

森林総合研究所
交付金プロジェクト研究 成果集 21

要間伐林分の効率的施業法の開発

独立行政法人 森林総合研究所
2009. 2

序文

我が国では、1980 年以降の継続的な木材価格の低下による林業採算性の悪化に伴い、人工林の適切な保育作業が実行されない放置林分（要間伐林分）や主伐の手控えが著しく増加した。一方、森林の多面的機能（温暖化防止、水土保持、生物多様性保全機能など）に寄せる国民の関心は高く、森林整備のために国民や企業が費用の一部を負担することが認められつつあり、県においても森林整備のための環境税が導入されてきている。平成 20 年には「森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法」が制定され、京都議定書の履行に関わる特定間伐等（平成 24 年までに行われる間伐または造林）に対して、交付金の交付等の措置が執られるようになった。しかし、これらの追い風を利用し、間伐や林道開設などの森林整備が徐々に進められる一方、依然として、何らの対策もないまま放置された要間伐林分が数多く存在する。

このように要間伐林分が多く存在する理由について施業の現場から見ると、個々の林分の置かれた条件で、将来を見通して最も効率的・経済的な間伐方法を選択する指針、言い換えれば、種々の間伐や伐期を想定しつつ、間伐搬出コストや収穫による収入等、将来の伐期までの経営収支を分析できるものが未開発であったこと、種々の間伐を実施した場合における林分構造の変化や生物多様性等への効果に関する知見が不十分であったこと、が考えられる。そのため、間伐方法や伐期の決定においても、戦略的なものではなく消極的な理由から選択されているのが大方の実態といえる。

そこで、種々の間伐を実施した場合の林分構造や生物多様性への施業効果を明かにするとともに、施業の効率性・経済性を確保するという観点から、間伐方法の選択と実施に対する処方箋を早急に示すことを目標として、3 カ年の研究計画のもとに本プロジェクト「要間伐林分の効率的施業法の開発」を立ち上げた。

本成果報告書は、このプロジェクトの研究成果として、第 1 章において、間伐による林分構造や生物多様性への施業効果の実態を示すとともに、第 2 章においては、立地条件に応じた間伐作業法、自然条件に応じた低コスト路網整備法、さらに、間伐から主伐までを見通したトータルな経営収支の予測手法の開発を取りまとめたものである。特に、経営収支の予測手法の開発では、汎用性のあるパソコン用プログラム「林業経営収支予測システム FORCAS（FORrest management CAsh forecast System：フォーカス）」を開発し、試行版を森林総合研究所のホームページにダウンロードできるように掲載した。

これらの研究成果は、要間伐林分に対して間伐方法や伐期の選択を検討する上で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いと考え、ここに本書を刊行する次第である。なお、本書はプロジェクト研究の実施報告書であるが、今後、間伐に関するこれまでの研究成果を現場で利用可能な形に組み立てて、分かり易く解説した間伐マニュアルを刊行することを予定している。

平成 21 年 2 月

独立行政法人 森林総合研究所
理事長 鈴木 和夫

研究課題：要間伐林分の効率的施業法の開発

目 次

研究の要約	1
第1章 要間伐林分の類型化と施業評価	9
1. 列状・強度間伐が林分構造に及ぼす影響の解明	9
2. 間伐が生物多様性に及ぼす影響の解明	19
第2章 目的とトータルコストを考慮した間伐システムの選択方法の提示	26
1. 立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発	26
2. 自然条件に応じた低コスト路網整備法の開発	37
3. トータル収支を考慮した収支予測手法の開発	44

研究の要約

I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成17～19年度（3か年）

予算区分：運営費交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主査	研究コーディネータ	埤田 宏（平成17年） 佐藤 明（平成18年） 石塚森吉（平成19年）
研究推進責任者	林業工学研究領域長	今富裕樹

III 研究組織

森林総合研究所 森林植生研究領域、森林昆虫研究領域、林業工学研究領域、
林業経営・政策研究領域、温暖化対応拠点、東北支所、九州支所

IV 研究目的

現在の日本の林業は、立木価格の低下による採算性の悪化、森林整備の中心的な担い手である森林組合の技術水準の低下や経営基盤の脆弱性等を反映して、放置林分の増加や主伐の手控えが増加傾向にある。一方、森林の多面的機能の定量評価に寄せる国民の関心は高く、水土保持や温暖化防止に資する森林の役割が理解され、森林の維持管理のために国民や企業が費用の一部を負担することが認められつつある。これらの追い風を利用し、各種の交付金やボランティアによる森林整備が進められる一方、何らの対策もないまま放置された森林の存在も増えている。

施業の現場から見ると、保安林制度、森林の機能区分、森林認証制度などを意識した制限的な施業基準と、列状強度間伐等の粗放な省コスト作業のトレードオフ関係が不明なままであり、最も適切な方法を選択し、将来の林分状態を予測することができない。そこで、水土保持林を主対象に、間伐方法の選択と実施に対する処方箋を早急に示すことを目標とし、指定施業要件や森林認証制度の基準・指標と実際に行なわれている粗放的な間伐方法を比較検証し、施業の効率性・経済性という観点から見直す。

V 研究方法

第1章 要間伐林分の類型化と施業評価

1. 列状・強度間伐が林分構造に及ぼす影響の解明

茨城森林管理署管内の35年生のヒノキ人工林と100年生ヒノキ人工林に調査プロットを設定し、各立木の直径と樹高を測定すると同時に、品等区分を行った。35年生林では、現状での成長を1年間計測した後、実際に列状間伐を行って成長の反応を解析した。100年生林では、林内に残る伐根を数えるとともに樹齢を同定し、その間伐履歴を推定した。

2. 間伐が生物多様性に及ぼす影響の解明

常陸太田市の人工林が優占する地帯で、茨城営林署管内の林齢30年前後の間伐林分・無間伐林分各5林分を選定し、マレーズトラップによって飛翔性昆虫のサンプリングを2005年と2007年に行うと共に、羽化トラップによってリター中の節足動物を2006年にサンプリングした。間伐林と無間伐林分に出現する昆虫種の多様性を明らかにすると共に、上記の林分で下層植生を調査した。調査は間伐翌年（1年後）と3年後の2回にわたって間伐・無間伐林分で実施し、それぞれの年について種数を比較した。このことにより間伐の短期的な効果を示した。

第2章 目的とトータルコストを考慮した間伐システムの選択方法の提示

1. 立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発

スキッダ、フォワーダ、タワーヤーダ、スイングヤーダ、林内作業車、集材機など9機械16機種337例の集材機械を対象に搬出コスト、機械適用範囲、作業システムのパターン分析を行った。急傾斜地の列状間伐を対象に受口・追口の高さ、ツル幅等を変えた18タイプの伐倒試験を行い裂け上がり等について分析するとともに、有限要素法を用いて追口の切り方に伴う立木の内部応力変化を3次的に解析した。利根沼田森林管理署管国有林地内の人工林カラマツ（24年生）を対象に、4タイプの伐採方法による間伐試験を行い、簡易な素材を用いた残存木損傷の軽減効果を分析した。

2. 自然条件に応じた低コスト路網整備法の開発

高密作業道路網を活用した車両系集材で間伐施業を行っている施業地の路網を対象にして、地形、地質の異なる条件下に作設された作業道の特性（配置、規模、作設法等）について調査した。調査は、GPS測位による作業道路線位置と線形を把握し、地形図（1/5000森林基本図）上に表示して路線図を作成した。これを元に道の横断測量を行い、道の規模の要因として幅員、切土高、盛土勾配、縦断勾配等を計測した。地形要因として横断測量と同時に切土のり面上部の地山斜面の傾斜、盛土のり面下方斜面傾斜（計測出来ない場合は欠測）を計測した。土の要因として路面のCBR値、最大乾燥密度（締固め試験）を測定した。また、10mメッシュ数値地図（以下、10mDEM）を用いて施業地全体の傾斜特性、傾斜30°以上の斜面面積等を求めた。

3. トータル収支を考慮した収支予測手法の開発

間伐計画においては、間伐の一時的な収支の評価だけではなく、その後の成長や収穫量への影響を含めた正確な推定をもとに経営判断を行うことが求められる。このような考え方を背景に、適切な間伐の推進を支援するため、強度間伐や列状間伐など様々な間伐方法に対応した収穫予測手法と、作業システムや立地条件によるコスト予測手法を統合し、間伐から主伐までの中長期を見通したトータルな収支予測手法と、それを実装した収支予測システムを開発し、多様な施業・作業システムに対応した収支予測を行った。

実 施 課 題 名	担 当	期 間
要間伐林分の類型化と施業評価 1. 列状・強度間伐が林分構造に及ぼす影響の解明 2. 間伐が生物多様性に及ぼす影響の解明 目的とトータルコストを考慮した間伐システムの 選択方法の提示 1. 立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発 2. 自然条件に応じた低コスト路網整備法の開発 3. トータル収支を考慮した収支予測手法の開発	森林総研 森林植生 研究領域 森林総研 森林昆虫 研究領域、森林植生研 究領域、東北支所 森林総研 林業工学 研究領域 森林総研 林業工学 研究領域 森林総研 経営政策 研究領域、温暖化対応 拠点、九州支所	平成 17～19 年 平成 17～19 年 平成 17～19 年 平成 17～19 年 平成 17～19 年

VI 研究結果

第 1 章 要間伐林分の類型化と施業評価

1. 列状・強度間伐が林分構造に及ぼす影響の解明

林木個体の成長に影響を及ぼす隣接木の範囲（距離）を、35 年生ヒノキ人工林において解析した結果、その範囲は個体の周辺約 5 m 以内であった。立木の平均個体間距離 5 m は立木密度 400 ～620 本/ha に相当するが、100 年生ヒノキ人工林 6 林分において間伐の履歴を調べた結果、概ね 70 年生までに立木密度をこの範囲に誘導していることが明らかになった。このことから、林木の生長に影響を及ぼす隣接個体の範囲 5 m は、将来まで残す将来木（立て木）の平均個体間距離の目安になると考えられた。一方、35 年生ヒノキ人工林において 3 種の列状間伐区（1 残 1 伐、2 残 1 伐、3 残 1 伐）を設定し、1 年目の成長調査と将来木の選定を実施した結果、将来木の成長量は隣接木の影響より自身のサイズ（直径）に依存し、その傾向は強度な間伐ほど顕著であることが明らかになった。したがって、定性間伐では劣勢木が除去され個体間の成長差は縮小するが、列状間伐、とくに強度の列状間伐では、個体間の成長差がより広がるものと考えられる。

2. 間伐が生物多様性に及ぼす影響の解明

本調査では、30 年生前後の林分における定性間伐の効果を対象とした。まず飛翔昆虫のサンプリング結果では、間伐 1 年後の林分でチョウ、ハナバチ、ハナアブの種数が無間伐林分よりも有

意に多いことが明らかになった。また、有意差は検出されなかったが、カミキリの種数も間伐林分に多い傾向が認められた。しかし、間伐3年が経過した時点では、間伐林分、無間伐林分の間で昆虫の種数に有意差は認められなかった。一方、間伐2年後の羽化トラップによるサンプリングにおいては、間伐林分では無間伐林分に比べて、カ垂目昆虫をはじめ腐植食性昆虫の個体数の顕著な減少が認められた。これは、間伐林分における落葉（葉身リター）の有意な減少と同調しており、何らかの関係が示唆された。

なお、本調査を行った間伐林分では下層間伐が実施されたため林冠を疎開するものではなく、結果として、3年間を通じて間伐林分と無間伐林分に植被率の差は見いだされなかった。しかし、間伐林分の本数密度、落葉量は無間伐林に比べ大きく減少しており、それらが飛翔性の昆虫の増加や腐植食性昆虫の減少に影響を及ぼしたと考えられた。

第2章 目的とトータルコストを考慮した間伐システムの選択方法の提示

1. 立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発

間伐材搬出に使用されている集材機械は、地形傾斜 15～20 度以下の緩傾斜地では車両系機械、地形傾斜 15～20 度を超える傾斜地では架線系機械が適用されていること、タワーヤード等の軽架線システムは、小面積伐区での短距離集材として適用されていることが多いこと等が分かり、間伐材搬出のための集材機械の実用上の適用を明らかにした。また、わが国で普及している間伐材搬出のための作業システムの類型化を行い、その中で代表的な 11 の作業システムについて、集材距離を関数とする伐出コスト推定のためのモデル式を作成し、伐出コストの算定を可能とした。さらに、間伐材搬出時の安全作業を確保する観点から安全な伐採法解明のための試験を行った結果、斜面傾斜角を a （度）、受口角を b （度）としたとき、 $b > 90 - a$ とすれば、伐倒時の裂け上がりや防ぎ易くなり、安全確保の上で望ましいことを明らかにした。残存木損傷の防護効果について試験を行った結果、防護資材としてポリ排水管が最も効果が高く、あて木のみでの防護と比較すれば、3～4 割防護効果が高いことがわかった。

2. 自然条件に応じた低コスト路網整備法の開発

フォワーダ等の林業用機械を前提とした作業道の路線配置や作設法についての実態調査を行った。この結果、斜面傾斜が急になる程、作業道の開設位置に関する地形条件が及ぼす影響は大きくなり、登り路線（幹線）と等高線に沿った作業用路線（支線）とに明確に区別して作設されることがわかった。幹線と支線とが区別されて作設される斜面傾斜角は、路肩部が盛土で構成され始める、30 度程度であるものと判断された。現状における作業道の作設法は、4 種類存在することが確認された。急傾斜地では、路肩部も地山部も均等に締め固めて支持力を大きくして路体を堅固にする必要があり、土質と斜面傾斜に応じて、地山部と盛土部を均等に締固める方法、木製構造物を用いる方法があることがわかった。また、作業道の路体強度の評価手法のひとつとして、路面支持力の比（転圧度：山側の CBR 値に対する路肩側の CBR 値の比）を見出した。この評価手法を利用することで、作業道路体の優劣の判定をすることが可能となる。

3. トータル収支を考慮した収支予測手法の開発

間伐から主伐までを見通したトータルな収支を予測できるパソコン用プログラム、林業経営

収支予測システムFORCAS（FORrest management CASH forecast System：フォーカス）を開発した。FORCASは小班レベルの林分を対象として、収入を推定する収入予測サブモデルと、主間伐のコストを推定するコスト予測サブモデルから成り、それぞれで推定された収入と支出を合算して収支を予測するソフトウェアで、表計算ソフトEXCEL上で作動する。FORCASを用いて、一例として列状間伐と定性間伐の収支を比較したところ、間伐時だけの収支では列状間伐が有利である一方、主伐までのトータルの収支では定性間伐の方が有利であると推定された。FORCASを活用することによって、施業計画やコスト条件を変えて収支予測を簡易かつ迅速に行うことができ、目的に応じた施業計画を容易に比較検討できることが可能となる。

Ⅶ 今後の課題

第1章 要間伐林分の類型化と施業評価

1. 列状・強度間伐が林分構造に及ぼす影響の解明

成長や品等を左右する因子の解析結果は、短期間の成長計測のデータに基づくものである。残念ながら、長期間にわたって継続観測された類似のデータはみあたらない。高齢級の林分でも位置情報を含めた計測をおこなうなど、本課題の結果の長期間な観点からの信頼性を高める必要がある。また、本課題の結果の中では、強度な列状間伐区で着葉量が順調に増えると想定したが、さまざまな状況下の人工林での研究事例を増やし、結果の信頼性を高めることが必要である。

2. 間伐が生物多様性に及ぼす影響の解明

植生に大きな変化がなかったことから、本研究で記述した昆虫の多様性の変化は一時的なものと推測する。ランドスケープレベルの生物多様性管理を行うためには、長期的な生物多様性の変化を解明する必要がある。

第2章 目的とトータルコストを考慮した間伐システムの選択方法の提示

1. 立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発

立地条件に応じた適正な間伐作業法の選択肢をより総合的に構築するため、生産性、コストについては路網配置や機械操作の習熟特性の影響を考慮した評価値を解明するとともに、間伐に伴う残存木損傷の保全コストや材質等に及ぼす影響を解明する必要がある。今回着手した有限要素法による受け口周辺部の内部応力変化については、立木の様々な形状、状態に対応した解明を進める必要がある

2. 自然条件に応じた低コスト路網整備法の開発

作業道は、さまざまな自然条件の場所に開設され、作業システムの中での使われ方も多様であるため、作設法にもそれぞれ独特の方法があり、今後も調査を続ける必要がある。路線配置では、多大な時間と労力、経験を必要とする「現場合わせ」がどこまで図上で可能（微地形がどの程度読み取れるか）か検討する必要がある。また、作設法では、路体の強化と均質に作設することを目指した具体的な工法をコスト面からも検討し、提示する必要がある。

3. トータル収支を考慮した収支予測手法の開発

FORCASの推定値について、検証とそれにとともなう改善を行い、精度向上を進める必要がある。そのためには、現場での適用を進めながら、そのフィードバックによる改善を繰り返すことが効果的であろう。また、現在、3種の伐出システムに対応しているが、より広い適用を考えれば、

もっと多くの種類の伐出システムへ対応する必要がある。

VIII 研究発表

第1章 要間伐林分の類型化と施業評価

1. 列状・強度間伐が林分構造に及ぼす影響の解明

1) 鈴木和次郎・池田伸・和佐英二・平野辰典・須崎智応・石神智生 高齢級ヒノキ人工林の林分構造に見る間伐効果. 日本森林学会誌 (印刷中)

2. 間伐が生物多様性に及ぼす影響の解明

- 1) 岡部貴美子・井上大成・槇原寛・磯野昌弘・田中浩 (2007) 人工林の間伐と生物多様性、第54回日本生態学会大会講演要旨 p383
- 2) 井上大成・岡部貴美子・田中浩・大谷英児 (2008) スギ人工林の間伐がチョウ類群集に与える影響、日本応用動物昆虫学会第51回大会講演要旨
- 3) 岡部貴美子 (2008) 森林の間伐と生物多様性の関係、林業地域における生物多様性保全技術(仮題). 林業振興技術協会 (出版準備中)
- 4) 磯野昌弘・井上大成・岡部貴美子・田中浩 (2008) スギ間伐林分における落葉分解昆虫の減少、日本昆虫学会第68回大会講演要旨 p67

第2章 目的とトータルコストを考慮した間伐システムの選択方法の提示

1. 立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発

- 1) 今富裕樹・岡勝・梅田修史 (2007) 効率的な作業機械と路網整備による搬出コスト低減技術の開発、機械化林業638、16-20
- 2) 鹿島潤・上村巧・近藤耕次・岡勝・加利屋義広・濱本高光・川添峰夫 (2007) 上方伐倒における受け口と追い口の形状の効果 第118回日本森林学会大会講演要旨118:P1c02
- 3) Masaru OKA・Motoki INOUE・Hiroshi KOBAYASHI (2006) Studies of the Pattern Classification of the Logging Systems for Thinning on the Basis of the Applicability of Forestry Machines and Features of Logging System J.Jpn.For.Eng.Soc (21)2、115-124
- 4) 松田浩幹・岡安崇史・光岡宗司・井上英二・鹿島潤・岡勝 (2006) 有限要素法による立木伐倒時の切り口周辺の応力分布予測に関する基礎的研究、森林利用学会研究発表会要旨集13、23
- 5) 岡勝・佐々木達也・近藤耕次・鹿島潤・濱本高光・加利屋義広・小林洋司 (2006) 簡易な防護具を用いた残存木損傷の軽減効果の検討、森林利用学会誌 (20)4、273-276
- 6) 岡勝 (2007) わが国の伐出作業システムの現状と課題、森林利用学会誌 (22)2、75-78
- 7) 岡勝・田中良明・吉田智佳史・中澤昌彦・近藤耕次・川添峰夫 (2006) 架線系集材システムによる列状間伐のコスト分析、森林利用学会研究発表会要旨集14、11
- 8) 岡勝・田中良明・吉田智佳史・中澤昌彦・近藤耕次・川添峰夫 (2007) 架線系集材システムによる列状間伐のコスト分析、森林利用学会研究発表会要旨集14、11
- 9) 岡安崇史・上村巧・松田浩幹・光岡宗司・井上英二・鹿島潤・岡勝 (2007) 3次元有限要素法による立木伐倒時の切り口周辺部の応力解析、森林利用学会研究発表会要旨集14、5
- 10) 佐々木達也・岡勝・上村巧・鹿島潤・加利屋義広・濱本高光・平澤林太郎・近藤道治 (2007) カラマツ残存立木損傷による初期の変色・腐朽に関する調査、森林利用学会研究発表会要旨集14、18
- 11) 上村巧・松隈茂・福田章史 (2007) 伐木作業者の使用する道具とその質量について、森林利用学会誌 (21)4、275-278

2. 自然条件に応じた低コスト路網整備法の開発

- 1) 梅田修史・鈴木秀典・山口智 (2006) 高密路網成立の地盤条件と作設法 (1)、日本森林学会関東支部論文集、57、325-326
- 2) 鈴木秀典・梅田修史・山口智 (2007) 高密路網が開設される地形の特徴、関東森林研究、58、229-231.
- 3) Hidenori SUZUKI, Shuji UMEMA and Satoshi YAMAGUCHI (2007) Influence of terrain condition on forestry road construction on ridges、J.Jpn. For. Eng. Soc. 22(3).133-142
- 4) 梅田修史・鈴木秀典・山口智 (2007) 作業道路網の開設に関する一考察、森林利用学会誌、23(3)、143-152
- 5) 鈴木秀典・山口智・梅田修史・佐藤誠司・加利屋義広 (2008) 火山灰質粘性土における作業道路面の締固めと路面支持力、森林利用学会誌、22(4)、271-274

3. トータル収支を考慮した収支予測手法の開発

- 1) 中島徹・松本光朗・白石則彦 (2006) システム収穫表プログラム LYCS におけるヒノキのパラメータ推定、森林資源管理と数理モデル、5、1-10
- 2) 中島徹・白石則彦・松本光朗 (2006) 両極端な林分密度に対応した森林資源シミュレーションモデルの開発、中部森林研究、54、65-168
- 3) 細田和男・中北理・小倉正男 (2006) 列状間伐と下層間伐の間伐後の成長比較—岡山県新見市ヒノキ若齢林の事例—、日林関東支論、57、55-56
- 4) 松本光朗・鹿又秀聡 (2006) 低コスト施業のための多様な密度管理計画に対応した経営予測手法の開発、低コスト施業の保育効果等に関する調査報告書 (林野庁)、76-99
- 5) 細田和男・松本光朗・時光博史 (2006) ヒノキ列状間伐林における残存木の成長、日本森林学会大会講演要旨集、117、G23
- 6) 小倉正男・細田和男 (2006) 列状間伐施業における林況変化と経営的評価試験 (第2報)、平成17年度森林・林業交流研究発表集録、19-21
- 7) 細田和男 (2006) 列状間伐林の追跡調査と予測モデルの開発、林業いばらき、584、9
- 8) 鹿又秀聡・野田巖・中島徹 (2006) 利用間伐の実態と推進に向けての課題、日本森林学会大会講演要旨集、117、G25
- 9) 中島徹・松本光朗・鹿又秀聡・龍原哲・白石則彦・李定洙・竹添勝俊 (2007) 多様な森林施業に対応した地域レベル間伐収支モデルの開発に関する研究、日本林学会大会学術講演集、118、M06
- 10) 松本光朗 (2007) 加子母森林組合におけるシステム収穫表 LYCS 現地調査報告書、平成18年度森林環境保全先端技術導入機械開発事業報告書 (林野庁)、29-41
- 11) 松本光朗・中島徹 (2007) 収穫表作成システム LYCS Ver3.1 使用マニュアル、平成18年度森林環境保全先端技術導入機械開発事業報告書 (林野庁)、42-60
- 12) 松本光朗・中島徹 (2007) 収穫表作成システム LYCS Ver3.1 解説書、平成18年度森林環境保全先端技術導入機械開発事業報告書 (林野庁)、61-75
- 13) 松本光朗・鹿又秀聡 (2007) 低コスト施業のための多様な密度管理計画に対応した経営予測

手法の開発、低コスト施業の保育効果等に関する調査報告書（林野庁）、79-119

14) 中島徹・松本光朗・龍原哲（2008）収穫木の材価を最大化する採材アルゴリズムの適用
関東森林研究、59、55-58

15. 中島徹・松本光朗・龍原哲・白石則彦（2008）無間伐林分に対応可能な森林資源予測システムの開発に関する研究、日林学術講、119、H13

IX 研究担当者

第1章－1 正木隆、鈴木和次郎、太田敬之

第1章－2 岡部貴美子、大谷英児、井上大成、田中浩、磯野昌弘

第2章－1 岡勝、吉田智佳史、近藤耕次、中澤昌彦、上村巧、鹿島潤、
佐々木達也、今富裕樹

第2章－2 梅田修史、鈴木秀典、山口智

第2章－3 松本光朗、細田和男、鹿又秀聡

第1章 要間伐林分の類型化と施業評価

1. 列状・強度間伐が林分構造に及ぼす影響の解明

ア 研究目的

戦後の人工林施業における間伐方式は、従来は定性間伐が主流であった。これは樹木の形状や形質を1本1本評価して間伐木を選定するもので、最終伐期における高収益を目指すうえでは、これがもっとも望ましいと考えられる。しかし、定性間伐では高度な選木技術・伐倒技術が必要とされる。現在、それに熟達した技術者は不足しつつあるのが実態である。一方、列状間伐は、このような高度な選木技術は必要としない。また、間伐時に一定の確率で高品質材も生産される。そのため、列状間伐は短期的な収益と最終の伐期における収益の確保の両立が可能とされている（渡辺，2005）。しかし、品質も加味した人工林の間伐・成長研究は今まで行われてきていない。そこで本課題では、以下の二つの研究を行った。

第一に、林齢35年生の人工林において質・量の両面から調査を行い、実際に列状間伐を行った。その結果から、間伐が成長と質の構造におよぼす影響を評価した。第二に、現在高齢級に達している人工林で調査を行ってその量と質の構造を明らかにし、過去の間伐履歴が高齢級人工林の構造にどのように影響を与えているかを解明した。本課題は、これらの結果に基づいて列状間伐の長期的・短期的なメリットとデメリットを示すことを目的とする。

イ 研究方法

第一の調査は、茨城森林管理署269林班は小班で行った（写真1-1-1）。この小班14.75haのうち9.7haが35年生ヒノキ林であり、それを調査対象とした。このヒノキ林の植栽時本数は3500本/haで、26年生時に一度間伐が実行されている。2005年11月に、この小班内に4つのプロットを設定した。一つのプロットの面積は160～200m²である。各プロットにおいて直径と樹高の毎木調査を行い、位置図を作成するとともに品等区分を行った。2006年11月に再度測定を行った後、2007年2月に3プロットにおいて列状間伐（1残1伐～3残1伐）を行った。間伐後、一成長期を経過した2008年1月に、再度測定を行った。



写真1-1-1 プロットを設定した茨城森林管理署269林班は小班内の35ヒノキ人工林

第二の調査は、茨城森林管理署が経営・管理する茨城県内の国有林で、明治32年に始まる特別経営時代（1899年～1922年）に造成された、およそ100年生のヒノキ人工林6林分で行った（写真1-1-2）。2005年から2006年にかけて各調査対象林分内に50m×50mの調査区を設定し、直径と樹高の毎木調査をおこなうとともに品等区分を行った。過去の施業履歴を確認する目的で、調査区内に残された伐根から円板を採取し、伐採時の樹齢を特定した。

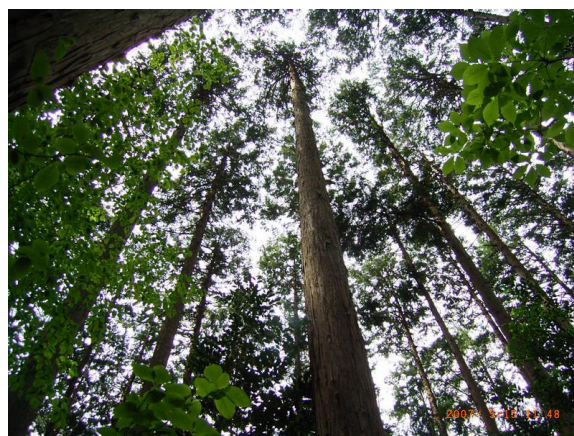


写真1-1-2 調査を行った95年生ヒノキ人工林（常陸大宮市）

上記の二調査における品等区分では、立木の樹幹や樹冠の形状、そして幹部のキズや腐れなどの形質から上（将来木）・中（調整木）・下（除去木）のいずれかの判定を行った。さらにその中で、上については“上（上）”と“上（下）”、中については、“中（上）”、“中（下）”と二段階に細分した。この品等区分は、基本的に寺崎（1928）の樹型級区分を参考とした。

ウ 結果

1) 35年生ヒノキ林の調査

調査林分（4プロット）の設定時の構造を表1-1-1～1-1-3に示す。本数密度は1300～1700本であり、そのうちの15～30%が将来木であった。調整木もあわせると全体の20～40%がそれに該当し、これらは従来の定性間伐では残すと判断される樹木である。平均直径は18～20cmであり、将来木の直径はこの平均値よりも大きい傾向を示した。平均樹高は16m前後であり、これについては将来木が顕著に高い値を示す傾向はみられなかった。

表1-1-1 調査区内の本数と密度

プロット名	面積 (ha)	全体		将来木		調整木	
		本数 (本)	密度 (本/ha)	本数 (本)	密度 (本/ha)	本数 (本)	密度 (本/ha)
Plot 1	0.20	340	1700	51	255	16	80
Plot 2	0.20	303	1515	48	240	15	75
Plot 3	0.16	202	1263	58	363	23	144
Plot 4	0.18	228	1267	35	194	8	44

表1-1-2 調査区内の立木の平均直径

プロット名	面積 (ha)	全体		将来木		調整木	
		平均 (cm)	sd (cm)	平均 (cm)	sd (cm)	平均 (cm)	sd (cm)
Plot 1	0.20	17.9	4.8	22.1	3.6	17.3	2.0
Plot 2	0.20	18.0	4.4	21.4	2.7	19.1	3.5
Plot 3	0.16	20.0	4.5	22.6	3.0	18.2	2.5
Plot 4	0.18	19.9	4.7	24.5	3.9	20.2	3.1

表1-1-3 調査区内の立木の平均樹高

プロット名	面積 (ha)	全体		将来木		調整木	
		平均 (cm)	sd (cm)	平均 (cm)	sd (cm)	平均 (cm)	sd (cm)
Plot 1	0.20	15.8	1.9	16.8	0.4	16.1	0.4
Plot 2	0.20	16.0	1.1	16.7	0.3	16.3	0.5
Plot 3	0.16	16.4	0.8	16.8	0.3	16.2	0.4
Plot 4	0.18	16.3	0.9	17.0	0.3	16.5	0.5

図1-1-1に、プロット1の立木位置図を示す。図中に黒いシンボルで示しているのが将来木である。その分布パターンをペア相関係数で解析した結果が図2である。この図が示すとおり将来木はランダム分布を示していた。このことから、もしも列状に規則正しく間伐をおこなえば、一定の確率で将来木が収穫されると予想される。

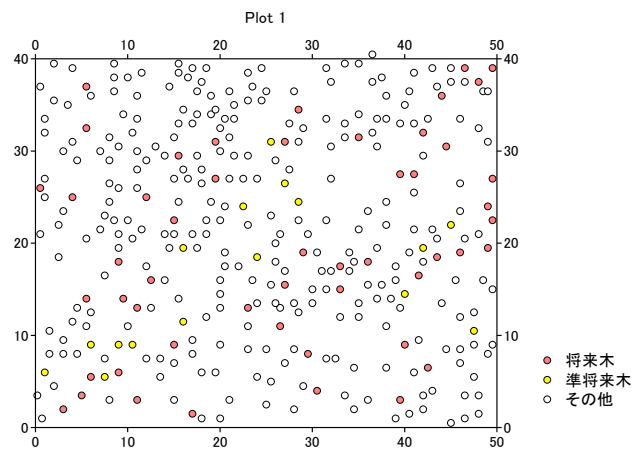


図1-1-1 プロット1の立木位置図

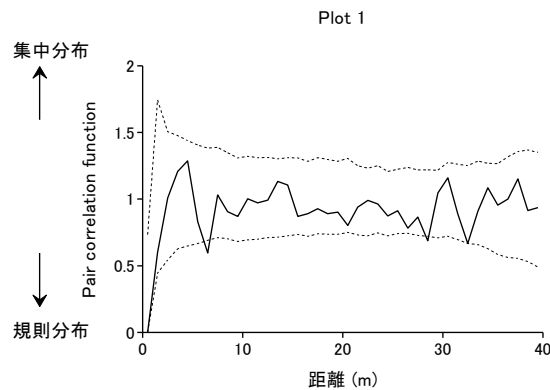
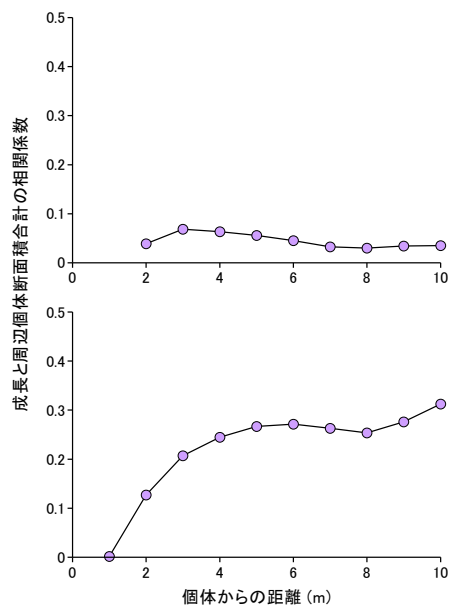


図1-1-2 プロット1における将来木の分布パターン

次に、2005～2006年の調査で得られた直径成長のデータ、および立木位置図から計算した個体間距離に基づいて、個体の成長や質が、それ自身のサイズや周辺の木との相互競争との関係からどのように影響を受けているか分析した。分析の方法は（Masaki et al.,2006）に準拠した。まず、対象木から同心円状にさまざまな大きさの円を想定し、その中に生育している他個体の胸高断面積合計（BA）を求めた。その際、対象木よりも大きい個体のみについて計算したものと、全個体について計算したものの2通りの計算を行った。そして成長と相関の高く、かつなるべく小さいサイズの円をもって、対象個体が周辺木と競合をおこなっている範囲と定めた。そして成長 $=f(\text{直径、競合個体BA})$ 、品等 $=f(\text{直径、成長、競合個体BA})$ という2つのモデルにより、目的とする解析を行った。

図1-1-3に、同心円の大きさ（個体からの距離＝円の半径）と直径成長との相関関係を示す。この図から、個体の成長は、その周辺の大小の全個体の胸高断面積合計と相関が高く、その範囲は半径ほぼ5mであることが読み取れる。そこで距離＝5mを個体間の競合範囲として、その範囲での断面積合計をモデルの変数として用いた。



各個体からの距離を1～10mまで変化させ、それを半径とする円内に生育する他個体の胸高断面積合計を計算し、個体の成長との相関係数を計算した。胸高断面積合計は対象個体よりも大きい個体について計算したもの（上）と全個体について計算したもの（下）の2種類を計算した。

図1-1-3 成長と周辺個体の胸高断面積合計との関係

表1-1-4に成長を目的変数としたモデル分析の結果を示す。この人工林では、個体の成長はそれ自身のサイズ（直径）で規定されておらず、むしろ競合個体の影響のほうが決定的であることが示された。推定パラメータは負であることから、周辺個体のBAが大きいほど成長が抑制されるといえる。ただし、サイズと競合個体BAの交互作用も有意（正）であった。すなわち、大きい個体では競合による負の効果が緩和されることを意味している。

表1-1-4 成長を左右する因子の分析結果

変数	パラメータ推定値	有意水準	
切片	0.3692	0.003	**
直径	0.0085	0.088	.
競合個体BA	-0.0107	0.000	***
直径×競合個体BA	0.0004	0.000	***

次に、品等を目的変数として解析をおこなった結果を示す（表1-1-5）。品等についても成長と同様の傾向を示しており、個体の品等を左右するものは、それ自身のサイズや成長ではなく、周辺個体との競合効果であった。すなわち、周辺個体との競合が大きいほど、品等は低下することが示された。そして成長の分析結果と同様に、サイズの大きい個体は競合による負の効果が低減されることも示された。

表1-1-5 品等を左右する因子の分析結果

変数	パラメータ推定値	有意水準	
切片	-2.1476	0.159	
直径	0.0793	0.187	
成長	-0.7479	0.122	
競合個体BA	-0.0755	0.013	*
直径×競合個体BA	0.0038	0.003	**

このモデルの結果を現実の林分構造にあてはめて、全個体のうち将来木はどのような状況下に多く出現するかを推定した。その結果を図1-1-4に示す。全個体（図1-1-4右）でみると、現実の林分では周辺木との競合がやや強く、かつ胸高直径が小さい個体が最も多く分布していることがわかる。一方、将来木は、平均よりも直径が大きい反面、多少は他個体との競合下にある状況でもっとも出現しやすいと予測された。

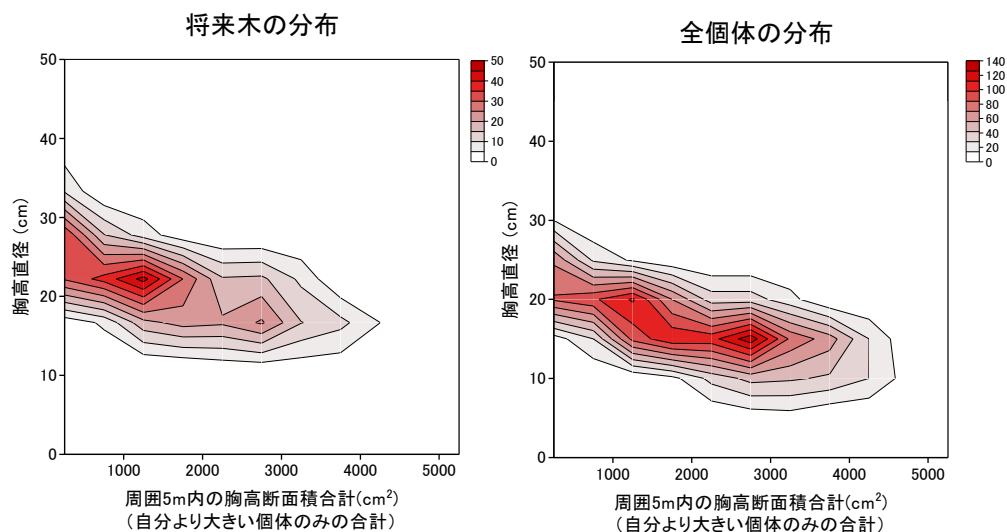


図1-1-4 表1-1-5の結果を現実の林分にあてはめて将来木の出現状況を予測した結果

そして、調査林分に2残1伐、3残1伐の列状間伐を行った場合、および同じ材積割合で定量的な下層間伐を行った場合、という4種類の間伐を行ったと仮定して、将来木の出現状況を確認した（図1-1-5）。その結果、2残1伐を行うと、将来木の多くは競合のない状況下におかれることが示された。一方、下層間伐では出現状況の顕著な差は生じなかった。3残1伐の場合は、これらの2残1伐と定性下層間伐との中間的なパターンを示した。

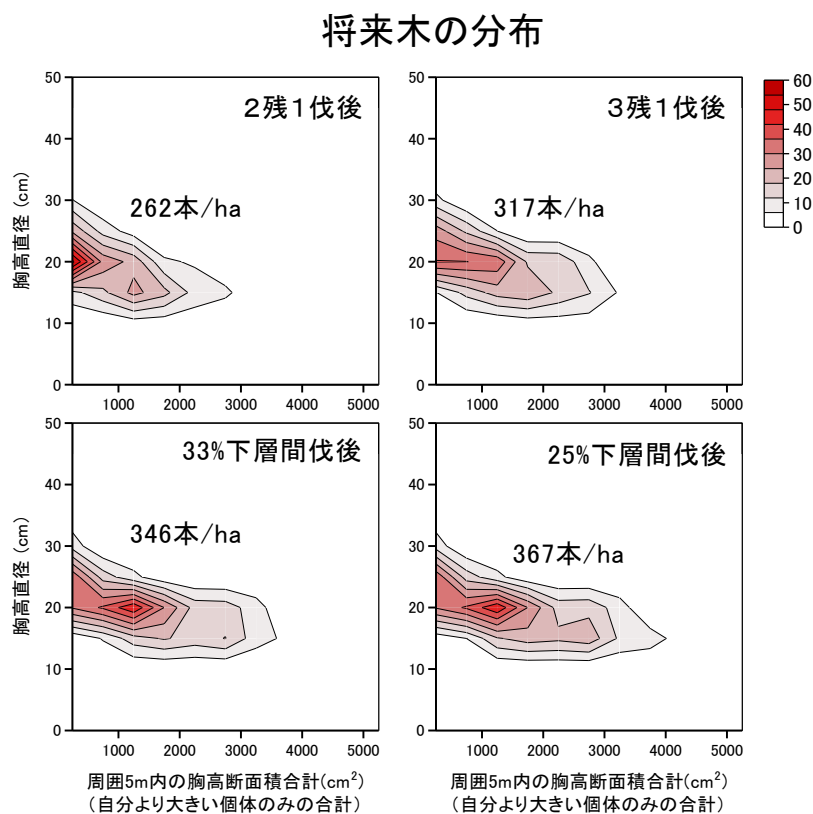


図1-1-5 列状間伐および下層間伐後の将来木の出現状況の予測

上記の解析と同様に、成長に関する分析を、間伐後の1年間の成長について行った。その結果では、競合個体の効果が検出されず、逆に、各個体のサイズの影響が有意な因子として示された。その効果は3残1伐→2残1伐→1残1伐、と間伐率が高くなるとともに大きくなった。このことは、強い列状間伐をほどこすほど、周辺個体との競合よりも、自身のサイズが成長を規定するようになることを示している。

2) 100年生前後のヒノキ林の調査

次に、高齢ヒノキ人工林で行った調査結果について述べる。表1-1-6に調査を行った林分の情報をまとめて示す。この表が示すとおり、最近の間伐記録のない林分から、間伐が1970以降にもおこなわれた林分まで、幅広い間伐履歴の林分を調査対象とした。林分構造でみると、本数密度は240～840本/haの範囲にあり、幹材積はおおよそ300～1300m³/haであった。これは、間伐の加え方によっては、ヒノキ林で高蓄積の林分へと誘導できることを示す事例である。

表1-1-6 調査林分の履歴

調査区名	所在地	標高 (m)	方位	傾斜 (度)	植栽年	調査時 林齢	造林帳簿, 林班沿革簿上の 間伐履歴	備考
七内	常陸大宮市 (旧美和村)	320	S41°W	30	1911	95	1942年に保育間伐	旧精英樹母樹林
横道 1	石岡市 (旧八郷村)	500	N54°E	21	1901	105	間伐記録は残っていない	
岩谷	城里町 (旧七会村)	160	N65°E	38	1901	105	間伐記録は残っていない	
内山	城里町 (旧桂村)	150	S80°W	35	1906	100	1977年, 1982年に間伐	旧採種林
横道 2	石岡市 (旧八郷村)	450	N41°E	17	1911	95	1986年, 1997年に間伐	
横道 3	石岡市 (旧八郷村)	430	S80°E	10	1911	95	1979年, 1997年に間伐	

表1-1-7 調査林分の林分構造

調査区名	本数密度** (本/ha)	平均胸高直径* (cm)	平均樹高* (m)	胸高断面積合計** (m ² /ha)	幹材積** (m ³ /ha)
七内	843 (2150)	37.5	28.3	96.9 (102.5)	1298.9 (1321.4)
横道 1	465 (531)	39.7	22.7	59.3 (59.5)	602.5 (603.0)
岩谷	379 (479)	44.3	29.3	59.6 (60.7)	793.8 (802.8)
内山	318 (773)	40.1	22.5	43.1 (45.0)	452.3 (460.8)
横道 2	329 (450)	34.5	18.7	31.5 (31.9)	267.7 (268.7)
横道 3	240 (512)	40.3	21.6	31.1 (32.6)	297.4 (303.2)

*植栽木のみを対象

**括弧内は広葉樹および植栽木以外の針葉樹も含めた値

図1-1-6に各調査区の品等構成を示す。どの区も将来木は100本/ha前後と一定していた。このことは、各調査区は本数的な間伐履歴は異なるものの、調整木や除去木を完全には除去してこなかった、という点においては同等であるといえる。

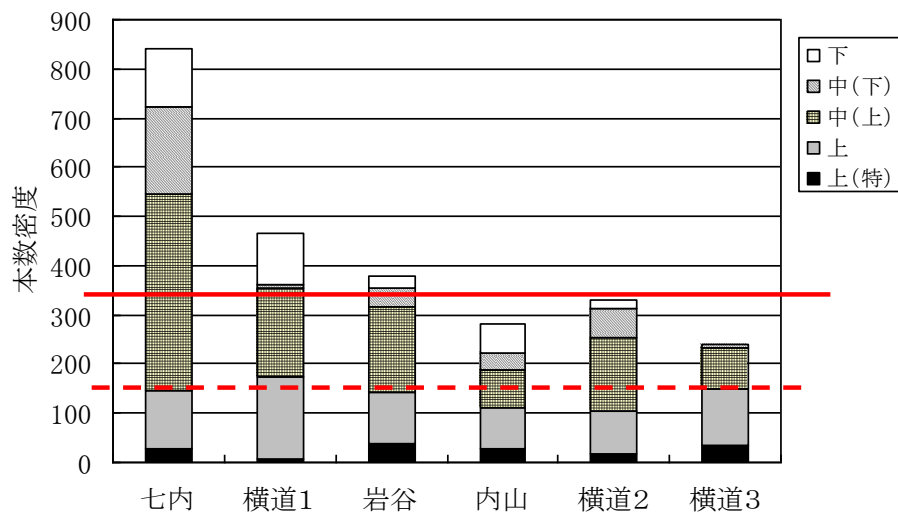


図1-1-6 各調査区の品等構成

伐根から推定した各調査区の間伐履歴を図1-1-7に示す。この推定から、どの調査区も林齢40年強までの期間に、本数密度を初期の3000本/haから1000本/ha以下にまで落としていていることがうかがえる。そしてほとんどの林分では、70年生までの間に間伐により本数密度を500本/haまで落としていたことも明らかになった。このように、高齢ヒノキ人工林に共通する特徴として、早い時期に強めの間伐を経験してきたことがあげられる。

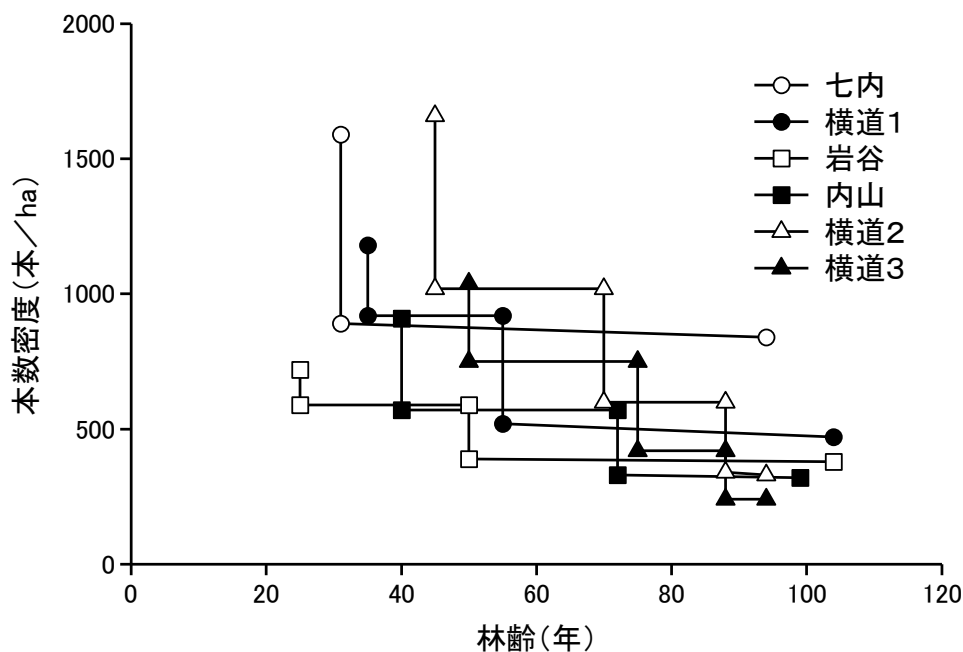


図1-1-7 各調査区における本数密度の推移の推定

エ 考察

35年生ヒノキ人工林での調査の結果、個体の成長は周辺約5m以内の個体との競合の影響を受けており、競争環境はかなり局所的であることが示された。個体間距離5mは、立木密度であらわすと、400～620本/haに相当する。今回調査したヒノキ高齢林は、七内調査区をのぞき、すべてこの立木密度の範囲におさまっていた。このことから、この立木密度がヒノキ人工林で長伐期施業をおこなう際の最終的に残す本数の目安であると考えられる。

ちなみに、秋田のスギ人工林で調査された結果では、個体同士が競合する距離は約8mであり、これは150～240本/haの立木密度に相当する。実際、秋田の高齢スギ人工林はこのくらいの立木密度を示すことが多い。今後、地域ごと、樹種ごとに、個体間の競合距離を明らかにすれば、長伐期施業をおこなう時に最終林型を想定する目安となるであろう。

35年生ヒノキ人工林での成長分析の結果、間伐率の高い列状間伐（1残1伐～2残1伐程度）はどちらかというと途中の間伐収穫をともなった短伐期向きの施業であり、間伐率の低い列状間伐（3残1伐など）は将来の施業方針に選択の余地を残す、長伐期向きの施業であることが示された。また、強い列状間伐ほど、周囲との競争よりも、自身のサイズ（＝着葉量）が成長を規定するようになることも、本課題の結果で示された。これはすなわち、列状間伐によって大きい木はより大きく、小さい木は低成長のままで、個体間の成長差が広がる効果が生じ、「複相」の択伐林型へと誘導できる可能性があるといえる。

以下、本課題の結果に基づいて列状間伐のメリットとデメリットを考察する。第一に、将来木はランダム分布をしていることから、列状間伐を行うことで、間伐時に形質のよい個体が含まれることになる。これは短期的なメリットであろう。しかし第二に、将来木はあくまで「将来」木であり、35年生の段階で極端に大きな付加価値がつくわけではない。したがって単純に列状間伐をおこなえばよいというわけではなく、ロットをまとめて収益を大きくする経営上の工夫はとらなければならない。しかし、往々にしてこれが考慮されずに列状間伐が行われている気配がある。これは、列状間伐が一見簡単そうに見えることがもたらすデメリットであると考ええる。第三に、強度の列状間伐は、残された将来木を周辺個体との適度な競合下から、無競合の状態に開放してしまうことも示された。これは価値の長期的な維持にはつながらない可能性があり、その意味でデメリットであるといえる。しかし、これは短期間の調査から断定するのは難しく、今後の追跡調査が必要である。第四に、強度の列状間伐は、将来木の残存本数を一気に高齢時の期待本数にまで落としてしまうが、残存木の成長のサイズ依存性は高まり、複相、すなわち択伐林型に誘導できることが示唆された。これは長期的には弾力的な経営を可能にするメリットであろう。

しかし、枝が枯れ上がって樹冠長率が低下している「間伐手遅れ林」では、どのような間伐をおこなうにせよ、間伐後の着葉量増加が見込めない可能性もある。したがって、30年生くらいまでの初期保育が十分でない林分では、少なくとも現在の知見に基づく限りにおいて、「列状間伐→長伐期施業」というオプションは避けることが望ましい。

オ 今後の問題点

成長や品等を左右する因子の解析結果は、短期間の成長計測のデータに基づくものである。残念ながら、長期間にわたって継続観測された類似のデータはみあたらない。高齢級の林分でも位置情報を含めた計測を行うなど、本課題の結果の長期間な観点からの信頼性を高める必要がある。

また、本課題の結果の中では、強度な列状間伐区で着葉量が順調に増えると想定したが、いわゆる間伐手遅れ林ではどうなるかわからない。さまざまな状況下の人工林での研究事例を増やし、結果の信頼性を高めることが必要である。

カ 要約

35年生のヒノキ人工林と100年生ヒノキ人工林に調査プロットを設定し、直径と樹高を計測すると同時に、品等区分を行った。35年生林では、現状での成長を1年間計測し、その後、実際に列状間伐を行って成長の反応を解析した。100年生林では、林内に残る伐根を数え、かつ樹齢を同定して間伐履歴を推定した。

35年生ヒノキ人工林での調査の結果、個体の成長は周辺約5m以内の個体との競合の影響を受けていた。残存するヒノキ高齢林の立木密度はこの個体間距離に相当していた。間伐前後の成長解析により、間伐率の高い強度の列状間伐（1残1伐～2残1伐など）は途中の間伐収穫をともなった短伐期向きの施業であり、間伐率の低い列状間伐（3残1伐など）は将来の施業方針に選択の余地を残す、長伐期向きの施業であることが示された。列状間伐によって個体間の成長差が広がる効果が生じ、「複相」の択伐林型へと誘導できる可能性が示唆された。

キ 引用文献

Masaki, T., Mori, S., Kajimoto, T., Hitsuma, G., Sawata, S., Mori, M., Osumi, K., Sakurai, S. and Seki, T. (2006) Long-term growth analyses of Japanese cedar trees in a plantation: neighborhood competition and persistence of initial growth deviations, *J. For. Res.* **11**, 217-225.

渡邊定元（2005）新しい間伐法の紹介：列状間伐と中層間伐，*森林科学*，**44**，18-25.

（正木隆）

2. 間伐が生物多様性に及ぼす影響の解明

ア 研究目的

1992年の生物多様性条約の締結、1995年のモントリオールプロセスの合意などの流れの中で、もはや持続可能な森林経営は生物多様性の保全なしには語れない。森林認証制度の中でも生物多様性に配慮した施業が求められているものの、施業方法と生物多様性の維持や増加との関連は必ずしも科学的に解明されていない。

昆虫は地球上で最も種数や個体数が豊富で多様な生物群であり、様々な機能面で森林の持続性を支えている (Brown, 1997; Maleque et al., 2006)。たとえば、1) 鳥や小型哺乳類の餌となりこれらの生物多様性維持に貢献する、2) 花粉媒介等によって森林植生の持続性を保証する、3) 植物や動物遺体の分解機能によって森林の基盤となる土や養分を供給するなどである。また同時に昆虫の多様性は種及び個体数の多くをしめる食植性昆虫の多様性に依存することから、植物の多様性は昆虫の多様性に大きく影響する (Siemann et al., 1998)。さらに捕食寄生性の昆虫はこれらの昆虫の多様性によって、種数や個体数が変化すると予想される。また分解者の多様性は森林生息性の生物の多様性のみならず、枯死木等のバイオマスや分布等を含む森林構造の多様性にも大きく影響を受ける。森林ではこのような植物を基盤とした生態系ネットワークの解明が、生物学的にも、持続可能な森林利用のための生態系管理手法の開発のためにも重要である (Schulze & Mooney 1994; Hunter., 1999)。

人工林は生産林として木材生産の効率を上げることが重要であるが、収穫の視点だけではなく持続可能な森林利用についても考慮することが必要である。そして生態系機能を持続的に維持するためには、実際の施業が生物多様性に与える正・負の影響を解明し評価しなければならない。これらのことから本研究では1) スギ人工林を間伐することによって無間伐林よりも生物多様性が高まるか、2) 高まるとすれば急激な上昇をするのか、それとも植物種 (食物資源) の増加に伴い徐々に高まるのかを明らかにすることを目的とした。森林の生物多様性の変化は短期的な変化と長期的な変化がある。本研究では研究期間の制約から、短期的な変化についてのみ解明することとした。

イ 研究方法

茨城県常陸太田市の国有林 (スギ人工林) から林齢30年前後の間伐 (伐り捨て間伐、材積間伐率約30%、定性間伐) 林直後の林分5林分と無間伐林 (過去5年以内に間伐履歴が無く林内の状況から更に数年以前にわたっても間伐が行われていないと推測される林分と定義した) 5林分を抽出した (図1-2-1)。2005年と2007年に各林分内の中央に近い部分に飛翔昆虫を捕獲するのに適するマレーズトラップを2基ずつ、10m程度の間隔を置いて設置した。昆虫サンプルの採集は6～8月の3ヶ月間行った。2007年には無間伐林1林分で間伐が行われたため、同地域内の無間伐林1林分に変更した。マレーズトラップ2基で採集された昆虫のうち、1基についてカミキリとチョウの種を同定し、個体数を記録した。また間伐1年後の大型ハエ類を科レベルで同定した。ハナアブは種レベルの同定を行った。ハナバチについては間伐1年後のサンプルについて種レベルの同定を行った。2005年、2007年ともMann-whitneyのU-testにより種数を検定した。

2006年4月～10月にかけて、同林分内の地表面 (リター上) に羽化トラップ (図1-2-2) をそ

れぞれ1基ずつ設置した。羽化トラップにより採集された節足動物は目・亜目レベルで同定を行い、Mann-whitneyのU-testにより個体数を検定した。2007年5月には、各林分に50 x 50cmの方型枠を1個設置し、枯枝を除去した後に、粗大リターの湿重を測定するとともに、1か所に内径7.5cm、高さ7.5cmの円筒を打ち込み土壌を採取した。土壌は3mmメッシュのふるいにかけて大型有機物を取り除いた後、さらに、0.8mmメッシュのふるいにかけて、残渣の中から肉眼で識別できる葉身を手作業で取り出し風乾後秤量した。

2005年9月の曇天日に各林分で全天写真を撮影し、開空度を調べた。またこれらの林分で林床植生の組成及び植被率を調査した。それぞれの林分で10mx100mのベルト内に規則的に配置した40個の1mx1mのコドラート内の林床植生をブラウンプランケ法に準じた方法で調査し、組成及び植被率を評価した。2005年、2007年ともMann-whitneyのU-testにより、林床植物の種数を検定した。



図1-2-1 試験地の設定箇所



図1-2-2 羽化トラップ

ウ 結果

調査を行った間伐・無間伐林分間で収量比数を比較すると、ばらつきが大きく、間伐林分の方が低いという有意な差は見いだせなかった。また間伐林分で開空度が顕著に大きいということもなかった（表1-2-1）。下層間伐であり、間伐強度が低くおさえられたことが影響したと考えられる。ただし、林分特性としては、間伐林分に対して無間伐林分で平均胸高直径が低く、本数密度は高かった。間伐翌年は植被率の高い間伐林分が見受けられたものの、ばらつきが大きかった。林床植物の種数には、間伐翌年、3年後とも間伐林分・無間伐林分間で有意な差は認められなかった。

表 1-2-1 間伐・無間伐林の林分特性（2005 年）

林分		開空度(%)	胸高断面面積 (m ² ha-1)	枝数 (ha-1)	植被率	平均胸高直径(cm)	収量比数
無間伐	1	10.89	54.06	2470	13%	16.14939408	0.98
無間伐	2	10.24	49.00	2590	39%	14.47551027	0.86
無間伐	3	7.51	79.94	2810	3%	18.07253772	1
無間伐	4	10.63	46.09	3250	5%	12.87548798	0.92
無間伐	5	7.57	52.30	2490	18%	15.15973204	0.94
間伐	か	8.28	54.69	1660	30%	20.02702877	0.89
間伐	つ1	9.89	44.29	1550	62%	18.54904655	0.78
間伐	む	7.56	68.41	2557	6%	18.13477217	1
間伐	ね1	8.25	54.41	1660	62%	20.04470219	0.89
間伐	よ	8.46	57.42	1260	4%	23.60065705	0.86

マレーズトラップによって主に飛翔昆虫を捕獲したところ、間伐翌年にはチョウ、ハナバチ、ハナアブの種数は間伐林で無間伐林よりも有意に高かった。カミキリの種数は統計的な有意差は検出されなかったが、やはり間伐林の方が高い傾向が認められた。またハエ類を科レベルで調査したところ、間伐林の方が個体数の多い科が複数見られた。チョウとカミキリで間伐、無間伐林のそれぞれの種構成を比較したところ、無間伐林で捕獲されたほとんどの種は間伐林と同じであることがわかった（図1-2-3）。一方、間伐林で採集された種の多くは無間伐林では全く捕獲されなかった。

羽化トラップでは、リター層を含む土壌中から羽化してくる昆虫の他、土壌に生息する無脊椎動物が多数捕獲された。無間伐林ではトラップの1つが消失したため4林分の結果を示した。間伐林分ではカ亜目昆虫の個体数が有意に減少していた（図1-2-4）。同様に、トビムシ目と有錐類も間伐林で減少傾向が見られた（図1-2-4）。間伐林では、顕著に個体数の増加した分類群は見られなかった。間伐林では、粗大リター量が増大する傾向がみられたが、その違いは大きくなかった。一方、葉身リター量は間伐林分で有意に減少していた。

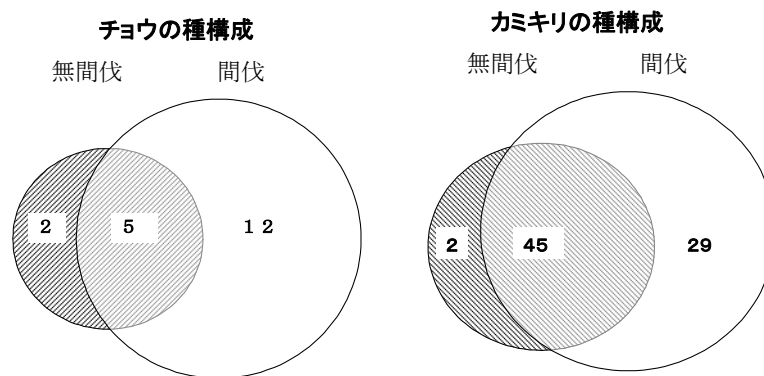


図 1-2-3 チョウ、カミキリの種構成

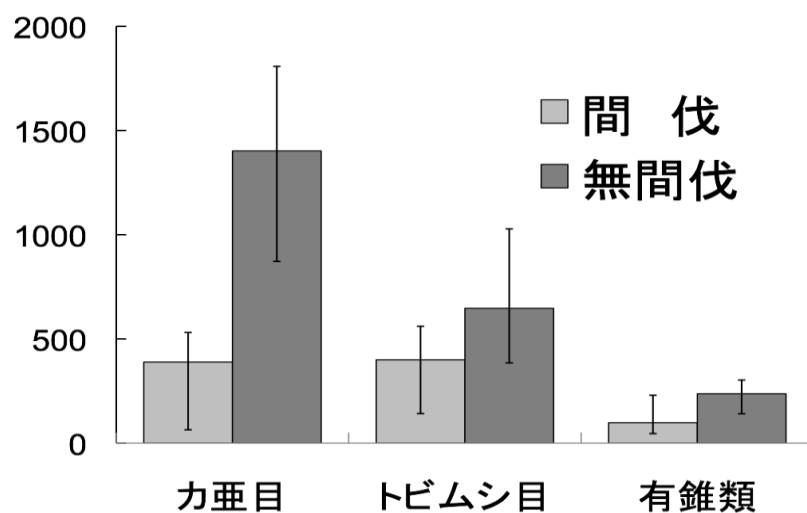


図1-2-4 林床の昆虫類の個体数（50x50cmあたりの中央値・最小ー最大、2006年）

エ 考察

本研究を行った間伐林分では開空度の増加による林内の光環境の改善の度合いは大きくなかった。結果的に、間伐林分と無間伐林分では、開空度及び収量比数には有意な差はなかった。実施された間伐が、下層間伐的であり、大きく上層の樹冠を疎開するものではなかったことが示唆される。しかし、本数密度は無間伐林に比べ大きく減少しており、間伐翌年には間伐林内により広い空間が形成されたと考えられた。飛翔性の昆虫にとっては、林内に入り込むための空間が提供されたと思われる。また林縁や林内に風が通りやすくなり、昆虫等が風に運ばれる機会も増えたものと推測された。一方で下層植生はほとんど増加していないことから、枝葉や蜜などの食物資源に誘引され林内に定着したとは考えにくい。また伐り捨て間伐のため、間伐翌年には新鮮な木

材の供給によって誘引される昆虫がいることも予測されたが、キバチは採集されず、またスギに選好性を示すカミキリも特に増加しなかった。間伐3年後にはマレーズで捕獲された昆虫の種数に差が無くなったことから、林内への定着数の増加はほとんどないものと考えられた。カラマツの間伐によって開空度が増しカミキリの種数が増加することが明らかになっている (Ohsawa, 2004) ことから、間伐強度を高くすることには更に種数を増やす効果があるかも知れない。

一方土壌生息性の節足動物に対して、間伐は、負の効果をもつことが示唆された。間伐林では腐植食性であると考えられているカ垂目やトビムシ目、さらには、これらに寄生すると考えられている有錐類で個体数の減少が見られた (図1-2-4)。これらの昆虫がどのような分解段階の腐植に依存しているかは明らかではないが、少なくとも、分解途上にある葉身リター量は間伐林分で減少していた。また、これらの土壌動物の多くは土壌水分の過多や欠乏に鋭敏に反応することが知られている (青木 1973)。これらのことから、間伐に伴うギャップの生成は、リター供給量の減少、あるいは、林内の水環境の変化をつうじて、土壌生息性の節足動物に大きな影響を与えたと推測される。

間伐は昆虫の多様性のみならず害虫の増減にも影響を与えると推測されている (佐藤, 2007)。特に伐り捨て間伐の場合は間伐木が誘引源になる可能性が指摘される (例ニホンキバチ; 佐藤 2007参照) が、本研究期間中にスギの害虫 (小林, 1986による) が特に増加することはなかった。調査地周辺では過去にこれらの害虫の被害報告がなかったことから、元々大きな個体群がなかったことによると推測される。間伐後の負の影響の大きさを予測するには、事前の害虫個体群の生息状況を考慮する必要があるだろう。

列状間伐はスギ人工林の生長を促進させ、下層植生の発達や昆虫の多様性を増加させる効果がある (Maleque et al., 2006; Ishii et al., 2007)。しかし列状間伐とそれ以外の間伐を比較した研究例はなく、またどのような間伐手法が生物多様性に最も大きな正の影響を与えるかは明らかになっていない。本研究では、比較的弱度の下層間伐が行われたと考えられ、林内の光環境および植生への短期的な影響は比較的少なく、また林分間のばらつきが大きかった。下層植生が林内照度に大きく左右されること (斉藤, 1989) から、間伐率の影響は大きいと予想される。高い間伐率により開空度を確保することは、飛翔性昆虫の生息空間を広げ多様性を高める他に、林床植生の多様性と量の増加にともなう他の生物多様性に対する間接的な効果も期待できる。他方、高い間伐率に伴うリター層の一時的な乾燥は、ここに生息する生物の多様性を減少させるだろう。

本研究結果からは間伐後3年目までの多様性変化しか明らかにすることができなかった。木材生産のための人工林の施業の、生物多様性や水、養分などに対する影響解明には長期的な観測と解析が必要であることがわかっている (Thomas et al., 1999)。間伐後の下層植生の発達は、生育空間の構造変化や植物量の増加を通じ、他の生物の多様性を高めることが期待される (図1-2-5)。持続可能な森林管理のためには、主に草本からなる短期的な下層植生の発達のみならず、低～高木相の発達に伴う生物の長期的な多様性変動を明らかにすることが必要である。

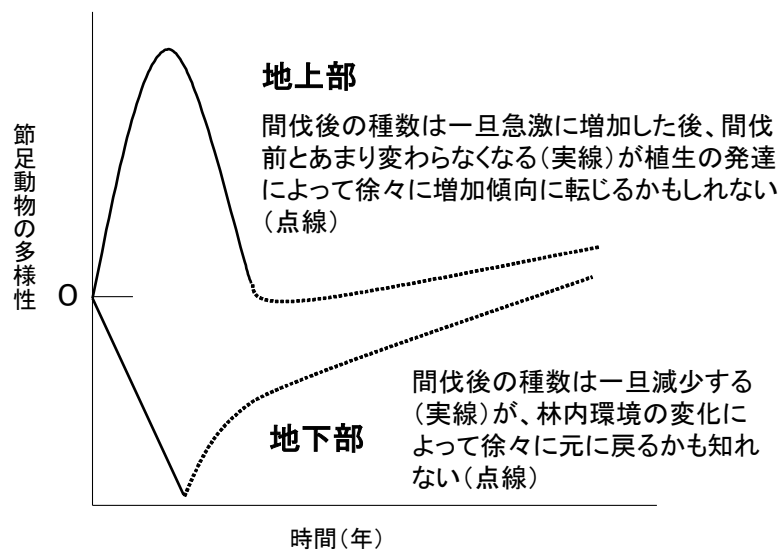


図1-2-5 生物の長期的な多様性変動の予測

オ 今後の課題

間伐が生物多様性に与える影響に関与する要因としては、間伐率、間伐手法（伐り捨て、搬出など）などが考えられるが、いずれも短期的、長期的な影響を考える必要がある。本研究により伐り捨て間伐の短期的（3年間）な影響を示すことができた。しかしながら森林の生物多様性は植生変化に伴う長期的な変化が示唆されていることから、過去の施業履歴を考慮に入れて間伐の有無が及ぼす長期的な影響を解明する必要があることがわかった。またこのような影響は周囲の広葉樹林や人工林からの影響を強く受けることが示唆されたことから、林分単位ではなくランドスケープレベルで正負の影響を抽出する必要がある。気候や立地等の影響もむしできないことから、複数のケーススタディを積み重ねて解明してゆく必要がある。さらには今後森林のバイオマスイネネルギー利用を視野に入れ、搬出による収奪が生物多様性に与える影響などもあわせて解明する必要がある。

カ 要約

間伐林分では間伐1年後には植被率は無間伐林と差がなかったが、飛翔昆虫サンプルではチョウ、ハナバチ、ハナアブでは顕著に、カミキリはやや差が認められた。間伐3年が経過した後、植被率には間伐林と無間伐林の間で差が認められなかった。昆虫も間伐林、無間伐林の間で種数に差が認められなかった。一方、羽化トラップによるサンプリングでは間伐林では無間伐林に比べて腐植食性昆虫の個体数の顕著な減少が見られた。

キ 引用文献

青木淳一（1973）土壌動物学，北隆館，814p.

Brown, K. S. Jr. (1997) Diversity, disturbance, and sustainable use of Neotropical forests: insects as indicators for conservation monitoring, *J. Ins. Conserv.*, **1**, 25-42.

Hunter, M. L. Jr. (ed.) (1999) Maintaining biodiversity in forest ecosystem, Cambridge Univ.

Press, 698p.

Ishii, H. T., Maleque, M. W. and Taniguchi, S. (2008) Line thinning promotes stand and understory diversity in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations. *J. For. Res.*

小林富士雄 (1986) スギ・ヒノキせん孔性害虫, 林業改良普及双書 92, (社) 全国林業改良普及協会, 185p.

Maleque, M. W., Ishii, H. T. and Maeto, K. (2006) The use of arthropods as indicators of ecosystem integrity in forest management, *J. For.*, **104**, 113-117.

Maleque, M. W., Ishii, H. T., Maeto, K. and Taniguchi, S. (2006) Management of insect biodiversity in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations, central Japan. *Eur. J. For. Res.*, **9**, 29-36.

斉藤昌宏 (1989) スギ人工林における林内日射量と林床植生量の関係. 日本林学会誌 71: 276-280. 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, 森林総研研報, **6**, 135-143.

Ohsawa, M. (2004) Species richness of Cerambycidae in larch plantations and natural broad-leaved forests of the central mountainous region of Japan, *For. Ecol. Manage.* **189**, 375-385.

Schulze, E. -D. and Mooney, H. A. (eds.) (1994) Biodiversity and ecosystem function, Springer, 525p.

Siemann, E., Tilman, D., Haarstad, J. (1998) Experimental tests of the dependence of arthropod diversity on plant diversity. *Amer. Nat.*, **152**, 738-750.

Thomas, S. C., Halpern, C. B., Falk, D. A., Ligouroi, D. A. and Austin, K. A. (1999) Plant diversity in managed forests: understory responses to thinning and fertilization, *Ecol. Appl.*, **9**, 864-879.

(岡部貴美子)

第2章 目的とトータルコストを考慮した間伐システムの選択方法の提示

1. 立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発

ア 研究目的

間伐が十分に行なわれていない状況を打開するための一手段として、高性能林業機械の導入による生産性の向上があげられる。しかしながら、立地条件を考慮した適正な作業方法やシステムの選択手法が確立されていないこと等により、効果は十分に発揮されていない。また、事業体が間伐の実施可否を判定する基準のひとつにコストの評価があげられるが、収益性を簡易に判定する支援システムは無く、結果として間伐遅れ林分の増大を誘引している。

本課題では、①立地条件に応じた間伐材搬出の実態解明と間伐材生産の生産性・コストモデル開発、②列状間伐を対象にした安全な伐倒技術に関する実験的解明、③間伐材搬出に伴う残存木損傷の軽減策の解明の3つの観点から立地条件に応じた適正な間伐作業法の分析・検討を行い、その結果を通じて適正な作業法を長所、短所共に提示し選択の指針を示すことを目的とした。

イ 研究方法

①立地条件に応じた間伐材搬出の実態解明と間伐材生産の生産性・コストモデル開発

間伐事例（択伐事例も含む）を対象に、伐区を単位とした集材機械の適応性を調査した。代表的な要因として地形傾斜、集材距離、伐区面積、積載量を取り上げ集材機械の適応範囲を分析した。1993～2004年度の作業事例を対象に行った間伐作業（一部1981～1984年度の資料を含む）を事例として用いた。事例総数は337例であり、高性能林業機械システムが148事例、従来型林業機械システムが189事例であった。集材機械は、スキッダ、フォワーダ、タワーヤーダ、スイングヤーダ、トラクタ、林内作業車、集材機、自走式搬器、ウインチ付きグラブの9機械（16機種）を分析した。また、わが国で代表的な13の伐出システムを対象に、伐出機械の生産を理論的に求め実績コストによる補正を行い、システムごとの費用関数について集材距離を変数に1次式で近似した。

②列状間伐を対象にした安全な伐倒技術に関する実験的解明

急傾斜地の列状間伐を対象に、受口角、追口角、受口深さ、追口高さ、ツル幅を様々に組み合わせた伐倒試験を行い、立木の倒れ方、切口状態、裂け上がり等についてVTRをもとに分析した。また、これまで未解決であった受口・追口の切り方に伴う立木の内部応力変化について、追口高さの違いによる受口周辺の応力発生状況、立木芯部剛性の違いが立木の変形挙動に与える影響、切口周辺の応力分布、楔打ち込みの影響を明らかにするため、弾性有限要素解析法により理論解析した。有限要素解析では、下端面の全節点の水平・鉛直変位を固定し、上端面の全節点を立木上部の自重の影響を考慮して鉛直下向きの荷重を与えるとともに、3次元解析による応力変化の視覚化を試みた。

③間伐材搬出に伴う残存木損傷の軽減策の解明

間伐では機械やワイヤーロープ、搬出木等による残存木損傷の発生することから、損傷を軽減する作業技術の構築が急務とされる。これまでの調査から、架線系集材（タワーヤーダ）の場合、主索から水平5m、地表から2mまでの高さが損傷する危険性の高いことが明らかにされている。

(岡ら, 2005)。また、佐々木ら(2006)は簡易な素材としてポリ排水管を防護具として用いた場合の有用性を試験的に示した。そこで、残存木の損傷を効果的に防護する方法として、列状伐採と点状伐採の2タイプの全木集材作業を対象に、利根沼田森林管理署管内国有林地内の人工林カラマツ(24年生)において、実験的な調査を行い、残存木被害の分布特性や簡易な素材として使用したコルゲート型のポリ排水管(半円形に加工)、あて木およびそれらの組み合わせによる防護効果を分析した。

ウ 結果

①立地条件に応じた間伐材搬出の実態解明と間伐材生産の生産性・コストモデル開発

集材機械の適応範囲として代表的な4要因を取り上げた。その結果、地形傾斜に対する適応性は15～20度を境に車両系機械と架線系機械が区分された。ただし、林内作業車等については、ウインチ付きグラブとの組み合わせによる急傾斜地での適応例であり、急傾斜地においては集材路網を整備することにより機械の適用性を高めているとも言えよう。ただし、集材作業は集材路上において実施される。集材距離、伐区面積、積載量については、機械サイズ(機械出力)の違いを反映した結果が得られた。大まかにみると、タワーヤード等の軽架線システムは短距離、小面積、少積載量での適応であったのに対し、集材機など主索式の型のシステムでは中～長距離集材、小～中面積、少積載量、スキッド・トラクタなどの車両系システムでは中～長距離、中～大面積、大積載量で適応されていることが判明した(図2-1-1、2-1-3)。これらの適応分布から、現場の作業条件に応じた集材機械の選択がなされていることが推察される。

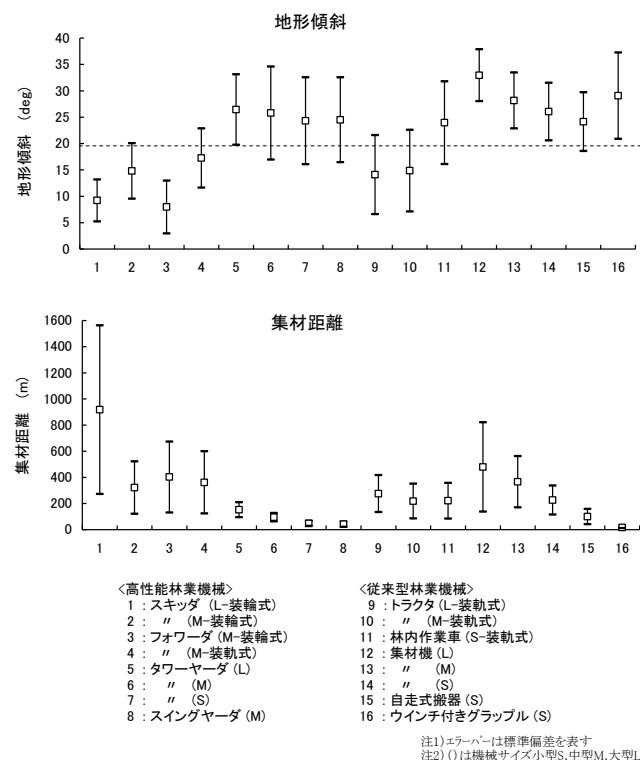


図 2-1-1 集材機械の作業適応範囲 (地形傾斜、集材距離)

伐採方法の違いとして皆伐、列状伐採、点状伐採の3タイプを取り上げた。タワーヤードシステムにおける事例の平均生産性は、皆伐 $4.1\text{m}^3/\text{人日}$ 、列状間伐 $3.2\text{m}^3/\text{人日}$ 、点状間伐 $2.0\text{m}^3/\text{人日}$ であり、間伐を比較した場合、列状間伐は点状間伐の約 1.6 倍であった。生産性と伐出コストの関係は、累乗的な関数で近似された。生産性が $2.0\text{m}^3/\text{人日}$ までは、生産性の増加に伴い急激にコストが減少する傾向が示され、生産性が低い場合は生産性向上によるコスト縮減効果が大きいことが判明した。システムごとの伐出コストを現場の標準的な条件下で算定した結果、集材距離の増加に伴い伐出コストは直線的な増加傾向を示し、コストの増加傾向（切片、傾き）はシステムにより違いがみられた。スイングヤードやタワーヤードシステムでは傾きが大きく、トラクタや集材機システムでは傾きが小さい傾向が示された。傾きは変動費、切片は固定費を表し、スキッドシステムなど集材能力の高い車両系システム、集材機システムなど到達性が高いシステムでは固定費が高くなる傾向が判明した。切片と傾きは作業条件により変動するが、その違いからシステムの交点が求められ、最小コストとなるシステムを最適システムとして選択することが可能となった。図 2-1-2 は、結果の一部を示したものである。

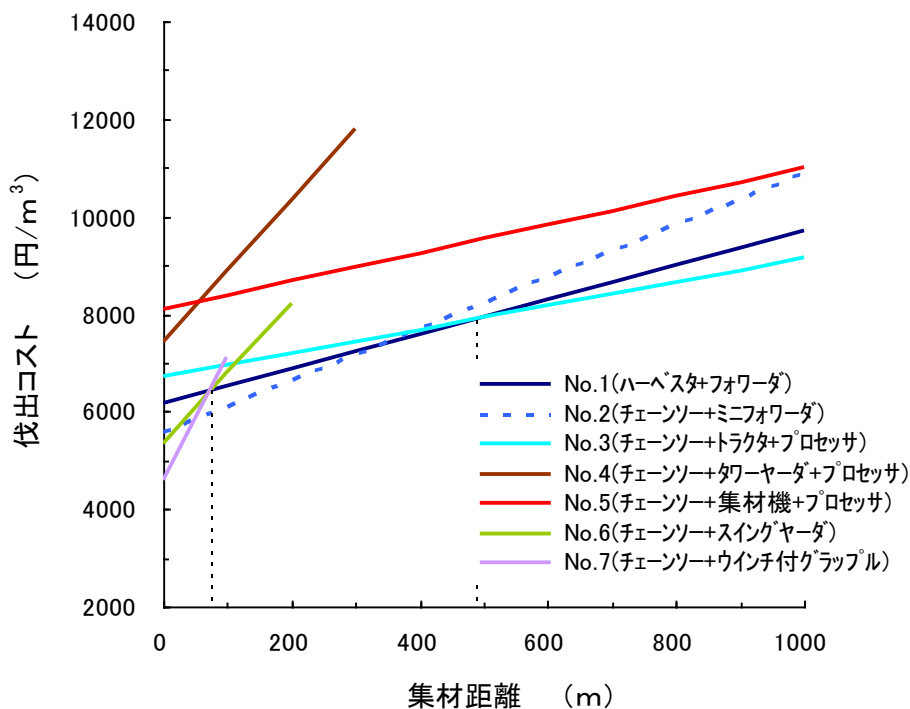


図 2-1-2 集材距離と伐出コストの関係

次に、わが国で普及している作業システムについて、実態調査や文献をもとに典型的な 34 システムをモデル的に設定した（表 2-1-1）。地形傾斜、集材距離、伐区面積など集材機械の適用に関する 4 要因と集材木の形態、機械配置、システムの工程数、機械台数など作業システムに関する特性を示す合計 9 要因を用いて、数量化Ⅲ類により分析を行った。カテゴリースコアから推計されたサンプルスコアのプロットの分布は一樣ではなく、ある程度集中して分布する結果が得られた。主観的な判断であるが、プロットの近接状況からシステムは 5 つのグループに分類された（図 2-1-3）。各グループに属するシステムをみると、グループ 1～3 は架線系システム、グルー

プ4～5は車両系システムであった。グループ1では中～大型集材機を用いた全木・全幹集材システム、グループ2ではタワーヤード、スイングヤード、自走式搬器、ウインチ付きグラブ等を用いた短幹集材システムであった。グループ4ではスキッド、トラクタを用いた全木・全幹集材システムであり、グループ5ではフォワーダ、林内作業車を用いた短幹集材システムであった。ここで、原点を-2.5、-2.5とし、原点から45度の補助線と等値線を与えた場合、補助線を境に架線系システムと車両系システムが対称的に分布することが判明した。補助線の上部は架線系システム、下部は車両系システムのグループである。第1軸、第2軸とも原点に近いグループは短幹集材システムであり、遠いグループは全木・全幹集材システムであり、等値線をみた場合、原点に近いグループは工程数が少ない短幹システム、最も遠いグループは主索式による全木・全幹材システムとなる結果となった。これらの結果から、第1軸は車両系システムの特徴である輸送力、第2軸は到達性、補助線は機動性を表すことが示唆される。

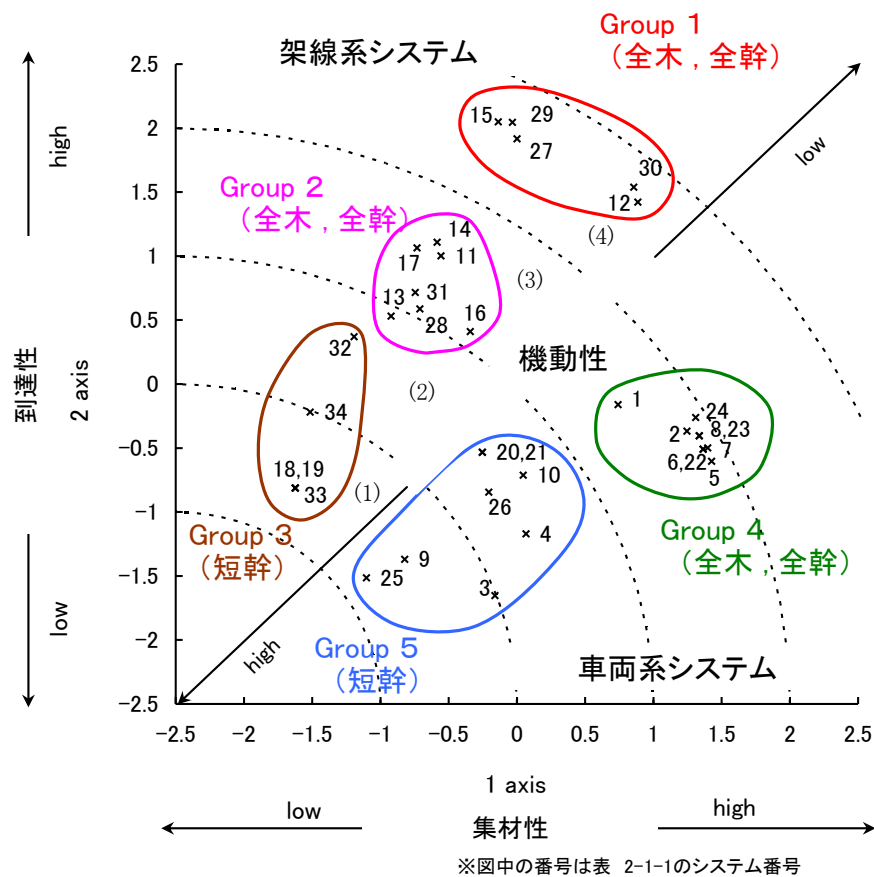


図 2-1-3 サンプルスコアの分布によるシステムのグループ化と位置

表 2-1-1 解析に用いた伐出モデルシステム

システム No. ¹⁾	集材木 の形態	作業工程 ²⁾					工程数	機械 台数
		伐木	木寄せ	集材 (1段)	集材 (2段)	造材		
1	全木	Fe (L)		Sk (L)		Pr (L)	4	4
2	"	Fe (L)		Sk (L) ⁴⁾	Tr (L) ⁴⁾	Pr (L)	4	7
3	短幹	Ha (M)		Fow (M)		(Fo (M))	2	2
4	"	Ha (M)		Fow (M)		Gl (M)	3	3
5	全木	C	Gl (M)	Sk (M-L)		Pr (M)	5	6
6	"	C	Gl (M)	Tr (M-L)		Pr (M)	5	6
7	全幹	C	Gl (M)	Sk (M-L)		Gs (M)	5	6
8	"	C	Gl (M)	Tr (M-L)		Gs (M)	5	6
9	短幹	C		Foc (M)		(Fo (M))	2	3
10	"	C	Glw (S)	Foc (M)		(Fo (M))	3	4
11	全木	C		Ty (M-L)		Pr (M)	4	5
12	"	C		Cy (M-L)	Cy (L)	Pr (M)	5	6
13	"	C		Swy (M)		Pr (M)	3	4
14	全幹	C		Ty (M-L)		Gs (M)	3	4
15	"	C		Cy (M-L)		Gs (M)	3	4
16	"	C		Mca (S)	Ty (S-M)	Pr (M)	4	5
17	"	C		Ty (S-M)		C	4	6
18	短幹	C		Ty (S)		(Men)	2	3
19	"	C		Swy (M)		(Swy (M))	2	3
20	"	C		Ty (S)	Foc (M)	(Fo (M))	3	4
21	"	C		Ty (S)	Foc (M)	Pr (M) ⁵⁾	4	5
22	全木	C	Gl (M)	Tr (M-L)		C	5	7
23	全幹	C	Gl (M)	Tr (M-L)		C	5	7
24	"	C	Gl (M)	Tr (M) ⁴⁾		C	5	8
25	短幹	C		Mfo (S)		(Men)	2	3
26	"	C	Glw (S)	Mfo (S)		(Men)	3	4
27	全木	C		Cy (M-L)		C	4	6
28	"	C		Mca (S)		C	4	6
29	全幹	C		Cy (M-L)		C	4	6
30	"	C		Cy (S)	Cy (L)	C	5	7
31	"	C		Mca (S)		C	4	6
32	短幹	C		Cy (S)		(Men)	2	3
33	"	C		Mca (S)		(Men)	2	3
34	"	C		Glw (S)		(Glw)	2	3

1) No.1-4: 高性能林業機械システム, No.5-21: 従来型機械と高性能林業機械の併用システム, No.22-34: 従来型機械システム

2) 機械の符号とサイズ。機械サイズは小型S、中型M、大型Lとした。

Fe: フェラーバンチャ Fow: フォワーダ (装軌式) Tr: トラクタ Rr: プロセッサ
Ha: ハーベスタ Foc: フォワーダ (装軌式) Mfo: 林内作業車 Gs: グラップルソー
C: チェーンソー Ty: タワーヤーダ Cy: 集材機 Glw: ウインチ付きグラップル
Sk: スキッド Swy: スイングヤーダ Mca: 自走式搬器 Gl: グラブルローダ

3) 極積工程の点線枠の()は伐木機械等のオペレータが兼務。工程数、機械台数には含

4) スキッド2台、トラクタ2台の並列配置(No.2)、トラクタ2台の並列配置(No.24)

5) プロセッサは林内で使用。機械配置はタワーヤーダ→プロセッサ→フォワーダの順序である

②列状間伐を対象にした安全な伐倒技術に関する実験的解明

上方伐倒における伐倒時の裂け上がり (図 2-1-4) は、斜面傾斜角: a° 、受け口角: b° としたとき、 $b > 90 - a$ とすることで裂け上りを防ぎやすくできることが明らかになり、斜面や伐倒木の長さなどの状況により、受け口角 b をより大きくする必要が判明した (図 2-1-5)。また、伐倒木の斜面滑落防止は、追い口を高く切ることによって伐倒後に木を株の上に乗せ易くなり、斜面滑落を防止しやすくなることが判った。応力の理論解析では、伐倒時における受口、追口、つる周辺部の2次元解析の結果、つる周辺部の水平せん断応力は追口の高さが大きくなると受け口周辺への応力が増大し、その分布範囲も拡大すること、鉛直方向のせん断応力も水平方向のせん断応力と同様に、追い口高さの増大により受け口周辺で増大することが判明した。

これらは、いずれも追い口高さの増大に伴う変位入力点から受け口支点までの距離の増大により、支点に作用する応力が増加したものであると考えることができる。芯部剛性の異なる2種類

の立木を想定し、受け口周辺の偏差ひずみ分布を解析した結果、芯部の剛性低下は伐倒時の立木の変形挙動に大きな影響を及ぼす可能性が認められた（図 2-1-6）。さらに、3次元弾性有限要素解析により、連続的な応力解析を試みた結果、伐倒時における追口周辺部における応力分布の波及状況を視覚的に把握することが可能となった（図 2-1-7）。



図 2-1-4 伐倒時の裂け上がりのようす

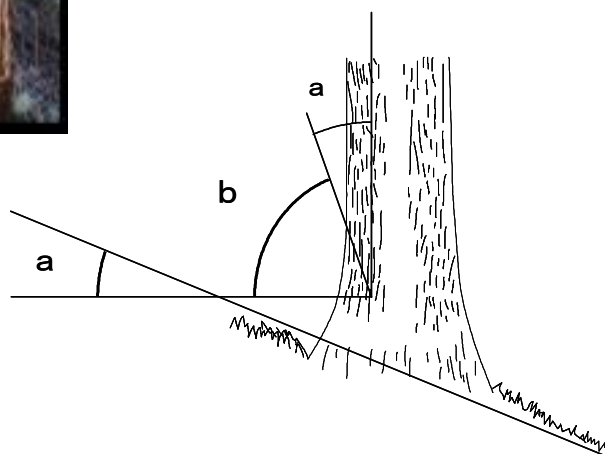
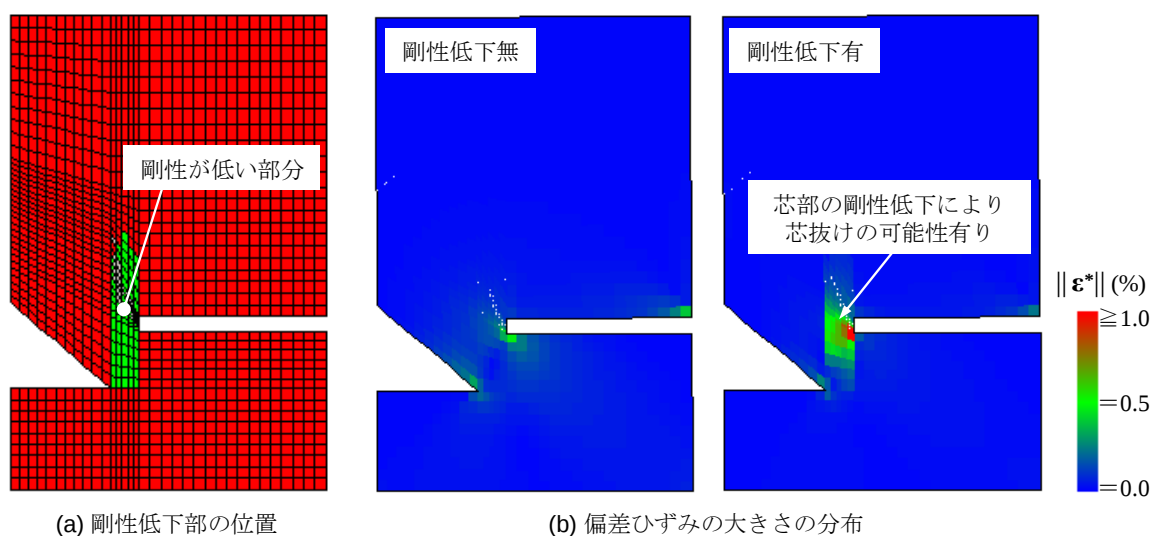


図 2-1-5 裂け上がり防止のための受口の条件



(a) 剛性低下部の位置

(b) 偏差ひずみの大きさの分布

図 2-1-6 受け口周辺の偏差ひずみ分布解析

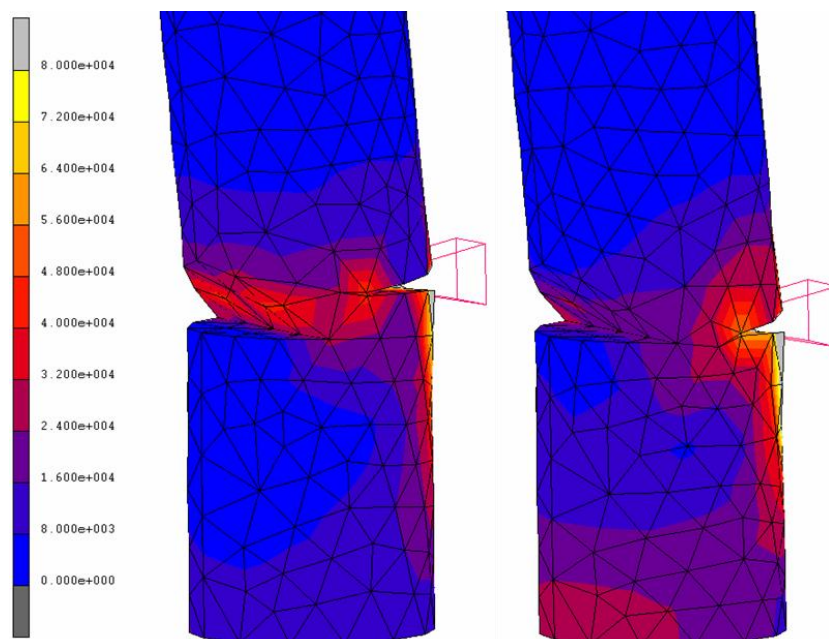


図 2-1-7 連続的な応力解析結果

③間伐材搬出に伴う残存木損傷の軽減策の解明

タワーヤードなど架線系集材においては主索、作業索など集材木の移動範囲から 5m 以内での損傷木発生頻度が高く、地上高 2m 以下での損傷頻度が高いことが判っている（岡ら，2005）。また、佐々木ら（2006）は簡易な素材としてポリ排水管を防護具として用いた場合の有用性を試験的に示した。これにより、損傷の危険性の高い箇所が予め予測でき、簡易な防護具の効果的な設置範囲を絞ることが可能である。今回行った実験的な調査の結果、防護効果はポリ排水管が最も高く、あて木のみでの防護に対し 3～4 割高い結果が得られた（表 2-1-2）。また、列状・点状伐採、全木・短幹集材を比較した結果、列状＋短幹集材の損傷率が最も低く、点状＋全木集材で最も高くなることが判明した。なお、生産性は列状間伐の方が点状間伐より高い結果となった。

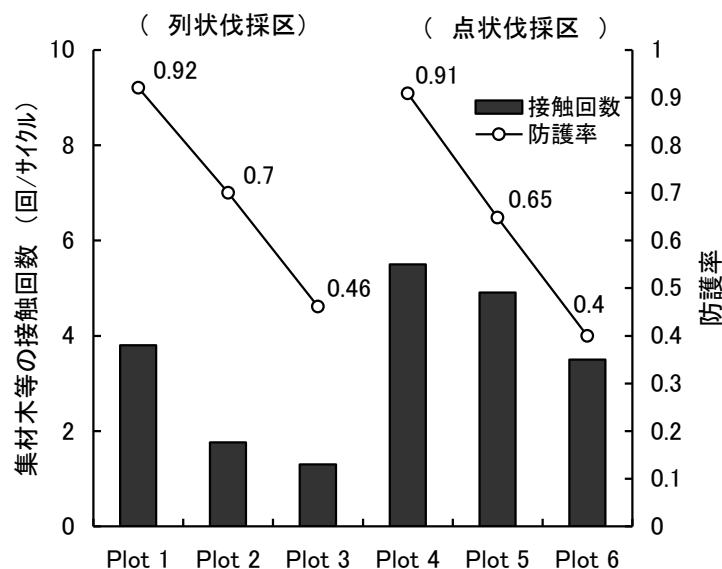
表 2-1-2 間伐材搬出に伴う残存木損傷

Plot No.	伐採方法	防護具の種類	立木本数 (本)	伐倒木本数 (本)	伐採率 (%)	残存木本数 (本)	防護具設置率 (%)	集材回数* (回)	損傷木本数 (本)	残存木損傷率 (%)
1	列状	ポリ排水管	47	9	19.1	38	53	10	2	5.3
2	"	あて木	42	11	26.2	31	39	17	3	9.7
3	"	なし	32	9	28.1	23	0	10	3	13.0
4	点状	ポリ排水管	44	10	22.7	34	44	8	4	11.8
5	"	あて木	40	13	32.5	27	63	11	8	29.6
6	"	なし	36	10	27.8	26	0	10	11	42.3
全体			241	62	25.7	179	50	66	31	17.3

* 集材回数には、当該プロット（17プロット：20×20m）内を通過した線下伐倒木の集材を含む。

ポリ排水管を防護具とした Plot1、4 では、あて木を防護具とした Plot2、5 や防護具無し (Plot3、6) に比べ損傷率は小さく、1 か所あたり損傷面積や損傷の高さの面で防護による軽減効果が確認された。その検証として集材木、ワイヤーロープ、搬器が残存立木に何回接触したかを計測し、防護具の有無による損傷発生を検討した。図 2-1-8 は、集材 1 回あたりの接触回数と損傷の防護率をプロット別に示したものである。接触回数は重複計上とし接触の有無を観測し、接触しても損傷しなかった場合を防護とみなした。ここで、防護率＝累計防護回数／累計接触回数とした場合、防護率は、ポリ排水管＞あて木＞防護具なしという結果が示され、ポリ排水管を防護具とした場合 0.9 以上、あて木を防護具とした場合 0.65～0.7、防護無しの場合 0.4～0.45 程度の防護率であった。言い換えれば、ポリ排水管を防護具として用いた場合、集材木等の接触に対し約 90% を防護し、あて木を防護具とした場合の 1.4 倍、防護具無し 2.2 倍という結果が得られた。

ポリ排水管は硬い素材であり、集材木やワイヤーロープなどとの擦れには優れた防護効果を発揮したが、素材が硬いことから柔軟性に乏しく、根元部分への対応が問題となった。そこで、根張り部分への対応として、先端を尖らせたあて木＋ポリ排水管を二重巻きに固定する工夫を試みた (図 2-1-8)。その結果、集材木との擦れなどによるポリ排水管の回転を防ぎ、ポリ排水管が対応できない根元部をあて木がカバーすることが確認され、ポリ排水管のみの防護に比べ根張り部分の損傷が 1/3 程度に軽減する結果が得られた。



注1) 防護率＝累積防護回数／累積接触回数とした。
 注2) 集材木、ワイヤーロープなどの打撃・接触が観測された立木を対象とした。
 注3) Plot1,4:ポリ排水管, Plot2,5:あて木, Plot3,6:防護具無し

図 2-1-8 簡易な素材を用いた残存木損傷の防護効果



図 2-1-9 根張り部分へのポリ配水管の改良

エ 考察

①立地条件に応じた間伐材搬出の実態解明と間伐材生産の生産性・コストモデル開発

作業システムを集材方式からみた場合、全木、全幹、短幹システムに加え（Silversides et al., 1989）、全木＋短幹システムの4つのタイプが考えられる。全木＋短幹集材システムによる2段階の集材方式は、作業路網の整備による作業地へのアクセス性の向上と密接な関係が予想され、フォワーダ、スイングヤードの増加傾向からも推察される。高性能林業機械ではプロセッサが依然として導入割合が最も多く（林野庁，2008）。ハーベスタはプロセッサの代用として造材作業に使用されるケースも多いと考えられる。プロセッサは従来、林道など一定の作業スペースのある箇所で適用されてきたが、近年、小旋回型のベースマシンの適用、あるいは3m程度の広幅員化された作業路上での林内作業の適用が可能となった。今後の傾斜地におけるフォワーダやプロセッサ、スイングヤード等の機動性、到達性の向上に向けたシステム展開が予想される。

伐出コストの類型化を考察した結果、伐出システムはType 1（固定費小、変動費小）、Type 2（固定費小、変動費大）、Type 3（固定費大、変動費大）、Type 4（固定費大、変動費小）の4タイプに区分された。これらの違いは、システムの経済的な特性の1つを現していると考えられる。収益性を上げる観点からみれば、固定費、変動費ともに小さいType 1が有利と考えられる。固定費、変動費ともに大きいType 3は、短距離において収益ラインを超えることが予想され、採算面から他のタイプに比べ不利となることが予想される。また、13システムの中から最も普及している6システムを取り上げコストの費用構造を比較した結果、従来型システムでは労務費の占める割合が多く約80%、高性能林業機械との併用型システムでは45～60%程度となる結果となった。これらの結果は今後、さらに実証する必要があるが、コスト予測モデルにより集材距離を変数とした簡単な伐出コストの予測モデルの利・活用、固定費と変動費を指標にしたシステムのタイプ区分により、システム改善の方向性を模索する指針として期待される。

②列状間伐を対象にした安全な伐倒技術に関する実験的解明

立木内部の応力解析については、立木の力学挙動を現実的に表現し得る構成モデルを導入していないものの、追い口高さと受け口周辺作用応力との関係や立木芯部の剛性低下による変形挙動の差異などの知見を得ることができたものと考えられ、立木の形状や傾き、受け口と追い口の切り方を様々に変えた場合にどのように内部応力が異なり、その違いが作業の安全性に与える影響を視覚的に訴える資料を作ることが技術的に可能になったことを意味すると考えられる。このことは、安全な伐倒作業の教育を行う上で非常に重要であり、裂け上りを防止する切り方とともに、教育用資料、あるいは作業現場で利用できる手引き書・リーフレットとして活用されることが期待できる。

③間伐材搬出に伴う残存木損傷の軽減策の解明

間伐作業では、残存が1つの障害木となるため列状間伐の採用により生産性の向上を図るだけでなく（岡ら，2004）、列状に作業範囲を限定することにより残存木損傷の拡散を防ぐことが実験結果から明らかとなった。また、簡易な素材としてポリ排水管や先端を尖らせたあて木の併用により、ポリ排水管やあて木だけの単独使用に比べ、残存立木の損傷を効果的に軽減することが明らかとなった。事前に集材架線や走行路などが予想できれば、損傷の危険度の高い範囲が予測でき、その部分に集中的に防護策を講じることにより、効果的な残存木損傷軽減に供する間伐材搬出技術の知見を得ることができたと考える。

オ 今後の問題点

立地条件に応じた適正な間伐作業法の選択肢をより総合的に構築するためには、生産性、コストについて路網配置や機械操作の習熟特性の影響を考慮した評価値を解明するとともに、システム分類を集材方式から形態的に行うだけでなく、集材機能の側面も併せて行うことがシステム改善に不可欠と考えられ、今回の分析結果を今後の課題として活かしたい。また、今回着手した有限要素法による受け口周辺部の内部応力変化については、より現実的な結果を得られる精度の高いモデルを構築し、立木の様々な形状、状態に対応した解明を進めるとともに、風倒被害木や著しく重心の偏った立木などに適用し適応する必要がある。さらに、間伐に伴う残存木損傷箇所の変色や腐朽など材質の劣化を経年的分析すること、集材木等の打撃による表面から見えない立木内部の損傷について定量的な評価手法について検討する必要がある。

カ 要約

本課題では、①立地条件に応じた間伐材搬出の実態解明と間伐材生産の生産性・コストモデル開発、②列状間伐を対象にした安全な伐倒技術に関する実験的解明、③間伐材搬出に伴う残存木損傷の軽減策の解明の3つの側面から間伐作業について主要な利点、欠点について実態および実験的、理論的な研究により明らかにした。小～中径材を対象とした生産性・コストモデルは、これまでの生産性に関する理論式（岡，2006）をもとに、全国的な実績結果により補正したものを「課題5：トータル収支を考慮した収支予測手法の開発」に受け渡し FORCAS の開発に活用された。伐倒の安全性に関する、実験および3次元有限要素法による解析結果は今後の安全な伐倒指針への適用が期待される。また、残存木損傷の実験は生産性と林分保全のトレードオフ関係を明らかにする上での活用が期待される。

キ 引用文献

岡勝（2004）大型プロジェクト研究「機械化作業システムに適合した森林施業法の開発（平成9～13年度）－研究成果の概要と今後の課題－」． 機械化林業 **608**, 3-11.

岡勝・近藤耕次・吉田智佳史・田中良明・佐々木達也・井上源基・近藤道治・山口達也・小嶋重幸（2005）伐出作業に伴う残存木被害軽減策の検討（Ⅰ）－架線系集材における被害要因の分析－．日本関東支論 **56** : 79-80.

岡勝（2006）機械化による伐出作業の経済的分析・評価に関する研究． 博士論文 東京大学 203p.

林野庁（2008）平成18年度林業機械保有状況調査結果の概要について http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kaihatu/080215_1.html. 2008.05 online.

佐々木達也・岡勝・近藤耕次・山田健・遠藤利明・上村巧（2005）伐出作業に伴う残存木被害軽減策の検討（Ⅱ）－被害防護具の選択に関する予備的考察－．日林関東支論 **56** : 81～82.

Silversides CR, Sundberg U（1989）Operational Efficiency in Forestry vol2:Practice. 169pp, Kluwer Academic Publishers, London.

（岡勝、鹿島潤）

2. 自然条件に応じた低コスト路網整備法の開発

ア 研究目的

間伐を促進するため、自然条件に対応した路網と林業機械の組み合わせによる作業システムの提示が求められている。これまで、集材の効率性に関する路網密度と集材距離特性、架線系集材（タワーヤーダ集材等）を前提にした路網配置に関する報告（櫻井，2006；山口，2005）はあるが、高密度に開設された作業道路網の活用を前提とした車両系集材（ウインチ付きグラップルとフォワーダの組み合わせ）による小規模なシステムの報告は十分ではない。小型で機動性のあるグラップル・フォワーダによる作業システムでは、機械の操作は他のシステムに比べて特別な技術が必要ではなく、不熟練者が作業に参入し易い面がある。しかし、システムの活用には、高密度な作業道路網の開設が大前提であり、施業地の何処に、どの程度の規模の道をどのような方法で開設するかが重要となる。

本課題では、高密作業道路網（路網密度 200m/ha 以上、林道と作業道の組み合わせからなる）の実態を把握し、その特徴（配置、規模、作設法）を明らかにして自然条件に適応した作設法を提示して作業道路網整備法の開発を行う。なお、ここで作業道とは、幅員 2.5～3.0m の道で継続的に使用し、少なくとも軽自動車が通行できる道である。

イ 研究方法

高密作業道路網を活用した車両系集材で間伐施業を行っている施業地の路網を対象にして、地形、地質の異なる条件下に作設された作業道の特性（配置、規模、作設法等）について調査した。調査対象地は、高知県四万十町町有林（3 箇所）、秋田県湯沢市私有林（2 箇所）、茨城県常陸太田市私有林、山梨県甲府市私有林、群馬県安中市国有林（群馬森林管理署管内）、栃木県大田原市国有林（塩那森林管理署管内）、奈良県川上村社有林（3 箇所）、秋田県大館市県有林（2 箇所）の計 8 地域 14 箇所である。

調査は、GPS 測位による作業道路線位置と線形を把握し、地形図（1/5000 森林基本図）上に表示して路線図を作成した。これを元に道の横断測量を行い、道の規模の要因として幅員、切土高、盛土勾配、縦断勾配等を計測した。地形要因として横断測量と同時に切土のり面上部の地山斜面の傾斜、盛土のり面下方斜面傾斜（計測出来ない場合は欠測）を計測した。土の要因として路面の CBR 値、最大乾燥密度（締固め試験）を測定した。また、10m メッシュ数値地図（以下、10mDEM）を用いて施業地全体の傾斜特性、傾斜 30°以上の斜面面積等を求めた。

ウ 結果

表 2-2-1 に各試験地の測定結果を示す。調査対象地には、路網開設がほぼ完了した地域（四万十町、湯沢市、常陸太田市等、路網密度：214.4～271.1m/ha）と現在開設中の地域（甲府市、安中市、川上村、路網密度：61.7～169m/ha）が認められた。これらの地域の路網は、継続的な使用を前提とした道である。大田原市国有林、大館市長坂県有林は、間伐を行った後は十数年の間、使用・管理をしない路である。ここでは、作設法や間伐後の活用法が異なるため、前者を作業道、後者を作業路として区別したが、両者には開設位置、規模、集材方法等に大きな違いは認められなかった。各調査地は基本的に間伐施業を行っており、常陸太田市私有林では、択伐によるヒノ

キ（80 年生）の主伐が行われている。川上村社有林では、間伐対象木が 100 年を越えたスギの大径木であるため、2 トントラックによる運材を行っている。その他では、ウインチ付きグラップル、フォワーダあるいは林内作業車により 40 年～50 年のスギ（四万十町はヒノキ）の保育間伐を行っている。

調査地の中で最も急傾斜地である四万十町の 3 調査地の平均傾斜は、 $32.0^{\circ} \sim 36.6^{\circ}$ と他の調査地よりも大きく、また変化係数は、 $0.21 \sim 0.29$ と小さな値であった。一方、緩傾斜地である松井田、常陸太田は、平均値 26° 、 19.8° と小さく、変化係数は 0.36 、 0.44 と大きな値を示し、この傾向は 10mDEM においても同様に確認された。斜面傾斜の平均値と変化係数の値から、四万十町は他の調査地に比べ斜面全体が緩急の少ない一定傾斜の急斜面で構成されており、一方、松井田、常陸太田は全体が緩斜面であり急傾斜の斜面が一部に存在する。

表 2-2-1 各試験地の測定結果

	面積 (ha)	路網密度 (m/ha)	斜面傾斜				30度以上斜面 の面積割合 %	道の規模				乾燥密度 ρ_d g/m ³	CBR値 %
			資料数	平均値 度	標準偏差	変化係数		幅員 m	切土高 m	盛土勾配 度	縦断勾配 度		
四万十町, 井ノ谷山	17.4	271.1	97	36.6	7.95	0.22	64.8	2.67	1.46	53.2	10.5	1.63	23.7
轟山	23.9	248.3	157	35.8	7.52	0.21	60	2.7	1.45	58.9	10.2	-	16.2
重木山	35.8	215.7	178	32.0	9.24	0.29	64	2.9	1.3	56	9.3	-	20.6
湯沢市, 滝向	23.1	214.4	152	34.3	11.9	0.35	46.2	3.47	3.04	50.7	9.5	1.21	14.1
落合	20.5	267.1	79	29.5	8.95	0.30	45.3	2.2	2.4	46.5	7.7	1.42	17.8
常陸太田市	45.2	267.3	138	19.8	8.66	0.44	4.5	2.6	1.95	45.7	8.8	1.01	2.8
甲府市	69.5	73.8	221	28.7	10.6	0.37	47.2	2.75	1.22	63.1	9	1.20	16.9
安中市, 松井田	29.3	169.0	26	26.0	9.49	0.36	24.6	2.42	1.19	42.9	7.5	1.32	6.8
川上村, 大滝	23.2	78.7	35	32.3	8.05	0.25	65.5	2.7	1.8	41.3	9.7	1.68	27.2
武木(上)	33.7	67.2	36	29.9	7.25	0.24	79.4	2.8	1.6	41.7	7.6	1.66	21.3
武木(下)	27.4	61.7	29	23.5	9.04	0.39	51.8	3.4	1.3	36.5	6.4	1.51	29.1
大田原市, 磯上	41.3	222.3	190	35.8	7.9	0.22	40.1	3.17	2.06	46.2	9.5	-	-
大館市, 長坂(上)	6.7	128.1	59	23.3	8.76	0.37	1.5	2.65	0.83	50.3	7.9	-	-
長坂(下)	6.7	75.6	11	22.6	4.1	0.18	5.7	2.99	0.68	65.4	8.5	-	-

図 2-2-1 は、路線配置図である。ここでは、平均傾斜が最大の四万十町井ノ谷山と最小であった常陸太田市の場合を示す。図の緑色の部分は、傾斜 30 度以上の斜面である。30 度で斜面を区分したのは、幅員が 2.5m～3.0m、切土高 1.5m～2.0m の作業道では、傾斜が 30 度以上になると、路面の一部（路肩部）が盛土で構成され、幅員が小さく、この幅員を最大限に利用する作業道では、路肩部、盛土のり面を補強する必要が生じるためである。また、30 度以上の斜面は、防災的な観点からは急傾斜地と定義され山崩れ等の発生頻度の高い斜面であり、地形的には小起伏面との傾斜変換線が遷急線（侵食前線）となる斜面である。四万十町では 30 度未満の緩斜面は、尾根部と谷筋であり、尾根部に登り路線（幹線）、30 度以上の急斜面に等高線に沿った作業用路線（支線）を作設し地形に拘束された路線配置である。一方、常陸太田市では、面積の 95%が 30 度未満の緩斜面であり、地形に拘束された配置とは認め難い路網となっている。

道の規模は、作業法と作業システムに密接に関係する。今回の調査地の作業システムは、グラップル、フォワーダ（林内作業車）であり、幅員、縦断勾配に大きな差は認められない。盛土勾配は、林道盛土のり勾配の標準が、1 割 5 分（＝34 度）（条件により 1 割 2 分（＝40 度））であるのに対し、 $36.5^{\circ} \sim 65.4^{\circ}$ と大きな値である。林道と作業道の相違点は、構造、作設法等の様々な面で存在するが、盛土勾配はその一つである。また、路面の縦断勾配は各調査地で大きな差は認めがたいが、四万十町などの急傾斜地では、縦断勾配の分布に二つのピーク（尾根部の登り路線と斜面の作業路線）が認められた。斜面傾斜を中心にして、地形、道の規模、土の各要

因関の関係を求めた。その例を図2-2-2に斜面平均傾斜と路面の CBR 値の関係を示す。斜面傾斜、
30°以上斜面面積割合、最大乾燥密度（締固め試験）、CBR 値（路面の荷重を支える能力）の 4
因子間には相関があり、道の規模では、盛土のり勾配とに相関関係が認められた。

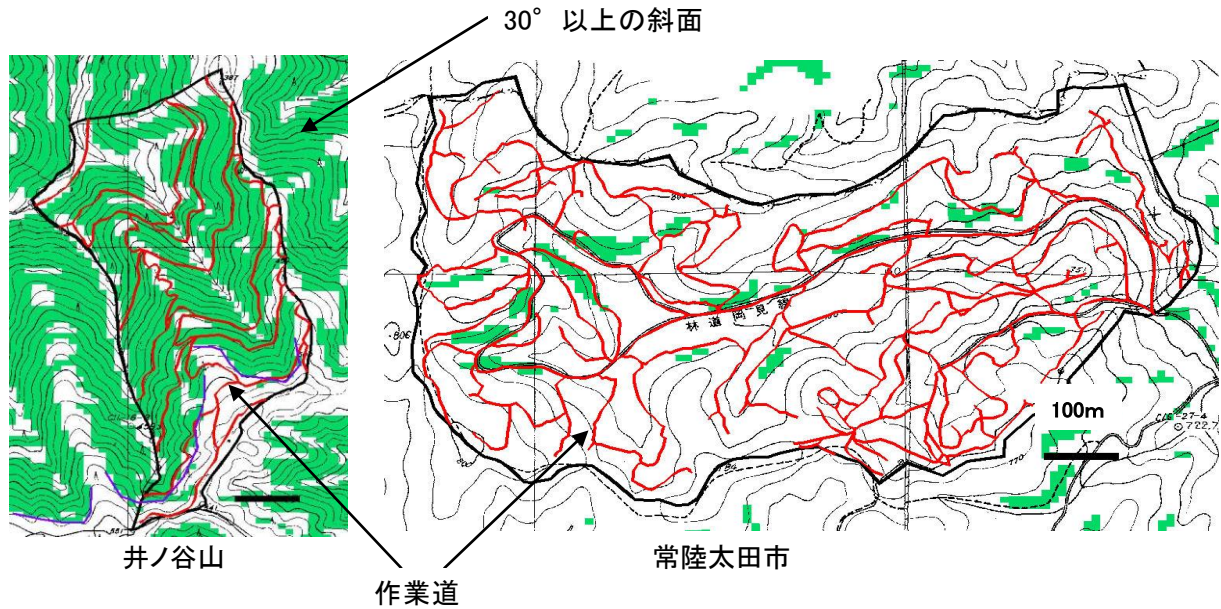


図 2-2-1 路線配置図

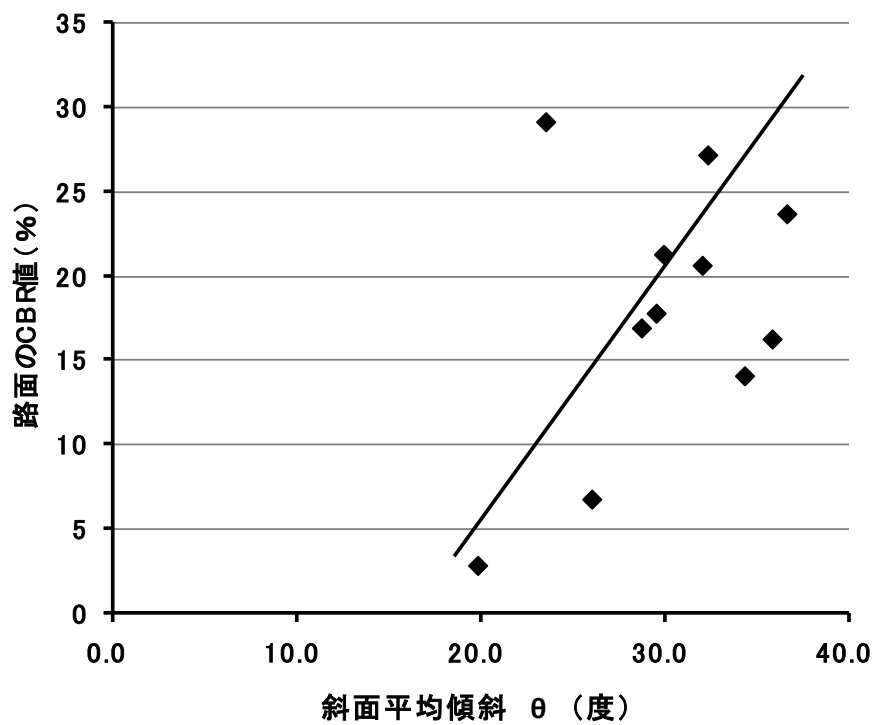


図 2-2-2 斜面平均傾斜と路面支持力（CBR 値）の関係

作業道の作設法は、従来からの方法を含め以下の4つの方法が認められた（図2-2-3）。a. 四万十町の方法：路床土となる地山部を一度ほぐして盛土部と同時に均等に転圧して作設する方法。b. c. 湯沢市の方法：基本的にはcと同じであるが、作設開始から供用までに3年間で費やして作設する方法。c. 一般的な方法（常陸太田市、大田原市、大館市）：切土を谷側の斜面に盛り、盛土部のみを転圧して作設する方法。d. 甲府市の方法（川上村）：路肩部に木製構造物を設置して作設する方法。従来の作業道の作設法は、cが一般的な方法であった。この作設法は、谷側の盛土部（路肩部）の締固めが不十分であり、盛土部を路体の一部として利用できないことが多く、集・運材作業に必要な幅員を確保するために、山側の切土量を増やす（道を山側へ押しやる）ことが行われ、切土のり面が大きくなるのと同時に盛土部の崩落を生じていた。a、b、dの作設法は、盛土部（路肩部）を強くして路体の一部とする方法であり、いずれの作設法も独特な方法である。

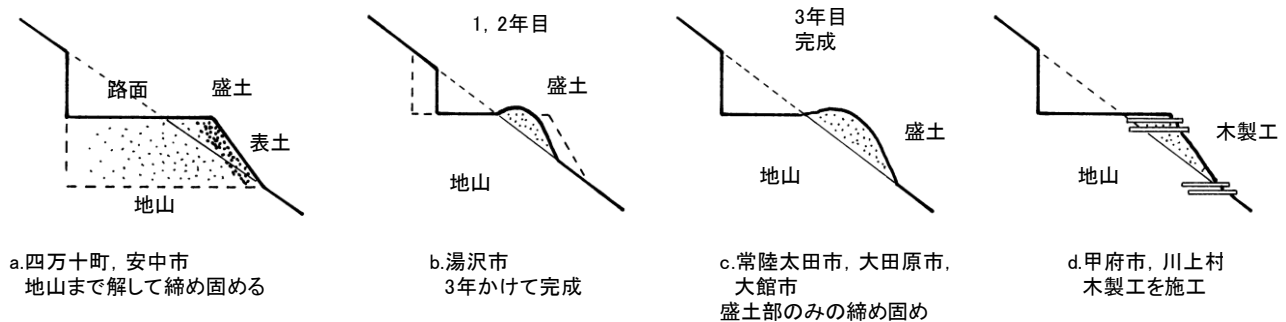


図 2-2-3 作業道の作設方法

これらの方法で作設された道の路面支持力(CBR 値)の計測結果と土の締固試験結果を図2-2-4に示す。山側（地山側）と路肩側（盛土側）とでは、aとdで作設された所では路肩側が大きな値を示し、値も10～30%と大きい。一方、c、bでは、山側の値の方が大きくなる傾向があり、値も10%よりも小さなものが多い。CBR 値と土の締固め特性（最大乾燥密度 ρ_d ）とから、四万十町、川上村などの急傾斜地での ρ_d が大きな値を示した所では CBR 値も大きくなり、土質条件に適応する作設法が行われている。一方、甲府市は、 ρ_d の小さな値に対して CBR 値が大きな値を示した。これは、路盤に碎石等を敷いて転圧しているためと考えられ、締固め能力の小さな土であっても作設の方法で路盤強化が出来る事を示している。

エ 考察

作業道は、図上で道を通すか否かの検討はなされても、具体的な路線の配置までは行われていない。これは、現地で地形を確認しながら緩斜面の有無、場所を把握して路線位置を決める（「現場合わせ」と呼ばれる）ためであり、路線配置には微地形を把握することが不可欠であることを示している。各調査地での路線配置は、斜面平均傾斜が大きくなる程、緩斜面に幹線（登り路線）、急斜面に縦断勾配の小さな作業用支線を配置する傾向が認められた。斜面傾斜を30度以上と30度未満とに区分し、面積割合とそれぞれに開設されている路線長割合を求めた。平均傾斜の最も

大きな四万十町井ノ谷山では、30 度以上と未満の斜面面積の割合は、65 : 35 である。この面積に路網は、48 : 52 の割合で配置され、全路線長の半分以上が面積割合 35% の 30 度未満の斜面に配置されている。同様に湯沢市滝向では、面積割合が 46:54、路線の配置割合は 23 : 77 であり、路線長の約 8 割が 30 度未満の斜面に開設されている。最も緩斜面であった常陸太田市では、5 : 95 の面積割合の斜面に 3 : 97 の割合で道が開設され、面積に応じた路線長の道が開設されていた。このことから、路網は、基本的に 30 度未満の緩斜面に多く配置され、平均傾斜が大きな斜面になるほど 30 度未満斜面の分布位置と割合の把握が路網配置には重要となると考えられる。

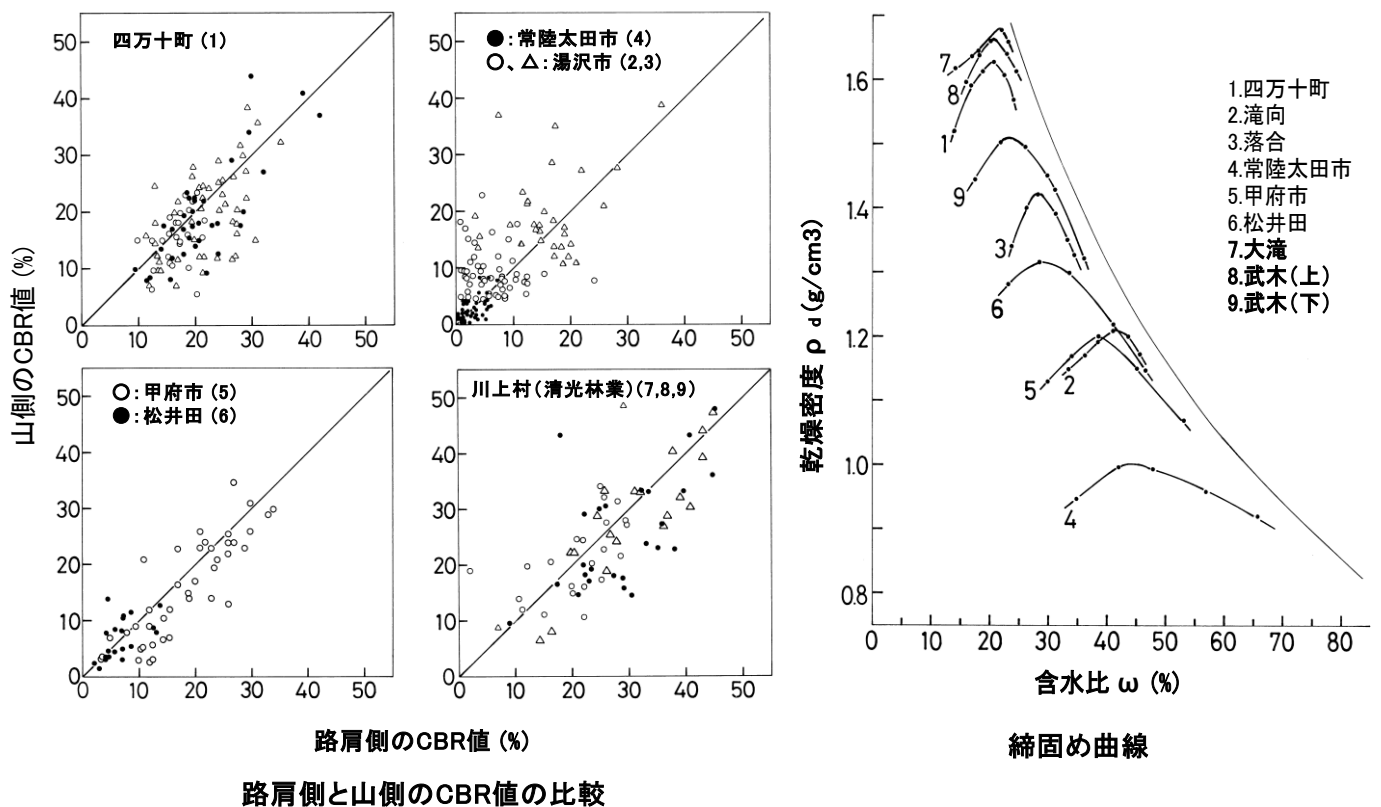


図 2-2-4 路面の CBR 値と締固め試験結果

作業道の作設法は、今回の調査では4種類の方法が確認された。このような作設法の評価法として、転圧度（山側の CBR 値に対する路肩側の CBR 値の比）の平均値、標準偏差、変化係数で表す方法（図 2-2-5）を提案した。転圧度では、優れた作業道の作設法は値が1程度であり変化係数は小さく表れる。これは、路面の山側と路肩側とが均質に締め固められていることを意味しており、盛土部を地山と同じ程度に締め固めることが重要であることを示唆している。したがって、作業道の作設では、所定の路盤支持力を確保するとともに、地山部と盛土部を均等に締め固める方法が崩れない道を作る最善の方法であり、四万十町、川上村での方法は、いずれも合理的な作設法と判断される。また、斜面傾斜の大きな施業地では、CBR 値の平均値も大きな値であった（表 2-2-1、図 2-2-2）。斜面傾斜が大きな施業地では、路体強度（路面も路体の一部）を大きくして崩れにくい道を作設し、また斜面を構成する土の性質も締め固め効果の大きな土であると判断される。したがって、斜面傾斜の大きな施業地では、路面支持力の大きな路体を作設する必要がある。作設法としては、所定の路盤支持力を確保し盛土部、地山部が均等になる工法である木製工を用いた方法や地山、盛土部を同時に均質に締め固める方法が優れている。一方、緩斜面ではフォワーダの走行に支障のない支持力を保有する路面であれば、路体の強固な道は必ずしも必要ではないと考えられる。

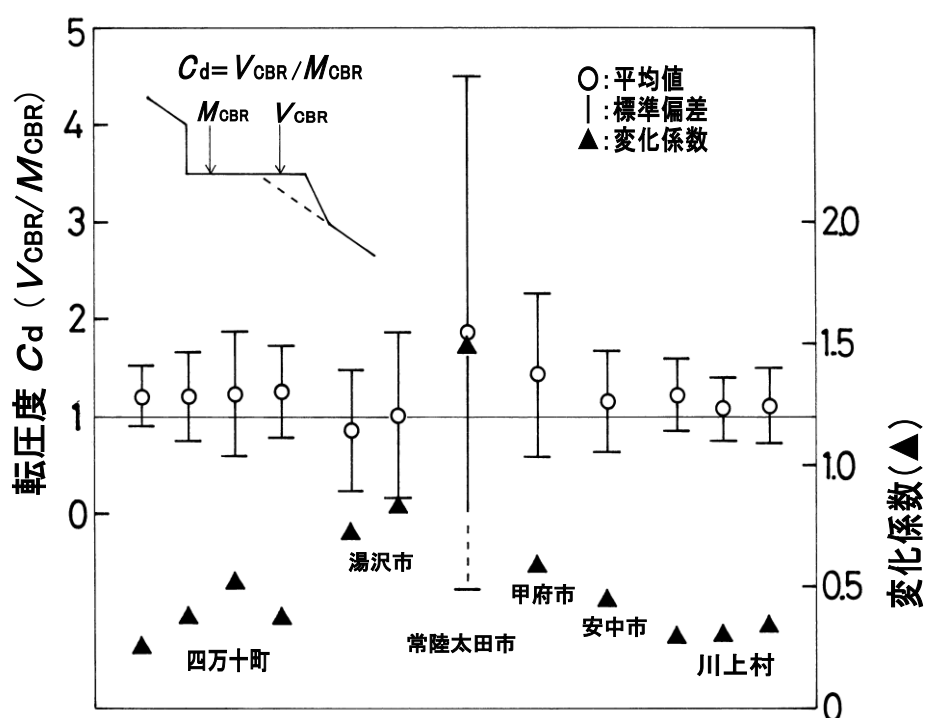


図2-2-5 転圧度による作設法の評価

オ 今後の課題

作業道は、さまざまな自然条件の場所に開設され、作業システムの中での使われ方も多様であるため、作設法にもそれぞれ独特の方法があり、今後も調査を続ける必要がある。路線配置では、多大な時間と労力、経験を必要とする「現場合わせ」がどこまで図上で可能（微地形がどの程度

読み取れるか) か検討する必要がある。また、作設法では、路体の強化と均質に作設することを目指した具体的な工法をコスト面からも検討し、提示する必要がある。

カ 要約

実態調査により車両系集材を前提とした作業道路網の路線配置、作設法について検討した。この結果、斜面傾斜が大きくなる程、道の開設位置に関する地形条件の影響は大きくなり、登り路線（幹線）と等高線に沿った作業用路線（支線）とに明確に区分される。幹線、支線の傾斜の区分は、路肩部が盛土で構成され始める傾斜 30 度程度になると判断された。作設法は、4 種類が確認された。急傾斜地では、路肩部も地山部も均等に締め固めて支持力を大きくして路体を堅固にする必要がある。このためには、土質と傾斜に応じて地山部と盛土部を均等に締固める方法、木製構造物による方法がある。また、道の評価法の一つとして、路面支持力の比（転圧度）で評価することが出来る。

キ 引用文献

櫻井倫他 (2006) タワーヤード、スイングヤード集材における地形が集材可能範囲へ及ぼす影響, 森林利用学会誌 **21**(4), 245-249

山口智他 (2005) 集材機集材における路網計画, 森林利用学会誌 **20**(4), 285-287

(梅田修史)

3. トータル収支を考慮した収支予測手法の開発

ア 研究目的

間伐計画においては、間伐の一時的な収支の評価だけではなく、その後の成長や収穫量への影響を含めた正確な推定をもとに経営判断を行うことが求められる。しかしながら、現在の間伐の評価は、未だ間伐時の一時的な収支評価に留まっていることがほとんどである。低い材価を前提として戦略的な経営を行うためには、施業・作業の差異による収支の比較だけではなく、その後の間伐や主伐までを見通したトータルな収支評価が必要である。また、その前提として、強度間伐や列状間伐を含む様々な間伐様式に対応した収穫予測手法について、実証的な実験を背景としたモデル化やパラメータ取得をふまえて開発する必要がある。

このような背景をふまえ、本課題においては様々な間伐様式に対応した収穫予測手法と、立地条件や間伐方法、伐出システムに応じたコスト予測手法を開発し、これを統合することにより間伐から主伐までを見通したトータルな収支を評価・予測する収支予測手法を開発することを目的とする。

イ 研究方法

1) 収支予測システムの設計

トータルな収支予測を行う手法とそれを実現する収支予測システムを設計した。効率的な開発のため、既に開発されている手法やシステムを活用することとし、収入予測を行うシステム収穫表LYCSを、コスト予測には「課題3：立地条件に応じた適正な間伐作業法の開発」で開発された伐出システムと集材距離によりコストを推定するコストモデルを採用することとした。また、開発にあたっては、森林組合などの現場の利用者を想定し、利用が易しいインターフェースを持つこととした。

2) 収入予測サブシステムの開発

様々な間伐方式に対応した収入予測サブシステムの開発とともに、現地データによる推定値の検証を行った。検証データとして、岡山県および広島県下の間伐比較試験地4団地9試験区の林分調査結果を用いた。樹種はヒノキで、間伐時の林齢は27～42年生である。間伐前本数、直径分布、本数間伐率および間伐方法（下層間伐または全層（列状）間伐）をLYCSへの入力とし、間伐前の実測の平均樹高に近くなるようにLYCSの地位を設定した。間伐から4～9年経過した実測の直径分布や材積成長量をLYCSの予測値と比較検討した。

3) コスト予測サブシステムの開発

コスト予測サブシステムについて、課題3で得られた成果に改良を加え、間伐及び主伐のコスト予測手法の開発を行った。課題3で開発されたコスト予測手法は、集運材距離を変数にしたものであった。ここでは、現場での適応を考慮し、集運材距離に加え、間伐率やその方法（定性、列状等）、LYCSによって計算された伐採木の平均単木材積、労務費、作業面積を評価要素に加えた。

4) 収支予測システムの開発と適用

上記のように個別に開発された手法やサブシステムを、収支予測システムとして統合し、現場で利用可能なソフトウェアを開発した。さらに、開発された収支予測システムを用い、異なる施

業計画や伐出システムを設定して予測を行い、施業計画や伐出システムによる収支予測の違いを比較し、ソフトウェアの妥当性を検討した。

ウ 結果

1) 収支予測システムの設計

現場の実態とその利用形態をふまえ、開発する収支予測システムは、小班レベルの林分を対象として、施業計画や伐出システムに応じた推定を行うものとした。また、その構造は、収入の予測を行う収入予測サブシステムと、収穫に伴うコストを予測するコスト予測サブシステムから成り、それぞれで得られた収入と支出を合算して収支を予測するという設計とした（図2-3-1）。

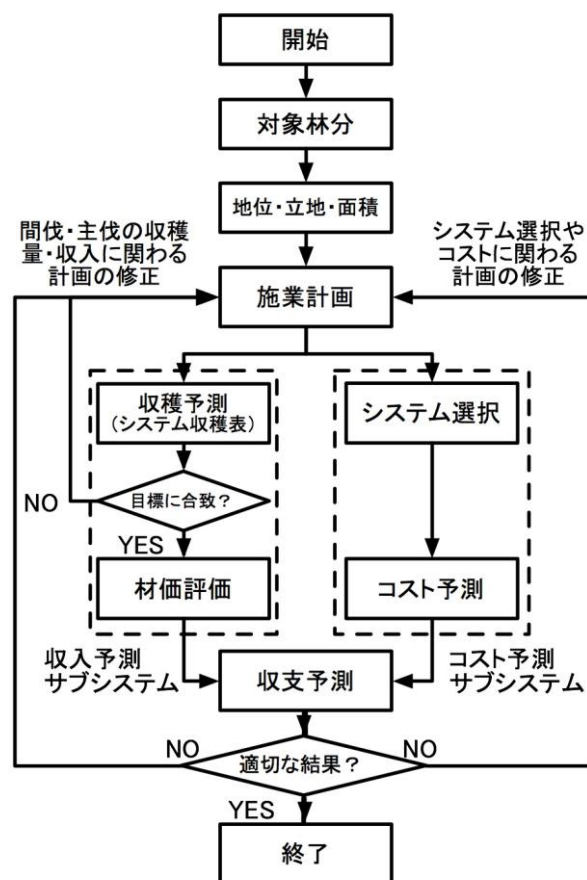


図2-3-1 収支予測システムのフロー

収入予測サブシステムは、効率的な開発のため、既に開発が進んでいたシステム収穫表LYCSを利用することとした。収集予測サブシステムは、収穫予測とそれによる材価評価というステップをふむ。対象林分の地位や、間伐回数や間伐林齢、方法、強度、主伐林齢の選択によって推定値は変化するが、特に元々LYCSが持つ特徴である直径階別本数の推定値の変化により、実態に沿った材価評価がなされ、それによる材価推定値が変化することが本サブシステムの大きな特徴である。実際の利用を想定すると、収入予測サブシステムの中で、施業の条件を変えながら何度

もLYCSによるシミュレーションを繰り返し、目的に沿った管理計画を得るという使い方になる。

一方、コスト予測サブシステムは、対象林分により林道からの距離（集運材距離）や伐出システム、施業面積、賃金を変数として、これらの変化や選択によりコストが左右される。実際に利用を想定すると、コスト予測サブモデルの中で条件を変化させながら、コストの予測や、適切なコストをもたらす伐出システムや距離を見つけるという使い方になる。

このように、収入予測サブシステムから予測された収入と、コスト予測サブシステムから予測されたコストを合算し、その結果が収支予測となる。その予測結果が、目標と比較して思わしくなければ、また収入予測サブシステムや、コスト予測サブモデルに戻って、それぞれの代替案を比較・検討するという手順を繰り返し、最も適切な組み合わせを見つけ、最終的にそれを施業計画として選択するという手順となる。

2) 収入予測サブシステムの開発

収入予測サブシステムとして採用するシステム収穫表LYCSは、間伐の時期や強度を自由に設定し、目的に沿った収穫表を求めるも手法、およびソフトウェアである。白石（1985, 1995）により開発されてから、松本、中島によりシステムの改変が重ねられてきたが（Matsumoto 1997, 笹川ら 2004, 松本 2004）、今回の収支予測システムの開発を機会に、さらに改良を加え、より柔軟で現場で利用しやすいシステムを開発した。

まず、LYCSの適用樹種・地域は従来から幅広いものであったが、カラマツを主体にさらに適用樹種・地域を加え、その結果、スギ（15地域）、ヒノキ（10地域）、カラマツ（4地域）の全国のパラメータ取得を行うとともに、これをLYCSに実装した（表2-3-1）。また、当初は収穫材積のみの推定であったが、径級別本数から径級別の丸太材積を推定し、さらに丸太価格を反映させることにより、収入を予測する機能を実装した。このように改善されたLYCSを、収支予測システムの収入予測サブシステムとして採用した。

表2-3-1 LYCSおよびFORCASが対応している樹種、地域、林齢（平成20年4月現在）

樹種	スギ		ヒノキ		カラマツ
地域	青森(60)	大井・天竜(70)	関東(60)	中国(100)	北海道(80)
	秋田(100)	紀州(80)	天城(80)	九州(120)	岩手(55)
	山形(100)	愛知・岐阜(80)	富士・箱根(100)		出羽(65)
	越後・会津(100)	山陰(60)	大井・天竜(100)		信州(80)
	北関東・阿武隈(100)	土佐(100)	木曾(120)		
	茨城(65)	熊本(100)	愛知・岐阜南部(80)		
	千葉(100)	鹿児島(60)	紀州(100)		
	天城(65)	鹿児島・民(120)	土佐(100)		

注1：地域名に続くカッコ内に示された数字は、推定可能な最高林齢を表す。

列状間伐実施林で得られたデータを用い、収入予測サブモデル（LYCS）による推定値の適合性を調べた。その結果、幹材積や直径の推定の適合性が、主に樹高成長の推定の適合性による左

右されることが分かった（図2-3-2）。樹高成長の予測が成功した試験地では、直径分布や材積成長がおおむね再現できており（図2-3-3）、下層間伐だけではなく列状間伐を想定した場合においても、LYCSの有効性が確認できた。いっぽう、樹高成長の予測が不十分な場合は、予測値の当てはまりが悪かった。この結果から、LYCSでの推定においては、樹高成長の適合性に注意を払いながら、適合性が悪い場合は成長パターンが似た地域を探して適用するなど、適用条件、適用手法を検討する必要がある。

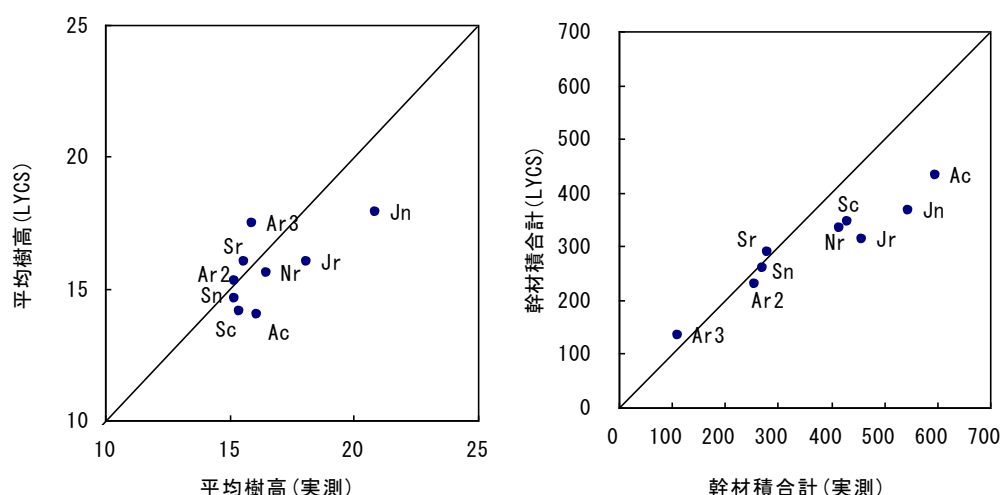


図2-3-2 実測の林分データとLYCSによる予測値の比較

注) 記号は試験区を表し、2文字目がn: 下層間伐、r: 列状間伐、c: 無間伐

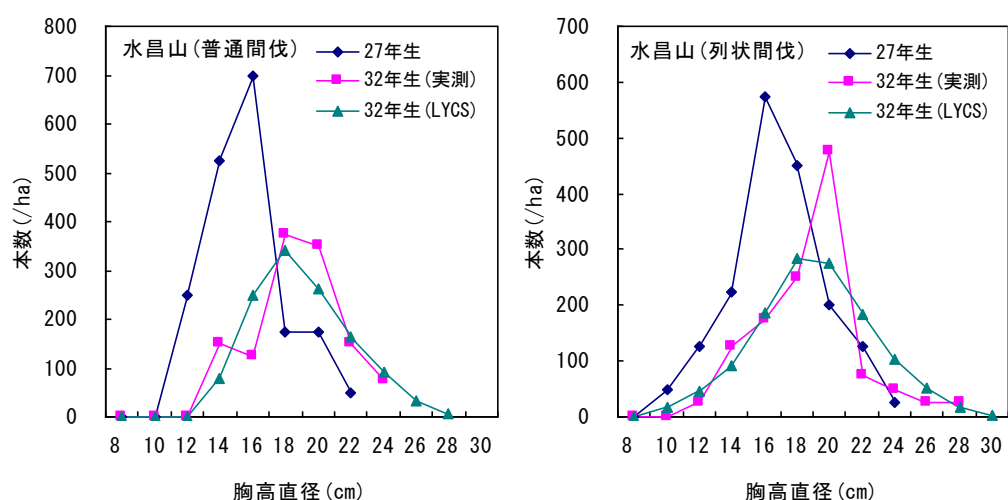


図2-3-3 実測の直径分布とLYCSによる予測分布（樹高の推定が良好な試験地の例）

3) コスト予測サブシステム

課題3によって開発された伐出システムと集運材距離によるコストモデルに、間伐率やその方法（定性、列状等）、LYCSによって計算された伐採木の平均単木材積、労務費、作業面積に関する因子を加え、コスト予測サブモデルを開発した。

今回採用した伐出システムは以下の3通りである。

S1：林内作業車型 チェンソー（伐・造）＋ウインチ付き林内作業車（集）

S2：集材機型 チェンソー（伐）＋架線（集）＋プロセッサ（造）

S3：タワーヤーダ型 チェンソー（伐）＋タワーヤーダ（集）＋プロセッサ（造）

ここで、主伐の時はS2,S3を利用する。S1は集材距離が50m程度まで利用可能。列状間伐を行うときはS3とする。

S3を例にコスト推定モデルの構造を示すと、基本形として以下のように表すことができる。

$C = 14.5L + 7441$ C ：伐出コスト（円/m³） L ：集運材距離(m)

伐出木の平均単木材積(VT：m³)を考慮した場合のコスト（ C_v ：円/m³）

$$C_v = 14.5L + 7411 \times (1.8 - VT) / 1.3$$

労賃(w ：円)を考慮した場合のコスト(C_w ：円/m³)

$$C_w = 0.4 \times C_v \times (w/15000) + 0.6 \times C_v$$

ここで、システムごとに労賃の占める割合は40～80%の間で変動する。S3は労賃の割合が40%とした。

また、現場での実態に沿って、列状間伐の時のコストは定性間伐の85%とし、皆伐の際のコストは間伐コストの70%とした。

4) 収支予測システムの開発と適用

それぞれ開発された収入予測サブシステムとコスト予測サブシステムを統合し、収支予測システムを開発した。この開発にあたっては、開発の効率性を考慮し、すでに開発が進んでいたシステム収穫表LYCSをベースにすることし、Windowsパソコンで作動するExcelのマクロソフトであるLYCSver3.2に、コスト予測のオプションを加える形で開発した。開発された収支予測システムは、最終的に林業経営収支予測システムFORCAS（FORrest management CAsh forecast System：フォーカス）と名付けた。以下、本システムをFORCASと略称する。

FORCASの使用手順を図2-3-4に示した。図に従って簡単に使用順序を示す。

- ①まず、林分調査の結果を入力する。このとき、データが無い場合は林分調査の結果入力を省くことができる。
- ②次に、材価と採材方法を入力する。
- ③コストに関わる選択肢として、伐出システムや集材距離、施業面積、労務費を指定する。
- ④主伐の時期、間伐の時期や強度、方法を指定し、実行ボタンを押す。
- ⑤実行ボタンを押した後、数分の計算処理を経て、指定に応じた収穫予測結果が表示される。
- ⑥さらに収入予測結果、コスト予測結果と、それらを合算した収支予測結果が表示される。
- ⑦その結果をふまえて、③、④の条件を変えながら予測を繰り返し、目標に見合った施業計画、作業システムを見つけ出す。

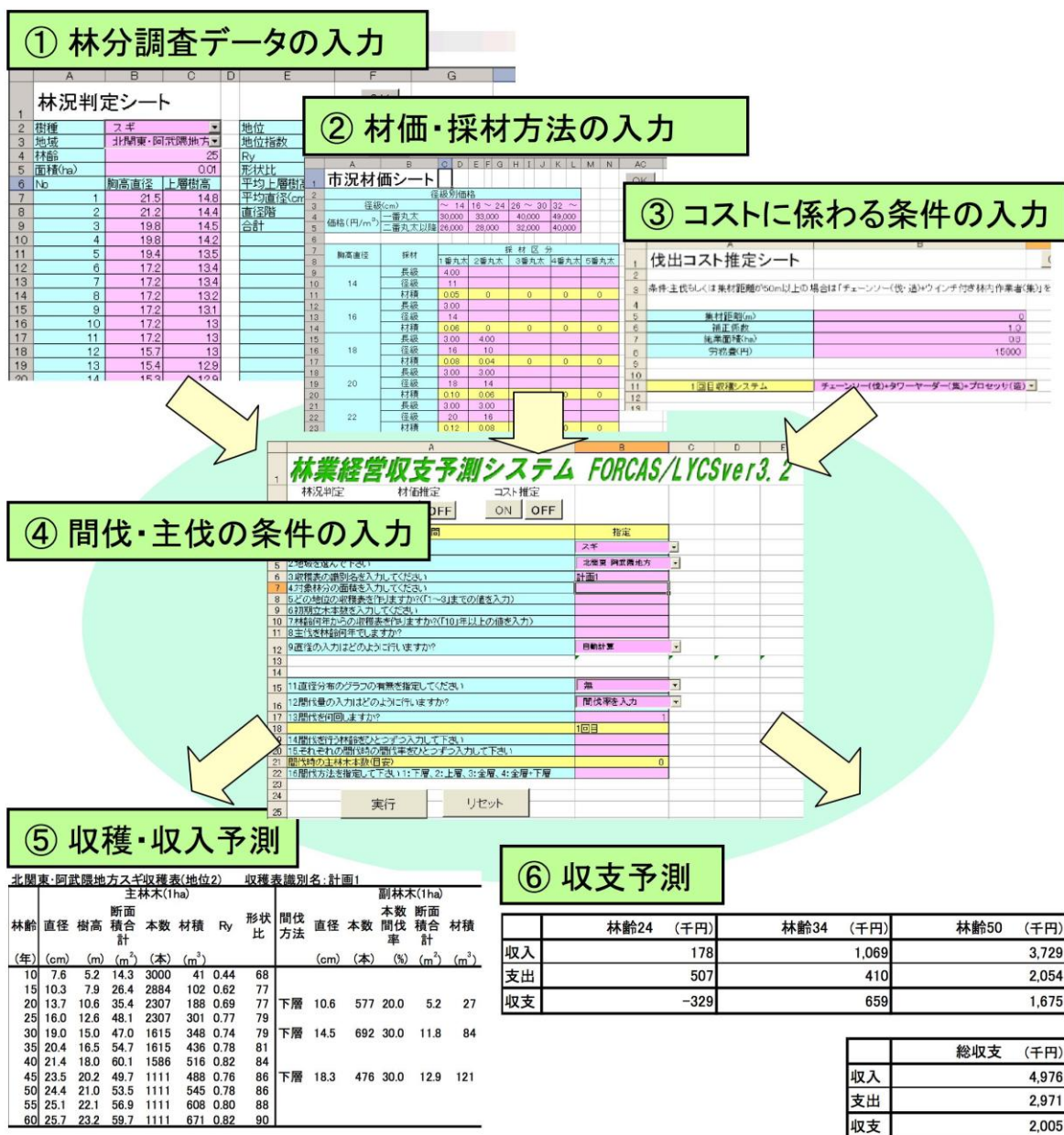


図2-3-4 林業経営収支予測システムFORCASの利用の流れ

今回開発したFORCASを、長伐期、長伐期列状、強度間伐、無間伐の4つの施業パターンと、林内作業車型、集材機型、タワーヤーダ型といった3つの伐出システムについて適用し、その推定結果を比較した。比較の条件は以下の通りである。

対象林分：茨城地方スギ、地位：標準、面積：3ha。

集材距離：50m、労務費：15000円/人・日。

植栽密度：3000本植栽。

施業計画 長伐期：60年伐期、4回間伐（19、25、36、46年生時に下層間伐）

長伐期列状：60年伐期、4回間伐（19、25年生時に下層、36、46年生時に列状間伐）

強度間伐：45年伐期、3回間伐（15、21、30年生時に下層間伐）

無間伐：45年伐期、間伐無し。

今回設定した施業計画は、4つの施業パターンに相応した間伐の回数や主伐林齢を設定した（表2-3-2）。FORCASは、山土場までのコストを予測するものなので、それ以降の山土場から市場までの運材費及び市場手数料をそれぞれ1500円/m³とし、径級別価格を市況（2007年10月）と比べて3000円程低く設定し、径級14～24cm：9000円/m³、24～30cm：10500円/m³、30cm～：12000円/m³とした。

表2-3-2 比較のために設定した施業計画

	長伐期			長伐期列状			強度間伐			無間伐	
	林齢 (年)	本数密度 (本/ha)	間伐方法	林齢 (年)	本数密度 (本/ha)	間伐方法	林齢 (年)	本数密度 (本/ha)	間伐方法	林齢 (年)	本数密度 (本/ha)
植栽	1	3000		1	3000		1	3000		1	3000
1回目間伐	19	1800	下層	19	1800	下層	15	1700	下層		
2回目間伐	25	1250	下層	25	1250	下層	21	1030	下層		
3回目間伐	36	800	下層	36	800	列状	30	580	下層		
4回目間伐	46	550	下層	46	550	列状					
主伐	60	0		60	0		45	0		35	0

以上のような、4つの間伐計画と3つの作業システムの組み合わせにより、FORCASを用いて収支を予測し、その比較を行った（図2-3-6）。その結果、列状間伐と定性間伐の比較では、間伐収入は列状の方が多いものの、主伐までのトータルの比較では定性間伐の方が有利であることが分かった。また、集材距離の短いこの条件では、伐出システムとして林内作業車型が有利となることが分かった。

このように林業経営収支予測システムFORCASによって、施業計画や伐出システムの条件、選択を変えながら収支予測を簡易かつ迅速に行うことができ、目的に応じた施業計画や条件を容易に比較検討できることが確認された。

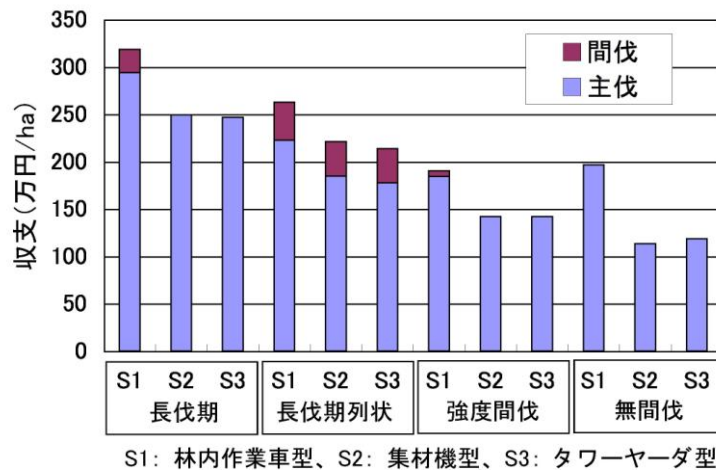


図 2-3-6 FORCAS で予測された施業・伐出システム別の収支の比較

【比較の条件】 対象林分：茨城地方スギ。地位：標準、面積：3ha。集材距離：50m、労務費：15000 円/人・日。 長伐期：60 年伐期、4 回間伐。長伐期列状：60 年伐期、後期 2 回が列状間伐。強度間伐：45 年伐期、3 回間伐。無間伐：45 年伐期、間伐無し。

エ 考察

本課題の当初の目的は、間伐から主伐までを見通したトータルな収支を評価・予測する収支予測手法を開発するものであった。これについて、林業経営収支予測システムFORCASの開発と、それによる予測・比較により、達成できたものとする。

1) 収支予測システムの設計

本プロジェクトは3年間という短い期間の中で、長いわが国の林業経営研究の中でも行われたことのない林業経営の収支予測手法と、それを実行するためのソフトウェアを開発するという目的を達成するためには、一からの開発ではとても間に合うものではなく、すでに得られている成果を発展させながら統合するという方法論を取ることにした。最終的に、プロジェクト期間内に収支予測システムの開発まで達成できたことは、この方法論が適切であったことを示すものである。

2) 収入予測サブシステムの開発

収入予測サブシステムの開発においては、すでに多様な収穫予測を行うことのできるシステム収穫表LYCSに、採材・材価推定の機能を加えることにより開発した。このことは、収入予測サブシステムの開発だけではなく、それまで収穫予測に留まっていたLYCS自体についても、収入予測まで機能が拡張されたことは、現場での活用をさらに広げるものであり、LYCS単体の改善においても意義深いものであった。

収入予測サブシステムの基盤となっている収穫予測部分においては、列状間伐の予測について検証が必要と考えていた。しかしながら、列状間伐がもたらす成長への影響については、列状間伐以前の林分情報が十分に揃っている事例が少なく、本課題で取り扱ったような観測事例に限られた。しかしながら、その限られた事例の中でも、収入予測サブシステムおよびLYCSは、樹高予測が適切であれば十分な予測精度を持つことが明らかとなった。同時に、不十分な予測精度が、不十分な樹高予測がもたらすものであることも明らかとなり、「FORCASやLYCSを適用する場合には、まず樹高予測を重視すべき」という重要な指摘をもたらしたことも重要な成果と考える。

3) コスト予測サブシステムの開発

コスト予測システムは本プロジェクト課題3で開発されたコストモデルに、単木材積や労務費、作業面積といった現場の経営条件を加えることにより開発したものである。得られたコスト予測サブシステムは、伐出システムが林内作業車、架線、タワーヤーダ（スウィングヤーダ）と限られているが、変数の選択やパラメータの設定は現地調査に基づいたものであり、現場で求められているシステムが得られたと考えている。

このような、森林組合などの現場レベルでの利用を想定した、伐出システムや立地などの条件に反応するコスト予測手法は、これまで開発されたことはなく、新規性の高い開発が出来たものと考えている。今後は、このサブシステムの開発手法を基礎に、多様な伐出システムのパラメータの導出を、精度の向上を考慮しながら進めることが必要と考える。

4) 収支予測システムの開発と適用

開発された収支予測システムを、最終的にWindows版Excelで作動するマクロプログラムとして開発した。これは、LYCSにコスト予測機能を付加するという方針により、短期間で開発が可能となると同時に、すでにLYCSが持っていた使いやすいインターフェースをそのままFORCASに受け継ぐことができた。

FORCASは、個別林分を対象とした主間伐による収支予測を行うものであり、林業経営の現場である森林所有者や森林組合での利用を想定しているものである。特に、FORCASは間伐の収支を予測するために、近年注目されてきている提案型施業に非常に適している。さらに、FORCASは一度の間伐の収支だけではなく、主伐までのトータルの収支も考慮することができ、より適切な提案を示すことができよう。また、FORCASの想定する利用者は現場に限られるものではなく、地域の一般的な施業を検討するなど、施業計画策定に関わる市町村関係者、地域森林計画に関わる都道府県関係者においても活用の可能性は高いものと考えている。

このような広い利用を想定し、林業経営収支予測システムFORCASは、収入予測サブモデルでもあるシステム収穫表LYCSとともに一般公開を開始し、森林総合研究所ホームページからダウンロード可能とした。このことは、現場での利用を進めるとともに、各地での適用事例が増え、適合性やバグ報告などのフィードバックをもたらし、さらに改善に繋がるものである。

オ 今後の課題

林業経営収支予測システムFORCASの推定値について、検証とそれにもなう改善を行い、精度向上を進める必要がある。そのためには、森林組合や素材生産業者など、現場での適用を進め

ながら、不具合や改善点といったフィードバックによる改善・修正を繰り返していくことが効果的であろう。

具体的な改善点は以下の通りである。収入予測サブシステムについて、採材計算時、個別林木の樹高を直径にかかわらず林分の平均直径を与えているが、樹高と直径を連動させる必要がある。また、曲がりなどの材の質を考慮できれば、もっと精度の高い予測を行うことが出来る。コスト予測サブシステムについては、現在3種の伐出システムに対応しているが、全国的なより広い適用を考えれば、もっと多くの種類の伐出システムへの対応を、精度の確保と併せて行う必要がある。

カ 要約

間伐から主伐までを見通したトータルな収支を予測する手法と、そのパソコン用プログラムである林業経営収支予測システムFORCAS (FORrest management CAsh forecast System : フォーカス)を開発した。FORCASは小班レベルの林分を対象とし、収入を推定する収入予測サブモデルと、主間伐のコストを推定するコスト予測サブモデルから成り、それぞれで推定された収入と支出を合算して収支を予測するものであり、表計算ソフトEXCEL上で作動する。FORCASを用いて列状間伐と定性間伐の収支を比較したところ、間伐時だけの収支では列状が、主伐までのトータルの収支では定性の方が有利であると推定された。これにより、FORCASによって、施業計画やコスト条件を変えて収支予測を簡易かつ迅速に行うことができ、目的に応じた施業計画を容易に比較検討できることが確認された。

キ 引用文献リスト

Matsumoto, M. (1997) Construction of yield tables for sugi (*Cryptomeria japonica*) in Kumamoto district using LYCS, *J.For.Plann.*, **3**, 55-62.

白石則彦 (1985) 同齢単純林の生長予測に関する研究, 東大演報, **75**, 199-256.

白石則彦 (1995) 人工林間伐指針システム収穫表 (LYCS), “システム収穫表プログラム”木平勇吉編, 100-115.

笹川裕史・松本光朗 (2004) 列状間伐に対応した収穫予測手法の開発, 日林講, **115**, 578.

松本光朗 (2004) 列状間伐に対応した収穫予測技術の開発, “平成15年度地域資源の循環利用に資する間伐等に関する調査報告書”林野庁, 35-55, 2004.3

(松本光朗、細田和男、鹿又秀聡)

「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 21

「要間伐林分の効率的施業法の開発」

発 行 日 平成21年 2月 19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 株式会社 梶本

