

令和元年版

# 研究成果選集

2019



国立研究開発法人 森林研究・整備機構

森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute

## はじめに

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

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

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

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

目次に表題と概要を掲載するとともに、本文では研究成果ごとに見開きで解説しております。できるだけ平易な言葉を用いるように努め、専門用語につきましては解説を付けました。また、地球規模の問題解決への貢献を示すために、国連が定めた17の持続可能な開発目標(SDGs)のどれに該当するかを、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。

2019年7月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 所長 沢田治雄





## contents

### 重点課題ア 森林の多面的機能の高度発揮に向けた森林管理技術の開発

#### ア 森林生態系を活用した治山技術の高度化と防災・減災技術の開発

##### ■ 雪崩の流下を妨げて災害を軽減する森林のはたらき ..... 04

森林には雪崩の流下を妨げて災害を軽減する効果があることを、初めて定量的に示すことができました。本研究の成果は災害軽減効果の高い森林の配置や造成に役立ちます。

##### ■ 間伐時の渓流水の濁りの発生と作業道の影響 ..... 06

列状間伐が行われたスギ人工林を流れる渓流水で濁りの発生について調べた結果、作業道の影響と推定される渓流水の濁りが認められました。森林施業の際には作業道の影響に配慮する必要性が明らかになりました。

##### ■ 森林火災の発生危険日数がわかる地図を作りました。 ..... 08

太陽エネルギー量と降水量から判定した森林火災発生危険日数の地図を作りました。危険日数は、新植地では林齢 20 年以上の森林と比べ 7 倍程度、危険日数の多い地域では少ない地域と比べ最大で 3 倍程度になることがわかりました。

##### ■ 野生山菜を安全に利用するために ..... 10

福島第一原発事故後の 2012 年から 2016 年までの、野生山菜 19 種の放射性セシウム濃度の経年変化の傾向を明らかにしました。

#### イ 気候変動の影響評価技術の高度化と適応・緩和技術の開発

##### ■ 永久凍土の凹凸地形面の形成過程を年輪から復元し、温暖化影響を予測 ..... 12

有機物が分厚く堆積した凹凸地形面を持つ永久凍土への温暖化の影響を解明するため、凹凸の形成過程を年輪から復元しました。温暖化は短期的には凹凸の形成を加速し、長期的には崩壊を招くことを発見しました。

##### ■ アマゾン熱帯林で持続的な択伐施業の可能性を検証する ..... 14

中央アマゾンの熱帯林でインパクトを最小限に抑える択伐施業を行うと、残された樹木が成長することによって地上部バイオマスは約 14 年で回復するため、森林の炭素蓄積量を維持しながら管理できることがわかりました。

#### ウ 生物多様性の保全等に配慮した森林管理技術の開発

##### ■ 世界自然遺産候補の奄美とやんばるの森で、 生物多様性の保全と森林利用の調和をはかる ..... 16

国内屈指の生物多様性ホットスポットである奄美大島とやんばるの森で、地域を象徴する希少種の生態を明らかにするとともに、生物多様性の保全と森林利用との調和をはかる森林管理を提案しました。

##### ■ 天敵微生物を使ってシイタケ害虫の被害を防ぐ ..... 18

シイタケの栽培には菌床栽培と原木栽培がありますが、どちらの栽培方法でも害虫が発生します。これらの害虫を、化学農薬ではなく、天敵微生物をつかって防除する方法を確立しました。



## 重点課題イ 国産材の安定供給に向けた持続的林業システムの開発

### ア 持続的かつ効率的な森林施業及び林業生産技術の開発

#### ■ トドマツの天然更新を成功に導く秘訣 ..... 20

上木伐採によるトドマツ前生稚樹への障害は、急激な光強度の増大による光障害が原因であることを明らかにしました。トドマツ前生稚樹の天然更新を促進するためには、保残木により光障害を回避することが有効です。

#### ■ 集材作業を無人化する自動走行フォワーダの開発 ..... 22

先山と土場の間の往復走行と、荷おろし作業を自動で行い、スイッチバック走行にも対応した自動走行フォワーダを開発しました。本車両は伐出作業の労働力不足解消だけでなく、作業者の安全性向上にも貢献します。

### イ 多様な森林資源の活用に対応した木材供給システムの開発

#### ■ 木材を活用した共同住宅のリニューアル手法の提案 ..... 24

わが国の共同住宅の多くは 1970～1980 年代に建設されており、老朽化対策が課題となっています。そこで、木造建築と減築を活用して、少ない費用でリニューアルする手法を提案しました。

#### ■ 新たな森林の有効活用に向けた課題と解決策の提示 ..... 26

森林への多様な要求・価値を対立させることなく効果的・持続的に満たすには、新興のスポーツ・レジャー利用側の森林管理への貢献と、森林経営側のリスクを軽減する制度構築が必要となることを明らかにしました。

#### ■ 燃料用丸太の天然乾燥に必要な日数を簡便に推定するツールを開発 ..... 28

燃料用木質チップの原料となる丸太の天然乾燥試験を行い、丸太をチップ化する前に屋外でどのくらいの期間乾燥すればいいのかを把握できるツールを開発しました。

## 重点課題ウ 木材及び木質資源の利用技術の開発

### ア 資源状況及びニーズに対応した木材の利用技術の開発及び高度化

#### ■ 木材の繊維に直交する（横）方向の変形や破壊現象へ影響する因子を探る ..... 30

木材の乾燥や変形加工の制御に不可欠な情報となる繊維に直交する（横）方向の力学的性質への影響因子を評価する手法を確立し、木材中の破壊されやすい部位や変形しやすい条件を組織構造の観点から明らかにしました。

#### ■ 樹種のバリエーション拡大と耐火基準クリアで、国産 CLT の普及を促進 ..... 32

CLT の強度データを国土交通省指定の強度データに反映させるとともに CLT に 2 時間の火災に耐える性能を付与する技術を開発しました。これらの成果は、CLT 建築物の普及と地域材の市場拡大に寄与します。

### イ 未利用木質資源の有用物質への変換及び利用技術の開発

#### ■ 木材の美しさを長持ちさせるセルロースナノファイバー配合塗料の開発 ..... 34

セルロースナノファイバーを混ぜ合わせることで、木材の美しさを長持ちさせる塗料を開発しました。

■ スギ材から製造した新素材「改質リグニン」を用いた自動車の開発 ..... 36

スギ材から製造した新素材「改質リグニン」を用いて優れた性能を持つ繊維強化材を開発し、それをボンネット等の自動車用部材として利用した世界初の自動車の試作に成功しました。

■ 未利用資源「トドマツ樹皮」有用成分の効果的な抽出法 ..... 38

トドマツの樹皮には化粧品や香料等の原料として有用な成分（ $\beta$ -フェランドレン、*cis*-アビエノール）が含まれることを発見し、それらを環境に配慮しながら効率的に抽出する手法を開発しました。

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

### ア 生物機能の解明による森林資源の新たな有効活用技術の高度化

■ 遺伝情報を利用して気候変動による樹木の分布変化を明らかにする ..... 40

日本の森林の重要な構成樹種であるスダジイとモミ属 3 種を対象に、遺伝情報や種の分布情報、気候要因を複合的に解析し、これらの種が過去の気候変動の過程でいかに分布を変えて現在に至ったのかを明らかにしました。

■ 利用可能なシイタケ原木林の判定技術及び樹木への  
放射性セシウム吸収抑制技術の開発 ..... 42

伐倒せずに樹木の放射性セシウム濃度を検査する装置とシイタケ原木林としての利用可否を判定する手法を開発しました。また、樹木への放射性セシウム吸収を抑制する手法を開発しました。

### イ 多様な優良品種等の開発と育種基盤技術の強化

■ カラマツの種子をつけやすくする方法の開発 —カラマツ苗木の安定供給に向けて— ..... 44

カラマツは材に強度があるため近年注目され、造林のための苗木の需要が高まっていますが、慢性的に苗木が不足しています。その原因は種子不足です。そこで、カラマツに種子をつけやすくする方法を明らかにしました。

■ ブナ種子の超低温保存技術の開発 ..... 46

地球温暖化による生育地の著しい縮小が懸念されているブナの種子の超低温（ $-170^{\circ}\text{C}$ ）保存技術確立しました。これにより、従来は困難であったブナ種子の長期保存が可能となりました。

# 雪崩の流下を妨げて災害を軽減する森林のはたらき



森林防災研究領域 竹内 由香里  
名古屋大学 西村 浩一

山地の森林は、雪崩の流下を妨げて災害を軽減するはたらきがあります。この森林の減勢効果については、早くから経験的に知られていましたが、定量的に評価されたことはありません。本研究では、新潟県および岩手県において実際に発生した表層雪崩を対象として、森林の減勢効果を数値モデルで確かめました。これらの雪崩は高速で森林に流入し、広範囲の樹木を倒壊しましたが、森林内で停止しました。数値モデルで森林がない場合を仮定して雪崩の流下をシミュレーションした結果、雪崩は実際より長距離を流下し、森林の減勢効果を初めて定量的に示すことができました。この成果は、災害軽減効果の高い森林の配置を具体的に示すのに貢献できます。

## 成果

### 雪崩災害を軽減する森林のはたらき

山地の森林には雪崩の発生を防ぐ効果とともに、雪崩が発生した場合には流下する雪崩の進行を妨げる減勢効果があることが、早くから経験的に知られていました。しかし、森林の減勢効果に関わるデータを得ることは難しく、森林の効果を定量的に示すことができませんでした。本研究では、実際の雪崩に関するデータを元に森林の減勢効果を定量的に表わすことを目的として、雪崩の運動モデルを用いたシミュレーションを行ないました。

### 妙高山域幕ノ沢と岩手山で発生した雪崩

対象としたのは、2008年2月に新潟県の妙高山域の幕ノ沢および2010～2011年冬期に岩手山で発生した大規模な表層雪崩です。雪崩は森林のない標高の高いところで発生し、下流の森林に高速で流れ込みました。雪崩によってスギ林や亜高山帯林の多数の立木が倒壊しましたが、いずれの雪崩も森林より下流へ行くことはなく、森林内で止まりました。これらの雪崩の到達範囲や立木の直径、本数密度、折損状況などの現地調査により森林の減勢効果の解明につながる貴重なデータが得られました(図1、図2)。

### 雪崩の減勢効果を示した数値シミュレーション

現地調査の結果にもとづき、雪崩の運動モデルを用いて実際の地形上で雪崩の流下を再現し、森林がある場合とない場合の雪崩の速度や流下距離を比較しました。妙高山域の幕ノ沢において森林がないと仮定したシミュレーションを行なった結果、雪崩はスギ林内を流下した実際の雪崩より約200mも

遠くまで流下する結果になりました(図3a)。つまり、幕ノ沢のスギ林は、雪崩を減速させ、流下距離を200 m縮める減勢効果があったといえます。同様に岩手山の雪崩についても森林がないと仮定してシミュレーションを行なった結果、森林内を流下した実際より200 m～600 mも遠くまで流下した可能性が示されました(図3b)。

雪崩の発生を防ぐ森林の効果については、早くから多くの研究がありましたが、流下する雪崩に対しても森林は減勢効果があることを初めて定量的に示すことができました。この手法は、今後、災害軽減効果の高い森林の配置を具体的に示して造成することにも貢献できると考えています。

## 研究資金と課題

本研究の一部は、JSPS科研費 (JP15K01271)「流下する雪崩に対する森林の減勢効果の研究」による成果です。

## 文献

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





図1. 妙高山域幕ノ沢で2008年2月に発生した表層雪崩により倒壊したスギ林の様子

左図の遠方に見えるのは雪崩が発生した沢の源頭部。



図2. 岩手山西斜面で2010～2011年冬期に発生した表層雪崩により倒れて堆積した亜高山帯林の様子

右図の遠方に見えるのが岩手山山頂。

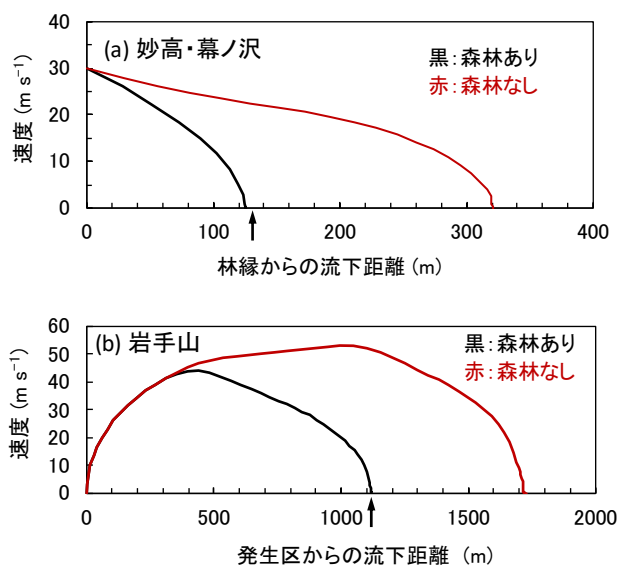


図3. 森林の有無による雪崩の速度変化の比較

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

# 間伐時の渓流水の濁りの発生と作業道の影響



震災復興・放射性物質研究拠点

篠宮 佳樹

立地環境研究領域

小林 政広

企画部 坪山 良夫

森林防災研究領域

澤野 真治

作業道開設をともなう列状間伐が実施された茨城県のスギ人工林の流域で、河川の濁りの原因とされる懸濁物質 (Suspended Sediments; 以降SS) の流出について調査しました。流域面積の17%に対して本数で35%の列状間伐という比較的小面積の施業にも関わらず、間伐実施前に比べて間伐実施中の出水時のSS濃度が上昇することが確認されました。今回観測された濁りの原因として、現地の状況から谷沿いに開設された作業道の影響が推定されました。

## 成果

### 森林施業と渓流水の濁り

渓流水に含まれるSSは河川の濁りの原因とされ、しばしば問題となっています。SSの著しい流出は魚類や藻類など河川や海の水生生物の生育環境を悪化させると考えられています。一方で、林業の活性化のためには、新たな作業道を開設し搬出効率の良い列状間伐を行うなどの森林施業を進めることも重要です。多面的機能に配慮しつつ林業を活性化するためには、森林施業とSS流出の関係を明らかにすることが重要です。

### 作業道開設を伴う列状間伐中の渓流水の濁り

茨城県のスギ人工林で、本数で35%の間伐率の列状間伐が実施され、伐採木の搬出のため5つの谷沿いに作業道が開設されました(図1、図2)。間伐の対象は観測点から上流の面積の17%です。

SS濃度は流量の影響も受けるため、流量も考慮しながら間伐の影響を評価する必要があります。同じ流量範囲(約0.2mm h<sup>-1</sup>以下)で比べると、間伐実施中のSS濃度に間伐実施前より高い値がいくつか出現しているのがわかります(図3)。このように部分的な間伐でも間伐実施中のSS濃度の上昇が認められました。ただし、従来の研究では、伐採地の溪流で観察されるSS濃度の最高値は1,000 mg L<sup>-1</sup>オーダーと言われていますが、今回観測された濁度はそれに比べればはるかに低いものでした。これは、間伐域以外からの流入水による希釈効果が表れていると考えられます。

### 増えたSSはどこからきたのでしょうか?

列状間伐が行われた林地には、表土の露出など目立った攪乱箇所は見当たりませんでした(図2)。これに対して、間伐実施中の作業道は裸地状態にありました(図4)。間伐は林地浸食の防止に効果があると言われる一方で、間伐に伴って作業

道や林道から濁水が流入している事例が報告され、濁水の流出に関しては伐採作業そのものよりも作業道の影響が大きいという指摘もあります。林内の作業道で濁水が発生したとしても、通常は落葉層や土壌層の濁水ろ過機能により浄化されることも期待できますが、今回の作業道の大部分は、浅い谷地形に沿って開設されており、溪流との間に緩衝域がありませんでした。普段は流水が無い谷ですが、降雨の際には作業道に表流水が発生し、濁水が直接溪流に流れ込んだと考えられます(図1、図5)。つまり、SSは林地ではなく、谷地形に作られた作業道の路面から発生したと考えられます。

今回の観測の結果、濁水の発生においては作業道の影響が大きいことが認識されました。森林資源の持続的な利用のため、環境への影響に十分な配慮が必要な流域においては、作業道からの濁水の発生を低減する技術が必要です。今回の研究結果を今後の技術開発に活かしていきたいと考えています。

## 研究資金と課題

本研究は、JSPS科研費(JP22580169)「豪雨・台風に伴う森林域の栄養塩動態に関する実証的研究」による成果の一部です。

## 文献

篠宮佳樹(他)(2018)作業道作設を伴った流域面積の17%で実施された列状間伐中の懸濁物質の流出. 水文・水資源学会誌, 31, 178-187.





図1. 流域の地形図

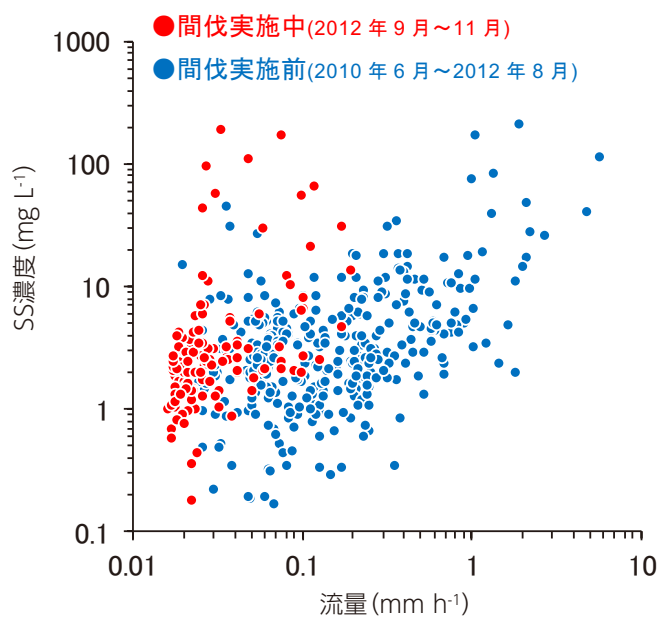


図3. 流量とSS濃度の関係

同じ流量の範囲(概ね $0.2 \text{ mm h}^{-1}$ 以下)において、間伐実施前のSS濃度の最高値( $46 \text{ mg L}^{-1}$ )より高い濃度(2~4倍程度)が間伐実施中に複数回観測されました。

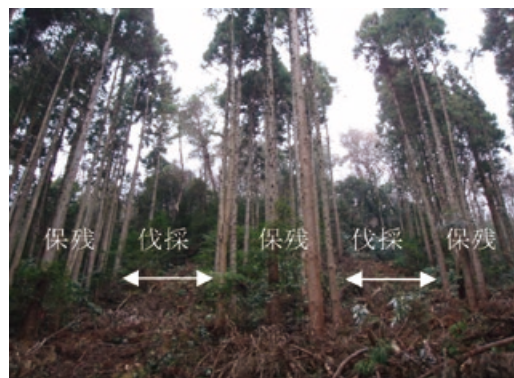


図2. 列状間伐終了直後の林内の様子

間伐された跡の林地斜面は作業で出た枝葉や倒れた林床植生で覆われていて、表土が露出した場所は特に観察されませんでした。



図4. 間伐実施中の作業道の様子

作業道は裸地状態でした。

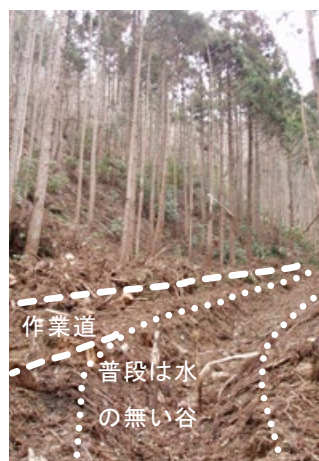


図5. 間伐終了直後の作業道の様子

作業道は谷(普段は水が無い)沿いに開設されました。間伐終了後、残材や枝条が作業道に積み上げられました。

# 森林火災の発生危険日数がわかる地図を作りました。



森林防災研究領域 玉井 幸治・吉藤 奈津子・勝島 隆史

森林災害・被害研究拠点 高橋 正義・後藤 義明

林業は植林から伐採までの数十年の間に災害をうけるリスクがあります。安定した林業経営のためには、森林の生育ステージごとにリスクを見積もることが必要です。そこで3つの生育ステージに相当する森林タイプごとに森林火災の発生危険日数を示した全国地図を作りました。林床可燃物が燃えやすくなる火災発生危険日を判定するために、林床に達する太陽エネルギー量と降水量から林床可燃物に含まれる水分量を推定するモデルを作成し、全国の火災発生危険日数を地図上に表示する技術を開発しました。その結果、火災発生危険日数は、新植地では林齢20年以上の森林と比べ7倍程度、危険日数の多い地域では少ない地域と比べ最大で3倍程度になることがわかりました。

## 成果

### 森林火災発生危険日の判定

森林火災ではまず、林床可燃物が最初に燃え始めます。林床可燃物が20%以上の水分を含んでいると火種があっても燃えないと言われています。したがって、林床可燃物に含まれる水分量が20%よりも少なくなる日を森林火災発生危険日とみなすことが出来ます。そこで林床に届く太陽エネルギー量と降水量から林床可燃物に含まれる水分量の変動を推定するモデルを作成し、林床可燃物に含まれる水分量が、可燃物の乾燥重量の20%よりも少なくなった日を森林火災発生危険日と判定しました。

### 森林火災発生危険日数地図

林床に届く太陽エネルギー量は、森林の状態によって異なります。その量は苗を植えてすぐの新植地では多いのですが、樹木の成長にともなって次第に少なくなります。間伐などによって樹木の密度が低くなった森林では、密度の高い森林よりも多くの太陽エネルギーが林床まで届きます。そこで、林齢20年以上のうっ閉した森林、1haあたりの立木が1,500本以下の低密度林、林齢10年未満の新植地の3タイプについてそれぞれ、森林火災発生危険日を判定しました。この3タイプの森林について、1995～2013年の各年の危険日と判定された年間の日数の平均値を図2に示します。年間の危険日数が多い地域は、林齢20年以上の森林では44日程度、低密度林では200日程度、新植地では300日程度となり、森林のタイプによって7倍程度も異なることがわかりました。またいずれの森林タイプにおいても、北関東、東海、瀬戸内などの危険日数の多い地域での日数は、北海道から中国地方の日本海側に分布する危険日数が少ない地域の約1.8～3.3倍もあることもわかりました。

### 森林保険制度

樹木の苗を植えてから木材として伐採するまでには通常40～50年以上の年月を必要とします。その間には様々な災害によって樹木が枯れてしまい価値がなくなってしまうことがあり、林業経営上のリスクとなっています。森林火災のような万一の災害に備えて林業経営者から掛け金を集め、いざ損失が生じたときに保険金を支払うことによって林業経営の安定化を図るのが森林保険制度です。掛け金の額は森林の持つ被災リスクに応じて定められる必要がありますが、対象とする災害の種類や樹木の生育段階に応じて被災リスクは異なります。今回の成果は、森林火災のリスクを生育段階に応じてきめ細かく評価することを可能にするものです。

## 研究資金と課題

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

## 文献

玉井幸治・後藤義明 (2016) 間伐・除伐・風倒被害による林野火災発生危険度への影響. 森林火災対策協会報, 36, 4-8  
玉井幸治 (他) (2019) 林床可燃物含水状態の推定モデルによる森林火災発生危険日出現日数の算出. 水利科学, 365, 84-98.

## 専門用語

林床可燃物: 森林の地面に貯まっている落葉落枝や下草などのこと。乾燥すると燃えやすくなるため、森林火災の時には最初に燃え始める。



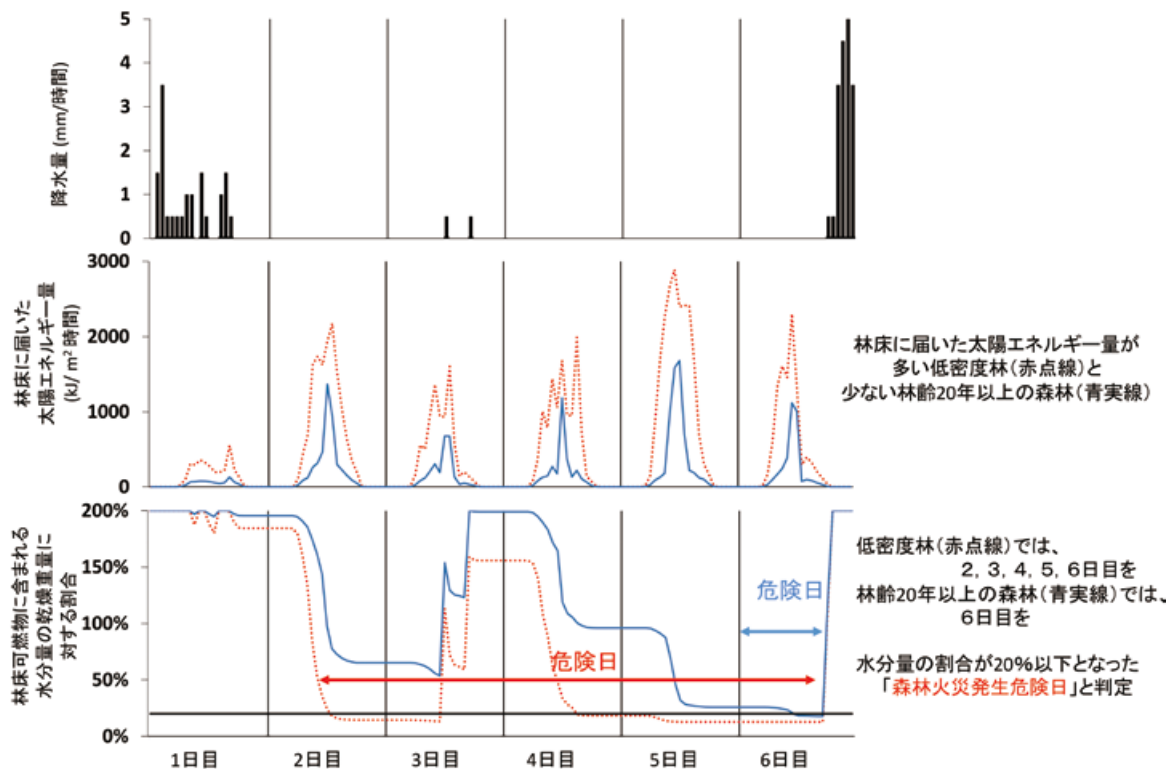


図1. モデルによる林床可燃物に含まれる水分量の推定結果と森林火災危険日の判定結果の一例

林床可燃物に含まれる水分量は、雨が降ると増えますが、雨がやむと林床に届いた太陽エネルギーによって乾燥します。太陽エネルギー量が多いほど、林床可燃物は早く乾燥するようになり、「森林火災発生危険日」に判定される日数が増えます。(玉井・後藤 (2016) を改変して引用)

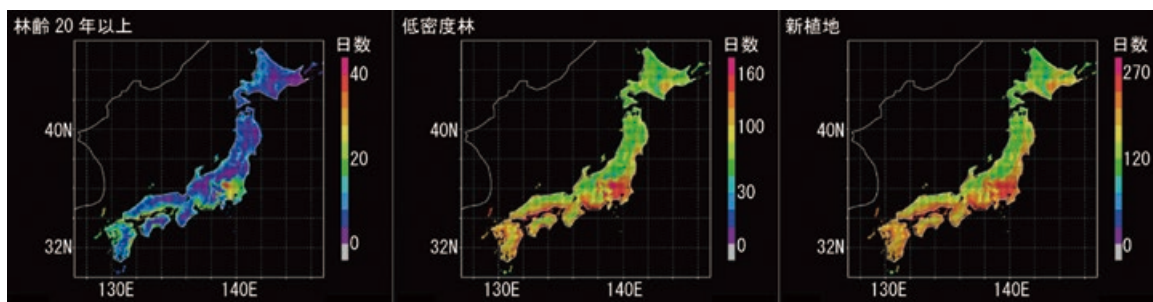


図2. 森林火災発生危険日数地図

危険日数は、赤紫色のところほど少なく、赤色ほど多いことを示します。「森林火災発生危険日」の最大日数は、林齢20年以上の森林、低密度林、新植地でそれぞれ、1年間で40日程度、160日程度、270日程度と、森林のタイプによって大きく異なることがわかりました。(玉井 他 (2019) を改変して引用)



# 野生山菜を安全に利用するために



植物生態研究領域 清野 嘉之

震災復興・放射性物質研究拠点 赤間 亮夫

福島第一原発事故で野外に放出された放射性セシウムは、放射性崩壊によりその量が減衰しながら平衡状態に向けて生態系内で移動を続けています。山菜には木も草もあり、その種類によって生活様式や物質代謝が異なるので、食用部分の放射性セシウム濃度やその経年変化の傾向も山菜の種類によって異なると考えられます。野生山菜19種について事故の翌年から5年間、放射性セシウム濃度を調べました。その結果、13種は濃度が低下、3種は濃度が上昇しており、増減が不明瞭で放射性セシウムの吸収と排出がつかっているように見えるのは3種でした。今後も、濃度がどのように推移していくのかを見きわめるために、調査の継続が必要です。

## 成果

### はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故により野外に放出された放射性セシウムは、放射性崩壊により減衰しながら、平衡状態に向けて生態系内で移動を続けています。山菜には木も草もあり、その種類によって生活様式や物質代謝が異なるので、植物が取り込んだ放射性セシウムの食用部分における濃度やその経年変化の傾向も山菜の種類によって異なると考えられます。

### 野生山菜の放射性セシウム濃度の経年変化

2012年から2016年まで、300種以上の野生山菜の放射性セシウム濃度を調べ、うち19種については、同じ個体、あるいは同じ群生から春に繰り返して採取を行い、事故から5年間の濃度の変化を明らかにしました（図1）。13種は濃度が低下する傾向にありました。3種は濃度が上昇する傾向にありました。残りの3種は、増減が不明瞭で、放射性セシウムの吸収と排出がつかっていると考えられました。

### 食品としての安全性の確保

野生山菜の放射性セシウム濃度は、山菜の種類や地域、採取年によって異なります。山菜の放射性セシウム濃度を予測し、摂食による内部被ばくのリスクを減らすことが出来れば食生活の安全性の確保につながります。そのため、今回結果をお示したモニタリングだけでなく、野生山菜を採取する際に比較的容易に得られる情報（生育地の空間線量率、生育地は林外か、林縁か、林内か、地表に堆積している落葉・落枝の量は多いか、少ないかなど）にもとづいて、山菜の種類ごとに放射性セシウム濃度の範囲（上限と下限）を予測するモデルの開発を進めています。

### まとめ

野生山菜として採取される植物種の大半では、事故から5年経過した時点でも放射性セシウム濃度は変動していました。チェルノブイリ事故では、汚染した森林の樹木や土壌中に分散した放射性セシウムの移動が安定するまでに5～10年かかっています。どの山菜がより安全で安定した資源として利用できるのかという情報を的確に提供するために、調査を継続するとともに、植物体の放射性セシウム濃度の移動メカニズムにもとづいた将来予測に取り組んでいきます。

## 研究資金と課題

本研究は、JSPS科研費（JP15K07496）「山菜の放射能汚染の季節変化と採取時の汚染リスク判定法」の助成を受けました。

## 文献

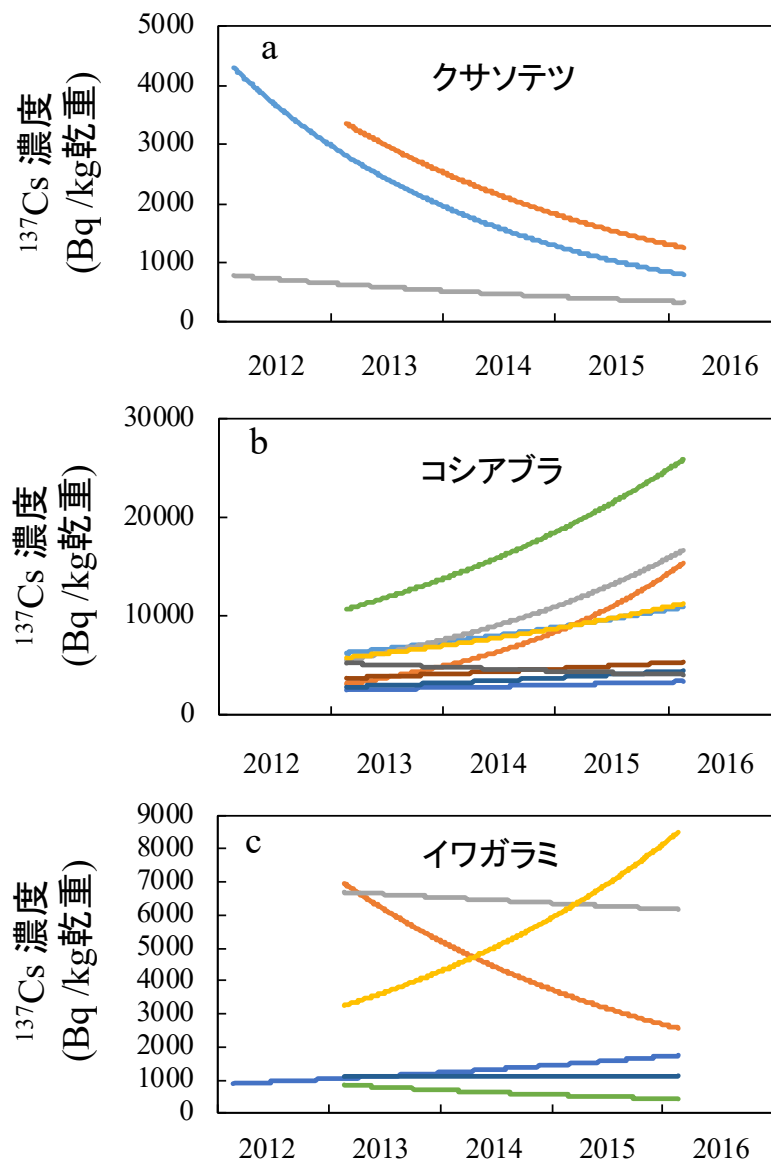
清野嘉之（他）（2018）野生山菜の放射性セシウム濃度：福島第一原発事故後の経年的トレンド。関東森林研究，69（1），109-110。

清野嘉之（他）（2018）2011年の福島第一原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの野生ゼンマイ（*Osmunda japonica*）の葉への移行。森林総合研究所研究報告，17（3）（No.447），217-232。

## 専門用語

放射性セシウム濃度：ここではバイオマス当たりのセシウム137量（減衰補正済み，Bq/kg乾重）。

空間線量率：対象空間を通過する時間当たりの放射線量（ $\mu\text{Sv/h}$ ）。インターネットで最新の分布図を入手できる（文部科学省放射線量等分布マップ拡大サイト、<https://ramap.jmc.or.jp/map/>）。



**図1. 2011年福島第一原子力発電所事故後の野生山菜のセシウム137濃度の経年変化**  
 一つの線が一つの調査個体(群生)を表します。セシウム137( $^{137}\text{Cs}$ )濃度が減少傾向であったのはクサソテツ(図1a)、ウド、タラノキ、ニワトコ、ミツバアケビ、リョウブ、フキ、カタクリ、ヨモギ、ワラビ、イタドリ、ノコンギク、ヤブレガサの13種、増加傾向であったのはコシアブラ(図1b)、ヤマドリゼンマイ、ハナイカダの3種、増減が不明瞭であったのはイワガラミ(図1c)、ツルアジサイ、ゼンマイの3種でした。



# 永久凍土の凹凸地形面の形成過程を年輪から復元し、温暖化影響を予測



立地環境研究領域 藤井 一至

有機物が分厚く堆積した凹凸地形面を持つ永久凍土への温暖化の影響を解明するため、凹凸の形成過程と条件を調査しました。そこから、凹凸の形成によって傾いたクロトウヒは根元からの高さ30cm以下にあて材を形成することで樹体を支える特性をもつことを発見し、年輪のあて材形成の履歴から凹凸の形成過程を復元する技術を確認しました。その結果、凹凸地形面の形成は温暖年に活発であり、1960年以降、堆積有機物層の発達と凹凸地形面の形成が加速していることを解明しました。ただし、今後さらに温暖化が進み、凹凸地形面の条件となる浅い永久凍土面が深くなると、凹凸地形面が崩壊し、堆積した有機物の分解を招くことが予想されます。

## 成果

### 土壌への温暖化影響を検証

温暖化が急速に進んでいる北極圏の永久凍土地帯では、凍土の融解にともない、堆積した有機物の分解が二酸化炭素を発生させ温暖化をさらに加速することが懸念されています。永久凍土地帯の南縁のクロトウヒ林では直径1～2メートルのマウンドが点在する凹凸地形面が形成され、樹木が直立できない「酔っ払いの森」が分布し、温暖化との関わりが議論されています。本研究では、凹凸地形面は平坦な地形面よりも有機物の堆積量が多く、高い炭素貯留能を持つことを新たに解明しました。凹凸地形面の形成過程を復元し、形成条件を抽出することで、森林および凍土の炭素貯留機能への温暖化影響を検証しました。

### 凍土の動きを復元する技術を確認

凍土地帯のような遠隔地では観測データが限られ、温暖化影響の検証や将来予測が困難ですが、今回調査したカナダ北西準州イヌビツク近郊では、樹齢二百歳のクロトウヒの年輪解析による環境復元が可能です。ここでクロトウヒの年輪と凹凸地形面の発達程度との関係を調査した結果、凹凸地形面の形成によって傾いたクロトウヒは根元からの高さ30cm以下にあて材を形成することで樹体を支える特性をもつことを発見し、年輪のあて材形成の履歴から凹凸の形成過程を復元する技術を確認しました。

### 凍土への温暖化影響を検出

年輪解析の結果、凹凸地形面の形成は温暖年に活発であり、年平均気温の増加し始めた1960年以降、堆積有機物層の発達と凹凸地形面の形成が加速していることを解明しました。温暖化は永久凍土の融解によって有機物の分解を加速すると考えられてきましたが、短期的な温暖化は炭素貯留効果の高い凹凸地形面の形成を促進することがわかりました。ただし、凍土地帯の凹凸地形面の形成は浅い永久凍土面の存

在を前提条件としていることを発見しました。今後さらに温暖化が進み、凹凸地形面の条件となる浅い永久凍土面が深くなると、凹凸地形面に堆積した有機物の減少を引き起こすことが予想されます。

### 永久凍土の温暖化影響予測に貢献

酔っ払いの森と呼ばれるクロトウヒ林は自然現象として起こる凹凸地形面の形成と連動して発達していることを解明し、その上で、近年の温暖化が凹凸地形面の発達、樹木の傾きを強めていることを解明しました。これまで土壌有機物動態に対する温暖化影響予測は検証データが少ないことが不確実性を高める要因となってきましたが、年輪による復元データによって温暖化に対する土壌炭素蓄積量の変動予測モデルを精緻化することが可能になります。

## 研究資金と課題

本研究は、JSPS科研費(JP17K15292)「環境考古学を応用した永久凍土の炭素動態復元と温暖化影響の検証」による成果です。

## 文献

Fujii, K. et al. (2019) Effects of hummocky microrelief on organic carbon stocks of permafrost-affected soils in the forest-tundra of northwest Canada, *Pedologist*, 63 (1), 1-10.

## 専門用語

永久凍土地帯: 二年以上継続して凍結した永久凍土層の先端(凍土面)を深さ1メートル以内に持つ地域。

あて材: 傾斜地などで樹木が偏って成長し、肥大成長した部分「あて」をもつ材のこと。



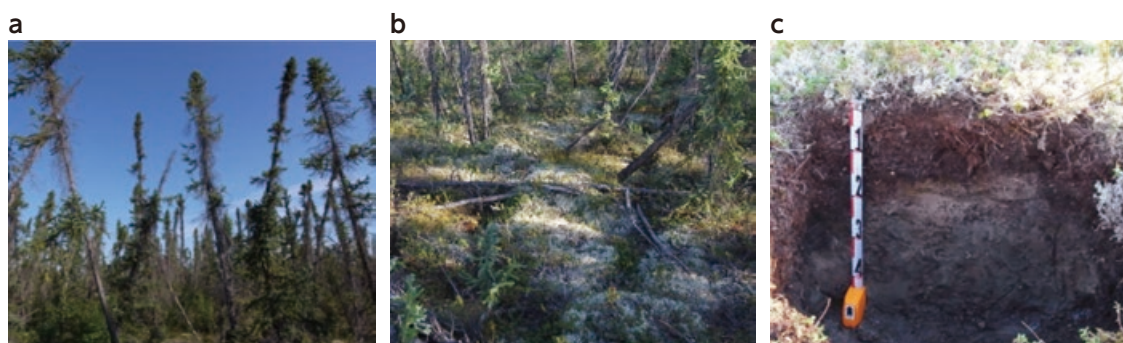


図1. 酔っ払いの森(a)と凹凸地形面(b)および土壌断面(c)

クロトウヒが傾いて育つ地面には凹凸が形成され(a, b)、マウンドには分厚く有機物が堆積します(c)。

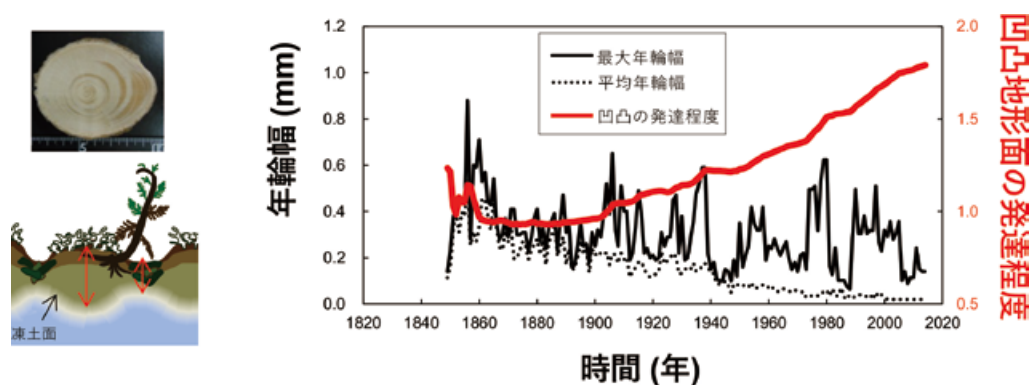


図2. クロトウヒの年輪と凹凸地形面の発達過程

年輪成長が偏る年があり、徐々に凹凸(マウンド)の形成とあて材形成が大きくなります。

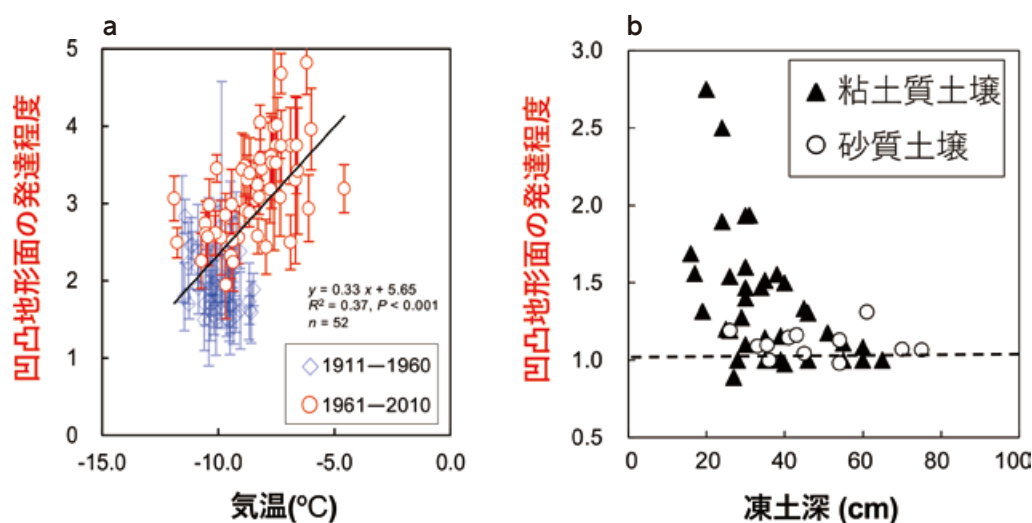


図3. 凹凸地形面の発達程度と気温の関係(a)と凍土深の関係(b)

温暖化とともに凹凸(マウンド)が大きくなりますが(a)、凍土深50cm以上では活発化しません(b)。

# アマゾン熱帯林で持続的な択伐施業の可能性を検証する



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

森林伐採により熱帯林の減少や劣化が進むと、地球規模での炭素循環や気候変動に悪影響を及ぼすことが危惧されています。そこで、木材の利用と気候変動の抑制を両立させるとして、伐り残される森林への影響を最小限に抑える低インパクト択伐施業に期待が寄せられています。しかし、択伐された森林が実際にどのように回復するかは明らかにされていませんでした。そこで、アマゾン中央部の択伐施業地で伐採後の経過年数と森林の地上部バイオマスの関係を調べたところ、伐採後およそ14年でバイオマスはもとのレベルにまで回復することがわかりました。ただし森林の構造がもとに戻るには、さらに長期間が必要なことも明らかになりました。

## 成果

### 伐採される「地球の肺」

日本にもマサランドゥーバやイペなどのアマゾン産の木材が輸入されています。これらの木材は天然林から抜き伐り（択伐）することによって生産されています（図1、2）。一方で、地球の肺ともいわれ地球規模の炭素循環に影響するアマゾン熱帯林が択伐によって減少・劣化すると、地球全体の気候にも悪影響を及ぼすことが危惧されています。熱帯林での持続的な木材生産と環境調節機能の維持とのバランスを見極めるためには、択伐を受けた森林がどのように回復するのか正確に知る必要があります。

### アマゾン中央部での調査

そこで、これまでに調査事例がほとんどなかったアマゾン中央部において、民間会社によって択伐された森林を試験地にして、伐採後の樹木のバイオマスの経時的な変化を調べました。ここでは会社が森林をブロックに区切り、1997年からブロックを変えながら択伐を続けていますので、択伐のあとにどのように森林が変化していくのか、伐採年の異なるブロックで一度に調べることができます。択伐年の異なるブロックに調査プロットを設置し、樹木の本数と直径を3～4年おきに計3回繰り返し測定しました。また、隣接する保護林でも同様に調査し、択伐されていない森林の平均的なバイオマスを把握しました。その結果、伐採後の経過年数とバイオマスとの関係から、伐採後およそ14年でバイオマスはもとのレベルに戻ると推定されました（図3）。ただし、樹木の大きさごとにバイオマスをみると、択伐林と保護林とではバイオマスの内訳が大きく異なっており、どの大きさの木が何本あるかという樹木のサイズ構造まではもとの姿に戻っていないこともわかりました（図4）。

## 木材利用とのバランス

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

## 研究資金と課題

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

## 文献

Otani, T. et al. (2018) Recovery of above-ground tree biomass after moderate selective logging in a central Amazonian forest. *iForest*, 11, 352-359.  
大谷達也(他) (2016) ブラジル・中央アマゾンの択伐林におけるバイオマスの回復. *海外の森林と林業*, 96, 16-21.

## 専門用語

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





図1. 天然林から切り出される木材



図2. 調査地に残る切り株

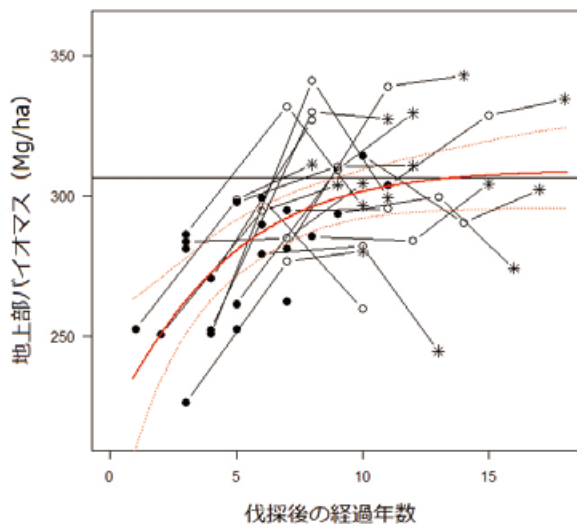


図3. 択伐後の経過年数とブロックごとの地上部バイオマスとの関係

択伐後にバイオマスが増加していく様子を数式で表し(赤い曲線)、隣接する保護林と同等にまで(黒い横線)回復するのに14年かかると推定されました。(Otani, T. et al. (2018))

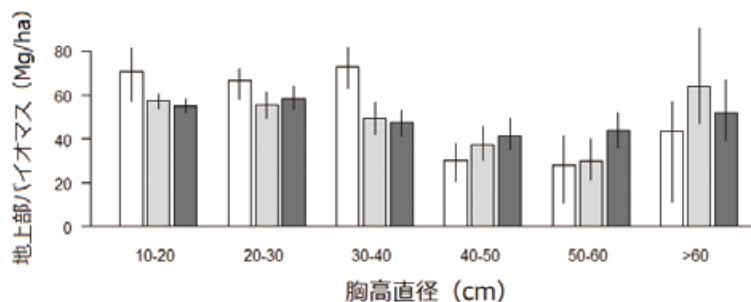


図4. 保護林(白)、択伐後10年未満のブロック(薄い灰色)、および択伐後10年以上のブロック(濃い灰色)における樹木の大きさ(幹の直径)ごとのバイオマス

保護林と択伐林ではバイオマスの内訳が異なっていました。(Otani, T. et al. (2018))



# 世界自然遺産候補の奄美とやんばるの森で、生物多様性の保全と森林利用の調和をはかる



森林植生研究領域 阿部 真 企画部 正木 隆  
関西支所 齋藤 和彦 九州支所 小高 信彦・安田 雅俊・安部 哲人  
琉球大学 高嶋 敦史 東京農工大学 岩井 紀子 長崎大学 杉村 乾

奄美大島と沖縄島北部のやんばるの森林で、生物多様性の保全と森林の利用を両立させるため、希少なトゲネズミやカエル類の生態調査に有効な技術を開発しました。また、やんばるで、施業履歴や林齢などの林分情報を更新するとともに、林冠構造を広域的に把握し、大径・高齢林分を抽出しました。さらに、着生ランや樹洞の分布から、希少種の生息環境を維持するためには高齢林の保全が重要であることを明らかにしました。一方、年間の伐採面積が現状レベルであれば、生物多様性の保全に対する林業の影響は限定的であることも示唆されました。以上の成果の共有や、成果を踏まえた提案が、地域のゾーニングや動植物の保護管理に活かされています。

## 成果

### 生物多様性のホットスポット

日本の南西諸島には世界的に稀な亜熱帯性多雨林が分布し、多くの固有種を含む極めて多種の動植物が生息しています。わが国は奄美大島・徳之島・沖縄島北部・西表島の特に生物多様性の高い森林について、2017年と2019年に、世界自然遺産への登録をユネスコの世界遺産委員会に推薦しました。一方、これらの島々では多くの固有種が絶滅の危機に瀕しています。林業による天然生林の伐採は、絶滅のリスクを高める可能性があります。そこで私たちは、奄美大島や沖縄島北部のやんばるでは重要な経済活動です。そこで私たちは、両地域で生物多様性の保全と森林の利用を両立させていくための研究を行いました。

### 希少種の調査技術を開発

生物多様性の保全のためには、希少な動植物の生態を知る必要があります。そこで、やんばるを代表する希少種、オキナワトゲネズミの観察ツールである「巣箱カメラ」を開発しました(図1)。これにより、精度の高い生息地探索と、糞の採取や個体の識別が可能になりました。また、奄美大島を代表する希少種として、アマミシカワガエル、オットングガエル、アマミハナサキガエルの3種について、沢の水からDNAを抽出して生息の有無を判定する手法を確立しました。これによって、これらのカエルの調査を簡便に実施できるようになりました。

### 林分情報の更新と詳細化

森林の管理では林分の歴史や状態を正確に把握することが重要です。やんばるの森の林齢や施業履歴の記録を掘り起こし、地図を更新しました(図2)。また、航空機レーザー測量(LiDAR)の数値から、広範囲の地形と林冠高を把握しました。さらに、施業履歴にない大径・高齢の林分を、空中写真の判読により抽出しました。詳細な林分情報をもとに植生の現地調査をおこなった結果、施業履歴によって林分の階層構造や絶滅危惧種・外来種の数が大きく異なることがわかりまし

た。また、高齢林に依存する希少種を効率的に発見できるようになりました。

### 生物多様性保全の鍵は?

やんばるにおいて、固有の着生ランであるオキナワセッコク、そして日本最大の甲虫であるヤンバルテナガコガネなどが利用する樹洞(大きなウロ)の分布を調べました。その結果、イスノキなどの大径木を含む高齢林が希少種の生息地として重要であることを明らかにし、優先的に守るべきであるという提案をおこないました。また、やんばると奄美大島における近年の伐採面積から将来の林齢構成を計算した結果、若齢林は減少していくと予測されました。林業の影響は縮小傾向と考えられますが、生物多様性保全のために丁寧なゾーニングが必要です。

### 森林管理への利用

開発した調査技術によって得られた新たな知見にもとづき、希少種の保全や回復をはかる林分の管理を提案しました(図3)。以上の成果は、国有林や県・村等の森林管理者、また環境省那覇自然環境事務所(現 沖縄奄美自然環境事務所)等の自然保護行政当局と共有することで、ゾーニングや動植物の保護管理に活用されています。また、国による世界自然遺産推薦の際に、推薦区域の選定に貢献しました。

## 研究資金と課題

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(4-1503)「奄美・琉球における森林地帯の絶滅危惧種・生物多様性保全に関する研究」による成果です。

## 文献

阿部真(他)(2018)特集:世界自然遺産候補、沖縄・奄美の森林生態系管理. 森林科学, 84, 2-26.



図1. 巣箱カメラ(左)と撮影画像(右)

内部のカメラ(動画可能)により、個体の大きさ等の特徴を確認できます。  
右はオキナワトゲネズミ3頭が巣箱に入ったところ。

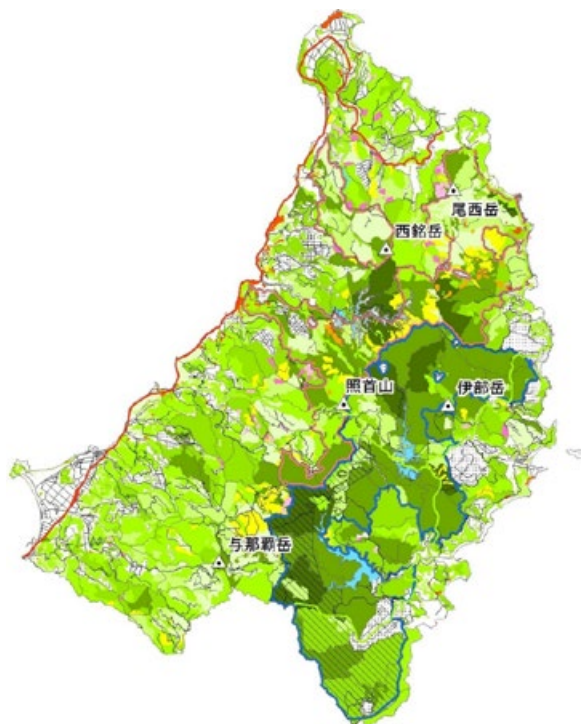


図2. やんばるの新たな林齢地図

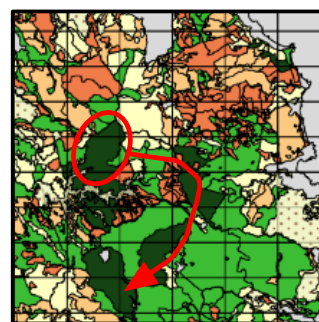
掘り起こした記録をもとに林齢地図を更新しました。10年ごとに色分けしており、最も濃い緑は2019年現在で90年生以上の林分です。

#### 林齢区分

- 0 - 42
- 43 - 54
- 55 - 69
- 70 - 84
- 85 -



#### トゲネズミ回廊案



#### 国有林の 保護林指定区分※

- 保存地区
- 保全利用地区

#### 世界自然遺産 (2017当時)

- 推薦区域
- 緩衝地帯

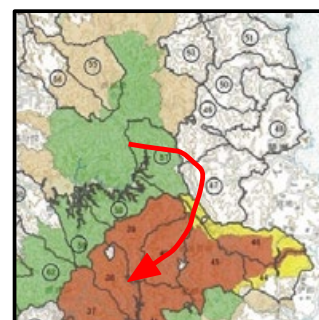


図3. 絶滅危惧種の回復のための林分配置の提案

オキナワトゲネズミの生息域から連続した高齢林分を保全・育成して回廊とすることで、高齢林に依存するトゲネズミの回復を期待します。

(上) 赤丸で囲んだ生息域から、連続した高齢林分を繋げる回廊案  
(環境省へのプロジェクト報告書から抜粋)

(下) 国有林が指定する保護林と世界自然遺産の推薦地域(2017)。  
提案した回廊で保護林から外れていた林班は、2019年の再推薦で新たな緩衝地帯としてゾーニングされました。

※九州森林管理局HPから抜粋、加工

[http://www.rinya.maff.go.jp/kyusyu/keikaku/hogorin/shinrin\\_seitaikei/yanbaru.html](http://www.rinya.maff.go.jp/kyusyu/keikaku/hogorin/shinrin_seitaikei/yanbaru.html)



# 天敵微生物を使ってシイタケ害虫の被害を防ぐ



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

シイタケの栽培は、菌床栽培と原木栽培で行われますが、どちらの栽培方法でも害虫が発生します。シイタケを含む栽培きのこ類には自然食品、健康食品というイメージがあることから、害虫の防除に化学農薬の使用は避けられています。そこで、自然界に生息する天敵微生物を用いてシイタケ害虫を防除する方法を検討しました。その結果、製剤として販売されている天敵微生物のうち、天敵線虫、天敵細菌、天敵糸状菌の製剤がシイタケ害虫の防除に有効であることがわかりました。そして、これらの製剤をもちいた防除方法を確立しました。今後、これらの天敵微生物製剤がシイタケ栽培の現場で早期に使用できるように、制度的な手続きを進めていきます。

## 成果

### シイタケ栽培で発生する害虫

シイタケ栽培は、おが粉と栄養剤をまぜたものにシイタケ菌を培養した“菌床”を使った菌床栽培と、丸太にシイタケ菌の種菌を接種して作る“ほだ木”を使った原木栽培で行われます。シイタケに害虫がつくことはあまり知られていないようですが、どちらの栽培方法でも多くの害虫が発生します(図1)。菌床栽培では、シイタケと菌床の食害や、虫体が商品に付着したまま販売される“異物混入”の発生が深刻です。原木栽培では、丸太に接種したシイタケ種菌や丸太を食害されて、ほだ木が作れなくなることに加え、異物混入の発生が深刻です。

### シイタケ害虫に効果のある天敵微生物製剤

シイタケを含む栽培きのこ類には自然食品、健康食品というイメージがあることから、害虫の防除に化学農薬の使用は避けられています。一方、自然界に生息する天敵であれば害虫の防除に使用したいという、生産者の意向が高まっています。日本では、害虫の防除に有効な天敵微生物を製剤化した、天敵微生物製剤が販売されています。それらには、天敵線虫製剤、天敵細菌製剤、天敵糸状菌製剤などがあります。現在、シイタケ害虫に使用できるのは、シイタケオオヒロズコガに対する天敵細菌製剤とハラアカコブカミキリに対する天敵糸状菌製剤しかありません。そこで、これら以外の天敵微生物製剤のシイタケ害虫に対する防除効果を調べたところ、天敵線虫製剤が複数の害虫に有効であること、天敵細菌製剤がムラサキアツバやコクガにも有効であることがわかりました(表1)。

### 天敵線虫製剤の実証試験

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

### 天敵微生物製剤の農薬登録

日本では、天敵微生物製剤といえども農薬として登録されないと生産者が使用できません。このため、本研究で効果が確認された天敵微生物製剤がシイタケ栽培の現場で早期に使用できるように、農薬登録の作業を進めていきます。

## 研究資金と課題

本研究は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターのイノベーション創出強化研究推進事業「高品質シイタケ安定生産に向けた天敵利用によるケミカルレスな害虫激減技術の開発」(課題番号 28031C)による成果です。

## 参照サイト

マニュアル「しいたけ害虫の総合防除」  
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/news/2019/20190227shiitake/index.html>

## 菌床栽培の主要害虫

## 原木栽培の主要害虫



図1. 主要なシイタケ害虫とその被害

表1. シイタケ害虫に効果のある天敵微生物製剤とその施用法

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

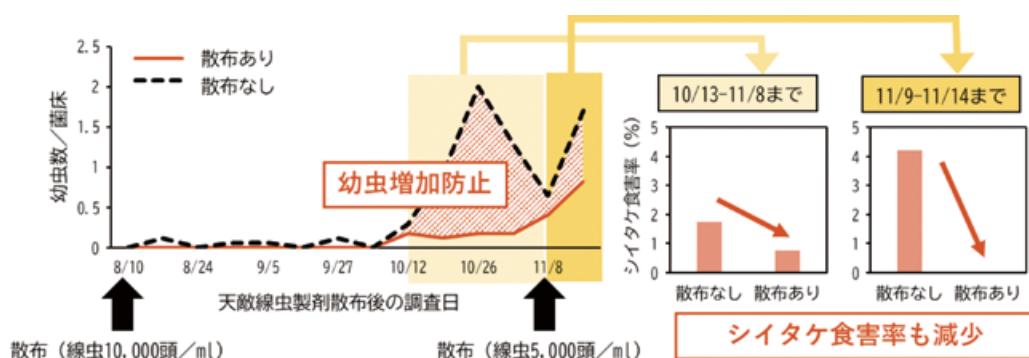


図2. 実際のシイタケ栽培施設において天敵線虫製剤を施用した時のフタマタナガマドキノコバエ幼虫の防除効果



# トドマツの天然更新を成功に導く秘訣



北海道支所 北尾 光俊・原山 尚徳・古家 直行・上村 章・石橋 聡  
植物生態研究領域 韓 慶民

トドマツは耐陰性が高いため、暗い林内の環境でも天然更新した前生稚樹を数多く見かけます。北海道東部地域では、こうした前生稚樹を利用した低コストな再造林技術が期待されます。そこで冬季に上木伐採を行い、光環境の変化がトドマツ前生稚樹の葉の光合成活性に及ぼす影響を調べました。その結果、伐採率が高く明るい林内ほど、光阻害と呼ばれる光合成活性の低下が強く生じている事がわかりました。さらに光阻害にともなう落葉と相まって、その後のトドマツの成長に負の影響が出る事が明らかになりました。トドマツの天然更新を利用した再造林を促進するためには、保残木として上木を一部残し、強い光から前生稚樹を守ることが有効です。

## 成果

### トドマツ人工林内の前生稚樹を活用する施業試験

トドマツ人工林内のトドマツ前生稚樹を活用し、天然更新を図る施業法を開発するため、北海道森林管理局が根釧西部森林管理署標茶国有林に設定した試験地で調査を行いました。試験地は2014年に設定され、2015年10月、2016年1月に異なる伐採率(0, 33, 50, 66, 100%)で上木の伐採が行われました。2016年5月に現地を調査したところ、伐採率が66%以下の試験地では稚樹が健全に生存していたのに対し、皆伐区(伐採率100%)ではほとんどの前生稚樹で葉が褐変・落葉し、枯死した個体も多くみられました(図1)。当年秋の調査によると、二つの皆伐区の稚樹(樹高30cm以上)の生存率は2割程度でした(伐倒集材による損壊枯死を含む)。

### 上木伐採後の光阻害と成長低下

トドマツ前生稚樹の枯死原因を明らかにするため、上木伐採後の翌春に、日射量と伐採前に展開した稚樹の葉(伐採前展開葉)の光合成活性を調べました。その結果、伐採率が高く明るい林内ほど光合成活性が低下し、光阻害が増大していました(図2)。光阻害とは、「必要以上の光が当たることで生じる光合成活性の低下」と定義されます。一方で、幹の水を通す能力は維持されており、枯死の原因は冬季の乾燥害ではありませんでした。つまり、トドマツ前生稚樹の葉の褐変や落葉の原因は、暗い環境から明るい環境に急劇に変わったことによる「光阻害」であると考えられます。また、光阻害による伐採前展開葉の障害により、伐採後1年目に伸長する枝の成長も低下することがわかりました(図3)。さらに伐採前展開葉が光阻害の影響で早めに落葉したことで、伐採後2年目に伸長する枝の成長も抑制されることがわかりました。つまり、光阻害を受けると、枯死に至らない場合でも、成長への影響が2年間続く事になります。

### トドマツ前生稚樹の天然更新につながる保残木施業

トドマツの主伐後の日射量と前生稚樹の生存率の関係を調べた結果、連続して直射日光が当たらないようにすること、日影になる時間を長くすることが生存率を高めるために有効であることがわかりました(図4)。さらに生存率だけでなく、直射日光を遮ることで成長量も改善することがわかっていきます。これらのことから、皆伐面に保残木を配置することがトドマツ稚樹の天然更新に有効な施業方法として考えられました。

## 研究資金と課題

本研究は、森林総合研究所交付金プロジェクト「トドマツ人工林主伐に対応した低コスト天然更新施業・管理システムの開発」による成果です。

## 文献

Kitao, M. et al. (2019) Sustained growth suppression in forest-floor seedlings of Sakhalin fir associated with previous-year springtime photoinhibition after a winter cutting of canopy trees. *Eur. J. For. Res.*, 138, 143-150.  
Kitao, M. et al. (2018) Springtime photoinhibition constrains regeneration of forest floor seedlings of *Abies sachalinensis* after a removal of canopy trees during winter. *Sci. Rep.*, 8, 6310.

## 専門用語

光阻害:「必要以上の光が当たることで生じる光合成活性の低下」と定義されるが、広義には強い光により生じる障害全般を意味する。



図1. 皆伐前に林床を覆っていたトドマツ前生稚樹(左)は、皆伐後に褐変枯死した(右)。

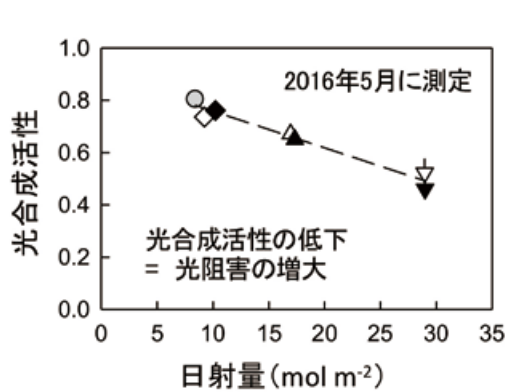


図2. 日射量の増加による光阻害の増大

光合成活性はクロロフィル蛍光反応によって測定しました。(Kitao, M. et al. (2018)より引用)

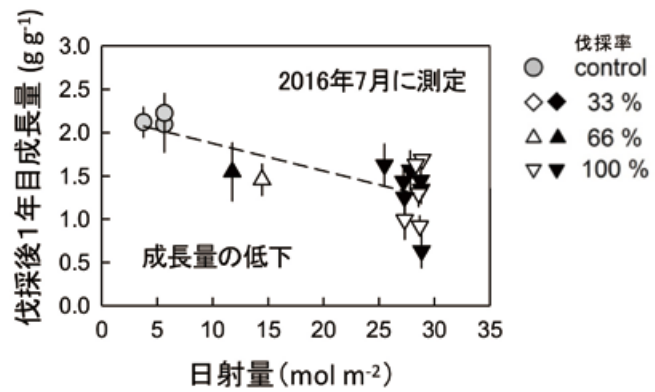


図3. 日射量の増加による成長量の低下

成長量は伐採後伸長枝(針葉+枝)の重さを伐採前展開葉の重さで割った値で表しました。伐採前伸長枝の長さから落葉する前の伐採前展開葉の重さを推定しました。(Kitao, M. et al. (2018)より引用)

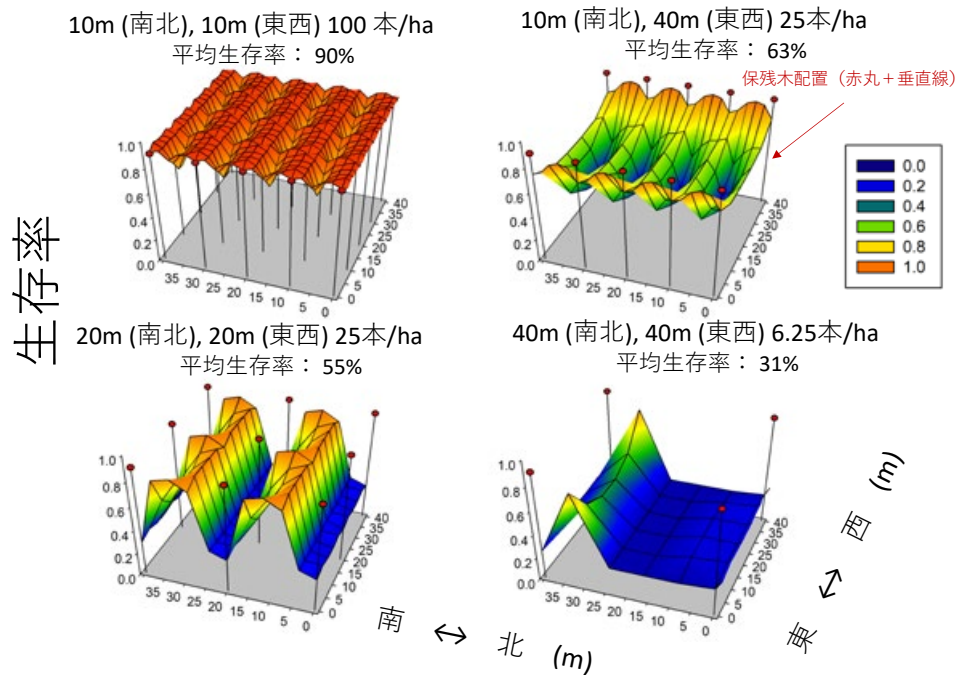


図4. 保残木の配置と前生稚樹の生存率の推定値

保残木は樹高20m、樹冠長5m、樹冠直径4m、樹幹直径0.3mとしました。保残木が全くない場合の平均生存率は22%でした。(北尾(未発表))



# 集材作業を無人化する自動走行フォワードの開発



林業工学研究領域 毛綱 昌弘・山口 浩和・鈴木 秀典・山口 智・宗岡 寛子

佐々木 達也・有水 賢吾

魚谷鉄工株式会社 飯澤 宇雄・大東 史典 株式会社舞鶴計器 阿部 慶一・佐藤 晃之

丹波市森林組合 辻 浩志 兵庫県立農林水産技術総合センター森林林業技術センター 小長井 信宏

伐出作業の労働生産性の向上を目指して、土場における荷おろし機能を有する自動走行フォワードを開発しました。これにより、生産量を維持しながら、作業班の構成人数を1名少なくすることが可能です。開発機は土場に置かれたQRコードを読み取り、複数の盤台に自動で荷おろしすることができます。自動走行機能には誘導電線を用いた制御方法を採用し、前後進を可能とすることでスイッチバック区間を有する作業道にも対応可能となりました。始業時に、一度人間が運転して走行速度等を記録しながら作業道の安全性を確認し、その後は有人運転時と同じ速度で無人走行できます。この成果は伐出作業をロボット化する革新的技術として活用可能です。

## 成果

### 集材作業の課題

複数の作業員によって流れ作業で行われる伐出作業において、フォワードによる集材作業は素材生産の最後の工程であり、集材距離が長距離化している現場において作業能率低下の原因となっています。また、作業道上の運転作業は振動騒音が激しく、運転手の労働負担も大きな問題となっています。これらを解決するために無人走行フォワードを開発し、労働力不足への対応、労働生産性や安全性の向上を試みました。

### 走るだけではなく荷おろし作業も自動化

土場まで材を運んだあと、材を荷台からおろす作業員を必要とするようでは作業班の構成人数を減らすことはできません。このため、開発機では荷台を車体横方向に傾けることによって材をおろす機構を採用しました。山の傾斜を利用して作設された盤台に向かって荷台の材をおろすことで、おろされた材はバラバラにならずに貯めておくことができます。一日の作業量を貯めるには一つの盤台では足りないため、開発機では複数の盤台をQRコードによって識別できるようにして、材の仕分けにも対応することが可能となりました。

### スイッチバック走行も可能な誘導制御

自動走行機能には誘導電線を用いた制御方法を採用しています。この方法は作業道上にあらかじめ電線を敷設しておき、電線に供給される電気を検出することで電線に沿ってフォワードは自動走行します。フォワードは先山と土場の間を繰り返し

返し往復走行しますので、開発機では前後進ともに自動走行可能な構造としました。この機能により、土場においてUターンすることなく往復走行が可能となりました。急傾斜地に作られる作業道は、急カーブを避けてスイッチバック区間を設ける場合がありますが、開発機はスイッチバックの折り返し走行にも対応しています。この自動走行機能を用いれば既存の作業道に対して拡張工事等を行うことなく利用可能です。

### 有人運転時と同じ速度で無人走行

自動走行で作業道を往復できても、速度が遅くなってしまえば素材生産量が少なくなってしまいます。作業道は急勾配、急カーブ等、安全な速度で走らなければならない箇所が多数存在するものの、比較的高速で走行可能なところもあり、一定の速度で走っている作業能率の向上は望めません。このため、本機では作業員が搭乗して（例えば始業時）運転した時の速度を記憶して、自動走行時にはその速度を再現するように速度の調整を行うことができます。

## 研究資金と課題

本研究は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターの革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）「無人走行フォワードによる集材作業の自動化に関する実証研究」による成果です。



図1. 開発したフォワーダの外観図

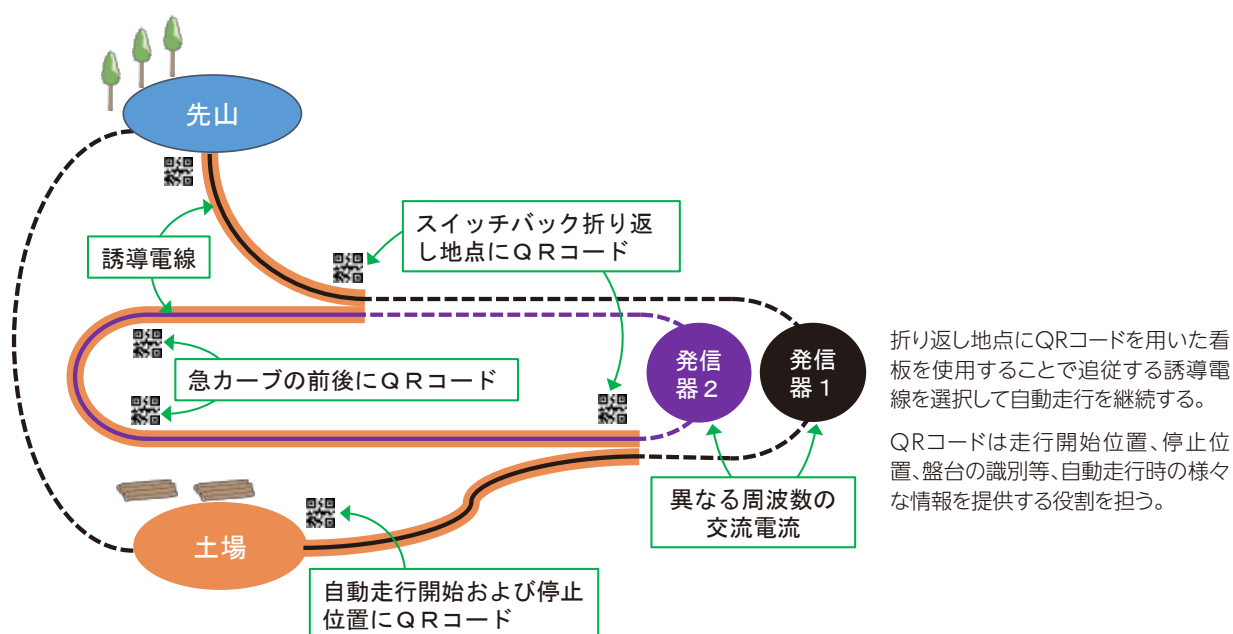


図2. スwitchバック走行へ対応した誘導電線の敷設方法



図3. 自動荷おろし作業中のフォワーダ

荷台が傾くのと同時に可動式建て木が倒れることで荷おろし作業を自動で行う。

倒れた建て木をスロープとして利用することで、おろした材がバラバラにならないように機能している。



# 木材を活用した共同住宅のリニューアル手法の提案



林業経営・政策研究領域 青井 秀樹

わが国の共同住宅は1970～1980年代に建設されたものが多く、老朽化対策が課題ですが、所有者である自治体は財政的な余裕が乏しいため建て替えが困難な状況です。特に5階以下の建物では、エレベータが無い場合も多く、上層階に空室が多いことも課題です。そこで5階建て、エレベータ無しの共同住宅を想定して、最上階(5階)を取り壊した(減築)後に、木造で5階、6階を増築するリニューアル手法を提案しました。このリニューアルにより、入居者増と賃料収入増を見込めます。この手法を用いた建設費は、RC造6階建て新築と比較して、その4割程度に抑えられ、立地が良い場合であれば12年で投資を回収できることも分かりました。

## 成果

### 共同住宅のストックを巡る背景

わが国におけるRC(鉄筋コンクリート)造を主体とする共同住宅は2,209万戸、このうち3～5階建ては835万戸に上ります。これらは、築40年以上経過したものが多く、老朽化対策が課題ですが、所有者である自治体には財政的な余裕が乏しいため、多額の建設費を要する建て替えが困難な状況です。特に5階建て以下ではエレベータが無い場合も多いため、入居希望者が上層階を敬遠して空室が多いことも課題です。

### 木造建築と減築を活用したリニューアル手法

ここでは5階建て、エレベータ無しの共同住宅を対象とします。5階建て共同住宅の最上階(5階)を取り壊した(減築)後に、木造で5階、6階の2層を増築することにより、階数と床面積を増やすリニューアル手法を提案しました(図1)。

このリニューアルと同時にエレベータを増設することで、利便性向上を付与し、それによる入居者増と賃料収入増でリニューアル費用の回収を狙うことも併せて提案しました。この手法を用いた建設費は、RC造6階建て新築と比較して、その4割程度に抑えられ(表1)、立地が良ければ12年で投資の回収が可能となります。

この手法では、木造の増築部分を加えた建築物全体の重量が元々の重量以下になるため、建築物が沈下する可能性がありません。つまり、単位面積当たりの重量が相対的に軽い木造だからこそこのリニューアル手法と言えます。なお、減築や木造

増築による重量の変化を試算するとほぼ変化無し(正確には“軽くなっている”)となります。

(注:国土交通省によって建築物の耐震性能や容積率等が定められていますが、本リニューアル手法を用いた建築物においても、それらの規定を満たすことを前提としています。)

### 今後に向けて

本リニューアル手法を用いた事例は、今のところまだありません。しかし、ストックが活用できること、建設費を抑制できること等のメリットがありますので、共同住宅以外の用途への幅広い応用が期待されます。また屋上階の木造増築事例が多い欧州ではCLTを活用することが多いため、CLT利用拡大につながる可能性も考えられます。

## 研究資金と課題

本研究の一部はJSPS科研費(JP16H03128)「国産材CLTの普及拡大に向けた利用モデルの構築と検証」によって行いました。

## 文献

青井秀樹(2018) 減築と木造増築による老朽化マンションの再生に伴う国産材利用拡大の可能性. 林業経済, 71(8), 1-16.

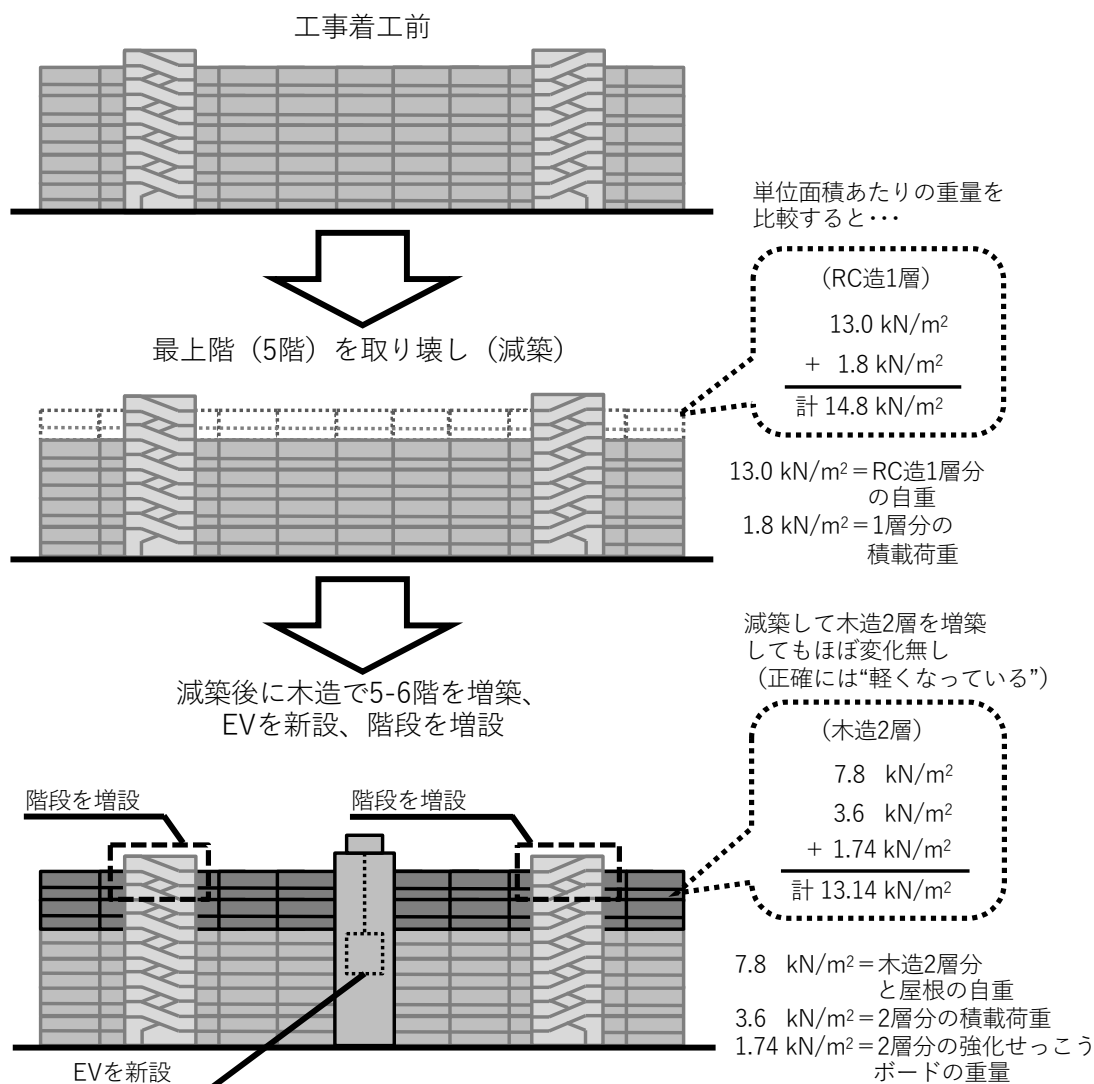


図1. リニューアル手法の内容  
 (青井秀樹(2018)の図を一部改変して使用)

表1. 建設費比較

(A) RC造6階建て新築の建設費

|     | 項目        |          |
|-----|-----------|----------|
| 内訳① | プロジェクト管理費 | 2.521億円  |
| 内訳② | 解体費       | 0.568億円  |
| 内訳③ | RC造新築費    | 10.468億円 |
| 内訳④ | 設計・監理費    | 1.570億円  |
| 合計  |           | 15.127億円 |

(B) 本リニューアル手法による建設費

|     | 項目           |         |
|-----|--------------|---------|
| 内訳① | プロジェクト管理費    | 0.872億円 |
| 内訳② | RC造部分減築工事費   | 0.549億円 |
| 内訳③ | 木造増築費        | 2.512億円 |
| 内訳④ | 既存階修繕費+設備更新費 | 0.480億円 |
| 内訳⑤ | EV関連費        | 0.324億円 |
| 内訳⑥ | 設計・監理費       | 0.497億円 |
| 合計  |              | 5.234億円 |

注:両者ともに条件の細かな変動で金額が変わる可能性があります。



# 新たな森林の有効活用に向けた課題と解決策の提示



林業経営・政策研究領域 平野 悠一郎

近年、世界各地の森林は、林産物獲得や生態系保全のみならず、人々が楽しみ健康を維持する場として利用されています。しかし、新興のマウンテンバイクやトレイルランニングは、ウォーキング等の従来の利用者から危険視され、森林・山道の所有・管理者からは事故や土地劣化を懸念されてきました。日本のマウンテンバイカーやトレイルランナーの有志は、森林・山道の整備や経済効果を伴うイベント等、所有・管理者を含む地域のメリットとなる活動を行い、この対立解消を進めています。一方、欧米では、法令や契約等で各利用の持続性や権利・義務を担保し、利用者間の対立や事故・土地劣化に伴う森林経営側のリスクを軽減することに成功しています。

## 成果

### 新たな要求を含めた森林利用の多様化は対立を伴う

近年の日本では、マウンテンバイクやトレイルランニング等、リフレッシュや健康維持等を目的としたスポーツの場として、森林や林内に続く山道を利用したいと思う人々が増加してきました。しかし、これらの新興利用は、すぐに厳しい対立に直面しました。先行ユーザーである登山者ほか林内歩行者は、桁違いのスピードで走るマウンテンバイカーやトレイルランナーを「危ない」と問題視し、林地・道の所有者や管理者は、現実に事故が起きた場合、訴訟等を通じて自らの安全管理責任が問われるのではないかと懸念します。山村等の付近に暮らす人々も、これらの利用が増えることで、自らの生活に踏み込まれる抵抗感を少なからず感じ、自然保護を重視する人々にとっては、動植物の生息環境への影響等が心配になります(図1)。

### 利用者側の地域貢献は日本での対立解消の即効薬かつ必要条件

こうした対立に直面したマウンテンバイカーやトレイルランナーは、気持ちよく利用できる場所を確保するために、「相手側の役に立つ」活動を各地で展開するようになりました。すなわち、魅力的な森林・山道を抱えつつも、過疎・高齢化に悩む山村等において、森林・山道の持続的な整備を自主的に行い、地域に経済効果をもたらすイベント(大会・ツアー等)を開催し、或いは清掃・祭礼・農作業・集落運営等に積極的に携わることで、地域活性化に貢献していくというものでした(図2)。その結果、彼らは地域の関係主体からの好印象や信頼を得て、安全面・環境面に配慮したルールを守りながら、当地での利用を楽しむことができるようになっていきます。

### 森林経営側の各種リスク軽減のための制度構築という長期的な課題

しかし、これらの利用者側の貢献の成果を、長く保障するための制度が日本には存在していません。その結果、所有・管理者を含めた森林経営側は、事故等に伴う安全管理責任を問われるリスクが軽減されないという問題が生じています。このために、利用者側が整備に貢献したいと思っても、森林・山道への立ち入り自体に難色を示されることもあります。

この点、アメリカ、イギリス、ニュージーランド等では、関連の法律や権利関係を通じて、利用者への許可の仕組みや利用の権利・義務を明確化し、また利用者代表組織を通じた整備技術の普及、及び保険・事故補償制度の整備等を進めることで、持続的な利用の担保と、森林経営側の安全管理責任の明示・軽減が図られています(図3)。日本でも、将来に渡って効果的な利用を維持していくためには、こうした制度構築が求められるでしょう。

## 研究資金と課題

本研究は、JSPS科研費(JP15K21615)「新たな林地利用を踏まえた森林の多面的経営の成立条件の解明」、JSPS科研費(JP16K15081)「超高齢・都市社会に対応した新たな都市近郊林管理の方法論(SURF)の開発」による成果です。

## 文献

平野悠一郎(2018) 日本におけるトレイルランニングの林地利用の現状と動向:コンフリクトの表面化とランナーの対応. 日本森林学会誌, 100(2), 55-64  
平野悠一郎(2018) イギリスの野外トレイルにおける多様な利用の調整:湖水地方を事例として. 林業経済, 71(9), 1-18

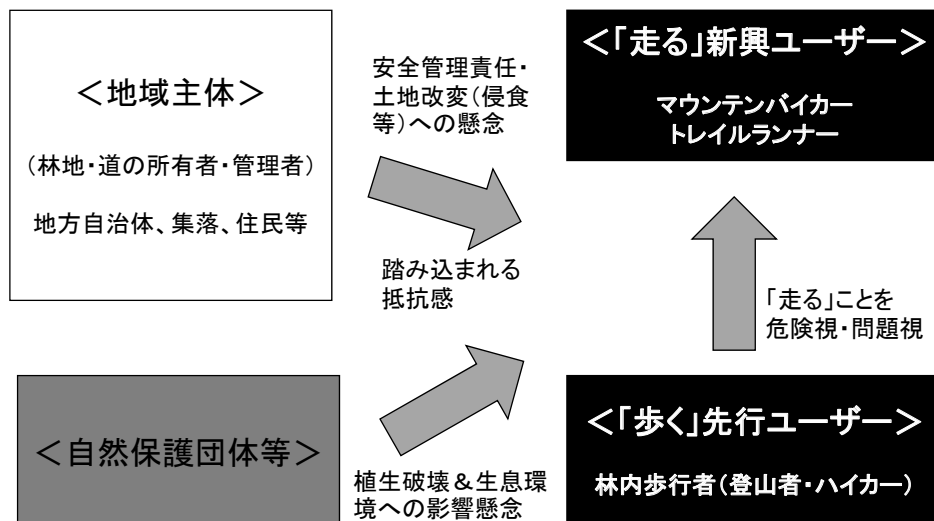


図1. 新たな要求に伴う森林・山道利用をめぐる対立の構図

(平野悠一郎(2016)「都市近郊林における通行の利用の実態と課題:価値の多様化とコンフリクトの発生」『環境情報科学』45(2):19-24、図1(P.22:筆者作成)を一部改変)



図2. 地域活性化に貢献するマウンテンバイカーやトレイルランナー



|          | 利用許可の<br>明確性    | 利用者の<br>権利保障    | 安全管理責任の<br>明示化      | 代表組織の<br>成熟度  | 持続的な<br>整備技術  | 地域への<br>貢献活動  | 行政の積極性          |
|----------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| アメリカ     | ◎               | ○               | ○                   | ◎             | ◎             | △             | △               |
|          | 基本的に所有者に付随      | 利用契約・保全地役権      | 州法・利用契約に基づく         | 全国(IMBA)・地域組織 | トレイルビルダー業界の存在 | 持続的なトレイル整備に参画 | 一部の過疎地域でのバイクパーク |
| イギリス     | ◎               | ◎               | ◎                   | ◎             | △             | ×             | ○               |
|          | 野外アクセスを許容する法的権利 | 野外アクセスを許容する法的権利 | 野外アクセスを許容する法的権利に基づく | 全国・地域組織       | 余り見られない       | 確認できず         | 自転車奨励、観光・レク誘致   |
| ニュージーランド | ◎               | △               | ◎                   | ○             | ◎             | △             | ◎               |
|          | 基本的に所有者に付随      | 利用契約等           | 法律・利用契約・事故補償(ACC)   | 地域組織          | トレイルビルダー業界の存在 | 余り見られない       | 観光・レク誘致         |
| 日本       | ×               | ×               | ×                   | △             | △             | ◎             | ×               |
|          | 多様かつ複雑          | 権利保障が曖昧         | 安全管理責任の不透明          | 限定的な地域組織      | 限定的な地域組織を通じて  | 限定的な地域組織が多く実施 | 野外活動自体の誘致に消極的   |

図3. スポーツ・レジャーによる森林の有効活用を促す上での日本と諸外国の違い



# 燃料用丸太の天然乾燥に必要な日数を 簡便に推定するツールを開発



木材加工・特性研究領域 渡辺 憲・鳥羽 景介・柳田 高志  
四国支所 小林 功

燃料用木質チップは含水率が低いほど大きなエネルギーが得られます。そのため、原料となる丸太を土場に積み、自然に乾燥(天然乾燥)してからチップにすることで、手間をかけず低コストで含水率を下げる工夫がなされています。しかし、丸太の乾きやすさは時期や地域によって異なるため、乾燥日数を事前に把握することが難しいという問題がありました。そこで、スギ丸太の天然乾燥試験を福井県と茨城県の2か所で行い、得られたデータをもとに、乾燥日数を簡便に推定するツールを開発しました。このツールを用いると、時期を問わず乾燥日数を把握することができ、低含水率で品質の高い燃料用木質チップの効率的な生産につながります。

## 成果

### 丸太を自然に乾燥してから燃料用木質チップへ

近年、木質バイオマスを利用した発電や熱供給事業が各地で進められており、未利用間伐材等の丸太から燃料用木質チップを生産する動きが活発化しています。燃料用木質チップは含水率が低いほど大きなエネルギーが得られるため、伐採した丸太を土場に積み(図1)、自然に乾燥(天然乾燥)してからチップにするという生産方式が主流となっています。

### どのくらいの期間乾燥すればいいのかわからない

通常、丸太の乾燥には数ヶ月程度の長い時間がかかるので、あらかじめ乾燥日数の目安をつけておくことは燃料用木質チップを効率的に生産する上で重要なことです。しかし、丸太の乾きやすさは気象条件に左右され、時期や地域によって大きく異なります。その上、同じ環境であっても丸太の乾き方は1本1本異なるため、乾燥日数を事前に把握することが難しいという問題がありました。

### 乾燥日数を推定するツールを開発

そこで本研究では、スギ丸太の乾燥試験を福井県あわら市と茨城県つくば市で行い、得られたデータをもとに乾燥日数を推定するツールを開発しました(図2)。このツールはExcel形式となっており、乾燥前の丸太の情報(含水率や直径、長さなど)、乾燥を開始する月、目標とする含水率(何パーセントまで乾燥するか)、乾燥実施場所に近い地点のアメダスデータ(月ごとの気温と降水量)を入力することで、乾燥日数の推定値が求められます。これによって時期を問わず乾燥日数を把握することができるようになり、低含水率で品質の高い燃料用木質チップの生産を効率的に行えます。

## 今後の取り組み

このツールは限られた試験データを元に作られているため、今のところ使える場面が限られます。例えば、樹種はスギを対象としており、日当たりと風通しの良い場所で丸太を山積み(いわゆる「はい積み」)にすることを想定しています。また、日本全国のうち適用可能な地域は一部の沿岸部に限定されます(図3)。今後は適用範囲を広げられるよう試験データの収集とツールの改良に努めていきます。

## 研究資金と課題

本研究は、環境省・林野庁の実証事業「木質バイオマスエネルギーを活用したモデル地域づくり推進事業」による成果の一部です。

## 文献

渡辺憲(他)(2017) 階層ベイズモデルを用いた丸太の天然乾燥における乾燥時間の推定および丸太の諸形質が乾燥性に及ぼす影響の評価. 木材学会誌, 63, 63-72.

渡辺憲(他)(2018) 燃料用丸太の天然乾燥試験ー福井県における乾燥事例. 木材工業, 73, 98-103.

## 専門用語

含水率: 物質に含まれる水分の割合。



図1. 燃料用丸太の天然乾燥の風景



図3. ツールを適用可能な地域

## 燃料用丸太の天然乾燥において乾燥日数を推定するツールを開発しました

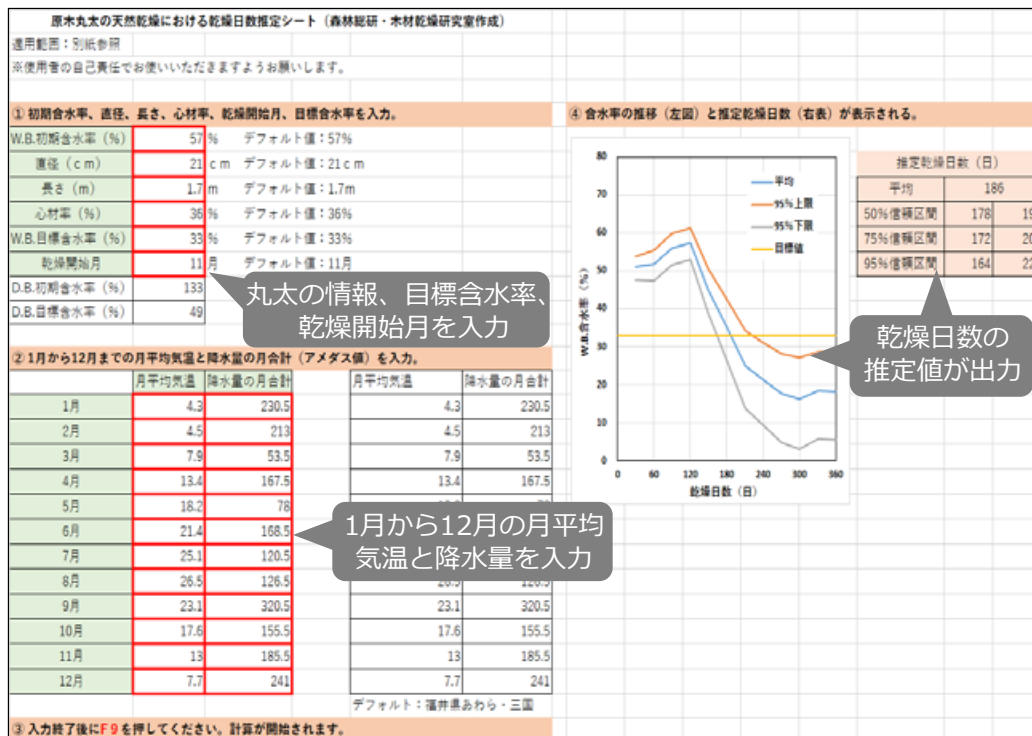


図2. 乾燥日数推定ツール



# 木材の繊維に直交する(横)方向の変形や破壊現象へ影響する因子を探る



木材加工・特性研究領域 三好 由華  
京都府立大学 神代 圭輔・古田 裕三

木材は不均質な組織構造をもつため、その力学的性質は繊維に沿った(縦)方向と繊維に直交する(横)方向で大きく異なります。特に、横方向の力学的性質は「木材の乾燥割れを防ぐ」ことや「自在な形状に木材を変形させる」ために不可欠な情報です。しかし、横方向の力学的性質は木材の組織構造の影響を受けてばらつきが大きいため、複雑なものとして十分に研究が進められてきませんでした。本研究では、組織構造の変形や破壊の現象を敏感に捉えることができる試験条件を検討し、横方向の力学的性質へ関与する因子を評価する手法を確立しました。これにより、木材中の破壊しやすい部位や変形しやすい条件を組織構造の観点から明らかにしました。

## 成果

### 横方向の力学的性質は木材の乾燥や変形加工において重要な要素

木材の繊維に沿った(縦)方向の力学的性質は、柱や梁の強さといった、建築物の強さに直接かわる重要な性質であるため、これまでに数多くの研究が行われてきました。一方で、繊維に直交する(横)方向の力学的性質は、木材中の水分量や木材の組織構造の影響を受けて複雑なふるまいを示し、樹種ごとのばらつきも大きいことから、何の因子がどのように力学的性質の発現に関与しているか評価する手法がこれまでに確立されておらず、研究も少ない状況にありました。

しかし、横方向は木材の乾燥や変形加工の際に、引っ張られる力(引張応力)によって割れが発生する方向であるため(図1)、木材を「割れないように乾燥する」ことや「自在な形状に変形する」ためには、横方向の力学的性質は制御すべき重要な要素です。そこで、本研究では、横方向の力学的性質へ関与する因子を評価する手法を確立し、まずは、変形や破壊現象に及ぼす組織構造の影響を明らかにすることを目指しました。

### 組織構造の影響を際立たせる実験手法の確立

横方向の変形や破壊現象へ組織構造が及ぼす影響を明らかにするためには、細胞が変形しやすく、しかも、どこで破壊したかを観察しやすい試験片形状である必要がありました。そこで、様々な樹種(図2)から0.1mm厚の薄い試験片を作製し、引張試験を行いました。引っ張る方向に対して年輪が平行(0°)、直交(90°)、その中間(45°)となる試験片を用いることで、細胞の形が変形しやすい条件を明らかにすることができました(図3)。また、顕微鏡写真を観察することで、木材中の破壊しやすい細胞や部位を明らかにすることができました。

### 横方向の変形や破壊現象は組織構造に大きく支配されている

結果の一部を図4に示します。強度(破壊時の応力)は、放射組織が発達した広葉樹において大きい傾向を示しますが、道管が環状に配列したケヤキでは低く、道管を持たないヤマグルマでは高い値を示しました。また、破壊ひずみ(破壊までの変形量)は、同程度の密度にも関わらずスギとヒノキで大きく異なりました。横方向の力学的性質は、縦方向とは異なり、密度と明確な関係を示さない場合があることが明らかになりました。また、放射組織の幅、道管の大きさや配列など木材の組織構造の特徴が、横方向の力学的性質に大きく影響を及ぼしていることを示すことができました。この成果は、木材の乾燥や変形加工の過程において割れを防ぐためには、何の因子に着目して、どのような制御を行えば良いか考えるための基礎的な知見となります。

## 研究資金と課題

本研究の一部は、森林総合研究所交付金プロジェクト「木材の変形加工や乾燥技術の高度化のための横引張変形および破壊特性の制御技術の確立」による成果です。

## 文献

Miyoshi, Y. et al. (2018) Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension. J Wood Sci, 64, 509-514

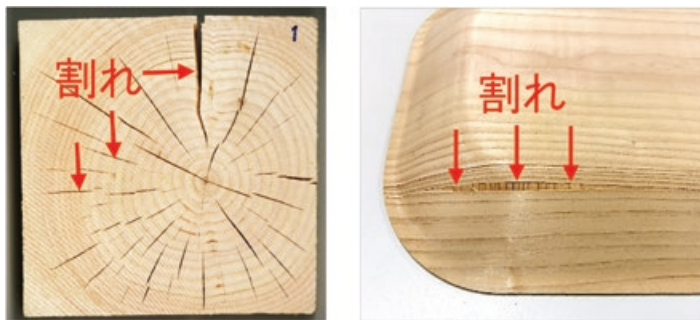


図1. 木材の割れの様子

角材の木口面では乾燥による割れが、積層成形したトラーでは曲面に割れが発生します。

| スギ                     | ヒノキ                    | カヤ                     | ヤマグルマ                  | ブナ                     | ホオノキ                   | ケヤキ                    | アラカシ                   |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 早材から晩材への移行急            | 早材から晩材への移行緩やか          | 早材から晩材への移行緩やか          | 無道管<br>放射組織の幅大         | 道管：散孔性<br>放射組織の幅大      | 道管：散孔性<br>放射組織の幅小      | 道管：環孔性<br>放射組織の幅大      | 道管：放射状<br>放射組織の幅大      |
| 0.34 g/cm <sup>3</sup> | 0.39 g/cm <sup>3</sup> | 0.50 g/cm <sup>3</sup> | 0.51 g/cm <sup>3</sup> | 0.58 g/cm <sup>3</sup> | 0.67 g/cm <sup>3</sup> | 0.88 g/cm <sup>3</sup> | 0.95 g/cm <sup>3</sup> |
|                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |

図2. 実験に用いた樹種の組織構造の特徴と密度

写真は森林総合研究所の日本産木材データベースから引用しています。

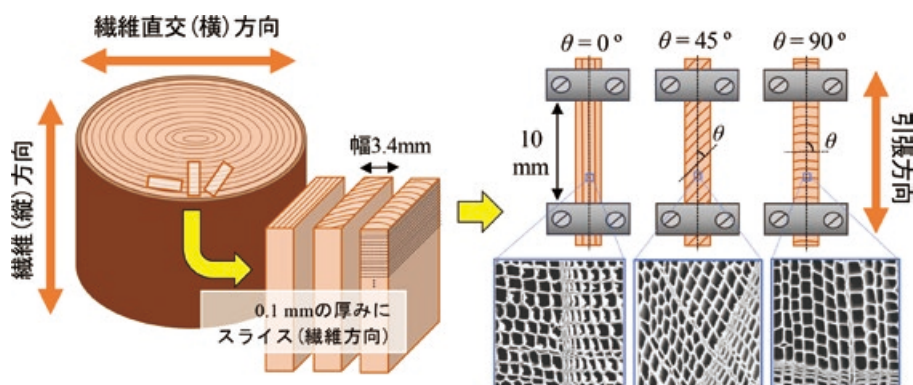


図3. 試験片の作製手順と測定時の様子

写真は測定時に細胞が変形している様子を示します。

45°の試験片では細胞が大きく変形する様子が認められました。

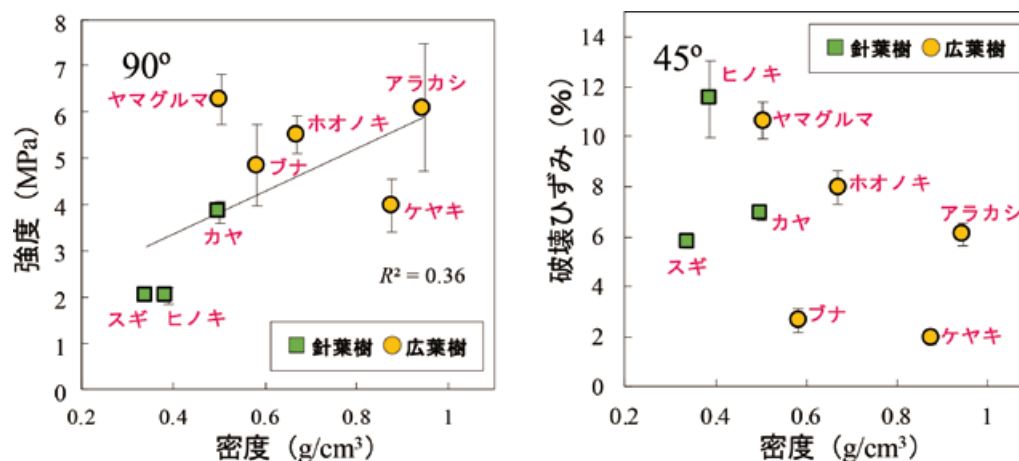


図4. 年輪傾角90°の試験片の強度と年輪傾角45°の試験片の破壊ひずみ

(Miyoshi, Y. et al. (2018)を改変して引用)



# 樹種のバリエーション拡大と耐火基準クリアで、 国産CLTの普及を促進



複合材料研究領域 宮武 敦 木材改質研究領域 上川 大輔

参画機関：構造利用研究領域、複合材料研究領域、木材改質研究領域、(株)竹中工務店、(一社)日本CLT協会、(公社)日本木材加工技術協会、愛媛県農林水産研究所林業研究センター、鹿児島県工業技術センター、広島県立総合技術研究所 林業技術センター、(地独)北海道立総合研究機構 林産試験場、富山県農林水産総合技術センター木材研究所、(国大)宇都宮大学、(国大)東京農工大、秋田県立大学木材高度加工研究所、(国研)建築研究所

平成30年に「CLTパネル工法」に関する建築基準関連法規が制定され、建築物の構造設計や防耐火設計において守るべき基準が示されましたが、それらの基準を守るために必要な技術の情報はまだ整備途上です。そのような中、私たちは、様々な樹種を用いて製造したCLTの強度データを収集し、その成果は国土交通省が指定するCLTの基準強度に反映され、樹種に応じた強度性能を用いた合理的な構造設計を可能にしました。また、壁用CLTに2時間の耐火性能を付与する技術を開発し、国土交通大臣の認定を取得しました。この結果、建物の壁に要求される最高の防耐火設計が可能になり、建物の高さに対する制限はなくなりました。

## 成果

### ヒノキやカラマツなど地域材を用いたCLTの強度性能把握

平成25年に制定された直交集成板の日本農林規格にはCLTの製造に用いてよい樹種として27の樹種が規定されましたが、平成28年に制定された「CLTパネル工法」に関する建築基準関連告示では、いずれの樹種で製造したCLTもスギと同等の強度性能とみなされていました。そこで、スギに加えて、ヒノキ、カラマツ、トドマツなどの地域材を用いて製造したCLTの強度データを収集してきました。その結果、樹種に応じて強度性能が異なること(図1)、また、それらの樹種を用いたCLTの強度性能が推定できることが明らかになりました。これらの成果は、国土交通省が指定するCLTの基準強度に反映され、樹種に応じた強度性能で設計することが可能になりました(図2)。スギの強度性能を補うためのヒノキやカラマツなどを複合した製品の開発や利用技術開発が進めば、製品の仕様のバリエーションが増え、それぞれの性能を活かした、より合理的な設計が可能になります。このことは、CLTの普及促進とともに、地域材の生産拡大につながると期待されます。

### CLT構造部材の火災安全性を確保するための 技術開発と実用化

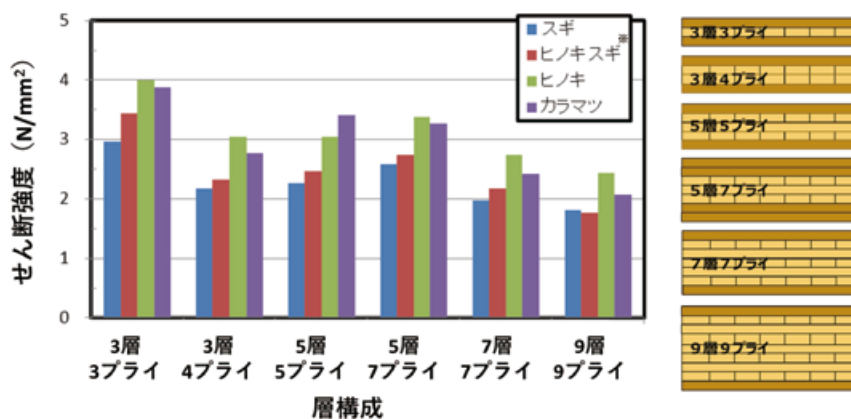
CLT構造部材を中高層建築に用いるには、2時間の火災に耐える性能(2時間耐火性能)を耐火試験により確認し、国土交通大臣の認定を受ける必要があります。CLT構造の外壁で2時間耐火の性能を持つ認定品はなく、中高層建築物へのCLT利用のネックとなっていました。そこで、CLTの表面を覆う

耐火被覆や取り付け方を検証する実験を行い(図3)、適切な厚みの強化せっこうボードや軽量気泡コンクリートで被覆することで、火災が2時間継続しても内部のCLTは焦げず十分な強さを保ち続ける性能を持つCLT壁部材を開発しました。この成果をもとに、CLTを使用した外壁及び間仕切壁の2時間耐火構造の国土交通大臣認定を取得しました(申請者：日本CLT協会)。荷重支持部にCLTを用いた外壁は日本初の認定となります。

今回の認定取得により、防火上は階数の制限なくCLT構造の外壁を建築物に用いることが可能となりました。また、CLT部材の接合部や耐火集成材との取合い部分、コンセント周囲等の弱点部分の火災安全性も確認しています。これらの成果と既認定のCLT床等の耐火構造とを組み合わせることにより、建物全体にCLTを使用した中高層建築物が実現できます。

## 研究資金と課題

強度性能に関するデータ収集は、林野庁委託事業(平成25年度補正～平成29年度、例えば「CLT等新たな製品・技術の開発促進事業」)で実施したものです。また、耐火性能に関する技術開発は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターの革新的技術開発・緊急展開事業(うち経営体強化プロジェクト)「CLTを使った構造物の施工コストを他工法並にする技術開発(平成29～31年度)」で実施したものです。



せん断強度（JAS規格の水平せん断試験による）は、樹種による差があることが明らかに。

図1. 地域材を用いたCLTのせん断強度の違い

※ヒノキスギ 外層(右図 ■)ヒノキ、内層(右図 ■)スギ

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

※ E1～E5：曲げ性能による区分、S1～S4：せん断性能による区分

告示改正前：全ての樹種はスギ同等E5、S4の性能として設計

告示改正後：全ての樹種はその性能に応じた等級で設計可能に

図2. 27樹種の強度性能に応じた区分



耐火試験中の炉内  
2時間経過時の温度は  
約1050℃に達する。



試験後の様子  
炎や煙は見られず、被覆材の  
脱落も無し



試験後の内部CLT表面の様子  
CLT表面に炭化は無く、十分な強度を  
保持した健全な状態。

図3. せっこうボード等で被覆した国産スギCLT壁の耐火試験



# 木材の美しさを長持ちさせる セルロースナノファイバー配合塗料の開発



木材改質研究領域 石川 敦子・小林 正彦・神林 徹 企画部 片岡 厚  
森林資源化学研究領域 下川 知子・林 徳子 研究ディレクター 眞柄 謙吾  
玄々化学工業株式会社 大木 博成・何 昕・伊藤 拓美

セルロースナノファイバー (CNF) は、木材の主成分であるセルロースをナノサイズまでほぐしたもので、様々な分野での用途開発が進められています。このCNFの用途の一つとして、CNFを配合した木材用塗料を開発しました。森林総合研究所で開発した酵素・湿式粉碎処理方法でスギからCNFを製造し、塗料に配合してスギ材を塗装したところ、CNFの配合によって、使用時の変色や表面欠陥を抑制できることがわかりました。CNF配合塗料を木材の塗装に用いることで、木材の美しさをより長持ちさせることが可能です。

## 成果

### 木材の美しさを長持ちさせることが求められている

公共建築物や商業施設、住宅等の様々な用途で、内外装ともに木材が使われる機会が増えています。こうした用途では、木材の美しさが長期間持続することが求められています。木材を塗装することで変色等を抑制できますが、ある程度の年月が経つと劣化するため、さらに美しさを長持ちさせることが望まれています。

### セルロースナノファイバー配合塗料の開発

セルロースナノファイバー (CNF) は、木材の主成分であるセルロースをナノサイズまでほぐしたもので、いろいろなものに配合することで強度等の性能を向上させることがわかっていました。そこで、木材用塗料にもCNFを配合すれば、塗膜の強度が向上し、塗装が長持ちするのではないかと予想し、CNFを塗料に配合する研究を進めました (図1)。木材塗装には一般的に、下塗り、中塗り、上塗りの3工程があります。このうち特に重要なのは、木材に浸透して基礎を固める下塗りと、塗装表面の強度や美観を高める上塗りです。そこで、CNFを下塗りや上塗り用の塗料に配合することで、塗装性能がどのように変化するのか調べました。

CNF配合塗料を上塗り又は下塗りに用いてスギ材を塗装し、人工太陽光と人工降雨を照射する促進耐候性試験を行ったところ、CNF配合塗料を用いたスギ材は、紫外線や雨水の影響を受けても表面欠陥の発生が少なくなること、特に下塗りに用いた場合には、表面の変色が大幅に抑制されることがわかりました (図2)。下塗り塗料では、CNFを配合すると、塗装後に塗料が乾く時、木材表面に微細な網目構造を形成し、木材と上塗り塗料の界面を安定化することで塗膜欠陥と変色が抑制されると推察されます。こうしたメカニズムについては、今後さらに研究を進める予定です。

木材の塗装は、一般に変色や塗膜割れ等の欠陥が目立つようになると塗り替えられます。開発したCNF配合塗料の塗り替え時期も、今後さらに試験時間を延長して見極める必要があります。しかし、図2に示した変色抑制効果が持続するこ

とを前提にすると、通常の倍以上長持ちする可能性があります。なお、本研究の成果は「木部用塗料及び塗装方法」として特許を出願しました。

実際に屋外で使用する場合には、前述の促進耐候性試験で発生する変色や欠陥のほか、物体の衝突による傷、カビや藻類の繁殖、さらに日当たりの強弱や風通しの有無といった設置環境の影響も受けるため、木製のベンチやフェンス等を、開発したCNF配合塗料で塗装し、屋外における経年変化の観察をしています (図3~5)。それらの結果を見ながら、出来るだけ低コストで、さらに長持ちするメンテナンス方法の開発を進める予定です。

## 研究資金と課題

本研究は、木質バイオマス加工・利用システム開発事業「酵素・湿式粉碎を用いたセルロースナノファイバー生産技術の確立と新規利用技術の開発」及び木材のマテリアル利用技術開発事業「地域材を活用したセルロースナノファイバーの用途技術開発」による成果です。

## 文献

大木博成 (他) (2017) 特願2017-46537.  
石川敦子 (他) (2019) 酵素・湿式粉碎処理により製造されたセルロースナノファイバーを配合した塗料の性質、木材保存、45 (2), 68-76.

## 専門用語

促進耐候性試験：人工太陽光と人工降雨を照射して、屋外での劣化を予測する試験。

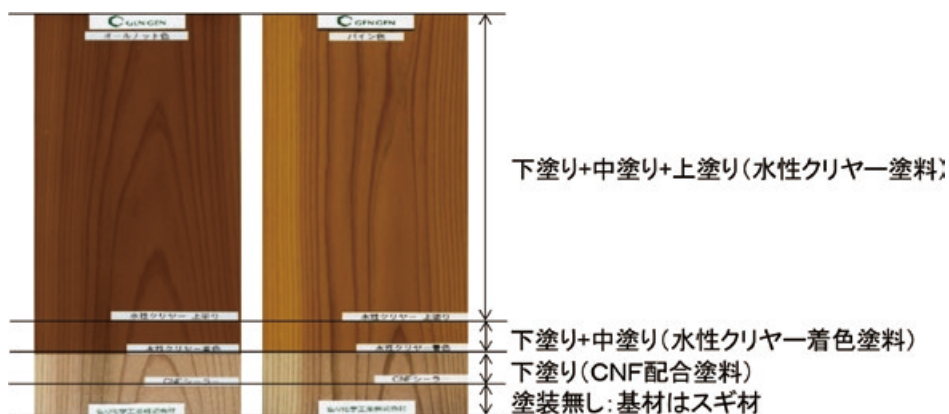


図1. 塗装見本(左:オールナット色、右:パイン色)

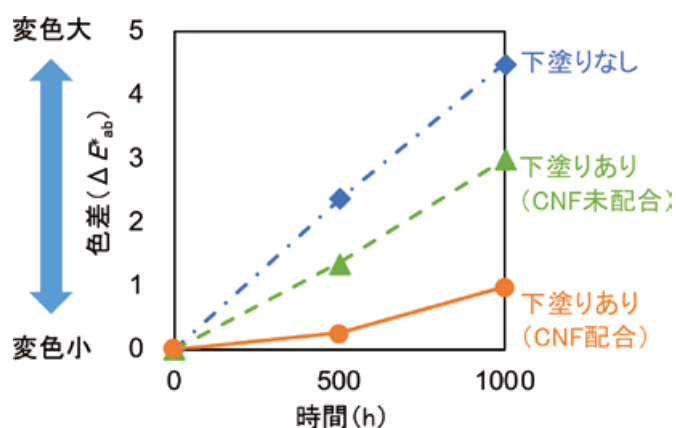


図2. 促進耐候性試験の結果

下塗り用塗料にCNFを配合すると変色が抑制されることがわかりました。  
(石川 他(2019)より修正して引用)



図3. CNF配合塗料を下塗りに用いて  
塗装した木製ベンチ



図4. CNF配合塗料を下塗りに用いて  
塗装した木製フェンス



図5. CNF配合塗料を下塗りに用いて工場塗装した  
木材で作製したフェンス(嶺北森林管理署)



# スギ材から製造した新素材「改質リグニン」を用いた自動車の開発



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

国立研究開発法人産業技術総合研究所 蛭名 武雄・石井 亮・棚池 修

株式会社宮城化成 小山 昭彦・伊藤 佑輝・岩田 伸一 株式会社光岡自動車 笠原 勝義

スギ材の約3割は「リグニン」という成分で構成されています。私達はスギ材のリグニンを、加工しやすい「改質リグニン」として取り出す技術を開発し、実用化に向けた取り組みを進めています。用途開発の一環として、改質リグニンを用いた繊維強化材 (FRP) の開発を進めたところ、従来製品よりも強度が向上し、長期耐久性試験においても高い性能を示すFRPの開発に成功しました。さらに研究を進め、高い加工精度や平坦性を確保することで、世界で始めて外装材にリグニン系材料を用いた自動車の試作に成功しました。現在、長期耐久性の評価を進めています。

## 成果

木材にはリグニンという成分が2~3割含まれています。リグニンは、木材をしっかりした構造にする役割をもつ化合物で、高い強度や耐熱性を示す優れた素材であることが知られています。しかしながら、リグニンは樹種や生育場所や部位により化学構造が異なるため、常に一定の性能が必要な工業製品化は困難でした。私達は、国内のスギ材のリグニンの特性が比較的均一であることを見だし、スギ材から性能の安定したリグニンを取り出す独自の技術を開発しました。開発したこの新素材「改質リグニン」は、森林由来の国産新素材として期待されています。

改質リグニンを樹脂成分として用いたガラス繊維強化材 (GFRP) の開発を進めました。図1に制作と評価の工程を示します。まず、改質リグニンを樹脂化するための様々な薬剤や条件を試し、改質リグニンと混ざりやすく、揮発性有機溶媒を用いないタイプの液状硬化剤を見出しました。次に改質リグニンと反応するエポキシ化合物を加え、均一に混合することで成形樹脂としました。成形樹脂を真空含浸法で型に設置したガラス繊維布に含浸させ、乾燥・仮硬化を行った後、型から外して120℃で最終硬化を行いました。作製したサンプルから生じる揮発性有機溶媒スチレンの量を評価したところ、改質リグニンを用いたGFRPの場合は、不飽和ポリエステル樹脂を含浸させる従来品の4500分の1未満となり環境にやさしい材料であることが確認されました(表1)。また、改質リグニンを用いたGFRPが、従来のGFRPよりも引張弾性率が10~20%向上していること、硬化処理前後の部品の収縮率は従来品と比較して一ケタ小さくなり、自動車用部材として十分な寸法精度を持つことも確認されました。

自動車の外装部品としてボンネットを試作し、株式会社光岡自動車の市販する自動車に取り付けました。ボンネットは、十分な強度や表面平坦性を示し、既存品と変わらない外観塗装を施すことも可能でした。内装部品としてはドアトリム4枚、スピーカーボックス、アームレストそれぞれ4つを試作し、取り付けました(図2)。この自動車は、世界初の改質リグニン使用

自動車として、平成30年10月23日にプレス発表しました。現在、車内環境(温度、湿度)を自動計測するとともに天候(降雨、日照)と走行を記録し、部品の経時変化の評価を進めています。改質リグニンを用いたFRPは、既存品より高い強度を持つため材料使用量を低減することも可能で、自動車の軽量化素材としても期待されています。

## 研究資金と課題

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

## 専門用語

繊維強化材(FRP): ガラス繊維、炭素繊維などの繊維をプラスチックの中に入れて強度を向上させた複合材料(FRP: Fiber-Reinforced Plastics)のこと。例えば、ガラス繊維を用いたものをGFRP、炭素繊維を用いたものをCFRPという。

エポキシ化合物: エポキシ基という反応性の高い化学構造を持つ化合物で、それを起点として架橋させ、全体を硬化できるため、熱硬化性樹脂に多用されている。

真空含浸法: ガラス繊維や炭素繊維などの強化繊維に樹脂を含浸させる際に真空引きをすることでFRPを効率的に制作する成型方法。

不飽和ポリエステル樹脂: 繊維強化材に多く用いられる石油化学系の樹脂。無水マレイン酸とグリコールの縮合反応により得られるポリエステルを、スチレンやメチルメタクリレートに溶解したものを加熱硬化させて製造される。

引張弾性率: 材料が受けた引張り応力を材料に生じたひずみで除した値で、この値の大きいほど一定荷重に対する変形が小さいことを意味する。

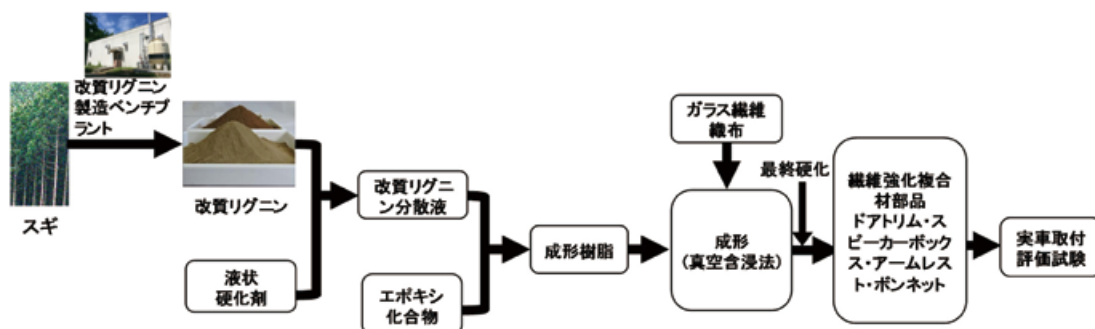


図1. 改質リグニンを用いた繊維強化材と自動車用部材の制作の工程図



図2. 改質リグニン繊維強化材を用いて試作した自動車

表1. 製造した繊維強化材からの揮発性有機化合物発生量

LB/試験FRP

| 測定成分         | 不飽和ポリエステル<br>(従来仕様品) | 改質リグニン使用 |
|--------------|----------------------|----------|
| ホルムアルデヒド     | 26                   | 0.06     |
| アセトアルデヒド     | 9.1                  | 0.05     |
| トルエン         | 0.09                 | <0.08    |
| エチルベンゼン      | 1.7                  | <0.08    |
| キシレン         | 0.35                 | <0.24    |
| スチレン         | 360                  | <0.08    |
| テトラデカン       | <0.08                | <0.08    |
| フタル酸ジ-n-ブチル  | <0.08                | <0.08    |
| フタル酸ジ-2-ヘキシル | <0.08                | <0.08    |

試験方法:トヨタ法「サンプリングバッグ法による揮発成分測定方法」

$$360 \div 0.08 = 4500$$

改質リグニンを用いたGFRPの場合は、不飽和ポリエステル樹脂を含浸させる従来品の4500分の1未満



# 未利用資源「トドマツ樹皮」有用成分の効果的な抽出法



森林資源化学研究領域 楠本 倫久・橋田 光・松井 直之  
関西支所 大平 辰朗

現在、トドマツは伐採時期を迎えており、その樹皮のほとんどが利用されずに大量に焼却処分されています。ところが、トドマツの樹皮は、 $\beta$ -フェランドレンや $cis$ -アビエノールといった大変有用な成分を、他のモミ属と比べて5～10倍以上多く含んでいることが分かりました。そこで、まず前者を減圧マイクロ波水蒸気蒸留法で、次に後者を超臨界二酸化炭素抽出法で抽出することにより、有機溶媒を使わずこれまでより短時間・高濃度で抽出することが可能となりました。

## 成果

### なぜトドマツ樹皮の利用が必要か

トドマツは北海道の人工林面積の約50%を占める主要な針葉樹です。戦後、大量に植えられたトドマツ林の半分以上が今伐採時期を迎えており、林地や製材工場では、枝葉や樹皮などが大量に産出されています(図1)。近年、枝葉から採れる精油に機能性が見出され、その一部が空気浄化剤などの原料として工業的に利用され始めていますが、樹皮の方は主に焼却処分されており、その価値は見出されていません。今後、これまで以上に産出量が増えると予想されるトドマツの樹皮から有用な成分を取り出すことで、樹皮の経済的価値を高め有効利用につなげることができそうです。

### 樹皮に豊富な高付加価値成分

トドマツ樹皮に含まれる成分を調べたところ、 $\beta$ -フェランドレンと $cis$ -アビエノールという2つの有用成分(図2)がそれぞれ1%程度含まれていることが分かりました。これは他のモミ属と比較しても5～10倍以上の量です。 $\beta$ -フェランドレンは、空気浄化剤や化粧品原料、透明性に優れた耐熱性バイオベースポリマー(バイオマス資源を主原料とする高分子)を製造するための原料としても期待されています。また、 $cis$ -アビエノールは、抗菌・抗ウイルス作用に加え、幻の香料とされる龍涎香(アンバーgris: マッコウクジラの結石)の代替原料としても期待されています。しかしながら、これらの成分は合成が困難であり、天然物から供給する必要があります。

### 環境汚染に配慮した効率的な取り出し方

これら2つの成分を、環境に配慮しながら連続して取り出す技術を検討しました。まず、トドマツ樹皮から $\beta$ -フェランドレンを得る方法として、減圧マイクロ波水蒸気蒸留(VMSD)法を選択しました(図3)。最適な条件では、従来法(マイクロ波を用いない水蒸気蒸留)に比べて処理時間を約33%短縮でき、

かつ5ポイント程度高い純度で目的物質を得られることが分かりました。次に、この抽出済の樹皮から $cis$ -アビエノールを取り出す方法を検討し、有機溶媒を使わない技術として注目されている超臨界二酸化炭素抽出(SFE)法を選択しました(図4)。最適な条件では、 $cis$ -アビエノールを50%以上含む抽出物を1工程かつ短時間(30分以内)で得ることができました。これに対して、従来の有機溶媒による抽出法で同等の純度を確保するためには少なくとも3工程を要し、長時間(24時間以上)を必要としました。

これら2段階の抽出法(図5)は、いずれも有機溶媒を使用しないため土壌や地下水を汚染することがありません。この抽出プロセスによってトドマツ樹皮から有用成分を効率的に回収でき、トドマツ樹皮の経済的な価値を高めることが可能になります。

## 研究資金と課題

本研究は、実施課題「生活環境改善に役立つ抽出成分の解明と利用技術の開発」による成果です。

## 専門用語

減圧マイクロ波水蒸気蒸留(VMSD)法: 減圧状態で熱効率に優れたマイクロ波加熱を利用した水蒸気蒸留法。一般的な水蒸気蒸留法に比べ、短時間かつ低温下で蒸留ができる。原料中の水分を利用することで、乾燥した抽出残渣が得られる。

超臨界二酸化炭素抽出(SFE)法: 臨界温度・圧力を超えた高密度の二酸化炭素を溶媒として用いる環境負荷の少ない抽出方法。室温に近い温度で抽出でき、抽出物の変質が少ないなどの利点がある。

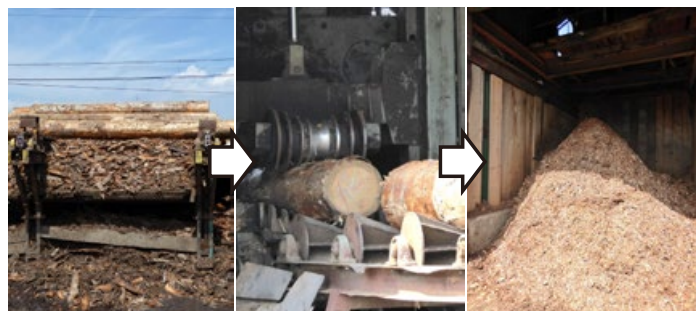


図1. 造材・製材工場で排出されるトドマツ樹皮

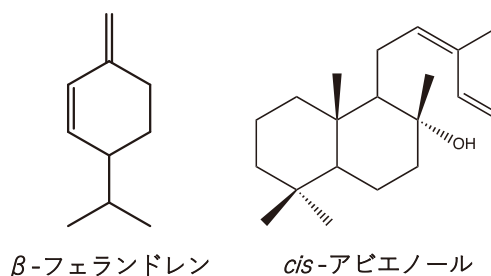
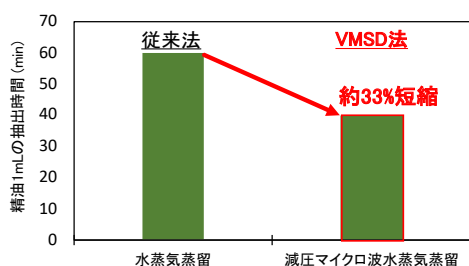
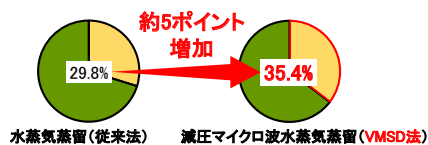


図2. 樹皮に含まれる有用成分

○トドマツ樹皮精油1mLの抽出時間

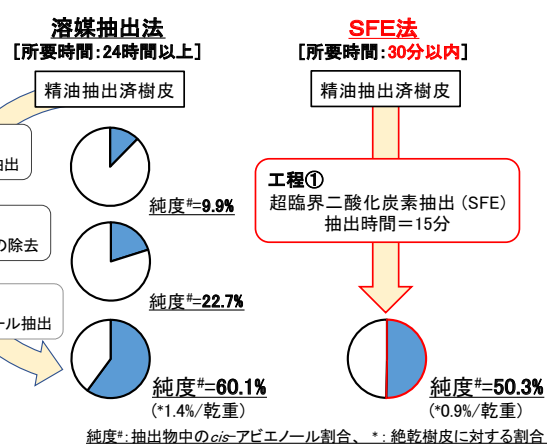


○トドマツ精油中の $\beta$ -フェランドレン含有量



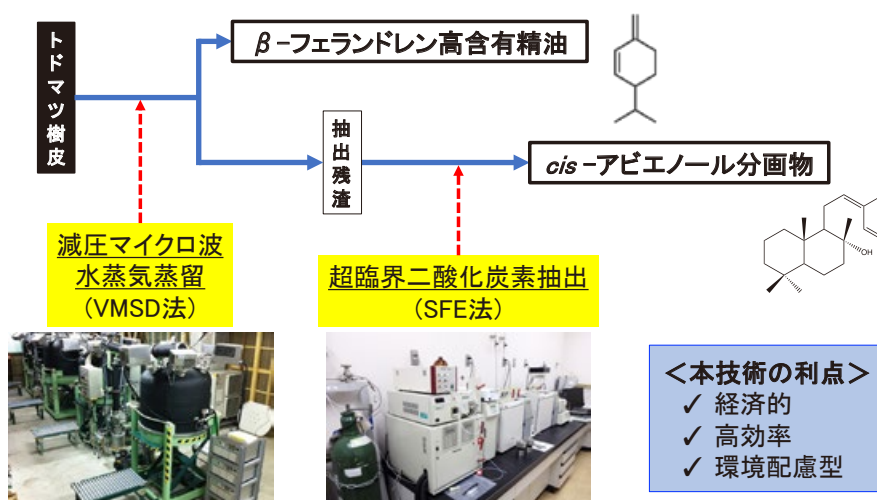
VMSD法 ⇒ 経済的かつ効率的に抽出・分離可能

図3. 減圧マイクロ波水蒸気蒸留による $\beta$ -フェランドレンの抽出



SFE法 ⇒ 簡易な操作で短時間に抽出・分離・精製可能  
有機溶媒を使用しない環境配慮型の技術

図4. 超臨界二酸化炭素抽出による*cis*-アビエノールの抽出



2段階の抽出・分離・精製プロセスを開発

図5. トドマツ樹皮の有用成分を効率的に得る方法

- <本技術の利点>
- ✓ 経済的
  - ✓ 高効率
  - ✓ 環境配慮型



# 遺伝情報を利用して気候変動による 樹木の分布変化を明らかにする



樹木分子遺伝研究領域 松本 麻子・上野 真義・内山 憲太郎

関西支所 中尾 勝洋 北海道支所 津山 幾太郎 大阪大学 青木 京子

岐阜県立森林文化アカデミー 玉木 一郎 筑波大学 津村 義彦 環境省 藤井 沙耶花

日本の森林の重要な構成樹種であるスダジイとモミ属3種を対象に、遺伝情報や種の分布情報、気候要因を複合的に解析し、これらの種が過去の気候変動の過程でいかに分布を変えて現在に至ったかを明らかにしました。スダジイは最終氷期最寒冷期に九州以南だけでなく関東南部などにも生育可能な環境があり、現在の地域性の基盤がすでに成立していたこと、モミ属では異なる種の分布が重なる地域があり、種間交雑が生じた遺伝的な痕跡が現在の個体群にみられることなどが分かりました。最終氷期の後、スダジイは分布域を拡大し、モミ属は縮小したと考えられます。このような分布変遷の推定は、将来の気候変動に対する個体群応答の予測にも応用できます。

## 成果

### 森林を構成する樹種の現在の分布域と遺伝的地域性

日本は国土の約2/3を森林が占める緑豊かな国です。地形は起伏に富み気候も一様ではないため、森林も実に多彩です。常緑広葉樹林の主要な構成樹種であるスダジイは温暖な環境を好み、東北南部から沖縄県八重山諸島にまで分布が広がっていますが、遺伝解析の結果から、地域性が異なる4つのグループ(奄美群島以南、九州南部付近、九州から新潟までの日本海側、関東・近畿・四国の一部)に分化していることが分かりました。

冷涼で湿性な環境を好むモミ属のシラビソ、ウラジロモミ、モミでは、モミが秋田県から鹿児島県の屋久島まで広範囲に、シラビソとウラジロモミは福島県から中部地方に分布します。さらに同じ地域でみると、モミ、ウラジロモミ、シラビソの順に低標高から高標高に向けて分布域を画しています。この3種は遺伝的には互いに明確に異なっていることが分かりましたが、種の中での地域性はそれほど明瞭ではありませんでした。

### 最終氷期最寒冷期の推定分布域

これらの樹種は、どのような分布の変遷を経て今に至ったのでしょうか。現在の分布域と気象データから生育条件を探り、過去の気候変遷に投影して生育域を推定しました。

スダジイは約2万1千年前の最終氷期最寒冷期(LGM)に比較的温暖だった九州南部や南西諸島に逃避していたとされますが、現在、遺伝的地域性が異なるグループが分布する九州から新潟までの日本海側や関東・近畿・四国の一部などにも、LGMに生育可能な環境があったことが分かりました(図1)。現在みられる遺伝的地域性の成立に関するモデル推定では、LGM以前、すでに地域性は形成されていて、各地の個体群はその地域で生き延びていたことが推察されました。また、モミ属ではLGMの分布域は各種とも現在よりかなり広く、東北や四国ではモミとウラジロモミの分布の重なりも検出されました。それらの地域では、モミなのにウラジロモミのミトコンドリアDNAを持つ個体や、ウラジロモミなのにモミのもの

を持つ個体が検出されており、分布の重複時に種間交雑が生じた可能性が推察されました(図2)。

### 遺伝情報と将来予測

LGM以降、日本の平均気温は約5~7度上昇したとされます。その過程でスダジイは分布域を拡大し、モミ属は縮小しました。このような分布変遷の推定手法は、将来の気候変動に対する個体群分布の推定にも応用できます。今後、環境条件と遺伝的地域性の統合解析から気候変動に対する個体群の応答を明らかにし、森林分布などについてのより精度の高い将来予測を行っていきます。

## 研究資金と課題

本研究は、環境省地球環境保全研究費「自然再生事業のための遺伝的多様性の評価技術を用いた植物の遺伝的ガイドラインに関する研究」、JSPS科研費「ブナ科植物とそれに付く植食性昆虫の遺伝構造比較による照葉樹林の分布変遷の解明」(JP10J40030)、「相互作用する植物・昆虫・菌類のゲノム解析による照葉樹林の変遷過程の解明」(JP15J40011)、「樹木種の浸透性交雑を通した適応的遺伝子の獲得プロセスの解明」(JP15K07489)、「RADseq比較ゲノム解析による照葉樹林の生物間ネットワークの変遷過程の解明」(JP18K06381)および総合地球環境学研究所プロジェクトD-02「日本列島における人間—自然相互関係の歴史的・文化的検討」による成果です。

## 文献

Aoki, K. et al. (2018) Approximate Bayesian computation analysis of EST-associated microsatellites indicates that the broadleaved evergreen tree *Castanopsis sieboldii* survived the Last Glacial Maximum in multiple refugia in Japan. *Heredity*, 122, 326-340.

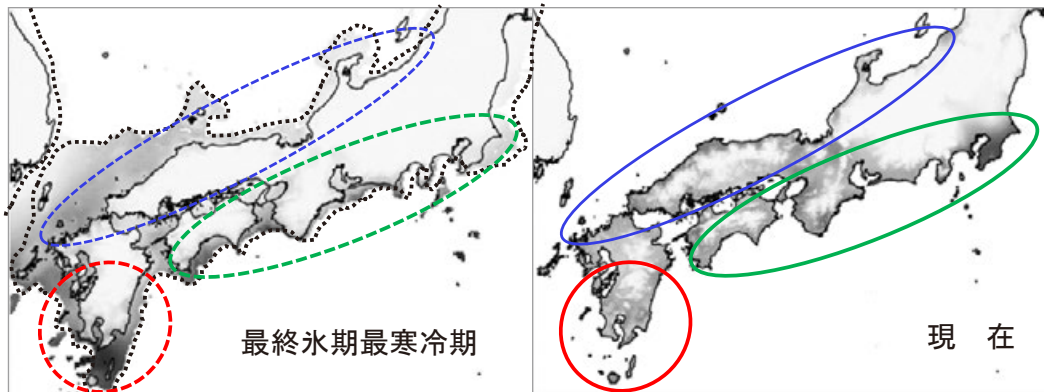


図1. スダジイの最終氷期最寒冷期と現在の分布

最終氷期最寒冷期、左図の破線(黒)で示すように海岸線は現在よりもかなり沖に移動していたと考えられます。地図上の色が濃い部分はスダジイが生育可能な範囲です。赤、青、みどりの楕円で囲んだ地域には、現在、遺伝的に異なるグループが分布しています(奄美群島以南のグループは図示されていません)。最寒冷期には温暖な九州南部(赤)にまで分布が追いやられていたとされていますが、九州から新潟までの日本海側(青)や関東・近畿・四国(緑)にも生育できる環境があったことが分かりました。その後の気温上昇などの気候変動に伴い、スダジイの分布は右図のような現在の範囲にまで拡大しました。

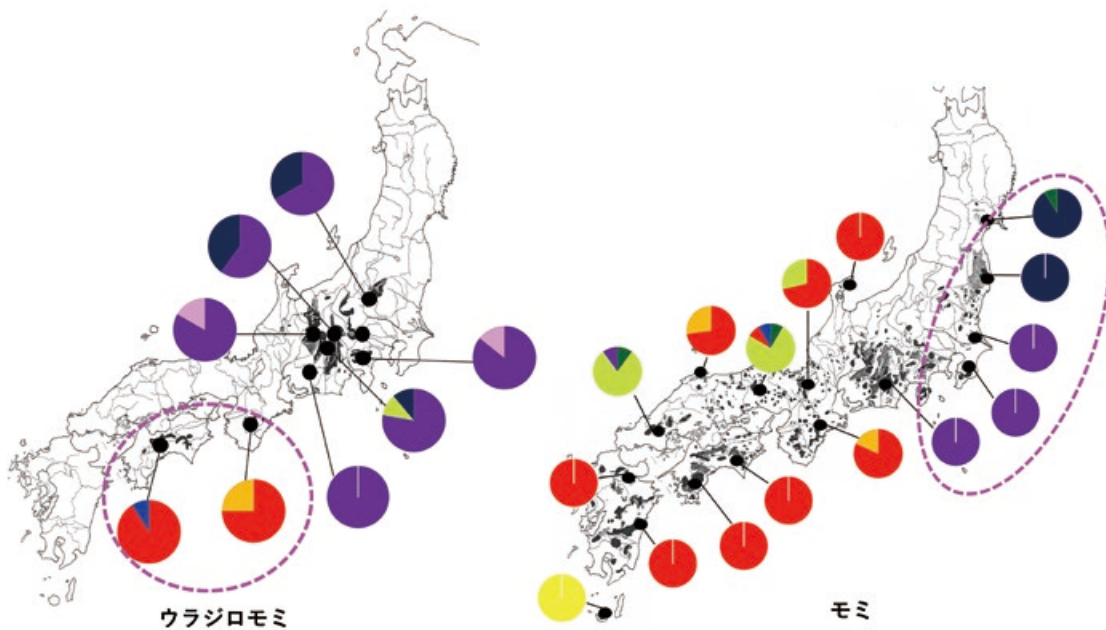


図2. ウラジロモミとモミのミトコンドリアのDNAタイプ組成の地域性

ミトコンドリアDNAは母方からのみ子(種子)に受け継がれ、拡散範囲が花粉と比べても限られることから、遺伝的分化が明瞭に検出できる可能性が高い遺伝情報です。ミトコンドリアDNAの塩基配列が異なる個体の割合を地域ごとに調べると、ウラジロモミでは紫(●)のDNAタイプの頻度が最も高く、モミでは赤(●)のDNAタイプが高頻度でした。四国と紀伊半島のウラジロモミ個体群ではモミのDNAタイプ(●)が検出され、東日本の太平洋側のモミ個体群ではウラジロモミのDNAタイプ(●)が検出されました(破線で囲った地域)。これらの地域では、最終氷期最寒冷期における2種の分布の重なりが検出され、種間交雑が生じた可能性が推察されます。



# 利用可能なシイタケ原木林の判定技術及び 樹木への放射性セシウム吸収抑制技術の開発



きのこ・森林微生物研究領域 平出 政和・小松 雅史

震災復興・放射性物質研究拠点 三浦 寛 立地環境研究領域 平井 敬三・長倉 淳子・金指 努

北海道支所 伊東 宏樹 関西支所 齊藤 哲

東京大学 田野井 慶太郎・益守 眞也・小林 奈通子・二瓶 直登

栃木県林業センター 石川 洋一・今井 芳典・杉本 恵里子・齊藤 佳緒里

放射性セシウムに汚染された地域のシイタケ原木の生産再開に向けて、汚染が軽微な地域において、伐倒せずに樹木の放射性セシウム濃度を検査する装置とともに、シイタケ原木林としての利用可否を判定する手法を開発し、その有効性を確認しました。一方、直ちに利用再開が困難な地域に対しては、土壌から樹木への放射性セシウム吸収を抑制する方法を探り、樹木の放射性セシウム濃度は土壌中の交換性カリウム量が多くなるほど低下すること、原木林へのカリ肥料の散布が樹木への放射性セシウム吸収を抑制することを明らかにしました。

## 成果

### 放射能汚染の程度に応じた対策

東京電力福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性セシウムによる森林汚染のため、事故から8年が経過した現在でもシイタケ原木林の利用は停滞したままとなっています。原木林の利用再開に向けた対策が必要とされていますが、原木林の林齢及び汚染程度は様々なため、これらの状況に応じて対策を講じる必要があります。

### 短期的な対策－利用可能な原木林の判定－

原木栽培に利用可能な原木の放射性セシウム濃度は50Bq/kg以下に定められています。しかし、それを判定するためには、樹木を伐倒して放射性セシウム濃度を測定しなければなりません。そこで、樹木を伐倒せずに原木としての適否を判定する可搬型検査装置(図1)を開発するとともに、伐採を予定している原木林内の樹木をすべて検査しなくてもその原木林が利用可能かを判定する手法を開発しました。本判定方法により利用「適」と判定された原木林から取り出した原木の放射性セシウム濃度はすべて50Bq/kg以下でしたが、「不適」と判定された原木林には50Bq/kgを上回る原木が混入していました(図2)。これらの手法とは別に栃木県では原木用の非破壊検査装置も開発・導入しており、両判定方法により判定精度を高める予定です。

### 中長期的な対策－樹木への放射性セシウム吸収抑制－

放射性セシウム濃度が高く、直ぐに利用困難な原木林では、樹木による土壌からの放射性セシウム吸収を抑制するために、樹木の放射性セシウム濃度を決める要因を解明しました。樹木を伐倒せずに採取できる当年枝(その年の春から夏に成長した枝)を利用して約10km四方の範囲で調査を行ったところ、樹木の放射性セシウム濃度は、土壌中の放射性セ

シウム量ではなく、交換性カリウム量に強く影響されることを明らかにしました(図3)。また、幹の放射性セシウム濃度が当年枝の放射性セシウム濃度と比例していることから、当年枝の調査をもとに幹の放射性セシウム濃度を推定する方法を確立しました(図4)。更に、原木林にカリ肥料を散布して交換性カリウム量を増加させたところ、面移行係数が減少し(図5)、樹木による放射性セシウム吸収を抑制することに成功しました。今後、原木林でカリ肥料散布による放射性セシウム吸収抑制対策を実施するには、散布による放射性セシウム吸収抑制効果の持続期間や最適な散布量についてさらに検討する必要があります。

本稿で紹介した成果の詳細は、森林総合研究所のホームページで公開されています(<http://www.ffpri.affrc.go.jp/rad/pubs.html>)。

## 研究資金と課題

本研究は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターのイノベーション創出強化研究推進事業「放射能汚染地域におけるシイタケ原木林の利用再開・再生技術の開発」(課題番号 28028C)の支援を受けて行いました。

## 専門用語

交換性カリウム量: 植物が土壌から吸収出来るカリウム量を示す。

面移行係数: 土壌等から樹木等への放射性セシウムの移行のしやすさを示す指標。



図1. 伐倒せずに樹木の放射性セシウム濃度を測定できる可搬型検査装置

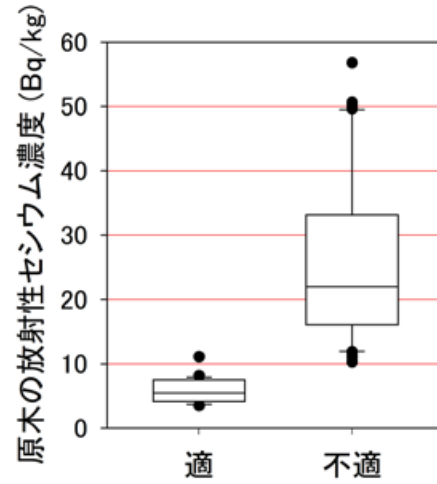


図2. 判定した原木林から取り出した原木の放射性セシウム濃度

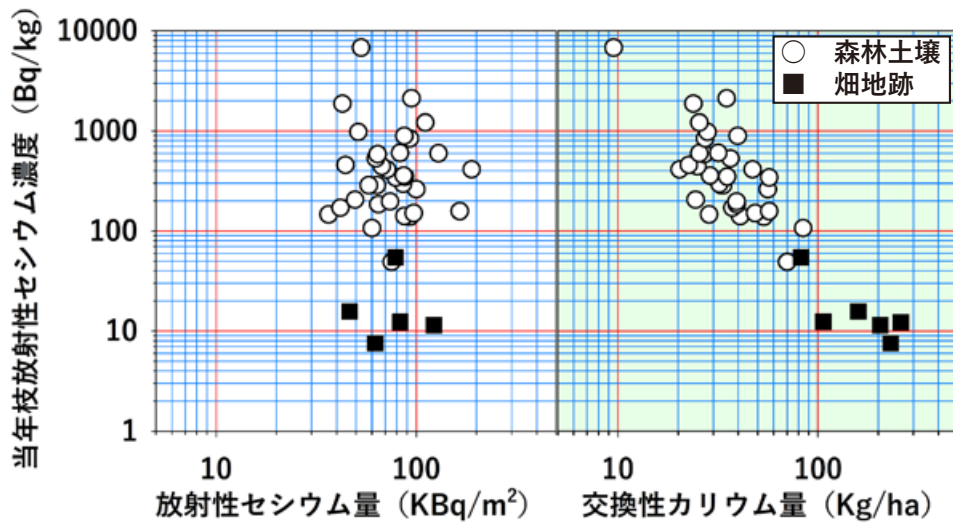


図3. 樹木の放射性セシウム濃度に影響を与える要因

左: 約10km四方の範囲では、土壌の放射性セシウム量と樹木の放射性セシウム濃度の間に特別な関係は見られません。  
右: 土壌の交換性カリウム量が増加すると樹木の放射性セシウム濃度は減少します。

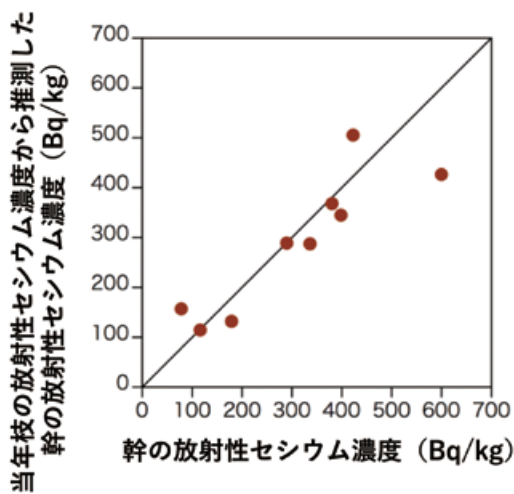


図4. 当年枝の放射性セシウム濃度から推測した樹木幹の放射性セシウム濃度

樹木を伐倒せずに原木として使用する幹の放射性セシウム濃度が推定できます。

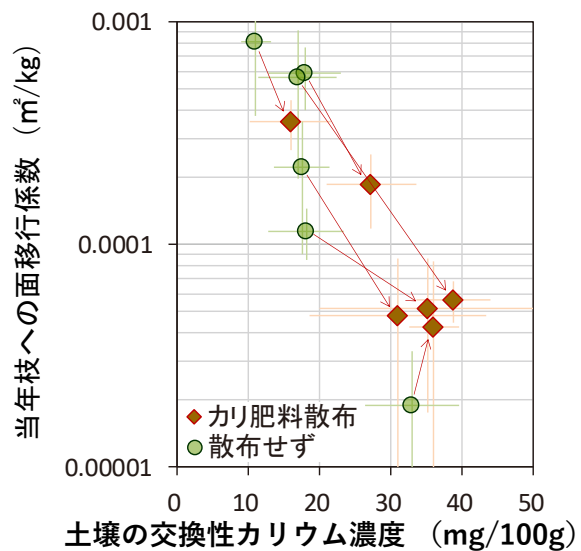


図5. カリ肥料の散布による放射性セシウムの吸収抑制効果

カリ肥料を散布すると大部分の原木林で放射性セシウムの面移行係数は減少します。



# カラマツの種子をつけやすくする方法の開発 —カラマツ苗木の安定供給に向けて—



林木育種センター 高橋 誠・松下 通也・田村 明  
山梨県森林総合研究所 西川 浩己

カラマツは材に強度があるため近年注目され、造林のための苗木の需要が高まっていますが、慢性的に苗木が不足しています。その原因は苗木を生産するための種子の不足です。そこで、カラマツに種子をつけやすくする方法を明らかにするために、カラマツ採種園において光環境の測定と着果量の調査を行いました。調査結果を解析したところ、カラマツの着果には樹冠が受ける光の強さが密接に関係していることを明らかにしました。また、光環境を改善する施業と環状剥皮処理を併用することにより、さらに着果量が増大することも明らかにしました。

## 成果

### カラマツとカラマツの種苗生産

カラマツはスギ、ヒノキに次いで人工林面積が広く、特に中部地方以北の地域において重要な造林樹種となっています。また、材に強度があるため、近年集成材や合板の材料としての需要が高まっています。年平均で1千万本以上のカラマツの苗木が生産されています。それでも慢性的に苗木が不足する状況が続いています。これには、カラマツの種子の豊凶が顕著なため、苗木生産に必要なカラマツ種子が不足していることが密接に関係しています。このため、カラマツの苗木を安定的に生産・供給するために、着果量を増大させる要因を明らかにしました。

### カラマツ採種園における光環境と種子生産の調査とデータ解析

山梨県のカラマツ採種園において、各採種母樹の光環境を地上高別に調査するとともに、これらの母樹の着果量を調査し、その調査データを一括して統計解析することにより、光環境とカラマツの種子生産性との関係について明らかにしました。

その結果を図1に示しました。2つのグラフの横軸は、光環境を樹冠が受ける光の強さ（相対光量子束密度）として表しています。各グラフの右にいくほど明るいことを、左にいくほど暗いことを意味しています。縦軸は、それぞれの明るさにおける各着果指数別の個体の割合を統計解析により推定した結果です。光の強さが50%以下では着果しない個体の割合が半分以上を占めていますが、光環境が改善すると、着果しない個体の割合は大幅に減少しており、着果には光環境が大きく影響しています（図1a）。そこに、環状剥皮処理（図2）を組み合わせると2つの処理の相互作用により、さらに着果する個体の割合が高まることが推定されました（図1b）。

### 種子生産性を高めるためのカラマツ採種園の管理

今回の解析により、光環境の改善の有効性と、それを環状剥皮処理と併用することによる着果促進の効果を調査データに基づいて初めて定量的に明らかにすることができました。これらの結果から、既に設定されているカラマツ採種園において受光伐により採種園内の光環境を改善した上で、採種母樹に環状剥皮処理を行うことにより、カラマツの種子生産量を高めることができるものと期待されます。

## 研究資金と課題

本研究は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターの革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）「カラマツ種苗の安定供給にかかる技術開発」による成果です。

## 専門用語

採種園：山行き苗木用の種子を生産するための園地。通常、成長などが優れている樹木（精英樹）のクローンで構成する。

環状剥皮処理：カラマツなどにおいて、着果を促進するために、鋸等の道具を用いて樹皮を剥皮する処理。幹の樹皮を半周する剥離処理を互い違いに2段行う方法がしばしば用いられる。

受光伐：採種園において、園内の採種母樹の光環境を改善するために行う列状等の間伐のこと。

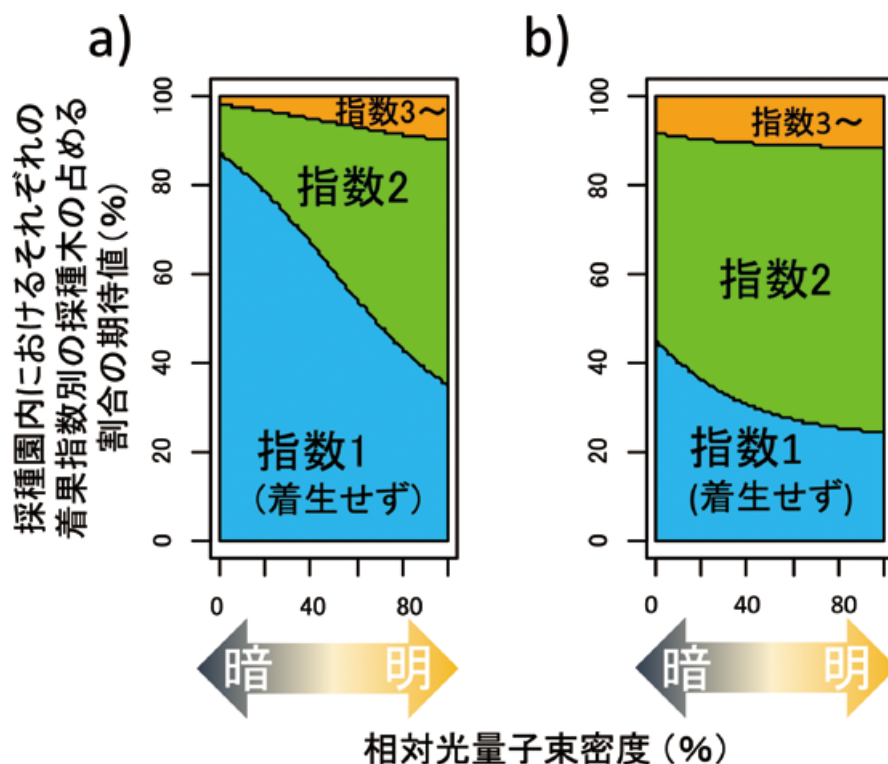


図1. 光環境改善と環状剥皮処理による着果の促進効果

(a)は光環境の変化と着果との関係を、(b)はそこに環状剥皮処理の効果が加わった場合の結果を表しています。横軸は、光条件を樹冠が受ける光の強さ(相対光量子束密度)を、縦軸は、それぞれの明るさにおける各着果指数別の個体の割合を統計解析により推定した結果を表しています。着果指数は、球果の着果量を評価するための指数で、全く着果がみられない1から樹冠全面に密に着果がみられる5までの5段階で評価しています。



図2. 環状剥皮処理を行ったカラマツの樹幹

鋸等の道具を用いて、互い違いに2段の剥皮処理を実施しています。(西川浩己氏撮影)



# ブナ種子の超低温保存技術の開発



林木育種センター 遠藤 圭太・松下 通也・木村 恵・栗田 祐子・安部 波夫・高橋 誠・生方 正俊  
関西育種場 山田 浩雄 北海道育種場 花岡 創 林野庁 塙 栄一・木下 敏

ブナは日本の森林を構成する主要樹木の一つです。しかし、今後、地球温暖化によって生育地が著しく減少すると予測されており、日本のブナ遺伝資源の減少・滅失を防ぐための一つの方策として種子の長期保存が求められています。そこで私たちは、ブナ種子の超低温保存技術の開発に取り組みました。そして、ブナの種子が乾燥法によって、保存前に含水率を最適値に調整すると高い生存率を維持して-170℃で保存できることを明らかにしました。今後、全国で実施されているブナ林の保全・再生事業に貢献できるものと期待されます。

## 成果

### ブナ遺伝資源の長期保存の必要性

ブナ(図1)は、日本の森林を構成する主要樹木の一つです。しかし、これまでに多くのブナ林が失われ、今後は地球温暖化によって生育地がさらに縮小することが危惧されています。そのため、ブナ遺伝資源を早急に確保する必要があり、それらを効率よく保存するための種子の長期保存技術の開発が喫緊の課題となっています。

### 乾燥法によるブナ種子の超低温保存

超低温保存技術は、-150℃以下の超低温温度で生物の器官や細胞を保存する方法で、植物種子の長期保存にも利用されている技術です。一般的な冷蔵庫や冷凍庫では長期間保存できない試料を長期間にわたって保存できることが利点の一つです。そこで本研究では、ブナ遺伝資源の永久的な保存を目指し、ブナ種子(図2)の超低温保存技術の開発に取り組みました。

ブナの種子は通常25~30%程度の水分を持ち、そのままでは超低温保存することができません。そこで、乾燥法により水分量を低下させた含水率の異なるブナの乾燥種子を用いて超低温保存試験をしました。すると、-170℃で超低温保存したブナの保存種子の生存率は、保存時の種子含水率の違いによって異なることが分かりました(図3)。そこで、統計モデルを用いて種子含水率と超低温保存後の種子の生存率の関係を解析し、超低温保存に最適な種子の含水率を調べました。すると、保存後も高い生存率を維持できる種子含水率は9~12%であるということが分かりました。これらの結果から、ブナの種子が乾燥法によって-170℃で超低温保存できること、さらには、高生存率を長期間にわたり維持して保存するための種子含水率の最適値が明らかとなりました。

### ブナ林の保全、再生事業への貢献

日本のブナ林の現状とその厳しい将来予測から、現在は、全国的にブナ林の保全、再生事業が展開されています。これらの取り組みを今後も継続していくためには、ブナの苗木を持続的に生産し、供給できる体制が必要です。本研究で確立した種子の超低温保存技術は、日本のブナ遺伝資源の減少や滅失を防ぐだけでなく、苗木生産のための種子の供給源としても利用することができます。

## 研究資金と課題

本研究は、実施課題エイb3「林木遺伝資源の利用促進に向けた保存・評価技術の開発」における構成課題「栄養体および種子等の長期保存技術の高度化」による成果です。

## 文献

Endoh, K. et al. (2018) Cryopreservation of *Fagus crenata* seeds: estimation of optimum moisture content for maintenance of seed viability by Bayesian modeling. Can. J. For. Res., 48, 192-196.

## 専門用語

乾燥法: 乾燥処理をして試料の含水率を低下させて保存する方法。

遺伝資源: 動植物の細胞や個体そのものなどの遺伝子を含む価値のある生物材料。



ひのえまた  
図1. 福島県檜枝岐村のブナ林  
ブナは日本の冷温帯広葉樹林の優占種です。

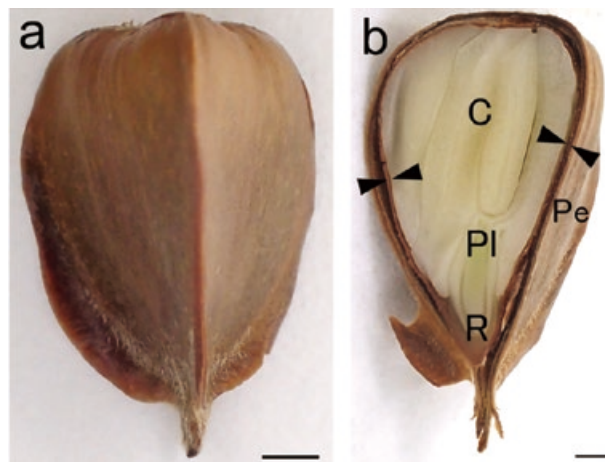


図2. ブナ種子の外観(a)と縦断面(b)  
C, 子葉; PL, 幼芽; R, 幼根; Pe, 果皮; 矢尻, 種皮 Bars=1mm

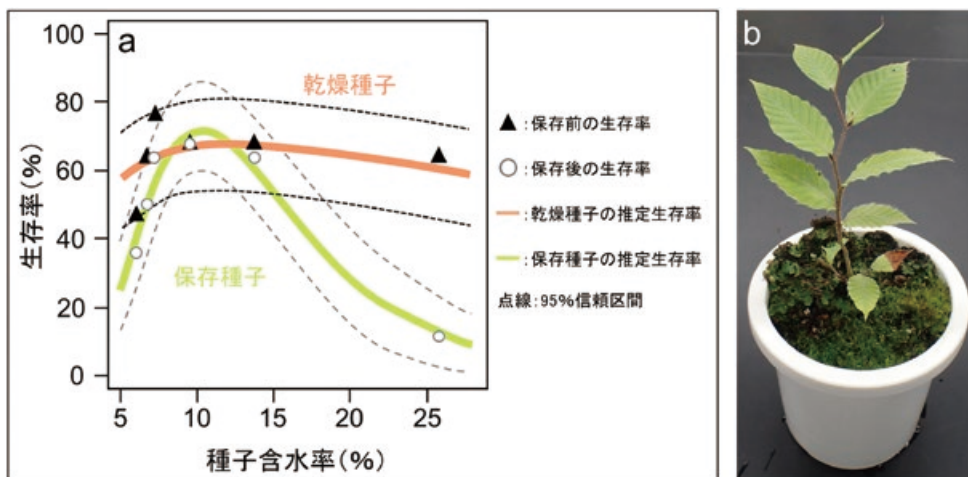


図3. 超低温保存したブナ種子の生存率(a)と保存種子から発芽して成長した実生(b)  
(Endoh, K. et al. (2018)より改変)



森林総合研究所  
令和元年版 研究成果選集

---

発 行 日 令和元年7月  
編 集・発 行 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所  
茨城県つくば市松の里1  
電話 029(829)8373  
お問い合わせ 企画部広報普及科  
メールアドレス kanko@ffpri.affrc.go.jp  
ホームページ <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ffpri.html>  
印 刷 所 前田印刷株式会社 筑波支店  
茨城県つくば市山中152-4  
電話 029(875)6696

---

本誌から転載・複製する場合は、森林総合研究所の許可を得てください。



森林総合研究所

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