

平成30年版

研究成果選集

2018



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

はじめに



林総合研究所は、森林・林業・木材産業に係わる研究を通じて、
豊かで多様な森林の恵みを生かした循環型社会の形成に努め、

人類の持続可能な発展に寄与することをミッションとし、

日本と世界の森林問題にかかわる総合的な研究開発を担っています。

平成28年3月には5年間の中長期計画を定め、森林の多面的機能の高度発揮に向けた
森林管理技術の開発、国産材の安定供給に向けた持続的林業システムの開発、
木材及び木質資源の利用技術の開発、森林生物の利用技術の高度化と林木育種による
多様な品種開発及び育種基盤技術の強化に重点的に取り組んでいます。

「平成30年版研究成果選集」では、これら重点課題を構成する以下の9つの戦略課題において
平成29年度に得られた主要な研究成果をとりまとめました。

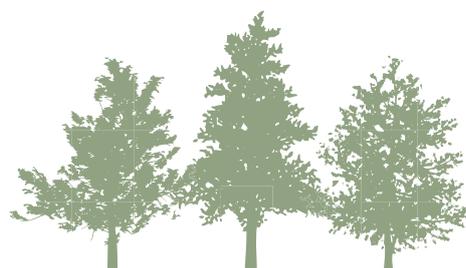
- 森林生態系を活用した治山技術の高度化と防災・減災技術の開発
- 気候変動の影響評価技術の高度化と適応・緩和技術の開発
- 生物多様性の保全等に配慮した森林管理技術の開発
- 持続的かつ効率的な森林施業及び林業生産技術の開発
- 多様な森林資源の活用に対応した木材供給システムの開発
- 資源状況及びニーズに対応した木材の利用技術の開発及び高度化
- 未利用木質資源の有用物質への変換及び利用技術の開発
- 生物機能の解明による森林資源の新たな有効活用技術の高度化
- 多様な優良品種等の開発と育種基盤技術の強化

目次に表題と概要を掲載するとともに、本文では研究成果ごとに見開きで解説しています。
できるだけ平易な言葉を用いるように努めましたが、
専門用語につきましては解説を付けました。

この研究成果選集が皆様のご参考になれば幸いに存じます。

2018年7月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 所長 沢田治雄



Contents

● 重点課題ア 森林の多面的機能の高度発揮に向けた森林管理技術の開発

ア 森林生態系を活用した治山技術の高度化と防災・減災技術の開発

- 航空レーザー測量データから地震後の崩壊危険斜面を予測する 04
航空レーザー測量 (LiDAR) データから地震後の降雨により崩壊が発生しやすい斜面を予測する技術を開発しました。
- スギ林の遮断蒸発の鍵を握る樹皮の雨水貯留 06
森林の遮断蒸発のメカニズムを詳しく検討するため、詳細な遮断の計測と浸水実験を行いました。その結果、降雨中に発生する遮断蒸発は少なく、主に樹皮に貯留された水分が降雨後に蒸発することを明らかにしました。
- タブレット端末一つで森林気象害の被害地調査と被害種別判定 08
強風や豪雪、低温、乾燥などの気象害によって山の樹々が枯れたり、倒れたりしていた時にタブレット一つで被害原因の判別と、被害調査ができるシステムを開発しました。
- 森林の放射性セシウムは事故からの5年間で土壌表層に移動した 10
福島県及び茨城県内の汚染程度の異なる9つの森林で樹木と土壌の放射性セシウムの分布を調べたところ、福島原発事故から5年間に樹木の葉・枝から林床に移動し、その多くは土壌表層に蓄積していることが明らかになりました。

イ 気候変動の影響評価技術の高度化と適応・緩和技術の開発

- 図像資料を用いて江戸時代の土地利用を復元する 12
江戸時代から現在にかけての数百年にわたる植生と土地利用の変遷を推定するため、過去の絵画や写真など複数の図像資料を比較しました。その結果、これらの図像資料を時系列で整理することで、景観の変遷を正確に復元することができました。
- 気候変動によりマツ材線虫病の危険域は世界的に拡大する 14
現在、東アジアと南ヨーロッパで深刻な被害をもたらしているマツ材線虫病の被害域は、将来の気候変動により、東ヨーロッパ、中央アジア、極東ロシアにまで拡大する可能性があることを明らかにしました。

ウ 生物多様性の保全等に配慮した森林管理技術の開発

- 木材生産と生物多様性保全の両立をめざす保残伐施業の実証実験 16
生物多様性に配慮した主伐方法である保残伐を人工林に適用する、国内初の実証実験を開始しました。これまでの調査から、保残伐は木材を生産しつつ、伐採直後の森林性種の保全に役立つことが分かりました。

- **使える技術を総動員する新たな松くい虫被害対策** …………… 18
 薬剤使用に対する制約が強まる中で対応が困難となっている松くい虫被害に対し、使える技術を総動員する新たな防除体系を提案しました。松林を「伐って使う」ことが、これからの松くい虫被害対策では重要になります。

● 重点課題イ 国産材の安定供給に向けた持続的林業システムの開発

ア 持続的かつ効率的な森林施業及び林業生産技術の開発

- **新たな地ごしらえ機械の導入で下刈コストを削減し、低コスト再造林施業を実現** …………… 20
 緩傾斜地が多い北海道の再造林地に新たな地ごしらえ機械を導入し、地ごしらえの効率化を図るとともに下刈回数を大幅に低減できました。このことで、カラマツの再造林費用を大きく削減できました。
- **低コストのデジタル空中写真で林分材積を高精度に推定する** …………… 22
 デジタル空中写真の立体視による平均樹高と本数から、スギやヒノキ、カラマツ人工林の林分材積を精度よく推定する式を地域別に作成し、森林立体視ソフト「もりったい」に組み込みました。

イ 多様な森林資源の活用に対応した木材供給システムの開発

- **国産広葉樹の家具・内装材用途での活用に向けて** …………… 24
 家具・内装材用の広葉樹原材料の約8割を海外産が占めています。それを国産に置き換えることを目指して、国産広葉樹の資源蓄積状況、流通・加工の現状を把握し、国産広葉樹の利用を進めるための課題と対応策を示しました。
- **木質バイオマスを直接メタン発酵する技術の実証試験
 —放射能汚染バイオマスにも適応可能な新技術—** …………… 26
 世界で初めて木質バイオマスを原料とするメタン発酵の実証試験を行いました。様々な樹種、枝葉、樹皮を原料としてメタン発酵が可能で、放射性セシウムがメタンガスに移行しないことを実証することができました。

● 重点課題ウ 木材及び木質資源の利用技術の開発

ア 資源状況及びニーズに対応した木材の利用技術の開発及び高度化

- **木材表面上の加工欠点の発生原因を可視化する** …………… 28
 木材の切削加工の過程を撮影したデジタル画像を解析することで、毛羽立ちなどの加工欠点の原因となる木材の変形（ひずみ）を迅速かつ簡便に可視化する技術を開発しました。
- **豊富な国内森林資源を活かすCLTの効率的な製造と性能確保の技術を開発** …………… 30
 CLTの効率的な製造方法を開発するため、材料となる木材・製造の条件と試作した製品性能との関係を検証して、使用するひき板（ラミナ）の形状や材質からCLT製品の性能を予測することができるようになりました。

イ 未利用木質資源の有用物質への変換及び利用技術の開発

- **木を焙^ほじて長持ちする舗装材をつくる**…………… 32
木を焙じる程度に炭化することで、長持ちで、歩きやすく、燃料や資材にリサイクルできる「高性能で環境に優しい木質舗装材」を開発しました。
- **様々な製品展開が可能な新素材「改質リグニン」のデザインング**…………… 34
スギ材から製造される新素材「改質リグニン」を用いた様々な製品を開発するには、用途に応じた物性を持つ改質リグニンの製造が重要です。製造工程を工夫することで、様々な特性を持つ改質リグニンの製造に成功しました。
- **未利用の「竹」を効果的に利用する方法**…………… 36
放置竹林として問題になっている「竹」は、適切な管理を行うためにも大量消費につながる効果的な利用法が重要です。そこで環境に優しい技術を利用し、竹から高付加価値素材を製造する方法を開発しました。

● 重点課題Ⅱ 森林生物の利用技術の高度化と林木育種による多様な品種開発及び育種基盤技術の強化

ア 生物機能の解明による森林資源の新たな有効活用技術の高度化

- **根のタンニンがアルミニウムを無毒化する —酸性の荒廃地の緑化にむけて—**…………… 38
ユーカリは、有毒なアルミニウムが植物の生育を妨げる酸性の土壌でもよく成長できる樹木です。アルミニウムの無毒化においては、ユーカリの根に含まれるタンニンが重要な役割を果たしていることを明らかにしました。
- **菌の有機物分解能力を評価する —マツタケ類の分解能力の多様性が明らかに—**…………… 40
菌の有機物分解能力を簡単に把握するため、色素を結合させた多糖類を用いた評価法を開発し、マツタケおよび近縁種の分解能力の多様性を明らかにしました。

イ 多様な優良品種等の開発と育種基盤技術の強化

- **より強いマツノザイセンチュウ抵抗性品種の開発**…………… 42
日本全国のマツ林で問題となっているマツノザイセンチュウによるマツ枯れの被害を防ぐため、より強い抵抗性品種を効率的に開発するための育種技術とその技術を活用した品種を開発しました。
- **早生樹「コウヨウザン」の造林樹種としての評価と優良系統の選定**…………… 44
中国原産の早生樹「コウヨウザン」は新たな造林樹種の一つとして期待されています。このため、コウヨウザンの植栽適地や成長性、製材品の性能を明らかにするとともに、造林用種苗を生産するための優良系統の選定を行いました。

航空レーザー測量データから地震後の崩壊危険斜面を予測する

森林防災研究領域 村上 亘

大きな地震の後に降雨による崩壊が起こりやすくなる現象が数多く報告されていますが、そのメカニズムについては不明でした。今回、地震発生後の複数の時期に航空レーザー測量で得られた詳細な地形データを比較することで、地震後に崩壊が発生した斜面の地形的特徴をつきとめました。崩壊の多くは山地斜面内の浅く凹んだ緩斜面で発生し、そこには地震による亀裂などの斜面変形の痕跡が認められました。本研究の成果は、2016年熊本地震により被害を受けた阿蘇地域のように、地震後の降雨により再度の崩壊発生が懸念される地域の防災対策に役立てる予定です。

成果

地震後の山地斜面では降雨による崩壊が多い

1995年の阪神淡路大震災以降、国内各地で大きな地震による災害が多発しています。これらの大きな地震の後に降雨による崩壊の発生が増加することが数多く報告されていますが、そのメカニズムについては不明な点が多く残されています。私たちは2008年岩手・宮城内陸地震の発生後に降雨による崩壊がみられた岩手県の山地で、地震発生後の詳細な地形データの時系列解析と現地調査を行い、地震が斜面に与えた影響と地形の関係を詳しく調べました。

航空レーザー測量データの比較から明らかとなった崩壊斜面の地形的特徴

近年、航空レーザー測量（Light Detection And Ranging：以下LiDAR）という計測技術の発達により、従来よりも高精度な地形データを得ることが可能になりました。私たちは2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震後の複数の時期にLiDARで得られた詳細な地形データを比較して、地震後の降雨で崩壊が発生した斜面の地形的特徴を検討しました。その結果、斜面内の部分的に浅く凹んで傾斜が緩くなっていた場所が崩壊していることがわかりました。また、周辺の崩壊が発生していない斜面において同様の地形を特定し、現地調査で斜面の様子を詳しく調べました（図1a）。その結果、これらの緩斜面には、地震の際に形成されたと思われる亀裂などの斜面変形の痕跡が認められました（図1b、c）。

変形斜面の内部構造が示す崩壊リスク

今回の調査で亀裂のような地震による変形の痕跡が見つかった場所において、地盤の堅さを調べる簡易貫入試験や掘削断面の観察を行ったところ、地下70～100cmの風化層の中に、指で押せばへこむような硬さしかない弱層が形成されていることがわかりました（図2）。亀裂や弱層は地震動で斜面の一部がずり落ちたために形成さ

れたものと考えられます。このような弱層は地震による変形を受けていない斜面にはみられないことから、弱層がすべり面となることで、地震後の降雨の際に崩壊が発生しやすくなっていることがわかりました（図3）。

成果の利用

2016年に発生した熊本地震の被災地においても降雨時の崩壊発生が心配されています。本研究の成果は、阿蘇地域のように地震後に再度の崩壊発生が懸念される地域の防災対策に役立てる予定です。

研究資金と課題

本研究は、JSPS科研費（JP15K01272）「複数時期の画像およびLiDARデータの解析による変形斜面の特定と崩壊リスクの予測」による成果の一部です。

文献

村上 亘（他）（2017）2008年岩手・宮城内陸地震後の降雨により崩壊が発生した山地斜面の地形的特徴。日本地すべり学会誌，54(1)，3-12。

専門用語

航空レーザー測量（Light Detection And Ranging：LiDAR）：飛行機やヘリなどから照射したレーザーの反射時間を基に標高を計測する手法。従来よりも詳細な地形情報を得ることができる。

簡易貫入試験：5kgのおもりを50cmの高さから落下させ、直径25mm、先端角60°のコーン（円錐形の突起物）が10cm貫入するのに要したおもりの落下回数（Nc値）で地盤の硬さを計測する手法。

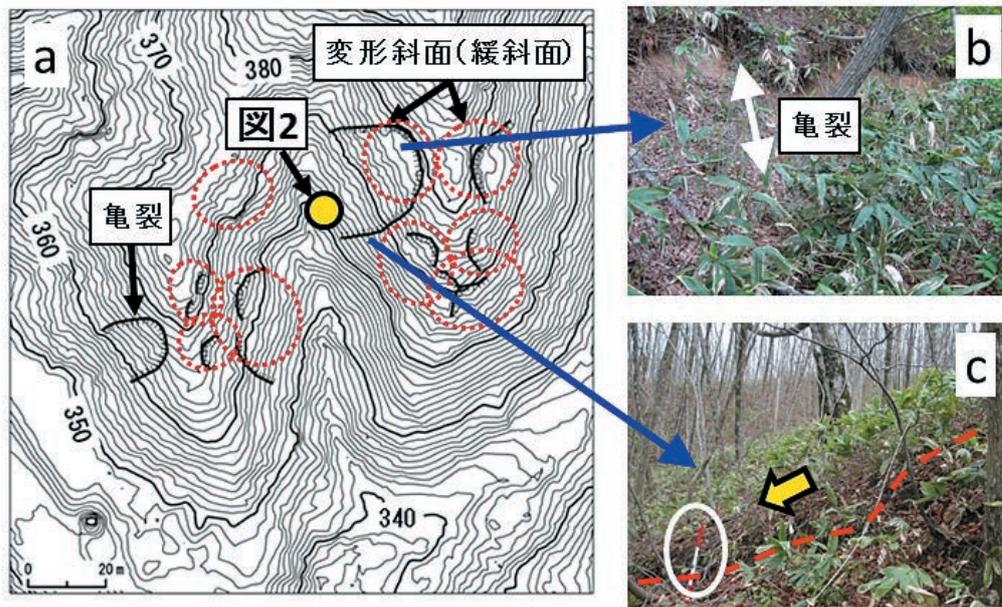


図1. 崩壊が発生していない斜面において特定された変形斜面（緩斜面：赤点線枠）と現地調査で確認された亀裂の分布（a）および亀裂の写真（b、c）

cの写真の位置では、亀裂（赤破線）よりその下方斜面（写真奥）が下流側（黄色矢印方向）に変形し、写真左下のポール付近（白枠）でせり出している状況が認められました。aの写真の黄色の丸は、図2の調査点。（村上他2017より修正して引用）

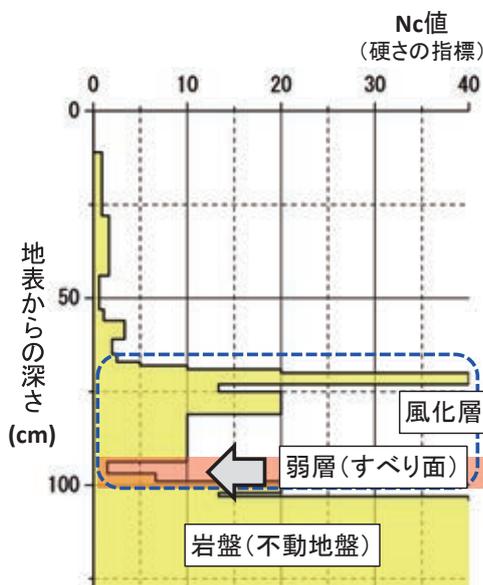


図2. 簡易貫入試験の結果

調査位置は図1の黄色の丸。Nc値が10未満の弱層（矢印）は亀裂を発生させた斜面変形の発生した移動層と不動地盤の間のすべり面、Nc値が10～30の層は岩盤の風化層（青破線枠）と推定されました。（村上他2017より修正して引用）

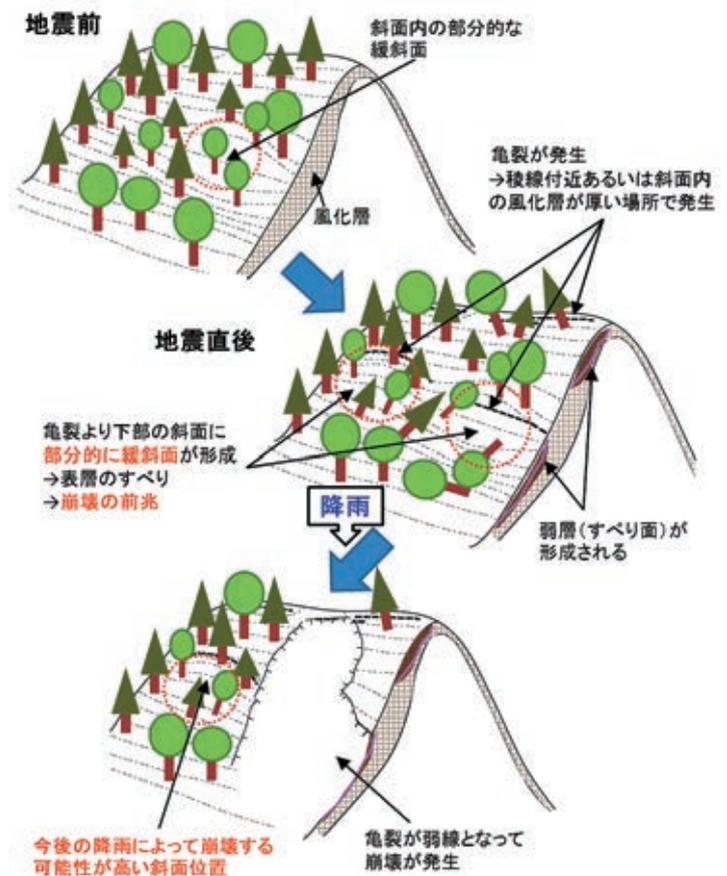


図3. 地震後の降雨による斜面崩壊発生の様式図（村上他2017より引用）

スギ林の遮断蒸発の鍵を握る樹皮の雨水貯留

森林防災研究領域 飯田 真一・清水 貴範・玉井 幸治・野口 正二・澤野 真治・荒木 誠
アメリカ合衆国デラウェア大学 Delphis F. Levia

九州支所 清水 晃・壁谷 直記

北海道支所 延廣 竜彦

森林に降った雨の一部は地面まで到達せずに遮断蒸発します。遮断蒸発量は雨が降っている間の蒸発量と葉および樹皮に貯留される雨水の量の合計ですが、これらの測定例は少なく、遮断蒸発の詳細なメカニズムは不明のままです。そこで、時間間隔を短くしてスギ林の遮断強度を1時間ごとに調べました。その結果、遮断強度は降雨の継続とともに減少し、降雨前半の遮断量が遮断蒸発量の大半を占めることが分かりました。このことは降雨中の蒸発量よりも、葉と樹皮の雨水貯留量が遮断蒸発に重要であることを示唆します。そして、浸水実験により雨水貯留量の7割以上が樹皮によることも明らかとなりました。この成果は遮断蒸発量の高精度の予測に役立ちます。

成果

遮断強度の計測は手間がかかる

森林に雨が降ると、その一部は地面まで到達することなく蒸発して大気に戻ります。この遮断蒸発は降雨の1～3割にも相当するほど多く、森林の水循環に重要な役割を果たしていますが、その発生メカニズムについては不明な点が多く残されていました。その理由として、1時間ごとの短い時間間隔での計測事例が極めて少なく、降雨中の遮断強度の実態が不明であったことが挙げられます。遮断蒸発量は、降雨量、地面まで到達する樹冠通過雨量、ならびに幹の表面を流下する樹幹流量をそれぞれ個別に計測し、これらの3つの要素の収支に基づいて算出されます(図1)。遮断強度を正確に計測するためには、3つの要素を同時に、短い時間間隔で測定しなければなりません。このことが遮断強度の実測を実現するための大きなハードルとなっていました。

遮断強度は降雨の継続とともに減少する

そこで、私たちは転倒マス型流量計を用いて従来よりも詳細に遮断蒸発を計測する技術を開発し、スギ壮齢林を対象として1時間ごとの測定を3年間にわたって行いました。その結果、遮断強度は降雨の初期に大きく、降雨の継続とともに減少する傾向を示しました(図2)。合計21の降雨について前半と後半の遮断量を検討すると、前半の遮断量は遮断蒸発量の9割以上に相当することが分かりました(図3)。これらの傾向は、降雨開始時に乾燥していた葉および樹皮が降雨の継続とともに徐々に濡れてゆく、すなわち雨水を貯留する過程を反映していると考えたと矛盾無く説明することが可能です。

雨水貯留量の7割以上が樹皮によるもの

次に、同じ森林から採取した葉と樹皮を用いて浸水実験を行いました。その結果、葉と樹皮に貯留される雨水貯留量は遮断蒸発量とほぼ一致し、遮断蒸発量の大部分

が雨水貯留量であることが判明しました。さらに、雨水貯留量の7割以上が樹皮によるものです。これらのことは、降雨中に遮断蒸発が生じるのではなく、多くはスギの樹体に付着し貯留されてしまい、降雨後に蒸発していることを示しています。

この研究は、これまで考えられていた以上に遮断蒸発がスギの樹皮による雨水貯留によって支配されていることを明らかにした画期的なものです。この知見は、スギのように樹皮が厚い針葉樹の遮断蒸発を正確に予測するためのモデルを作成する場合に役立ちます。ただし、広葉樹は針葉樹と比べて樹皮は薄いことが多く、葉の形も異なるため、広葉樹の遮断蒸発は樹皮以外の要因に影響を受ける可能性があります。

研究資金と課題

本研究の一部は、農林水産省委託プロジェクト研究「農林業に係る気候変動の環境評価委託事業」のうち「森林流域からの水資源供給量に関わる気候変動の影響評価」による成果です。

文献

Iida, S. et al. (2012) Calibration of tipping-bucket flow meters and rain gauges to measure gross rainfall, throughfall, and stemflow applied to data from a Japanese temperate coniferous forest and a Cambodian tropical deciduous forest. *Hydrol. Process.*, 26, 2445-2454. DOI:10.1002/hyp.9462
Iida, S. et al. (2017) Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand. *J. Hydrol.*, 548, 770-783. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.03.009

専門用語

遮断蒸発：森林に降った雨が樹木に遮られて、地面に到達せずに蒸発する現象。



図1. スギ壮齢林分における遮断蒸発の計測

樋で樹冠通過雨を、幹に巻きつけた青色のウレタンマットで樹幹流を集水し、転倒マス型流量計で強度を計測します。転倒マス型流量計は高強度の流量を過小評価するため、その補正技術を用いています。降雨量から樹冠通過雨量と樹幹流量を差し引いたものが遮断蒸発量になります。

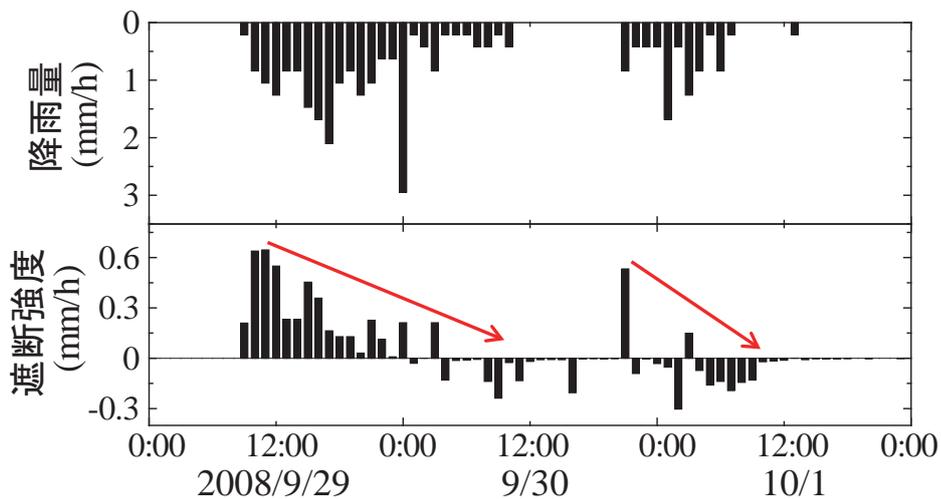


図2. 実測された降雨と遮断強度の変化

遮断強度は降雨開始直後に大きいです。降雨の継続とともに減少する傾向を示しました。一旦雨がやんだ後、再び降りだした直後に遮断強度は一時的に大きくなりますが、すぐに減少傾向を示しています。

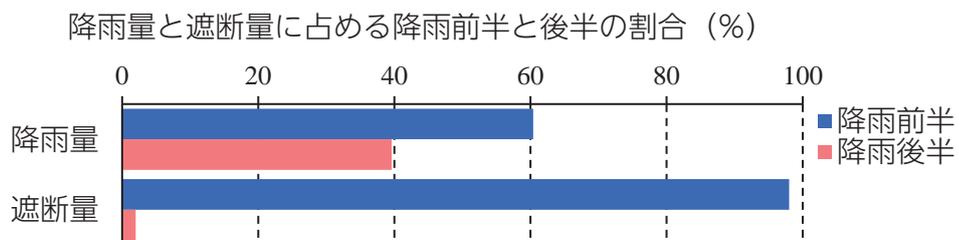


図3. 21の降雨で計測された降雨前半と後半の遮断過程の違い

降雨前半と後半で降雨量に大きな差が無いにもかかわらず、遮断量の9割以上が降雨前半に生じていることが分かりました。乾燥していた葉と樹皮が雨水で濡れ、雨水を貯留の様子を反映しているものと考えられます。すなわち、降雨後半では、前半の雨ですでに雨水を貯留しているので、遮断量は小さくなります。

タブレット端末一つで森林気象害の被害地調査と被害種別判定

森林防災研究領域 鈴木 寛

森林災害・被害研究拠点 高橋 正義

森林保険センター 伊藤 香里・平浪 浩二・糸川 結花・佐藤 宏行・宮澤 國明

山のある場所の樹木がたくさん枯れたり、倒れたり、折れることがあります。強風、豪雪、低温、乾燥などの厳しい気象条件がそのような被害を引き起こす原因と考えられ、総称して気象害と呼ばれます。気象害は時間が経ってから発見されることが多く、十分な経験と知識がなければ原因を推定することが困難でした。そこで、過去の気象害のデータをもとに、被害形態、地形、樹種などの被害情報をタブレットに入力すると被害原因が判別されるシステムを作りました。また、GPSで位置情報を取得する機能や被害地の写真を撮影する機能を組み込み、森林の管理者や森林保険にかかわる人が、誰でもタブレット一つで被害地調査と被害原因の判別を行えるシステムとしました。

成果

気象害は判別が難しい

気象害とは、強風、豪雪、低温、乾燥などの厳しい気象条件が原因で発生する、枯死、根返り、幹折れなどの森林被害のことです。気象害が発生している厳しい気象条件の時に人が山に立ち入ることは少ないため、被害の発見はどうしても発生から遅れてしまいます。時間が経ってから被害の原因となった気象現象を特定するには、相当の経験や知識がなければ困難です。

被害対策として、森林保険の手続きとして被害原因を知る

気象害が発生した後は、被害木の伐採などの処理を行い、補植や植え替えをしなければなりません。しかし、気象害は特定の地形、樹種、樹齢で発生することが多いため、被害原因を特定して対策を講じておかないと、再び同じ被害にみまわれる危険性があります。また、気象害の被害を補償する制度として森林保険がありますが、保険の補償を受けるには、やはり被害原因を特定しなければなりません。

タブレット一つで被害原因の判別と被害地調査をする

それぞれの気象害が特定の条件下で発生しやすいことを逆手にとって、被害の発生状況から被害原因を特定するシステムを開発しました。開発にあたって、いつ、どこで、どの樹種が、どのような被害を受けたのか、既存

の被害報告や論文から情報を取り出し、それらを訓練データとして蓄積しました。被害が発生したときは、タブレットに表示される設問に対して現地の状況を見ながら選択肢を選んでいくと、訓練データを参照して被害原因が判別されます。対象とする気象害は、風害、雪害、干害、寒風害、凍害、潮害で、被害種別ごとにそれが原因である確率が計算されます(図1)。また、タブレットのGPSで被害地の位置情報を取得するとともに、選択肢を選びながら、内蔵カメラでその状況を撮影しておけば、すべての選択画面を終えたときには、被害状況が一通り記録できます。さらに、森林保険と連動させれば保険の契約情報を呼び出すことも可能です。このシステムを用いることで、熟練した経験や知識がなくても、タブレット一つで気象害の被害地調査と被害原因の判別ができるようになりました。

気象害の知識磨きと被害情報の収集も行えます

被害状況の選択肢を選ぶとき、様々な角度から被害の様子を確認するので、気象害の知識や見方が身につけられます。また、被害情報を統一形式で集積するシステムになっているため、データを蓄積してシステムに学習させれば、さらに推定精度を向上できます。

文献

鈴木 寛 (他) (2017) ナイーブベイズ分類による気象害種別の判定手法の開発. 関東森林研究, 68, 161-168.

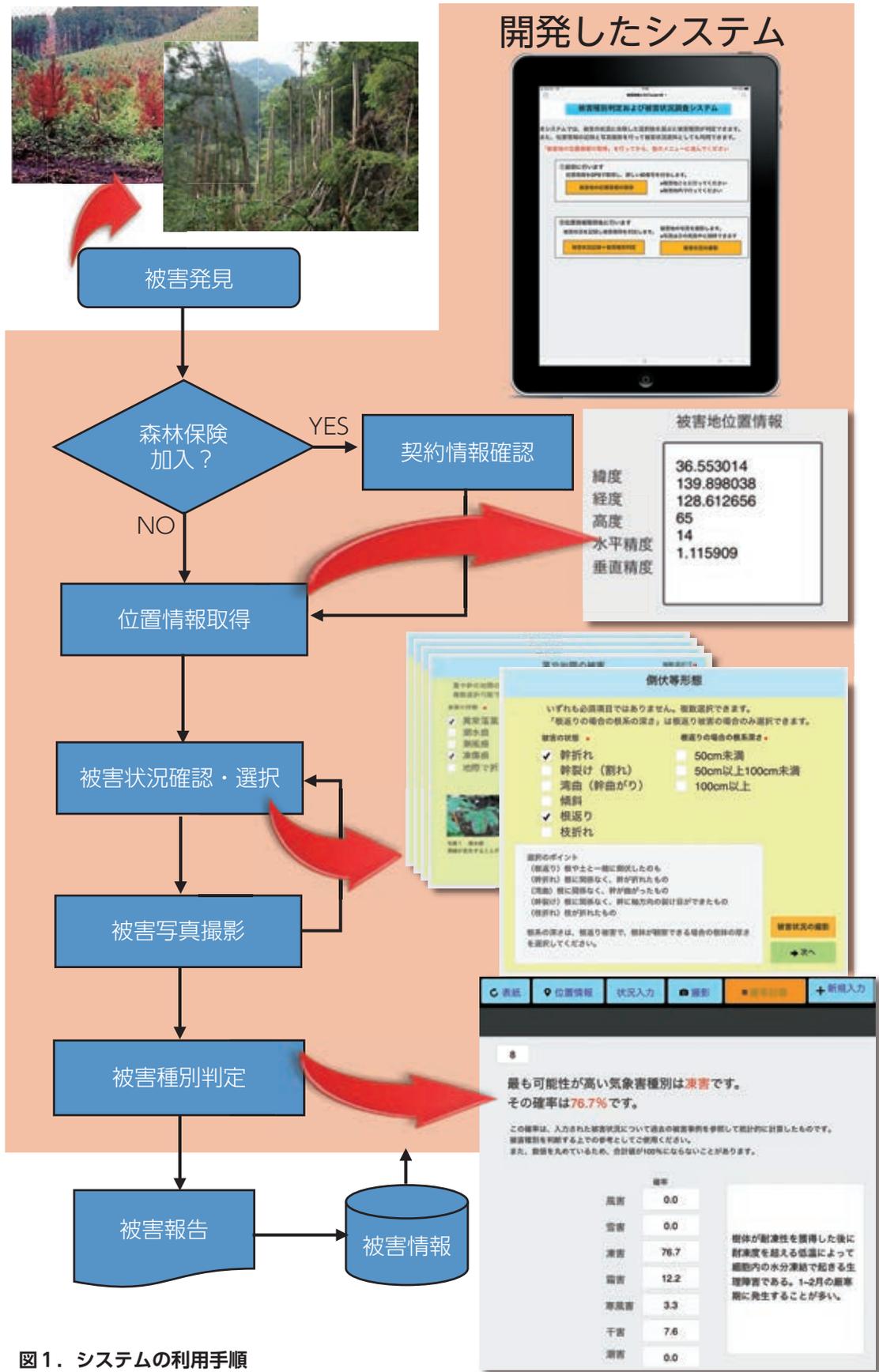


図1. システムの利用手順

森林の放射性セシウムは事故からの5年間で土壌表層に移動した

震災復興・放射性物質研究拠点 金子 真司・今村 直広

きのこ・森林微生物研究領域 小松 雅史 木材加工・特性研究領域 大橋 伸太

立地環境研究領域 橋本 昌司 東北支所 梶本 卓也 企画部 高野 勉

福島県内の川内、大玉、只見および茨城県内の筑波山のスギ林、ヒノキ林、コナラ林、アカマツ林の9林分に設置した調査地で、2011年8月以降5年間の樹木の葉、枝、樹皮、幹材、落葉層、鉍質土壌の放射性セシウムの濃度と蓄積量の変化を調べました。その結果、針葉樹の葉や樹木の枝の放射性セシウム濃度は時間の経過とともに急激に低下し、それにともない樹木における放射性セシウムの蓄積量が大きく低下しました。これに対して、落葉層と鉍質土壌では放射性セシウムの蓄積量はむしろ増加し、3年後の2014年以降は森林全体の放射性セシウムの90%以上が落葉層と鉍質土壌にあり、その多くが鉍質土壌の表層0-5cmに存在していました。

成果

森林内の放射性セシウム動態調査

東京電力福島第1原子力発電所の事故（以下、原発事故）によって森林域に降下した放射性セシウムは、森林整備の停滞や特用林産物の出荷制限、さらには林業従事者の被ばくリスク上昇など様々な問題を引き起こしました。これらの問題に対応するためには、森林内における放射性セシウムの分布状況を把握するとともに、経年的にどのように変化していくかを把握する必要があります。

そこで、2011年8月に、福島県内の川内、大玉、只見および茨城県内の筑波山のスギ林、ヒノキ林、コナラ林、アカマツ林の9林分に調査地（図1）を設けて、樹木の葉、枝、樹皮、幹材、それと落葉層や鉍質土壌に存在する放射性セシウムの濃度と蓄積量の変化を調べました（図2）。

5年間で放射性セシウムは樹木の葉・枝から土壌表層に移動

針葉樹の葉や樹木の枝の放射性セシウム濃度は、時間の経過とともに急激に低下したことがわかりました。幹材の放射性セシウム濃度は、アカマツで低下、スギやコナラでは増加する傾向がみられましたが、樹木の他の部位に比べて低濃度でした。時間の経過とともに、森林内の放射性セシウムの蓄積量は、樹木においては急激に低下しましたが、その一方で、落葉層と鉍質土壌の放射性セシウムの蓄積量は増加しました。3年後の2014年以降は森林全体の放射性セシウムの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0-5cmに存在していました（図3）。このように、原発事故で森林にもたらされた放射性セシウムは時間の経過とともに樹木か

ら土壌へ移動し、その多くは土壌の表層付近にとどまっていることを明らかにしました。

放射能汚染地域の林業再開のための基盤データを提供

原発事故直後から数年間にわたり森林内の放射性セシウムの動態を網羅的かつ長期的に調査したデータは、チェルノブイリ原発事故においても得られていませんでした。本研究では、2011年の原発事故直後から5年間の間に森林内で放射性セシウムが移動した過程を明らかにできました。得られた知見は、今後の被災地の森林管理に利用できます。とくに、森林内の放射性セシウムの移動を予測するモデルの開発や特用林産物の出荷制限解除時期の推定、林業従事者や森林利用者の被ばく低減を考えるうえで重要な成果です。また、放射性セシウムの中でもセシウム137の半減期は30年と長いいため、今後も引き続き森林内における放射性セシウムの観測を続けていくことが重要です。

研究資金と課題

本研究は、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」、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」の成果です。

文献

Imamura, N. *et al.* (2017) Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Scientific Reports*, 7, 8179.

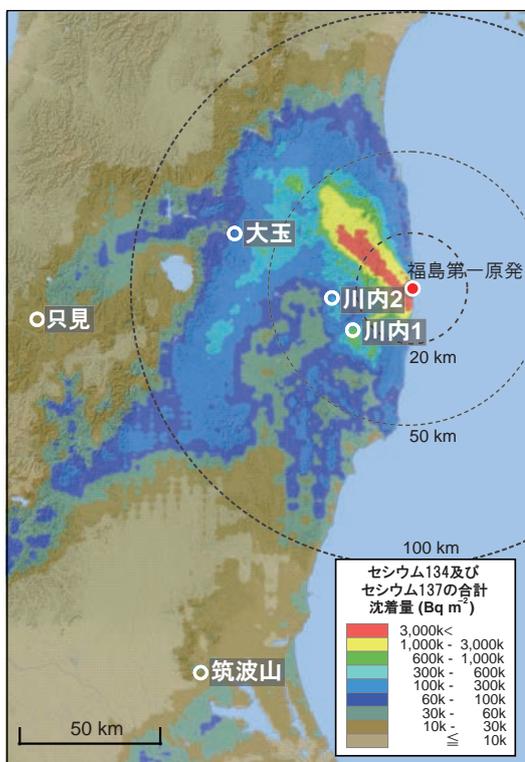


図1. 各調査地の位置

航空機モニタリングによる2012年6月28日時点のセシウム134とセシウム137の合計沈着量(放射線量等分布マップ拡大サイト/地理院地図)



図2. 調査地における試料採取の様子

(a) 樹皮の採取 (b) 土壌試料の採取

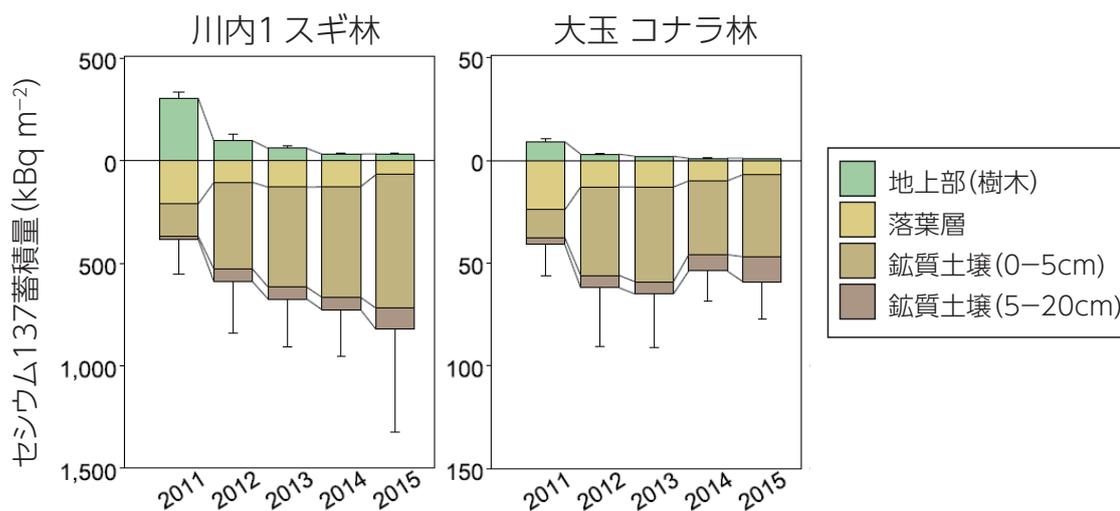


図3. 森林内の放射性セシウム蓄積量の分布の経年変化

川内村の川内1のスギ林及び大玉村のコナラ林の例。
エラーバーは標準偏差を示します。

画像資料を用いて江戸時代の土地利用を復元する

関西支所 岡本 透

気候変動に対する土壌炭素蓄積量の変動を精度高く予測するには、過去の土地利用の影響を予測モデルに反映することが必要です。そこで、デジタルアーカイブを中心とした画像資料を収集し、過去数百年にわたる土地利用の変化を復元する手法を確立しました。江戸時代の浮世絵のような絵画では、できるだけ多くの資料を収集し、それらの描写を比較することで、当時の植生や土地利用を正確に復元することができました。さらに、絵画資料と同じ場所で明治以降に撮影された写真を収集しました。このようにして収集した画像資料を時系列で整理することで、江戸時代から現在までの土地利用を明らかにすることができました。

成果

なぜ昔の土地利用を調べるのか

土壌は地球温暖化に関わる炭素の貯留場所として重要な役割を果たしています。そのため、将来の気候変動に対する土壌炭素蓄積量の変動を精度高く予測することが求められています。将来予測に用いられる土壌炭素蓄積量の実測値は、有機物の供給源である植生の変遷に影響を受けています。このため、気候変動に対する土壌炭素蓄積量の変動を精度よく予測するには、過去の土地利用の変遷を明らかにし、予測モデルに反映することが必要です。そこで、過去数百年にわたる土地利用の変化を、歴史資料の一つである絵画、絵図、写真などの画像資料を用いて復元できるかどうか試みました。

画像資料を効率よく集めるには

画像資料は、各地の公文書館、図書館、博物館、美術館などに所蔵されています。近年、画像資料のデジタルアーカイブ化がこのような施設で積極的に進められています。日本国内では国立国会図書館、海外ではニューヨーク公共図書館などにおいて知的財産権の消滅した資料が多数公開されています。こうしたデジタルアーカイブを利用することで、画像資料を効率よく集められることが分かりました。

浮世絵の表現を確かめるには

江戸時代の山の状態を知るためによく使われる画像資料が浮世絵です。ただし、実景をそのまま写した写真とは異なり、版画である浮世絵の描写は簡略化や強調化が

されているのではないかと、という疑いがあります。浮世絵の資料性を高めるには、複数の資料を収集し、それらの描写を比較することが必要です。さらに、村絵図、街道絵図、裁許絵図などの作成目的の異なる絵画資料との比較も、浮世絵の資料性を高めるために有効です。江戸時代後期以降の浮世絵の描写は、当時の山の多くが樹木の少ない状態であったことを示していました。ただし、その山肌が裸地なのか、それとも草地なのかは、慎重に判断する必要があることが分かりました。

数百年にわたる土地利用の変化

明治時代以降、写真技術の普及と私製葉書の認可が進むに連れて、日本各地を撮影した写真や風景絵葉書の数は急激に増えていきました。実景を写した画像資料を手に入れることができれば、当時の山の状態を復元することができます。同じ場所を対象にした江戸時代の絵画資料、明治時代以降の写真、現在の写真を時系列順に並べ、比較することにより、過去数百年にわたる土地利用の変化を明らかにすることができました。この研究の成果は、過去の植生が土壌炭素蓄積に与えた影響の評価につながります。今後、さまざまな地域でこの方法を適用し、将来の土壌炭素蓄積量の変動の予測向上に活かしていきます。

文献

岡本 透 (2017) 古地図から読み解く百年で移り変わる山の風景. 日本農学会編「山の農学—「山の日」から考える」, 19-36.



図1. 歌川広重の「日坂（静岡県掛川市）」の比較

左は保永堂版東海道五拾三次之内（1833-36年頃）、中は丸清版東海道（隷書東海道：1847-51年）、右は五十三次名所図会（縦絵東海道：1855年）です。広重の保永堂版の「日坂」は、江戸時代の山の状態を紹介する際によく使用されます。しかし、その他の広重の東海道作品と比較すると、保永堂版は風景の描写が強調されていることが分かりました。



図2. 街道絵図、幕末期に撮影された写真との比較

1681～1683年頃に作成された「東海道絵図」の日坂部分（左）から、街道沿いに松並木が整備されていること、遠くの山2箇所には森林があったことが分かりました。Felice Beatoが幕末期に撮影した東海道の写真（右）に写る街道松の樹形をみると、広重の保永堂版の松の樹形が不自然であることが分かりました。図1と図2から、江戸時代の実景を示す場合には、広重の保永堂版以外の浮世絵を使った方がよいことが分かりました。



図3. 江戸時代から現在までの土地利用の変化

左は1851年に刊行された広重の「東海道風景図会」、中は1918～1932年の間に発行された絵葉書、右は現在の写真です。遠景の山は静岡県掛川市と島田市に跨る粟ヶ岳です。その山頂周辺は江戸時代から現在まで通して森林であったことが明らかになりました。一方、その山腹は、江戸時代は草地でしたが、現在に向かって少しずつ森林の面積が拡大していることが明らかになりました。

国立国会図書館、ニューヨーク公共図書館、メトロポリタン美術館および個人所蔵の図像資料を使用しました。

気候変動によりマツ材線虫病の危険域は世界的に拡大する

国際連携・気候変動研究拠点 平田 晶子・大橋 春香・松井 哲哉

東北支所 中村 克典 関西支所 小南 裕志・中尾 勝洋

長野県環境保全研究所 高野 宏平 東京農業大学 田中 信行

東京大学 竹内 渉

マツ材線虫病（マツ枯れ）は、東アジアや南ヨーロッパで深刻な被害をもたらしており、気候変動による被害域の拡大が懸念されています。そこで、気候変動シナリオ下でのマツ枯れの発生危険域を世界で初めて地球規模で予測しました。その結果、将来の気温上昇量が大きいシナリオ下では、マツ枯れ発生危険域は、現在、世界のマツ21種が天然分布する地域の5割にまで拡大し、そのうちの約4割の地域はマツの分布に適さない気候条件になってしまう可能性があることがわかりました。本研究の結果は、マツ枯れの拡大阻止に取り組む世界の国々にとって重要な基礎情報となり、気候変動にともなう被害拡大の予防に役立ちます。

成果

世界に広がるマツ枯れ被害

マツ材線虫病（マツ枯れ）は、線虫であるマツノザイセンチュウがマツノマダラカミキリおよびその近縁種によって媒介されることで発生する、マツ類樹木の伝染性病害です。日本では、20世紀の初頭に北米からマツノザイセンチュウが侵入して以来、マツ林に深刻な被害をもたらしてきました。現在は、日本・韓国・中国といった東アジア諸国ばかりでなく、ポルトガルやスペインなどの南ヨーロッパ諸国でも深刻な被害をもたらしています。

マツ枯れは一度発生すると、短期間のうちに壊滅的な被害を引き起こすこともあります（図1）。そのため、マツ枯れ被害が今後も地球規模で拡大し続けると、各国の森林生態系の機能やサービス、林業・林産業に甚大な影響をもたらすのではないかと危惧されています。したがって、マツ枯れの発生危険域を早めに特定することが、マツ枯れを防除するために重要です。

気候変動によって被害域は拡大するか？

マツ枯れの発生は気温と密接な関係があることから、将来の気候変動によって被害域が北方へ拡大することが懸念されています。また、現在はマツ林が分布しているものの、将来の気候変動によって気温や降水量などの気候条件がマツの分布に適さなくなる地域では、マツの活性が低下することによってマツ枯れに対する抵抗性が弱まる危険性があります。

そこで本研究では、マツ枯れに対する抵抗性が低い世界のマツ21種（感受性マツ）の天然分布域を対象に、現在および将来の気候変動シナリオ下でマツ枯れが発生する危険域を、各月の平均気温の積算値から推定して地図化しました。さらに、21種のマツの分布と気温や降水量といった気候条件との関係を統計モデルによって定量化

し、将来はマツの分布に適さなくなる地域を推定して地図化しました。

これら2つの異なる地図を重ね合わせた結果、現在の気候条件下では、東アジアや南ヨーロッパのマツ分布域がマツ枯れ被害の危険域として判定され（図2）、実際にこれらの危険域の多くで、すでにマツ枯れ被害が見られました。また、将来の気候変動にともなって、危険域は東ヨーロッパや中央アジア、極東ロシアにまで拡大すると予測されました（図3）。気温上昇量が特に大きい気候シナリオ下では、危険域は感受性マツの天然分布域の5割にまで拡大し、しかもそのうちの4割はマツの分布に適さない気候条件になってしまう可能性があることがわかりました。

国際的なマツ枯れ防除の必要性

このように、気候変動が今後も進行した場合には、現在よりはるかに北方の国や地域でもマツ枯れ対策が必要になります。本研究の結果は、マツ枯れ拡大の阻止に取り組んでいる国々にとって重要な基礎情報となるほか、今後の気候変動にともなって被害が拡大する可能性のある国や地域におけるマツ枯れ防除策の立案に役立ちます。

研究資金と課題

本研究は、(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (S-14) 「緩和策と適応策に資する森林生態系機能とサービスの評価」による成果を含んでいます。

文献

Hirata, A. *et al.* (2017) Potential distributions of pine wilt disease under future climate change scenarios. PLoS ONE, 12(8), e0182837. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182837>



図1. マツ材線虫病の被害を受けた森林

ひとたび侵入すると、わずかな期間に壊滅的な被害をもたらすこともあります。

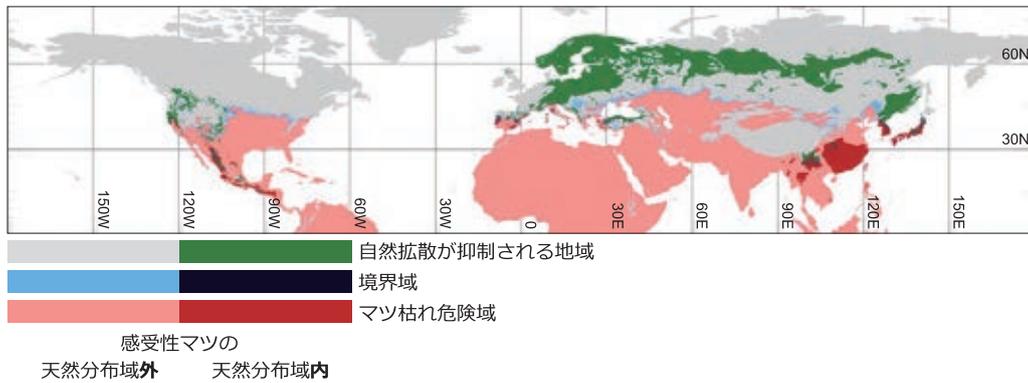


図2. 現在のマツ枯れ危険域

濃い赤色の地域が、感受性マツの天然分布域でかつ気候的にマツ枯れが発生しやすい地域です。東アジアや南ヨーロッパのマツ枯れのほとんどが、この赤い危険域で発生しています。

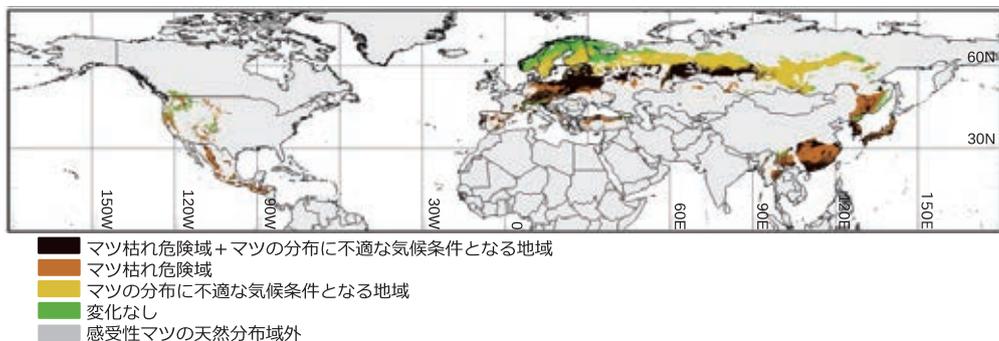


図3. 気温が現在よりも平均で3.7℃上昇すると予測されている気候変動シナリオ (RCP 8.5) にもとづく将来 (2061-2080年) のマツ枯れ危険域とマツの分布に不適な気候条件となる地域

濃茶の地域は、マツ枯れの危険域であると同時に、マツの分布には適さない気候条件になると予測された地域です。このような地域では、マツは現在よりも厳しい環境におかれるため、マツ枯れリスクもより高くなる可能性があります。

木材生産と生物多様性保全の両立をめざす保残伐施業の実証実験

研究ディレクター 尾崎 研一 森林植生研究領域 山浦 悠一

北海道支所 佐藤 重穂・佐山 勝彦・山中 聡・稲荷 尚記

北海道立総合研究機構 明石 信廣・雲野 明・対馬 俊之・長坂 晶子・長坂 有

北海道大学 庄子 康

多くの人工林が主伐期を迎え、木材生産と生物多様性保全を両立させる伐採方法が求められています。そこで、生物多様性に配慮した主伐方法である保残伐を、人工林に適用するための国内初の実証実験「トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験」を2013年に開始しました。この長期実験のうち、今回は伐採コストと伐採直後の生物多様性を調べました。その結果、広葉樹の単木保残は伐採による森林性種の減少を抑制し、群状保残の保残部分は森林性種の避難場所となることが分かりました。また伐採コストの増加は最大でも約5%でした。以上の結果から、保残伐は木材を生産しつつ、伐採直後の森林性種の保全に役立つことが分かりました。

成果

トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験とは

日本では多くの人工林が主伐期を迎え、木材生産と生物多様性保全を両立させる伐採方法の開発が必要になっています。近年、生物多様性に配慮した主伐方法として保残伐が世界的に注目されていますが、人工林への適用例はほとんどありません。そこで、国内初の保残伐の実証実験として「トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験(略称REFRESH)」を北海道有林の協力を得て2013年に開始しました。

実験の概要

本実験では、トドマツ人工林と広葉樹天然林に1区画の面積5~9haの実験区を設け、8つの処理を3セット設置しました(図1)。単木保残区では人工林内に天然更新した広葉樹林冠木を3段階の量で保残しました(図2)。一方、群状保残区では実験区の中央に保残部分を残し、閉鎖林分の環境を維持しました。伐採は2014年から1セットずつ3年かけて行いました(図3)。伐採後は、通常の人工林同様に地ごしらえ、トドマツの植栽、下刈りを行っています。

生物多様性と木材生産性への影響

これまでに、伐採コストと伐採直後の生物多様性等を調べました。伐採コストに関しては、保残伐では皆伐に比べ、伐倒で最大1割、木寄せで最大3割のコスト増が発生しました。しかし、これらの工程が全体のコストに占める割合が小さいため、全体を合計したコストの増加は最大でも約5%にすぎませんでした。次に生物多様性に関しては、鳥類では森林性種のなわばり密度は単木保残の保残量が多いほど増加しました(図4)。林床植物では、伐採によって消失した種数は保残量が多いほど少な

く、群状保残の保残部分は植物の避難場所となっていました。一方、地表性甲虫類では、森林性種の個体数は単木保残の保残量が多いほど増加しました。また、群状保残の保残部分では森林性種の個体数が増加しました。以上の結果から、広葉樹の単木保残は伐採による森林性種の減少を抑制し、群状保残の保残部分は森林性種の避難場所として機能することが明らかになりました。

木材生産と生物多様性保全の両立にむけて

今回の結果から、保残伐は伐採直後の森林性種の保全に役立つことが分かりました。一方で、保残伐の効果は対象とする生物群によって異なることが予想され、実際の施業への適用にあたっては、柔軟な技術的配慮が必要と考えられます。今後は伐採後の生物の回復状況や植栽木の成長を調べ、最終的には次の主伐までの約50年間、長期的な継続調査をめざします。

研究資金と課題

本研究は、JSPS科研費(JP25252030)「人工林の保残伐がもたらす生態系サービスを大規模実証実験で明らかにする」、(JP16H03004)「人工林における保残伐の費用便益分析：大規模実証実験と熟議型貨幣評価の結果から」、および三井物産環境基金「人工林において生物多様性保全と木材生産は両立できるか？—保残伐実験による検証と普及方法の提案—」、「保残伐による森林景観の持続的管理手法の提案」による成果です。

文献

Yamaura, Y. *et al.* (2018) Retention experiment for plantation forestry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH): A large-scale experiment for retaining broad-leaved trees in conifer plantations. *Bulletin of FFPRI*, 17, 91-109.



図1. トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験(REFRESH)の8通りの実験区

1区画の面積は5～9ha。



図2. 単木中量保残区(上)と群状保残区(下)

	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
第1セット	実験区設定	伐採 地拵え	植栽		
	伐採前調査		伐採後調査		
第2セット	実験区設定		伐採 地拵え	植栽	
		伐採前調査		伐採後調査	
第3セット			実験区設定	伐採 地拵え	植栽
			伐採前調査		伐採後調査

図3. トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験(REFRESH)の伐採・植栽と実験のスケジュール

第1～第3セットはそれぞれ1年ずつスケジュールをずらしています。

専門用語

保残伐：伐採時に一部の樹木を残して複雑な森林構造を維持することにより生物多様性や生態系サービスを損なわないように木材を生産する方法のことで、保持伐ともいう。従来の伐採方法に比べて、伐る木よりも残す木を優先的に選ぶ点と、残すものは永続的に残す点で異なっている。

森林性種：主に森林に生息する種。

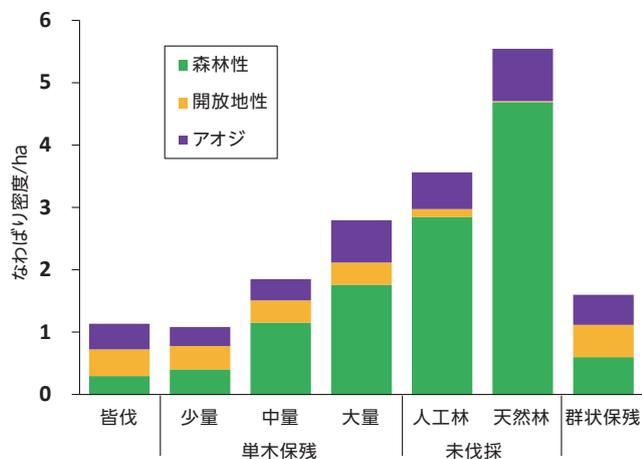


図4. 実験区における伐採1年後の鳥類のなわばり密度

使える技術を総動員する新たな松くい虫被害対策

東北支所 中村 克典・前原 紀敏・相川 拓也・大塚 生美

森林昆虫研究領域 佐藤 大樹・浦野 忠久 関西支所 市原 優

林木育種センター東北育種場 井城 泰一・那須 仁弥 林木育種センター 山野邊 太郎

青森県産業技術センター林業研究所 中島 剛 岩手県林業技術センター 後藤 幸広・谷内 博規

山形県森林研究研修センター 宮下 智弘・渡部 公一 山口県農林総合技術センター 杉本 博之

松くい虫被害に対しては駆除、予防、抵抗性マツの植栽による防除体系が確立されています。しかし、近年の農薬等薬剤の使用に対する制約によって、十分な防除ができずに被害が拡大する事態が起きています。そこで本研究では、①媒介昆虫を駆除する省労力で環境への負荷の少ない技術の効果を実証し、②被害材の燃料利用を促進するモデルを提示し、③予防伐採推進に向けたアカマツ材のCLT製造技術を確認し、④被害地、未被害地、アカマツ林業地域のそれぞれで必要とされる抵抗性マツ利用技術を開発しました。そして、薬剤の使用が制約される中でも使える技術を総動員する、新たな防除体系を提案しました。

成果

環境低負荷で効率の良い松くい虫被害対策を求めて

松くい虫被害に対しては、駆除、予防、抵抗性マツの植栽を3本柱とする防除体系がすでに確立されています。しかし、農薬等薬剤の使用に対する制約が強まる中、特に予防のための殺虫剤散布が困難となり、被害の拡大を抑えられない事態が起きています。こうした状況下で松くい虫被害対策を着実に進めるには、使える技術を総動員する取り組みが必要です。そのため、本研究では以下の4つの取り組みを行いました(図1)。

場面に応じた駆除手法選択

省労力で環境への負荷の少ない媒介昆虫の駆除技術として、天敵微生物製剤と被覆・粘着資材を利用した手法をとりあげ、防除の現場での効果を実証しました。これらの手法をそれぞれの特性や場面に応じて使い分けることで、これまで作業を行うことが難しかった場所で駆除を実施し、また駆除にかかる労力や経費を削減できるようになりました(表1)。

松くい虫被害材の燃料利用を促進

被害材を燃料として利用すれば、松くい虫防除と木質資源の有効利用を両立できます。そこで、木質バイオマス発電所や地域熱電供給システムで被害材を利用する取り組みを岩手県で調査し、モノ(木材やチップ)と情報の流れを模式化しました(図2)。模式化したことで、被害材の利用を進めるために何をすべきか、どこがネックになっているのかを検討し、対処することが容易になりました。

高付加価値化で予防伐採を促進

未被害の松林を守るためには、周辺の松林を予防的に伐採することが有効です。この予防伐採を進めるには、伐った松がお金になることが重要です。そこで、松材の新たな用途を創り出して付加価値を高めるため、アカマツCLT(直交集成板)の製造技術を確認しました。

場面に応じた抵抗性マツ利用技術

被害地で求められる強抵抗性クロマツと、未被害地で求められるマツノザイセンチュウ非感染の抵抗性クロマツ採種木を作出する技術をそれぞれ確立し、苗木の育成を進めました。さらに、アカマツ林業の存続に向け、材質などの特性とマツノザイセンチュウ抵抗性をもとに適切な植栽品種を選ぶことができる検索システムを開発しました。

松林を利用し、松林を守る

以上の成果をまとめて、薬剤の使用が制約される中でも使える技術を総動員する、新たな防除体系を提案しました。松くい虫被害が広まってしまった状況で松林を維持存続するには、守るべき松林に防除対策を集中し、周辺の松林では樹種転換等によって松自体を減らす取り組みが求められます。本研究は、松林を「伐って使う」ことによる被害対策の重要性を示しています。

研究資金と課題

本研究は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「薬剤使用の制約に対応する松くい虫対策技術の刷新」(課題番号27020C)による成果です。



図1. 松くい虫被害対策技術の刷新に向けた各種個別技術

表1. 媒介昆虫駆除手法の特性と使い分け

現行で主流となっている「くん蒸剤処理」と本研究で取り上げた2つの手法を比較しています。赤字で示した各手法の弱点をみると、各手法はそれぞれ補完し合う関係になっていることがわかります。

手法	天敵微生物製剤処理*	被覆・粘着資材による成虫逸出抑制	くん蒸剤処理
防除種別	生物的防除	物理的防除	化学的防除
防除効果	高	高	高
密閉処理の要否	不要	不要	必要
製剤施用量調整	容易	(製剤不使用)	困難
シート回収要否	生分解性シート使用で不要	必要	生分解性シート使用で不要
製剤・資材単価(1m ³ あたり)	約10,000円	約3,500円	約4,500円
適した使用場面	散在する少数の被害木、丸太集積や密閉が困難な林地	人家周辺(公園、ゴルフ場)、海岸、林道沿い等シート回収が容易な場所	林地一般

*平成29年より製剤が生産中止となった。

専門用語

駆除: 松くい虫防除においては、病原体マツノザイセンチュウの媒介昆虫であるマツノマダラカミキリが成虫になって飛び広がる前に死滅させることを指す。

予防: 松が枯れないように、予防的に殺虫剤を散布したり、薬剤を注入したりする処理。

天敵微生物製剤: 媒介昆虫マツノマダラカミキリを病死させるカビを使った防除資材。枯れた松から脱出したカミキリの成虫はカビを培養したシートに触れると死亡するため、マツノザイセンチュウの媒介を防ぐことができる。

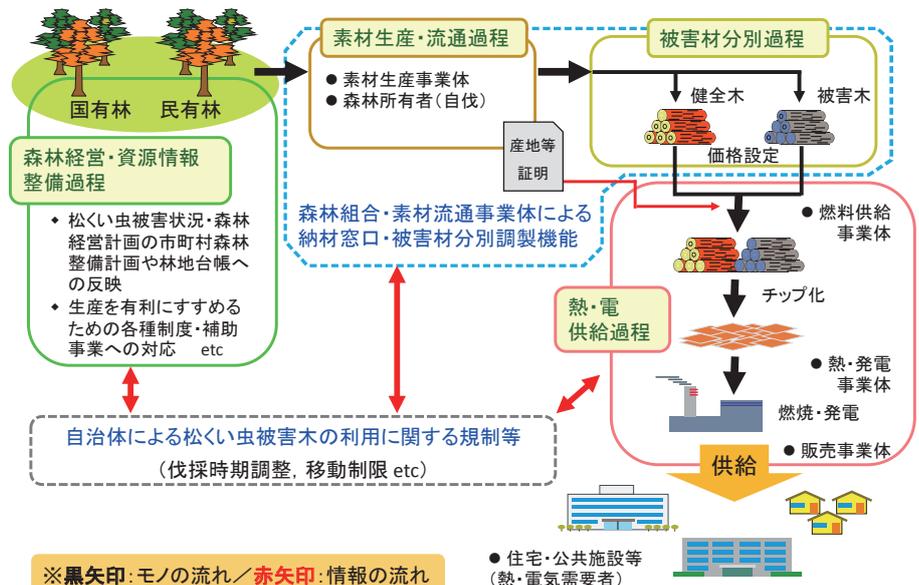


図2. 木質バイオマス大規模発電型の松くい虫被害材燃料利用モデル

新たな地ごしらえ機械の導入で下刈コストを削減し、 低コスト再造林施業を実現

北海道支所 原山 尚徳・上村 章・佐々木 尚三・山田 健
植物生態研究領域 宇都木 玄

低コスト再造林施業を進めるため、北海道の傾斜が緩やかな林地でクラッシャという新しい地ごしらえ機械を導入し、カラマツの植栽実証試験を行いました。クラッシャによる地ごしらえは、人力や従来の機械地ごしらえよりも作業効率が高く、コストも削減できました。さらに地ごしらえ過程で発生する枝条などの破砕物が土壌を覆うため、雑草木の成長が抑制され、下刈費用の大幅な削減が可能となりました。一方、植栽孔を掘るために破砕物を除去する必要があり、裸苗では植えつけ効率が低下しました。しかし地ごしらえ費用や下刈費用削減の効果が大きく、北海道で最も一般的な手法と比較して、再造林全体のコストを最大で37%削減できることがわかりました。

成果

低コスト再造林の必要性

主伐による木材収入が低迷する中、低コストな再造林システムの構築が大きな課題となっています。日本は南北に長く、気候、立地、樹種などの諸条件が異なるので、各地域に適した再造林システムの構築が必要となります。私たちは、北海道の主要な造林樹種であるカラマツを対象に、緩中傾斜地が多い利点を活かした機械化を行い、再造林作業の効率化や低コスト化を図る研究を進めました。

地ごしらえ機械「クラッシャ」の導入と雑草木抑制効果

地ごしらえの効率化・低コスト化を図るため、主伐時に発生する枝条や伐根を破砕できるクラッシャを導入しました(図1)。これにより、枝条を造林地脇に寄せる従来の地ごしらえ方法よりも作業効率が向上し、コストは人力の57%、従来機械の75%に低減できました。また、クラッシャ地ごしらえで発生する枝条や伐根の破砕物が土壌を覆うことで、雑草木の繁茂が大幅に減少することがわかりました(図2)。

下刈省略

カラマツは雑草木による成長の阻害を強く受ける樹種で、通常植栽後2年間は年2回、その後3年間は年1回下刈を行います。私たちは、クラッシャで地ごしらえをした伐採地にカラマツ苗を植栽し、下刈作業をどの程度省略できるか調べました。その結果、植栽後2年間下刈を省略してもカラマツは順調に成長し、クリーンラーチの大型苗を植栽した場合は下刈を完全に省略できました。他方、主伐時に枝条が少ない林地や、小型なコンテナ苗を植栽した林地では、植栽2年目には雑草木がカラマツを被覆するため、植栽当年のみ下刈の省略が可能であることがわかりました。

再造林コストの試算結果

クラッシャ地ごしらえでは、特に裸苗植栽において破砕物の除去作業が必要となり、植えつけ効率が低下しました。正負の効果を考慮に入れるため、苗種や植栽密度を変えた複数の条件で、クラッシャ地ごしらえの導入による再造林コスト全体を計算しました(図3)。その結果、下刈費用の削減分は植えつけ費用の増加分を大きく上回り、従来の再造林コストを最大で37%削減できることがわかりました。

クラッシャ地ごしらえは急傾斜地や石礫地では導入が困難なものの、北海道の多くの林地で適用可能な新たな低コスト再造林手法です。本州以南のスギやヒノキについても機械化や植物の成長特性を生かした下刈り技術を開発し、地域に適した低コスト再造林施業の構築に向けて研究を進めていきます。

研究資金と課題

本研究は、革新的技術開発・緊急展開事業(うち地域戦略プロジェクト)「優良苗の安定供給と下刈り省力化による一貫作業システム体系の開発」による成果です。

文献

原山尚徳(他)(2018)クラッシャ地拵による破砕物の量が下草繁茂に及ぼす影響. 北森研, 66, 73-76.
山田 健(他)(2018)地拵え用クラッシャの作業性能と造林作業にもたらす効果. 森林利用, 1, 67-71.

専門用語

クリーンラーチ: グイマツ雑種F1で、成長の優れたカラマツ育種苗。



図1. エクスキャタに装着したクラッシャと、クラッシャ地ごしらえで堆積する破砕物

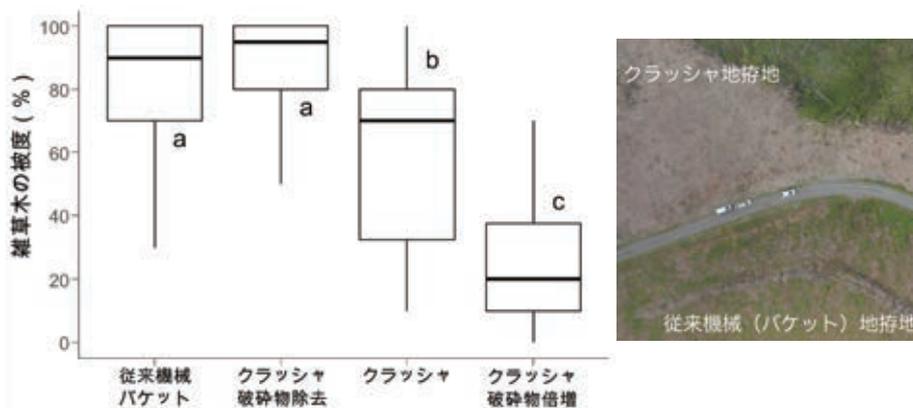


図2. 従来機械であるバケットとクラッシャ地ごしらえにおける、地ごしらえ1年後の雑草木被度の比較

クラッシャ地ごしらえ地で雑草木の繁茂が抑えられました。

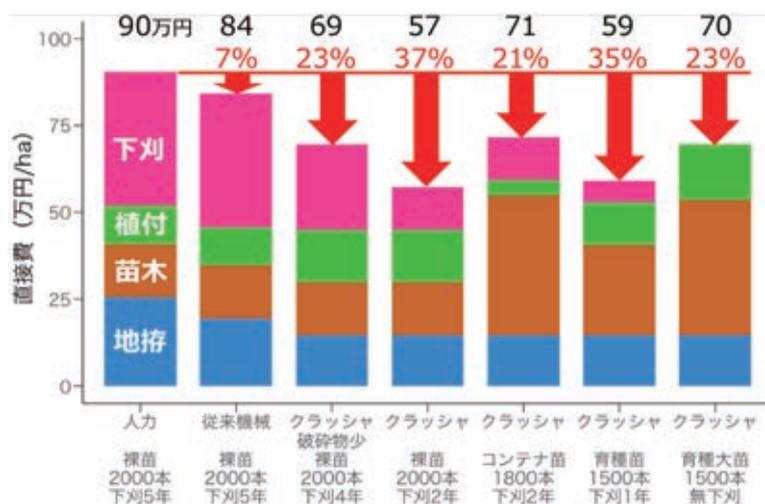


図3. 従来地ごしらえとクラッシャ地ごしらえ地におけるカラマツ再造林コストの比較

北海道で最も一般的な人力地ごしらえと比較して、クラッシャ地ごしらえでは再造林費用が21%から37%削減可能と試算されました。(育苗種=クリーンラーチ)

低コストのデジタル空中写真で林分材積を高精度に推定する

森林管理研究領域 細田 和男・西園 朋広・佐野 真

北海道支所 古家 直行 東北支所 小谷 英司

関西支所 田中 邦宏・齋藤 和彦・田中 真哉・家原 敏郎

四国支所 北原 文章 九州支所 近藤 洋史

一般社団法人日本森林技術協会 金森 匡彦・大萱 直花・古田 朝子

比較的安価に購入でき、森林組合などの事業所レベルでも導入し易いデジタル空中写真に着目し、空中写真から林分材積を精度よく推定する方法を開発しました。空中写真から読みとった平均樹高や本数を現地調査のデータと比較して、相互の関係を明らかにしました。さらに、全国各地の国有林に設定されている収穫試験地のデータを用いて、平均樹高と本数からスギやヒノキ、カラマツ人工林の林分材積を求める推定式を地域別に作成しました。この推定式を森林立体視ソフト「もりったい」に組み込むことにより、現地調査を行うことなく、デジタル空中写真から高精度に林分材積を推定できるようになりました。

成果

空中写真は身近なりモートセンシング

森林を伐採する際には、収穫できる木材の量や収支を見積もるための事前調査が欠かせません。森林調査は人が林の中を歩き回って、伐採予定区域の面積や立木の本数、胸高直径、樹高などを調べるのが一般的です。しかし、これには多くの人手と時間がかかります。より効率的に調査を行うため、人工衛星画像、航空レーザー測量、3次元レーザー扫描仪、ドローンによる低空撮影など様々なリモートセンシング技術の応用が提案されています。本研究では、全国の多くの森林をカバーしており、1,000～2,000円/km²と比較的安価で、森林組合などの事業所レベルでも導入し易いデジタル空中写真に着目し、空中写真から林分材積を精度よく推定する方法の開発に取り組みました。

現地調査と空中写真との違い

空中写真は、上空はるか数千メートルを高速で飛行する航空機から撮影されるもので、写真の立体視判読による平均樹高や本数は、現地での森林調査（以下、現地調査）によるものと同じではありません。例えば、同時に植え付けられた立木でも、育ちの遅い下層木は優勢な上層木の陰に隠れ、上空からの空中写真には写りません。本研究を行ったスギ人工林19か所での検証の結果、空中写真の立体視判読による平均樹高は、現地調査におけるLoreyの平均樹高とほぼ一致することが分かりました（図1左）。また、立体視判読による本数は、1,000本/haまでの林では現地調査の本数とよく一致することが確認されました（図1右）。さらに、1,000本/haを超える混んだ林の場合、立体視判読では実際の本数を数えきれないという限界も改めて認識されました。

Loreyの平均樹高と本数による林分材積の推定

森林総合研究所は、林野庁の各森林管理局と共同して、

全国の国有林に収穫試験地と称される多数の固定試験地を設定し、最も古いものでは1920年代から、胸高直径や樹高、林分材積の測定を継続してきました。本研究ではこの中からスギ、ヒノキまたはカラマツの人工林278か所、のべ2,292回分の調査データを使用し、Loreyの平均樹高と本数から、林分材積を求める推定式を樹種別、地域別に作成しました（表1）。式の推定精度は樹種や地域によって異なりますが、1,000本/ha未満の林分において、多くの式は誤差が15%以内で、サンプリングによる現地調査と遜色ないものでした。低コストのデジタル空中写真を用いて立体視判読を行うことにより、皆伐の対象となる密度1,000本/ha未満の林分においては現地調査を行うことなく、高精度に林分材積を推定することができるようになりました。本研究で作成した林分材積の推定式は、森林立体視ソフト「もりったい」の新しいバージョンに組み込まれています（図2）。

研究資金と課題

本研究は、農林水産省委託プロジェクト「低コストな森林情報把握技術の開発」による成果の一部です。

専門用語

立体視判読：重なるように連続して撮影された隣りあわせの空中写真を、パソコンの3Dディスプレイなどを用いて、人間の左右の目に立体的に見えるようにし、地面や樹木の高さなどを計測すること。

Loreyの平均樹高：各立木の胸高断面積を重みとする加重平均樹高。胸高直径の細い立木の影響が小さくなり、上層木だけの平均樹高に近くなる。

森林立体視ソフト「もりったい」：林野庁補助事業「デジタル森林空間情報利用技術開発事業」の成果として日本森林技術協会と株式会社パスコが共同開発したソフトウェア（詳しくは「もりったい」で検索🔍）。

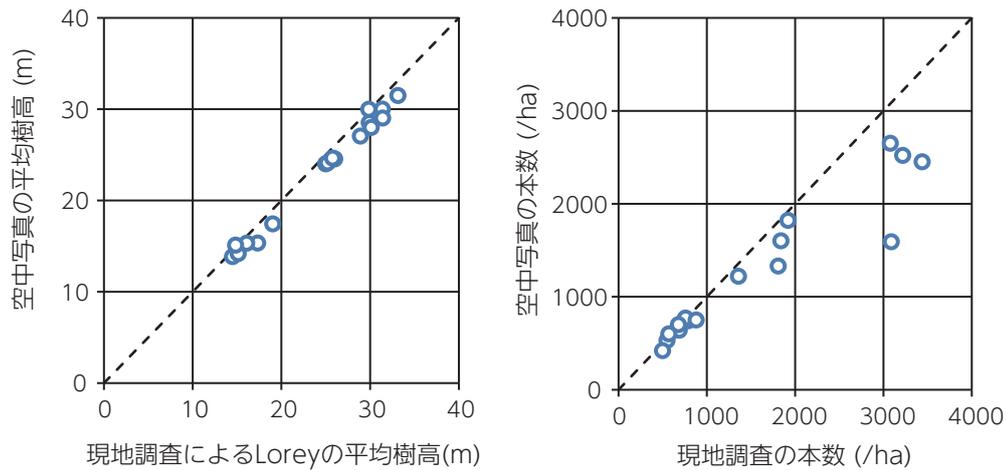


図1. 現地調査と空中写真とによる平均樹高や本数の比較

空中写真による平均樹高は、現地調査によるLoreyの平均樹高とほぼ一対一ですが、約5%わずかに低い傾向がありました。また、樹高と本数から林分材積を推定する手法は、現地調査と空中写真の本数がよく一致する1,000本/ha未満の人工林に適しているといえます。

表1. Loreyの平均樹高と本数から林分材積を求める推定式 (主な地域)

V: 林分材積(m³/ha)、LH: Loreyの平均樹高 (m)、N: 本数 (/ha)
誤差率は1,000本/ha未満の林分に対しての値です

樹種	地域	林分材積の推定式	誤差率 (%)
スギ	青森・岩手・宮城	$V = 0.005 \times LH^{2.513} \times N^{0.613}$	7.5
	秋田・山形	$V = 0.003 \times LH^{2.559} \times N^{0.632}$	8.4
	四国	$V = 0.032 \times LH^{2.159} \times N^{0.472}$	14.6
	九州	$V = 0.055 \times LH^{1.856} \times N^{0.533}$	8.2
ヒノキ	南関東・静岡	$V = 0.008 \times LH^{2.349} \times N^{0.603}$	6.5
	岐阜・愛知	$V = 0.009 \times LH^{2.493} \times N^{0.517}$	6.6
	近畿・中国	$V = 0.256 \times LH^{1.889} \times N^{0.286}$	12.4
カラマツ	北海道	$V = 0.025 \times LH^{2.053} \times N^{0.480}$	15.2
	岩手・秋田・山形	$V = 0.007 \times LH^{2.515} \times N^{0.462}$	11.6
	長野	$V = 0.010 \times LH^{2.373} \times N^{0.490}$	14.9

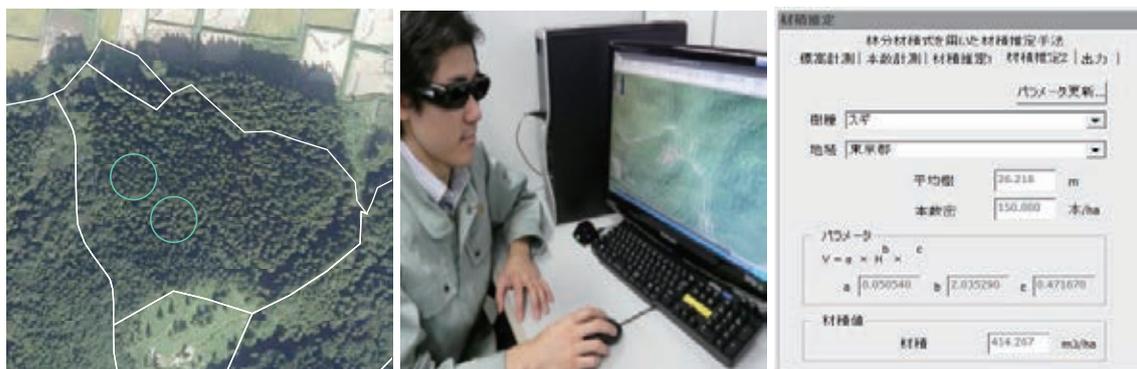


図2. 森林立体視ソフト「もりたい」による材積の推定

パソコンの3Dディスプレイと特別なメガネにより空中写真を立体視し、区画内の平均樹高や本数を測定します

国産広葉樹の家具・内装材用途での活用に向けて

林業経営・政策研究領域 青井 秀樹・田中 亘 木材加工・特性研究領域 杉山 真樹

東北支所 天野 智将

家具・内装材向けの広葉樹原材料は全体の約8割を海外産が占めています。一方、我が国の私有林には約7億7千万 m^3 の広葉樹の蓄積があり、その活用によって原材料を国産に転換することが可能です。そこで国産広葉樹の地域別の蓄積状況、流通・加工状況、および国産広葉樹の利用を進めるための課題、その対応方策の解明を試みました。その結果として、本州日本海側や内陸部には豊富な有用樹種の蓄積があること、一方で、流通・加工体制が未整備であることを指摘しました。国産広葉樹の利用を進めるためには、本州日本海側や内陸部の広葉樹資源の活用が鍵となるため、その豊富な資源に見合った販売先、販売方法を提案しました。

成果

家具や内装材向けの広葉樹原材料を巡る概況

国内生産される家具に限定して原材料需要を原木換算すると72万 m^3 と推計されます。しかし家具・内装材用では全体の約8割を海外産が占めているのが現状です。統計上では我が国の私有林に約7億7千万 m^3 の広葉樹の資源蓄積があり、これを利用しない手はありません。ただし1980年代後半以降は海外産広葉樹への依存が高まってきたため、国産広葉樹の地域別の蓄積状況、流通・加工状況が把握されていませんでした。そこで本調査研究ではそれらを解明すると共に、国産広葉樹の利用拡大のための課題と対応方策を明らかにすることを目標としました。

有用樹種の蓄積状況

現在の広葉樹の主な産地は北海道や東北地方です。これに加え、潜在的な産地として、本州日本海側や内陸部では十分な直径を持つナラ類、ヤマザクラ、クリ等の有用樹種の蓄積が豊富にあることが分かりました(図1)。しかし、本州日本海側や内陸部では、人手不足の上に、路網の未整備、高性能林業機械の未活用といった課題があり、生産拡大は容易ではありません。

広葉樹原木の流通・加工状況

広葉樹原木の流通・加工状況は図2に示す形に整理できます。流れとしては、広葉樹が山で伐採された後に、伐採現場近くの集積所で樹種、直径、品質等を基準に仕分けられます。ここでは有用樹種、最小直径が20cm以上、節無し、腐れ無し、まっすぐな部分が2m以上等を満たす広葉樹原木(用材と呼ぶ)が選抜され、主に原木市場に出荷されます。原木市場では製材業者がそれらを買付け、乾燥ひき板に加工して家具・内装材の製造者に販売します。しかし製材・乾燥工場は2000年代に大幅に淘汰さ

れ、現状では残った少数の工場がフル操業しており、生産拡大の余力が乏しい状況です。

国産広葉樹の利用拡大に向けた方策

海外産広葉樹を国産に転換するには、生産縮小してきた広葉樹製材・乾燥工場の生産能力を拡充する必要があります。そのためには広葉樹用材の安定供給が不可欠で、路網整備、高性能林業機械の活用による広葉樹用材の増産が必須となります。

現在、本州日本海側や内陸部で生産された広葉樹用材の多くは低質材として扱われ、生産のインセンティブが働きにくい状況にあります。そこで、広葉樹用材の品質と量に見合った有利な販売先、販売方法を提案しました(図3)。ここでは一度に10 m^3 の用材が集まるかどうかを基準としています。仮に上質材だけで10 m^3 集まる場合は、価格形成力がある遠方の広葉樹主体の原木市場での競り売りを推奨しています。有利な価格が実現できれば生産のインセンティブが働き、安定供給体制が実現でき、さらにそれを需要する工場群の形成につながります。生産と需要の拡大はさらなる広葉樹用材の需要拡大につながります。こうした循環を本州日本海側や内陸部で実現することが国産広葉樹用材の利用拡大の鍵となります。

研究資金と課題

本研究は、森林総合研究所交付金プロジェクト「マテリアル用国内広葉樹資源の需給実態の解明と需要拡大に向けた対応方策の提案」による成果です。

文献

青井秀樹(他)(2016)国産広葉樹資源をマテリアル用途で活用する可能性. 森林バイオマス利用学会誌, 11(2), 39-48.

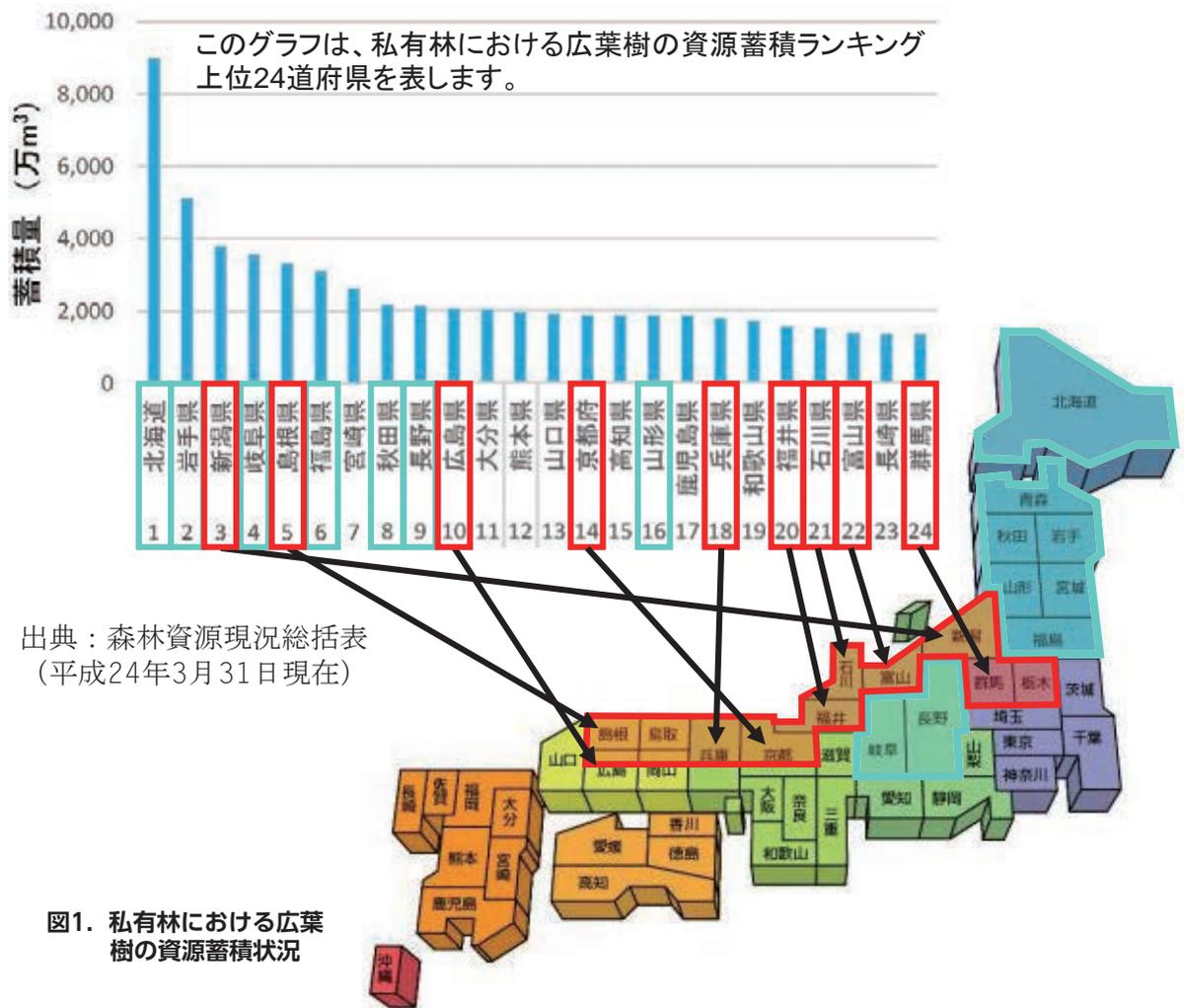


図1. 私有林における広葉樹の資源蓄積状況

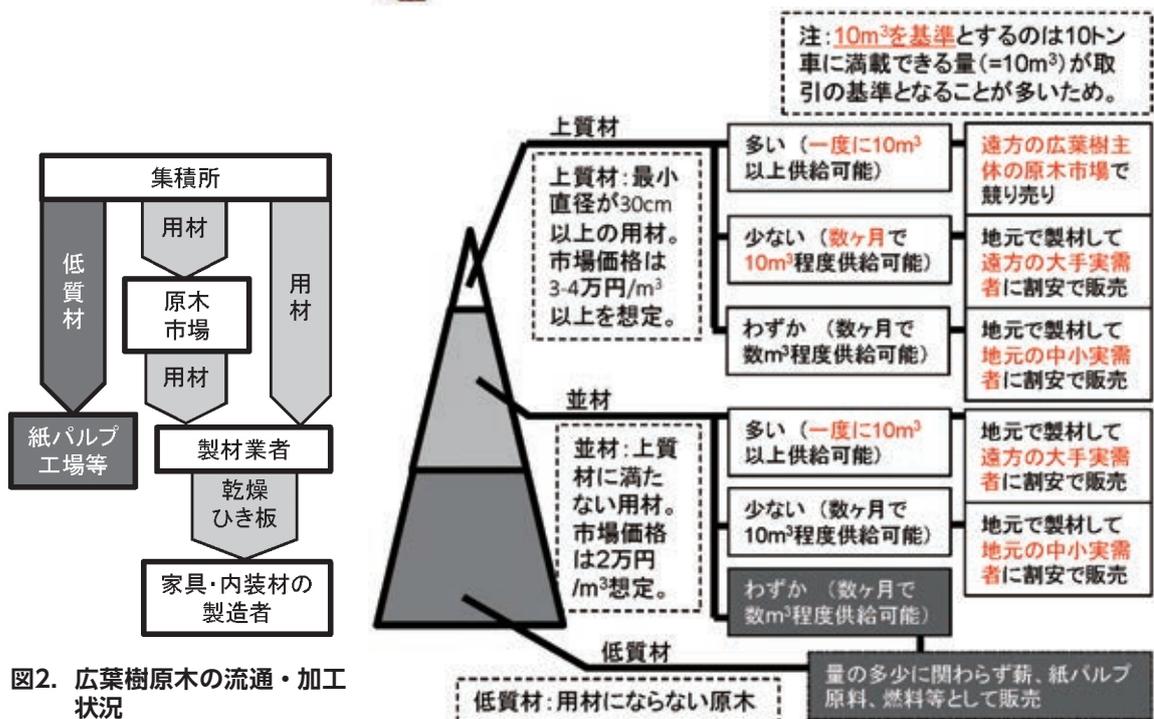


図2. 広葉樹原木の流通・加工状況

図3. 広葉樹原木の質・量に基づく販売先、販売方法案

木質バイオマスを直接メタン発酵する技術の実証試験 — 放射能汚染バイオマスにも適応可能な新技術 —

森林資源化学研究領域 大塚 祐一郎・ロナルド R. ナバロ・中村 雅哉
研究ディレクター 真柄 謙吾

「湿式ミリング処理」という新しい処理技術を応用して、木質バイオマスを主原料とした世界初のメタン発酵の実証実験施設を福島県南相馬市小高区に作りました。この施設での実証試験の結果、南相馬市産の様々な樹種、またそれらの枝葉、樹皮などを主原料にして長期間連続的にメタン発酵できる条件を見つけることができました。また東京電力福島第一原子力発電所事故による放射性物質の影響を受けた原料を用いた場合でも、生産されるメタンガスには放射性物質が含まれないことを確かめることができました。本実証事業により、木質バイオマスの新しい利用方法が実証されただけでなく、放射性物質に汚染された森林の活用にも貢献できます。

成果

木質バイオマスのメタン発酵実証実験施設

森林総合研究所では、湿式ミリング処理という新しい木質バイオマスの前処理技術を開発してきました。これにより、これまで難しいとされていた木質バイオマスを主原料としてメタン発酵が可能になることを実験室レベルでは確認していました（平成27年度成果選集）。今回は、実用化に向けた基礎データを得るために福島県南相馬市小高区において世界初の木質バイオマスを主原料としたメタン発酵の実証実験施設を作り、実証試験を行いました。

図1は実証実験施設の概観とプロセスを示しています。この施設では南相馬市内で収集した原料を粉碎後、湿式ミリング処理によりスラリー（泥状の混合物）化して、メタン発酵槽へ投入することで、メタン発酵によりバイオガス（メタンガス60%）が生産されます。得られたガスはそのまま燃料になります。発酵排液は固液分離処理で排水と残渣に分け、排水は浄化後にリサイクルします。発酵残渣はプレス機で減容化します。

実証試験の成果：

（1）メタン発酵

さまざまな条件検討の結果、メタン発酵を安定的に継続するためには木質バイオマスに対して1/10量程度の動物性タンパク質を添加する必要があることがわかりました。動物性タンパク質を添加する条件を見出したことにより安定的なメタン発酵の継続に成功し、さらにスギ・アカマツ・ケヤキ・コナラ材及びそれらの枝葉・樹皮・混合物でメタン発酵できることがわかりました。図2に示すように、メタン発酵によって発生したバイオガスの量は原料1kg当たりスギ樹皮で400L、アカマツにおいては500Lのバイオガスが発生することがわかりました。そのうちメタンガスの濃度は概ね60%で、直接燃焼可能なガスが得られることを確認しました。

（2）放射性セシウムの移行

原料に含まれる放射性物質が、実証実験のプロセスでどのように移行するのかを調べました。原料に含まれる放射性物質を100%とした場合、メタン発酵によって生産されたバイオガスには放射性物質はまったく移行しないことが明らかになりました。放射性物質の約92.5%は発酵残渣に集められ、残りの3~8%は、リサイクルされる発酵排水に含まれることがわかりました。この結果から、放射性セシウムの影響を受けた原料を使用しても安全なメタンガスを生産できることが実証されました（図3）。

なお、本成果の詳細につきましては、下記の文献及びウェブサイトをご覧ください。

研究資金と課題

本研究は、福島県委託事業「メタン発酵による木質バイオマス活用実証事業」による、広島大学、静岡大学、広島国際学院大学との共同研究の成果です。

文献

Shikinaka, K. *et al.* (2016) Simple and practicable process for lignocellulosic biomass utilization. *Green Chemistry*, 18, 5962-5966.

福島県林業振興課ウェブサイト

メタン発酵による木質バイオマス活用実証事業成果概要版
https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/320079_774402_misc.pdf

メタン発酵による木質バイオマス活用実証事業報告書
https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/320079_774401_misc.pdf

メタン発酵による木質バイオマス活用事業性評価
https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/320079_774403_misc.pdf

木材表面上の加工欠点の発生原因を可視化する

木材加工・特性研究領域 松田 陽介

木材製品の表面は、毛羽立ちなどがなく平滑であることが求められます。そのような良好な表面を得るために、鉋（かんな）がけなどの切削加工が行われます。しかし、切削加工によって木材に過大な変形（ひずみ）が生じると、それがしばしば毛羽立ちなどの加工欠点の原因となります。本研究では、木材の切削加工の過程を撮影したデジタル画像を画像相関法と呼ばれる手法を用いて解析することで、切削加工時に発生するひずみを可視化しました。本研究によって、加工欠点の発生しない切削条件の最適化や切削工具の設計のための基礎データの蓄積を加速化できます。

成果

木材の切削加工時の変形（ひずみ）の検出

木材製品の表面は、鉋（かんな）がけやプレーナー加工などの切削加工によって平滑に仕上げられます。しかし、使用する切削工具の状態や被削材の材質などによって、切削加工時に過大な変形（ひずみ）が発生する場合があります。これが加工欠点の原因となります。したがって、過大なひずみの発生しにくい切削条件を見出すことは重要です。本研究では、ヒノキの切削加工の様子を撮影したデジタル画像を画像相関法によって解析することで、切削加工時に発生したひずみを可視化しました（図1）。これまで木材の切削加工時のひずみの測定にあたっては、特殊な装置や試験体の前処理が必要でしたが、画像相関法ではこれらの準備が不要となり効率的に測定することができました。またカメラのレンズの倍率を上げることで、ひずみ分布を他の方法と比べてより細かく調べることが可能となりました。

切削条件とひずみの関係

切削角（刃の傾き）や切込量（削り取る厚さ）によって、切削加工した面の表層で発生するひずみがどのように変化するか調べました。その結果、切削角が大きいほど、切削工具の進行する方向と垂直方向の圧縮ひずみが大きくなることがわかりました（図2）。また、X線CT撮像によって表層の状態を調べると、圧縮ひずみが残留した切削条件では、細胞がつぶれていることが確認できました（図3右）。一方、ひずみがほとんど検出されなかった切削条件では、細胞は原形を保っていました（図3左）。

つぶれた細胞は塗料内や空気中の水分によって膨潤することで毛羽立ちとなる可能性があり、その場合表面の平滑性が損なわれます。また、接着剤内の水分によって膨潤し、接着面に凹凸が生じて接着性能が損なわれる可能性があります。このような加工欠点が生じないように、表層の細胞がつぶれない切削条件（切削角や切込量）を設定することが重要となります。

切削条件の最適化や切削工具の設計を効率的に行えます

従来、木材表面を平滑に仕上げられる切削条件を見出すため、現場の技術者たちは経験に基づいて様々な試行錯誤を行ってきました。本研究では切削加工の過程を撮影したデジタル画像を解析することで、加工欠点の原因となるひずみを測定する技術を開発しました。この方法を用いれば、加工欠点が発生しない切削条件を見出すための基礎データを効率よく蓄積できるようになり、切削条件の最適化や切削工具の設計に寄与することができます。

研究資金と課題

本研究の一部は、森林総合研究所交付金プロジェクト「超高品質材面加工のための切削時におけるひずみ分布可視化技術の開発」による成果です。

文献

Matsuda, Y. *et al.* (2017) Residual strain analysis with digital image correlation method for subsurface damage evaluation of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) finished by slow-speed orthogonal cutting. *J Wood Sci*, 63, 615-624.

専門用語

画像相関法：試験体の変形の前後で画像を撮影し、両画像の画素配列を比較することによって試験体の変形（ひずみ）を計算する手法。

X線CT撮像：試験体にX線を照射することによって、試験体の内部構造を可視化する技術。

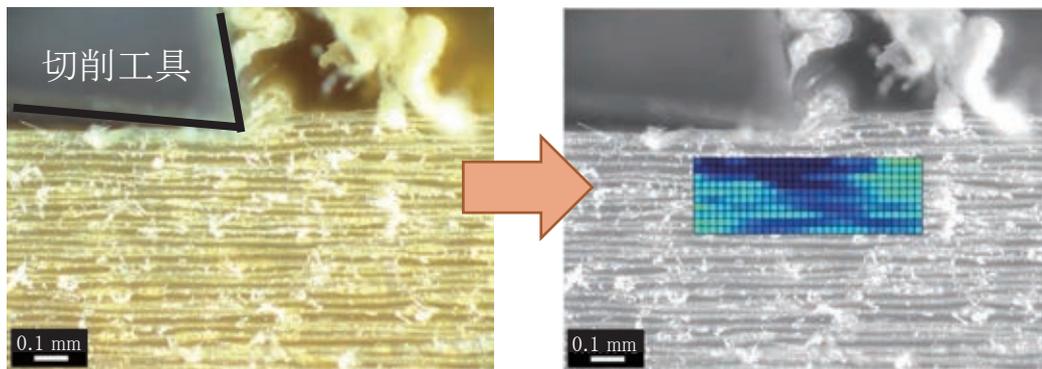


図1. 画像相関法によるひずみ解析の例

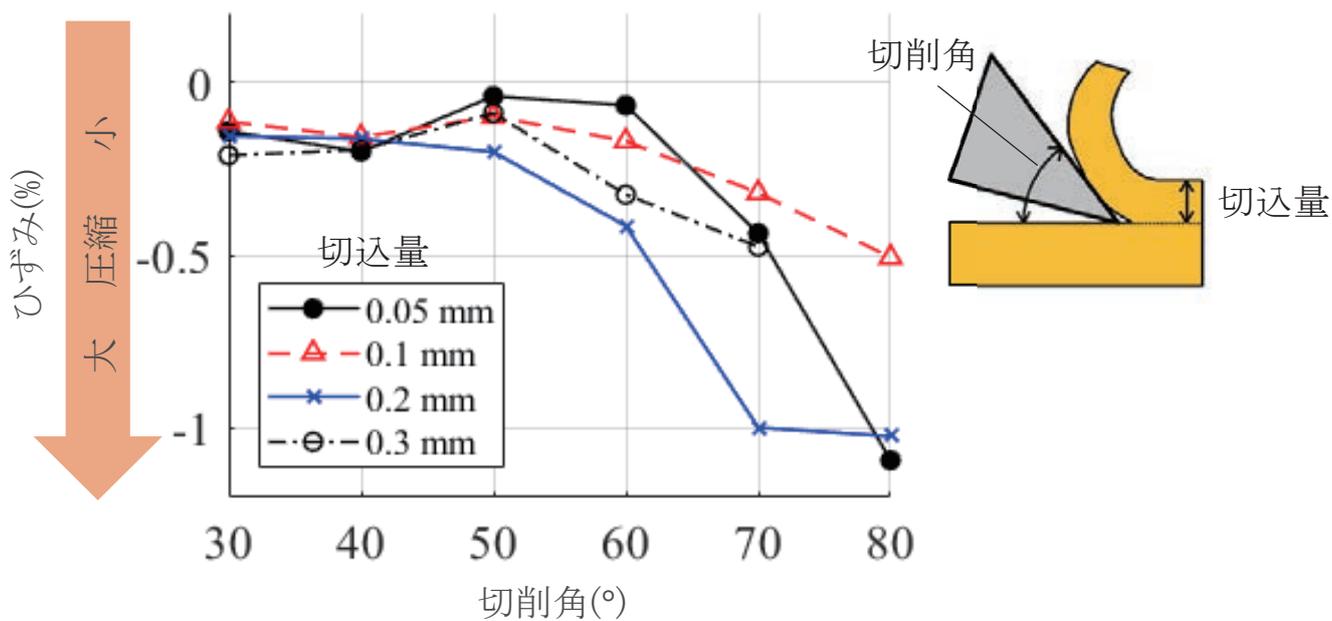


図2. ひずみと切削条件の関係

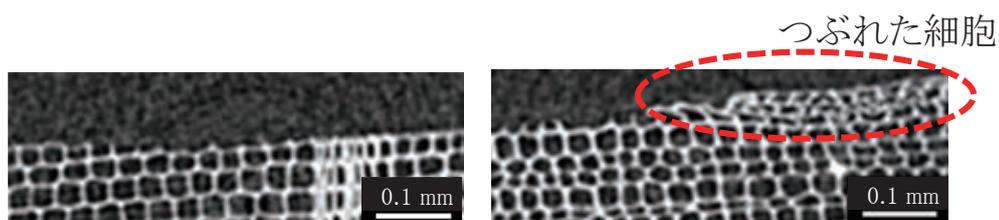


図3. X線CT撮像による表層の木口面断層図
 左: 切削角50°切込量0.05mm 右: 切削角80°切込量0.05mm

豊富な国内森林資源を活かす

CLTの効率的な製造と性能確保の技術を開発

「伐採木材の高度利用技術の開発」プロジェクトチーム

代表：軽部 正彦、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

ひき板（ラミナ）を並べ、繊維を直交させて積層接着した直交集成板（Cross Laminated Timber, CLT）は、木材を大量に活用する厚く大きな板です。CLTの効率的な製造方法を開発するため、材料となる木材や製造の条件とCLT製品の性能との関係を検証して、使用するラミナの形状や材質から製品の性能を予測することができるようになりました。2016年4月の建築基準法により、CLTは一般的な建築材料の仲間入りを果たしましたが、その改正にあたっては本研究の成果も活用されました。

成果

ラミナ構成の最適化に向けて

CLTの材料となるラミナは、その材料となる原木の樹種や太さ（径級）、丸太から製材される際の木取り（切り分け方）によって寸法や材質が変わってきます。CLTの製造では、あらかじめラミナを樹種や幅・厚さのほか、強度性能にもとづいて選別し、CLT製品内での配置や位置を決定することが重要です。私たちは、同じ樹種で強度が異なるラミナの配置を最適化した「異等級構成」、スギとヒノキの異なる樹種のラミナを使った「異樹種構成」、ラミナの幅を一定にして厚さを変えて組合せた「非等厚構成」、ラミナの幅と厚さの比を変化させた「可変断面構成」、という4つの組合せのCLTを試作して、それぞれの特徴を明らかにしました。試作に用いた各ラミナは、新たに開発した二次元バーコードを利用した追跡方法によって、材料の段階からCLT製品内で積層接着された位置までを追跡できるようにし、ラミナの性能とCLT製品性能の関係を検証しました。

空隙充填性接着剤の開発と接着性能・長期寸法安定性の評価

CLTは、ラミナの繊維方向をほぼ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。ラミナの繊維方向を全て揃えた集成材とは異なり、繊維方向が層によって異なるため、収縮率の違いによる製品の変形やラミナ厚さのバラツキによる接着性能の変化を考慮しなければなりません。そこで、これらの影響を緩和できる新しい接着剤の開発と

接着性能の評価を行いました。また、ラミナ構成を変えた場合のCLTの各種寸法や反り・曲りなどの経時的な形状変化も検証し、適正な接着条件とCLT製品形状の安定性を明らかにしました。

強度性能評価技術の開発と試作CLTの評価

試作したCLT製品を用いて日本農林規格では規定されていない面内曲げ、引張り、圧縮について性能試験法を確立して評価しました。また、建築物として床・壁に使用された場合を想定した破壊加力実験を行って、強度と破壊性状を明らかにしました。

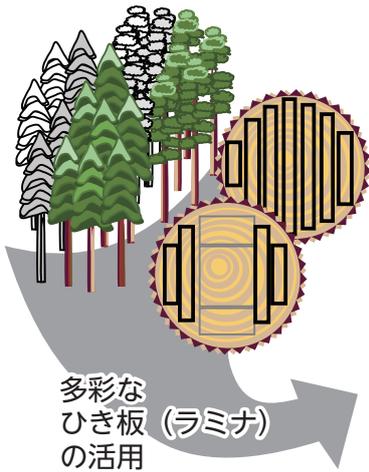
ラミナからのCLT性能を予測する技術開発

二次元バーコードを使ったラミナの追跡にもとづき、原板ラミナの形状や材質、そして製造条件の異なる試作CLTの強度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。このソフトウェアを用いれば、ヤング率のわかっているラミナを使って最適なCLTの積層構成をシミュレーションして製品設計することができます。これにより、利用可能な森林資源の状況に対応したCLTの製造が可能となりました。

これらの成果は、今後、現在より多彩なCLTがJAS規格等で認められるための基礎データとして活用される予定です。

研究資金と課題

本研究は、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」のうち「伐採木材の高度利用技術の開発」の成果です。



異等級構成
同じ樹種で強度が異なるラミナの配置を最適化

異樹種構成
スギとヒノキのラミナ使用

非等厚構成
ラミナの幅を一定にして厚さを変えた組合せ

可変断面構成
ラミナの幅と厚さの比を変化

図1. 4つの組合せの直交集成板 (CLT) を試作

二次元バーコードを使ったラミナ追跡技術を開発

材料・製造条件と製品性能の関係を検証

ラミナの形状や材質からCLT性能を予測する技術を開発

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	○	○	△	○	○
	強度	平行層	×	×	○	×	△
面内曲げ	弾性率	機械接合梁	○	○	△	△	△
	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

図2. CLT性能を予測する技術の開発

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

壁利用を想定した面内せん断試験

床利用を想定した面外曲げ試験

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3. 建築材料として必要な特性・性能の評価技術を開発して確認

木を焙じて長持ちする舗装材をつくる

木材加工・特性研究領域 吉田 貴紘・久保島 吉貴 木材改質研究領域 上川 大輔
奈良県森林技術センター 増田 勝則・有山 麻衣子・愛須 未紀・矢杉 瑠美
京都府立大学 伊藤 貴文 東北工業大学 佐野 哲也
ニチレキ株式会社 三上 隆司・中瀬 吉行 有限会社地域資源活用研究所 竹内 健二

公園や遊歩道などで木材のチップを使った舗装を見かけますが、チップがはがれたり腐ったりして、長持ちしないことが問題になっています。そこで、木材を半炭化処理（250℃前後の低温炭化）することで、腐りにくく、耐用年数20年を見込める高性能な「半炭化処理木質舗装材」をつくることに成功しました。この木質舗装材は、アスファルトコンクリート舗装材に比べて歩きやすく、使った後は燃料や資材へのリサイクルも可能です。半炭化処理木質舗装材は人や環境に優しい土木材料として期待できます。

成果

木の舗装を長持ちさせるために「半炭化」でアップグレード！

公園や遊歩道などを歩いていると、木材のチップを固めた舗装を見かけることがあります。石や砂の代わりに木材を使うことで、軟らかく、熱をためにくく、歩きやすい舗装になります。しかし、しだいに木材が腐ったりはがれたりして、舗装が長持ちしないことが問題になっています。木材を炭化すれば腐らなくなることが知られていますが、炭化が進みすぎると木材はもろくなるので、舗装には使えません。そのため、私たちは、木材を焙(ほう)じる程度に炭化（半炭化）すれば腐りにくさ（耐朽性）と強さを両立出来るのではないかと考え、半炭化処理をほどこした木材のチップに適切な接着材を組合せることにより、長持ちする新たな木質舗装材の開発に取り組みました。

腐りにくさと強さを両立する半炭化方法

まず、様々な程度に処理した半炭化木材をつくり（図1）、圧縮や曲げなどの強度を調べました。また半炭化木材チップに石砂、セメント、アスファルト乳剤などを加えた舗装材を作り、野外に置いた時の変化なども調べました。その結果、適度な条件で半炭化処理をすることによって、強度を保ったまま腐りにくくなることがわかりました（図2）。また、半炭化処理すると木材は水を撥きやすくなり、接着材（アスファルト）となじみやすくなるため、雑草が生えにくく、チップがはがれにくくなります（図3）。従来の木質舗装材の寿命が10年程度なのに対し、半炭化処理木質舗装材の寿命は20年程度と考えられ、大幅に長持ちすることがわかりました。また、新たな舗装材に含まれる木材の割合は体積の約70%になりました。

燃料や資材にリサイクル可能な舗装材に

耐用年数を過ぎた舗装材を有効利用するため、舗装材を燃料に使えるかどうかを調べました。その結果、ある程度の大きさまで碎けば、燃料として産業用途のボイラーなどで使えることがわかりました（図4）。また、災害時には非常用燃料としても活用できます。さらに、燃やした後の灰を舗装材の砂の代わりなどにリサイクルできることもわかりました。

実際に舗装してみる

開発した半炭化処理木質舗装材を、国内数か所の公園、外構などに施工してみました（図5）。接着材にアスファルト乳剤を用いることから、一般的な舗装工事のようにアスファルトを加熱する必要がないため、熱気や臭いの影響がほとんどなく、作業しやすくなります。さらに、舗装材はクッション性にも優れており、被験者の歩行試験においても、多くの人が、足への負担感が少ないと回答しました。

このように、半炭化処理木質舗装材は土木分野における木材の新たな用途を創出するとともに、人や環境に優しい材料として公園や遊歩道などへの導入が期待できます。

研究資金と課題

本研究は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「半炭化処理による高性能木質舗装材の製造技術開発」（課題番号27014C）による成果です。

文献

吉田貴紘（他）（2016）次世代炭焼き技術「トレファクション」による高性能木質固形燃料の開発. 森林総合研究所第3期中期計画成果集, 36-37.

増田勝則（2017）半炭化木チップ舗装における木材の熱処理条件の検討. 奈良県森林技術センターだより, No.124, 2-3.

専門用語

チップ：木材をくदैいて小さくしたもの。一般には、削りとして四角い板状にする方法（切削チップ）と、たたいて小さな塊にする方法（破碎チップ）に分けられる。半炭化処理木質舗装材の原料にはどちらのチップも使用できる。

半炭化：従来の炭化温度（600～1,000℃）よりも低い温度領域（250℃前後）で酸素を遮断した条件での熱処理を指す。英語でトレファクションと呼ばれており、本来の意味はコーヒー豆などの「焙煎」。

アスファルト乳剤：石油アスファルトを細かい粒子として水の中に分散させた黒褐色の液体。施工に加熱が不要で常温でできる特徴がある。



図1. 無処理木材チップ（上）と半炭化木材チップ（下）

半炭化木材チップの色は褐色～濃い褐色を示します。

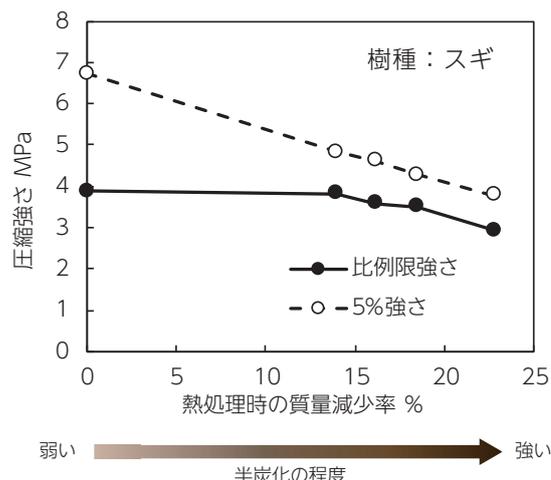


図2. 半炭化の程度と強度（圧縮強さ）との関係

木材を熱すると分解が進みますが、質量減少率が20%程度の半炭化では強度に問題無いことがわかりました。

「比例限強さ」：加えた力を取り去ると元の形に戻ることでできる限界点における強さ

「5%強さ」：試験体の圧縮される方向の長さの5%に相当する変形（ひずみ）が残る時の強さ



図3. 舗装材を野外に放置した際の変化（放置してから1年後の様子）

半炭化処理をしないと雑草による劣化（上面に種子が落ちて発芽する）が見られますが、半炭化処理をすると雑草の繁茂を抑えることができます。



図4. 舗装材の燃焼性を評価する

舗装材を砕いて十分な空気を与えると、燃料として使えます。図はコーンカロリメータと呼ばれる装置で燃焼の様子を測定しています。



図5. 試験施工

上図：施工のフロー（岩沼市震災復興関連公園（宮城県岩沼市） 原料の混合は現場にて比較的小規模な装置で行い、転圧も小型機械で行います。また着色のために色粉（べんがら）を混ぜています。

下図：試験施工例 左：大和民俗公園（奈良県大和郡山市） 右：森林総合研究所（茨城県つくば市）

様々な製品展開が可能な新素材「改質リグニン」のデザインング

新素材研究拠点 ネー ティティ・山田 竜彦

スギ材の約3割は「リグニン」という成分で構成されています。私達はスギ材のリグニンを、加工しやすい形に改質しながら「改質リグニン」として取り出す技術を開発し、実用化に向けた取り組みを進めています。改質リグニンから様々な製品を開発するためには、用途に応じて性質をコントロールすることが重要です。使用薬剤であるポリエチレングリコール（PEG）の分子量を変化させることで、改質リグニンのガラス転移温度（ T_g ）や熱溶融温度（ T_f ）などの物理的性質を自由にコントロールすることに成功しました。様々な用途に応じた改質リグニンのデザインングが可能となっています。

成果

木材にはリグニンという成分が2~3割含まれています。リグニンは、木材をしっかりした構造にする役割をもつ化合物で、高い強度や耐熱性を示す優れた素材であることが知られています。しかしながら、リグニンは樹種や生育場所や部位により化学構造が異なるため、常に一定の性能が求められる工業製品化は困難でした。私達は、国内のスギ材のリグニンの特性が比較的均一であることを見だし、スギ材から性能の安定したリグニンを取り出す独自の技術を開発しました。改質リグニンの製造には、ポリエチレングリコール（PEG）という化合物を用い、PEGで改質されたリグニンを木材から取り出しています（図1）。改質リグニンから、様々な製品を作り出すためには、それぞれの用途に応じた特性を持つ改質リグニンを製造するデザインング技術が必要です。そこで、改質リグニンの製造に使用するPEGの種類と、改質リグニンの性質との関係を詳細に検討しました。

スギ材は、PEG中の酸加溶媒分解という反応で分解され、PEGが結合した改質リグニンとして取り出されます。改質リグニンに熱を加えると、柔らかくなり、押し出したり引っ張ったりすることで、様々な形に加工することができました（図2）。図3に改質リグニン中のPEGの量と、ガラス転移温度（ T_g ）や熱溶融温度（ T_f ）との関係を示します。 T_g や T_f の値が低いほど、熱で柔らかくなりやすい性質であることを示しています。分子の長さが異なるPEG（PEG200、PEG400、PEG600：数値はそれぞれ平均分子量が200、400、600を意味します）を用いて反応を進めたところ、分子の長いPEGを用いた方が、低い温度域の T_g を示しました。これは、分子の長いPEGを用いることで、やわらかい特性をもつ改質リグニンを製造できることを意味しています。また、改質リグニン中に結合したPEGの量と T_g と T_f の関係においては、PEGの結合量が多いほど温度が低くなることわかりました。これらは、使用するPEGの長さや結合量をコントロールすることで、様々な物性の改質リグニンの製造が可能となることを示しています。期待される用途のうち、3Dプリンター用フィラメントや射出成形用プラスチック樹脂として利用する場合は、比較的低い温度域で加工するため、

低い温度域に T_g や T_f を示すPEG600の改質リグニンが適していました。一方、高い耐熱性が要求される電子基板用のフィルム化においては、比較的高い温度域に T_g や T_f を示す改質リグニンが有利で、PEG200が適していました。また、自動車の部材となる繊維強化材用の樹脂や、シーリング材料（ガスケット）として利用する場合、耐熱性と加工性のバランスのとれた温度域に T_g や T_f を持つPEG400の改質リグニンが適していました。このように、改質リグニンは1種類でなく、各製品に適する物性のものを製造時にデザインングすることが重要です。これら改質リグニンを用いた高付加価値製品群の市場性は2000億円ともいわれ、木質バイオマスを用いる新産業として期待されています。

研究資金と課題

本研究は、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)次世代農林水産業創造技術「地域のリグニン資源が先導するバイオマス利用システムの技術革新（SIPリグニン）」による成果です。

専門用語

ポリエチレングリコール（PEG）：エチレングリコールというアルコール系の化合物が複数個、直鎖状に結合した構造をもつ安全性の高い親水性の化合物。

ガラス転移温度 Glass Transition Temperature (T_g)：物質に熱を加えたとき、ガラス状のかたい状態からゴム状の柔らかい状態に変わる温度。ここでは、試料の温度をゆっくりと上昇させながら物質の変形を測定する手法で計測した。

熱溶融温度 Flow Temperature (T_f)：物質に熱を加えたとき、個体が液体になって流れ出す温度。ここでは、試料の温度をゆっくりと上昇させながら物質の変形を測定する手法で計測した。

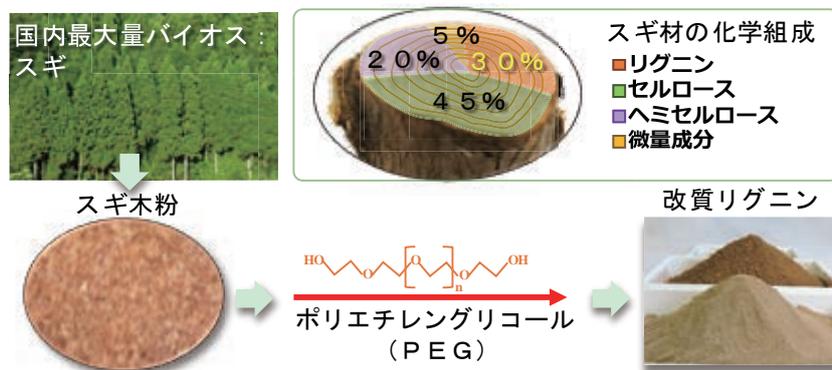


図1. スギ材の化学組成とポリエチレングリコール (PEG) による改質リグニンの製造

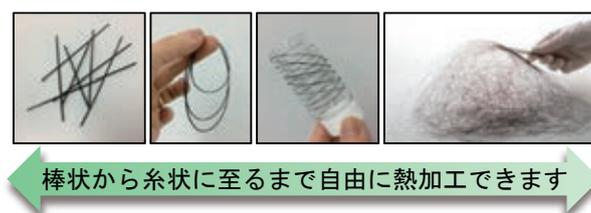


図2. 熱で加工した改質リグニン

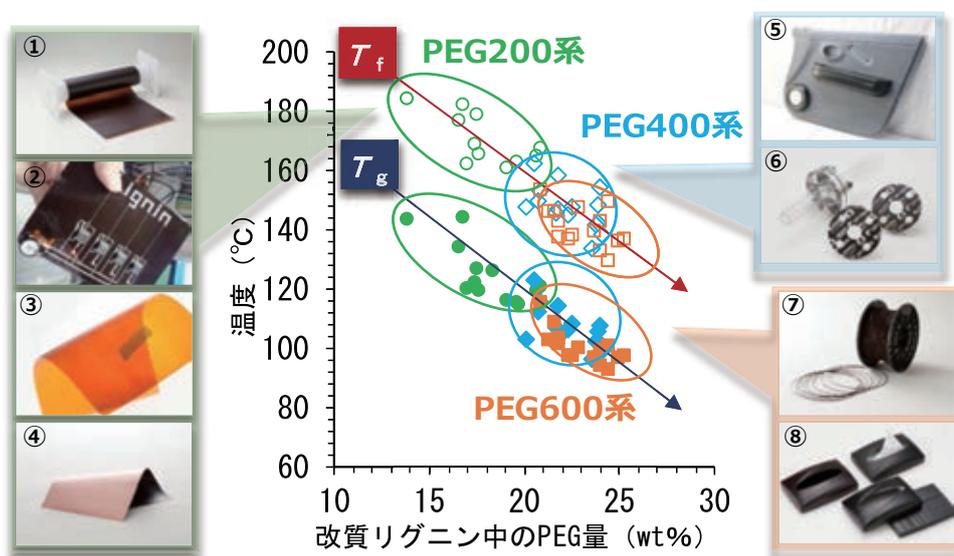


図3. 改質リグニン中のPEG量と熱特性との関係
(T_g : ガラス転移温度、 T_f : 熱熔融温度)

写真: 改質リグニンを用いて開発された高付加価値製品

- ①改質リグニン-粘土ハイブリッド膜 (産総研)
- ②回路を搭載した改質リグニン電子基盤 (産総研)
- ③タッチセンサー用改質リグニンフレキシブル基板 (産総研)
- ④銅箔塗工型改質リグニンハイブリッド膜 (産総研)
- ⑤改質リグニン繊維強化材 (自動車用ドアトリム) (株式会社宮城化成)
- ⑥改質リグニンガスケット (ジャパンマテックス株式会社)
- ⑦3Dプリンター用改質リグニンフィラメントと3Dプリンター造形物 (ネオマテリア株式会社)
- ⑧改質リグニン/パルプコンポジット射出成型品 (トクラス株式会社)

未利用の「竹」を効果的に利用する方法

森林資源化学研究領域 大平 辰朗・松井 直之・橋田 光・池田 努・下川 知子

日本かおり研究所(株) 金子 俊彦・田中 雄一・小澤 洋平

大倉工業(株) 福家 正志・高石 佳樹・笠岡 英司

放置竹林の増加や、里山林への竹の侵入等が問題となっています。竹林の適切な管理を進めるためには、付加価値の高い効果的な竹の利用法の開発が必要です。そこで省エネルギー効果が高いマイクロ波を用いて、竹から優れた機能性を有する抽出液とその抽出残渣を効率的に製造する方法を開発しました。竹由来の抽出液は、抗菌・抗ウイルス活性、リラククス効果、抗炎症作用が優れており、各種消毒剤やヘルスケア素材として活用可能です。一方、抽出残渣は優れた消臭剤として活用でき、さらに残渣から製造したセルロースナノファイバーをボードの製造に利用したところ、曲げ強度が数十パーセント向上することがわかりました。

成果

なぜ竹の効果的な用途開発が必要なのか

竹は、西日本の里山地域を中心に広く分布しています。しかしながら放置竹林の増加や里山林への竹の侵入等が問題となっており(図1)、この適切な管理を行うためには、付加価値の高い効果的な竹の利用法の開発が課題となっています。

竹の利用量は限定的

竹は古来より日本人に親しまれてきた素材の一つであり、変形しにくく弾力性が強い一方で、裂けやすいという物理的な特性を有するため、器具類、家具類、水筒、自動車用ハンドル等として利用されてきました。また竹の皮は食品などの包装用としても利用されています。一方で、竹の葉や稈に含まれる成分が薬の一部として利用されることもあります。例えば、ハチクの皮は竹筍(チクジョ)と呼ばれ、漢方薬の原料となっています。また、モウソウチクの稈部から発見された強い抗菌性物質は薬剤として製品化されています。しかし、これらに利用されている竹の量は限られています。

効率的な処理技術の開発 —無駄のない総合利用を目指して—

竹資源を無駄なく総合的に利用するために、民間企業と共同で開発した「減圧式マイクロ波抽出装置」(図2)を活用しました。マイクロ波は加熱の効率が高く、省エネルギー効果が高い環境に優しい技術です。この装置は、減圧状態で竹に含まれる水分をマイクロ波で瞬時に蒸気にして有効成分を抽出するため、速やかな抽出ができ、大量処理が可能です。また低温(60℃前後)状態での抽出も可能であるため、変質の少ない優れた品質の抽出液が得られます。さらに、竹を素材として利用する時には含有する水分が障害となりますが、本法の抽出残渣は含水率が低い状態で得られます。そのため抽出残渣が容易に利用できますので、結果的に竹を抽出液と抽出残渣の両方で無駄なく総合的に利用することが可能となります(図3)。

抽出液の用途

得られた抽出液は、日常生活で問題になる有害菌等に対する優れた抗菌効果が認められるほか、インフルエンザウイルスに対する抗ウイルス効果も優れていますので、各種消毒剤の原料として利用できます。また、ラットを用いた動物実験により、抽出液の香りにはリラククス効果が高いことがわかりました(図4)。さらに、抽出液は抗炎症作用が高いことも判明しており、ヘルスケア商品の原料として活用が期待できます。

抽出残渣の用途

大量に排出される抽出残渣は、パーティクルボードの原料としての適性が認められました。また、アンモニアに対する消臭活性が高いため、その機能を活かした消臭剤を開発できました。さらに、抽出残渣からセルロースナノファイバーを製造し、それらをパーティクルボードに添加することで、ボードの曲げ強度を数十パーセント向上できました(図5)。この成果を発展させれば、将来的には軽量で強度に優れた建築資材の製造が可能になります。

以上で示した方法により、これまで限定的な利用に留まっていた竹が高い付加価値の製品として様々な分野で多面的に利用できます。そのため、放置竹林の解消など、竹林の適切な管理を推進できるほか、竹を活用した地場産業の活性化にも貢献できます。

研究資金と課題

本研究は、木質バイオマス加工・利用システム開発事業「竹資源のグリーンテクノロジーによる高度利用技術の開発」による成果です。

文献

大平辰朗(2017)竹. 山林, 1594, 21-30.

大平辰朗(他)抗ウイルス剤とその使用方法 特許第6155435号



図1. 放置竹林



図2. 減圧式マイクロ波抽出装置

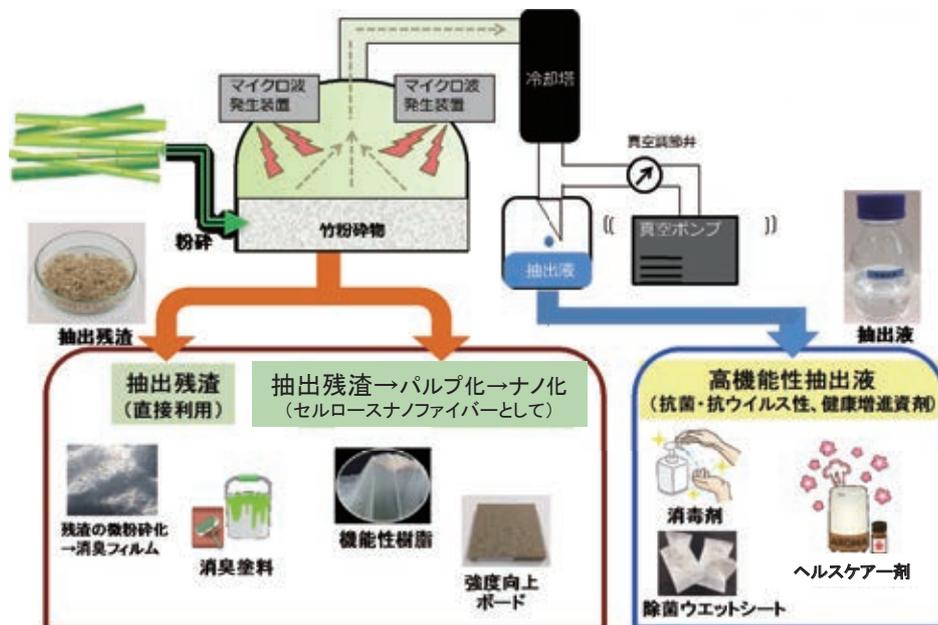


図3. マイクロ波処理技術を用いた竹の総合利用技術

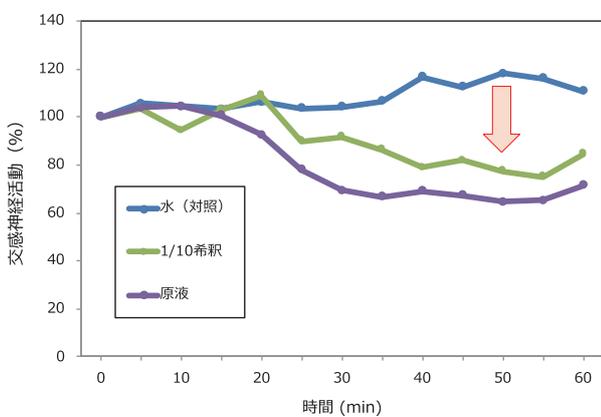


図4. 竹抽出液の香りによるラットの交感神経活動への影響

交感神経活動が低下することでリラックス効果が得られます。

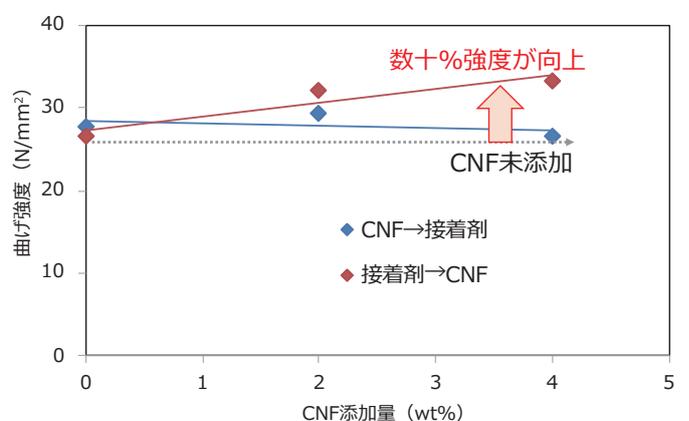


図5. 竹抽出残渣由来CNFを添加したパーティクルボードの強度への影響

ボード製造時に先に接着剤を添加し、その後CNFを添加すると強度が向上します。

根のタンニンがアルミニウムを無毒化する —酸性の荒廃地の緑化にむけて—

樹木分子遺伝研究領域 田原 恒 森林資源化学研究領域 橋田 光
九州大学 平舘 俊太郎 理化学研究所 篠原 健司

世界の陸地の約3割を占める酸性の土壌では、有毒なアルミニウムが溶け出してきて植物の生育を妨げています。近年、私たちは、酸性の土壌でもよく生育できるユーカリの根から、アルミニウムを無毒化する新しい物質（タンニンの1種）を発見しました。ユーカリの根は、このタンニンの他にもアルミニウムを無毒化できる物質を含んでいますが、今回、ユーカリの根の中を再現した溶液を分析した結果、このタンニンがアルミニウムの無毒化に特に重要な役割を果たしていることを明らかにしました。今後は酸性の土壌を効率的に緑化するための技術開発を目指して、根の中でどのようにタンニンが合成されるのかを研究していきます。

成果

アルミニウムが問題となる酸性の土壌

世界の陸地の約3割は、酸性の土壌で覆われています。酸性の状態では、土壌から植物にとって有毒なアルミニウムが溶け出します。そのため、多くの植物は根を伸ばすことができず、養分や水分を吸収できなくなり、成長が悪くなったり枯れてしまったりします。

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植物に、オーストラリア産樹木のユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) があります (図1)。私たちは近年、ユーカリの根からアルミニウムを無毒化する新しい物質としてエノテインBを発見しました (図2)。エノテインBはタンニンの1種で、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。

アルミニウム無毒化におけるエノテインBの重要性

ユーカリの根がエノテインBというアルミニウムを無毒化できる物質を含んでいることは確かです。しかし、ユーカリの根は、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) を含んでおり、根の中でエノテイン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。今回、私たちは根の中に含まれるアルミニウムとエノテインB、有機酸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3)。

クエン酸やシュウ酸のみを加えた溶液では、有毒なアルミニウムが溶液中に残り、クエン酸やシュウ酸だけでは全てのアルミニウムは無毒化されていませんでした。一方、エノテインBを加えた溶液では、溶液中から有毒なアルミニウムが姿を消し、エノテインBが全てのアルミニウムを無毒化していました。また、エノテインB、クエン酸やシュウ酸を加えた溶

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、実際の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明らかとなりました。

酸性の荒廃地の緑化に向けて

現在、エノテインBがユーカリの根の中でどのように合成されるのか、その仕組みを明らかにするための研究を進めています。それによって、アルミニウムに耐えられる樹木や作物の開発が可能となり、酸性の荒廃地の緑化や、酸性土壌での生産性の向上により、地球温暖化の原因である二酸化炭素の固定や、人口増加による食糧不足の緩和に貢献できます。

研究資金と課題

本研究は、JSPS科研費 (JP25850118およびJP15K07490) による成果です。

文献

Tahara, K. et al. (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.

専門用語

タンニン：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。タンニン (tannin) という言葉は、古くから皮をなめす (tan) ために利用されてきたことに由来する。染料や医薬品などの原料としても利用されている。



図1. 酸性の土壌で育つユーカリ

ユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) は有毒なアルミニウムが植物の生育を妨げる酸性の土壌でもよく育ちます。

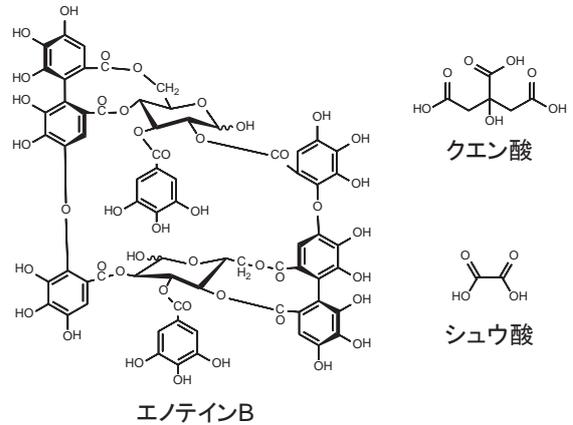


図2. アルミニウム無毒化物質の構造

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。
(Tahara et al. 2017より改変)

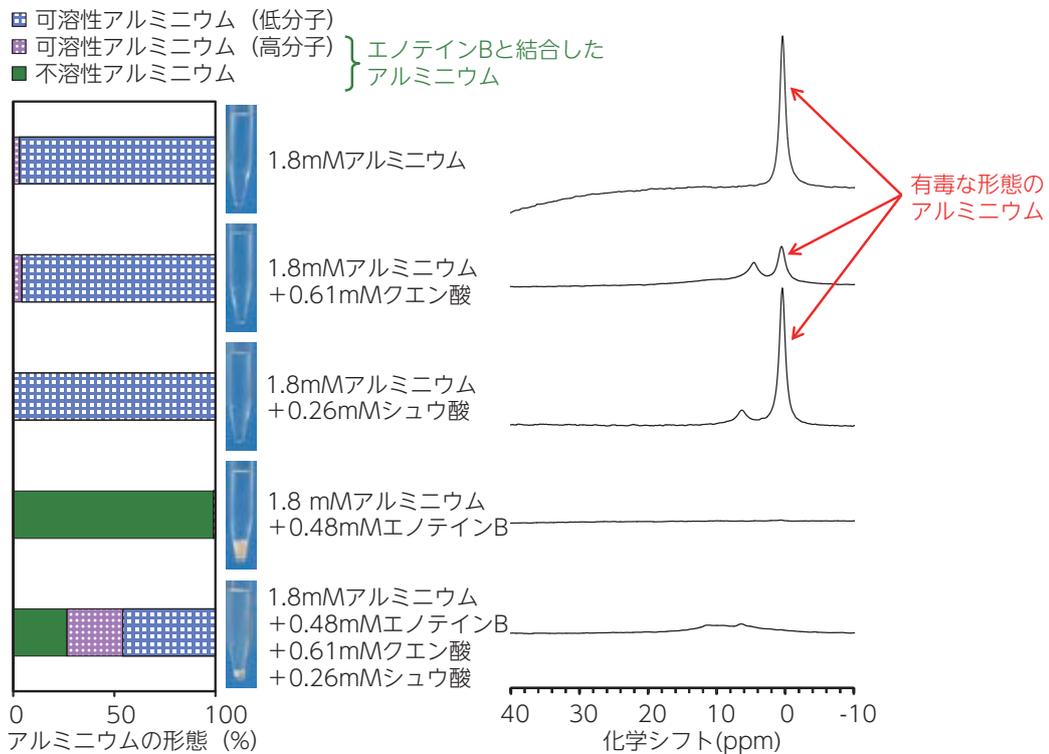


図3. アルミニウムの存在形態

ユーカリの根の中を再現した溶液 (アルミニウムと無毒化物質の濃度を根の中と同じにして作製) を使って、エノテインBがアルミニウムの無毒化に特に重要であることを明らかにしました。(Tahara et al. 2017より改変)

菌の有機物分解能力を評価する —マツタケ類の分解能力の多様性が明らかに—

森林資源化学研究領域 下川 知子・山口 宗義

きのこ・森林微生物研究領域 村田 仁・山中 高史

菌根菌であるマツタケは、生きた樹木の根から養分を得て成長し、子実体（きのこ）を作ります。そのため、木を腐らせて養分を得る腐生菌であるシイタケやナメコなどのように、原木や菌床を用いた栽培は成功していません。しかし、木質成分である多糖などの有機物を分解する能力の高いマツタケ菌株を得ることができれば、栽培化の可能性が高まります。今回、色素を結合させた多糖類を用いて菌の分解能力を可視化する方法を活用することにより、マツタケおよびその近縁種がセルロースやデンプンを分解する能力は、種や菌株により異なることを明らかにしました。

成果

色素結合多糖を含む培地の作製

ポテトデキストロース寒天(PDA)培地に、色素を結合させた多糖類を添加します。1つはセルロース[ヒドロキシエチル(HE)セルロース]に色素を結合させたもの、もう1つはアミロースに色素を結合させたものです。二つの培地は菌が産出するセルラーゼ(セルロースを分解する酵素)やアミラーゼ(デンプンを分解する酵素)の活性を測定するために使います。これらの色素結合多糖類は不溶性であり、寒天培地の中で顆粒状に散在します。この培地に菌類を植えつけ、これらの多糖類を分解する酵素を生産すると、顆粒状の多糖類が分解されて消え培地全体に色素が拡がります(図1)。

分解能力の評価

直径約5センチのシャーレに色素結合多糖類を含むPDA培地を作り、培地の中央に菌を植えて23℃で培養し、4週間後に分解の程度を評価しました。全く分解していない状態をレベル0、顆粒状の多糖類が全て酵素により分解された状態をレベル5とし、X軸方向にアミラーゼ活性を、Y軸方向にセルラーゼ活性をプロットしました(図2)。グラフの右上に行くほどセルラーゼおよびアミラーゼの活性が高くなります。この評価法を用いて日本産のマツタケおよびその近縁種の有機物分解能力を調べました。赤色のラインで囲われたグループにはマツタケやニセマツタケが入りました。緑色のラインで囲まれているのがニセマツタケです。青色のラインで囲まれたグループの中にはバカマツタケが入りました。マツタケの中にはセルラーゼ活性を示すものと全く活性を示さないものがあり、アミラーゼ活性については比較的高いものとそうでないものがありました。以上のように、分解能力はマツタケとその近縁種との間で、また同じ種の中でも菌株の間で異なることを明らかにしました。

菌株選抜・育種への応用

菌床や原木を用いた栽培では、まず菌糸が蔓延し、その後子実体が発生します。多糖などの有機物を分解する能力は

菌糸の成長にとって重要です。すでに、マツタケと同じ菌根性のきのこであるホンシメジでは、有機物分解能力が高い菌株を選抜し、それを用いて菌床栽培によるきのこの生産が可能になっています。今回の簡易な評価法を用いることで、重粒子線照射で作出したマツタケ変異株の中に野生株よりも有機物分解能力の高いものが存在することを確認できました。このように、有機物分解能力が高い菌株を選抜するのに今回の評価手法は有効です。今後も様々な菌種や菌株の特徴を評価しながら、菌根性きのこの人工栽培技術の開発を目指して研究を進めていきます。

研究資金と課題

本研究は、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」のうち「高級菌根性きのこの栽培技術の開発」による成果です。

文献

Shimokawa, T. *et al.* (2017) Agar plate assays using dye-linked substrates differentiate members of *Tricholoma* sect. *Caligata*, ectomycorrhizal symbionts represented by *Tricholoma matsutake*. *Mycoscience*, 58, 432-437.

Murata, H. *et al.* (2017) Heavy-ion beam mutagenesis of the ectomycorrhizal agaricomycete *Tricholoma matsutake* that produces the prized mushroom "matsutake" in conifer forests. *Mycorrhiza*, DOI 10.1007/s00572-017-0810-z.

専門用語

セルロース：グルコースが β -1,4-結合した植物細胞壁の主要な多糖類。

アミロース：グルコースが α -1,4-結合したデンプンの構成物質となる多糖類。

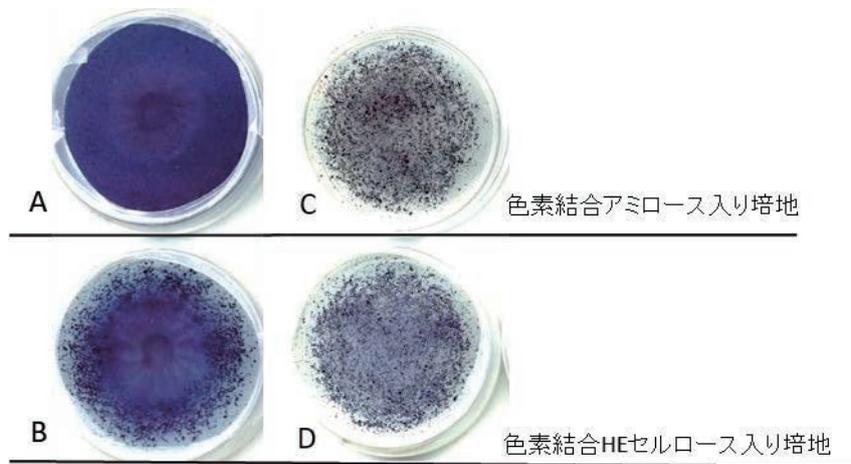


図1. 検出培地でのマツタケ類の生育

マツタケ菌株(A、B)とバカマツタケ菌株(C、D)を4週間生育させたシャーレを裏から観察したもの。Aでは培地全体の多糖類が分解され、Bでは菌糸の下とその周辺の多糖類のみが分解されています。Aをレベル5、Bをレベル4、菌糸が生えていても多糖類が分解されていないCとDをレベル0と判定しました。

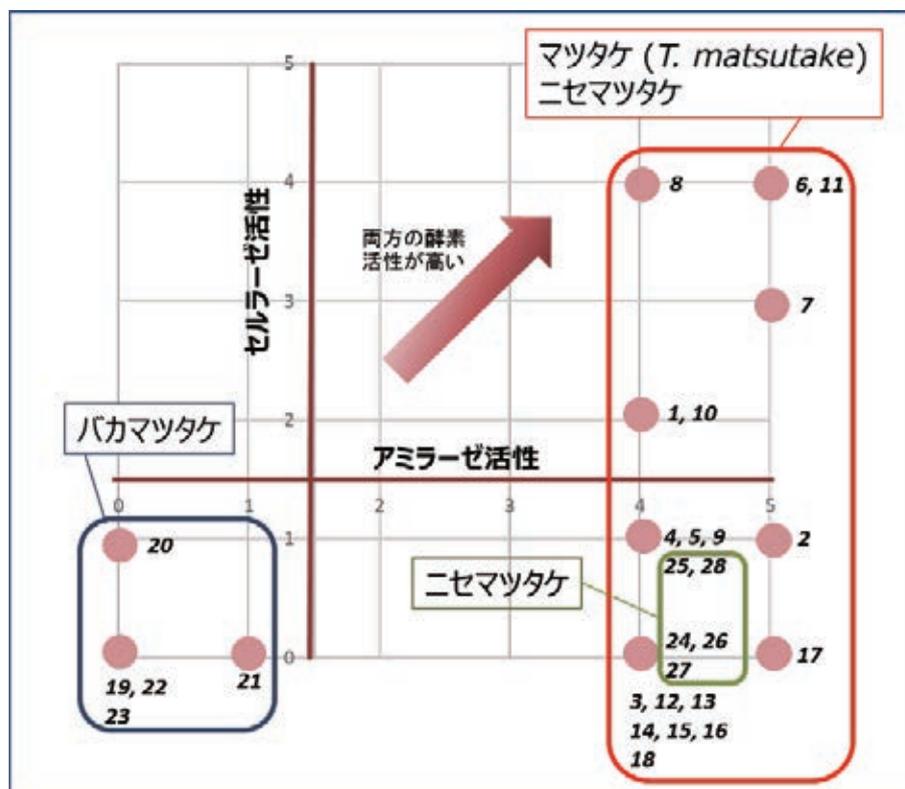


図2. 2種の多糖類の分解能力の解析結果に基づくマツタケおよびその近縁種の菌株の位置づけ

斜体数字は調べた菌株の整理番号。アミラーゼ活性およびセルラーゼ活性をそれぞれ6段階に評価してプロットしました。

より強いマツノザイセンチュウ抵抗性品種の開発

林木育種センター 平尾 知士・山野邊 太郎・大平 峰子・高橋 誠・星 比呂志
東北育種場 井城 泰一 関西育種場 岩泉 正和・三浦 真弘
九州育種場 松永 孝治 九州大学 渡辺 敦史

マツノザイセンチュウによるマツ枯れの被害は、依然として我が国最大の森林病虫害であり、今後の地球温暖化に伴う環境の変化によって、さらに被害が拡大することが懸念されています。このマツ枯れ被害に対応するため、より強い抵抗性を有する品種を効率的に開発する育種技術の確立が求められています。そこで、より高い病原力を有する線虫系統の選定を行うとともに、接種に適した温度条件を明らかにしました。この成果を接種検定に適用することで、より強い抵抗性品種をアカマツで9品種、クロマツで10品種開発しました。さらに、抵抗性の個体を効率的に選抜するDNAマーカーの開発を行いました。

成果

マツノザイセンチュウによるマツ枯れを防ぐために

森林総合研究所林木育種センター及び府県の試験研究機関では、マツ林の健全化を目指し、昭和53年からマツノザイセンチュウ抵抗性育種事業を推進し、抵抗性品種の開発を進めてきました。一方、今後、地球温暖化に伴う環境の変化によってマツ枯れの被害が拡大することが懸念されており、より強い抵抗性を有する品種を効率的に開発する育種技術の確立が求められています。

より病原力の高い線虫系統の選定

より強い抵抗性を有する品種を開発するためには、これまでの抵抗性育種事業で利用してきた線虫系統（島原やKa4）よりも病原力の高い線虫系統を用いて接種検定を行うことにより、より強い抵抗性個体を選抜する必要があります。そこで、東北から九州のマツの被害林分から186系統の線虫を収集し、抵抗性の苗木に接種することにより病原力の評価を行いました。その結果、より高い病原力を有する線虫系統が存在することがわかり、これを抵抗性品種の開発に活用することとしました（図1）。また、一連の調査の中で、接種直後の1～2週間の高温がより効果的な検定のために重要であることを解明しました。

より強い抵抗性品種の開発

新たに収集した病原力が高い複数の線虫系統を活用して、接種直後の高温が確保できる適切な時期に接種検定することにより、アカマツで9品種、クロマツで10品種のより強い抵抗性を有する品種を開発しました（表1）。また、従来のアカマツ抵抗品種のうち1品種について、より強い抵抗性を有するものとして評価しました。

抵抗性に関するDNAマーカーの開発

マツノザイセンチュウに対する抵抗性に関して、遺伝的に抵抗性を有する個体を効率的に選抜するためには、抵抗性に関係する遺伝子の情報が必要ですが、これまでこれらの

遺伝子の数やゲノム上での位置については明らかにされていませんでした。今回、クロマツ抵抗性品種4クローンを交配した苗木について遺伝分析を行うことで、抵抗性に関係する遺伝子がゲノム上の少なくとも2ヶ所に存在することを明らかにしました。また、このうちの1ヶ所については、2つのDNAマーカーを利用することで抵抗性を有する個体の選抜が可能であることが明らかとなりました（図2）。さらに、今回開発した抵抗性クロマツの1品種については、DNAマーカー情報からも抵抗性を有する可能性が高いものと判定できました。

今後の取り組み

今後、本事業で開発した新たな育種技術を活用するとともに、DNAマーカーについて選抜精度の向上に向けた取り組みを進めることにより、より強い抵抗性を有する品種開発を促進するとともに、これらの開発品種の普及に努めていきます。

研究資金と課題

本研究は、林野庁委託事業「マツノザイセンチュウ抵抗性品種開発技術高度化事業」による成果です。

専門用語

病原力：線虫がマツを枯らす能力の高さ。通常、マツの苗木に線虫を接種して、その後の苗の枯死率や発病率によって推定する。

DNAマーカー：生物が持つ遺伝情報を規定している膨大な量のDNA（デオキシリボ核酸）の内、特定の形質に関与する遺伝子の存在を示唆する目印として使われるもの。

接種検定：マツの苗木にマツノザイセンチュウを含む懸濁液を注入し、一定期間の後、苗木が枯れるかどうか、枯れない場合はどの程度健全なのかを調査し、マツノザイセンチュウに対する抵抗性を評価すること。

新たな選抜技術の開発

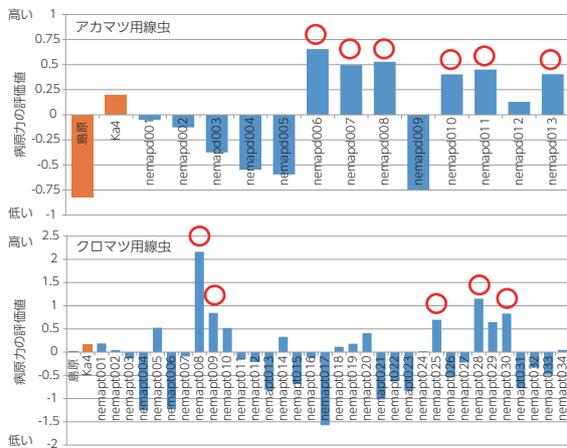


図1. アカマツとクロマツにおけるより強い抵抗性品種開発用のための線虫の選定

上段は近畿瀬戸内地域で収集されたアカマツの線虫系統における病原力の評価値を、下段は九州地域で収集されたクロマツの線虫系統における病原力の評価値を示しています。左端の2つのオレンジのバーは従来の育種事業で用いられてきた主な線虫系統（島原とKa4）です。赤丸のついた線虫系統をより強い抵抗性品種の開発に用いる線虫系統として選定しました。

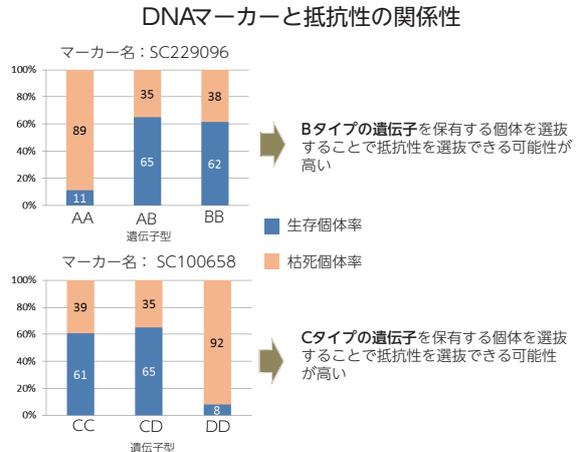


図2. クロマツ抵抗性遺伝子のDNAマーカー開発

抵抗性品種の人工交配家系を用いた遺伝解析から、特定の抵抗性遺伝子に関与する2つのDNAマーカーを開発しました。2つのマーカーにおいてBタイプ及びCタイプの遺伝子をともに保有する個体を選抜することにより、抵抗性を有する個体を選抜することが可能となりました。

抵抗性品種の開発

表1. 開発したマツノザイセンチュウ抵抗性品種

No.	品種名 (アカマツ)	品種名 (クロマツ)
1	高知 (香美) アカマツ13号	熊本 (合志) クロマツ31号
2	高知 (香美) アカマツ14号	熊本 (合志) クロマツ32号
3	高知 (香美) アカマツ15号	熊本 (合志) クロマツ33号
4	高知 (香美) アカマツ16号	熊本 (合志) クロマツ34号
5	高知 (香美) アカマツ17号	熊本 (合志) クロマツ35号
6	高知 (香美) アカマツ18号	熊本 (合志) クロマツ36号
7	高知 (香美) アカマツ19号	熊本 (合志) クロマツ37号
8	高知 (香美) アカマツ20号	熊本 (合志) クロマツ38号
9	高知 (香美) アカマツ21号	熊本 (合志) クロマツ39号
10		熊本 (合志) クロマツ40号

図1に示した新たな線虫系統を用い、接種直後の高温が確保できる適切な時期に接種検定することにより、より強い抵抗性品種を開発しました。また、アカマツについては、この他、平成28年度に開発した「高知 (香美) アカマツ3号」について、より強い抵抗性を有することを新たな選抜技術を用いて確認しました。さらに、クロマツについては、今回開発した「熊本 (合志) クロマツ38号」について、図2のマーカーによっても抵抗性を有する可能性が高いと判定できました。

早生樹「コウヨウザン」の造林樹種としての評価と優良系統の選定

林木育種センター 山田 浩雄・磯田 圭哉・山口 秀太郎・近藤 禎二・生方 正俊

関西育種場 久保田 正裕 九州育種場 大塚 次郎・倉本 哲嗣

鹿児島大学 藤澤 義武・鶴川 信 広島県立総合技術研究所 涌嶋 智・渡辺 靖崇

中国木材株式会社 松岡 秀尚・小西 浩和

中国原産の早生樹「コウヨウザン」は、幹が通直で成長が早いこと、さし木による増殖が可能で萌芽性にも優れていることから、西南日本における新たな造林樹種の一つとして期待されています。これまでの研究の結果、コウヨウザンは、照葉樹林帯が植栽の適地であること、スギの適地ではスギを上回る成長を示すこと、成熟材ではヒノキと同等の材質を示すこと等が明らかとなりました。また、さし木クローンが植栽された林分で、クローン毎に成長と材質の評価を行い、22クローンを優良系統として選定しました。今後、これらの優良系統を使って種子や穂木を採取する採種圃園を造成していくことにより、優良な造林用種苗の生産が期待されます。

成果

新たな造林樹種として期待されるコウヨウザン

コウヨウザンは、中国の中南部や台湾が原産のヒノキ科コウヨウザン属の常緑針葉樹で、日本のスギやヒノキと近縁な樹種です。中国では揚子江以南の中南部における代表的な造林樹種として広く植栽されています。日本には江戸時代以前に渡来したとされ、単木的には寺社林等に広く植栽されているほか、林分としては国有林、大学演習林、県有林などで造林されています。幹が通直で成長が早いこと、さし木による増殖が可能で萌芽性にも優れていることから、西南日本における新たな造林樹種の一つとして期待されています。そのため、日本での植栽適地や成長量、製材品の材質について調査するとともに、造林用種苗を生産するための優良系統の選定を行いました。

照葉樹林帯がコウヨウザンの植栽適地

コウヨウザンの植栽可能な地域を明らかにするため、既存の文献情報やインターネット上の情報等を収集し、寺社林等に単木的に植栽されているものを含めて、コウヨウザンの所在地マップを作成しました(図1)。コウヨウザンは、東北地方から九州までの広い地域に植栽されており、特に関東地方や近畿から北陸地方にかけての地域に多くみられました。所在地の気候条件は、年平均気温12℃以上、暖かさの指数90℃・月以上、寒さの指数-15℃・月以上となり、潜在植生が照葉樹林帯と考えられる地域が植栽の適地であることがわかりました。

スギを上回るコウヨウザンの成長

これまでに、ある程度まとまった本数のコウヨウザンが植栽されている林分17カ所について成長量の調査を行いました。広島県庄原市の52年生の民有林では、同地域のスギの1等地の収穫予想表から得られる総収穫量と比較して、2倍以上の成長量を示しました(図2)。全体的に見ると、スギの植栽に適した土壌が深く湿潤な立地条件では、スギを上回る良好

な成長性を示すことが明らかになりました。また、樹木の高さ別に円板を取って樹幹解析を行った結果、植栽後50年を過ぎても旺盛な成長を継続していることがわかりました。一方、アカマツの生育適地のような尾根部等の乾燥した立地条件では成長がスギを下回るなど、植栽地の選定の重要性が明らかになりました。

壮齡林ではヒノキと同等性能のコウヨウザンの製材品

林齢が20年程度から50年を超える4林分から材質調査用の個体を伐採し、製材品を作製して曲げ強度試験等を行いました(図3)。林齢の高い個体から作製した成熟材を多く含み、節の少ない製材品では、ヒノキ材と同等の曲げ強度等を示しました。一方、林齢の若い個体から作製した未成熟材を多く含み節の多い製材品では、スギ材と同等程度の曲げ強度等を示しました。このように、製材品の材質は樹齢や木取りによって影響を受けることが明らかとなりました。

コウヨウザンの優良系統の選定

DNA分析により、広島県庄原市の林分はさし木により造林されたことが明らかとなりました。この林分の727個体は、92の母樹から増殖したさし木クローンの苗木が植栽されたものでした。クローン毎に成長と材質の評価を行い、その中から成長や材質の優れた22クローンを優良系統として選定しました(図4)。今後、これらの優良系統をもとに品種開発等をさらに進め、種子や穂木を採取する採種圃園の造成や優良な造林用種苗の生産につなげていくことにより、林業の成長産業化や地球温暖化森林吸収源対策に貢献します。

研究資金と課題

本研究は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「西南日本に適した木材強度の高い新たな造林用樹種・系統の選定及び改良指針の策定」(課題番号27003B)により行われ、その成果を「コウヨウザンの特性と増殖の手引き」としてとりまとめ、公表(<https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/documents/koyozantebiki.pdf>)しています。

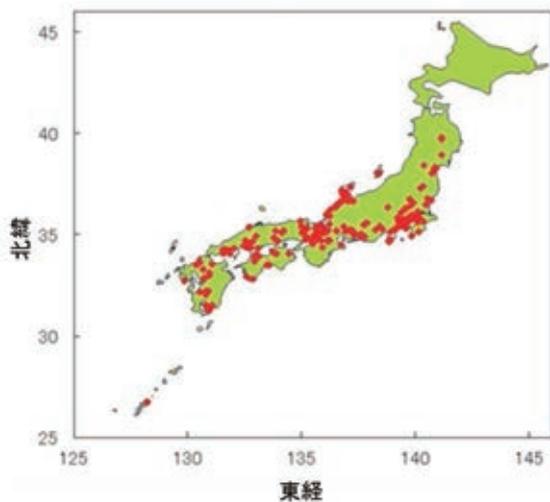


図1. コウヨウザンの所在地マップ

赤点が所在地を示します。寺社林等に多く植栽されています。東北地方以南の照葉樹林帯に多く生育している傾向にあります。

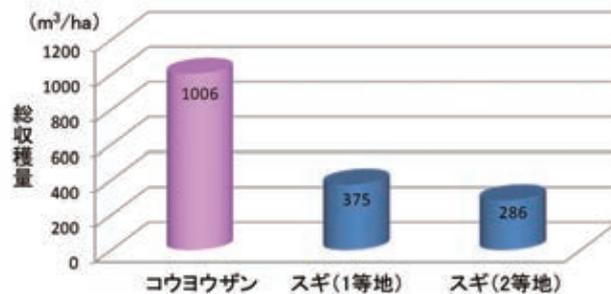


図2. コウヨウザンと同一地域のスギの総収穫量との比較

広島県庄原市の52年生のコウヨウザンの林分の材積は1006m³/haであり、この地域のスギの1等地の収穫予想表における総収穫量375m³/haの約2.6倍、2等地の総収穫量286m³/haの約3.5倍でした。



図3. 平角材の曲げ強度試験

林齢の異なる4林分から製材品を作製して材質を調査しました。成熟材を多く含む製材品ではヒノキと同等の材質を示しました。

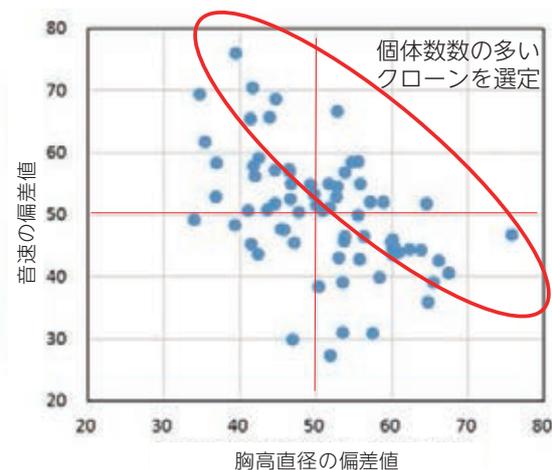


図4. 胸高直径の偏差値と音速の偏差値との関係

広島県庄原市の林分から、植栽された個体数が多く成長が平均以上のさし木向け6クローンや、成長が特に優れた7クローン等、赤の楕円の中から22クローンを優良系統として選定しました。胸高直径は成長形質の指標、音速は材質形質の指標であり、図中の赤線は偏差値50（平均値）を示しています。

専門用語

クローン：もとの木からさし木、つぎ木等で無性的に増殖され、もとの木と全く同じ遺伝子を持つ個体を示す。

暖かさの指数・寒さの指数：植生の分布と気温との関係を表すための指標。暖かさの指数は、月平均気温が5℃以上の月について月平均気温から5℃を引き、これを1年間加算した値。寒さの指数は、月平均気温が5℃以下の月について月平均気温から5℃を引き、これを1年間加算しマイナスをとった値。

未成熟材・成熟材：未成熟材は、樹木の成長過程の初期に形成層において未熟な細胞から形成された材で、成熟材はそれ以降に成熟した細胞から形成された材。一般に未成熟材は成熟材に比べ強度が劣ることが知られている。

森林総合研究所
平成30年版 研究成果選集

発行日 平成30年7月
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
茨城県つくば市松の里1
電話 029(829)8373
お問い合わせ 企画部広報普及科
メールアドレス kanko@ffpri.affrc.go.jp
ホームページ <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ffpri.html>
印刷所 朝日印刷株式会社 つくば支社
茨城県つくば市東2-11-15
電話 029(851)1188

本誌から転載・複製する場合は、森林総合研究所の許可を得てください。



森林総合研究所

茨城県つくば市松の里1 <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ffpri.html>