009、中西・小林2012、山下ら2014)、風通しがよくなることによる風倒木の増加(山下ら2014)が考えられる。しかしながら、本研究では強度間伐に伴うこれら被害の増加は認められなかった(表-3)。まずシカ害について、本県でのシカ密度はおおよそ平均12頭km²(江口ら(2015)を参考に算出)であり、他県におけるシカ激害地域と比較して少ない。すなわち、シカの食糧となる植物が強度間伐地以外にも十分あるため、強度間伐による植生増加の影響が小さかったのではないかと考えられた。次に風倒被害について、被害は適正密度の植栽を実施したところに比べ、過密植栽をした地域で多いという報告がある(山下ら2014)。本県での植栽密度は原則3,000本ha⁻¹以下であるため、風倒被害が生じやすいほどの過密植栽でなかったことが原因と考えられた。以上の点から、愛知県において強度間伐を実施しても、森林被害が増加する可能性は小さいと考えられた。

以上のとおり、愛知県における強度間伐は、現状ではメリットが多くデメリットが少ないことが認められた。しかしながら、強度間伐による光環

境の改善効果は4年程度であり、その後は林冠閉鎖することが予想される(図-2)。そのため、本研究で認められた強度間伐の効果が、その後どうなるかは不明である。今後は本調査を継続し、強度間伐の効果を長期モニタリングすることで、強度間伐地における適切な森林管理手法を解明する。

引用文献

- D'Alessandro CM, Saracino A, Borghetti M (2006) Thinning affects water use efficiency of hardwood saplings naturally recruited in a *Pinus radiata* D. Don plantation. *Forest Ecology and Management* **222**:116–122.
- 江口則和・石田朗・山下昇・高橋啓・鈴木千秋・岡田良平・佐藤亮介(2015)愛知県東部地域におけるニホンジカの個体数指標の推定. *中部森林研究* **63**:21–26.
- Farquhar GD, von Caemmerer S, Berry JA (1980) A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* **149**:78–90
- 石田朗・豊嶋勲・中西敦史・小林元男(2014)森林の強度伐採による効果のモニタリング(第2報). *愛知県森林・林業技術センター報告* **51**:1–7.
- 小谷二郎(2009)過密な針葉樹人工林に対する強度間伐が広葉樹の更新に与える影響-間伐後3年間の実生の生残と成長-. *石川県林業試験場研究報告* **43**:5–12
- Lambers H, Chapin FS, Pons TL (2008) Plant Water Relations. *In* *Plant Physiological Ecology*. 527–540 pp
- 中西敦史・小林元男(2012)森林の強度伐採による効果のモニタリング(第1報). *愛知県森林・林業技術センター報告* **49**:11–21.
- Pugnaire FI, Valladares F (2007) *In* *Functional plant*

ecology, CRC Press, Boca Raton, 748 pp

島田博匡 (2006) ヒノキ人工林の林床における強度間伐後 2 年間の木本種動態. 三重県林研研報 1-12.

島田博匡・野々田稔朗 (2009) 針葉樹人工林における強度間伐後の広葉樹侵入に及ぼすシカ採食の影響. 日本森林学会誌 **91**:46-50.

Taylor K (1976) Plant ecophysiology. Nature **263**:177-177.

Thornley JHM, Johnson IR (1990) Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Clarendon Press, Oxford 660 pp

山下昇・江口則和・中島寛文・石田朗・豊嶋勲・上原祐助・鈴木祥仁・伊丹哉恵 (2014) 強度間伐の知識と実践. 森林整備加速化・林業再生事業新愛知県協議会, 34 pp

Zanngh HH, Sharifi MR, Nobel PS (1995)

Photosynthetic characteristics of sun versus shade plants of *encelia-farinosa* as affected by photosynthetic photon flux-density, intercellular CO₂ concentration, leaf water potential, and leaf temperature. Australian Journal of Plant Physiology **22**:833-841.