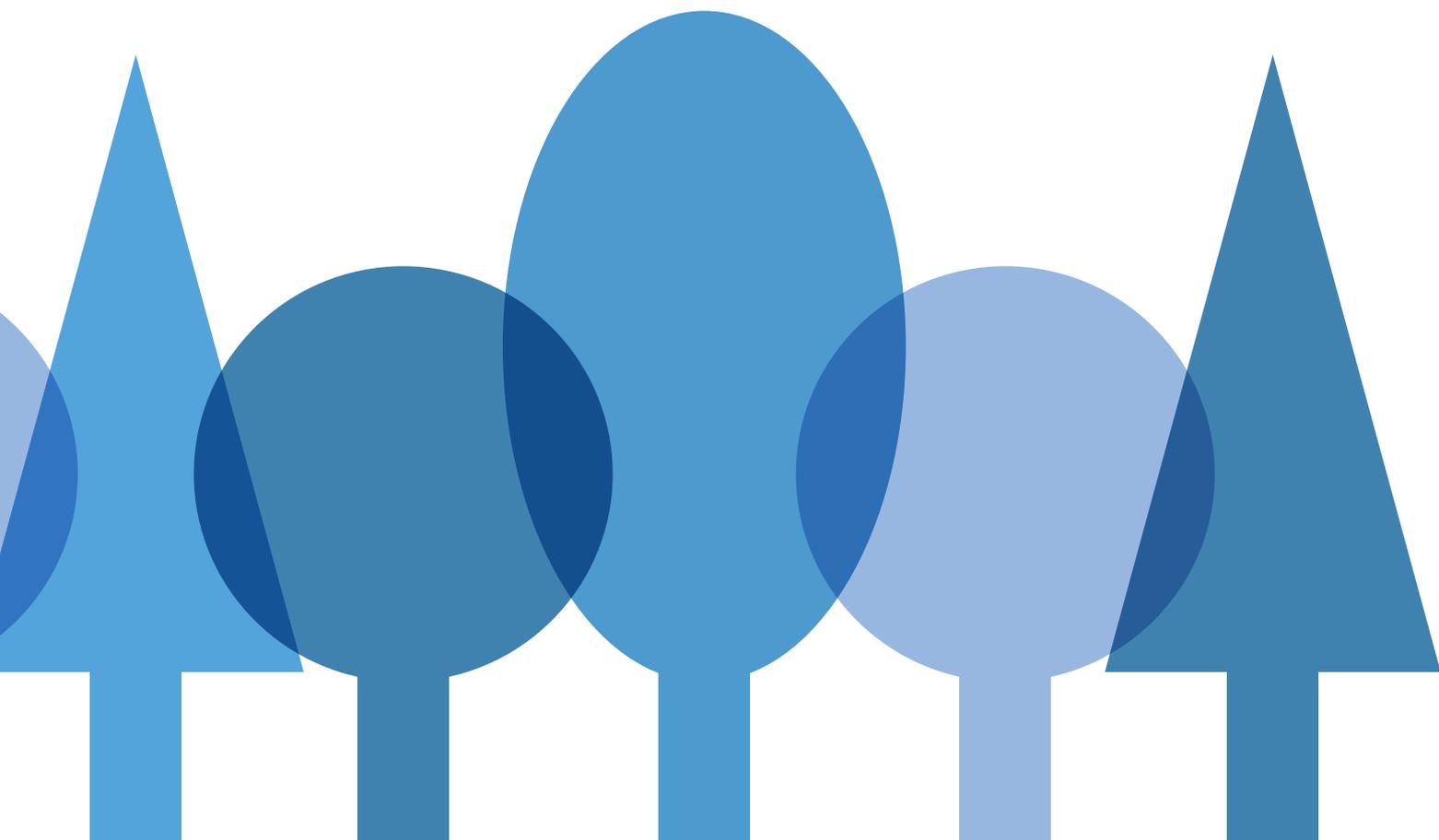


森林総合研究所

令和6年版

研究成果選集

2024



はじめに

森 林総合研究所は、
豊かで多様な森林の恵みを生かした循環型社会の形成に努め、
人類の持続可能な発展に寄与することをミッションとし、
日本と世界の森林・林業・木材産業・林木育種に関わる総合的な研究開発を担っています。

令和3年度から開始した第5期中長期計画では、環境変動下での森林の多面的機能の発揮に向けた研究開発、森林資源の活用による循環型社会の実現と山村振興に資する研究開発、多様な森林の造成・保全と持続的資源利用に貢献する林木育種を重点課題として研究開発に取り組んでいます。

「令和6年版 研究成果選集 2024」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令和5年度に得られた主要な研究成果をとりまとめました。

- 気候変動影響の緩和及び適応に向けた研究開発
- 森林生物の多様性と機能解明に基づく持続可能性に資する研究開発
- 森林保全と防災・減災に向けた研究開発
- 林産物の安定供給と多様な森林空間利用の促進に資する研究開発
- 生物特性を活用した防除技術ときのこ等微生物利用技術の開発
- 木材利用技術の高度化と需要拡大に向けた研究開発
- 木質新素材と木質バイオマスエネルギーの社会実装拡大に向けた研究開発
- 林木育種基盤の充実による多様な優良品種の開発
- 林木育種技術の高度化・拡張と特定母樹等の普及強化

できるだけ平易な言葉を用いるように努め、専門用語には解説を付けました。

また、こうした成果が、国連が定めた17の持続可能な開発目標(SDGs)のどれに貢献できるのかを、研究成果ごとにアイコンで示しました。

この研究成果選集が皆様のご参考になれば幸いに存じます。

2024年6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



重点課題

1

環境変動下での森林の
多面的機能の発揮に向けた研究開発

ア 気候変動影響の緩和及び適応に向けた研究開発

- 熱帯低地林における択伐後の地上部現存量と
細根現存量の回復状況を明らかに…………… 04
熱帯林の伐採からの回復過程を明らかにするため、ボルネオ島の森林を対象に地上部と地下部
現存量を調べた結果、択伐からの経過年数が長いほど、いずれの現存量とも伐採履歴のない原
生林の値に近づくことが明らかになりました。
- 違法伐採対策を最優先する場所はどこ？
—カンボジア REDD+ プロジェクトへの貢献— …………… 06
REDD+ プロジェクトの森林減少・劣化抑制効果を高めるために、違法伐採が住民の生計維持に
影響しやすい区域を予測する手法を開発しました。これにより、どこから優先的に違法伐採を
予防していくとよいか地図化できるようになりました。

イ 森林生物の多様性と機能解明に基づく持続可能性に資する研究開発

- 北日本天然林の多様な樹種が健全に生き永らえる寿命を明らかに…………… 08
北日本の主要樹種を対象に健全に生き永らえる年数の目安を推定し、700年以上生きる長命グ
ループ(ミズナラなど)、100年をなんとか超える短命グループ(シラカンバなど)、中間のグルー
プ(ブナなど)に区分できることを明らかにしました。
- 植物に有毒なアルミニウムを無毒化するタンニンの生合成経路を一部再現…………… 10
酸性土壌では、主にアルミニウムが植物の生育を阻害します。アルミニウムを無毒化する加水
分解性タンニンの中間代謝産物を、本来タンニンを蓄積しない草本植物ベンサミアナタバコの
葉で作らせることに成功しました。
- 保持林業の実証実験—初期の成果から人工林における保持林業を提案—…………… 12
北海道の大規模実験の成果から人工林で保持林業を実施する場合、単木保持では広葉樹を10本
/ha以上、できれば50本/ha以上残すこと、群状保持と単木保持は組み合わせると効果的である
ことを提案しました。

ウ 森林保全と防災・減災に向けた研究開発

- きのこ原木の放射性セシウム濃度の効率的な予測には統計情報の活用が重要…………… 14
きのこ原木の放射性セシウム濃度の指標となる当年枝データを解析し、濃度予測値は調査区に
よらず一定のばらつきをもつとみなすことができ、予測のため当年枝を採取する個体数は少数
でもよいことが分かりました。
- ドローンを活用した新たな技術により国内最大級の雪崩の発生要因を推定…………… 16
雪崩災害の翌年以降に行ったドローンによる積雪分布調査から降雪や吹雪の積雪分布への影
響の傾向を見いだして、大規模雪崩発生当時の積雪状態や流下しうる積雪層の厚さを推定でき
ました。

森林資源の活用による循環型社会の実現と 山村振興に資する研究開発

ア 林産物の安定供給と多様な森林空間利用の促進に資する研究開発

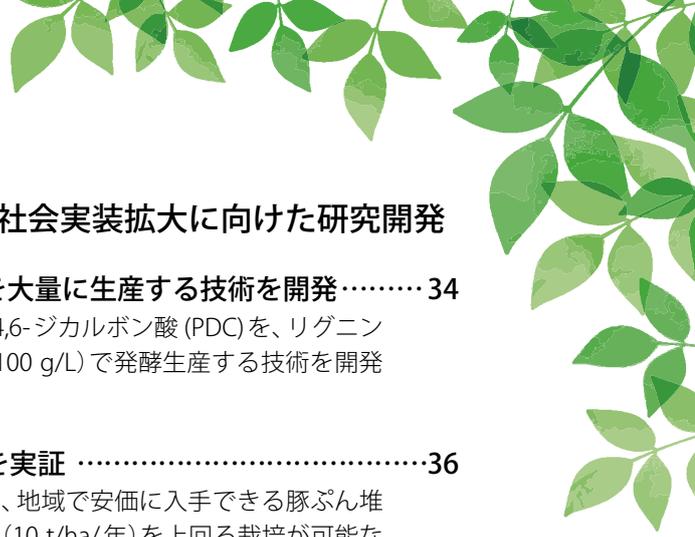
- **ドローン空撮画像から下刈りの要否を判断**…………… 18
ドローンを活用した苗木と雑草木との競合評価手法を開発しました。ドローン空撮画像から90%程度の精度で苗木を自動抽出し、雑草木との競合状態を判定することで、下刈りの必要な場所を地図上に示せます。
- **地形条件と道路の幾何構造から見る路網整備の難易度を地図化**…………… 20
林業専用道と森林作業道について、路網整備の難易度を明示する地図表現手法を開発しました。
- **環境配慮意識と生態系サービス保全の関係性を解明**…………… 22
森林がもたらす生態系サービスの保全と木材生産を両立していた地域を特定し、聞き取り調査を行ったところ、環境への配慮に高い意識を持った林業事業者が伐採に携わっていることが分かりました。
- **多様な林業労働力の確保に向けた施策の動向と促進対策の課題**…………… 24
近年の施策を通じて多様な林業労働力を確保しようとする動きが活発となる中、多様な労働力確保をより推し進めていくためには、労働者の特性に応じた安全な環境整備や評価が重要です。

イ 生物特性を活用した防除技術ときのこ等微生物利用技術の開発

- **東日本のナラ枯れの被害域拡大を引き起こしている
カシノナガキクイムシの由来を遺伝情報から明らかに**…………… 26
ナラ枯れ被害発生に関わるカシノナガキクイムシのDNA分析の結果、東日本には複数の遺伝的に異なる集団があること、近年の被害域拡大は地元ではなく近隣被害地から移住した集団による可能性が高いことが分かりました。
- **日本に自生する白トリュフを継続的に発生させることに成功**…………… 28
日本に自生するトリュフの栽培化を目指した研究に取り組み、2022年11月に続いて翌年11月にも栽培試験地内で白トリュフであるホンセイヨウシヨウロを発生させることに成功しました。

ウ 木材利用技術の高度化と需要拡大に向けた研究開発

- **スギ大径材からの心去り平角の製材において、
新たな設備投資を伴わないコスト低減策を提案**…………… 30
スギ大径材から心去り平角を2本製材する場合、後に製材する心去り平角は修正びきをしなくても目標寸法に製材できることを明らかにし、新たな設備投資を伴わない製材コスト低減策を提案しました。
- **安全で快適に歩ける木の床の条件を人の生理面から明らかに**…………… 32
歩きやすい床の条件について、4種類の木の床を歩行したときの足の筋肉の活動量を測定することにより調べた結果、床の表面性状や剛性、歩行時の履物の有無が複合して歩きやすさに影響することが分かりました。



エ 木質新素材と木質バイオマスエネルギーの社会実装拡大に向けた研究開発

- **リグニン由来化合物からバイオプラスチック原料を大量に生産する技術を開発**…………… 34
バイオプラスチックや強力接着剤の原料になる2-ピロン-4,6-ジカルボン酸 (PDC) を、リグニンから製造されるバニリン酸を原料として、世界最高収量 (100 g/L) で発酵生産する技術を開発しました。
- **関東に分布するヤナギで、豚ふん堆肥の施用効果を実証** ……………36
関東に分布するオノエヤナギとタチヤナギの2種について、地域で安価に入手できる豚ふん堆肥の施用により、ヤナギの栽培実績のある欧州での目標値 (10 t/ha/年) を上回る栽培が可能なことを実証しました。

重点課題

3

多様な森林の造成・保全と 持続的資源利用に貢献する林木育種

ア 林木育種基盤の充実による多様な優良品種の開発

- **画像認識でクロマツ雌花の開花ステージを判定**…………… 38
連続的に変化する雌花の発達段階を示す開花ステージの判定について、人の目視ではなく AI (深層学習) の画像認識を用いて判定したところ、正解率97%に達する精度の高いモデルが作成できました。
- **下刈りコスト削減に資する初期成長に優れた第2世代品種の開発** …………… 40
スギとカラマツのエリートツリーの中から初期成長に優れた品種を開発しました。カラマツについては、東北地方で初の品種開発です。これらの品種は下刈りコスト削減に資する優良品種として期待されています。

イ 林木育種技術の高度化・拡張と特定母樹等の普及強化

- **絶滅危惧種オガサワラグワ培養苗の新しい馴化手法の開発** …………… 42
小笠原諸島の森林を守るために、絶滅危惧種オガサワラグワの保全に取り組んでいます。本研究では、野生復帰の実現に向けて、効率的に培養苗を鉢上げできる飲料用ペットボトルを利用したPB^{じゅんか}馴化法を開発しました。
- **系統選択に役立つ「エリートツリー特性表(九州育種基本区・スギ)」を公表** …………… 44
九州育種基本区の特定母樹に指定されているスギエリートツリーについて、これまでに得られたデータを解析して系統ごとの成長・材質・繁殖の特性を評価し、「エリートツリー特性表」として取りまとめ、公表しました。



熱帯低地林における択伐後の地上部現存量と細根現存量の回復状況を明らかに

生物多様性・気候変動研究拠点: 宮本 和樹 北海道大学: 相場 慎一郎
京都大学: 青柳 亮太 マレーシア・サバ州林業局森林研究センター: Reuben Nilus

高い炭素蓄積を有する東南アジア、ボルネオ島の熱帯林では、全面積の49%が木材生産林です。持続可能な森林管理や気候変動影響の緩和を促進する上で、択伐*による森林へのインパクトを低減し、回復を促進することが重要です。そこで、択伐後の地上部現存量*と細根現存量を伐採履歴のある木材生産林で調べました。その結果、択伐からの経過年数が長いほど地上部現存量だけでなく細根現存量が伐採履歴のない森林(原生林)に近づき、回復していることが明らかになりました。

■ ボルネオ島の森林面積の約半分は木材生産林

東南アジア、ボルネオ島の熱帯林は多様な野生生物種を育む生物多様性のホットスポットであり、高い炭素蓄積を有する森林です。一方、ボルネオ島の森林面積のうち49%は木材生産林です。こうした森林では、伐採のインパクトを低減し、回復を促進することが持続可能な森林管理や気候変動影響の緩和を促進する上で重要です。しかし、木材生産林では過去に行われた伐採の影響が残されており、回復が妨げられている可能性があります。特に、伐採・搬出時にはトラクターなどの重機が作業道を繰り返し走行するため、作業道の土壌は踏み固められます。そのため、作業道上での新たな樹木の定着や成長は林内と比べて困難と考えられます。

■ 森林地上部と細根の回復状況

ボルネオ島の木材生産林の地上部現存量と地下部の細根(直径2 mm以下の根)現存量について、伐採年が異なる2つの択伐林と、伐採履歴のない森林(原生林)を対象に調査しました(写真1)。その結果、地上部現存量は伐採年の古い択伐林の方が新しい択伐林よりも多く、原生林に近い値になっていました(図1)。細根については、伐採年の比較に加え、作業道と林内との比較も行いました(図2)。林内の細根現存量は伐採年にかかわらず原生林と違いはありませんでしたが、同じ伐採年では作業道の方が林内よりも少なくなっていました。更に、作業道の影響を原生林の林内と択伐林の作業道と比較すると、伐採年の新しい択伐林でのみ原生林よりも細根現存量が少なくなっていました。このことから、伐採年の新しい択伐林と比べて伐採年の古い択伐林の方が細根現存量も回復が進んでいることがうかがえました。これに対して、細根生産速度*は作業道、林内いずれの場合も森林間で差はみられず、原生林と同程度でした(図3)。

■ 人為攪乱^{かくらん}からの森林回復過程の解明へ向けて

伐採からの経過年数が長い森林ほど地上部現存量だけでなく細根現存量も原生林の値に近づき、回復が進んでいることが明らかになりました。現存量の点からみれば、伐採から16年程度の択伐林の回復は順調で原生林に近づきつつあると考えられますが、樹種の組成やサイズ構造は原生林とは異なっています。また、立地環境や過去の伐採の程度、つる植

物との競合などによって回復の状況は異なることから、択伐林の回復過程の解明には更なる観測データの蓄積が必要です。

研究資金

- ・科研費(JP18K05753)「ボルネオ熱帯林における伐採インパクトの違いが細根現存量の回復に及ぼす影響」
- ・本研究所の実施課題「地域の環境条件に応じた多様な森林機能の活用」

参照文献・サイト

Miyamoto K, Aiba S, Aoyagi R, Nilus R. (2024) Logging impacts on above- and belowground forest biomass and production in Bornean lowland forests. TROPICS 33(1), doi: 10.3759/tropics.MS23-09.

専門用語

択伐: 収穫のために、ある面積の森林を全て伐採するのではなく、目的にあった樹種やサイズの樹木のみを選択して伐採することをさします。

現存量: 面積当たりの生物体(ここでは樹木)の乾燥重量です。

細根生産速度: 期間あたり(年など)の細根の成長量。ここでは森林土壌中に埋めた2 mm メッシュの円筒(イングロースコア)に新たに侵入した細根の乾燥重量に基づき算出しました。



写真1 調査地の原生林と2つの択伐林の様子

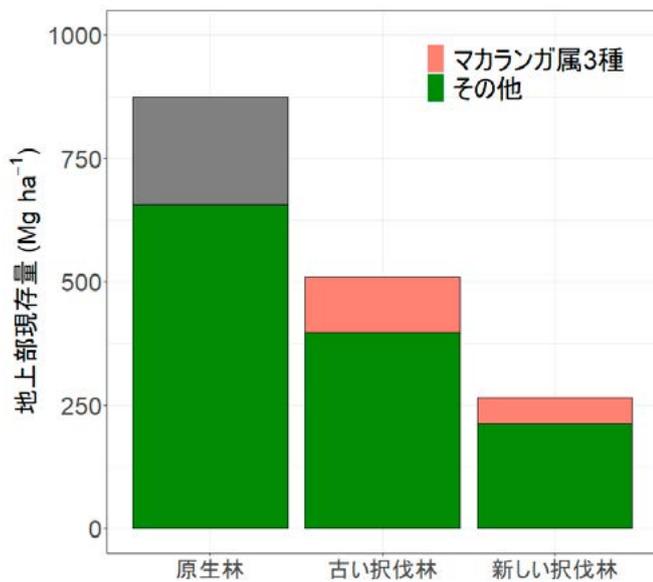


図1 地上部現存量の比較

図中の赤で示した部分は、伐採などで開かれた場所に出現する先駆種(パイオニア種)のマカラング属3種の現存量で、それぞれの森林の現存量の20%程度を占めていました。

また、図中の灰色で示し部分は原生林内でみられた極めて大きな樹木(フタバガキ科 *Shorea acuminatissima*, 直径約190 cm、写真1左上)の現存量で、この1個体の有無で現存量が大きく異なることから、他とは区別して示しました。

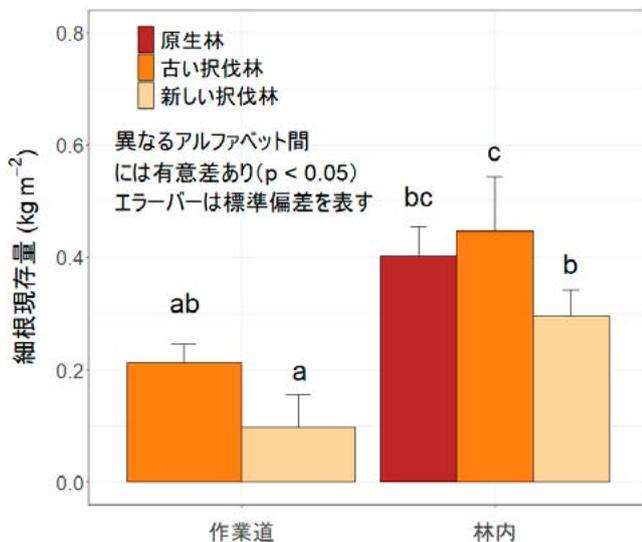


図2 細根現存量の比較(深さ15 cm)

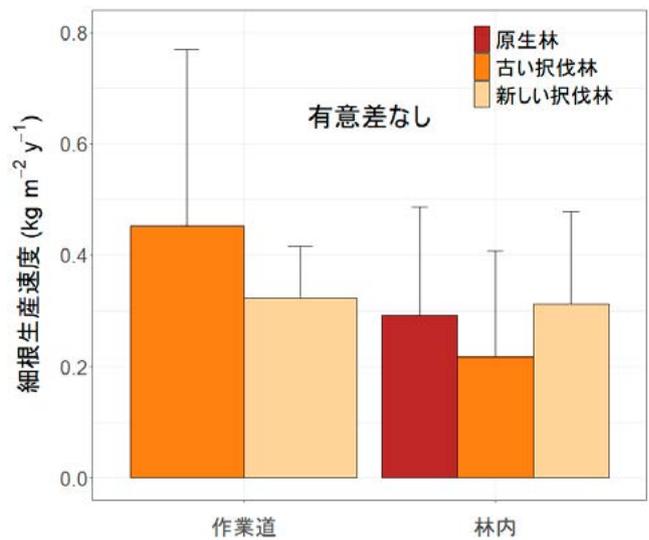


図3 細根生産速度の比較(深さ15 cm)



違法伐採対策を最優先する場所はどこ？ —カンボジア REDD+ プロジェクトへの貢献—

生物多様性・気候変動研究拠点：江原 誠、松井 哲哉 東北支所：松浦 俊也
北海道支所：津山 幾太郎 筑波大学：GONG Hao
カンボジア農林水産省森林局：SOKH Heng、CHOEUNG Hong Narith、SEM Rida
カンボジア環境省：LENG Chivin 九州大学：野村 久子、百村 帝彦

カンボジア中部にあるプレイロン野生生物保護区*および周辺の森林は、我が国の二国間クレジット制度(JCM)*におけるREDD+(レッドプラス)プロジェクトの対象地です。この地域の森林はフタバガキ科*樹木の天然樹脂供給源として地域住民に活用されていますが、違法伐採による森林減少・劣化にさらされています。本研究はプロジェクトの森林減少・劣化抑制効果を高めるため、違法伐採対策を優先的に行う区域の分布を予測する手法を開発しました。これにより、プロジェクト実施者は、森林減少・劣化で困窮する樹脂採取世帯への応急的な救済や違法伐採の予防措置をどこで強化すればよいか地図化できるようになりました。

■ 現場の森林減少・劣化の悪循環

我が国のJCMを含め二つのREDD+プロジェクトの対象地とされているカンボジア中部のプレイロン野生生物保護区および周辺の森林(図1)は、フタバガキ科樹木の天然樹脂の供給源として地域住民に活用されています。しかし、違法伐採による森林減少・劣化により樹脂が採取できず収入が激減した世帯の中には、生計維持のために自ら違法伐採して農地転用する世帯もあります。こうした森林減少・劣化の悪循環を断ち切るには、これらの世帯への経済的救済措置や違法伐採予防策が早急に求められます。しかし、森林減少・劣化の影響を受けやすい採取世帯がどこに分布するか分からず、どこから優先的に対策すべきか検討が困難でした。

■ 優先的に対策すべき場所の予測

プレイロン野生生物保護区の周辺(図1)に居住する世帯(404のサンプル世帯※1)を対象に、2014年と2016年の職業、この期間の非木材林産物の採取場所と種類、採取しやすさの変化とその原因を調査しました。そして、一般化線形混合モデルと地球統計学的手法のクリギングで解析した結果、2014-2016年間の森林減少や違法伐採の影響を受けた世帯がいる確率が高い村の分布(図2上)や、持続的な樹脂採取に向けて森林管理を優先すべき区域(図2下)を予測できるようになりました。解析結果から、2014年に天然樹脂を採取していた世帯の割合が高い村ほど、また保護区に近い村ほど、この期間の森林減少・劣化の影響を受けた世帯がいる確率が高いことが分かりました。保護区から離れた村では、既に2014年の時点で周辺の森林が樹脂採取は不可能なほど減少・劣化していたため、そもそも樹脂を採取する世帯はほとんど存在しておらず、この期間の森林減少・劣化の影響は限定的でした。

■ REDD+ プロジェクトへの貢献

政府やプロジェクト実施者は、これらの予測図を用いることで、森林減少・劣化による収入減の影響を受けやすい樹脂採取世帯の救済や採取環境を維持するための違法伐採予防措置をどの行政区や土地利用区分で強化すればよいか地図上で把握できます。例えば、森林減少・劣化の影響を受けた世帯がいる確率が高い村(図2上)やそれらを含む行政区では、失職した樹脂採取者を保護区のレンジャーに雇用する、非木材林産物の商品化やその改善をするなどの対策が考えられます。

また、村から近い、優先的に対策すべき区域(図2下)では、違法伐採パトロールの強化に加えコミュニティ林業*地の新設や保護区の拡張なども有効でしょう。本研究の調査・予測手法は、森林減少・劣化による同様の課題を抱える他地域でも活用できると考えられます。

研究資金

- ・科研費(IP19H04343)「途上国住民の栄養改善に森林保全は寄与するか？」
- ・科研費(IP16H07434)「森林減少の影響を受けやすい住民の地理的分布を考慮した森林管理方策の検討」
- ・林野庁補助事業「REDD+ 民間推進体制整備事業」
- ・総合地球環境学研究所(Project No. RIHN14200158)「健康な社会のための持続可能な生態系アプローチ」

参照文献・サイト

Ehara et al. (2023) Where do people vulnerable to deforestation live? Triaging forest conservation interventions for sustainable non-timber forest products, Land Use Policy, 131:106637, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106637>, 2023.05.

専門用語

プレイロン野生生物保護区 (Prey Lang Wildlife Sanctuary)：2016年に設立された431,683haの野生生物保護区。同保護区とその周辺では、森林減少・劣化による温室効果ガスの排出を削減し、地球規模の気候変動を緩和するためのREDD+プロジェクトを実施中(図1)。保護区内における地元住民の生計維持のための非木材林産物採取は、行政当局の事前同意があり、採取による生物多様性への影響が考慮されていることを条件に合法とされる。

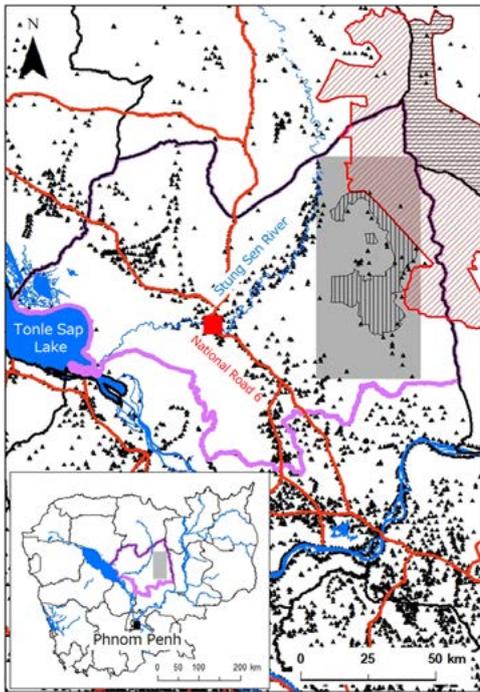
二国間クレジット制度 (Joint Crediting Mechanism, JCM)：我が国の優れた低炭素技術・製品・システム・サービス・インフラ等を途上国に普及させ、対策を実施することを通じて実現した温室効果ガス排出削減量を定量的に評価し、その一部を我が国の削減目標の達成に活用するための制度。

フタバガキ科 (Dipterocarpaceae)：東南アジアの熱帯林における代表的な樹木の分類群。天然林からの伐採により木材が生産されるほか、立木からは樹脂が採取される。その中でも *Dipterocarpus alatus* から採れる含油樹脂は、カンボジア国内では松明(たいまつ)の油、竹・籐(とう)細工の防水、船の漏水防止などに使われるほか、高品質なものはベトナムなどへ輸出される。※2

コミュニティ林業 (Community Forestry)：カンボジア森林局が区画・登録した国有林の一部を、一定の条件下で住民が商業や自給目的で管理する制度。

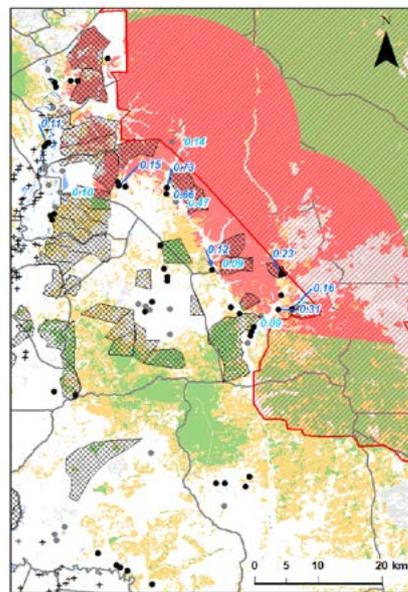
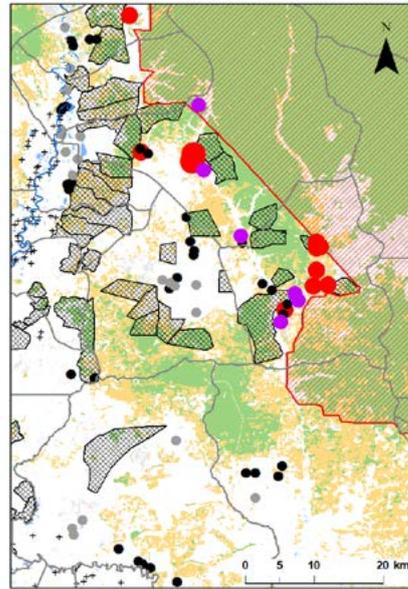
※1 Staged sampling method (Shively, 2011) と PEN (Poverty Environment Network) Technical Guidelines (PEN, 2007) にもとづき抽出。

※2 竹田(2002)、Tola(2009)、倉島ら(2014)、Dymose et al.(2017)にもとづく。



凡例

- 主要道路
- 州境
- Kampong Thom 州境
- 水域
- 研究対象地
- ▨ プレイロング野生生物保護区
- ▨ プレイロングREDD+プロジェクト地
- ▨ トゥムリンREDD+プロジェクト地
- ▲ 2008年の国勢調査により特定された村
- コンボントム州都



凡例

	樹脂採取業において違法伐採の影響を受けた世帯がある確率	
	高い	低い
訪問した村	●	●
訪問していない村	●	●
調査対象外の村	+	

注) 村には集落を含む場合がある。

- 水域
- 森林 (常緑または常緑・落葉混交林)
- 2014-2016年間の森林減少地
- 落葉林 (森林減少解析の対象外)
- 他の土地利用
- ▨ プレイロング野生生物保護区
- ▨ コミュニティ林業地
- 樹脂採取業を守るために違法伐採対策を優先的に実施するべき区域
- 行政区界 (コミューン)

	樹脂採取業を営む世帯の割合の予測結果	
	高い (≥0.05)	低い
訪問した村	青色の数字	●
訪問していない村	水色の数字	●
調査対象外の村	+	

注) 村には集落を含む場合がある。

図1 調査地とプレイロング野生生物保護区の位置 (Ehara et al., 2023 (CC BY-NC) を和訳)

図2 違法伐採による森林減少・劣化の影響を受けた世帯がある確率の高い村の場所(上)、樹脂採取業を守るために違法伐採対策を優先的に行う区域(下) (Ehara et al., 2023 (CC BY-NC) を改変・和訳)

北日本天然林の多様な樹種が健全に生き永らえる寿命を明らかに

研究ディレクター: 正木 隆 (元) 東北支所: 大住 克博

北日本の天然林に生育する42樹種の健全な大径木の丸太を調べ、各樹種の長寿性*と最大径の目安を推定しました(ここでは便宜的にそれぞれ寿命・最大径と呼びます)。最長はミズナラやトチノキの約700年以上、最短はシラカンバやミズキの約100年、北日本の天然林を代表するブナやハルニレは中間の約400~500年でした。樹種ごとの最大径は45~130cmに及び、寿命と比例していましたが、約600年で最大径約70cmになるオノオレカンバやイチイ、約300年で最大径約45cmになるヤマボウシなど、太くならないまま老齢となる樹種もありました。本研究の推定値は北米の近縁種と類似し、普遍的であることが分かりました。

■ 樹木の長寿性を理解する意義

樹木は長寿な生物ですが、いつまで生きられるか、どこまで太くなれるか、に関するまとまった情報はありませんでした。多様な樹種からなる森林の成り立ちを理解し、その行く末を予測するには、それぞれの樹種の長寿性を理解することが重要です。そこで、北日本の木材市場で芯に空洞や腐りのない健全な天然大径木42樹種1684本の胸高直径と年輪数を調べました(図1)。

■ 独自の統計的推定法を開発

理論的には、樹木は条件がよければずっと生き続けて太り続けることが可能で、ある意味寿命や最大の太さは無限かもしれません。しかし実際には、ある限界付近の年齢・直径を超えて健全なまま生きる個体はわずかです。そこでここでは、全体の2.5%*の健全個体のみが超えうる年齢・直径を目安とし、それぞれ分かりやすく「寿命」「最大径」とよぶこととします。

寿命と最大径を推定するため、独自の統計的手法を開発しました。市場に出荷されてくる天然木の丸太は伐採・搬出の時点で、目立った傷害がないことに加え、ある年齢・直径以上のものが選別されています。そこで、樹種に特有の年齢・直径の下限値を考慮に入れた対数正規分布*を考案して解析しました。

■ 多様な樹種のそれぞれの寿命

寿命と最大径は樹種によって大きく異なっていました(図2)。最も長かったのは約700年以上生きるトチノキ、ミズナラ、ハリギリで、最も短かったのは、約100年をなんとか超えるシラカンバ、ミズキ、ドロノキなどでした。北日本の天然林を代表するブナやハルニレは中間の約400~500年でした。最大径については、トチノキ、ミズナラ、ハルニレの約130cmが最も大きく、ミズキ、ヤマボウシの約45cmが最も小さい部類でした。寿命と最大径は正比例していましたが、アサダ、オノオレカンバ、イチイ、ヤマボウシのように、寿命のわりに最大径が小さい樹種がありました。これらの樹種は細い木でもかなり老齢な個体が含まれていることを意味します。

今回推定した寿命・最大径を北米の近縁種と比べたところ、相対的な類似関係が認められ、本研究の結果の普遍性が確認されました(図3)。日本と北米は、ベーリング海に時々出現した陸橋を通じて生物が往来したために互いに近縁な種が分布していますが、少なくとも過去200万年は隔離されてきま

した。長寿性に関わる樹木の性質は、この時間スケールではほぼ変わらずに維持されるようです。

■ 広葉樹林の再生は長期的なビジョンで

北日本の天然林には、樹齢700年に及ぶ樹木が最近まで当たり前にあったことが分かりました。今、生物多様性の保全や回復の一手段として針葉樹人工林の広葉樹林化が選択肢となっていますが、本来の原生的な広葉樹林を再生するには、700年以上におよぶ超長期的な視点が必要と言えます。

研究資金

・科研費(JP21H04946)「森林の生物多様性の分布形成機構の解明に基づく気候変動に適応的な保護区の提示」

参照文献・サイト

Osumi K, Masaki T (2023) Longevity of tall tree species in temperate forests of the northern Japanese Archipelago. *Journal of Forest Research*, 28: 333-344. doi: 10.1080/13416979.2023.2207261.

プレスリリース(2023)「北日本の主要樹種の寿命を推定—天然林の再生のための重要情報—」<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2023/20230608/index.html>

専門用語

寿命と長寿性: 生物学では寿命 lifespan と長寿性 longevity は異なる概念です。1年生草本や動物などは個体として生存可能な時間に上限があり、生物学的な寿命が存在します。一方、樹木においては、木部細胞が細胞として死んでも樹体を支える機能を保ち続けること、枝の部分的な枯死・入れ替えによって個体全体の枯死を回避できることなどから生物学的な意味での寿命は存在しないと考えられるため、寿命ではなく長寿性の概念を適用します。しかし本項では読みやすさを考慮し、長寿性の目安を便宜的に「寿命」とよぶこととしました。

2.5%という数値: 統計学では確率分布の左右の端の合計5%(片側2.5%)の部分を「めったに起こらない」事象とみなします。本研究もその慣例にならい、上限サイドの2.5%の部分をめったに到達しない樹齢・直径、すなわち寿命・最大径の目安としました。

対数正規分布: 変数の対数をとったものが正規分布となる確率分布です。通常の正規分布と異なり、変数の値は0を下回ることがありません。本研究では、樹種ごとに特有の年齢・直径(市場出荷用に選別される最低限の値)があり、その右側で対数正規分布の形をとる、という確率分布を考案しました。



図1 岩手県矢巾町「盛岡木材流通センター」の経営する木材市場に、1995年6月から1998年3月まで2年9カ月の間、毎月市場を訪れ、公売にかけている芯に空洞や腐りのない健全な丸太の中から大きいものを対象に、伐採面での年輪数と胸高に相当する位置での直径を計測しました。

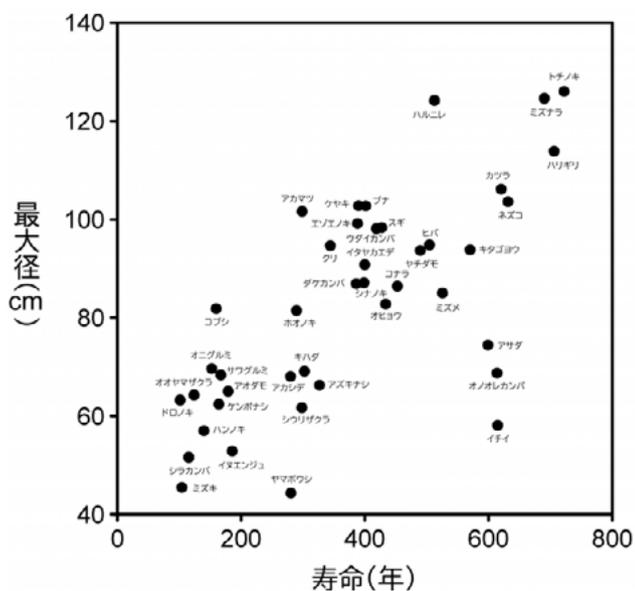


図2 調べた42樹種の長寿性の目安(寿命)と、どこまで太れるかの目安(最大径)の推定値。発表論文 (doi: 10.1080/13416979.2023.2207261) の図1を改変しました。

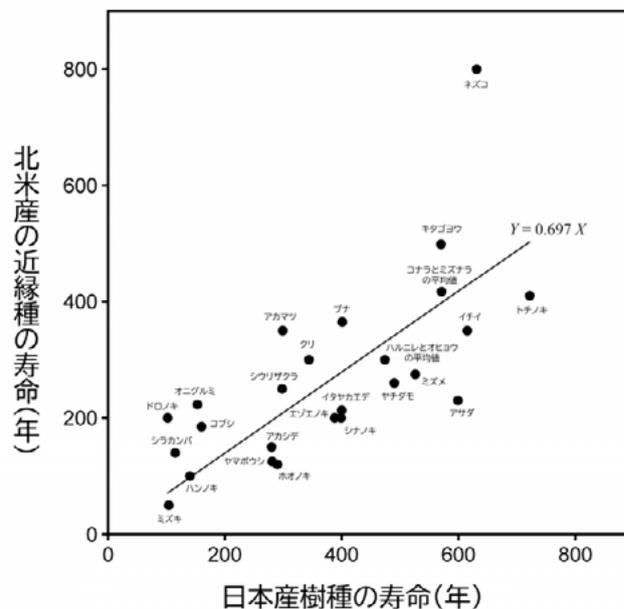


図3 日本産樹種と同節の北米産の近縁種の寿命の比較。マークには日本産樹種の和名を添えています。北米の近縁樹種の寿命については、文献やインターネットで27種の情報を得ることができました。北米のデータは寿命の定義や調べ方が統一されていないこともあり日本産樹種の寿命と1:1の関係にはなっていませんが、相対的な類似関係が認められました。発表論文 (doi: 10.1080/13416979.2023.2207261) の図4を改変しました。

植物に有毒なアルミニウムを無毒化する タンニンの生合成経路を一部再現

樹木分子遺伝研究領域: 山溝 千尋、田原 恒
産業技術総合研究所: 光田 展隆、江面 健太郎
マルティン・ルター大学: Carsten Milkowski
岡山県立大学: 伊東 秀之

ユーカリは酸性土壌でも元気に生育します。その理由は、ユーカリの根に蓄積する加水分解性タンニン*が、酸性土壌に多く含まれる植物にとって有害なアルミニウムと結合してそれを無毒化するためです。他の樹木でも、根に蓄積されるタンニンの量を制御できれば、酸性土壌に強い樹木を創ることができます。そのためには、タンニンがどのような遺伝子によって生合成されるかを明らかにする必要があります。今回、タンニンを蓄積しない草本モデル植物*ベンサミアナタバコの葉にユーカリの遺伝子を導入することで、タンニン生合成の一部を再現し、中間代謝産物*を生成させることに成功しました。この成果により、タンニン生合成機構の解明が加速します。

■ タンニンはアルミニウム耐性の強い味方

ユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) は、植物の生育にとって有害なアルミニウムを多く含む酸性土壌でも旺盛に成長します(写真1)。ユーカリの根から発見された加水分解性タンニン(以下、タンニン)は、根に侵入してきたアルミニウムと結合して、無害な状態にすることができます(図1)。植物に含まれるタンニンの量を制御して、アルミニウムに耐性をもつ樹木や作物の開発につなげたいと考えました。

■ 草本モデル植物で生合成経路の一部を再現

そのためには、植物内でタンニンがどのように生合成されるのかを明らかにする必要があります。しかし、草本モデル植物や木本モデル植物であるポプラは、タンニンを蓄積しないため、どのような遺伝子によってタンニンが生合成されるのかあまり分かっていませんでした。

そこで、植物がタンニンを生成する仕組みを解明するため、本来タンニンを蓄積しない草本モデル植物であるベンサミアナタバコでタンニンを作らせることに挑戦しました。ユーカリから、タンニン生合成の第一段階と第二段階の反応を担う酵素遺伝子(それぞれSDHとUGTといいます)が、これまでに2つずつ単離されています(図2)。草本モデル植物のシロイヌナズナやベンサミアナタバコには、タンニン生合成の起点となる没食子酸合成に関与するSDH遺伝子が存在しません。そこで、ユーカリで同定されているSDH遺伝子をベンサミアナタバコ葉に導入したところ没食子酸が検出され、更にSDH遺伝子とUGT遺伝子を導入することでβ-グルコガリンが検出されました。こうして、本来タンニンを蓄積しない草本モデル植物で生合成経路の一部を再現することに成功しました。

■ 加水分解性タンニンの生合成機構解明の加速

遺伝子組換えユーカリを作成して、候補となる遺伝子が実際にタンニンの生合成に関わっているかを調べるには、既存の技術では一年以上を要していました。しかし、今回構築した草本モデル植物ベンサミアナタバコを用いてタンニンの生合成経路を迅速に再現する技術によってその期間が1週間程

度に短縮されます(図3)。また、本来タンニンを蓄積しない草本モデル植物でタンニンを作らせることで、それぞれの代謝産物を明確に検出し、その役割を明らかにすることができます。この技術を活用して生合成機構の解明を加速させ、タンニンの人為的制御によって、酸性土壌で生育可能な樹木や作物の開発を目指します。

研究資金

- ・科研費(JP22K05739)「ユーカリの加水分解性タンニンの生合成機構とアルミニウム耐性における役割の解明」
- ・科研費(JP22H02391)「ゲノム編集ユーカリを用いた加水分解性タンニン生合成遺伝子の同定」

参照文献・サイト

Oda-Yamamizo C, Mitsuda N, Milkowski C, Ito H, Edura K, Tahara K (2023) Heterologous gene expression system for the production of hydrolyzable tannin intermediates in herbaceous model plants. *Journal of Plant Research*, 136 (6): 891–905.

専門用語

加水分解性タンニン: 植物に分布するポリフェノール的一种。皮なめしや下痢止め、防腐効果が古くから報告され活用されています。タンパク質や金属イオンと反応し、強く結合する能力を持っています。

モデル植物: 普遍的な生命現象の研究に用いられる実験植物。栽培が容易で遺伝子情報の解明が進んでいる種が使われます。草本モデル植物のベンサミアナタバコは短期間で大量のタンパク質を作れるため、ワクチン製造にも使われています。

中間代謝産物: 生体内の代謝において、最終的な代謝産物に至る過程で生じる中間段階の物質。加水分解性タンニン生合成における最初の中間代謝産物は没食子酸で、没食子酸を材料にして生合成される代謝産物がβ-グルコガリンです。



写真1 ユーカリは、有害なアルミニウムを多く含む酸性の土壌でも旺盛に成長します。

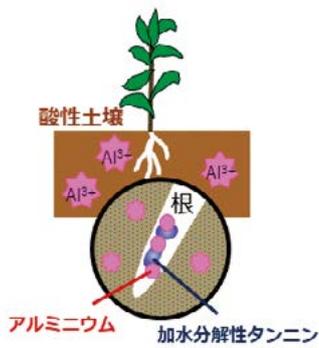


図1 加水分解性タンニンのアルミニウム無毒化機構

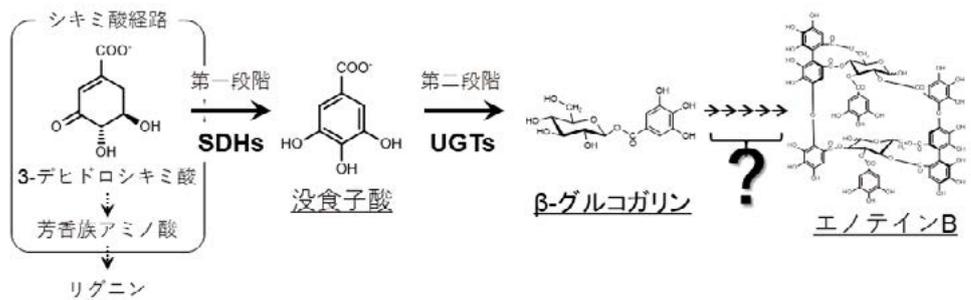


図2 加水分解性タンニン生合成経路

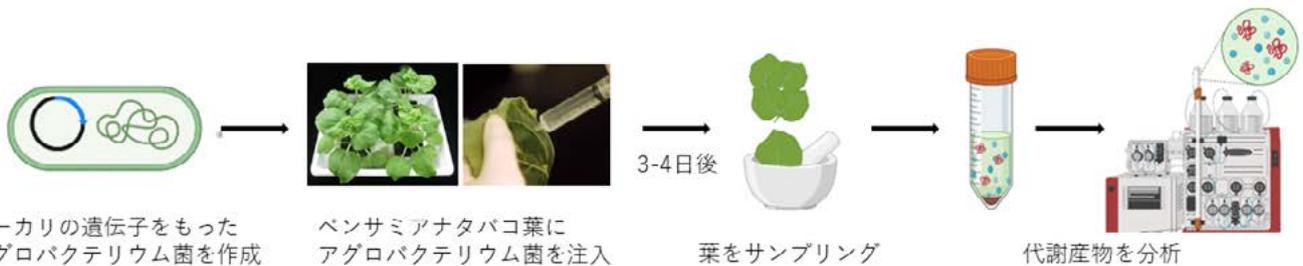
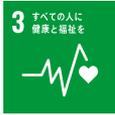


図3 ベンサミアナタバコ葉で加水分解性タンニンの生合成経路を一部再現



保持林業の実証実験 —初期の成果から人工林における保持林業を提案—

北海道支所:尾崎 研一、山中 聡、上田 明良、小長谷 啓介 四国支所:山浦 悠一
九州支所:佐山 勝彦 企画部:佐藤 重穂 野生動物研究領域:河村 和洋
北海道立総合研究機構:明石 信廣、雲野 明、長坂 晶子、長坂 有

伐 採時に一部の樹木を伐り残す保持林業の大規模実験を2013年から北海道有林のトドマツ人工林で行っています。実験開始から10年間の経過し初期の成果をまとめました。単木保持では林床植生を除く色々な生物群で広葉樹の保持量が多いほど生物多様性保全効果が高いことが明らかになりました。一方、群状保持の効果は生物群によって異なり、保持部分が伐採の影響から逃れる一時的な避難場所として機能するものと機能しないものがありました。以上の成果から、人工林で保持林業を実施する場合、単木保持では広葉樹を10本/ha以上、できれば50本/ha以上残すこと、群状保持と単木保持は組み合わせると効果的であることを提案しました。

■ 保持林業とは

多くの人工林が主伐期を迎え、木材生産と公益的機能の両立が可能な伐採方法が求められています。保持林業(または保持伐、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。この保持林業を人工林に適用するために、2013年から北海道有林のトドマツ人工林において「保持林業の実証実験(略称:REFRESH)」という大規模な実験を行っています。

■ 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セット設置しました(図1)。単木保持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段階の量で保持しました。一方、群状保持区では実験区の中央に60 m四方の保持部分を残し、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、通常的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。

■ 初期の成果のまとめ

実験開始から10年間の経過し初期の成果をまとめました(表1)。生物多様性については鳥類、林床植生、昆虫類、コウモリ、外生菌根菌を調査しました。その結果、単木保持では林床植生を除く色々な生物群で森林性種の個体数、種数と保持量に正の相関がみられました。このことから、広葉樹の保持量が多いほど生物多様性保全効果が高いことが明らかになりました。特に鳥類では少量の広葉樹を保持することが費用対効果の高い保全手法であることが示されました(図2)。一方、群状保持の効果は生物群によって異なり、林床植生、オサムシ類、外生菌根菌のように保持部分が伐採の影響から逃れる一時的な避難場所として機能するものと、鳥類や腐肉食性甲虫のように機能しないものがありました。

次に、木材生産性については、伐出コストの増加や収穫量の減少といった負の影響は10本/ha保持では無視できる範囲でしたが、50本/ha保持以上で顕在化しました。また、水土保

全機能については量水堰^{せき}を設けて伐採前後の流量と水質の変化を調べました。その結果、保持伐は皆伐による伐採後2年間の流量と溶存有機炭素量の増加を緩和することが分かりました。

■ 人工林において適切な保持林業の提案

以上の成果から人工林で適切な保持林業を提案しました。単木保持では木材生産性を犠牲にしないのであれば保持木を50本/ha(材積で約10%)以下に抑えるが、多少のコスト増加を許容するならば50本/ha以上の保持が望ましいと言えます。ただし、保持林業が国内で普及していない現状を考慮すると、10本/ha(材積で約2%)から始めるのが現実的だと考えます。また、単木保持と群状保持では効果的な生物群が異なるため、両方の生物群を保全するには単木保持と群状保持を組み合わせる必要があります。

研究資金

- ・科研費(JP25252030)「人工林の保残伐がもたらす生態系サービスを大規模実証実験で明らかにする」、同(JP18H04154)「保残伐の大規模実験による自然共生型森林管理技術の開発」
- ・三井物産環境基金(R12-G2-225)「人工林において生物多様性保全と木材生産は両立できるか?—保残伐実験による検証と普及方法の提案—」、同(R15-0025)「木材生産と生物多様性を両立させる「保残伐施業」の効果を検証する。」
- ・日本生命財団環境問題研究助成(2018年度若手研究・奨励研究助成、助成No.06)「人工林を支え植栽木を育む土壌共生菌類の多様性は、環境配慮型の森林施業によって保全されるのか」

参照文献・サイト

Yamura et al. (2023) Sharing land via keystone structure: retaining naturally regenerated trees may efficiently benefit birds in plantations. *Ecological Applications*, 33(3): e2802.

プレスリリース(2023)「わずかな広葉樹の大きな役割—人工林内の広葉樹の保持は効率的に鳥類を保全する—」<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2023/20230213/index.html>

保持林業の実証実験プロジェクト <https://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/refresh/index.html>

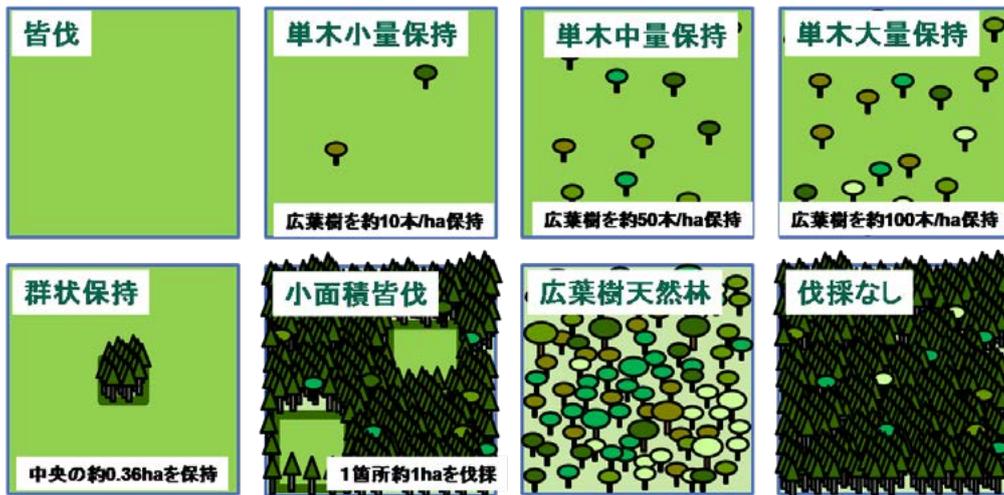


図1 保持林業の8通りの実験区

表1 保持林業の実証実験、初期の成果のまとめ

機能	生物群など	単木保持量との関係 ^a	群状保持の避難場所効果 ^b
生物多様性保全	鳥類	+	なし
生物多様性保全	林床植生	なし	+
生物多様性保全	オサムシ類	+	+
生物多様性保全	腐肉食性甲虫	+	なし
生物多様性保全	コウモリ	+	
生物多様性保全	外生菌根菌	+	+
木材生産性	伐出生産性	-	
水土保持	伐採直後の変化を緩和	+	

a: 広葉樹保持量と正(+), 負(-)の関係、または関係が認められない(なし)

b: 群状保持の避難場所効果があり(+), なし(なし), または調査せず(空欄)

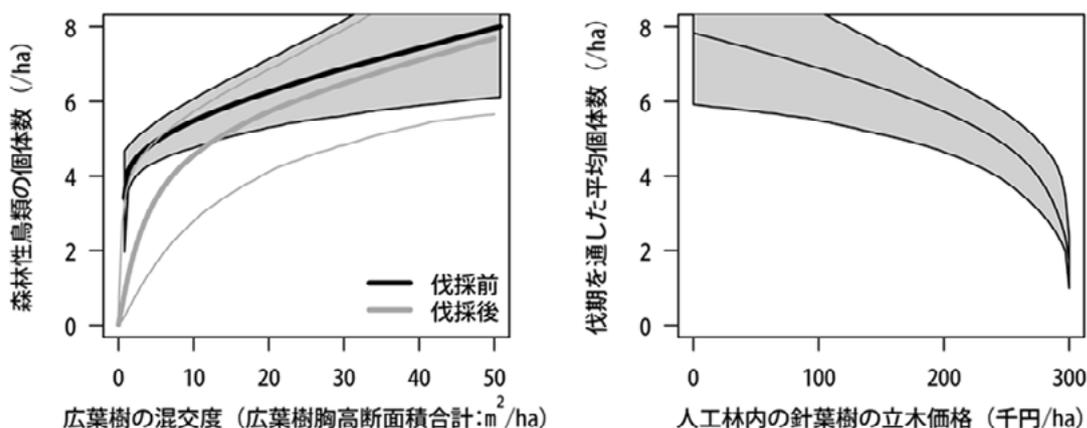


図2 広葉樹の量(左)と山元立木価格(右)に対する森林性鳥類個体数の反応

(左) 伐採の前後で、広葉樹の量に対する森林性鳥類の個体数の反応曲線と誤差範囲を求めました。広葉樹をhaあたり10本と50本保持した際は、広葉樹の胸高断面積合計が0.6 m²/haと3.2 m²/haにそれぞれ相当します。(右) 左図の關係に基づき、伐期を通した平均的な森林性鳥類の個体数が人工林の経済的な価値(山元立木価格)とどのような關係にあるかを描きました。(Yamaura et al. (2023)のFig. 8をWiley社の許可を得て和訳・転載)

きのこ原木の放射性セシウム濃度の効率的な予測には 統計情報の活用が重要

北海道支所:伊東 宏樹 震災復興・放射性物質研究拠点:三浦 寛
きのこ・森林微生物研究領域:小松 雅史 福島大学:金指 努
企画部:長倉 淳子 研究ディレクター:平井 敬三

原 発事故の影響により、福島県では今でもきのこ栽培用の原木生産が再開できていない地域が広くあります。きのこ原木林の利用再開を進めるためには、原木の放射性セシウム*濃度の予測が欠かせません。今回、原木の放射性セシウム濃度の指標となる当年枝の濃度について、ばらつき具合を統計モデルにより解析しました。その結果、調査区(20~40m四方程度)内の濃度の頻度分布について、95%予測区間の上限と下限との比は一定とみなしてよいことが分かりました。これにより、調査区内のきのこ原木の放射性セシウム濃度の分布を予測するために当年枝を採取する個体数は比較的少数でよく、既往の研究例などもふまえ、5個体あればよいと判断されました。

■ きのこ原木の放射性セシウム濃度

2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故により降下した放射性物質(現在まで残るのはほとんどがセシウム137)により、福島県のきのこ栽培用原木林(写真1)は、多くが汚染されてしまいました。きのこ原木の放射能濃度の当面の指標値は50Bq/kg(乾重量)と定められており、出荷の際はこの濃度を下回る必要があります。原木林の利用再開のためには、林分内の原木の放射性セシウム濃度を調べ、どのくらいの濃度の原木がどのくらいあるのかを予測することが求められます。今回、原木の放射性セシウム濃度の指標となる、当年枝の濃度測定データを統計モデルで解析し、濃度がどの程度ばらつくのか、ばらつき具合は場所により異なるのかを評価しました。

■ ばらつき具合は調査区スケールで一定

解析の結果、調査区(20~40m四方程度)内での当年枝の放射性セシウム濃度のばらつきについて、95%予測区間の上限と下限との比がどの調査区でも一定とみなしてよいことが分かりました。これにより、放射性セシウム濃度予測のために測定する必要のある個体の数は、調査区ごとにばらつきが変わる場合と比べて少なくてすむことになります。

■ 5個体の測定で一定の精度

更に、新しい調査区で、原木の放射性セシウム濃度の分布を予測する際には、5個体から当年枝を採取して測定して平均を推定すれば、一定の精度で分布を予測できることが分かりました。

測定値がまだない状態で、調査区における当年枝の放射性セシウム濃度を予測すると、既存の測定値全体を反映して、予測値の95%区間の幅は386倍程度にまでばらつくことと推定されます(図1a)。次に、新しく調査区内で測定値を得たうえで、今回推定した調査区内のばらつきの情報を加えて推定すると、予測値のばらつきは小さくなります。更に、試料となる当年枝を採取する個体の数が増えるにつれて、平均の推定値は調査区の平均に近づき、ばらつきも小さくなっていきます。

今回、先行研究などによる推奨値も勘案のうえ、5個体で測

定すると濃度の分布を一定の精度で予測できると判断されました。図1bに濃度の平均が小さい場合の、図1cに大きい場合のそれぞれについて、5個体から測定値を得たと想定したときの、放射性セシウム濃度の予測分布を示しました。濃度の平均に関わらず、5個体から測定すれば、放射性セシウム濃度の95%予測区間の上限と下限との比はおおよそ23倍に収まると予測されました。

今回明らかにした、調査区内での放射性セシウム濃度の予測区間の上限と下限の比を一定と見なせるという結果は、調査手法の効率化や原木の将来の放射性セシウム濃度予測手法の確立に欠かせない重要な知見です。

研究資金

- ・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」(JPJ007097)「放射能汚染地域におけるシタケ原木林の利用再開・再生技術の開発」(課題番号:28028C)
- ・本研究の交付金プロジェクト「放射能汚染地域の林業再生に関する技術開発」

参考文献・サイト

Itô H, Miura S, Komatsu M, Kanasashi T, Nagakura J, Hirai K (2023) Variability in radiocesium activity concentration in growing hardwood shoots in Fukushima, Japan. PLOS ONE 18: e0293166.

専門用語

放射性セシウム:放射線を放出するセシウム。東京電力福島第一原発事故では主にセシウム137と134が放出されました。本研究では、放射性セシウムのうち半減期30年のセシウム137を解析対象としました。半減期2年のセシウム134の放射能は事故当初の100分の1近くに低下しており、長期的な放射能汚染への影響が小さいためです。



写真1 福島県内のきのこ原木林(2014年5月)

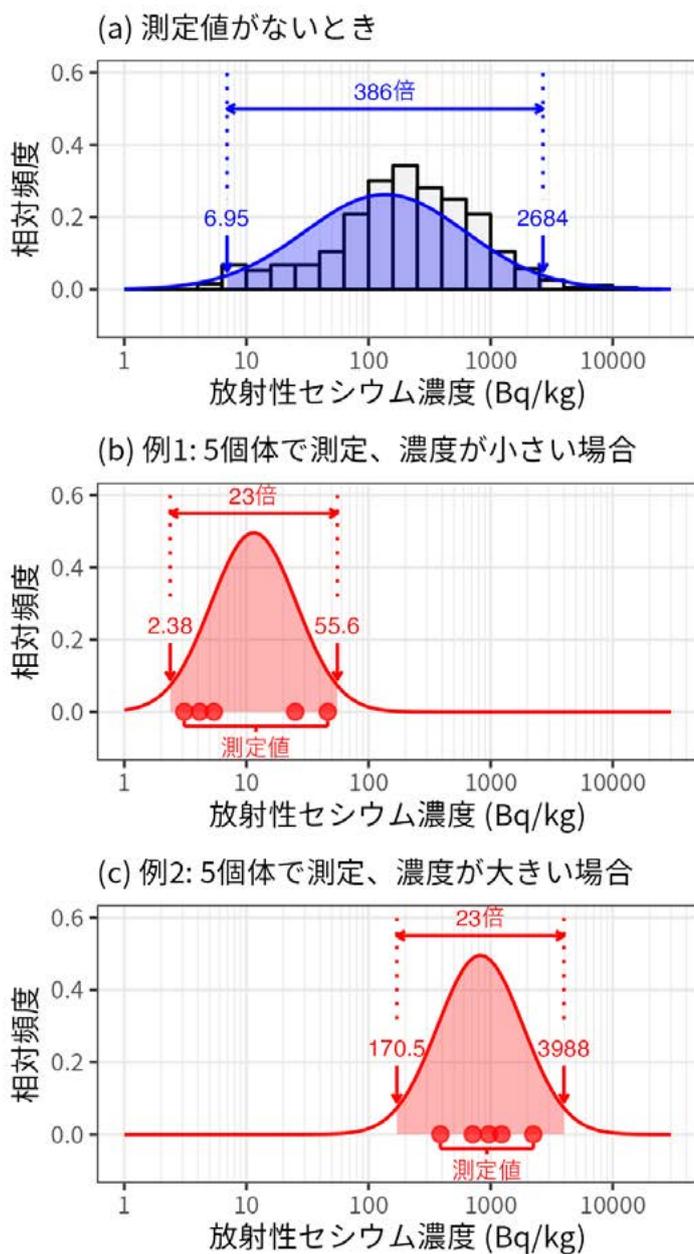


図1 当年枝の放射性セシウム濃度の予測の例

(a) 当年枝の放射性セシウム濃度の測定値がまだないときの予測値の分布(青線)と95%予測区間(青色の領域)。ヒストグラムは既存の418検体の測定値の分布。

(b) 濃度が小さい場合に5個体から測定値を得たと想定して、シミュレートしたときの測定値(赤丸)と、今回推定された濃度のばらつきの情報を加えて推定した予測値の分布(赤線)および95%予測区間(赤色の領域)。薄い青色の領域は測定値がないときの予測分布。

(c) (b)と同様の設定で、濃度が大きい場合を想定してシミュレートした例。



ドローンを活用した新たな技術により 国内最大級の雪崩の発生要因を推定

森林防災研究領域: 勝山 祐太、勝島 隆史、竹内 由香里

防災科学技術研究所: 安達 聖

大規模な雪崩は発生域が広大なため、発生域全体の積雪状態や流下しうる積雪量を災害直後に現地で調査することは困難でした。そこで、ドローンを使い雪崩発生区の広範囲の積雪分布を観測することでこの斜面の積雪分布への降雪や吹雪の影響の傾向を見いだして、雪崩発生直前の積雪状態を推定する手法を開発しました。新しい手法を使い、2021年1月10日に岐阜県・野谷荘司山(標高1797m)で発生した国内最大級の雪崩の発生直前の積雪状態を調べました。その結果、雪崩発生10日前と3日前の大雪とその後の寒気によって、発生域全域にわたって非常に不安定な積雪状態だったことや最大で2m程度の厚さの積雪が雪崩として流下しうる状態だったと推定できました。

■ 従来の雪崩発生区の現地調査

積雪状態は時々刻々と変化しているため、雪崩の発生要因を調べるためには、発生域の積雪調査を迅速に行う必要があります。しかし、雪崩が発生するときは天候が悪いことが多く、人が立ち入って現地調査を行うことは困難でした。また、大規模な雪崩の場合は、発生域が広大なため、たとえ人が立ち入れたとしても限定的な現地調査にとどまっています。雪崩発生域の地形は複雑なことが多く、例えば雪庇や吹きだまりなど吹雪等によっても積雪の量や状態は場所によって大きく異なることが知られています。そのため、限定的な現地調査だけでは雪崩発生域内のどこの積雪がどれだけ雪崩として流下しうる状態にあったかなどはわかりませんでした。このことは、具体的な被害範囲を推定する雪崩流下シミュレーションを困難にする要因の一つとなっていました。

強度が弱く、約2mの厚さの積雪が雪崩として流下しうる状態になっていたことがわかりました(図2)。これら推定結果を使うことにより精緻な雪崩流下シミュレーションが可能となり、雪崩ハザードマップの高度化が期待できます。

■ 研究資金

・科研費(JP22K14458)「数値計算と長期モニタリング結果に基づいた雪崩発生危険度の可視化技術開発」

■ 参考文献・サイト

Y. Katsuyama, T. Katsushima, S. Adachi, and Y. Takeuchi, "Estimation of Spatial Snowpack Properties in a Snow-Avalanche Release Area: An Extreme Case on Mt. Nodanishoji, Japan, in 2021," J. Disaster Res., Vol.18 No.8, pp. 895-910, 2023.

■ ドローンを活用した新しい手法

新しい手法では、まず、ドローンを使い詳細な積雪分布を観測することで雪崩発生域における降雪や吹雪の影響の空間分布の傾向を見いだします。そして、この分布傾向を加味しつつ、積雪層内の物理的な性質の時間変化をコンピュータ上で再現し、雪崩発生直前の積雪状態を広範囲で推定します。この手法では、雪崩発生翌年以降にドローンを使った観測を行うことができるため、天候の悪い雪崩発生直後に人が現地に立ち入る必要がありません。また、雪崩発生域内のどこの積雪が不安定な状態であったかやどれだけの量の積雪が雪崩として流下しうる状態にあったかなどを示す地図を描くことができます。

■ 国内最大級の雪崩発生要因

新しい手法を使い、2021年1月10日に岐阜県・野谷荘司山で発生した国内最大級の雪崩(図1)について、発生直前の積雪状態を推定しました。その結果、雪崩発生域の全域で積雪は自重を支えるだけの十分な強度がない非常に不安定な状態となっていたことがわかりました。このような不安定な積雪は、発生区域内の多くの場所で雪崩発生3日前の大雪に伴い形成されており、約1m程度の厚さの積雪が雪崩として流下しうる状態だったと推定しました(図2)。ただし、一部北向きの斜面では、雪崩発生10日前の大雪に伴い形成された積雪層の

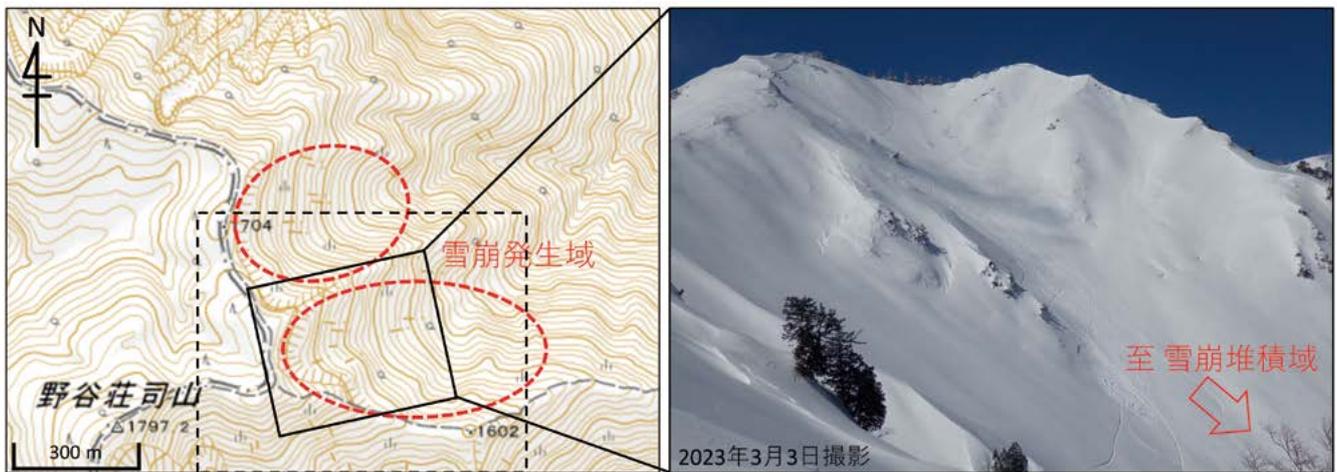


図1 雪崩発生域の場所と写真

雪崩発生域のおおよその場所を赤色破線で、図右の写真のおおよその範囲を黒色実線で、図2のおおよその範囲を黒色破線で示しました。地形図には地理院タイルを使用しました。

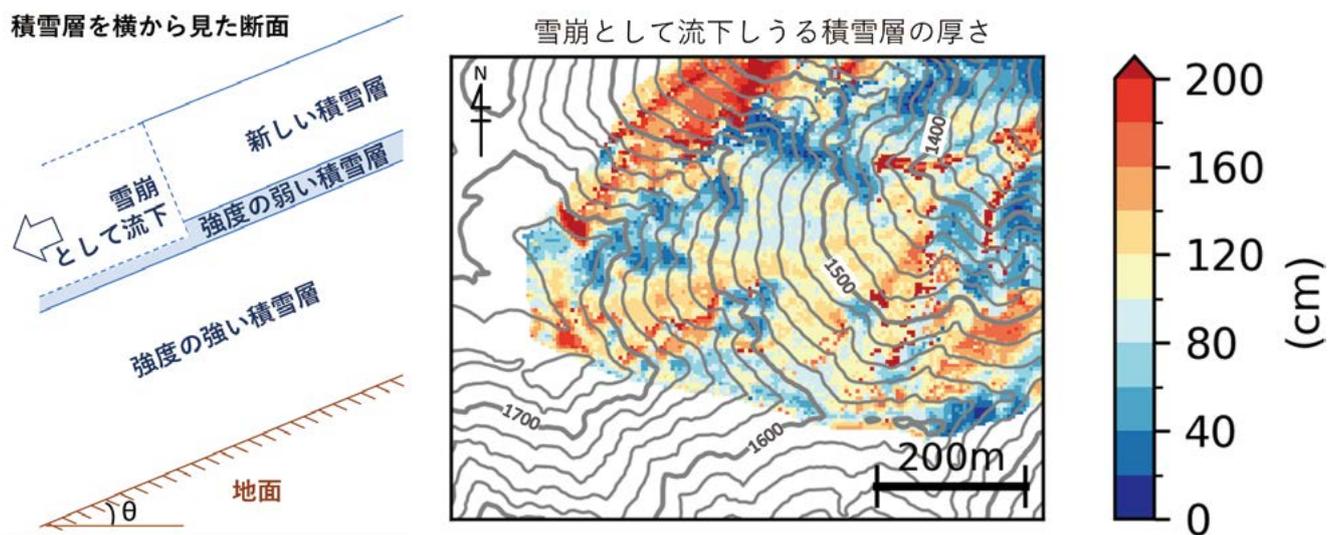
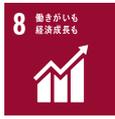


図2 雪崩発生直前の雪崩として流下しうる積雪層の厚さ

相対的に強度の弱い積雪層よりも上層の積雪はいつ雪崩として流下してもおかしくない不安定な状態にあります(左図)。このような雪崩として流下しうる積雪層の厚さを図右側のカラーバーに従って色分けして示しました(右図)。標高20m毎に灰色の実線で等高線を描きました。



ドローン空撮画像から下刈りの要否を判断

関西支所: 中尾 勝洋

造 林地における下刈り要否の判定を行うため、ドローンによる空撮画像から苗木と雑草木との競合関係を評価する手法を開発しました。これにより高精度で自動抽出した苗木と雑草木との競合状態を、現地調査による目視判定と同程度の精度で判定できます。本手法は、以下の2つのモデルから成り立ちます。苗木抽出モデルは畳み込みニューラルネットワーク*を用い、空撮画像から苗木の位置を90%程度の精度で抽出します。競合評価モデルは、抽出した苗木位置とその周辺の雑草木との競合状態を80%以上の精度で判別します。この手法を用いれば、雑草木に埋もれている苗木を見つけ、下刈りの必要な場所を地図上に示せます。

■ 空から判定する

ドローンを活用した苗木と雑草木との競合評価手法を開発しました。ドローン空撮画像から90%程度の精度で苗木を自動抽出し、下刈り要否の判断に必要な雑草木との競合状態を目視判定と同程度で判定できました。

■ 2つの“眼”

開発した評価手法は、苗木抽出モデル、競合評価モデルの2つから構成されています(図1)。苗木抽出モデルは、大量の苗木画像を学習させた畳み込みニューラルネットワークモデルを用いて、植栽直後の空撮画像から苗木位置を90%程度の精度で抽出します。競合評価モデルは、前述の苗木位置と、雑草繁茂後のドローン空撮画像から得られた高さ情報(数値表層モデル: DSM*)とオルソ画像の色情報を用いた解析によって、造林地内の苗木と雑草木との競合状態を4段階(U1-U4)で判別します。この判別結果は、目視調査で得られた競合状態(C1-C4)と比較して80%以上の精度となりました(図2)。下刈りは、目視で苗木の梢端部が競合植生に埋もれていること(C3-C4)が目安とされています。ドローンで俯瞰することにより、雑草木が繁茂して歩きにくい現場作業を行う前に、雑草木に負けそうな苗木を見つけ、下刈りの必要な場所を予め地図上に示せるようになりました。

■ タイミング大切です

基盤となるドローン空撮のタイミングもポイントです。ドローンによる空撮は、雑草木が繁茂する夏季に加えて、地面が明瞭に判別できる植栽直後に撮影することが重要です。競合植生の繁茂が少なく苗木抽出を行える点、基準となる地盤高を把握することで夏季の雑草木高を精度よく評価できる点などのメリットがあるためです。実際、雑草木の繁茂する夏季の空撮画像だけでは苗木の誤判別率が増加し、抽出精度が低下してしまいます。

■ PDCAサイクルの実行で効率的になります

開発した技術により、下刈りが必要な場所を現地作業の前に特定できるようになります。これにより、下刈り作業が必要な場所を限定し、その場所に作業を集中できるため、費用対効果の向上につながります。造林-保育作業は、苗木を植える場所を観察し、植栽と下刈りの計画(Plan)を立てて、実

行(Do)するわけですが、人間の初見だけでは計画を完璧に実行できません。この技術は実行した後のチェック(Check)を容易にし、その結果に合わせて修正実行(Act)することが可能となります。このように、最先端技術の林業への適用により、より効率的な造林・育林体系を提案できるはずで、今後は、現場への技術導入と社会実装を進めつつ、新たな課題や展望に向けた研究を展開していきます。

研究資金

・農林水産省委託プロジェクト研究「成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発」18064868

参考文献・サイト

森林総合研究所第5期中長期計画成果15『エリートツリーを活かす育苗と育林、施業モデル』<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/5th-chuukiseika15.html>

農林水産省「知」の集積と活用場「持続的な林業生産システム研究開発プラットフォーム」<https://ml-wiki.sys.affrc.go.jp/chisourinboku/%E6%83%85-41>

専門用語

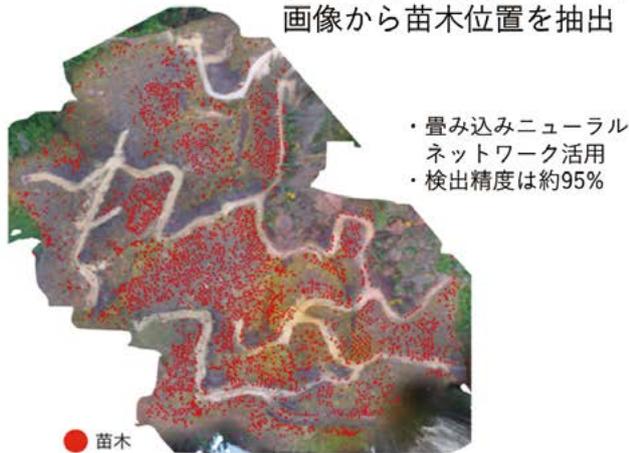
畳み込みニューラルネットワーク: 画像認識の分野で広く使われる技術で、画像中の特徴やパターンを検出するのに有効とされる方法。

DSM: Digital Surface Modelの略で、建物や樹木など地上の物体の高さや凹凸を表現する数値情報。



苗木抽出モデル

大量の苗木画像を学習し、画像から苗木位置を抽出



競合評価モデル

苗木と雑草木との競合を色や高さ情報から評価

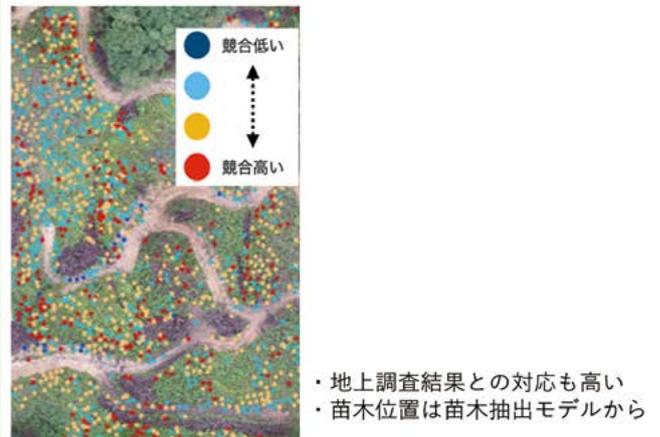
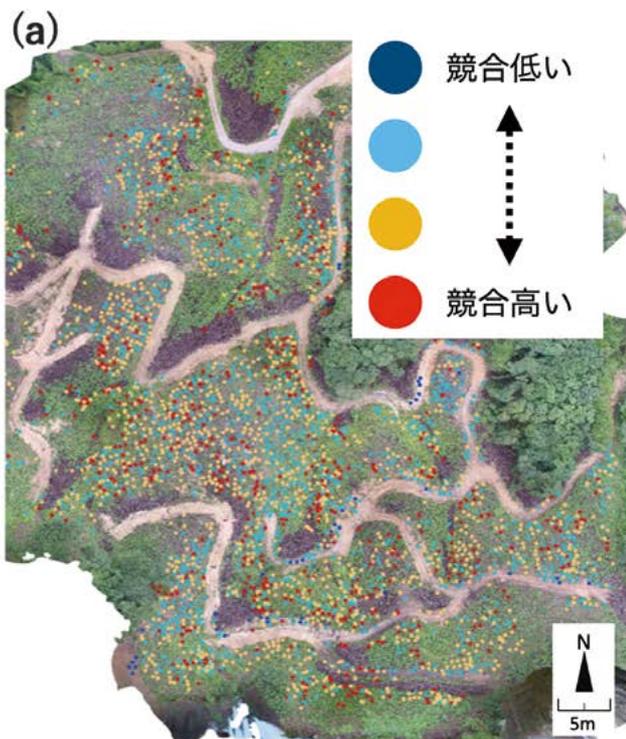


図1 現地調査および解析の流れ

大まかな流れは、空撮、画像処理を行い、2つのモデルでそれぞれ解析を行います。



(b)

	C1	C2	C3	C4
U1	23	14	0	0
U2	287	281	2	0
U3	0	23	60	2
U4	0	0	4	23
正答率	7.40%	88.40%	90.90%	92%

▲ 競合弱 ←-----→ 競合強 ▲

図2 競合評価の結果

三室国有林(岡山県新見市)における事例。

(a)競合状態の分布。丸が苗木位置を、色が雑草木との競合状態を示しています。

(b)地上調査に基づく競合状態(C1- C4)と空撮画像から判定した競合状態(U1- U4)の対応関係。

地形条件と道路の幾何構造から見る路網整備の難易度を地図化

林業工学研究領域：白澤 紘明 岐阜県森林研究所：臼田 寿生、和多田 友宏

森林 林内の道路網(路網)は森林管理や林業経営において不可欠な基盤です。路網整備にあたっては、対象林地に路網を容易に整備できるか、逆に困難かを、地形図等を参考に見極めなければなりません。本研究では、道路区分として林業専用道と森林作業道*を想定し、路網整備の難易度を明示する地図表現手法を開発しました。この手法では、地形データを用いた路網設計のシミュレーションにより、想定する幾何構造を満たし路網整備が可能な林地を推定します。整備の難易度を示す地図は林地の選定に有用であり、また丈夫で壊れにくい路網整備の推進に貢献します。成果地図は岐阜県全域で作成し公開しました。

■ 路網と地形の密接な関係

路網整備は地形の改変を伴います。大幅な改変は斜面を不安定化させ、路網の損壊を招きます。安定して継続的に利用可能な路網を整備するためには、計画時に林地の地形条件を十分に考慮することが重要です。一方、道路には幾何構造という制約があります。これは道路の形状を規定するもので、幅員、縦断勾配、曲率半径などで構成されます(図1)。例えば林業専用道では、幅員は3.6m、縦断勾配は原則7%以下、回転半径は12m以上にしなければいけません。

我が国の林地の大部分は急峻で複雑な地形をしています。地形条件が厳しい林地において、想定する幾何構造を満たし路網整備が可能か判断することは、既存の地図だけでは難しく、相当な経験を要します。そこで本研究では判断を支援すべく、路網整備の難易度を明示する地図表現手法の開発に取り組みました。

■ シミュレーションによる整備可能性の検証

対象となる林地で幾何構造の制約を満たし路網整備が可能な範囲を特定するため、網羅的な路網設計シミュレーションを実施します。現実の地形とよく整合する地形データを用いることで、現実即した路網の三次元形状が再現されます(図2)。シミュレーションには航空レーザ測量による高精度な地形データを用いました。道路区分として林業専用道と森林作業道を想定しました。幾何構造は両道路区分の作設指針*を参考に設定しました。

■ 作設可能範囲と到達可能範囲

シミュレーションの結果を集約することで、路網整備の難易度を地図化できます(図3)。路網作設が可能と推定される範囲だけではなく、既設道との連結性を考慮し、既設道から到達が可能と推定される範囲も可視化されます。これらの成果地図により、想定する幾何構造が対象とする林地の地形条件に適合するかを確認することができ、林業専用道や森林作業道の整備に適している林地が明確になります。成果地図を利用することで、斜面を不安定化させるような無理な路網整備を未然に防ぎ、路網の安全性向上につながる効果が期待できます。利用シーンとしては、地域において路網整備を重点的に実施可能な林地の特定や主伐・再造林候補地の選定等、森林管理・林業経営における様々な場面が想定されます。一

方、地図内に表現された路網整備可能な林地は地形と幾何構造のみを考慮し算出しているため、家屋等の保全対象への影響や林地の地位などの条件が考慮されていません。従って利用に際しては、現場に応じた情報を付加して利用することが必要です。

開発した地図表現手法は、地形と既設道のデータがあれば広範囲での適用が可能です。岐阜県全域に適用し作成した成果地図は、「ぎふ森林情報WebMAP」で公開されています(<https://www.forest.rd.pref.gifu.lg.jp/shiyou/sinrinwebmap.html>)。

研究資金

・本研究の実施課題「森林デジタル情報の活用による林業生産技術の高度化」

専門用語

林業専用道・森林作業道：路網を構成する道路区分であり、もっぱら森林施業のための道路です。前者のほうが大型車両の通行を想定していますが、どちらも土構造(切土と盛土による構築)を基本とするため地形に沿うような形で整備を進める必要があります。

作設指針：林業専用道と森林作業道、それぞれについて国や都道府県が制定しています。路網整備の基本的な考え方や方向性、幾何構造を含め遵守すべき事項が記述されています。



図1 道路の幾何構造

路網設計シミュレーションでは図で説明のある要素を考慮しました。

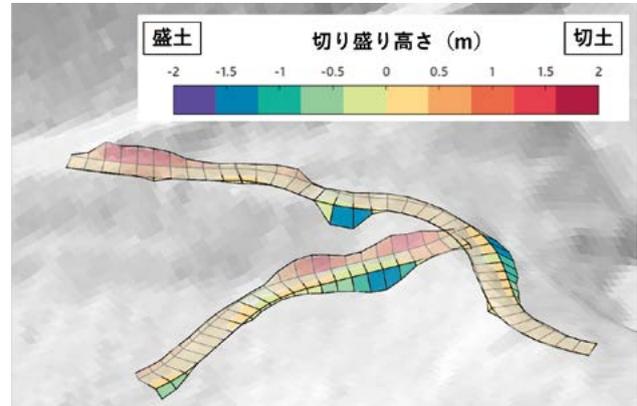
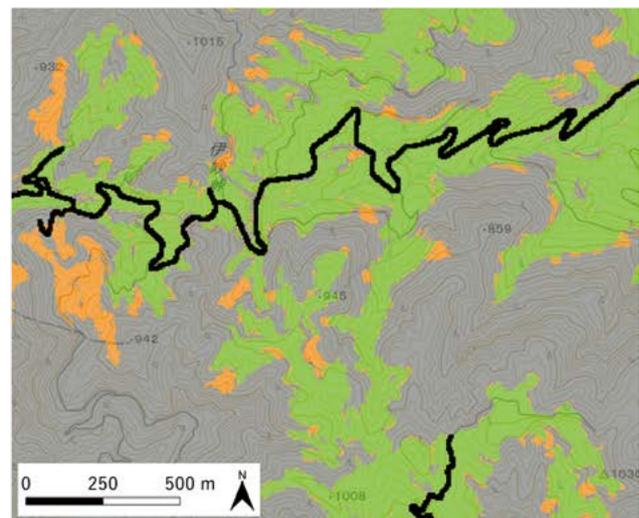
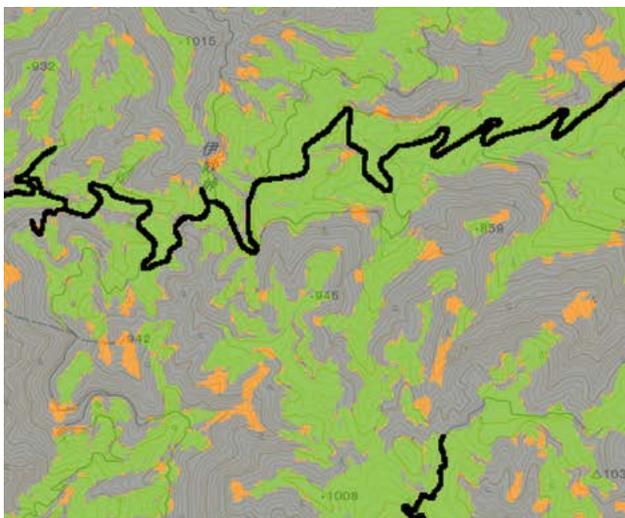


図2 路網設計シミュレーションの様子

道路中心線を変化させ、路面と法面^{のりめん}の形状を地形データ上で推定します。推定結果から図1にある要素を計測し、幾何構造の制約を満たすか判定します。図中の法面は法高で、路面は道路中心線における地盤高と計画高の差で着色しています。

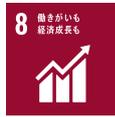


背景図：地理院タイル（淡色地図）

縦断勾配7%以下
 12%以下
 作設/到達困難
 取り付けとなる既設道

図3 路網整備難易度推定図

林業専用道について、路網作設が可能と推定される範囲(左図)とその範囲の中で既設道(黒線)と接続して到達可能と推定される範囲(右図)を示します。縦断勾配については2つの制限値を設けており、縦断勾配7%以下の緑色の範囲で路網整備が容易であると推定されます。



環境配慮意識と生態系サービス保全の関係性を解明

森林管理研究領域: 山田 祐亮、高山 範理
四国支所: 山浦 悠一、志水 克人

森林防災研究領域: 村上 亘、南光 一樹

木 林が提供する生態系サービス*は時として、木材生産を目的とした伐採により低下することがあります。生態系サービスの保全と木材生産の両立は重要な課題です。本研究では、生態系サービスにとって重要な林地で伐採が控えられている地域を空間解析により特定し、聞き取り調査によってその地域の特徴を調べました。その結果、生態系サービスの保全と木材生産を両立していた地域では、環境への配慮に高い意識を持った林業事業者が伐採に携わっていることが分かりました。このことから、環境教育等により林業事業者の環境配慮意識を高めることが、生態系サービスの保全につながる可能性が示されました。

生態系サービスと地域の伐採動向

樹木の根が地面を支える表面崩壊防止の働き、河川への表土流出を防ぐ働き、保健休養やレクリエーションの場の提供といった生態系サービスは、木材生産を目的とした伐採により低下することがあります。従って生態系サービスの保全と木材生産の両立は重要な課題になります。本研究では九州の隣接する複数の市の民有人工林を対象に、生態系サービスと伐採個所の地理的分布を比較し、どのような地域で生態系サービスを損なわない木材生産が行われているかを分析しました。

生態系サービス評価と伐採個所抽出

対象地域において、地形、気候、森林資源分布等から、表層崩壊危険度、表土流出危険度、森林レクリエーション好適度の分布マップを作成しました。たとえば表層崩壊危険度マップを見ると、南東部にあるA市と比べて、B市には表層崩壊の危険性が高い林地が多く分布していました。また、2015～2019年に行われた伐採個所を衛星画像から抽出したところ、A市の方が伐採面積が大きいことが分かりました。

生態系サービスと伐採の関係

作成した生態系サービスの分布マップと伐採個所を重ね合わせ、その関係性を調べました。その結果、A市の場合、表層崩壊危険度や表土流出危険度の高い林地において、伐採面積比率が比較的低いことが分かりました。一方で、B市では危険度が高くても低くても伐採面積比率がほぼ変わらない傾向にありました。森林レクリエーション好適度マップでは、どちらの市においても、伐採箇所との明確な関係性は見られませんでした。

環境配慮意識が高いと生態系サービスに配慮した林地で伐採か

対象地域で聞き取り調査を行い、各地域の特徴を整理しました。A市は森林組合が中心となって木材生産を盛んに行うと同時に、地域住民と密接な関係性を保ち、生態系サービスに配慮した独自の基準で伐採地の選定をしていました。このような環境配慮意識の高さが、生態系サービスと木材生産の両立に寄与していると考えられます。一方、B市では生態系

サービスの受益者である地域住民との関係性が希薄な林業事業者による伐採が増加しており、危険度とは関係なく伐採地が選ばれている可能性があります。

生態系サービスと木材生産の両立を目指して

今回の結果から、地域の生態系サービスに対する林業事業者の意識が、保全と木材生産の関係性に影響していることが示唆されました。今後は、教育や研修による環境配慮意識の高まりが生態系サービス保全に与える影響を明らかにしていく予定です。

研究資金

・科研費(JP19K15878)「地域政策が森林所有者の意思決定を誘導する効果の定量化」

参考文献・サイト

Yusuke Yamada, Yuichi Yamaura, Katsuto Shimizu, Wataru Murakami, Kazuki Nanko, Norimasa Takayama (2023) Conflicts among ecosystem services may depend on environmental awareness: a multi-municipality analysis, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpad046. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad046>

専門用語

生態系サービス: 自然環境が人間にもたらす恩恵のことです。森林の生態系サービスは災害防止や水質浄化、保健休養、木材生産を通して、人々の生活を守り、豊かにします。

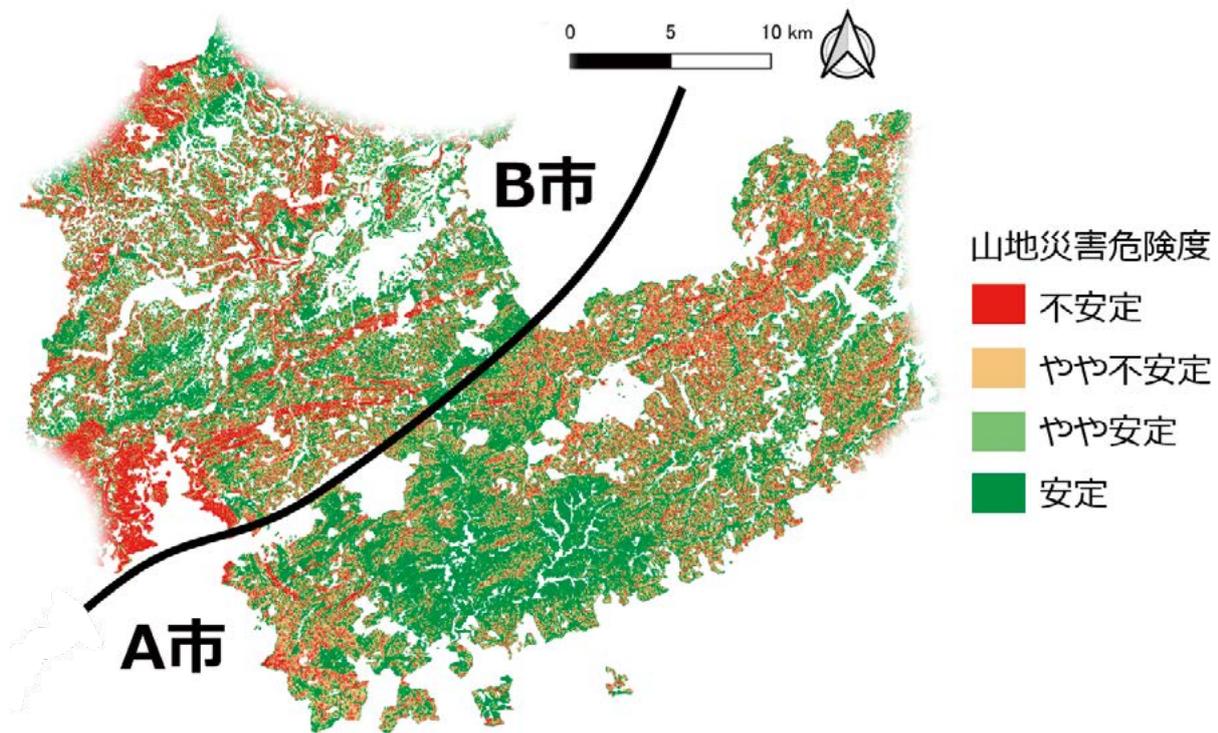


図1 表層崩壊危険度マップ

表層崩壊危険度が高い不安定な山林では、成熟した森林による表層崩壊防止の生態系サービスが期待される。(Yamada et al. 2023を一部改変)。

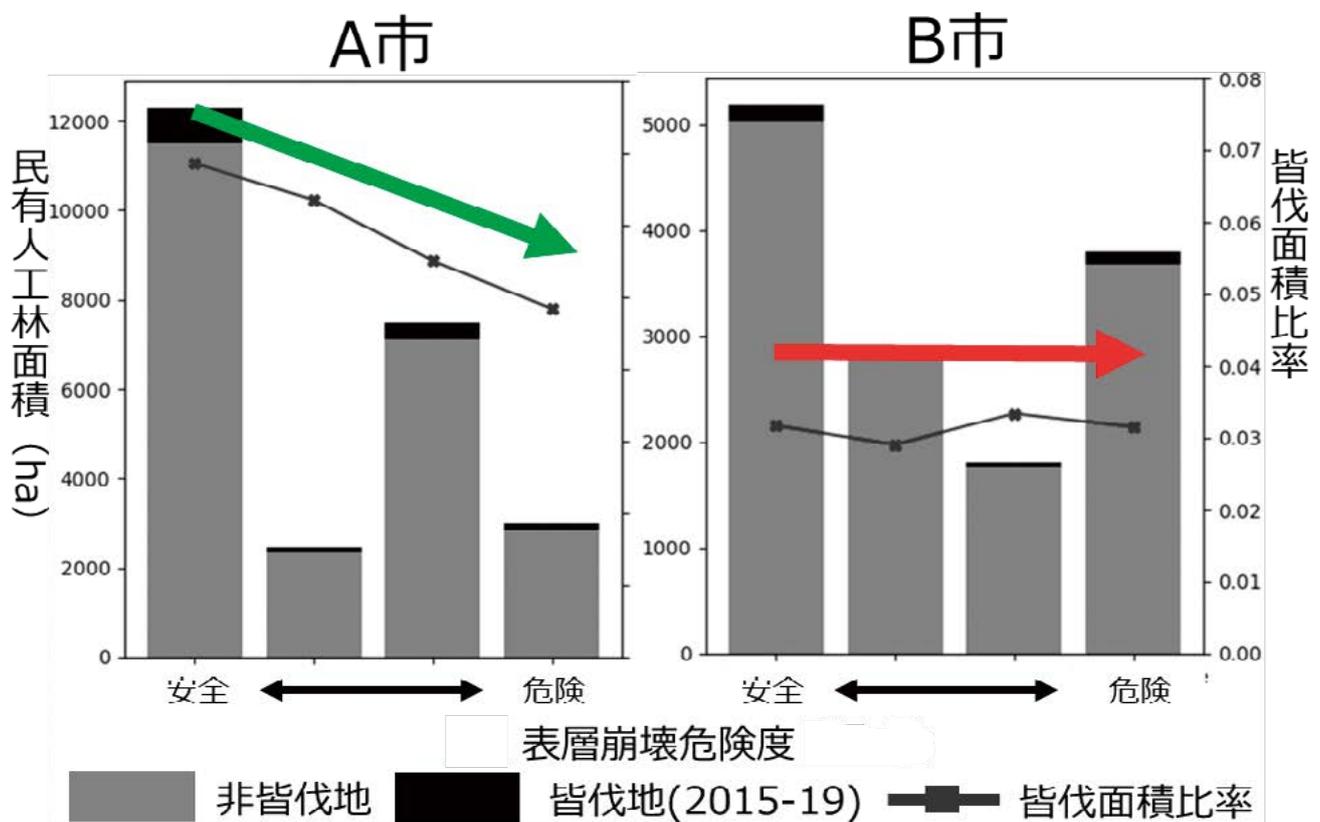


図2 伐採箇所と生態系サービス(表層崩壊防止)の関係性

A市では、危険度が高い(森林による崩壊防止が期待される)林地ほど、皆伐面積比率が低くなっています(Yamada et al. 2023を一部改変)。



多様な林業労働力の確保に向けた施策の動向と促進対策の課題

林業経営・政策研究領域: 田中 亘

「林業労働力の確保の促進に関する基本方針*」の過去2回の変更を通して、高齢者、建設業者、女性、障害者、外国人材が時代の要請を反映して雇用促進等の新たな対象として示されるようになり、多様な労働力の確保が重要施策となっています。国の基本方針を受けた都道府県の同基本計画では、それらの多様な労働力を施策対象として全て取り入れるのではなく、選択的に対応していることが明らかになりました。障害者や外国人材は、林業の現場に浸透しつつある状況ですが、現在はその端緒にあります。林業において多様な労働力が活躍するためには、安全性の確保とならんで、労働力の適切な評価も重要といえます。

■ 林業労働力の確保促進対象の多様化

1996年に策定された「林業労働力の確保の促進に関する基本方針」は2010年に1度目、2022年に2度目の変更が行われました。これらの変更において、高齢者、建設業者、女性、障害者、外国人材が確保されるべき対象として新たに加えられ、多様な労働力の確保が重要施策となっています。その新たな労働力確保の目的や社会状況について、図1のようにまとめました。建設投資が減少した時期における建設業者の林業への参入、近年における外国人労働者の増加や受入れに対する関心の高まり、といったように基本方針の変更は時代の要請を反映していることが分かります。

■ 都道府県計画における多様化の動き

都道府県では国の基本方針に則して、林業労働力の確保の促進に関する基本計画を定めています。インターネット上で基本計画を確認できた35道県において、5つの対象に関する記述の有無を図2のとおり整理しました。まず、5つの対象全てについて項目立てで記述しているわけではなく、選択的に対応していることがうかがえます。また、2010年に加えられた高齢者、建設業者は、2022年に加えられた女性、障害者、外国人材よりも多くの道県で記述されていることが分かります。今後、各都道府県で基本計画の変更を経ながら、障害者や外国人材に関する記述が増えていくことが予想されます。

■ 多様な労働力確保の成果と課題

障害者における林業関連の就労は、これまできのこ生産で多く見られましたが、植林作業のように木材生産に関わる場面での就労も期待されています(表1)。植林に関しては、現場の安全性や作業時間の確保などが課題としてあげられます。障害者にとっても安全な作業環境を整えること、現場までの移動の効率化などによって作業時間を一定程度確保することが重要です。また、作業内容や実労働時間など、労働力をどのように統計的に把握するかについても検討が必要と考えられます。

林業における外国人材の受入れに関しては、技能検定*制度を設けた上で、当面は技能実習制度(将来的には育成就労制度)および特定技能制度を軸として進めていくことが見込まれます。現状においては制度面での制約が強いため、林業における外国人材受入れのニーズは限定的です。しかし、将

来的には概ね3年間以上就労できるようになることが見込まれるため、林業の多くの現場で受入れのニーズが高まることが予想されます。今後、外国人材に対する技術や安全の指導を安定的に行う仕組みを作ること、それらの達成状況を確実に把握し評価することが重要となります。

研究資金

・本研究の実施課題「多様化する森林との関わりを支える社会経済的・政策的方策の提示」

参照文献・サイト

田中亘(2024) 林業における多様な労働力確保の可能性と課題. 林業経済研究70(2)印刷中

専門用語

林業労働力の確保の促進に関する基本方針:「林業労働力の確保の促進に関する法律」第三条の規定に基づいて農林水産大臣と厚生労働大臣が定めるもので、情勢の推移により必要が生じたときに変更される。

技能検定: 技能の習得程度を評価する国家検定制度。技能実習2号への移行対象職種として指定されるために必要な制度であり、林業では2023年に試行試験が実施された。

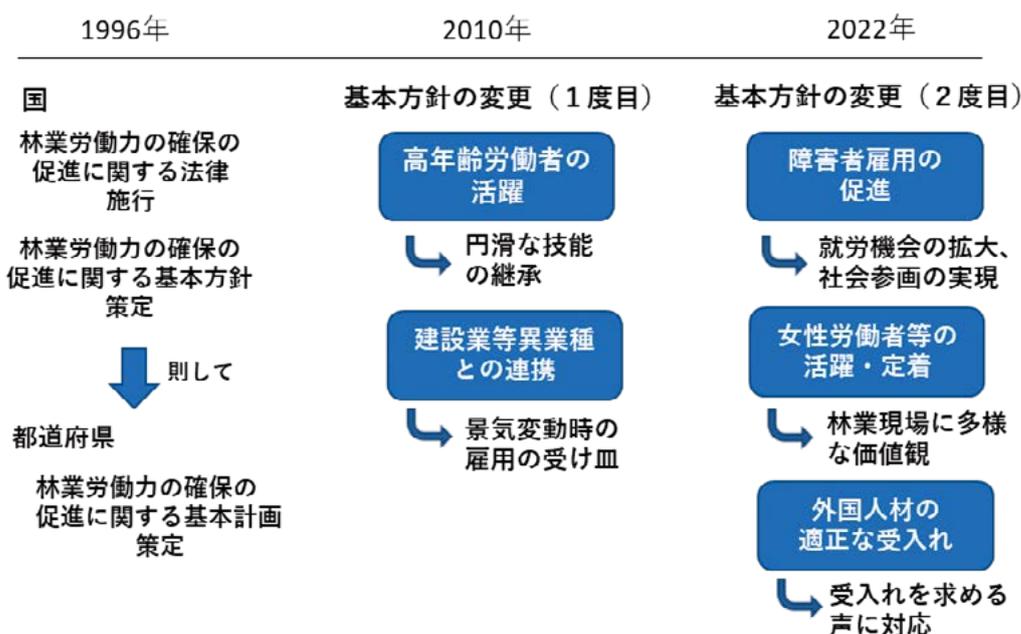


図1 「林業労働力の確保の促進に関する基本方針」の変更と新たな対象追加の動き

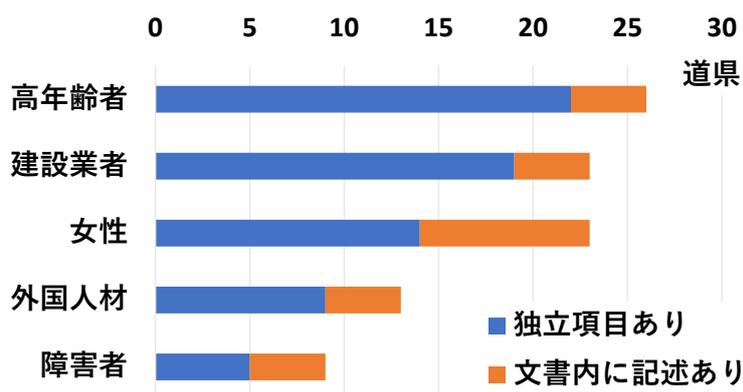


図2 基本計画における多様な労働力の記述

林務担当部署等ウェブページにおいて基本計画が確認できた35道県を対象としています(2023年10月時点)

表1 新たな確保促進の対象における成果と課題

	障害者	外国人材
活躍が期待される主な場面	一部の植林作業	林業分野全般
これまでの成果	きのこ生産など木材生産以外の林業関連分野	技能実習1号（1年間）のみで限定的な受入れ
課題	安全な作業環境の整備と実労働時間の確保	技能習得・人材育成の制度が未整備
労働力の統計的把握	困難	可能

東日本のナラ枯れの被害域拡大を引き起こしている カシノナガキクイムシの由来を遺伝情報から明らかに

北海道支所:小林 卓也、上田 明良、尾崎 研一 生物多様性・気候変動研究拠点:滝 久智
森林昆虫研究領域:加賀谷 悦子 宇都宮大学:逢沢 峰昭
青森県産業技術センター林業研究所:伊藤 昌明 東北支所:中村 克典、磯野 昌弘
北海道立総合研究機構:和田 尚之、内田 葉子、徳田 佐和子

ナラ枯れは、カシノナガキクイムシが樹木の幹に多数穿孔し、この虫が媒介する病原菌によって、ナラ類やカシ類などの樹木が大量に枯死する病気です。被害は全国各地に広がっており、近年の東日本では関東平野や北東北で被害が拡大しています。カシノナガキクイムシのDNA分析の結果、東日本には少なくとも3つの遺伝的に異なるグループが分布することが明らかになりました。一方、それぞれのグループの分布域は最近拡大しており、特に被害域拡大の最前線では、地元ではなく既存の被害地からカシノナガキクイムシが移住することで、新たな被害地が生じている可能性が強く示唆されました。近隣被害地からのカシノナガキクイムシの飛来を念頭に被害対策を考える必要があります。

東日本のカシノナガキクイムシの遺伝的地域性

ナラ類、シイ・カシ類などが集団で枯死するナラ枯れが全国各地で発生しています。これは、カシノナガキクイムシという小さな昆虫が大発生して樹木の幹に多数穿孔し、この虫が媒介するナラ菌と呼ばれる菌によって樹木が枯死するものです(図1)。ナラ枯れは、1980年代末以降、主に本州日本海側を中心として発生していましたが、近年では関東平野や北東北、北海道南端部にまで拡大しています(図2左)。

東日本各地のナラ枯れ被害地で採取したカシノナガキクイムシの遺伝的な特徴をDNA分析で調べたところ、東日本のカシノナガキクイムシには地域による遺伝的な違いがあり、これらは少なくとも3つの遺伝的に異なるグループに分けられることが明らかになりました(図2右)。このことから、ナラ枯れ被害をもたらしているカシノナガキクイムシの由来は単一ではないことが分かりました。

地域集団の分布拡大

一方で、同じ遺伝的グループに属する集団が、地理的に遠く離れた地域に分布するケースもありました。これらの地域では、比較的最近、同じ遺伝的グループに属する集団が分布域を拡大させたと考えられます。また東北地方の太平洋沿岸地域などでは、異なる遺伝的グループが混在して同所的に分布していました。これらの地域では、異なる地域集団が分布域を拡大するなかで交錯し、混合した結果であると推定されました。

被害域拡大の最前線のカシノナガキクイムシ

2023年、北海道で初となるナラ枯れ被害が、道南の渡島半島南端部で確認されました。被害を引き起こしたカシノナガキクイムシを調べたところ、津軽海峡を挟んだ対岸にあたる津軽半島の被害地のものと遺伝的にほとんど同じであることが分かりました。また、太平洋側の北端の被害先端地に近い岩手県北部のカシノナガキクイムシの集団は、その南方の既存被害地の集団と遺伝的特徴が類似していました。更に、南西方向から被害が拡大している関東平野の集団は、その西

の既存被害地である静岡県内の集団と遺伝的特徴が類似していました。これらのように最近ナラ枯れ被害が新たに生じた地点では、その近隣の既存被害地と遺伝的に同じカシノナガキクイムシが被害の原因となっていました。

これまでの研究では、地元のカシノナガキクイムシが被害をもたらした例が知られていました(森林総合研究所プレスリリース(2011))。今回の研究では、東日本において近年新たに発生した被害の多くは、その地に生息していたカシノナガキクイムシではなく、隣接する既存の被害地から移動してきたカシノナガキクイムシによって起こっている可能性が強く示唆されました(図2)。

温暖化に伴い、今後もナラ枯れ被害域は拡大し続ける可能性があります。ナラ枯れが発生していない地域では、最も近い被害地からの飛来を警戒し、ナラ枯れの発生に対応できる体制整備を行うことが重要となります。

研究資金

・本研究の交付金プロジェクト「高解像度の集団遺伝解析によるナラ枯れ拡大地域におけるカシノナガキクイムシの由来の解明」

参考文献・サイト

プレスリリース(2011)「ナラ枯れは『地元』のカシノナガキクイムシが起こしている —遺伝子解析が示すナラ枯れ被害拡大の要因—」
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2011/20110131/>



図1 青森県のナラ枯れ被害地(左)とカシノナガキクイムシ(右)

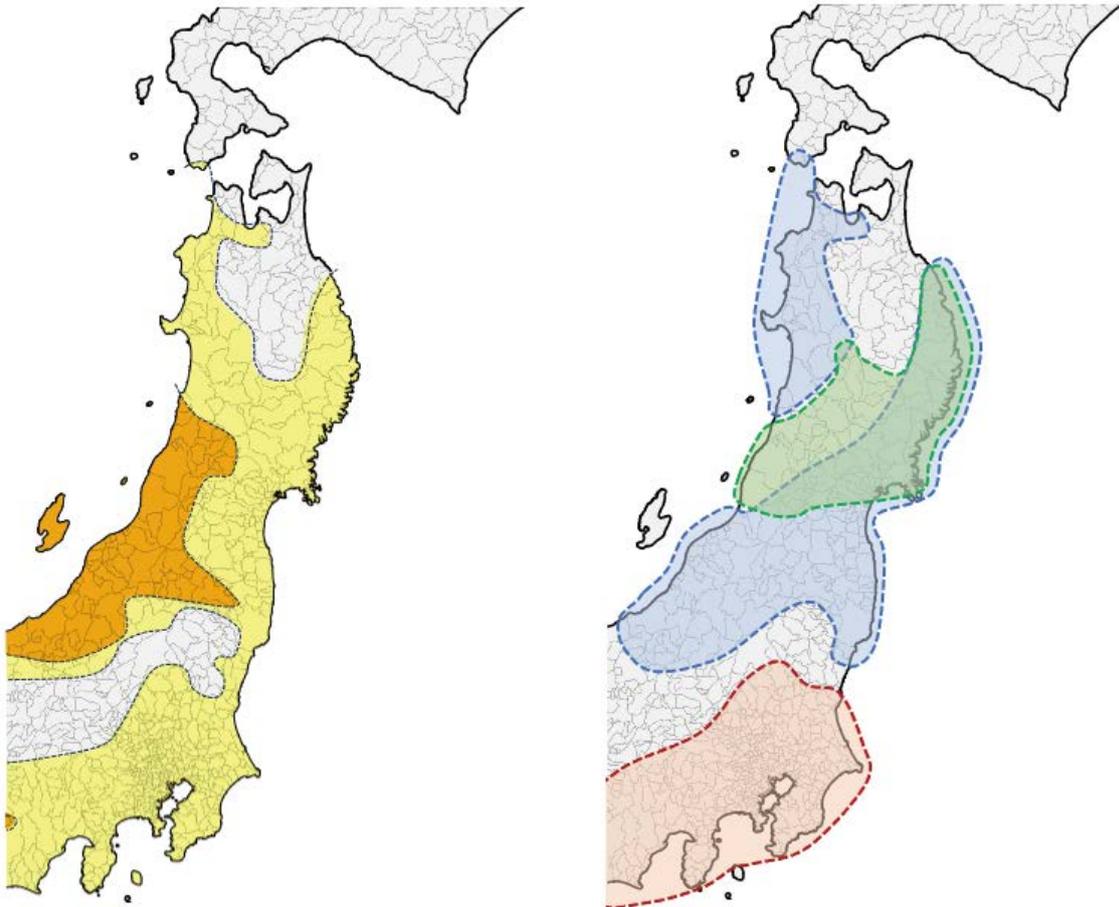
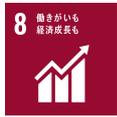


図2 東日本におけるナラ枯れ被害域の拡大(左)とカシノナガキクイムシの遺伝的グループの分布(右)

ナラ枯れは2007年ごろまでは本州中部日本海側の地域(オレンジ色)を中心に発生していましたが、その後2023年までには東北地方と北海道南端部、関東地方の広い範囲(黄色)にまで拡大しています。これらの被害拡大を引き起こしているカシノナガキクイムシには、3つの遺伝的グループ(茶色、青色、緑色)が含まれることが分かりました。グループ間で分布が重なっている地域には混合した集団が生息しています。



日本に自生する白トリュフを継続的に発生させることに成功

東北支所:山中 高史 北海道支所:小長谷 啓介
立地環境研究領域:古澤 仁美、野口 享太郎 森林資源化学研究領域:山口 宗義
きのこ・森林微生物研究領域:小河 澄香 九州支所:木下 晃彦、中村 慎崇、北出 雄生

高級食材のきのこであるトリュフは国内にも自生し、その栽培化が期待されています。2022年11月、栽培試験地内で白トリュフであるホンセイヨウショウロの子実体(きのこ)を発生させることに成功しました。その後も継続的に調査したところ、2023年11月に同じ試験地内で前年より多くの子実体が発生し、また発生範囲も広がっていることを確認しました。ホンセイヨウショウロの菌が順調に増殖しているものと考えられます。引き続きホンセイヨウショウロなど日本に自生するトリュフの栽培技術の確立に向けた研究に取り組んでいきます。

■ 国内に自生するトリュフの人工的発生に成功

高級食材のきのこであるトリュフは、生きた樹木の根に共生する菌根菌*と呼ばれる菌類に属しています。人工的にこれらの子実体を発生させるには、共生する樹木や共生が成立する環境を明らかにして、それを再現することが重要です。そこで、我々研究グループは、日本に自生する、食材として有望な2種のトリュフ(ホンセイヨウショウロ(白トリュフ)、アジアクロセイヨウショウロ(黒トリュフ))の自然発生地で調査を進め、トリュフの生育に適した共生樹種や土壌環境を解明し、これら2種のトリュフを共生させたコナラ苗木の作出に成功しました。

トリュフ共生苗木を栽培試験地に植栽し、トリュフ菌の定着や子実体発生状況の観察を継続しました。その結果、2022年11月にホンセイヨウショウロ栽培試験地4箇所のうち2箇所(茨城県、京都府)において子実体が発生しました。茨城県内の試験地(2017年10月植栽)では8個、京都府内の試験地(2019年4月植栽)では14個の子実体発生を確認しました(写真1)。発生した子実体が植栽したコナラ苗木に共生させた菌株に由来することを遺伝情報によって確認し、わが国に自生するトリュフの人工的発生に成功したことを科学的に証明しました。

■ トリュフの継続的な発生を確認

その後調査を継続したところ、2022年に子実体が発生した上記2箇所の試験地において、2023年11月にホンセイヨウショウロの子実体発生が再び確認できました。茨城県内の試験地で発生した子実体は10個と前年とほぼ同じでしたが、京都府内の試験地では90個と前年の約6倍に増加しました。また、京都府内の試験地では子実体の発生範囲が前年より大幅に広がっており(図1)、土壌中でトリュフ菌が順調に増殖していると考えられました。どちらの試験地でも、苗木に共生させたホンセイヨウショウロ菌は同じ発生地で採取した子実体由来のものです。従って、発生した子実体の数や発生範囲の違いは菌の遺伝的な違いによるのではなく、栽培試験地間の環境条件の違いによると考えられますが、これについては今後詳細な検討が必要です。

今後も調査を継続し、子実体の発生量の推移を明らかにするとともに、現場での栽培から収穫に至るまでの作業工程を

構築して実用化に向けた研究開発を進めていきます。

研究資金

- ・農林水産省委託プロジェクト研究「森林資源を最適に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」15653601
- ・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」(JPJ007097)「国産トリュフの林地栽培に向けての技術体系の構築」(課題番号:04008B1)

参照文献・サイト

プレスリリース(2023)「国産トリュフを人工的に発生させることに成功した」<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2023/20230209/index.html>

プレスリリース(2024)「国産白トリュフを継続的に発生させることに成功した」<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2024/20240129/index.html>

専門用語

菌根菌:植物の生きた根に共生して菌根という器官を形成し、そこを介して、植物からの養分を得て生育する菌類の総称。トリュフのほか、マツタケなども菌根菌であり栽培技術が確立されていない種が多い。



京都府内試験地



茨城県内試験地

写真1 各試験地で発生が確認されたホンセイヨウシヨウロの子実体(プレスリリース(2023)より)

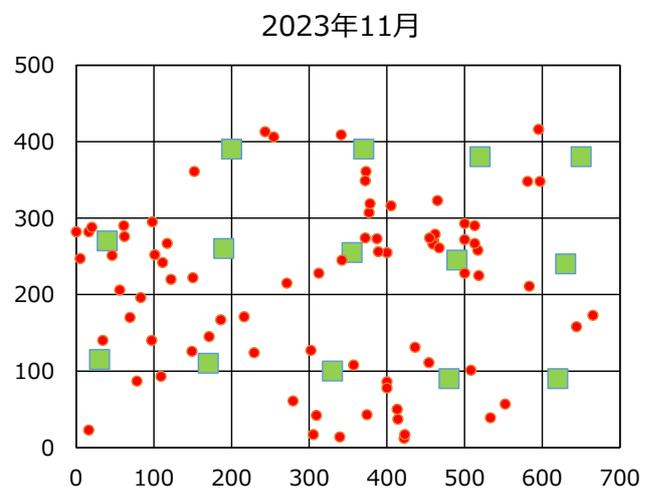
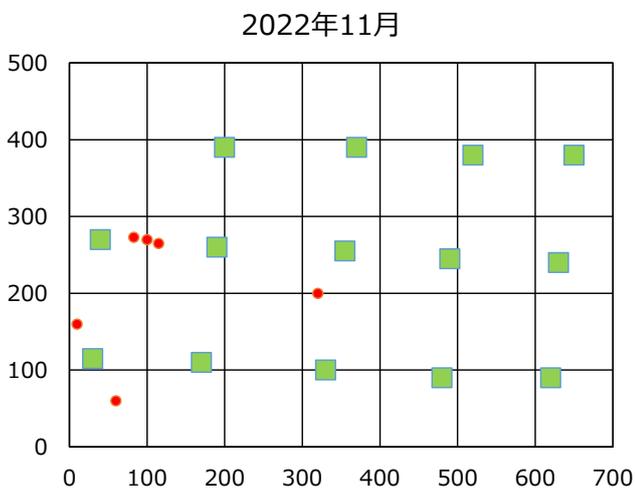


図1 京都府内の試験地でのホンセイヨウシヨウロの発生ポイント(●)の推移

左:2022年11月、右:2023年11月。■はトリュフ苗木の植栽箇所。

各軸の数値は区の左下からの距離(単位:センチメートル)。2022年は試験地の左側のみであったが、2023年は試験区内全体に発生している(プレスリリース(2024)より)。

スギ大径材からの心去り平角の製材において、新たな設備投資を伴わないコスト低減策を提案

四国支所：伊神 裕司

木材加工・特性研究領域：山下 香菜、藤本 清彦、松田 陽介、村野 朋哉

構造利用研究領域：井道 裕史 企画部：松村 ゆかり

スギ大径材から心去り平角*を2本製材する場合、製材時の反りに対応するため、多くの製材工場ではどちらの平角も修正びきを行い目標寸法に整える製材方法が採用されています。この場合、製材能率と歩止まりの低下が課題ですが、後に製材する平角は先に製材する平角よりも反りが小さいことを先行研究で明らかにしました。そこで、後に製材する平角は最初から目標寸法で製材する方法を提案して実証試験を行い、製材能率と歩止まりの向上を確認しました。更に、提案方法を導入したモデル工場を設定して試算したところ、製材コストが大幅に低減することが分かりました。この方法は、新たな設備投資を必要とせず、中小規模の製材工場でも導入が容易な製材コスト低減策となります。

■ 心去り平角製材の課題と対応

スギ大径材から送材車付き帯のご盤を用いて心去り平角を2本製材する場合、製材時に発生する反りに対応するため(写真1)、どちらの平角も乾燥前の目標寸法よりも大きな寸法で製材してから修正びき(ひき直し)を行い、反りを小さくして目標寸法に整える製材方法が多くの製材工場で採用されています。この一連の作業が製材能率と歩止まりの低下を招くことが課題となっていますが、後に製材する平角Bの反りは、先に製材する平角Aと比較して修正びきが必要ない程度に小さいことを先行研究において明らかにしました(図1)。そこで、本研究では、後に製材する平角Bは最初から目標寸法で製材を行う木取りを適用した製材方法を提案して製材工場で実証試験を行い、製材時の作業測定結果に基づいて製材能率および歩止まりの向上効果を確認するとともに製材コストを試算し、この製材方法の有用性を検討しました。

■ 製材工場における実証試験

実証試験における木取りを図2に示します。試験を行った製材工場では、出荷時の断面寸法が120mm×210mmの心去り平角を2本製材する場合、平角A、Bともに、反りが発生する方向の寸法を大きくして一旦断面寸法160mm×225mmで製材し、その後修正びきを行って乾燥前の断面寸法135mm×225mmとする製材方法Iを採用していました。一方、実証試験では製材方法IIを採用し、平角Bは修正びきを行うことなく最初から乾燥前の断面寸法135×225mmに製材しました。乾燥後にモルダ掛け仕上げ*を行った結果、平角A、Bともに削り残し等はなく、平角Bについては修正びきを行うことなく目標寸法に製材できることを確認しました。

■ 心去り平角の製材コストの試算

図3に示すモデル工場を設定し、表1の数値を用いて心去り平角の製材コスト等を試算した結果を表2に示します。製材方法IIは製材方法Iと比較し、修正びき前にのこを入れる回数は10回から11回へと増える一方で平角Bは修正びきを行わないことから丸太1本に関連する全作業時間が短縮し、丸太中心部から板製品を1枚多く製材できることから歩止まり

が向上することが分かりました。その結果、出荷時の寸法に換算した心去り平角の製材コストが57,500円/m³から52,000円/m³へと大幅に低減することが示されました。なお、製材方法Iから製材方法IIへの変更は、特段の新たな設備投資を伴うことなく可能であり、我が国の製材工場の約90%を占める中小規模の製材工場でも導入が容易であるという点からも有用な製材コスト低減策となります。

研究資金

・林野庁補助事業「大径化した原木等を活かした地域材による設計合理の技術開発・普及啓発事業」

参照文献・サイト

伊神裕司ら(2021)スギ大径材から心去り平角を効率良く製材. 森林総合研究所第4期中長期計画成果, 35, 31-32.

伊神裕司ら(2024)スギ大径材からの心去り平角の製材—製材歩止りと製材能率の向上策—. 木材工業, 79(4), 140-145.

専門用語

心去り平角：断面が長方形の角材で樹心を含まない製材品。

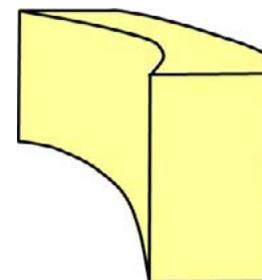
モルダ掛け仕上げ：回転する複数の刃物を取り付けた加工機械であるモルダを用いて、製材品の出荷時の寸法に整える作業。



写真1 製材時に発生する心去り平角の反り



図1 心去り平角の製材順と反りの関係



反りの大きさ $A > B$

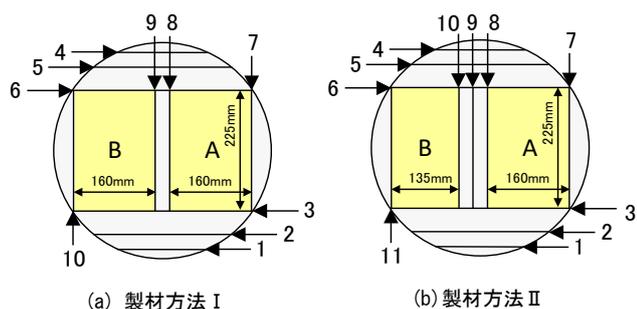


図2 実証試験に用いた木取り (数字はこのを入れる順番を示す)

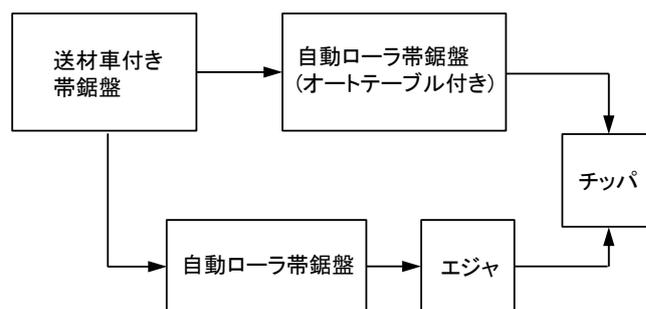


図3 モデル工場の製材工程

総出力: 191kW

機械設備費 : 9,700万円

表1 製材コストの試算に用いた数値

項目	数値
年間稼働日数(日)	240
1日当実働時間(時間/日)	6.5
原木価格(円/m ³)	13,000
労務費(万円/人・年)	400
平割製品販売価格(円/m ³)	40,000
板製品販売価格(円/m ³)	20,000
チップ販売価格(円/dry-t)	12,000
おが粉販売価格(円/m ³)	1,000

表2 製材コスト等の試算結果

項目	製材方法I	製材方法II
修正びきを含めた丸太1本に関連する全作業時間(秒)	812.5	727.4
製材歩止まり(%)	52.4	55.0
製材コスト(円/m ³)	57,500	52,000



安全で快適に歩ける木の床の条件を人の生理面から明らかに

構造利用研究領域: 森川 岳

安全で快適に歩ける木の床の条件を明らかにするために、歩行時における足の筋肉の活動量を表面筋電位*の測定により調べました。床は、表面性状(凹凸、平滑)の異なる2種類の床仕上げ材*と剛性*(高剛性、低剛性)の異なる2種類の床下地材*を組み合わせた4種類の木の床ならびにコンクリートにビニール仕上げ材を張った対照の床とし、歩行は裸足ならびに靴下履きで実施しました。裸足、靴下履きのいずれも、凹凸仕上げ材と高剛性下地材の組み合わせが最も歩きやすかった一方、靴下履きでは低剛性下地材において平滑仕上げ材が凹凸仕上げ材より歩きやすくなるなど、条件の組み合わせによって歩きやすさが変化することが分かりました。

■ 転倒防止や疲労抑制のために

木の床の歩行に係る性能は、安全性や疲労の面から、硬さや滑りやすさなどの物性を中心に研究されてきました。しかし、人の生理面からの検討は十分ではありません。本研究では、表面性状の異なる2種類の床仕上げ材(スギ・表面圧密加工材=凹凸仕上げ材、ヒノキ・セラミック塗装材=平滑仕上げ材、写真1)と剛性の異なる2種類の床下地材(24mm合板=高剛性下地材、根太+15mm合板=低剛性下地材)を組み合わせた4種類の木の床、およびコンクリートにビニール仕上げ材を張った対照の床(写真2)を、裸足ならびに靴下履きで歩行した時(写真3)の足の表面筋電位を測定し、歩きやすい木の床の条件について調べました。なお、各床の滑りやすさは、裸足では、凹凸仕上げ材と平滑仕上げ材は同程度で、対照の床が最も滑りにくい、靴下履きでは、平滑仕上げ材が最も滑りやすく、凹凸仕上げ材、対照の床の順に滑りにくいものとなります。対照の床は、4種類の木の床より剛性の高い床です。

■ 裸足での歩行

裸足での歩行では、表面筋電位は、どの下地材でも凹凸仕上げ材が平滑仕上げ材より低くなりました(図1左)。これは、同じ距離を少ない筋肉の活動量で歩いたことを表し、歩きやすい床であることを示しています。凹凸仕上げ材が歩きやすい要因としては、滑りやすさは同程度なため、凹凸が足を後ろに蹴り出す上での取っ掛かりとなったことが挙げられます。また、床からの圧力を感じる足裏の感覚は立位時のバランス維持に影響するため、凹凸で圧力変化を感じやすくバランスを取りやすかったことも考えられます。高剛性下地材が低剛性下地材より歩きやすかった結果は、たわまず安定して歩けたことを反映しています。高剛性下地材が最も高剛性の対照の床より歩きやすかった結果も合わせると、剛性が高過ぎず低過ぎない床が歩きやすいことを示しています。裸足の場合、表面の凹凸の有無と剛性が歩きやすさに影響することが分かりました。

■ 靴下履きでの歩行

靴下履きでは、裸足と同様に凹凸仕上げ材+高剛性下地材が最も歩きやすかった一方、他3つの床は対照の床よりも歩きにくくなりました(図1右)。これは、靴下履きでは非常に滑りやすいことを反映しています。高剛性下地材では、裸足と

同様に凹凸仕上げ材が平滑仕上げ材より歩きやすい結果でしたが、低剛性下地材では逆の結果でした。低剛性下地材では、たわみによる高低差が足の取っ掛かりとなったと考えられます。一方、凹凸仕上げ材+低剛性下地材で歩きにくかったのは、凹凸で低剛性下地材の不安定さが体に伝わり、歩行が慎重になったと考えられます。靴下履きでは、床の滑りが大きく影響しますが、下地材との組み合わせで影響度が変化することが分かりました。

■ 安全で快適に歩ける木の床

裸足と靴下履きのいずれも、凹凸仕上げ材+高剛性下地材が最も歩きやすいことが表面筋電位の測定から分かりました。しかし、履物の有無や仕上げ材と下地材の組み合わせによって、歩きやすさが変化することも分かりました。安定してバランスよく歩ける床の条件を更に明らかにし、転倒防止や疲労抑制など、安全で快適に歩ける木の床の開発につなげていきます。

研究資金

・本研究の実施課題「木質構造の構造安全性能、木材活用による快適性等に関する研究開発並びに健康機能・環境優位性の創出に資する研究の推進」

参照文献・サイト

森川岳ら(2023)異なる木質床での歩行が生理・心理に及ぼす影響(第1報)―裸足での歩行時における下肢表面筋電図および印象評価―. 木材学会誌, 69(1), 1-13.

森川岳(2023)異なる木質床での歩行が生理・心理に及ぼす影響(第2報)―靴下履きでの歩行時における下肢表面筋電図および足底圧力分布―. 木材学会誌, 69(4), 155-167.

専門用語

表面筋電位: 筋電位とは、筋肉の繊維が収縮するとき発生する活動電位であり、表面筋電位は皮膚表面に張った電極で測定された筋電位を指します。本研究では、歩行時の足の表面筋電位が大きいほど、歩きにくい床であったことを示します。

床仕上げ材、床下地材: 床仕上げ材は、床構造のうち、室内に面して直接人の目にふれる表面材料を指します。床下地材は、床構造のうち、床仕上げ材の下に張る下地材を指します。

剛性: 外から加わる力に対しての変形しにくい性質のことです。剛性が高いと変形しにくく、低いと変形しやすいことを表します。



写真1 凹凸仕上げ材(左、スギ・圧密化仕上げ材)と平滑仕上げ材(右:ヒノキ・セラミック塗装材)

凹凸仕上げ材は年輪の色の濃い部分で盛り上がっているのに対し、平滑仕上げ材は滑らかです。凹凸仕上げ材の凹凸は非常に小さく見えますが、靴下を履いていても感じ取れます。

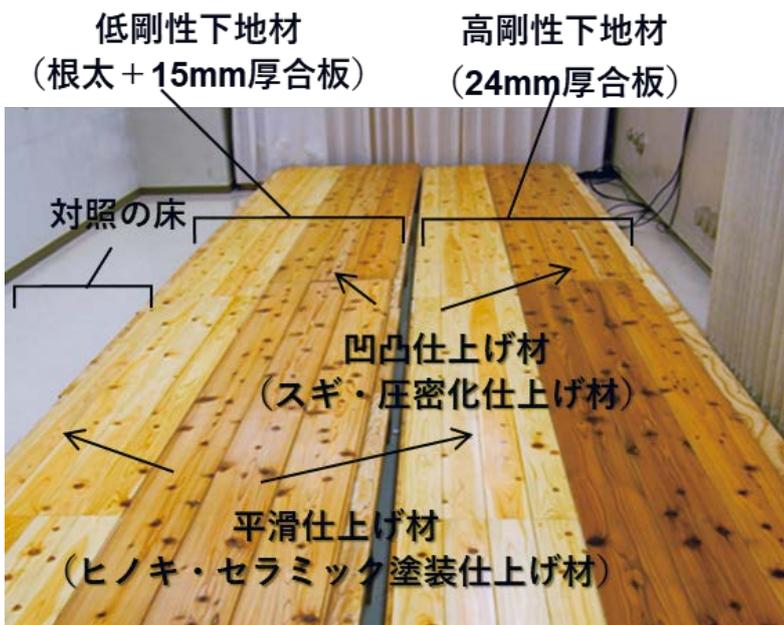


写真2 4種類のモデル床+対照の床

長さ方向に7.2mの床で10歩進んだ時の値を測定しました。

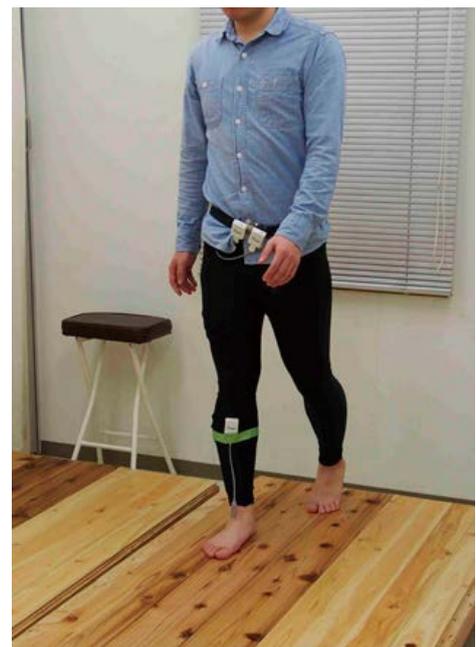


写真3 歩行の様子(裸足)

表面筋電位は右足で測定しました。

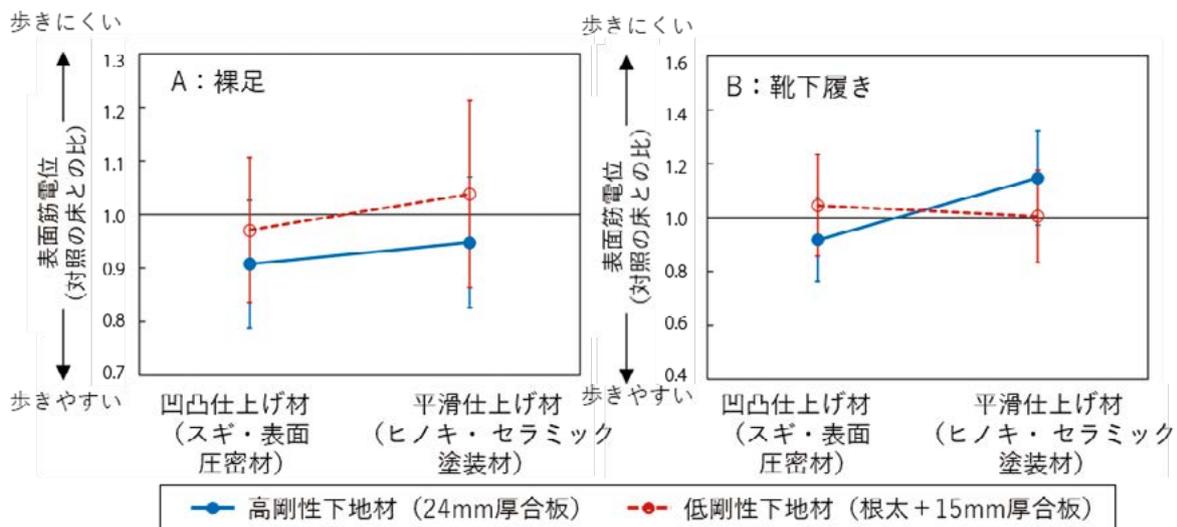


図1 裸足ならびに靴下履きでの歩行時の表面筋電位(対照の床との比)

表面筋電位は、対照の床を歩いた時の値との比で表しています。値が低いほど、歩きやすかったことを示します。1より低い値は、対照の床より歩きやすかったことを意味します。



リグニン由来化合物からバイオプラスチック原料を大量に生産する技術を開発

森林資源化学研究領域: 荒木 拓馬、大塚 祐一郎、鈴木 悠造、中村 雅哉
長岡技術科学大学: 政井 英司、上村 直史

微生物の代謝産物である2-ピロン-4,6-ジカルボン酸 (PDC) は、生分解性や耐熱性のバイオプラスチック、そして非常に強力なエポキシ接着剤の原料として利用できる化合物です。PDCは多くのプラスチック原料とは異なり、石油化学原料から合成することが難しいため、現実的には、微生物機能を利用した発酵生産がPDCを生産する唯一の方法です。しかしながら、高濃度での発酵生産が難しいという問題があり、そのことが実用化に向けての大きな障壁となっていました。我々は、PDC生産菌の培養方法や発酵条件に改良を加え、世界で初めて実用レベルとなる高濃度(100 g/L)でのPDCの発酵生産に成功しました。

■ バイオプラスチック原料“2-ピロン-4,6-ジカルボン酸 (PDC)”

地球温暖化などの環境問題が深刻化する中で、石油系材料に替わる再生可能な新たなバイオ素材の開発が求められています。再生可能な木材には、リグニンという成分が2~3割程度含まれています。しかしリグニンは、その化学構造が非常に複雑であり、石油系の合成高分子のような使い方をするのが難しい化合物です。そこで近年では、リグニンを化学的あるいは生物的に分解し、その分解物から石油化学原料を代替する化合物を取り出して利用するなどの研究が各国で行われています。

森林総合研究所では、微生物の代謝機能を利用することで、リグニンの分解物をまとめて扱いやすい各種の単一の化合物に変換する技術の開発に取り組んでいます。その中で、生分解性や耐熱性のバイオプラスチック、あるいは非常に強力な接着剤の原料としても利用できるPDCという化合物の発酵生産にも取り組んでいます(図1)。PDCは石油化学原料から合成することが難しいため、微生物による発酵生産が唯一の製造方法です。そのために、世界各国でPDCの発酵生産研究が行われていますが、その生産量は低く、PDCの実用化に向けての大きな障壁となっていました。バイオプラスチック原料の発酵生産では、石油化学工業とコスト的に競合するために培養液1Lあたり100 g(100 g/L)以上の生産量が必要とされていますが、世界的にも、これまでの最高生産濃度は約60 g/Lにとどまっていた。

■ PDCの大量生産を目指して

私たちは代表的なリグニン分解物の一つであるバニリン酸からPDCを高効率で製造できる新たなPDC生産菌を作出しました。しかし、一般的な培養方法・発酵条件では、約20 g/LのPDCしか得られなかったことから、代謝産物を網羅的に調べるメタボローム解析*という手法を用い、発酵生産における問題点を明らかにし、そしてその改善を図ってきました。その結果、培地中で菌の栄養源となる化合物の添加量と添加時期を最適化することでPDC生産菌の高密度培養と、バニリン酸代謝活性の高効率状態の維持を同時に達成することに成功し、これまでにない高濃度でのPDC製造条件の設定に成

功しました。その結果、バニリン酸から変換効率99%、発酵生産濃度約100 g/LでPDCを実用レベルで生産することに世界で初めて成功しました(図2)。更に、培地成分のナトリウム塩をアンモニウム塩に変更することで、発酵後の培地中からPDCを効率よく抽出・精製できることも明らかにしました(図3)。

研究資金

・本研究の実施課題「木質バイオマテリアルの社会実装に向けたリグニン利用技術の開発」

参考文献・サイト

Otsuka, Y. et al. (2023) High-level production of 2-pyrone-4,6-dicarboxylic acid from vanillic acid as a lignin-related aromatic compound by metabolically engineered fermentation to realize industrial valorization processes of lignin. *Bioresource Technology*, 377:128956.

中村雅哉(他)2-ピロン-4,6-ジカルボン酸の製造方法. 特許7392928.

専門用語

メタボローム解析: 生体内に含まれるアミノ酸、有機酸、脂肪酸などの代謝物質の種類や濃度を網羅的に分析する手法です。

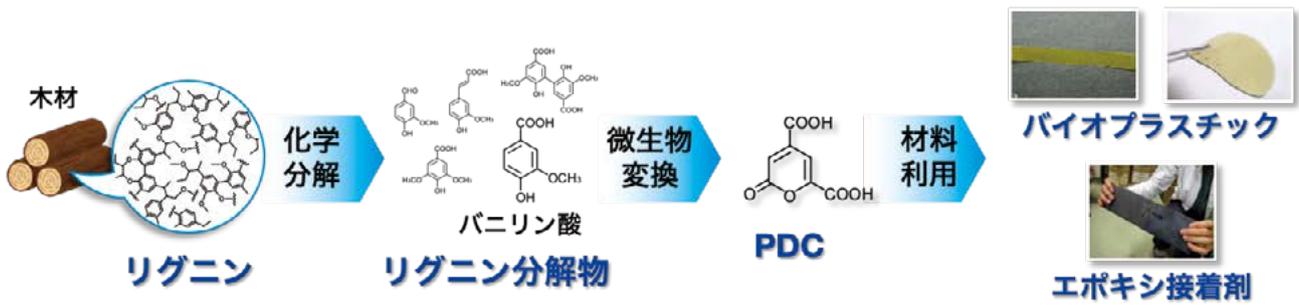


図1 微生物機能を活用したリグニン利用のコンセプト

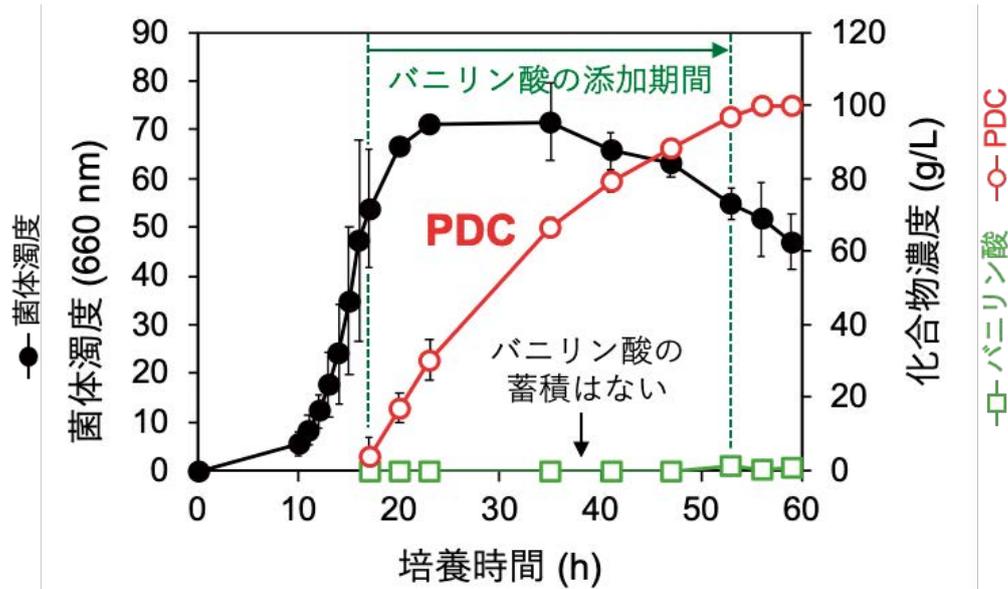


図2 バニリン酸からのPDCの大量生産

培養初期にPDC生産菌の密度を高め、PDC生産菌を高密度に維持した状態でバニリン酸(原料)を逐次添加することでPDCへの代謝活性も同時に高い状態に維持することに成功しました(波長660 nmの光の透過度で測定した濁度をPDC生産菌の密度の目安としました)。

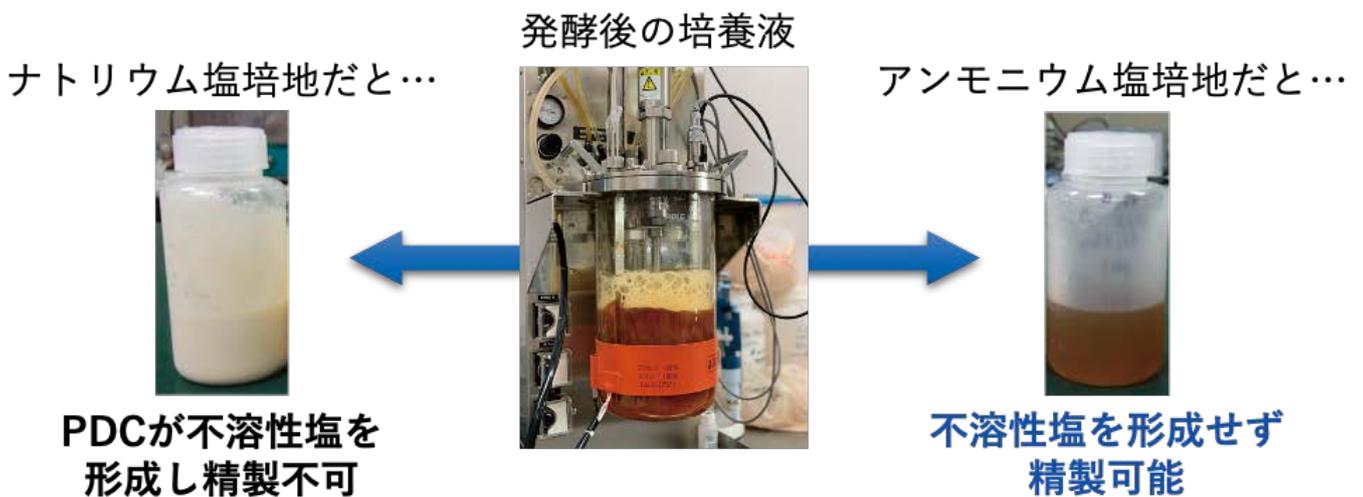


図3 発酵後の培養液からのPDCの精製

発酵後の培養液を酸処理するとナトリウム塩を含む培地ではPDCが不溶性の塩を形成してしまい精製が困難ですが、アンモニウム塩を含む培地に変更すると不溶性塩は形成されず容易に精製が可能です。



関東に分布するヤナギで、豚ふん堆肥の施用効果を実証

植物生態研究領域: 香山 雅純、上村 章
森林災害・被害研究拠点: 高橋 正義

北海道支所: 菊地 賢

資 源作物として有望視されるヤナギのうち、関東に分布する7種類のヤナギの栽培試験を2年間行い、安価な豚ふん堆肥の施用が、その成長量に大きく影響することを明らかにしました。堆肥の施用量は、1 haあたり年間20 tとその倍の40 tとし、無施肥の対照区も設定し試験を行いました。堆肥の施用により、7樹種のヤナギ全ての成長が促進されました。特に、40 tの堆肥の施用で、オノエヤナギとタチヤナギの1株あたりの幹・枝の成長量は3 kgを超え、1 haあたりの年平均生産量としてはそれぞれ14.1と 13.7 dry-t/ha/年に達しました。豚ふん堆肥の施用は、温暖な地域での有望なヤナギ生産技術になると考えられます。

■ ヤナギによる木質バイオマス生産の地域拡大

カーボンニュートラル*の実現に向け、エネルギー利用される木質バイオマスの量が増加しています。このことから、将来にわたり木質バイオマスを持続的に安定供給するために、ヤナギなどの成長が早い早生樹の活用が期待されています。森林総合研究所では、ヤナギを用いたバイオマス利用の研究を行っており、寒冷地に分布するエゾノキヌヤナギとオノエヤナギについては、植栽技術のマニュアル化も行ってきました。しかし、全国に30種存在するヤナギ類の中で、関東以西の温暖な地域に分布する種については、その栽培技術が確立されていません。そこで本研究では、関東に分布する代表的なヤナギ7種について、その植栽試験を実施しました。

した。豚ふん堆肥には各種養分が平均的に高濃度で含まれていることから、ヤナギ全般に対しての成長促進効果が高かったと考えられます。

■ 研究資金

・本研究の交付金プロジェクト「関東中部地域における超短伐期施業に適したヤナギ系統の選抜」

■ 参考文献・サイト

Kayama, M. et al. (2023) Growth characteristics of seven willow species distributed in eastern Japan in response to compost application. *Forests*, 14, 606.

■ 廃棄物由来の肥料の使用

ヤナギは養分要求性が高い樹木として知られており、その栽培には施肥が不可欠です。海外では有機廃棄物を肥料として用いることが、環境面と経済性から推奨されています。我が国の温暖な地域では養豚が盛んであり、安価な豚ふん堆肥が生産されています。そこで、本研究は豚ふん堆肥を用いたヤナギの栽培を試みました。堆肥の使用量は、花卉栽培のマニュアルに従い、1 haあたり年間20 t (堆肥区) と、その倍の40 t (2倍堆肥区) とし、無施肥の対照区も設定し2年間の育成試験を行いました。

■ 専門用語

カーボンニュートラル: 二酸化炭素など温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させ、その排出量を「実質ゼロ」に抑えるという概念です。

■ ヤナギの成長に対する豚ふん堆肥の効果

今回の試験に用いた、茨城県内の養豚業者から購入した豚ふん堆肥は特に多くのリンが含まれており、2倍堆肥区の土壌中のリン濃度は対照区に比べて55倍に増加していました (表1)。また、今回植栽試験を行った試験地の土壌養分は乏しく、無施肥の対象区での成長は抑制されていましたが、豚ふん堆肥を施用することで、全てのヤナギの成長が促進されました (写真1)。特に2倍堆肥区のオノエヤナギとタチヤナギの年間成長量は乾重量でそれぞれ14.1と13.7 t/haを示し (図1)、ヤナギの栽培実績のある欧州での目標値10 t/ha/年を大きく上回りました。更に、ヤナギの葉に含まれる養分を分析し、樹高成長との相関を調べた結果、窒素、リン、カルシウム、マグネシウムの量がヤナギの成長に関係しているものの、最も成長促進に効果がある養分については樹種間で異なっていま

表1 処理区の土壌と堆肥の化学分析結果 (Kayama et al. 2023 を改変)。堆肥の下の%表示は、各元素の質量%。

	pH	元素濃度 (mmol/kg)					
		C	N	P	K	Ca	Mg
対象区	5.59	2980	193	1.4	2.7	10.5	1.7
堆肥区	6.29	4350	293	39.0	25.0	26.5	19.2
2倍堆肥区	6.66	6040	410	77.0	44.5	39.6	31.1
堆肥	7.36	28800	2344	4101	1368	562	405
		34.4%	3.3%	12.7%	5.3%	2.2%	1.0%



写真1 実験終了時 (2020年11月) のコゴメヤナギ。左から対照区 (無施肥)、堆肥区、2倍堆肥区。左端の白線は高さ1 mを示します。

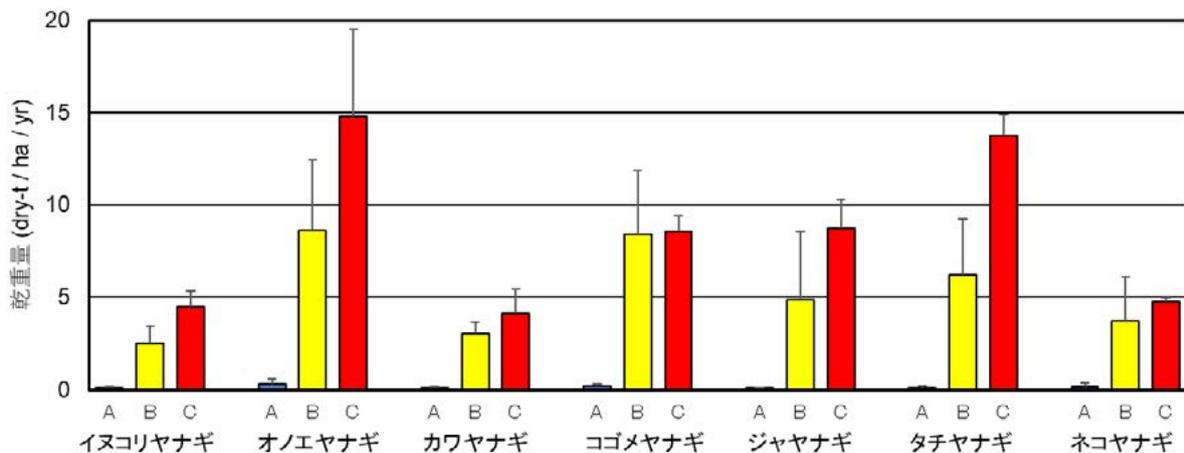


図1 ヤナギ7樹種の1 haあたりの地上部の年間乾重量。Aが対照区、Bが堆肥区、Cが2倍堆肥区。森林総合研究所苗畑 (茨城県つくば市) で2019年~2020年に実施。イヌコリヤナギとタチヤナギは2020年~2021年に実施 (Kayama et al. 2023を改変)。



画像認識でクロマツ雌花の開花ステージを判定

林木育種センター東北育種場:宮本 尚子、井城 泰一

林木育種センター:武津 英太郎

林木育種センター九州育種場:岩泉 正和、松永 孝治

林木育種センター関西育種場:山野邊 太郎

雌 花の発達段階を示す開花ステージの判定は、人工交配の適期の見きわめや、開花フェノロジー*と環境条件との関係を調べる際に必要となります。一般的に、開花ステージは人の目視により判定しますが、その判定には習熟が必要であり、また、判定に個人差が生じるなどの課題があります。今回、人の目視によらない判定手法を構築するため、クロマツ雌花の開花ステージを対象に、AI(深層学習*)による画像認識を用いて判定する手法を検討しました。3,074枚に及ぶ様々な発達段階の雌花の画像を3つの開花ステージに分類し学習させたところ、正解率97%に達する精度の高いモデルが作成できました。

■ 簡易な開花ステージ判定法の開発の必要性

マツ材線虫病の被害対策として、マツノサイセンチュウ抵抗性品種を植栽した採種園から種子を生産して、抵抗性苗木を普及させることや、抵抗性品種同士を交配させて、より強い抵抗性品種を開発する取り組みを進めています。これらの取り組みでは、採種園を構成する抵抗性品種の開花時期を合わせるための開花フェノロジーの特性を調査することや、連続的に発達していく開花状況から人工交配の適期を見きわめる必要があります(図1)。そのためには、雌花の発達段階をいくつかの開花ステージに分けて判定しますが、その判定には雌花の形態に関する知見や経験、習熟が必要であり、また、判定に個人差が生じるなどの課題がありました。

■ 画像認識を利用した開花ステージ判定

そこで、クロマツ雌花の開花ステージの判定を、調査者の経験や習熟に頼らないで行うことを目的に、AI(深層学習)による画像認識を用いる方法を検討しました。深層学習の技術によって、入力した画像から有効な特徴量を自動的に抽出し、分類に利用することができます。AIによる画像認識については、これまでに、様々な物体が写った大量の画像とその物体のラベル(ここでは開花ステージ)が対になったデータセットを学習させることで高精度なモデルが提案されています。また、画像のデータセットを一から学習させる方法の他に、既存のモデルを活用し、モデルのパラメータのうち、入力に近い部分の値は既存のモデルの値を利用し、出力に近い部分のみを学習で求める方法があります。この方法は「転移学習」と呼ばれ、データ数が少ない場合にも精度の高いモデルが効率的に作成できる有効な手法です。

マツの研究に携わっている5名の調査者が、様々な発達段階の雌花の画像を対象に、それぞれが目視で3つの開花ステージに分類しました(図2)。5名の分類判定が全て一致した合計3,074枚の開花ステージの画像を使用し、学習済みのモデルを活用する転移学習(Sandler et al. 2018)を行って、開花ステージの予測モデルを作成しました。

■ 正解率97%のモデルが完成

AIに雌花の開花画像を学習させた結果、開花ステージの判

定の正解率が97%の非常に精度の高いモデルが作成できました。また、実際の野外作業で開花ステージを判定するためには、モバイル端末による判定作業が必須であると考え、判定ツールとなる予測モデルを組み込んだWebアプリケーションも開発しました(図3)。今回、精度の高いモデルが作成できたことで、今後、同じような画像を用いた形質評価にも応用できると考えています。

研究資金

・本研究の実施課題「育種関連情報管理システムの構築」「次世代育種集団の構築及びエリートツリーの開発」

参考文献・サイト

宮本尚子ら(2023) 畳み込みニューラルネットワーク MobileNetV2 を用いたクロマツ雌花開花ステージの判定ツールの開発. 日本森林学会誌, 105 (10): 316-322.

Sandler M, Howard A, Zhu M, Zhmoginov A, Chen LC (2018) MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) pp. 4510-4520.

専門用語

開花フェノロジー: フェノロジーは生物季節と訳され、開花フェノロジーは植物が季節や環境の変化に合わせて花を成長させることを指します。花の成長の変化と気温・日長などの環境要因との関連を研究することは植物の生態や気候変動を理解することにつながるため、農業や林業、生態学や環境科学に応用されています。

深層学習: 人間の神経細胞の仕組みを再現した多層からなるニューラルネットワークを用いた機械学習法の一つで、画像認識等に広く用いられます。



図1 連続的に発達していく雌花の開花の様子

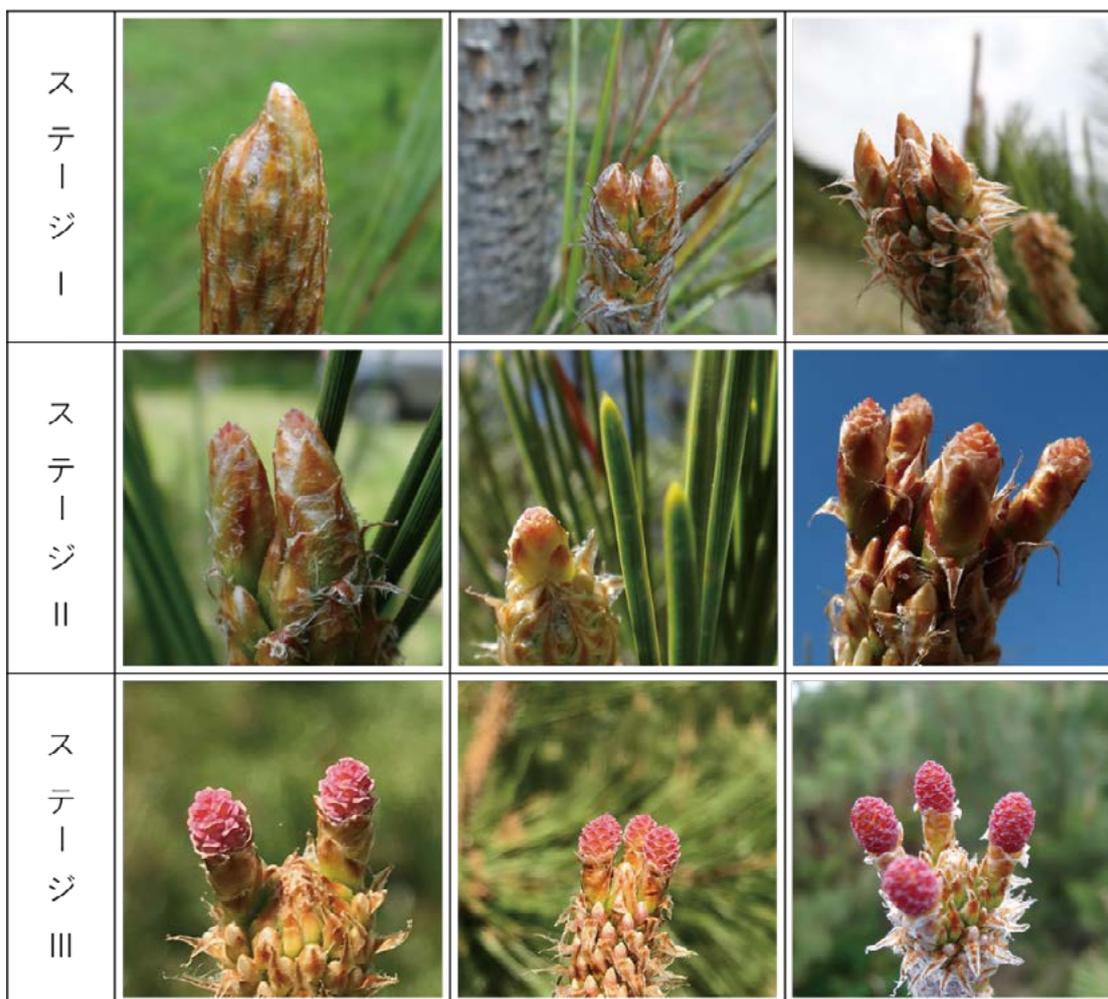


図2 典型的な開花ステージ I、II、および III の画像(宮本ら(2023)を改変)

クロマツ雌花ステージ判定

判定する写真をアップロードまたは撮影してください。



認識結果

stage_02

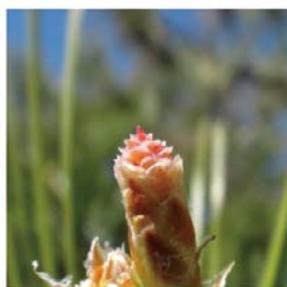


図3 Webアプリケーション(左)とその使用例(右)(宮本ら(2023)を改変)



下刈りコスト削減に資する初期成長に優れた第2世代品種の開発

林木育種センター: 田村 明、松下 通也

林木育種センター東北育種場: 井城 泰一、那須 仁弥

林業の採算性を向上し、再造林率を高めるためには、育林経費の中で大きなウエイトを占める下刈り経費を削減することが重要です。このため、これまで普及の主体であった第1世代精英樹よりも成長が優れている第2世代の精英樹の中から初期成長に優れた品種を開発することによって下刈り期間の更なる短縮が期待できます。今回、東北地域の主要な造林樹種であるカラマツについて、初めて初期成長に優れた第2世代品種を2品種開発しました。また、スギについても関東地域で初期成長に優れた第2世代スギ品種を新たに3品種開発しました(図1)。

■ 初期成長に優れた第2世代品種の必要性

我が国の森林・林業において、林業の採算性を向上し、再造林率を高めることが重要な課題となっています。特に下刈り等の造林初期のコスト削減が重要です。このため、下刈りコストの低減が期待できる、初期成長が従来よりも優れた第2世代品種を早急に開発することが必要です。

■ 前方選抜による初期成長に優れたカラマツ第2世代品種の開発

東北育種基本区において、主要な造林樹種であるカラマツの中から、前方選抜を用いて、初期成長に優れた2品種を開発しました。前方選抜は、選抜の候補となっている個体やその親、兄弟等の血縁関係のある個体の調査結果(検定データ)から、遺伝的能力を表す指標である育種価*を推定して優良な個体を選抜する方法です。個体から後代の苗木を作出・評価するプロセスを伴わないため、早期に品種開発することが可能となります(図2)。

品種開発にあたっては、第2世代精英樹やその候補木の苗木などが植栽されている4箇所の試験林の17,607個体を調査して得られた樹高や胸高直径、幹曲がり、材の剛性に関するデータを解析し、5年次の樹高(初期成長)の育種価から算出した偏差値が優れた2個体(表1)を品種として開発しました。これらの開発品種から生産される後代の苗木は、第2世代精英樹の中でも優れた初期成長を示すことが期待できます。また10年次の材積も優れ、曲がりも少なく、材の剛性も欠点がなかったことから、林業の採算性向上に貢献する品種として期待できます。更に開発した2品種は、特定母樹としても指定されており、特定母樹で構成される採種園に積極的に導入することによって、下刈りコスト削減に資する苗木の割合を増やすことが期待できます。

■ 後方選抜による初期成長に優れたスギ第2世代品種の開発

関東育種基本区において、主要な造林樹種であるスギの中から、後方選抜を用いて、初期成長に優れた3品種を開発しました。後方選抜は、選抜の候補となっている個体の後代の調査結果(検定データ)から、当該個体の遺伝的能力を表す指標である育種価を推定して優良な個体を選抜する方法です。後代の苗木の成長を調べる必要があるため、品種開発までに

期間を要しますが、確実性が高い選抜方法です(図2)。

品種開発にあたっては、第2世代精英樹等から育成された実生苗が植栽された72箇所の試験林の92,511個体を調査して得られた樹高や胸高直径、幹曲がり、材の剛性に関するデータを解析し、5年次の樹高(初期成長)の育種価から算出した偏差値が優れた3個体(表1)を品種として開発しました。これらの開発品種から生産される後代の苗木は、第2世代精英樹の中でも優れた初期成長を示すことが期待できます。また10年次の材積も優れ、曲がりも少なく、材の剛性も欠点がなかったことから、林業の採算性向上に貢献する品種として期待できます。

研究資金

・本研究の実施課題「優良品種の開発」

専門用語

育種価: その個体が親として子に樹高や材質などの性能を伝えることができる能力(遺伝的能力)で、数値が大きいほど遺伝的な改良効果が大きくなります。



図1 開発された初期成長に優れた第2世代品種
 左から、カラマツ東育2-16号、カラマツ東育2-68号、
 スギ林育2-200号、スギ林育2-288号、スギ林育2-289号

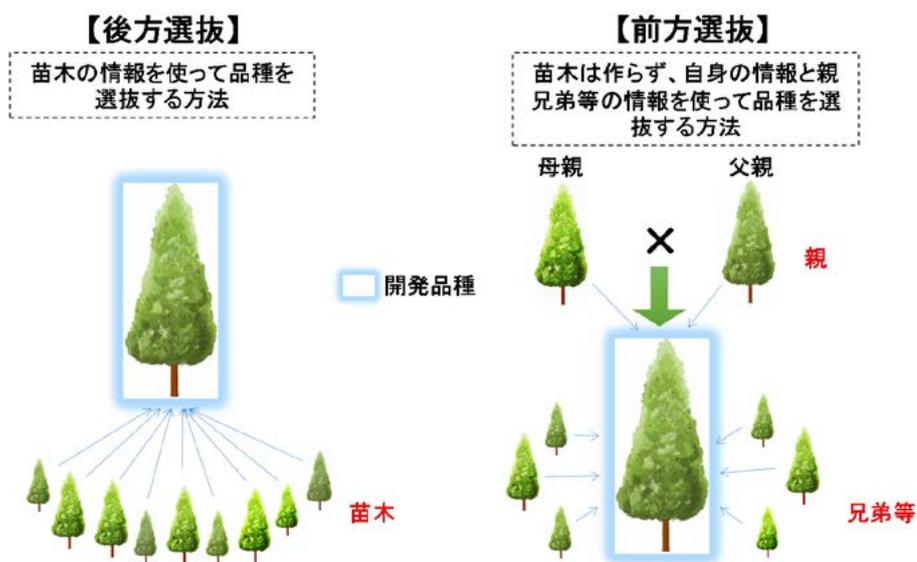


図2 後方選抜と前方選抜の概念図

表1 初期成長に優れた第2世代品種の初期成長および10年次以降の諸特性

開発品種名	選抜方法	5年次樹高 ¹⁾ (初期成長)偏差値	10年次材積 ²⁾ (5段階評価値)	幹曲がり ³⁾ (5段階評価値)	剛性 ⁴⁾ (5段階評価値)
カラマツ東育2-16	前方選抜	67	5	5	4
カラマツ東育2-68	前方選抜	68	5	5	3
スギ林育2-200	後方選抜	59	5	5	4
スギ林育2-288	後方選抜	79	5	5	5
スギ林育2-289	後方選抜	58	5	5	3

- 1) 第2世代精英樹および候補木の集団内において、5年次の樹高の育種価から算出した偏差値。
- 2) 10年次の幹材積の5段階評価値。5は調査した第2世代の集団内で偏差値65以上。
- 3) 10年次以降における幹曲がり。5は通直であることを示しています。
- 4) 選抜林分の第2世代精英樹候補木の集団内で偏差値から5段階評価。3は偏差値45以上55未満、4は偏差値55以上65未満、5は偏差値65以上を表しています。



絶滅危惧種オガサワラグワ培養苗の新しい馴化手法の開発

林木育種センター:遠藤 圭太、織部 雄一郎、松下 通也、長谷部 辰高、玉城 聡、倉本 哲嗣、山田 浩雄

東京都小笠原支庁小笠原亜熱帯農業センター:北山 朋裕、村田 崇真

NPO 法人小笠原野生生物研究会:吉井 嘉子、横谷 みどり 静岡大学:花岡 創

小 笠原諸島には、絶滅危惧種であるオガサワラグワという固有の樹木が生育しています。現存数が非常に少なく、外来種の侵入の影響もあって自然での個体数の回復はとても困難です。そのため、私たちは組織培養技術を利用してオガサワラグワの苗木を生産し、島内に植栽・育成する野生復帰試験に取り組んでいます。本研究では、培養苗を野外の環境へ順応させる(馴化)技術として「PB 馴化法」を開発し、馴化の過程で多くの苗木が枯死するという問題を解決しました。培養植物を扱うための設備等が充実していなかった島内の施設においても、入手の容易なペットボトルを利用して効率的にオガサワラグワの苗木を生産できるようになりました。

■ 絶滅危惧種オガサワラグワ

オガサワラグワ(図A)は、東京都小笠原村の父島、母島および弟島にのみ生育する小笠原諸島に固有の樹木です。かつては、島内の森林の主要樹木でしたが、明治期に木材利用のために大量伐採されて個体数が激減してしまいました。現在では天然のオガサワラグワは120本ほどしかなく、絶滅の危機に瀕しています。島内への外来種の侵入や種子生産不良なども影響し、現状ではオガサワラグワの個体数が自然に回復することは困難です。そのため、現存するオガサワラグワを生息域外において確実に増殖して保存し、将来の野生復帰に備えることが重要です。

■ 組織培養による生息域外保存

林木育種センターでは、組織培養を開発し(板鼻 2019)、オガサワラグワのクローン苗を生息域外保存しています(図B)。現存木のクローン苗の生産方法として、自生地のオガサワラグワから枝を採取し、植物ホルモンなどを添加した培地を用いることで、腋芽から個体を再生して苗木を生産しています(図C)。父島産27個体、母島産7個体および弟島産31個体のオガサワラグワのクローン苗をそれぞれ培養体として維持しており、それらの中には、原木が枯死してしまったため培養体としてのみ現存する個体もあります。

■ PB 馴化法の開発

そして、組織培養によって作製したクローン苗木を使って、オガサワラグワの野生復帰試験にも取り組んでいます。島内への外来生物の侵入の危険性に配慮し、島外からの土を持ち込まないように推奨されているため、現地へはガラス製サンプル瓶に入れたまま無菌状態で培養苗を輸送しています。培養植物は、高湿度下で環境ストレスの少ない条件下で生育していたため、サンプル瓶内から野外に直接出すと環境の変化に適応できず苗木が枯死してしまいます。このため、培養苗を野外の環境へ徐々に順応させる馴化処理を島内で行う必要があります。しかし、オガサワラグワの培養苗は、市販の育苗ケースを利用する通常の方法では、馴化処理の過程で多くの苗木が枯死してしまうという問題がありました。また、島

内の施設には培養植物を扱うための十分な設備がなく、簡便な馴化技術が必要でした。

私たちは、飲料用ペットボトルを利用したオガサワラグワの培養苗の馴化技術を開発しました(遠藤ら 2024)。島内でも入手の容易なペットボトルをハサミなどで二分するだけで馴化のための保湿用カバーとプラスチックポット用のソーサー(図D)を作ることができます。これらの自作した道具を用い、父島と母島で培養苗の馴化試験を実施した結果(図EとF)、67~100%の高い生存率で馴化に成功しました(図GとH)。また、この馴化技術は、特別な施設や道具が不要で、とても簡単に作業できることも分かりました。本法は「PB(PET bottle)馴化法」として、小笠原村で実施されている「村民参加の森づくりプロジェクト」等の森林の保全事業において、オガサワラグワの苗木生産に実際に利用されています。

研究資金

- ・環境省環境研究総合推進費(JPMEERF20184R01)「小笠原諸島の植生回復を目指した絶滅危惧種オガサワラグワの Ex situ 保存技術の開発」
- ・本研究の実施課題「林木遺伝資源の保存技術の高度化」

参照文献・サイト

- 板鼻直榮 (2019) オガサワラグワのクローン増殖と組織培養苗の植栽. 森林科学, 86, 23-26.
- 遠藤圭太ら (2024) 飲料用ペットボトルを再利用した絶滅危惧種オガサワラグワの培養苗の馴化. 日林誌, 106, 7-12.



図 PB馴化法を用いたオガサワラグワの苗木生産

(A) 小笠原村弟島のオガサワラグワ天然木。(B) 組織培養による生息域外保存。(C) 腋芽から作製した培養苗。(D) 馴化のために飲料用ペットボトルから自作した保湿カバー(左)とソーサー(右)。(EとF) PB馴化法を用いた培養苗の馴化。容器内には水滴が観察され、湿度が高く維持されています。(GとH) 父島(G)および母島(H)で馴化して得られたオガサワラグワのクローン苗木。



系統選択に役立つ

「エリートツリー特性表(九州育種基本区・スギ)」を公表

林木育種センター九州育種場:久保田 正裕、松永 孝治、倉原 雄二、岩泉 正和、福田 有樹
 林木育種センター:栗田 学、高橋 誠

林 木育種センター九州育種場では、これまでに200系統のスギエリートツリー*を開発し、そのうち18系統が特定母樹*に指定されています。これら特定母樹から生産される成長に優れた苗木(特定苗木)の活用は、初期育林コストの削減や森林のCO₂吸収能力の高度発揮に資すると期待されています。特定母樹に指定されているスギエリートツリーの普及を推進するため、これまでに得られたデータを解析して系統ごとの成長・材質・繁殖の特性を評価し、「エリートツリー特性表」として取りまとめ、公表しました。本特性表を活用することにより、各ユーザーに適した系統の選択が容易になると期待されます。

■ エリートツリーの開発と特性評価

2021年度に策定された「みどりの食料システム戦略」において、エリートツリー等の成長に優れた苗木の活用を2050年までに9割以上とすることが重要業績評価指標(KPI)として位置付けられました。林木育種センター九州育種場では、これまでに37箇所の植栽試験地に植栽された約63,000個体の中から200系統のスギエリートツリーを開発し、そのうち18系統が特定母樹に指定されています(2023年3月末現在)。これら特定母樹から生産される成長に優れた苗木(特定苗木)の活用は、初期育林コストの削減や森林のCO₂吸収能力の高度発揮に資すると期待されています。一方で、特定苗木を生産する苗木生産者や植栽する造林者からは、系統選択に役立つため、特定母樹に指定されたエリートツリーの系統ごとの特性情報が求められていました。そこで、林木育種センター九州育種場は、特定苗木等の実際の利用の効果を明らかにするための次代検定林*の成長量データや、材の剛性(ヤング率)等の材質特性、さし木発根率、雄花着花量等の繁殖特性に関するデータの蓄積を進めてきました。蓄積されてきたデータを解析し、特定母樹に指定されたスギエリートツリーについて、系統ごとの成長・材質・繁殖の特性を評価し、「エリートツリー特性表(九州育種基本区・スギ)」(図1)として取りまとめ、公表しました。

■ 「エリートツリー特性表」の作成

「エリートツリー特性表」を作成するに当たり、まず、エリートツリーの原木を選抜した次代検定林で得られたデータから、原木の成長と材質の特性を評価しました。次に、エリートツリーおよび候補木のさし木苗木を植栽した次代検定林で得られたデータから、さし木クローンの成長特性を評価しました。更に、林木育種センター九州育種場内に保存したエリートツリーのクローンを調査して得られたさし木発根や着花のデータから、繁殖特性を評価しました。特定母樹に指定された18系統について、以上の特性評価結果を「IVスギエリートツリー特性表」(表1)として取りまとめました。この表には、系統ごとに選抜地、成長特性として原木の樹高、胸高直径(5~20年次)、さし木クローンの樹高、胸高直径(5~15年次)、および

単木材積(15年次)の評価値を、材質特性として原木のヤング率の評価値を、繁殖特性として発根率、雄花着花量の評価値を掲載しました。特性の評価値は1から5の5段階評価で表し、5が相対的に優れており、1が劣っています(雄花着花量は5が相対的に多く、1が少ないとしています)。

また系統の特性が一目で分かるよう、図や写真とともに表示したページを設けました(図2)。「Vスギ特定母樹の特性に基づく類別化」では、初期成長(5年次)、材の剛性(ヤング率)、さし木発根率の3つについて、特性が優れる系統を楕円で囲みました。集合に含まれる系統はその特性が特に優れることを意味します。また、「III代表的なエリートツリーの特性」では、代表的な8系統について、1系統で1ページずつ、特性の評価値のほかに選抜地や検定地の位置図、初期成長のグラフ、採穂台木や幹の通直性の写真等を掲載し、特性を詳しく説明しました。

■ 「エリートツリー特性表」の活用と今後の展望

「エリートツリー特性表」はウェブサイト(<https://www.ffpri.affrc.go.jp/kyuiku/research/tokusei/index.html>)からダウンロードできます。各ユーザーは、本特性表を活用することによって、特定母樹に指定されたスギエリートツリーの系統選択が容易になり、特定苗木の普及が進むと期待されます。今後は、特性調査を更に進めて評価値の正確度を高め、本特性表を更新していく計画です。

研究資金

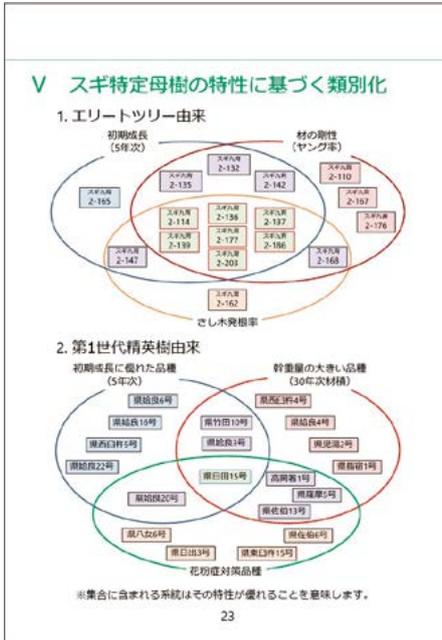
・本研究の実施課題「エリートツリー等の展示林整備及び特性情報の公表」

専門用語

エリートツリー:全国各地の国有林や民有林で選抜された第1世代精英樹同士を交配して作出した実生後代の中から成長、材質等の特性に基づいて選抜した第2世代以降の精英樹です。

特定母樹:「森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法」に基づき、森林のCO₂吸収能力を高めるため、成長に優れた林木を農林水産大臣が指定した系統です。

次代検定林:選抜個体の子供の成績から選抜個体の遺伝的能力を評価することを次代検定と呼び、そのために造成された試験林です。



III 代表的なエリートツリーの特性

2. スギ九州2-136 (特定25-46)

成長特性	選抜地	材質特性	繁殖特性	その他
初期成長 4	5	4	4	E90
41	4	1		

選抜育種区: 南九州
特定林所在地: 熊本県、西崎県、鹿児島
選抜地: 熊本県、西崎県、鹿児島
特定林所在地: 熊本県、西崎県、鹿児島

【特性】
材積成長（15年次）と材質が優れ、GA雄花着花量は少ない系統です。初期成長（5年次）と適度成長がやや優れ、発根率がやや高い系統です。初期成長に優れた第2世代品種としても評価されています。

【特定地域】
南九州育種区で選抜され、南九州育種区と南九州育種区の試験地で特定されています。

図 スギ九州2-136の初期成長
九州育種区内に試験地、エリートツリーは選抜された。

図 採種母木（九州育種基本区）
ポールは高さ2m

図 適度性（9年次）
ポールは高さ5m

図1 「エリートツリー特性表」(表紙)

図2 図や写真を用いた特性の紹介ページ(左: Vスギ特定母樹の特性に基づく類別化、右: III代表的なエリートツリーの特性(抜粋))

表1 「IVスギエリートツリー特性表 1. 選抜地・成長・材質・繁殖特性等に関する情報」より抜粋

系統名	特定母樹 指定番号	選抜 育種区	選抜県名	成長特性(原木)		成長特性・通直性(さし木)								材質特性(原木)			繁殖特性				
				5年次		15年次								剛性(ヤング率)			発根率		雄花着花量(GA)		
				樹高 (m)	5段階 評価	検定林 数 ^{※1}	樹高 (m)	5段階 評価	胸高 直径 (cm)	5段階 評価	材積 (m ³)	5段階 評価	幹 曲り	根元 曲り	測定 年次	5段階 評価	機械等級 区分	検定 数 ^{※2}	5段階 評価	検定数 ^{※2} (場所×年)	5段階 評価
スギ九州2-110	特定25-45	南九州	宮崎県	4.7	4	1	8.9	3	14.6	4	0.08	4	4	4	41	2	E70	11	4	2	3
スギ九州2-114	特定29-49	南九州	宮崎県	3.5	5	1	9.5	5	15.2	4	0.10	5	4	3	41	2	E70	5	4	2	2
スギ九州2-132	特定29-50	南九州	宮崎県	3.7	4	1	8.9	3	13.8	3	0.07	3	4	4	41	3	E70	3	4	2	4
スギ九州2-135	特定26-1	南九州	宮崎県	3.0	3	1	9.8	5	16.4	5	0.11	5	4	4	41	4	E90	6	3	2	1
スギ九州2-136	特定25-46	南九州	宮崎県	3.3	4	1	9.8	5	15.3	4	0.10	5	4	4	41	4	E90	15	4	2	1
スギ九州2-137	特定25-47	南九州	宮崎県	3.5	4	1	9.5	5	14.7	4	0.09	4	4	4	41	3	E70	10	4	2	3
スギ九州2-139	特定25-48	南九州	宮崎県	3.2	4	1	9.4	5	16.0	5	0.10	5	4	4	41	4	E90	11	4	2	3
スギ九州2-142	特定26-2	南九州	宮崎県	3.1	4	1	9.4	5	14.7	4	0.09	4	3	3	41	2	E70	6	4	2	2
スギ九州2-147	特定26-3	南九州	宮崎県	4.8	4	1	9.7	5	15.0	4	0.09	5	3	4	41	2	E50	8	4	2	3
スギ九州2-162	特定25-49	北九州	佐賀県	3.8	4	2	8.9	3	14.0	4	0.07	4	3	4	41	2	E50	4	4	2	5
スギ九州2-165	特定26-4	北九州	佐賀県	2.2	4	2	9.0	4	14.1	4	0.07	4	3	3	41	2	E50	3	2	2	3
スギ九州2-166	特定26-5	北九州	佐賀県	2.2	3	2	8.9	3	14.1	4	0.07	4	4	4	41	2	E50	3	3	2	1
スギ九州2-167	特定25-50	北九州	佐賀県	2.4	3	2	8.9	3	14.3	4	0.07	4	4	4	41	4	E70	5	3	2	2
スギ九州2-168	特定25-51	北九州	佐賀県	3.3	2	2	8.8	3	13.7	3	0.07	3	3	3	41	4	E70	4	4	1	2
スギ九州2-176	特定29-51	北九州	佐賀県	2.2	3	2	8.9	3	13.9	3	0.07	3	3	3	41	4	E70	4	4	2	3
スギ九州2-177	特定25-52	北九州	佐賀県	3.8	4	2	9.0	3	14.0	4	0.07	4	3	3	41	4	E70	7	5	2	2
スギ九州2-186	特定25-53	北九州	佐賀県	3.0	4	2	9.0	3	14.7	4	0.08	4	4	4	41	4	E70	4	5	2	1
スギ九州2-203	特定29-52	北九州	佐賀県	1.2	4	2	8.9	3	13.6	3	0.06	3	3	3	41	4	E70	20	5	2	5

森林総合研究所
令和6年版 研究成果選集 2024

発行日 2024(令和6)年6月12日
編集・発行 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/ffpri.html>
お問い合わせ 企画部広報普及科編集刊行係
電話 029 (829) 8373
電子メール kanko@ffpri.affrc.go.jp



印刷・製本 株式会社デジタル印刷
〒300-3262 茨城県つくば市蓮沼1322-1

本誌から転載・複製する場合は、森林総合研究所の許可を得てください。



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

