

森林総合研究所

交付金プロジェクト研究 成果集 33

管理水準低下人工林の機能向上の ための強度間伐施業技術の開発

独立行政法人 森林総合研究所

2011. 3

序文

山村地域における林業の担い手の減少や高齢化、長引く木材価格の下落などにより、林業を取り巻く経営環境がとてつもない状況となっている。それに伴って、間伐などの手入れが十分にされていないスギ・ヒノキ人工林が増加している。人工林を手入れせずに放置すれば、森林が持っている木材を生産する機能や水土保持機能などが損なわれる心配がある。

このような中で、手入れ不足の人工林に対して、間伐遅れを一気に解消するために本数間伐率で50%を超えるような強度間伐が、近年、実施されるようになってきた。強度間伐は、今日の厳しい林業事情を考慮すると、手入れ不足の森林を健康にするための省力的で効果的な方法のひとつとすることができる。しかしその一方で、強度間伐は、長期間放置されていた森林を一時に高い間伐率で伐採するために、風害や虫害の発生に対するリスク、林分成長や材質への影響等が懸念される。また、強度間伐の実施にあたっては、安全で効率的な間伐材搬出技術の開発や、収益性の確保といった予測も必要となる。

そこで、既存の間伐施業体系には収まらない生育段階が進んだ放置人工林を対象として、強度間伐のリスクや効果、適用条件等の解明、安全で省力的な間伐材搬出技術の開発、推定される間伐量と作業特性に基づいたコスト算定予測などを行うために、森林総合研究所では平成19年度から3年間の計画で、研究プロジェクト「管理水準低下人工林の機能向上のための強度間伐施業技術の開発」を実施した。

本成果報告書は、この研究プロジェクトの研究成果として、第1章においては、強度間伐がもたらす風害や昆虫害などの発生リスク評価、被害を最小限に抑える地形条件や施業方法について、第2章においては、強度間伐が材質や林分成長・収量に与える影響の解明、強度間伐施業後の林分の成長予測の提示、適用可能な立地条件の解明、第3章においては、スイングヤーダ等の機械類を利用した安全性の高い、効率的な間伐材搬出技術の開発、第4章においては、強度間伐による間伐量を基にしたH型架線集材やスイングヤーダなどの作業システムに応じた生産性・コスト推定法の解明、収益性予測手法の開発についてとりまとめたものである。

これらの研究成果は、強度間伐を実施していく上での有用な情報を含むため、広く関係者に活用していただきたく、ここに本書を刊行する次第である。

なお、本プロジェクト研究の実施にあたり、国有林関係者、高知県林業振興・環境部関係者、高知県下の森林所有者など、多方面の方々に試験地の提供や調査のサポートなど、多大なご協力をいただいた。ここに感謝申し上げます。

平成23年3月

独立行政法人 森林総合研究所
理事長 鈴木和夫

目 次

研究の要約	1
第1章 強度間伐に伴う風害および虫害発生リスクとリスク回避	
1. 強度間伐に伴う風害リスクの回避	6
2. 強度間伐による虫害発生リスクの評価	13
3. 四国の強度間伐ヒノキ林分における残存木の葉の水分特性	20
第2章 強度間伐による林分成長および材質への影響評価	
1. 四国地域のヒノキ林における強度間伐後の林分成長と林分変化	24
2. 九州のスギ林における強度間伐後の残存木の成長経過および 16年後の林分構造と樹形	30
3. 間伐が窒素循環と水利用に及ぼす影響	39
4. ヒノキ人工林における間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響の 解明	42
5. 強度間伐が材質に及ぼす影響	50
第3章 スイングヤーダ集材作業の省力・安全化技術の開発	57
第4章 林業事業体による強度間伐の作業特性の解明と収益予測手法の開発	
1. 間伐率がスイングヤーダ集材作業におよぼす影響	64
2. 伐採率が直引集材の可能性に及ぼす影響の検討	68
3. H型架線集材における伐採率と損益分岐点の検討	74

研究の要約

I 研究年次及び予算区分

平成 19～21 年度（3 か年）

運営費交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主査 四国支所長 楠木 学（平成 19 年 4 月 1 日～平成 21 年 3 月 31 日）

四国支所長 今富裕樹（平成 21 年 4 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）

取りまとめ責任者 四国支所長 今富裕樹、四国支所研究調整監 鳥居厚志

III 研究場所

森林総合研究所・四国支所

森林総合研究所・本所

森林総合研究所・九州支所

IV 研究目的

林業の担い手不足や長引く木材不況のために、各地で間伐遅れなど手入れ不足のスギ・ヒノキ人工林が増加している。人工林を手入れせずに放置すれば、林木の成長や水土保持機能などが損なわれるおそれがある。そこで近年、本数間伐率 50% 程度の強度間伐が実施されるようになってきた。強度間伐は、間伐の遅れを取り戻し、森林を健全に導くものとして期待される。その推進のため、林分成長や材質の予測、虫害や風害のリスクの低減、さらに収益面でのメリットや安全で効率的な作業も検討し、施業指針をまとめることを目的として本研究を実施した。

V 研究方法

既存の間伐施業体系には収まらない生育段階が進んだ放置人工林を対象に、強度間伐の効果、適用条件、リスクなどを解明する。また高性能機械導入にあたって、安全で省力的な搬出技術を開発する。さらに、推定される間伐量と作業特性に基づいてコスト算定プログラムを作成する。これら目的の達成のために以下の 4 つの実施課題を設定し、放置人工林の生産機能を高めるための適正な強度間伐施業マニュアルを作成する。

- 1) 強度間伐がもたらす風害や昆虫害などの発生リスク評価を通して、リスクを最小限に抑える地形条件、施業方法を解明する。
- 2) 強度間伐が材質や林分成長・収量に与える影響を解明し、強度間伐施業後の林分の成長予測を提示し、適用可能な立地条件を明らかにする。
- 3) スイングヤーダ等の機械類を利用した安全性の高い、効率的な間伐材搬出技術を開発し、作業マニュアルを作成する。
- 4) 強度間伐による間伐量を基に H 型架線集材やスイングヤーダなどの作業システムに応じた生産性・コスト推定法を解明し、事業前の見積もりや事業体の収益性予測手法とともに、残存

木の収量変化や路網開設コストの低減等を組み込んだ、次回の間伐（伐採）の収益性予測手法を開発する。

Ⅵ 研究結果

研究計画表

課題名	担当	期間
強度間伐に伴う風害および虫害発生リスクの評価	四国・流域森林保全 G、気象環境・気象害防災林研、四国・人工林保育 T、四国・生態系変動 G	19～21
強度間伐による林分成長および材質への影響評価	四国・人工林保育 T、四国・森林生態系変動 G、九州・森林生態系 G、木材特性・組織材質研、森林管理・環境変動モニタリング T、立地環境・養分動態研	19～21
スイングヤーダ-集材作業の省力・安全化技術の開発	林業工学・安全技術研、林業工学・機械技術研、林業工学・収穫システム研	19～20
林業事業体による強度間伐の作業特性の解明と収益予測手法の開発	林業工学・収穫システム研、林業工学・安全技術研、林業経営・政策・林業システム研、四国・流域森林保全 G、四国・人工林保育 T、	19～21

力学モデルによる風害リスクの定量化手法を開発した。過密林分を強度間伐すると、強風時には風害リスクが増大するが、間伐率を抑えればリスクも小さいと推定できた。また、強度の間伐と虫害リスクとの関係では、四国地域での虫害リスクは、強度な間伐の実施後 1 年目に高く、標高の低い林分（海拔 600m 以下）の南向き斜面で、特に斜面上部で高いことを明らかにした。

間伐直後には、林分成長量は一時的に落ち込むが 4-5 年程度で回復するので問題はないこと、間伐率 25～50%（材積）の間ではあまり成長量の違いはないことを明らかにした。またこの範囲では、林木の水分ストレスは目立たなかった。間伐の有無や間伐の前後で材密度や動的ヤング率に差は見られず、強度間伐によって材質に悪影響が出る可能性は小さいことを明らかにした。

プロセッサのオペレータがスイングヤーダ運転を兼務する場合を想定して、運転操作の自動化や無線遠隔操作化するための装置の開発を行った。自動運転や無線操作化されたスイングヤーダの転倒防止のため、索張力等から転倒の危険性を診断し、機体の安定を保つ手法を開発した。また、各作業の時間観測の結果から得られたモデルを用いて、機械、伐採木の位置や丸太の集荷状況を経時的に再現するシミュレーションソフトウェアを開発した。

スイングヤーダと H 型架線を使用した強度間伐作業システムにおいて、伐採率の変化に応じたコストを計算できる手法を開発した。これにより、強度間伐を実施する・しない場合の集材コストの差や、固定費に対する損益分岐点などの収益性を検討することが可能となった。

VII 成果の利活用

風害リスクを評価するシミュレーション手法を開発したことにより、風害リスクと施業との関係の定性的な性質は十分に示すことができ、リスク低減に向けた検討が可能となった。また、本研究で開発したリスク計算アルゴリズムを発展させ、より実用的な改善を行うため、農林水産省委託プロジェクト研究の課題として応募しているところである。虫害リスクの評価については、四国地域のデータに基づき、強度間伐後にヒノキの立ち枯れの発生しやすい立地条件を提示することができ、施業上の留意点として成果が得られた。

強度間伐後の林分成長に関する知見、強度間伐後の林木の水分ストレスや材質変化に関する知見は、強度間伐に対する心理的な抵抗感を払拭できるという意味で意義深く、間伐の推進に大きく寄与できる。

スイングヤーダ運転の自動化や無線遠隔操作化のために開発したスナッチブロック型検出装置、ストッパー型搬器検知装置、及び無線操作式チョークフック装置は、実用化に向けたプロトタイプとして利用できる。また、本研究で開発した機体の安定度計算手法は、スイングヤーダのみならず、油圧ショベルをベースマシンとする各種の林業機械で適用することができる。また伐倒木の位置や集荷状況を再現するソフトは、作業の最終結果のみならず、作業の実行状況も再現できる特徴があり、機械の待ち時間の推定など効率的な作業改善のための支援ツールとして活用できる。

コスト計算についての成果は、既に林野庁森林技術総合研修所での林業事業体や都道府県の職員を対象とした研修において活用されている。

本研究プロジェクトで得られた成果は、平成 21 年 11 月 21 日に行った公開シンポジウムにおいて発表した。参加者（林家や行政担当者）からは、成果の細部に至る濃密な質問や意見が多く出て、興味の深さがうかがわれた。

林業実務者や行政担当者向けに、強度間伐に関するマニュアルを作成した。間伐作業マニュアルは、強度間伐を行った際に予想される、メリット、デメリットを簡潔にまとめてあり、森林所有者、林業事業体が、強度間伐の導入を検討する際の指針となる。

VIII 今後の問題点

強度間伐による林木の成長や材質への影響について、より長期的な評価が望ましいとの指摘があった。この点は事前評価時にも議論されたが、事例を探すことが困難であるとの判断から当プロジェクトの研究計画には盛り込まなかった経緯がある。ただし指摘の主旨は理解できるので、時期をみて（およそ10年後を想定）追跡調査等を行う予定である。

また今回調査対象とした林分は 5～7 齢級であり比較的若い。間伐遅れのままさらに年数が経過した場合、たとえ間伐を行っても成長が回復できない「手遅れ林分」と化すおそれがある。手遅れであるか否かを、林齢や林分密度などから判定する技術を開発する必要がある。

IX 研究発表

鈴木覚・吉武孝・後藤義明（2009）日本における森林気象害および林野火災の発生状況（1954年度～2003年度）、森林総合研究所研究報告，81(1)，71-100.

鈴木覚・後藤義明・吉武孝・島田和則・萩野裕章・野口宏典・奥田史郎・佐藤重穂・小谷英司・宮本和樹・野口麻穂子・伊藤武治（2009）風害リスク評価に向けた林木の受風面積の推定と間

- 伐による影響，日本森林学会大会発表データベース， Vol. 120 ， 863.
- 鈴木覚・吉武孝・後藤義明（2009）林木に作用する風圧力の推定，第 61 回日本森林学会関東支部大会，39.
- 鈴木覚・吉武孝・後藤義明（2010）仮想的林分による間伐の風害リスクの定量的評価，日本森林学会大会発表データベース， Vol. 121 ， 206.
- 鈴木覚・吉武孝・後藤義明（2010）林木に作用する風圧力の推定，関東森林研究，61 巻，215-218.
- 佐藤重穂（2007）スギ・ヒノキ人工林における間伐の実施と病虫害発生に関連性，森林総合研究所研究報告，6(3)，135-143.
- 佐藤重穂・谷地森秀二（2007）高知県吾川郡いの町におけるテングコウモリ *Murina hilgendorfi* の捕獲記録，四国自然史科学研究，4，30-33.
- 佐藤重穂・松本剛史・奥田史郎（2007）マスダクロホシタマムシによるヒノキ枯損被害，林業と薬剤，182，22-26.
- 佐藤重穂・松本剛史・奥田史郎（2007）マスダクロホシタマムシによるヒノキ枯損被害の発生条件の検討，第 58 回日本森林学会関西支部大会研究発表要旨集，30.
- 佐藤重穂（2008）スギ・ヒノキ人工林における間伐の実施に伴う虫害発生の危険性の評価，森林防疫，57，87-91.
- 佐藤重穂（2008）施業で害虫は防げるか？，山林，NO.1492，46-49.
- 佐藤重穂・松本剛史（2008）ヒノキ人工林の強度な間伐に伴う枯損被害の発生要因」樹木医学研究，12，202.
- 佐藤重穂・松本剛史・奥田史郎・宮本和樹（2008）ヒノキ人工林におけるニホンキバチ被害の経年変化の特徴，第 59 回日本森林学会関西支部大会研究発表要旨集，70.
- 佐藤重穂・松本剛史（2009）ヒノキ人工林の強度な間伐が穿孔性害虫の発生に及ぼす影響，第 120 回日本森林学会大会，712. 日本森林学会大会発表データベース， Vol. 120 (2009) No. SPACE pp.712-
- 佐藤重穂・松本剛史「ヒノキ林における間伐の強度とマスダクロホシタマムシの発生消長との関係」樹木医学研究，13:160-161、2009.
- 佐藤重穂・松本剛史（2009）ヒノキ人工林の間伐がヒノキカワモグリガの被害量に及ぼす影響，第 60 回日本森林学会関西支部大会発表要旨，93.
- 伊藤崇之・毛綱昌弘（2007）林業機械の安全装置開発のための油圧ショベルの安定度計算，第 14 回森林利用学会学術研究発表会，3.
- 伊藤崇之・上村巧（2007）ウインチ負荷の観測による自走式搬器の自動荷おろし機構の開発，森林利用学会誌，22(3)，187-196.
- 小谷 英司・都築伸行（2007）林家地図情報管理システムの開発－高知県林家での開発例を中心として－，第 58 回日本森林学会関西支部研究発表要，53，8.
- 小谷 英司・都築伸行（2008）廉価な GPS による中小規模林家の地図情報管理方法検討，四国森林管理局 H19 四国森林・林業研究発表要旨集，21.
- 小谷 英司・都築伸行（2008）高感度 GPS による林家情報の管理方法の検討，日本森林学会大会発表データベース， Vol. 119 ， 75.
- 田中良明・吉田智佳史・中澤 昌彦・近藤耕次・岡 勝・都築 伸行・小谷 英司（2008），スイン

グヤーダによる強度間伐の作業特性の検討，日本森林学会大会発表データベース， Vol. 119， 799.

田中良明・吉田智佳史・中澤 昌彦・近藤耕次・岡 勝・都築 伸行・小谷 英司（2009），伐採率が直引集材の可能性に及ぼす影響の検討，森林利用学会誌，23(4)，259-262.

X 研究担当者

第 1 章

佐藤重穂、松本剛史（四国支所・流域森林保全 G）、鈴木 覚（気象環境領域・気象害防災林研）、奥田史郎（四国支所・人工林保育 T）、宮本和樹、野口麻穂子（四国支所・森林生態系変動 G）

第 2 章

奥田史郎（四国支所・人工林保育 T）、伊藤武治、篠宮佳樹、宮本和樹、野口麻穂子（四国支所・森林生態系変動 G）、荒木眞岳（九州支所・森林生態系 G）、藤原 健（木材特性領域・組織材質研）、平田泰雄（森林管理領域・環境変動モニタリング T）、稲垣善之（立地環境領域・養分動態研）

第 3 章

広部伸二、鹿島 潤、伊藤崇之（林業工学領域・安全技術研）、毛綱昌弘、山口浩和（林業工学領域・機械技術研）、田中良明（林業工学領域・収穫システム研）

第 4 章

田中良明、岡勝、吉田智佳史（林業工学領域・収穫システム研）、都築伸行（林業経営・政策領域・林業システム研）、小谷英司、佐藤重穂（四国支所・流域森林保全 G）、奥田史郎（四国支所・人工林保育 T）、広部伸二（林業工学領域・安全技術研）

第1章 強度間伐に伴う風害および虫害発生リスクとリスク回避

1. 強度間伐に伴う風害リスクの回避

ア 研究目的

近年の厳しい林業事情から人工林の保育や管理が十分に行えない状況にある。そのため、間伐適期を過ぎた放置林が大量に発生し、その整備が喫緊の課題となっている。限られた労力、費用で放置林を効率的に整備する必要がある、それが従来よりも強度な間伐を行う背景となっている。しかし、こうした施業では従来より多くの立木を一時に伐採するため、残存木に風害が発生することが懸念されている。

強風による幹折れや根返りは、樹体に風が衝突することによって生じた風圧力が、樹幹や根系の耐力を上回ったときに発生するのであり、風害の発生リスクは予想される風圧力と耐力との大小関係によって予測可能である。風圧力は受風面積（風を受ける樹冠の面積）と林内風速分布の変化を推定することによって見積れ、耐力は林木のサイズから限界倒伏モーメントとして推定できる。

ここでの問題点は、林分における受風面積と林内風速分布をどのように推定するかということである。つまり、孤立した林木と異なり、林分においては個体同士が接しているため枝葉を自由に延伸させることができず、樹冠の形状は複雑に変形する。そのため、林木の受風面積は個体ごとに樹冠の変形を考慮しなければもとめられず、また、林内風速分布は個体同士が相互に被陰することによる空間的な不均一性を考慮しなければもとめられない。

本研究では、林分における受風面積と林内風速分布の推定に焦点をあてつつ、林分の風害リスクを評価できる手法を開発すること、および開発した手法で間伐率と風害リスクとの関係を予測し、回避することを目的とした。

イ 研究方法

(1) 風害リスク評価モデルの構成

本研究では力学的な風害発生過程から間伐による風害リスクを評価することとし、風圧力に関して次の方程式を基礎とした((1)式)。

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A \cdot U^2 \quad (1)$$

ここに、 F は風圧力、 ρ は空気の密度、 C_d は抗力係数、 A は受風面積、 U は風速である。受風面積は風向に対する樹冠の重なりを考慮した樹冠の鉛直平面への投影面積であり、本研究では樹冠形状モデルを開発して受風面積を推定した。風速は、風速分布モデルを開発して推定した。風圧力と風心高(h_w)の積で回転モーメント(M_r)を計算した((2)式)。

$$M_r = F \cdot h_w \quad (2)$$

一方、林木の耐力として、個体ごとに限界倒伏モーメント(M_l) (kgfm)を計算した。限界倒伏モーメントは既往の文献から得た関係式((3)式)により推定した($n=9, R^2=0.94$) (上村, 2007)。

$$M_l = 8617.9 \cdot D^2 \cdot h \quad (3)$$

ここに、 $D(m)$ は胸高直径、 $h(m)$ は樹高である。

風圧力で生ずる回転モーメントと限界倒伏モーメントとの大小関係から個体ごとに倒伏する、しない、の判定をおこなった（(4)式）。

$$\begin{cases} M_r \geq M_l \Rightarrow \text{倒伏する} \\ M_r < M_l \Rightarrow \text{倒伏しない} \end{cases} \quad (4)$$

樹冠形状モデルと風速分布モデルのパラメタリゼーションに必要な林木配置や林況、および気象観測は筑波共同試験地（茨城森林管理署 217 林班く 1 およびく 6 小班）で行った。小班の面積は 1.29ha、平均傾斜は 30° で、1973 本の林木があり、その内訳は 1367 本がヒノキ、570 本はスギ、その他 36 本であった。ただし、本研究で解析対象とした場所はヒノキだけが植栽されていた。寺崎式で選木を行い、材積間伐率 15%および 35%の 2 回の間伐を行った。一回目の間伐は 2008 年 10 月、二回目の間伐は 2009 年 2 月に行った。なお、本報告では簡便のため一回目間伐を間伐（一）、二回目間伐を間伐（二）と表記した。標準地の林木 45 本の平均樹高は 14.7m、平均胸高直径は 22.6cm、平均枝下高 7.3mであった。

これら①樹冠形状モデルと②風速分布推定モデル、および③倒伏判定で構成される一連の評価手順を風害リスク評価モデルと呼び、倒伏すると判定された林木の立木密度を風害リスクと表現することとした。風害リスク評価モデルに、現実 に即した立木配置と樹高を入力すれば、実在している林分の風害リスクの見積もりが可能であり、仮想的な立木配置と樹高を設定すれば、様々な仮想条件における林分の風害リスクが見積もれる。本報告では仮想的な林分を PC 上で生成させ、間伐率と風害発生リスクとの関係について検討した。仮想林分として 1) 林地の傾斜は 30° 、2) ヒノキ林、3) 3000 本植栽、4) 四国林分密度管理図に従って成長し、自然枯死木がランダムに発生する、5) R_y （収量比数）0.9 の時に間伐、6) 抗力係数（(1)式の C_d ）は 0.3、7) 樹高は平均樹高 $\pm 1.3S.D.$ でランダムに変動、8) 樹冠長率は 50%、の条件を与えた。こうして発生させた仮想林分において、本数間伐率を 10%から 70%まで 10%刻み、風速は $15\text{ms}^{-1} \sim 45\text{ms}^{-1}$ まで 5ms^{-1} 刻みの合計 49 通りの条件で、それぞれ 10 回ずつ仮想林分を生成させて計算を行った。計算結果として得られた風害リスクの平均値を各条件の風害リスクとした。

(2) 樹冠形状モデル

樹冠形状モデルは風害リスク評価モデルの一部を構成するものである。林木に作用する風圧の大きさは、風を受ける樹冠の面積（受風面積）に比例し、その面積は一般に樹冠の鉛直平面への投影面積として計算される。樹冠形状モデルでは、林木の位置と樹高に対して、平均的な樹冠形状および隣接木と接触したときのルールを与えることによって樹冠を変形させ、樹冠形状を推定した。モデルに与えた条件は次の 4 つである。1) 樹冠の形状は三角錐、2) 樹冠頂点のなす角は 50° 、3) 樹冠長比は 50%、4) 個体の樹冠同士が接触する場合、接触がないと仮定した場合の予想される樹冠形状において、両者が交わる平面まで樹冠が形成される。

林木の配置はトータルステーション（GPT-3005hiper, Topcon）で根元位置を 3 次元で測定し、樹高と樹冠長をバーテックスで測定した（Vertex IV, Haglof Inc.）。頂点のなす角は試験地における任意の林木 6 本の梢端の写真から読み取った平均値である。樹冠長比は $20\text{m} \times 20\text{m}$ で設定した標準地における平均値である。

(3) 風速分布モデル

風速分布モデルは風害リスク評価モデルの一部を構成するものである。林分内においては地形、個体サイズ、個体配置、密度などを反映して3次的に不均一な風速分布が形成される。さらに、間伐は個体配置や立木密度を変化させるので、それに伴って風速分布も変化するはずである。そこで、林内風速の鉛直分布を観測し、先述した2回の間伐による風速分布の変化を解析してモデル化した。

林内風速の鉛直分布の観測では、17mの気象観測塔において8高度(17.2m, 14.5m, 11.0m, 9.3m, 7.4m, 5.6m, 2.0m, 1.0m)で風速を測定した(三杯風速計、model 3002, R. M. Young Company)。8高度の中で最上部は林冠上に位置し、風向もその高度で測定した。風速および風向は5秒ごとにサンプリングし、それぞれ10分間の平均値をデータロガー(CR10X, Campbell Scientific Inc.)に記録した。

本研究では林木に作用する力を推定する目的から、樹冠が分布する位置の風速を知る必要がある。樹冠下の風速は樹幹に作用することになるが、その値は無視できる。従って、本研究においては1hから0.5hまでの4高度の測定値を、(5)式に当てはめ(Kaimal and Finnigan, 1994)樹冠付近の風速鉛直分布を推定した。

$$\frac{\overline{u_z}}{\overline{u_h}} = \exp\left\{-\nu_e\left(1 - \frac{z}{h}\right)\right\} \quad (5)$$

ここで、 h は樹高、 z は高度(ただし $z < h$)、 u_h ならびに u_z は高度 h および z における風速、 ν_e は無次元の係数である。 ν_e は葉面積指数と相関があるといわれていることから、本研究では葉面積指数と相関すると思われる葉層体積を用いて、 ν_e の特性を検討した。ここで、葉層体積を、葉が分布する空間の体積と定義した。葉層体積は樹冠形状モデルにおいて、「葉が枝の先端に80cmの厚さで分布する」という条件を加えて推定した。なお、枝先における葉の分布する厚さは任意の枝20本の平均値である。 ν_e は0.5hから1hまでの4高度における風速データを用いて最小二乗法により決定した。また、斜面に対して正対する方向からの風に対して最も風害が発生しやすいことから、本研究において斜面方位に対して $\pm 45^\circ$ の方向からの風を解析した。

ウ 結果

(1) 受風面積推定

小班内の個体分布を図1-1-1aに示す。微少な地形の起伏があるとともに、部分的に立木密度の低い場所もみられた。そこで、本研究では傾斜が均一で比較的立木密度が一定している範囲(図中白枠)を選んで解析対象とした。解析範囲内のある

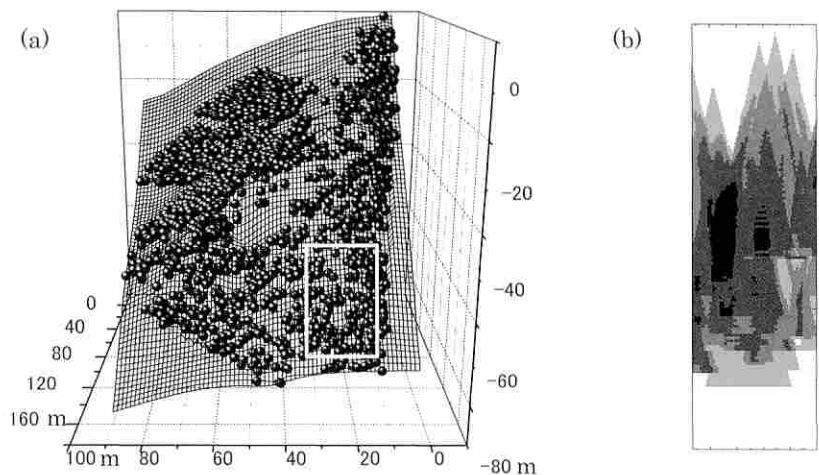


図1-1-1 小班における個体の根元位置と計算した範囲(a)と、ある10m×10m領域における鉛直投影(b) (●: 根元位置、白枠: 計算範囲)

10m×10m の領域における樹冠分布の鉛直平面への投影図を図 1-1-1b に示す。図 1-1-1b は個体ごとに推定した樹冠形状が複数重なり合った状態を示しており、重なりが濃淡で示されている。このように樹冠形状モデルでは個体ごとに樹冠の形状が推定できるとともに、重なり具合も推定できる。平均受風面積は間伐率を上げるにしたがって上昇していた（表 1-1-1）。これは、小さい個体が優先的に選木されて間伐され、成長のよい大型の個体が残される傾向があるため、一本あたりの受風面積が増加したものである。

(2) 林内風速分布推定

林内風速の鉛直分布は樹冠上で最も強く、葉の密度が高い 7m 付近まで減少し、それよりも低い位置で再び風速が大きくなっていた（図 1-1-2）。このような S 字の形状に似た分布は典型的な林内風速の鉛直分布である（近藤, 1994）。

v_e は、間伐前から間伐（一）、間伐（二）へと、立木密度が減少するに従って小さくなっていた。また、間伐前後に関わらず、風速が大きくなるほど v_e は減少していた（図 1-1-3）。これらを指数関数で回帰したときの係数および決定係数を表 1-1-2 に示す。 v_e 切片は間伐前、間伐（一）、間伐（二）それぞれ、7.54、6.72、5.20 であり、間伐率が大きくなるに従って小さくなっていた。また、風速階の中心に v_e を与えて最小風速階に対する相対 v_e を計算し、すべてのデータを一つの指数関数（ $v_e=a \cdot \exp(b \cdot u_h)$ ）で回帰したとき、回帰曲線（ $a=1.02$, $b=-0.017$ ）の決定係数は 0.75 であった。相対 v_e の回帰曲線における決定係数が十分大きいことから、間伐の有無ならびに間伐率にかかわらず、一つの式で表せるものと考えた。

次に、 v_e 切片と葉層体積の関係を検討した。ここで、風向に対応させるため、気象観測を行った位置を原点に、斜面方位に対して±

表 1-1-1 平均受風面積の推定

	間伐前	間伐(一)	間伐(二)
平均受風面積(m ²)	17.5	19.8	21.6
標準偏差(m ²)	7.3	6.7	5.6

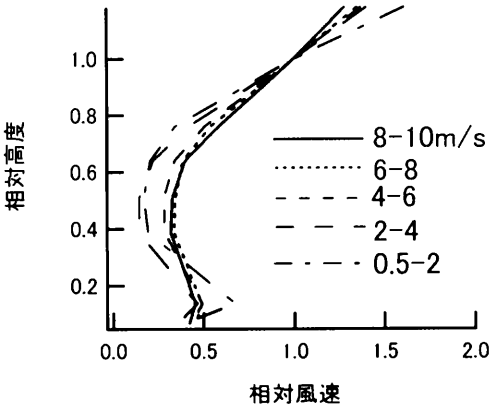


図 1-1-2 2009 年 3、4 月に観測された風速の鉛直プロファイル

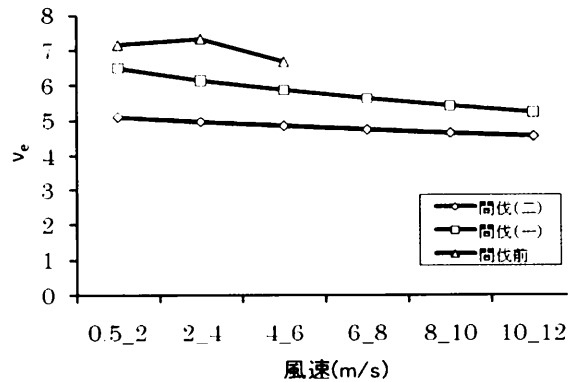


図 1-1-3 間伐前後における v_e の変化

表 1-1-2 $v_e=a \cdot \exp(b \cdot u_h)$ で回帰したときの係数

	a	b	R ²
間伐前	7.54	-0.034	0.51
間伐(一)	6.72	-0.043	0.99
間伐(二)	5.20	-0.023	1.00

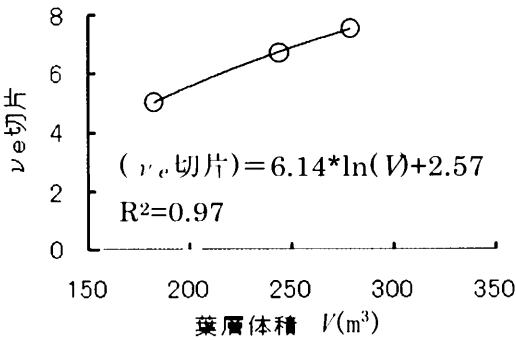


図 1-1-4 葉層体積に対する v_e 切片

45° 方向をそれぞれ一辺とする斜距離 10m の正方形の領域を設定し、その領域の上空に存在する葉層体積を計算した。間伐前、間伐（一）、間伐（二）の葉層体積に対する v_{ϕ} 切片を図 1-1-4 に示す。決定係数が高く、葉層体積から v_{ϕ} 切片が良好に推定可能と考えられる。これらから、葉層体積から切片を求め、相対 v_{ϕ} の回帰曲線を使うことによって、個体毎の風速に応じた v_{ϕ} が得られる。

(3) 風圧力推定

個体ごとに、樹幹を基点に斜面方位に対して $\pm 45^{\circ}$ 方向に 10m×10m の方形領域を設定して葉層体積を推定し、 v_{ϕ} の推定と風圧力計算を行った。図 1-1-1 の白枠内にある個体の間伐前、間伐（一）、間伐（二）それぞれ 134 個体、94 個体、64 個体について計算を行った。個体あたりの風圧力および回転モーメントともに間伐率が大きくなるに従って増加した（表 1-1-3）。一方、樹高に対する風心の高さとして求めた平均風心高比は、間伐前後、ならびに間伐率の大小にかかわらず、ほぼ一定していた。

個体ごとの回転モーメントの変化を、間伐前に対する間伐後のモーメントの比でみると、間伐（一）は 77%（72 個体）が 1 割未満の増加にとどまり、3 割以上増加するものはなかった（図 1-1-5a）。一方、間伐（二）は 1~2 割増加するものが全体の 50%（32 個体）あり、3 割以上上昇するものが 3 個体あった（図 1-1-5b）。

(4) 間伐率と風害リスク

推定した風害リスクは風速 30ms^{-1} までいずれの間伐率であってもほぼ 0%であるが、 35ms^{-1} を境に一部の間伐率で急激に上昇し、間伐率が 50%以上であると 45ms^{-1} のときに 30%以上が倒伏すると推定された（図 1-1-6）。間伐率が高いほどリスクは大きくなる傾向がみられたが、間伐率 20%の場合は風速 40ms^{-1} まで、間伐率 10%では 45ms^{-1} であっても風害リスクの上昇はみられなかった。

エ 考察

間伐を行うと、風が樹冠の低い位置まで入り込むため風心高が低下すると予想されたが、平均風心高比に間伐前後でほとんど差が生じていなかった。仮に間伐で風心高が低下した場合、回転モーメントは風圧力と風心高との掛け算で計算されるので、間伐による風圧力増加の影

表 1-1-3 風圧力、モーメント、風心高比の変化

	間伐前	間伐(一)	間伐(二)
平均風圧力(N)	1077.9	1387.4	1664.0
平均モーメント(Nm)	12363.8	15966.2	18973.2
平均風心高比	0.76	0.76	0.75

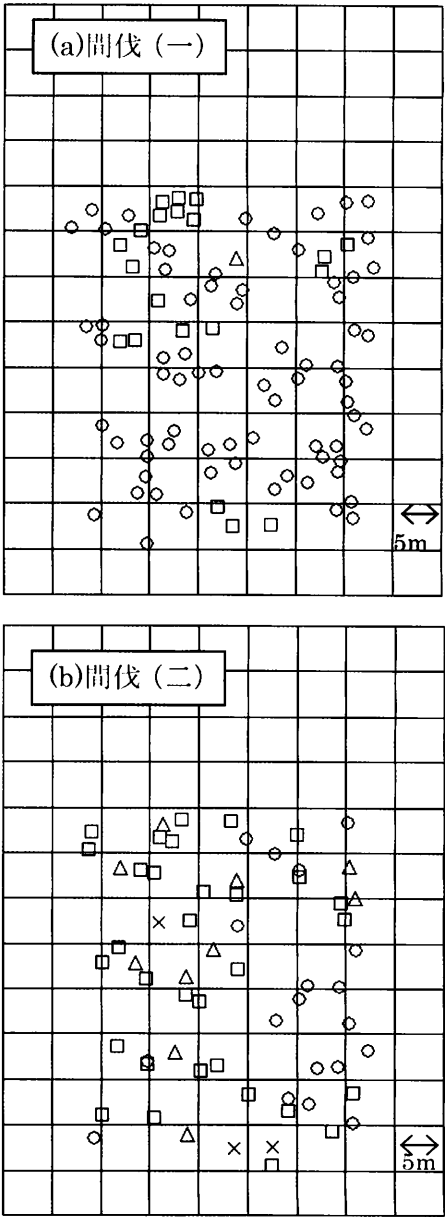


図 1-1-5 間伐（一）(a)および間伐（二）(b)における間伐前に対するモーメントの比（○<1.1, 1.1 ≤ □<1.2, 1.2 ≤ △<1.3, 1.3 ≤ ×）

響が低減されるはずであるが、間伐を行っても風心高比に変化が少ないことは、林内風速の増大がそのまま風圧力の増加になったことを示しており、このことは表 1-1-3 に示した平均風圧力と平均回転モーメントが比例($r=1.00$)していることでも裏付けられる。このように風心高比に変化が少ない原因は、強風の侵入によって風速の絶対値は大きくなっても、風速の鉛直分布に大きな変化がないためと推察される。個体ごとのモーメントを見てみると、間伐前後に回転モーメントが大きく増加するものがあつた。このことは、間伐によって不均一に空間が開けたことが原因と考えられる。林分のある部分に風害が発生して空間が開けると、そこを起点に被害が拡大する可能性が指摘されており、間伐で回転モーメントが大きく増加する個体が存在することは、その個体が風害発生を引き金となる可能性が指摘できよう。

Ry0.9 の時に間伐する場合、間伐率 20%以下を除いて、風害リスクは風速が 35ms^{-1} を超えると急激に上昇すると推定された。そうした風速は突風率を 2 とすれば主に台風が襲来した場合に観測される風速に相当するのであり、台風が頻繁に襲来する地域で過度に過密化した林分を 30%以上間伐する場合は風害リスクが高いといえる。このような林分を、風害リスクの小さい間伐率 20%以下で適正な密度まで移行させるには、複数回の間伐が必要である。過去の被害例によると、風害の発生は間伐後 4 ないし 5 年以内に台風が襲来した場合に発生することが多く、被害を発生しやすい地形や林況もわかっている。従って、予測される風害リスクに加え、施業対象地の台風の襲来頻度、立地条件、林況等を含めてリスクを判断し、総合的に間伐率を決定する必要がある(鈴木, 2010)。

オ 今後の問題点

風害リスク評価モデルの予測精度を向上させるには、モデルを構成する要素の精度を改善していく必要がある。また、モデルの汎用性を向上させるには、間伐方法や傾斜などの立地条件による違いを評価する必要がある。ただし、林内の気象観測は多大な労力を要するので、多数の条件における風速分布を気象観測のみから推定するのは困難である。風洞実験などと組み合わせながら行うのが現実的であろう。

また、より根本的な意味での問題点は、本研究が「ある強風が吹いた場合」の風害リスクを算定するものであることにある。安全側に予測するのであれば、一律に台風並の風速を設定すればよい。しかし、耐風性の高い施業は、林業生産性の面で劣ることが多く、風害リスクを意識した施業を現実導入していくには、耐風性の高い施業を取り入れるべき林地とそうでないところと

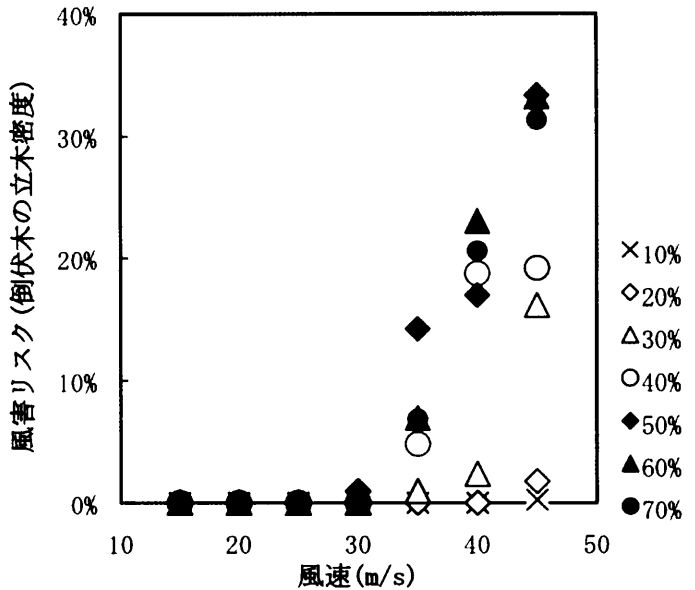


図 1-1-6 Ry0.9 のときの、間伐率および風速ごとの風害リスク推定値

をきめ細かく判別し、生産性との両立を図っていくことが不可欠となる。その場合、林地ごとに「その場所にどの程度の強風が見込まれるのか」を予測し、きめ細かく風害リスクを推定できるように、モデルを発展させなければならない。

本研究における枝葉分布は「間伐直後」を想定したものである。間伐後に時間が経過すると開いた空間に残存木が枝葉をのぼすことによって樹冠形状が変化する。今後こうした樹冠の成長過程を樹冠形状モデルに取り入れることによって、時系列的な風害リスクの変遷を追うことができるようになると考えられる。こうした解析を行えば植栽から収穫に至るまでの風害リスクが間伐のタイミングと間伐率によってどのように異なるかが予測でき、風害リスクを考慮した森林管理が可能になると考えられる。

カ 要約

林分における受風面積と林内風速分布を樹冠形状モデル、風速分布モデルで推定して林木ごとに倒伏判定を行い、倒伏すると推定された林木の立木密度を風害リスクとして定量化した。一連の計算過程を風害リスク評価モデルとして開発した。

間伐前後に回転モーメントが大きく増加する個体があった。その原因は、間伐によって開けた空間が不均一に生じたことにあるが、こうした林木が風害発生を引き金となる可能性が考えられた。PC上で仮想的に発生させた過密林分において間伐による風害リスクを計算すると、本数間伐30%以上では台風の襲来をうけたときに風害が発生すると推定された。

キ 引用文献

- Kaimal, J. C., Finnigan, J. J. (1994) Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement Oxford University Press, New York. pp. 289.
- 上村佳奈 (2007) “森林管理と数理モデル Vol. 6”, 吉本敦ら編, Formath 研究会, p19-28.
- 近藤純正 (1994) 水環境の気象学 一地表面の水収支・熱収支一, 朝倉書店, 東京, pp. 368.
- 鈴木覚 (2010) “強度間伐施業のポイント”, 森林総合研究所四国支所編, 森林総合研究所四国支所, p11-12.

(鈴木 覚)

2. 強度間伐による虫害発生リスクの評価

ア 研究目的

近年の木材価格の低迷や林業の担い手となる労働力の不足などの要因によって、管理不足による間伐遅れの人工林が増加する一方、地球温暖化対策の一環として人工林の間伐を推進する政策がとられ、その結果として、間伐時期の遅れた林分に対して強度な間伐が実施されるようになっている。従来、スギ人工林に比べて、ヒノキ人工林は強度な間伐を行うと、そのあとにしばしば立ち枯れが発生すると言われていた。この枯損の原因として、マスダクロホシタマムシの加害によることが知られていた(越知, 1981)が、そのほかにも間伐による環境の急変(渡辺ら, 2008)や、樹幹の日焼けおよび強風による樹木の組織の破壊なども枯損につながるものと指摘されている。しかし、これらの要因については、いくつかの事例報告はあるものの、立地条件別に詳細な検討は加えられていない。これらの被害を軽減する間伐法の提案することを目的として、虫害発生リスクの評価するために、以下のような調査を行った。

マスダクロホシタマムシは、おもにスギやヒノキの衰弱木を加害する二次性害虫であるが、ヒノキ林においては衰弱木に集中的な加害をして、ヒノキを枯死させることがある(竹谷, 1979; 越知, 1981)。ヒノキ林の強度な間伐後にマスダクロホシタマムシによってヒノキの枯損が発生する事例が報告されており(越知, 1981)、強度な間伐による虫害リスクの評価するためには、間伐の強度とマスダクロホシタマムシの発生密度の関係を明らかにする必要がある。そこで、間伐後のヒノキの枯損の危険性を評価することを目的として、強度な間伐を実施した2箇所のヒノキ人工林の試験地において、マスダクロホシタマムシの成虫の密度を2年間にわたって調べた。

次に、間伐後にヒノキの枯損の起こりやすい立地環境を明らかにすることを目的として、四国のヒノキ林を対象に、強度な間伐の実施後、数年を経過した林分の多地点調査を行い、立ち枯れの発生の状況について把握するとともに、立地条件との関係について検討した。また、特に多くの立ち枯れの発生した林分について、虫害の痕跡について調査した。

イ 研究方法

(1) マスダクロホシタマムシの密度調査

調査地は高知県の町の奥大野試験地(嶺北森林管理署管内国有林、標高900m、31年生ヒノキ人工林、北西向き斜面)と土佐清水市の辛川試験地(四万十森林管理署管内国有林、標高320m、34年生ヒノキ人工林、西向き斜面)に設定した。奥大野試験地には40m×40mの調査区を12プロット、辛川試験地には20m×20mの調査区を6プロット設置し、プロット内のヒノキを間伐した。奥大野試験地では50%点状間伐区、50%列状間伐区、35%定性間伐区、対照区(無間伐)が各3プロット設定され、2008年5月に間伐を実施した。辛川試験地では50%間伐区(点状間伐)、対照区(無間伐)が各3プロット設定され、2008年1月に間伐を実施した。間伐率はいずれも胸高断面積である。なお、ここでは点状間伐とは、列状のような規則的な配列で間伐木を選定するのではない間伐方法を指すこととして、点状間伐における間伐木はプロット内の劣勢木を主体として、間伐後の立木配置に偏りが生じないように配慮して間伐木を選木した。50%列状間伐区では、等高線に対してほぼ垂直な幅5mの間伐列と残存列を設定し、間伐列内のヒノキを間伐した。互いに隣り合ったプロット間の距離は奥大野試験地では50m、辛川試験地では30m

であった。奥大野試験地における間伐前のヒノキの平均樹高は 11.3m、平均胸高直径は 15.6cm であり、辛川試験地における平均樹高は 13.3m、平均胸高直径は 17.0cm であった。いずれのプロットにおいても、伐採した間伐木はプロット内に放置した。両調査地とも、2008 年と 2009 年のそれぞれ 5 月から 9 月までの間、各プロットに 1 器ずつ α ピネンとエタノールを誘引剤とする粘着トラップを設置して、マスダクロホシタマムシを捕獲した。粘着トラップは円筒型で、粘着紙としてカミキリホイホイ（アース製薬（株））を 5 枚つないだものを粘着面が円筒の外側を向くようにして、各プロットの中心付近の地上高 1.5m の部位に設置した。トラップ内部に α ピネン 10ml とエタノール 20ml をそれぞれ含ませた別々の脱脂綿を設置し、少量ずつ蒸散するようにした。調査期間中には約 15 日ごとにトラップの粘着紙を交換するとともに α ピネンとエタノールを含ませた脱脂綿を交換して、粘着紙に捕獲されたマスダクロホシタマムシを数えた。

（2）間伐後のヒノキ林の立ち枯れの発生状況調査

高知県の中部および西部のヒノキ人工林を対象とした。この地域は人工林率が約 63% で、造林樹種の半数以上をヒノキが占めているヒノキ造林の盛んな地域である。ヒノキ人工林の中から、本数間伐率 30～50% の間伐を実施した経歴があり、間伐後 2 年以上経過している林分 28 箇所を抽出した。2009 年 10 月から 2010 年 3 月に現地を調査し、立ち枯れの発生程度を 4 段階に区分する（表 1-2-1）とともに、標高、斜面方位、林床植生のタイプを記録した。

このうち、特に立ち枯れの発生本数の多かった高知県西部の一林分について、21m×25m の区画を区切って毎木調査を行った。この林分では 2002 年に間伐が実施されていた。調査区画内のヒノキの残存木と切り株のおよその位置を記録し、残存木について胸高直径、枯れの有無、昆虫の被害痕、樹脂の流出状況について調べた。

表 1-2-1 枯死木の発生状況による被害区分

区分	被害程度	枯死木の発生状況
3	激害	立木の 20% 以上が枯死している。
2	中害	散発的な枯死が発生している。枯損木は 5～20% 程度
1	微害	単木的に枯死木がみられる。枯損木は 5% 以下。
0	被害なし	枯死木は発生していない。

ウ．結果

（1）マスダクロホシタマムシの密度調査

奥大野試験地では 2008 年には全プロットの合計で 46 個体のマスダクロホシタマムシ成虫が粘着トラップに捕獲された。そのうちの 23 個体は 50% 点状間伐区で、15 個体は 50% 列状間伐区で、8 個体は 35% 点状間伐区であり、対照区ではまったく捕獲されなかった（図 1-2-1）。四つの処理の違いによって成虫の捕獲数は有意差があり（Kruskal-Wallis の検定, $H=8.42$, $p=0.038$ ）、間伐率が高いほど成虫の捕獲数が多かった（Kendall の順位相関係数 $\tau=0.774$, $p<0.001$ ）。2009 年に奥大野試験地で捕獲されたマスダクロホシタマムシ成虫は、全プロットの合計で 2 個体であったが、2 個体とも 50% 点状間伐区で捕獲された（図 1-2-1）。四つの処理の違いによって成虫の捕獲数に有意差はなく（Kruskal-Wallis の検定, $H=3.00$, $p=0.392$ ）、間伐率と成虫の捕獲数の間に有意な相関はなかった（Kendall の順位相関係数 $\tau=0.270$, $p=0.222$ ）。

一方、辛川試験地では 2008 年には全プロットの合計で 6 個体のマスダクロホシタマムシ成虫

が捕獲され、そのうち 5 個体が 50%間伐区で、1 個体が対照区で捕獲された (図 1-2-2)。50% 間伐区と対照区の間で成虫の捕獲数に有意差はなかった (Mann-Whitney の U 検定, $z=1.65$, $p=0.099$)。2009 年に辛川試験地で捕獲されたマスダクロホシタマムシ成虫は、全プロットの合計で 3 個体であったが、そのうち 2 個体は 50%間伐区で、1 個体は対照区で捕獲された (図 1-2-2)。50%間伐区と対照区の間で成虫の捕獲数に有意差はなかった (Mann-Whitney の U 検定, $z=0.745$, $p=0.456$)。

なお、奥大野試験地、辛川試験地とも、2009 年までに試験区内で立ち枯れ木の発生は見られていない。

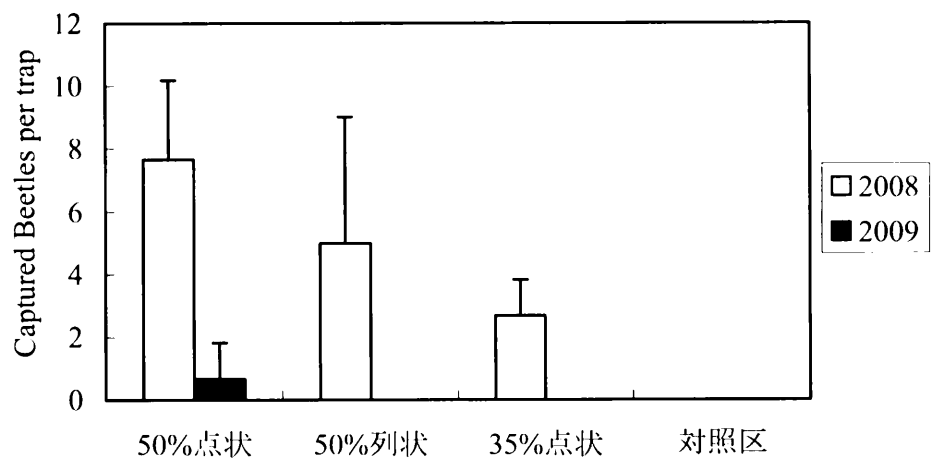


図 1-2-1 奥大野試験地におけるマスダクロホシタマムシの捕獲数
誤差範囲は標準偏差。

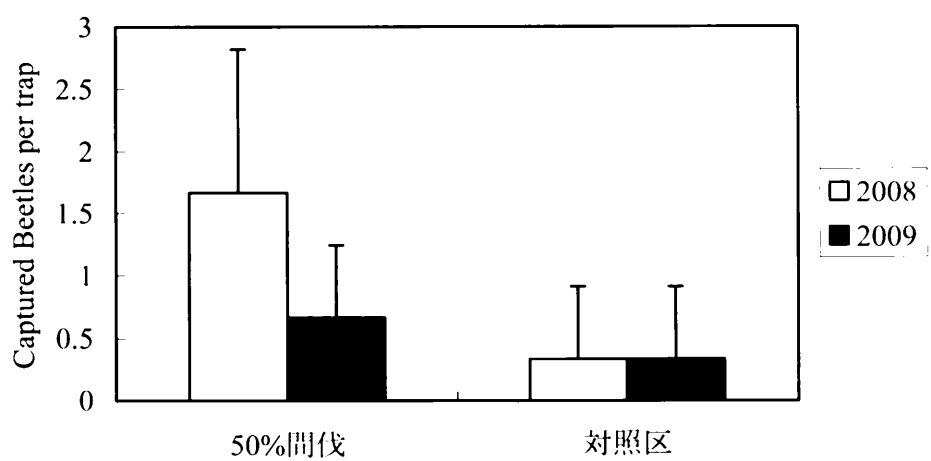


図 1-2-2 辛川試験地におけるマスダクロホシタマムシの捕獲数
誤差範囲は標準偏差。

(2) 間伐後の立ち枯れの発生状況調査

間伐後のヒノキ林の立ち枯れの発生は、調査した 28 林分のうち 43%にあたる 12 林分で被害程度微害以上の枯損の発生が見られた。内訳は区分 1（微害）が 5 林分、区分 2（中害）が 4 林分、区分 3（激害）が 3 林分であった。立ち枯れの発生程度と標高の関係を検討したところ、標高の低い林分で多くの立ち枯れが発生していた（図 1-2-3）。立ち枯れの発生した林分の 92%にあたる 11 林分は標高 600m 以下であった。標高と立ち枯れの発生程度の間には有意な負の相関があった（Kendall の順位相関係数 $\tau = -0.443$, $p < 0.001$ ）。

次に、斜面方位についてみると、立ち枯れの発生の多くは南向き斜面（南東向き、南西向きも含む）で発生していた（図 1-2-4）。南東・南西向きを含む南向き斜面の 16 林分のうち、69%にあたる 11 林分で微害以上の枯損の発生が見られた。

なお、林床タイプを常緑低木型、落葉低木型、シダ優占型、ササ優占型、貧植生型の 5 つに区分したが、高標高地で落葉低木型とササ型が多く、この二つの型では微害以上の枯損の発生はなかったものの、それ以外には林床タイプと枯損被害の間に関係は見られなかった。

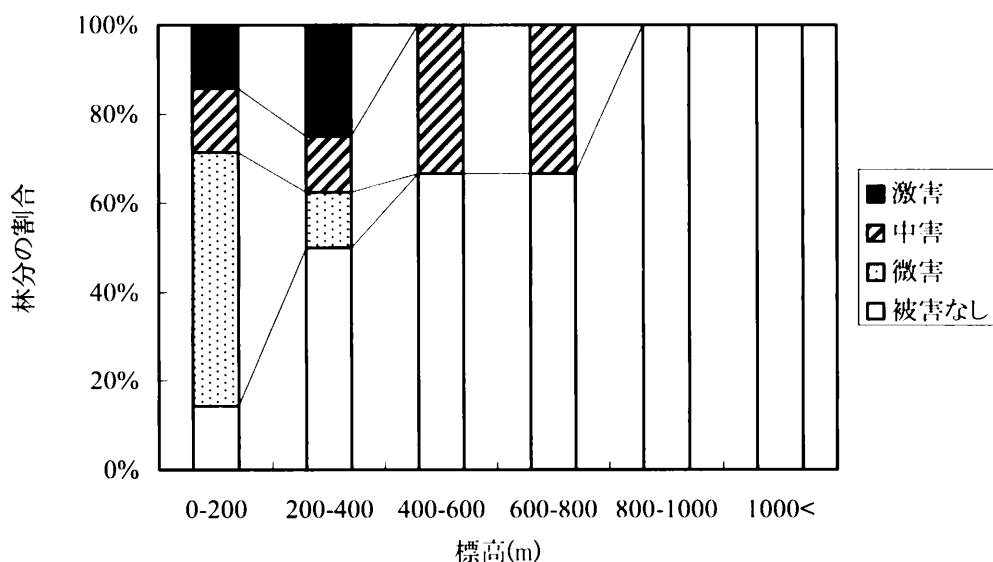


図 1-2-3 間伐後のヒノキ林の枯損の発生状況と標高の関係

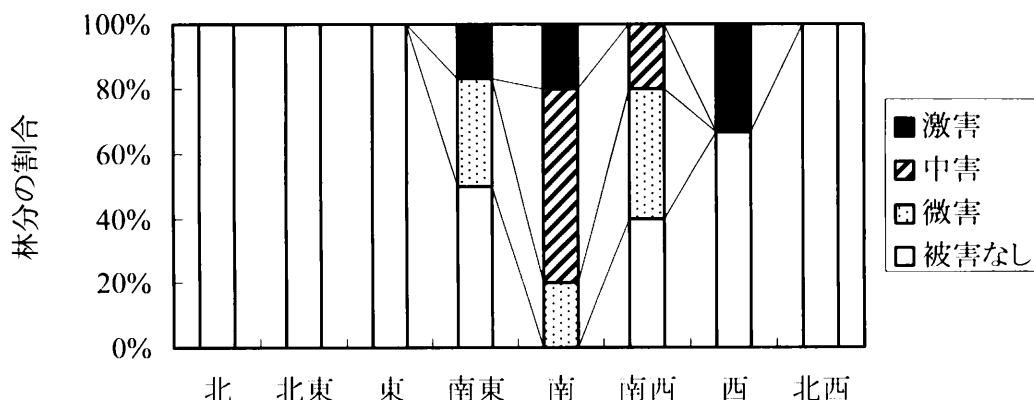


図 1-2-4 間伐後のヒノキ林の枯損の発生状況と斜面方位の関係

立ち枯れの発生の著しい高知県西部のヒノキ林分の区画調査では、切り株を含む毎木調査から本数間伐率は 39%であり、間伐後の残存木のうち 25%が枯死していた。枯死木のうち、被圧によると思われるものを除いた立ち枯れ木の発生率は 23%であった。間伐後の残存木のうち、73%に昆虫の加害によると思われる樹脂の流出痕があった。調査区画を斜面上部と下部の二つに区分すると、斜面上部で立ち枯れ木の発生率が斜面下部よりも高かった（図 1-2-5）。樹種の流出痕については、斜面上部と斜面下部とで違いは見られなかった（図 1-2-5）。一部の立ち枯れ木については昆虫の食害痕および脱出痕が見られたものの、食害痕や脱出痕が古いため、加害昆虫の種は特定できなかった。

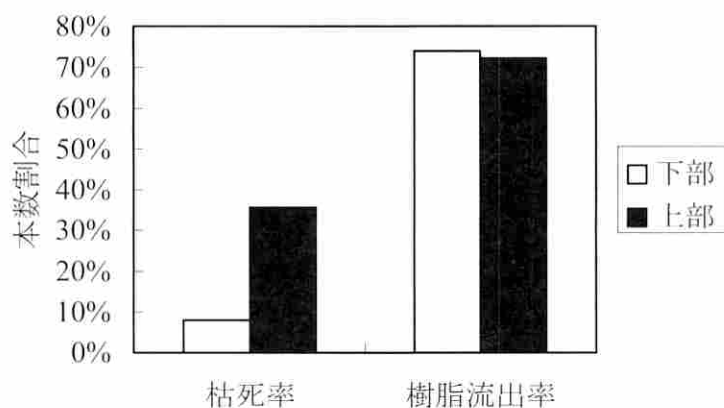


図 1-2-5 間伐後のヒノキ林の斜面の上下による立ち枯れと樹脂流出の本数の割合

エ 考察

(1) マスダクロホシタマムシの密度調査

今回の二つの試験地における密度調査の結果のうち、間伐後 1 年目の 2008 年の奥大野試験地では、間伐率が高いほど、マスダクロホシタマムシの成虫が多く捕獲された。これは林内に放置された間伐木が誘引源となってマスダクロホシタマムシがプロット内で捕獲されたが、対照区では誘引源としての間伐木がないので、ほとんど捕獲されなかったものと推測された。間伐後 2 年目にはマスダクロホシタマムシの捕獲数は少なかったが、立ち枯れ木の発生も見られなかったことから、奥大野試験地では間伐後の残存木への加害はほとんど生じていないと考えられた。一方、辛川試験地では間伐後 1 年目の 2008 年には 50%間伐区で多くの成虫が捕獲されたものの、対照区と比べて有意差は見られなかった。間伐後 2 年目には若干少なくなったが、50%間伐区、対照区とも成虫が捕獲された。

既往の被害事例の集計からは、マスダクロホシタマムシによるヒノキの枯損被害は四国地域では標高 400m以下の場所が多く、標高 800mを越す場所ではほとんど記録がないことが示されている（佐藤ら，2007）。今回、標高 900mの奥大野試験地において、低標高地である辛川試験地よりも多くのマスダクロホシタマムシが捕獲されたことから、高標高地で枯損被害が発生しないのは虫密度が低いわけではないことが示唆された。ただし、今回の 2 つの試験地におけるマスダ

クロホシタマムシの捕獲数の違いについては、試験地の標高だけでなく、間伐実施区の大きさの違い、間伐時期の違いなども影響をしている可能性がある。

(2) 間伐後の立ち枯れの発生状況調査

多地点のヒノキ林の調査結果から、標高の低い林分で強度な間伐後に立ち枯れが発生しやすく、また、南向き斜面（南東・南西向きを含む）で多くの立ち枯れが発生しているという結果が得られた。また、被害の激しかった林分の区画調査の結果から、林分内では斜面下部よりも斜面上部で立ち枯れが多く発生することが明らかになった。樹脂流出の状況から、強度な間伐後には斜面上部でも下部でも、残存木は昆虫の加害を受けて樹種を流出するものの、斜面上部では特に立ち枯れが多く発生するものと考えられた。

これらの調査結果から、ヒノキ林で強度な間伐後に立ち枯れの発生しやすい立地条件は、標高の低い地域の南向き斜面（南東・南西向きを含む）であり、林分内では斜面上部で多くの立ち枯れが発生することが明らかになった。これらの立地条件は、樹木にとって夏期の高湿や水分不足による水ストレスが生じやすい条件と一致する。渡辺ら（2008）は漏脂病や昆虫の加害を伴わないヒノキの樹脂流出と間伐の関係について検討し、間伐率が高いと樹脂流出が生じやすいこと、低標高の南向き斜面で樹脂を流出する割合が高いことを示し、強度な間伐に伴う環境の急変がヒノキ残存木にストレスを与えたこと、ストレスが強まると樹脂流出が増加することを示唆した。ここで示された立地条件は、今回の調査結果で明らかになった立ち枯れが生じやすい立地条件と一致する。間伐後にストレスを生じた樹木がマダコクロホシタマムシをはじめとする二次性害虫の集中的な加害を受けやすく、立ち枯れの発生にいたる場合が多いものと考えられる。ただし、後述（第1章3節、第2章3節）のように、間伐率50%では水ストレスが残存木に直接的に負の影響を与えることは示されず、間伐率75%で負の影響が示された。残存木への水ストレスは、間伐率の高さと立地条件の相互作用も影響するかもしれない。

一方、間伐後には台風のように強い風を受けることによって、樹木内部の組織が破壊されることでも、樹木は衰弱すると考えられる。高知県では台風による被害は南西～南～南東向きで多いとされるが（深田ら、2009）、こうした立地条件では強風で樹木が衰弱した結果、二次性害虫の加害を受けやすくなるかもしれない。しかし、今回の調査結果からは、昆虫の加害以外の要因による立ち枯れの発生については、検討することができなかった。

標高の低い地域の南向き斜面で、尾根に近い斜面上部では、特にヒノキの立ち枯れが発生しやすいので、こうした場所のヒノキ林では、強度な間伐は避けて、通常の間伐を行った方が望ましいと考えられる。

オ 今後の問題点

ヒノキ林で間伐後に生じる立ち枯れに対する昆虫以外の要因について検討できなかったが、昆虫の加害がなくても強度な間伐後に立ち枯れが生じる場合がどの程度あるか、今後、検討する必要がある。

カ 要約

強度な間伐の実施後にヒノキ林で昆虫の加害によって立ち枯れが発生する危険性について検討した。二次性害虫であるマダコクロホシタマムシは衰弱したヒノキを集中加害して枯死を生じさ

せるが、間伐率が高い林分ほど、間伐後にマダクロホシタマムシの密度が高くなった。間伐後にヒノキの立ち枯れの発生しやすい立地条件は、標高の低い地域の南向き斜面（南東・南西向きを含む）であり、林分内では斜面下部よりも斜面上部で多くの立ち枯れが発生していた。こうした立地条件にあるヒノキ林では、強度な間伐は避けて、通常の間伐を行った方が望ましいと考えられる。

キ 引用文献

- 深田英久・宮田弘明・山崎敏彦・渡辺直史（2009）間伐施業と台風被害との関係に関する調査，高知県立森林技術センター研究報告，34，84-97.
- 越知鬼志夫（1981）四国地方におけるマダクロホシタマムシの生態と被害，森林防疫，30，108-112.
- 佐藤重穂・松本剛史・奥田史郎（2007）マダクロホシタマムシによるヒノキ枯損被害，林業と薬剤，182，22-26.
- 竹谷昭彦（1979）九州地域の森林害虫の実態，林業と薬剤，67，1-7.
- 渡辺直史・深田英久・塚本次郎（2008）ヒノキ強度間伐林分の残存木樹幹表面における樹脂流出と間伐強度および立地要因との関係，森林立地，50，117-123.

（佐藤重穂・松本剛史）

3. 四国の強度間伐ヒノキ林分における残存木の葉の水分特性

ア 研究目的

樹木に対する水分ストレスは強度間伐が残存木に与える負の影響として考えられる要素のひとつである。表層土壌の水分は間伐によって増加する傾向があるという結果が示されているものの（荒木ら，2002；篠宮ら，2004，2006）、間伐によって林冠部の環境が突然変化することで、樹木個体内部の水収支には悪影響を与える可能性も指摘されている。そこで本研究では、強度間伐後の経過年数が異なる 2 地点のヒノキ林分を対象に、残存木の葉の水分特性を水ポテンシャルおよび $P-V$ 曲線法（Tyree and Hammel, 1972；丸山・森川，1983）から得られる特性値によって評価することを目的として調査を行った。

イ 研究方法

(1) 調査地

高知県土佐清水市にある辛川試験地 35 年生（2009 年現在）ヒノキ林分（辛川山国有林 1268 林班ほ小班）および高知県西部の 2002 年に強度間伐後に立ち枯れが発生したヒノキ林分である。以後、前者を「辛川」、後者を「立ち枯れ林分」と記述する。辛川では 2008 年 1 月に一部の調査区について本数率 57%の強度間伐（点状間伐）を実施した、間伐後間もない林分である。これまでのところ立ち枯れは発生していない。一方、立ち枯れ林分は 2002 年に本数率約 40%の強度間伐（点状間伐）が実施された後、約 7 年が経過した林分である（表 1-3-1）。枯死率は全体で約 23%であり、特に斜面上部では約 36%と高い枯死率を示していた（第 1 章 2 節参照）。辛川では同じ斜面下部に位置する 50%強度間伐区と無間伐区（それぞれ 20m × 20m）、立ち枯れ林分では斜面上部と下部（25m × 21m 調査区の上下半分の範囲）を調査対象とした。

表 1-3-1 調査区の概要

		間伐前 (本/ha)	間伐後 (本/ha)	間伐率 (%)	間伐実施年
辛川	無間伐区	1775	1775	0.0	－
辛川	間伐区	1700	725	57.4	2008
立ち枯れ林分		1714	1047	38.9	2002

(2) 調査方法

2009 年 9 月に、各試験地の調査区毎にヒノキ樹木 3 個体を選定した（表 1-3-2）。明け方（5:50－6:40）と日中（12:00－12:50）にそれぞれの個体の林冠部で 4 か所ずつ枝先をサンプリングした。そのうち 3 つについて、プレッシャチャンバー（PMS600、PMS 社）を用いて水ポテンシャルを測定した。また、残り 1 つのサンプルは吸水処理後、プレッシャーチャンバーで水ポテンシャルを繰り返し測定しながら $P-V$ 曲線を作成した。 $P-V$ 曲線の作成は丸山・森川（1983）の方法に従った。

ウ 結果

明け方と日中の水ポテンシャルを比較した結果を図 1-3-1 に示す。個体ごとに多少のばらつきはあるものの、夜明け前、日中ともに有意な差は見られなかった。また、 $P-V$ 曲線から得られる種々の水分測定値、すなわち圧ポテンシャルを失う時の水ポテンシャル ($\psi_{w^{up}}$)、その時の相対含水率 (RWC^{up}) および十分吸水したときの浸透ポテンシャル ($\psi_{s^{sat}}$) については、同一サイト内の調査区間（辛川では間伐区と無間伐区、立ち枯れ林分では斜面上部と下部）でも、異なるサイト間でも有意な差は得られなかった（表 1-3-3）。

表 1-3-2 供試木の概要

調査区	個体番号	胸高直径 (cm)	樹高 (m)
辛川 無間伐	127	20.4	16.0
	128	23.8	17.8
	136	19.4	14.2
辛川 50%間伐	290	26.9	15.4
	292	19.5	15.8
	294	23.8	15.8
立ち枯れ林分 上部	1	22.4	16.2
	2	29.2	17.2
	3	23.3	16.5
立ち枯れ林分 下部	4	29.3	18.6
	5	34.7	18.1
	6	33.3	18.4

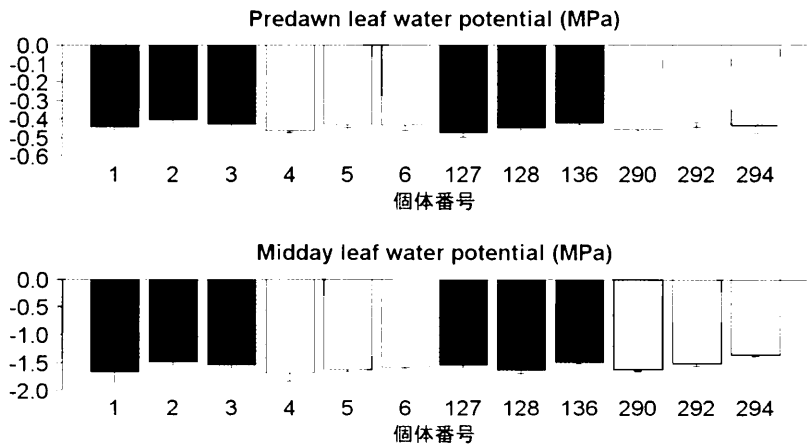


図 1-3-1 明け方（上）と日中（下）における個体毎の葉の水ポテンシャル

表 1-3-3 各調査区における $P-V$ 曲線から得られる水分特性値

調査区	ψ_w^{t1p} (-MPa)	ψ_s^{sat} (-MPa)	RWC ^{t1p}
辛川 無間伐	1.67	1.26	0.760
辛川 50%間伐	1.53	1.04	0.759
立ち枯れ林分 斜面上部	1.70	1.22	0.779
立ち枯れ林分 斜面下部	1.62	1.03	0.758

エ 考察

辛川試験地では、前年に行った予備調査の結果（宮本ら 2009）と同様、間伐処理の有無による差はみられなかった。これは、第 2 章 3 節で示されている炭素安定同位体を用いた水ストレスの評価結果とも一致する。一般的な傾向を示すためには、さらに十分な林分調査データの蓄積が必要であるものの、50%程度の間伐では、水ストレスが残存木に対して直接的に負の影響を与える可能性は小さいことが示唆された。

立ち枯れ林分においても、斜面位置による違いは見られなかった。立ち枯れ林分での個体は間伐後も比較的健全に生育してきた個体と考えられ、現時点でそのような個体を測定しても明らかな水ストレスの兆候は検出されなかったと考えられる。

ただし、十分吸水したときの浸透ポテンシャル（ ψ_s^{sat} ）と圧ポテンシャルを失う時の水ポテンシャル（ ψ_w^{t1p} ）との関係を見ると、各調査地における処理区間には異なる傾向が示された。辛川の 50%間伐区および立ち枯れ林分の斜面上部では、2 つの水分特性値の間に正の相関が見られた（辛川 50%間伐区 $r = 0.974$ 、立ち枯れ林分斜面上部 $r = 0.999$ ；共に $n = 3$ 、 $p < 0.05$ ）。一方、辛川の無間伐区および立ち枯れ林分の斜面下部ではこのような相関は見られず、一定の範囲に値が収まっていた。間伐から間もない林分や斜面上部の立地では、樹木周辺の環境条件（気温、土壌水分など）の不均一性が大きくなり、葉の水分特性値も個体間での変動幅が大きくなると考えられる。それによって耐乾性に劣る個体が枯死する危険性も示唆されるが、今回はデータ数が少ないために十分な議論ができない。更なるデータの蓄積が必要である。

オ 今後の問題点

本節では、いずれの調査区においても残存木に対する明らかな水ストレスの兆候は検出されなかった。辛川試験地は北西斜面に位置しており、南向き斜面の林分と比べて水ストレスの影響が小さかったこと、間伐区、無間伐区共に斜面下部に位置していたことが影響している可能性がある。一方、立ち枯れ林分は南向き斜面に位置しており、辛川よりも水ストレスを受けやすい立地環境であると考えられる。しかし、間伐直後は立ち枯れが発生したものの、現在残存している個体の多くは健全に生育しているために、水ストレスの検出が困難であったことが考えられる。以

上のことから、強度間伐が残存木の水分ストレスについて、一般的な傾向を見出すためには、間伐直後において斜面方位の異なる様々な林分におけるデータが必要である。

カ 要約

強度間伐後の残存木が受ける水ストレスを評価する目的で、強度間伐後間もない林分と間伐から約7年が経過し、立ち枯れが発生しているヒノキ林分において、残存木の水ポテンシャルと $P-V$ 曲線法によって得られる水分測定値を間伐区と無間伐区、斜面上部・下部とで比較した。明け方と日中の葉の水ポテンシャルについて、間伐処理や斜面による違いは見られなかった。 $P-V$ 曲線から得られる種々の水分測定値、すなわち圧ポテンシャルを失う時の水ポテンシャル (ψ_w^{up})、その時の相対含水率 (RWC^{up}) および十分吸水したときの浸透ポテンシャル (ψ_s^{sat}) についても、間伐処理の違いや斜面位置の違いによる差は見られなかった。今回調査した間伐林分では残存木に顕著な水ストレスは検出されなかったが、南向き斜面の立ち枯れ林分では、間伐直後には枯死した個体の少なくとも一部は水ストレスを受けていたと考えられ、今後このような立地での間伐直後における残存木の水ストレスを評価していく必要がある。

キ 引用文献

- 荒木 誠・加藤正樹・宮川 清・小林繁男・有光一登 (2002) ヒノキ林における皆伐および間伐が表層土壌水分状態に及ぼす影響, 森林立地, 44, 1-8.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・深田英久 (2004) 間伐がヒノキ林の表層土壌水分に及ぼす影響, 森林応用研究, 13, 137-142.
- 篠宮佳樹・豊田信行・中岡圭一・奥田史郎・稲垣善之 (2006) 間伐・小面積皆伐がヒノキ林の表層土壌水分に及ぼす影響, 森林応用研究, 15, 93-99.
- 丸山 温・森川 靖・(1983) 葉の水分特性の測定— $P-V$ 曲線法—, 日林誌, 65, 23-28.
- 宮本和樹・奥田史郎・野口麻穂子・伊藤武治 (2009) 強度間伐後のヒノキの葉の水分特性に関する予備試験, 森林応用研究, 18, 27-31.
- Tyree, M.Y. and Hammel, H.T. (1972) The measurement of the turgor press and the water relations of plants by the pressure bomb technique. J. Exp. Bot 23, 267-282.

(宮本和樹・野口麻穂子・伊藤武治・奥田史郎)

第2章 強度間伐による林分成長および材質への影響評価

1. 四国地域のヒノキ林における強度間伐後の林分成長と林分変化

ア 研究目的

木材の自由化に始まった国内市場における木材価格の低迷傾向は長期的に定着するばかりでなく、更に進行しその結果として針葉樹人工林の保育も疎かにされるようになってきた。そのため、近年保育を必要とする林齢の人工林資源はますます増加してきており、施業技術も修正を迫られる状況にある。藤森(1991)が提唱している多様な施業指針に沿った長伐期の人工林管理も、高品質大径材の需要が大きい中では有効な生産目標とならない状況になり、人工林も木材生産機能と環境保全機能を併せた多様な機能の発揮を強く求められるようになってきた。

針葉樹人工林はその施業体系の性質上、個体密度の調節を不可欠としており、保育不足の林分に対する効果的な間伐方法として強度間伐が施業方法の一つとして検討、実施されるようになってきたと考えられる(高知県 2003)。ただ、強度間伐自体にははっきりとした体系が在るわけではなく、また強度間伐の定義も曖昧である。間伐によって誘導しようとする目標林も定まっておらず、施業実施側の直接的な目的も経営的視点から見た間伐回数の削減、間伐遅れ林における保全機能の低下を防止するための林内植生の再生、など多様である。さらには、従来の中度、弱度の間伐に比べて、間伐後の林分に及ぼす影響についても明らかでない点が多い。特にヒノキ林については伐開による枯損木発生などのリスクが生じる可能性もある。そこで、実際に一定の強度での間伐を実施し、その後の林分成長、個体成長を比較することで、強度間伐を含めた間伐強度が当面の林分に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

イ 研究方法

強度間伐の定義そのものも難しいところがあるが、ここでは従来の間伐強度を 30%程度までとして、胸高断面積合計比で最大 50%となる間伐を想定した。高知県内の2カ所のヒノキ林で、いくつかの異なる間伐率での間伐を実施し、間伐後の個体成長、林分成長を比較するための調査地を設定した。間伐を実施した林分は、高知県いの町本川(奥南川)と大正町(大正)に位置する2林分のヒノキ林である。いずれも、過去に除伐を実施した以外は密度調整を実施していない林分である。間伐はそれぞれ、2002 年秋に実施した。事前の林分調査を元に、立木配置も考慮して点状に間伐するように選木し、それぞれの林分において目標として、本数間伐率で約 30%、40%、50 の間伐処理区(20m×20m)を設けたほか、奥南川では無間伐区を設けた。大正では、間伐後の 2004 年に、隣接林分の無施業林分内に無間伐区(15m×15m)を設けた。林齢は奥南川が処理区設定時点で 30 年生、大正が 38

年生でと大正の方が若干高かった。奥南川、大正とも針葉樹人工林に囲まれており周囲に広葉樹は少ない。試験地は奥南川が標高約 880m、大正が約 280m と本川の方が高い標高に位置していた。それぞれの、林分概況と間伐実施前後の変化を表 2-1-1、2 にそれぞれ示す。間伐は形質不良木をほぼ全個体間伐しながら、残りの個体を均等な配置とする、下層に全層を加味したやり方としたため、本数間伐率に比べて断面積間伐率の数値は小さくなる傾向があったが、間伐強度の大小関係が変わることは無かった。大正では、50%間伐区の一つが胸高断面積間伐率でみると 40%に近くなったが、当初設定上のまま 50%として表す。ほぼ毎年成長休止期に間伐区内の全個体の胸高直径を測定したほか、適宜樹高の測定を行った。また大正については、間伐直後の樹高はサンプル個体のみについて計測した。

表 2-1-1 間伐林の概況（奥南川）

処理区	(cm)	(m)	(m ² /ha)	(m ³ /ha)	本数 (No/ha, %)			断面積 間伐率	材積 間伐率
	胸高直径	樹高	断面積	材積	間伐前	間伐後	間伐率		
30%	17.86	14.39	57.5	394.6	2400	1525	36.5	32.2	31.6
40%	17.70	12.99	56.4	354.1	2475	1400	43.4	37.3	36.9
50%	16.37	14.50	57.7	405.8	3025	1325	56.2	49.9	49.2
無間伐	16.84	14.88	68.9	506.1	3000	3000	0.0	0.0	0.0

表 2-1-2 間伐林の概況（大正）

処理区	(cm)	(m)	(m ² /ha)	本数 (No/ha, %)			断面積 間伐率
	胸高直径	樹高	断面積	間伐前	間伐後	間伐率	
30%(1)	23.68	18.14	54.0	1750	1200	31.4	25.7
30%(2)	28.39	19.16	47.7	1200	725	39.6	31.8
40%(1)	26.48	18.71	39.9	1325	725	45.3	36.5
40%(2)	26.11	18.77	47.1	1550	850	45.2	38.6
50%(1)	24.79	18.40	38.5	1675	775	53.7	42.8
50%(2)	26.59	18.90	43.0	1350	750	44.4	35.4
無間伐※	23.63	17.87	85.8	1911	1911	0.0	0.0

※無間伐林は2004年設定時、樹高はサンプル個体の平均

ウ 結果

個体別の成長量を間伐から約 6 年経過した林分で比較すると、胸高直径の年平均成長量（図 2-1-1）は奥南川、大正いずれでも無間伐区よりも間伐区の方が有意に大きかった（Tukey-Kramer の HSD 検定、 $p<0.05$ 、以下同様）。間伐率別では奥南川では 30%区のみ有意に小さかったが、40%、50%では差がなかった。大正では処理区間での間伐率のバラツ

キもあって、間伐率ごとの差は明らかでは無かったが、奥南川、大正と合わせて断面積間伐率と直径成長でみると、間伐率が高いほど直径成長が大きくなる正の相関がみられた。奥南川の個体別の間伐後6年間の平均樹高成長量は（図2-1-2左）、間伐区の方が無間伐区に比べて小さく、特に40%、50%区の強度間伐区は30%区に比べても小さかった。ただし、最近2年間の樹高成長量で比較すると、奥南川、大正とも無間伐区、間伐区とも差が無かった。奥南川の個体別の材積成長量では（図2-1-2右）、無間伐も含めて処理区間での有意な差は無かった。間伐区での直径、樹高成長の違いを反映して、個体別の平均形状比（H/D）はいずれの間伐率でも無間伐区に比べて小さく（図2-1-3右）、間伐の効果が発揮されていたが、間伐率の違いによる差は明らかではなかった。

林分あたりの材積成長量をみると（図2-1-3左）、奥南川では間伐区での材積成長量が無間伐区に比べて小さく、特に間伐率が高いほど成長量は小さかった。胸高断面積合計の年平均成長量は（図2-1-4）、異なる間伐区間では顕著な差はみられないが間伐強度が高い林分（40-50%区）で高い傾向を示し、奥南川では無間伐区より若干大きかった。無間伐区での胸高断面積成長量は奥南川、大正では差が小さく、全体的に胸高断面積成長量でみた間伐処理区間での差は間伐後6年程度で縮まっているとみられる。

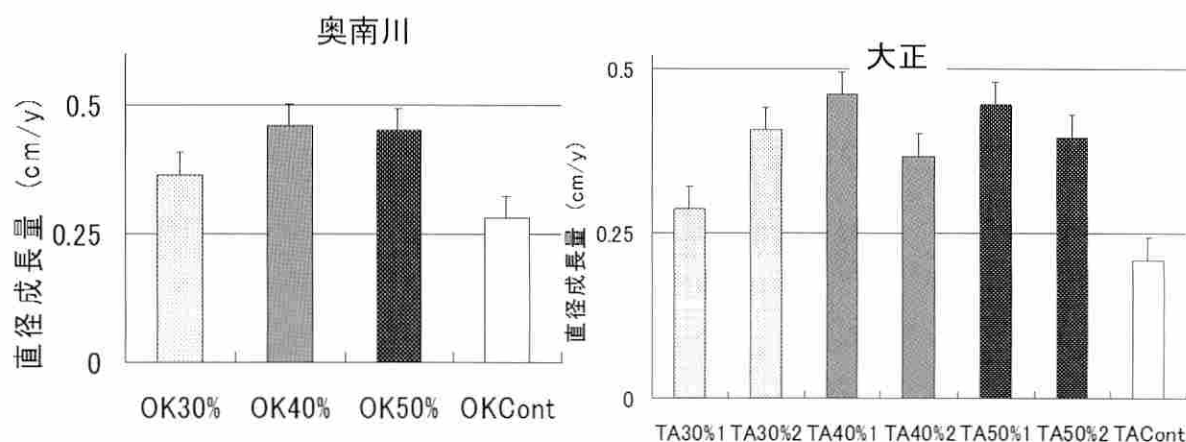


図2-1-1 間伐後6年間の平均直径成長量

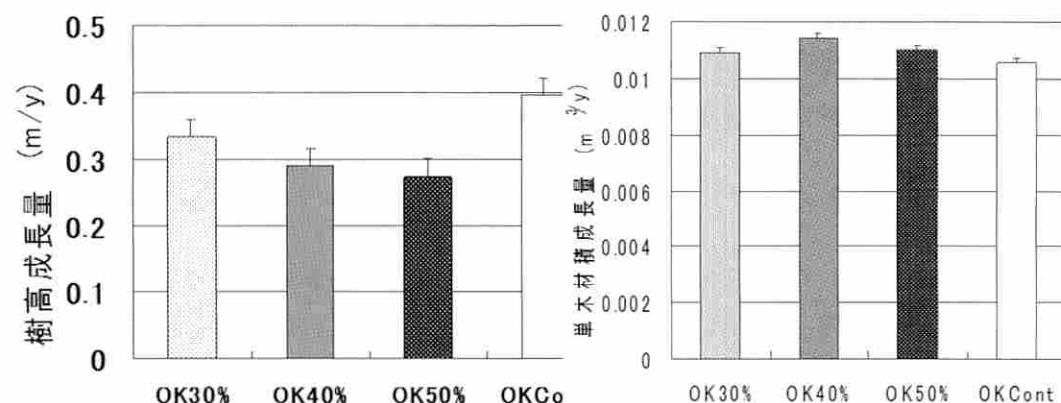


図2-1-2 間伐後6年間の個体別の樹高成長量、材積成長量（奥南川）

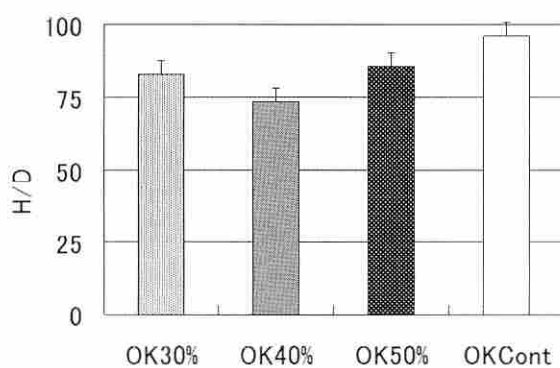
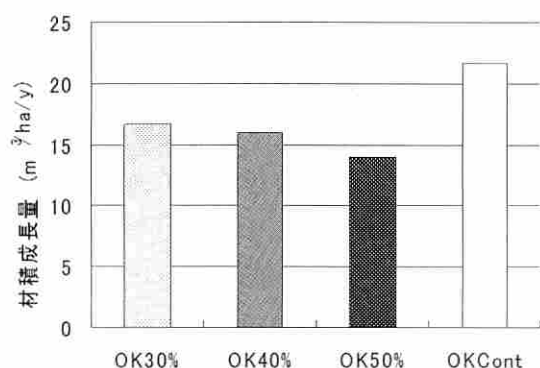


図 2-1-3 間伐後の林分材積成

長量と個体別の平均形状比（奥南川）

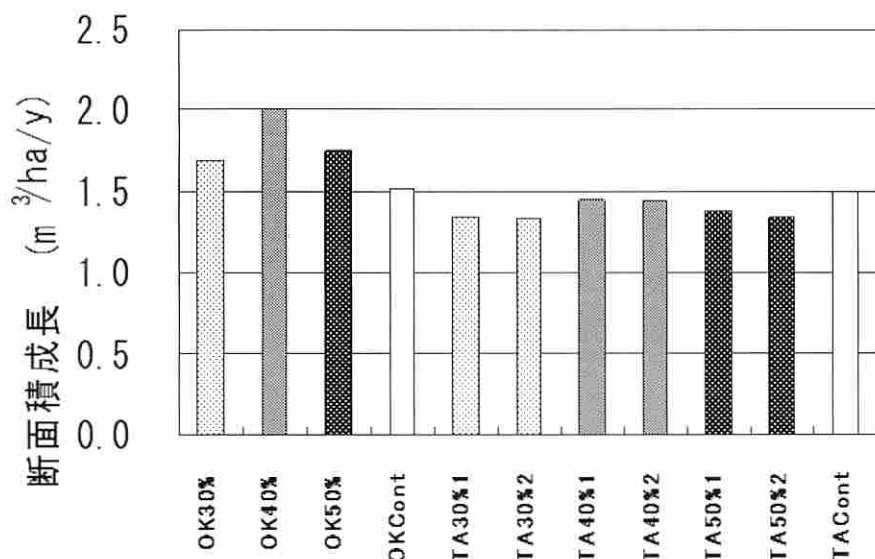


図 2-1-4 間伐後 6 年間で林分の胸高断面積合計の成長量

エ 考察

ヒノキ林の強度間伐による成長改善効果は、特に間伐後の一定期間における直径成長量の改善に顕著に表れると考えられた。これは、細田ら(2005)や深田ら(2008)らによる報告と同様の傾向を示した。また、個体別の平均樹高の成長量については、奥南川で無間伐区より間伐区の方が小さく、特に間伐率が大きいほど樹高成長が小さくなっており、深田ら(2008)が示した傾向と同じとなった。これは、結果として個体あたりの材積成長量に差がない結果となって表れていると考えられる。それでも、形状比や直径成長には間伐による効果が間伐率の違いも加味して表れており、個体の成長については強度の間伐による改善の効果は発揮されることが考えられた。

強度間伐後の林分あたりの材積成長量の変化では、単木の材積成長量に間伐率による差が

ないことから窺えるように、間伐に伴う個体数の減少が、無間伐区よりも小さい林分成長量をもたらしたと考えられる。一方で、胸高断面積合計では、間伐後6年程度で無間伐と同程度か上回る程度の成長回復が強度間伐区でもみられており、少なくとも従来の間伐にくらべても強度間伐による成長減退の影響は小さいと考えられた。ただし、無間伐区との差については、間伐後の一時的な樹高成長の変化など林冠構造の変化などが影響していることが理由として考えられる。個体における小さな樹高成長と、直径成長の増加は樹冠も含めた間伐個体の水平方向への拡大が先行したことを示唆する。同じ林分で葉量の推定を行った宮本ら（2009）は、間伐率を問わず間伐後5年程度での葉量の回復を指摘しており、間伐後の樹冠周囲での光環境の改善効果も考慮すると、間伐区での個体あたりの資源量は増加していることが考えられ、樹冠の拡大、葉量の増加に伴う枝量への一時的な資源配分の変化が生じている可能性がある。今後、林冠の再鬱閉が進む状況で、個体数の減少を補う個体成長により林分あたりの成長量が間伐区で増加していき、無間伐区との成長量の差が縮まって行くことが考えられる。

オ 今後の問題点

強度間伐も含めたヒノキ林の間伐後の成長については、調査した林分では著しい負の影響はみられていない。しかしながら、ヒノキ林の立ち枯れなどの枯損事例は報告されており、異なる立地条件での間伐後の林分成長についてもまだ多くの事例を参照する必要がある。さらに、間伐後の個体、林分成長についての今後の推移についても、林分の高齢級化に伴う林分構造の変化なども含めてさらに追跡していく必要がある。

カ 要約

ヒノキ人工林における、強度を含めたいくつかの異なる強度での間伐後の林分、個体成長への影響を評価するために、高知県内の高標高域（奥南川 880m）と低標高域（大正 240m）の2カ所のヒノキ人工林に間伐試験地（本数間伐率で 30-50%間伐区および無間伐区）を設定し、残存木の成長量を比較した。間伐から約6年経過した林分では、個体の直径成長量（年平均）は、概ね間伐率が高いほど高い傾向を示した。一方、個体の樹高成長量は奥南川でいずれの間伐区でも無間伐区に比べて小さく、間伐率が大きいほど小さい傾向があった。個体の材積成長量（奥南川）はわずかに間伐区の方が無間伐区に比べて大きかったが、間伐率での差は明瞭では無かった。一方、林分での成長量は、胸高断面積合計の年平均成長量でみると、異なる間伐区間では顕著な差はみられないか間伐強度が高い林分（40-50%区）で高い傾向を示し、奥南川では無間伐区より大きかった。ただし、林分材積成長量でみると（奥南川）間伐区は無間伐区に比べてまだ小さく、間伐率が大きいほど成長量も小さかった。間伐は直径の成長や形状比の改善には短期的に効果が出ており、林分成長については減退がみられたものの、長期的には無間伐との差は縮まって行くと考えられた。

キ 謝辞

本川での本試験は四国森林管理局森林技術センターと共同で実施されており、試験地の設定や測定について多大なご協力を頂いた。また、大正の試験地については、林分の選定、

間伐の実施について高知県須崎林業事務所にご協力頂いた。合わせて厚く感謝する。

ク 引用文献

藤森隆郎 (1991) 多様な森林施業、全国林業改良普及協会、p191

高知県間伐対策推進室 (2003) 新たな森林づくりに向けた取り組み<高知県>、林業技術、735 : 20-24

細田和男ほか(2005) 間伐強度がヒノキ人工林の林分成長に及ぼす影響―愛知県信楽町段戸国有林の事例―、日本森林学会関東支部大会発表論文集 56:43-46

深田英久ほか(2008) 強度間伐施業等が残存木に与える影響に関する調査、高知県立森林技術センター平成 20 年度研究成果報告書、35-36

宮本和樹ほか(2009) 間伐から 5 年が経過したヒノキ人工林の成長と葉面積指数の比較、森林立地 51(1):21-26

2. 九州のスギ林における強度間伐後の残存木の成長経過および16年後の林分構造と樹形

ア 研究目的

近年の厳しい林業事情を反映して、従来の弱度、多頻度の間伐に代わってより高い間伐率で間伐を行う「強度間伐」が行われるようになってきた。強度間伐には、残存木の成長が比較的長期間大きく維持されること、主伐までの間伐回数を減らして低コスト化できることなどが期待されている。しかし、強度間伐が残存木の成長に与える効果（影響）と、強度間伐後ある程度の年数が経過した林分の構造についてはまだ不明な点が多く、特に九州のスギ林における報告はほとんどない。

本課題では、鹿児島県において、33年生時に強度間伐（本数間伐率62%）と通常間伐（同約20%）が行われたスギ人工林に調査区を設定し、樹幹解析と毎木調査を行った（荒木ら、2010）。本課題の目的は、強度間伐区と通常間伐区における間伐後の残存木の成長経過（胸高直径、樹高、単木材積など）を比較し、強度間伐が短期的（5年程度）および中期的に（15年程度）残存木の成長に与える効果（影響）を明らかにすることと、さらに、間伐から16年経過後の強度間伐区と通常間伐区における林分構造や樹形（樹冠形、幹形）の違いを明らかにすることである。

イ 研究方法

（1）調査地

鹿児島県薩摩川内市にある、49年生（2009年現在）のスギ人工林（藤川山林（株）の社有林）を調査地とした。調査林分は北東向きの緩斜面で標高400–450mの範囲にあり、地位Ⅰに相当する。本林分は、1961年に約3000本 ha^{-1} で植栽された後、15年生時に除伐、枝打ち（地上高3–4m）、20年生時に保育間伐（約15%）、27年生時に利用間伐（約20%）が行われており、いわゆる間伐遅れ林分ではない。1993年（33年生時）に複層林を造成するため、この林分の7割程度の面積（0.69ha）に対して、本数間伐率で62%（1,211→462本 ha^{-1} ）の間伐と地上高8–10m程度の枝打ちが行われ、下木としてスギが植栽された（以下、強度間伐区）。残りの3割程度の面積（0.27ha）に対しては、約20%の間伐（間伐前後の立木密度は不明）が行われた（以下、通常間伐区）。間伐はいずれも定性間伐である。1993年以降は間伐などの作業は行われておらず、多少の風倒木はあったものの、台風などによる大きな風害は発生していない。

（2）調査方法

2009年6月に、調査林分の周囲測量と毎木調査を行った。各間伐区とも全域を毎木調査の対象とし、地上高1.3mで胸高直径（ D ）を全木測定した。樹高（ H ）と枝下高は、各区とも本数で2割程度の個体（強度間伐区64本、通常間伐区45本）について、測高器（Haglöf社Vertex IV）を用いて測定した。間伐区ごとに D - H 関係（拡張相対成長式）を求め（依田、1971）、残りの木の樹高（ H ）を推定した。林分材積を推定するため、後述する10本の樹幹解析供試木から（ $D^2 \times H$ ）と単木の幹材積（ V ）との相対成長式を両区共通で求めた（依田、1971）。この式を用いて全個体について幹材積を計算し、間伐区ごとに合計したものを各区の林分材積とした。収量比数は、鹿児島県におけるスギ人工林システム収穫表SILKS（長濱ら、2006）を使用して計算した。その際、樹高測定木のうち樹高上位60%の個体の平均値を上層木樹高（強度間伐区22.4m、通常間伐区24.0m）とした。

各間伐区から 5 本ずつ樹幹解析の供試木を選び(表 2-2-1), 2009 年 7 月に供試木を伐倒した。伐倒した際、樹高および 1m ごとの樹冠半径を測定した。樹幹解析用の円盤を、地上高 0.3m から 15.3m までは 1m ごとに、15.3m から梢端までは 50cm ごとに採取した。円盤断面をフラットベッドスキャナーにより画像化し、パソコン上で解析ソフト Stem Analyzer (今村ら, 2001) を使用して長径と短径の 4 方向について年輪幅を測定した。年輪データから直径や樹高、材積の計算には、解析ソフト Stem Density Analyzer (SDA) (Nobori ら, 2004) を使用した。

表 2-2-1 樹幹解析供試木の概要

個体 ID	強度間伐区					通常間伐区				
	T1	T2	T3	T4	T5	C1	C2	C3	C4	C5
胸高直径(cm)	35.3	40.4	42.3	43.9	50.5	23.2	32.1	35.1	38.4	42.7
樹高 (m)	22.0	21.0	23.0	24.5	23.7	21.8	25.2	24.6	23.6	22.9
枝下高 (m)	13.7	9.0	8.8	8.7	9.5	11.6	10.6	12.2	12.5	9.2
樹冠長率 (%)	37.4	57.2	62.0	64.7	60.2	46.9	57.9	50.7	46.9	60.0
枝下径 (cm)	19.9	28.0	30.2	31.8	37.7	16.6	25.0	24.6	24.1	30.7
形状比 (m m ⁻¹)	62	52	54	56	47	94	78	70	62	54
材積 (m ³)	0.99	1.21	1.38	1.56	2.12	0.48	1.04	1.13	1.21	1.44

ウ 結果

(1) 残存木の成長経過

強度間伐区、通常間伐区それぞれ 5 本の樹幹解析木から得られた、胸高直径と単木幹材積の連年成長量の平均値を図 2-2-1 に示した。33 年生時の間伐以前は胸高直径成長量に両区の間で有意な差はなかったが、強度間伐区では間伐の翌年からすぐに増加を始め、34 年生以降は強度間伐区の方が有意に大きかった (t-test, $p<0.05$)。単木材積成長量は、両区とも間伐から数年間はほぼ横ばいであったがその後増加し、強度間伐区の方が長い期間増加が続いた。42 年生以降は、強度間伐区で平均材積成長量が有意に大きくなり (t-test, $p<0.05$)、通常間伐区よりも 1.7 倍程度大きい値で安定した。

1 年間あたりの樹高成長量は、気象条件などの影響を受けているためか、間伐の効果を検出しにくかった。そこで、5 年間あたりの樹高成長量の平均値を間伐前後で比較した (図 2-2-2a)。間伐前の 5 年間 (28-32 年) は樹高成長量に区間の差がなく、両区とも 2.1m 程度樹高が伸びていた。しかし、間伐後の 5 年間 (33-37 年) では、通常間伐区で 1.6m、強度間伐区では 0.9m まで樹高成長量が減少し (Paired t-test, $p<0.01$)、強度間伐区で有意に樹高成長量が小さかった (t-test, $p<0.05$)。強度間伐区では次の 5 年間 (38-42 年) で樹高成長量は増加し (Paired t-test, $p<0.01$)、間伐前と同程度まで回復した。さらに次の 5 年間 (43-47 年) では、樹高成長量は通常間伐区より強度間伐区で有意に大きくなった (t-test, $p<0.05$)。

通常間伐区、強度間伐区それぞれ 1 個体について、間伐前後における 5 年間あたりの直径成長量の垂直分布を図 2-2-3 に示した。地際を除いた幹内において、直径成長量が最大となる高さは、

齢の増加（樹高成長）にともない上方に移動するが、概ね梢端から 3m ほど下の幹上部であった。この幹上部における 5 年間あたりの直径成長量の最大値を、幹内最大直径成長量と定義した（図 2-2-3 中の矢印）。通常間伐区の個体では、幹内最大直径成長量は間伐前後を通じて $5 \text{ cm } 5\text{year}^{-1}$ 前後で大きな変化はなかった。しかし、強度間伐区の個体では、概ね $6 \text{ cm } 5\text{year}^{-1}$ 前後である幹内最大直径成長量が間伐後 5 年間（33-37 年）は $3.5 \text{ cm } 5\text{year}^{-1}$ となり、幹上部（樹冠内の幹）の直径成長量が大きく減少していた。そこで、5 年間あたりの幹内最大直径成長量の平均値を間伐前後で比較すると（図 2-2-2b）、樹高成長量とほぼ同じ傾向（図 2-2-2a）を示した。すなわち、強度間伐後の 5 年間（33-37 年）は幹内最大直径成長量が減少していた。しかし、次の 5 年間（38-42 年）で回復し、さらに次の 5 年間（43-47 年）では幹内最大直径成長量は通常間伐区より強度間伐区で有意に大きくなった（t-test, $p < 0.01$ ）。

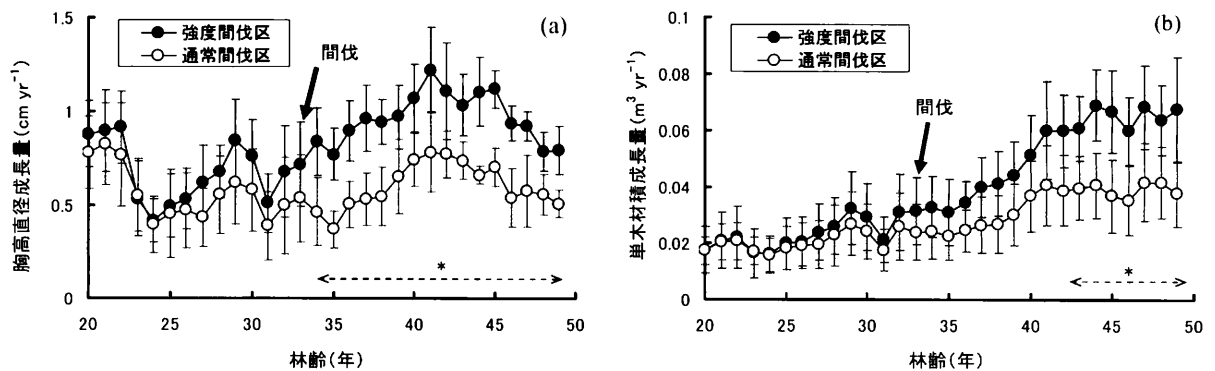


図 2-2-1 間伐前後における胸高直径 (a) と単木幹材積 (b) の連年成長量
実線の矢印は間伐時期を示す。バーは標準偏差。破線の矢印は平均値に区間で有意差があることを示す (t-test, $n=5$, $p < 0.05$)。

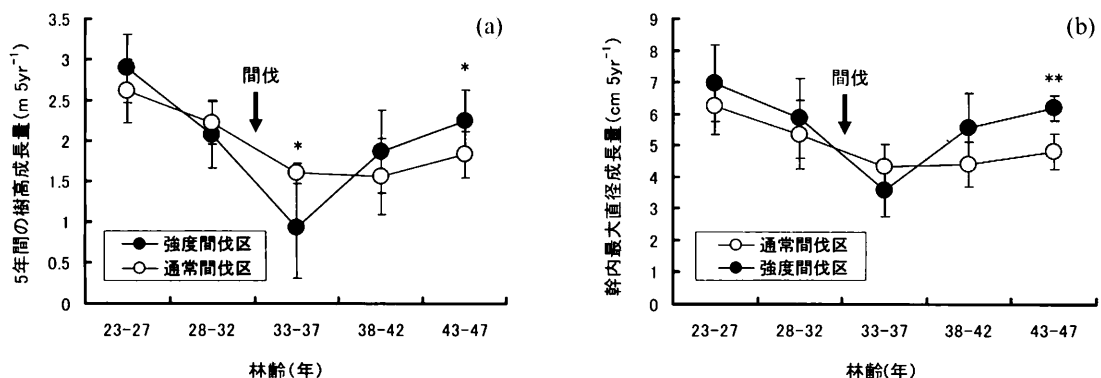


図 2-2-2 間伐前後における 5 年間あたりの樹高成長量 (a) と幹内最大直径成長量 (b)
矢印は間伐時期を示す。バーは標準偏差 (t-test, $n=5$, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)。幹内最大直径成長量については図 2-2-3 を参照のこと。

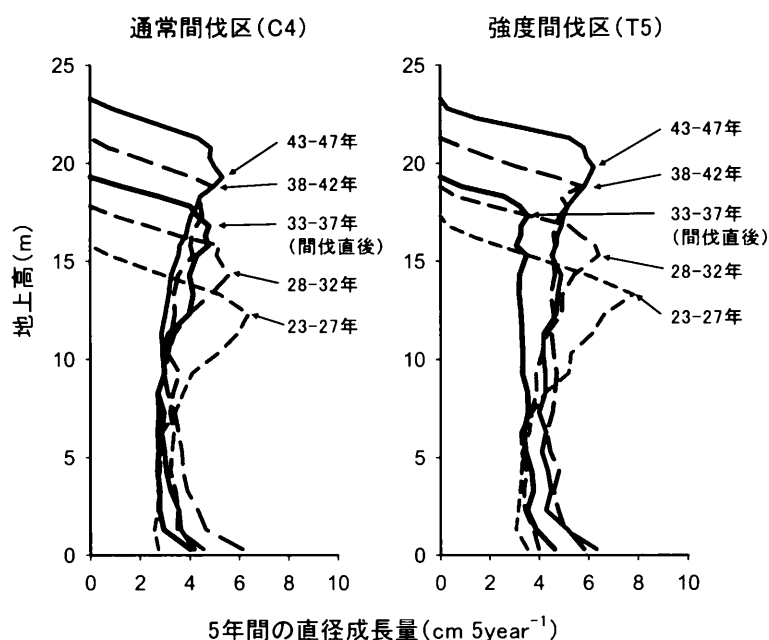


図 2-2-3 間伐前後における 5 年間あたりの直径成長量の垂直分布

通常間伐区 (左) 強度間伐区 (右) それぞれ 1 個体 (C4, T5) の例を示した。矢印で示したところが地際を除いた幹内における直径成長量の最大値で、これを幹内最大直径成長量と定義した。

(2) 間伐から 16 年後の林分構造

強度間伐区と通常間伐区における、間伐から 16 年が経過した 49 年生現在の林分構造を表 2-2-2 に示した。立木密度はそれぞれ 441 と 697 本 ha^{-1} 、収量比数はそれぞれ 0.56 と 0.74 であった。強度間伐区では間伐から 16 年が経過した後も収量比数が低いため、当面の間、あるいは主伐まで間伐は必要ないと考えられた。

平均胸高直径は強度間伐区が 42.0cm、通常間伐区が 34.5cm であり、強度間伐区で大きかった (t -test, $p < 0.0001$)。胸高直径の相対頻度分布は両区とも正規分布をしていたが、強度間伐区のほうがバラツキが小さく、分布が全体的に右にシフトしていた (図 2-2-4)。したがって、強度間伐区のほうが、胸高直径が大きい個体が多く割合を占めていた。両区の頻度分布形の違いは、強度間伐区のほうが間伐時に直径の小さい個体が多く除去されたことと、間伐後の残存木の直径成長量の違い (図 2-2-1a) によってもたらされたものと考えられる。

平均胸高直径は強度間伐区で大きかったが、平均樹高は通常間伐区の方がやや高かった (t -test, $p = 0.0002$)。その結果、平均形状比 (樹高 ÷ 胸高直径, m m^{-1}) は、強度間伐区が 51.1、通常間伐区が 66.7 と強度間伐区で小さかった (t -test, $p < 0.0001$)。強度間伐によって残存木の形状比が小さくなり、間伐後に個体の耐風性が高まることが示唆された。

平均枝下高は強度間伐区が 9.7m、通常間伐区が 12.2m であり、両区の違いに 2.5m の差が認められた (t -test, $p < 0.0001$)。強度間伐時に行われた枝打ち高さが 8-10m 程度だったことから、強度間伐区では間伐後に枝の枯れ上がりがそれほど進んでいないと考えられる。その結果、平均樹冠長率は強度間伐区が 54.8%、通常間伐区が 46.0%であり、強度間伐区の個体のほうが相対的

に長い樹冠を持っていた (t-test, $p<0.0001$)。

1 ha あたりの胸高断面積合計と林分材積は、強度間伐区より通常間伐区の方が大きかった。しかし、通常間伐区の値に対する強度間伐区の値の比は、胸高断面積合計で 0.93、林分材積で 0.85 であった。間伐時には間伐率の違い (62%と約 20%) を反映して両区の差がもっと大きかったと考えられるため、間伐後の 16 年間で両区の差は縮まったと推察される。

表 2-2-2 間伐から 16 年後 (49 年生現在) の林分構造

	強度間伐区	通常間伐区
面積 (ha)	0.69	0.27
本数 (本)	305	189
立木密度 (本 ha ⁻¹)	441	697
収量比数	0.56	0.74
平均胸高直径 (cm)	42.0 *	34.5 *
平均樹高 (m)	21.5 * ¹⁾	22.7 * ²⁾
平均枝下高 (m)	9.7 * ¹⁾	12.2 * ²⁾
平均樹冠長率 (%)	54.8 * ¹⁾	46.0 * ²⁾
平均形状比 (m m ⁻¹)	51.1 * ¹⁾	66.7 * ²⁾
胸高断面積合計 (m ² ha ⁻¹)	61.9	66.7
林分材積 (m ³ ha ⁻¹)	598	703

* 平均値に区間で有意差があったことを示す (t-test, $p<0.01$) ¹⁾ n=66, ²⁾ n=45

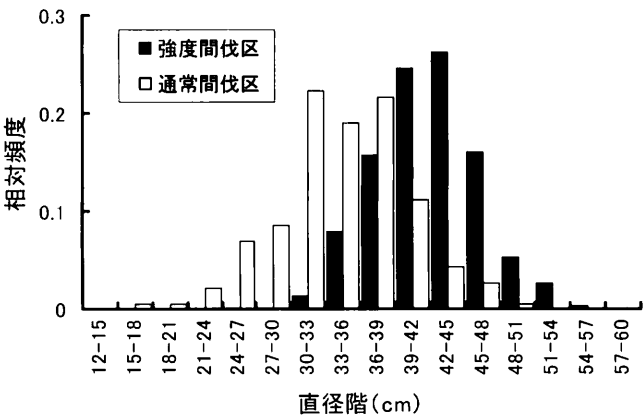


図 2-2-4 間伐から 16 年後 (49 年生現在) の胸高直径の相対頻度分布

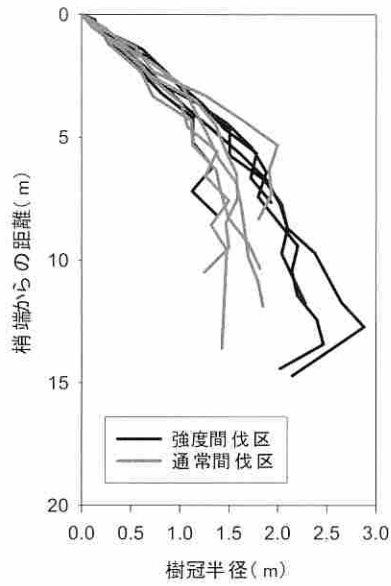


図 2-2-5 間伐から 16 年後（49 年生現在）の樹冠形

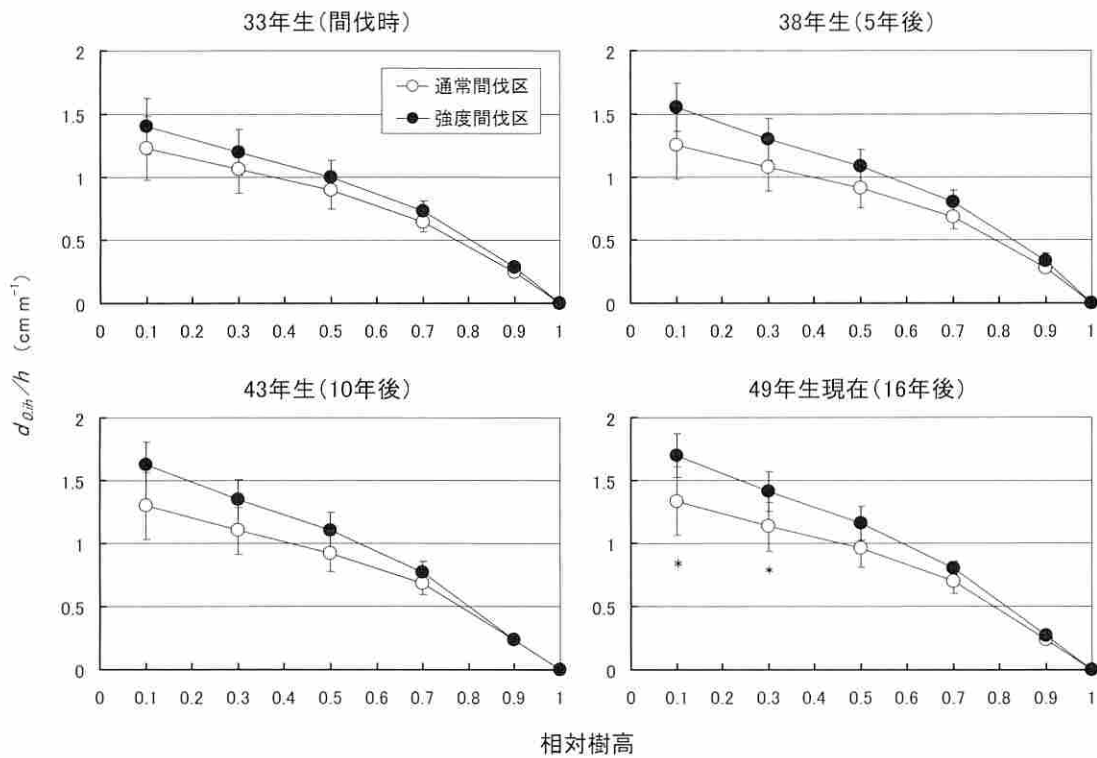


図 2-2-6 間伐から 5 年ごとの幹形（完満度判定のための幹曲線）の変化

横軸は相対樹高，縦軸の $d_{0.ih}/h$ は相対高 $0.1h$, $0.3h$, $0.5h$, $0.7h$, $0.9h$ における直径 $d_{0.ih}$ (cm) を樹高 h (m) で割ったもの（梶原，1993）。各区 5 本の平均値で示す。バーは標準偏差。

(3) 間伐から 16 年後の樹形

強度間伐区、通常間伐区それぞれ樹幹解析木 5 本の樹冠形を図 2-2-5 に示した。梢端から 5m 深さまでの樹冠の形（樹冠半径）は、両区で概ね違いはなかった。しかし、梢端から 5m より深くなると、通常間伐区では樹冠半径がほぼ一定となり円柱形に近い樹冠形を示した。一方、強度間伐区では、梢端からの距離が深くなるにつれて樹冠半径が増加し、通常間伐区よりも樹冠幅が広く、円錐形に近い樹冠形を示した（両区 1 本ずつの例外を除く）。この樹冠形の違いは、両区の立木密度の違い（表 2-2-2）、すなわち隣接木との接触度合いに起因すると考えられた。また、樹冠幅と樹冠長率の違い（表 2-2-2）もあわせると、強度間伐によって残存木の樹冠は、樹冠長が長く、樹冠幅も広い形になると考えられた。

間伐から 5 年ごとの幹形の変化を図 2-2-6 に示した。横軸は相対樹高、縦軸は相対高 $0.1h$, $0.3h$, $0.5h$, $0.7h$, $0.9h$ における直径 $d_{0.1h}$ (cm) を樹高 h (m) で割ったもので、現実の幹曲線を直径方向、樹高方向ともに樹高分の 1 に縮めて得られる一種の相対幹曲線であり、完満度判定のための幹曲線と呼ばれる（梶原, 1993）。通常間伐区では、間伐後もほとんど幹形が変化せずに比較的完満な幹形をしていた。一方、強度間伐区では、間伐から年数が経つにつれて幹の下半分の直径が樹高に対して相対的に太くなっていき、49 年生時（16 年後）では $0.1h$, $0.3h$ で通常間伐区と有意な差が認められた（t-test, $p < 0.01$ ）。したがって、強度間伐によって、残存木の幹形は完満度が減少（ウラゴケ化）すると考えられた。

エ 考察

間伐遅れではない 33 年生のスギ人工林に本数間伐率で 62% の強度間伐をした場合、間伐後の数年間は通常間伐（本数間伐率約 20%）よりも樹高成長量と幹上部の直径成長量が減少し（図 2-2-2, 図 2-2-3）、短期的（5 年程度）には負の影響があることが示された。しかし、中期的（10 年程度）にみると樹高成長と幹上部の直径成長は間伐前程度に回復し、長期的（15 年以上）には通常間伐よりも成長がよくなる可能性も示唆された。

一般に、樹高成長は林分密度や間伐強度による影響を受けないと考えられており（安藤, 1982）、間伐が樹高成長に与える影響について報告した例は少ない。しかし、北米における 27 年生のダグラスファー林（Harrington ら, 1984）や 31~46 年生のヒノキ林（深田ら, 2009）で様々な強度で間伐を行った場合、無間伐区に比べて間伐率が高いほど樹高成長量が低下することが報告されている。本研究におけるスギ林の場合でも、強度間伐によって樹高成長には短期的な負の影響がある可能性が示唆された。強度間伐によって樹高成長が低下するメカニズムについては未解明であり、今後の課題である。しかしながら、長期的な木材生産という林業的な視点から見れば、強度間伐による短期的な樹高成長や幹上部の直径成長の低下は問題にはならないであろう。

胸高直径は強度間伐にすぐに反応し、通常間伐よりも成長量が大きく増加した（図 2-2-1a）。単木幹材積成長量は、樹高と胸高直径の強度間伐直後の反応の違いを反映して間伐後の数年間は横ばいであったが、その後は通常間伐より長期間増加を続け、通常間伐よりも大きな値で安定した（図 2-2-1b）。したがって、強度間伐によって残存木の直径成長と材積成長には大きな促進効果があることが示された。また、その正の効果は、特に材積成長において通常間伐より長期間持続することが示唆された。

残存木の樹冠は、強度間伐によって樹冠長が長く（表 2-2-2）なり、樹冠幅も広くなる（図 2-2-5）

ことが示された。このことは単木あたりの葉量の増加を示唆しており、葉量の増加が単木材積成長の促進につながったと考えられる。一方で、樹冠長が長い、すなわち、枝の枯れ上がりが進まないことが、強度間伐によって幹形の完満度が減少（ウラゴケ化）していた（図 2-2-6）要因であると推察された。

間伐後の残存木の成長経過を反映して、間伐から 16 年が経過した現在では、強度間伐区のほうが通常間伐区よりも平均胸高直径が太く（表 2-2-2）、胸高直径が大きい個体が多くを占めていた（図 2-2-4）。したがって、強度間伐によって通常間伐よりも早期に直径が太い材を多く生産できることが示唆された。しかしながら、通常間伐より年輪幅は広くなり（図 2-2-1a）、幹形は完満度が減少（ウラゴケ化）しているため（図 2-2-6）、優良材生産を目指す場合には注意が必要であろう。また、強度間伐区では間伐から 16 年経過後も収量比数が低いため（表 2-2-2）、当面間伐は必要ないと考えられ、強度間伐によって間伐回数を減少できることが示唆された。

オ 今後の問題点

本節では、よく手入れされた 33 年生のスギ人工林に強度間伐をした場合、残存木の成長と間伐効果の持続性について強度間伐の有効性が確認された。しかしながら、40～50 年生の手入れ不足の林分に強度間伐を行った場合にも同様な効果が得られるかどうか検討が必要である。

カ 要約

鹿児島県における 33 年生時に強度間伐（本数間伐率 62%）と通常間伐（約 20%）が行われた 49 年生のスギ林分を対象に、樹幹解析と毎木調査を行い、間伐後の残存木の成長経過と、間伐から 16 年経過後の林分構造および樹形（樹冠形、幹形）を両区で比較した。樹高成長と幹上部の直径成長は、強度間伐によって数年間は成長量が低下したものの、その後回復した。直径成長量は強度間伐後すぐに増加を始め、通常間伐より常に大きな値を示した。単木材積成長量は、強度間伐によって通常間伐より長い期間増加を続け、より大きな成長を維持していた。その結果、間伐から 16 年経過後は、強度間伐区のほうが平均胸高直径は太く、通常間伐区より直径が大きい個体が多くを占めた。しかし、幹形は完満度が減少（ウラゴケ化）していた。また、強度間伐区では枝の枯れ上がりが抑制されて平均枝下高が低く、残存木の樹冠は通常間伐区よりも長くて幅が広い形に変化していた。強度間伐区の現在の収量比数は 0.56 と低く、当面間伐は必要ないと考えられた。以上の結果から、強度間伐は残存木の直径成長と材積成長には通常間伐より大きな促進効果と効果の持続性を持っており、年輪幅や幹形にこだわらない大径材生産を目標とする場合には有効な手法になる可能性がある。

キ 謝辞

本課題を遂行するにあたり、藤川山林株式会社鹿児島事業所には社有林を調査地として提供していただいた。同所の津田盛吉所長をはじめ、笹野和志氏、豊留勝氏、加治屋満氏には現地調査において多大なご協力をいただいた。同所の作業班の方々には、伐倒調査を手伝っていただいた。皆様に深く感謝申し上げる。

ク 引用文献

安藤 貴（1982）林分の密度管理，126pp，農林出版，東京．

荒木眞岳・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．

Harrington, C.A. and D.L. Reukema（1983）Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation, Forest Sci., 29, 33-46.

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，高知県立森林技術センター研究報告，34，56-83．

今村光晴・光田靖・吉田茂二郎・今田盛生（2001）樹幹解析支援ソフトウェアの作成，日林九支論，54，15-16．

梶原幹弘（1993）相対幹形－その実態と利用－，138pp，森林計画学会出版局，東京．

長濱孝行・近藤洋史（2006）鹿児島県におけるスギ人工林システム収穫表 SILKS の構築，森林計画誌，40，221-230．

Nobori, Y., Sato, K., Onodera, H., Noda, M., and Katoh, T. (2004) Development of stem density analyzing system combined X-ray densitometry and stem analysis, Journal of Forest Planning, 10, 47-51.

依田恭二（1971）森林の生態学，331pp，築地書館，東京．

（荒木眞岳）

3. 間伐が窒素循環と水利用に及ぼす影響

ア 研究目的

強度な間伐を実施すると、その影響で残存木の栄養生理や水分生理が変化することが予想される。これら樹木生理面からみた間伐に対するレスポンスは、間伐後の林木の成長や衰退を予測する上で重要な情報である。ここでは、高知県のヒノキ林を対象に、栄養生理の指標として表層土壌の窒素無機化速度と葉の窒素濃度からみた窒素循環を、水分生理の指標として葉の $\delta^{13}\text{C}$ の測定から水分ストレスを調べ、強度間伐の影響を評価した。

イ 研究方法

窒素循環の調査は、高知県津野町の高標高と低標高に位置するヒノキ林において、斜面に隣り合う20m×20mの調査区を2箇所設置した(Inagaki et al 2008; 印刷中)。一方を2002年生育期前に本数で50%を伐採する強度間伐区とし、他方を無間伐の対照区とした。2002年、2003年に表層土壌を採取し、窒素無機化速度を測定した。また、試験区各林分のヒノキ生葉、落葉の窒素濃度を測定した。

水分ストレスの調査は、高知県津野町内の異なる間伐率のヒノキ林(3地域10林分、間伐率は本数間伐率で0~75%)で、間伐2年後の葉の炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)を測定した。 $\delta^{13}\text{C}$ は、気孔を閉じた状態では高い値を示し、水分ストレスが大きいことを示す指標として利用される。

ウ 結果

(1) 窒素循環に及ぼす影響

表層土壌の窒素無機化速度と、ヒノキ生葉、落葉の窒素濃度の測定結果を示す(表2-3-1)。窒素無機化速度は、間伐区で対照区の3~7倍の値を示した。2002~2006年に採取した生葉の窒素濃度は、間伐区で対照区の1.05~1.19倍の値を示した。土壌における窒素無機化速度の増加に対応して、ヒノキの窒素吸収が増加することが示唆された。一方、2002~2006年の落葉窒素濃度は、間伐区で対照区の1.04~1.06倍を示した。落葉窒素量は対照区で間伐区の0.58~0.92倍の値を示した。間伐後に残存木の落葉量増加が小さいために、ヒノキの落葉による窒素供給量は低下した。以上の結果より、間伐区では土壌における利用可能な窒素が顕著に増加するものの、ヒノキの窒素濃度の変化は小さかった。間伐区におけるヒノキの落葉窒素量の増加は少ないため、リターフォールによる窒素供給は低い水準で推移した。しかし、窒素濃度の高い下層植生の発達により(野口ら2009)、生態系の窒素循環速度が維持されると考えられた。四国と近畿地方のヒノキ林における窒素循環を比較した事例においても、葉の窒素濃度は地域によって大きく異なるが、間伐が葉の窒素循環に及ぼす影響は小さいことが示唆された(Inagaki et al 2010)。

(2) 水利用に及ぼす影響

$\delta^{13}\text{C}$ の測定結果を図2-3-1に示す。間伐2年後に採取した葉の $\delta^{13}\text{C}$ を10林分で比較すると、TY75%区とTY75%間伐区では、同じ地域の0~50%間伐区よりも $\delta^{13}\text{C}$ が高い傾向が認められた。この結果より、間伐率が50%以下であれば、残存木に対する環境変化は $\delta^{13}\text{C}$ に影響を及ぼさないことを示した。

表 2-3-1 高知県のヒノキ林における窒素循環特性. 値は平均値(標準偏差)を示す

		土壌窒素無							
		機化速度		生葉窒素濃度		落葉窒素濃度		落葉窒素量	
		mgN kg ⁻¹ d ⁻¹		(g k ⁻¹)		(g kg ⁻¹)		(g N m ⁻²)	
低標高	対照区	0.26	(0.13)	8.19	(0.29)	5.85	(0.24)	1.2	(0.1)
	間伐区	1.86	(1.25)	9.73	(1.16)	6.17	(0.47)	1.1	(0.4)
	比	7.12		1.19		1.06		0.92	
高標高	対照区	1.81	(1.02)	10.50	(0.40)	8.55	(0.99)	3.1	(1.1)
	間伐区	5.99	(3.48)	11.08	(0.87)	8.87	(1.20)	1.8	(0.9)
	比	3.30		1.05		1.04		0.58	

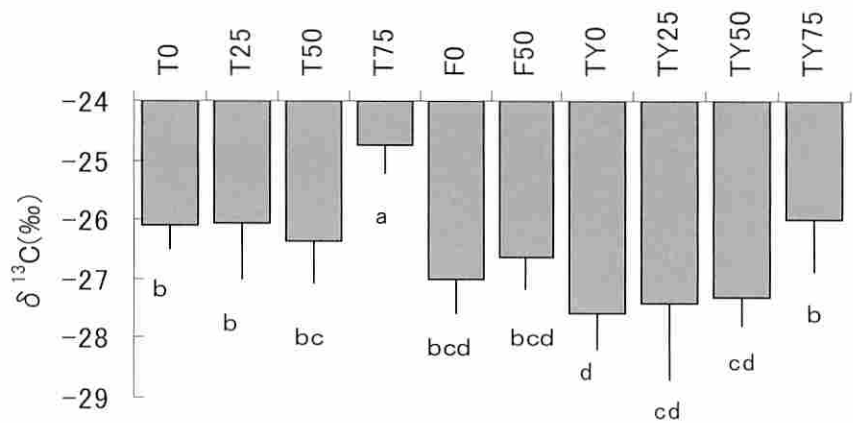


図 2-3-1 異なる間伐率のヒノキ林における間伐 2 年後の葉の炭素安定同位体比

T, F, TY は地域名、数字は本数での間伐率を示す。

値は平均値(標準偏差)を示す。異なる英数字は 5%の有意水準で調査区間に差が認められることを示す。

エ 引用文献

- Inagaki Y, Kuramoto S, Torii A, Shinomiya Y, Fukata H (2008) Effects of thinning on leaf fall and leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantation stands in Japan. *Forest Ecology and Management* 255: 1859-1867
- Inagaki Y, Okuda S, Sakai A, Nakanishi A, Shibata S, Fukata H (2010) Leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress forests in relation to the time of leaf-fall under different climatic conditions in Japan. *Ecological Research* 25: 429-438
- Inagaki Y, Kuramoto S, Fukata H (印刷中) Effects of typhoons on leaf fall in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantations in Shikoku Island, Japan *Bulletin of*

Forestry and Forest Products Research Institute

野口麻穂子・酒井敦・奥田史郎・稲垣善之・深田英久（2009）四国地方のヒノキ人工林における
間伐後 6 年間の林床植生変化. 森林立地 51: 127-136

（稲垣 善之）

4. ヒノキ人工林における間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響の解明

ア 研究目的

森林を適切に管理し、水資源や土壌の保全などの多面的機能を木材資源の供給と同時に発揮することが求められている。そのため、人工林施業が水土保持機能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。森林土壌の孔隙は大小様々な大きさのものを含むため、土壌は良好な浸透とともに保水効果を発揮する。そのため、水土保持機能の1指標として土壌の物理性、特に孔隙組成が着目されてきた（有光，1987；小柏，1991 など）。

我が国における人工造林地で皆伐施業に伴う土壌物理性への影響が、上田ら（1965）、小林（1982）、荒木・有光（1984）、小野（2005）によって報告されている。これらの研究によって皆伐による透水性や粗孔隙の減少、容積重や固相率の増加などが指摘された。こうした変化は地表流や表土流亡を促進している可能性がある。

間伐に伴う土壌物理性の影響については、顕著な変化はないと認識されてきた（塚本，1992）。スギ林においては間伐による土壌の粗孔隙の増加や（小柏ら，1991）、表層土壌の膨軟化（諫本，1992）が報告された。ヒノキ林では、間伐による表層土壌の粗孔隙量が増加する事例（西山，2003）、一定の明確な変化が認められていない事例（古池，1986；辻野・川崎，1999；荒木ら，2002）がある。高知県のスギ林及びヒノキ林で、間伐による表層土壌の物理性を調査したところ、ヒノキ林でのみ透水性の低下傾向が報告された（吉田ら，1992）。これらの知見より、スギ林では間伐により土壌粗孔隙が増加し、間伐による水土保持機能の向上が期待される。一方、ヒノキ林では間伐による粗孔隙の増加は限定的であると推察されるが、詳しいことはわかっていない。

高知県をはじめとして四国地方ではヒノキの植林面積が広い（深田，2006；林野庁，2008）。四国山地から南の太平洋側地域は国内有数の多雨地域で多いところでは年間降水量 4000mm に達し、かつ起伏が大きい山地が広く分布している。間伐は下層植生を増やし表土流亡を防ぐ効果が期待されており（清野，1990；西山，2003）、表土流亡の懸念の高い四国地方のヒノキ人工林では間伐の意義は大きい。近年、木材価格の低迷や林業労働者不足といった社会経済状況のため、集約的でコスト抑制可能な森林管理方法として本数で 40% を超える強度間伐が注目されている。強度間伐の場合は通常の間伐よりは影響が大きいと予想される。そこで本研究では、四国地方の伐採率や土壌型の異なる 3 つのヒノキ林に間伐区・対照区を設け、表層土壌の物理性を比較した。その結果を基に間伐がヒノキ人工林の表層土壌の物理性に及ぼす影響について考察した。

イ 研究方法

調査は、高知県津野町天狗高原（TNG）、旧宮（FMY）愛媛県久万高原町露峰（KUM）の 3 ヶ所のヒノキ林で行った。調査地の概要を表 2-4-1 に示す。TNG は標高 1150m に位置し、四国地方のヒノキ林としては高い場所に位置する。このヒノキ林は焼き畑、採草地として利用されていた草原に植林されたものであり、2002 年における林齢は 42 年生であった。TNG では石灰岩の上に火山灰が堆積しており、土壌型は B₁₀(d) 型であった（土じょう部，1976）。FMY は標高 710m に位置し、ヒノキ林を伐採した後に植林された 23 年生の林分である。伐採時に残された 46 年生のヒノキが一部混在する（立木本数で約 5%）。土壌母材は秩父帯の砂岩・泥岩からなる堆積岩で、土壌型は B₀ 型であった。KUM は標高 1000m に位置し、ヒノキ植栽前は採草地として利用されていた。伐採

時の林齢は 65 年生であった。表層地質は玄武岩だが、その上に火山灰が堆積しており、土壌型は B1₀ (間伐区は B1₀ (d) 型) であった。各試験地近傍の開けた場所で転倒柵式雨量計を用いて降水量を測定した。高知県津野町は四国地方でも降水量の多い地域にあり、2003 年 (1 月～12 月) の年降水量は TNG で 4400 mm, FMY で 3790mm, KUM で 2641mm であった。

2002 年の成長期前に TNG, FMY の各ヒノキ林分で 20m×20m の試験区を傾斜、斜面方位、樹木の生育状況などがほぼ等しくなるように 2 つ隣接して設定し、一方を間伐区、他方を無間伐の対照区とした。2002 年 1～4 月に間伐区の伐採を本数で約 50% の割合で実施した。伐採木は TNG では架線集材で、FMY では人力で試験区外へ搬出された。間伐前後の林分概況 (被圧木は除外) を表 2-4-2 に示す。間伐を実施した際には、残存木の空間配置が均等になるよう、及び直径階分布が間伐前後で変わらないよう考慮して全ての直径階から伐採木を選定した。間伐の結果、立木本数は TNG で 51%, FMY で 48% 減少した。TNG では、間伐区で間伐前の立木密度がやや小さかったが、その他の性質に大きな違いはみられなかった。FMY の 23 年生の立木について、樹高、胸高直径には間伐区と対照区で大きな差はみられなかった。したがって、それぞれのヒノキ林で対照区と間伐区の生育状況はほぼ同じであると考えられた。KUM では、傾斜、斜面方位、樹木の生育状況などに大きな差のない 28m×28m の試験区を近接して設定し、間伐区、対照区とした。間伐区では 2003 年 9 月に本数で 33% の下層間伐を実施した。伐採木は作業車両による地引き、またはつかみ取りにより搬出された。下層植生としてヤマウルシ (*Rhus trichocarpa*)、クマノミズキ (*Swida macrophylla*) などが生育していたが、それらは伐採しなかった。

本報では採土円筒 (直径 11.3cm, 高さ 4cm, 容積 400mL) を用いて、それぞれの試験区内の任意の場所から深さ 0～5cm の土壌を 3 個ずつ採取した。TNG, FMY の円筒採取は間伐の約 13 ヶ月後 (2003 年 5 月)、KUM では間伐の約 8 ヶ月後 (2004 年 5 月) に行った。河田・小島 (1979) に準拠して土壌の物理性、孔隙組成を測定した。孔隙解析では加圧板法により、 $-6.18(-63)$, $-49.1(-501)$ kPa (cmH₂O) などの水分ポテンシャルで測定を行った。孔隙区分について、竹下 (1984)、有光ら (1995) などを参考にして、

粗孔隙：0～ -49.1 kPa

大孔隙：0～ -0.4 kPa

中孔隙： -0.4 ～ -6.18 kPa

小孔隙： -6.18 ～ -49.1 kPa

細孔隙： -49.1 kPa 以下

のように区分した。大孔隙率は河田・小島 (1979) の最小容気量を相当させた。飽和透水係数は幾何平均で、それ以外の測定項目は算術平均で表示した。

ウ 結果

各試験地の間伐区・対照区の土壌水分特性曲線を図 2-4-1 (便宜的に全孔隙率を土壌水分ポテンシャルが -0.1 kPa の時に、最大容水量を -0.2 kPa の時に表示。圧力調整器の故障により KUM の -0.98 ～ -6.18 kPa は測定できなかった) に示す。FMY, KUM では、間伐区・対照区の土壌水分特性曲線に大きな違いは認められなかった。TNG では、対照区のほうで全孔隙率が大きかったが、 -0.98 kPa 以下の範囲では間伐区のほうで含水率が高くなっており、TNG の間伐区の土壌水分特性曲線は対照区のそれより傾きが大きくなっていた。

各試験地の間伐区・対照区の土壌物理性の分析結果を表 2-4-3 に示す。容積重，全孔隙率，大孔隙率の間伐区と対照区の違いは TNG，FMY，KUM のいずれでも認められなかった。FMY の粗孔隙率及び細孔隙率，KUM の粗孔隙率及び細孔隙率に関していずれも有意差はなかった。TNG の間伐区では対照区と比較して粗孔隙率（対照区 58.3%，間伐区 47.2%），中孔隙率（対照区 34.7%，間伐区 28.8%）が低く，細孔隙率（対照区 27.6%，間伐区 36.1%）は高かった（いずれも t-検定で $p<0.05$ ）。小孔隙率については TNG，FMY，KUM のいずれでも有意差は認められなかった。TNG の間伐区は対照区と比較して大・中孔隙を中心に粗孔隙率が約 11% 少なく，細孔隙率が約 8% 多く，全孔隙率は約 3% 少なかった（図 2-4-2）。飽和透水係数は全体として $5\sim9\times10^{-4}$ (m s^{-1}) と全般的に良好であり，TNG，FMY，KUM のいずれも対照区・間伐区の有意差はみられなかった。

表 2-4-1 試験地の概要

	天狗高原 (TNG)	旧宮 (FMY)	久万 (KUM)
標高 (m)	1150	710	1000
年降水量 (mm)	4400**	3790**	2641**
傾斜 (°)	30	30	20
斜面方位	対照区 S25° W	N70° W	N10° W
	間伐区 S60° W	N50° W	N10° W
土壌型	B _{1b} (d)	B _b	B _{1b} (d)
土壌母材	火山灰	堆積岩	火山灰，玄武岩
林齢 (間伐時)	42	23*	65

* FMY では，46 年生のヒノキが一部混在する

** 各調査地付近で観測した 2003 年の年降水量

表 2-4-2 調査林分における間伐実施概要

試験区	立木本数 (本/ha)			幹材積 (m^3/ha)			平均樹高 (m)	
	間伐前	間伐後	間伐率 (%)	間伐前	間伐後	間伐率 (%)	間伐前	間伐後
TNG 対照区	1025	-	0	353	-	0	14.7	-
TNG 間伐区	875	425	51	341	178	48	15.5	15.8
FMY* 対照区	1675 (25)	-	0	160 (30)	-	0	10.9 (18.1)	-
FMY* 間伐区	1500 (125)	825 (25)	45 (48)**	122 (97)	69 (14)	43 (62)**	10.6 (16.1)	10.8 (14.9)
KUM 対照区	395	-	0	341	-	0	20.1	-
KUM 間伐区	421	281	33	375	261	30	21.1	21.2

* FMY については 23 年生の立木の値を示し，混在する 46 年生の立木については () 内に示した

** 間伐割合は 23 年生の立木の値を示し，林分全体については () 内に示した

表 2-4-3 土壌物理性の分析結果

	TNG		FMY		KUM	
	対照区	間伐区	対照区	間伐区	対照区	間伐区
容積重	0.255	0.359	0.429	0.387	0.269	0.196
(Mg m ⁻³)	(0.050)	(0.069)	(0.035)	(0.020)	(0.049)	(0.056)
全孔隙率	85.9	83.3	78.8	81.2	86.5	88.2
(%)	(1.8)	(3.9)	(2.1)	(0.7)	(1.7)	(0.5)
粗孔隙率	58.3	47.2 *	55.0	54.6	53.1	56.9
(%)	(5.4)	(3.3)	(3.4)	(4.5)	(4.6)	(3.3)
細孔隙率	27.6	36.1 *	23.8	26.5	33.4	31.3
(%)	(3.7)	(0.7)	(5.4)	(4.0)	(2.9)	(2.9)
大孔隙率	13.5	8.6	24.7	20.3	17.5	21.0
(%)	(2.3)	(3.2)	(9.3)	(3.5)	(1.0)	(4.2)
中孔隙率	34.7	28.8 *	23.4	25.9	27.1	25.9
(%)	(2.9)	(1.3)	(7.0)	(1.7)	(3.3)	(2.2)
小孔隙率	10.1	9.9	6.9	8.5	8.4	10.0
(%)	(1.2)	(0.9)	(4.6)	(1.8)	(0.6)	(1.3)
飽和透水係数						
(m s ⁻¹) ¹⁾	5.1×10 ⁻⁴	6.0×10 ⁻⁴	7.2×10 ⁻⁴	6.0×10 ⁻⁴	9.4×10 ⁻⁴	8.9×10 ⁻⁴
レキ率	1.0	1.5	3.6	5.6	0.2	0.1
(%)	(0.0)	(0.4)	(3.2)	(3.7)	(0.1)	(0.0)

* $p<0.05$

¹⁾ 幾何平均, ²⁾ () 内の数値は標準偏差

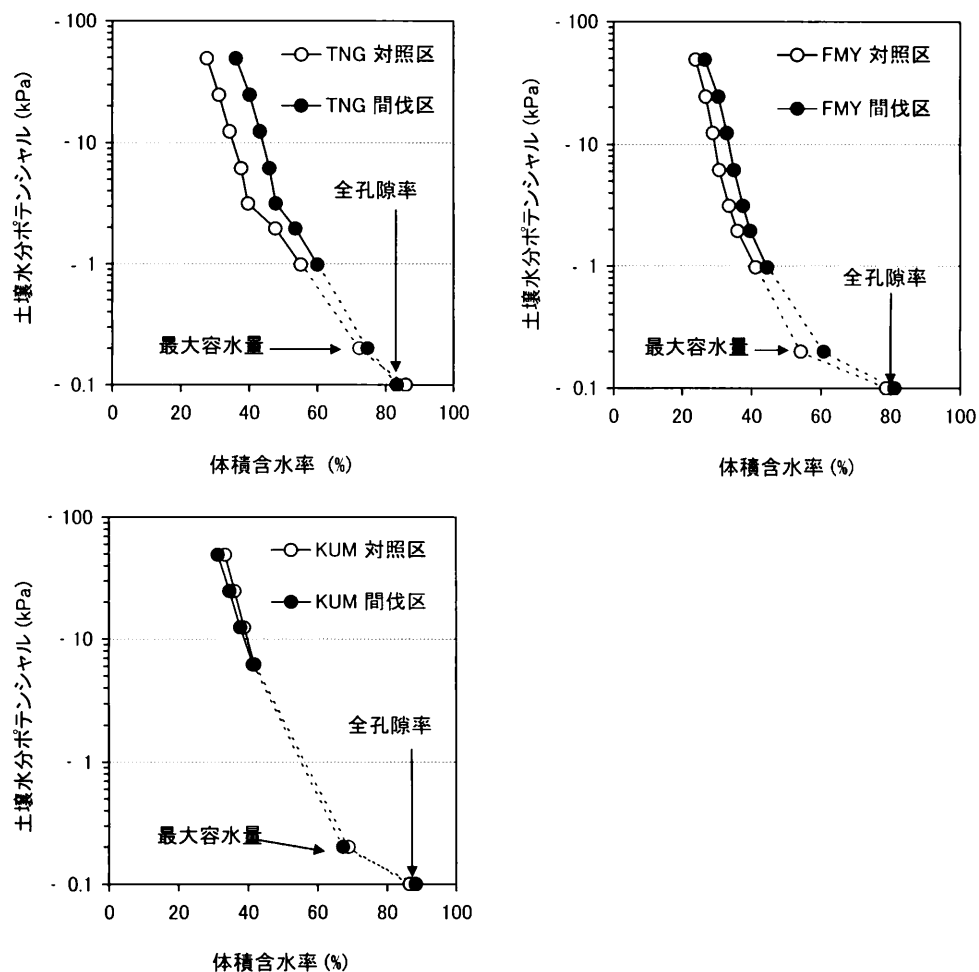


図 2-4-1 TNG, FMY, KUM における間伐区・対照区の土壌水分特性曲線

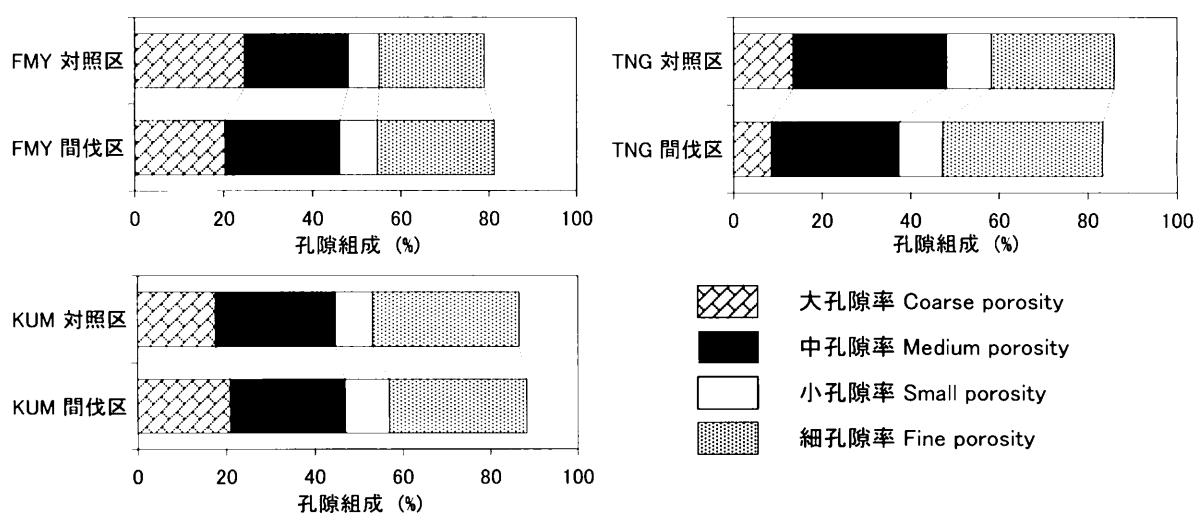


図 2-4-2 TNG, FMY, KUM における間伐区・対照区の表層土壌の孔隙組成

エ 考察

FMY, KUM では間伐区・対照区間の表層土壌の物理性に明確な違いは認められなかった。古池 (1986) は 23 年生ヒノキ林で本数間伐率 55% の強度間伐区と対照区で、辻野・川崎 (1999) では本数間伐率 56% の強度間伐を毎年行ない対照区と比較したが、斜面位置や経過年数などで土壌の物理性の変化傾向は一定でなかった。KUM, FMY においては間伐による有意な影響は認められず、これまでの知見と同様の傾向を示した。KUM では下層植生が伐採されなかったため表土が保全されたと考えられる。FMY では強度の間伐が行われているが、間伐前より下層植生が存在し (野口ら, 2009), 表土が保全されたと考えられた。

これに対して、TNG のヒノキ林では強度間伐により大・中孔隙を中心とした粗孔隙の減少と細孔隙の増加という変化が生じたと考えられる。TNG の孔隙組成に関するこれらの変化は我が国のヒノキ人工林において皆伐時に認められた土壌の変化 (小林, 1982; 荒木・有光, 1984; 小野, 2005) とほぼ同様の傾向であった。TNG 間伐区では間伐後 1 年目に対照区の約 20 倍の細土、約 3 倍のリターの流亡が認められたこと (深田, 2006) から、TNG 間伐区で地表流が発生しやすくなるような変化が起きたことがうかがえる。皆伐に伴う表層土壌の物理性変化の要因として、伐採木の搬出作業による地表の攪乱、土壌有機物の分解、雨滴の衝撃が挙げられていることから (小林, 1982), TNG 間伐区でも搬出作業による地表攪乱や雨滴衝撃により土壌構造が破壊され目詰まりを起こしたと考えられる。列状間伐されたスギ・ヒノキ人工林では集材機近傍と対照区との表層土壌の物理性の差異は認められなかった (津田・佐々木, 2005), 架線集材は林地に与える影響が比較的少ない (佐藤, 2006) との報告がある。しかし、TNG の土壌型である黒色土は一般に火山灰を起源とし、容積重は小さい (河田, 1989)。加えて TNG 間伐区の下層植生タイプは間伐後 1 年目も貧植生型であり (深田ら, 2006), 間伐区の植被率は対照区より低かった (野口ら, 2009)。そのため、圧密や雨滴など外部からの衝撃に対する抵抗性が低く、影響を受けやすかったと考えられる。

TNG のヒノキ林は表土保全効果をあまり期待できない場所で強度間伐を実施したため、皆伐と同じような土壌の変化が認められたと考えられる。ただし、TNG の間伐後 4 年目以降の植被率は 80% 以上に達したこと (野口ら, 2009), かつ同区の下層植生タイプは貧植生型から表土保全効果の高い草本・地表植物型に間伐後 2 年目以降変化したこと (深田, 2006) が報告されている。これらのことから下層植生の急速な発達により表土保全効果が高まり、土壌の孔隙組成は間伐前の状態に回復する可能性が高い。したがって、間伐の直後の影響と下層植生の回復に伴う表土保全効果の両方を評価する必要がある。

以上より、ヒノキ人工林では強度間伐に伴って表層土壌の孔隙組成が変化する場合があることがわかった。下草植生が少ない、あるいは抵抗性が小さい土壌では間伐直後の影響が大きいことから、間伐の伐採率を高くする場合には表土保全に関して注意が必要である。

オ 今後の課題

強度間伐により表層土壌の孔隙組成変化が認められたヒノキ人工林で、下層植生の回復に伴う土壌の物理性変化を評価する必要がある。

カ 要約

高知県津野町の天狗高原 (TNG)、旧宮 (FMY)、愛媛県久万高原町 (KUM) の 3 つのヒノキ林に間伐区と対照区を設定し、表層土壌の物理性 (間伐後概ね 1 年経過) を比較した。TNG, FMY, KUM の本数間伐率はそれぞれ 51%, 48%, 33%, 土壌型は TNG, KUM が黒色土, FMY は褐色森林土である。FMY, KUM では対照区・間伐区で孔隙組成に有意な差は認められなかったが、TNG の粗孔隙率は対照区より間伐区で有意に低く、細孔隙率は対照区より間伐区で有意に高かった (いずれも t -検定で $p < 0.05$)。これらのことから、間伐の影響は林分によって異なり、一部のヒノキ林では強度間伐した場合に表層土壌の孔隙組成が変化することがわかった。TNG は下層植生が少ないこと、抵抗性が小さい土壌型であることから影響が強く表れたと推察された。

キ 引用文献

- 荒木誠・有光一登(1984)皆伐施業による表層土壌の物理性の変化 (I) —ヒノキ林皆伐跡地における湿式団粒分析の一例—, 日林論, 95, 195-198.
- 荒木誠・加藤正樹・宮川清・小林繁男・有光一登(2002)ヒノキ林における皆伐と間伐が表層土壌水分状態に及ぼす影響, 森林立地, 44(2), 1-8.
- 有光一登(1987)森林土壌の保水のしくみ, 創文, 199pp.
- 有光一登・荒木誠・宮川清・小林繁男・加藤正樹(1995)宝川理水試験地における土壌孔隙量をもとにした保水容量の推定—初沢小試験流域1号沢および2号沢の比較—, 森林立地, 37(2), 49-58.
- 土じょう部(1976)林野土壌の分類 1975, 林試研報, 280, 1-28.
- 深田英久・渡辺直史・梶原規弘・塚本次郎(2006)土壌保全からみたヒノキ人工林の下層植生の動態と植生管理への応用, 日林誌, 88, 231-239.
- 深田英久(2006)間伐がもたらすヒノキ人工林生態系への影響に関する研究, 愛媛大学連合大学院学位論文, 117pp.
- 古池末之(1986)保育作業が立地要因の変動に及ぼす影響 (I) —ヒノキ人工林の枝打ち、間伐による土壌、植生の変化と表層土壌の流去および地表流去水の動態—, 兵庫県立林業試験場研究報告, 30, 41-52.
- 諫本信義(1992)森林の水源涵養機能に関する研究(第1報)—スギ林における間伐6年後の土壌理化学性の変化—, 日林九支論集, 45, 157-158.
- 河田弘・小島俊郎(1979)環境測定法IV—森林土壌—, 共立出版, 190pp.
- 河田弘(1989)森林土壌学概論, 博友社, 399pp.
- 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, 森林総研研報, 359, 1-122.
- 小林繁男(1982)森林の皆伐に伴う土壌の変化, ペドロジスト, 26(2), 150-163.
- 西山嘉寛(2003)岡山県北部のヒノキ林における水土流出実態の解明—, 岡山県林試研報, 19, 1-15.
- 野口麻穂子・酒井敦・奥田史郎・稲垣善之・深田英久(2009)四国地方のヒノキ人工林における間伐後6年間の林床植生変化, 森林立地, 51, 127-136.
- 小柏一久・近藤次雄・真下育久(1991)数量化I類の手法を用いた森林土壌の粗孔隙量の要因解析 (II) スギ林における表層土壌の粗孔隙量と林分密度, 日林誌, 73, 396-400.
- 小野裕(2005)ヒノキ林皆伐後の土壌の物理性変化, 日林誌, 87, 36-44.
- 林野庁(2008)森林・林業統計要覧 2008, 林野庁, 246pp.

- 佐藤弘和(2006)浮遊土砂の流出抑制に配慮した森林管理方法. 日林誌, 88, 50-59.
- 竹下敬二(1984)森林のもつ水土保持機能と今後の課題, 林野時報, 30, 18-24.
- 津田城栄・佐々木重行(2005)列状間伐における間伐列と残存列の土壌物理性及び下層植生の相違について, 九州森林研究, 58, 164-165.
- 辻野新子・川崎圭造(1999)長伐期施業によるヒノキ林間伐後の林内環境の変化(I)ー強間伐による表層土壌への影響ー, 中部森林研究, 47, 9-12.
- 塚本良則(編)(1992)森林水文学, 文永堂出版, 328pp.
- 上田晋之助・堤利夫・柴田信男(1965)吉野林業地帯における地力の維持と増進に関する研究ー皆伐直後における表層土壌の流亡と, その理化学的性質の変化についてー, 京大演報, 37, 102-124.
- 吉田桂子・岩川雄幸・平井敬三(1992)間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響ースギ林とヒノキ林の場合ー, 平成3年度森林総合研究所四国支所年報, 11-12.

(篠宮 佳樹)

5. 強度間伐が材質に及ぼす影響

ア 研究目的

木材価格の低迷等により放置され、適切な施業が行われてこなかった管理水準低下林分に対して立木の40%以上を間伐する強度間伐が導入されつつある。このような施業は、すでに過密となって年数が経過した林分に対して強度の間伐を行うことから、従来の間伐よりも立木密度の低下が大きく、立木の成長や材の密度等材質に大きな影響を与える可能性がある。これまでに、多くの樹種について間伐の密度等材質への影響が検討されてきている。スギでは、立木密度と材の密度との間に正の関係があるとされており、間伐強度が高い場合や植栽密度が低い場合には材の密度や材の強度が低いという結果が得られている(滝野ら 1979; Wang and Chiu 1993; 藤原ら 2004)。一方、ヒノキでは間伐の材質への影響はほとんど明らかになっていない。池田(2000, 2002)は、間伐区と対照区とで立木の応力波伝播速度を比較し、間伐区と対照区との間で差を見いだしたが、間伐の応力波伝播速度への影響は大きくないと考えている。これらの間伐が材質に及ぼす影響を検討した研究は、ほとんどが若齢時に行った間伐を対象としており、ある程度の林齢に達した林分に対する間伐の影響や管理水準が低下した林分に対する間伐の影響などは検討されていない。本研究では、放置林分に対する強度間伐がその後に形成される木材の性質に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、約50%の定性間伐を施したスギ林分とヒノキ林分、強度間伐を行っていないスギ林分とヒノキ林分から試料木を採取し、年輪構造及び密度、動的ヤング率の比較を行った。

イ 研究方法

① 試料木

高知県香美市において約50%の定性間伐(2003年12月、間伐後の立木密度600本/ha)を施したスギ林分(41年生)から2007年10月に20本の試験木を伐採し、また2008年10月に対照試料として強度間伐を行っていないスギ林分(約39年生)から試験木を10本伐採した。2008年10月に高知県大豊町において約50%の定性間伐(2004年10月)を施したヒノキ林分(約42年生)と強度間伐を行っていないヒノキ林分(約40年生)それぞれから10本ずつ伐採した。伐採木から長さ約4mの丸太を玉切り、試験材とした。それぞれの試験木丸太から、地上高0.2m、2.2m、4.2m部位の円盤各1枚と、円盤間の約1.9m長の丸太2本を採取し、それぞれ年輪構造の解析及び動的ヤング率の測定に用いた。

② 年輪構造解析

円盤から、髄を始点として半径方向に直交する4方向のストリップを採取し、それぞれから2.0mm厚さの木口薄片を作製した。木口薄片を気温20℃、相対湿度65%の恒温恒湿室内で調湿し、軟X線撮影装置(Softex, EMBW 特型)で軟X線撮影を行った。なお、撮影条件は、管電圧20kVp、管電流14mA、照射距離2.5m、照射時間4分とした。軟X線撮影により得たネガ(Fiji Film, IX-FR)をマイクロデンシトメータ(Joyce Roebel, 3cS)で髄から樹皮まで光学的にスキャンし、ネガの黒化度を密度に換算することによって髄から樹皮までの密度プロファイルを得た。密度プロファイル上で年輪界を決定し、年輪ごとに年輪幅、早材幅、晩材幅、年輪内平均密度、早材・晩材平均密度、晩材率などを計算し、年輪ごとに4方向を平均して年輪構造指標を得た。なお、早材と

晩材の境界は、密度値で 550 kg/m^3 とした。

③ 動的ヤング率及び密度の測定

スギ強度間伐木及び対照木の約 1.9 m 長丸太から、厚さ約 50 mm の髄を含む柾目板を製材し、両端を除いた中央部から長さ約 1 m、厚さ 30 mm の柾目板に仕上げた。強度間伐を行った年（2003 年）の年輪を境界に、間伐前と間伐後に形成された材とに分割した（図 2-5-1）。また、強度間伐を行っていない林分から採取した丸太（対照木）についても同様に柾目板を作製し、強度間伐を行った年の年輪で分割した。間伐年以前に形成された材からなる柾目板から半径方向 30 mm、接線方向 30 mm の正方形断面をもつ軸方向長さ 1000 mm の試験体をそれぞれ 2 体、間伐後の材からなる部分より接線方向 30 mm、半径方向約 3

～8 mm（強度間伐後の成長量による）の長方形断面をもつ軸方向長さ 1000 mm の試験体 1 体を得た。試験体の両木口にセンサー（Rinntech, ARBOTOM）を取り付け、一端のセンサーを打撃することによって生じた応力波の伝播速度を測定した。応力波の伝播速度及び伝播速度測定時の試験体の密度から、下式によって動的ヤング率を計算した。

$$E = v^2 \times \rho \times 10^{-9}$$

ここで、 E : ヤング率 (GPa), v : 応力波伝播速度 (m/s), ρ : 密度 (kg/m^3)。

ヒノキ強度間伐木及び対照木の約 1.9 m 長丸太から厚さ約 50 mm の髄を含む柾目板を製材し、丸太元口から 1 m 部位から上方に長さ約 90 cm の柾目板を採取した。この柾目板を天然乾燥させた後、10 mm 厚さの柾目薄板を 4 枚採取した。強度間伐を行った年の年輪（2004 年）で柾目薄板を分割し、間伐前に形成された材から半径方向 10 mm、接線方向 10 mm の正方形断面をもつ軸方向長さ 300 mm の試験体を各 2 体、半径方向 1.7～10 mm、接線方向 10 mm の長方形断面をもつ軸方向長さ 300 mm の試験体を各 1 体作製した。また、強度間伐を行っていない林分から採取した材についても同様に柾目薄板を作製し、強度間伐木と同じ年の年輪で分割して同様の試験体を作製した。動的ヤング率測定用試験体を気温 20℃、相対湿度 65% に調整された恒温恒湿室内で恒量に達するまで調湿し、試験体の木口的一端を打撃することによって発生した縦振動の固有振動数を FFT アナライザ（小野測器, CF-1200）により測定した。固有振動数と試験体の長さ及び密度から下式により動的ヤング率を計算した。

$$E = 4 \times (l \times f)^2 \times \rho \times 10^{-9}$$

ここで、 E : ヤング率 (GPa), l : 試験体の長さ (m), f : 固有振動数 (Hz), ρ : 密度 (kg/m^3)。

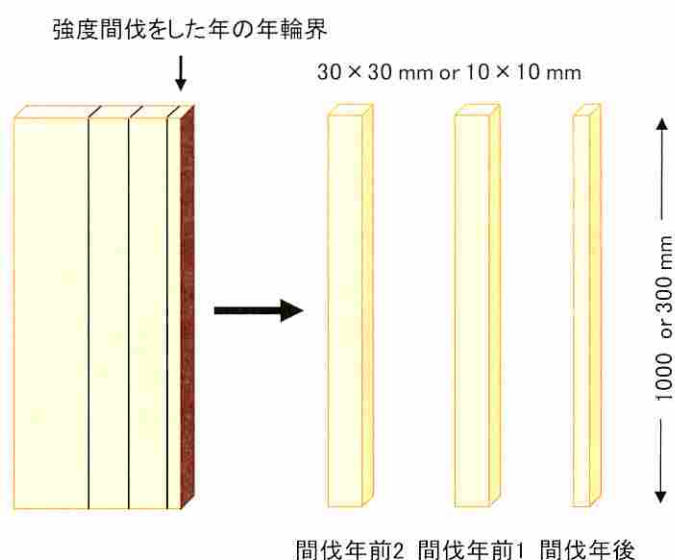


図 2-5-1 柾目板からの動的ヤング率測定用試験体の採取方法

気乾密度は、気温 20℃、相対湿度 65%の恒温恒湿室において恒量に達したヒノキの動的ヤング率測定用試験体の寸法と質量から求めた。また、容積密度はスギの動的ヤング率測定用試験体から軸方向 30 mm の試験体を切り出し、生材時の寸法及び全乾時の質量から求めた。

ウ 結果

① 強度間伐木及び対照木における年輪構造

強度間伐スギについて年輪幅等を間伐前の4年間の平均値を1として間伐後の変化を比較すると、間伐前に比べて間伐後の年輪幅、早材幅が減少し、年輪内平均密度、晩材率が増加した。その一方で、早材平均密度と晩材平均密度の間伐前後の差はほとんど認められなかった(図 2-5-2 上段)。強度間伐ヒノキについての結果もほぼ同様で、年輪内平均密度と晩材率が増加したが、早材及び

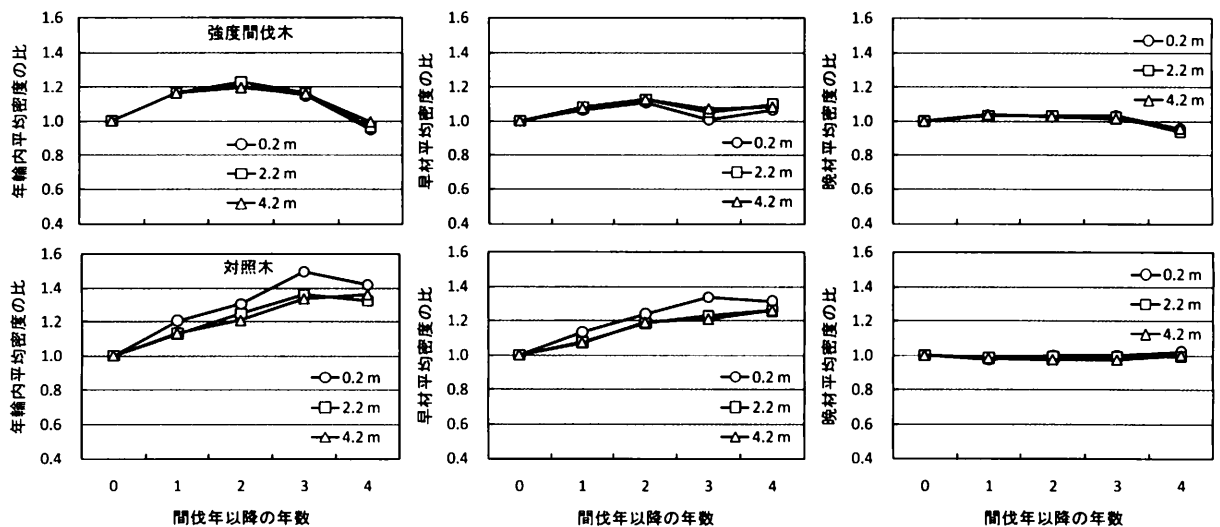


図 2-5-2 スギ強度間伐木と対照木における間伐年以降に形成された年輪の年輪内平均密度、早材平均密度、晩材平均密度の間伐前の平均値に対する比
上段：強度間伐木，下段：対照木

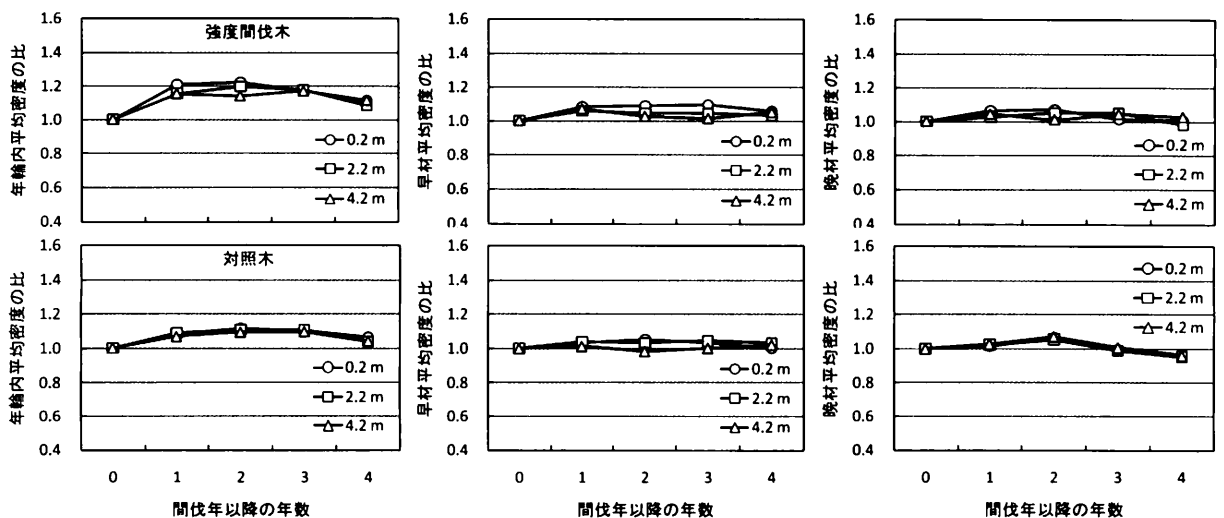


図 2-5-3 ヒノキ強度間伐木と対照木における間伐年以降に形成された年輪の年輪内平均密度、早材平均密度、晩材平均密度の間伐前の平均値に対する比
上段：強度間伐木，下段：対照木

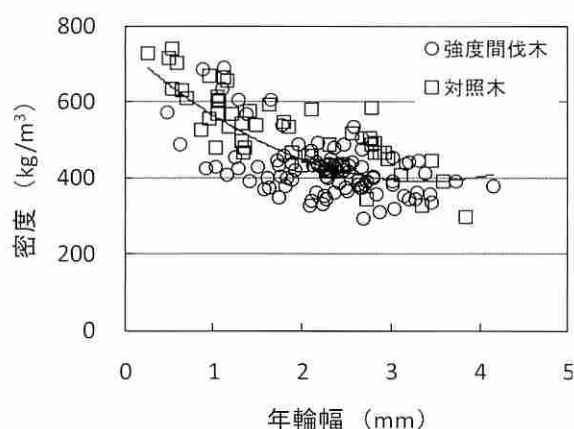


図 2-5-4 スギにおける年輪幅と密度との関係

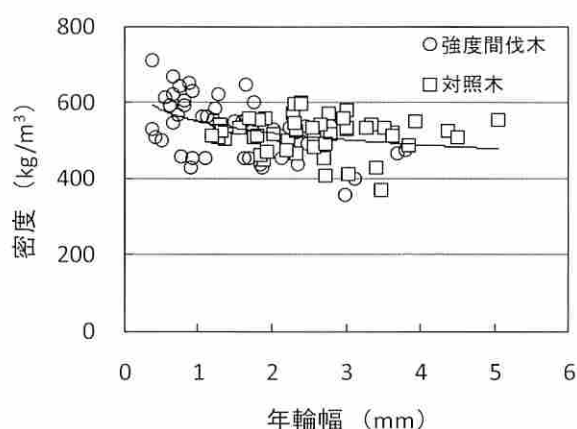


図 2-5-5 ヒノキにおける年輪幅と密度との関係

晩材密度はほとんど変化しなかった（図 2-5-3 上段）。これらの傾向は、対照木で強度間伐を行った年の年輪の前と後ろを比較した場合においてもほぼ同様であったが、とくに晩材密度ではスギ、ヒノキともに間伐の有無や間伐の前後においてほとんど差がなかった（図 2-5-2 下段、図 2-5-3 下段）。強度間伐をした年以降に形成された年輪について年輪幅と年輪内平均密度との関係をみたところ、スギ、ヒノキともに年輪幅が広いと密度が小さい傾向がみとめられたが、年輪幅と密度との関係は強度間伐木と対照木とで差がみられなかった（図 2-5-4、2-5-5）。また、年輪幅と密度との関係は、年輪幅が小さいと傾きが大きく、年輪幅が広くなると傾きが小さくなる関係にあり、年輪幅が広くなるにつれて密度の変化は小さくなった。

② 強度間伐木及び対照木における材の密度

スギ及びヒノキについて強度間伐前に形成された材と間伐後に形成された材の密度を比較した。スギで容積密度を間伐前後で比較してみると、両者ではほとんど差がなかった（図 2-5-6）。ヒノキでは、間伐後の材は間伐前に比べてやや密度が高くなっていたが、この傾向は対照木において

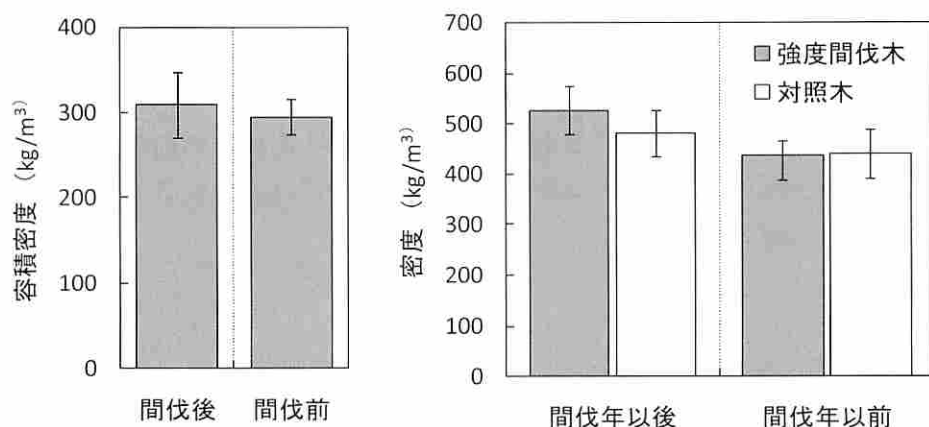


図 2-5-6 スギ強度間伐木の間伐前及び間伐後に形成された材の容積密度と標準偏差（左図）とヒノキ強度間伐木及び対照木における間伐年以前、間伐年以降に形成された材の気乾密度と標準偏差（右図）

間伐年以後：間伐をした年以降に形成された材からなる試験体、間伐年以前：間伐をした年より前に形成された材からなる試験体

も同様であった（図 2-5-6）。

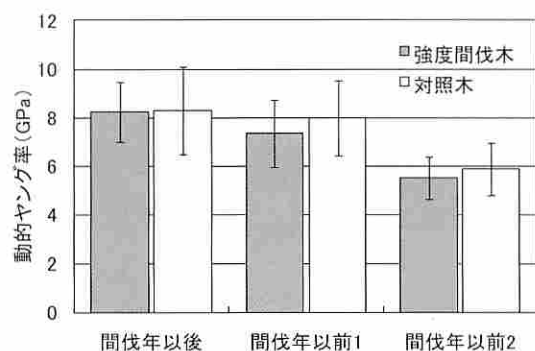


図 2-5-7 スギ強度間伐木, 対照木における動的ヤング率の平均値及び標準偏差

間伐年以後：間伐をした年以降に形成された材からなる試験体，間伐年以前：間伐をした年以前に形成された材からなる試験体。間伐年以前 2 は間伐年以前 1 の髓側に隣接する試験体。

③ 強度間伐木及び対照木における動的ヤング率

間伐前と間伐後に形成されたスギ材の動的ヤング率を比較すると，間伐前の材についての試験体のうちより髓に近い方の試験体で動的ヤング率が他の試験体に比べて小さいものの，間伐前後でほとんど差が見られず，強度間伐木と対照木との間にも有意な差はみとめられ

なかった（図 2-5-7）。一方，ヒノキでは，間伐後に形成された材は間伐前に形成された材に比べて動的ヤング率が高くなっていたが，対照木でも同じ傾向を示し，強度間伐木と対照木との間には有意な差はみとめられなかった（図 2-2-8）。密度以外の要因の影響をみるために，ヤング率を密度で除した比ヤング率の比較を行った。強度間伐木における間伐年の前後，対照木における強度間伐年の前後に形成された材について比較したところ，いずれの組み合わせにおいても有意な差は検出されなかった（図 2-5-9）。

エ 考察

① 強度間伐の年輪構造，密度への影響

約 50%の定性間伐を施した強度間伐木と強度間伐を行っていない対照木とを，それぞれ同じ年に形成された年輪について年輪構造を比較した。年輪構造は環境条件の影響を受けるので，強度間伐木には環境条件に加えて強度間伐の影響が現れると考えられる。前述したように，年輪内平均密度の変化や年輪幅と密度との関係が強度間伐木と対照木とでほとんど差がないことから，年輪構造には強度間伐の顕著な影響は現れていないと考えられる。また，年輪幅と密度との関係が強度間伐木と対照木とでは異なることから，肥大成長が促進された場合には密度が低下し，肥

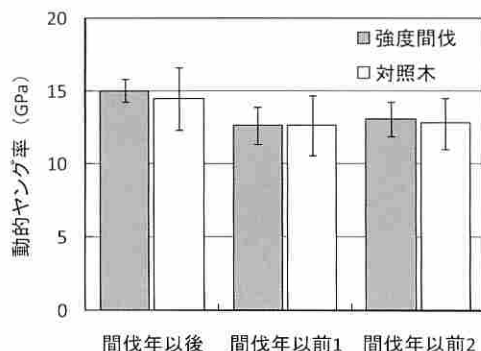


図 2-5-8 ヒノキ強度間伐木, 対照木における動的ヤング率の平均値及び標準偏差

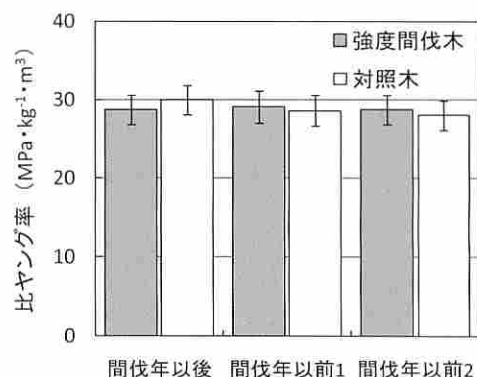


図 2-5-9 ヒノキ強度間伐木, 対照木における比動的ヤング率の平均値及び標準偏差

大成長が抑制された場合に密度が増加すると考えられる。図 2-5-4、2-5-5 に示したように、年輪幅の変化に対する密度の変化は、年輪幅が広くなるほど小さくなるため、肥大成長が促進された場合においても、密度の変化は比較的小さいと考えられる。

② 強度間伐のヤング率への影響

スギで間伐前に形成された材の試験体 2 体と間伐後の材についての試験体との 3 者で動的ヤング率を比較したところ、間伐前の試験体のうち髓に近い方の試験体の動的ヤング率が他の 2 体の試験体よりも動的ヤング率が低くなっていた。これは、ヤング率が髓から外側に増加して安定する傾向にあるためだと考えられる。一方、間伐年を挟んだ間伐前の材の試験体と間伐後の材の試験体とでは動的ヤング率に有意な差はみとめられなかった。また、試験体の採取部位別に強度間伐木と対照木とを比較した場合でも有意な差はみとめられなかった。これらのことから、スギの動的ヤング率への強度間伐の影響は顕著ではないと考えられる。ヒノキでは、強度間伐木、対照木ともに間伐年以降に形成された材からなる試験体で動的ヤング率が高くなっていた。しかし、それぞれの試験体の採取位置ごとに強度間伐木と対照木の動的ヤング率を比較すると、いずれの試験体においても有意な差は認められていない。これらのことから、間伐年以降に形成された材からなる試験体で動的ヤング率が高いことが強度間伐の影響であるとはいえず、強度間伐の影響があるとしても強度間伐が動的ヤング率に及ぼす影響が本研究で行った比較によって検出できるほどには顕著ではないと考えられる。

比動的ヤング率が強度間伐木と対照木、間伐年の前と後に形成された材との組み合わせで、有意な差がなかったことから、間伐年の前後で強度間伐木と対照木ともに動的ヤング率に差が生じた理由は、主として密度の違いによると考えられ、密度以外の要因の影響はほとんどないと考えられる。このことから、強度間伐後に形成された材における動的ヤング率は、年間肥大成長量の変化に伴う晩材率の変化による密度の変化の影響を受けると考えられる。したがって、強度間伐により肥大成長が大いに促進された場合には、密度の低下によって動的ヤング率が低下する可能性があるが、間伐年より後に形成された年輪で密度がやや増加していることや動的ヤング率も間伐前に形成された材に比べてやや高くなっていることから、強度間伐後 4 年を経過した時点では強度間伐の影響によるヤング率の変化はほとんどないと考えられる。

③ 強度間伐の材質への短期的影響

強度間伐後に形成された材の密度、動的ヤング率などの材質を間伐前と間伐後、強度間伐をしたものとしていないものとで比較することによって強度間伐の材質への影響を検討した。間伐後 4 年経過時点においては、間伐年以降に形成された材の密度や動的ヤング率に強度間伐木と対照木との間で有意な差は認められていない。したがって、過密林分に対する強度間伐が材質に及ぼす影響は間伐後 4 年間までの範囲では顕著ではないといえる。

オ 今後の問題点

管理水準低下林分に対する強度間伐が施業として導入されたのはごく最近のことであり、現時点では材質への顕著な影響は認められていないが、今後どのようなのかについては未だ不明である。強度間伐の導入は、強度間伐後にある程度長期間育成することが前提となっている。このため、中長期的な影響を明らかにする必要がある。年輪構造における年輪幅と密度との関係は、強度間伐木でも対照木でも違いは認められておらず、間伐後に形成される材の密度は今後の成長

量の変化に応じた変化を示すものと推察される。このため、成長量に飛躍的な増加がなければ密度の大きな変化は生じないものと考えられる。今後、成長量の定期的なモニタリングなどにより成長量の変化を追跡していく必要があると考えられる。

カ 要約

施業コストを削減するために、適切な施業が行われてこなかった管理水準低下林分に対して立木の40%以上を間伐する強度間伐が導入されつつある。このような施業は、過密林分に対して強度の間伐を行うことから、従来の間伐よりも立木密度が大きく低下し、立木の成長や材の密度等に大きな影響を与える可能性がある。本研究では、約50%の定性間伐を行い4年が経過したスギ及びヒノキを対象に、間伐前に形成された材と間伐後に形成された材の年輪構造及び動的ヤング率の比較を行った。また、強度間伐を行っていない対照木についても同様の測定を行い、間伐の前後及び間伐の有無による違いについて検討した。

強度間伐スギについて年輪幅等を間伐前後で比較すると、間伐前に比べて間伐後の年輪幅、早材幅が減少し、年輪内平均密度、晩材率が増加した。その反面、早材平均密度と晩材平均密度の間伐前後の差はほとんど認められなかった。強度間伐ヒノキについての結果もほぼ同様で、年輪内平均密度と晩材率が増加したが、早材及び晩材密度はほとんど変化しなかった。これらの傾向は対照群でもみとめられ、強度間伐以外の要因が関与していると考えられ、強度間伐の年輪構造に対する影響は短期的には大きくないと考えられた。間伐前と間伐後に形成された材の動的ヤング率を比較すると、スギでは間伐前後でほとんど差が見られず、強度間伐木と対照木との間にも有意な差はみとめられなかった。一方、ヒノキでは、間伐後に形成された材は間伐前に形成された材に比べて動的ヤング率が高くなっていたが、対照木でも同じ傾向を示し、強度間伐木と対照木との間には有意な差はみとめられなかった。管理水準低下林分への強度間伐の影響は、間伐後4年の時点ではほとんど見られないことから、強度間伐の短期的影響は大きくないと考えられる。

キ 引用文献

- 藤原 健，山下香菜，平川泰彦（2004）収穫試験地における主要造林木の全乾容積密度および気乾密度の樹幹内変動，森林総研研報，3，341-348.
- 池田潔彦（2000）応力波伝搬速度によるヒノキ立木材質の評価，第50回木材学会研発要，108.
- 池田潔彦（2002）応力波伝搬速度による立木材質の評価と適用に関する研究，静岡林技セ研報，No. 29，1-63.
- 滝野真二郎，佐々木 光（1979）スギ間伐材の材質 ―植栽密度の影響―，木材研究資料，No. 14，99-104.
- S. Y. Wang and C. M. Chiu（1993）Wood properties of Japanese cedar originated by seed and vegetative reproduction in Taiwan VI. Compression and bending properties, Mokuzaigakkaishi, 39, 1128-1139.

（藤原 健）

第3章 スイングヤーダ集材作業の省力・安全化技術の開発

ア 研究目的

高性能機械導入による列状間伐や強度間伐が省力的で効率的な施業方法として各地で実施されつつあり、架線系集材機械としては機械の稼働率の高いスイングヤーダが広く利用されてきている。急峻な立地環境下でスイングヤーダによる集材を省力的かつ効率的に行うためには、運転操作の自動化による作業システムの省力化と軽労化、さらに機体の転倒防止技術の開発による安全性の確保が大きな課題である。具体的には、タワーヤーダと比べると索速度が遅いため作業能率が低く、また、ガイラインを使用しないため機体転倒の危険性があり、現実には重大災害が発生している(1)という問題に対する解決策が必要となる。スイングヤーダの動力性能上の改良は困難であるため、集材作業の作業能率を向上するためには、スイングヤーダ集材にかかわる作業員数を減らすことが最も効果的であり、スイングヤーダの運転操作を自動化する必要がある。また、安全な作業のために転倒防止手法の開発が急務である。

本研究では、他の作業者がスイングヤーダの操作の一部を兼務して行う場合を想定して、スイングヤーダの運転操作を自動化あるいは無線遠隔操作化するための装置類の開発を行うとともに、自動運転あるいは無線操作化されたスイングヤーダの転倒を防止するため、索張力等から機体転倒の危険性を診断し、機体の安定を保つ手法を開発する。また、これらの装置類及び手法を用いたスイングヤーダ・プロセッサ作業システムを提案する。

イ 研究方法

自動化あるいは無線遠隔操作化のための装置類の開発では、スイングヤーダの搬器走行時における索の傾斜角及び移動量を検出する装置(スナッチブロック型検出装置)、走行する搬器の接近を検知しスイングヤーダの集材ウインチに停止信号を送出する装置(ストッパー型搬器検知装置)、及び荷おろし作業の際に作業者が荷しぼり索に触れることなく離れた場所から荷の開放をおこなうことのできる装置(無線操作式チョークフック装置)を試作する。

上記装置類の性能評価としては、森林総合研究所構内の架空索実験施設で、既存のスイングヤーダあるいは制御機器を付加したスイングヤーダ用ウインチを用いて、実際の索張りを模した状態で各装置の性能試験を行う。

機体の転倒を防止する手法では、上記の「スナッチブロック型検出装置」で検出される索傾斜角及び既存の張力計の値をもとに、作業索に負荷される張力による機体転倒力の推定を行う。また、スイングヤーダのブーム・アームのシリンダー長及び油圧の計測値をもとに、機体姿勢の変化に伴う重心位置の変位を推定し、転倒診断を行うシステムを検討する。

ウ 結果

試作開発した装置類の概要は、以下のとおりである。

「スナッチブロック型検出装置」(図 3-1)は、作業索用スナッチブロック(滑車)をベースにした装置で、スイングヤーダのアーム先端に設置して使用する。シーブ(みぞ車)を通る作業索に沿って揺動する腕を左右に付加し、腕の角度を検出することで索の角度を求める方式である。また索の移動量を求めるためにシーブ回転を検出する機器も装備している。なお、腕の角度の検出には

分解能が 4096puls/roll のアブソリュート式ロータリーエンコーダを、またシーブ回転の検出には同じく 20puls/roll のインクリメンタル式ロータリーエンコーダを用いた。図 3-1 の右背面側が角度検出部であり、左前面側がシーブ回転検出部である。

「ストッパー型搬器検知装置」(図 3-2)は、長さが約 1m、質量が 5kg の板バネ形状の装置で、両端で作業索から懸下する方式である。その一端はスインギヤードのガイドブロックと結束するが、搬器との接触を検知するために他端にはリミットスイッチを装着している。なお、装置は複数をつなぐことで、搬器の停止位置を調整することが可能である。

「無線操作式チョークアップ装置」(図 3-3)は、荷しばり索に装着し、その一端のアイ(輪)部分を可動フックで固定及び開放する方式である。固定は手動、開放は無線操作で行い、無線には、免許を必要としない特定小電力無線を用いている。寸法は約 12cm の立方体(突起部除く)で、質量は約 5kg である。

上記の試作装置類の性能評価試験結果は以下のとおりである。

「スナッチブロック型検出装置」の索角度検出では、まず、角度検出用の左右 2 個のエンコーダで、索を静的に設置した状態で角度を変化させ、そのエンコーダ値を実測した。



図 3-1 スナッチブロック型検出装置



図 3-2 ストッパー型搬器検知装置



図 3-3 無線操作式チョークアップ装置

図 3-4 の 2 つの図に、それぞれの角度エンコーダ値と索角度の関係を示す。図中の近似式及び相関係数が示すように、構造上の精度が十分高く、設計どおりの角度検出が可能であった。

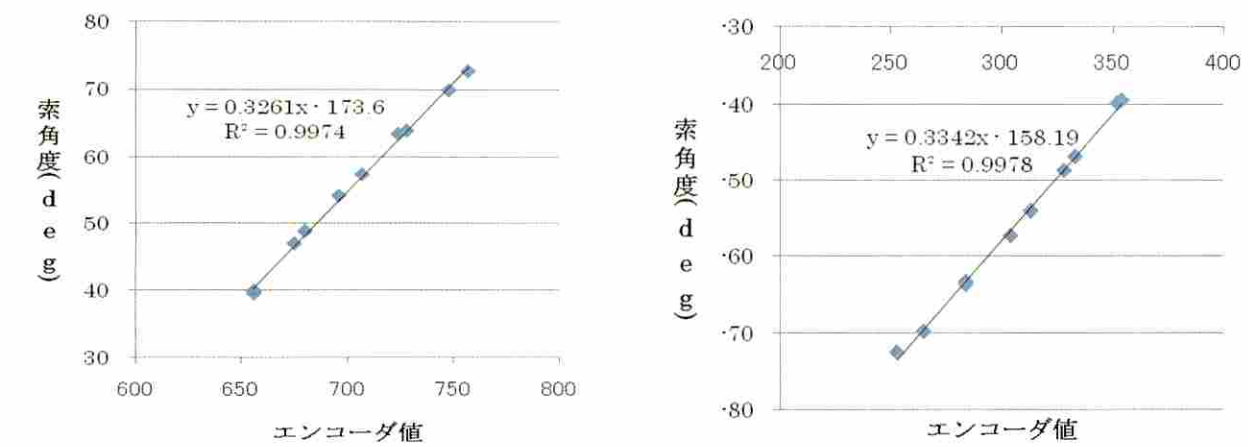


図 3-4 角度検出装置の誤差精度

次に、同装置をスイングヤードに設置し、材をけん引した状態で角度検出試験を行った。試験場所は森林総合研究所構内の架空索実験施設の平坦地で、試験条件としては、材をけん引走行する距離が約 25m、同走行速度が 0.7～1.1m/s である。また、けん引される集材材木は、短幹材が 2 本と全幹材が 1 本である。質量は、短幹材が 311kg(短幹材 1)及び 325kg(短幹材 2)、全幹材が 677kg である。なお、角度検出のサンプリングタイムは 8Hz である。

角度検出に基づいたリアルタイムな索張力の計算では、索の揺動等により誤差の生じる場合があった(図 3-5)。この誤差は、検出する角度データ(エンコーダ値)に突発的に現れるもので、数個のデータを移動平均等で処理して抑制できるものである。

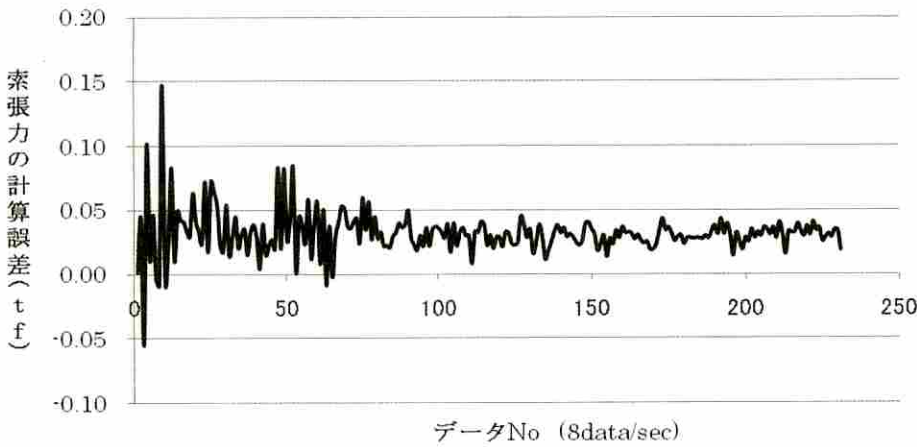


図 3-5 索張力のリアルタイムな計算誤差例

集材木の違いの影響では、集材木の質量が大きい方が、突発的な角度誤差の生じる程度が大きい傾向があったが、検出角度に基づいた索張力計算の平均値では、集材木の違いによる影響はなかった(図 3-6)。また、「スナッチブロック型検出装置」の索移動量検出でも、集材木の重量が大きい方が移動量誤差の大きい傾向が見られたが、その誤差率は小さく、実用上十分な精度で搬器走行距離を計算できることが明らかになった(図 3-7)。

「ストッパー型搬器検知装置」については、図 3-8 に索傾斜角度による長さの変化を示す。装置が 1 個では 30 度の索傾斜で約 0.7m の長さとなり、緩衝距離としてはやや不十分であるが、2 個の装置を連結した場合、30 度の索傾斜でも約 1.6m の長さを得ることが可能であり、十分な緩

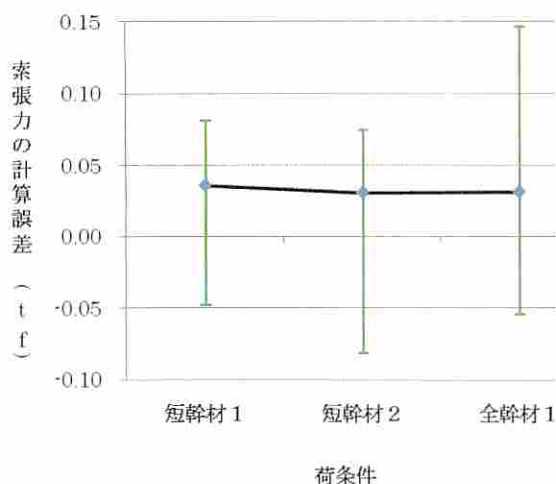


図 3-6 索張力の計算誤差

衝距離を確保できることが明らかになった。また、同装置に搬器を衝突させてウインチ動作を停止する実験では、両者が接触してから約 0.1 秒後にウインチを停止することができた。「無線操作式チョーカフック装置」では、設計どおりの性能を有することが確認できた。無線の到達距離も 30m 以上の実用的な距離を確保していることが明らかになった。

転倒診断システムを図 3-9 及び 3-10 に示す。前者は、スイングヤードのベスマシンである油圧ショベルについて、

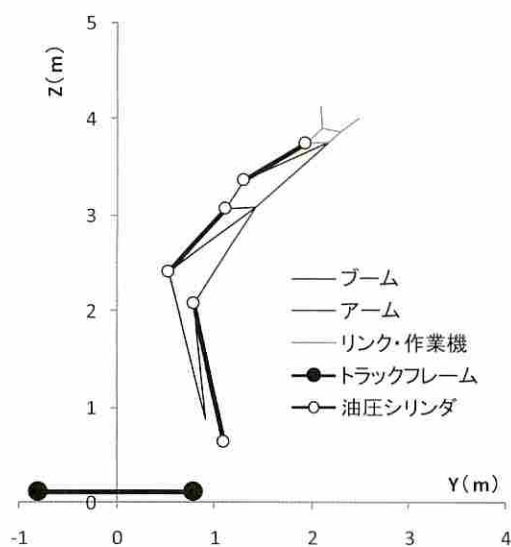


図 3-9 機械の構成要素と配置
(側方からの模式図。Y 軸方向が機械前方)

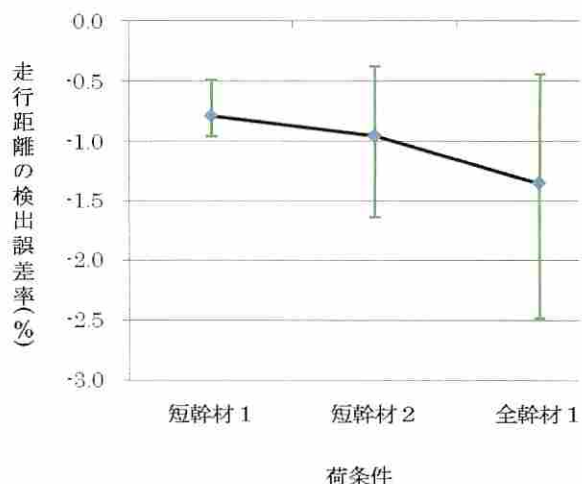


図 3-7 索移動量の計算誤差

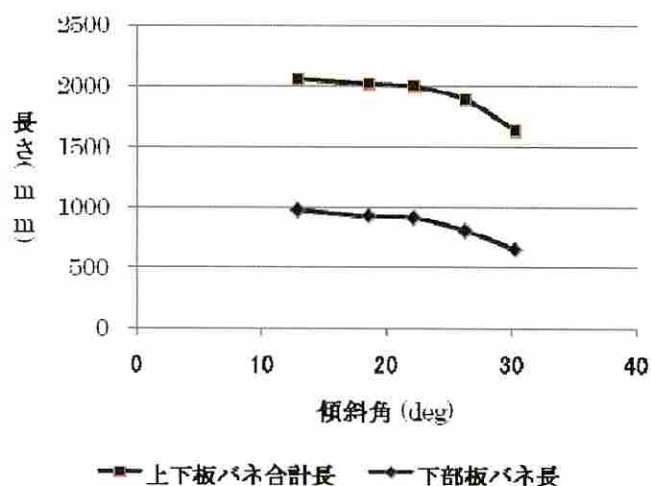


図 3-8 傾斜による長さの変化

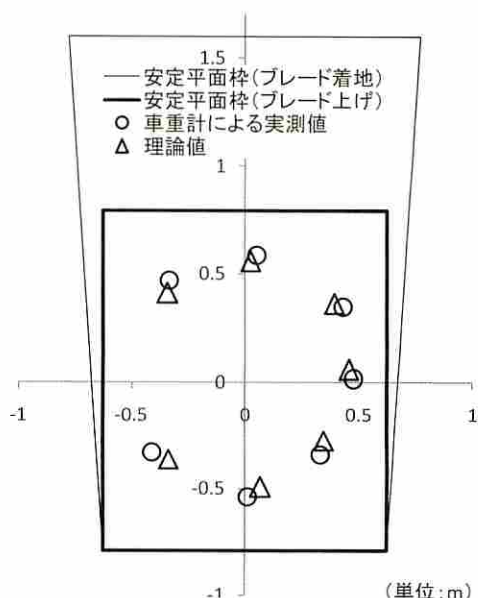


図 3-10 重心位置の推定(平面図)

作業時に空間的な位置変化を生じるアーム・ブームのみを模式化したものであり、それらの2次元的な配置を示している。これらの構成要素について足回り(トラックフレーム)との相対位置を検知することで、位置変化を生じない他の機械構成部分とともに機械全体の重心位置を計算し、機械の安定性を判断する。図3-10はその結果の一例であり、車重計による実測値から得られる実際の重心位置に対して、同システムで計算した結果(図中の「理論値」)がほぼ同じ位置に再現できていることがわかる。

エ 考察

装置類の開発では、ほぼ目標どおりの性能を有する装置類を試作することができた。「スナッチブロック型検出装置」では、検出角度に突発的な誤差を生じる場合があり、リアルタイムな索張力計算で精度低下の原因となるが、移動平均等のデータ処理による対処が可能な範囲であり、実用上問題のない程度である。また、同装置の索移動量検出では、集材木の質量の影響があるとはいえ、その誤差率が小さいため、実用上十分な精度で搬器走行距離を計算できると考えられる。「ストッパー型搬器検知装置」では、索傾斜角が30度の場合でも、2個を連結して用いることで十分な制動距離を確保することが可能である。「無線操作式チョーカフック装置」では、30m以上の無線到達距離を確保できたが、プロセッサのオペレータが運転席からチョーカフックの開放を無線操作で行う場合に十分な距離といえる。

機体の転倒を防止する手法では、「スナッチブロック型検出装置」で検出した索角度を用いて索張力を計算する方法、及び、機体の転倒力を求める方法ともに、その有用性を見出した。前者は、先に述べたように、突発的な検出角度誤差が生じる場合もあるが、データ処理による対処が可能である。また、集材木の重量にかかわらず平均値がほぼ一定していることから、索張力計算に伴う誤差をオフセット誤差と見なすことによって転倒力計算の精度向上が可能である。一方後者では、機体姿勢の変化に伴う重心位置の変位の推定において、上部機体旋回角度による重心位置変化量も考慮した上で、スイングヤードのブーム・アームのシリンダー長及び油圧の計測値をもとに、ブーム・アームの角度とトルクを求めることで、機体の安定度を計算するモデルを作成できる。

オ 今後の問題点

「スナッチブロック型検出装置」、「ストッパー型搬器検知装置」、及び「無線操作式チョーカフック装置」とともに試作装置の範囲にあり、実用化のためには改良が必要である。特に「スナッチブロック型検出装置」では、ハードの面で張力計との一体化が必要であり、ソフトの面ではブーム・アームのシリンダー長のデータ取得方法も含めたリアルタイムな演算処理プログラムの開発が不可欠である。「無線操作式チョーカフック装置」では、荷しばり索をよりスムーズに開放するためのフック形状の改良が必要である。ブーム・アームのシリンダー長及び油圧の計測値をもとに、機体姿勢の変化に伴う重心位置の変位を演算する手法については、機体の転倒を防止するために、ハード・ソフトの両面からより実効的な手段を検討することが必要である。

カ 要約

本研究では、スイングヤードの運転者以外の作業者がその操作の一部を兼務して行う場合を想

定して、スイングヤーダの運転操作を自動化あるいは無線遠隔操作化するための装置類の開発を行うとともに、自動運転あるいは無線操作化されたスイングヤーダの転倒を防止するため、索張力等から機体転倒の危険性を診断し、機体の安定を保つ手法を開発することを目的とした。

試作開発した装置は、「スナッチブロック型検出装置」、「ストッパー型搬器検知装置」及び「無線操作式チョーカフック装置」の3つである。各装置の機能は、スイングヤーダの搬器走行時における索の傾斜角及び移動量を検出すること(スナッチブロック型検出装置)、走行する搬器の接近を検知し集材ウインチに停止信号を送出すること(ストッパー型搬器検知装置)、及び荷おろし作業の際に作業者が荷しばり索に触れることなく離れた場所から荷の開放をおこなうこと(無線操作式チョーカフック装置)であるが、実際に搬器の集材走行を行った試験においても、実用的に十分な検出精度で機能することが明らかになった。

これらの装置を用いることで、図 3-11 に示すような改良システムが可能となる。

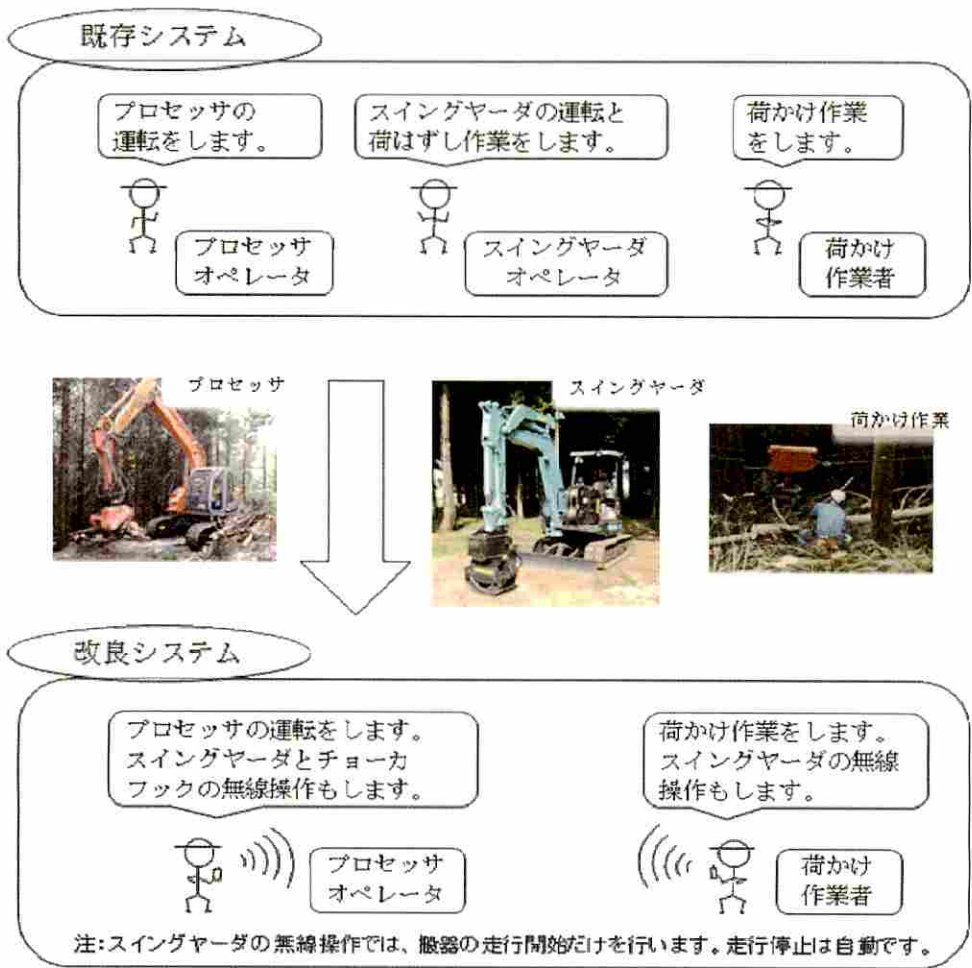


図 3-11 試作装置を用いた「スイングヤーダ+プロセッサ」改良システムの提案

キ引用文献

(1) 林業・木材製造業労働災害防止協会(2009) 林材業における労働災害の現状と対策. 87pp, 林業・木材製造業労働災害防止協会, 東京.

(広部伸二)

第 4 章 林業事業体による強度間伐の作業特性の解明と収益予測手法の開発

1. 間伐率がスイングヤード集材作業におよぼす影響

ア 研究目的

強度間伐では、間伐率を上げることによって、伐採木の間隔が短くなり、集材作業においては複数の伐採木をまとめて運搬できることが考えられ、能率の向上が期待される。一方で、間伐作業では、残存木が集材の障害物となる。間伐率を上げることによって、残存木の密度が減少すれば、集材作業の能率が向上することも期待される。この研究は、集材作業の計画時において、間伐率がコストに与える影響が評価できるように、間伐率がスイングヤード集材作業の能率にどのような影響を及ぼすのか明らかにすることを目的とする。

イ 研究方法

高知県香美市の民有林に 0.4ha の 35 年生ヒノキ林に試験地を設定した。平均胸高直径は 27.8cm、平均樹高は 14.1m、立木密度は 1,100 本/ha であった。スイングヤードの集材架線を境にして、一方で本数の間伐率で 35%（図の下側）、もう一方で 45%の伐採を行った（図 4-1-1）。

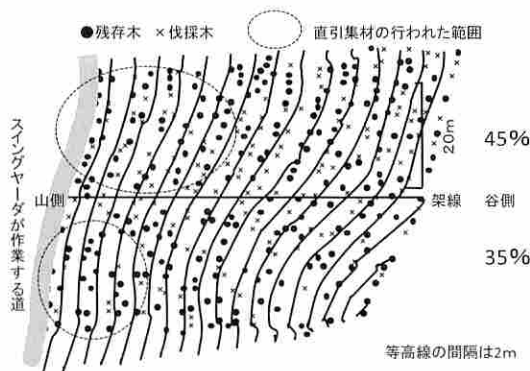


図 4-1-1 試験地の概要

集材方向は谷側から山側への上荷（上木、上方）集材であった。測量によって立木配置図、地形図を作成、集材作業をビデオカメラによって撮影、作業分析を行った。

ウ 結果と考察

集材作業 1 回当たりの伐採木の運搬本数を 35%間伐、45%間伐の場合にわけて図 4-1-2 に示す。

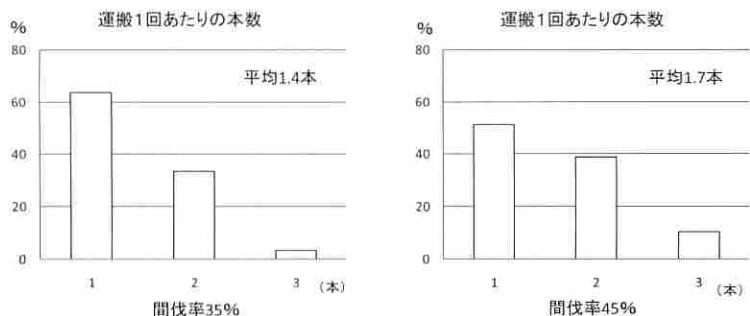


図 4-1-2 集材 1 サイクル当たりの集材本数

間伐率 35%では、1 回あたり平均 1.4 本なのに対して、45%では 1.7 本と増加している。度数分布を見ると、35%の間伐では伐採木 1 本のみを積載する場合が 50%以上なのに対して、45%の間伐では 1 本のみ集材する割合が減った分、3 本まとめて運搬する割合が増加しており、これは強度間伐によって伐採木をまとめて運搬する機会が増加していることを示している。

しかし、集材作業 1 回あたりの積載量が増加すると荷重が増加することによって集材搬器の走行速度が低下することや、伐採木を搬器に取り付ける荷かけ作業、あるいは搬器から取り外す、荷はずし作業などの手間は増加することが懸念される。こうしたマイナスの影響を能率の算定に考慮する必要がある。図 4-1-3 に材積による運搬量と搬器の走行速度の関係を、図 4-1-4 では運搬本数と荷かけ、荷はずし所要時間の関係を示す。

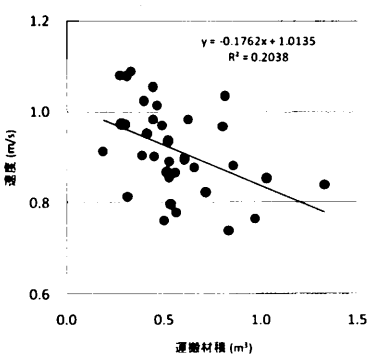


図 4-1-3 運搬材積と走行速度の関係

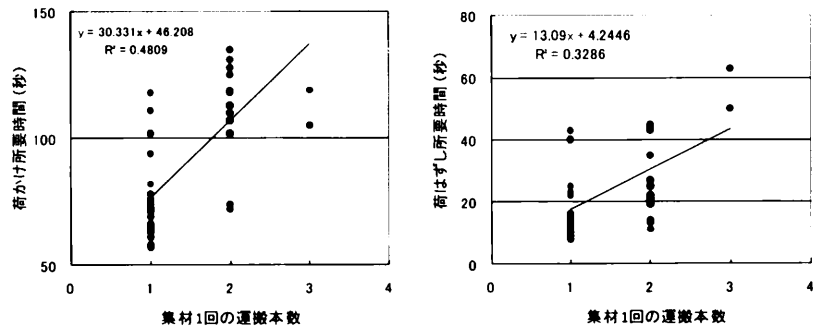


図 4-1-4 荷かけと荷はずし所要時間と運搬本数

図 4-1-3 ではデータは、ばらついているものの、回帰直線は負の傾きを持ち、集材 1 回あたりに運搬する材積が増加することによって走行速度が次第に低下していくことを示している。また、図 4-1-4 では、特に、荷かけ所要時間が 1 本の場合と 2 本の場合では、大きく異なることを示している。荷かけ、荷はずし所要時間ともに、回帰直線は正の傾きをもち、集材における運搬本数が増加すると、やはり、それだけの手間がかかることを示している。

これらの回帰直線を使ってスイングヤードの作業能率を算定したものが図 4-1-5 である。この図より、スイングヤードの集材作業の能率は、1 本ずつ運搬する場合、平均運搬距離が 30m では 6.0m³/h 程度の能率であるが、2 本ずつ運搬した場合には 10.0m³/h 近くまで上昇することが示されている。運搬距離 30m での比較で、能率が単純に 2 倍にならないこと、あるいは図で 1 本と 1.5 本の能率向上とに比べて、1.5 本と 2 本間の能率向上の程度が低くなっているのは、走行速度

の低下、荷かけ、荷はずし所要時間の増加の影響等を反映したものである。

また、スイングヤードは、通常2つのウインチを使って索張りを行って集材作業を行うが、今回の調査では、現場の作業員の判断によって、スイングヤードの近く、すなわち伐採木を集めてくる道の近くでは、1つのウインチから直接ワイヤーロープを引き出して木材に荷かけする集材が行われた。ここではこの作業方法を、直引集材とよぶことにする。図 4-1-6 に直引集材と通常

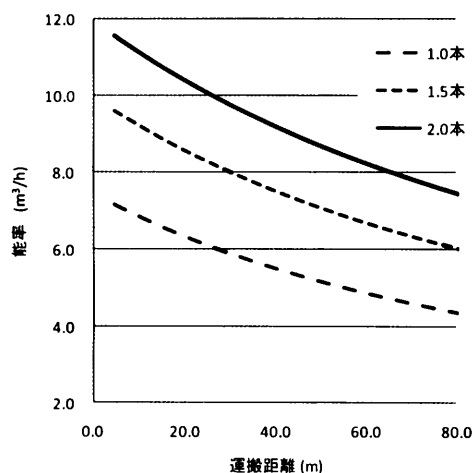


図 4-1-5 スイングヤードの作業能率

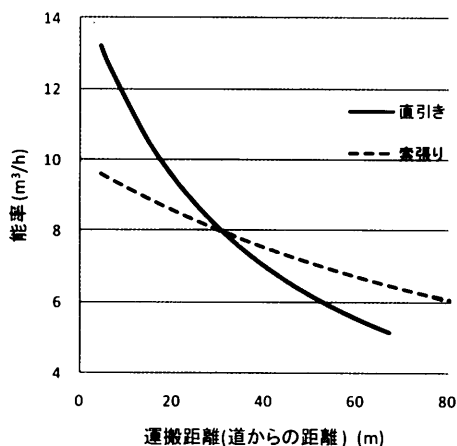


図 4-1-6 直引きと索張りによる集材の能率比較

図から運搬距離が短い、つまり道に近い範囲では、直引集材のほうが能率が高く、その分岐点は30m程度であることが分かる。これは索張りを使った集材が、架線方向の移動と、横取りという架線に対して直角方向の移動からなる2段階の作業で構成されているのに対して、直引集材では横取りの過程を省略して直接集材することによる。しかし、搬器の走行速度は作業員の歩行速度よりも速いため、道からの距離が離れるに従って、索張りを使った集材の能率が高まってくるのである。この直引集材の行われた範囲は、図 4-1-1 に破線の楕円で示すように35%間伐では道から10m程度、45%間伐では道から35m程度であった。これは45%の間伐では残存木の密度が低下して、残存木の隙間を使って直引集材が行えるようになったからである。

このことから、強度間伐では、集材 1 回あたりの運搬本数の増加に加えて、残存木の隙間が広がる効果によって、道の近辺では能率の良い直引集材を実施することで、さらに能率が上昇することがわかった。

35%間伐を想定して平均運搬本数が 1.4 本、10m 以内で直引集材を採用とした場合、45%間伐を想定して平均運搬本数 1.7 本、30m の範囲内で直引集材を採用とした場合の作業の能率と運搬費は、それぞれ、8.2m³/h、1,450 円/m³、10.0m³/h、1,200 円/m³となりおよそ 250 円/m³のコスト削減がはかられることが明らかになった。

エ 今後の問題点

残存木の隙間の効果については、立木密度が 1,100 本/ha という条件で 35%と 45%という 2 つの条件について間伐を行って実験的に明らかにしたにすぎない。より、一般的に隙間の効果を定量的に評価する方法が必要である。これについては、次節で検討を行う。

オ 要約

傾斜地での集材システムであるスイングヤード作業システムの現地調査を実施、作業分析を行って能率を明らかにした。スイングヤードの集材作業は、間伐率を上げると、集材 1 回あたりの運搬量が増加することによっておこる速度の低下や、荷かけ、荷はずしの手間を考慮しても、能率が増加することが明らかになった。また、残存木の密度の低下によって、隙間が生じて、より能率の高い直引集材が、道の近くのより広い範囲で実行することができることが明らかになった。

2. 伐採率が直引集材の可能性に及ぼす影響の検討

ア 研究目的

前節において、スイングヤード集材作業において、強度間伐を実施した場合、隣接する残存木の間隔がひろがり、より能率の高い直引集材が実行できるようになることが明らかにした。しかし、この結果は、立木密度が 1,100 本/ha で 35%と 45%の間伐率で試験的に実証したものである。より一般的に、立木密度と間伐率を与えてやれば、どの程度の伐採木が直引可能になるのか推定できることが望ましい。この節の目的は、間伐率が直引集材の可能性に及ぼす影響を定量的に検討することである。

イ 研究方法

直引集材の可能範囲を検討するにあたって、まず人工林の立木配置モデルを作成した。立木配置モデルとは、実際の人工林に似せた立木配置をもつ立木データの集合である。正方形の格子を作成して、それぞれの格子の中央に立木を配置した。格子の間隔は、植栽密度 d 本/ha より、 $10,000/d$ の平方根から計算する。この植栽密度から、実際の立木密度まで立木を消去することが必要である。

まず、自然枯死等で、本数が減少することを考慮、立木に乱数を与えて値順にソート、値の小さなものから指定された本数を削除するものとした。乱数を使った方法では、立木の隣接性がまったく考慮されないで、モデル内に大きな無立木地を生じさせることがあり、この方法だけで必要な立木密度まで立木を消去することはできない。

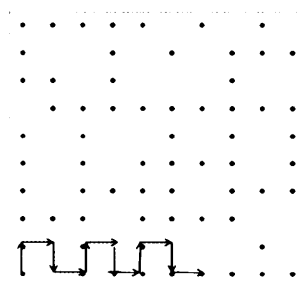


図 4-2-1 経路法

そのため、実際の間伐の選木で行われるように、図 4-2-1 に示すように、モデル内の残存立木を順にめぐっていく経路を設けて、経路順に 10 本に n 本を乱数で消去していく方法を使用した (2)。しかし、この方法にも経路間の立木配置の考慮がなされていない欠点があり、これに対応するために経路法を変更した。ある立木に対して上下左右に立木が隣接している場合には 1、斜め方向に隣接している場合には $1/\sqrt{2}$ の重みを与える。 $1/\sqrt{2}$ としたのは、中心からの距離に反比例する重みを考えたためである。乱数ではなく、この重みを経路内の 10 本の立木に与え、値順にソートして、大きい値のものから n 本を消去する。この重みは、ある立木の周辺の混み具合を数値で表現したものと考えられ、密度の高いところから選木していくというルールを経路法に加味したことになる。この重みつき経路法の n を調整することによってモデルの立木密度を所定

の密度へ近づけることができる。

所定の立木密度となったところで、これまで格子の中心位置に配置していた立木に、位置誤差を与えて現実の林分に似せた立木配置とする。実際の林分では、植栽列が確認できることから、位置誤差は、全体的に列構造が残るような方法で与えた。縦方向を植栽列として、列の開始位置、さらに列の間隔の誤差を与えて立木を再配置する。その上で縦方向と横方向に植栽時の誤差を与えて位置を確定する。ここでの誤差は正規乱数である。

最後に、各立木に胸高直径の値を付与する。実際のデータや密度管理図等で予測される平均胸高直径を平均値として、変動係数を指定して、正規乱数を各立木に胸高直径として与えた。立木の集材路への直接到達性を次のように定義した。

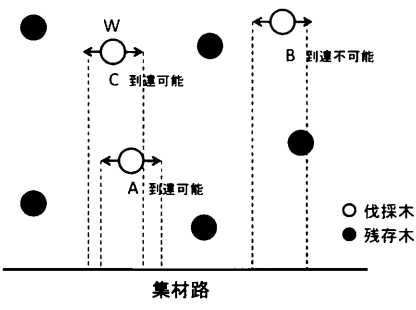


図 4-2-2 直接到達性の定義

ある伐採木に対して、集材路に直角にワイヤーロープで集材することを考えて、図 4-2-2 に示すように、伐採木の位置を中心に、集材路に平行して幅 W の線分を考え、この線分を集材路に直角に集材路まで動かしたときにできる領域を考える。図中の A のようにこの領域内に残存木がなければ、その伐採木は直接到達可能であると定義する。図中の B のように、この領域内に残存木があれば、直接到達不可能である。ただ、図中の C のように、この領域内に伐採木があっても、集材路に近い側から伐採木を集材していくので、直接到達可能である。

直接到達の可能性の判定のためのアルゴリズムは以下の通りである。まず、直接到達性を判定する領域の幅に対して、解像度 1cm に対応する、整数の 1 次元配列を用意して、値ゼロで初期化する。例えば、幅 20m の領域を判定するのであれば、大きさ 2000 の整数の配列を用意する。直接到達性を判定する立木とすべての残存木のリストを作成、そのリストを立木の縦座標が大きい順にソートする。このリストの順に、立木については、その立木の横座標に対応した位置に、胸高直径の幅だけ、その立木の識別番号を配列に書き込んでいく。伐採木については、胸高直径ではなく W の幅だけ識別番号を書き込んでいく。すべて描き終わったら、伐採木の識別子を書き込んだ位置を調べて、残存木で上書きされていないかをチェックする。上書きされていないければ、その伐採木は直接到達可能であり、上書きされていれば不可能である。この処理を伐採木の数だけ繰り返す。

まず、立木配置モデルを使ったシミュレーションで直接到達性の計算を行い、その後、実際の林分の立木配置図を使って直接到達性の計算を行い、モデルの良否を検討した。検討に使ったのは実際に前節で強度間伐試験を行って、直引集材が実施された林分である。40 年生のヒノキ林で平均胸高直径は 27.8cm、立木密度は約 1,100 本/ha であった。この林分の幅 20m、奥行き 50m

の領域を使って検証に用いるものとした（図 4-2-3）。図から明らかなように、植栽列は集材路に対して斜め方向となっている。また、2 列ずつ植栽されていることがわかる。残存木の間隔などより、初期の植栽密度は 2,500 本/ha であると推定された。

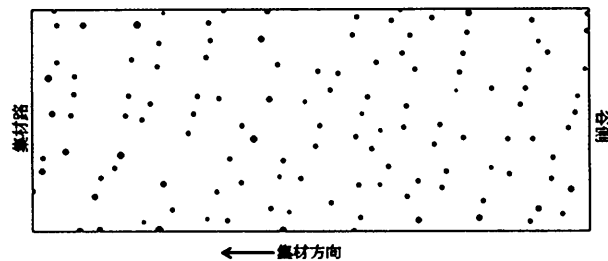


図 4-2-3 立木配置図

植栽密度 2,500 本/ha、平均胸高直径 27.8cm で、50×60 個の格子を持つ立木配置モデルを作成した。胸高直径の変動係数は文献と実際の変動係数を参考にして 0.2 とした(1)。そこから 10% をランダムに削除、重みつき経路法によって 10 本に 3 本の削除を 2 度行って、密度を約 1,100 本/ha とした。直接到達性の幅 W は 50cm とした。また、列の開始位置、列間、植栽時の誤差はそれぞれ 30、20、20cm とした。

図 4-2-3 に示されるように、植栽列は集材路に対して角度を持つことが考えられるので、モデルは集材路に対して植栽列が縦方向、横方向、斜め方向（45 度）場合を作成した。50×40 のモデルを作成、中心から大きさ 20×50m の領域をとりだした。横方向、斜め方向では、それぞれ 90、45 度の回転を与えてから領域を取り出した。この領域に対して再び重みつき経路法で 30、40、50、60%の選木を行い、選ばれた伐採木に対して直接到達性を算定した。

奥行き 50m を 10 等分して、20×5m の領域に存在する伐採木のうちの何割が直接到達可能か算定した。乱数を変えながら 100 回の計算を行い、その平均値を算定した。伐採率の低いモデルでは、区域内に伐採木がない可能性もあるが、そのような場合は、データを除外した。縦方向、横方向、斜め方向の結果を図 4-2-5～図 4-2-7 に示す。また図 4-2-3 に示す立木配置を使って、同様の計算を行った。経路法の経路は、植栽列に沿って移動していく経路を手入力で作成した。重みを用いない経路法で 30、40、50、60%の選木を行った。乱数を変えて 100 回計算し、平均値を求めた。結果を図 4-2-4～図 4-2-6 に示す。

ウ 結果と考察

図 4-2-4 から図 4-2-6 より、直接到達性は指数関数のような減少関数で集材路付近では 1 に近く、50m 付近では 0 に近い値を示すことがわかる。また、伐採率が上がるに従って、グラフ全体が上昇する傾向が示されており、直接到達性は伐採率が上がると大きくなることがわかる。方向別の比較では、縦方向で直接到達性が最も低い。これは植栽列が集材路に対して直角だと、集材路近辺にある残存木が残っている場合に、その後方の木がいくら伐採されても、その残存木の後方で直接到達可能にならないことによると考えられる。一方、横方向のモデルでは、そのような列構造がくずれるため、全体的に縦方向よりも直接到達性は高くなっている。さらに、斜め方向では直接到達性は向上しており、60%の点状間伐を行った場合は 45m 付近においても 5 本に 1

本の割合で伐採木へ直接到達可能であることが示されている。図に示した回帰曲線はいずれも指数関数である。

$y=a \cdot e^{-bx}$

y は直接到達性、x は集材路からの距離を表す。表 4-2-1 に指数関数のあてはめの r^2 、指数関数の係数 a、b、および関数から計算される直接到達性が 0.5 となる道からの距離を示す。

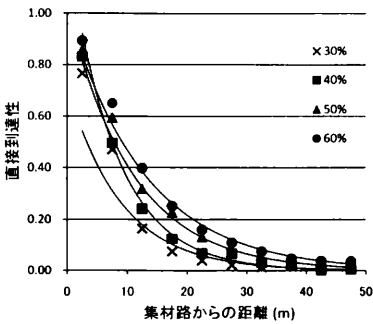


図 4-2-4 縦方向の直接到達性

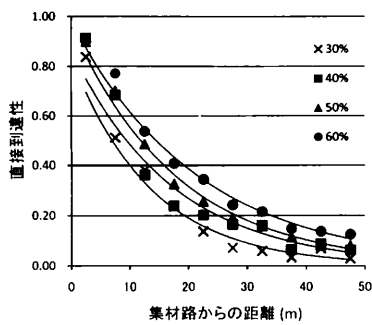


図 4-2-5 横方向の直接到達性

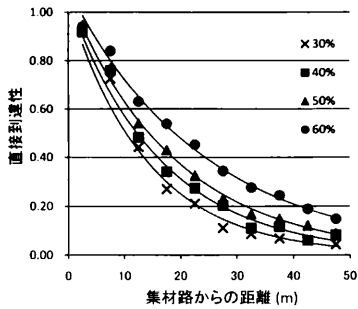


図 4-2-6 斜め方向の直接到達性

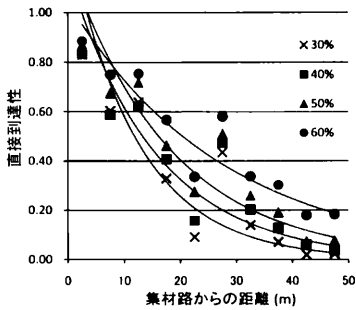


図 4-2-7 実際の林分の直接到達性

表 4-2-1 指数関数の係数

方向	伐採率	距離*	a	b	r ²
縦方向	30%	3.2	0.716	-0.111	0.950
	40%	7.4	1.260	-0.125	0.925
	50%	7.9	1.022	-0.091	0.953
	60%	9.1	1.011	-0.077	0.984
横方向	30%	7.0	0.839	-0.074	0.926
	40%	9.4	0.870	-0.059	0.941
	50%	12.1	0.972	-0.055	0.988
	60%	14.4	0.984	-0.047	0.984
斜め方向	30%	10.3	1.040	-0.071	0.979
	40%	12.2	1.053	-0.061	0.962
	50%	14.5	1.076	-0.053	0.994
	60%	19.1	1.095	-0.041	0.996
実際の林分	30%	11.8	1.316	-0.082	0.828
	40%	13.3	1.172	-0.064	0.846
	50%	16.1	1.214	-0.055	0.869
	60%	20.4	1.043	-0.036	0.881

*距離は直接到達性が0.5になる集材路からの距離

全体的に指数関数への当てはまりがよいが、縦方向や横方向の伐採率の低いところで a が 1 よりも低く、距離 0 では直接到達性は 1 であると考えられるので、その意味で指数関数への当てはまりが悪いと考えられる。斜め方向では全体的に指数関数への当てはまりが良い。このことから、残存木に縦方向の列構造が残っている場合には、集材路の近辺で指数関数では説明できない直接到達性の低下がおり、縦方向、斜め方向のように、列構造が崩れるほど、また伐採率が上がるほど、指数関数の当てはまりがよくなることがわかる。

図 4-2-7 は、実際のデータから計算された直接到達性であるが、斜め方向の結果に近いパターンを示している。しかし、35m 付近のデータは当てはまりが悪い。これはこの付近で例外的に 3 列の植栽が行われており、ここにおいても同じ伐採率で選木したために面積当たりの伐採率が上昇して到達性を引き上げたものと推測された。表で直接到達性が 0.5 となる距離も、斜め方向と比べてやや過大な推定を与えている。これらのことを考えても、モデルを使った直接到達性の計算は植栽列の方向性を考えれば、実際の林分での推定に用いることができるものと考えられる。

エ 今後の問題点

直接到達性と上荷直引集材が可能かどうかは同義ではない。実際の試験では 20m 付近までは、すべて直引集材され、30m 付近で半分程度の伐採木が直引集材された。これは、道の近辺では、斜めに直接到達可能であれば直引集材されること、また 1 本の伐採木が到達可能であれば、近隣の伐採木も一緒に荷かけして集材されること等による。こうした影響を評価することによって直引集材の可能範囲が算定されるが、今回作成したモデルを利用すればこうした検討は可能であり、今後、モデルの精度を向上させることが必要である。

オ 要約

間伐率を上げると、道から直角に一定の幅で、直接到達できる伐採木が増加する。この関係を明らかにするために立木配置モデルを使ってシミュレーションで直接到達性を算定する方法を作成した。この方法によって任意の植栽密度の林分において、直接到達性が間伐率との関係で評価できるようになった。また実際の林分での直接到達性を算定した結果は、シミュレーションの結果とおおむね一致した。この方法を使えば、直引集材が可能な伐採木の割合が、集材を行う道からの距離によってどのように変化していくの評価することができる。

カ 引用文献

- 1) 安藤貴（1982）林分の密度管理，126pp，農林出版株式会社，東京．
- 2) 田中良明・吉田智佳史・伊藤崇之・上村巧・岡勝・井上源基（2006）間伐木選木のアルゴリズム，日林関東支，56，83～84．
- 3) 田中良明・吉田智佳史・中澤昌彦・近藤耕次・岡勝・都築伸行・小谷英司（2008）スイングヤードによる強度間伐の作業特性の検討，日本森林学会大会発表データベース， Vol. 119 ， 799．
- 4) 都築伸行（分担）（2007）平成 19 年度 人工林の集中的な皆伐の抑制方策に関する調査（その 1：人工林の集中的な皆伐を回避するための森林施業に関する調査）報告書，11～17，林野庁，東京．

3. H型架線集材における伐採率と損益分岐点の検討

ア 研究目的

H型架線による集材は、2本の主索間にある伐採木を真上に吊り上げるため、集材時に地表や残存木に悪い影響を与えにくいという好ましい特性をもっている（図4-3-1）。しかし、その架設や撤去に必要な費用が、事業地の生産量に対して固定費となり、一定以上の生産量がなければ経済的になりたない。この研究では、架設、撤去にかかる固定費を満たすために必要とされる生産量を明らかにするために、H型架線による架線集材を調査、分析してその生産性を明らかにすることを目的とする。

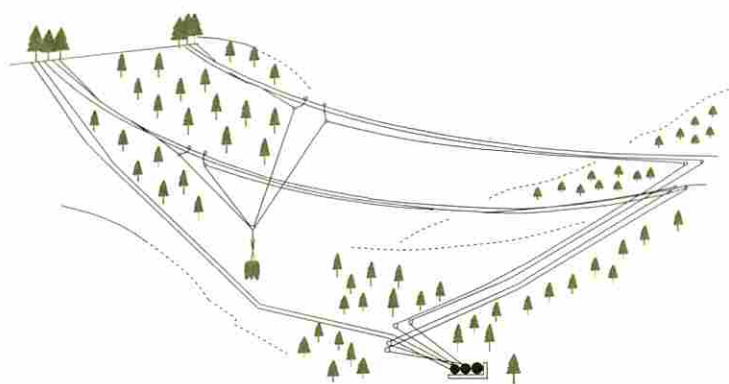


図 4-3-1 H型架線

イ 研究方法

調査は高知県長岡郡大豊町西峰の県有林で行った。調査林分は47年生スギ、ヒノキ混植林で平均樹高、平均胸高直径は、スギ、ヒノキ、それぞれ、20.0m、30.0cm、16.8m、28.5cmであった。H型架線は2つの峰の間に谷に垂直にはられていた。2本の架線の間隔はおおよそ200mであった。土場は一方の架線の線下の道沿いに設けられた。調査プロットを2本の架線の中央、林道より谷側に設け、37サイクルの作業を観測した。作業はプロセッサのオペレータ、集材機運転手、荷かけ手の3名で行われた。

調査では、集材作業のビデオ撮影を行うとともに、搬器にGPS受信機を搭載して、作業中の搬器の軌跡を得ることとした。調査プロット内の林分調査および荷かけ地点、土場の位置を測量して各集材サイクルの移動距離を求めた。

ウ 結果と考察

図4-3-2はH型架線の搬器に取り付けたGPSレシーバの1秒ごとの軌跡である。XY座標は平面直角座標系、ZはGPSが出力した高さである。土場を出発した搬器は横移動（架線に対して垂直）と縦移動（架線方向）の移動をおこなって、荷かけ地点へ誘導され、荷かけ後土場へ戻る。これらの軌跡を分析、各要素作業の所要時間を計測した（図4-3-3）。

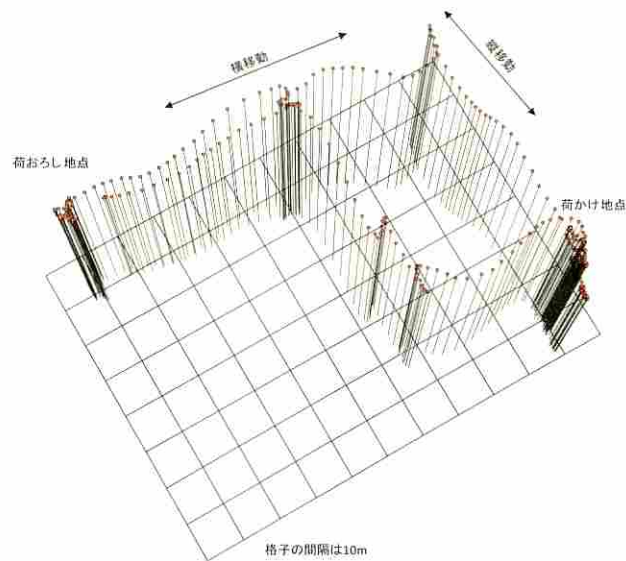


図 4-3-2 H 型架線の搬器の軌跡

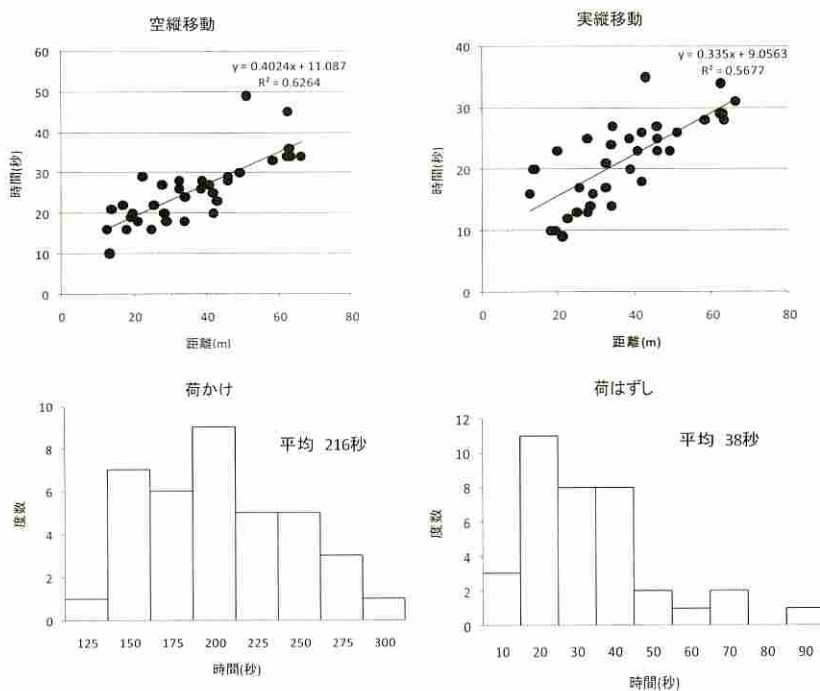


図 4-3-3 主要要素作業の所要時間

荷かけ時間が、荷はずし時間に比べて長いですが、これは荷かけという要素作業の中に、地上のオペレータが無線によって搬器を誘導する過程を含めているからである。樹冠の空いている空間の真上に搬器を誘導することが必要なため、この作業が一連の集材作業の中でボトルネックになっていると思われる。これらの結果から、スパン長を L 、2本の架線の間幅を W とする H 型架線の生産性を試算したのが図 4-3-4 である。 $L:W$ の比を調査地と同じ 7:2 として計算を行った。面状に集材を行う H 型架線では、荷おろしの位置をどこにするかによって、集材距離が変化する。

そのため、荷おろし地点を中央にした場合と、荷おろし地点を一方の架線の下にした場合において試算を行った。

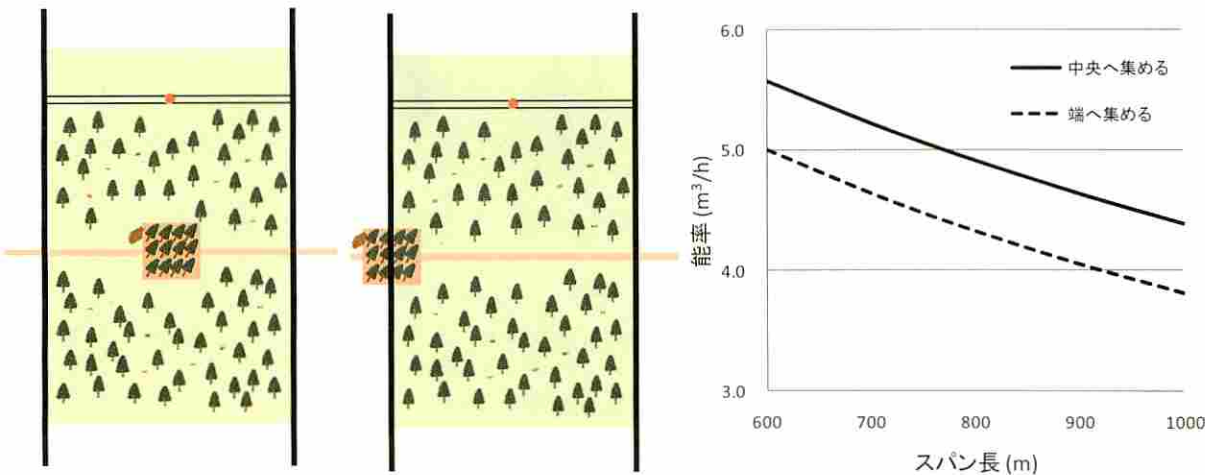


図 4-3-4 H 型架線の集材能率

図から、中央に集めるほうが平均集材距離は短くなるために能率が高く、またスパン長が長くなるにつれて次第に能率は減少していくことがわかる。能率の算定が可能になると、集材作業の費用が推定できる。費用のうち、生産量に比例する変動費はおおよそ、7、700 円/m³ となった。調査地の条件は、立木密度 1,500 本/ha、平均材積 0.50/m³ である。固定費である H 型架線の架設撤去に要する費用が、機械の移動費等も含めて 100 万円であったとすると、この固定費に対する損益分岐点を間伐率であらわすことができる。造材の歩止まり 0.75、スギの平均価格 8,000 円/m³ とした場合の損益分岐点を算定したところ 38.5%の間伐率となった。この損益分岐点は、林分の条件、木材の価格等によって変わってくるものであるが、能率の推定が可能となっているので、その条件に応じた損益分岐点を評価することが可能である（図 4-3-5）。

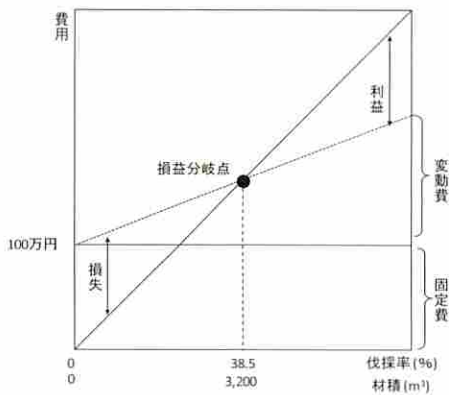


図 4-3-5 損益分岐点の試算例

エ 今後の問題点

今回の搬器の移動速度は水平距離をもとに算定した。したがって搬器の高さ方向の移動を考慮していない。地形条件が類似していれば、同様の結果になるものと思われるが、より正確な能率の推定には高さ方向の移動を検討する必要がある。また能率を作業日報のような長期的な記録から評価することも必要である。

オ 要約

急傾斜地における架線集材方式である H 型架線集材システムを対象に、間伐作業の現地調査、作業分析を行い、能率の算定に必要な要素作業の速度や平均所要時間を得た。この結果を用いて、固定費となる架設撤去費に対する損益分岐点を間伐率によって表わすことができた。損益分岐点は、木材の価格、補助金の有無等によって変わってくるが、いずれにせよ経済的に成り立つ最低限の間伐率が算定できるので、間伐率を決定する場合の 1 つの指標とすることができる。

(田中 良明)


~~~~~

「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものである。

この冊子は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集」として刊行するものである。

~~~~~

ISSN 1349-0605

森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集 33
「管理水準低下人工林の機能向上のための強度間伐施業
技術の開発」

発 行 日 平成23年 3月31日

編 集・発 行 独立行政法人 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

電話. 029-873-3211 (代表)

印 刷 所 大成印刷株式会社