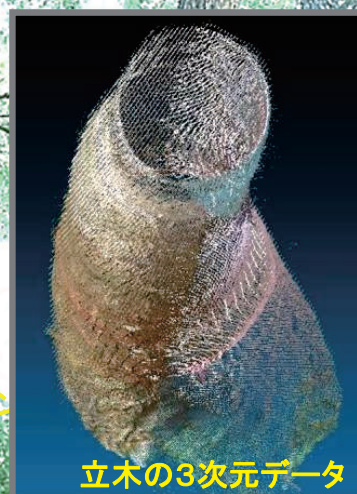


林業新技術 2018

—現場への普及に向けて—



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



「林業新技術2018」について

森林の有する多面的機能の発揮、林業の持続的で健全な発展、林産物の供給や利用の確保を図るためには、将来の林業・木材産業の発展に資する技術開発を推進するとともに、開発された技術を計画的、効果的に現場に普及し、実用化を図ることが極めて重要です。

このため、国立研究開発法人 森林研究・整備機構および公立林業試験機関の近年の研究成果のうち、今回は森林造成、木材利用など9件の優れた技術を、現場へ普及するために選定しました。



「林業新技術2018」技術一覧

- 間伐がスギ林の根系分布に及ぼす影響**…………… 3-4
森林総合研究所 ほか
スギ間伐林の崩壊防止機能への影響を調べるために、根系を掘削して調べたところ、根系分布への間伐の影響が分かりました。崩壊防止は間伐だけでは限界がありますが、健全な森林を作ることが森林の機能を高めるために必要となります。
- 「丹沢ブナ林再生指針」の作成**…………… 5-6
神奈川県自然環境保全センター
神奈川県丹沢山地で衰退が進むブナ林を植生保護柵やシカ捕獲、ブナハバチ防除を組み合わせ、効果的・順応的に再生するための考え方や進め方を体系的に整理した技術指針を作成しました。各種事業の一体的な実施によるブナ林再生の推進が期待できます。
- 福島原発事故後5年間の森林内における放射性セシウムの動態**…………… 7-8
森林総合研究所
放射性物質調査から、放射性セシウムは時間の経過とともに樹木から土壌へと移動し、事故から4年後にはその多くは土壌の表層付近に存在していることが明らかになりました。森林の放射性セシウム汚染はしばらく続きますから、調査の継続が必要です。
- クラッシャ機械地拵えによる下刈省力化と再造林コストの低減**…………… 9-10
森林総合研究所
林内造材した伐採現場にクラッシャという新しい地拵え機械を導入することで、地拵えの効率化・低コスト化だけでなく下草の繁茂が抑制されることが明らかになりました。これにより緩中傾斜地の再造林コストの大幅な削減が期待されます。
- 地上型三次元レーザースキャナによる森林計測と採材丸太の評価**…………… 11-12
広島県立総合技術研究所 林業技術センター
地上型三次元レーザースキャナで立木の形状を精密に測定することで、森林から出材可能な丸太の径級や曲り区分ごとの本数、材積、価格を算出できました。現地調査の効率化に加え正確な伐採支計画の策定が可能になります。
- 豊富な国内資源から要求性能を満たすCLTを効率的に製造する技術を開発**…………… 13-14
「伐採木材の高度利用技術の開発」プロジェクトチーム
ひき板（ラミナ）の形状や材質と製造の条件、製品性能との関係を実験的に検証して、CLT（直交集成板）の効率的な製造と性能予測が可能になりました。厚く大きなCLTは、建物の床や壁に森林資源を活用できる技術です。
- 立ち木の状態で木材の強度を精度よく調べる**…………… 15-16
鳥取県林業試験場
立木状態で木材の強度性能の推定に用いる応力波伝搬時間の計測について、計測値のバラツキを大幅に低減する計測手法を開発しました。強度性能選抜の精度の向上や、実大材の水分管理等への応力波法の活用が期待出来ます。
- 酸性の荒廃地の緑化技術を開発するためにータンニンによるアルミニウムの無毒化ー** …… 17-18
森林総合研究所
ユーカリでは、根に含まれるタンニンが、酸性の土壌で植物の生育を妨げるアルミニウムを無毒化する上で重要な役割を果たしていることを明らかにしました。酸性の土壌にも耐えて生育できる樹木の開発につなげていきます。
- バツの木、アオダモの育成手法ー採種から苗木育成、植栽初期の保育までー** …… 19-20
森林総合研究所 林木育種センター
国産材バツの原料であるアオダモの採種方法、マルチキャビティコンテナを利用した育苗方法、山出し後の保育方法について検討しました。一連の技術を利用することにより、効率的にアオダモの人工造林を進めることができます。

間伐がスギ林の根系分布に及ぼす影響

1. 現状と課題

近年全国各地の山林で、豪雨に伴う斜面崩壊の被害が発生しています。このため森林がもつ多面的機能の一つである斜面崩壊の防止機能を効果的に発揮させる森林管理が重要になります。崩壊防止機能のなかでも斜面崩壊への抵抗力を高める樹木根系の役割は大きいと考えられています。しかしながら、樹木根系の実際の状態は、最終的に掘り出さないと詳しいことは分かりません。また実測例も限られており、森林管理との関係を比較できる状態までには至っていません。

このため、今回は日本に広く分布するスギを対象に、間伐林と未間伐林の根系分布の違いを調べました。



写真1 豪雨によって発生した林内の崩壊地

2. 技術開発の内容

2.1 根系分布の調査方法と分布の変化

根系の発達是一般的に樹種だけで無く土層の厚さや地下水の位置など、周囲の影響を受けて変化します。このため実際に注意深く掘削して根系の長さや太さを測定し、深さ毎の根系の分布量を調べました（図1）。ここでは和歌山県内のスギ間伐林（写真2）、未間伐林（写真3）で行った調査を例に説明します。

樹木の根系は一般に根元に近い部分では太く、先端ほど細くなります。スギは他の樹種と比べて細い根が多く高密度で分布しています。ただ根系の到達する深さや広がり、根が侵入できる土層の硬さや厚さ、地下水面の位置などにより制約を受けるので、樹木毎に根の分布は異なります。

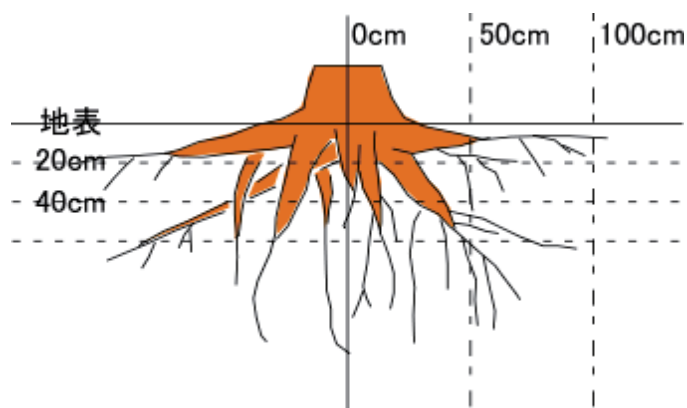


図1 根系の調査方法の模式図

それぞれの樹木の根株を丁寧に掘り出して、根系の広がりや深さ毎の量を調べます。



写真2 スギ間伐林
(18年生、間伐後4年)

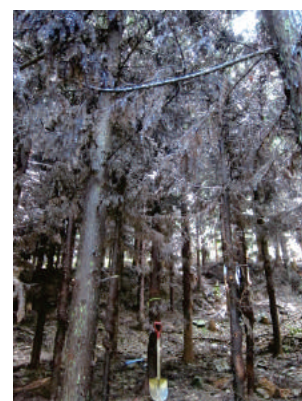


写真3 スギ未間伐林
(16年生)

一般的に根系は地下の浅い場所で多く、深くなるほど少なくなる傾向にあります。間伐を行うと、受け取る日射量が多くなるため、樹木の枝葉の分布は広がり、樹幹が太くなります。樹幹が大きくなると根系量も増加します。実際の調査事例では、間伐した森林では、未間伐の森林と比べて全ての深度で根の量は多くなっていますが、間伐林では浅い部分で根の量が特に増加しています（図2）。水平方向では、樹幹の中心から離れるほど根系の量が少なくなりますが、間伐林のスギは未間伐林と比べて、樹幹からの距離が同じでも根系量は増加し、根系の分布範囲がより遠方にまで広がることが分かりました（図3）。しかし鉛直方向には土層の厚さなど地盤条件の影響もあり、間伐による影響は確認出来ませんでした。

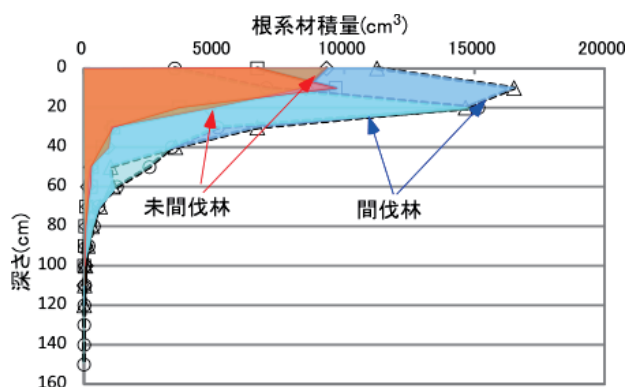


図2 間伐林と未間伐林それぞれの単木当たりの深さ毎の根系分布量¹⁾

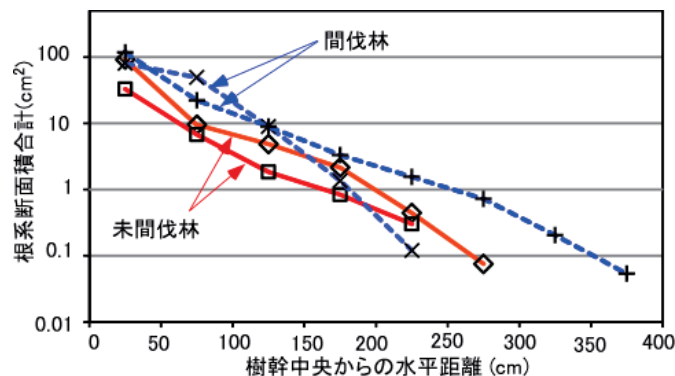


図3 間伐林と未間伐林それぞれの単木当たりの樹幹中央からの水平距離毎の根系分布量¹⁾
引用した図の縦軸を対数表示で示した。

2.2 スギ根系分布の変化が斜面の安定に及ぼす影響

斜面の崩壊は、土層がある面を境とした横ずれによって起きます。土層中の横ずれの箇所に根が含まれると、土層と根が補完して横ずれに対する抵抗力が増加します。このため土層に含まれる根が多いほど、崩壊発生への抵抗力が高まります。

間伐林の立木の根系は主に水平方向に分布が拡大し量も増加していました。このため立木周辺の根系分布範囲では崩壊に対する抵抗力は大きくなると言えます。しかし深さ方向への根系の成長に関しては間伐の有無による影響を確認出来ないため、根系分布の下方で起きる崩壊の防止効果まで高まるとは言えません。また間伐後、立木間距離が広がり伐採木の根系は腐朽消失するため、残存木の根系が水平方向へ生長し伐採木の範囲をカバーするほど十分広がるまでは、斜面全体で見ると一時的に森林の崩壊防止機能は低下するとも考えられます。しかし、長期的に見ると未間伐の林分に比べて、健全な森林が形成されます。健全な森林では風倒害や病虫害などの外的攪乱の影響を受けにくく、また斜面の中でも立木の周辺では、根系量が増加しその部分での崩壊防止機能はより高くなると予想されます。

3. 期待される効果と普及の対象

スギ間伐林では根系量が特に地下の浅い場所で増大することが分かりました。しかし根系の分布はその場所の土層や水分など環境条件によって異なるため、間伐を行うだけで一律に崩壊に対する抵抗力が高まるとは限りません。特に近年では極端に激しい豪雨も発生しており、森林の崩壊防止機能だけでは限界があると言われています。森林の利点として災害防災だけでなく、木材生産や生物多様性など様々な機能を同時に発揮できる点があります。これらのバランスを図りながら健全な森林を目指して管理することが必要です。

1)：掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時、スギ林分の間伐が根系生長と表層崩壊防止機能に与える影響、日本緑化工学会誌、42(2)299-307、2016

「丹沢ブナ林再生指針」の作成

1. 現状と課題

神奈川県丹沢山地の豊かな自然環境の象徴であるブナ林では、大気汚染（オゾン）、乾燥による水ストレス、葉食昆虫ブナハバチの複合被害でブナの立ち枯れが進行し、ニホンジカによる更新阻害と相まって草地が拡大しています（図1）。このような現状に対して、ブナの立ち枯れに歯止めをかけ、ブナ等樹木の天然更新を促進することで、多様な樹種から構成される鬱蒼（うっそう）としたブナ林を再生していくことが求められています。

そこで、これまでの長期研究の成果をもとに、丹沢大山自然再生の基本的な考え方に即したブナ林再生の目標像とそこに至るまでのロードマップを示すとともに、重点的な対策が必要な地域を選定したうえで、そこでの各種手法を組み合わせた事業の進め方を体系的に整理した「丹沢ブナ林再生指針」を作成しました。



図1 ブナの立ち枯れが進行して草地が拡大している檜洞丸の山頂付近

2. 技術開発の内容

2.1 再生ロードマップの作成

ブナ林の再生では、ブナハバチ防除によってブナを保全することで林冠ギャップの拡大を防ぎつつ、ブナ等の枯死で生じた林冠ギャップで植生保護柵やシカ捕獲によってシカの採食影響を抑え、天然更新を促進して早期の林冠閉鎖を目指します。この目標達成に向け、再生に要する時間と各時点で必要となる対策を示す再生ロードマップを整理しました（図2）。

自然力を活かした森林の再生には50年、100年といった長い時間を想定する必要があります。とくに衰退が進み開空度が高くなった林冠ギャップでは周辺の母樹からの散布種子数が著しく減少する（図3）ことから、これを再生に長い時間を要する大ギャップと位置づけて、低木林を形成しつつ、林縁から徐々に再生するロードマップとしました（図2）。

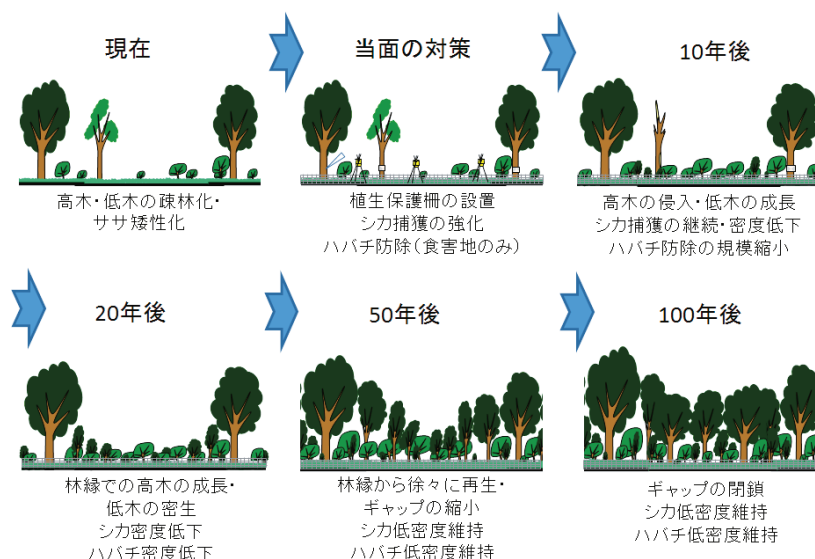


図2 大ギャップの再生ロードマップ

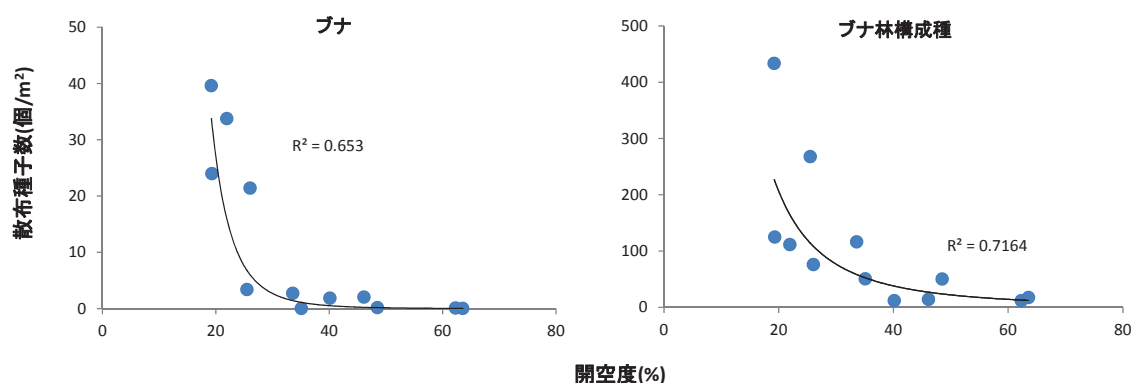


図3 開空度と散布種子数との関係
開空度が高くなるにつれてブナやブナ林構成種の散布種子数が減少する。

2.2 効果的なブナ林再生の実施方法

衰退リスクに応じた対策の優先度を地図化した再生優先地マップを作成し、とくに西丹沢の檜洞丸において、ブナハバチ対策とギャップへの対策を組み合わせた重点対策が必要なことを明らかにしました。そこで、平成29年度から当センター事業部門と連携し、植生保護柵設置、シカ捕獲およびブナハバチ防除を組み合わせた総合的なブナ林再生事業を実施しています（図4）。併せて、これらの対策を長期にわたって効果的・順応的に実施していくため、各種モニタリングにより効果を総合的に検証していく事業実施体制としています。



図4 西丹沢檜洞丸におけるブナ林再生事業例



図5 丹沢ブナ林再生指針

3. 期待される効果と普及の対象

「丹沢ブナ林再生指針」（図5、<http://www.pref.kanagawa.jp/ent/f160543>）は事業担当者向けの示方書として、再生の考え方や進め方を、植生保護柵、シカ捕獲、ブナハバチ防除および各種モニタリングを実施する事業間で共有し、一体的な進捗管理や効果検証による効果的なブナ林再生の推進が期待されます。また、当指針を公開することにより、広く県民の理解を得て事業を進めることに役立ちます。

開発担当機関：神奈川県自然環境保全センター

福島原発事故後5年間の森林内における放射性セシウムの動態

1. 現状と課題

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所の事故では、放射性セシウムが東日本の広範囲に沈着しました。被災地では、宅地や農地の除染、インフラの復旧・整備、居住制限区域の見直し等、復興に向けての政策が積極的に進められています。森林は周辺部を除くとほとんど除染されていませんが、自然減衰によって空間線量率は大きく低下してきており、施業を対象とする範囲は広がってきました。しかしながら、福島県やその周辺地域ではコナラ等のきのこ原木の生産は困難な状況が続いています。そのため、広葉樹生産等の森林・林業活動の再開に向けて、今後の汚染状況を予測するために、森林内の放射性セシウムの動態を明らかにすることが求められています。

2. 技術開発の内容

2.1 調査地および方法

森林総合研究所では事故が発生した2011年から、福島県や茨城県内のスギ林、ヒノキ林、アカマツ林、コナラ林において、樹木の葉、枝、樹皮、幹材、および堆積有機物層（落葉層）や鉍質土壌（土壌）に存在する放射性セシウムの濃度と蓄積量を毎年調査しています（図1）。

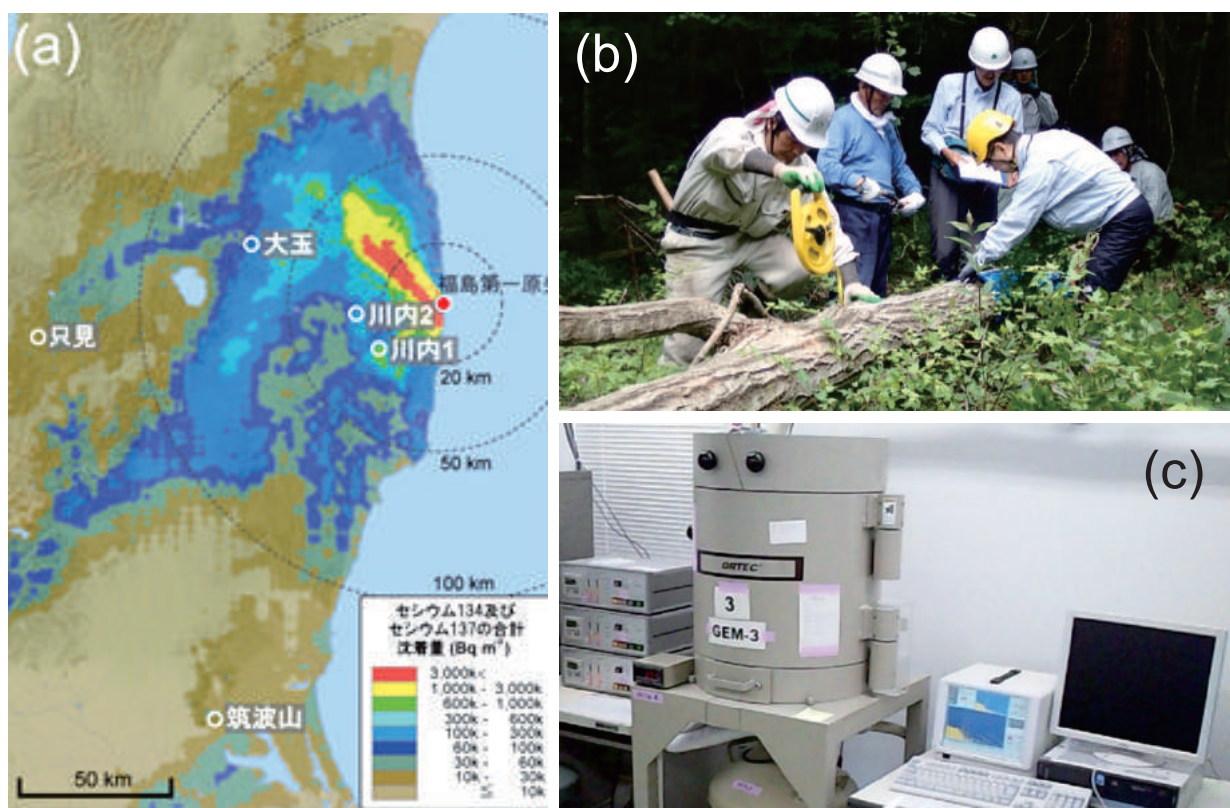


図1 (a) 福島県と茨城県の調査地点（放射性セシウム沈着量は2012年6月28日時点のもの）
(b) 樹木試料の採取の様子
(c) 放射性物質の測定に使用されるゲルマニウム半導体検出器

2.2 樹木から土壌への移動

事故直後の2011年にはスギなどの針葉樹の葉には高濃度の放射性セシウムが含まれていましたが、年数が経つにつれてそれらの濃度は急激に低下しました(図2)。2011年に採取した幹材からも低濃度の放射性セシウムが検出されました。幹材中の放射性セシウム濃度は、その後アカマツでは低下し、スギやコナラでは増加する傾向がみられました。

森林内の放射性セシウム蓄積量の変化は、全体としては大きくありませんでした(図3)。ただし、時間の経過とともに葉や幹の濃度が低下したため、地上部(樹木)の蓄積量は急激に低下しました。一方、鉍質土壌の蓄積量は増加し、事故から4年後の2015年には森林全体の90%以上が落葉層と鉍質土壌に存在し、その大半は鉍質土壌の表層0~0.5cmに存在していました。

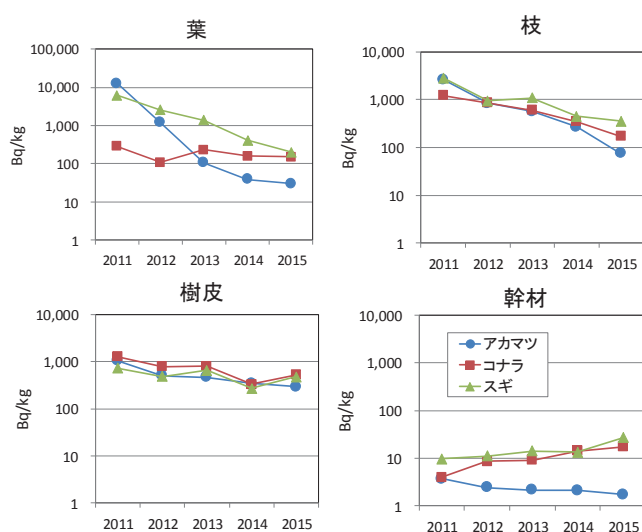


図2 樹木の各部位の放射性セシウム濃度の経年変化
(大玉村のスギ、コナラ、アカマツの例)

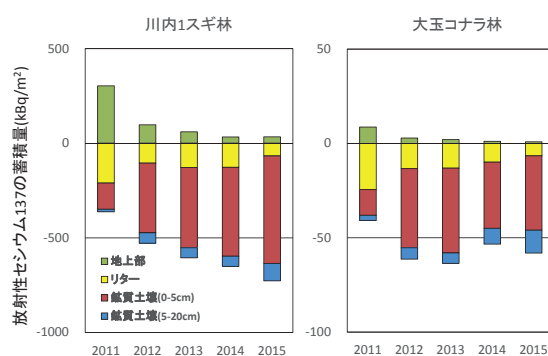


図3 森林内の放射性セシウム蓄積量の経年変化
(川内村スギ林及び大玉村コナラ林の例)

3. 期待される効果と普及の対象

森林に降下した放射性セシウムは事故直後には地上部(樹木)にも存在していましたが、事故から4年が経過してそのほとんどは林床に移動し、落葉層や土壌表層に存在していることが明らかになりました。放射性セシウムは土壌中に含まれる粘土に強く吸着しているため、雨水に溶けて土壌深部まで浸透していく心配はありませんが、土壌侵食が起こると土壌とともに森林外に流出する可能性があります。そのため森林内で作業を行う際は、放射性セシウムを流出させないために土砂流出を防ぐよう配慮することが大切です。コナラやスギの幹材では放射性セシウム濃度が増加傾向にありました。このことは樹木根による放射性セシウムの吸収を示唆しており、今後もその変化を注視する必要があります。

この研究は林野庁受託事業「森林内における放射性物質実態把握調査事業(H24-28)」、森林総合研究所交付金プロジェクト「森林・林業・木材における放射線影響に関する基礎的研究」による成果です。

クラッシャ機械地拵えによる 下刈省力化と再造林コストの低減

1. 現状と課題

主伐の増加とともに再造林面積が拡大することが予測されます。しかし主伐による木材収入は再造林コストを賄うのに不十分なため、低コスト再造林システムの構築が求められています。北海道では傾斜地が緩やかな林地が多いため（写真1）、機械化により生産性を高め、コストを削減することが重要となります。造林作業の中では「地拵え」が最も機械化を導入し易いのですが、今なお7～8割の林地で人力による地拵えが実行されています。一方で生産性が非常に高いハーベスタで伐採作業を行ない、グラブやバケットなどの機械を使った地拵えを行う場合も増えています。しかし大量に生じる末木枝条が林内の一部に集積され、カラマツ造林の天敵とも言える野鼠の住処となったり、植栽可能な林地面積を減らしてしまいます（写真2）。

そこで私達は、末木枝条を破砕することで地拵えを行うクラッシャ（マルチャーとも呼ばれる）という新しい地拵え機械の導入試験を始めました。



写真1 傾斜が緩やかな北海道の再造林地



写真2 末木枝条が大量に集積した
バケット機械地拵え地の様子

2. 技術開発の内容

2.1 新たな地拵え機械クラッシャの導入

クラッシャは、ドラムに取り付けられた固定刃が高速回転することで、末木枝条や植生を破砕する地拵え機械です。トラクタに取り付けるタイプと、エクスカベータ（油圧ショベル）に取り付けるタイプがあります。私達は、欧州や北米のメーカーから出ているクラッシャの中から、刈り幅の広さ、軽量、刈刃の耐久性などを基準として、イタリアSepipi社のMINI-BMS125という機種を選択しました。この機種は、北海道の林業現場で多く見られる0.5m³クラスのエクスカベータに装着することが出来ます。私達はこのクラッシャへ、大径残材の移動・植生根茎の処理等のためのレーキ（熊手）を付加しました。



写真3 新たに導入した地拵え機械クラッシャ

2.2 クラッシュの作業効率

クラッシュ地拵えは、エクスカベータが走行可能な傾斜20°程度まで可能で、末木枝条は10～20cm程度の小片に破碎され、林地に集積することはありませんでした(写真4右)。また、従来機械地拵えの後には残ったササや雑草を人力で刈払っていましたが(補正刈り)、この作業が必要なくなりました。

クラッシュの地拵え作業効率(0.037～0.055)は人力(0.01～0.017)よりも非常に高くなりました。一方、機械地拵えで普及が進んでいるバケット地拵えと比べると、傾斜10°程度の緩傾斜地ではほぼ同等、それよりも急な試験地で4割ほど低下しました。これは、クラッシュを高速回転させる際に多くの油量が必要で、ベースマシンの走行やブームの操作に使う油量が少なくなり、傾斜が急な箇所では動作が遅くなったためです。また、コストを平成29年度北海道造林事業標準単価(傾斜10°以下)と比較すると、人力地拵えの43%減、機械地拵え(手刈補正込)の25%減となりました。



写真4 地拵え前(左)とクラッシュ地拵え後の林地(右)

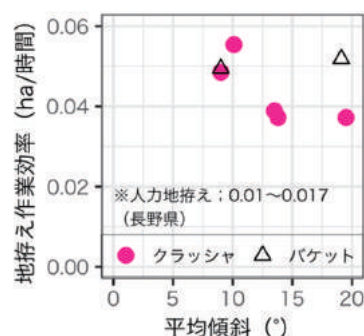


図1 傾斜と地拵え作業効率の関係

2.3 下刈省力化と再造林コストの低減

クラッシュ地拵えで生じる末木枝条の破碎物(写真5)には、下草繁茂の抑制効果がありました。破碎物が厚くなるほど抑制効果が高く、下草被度は、破碎物堆積厚7cmでバケット地拵えの半分となりました(図2)。こうして下草繁茂が抑制された林地にカラマツ苗を植栽した場合、2年間下刈を行わなくても、植栽苗は順調に生育しました(図3)。破碎物が支障となり、裸苗の植栽効率は3割ほど低下しますが、2年間の下刈省力のコスト削減効果は大きく、再造林コスト全体で最大37%削減可能と試算されました。



写真5 クラッシュ地拵えによる末木枝条の破碎物

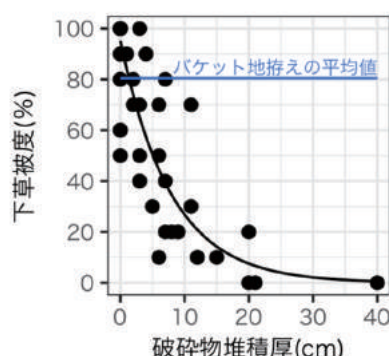


図2 末木枝条破碎物の厚さと下草被度の関係

破碎物が堆積すると、下草が生えにくいバケット地拵え地よりも、さらに下草が生えなくなりました。

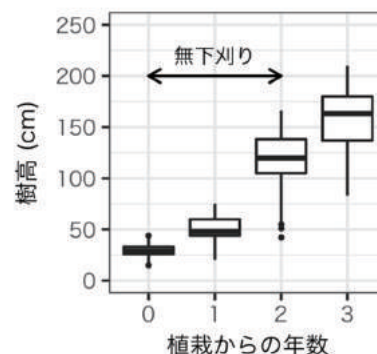


図3 クラッシュ地拵え地に植栽し、2年間無下刈とした

カラマツ苗の樹高の経年変化

破碎物の下草抑制効果により、2年間の無下刈り期間中も順調な樹高成長を示しました。

3. 期待される効果と普及の対象

ハーベスタなど林内造材した伐採現場にクラッシュを導入することで、地拵えの効率化・低コスト化が図られるだけでなく、下草の繁茂が抑制されることで下刈コストも削減できることが明らかになりました。ただし、クラッシュに負担がかかるため、岩の多い場所の地拵えには不向きとなります。クラッシュは、伐採から時間が経過するなど、雑草木が繁茂した林地の地拵えにも活用できます。現在は、下刈作業にも活用出来ないか検討しています。

地上型三次元レーザースキャナによる 森林計測と採材丸太の評価

1. 現状と課題

搬出間伐や主伐を行う際に、対象の森林から生産される丸太の量や品質を事前に評価することは、投入する労務・機械の運用計画や事業の収支を考える上で不可欠です。通常は標準地調査を行います。林分状況を正確に反映する区域設定が難しく、また、目視による観察だけでは、採材玉数や曲がり区分、末口径級など、価格を正確に算定するために必要な情報を得ることが困難です（図1）。このため、地上型三次元レーザースキャナ（Terrestrial Laser Scanner：以下TLSと略）を用いて立木の幹形状を精密に計測し、林分から得られる丸太の品質や価格を評価する手法の現地実証試験に取り組んできました。



図1 目視による立木の観察
採材可能な丸太数や曲がり区分、
末口径の評価は困難。

2. 技術開発の内容

2.1 TLS計測と曲がり判定アルゴリズム考案

スギ林内でTLS計測を行い（図2）、得られた点群（立木や地表面などから反射してきたレーザー光から得られた点の集まり）データ（図3）から、区域内のスギ全立木3,153本を抽出し、樹幹の高さ方向10cm毎に内接円（リング）を作成しました。上下のリングのずれによって樹幹の曲がり把握できることを利用して（図4）、立木から任意の長さの丸太を採材した場合の曲がりの判定ができるアルゴリズムを考案し（特許）、これを利用したソフトウェアを作成しました。このソフトウェアで得られた数値から、径級や曲がり区分ごとの丸太の本数や材積、価格を計算することができます（図5、表1）。



図2 地上型三次元レーザースキャナ
（米FARO社製 Focus3D）



図3 TLSで得られた点群データ
RGBデータを重ねているのでカラー写真
のように見える。

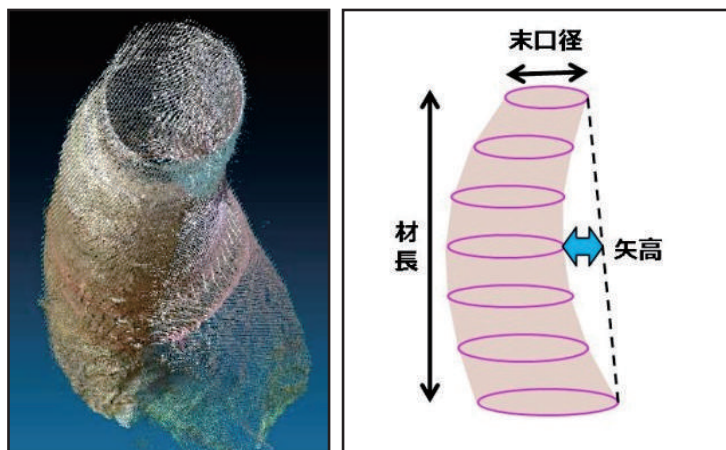


図4 樹幹の曲がり

点群データからリングデータを作成し、曲がり判定に必要な矢高を計算する。

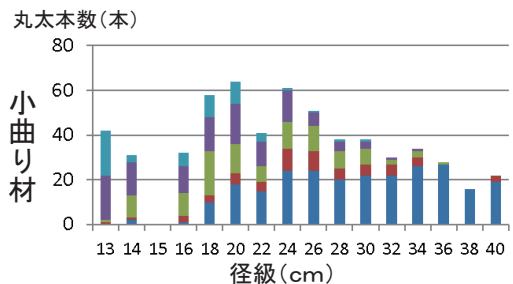
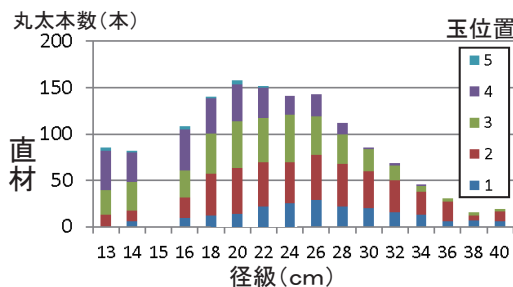


図5 曲がり判定のソフトウェアから出てきた結果を表計算ソフトで集計した例

採材長、元玉元口高、余尺、樹皮厚、径級・曲がり区分ごとの価格などを設定して、丸太の本数、材積、価格を算定する。

	実数	1ha 当たり	単位
本数	1,390	1,866	本
材積	320.0	429.4	m ³
価格	3,625	4,865	千円
単価		11,329	円/m ³

	実数	1ha 当たり	単位
本数	586	786	本
材積	154.5	207.4	m ³
価格	1,490	2,000	千円
単価		9,645	円/m ³

対象	曲り区分	原木丸太の採材長		比較
		4m	3m	
本数 (本)	直	1,390	2,237	3mが +36%
	小曲り	586	521	
	曲り	162	154	
	大曲り	21	26	
	小計	2,159	2,938	
材積 (m ³)	直	320	406	3mが +5%
	小曲り	155	107	
	曲り	46	31	
	大曲り	8	11	
	小計	528	555	
金額 (円)	直	3,624,795	3,005,796	4mが +44%
	小曲り	1,490,436	582,496	
	曲り	280,873	130,669	
	大曲り	28,356	37,619	
	小計	5,424,460	3,756,580	

表1 同じ林分について、原木の採材長を3mと4mに設定して比較した例

得られる丸太の本数と総材積については3m採材の方が多いが、4m採材の方が材積あたり単価が高いため、金額については4mの方が高いという結果が得られた。曲り区分の矢高は直：20mm未満、小曲り：20～45mm未満、曲り：45～100mm未満、大曲り：100mm以上とした。なお、曲り判定のソフトウェアは曲り区分と矢高を任意に変更可能。

2.2 TLSの作業効率

TLSの作業効率を調べたところ、広い林地を連続的に計測する面的調査では、一日当たり31から39回の計測が可能で、面積では一日当たり0.6～2.5haの調査を行うことができました(図6)。計測本数では647～1,287本/人日となり、従来方法の直径巻尺を用いた胸高直径+番号ラベル付けの作業と比べると約3～5倍、レーザーコンパスを用いて精密に測定した樹高+枝下高調査の作業と比べると約13～27倍の作業効率でした(図7)。

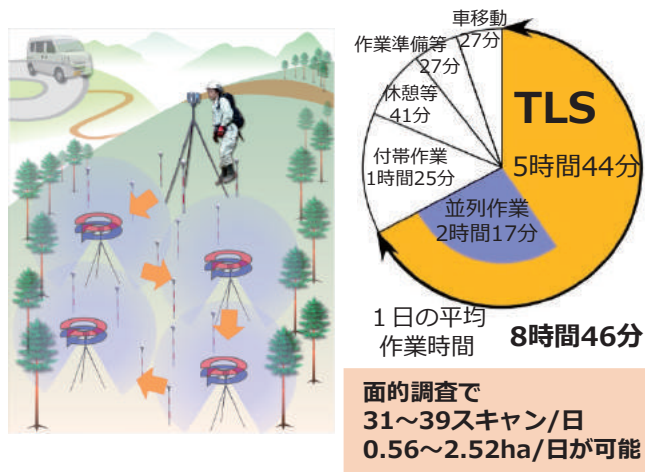


図6 TLSによる面的調査の作業状況



図7 TLSと従来の調査方法の作業効率

3. 期待される効果と普及の対象

本研究で作成した立木の曲がり判定を行うアルゴリズムは、「特許第6300211号および特許第6317052号『採材支援装置および制御プログラム』」として特許登録されました。今後は、森林のTLS計測を行った事業者等を対象に受託研究等による採材解析サービスの提供を行うとともに、ソフトウェア開発ベンダー向けの技術移転を進めていきます。

開発担当機関: 広島県立総合技術研究所林業技術センター

豊富な国内資源から要求性能を満たすCLTを効率的に製造する技術を開発

1. 現状と課題

1990年代後半からヨーロッパを中心に開発されてきたCLT（Cross Laminated Timber：直交集成板）は、ひき板（ラミナ）の繊維方向を平行にして幅方向に並べ、それらを何層か互いに繊維方向が直交するように積層接着したものです。CLTは、そのまま建物の床や壁などの大きな面を造る材料になることから、大量の木材を建物の形で貯蔵することができますが、国内に豊富に存在するスギなどを用いてCLTを製造し実際の建物に活用する研究は、まだまだ足りないのが現状です。

そこで、日本の森林資源をCLTに活用するため、CLTを効率的に製造し、その性能を確保する技術を開発しました（図1）。

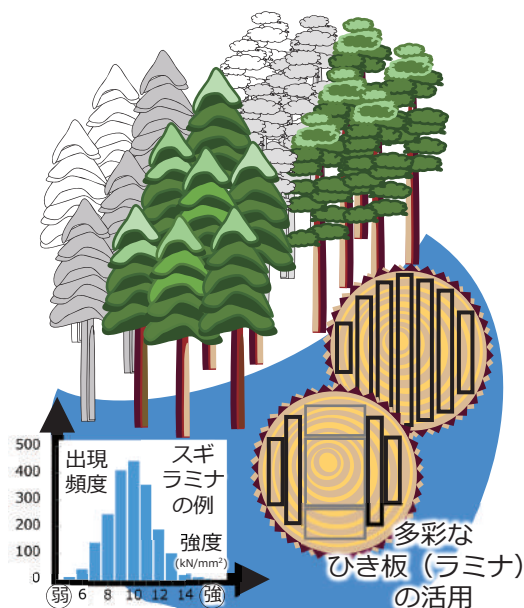


図1 国内森林資源活用のイメージ

2. 技術開発の内容

ラミナの寸法や材質は、丸太の樹種や太さ（径級）、製材時の木取り（切り分け方）によって変化します。そこで、樹種や幅・厚さ、強度性能でラミナを選別し、CLT製品内での配置や位置を決定することが、安定した性能を持つCLTを製造するためには重要です。私たちは、同じ樹種で強度が異なる「異等級構成」、スギとヒノキの「異樹種構成」、ラミナ幅を一定にして厚さを変えた「非等厚構成」、ラミナ幅と厚さの比を変化させた「可変断面構成」、の4つの組合せのCLTを試作して、ラミナとCLT製品の性能の結びつきを確認しました（図2）。

試作用のラミナには、新たに開発した二次元バーコード（QRコード）を利用した追跡方法を用いて、CLT製品内のどの位置に積層接着されたかを追跡し、ラミナ性能とCLT製品性能の関係検証に用いました（図3）。

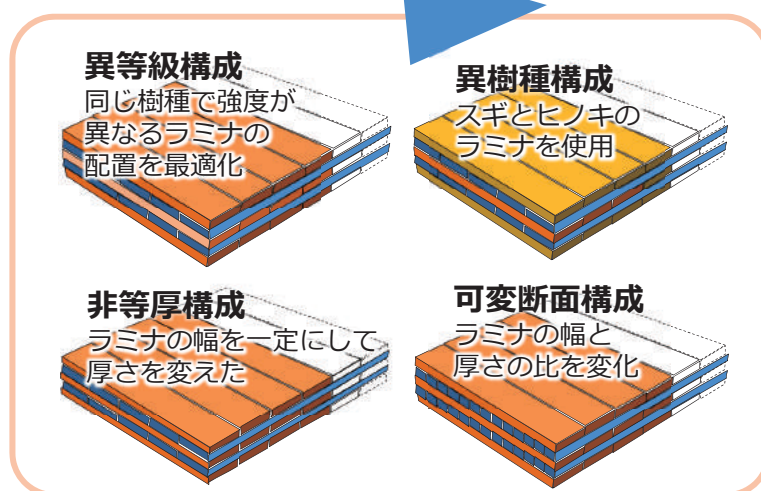


図2 4種の直交集成板（CLT）を試作



図3 試作CLT用のラミナ

新しい接着剤の開発と評価、CLT製品の各種寸法や反り・曲りなどの形状変化も検証しました。さらには日本農林規格では規定されていない面内曲げ、引張り、圧縮の性能試験法を確立して強度評価に加えると共に、建物の床・壁を想定した破壊加力実験も行いました（図4）。



二次元バーコードを使ったラミナ追跡技術を開発

CLTの強度評価：

引張り、圧縮、面外曲げ、面内曲げ、面外せん断、面内せん断、めり込み



空隙充填性接着剤、接着性能評価法、長期寸法安定性評価法も開発



図4 性能の評価技術を開発して確認

二次元バーコードを使ったラミナの追跡にもとづき、ラミナの性能と、製造条件の異なる各試作CLTの試験結果を総合して、CLTの各種強度性能値をラミナ性能から推定するソフトウェアを開発しました。これにより、要求性能を満たすCLT製品の積層構成をシミュレーションにより最適化でき、森林資源の状況に応じて効率的にCLTを製造することが可能となりました（図5）。

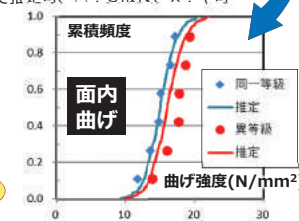
材料・製造条件と製品性能の関係を検証

推定手法の検証結果

強度種類	性能	推定理論	H25	H26	H27	H28	H29
			異等級	+異樹種	+非等厚	+可変断面	
面外曲げ	弾性率	せん断解析	○	○	△	○	○
	平行層		×	×	○	×	△
	強度	機械接合梁	○	○	△	△	△
	平行層		×	×	○*	○*	○
	強度						
面内曲げ	弾性率	平行層	△	△	○*	○	○
	強度	平行層	△	△	○*	○	○
圧縮	弾性率	平行層	○	○	○	○	○
	強度	平行層	△	△	○	○	○
引張り	弾性率	平行層	○	○	○	○	○
	強度	平行層	△	△	△	△	○

○：推定可、○*：改良して推定可、△：要改良、×：不可

層構成の影響を平行層理論による推定強度と実験値で比較



精度良く予測可能

ラミナの形状や材質からCLT性能を予測する技術を開発

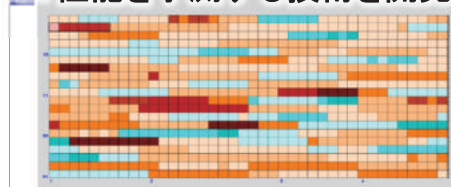


図5 CLT性能を予測する技術開発の流れ

3. 期待される効果と普及の対象

本研究の成果も活用されて、CLTは2016年4月の建築基準法改正によって一般的な建築材料の仲間入りを果たしました。

開発したソフトウェアにより、国内に豊富に存在する森林資源から得られるラミナの性能を基にして、最適なCLTの積層構成を設計・検討できるようになりました。今後は、より多彩なCLTのJAS化や、CLT製品性能の最適化に活用される予定です。

開発担当機関：「伐採木材の高度利用技術の開発」プロジェクトチーム

農林水産省委託プロジェクト研究「森林資源を最適利用するための技術開発」（平成25～29年度実施）

参画機関：木材加工・特性研究領域、構造利用研究領域、複合材料研究領域、木材改質研究領域、銘建工業(株)、山佐木材(株)、協同組合レングス、岡山県農林水産総合センター森林研究所、(地独)北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場、(株)オーシカ、鳥取県林業試験場、広島県立総合技術研究所林業技術センター、(国大)宇都宮大学、(国研)建築研究所

立ち木の状態で木材の強度を精度よく調べる

1. 現状と課題

生物材料である木材は、同じ樹種でも曲げにくさ（ヤング係数）などの性能が大きくばらつきます。一方、建築に用いられる木材ではヤング係数に基づく区分（機械等級区分）が導入され、国や県などが発注する公共物件の仕様書では使用木材の機械等級が指定されるなど、強度性能への関心が高まっています。

鳥取県では、このようなニーズに応えられるスギ産地の形成を目的に、優れた強度性能を持つスギ個体を選抜して次世代の母樹とするため、公有林のスギを対象に、立木の状態で非破壊的に強度性能を調べています。

非破壊で立木の強度性能を評価する指標として、応力波伝搬法ヤング係数（以下、 E_{WS} ）があります。 E_{WS} の算出には応力波伝搬時間測定装置（FAKOPP、図1）を用い、2点間の応力波伝搬時間（以下、SPT：Stress wave Propagation Time）を計測します。しかし、従来の計測手法（以下、従来手法、図2）では、センサーの設置場所やセンサーへの打撃力の違いによって計測されるSPTの値に大きなバラツキが発生するため、選抜結果の信頼性に不安がありました。



図1 FAKOPP

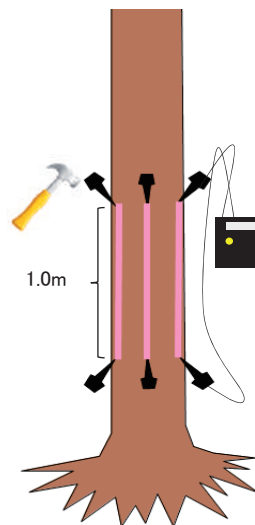


図2 従来の手法

2. 技術開発の内容

2.1 センサーの配置や打撃手段の改良

FAKOPPのセンサー配置や間隔、打撃手段などを検討した結果、治具（図3）を用いてセンサーを樹幹に対して斜めに1.5m間隔で配置し（図4）、装置（図5）を用いて一定の力で打撃する計測手法（以下、MM法、Measurement of oblique line by Mechanical knocking、図6）を考案しました。



図3 斜め配置治具



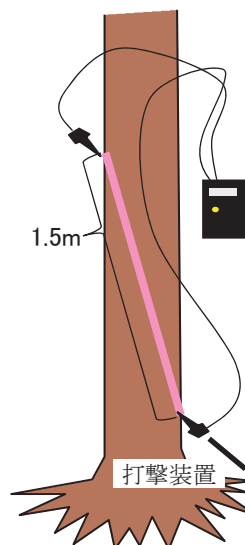
図4 治具の設置



図5 定力打撃装置



図6 MM法での計測と模式図



2.2 計測値のバラツキの低減効果の確認

足場の良い平地で、5本の丸太を用いて各4箇所ずつ、従来手法とMM法でSPTを各7回計測し、計測値のバラツキ（変動係数）を比較しました。その結果、MM法を用いることで従来手法に比べ大幅に計測値のバラツキを抑えられることが確かめられました（図7）。

さらに、実際の山林内で30本の立木を対象にしたSPT計測でも、同様の効果が確認できました（図8）。

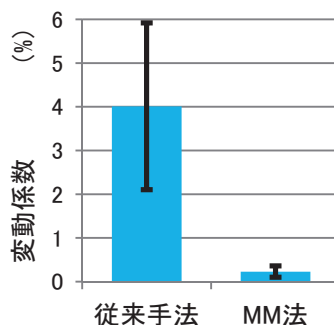


図7 計測値のバラツキ(丸太)

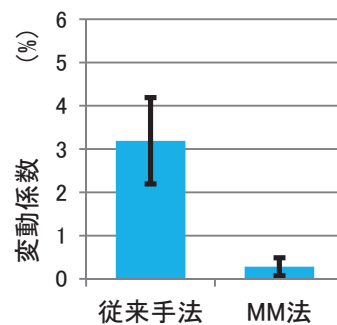


図8 計測値のバラツキ(立木)

（グラフは平均値、エラーバーは標準偏差）

2.3 強度性能の推定精度の確認

計測値が安定しやすいMM法では、強度性能の推定精度が向上しているのでしょうか。

そこで、39本の立木を対象に、立木の状態で従来手法とMM法でSPTを計測して E_{ws} を算出し、その後、伐採した丸太でFFTスペクトラムアナライザーを用いて縦振動ヤング係数(E_{tr})を算出して比較しました。

その結果、従来手法よりもMM法で計測したSPTで求めた E_{ws} の方が、 E_{tr} との間に高い相関を持つことが明らかとなりました（図9）。

このことにより、MM法でSPTを計測することによって、これまでより高い精度で立木の強度性能を推定できることが確認されました。

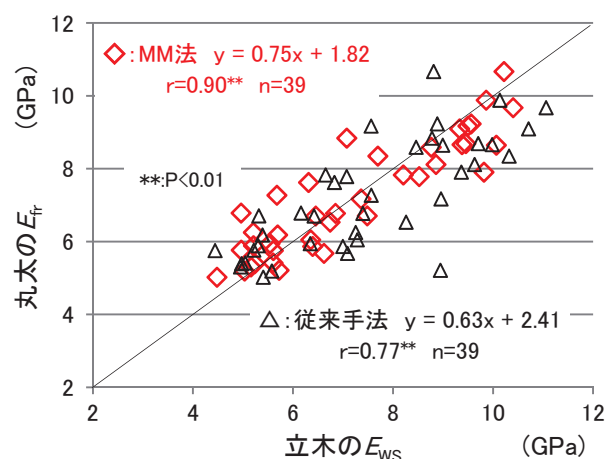


図9 立木の E_{ws} と丸太の E_{tr} との関係

E_{ws} の算出では立木の木材密度を 0.9g/cm^3 と仮定
 E_{tr} の算出には丸太の計測で得た実密度を使用

3. 期待される効果と普及の対象

この研究成果を用いて県内の公有林を対象にスギ立木の強度性能調査を行い、高い強度性能の個体を複数確保しました（図10）。また、近隣県の公設試験場や大学等に対する計測手法の説明・実演（図11）や、学術誌（木材工業，Vol. 73，No. 7，292-295（2018））等での紹介など、様々な手段を通じて技術の普及を図っています。

さらに、MM法による経時的な定点間のSPT計測によって、丸太等木材内の水分量の変化を把握する手法も確立しており、ハイ積み状態の燃料用丸太や葉枯らし中のスギについて乾燥状況を調査（図12）するなど、この手法を用いた計測の応用範囲が広がっています。



図10 選抜した優良個体



図11 MM法の研修会



図12 スギ葉枯らしの調査

酸性の荒廃地の緑化技術を開発するために ータンニンによるアルミニウムの無毒化ー

1. 現状と課題

世界の陸地の約3割は、熱帯や亜熱帯を中心に分布する酸性の土壌で覆われています（図1）。酸性の状態では、植物にとって有毒なアルミニウムが土壌から溶け出てきます。そのため、多くの植物は生育できませんが、そのような場所に分布する植物もあります。そこで、酸性土壌でも生育できる植物の開発を目指し、アルミニウムに耐性を示す樹木の仕組みの解明に取り組みました。



図1 酸性土壌の荒廃地
インドネシア南カリマンタンの石炭鉱山跡地

2. 技術開発の内容

2.1 アルミニウム無毒化物質エノテインBの発見

酸性の土壌や有毒なアルミニウムにも耐えて旺盛に成長できる樹木のひとつに、オーストラリア原産のユーカリ（*Eucalyptus camaldulensis*）があります（図2）。私たちは、アルミニウムを無毒化する新しい物質として、タンニンの1種でユーカリの根にあるエノテインBを発見しました（図3）。タンニンとは、植物に含まれるポリフェノールで、タンパク質や金属などと結合して難溶性になる性質を持つ物質群です。エノテインBは、1分子で少なくとも4個のアルミニウムと結合することができます。エノテインBと結合したアルミニウムは細胞内の他の物質と結合しないため、植物にとって無毒になります。



図2 ユーカリ(*Eucalyptus camaldulensis*)
一般的な植物が生育しにくい有毒なアルミニウムを含む酸性の土壌でも、ユーカリはよく育ちます。

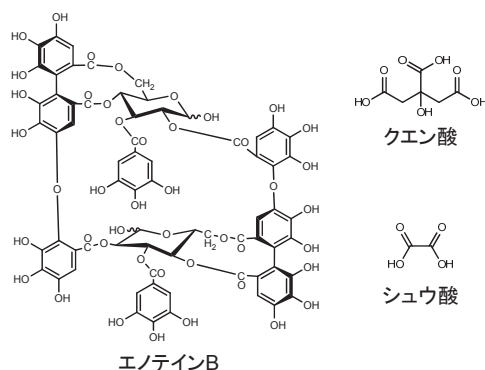


図3 アルミニウム無毒化物質の構造
ユーカリの根が含むアルミニウム無毒化物質には、タンニン（エノテインB）と有機酸（クエン酸、シュウ酸）があります。

2.2 アルミニウム無毒化におけるエノテインBの重要性

ユーカリの根は、アルミニウムを無毒化できるエノテインBを含んでいます。しかし、他にもアルミニウムを無毒化できる有機酸（クエン酸やシュウ酸）も含んでおり、エノテインBが実際にアルミニウムの無毒化に貢献しているかどうかは不明でした。私たちはアルミニウムとエノテインB、有機酸について根の中での濃度を再現した溶液を作製し、アルミニウムがどの物質によって無毒化されるかを調べました（図4）。

クエン酸やシュウ酸を含む溶液では、有毒なアルミニウムが溶液中に残っていました。一方、エノテインBのみを無毒化物質として含む溶液では、有毒なアルミニウムが溶液中から検出されなくなり、エノテインBがアルミニウムを全て無毒化していました。また、エノテインBをクエン酸やシュウ酸と混ぜた溶液では、アルミニウムの半分以上がエノテインBと結合していました。これらの結果から、根の中でもエノテインBがアルミニウムの無毒化に重要な役割を果たしていることがわかりました。

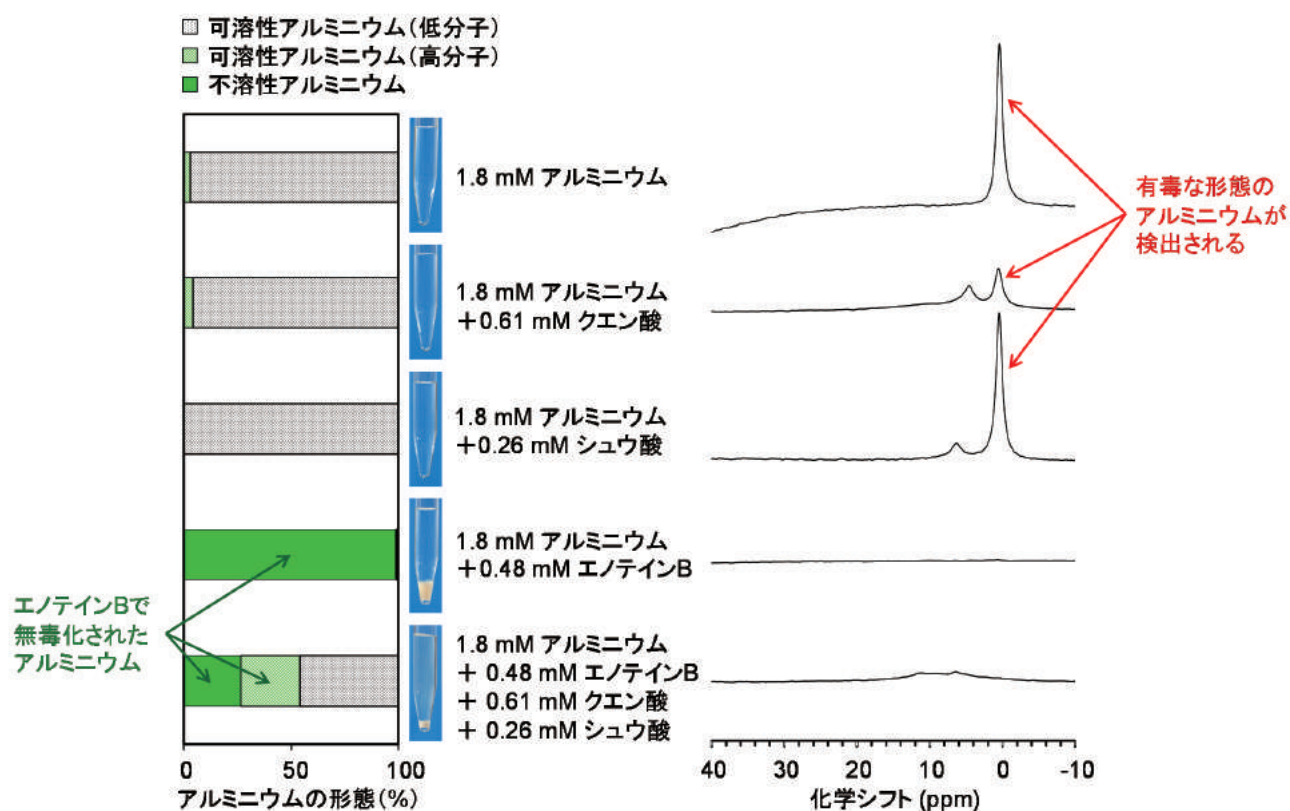


図4 エノテインBによるアルミニウムの無毒化

ユーカリの根の中と同じ濃度になるように、アルミニウムと様々な無毒化物質を加えた溶液を作製しました。エノテインBを加えた溶液では、無毒の不溶性アルミニウムや可溶性アルミニウム（高分子）が作られ、有毒なアルミニウムは検出されません。

3. 期待される効果と普及の対象

現在、ユーカリの根の中でエノテインBが合成されるメカニズムの解明を進めています。このような研究は、酸性の荒廃地での緑化や生産性向上に寄与するアルミニウム耐性の樹木や作物の開発につながり、地球温暖化の原因とされる二酸化炭素の固定や人口増加による食糧不足の緩和への貢献が期待できます。

図3と4は、許可を得て論文中の図を改変し作成したものです。Tahara K, Hiradate S, Hashida K, Shinohara K (2017) An aluminum-resistance mechanism in *Eucalyptus camaldulensis*: complexation between aluminum and oenothien B in presence of organic acids *in vitro*. Journal of Forest Research, 22, 261-264. Copyright © The Japanese Forest Society, reprinted by permission of Taylor & Francis Ltd, www.tandfonline.com on behalf of The Japanese Forest Society.

バットの木、アオダモの育成手法 —採種から苗木育成、植栽初期の保育まで—

1. 現状と課題

北海道のアオダモは、国産材の中では最も野球バットに適した樹種として知られています。しかし、過去の伐採やササによる天然更新の阻害、エゾシカによる食害によって資源が減少しています。このため、アオダモ資源の持続可能な利用を目指して北海道内各地で植樹活動が行われていますが、豊凶の周期が5～8年程度と長いために安定的な種子の採取が困難であること、成長が遅いために山出しまでに年数がかかること、山出し後も下刈りなど保育作業やエゾシカによる食害の防除が長期間必要であることなどが課題となっています。

2. 技術開発の内容

2.1 アオダモの採種方法

2002年から2015年までの14年間、北海道育種場内でアオダモの開花（図1）を調査した結果、調査個体の80%以上が開花した豊作の年はおおむね5年から6年の間隔で3回観察されました（図2）。アオダモは雄性株と両性株がある両全性異株性の樹種ですが、豊作年にはどちらの株とも高い着花率を示しました。2002年から2009年にかけて結実した種子を採取して充実種子の割合（充実率）を調査したところ、豊作年では結実も良好であり（図1）、約90%が充実種子でした。一方、開花率が20%から30%程度の年では、シイナや虫害種子が多く、充実率が低い傾向が見られました。アオダモの種子は乾燥後（図1）、長期間（5～10年）冷蔵保存ができることから¹⁾、豊作年に十分な量の種子を採取し、次の豊作年まで冷蔵保存した種子を利用することで安定的な苗木生産が可能になります。



図1 アオダモの開花(左上)、結実した種子(右上)および採取後乾燥させた種子(左下)

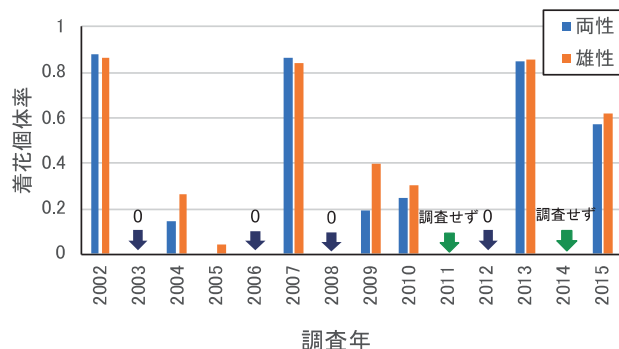


図2 北海道育種場内のアオダモ天然集団における着花個体率の年変動

2.2 マルチキャビティコンテナを利用した苗木の育成方法

アオダモの苗木は通常、苗高40-50cmで山出しします。従来の苗畑での育苗では播種から山出しまでに5年前後かかることから、マルチキャビティコンテナを使用し、ビニールハウスで保温することにより、育苗年限の短縮を試みました（図3）。ビニールハウス内または野外のそれぞれの環境条件において液肥（ハイポネックスN-P-K=6-10-5の200倍希釈液を与える方法）を5～9月に2週間に1回、または固形肥料（マグアンプK、N-P-K-Mg=6-40-6-15）を5月に1回与える方法の2種類の施肥方法で育成し、3年間の成長経過を比較しました。育成中のビニールハウス内の気温は、野外よりも約1.2℃高めでした。

その結果、ビニールハウス内で液肥を与えて育成する方法で苗高の成長が最も良好で、3年目の成長期終了時において苗高が40cmを超える苗木が70%以上得られ（図4）、ビニールハウス内で液肥を与えて育成することにより、育苗年限を1年から2年短縮できることが明らかになりました。



図3 ビニールハウスで育成中の
アオダモ・コンテナ苗

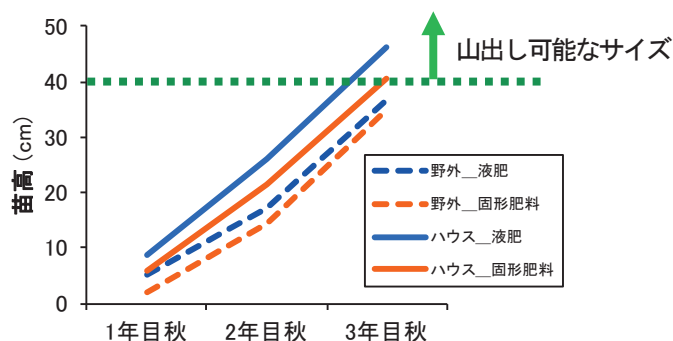


図4 アオダモ・コンテナ苗の3年間の苗高の推移

2. 3 植栽後の保育

アオダモはエゾシカに好まれるため、植栽後の食害の防除が重要です。コンテナ苗を植栽した試験地において、個々の苗木をツリーシェルターで保護したところ（図5）、エゾシカの食害を受けた個体はほとんどなく、雑草木による成長阻害を低減する効果もあったと考えられ、5年次の生存率は90%を超えていました。また、平均苗高は166cmでした（図6）。アオダモの植栽木の成長経過に関する調査事例はありませんが、同樹齢の天然更新木の平均苗高が120cm程度であったとする報告があることから²⁾、本試験地の植栽木の成長経過は良好だと言えます。今回設置したツリーシェルターはメッシュ素材であるため通気性が高いことも、良好な成長経過を示した要因のひとつと考えられます。



図5 ツリーシェルターを設置した
アオダモ・コンテナ苗

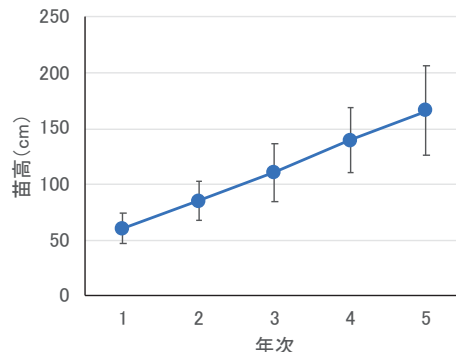


図6 アオダモ・コンテナ苗植栽後の平均苗高の推移
(エラーバーは標準偏差を示す)

3. 期待される効果と普及の対象

野球に関わる一般市民が参加するアオダモの植樹も継続的に行われていますが、計画的な採種や育種年限が短縮できるコンテナ苗の育成等の本研究の成果は、これらの活動を含めた国産材バットの生産維持に向けたアオダモ人工林の効率的な育成に寄与するものと期待されます。

引用文献

- 1) 滝谷美香 (2008) アオダモを種子から育てよう. 北海道立林業試験場. 15pp.
- 2) 五十嵐恒夫 (1985) 北海道のアオダモに関する基礎資料. 財団法人北海道森林技術センター. 25pp.

「過去の林業新技術」技術一覧

下記の技術の詳細は、森林総合研究所ホームページから、ご覧になれます。

URL:<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/shingijutu/index.html>

林業新技術2013

- ・造林未済地の把握と天然更新を利用した森林化 (北海道立総合研究機構 林業試験場他5機関)
- ・再造林の低コスト化をいかに進めるか (森林総合研究所他4機関)
- ・間伐が水流出に及ぼす影響を明らかに (森林総合研究所、秋田県森林技術センター)
- ・森林作業道からの土砂流出抑制技術の開発 (森林総合研究所他2機関)
- ・森林用ドロップネットで効率よくシカを捕獲する (森林総合研究所他3機関)
- ・耐震性・施工性に優れた厚板耐力壁の開発 (奈良県森林技術センター)
- ・竹炭製品の吸放湿および結露防止効果 (鹿児島県工業技術センター)
- ・林地残材を原料とした木製単層トレイの量産化に成功！ (森林総合研究所、庄内鉄工株式会社)
- ・きのこ栽培に有用なLED照明法の開発 (森林総合研究所他8機関)

林業新技術2014

- ・高齢のコナラ林を若返らせる (石川県農林総合研究センター 林業試験場)
- ・「ネットフェンス」と「くくりわな」を併用してニホンジカを効率的に捕獲する (静岡県農林技術研究所 森林・林業研究センター)
- ・チェーンソー用防護服が事業体経営を護ります (森林総合研究所他2機関)
- ・高精度DEMを使った路線選定プログラム (森林総合研究所)
- ・過去の写真から山地崩壊発生の前兆をつかむ (森林総合研究所)
- ・膨大な木材の強度データを活用するには？ (森林総合研究所)
- ・スギ・ヒノキ穿孔性害虫被害材の土木資材等への利用 (神奈川県自然環境保全センター、神奈川県産業技術センター 工芸技術所)
- ・これからの低コスト造林の基本は成長の優れた苗木の選択から (森林総合研究所 林木育種センター)
- ・遺伝子と形態からサクラ栽培品種を見分けて正しく管理しましょう (森林総合研究所他3機関)

林業新技術2015

- ・近赤外光を用いた健全なスギ種子の自動判別技術 (森林総合研究所他2機関)
- ・中距離対応型架線集材システムの開発 (森林総合研究所)
- ・木材の直接メタン発酵技術～放射能汚染した木材にも応用可能な新技術～ (森林総合研究所)
- ・地下の見えないマツタケ菌糸を測る (森林総合研究所)
- ・サクラ栽培品種のクローンを増殖・保存する (森林総合研究所)
- ・木材生産のための過密林の間伐のしかた (岐阜県森林研究所、岐阜県立森林文化アカデミー)
- ・木製治山ダムを効率的に修繕する (京都府農林水産技術センター 森林技術センター)
- ・宮崎モデルによる大規模建築物の木造化に関する研究 (宮崎県木材利用技術センター 構法開発部、木構造相談室)
- ・トドマツの水食い材発生の低減に向けた心材含水率の改良 (森林総合研究所 林木育種センター)

林業新技術2016

- ・ 東北におけるマツノザイセンチュウ抵抗性クロマツ種子の生産性向上
(森林総合研究所 林木育種センター)
- ・ 樹木の風害の被害形態と等価限界風速の関係
(森林総合研究所、静岡県農林技術研究所 森林・林業研究センター)
- ・ 天然更新を促進するための新たな作業技術の開発
(森林総合研究所、北海道森林管理局 森林技術・支援センター)
- ・ 中小規模木質バイオマス発電施設には熱電併給が不可欠
(森林総合研究所)
- ・ 高齢級人工林の間伐と主伐の収支を評価する
(鹿児島県森林技術総合センター)
- ・ 誘引してシカを獲る新しいくくりわなができました
(静岡県農林技術研究所 森林・林業研究センター)
- ・ 安定同位体比解析でわかるクマの人里依存度
(森林総合研究所)
- ・ 新たな乾燥技術「コアドライ®」の開発と普及
(北海道立総合研究機構 林産試験場)
- ・ 気圧を下げると乾燥時間が速くなる
(森林総合研究所、岐阜県森林研究所)

林業新技術2017

- ・ 小笠原諸島での正しい植栽の方法
(森林総合研究所)
- ・ 海岸防災林が津波を和らげる効果およびその効果を高める方法
(北海道立総合研究機構 林業試験場ほか)
- ・ 大径材生産に向けた造材機械の作業限界の解明
(森林総合研究所)
- ・ 標高が高い皆伐地における広葉樹の森づくり
(東京都農林総合研究センター)
- ・ 丸太を削って横断面のヤング係数分布を評価する
(森林総合研究所)
- ・ 単板のたて継ぎ(スカーフジョイント)を用いた厚物合板の開発
(森林総合研究所ほか)
- ・ スギ小幅板を活用した3層クロスパネルの開発
(鳥取県林業試験場)
- ・ トリュフの人工栽培に向けて
(森林総合研究所)
- ・ 施設を活用したスギ苗木増殖技術
(森林総合研究所 林木育種センター)



ブナの立ち枯れ



ユーカリの苗木



アオダモの開花

林業新技術 2018

ー現場への普及に向けてー

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番地
発行日 2018(平成30)年8月24日

お問い合わせ先

広報普及科編集刊行係
TEL 029-829-8373
E-mail kanko@ffpri.affrc.go.jp

* 本誌掲載内容の無断転載を禁じます。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。