

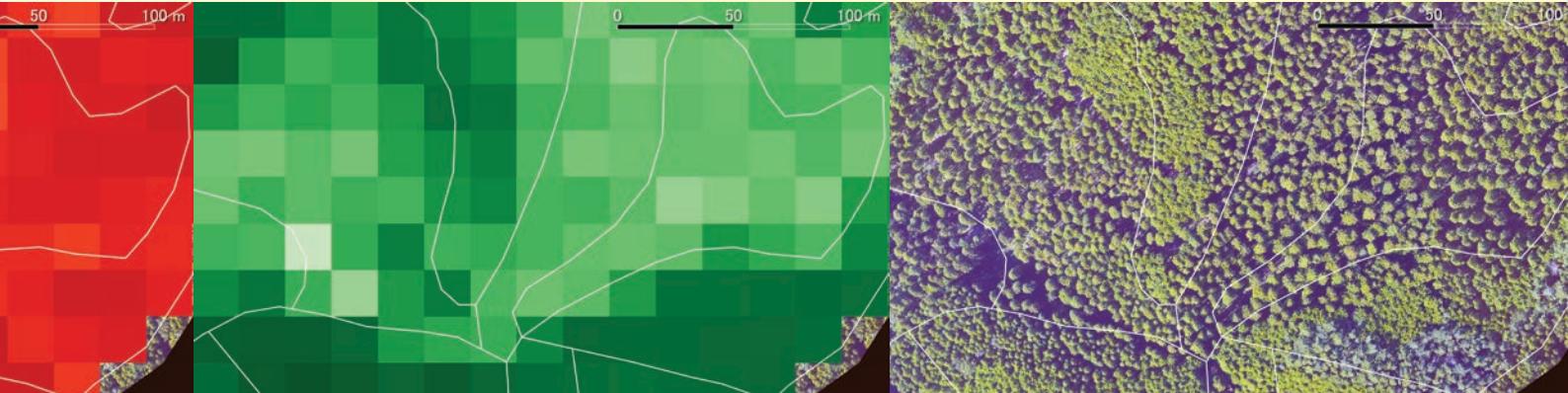
ISBN 978-4-909941-59-6

管理優先度の高い民有人工林の 抽出と管理のための手引書

農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究
「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」
(令和3年度～令和7年度)
研究成果

森林総合研究所・茨城県林業技術センター
福岡県農林業総合試験場・(株)CTI リード

(令和8年3月)



農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究

「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」

(令和3年度～令和7年度)

研究成果ホームページ

[https://www.ffpri.go.jp/labs/
hmpforest_hp/index.html](https://www.ffpri.go.jp/labs/hmpforest_hp/index.html)



管理優先度の高い民有人工林の 抽出と管理のための手引書

農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究
「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」
(令和3年度～令和7年度)
研究成果

森林総合研究所・茨城県林業技術センター
福岡県農林業総合試験場・(株)CTI リード

(令和8年3月)

序文

この手引書は、管理が行き届いていない人工林を見つけ出し、これから施業方法と、施業に着手する優先順位を決めるための、新たな技術を紹介する読み物です。これらの技術は、森林経営管理制度を念頭に置き、市町村による民有林管理の判断を支援することを主な目的としています。しかし、そればかりでなく、人工林管理のデジタル化、省力化に広く寄与することも想定しています。そのため、主な読者として、市町村の林務担当者、市町村から業務を受託し市町村を支援する林業経営体や林業コンサルタントなど、さらに森林所有者や都道府県の林務担当者、航測会社の担当者などにも読んでいただきたいと考えています。

森林経営管理制度は平成31（2019）年度に施行されました。この制度は、所有者自らでは森林整備ができない場合に、市町村が所有者から経営管理の委託を受けたうえで集積・集約化を図る仕組みです。森林環境譲与税などを活用し、市町村が主導して森林整備を推進することが期待されます。この制度では、市町村が林業経営の適否や施業の方法、優先順位などを判断することとなります。広域に分散する人工林を正確かつ公平に評価して、効果的に森林整備を推進することは容易ではありません。そこで、私たちは、リモートセンシング技術を用い、人工林の管理状態を広域で評価する方法を開発し、管理状態に応じて施業方法とその優先順位を決める手順を作成しました。開発・作成に用いた人工林の樹種は主に本州・四国・九州のスギおよびヒノキですが、これらの方法や手順は我が国の主な針葉樹による育成単層林に適用可能です。

新たな制度や技術を市町村の現場で活用するためには、それらの制度や技術の背景にある専門知識と市町村の個別の事情の双方に精通している必要があります。しかし、多くの市町村では専門知識に通じている林務担当者は僅かなのが現状です。それでも新たな制度や技術を多くの市町村が施策に活かすためには、専門知識と個別の事情の双方に精通して市町村を支援する様々な関係者の関与が必要となります。令和7（2025）年度に改正された森林経営管理制度における「集約化構想」の作成や「経営管理支援法人」の指定などは、このような関係者の関与を制度化したものと言えるでしょう。

この手引書は、私たちの新たな技術を施策に応用したい市町村担当者と、市町村を支援してこれらの技術を実装したり施業に活用したりする地域の関係者を想定した構成となっています。まず、「概要編」では、市町村担当者と関係者の双方に対して、新たな技術の概要や利用方法、期待される業務の効率化などを説明します。次に、「技術編」では、主に専門知識を備えた関係者に対して、これらの技術の背景理論や実装方法などを説明します。地域における適切な森林経営管理の推進に役立てていただければ幸いです。

なお、この手引書は農林水産省農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」（令和3～7年度、課題番号JP21453194、参画機関：森林総合研究所・茨城県林業技術センター・福岡県農林業総合試験場・（株）CTI リード）の成果です。本研究の実施に当たり、茨城県常陸太田市および福岡県久留米市から多大なるご協力を頂きましたことを、ここに記して御礼申し上げます。

令和8年3月1日

研究開発責任者

森林総合研究所 鷹尾 元

目次

序文	i
目次	ii
この手引書で解説する技術と方法	iii
概要編	1
• 1. はじめに	2
• 2. 森林経営管理制度と「判断」の分かれ目	4
• 3. 経営管理が行われていない人工林を抽出する	6
• 4. 斜面崩壊危険度を判定する	8
• 5. 風害のリスクを評価する	10
• 6. 管理優先度と施業を判断する=間伐か、皆伐か	11
• 7. 森林保険=危険を回避するために	13
• 8. おわりに	14
技術編 管理優先度判定 ツールボックス	15
T-1. 航空レーザ計測 (ALS) による人工林の管理状態マップ	16
T-2. 管理状態マップから管理不足の恐れのある森林を抽出する	19
T-3. 皆伐後すぐに植栽した場合のスギ根系の斜面崩壊防止機能	22
T-4. 山地崩壊の発生危険度を知る	24
T-5. 土層深の測定とマッピング	28
T-6. 崩壊危険地形 (0次谷) の抽出技術の開発	30
T-7. 風害リスクの構造とリスクの高まり	32
技術編 施業技術 マニュアル	35
M-1. 間伐の効果をどう評価する?	36
M-2. 林業の適否と管理優先度に応じた施業の指針	39
M-3. 間伐について	41
M-4. 列状間伐：間伐遅れ林分に対する緊急措置	44
M-5. 風雪害リスクを考慮した間伐技術としての将来木施業	46
M-6. 再造林：その意義と必要性	47
M-7. 斜面崩壊リスク軽減に天然植生を活用する新しい再造林技術	48
M-8. 育成複層林について - 複層林・育成複層林とは?	49
M-9. 育成複層林について - 管理上のポイント	50
M-10. 広葉樹林化：主伐後に広葉樹の森を作る	51
付録	53
• 仕様書例 (経営管理が行われていない人工林、斜面崩壊危険度)	54

この手引書で解説する技術と方法

技術・方法	何が判るのか？	何ができるのか？	必要なもの・こと	参照章
1 間伐が遅れている森林を発見する	● 経営管理が行われていない可能性がある森林	➤ 意向調査の前に、森林に立ち入らずに、経営管理の現状を推測できる ➤ 集積が必要となりそうな地域を地図上で絞り込める	◆ ALS ¹ データ ◆ 解析用 PC・ソフト（外注も可）	概要編 2.1、3 技術編 T-1～2 付録 S-1
2 崩壊の危険性が高い森林を発見する	● 皆伐した場合に崩壊の危険性が高まる森林 ● 施業や路網作設に注意を要す微地形「0次谷」の所在	➤ 人工林施業を継続するか、針広混交林化・広葉樹林化を目指すかの判断の参考となる ➤ 林業事業体が施業する際の要注意地点が示される	◆ ALS データ、またはそれから作成した精細 DEM ² ◆ 解析用 PC・ソフト（外注も可）	概要編 2.2、4 技術編 T-3～6 付録 S-2
3 森林の施業主体と将来目標を判断する	● 市町村経営管理事業か、林業事業体に再委託か？ ● 人工林施業を継続するか、針広混交林化・広葉樹林化を目指すか	➤ 林野庁の手引書 ³ を参考にしたフロー図（図 1）により、施業の主体と将来目標を判断できる	◆ 上記 1 および 2（無くても可） ◆ フロー図の調整（必要であれば）	概要編 1 技術編 M-1～2
4 風害の危険性が高い森林を発見する	● 放置すれば風害の危険性がより高まる森林	➤ 他の森林に優先して施業を検討すべき森林が示される	◆ 上記 1、または現地調査に基づく収量比数	概要編 2.4、5 技術編 T-7
5 施業方法を判断する	● 森林の現状と将来目標に適合した施業方法	➤ 各種施業方法の特徴を理解し、優先度とともに選択できるようになる	◆ 上記 3 および 4、または自治体が定めた森林の現状と将来目標	概要編 2.5、6 技術編 M-1～11

¹ ALS : 航空機レーザ計測 (Airborne Laser Survey)

² DEM : 数値標高図 (Digital Elevation Model)

³ 森林経営管理制度に係る事務の手引

概要編

■ 1. はじめに

森林経営管理制度（以下、制度）とは、市町村または林業経営体が森林所有者に代わり経営管理を行うことにより、市町村管内の林業経営の効率化及び森林の管理の適正化を一体的に促進する制度です。この制度では市町村が、

- 市町村内の民有林の中から、意向調査や現状評価により、制度の対象となる森林を選び、
- 林業を継続するかどうかを判断し、
- 林業を継続するものについては、林業経営体に経営管理を再委託するかどうかを判断し、
- 林業経営体に経営管理を再委託せず、市町村自らが経営管理するものについては、その施業順位と方法を決めて経営管理に当たる

という流れに基本的に従います。

これらの判断は地域の実情に応じ、さまざまな要素を考慮して行われます。このうち、森林自体の生育状況や立地状況は、これから経営管理の方法を決めるために欠かせない要素です。しかし、制度の対象となる森林の所有者はすでに経営管理の意欲に乏しいことが多いので、所有者からの聞き取りにより森林の状況を正確に把握することは容易ではありません。したがって、市町村は広域に分布する管内の民有林の状況を自ら把握し、判断に活かしていく必要があります。

私たちは、これらの判断において参考となる情報を提供する、以下の一連の方法を考案しました。

- 経営管理が行われていないと考えられる森林を地図に表す
- 林業の継続に適さない危険な地形を地図に表す
- 経営管理の緊急性が高い森林を選ぶ
- 森林の状況に応じて経営管理の方法を選ぶ

この概要編では、これらの方法が制度の判断の中でどのように位置づけられるかを示し、得られる情報をどのように用いるかを概説します。方法の詳細や実装の方法については技術編：管理優先度判定ツールボックスまたは技術編：施業技術マニュアルの対応する項目を参照してください。

これらの方法の実装には林業や情報技術のプロの支援が不可欠であると私たちは考えます。そこで、市町村の林務担当者ばかりでなく、これまで森林整備事業や森林情報整備などで市町村と二人三脚で取り組んできた林業経営体やコンサルタント、さらに経営管理支援法人にもこの手引書の内容を知っていただきたいと考えています。また、市町村がこれらの方法の実装を委託するための仕様書の見本を巻末の付録に添付しました。

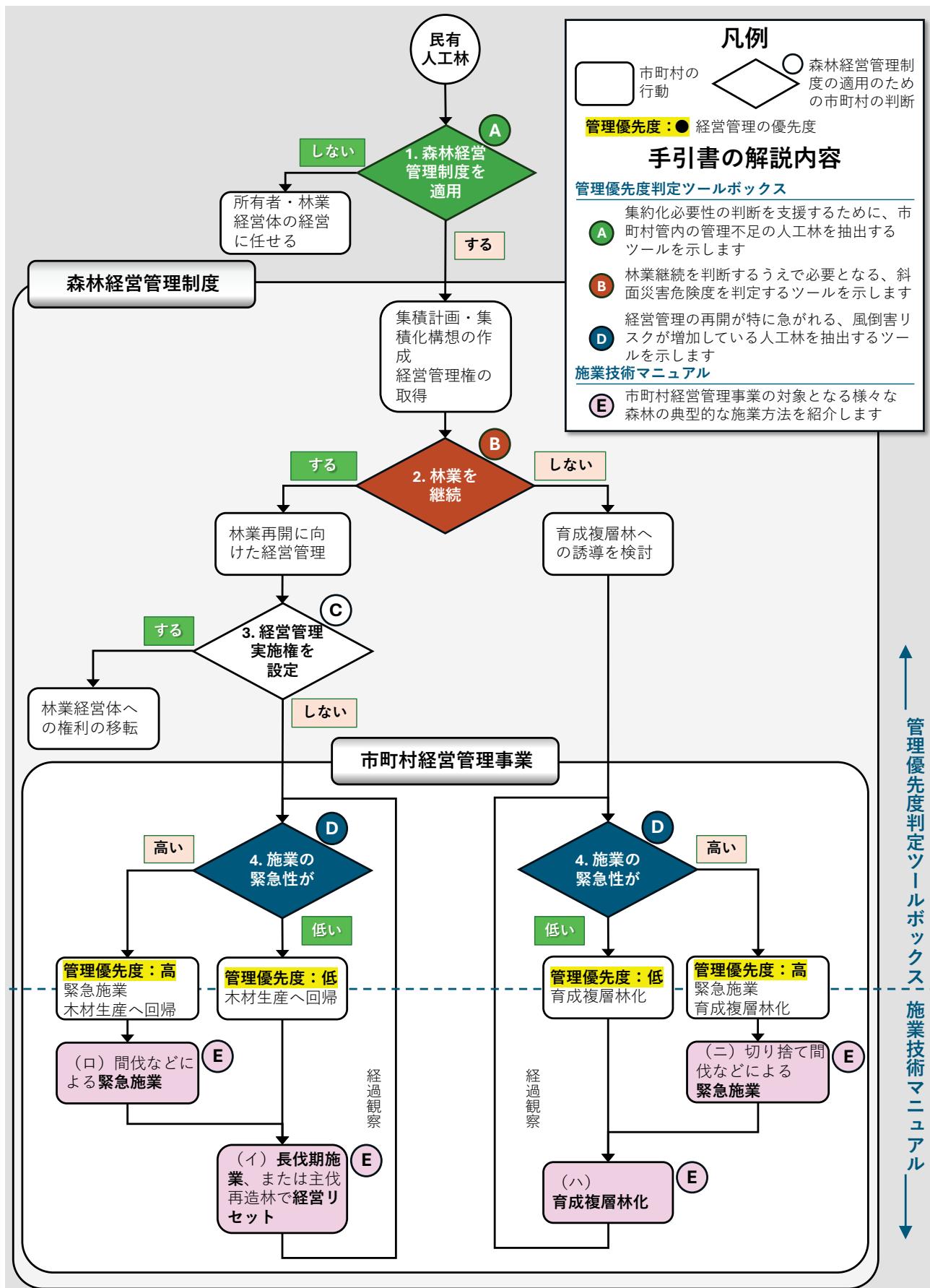


図 1 森林経営管理制度に基づく民有林の仕分けのフローチャートと手引書の位置づけ

■ 2. 森林経営管理制度と「判断」の分かれ目

制度の下で市町村が行う典型的な判断の流れをフローチャートとして示します(図 1)。市町村で実際に行われているものと順序などは一致しないかもしれません、基本的には図 1 の中のいくつかの判断の組み合わせで制度の対象と経営管理方法が絞り込まれていきます。本章の各節では、それぞれの判断の場面において、私たちが提案する技術や方法がどのように位置づけられ、判断を支援するかについて説明します。そして、それらの方法がどのようなものなのかについては次章以降で説明します。

2.1. 森林経営管理制度を適用するか (図 1 の判断 A)

市町村管内の民有林から、制度の対象とする森林、つまり経営管理権集積計画（以下、集積計画）または権利集積配分一括計画（以下、一括計画）を作成して経営管理権を市町村に集積していくべき森林をまず絞り込む必要があります。市町村が経営管理権を取得しない民有林については、森林所有者の経営管理に任せたり、森林所有者に林業経営体を紹介したりするなど、制度の外での経営管理を継続してもらいます(図 1 の判断 A)。

経営管理権を集積することが必要かつ適当な森林とは、①経営管理が行われていない森林で、②引き続き森林所有者が経営管理を行う見込みがなく、③経営管理の集積を図ることにより林業経営の効率化や森林の管理の適正化が図られると認められる森林とされています。現在の経営管理の状況(①)は、経営管理を行う見込み(②)とともに、森林所有者への意向調査により確認される例が多くあります。しかし、すでに経営管理の意欲に乏しい森林所有者に対する意向調査では①の把握は容易ではありません。

意向調査を行う前に、別の方によって地域全体の現在の経営管理の状況を調べ、さらに地域の実情などを鑑みながら集積の必要性を検討すれば、経営管理の意向調査の地域を絞り込んだり、市町村による経営管理権の取得の前に地域経営管理集約化構想（以下、集約化構想）を作成して地域全体の方針を予め関係者で共有したりすることが可能になると期待できます。

私たちは、リモートセンシング技術により人工林の管理状態を精度良く推定して、管理不足の森林を地図化する技術を開発しました。この方法と使い方を「[3. 経営管理が行われていない人工林を抽出する](#)」で説明します。

2.2. 林業を継続するか (図 1 の判断 B)

市町村が経営管理権を取得した森林や、集約化構想の作成のための協議を行おうとする森林においては、今後も林業を続けて（育成单層林を維持して）いくべき森林なのか、それとも林業を断念して広葉樹林や針広混交林（育成複層林）へ移行すべき森林なのかを決める必要があります(図 1 の判断 B)。

林業の継続の適否は主に林業の採算性の観点から判断することになります。つまり、林地生産力が比較的高く、急峻地ではなく、木材の供給先が比較的近隣にある森林であったり、隣接した森林で森林経営計画が作成されていたり、民間事業者から経営管理実施権の取得の要望がある森林であつ

たりすれば、林業の継続の可能性は高いと言えます。

私たちは、林業の採算性に加えて、斜面崩壊の危険度の観点からも森林を評価して、採算性はある程度見込める場合によっては林業の継続を断念することも選択肢となります。現在は森林が存在していても、林業を続けていれば皆伐後に斜面崩壊の危険度が高まる可能性があるからです。そのために、地形情報から皆伐後の斜面崩壊の危険度判定を自動化する技術を開発しました。林業継続の判断の一因子として斜面崩壊の危険度を分かりやすく示します。この技術と使い方を「[4. 斜面崩壊危険度を判定する](#)」で説明します。

2.3. 経営管理実施権を設定するか（図 1 の判断 C）

林業を続けることにした森林については、基本的には、経営管理実施権配分計画（以下、配分計画）または一括計画に基づき経営管理実施権を民間事業者に配分し、民間事業者が経営管理を実施します。しかし、経営管理実施権の配分を希望する民間事業者が現れない場合には、市町村が当面の間直接経営管理する事業（以下、市町村森林経営管理事業）を行うこととなります（図 1 の判断 C）。林業を続けることにした森林において経営管理実施権に基づき民間事業者が行う施業については、市町村と民間事業者の関係に基づくものなので、私たちから新たな技術や方法の提案はありません。

2.4. 経営管理の緊急性は高いか（図 1 の判断 D）

市町村森林経営管理事業を行う森林のうち、林業を続けることにした森林では間伐により長伐期施業を実施する一方、林業を断念した森林では間伐を繰り返して育成複層林化する等とされており、いずれにしても間伐が主な施業方法となります。このような森林が複数ある場合に、どこから手を付けていけばよいのでしょうか（図 1 の判断 D）。

一つの考え方として、森林被害の危険度が現状では比較的高く、間伐により危険度を下げられる可能性がある森林では、林業を継続するかどうかにかかわらず、まず危険度を下げるために優先して間伐を行うことが選択肢となります。

台風の常襲地域である我が国では過密な林分の風害に対する脆弱性が課題となります。私たちの研究からも、風害の危険度は森林が混み過ぎても空き過ぎても高くなることが明らかになりました。森林の密度を中庸に保つということは昔から言われていることです、風害の危険度からも裏付けられたことになります。「[5. 風害のリスクを評価する](#)」では、風害危険度から見た適切な森林の密度と、混み過ぎた森林を、間伐による一時的な風害危険度の上昇も考慮しながら、間伐して風害の危険度を低下させる考え方を示します。

2.5. 間伐か、皆伐か（図 1 の施業選択 E）

市町村森林経営管理事業を行う森林では、前節でも述べたとおり、間伐が主な施業方法となると考えられます。林業を続けることにした森林（「自然的条件が良く経済的に成り立つと見込まれるものの民間事業者に経営管理実施権を設定できていない森林」）では、間伐により長伐期施業を実施するなどにより、経営管理実施権を設定して林業を再開できる森林に誘導します。一方、林業を断念した森林（「自然的条件が悪く今後とも経済的に成り立たない森林」）では、間伐を繰り返して育成

複層林化するなどにより、森林の有する多面的機能の発揮を確保します。

林業を続けることにした森林では、間伐により林木の成長が十分に回復する見込みがあれば間伐を計画する一方で、間伐しても回復の見込みが立たなければ主伐再造林によってリセットすることも選択肢となります(図 1 の判断 E)。いずれにしても、施業の開始が速ければ林業再開も早まるので、管理優先度は高いといえます。

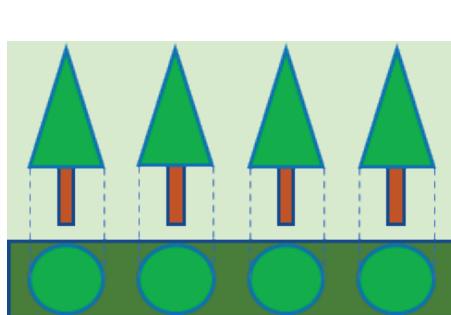
一方、林業を断念した森林では、間伐（または抾伐）により育成複層林化（針広混交林化または広葉樹林化）を目指します。2.2 で触れたとおり、皆伐には斜面崩壊危険度の上昇を伴うので、林業を断念した森林における林相改善などを目的とした皆伐を私たちは推奨しません。また、林業継続・断念にかかわらず、2.4 で緊急性が高いと判断された森林では切り捨て間伐などを緊急に実施することを検討する必要もあり、管理優先度は非常に高いといえます。これらの施業の判断を「[6. 管理優先度と施業を判断する](#)」で示します。

3. 経営管理が行われていない人工林を抽出する

健全な人工林を維持し、木材の価値を高めるためには、成長する木々の一部を間伐して適切な「混み合い度」を維持しなければなりません。手入れを怠れば人工林は混み合ってきます。したがって、混み合い度の高い人工林は経営管理が行われていない森林である恐れがあります。

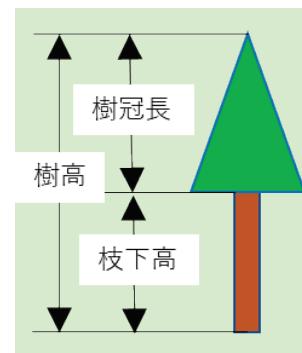
市町村の管内全域で混み合い度の高い人工林を探すために、広域を一度に観測できるリモートセンシング技術、中でも航空機レーザ計測（ALS）データを用いることを提案します。ALS とは、航空機から地上に向けてレーザパルスを多数照射し、その反射パルスにより地表の凹凸を計測する技術です。森林の場合、反射パルスを地面から反射したものと立木から反射したものに分け、地形とその上にある森林との両方を観測・解析できます。

混み合い度の指標として、相対幹距比、収量比数、樹冠疎密度、形状比、樹冠長率などがあります。これらのうち、ここでは ALS によって偏りなく推定できる樹冠疎密度と樹冠長率に着目します。樹冠疎密度は「林内の暗さ」(図 2(a))、樹冠長率は「枝の枯れ上がりの少なさ」(図 2(b)) と



$$\text{樹冠疎密度} = \frac{\text{樹冠投影面積}}{\text{林分面積}}$$

(a) 樹冠疎密度
「林内の暗さ」に近い



$$\text{樹冠長率} = \frac{\text{樹冠長}}{\text{樹高}} = \frac{\text{樹高} - \text{枝下高}}{\text{樹高}}$$

(b) 樹冠長率
「枝の枯れあがりの少なさ」に近い

図 2 ALS で計測しやすくイメージしやすい混み合い度の指標

ほぼ言い換えられるので、専門家でなくてもイメージしやすい指標でもあります。一方、これら以外の指標を ALS で推定すると、特に混み合った森林において、偏りや誤差が大きくなることが明らかになっていきます【T-1】。

なお、樹冠長率とは、単木の樹高と枝下高を測って求められる、単木ごとの指標です（図 2 (b)）。一方、ALS からは、単木ごとではなくある範囲に生えている複数の木々の平均的な樹高と樹冠長の観測により、平均的な樹冠長率が求められます。そこで、ALS から求められる樹冠長率のことを今後「平均樹冠長率」と呼びます。

樹冠疎密度および平均樹冠長率を用いて手入れ不足の人工林を探してみましょう。樹冠疎密度が高く（林内が暗く）、かつ平均樹冠長率が低い（枝が枯れ上がり、樹冠が短い）人工林を手入れ不足と判断します。対象地域を一辺が 20m の正方形のメッシュに切り分け、各メッシュに落ちたレーザパルスを集計して計算し、樹冠疎密度と平均樹冠長率の画像地図を作成します。それらを GIS 上で林小班界などと重ね合わせて、各林分の手入れ不足の状況を判断します。

樹冠疎密度と平均樹冠長率の画像をカラー合成すると、色合いから混み合い度が分かります。例えば、樹冠疎密度と平均樹冠長率の画像を白黒反転させてそれぞれ水色（G と B）、赤色（R）に割り当てると、手入れされた人工林は水色または白っぽく表示されます。一方、手入れ不足の森林、すなわち樹冠疎密度が高く、平均樹冠長率が低い林分は赤色に表示されます（図 3）【T-2】。

さらに、閾値を設けて手入れ不足の恐れがある人工林を抽出できます。例えば、樹冠疎密度が 80% 以上、平均樹冠長率が 30% 以下の森林を混み合った手入れ不足の恐れのある森林であるとすると、

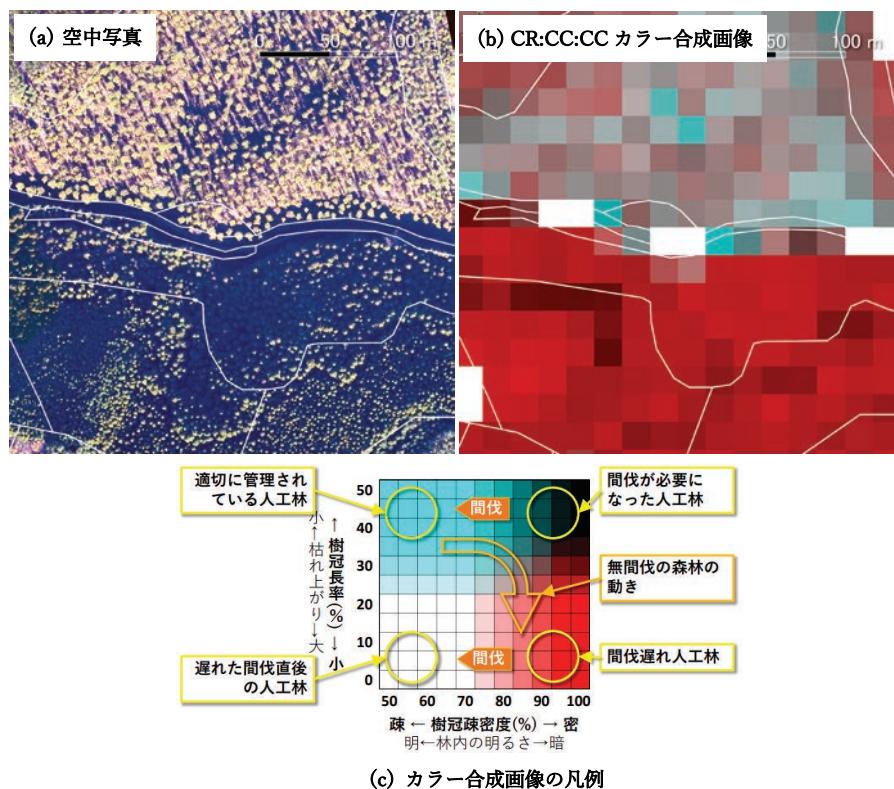


図 3 樹冠疎密度(CC)と樹冠長率(CR)で表した林分の手入れ不足の状況

間伐が遅れて混み合った森林は真っ赤に表示される（図 15 と同じ）

A市の私有人工林のうち63%を占めました。抽出の基準をより緩めた平均樹冠長率が20%以下の手入れ不足森林はA市の私有人工林の27%と推測されました。このように、これらの閾値は地域の状況や行政ニーズに合わせて自由に変更できます。

樹冠疎密度と平均樹冠長率は森林資源解析業務の一部として委託発注できます。もし森林資源解析業務は完了していても、既存のALSデータを再解析して作成できます。巻末の仕様書例を参考にしてください。

管内全域の手入れ不足人工林の分布状況を把握できれば、意向調査の準備や集約化構想の作成、意向調査後の現地確認の補助などに利用でき、さらに森林経営管理制度外の民有林管理施策一般へも活用が期待できます。

4. 斜面崩壊危険度を判定する

どんな山の斜面でも豪雨や台風によって崩壊する危険性をはらんでいます。基盤ごと崩れる深層崩壊の発生に対して森林が発揮する防止効果は小さい一方、表層土のみが崩れる表層崩壊に対しては、森林は表層土の中に根を張り巡らすことにより一定程度の防止機能を発揮します。しかし、たとえ現在は森林があったとしても、林業を将来にわたって続ける場合、皆伐再造林後の2、3齢級頃に前世代と次世代の根の量の合計が最小となり、斜面が最も脆弱となります【T-3】。

したがって、林業を継続するかどうかを判断する際には、林業の採算性ばかりでなく、皆伐後の斜面崩壊危険度も考慮する必要があると考えられます。つまり、たとえ林業の採算性がある程度見込めるに、皆伐に伴う将来の斜面崩壊危険度を考慮すれば林業を断念することも選択肢となりえます。

斜面崩壊危険度を市町村管内の民有人工林全域に対して示す方法を2つ提案します。これらの危険度情報は既往の情報を組み合わせて処理することで得られるので、新たにデータを取得する必要はありません。

1つ目は山腹崩壊危険度分布図です(図4)【T-4】。この方法は、「山地災害危険地区調査要領」(林野庁、令和6年)⁴のうち、「山腹崩壊危険地区調査実施要領」にある「雨量区分、地質、地形及び林況による山腹崩壊危険度点数表」に準拠し、地形情報など様々な地図情報を統合して山腹崩壊危険度点数を地域全体で自動的に算出します。その際、齢級として、森林簿による現在の林齢ではなく、危険度が最も高くなる2~3齢級を一律に与えると、育成单層林施業を続けた場合の最大の危険度点数が示されます。そして、同要領の「山腹崩壊危険度判定表」に従い、合計点数が100点未満の地点は危険度d(最低)、100点以上の場合は点数に応じて危険度c~a(最高)に位置付けます。

2つ目は0次谷分布図です(図5)【T-6】。0次谷とは谷頭部にある緩やかな凹地形のことです。表土が比較的厚く、地表水が集まりやすいため、崩壊が発生しやすい地形です。そのため、0次谷での皆伐や作業道等の作設は不適であるとされています。これまで、0次谷の所在は地形図や「CS立体図」などの地形表現図を判読することにより把握していました。しかし、肉眼判読では判読できる範囲が限られるので、市町村管内のすべての0次谷を示すことは容易ではありませんでした。新たな方法では、数値標高モデルから0次谷と思われる地形をすべて自動的に抽出して表示します。

⁴ 山地災害危険地区調査要領 https://www.rinya.maff.go.jp/j/saigai/saigai/attach/pdf/con_1-5.pdf

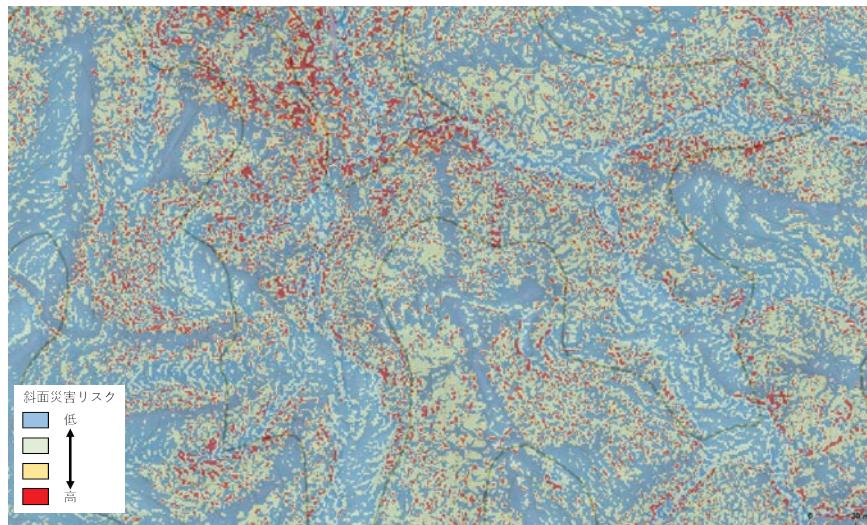


図 4 山腹崩壊危険度分布図

背景に国土地理院「地理院タイル 標準地図」を利用（図 19と同じ）



図 5 0次谷の抽出結果

■ 0次谷、■ 流送域

背景にCS立体および国土地理院「地理院タイル 標準地図」を利用

この0次谷抽出ツールを公開しました（ArcGIS用）⁵。

これらの情報の作成に必要な入力情報のうち、地形情報の算出には直近のALSデータから得られた数値標高モデルを使うか、なければ国土地理院の「基盤地図情報（数値標高モデル）」を使えます。土層深については、日本全国の土層深分布図を新たに作成し公開しました【T-5】。その他の入力情報もすべて公開情報から得られます。これらの情報を委託業務により作成する場合には、巻末の仕様書例を参考してください。

山腹崩壊危険度分布図や0次谷分布図は林業不適地を確定するものではありません。これらの情報を林業の採算性に関する情報その他と対比することにより、市町村が経営管理権を取得した森林

⁵ 0次谷抽出ツール（ArcGIS用） <https://arcg.is/0r9aK50>

において林業を継続するかどうかを判断する材料となります。また、集約化構想の作成に際して関係者間で斜面災害危険度を共有することにも役立ちます。さらに、0次谷分布図は現地での施業の際に伐採区域や路網設置場所の選定の参考ともなります。

5. 風害のリスクを評価する

我が国は台風の常襲地域であり、強風による森林の風害がたびたび発生しています。しかし、風害を防ぐにしても、ある特定の森林に実際に強風が吹くかどうかは台風の強さや経路など制御不可能な要素に因る部分が大きく、また強風が当たりそうな地形にある森林を別の場所に引越すわけにもいきません。したがって、風害に備えるためには、施業によって強風に対しより強い林相に誘導して森林自体の脆弱性をできるだけ取り除かなければなりません。

私たちは、林相による強風への耐性の違いを探るために、スギやヒノキのミニチュア模型で様々な密度や成長段階の人工林模型を作り、風洞の中でそれらを強風に曝す実験を行いました(図 6)。そして、林内の立木に当たる風の力の強さと根や幹の耐久力との関係から、根返り（根が土壌から引きはがされて立木が根株ごと倒れること）または幹折れ（幹の半ばで折れて立木の上部だけが脱落すること）が発生する風速（限界速度）を推定しました。その結果、以下の 2 点が明らかになりました【T-7】。

1つ目に、林木の成長に連れて、ある程度の混み合い度になるまで限界速度は上昇して風害に強くなりますが、無間伐のままさらにお過密になると限界速度は逆に少しづつ下降して風害に弱くなっていくことが分かりました。人工林が植栽されて無間伐のまま成長すると、林分密度管理図の上で植栽密度に応じた自然枯死線を下から上にたどります(図 7 点線)。林分密度管理図に限界速度(図 7 色付曲線)を重ねると、成長とともに限界速度は増加しますが、収量比数が 0.7 前後を超えると増加が緩やかになり、0.8 前後を超えると減少に転じることがわかります。これまでにも「一般に、収量比数 0.8 以上が混み過ぎとみなされます。」(「令和 6 年度森林総合監理士基本テキスト」⁶⁾ とされている経験則を、風害への脆弱性の観点からも確認できることになります。以上より、非常に混み合

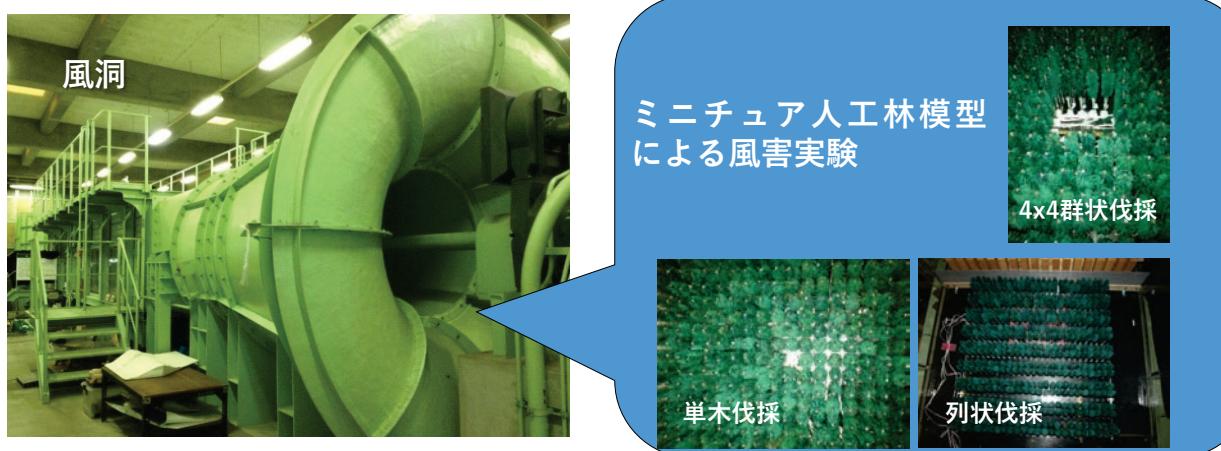


図 6 風洞内での強風実験

⁶ 令和 6 年度森林総合監理士基本テキスト

https://www.rinya.maff.go.jp/j/ken_sidou/forester/attach/pdf/index-72.pdf

った森林では、これ以上限界速度を低下させないために間伐などの施業早急に検討する必要があります。

2つ目に、間伐直後には脆弱性が増大することが確認されました(図 8)。列状間伐を行うと、残存列数にかかわらず、1伐の場合には無間伐に比べて1.4倍、2伐の場合には1.8倍の力が立木に加わることが分かりました。つまり、伐採幅を大きくして開いた空間を大きくするほど風害リスクが上昇します。風害リスクのために間伐を検討すべき森林で間伐によりさらに風害リスクが上がることを、どのように取り扱えばよいのでしょうか。

樹木を強風に強くするには幹を太らせることが重要です。間伐すると直後の風害リスクは上昇しますが、その後の肥大成長によって、間伐前よりも耐風性が高まることが期待できます。このことは、逆に、間伐を行っても十分な肥大成長が見込めない林分は、耐風性の強化が期待できないことを意味します。間伐後に十分な成長が見込めない林分は、全面的に更新するか針広混交林などの耐風性が高い森林⁷へ誘導していくことが望まれます(「6. 管理優先度と施業を判断する」)。

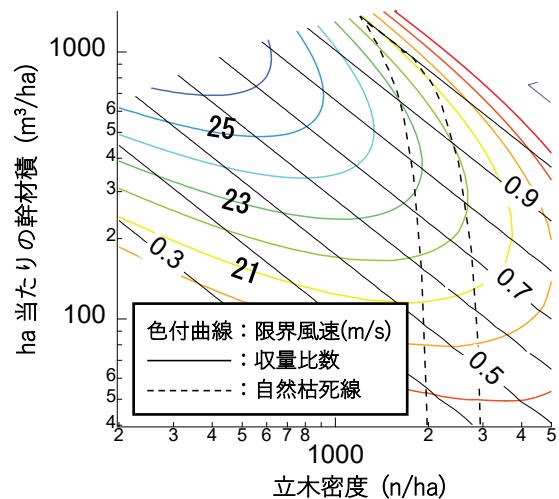


図 7 林分密度管理図上での風害限界速度

(機能編、図 25と同じ)

(北関東・東山地方地方 スギ)

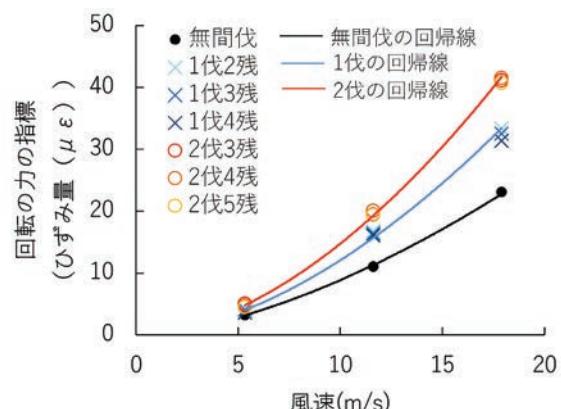


図 8 間伐すると立木に当たる風の力が強くなる

(機能編、図 26と同じ)

6. 管理優先度と施業を判断する = 間伐か、皆伐か

本章では、市町村森林経営管理事業を実施する、管理不足により混み合った森林の施業について検討します。これらの森林は、林業を続けることにした森林(「自然的条件が良く経済的に成り立つと見込まれるもの」の民間事業者に経営管理実施権を設定できていない森林)と林業を断念した森林(「自然的条件が悪く今後とも経済的に成り立たない森林」)とに分かれます。それぞれに対して間伐などの施業を実施して、林業の再開または森林の有する多面的機能の発揮を目指します。また、林業継続の是非にかかわらず、風害の危険性が高いなど、緊急性が高いと判定された林分に対しては緊急的な施業も求められます(図 1)。

⁷ Griess, V.C. and Knoke, T., 2011. Growth performance, windthrow, and insects: meta-analyses of parameters influencing performance of mixed-species stands in boreal and northern temperate

地域により、森林の成長や仕立て方も、木材生産の目標も、林業を取り巻く状況も様々なので、全国の統一基準を示すことは困難です。本章では、これまでに得られた知見に基づき、間伐を中心とした施業方法の選択に当たっての考え方をまとめました。また、様々な施業方法について概説します。地域の事例と比較しながら検討の参考にしていただければと思います。詳しくは、本手引書の「技術編：施業技術マニュアル」を参照してください【M-1】【M-2】。

6.1. 林業を継続することにした森林

これらの森林では間伐による長伐期施業を実施するなどにより、経営管理実施権を設定できる森林に誘導することが期待されます。

一般的に、混み合った森林を間伐せずに放置すれば、樹冠の広がりも長さも変わらないまま樹高だけが成長し続けます。その結果、幹の肥大成長は抑制されて細長くなり、林床は暗い今まで下層植生の発達も望めません。一方、間伐を行えば、残存木同士の間隔が拡がるので樹冠も縦横に大きくなり、幹の肥大成長は促進されて太くなり、林床は明るくなり下層植生が発達します(図 9)。そして、これらの効果は林冠が発達して再び閉鎖するまで継続し、その期間は間伐の程度によって変化します。

しかし、間伐しても残存木の成長が十分に促進されないのであれば、間伐による林業再開は困難なので、皆伐により一度リセットして再造林から始めることが選択肢となります。それでは、間伐による残存木の成長は予見できるのでしょうか。

私たちは、間伐後の樹冠長の回復に着目し、それと関係があると思われる因子をこれまでの観測データから統計解析により選びました。その結果、樹冠長の回復と関係の深い主な因子として、林齢、地域、収量比数が選ばれました。つまり、林齢が高く、既に非常に混み合っている（収量比数が高い）森林では、間伐後の樹冠長の回復も芳しくなく、また、地域による違いも大きいことが予想されました。樹冠長が回復しなければ幹の肥大成長の回復も期待できないので、一般的に高齢級または高密度の森林では間伐効果が小さいと考えられます【M-1】。

間伐効果が期待できるようであれば、立木の成長に適した規模の間伐を実施することが望まれます【M-3】。また長伐期施業を考慮する場合は、将来木施業の導入も考えられます【M-5】。そして斜面崩壊リスクの低い林分であれば間伐材の搬出も考慮できますので、状況によっては列状間伐の導

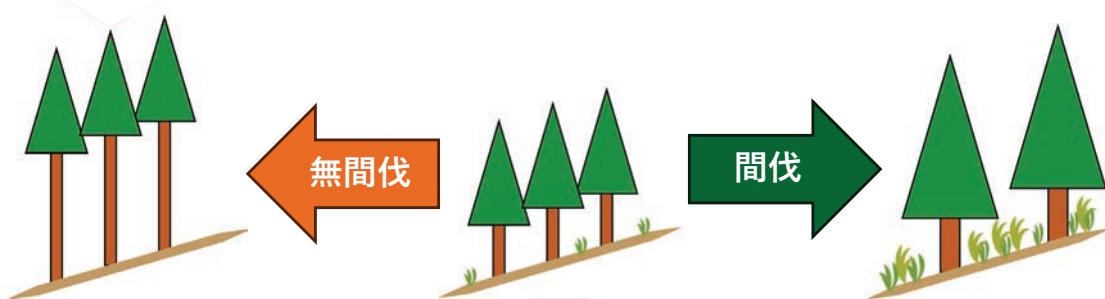


図 9 間伐を行う場合と行わない場合の概念図

間伐を行うことで残存木の樹冠サイズは増大し、幹の肥大成長は増加する。さらに、下層植生の発達も促進される。間伐を行わないと、残存木の樹冠サイズはそのままで、樹高成長が継続するので、幹の肥大成長は次第に減少する。下層植生の発達は望めない。

入も想定されます【M-4】。風害リスクが高く緊急性が高い場合は、まず風害リスクが低下する密度になるまでの間伐を行う必要があります【M-3】。

一方、間伐効果が期待できないのであれば、皆伐・再造林による世代交代を行うという通常の施業スキームに戻すことが望まれます【M-6】。再造林後に最大となる山腹崩壊危険度を軽減するため、「改良列間筋刈り」という新たな技術も紹介します【M-7】。

6.2. 林業を継続しない森林

これらの森林では間伐を繰り返して複層林化するなどにより、森林の有する多面的機能を発揮させることが期待されます【M-8】【M-9】。

風害リスクが高く緊急性が高い場合は、まずは風害リスクを下げるための間伐（切り捨て間伐）を実施します。その後、状況によっては繰り返しの間伐による針広混交化・広葉樹林化を目指します。間伐による風害リスク低減が難しい場合、一時的な斜面崩壊リスクの増加を許容して、強度の間伐による広葉樹の導入を目指すか、場合によっては広葉樹造林も検討します【M-6】【M-10】。

風害リスクが低い林分では、斜面崩壊リスクを高めないために、現時点では経過観察に留めるか、地形の改変等に十分注意しながら、弱度の切り捨て間伐を繰り返します【M-3】。弱度の間伐では、林冠の再閉鎖までの期間が短くなるため、定期的な確認が必要です。なお、ここでの間伐は残存木の成長よりも林床の光環境の改善を優先させることから、残存木に対する間伐効果については考慮しません。そして、木材生産以外の公益的機能を発揮させるため、将来的には、針広混交林・広葉樹林に誘導することを考えます【M-10】。

7. 森林保険＝危険を回避するために

森林の経営管理を自然環境の中で長期にわたり行えば、様々な森林被害に見舞われる危険があります。前章までに見てきたとおり、斜面崩壊の危険性はたとえ適切な経営管理を実施しても0にできません。また、風害の危険性も0にできず、しかも危険性を下げるための間伐が短期的には危険性を上げてしまうというジレンマに陥ります。さらに、火災や雪害など、様々な森林被害の危険性に曝されます。

これらの危険性を受け入れながら森林の経営管理を行っていくためのセーフティネットが森林保険です(図10)。間伐後のハイリスクな数年間を保険でカバーするのもリスクへの備えとして有効と考えられます【T-7】。経営管理権を取得した森林において将来の被害に備えるために、森林保険への加入について森林所有者と協議することを検討してください。



図 10 森林保険ポスター

■ 8. おわりに

ここで説明した方法には、すでに実装可能な段階のものも、実装するためには地域の状況に合わせて細かい調整が必要なものもあります。すでに実装可能なものについては、そのための仕様書例も巻末に添付しました。

これら的方法は、日本の森林経営管理に市町村の果たす役割がますます重要となる中で、地理空間情報やIT技術によりその業務を支援するための、現段階での一提案です。私たちの方法が市町村の業務の効率化に貢献し、さらに新しい方法やビジネスの種となって、より一層の林業の持続的発展及び森林の有する多面的機能の発揮につながることを期待しています。

技術編

管理優先度判定

ツールボックス

T-1. 航空レーザ計測（ALS）による人工林の管理状態マップ

ALS データから平均樹冠長率 CR と樹冠疎密度 CC を計算する方法および CR、CC の 20m メッシュの管理状態マップを作成する方法を説明します。このセクションで説明する ALS データは、市町村で一般的に行われている森林資源解析業務で整備される LAS 形式のオリジナルデータ org.las とグラウンドデータ grd.las（もしくは grd.txt）を前提としています。

■ 点群データを樹冠層と下層植生等に分離する

LAS 形式のオリジナルデータ org.las には、三次元位置(X,Y,Z)のほかに、レーザのリターン（パルス）番号 N、入射角 θ 、反射強度 I、飛行コース番号などの情報が含まれています。また、オリジナルデータから地盤面の点群データを抽出したグラウンドデータ grd.las（もしくは grd.txt）には、(X,Y,Z)の情報が含まれています。まず、グラウンドデータから 50cm 以下のメッシュサイズの数値地形モデル(DTM)を作成します（既にラスター化された 50cm～1m 程度のメッシュサイズの DTM があればそれを利用しても構いません）。次に、オリジナルデータの中のファーストリターンの点群データのみを対象として、点群データの Z から鉛直直下の DTM の標高値を差し引くことで、DTM によって正規化された Z（正規化 Z）を持つ点群データを作成します（図 11）。そして、『正規化 Z < -0.15m』の点は地中ノイズ（明らかに地面より低い点）として削除します（DTM の補間誤差を±0.15m と仮定）。一方、空中ノイズ（明らかに樹冠部より高い点）を削除するために、適切な専用コマンドやツールがある場合はそれらを使用してください。ない場合には、周辺の森林の最大樹高よりも十分に高く、高過ぎない任意の高さ（例:50m）を空中ノイズ閾値として設定し、『正規化 Z > 空中ノイズ閾値』の点を削除します。

さて、正規化された点群データには葉・枝・幹・下層植生・地盤面などの情報が混在していますが、まずは下層植生や地盤面と思われる点群データをノイズとみなすことを考えます。図 12 に、0.04ha のある地上調査プロット内の点群高を横軸に持つヒストグラムを示しますが、ノイズの分離の閾値は場所（地上調査プロットや後述するマップの各メッシュを意味します）によって変わりますので、動的な閾値を考えます。ここで、隣り合う点群高の十分位数(Decile)の差が最大になる二つの十分位数の組 (D_{N-1} , D_N) を選び、その中間の高さ $(D_{N-1}+D_N)/2$ を閾値とすれば、大部分のノイズが分離され、同時に樹冠層が適切に分離される様子が見て取れます。なお、樹冠が鬱閉した林分では地盤面付近の点群データが存在しないこともありますので、十分位数の計算の前に、プロット内の点群データに高さ 0m の疑似データ

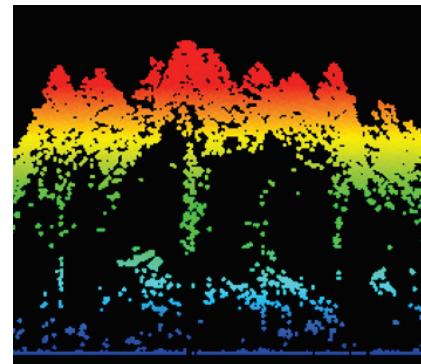


図 11 ファーストリターンの正規化点群高

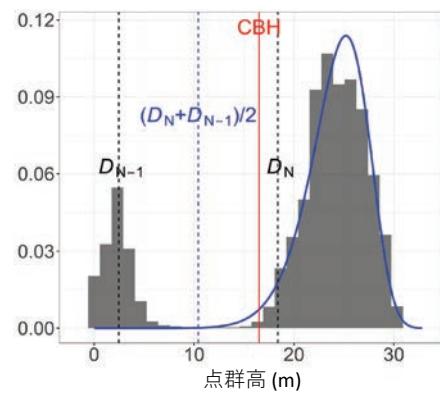


図 12 プロット内の正規化点群高ヒストグラム

を一つ追加しておくことで、動的閾値が極端に高くなるのを回避することが重要です（後述する樹冠疎密度 CC の計算時にこの疑似データは除外します）。

■ 平均枝下高 CBH、平均樹高 H、平均樹冠長率 CR を算出する

十分な数のプロットを調査した平均枝下高 CBH と平均樹高 H の実測データがある場合、各プロット内の動的閾値以上（樹冠層のこと）の点群データに適合するワイブル分布（図 12 の青色の曲線）の確率密度関数（式(1)）のパラメータをプロットごとに求めます。そして、全てのプロットを利用して、ワイブル分布の分位点関数（式(2)）で計算される分位点と実測の CBH（図 12 の CBH）との一致相関係数 CCC（式(3)）が最も高くなるときの確率 p を 0.1%～99.9%まで 0.1%ごとに探索します。つまり、この探索によってある確率 p で CCC が最大になるときの分位点を CBH の最良推定値とみなします。

$$f(h; \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{h}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{h}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (h \geq 0) \quad (1)$$

$$F^{-1}(p; \alpha, \beta) = \alpha \{-\ln(1-p)\}^{1/\beta} \quad (0 < p < 1) \quad (2)$$

$$CCC = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\bar{x} - \bar{y})^2} \quad (3)$$

ここで、 h はプロット内の正規化された点群高、 α 、 β はスケールパラメータとシェイプパラメータ、 p は確率、 σ_x 、 σ_y は平均枝下高の推定値と実測値の分散、 σ_{xy} はその共分散、 \bar{x} 、 \bar{y} は各平均値をそれぞれ表します。茨城県北部の民有スギ・ヒノキ人工林において 100 地点の CBH の実測データを使用して解析した事例では、ワイブル分布の 1.5% の分位点が CCC 最大の時でした。この CBH 推定と同様の手順で推定した H は 81.1% 点が最良の推定値でした。そして、 $100 \times (H - CBH)/H$ によって各プロットの平均樹冠長率 CR（百分率で表現）を計算します。

CBH と H の推定に必要な確率 p を対象地域内の地上プロット調査データを利用して導出すれば、その地域の推定値は最も正確になりますが、もし十分なプロット数の CBH の実測データがない場合は、上述した茨城県北部で調整した確率 1.5% の分位点 $F^{-1}(0.015; \alpha, \beta)$ か、福岡県久留米市で調整した $F^{-1}(0.065; \alpha, \beta)$ か、あるいはその中間の確率を適用した $F^{-1}(0.04; \alpha, \beta)$ を CBH の推定値としてください。同様に H の実測データがない場合は、例えば $F^{-1}(0.88; \alpha, \beta) \times 0.98$ を H の推定値としてください（これらの詳細は Takahashi and Tanaka (投稿中)⁸をご覧ください）。このように実測データを利用しない場合の CBH や H の推定値から算出される CR の精度や正確度は把握できませんが、プロット間の CR の相対的な大小関係は大きく異なりはしないものと推察されます。

■ 樹冠疎密度 CC を算出する

樹冠疎密度 CC はプロット内のファーストリターンの全点群数（ただし、疑似データ数' 1' を減算）

⁸ Takahashi, T. & S. Tanaka, Enhancing thinning efficiency in closed-canopy conifer plantations using dynamic threshold-derived live crown ratio and canopy cover from airborne discrete-return LiDAR data (Submitted)

に対する動的閾値以上の点群数の割合（つまり、上空から樹冠に照射した全てのレーザのうち、樹冠層に存在するファーストリターンの割合）を百分率（%）で表せばよいのですが、その CC に Korhonen et al. (2011)⁹で提案された以下の補正式（式(4)）を適用するとより信頼性を高めることができます。ただし、ALS 計測時のセンサの仕様や飛行コース取りによっては補正がうまく働くかない場合や信頼性が逆に下がる場合もあり得ることに留意してください。

$$CC = 0.0253 \times \theta_{scan} \times F_{max} \quad (4)$$

θ_{scan} および F_{max} は、それぞれプロット内の平均レーザスキャン角（スキャン角に負数があれば絶対値にしてから平均する）（単位： $^{\circ}$ ）と点群高の最大値（単位：m）を表します。

■ 平均樹冠長 CR および樹冠疎密度 CC の 20m メッシュマップ (管理状態マップ) を作成する

市町村で一般的に行われている森林資源解析業務では、ALS 計測に並行して 0.04ha の円形プロットによる地上調査がよく行われますが、そのようなサンプリング調査データを基本的に参照して CBH や H を推定する手順を踏んでいることを考えれば、プロットと同じ面積の直交メッシュ（20m × 20m）で当該市町村の森林域の管理状態マップ（CR と CC の広域マップ）を作成することが合理的であると考えられます。また、森林 GIS フォーラム「森林資源データ解析・管理標準仕様書」¹⁰の表 2.1 (p. 10) にあるとおり、林班や小班内の空間的な偏りを 20m メッシュ規模ならば把握できることからも、管理状態マップを 20m メッシュで作成することが有益であると考えられます。

20m メッシュの CR マップの作成ですが、十分なプロット数の CBH、H の実測データがある場合は、その実測データで導出した最良の確率 p_{CBH} と確率 p_H を使って、各メッシュ内の $F^{-1}(p_{CBH}; \alpha, \beta)$ と $F^{-1}(p_H; \alpha, \beta)$ を計算することで、CBH マップと H マップがそれぞれ作成され、両マップを使って CR マップができるになります。CBH、H の実測データがない場合は、先に具体的に挙げた複数の確率から適切な数値を選択して、各メッシュ内でその確率の分位点を計算して CBH、H および CR のマップを作成すれば良いことになります。

20m メッシュの CC マップの作成は、CC の導出上、地上調査プロットの情報は不要であり、基本的には各メッシュ内のファーストリターンの点群データを樹冠層とそれ以外に分離するだけで、その後は単純な割合計算でマップができることになります。Korhonen et al. (2011) の補正式(式(4))で CC を補正したい場合も、先に説明した通り、各メッシュ内の平均レーザスキャン角と点群高の最大値を式(4)に代入するだけです。

⁹ Korhonen L, Korpela I, Heiskanen J, Maltamo M. 2011. Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. *Remote Sens Environ.* 115(4):1065–1080. doi: /10.1016/j.rse.2010.12.011.

¹⁰ 森林 GIS フォーラム、森林資源データ解析・管理標準仕様書 Ver3.0 (2025 年 7 月版)

https://fgis.jp/wordpress/wp-content/uploads/2025/08/%E6%A3%AE%E6%9E%97%E8%B3%87%E6%BA%90%E3%83%87%E3%83%BC%E3%82%BF%E8%A7%A3%E6%9E%90%E3%83%BB%E7%AE%A1%E7%90%86%E6%A8%99%E6%BA%96%E4%BB%95%E6%A7%98%E6%9B%B8Ver3_0_2025%E5%B9%B47%E6%9C%88%E7%89%88fin.pdf

T-2. 管理状態マップから管理不足の恐れのある森林を抽出する

20m メッシュの管理状態マップ（樹冠疎密度 CC マップと平均樹冠長率 CR マップ）は、単独であるいはカラー合成して判読することで、管理不足の恐れのある森林を GIS 上で視覚的に評価することができます。また、CC と CR にそれぞれ適切な閾値を設定することで、具体的な数値で森林の管理状態を定義し、その閾値による管理状態マップを作成・表示できます。

樹冠疎密度、平均樹冠長率マップの単画像の判読による管理状態評価

図 13 に、スギ・ヒノキ小班を対象とした広域での 20m メッシュの樹冠疎密度 CC マップと平均樹冠長率 CR マップを示します（共に 0% から 100% の間の連続値です）。GIS 上での各マップの表示方法は好みで問題ありませんが、例えば CC については数値が高いほど色が濃くなるように表示し、CR については数値が低いほど色が濃くなるように表示すると、どちらのマップも色が濃いところほど森林の管理が不足している可能性が高いことが直感的にイメージしやすくなるかもしれません。

図 14 では図 13 を一部拡大し、同地域の空中写真とともに示しました。間伐が適切にされて来ていると考えられる場所（色が薄い ⇒ 管理林の可能性）では CC が低く CR が高い傾向が、樹冠が混み入った場所（色が濃い ⇒ 管理不足林の可能性）では CC が高く CR が低い傾向があります。また、CC が低く CR も低い場合などは、長年間伐遅れだった場所が間伐されて間もない状態なのかもしれません。このように、CC、CR が持つ意味や特徴を理解した判読は、林分の管理状態を評価する非常に有用な手段の一つと言えます。

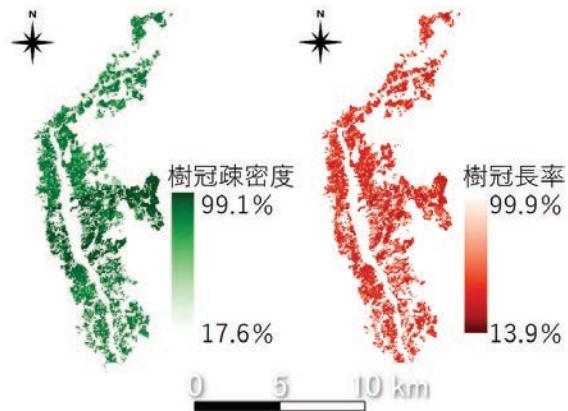


図 13 広域の 20m メッシュマップ



(a) 空中写真



(b) 樹冠疎密度 CC



(c) 平均樹冠長率 CR

図 14 空中写真と 20m メッシュの樹冠疎密度 CC マップと平均樹冠長率 CR マップの見え方

白線は小班界を示す。凡例は図 13 と同じ。

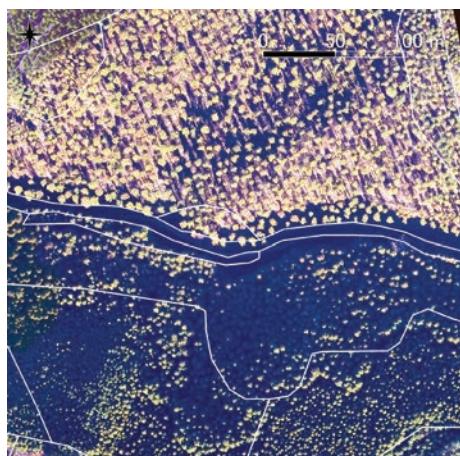
樹冠疎密度、平均樹冠長率のカラー合成マップ^{判読による管理状態評価}

前項では、樹冠疎密度 CC と平均樹冠長率 CR のマップのそれぞれを単独で判読する説明をしていますが、CC と CR のマップをカラー合成したマップを作成して、管理状態を判読（判断）することも可能です。図 15 に、R:G:B に CR:CC:CC を割り当てて作成したカラー合成マップを示します。

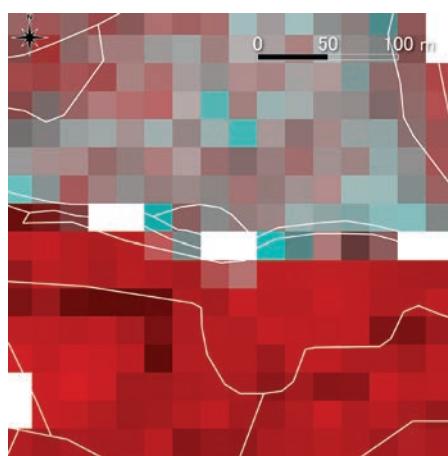
カラー合成マップでは、CC と CR の相互関係が反映された色分け表示がされるため、前項の CC マップと CR マップの単独の判読と同様に、合成色で表現される CC と CR の持つ意味や特徴を理解した判読もまた林分の管理状態を評価する非常に有用な手段の一つと言えます。

樹冠疎密度、平均樹冠長率マップの閾値処理による管理状態マップ作成

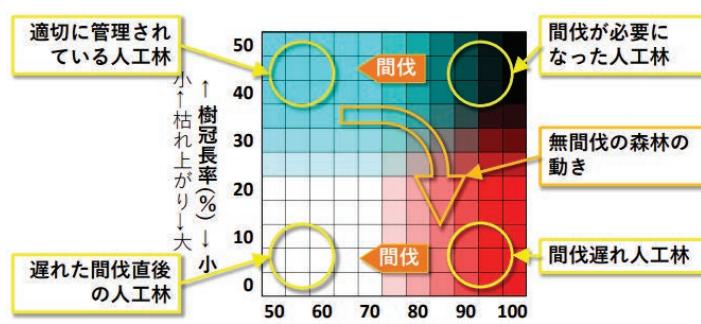
ここでは、前項までの判読による管理状態の評価ではなく、森林の管理の程度に対して、CC マップと CR マップのそれそれぞれにある閾値を設定して、よく管理されている林分、間伐が必要な林分、あるいはかなり過密な林分などに区分した管理状態マップを作成する方法を説明します(図 16)。



(a) 空中写真



(b) CR:CC:CC カラー合成画像



(c) (b)図のカラー凡例

図 15 20m メッシュの CR:CC:CC のカラー合成マップの見え方

画像の上部の小班は強度に間伐されている一方、画像の下部の小班は樹冠が非常に鬱閉している。これらの違いがカラー合成マップではそれぞれ水色系と赤系で表現されている（白線は小班界を示す）。

- ① 樹冠疎密度 CC マップの個々のメッシュは、20m メッシュ内の樹冠と樹冠の隙間の空隙率の大きさを表していますので、例えば間伐が行われたばかりの林分であれば空隙率が大きく(CC は小さく)、時間が経過すると、樹高および樹冠の成長と共に樹冠が閉鎖する(CC は大きくなる)ことになりますが、樹冠閉鎖の基準（閾値）を例えば CC=80% とみなすと、CC<80% の林分であれば、過去に施業が行われている管理林分 (M1) と定義できます(図 16(a))。
- ② $CC \geq 80\%$ の林分の中には、樹冠閉鎖して間もない林分や時間が経過していても樹高成長が旺盛であれば樹冠長率 CR が大きい値を維持できている健全な林分（管理林分）、樹高成長が枝

の枯れ上がり速度に追いつかないことで CR が小さくなっている林分（要間伐林分）や、そのような地位の低い林分などで過密状態が著しい林分（超過密林分）などが様々に存在すると考えられます。そこで、 $CC \geq 80\%$ の林分を対象として、例えば $CR \geq 30\%$ の林分を管理林分(M2)、 $20\% \leq CR < 30\%$ の林分を要間伐林分、 $CR < 20\%$ の林分を超過密林分とそれぞれ定義します（図 16(b)）。

- ③ M1 と M2 を合わせて管理林分とみなした後、管理林分・要間伐林分・超過密林分の 3 つを色分け表示すれば、管理状態マップができることになります（図 16(c)）。

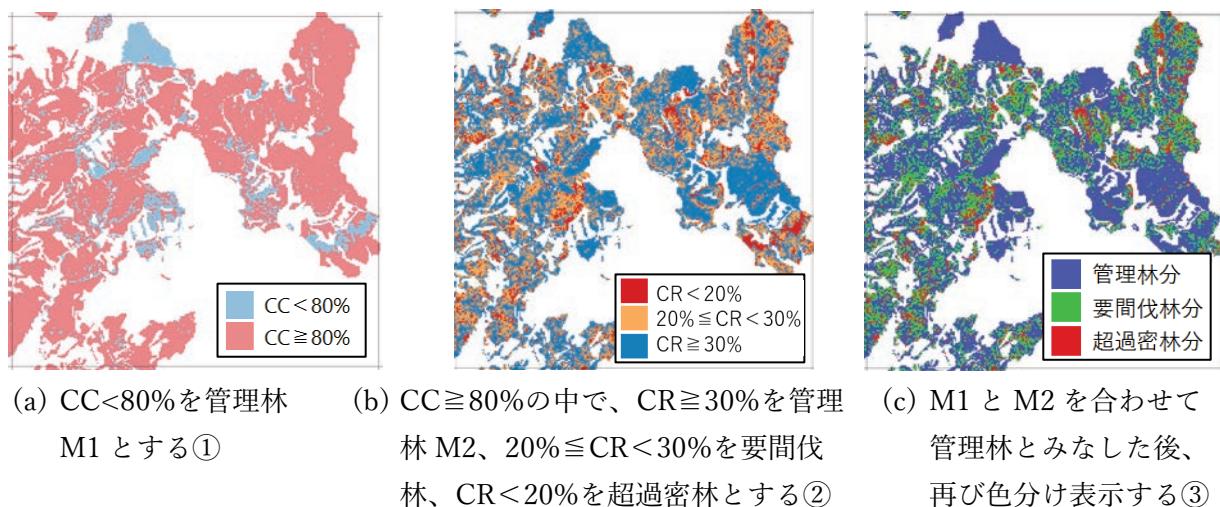


図 16 樹冠疎密度 CC と平均樹冠長率 CR に閾値を設けて管理度マップを作成する手順

■ 管理状態の判断に用いる樹冠疎密度、平均樹冠長率の閾値について

管理林分か否かを判断する際の CC の閾値を 80% とすることの科学的な根拠はありません（今は未だわかっていません）が、森林計画の制度上は 80% で問題ないでしょう。

要間伐林分の CR の上限の閾値は 40%、35%、あるいは 30% とする文献、CR の下限の閾値（すなわち、超過密林分との境）については 30% あるいは 20% と解釈できる文献などがあります¹¹。CR の上限および下限の閾値の設定に悩む必要はなく、目的や地域の実情に応じて自由に閾値を設定してください。また、要間伐林分と超過密林分を区別しないで、併せて管理不足林分として扱うなど、さまざまな用途に応じた管理状態マップを作成すると良いでしょう。

¹¹ 令和 6 年度森林総合監理士基本テキスト（前出）

https://www.rinya.maff.go.jp/j/ken_sidou/forester/attach/pdf/index-72.pdf、藤森隆郎（2010）間伐と目標林型を考える、林業改良普及双書 No.163、全国林業改良普及協会（発行所）, 191 p., Smith DM, Larson BC, Kelty MJ, Ashton PMS. 1997. The Practice of Silviculture—Applied Forest Ecology, ninth ed, 560 p., Schomaker ME, Zarnoch SJ, Bechtold WA, Latelle DJ, Burkman WG, Cox SM (2007) Crown-Condition Classification: A Guide to Data Collection and Analysis. Gen. Tech. Rep. SRS-102. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 78 p.、など

T-3. 皆伐後すぐに植栽した場合のスギ根系の斜面崩壊防止機能

毎年のように豪雨や地震により斜面崩壊が多く発生しています。崩壊に対する斜面の抵抗性を少しでも高めるためには、根の特性を考慮して森林を管理することが重要となります。スギの場合、皆伐すると10年弱で急激に抵抗力が減少すること、一方で、すぐに植栽をすれば10年以降の回復速度も大きいことがわかりました。

斜面崩壊に対する根の機能

斜面では重力の影響を受けて土層は常に下方へ移動しようとする状態にあります。これに対し、土自体が保有する抵抗力と、森林の場合であれば樹木の根系が発揮する力により、土層は通常安定を保っています。しかし、降雨により土が発揮する抵抗力が低下したり、地震により斜面下方へ移動させようとする力が増大したり、あるいは樹木の伐採により根系の抵抗力が低下したりすると、土層が発揮する抵抗力よりも下方へ移動させようとする力が上回り崩壊が発生します。

降雨や地震などの自然現象は制御することが難しい反面、樹木根系が発揮する抵抗力は森林の状態に依存するため、これをどのようにコントロールするのかが重要ということです。

根系が発揮する抵抗力を評価する場合、最もシンプルな手法として「根の引抜抵抗力」が計測されます(図17)。対象とする樹木の近傍の土を掘り出し、表出した根をペンチ状の特殊治具で挟み込み引き抜く際の力を計測して、根の直径との関係を調べる調査です。この調査は多くの樹種を対象に行なわれてきており、根の引抜抵抗力は根の直径のべき乗で表すことができるとされています。

$$N = a \times D^b \quad (5)$$

ここでNは引抜抵抗力、Dは根の直径で、aおよびbは定数です。スギの場合は、bがおよそ1.5になります。太い根は影響が大きいことになります。

根の抵抗力の経年変化

樹木は成長につれて根の量を増やし、また、各々の根も太くなります。他方、伐採された場合は、根は腐朽して脆くなり力を失っていきます。ここでは、50年生のスギ林を皆伐した後すぐにスギを



図17 根の引抜試験の様子

植栽した場合に、その林分で発揮される根の抵抗力の経年変化を考えます。

先述の通り、生根の引抜抵抗力は根の直径のべき乗で表すことができます。伐採からの年数が異なる根株の根を対象に引抜抵抗力を調べた結果、生根と同様に、根株の、生きていない根の引抜抵抗力は根の直径とべき乗の関係にあることがわかりました。つまり、新規植栽もしくは皆伐実施から何年後の樹木に対し、斜面崩壊の潜在すべり面にどれくらいの太さの根が何本あるのかがわかれれば、林分で根が発揮する抵抗力を推定することができます。各々の時点での根の分布については、既往研究で詳細に調査がなされており、ここでは、新規植栽から 10 年後、その後は 5 年ごとに 50 年後まで調べられた結果を使用しました。伐採後の抵抗力の低下については、皆伐された 50 年生の樹木の根が太さと位置を保ったまま腐朽が進行すると仮定して、1 年後、2 年後、4 年後、7 年後、8 年後のべき乗関数に導入して、根の抵抗力を算出しました。

伐採に伴う根の腐朽による抵抗力の変化は、伐採からの年数に比例する減少としてあらわされ、伐採から 9 年弱で抵抗力が消失することが示されました。他方、新規植栽からの成長にともなう変化は、およそ 7 年後から 15 年後くらいまでに大きく増大し、25 年後程度からはほぼ一定値に収束するロジスティック関数で表現されることがわかりました。これら 2 つの関数を足し合わせると皆伐後の根の腐朽による抵抗力の減少と、新規植栽後の根の成長に伴う抵抗力の増大の両方の効果が示されることとなります。その結果、10 年弱で抵抗力が最小値を示すまでに急激に減少するが、一方で、その後回復も早くおよそ 25 年後には元に戻ることがわかりました。つまり、皆伐を行うと急激に抵抗力が低下するのでその実施は慎重な検討が必要であること、他方、元の抵抗力の回復を急ぐためにも皆伐後は速やかに植栽することが重要であることが明らかになりました(図 18)¹²。

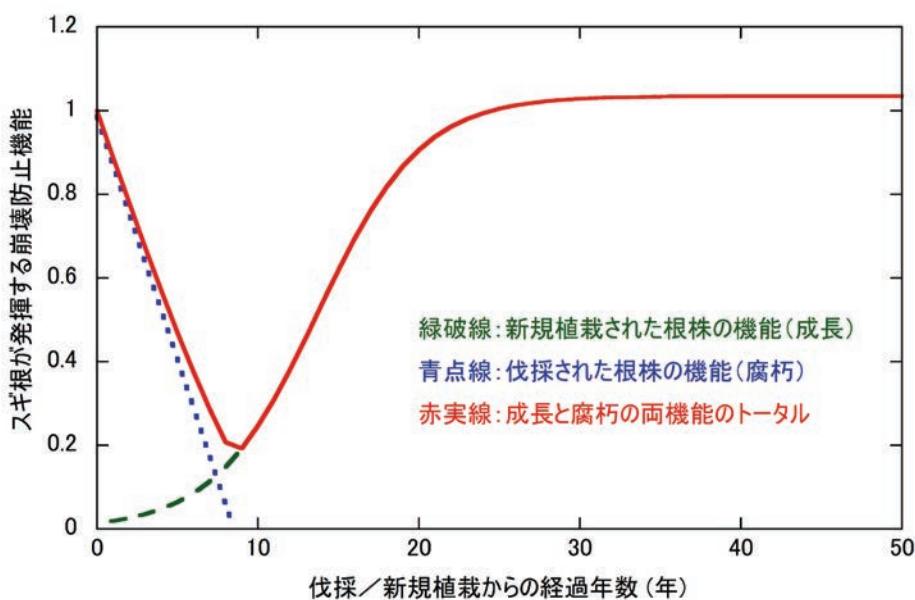


図 18 スギ根が発揮する崩壊防止機能の経年変化

¹² Okada et al. (2023) Changes in slope stability over the growth and decay of Japanese cedar tree roots, Forests 14(2): 256, <https://doi.org/10.3390/f14020256>

T-4. 山地崩壊の発生危険度を知る

山地斜面で崩壊が発生しやすい場所には特徴的な「地形」ができます。特徴的な「地形」を把握し、ほかの要因も考慮したうえで崩壊危険度を総合的に判断する必要があります。ALS からえられる詳細な地形情報とほかの要因項目の最新情報を組み合わせることで、斜面の危険度を評価できます。

■ 山地崩壊が発生しやすい場所とは？

山地斜面が崩壊する要因は、大きく分けて外的要因と内的要因に分かれます。外的要因とは、雨や地震など外部から斜面に与えられる要因です。一方の内的要因とは、山地斜面の形状（地形）や地質、土層の厚さ、成立する植生の状況など、その場所のもつ条件です。斜面で崩壊が発生するのは、外的要因に対する内的要因の弱さ（崩れやすいかどうか）に依存するといえます。

山地斜面で崩壊が発生しやすい場所には特徴的な「地形」ができます。そのような「地形」はその場所で過去に発生した現象の痕跡であり、そのような場所を把握し、評価することで、崩壊が発生しやすい山地斜面の場所を知ることができます。一方で、特徴的な「地形」があったからといって、その場所がすべて一律に危険というわけではありません。

上述のとおり、崩壊が発生する内的要因には「地形」のほか「地質」や崩壊物質となりうる斜面の「土層の厚さ」、成立している「植生の状況」などがあります。同じ「地形」でもこれらの状況が異なると、外的要因である雨や地震に対する崩壊のしやすさも異なります。特徴的な「地形」を把握し、ほかの要因も考慮したうえで、崩壊危険度を総合的に判断する必要があります。

■ 斜面の危険度をどう評価するか？

林野庁では山地災害危険地区調査実施要領を定め、その中で斜面の自然条件を総合的に点数化するために「雨量区分、地質、地形及び林況による山腹崩壊危険度点数表」（以下、点数表）を示しています（表 1）。この点数表により上記の降雨条件（多雨地域か少雨地域か）、地形（傾斜、曲率）、土層厚、齢級、地質条件から山腹崩壊危険度を点数としてあらわせます。そして、同要領の「山腹崩壊危険度判定表」により、点数を a、b、c、それ以外の 4 段階の危険度に区分できます。これらの点数や危険度を基に斜面の危険度を評価することで、対象とする森林の斜面に適した対策を考えることができます。

点数表に与える調査項目のうち、地形条件については地形図等から傾斜や曲率などの地形量【トピックコラム】を読み取って算出します。ALS などの最新技術によってえられる地形データを使用すれば、より詳細かつ正確な地形量が算出できます。地質や植生についても従来よりも広域、面的に、かつ詳細なデータが入手、利用できるようになっています。

土層厚については、これまで地域ごとの詳細なデータがなく、一定値あるいは傾斜による重みづけで推定していましたが、機械学習を利用した本プロジェクトの研究成果により、地域性を持った土層厚の分布データを作成できました【T-5】。このデータを用いることで、従来よりも現地に適した斜面のリスク評価を行うことができます。

齢級は、他の調査項目とは異なり、時間とともに変化し続けます。しかし、これからも林業を継続する場合には、将来皆伐・再造林して最も危険となる 2-3 齢級における危険度に留意することが必要です（表 2）。

以上のように、林野庁の点数表に基づきつつも、個別の調査項目に新しい情報や技術を適用することで広域での危険度評価を可能にしました。ここで採用した個別の調査項目の算出と統合の流れを表2に示します。

表1 山地災害危険地区調査実施要領（林野庁、R6年度版）の山腹崩壊危険度点数表

※配点はこれまでの研究成果や経験的な知見に基づくものであり、恒常的に見直されている。

※0次谷の谷線が通過する箇所には15点加算する変更も加えられた。

雨量区分、地質、地形及び林況による山腹崩壊危険度点数表（多雨地域）

調査項目	単位	区分	地質						
			第1類	第2類	第3類	第4類	第5類	第6類	第7類
1	傾斜	% %	0~30	0	0	0	0	0	0
			31~50	8	16	17	22	27	25
			51~70	42	31	51	52	47	48
			71~90	62	48	59	55	69	57
			91~	70	56	51	60	59	44
2	縦断面形		凹形	30	24	25	26	29	25
			平滑	22	19	10	5	16	8
			複合	8	14	0	0	0	13
			凸形	0	0	5	5	6	0
3	横断面形	度	~150	20	19	25	26	29	25
			151~210	30	24	20	14	25	13
			211~	0	0	0	0	0	0
4	土層深	m	0.5以下	0	0	0	0	0	0
			0.5~1.0以下	6	5	3	3	4	3
			1.0~2.0以下	10	8	8	9	10	8
			2.0超	20	16	17	17	20	16
5	齡級		1	34	26	27	28	33	28
			2~3	50	40	42	43	49	41
			4~7	36	31	30	31	37	30
			8~11	34	26	27	28	33	28
			12以上	30	24	25	26	29	31

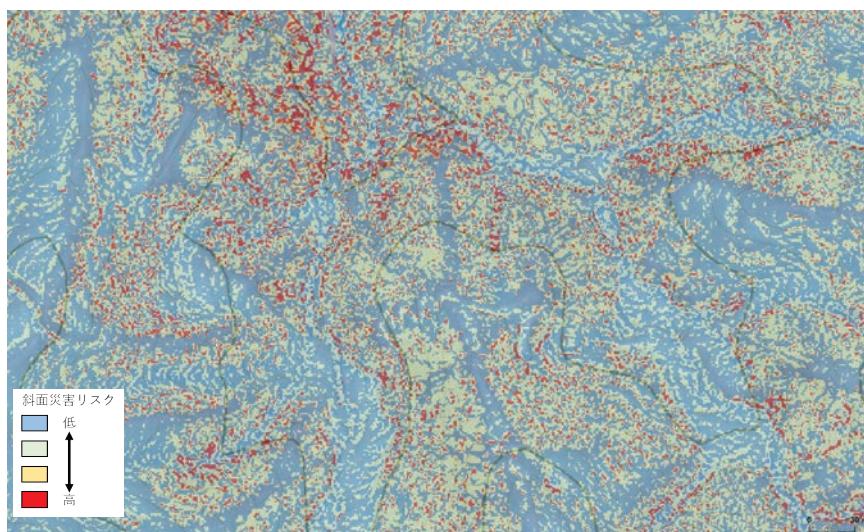


図19 山腹崩壊危険度点数表（林野庁、R6版）に基づく斜面のリスク評価結果

齡級を2-3齡級（若齡林）とした場合の斜面のリスク評価結果。赤い範囲が多い斜面ほど崩壊リスクが高いことを示す。伐採し、若齡林となることで、リスクが高くなる斜面では、施業等を行う際には留意する必要がある。背景に電子地形図25000（国土地理院）を加工して利用。

表 2 山腹崩壊危険度を算出するためには必要な調査項目の処理（山地災害危険地区調査要領（令和6年3月版）に準拠）

必要な情報 (調査項目)	1. 入力データ(例)	2. データの処理	3. 点数表 ^{*1} に適合した区分	4. 積算	5. 危険度判定
地域区分	都道府県 ---		都道府県ごとに「多雨地域」または「非多雨地域」に2区分		
地質	産総研「20万万分の1日本シームレス地質図®」 https://gbank.gsi.jp/seamless/	対象地域の切出しと重ね合せ、ラスター化	地質による7区分		表-1=1 (多雨地域) または表-1 (非多雨地域) 表-2 (非多雨地域) 基づき、表-6-1 または表-6-2 (非多雨地域) 各区分による危険度点数を求める積算が現に山崩崩壊が発生している箇所の積算点箇所が100点未満となつた場合には100点に危険度を判定
傾斜 ^{*2} (%)	傾斜計算 ^{*3} (例えば、QGIS の傾斜による5区分 SAGA の「Slope, Aspect, Curvature」で計算)	縦断曲率計算 ^{*3} (例えば、「凹型」、「平滑」、「凸型」の3区分 ^{*4} OGIS の SAGA の「Slope, -0.015以下：凹型、0.015以上：凸型、 Aspect, Curvature」で計算)	横断曲率計算 ^{*3} (例えば、「凹型」、「平滑」、「凸型」の3区分 ^{*5} OGIS の SAGA の「Slope, -0.015以下：谷型(点数表の「～150」)、 Aspect, Curvature」で計算)	平面曲率計算 ^{*3} (例えば、「凹型」、「平滑(同「211～」)」、「尾根型(同「211～210」)」、それ以外：平滑(同「151～210」))	合計点による危険度点数を求める積算が現に山崩崩壊が発生している箇所の積算点箇所が100点未満となつた場合には100点に危険度を判定
縦断面形 ^{*2} (m ⁻¹)	数値標高図(DEM) 航空機レーザ計測(ALS)による詳細なものを推奨	縦断面形 ^{*2} (m ⁻¹)	縦断面形による3区分 ^{*5} OGIS の SAGA の「Slope, Aspect, Curvature」で計算	横断面形による3区分 ^{*5} OGIS の SAGA の「Slope, Aspect, Curvature」で計算	合計点による危険度点数を求める積算が現に山崩崩壊が発生している箇所の積算点箇所が100点未満となつた場合には100点に危険度を判定
土層深 (m)	全国の土層深予測マップ [T-5]、図 21	対象地域の切出しと重ね合せ	土層深による4区分		補正
階級	現状評価 森林 GIS 等か [最脆弱時評価]なし	現状評価 ラスター化 [最脆弱時評価]なし	現状評価 階級による5区分 [最脆弱弱時評価]「2～3階級」区分に固定		
0次谷 ^{*2}	数値標高図(DEM) (同上)	0次谷の抽出 [T-6] ラスター化	0次谷、「それ以外」の2区分 [現状評価]による5区分 [最脆弱弱時評価]「2～3階級」区分に固定	「0次谷」には 15点加算	
収量比数 (Ry)	現状評価 森林 GIS 等か [最脆弱時評価]なし Ry [最脆弱時評価]なし	現状評価 ラスター化 [最脆弱時評価]なし	現状評価 Ry による「疎」、「中庸」、「密」の3区分 [最脆弱弱時評価]「疎」に固定	「疎」、「密」には 3点加算	

*1 「雨量区分、地質、地形及び林況による山腹崩壊危険度点数表 (多雨地域)」(同要領 表-1-2)を示す

*2 地形に関する調査項目(傾斜、縦断面形、横断面形、0次谷)は、同要領における地形図判読ではなく、DEMを用いた計算により求められる

*3 地形項目の計算は計算機への負荷が大きいので、高精度DEM(例えば0.5m メッシュ)では計算が困難な場合には、5m メッシュ程度まで間引いて計算してもよい

*4 同要領ではこの他に「複合」を加えた4区分となつていてるが、詳細なDEMを使う場合にはこれら3区分に収束できる

*5 曲率の算出値は使用するツールにより異なる場合があるので、必要に応じて区分曲率を調整する

■ トピックコラム：地形量と地形種

地形の情報には、「地形量」と「地形種」があります。地形量とは標高や傾斜、曲率など、長さや面積、あるいはそれらの比などで定量化できる形態要素です。上述した山地災害危険地区調査実施要領では、地形の情報のうち、地形量を得点化し、ほかの要因項目と組み合わせることで、斜面崩壊の危険度を評価しています。一方の地形種とは特定の成因によって形成された特定の形態的特徴を持つ地形であり、地すべり地形や0次谷、扇状地、崖錐等があります。地形量が同じであっても地形種によっては形質や地質、形成された時期によって性質（崩れやすさ）が異なることがあります。斜面崩壊のリスクを評価する際には、地形量だけではなく、地形種も評価することが重要です。しかし、地形種は地形量とは異なり数値化しづらく、技術と経験を要する目視判読作業が必要です。

近年、上記の地形種を容易に判読するためにALSデータからさまざまな微地形表現図が考案、作成されています。CS立体図もその一つです(図20)。CS立体図はALSデータからえられる標高、傾斜、曲率という3つの地形量を、異なる色調で彩色して透過処理することで立体表現した図法です。2012年に長野県林業総合センターで考案され、現在では多くの自治体や民間企業などで作成、利用されています。林野庁ではCS立体図を利用した危険な地形種の判読を普及させる一つとして、「CS立体図を使用した地形判読マニュアル」を作成し、公表しています。このような地形種の判読結果と山地災害危険地区調査実施要領を利用したリスク評価を合わせて活用することで、より現場に適した斜面のリスク評価を行うことが可能となります。

地形種は数値化しづらいと上述しましたが、これは自動的に判読（抽出）することが難しいこともあります。すべての地形種を自動的に抽出することは難しいのですが、これまでに斜面崩壊の危険性が高い地形種のひとつである0次谷については、自動的に抽出することが可能となりました【T-6】。自動抽出された0次谷の候補はすべてが正しいわけではなく、目視判読等による精査は必要ですが、これらをうまく使いことにより、リスク評価を行う際の作業の効率化が期待されます。

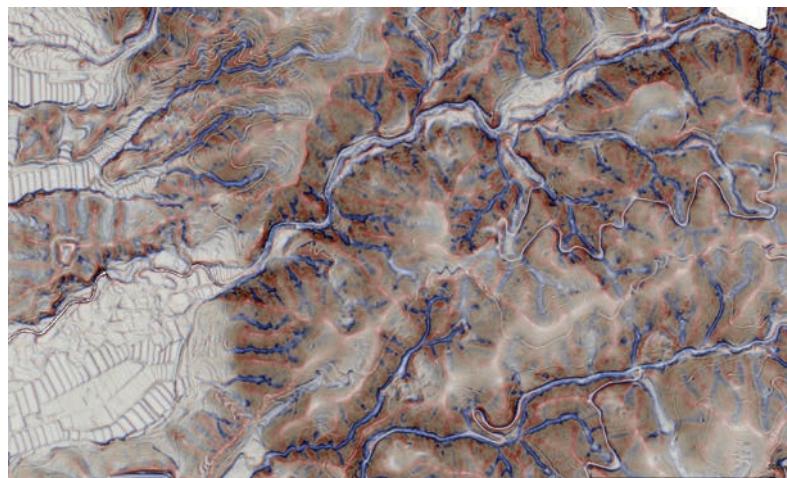


図20 CS立体図

T-5. 土層深の測定とマッピング

山地崩壊危険度を推定するために、土層深を与える必要があります。これまで土層深の地域ごとの分布データはなく、一定値あるいは傾斜による重みづけで推定していました。ここでは、「点」で観測した土層深をもとに機械学習により、土層深を「面」として推定することに成功し、日本全国の土層深分布図を公開しました。

■ 土層深とは

対流圏から地下奥深くの岩盤に至るごく薄い地球の表層部はクリティカルゾーンと呼ばれ、人間を含むあらゆる生物の生存基盤となっています。このうち、地表より下の部分は、植物由来の有機物の影響を受けた「A層」、岩石風化に由来する粘土等の小粒子や上層から溶脱した集積物による「B層」、風化した岩石による「風化層（C層）」、これらABC層に加え未固結の岩石も含む「レゴリス」、固結した岩盤上部の僅かに透水性がみられる層（固結層の一部）で主に構成されています。日本語の「土層」は使われる学問分野・文脈によって範囲が異なる用語ですが、一般にはA層+B層（=土壤）を指す場合と、これに風化層や未固結層を含む場合があります。いずれにしても土層はクリティカルゾーンにおける主要な構成層であり、その性質や量（厚さ）の地理的な分布は農林業、水資源、そして山地では斜面崩壊リスクなどを通じて我々の生活環境に大きく影響しています。

■ 土層深の分布を推定する

土層の厚さを測定する最も基本的なアプローチは、縦穴を掘ったり露頭を見つけたりして土層の断面を直接観察する方法です。色や性質の違いから層位を分け、各層の厚さを決定します。土壤サンプラー やボーリング試験などによってコア（円筒状のサンプル）を採取してこれを観察することもできます。もう一つのアプローチは、先端が尖ったステンレス製の棒を地表から挿入して、どこまで入るか？深度に対して抵抗値がどのように変化していくか？を簡易貫入試験機や土層強度検査棒などの器具を用いて測定する方法です。土層の抵抗値（硬さ）の変化と層位の性質には関係があるため、抵抗値の変化量から各層の厚さを推定できます。断面の作成やボーリング試験は調査コストが非常に大きく多地点を測定する目的には適していないため、山地で土層深の空間分布を明らかにするためには簡易貫入試験器や土層強度検査棒による測定がよく行われます。

測定された土層深は「点」のデータです。その空間分布を分かりやすく把握したり斜面の危険度評価に用いたりするためには、これを「面」のデータに変換する必要があります。この変換技術を空間内挿、空間モデリング等と呼びますが、現在ではこれに機械学習（AI）の技術が応用されています。ある地点（緯度経度）における土層深は、その地点の土層生成の歴史を反映しています。降水・高温による岩石の風化、斜面上部から下部への浸食と堆積、植物による有機物投入、火山灰（テフラ）の降下など、多岐にわたる要因が複雑に作用することで現在の土層が成立しています。このことから、土層厚を目的変数に、降水量・気温・地形・植生・テフラ降下量等の環境因子を説明変数にした回帰式を機械学習モデルで作成することにより、環境因子から土層厚を推定できます。ある地域における標高データなど環境因子の地理空間情報を収集することにより、域内の全地点における土層深を回帰式から推定し、マッピングすることができます。

■ 日本全国の土層深の分布

この手法を全国の山地に適用した例を図 21 に示しました¹³。森林総合研究所が提供するインターネット土壤情報閲覧サービス「森林土壤デジタルマップ」¹⁴で閲覧できるほか、地図データのダウンロードも可能¹⁵です。ただし、このマップは全国・市町村スケールで土層深の分布傾向を俯瞰するのには役立ちますが、特定の斜面の崩壊危険度を評価する目的には適していません。より実態を反映した危険度評価のためには現地に赴いて複数地点で土層深を実測し、評価対象地域に最適化されたマップを作成する必要があります。

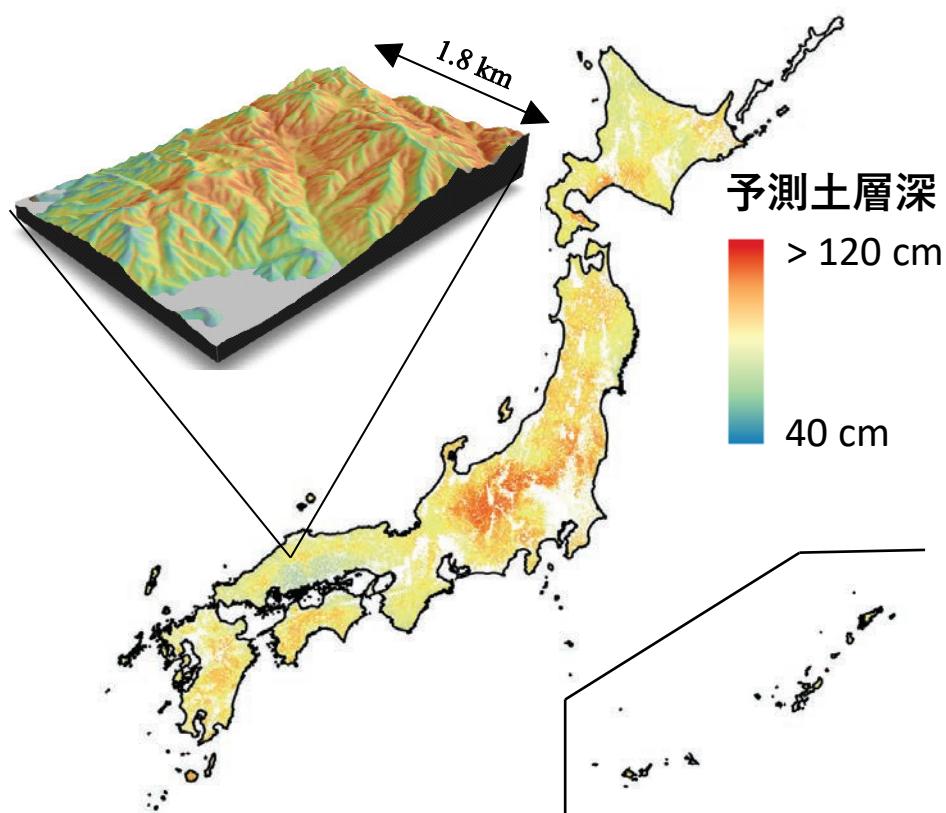


図 21 全国の山地・丘陵地における土層深(A層+B層)の予測マップ

※空白は平野部のため予測の対象外。通常の土壤調査はB層の途中であっても1~1.5 mで中断する例が多いため、特に1 m以深の土層は著しく過小評価されていることに留意する必要がある。

¹³ Yamashita et al. (2024) Geoderma 116896

¹⁴ 森林土壤デジタルマップ <https://www2.ffpri.go.jp/soilmap/>

¹⁵ Yamashita et al (2024) Predictive map of soil thickness probability in hilly and mountainous areas of Japan <https://doi.org/10.5281/zenodo.11000531>

T-6. 崩壊危険地形（0次谷）の抽出技術の開発

斜面崩壊のリスクを評価する際には、地形量だけではなく、地形種も評価することが重要です。本プロジェクトにおいては、斜面崩壊の危険性が高い地形種のひとつである0次谷を、航空機レーザ計測(ALS)データより自動抽出し、ポリゴンデータとして出力するツールを開発しました。

■ 0次谷とは何か？

谷地形の最上部で凹地形となっている、明瞭な流路を持たない集水地形のことを0次谷といいます。0次谷の多くは過去に形成された崩壊地形で、周囲から流れ込んだ土砂で埋められています。このため、地下水も集中しやすく、周囲よりも地下水位が高いため、近い将来に崩壊が発生する危険性も高い場所であるといえます。0次谷は、1/2.5万地形図では等高線の凹み具合を眺めて、凹んでいる等高線群の間口よりも奥行が小なる地形の場所¹⁶を判読することになりますが、判読するにはある程度の習熟が必要です。近年では航空機レーザ(ALS)データから作成された「CS立体図」等により、目視で簡単に判読できるようになってきています。しかしながら、こちらも判読自体は肉眼・手動の作業となり、狙った範囲しか判読することができません。そこで、対象地全体で0次谷の分布を容易に把握できるように、ALSデータから0次谷を自動的に抽出し、ポリゴンデータとして出力するツールを開発しました。

■ 0次谷を抽出する原理

0次谷の抽出はALSデータから得られた詳細なDEM(数値標高図)を用いて行います。まず、DEMから接峰面(尾根の間の谷間(凹地形)を埋めた仮想の地形)を推定します。そして、接峰

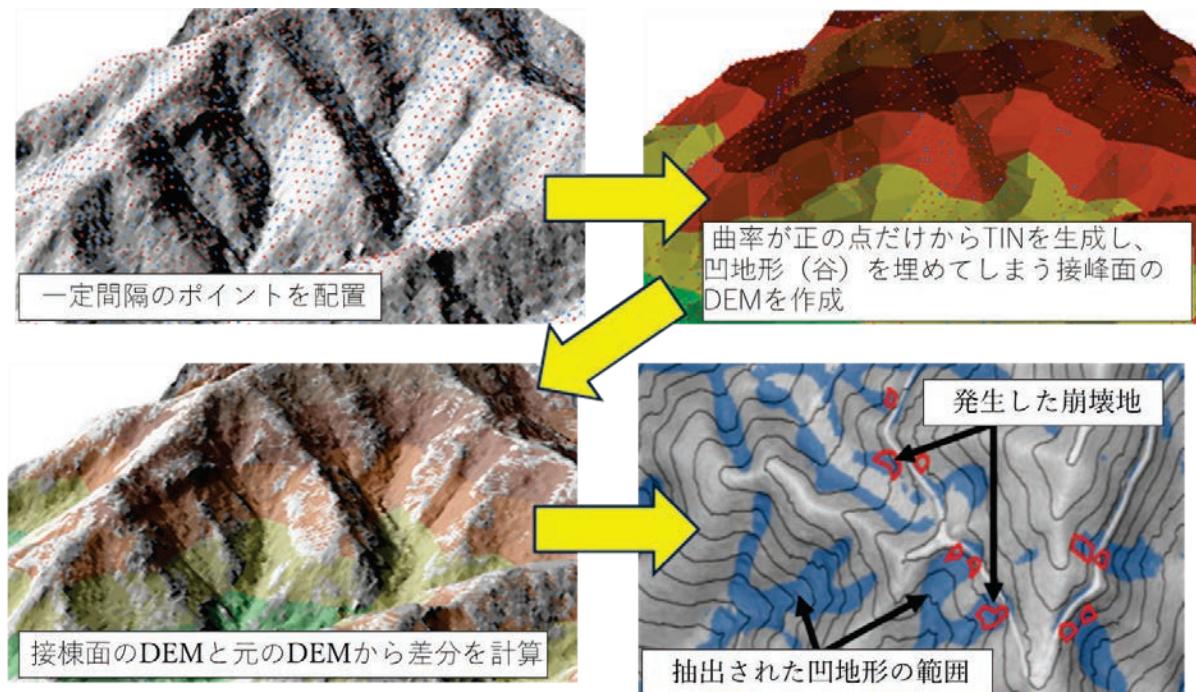


図 22 凹地形(0次谷+流域)の抽出方法

背景に電子地形図25000(国土地理院)を加工して利用。

¹⁶ 国土技術政策総合研究所(2016)砂防基本計画(土石流・流木対策編)解説、国土技術政策総合研究所資料、904

面と DEM との差分から得られる凹地形を 0 次谷および流送域（流路の侵食範囲）として抽出します。（図 22、大丸・村上（2025）¹⁷）。接峰面は、DEM 上に任意の間隔の格子点を設定し、このうち凸型斜面上にある格子点のみを用いて TIN（Triangulated Irregular Network）を生成して推定します。

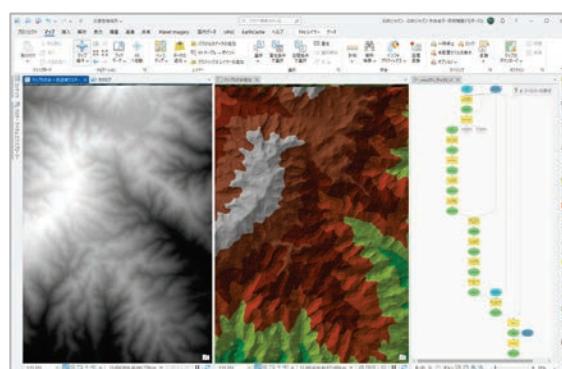
この手法では、任意の凹地形の接峰差分値のラスターデータとして、0 次谷と流送域が一緒に抽出されます。このため、0 次谷のみを分離し、GIS 上で明示しやすいようにポリゴンデータとして出力するフローを考案しました（図 23 (a)）。これにより、0 次谷のみを抽出することが可能となりました。

0 次谷の図化支援ツールの開発

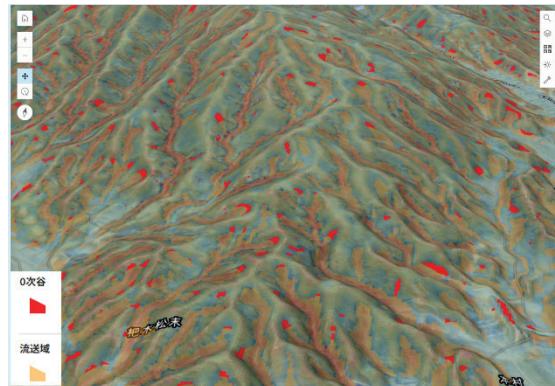
前項で紹介した手法を基に、ESRI ジャパン(株)に協力いただき、0 次谷を抽出し、GIS 上で重ねて表示することができるツールを ArcGIS pro に実装しました¹⁸（図 23 (b)）。本ツールは、大丸・村上（2025）に基づいて、凹地形（0 次谷+流送域）をラスターデータとして抽出するモジュール（図 23 (a) の※01）と、抽出されたラスターデータをポリゴン化し、流送域の部分を分離して 0 次谷のみを出力するモジュール（図 23 (a) の※02、出力結果は図 23 (c)）の 2 つで構成されています。



(a) 0 次谷を抽出するためのフロー



(b) ArcGIS Pro に実装された
0 次谷の抽出ツール



(c) 抽出された 0 次谷

図 23 ArcGIS Pro に実装された 0 次谷の抽出ツール

背景に電子地形図 25000（国土地理院）を加工して利用。

¹⁷ 大丸・村上（2025）2017 年九州北部豪雨における 崩壊発生斜面の地形的特徴－詳細地形データによる凹地形の解析から－, 水利科学, 402, p68-178

¹⁸ 0 次谷抽出ツール（ArcGIS 用） <https://arcg.is/0r9aK50>

T-7. 風害リスクの構造とリスクの高まり

台風の発生状況や将来予測から、強風ハザード（強風の発生状況）が徐々に悪化しつつあり、将来は更に悪化する可能性が考えられます。一方で森林の強風に対する脆弱化も進行しています。強風ハザードの悪化と脆弱化の進行による相乗的な効果で、思いもよらぬ大きな風害が発生することが危惧されます。風害に強い施業が望まれます。

■ 風害リスクとは

一般に「リスク」は、「ハザード（リスクをもたらす可能性のある要因）」、「曝露（ハザードへの晒されやすさ）」、「脆弱性」の3つの要素で示されます（図24）。風害リスクにおいては、ハザードとは強風の発生状況を指し、地域ごとの強風の発生しやすさは台風の頻度、強さ、経路でおおむね決まります。曝露とはハザードの存在する場所に森林があり、かつ地形的なハザードへの曝されやすさを指しています。脆弱性とは林分ごとの強風からの影響の受けやすさを指します。これらの3要素で、樹木に作用する風力と樹木の根や幹の耐力が決まり、風力が耐力を上回った場合に風害が発生します。つまり、風害リスクとは、”風力が耐力を上回る可能性”と言い換えることができます。

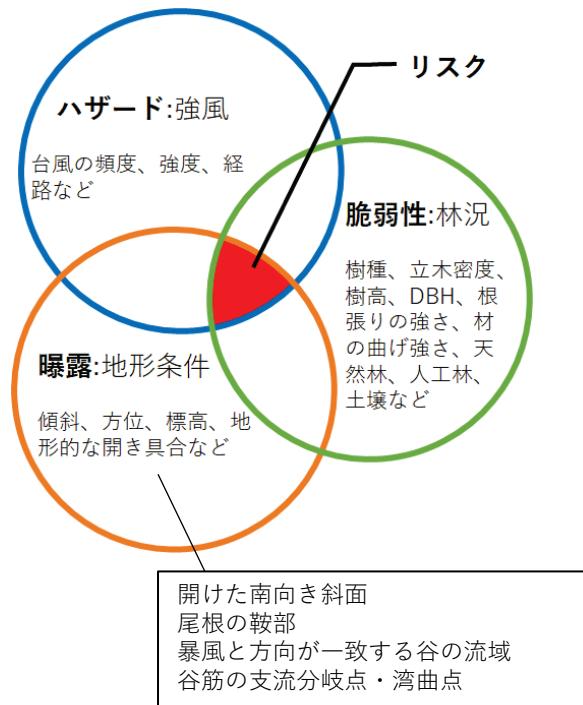


図24 リスクを構成する3要素

■ 風害と間伐

強風ハザードは自然現象として受け入れるしかなく、林業や森林管理で対応できるのは、強風ハザードへの曝露の大きさを見分け、曝露の大きさに応じて林分の脆弱性を改善することです。曝露の大きさは、過去の被害発生の有無や、上述した地形条件と現場とを照合して判断します。また、林分の耐風性を高めて脆弱性を改善するには、適切な水準で密度管理する必要があります。風害リスクを評価する力学モデルと林分密度管理図とを組み合わせると、成長過程における林分の耐風性が推定できます。それによると、スギやヒノキの一斉林の場合、限界風速（被害が発生する風速）の等値線を地形図の等高線に見立てると、Ry（収量比数）が0.7前後に尾根があり、尾根付近で限界速度の増加が緩やかになり、Ryが0.8前後を超えて林分が過密になると耐風性が落ちていきます。したがって、風害に強い林分を仕立てるには、適切な時期に間伐を実施し、耐風性の高い混み合い度に林分を維持する必要があります（図25）。

なお、本章では混み合い度の指標として収量比数を用いました。【T-1】、【T-2】で用いた樹冠疎密度や樹冠長率は用いていません。後者の指標で統一的に説明できればより分かりやすいのですが、残念ながら、現時点ではそのための理論的・実証的なエビデンスが不足しています。【T-1】、【T-2】

と本章をまとめて言葉で表すならば、「管理不足で混み合った森林の中でも、非常に混み合った森林は強風への脆弱性が高いため、施業を行う緊急性が高い」ということになります。

一方で、間伐を実施した直後の数年間は風害が発生しやすいことが知られています。耐風性を高めるための間伐が、一時的にはリスクを高めるのです。では、間伐をどのように扱えばよいでしょうか。

■ 風洞実験による施業影響の評価

風洞装置（強風を人工的に発生させる装置）で、樹木模型を使った間伐実験を行いました（図6）。間伐方法は列状間伐を想定し、樹木模型に働く回転の力（転倒させようとする力）を計測しました。その結果、残存木に働く回転の力は伐採した列数の影響が大きく、一方、残存列数の影響はほとんど見られませんでした。そこで、残存列数の異なる1伐の結果を平均すると、無間伐の1.4倍の回転の力が働き、2伐の結果を平均すると、無間伐の1.8倍の回転の力が働いていました。無間伐よりも大きな回転の力が働いたのは、残存木に強い風があたるようになったことを意味しており、風害リスクが大きくなつたと判断できます。1伐よりも2伐の方が回転の力の上昇幅が大きかったことから、伐採幅を大きくして開いた空間を大きくするほど風害リスクが上昇することがわかります（図26）。

樹木を強風に強くするには幹を太らせることが重要です。間伐すると直後の風害リスクは上昇しますが、その後の肥大成長によって、間伐前よりも耐風性が高まることが期待できます。このことは、逆に、間伐を行っても十分な肥大成長が見込めない林分は、耐風性の強化が期待できないことを意味します。間伐後に十分な成長が見込めない林分、経済的に林業に不向きな林分、風害リスクが特に高い林分は、全面的に更新するか針広混交林などの耐風性の高い森林へ誘導していくことが望まれます¹⁹。

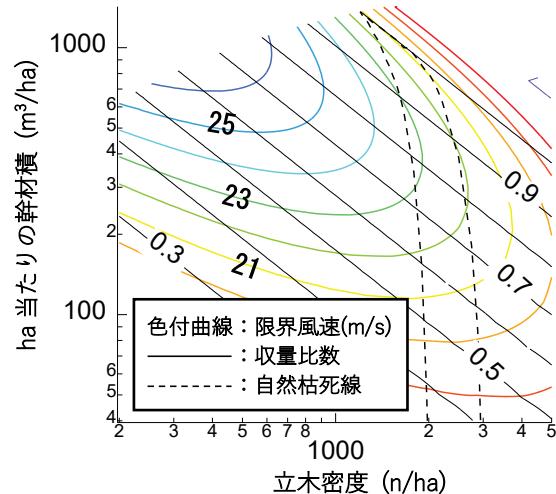


図 25 林分密度管理図上での風害限界速度

色付曲線は限界風速（被害が発生する風速）の等高線を表し、収量比数0.7付近が尾根となり耐風性が相対的に高いことがわかる。ただし、限界風速の大きさは林分の条件によって変わる。

（北関東・東山地方スギ）

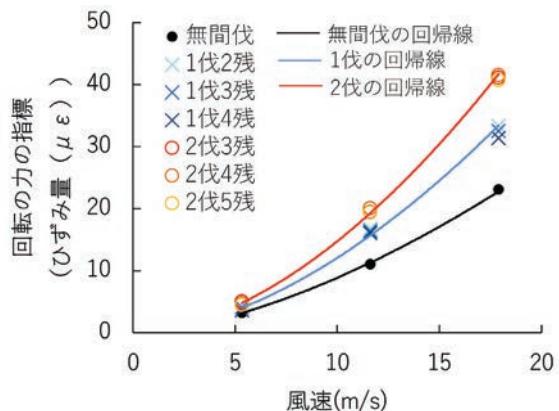


図 26 間伐すると立木に当たる
風の力が強くなる

¹⁹Griess, V.C. and Knoke, T., 2011. Growth performance, windthrow, and insects: meta-analyses of parameters influencing performance of mixed-species stands in boreal and northern temperate (再掲)

■ 風害リスクが高まっている －風害への備えが必要－

北西アジアでは、1960 年代後半以降、台風の最大強度となる緯度が高緯度側にシフトしてきており、以前よりも日本の近くで最大強度になる傾向が観測されています。また、日本に上陸した台風は、1970 年代後半以降、強度が増していることがわかっています。加えて、将来は現在よりも台風の強度が強くなると見込まれています。したがって、現在から将来にわたって、強風ハザードが悪化し続けると考えられます。次に、森林の脆弱性について検討します。わが国の人造林は半数が造林後 50 年を超えていましたが、主伐が進まず長伐期化が進展し、森林蓄積が年々増加しています。また、2020 年農林業センサスによると林業経営体が実施した間伐の作業面積は、2020 年までの 15 年間に 6 割近く減少しました。以上のこととは、人工林の高齢化により樹高や材積が増大しているのに対して、立木密度の調整が遅れて全体的に過密化が進行していると推察されます。適正密度よりも過密になると風害を受けやすくなることから、脆弱な林況へ推移している可能性があります。ハザードと脆弱性の両方の要素が風害リスクを高める方向に推移すると、2 つの要素の相乗的な効果で思いもよらぬ大きな風害が発生することが危惧されます。

■ もう一つの風害対策

高まりつつある風害リスクに対応するため、積極的に間伐を実施し、適切に密度管理する重要性が増しています。しかし、万全に対策を施したとしても風害を 100% 回避することは不可能です。また、間伐後の一時的な風害リスクの増大を考えたとき、間伐をためらってしまう場面もありそうです。そのようなときに有効な、もう一つの対策は森林保険です(図 10)。森林保険は年単位で加入し、1 年間から 20 年間までの任意の期間で加入できます。たとえば、間伐後のハイリスクな数年間を保険でカバーするのもリスクへの備えとして有効と考えられます。森林保険は、「森林所有者が自ら災害に備えることができる唯一のセーフティネット」とされていますが、単なる経済的な補償手段にとどまらず、健全な森林の整備を支え、森林が有する多面的機能を発揮させるためにも有効活用されるべき制度と考えられます。

技術編

施業技術

マニュアル

M-1. 間伐の効果をどう評価する？

管理優先度の高い林分に対し間伐を行うかどうかの判断をする際、間伐に伴う樹冠長の変化と平均個体間距離の変化の比を指標として利用することで、林齢をはじめとする幾つかの条件から間伐要否の判断できるようになります。また間伐の効果の持続性は間伐強度・方法の影響を受けますので、場合によっては間伐の繰り返しが必要となります。

■ 間伐の効果

管理優先度が高いと判定された林分に間伐を行う際に問題となるのが、「どのような条件でも間伐の効果は最大限期待できるのか？」「どのような間伐を行うのがもっとも効果的か？」という点です。とりわけ、“管理優先度が高い”と判断された人工林において、木材生産林としての役割を今後も重視していく場合、間伐の効果が速やかに発揮されることはとても重要です。

間伐の効果の指標として一般的に考えられるのは、間伐による成長（樹高成長・肥大成長）の増加です。ただし、樹高と直径の比である形状比（樹高／幹直径）は、高齢のスギ林では林齢に伴う樹高成長の低下に対し直径成長は維持されるため間伐後に形状比が下がるのに対し、若齢の林分では、樹高成長も旺盛なため間伐後の形状比の反応が鈍い場合もあります(図 27)。このように、形状比を指標として間伐の効果を画一的に判断することは難しいようです。

■ 間伐効果の指標としての樹冠長変化

そこで、間伐にともなう樹冠長の伸長に着目してみると、スギ林においては、間伐なし、あるいは間伐直前・直後の場合は、樹冠長と林内の平均個体間距離の関係はばらつきますが、間伐から2年以上たつと線形の関係を示すことがわかりました(図 28)。また、間伐前後における平均個体間距離の変化と樹冠長の変化の比 $\Delta CL / \Delta S$ は、熊本県、福岡県のスギ・ヒノキ林のデータではほぼ一山型の分布を示しました(図 29)。つまり、 $\Delta CL / \Delta S$ は間伐に対する応答として一定の傾向をもつ値であることが見いだされ、間伐効果の指標として有効であると考えられました。 $\Delta CL / \Delta S$ は、林齢の影響を強く受

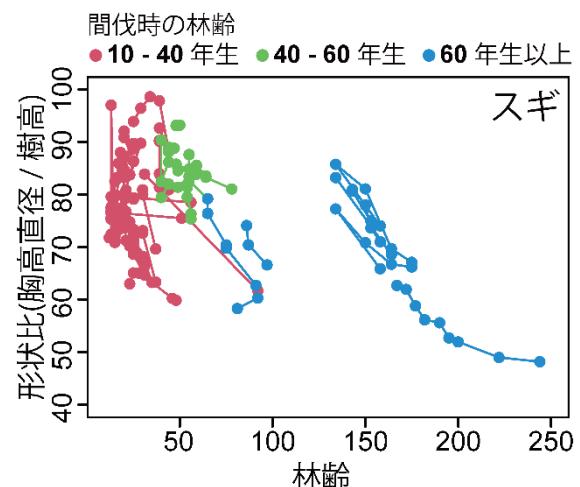


図 27 文献情報に基づくスギ林における林齢と形状比の関係

線で結ばれたシンボルは同一の林分を表す。高齢林（青）は、間伐あり、なし共に形状比が低下するが、若齢林では変化の傾向が一定ではない。

- 間伐後 2 年以上経過 ● 間伐後 2 年未満
- 間伐無し、間伐前

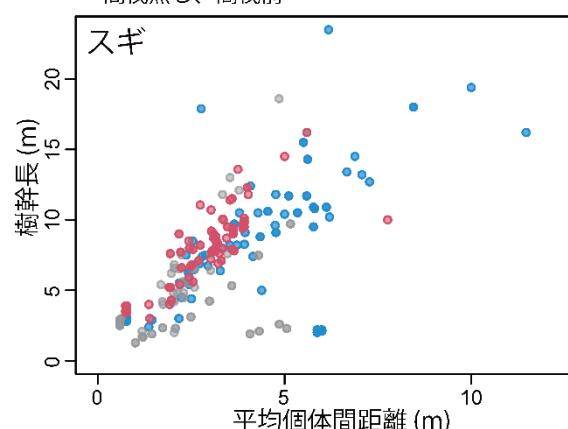


図 28 文献情報に基づくスギ林における平均個体間距離と樹冠長の関係

間伐 2 年以上（赤）は、間伐 2 年未満（青）、あるいは間伐なし（灰）より線形性が高い。

け、林齢が大きいほど $\Delta CL / \Delta S$ が小さくなる傾向にありました。その他に地域、収量比数 (Ry)、間伐前の樹冠長、地位の影響も受けるようです (図 30)。このため、間伐の効果が速やかに得られるかどうかの判断には、林齢を中心としながらも他の要素も併せて複合的に検討する必要があるでしょう。

■ 間伐効果の持続期間

一度間伐を行ったからといって、その効果は恒久的に持続するわけではありません。間伐により樹冠の発達が促進された結果、間伐からある程度の期間が経つと林冠は再び閉鎖してしまいます。林冠閉鎖後はさらなる葉量の増加は期待できず、成長の促進も望めません。高知県のヒノキ林 (間伐時 31~34 年生) で樹冠長と樹冠長率の変化をみると、高標高サイト (約 900m) では、50% 通常間伐と 50% 列状間伐で樹冠長や樹冠長率が比較的高く維持されているのに対し、35% 通常間伐では間伐から 4 年後には低下傾向がみられました (図 31)。また低標高では、50% 通常間伐で間伐から約 10 年後に樹冠長や樹冠長率の低下傾向を示しました。いずれも現在、樹冠長率が 40% を下回り始めていることから、早期に次の間伐が必要であると考えられます。

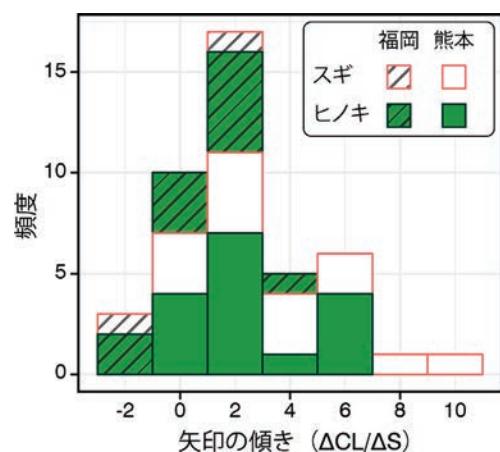


図 29 熊本・福岡のスギ・ヒノキ林における、間伐に伴う樹冠長変化量 (ΔCL) と平均個体間距離変化量 (ΔS) の比 $\Delta CL / \Delta S$ の分布

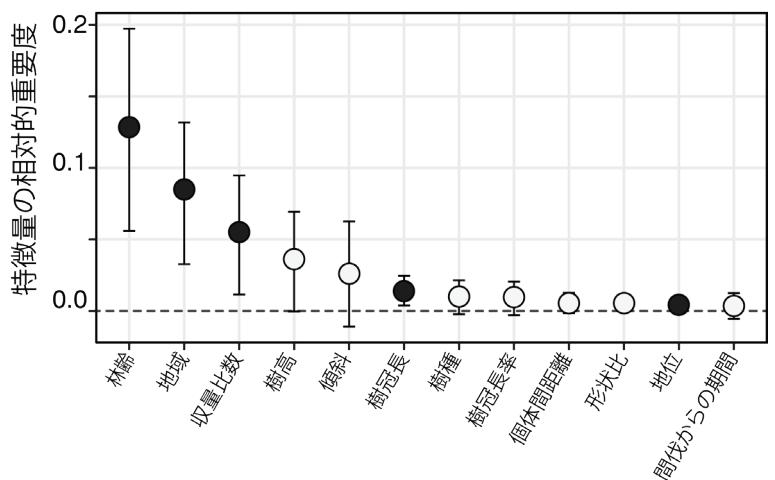


図 30 機械学習法で評価した、 $\Delta CL / \Delta S$ に対する間伐前の森林特徴の重要度

重要度の 95% 分布範囲 (エラーバー) が 0 を含まない場合は、黒丸で示す。

■ 良好な成長維持に必要な樹冠サイズ

個体の直径成長を健全に維持するためにどれくらいの樹冠長や樹冠長率が必要なのでしょうか？たとえば、上記の高知県のヒノキ林では、年間 5 ミリの幹成長速度を維持するには、低標高サイトの場合、樹冠長率が約 40% 以上（樹冠長では約 6m 以上）必要であることが調査から示されました。高標高サイトでは必要な樹冠長や樹冠長率はさらに大きくなる傾向にあるようです。また、安定した肥大成長に必要な樹冠長は、間伐率が低いほど大きくなるなど、標高だけでなく、間伐の仕方の影響を受けることも示されました。

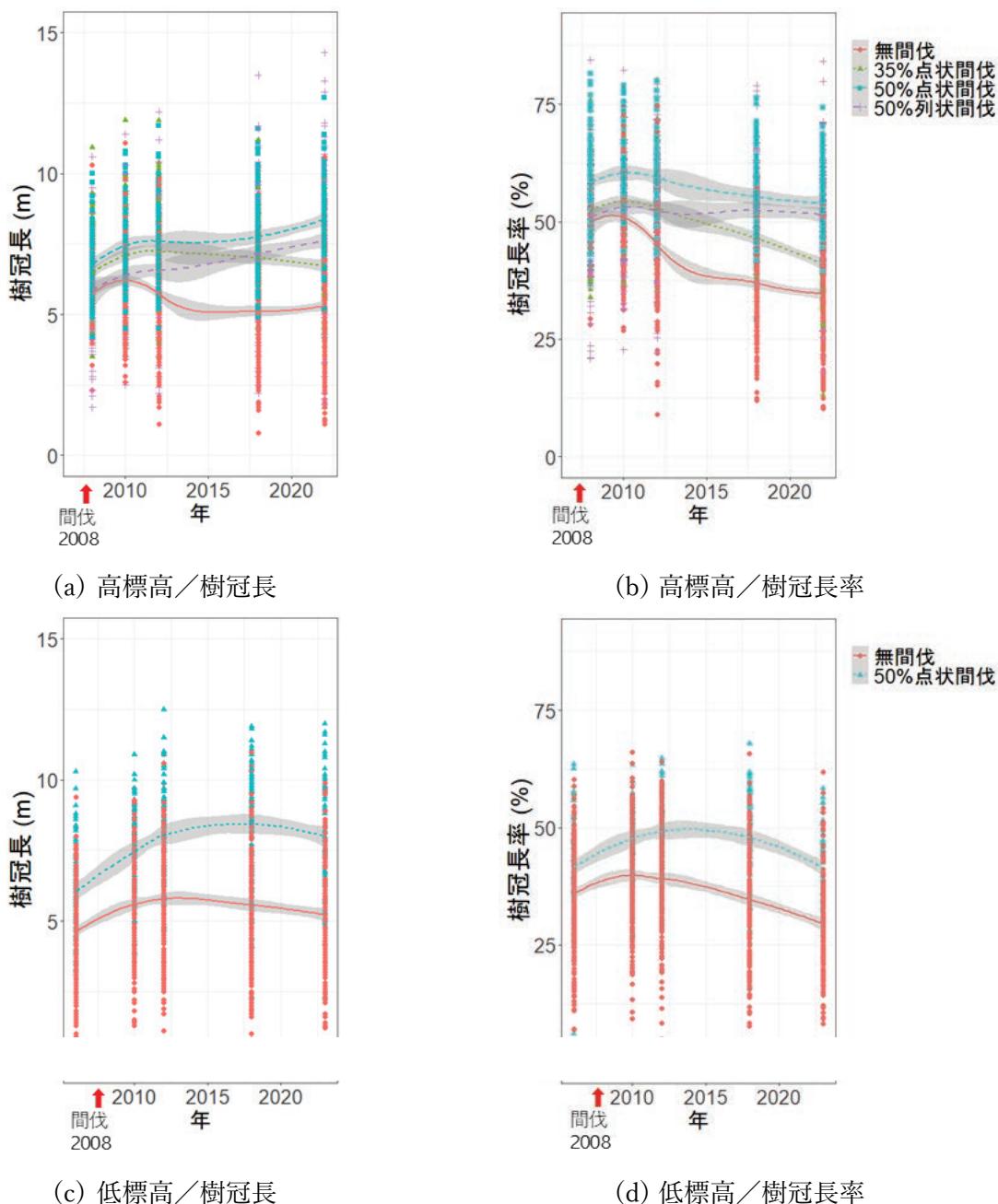


図 31 ヒノキ人工林間伐試験地における間伐からの樹冠長と樹冠長率の変化

高標高サイトおよび低標高サイトの標高はそれぞれ約 900m および約 300m

M-2. 林業の適否と管理優先度に応じた施業の指針

市町村が所有者に代わり経営管理を行う森林に対して、林業を継続するかどうかの判断に基づき、それぞれ状況を改善するための適切な施業（間伐）が必要となります。このトピックでは、適切な施業を判断するための指標の提案と、具体的な施業方法について概説します。

■ 施業の基本原則

管理優先度に応じて区分された人工林に対してとりうる施業の基本原則を次の通り整理しました。

- 林業を継続する森林では、従来の施業を継続して適切に森林を管理する。（図 1（イ）（ロ））
- 林業を断念する森林では、木材生産林を目標林型とせず、将来的には多面的機能を重視した育成複層林を目指す。（図 1（ハ）（ニ））
- 施業により斜面崩壊や風害など森林被害の危険度を低減する可能性がある森林では、適切な密度管理によりまず危険度を可能な範囲で下げる。（図 1（ロ）（ニ））
- 施業方法としては、
 1. 間伐による密度管理（積極的管理。針広混交化を含む）
 2. 経過観察による林分維持（消極的管理）
 3. 皆伐および林種転換を含む再造林（リセット）

を主に検討する。

これらの基本原則をベースにして、市町村が経営管理事業を実施する森林（図 1）に対して推奨される施業の指針を以下に示します。

■ 林業を継続する森林

木材生産林としての活用が期待されるものの、市町村に経営管理が委託される森林では、これまでに実施されてきた施業が引き続き実施されることが推奨されます。ただし、施業を行う際には、林内の斜面崩壊リスクの高い箇所の存在を十分把握しつつ、過度の土地改変や 0 次谷【T-6】周辺の皆伐、路網開設等には注意すること、そして斜面崩壊リスクが高い時期が長くならないように【T-3】伐採後直ちに再造林することが望まれます。

管理優先度が低い森林（図 1（イ））

現時点で風害対策などの緊急性が低い森林では、経過観察を行いつつも、将来の主伐に向けた経営管理を優先する必要があります。その際、将来木施業【M-5】を含む長伐期施業を想定する場合、十分な樹冠の発達を想定した早い時期での間伐を行う必要があるでしょう。一方、林齢等から判断して速やかな間伐効果が期待できないようであれば主伐を行うことが望まれます【M-6】。その際には、再造林の省力化・低コスト化に加えスギ林が発揮する崩壊防止機能が低くなる期間【T-3】を短くする意味でも、伐採後ただちに再造林を行う一貫作業システムの採用が必要でしょう。

管理優先度が高い森林（図 1（ロ））

過密状態で風害リスクが高まっているなど、管理優先度が非常に高い森林では、まず風害リスクが低下する密度になるまでの間伐を行う必要があります【T-7】。その後は、風害リスクが高まらないように定期的な間伐を主伐まで繰り返します。間伐強度によっては、効果の持続時間が限定されるため【M-1】、間伐回数が増加する点に注意が必要です。

速やかな間伐効果が期待できない場合、長伐期施業を考慮する場合は、将来木施業の導入も考えられます【M-5】。また、地利的状況が好ましい立地条件であれば、皆伐・再造林による世代交代を行います【M-6】。そして斜面崩壊リスクの低い林分であれば間伐材の搬出も考慮できるので、状況によっては列状間伐の導入も想定されます【M-4】。

■ 林業を断念する森林

林業を断念する森林では、直ちに施業を行うのではなく、長期的な視野を持って目標林型を設定することが推奨されます。その際、木材生産林としての機能を重視しないため、残存木の成長に対する間伐効果は重要ではなくなります。

管理優先度が低い森林（図1（ハ））

現時点で風害対策などの緊急性が低い森林では、林分状況の悪化を防ぎつつ、将来的には森林の多面的機能の発揮の高度化に繋がる育成複層林（針広混交林、広葉樹林）への誘導を目標とすることが考えられます。このため経過観察を行いつつ、可能な時点で林床の光環境改善を目的とする間伐を実施し、後継木の育成を行います。ただし、人工林に広葉樹を誘導することは決して簡単なことではないため【M-8】、【M-9】、ある程度のコストがかかることを想定する必要があります。

管理優先度が高い森林（図1（ニ））

過密状態で風害リスクが高まっているなど、管理優先度が非常に高い森林は、慎重に管理することが求められます。まず、風害リスクを高めないための間伐（切り捨て間伐）を喫緊に行う必要がありますが、一度に強度の間伐を行うとかえって風害のリスクを高めたり斜面崩壊のリスクを高めたりする恐れがあります。このため、下層植生等の発達状況を確認しながら間伐・更新伐を繰り返し、段階的に残存木を減らしながら、針広混交化を目指します【M-8】、【M-9】。場合によっては一時の根系による表層防止機能の低下【T-3】を許容して、強度の間伐による広葉樹の導入を目指すか、広葉樹造林も検討します【M-10】。いずれの場合においても、コストがかかるなどを想定しておく必要があります。

■ 対象とする森林に赴くことも大切

間伐効果の有無の判断は、まず林齢を考慮しながら、それ以外の森林の現場の状況に着目することが大切です。また管理優先度の低い森林についても、定期的な林況の確認は必要です。いずれの場合においても、実際に対象とする森林に足を運んで確認することが重要となります。

M-3. 間伐について

間伐は、林冠が閉鎖してから主伐するまでの間に林木を抜き伐りする作業で、目標林型を達成するために必要な保育技術です。間伐には、形質不良木を除去して主伐時に材質の優れた個体を残すという林業的な目的に加えて、病虫害、風害や冠雪害等に対する耐性を高めて林分を健全に保つこと、土壌保全機能や水源涵養機能等の環境保全的な機能を向上させる効果が期待されます。

■ 間伐とは

間伐は、林冠が閉鎖してから主伐（収穫）するまでの間に林木を抜き伐りする作業で、目標林型を達成するために必要な保育技術です。間伐は、間伐材を放置する保育間伐（切り捨て間伐）と、間伐材を搬出して販売する搬出間伐に区分できます。戦後に造林された人工林の中には、間伐が適切に実行されずに過密となった間伐遅れ（管理優先度の高い）林分が多いのが現状です。

■ 間伐の目的

スギやヒノキの人工林は、一般に 3,000 本/ha 程度の密度で植栽されます。間伐が適切に実行された場合、主伐時の立木密度は、伐期齢が 50 年生前後では 600 本/ha 程度、80 年生以上の長伐期では 400 本/ha 以下になるといわれています（竹内 1998）²⁰。なぜ、収穫時よりも高い密度で植栽して間伐を行うのでしょうか。高密度で植栽する理由は、活着不良、誤伐、病虫害等で密度が低下するリスクに備えること、林冠を早く閉鎖させることにより、雑草木の成長を抑制し、枝下の長い完満で無節性の高い材を生産するためです。また間伐を行う理由は、形質不良木を除去して主伐時に材質の優れた個体を残すとともに、主伐までの間に中間収入を得るためです（竹内 1998）。つまり、木材生産林における間伐の本来の目的は、主伐に向けて林型を整えながら、収穫（中間収入）を得ることといえます。しかし、間伐の収支が見合わない場合や、木材生産を目的としない人工林であっても、必要な機能に応じた林型に整えることを目的に間伐を行う必要があります。

間伐遅れ林分における林木の成長理論的に、林冠が閉鎖した林分では、個体の樹冠同士が接触することで樹冠幅は一定となり、また樹高成長と同程度の長さで下枝が枯れ上がるため、樹冠長も一定となります。その結果、個体の樹冠はほぼ同じ大きさを保ったまま（光合成を行う葉量も一定のまま）、樹高成長の分だけ毎年上方に移動することになります。そのため、林冠閉鎖した状態が長く続くと、樹冠長率（=樹冠長／樹高）は年々低下します。肥大成長（年輪幅）も小さくなるため、形



図 32 間伐遅れのヒノキ林（左）と強度間伐が行われたスギ林（右）の林床の様子

²⁰ 竹内郁雄（1998）間伐. 林業技術ハンドブック. 全国林業改良普及協会. P.802-882

状比（樹高／胸高直径）は高くなります。また、林床に光が届かないために、下層植生が発達しない林分も多くみられます（図 32）。

■ 間伐の効果

間伐により林冠閉鎖した林分の立木密度を強制的に減少させることで、残存木の占有面積を広げます。残存木の占有面積が広がると、枝の枯れ上がりが止まることで樹冠長が長くなり、また横方向にも樹冠が拡大します。その結果、個体葉量が増加し、残存木の肥大成長が促進されます（図 33）。つまり、間伐によって残存木の樹冠長率や形状比の改善が期待されます。また、間伐強度にもよりますが、林床に光が届くようになり、林床植生の発達も期待されます（図 32）。間伐に期待される効果をまとめると、残存木の成長を促進して価値の高い材を生産すること、形状比の改善により風害や冠雪害等に対する耐性を高めて林分を健全に保つこと、下層植生の発達により林地の土壤を保護して持続的な経営を可能にするとともに、土壤保全機能や水源涵養機能等の環境保全的な機能を向上させることができます。

■ 間伐の種類

林木の形質等に重点をおいて選木し、間伐を行った結果として間伐量が決まるものを「定性的間伐」といい、樹型級区分に基づいて選木する寺崎式間伐はその代表例です。一方、林分の蓄積や成長量等に重点をおいて適正な密度を維持するために、間伐量を先に決めて間伐を行うものを「定量的間伐」といい、林分密度管理図を利用して本数間伐率を決定する場合などがこれにあたります。また、林分内の個体サイズの小さい劣勢木や形質不良木を中心に間伐する方法を「下層間伐」といい、優勢木で形質に優れた個体が残るので主伐時の販売に有利とされています。逆に、間伐収入に重きをおいて、利用径級に達した優勢木を中心に間伐するものを「上層間伐」とい（優勢木間伐、なすび伐りともいう）、同時に形質の悪い劣勢木も間伐することで形質の良い準優勢木を育成します。「列状間伐」は、個体サイズや形質に着目せずに間伐する機械的間伐のひとつであり、メリットとデメリットの双方が指摘されています【M-4】。また、将来木を先に選び、その成長を妨げる個体を中心に間伐する「将来木施業」も行われています【M-5】。実際には、先に間伐量を決め（定量的）、個体サイズと形質等に着目して選木を行い（定性的）、劣勢木や形質不良木を中心に取り除く下層間伐が一般に広く行われています。

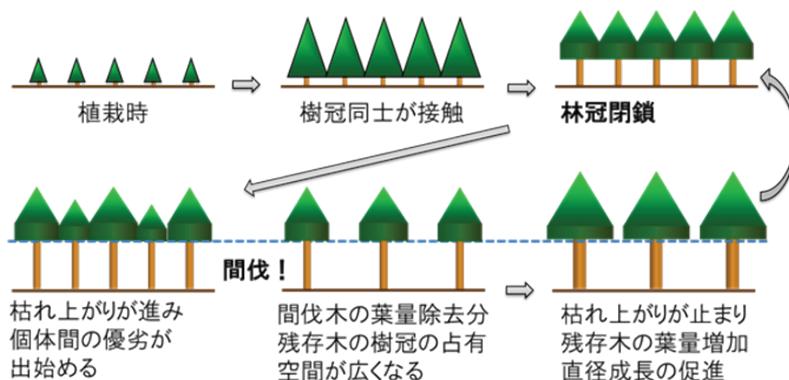


図 33 間伐の本質を表す概念図

間伐は、強制的に立木密度を低下させて人工的に葉量を除く作業で、残存木の葉量を増加させ、直径成長を促進させる。間伐の強度と頻度によって、年輪幅・枝下高・幹形を制御できる。

■ 間伐の強度

間伐の強度の指標として、「本数間伐率」と「材積間伐率」が一般に使われています。本数間伐率は、立木本数を数えるだけで計算できることから簡便であり、わかりやすいためよく使われます。一方、材積間伐率は直径と樹高の測定が必要になるため算出するのは大変です。しかし、間伐の本質は残存木の樹冠が拡張できるように間伐木の樹冠を除去する作業であることを考えると、樹冠除去量を示すことのできる材積間伐率の方が、間伐強度の指標として適切であるといえます。なお、一般には使われていませんが、直径を測定するだけで算出できる「断面積間伐率」もあり、断面積間伐率と材積間伐率さらには葉量間伐率の数字は、ほぼ同じになることが確認されています（図 34、竹内 2015²¹）

本数間伐率には間伐木のサイズの概念が含まれていないため、同じ本数間伐率でも下層間伐か上層間伐かで材積間伐率（間伐後の林分の様子）は大きく異なることに注意が必要です。例えば、下層間伐の場合は、本数間伐率よりも材積間伐率の方が小さくなります。特に、間伐遅れ林のように個体サイズのばらつきが大きい林分に下層間伐をした場合はその傾向が顕著であり、本数間伐率が40%であっても材積間伐率は20%程度である例が示されています。

■ 間伐遅れ（管理優先度の高い）林分の取扱い

間伐遅れ林分は、過密な状態が長く続いたために樹冠長率が小さく、形状比が高くなっています。そのため、風害や冠雪害を受ける危険性が高い状態にあるといえます。その状態を解消するためには間伐が必要ですが、間伐後しばらくの間はその危険性が高まるため、弱度の間伐を繰り返すことが適切であるとされています。しかし、これまで間伐が実行されてこなかったことを考えると、弱度な間伐を繰り返すことは現実的ではないかもしれません。また、樹冠長率が小さい林分に間伐しても、樹冠の拡大（葉量の回復）はそれほど見込めないため、幹の肥大成長の促進や形状比の改善もそれほど期待できません【M-1】。これらのこと考慮して、間伐遅れ（管理優先度の高い）林分の取り扱いを慎重に決める必要があります【M-2】。

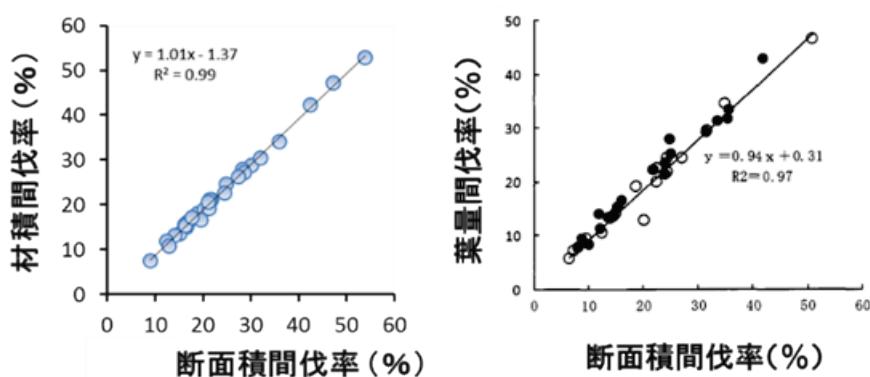


図 34 断面積間伐率と材積間伐率（左）と断面積間伐率と葉量間伐率（右）の関係
竹内（2015）より引用

²¹ 竹内郁雄（2015）間伐の理論と実際—林業技士養成研修テキスト（林業経営部門）．日本森林技術協会. PP.43

M-4. 列状間伐：間伐遅れ林分に対する緊急措置

列状間伐は機械的間伐の代表例です。かかり木の発生が少なく、搬出が容易であるなど、高齢・高密度の間伐遅れ林分に有効な間伐方法です。ただし列状間伐には、1回だけでは林況の改善効果が乏しく、実施後の風害リスクが通常間伐よりも高いという問題もあります。列状間伐を実施する場合、その後の林分の扱いを十分に検討することが特に重要です。

■ 列状間伐の意義

列状間伐は、比較的高齢級の間伐遅れ林分の状況を改善するため最初に行う施業として有効な選択肢です。列状間伐は、伐採する植栽列または幅を決めて伐るため選木を必要とせず、かかり木の発生が少なく搬出も容易であるなど、経済的合理性・労働安全性が高い利点があります。ただし、列状間伐を1回行っただけの間伐遅れ林分は、まだ極めて歪かつ不健全な構造であるといえます。間伐列に面しない立木には間伐効果が乏しいうえに、林分内の健全木と劣性木の割合は間伐前と変わりません。間伐遅れ林分に対する列状間伐は、いわば緊急避難的措置であり、その後の林分の扱いを明確にした上で実施すべきです。

■ 列状間伐を実施する際の留意点

間伐遅れ林分に対して初回の列状間伐を計画する際は、その次に行う施業を含めた林分の将来像を考えて間伐率（伐採列と残存列の比率）を決めることが必要です。また、列状間伐実施後の林分を継続的に観察して、林冠の再閉鎖の時期を見極め、2回目の間伐時期を調整することも有効です。2回目以降の間伐は、初回間伐で残した列に再度列状の間伐を入れるほか、残存列に通常間伐を施すなど、複数の間伐方法を組み合わせてもよいでしょう。

間伐遅れ林分の樹木は、樹冠長率が小さく形状比が高く、風害・冠雪害等の気象害を受ける危険性が高いです。間伐により樹高成長・幹の肥大成長を促すことで、その危険を減少させることができます。しかし、間伐後の気象害のリスクは、一時的に間伐前よりも高まるというジレンマがあります。特に列状間伐は、通常間伐よりも連続した伐開面が大きいため、風害リスクがより大きくなる可能性があることに留意が必要です【T-7】。風害リスクを下げるには伐採列数が少ない方が効果的ですが、弱度の間伐では間伐効果の持続期間が短いため、間伐を高頻度に行わなければなりません。これまでに間伐が適切に行われてこなかった林分に、これから高頻度の間伐を行うことが経済的に可能かつ合理的であるかは、十分に検討すべきでしょう。

■ 列状間伐実施の具体例

列状間伐には、植栽列を単位として伐採する列と残す列を決めるもの（ここでは「残存法」とします）の他に、植栽列によらず一定の間隔で伐採する幅と残す幅を決めるもの、魚骨状や放射状に伐採列を配置するものがありますが、ここでは代表的な残存法について述べます。列状間伐を検討する際には、伐採列数がポイントです。1列伐って2列または3列残す場合（1伐2残／1伐3残）の間伐率は、各々33%，25%です。茨城県のヒノキ林において間伐率35%の列状間伐を実施した場合、9年後には残された木の葉量に変化が見られず間伐による成長促進効果が失われました（宮本

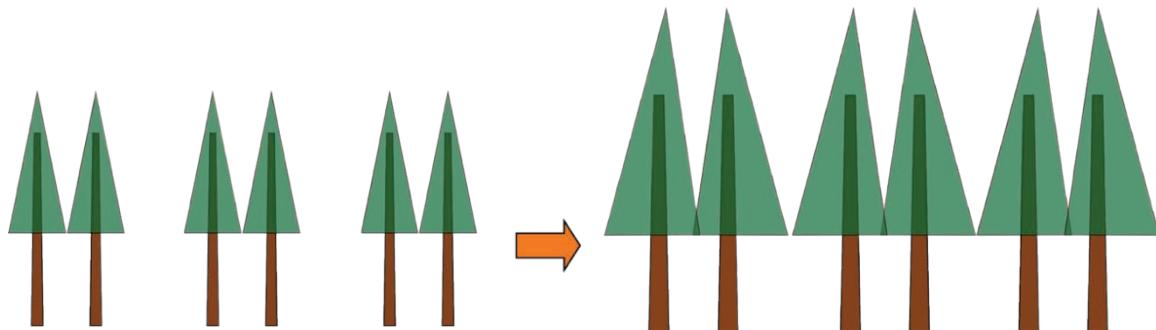


図 35 1伐2残の列状間伐における比較的速やかな林冠閉鎖

ら 2025)²²【M-1】。1列の間伐では空いた林冠が比較的速やかに閉鎖するため、間伐効果を維持するためには、次の間伐が早期に必要になると考えられます。

次に、2列伐って2列または3列残す場合（2伐2残／2伐3残）の伐採率は各々50%、40%になります。この場合、林冠が閉鎖するまでの時間（間伐効果の持続期間）はより長くなります。高知県のヒノキ林・高標高サイトにおいて伐採率50%の列状間伐を行った場合の間伐効果は10年以上持続したと考えられます（図31（b））。その反面、2伐では1伐より立木に当たる風の力が強いため（図26）、風害リスクが上昇する可能性があります。このように、伐採列と残存列を検討する際には、間伐頻度によるコストと気象害リスクの許容範囲とのバランスを考慮する必要があります。さらに、上記の間伐効果の持続期間は、あくまで一つの事例から推測したものです。間伐後の林冠閉鎖までの期間は樹種や環境条件によって異なるため、初回の列状間伐実施後に必要な次の間伐の時期は、個々の林分の状況を観察しながら見極めなくてはなりません。

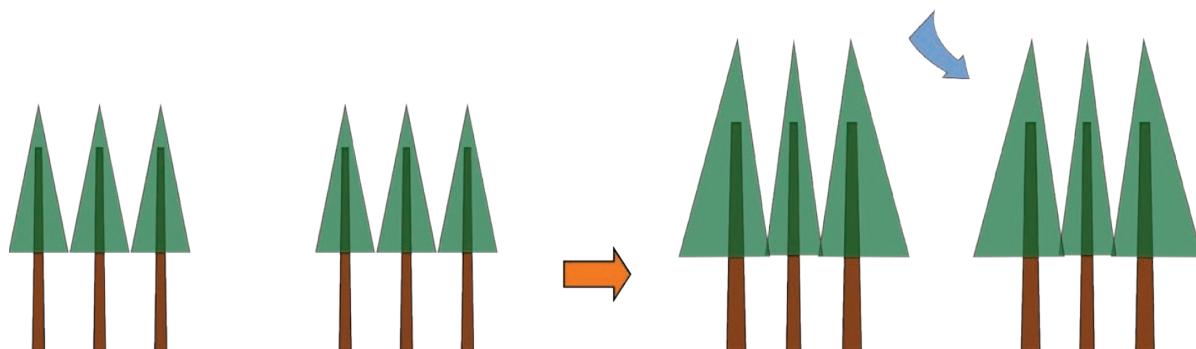


図 36 2伐3残の列状間伐における間伐効果の持続と風害リスク

■ 列状間伐以外の選択肢

気象害のリスク回避を優先して間伐を行うならば、経済的なコストは高いですが、弱度かつ高頻度の列状間伐が有効です。このほかに、通常間伐も選択肢になり得ます。通常間伐は連続した伐開面が小さいため、風害リスクは列状間伐より低いと考えられるからです【M-3】。ただし、立木密度が高い間伐遅れ林分に対して通常間伐を行う場合、伐倒時にかかり木が発生しやすい点に注意が必要です。この場合、作業者の安全確保を優先して間伐木は搬出せず切り捨てる方が合理的かもしれません。

²² 宮本ら（2025）列状間伐から15年後のヒノキ人工林における生育状況. 日本森林学会大会講演要旨集、136:138(E-19)

M-5. 風雪害リスクを考慮した間伐技術としての将来木施業

将来木施業は、主伐に向けて育成する優良木を将来木に選び、それに隣接する競合木のみを伐倒対象にする単木管理型間伐技術です。伐倒を将来木周囲に限定する将来木施業は過密人工林の間伐に適していると考えられる一方、日本での実施例はまだ少ないと考えられます。本プロジェクトでは約50年生のスギ・ヒノキ人工林において将来木施業の試験を実施しました。

■ 将来木施業とは

将来木施業とは、主伐に向けて育成する優良木を将来木に選び、将来木に隣接する競合木のみを伐倒対象にする単木管理型間伐技術です。通常間伐は林分全体を均一に立木密度管理することで間接的に競争をコントロールするのに対し、将来木施業は将来木周囲の競争をピンポイントで直接コントロールします。

■ 手入れ不足の過密人工林と将来木施業

伐倒を将来木の周囲に限定する将来木施業は過密人工林の間伐に適していると考えられます。過密林は不健全な立木が多いため、林分全体に均一な施業を行う通常間伐では間伐率を高めないと残存木への成長促進効果を得づらい一方、間伐効果を得るために間伐率を高めると風雪害等が起こりやすくなるジレンマがあります。しかし過密林にも少ないながら優良木は混在します。優良木ほど根系は広く深く、樹勢が強いため間伐への反応も良く、かつ強めの間伐にも耐え、間伐後の風雪害リスクも低いと考えられます。そのような優良木に施業資源を集中しその成長を促す将来木施業は、過密人工林の速やかな健全性回復に有効だといえます。

■ 将来木施業の試験

日本での将来木施業実施例はまだ多くありません。本プロジェクトでは、約50年生のスギ・ヒノキ人工林に将来木施業試験地を設定し、間伐実施1年前からの立木の成長を追跡中です(図37)。間伐での伐倒候補は将来木に樹冠接触する林冠木のみです。強度間伐法である鋸谷式間伐に準じ、伐倒候補木中、最も優良な2本程度を準将来木として残し、他の伐倒候補木は全て伐倒します。間伐エリアの外側は、将来木の“風防”ともなるよう無間伐エリアとします。“風防”的な厚さは本試験の検討対象ではありませんが、一般的な列状間伐の「3残1伐」～「4残2伐」方式に準じ、林冠木3～4本程度を想定しています。保安林等の間伐率制限がある林分では、間伐前の標準地調査で将来木あたりの伐倒本数を推定し、間伐率制限に応じて将来木本数を調整することができます。

本試験は本稿執筆時点では間伐実施から0～1年が経過した段階です。間伐効果が成長に現れるには一般に2～3年がかかるため、過密人工林での将来木施業の有効性検証にはさらに観察が必要です。今後の追跡により、将来木施業による間伐効果の大きさと持続期間を明らかにします。また無間伐エリアでは無施業に近い状態が継続し、立木成長の抑制が懸念されることから、無間伐エリアでの立木の成長実態等についても観察を継続します。

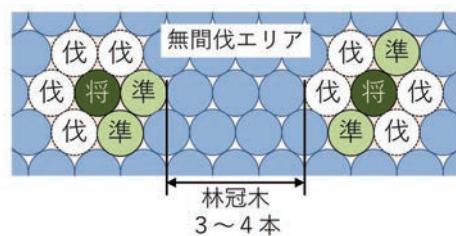


図 37 試験中の将来木施業の概念図

各円は林冠木の樹冠。将来木（将）、準将来木（準）、伐倒木（伐）からなる間伐エリアの外側は無間伐エリア。

M-6. 再造林：その意義と必要性

現在、人工林では伐採が盛んにおこなわれていますが、伐採した後に再造造林をすることは森林資源を持続的に確保するだけでなく、斜面崩壊防止のためにも重要です。どの樹種をどのように植栽するのかは立地条件、気候条件、植栽後の管理方法、市場の状況などを考慮に入れて決めることが大切です。

■ なぜ再造造林をしないといけないのか？

現在、戦後の拡大造林で植栽された木が伐期に入っています。林齢51年から70年の人工林が日本の人工林面積の約半分を占めていることから（林野庁 2024）²³、人工林では伐採が盛んにおこなわれています。しかし、伐採による収入に比べて造林保育コストが大きいことなどから、伐採後に再造造林が行われないケースも少なくないことが問題になっています。

伐採するとそれまで斜面の崩壊に対して抵抗力を発揮していた木の根が徐々に腐朽して抵抗力を失う一方で、再造造林しなければ新たな木の根が成長せず抵抗力は回復しないので、崩壊の危険性が高まります【T-3】。

さらに、ニホンジカやエゾシカなど（以下シカ）が多く生息する地域では、再造造林せず防鹿柵等を設置しないと伐採跡地にシカ等が自由に入ることができ自然に生えてきた草木を食べます。これにより、植生の回復が大幅に遅れるだけでなく、急傾斜地では地表面が露出し土砂の流出が発生します（図38）。

そのため、木を切った後に再び造林することは将来の木材資源の維持だけでなく、斜面崩壊や土砂流出の防止のためにも重要といえます。

■ 何を植えるのか？

再造造林で植栽する木をどの樹種にするのかは決められていません。植林する場所（立地条件、気候条件など）、市場の状況で選択することになります。多くの植林事業ではスギ、ヒノキ、カラマツなどを用いた単一樹種の一斉造林が多く採用されています。同じ樹種を一斉に植栽したほうが異なる樹種を植栽した場合よりも植栽した木の成長の差が少なく、植林後の管理（下刈り、間伐など）がしやすくなります。一方、単一樹種で植林すると病虫害等にあった場合に被害が大きくなるほかに、伐期に達した時にその樹種の木材の需要がない場合や、木材価格が安くて得られる収入が想定よりも低くなる場合があります。これは前例があまりない樹種を植栽する場合も同様の危険性があります。市場の状況を注視し、植栽地にあった樹種を選択することが大事です。



図 38 シカ食害による植生減少の結果

土砂の流出が発生した急斜面

²³ 林野庁（2024）令和5年度森林・林業白書

M-7. 斜面崩壊リスク軽減に天然植生を活用する新しい再造林技術

人工林の斜面崩壊リスクは幼齢段階で最も高くなり、その軽減には造林地の天然植生、すなわち雑草木の根系を最大限充実させることが重要です。天然植生を排除することなく植栽木の成長を確保する初期保育技術があれば幼齢造林地の根系充実に効果的です。本プロジェクトでは、植栽木と天然植生を共存させる単木管理型の新しい省力的初期保育技術を試みました。

■ 防災と人工林幼齢段階と天然植生

人工林の斜面崩壊リスクは幼齢段階（5～15年生頃）で最も高くなります【T-3】。これは伐採木の根系の腐朽が進む一方、植栽木の根系が未発達なためとされています。その間の斜面崩壊リスク軽減には造林地の天然植生、すなわち雑草木の根系を最大限充実させることが重要です。

幼齢造林地では植栽木の成長のために下刈りや除伐などの初期保育作業が行われ、植栽木の競合相手である天然植生は刈り払われるのが通常です。植物の根系は地上部量と釣り合った量になっており、天然植生も地上部が刈り払われた分だけ根系量が少なくなります。もし天然植生を排除することなく植栽木の成長を確保できれば幼齢造林地の根系充実に効果的です。

■ 天然植生と共存的な初期保育技術

天然植生を排除せず、植栽木と水平共存させる単木管理型の新しい初期保育技術として、列間筋刈りと坪刈りを組合せた「改良列間筋刈り」方式の省力的下刈りを試験中です(図39)。この下刈り方式では、植栽木の成長空間確保のため、列間筋刈りで植栽列間を一筋おきに刈り払った上で植栽木周囲を半径70cm程度で坪刈りします。それ以外の場所は無下刈りにし、天然植生の成長空間を確保します。刈払い箇所は年度間で変えず毎年同じ場所を刈り払います。刈払いエリアへの侵入天然植生は、植栽木の成長と下刈り作業時の視界確保のため、作業者の目の高さまで刈り払います。

下刈りと同様、除伐も天然植生を全て刈り払う通常方式では行いません。植栽木成長の直接阻害木のみを伐倒する将来木施業的な単木管理方式で行い、少なくとも斜面崩壊リスクの高い幼齢段階を脱する初回間伐までは、経営的に許容可能ならその後もずっと天然植生を維持・活用し続けます。

■ 試験状況

試験では、下刈り期間を5年間とし、毎年改良列間筋刈りする「完全型」と、2年間通常の毎年全面刈りの後、残り3年間を毎年改良列間筋刈りする「混合型」の2方式を実施しています。下刈り期間終了1年後の6年生時点で、植栽木のスギは、混合型では林冠層に、完全型では概ね先駆性樹種の樹冠下、亜林冠層にありました。両方式とも樹高平均はほぼ3.5mに達し、天然植生との競合による成長低下はあっても、人工林経営に許容可能なレベルと考えられました。他方、少数ながらツル切りが必要な植栽木があり、低成本再造林の共通課題であるツル対策の重要性が示されました。今後は、上述の単木管理方式の効果を、除伐についても検証していく計画です。

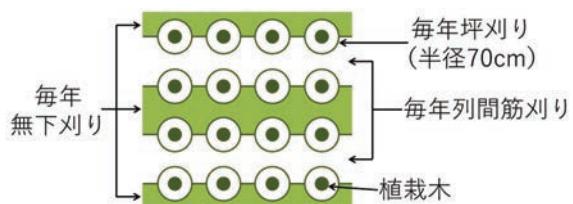


図39 「改良列間筋刈り」方式による省力的下刈り法の概念図

刈払いエリア（毎年列間筋刈り+毎年坪刈り）は植栽木のため、無下刈りエリア（毎年無下刈り）は天然植生のための成長空間として確保

M-8. 育成複層林について – 複層林・育成複層林とは？

上層・下層に同じ樹種を植栽する従来の垂直タイプの複層林は、林床の裸地化を防ぎ、環境に配慮した施業として注目された一方、下層木の成長不良や伐採、上層木搬出時の下層木の損傷、集約的な施業が必要などの課題が指摘されてきました。近年、育成複層林とよばれているものは、齢構成の異なる区画を面的に配置した水平タイプの複層林（複相林ともよばれる）を基本としています。

■ 複層林とは

私たちが目ににする人工林は大抵の場合、同じ年に植栽した苗木が成長し、単一の葉群を形成する森林（単層林）です。これに対し、単層林の間伐時にできた空間に新たに苗木を植栽（あるいは後述するように天然更新を期待）して樹齢の異なる集団をつくり、複数の葉群を形成する森林を複層林とよびます。従来からの複層林は層が上下に分かれるため、層の数によって二段林、三段林などともよばれます（図 40 上）。複層林は皆伐を行わず裸地化を避けるため、景観保全や水土保全に適しているとされる一方、下層木の生育不良（図 41）や上層木の伐採時に下層木へ損傷が懸念されること（図 40 下）、各層の光環境などに配慮した集約的な施業が必要などの課題が指摘されてきました。

■ 育成複層林とは

育成複層林は上述した従来の複層林（これを垂直タイプの複層林とよびます）に対し、異なる樹齢からなる区画を面的に配置することで垂直タイプの複層林の問題点を軽減しようとしているもので、水平タイプの複層林あるいは複相林ともよばれています。林野庁は森林・林業基本計画の指向する森林の状態として、単層林（育成单層林）を現状の 1100 万 ha から 660 万 ha とする一方、育成複層林を現状の 110 万 ha から 680 万 ha とすることを目指しています（林野庁 2024）。育成複層林には 2 つのタイプが存在します。1 つは単層林に対して帶状や群状に小面積皆伐を行い、その後、スギ・ヒノキなどの造林樹種を植栽して複層林を造成するタイプ、もう 1 つは単層林の間伐（あるいは小面積皆伐）後に植栽を行わず、天然更新によって植栽木以外の広葉樹等の生育を促すタイプです。

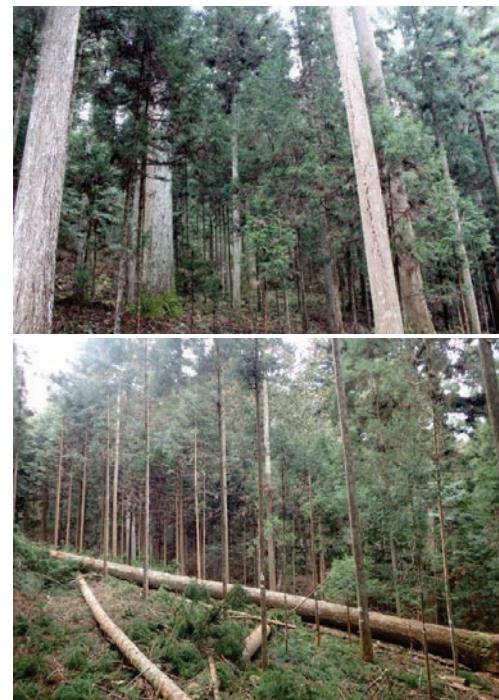


図 40 スギの高齢複層林の林内（上）と上層木の一部を伐採した後の様子（下）

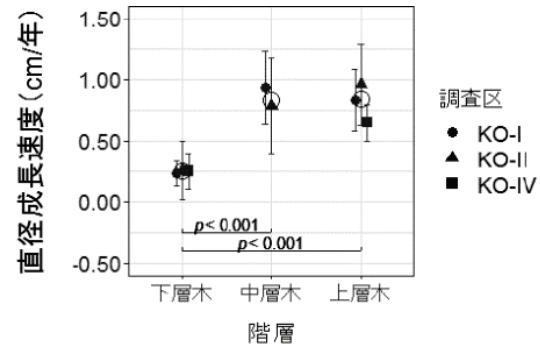


図 41 スギの複層林（写真の森林）における上層、中層、下層木の直径成長速度の比較
黒いシンボルは調査区の平均値、白丸は全体の平均値を示す。（宮本ら 2020）

M-9. 育成複層林について – 管理上のポイント

育成複層林には（1）スギ・ヒノキ等の植栽により造成するタイプと、（2）上層木の伐採後、天然更新により、針広混交林・広葉樹林化を目指すタイプの2つがあります。後者の場合は、林内の前生稚樹の存在等の諸条件が重要であり、条件が整っているか慎重な事前の検討が必要です。

■ 広葉樹林化への過度な期待は禁物、条件に応じて植栽も検討

育成複層林の2つのタイプのうち、伐採後にスギ・ヒノキ等を植栽するタイプ(図 42)では、齢構成の異なる林分（パッチ）がモザイク状または帯状に配置されるため、単層林ほど木材生産に重きを置かないにせよ、場合によっては各パッチで保育管理がしやすいよう作業道等路網の配置を工夫する必要があるでしょう。一方、針広混交林化・広葉樹林化を促すタイプ(図 43)を成立させるには、元々林内に残っている広葉樹等の稚樹（前生稚樹）の存在が重要です。他にも周辺に種子の供給源となりうる広葉樹林や埋土種子の存在も広葉樹林化の要素としてあげられますが、前生稚樹と比べると効果は限定的と考えられています（佐藤 2021）。そのため、長い間間伐等の手入れがされておらず過密となっている林分や再造林地では、林内の前生稚樹が乏しく、特に高木性の樹種による広葉樹林化を期待することは難しい場合が少なくありません。その場合、間伐により下層植生の繁茂を期待するに留めるか（代替の目標）、その立地に適した樹種の植栽を検討することが適切です。

①群状育成複層林：上木を群状に配置した残りの部分に植栽するものをいう
②帶状育成複層林：上木を帯状に配置した残りの部分に植栽するものをいう



図 42 スギ・ヒノキ等の植栽により造成する育成複層林のイメージ（森林整備センター 2022）

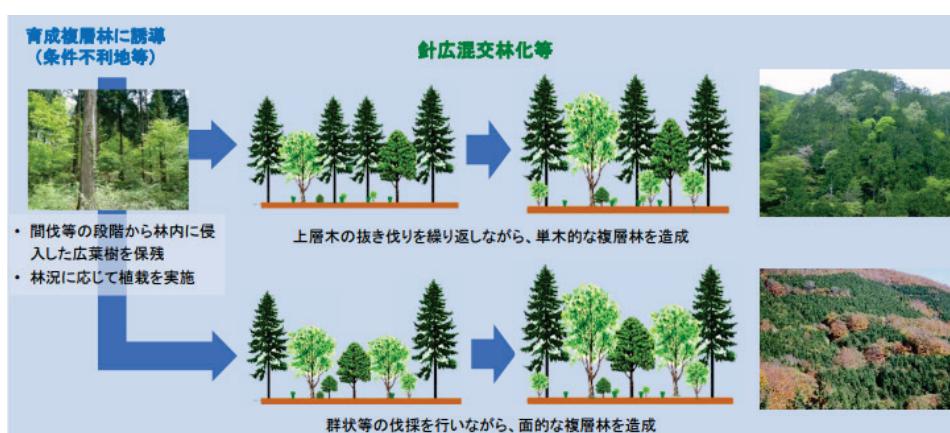


図 43 天然更新により、針広混交林・広葉樹林化を目指すタイプの育成複層林（林野庁 2020）

参考文献：(国研) 森林研究・整備機構 森林整備センター（2022）水源林造成事業における育成複層林造成への手引き. /宮本和樹ら（2020）森林総合研究所研究報告 Vol.19: 45-53. /林野庁（2020）多様で健全な森林の誘導. 令和2年10月12日林政審議会資料5. /林野庁（2024）令和5年度森林・林業白書. /佐藤保（2021）針広混交林を目指す市町村森林経営管理の施業. 林業改良普及双書 No.197. 全国林業改良普及協会.

M-10. 広葉樹林化：主伐後に広葉樹の森を作る

木材生産に適さない林地では、主伐後、広葉樹林への林種転換（広葉樹林化）が選択肢のひとつになります。広葉樹林化の方法には、鳥などによって散布される種子や萌芽による天然更新と、苗木を植える人工植栽があります。更新方法を選ぶには、どんな森にしたいか（目標林型）、どんな更新材料があるかを見極めることが必要です。

■ 天然更新：自然の力を活かす

人工林の伐採後は、地中に埋もれている種子（埋土種子）や伐採後に新たに散布される種子（散布種子）、伐採前から林内に生育する樹木（前身稚樹）によって更新が始まります（図 44）。埋土種子の多くは、アカメガシワやキイチゴ類などの先駆性樹木のため、極相林のような発達した森の再生には、前身稚樹と散布種子源となる近接広葉樹林の存在が重要となります。前身稚樹は樹種やサイズによって萌芽力が変わります。散布種子は形態によって散布される距離が変わるため、短期的にみるとその効果が期待できる範囲は種子源から鳥散布種子で 30m、風散布種子で 100m 程度です。このような更新材料ごとの特性と目標林型を照らし合わせ、天然更新の可能性を見極めることが重要です。

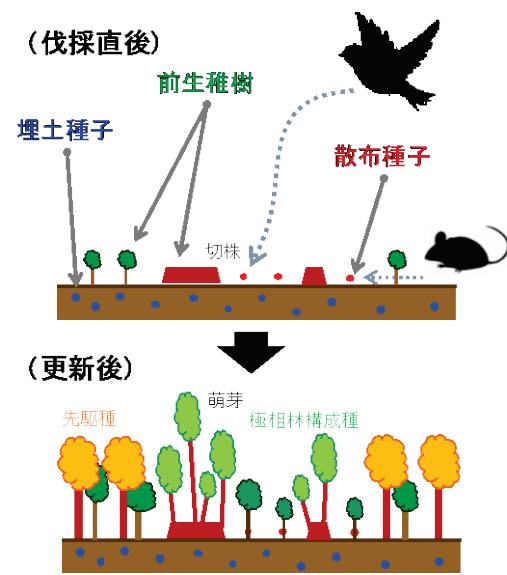


図 44 伐採後の更新材料

■ 広葉樹植栽：人為的に手助けする

天然更新による目的樹種の更新が難しい場合は、苗木を植栽し更新を手助けする必要があります。その際には、目標林型の設定が重要で、広葉樹による木材生産を目指すのか天然生林を目指すのかによって、植える樹種の選択や植栽密度などが大きく異なります。天然生林を目指す場合には、対象地の地域や地形にあった樹種を選ぶ必要があります。また、遺伝子搅乱を防ぐためにも植える苗木はその地域で採取された種から作る必要があるでしょう。広葉樹植栽については、このような課題と難しさがあり、慎重に進めていく必要があります。

■ 更新阻害：シカから守る

シカの生息が認められる地域では、被害対策が必要となってきます。天然更新であっても例外ではなくシカの生息密度が高い地域では、忌避植物のみが繁茂することになります（図 45）。シカの被害対策には、防護柵、単木保護資材などありますが、目的やシカの影響レベルにあった資材の選択が必要です。また、忌避植物を使った植栽も選択肢のひとつとして考えられます。



図 45 忌避植物のシロダモのみが更新する林地

付録

■ 仕様書例（経営管理が行われていない人工林、斜面崩壊危険度）

本書で提案した「経営管理が行われていない人工林を抽出する」、「斜面崩壊危険度を判定する」それぞれの地図情報を、市町村などが森林の航空レーザ計測及び森林資源解析業務を外部委託する際に、本書を参照した仕様を指定するための仕様書例「森林の航空レーザ計測及び森林資源解析業務 特記仕様書案」を次ページ以降に示します。

ベースとなる仕様書は、インターネット上に公開されている同様の事業の複数の特記仕様書を参考にして作成した架空のものです。このベース仕様書に、上記の地図情報を納入成果品に含めるための項目を書き加え、または部分修正しました。「経営管理が行われていない人工林を抽出する」の部分は黄色のマーカで、「斜面崩壊危険度を判定する」の部分は水色のマーカで、それぞれ示しています。これらのうち、いずれか片方だけでも委託できます。

それぞれの解析方法については、本書技術編の該当する章を参照するように指示してあるので、仕様書の中で詳細を指定する必要はありません。他の事業成果物の仕様と同様に、対象範囲や成果品のファイル形式、データ形式など、入出力のパラメータを仕様書で指定してください。

この仕様書例をもとに、発注者の様式や地域の事情に合わせて適宜変更し、活用してください。

森林の航空レーザ計測及び森林資源解析業務 特記仕様書案

第1章 総則

第1条 適用範囲

本特記仕様書は、発注者（貴団体名）が発注する「(業務名)」（以下「本業務」という。）に適用する。本業務の実施にあたっては、この特記仕様書、共通仕様書、設計図書及び関係法令等に準拠しなければならない。

第2条 業務目的

本業務は、**航空レーザ計測**を実施し、その点群データを用いて**森林の詳細地形情報**（標高、傾斜等）及び**森林資源情報**（樹高、立木本数、蓄積等）を面的かつ詳細に把握し、**安全かつ効率的な森林施業計画**（路網線形設計、間伐計画等）の策定に資する基礎データを収集・提供することを目的とする。

第3条 業務対象地

- **業務区域**：○○市町村内の森林（国有林等を除く民有林を基本とする。）
- **対象面積**：約 ○○○ km²（○○林班～○○林班の範囲）
 - （補足）具体的な区域については、発注者が別途提示する区域図による。

第4条 履行期間

契約締結日の翌日から 令和〇年〇月〇日までとする。

第2章 業務内容及び技術的要求事項

第5条 航空レーザ計測

1. **計測密度**：森林資源解析に必要となる最低〇点/m² 以上を確保すること。¹
2. **計測時期**：葉のない時期（無葉期）に計測すること。（ただし、広葉樹林が多く、適切な無葉期の確保が困難な場合は、監督職員と協議する。）
3. **座標系**：測量法に基づく公共座標系（○○系）を使用すること。標高は標高の基準（例：東京湾平均海面または指定された水準点）に準拠すること。

¹ 計測密度は最低 4 点/m²は必須条件とされている（下記）。しかし、混み合った森林を対象として十分な精度の地形データ（1m メッシュまたはそれより精細）や林冠の情報を取得するためには、より多くの点数（例えば、10 点/m²程度）が望ましい。

第6条 森林地形解析

1. データ補正：航空レーザ点群データから植生を除去し、真の地表面を抽出・分類すること。
2. 数値標高モデル（DEM）の作成：地表面点群データに基づき、○m メッシュの高精度な DEM を作成すること。²
3. 等高線作成：○m 間隔の等高線（補助曲線含む）を作成すること。
4. 山地崩壊危険度点数マップの作成：山地災害危険地区調査実施要領（林野庁、令和4年度版）に基づく山地崩壊危険度点数を、2. で作成した DEM を用い、森林総合研究所「管理優先度の高い民有人工林の抽出と管理のための手引書」技術編 T-4、T-5 の方法により作成すること。
5. 0次谷マップの作成：2. で作成した DEM を用い、森林総合研究所「管理優先度の高い民有人工林の抽出と管理のための手引書」技術編 T-6 の方法により作成すること。

第7条 森林資源解析

1. 基本データ：航空レーザ点群データに加え、発注者が提供する森林簿、森林計画図 GIS データ、林分収穫表などの資料を収集・整理し、解析の基礎データとすること。
2. 資源情報項目：解析により、以下の森林資源情報を面的に把握し、データ化すること。
 - イ) 樹高（平均樹高、上層木平均樹高等）
 - ロ) 立木本数（本数密度、ha 当たり本数）
 - ハ) **樹冠疎密度 (%)**
 - ニ) **平均樹冠長率**（平均樹冠長を平均樹高で除したもの、%）
 - ホ) **管理状態マップ**（間伐遅れの恐れのある森林を抽出したもの）
 - ヘ) 蓄積（ha 当たり材積）
 - ト) 林相区分（針葉樹・広葉樹・混交林等の区分）
 - チ) その他（監督職員と協議の上、必要に応じて追加する。）

なお、ハ)、ニ)、ホ)については、森林総合研究所「管理優先度の高い民有人工林の抽出と管理のための手引書」技術編 T-1、T-2 を参照すること。ホ)を作成するための閾値の設定は監督職員と協議のうえ行うこと。
3. 解析精度：解析結果は、「森林資源データ解析・管理標準仕様書（Ver. 3.0）」等の林野庁が定める基準に準拠した精度を確保すること。

² DEM のメッシュ間隔は、詳細な地形の判読および解析を行うためには、1m または 0.5m 程度が望ましい。これらの精細なメッシュ間隔では、コンピュータによる地形解析（技術編【T-4】、【T-6】など）を行う際に計算負荷が高くなり結果が得られない場合がある（技術編 表 2）。しかし、その場合には精細な DEM を間引き、例えば 5m 程度まで粗くしてから計算すれば負荷は減り、地形解析と詳細な地形判読とを両立できる。

第8条 現地調査（グラウンドトゥルース）

森林資源解析の精度検証のため、〇〇箇所以上の標準地（プロット）を設定し、樹種、樹高、胸高直径（DBH）、枝下高等の現地実測を実施すること。³

第3章 成果品及び納品

第9条 成果品一覧

本業務の最終成果品として、以下を納入すること。

1. 解析報告書：業務の実施体制、計測方法、解析手法、現地検証結果、解析精度、今後の活用方法等を取りまとめたもの。（紙媒体〇部、電子媒体1式）
2. 航空レーザ計測点群データ：
 - LAS形式（反射強度等の属性情報を含む）
 - 分類済み点群データ（地表面、植生、建物等に分類されたもの）
3. 数値標高モデル（DEM）：
 - OmメッシュのGeoTIFF形式
4. 山地崩壊危険度点数マップ：
 - OmメッシュのGeoTIFF形式
5. 0次谷マップ：
 - ポリゴンGISデータ（シェープファイル形式またはGeoPackage形式）
6. 森林資源解析結果GISデータ：
 - OmメッシュのGeoTIFF形式
 - Omメッシュを小班単位で平均化したポリゴンGISデータ（シェープファイル形式またはGeoPackage形式）
 - （項目）：樹高、木数密度、蓄積、林相区分等の解析結果
7. オルソフォト（正射写真）：
 - 計測と同時に取得した空中画像データから作成した高解像度のオルソフォト（GeoTIFF形式）
8. その他：業務実施過程で作成された各種図面、資料、関係法令等に基づき必要な成果品。

³ 航空レーザ計測による計測データの精度検証のための現地調査の点数として基本的には1樹種当たり30点以上が推奨されている。現地調査の地点は、同一樹種でも様々な林齢と様々な立地条件に分散させる必要がある。対象地域の状況によっては30点以上が必要となる場合もありうる。現地調査の点数や方法について、詳しくは以下を参照のこと。森林GISフォーラム、森林資源データ解析・管理標準仕様書 ver.3.0

第 10 条 成果品の著作権及び帰属

本業務の成果品にかかる著作権、所有権及びそれらに係る一切の権利は、発注者（〇〇市町村）に帰属するものとする。受注者は、発注者の許可なく第三者に成果品を複写、公表、貸与又は使用させてはならない。

第 4 章 その他

第 11 条 協議

本特記仕様書に記載のない事項、その他疑義が生じた場合は、その都度発注者と受注者が協議の上、発注者の指示に従い業務を遂行するものとする。

第 12 条 秘密保持

受注者は、本業務の実施により知り得た発注者の機密情報、個人情報及び業務の成果内容を、第三者に漏洩してはならない。

責任編集者

鷹尾元、岡田康彦、高橋與明、壁谷大介

執筆者一覧

氏名	担当章
荒木眞岳	M-3
岡田康彦	T-3
小野澤郁佳 ^{*1}	仕様書例
壁谷大介	M-1、M-2
北川涼	M-1
鈴木覚	T-7
鷹尾元	概要編、仕様書例
高橋與明	T-1、T-2、仕様書例
樋間岳	M-4
宮本和樹	M-1、M-8、M-9
村上亘	T-4、T-6、仕様書例
八木貴信	M-5、M-7
山川博美	M-10
山下尚之	T-5
米田令仁	M-6

50 音順、所属：(無印) 森林総合研究所、*1 福岡県農林業総合試験場

編集履歴

Ver. 0.0

2026 年 3 月 1 日



国立研究開発法人 森林研究・整備機構

森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所 第5期中長期計画成果37（森林産業-17）

管理優先度の高い民有人工林の抽出と管理のための手引書

編集・発行：国立研究開発法人森林研究・整備機構
森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1
問合せ先 広報普及科編集刊行係
電話 029-829-8373
E-mail: kanko@ffpri.go.jp

発行日： 2026年3月1日

本書の引用記載：

森林総合研究所, 茨城県林業技術センター,
福岡県農林業総合試験場, CTI リード (2026),
管理優先度の高い民有人工林の抽出と管理の
ための手引書. 国立研究開発法人森林研究・整
備機構 森林総合研究所, 58 pp.

ダウンロード URL：

<https://www.ffpri.go.jp/pubs/chukiseika/5th-chuukiseika37.html>

表紙写真：(上) 0次谷と流域の鳥瞰図 (技術編T-6参照)

(下右) 空中写真、(下中) 樹冠疎密度マップ、(下左) 平均樹冠長率マップ

(技術編T-2参照)

