

第4期中長期計画成果集



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

森林総合研究所は、森林・林業・木材産業・林木育種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、5年を1期間とする中長期計画を策定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。

第4期中長期計画（平成28年度～令和2年度）では、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を重点課題として研究開発に取り組んできました。

「第4期中長期計画成果集」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第4期中長期計画期間中に得られたすべての研究成果を対象に改めて選定しました。

- ・ 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
- ・ 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おります。できるだけ平易な言葉を用いるように努め、専門用語につきましては解説を付けました。また、地球規模の問題解決への貢献を示すために、国連が定めた17の持続可能な開発目標（SDGs）のどれに該当するのかを、研究成果ごとにアイコンで示しました。

この中長期計画成果集が皆様のご参考になれば幸いに存じます。

2021年11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 浅野（中静） 透

森林総合研究所 第4期中長期計画成果集

目次

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Ⅰ 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

- 雪崩の流下を妨げて災害を軽減する森林のはたらき 06
森林には雪崩の流入で多数の樹木が倒壊した場合であっても、雪崩の勢いを弱めて災害を軽減する効果があることを初めて定量的に示しました。この成果は災害軽減効果の高い森林の配置や造成に役立ちます。
- 日本の森林から供給される水資源量の長期変化を予測する 08
我々の日常生活には山岳の水源から供給される水資源が欠かせません。そこで、森林を対象とした水循環モデルを構築し、山岳の主な土地利用である森林から供給される水資源量の長期的な変化を推定しました。
- 風害、冠雪害、森林火災の発生リスクを推定するモデルを開発しました 10
強風や大雪によって、樹木の根返りや幹折れが発生することがあります。また、大気や地面が乾燥すると森林火災が発生しやすくなります。気象条件に起因する森林災害の発生リスクを推定するモデルを開発しました。
- 放射性セシウムは依然として表層土壌に残っていた
ー森林における長期観測と、きのこ及びきのこ原木林の利用再開の手がかりー 12
放射性セシウムが森林内でどのように動き、現在どこに存在しているのか、10年間調査しました。樹木やきのこの放射性セシウムの吸収しやすさについても調査し、シンポジウムや図書によって情報を発信してきました。

イⅠ 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

- 気候変動が人工林に及ぼす影響を予測する 16
スギ林で、大規模な降雨の遮断実験や年輪解析を行い、既往の結果もふまえて作成したスギ林の純一次生産量を推定するシミュレーションモデルに基づき将来の気候変動がスギ人工林に及ぼす影響を予測しました。
- AIを活用して高精細な森林土壌炭素貯留量の日本地図を作成 18
AIを活用して高精細な森林の土壌炭素貯留量の日本地図を作成しました。この地図は国連食糧農業機関（FAO）の地球土壌有機炭素地図の一部として公開され、気候変動モデルの基盤情報として多方面で活用されています。
- 中央アマゾン熱帯林で択伐施業の持続可能性を検証する 20
中央アマゾン熱帯林で森林への影響を最小限に抑える低インパクト択伐施業を行うと、およそ14年で残された樹木が成長して地上部バイオマスが回復し、森林の炭素蓄積量を維持しながら管理できることがわかりました。
- 途上国の環境条件にあわせた森林減少・森林劣化のモニタリング手法を開発する 22
途上国における森林減少や森林劣化による温室効果ガス排出の削減量を把握するため、地上調査とリモートセンシングによる森林炭素蓄積量の計測・検証を行い、排出削減量モニタリングの設計手順を作成しました。

ウⅠ 生物多様性の保全等に配慮した森林管理技術の開発

- トドマツ人工林の保持伐は伐採直後の生物多様性保全に効果がある 26
生物多様性に配慮した伐採方法である保持伐を人工林に適用する国内初の実証実験「トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験」を実施しました。保持伐は伐採直後の森林性種の保全に効果があることがわかりました。
- ブナは窒素を巧妙にやりくりして実をつける 28
実を成熟させるために、ブナは必要となる窒素を土壌からより多く吸い上げたり、殻斗や葉など他の器官から転流させたりすることで、窒素資源を巧妙にやりくりしていることがわかりました。

- 天敵微生物を使ってシイタケの害虫の被害を防ぐ 30
シイタケの栽培方法には、菌床栽培と原木栽培の2種類がありますが、どちらの栽培方法でも害虫が発生します。これらの害虫を、化学農薬ではなく、天敵微生物を使って防除する方法を確立しました。
- シカ被害対策グレードアップ術～防鹿柵をめぐる攻防戦～ 32
防鹿柵に「シカの侵入を防ぐ」という機能を十分に発揮させるためには、植林地周辺のシカ密度を把握し、イノシシ等他の動物による柵への攻撃に耐えられる仕様と設置方法を選択する必要があることがわかりました。

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

- 人工林の造林・保育を一連の作業としてコスト削減 36
低コスト林業を実現するため、育苗から下刈りまでの造林・保育技術を開発しました。
- 広葉樹資源を有効に活用し地域を支える 38
中山間地に分布する広葉樹林の資源量推定のための技術開発と用途に関する情報整理を行い、近畿圏に多いコナラを中心に、さまざまな径級ごとに無駄なく利用し、全体の付加価値を高める活用方策を提案しました。
- 原木の品質がわかるICTハーベスタの開発 40
丸太を生産しながら品質（曲がり、強度、密度）を自動で測る次世代ハーベスタを開発しました。丸太の品質を含めたハーベスタから得られる情報を、インターネットを介して関係者間で共有できる機能も備えています。
- 地上レーザースキャナーによる森林調査：効率的な資源量把握に向けて 42
森林調査を効率化するための地上型レーザースキャナーの活用方法について、胸高直径や樹高の計測精度と、この方法に固有な樹高の過小評価の補正法を明らかにし、導入の費用対効果を従来の調査法と比較しました。

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 46
家具・内装材用の広葉樹原材料のうち約8割が海外産ですが、それを国産に転換するための対応方策を提案しました。
- 新たな森林の有効活用に向けた課題と解決策の提示 48
日本におけるレジャー・スポーツを中心とした「新たな森林利用」の発展状況と、それに伴う課題及び解決策を、海外との比較研究を踏まえて提示しました。
- 世界初の長期連続運転を可能にする木質バイオマスを主原料とした
メタン発酵実証試験とその発酵残渣の応用 50
木質バイオマスを原料とする長期連続メタン発酵の実証試験を行い、安定的なメタン発酵の条件を明らかにしました。また発酵残渣はバイオプラスチックの原料として有効活用できることも明らかにしました。
- 蒸気タービン方式木質バイオマス熱電併給事業採算性評価ツールを開発 52
電力固定価格買取制度の下で、蒸気タービン方式の木質バイオマス発電熱電併給システムを用いた事業の採算性を評価できるツールを開発しました。

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

- 樹木年輪のコア試料を自動採取する装置（スマートボーラー）を開発・商品化 56
市販のインパクトレンチの動力をギアで増幅することにより、従来人力で行われてきた成長錐コア採取を自動化しました。本装置により、人力に比べて1日当たり約3倍の数のコア試料を採取できるようになりました。
- 大径材の丸太段階で強度を予測し要求性能に応じた製材品を安定供給する 58
大径材から得られる大断面の製材品を国産材の利用が少ない住宅のはり・けた材や枠組壁工法用製材として利活用するために、丸太段階で製材品の強度を予測し効率的に製材・乾燥を行い安定供給する技術を開発しました。

■国産材CLT（直交集成板）の普及に向けた技術開発	60
国産材CLTの普及に向けて、建築基準の改正に必要な強度データの収集、耐火性能付与技術の開発に取り組みました。また、製造工程の効率化、製品仕様の標準化による製造コスト低減への道筋を示しました。	

■国産材を活用してツーバイフォー建築を強くする	62
ツーバイフォー（枠組壁工法）建築にスギ等の国産材を利用するための技術開発を行い、建物の耐震性能を確保するとともに広い空間を実現できる壁やはり（梁）の部材の開発を行いました。	

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

■スギから製造したセルロースナノファイバーを用いた木の美しさを長く維持する塗料の開発	66
スギから、木材用塗料への配合に適したセルロースナノファイバー（CNF）を製造する技術開発を行いました。このCNFを配合した、木製品の美しさを長持ちさせる下塗り用の塗料を、「CNFシーラー」として実用化しました。	

■森林資源由来の高性能プラスチック代替素材「改質リグニン」の開発	68
森林資源を活用した化成品素材を創り出す検討を進め、スギ材から「改質リグニン」という新素材の開発に成功し、有効利用が困難といわれたリグニンの工業材料化への道筋を見出しました。	

■竹の効果的な利用法	70
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の大量消費に繋がる効果的な利用法が求められています。そこで環境に配慮した技術を活用し、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

■DNA分析によって無花粉スギの原因となる遺伝子(MS1)を特定しました	74
花粉発生源対策に有効な無花粉スギを高精度で選抜するには、無花粉を引き起こす原因遺伝子の特定が必要です。雄花で働く遺伝子の発現解析や連鎖地図の作成、DNA配列の探索によってMS1遺伝子を特定しました。	

■裸子植物と被子植物の光合成のしくみは異なる	76
これまで、光合成の代謝のしくみは、裸子植物である針葉樹と被子植物である広葉樹とで違いはないとされてきました。今回の研究により、両者に違いがあることがわかりました。	

■地球温暖化に適応したシイタケ品種の開発	78
地球温暖化が進行する中、多くの山村・中山間地域で基幹産業となっているシイタケ生産を、将来にわたり安定的に維持していくため、従来よりも高温環境で発生することが期待される有望菌株を選抜しました。	

■国産トリュフの栽培を目指す	80
トリュフは、樹木の根に共生して生育するきのこです。その人工栽培に向けて、トリュフ発生地を参考に土壌環境を整えた圃場にて、トリュフ菌を共生させた苗木を植栽し、菌の定着に成功しました。	

イ！多様な優良品種等の開発と育種基盤技術の強化

■気候変動適応のための育種技術の開発	84
地球規模で生じている気候変動に対応するために、乾燥等の環境下で成長を維持できるスギ系統を選抜する技術を開発し、その技術を用いて気候変動に適応するスギ品種の育種に向けた育種素材を選抜しました。	

■土を使わずスギを発根させる「エアざし」技術の実用化にむけて	86
土を使わずに発根させることができる「エアざし」の実用化にむけて、さしつけ環境に適した散水パターンの推定方法を明らかにするとともに、エアざしを活用したスギさし木コンテナ苗の生産マニュアルを公開しました。	

■期待される新たな造林樹種コウヨウザンー国内林分からの優良系統選抜ー	88
成長がスギよりも早いことなどが期待されているコウヨウザンについて、国内で成林した林分から優良系統を55系統選抜しました。これらは日本の気候に適した優良系統として、今後の活用が期待されます。	

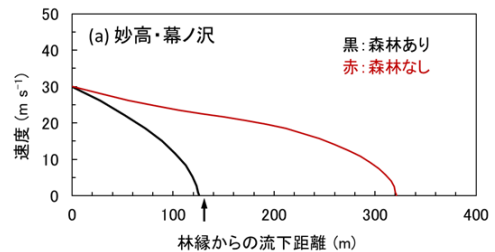
■アフリカにおけるメリア第二世代の選抜	90
ケニアなど東アフリカ地域の郷土樹種であるメリアについて、育種研究の結果、開始からわずか7年で成長や幹の通直性、耐病性に優れるなどの特性を備えた優良な第二世代系統を選抜することができました。	
■マツ材線虫病に対する抵抗性の遺伝領域を明らかにする	92
マツ材線虫病は日本だけでなく世界的にも深刻な森林被害をもたらしている病虫害です。今回、DNA解析を行うことで、世界で初めてマツ材線虫病抵抗性に関わる遺伝領域を明らかにしました。	

第4期中長期計画研究成果選集 掲載課題一覧	94
-----------------------------	----

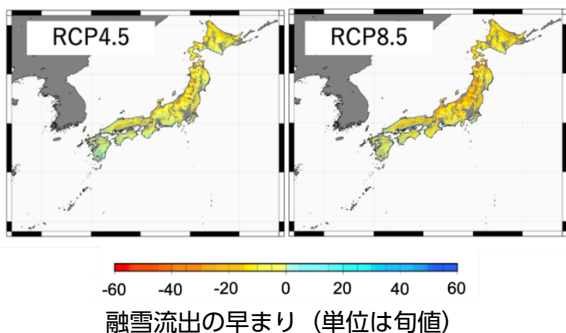
森林の多面的機能の高度発揮に向けた森林管理技術の開発

森林の国土保全機能や水源涵養機能の高度発揮、東日本大震災被災地での林業・木材産業の復興と海岸防災林の着実な復旧・再生が求められています。このため、以下の4つの課題に取り組みました。

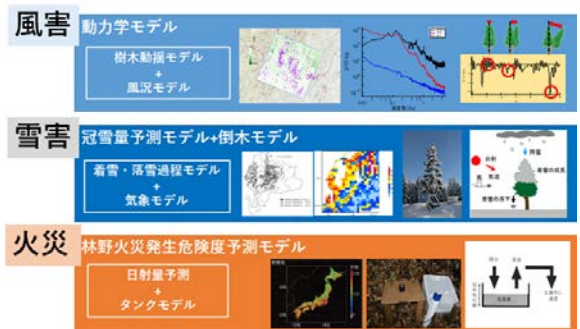
- アア a 山地災害発生リスクの予測と森林の防災機能の変動評価
- アア b 森林の水源涵養機能を高度に発揮させる技術の開発
- アア c 森林気象害リスク評価手法の開発
- アア d 森林における放射性物質の動態把握と予測モデルの開発



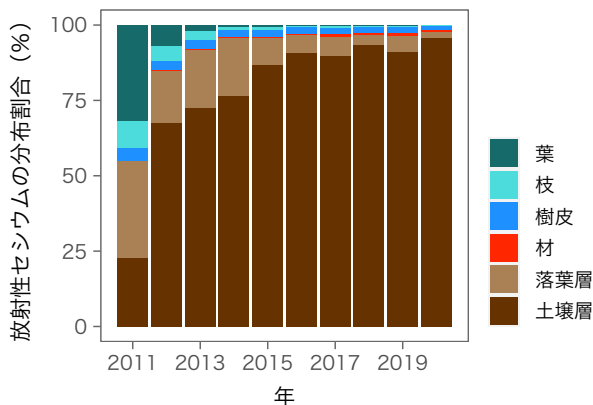
シミュレーションによって森林による雪崩災害軽減機能を明らかにしました。



温暖化の進行が水資源に与える影響として、森林流域からの融雪流出の早期化などを、2つの温暖化シナリオを対象に明らかにしました。



各種気象害のリスク予測モデルを開発しました。



原発事故後10年間の森林内における放射性セシウムの動態を明らかにしました（左図）。それらの成果を、放射性セシウムに関する科学的な情報として、国内外の専門家や一般市民に向けて発信してきました（右図）。



雪崩の流下を妨げて災害を軽減する森林のはたらき



森林防災研究領域 竹内 由香里・勝島 隆史・勝山 祐太

新潟県の妙高山域幕ノ沢と岩手県の岩手山西斜面で発生した表層雪崩を対象として、雪崩の勢いを弱める森林の減勢効果を数値モデルで調べました。これらの雪崩は高速で森林に流入し、広範囲の樹木を倒壊させた後、森林内で停止しました。そこで、森林がある場合とない場合を想定した雪崩の流下を数値モデルのシミュレーションで比較したところ、森林がない場合、雪崩はより遠くまで流下することがわかり、森林の減勢効果を定量的に示すことができました。この成果は、災害軽減効果を高めるように森林を配置し造成するのに貢献できます。

成果

雪崩災害を軽減する森林のはたらき

山地の森林には雪崩の発生を防ぐ効果とともに、雪崩が発生し森林に流入した場合には雪崩の進行を妨げ速度を低下させる減勢効果があることが、以前から経験的に知られていました。しかし、森林の減勢効果は雪崩の種類や規模、森林の条件（面積や立木密度、樹幹の直径、樹種など）、さらに地形によって異なり、これらの関係を示すデータを得ることが難しいため、その効果を定量的に示すことができませんでした。本研究では、実際の雪崩を調査して得られたデータに基づき、森林の減勢効果を定量的に表わすことを目的として、雪崩の運動モデルを用いたシミュレーションを行ないました。

妙高山域幕ノ沢と岩手山西斜面で発生した雪崩

対象としたのは、2008年2月に新潟県の妙高山域幕ノ沢および2010～2011年冬期に岩手県の岩手山西斜面で発生した大規模な乾雪表層雪崩です。雪崩は森林のない標高の高いところで発生し、下流の森林に高速で流れ込みました。妙高山域幕ノ沢ではスギ林、岩手山西斜面では亜高山帯林の多数の立木が倒壊しましたが、いずれの雪崩も森林を抜けて下流へ行くことはなく、森林内で止まりました。これらの雪崩の到達範囲や立木の直径、本数密度、折損状況などを現地で調査し、森林の減勢効果の解明につながる稀少なデータを得ました（図1、図2）。

雪崩の減勢効果を示した数値シミュレーション

雪崩の運動モデルに実際の地形と現地調査の結果を反映させて雪崩の流下をシミュレーションで再現し、森林がある場合とない場合を想定した場合の雪崩の速度や流下距離を比較しました。その結果、妙高山域幕ノ沢の雪崩において森林がない場合には、スギ林内を流下した実際の雪崩と比べて約200 m

も遠くまで流下する結果となりました（図3の（a））。つまりこのスギ林は、倒壊しつつも雪崩を減速させ、流下距離を200 m縮める減勢効果があったといえます。同様に岩手山西斜面の雪崩についても森林がないと仮定してシミュレーションを行なった結果、森林内を流下した実際の場合より200 m～600 mも遠くまで流下する可能性を示せました（図3の（b））。

雪崩の発生を防ぐ森林の効果については、以前から研究されてきましたが、森林は流下する雪崩にも顕著な減勢効果があることを定量的に示したのは、この研究が初めてです。この手法は、今後、森林の災害軽減効果を考慮し、効果を高めるように森林を配置し造成することに貢献できると考えています。

研究資金と課題

本研究の一部は、科学研究費補助金「流下する雪崩に対する森林の減勢効果の研究」（15K01271）による成果です。

文献

Takeuchi, Y. et al. (2018) Observations and numerical simulations of the braking effect of forests on large-scale avalanches. *Annals of Glaciol.*, 77, 50-58.
doi.org/10.1017/aog.2018.22

専門用語

乾雪表層雪崩：斜面に積もった積雪全層が地面を滑って崩落する全層雪崩に対し、積雪の上層（表層）部分が雪面上を流れ下る雪崩を表層雪崩という。特に、発生したときの雪が氷点下で融雪水や雨水を含まない乾雪表層雪崩は、高速になりやすく、大きな災害になることがある。



図1 妙高山域幕ノ沢(左)と2008年2月の表層雪崩で倒壊したスギ林の様子(右)
雪崩は左図の赤丸で示す幕ノ沢の源頭部で発生しました。

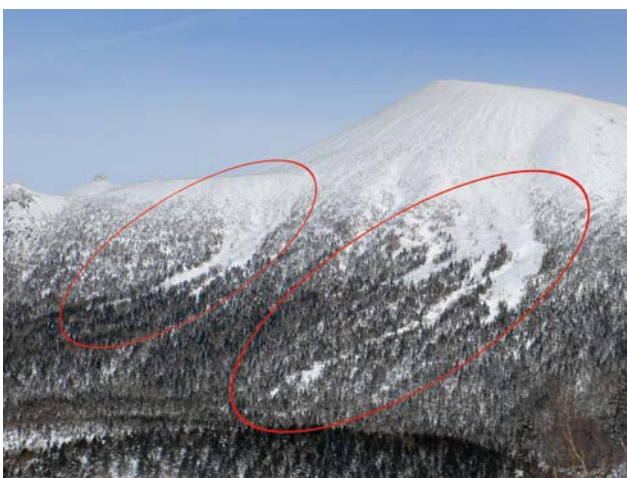


図2 岩手山西斜面(左)と2010～2011年冬期の表層雪崩による倒木の様子(右)
左図の楕円部分は雪崩の流下で森林が倒壊した跡です。

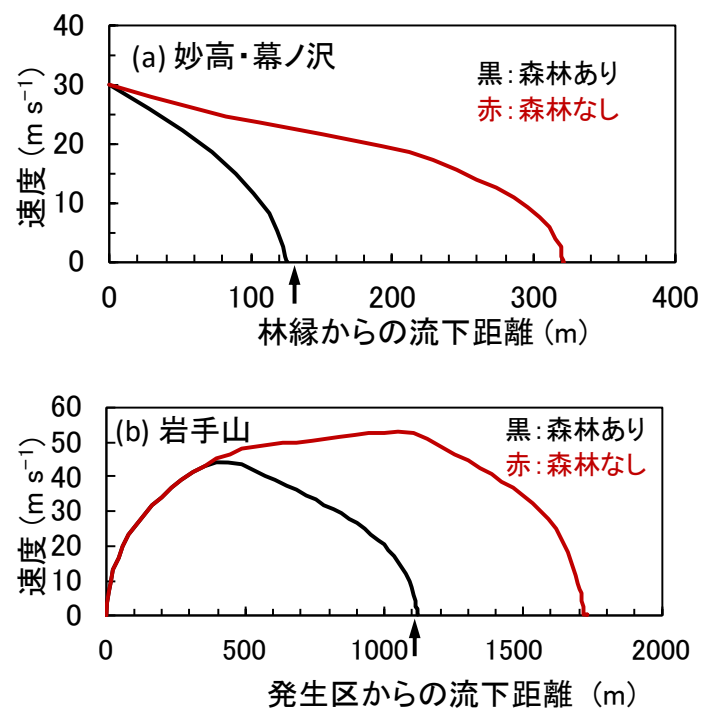


図3 森林の有無による雪崩の速度変化の比較

森林内を流下した雪崩(黒線)に比べて、森林がないと仮定した計算(赤線)では、雪崩がなかなか減速せず、長距離を流下しました。↑は実際の雪崩の停止位置を示しています(Takeuchi et al 2018を改変して引用)。

日本の森林から供給される水資源量の長期変化を予測する



北海道支所 澤野 真治
森林防災研究領域 玉井 幸治

現在進行している気候変動のもとで水資源を持続的に利用していくためには、水資源量の分布を長期間に渡って知ることが欠かせません。そこで、水源地域に広く分布する森林を対象とした水循環モデルを作成して、気温や降水量の長期的な変化による森林域から供給される水資源量の長期変化を予測しました。日本全域で見た森林の水資源量は将来的に増加する傾向を示しましたが、一部の地域や季節によっては水資源量が減少する場所があることがわかりました。このような情報は下流域での水需要の詳細な情報と組み合わせることで、水資源管理の高度化に寄与することが期待されます。

水源として重要な日本の森林

日本の国土面積の約6割を占める山岳地帯は、標高が低い場所と比べて雨が多く降ることから水源としての役割を担っています。また、その山岳地帯の多くは森林に覆われているため、森林での水の動きが我々の日常生活での水利用に大きく影響します。地球規模で進行している気候変動は、雨の降り方に変化をもたらす事が予測されています。こうした雨の降り方の変化は、様々な場所の利用可能な水資源量に影響を及ぼす可能性があります。将来どのくらいの水資源量が利用できるのかを知ることは、水資源を安定的に確保していくための情報として欠かせません。そこで、私たちは森林を対象とした水循環を予測するモデルを開発し、森林から供給される水資源量の長期変化の予測に取り組みました。

森林の水の動きを予測する

これまでに公開されている研究成果に基づいて、森林における水や雪の動きを予測する森林の水循環モデルを開発しました。広域で評価するための気象データを用いて、開発した森林水循環モデルの推定結果と森林総合研究所が長期間観測を継続している4つの試験地で得られた観測結果の比較を行いました。その結果、構築したモデルは、降水量や気温が異なる4つの試験地で得られた降水量と流出量の対応関係を再現することができました（図1）。

水資源量の長期的な変化

森林から供給される水資源量の長期的な変化は、東京大学などの研究グループが公表している将来気候データのうち、温室効果ガスの濃度が異なる2つのRCPシナリオに基づく将来気候データ（RCP4.5、RCP8.5）を用いて推定し、3つの時期（20世紀末（1981-2000）、21世紀半ば（2041-2060）、及び21世紀末（2081-2100））で比較しました。日本の森

林域全体について集計したところ、年平均気温や年降水量は時代とともに増加する傾向を示し、年蒸発散量は年平均気温の変化に、年流出量は年降水量の変化にそれぞれ追従するような変化を示しました（図2）。地域的な違いでは、北日本を中心に多くの地域では年流出量が増加する傾向を示しましたが、西日本の一部地域では年流出量が減少する傾向を示しました。（図3）。また、春季には北海道、東北、北陸や高標高地の積雪地域では主に雪解けが早まることにより、それ以外の地域では春先の降水パターンの変化により、春先の流出量のピーク時期が移動するなど、水資源供給量は季節的にも変化することがわかりました（図4）。

今回の研究で推定した水資源供給に関する情報は、農業用水や生活用水といった下流域の水需要と組み合わせることで、安定的な水資源利用の将来像の描出への貢献が期待できます。

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「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発（農林業に係る気候変動の影響評価）」による成果です。

専門用語

RCPシナリオ：RCPシナリオは、代表的濃度経路シナリオの（Representative Concentration Pathways）の略称で、気候変動に大きく影響を及ぼす温室効果ガスの大気中の濃度が時代と共にどのように変化するかを想定したものです。本研究では複数あるRCPシナリオのうち、最悪の状況を想定したRCP8.5と現実的な温室効果ガス排出抑制を選択した場合を想定したRCP4.5の2つのシナリオを用いました。

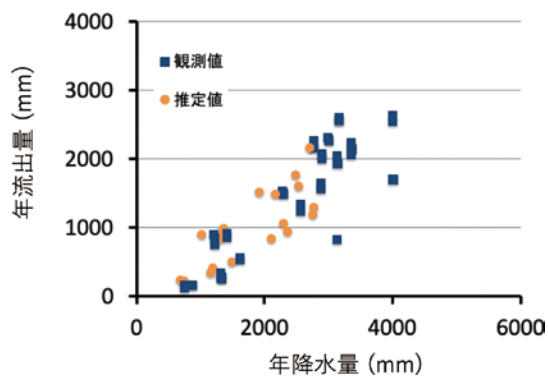


図1 水循環モデルの推定値と観測値との比較
モデルによる推定値は、観測された年降水量と年流出量の関係を再現することができました。

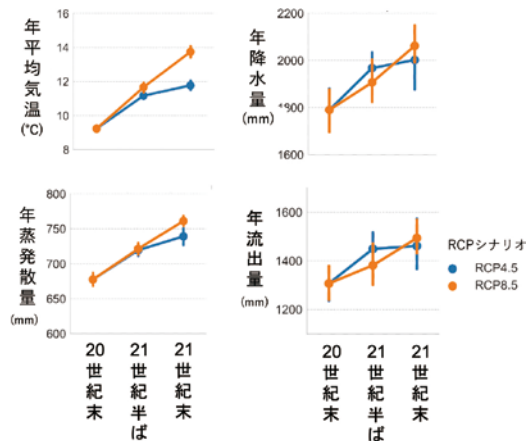


図2 日本の森林域における年平均気温、年降水量、年蒸発散量及び年流出量
いずれの値も時代と共に上昇している傾向が見られました。

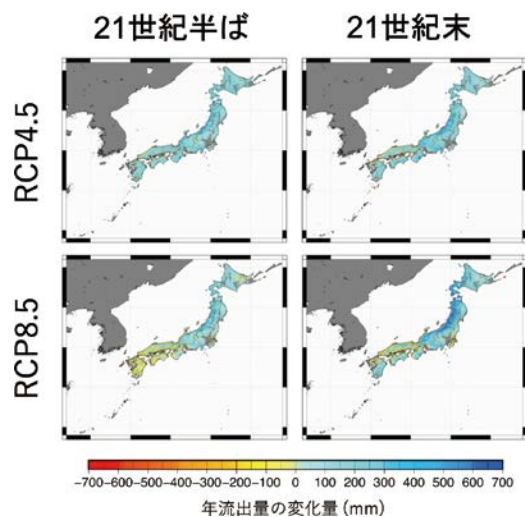


図3 20世紀末を基準とした 将来気候下の年流出量の変化量 (mm)

多くの地域で年流出量が増加するという予測結果になりましたが、西日本の一部では年流出量が減少する予測結果になりました。

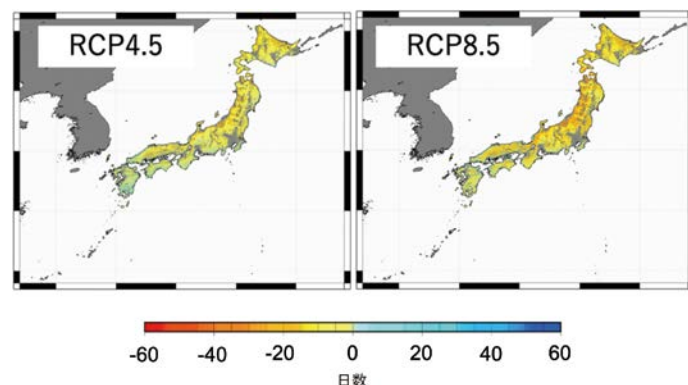


図4 21世紀半ばにおける春先のピーク流量出現時期の変化日数

暖色系で示された地域では春季の流出量の最大値が現れる時期が早まっていることを表します。北海道、東北、北陸と高標高地では主に融雪の早期化により、それ以外の地域では春先の降水パターンの変化により、春先の流出量のピーク時期が移動していました。

風害、冠雪害、森林火災の発生リスクを推定するモデルを開発しました



森林災害・被害研究拠点 鈴木 寛

森林防災研究領域 玉井 幸治・勝島 隆史

林業では、苗を植えてから木材として伐採するまでに40～50年以上の年月が必要です。その間に様々な災害によって樹木が被害を受けることがあります。気象条件に起因する森林災害を気象害といいます。我が国で発生する気象害の被害面積トップ3である、風害、冠雪害、森林火災について、それぞれの災害の発生リスクを推定するモデルを開発しました。いずれも、被害が発生する物理過程を踏まえたモデルであることに特徴があります。風害に関しては風による樹木の揺れから、冠雪害に関しては冠雪重量（樹冠に付着する雪の重さ）から、森林火災に関しては林床可燃物（地面に溜まっている落葉落枝や下草）の水分量からリスクを推定します。

成果

樹木の揺れを再現して風害のリスクを推定する

台風などに伴う強風で幹折れや根返りなどの風害が発生します。風が吹くと樹木は揺れ、風が強いほど大きく揺れます（図1）。揺れ幅の大きさが最大のときに最も大きな力が樹木に働きます。樹木は風に押されて受動的に揺れるだけでなく、樹木ごとに揺れやすい固有の速さが定まっています。樹高の高いものほどゆっくり揺れる傾向があります。樹木の揺れをシミュレートして揺れ幅の大きさを推定し、その最大値から風害リスクを推定するモデルを開発しました。2018年台風21号の際に大阪府北部の山中で発生した大規模な風害を事例に、モデルによる推定と実際に発生した風害の分布とを比較すると、その結果の一致率はおよそ6割でした（図2）。

冠雪の重さを推定して冠雪害のリスクを推定する

樹冠に大量の雪が降り積もると、幹折れや根返りなどの冠雪害が発生します（図3）。被害発生の予測には、樹冠に付着する雪の重さ（以下、冠雪重量）と、それに対する樹木の力学的抵抗性の評価が必要です。そこで、樹冠に付着した冠雪重量を一冬にわたり測定し、気象データから冠雪重量の変化が推定できるようにしました。さらに、樹木の力学的抵抗性を構造力学に基づいて評価することによって、冠雪害リスクが推定できるモデルとしました。

林床可燃物の水分量から森林火災発生リスクを推定する

森林火災では、林床可燃物と呼ばれる、地面に溜まっている落葉落枝や下草が最初に燃え始めます。林床可燃物が20%

以上の水分を含んでいると火種があっても燃えません。そこで林床に届く太陽エネルギー量と降水量から林床可燃物の水分量を推定し、林床可燃物の水分量が20%よりも少なく、森林火災発生リスクの高い日を判定するモデルを開発しました（図4）。苗を植えて年数の少ない新植地、間伐後などの低密度林、林齢20年以上のうっ閉した森林の3タイプでは、その順番に森林火災発生リスクが大きいことがわかりました。

リスク推定技術を森林保険制度に活かす

気象現象に起因する森林災害を確実に避けるのは困難です。気象害による被害に備えて林業経営者から掛け金を集め、損失が生じたときに保険金を支払って林業経営の安定化を図るのが森林保険制度です。掛け金は被災リスクに応じて定められる必要があります。今回の成果は、風害、冠雪害、森林火災のリスク評価を可能にするものです。

研究資金と課題

本研究は、所内委託プロジェクト*「森林気象害のリスク評価手法に関する研究」による成果です。

文献

玉井幸治（他）（2019）林床可燃物含水状態の推定モデルによる森林火災発生危険日出現日数の算出。水利科学, 365,84-98
鈴木寛（他）（2020）樹木の揺れに基づく力学モデルと風害リスク評価。水利科学, 376,1-18

*森林総合研究所所内委託プロジェクト

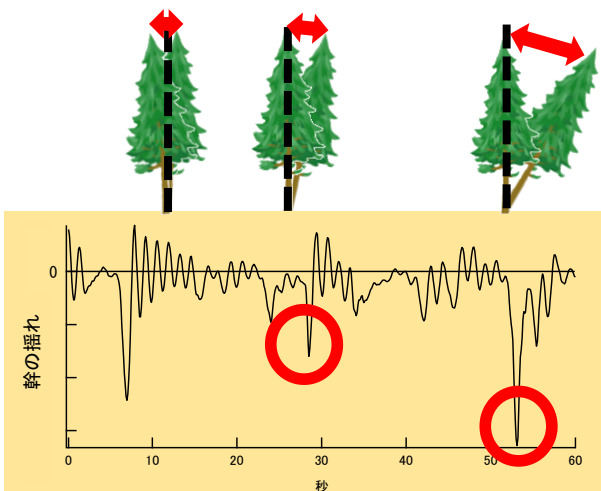


図1 樹木の揺れの波形と模式図
風の力で時々大きな揺れ幅が発生します（赤丸）。

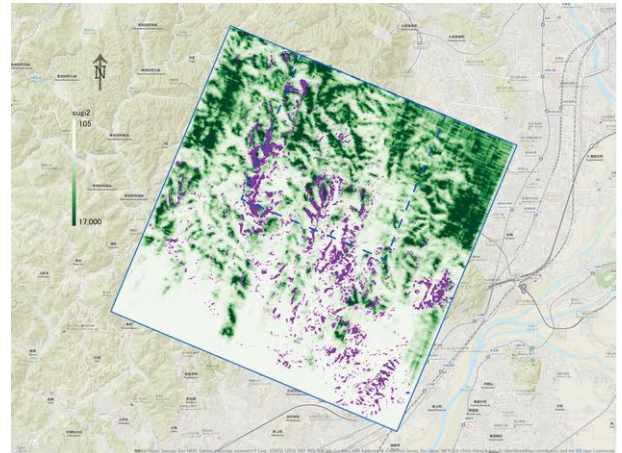


図2 風害被害地の分布（紫）と揺れの大きさの推定結果（緑）の比較（鈴木2020）

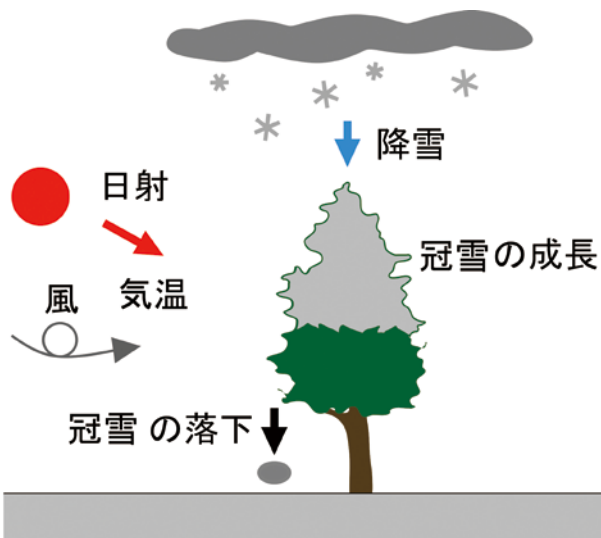


図3 冠雪の成長と落下過程の概念図

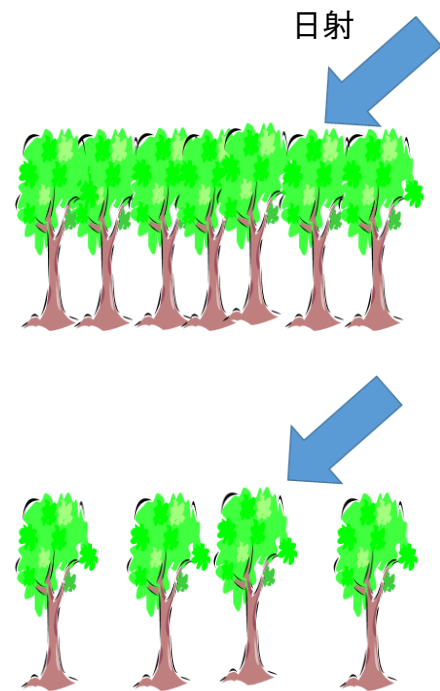


図4 林床可燃物の含水状態と森林火災発生リスクの概念図

樹冠が閉鎖していて林内が暗い森林（上図）では林床面日射量が少なく蒸発量は少ないため、林床可燃物はゆっくりと乾燥して森林火災発生リスクは小さい。逆に林冠が疎で林内が明るい森林では（下図）、林床面日射量は多く蒸発量が多いため、林床可燃物は早く乾燥して森林火災発生リスクは大きい。

放射性セシウムは依然として表層土壌に残っていた —森林における長期観測と、きのこ及びきのこ原木林の 利用再開の手がかり—



震災復興・放射性物質研究拠点 篠宮 佳樹・三浦 寛・阪田 匡司・坂下 渉・高野 勉・池田 重人
植物生態研究領域 荒木 眞岳 立地環境研究領域 平井 敬三・小林 政広・橋本 昌司・今村 直広
きのこ・微生物研究領域 平出 政和・小松 雅史 木材加工・特性研究領域 大橋 伸太
関西支所 金子 真司 福島大学 金指 努

東京電力福島第一原発事故による森林の放射能汚染の実態を明らかにするため、福島県内の森林で葉や幹、土壌などの調査を10年にわたって続けました。事故後の数年のうちに放射性セシウムは葉や枝から地表へと移動し、現在その大部分が表層土壌にとどまっていることが分かりました。また、樹木に必須の栄養であるカリウムが土壌に多く含まれていると樹木の放射性セシウム吸収が抑制されること、野生きのこは種類によって放射性セシウムの吸収しやすさに違いがあることも明らかになりました。さらに、これらの研究成果をシンポジウム、図書を通じて、専門家や一般市民に向けた最新の情報として発信してきました。

成果

森林内における放射性セシウムの動きを長期にわたって観測

東京電力福島第一原発事故により、放射性セシウムが東日本の広い範囲の森林に降りそそぎました。森林総合研究所では、原発からの距離が異なる3箇所の森林で、事故が起きた2011年から、樹木（葉、枝、樹皮、材）、落葉層、土壌を採取して、放射性セシウムによる汚染状況を調べてきました（図1：スギ林の例）。事故直後に樹木に付着した放射性セシウムは、数年で土壌へ移動しましたが、最近の5年間では大きな変化はなく、大部分は土壌（特に深さ0～5 cmの表層部）に存在していることが分かりました。チェルノブイリ事故後の調査では、土壌から根を通じて樹体へ吸収された放射性セシウムが落葉落枝として再び地表にもどる、という動きが繰り返され、放射性セシウムが森林生態系内を循環していることが分かっています。放射性セシウムのうち、セシウム137は半分の量になるまでに約30年かかるため、森林への汚染の影響は長く続くと予想されています。これからの影響を予測するため、放射性セシウムがどのように森林生態系内を循環するか、観測を続ける必要があります。

カリウムが放射性セシウムの吸収を抑える

原発事故後の2016年から2017年の冬に伐採された34か所のコナラ林で、その年に萌芽によって伸びたコナラの枝（当年枝）のセシウム137濃度と、深さ0～5cmまでの土壌に含まれる樹木が吸収可能なカリウム蓄積量との関係を調べました（図2）。その結果、カリウム蓄積量が多ければ、コナラ当年枝のセシウム137濃度が低くなることがわかりました。この成果は、きのこ原木として利用できる原木林を探すための手がかりになると考えられます。

野生きのこの放射性セシウムの吸収しやすさ

原発事故は山村に住む人々の暮らしをも変化させました。山の生活に彩りを添えていた、野生のきのこや山菜も放射性

セシウムで汚染されました。検査施設に持ち込まれた様々な野生きのこを調べてみると、放射性セシウムの吸収しやすさは種類ごとに違ってくるのが分かってきました（図3）。現在、野生きのこは種類に関わらず一括して出荷制限が適用されています。この成果は、出荷制限を種類ごとに細かく設定するなど、基準の見直しにつながると期待されます。

10年間の研究成果を人々に伝える

森林の放射性セシウムに関する研究をまとめ、分かったことを国内外の専門家だけでなく、一般市民に向けても講演会、シンポジウム、図書を通じて発信し、普及に努めてきました（図4）。これからも、多くの方々から頂いたご意見やご感想を参考に分かりやすい情報発信に努め、皆さんの安心・安全な生活に貢献していきたいと考えています。

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」、生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」、交付金プロジェクト*「放射性セシウムの空間分布及び空間変異メカニズムの解明」による成果です。

文献

Tsutomu Kanasashi, et al. (2020) Relationship between the activity concentration of ^{137}Cs in the growing shoots of *Quercus serrata* and soil ^{137}Cs , exchangeable cations, and pH in Fukushima, Japan Environ Radioact., 220-221, 106276.
Komatsu, M., et al. (2019) Extensive analysis of radiocesium concentrations in wild mushrooms in eastern Japan affected by the Fukushima nuclear accident : Use of open accessible monitoring data. Environ. Pollut., 255, 113236.

*森林総合研究所交付金プロジェクト

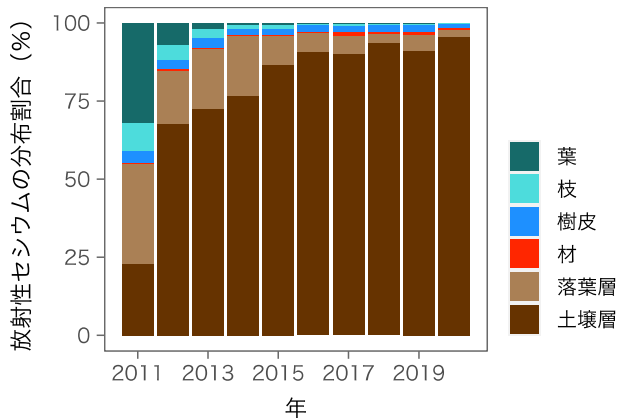


図1 スギ林内における放射性セシウム分布の10年間の変化

事故直後に樹木（葉、枝、樹皮）に付着した放射性セシウムは林床へ移動し、その後ほとんどが表層土壌に残っています。

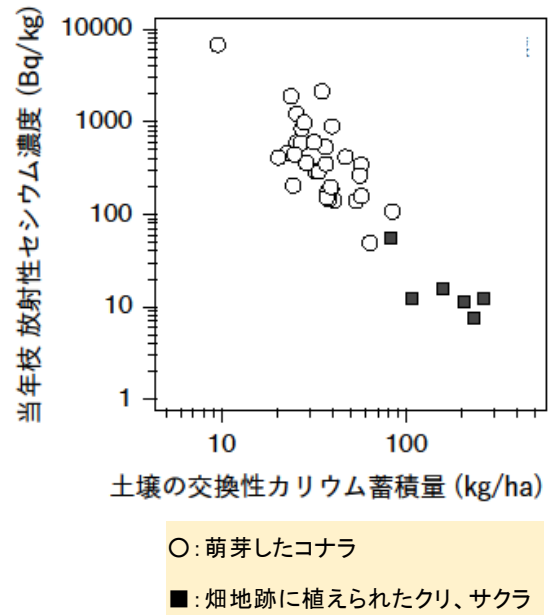


図2 深さ0～5cmまでの土壌中の交換性カリウム蓄積量とコナラ当年枝のセシウム137濃度の関係

図の縦軸、横軸とも対数で表示されており、主要な目盛1つで10倍異なります。土壌の交換性カリウム蓄積量が多いと当年枝のセシウム137濃度が低く、両対数グラフ上で負の相関が認められます。(Kanasashi et al.2020を加筆して作成)

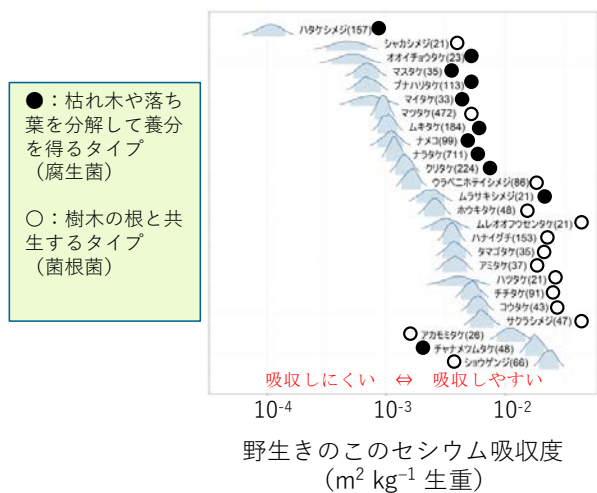


図3 野生きのこの放射性セシウムの吸収しやすい枯れ木や落ち葉を分解して生活するタイプのほうが樹木の根と共生して生活するタイプより放射性セシウムを吸収しやすい傾向にあります。



図4 広く一般市民に向けて情報を発信したシンポジウム（左）と図書（右）

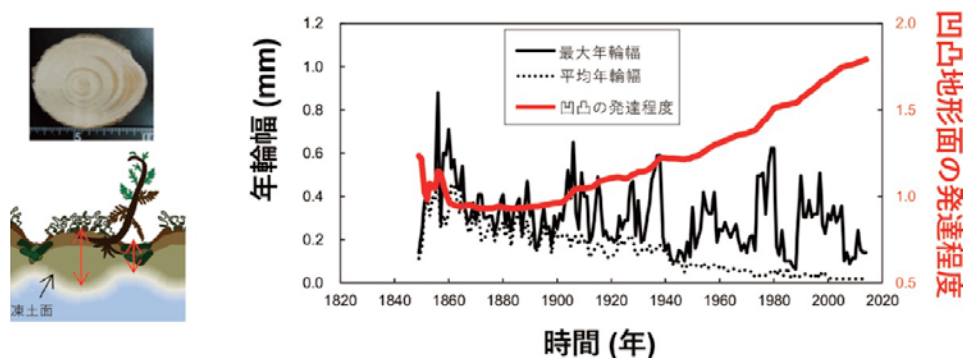
国内外の専門家や一般市民に向けて、放射性セシウムに関する科学的な情報を発信し、成果の普及に努めました。

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

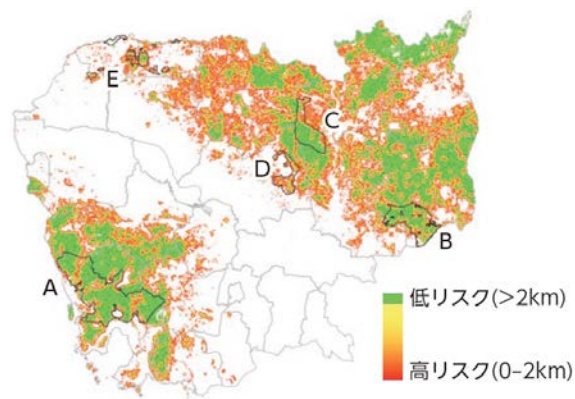
気候変動が将来の森林や林業分野に与える影響をより高精度で予測し、森林の持続可能な管理経営のための適応策・緩和策を進めることが求められています。このため、以下の2つの課題に取り組みました。

アイa 長期観測による森林・林業への気候変動影響評価技術の高度化

アイb 生態系機能を活用した気候変動適応及び緩和技術の開発



永久凍土の凹凸地形面の形成過程を年輪から復元し、温暖化影響を予測しました。



民間のREDDプラスの取組みを評価するため森林減少リスクマップ（カンボジア、2014年）を作成しました。



森林の乱開発により裸地化した土地の森林再生を図るため、植栽苗の被陰シェルターを開発しました。

気候変動が人工林に及ぼす影響を予測する



関西支所 齊藤 哲

植物生態研究領域 荒木 眞岳・井上 裕太・田中 憲蔵 立地環境研究領域 橋本 昌司・大曾根 陽子

九州支所 鳥山 淳平 信州大学 安江 恒 岐阜大学 斎藤 琢

将来、気候変動が進行した場合、森林・林業への影響が懸念されています。そこで日本の人工林に気候変動が及ぼす影響を予測することを目的とし、木材生産の中心となるスギ人工林の純一次生産量を推定しました。雨を遮断した野外実験で、スギは土壌が多少乾燥しても光合成を続ける水消費型の樹種だとわかりました。次に、スギ林の純一次生産量を推定するシミュレーションモデルを作成し、現在と将来の気候条件でそれぞれの純一次生産量を計算しました。その結果、スギ林の純一次生産量は、現在温暖な地域で減少し、冷涼な地域では増加する傾向にあることがわかりました。また、温暖化の程度によって人工林への影響の出方に違いが見られました。

成果

スギ林の純一次生産量を推定するシミュレーションモデル

将来の気候変動で気温の上昇や乾燥が起こると予測されています。樹木は、光、気温、CO₂濃度、乾燥など様々な環境条件で光合成を行い、成長します。将来のスギ林の純一次生産量を推定するには、光合成など生理特性と環境条件との関係を考慮する必要があります。そこで、野外実験や年輪解析を行い、既存の知見やデータも加え、生理特性と環境条件との関係を反映させた純一次生産量を推定するシミュレーションモデルを作りました。

スギの特徴：水消費型で寒い地域では冬暖かいとよく育つ

高さ約20mのスギ林で、降雨を遮断する実験を行い（写真1）、光合成反応を調べました。樹木は光合成を行う際、葉にある気孔（CO₂の取り込み口）を開きますが、同時に気孔から水蒸気も出ていきます。乾燥が進むと一般的に樹木は水の消費を抑えるために気孔を閉じ気味にする反面、光合成もあまりできなくなります。しかし、スギは多少土壌が乾燥しても気孔を閉じずに光合成を続けていました。スギは水の節約よりも光合成を優先する水消費型の樹種であることがわかりました。また年輪幅（幹の太り具合）と気候条件との関係から、寒い地域では、冬から春にかけての気温が高いと幹がよく成長することがわかりました。

将来のスギ林の純一次生産量を予測する

想定されているいくつかの気候シナリオのうち、CO₂排出量が少ないRCP2.6と多いRCP8.5の2通りのシナリオで将来のスギ林の純一次生産量を推定し、現在と比較しました。気候変動の進み方は世界で様々な気候モデルで推定されており、その中から代表的な5つを使って計算しました。平均値で見ると、CO₂排出量が少ないシナリオで計算した場合、純一次生産量は西日本の一部で減少し、東日本の冷涼な地域で増加する傾向がみられました。水消費型のスギは乾燥で純一次生産量が減と考えられますが、乾燥以外の環境要因の影響が大きく逆に純一次生産量が増加する地域もでてくる結果となりました。また、5つの気候モデルのうち気温の上昇幅が最

も大きいものを用いた場合、日本の半分以上の地域で純一次生産量が減少する可能性も示されました（図1）。一方で、CO₂排出量が多いシナリオで計算した場合、日本の広範囲で純一次生産量が高まる可能性も示されました。今後明らかにされる光合成の新知見や、温室効果ガスの排出量、気温上昇の大きさによって、今回の推定結果も変わる可能性があります。その点に注意が必要ですが、今回の予測結果は、気候変動に備えて今後の森林管理計画を考えるとときに重要な情報となります。

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「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発（人工林に係る気候変動の影響評価）」による成果です。

文献

- Oosone, Y. et al. (2020) Plant trait database for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* (SugiHinoki DB): Their physiology, morphology, anatomy and biochemistry. Ecol. Res., <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12062>
- Toriyama, J. et al. (2021) Estimating spatial variation in the effects of climate change on the net primary production of Japanese cedar plantations based on modeled carbon dynamics. PLOS ONE, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247165>

専門用語

純一次生産量

光合成によるCO₂の総吸収量から呼吸による放出量を引いたもの

気候シナリオ

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次報告では、政策的な緩和策を前提とした代表的濃度経路（RCP）ごとに8.5、6.0、4.5、2.6の4つの温室効果ガスの排出量のシナリオが想定されています。数値が大きいほど、排出量が多いことを意味します。



写真1 高さ20mのスギ林（約40年生）に設置した降雨遮断施設

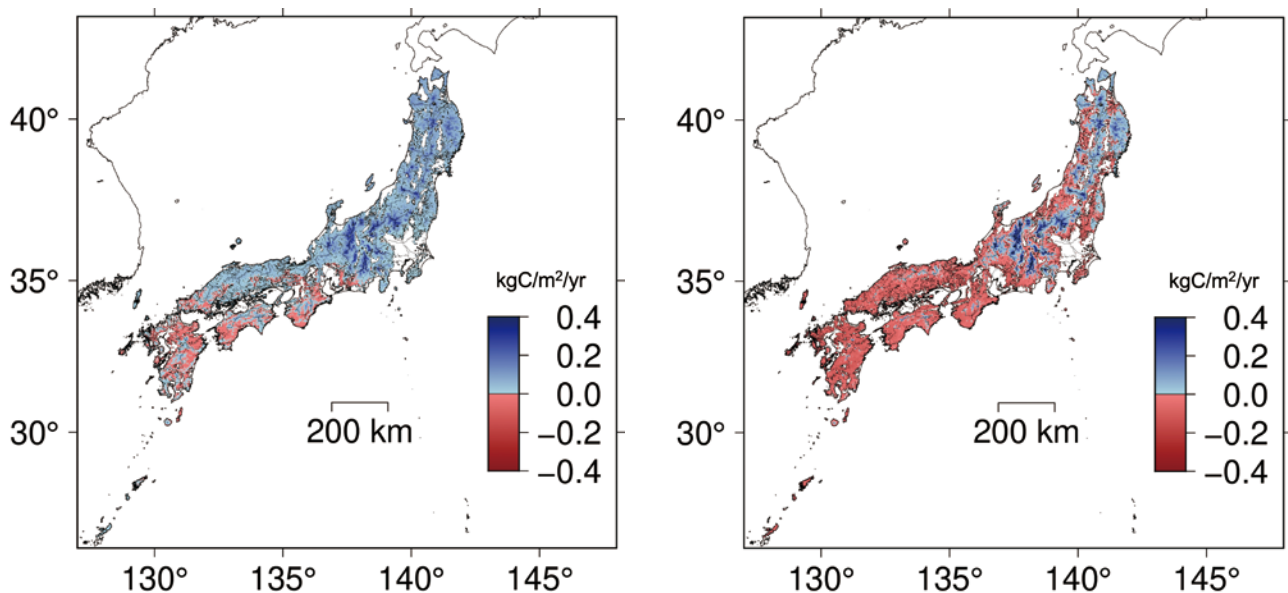


図1 CO₂排出量が少ない（RCP2.6）シナリオの将来のスギ林の純一次生産量の変化
 (将来(2096～2100年)－現在(1996～2000年))。青色が増加、赤色が減少。
 (左) 世界の5つの研究機関が予測した気候モデルで進む場合の推定の平均値。
 (右) 5つの中で気温上昇が最も大きいと予測された気候モデルのように進む場合。
 計算結果は <https://zenodo.org/record/5105060> からダウンロードできます。



図2 パンフレット

「気候変動が人工林に及ぼす影響を予測する」は
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/4th-chuukiseika36.html>
 からダウンロードできます。

AI を活用して高精細な森林土壌炭素貯留量の日本地図を作成



立地環境研究領域 山下 尚之・石塚 成宏・橋本 昌司・大曾根 陽子・川西 あゆみ・

相澤 州平・今矢 明宏・平井 敬三・森貞 和仁・田中 永晴

震災復興・放射性物質研究拠点 三浦 寛 森林防災研究領域 南光 一樹 関西支所 金子 真司

九州支所 酒井 佳美 農業・食品産業技術総合研究機構 稲富 素子 鹿児島大学 鶴川 信

国土地理院 岩橋 純子 国際緑化推進センター 高橋 正通

森林土壌は温室効果ガスである二酸化炭素の重要な吸収源です。日本の森林は山地に分布し、地形や地質、水分環境が複雑なために土壌炭素貯留量を詳細に推定することは困難でした。我々は、AIを活用して新たに土壌炭素貯留量を推定するモデルを開発し、高精細な森林の土壌炭素貯留量の日本地図を作成しました。この地図から北海道、東日本や主要な火山の近傍、また小流域スケールで見ると尾根や斜面下部で土壌炭素貯留量が大きいことがわかりました。この地図を農地の土壌炭素貯留量地図と統合して国連食糧農業機関（FAO）に提供し、地球土壌有機態炭素地図の日本部分として公開しました。現在、この地図は気候変動モデルの重要な基盤情報として活用されています。

成果

森林の土壌における炭素の貯留

土壌は陸域最大の炭素貯留の場であり、気候変動に影響が大きい大気中の二酸化炭素の吸収源として注目されています。適切に気候変動影響の緩和・適応策を立てるには、どこに、どの程度の炭素が土壌にため込まれているのかを、全国で正確に把握することが重要です。ところが、主に平地にある農耕地に比べて、森林は山地に多く分布するために地形や地質、水分等の立地環境が非常に複雑です。土壌の炭素貯留量はこれらに強く影響されるため、日本の森林において正確に分布を把握することは困難でした。

地形や気象から土壌炭素貯留量を推定する技術

近年、土壌炭素貯留量と、地形・気象・植生等の土壌生成因子（図1）との強い関係性を利用したデジタル土壌マッピング技術が急速に発展してきました。これは、衛星リモートセンシング技術により高精細な土壌生成因子データが容易に入手できるようになったことに加え、AI（機械学習モデル）の発達で土壌炭素貯留量の推定精度が飛躍的に高まったためです。

日本の森林における土壌炭素貯留量の分布

このデジタル土壌マッピング技術を用い、林野庁森林吸収源インベントリ情報整備事業の森林土壌炭素蓄積量調査結果（図2）のうち土壌炭素濃度、1m²当たりの土壌量、石礫率を教師データとして、日本の森林（約23万km²）における0-5、5-15、15-30 cmの深さの土壌炭素の貯留量を予測して地図化しました。この地図は従来の統計的推定手法と比較

して、推定精度が約20%向上し、全国、地域、小流域の異なるスケールでも空間変動を良好に再現できました。全国スケールで見ると北海道、東日本や主要火山の近傍（図3）に、小流域スケールでは尾根や斜面下部（図4）に、土壌炭素がより多く貯留していることがわかりました。

土壌炭素貯留量地図の活用

土壌炭素貯留量の地図は、気候変動モデルの基盤情報として活用され、その結果は地球規模や国家スケールの吸収源対策等、気候変動対策の立案に用いられています。また、土壌有機態炭素を指標とした土壌肥沃度の評価などにも利用され、土壌資源の持続的な管理と利用においても重要な情報です。私たちが作成した日本部分の土壌炭素貯留量の空間データはFAOが全世界を対象に作成した地球土壌有機態炭素地図の一部として公開されており、だれでも閲覧・ダウンロードが可能です（図5）。

研究資金と課題

本研究は、林野庁「森林吸収源インベントリ情報整備事業」及び実施課題*「森林における物質・エネルギーの蓄積・輸送パラメタリゼーションの高度化と精緻化」による成果です。

専門用語

デジタル土壌マッピング技術：ある地点で調査した土壌の測定値を面的に広げて地図化するための技術。地形・気象等の土壌生成因子を用いて未調査地点の測定値を推定する。

*森林総合研究所実施課題

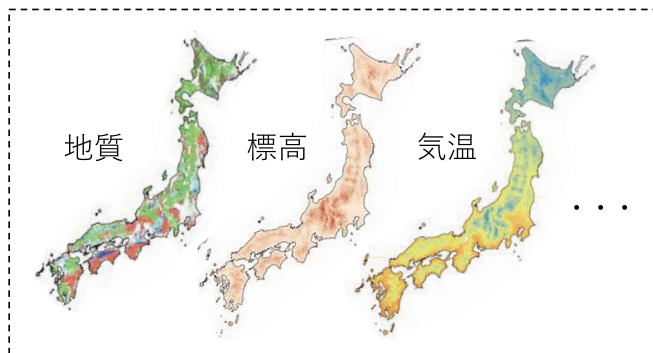


図1 土壌の炭素貯留量を推定するために必要な土壌生成因子の例

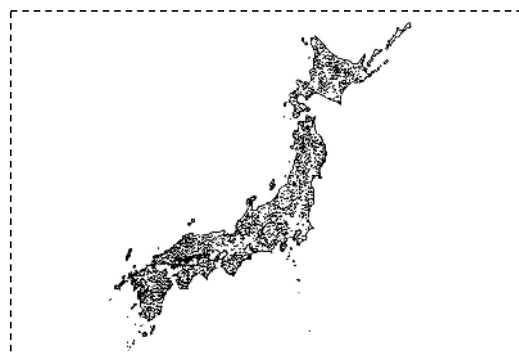


図2 全国約2300地点の土壌調査地点において土壌炭素貯留量を測定

AIによる推定

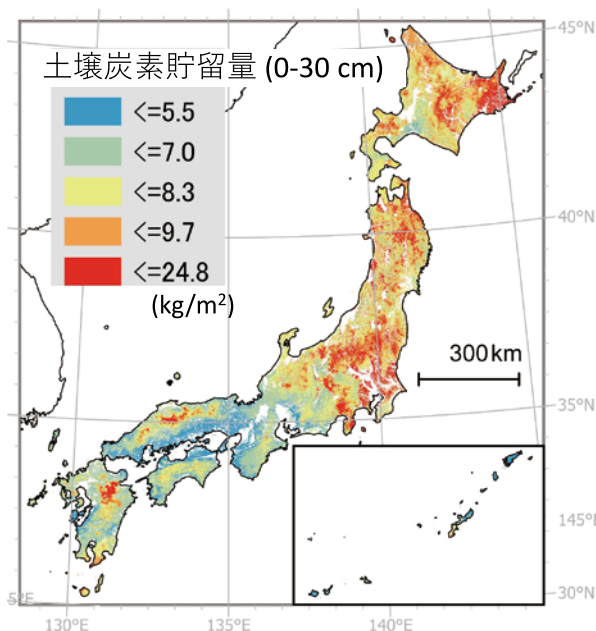


図3 全国の土壌炭素貯留量

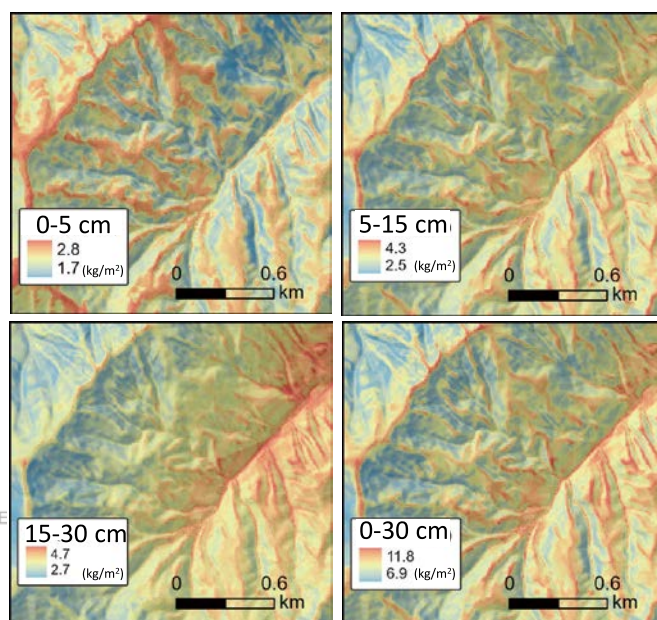


図4 山間部（小流域）における深度別の土壌炭素貯留量

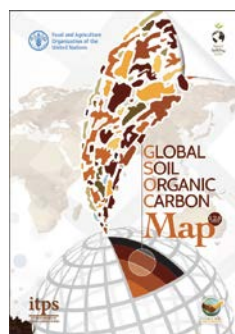
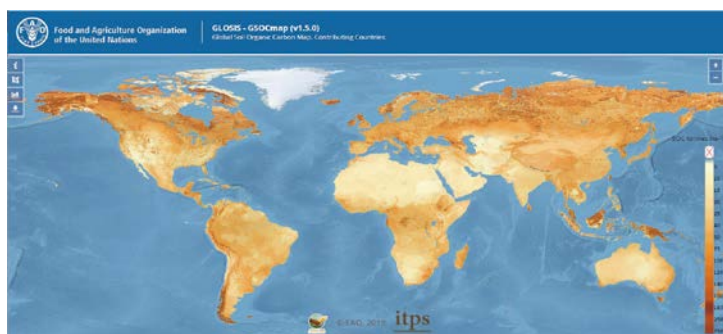


図5 地図の一部を提供したFAOの地球土壌有機態炭素地図のwebサイトとパンフレット
(<http://54.229.242.119/GSOCCmap/>)

中央アマゾン熱帯林で択伐施業の持続可能性を検証する



四国支所 大谷 達也 東北支所 梶本 卓也
木材加工・特性研究領域 大橋 伸太 国際農林水産業研究センター 諏訪 鍊平

森林伐採による熱帯林の減少や劣化が、地球規模での炭素循環や気候変動に悪影響を及ぼすことが危惧されています。そのため、木材を利用しつつ気候変動を抑制する働きも喪失させないよう、伐り残される森林への影響を最小限に抑える低インパクト択伐施業に期待が寄せられています。しかし、択伐された森林が実際にどのように回復するかは明らかにされていませんでした。そこで、アマゾン中央部の択伐施業地で森林の地上部バイオマスの変化を追跡したところ、伐採後およそ14年でもとのレベルにまで回復することがわかりました。ただし森林の構造がもとに戻るには、さらに長期間が必要なることも明らかになりました。

成果

伐採される「地球の肺」

日本にもマサラドゥーバやイペなどのアマゾン産の木材が輸入されています。これらの木材は天然林から抜き伐り（択伐）することによって生産されています（図1）。一方で、地球の肺ともいわれ地球規模の炭素循環に影響するアマゾン熱帯林が択伐によって減少・劣化すると、地球全体の気候にも悪影響を及ぼすことが危惧されています。熱帯林での持続的な木材生産と炭素循環機能の維持とのバランスを見極めるためには、択伐を受けた森林がどのように回復するのか正確に知る必要があります。

アマゾン中央部での調査

そこで、これまでに調査事例がほとんどなかったアマゾン中央部において、民間会社によって択伐された森林を試験地にして、伐採後の樹木のバイオマスの経時的な変化を調べました。ここではブロックに区切られた森林を1997年から順番に択伐していますので、択伐された年の異なるブロックを調べれば、択伐のあとにどのように森林が変化していくのか、一度に調べることができます。私たちは、択伐後1年から11年経ったブロックに調査区を設置し、3～4年おきに計3回、樹木の本数と直径を繰り返し測定しました。隣接する保護林でも同様に調査し、択伐されていない森林の平均的なバイオマスも把握しました。また、通常は不規則な形のため測定することが困難な板根をもつ樹木の直径を簡便に推定する方法を開発しました（図2）。その結果、伐採後の経過年数とバイオマスとの関係から、伐採後およそ14年でバイオマスはもとのレベルに戻ると推定されました（図3）。ただし、樹木の大きさごとにバイオマスをみると択伐林と保護林とはその内訳が大きく異なっており、森林の構造まではもとの姿に戻っていないこともわかりました（図4）。

木材利用とのバランス

ブラジルでは、同じ場所の森林を繰り返し択伐するには25年から30年の期間をあげることが法律で定められています。また、今回調査した択伐施業地では入念な管理計画を立て、ヘクタールあたり平均2本ほどというとても穏やかな択伐を行っています。調査の結果から、インパクトを最小限に抑えた丁寧な択伐を行えば、残された樹木が成長することで、森林のバイオマスは次の択伐までに回復できることが確認されました。今後は、択伐後に森林の構造までもとに戻るにはどれくらいの期間が必要か調べていく必要があります。

研究資金と課題

本研究は、SATREPS 課題「アマゾンの森林における炭素動態の広域評価」、および JSPS 科研費（JP16H05791）「アマゾン熱帯林における低インパクト型択伐施業の可能性：樹種の成長特性に基づく検証」による成果です。

文献

- Otani T. et al. (2018) Recovery of above-ground tree biomass after moderate selective logging in a central Amazonian forest. *iForest*, 11, 352–359.
- Otani T. et al. (2019) Use of SfM-constructed 3D models to estimate biomass of buttressed trees in the central Amazon. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 39, 210.

専門用語

バイオマス：面積あたりの生物の量。ここでは1ヘクタールあたりの樹木の乾燥重量のこと。そのおよそ半分が炭素の量になります。



図1 天然林につけられた伐採路



図2 大きな板根をもつ樹木

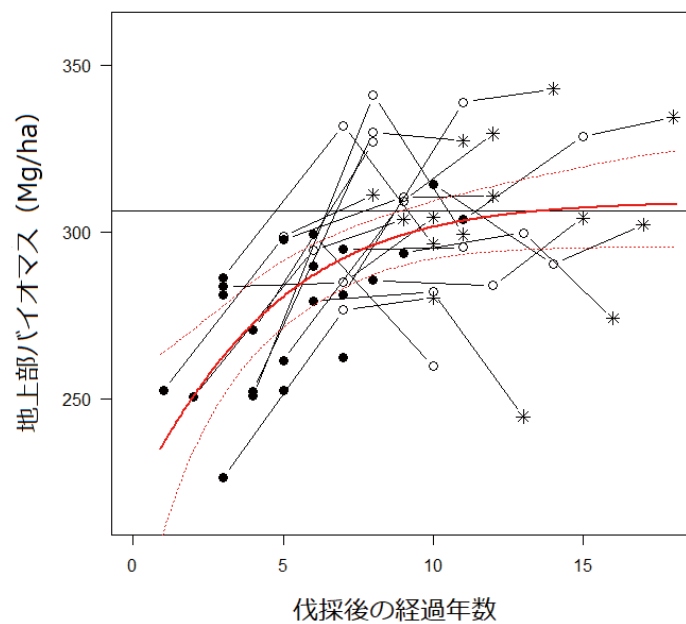


図3 択伐後の経過年数とブロックごとの地上部バイオマスとの関係

択伐後にバイオマスが増加していく様子を数式で表し（赤い曲線）、隣接する保護林と同等にまで（黒い横線）回復するのに14年かかると推定されました。

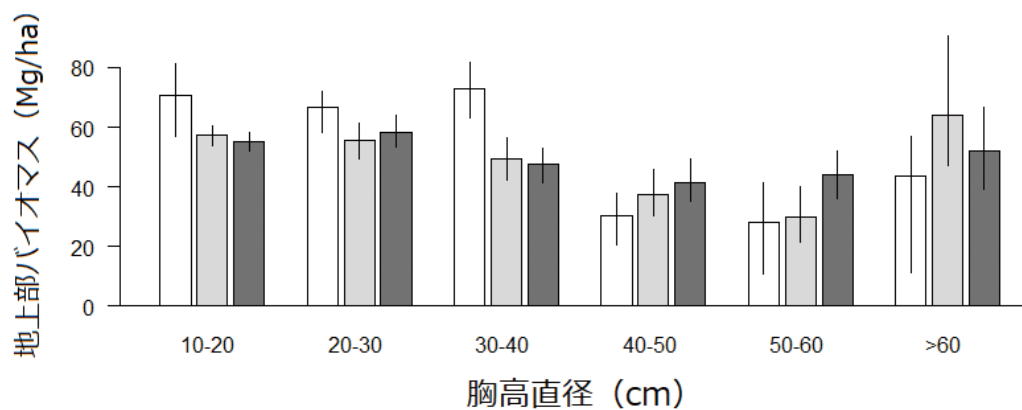


図4 保護林（白）、択伐後10年未満のブロック（薄い灰色）、および択伐後10年以上のブロック（濃い灰色）における樹木の大きさ（幹の直径）ごとのバイオマス

保護林と択伐林ではバイオマスの内訳が異なっていました。

途上国の環境条件にあわせた森林減少・森林劣化のモニタリング手法を開発する



森林植生研究領域 宮本 和樹・佐藤 保 研究ディレクター 平田 泰雅
森林管理研究領域 齋藤 英樹
元国際連携・気候変動拠点 Luis Alberto Vega Isuhuaylas

途上国の森林減少・森林劣化による温室効果ガス排出の削減等の取り組みであるREDDプラスの推進のため、地上調査とリモートセンシング技術により、途上国における様々な環境条件に応じた実用的な森林炭素蓄積量の計測手法を開発しました。また、森林炭素蓄積量計測結果の検証システムを構築し、衛星データを用いて作成した森林分布図の精度評価を途上国が行えるようにしました。さらに、排出削減量のモニタリングに関して4つのステップからなるシステム設計手順を作成しました。

成果

REDDプラスを推進する技術開発

気候変動の影響を緩和するための方策として、途上国の森林減少・森林劣化による温室効果ガス排出量の削減等の取り組みであるREDDプラスの推進が重要です。そのためには、途上国の様々な環境条件に応じた実用的な森林炭素蓄積量の計測手法を確立し、得られた計測結果の精度を検証する技術が必要です。森林炭素蓄積量の計測は主要な温室効果ガスである二酸化炭素の排出削減量を算出するための基本情報となります。また、排出削減量のモニタリングシステムに関する設計手順のマニュアル化も重要です。これらの点について技術開発を進めました。

様々な環境条件下の森林計測手法の確立と計測結果の検証システムの構築

途上国の様々な環境条件に応じた実用的な森林炭素蓄積量の計測事例として、異なる標高帯に分布する森林の炭素蓄積量について、地上調査とリモートセンシングによる計測を行いました。地上調査では、伐採などの影響が異なる2つの森林タイプについて標高にともなう炭素蓄積量の変化を示しました（図1）。リモートセンシングによる広域評価では、複雑な地形と被覆面積が小さいことから検出が困難な山岳地域の森林について、機械学習により炭素蓄積量の小さい森林でも高精度に分類することが可能になりました（図2）。

REDDプラスでは、森林の炭素蓄積量を広域で計測すると同時に、その計測結果について検証し精度を示す必要があります。このため本研究では、森林炭素蓄積量推定結果の検証システムを構築し、途上国が、衛星データを用いて作成した森林分布図の精度評価を実行できるようにしました。また検証地点における森林の状況を効率的に把握するために無人航空機（UAV）による現地調査技術を開発し、アクセスが困難な地域において効率的な調査が可能になりました（図3）。

モニタリングシステム設計手順の提示

REDDプラスにおける排出削減量のモニタリングを効率よく進めるため、4つのステップからなるシステム設計手順を作成しました（図4）。モニタリングを実施するためには、プロジェクトの実施を想定している相手国のREDDプラスに関連する情勢や森林減少及び森林劣化のドライバー（発生要因）に関する情報を正確に把握する必要があります。また、モニタリングを長期にわたり、確実に実施していくための方法論の見直し作業も重要であり、住民参加型のモニタリングの形成や森林劣化による排出量を把握できるシステム構築が求められています。

研究資金と課題

本研究は、林野庁補助事業「REDD+推進民間活動支援事業」による成果です。

文献

Miyamoto, K. et al. (2018) Variation in tree community composition and carbon stock under natural and human disturbances in Andean forests. Peru, *Forests* 9, 390.
Vega Isuhuaylas, L. A. et al. (2018) Natural Forest Mapping in the Andes (Peru): A Comparison of the Performance of Machine-Learning Algorithms, *Remote Sens.*, 10, 782.

専門用語

REDDプラス：途上国における森林減少・森林劣化からの温室効果ガスの排出を削減する取り組み（REDD）に加え、森林保全による排出抑制等（プラス活動）に対して経済的なインセンティブ（資金やクレジット）を与えるメカニズム。

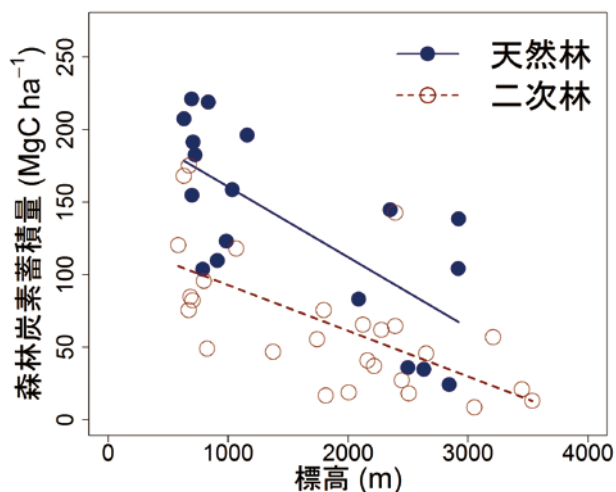


図1 ペルーでの標高にともなう森林炭素蓄積量の変化
天然林、二次林いずれにおいても、森林炭素蓄積量は標高によって大きく異なることを示しました。

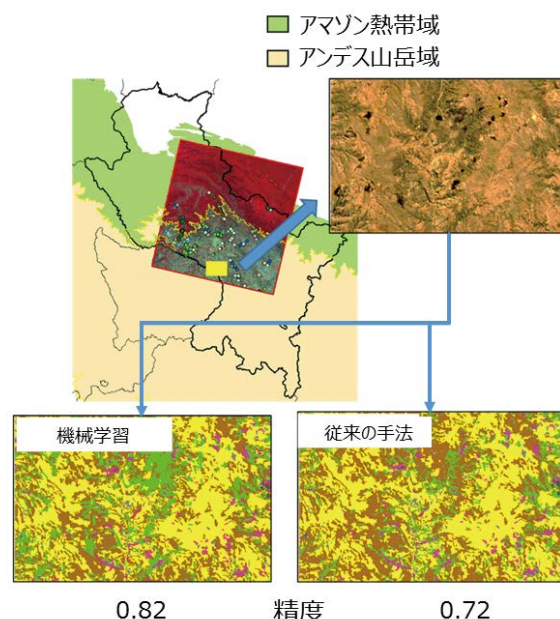


図2 機械学習と従来手法によるペルーの土地被覆分類の比較

機械学習（ランダムフォレスト）による分類により精度よく森林などの土地被覆分類ができることを示しました。

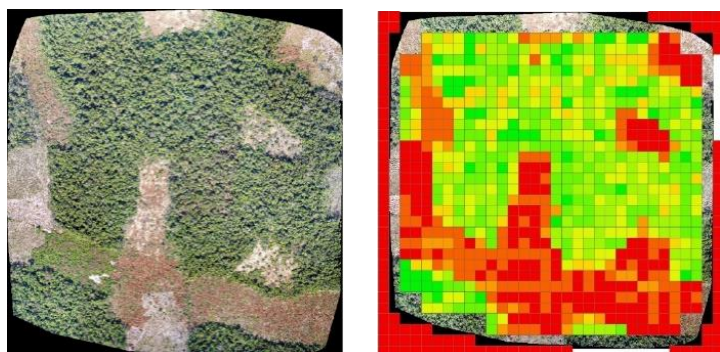


図3 無人航空機（UAV）から撮影した写真（左）と推定された森林地上部現存量（右、暖色ほど現存量が低い）

アクセス困難な場所での調査に役立ちます。

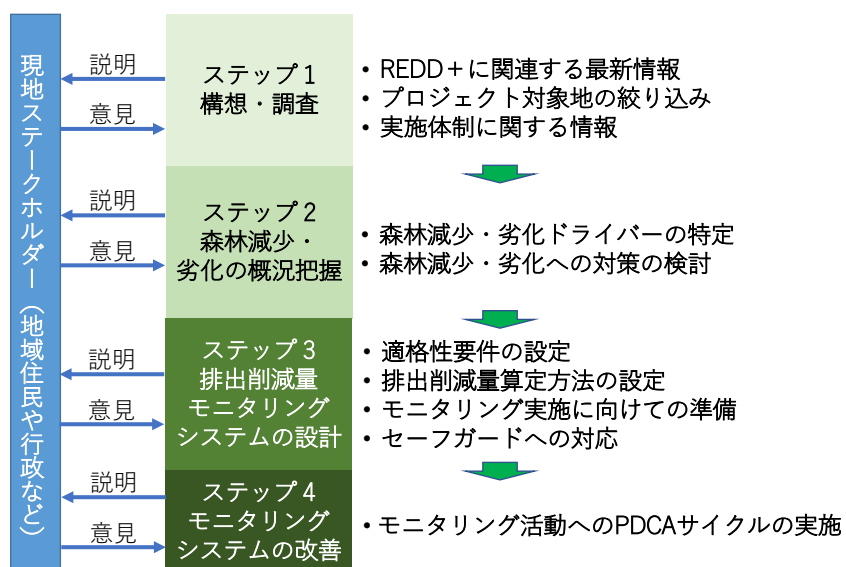


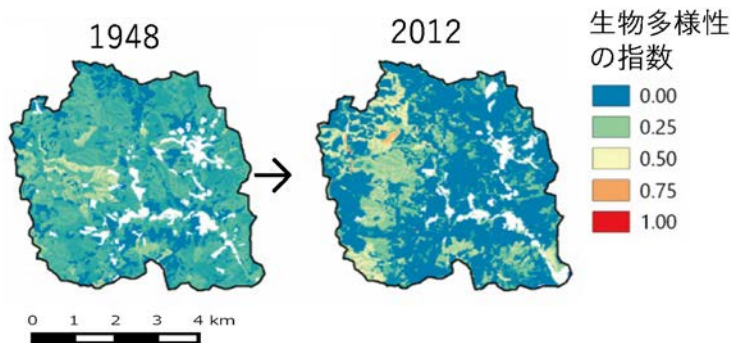
図4 排出削減量モニタリングシステムの設計手順を示したフローチャート
REDDプラスのプロジェクト設計の参考として役立ちます。

生物多様性の保全等に配慮した 森林管理技術の開発

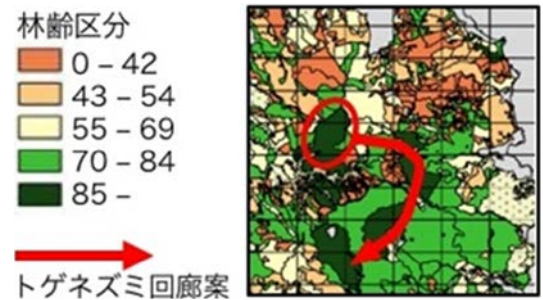
生物多様性の保全などの森林の多面的機能を発揮するには、その定量的評価手法、機能の高い森林へと誘導するための技術、そして絶滅危惧種の統合的保全手法の開発が必要です。また、森林に広域に発生する病虫害に対して環境負荷の少ない総合防除技術を高度化することが必要です。そこで以下の2つの課題に取り組みました。

アウ a 生物多様性保全等の森林の多面的機能の評価及び管理技術の開発

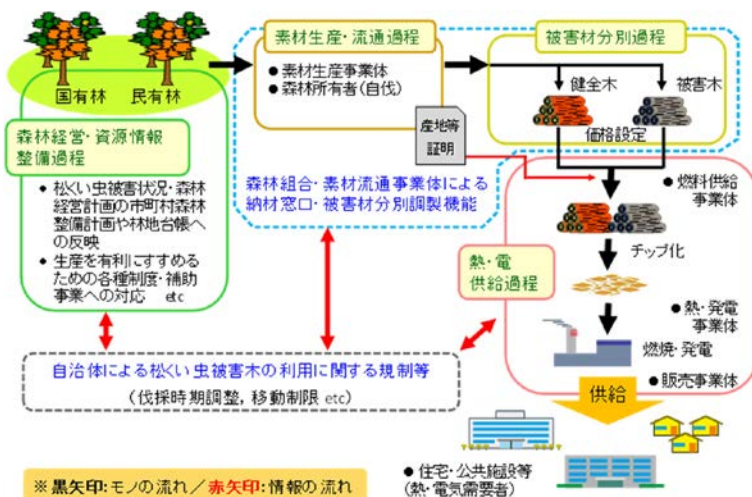
アウ b 環境低負荷型の総合防除技術の高度化



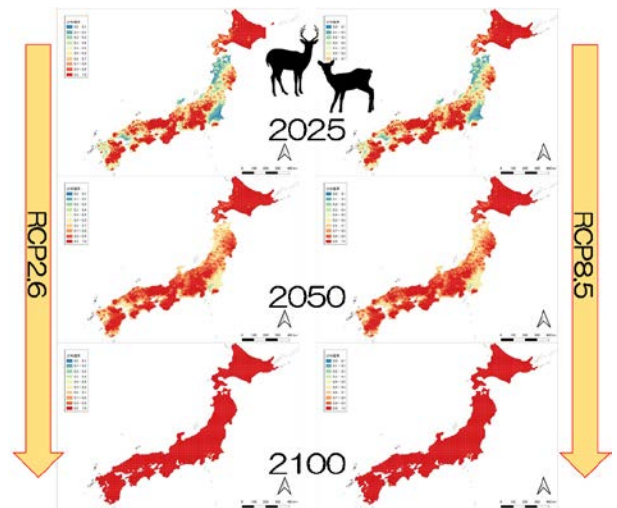
アウ a 森林の生物多様性保全機能の評価するため森林の構造の複雑さを示す指数を開発し、戦後から現在までの変遷を茨城県北部で推定しました。



アウ a やんばるの絶滅危惧種オキナワトゲネズミの保全・回復のための回廊となる林分配置を提案しました。



アウ b 松くい虫被害材を地域で利用している取組を調査し、木材やチップと情報の流れを模式化しました。



アウ b ニホンジカの分布拡大モデルを開発しました。このモデルは捕獲など分布拡大を抑制する取組の効果を判定するのに役立ちます。

トドマツ人工林の保持伐は伐採直後の生物多様性保全に効果がある



北海道支所 尾崎 研一・山中 聡・上田 明良 四国支所 山浦 悠一・佐藤 重穂
九州支所 佐山 勝彦 北海道立総合研究機構 明石 信廣・雲野 明・対馬 俊之

戦後植栽された多くの人工林が主伐の時期を迎え、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持伐を、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」を実施し、伐採コストと伐採1～数年後の鳥類、植物、昆虫の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、保持伐は木材を生産しつつ、伐採直後の生物多様性保全に効果があることが分かりました。

成果

保持伐とは

保持伐（または保残伐）とは、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です。従来の伐採方法に比べて、残す木を生物多様性の観点から選ぶ点と、残すものは永続的に残す点で異なります。近年、生物多様性に配慮した主伐方法として保持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、国内初の保持伐の大規模実証実験として「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年から実施しています。

実験の概要

本実験では、50年生以上の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通りの処理を3セット、合計23（小面積皆伐のみ2セット）の実験区を設置しました（図1）。単木保残区では人工林内に天然更新で混交していた広葉樹林冠木を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。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、下刈りを行いました。

木材生産性と生物多様性への影響

2014年から2017年までに、伐採コストと伐採1～数年後の生物多様性を調べました。伐採コストに関しては、保持伐では皆伐に比べ、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、これらの工程が集材や土場での作業などを含む全体のコストに占める割合が小さいため、全体のコストの増加は最大でも約5%にとどまりました。

次に生物多様性についてです。鳥類では、森林性種のなわばり密度は未伐採の人工林や天然林で高く、伐採した皆伐区、単木保残区、群状保残区で低くなりました。しかし単木保残区では保残量が多いほどなわばり密度が増加し、伐採による減少が抑制されました（図3）。地表性甲虫類でも同様に、森林性種の個体数は伐採によって減少しましたが、単木保残

の保残量が多いほど伐採による減少が抑えられました（図4）。また、群状保残の保残部分では森林性種の個体数が伐採前と変わりませんでした。一方、林床植物では、単木保残区では地ごしらえなどによる地表の変化により、荒れ地を好む種が増加しましたが、群状保残の保残部分では伐採前から種構成は変化しませんでした。以上の結果から、生物群によって効果に違いがあるものの、広葉樹の単木保残は伐採による森林性種への悪影響を和らげ、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、保持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、保持伐の効果は対象とする生物群によって異なるため、実際の施業への適用にあたっては、保全する生物群に対応した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、次の主伐までの約50年間の長期的な継続調査をめざします。

専門用語

森林性種：主に森林に生息する種

研究資金と課題

本研究はJSPS科研費（JP25252030、JP16H03004）、および三井物産環境基金（R12-G2-225、R15-0025）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 Forestry and Forest Products Research Institute*. 17, 91-109.

Yamanaka S. *et al.* (2021) Effects of dispersed broadleaved and aggregated conifer tree retention on ground beetles in conifer plantations. *Forest Ecology and Management*, 489: 119073.



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 単木小量保残区（左）と単木中量保残区（中）、単木大量保残区（右）

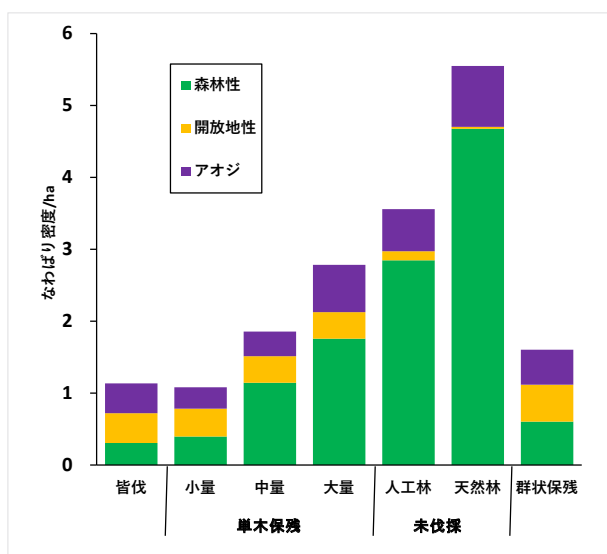


図3 実験区における伐採1年後の鳥類のなわばり密度

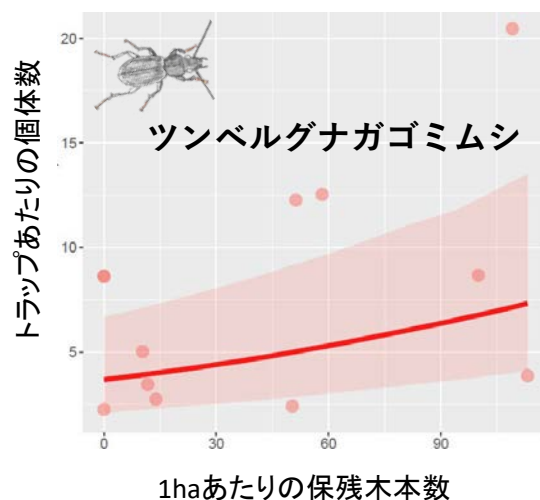


図4 単木保残の保残量と地表性甲虫類の個体数の関係。地表性甲虫類の代表として最も個体数の多いツンベルグナガゴミムシの例を示しました。色が塗られた部分は推定値の幅を表しています。

ブナは窒素を巧妙にやりくりして実をつける



植物生態研究領域 韓 慶民・壁谷 大介

四国支所 稲垣 善之

多くの樹木では、種子生産量が大きく年変動する豊凶現象が古くから知られています。しかし、豊凶が起こるメカニズムはよくわかっていません。本研究では、ブナの種子生産において、土壌からの窒素の吸い上げや、他器官からの窒素の転流が種子の成熟に関係していることを明らかにしました。この成果は、ブナなどの堅果類樹木の結実間隔や着果量の予測に役立つだけでなく、今後の気候変動に対応したブナ林の天然更新や保全技術の開発、さらにはツキノワグマなどブナの堅果を餌とする野生生物の保護管理手法の策定など、幅広い分野で応用が期待されます。

成果

ドングリの結実豊凶現象の謎

秋になると、人里にクマが出没したというニュースが新聞やテレビで取り上げられることがあります。そして、しばしば「ブナ科樹木のドングリ（図1）が不作で、餌を求めて人里まで行動圏を拡げたため」と、その原因が説明されます。このように、樹木種子の豊凶現象は動物の行動と関連して話題になることがありますが、豊凶を引き起こすメカニズムの詳細は明らかにされていません。私たちは、種子を作るのに必要な窒素をどれだけ獲得できるかがブナの結実量を決定していることを明らかにしてきました。しかし、その窒素をどのように獲得しているかは未解明のままでした。そこで、土壌から吸い上げた窒素がいつどのように各器官の成長に使われるのかを窒素の安定同位体（ ^{15}N ）を用いて調べ、結実した木としなかった木で比較しました（図2）。

結実に必要な窒素のやりくり

結実した木の初夏の時期では、土壌から吸い上げた窒素の64%がドングリを包んでいる殻斗の成長に使われ、残りは葉の成長に利用されました（図3）。一方、結実しなかった木では、吸い上げた窒素のほとんどが葉の成長に利用されました。また、結実しなかった木では吸い上げた窒素の総量が少なく、結実した木としなかった木とでは葉に配分された窒素の量に違いはありませんでした。これらのことから、葉や枝の成長期にあるブナでは、土壌から吸い上げる窒素を増やすことで結実に必要な量を獲得していることが分かりました。

枝と殻斗の成長が終了した晩夏以降では、結実した木では吸い上げた窒素の70%が殻斗の中で発達中の種子に配分されました。また、葉と殻斗から種子への窒素の転流がみられました。その結果、殻斗の中の種子は大きく成長して窒素濃度も倍増し、充実種子となりました。一方、結実しなかった木では、吸い上げた窒素のほとんどが葉に配分されました。これらのことから、ブナでは結実に必要となる窒素を獲得するため、土壌から吸い上げる量を増やすとともに、他の器官からも転流させていることが分かりました。

今後の展望

2世紀以上にわたり神秘的なベールに包まれていた樹木種子の豊凶現象は、本研究の成果も含めて次第に明らかにされつつあります。全貌の解明に向けた鍵のひとつとしては、結実の起点となる前年の花芽の分化に関する遺伝子発現量の制御と窒素等の資源量との関係を明らかにすることがあげられます。

以上の成果は、ブナなどの堅果類樹木の結実間隔や着果量の予測だけでなく、今後の気候変動に対応したブナ林の天然更新や保全技術の開発、さらにはツキノワグマなどブナの結実に依存する野生生物の保護管理手法の策定など、幅広い分野で応用が期待されます。

研究資金と課題

本研究はJSPS科研費（JP21380103）、（JP25292094）、（17H03837）の助成を受けたものです。

文献

- Han, Q.M. et al. (2017) Influence of reproduction on nitrogen uptake and allocation to new organs in *Fagus crenata*. *Tree Physiol.* 37, 1436-1443.
- Han, Q.M. et al. (2020) Reproduction affects partitioning between new organs of a pulse of ^{15}N applied during seed ripen *Fagus crenata*. *ing in Fagus crenata*. *New For.* 51, 739-752.

専門用語

殻斗（かくと）：ドングリの一部または全体を包んでいる包状器官のこと

転流：成熟葉などで利用されていた糖やアミノ酸などが、成長中の若い器官などへ運搬されること

安定同位体（ ^{15}N ）：原子量14の窒素（ ^{14}N ）と共に天然に微量に存在し、放射性でない原子量15の窒素のこと



図1 ブナの殻斗（ドングリの全体を包んでいる包状器官）。この中に種子が2個あり、殻斗や葉から窒素をもらいながら成熟していく

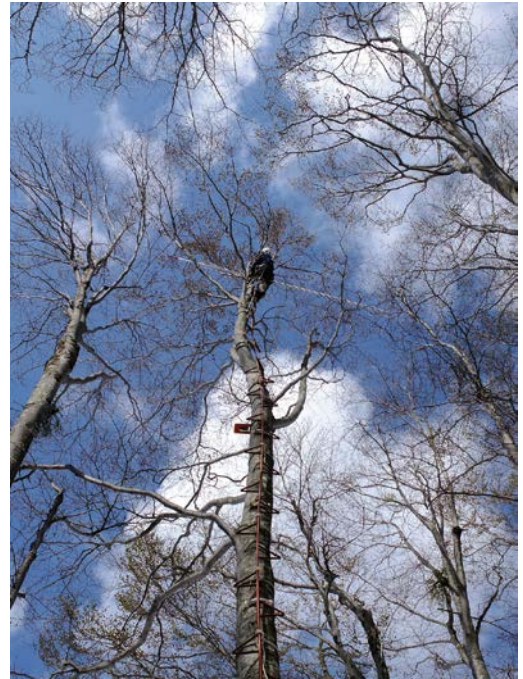


図2 ブナ個体の幹に取付けた梯子を利用して、樹高20m以上の樹冠から葉やドングリを採取

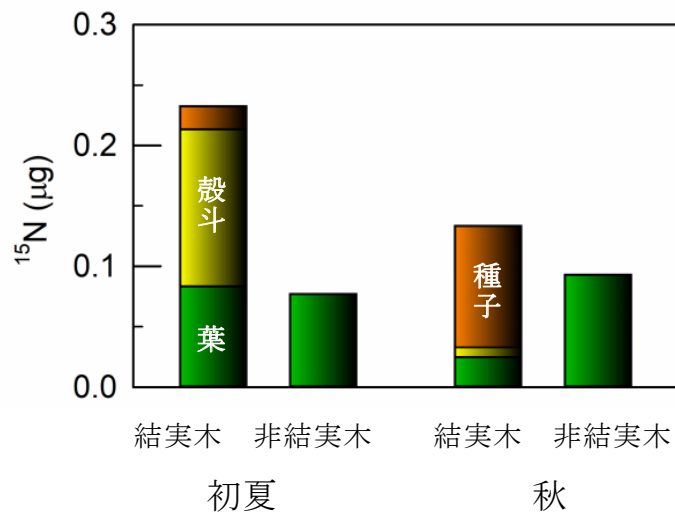


図3 土壌から吸い上げた窒素 (^{15}N) の個体内での各器官への配分。配分量は結実の有無や季節によって異なる。初夏までの期間は、種子を包む殻斗に窒素が配分され、晩夏から秋にかけては主に種子に配分されるとともに殻斗の窒素が種子に転流する。

天敵微生物を使ってシイタケの害虫の被害を防ぐ



森林昆虫研究領域 北島 博・向井 裕美 きのこ・森林微生物研究領域 小坂 肇
徳島県立農林水産総合技術支援センター 阿部 正範・吉住 真理子・中野 昭雄
群馬県林業試験場 松本 哲夫・和南城 聡 佐賀県林業試験場 多良 勇太・宮崎 潤二
大分県農林水産研究指導センター 石原 宏基・彌田 涼子・米倉 邦明
(株) エス・ディー・エス バイオテック 田辺 博司

シイタケの栽培方法には、菌床栽培と原木栽培の2種類がありますが、どちらの栽培方法でも害虫が発生します。シイタケを含む栽培きのこ類には自然食品、健康食品というイメージがあることから、害虫の防除における化学農薬の使用は避けられています。そこで、自然界に生息する天敵微生物を用いてシイタケ害虫を防除する方法を検討しました。その結果、製剤として販売されている天敵微生物のうち、天敵線虫、天敵細菌、天敵糸状菌の製剤がシイタケ害虫の防除に有効であることがわかりました。そして、これらの製剤をもちいた防除方法を確立するとともに農薬として登録し、シイタケ栽培の現場で使用できるようにしました。

成果

シイタケ栽培で発生する害虫

シイタケ栽培には、おが粉と栄養剤をまぜたものにシイタケ菌を接種して培養した“菌床”を使った菌床栽培と、丸太にシイタケ菌の種菌を接種して作る“ほだ木”を使った原木栽培という2つの方法があります。シイタケに害虫がつくことはあまり知られていないようですが、どちらの栽培方法でも多くの種類の害虫が発生します（図1）。菌床栽培では、シイタケそのものや菌床に対する食害に加えて、虫体が商品に付着したまま販売される“異物混入”の発生が深刻です。原木栽培では、丸太に接種したシイタケ種菌や丸太そのものが食害されて、ほだ木が作れなくなることに加え、異物混入の発生が深刻です。

シイタケ害虫に効果のある天敵微生物製剤

シイタケを含む栽培きのこ類には自然食品、健康食品というイメージがあることから、害虫の防除に化学農薬の使用は避けられています。一方、自然界に生息する天敵であれば害虫の防除に使用したいという、生産者の意向が高まっています。日本では、害虫の防除に有効な天敵微生物を製剤化した、天敵微生物製剤がすでに販売されています。それらには、天敵線虫製剤、天敵細菌製剤、天敵糸状菌製剤などがあります。シイタケ害虫については、本研究の開始時点でシイタケオオヒロズコガに対する天敵細菌製剤とハラアカコブカミキリに対する天敵糸状菌製剤だけが利用可能でした。そこで、これら天敵微生物製剤のシイタケ害虫数種に対する防除効果を調べたところ、天敵線虫製剤が重要な菌床害虫であるナガマドキノコバエ類を含む複数の害虫に有効であること、天敵細菌製剤がムラサキアツバやコクガにも有効であることがわかりました（表1）。

天敵線虫製剤の実証試験

実際のシイタケ栽培施設で、菌床栽培の害虫フタマタナガマドキノコバエの幼虫を防除する実証試験を行いました。その結果、天敵線虫製剤の施用によって幼虫の急激な増加を抑制できたことに加え、食害されるシイタケの割合を減らすことができました（図2）。また、食害が減少することによる収益の増加は、天敵線虫製剤の散布によるコスト増を上回ることもわかりました。

天敵微生物製剤の農薬登録

国内では、天敵微生物製剤といえども農薬として登録されない限り、生産者は栽培現場で使用することができません。本研究で効果が確認された天敵微生物製剤のうち、ナガマドキノコバエ類、ムラサキアツバ、ハラアカコブカミキリ（幼虫）に対する線虫製剤、およびムラサキアツバに対する細菌製剤を農薬として登録し、シイタケ栽培の現場で使用できるようにしました（表1）。使用法の詳細については、下記の「しいたけ害虫の総合防除 改訂第2版」をご覧ください。

研究資金と課題

本研究は、生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」（高品質シイタケ安定生産に向けた天敵利用によるケミカルレスな害虫激減技術の開発）による成果です。

参照サイト

「しいたけ害虫の総合防除 改訂第2版」
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/4th-chuukiseika28.pdf>



図1 主要なシイタケ害虫とその被害

表1 シイタケ害虫に効果のある天敵微生物製剤とその施用法

天敵微生物製剤	効果のある害虫	効果を確認した施用法	農薬登録*1
線虫製剤 線虫とは、細長い体をもつ生物で土の中に莫大な種類と個体数が生息しています。	ナガマドキノコバエ類	希釈液を菌床に散布	済
	ムラサキアツバ		済
	セモンホソオオキノコムシ		未
	ハラアカコブカミキリ(幼虫)	希釈液をほだ木に散布	済
細菌製剤 細菌とは、1つの細胞で体が構成されている肉眼では見えないほど小さな生き物です。	ムラサキアツバ	希釈液を菌床に散布	済
	コクガ		未
	シイタケオオヒロゾガ類	希釈液を形成種菌に塗布または、ほだ木表面に散布	済*2
糸状菌製剤 糸状菌とは、一般にカビと呼ばれるものです。	ハラアカコブカミキリ(成虫)	ほだ木組に設置	済

*1 農薬登録済の製剤と施用法はシイタケ栽培の現場で使用することができます。

*2 シイタケオオヒロゾガ類の1種シイタケオオヒロゾガに対してシイタケ栽培の現場で使用することができます。

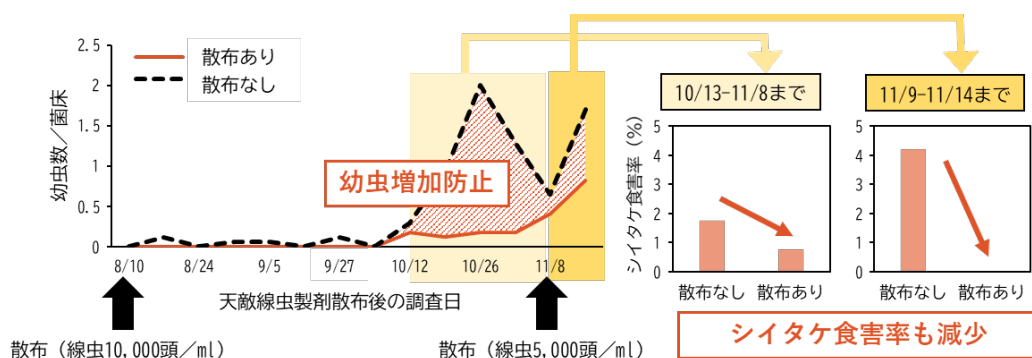


図2 実際のシイタケ栽培施設において天敵線虫製剤を施用した時のフタマタナガマドキノコバエ幼虫の防除効果

天敵微生物製剤では化学農薬のように害虫のほとんどを駆除することは難しいですが、害虫の数を減らすことで被害を抑えることができます。

シカ被害対策グレードアップ術～防鹿柵をめぐる攻防戦～



野生動物研究領域 飯島 勇人・岡 輝樹
多摩森林科学園 林 典子
森林整備センター 渡辺 康文・久保田 拓也

ニホンジカによる造林地被害を防除するため、防鹿柵の設置が一般的に行われていますが、それでも被害を完全に抑え込むことはできていません。柵の機能はシカ以外の動物が接触したり攻撃したりすることで低下し、早急なメンテナンスをしないとシカの侵入を許すことになります。また、造林地に柵を設置してもシカが高密度であるほど被害を受ける苗木の割合が高いこと、柵の仕様によって侵入を防ぐことができるシカ密度の上限も異なることがわかりました。シカの密度に応じた仕様の柵を選択し、立地環境や他動物による攻撃等にも耐えられるように意識して設置することにより、シカ害をより効率的に軽減することができます。

成果

柵に迫る動物たち

防鹿柵はシカによる林業被害を防除する資材として広く用いられていますが、どんなに仕様やマニュアルに忠実に設置したとしても、あとは苗木の成長を待っていただければいいというほどの優れたものではないようです。どのような状況の時に柵はシカの侵入を許すことになるのかを探りました。

全長約2kmの柵を2週間に1回の頻度で、1年の間、点検と修理を繰り返しました。すると、毎回必ずどこかが動物による攻撃等により破損していました。柵周辺に設置した自動撮影カメラの撮影記録から柵に対する動物の行動を「柵を通過」、「柵を攻撃」、「柵に接触」、「柵を観察」の4つに分類したところ、イノシシ、アナグマ、ウサギは柵の下から潜り込んで通過したり、また柵に接触したり壊そうと攻撃したりしていました。シカは時々接触するだけで攻撃はせず、じっと柵を観察しており、他の動物によって開拓された侵入口を探しているようでもありました。

シカの密度と防鹿柵の仕様

防鹿柵の効果はその地域のシカ密度によっても異なると考えられます。全国の水源林造成事業地のデータを解析したところ、シカ密度が高い造林地ほど被害割合が大きくなることわかりました。植栽した幼齢木の被害率を50%未満とすることを目標とした場合、密度が5頭/km²未満の場合には忌避剤だけで目標を達成できましたが、密度が5～20頭/km²では標準的な仕様の柵、20～40頭/km²ではよりしっかりと工夫を施した柵の効果が高いことがわかりました。そして密

度が40頭/km²を超えると防除資材の設置だけでは被害率を50%未満にすることはできませんでした。さらに、防除効果を高めるためには、ステンレス入りで網目が細かいネットを高い位置から地表面を覆うまで設置する仕様の柵が有効でした。こうした仕様の柵を用いることにより、イノシシ、アナグマ、ウサギといった他の動物による攻撃や通過を防ぎ、結果としてシカの侵入を防ぐことができると考えられます。

研究資金と課題

本研究は、実施課題*「野生動物管理技術の高度化」及び交付金プロジェクト**「都市近郊における獣害防除システムの開発」による成果です。

文献

高山夏鈴（他）（2019）シカ防護柵の設置が各種哺乳類の移動に与える影響。森林防疫, 68（5）, 3-10.
飯島勇人（他）（2020）造林地のシカ密度に応じた防除資材の選択基準を明らかにしました。森林総合研究所令和2年度研究成果選集, 19.

専門用語

忌避剤：シカによる食害を防ぐために樹木に散布または塗布し、摂食を阻害する薬剤のこと。ジラム水和剤（製品名：コニファー水和剤）、全卵粉末水和剤（製品名：ランテクター）等が使われている。

*森林総合研究所実施課題

**森林総合研究所交付金プロジェクト

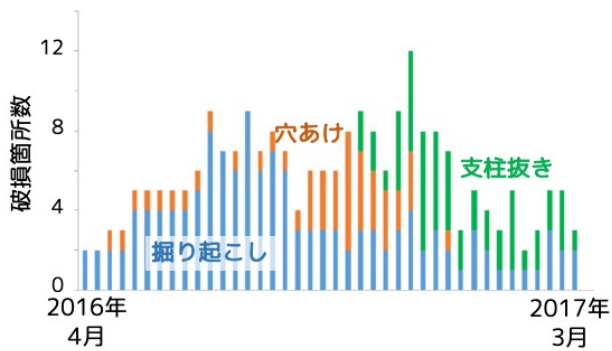


図1 全長約2kmの柵を2週間に1回見回りしたところ、必ずどこかが動物の干渉により破損していました。

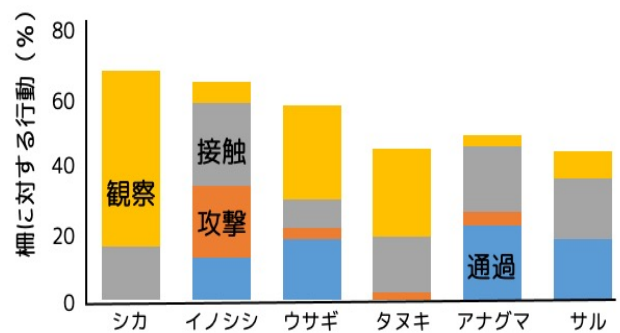


図2 自動撮影カメラの記録からネット柵に対する動物の干渉を4つに分類しました。イノシシ、ウサギ、アナグマはネット下部から潜り込んで柵を通過していました。



図3 ネットの破損部分から潜り込んで侵入するニホンジカ（写真：大谷達也）。

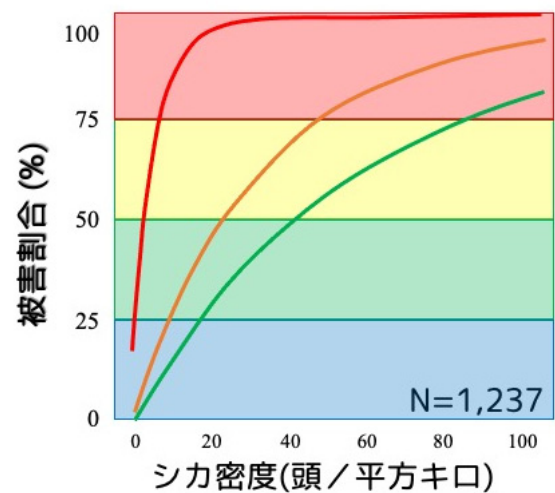


図4 造林地の被害割合はシカ密度が高いほど大きくなります。一般的に被害割合が50%になると、植え直しが必要となります。

赤：最も防除効果が低い仕様
 橙：標準仕様
 緑：最も防除効果が高い仕様

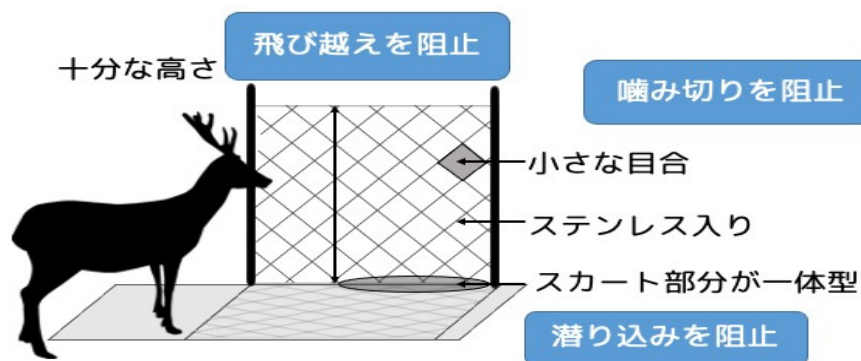


図5 柵をシカ被害に強くするために注意すべきポイント。

持続的かつ効率的な森林施業及び 林業生産技術の開発

森林資源の持続性を確保しつつ、多様なニーズに応じて柔軟かつ持続的に木材を供給するため、多様な森林の施業技術や木材生産技術の確立が求められています。このため、以下の2つの課題に取り組みました。

イア a 地域特性と多様な生産目標に対応した森林施業技術の開発

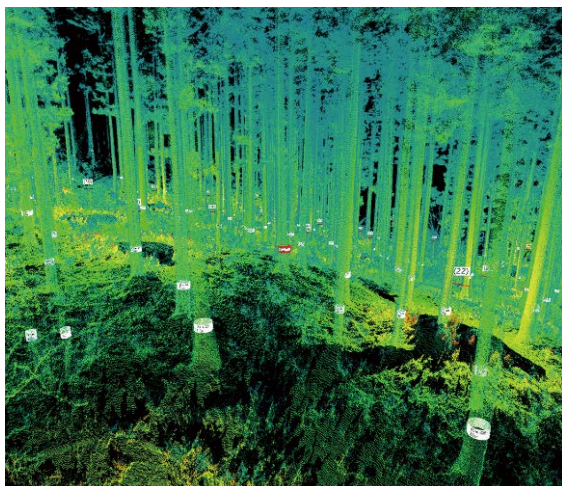
イア b 効率的な森林管理手法及び先導的な林業生産システムの開発



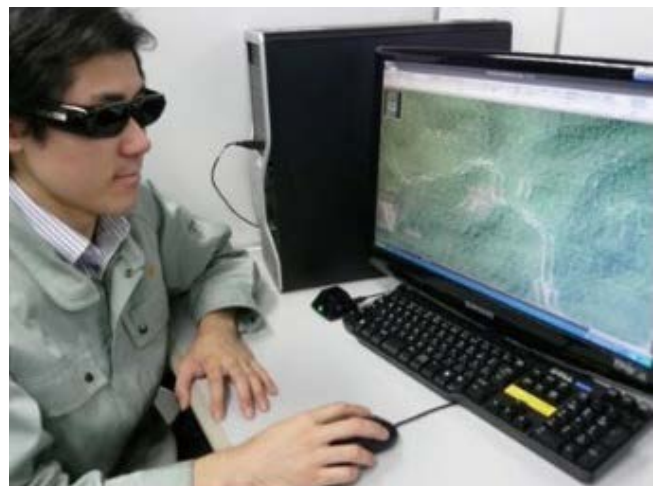
コンテナ苗の育苗技術を高度化しました。



コンテナ苗の自動植栽機を開発しました。



林内レーザー測量による森林の見える化技術を開発しました。



航空写真を用いた材積推定技術を開発しました。

人工林の造林・保育を一連の作業としてコスト削減



研究ディレクター 宇都木 玄 植物生態研究領域 飛田 博順・原山 尚徳・上村 章
森林植生研究領域 八木橋 勉・倉本 恵生 林業工学研究領域 山田 健 新潟大学 梶本 卓也
九州大学 松田 修 住友林業 原 真司 九州計測器 岩倉 宗弘 長野県林業総合センター 大矢 信次郎
秋田県林業研究研修センター 長岐 昭彦 徳島県立農林水産総合技術支援センター 藤井 栄
高知県立森林技術センター 藤本 浩平

国産材の供給力強化と循環利用には、林業用種苗の生産拡大と主伐後の造林・保育の省力化が重要です。コンテナ苗は種苗生産の機械化・省力化に適しており、効率的な育苗技術が開発できれば、地域の苗木供給量は拡大します。また一貫作業システムを利用しながら、地ごしらえの機械化を推進し、植栽可能期間の長いコンテナ苗等を活用すれば、下刈り作業回数を削減し、労働負担を下げる事が可能です。これらの技術をより高度化するため、充実種子選別装置により育苗効率を高める技術やクラッシュ・バケット地ごしらえにより雑草を抑制する技術を開発しました。こうした技術を組み合わせれば、造林・保育コストを50%以上削減できる場合もあることを示しました。

成果

充実種子選別装置と育苗技術の開発

近赤外光は目に見えない光ですが、種子の中の脂質などに反応します。そこで、スギ、ヒノキ、カラマツについて、それぞれ950～1400nmの間の三つの波長を組み合わせることで胚乳の健全性を評価する指標を開発しました。さらに種子の投入から健全性評価、回収までの工程を完全自動化し、発芽率90%以上の種子を選別できる高効率な充実種子選別装置を商品化しました（図1）。この機械で選別された種子を用い、マルチキャビティーコンテナ（図2）や小型プラグに一粒播種する育苗技術を提案し、生産規模や育苗スケジュールに基づく作業工程管理表を作成しました。これにより生産者における省力化率および育苗・生産コストの算出が可能となりました。例えば年間100万本の苗木生産の場合、選別種子の導入以前は一本当たり10秒-36秒の移植作業時間が必要でしたが、これを充実種子の選別により効率化した場合、年間約10400-13600時間の余剰時間を得ることができました。

一貫作業システムをより高度化した造林・保育技術の開発

一貫作業システムとは、木材の伐採や搬出に用いた林業機械を活用し、機械地ごしらえや苗木運搬を行い、植栽可能期間の長いコンテナ苗を植栽することで効率的な施業を行うことです。また地ごしらえを人力から機械化することで50%以上の地ごしらえコストの削減が可能であり、地ごしらえ直後に植栽を行うことで、1年目の下刈りを省略することもできます。

北海道や長野県で行った研究では、エクスカベータに装着したクラッシャー（図3）やバケット（図4）と呼ばれる機械で丁寧に地ごしらえを行うと、雑草の回復が遅れることから2年目以降の下刈りも省略でき、30%以上の下刈り作業コストの削減が可能となりました。秋田県で行った研究では、機械地ごしらえによる一貫作業システムに加え、植栽後2年

目、3年目、5年目に下刈を行い、コンテナ苗を用いた場合は26%、コンテナ苗の代わりに裸苗を用いた場合は35%の造林・保育経費の削減が可能になりました。

コンテナ苗の価格は挿し木か実生か、また樹種や地域によって異なりますが、充実種子選別装置を使った効率的な作業により裸苗と同程度の価格になれば、丁寧に機械地ごしらえされた林地にコンテナ苗を植栽し、下刈りの回数を減らすことで、造林・保育コストを50%以上削減できる場合もあることを示しました（図5）。さらに本研究で開発した技術は労務軽減などの労働環境の改善を通じ、良質な種苗生産と全工程の低コスト化の両方に貢献できることが明らかになりました。

研究資金と課題

本研究は、生研支援センター「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

特許取得：近赤外光を用いた樹木の種子選別方法（番号6782408 令和2年10月22日）

宇都木玄、原山尚徳、上村章（2017）再造林に向けた低コスト林業への挑戦。森林科学, 80, 2-5.

八木橋勉、原山尚徳（2019）樹種に応じた作業軽減で再造林の経費を削減する。季刊森林総研, 44, 16-17.

専門用語

小型プラグ：多孔容器で、マルチキャビティーコンテナより孔が小さい

カラマツ、ヒノキ、スギの充実種子を瞬時に選別



図1 充実種子選別装置の開発

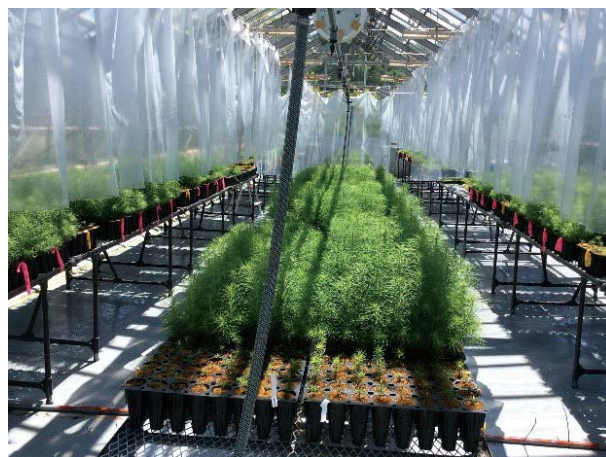


図2 コンテナによる苗木の育苗



図3 クラッシャによる地ごしらえ



図4 バケットによる地ごしらえ

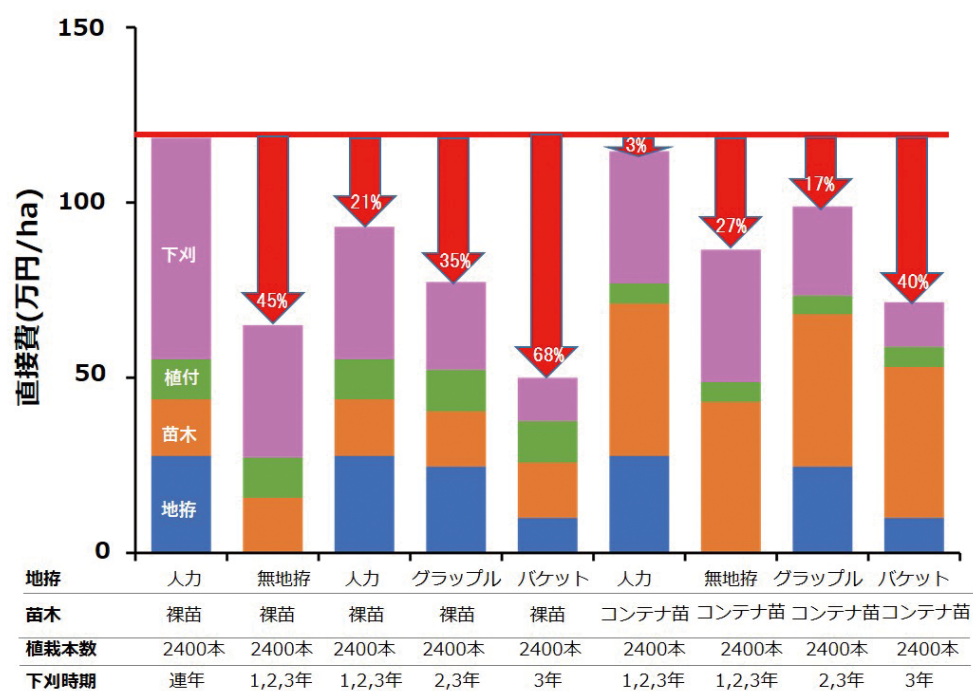


図5 長野県における造林-保育経費削減の事例（5年間）

バケット地ごしらえを用い雑草木の抑制効果が得られた場合、下刈回数が1回になり、50%以上の造林-保育経費削減効果が得られる。「下刈」は横軸のラベルに下刈実施年を示した。

広葉樹資源を有効に活用し地域を支える



関西支所 山下 直子・田中 真哉・齋藤 和彦・中尾 勝洋 森林植生研究領域 奥田 史郎
林業経営・政策研究領域 山本 伸幸 北海道支所 伊東 宏樹 東北支所 高橋 裕史
四国支所 垂水 亜紀・小林 功 多摩森林科学園 吉永 秀一郎
国際農林水産業研究センター 諏訪 鎌平 林野庁 細田 和男

燃料革命以降、中山間地に分布する広葉樹林は放置されて大径化し、近年のナラ枯れやシカ害によりその価値が失われてしまっておりあります。そこで、価値が低下する前に、樹木をその特性に合った用途で無駄なく利用する方法を確立し、付加価値を高めて利用することが重要です。本研究では近畿圏の中山間地を対象に、利用可能な広葉樹資源量を推計しました。さらに、枝から幹まで多様な用途での利用を目指し、胸高直径から枝を含む材積を推定できるようにしました。中山間地の広葉樹林では太くて通直な材を家具・建材用として、直径30 cm以下の材を木工用品や薪及びシイタケ原木として供給することで、持続的経営が可能となると考えられます。

成果

資源はどこにどのくらいあるのか—利用可能資源の定量化—

広葉樹の利用を進めていくためには、今どこにどのくらいの資源があるか？という情報が必要です。そこで、人工衛星と全国的な林分調査による観測・測定データから、近畿圏の広葉樹資源量を推計しました。その結果から（図1左）、京都・滋賀県と福井県との県境や、大阪南部などの県境付近で広葉樹資源が多いことが分かりました。さらに、アクセスのしやすさなど林分の立地条件を考慮し、「林道から500m以内かつ斜面傾斜角が30度未満の森林」という条件で利用可能な広葉樹資源量を再推計しました（図1右）。立地条件を考慮した結果、県境の資源量が多いエリアはアクセスが困難なほど傾斜がきつく、広葉樹の利用が進めにくいと判断されました。図1の左右で色が大きく違う地域は資源が豊富でも利用が難しい場所ですが、路網整備等で条件が整えば、利用の可能性が残されている場所とも言えます。現状では、アクセスが良く資源が充実したポテンシャルの高いエリアは、滋賀県湖南地域などと考えられました。

どんなものにどのくらい使えるか？

—用途別の潜在供給力の評価—

広葉樹には板材、薪材、シイタケ原木など様々な用途があり、一本の木からも複数の用途の材が得られます。そのため、枝や幹の先端部分などを活用できれば、これまで考えていたよりも利用できる材積が多くなります。そこで、里山に多いコナラ、ヤマザクラを対象に、胸高直径から用途別に利用可能な資源量を推定する方法を検討しました。ここでは、直径30cm以上の大径部分は家具等の板材に、直径14cmから30cmまでの中径部分は小型の木工品用材に、6cmから14cmまでの小径部分はシイタケ原木や薪材に、それぞれ用途を想定しました。

径級区分ごとに胸高直径と材積の関係を見てみると（図2）、

コナラはヤマザクラに比べて同じ胸高直径でも全ての径級で材積が大きくなる傾向にあり、特に胸高直径の大きいコナラでは小径材が多く採材できることがわかりました。

どのようにして使うか？—有効活用方策の提案—

近畿圏に多いコナラを中心とした広葉樹の9割はチップとして取引されています。また近年の傾向として、かつて主流であった薪やシイタケ原木としての需要が高まってきており、その価格も上昇しています（図3）。さらに外国産広葉樹の輸入が不安定な状況や、国産材および地域産材ニーズの増加から、家具・建材メーカーは国内の広葉樹に目を向けはじめています。そこで、直径の太い通直な材は材価の高い用途に、枝等の細い部分はチップや燃料用として活用し、全体の付加価値を高めて山元に利益を還元することにより、広葉樹二次林を持続的に経営する必要があります。さらに供給者側と需要者側が積極的に情報交換を行う場を作り、新たな広葉樹の流通を生み出す取組を強化することも重要です。

研究資金と課題

本研究は、交付金プロジェクト*「広葉樹も多い中山間地で未利用資源をむだなく循環利用するための方策の提案」による成果です。

文献

詳しくは、下記をご覧ください。
森林総合研究所（2019）第4期 中長期計画成果16
中山間地で広葉樹林を循環利用するためのハンドブック
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/4th-chuukiseika16.html>
山下直子（他）（2020）中山間地での広葉樹の循環的利用と地域再生。
山林 1627, 18-23.



*森林総合研究所交付金プロジェクト

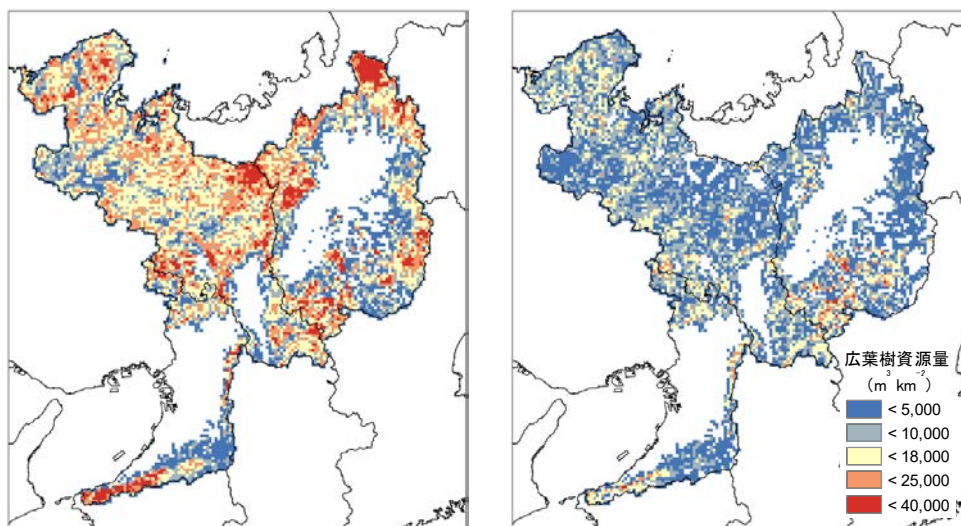


図1 近畿圏（京都、大阪、滋賀）における広葉樹の資源量分布の推定結果（一部アカマツ等針葉樹も含む）。左の図は、全量推定の結果で、右側は立地で条件づけた場合（林道からの距離500m以内、傾斜30度未満）の資源分布を表しています。

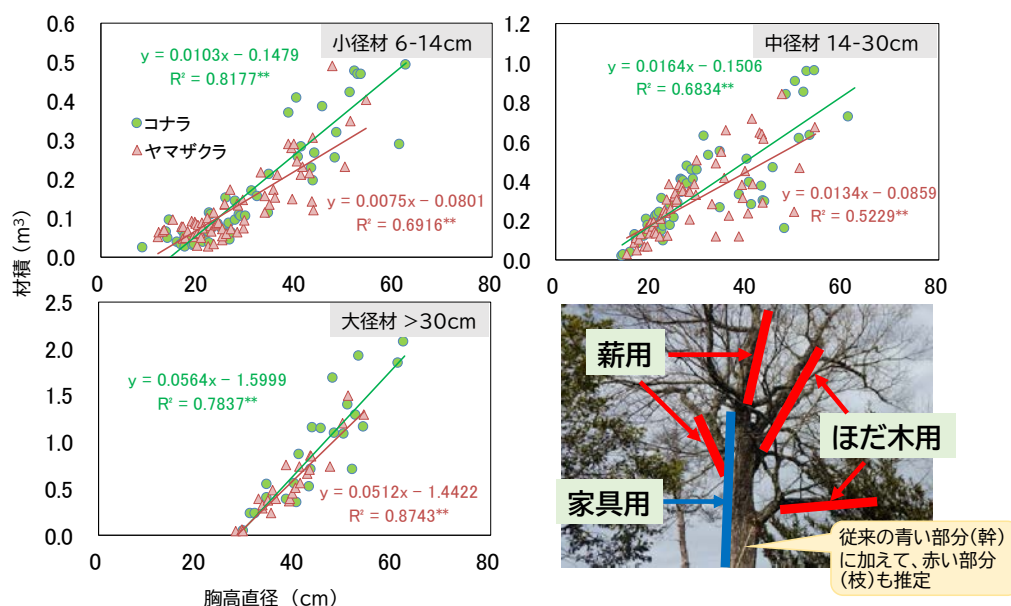


図2 枝を含む個体全体の総材積の推定。胸高直径の大きな木ほど、枝量（小径・中径材）が多く、複数の用途に利用可能であることがわかりました。

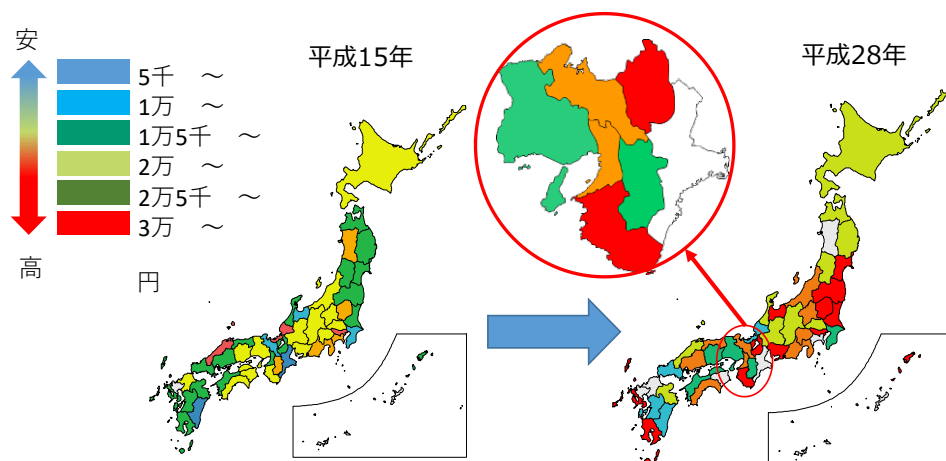


図3 都道府県別シタケ原木価格（ナラ（円/m³））。原木価格が30,000円/m³以上の地域は、平成15年の3都県に対し、平成28年では10都県に増加しており、特に、近畿の滋賀、京都、大阪、和歌山で高騰しています。

原木の品質がわかる ICT ハーベスタの開発



林業工学研究領域 上村 巧・中澤 昌彦

構造利用研究領域 加藤 英雄 木材加工・特性研究領域 松村 ゆかり

林業経営・政策研究領域 田中 亘 広島県立総合技術研究所 山本 健

南星機械 田中 誠一郎・金澤 豊 坂本電機製作所 國友 建・長谷川 勝己 小松製作所 白井 教男

山の木を伐倒して切り分ける前に品質がわかれば、使う目的に応じた無駄の少ない丸太を生産できます。そこで、木の曲がり、強さに関係するヤング率、密度を機械的に判定できる要素技術を開発し、ハーベスタに搭載しました。また、ハーベスタで丸太を生産する際、丸太の径や長さは自動で計測されていましたが、日本ではそのデータが活用されていませんでした。そこで、ICTを取り入れ、品質を含めた丸太形状や作業位置の情報など、ハーベスタから得られる様々なデータを世界標準のフォーマットであるStanForD2010形式で共有できる機能も開発して搭載しました。

成果

なぜハーベスタに計測機器をつけるのか

山の木を伐倒して切り分ける前に品質がわかれば、使う目的に応じた無駄の少ない丸太が生産できます。そこで、木の曲がり、密度、強さに関係するヤング率を機械的に判定できる要素技術を開発し、ハーベスタに搭載しました（図1）。

木の曲がりを判定する技術

3Dレーザを用いて木の形状を計測し、曲がりを判定する方法を開発しました。ハーベスタヘッドにより丸太を掴んだ状態で、図1の赤い装置からレーザ光線を木の根元側にに向けて照射し、丸太の上下左右の曲がりを判定できるデータを取得します。また、ハーベスタの傾きに関わらず木の形状が計測できるようにするため、ハーベスタの傾きにレーザ光が追従するための平行リンク（図2）を取り付けました（特許出願中）。

木の強度を判定する技術

木の強さに関係するヤング率という指標は、密度と木の中を伝わる音波の速度（音速）を計測すると評価できます。密度は、ハーベスタが計測する木の体積と、ハーベスタヘッドとアームの接続部に取り付けた専用の質量計で計測したデータから算出します。音速の測定はつかんだ木に2本のセンサを打ち込んで行い（図3）、ハーベスタヘッド内に搭載した機器により繰り返し計測が可能な機構を開発して評価できるようにしました（特許出願中）。計測に用いる音波を電氣的に発生する方式にしたことで、100回以上の繰り返し計測が2秒以内で可能となり、測定精度も向上させることができました。

情報の共有と活用

生産した丸太の径や長さは、ハーベスタでの作業時に計測されていましたが、日本ではオペレータが作業の参考にするだけで、他に活用されていませんでした。そこで最新のICTや計測技術を取り入れ、品質を含めた丸太形状や作業位置及び時刻の情報など、ハーベスタから得られる様々なデータを共有し活用できるようなソフトウェアを開発し、ハーベスタの制御機器に組み込みました。データの共有にあたっては、海外の先行事例を参考に世界標準のフォーマットであるStanForD2010形式を採用することとし、各地への聞き取り調査結果から日本の原木取引に適したデータ項目を追加しました。ハーベスタから得られる情報は丸太の生産者だけでなく様々に活用できますが、丸太を買って利用する人々と共有することで、流通コストの削減や付加価値の高い丸太の生産が可能となり、森林所有者の収益増にもつながります。

研究資金と課題

本研究は生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち先導プロジェクト）」による成果です。

文献

特願2019-33337 樹木、木材、柱等木製建築物用 音速測定装置、坂本電機製作所 山本保則 國友建、(2019)

特願2020-042081 形状計測システム、南星機械 田中誠一郎 金澤豊 甲斐雄輝 NextTechnology 秦 裕貴 森林総合研究所 上村巧 中澤昌彦 加藤英雄、(2020)

専門用語

ヤング率：引張り応力または圧縮応力の方向に対するひずみ量の関係、ヤング率が高いと強度が高い



図1 開発したハーベスタ
情報共有の機能を運転席の制御機器に搭載

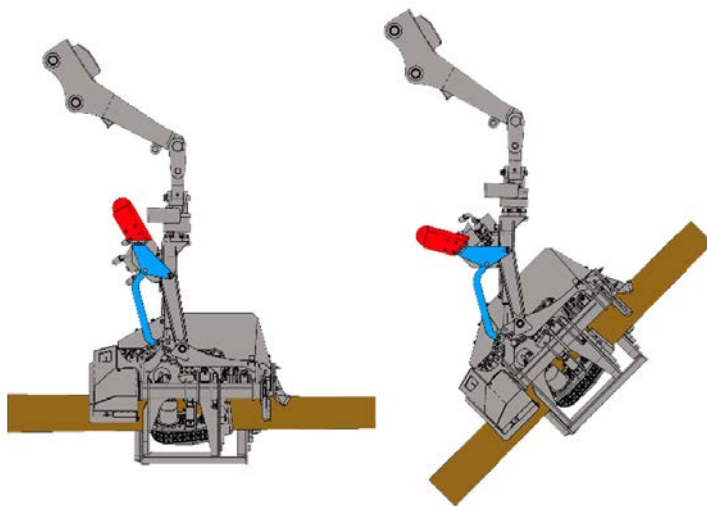


図2 曲がりを判定する装置
赤が3Dレーザによる測定装置
青が傾きに追従する平行リンク

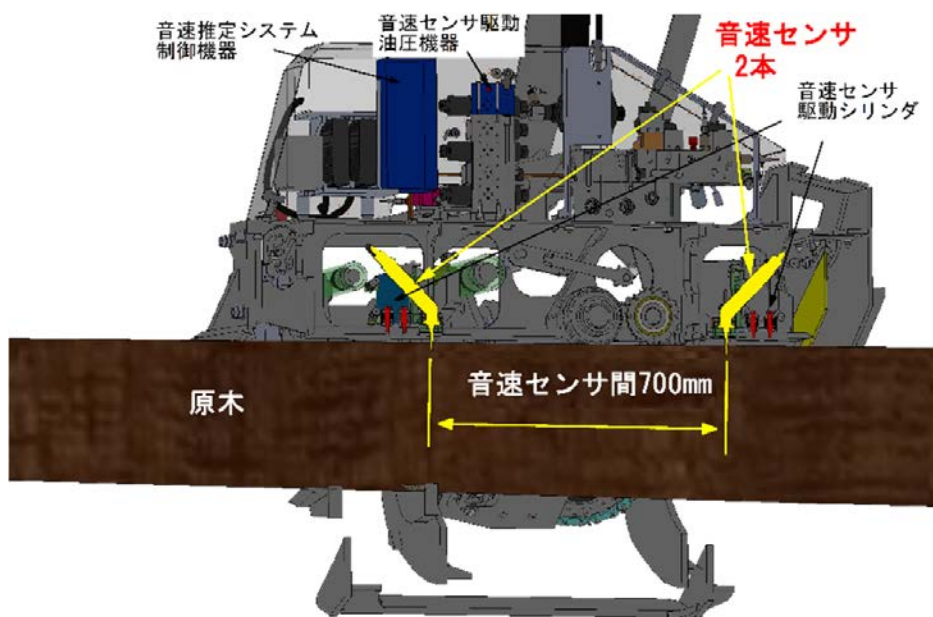


図3 強度を判定する音速センサ
木にセンサを打ち込み、音波が伝わる時間を計測する

地上レーザースキャナーによる森林調査： 効率的な資源量把握に向けて



森林管理研究領域 西園 朋広・北原 文章 林業工学研究領域 中澤 昌彦・瀧 誠志郎

東北支所 小谷 英司 林野庁 細田 和男

近年、効率的な森林調査のため、地上型レーザースキャナー（TLS）を導入する動きがみられます。本研究では、全国の針葉樹人工林でTLSの計測実験を行い、胸高直径は良好に計測され、樹高・材積は過小に計測されることを明らかにしました。次に、この樹高の過小計測結果を補正するために、補正式を考案しました。また、TLSと無人航空機（UAV）から得られたデータを結合することで、樹高の計測精度が向上することを明らかにしました。さらに、TLSを用いた森林調査コストをこれまでの手作業による調査コストと比べたところ、年間を通じ多くの森林調査を行う場合にはTLSの利用が効果的であることを明らかにしました。

成果

地上型レーザースキャナーの計測精度

森林の効率的な調査方法として、リモートセンシング技術を応用した地上型レーザースキャナー（terrestrial laser scanner：以下、TLSと記す）を用いた計測技術があります。近年では森林調査に特化したハードウェア・ソフトウェアの開発が進み、国有林や水源林造成事業などへの導入も始まりつつあります。このような新たな技術を林業現場へ効果的に導入するためには、計測精度や導入の費用対効果に関する検討が不可欠です。本研究では、全国50か所の針葉樹人工林でTLSの計測実験を行いました（図1、2）。その結果、①胸高直径は良好に計測されること、②樹高・材積は全般的に過小に計測される傾向があり、特に、大きいサイズの樹木で計測誤差が大きいことが分かりました。また、樹種、林分サイズ、傾斜などの林分特性が計測誤差の発生に影響を与えることが示されました。これらの林分特性に留意して、TLSを活用していく必要があります。

樹高計測の補正方法の提案

TLSによる樹高の計測精度が十分でない場合にそれを補正する方法として、汎用的な樹高曲線式（胸高直径から樹高を推定する曲線式）を作成しました。この方法では、現地で10本程度の立木の樹高を正確に測定すれば、TLSによる胸高直径から、補正された樹高を推定することができます。また、TLSと無人航空機（UAV）から得られたデータを結合できる場合には、樹高の計測精度が向上することが明らかになりました（図3）。

TLS導入の費用対効果

TLSは効率よく森林調査を実施できますが、現状ではハードウェア・ソフトウェアを含めた1セットで数百万円以上の

価格となり、簡単には導入できません。そこで、従来型の手作業による森林調査とTLSによる森林調査について、費用対効果を試算し、検討しました（図4）。その結果、年間を通じ多くの森林調査を行う場合にはTLS計測が効果的ですが、調査数量が少ない場合の導入は割高となることが分かりました。なお、両者の関係が逆転する調査箇所数は条件によって異なるので、導入の検討にあたっては十分な留意が必要となります。

手引きの作成

以上の検討を踏まえ、また、本研究で対象とした機器の概要や使い方のポイントなどを紹介するために、小冊子「地上型レーザースキャナーとUAVによる新しい森林調査」を作成しました（図5）。特に林業の現場において森林調査に携わる方々に、TLSの導入を検討する際の参考資料としてご活用いただきたいと思います。小冊子をご覧になりたい方は、以下のURL又はQRコードからダウンロードしてください。<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/4th-chuukiseika34.html>



研究資金と課題

本研究は一般財団法人日本森林林業振興会・森林林業振興助成事業「地上型レーザースキャナーによる効率的な収穫調査と素材生産現場への活用方法の提案」による成果です。

文献

北原 文章（2020）「特集号：地上型レーザースキャナ（TLS）を用いた森林計測」森林計画学会誌，54（1），2

森林総合研究所（2020）第4期中長期計画成果34「地上型レーザースキャナーとUAVによる新しい森林調査」



図1 TLSによる森林計測の様子

二種類のTLSにおける計測の様子を示しています。(左の事例)一脚を用いて本体を固定し、10m間隔の測定点で計測します。(右の事例)背負子を用いて本体を頭上に配置し、歩行しながら計測します。

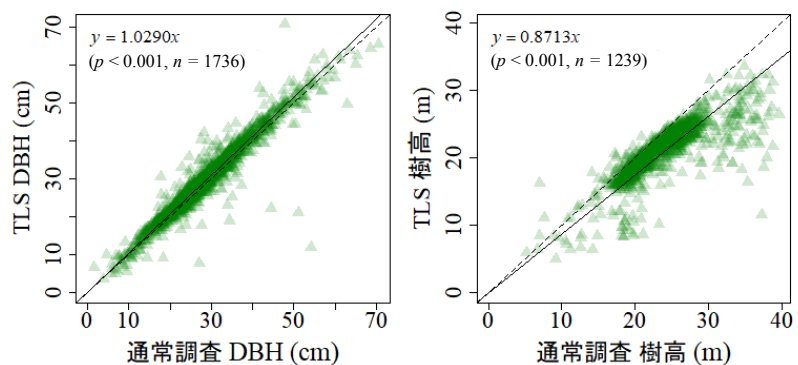


図2 TLS（一脚型）によるスギ人工林での計測

点線は $y=x$ を示し、実線は計測データに $y=ax$ をあてはめた回帰式を示しています。一部の外れ値を除くと、胸高直径（DBH）は良好に計測されます（実線と点線がほぼ一致する）が、樹高は全般的に過小に計測される（実線が点線よりも下側に位置する）ことが分かります。



地面・幹の良質な情報

林冠部の良質な情報

地面・幹・林冠部の良質な情報

図3 TLSとUAVのデータ

TLSとUAVのデータを結合できる場合には、胸高直径だけでなく、樹高についても良好な計測が期待できます。

	手作業	TLS①	TLS②
機器購入費用	30万円	500万円	1000万円
機器償却期間		5年	
人件費		2万円/人日	
セット人員	3人1組	2人1組	
調査効率	5か所/日	7か所/日	14か所/日

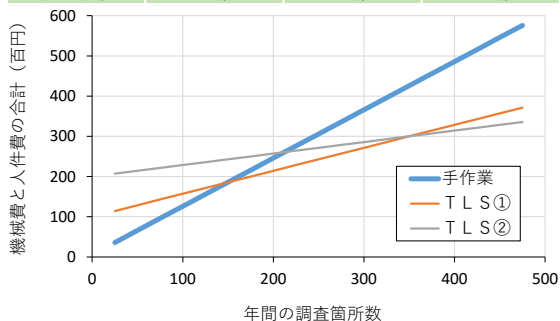


図4 TLSの費用対効果の試算

上表の条件を用いて年間費用を試算しました。調査箇所が増えると、手作業・TLSともに年間費用は増加しますが、特に手作業での増加が大きいため、調査箇所が多い場合にはTLSの方が有利になります。

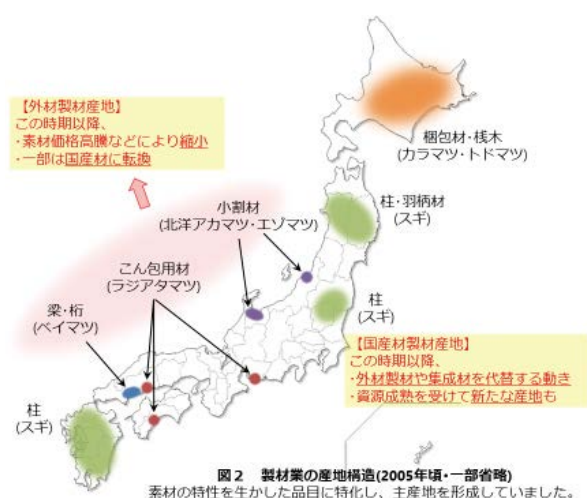


図5 小冊子「地上型レーザースキャナーとUAVによる新しい森林調査」

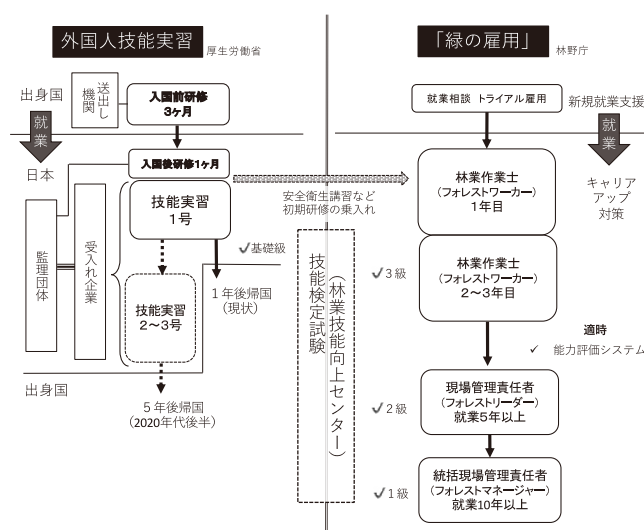
多様な森林資源の活用に対応した 木材供給システムの開発

我が国の豊かな森林資源の有効活用を図り、建築用材から木質バイオマス等に至る多様な木材需要に対応するため、地域性を活かした木材・木質原料の安定供給体制の構築が求められています。このため、以下の2つの課題に取り組みました。

- イイ a 持続的林業経営と合理的、効率的流通・加工体制の構築に向けた社会的・政策的対策の提示
- イイ b 地域特性に応じた木質エネルギー等の効率的利用システムの開発



2005年ごろの製材業の産地構造。当時は素材特性に合った品目に特化して主産地を形成していました。



林業労働のための外国人技能実習制度の仕組みと「緑の雇用」との連携方策案を提示しました。



エネルギー資源としてのヤナギ栽培技術を開発しました。



丸太の天然乾燥乾燥日数を推定するツールを開発しました。

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・久保山 裕史・山本 伸幸・石崎 涼子・都築 伸行・志賀 薫・早船 真智
生物多様性・気候変動研究拠点 道中 哲也 木材加工・特性研究領域 杉山 真樹
北海道支所 嶋瀬 拓也・天野 智将 関西支所 平野 悠一郎 四国支所 垂水 亜紀
九州支所 横田 康裕 名古屋大学 岩永 青史 (国研) 国際農林水産業研究センター 岡 裕泰

現在、家具・内装材で使用される広葉樹原材料の約8割が海外産です。一方、我が国の私有林には約8億1千万 m^3 の広葉樹の蓄積がありますので、海外産を国産に転換できる可能性があります。そこで地域別の蓄積状況、流通・加工状況を明らかにして国産広葉樹の利用を進めるための対応方策を提案しました。対応方策としては、いずれの地域においても、林業労働力拡充、路網整備、高性能林業機械の活用、製材・乾燥工場の生産能力拡充が挙げられます。ただし、本州日本海側や内陸部では用材の市場出荷を促す動機付けが必要と分かり、そのための販売方法案も示しました。

成果

私有林における資源蓄積状況と利用状況

図1は私有林における広葉樹の資源蓄積ランキングです。水色の枠で囲んだ道県では豊富な蓄積を誇っています。そこには、広葉樹の低質材を利用する紙パルプ製造業者や薪製造業者だけでなく、用材(※)を利用する製材業者や家具・内装材製造業者等の幅広い業種が集まっており、あらゆる品質の広葉樹を利用する体制が整っている状況です。一方、赤枠で囲んだ府県(本州日本海側や内陸部)にも十分な蓄積はあるのですが、広葉樹の利用が紙パルプ向け以外で進んでいない状況です。国産広葉樹の利用をさらに進めるには、水色の枠で囲んだ道県も含めた全国各地において広葉樹の素材生産や製材・乾燥工程での増産余力が乏しいため、林業労働力拡充、路網整備、高性能林業機械の活用、製材・乾燥工場の生産能力拡充が対応方策として求められます。

広葉樹原木の流通状況

図2は北海道、東北地方、中部地方での広葉樹原木の流通状況です。伐採された原木は、集積所で樹種、直径、品質等を基準に仕分けられて、全体の数%が用材として選抜されて原木市場に出荷されます。原木市場には、主に製材業者が買い手として集まります。特に、旭川市等には「銘木市場」と呼ばれる市場があり、買い手が全国から集まるので有名です。そこでは、大径の用材が多数出荷され、驚くほどの高額単価(例:2021年5月の旭川銘木市場での最高値は末口径90cm、長さ3mのセンで30万円/ m^3)で落札されます。これはコロナ禍のさなかであっても従前と変わっていません。一方、本州日本海側や内陸部では、紙パルプ以外の利用が乏しいため、用材となりうる原木であっても低質材同等の割安な単価で売り渡すケースも見られます。

用材の市場出荷を促す販売方法案

資源蓄積の観点から、今後有望視されるのは本州日本海側や内陸部です。しかし、用材品質の原木であっても、コストや手間にかかる市場出荷は敬遠される傾向にあります。そこで我々は、用材の市場出荷を促すため、広葉樹原木の質と量に基づく販売方法案を作成しました(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。10 m^3 という数字は、10トントラック1台に満載できる量を指し、現状では市場出荷の可否を決めるひとつの基準となっています。仮に上質材だけで10 m^3 集まる場合は、運賃負担を伴っても、原木市場で競り売りした方が出荷者にとって有利と見込まれます。このように有利な単価で販売できれば、それが市場出荷の動機付けになると考えられます。

研究資金と課題

本研究は、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、田中亘、杉山真樹、天野智将(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, vol.11, No.2, pp.39-48.

専門用語

用材:ここでは広葉樹原木のうち、需要者からの引き合いが多い人氣樹種、原木の最小径が20cm以上、節無し、腐れ無し、まっすぐな部分が2m以上等といった条件を満たす原木をいいます。

*森林総合研究所交付金プロジェクト

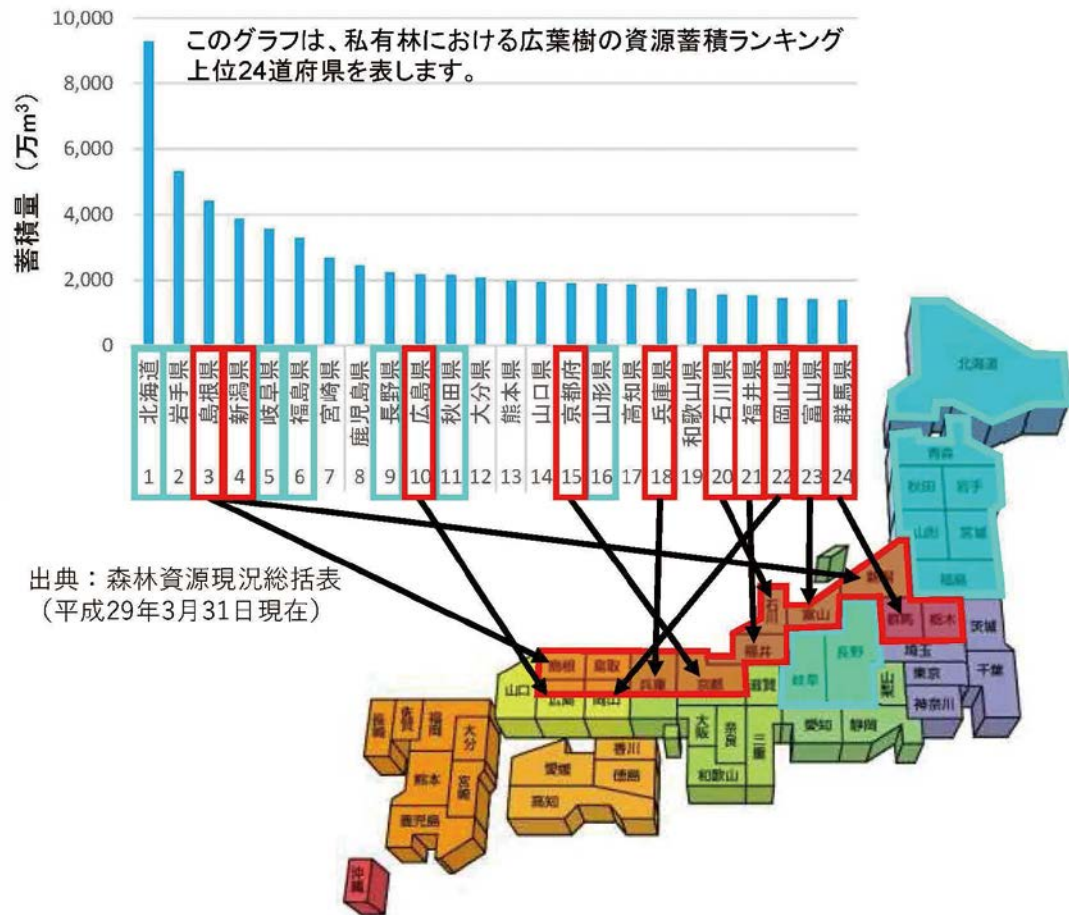


図1 私有林における広葉樹の資源蓄積状況

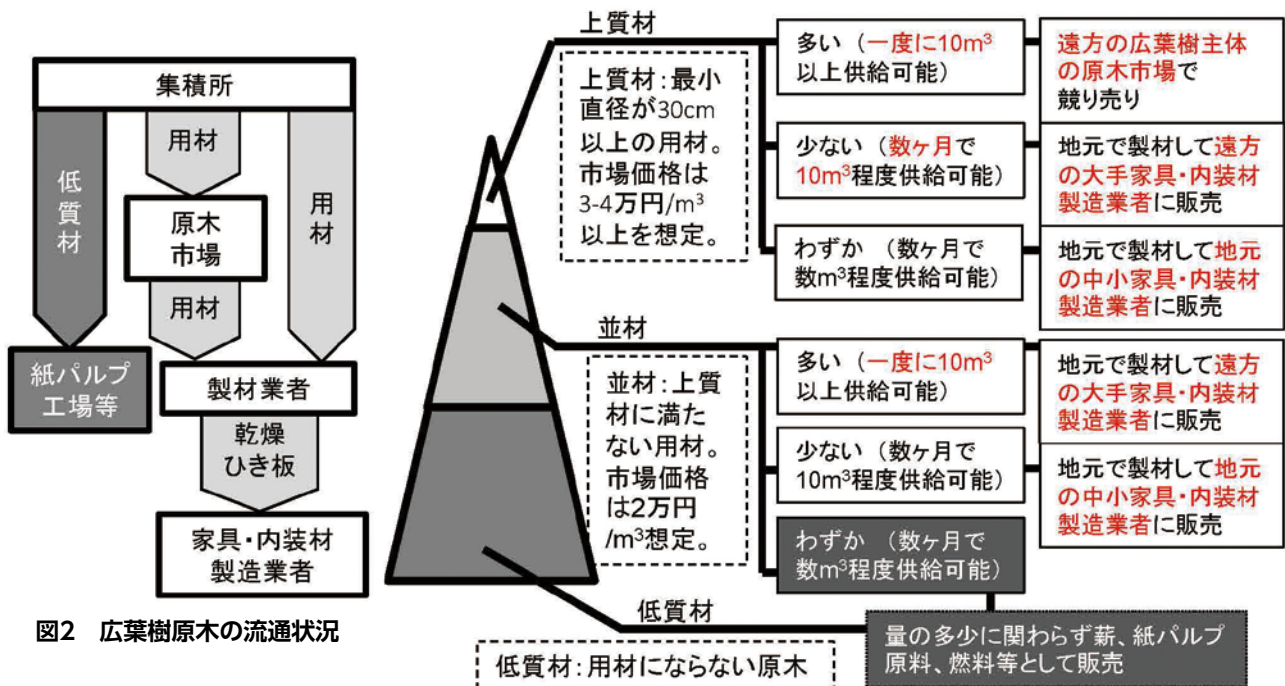


図3 広葉樹原木の質・量に基づく販売方法案

新たな森林の有効活用に向けた課題と解決策の提示



関西支所 平野 悠一郎

近年の日本では、レジャー・スポーツを中心とした「新たな森林利用」の発展が見られてきました。その結果、利用者の多様化と集中が加速したため、従来の利用者、地域住民、林地・山道の地権者、行政管理部门等において、新たな利用者による事故の危険や自然保護面での影響が懸念されるといったコンフリクトも目立ってきました。この課題の解決には、海外の先行事例を踏まえ、①利用の競合しない山村地域での新たな利用の発展の模索、②各主体の林地・山道利用の権利・義務と安全管理責任を明示する制度構築、③各主体の利害を代表し他主体との調整の窓口となる組織の成熟が必要であると提示しました。

成果

新たな森林の有効活用とは？

日本では1990～2000年代以降、旧来の登山やハイキング、野外キャンプ等に加えて、マウンテンバイク、トレイルランニング、フォレストアドベンチャー、サバイバルゲーム等、レジャー・スポーツにおいて各種の「新たな森林利用」が発展し、多くの利用者（愛好者）を獲得しつつあります。これらの新たな利用は、放置人工林等、森林の荒廃が進む地域において、森林や山道の有効活用につながり、訪問者の増加や大会等のイベント開催を通じて、地域に大きな経済効果をもたらす事例も見られるようになりました。さらに、マウンテンバイクやトレイルランニングの利用者の中には、自ら進んで過疎・高齢化の加速する山村地域に移り住み、新たな利用のフィールドを確保しつつ、地域の維持・再生、活性化に取り組む人々も見られるようになりました。

新たな利用をめぐるコンフリクトの深刻化という課題

しかし、こうした新たな森林利用の発展は、特にアクセスのしやすい都市近郊林や、都市公園・自然公園などの利用過密地において、利用者の集中に伴うコンフリクトを深刻化させることにもなりました。例えば、従来からの利用者である地域住民やウォーカーが、スピードに乗って走ってくるマウンテンバイカーやトレイルランナーを危険視し、フィールドとなる林地・山道の地権者や行政管理部门が、事故や遭難、あるいは森林の劣化や生態系への悪影響を懸念したことで、新たな利用をめぐる規制の動きも見られるようになりました。

課題解決の方向性とそれに向けての動き

この課題解決の方向性は、新たな森林利用が先行して発展してきた海外の事例を参考にしつつ、日本の現状に照らし合わせることで明確化できます。まず、ほとんどが森林に覆われた日本では、なにも利用過密地に行かなくても、新しい利用を楽しめる場所はたくさんあります。特に山村地域では、林業の低迷や過疎・高齢化の中、新しい利用を呼び込むこと

で、地域活性化を図ろうとするニーズもあります。こうした森林側・地域側のニーズに、新たな利用を円滑に結びつける仕組み作りが必要です。

次に、アメリカ、イギリス、ニュージーランド等、新たな利用が発展を遂げてきた海外では、同様のコンフリクトを経験した結果、林地や山道を「誰が、どのように使えるのか」を明確にする制度構築が進んできました。例えば、新たな利用者を含めた各主体に、林地・山道利用にあたっての権利・義務を明示し、また、事故や遭難にあたっての安全管理責任を明確化する法整備を行うなどです。さらに、利用者や地権者、管理者との森林をめぐるコンフリクトが発生した際、それぞれの主体の立場・利害を代表して、他主体との調整にあたる組織と場が、関連の制度を伴って用意されています。これらの仕組みや制度の構築によって、日本での新たな利用を踏まえた森林の有効活用は一層進んでいくはずです。

研究資金と課題

本研究は、科研費 JSPS (JP15K21615)「新たな林地利用を踏まえた森林の多面的経営の成立条件の解明」、及び科研費 JSPS (JP19K12453)「アメリカにおける森林の多面的利用の制度的基盤の解明」による成果です。

文献

平野悠一郎 (2016) マウンテンバイカーによる新たな森林利用の試みと可能性. 日本森林学会誌, 98 (1), 1-10.

平野悠一郎 (2018) 日本におけるトレイルランニングの林地利用の現状と動向: コンフリクトの表面化とランナーの対応. 日本森林学会誌, 100 (2), 55-64.

専門用語

コンフリクト: 各主体が異なる立場・価値に基づいて引き起こす軋轢・対立



図1 世界各地で発展するマウンテンバイクの森林利用



図2 過疎山村にも人を呼び込むトレイルランニングの大会



図3 森林内の立木をそのまま支点とするフォレストアドベンチャー



図4 森林内に設けられたサバイバルゲームのフィールド

世界初の長期連続運転を可能にする木質バイオマスを主原料としたメタン発酵実証試験とその発酵残渣の応用



森林資源化学研究領域 大塚 祐一郎・中村 雅哉

「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、様々な樹種の木材や枝葉、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。またリグニンを多く含む発酵残渣からは化学分解と微生物発酵で生分解性バイオプラスチックの原料を効率よく製造できることも明らかにしました。本研究成果は、再生可能エネルギーの選択肢を増やすだけでなくマイクロプラスチックによる環境汚染問題の解決にも貢献できると考えられます。

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。この施設では収集した木材原料を粉碎後、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、発酵によりバイオガス（メタンガス55-60%）を生産します。得られたガスはそのまま燃焼可能な燃料になります。発酵排液は脱水して発酵残渣とします。発酵残渣には微生物によって分解されにくいリグニンというポリフェノールが多く含まれます。

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、重量割合で1/10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。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、そのまま燃焼可能なガスが得られることを確認しました。

(2) 発酵残渣の有効活用

本実証試験において、木材1kgのメタン発酵で平均457gの発酵残渣が発生することがわかりました。この発酵残渣の60%以上は木材のポリフェノール成分であるリグニンが占めます。この発酵残渣に含まれるリグニンを化学分解すると高

効率に芳香族物質に変換できることが明らかとなりました。

我々は過去にリグニンから得られる様々な芳香族物質を原料として、遺伝子組換え技術によって作出した微生物の発酵によって2-ピロン-4,6-ジカルボン酸（PDC）という生分解性バイオプラスチックの原料を製造する技術を確立しています。木材のメタン発酵残渣とバイオプラスチック原料製造技術を組み合わせることで、図2に示すように高効率に発酵残渣からPDCを製造し、これを原料として様々な生分解性バイオプラスチックが製造できることを明らかにしました。

おわりに：

本研究成果は、木質バイオマスから新たにメタンガスというガス燃料を製造できることを実証し、さらに発酵残渣を原料に生分解性バイオプラスチックを製造できることも明らかにしました。これにより収益性の高い事業モデルの提案が可能となるだけでなく、再生可能エネルギーの選択肢を増やすことや現在問題となっているマイクロプラスチックによる環境汚染の解決にもつながると考えられます。

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

Navarro, R.R. et al. : Combined simultaneous enzymatic saccharification and comminution (SESC) and anaerobic digestion for sustainable biomethane generation from wood lignocellulose and the biochemical characterization of residual sludge solid, *Bioresour. Technol.*, 300 : 122622 (2020)

Qian, Y. et al. : Engineered Microbial Production of 2-Pyrone-4,6- Dicarboxylic Acid from Lignin Residues for Use as an Industrial Platform Chemical, *Bioresources*, 11 (3) : 6097-6109 (2016)

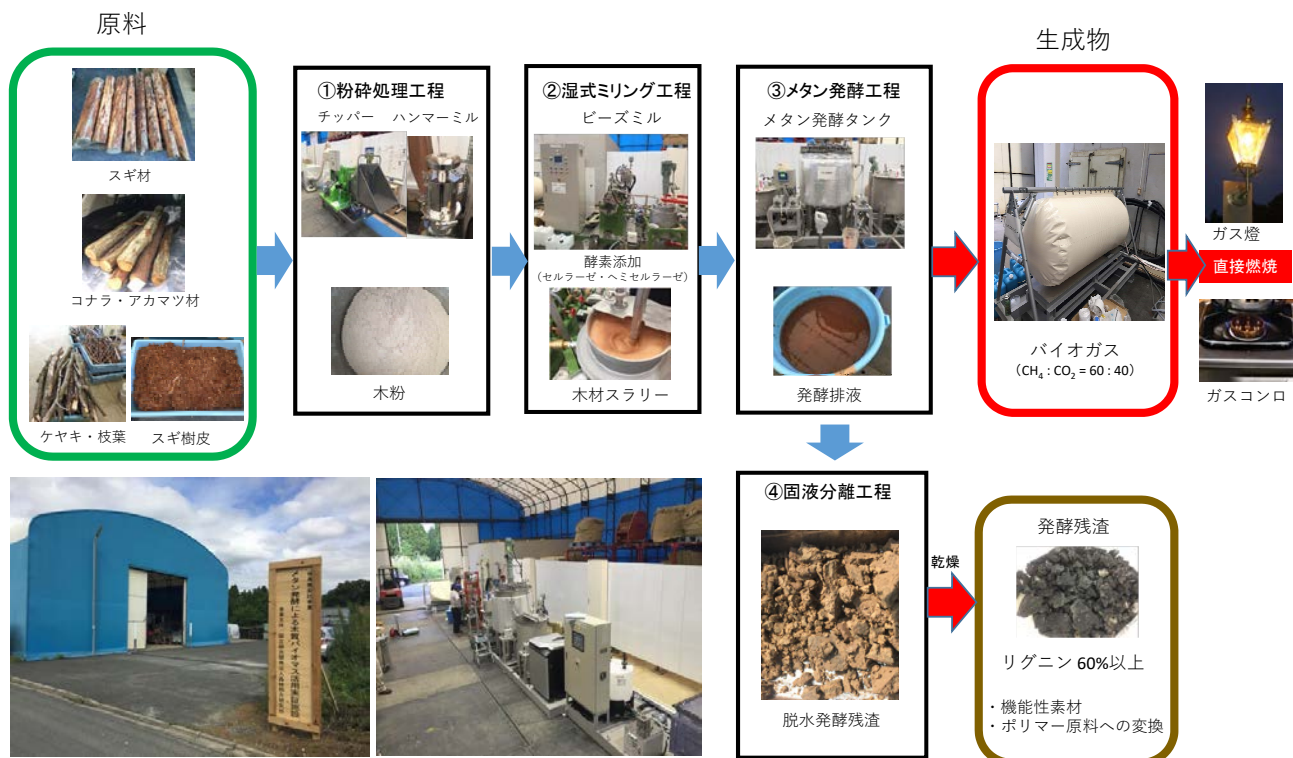


図1 木材の直接メタン発酵実証実験施設の概観とプロセス

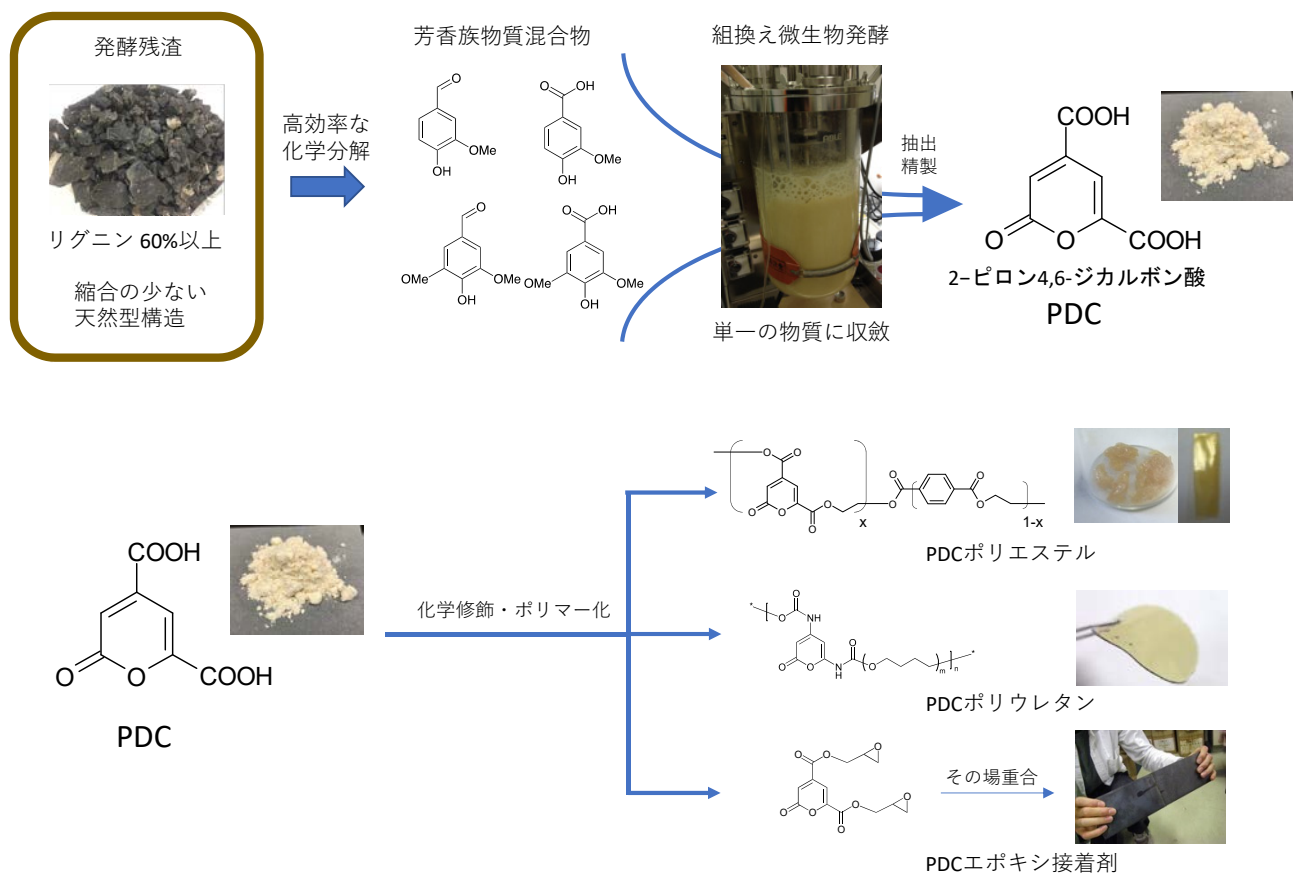


図2 発酵残渣から組換え微生物発酵によりバイオプラスチック原料となるPDCを製造する技術とPDCを骨格とした自由な分子設計によって合成されるバイオプラスチック

蒸気タービン方式木質バイオマス熱電併給事業採算性評価ツールを開発



木材加工・特性研究領域 柳田 高志
林業経営・政策研究領域 久保山 裕史
北海道立総合研究機構 林産試験場 古俣 寛隆

我が国では2012年7月の再生可能エネルギー固定価格買取制度（以下、FIT）の運用開始以降、木質バイオマス燃料とする蒸気タービン方式の発電施設が各地で建設されています。木質バイオマス発電事業を検討する際に、燃料消費量の推算や事業性の評価が必須となりますが、その計算は非常に複雑です。そこで、蒸気タービン方式の木質バイオマス発電事業について、発電のみではなく、一部の熱を利用する熱電併給事業の採算性評価ツールを開発・公開しました。

成果

背景

脱炭素社会の構築が求められる中、再生可能エネルギーへの期待が高まっています。再生可能エネルギーの一つとして、近年、木質バイオマスを用いた電気や熱の供給事業が注目を集めています。これらの事業によって、事業者には安定した利益が、地域林業には大きな経済効果が期待されます。一方、木材の供給者にとっては丸太やチップの販売価格、製材業等のマテリアル産業にとっては原料の競合、発電事業者にとっては原料購入価格の変動や稼働停止等の事業のリスクが不安視されています。そこで、事業関係者がそれらの検討を行うための事業性評価ツールを、表計算ソフト（Microsoft Excel®）を用いて作成しました。

ツールの開発

これまでに森林総研では、木質バイオマス発電の主な技術である蒸気タービン方式の発電事業について、採算性が簡単に評価できるツールを開発・公開してきました。この度、北海道立総合研究機構林産試験場と協力して、熱電併給事業の評価もできるように改良しました。蒸気タービンの熱収支には、複雑な計算モデルが必要なため、発電出力および熱出力の推定には、『エネカルク Ver.3』蒸気タービン計算モジュールを組み込みました。

ツールの利用方法

本ツールでは、蒸気タービン方式のシステムを用いた発電・熱電併給事業の評価が可能です。ユーザーが想定する原料の調達や、プラントの条件等を入力することで、木質バイオマスを用いたさまざまな発電・熱電併給事業の経済性等を評価することができます。任意の諸条件を入力することにより、年間の燃料消費量や電気・熱の売上高、事業評価（内部収益

率や投資回収年）等の出力結果が表示されます（図1）。

ツールの入手方法については、下記URLをご参照ください。
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/database/hatsuden/hatsuden.html>

研究資金と課題

本研究は交付金プロジェクト*「木質バイオマス発電事業の安定的な拡大手法の開発」、「小規模エネルギー利用のための木質バイオマス利用技術の高度化」の成果です。

文献

久保山裕史（他）（2017）未利用木質バイオマスを用いた熱電併給事業の成立条件、日林誌、99、226－232
小西二郎（2010）省エネ計算ツール“エネカルク Ver.3”徹底解説、財団法人省エネルギーセンター

専門用語

FIT：太陽光、風力、水力、地熱、およびバイオマスの再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定価格で一定期間買い取ることを国が約束する制度です。電力会社が買い取る費用の一部を、電気の利用者のすべての方から賦課金という形で徴収し、導入時にコスト高となる再生可能エネルギーの導入を支える仕組みとなっています。

謝辞

本シミュレーターへ導入した『エネカルク Ver.3』蒸気タービン計算モジュールの無償公開を承諾していただいた発行元の（一財）省エネルギーセンターならびに著者の小西二郎氏に深く感謝申し上げます。

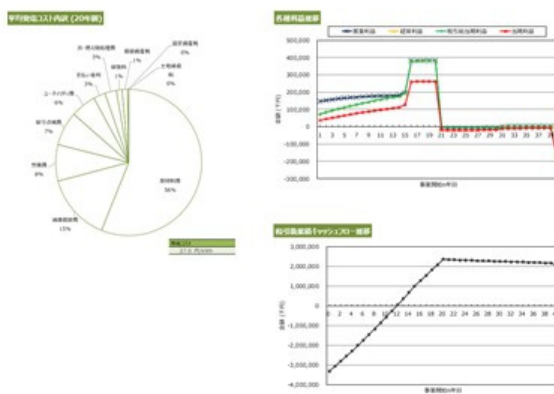
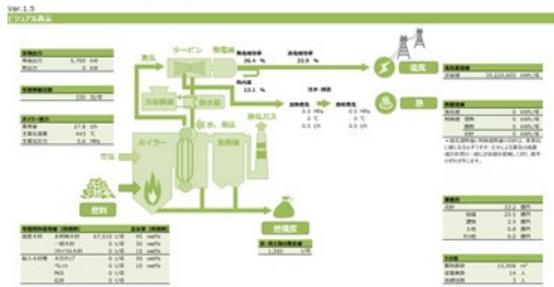
*森林総合研究所交付金プロジェクト

入力

ユーザーが想定する発電所の条件を入力する

入力項目			
1	発電能力	※発電方式の組合	5,700 kW
2	燃料 (熱利用)	薪炭 (熱利用) を用いるか?	はい/いいえ
3	燃料条件	※燃料条件	燃料圧力 0.50 MPa
4		※燃料で発電時の発電出力が低下する	→利用温度 (減圧器による調整) 152 °C
5		※燃料で発電時の発電出力が低下する	→利用温度 (減圧器による調整) 10.0 t/h
6		※燃料で発電時の発電出力が低下する	→利用温度 (減圧器による調整) 10.0 t/h
7	年間稼働日数		330 日/年
8	燃料条件	※燃料条件	燃料条件
9		※燃料条件	燃料条件
10		※燃料条件	燃料条件
11		※燃料条件	燃料条件
12		※燃料条件	燃料条件
13		※燃料条件	燃料条件
14		※燃料条件	燃料条件
15		※燃料条件	燃料条件
16		※燃料条件	燃料条件
17		※燃料条件	燃料条件
18		※燃料条件	燃料条件
19		※燃料条件	燃料条件
20		※燃料条件	燃料条件
21		※燃料条件	燃料条件
22		※燃料条件	燃料条件
97	税金	法人税率	2.4 %
98		法人税率	2.4 %
99		法人税率	2.4 %
100		法人税率	2.4 %
101		法人税率	2.4 %
102		法人税率	2.4 %
103		法人税率	2.4 %
104	調整・評価	※調整・評価	調整・評価
105		※調整・評価	調整・評価
106		※調整・評価	調整・評価
107		※調整・評価	調整・評価
108		※調整・評価	調整・評価
109		※調整・評価	調整・評価
110		※調整・評価	調整・評価
111		※調整・評価	調整・評価
112		※調整・評価	調整・評価

ビジュアル表示



出力

結果が自動計算される

出力項目			
113	ボイラー能力	蒸気量	27.8 t/h
114		主蒸気温度	443 °C
115		主蒸気圧力	5.6 MPa
116	定格出力	発電出力	5,700 kW
117		熱出力	A: 潜熱 + 顕熱 (全熱熱量) 0 kW
118			B: 潜熱のみ (ドレン熱量を除く) 0 kW
119	各種効率	電気	発電機: A 26.4 %
120			送電機 22.9 %
121		熱: B	全熱熱量基準 0.0 %
122		総合効率: A+B (85%以下で抽気条件を設定)	26.4 %
123	原料消費量	国産木材	未利用木材 67,510 t/年
124		※燃焼時質量	→購入時質量換算 74,261 t/年
125		一般木材	0 t/年
126		リサイクル木材	0 t/年
127		輸入木材等	木質チップ 0 t/年
128			ペレット 0 t/年
129			PKS 0 t/年
130			石炭 0 t/年
131	エネルギー	電気	発電機 45,143,389 kWh/年
132		送電機	39,229,605 kWh/年
133		熱	0 kWh/年
134	売上高	電気	国産木材 1,255,347 千円/年
135		(20年目まで)	一般木材 0 千円/年
136			リサイクル木材 0 千円/年
137		輸入木材等	木質チップ 0 千円/年
138			ペレット 0 千円/年
139			PKS 0 千円/年
140			石炭 0 千円/年
141		合計	1,255,347 千円/年
142	電気	国産木材	未利用木材 863,051 千円/年
143		(21年目から)	一般木材 0 千円/年
144			リサイクル木材 0 千円/年
145		輸入木材等	木質チップ 0 千円/年
146			ペレット 0 千円/年
147			PKS 0 千円/年
148			石炭 0 千円/年
149		合計	863,051 千円/年
150		熱	0 千円/年
151	事業費	発電・CHP設備	29.5 億円
152		建物	2.9 億円
153		車両	0.0 億円
154		チップ製造設備	0.0 億円
155		送電機・送電線	0.0 億円
156		土地	0.8 億円
157		合計	33.2 億円
158	資金調達内訳	自己資金	6.6 億円
159		借入金	有利息 26.6 億円
160			無利息 0.0 億円
161		補助金	0.0 億円
162		合計	33.2 億円
163	その他	従業員数	14 人
164		取捨枚数	3 人
165		敷地面積	15,908 m ²
166		灰・燃え殻の発生量	1,350 t/年
167	評価指標	発電コスト (20年平均)	27.0 円/kWh
168		税引前IRR (20年)	9.4 %
169		税引前NPV (20年)	2,319,085 千円
170		投資回収年	12 年

損益計算とキャッシュフロー

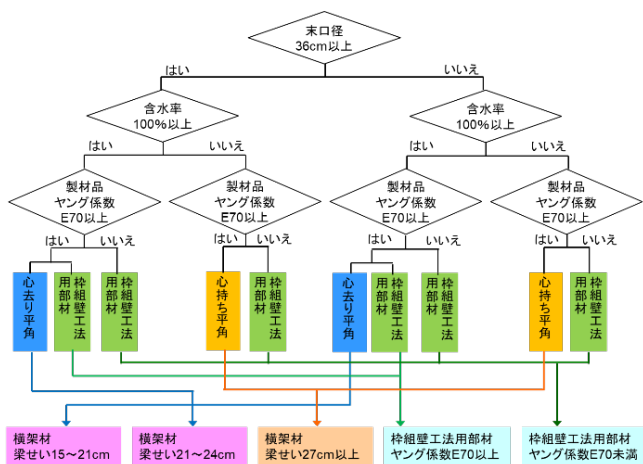
Ver. 1.5 損益計算とキャッシュフロー			
1	項目	単位	金額
2	1	2	3
3	4	5	6
4	7	8	9
5	10	11	12
6	13	14	15
7	16	17	18
8	19	20	21
9	22	23	24
10	25	26	27
11	28	29	30
12	31	32	33
13	34	35	36
14	37	38	39
15	40	41	42
16	43	44	45
17	46	47	48
18	49	50	51
19	52	53	54
20	55	56	57
21	58	59	60
22	61	62	63
23	64	65	66
24	67	68	69
25	70	71	72
26	73	74	75
27	76	77	78
28	79	80	81
29	82	83	84
30	85	86	87
31	88	89	90
32	91	92	93
33	94	95	96
34	97	98	99
35	100	101	102
36	103	104	105
37	106	107	108
38	109	110	111
39	112	113	114
40	115	116	117
41	118	119	120
42	121	122	123
43	124	125	126
44	127	128	129
45	130	131	132
46	133	134	135
47	136	137	138
48	139	140	141
49	142	143	144
50	145	146	147
51	148	149	150
52	151	152	153
53	154	155	156
54	157	158	159
55	160	161	162
56	163	164	165
57	166	167	168
58	169	170	171
59	172	173	174
60	175	176	177
61	178	179	180
62	181	182	183
63	184	185	186
64	187	188	189
65	190	191	192
66	193	194	195
67	196	197	198
68	199	200	201
69	202	203	204
70	205	206	207
71	208	209	210
72	211	212	213
73	214	215	216
74	217	218	219
75	220	221	222
76	223	224	225
77	226	227	228
78	229	230	231
79	232	233	234
80	235	236	237
81	238	239	240
82	241	242	243
83	244	245	246
84	247	248	249
85	250	251	252
86	253	254	255
87	256	257	258
88	259	260	261
89	262	263	264
90	265	266	267
91	268	269	270
92	271	272	273
93	274	275	276
94	277	278	279
95	280	281	282
96	283	284	285
97	286	287	288
98	289	290	291
99	292	293	294
100	295	296	297
101	298	299	300
102	301	302	303
103	304	305	306
104	307	308	309
105	310	311	312
106	313	314	315
107	316	317	318
108	319	320	321
109	322	323	324
110	325	326	327
111	328	329	330
112	331	332	333
113	334	335	336
114	337	338	339
115	340	341	342
116	343	344	345
117	346	347	348
118	349	350	351
119	352	353	354
120	355	356	357
121	358	359	360
122	361	362	363
123	364	365	366
124	367	368	369
125	370	371	372
126	373	374	375
127	376	377	378
128	379	380	381
129	382	383	384
130	385	386	387
131	388	389	390
132	391	392	393
133	394	395	396
134	397	398	399
135	400	401	402
136	403	404	405
137	406	407	408
138	409	410	411
139	412	413	414
140	415	416	417
141	418	419	420
142	421	422	423
143	424	425	426
144	427	428	429
145	430	431	432
146	433	434	435
147	436	437	438
148	439	440	441
149	442	443	444
150	445	446	447
151	448	449	450
152	451	452	453
153	454	455	456
154	457	458	459
155	460	461	462
156	463	464	465
157	466	467	468
158	469	470	471
159	472	473	474
160	475	476	477
161	478	479	480
162	481	482	483
163	484	485	486
164	487	488	489
165	490	491	492
166	493	494	495
167	496	497	498
168	499	500	501
169	502	503	504
170	505	506	507
171	508	509	510
172	511	512	513
173	514	515	516
174	517	518	519
175	520	521	522
176	523	524	525
177	526	527	528
178	529	530	531
179	532	533	534
180	535	536	537
181	538	539	540
182	541	542	543
183	544	545	546
184	547	548	549
185	550	551	552
186	553	554	555
187	556	557	558
188	559	560	561
189	562	563	564
190	565	566	567
191	568	569	570
192	571	572	573
193	574	575	576
194	577	578	579
195	580	581	582
196	583	584	585
197	586	587	588
198	589	590	591
199	592	593	594
200	595	596	597
201	598	599	600
202	601	602	603
203	604	605	606
204	607	608	609
205	610	611	612
206	613	614	615
207	616	617	618
208	619	620	621
209	622	623	624
210	625	626	627
211	628	629	630
212	631	632	633
213	634	635	

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・木質材料の更なる需要拡大に向け、消費者ニーズに対応する材料や利用法の開発、大径材等需要が少ない木質資源の利用方法の開発が求められています。このため、以下の2つの課題に取り組みました。

ウア a 原木等の特性評価技術の開発及び製材・乾燥技術等の高度化

ウア b 新規木質材料利用技術、構造利用技術及び耐久性付与技術の開発



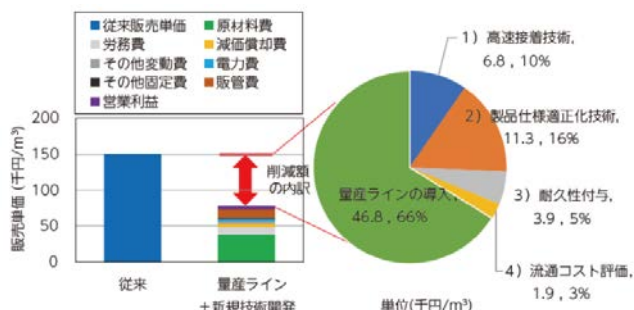
ウア a の成果の例：

大径材利用のための丸太選別フローチャートを作成しました。



ウア a の成果の例：

樹齢推定、年輪幅・密度・安定同位体比測定などの材質指標を測定する木材試料採取装置を小型軽量化し、作業効率を高めたスマートボーラーを商品化しました。これを用いれば、最大1mの長さのコア試料を大径材から採取することが可能です。



ウア b の成果の例：

CLTの製造コスト低減モデルを提案しました。



ウア b の成果の例：

ツーバイフォー建築にスギ等の国産材を利用する技術開発を行い、広い空間が実現可能な壁や梁の部材の開発を行いました。

樹木年輪のコア試料を自動採取する装置（スマートボーラー）を開発・商品化



木材加工・特性研究領域 香川 聡

森林バイオ研究センター 藤原 健

成長錐は、樹皮から髄付近までの円柱状のコア試料を樹幹から採取する器具で、木材特性（年輪幅・密度・同位体比他）の評価のための木材試料採取に用いられています。成長錐コアの採取は、従来人力で行われてきましたが、作業者の疲労により1日当たりのコア採取本数・長さが限られるという問題がありました。そこで我々は市販の充電式電動インパクトレンチを動力源とし、この回転力を増幅するためのギアを備えた成長錐コア自動採取装置を開発し、特許申請後にこれを「スマートボーラー」として商品化しました。本装置は、関連する国内および海外の大学、国公立試験研究機関、民間企業の研究者により活用されています。

成果

成長錐による試料採取

成長錐は樹木を伐採することなしに、比較的小さなダメージで非破壊的に木材試料を採取できるため（図1）、木材特性（年輪幅・密度・同位体比他）の評価のための試料採取に用いられています。従来は人力でハンドルを回すことにより試料を採取してきましたが、大径材から長くて（15cm以上）・太い（ $\phi 12\text{mm}$ ）コア試料を採取したり、人力で数多くの樹木から試料を採取したりすることは困難でした。そこで我々は人力ではなく市販のインパクトレンチの動力を利用することにより、自動で成長錐コア試料を採取する装置を開発しました。

回転動力を増幅する遊星ギア

市販のインパクトレンチの回転力だけでは、太くて長いコア試料を採取することは困難ですが、この動力を遊星ギア（ギア比24倍以上）により増幅することで（図2）、堅くて大径の広葉樹樹幹から直径12mm・長さ80cm以上のコア試料を採取できる大きな回転力（トルク）を発生することができま

大きな回転力を可能にする反力受け

先端にらせん刃のついた成長錐ビットを樹幹にねじ込むためには、大きなトルク（ $100\text{kg}\cdot\text{m}$ ）が必要です。作業者の手および足はそれぞれ上部および下部の反力棒を支えており（図3）、作用・反作用の法則により手と足に50kg程度の反力がかかります。そこで我々は、この大きな反力を作業者の手と足の両方で支えるための反力受けをデザインしました（図3）。

成長錐ビットを引き抜くためのソケット

樹幹内が腐朽している場合など、成長錐ビットを逆回転させてもビットが抜けないというトラブルは頻繁に起こります。そこで、我々は成長錐ビットを引っ張ることができる抜け止め機構を備えたソケットを考案し、「スマートソケット」と

して商品化しました。これにより、ビットを逆回転させながら作業者がビットを樹幹から引き抜く方向に引っ張ることが可能になり、腐朽した樹幹にスタックしたビットを速やかに引き抜くことが可能になりました。

製品が利用されている分野

森林総合研究所が保有する特許は民間企業へライセンスされており、開発した装置はすでに国内外で市販されています。人力による採取に比べて約3倍の数のコアを採取できるため、森林科学をはじめとする様々な分野（年輪年代、材質育種、森林動態、放射能分析等）で国内外の研究者により利用されています。特に、大径材や早生樹の材質評価および木材の樹種鑑定・産地判別のための効率的な試料採取に役立っています。

研究資金と課題

本研究は、JSPS 科研費（JP25292111）「安定同位体顕微鏡の開発」および基幹課題*「原木等の特性評価技術の開発及び製材・乾燥技術の高度化」による成果です。

文献

Kagawa, A. & Fujiwara, T. (2018) Smart increment borer : a portable device for automated sampling of tree-ring cores. J. Wood Sci., 64, 52-58.

Kagawa, A. & Fujiwara, T. (2020) United States Patent US 2020/0114433 A1.

専門用語

成長錐：樹木の幹から、樹皮から髄付近までの円柱状のコア試料を採取するための器具（図1）。成長錐はハンドル、ビット（鉄製で先端にらせん刃のついた中空のドリル）、抽出器（半円状の金属棒で、ビットの中に差し込んでコア試料を取り出すために使う）から構成されます。

*森林総合研究所基幹課題



図1 成長錐によるコア試料採取 従来はハンドル（青色の棒）を人力で回すことにより、樹幹に成長錐ビットをねじ込んでコア試料が採取されてきました。



図2 スマートボーラーの構成部品 スマートボーラーは、遊星ギア、反力受け、接続ソケットから構成され、これらが市販されています。



図3 スマートボーラーの使用風景 最大1mの長さのコア試料を大径材から採取することが可能です。

大径材の丸太段階で強度を予測し要求性能に応じた製材品を安定供給する



木材加工・特性研究領域 伊神 裕司・藤本 清彦

構造利用研究領域 加藤 英雄

四国支所 小林 功

戦後造林木が成長し全国的に大径材の供給が増加していますが、その主体は一般材であることから需要が少なく、中径材よりもむしろ大径材の方が低価格で流通しているのが実態です。そこで、大径材から大断面の製材品を生産し、国産材の利用が少ない住宅のはり・けた材や枠組壁工法用部材として活用するための技術開発を行いました。丸太段階で製材品の強度特性および含水率を予測して用途に応じて丸太の選別を行い、予測された強度特性を持つ製材品を確実に効率的に生産する製材・乾燥技術を開発して、要求される製材品を安定供給することが可能となりました。

成果

大径材の供給増と課題

戦後造成されたスギをはじめとする人工林が成長し、末口径が30cm以上の大径材の供給が増加しています。しかし、節が多く年輪幅が広いなどいわゆる一般材と呼ばれるグレードの丸太が主体であり、需要が少なく低価格で流通しているのが実情です。供給が増加しているにもかかわらず需要の少ない大径材の有効な用途の確立が大きな課題となっています。

大径材から得られる製材品の強度特性を丸太の段階で予測する

大径材の需要拡大を目指し、森林総合研究所が代表機関となり、平成28年から5年間の研究プロジェクトを実施しました。プロジェクトでは、大径材から心持ち平角、心去り平角、幅広板などの製材品を生産して、それらを国産材の利用が少ない住宅のはり・けた材や枠組壁工法用部材(ツーバイフォー材)として活用するための技術開発を行いました(図1)。

強度特性が確かであることを要求されるこれらの製材品を大径材から効率的に生産するため、製材品の強度特性に関連するヤング係数(たわみにくさの指標)および密度、乾燥効率に影響する含水率について、それらの丸太内部での分布を製材前の丸太段階で評価する技術を開発しました。これにより、大径材の任意の部位から得られる製材品の強度特性を高い確率で予測できるようになり、含水率の推定結果とあわせて、それぞれの丸太の品質と用途に応じた適切な木取りを設定することが可能となりました。

大径材を効率的に製材・乾燥し要求性能に応じた製材品を安定供給する

さらに、要求される強度特性を満たす製材品を安定供給するためには、大径材に対応した製材・乾燥技術の開発が必要です。一般材の大径材の製材においては、従来の良質な大径材の場合のような手間をかけた製材方法では採算が取れません。そこで、丸太の木口面における樹心位置の自動測定技術や心去り平角の製材時に発生する反りの抑制技術など、大径材製材の効率化に向けた技術開発を行いました。

また、弱減圧乾燥、高周波加熱乾燥などの新しい乾燥技術を適用し、品質と効率のバランスのとれた大断面製材品の乾燥技術を開発しました。例えば、スギ心去り平角の弱減圧乾燥では、従来の常圧の蒸気式乾燥と比較して大幅に乾燥時間を短縮できることがわかりました(図2)。

図3に示すフローチャートを用い、強度特性と含水率の予測結果に基づき用途に応じて丸太の選別を行い、開発した製材・乾燥技術により大断面の製材品を確実にまた効率的に生産することにより、要求される製材品を安定供給することが可能となります。今後は、これらの開発技術の社会実装を進め、大径材の需要拡大に貢献していきたいと考えています。

研究資金と課題

本研究は、生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業(うち先導プロジェクト)」による成果です。

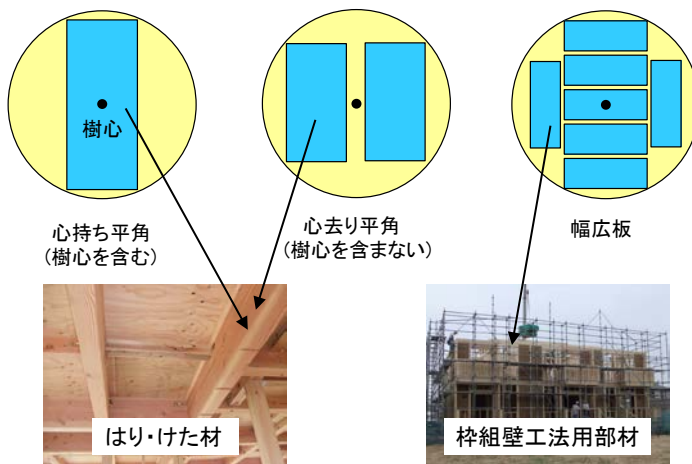


図1 大径材から生産される製材品の利活用

大径材から生産される大断面の製材品を住宅のはり・けた材や桝組壁工法用部材として利活用

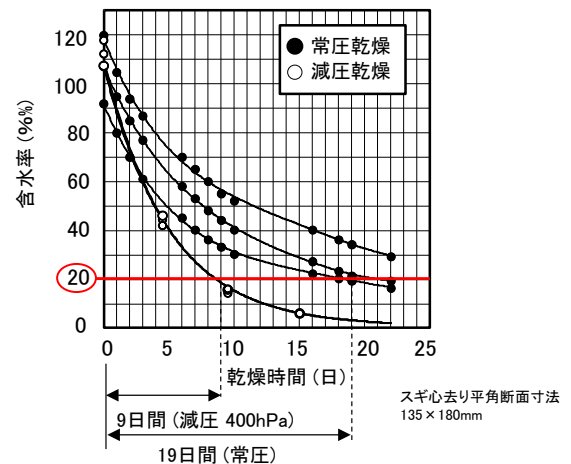


図2 心去り平角の弱減圧乾燥

弱減圧乾燥では、従来の常圧の蒸気式乾燥では19日を要した乾燥時間を9日間に短縮可能

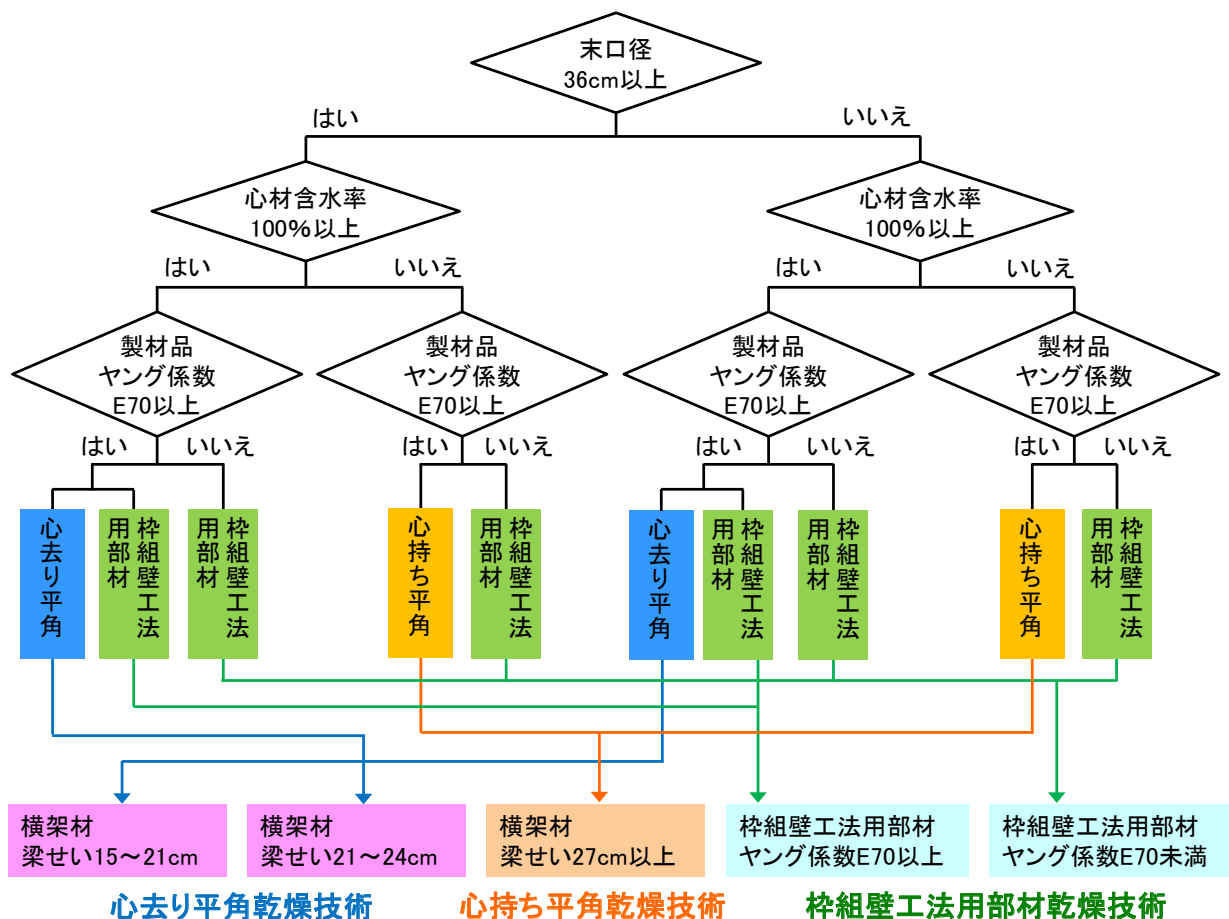


図3 大径材の丸太選別フローチャート

強度特性と含水率の予測結果に基づき用途に応じて丸太の選別を行い、開発した製材・乾燥技術により大断面の製材品を確実にまた効率的に生産することにより、要求される製材品を安定供給

国産材 CLT（直交集成板）の普及に向けた技術開発



複合材料研究領域 平松 靖・渋沢 龍也・宮武 敦

九州支所 塔村 真一郎

企画部 軽部 正彦

木材改質研究領域 上川 大輔

国内の豊富な森林資源を活かして効率的にCLTを製造するための技術開発に取り組みました。原料となる板材（ラミナ）の品質からCLT製品の性能を予測する方法や強度性能評価技術を開発し、様々な樹種で製造されたCLTの強度データを収集しました。その成果は国土交通省が指定するCLTの基準強度に反映されました。また、中高層建築物でのCLT利用に資するために、壁用CLTに2時間の耐火性能を付与する技術を開発し、国土交通大臣の認定取得に活用されました。さらに、製造工程の効率化と製品仕様の標準化による低コスト化技術の開発、製造や流通におけるコストと環境影響の評価に取り組み、製造コスト低減への道筋を示しました。

成果

CLTの強度性能評価技術の開発

CLTを建築物の構造材として利用するために必要となる曲げ、縦引張り、縦圧縮、座屈、せん断強度性能に関する評価技術確立し、原料であるラミナの強度性能、断面寸法、それらの組合せを変えて製造したCLTについて、各強度性能や破壊性状を明らかにしました（図1）。また、ラミナの強度性能からCLTの各強度性能を予測する方法を開発しました。これらの成果は、多様なラミナ構成のCLTの強度性能の予測と評価に役立ちます。

ヒノキやカラマツなど地域材を用いたCLTの強度データ収集

第3期中期目標期間に実施したスギCLTの強度データ収集の成果は、JASの制定やCLTに関する建築基準関連告示の制定に反映されてきました。一方、樹種の特性に応じた基準が未整備であったことから、ヒノキ、カラマツ、トドマツなどの地域材を用いて製造したCLTの短期・長期強度データの収集（図2）に取り組みました。その結果として、樹種によって強度性能が異なること、それらの樹種を用いたCLTの強度性能を推定できることを明らかにしました。これらの成果は、国土交通省が指定するCLTの基準強度に反映され（図3）、樹種に応じた強度性能で設計することが可能になりました。

CLTへの耐火性能付与技術の開発

CLT構造部材を中高層建築物に用いるためには、2時間の火災に耐える性能（2時間耐火性能）が求められます。CLT構造の外壁と間仕切壁を想定した耐火試験の結果、適切な厚さの強化せっこうボードや軽量気泡コンクリートでCLT表面を覆うことで、火災が2時間継続しても内部のCLTは焦げずに十分な強度を持続けることを明らかにしました（図4）。この成果は、業界団体によるCLTを使用した外壁及び間仕切

壁の2時間耐火構造の国土交通大臣認定の取得に活用されました。

CLTの製造コスト低減に関する技術の開発

CLTの製造効率化のため、小型CLT製造実証装置を用いた高速接着技術の開発に取り組みました。また、標準品の量産化によるコスト削減のため、床や壁の用途毎に、標準サイズ・仕様を定め、その製造に適した工場ラインを提案しました。さらに、CLT製造コスト評価のためのシミュレーションツールを開発して、生産量と原材料費に関わるシフト数、ラミナ購入価格等の影響を明らかにするとともに、高速接着技術や標準サイズの導入等の効果を明らかにしました（図5）。本ツールは民間企業等に活用してもらうことで、地域の実情に適したCLT製造の事業化の推進に役立ちます。

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（伐採木材の高度利用技術の開発）」、林野庁委託事業、例えば「CLT等新たな製品・技術の開発促進事業」、生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち経営体強化プロジェクト）」（国産材CLTの製造コストを1/2にするための技術開発）及び（CLTを使った構造物の施工コストを他工法並みにする技術開発）による成果です。

文献

平松靖（2019）「伐採木材の高度利用技術の開発」概要。Journal of Timber Engineering, 141, 9-14.

塔村真一郎、服部順昭（他）（2021）特集 国産材CLTの製造コストを半減し、施工コストを他構法並みにする技術開発。住宅と木材, 44（508）, 2-15.



上図：床利用を想定したせん断試験、
右図：壁利用を想定したせん断試験



図1 CLTの強度性能評価技術の開発



図2 長期強度データの収集

	S1	S2	S3	S4	目視1等 曲げヤング係数
E1	ベイマツなど 4 樹種				11kN/mm ²
E2	ヒノキ、カラマ ツなど 6 樹種				10kN/mm ²
E3		ツガなど 4 樹種			9kN/mm ²
E4		ベニマツ	トドマツなど 9 樹種		8kN/mm ²
E5	ホワイトサイプ レスパイン			スギなど 2 樹種	7kN/mm ²
せん断 強度	2.00N/mm ²	1.83N/mm ²	1.67N/mm ²	1.50N/mm ²	↑ ← JAS基準値

※ E1～E5：曲げ性能による区分、S1～S4：せん断性能による区分

告示改正前：全ての樹種はスギ同等
E5、S4の性能として設計

告示改正後：全ての樹種はその性能
に応じた等級で設計可能に



2時間耐火試験後も、内部 CLT 表面に炭化
はなく、十分な強度を保持した健全な状態

図4 せっこうボード等で被覆した
スギCLT壁の耐火試験後の様子

図3 直交集成板の JAS で定められた全樹種（27 樹種）に強度性能に応じ
た区分を設定

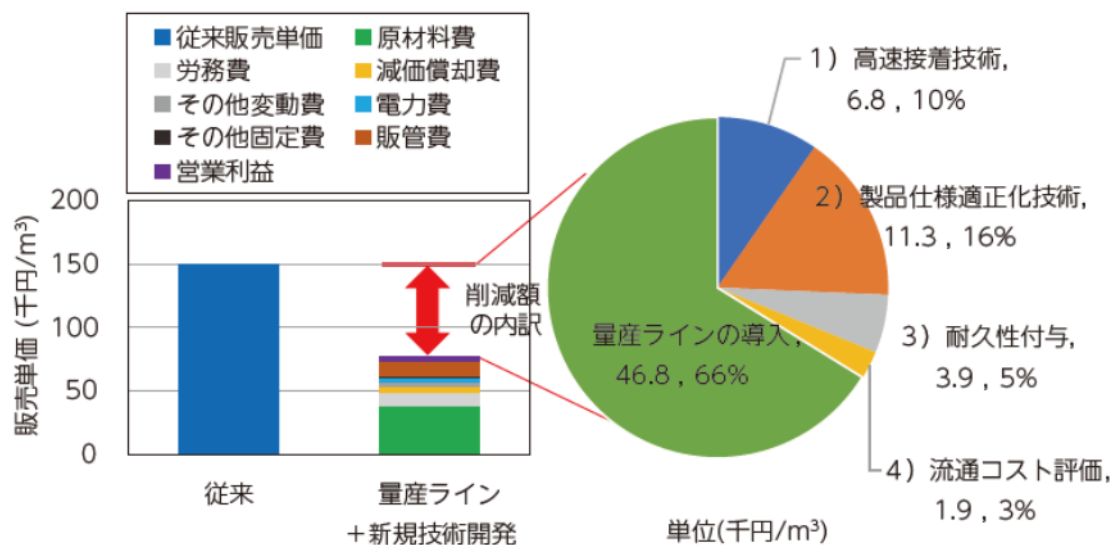


図5 CLT 製造コスト低減モデルの提案と各技術開発要素の寄与率
(中規模工場モデル 1.3 万 m³/年での試算例)

国産材を活用してツーバイフォー建築を強くする



複合材料研究領域 渋沢 龍也・宮本 康太

構造利用研究領域 原田 真樹・杉本 健一・井道 裕史

従来、国産材利用が活発ではなかったツーバイフォーによる中層・大規模建築物の木造化を推進するための研究開発に取り組み、ツーバイフォー建築にスギ等の国産材を利用するための技術開発を行いました。その結果、建物の耐震性能を確保するとともに広い空間を実現できる壁やはり（梁）の部材の開発に成功しました。得られた成果を用いることにより、スギ等の国産材を多用した柱なしの木造建築で、学校の教室やコンビニエンスストアの店舗程度の大きな空間を実現できます。

成果

研究の背景とねらい

断面寸法2インチ×4インチ（38mm×89mm）を中心とした小断面の木材の枠組に面状の木質材料をくぎ打ちしたパネルで構成される木造建築をツーバイフォー（枠組壁工法）建築といいます。ツーバイフォー建築は北米に起源を持つため、使用される木材も北米材を中心とした輸入材でしたが、近年では国産材の供給も増えています。そこで、国産材を利用しやすくするための部材の開発を行いました。たとえば、これまでツーバイフォーの壁は輸入材の枠組材を利用した場合の性能が基準であったため、枠組材に国産材を使用する技術開発は事実上できませんでした。また、オフィスや店舗のような大きな建築物を建てるためには、屋根や上階の床を支えて広大な空間を実現するはり（梁）の部材が必要ですが、その効率的な製造技術が必要でした。そこで、耐震性能の高い壁とはり（梁）を掛け渡す壁の間の距離（スパン）を長くとれるはり部材を開発しました。

耐震性の高い壁部材の開発

まず、木材単体や面材の性能と接合部分の性能に関するデータを接合部分を再現した試験体を用いたせん断試験により集めました（図1）。これらを組み合わせることで、部材の性能を予測し、必要な性能を得られる仕様を検討しました。建築基準法に定められる上限の性能（壁倍率5倍）を当初目標として、壁の耐震性能をシミュレーションしたところ、この目標を達成できる仕様が選定できたため、理論値の妥当性を実験的に確認しました（図2）。さらに、スギの枠組材に加え、他の国産樹種を用いた場合の性能の検証も必要と考え、ヒノキ枠組材を使った壁の試験も実施し、当初目標の2倍（壁倍率10倍）の性能が得られることを示しました。また、高性能の壁の仕様を分かりやすく示した施工図を作成しました（図3）。その結果、国産材を用いた部材により、耐震性の高い建物をつくれることが明らかとなりました。

大空間を実現するはり部材の開発

壁の間の距離8mを掛け渡せることを目的としたはり部材

を開発し、短期荷重に対する設計に必要な性能データを収集するとともに、長期使用時にはりのたわみ量がどれくらい増加するかを検証するために、開発したはり部材を用いた床によるクリープ試験を実施し、十分実用可能であることを確認しました。さらに、掛け渡す壁の間の距離を当初目標の8mの1.5倍（12m）に拡大した高性能のはり部材を開発し、はり部材7本で構成される12m×6mの実大床を作製しました。この床の試験を実施して設計モデルの適用性を検証するとともに、はりの曲げ試験を実施してはり単体の強度性能も評価しました。開発したはり部材を用いることで、学校の教室やコンビニエンスストアの店舗程度の大きな空間を柱なしの木造建築で実現できます（図4）。

研究成果の普及

得られた成果はマニュアル等で公表されています。今後、参画機関等で社会実装を進め、中層・大規模建築物の木造化による炭素固定効果の増大に寄与します。

研究資金と課題

本研究は、生研支援センター「[知]」の集積と活用による革新的技術創造促進事業（うち「知」の集積と活用による研究開発モデル事業）」（複合部材を活用した中層・大規模ツーバイフォー建築の拡大による林業の成長産業化）による成果です。

文献

- 青木謙治（他）（2020）枠組壁工法における構成部材の国産材化と耐力壁の性能評価，木材工業，75（11），513-518。
原田真樹（他）（2020）長スパン木質系面材充腹梁の曲げ性能評価，木材工業，75（11），498-505。

専門用語

壁倍率：幅1mあたり約2kNの力に耐えられる壁の性能を1とし、その何倍の性能を持つか表した数値。数値が大きいほど耐震性能が高い。

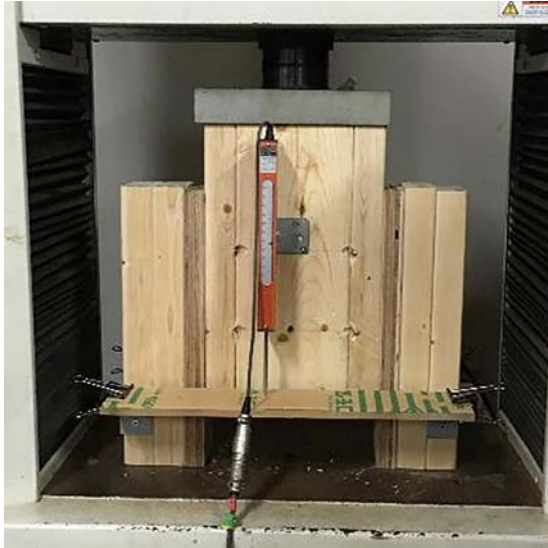


図1 接合部のせん断試験



図2 壁の面内せん断試験

構成要素の性能値から壁部材の性能を予測し、実験により確認しました。

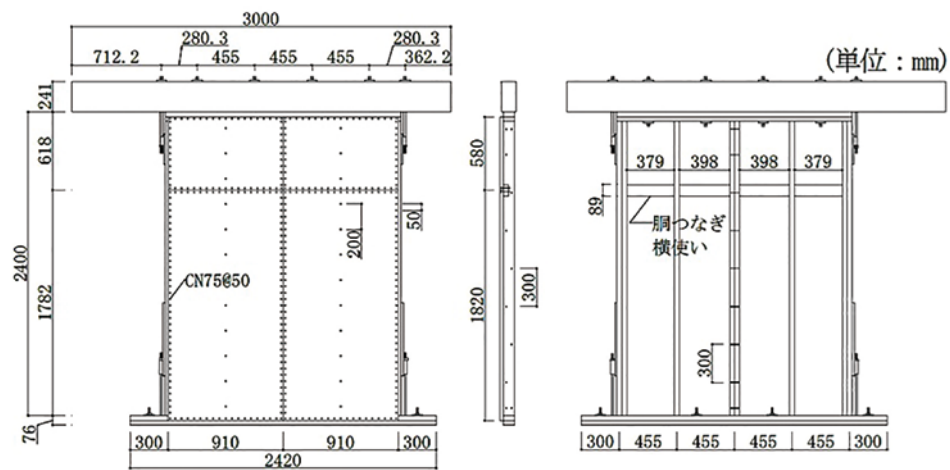


図3 高性能の壁部材の仕様の例

この図に従って施工することで容易に耐震性が確保できます。



図4 高性能のはり部材による実大床

12m×6mの実大床を作製し、性能評価試験を実施しました。

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

間伐材等由来の未利用材の有効利用のため、セルロース、リグニン等木材主成分の有効活用や、未利用抽出成分の機能を活かした、新たな需要創出が求められています。このため、以下の3つの課題に取り組みました。

ウイ a 多糖成分等を利用した高機能・高付加価値材料の開発

ウイ b リグニンの高度利用技術の開発

ウイ c 機能性抽出成分の抽出・利用技術の開発



ウイ a の成果の例 一貫製造技術による CNF



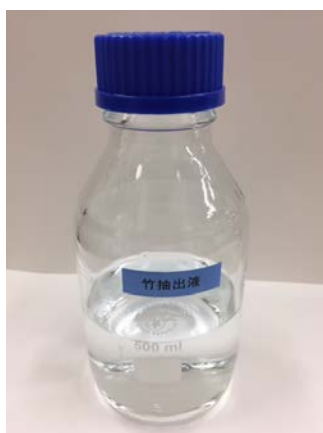
CNF 配合塗料を使用したウッドフェンス



ウイ b の成果の例 高性能改質リグニン



改質リグニンをを用いたスピーカー



ウイ c の成果の例
効率的な抽出法による機能性竹抽出液



竹の抽出残渣から製造した消臭ボード

スギから製造したセルロースナノファイバーを用いた木の美しさを長く維持する塗料の開発



森林資源化学研究領域 下川 知子・戸川 英二・野尻 昌信・渋谷 源・久保 智史・菱川 裕香子

木材改質研究領域 石川 敦子・小林 正彦・神林 徹 研究ディレクター 眞柄 謙吾

玄々化学工業（株） 大木 博成・今井 佳彦・何 昕

森林総合研究所では、スギ等の地域材からパルプを調製し、それを酵素・湿式解砕処理でナノレベルにまでほぐす一貫製造プロセスによりセルロースナノファイバー（CNF）を製造する技術を開発しました。木材用塗料との配合では、粘性が比較的低いCNFの方が粘性の高い塗料用樹脂と混合しやすいことが分かりました。そのため、汎用的なCNFよりも粘性の低いCNFを調製し、塗料へ均一に混ぜられるようになりました。CNF配合塗料を木材に塗装して促進耐候性試験を行ったところ、表面の割れが減少し、下塗りに用いた場合に表面の変色が抑制されました。開発した下塗り塗料は、「CNFシーラー」として実用化し、木製の食器や外壁の下塗り塗装に使用されています。

成果

一貫製造で作る木材用塗料に適したCNF

木質系バイオマスから得られるCNFは、木材中のセルロースを主とする多糖成分をパルプとして取り出し、その繊維を様々な方法でナノレベルにまで解繊して調製する軽くて丈夫な天然素材です。地域で得られる木質系バイオマスをCNFとして活用するため、中小規模でのCNF製造を可能とする、ソーダ・アントラキノン蒸解法によるパルプ化と、汎用機器を使用した酵素処理と機械的な湿式解砕を併用した酵素・湿式解砕法でナノ化を行う一貫製造プロセスを開発しました。このプロセスでスギから調製されたCNFは、幅が3～100nmであり、白濁した外観を示しました（図1a）。一般に、CNFを含む複合材料において、その性能を十分に引き出すためには均一な混合が必要です。一貫製造プロセスで製造した粘性の低いスギCNFは、粘性が高い塗料用樹脂とも容易に混合することができました（図1b、1c）。塗料に配合可能な性能を有するCNFの製造コストを削減するため、パルプ化における漂白工程の簡略化と製造スケジュールの見直しを中心に製造方法の改良を行いました。その結果、CNFの乾燥重量あたり、4,858円/kg（99t/年の製造規模）で製造可能との試算結果になり、開発を始めた当初の平成27年度に試算した製造コスト（改良前）と比べて二分の一以下となりました（表1）。

CNF配合による塗料の性能改良

木材塗装には一般的に、下塗り、中塗り、上塗りの3工程があります（図2）。CNF配合塗料を上塗りまたは下塗りに用いてスギ材を塗装し、人工太陽光と人工降雨による影響を調べる促進耐候性試験を行いました。塗料へCNFを配合することで、塗膜の割れ等の表面欠陥の発生が減少し、特に下塗り塗料（CNFシーラー）に用いた場合、表面の変色が抑制されました。図3は、CNFシーラーを用いることで木製食器の変色が抑制された例です。CNF配合によって、紫外線や酸素といった環境劣化要因を防ぐことが塗膜全体の安定化につながり、変色を抑制した要因の一つになったと考えています。

CNFシーラーの可能性

変色抑制効果が期待できるCNFシーラーを用いることで木製品に対して明確な美観維持効果が認められたことから、CNFシーラーの試験施工を実施しました。木材用塗料の実際の使用場面では、施工上の取り扱いの容易さや個々の設置環境での劣化の評価が必要です。そのため、工場でのスプレー塗装及び刷毛塗り塗装で木製ベンチやフェンス等にCNFシーラーを塗装し、経年観察を行っています（図4）。

現在、環境への配慮から、建築物の内外壁、家具、食器など、様々な用途への木材利用が広がっています。CNFシーラーを使用することで、これら木製品の美観を維持し、製品寿命を延ばす効果が見込まれ、木材需要の拡大が期待できます。

研究資金と課題

本研究は、林野庁補助事業「木材のマテリアル利用技術開発事業のうち新素材製造・利用技術開発事業」「地域材を活用したセルロースナノファイバーの用途技術開発」及び林野庁補助事業「林業イノベーション推進総合対策のうち新素材による新産業創出対策事業」「地域材セルロースナノファイバーを用いた木材用塗料の製造実証」による成果です。

文献

Magara K et al. (2021) Preparation of raw materials for cellulose-nanofiber blending water-based paints. Jpn Tappi J 75 (6) : 553-568.

石川敦子（他）（2019）酵素・湿式粉碎処理により製造されたセルロースナノファイバーを配合した塗料の性質。木材保存 45（2）：68-76

専門用語

ソーダ・アントラキノン蒸解法：アントラキノンという触媒を添加して、苛性ソーダ（水酸化ナトリウム）により木材をパルプ化する方法。

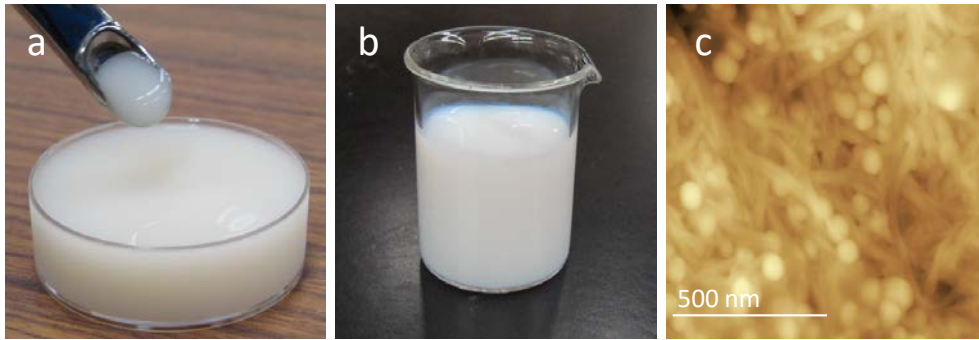


図1 一貫製造プロセスで製造したCNF (a)、CNFシーラー (b) の外観と、CNFシーラー塗膜表面の原子間力顕微鏡観察図 (c)

CNF懸濁液のCNF含有量は2.4wt%、CNFシーラー中のCNF含有量は1.5wt%です。

表1 CNF製造コスト試算の概要

項目	単位	改良前	改良後
製造コスト (CNF乾燥物)	円/kg	12,106	4,858
生産量 (CNF乾燥物)	t/年	35	99
生産効率	h/バッチ	24	8
機械設備費	%	100	90.5

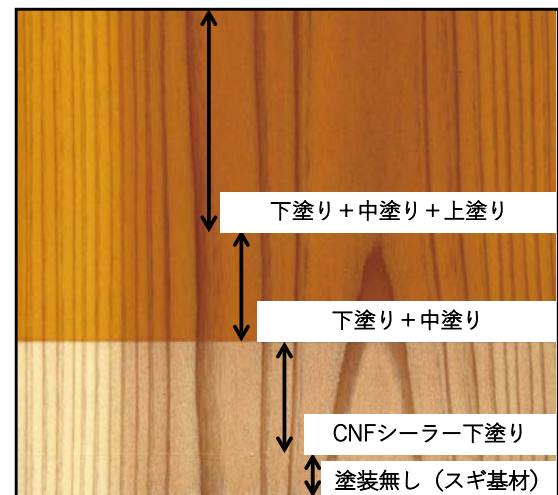


図2 CNFシーラーの塗装例

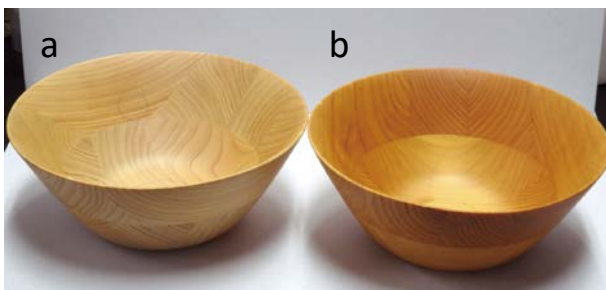


図3 木製食器を用いた紫外線暴露試験結果

CNFシーラーを下塗りに用いた場合 (a) と、用いない場合 (b) で変色程度に差が生じます。



図4 CNFシーラーを使用した木製外構柵の試験施工 (高知県嶺北森林管理署)

森林資源由来の高性能プラスチック代替素材 「改質リグニン」の開発



新素材研究拠点 山田 竜彦・ネーティティ・大橋 康典・高橋 史帆・高田 依里

森林資源化学研究領域 池田 努

リグニンは、植物細胞壁を構成する成分の一つで、木材には約20～35%含まれています。リグニンは樹木をしっかりと構造にする役割をもつ成分で、高性能材料の素材となる可能性をもつものの、バラツキが大きく、変質もしやすいため工業材料化は困難と考えられてきました。私達は、リグニンの有効利用の方法を検討する中で、リグニン源を国内のスギに限定してバラツキを解消し、高い加工性をもつように改質しながら抽出する新技術の開発に成功し「改質リグニン」とよばれる新素材を生み出しました。改質リグニンは熱に強い、加工しやすい、環境にやさしいという理想的な特徴を持ち、様々な製品の素材としての活用が期待されています。

成果

改質リグニンの開発

リグニンは陸上植物を固くしっかりと構造にする役割を持つ成分で、地上2番目に多い有機化合物といわれています。石油化学製品の代替素材としても有望視されてきましたが、植物の種類により性質が異なり、バラツキも大きく、変質もしやすいので、高性能な工業材料化は困難とされていました。私達は、リグニンの有効利用の方法を模索する中で、次の2つの観点から技術を見直し、新しい素材の開発に成功しました。

一つはリグニン源の絞り込みです。この点においては、日本の山林には大きなアドバンテージがありました。リグニン源として適していたのは「スギ」だったのです。スギは日本の林業を代表する造林木で、一属一種の日本固有の針葉樹です。幸いなことにスギのリグニンは均一で、他の樹木に比べて構造のバラツキが少なく、性質の安定したリグニン源として適していました。

もう一つは、工業材料用素材として求められる加工性を担保した取り出し方です。それには、ポリエチレングリコール（PEG）という安全で生分解性を持つ薬剤を用いることで達成できました。スギの木粉をPEGに浸漬して少量の酸と共に加熱することで、リグニン部分を分解すると同時にPEGと結合して、改質する新技術を開発しました。生産物は、PEGで改質されたリグニン分解物であるので、PEG改質リグニン（改質リグニン）、もしくはグリコールリグニン（GL）と呼ばれています。改質リグニンの製造技術においては、一度に50kgの木粉を仕込むレベルのベンチプラントまでスケールアップしたシステム開発と効率化の検討を行いました（図1）。改質リグニンの生産は、端材（おがこ、鉋屑）など未利用物を

用いることを想定しており、既存の木材産業への追加のビジネス展開が可能で、中山間地域の活性化への貢献が期待されています。

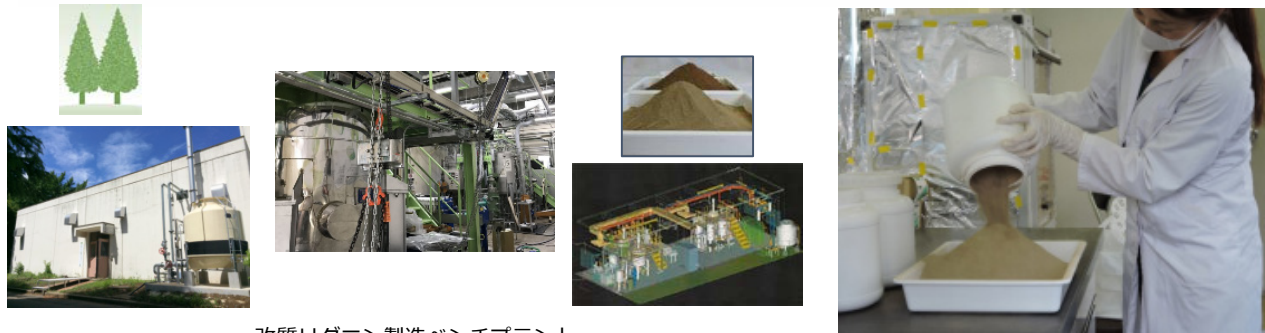
改質リグニンの製品展開

改質リグニンは、天然由来の芳香族系高分子でありながら、結合したPEGの作用で製品化する際の加工性に優れており、工業材料化において使いやすい素材となっています。芳香族系高分子の特徴である、高強度や高耐熱性などの特徴を生かして様々な高機能材料が試作できました（図2）。炭素繊維などの繊維強化材（FRP）を製造する際に繊維を固めるための樹脂（マトリックス樹脂）として利用すると、高強度な炭素繊維強化材料（CFRP）やガラス繊維強化材（GFRP）が製造できることで注目されています。GFRPの応用としては、世界で初めて自動車用の外装材にリグニン系材料を導入した試験車を製造し実装試験を進めています（図2④）。また、ハイレゾスピーカーのウーファースの素材として採用され、商品化も達成されました（図2⑤）。改質リグニンは高性能でありながら、環境中で分解するため、流出しても海洋プラスチック汚染問題を生じない地球の炭素循環に適合するエコ素材で、脱炭素社会・ゼロエミッションの達成に貢献することができ

研究資金と課題

本研究は、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「次世代農林水産業創造技術」（管理人：生研支援センター）（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）による成果です。

森林由来の新素材「改質リグニン」の製造プロセスを開発



改質リグニン製造ベンチプラント

改質リグニン

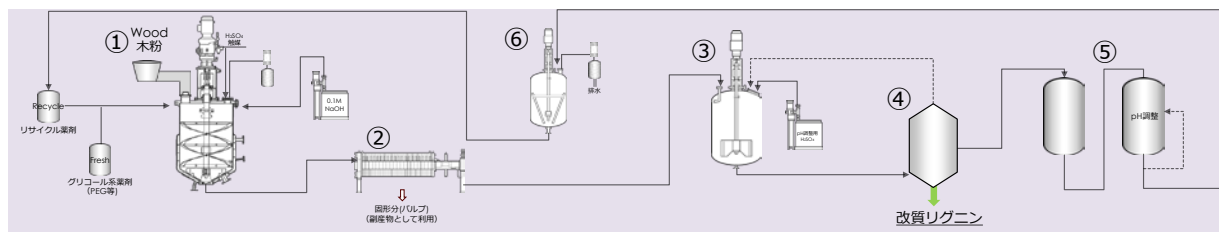


図1 改質リグニン製造ベンチプラントの工程

①加溶媒分解リアクター（木材中のリグニンは分解すると同時にPEGと結合して改質される）、②フィルタープレス（副産パルプを分離）、③酸沈殿工程（酸性化することで分離）、④濾過もしくは遠心分離による固液分離、⑤薬液リサイクル（水を除去してPEGを再生）

改質リグニンを用いた製品開発例



改質リグニン粘土ハイブリッド膜



タッチセンサー用改質リグニンフレキシブル基板



改質リグニン電子基板



改質リグニン外・内装材（繊維強化材：FRP）搭載車両



改質リグニン炭素繊維強化材を導入したウーファーユニット



改質リグニンをウーファースの素材として導入したハイレソスピーカー



ジビエストレッチャー（ジビエ搬出装置）（改質リグニン繊維強化材）



改質リグニンジョイントシート配管シール材（ガスケット）



3Dプリンター用生分解性改質リグニンフィラメントと3Dプリンター造形物

図2

写真：①、②、③産総研、④森林総研、産総研、(株)宮城化成、(株)光岡自動車、⑤オオアサ電子(株)、(株)宮城化成、⑥長野トヨタ(株)、(株)宮城化成、⑦ジャパンマテックス(株)、⑧ネオマテリア(株)、森林総研

竹の効果的な利用法



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・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。そのため、竹林の適切な管理を行うには大量消費に繋がる効果的な利用法の開発が必要です。そこで環境への負荷が少ないマイクロ波処理技術により、竹から高付加価値素材（抽出液、抽出残渣）を製造する方法を開発しました。抽出液は抗菌・抗ウイルス活性の他、リラックス効果、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、抽出残渣は悪臭や有害物質の除去剤として活用でき、さらに残渣からセルロースナノファイバーが製造でき、それをボードの接着面に均一に混入したところ、曲げ強度が数十パーセント向上でき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、竹の付加価値の高い効果的な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、変形しにくい性質がある一方で、加工性が高い特性を有するため、家具類、団扇、器具類等として利用されてきました。その他竹の皮は食品などの包装用として利用される例があります。一方で、竹の葉や稈に含まれる成分には私たちの生活に役立つ機能があります。例えば、ハチクの皮は竹筴（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見出された強い抗菌性物質は消毒剤等として製品化されています。しかしながら、これらに利用されている竹の量は限定的です。

効率的な利用技術の開発—無駄のない総合利用を目指して—

竹を効率よく利用するには、簡便かつ速やかな処理技術が必要です。また廃棄物をださず、環境への配慮も考慮した利用法も重要です。そこで、「減圧式マイクロ波抽出装置」（図2）を用いました。本法は、竹に含まれている水分に対してマイクロ波で加熱して蒸気を発生させ、それを利用して竹に含まれている有効成分を抽出します。この操作を減圧状態で行うと、低温（60℃前後）状態での抽出も可能になるため、変質の少ない優れた品質の抽出液が得られます。またマイクロ波処理は加熱効率が高いため抽出時間を短縮でき、大量処理が容易となり、効率的な利用につながります。加えて抽出時に試料から水分が除かれるため含水率の低い抽出残渣が得られます。そのため乾燥の必要がなく、そのまま利用できます。この方法により竹を無駄なく使い切る総合的な利用が可能となります（図3）。

抽出液の用途

竹の抽出液には、日常生活で問題になる有害菌等に対して優れた抗菌効果が認められている他、インフルエンザウイルスに対する不活化効果も優れていることが明らかになっており、各種消毒剤の原料として利用の可能性があります。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ッ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利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には、アンモニア等の悪臭や二酸化窒素等の有害物質に対する除去活性が高いことが判明し、その機能を活かした消臭剤が開発できました。さらに、抽出残渣からセルロースナノファイバー（CNF）を製造し、それらをパーティクルボード（PB）に添加したところ、ボードの曲げ強度が数十パーセント向上できました（図5）。この成果を利用し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かつ大量に利用できます。そのため、放置竹林等の適切な管理を推進できる他、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、林野庁木材需要創出総合プロジェクト事業のうち地域材利用促進のうち木質バイオマスの利用拡大に係る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

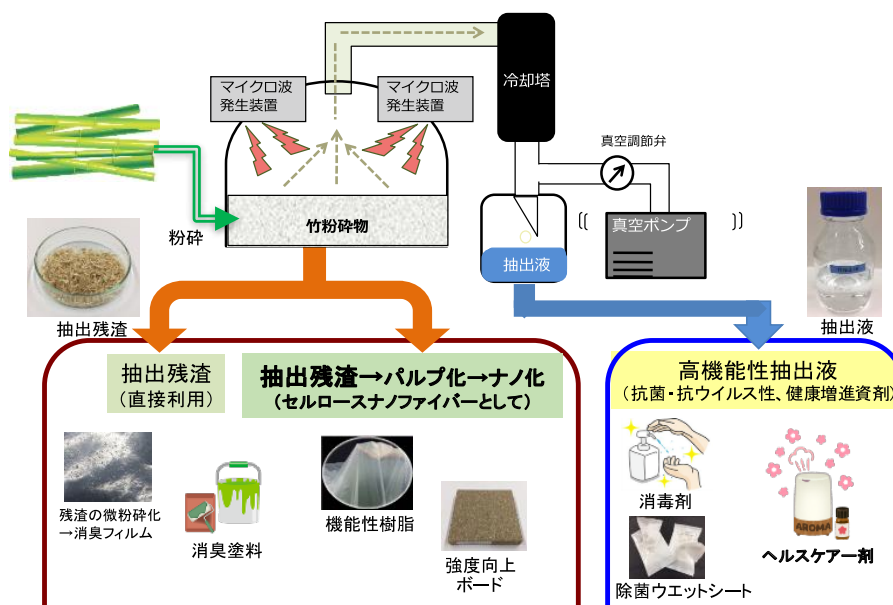


図3 マイクロ波抽出処理を起点とした竹の効果的な利用法

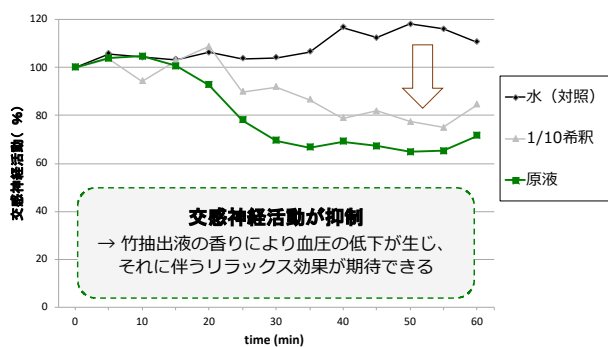


図4 竹抽出液によるラット交感神経活動への影響

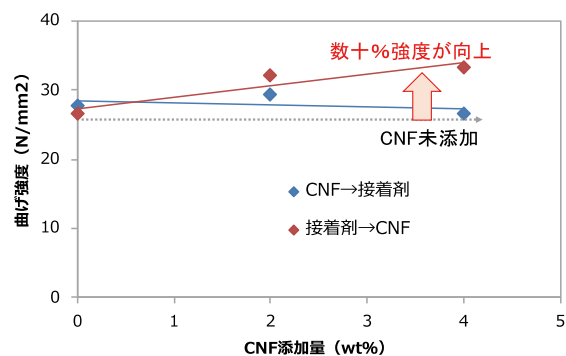


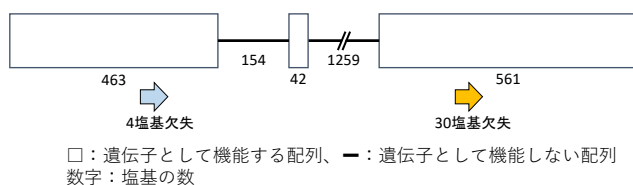
図5 竹抽出残渣由来CNFを添加したPB強度
接着剤添加後、CNFを添加すると強度が向上する

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

森林生態系に影響を及ぼす環境問題等への対応や森林資源の持続的な利用のため、分子生物学等の先端技術を活用して樹木が有する様々な機能を解明し、新たに有効活用する技術を高度化するとともに、きのこや森林微生物のもつ食用、腐朽分解、代謝などの特異な生物機能を解明し、産業創出に寄与すべく新たな利用法を開発する必要があります。このため、以下の2つの課題に取り組みました。

エア a 樹木の生物機能の解明とその機能性の新たな有効活用

エア b きのことび微生物が有する生物機能の解明と新たな有効活用



花粉生産の抑制に寄与する不稔性遺伝子 $MS1$ を、雄花で働く遺伝子の発現解析や連鎖地図の作成、DNA配列の探索によって針葉樹において世界に先駆けて特定しました。



アンモニアの同化酵素であるグルタミン合成酵素 (GS) の2つのタイプのうち、光合成の代謝系に含まれるGS2が、裸子植物には存在していないか又は存在しても機能が損なわれており、これらの植物では、光合成に関わる代謝経路が異なる可能性が示されました。



高温発生型の遺伝子座が検出された品種を交配して作出したシイタケ菌株は、従来品種の管理条件よりも高温の環境で栽培しても良好にきのこを発生させました。



トリュフ菌を予め共生させたコナラ苗を圃場に植栽した1年後に根系の観察を行ったところ、植栽後に伸長した根にトリュフの菌根（赤線で囲んだ部分）が新たに形成され、菌が定着していることがわかりました。

DNA 分析によって無花粉スギの原因となる遺伝子 (*MS1*) を特定しました



樹木分子遺伝研究領域 長谷川 陽一・上野 真義・魏 甫錦・内山 憲太郎・伊原 徳子・伊ヶ崎 知弘

企画部 松本 麻子 元森林総合研究所 二村 典宏 筑波大学 津村 義彦 新潟大学 森口 喜成

花粉発生源対策に有効な無花粉スギを高精度で選抜するには、無花粉の原因となる遺伝子を特定することが必要です。しかし、スギのDNAは、ヒトのDNAの3.5倍に達する110億塩基と巨大なため、その原因遺伝子を特定することは、これまでできませんでした。そこで、雄花で動く遺伝子の発現解析や連鎖地図の作成、DNA配列の探索を組み合わせ、これまでになく詳細に分析を行うことで、無花粉を引き起こす原因遺伝子のひとつである*MS1*を特定しました。この遺伝子の塩基配列の違いを識別して、無花粉を引き起こす遺伝子を持つスギ個体を見つけ出すことが可能になりました。

成果

花粉症対策のための無花粉スギの利用

国民の約3割が花粉症に悩んでいるといわれる現代において、植栽する種苗を無花粉スギに置き換えることは、植林による有効な花粉症対策のひとつです。無花粉スギは1992年に富山県で初めて見つかりました。その後、花粉形成の有無を丹念に調べて無花粉個体が探索されましたが、全国で約20個体しか見つかりません。地域の気候風土に合わせてスギを植えるためには、さらに多くの無花粉スギを探し出す必要があります。

無花粉スギの原因遺伝子 (*MS1*) の特定

花粉発生源対策に有効な無花粉スギを高精度で選抜するには、無花粉の原因となる遺伝子を特定することが必要です。そこで、原因遺伝子のひとつである*MS1*遺伝子の発現メカニズムと連鎖地図上の位置及び塩基配列の特徴を調べました。

まず、*MS1*遺伝子を持つ無花粉スギは、花粉の細胞壁の形成に異常があることがわかりました (図1)。次に、無花粉スギの染色体の地図 (連鎖地図) を作り、*MS1*遺伝子が存在する位置を明らかにしました (図2)。この部位には、花粉の細胞壁の材料となる脂質の輸送に関与するタンパク質を作る遺伝子 (CJt020762) が存在していました (図3)。無花粉スギでは、この遺伝子のDNA配列の2か所でそれぞれ4塩基と30塩基が欠損していました。そのどちらかが欠けている遺伝子を両親から受け継いだスギ個体は、無花粉になることを明らかにしました。このようにして、*MS1*遺伝子による無花粉化のメカニズムを明らかにしました。

無花粉遺伝子を持つスギ個体の探索

無花粉を引き起こす*MS1*遺伝子を片親だけから受け継いだ個体は正常に花粉を作るため、無花粉遺伝子を持つスギを見つけ出すことは容易ではありません。*MS1*遺伝子が特定され

たことで、外見上は正常でも無花粉遺伝子を持つスギを探し出すことが可能になりました。例えば、宮城県石巻市のスギ天然林から無花粉を引き起こす*MS1*遺伝子を持つスギ個体が新たに見つかりました (図4)。今後は、*MS1*の他の3種類の雄性不稔遺伝子 (*MS2*, *MS3*, *MS4*) も特定し (図2)、より多くの無花粉スギが利用できるようにしたいと考えています。

研究資金と課題

本研究は、林野庁事業「遺伝子組換えによる花粉発生制御技術等の開発事業」、交付金プロジェクト*「有用遺伝子の特定に向けたスギ全ゲノム走査」、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「無花粉スギの普及拡大に向けたDNAマーカー育種技術と効率的な苗木生産技術の開発」、生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」(成長に優れた無花粉スギ苗を短期間で作出・普及する技術の開発)、基礎生物学研究所共同利用研究「スギの全ゲノム配列の解読 (課題番号16-403、17-405、18-408)」による成果です。

文献

- Moriguchi, Y. et al. (2016) Tree Genet. Genomes, 12, 57.
Hasegawa, Y. et al. (2018) PLoS One, 13, e0206695.
Futamura, N. et al. (2019) Tree Genet. Genomes, 15, 30.
Hasegawa, Y. et al. (2021) Sci. Rep., 11, 1496.

専門用語

発現：タンパク質を合成するため、DNAがメッセンジャーRNAに転写されること。

連鎖地図：組換え頻度に基づいて遺伝子座を配置した地図。染色体上の遺伝子の並びを示している。

DNAマーカー：特定の遺伝的変異を識別するために使用する、固有の塩基配列のこと。

*森林総合研究所交付金プロジェクト

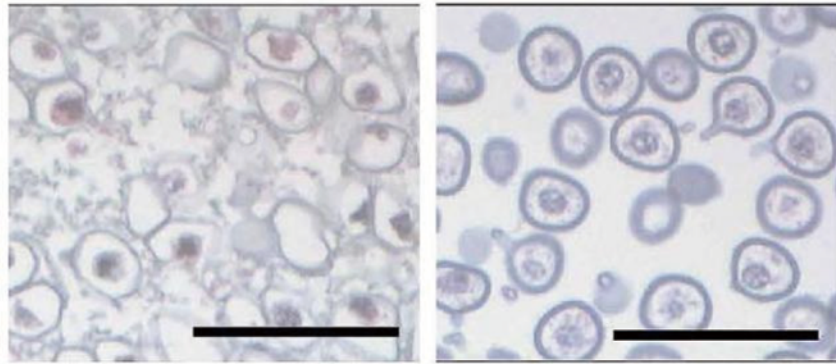


図1 成熟前の花粉（小孢子）の比較

左：細胞壁の発達が認められないMS1雄性不稔スギ個体の花粉形成過程。
右：正常個体の花粉形成過程。スケールバーは0.05 mm。

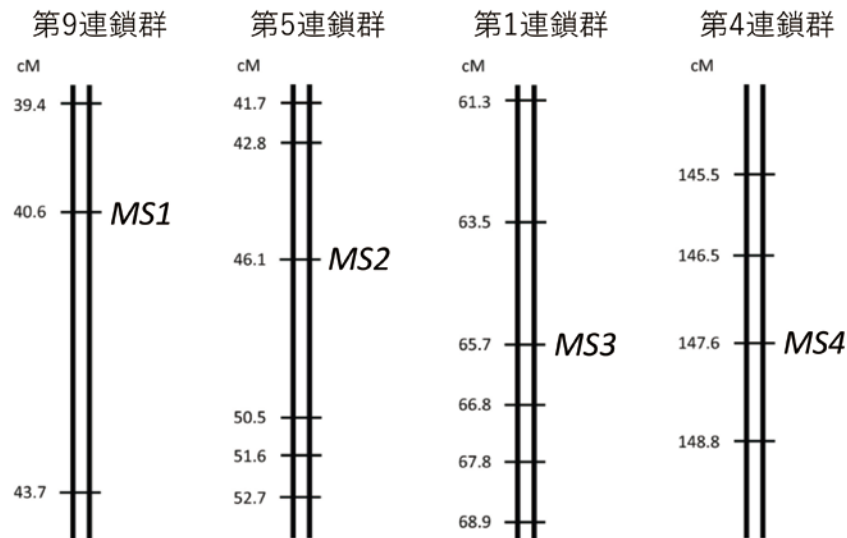
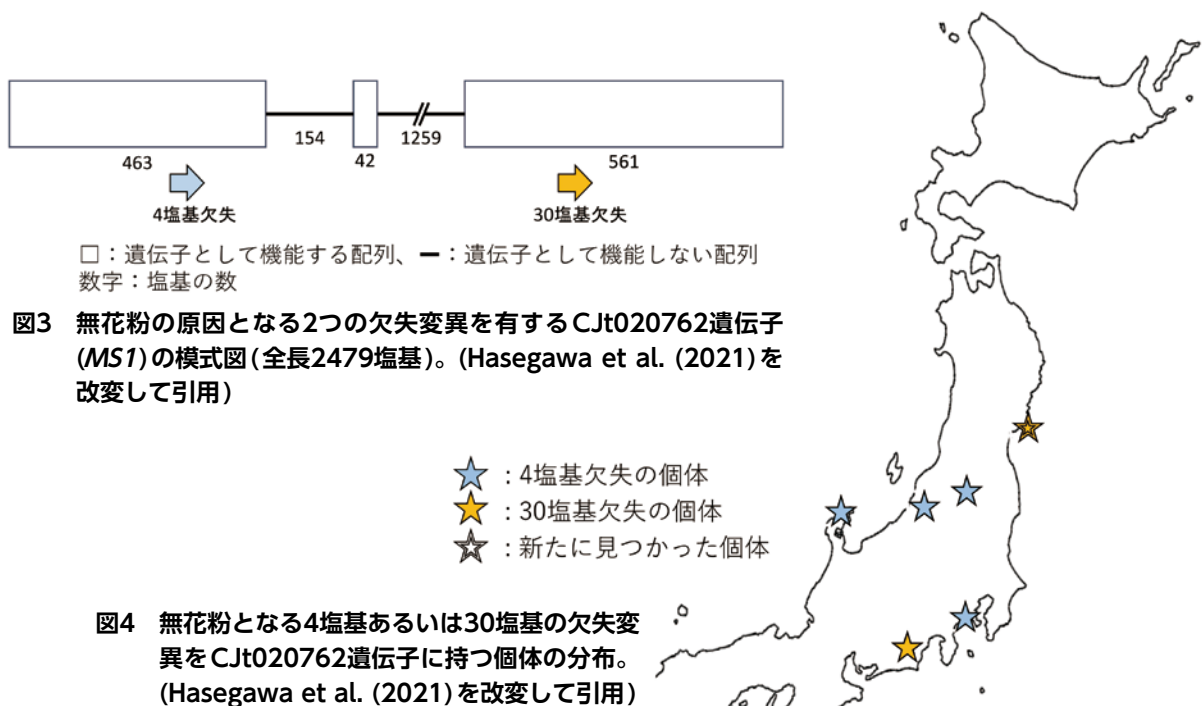


図2 4つのスギ雄性不稔遺伝子 (MS1~MS4) 近傍の連鎖地図。1本の連鎖群は、スギの11本の染色体の内の1本に対応する。数字は雄性不稔遺伝子およびDNAマーカーが存在する位置をあらわす。(Hasegawa et al. (2018)を改変して引用)



裸子植物と被子植物の光合成のしくみは異なる



樹木分子遺伝研究領域 宮澤 真一・伊原 徳子・田原 恒・西口 満

森林防災研究領域 深山 貴文

植物生態研究領域 飛田 博順 岩手大学 鈴木 雄二

草本植物や広葉樹は被子植物に分類され、スギやマツなどの針葉樹、イチョウ、ソテツなどは裸子植物に分類されます。これまで、裸子植物の光合成のしくみは被子植物と同じであると考えられてきましたが、光合成の一部である光呼吸という代謝に違いがあることが明らかとなりました。さらに、光呼吸に関わる酵素であるルビスコの性質を調べる新たな手法を開発し、裸子植物のルビスコの性質を初めて明らかにしました。光呼吸は植物のCO₂固定量を左右する代謝です。裸子植物の光呼吸の代謝経路の全容を解明できれば、地球環境の変化に影響を受ける森林のCO₂固定量の予測精度の向上が期待できます。

成果

裸子植物はアンモニアを多く放出する～見えてきた被子植物の光合成との違い

植物の葉は細胞中のアンモニア(NH₃)を放出したり、逆に空気中のNH₃を吸収したりします。葉のNH₃放出のしやすさを示す γ_{NH_3} という指標を計測したところ、ギンドロなどの広葉樹に比べ、スギなどの針葉樹は顕著に γ_{NH_3} が高く、NH₃を放出しやすいことがわかりました(図1a)。この原因を明らかにするため、遺伝子情報などをもとにして、主要なNH₃同化酵素であるグルタミン合成酵素(Glutamine synthetase, GS)の種類を調べることにしました。

GSは2つのタイプに分けられます(図1b)。ひとつは細胞質に存在するGS1(細胞質型)、もうひとつは葉緑体に存在するGS2(葉緑体型)です。様々な植物の葉を材料に、抗体を用いる手法でGSを識別した結果、被子植物にはGS1とGS2の両方が存在していましたが、イチョウを除く裸子植物にはGS1のみしかありませんでした(図2)。また、イチョウのGS2の遺伝子情報を解析したところ、機能が損なわれるような変異が生じていました。葉の細胞で発生するNH₃はGS2により同化されることが通説です。そのため、裸子植物である針葉樹の葉のNH₃が放出しやすいことは、GS2が存在しないためであると考えられました。GS2は光合成の一部である“光呼吸”の代謝経路に含まれることから(図3)、被子植物と同一と考えられてきた裸子植物の光呼吸の代謝経路を見直す必要が生じました。

ルビスコの性質を調べる新たな手法を開発

光呼吸は、CO₂固定酵素であるルビスコがO₂を固定することで誘導される代謝経路で、最終的にCO₂が発生します(図3)。そのため、植物の実際のCO₂固定量は、ルビスコが固定するCO₂量と、O₂固定で誘導された光呼吸から発生したCO₂量との差が重要です。ルビスコのCO₂固定能力とO₂固

定能力は、種によって異なります。この能力の違いは比特異係数という数値で表され、値が高いほど、O₂よりもCO₂を固定する能力が高いルビスコであることを意味します。今回、ルビスコの比特異係数を調べる新たな手法を開発し、これまで未解明であった裸子植物のルビスコの性質を明らかにしました(図4)。その結果、裸子植物であるイチョウのルビスコはCO₂固定の能力が特に低いことが明らかになりました。

本研究は、針葉樹(裸子植物)におけるNH₃発生が被子植物と異なることに注目して始まり、その後の展開により、CO₂固定量に影響を与える光呼吸の代謝経路が、被子植物と裸子植物との間で異なる可能性を示すに至っています。CO₂固定量を予測する数式モデルは被子植物の代謝経路をもとに考案されています。針葉樹は世界の森林面積の約3割を占めることから、今後、裸子植物の光呼吸の代謝経路の全容を解明して、数式モデルの改良を進めることで、CO₂固定量の予測精度の向上が期待できます。

研究資金と課題

本研究は、交付金プロジェクト*「裸子植物・針葉樹における新たなCO₂固定モデルの構築」、JSPS 科研費(JP19H03006)「針葉樹の炭素固定量予測モデルの精緻化に向けた光呼吸代謝の解明」による成果です。

文献

Miyazawa, S.-I. et al. (2018) Low assimilation efficiency of photorespiratory ammonia in conifer leaves. J. Plant Res., 131, 789-802.

Miyazawa, S.-I. et al. (2020) Oxygen response of leaf CO₂ compensation points used to determine Rubisco specificity factors of gymnosperm species. J. Plant Res., 133, 205-215.

*森林総合研究所交付金プロジェクト

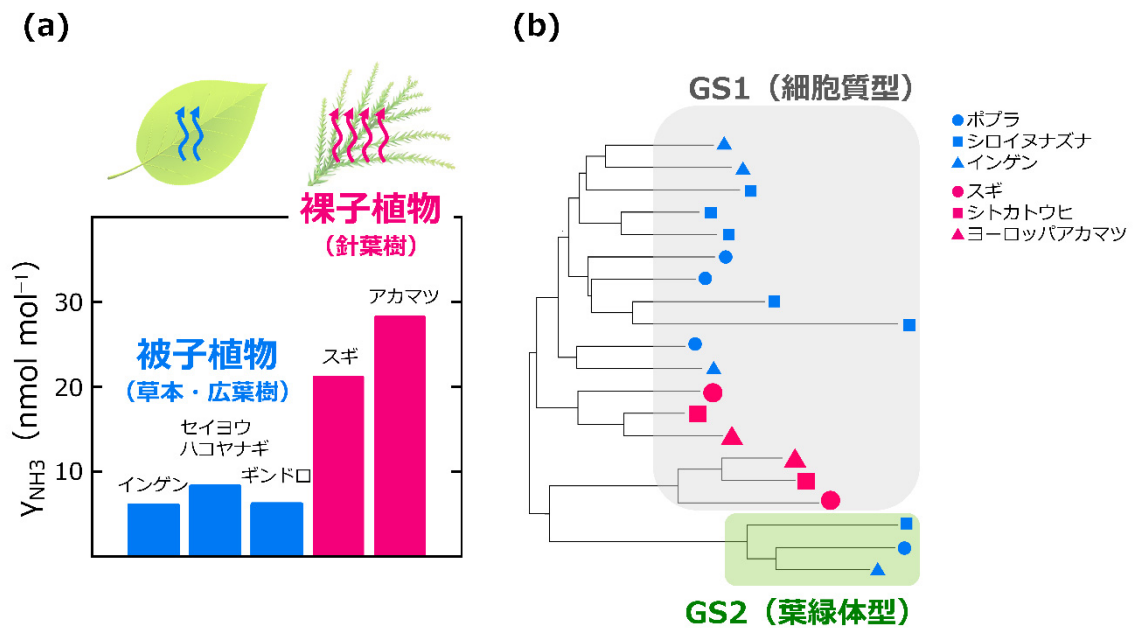


図1 (a) γ_{NH_3} は葉のアンモニア放出のしやすさを示す指標
(b) 遺伝子情報をもとに分類したグルタミン合成酵素 (Glutamine synthetase, GS) (Miyazawa et al. (2018) の図を改変)



図2 抗体を用いたGS1とGS2の検出 (Miyazawa et al. (2018) の図を改変)

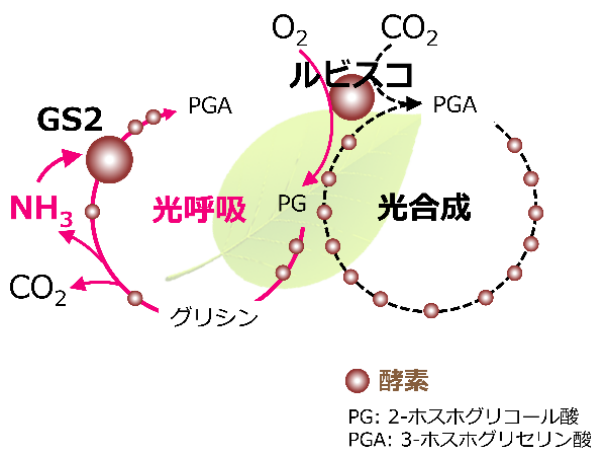


図3 光合成の代謝経路の概略

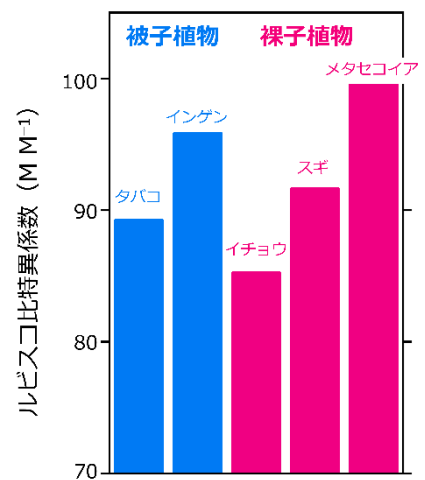


図4 ルビスコ比特異係数の比較 (Miyazawa et al. (2020) より)

地球温暖化に適応したシイタケ品種の開発



九州支所 宮崎 和弘・木下 晃彦 多摩森林科学園 加藤 珠理
岩手生物工学研究センター 坂本 裕一 秋田県立大学 村口 元
大分県農林水産研究センター 石井 秀之・彌田 涼子・宮本 亮平・川口 真司・石原 宏基・十時 しおり
株式会社北研 後藤 史和・山内 隆弘

地球温暖化の影響は、すでにいろいろなところに表れています。シイタケの栽培をとりまく環境も例外ではなく、すでに発生不良や子実体の品質低下、生産者施設の光熱費の負担増など、継続的生産にマイナスの影響が見られています。山村・中山間地域の多くで、シイタケ生産が基幹産業となっており、将来にわたって安定的な生産を維持していくためには、従来品種よりも高温環境下で安定的に発生する品種の開発が不可欠となります。そこで、本研究では将来的な品種開発の活性化を視野に入れ、シイタケのゲノムデータを整備するとともに、高温発生型の菌株を検出するマーカーを開発し、マーカーを用いて選抜した菌株間の交配と各種試験を通じて有望菌株の選抜を行いました。

成果

シイタケのゲノムデータの整備

シイタケをはじめとした食用きのこの品種育成（以下、育種）は、通常優良な形質を有する菌株間の交配による、交雑育種を基本とします。しかし、この方法は偶然に依存するところが多く、効率の悪い方法と言えます。そこで、優良な品種を効率よく育種するためには、目的とする形質を有する株を、できるだけ早期に簡便に選抜する必要があります。現在では、DNA解析技術がすすみ、イネなど主要な品目ではDNA解析による選抜が実際の育種現場で使用されています。しかし、食用きのこの育種現場ではまだ有効な選抜用マーカーは活用されていません。その理由のひとつに、育種や選抜用マーカーの開発の土台となるゲノムデータがきちんと整備されていないことが挙げられます。そこで、シイタケの遺伝子機能解析や育種を効率的にすすめられるように、ゲノムデータの整備を行いました（図1）。その結果、全ゲノムの約94%の配列を明らかにしました。これにより、ほとんどの形質に関わる遺伝子の位置が特定可能となり、高温発生形質だけでなく、その他の栽培形質に関連する原因遺伝子の探索にも応用できるようになりました。

高温発生型の選抜用マーカーの開発

次に、高温発生に関連する遺伝子座を特定するため、QTL（quantitative trait loci：量的形質遺伝子座）解析により、シイタケ子実体の発生温度特性の決定に関わっている遺伝子座を探索しました。その結果、シイタケのゲノム上に存在する関連遺伝子座を複数検出しました（図2）。さらに、その遺伝子座の塩基配列を詳しく解析し、PCR（polymerase chain reaction：ポリメラーゼ連鎖反応）法により、有望菌

株を検出するための選抜用マーカーを開発しました（図3）。

地球温暖化に適応した品種の開発

開発した選抜用マーカーを活用し、育種のための母材菌株から分離した孢子由来の菌株の中から、対象とした遺伝領域の高温発生型を有する菌株を選抜しました。さらに、異なる育種母材菌株由来の孢子菌株同士の交配を行い、あらたな交配菌株を作出しました。作出された交配菌株について、寒天培地での生長試験、対峙培養による耐病性試験、小型菌床による温度特性試験、実際の栽培試験による収量等栽培品種としての性能試験などの選抜試験を実施し、有望菌株の絞り込みを行いました。最終的に、有望と考えられる13菌株を選抜し（図4）、今後さらに品種登録に必要な各種試験を行いながら、数年後の品種登録を目指します。

研究資金と課題

本研究は、生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」（マーカー利用選抜による気候変動に適応した菌床栽培用シイタケ品種の開発）による成果です。

専門用語

QTL（quantitative trait loci：量的形質遺伝子座）：数量で表される連続する形質に影響を与える遺伝領域（遺伝子座）のことを指す。

PCR（polymerase chain reaction：ポリメラーゼ連鎖反応）：DNAポリメラーゼの働きを利用し、ゲノム上の特定の領域のDNA分子を増幅する反応を指す。

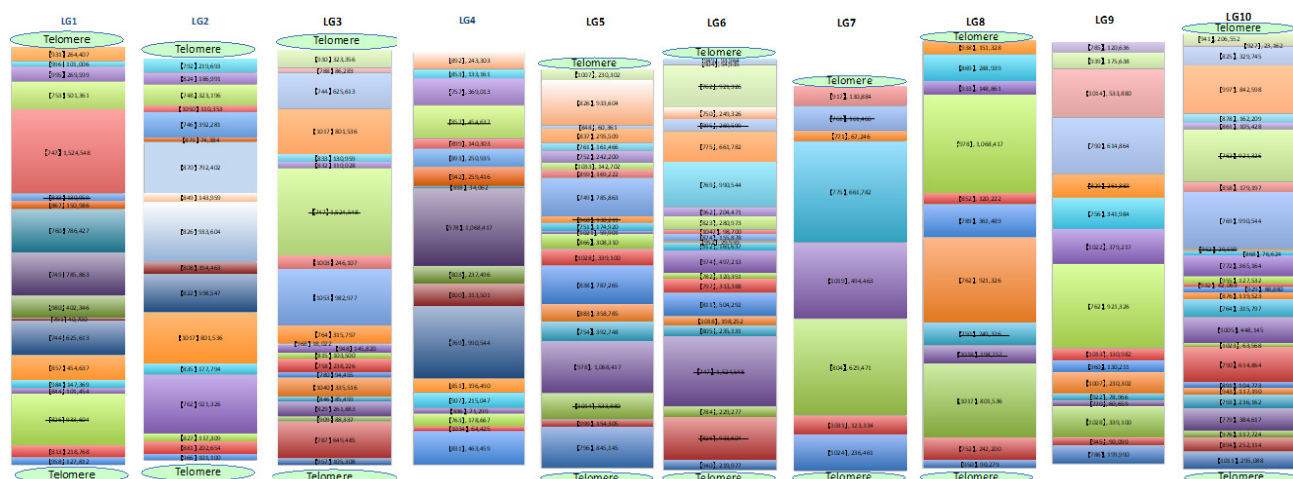


図1 シイタケゲノムデータの概略図

次世代型のシーケンサーを利用して得られたシイタケのゲノム断片データを、連鎖解析ならびにBACライブラリーを利用して並び替えを行い、染色体に対応するようにゲノムデータを整備しました。その結果、今後のシイタケの遺伝子機能解析や、選抜マーカーの開発をすめやすくなりました。

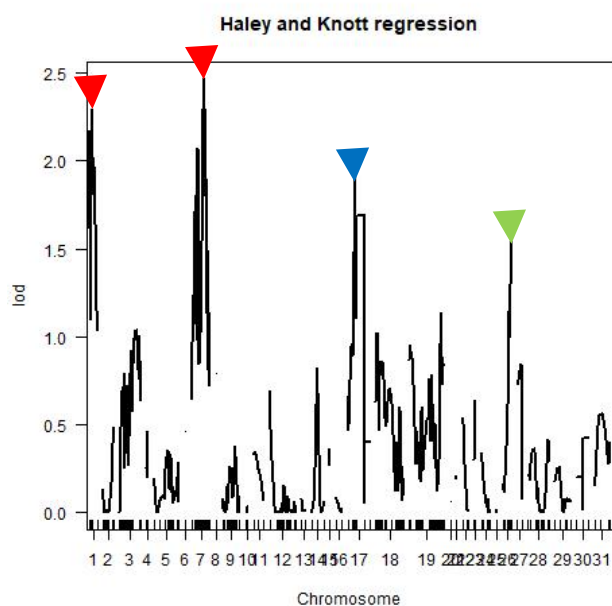


図2 シイタケの子実体発生温度の決定に関連するQTLの検出結果

▼で示した箇所に、シイタケの子実体の発生温度に影響を与える遺伝因子が存在することが推定されました。

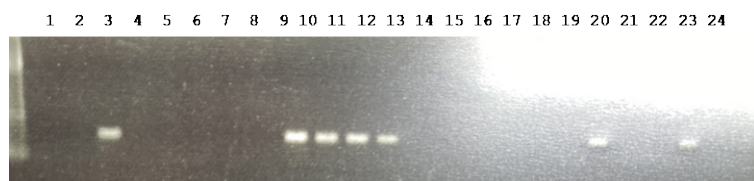


図3 高温発生型検出の選抜マーカーによる解析結果

バンドが検出される菌株が、高温発生型の遺伝子座を持っていると判断できます。



図4 選抜された有望菌株の栽培試験

従来品種を管理する環境よりも高温の条件下で管理しても、子実体の発生が認められます。

国産トリュフの栽培を目指す



研究ディレクター 山中 高史 きのこ・森林微生物研究領域 小長谷 啓介・中村 慎崇・仲野 翔太
立地環境研究領域 古澤 仁美 森林資源化学研究領域 下川 知子 東北支所 野口 享太郎
関西支所 市原 優 九州支所 木下 晃彦

西洋料理の高級食材として知られるトリュフは、日本国内にも分布することが知られています。そこで、国産トリュフの安定的な生産に向けて人工栽培技術の開発を開始しました。まず、食用として有望な国産トリュフ2種（ホンセイヨウショウロとアジアクロセイヨウショウロ）の種名を確定しました。これら2種は、主にコナラやクリなどのブナ科樹木の林に発生しますが、発生地の土壤環境を比べると、pH値や養分条件が異なることを明らかにしました。この結果を踏まえて環境条件を整えた圃場に、トリュフ菌を共生させた苗木を植栽することで、トリュフ菌を長期間苗木に定着させることに成功しました。また、ホンセイヨウショウロの香り成分を特定しました。

成果

国産トリュフの発生する土壤環境を解明

トリュフは、高級食材として知られる菌根性きのこです。国内で販売されるトリュフはすべて、海外からの輸入によるものです。トリュフは、日本国内にも分布することが知られており、国産トリュフの栽培による新たな市場創出への期待が高まっています。そこで、国産種の人工栽培を目指した研究開発を開始しました。国内各地における発生事例が多く、きのこが比較的大型で食用に有望な2種を栽培化の対象として選定しました。これらはいずれも正式な報告のない種であったため新種として報告し、和名をアジアクロセイヨウショウロとホンセイヨウショウロと名付けました（図1）。トリュフは樹木の根に共生して生育し、球形～塊状のキノコを土壌中の地表近くに作ります。そこでまず、共生相手となる樹種とトリュフ発生地の土壤環境を調べました。その結果、これらトリュフは共通して、主にコナラやクリなどブナ科樹木の林に発生していました。しかし、土壤環境を見ると、アジアクロセイヨウショウロの発生地はpHが6から8で、カルシウムなどの塩基を多く含んでいるのに対し、ホンセイヨウショウロの発生地はpHが5から6で塩基が乏しいことがわかりました（図2）。これらのトリュフの菌株について、菌糸の生長に適した培地のpHを調べた結果、アジアクロセイヨウショウロではpH8、ホンセイヨウショウロではpH5～6が生育に適した値であり、野外の発生地の土壤条件と一致していました。

トリュフ菌根形成苗木の植栽による菌の定着に成功

トリュフは、樹木の根に共生する菌根菌であり、樹木から栄養分を獲得し、土壌中に栄養菌糸体を発達させてきのこを作ります。そのため、トリュフを人工栽培するためには、トリュフ菌をあらかじめ共生させた苗木を圃場などに植栽するか、すでに生育している樹木に菌を共生させて、土壌中に菌糸を定着させることが必要です。そこで、きのこをすりつぶして作ったホンセイヨウショウロ胞子懸濁液を用いて、コナラなどの苗木の根に菌を共生させて、これらを圃場に植栽しました。植栽1年後に苗の根系を観察すると、植栽後に伸長した根にホンセイヨウショウロの菌根が新たに形成されたことから、トリュフ菌の定着に成功したことが確認できました（図3）。

国産トリュフの香り成分を特定

トリュフは種により、様々な香りを発します。白トリュフの一種であるホンセイヨウショウロの香り成分を、イタリア産白トリュフと比較しました。イタリア産白トリュフの香り特徴づける成分は、2,4-ジチアペンタンです（図4）。一方、ホンセイヨウショウロからは、マツタケオールといわれる1-オクテン-3-オールの他に、2,4-ジチアペンタンにメチル基のついた、3-メチル-2,4ジチアペンタンが検出されました。3-メチル-2,4ジチアペンタンはこれまで世界中のトリュフから報告のなかった香り成分です。

今後は、トリュフ定着に成功した苗木について土壌中の菌糸量や菌根形成量を測定して、菌の定着が安定的に継続するかを確認するとともに、他の国産種の香り成分の特定を進めて行きます。

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（高級菌根性きのこ栽培技術の開発）」による成果です。

文献

古澤仁美（他）（2020）日本における2種のトリュフ（アジアクロセイヨウショウロ およびホンセイヨウショウロ）の生息地の土壌特性。森林総合研究所研究報告，19（1），55－67。

Nakano, S. et al. (2020) Influence of pH on in vitro mycelial growth in three Japanese truffle species : *Tuber japonicum*, *T. himalayense*, and *T. longispinosum*. Mycoscience, 61, 58－61.

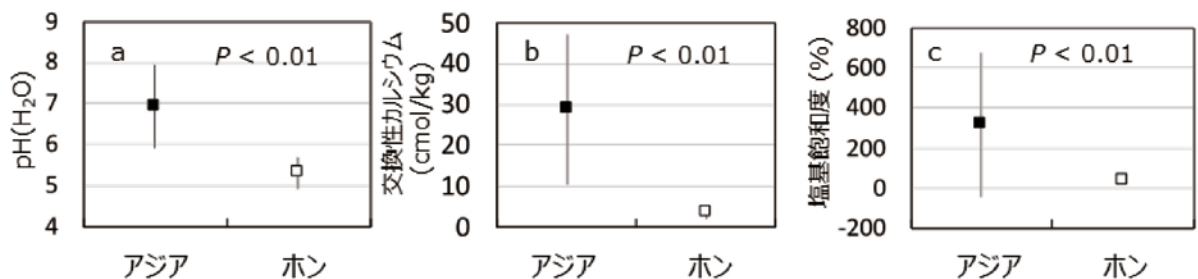
Shimokawa, T. et al (2020) Component features, odor-active volatiles, and acute oral toxicity of novel white-colored truffle *Tuber japonicum* native to Japan. Food Science & Nutrition, 8, 410-418.

専門用語

菌根性きのこ：植物の生きた根に共生して生育する菌類がつくるきのこ。トリュフのほか、マツタケなどが菌根菌であり、その多くで栽培技術が確立されていない。



図1 アジアクロセイヨウショウロ (左) とホンセイヨウショウロ (右)。スケールバーは5cm。



*図中のバーは標準偏差を示す

図2 アジアクロセイヨウショウロ (アジア) とホンセイヨウショウロ (ホン) の発生地土壌の特徴 (a, pH ; b, 交換性カルシウム濃度 ; c, 塩基飽和度)。アジアクロセイヨウショウロの発生地は、ホンセイヨウショウロの発生地と比べて、土壌のpH値が高く、カルシウムなど塩基を多く保つ傾向にあります。



図3 圃場植栽苗におけるホンセイヨウショウロ定着の様子。ホンセイヨウショウロをあらかじめ共生させたコナラ苗を圃場に植栽し、1年後に根系の観察を行ったところ、植栽後に伸長した根にホンセイヨウショウロ菌根 (赤線で囲んだ部分) が新たに形成され、菌が定着していることがわかりました。

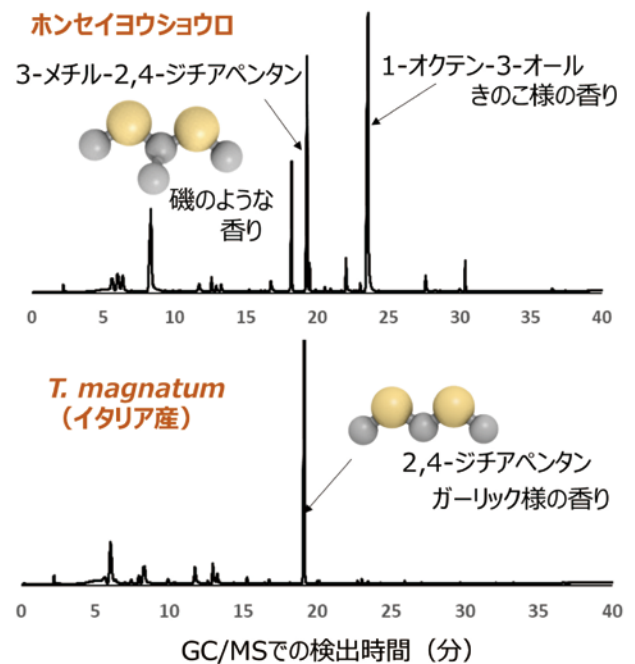


図4 ホンセイヨウショウロ (上) とイタリア産白トリュフ (下) の香り成分の分析結果。

多様な優良品種等の開発と 育種基盤技術の強化

林業種苗に対する多様なニーズに対応するため、エリートツリーや優良品種を開発し、特定母樹への申請を進めるほか、高速育種技術等を開発する必要があります。また、原種苗木配布システム、林木遺伝資源の長期保存技術、バイオテクノロジーを活用した育種技術の開発、林木育種分野における国際的な技術協力等に取り組む必要があります。このため、以下の2つの議題に取り組みました。

エイ a エリートツリーと優良品種の開発及び高速育種等の育種技術の開発

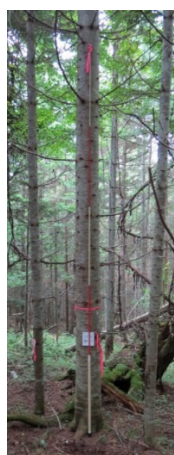
エイ b 林木遺伝資源、バイオテクノロジー、国際協力等による育種・普及技術の開発



スギ東育2-224
(東北育種基本区)
30年次樹高18.5m
胸高直径29.0cm

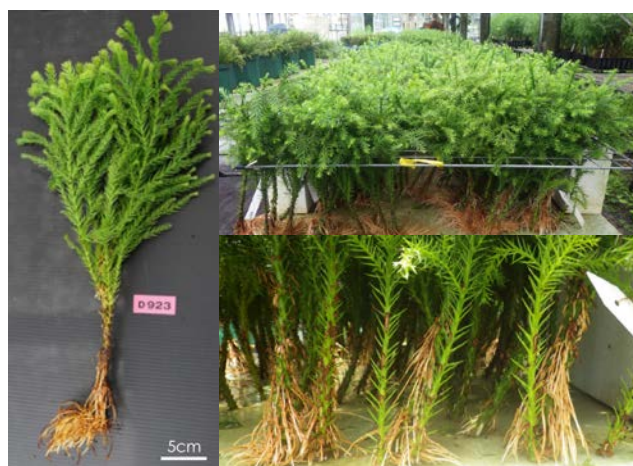


カラマツ林育2-79
(関東育種基本区)
20年次樹高14.7m
胸高直径16.0cm

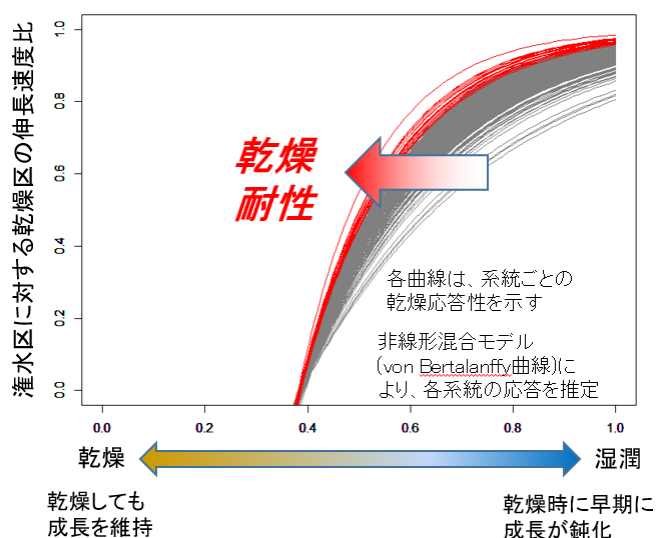


トドマツ北育2-314
(北海道育種基本区)
30年次樹高17.4m
胸高直径27.0cm

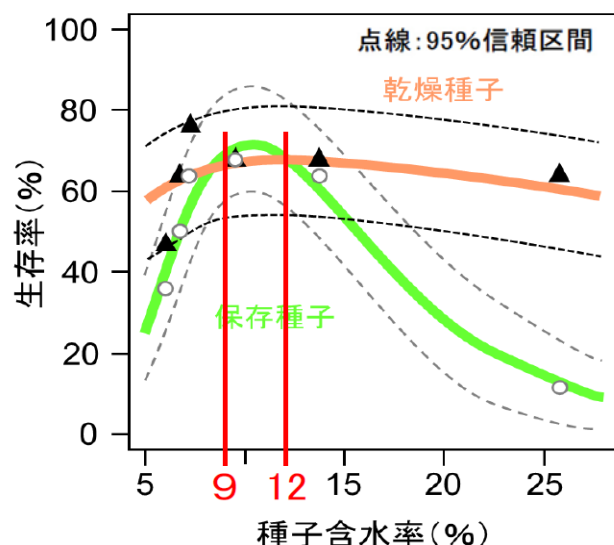
エイ a の成果の例：エリートツリー等を開発するとともに、特定母樹に申請し、指定されました。



エイ b の成果の例：コストを3割削減することが可能な新たな増殖法「エアざし」を開発し、特許を取得しました。

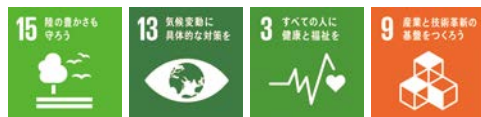


エイ a の成果の例：乾燥ストレスに対するスギ系統の応答性を評価し、乾燥耐性に優れたスギ育種素材を作出しました。



エイ b の成果の例：ブナ種子の超低温保存に適した含水率を解明し、ブナ種子の長期保存が可能になりました。

気候変動適応のための育種技術の開発



林木育種センター 三嶋 賢太郎・松下 通也・高島 有哉・永野 聡一郎・能勢 美峰・平尾 知士

気候変動問題は、世界的な環境問題となっています。日本において森林は国土の約7割を占めており、また森林面積の約4割は人工林であるため、国土保全や林業の生産性の観点から、気候変動が進んだ場合においても人工林の健全性や生産性が維持されることが重要です。そこで、気候変動によって予想される乾燥等の環境下におけるスギの成長等を評価する技術を開発するとともに、その技術を用いて気候変動に適応するスギ品種の育種に向けた育種素材を選抜しました。

成果

フィールドで環境ストレスを評価する技術の開発

林木育種センターでは、日本全国に検定林と呼ばれる試験地を数多く設置しており、定期的に調査を行い、経時的な樹高や胸高直径等の成長データを蓄積しています。私たちは、降水量や地形データから各検定林における湿潤・乾燥といった土壤水分条件を表す指標を算出し、検定林の成長データと共に解析することで、乾燥条件下でのスギ系統の成長の変化を明らかにすることができました。

温室で環境ストレス応答を評価する技術の開発

また、温室において乾燥条件下で複数のスギ系統を育成し、乾燥ストレス下での成長の変化を評価する技術開発にも取り組みました。乾燥によるストレスの程度を評価する指標として、葉の気孔の開閉による葉面の温度変化を、赤外線領域の波長を測定する装置を用いて簡易に評価できる手法を開発するなどして評価を行いました。水やりを継続して育成した灌水区のスギと途中から水やりを停止した乾燥区のスギの生育状況を調査することにより、乾燥下において気孔をいち早く閉じる系統、逆に遅くまで気孔を閉じない系統といった乾燥ストレスへの反応（応答）の違いを明らかにすることができました（図1）。

遺伝子発現量で環境ストレス応答を評価する技術の開発

植物が環境によるストレスを受けている場合、そのストレス条件下で生命活動を維持するために様々な遺伝子の働き方（発現状態）が通常的环境状態下とは異なってくると考えられます。そのため、温室での乾燥試験と並行し、乾燥区と灌水区での遺伝子発現量を比較する解析を行いました。これにより乾燥ストレス条件下で遺伝子発現量が顕著に増加・減少する遺伝子を調べ、最終的に乾燥ストレスへの応答に関与する可能性が考えられる約40の遺伝子を絞り込むことができました。この絞り込んだ遺伝子の遺伝子発現量を解析すること

により、乾燥条件下であっても灌水条件下と同様の遺伝子発現を示すスギ系統があることを明らかにしました（図2）。そのような系統の生理的な状態を測定してみると乾燥条件下においても健全性を維持していました。一般的に遺伝子の発現は、植物の見た目が変化する前から大きく変化することから、今回明らかにした遺伝子発現の変化を調べることで、いち早く乾燥に適応している系統を見つけることができると考えられます。

開発した評価技術による環境適応に優れた系統の選抜

上記の開発した評価技術を用いて、成長の優れた全国の精英樹の中から乾燥耐性に優れるスギ19系統を育種素材として選びました。これらのスギは、今後の気候変動適応に向けたスギの品種改良のために活用されます。

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「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発（気候変動に適応した花粉発生源対策スギの作出技術開発）」による成果です。

文献

Takashima et al. (2021) Evaluation of responsivity to drought stress using infrared thermography and chlorophyll fluorescence in potted clones of *Cryptomeria japonica*. Forests 12 (1), 55.

専門用語

遺伝子発現：DNA上の遺伝子の情報がRNAに転写されて機能すること。

環境ストレス応答：乾燥などの環境ストレスに対して樹木の内部で生じる生理的な反応



図1 乾燥試験における灌水停止35日後のスギ系統の状態
健全な系統と萎れる系統が明確に異なっています。

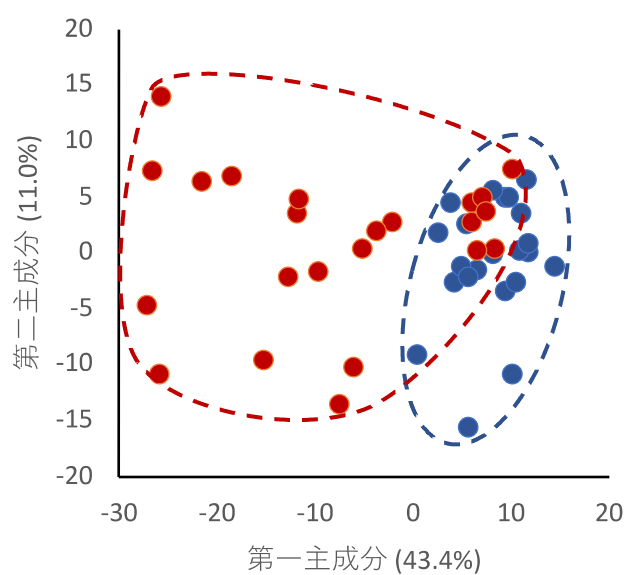


図2 灌水区と乾燥区における遺伝子発現の全体の傾向
横軸と縦軸は、それぞれ遺伝子の発現量の全体の傾向を要約した値（主成分分析の第一主成分と第二主成分）を表しています。一つの点是一个の系統を示し、青色の点は灌水区、赤色の点は乾燥区で生育した個体を示し、点の位置が近いほど遺伝子発現が類似していることを、離れているほど異なっていることを表します。

土を使わずスギを発根させる「エアざし」技術の実用化にむけて



林木育種センター九州育種場 栗田 学・久保田 正裕 林木育種センター 倉本 哲嗣
九州大学 渡辺 敦史 宮崎大学 伊藤 哲・平田 令子
大分県農林水産研究指導センター 佐藤 太一郎 宮崎県林業技術センター 上杉 基・三樹 陽一郎
鹿児島県森林技術総合センター 永吉 健作 株式会社長倉樹苗園 長倉 良守
株式会社林田樹苗農園 林田 尚幸

「エアざし」では、土を使わず、さし穂全体を空気中に露出するように立て、一定の条件で定期的に霧状にした水をかけることによって、安定して発根させることができますが、この技術を活用したコンテナ苗生産手法を実用化するためには、生産性やコストを加味した、生産システムの最適化が必要でした。そこで、「エアざし」での生産効率を高めるため、さしつけ環境に適した散水パターンの推定手法を明らかにするとともに、特定母樹や花粉症対策品種の増殖において、「エアざし」を活用した際の発根データを蓄積しました。得られた成果の一部は、コンテナ苗生産マニュアルとして取りまとめ、公開しました。

成果

「エアざし」の開発

近年、農作物では植物工場を利用した生産が実用化されています。このような植物工場的な生産技術を活用した、スギさし木コンテナ苗の安定的かつ効率的な生産手法の開発に向けた研究に取り組み、さし穂全体に定期的にミスト散水すること等の一定の条件を整えることにより、スギさし穂から安定して発根させることが可能になりました。このため、令和2年5月27日に本技術に関する特許を取得しました（特許番号：第6709449号）。この技術は、温室などの施設内において、網などの支持資材を用いてさし穂全体を空気中に露出するように立て、定期的にミスト散水を行うことで、発根を誘導するという非常に簡便な発根技術で、我々は通称「エアざし」と呼んでいます（図1）。

「エアざし」の実用化に向けた取り組み

エアざしを活用したスギさし木コンテナ苗生産手法を実用化するためには、生産性やコストを加味した、生産システムの最適化が必要となります。そこで、エアざしに適した散水パターンを明らかにするため、さしつけ場所の環境条件に適した散水回数や1回の散水に必要な散水量などについて検討を行いました。まず、葉水（散水により葉の表面についた水滴等の水分）をつけたさし穂のさしつけ後の経時的な重量変化を調査し、さしつけ環境の温湿度条件から葉水が蒸発するまでの時間の推定方法を明らかにしました。また、サーモカメラを用いて散水時のさし穂の経時的な温度変化を調査することによって、さし穂全体に葉水を付着させるために適した

散水時の水滴のサイズや散水時間、散水量を明らかにしました。さらに、九州育種基本区の特定母樹など優良系統について、エアざしでの発根率を明らかにしました（図2）。過去に行われた苗畑での露地ざしの発根率と比較するとエアざしでは平均発根率がおよそ1.4倍高くなり、系統の違いによる発根率のばらつきが小さくなる傾向が確認されました。

「エアざし」の普及に向けた取り組み

このような試験の結果の一部を取りまとめ、エアざしの普及にむけて「用土を用いない空中さし木法によるスギさし木コンテナ苗生産マニュアル」を公表しました（図3）。マニュアルは森林総合研究所林木育種センター九州育種場のホームページからダウンロードすることが可能です（<https://www.ffpri.affrc.go.jp/kyuiku/research/syoukai/eazasi.html>）。

研究資金と課題

本研究は、生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」の支援を受けて行いました。また、本研究の一部は交付金プロジェクト*「適正かつ早期の普及に必要な技術の開発」により行いました。

文献

栗田学ほか（2020）用土を用いない新たなスギ挿し木発根手法の検討 ―スギ挿し木苗の植物工場的生産技術の開発に向けて―。九州森林研究, 73, 57-61.

*森林総合研究所交付金プロジェクト



図1 エアざしを行っている様子

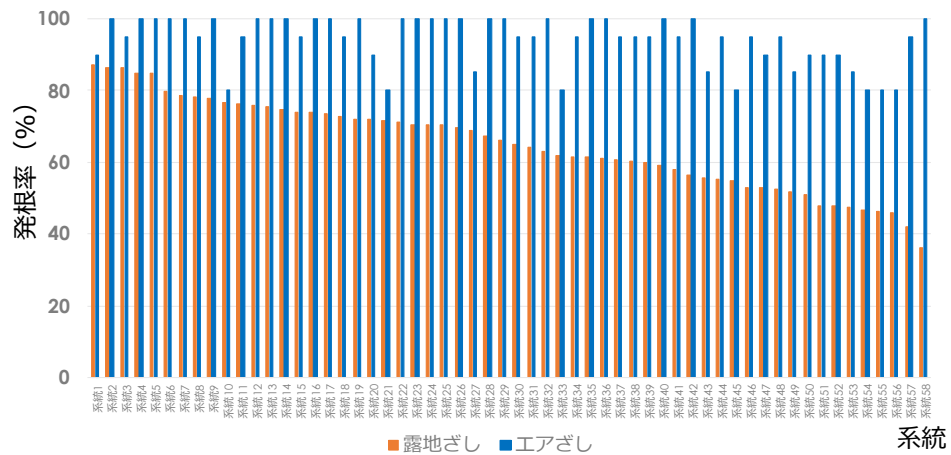


図2 九州育種基本区の特定母樹や花粉症対策品種の発根率
露地ざし（橙色）とエアざし（青色）での発根率

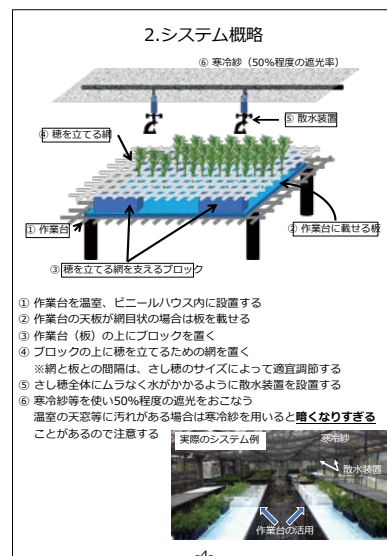


図3 作成・公表したマニュアルの一部

期待される新たな造林樹種コウヨウザン

ー国内林分からの優良系統選抜ー



林木育種センター 磯田 圭哉・山口 秀太郎・近藤 禎二・藤澤 義武・稲永 路子・生方 正俊
林木育種センター関西育種場 山田 浩雄 林木育種センター九州育種場 久保田 正裕・大塚 次郎
鹿児島大学 鶴川 信 広島県立総合技術研究所 涌嶋 智・渡辺 靖崇・坂田 勉・古本 拓也
中国木材株式会社 松岡 秀尚・小西 浩和 住友林業株式会社 岡田 広行・兼光 修平

新たな造林樹種としてコウヨウザンが注目されています。中国・台湾原産のこの樹種は、成長が早く、材質も良いことに加え、萌芽更新が可能ということで期待されています。そこで、国内の成林した植栽林分の詳細な調査を行うとともに、伐採した材を用いて様々な製品を試作して性能評価したところ、コウヨウザンは成長が良くかつ材が十分に利用できることが明らかになりました。そこで、成長、材質、増殖性の評価を踏まえた上で、日本の気候に適した優良系統、55系統を選抜しました。優良系統は今後のコウヨウザン種苗生産への活用が期待されます。

成果

新たな造林樹種、コウヨウザン

近年、コウヨウザン（図1）が早生樹として注目されています。ヒノキ科コウヨウザン属の常緑針葉樹で、ヒノキ科の中で最も古くに分化した樹種です。原産地は中国南部と台湾で、中国本土では造林面積990万haと主要な造林樹種となっています。成長が早く、材質も良いことから、我が国でも西日本を中心に造林面積が増加しています。成長が早いという特徴の他に、コウヨウザンにはスギやヒノキにはない大きな特徴として萌芽力の高さがあります（図2）。再造林コストを大幅に下げることができる萌芽更新は大きな魅力です。短伐期と萌芽更新を組み合わせる利用を考えると、最初に植栽する種苗の性能が重要になります。

国内のコウヨウザン

日本国内に試験的に造林され、すでに成林している林分が大学演習林、国有林、私有林、植物園等に見られます（図1左）。お寺や神社の境内にも単木ですがコウヨウザンの巨樹（図1右）がしばしば見られます。林木育種センターでは、共同研究機関と共に、これらのコウヨウザン林分の調査を進めてきました。全国21箇所の林分を調査した結果、成長速度はスギの2倍以上になることも多く（図3）、材質も若齢林でスギと同程度、50年生程度の林分ではヒノキと同程度の強度を示すことが明らかになりました。また、実際に製品を試作してその制作過程や製品の性能の評価も行い、柱材だけでなく、集成材、LVL、合板、パレットなどにも十分使えることが明らかとなりました。

優良系統の選抜

国内のコウヨウザン林分は、日本の気候に適した個体が残って成林したと考えられます。このため、その中から特に成長や材質に優れた個体を選ぶことで、日本の気候に適した成長性の良いコウヨウザンの優良種苗の生産が可能になると考えられます。そこで、国内の優良コウヨウザン林分から、成長等が特に優れた個体を優良系統として選抜しました。広島県庄原市の民有林は、DNA分析からさし木によるクローン造林が行われていたことが明らかとなったことから、複数個体を調べることでクローンの遺伝的な特性を評価して22系統を選抜しました。他の林分は、実生苗を植栽した林分であったため、スギ等の精英樹と同様に、個体の成長が周囲より優れているものを選び、材質や増殖性も加味して7林分から33系統を選抜しました（図4）。今回選抜した計55系統の優良系統は、今後、採種園や採穂園造成に用いられ、コウヨウザン造林用の種苗生産に利用されることが期待されます。

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委託事業「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」及び生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」（木材強度と成長性に優れた早生樹「コウヨウザン」の優良種苗生産技術の開発）による成果です。

文献

近藤禎二（他）（2020）わが国におけるコウヨウザンの成長。森林遺伝育種, 9, 1-11.

コウヨウザンの特性と増殖マニュアル2021 (https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/documents/koyozan_manual.pdf)



図1 広島県庄原市の民有林にあるコウヨウザン林分（左）と福島県須賀川市の永泉寺にあるコウヨウザンの巨樹（右）



図2 コウヨウザンの切株からの萌芽（上）と立木の地際からの萌芽（下）

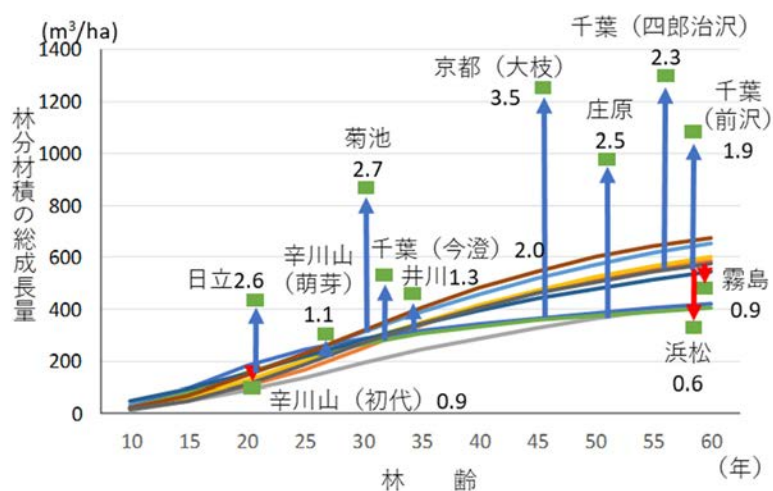


図3 各地のコウヨウザン林の成長のスギとの比較

数字は各林分の所在地域のスギ収穫予想表の1等地の総成長量に対する比率。なお、菊池、霧島は2等地との比率。土佐清水は植栽後21年生時及び伐採後の萌芽林の2つを示した。



図4 優良系統を選抜したコウヨウザン林

赤丸は調査したコウヨウザン林分。数字はその林分から選んだ優良系統数。

アフリカにおけるメリア第二世代の選抜



林木育種センター 松下 通也・生方 正俊・市川 秀隆

ケニア森林研究所 Jason Kariuki

国土の約8割が乾燥地・半乾燥地のケニアは、2010年に7%である森林率を2022年までに10%へ引き上げる政府目標を定めました。メリア (*Melia volkensii* センダン科センダン属) は乾燥に強くて成長が良く、高品質材がマホガニーの代替としても期待されています。育種により改良された優良メリアは、従来種苗より成長が早く、材質も優れると期待され、年々増す需要に種苗供給が追いつかないほどの人気です。成長や材質に優れる次世代メリアを生み出す育種を進め、また政府系機関や民間企業等による優良種苗の生産・利用を支援し、東アフリカの持続可能な森林経営の実現に貢献するものと期待されます。

成果

メリアにおける第一世代（親世代）の評価

第一世代メリアの採種園が2012年に設定され、その採種園等に由来する実生苗木を用いてケニア国内8カ所に検定林を2015年に設定しました。その後、これらの検定林の調査を進め、その調査データを解析しました。解析にあたっては、検定林内での植栽環境のばらつきの影響を統計的に適切に補正した上で統計解析を行い、樹高、直径、材積、幹の通直性、耐病性及び着果性の6つの形質について、遺伝率を推定しました。その結果、遺伝率は複数の形質において他の樹木種で報告されているのと同程度の、0.1~0.3程度と推定されました。遺伝率が極端に低い場合、育種の改良は困難になりますが、メリアでは複数の形質において十分に改良が見込めると判断されました。

検定林に植栽された苗木個体（子供世代）の成長データをもとに、第一世代（親世代）の育種価を推定しました。その結果、ケニア国内2箇所の大規模採種園に植栽されている母樹系統のなかには、種子生産性や苗木の成長や通直性が特に優れた「グレートマザー」があることが明らかになりました。

複数形質の改良を目的とした第二世代選抜

親世代の評価だけでなく、植栽されている子供世代の個体の性能も評価するため、各形質の育種価（育種的性能）を推定しました。推定した育種価をもとに、複数の形質を同時に改良するための選抜を以下のように実施しました。まず、ケニアにおけるメリアの育種集団では、既にケニア全土から選抜された時点で100系統と育種を進める母集団としては絞られており（日本のスギでは約3,700の第一世代精英樹を選抜）、また検定林設定の段階で十分な種子が得られ、実生を検定林に植栽できたのは60~70母家系でした。このため第二世代個体の選抜にあたっては、なるべく多様な母家系が次世代に貢献できるよう配慮し、幹の材積や通直性において育種価で

劣位のものを除いた上位50母家系程度が次世代に貢献するようにしました。また、優先する形質を①材積（成長性）、②幹の通直性、健全性（病気に強い）、③着花/着果性（多くの花・果実を着ける）として、それぞれの形質の育種価なるべく上位でありかつ家系平均を下回らないようにしました。その結果、植栽個体数のうち上位約10%程度に相当する個体を優良なメリア第二世代系統の候補としてコンピュータ上で選抜し（図1）、その後現地の検定林個体を確認して優良と判断されたものを第二世代系統として2019年に選抜しました（図2）。今後は、今回の若齢時における選抜段階の評価と将来の収穫段階の評価との関係性等について、引き続き検定林の調査を継続していきます。

研究資金と課題

本研究は、独立行政法人国際協力機構技術協力プロジェクト「ケニア国持続的森林管理のための能力開発プロジェクト」の成果です。

専門用語

遺伝率：遺伝率は、樹高や胸高直径といった、連続的な値を示し、多くの遺伝子が関与すると考えられている量的形質において、値のばらつきが母樹の違いなどの遺伝的影響によって説明されるか、その程度を示す指標です。遺伝率が高い場合、親の特性がその子供にも現われやすく、育種の改良の効果が大きいと期待できます。

育種価：育種価とは、親から子に伝わる能力（遺伝的能力）を数値化したものです。樹高や材積等の量的形質における実際の測定結果や遺伝率を用いた統計解析により数値として推定します。例えば、ある個体の樹高の育種価が+1.0mとなった場合、調査した集団の平均より樹高成長の能力が1m遺伝的に優れているということを意味します。畜産分野では、例えばブランド牛の育種のための種雄牛の評価表に予測育種価が載せられており、交配のための種雄牛を選択するためなど広く活用されています。

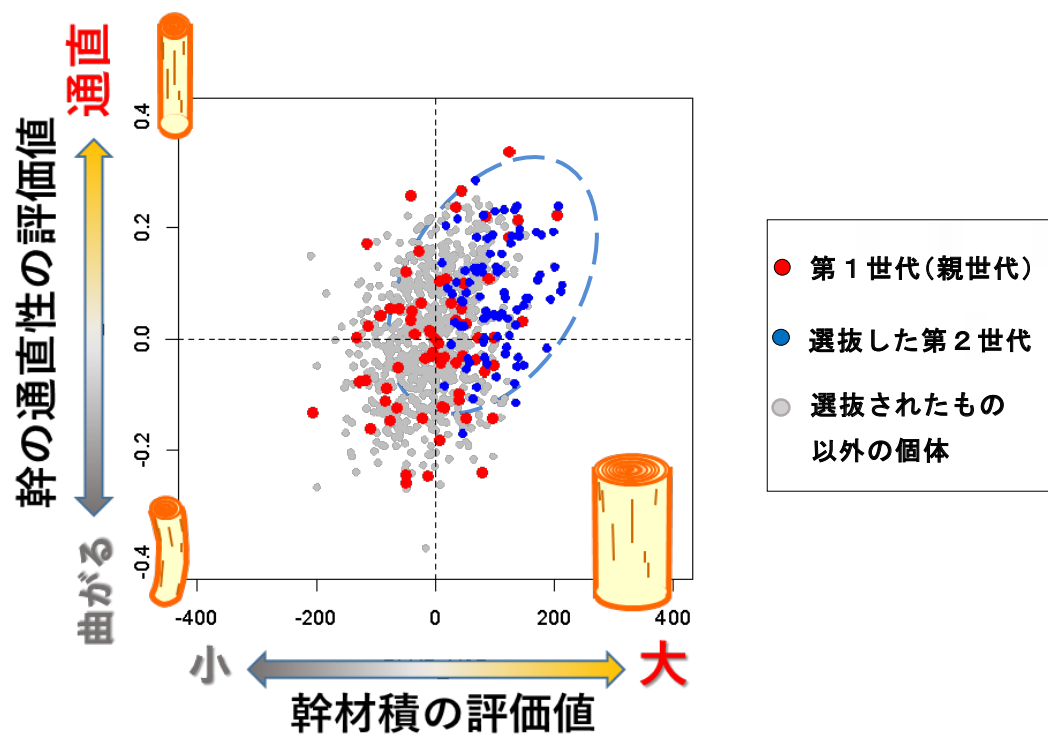


図1 材積成長の良さと幹の通直性の良さを兼ね備える優良なメリア第二世代（●）を選抜しました。



図2 第二世代優良系統として選抜したメリアの個体にペンキでマーキングをしました。評価の高い個体では植栽後4年で幹の直径が20cmに達しています。

マツ材線虫病に対する抵抗性の遺伝領域を明らかにする



森林バイオ研究センター 平尾 知士

林木育種センター九州育種場 松永 孝治

かずさDNA研究所 平川 英樹・白澤 健太

林木育種センター 磯田 圭哉・三嶋 賢太郎

九州大学 田村 美帆・渡辺 敦史

マツ材線虫病によるマツ枯れは、我が国最大級の森林病虫害であり、中国や韓国および地中海沿岸に自生しているマツにも被害が生じています。我々は、松林の再生と健全化を目指して、マツ材線虫病に対する抵抗性品種の開発と抵抗性メカニズムの解明を進めています。これまで抵抗性品種が持つ抵抗性が後代に遺伝することは知られていましたが、実際にゲノム上のどこにその領域があるのかは不明でした。今回、クロマツの抵抗性品種を用いてDNA解析を行うことで、抵抗性に関わる遺伝領域を明らかにすることができました。この成果をもとにさらに研究を進めることで、抵抗性機構の解明やより強い抵抗性品種の開発に繋がります。

成果

マツ材線虫病と抵抗性品種の開発

マツ材線虫病は病原体であるマツノザイセンチュウがマツノマダラカミキリ等の媒介者によって運ばれて起こるマツ類樹木の伝染病です。この伝染病は日本だけでなく、韓国や中国の東アジア諸国および地中海沿岸を中心とするヨーロッパ諸国に自生するマツにおいても、被害が報告されています。このマツ材線虫病に対し、我が国では1978年から、被害を受けたマツ林に残存している抵抗性候補木を選抜し、苗畑で複数回の接種検定を実施して、抵抗性品種の開発を進めてきました。2021年3月までにクロマツで211品種、アカマツで283品種が開発されています。

抵抗性形質に関わる遺伝領域はどこにあるのか？

これまでに抵抗性品種が持つ抵抗性形質は、後代に遺伝することが知られていました。しかし、実際にゲノム上のどこに、その抵抗性形質に関わる領域が存在するのかは不明でした。抵抗性形質に関わる遺伝領域の数や位置を明らかにすることは、育種的な改良を効率的に進める上でとても重要です。

今回、抵抗性品種間の人工交配によって得られた実生家系をDNA解析することにより、連鎖地図（遺伝子地図）を作成するとともに（図1）、実際にマツノザイセンチュウを接種してそれぞれの苗木の抵抗性を評価する（図2）ことによって、抵抗性形質に関わる遺伝領域を探索しました。その結果、第3連鎖群に抵抗性に関わる遺伝領域が存在することがわかりました（図3）。今回の研究の結果、抵抗性品種、田辺ク

ー54号が第3連鎖群に抵抗性に関わる領域を持っていると考えられました。今後、研究をさらに進め、この領域の詳細を明らかにすることで、抵抗性を決定する原因遺伝子の特定やDNAマーカーを使った分子育種の実現に繋がります。

最後に

私たちは、抵抗性育種をさらに促進し、効率的により強い抵抗性品種を開発することを可能にすべく、抵抗性メカニズムの解明に向けた研究と抵抗性育種を精力的に進めていきます。

研究資金と課題

本課題の一部は林野庁委託「マツノザイセンチュウ抵抗性品種開発技術高度化事業」によって実施されました。

文献

Hirao, T. et al. (2018) Construction of genetic linkage map and identification of a novel major locus for resistance to pine wood nematode in Japanese black pine (*Pinus thunbergii*). BMC Plant Biology, 19, 424.

専門用語

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、特定の部位のDNAで、特定の形質に関与する遺伝子の存在を示唆するものとして使われるもの。

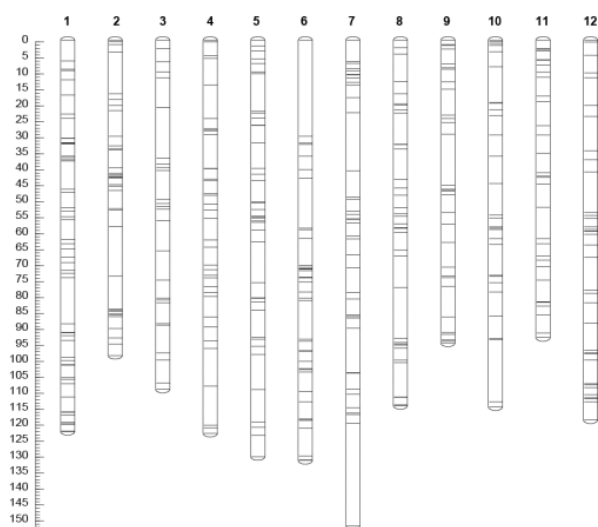


図1 クロマツの連鎖地図（遺伝子地図）

クロマツがもつ12本の基本染色体上に、遺伝子領域の変異をもとに作成したDNAマーカーを使って、遺伝子の相対的な位置の関係を示す連鎖地図（遺伝子地図）を作成しました。図の一本一本の線が各染色体上のDNAマーカーの位置を示しています。

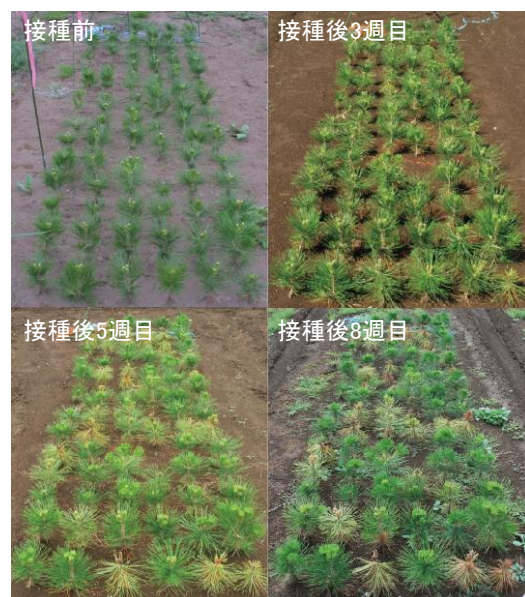


図2 抵抗性形質の遺伝性評価

抵抗性品種間の人工交配によって得られた実生個体に対してマツノザイセンチュウを接種し、その後の実生個体の経時変化を示しています。苗木によって、時間の経過とともに衰弱・枯死する個体（白みを帯びた個体）と健全なままの個体の違いがみられます。

遺伝情報

形質情報

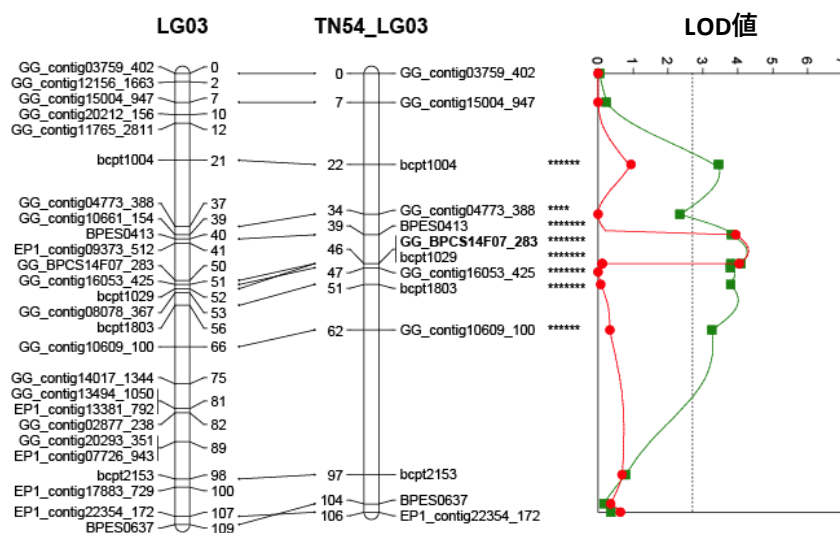


図3 マツ材線虫抵抗性形質に関わる遺伝領域の検出

得られた形質情報と遺伝情報を利用して解析した結果、今回用いた人工交配家系では、第3連鎖群（LG03）に田辺ク-54号に由来する抵抗性の領域が検出されました（中央、TN54_LG03）。LOD値は統計的なもののさしの一つで、右図の赤や緑の線で示す値が高ければ高いほど抵抗性に関わる領域が存在する確率が高いことを示します（右、LOD値）。

第4期中長期計画 研究成果選集(平成29年版～令和3年版)掲載課題一覧

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

戦略課題ア 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

課題名	掲載年	掲載ページ
レーザーセンサーで熱帯低気圧による豪雨の雨滴径の特性を解明	29	4
森林に降る雨水が溪流にいたる道程は意外と深い	29	6
木の樹冠に付着する雪の重さを推定する	29	8
スギ材の放射性セシウム濃度を葉から推定する	29	10
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	30	4
スギ林の遮断蒸発の鍵を握る樹皮の雨水貯留	30	6
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	30	8
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	30	10
雪崩の流下を妨げて災害を軽減する森林のはたらき	1	4
間伐時の渓流水の濁りの発生と作業道の影響	1	6
森林火災の発生危険日数がわかる地図を作りました	1	8
野生山菜を安全に利用するために	1	10
津波に“ねばり”強い海岸林の再生に必要な生育基盤の整備	2	4
樹冠の状態によって変わる森林の中で雨の降り方をレーザーセンサで解明	2	6
日本の民有林における干害被害の長期推移と地域性	2	8
森林内での放射性セシウムの動きを予測する	2	10
土石流を引き起こす降雨条件は谷底の土砂量に応じて変化する	3	4
大都市で発生した大気汚染物質はどこまで、どれだけ森林に届くのか？	3	6
樹体を「センサー」とした風荷重計測手法を開発	3	8
福島のもで放射性セシウムはどう動いてきたのか？	3	10

研究成果選集のバックナンバーは下記URLで公開中です。

森林総合研究所ホームページ研究成果選集
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/index.html>



戦略課題イ 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

課題名	掲載年	掲載ページ
センサーネットワークによる森林のCO ₂ 吸収量の高精度観測と長期モニタリングデータの活用	29	12
熱帯地域の乾燥落葉林の光合成の季節変化 ー乾季に入っても光合成が活発だったー	29	14
図像資料を用いて江戸時代の土地利用を復元する	30	12
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	30	14
永久凍土の凹凸地形面の形成過程を年輪から復元し、温暖化影響を予測	1	12
アマゾン熱帯林で持続的な択伐施業の可能性を検証する	1	14
亜寒帯林の炭素蓄積過程に林床のコケや地衣類がおよぼす影響を解明	2	12
民間のREDD プラスの取組みを政府が適切に評価するための手法を開発	2	14
気候変動下での天然生落葉広葉樹林による炭素吸収量の将来予測	3	12
高温や乾燥ストレスを緩和して熱帯の森を再生する植林技術の開発	3	14

戦略課題ウ 生物多様性の保全等に配慮した森林管理技術の開発

課題名	掲載年	掲載ページ
生物多様性と炭素を守る新しい仕組みー環境保全オフセッター	29	16
スギ花粉症対策に向けた新技術ー菌類を活用して花粉の飛散を抑えるー	29	18
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	30	16
使える技術を総動員する新たな松くい虫被害対策	30	18
世界自然遺産候補の奄美とやんばるの森で、生物多様性の保全と森林利用の調和をはかる	1	16
天敵微生物を使ってシイタケ害虫の被害を防ぐ	1	18
森林のもつ10種類の多面的機能を評価し、その変遷をたどる	2	16
造林地のシカ密度に応じた防除資材の選択基準を明らかにしました	2	18
森林からの自然の恵みの未来予測	3	16
ニホンジカは2050年までにその勢力を全国に拡大すると予測されます	3	18

重点課題Ⅱ 国産材の安定供給に向けた持続的林業システムの開発

戦略課題ア 持続的かつ効率的な森林施業及び林業生産技術の開発

課題名	掲載年	掲載ページ
トドマツ人工林の造林適地をマップ化する	29	20
大径材生産に向けた造材機械の作業限界の解明	29	22
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	30	20
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	30	22
トドマツの天然更新を成功に導く秘訣	1	20
集材作業を無人化する自動走行フォワードの開発	1	22
コンテナ苗の根鉢の形成程度を簡単に評価できる方法を開発しました	2	20
木のぬくもりあふれる寝室で良い眠りを	2	22
シカからスギを一本ずつ守る「単木保護資材」	3	20
森林作業道における情報化施工システムの開発	3	22

戦略課題イ 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

課題名	掲載年	掲載ページ
歴史から展望する木材産業のこれから	29	24
木質バイオマス資源作物としてのヤナギ栽培の実用化	29	26
国産広葉樹の家具・内装材用途での活用に向けて	30	24
木質バイオマスを直接メタン発酵する技術の実証試験 ー放射能汚染バイオマスにも適応可能な新技術ー	30	26
木材を活用した共同住宅のリニューアル手法の提案	1	24
新たな森林の有効活用に向けた課題と解決策の提示	1	26
燃料用丸太の天然乾燥に必要な日数を簡便に推定するツールを開発	1	28
森林管理の担い手としての森林組合の動向と課題	2	24
原料投入の工夫で木材チップ製造の省エネルギー化と低コスト化を達成	2	26
林業の現場への外国人労働力受入れにあたっての課題	3	24
ヤナギ超短伐期栽培の年収量に対する収穫と気象の影響を解明	3	26

重点課題ウ 木材及び木質資源の利用技術の開発

戦略課題ア 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

課題名	掲載年	掲載ページ
木材の水分バランス	29	28
平成28年（2016年）熊本地震では中規模木造建物に大きな被害は出ていなかった	29	30
木材表面上の加工欠点の発生原因を可視化する	30	28
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	30
木材の繊維に直交する（横）方向の変形や破壊現象へ影響する因子を探る	1	30
樹種のバリエーション拡大と耐火基準クリアで、国産 CLT の普及を促進	1	32
国産早生樹の利用可能性を探る ―樹種の特徴を知り、使い方を工夫する―	2	28
国産材 CLT の製造コストを半減し施工コストを他工法並みにする技術開発	2	30
割れの発生の原因となる木材内部の力を測ることでより良い乾燥方法を探る	3	28
大断面集成材の低コスト化技術の開発 ―川上から川下まで―	3	30

戦略課題イ 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

課題名	掲載年	掲載ページ
加工しやすく衝撃に強い木材・プラスチック複合材をつくる	29	32
木材中のリグニンを迅速に精度よく分析する画期的な手法を開発	29	34
スギ材合板工場の副産物から生まれた空気浄化剤	29	36
木を焙 ^{ほう} じて長持ちする舗装材をつくる	30	32
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	30	34
未利用の「竹」を効果的に利用する方法	30	36
木材の美しさを長持ちさせるセルロースナノファイバー配合塗料の開発	1	34
スギ材から製造した新素材「改質リグニン」を用いた自動車の開発	1	36
未利用資源「トドマツ樹皮」有用成分の効果的な抽出法	1	38
セルロースナノファイバーの製造コストを削減する	2	32
木質由来の天然新素材「改質リグニン」を用いた新機能性樹脂材料	2	34
木材から造る香り豊かなアルコール ―世界初の「木のお酒」を目ざして―	2	36
水をはじく紙の簡単な作り方：薬品の蒸気を用いてコーティング	3	32
化粧品などの素材として活用できる改質リグニン微粒子を開発	3	34
廃棄物から生まれた空気浄化塗料 ―スギ合板乾燥廃液の価値を高めるには？―	3	36

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

戦略課題Ⅱ 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

課題名	掲載年	掲載ページ
4種類の無花粉スギ原因遺伝子のゲノム上の位置を特定	29	38
国産トリュフの新種発見—栽培化にむけて—	29	40
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—	30	38
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—	30	40
遺伝情報を利用して気候変動による樹木の分布変化を明らかにする	1	40
利用可能なシイタケ原木林の判定技術及び樹木への放射性セシウム吸収抑制技術の開発	1	42
スギの成長や材質に関わる遺伝領域を特定し環境要因と遺伝要因の影響を明らかにする	2	38
国産トリュフの栽培技術の開発	2	40
無花粉スギの原因遺伝子 (MS1) を特定しました	3	38
微生物によるダイオキシン分解機構を解明	3	40

戦略課題Ⅲ 多様な優良品種等の開発と育種基盤技術の強化

課題名	掲載年	掲載ページ
新たな無花粉スギ品種の開発と今後の品種改良を促進するDNAマーカーの開発	29	42
漢方薬の原料「カギカズラ」の国内栽培を目指して—国産品の薬用成分、増やし方、育て方—	29	44
より強いマツノザイセンチュウ抵抗性品種の開発	30	42
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	30	44
カラマツの種子をつけやすくする方法の開発—カラマツ苗木の安定供給に向けて—	1	44
ブナ種子の超低温保存技術の開発	1	46
遺伝的に多様で優良形質の無花粉スギ品種の開発に役立つリソースを構築	2	42
スギの実生コンテナ苗を1年で生産するための施肥技術の開発	2	44
乾燥した生育環境への適応性を評価するスギの遺伝子発現マーカーの開発	3	42
土を使わずスギを発根させる「エアざし」技術を開発	3	44

森林総合研究所
第4期中長期計画成果集

発行日	令和3年11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.affrc.go.jp/ffpri.html
印刷所	前田印刷株式会社 筑波支店 茨城県つくば市山中152-4 電話 029(875)6696

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下さい。

第4期中長期計画成果集

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

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