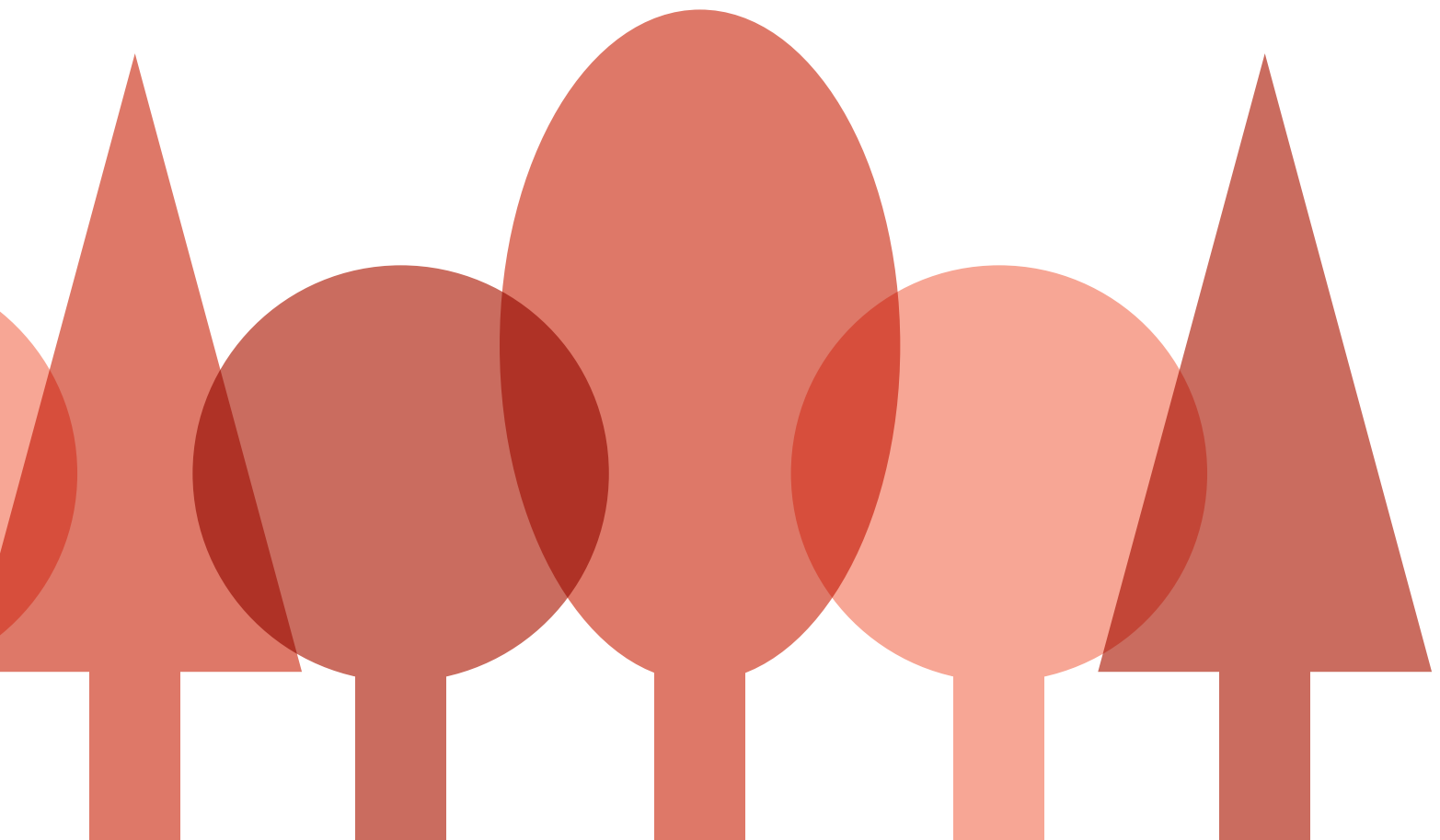


森林総合研究所

令和5年版

研究成果選集

2023



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5年版研究成果選集」では、これら重点課題を構成する以下の9つの戦略課題において令和4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。

2023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

- 土壌の有機物分解を評価する「ティーバッグ法」の修正法を提案 04
ティーバッグを使って有機物分解を評価する「ティーバッグ法」の問題点を明らかにし、より精度を高めた修正法を開発しました。この成果は、土壌有機物分解に対する気候変動影響を評価する際の精度向上に貢献します。
- 気候変動緩和のための土地利用変化が大きい地域ほど生物種が減る傾向 06
土地利用変化を伴う植林などの気候変動緩和策の実施は、地球規模では生物種の減少を抑えられますが、地域レベルでは変化面積の割合が大きくなるほど生物種の減少傾向が強まる恐れがあることが分かりました。

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

- 最終氷期を生き延びた奥尻島のブナ林 08
北海道奥尻島のブナ林について、DNA 変異を利用して集団形成の歴史を探りました。その結果、奥尻島ブナ林の起源は古く、北海道と東北地方のブナ林の混合によって最終氷期最盛期より前に形成されていたことが分かりました。
- 針葉樹では世界で最も完成度の高いスギ全染色体の塩基配列解読に成功 10
スギの全染色体を網羅する塩基配列を解読、約5万個の遺伝子とその位置を特定し、種を代表する標準配列「参照ゲノム配列」を構築しました。森林総合研究所のウェブサイト (ForestGEN) から閲覧や検索が可能です。
- マダニ媒介感染症対策における生態学的アプローチ 12
マダニ媒介感染症 SFTS が懸念される地域においてそのリスク抑制に有効な、生態系を基盤とする対策を提案しました。

ウ 森林保全と防災・減災に向けた研究開発

- 原発事故後10年間の森林土壌・木材中の放射性セシウムの動きを解明 14
福島第一原発事故後10年間の継続調査によって、土壌や木材への放射性セシウム (セシウム 137) の集積が多く、森林で鈍化し、横ばいとなったことを明らかにしました。
- 治山ダムによる流木捕捉量を予測する数値計算手法の開発 16
豪雨時に山地で発生する土石流に伴う流木被害を軽減するために、流下中の流木が土石流の先頭に集まる過程や流木が停止する条件を数式化し、治山ダムで捕捉できる流木の量を予測する数値計算手法を開発しました。

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

- スギ等の成長に優れた苗木による施業モデルの開発、造林コスト30%削減 …………… 18
成長に優れた苗木による低コストな造林の実現のために、育苗管理技術を高度化し、その成長特性を活かした下刈り回数削減等により、再造林初期費用がこれまでより30%以上削減可能となる施業モデルを提案しました。
- 降雨規模に応じて林道災害発生頻度を予測するモデルを構築 …………… 20
降雨規模に応じて林道災害発生頻度(単位林道長さあたりの平均災害発生箇所数)を予測するモデルを構築し、将来の豪雨の増加に伴い林道災害発生箇所数が大幅に増加する可能性があることを明らかにしました。
- 「持続可能な森林経営」を主眼に高校教科書再構成 …………… 22
高校の専門教育で実施率の低い科目「森林経営」について、専門性を身につけた人材育成を求める社会のニーズを反映させて、「持続可能な森林経営」を主眼に教科書の内容を再構成して提案しました。
- 業務増大する市町村の森林行政、体制整備の方策提案 …………… 24
市町村の森林行政業務は、近年の新制度導入によって人員増を上回る規模で増加し、能力不足を感じている市町村も多いことが全国アンケート調査で分かり、市町村の現状を踏まえた4つの体制整備方策を提案しました。

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

- きのに振動を与えて害虫の発生を抑制する …………… 26
振動を与えることにより、きのこ害虫であるキノコバエ類の行動や成長を制御することができ、このことを用いて、シイタケ栽培の菌床に振動を与えて害虫の発生を抑制する防除技術を開発しました。
- 国産トリュフ3種は地域ごとに遺伝的固有性をもつ …………… 28
国産トリュフ3種(ホンセイヨウショウロ、イボセイヨウショウロ、アジアクロセイヨウショウロ)の野生集団は、発生する地域によって遺伝的固有性があることを明らかにしました。

ウ 木材利用技術の高度化と需要拡大に向けた研究開発

- 樹種で異なる針葉樹材の近赤外線透過率、非破壊識別への応用期待 …………… 30
針葉樹21種で木材中の近赤外線透過率は樹種間で最大10倍の違いがあることが分かりました。木材の構造、心材成分、密度などが影響していると考えられ、樹種の非破壊識別への応用が期待できます。
- 過酷な海中環境でも使えます
—木材・プラスチック複合材(WPC)とアセチル化木材— …………… 32
海虫類の食害など木材にとって過酷な海中環境において、プラスチックとの複合化やアセチル化処理をすれば使えることを実験で明らかにしました。

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

- 「木の酒」の安全性試験で問題なし、実生産規模の製造プロセスも確立 …………… 34
「木の酒」の社会実装を促進するために、試験製造した「木の酒」の基本的な安全性試験を行い、問題となるデータがなかったことを確認しました。また実生産規模に適用可能な製造プロセスを確立しました。
- 燃料用木質バイオマスの効率的な生産に向けた林地残材の最適な破碎条件…………… 36
端材や枝条などの林地残材を効率的に破碎する条件を明らかにしました。破碎エネルギーや破碎生産性の測定から、枝条よりも端材で、現地移動型よりも工場定置型で効率的に破碎できることが分かりました。コストは破碎生産性が高い条件で低くなる傾向がありました。

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

- トドマツの優良個体選抜は植栽後15年程度からが最適…………… 38
林木の品種開発のためには長期間の評価を要することが課題です。そこで、2つの試験地でトドマツ家系の成長を40年間調査した結果から、成長に優れた個体を植栽から15年程度の評価により早期選抜する戦略を提案しました。
- マツ材線虫病に対する抵抗性の遺伝領域解明…………… 40
マツ材線虫病に対するより強い抵抗性品種の開発を目指して、クロマツの抵抗性品種の中でも抵抗性が特に強い品種「波方ク-73号」において、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。

イ 林木育種技術の高度化・拡張と特定母樹等の普及強化

- スギにおける高容積密度系統の早期選抜に向けた試み …………… 42
スギの年輪構造で容積密度に寄与している形質は早材密度と晩材率であることが分かりました。これらに着目すれば10年生程度の個体から高容積密度系統を早期選抜できることを明らかにしました。
- 海外育種技術協力に向けた取組
—モンゴルから院生ら招へい研修、ケニア・ベトナムに職員派遣し支援— …………… 44
気候変動対策等に役立つ林木育種技術の開発に取り組む国々を対象とした人材の能力強化を目的として、林木育種に関する研修のためモンゴルから大学院生らを招へいするとともに、ケニアとベトナムに職員を派遣しました。

土壌の有機物分解を評価する「ティーバッグ法」の修正法を提案

九州支所：森 大喜

森 木 林土壌の有機物分解を評価するため、市販のティーバッグを標準物質として使用し、土壌に埋設したティーバッグを90日後に掘り出して重さを測定する方法が広く採用されてきました。しかし、室内実験によって得られたティーバッグ重量を時系列で測定した結果と比較したところ、従来の方法では有機物分解過程を適切に再現できないことが分かりました。そこで、より精度の高い修正法として、時系列データ5点を取得して漸近線モデルを適用する手法を新たに提案しました。これにより、土壌有機物分解に対する気候変動影響評価の精度向上が期待されます。

■ 従来法では正しく評価できない

森林土壌の有機物は陸上で最も貯留量が多い炭素プールであり、その分解速度は大気中の二酸化炭素濃度に大きな影響を与えます。森林土壌の有機物分解に対する温暖化影響を広域で評価するためには、世界共通の均質な有機物で評価する必要があります。世界中どこでも入手可能な素材として、ルイボス茶と緑茶のティーバッグが標準有機物として選定されました。この評価方法は、ティーバッグを土壌に埋設し、90日後の重量残存率から有機物分解速度を評価できるように設計された比較的新しい手法です。土壌中の有機物は時間の経過とともに重量が減少し、重量がほぼ変化しない値に収束していく曲線（分解曲線）を描きます。ティーバッグ法はこの分解曲線をたった1時点のデータから推定できる画期的な方法として開発されました（図1）。現在世界各地で採用され、標準法としての地位を確立しつつあります。

しかし、本手法から求めた分解曲線が実際の分解過程を適切に表現しているのかを検証した研究はこれまでありませんでした。そこで、温度を制御した実験室内において、プラスチック容器に入れた土壌の中でティーバッグを分解させ時系列で重量減少データを取得した結果を、従来法であるティーバッグ法によって求めた分解曲線と比較してみました。その結果、ティーバッグ法は分解過程を適切に再現できないことが明らかになり（図2）、その傾向は特に低温環境の場所（図2の灰色部分）で顕著でした。

■ より高精度に分解を再現できる修正法を提案

室内実験から得られた時系列重量減少データに指数モデルおよび漸近線モデルを適用したところ、漸近線モデルによる分解曲線の再現精度は非常に高いことが分かりました（図2）。一方指数モデルはティーバッグ法よりもさらに再現精度が低くなりました。そこで、ティーバッグを10～20日間隔で5回掘り起こして重量減少データを取得し漸近線モデルを適用する手法を「ティーバッグ法の修正法」として新たに提案しました。今後はティーバッグ分解の時系列データを取得して正確な分解曲線を取得することが推奨されます。これにより、土壌有機物分解に対する気候変動影響評価の精度向上が期待されます。

■ 従来法は相対的な指標としても適当ではない

従来のティーバッグ法は分解曲線を適切に再現できない

ことが明らかになりましたが、従来法は有機物分解速度の相対的な大きさを比較するための「相対指標」としては有用かもしれません。そこで、分解曲線の形を決定する分解速度定数を従来法と修正法を用いて比較しました。この二つに正の相関があれば、従来のティーバッグ法によって分解速度の相対的な比較が可能ということになりますが、正の相関は確認されず、従来の方法は相対的な指標としても適切ではないと考えられました。

研究資金

・科研費（JP19K15879）「割り箸・ティーバッグ大規模分解実験と機械学習の併用による有機物分解速度の広域推定」

参考文献・サイト

Keuskamp et al. (2013) Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution* 4: 1070–1075

Mori et al. (2022a) Risk of misinterpreting the Tea Bag Index: Field observations and a random simulation. *Ecological Research* 37: 381–389

Mori et al. (2022b) Validation of the Tea Bag Index as a standard approach for assessing organic matter decomposition: a laboratory incubation experiment. *Ecological Indicators* 141:109077

Mori et al. (2022c) Is the Tea Bag Index (TBI) useful for comparing decomposition rates among soils? *Ecologies* 3: 521–529

専門用語

指数モデル：有機物の残存量が指数関数に従って減少していくと解釈する数理モデルです。

漸近線モデル：有機物の分解しやすい成分は指数関数に従って残存量が減少するが、分解しにくい成分は分解速度が非常に遅いためほとんど分解しないと解釈する数理モデル。有機物の残存量は、最終的に分解しにくい成分の値（漸近線）に近づきます。

ティーバッグ法 (Keuskamp et al. 2013)

緑茶とルイボス茶の90日目の重量減少率データ1点のみから有機物分解速度の指標 k を計算

ルイボス茶の残存率

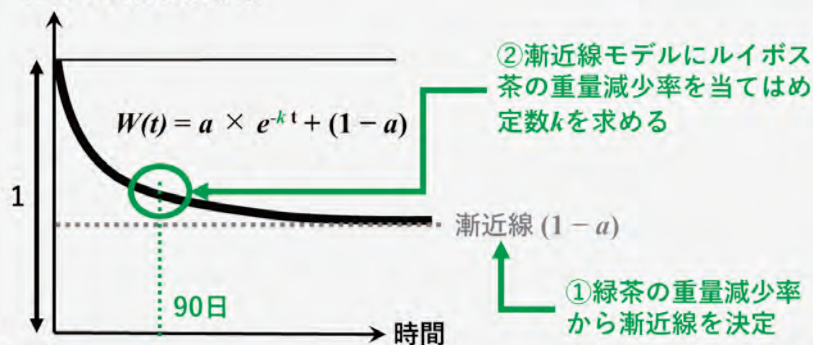


図1 ティーバッグ法の概要

緑茶重量減少率からルイボス茶の分解曲線の漸近線を計算し、ルイボス茶の重量減少率と合わせて分解速度定数 k (分解曲線の形を決定する値) を求め、これを指標とします。(Keuskamp et al. 2013)

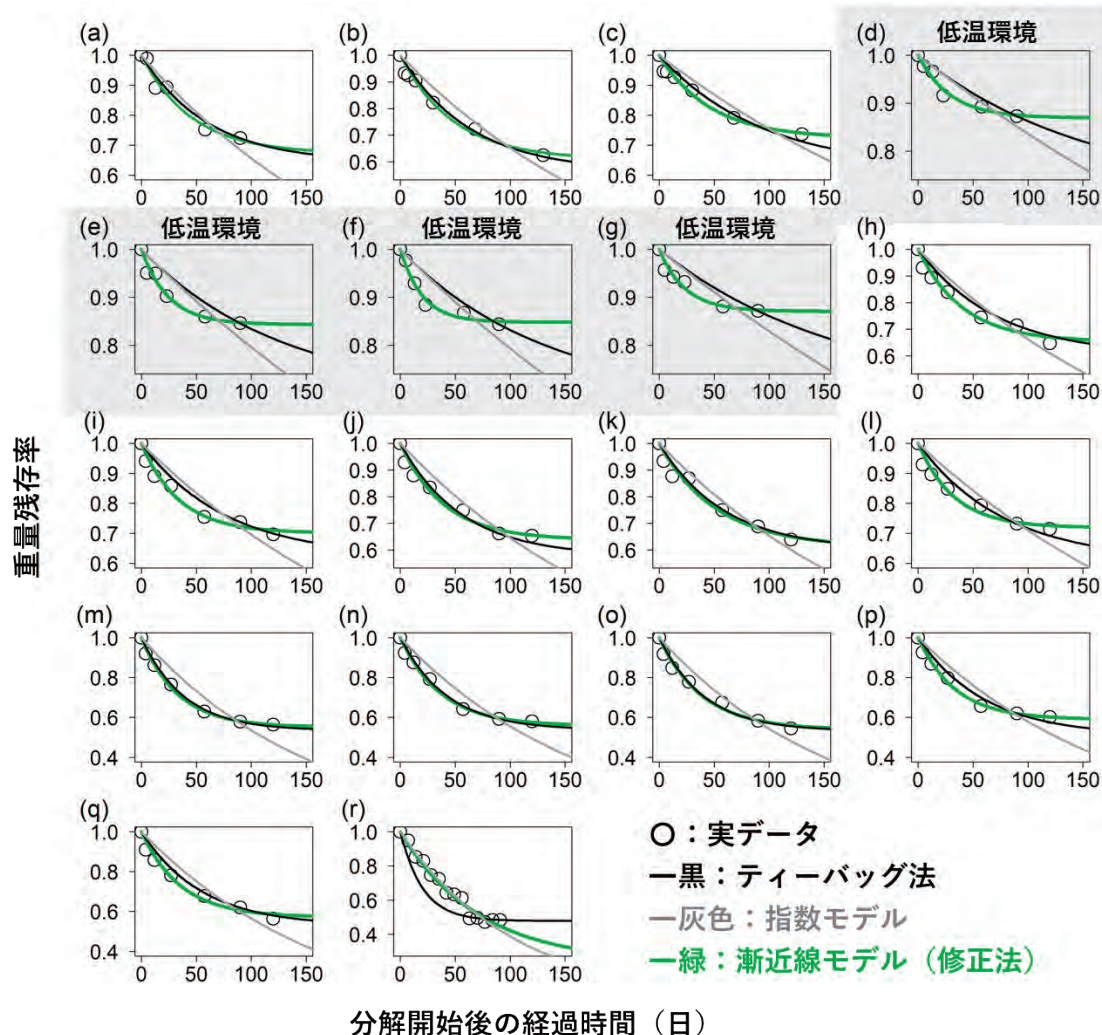


図2 18の異なる土壌環境におけるルイボス茶分解データとティーバッグ法、指数モデル、および漸近線モデル(修正法)で再現した分解曲線の比較

それぞれの図(a-r)は、異なる土壌環境(実験に用いた土壌の採取場所、用いた土壌の水分条件、室内実験を行う際の気温が異なる)での実験結果を表しています。漸近線モデル(修正法)がティーバッグ法よりも実データに近いこと、ティーバッグ法による再現精度は低温環境(d-g)で特に低いことが分かります。(Mori et al. 2022c)

気候変動緩和のための土地利用変化が大きい地域ほど 生物種が減る傾向

生物多様性・気候変動研究拠点：平田 晶子、松井 哲哉
立命館大学：長谷川 知子 京都大学：藤森 真一郎
国立環境研究所：高橋 潔、土屋 一彬

野生動物研究領域：大橋 春香

気 候変動による気温上昇を産業革命前の1.5度もしくは2度以内に抑えるため、植林や二酸化炭素回収・貯留付きバイオエネルギー（BECCS）などの気候変動緩和策が注目されています。しかし、これらの緩和策は大規模な土地利用変化を伴うため、生物多様性に深刻な影響を与える可能性があります。そこで、緩和策として植林やBECCSを導入した場合に生物多様性が受ける影響を、3つのモデルを使って地球規模で評価しました。その結果、土地利用変化の影響を考慮しても、気候変動の緩和は生物種の減少を抑える可能性があることが分かりました。ただし、地域レベルでは変化が大きいほど生物種の減少傾向が強まるため、これらの地域に緩和策の負荷が偏る恐れがあります。

■ 気候変動緩和策としての土地利用変化

気候変動による世界の平均気温の上昇を産業革命前の1.5度もしくは2度以内に抑えるためには、今世紀後半には温室効果ガスの排出量を正味ゼロにする必要があります。しかし、その目標の達成には、人為起源の排出量の削減に加えて、何らかの方策により大気中の温室効果ガスを除去する必要がありますと指摘されています。そこで注目されているのが、森林の炭素固定能力や、二酸化炭素の回収・貯留とバイオマスエネルギーを組み合わせた技術（BECCS）を利用した緩和策です。しかし、これらの緩和策を実施するためには、植林地やバイオ燃料作物栽培地を大規模に拡大するなど、土地利用を改変する必要があります。そのため、生物の生息環境が変化し、生物多様性に大きな影響を与えることが危惧されています。そこで、植林やBECCSなどの土地利用の改変を伴う緩和策が生物多様性に与える影響を地球規模で評価しました。

■ 緩和策が生物多様性に与える影響

植林やBECCSの導入強度を変えた3種類の将来シナリオを設定し（表1）、①世界規模の生産活動や経済活動などを17の地域別に予測する経済モデル（AIM/Hubモデル、Fujimori et al. 2017）、② AIM/Hubモデルによって計算される地域別の土地利用面積を世界の陸域を格子状に分割した土地利用分布図に分配する土地利用モデル（AIM/PLUMモデル、Hasegawa et al. 2017）、③気候変化や土地利用変化による陸域生物の潜在的な分布域の変化を予測する生物多様性モデル（AIM/Biodiversityモデル、Ohashi et al. 2019）の3つを用いて緩和策の影響を評価しました。なお、ここでは全球の陸域を0.5度（赤道付近で約55km四方）の格子状に分割し、各シナリオで想定される土地利用と気候条件下での生物種の潜在的な分布域の推定を行い、気候変動緩和策が生物多様性に与える影響を予測しました。

結果は、対策なしシナリオに比べて、BECCSや植林を導入する緩和シナリオの方が、地球の陸域全体の生物種の減少を抑えられる傾向にありました（図1）。緩和策ではBECCSの方が植林シナリオよりも生物種の減少が抑えられる傾向があ

りましたが、その差は大きくありませんでした（図1）。また、いずれのシナリオでも、土地利用改変面積の割合が大きい地域ほど、生物の種多様性がより低下することが分かりました（図2）。

■ 緩和策の影響の地域間差を減らす対策

地球規模でみると、土地利用改変の影響を考慮しても、気候変動の緩和は生物多様性の低下を抑える効果があることが分かりましたが、緩和策による土地利用改変の規模は地域によって差があるため、一部地域の生物多様性に負荷が偏る恐れがあります。気候変動緩和策が生物多様性に与える影響の地域間差を減らすためには、排出削減を着実に実施し、少しでも土地利用改変を伴う緩和策に頼らずにすむようにすること、既存の森林の適切な利用や管理、地域の生態系の特性に合った自然再生などを通じた炭素固定の増強などを考える必要があります。

研究資金

・環境省環境研究総合推進費（2-2002）「世界を対象としたネットゼロ排出達成のための気候緩和策及び持続可能な開発」

参考文献・サイト

Fujimori et al. (2017) SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. Global Environmental Change 42. 268-283.

Hasegawa et al. (2017) Global land-use allocation model linked to an integrated assessment model. Science of The Total Environment 580. 787-796.

Ohashi et al. (2019) Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land-based mitigation. Nature Communications 10. 5240.

専門用語

BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)：化石燃料代替としてバイオマスエネルギー（BE）を利用することでカーボンニュートラルを実現するとともに、バイオマスからエネルギーを生産する際に発生した二酸化炭素を回収・貯留する技術（CCS）を組み合わせることで二酸化炭素除去を行う方法です。

表1 モデル評価に使用した3種類の気候変動緩和策シナリオの概要

緩和策シナリオ	シナリオの概要
対策なしシナリオ	- 特段の緩和策を実施しない - 土地利用改変は将来の社会経済の変化に伴い生じる
BECCSシナリオ	21世紀末までの気温上昇を2度程度に抑える - BECCSの導入を中心に二酸化炭素除去を実施する - 森林面積は対策なしシナリオよりも小さくならない
植林シナリオ	21世紀末までの気温上昇を2度程度に抑える - 植林の導入を中心に二酸化炭素除去を実施する

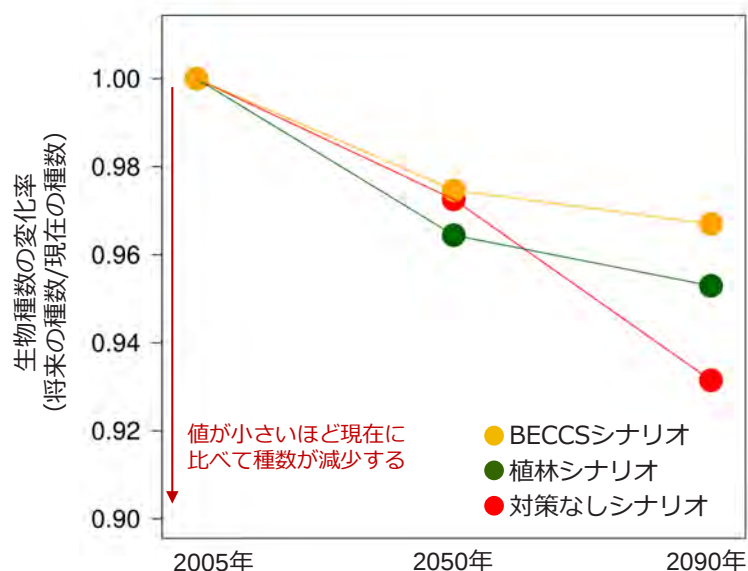


図1 各シナリオにおける生物種数の変化率(将来の種数/現在の種数)

2005年を現在として、21世紀半ばの2050年と、21世紀末の2090年の生物種数の変化率を見ると、2090年には対策なしシナリオでは約7%減少しますが、気候変動緩和策を導入したシナリオでは4%前後の減少に抑えられます。生物種数の変化率は、生物多様性モデルによって予測された0.5度の各格子における現在に対する将来(2050年と2090年)の種数の比の中央値です。

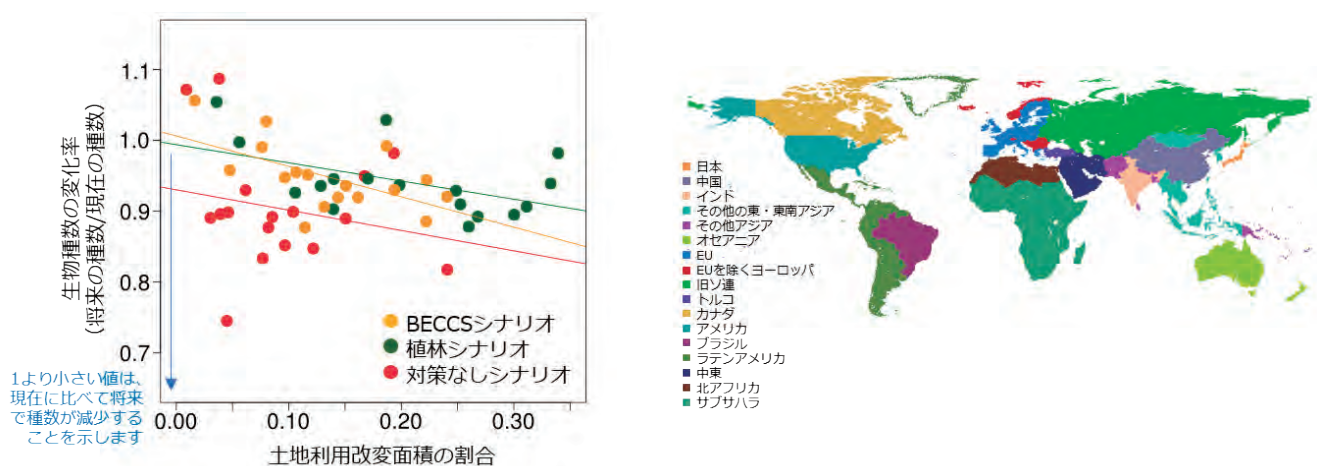


図2 土地利用改変面積の割合と生物種数の変化率との関係(2090年)

世界17地域(右)別の土地利用改変面積の割合と生物種数の変化率(将来の種数/現在の種数)の関係を調べました(左)。図中の点は、各地域における生物種数の変化率の中央値で、直線はシナリオごとの回帰直線を示します。いずれのシナリオでも、土地利用改変面積の割合が大きい地域ほど生物種数の変化率が小さくなる(種数が減少する)傾向がありました。



最終氷期を生き延びた奥尻島のブナ林

北海道支所:北村 系子 生物多様性・気候変動研究拠点:松井 哲哉

北海道教育大学:並川 寛司

筑波大学:津田 吉晃

十日町市立里山科学館:小林 誠

ブナの北限に近い日本海に浮かぶ孤島、奥尻島には豊かなブナ林が広がっています。北海道渡島半島のブナは北限に近づくほど遺伝的多様性が低下することが分かっていました。一方、奥尻島のブナ林は渡島半島や東北地方北部のブナ林と同等の遺伝的多様性を持っています。そこでDNA分析によって奥尻島ブナ林形成の歴史を調べたところ、このブナ林は最終氷期最盛期より前に東北地方と北海道のブナの混合によって形成され、両者と遺伝的交流を経ながら存続してきたことが分かりました。最終氷期後のブナの分布拡大は、従来の説の北進だけではなく、こういった逃避地(レフュージア)に残っていたブナ林からの広がりも貢献した可能性を示しています。

日本列島温帯林の分布の後退と拡大の新説

北半球における温帯林は約2万年前の最終氷期最盛期に南方に分布域を後退させていたものが、その後の気温上昇に伴って北に分布を拡大してきたと考えられてきました。とくに、ヨーロッパや北米大陸では最終氷期最盛期は大陸氷河に覆われており、氷河の後退に伴って温帯林が北方に拡大したとされています。

しかし、最近のDNA解析技術とコンピューター解析手法の発展によって、温帯林の植物がこれまで考えられてきたよりも北方で最終氷期に生き延びていたことが明らかになりつつあります。このように、氷期の厳しい環境下で生物が逃げ込んで生存していた場所を逃避地(レフュージア)と呼びます。

一方、日本列島では北海道と日本アルプスの一部を除いて、氷河に覆われていませんでした。そのため、各地にレフュージアがあった可能性が高いと考えられます。

ブナの北方への分布拡大

ブナは今から約1万年前に、新潟県付近まで後退していたものが北方へ分布拡大したとされています。北海道では約6000年前に、函館付近に分布していたブナが渡島半島を北に向かって分布を拡大し始め、約1000年前に現在の北限である黒松内低地帯付近に到達し、現在も北進を続けています。ブナの分布域では南から北へと遺伝的多様性が低下する地理的パターンが存在します。同様に、渡島半島の北進最前線でもブナ林の遺伝的多様性が低下しています。

奥尻島ブナ林の起源

一方、奥尻島は北海道本島から約16km離れた日本海にあり、ブナが分布する最北の島です。中期更新世(約100万年前)に北海道本島から離れ、その後最終氷期最盛期を含めて一度も本島と陸続きになっていません。

離島は海峡によって隔離されているために、生物の移動や分布拡大は、地理的に連続している大陸や本島とは異なります。本島からの移動や分散によって離島の集団が形成されると、遺伝的多様性が低下すると考えられます。

ところが、奥尻島の遺伝的多様性は北海道本島や東北地方北部のブナ林と同等であることが本研究で明らかになりました。さらに、3つの遺伝的クラスターに分けた場合、複数

クラスターの混合構造が認められました(図1)。

そこで、奥尻島のブナ林の成り立ちを探るために、集団動態の歴史を推定したところ、奥尻島のブナ集団は約7.74万年前、北海道と東北集団の混合により形成されたこと、その後もおそらく鳥や海流による種子の移入と風による花粉の運搬などにより複数回の遺伝的交流があったことが分かりました(図2)。とくに興味深いことに、奥尻島の初期のブナ集団は最終氷期最盛期より前に形成されたことが示されました。これは、古生態学、植物社会学の先行研究を支持し、奥尻島にブナ林のレフュージアが存在していたことを示しています。

このように、奥尻島ブナの遺伝的多様性を調べた結果から、最終氷期後の気温上昇に対するブナの分布拡大は、従来考えられていたような北進だけではなく、各地のレフュージアに残っていたブナも貢献した可能性のあることが分かりました。

研究資金

- ・科研費(JP17K07852)「北限のブナはどこから来たのか?—新発見の最前線創始者集団の由来探索と遺伝子流動—」、同(20K06152)「最終氷期におけるブナの潜在逃避地は北日本に存在したか?」
- ・JSPS 研究拠点形成事業B. アジア・アフリカ学術基盤形成型(JPJSCCB2022000)
- ・公益財団法人自然保護助成基金プロ・ナトゥーラ・ファンド助成(第27期)

参考文献・サイト

Kitamura K, Namikawa K, Tsuda Y, Kobayashi M, Matsui T (2022) Possible northern persistence of Siebold's beech, *Fagus crenata*, at its northernmost distribution limit on an island in Japan Sea: Okushiri Island, Hokkaido. *Frontiers in Plant Science*, doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.990927>

専門用語

最終氷期最盛期: 今から3万1000年前から1万6000年前の期間で現在よりも気温が約6°C低い状態が続きました。

遺伝的クラスター: 同じルーツを持つと推定される個体の集合です。

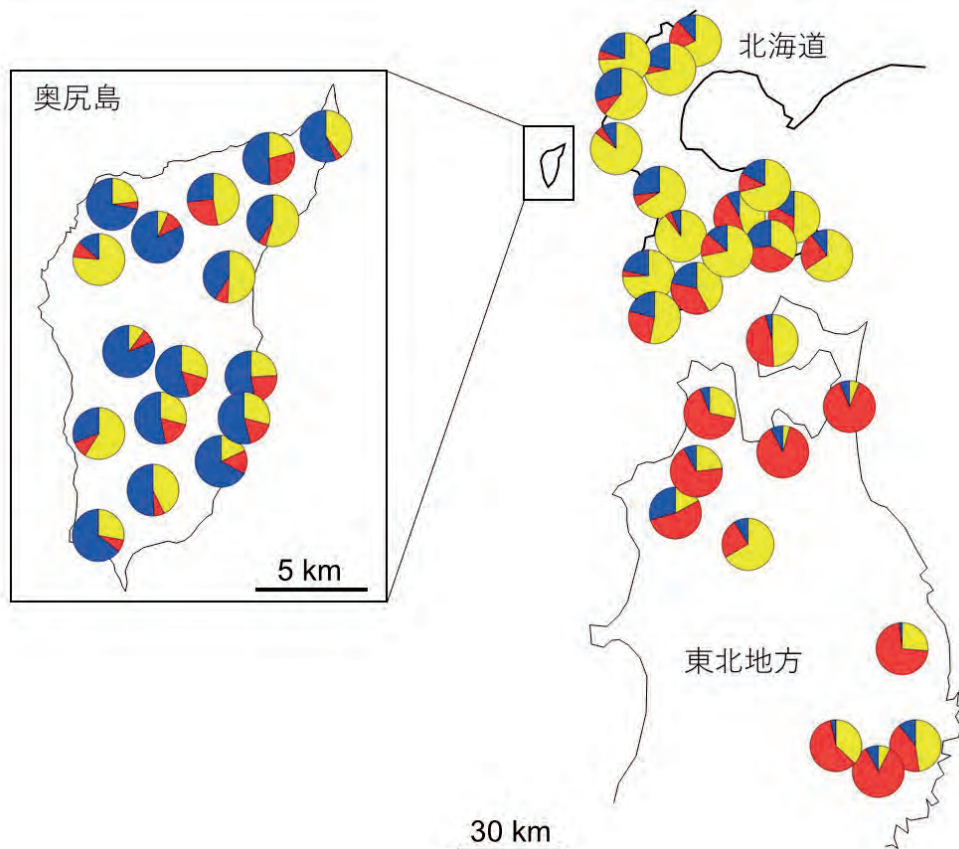


図1 奥尻島、北海道、東北北部のブナ林における3つの遺伝的クラスターの分布

赤、黄、青はそれぞれ東北、北海道、奥尻島に対応します。(Kitamura et al. 2022を改変)。奥尻島には、北海道と東北地方の集団が混合して形成された独自の集団(図2 参照)が主体となっているブナ林が多く分布しています。

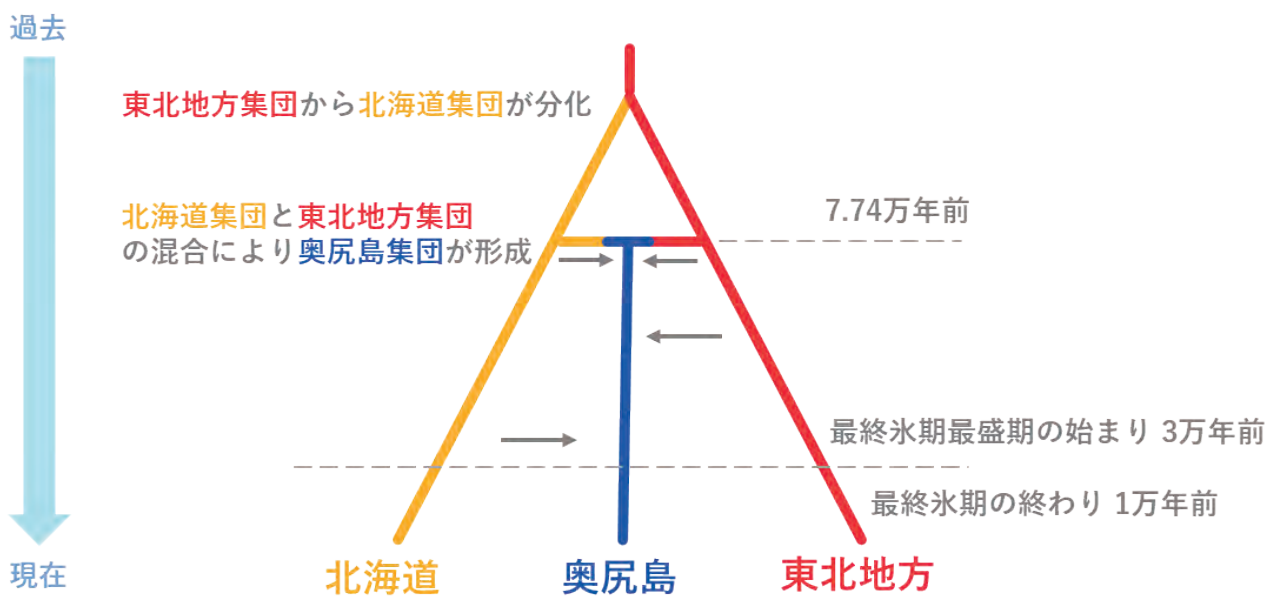


図2 集団動態の歴史の推定モデル

世代時間を20年と仮定した場合、推定された世代数から奥尻島集団は約7.74万年前に北海道と東北集団の混合により形成されたと考えられます。図中の矢印は遺伝的交流の方向を示しています。(Kitamura et al. 2022を改変)

針葉樹では世界で最も完成度の高い スギ全染色体の塩基配列解読に成功

樹木分子遺伝研究領域:上野 真義、伊原 徳子、内山 憲太郎、伊津野 彩子 企画部:松本 麻子
東京大学:藤野 健、横山 稔之、濱中 俊哉、原 蘭 陸正、鎌田 寛彬、小林 航、笠原 雅弘
基礎生物学研究所:山口 勝司、重信 秀治 国立遺伝学研究所:豊田 敦
筑波大学:津村 義彦 新潟大学:森口 喜成

ゲノムはあらゆる生物の設計図です。スギが属する針葉樹はゲノムが大きく(ポプラやユーカリの15~50倍)構造が複雑なため解読が困難でしたが、最新の技術でスギの全染色体(11本)を網羅する塩基配列の解読に成功しました。新型の塩基配列解読装置(シーケンサー)で配列データを収集して染色体ごとにつながった約91億塩基対を解読し、55,246個の遺伝子を同定しました。これは針葉樹では世界で最も完成度の高いゲノム解読です。また、ゲノム全体の83.6%を「繰り返し配列」として特定しました。解読した配列を標準配列「参照ゲノム配列」として公開したことで、スギの進化の歴史の推定や有用な遺伝子の同定が加速します。

■ ゲノム解読には自家受精した個体が使われた

スギは種子親(母親)と花粉親(父親)から受け取った2セットのゲノムを持っています。自家受精を繰り返すことによって両セットのゲノムをほぼ同一の塩基配列に近づけることができます。そこで自家受精を3回繰り返したところ、2セットのゲノムのほとんど(96%)の塩基配列が同一と推定される個体が得られました。このスギを使ってゲノムを解読しました。

■ 染色体の全体像が塩基配列として初めて明らかになった

複雑なゲノムを解読するには、ひと続きで長い(高分子量の)DNAを抽出する必要があります。そこでスギの若葉から平均長50,000塩基対(bp)以上のDNAを抽出してゲノム解読に使用しました。その結果、平均長16,960 bp、約1,888万本の読取配列(リード)からなる総計3,166億bpのデータを収集できました。これはスギのゲノムサイズの28.8倍の量に相当し、ゲノム全体が網羅されていると考えられました。これらのリードを2,650個の部分配列(コンティグ)にまとめました(図1)。

ゲノムは、染色体というひとつながりのDNA配列でできています。DNAは細胞核の中で折りたたまれて存在するため、その状態で隣り合っているDNAは近接したコンティグに存在する可能性が高いと考えられます。この情報を用いてコンティグの連結に成功し、長大な11本の連結配列(スキファールド)を得ました。これは、スギの11本の染色体に相当しました。この連結配列を、スギという種を代表する標準配列「参照ゲノム配列」としてとりまとめ、森林総合研究所のウェブサイト(ForestGEN)で公開しました。

■ スギゲノムの大半は「繰り返し配列」だった

完成した参照ゲノム配列は90.5億bpで、ヒトゲノムの約3倍の大きさに相当します。タンパク質を合成するための情報を持っているDNA領域(遺伝子)を探索したところ、植物に存在するはずの遺伝子の91.4%を含んだ55,246個を特定しました。これは既往の針葉樹研究で最高値だった89.4%を上回り、

さらに染色体上でそれらの位置が特定されたことから、針葉樹では世界で最も完成度の高いゲノム解読となります。また、タンパク質を合成する情報を持っていない部分(ゲノム全体の99.4%)の配列を解析した結果、ゲノム全体の83.6%が繰り返し配列であることが分かりました。繰り返し配列は、それ自身の配列をコピーして増えてきたと考えられ、また、未知の機能をもっていると言われていています。スギは、このような繰り返し配列が増えることでゲノムが巨大になってきたと考えられます。

研究資金

- ・本研究所の交付金プロジェクト1「スギの基盤遺伝情報の高精度化と有用遺伝子の機能解明」、「有用遺伝子の特定に向けたスギ全ゲノム走査」、および交付金プロジェクトFS「有用遺伝子の特定に向けたスギ全ゲノム塩基配列の概要解読」
- ・科研費(JP16H06279)「先進ゲノム解析研究推進プラットフォーム」、同(JP20H03239)「植物の巨大なゲノムを解読・解析する手法」
- ・農林水産省 農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業およ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(JPJ007097)「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(Project ID 28013B)」
- ・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(15-829、16-403、17-405、18-408、19-420、20-428、21-302、22NIBB402)」

参考文献・サイト

Fujino et al. (2023) A chromosome-level genome assembly of a model conifer plant, the Japanese cedar, *Cryptomeria japonica* D. Don. bioRxiv, doi: <https://doi.org/10.1101/2023.02.24.529822>
ForestGEN, https://forestgen.ffpri.go.jp/jp/info_sugi1.html

専門用語

ゲノム:生物がもつ1セットの遺伝情報の総体をゲノムと呼びます。遺伝情報の最小の単位はDNAを構成する4種の塩基(アデニン、チミン、グアニン、シトシン)で、その長さは塩基対(base pair: bp)で表されます。

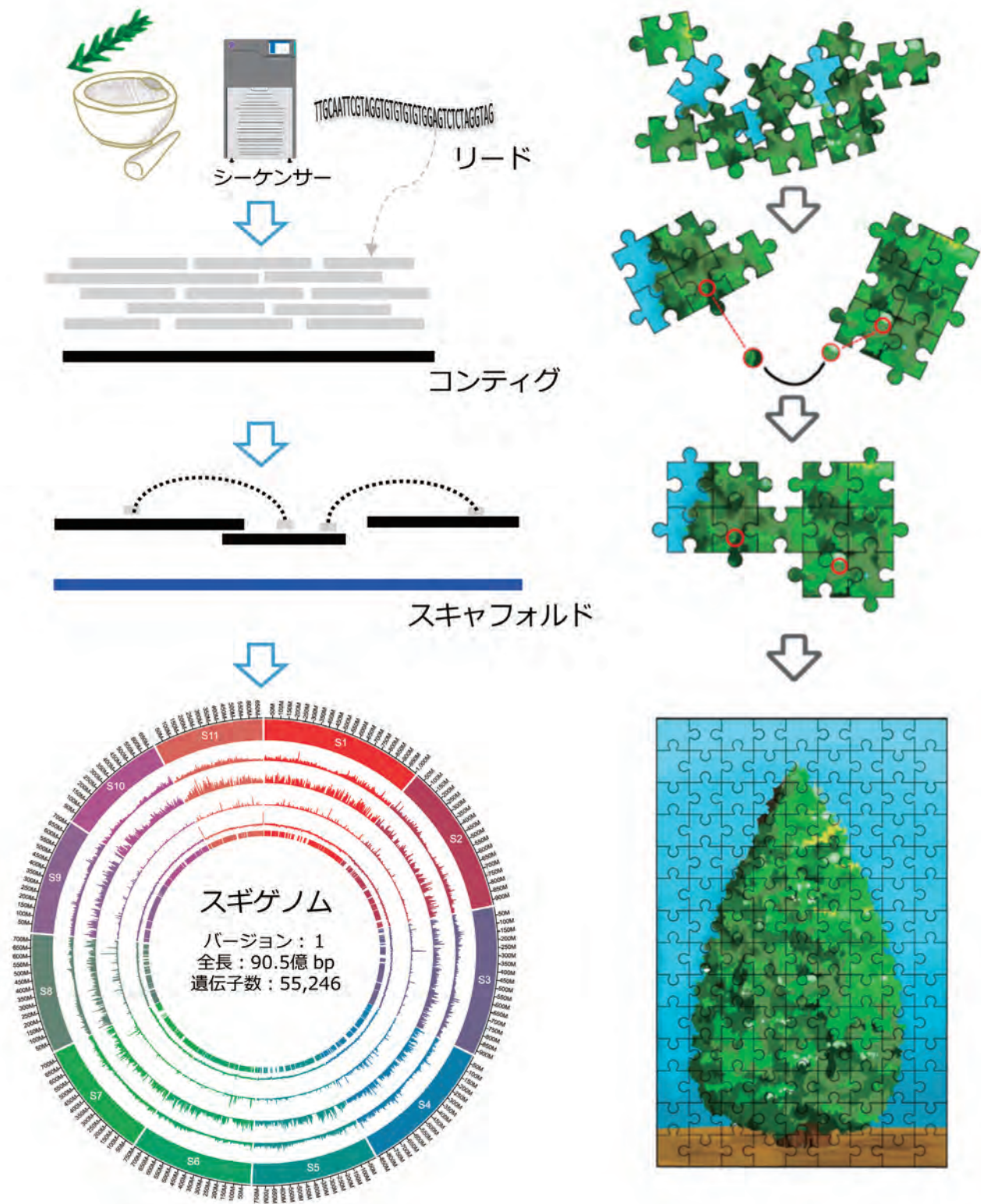


図1 ジグソーパズル(右)になぞらえたスギゲノム解読手順のイメージ図(左)

スギのゲノムが解読されていく様子をジグソーパズルが完成していく様子に例えて表現しました。高分子量DNAを抽出することで、ひと続きの長い塩基配列(リードと呼ばれる読み取り配列: 灰色の線分)を読み取ることができます。リードの長さはジグソーパズルのピースの大きさに例えられ、ピースサイズが大きいほど、そしてユニークなピースが多いほど組み立てが容易になります。そういったリードをつなぎあわせてもう少し大きなピースを組み立てました(コンティグと

呼ばれる部分配列: 黒い線分)。スギのゲノムは83.6%が繰り返し配列でユニークな配列が少なくゲノム解読を難しくしていましたが、近接したコンティグ同士の連結によって染色体全体を網羅した配列(スキャフォールドと呼ばれる最終的な連結配列: 青い線分)を構築することが出来ました。左下の図が、実際に解読されたスギゲノムの全貌を環状に表現した図です。内側の環から遺伝マーカーの密度、塩基配列の組成(グアニンとシトシンの含量%)、配列の不確かさの割合(%)、繰り返し配列の密度、遺伝子の密度、染色体番号(1~11)、および物理距離(100万bp)を表します。(Fujino et al. 2023を改変)

マダニ媒介感染症対策における生態学的アプローチ

生物多様性・気候変動研究拠点：岡部 貴美子、古川 拓哉

野生動物研究領域：亘 悠哉、飯島 勇人、森嶋 佳織、土井 寛大（日本学術振興会）

九州支所：鈴木 圭、山川 博美、森 大喜

マダニ媒介感染症SFTSの発生頻度が異なる複数の地域で、マダニ類と、宿主となりうる野生動物との関係を調査、解析した結果、マダニ密度が高いエリアではニホンジカやイノシシなどの大型哺乳類の密度も高いことが明らかになりました。このことから特に発生境界地では、予防対策としての大型哺乳類の密度管理が重要です。一方で大型哺乳類よりもアライグマやハクビシンなどがウイルスを増幅していることから、多発地域ではまず郊外や中山間地での増幅動物対策が必要です。また感染履歴を持つツシマヤマネコ野生個体が発見された対馬では、シカがウイルス媒介上重要なマダニを増やした可能性を明らかにし、野生動物対策の緊急性を指摘しました。

■ SFTS多発地域における対策

和歌山県の森林、農地、市街地が混在する地域に調査サイトを設定して、4-11月にマダニと野生動物を調査し、それぞれが利用する環境について解析しました。森林地帯ではニホンジカやイノシシの出現頻度が高く、ウイルスを媒介するタカサゴキラマダニが優占していました。一方農地や市街地周辺では、アライグマなどの中型哺乳類が多く、ウイルスを媒介するキチマダニやフタトゲチマダニの密度が高いことが分かりました。当該地域ではアライグマやタヌキからSFTSウイルス遺伝子が確認され、農地や市街地周辺に出没するこれらの哺乳類がウイルスを増幅している可能性が示唆されています。これらのことからSFTS多発地域では、まず人がマダニに刺される可能性が高い郊外や中山間地で、アライグマなどの捕獲とタヌキなどが定着しない環境の管理が必要です。また緊急避難的な対策として、一時的な植生除去はマダニ密度制御に有効ですが、これまでの研究から効果は短期的であること、生物多様性保全上のリスクとなる可能性が指摘されていることなどから、十分な配慮が必要です。

■ SFTS発生境界地域における対策

栃木県および岐阜県内の森林地帯のシカ密度が異なる地域で調査を行い、マダニ密度とシカなどの野生動物出現頻度との関係を調べました。その結果いずれの調査県でも、シカ密度が高いとマダニ密度が高い傾向が認められました（図1）。同じエリア内では、下層植生が豊富な林縁で最もマダニ密度が高いことが分かりました（図2）。高密度の野生動物を減らすのは難しいこと、シカ密度が増加するとマダニ密度が急激に上昇したことから、SFTS未発地域では予防策として、シカなどの重要宿主の個体数モニタリングと密度管理が必要です。あわせて、ウイルスを確認するためにシカの抗体陽性率検査を検討する必要があります。またシカ密度が高い森林地帯では、マダニの吸血を避けるためダニ忌避剤の使用や服装の配慮などが必要です。

■ 絶滅危惧種ツシマヤマネコ保全のための基礎情報

2022年にツシマヤマネコのSFTSウイルス抗体陽性個体が見つかった対馬において、ツシマジカによる植生被害が顕著な森林で、全国的に人の刺咬報告が多いフタトゲチマダニが多いことを明らかにしました。ツシマヤマネコのウイルス感受性は不明ですが、飼育ネコを含めたネコ科動物の高感受性（致死率が高い）が知られています。人の安全と希少種保全の両面から、有効な対策を早急に明らかにすることが必要です。

研究資金

・環境省環境研究総合推進費(4-2005)「SFTSに代表される人獣共通感染症対策における生態学的アプローチ」

参考文献・サイト

Iijima H, Watari Y, Furukawa T, Okabe K (2022) Importance of host abundance and microhabitat in tick abundance. Journal of Medical Entomology 59: 2110-2119.

Suzuki KK, Doi K, Morishima K, Yamagawa H, Mori T, Watari Y, Okabe K (2022) Preliminary research on the relationship between tick and deer abundance on Tsushima Islands, western Japan. Journal of the Acarological Society of Japan. 31: 67-73.

専門用語

SFTS (Severe Fever with Thrombocytopenia Syndrome): 重症熱性血小板減少症候群。これまでに中国南部、韓国、ベトナム、日本で確認されている、マダニがウイルスを媒介する人獣共通感染症で、アジアおよび日本で感染拡大しています。人やネコ科動物の致死率が高い。

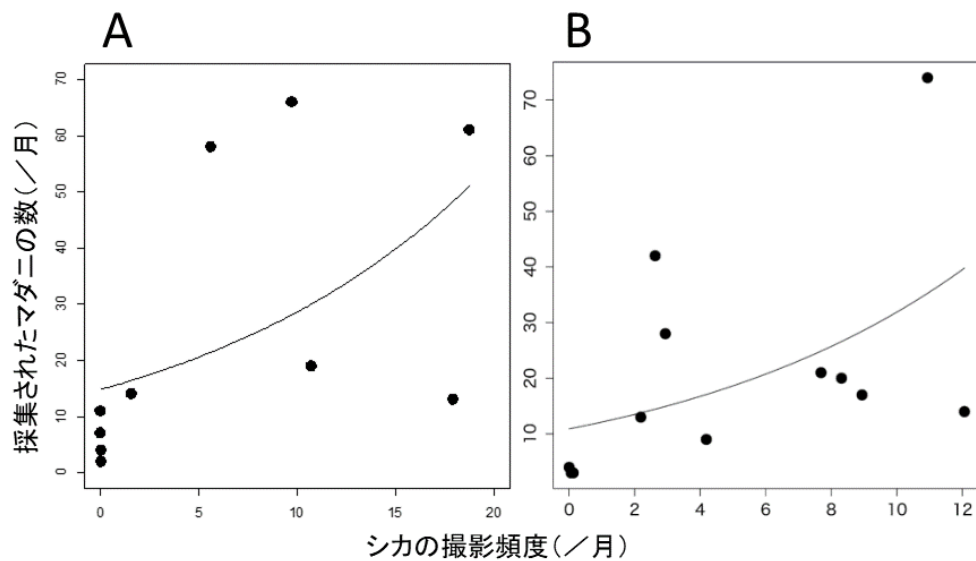


図1 シカの自動撮影頻度とマダニ成虫の密度との関係

A: 岐阜県、B: 栃木県。シカ撮影頻度の月平均値(横軸)が多いサイトでは、マダニの月平均採集数(縦軸)も上昇する傾向が認められました。(Iijima et al. (2022) J Med Entomol を改変)

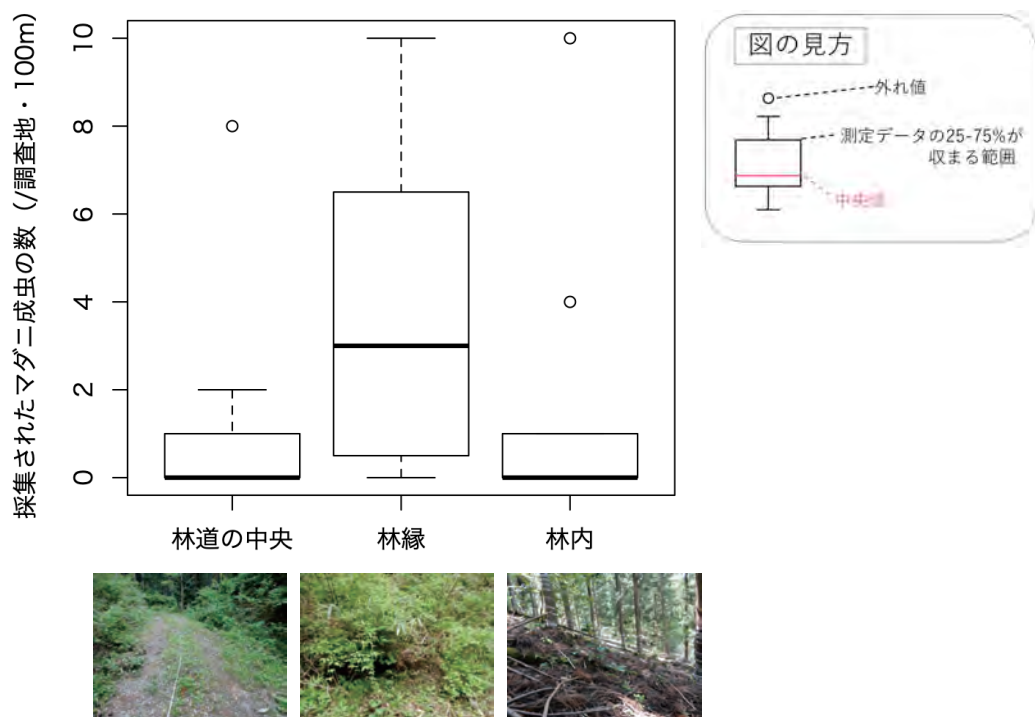


図2 下層植生の異なる林道の中央・林縁・林内におけるマダニ密度

原発事故後10年間の森林土壌・木材中の放射性セシウムの動きを解明

木材加工・特性研究領域：大橋 伸太、黒田 克史、安部 久、香川 聡、杉山 真樹、鈴木 養樹
立地環境研究領域：眞中 卓也、橋本 昌司 きのこと・森林微生物研究領域：小松 雅史
震災復興・放射性物質研究拠点：坂下 渉、三浦 覚、阪田 匡司、篠宮 佳樹、高野 勉
研究企画科：平井 敬三 北海道支所：今村 直広、藤原 健 関西支所：金子 真司

放 射性セシウムが沈着した森林を安全に利用していくためには、何十年も森林内に留まるセシウム137の動きを正確に把握・予測する必要があります。福島第一原発事故から5年後の時点では、セシウム137の土壌（鉱質土層）や樹幹木部（木材）への集積が確認されていました。今回、10地点での事故後10年間の継続調査によって、多くの森林でセシウム137の鉱質土層や木材への集積が鈍化し、横ばいとなったことを明らかにしました。これは多くの森林において、セシウム137の分布が大きく変化する事故直後の初期状態から、ほとんど変化しない準定常状態に移行したことを意味しています。今後、準定常状態のデータの拡充によって、樹木のセシウム137の吸収特性の解明が進み、将来予測の精度が大きく向上すると期待されます。

■ 大部分は鉱質土層表層に移動し、留まっている

福島第一原子力発電所事故後が起きた2011年以降、福島・茨城県内の10地点において森林内のセシウム137分布を継続的に調査し（図1）、事故後10年間のデータを解析しました。

森林土壌中では、落葉層のセシウム137の大部分がその下の鉱質土層表層（深さ0-5 cm）に比較的短期間で移動しており、事故から5年後の時点では鉱質土層表層のセシウム137蓄積量が増加傾向にあることが確認されていました。しかし事故から10年後の時点では、ほとんどの調査地において鉱質土層表層のセシウム137蓄積量の増加は止まり、ほぼ一定値になっていることが明らかになりました（図2）。また、事故後10年間ではセシウム137の鉱質土層表層から下層（5-20 cm）への目立った移動はなく、ほとんどが鉱質土層表層に留まっていることが分かりました。

■ 木材中の濃度の増加は多くの森林で止まった

木材中のセシウム137濃度は、事故から5年後の時点で、半数の調査地で増加傾向にあることが確認されていました。この増加はいずれ止まることが様々なモデルで予測されましたが、それに要する時間は予測モデル間で数年から数十年までの大きな開きがあったため、実際の動向が注目されていました。今回の解析によって、木材中のセシウム137濃度の増加は、多くの調査地において事故後5-7年程度で止まったことが明らかになりました（図3）。

■ 多くの森林で準定常状態へ

セシウム137の鉱質土層表層と木材への集積が鈍化し、横ばいになったことは、森林内の土壌と樹木の間を循環するセシウム137の量がほぼ一定で、見かけ上の分布がほとんど変化しない準定常状態になったことを意味しています。森林内のセシウム137の分布が大きく変化していた事故直後の初期状態では、樹木のセシウム137の吸収特性を調べるのが困難でした。また、初期状態のデータを基にした将来予測には

非常に大きな不確実性がありました。今回多くの森林で準定常状態が確認されたため、今後の観測データのさらなる拡充によって樹木のセシウム137の吸収特性の解明が進み、将来予測の精度が大きく向上すると期待されます。

研究資金

・林野庁委託事業「森林内における放射性物質実態把握調査事業」

参考文献・サイト

Manaka, T. et al. (2022) Ten-year trends in vertical distribution of radiocesium in Fukushima forest soils, Japan. Journal of Environmental Radioactivity 251-252: 106967. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106967>

Ohashi, S. et al. (2022) Decadal trends in ^{137}Cs concentrations in the bark and wood of trees contaminated by the Fukushima nuclear accident. Scientific Reports 12: 11243. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14576-1>

専門用語

セシウム：植物の必須元素であるカリウムと同じアルカリ金属の元素。土壌中の粘土鉱物に強く吸着・固定されることが知られています。その一方で、カリウムと挙動が似ているため、植物に比較的吸収されやすい元素であるとも考えられています。

セシウム137：福島第一原発事故によって環境中に放出された主な放射性物質の1つ。放出された量が多く、かつ半減期（量が半分になるまでの時間）が約30年と長いので、長期的な影響が最も懸念される放射性物質です。

落葉層：森林土壌のうち、落葉や落枝などの有機物が主体の層で、鉱質土層の上に堆積しています（図1）。この層に含まれるセシウムは、有機物の分解や雨による洗脱などによって鉱質土層に移動すると考えられています。

鉱質土層：森林土壌のうち、粘土鉱物や砂などの無機物が主体の層（図1）。セシウムはこの層に含まれる粘土鉱物に強く吸着・固定されると考えられています。

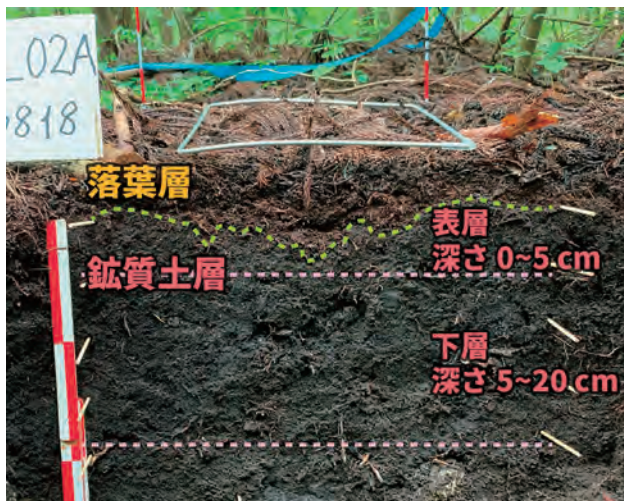


図1 放射性セシウム調査を行った土壌の断面(左)と樹幹木部(右)(スギ林での一例)

鉍質土層表層

深さ 0~5 cm

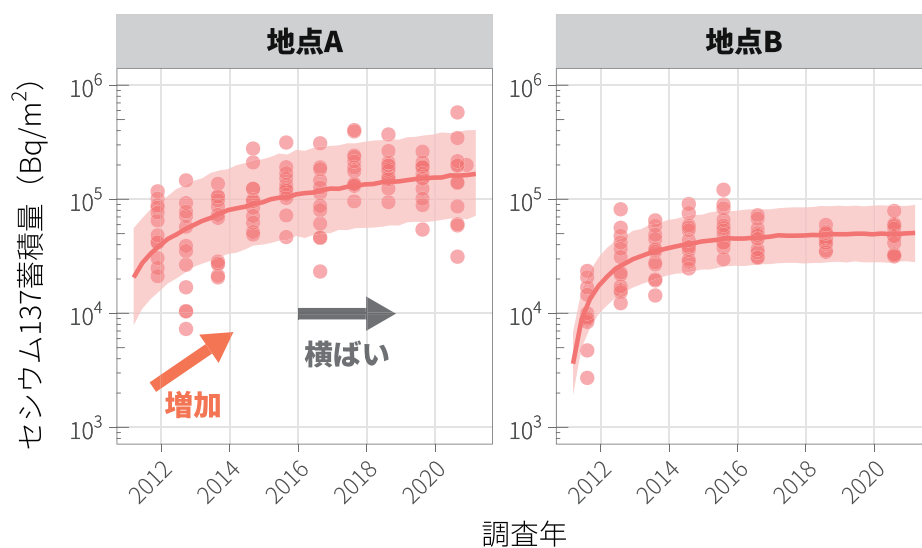


図2 鉍質土層表層(深さ0~5 cm)中のセシウム137蓄積量の経年変化(スギ林2地点の例)

点は観測値を、線と帯はそれぞれ回帰曲線と80%信頼区間を示しています。(Manaka et al. 2022の図を改変)

木材

樹幹木部

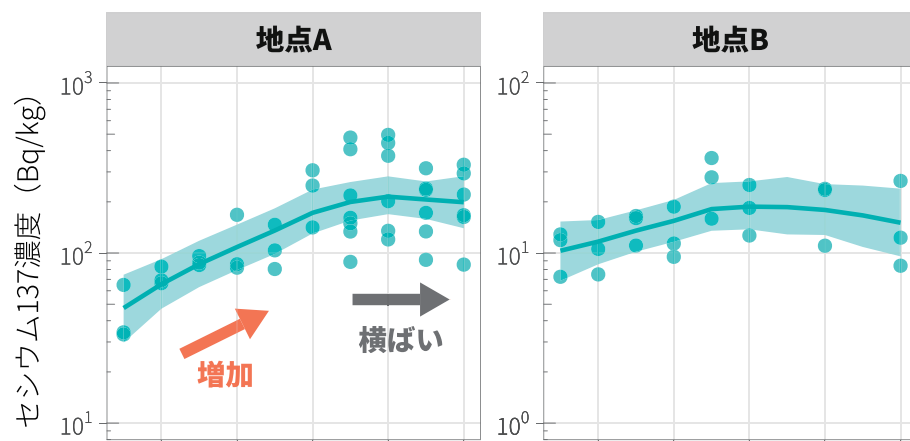
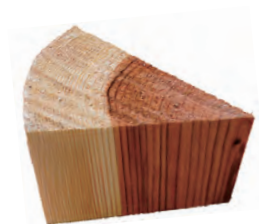


図3 木材中のセシウム137濃度の経年変化(スギ林2地点の例)

点は観測値を、線と帯はそれぞれ推定された傾向の中央値と95%信用区間を示しています。(Ohashi et al. 2022の図を改変)

治山ダムによる流木捕捉量を予測する数値計算手法の開発

森林防災研究領域：鈴木 拓郎、経隆 悠、浅野 志穂

豪 雨時に発生する土石流に伴う流木は下流の被害を拡大する要因でもあり効果的な流木対策が求められています。その1つとして流木を治山ダム等で捕捉し下流への流木の量を減らす対策があります。本研究では流木の量をより効果的に減らすため、土石流の先頭部へ流木が集まる過程や治山ダムによる流木の捕捉過程を明らかにし、それらを数式化した数値計算手法を開発しました。数値計算手法は個別の治山ダムの形状等を検討できる高精度な手法と渓流全体の中で治山ダムによる流木捕捉量を推定できる汎用的な手法をそれぞれ開発しました。この技術開発により治山ダムが流木を捕捉できる量を予測しながら、効果的な流木対策を計画できるようになります。

■ 治山ダムで流木を捕捉できる量を予測する

森林が降雨による山地斜面の土砂災害の発生を軽減していることは広く知られています。しかし、極端な豪雨時には、斜面崩壊が森林を巻き込んで流木混じりの土石流となり、流木が下流域の被害拡大の要因となる場合があることから、効果的な流木対策が求められています。林野庁による「流木災害等に対する治山対策検討チーム」中間とりまとめ(平成29年11月)では、流木対策として発生源対策とともに治山ダム等により流木を捕捉し流下量を減らすことが効果的と提言されています。しかし、一般的に土石流よりも比重が軽い流木は、流れの速い表面に浮上して土石流の先頭付近に集まるなど複雑な運動様式を示すため、具体的にどのような治山ダムなら効率的に流木を捕捉できるのか、これまで十分な知見がありませんでした。そこで本研究では治山ダムによる流木捕捉量を数値計算によって予測する手法を開発することにしました。

■ 流木や治山ダムの形状を再現する高精度計算

上流から治山ダムに到達した流木は複雑に絡み合いながら捕捉されます。この複雑な過程を再現するために、土石流や流木、治山ダムを粒子の集合体として扱う「粒子法」と呼ばれる計算手法を用いることにしました。その前段としてまず、基礎的な水路実験を行い、流木は溪床勾配が大きいほど土石流の先頭付近に集まり易いことや土石流先頭部に流木が集積した方が治山ダムでより多く捕捉できることなどの特徴を明らかにしました。そこでその結果を基に、流木の表面に摩擦力を作用させるなどの改良を粒子法に加えることで実験結果を再現できるようになりました(図1)。これにより様々な形状の治山ダムを数値計算で比較できるようになりました。

■ 渓流スケールで治山ダムの捕捉量を予測する

粒子法は詳細な検討には便利ですが、計算量が膨大であり広い範囲の渓流全体での評価は難しくなります。そこで渓流全体での治山ダムの流木捕捉量を予測するために、計算負荷の小さい手法を開発しました。ここでは土石流が流れる渓流空間を格子(メッシュ)に分割して計算する「格子法」を用い、粒子法で再現した流木の挙動を表現するために新たに数式

を開発し、一般的なパソコンでも利用可能な汎用的な計算手法を開発しました。この手法を用いて、実際に発生した流木災害事例の再現計算を実施したところ、既設の不透過型治山ダムによって流木が捕捉された現地の状況を再現できました。さらに、仮にこの治山ダムが無かった場合と既存のダムとは異なる透過型治山ダムが設置されていた場合を想定した予測計算も行い、それぞれの流木捕捉量を比較できるようになりました(図2)。

■ 2つの手法を組み合わせて効果的な対策を

流木災害対策の効果を上げるには、流木を効率的に捕捉する治山ダムを適切な箇所に設置することが重要です。本研究で開発した高精度な数値計算手法と汎用的な数値計算手法を組み合わせることで、効果的な流木災害対策計画につながると考えられます。

研究資金

・みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち農林水産研究の推進(委託プロジェクト研究)「流木災害防止・被害軽減技術の開発」JP19191196

参考文献・サイト

鈴木拓郎、剣持嵩之、経隆悠、浅野志穂(2022) 流木混じり土石流の氾濫・堆積過程に関する水路実験と数値計算、土砂災害に関するシンポジウム論文集、11:95-100

専門用語

治山ダム:土砂流出などによる山地荒廃を防ぐため、森林法に基づき設置されるダム。「不透過型」は土砂を常にせき止めますが、通水部に隙間を設けた「透過型」は平常時に土砂を徐々に流し、洪水時に土砂や流木を捕捉します。

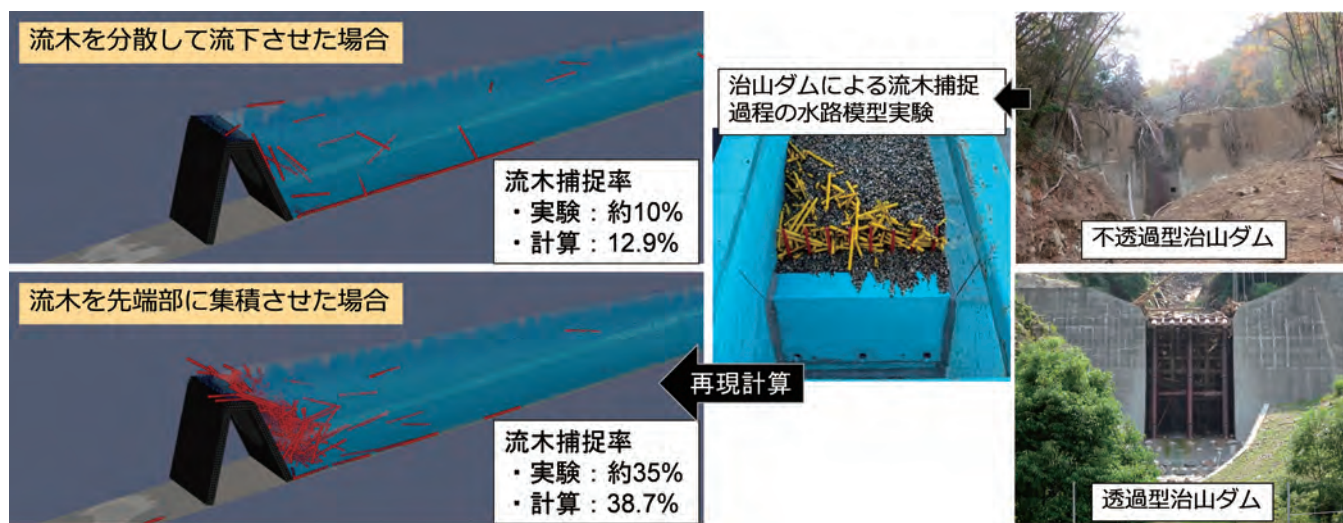


図1 粒子法による治山ダムの流木捕捉過程の再現計算

水路実験で流木が土石流の先頭部に集積した方が治山ダムでより多く流木を捕捉できることが分かりました。この結果を開発した計算手法で再現できるようになりました。

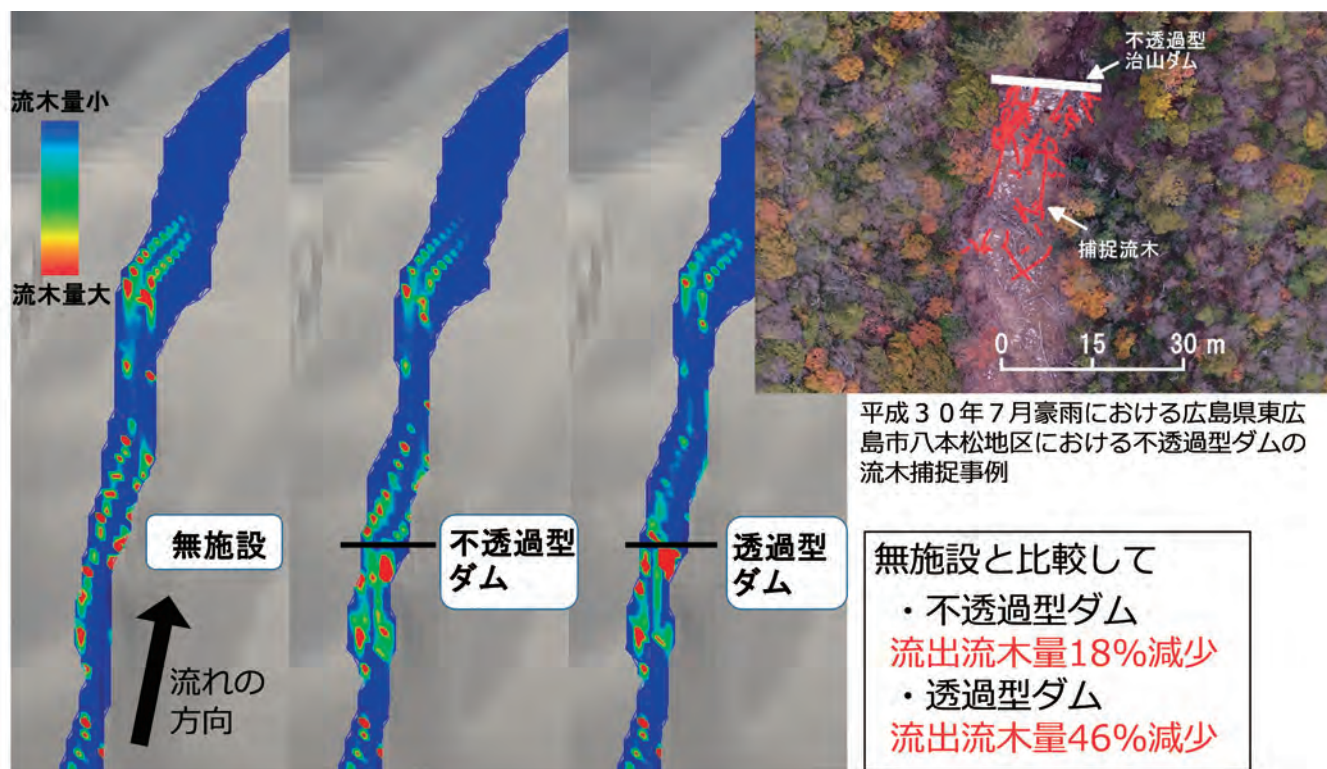


図2 格子法による治山ダムの流木捕捉量の予測計算

実際の流木災害時の流木堆積状況の調査結果を用いて、開発した計算手法が既存の不透過型治山ダムで流木が捕捉される様子を再現できることを検証しました。また、治山ダムなし、不透過型、透過型それぞれのケースについて、下流への流出流木量を比較推定できます。



スギ等の成長に優れた苗木による施業モデルの開発、 造林コスト30%削減

研究ディレクター：宇都木 玄 森林植生研究領域：酒井 武
植物生態研究領域：重永 英年 九州支所：山川 博美 林木育種センター：高橋 誠

スギのエリートツリー等の実生苗木の育苗管理手法を開発し、苗木の出荷には既存の苗木出荷規格を適用できること、エリートツリーの苗木は植栽後に高い成長能力があることを実証し、樹高成長モデルから湿潤な条件でその能力がより発揮されることを解明しました。九州地方で4つの植生タイプ別に、下刈り終了を判断する目安となるスギの樹高を提案し、立地条件によっては植栽後2年で下刈りを終了できることを示しました。さらに施業計画の立案をICTで支援するツール(I-Forests)を開発し、機械地^{じこしら}拵え、低密度植栽に加えてエリートツリー等を活用した下刈り回数削減により、再造林初期費用を30%以上削減できる施業モデルを提案しました。

■ 成長に優れた苗木の規格

スギのエリートツリー等成長に優れた実生苗木について、施肥量や積算温度を基準とした育苗管理手法を開発しました。また苗木の出荷規格を設定するため、現状の5～6段階の林野庁山林用主要苗木標準規格サイズに該当する苗木を山に植栽し、3年後の樹高成長量を比較しました。その結果いずれの規格でも2.5m～3m程度と問題のない樹高になり、エリートツリー等の苗木の出荷規格は現状の規格範囲を適用することができると考えられました。

■ 成長に優れた苗木の植栽後の成長

既存のスギ系統とスギエリートツリー9系統の苗木を九州の複数試験地に植栽し、その後の成長量を調べました。いずれの試験地でもエリートツリー樹高成長の系統間順位は同じであり、3年次のエリートツリーの平均樹高は既存系統を20～60%上回っていました(図1)。このことからスギのエリートツリーの苗木は、遺伝的に樹高成長が優れていると考えられました。さらに土壌水分環境(TWI)をパラメータとする樹高成長モデルで5年次樹高を解析すると、エリートツリーの苗木は概ね既存系統のスギよりも樹高が高くなり(図2)、特に湿潤な条件でその能力がより発揮されることが明らかになりました。九州地方で下刈り終了を判断する目安となるスギの樹高(90%以上の確率でスギの梢端部^{しょうたん}が雑草木より抜き出る高さ)を植生タイプ別に調べたところ、ススキ型で2.2m、ササ型で1.1m、キイチゴ型で1.5m、落葉広葉樹型で1.3m以上であることが分かり、立地条件の良いところでは植栽後2年で下刈りを終了できる場合も観察されました。

■ 成長に優れた苗木の施業モデル

ウェブ上でエリートツリー等の初期成長を予測するツール、現場でタブレット端末に情報を入力すると下刈り要否を判断するツール、および再造林初期費用等を予測するツールで構成されるI-Forestsを開発し(表1)、再造林初期費用を30%以上削減できる施業モデルを検討しました。その結果、地拵

えの機械化や2000本/ha以下の低密度植栽に加え、エリートツリー等成長に優れた苗木を活用して下刈り回数を従来の5回から2～3回に削減すると、目標を達成できることが分かりました(図3)。今後は低密度植栽や下刈り回数の削減が、伐採時期・除伐・ツル伐りに与える影響を研究することが重要です。

研究資金

・みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち農林水産研究の推進(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」(2018年度～2022年度、JP18064868)

参考文献・サイト

鶴崎幸・山川博美・伊藤哲・重永英年・佐々木重行(2020)競合植生によって異なるスギ造林地の刈り要否の判断基準。日本森林学会誌, 102:225-231.

宇都木玄・久保山裕史(2021)経営可能な林業の判断基準について—年間平均成長量(MAI)から見た土地期望価(LEV)による林業の経営判断—。日本森林学会誌, 103:200-206.

宇都木玄・高橋誠・酒井武・重永英年・山川博美編(2023)エリートツリーを活かす育苗と育林モデル 森林総合研究所第5期中長期計画成果15、32pp.

専門用語

エリートツリー: 形質等が優れた樹木を交配して得られた樹木のうち、さらに形質等が優れた個体を選別して交配した樹木です。

実生苗木: 交配による種子の発芽によって得られた苗木です。

機械地拵え: 伐採後の造林作業を楽にするため、植栽地を機械によって整備することです。

TWI (Topographic Wetness Index): 土壌水分量の指標で値が大きいほど、湿潤なことを示す値です。

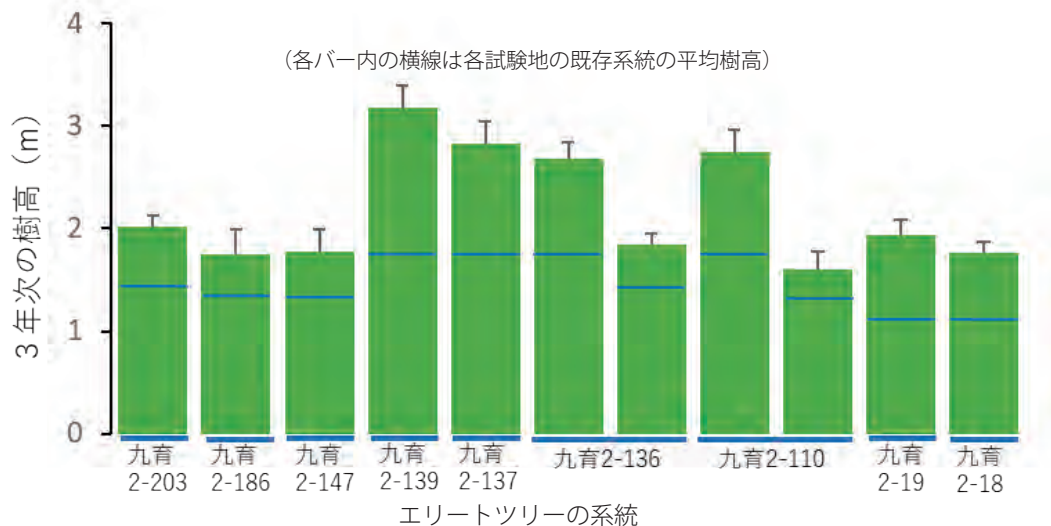


図1 九州の各試験地に植栽したスギエリートツリー 3年次の樹高
全てのスギエリートツリーの系統で、既存系統より樹高成長が良い。(宇都木ら2023)

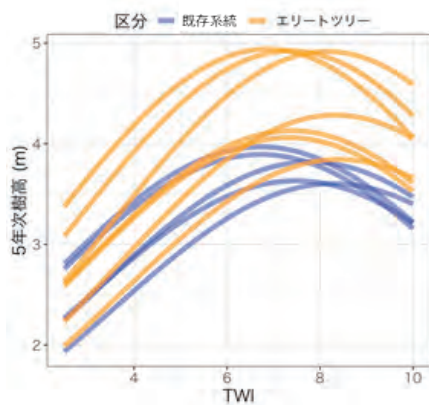


図2 TWIと5年次樹高予測値の関係
TWIが大きいほど湿った立地であり、そのような立地ほどエリートツリーの成長が良い。(宇都木ら2023)

表1 I-Forestsの各ツールの特徴

I-Forestsは3つのパーツから構成されており、業務の内容で使い分けが可能(宇都木ら2023)

ツール名	Browser-based Growth Estimation tool (I-Forest.GE)	GIS-based Forest data Viewer (I-Forest.FV)			Mobile-based Competition Assessment tool (I-Forest.CA)
		森林簿ビューワ	コスト計算	収穫量/収支予測	
動作環境	ウェブブラウザが動作する機器	QGISが動作するPC			スマートフォン タブレット
必要データ	標高データ	森林簿および航空機レーザ計測等の測量データ			現場視察
主機能	・苗木や競合植栽の成長の推定とマップ化 ・エリートツリーの成長予測	・地理情報の表示 ・現在および将来の林況推定	・指定した林分の主伐収入、再造林費用の推定	・伐期齢、間伐方法等による、収穫量と収支の推定	・調査年の下刈り要否を判断

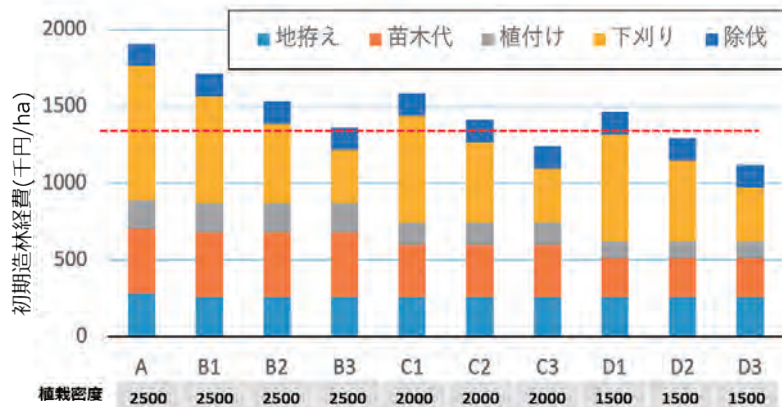


図3 想定した10個の施業モデルによる再造林初期費用と内訳
図中の赤点線はAモデルを既存とした場合の70%を示し、それより下の施業モデルにおいて、現状に比べて30%以上のコスト削減が可能です。(宇都木ら2023)

降雨規模に応じて林道災害発生頻度を予測するモデルを構築

林業工学研究領域：宗岡 寛子、鈴木 秀典、白澤 紘明
富山県農林水産総合技術センター森林研究所：図子 光太郎

気 候変動により豪雨が増加する中、森林管理・利用の基盤である林道を将来も維持していくためには、林道災害の発生箇所数と復旧費を予測し、復旧に充てる予算や人材を確保することが重要です。そこで本研究では、過去21年間の林道災害関係資料が残る富山県を事例として、降雨規模に応じて林道災害発生頻度を予測するモデルを構築しました。このモデルによれば、降雨規模に応じて林道災害発生頻度は指数的に増加すると考えられます。このようなモデルが地域ごとに構築できれば、各地域の将来の雨量予測データや林道距離を入力することで、気候変動下における将来の林道災害発生箇所数を予測できます。

■ 降雨規模と林道災害発生頻度との関係

森林管理・利用の基盤である林道を将来も維持するには、気候変動を考慮に入れて長期的な林道災害発生箇所数や復旧費用を定量的に予測することが重要で、特に気候変動の影響により24時間に数百mmといった大規模な雨の増加が予測されています。そこで富山県全域を対象として、広域で見たときの降雨規模に対する林道災害発生頻度(単位林道長さあたりの平均林道災害発生箇所数)を、地理情報システム(GIS)上の民有林林道線形データに、同県の過去21年間(1998～2018年)の民有林林道災害発生場所と雨量データとを重ね合わせることでモデル化しました。その結果雨量以外の要因による林道災害発生頻度への影響は規則性のないことが確認できました。一方降雨規模と林道災害発生頻度の間には明確な関係があり、降雨の増加に対して生じる林道災害発生箇所数は、桁違い(指数的)に大きく増加することが予測されました(図1)。例えば24時間雨量が100mmから350mm(3.5倍)になると林道災害発生箇所数はおよそ100倍になります。

■ 降雨規模と1か所あたりの復旧事業費との関係

復旧費用の予測を行うためには、林道災害発生箇所数に復旧事業費を乗じる必要があります。災害発生箇所数だけでなく、1か所あたりの復旧事業費も降雨規模の影響を受けるのであれば、そちらも大規模な雨の増加を加味して見積もる必要がありますが、富山県のデータから統計的な分析を行ったところ、そのような明確な傾向はみられませんでした(図2)。ただし、富山県の過去21年間においては24時間雨量が300mm以上といった豪雨の発生回数に限られていたため、今後データも蓄積して検討を加える必要があります。

■ 今世紀末、林道災害はどの程度増加する？

降雨規模に応じた林道災害発生頻度の予測モデルに雨量予測データを入力すれば、将来の林道災害発生箇所数を予測することができます。本研究では、事例とした富山県について、気象研究所がRCP8.5シナリオに基づき作成した雨量予測データを用いて、今世紀末の10年間(2081～2090年)の年平均林道災害発生箇所数を予測しました(図3)。その結果、林道延長

が現在と変わらない場合でも、今世紀末の年平均林道災害発生箇所数は過去21年間の年平均の約1.4倍にのぼるという予測結果が得られました。

■ 地域ごとのデータに基づく予測が必要

本研究は、富山県農林水産総合技術センター森林研究所との共同研究として取り組んだもので、富山県を対象としたモデルを構築しました。同じ降雨規模の下でも、林道災害発生頻度には地域差があると考えられるため、今後は地域ごとのデータ収集、モデル構築へと展開していく必要があります。

研究資金

・本研究の交付金プロジェクト2「大量の林道災害データを活用した長期的災害復旧費用のモデル化」

参照文献・サイト

宗岡寛子、白澤紘明、図子光太郎、鈴木秀典：降雨強度に応じた単位延長あたり林道施設災害発生箇所数の期待値，森林利用学会誌，36(1)，43～50

専門用語

RCP8.5シナリオ：IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が2014年発表の第5次評価報告書で提示した4シナリオの1つで、有効な温暖化対策がとられず、今世紀末の世界平均気温が約4℃上昇するという最悪のシナリオです。

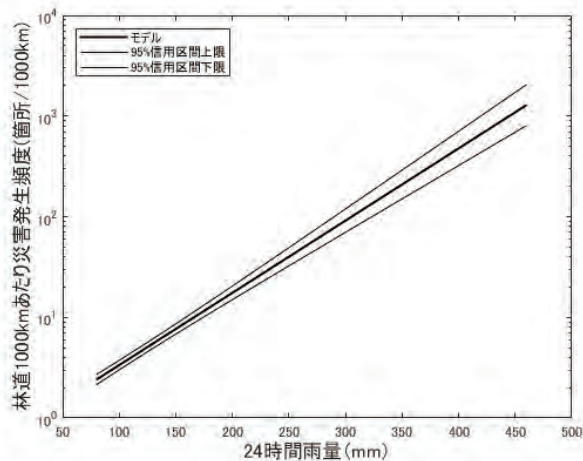


図1 降雨規模に応じた林道災害発生頻度

24時間雨量が100mmから350mmに増加すると、林道災害発生頻度は100倍とけた違い(指数的)に増加します。(縦軸は対数表示に注意)

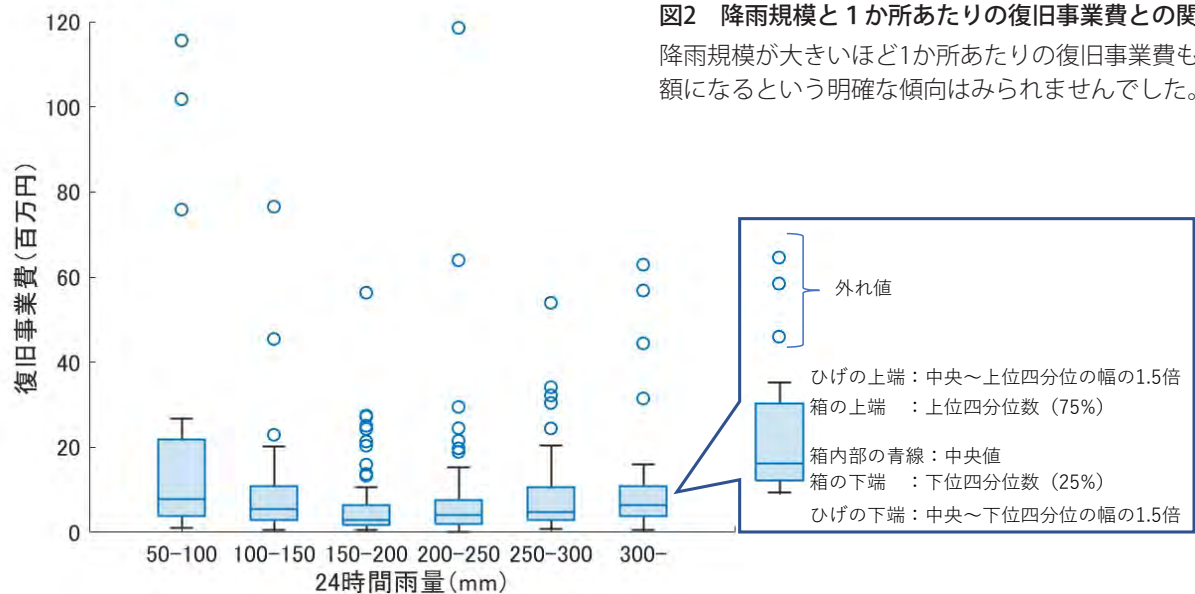


図2 降雨規模と1か所あたりの復旧事業費との関係
降雨規模が大きいほど1か所あたりの復旧事業費も高額になるという明確な傾向はみられませんでした。

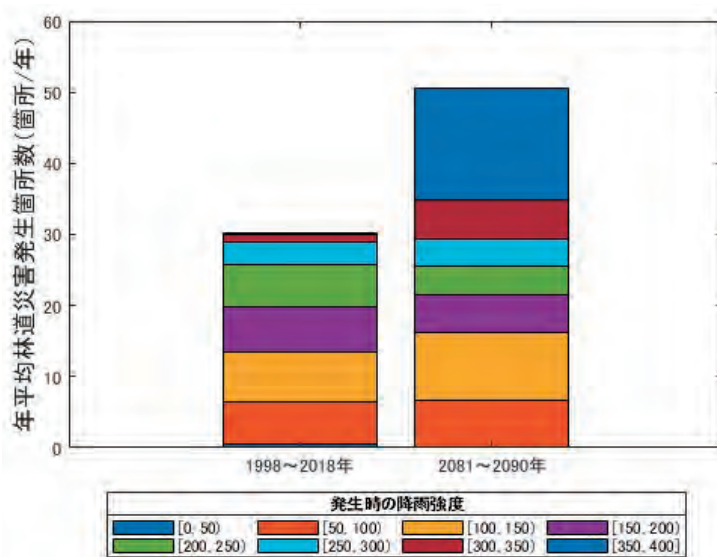


図3 富山県内の民有林林道における過去21間の年平均林道災害発生箇所数と今世紀末の予測

有効な温暖化対策がとられない場合、予想される2081～2090年の年平均林道災害発生箇所数は、過去21年間の年平均の約1.4倍にのぼるという結果が得られました。例えば200-250mmの部分等、将来予測で災害発生箇所数が減る場合もありますが、それはRCP8.5シナリオでその雨量の頻度が減少するためです。

「持続可能な森林経営」を主眼に高校教科書再構成

多摩森林科学園:井上 真理子

本 林・林業分野の発展には、専門的人材の育成が重要です。この分野の専門教育を行う高校での教育内容を調査したところ、学科再編が進んだことなどにより、学校によっては公務員等専門技術者として必要な森林・林業に関する広い内容が網羅されておらず、「森林経営」科目の実施率が低くなっていました。そこで、森林経営の基礎から応用につながる教育内容として、森林・林業をめぐる社会のニーズを受けて「持続可能な森林経営」を学べるように教科書を再構成しました。新しい内容としては、森林資源情報や森林サービス産業などを盛り込みました。この内容は、令和5年度から使用される高校用教科書に反映されています。

■ 高校の森林・林業の専門科目の内容

森林・林業分野の発展には、次世代を担う専門的人材の育成が重要です。森林・林業の専門教育機関(大学、林業大学校、高校)のうち、森林・林業の専門教育に関わる高校には林業科や森林環境科などがあります(図1)。森林・林業の専門科目として「森林科学」、「森林経営」、「林産物加工」の3科目があり、教科書の内容を分析したところ、全般的には公務員試験にも対応した幅広い教育内容が含まれていました(図2)。

■ 高校での森林・林業科目の開設状況

森林・林業の専門教育に関わる高校は72校あり(2020年)、その専門知識は森林・林業の専門学科やコースの科目、及び農業の学科や総合学科の選択科目で教えられています。各校の森林・林業の専門科目の実施状況を調べました。3科目を教える高校は、回答を得られた24校中15校(約6割)にとどまっていました(表1)。特に農業等の他学科と統合した学科では、「森林経営」科目を実施しない事例が多くありました。「森林経営」は林業職公務員試験で重要な内容ですが、森林の育成や伐採を行う「森林科学」や、木材加工やきのこ栽培を行う「林産物利用」と比べて実習内容が少なく、高校では座学での授業が多い学び難い科目と捉えられていました。

■ 持続可能な森林経営を学ぶ教育内容の提案

森林経営をめぐる社会ニーズをみると、持続可能な森林経営の実現が重視されています。そこではGIS(地理情報システム)などを用いた森林資源情報の高度化やスマート林業の実現、観光や健康などの森林空間活用も図られており、「森林経営」科目には新たな社会のニーズを反映して教育内容を再構築する必要があると考えました。そこで、文部科学省の教育方針を示した『学習指導要領』をふまえて、産業界とのつながりや実践的・体験的な学習を重視して教科書の内容を再検討しました。持続可能な森林経営を中心として経営の内容を構成し、①森林経営とは何か、②森林経営の組織、③森林経営の計画の3節を設定しました(図3)。内容には、森林経営の基礎から、応用としての森林GISや、森林サービス産業など様々な森林経営、管理を盛り込んでいます。この教育内容は、令和5年度から使用される高校用教科書「森林経営」に反映されて

おり、森林・林業に関わる仕事としての森林総合監理士の紹介や、地域と連携した森林生態系保全などの活動も新たに盛り込まれています。「森林経営」の学習を通じて、将来的に森林・林業を志す専門的人材が増えることが期待されます。

研究資金

・科研費(JP20H03035)「林学から森林科学への転換をふまえた森林の専門教育標準カリキュラムの構築」

参考文献・サイト

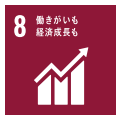
井上真理子編(2020)日本の森林教育. 森林総合研究所多摩森林科学園. 20pp,<http://www.ffpri.affrc.go.jp/tmk/introduction/documents/4th-chuukiseika32.pdf>

井上真理子・大石康彦(2022a)高等学校の森林・林業教育に関する専門科目の開設状況. 関東森林研究73:17-20

井上真理子・大石康彦(2022b)高等学校の専門教育における森林経営の教育内容の再構築. 日本森林学会誌104:274-285

専門用語

林業大学校:都道府県などによって、林業技術者養成などを目的に設置されている学校や研修機関です。近年、新設が相次いでいます。



業務増大する市町村の森林行政、体制整備の方策提案

林業経営・政策研究領域：石崎 涼子、鹿又 秀聡、笹田 敬太郎

市 町村における森林行政の役割と担当人員体制との間には大きなギャップがあるとされています。担当の業務実態について全国アンケート調査を行った結果、近年の業務量増加が担当職員数の増加を上回る規模で起こったこと、担当者が能力不足を感じている市町村が多いことなどが明らかになりました。今後の体制整備に向けて、市町村に共通して求められる方策に加えて、市町村の状況を踏まえて考えるべき4つの方策(ミニマム型、外部委託型、広域連携型、内部人材育成型)を示しました。

■ 市町村森林行政の役割と体制のギャップ

現在、市町村には、民有林の森林管理に関わる多くの行政権限があります。しかし、市町村で森林行政を担当する職員の数や専門性が十分でない場合が多く、市町村森林行政の体制整備は持続可能な森林管理を実現するうえでの課題となっています。そこで、民有林を抱える全国1,612市町村を対象に、郵送による業務実態調査アンケートを行ない、856市町村より回答を得て(回収率53.1%)、その結果をもとに体制整備の方策を検討しました。

■ ここ数年で市町村森林行政の業務量は約3割増

2019年度から森林経営管理制度と森林環境譲与税制度が開始されるなど、近年、市町村森林行政の業務は拡大しています。今回のアンケート調査によると、2020年現在、森林行政担当者は1市町村あたり平均で2.09人おり、このうち0.45人分は2019年度に創設された2つの制度に関わる業務に充てられていることが分かりました(図1)。これら以外の森林行政業務に携わる人員(1.64人)が2018年度までの業務量だと仮定した場合、2019年度以降に市町村森林行政の業務量は27%増えたと推定することができます。一方、総務省の統計によると、2016年から2020年にかけての全国市町村の林業部門の職員数は4%の増加にとどまっており、職員数の増加より遥かに大きな規模で業務量が増加したものと考えられます。

■ 樹木をみてもスギやヒノキが分からない

問題は職員の数だけではなく、森林行政担当者は様々な面で能力不足を感じていることも分かりました。例えば、現場においてスギやヒノキ等の樹種を区別できないと感じている担当者がいる市町村は53%に及び、特に担当職員数が少ない市町村ほどその割合が大きくなっています(図2の1)。

また、崩壊危険地等を森林行政担当職員が判別できないと感じている市町村が64%に及び、森林行政担当職員数が少ない市町村においては、そもそも担当者が業務を通じて崩壊危険地等の判別を意識する機会がないとする市町村も多いことが分かりました(図2の2)。

■ 条件に応じた体制整備の4方策

こうした市町村森林行政の体制整備には、まず市町村共通の方策として、業務の電子化やシステム化、情報基盤の整備などを通じた業務量の軽減が求められます。加えて、市町村の状況を踏まえた方策としては、担当職員の知識や能力の向上を図る「内部人材育成型」や近隣市町村との連携を図る「広域連携型」、一部業務の外注を図る「外部委託型」を組み合わせた体制整備が必要と考えられます。場合によっては、都道府県などの外部機関が森林管理の質を担保できるような体制を築く「ミニマム型」の検討も必要となるのではないかと考えられます。

研究資金

・本研究の交付金プロジェクト2「市町村森林行政に要する情報・知識の可視化と実行体制モデルの提示」の成果に基づき行った実施課題「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」

参考文献・サイト

石崎涼子・鹿又秀聡・笹田敬太郎(2022) 市町村における森林行政担当職員の規模と専門性―市町村森林行政の業務実態に関するアンケート調査(2020年実施)結果より―. 日本森林学会誌, 104, 214-222.

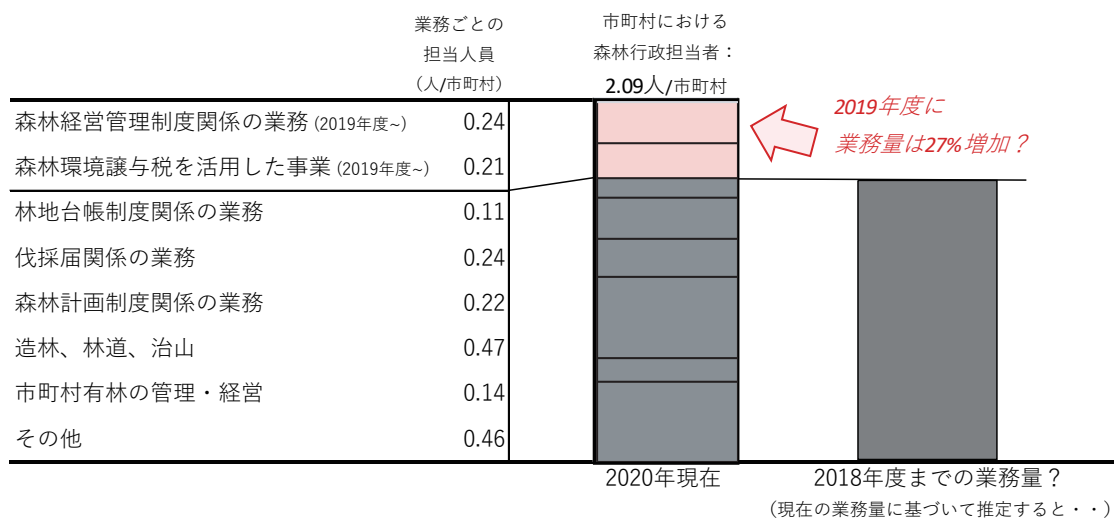
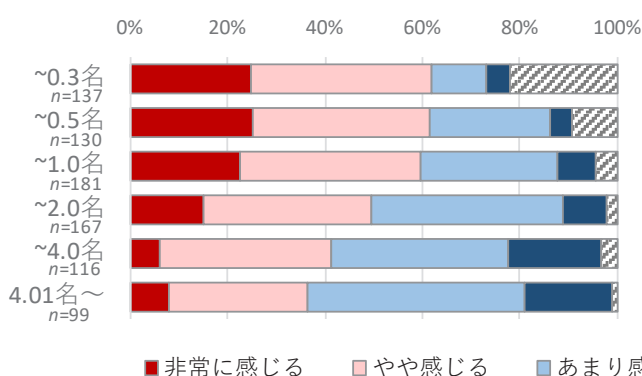


図1 市町村森林行政における業務別の担当人員数

2020年現在の森林行政担当者は、市町村あたり平均2.09人いますが、そのうち0.45人分は2019年度に創設された制度の業務に充てられています。この数値からは、2019年度に市町村森林行政の業務量は3割近く増加したものと推定されます。(石崎ら2022を改変)

1) 樹木をみても樹種が分からない(スギ、ヒノキ等)



2) 崩壊危険地域(地質等)の判別ができない

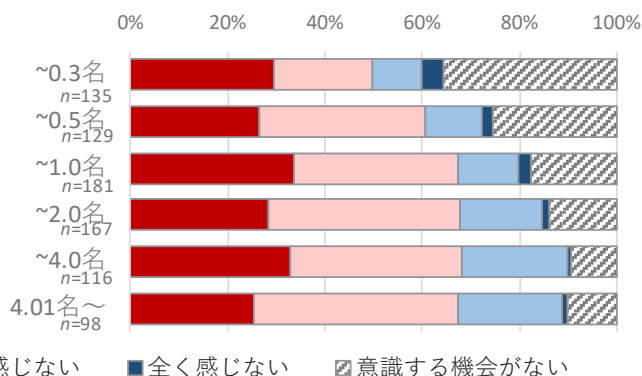


図2 森林行政担当職員の人員規模別にみた能力不足の実感(石崎ら2022を改変)

a.全ての市町村に共通する課題

- ✓ 業務の電子化やシステム化などを通じた業務量の軽減
- ✓ 基盤情報の整備

b.条件に応じた方策

	ミニマム型	外部委託型	広域連携型	内部人材育成型
現状	他業務をメインとする職員などが最小限の対応をしている。	業務に対する意識や関心はあるが、人員不足や専門性の不足などにより、十分な対応が難しい業務がある。		長期的な担当職員配置が可能、もしくは十分な引継ぎが可能。
方策	市町村の担当領域を最小限にとどめ、そこではカバーしにくい森林管理上の重要事項は都道府県など他の主体が担保できる体制を構築する。	一部業務を外部組織等に外注する。 ※市町村担当者にも一定の設計・管理能力が求められる。	複数の市町村で一部業務を共同実施する。 ※市町村間の合意形成や連携関係構築が必要となる。	専門的な職員の確保や継続的な知識・技術の向上を図る。 ※大学や研究機関などの外部機関との連携も必要となる。

図3 市町村の条件に応じた森林行政の体制整備方策



きのこに振動を与えて害虫の発生を抑制する

東北支所：高梨 琢磨、小林 知里

森林昆虫研究領域：向井 裕美

昆虫は、振動を情報として利用し、捕食者の回避などの行動をとります。このことから、害虫に振動を与えることで摂食などの阻害や忌避を促し、害虫による農林産物の被害を軽減することができます。私たちは、きのこ害虫であるキノコバエ類の行動及び成長を制御する振動の周波数を特定しました。さらに、シイタケの菌床栽培棚にその振動を与えて、キノコバエ類の発生を抑制する技術を開発しました。振動による害虫防除技術を用いることで、化学農業に頼らずに、安全で安心なきのこの安定生産に貢献することができます。

■ 昆虫が利用する振動と害虫防除への応用

昆虫は、振動を情報として利用し、捕食者の回避や種内のコミュニケーションなど様々な行動をとります。例えば、マツノマダラカミキリでは、振動を検知する感覚器が脚に存在し、特定の振動に対して歩行や摂食などの行動を停止します。このことから、害虫に対して人工的な振動を与えることで、摂食などの阻害や忌避を促すことによって、農林産物の被害を抑制することができます(図1)。

■ きのこの害虫キノコバエ類

シイタケをはじめとする食用きのこでは、おが粉(おがくず)を培地とした菌床を栽培施設内の棚に並べて栽培する菌床栽培が広く普及しています(図2)。菌床栽培により、一年を通じて安定的なきのこ生産が可能になりますが、菌食性の害虫による被害を受けることがあります。フタマタナガマドキノコバエ(図2)やツクリタケクロバネキノコバエなどのキノコバエ類は主要なシイタケ害虫であり、菌床を食害します。そのうえ、シイタケの子実体にこれらの害虫がついた状態で出荷されると異物混入という問題も起こります。また、消費者の安心・安全を求めるニーズから、化学農業をきのこ栽培には用いないことが一般的なため、化学農業に頼らない新たな害虫防除技術が求められています。

■ 振動による害虫防除の効果

菌床シイタケに対するキノコバエ類の被害を軽減するために、振動を用いた害虫防除技術を開発しました。最初に、キノコバエ類の幼虫の行動制御に有効な振動の範囲を特定しました。フタマタナガマドキノコバエの幼虫に対して、異なる単一周波数の振動を1秒間、一定の間隔で繰り返して与えたところ、幼虫は100 Hzと1000 Hzの振動に対して移動の停止や驚くような反応をおこしました。また、ツクリタケクロバネキノコバエの幼虫において、特定周波数の振動を与えた振動区と振動を与えなかった対照区の間で比較したところ、100 Hzより高い周波数の振動が、幼虫から蛹、成虫になる成長を抑制することが分かりました。

そこで、100 Hz、800 Hz及び950 Hzの振動を発する振動装置(東北特殊鋼(株)ほか)を、森林総合研究所のシイタケ栽培施設内の菌床栽培棚に設置して、振動を2秒間、一定間隔で繰

り返して菌床に与え、成長制御の効果を検証しました(図3)。フタマタナガマドキノコバエ及びナガマドキノコバエ類の近縁2種について、種ごとに幼虫を10頭ずつ菌床上に放して、幼虫が蛹になった数、さらにそれら蛹が成虫になった数を冬の2か月間にわたり観察しました。

その結果、100 Hz、800 Hzと950 Hzのすべての振動区において、蛹や成虫の発生が遅れ、さらに発生した成虫の数が減少して対照区より35%低下したことから、振動は成長を制御していることが分かりました(図3)。これら一連の試験結果より、振動はキノコバエ類の行動や成長を制御することで、被害を軽減する防除技術として効果を発揮することが示されました。振動による害虫防除技術は、誘引トラップなどの防除技術と組み合わせた総合防除によって、化学農業に頼らずに、安全で安心なきのこの安定生産に貢献すると期待されます。

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)「害虫防除と受粉のダブル効果！スマート農業に貢献する振動技術の開発」

参考文献・サイト

向井裕美、高梨琢磨、小野寺隆一、阿部翔太、小野利文 振動を用いた害虫の行動及び成長の制御によりキノコ類を保護する方法 特許第7233060号

高梨琢磨、向井裕美、小林知里、小澤壮太、平栗健史、清水博幸、小野寺隆一、阿部翔太 振動を用いたキノコの栽培技術 PCT/JP2022/39666

森林総合研究所(2020) しいたけ害虫の総合防除

専門用語

キノコバエ類: ナガマドキノコバエ類やクロバネキノコバエ類を含む、きのこの害虫。幼虫は菌床やシイタケを摂食し、蛹を経て成虫となります。ナガマドキノコバエ類の幼虫は菌床上で粘着性のある糸を吐いて住みかをつくり、成虫の大きさは1cm程度です。



図1 振動による害虫防除

昆虫は振動を検知して回避や停止などの行動をおこすことから、振動装置によって害虫に振動を与えることで摂食などの阻害や忌避を促し、被害を抑制することができます。



図2 (A)栽培施設のシイタケ菌床と(B)シイタケ子実体上のフタマタナガドキノコバエの幼虫(矢印)と拡大図(体長1cm)(B出典:JATAFFジャーナル10:19-24(2022))

シイタケ菌床栽培施設



菌床と栽培棚

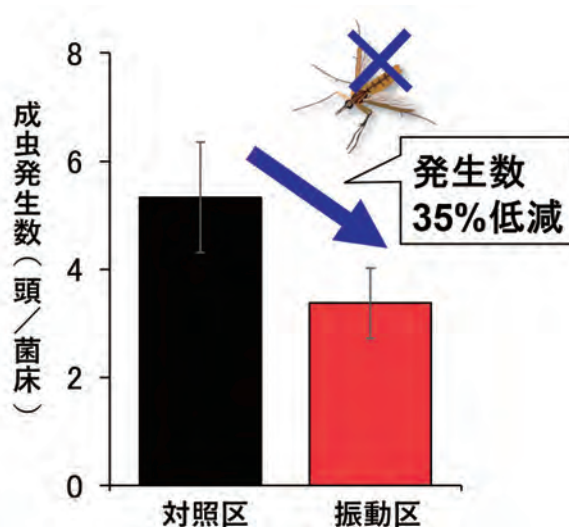
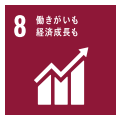


図3 栽培施設内での振動によるナガドキノコバエ類の制御効果

シイタケ栽培棚の菌床に振動を与えたところ、成虫の発生数が減りました。振動区は100Hz、800Hzと950Hzの総計。縦棒は標準誤差です。



国産トリュフ3種は地域ごとに遺伝的固有性をもつ

九州支所：木下 晃彦、中村 慎崇

林業上の有用樹種には、地域の遺伝的固有性を保全するために種苗移動制限が定められています。国産トリュフ栽培を広域に展開する場合も、野生集団の遺伝的固有性を損失しないよう配慮する必要があります。そこで国産トリュフ3種の野生集団の遺伝構造を調べた結果、地域ごとに遺伝的固有性があることを明らかにしました。トリュフは分散範囲が限られるため、日本列島が現在の形になった時期に、遺伝的固有性が形成されたと考えられます。地域の遺伝的固有性を守りながらトリュフ栽培を展開していくためには、トリュフ菌感染苗木の植栽範囲の設定や動物による持ち出しを防ぐための防護柵が必要であることが分かりました。

■ トリュフ接種苗木の移動制限は必要か

日本に自生する植物種や動物種では、野生集団の遺伝的固有性の保全の観点から、野生集団の遺伝構造が調査されています。その中で、スギやヒノキなど林業有用樹種には、地域の遺伝的固有性への影響リスクを低減させるため、種苗移動制限が定められています。しかし、きのこをはじめ菌類ではそのような取組は行われていません。

現在、森林総合研究所は、大学や公設研究機関と協同して国産トリュフの全国的な栽培に向けた研究開発を進めています。トリュフ栽培では、ある地域から採取したトリュフ菌体を用いてトリュフ菌が感染した苗木を作成し、屋外へ移植して発生を待ちます。しかし接種した菌の原産地とは異なる地域に接種苗木を移植することによって、在来の野生集団の遺伝構造をかく乱する恐れがあります。そこでまず、野生のトリュフ集団に地域ごとの遺伝的固有性があるのかを把握することにしました。

■ 列島形成とともに遺伝的に固有となった

本研究では、MIG-seq法という生物のゲノム中のDNA変異を検出する方法によって、北海道から鹿児島県まで採集した国産トリュフ3種(ホンセイヨウショウロ、イボセイヨウショウロ、アジアクロセイヨウショウロ)の種内の遺伝的変異を特定しました。そしてDNA変異情報をもとに分子系統解析を行ったところ、種によって傾向は異なるものの、3種は地域ごとに遺伝的固有性があることが明らかになりました。特にホンセイヨウショウロは明瞭な地理的遺伝構造を示し、日本の中央を縦断するフォッサマグナを境目に2つの主要な集団に分岐することが分かりました(図1)。

私たちがよく知る地上生のきのこのほとんどはヒダから空気中に胞子を射出することで、風に乗った胞子を遠方まで飛ばすことができます。しかしトリュフは地中にきのこを形成するため、雨によって流されたり、動物によって食べられたりすることによって胞子を散布します。または共生する樹木の菌根から伸びた菌糸が、他の樹木の根に移ることによっても、ゆっくりと移動すると考えられています(図2)。いずれにしてもトリュフの拡散範囲は、地上生きのこよりも狭く、その速度も極めて遅いと考えられ、さらに山や海など自然の障壁による影響を強く受けます。実際に野外のトリュフは移

動性が低いことから、数年にわたって同一のきのこ由来の胞子間で交配を繰り返していることが明らかにされています。したがって現在見られる3種の遺伝構造は、日本列島の地史や動植物の移動とともに、途方もない年月をかけて形成された姿といえるでしょう。

■ 地域の遺伝的固有性の保全と地元資源の活用

地域の遺伝的固有性を守りながらトリュフ栽培を行っていくためには、接種苗の植栽範囲を設定するとともに、動物等による栽培園からの持ち出しを防止する防護柵の設置などが必要です。また、トリュフが遺伝的固有性を示したことは、それぞれの地元特有の林産資源として“〇〇産トリュフ”といったブランド化の可能性を示唆しています。

研究資金

- ・科研費(JP19K06137)「日本の黒トリュフの起源を探る」
- ・本研究の実施課題「きのこ等微生物の特性解明と生産性及び有益性向上技術の開発」

参考文献・サイト

Nakamura et al. (2020) Genotypic diversity of the Asiatic black truffle, *Tuber himalayense*, collected in spontaneous and highly productive truffle grounds. *Mycological Progress* 19, 1511–1523.

専門用語

遺伝的固有性：地域の環境に適応して形成された、その地域に特有の遺伝的特性です。

フォッサマグナ：約2000万年前に日本列島がアジア大陸から離れる際に形成されたとされる大地の裂け目で、数百万年前の地殻変動などによって埋められた部分です。

菌根：植物の根に真菌類が共生して作る構造体のことです。菌根を形成する菌類を菌根菌といいます。



図1 ゲノム中のDNA変異から推定したホンセイヨウショウロ集団の遺伝構造

枝の末端は各地域のサンプルで、サンプル間の遺伝的変異が大きいほど枝は長く遠くに位置し、小さいほど枝は短く近くに位置します。

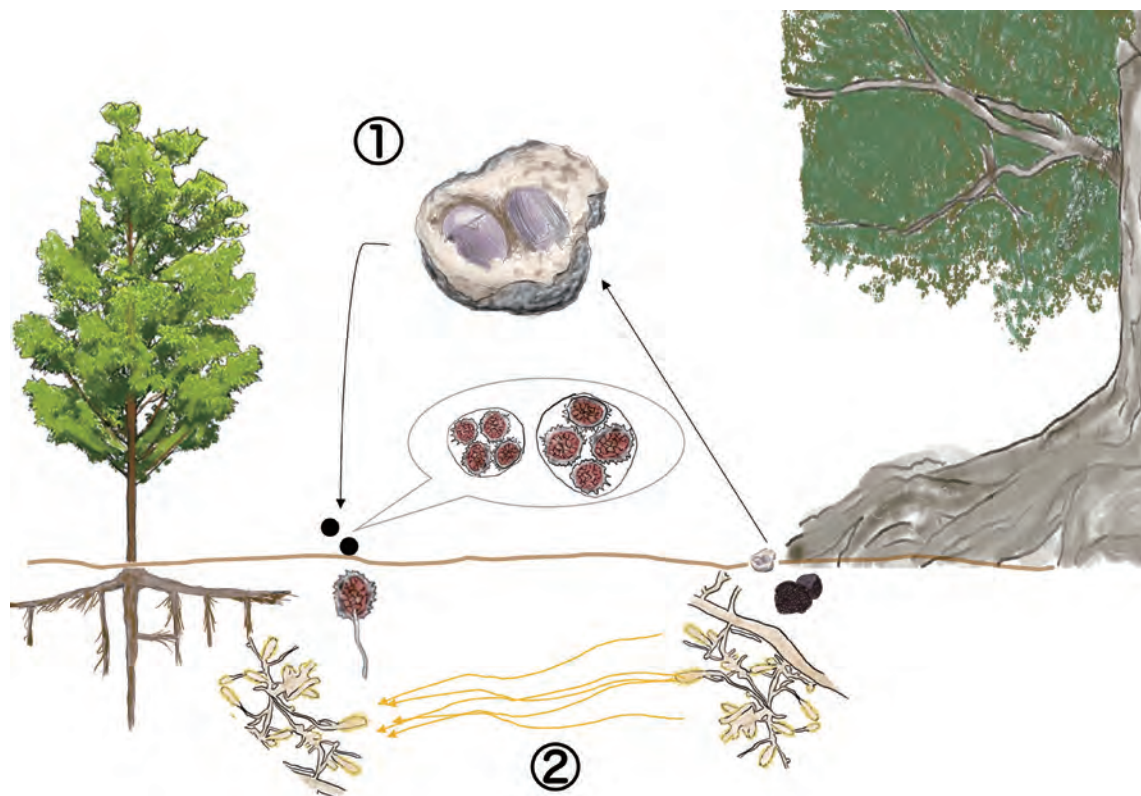


図2 トリュフの繁殖様式

トリュフから出るにおいに釣られて昆虫や動物が摂食し、ふんに含まれた胞子が移動して他の場所で発芽し菌根共生します①。または、菌根から伸びる菌糸によって他の樹木個体へ移動します②。



樹種で異なる針葉樹材の近赤外線透過率、非破壊識別への応用期待

木材加工・特性研究領域: 安部 久、渡辺 憲、児嶋 美穂
日本大学: 倉田 洋平

北海道支所: 矢崎 健一

ワシントン大学: Peter Kitin

文化財等に用いられている木材の樹種を非破壊的に調べる方法の開発が求められています。非破壊検査で用いる近赤外線(波長800–2500 nm)を樹種識別に応用する試みもありますが、樹種ごとの透過率を網羅的に調べた研究はありませんでした。そこで、森林総合研究所が所蔵する針葉樹21種の木材標本を用いて、樹軸方向に対する可視から近赤外まで(波長500–1200 nm)の光の透過率を調べたところ、樹種間に違いがあり、木材の構造、心材成分、密度などから影響を受けている可能性があることを明らかにしました。また、波長1100 nmの光の透過率は樹種間で最大10倍の開きがあることを明らかにしました。この成果は近赤外線による非破壊の樹種識別への応用が期待できます。

■ 近赤外分光法による非破壊的な樹種識別方法

我が国の重要な文化財は木材で造られているものが多く、用いられている木材の樹種を調べることは日本文化を深く理解していくために重要です。しかし、文化財は破壊を伴わない調査が原則であり、非破壊的に木材の樹種を調べる方法の開発が切望されています。それによってこれまで樹種が分かっていなかった多くの木質文化財の樹種が分かるようになります。近赤外分光法は近赤外線を用いた分析方法で非破壊的な計測装置で広く活用されています。これまでの研究で、近赤外線の中で短い波長領域(800–1150 nm)の光を用いると、奈良時代以降に制作された仏像に多く利用されているカヤ材とヒノキ材を判別できることが分かり、両樹種の木材中での光の透過性が異なることが原因である可能性が示唆されていました。しかし、近赤外領域だけでなく、可視光線から近赤外線に至る波長領域(500–1200 nm)の光の木材中での透過率についてはほとんど調べられていませんでした。

■ 木材標本を用いて透過率の評価

この研究では森林総合研究所が所蔵する針葉樹21種の由来の明らかな木材標本から辺材と心材の試料を切り出し、波長500–1200 nmの光の透過率を測りました(図1)。その結果、波長が500–700 nmの可視光線は多くの樹種で透過しませんが、約700 nmを超えた近赤外領域では波長が大きくなるに従って透過率が上昇し、波長1100 nm付近ですべての樹種に透過率のピークが見られました(図2)。

■ 透過率は樹種によって10倍以上異なる

各樹種で波長1100 nm付近の近赤外線を用いて各樹種の透過率を測定し比較しました(表1)。その結果、波長が1100 nmの付近の近赤外線の透過率は、サワラが最も高い42.1%で、最も低いイチイ3.9%と比較して10倍以上の開きがありました。針葉樹材の約95%の体積を占める仮道管にらせん肥厚を有する樹種(ベイマツ、トガサワラ、カヤ、イチイ)の透過率は他の樹種よりも低い傾向がありました。また、近赤外線の透過率が心材で高くなる樹種や逆に低くなる樹種、心材と辺材間で変化が大きい樹種や小さい樹種がありました。ヒノキ属

のヒノキとサワラ、トウヒ属のエゾマツとアカエゾマツ、モミ属のトドマツとモミ、ツガ属のツガとコメツガ、トガサワラ属のトガサワラとベイマツのように、同じ属の樹種は心材と辺材間の変化が同じ傾向を示すことも分かりました。さらに、材の密度が高くなると透過率が低くなる傾向がみられました(図3)。木材の構造や成分は同じ属に属する樹種では類似した性質を持っています。木材中での近赤外線の透過経路は明らかになっていませんが、仮道管壁の表面構造や心材化に伴って沈着する成分、密度などが木材の光学的な特性に影響を及ぼしていると考えられます。さらに、今後これらの木材中の光の透過率に影響を及ぼす因子と木材中での光の透過経路などの光学特性との関係の解析を進めることで、近赤外線による樹種の非破壊識別や材質評価への応用が期待できます。

研究資金

・本研究の実施課題「大径材および国産早生樹等の利用拡大に向けた木材特性の評価」

参考文献・サイト

Abe H et al. (2022) Longitudinal transmittance of visible and near-infrared light in the wood of 21 conifer species. IAWA J, 43,40.

専門用語

らせん肥厚: 木材を構成する道管や仮道管等の細胞壁の内面上に存在するらせん状の隆起です。

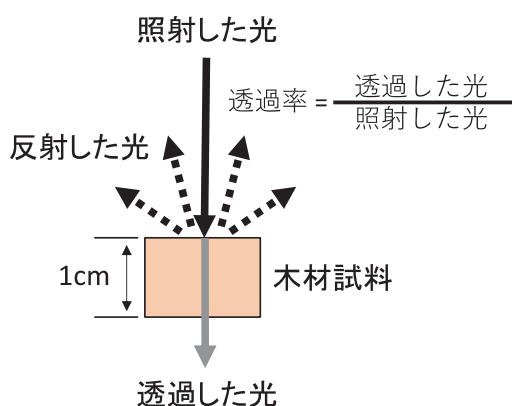


図1 木材の透過率の測定方法

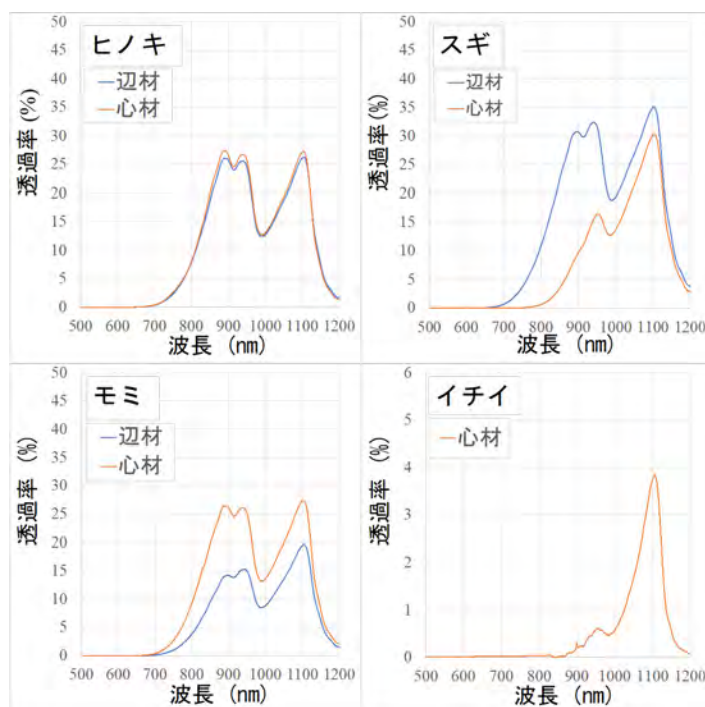


図2 樹種・部位ごとに示した波長と光透過率との関係

表1 樹種・部位ごとの1100nm付近の波長の光の透過率の平均(%)

樹種	科	属	全体	辺材	心材
サワラ	ヒノキ科	ヒノキ属	42.1	41.8	42.3
トドマツ	マツ科	モミ属	35.1	30.9	39.3
エゾマツ	マツ科	トウヒ属	34.8	34.1	35.6
コウヤマキ	コウヤマキ科	コウヤマキ属	33.3	32.8	33.8
スギ	ヒノキ科	スギ属	32.7	35.1	30.4
ゴヨウマツ	マツ科	マツ属	32.2	34.3	30.6
アカエゾマツ	マツ科	トウヒ属	31.8	31.8	31.7
アカマツ	マツ科	マツ属	30.4	32.0	29.1
アスナロ	ヒノキ科	アスナロ属	27.3	25.6	28.9
ヒノキ	ヒノキ科	ヒノキ属	26.8	26.2	27.2
モミ	マツ科	モミ属	25.6	19.7	31.6
イチョウ	イチョウ科	イチョウ属	24.6	25.2	24.0
カラマツ	マツ科	カラマツ属	23.4	24.2	22.5
ツガ	マツ科	ツガ属	20.9	22.7	18.6
ネズコ	ヒノキ科	ネズコ属	20.7	22.0	19.4
コメツガ	マツ科	ツガ属	20.6	23.8	17.4
ベイマツ	マツ科	トガサワラ属	16.8	17.5	16.0
トガサワラ	マツ科	トガサワラ属	15.2	16.2	14.2
イヌマキ	マキ科	イヌマキ属	14.0	14.2	13.8
カヤ	イチイ科	カヤ属	10.4	9.8	10.8
イチイ	イチイ科	イチイ属	3.9		3.9

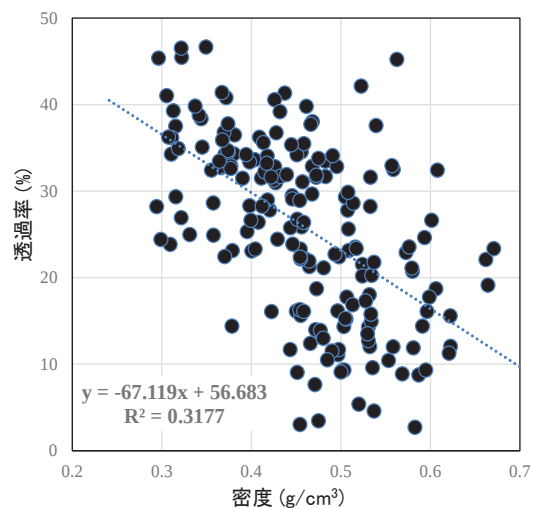


図3 1100nm 付近の波長の光の透過率と密度の関係

過酷な海中環境でも使えます

—木材・プラスチック複合材(WPC)とアセチル化木材—

木材改質研究領域: 松永 正弘、小林 正彦

海上・港湾・航空技術研究所: 山田 昌郎

海 中環境には木材を分解する海虫類が生息していることから、普通の木材を海中で使用すると短期間で海虫類の食害を受けてしまいます。そこで本研究では、そのような過酷な環境でも利用できる可能性がある木材として、プラスチックと複合化した木材や、お酢の仲間である無水酢酸を使ってアセチル化処理した木材について海中暴露試験を行いました。その結果、どちらも海虫類の食害をほとんど受けず、劣化しないことが明らかとなりました。この成果により、今後、木材の用途を海中環境へ拡大できると考えています。

■ 木材を海中で利用するために

海中環境には木材を分解する海虫類が生息しており、木材を使用する環境としては陸上と比べて非常に過酷な環境です。そこで本研究では、海中でも利用可能な木材の候補として、木材・プラスチック複合材(WPC)の海中暴露試験(2019年2月28日開始)およびアセチル化木材の海中暴露試験(2020年6月9日開始)をそれぞれ約2年間行い、海中環境での適用可能性について検証を行いました。

■ WPC、外観や質量に大きな変化なし

WPCは、木粉と熱可塑性のプラスチックを加熱しながら練り混ぜて製造する木質材料です。木粉の質量割合(木粉率)が50%程度である市販のWPCには、木粉とプラスチックのなじみを良くしたり、色を調えたりする添加剤が配合されています。しかし、本研究では、可能な限りWPC中の木粉率を高め、プラスチックの使用量を減らすことを目標の一つとしたことから、WPCの木粉率は75~60%としました。また、添加剤を用いず、スギの木粉とプラスチックのみを原料としたWPCを使って海中暴露試験を試みました。暴露試験の結果、木材は暴露後3か月で海虫類による食害の影響を受け大きく変形しましたが、WPCについては暴露2年でも大きな外観の変化はありませんでした(写真1)。また、暴露2年後のWPCの質量減少率も10%未満でした(図1)。

現在、WPCの主な用途はデッキ材などのエクステリア資材ですが、本研究で得られた成果により、今後、栈橋のような木製港湾構造物の防食保護材など、海中においてWPCの用途を拡大できると考えています。

■ アセチル化木材でも食害ほぼなし

アセチル化木材とは、お酢の仲間である無水酢酸を使って、木材成分中に多数存在する水酸基と呼ばれる官能基をアセチル基に置換した木材のことです。水酸基が水分子とくっつくことで木材は寸法・形状が変化したり腐ったりするので、水酸基をアセチル基に置換すればそういった欠点を抑えることができます。そこで、地中や淡水中では高い耐腐朽性能を持つことが知られているアセチル化木材が海中でも使え

るのかどうか検証するため、海中暴露試験を実施しました。その結果、写真2のように未処理の木材は3か月で海虫類による激しい食害を受けましたが、アセチル化木材は2年間暴露してもほとんど食害を受けませんでした。また、アセチル化木材は海中で質量が減少せず、むしろ数%増えました(図2)。これは、海水に含まれる塩分等が試験片内に入り込み、わずかに質量増加したものと推測されます。

現在のアセチル化木材の主な用途はデッキやフェンス、ルーバーなどですが、今後は港湾構造物や海岸沿いの木橋など、海洋施設での利用も期待されます。

研究資金

- ・本研究の交付金プロジェクト「土木分野における木材の利用技術の高度化(H30~R2年度)」
- ・科研費(JP20K06174)「木材だけの力で創る新たな木材改質処理法の開発」
- ・本研究の実施課題「多様なニーズに対応した木質材料の耐久性向上・性能維持管理技術の高度化」

参考文献・サイト

- 小林正彦ら(2022) 海洋環境における木材・プラスチック複合材(混練型WPC)の劣化解析. 森林総合研究所研究報告, 21(2), 113-128.
- 松永正弘ら(2022) 各種処理法でアセチル化したスギ材の海洋暴露評価. 木材保存, 48(3), 114-128.

専門用語

海虫類: 貝類のフナクイムシや甲殻類のキクイムシなど、海水中で木材を食害する海生生物です。

海中暴露試験: 試験架台に結束した試験片を、定期的に海水が循環する水槽中に沈める試験方法です。

超臨界二酸化炭素: 温度が31°C以上、圧力が74気圧以上で流体に変化した二酸化炭素のことです。無水酢酸をよく溶かし、木材内部まで素早く拡散浸透するため、短時間で均一に木材をアセチル化できます。

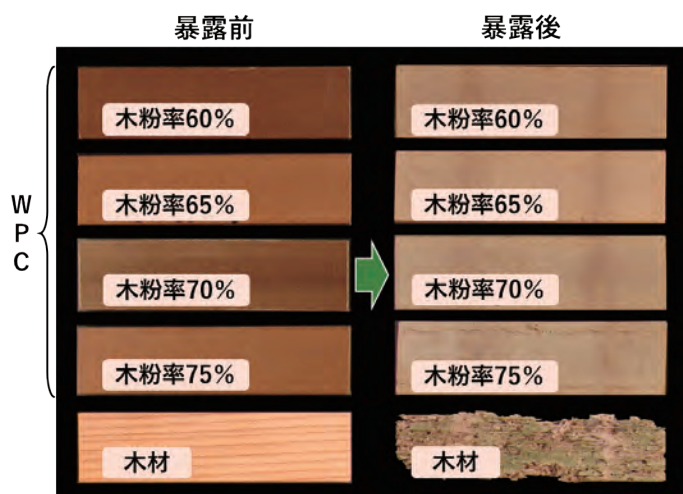


写真1 海中暴露試験24か月後のWPCと海中暴露試験3か月後の木材の外観（小林ら2022を改変）

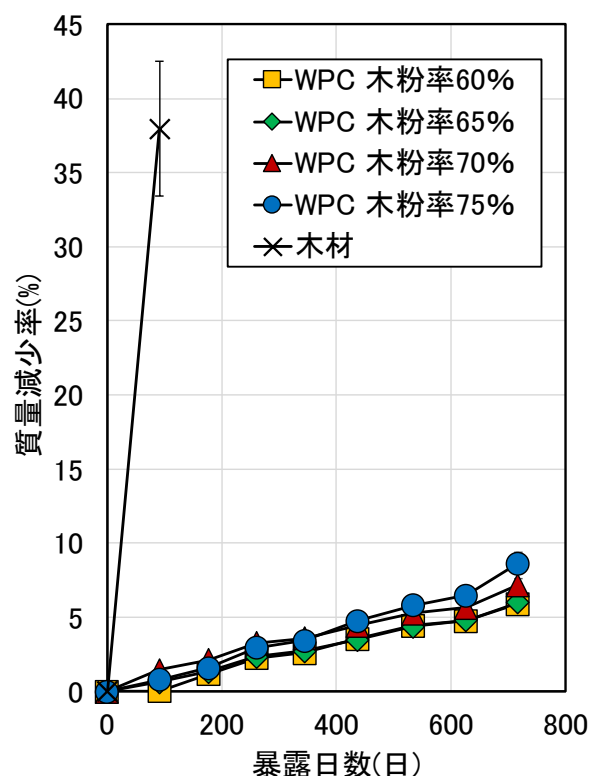


図1 海中暴露試験によるWPCと木材の質量減少率の変化（小林ら2022を改変）

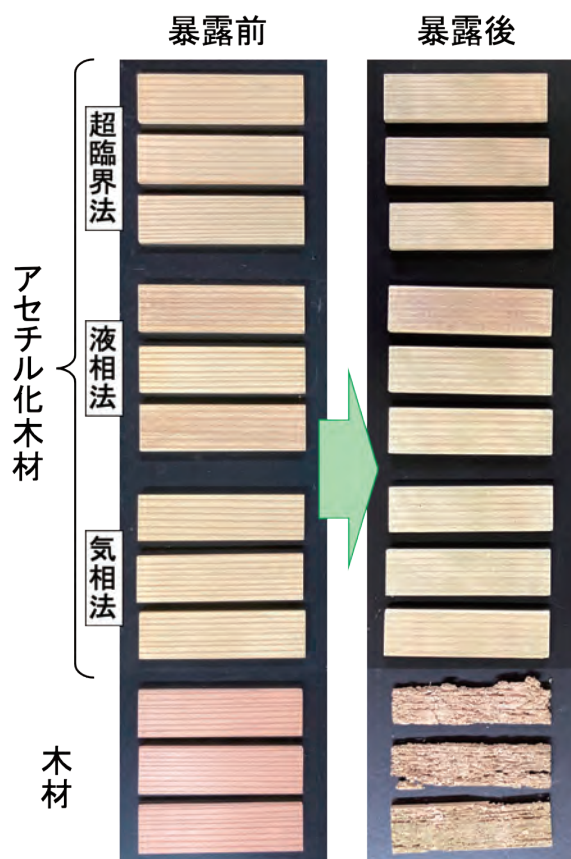


写真2 海中暴露試験24か月後のアセチル化木材と海中暴露試験3か月後の木材の外観

アセチル化処理は①超臨界二酸化炭素中で処理する「超臨界法」②液体の無水酢酸中で処理する「液相法」③気体の無水酢酸中で処理する「気相法」で行いました。（松永ら2022を改変）

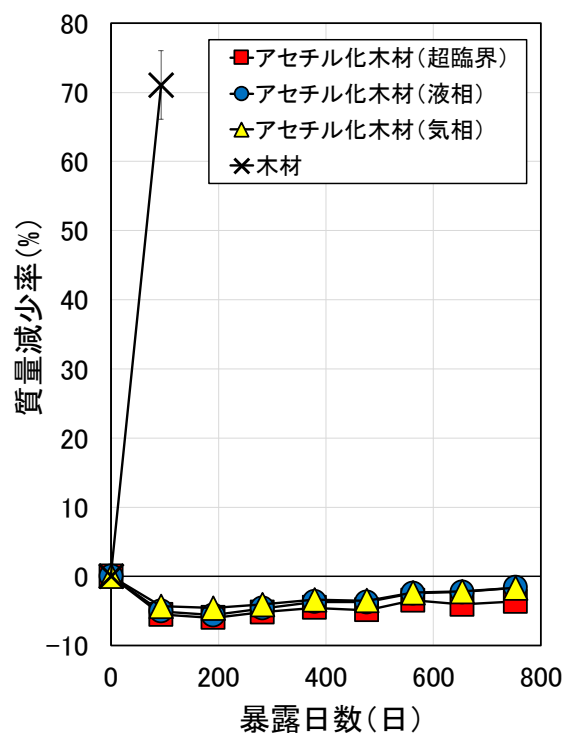


図2 海中暴露試験によるアセチル化木材と木材試験体の質量減少率の変化（松永ら2022を改変）

「木の酒」の安全性試験で問題なし、実生産規模の製造プロセスも確立

森林資源化学研究領域：大塚 祐一郎、野尻 昌信、鈴木 悠造、荒木 拓馬、楠本 倫久、橋田 光、
森川 卓哉、松井 直之

複合材料研究領域：松原 恵理

関西支所：山下 直子、中尾 勝洋、小笠 真由美、北川 涼

木

林総合研究所は、木材を原料に香り豊かな「木の酒」を造る世界初の技術を開発しました。この「木の酒」の事業展開を実現するために、スギ、シラカンバ、ミズナラ、クロモジの木材から試験製造した「木の酒」について基本的な安全性試験を行い、問題となるデータはないことを確認しました。さらに実生産規模で製造する際の課題であった木材スラリー（細かい木粉と水が混ざりクリーム状になったもの）の移送方法と殺菌方法を確立しました。これにより実生産規模で丸太から「木の酒」を製造するための基本的な工程を確立しました。

「木の酒」の事業化に向けた課題

森林総合研究所は世界初の「木の酒」の製造技術を開発し、基本的な製造プロセスを実験室レベルで確立して、樹種によって異なる風味を持つ香り豊かな「木の酒」が製造できることを明らかにしていました。しかし「木の酒」の事業化を進めるためには、食経験のない木材を原料としたお酒であることから、安全性の検証や、実生産規模にスケールアップした場合のプロセスの構築などの課題に取り組む必要がありました。そこで「木の酒」製造技術の社会実装を促進するために、「木の酒」の安全性試験と実生産規模に適用可能なプロセス設計を行ってきました。

「木の酒」の安全性試験

スギ、シラカンバ、ミズナラ、クロモジから試験製造した「木の酒」について、基本的な安全性試験を行いました（図1）。まず化学分析によって、農薬、重金属、カビ毒、有機溶剤およびその他の有害物の含有量を調べました。その結果、これら4樹種の「木の酒」において、調査した全ての項目で通常の飲用では（仮にアルコール度数30%の「木の酒」10L以上飲んだとしても）許容摂取量以下であることが明らかとなりました。上記に加えて、遺伝子突然変異誘発性試験として復帰突然変異試験（Ames試験）および哺乳類の培養細胞を用いた染色体異常試験を行いました。その結果、どちらの試験においても全試料で陰性でした。さらにラットを用いた急性経口毒性試験（単回投与）と反復経口毒性試験（28日間連続投与）を行い、こちらも全試料において異常となるデータは認められませんでした。

以上の結果から、今回行った基本的な安全性試験では、スギ、シラカンバ、ミズナラ、クロモジの4樹種から製造した「木の酒」においては問題となるデータはないことが確認できました。

実生産規模に適用可能な「木の酒」製造プロセス

「木の酒」の基本的な製造プロセスは実験室レベルの小スケールでは確立していました。しかし実生産規模にスケールアップした場合の高粘度の木材スラリーの連続的な移送方

法と殺菌処理の工程については、実験室レベルでは検討できなかったことから、新たなプロセスを検討しました。その結果、食品加工の現場で一般的に用いられる装置から選択して検討したところ、高粘度木材スラリーの移送方法については「ねじポンプ」によって問題なく移送できること、また木材スラリーの連続殺菌処理には蒸気を用いた直接加熱殺菌機が最適であることを明らかにしました。これにより、実生産規模で丸太から「木の酒」を製造するための基本的な工程を確立することができました。この成果をもとに、森林総合研究所では丸太から「木の酒」を製造するパイロットプラントスケールの製造実験施設を所内に整備しました。令和5年度中には本実験施設を本格稼働し、事業化を検討する民間会社・団体からの見学や研修を受け入れていく予定です。

研究資金

・生研支援センターのイノベーション創出強化研究推進事業（JPJ007097）「木の酒の社会実装に向けた製造プロセスの開発と山村地域での事業条件の検討」

参考文献・サイト

大塚祐一郎 木そのものを発酵して造る香り豊かな新しいお酒ー山村地域の振興、国産材需要拡大への貢献を目指してー. 産学官連携ジャーナル, 7: 13-15 2022.07. https://www.jst.go.jp/tt/journal/journal_contents/2022/07/2207-05_article.html

専門用語

遺伝子突然変異誘発性試験：被験物質（この場合は「木の酒」）に含まれる物質によって、細胞のDNAや染色体の構造および量の変化が起こるかを確かめる試験です。一般的には、DNAへの直接的な影響を確認する復帰突然変異試験（Ames試験）と染色体の構造と量を確認する染色体異常試験の組み合わせで行われます。

急性経口毒性試験：1回もしくは短期間に複数回動物に投与して被験物質の毒性についての特性を調べる試験です。

反復経口毒性試験：被験物質を一定期間の間に複数回動物に投与して所定期間の症状観察後に、毒性についての特性を調べる試験です。



化学分析

- ・農薬 ・重金属
- ・カビ毒 ・有機溶剤
- ・その他有害物

変異原性試験

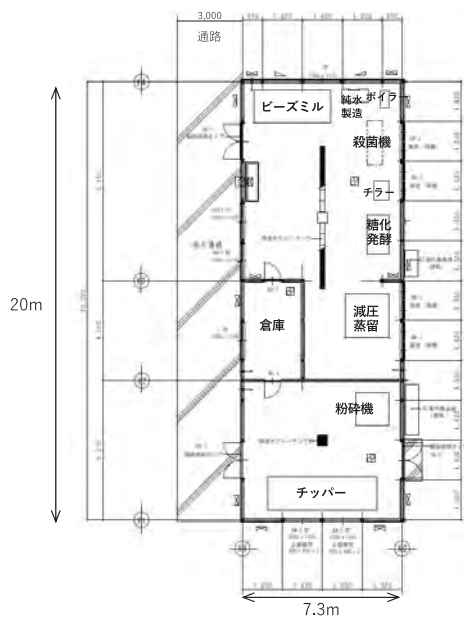
- ・Ames試験
- ・染色体異常試験

経口投与毒性試験

- ・急性経口毒性
- ・反復経口毒性

基本的な安全性試験を実施 → 全ての項目において異常値なし

図1 スギ、シラカンバ、ミズナラ、クロモジから試験製造した「木の酒」の安全性試験



- ・同一施設に「木の酒」の製造に必要な全ての機器を集約
- ・製造効率の大幅な向上で研究を促進
- ・丸太から「木の蒸留酒」が出来上がる全プロセスを可視化
- ・「木の酒」の事業展開を検討する企業・団体の見学や研修にも使用



「木の酒」の社会実装を促進

図2 丸太から「木の蒸留酒」まで一貫製造できる製造施設の整備



燃料用木質バイオマスの効率的な生産に向けた 林地残材の最適な破碎条件

木材加工・特性研究領域：藤本 清彦、伊神 裕司
研究コーディネーター：陣川 雅樹

北海道支所：佐々木 達也

脱炭素社会の実現に向け、再生エネルギーの1つとして木質バイオマスのエネルギー利用が進められていますが、木質バイオマスは安定供給に難があることや発電コストが高いことなどの課題を抱えています。そこで、現在あまり使われていない端材や枝条などの林地残材に着目し、それらを効率的に破碎する条件を明らかにしました。林地残材の種類別では枝条よりも端材で、破碎機の種類別では現地移動型よりも工場定置型で、消費エネルギーが低く、破碎生産性が高くなることが分かりました。破碎コストを試算したところ、破碎コストは破碎条件によって大きく異なっており、生産性の高い条件で低コストとなる傾向がありました。

■ 林地残材の破碎条件

脱炭素社会の実現に向け、再生エネルギーの1つとして木質バイオマスのエネルギー利用が進められています。しかし、木質バイオマスは安定供給に難があること、発電コストが高いことなどの課題を抱えており、燃料である木質バイオマスの安定的な供給と発電コストの削減が求められています。

そこで、2019年のデータで全国の森林で発生するが利用率が29%と低位にとどまっている林地残材に着目し、それらを効率的に破碎する条件を検討しました。林地残材として、スギの根元の切り落とし部分（以下、端材）、枝葉およびこずえ（以下、枝条）、枝条と端材の混合物（混合）の3種類を使用しました。使用した端材および枝条を図1に示します。破碎に使用する破碎機は、工場定置型、現地移動型の2種類（図2）を使用しました。破碎機には破碎物の大きさを調整するための穴が多数開いたスクリーンを付けています。使用されるチップのサイズは現場によって異なるため、スクリーンの穴の直径が異なる条件（30、50、70 mm）で破碎し、破碎時の消費エネルギー、生産性およびコストを求めました。

■ 破碎エネルギーと生産性

破碎時の消費エネルギーは枝条よりも端材で、現地移動型よりも工場定置型で小さくなることが分かりました。（図3）。破碎時の生産性は枝条では現地移動型が、端材では工場定置型が高くなりました（図4）。工場定置型で枝条を破碎する場合においても、端材を混合することで生産性を上げられることを明らかにしました。また、スクリーンの丸穴の直径（以下、スクリーン径）が大きいほど消費エネルギーが小さく、生産性が高くなることが明らかになりました。ただし、スクリーン径が異なると得られる破碎生成物のサイズが変わるため、使用する目的にサイズが適しているかなどに留意する必要があります。

■ 破碎コスト

破碎生成物である木材チップの全乾重量あたりの破碎コ

ストを算出しました（表1）。破碎機の減価償却費や管理費などの固定費、破碎機の保守、修理費、電気料金、燃料費、刃物費などの変動費、作業員の人件費、1時間あたりの生産量から計算しています。破碎コストは破碎機や林地残材の種類、スクリーン径によって大きく異なっていました。

スクリーン丸穴径別に比較すると、スクリーン径30 mmでは端材、枝条ともに工場定置型が現地移動型よりも、また、端材が枝条よりも低コストであることが分かりました。スクリーン径50 mmおよび70 mmでは、現地移動型が工場定置型よりも低コストとなりました。このとき、工場定置型では端材の方が枝条よりも低コストでしたが、現地移動型では枝条のほうが端材よりも低コストでした。破碎コストは、使用する破碎機の価格や破碎条件で異なるため、あくまでも1つの試算例ですが、スクリーン径30 mmで端材を破碎したときを除いて現地移動型のほうが工場定置型よりも低コストで破碎できることが分かりました。なお、試算には、原料費、輸送費、発電コスト等は含まれていません。

研究資金

・本研究所の交付金プロジェクト「森林バイオマスの強度収穫と林地保続性の共存」

参考文献・サイト

藤本清彦・佐々木達也・伊神裕司・陣川雅樹（2023）林地残材の破碎エネルギー、コストおよび破碎物の粒径分布に及ぼす破碎機種類およびスクリーン径の影響．木材工業，78（4），140～145．

専門用語

林地残材：林地残材とは樹木を伐採したときに発生する建築用材などに利用できない部分で、枝・葉・根元の切り落とし部分などが含まれます。通常、未利用のまま林地に放置されています。



図1 破碎原料の端材(左)と枝条(右)



図2 使用した工場定置型破碎機(左)と現地移動型破碎機(右)

工場定置型破碎機は工場で使用される破碎機でモーターによって破碎ローターを駆動して破碎します。現地移動型破碎機は森林内の土場などに運搬して使用する破碎機でエンジンによって破碎ローターを駆動します。

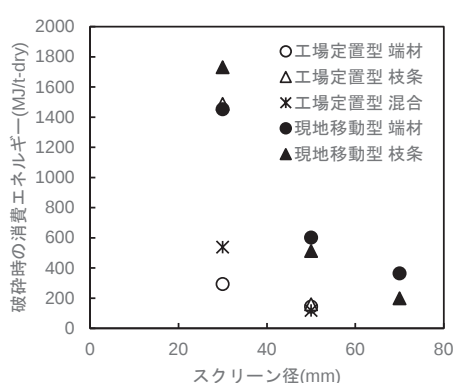


図3 破碎時の条件と消費エネルギーの関係

全乾重量1トンの林地残材を破碎するために消費したエネルギー量。工場定置型破碎機は現地移動型破碎機に比べて消費エネルギーが少ない。また、スクリーン径が大きくなると消費エネルギーが少なくなります。

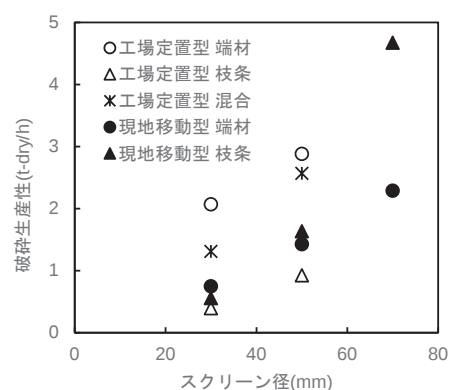


図4 破碎条件と破碎生産性の関係

1時間あたりに生産される破碎生成物全乾重量。端材では工場定置型破碎機で破碎生産性が高くなりますが、枝条では現地移動型破碎機で破碎生産性が高くなります。また、スクリーン径が大きくなると破碎生産性が高くなります。

表1 林地残材1トンの破碎にかかる費用

破碎機の種類	(単位: 円/t)				
	工場定置型		現地移動型		
スクリーン径 (mm)	30	50	30	50	70
林地残材の種類					
端材	14,889	10,441	23,344	7,643	4,629
枝条	57,918	24,641	39,265	6,350	2,173
混合	21,836	10,056			



トドマツの優良個体選抜は植栽後15年程度からが最適

林木育種センター北海道育種場：花岡 創、加藤 一隆

林木の品種開発では、伐期までの成長量を重視するため、長期間の成長量評価が望まれます。しかし、長期的な評価にかかる労力は大きく、また、成果の普及まで長期間を要することが課題です。本研究では、北海道の主要造林樹種であるトドマツを対象に、標準伐期(40年)よりも早い時期に優良個体を選抜した場合に、40年次の樹高をどの程度改良し得るかを推定するとともに、時間効率性の観点から最適な早期選抜時期を推定し、植栽から10~15年頃に選抜を行うことが最適であることを示しました。本成果は、今後実施される第3世代精英樹の選抜に活かすことで、次世代品種の早期普及に役立ちます。

■ 早期選抜戦略の必要性

日本における林木育種では、優れた成長を示す品種の開発を目標の一つとしています。北海道における主要造林樹種であるトドマツの場合は、民有林における標準伐期が40年とされており、成長量を評価するにあたっては、40年以上の評価を行うことが理想的です。しかし、評価に40年以上の時間をかけるということは、優良な個体を選抜・普及するためには、さらに長い年月を要することを意味します。そこで、林木育種の成果を、より短期間で普及することを目標に、伐期よりも早い段階で優良な個体を選抜する「早期選抜」の実現可能性について検討しました。

■ トドマツの早期選抜戦略の構築

トドマツで早期選抜の可否を検討するためには、試験地に植栽された複数家系について、(1)樹高成長に関する遺伝的能力の評価値(育種価)を樹齢別に算出し、それらの評価値に関して樹齢間に相関があること(幼老相関)を確認することが必要です。また、(2)それぞれの樹齢で選抜した場合に、選抜木から期待される次世代における性能向上の程度(改良効果)を推定した上で、選抜から普及までにかかる時間も考慮して求めた「年あたりの改良効果の指標」(値が大きいほど改良効果が大きい)を算出し、それを最大化し得る選抜時期を検討することが必要です。本研究では、2つの試験地に植栽した家系の遺伝的能力を、植栽から5、10、15、20、30、40年次の調査データを基に算出しました。なお、15年次の調査については、一方の試験地のみで実施されました。

まず、幼老相関を確認したところ、観察した樹齢が離れるほど、相関は低下する傾向にありましたが、樹齢差が25年までであれば、概ね0.5以上の相関があることが分かりました(図1)。その結果として、「年あたりの改良効果の指標」については、10年または15年次の選抜で最大化されることが分かりました(図2)。つまり、早期選抜を行うならば、10~15年程度が最も適していると判断されました。

■ 育種成果の普及を25年短縮することが可能

現在、トドマツの育種は第2世代精英樹を選抜し、これから普及を図る段階です。今後は第3世代精英樹の開発を進め

ることになりますが、その際には、必ずしも40年以上(写真1)の評価を実施しなくとも、植栽から10~15年程度(写真2)の評価でも選抜が可能と考えられます。しかし、10年程度ではまだ幹の直径が小さく、材質や幹の通直性の評価にはやや早いと予想されます。それゆえ、実際には15年程度での選抜が妥当と考えられます。植栽から15年程度の評価であっても、育種成果の普及を25年程度短縮することができると期待されます。

研究資金

・本研究の実施課題「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

Hanaoka S. and Kato K. (2022) Estimation of optimal timing of early selection based on time trends of genetic parameters in *Abies sachalinensis*. *Silvae genetica*, 71: 31-38.

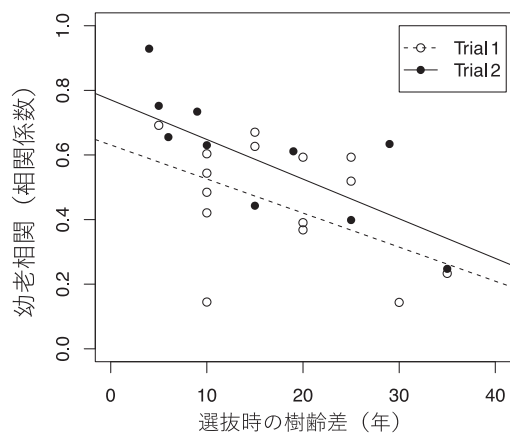


図1 2つの試験地 (Trial 1, 2) における樹齢差と幼老相関の関係

選抜する樹齢差が大きくなるほど、幼老相関が低下する傾向にありました。(Hanaoka and Kato (2022) の Fig. 2 を改変)

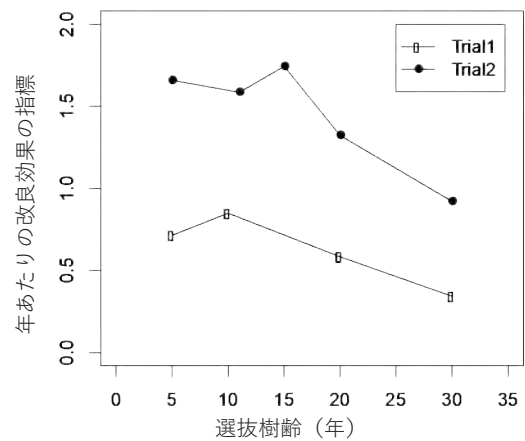


図2 2つの試験地 (Trial 1, 2) における年あたりの改良効果の指標の推移

10年または15年次の選抜で指標が最大となる傾向にありました。(Hanaoka and Kato (2022) の Fig. 4 を改変)



写真1 植栽から50年次に撮影した試験地の様子

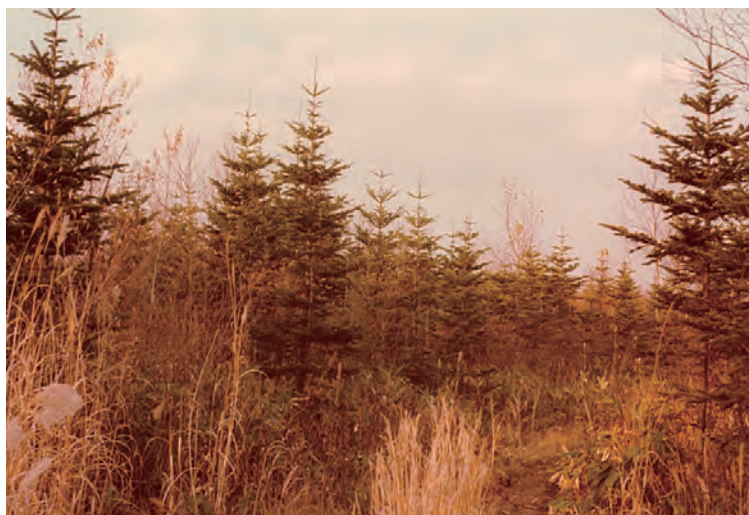


写真2 植栽から15年次に撮影した試験地の様子



マツ材線虫病に対する抵抗性の遺伝領域解明

林木育種センター：平尾 知士

林木育種センター九州育種場：松永 孝治

(公財)かずさDNA研究所：白澤 健太

私たちは、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。これまでに抵抗性品種における抵抗性の遺伝領域に関する情報は非常に限定的でした。しかし、今回、クロマツの抵抗性品種の中でも抵抗性が特に強い品種「波方ク-73号」において、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。この成果をもとに、今後さらに研究を進めることで、抵抗性メカニズムの解明やより強い抵抗性品種の開発につながります。

■ より強い抵抗性品種を開発するために

マツ材線虫病によるマツ枯れは、依然として我が国最大級の森林病虫害です。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。2023年3月末までにクロマツで276品種、アカマツで314品種が開発されています。今後、ゲノム情報も活用したより強い抵抗性品種の開発を進めていくためには、クロマツのゲノム上にあるより多くの遺伝的な変異を探索し、抵抗性形質と関連する遺伝領域の数や位置を明らかにしていくことが、とても重要です。今回、大規模なゲノム分析技術を適用することで、クロマツの抵抗性品種の中でも抵抗性が特に強い品種「波方ク-73号」の抵抗性遺伝領域を明らかにしました。

■ 抵抗性遺伝領域の解明に迫る

抵抗性に関わる遺伝領域を特定するためにはゲノム中の遺伝的な変異を検出し、表現形質（抵抗性形質）との関連性を調べていく必要があります。しかし、クロマツのゲノムサイズは240億塩基対（イネのゲノムサイズの約62倍の大きさ）ととても巨大であるため、その遺伝的な変異を網羅的に収集することが困難でした。今回、次世代シーケンサーという先進的なゲノム分析技術を適用することで、「波方ク-73号」の連鎖地図（遺伝子地図）を作成し、さら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1）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。分析の結果、第3連鎖群（染色体）上に抵抗性に関わる遺伝領域が存在することが分かりました（図2）。今回の研究の成果（Hirao et al. 2022）と先行研究の成果（Hirao et al. 2019）を比較した結果、「波方ク-73号」は抵抗性品種の中でも抵抗性が比較的弱い品種「田辺ク-54号」と同じ領域に抵抗性の遺伝領域を持っていることが分かりました。なぜ抵抗性の遺伝領域が強い品種と弱い品種で同じなのか？という遺伝的なメカニズムについては、依然として明確ではありません。しかし、今後、研究をさらに進め、この遺伝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抵抗性の遺伝メカニズム、さらにDNAマーカーを使った抵抗性に関する

ゲノム育種の実現につながります。

■ 多様でより強い品種目指し遺伝領域探索へ

多様かつより強い抵抗性品種を今後さらに作出していくためには、これまでに開発された抵抗性品種の抵抗性遺伝領域を一つ一つ明らかにしていく必要があります。今回適用した先進的なゲノム分析技術を駆使し、多数の抵抗性品種を対象として抵抗性遺伝領域の探索を進めていく予定です。

研究資金

- ・林野庁委託事業「マツノザイセンチュウ抵抗性品種開発技術高度化事業」
- ・科研費 (JP16K07792)「次世代シーケンサーを用いたクロマツにおけるマツノザイセンチュウ感受性遺伝子の探索」
- ・本研究所の実施課題「高速育種のためのDNAマーカー等の開発」

参考文献・サイト

- Hirao, T. et al. (2019) 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 Biol. 19 (1): 424.
- Hirao, T. et al. (2022) Quantitative Trait Loci Analysis Based on High-Density Mapping of Single-Nucleotide Polymorphisms by Genotyping-by-Sequencing Against Pine Wilt Disease in Japanese Black Pine (*Pinus thunbergii*) Front. Plant Sci. 13:850660.

専門用語

ゲノム：DNAの文字列に表される遺伝情報です。

次世代シーケンサー：数千から数百万ものDNAの塩基配列を同時に決定できる先進的な技術です。

ゲノム育種：ゲノムを解読し、有用な遺伝形質を持つ個体や系統を選抜する育種法のことです。



図1 抵抗性形質の遺伝性評価

波方ク-73号の自殖交配(雌親と雄親が同一の個体で人工交配したもの)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、10週後の実生個体の様子。苗木によって、枯死個体(赤みを帯びた個体)と抵抗性個体(緑が残る個体)の違いがみられます。

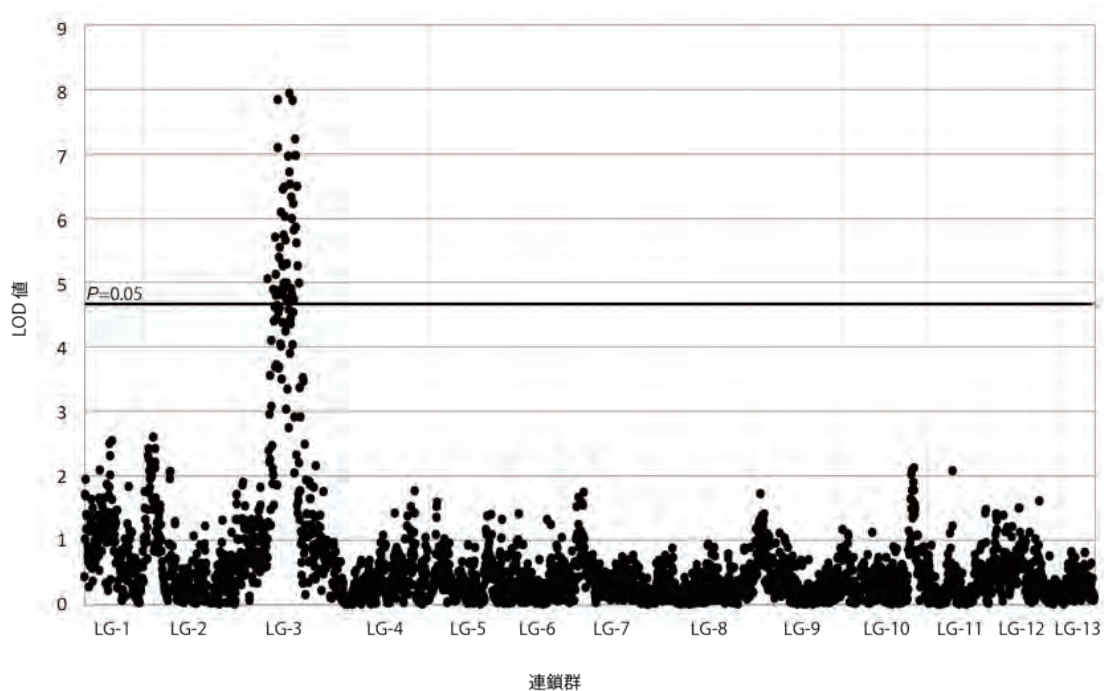


図2 マツ材線虫病抵抗性形質に関わる遺伝領域の検出

形質情報と遺伝変異の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(LG-3)に抵抗性の領域が検出されました。LOD値は統計的なもののさしの一つで、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。(Hirao et al. 2022)



スギにおける高容積密度系統の早期選抜に向けた試み

林木育種センター：安田 悠子、高橋 誠

林木育種センター東北育種場：井城 泰一、三嶋 賢太郎

林木育種センター関西育種場：高島 有哉

静岡県立農林環境専門職大学：平岡 裕一郎

木 材品質の重要指標「容積密度」は、樹木の肥大成長に伴って形成される年輪と関係しています。スギの容積密度の改良を効率的に進めるため、年輪構造の中でどの形質が大きく寄与しているのか、その寄与度が樹齢とともにどのように変化しているのかを調べました。各形質データを収集し、年輪密度との相関係数や形質間の遺伝相関係数の年次変動を解析しました。その結果、「早材密度」と「晩材率」が容積密度に大きく寄与していること、10年生程度の形質値を用いることで将来の容積密度を早期に評価できることが明らかになりました。

■ 高容積密度系統の選抜の重要性

容積密度は重要な育種対象形質の一つです。今日においては、地球温暖化対策における人工林の二酸化炭素吸収源としての機能を高める観点からも、容積密度は材積に次いで重要な形質となっているほか、木材として利用する際の材の強度を担保する観点からも重要です。このような林木育種へのニーズに迅速に対応することを目指して、実際に現れた性質（表現型）に対する効率的な評価技術の開発のための取組の一つとして、容積密度に関連する年輪構造や細胞レベルの構造を評価するための組織解剖学的アプローチによる表現型測定手法の高度化等の技術開発を進めています。

■ スギの容積密度に影響を与える年輪構造の探索

木材の横断面の構造を観察すると、肥大成長を毎年行った結果として年輪が形成されています。容積密度は、年輪幅や晩材率、早材密度といった年輪構造が複合的に関与した形質であることから、容積密度の改良を効率的に進めるためには、どの年輪構造が容積密度への寄与が大きいのか、それらの年輪構造と容積密度への寄与は樹齢とともにどのように変化しているのか、といったことについて明らかにする必要があります。18年生のスギ第一世代精英樹の人工交配家系24家系342個体を用いて、軟X線デンシトメトリ法により得られる7つの年輪構造データ（年輪密度、年輪幅、早材幅、晩材幅、晩材率、早材密度、晩材密度）（図1）を収集し、各形質と年輪密度との相関係数、各形質間の遺伝相関係数の年次変動を解析した結果、早材密度と晩材率がスギの容積密度に寄与する主要な因子であることを明らかにしました（図2）。また、17年次の林齢を特性評価年次として年次変動（幼老相関）を解析した結果、スギでは10年生程度の早材密度と晩材率の形質値を用いることで将来の容積密度を早期に評価できる可能性があることが明らかになりました。

■ 細胞レベル表現型データ一括取得へ技術開発

また、現在、年輪構造を構成する形質をより詳細に評価するため、細胞の壁厚や細胞内腔径等の細胞レベルの表現型

データを大量に取得する技術の開発を試みています。具体的には、細胞観察に由来から使われている光学顕微鏡画像を取得する際に、年輪単位の横断面の画像を取得して細胞を観察できる長切片を作成する技術と、得られる画像から細胞レベルの表現型データを一括して取得する技術を組み合わせた、新たな画像解析手法の開発を進めています（図3）。この技術を確立して、細胞レベルの表現型データの活用が可能になることによって容積密度のゲノム予測モデルの精度を高め、林木育種の高速化に寄与することを目指します。

専門用語

人工交配：交配を行う際に人為的に特定の個体の花粉を雌花に受粉させることです。

早材・晩材：1年輪内で年輪形成前半に形成された部分を早材、後半に形成された部分を晩材といい、早材密度は早材部分の単位体積あたりの質量、晩材率は年輪幅に占める晩材幅の割合を指します。

軟X線デンシトメトリ法：軟X線（約0.1～50 nmの波長のX線）を対象物質に照射して画像を取得し、軟X線の透過量に応じて生じた画像上の濃淡から対象物質の部位ごとの密度を測定する手法です。

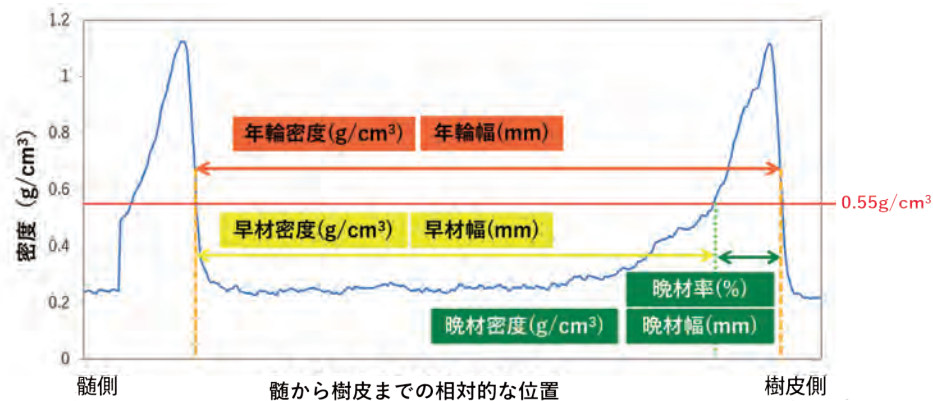


図1 軟X線デントメトリ法で得られる年輪構造データ

左側が幹の中心側、右側が樹皮側、青い線が密度の実測値です。両矢印の各範囲における密度や長さをもとに年輪構造データを取得します。赤い横線は早材と晩材の境界値で、これを上回る（密度が高い）青線範囲が晩材、下回る（密度が低い）青線範囲が早材です。

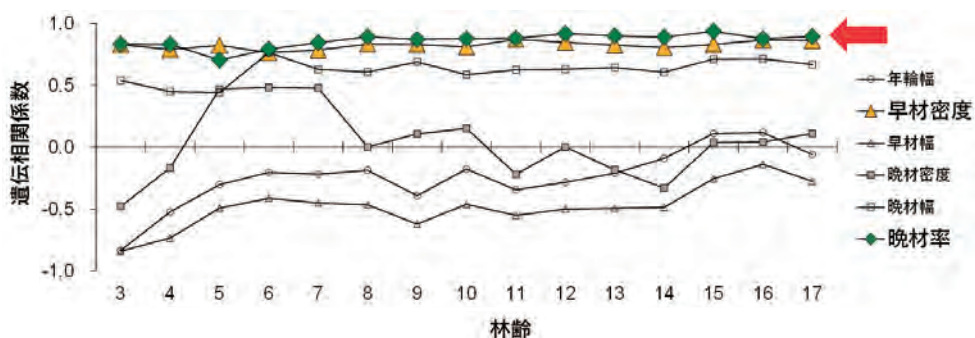


図2 平均年輪密度と他の年輪データとの遺伝相関係数の年次変動

緑色が平均年輪密度と晩材率との遺伝相関係数、黄色が平均年輪密度と早材密度との遺伝相関係数。係数が1.0に近いほど、高容積密度への寄与が大きいことを意味します。他の形質も林齢によって寄与が大きい場合がありますが、早材密度と晩材率はどの樹齢段階においても同様に寄与が大きいことが分かります。

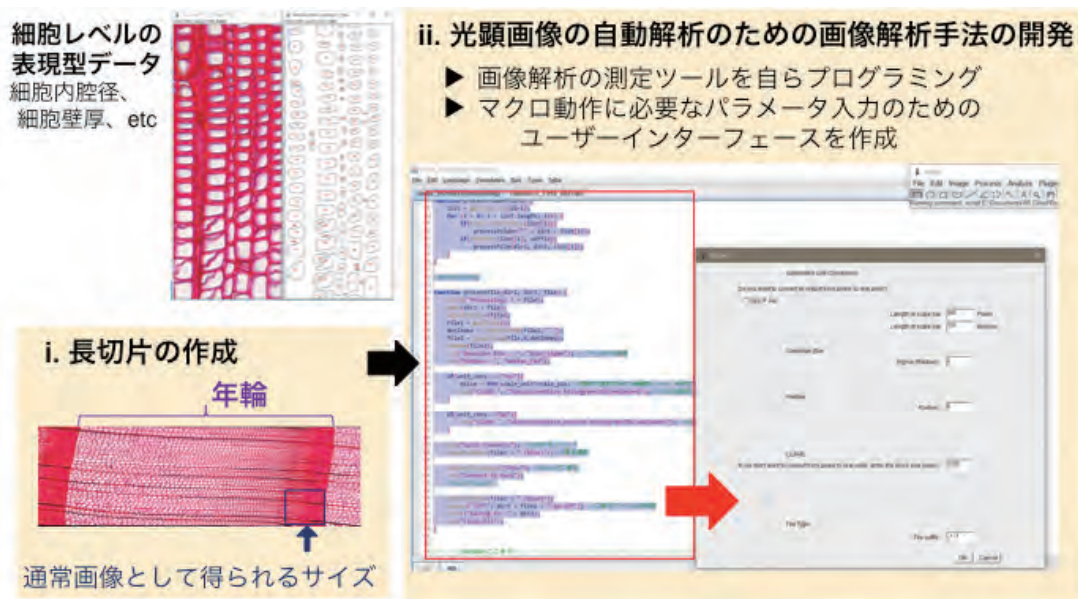


図3 細胞レベルの表現型データの大量取得に向けた技術開発フロー

細胞内腔径や細胞壁厚などの細胞レベルの表現型データを (i) 従来よりも広範囲の長切片画像を取得できるようにしました。得られた長切片画像から細胞壁厚や細胞内腔径を自動計測するため、(ii) 画像解析ソフト内で動作する測定ツール（マクロ）をプログラミングしました。マクロの動作のために必要なパラメータを入力するためのユーザーインターフェースも作成しました。このマクロを動作させることにより、自動的に測定を行い、その結果が表示されます。



海外育種技術協力に向けた取組

—モンゴルから院生ら招へい研修、ケニア・ベトナムに職員派遣し支援—

林木育種センター：稲本 龍生、千吉良 治、高濱 美樹、大宮 泰徳、千葉 信隆、稲永 良、
飯野 貴美子、飯塚 樹、高橋 誠、田村 明、永野 聡一郎、高橋 優介、
山田 浩雄、武津 英太郎、稲永 路子

林木育種センター北海道育種場：花岡 創

林木育種センター関西育種場：宮下 久哉

気 候変動対策等に役立つ林木育種技術の開発を行う該当国の人材の能力強化のため、大学生らの招へいと専門家の派遣等を行いました。大学生らの招へいについては、海外の若者に日本の科学技術を体験してもらう科学技術振興機構（JST）の事業によりモンゴル科学技術大学の大学院生・学生等を招へいし、林木育種と林木遺伝資源保全に関する技術研修を実施しました。また、ケニアの郷土樹種で乾燥に強いメリアとアカシアの育種を進めるためケニア JICA 技術協力プロジェクトの枠組みで職員を専門家として現地に派遣しました。更に、民間企業との共同研究として、アカシア種間雑種クローンの開発に取り組むためベトナムに専門家を派遣しました。

世界の森林減少や気候変動による影響への懸念は近年さらに深刻化しつつあります。このような中、気候変動の影響を受けている国々において、成長が早い、乾燥に強い等の特性を持つ個体に改良できる林木育種への関心が高まっており、林木育種センターに対する技術協力への要請が増えてきています。このため、このような国々からの要請に応じて、大学生らの招へいや専門家の派遣、共同研究等を行い、国際貢献に努めています。

■ モンゴルから院生ら招へい

海外の若者に日本の科学技術を体験してもらう、JSTの事業を通じて、モンゴル科学技術大学において主に森林を専攻する大学院生・大学生や引率者の計6名を招へいし、林木育種と遺伝資源保全に関する技術研修(写真1)を実施しました。また、学生を引率していた同大学の研究者と今後の共同研究や技術協力について意見交換を行いました。モンゴルは、気候変動対策として2030年までに10億本の植林を行い、森林面積を9%に増加させる国家目標を2021年に発表し、国を挙げて気候変動対策に取り組んでいます。今回の交流をきっかけとして、新たなパートナーシップ形成に向けて、同大学と共同研究の実施等の可能性について協議を行いました。このようなパートナーシップを通じてモンゴルにおける気候変動対策に貢献しうる今後の活動を模索していきます。

■ 専門家派遣

ケニアでは、郷土樹種で乾燥地でも丈夫に育ち、家具材や薪炭としても利用できるメリアとアカシアの育種を進めるため、2012年以降、ケニア各地から選抜した優良個体を第1世代として採種園を造成し、そこから得られた種子を育苗・植栽した試験林において乾燥耐性を評価するとともに、材積、通直性（幹の曲がりのないこと）、健全性、着花・着果性の形

質に着目して、第2世代の優良個体400個体を選抜してきました。今年度は3回、のべ7人の職員を専門家として現地に派遣し、メリア第2世代採種園の造成(写真2、3)、クローン増殖技術の開発、育種データ管理の改善、民間採種園の支援など多くの課題について、ケニア森林研究所（KEFRI）の研究者・技術者とともに取り組みました。

また、ベトナムにおいて、日系企業と取り組んできたアカシア種間雑種クローン開発のとりまとめを行いました。アカシア種間雑種とは、パルプチップ生産のため東南アジアで植林されてきたものの近年病虫害で生産性が低下しているアカシア・マンガウム等とアカシア・アウリカリフォルミス等を交配して得た種間雑種群のことを言います。これまでの10年間の取組のなかで、人工交配で得られた種間雑種を用いた試験地を造成して、成長が早く、病虫害にも強い優良な雑種個体を選抜し(写真4)、それらをクローン増殖して造成した試験地での検定(写真5)を進めてきました。その結果、今年度は新たに4クローンを選定しました。なお、昨年度選抜した1クローンについては、企業側での採種園の造成が進んでおり(写真6)、来年度以降、さし穂の生産が始まり、ベトナム国内の造林需要に応えられるとともに、パルプ原料等として国外に輸出される見込みとなっています。

研究資金

- ・本研究の実施課題「海外育種情報の収集及び技術指導」
- ・国際協力機構（JICA）業務委託「ケニア共和国 気候変動への適応のための乾燥地耐性育種プロジェクト」、「ケニア共和国 持続的森林管理・景観回復による森林セクター強化及びコミュニティの気候変動レジリエンスプロジェクト」（林木育種コンポーネント）
- ・科学技術振興機構（JST）「さくらサイエンスプログラム」
- ・王子グリーンリソース（株）との共同研究課題「アカシア属人工交配技術の実証試験」

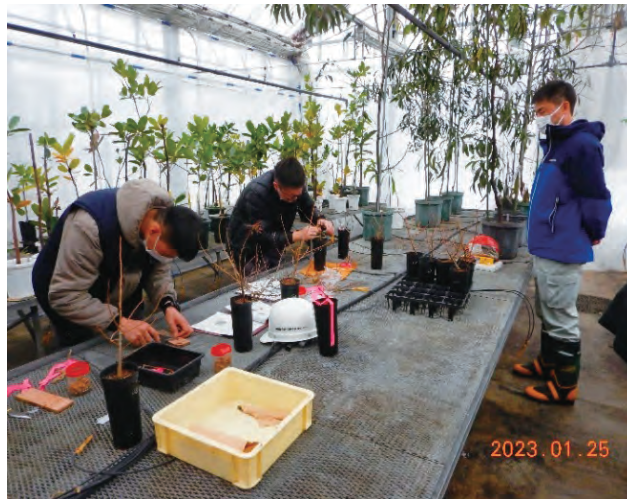


写真1 【さくらサイエンスプログラムによる招へい】カラマツのつぎ木実習



写真2 【ケニアのJICA技術協力プロジェクト】採種園へのメリア苗木の植栽



写真3 【ケニアのJICA技術協力プロジェクト】採種園周囲へのフェンスの設置



写真4 【アカシア属人工交配の実証試験】優良個体の選抜

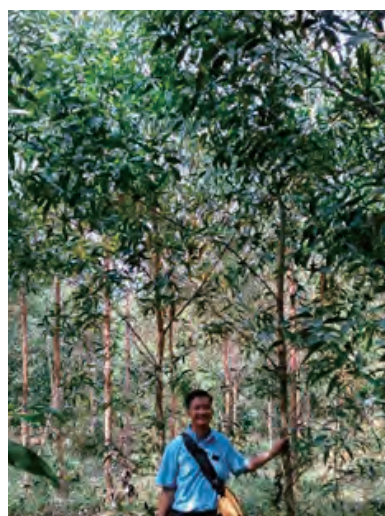


写真5 【アカシア属人工交配の実証試験】選抜した候補木をクローン増殖して検定



写真6 【アカシア属人工交配の実証試験】共同研究で開発した優良候補クローンの採穂園

森林総合研究所
令和5年版 研究成果選集

発 行 日 令和5年6月16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

