

表紙写真

- 1 セルロースナノファイバー製造実証事業の施設の外観
(P.32 あなたの地域でもセルロースナノファイバーが出来ます)
- 2 マレーシア・ボルネオ島の熱帯雨林
(P.42 熱帯雨林の光合成能力は樹木の高さで決まる)
- 3 東北地方北部にも出没するようになったシカ
(P.54 シカとカモシカの糞をすばやく識別)
- 4 未熟種子由来の不定胚の発芽
(P.66 抵抗性クロマツで海岸防災林を再生する)
- 5 乾燥試験に用いたスギ平角材
(P.18 気圧を下げて木材の乾燥時間を半分に)
- 6 竜巻による樹木の被害（根返り）
(P.50 樹木の被害から竜巻の強さを知る)
- 7 非組換えポプラと組換えポプラの生育状況
(P.74 イネの遺伝子を使ってポプラの木質バイオマスの増産に成功)
- 8 小面積樹冠下地がき作業
(P.10 天然更新を促進して北方天然林を再生する新たな作業法)
- 9 ハーベスタシステム
(P.14 伐採から再造林までの一貫機械作業でコストを削減)

裏表紙の写真：下層の茂みを好む鳥 ウグイス
(P.58 シカの採食圧で野鳥におこる変化の広がりをとらえる)

はじめに

森林総合研究所は、森林・林業・木材産業と林木育種に関する研究開発を一体的に実施する日本唯一の国立研究機関として、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まいりました。また、昨年4月には科学技術の水準の向上を通じて公益に資する国立研究開発法人となりました。

平成23～27年度まで実施した第3期中期計画では、政策上の優先事項を踏まえ、多様な社会ニーズに対応した森林管理技術・作業体系と林業経営システムの開発、ならびに木材及び木質資源の利用促進技術の開発を行うとともに、地球温暖化の防止、水源の涵養、国土の保全、生物多様性の保全等の森林の機能発揮に向けた研究、林木の新品種の開発と森林の生物機能の高度利用に向けた研究、を行ってまいりました。

「平成28年版研究成果選集」では、以下の9つの重点課題において平成27年度に得られた主要な成果をとりまとめました。

- 「地域に対応した多様な森林管理技術の開発」
- 「国産材の安定供給のための新たな素材生産技術及び林業経営システムの開発」
- 「木材の需要拡大に向けた利用促進に係る技術の開発」
- 「新規需要の獲得に向けた木質バイオマスの総合利用技術の開発」
- 「森林への温暖化影響評価の高度化と適応及び緩和技術の開発」
- 「気候変動に対応した水資源保全と山地災害防止技術の開発」
- 「森林の生物多様性の保全と評価・管理・利用技術の開発」
- 「高速育種等による林木の新品種の開発」
- 「森林遺伝資源を活用した生物機能の解明と利用技術の開発」

目次には表題と概要を掲載するとともに、研究成果ごとに見開き1ページで解説致しております。できるだけ平易な言葉を用いるように努めましたが、専門用語につきましては巻末に解説しました。

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。

2016年8月

国立研究開発法人 森林総合研究所 理事長 沢田 治雄

森林総合研究所 平成28年版 研究成果選集 目次

重点課題A 地域に対応した多様な森林管理技術の開発

A 1 多様な施業システムに対応した森林管理技術の開発

ここまでやれる多雪地域の再造林の低コスト化…………… 6
多雪地域において、コンテナ苗を利用した伐採から地拵え、植栽までの一貫作業、各々の作業の省力化等により、地拵えから下刈りまでの初期育林コストを50%程度削減できることを実証しました。

森林の持続性を物質循環の指標から評価する…………… 8
森林は外部への物質の流出を防ぐ機能を持ち、さまざまな物質を森林内部で循環させることで、樹木の成長に必要な養分を得ています。このような森林内の物質循環の状態をよくあらわす評価指標を作りました。

天然更新を促進して北方天然林を再生する新たな作業法……………10
過去の伐採によって劣化した北方天然林を再生するために、天然更新を促進する作業法として「小面積樹冠下地がき」と「人工根返し」が有効であることを実証しました。

A 2 森林の機能発揮のための森林資源情報の活用技術の開発

人工林を安全・確実に広葉樹林へと誘導するための新しいツールを開発…………… 12
人工林を安全・確実に広葉樹林に誘導するには源となる稚樹の分布を見極め、それが健全に育つようにリスクを回避しながら光環境をコントロールすることが必要です。それらをサポートする4つのツールを開発しました。

重点課題B 国産材の安定供給のための新たな素材生産技術及び林業経営システムの開発

B 1 路網整備と機械化等による素材生産技術の開発

伐採から再造林までの一貫機械作業でコストを削減…………… 14
ハーベスタとフォワーダによる伐採・搬出とクラッシャによる地拵えとを組合せ、伐採・造林作業の完全機械化を実現しました。地拵え後に大型苗を低密度で植栽した結果、伐採と造林の全体のコストを3割以上削減できました。

B 2 国産材の効率的な供給のための林業経営・流通システムの開発

木材価格の変動リスクに備えるための異常変動評価と価格予測…………… 16
丸太価格の暴落（高騰）の影響を軽減するには、価格の異常な急落（急騰）を察知するとともに、今後の価格予測を参考にして伐採量を制御する必要があります。この急落（急騰）を察知する方法や、数ヶ月先の価格を予測する方法を開発しました。

重点課題C 木材の需要拡大に向けた利用促進に係る技術の開発

C 1 木材利用促進のための加工システムの高度化

気圧を下げて木材の乾燥時間を半分に…………… 18
木材乾燥装置の内部気圧を下げることによって、木造建築物の構造用部材を、今までの半分の時間で乾燥処理できる技術を開発しました。時間の短縮によって乾燥コストの削減も期待できます。

重さを測らず、音で木材の密度と強度を知る…………… 20
木材の強度的性質を測定するには必ず重さを測定しなければなりませんが、重さを測らず強度的性質を調べる画期的な方法を開発しました。打撃音を利用するこの方法は非常に簡便で迅速な測定技術の開発につながります。

C 2 住宅・公共建築物等の木造・木質化に向けた高信頼・高快適化技術の開発

- 構造用パーティクルボードを JIS 規格に** 22
木質系面材を構造用途で使用するための研究開発を行い、その成果を応用することで JIS 規格（日本工業規格）にパーティクルボードを構造用途に使用するための区分を新設することに貢献しました。
- 変わりゆくシロアリ生息地と寒冷地におけるシロアリ対策の必要性** 24
シロアリの野外生息と被害情報を精査して生息マップを更新した結果、これまで防蟻処理を必要としなかった寒冷地の木造建築物においても、シロアリ対策が必要であることが明らかになりました。

重点課題 D 新規需要の獲得に向けた木質バイオマスの総合利用技術の開発

D 1 木質バイオマスの安定供給と地域利用システムの構築

- 中小規模木質バイオマス発電施設に対する燃料供給と熱電併給事業の採算性** 26
2,000kW 未満の木質バイオマス発電施設に対する燃料の安定供給のため、岩手県奥州市を対象に、地域の森林資源量の生産ポテンシャルと熱電併給事業の可能性を明らかにしました。

D 2 木質バイオマスの変換・総合利用技術の開発

- 地域産業を創出する現場設置型のリグニン製造システム** 28
地域にリグニン製造ステーションを創設することで、地方創生に貢献する新産業の創出を目指し、その核となる世界初の農山村での現場設置型のリグニン製造システムを開発しました。
- 高性能木質固形燃料「トレファクション燃料」の連続製造に成功** 30
従来の木質ペレットより高エネルギーで、水に強く扱いやすい高性能な木質燃料「トレファクション燃料」の実証プラント建設と連続製造に成功し、これを家庭、地域で有効活用するモデルを示しました。
- あなたの地域でもセルロースナノファイバーがつくれます** 32
あなたの地域でもスギからセルロースナノファイバー（CNF）が作れます。山村地域や製材工場の片隅でも CNF を製造する方法を考案し、ベンチプラントでその製造実証試験を行いました。
- ヤナギの葉に含まれる物質により木材・プラスチック複合材の耐久性を向上** 34
早生のエネルギー作物であるオノエヤナギの葉がプラスチックの抗酸化材料となることを明らかにしました。オノエヤナギの葉を原料とすることで、木材-プラスチック複合材料の軽量化も可能であることが分かりました。

重点課題 E 森林への温暖化影響評価の高度化と適応及び緩和技術の開発

E 1 炭素動態観測手法の精緻化と温暖化適応及び緩和技術の開発

- 植物が光合成に利用可能な光の量の新たな推定法** 36
植物が光合成に利用できる波長 400 ~ 700nm の光（光合成有効放射量）を、日本のような湿潤地域で季節や天気によって左右されず一般的な気象データから正確に推定する方法を開発しました。
- 枯死木の分解を高精度に予測する新たなモデル** 38
枯死木が腐朽して分解していく速度は、周辺環境や枯死木の初期条件の影響で大きな違いがあります。そこで、環境要因を反映したモデルを新たに作成した結果、精度よく分解速度を予測することが可能になりました。

E 2 森林減少・森林劣化の評価手法と対策技術の開発

- 広く、みんなで、着実に。荒廃した熱帯林の修復**…………… 40
荒廃した熱帯林の修復には、実際に木を植える場所だけでなく、農地や宅地のように森林ではない土地を含めた広い地域で、長期にわたる計画をたて、さまざまな利害関係者が協力することが必要です。
- 熱帯雨林の光合成能力は樹木の高さで決まる**…………… 42
熱帯雨林では個葉の光合成能力が樹高と共に増加するので、光が強い林冠層での効率の良い光合成が、森林全体の高い炭素固定能を支えていることが分かりました。

重点課題 F 気候変動に対応した水資源保全と山地災害防止技術の開発

F 1 環境変動・施業等が水資源・水質に与える影響評価技術の開発

- 森林の蒸発散量を簡易な手法で広域推定する**……………44
水源地帯を覆う森林の蒸発散量は、利用可能な水資源量の把握に欠かせない情報です。そこで、日本の多様な気候帯に分布する森林の蒸発散量を統一かつ簡易に推定する手法を開発しました。
- 渓流水のケイ酸濃度が季節によって変わる仕組み**…………… 46
ケイ酸は河川・沿岸生態系のケイ藻類にとって重要な栄養塩の一つです。山地渓流水のケイ酸濃度が季節によって変わる仕組みを、雨水から渓流水までケイ酸濃度がどのように変化するかを観測し明らかにしました。

F 2 多様な手法による森林の山地災害防止機能強化技術の開発

- 海岸林再生に向けたクロマツの通年植栽**…………… 48
東北地方の津波被害地の海岸林の再生に向けて、作業の平準化をはかるためにクロマツの通年植栽の可能性を検討しました。その結果、コンテナ苗を用いれば、厳冬期を除いて植栽可能であることがわかりました。
- 樹木の被害から竜巻の強さを知る**…………… 50
幹折れや根返りなどの樹木の被害と風速とを風工学的な手法で対応させました。本成果により、竜巻等突風の強さの基準である日本版改良藤田スケールに「広葉樹」と「針葉樹」が被害指標として採用されました。

重点課題 G 森林の生物多様性の保全と評価・管理・利用技術の開発

G 1 シカ等生物による被害軽減・共存技術の開発

- 小笠原で急速に広がる樹木病害「南根腐病」の防除に向けた実態解明**…………… 52
近年小笠原諸島では南根腐病による樹木の枯死が拡大しており、大きな問題になっています。その防除法開発に向けて、病原菌の分布、由来、伝播様式、被害の発生しやすい環境を明らかにしました。
- シカとカモシカの糞をすばやく識別**…………… 54
シカの生息状況を精確に把握するため、シカとカモシカの糞を簡単かつ迅速に識別する方法を開発しました。糞の表面に付着している DNA を利用して、両者の糞をすばやく識別します。

G 2 生物多様性を保全するための森林管理・利用技術の開発

- 人にも生物多様性にもやさしい森林づくり**…………… 56
途上国の森林減少・劣化を防ぐ REDD+ 活動において、生物多様性や地域の人々の利益を守るセーフガードについて分析・整理しました。
- シカの採食圧で野鳥におこる変化の広がりをとらえる**…………… 58
シカは植物を食べ、鳥を食べるわけではありません。しかし、シカが増えて森林の下層植生が食べつくされると、減ってしまう鳥がいます。シカによる生物多様性への間接的な影響を広域でどう評価するかを考えました。

重点課題H 高速育種等による林木の新品種の開発

H 1 林業再生と国土・環境保全に資する品種の開発

前方選抜による初期成長に優れた第二世代品種の開発 60
我が国の林木育種で初となる、検定データを使用して優良系統を選抜する前方選抜により、スギのエリートツリーの中から初期成長に優れた品種を、これまでの手法と比べて極めて短時間で開発しました。

H 2 林木育種の高速化及び多様なニーズに対応するための育種技術の開発

ゲノム情報を利用した育種高速化技術の体系化 62
スギの遺伝的改良に必要な、成長・材質等の特性を把握するにはこれまで数十年が必要でした。ゲノム情報を利用することその期間を大幅に短縮する手法を開発しました。

スギ雄花形成に関わる遺伝子を特定し花粉症対策に活かす 64
花粉症対策品種の開発に向けて、雄花形成から花粉飛散までの組織観察の結果をもとにスギ雄花の発達ステージを決定し、各ステージで働く遺伝子を明らかにしました。

抵抗性クロマツで海岸防災林を再生する 66
東日本大震災の津波で壊滅的な被害を受けたクロマツ海岸防災林の再生のため、マツ材線虫病に抵抗性があるクロマツ苗木を大量供給するシステムを産官民の共同研究により構築しました。

重点課題I 森林遺伝資源を活用した生物機能の解明と利用技術の開発

I 1 林木遺伝資源の収集、保存・評価技術の開発

I 2 ゲノム情報を活用した森林植物の遺伝的多様性の解明と保全・評価技術の開発

移植試験地でわかったアカマツの地域特性 68
樹木は、地域の環境に適応した遺伝的性質を持ち、異なる地域に移植すると成長量が低下すると考えられています。移植試験により、日本のアカマツは、南から北へ移植すると成長量が33%低下しました。

I 3 樹木及びきのこ等微生物の生物機能の解明と利用技術の開発

ストレスで誘導されるガラクチノール合成酵素遺伝子 (GoIS) は植物の気孔開閉に関与することを発見 70
ガラクチノール合成酵素遺伝子は、植物の乾燥・塩ストレス耐性を強化する遺伝子として着目されてきました。遺伝子組換え技術をつかって、この酵素遺伝子が植物の水利用に関わっていることを世界で初めて明らかにしました。

マツと共生するきのこ、ヌメリイグチがサクラで育つ 72
ヌメリイグチは、マツ科針葉樹のみと共生する菌根性きのこで優秀な食用菌とされますが、組織培養で育てやすいオオシマザクラに感染させ、成育させる技術を開発しました。

I 4 バイオテクノロジーの育種への利用技術の開発

イネの遺伝子を使ってポプラの木質バイオマスの増産に成功 74
木質生産を制御するイネの遺伝子をポプラに導入することにより、成長に悪影響を及ぼさずことなく木質バイオマスを増産させることに成功しました。さらに、このポプラが高い強度をもつことも分かりました。

用語解説 76

ここまでやれる多雪地域の再造林の低コスト化

東北支所
 林業経営・政策研究領域
 森林植生研究領域
 東北育種場
 岩手県林業技術センター
 秋田県林業研究研修センター
 山形県森林研究研修センター
 ノースジャパン素材流通協同組合
 国際環境研究協会

駒木 貴彰、八木橋 勉、野口 麻穂子、八木 貴信、天野 智将
 鹿又 秀聡
 櫃間 岳
 玉城 聡、織部 雄一郎
 新井 隆介、成松 眞樹
 長岐 昭彦
 中村 人史、渡部 公一
 外館 聖八朗
 松本 和馬

要 旨

東北地域の人工林伐採後の再造林率は 20 ～ 30% と低く、再造林率向上には初期造林コストの低減が不可欠です。そこで、多雪地型の一貫作業の導入や、下刈りコストの削減による初期造林コストの半減を目的に研究を行いました。その結果、伐採作業用の機械を地拵え作業に利用するとコストは通常作業の 60% 以下、植栽作業は 70% 程度に削減できることが分かりました。また、下刈りについては、スギとカラマツともに作業回数を従来の二分の一から三分の一に削減できることを明らかにしました。さらに、造林作業のコストを評価するコストシミュレーターを開発し、様々な作業を組み合わせたときのコスト評価をできるようにしました。

地拵えと植栽の省力化は実現できる

地拵えのやり方によって、その後の植栽作業の効率も大きく変わってきます。そこで、伐採作業に使用した機械（グラブプル）で地拵えを行い、その後にスギとカラマツのコンテナ苗を通常植栽本数密度の 60 ～ 85% の低密度で植栽しました。その結果、植栽樹種や土地の傾斜によって違いはあるものの、以前から行われている地拵えや植栽作業と比較して、人工数で 30 ～ 45%、経費で 40 ～ 60% まで削減できました（図 1）。ただし、機械の 1 日の使用コストが人力作業の 3 倍程度になるため、機械作業は 2 日以内に抑えた方がいいことが分かりました。

下刈り作業は削減できる

下刈り作業は、植栽から下刈り終了時までの初期造林コストの 40% 程度を占めるため、スギとカラマツについて、下刈り作業削減の試験を実施しました。その結果、スギはツル植物やササ生地以外では植栽後 2 年目、3 年目、5 年目の 3 回（図 2）、カラマツは同じく 1 年目と 2 年目の 2 回で下刈り作業を終了できる可能性が示されました。これにより、下刈り回数は従来の作業回数（二分の一から三分の一）に大幅に削減でき、さらに苗高 60cm 以上の大苗を利用すれば、下刈り回数を 1 回に削減できる可能性も示されました。また、ワラビを植栽することで造林地の下層植生を抑制するカバークロップ効果が期待できることも明らかになりました。

多雪地型一貫作業システムによってトータルコストを削減できる

九州地域での先行研究から、伐採と植栽を連続的に実施する一貫作業に、植栽時期の幅が広いコンテナ苗を組み合わせることで、造林コストを削減できることが明らかになっています。東北地域でも、コンテナ苗の成長と活着率が裸苗と同等かそれ以上の成績であることが分かっています。しかし、九州地域と違って冬間に積雪がある東北地域では、積雪期を挟んで伐採と植栽が連続しないことも考えられます。そこで、多雪地型一貫作業システムを考案しました（図 3）。このシステムによって、積雪前までに伐採後の地拵えを終了していれば、積雪による作業休止期間があっても融雪後すぐに植栽することで、連続的な一貫作業と工程上は大きな違いがないことを明らかにしました。また、伐採後に地拵えが行われているため、春植えの場合は植栽当年の下刈りが省略できます。さらに、造林コストシミュレーターを開発し、様々な造林作業を組み合わせた作業システムのコスト評価ができるようにしました。

本研究は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「多雪地域の森林資源持続に向けた低コスト再造林システムの構築」による成果です。

なお、本研究成果を取りまとめた研究成果集は、森林総合研究所のウェブサイトからダウンロードできます。

https://www.ffpri.affrc.go.jp/thk/research/publication/ffpri/result_of_the_third_stage_medium_term_plan/documents/3rd-chuukiseika33.pdf

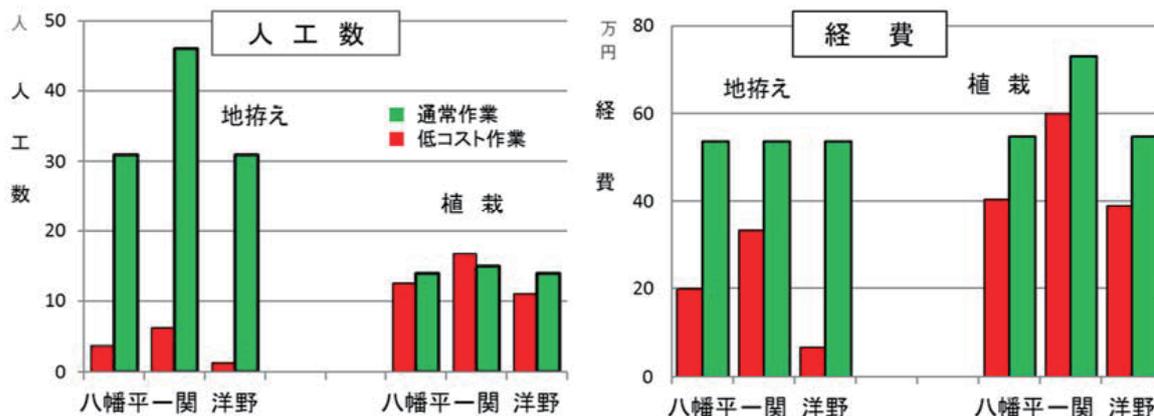


図1 機械地拵えと低密度植栽による人工数及び作業経費

人工数、経費共に機械地拵え作業による削減効果は大きいですが、植栽作業はコンテナ苗の運搬距離や苗木価格の影響等で人工数ほどの削減効果は現れませんでした。

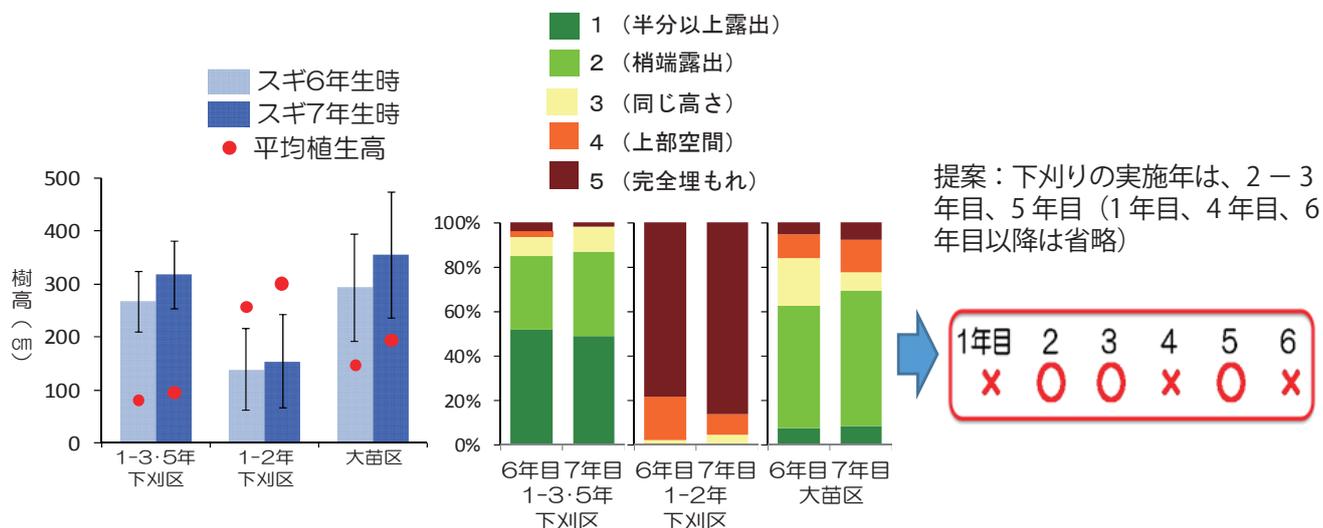


図2 スギの下刈り省略林分の樹高、植生高、被圧状況と下刈り実施年の提案

下層植生の高さや下刈り実施年の関係から、下刈りは毎年実施しなくても植栽木の成長を妨げないことがわかりました。(注：植栽木と周囲の植生の高さの比較から5段階に区分し、4と5が被圧状態を示す。縦軸の%は5区分の構成比。)

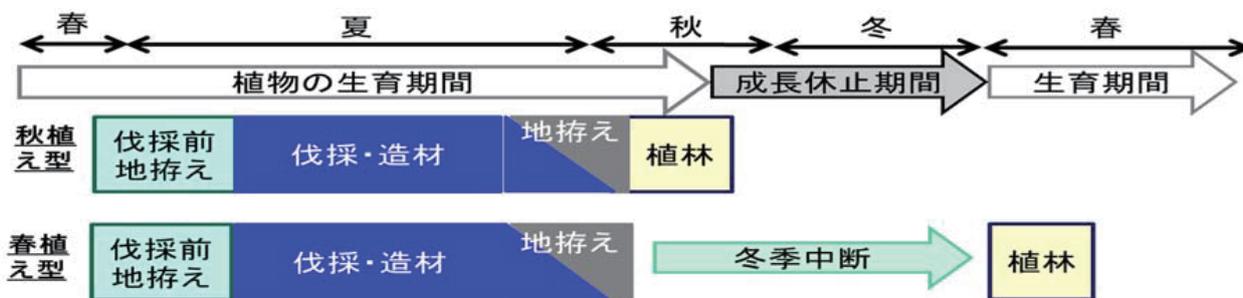


図3 多雪地型の一貫作業システム

晩秋(積雪期前)までに地拵えを終了しておけば、翌春の下層植生の成長が始まる前に植栽することにより(春植え)、工程面では秋植えと同様の効果が期待できます。

森林の持続性を物質循環の指標から評価する

立地環境研究領域
関西支所
九州支所

平井 敬三、大貫 靖浩、野口 享太郎、三浦 覚、山田 毅
谷川 東子
稲垣 昌宏

要 旨

日本では、積極的な植林活動によって増加した人工林の森林蓄積量を背景に、林業が盛んになりつつあります。森林は、農地のように施肥によって養分を補うことなく森林内部で物質が循環しています。したがって、生産力の基盤となる土壌を保全し、森林生態系での物質の循環を適切に維持して、系外への流出を少なくすることが持続的な林業活動を支えるために重要です。そこで、これまでの関連研究を整理して、森林の物質循環の状態を評価する 16 の指標を作りました。たとえば、林床被覆率は土壌侵食、樹木の養分利用効率は土壌生産力の状態を示す指標として有効です。これらの指標を尺度にすれば、物質循環上、森林が持続可能で健全な状態にあるか判断することができます。

物質循環とは

森林生態系では、炭素や樹木の成長に必要な窒素やリンといった養分など、さまざまな物質が循環しています。これらの物質は、大気や雨に含まれて森林外から入ってくるもの、斜面や溪流を通じて系外に出て行くもの、落ち葉として樹木から地表へ戻されるもの、土壌で分解されて無機物となり樹木に再び吸収されるものなどがあります。これらの動きを森林の「物質循環」と呼びます。

なぜ物質循環の状態を診断するのか？

日本の森林は、戦後から経済発展期の積極的な植林とその後の保育によって、全体として森林蓄積量が増加しています。今後は充実した森林資源を積極的に利用し、山村地域を含む森林・林業を活性化していくことが重要です。一方、戦時中など過去に過度に森林を伐採利用した反省にたつて、森林を適切に管理して、森林資源を持続的に利用する必要があります。

樹木の成長を支え、その基盤となる養分や水分を供給する物質循環は、木材生産、気候の緩和、レクリエーションなどとともに、森林の生態系サービスのうち「基盤サービス」とよばれる機能を果たしています。その機能を十分に発揮させるためには、基盤となる「土壌」を保全し、“森林の物質循環がどのような状態にあるか？”をよく知ることが必要です。

物質循環指標の作成と活用

これまでの研究成果や全国的な森林生態系多様性基礎調査の膨大なデータ等を解析して、物質循環の特徴をあらわす項目を検討し、16 の指標を選び出しました。そ

れらを機能毎に整理すると、「土壌侵食」、「土壌生産力」「環境変動」の3つに大きくまとめられました(表1)。

ここでは、「林床被覆率^{*}」と「養分利用効率」を例に詳しくみることにします。

林床被覆率が大きいほど土壌侵食量^{*}は小さくなるので(図1)、土壌侵食の程度を表す指標として有効であることがわかります。光環境の改善によって林床植生を繁茂させることが可能ですので、林床被覆率は森林施業によって管理することができます。これによって系外への物質の流出を防ぐことができます。

樹木の養分蓄積量は、地上部バイオマス量が同じでも、樹種によって異なり、ユーカリは他の樹種に比べて少ない窒素量で、ユーカリとアカシア類は広葉樹に比べて少ないリン量で同じ程度成長しており、養分利用の効率が低いことを示しています(図2)。今回、養分利用効率は熱帯性の造林樹種で検討しましたが、国内樹種を対象に調べることで、樹体内に窒素やリンを保持して系外への流出を防ぎ、効率的に養分を循環させる施業を検討できます。

このように、樹木と土壌との間での物質のやり取りについての仕組みを理解して、それを生かして持続的に木材を生産することや土壌の持つ基盤サービスを低下させない物質循環の機能を維持する森林管理が重要です。

詳しくは以下の文献をご覧ください。

Inagaki M., Tange T. (2014) Soil Science and Plant Nutrition 60:4, 598-608
Miura, S. et al. (2015) Soil Science Society of America Journal, DOI:10.2136/sssaj2015.05.0171,2015.11

表1 物質循環を評価する指標の一覧

| 項目 | 指標 | 物質循環の内容 |
|----|----------------|------------------------|
| 1 | 堆積有機物層現存量 | 表層土壌の移動と侵食 |
| 2 | 土壌侵食 | 微地形単位 |
| | | 土層厚分布と土壌物理特性 |
| 3 | 林床被覆率 | 表層土壌の保全 |
| 1 | 根粒の形成量、窒素固定活性 | 樹木成長に対する根粒菌の接種効果の評価 |
| 2 | 窒素無機化速度 | 窒素供給力 |
| 3 | 火山灰付加程度 | 土壌化学性への火山灰の影響 |
| 4 | 土壌生産力 | 土壌窒素含有率 |
| | | 地上部生産力に対する土壌窒素の影響 |
| 5 | 土壌中の交換性塩基量 | 土壌養分の収支 |
| 6 | 土壌微生物バイオマス | 土壌環境と可給態養分量 |
| 7 | 養分利用効率 | 地上部バイオマス中の養分濃度と養分蓄積量 |
| 1 | 渓流水のSS濃度 | 施業による懸濁物質の流出 |
| 2 | 樹木細根の量と形態 | 地下部の炭素・養分動態に対する環境変動の影響 |
| 3 | 植生タイプとリターフォール量 | 日本スケールでの土壌呼吸 |
| 4 | 土壌と針葉中のカリウム量 | スギ人工林の衰退現象 |
| 5 | 土壌中のイオウの蓄積速度 | 土壌の酸性物質貯留機能 |
| 6 | 葉の養分濃度 | 高窒素負荷の樹体養分状態への影響 |

これまでの研究を整理して、森林の物質循環の状態を評価する16の指標を選びました。その内容は評価する機能によって種類によって分けると「土壌侵食」、「土壌生産力」「環境変動」の3つに大きくまとめることができます。

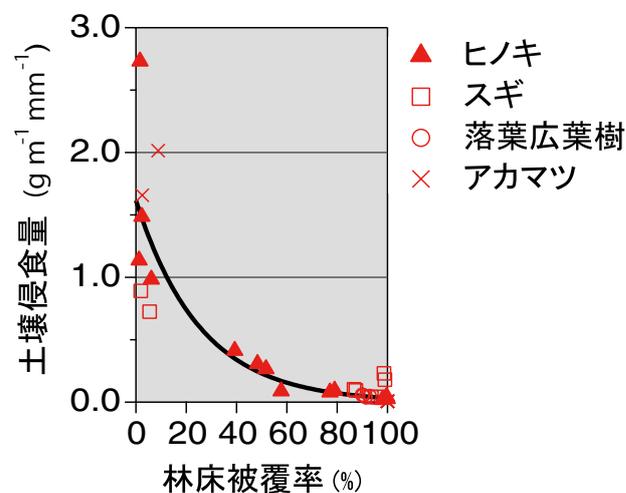


図1 林床被覆率と土壌侵食量の関係

林床被覆率が大きいほど土壌侵食量は小さくなるので、土壌侵食の程度を表す指標として有効であることがわかります。

● アカシア, ⊕ 窒素固定樹 (アカシア以外), ■ ユーカリ, □ その他広葉樹

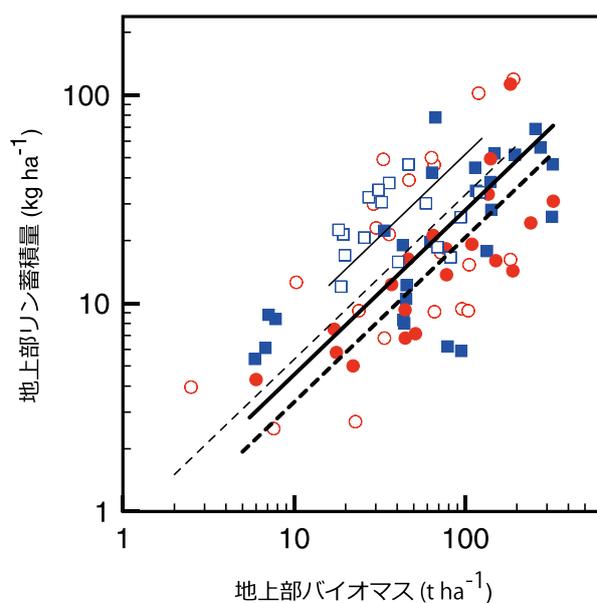
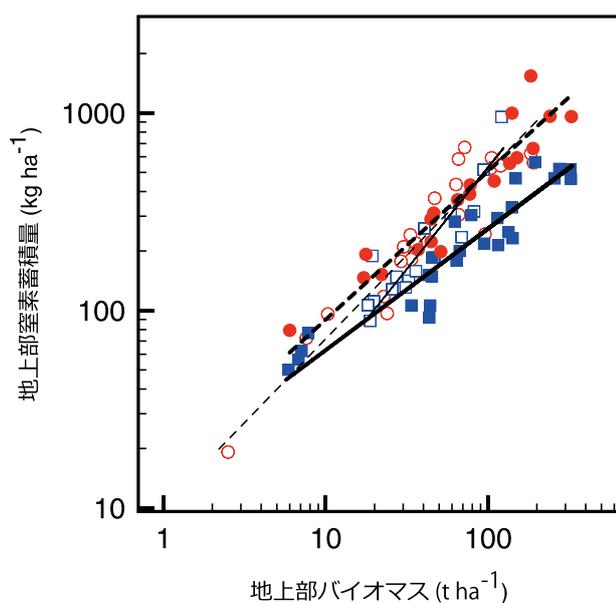


図2 熱帯人工林83林分の地上部バイオマス量と養分蓄積量との関係

同じサイズ(バイオマス量)で比較した場合、蓄積している養分量が少ないほど、より少ない養分を用いて効率的に成長していると考えられます。

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

天然更新を促進して北方天然林を再生する新たな作業法

北海道支所

研究コーディネータ

森林植生研究領域

森林管理研究領域

元北海道支所

石橋 聡、飯田 滋生、尾崎 研一、

北村 系子、佐山 勝彦、牧野 俊一

河原 孝行

倉本 恵生

高橋 正義

金指 あや子

要 旨

北海道の天然林では林床のササの繁茂によって、択伐後などの天然更新がうまくいかず劣化した林分がみられます。その再生のため、多様な樹種を確実に天然更新させる低コストな作業法として、「小面積樹冠下地がき」と「人工根返し」を考案し、実際の施業現場に適用して経過を観察しました。その結果、作業 5 年後には上層を構成する多様な樹種が更新し、更新本数も既存の更新完了基準をクリアしました。また、林床植生や林床に生息する代表的な昆虫であるオサムシ類の調査結果から、この作業が生物の多様性に与える負の影響は小さいことがわかりました。

新たな天然更新促進作業法

北海道の天然林ではほとんどの林床にササが繁茂しています。これは樹木の伐採によって林内が明るくなったことなどによりササが密生化するためですが、これが次代を担う後継樹の更新を妨げ、林分内容の劣化につながっています。

そこで、確実に更新し、かつ、多様な樹種を天然更新させる低コストな作業法として、「小面積樹冠下地がき」と「人工根返し」を考案しました。「小面積樹冠下地がき」は、上木を構成する多様な樹種の種子を利用することと林床の明るさをコントロールすることを主眼に、最大で 400m² 程度の小面積の地表のかき起こしを行ってササを除去します (図 1)。また、「人工根返し」は、伐根を油圧ショベル^{*}などで人工的にひっくり返します。これは原生林において根返り木の根元の土の盛り上がり(マウンド)と地面のえぐれ(ピット)に天然更新がみられる現象を模倣した方法です (図 2)。

多様な樹種の更新が得られ、かつ低コスト

上川北部森林管理署朝日天然林施業試験地において、択伐後の更新補助作業としてこれらの作業法を実施し、5 年間の更新状況を観察しました。その結果、施工地においてはササが更新の阻害要因とはならず、ウダイカンバのほか比較的暗い場所で生育できるトドマツ、イタヤカエデ、ミズナラなどが更新し、実施点の明るさに対応して上層を構成する多様な樹種が更新しており (図 3)、箇所ごとのばらつきはあるものの北海道森林管理局の更新完了基準をクリアしていました。

また、天然林内での更新補助作業として一般的に行われている「植込み^{*}」と、今回開発した「小面積樹冠下地がき(人工根返し含む)」の経費を比較しました(図 4)。その結果、作業経費は地がきが最も低くなり、次いで伐根植^{*}でした。地がきに使用される油圧ショベル等の大型機械は、伐倒搬出作業時にも使用されることから、伐倒搬出と更新補助を一貫作業で実施すれば機械の運搬費を削減でき、さらに経費低減が可能です。

生物多様性への負の影響は小さい

作業実施 4 年後に 6 種類の場所(無施業、択伐のみ、小面積樹冠下地がき、人工根返しのマウンド、同ピット、作業道)で植物の種組成を比較した結果、作業を実施した場所では無施業、択伐のみに比べて種多様度が高い傾向がみられました(図 5)。また、林床に生息し環境指標として有用な昆虫であるオサムシ類を対象に、作業実施後数年間の種構成の変化を調べたところ、地がき区と対照区の種構成の違いは作業実施 2 年後より、4 年後の方が小さくなりました(図 6)。さらに、森林性のオサムシ類の中にも地がき区と対照区それぞれを好む種がみられました。これらの結果は、作業による生物多様性への負の影響は小さく、むしろ多様な環境によって植物や昆虫の多様性を増進させる可能性があることを示しています。

本研究は、北海道森林管理局森林技術・支援センターとの共同研究として実施しました。



図1 小面積樹冠下地がき作業



図2 人工根返し後の状況

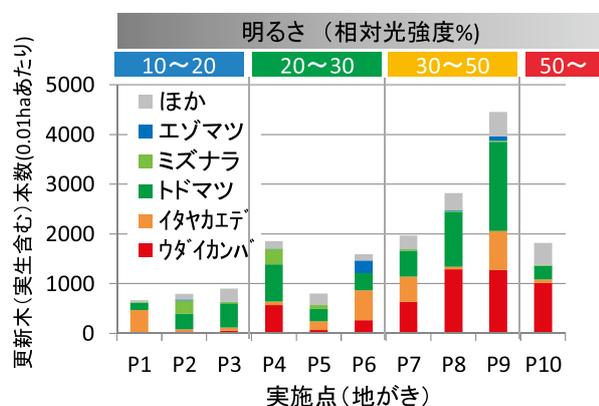


図3 「小面積樹冠下地がき」実施点ごとの更新本数と樹種構成

明るさの違いによって、本数と樹種構成が異なることがわかります。

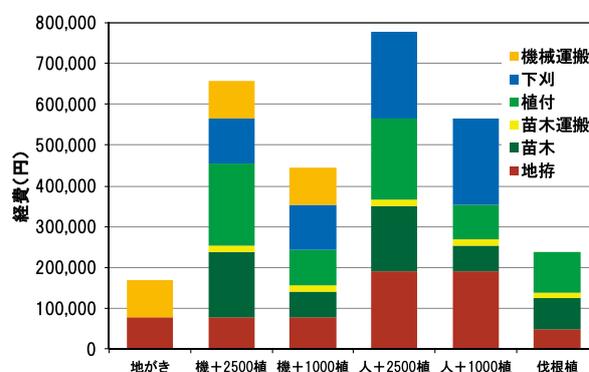


図4 更新補助作業経費の比較

択伐後更新面 0.04ha (20m × 20m) × 10 箇所
「機 + 2500 植」は大型機械地拵え 2500 本 / ha 植栽、「人」は人力地拵えを示す。

地拵え：全刈 (伐根植は周囲 2m 人力)

植栽樹種：トドマツ (伐根植は 1 伐根 6 本 80 伐根)

下刈：大型機械地拵え 1 回刈 4 年、人力地拵え 1 回刈 4 年 2 回刈 2 年、地がき・伐根植 なし

植栽作業に比べて地がきは経費が少なく済みます。

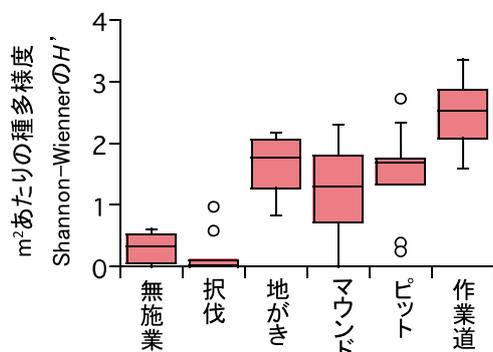


図5 林床植生の種多様度

種多様度 H' は大きいほど種の多様性が高いことを示し、作業を行った場所の方が高いことがわかります。

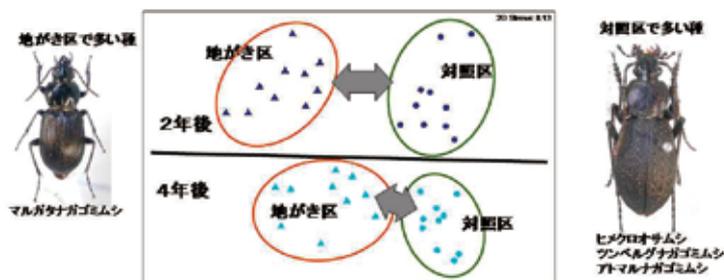


図6 地がき区と対照区のオサムシ類の種構成

図内の点は各調査区の種構成をあらわし、距離が近いほど種構成が類似しています。地がき区と対照区の種構成は作業実施 2 年後よりも 4 年後の方が近く、作業の影響が小さくなっています。

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

人工林を安全・確実に広葉樹林へと誘導するための 新しいツールを開発

森林植生研究領域

北海道立総合研究機構林業試験場

山形県森林研究研修センター

長野県林業総合センター

富山県農林水産総合技術センター

愛媛県農林水産研究所林業研究センター

静岡大学

岐阜県立森林文化アカデミー

正木 隆、伊東 宏樹、酒井 武、北川 涼（現横浜国立大学）

大野 泰之 秋田県林業研究研修センター 新田 響平

上野 満 新潟県森林研究所 塚原 雅美

清水 香代 岐阜県森林研究所 大洞 智宏、渡邊 仁志

相浦 英春 和歌山県林業試験場 山下 由美子

石川 実 新潟大学 箕口 秀夫

水永 博己 株式会社森林再生システム 速水 亨

横井 秀一

要 旨

近年、森林・林業の再生に向けた取り組みと同時に森林の公益的機能の維持が求められています。こうしたことから平成 19～23 年に人工林を広葉樹林に誘導するための研究を行いました。本研究では、その成果を使いやすいツールとして実用化しました。具体的には、①人工林内の広葉樹稚樹の本数を事前に予測するツール、②広葉樹の自然な組合せを判定するツール、③間伐によって人工林下の光環境を適切にコントロールするためのツール、④広葉樹林化にともなう周辺の病虫獣害リスクを予測するツールを開発し、同時にこれら 4 つのツールを使いこなすための解説資料を充実させました。この研究により、人工林を安全・確実に広葉樹林に誘導するための技術的基盤を整えました。

なぜ今、広葉樹林化なのでしょう

戦後に大面積で植栽した一斉針葉樹人工林が資源として成熟し、森林・林業の再生に向けた取り組みが進められています。同時に森林の持つ公益的機能にも配慮する必要があります。そのための手段の 1 つとして、人工林の一部を、生物多様性をはじめとした公益的機能重視の混交林あるいは広葉樹林へ転換・誘導することが求められています。

広葉樹林化に必要な技術とは

これまでの研究から、広葉樹林化の手法は見えてきました。種子から芽生えて成長した稚樹をササなどの邪魔者と競争しないよう育てていくことです。ただし、この道筋は周辺の様々な条件に左右されます。また、広葉樹林化によって、その周辺の木材生産林である人工林に獣害が生じるのではないかと、という現場からの懸念の声もありました。そこで、本研究では 4 つのツールを開発しました。

4 つのツール

最初のツールは、全国 150 箇所的人工林データの詳しい分析に基づいて人工林内の広葉樹稚樹の密度を予測するウェブアプリケーションです。これを使うことで広葉樹林化の候補地を効率よく選べます。次に、その地域に本来生育する広葉樹の自然な組合せを判断するツール

を開発しました（図 1）。現場データと合わせることで、目標林型を適切に設定することができるようになりました。

3 番目は、間伐にともなう林内の光環境の変化予測を行なう Windows アプリケーション“Can-Stand”です。これを使い、競合する植物を上手に抑えながら稚樹を確実に育てられるような間伐計画を立てることができます（図 2）。

最後が、獣害リスクを事前に予測するためのツールです。広葉樹林化を行なった場合に周辺の人工林に及ぶ獣害リスクを全国調査から予測し、その結果をウェブアプリケーション上でビジュアルに表示します。

「広葉樹林化技術パッケージ」

以上のツール群をパッケージとしてまとめ、技術研修用の教材や各ツールの解説動画とともに、ウェブサイトから誰でも利用できるようにしました。人工林を安全・確実に広葉樹林に誘導するための技術的基盤としてこのツールを使う際には、順応的管理（目的や現状を常に立ち止まって考え、場合によっては変更する管理手法）の視点を意識しながら使用して下さい。

本研究は、農林水産省受託事業「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業（うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立）」により実施した「広葉樹林化技術の実践的体系化研究」による成果です。

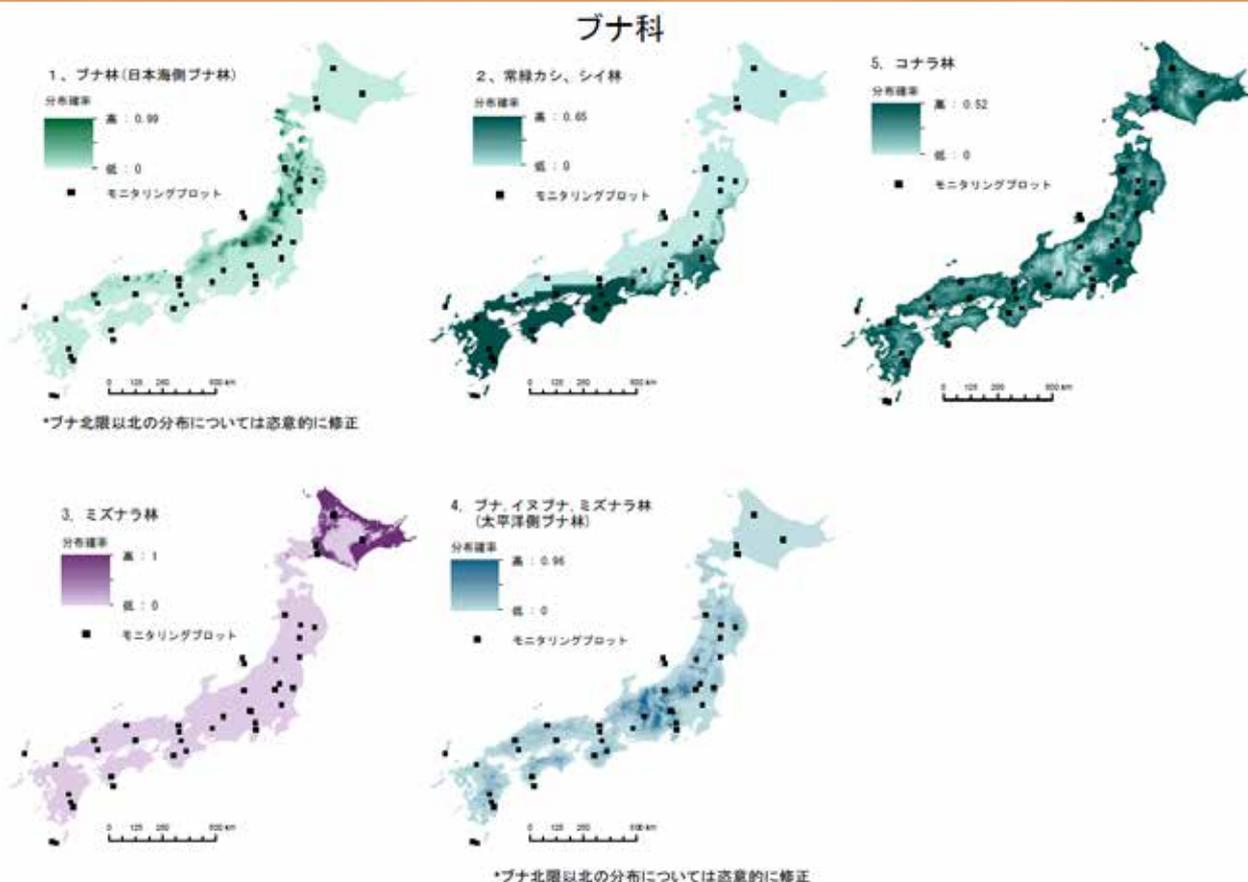


図1 広葉樹林化の目標樹種を判断するツール

ブラウザ上で施肥対象地の本来の広葉樹の自然な組合せをビジュアルに指定・検索できるシステムを提供しました。

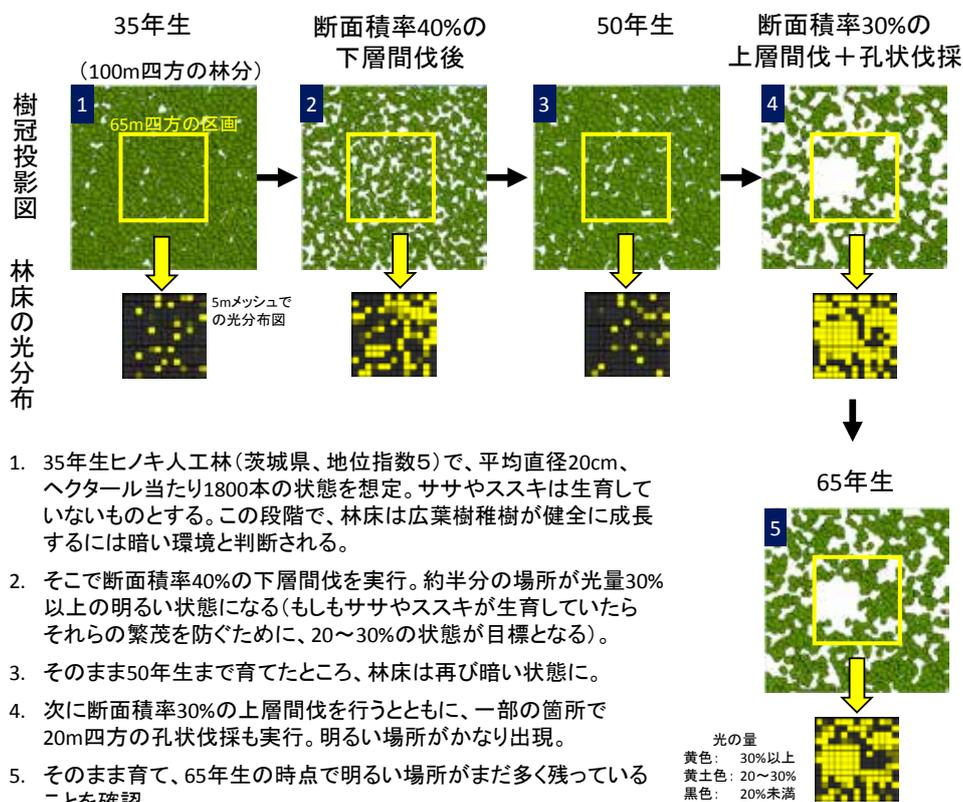


図2 35年生ヒノキ林を15年間で2回間伐したときの樹冠投影図と林床の光環境の変化をシミュレーションした例

伐採から再造林までの一貫機械作業でコストを削減

北海道支所
林業工学研究領域
植物生態研究領域
森林植生研究領域
下川町

佐々木 尚三、上村 章、原山 尚徳、伊藤 江利子、津山 幾太郎
上村 巧、中澤 昌彦、山田 健、山口 浩和、鈴木 秀典
宇都木 玄
倉本 恵生
高橋 祐二、斎藤 丈寛

要 旨

人工林資源が利用期を迎え、木材収穫とその再造林を低コストで確実にできる技術が必要とされています。車両系機械を林内で走行させて作業ができれば、これまで危険できついとされた人力作業は一変し、安全、快適で、高い生産性を実現することができます。また伐採・搬出・地拵えの機械化に合わせて、植栽や下刈りなど造林方法そのものを見直すことも有効と考えられます。そこで、北海道下川町の緩中傾斜地にある人工林でハーベスタとフォワーダによる伐採・搬出、クラッシャによる地拵えを実施しました。クラッシャ地拵え後に大型苗を低密度植栽した結果、初期保育経費を 30～40%削減することができました。

人工林の収穫と再造林技術が必要なわけ

日本の膨大な人工林資源は今まさに収穫期を迎えています。しかし、労働力の減少やコスト高から、これら森林資源の利用が進んでいません。木材の伐採と伐採跡地の地拵えをすみやかに効率よく低コストで行い、さらに労働安全や環境保全にも配慮した再造林技術が求められています。

そこで、作業条件の良い比較的なだらかな地形の場所として、北海道北部の林業の町として有名な下川町を選び、複数の車両系機械を林内で走行させる完全機械化作業を進めることにしました。

ハーベスタとフォワーダによる機械化伐採システム

CTL (Cut-To-Length : 短幹集材) システムでは、立木の伐倒から丸太をトラック輸送できる状態に集積する作業の全て(伐木集材作業)を、ハーベスタ(伐採機械)とフォワーダ(運搬機)の2台の機械によって行うことができます(図1)。作業者は常に安全で快適なキャビンの中で作業を行います。労働災害の原因となるチェーンソーによる伐倒作業など危険を伴うきつい人力作業が機械化されて、安全で快適、高い生産性の林業作業の実現が期待されます。

実証試験では、傾斜 20° 程度までの林地に CTL システムが使えること、森林路網を適切に配置して林内集材距離を 100m 程度に短縮すれば、労働生産性 30～50m³/人日、伐採コストは 2,000～3,000 円/m³ と、これまでの平均的な効率やコストを 2 倍以上改善することができることを示しました(図2)。

伐採後の整地作業「地拵え」

伐採跡地は未搬出材や枝条が散乱していて、植林する

には地拵えが必要です。この作業は、通常、刈払い機などによる人力で作業が行われることが多く、伐採と同様に危険できつく、効率の面でも不利です。

そのため、未搬出材や枝条、地表の前生植生を破碎するクラッシャを、ハーベスタのベースマシンとして使われていた油圧ショベルのアームに装着し、さらにレーキ(鉄の歯を櫛状に並べたもの)を付加したうえで(図3)、機械による地拵えを試みました。これにより従来の人力による作業と比べて作業効率はアップしました(図4)。加えて、地表植生や残存木や枝条を破碎するとともに地表の耕耘ができ、のちの植林作業がスムーズに行えるようになりました。

伐採と造林の一貫作業

クラッシャによる粉碎物が土壌を被覆することで苗木の競合植物が抑制され、下刈りを削減する効果があることも明らかになりました。クラッシャによる地拵え後に大型苗を 1,000～1,500 本/ha の低密度で植栽した結果、地拵えから下刈りまでの初期保育経費を 30～40%削減できました(図5)。伐採との一貫作業を行えば、人工林管理経費の全体として 3 割のコストカットも可能です(図6)。下川町有林をモデルとした場合、このような一貫システムは下川町有林全体の 82% で実施可能です。

本研究は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「先進機械を活用した伐採・造林一貫システムによる低コスト人工林管理技術の開発」による成果です。

詳しくは原山尚徳 他(2016) 北方森林研究 64 : 61-62. 及び、佐々木尚三(2016) 森林利用学会誌 31 (1) : 4-10. をご覧下さい。



図1 ハーベスタ・フォワーダシステム

伐採の全ての工程を2台の機械だけで行うことができます。写真のような先進機はもちろん、国内で普及している従来機でも、高い生産性や安全性が期待できます。



図3 クラッシャによる地拵え作業

伐採作業と同様に傾斜 20° までの林分で作業が可能でした。

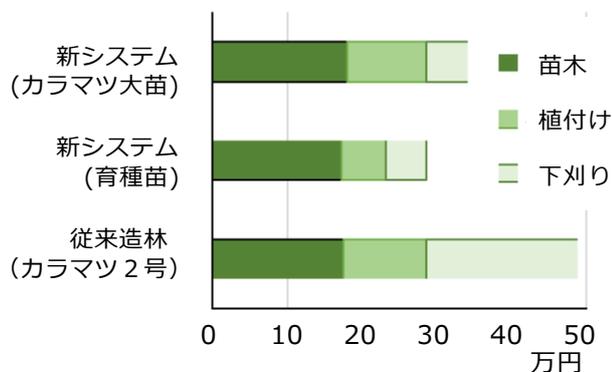


図5 初期保育経費の比較

クラッシャ地拵え後にカラマツ大苗や育種苗を低密度植栽することで、初期保育経費を30-40%削減できました。

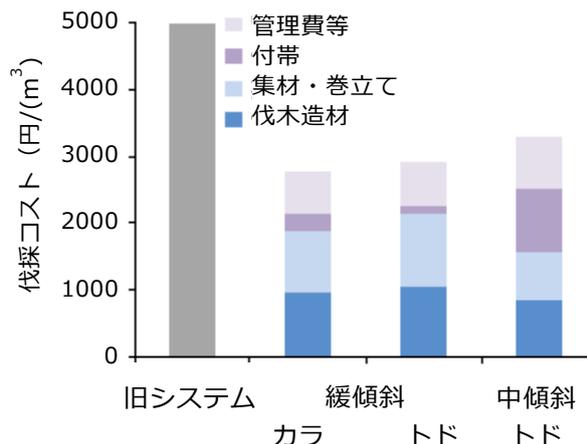


図2 伐採コストの比較

旧システムはチェーンソーとトラクタを使用するシステム。ハーベスタ・フォワーダによる全機械化伐採システムで3~4割のコスト削減となりました。

「カラ」はカラマツ林、「トド」はトドマツ林の実証例。

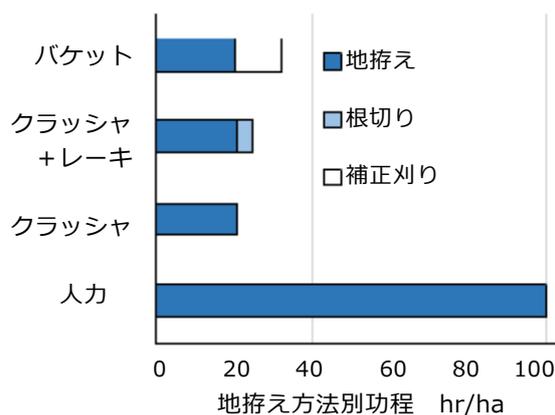


図4 クラッシャ地拵え作業の効率

同じ機械化地拵えであるバケット地拵えは人力補正刈りが必要です。

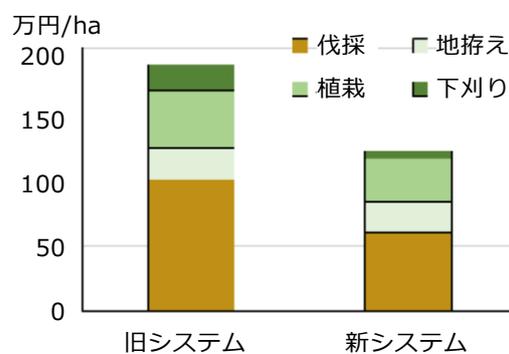


図6 伐採・造林の経費比較

伐採と造林の一貫作業を行えば、全体として3割のコストカットも可能です。

木材価格の変動リスクに備えるための異常変動評価と価格予測

林業経営・政策研究領域 久保山 裕史、道中 哲也、田村 和也、岡 裕泰、山本 伸幸

要 旨

丸太価格の暴落・暴騰は、林業事業者や林産企業の経営に大きな影響を及ぼします。暴落の影響を軽減するには、出材抑制をする必要があります。他方、価格暴騰の場合、出材量を拡大する必要があります。本研究では、出材調整を実施するか否かを判断するため、価格の異常な値動き（暴落・高騰）を察知する方法を開発しました。そして、ここ 2～3 年、異常な価格変動が多発していることを明らかにしました。また、価格の予測手法を開発し、2 ヶ月先まで誤差 3%以内の高い精度で価格を予測できました。これらを用いて、よりの確に出材調整等の実施判断ができます。この成果の一部は、国有林における「国有林材供給調整検討委員会」や日本木材総合情報センターの運営する Web サイト「原木需給.com」において活用されています。

価格変動の異常性を判定する

丸太価格の変動には季節性があるため、これらを除去すれば、異常変動（経済的なショック）をより正確に知ることができます。そこで、米国のセンサス局が公開している統計手法の一つ X-12-ARIMA を用いて、丸太価格の月次データ（期間は 10 年強）の季節調整値（図 1）を求め、これを基に前月比、前年比、2 カ年平均比を計算しました。

ある月の価格変動が、過去の変動と比べて異常かどうかを、上記の 3 つの比の 95%信頼区間からの逸脱の有無で判定しました（下に逸脱すれば急落（大幅安）、上はその反対）。実際に、宮崎県のヒノキ中丸太の 2002～2012 年月次データを用いて判定を行ったところ、2012 年 6 月の異常な急落が裏付けられました。他方、スギ中目丸太（径 24～28cm）の全国平均の 2002～2014 年月次データを用いた判定結果は、表 1 の通りとなり、消費税の駆け込み需要の影響が大きかった 2013 年 10 月以降に価格が高騰し、増税後も高水準の価格が維持されていたことが示されました。なお、最新の月次データを用いれば、直近の価格変動が通常を逸脱しているかを判定でき、出材調整を実施する必要があるかを判断することができます。

丸太価格の季節変動と価格予測

2002 年～2015 年 9 月までのスギ柱適寸丸太（径 14～22cm）、ヒノキ中丸太（径 14～22cm）、カラマツ中丸太（径 14～28cm）の全国平均価格の月次データを、統計ソフト R の Forecast パッケージを用いて、傾向変動、季節変動と不規則変動に分解しました。その結

果、図 2 のようにヒノキとスギでは季節変動が大きく、夏期に価格が大きく低下する傾向がみられましたが、カラマツはほとんど季節変動がないことがわかりました。この結果は、スギ・ヒノキでは、夏期の出材量が減少するような施策や施策を実施する必要があることを示しています。次に、月次価格の時系列分析で主に使われている指数平滑法（ETS）と自己回帰和分移動平均法（ARIMA モデル）を用いて、2 ヶ月先までの価格予測を行いました。2002～2014 年 10 月の月次データから、2014 年 11～12 月までの価格予測を行い、同様にデータを 1 ヶ月ずつ増やしながら合計 10 回の価格予測を行いました。予測結果は、表 2 に示したようにスギ・ヒノキでは、ARIMA モデルの誤差の平均値が小さく、カラマツでは両モデル間に差がありませんでした。また、誤差の大きいスギの場合でも、ARIMA モデルの誤差の平均値は 2.45%、337 円/m³と小さく、平常時においては高い精度で価格を予測することができました。

本研究は、森林総合研究所交付金プロジェクト「木材需給調整機能の解明と新たな原木流通システムの提案」による成果です。

詳しくは久保山裕史・立花敏（2014）針葉樹丸太の価格変動傾向に関する統計分析、関東森林研究 Vol.65 (1) : 9-12. 及び、Tetsuya Michinaka, Hirofumi Kuboyama, Kazuya Tamura, Hiroyasu Oka and Nobuyuki Yamamoto. (2016) Forecasting monthly prices of Japanese logs. Forests. Vol.7 (5) , 94; doi: 10.3390/f7050094. をご覧下さい。



図1 全国スギ中目丸太（径24～28cm）価格の月次データと季節調整値

月次データ（実績値）の変動は変動が大きいのに対して、季節調整値は季節性が除去されているのでなめらかになっています。

表1 全国スギ中目丸太（径24～28cm）価格の急騰・急落判定結果

| | 前月比 | 前年比 | 2カ年平均比 |
|----------|-----|-----|--------|
| 2013年10月 | 急騰 | | |
| 2013年11月 | 急騰 | | 大幅高 |
| 2013年12月 | 急騰 | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年1月 | | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年2月 | 急落 | 大幅高 | |
| 2014年3月 | | 大幅高 | |
| 2014年4月 | 急騰 | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年5月 | | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年6月 | | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年7月 | | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年8月 | | | |
| 2014年9月 | | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年10月 | | 大幅高 | 大幅高 |
| 2014年11月 | 急落 | | |
| 2014年12月 | | | |

2013年10月から約1年程度、大幅に高い丸太価格が続いていたことが分かりました。

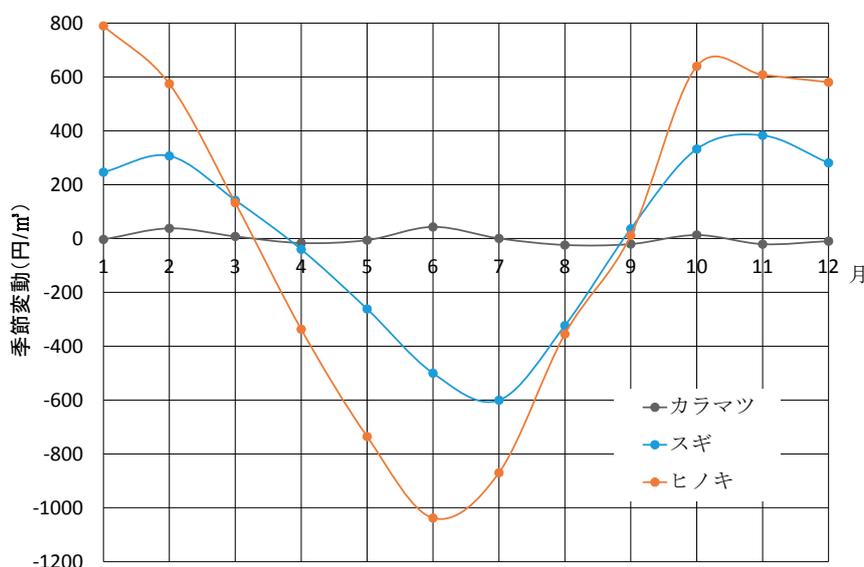


図2 スギ、ヒノキ、カラマツ丸太価格の季節変動

例えば、ヒノキの場合、価格は1月に最も高く、6月に最も低くなりやすく、その差が約1,800円/m³になっています。

表2 手法・樹種ごとの予測誤差

| | 手法・樹種 | 最小 | 平均 | 最大 | 標準偏差 |
|-------------|-----------|------|------|------|------|
| MAPE (%) | ETS・スギ | 0.76 | 2.69 | 5.33 | 1.54 |
| | ARIMA・スギ | 1.04 | 2.45 | 4.54 | 1.31 |
| | ETS・ヒノキ | 0.45 | 1.91 | 3.53 | 1.19 |
| | ARIMA・ヒノキ | 0.54 | 1.32 | 2.08 | 0.52 |
| | カラマツ | 0.1 | 0.89 | 2.22 | 0.68 |
| RMSE (円) | ETS・スギ | 135 | 360 | 674 | 202 |
| | ARIMA・スギ | 124 | 337 | 593 | 171 |
| | ETS・ヒノキ | 101 | 345 | 631 | 207 |
| | ARIMA・ヒノキ | 112 | 247 | 361 | 81 |
| | カラマツ | 16 | 109 | 273 | 81 |

MAPE（平均絶対パーセント誤差）は、実測値に対する予測値の相対的な精度を、RMSE（平均二乗平方根誤差）は、予測値と実測値の差の大きさを示しています。これらの値をみると、カラマツ、ヒノキ、スギの順に予測誤差が大きくなっていますが、10回の予測の中で、ARIMA法では誤差最大の場合でも4.54%（593円/m³）でした。

注：カラマツでは、ETS法とARIMA法の間ほとんど違いがありませんでした。

気圧を下げて木材の乾燥時間を半分に

加工技術研究領域
岐阜県森林研究所

齋藤 周逸
土肥 基生

要 旨

平成 22 年に施行された「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」では、今後の需要が期待できる公共建築物等の大規模建築物にターゲットを絞りつつ、住宅など一般建築物への利用への波及を含み、木材全体の需要を拡大することとしています。木造建築物の構造用部材には乾燥処理した木材を使用することが一般的になってきた中で、処理時間やコストが普及上の課題となっています。これらの課題を解決するため、減圧乾燥法という技術を応用して研究開発に取り組んだ結果、従来の乾燥法と同等の品質を維持したまま、乾燥時間を 50%、乾燥コストを 30%削減することに成功しました。

供給が増えている大径材

我が国は、戦後の針葉樹造林によって、1,000 万 ha という世界でも有数の人工林を築き上げてきました。その多くは樹齢 50 年を超え、大径化が進んでいるため、近年は大径材の供給が増えています。とくにスギは針葉樹人工林のほぼ半分以上を占めるため、その大径材を木造住宅用に効率的に有効利用することが、喫緊の課題となっています。

乾燥加工は不可欠

製材された直後のスギ材は、水分を多量に含んでいます。私たちが住む木造住宅の構造用部材として利用する場合、この水分を蒸発乾燥させる加工が必要です。木材は内部の水分が減少するにしたがって、形状変化が起こったり割れが生じやすくなったりします。そのため、水分の多いまま構造用材に使用すると、時間の経過により材内の水分が少なくなり、変形や収縮が生じて木造住宅の性能に悪影響を及ぼします。

乾燥時間を短縮するためには

この研究開発では、乾燥装置内の気圧を下げて木材の乾燥時間を短縮する減圧乾燥法について検討・検証しました。

水分蒸発は、図 1 左のように外気の温度と湿度の関係による気化現象として起こりますが、100℃になると沸騰することはご存知のとおりです。ただし、これは私たちが生活している通常の気圧（1 気圧、1013h Pa）のことです。特殊な装置を用いて周辺の気圧を低くすれば、図 1 右のように低い温度でも沸騰が起こるため、水分の蒸発は著しく速くなります。

減圧乾燥法の効果は大きかった

減圧乾燥法による時間短縮の検証試験は、岐阜県森林研究所に設置された箱型の減圧乾燥装置（図 2）を使用して行いました。用いた試験材は図 3 に示した木取りで大径材から製材されたスギ平角材です（図 4）。

従来の一般的な乾燥法の場合、スギ平角材^{*}を処理温度 80～90℃の条件で、含水率 20%を下回る状態にするためには 20 日以上長時間を要しました（図 5）。一方、装置内の気圧を 400hPa にした減圧乾燥法では（このとき水の沸点は 75℃）、上と同じ温度条件で従来法の半分以下の 9 日程度で含水率 20% 以下を達成することができました。

乾燥材生産コストの削減

減圧乾燥法には特殊な装置が必要ですが、現時点ではあまり普及していないこともあり、同規模の従来装置に比べると倍近い価格です。しかし、減圧乾燥法を使えば乾燥材の生産性が従来の 2 倍近くまで向上するため、乾燥装置の初期投資の回収を含めた乾燥コストは図 6 のように従来乾燥法の 7 割程度に抑えられます。このように、減圧乾燥法は、乾燥材の生産性を向上し、かつ乾燥コストも低減できます。

減圧乾燥法の普及は、一般建築用部材として国産材を大量に要求される場合にも、その供給体制に迅速な対応を可能とし、日本農林規格（JAS）に対応する高品質な一般建築用部材の需要に対する供給促進に貢献します。

本研究は、森林総合研究所交付金プロジェクト「スギ大径材を一般建築用部材として利用拡大するための加工・利用技術の開発」による成果です。

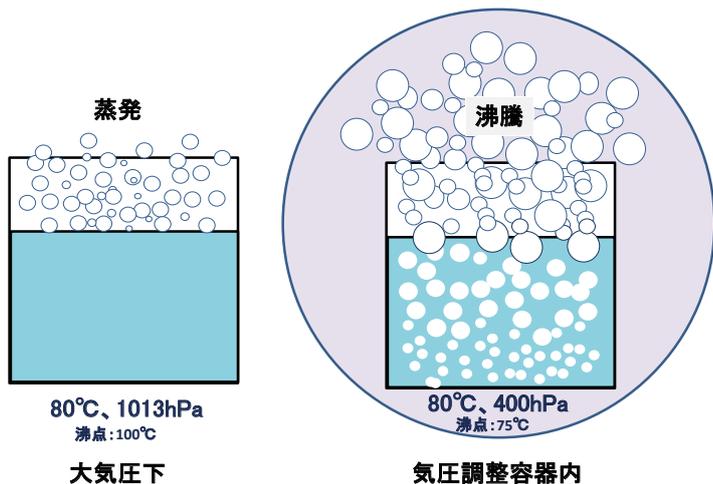


図1 周辺気圧を低くすると水の沸騰温度は低くなる



図2 箱形の減圧乾燥装置
(株)大井製作所:OHV4-1HSV型

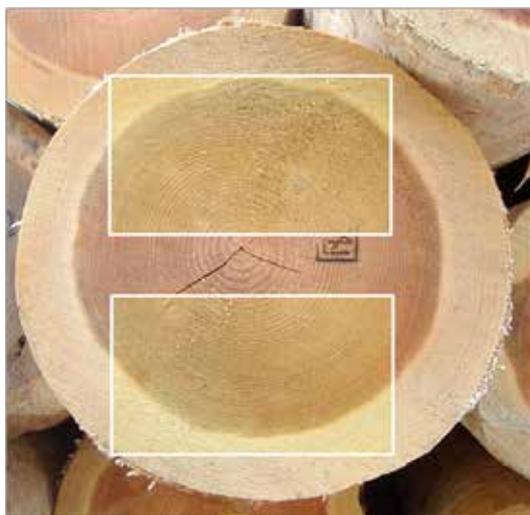


図3 大径材から製材されるスギ平角材
木取りの例



図4 乾燥試験に用いたスギ平角材
寸法:断面 180 × 135 mm、長さ 3050 mm

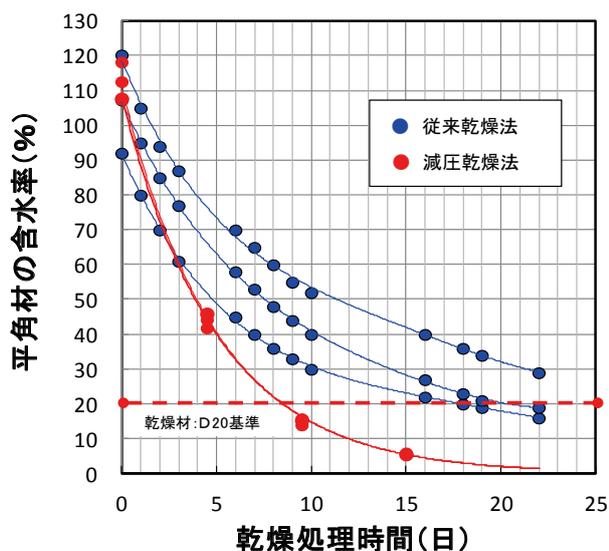


図5 乾燥法による含水率減少経過

青色の3本の線は、初期含水率が異なる平角材の含水率減少経過を示します。減圧乾燥法では、初期含水率が高かったにも関わらず、初期含水率が低かった従来乾燥法より早く乾かすことができました。

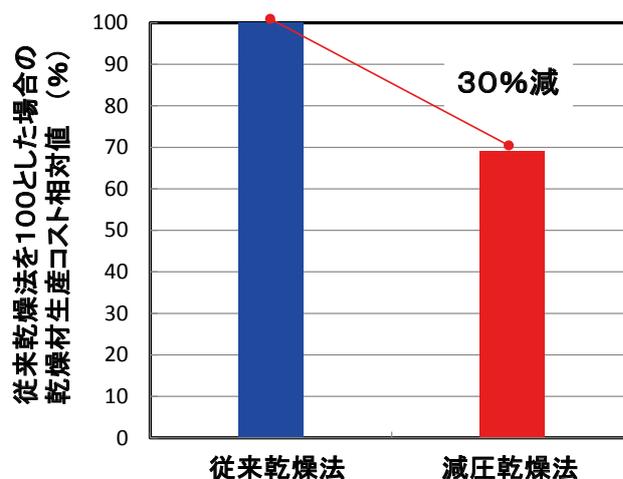


図6 装置の減価償却を含めた乾燥材生産コストの削減

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

重さを測らず、音で木材の密度と強度を知る

木材特性研究領域
富山県農林水産総合技術センター木材研究所
構造利用研究領域

久保島 吉貴
園田 里見
加藤 英雄

要 旨

木材強度の指標として、密度とヤング率^{*}を測定するには重さの測定が不可欠でした。しかし、^{せんぷく}積みした材や木製ガードレール用横棒（図 1）などでは、個々の木材を取り出して重さを測定するために相当の労力を要していました。もし、木材の重さを測定せずに重さを知る方法があれば、この面倒な作業から解放されることになります。私たちは、木材におもりを付けた場合と付けない場合の打撃音の違いを利用して、木材の重さが分からなくても密度とヤング率が分かる測定方法を開発しました。この方法は、積みしたままの状態や木製ガードレールの横棒が支柱に取り付けられたままでも、密度とヤング率を知ることができる測定技術の開発につながることを期待されます。

重さを測らず、木材の密度とヤング率を求めるための振動試験

まず、木材におもりを付けた状態と付けない状態で打撃したときの音の高さを測定します。この音の高さの比を、おもりの位置と重さが打撃音に与える影響を表す理論式に代入します。すると、木材の重さに対するおもりの重さの比が求められます。従って、あらかじめおもりの重さを測定しておけば木材の重さが計算できます。また、木材の重さと寸法から密度が計算できます。ヤング率は、木材の寸法、密度そしておもりを付けずに打撃したときの音の高さから計算できます。この一連の作業の中で、木材の重さは一度も測定していません。この測定方法を「質量付加振動法」と名付けることにしました。

質量付加振動法が正しいかを実験で確かめる

質量付加振動法が正しいかどうか、断面が幅 30mm、厚さ 5mm の長方形で長さが 300mm の節などの欠点がない小さい木材の実験で確かめました。実験では、木材を図 2 のようにスポンジの上に載せ、片方の端をハンマーで軽く叩いて発生した音をもう片方の端に置いたマイクロフォンで集音し、音の高さを測定しました。木材におもりを付けた場合（ホチキス針を木材に打ち込みます）と付けない場合とで音の高さを測定しました。おもりは木材の端に付けて調べました。

その結果、表 1 のように、質量付加振動法で求めた密

度と通常の方法すなわち木材の重さと体積から求めた密度を比べるとほとんど変わりませんでした。ヤング率は密度と比例する量で、質量付加振動法で求めた値と通常の計算方法で求めた値を比べると密度と同様にほとんど変わりませんでした。これにより質量付加振動法の理論が正しいことが実験で確認できました。

実用化に向けて

質量付加振動法を実用化するにあたり、おもりの重さや付け方の検討、積みモデルにおける^{せんぎ}積木の位置、そして実大材での検討を行っています。現在、積木は木材を打撃した際に振動が発生しない位置に置くのがよさそうであるとか、おもりは重すぎず軽すぎない適切な重さがありそうだということなどが分かってきました。

将来的には図 3 のような簡単な装置で測定作業が行えるような技術開発をめざします。

本研究は、JSPS 科研費 (JP15K07522) 「重量測定を行わずに木材の密度とヤング率を求めるための振動試験方法の開発」による成果です。

詳しくは、Kubojima, Y., Sonoda, S. (2015) European Journal of Wood and Wood Products 73:399-401 および Kubojima *et al.* (2016) BioResources 11:800-810 をご覧下さい。



積み重ねた状態の木材



支柱に取り付けられた木製ガードレール

図1 木材の重さの測定が必要とされる現場

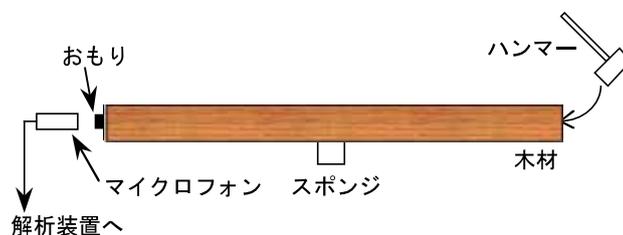


図2 質量付加振動法

表1 質量付加振動法による密度とヤング率の推定

| | おもり [g] | 打撃音の 高さ [Hz] | 密度 [kg/m ³] | ヤング率 [GPa] |
|---------|---------|-----------------|----------------------------|---------------|
| 質量付加振動法 | 0.0559 | 9348.1 | 428 | 13.56 |
| 通常の方法 | なし | 9375.2 | 429 | 13.57 |

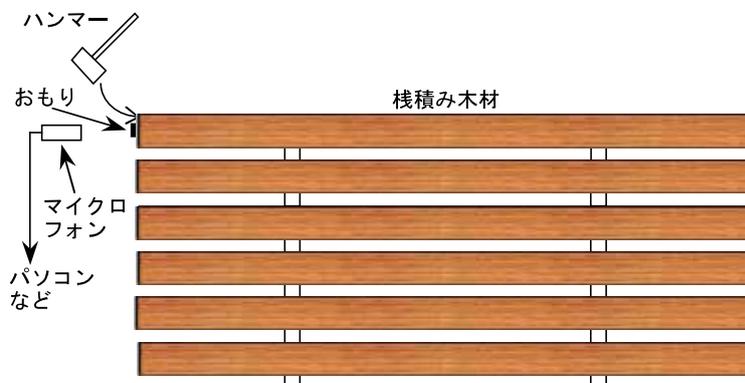


図3 未来のヤング率の測定イメージ

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

構造用パーティクルボードを JIS 規格に

複合材料研究領域

渋沢 龍也、宮本 康太

要 旨

パーティクルボードは建築解体材等の木質廃棄物から製造が可能な板状の材料です。パーティクルボードは、これまで家具等に用いられてきましたが、木造建築物の構造材としては使用できませんでした。そこで、構造用材として使用するための研究開発を行い、構造材としての性能を担保するための品質管理手法を確立しました。得られた成果を応用することで JIS 規格（日本工業規格）に構造用途に使用するための区分が新設され、現在、建築基準法における位置付けが検討されています。パーティクルボードは HWP（伐採木材製品）*として、環境に対する貢献が認められており、今後の普及推進が期待されます。

パーティクルボードとは

パーティクルボードとは、木材の小片に接着剤を噴霧して堆積したマットに熱と圧力を加えて成型した板状の材料です（図 1）。原料として間伐材や製材工場の端材、建築解体材等を使うことが可能で、未利用材や残廃材を有効利用できます。しかし、パーティクルボードは小片からできているため、強度性能が低く、家具や造作材にしか使用することができませんでした。

木造建築物の耐震性能

日本の木造建築物は、主要構造部分が柱・梁材からできていますが、これらは鉛直荷重を支える役割を果たしており、地震や台風などの水平力に耐えるためには、耐力壁と呼ばれる構造が必要となります。従来の耐力壁では、壁の柱・梁材で囲まれる四角形の空間の対角線上に、筋かいと呼ばれる材料を入れることで、つつかい棒の役割を担わせる方法が採られました（図 2）。近年では、断熱性能の確保が容易であることから、面状の材料を張った耐力壁が普及しましたが、使用可能な材料は合板や構造用パネル（OSB）等に限られていました。パーティクルボードも使用可能な材料でしたが、合板等より強度が低いために厚い製品を使用せざるをえず、結果として建築現場で特殊な施工方法を用いる必要があったことから、ほとんど使用されることはありませんでした。

構造用途で使用するための性能保証

パーティクルボードを構造用途で使用するためには、合板等と同じ厚さで同程度の性能を確保することが必要です。これまでは、各メーカーが個別に国土交通大臣の認定を取得していましたが、製品の間には互換性がなく、広く普及することができませんでした。一般的な材料として認知されるためには、どのメーカーの製品でも同じ性能を持つことを担保する必要があり、そのためには材料の規格によって性能を担保する方法が有効です。パーティクルボードの材料規格は、JIS 規格（日本工業規格）に規定されています。そこで、構造用途で使用可能な製品を位置付ける新しい分類として「構造用パーティクルボード」の区分を設定しました。構造用途で使用可能であることを示すためには、品質を担保するための試験方法とその合格基準値を決める必要があります。これまで森林総合研究所で実施してきた研究の成果を基に、これらの項目を決めることができました。

本課題の成果により、パーティクルボードを構造用途に使用するための方策が確立しました。現在、建築基準法における位置付けが検討されています。パーティクルボードは HWP（伐採木材製品）として、環境に対する貢献が認められており、今後の普及推進が期待されます。



パーティクルボードの原料(廃棄物が利用できる)

表層用パーティクル(左)と心層用パーティクル(右)



パーティクルボード(左)と
パーティクルボードを用いた本棚(中)
本棚を裏側から見るとパーティクルボ
ードが使われているのがわかる(右)

図1 パーティクルボード

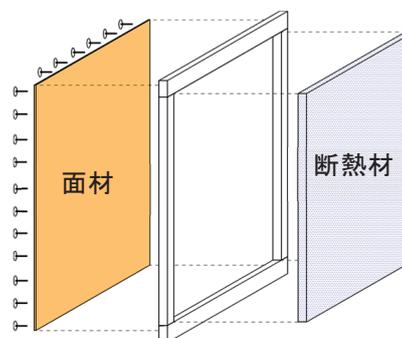
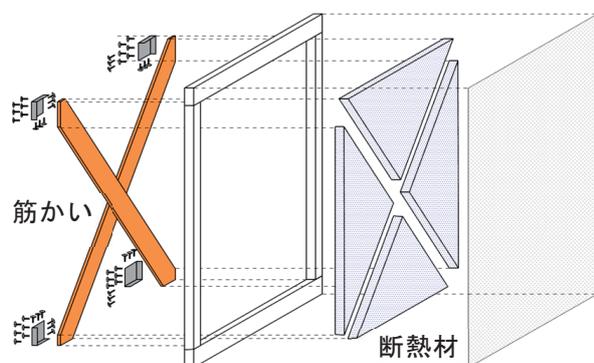


図2 筋かい耐力壁(左)と面材張り耐力壁(右)

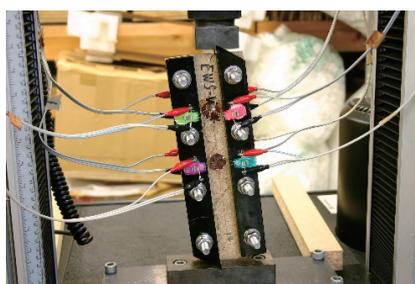


図3 パーティクルボードの各種性能評価

曲げ性能(左上): 床に必要な性能

面内せん断性能(右上): 壁に必要な性能

釘側面抵抗(左下)、釘一面せん断性能(右下): 部材の留め付けに必要な性能

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

変わりゆくシロアリ生息地と 寒冷地におけるシロアリ対策の必要性

木材改質研究領域
構造利用研究領域

大村 和香子、神原 広平
加藤 英雄

要 旨

シロアリは、熱帯～亜熱帯原産であるにもかかわらず、長い年月を経て徐々に寒冷な気候に適応し、生息域を拡げてきています。今回、日本各地における木造建築物へのシロアリ被害リスクを評価するため、主として 2010 年以降の野外生息域と被害情報を精査して、シロアリの野外生息マップを更新しました。その結果、これまで住宅の土台などで使用する木材に対して防蟻処理が必要とされていなかった北海道や青森県においても、シロアリの野外での生息や住宅等への被害が認められるなど、防蟻処理の必要な地域が変化していることを明らかにしました。これらの成果は、木造建築物に対するシロアリ被害を低減するためのシロアリ予防対策に活用できます。

シロアリ分布の変遷

木造建築物に多大な被害を与える木材害虫のシロアリは、元来熱帯～亜熱帯原産と考えられています。ところが、長い年月を経て徐々に寒冷な気候に適応するとともに、建築材料として使う木材も餌となることから、私たちの生活圏の拡大にともなって、シロアリも生息域を拡げています。

現在、離島を含む日本国内には 23 種類のシロアリが生息しています。このうち、木造住宅に対して特に甚大な被害を引き起こすのが、地中や地際の枯死木等の野外に営巣するイエシロアリとヤマトシロアリの 2 種類で、木造建築物の床下部分から侵入して加害します。特にヤマトシロアリは、北海道の一部や高地を除く日本全国に生息しており、明治時代にはすでに北海道の函館でその生息が報告されていました。

ヤマトシロアリの野外分布北限は 2001 年の段階では図 1 のように札幌市付近が北限でしたが、今回、野外生息域と被害情報を改めて精査した結果、図 2 のように北海道北部（名寄市）まで生息域を拡げている状況を明らかにしました（図 3）。

多雪地域でなぜシロアリが生息できるのか？

道内でも積雪量が特に多く、かつ冬期の気温が低い地域として知られるのが、ヤマトシロアリの野外生息北限である北海道名寄市です。なぜ、熱帯育ちで冬期に休眠もしないシロアリが、このような土地で越冬し野外生息できているのでしょうか？

シロアリの野外生息が確認されていない北海道東部は冬期、根雪（長期積雪＝観測点における積雪が 30 日以

上継続した状態）になる前に気温が氷点下になります。このとき土壌は直接気温の影響を受けるので、深くまで凍結することが報告されています。一方、名寄市が位置する北海道北部の名寄盆地は、冬期の比較的早い時期に根雪となることから、いわゆる「積雪の断熱効果」により土壌の凍結が進みにくいことが知られています。そのため、ヤマトシロアリが生息している、冬期に除雪作業を実施しないような場所では（図 4）、土壌の凍結が生じないことで、ヤマトシロアリの営巣している枯死木等の内部温度が、生息可能な温度に保たれると考えられます。

寒冷地の住宅でもシロアリ対策が必要

今回、土台などの木材に対して防蟻処理が必要とされていなかった北海道や青森県においても、シロアリの野外生息が認められたことから、防蟻処理の必要な地域が拡大していることが明らかになりました。これらの成果は、木造建築物に対するシロアリ被害リスクを低減させるためのシロアリ対策の改善に活用できます。

詳しくは以下の文献をご覧ください。

Kolbe, H.J. (1885) Zür Naturgeschichte der Termiten Japans, Berliner Entomolog Zeitschrift, 29 (1) , 145-150.

大村和香子 (2015) ヤマトシロアリとイエシロアリの被害地域の変遷とハザードマップの提案 (公社) 日本木材保存協会年次大会研究発表論文集, 31: 116-121.

大村和香子 (2015) 移りゆくシロアリ生息分布図 ～防蟻対策の地域区分とのかかわり～, 木材保存, 41 (3) , 102-107.



図1 ヤマトシロアリの分布北限
(木材保存学入門改訂版, 2001 より改変)



図2 更新したヤマトシロアリの野外生息マップ



図3 名寄市内で確認されたヤマトシロアリ



図4 積雪のある状態での地中温度の実測の様子

雪よけバケツの中にデータロガー（温度記録装置）が設置してあります。

中小規模木質バイオマス発電施設に対する燃料供給と 熱電併給事業の採算性

東北支所
林業経営・政策研究領域
加工技術研究領域

駒木 貴彰、天野 智将、小谷 英司
久保山 裕史
吉田 貴紘、柳田 高志

要 旨

木質バイオマス発電施設の建設が全国各地で進められています。多くは発電規模5,000kW以上の施設ですが、規模の小さい2,000kW未満の中小規模発電施設の導入を考えている地域もあります。こうした中小規模施設は、発電だけでなく発電の際に発生する熱も利用しなければ事業の採算性は厳しいといわれています。そこで、岩手県奥州市を対象に2,000kW未満の発電施設を想定して、燃料の安定供給と熱電併給事業の可能性を検討しました。その結果、木質バイオマス資源量は奥州市単独でも賅えますが、安定的な供給のためには周辺自治体まで集荷範囲を拡大する必要があること、発電規模500kW程度の施設を分散すれば地域の実情に即した熱電併給事業が実現可能であると考えられました。

木質バイオマス燃料の供給可能性

岩手県と岩手南部森林管理署の森林簿及び森林基本図による森林GISをもとに、奥州市の民有林と国有林の森林分布図を作成し、林齢別の人工林・天然林別資源量(乾燥重量換算)を評価しました。また、林道や作業道地図データとGoogle Earthの空中写真を判読した結果とを組み合わせ、道路・林道・作業道の地図を作製し、林道からの距離別に森林資源量を算出しました。さらに、針葉樹と広葉樹の既存利用(製材やパルプ用材等)との競合を考慮して、持続的な燃料供給が可能かを分析しました。

その結果、奥州市では、林道から250m以内に資源量が多く(表1)、また2,000kW規模の木質バイオマス発電所の需要を賅うだけの資源量は、奥州市単独でも十分にあることが分かりました(図1)。その一方で、発電施設のバイオマス消費量は、奥州市の既存用途の木材生産量と同程度であることから、既存需要に及ぼす影響を考慮すれば、奥州市周辺の自治体まで拡大した木質バイオマス集荷体制を作る必要があることが分かりました。

木材の効率的な搬出方法

奥州市の森林資源量を見ると、2,000kWクラスの木質バイオマス発電用の燃料供給は十分可能ですが、いかに低コストで発電施設まで搬送できるかが鍵になります。搬送費用の観点からは、伐採現場に近い場所で貯木、チップ化し、発電施設に運搬する方法にすれば搬送経費が1,000円/tとなり、原木で運ぶより安くなりました。また、グラブを装備したフルトレーラーを用意して輸送能力を向上させるとともに、1日当たりの運送回数を増やすことや、一般的なバイオマス材の採材寸法の2mを倍の4mにして積み卸しの時間を減らすこともコ

スト削減に有効です。

小規模分散型の熱電併給事業が経済的

森林総合研究所で開発した「木質バイオマス発電事業採算性評価ツール(柳田ら、2015)」による試算では、中小規模発電施設は、燃料価格が安ければ高い内部収益率が得られるものの、それがわずかに上昇するだけで赤字に転落するという結果が得られています。一方、中小規模施設でも、熱電併給を行えば経済性を高められると考えられることから(図2)、奥州市で熱需要が大きいとみられる旅館や病院等のアンケート調査を行いました。発電規模2,000kW程度の熱電併給事業を行うには4,000kW前後の熱需要が必要です。熱供給パイプの設置コスト等を考慮すれば、発電施設の周辺にまとまった熱需用者がいることが理想ですが、実際の熱需用者はまとまっておらず、1,000~2,000kWの小さな熱需要が市内3箇所に分散していることが分かりました。そのため、発電規模2,000kWの熱電併給事業ではなく、3つの地区それぞれで500kW規模(熱出力1,000kW)の熱電併給事業を行う方が経済的だと考えられます。

本研究は、奥州市の委託研究「木質バイオマス発電施設に対する燃料供給量予測と事業採算性評価手法の開発」による成果です。

詳しくは、柳田高志・吉田貴紘・久保山裕史・陣川雅樹(2015)再生可能エネルギー固定価格買取制度を利用した木質バイオマス発電事業における原料調達価格と損益分岐点の関係。日本エネルギー学会誌94(3):311-320をご覧ください。

表1 奥州市の林道・作業道からの距離別森林蓄積量

| 林道 距離 | 民有林 | | 国有林 | |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| | 人工林 | 天然林 | 人工林 | 天然林 |
| 0-100m | 805,771 | 536,838 | 187,808 | 414,082 |
| 100-250m | 616,169 | 470,687 | 72,766 | 274,391 |
| 250-500m | 314,072 | 184,432 | 56,418 | 39,170 |
| 500-1000m | 69,768 | 26,362 | 24,928 | 37,234 |
| 1000-2000m | 390 | 14 | 461 | 25,242 |
| 2000m以上 | 0 | 0 | 0 | 13,169 |

単位 [ton]

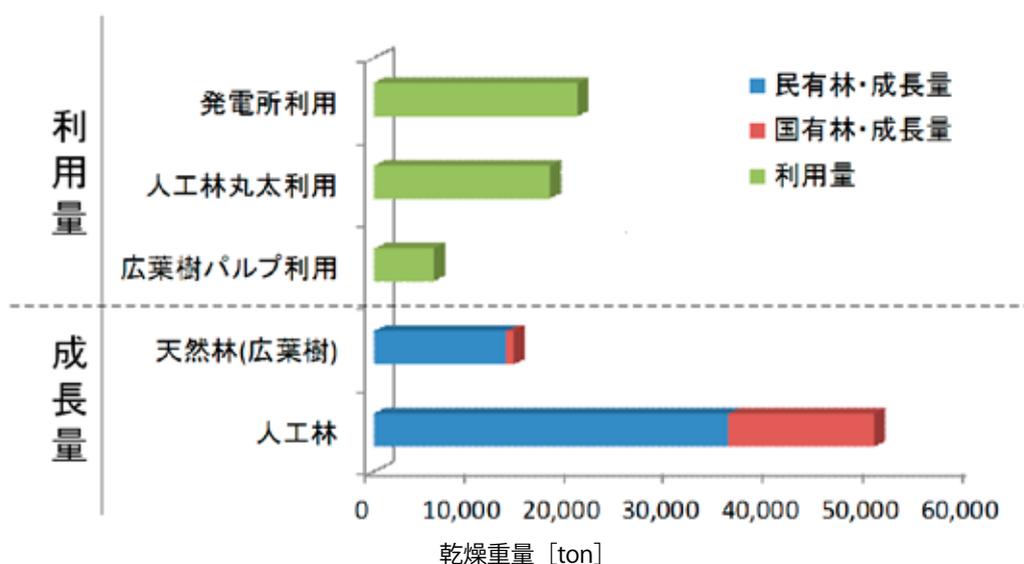


図1 奥州市の民有林・国有林別森林成長量および用途別木材利用量

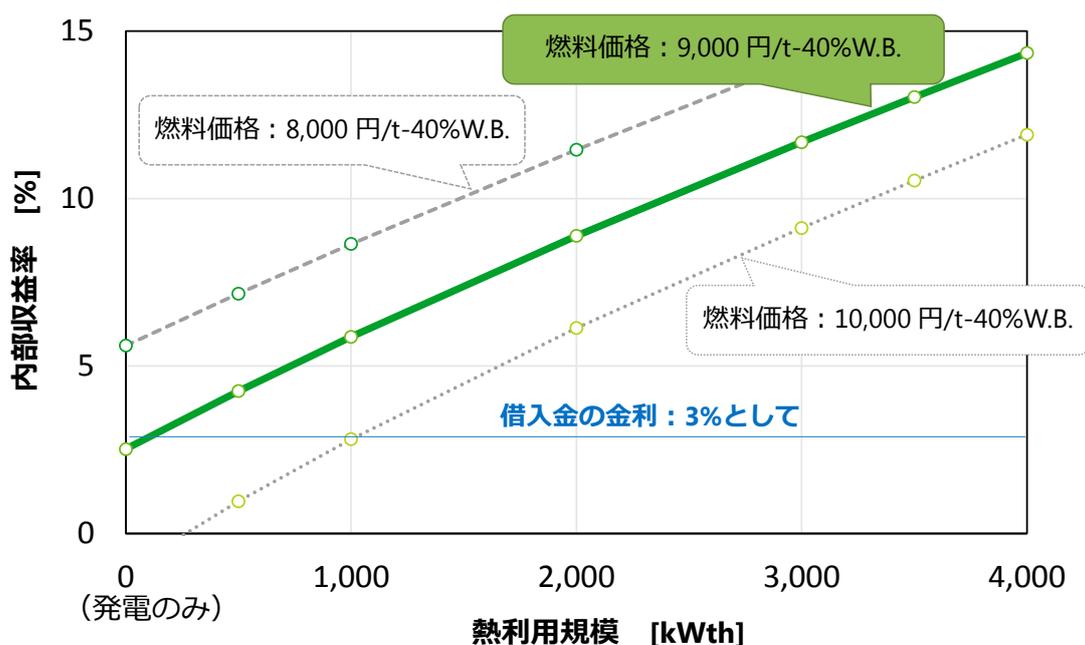


図2 熱利用規模毎の燃料価格と内部収益率の関係

発電規模 1,999 kW、燃料価格を 9,000 円 / t (含水率 40%W.B.) とした時 (緑色の実線)、発電のみの場合では内部収益率が 2.5% となり、仮に借入金の金利 3.0% とした場合には、内部収益率が下回ります。そのため、熱の販売による収益性の向上は、事業性改善の一つの手段になります。

地域産業を創出する現場設置型のリグニン製造システム

バイオマス化学研究領域

山田 竜彦、高田 依里、高橋 史帆、
ネー ティティ、池田 努

要 旨

リグニンは細胞壁の主成分の一つで、植物系バイオマスの約 20～35%を占めます。国内の林地残材においてもその約 30%はリグニンですが、十分な利活用はなされていません。私たちは、地域のリグニン資源を有効利用する技術を開発することで、新たな産業創出と地方創生への貢献をめざす取り組みを行っています。地域にリグニン製造ステーションを創設するため、改質リグニン製造に特化した世界初のシステムを開発しました。圧力リアクターを使用しないという特色を持つこのシステムを農山村現場に展開することで、様々なビジネス展開可能な化成品の原料が、国内の農山村から供給可能となります。

国産リグニン資源による新産業創出

リグニンは化学構造や物理特性の多様性が災いし、工業材料としての本格的な利用が困難な「未開の原料」とされてきました。私たちは、リグニンの短所とされた多様性を逆手にとって、多様なリグニンの全てを対象とするのではなく、スギリグニンのみをターゲットとすることにより、国産資源の利活用に特化できるという発想の転換を図りました。国土の約 7 割を森林が占める我が国において、最大量のバイオマスはスギとなっています。スギは我が国のみにも特異的に植林された固有の樹木で、当たり前ですが、スギのリグニンはスギからしか取得することはできません。従って、国産スギリグニンに特化した私たちの技術は、必然的に国産資源の利活用をもたらし、これを利用した産業創出は、地方創生に直接貢献します。また、スギのリグニンは、他の樹種のリグニンと比較して優れた特性を示しました。私たちは、スギ材からリグニンを加工しやすい性質を持つ工業材料の形に改質しながら分離する、世界初の現場設置型プラントシステムを開発しました(図 1)。本システムは、環境負荷が少なく安全性の高いコンパクトなシステムです。

安全に配慮した世界初の現場設置型システム

このプラントシステムは、化学プラントでありながら圧力容器や揮発性有機溶剤を用いない、安全性に配慮したコンセプトで設計されています。メインの反応には安全性の高いポリエチレングリコール(PEG)※等のグリコール系薬剤を使用し、揮発性の有機溶剤等は使用しま

せん。PEG は沸点の高い薬剤なので、リグニンの効率的な抽出に必要な 140℃程度への加熱を大気圧下で行うことができます。加えて、PEG はリグニンに結合しながら分解を促すので、リグニンの改質と抽出を同時に行えます(図 2)。

抽出されたリグニン溶液は、酸性にするだけで溶けない粒子として沈殿します。その沈殿物を集めたものが「改質リグニン」とよばれる工業材料です。また、沈殿したリグニンを除去した水溶液から濃縮器で水分を除去することで未反応の PEG がリサイクルされ、これを再び反応薬剤として利用することができます。さらに、システムに必要なすべての熱源は、地域の現場における木質ボイラーからの蒸気でまかなうことができます。

改質リグニンから製造される高付加価値製品

PEG をリグニンに導入することにより、リグニンの性質は劇的に向上し、改質リグニンとなります。改質リグニンは、熱可塑性※が高いなど加工性に優れ、様々な材料への利用が可能です。その製品マーケットは合わせると 1000 億円を超えると見込まれており、今後は産業化へ向けた開発を進めていきます。

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



ベンチプラント模式図



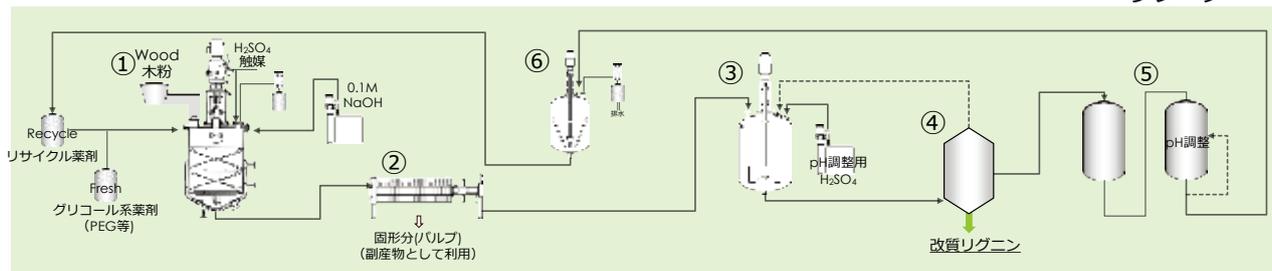
ベンチプラント外観 ベンチプラント内部



リアクター部外観

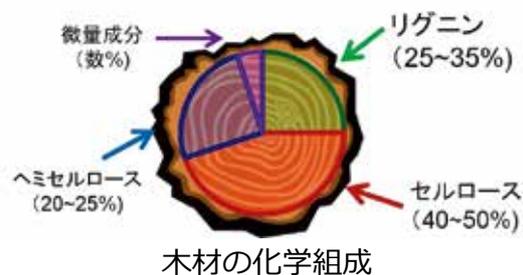


改質リグニンの
フレーク

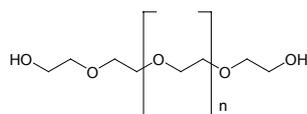


- ①酸加溶媒分解リアクター（常圧型の加熱装置です）、②フィルタプレス（パルプを分離します）、
- ③沈殿槽（リグニン沈殿を生成します）、④固液分離工程（リグニンを分離します）、
- ⑤回収タンク、⑥薬液回収濃縮装置（薬剤を再利用します）

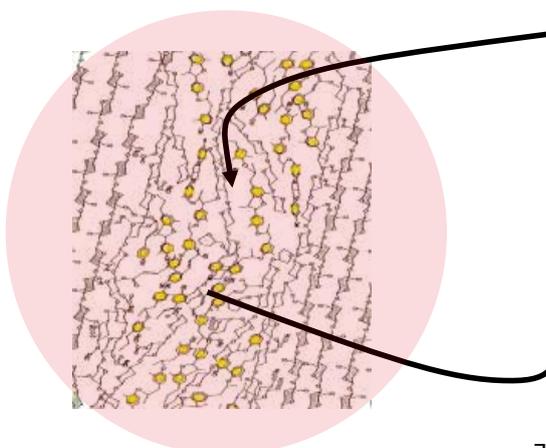
図1 改質リグニン製造ベンチプラントのシステム



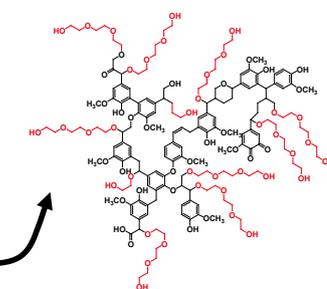
ポリエチレングリコール (PEG)



改質リグニンパウダー



木材の化学構造の模式図



改質リグニンの化学構造模式図

図2 木材中のリグニンを改質すると同時に取り出す技術を開発

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

高性能木質固形燃料「トレファクション燃料」の 連続製造に成功

加工技術研究領域
木材特性研究領域
木材改質研究領域
四国支所
多摩森林科学園
研究コーディネータ
株式会社アクトリー
三洋貿易株式会社

吉田 貴紘
久保島 吉貴
上川 大輔
垂水 亜紀
井上 真理子
木口 実
田中 孝二郎、増井 芽
大藪 吉郁、五十嵐 大徳、小林 明央

要 旨

木質ペレット^{*}等の木質固形燃料は、エネルギー（発熱量）が化石燃料より低く、水に浸すとふくらんだり形が崩れたりする欠点がありました。そこで発熱量が高くて水に強い高性能な木質燃料「トレファクション燃料」をつくる実証プラントを建設し、昼夜連続運転による燃料の製造試験に成功しました。この燃料を農業用温風機や家庭用ストーブで利用できることを明らかにし、地産地消型の高性能木質固形燃料として利用できることを示しました。

木を焙じて高性能な燃料をつくる国内初の実証プラント

木材チップや木質ペレットに代表される木質燃料は、発熱量が化石燃料より低く、水に浸すとふくらんだり形が崩れたりする欠点がありました。そこで、ちょうどコーヒー豆などを「焙じる」ように、原料木材をトレファクション^{*}と呼ばれる 250～300℃程度の高温度条件による半炭化処理を行い、これをペレット成型することで、発熱量は従来の木質ペレットより約 20～30%も向上したうえ、湿度の高い劣悪な状況下でも保管性に優れるといった高性能化を実現しました。さらに、この高性能燃料を製造する国内初の実証プラントを神奈川県伊勢原市に建設しました。

次世代炭焼き「トレファクション」実証プラントの概要

図 1 に実証プラント概要を示します。炭化炉は外熱式ロータリーキルン^{*}を採用し、1 時間あたり 20kg の木材チップを処理できます。枝葉や樹皮など多様な原料に対応できるとともに、木材チップから発生するガスを炉の加熱用燃料に使用します。トレファクションされたチップは、併設したペレット化装置で高密度のペレットに成型することが可能となっています。

昼夜連続製造に成功！

このプラントは平成 26 年 12 月に完成し、のべ約 20

日間の昼夜連続運転試験を行いました。生のスギ木材チップを原料にして、トレファクションチップを連続製造し、得られたチップからペレット燃料を製造することに成功しました。

地産地消の次世代型高性能燃料として期待

トレファクション燃料は、これまで主に石炭と混焼して大規模に発電に使用する方法が検討されてきましたが、本研究から、地域で小規模に熱利用する方法がみえてきました。試験の結果、この燃料は市販の家庭用ペレットストーブや農業用温風機（図 2）で使用可能であり、かつ従来ペレットよりも着火が早いといった特徴のあることがわかりました。また、保管性や携帯性に優れる特徴を活かして、アウトドアや防災燃料用途にも利用できるなど、図 3 に示すような地産地消型の燃料として期待できます。山村地域に眠る未利用木質バイオマス資源を地域で高性能燃料に加工し、地域内外へ多目的に活用できる道筋を展開すべく、製造・利用の実用化を目指していきます。

本研究は、林野庁木質バイオマス加工・利用システム開発事業「林地残材等のトレファクション燃料化による高性能利用技術の確立」による成果です。

トレファクション燃料製造フロー

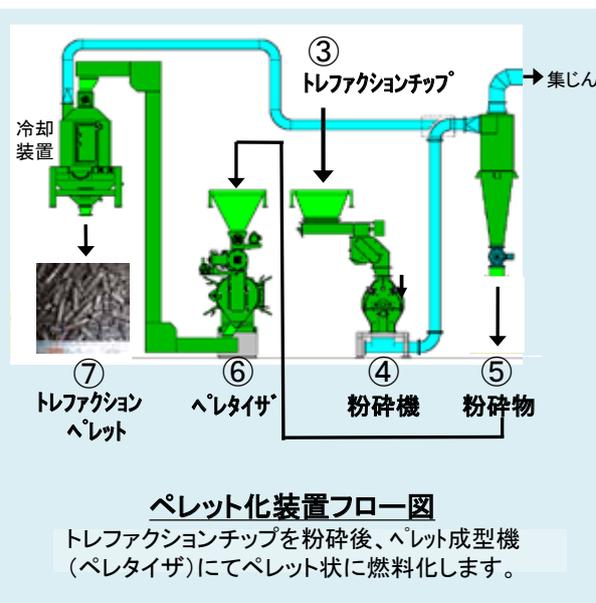
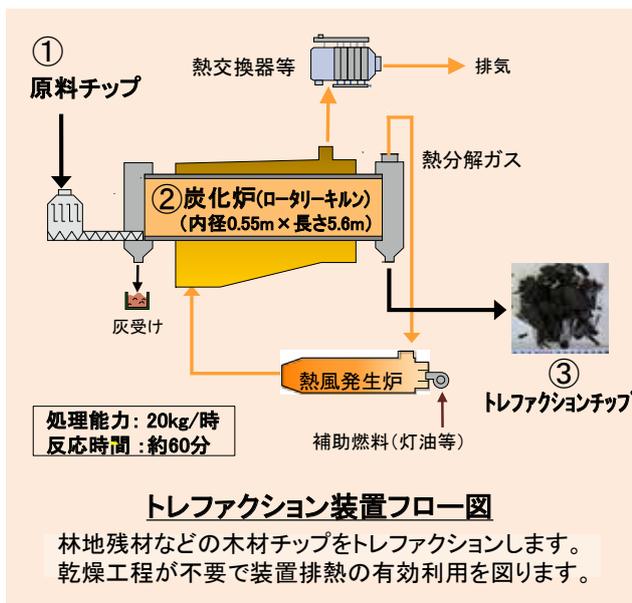
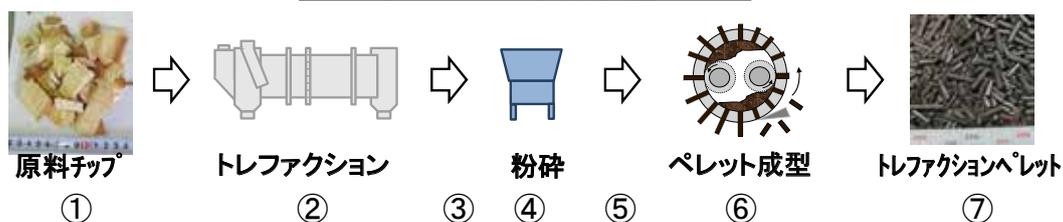


図1 トレファクション燃料製造実証プラント概要
設置場所: 神奈川県伊勢原市



図2 農業用温風機での利用実証

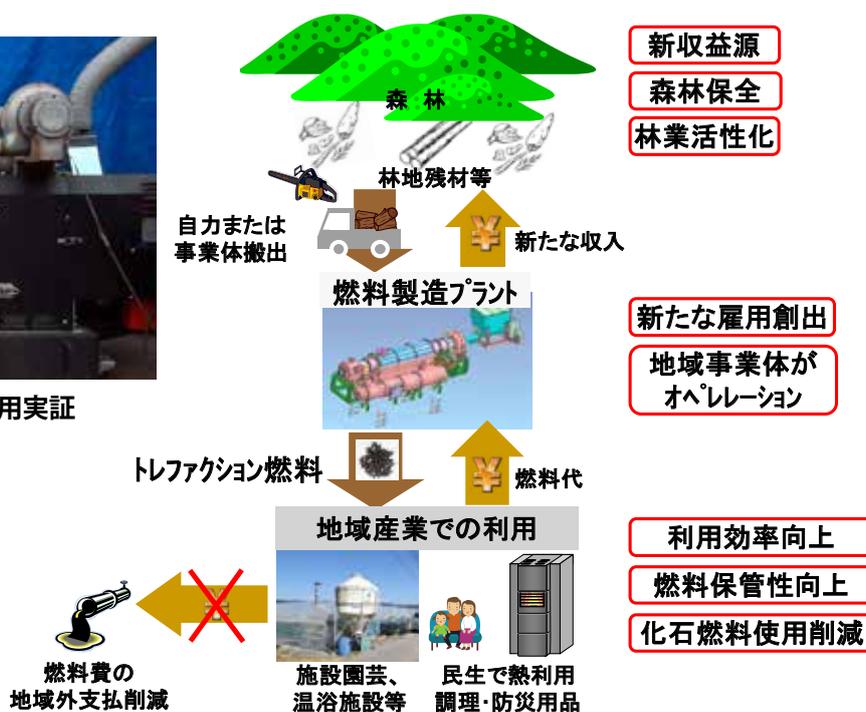


図3 トレファクション燃料利用モデル

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

あなたの地域でもセルロースナノファイバーがつかれます

きのこ・微生物研究領域
 バイオマス化学研究領域
 木材改質研究領域
 研究コーディネータ

林 徳子、下川 知子、野尻 昌信、渋谷 源
 眞柄 謙吾、久保 智史、戸川 英二、藤澤 秀次
 小林 正彦
 木口 実

要 旨

新用途が期待されるセルロースナノファイバー（CNF）を国産針葉樹チップから一貫製造する方法を開発し、製造実証プラントで検証しました。スギを水酸化ナトリウムとアントラキノン^{*}触媒で蒸解（ソーダアントラキノン法）してパルプ化し、漂白後、酵素と汎用の湿式粉碎機を併用してナノ化処理を行うことにより、環境負荷の少ない CNF 製造法を開発しました。この技術は、中山間地域において、国産のスギ・ヒノキ等を原料として地域に適応した CNF の製造を可能にし、小規模生産にも対応できるシステムです。同時に、CNF について特許調査、市場調査を行って利用上の問題点を明らかにし、製造コストを試算しました。また、安全性試験を実施して本方法で作製した CNF は安全性に問題がないことを確認しました。さらに、様々な企業や研究機関に CNF をサンプル提供して、新用途開発に向けた取り組みを開始しました。

木材の新規利用としてのセルロースナノファイバー（CNF）

我が国は、国土の 2/3 が森林に覆われた森林国です。現在、戦後植栽されたスギ等が伐期を迎え、資源として本格的に利用できるようになってきました。一方で、中山間地は、過疎化や高齢化が進み、現代社会が抱える問題がすでに先進化している地域でもあります（図 1）。

木材は、建材等として利用する以外に、主要な化学成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンを分離して利用することができます。中でもセルロースは、軽くて強い新素材である「セルロースナノファイバー（CNF）」の原料として一躍注目されており、平成 27 年 6 月に内閣府から発表された『日本再興戦略』改訂 2015』にも取り上げられるなど、今最も期待されている木材成分といえます。そこで、林業の成長産業化のキーテクノロジーと考えられるこの CNF を中山間地域で製造し、地域が抱える問題の解決に活かすことを考えました。

CNF を中山間地域で製造するためには、スギ等国産材を山元で直接パルプ化し、それを原料に高付加価値の CNF を製造し、利益を地域に還元させる新産業の創出が必要です。中山間という地域性から、CNF の製造には省エネルギーで環境負荷が少ない安全な方法を開発することが大切です。

セルロースナノファイバー製造ベンチプラントの開発

小規模なプラントでパルプ化から CNF まで一貫した製造システムが構築できることを実証するため、ソーダアントラキノン蒸解によるパルプ化とそれに続く漂白、酵素処理及びビーズミルによる湿式粉碎処理などの装置を備えた CNF 製造実証ベンチプラントを森林総合研究

所敷地内に建設しました（図 2）。このプラントによる CNF 製造工程は、パルプ化からナノ化までを一貫工程で行い、製紙工場等で行われているものよりも非常に簡素化されているのが特徴です。我々は本実証プラントにおいて、小規模でも生産性を上げることによって、CNF の生産コストを低減できることを明らかにしました。

平成 27 年 7 月から、CNF 懸濁液を企業や研究機関に無償配布を開始しました（現在は終了しています）。同時に、CNF についての特許調査、市場調査を行って利用上の問題点を明らかにしました。また、安全性試験を実施して、本方法で作製した CNF に問題がないことを明らかにしました。なお、本研究は、平成 28 年 1 月に開催された nanotech2016 において「次世代素材のセルロースナノファイバーの製造技術を開発し、日本に豊富にある木材の有効活用に貢献する点」が認められ、新人賞を受賞しました。

本研究は、林野庁受託事業「木材需要拡大緊急対策事業」のうち「セルロースナノファイバー製造技術実証事業」による成果です。

詳しくは以下の文献をご覧ください。
 平成 26 年度 森林・林業白書、林野庁、94-121, 128-134, 141-143

池田努 他（2008）木質系バイオマスを原料としたバイオエタノール生産のためのアルカリ前処理（第 1 報）、紙パルプ技術協会誌、6（9）：1102-1107
 林徳子（2015）国産スギを活用したセルロースナノファイバーの製造 — 酵素を利用したナノファイバー化、紙パルプテックタイムス、58（11）：9-15



図1 中山間地域の分布状況

出典：農林水産省（2010）平成21年度食料・農業・農村白書



図2 セルロースナノファイバー製造技術実証事業で建設した実証プラント

左からセルロースナノファイバー製造実証事業の施設の外観、蒸解装置、ビーズミル（ナノ化装置）。

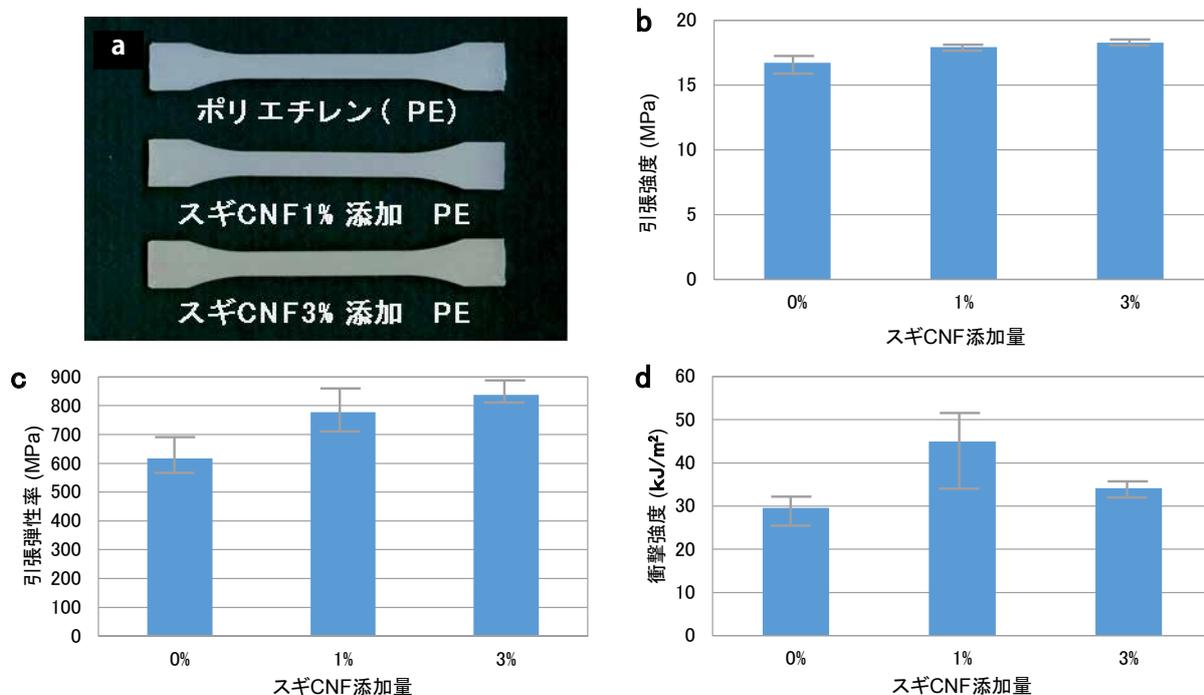


図3 ポリエチレン樹脂にスギCNFを無添加、1%添加、3%添加した時の (a) 射出成型物、
(b) 引張強度、(c) 引張弾性率、(d) 衝撃強度

引張弾性率、衝撃強度はCNF添加によって増加傾向を示しました。

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

ヤナギの葉に含まれる物質により 木材・プラスチック複合材の耐久性を向上

バイオマス化学研究領域
木材改質研究領域

久保 智史、橋田 光
小林 正彦

要 旨

オノエヤナギは、ヤナギ科植物の中でも分布域が広く成長が早いことから、その幹・枝を燃料として利用できる木質系エネルギー作物として注目されています。本研究では、植林地に残され、資源としては未利用のオノエヤナギの葉の化学成分に着目した利用研究を行いました。オノエヤナギの葉をポリプロピレンなどの汎用プラスチックと混合することで、プラスチックの酸化分解を強く抑制することができました。また、オノエヤナギの葉を使用することで、従来の原料に比べて、より軽量の木材-プラスチック複合材料を製造することができました。これらの成果から、オノエヤナギの葉を原料として用いることによって、軽量で耐久性に優れた混練型 WPC^{*}の製造が可能となると考えています。

ヤナギの「葉」が持つ化学的特徴

ヤナギは成長の早いエネルギー作物として世界中、特に北欧、北米で多く植林されており、日本でも北海道を中心に実証的な植林事業が展開されています。ヤナギをエネルギー作物として利用する場合、幹・枝を燃料として利用し、燃料利用されないヤナギの葉は収穫されずに林地に残されます。

一般的なヤナギの葉には、フラボノイドあるいは芳香族化合物が糖成分と化学結合した化合物が多く含まれています。我が国で植林が試みられているオノエヤナギの葉にも、抗酸化力に優れたアンペロブシンというフラボノイド（図 1）が重量換算で 10% 以上も含まれるタイプがあります。このことから、高含量のアンペロブシンを含むオノエヤナギの葉そのものにも高い抗酸化力があることが期待できます。

プラスチックの抗酸化剤としての特性

我々の身近にあるプラスチック製品の多くは、屋外で使用されると太陽光や温度によって引き起こされる酸化反応のために劣化が促進し、強度低下が起こります。特に、我が国で最も多く利用されているプラスチックの一つであるポリプロピレン（PP）は、酸化によって劣化しやすいプラスチックとして知られています。そこで、PP や更に酸化されやすいプラスチックであるポリエチレンオキシド（PEO）に対するオノエヤナギの葉の抗酸化特性を調べました。図 2 にオノエヤナギの葉とプラスチックとの混合物の酸化分解性を調べた結果を示します。オノエヤナギの葉を混合しない条件では、両プラスチックともに酸化分解による重さの減少が 30 分以内で起こっています。しかし、10% のオノエヤナギの葉を混合することで、PP および PEO の酸化による分解が始まる時間を、それぞれ 1.5 時間および 43 時間まで延長することができました。このことから、オノエヤナギの

葉がプラスチックに対して高い抗酸化能力を付与することが分かりました。

オノエヤナギの「葉」を原料とした WPC

木材-プラスチック複合材料（Wood Plastic Composites: 混練型 WPC）は、木粉と PP などの熱可塑性^{*}プラスチックを加熱混練し、成形して製造される新しい木質系材料です。WPC にはプラスチック材料と同様に抗酸化剤が混合されていますが、高価であるため、現在、より安価な添加剤の開発が課題の一つになっています。そこで、抗酸化力を持つオノエヤナギ葉の PP に対する混合割合を 50% に増加させた WPC を試作しました。プレス成形で試作したオノエヤナギの葉を原料とした WPC は、スギ木粉を原料とした一般的な WPC に比べて褐色を帯びていますが、成形性に大きな違いはありませんでした（図 3）。スギ木粉と PP を等量混合した WPC の比重は 1.06 g/cm³ でしたが、オノエヤナギ葉と PP を同じ割合で混合した WPC の比重は 0.77 g/cm³ でした。電子顕微鏡観察の結果、この WPC の低比重化は、内部の空隙構造によるものであることが分かりました。これは、発泡剤等を用いることなく WPC 内部に空隙構造ができることを示しており、WPC の軽量化に寄与できると考えています。その一方、オノエヤナギの葉の PP に対する混合性は、スギ木粉に比べて劣ることが明らかになりました。オノエヤナギの葉の WPC 用抗酸化剤としての性能は、加熱混練条件の最適化等によって WPC 中でより均一に分散させることでさらに高められると考えています。

本研究は、公益財団法人 LIXIL 住生活財団調査研究助成、「未利用バイオマスである“葉”を利用したウッドプラスチックの長期耐久性能向上技術の開発」による成果です。

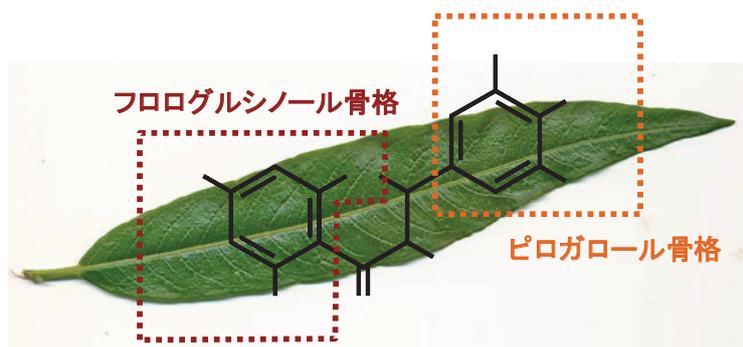


図1 オノエヤナギ葉の写真と葉に含まれるアンペロプシンの化学構造
アンペロプシンは、分子中にフロログルシノール、ピロガロールという2種類のポリフェノール構造を持つ、抗酸化力の高い化合物です。

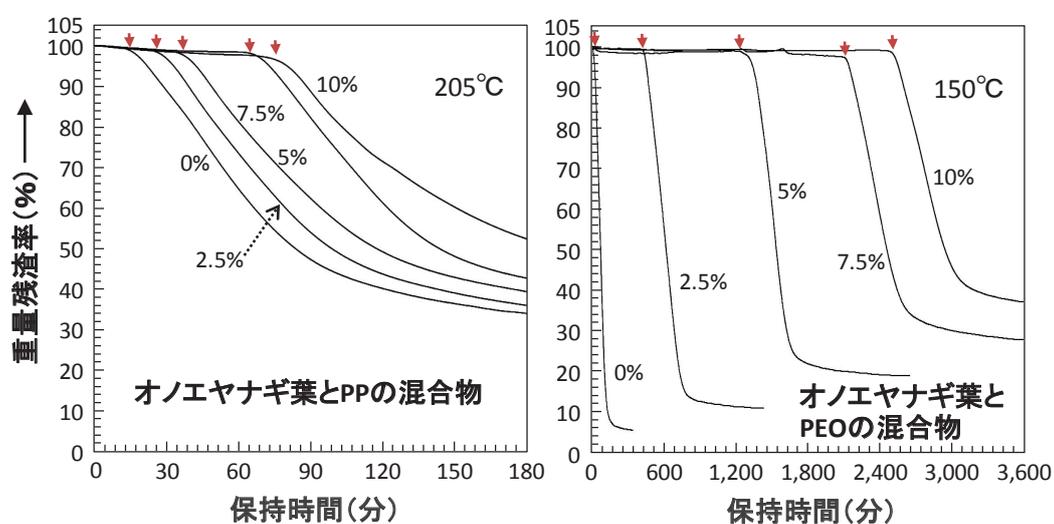


図2 オノエヤナギ葉を混合したPP (左) と PEO (右) の等温加熱条件での酸化分解試験結果
本測定では、酸化による分解を試料の重量減少として検出しています。赤矢印で示した酸化分解による重量減少開始時間はオノエヤナギ葉を混合することで長くなりました。また図中の温度は等温分解試験を行った温度を示しています。

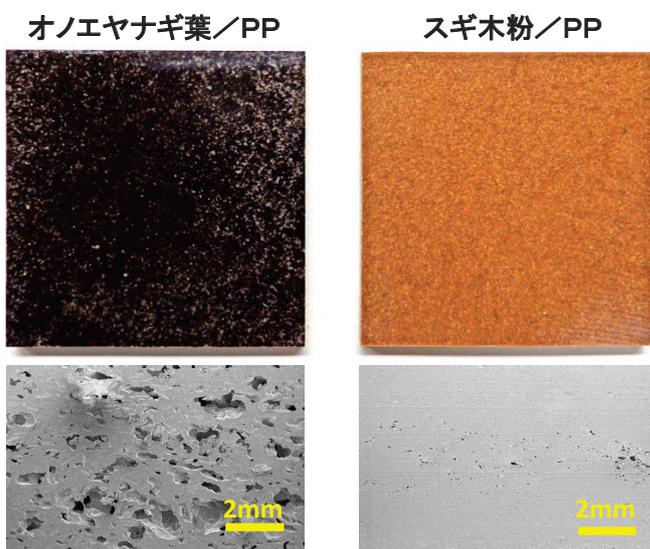


図3 オノエヤナギ葉 (左)、スギ木粉 (右) を 50%加えて試作した混練型WPCの表面写真 (上行) と電子顕微鏡で観察した同WPCの断面の写真 (下段)

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

植物が光合成に利用可能な光の量の新たな推定法

北海道支所
気象環境研究領域
北海道大学
関西支所

溝口 康子、山野井 克己
安田 幸生、大谷 義一
渡辺 力
小南 裕志

要 旨

植物は光合成によって二酸化炭素を吸収します。その駆動力となっているのが波長^{*}400～700nmの光で、これを光合成有効放射と呼びます。この光の量を測定する光量子センサと呼ばれるセンサを用いて長期間正確に光の量を測定することは難しく、推定値で代用する場合、様々な環境条件下で適用できる簡便な推定法はありませんでした。そこで、光合成有効放射量を正確に把握し、森林の二酸化炭素吸収量の正確な推定につなげるため、一般気象データを用いた推定法を開発しました。新たな推定法は、従来の方法に比べ、日本のような湿潤地域で精度良く推定できることがわかりました。

光合成有効放射量把握の重要性

植物は太陽の光を受けて光合成を行っています。光合成は植物の成長に欠かせないばかりでなく、大気中の二酸化炭素を吸収することから、地球温暖化抑制の視点からも注目され、光合成量の実測や予測の研究が世界的に行われています。このため、光合成の駆動力となる光の量を正確に把握することが求められています。

植物が光合成に利用する光は光合成有効放射と呼ばれています。光合成有効放射は日射（太陽の光）の一部で、日射の波長帯 150～3000nmのうち、400～700nmの波長の光のことを指します。

太陽からの光は、大気を通過する際に、大気中の水蒸気やエアロゾルなどにぶつかり、吸収・散乱されます。光の波長やぶつかる物質によって、吸収・散乱の程度が異なるため、日射量に対する光合成有効放射量の割合は一定ではなく、大気の状態によって変化します（図1、図2）。

従来の測定方法及び推定方法

光合成有効放射量の測定には、一般的に光量子センサが使われます。様々なセンサが市販・利用されていますが、世界的な基準となるセンサがないため、各センサの精度に対する信頼性が担保されていません。また、経年劣化が大きいセンサもあり、長期間の観測では精度維持が難しい場合があります。

一方、日射計は世界基準が確立されているため、精度の信頼性が高く、多くの場所で日射量の測定が行われて

います。光合成有効放射が日射の一部であることから、日射量から光合成有効放射量を推定することができれば、有効な方法の一つと考えられます。すでに、一般的な気象データから推定する簡易な方法が提案されていますが、日本のような湿潤な地域では、推定精度が低いという欠点がありました。

湿潤地域に対応した推定方法の開発

欧米の観測データを元に作られた簡易な推定法を用いて、国内5カ所で光合成有効放射量の推定を行ったところ、全てのサイトで誤差が5%以下になる推定法はありませんでした。そこで、一般的に測定されている日射量、気圧、気温および湿度から、日本のような湿潤地域にも適用可能な推定法を開発しました。新たな推定法の誤差はどの地点も5%以下で、季節や天気によらず、日変化の推定誤差は小さくなりました（図3）。

今回提案した推定法を用いて光合成有効放射量を求めることによって、センサの精度や劣化によるデータの不確実性が除去できるほか、一般気象データが測定されていれば、光合成有効放射量の推定が可能になります。信頼性の高い光合成有効放射量のデータが広域で得られることは、森林の二酸化炭素吸収量の正確な把握につながると期待されます。

詳しくは Mizoguchi *et al.* (2014) *Theoretical and Applied Climatology* 115, 583-589 をご覧下さい。

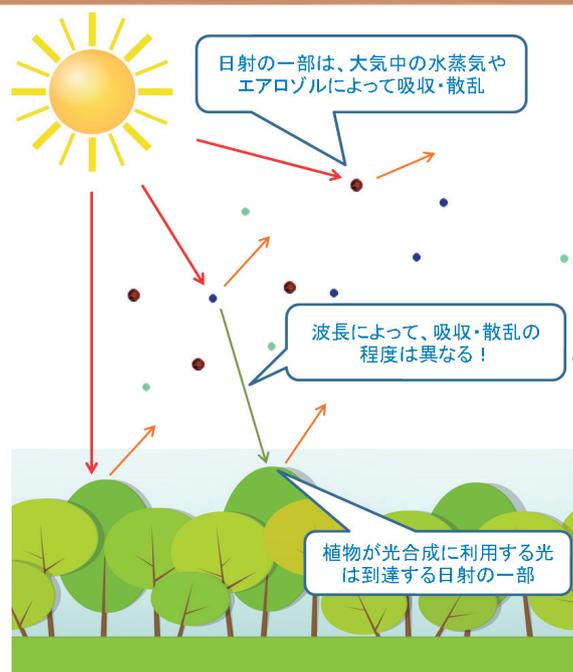


図1 日射（太陽の光）が植物に到達するまでのイメージ

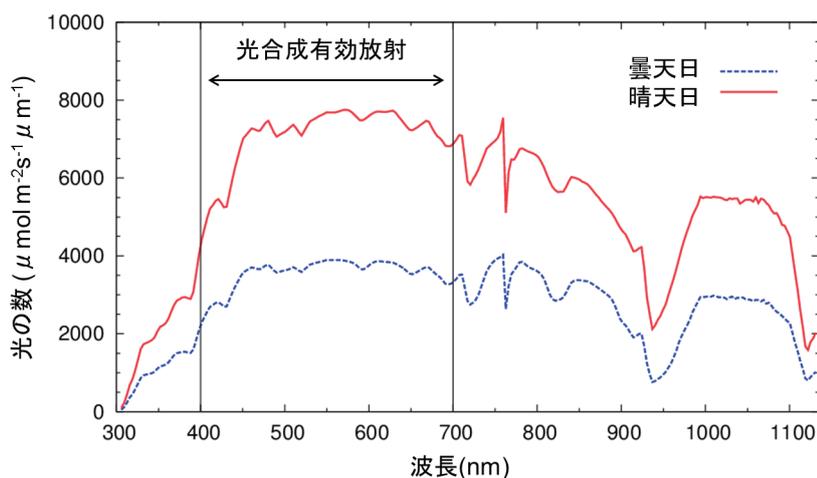


図2 日射の波長別光子数（光の数）の夏の曇天日及び晴天日の例

日射の波長は150～3000nmの範囲にあり、そのうち植物が光合成に利用する光合成有効放射の波長は400～700nmです。日射量に対する光合成有効放射量（波長毎の光の数を積算した値）の割合は、大気条件等によって変化します。

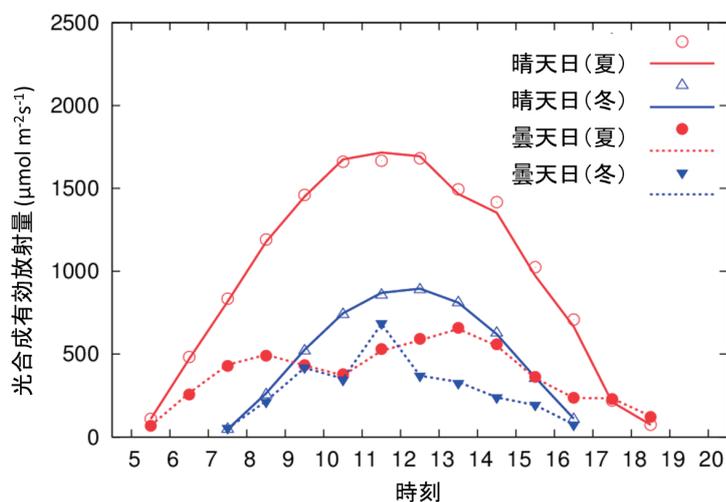


図3 光合成有効放射量の観測値と推定値の比較

夏・冬それぞれ晴天日及び曇天日の光合成有効放射量観測値（○、△、●、▼）及び、本研究で提案した方法による推定値（赤及び青色の実線及び破線）の日変化の一例（京都府山城）。観測値と推定値は大気の状態によらず、おおむね一致しています。

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

枯死木の分解を高精度に予測する新たなモデル

九州支所
立地環境研究領域

酒井 佳美
石塚 成宏

要 旨

日本の森林では、枯死木に蓄積されている炭素量は 1 平方メートル当たり平均 0.42 kg であり、重要な炭素貯留プールとなっています。枯死木の炭素蓄積量の変化を予測するには、分解による重量減少を推定することが必要です。私たちは、スギとヒノキの枯死木を日本各地から収集し、その重量が時間経過とともにどの程度減少するのかを調べました。重量減少は、各地点の環境や枯死木の初期条件によって大きくばらつきましたが、環境要因を反映させて枯死木の重量減少を示すモデルを作成したところ、従来のモデルより精度良く枯死木の分解速度を予測できるようになりました。

枯死木は炭素の貯蔵庫

日本では、枯死木（立枯木、倒木、根株）による炭素蓄積量は 1 平方メートル当たり平均 0.42 kg あります (Ugawa *et al.*, 2012)。これは、落葉や落枝からなるリターとほぼ同等で、土壌の約 15 分の 1 に相当します。枯死木は落葉や落枝に比べて大きく、分解して無くなってしまふまでの時間は数十年以上を要することもあります。そのため枯死木は長期間炭素を保持する「炭素の貯蔵庫」と捉えられています (図 1)。

枯死木の分解速度を予測する

枯死木の分解速度がわかると、その炭素動態（分解による炭素放出量と炭素蓄積量の変化）を予測することができます。しかし、枯死木の分解を継続的に測定するには数十年もかかってしまいます。そこで、私たちは間伐や除伐の際に林床に放置された材を「枯死木」とみなして日本各地からサンプルを集め、伐倒後放置された年数をもとに、その分解速度の推定を試みました。分解程度をあらわす数値には材密度 (g/cm^3) を使用しました。集めたサンプルの材密度は、伐倒後の経過年数とともに低下する傾向を示しましたが、ばらつきも大きいことがわかりました (図 2)。

その理由として、枯死木分解に関わる木材腐朽菌類や食材性昆虫の成育等に影響する環境条件と、材の直径や樹齢、耐朽性といった初期条件の両方が調査地点によってばらついたためと考えられました。

環境要因を加味した枯死木の重量減少推定モデル

そこで、伐倒後の経過年数に加えて、気象要因や直径など、枯死木の分解に影響がある要因を使って重量減少を推定することが可能な、一般化線形混合モデル[※] (Generalized linear mixed model, GLMM) を用いてモデルを作成しました。このモデルによって、スギとヒノキの枯死木が林床に放置されてから 20 年間の重量減少を推定することが可能になりました (図 3)。このモデルは、場所が変わっても環境要因を反映することができるため、広域での利用が可能です。本モデルでは、一般的な一次指数関数によるモデルに比べて、推定精度が向上しました。これにより、日本のスギとヒノキ人工林での枯死木の炭素動態をより正確に予測することを可能にしました。

詳細は、Sakai, Y., Ishizuka, S. & Takenaka, C. (2013) Predicting deadwood densities of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* forests using a generalized linear mixed model with a national-scale dataset. *Forest Ecology and Management* 295, 228-238. をご覧ください。

文献

Ugawa *et al.* (2012) Carbon stocks of dead wood, litter, and soil in the forest sector of Japan: general description of the National Forest Soil Carbon Inventory, *Bulletin of FFRRI*, 207-221.



図1 林床に放置された材とその分解の様子

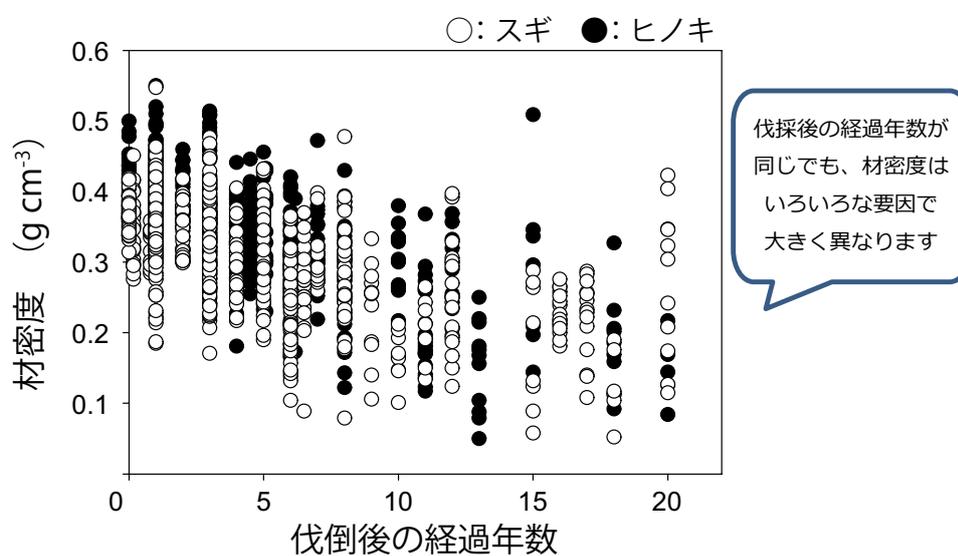


図2 日本各地で採取した枯死木の経過年数と材密度との関係

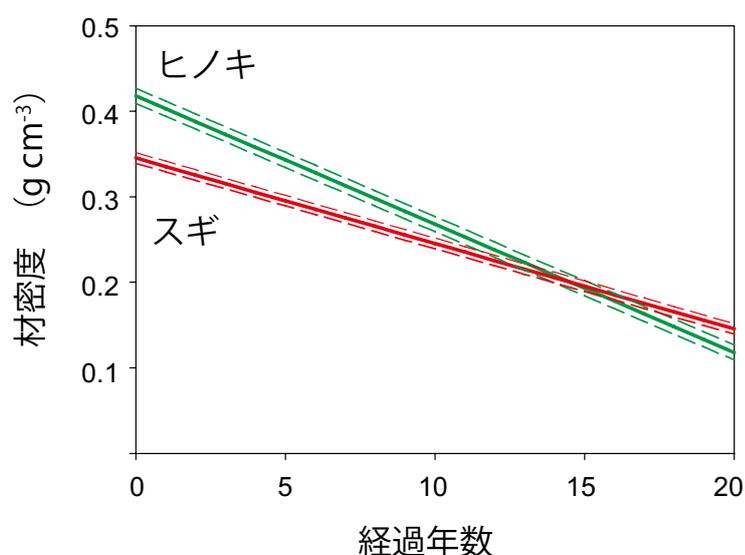


図3 GLMM による日本における平均的な気候条件でのスギとヒノキの材密度変化

気象条件：全国 128 調査林分の月平均気温、月平均降水量、平均最大積雪深
材の直径：13cm、伐倒時の林齢：30年としました
点線は調査地が変わることによる変動の 95%信頼区間を示しています

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

広く、みんなで、着実に。荒廃した熱帯林の修復

森林植生研究領域

藤間 剛

要 旨

気候変動の緩和、生物多様性の保全、地域の人々の生計向上など、森林が果たす役割に対する期待の高まりを受け、大面積の荒廃した土地に森林を復元することがさまざまな国際目標として設定されています。過去に実施された事例から、森林の復元を成功させるには、目的の異なる植栽地や他の土地利用（農地、宅地など）も含めた地域レベルで、途中経過をこまめに確認しながら取り組むことが重要であることが分かりました。荒廃地の森林を地域レベルで復元するには、森林だけでなく農業や経済開発のように広い範囲の政策改革により森林破壊要因を最初に減らすこと、そして拙速な植栽活動は厳に慎むことの2点が重要です。

劣化した森林の復元に関する国際目標

2014年9月にニューヨークで開催された国連気候サミットにおいて、「森林に関するニューヨーク宣言」が採択されました。この宣言は冒頭で、森林は人類の将来に必要な不可欠な存在であり、森林を保全し、持続的に管理し、復元することで、経済成長、貧困削減、法の支配、食料安全保障、気候変動に対する強靱性、生物多様性保全に貢献できると述べています。そして、「2020年までに1億5千万ヘクタールの劣化した土地および森林を復元する。その後、2030年までに最低でも2億ヘクタールの森林を追加的に復元する。」という目標を設定しています。このような大面積森林復元目標が、さまざまな国際的な取り組みで設定されています。

森林が破壊されたあとに樹木を植栽し、森林を復元しようとする取り組みは昔から行われてきました。しかしながら、ほとんどの取り組みは失敗に終わってきました。大面積の森林復元事業を成功させるため、これまでの森林復元事業に関する情報を整理して、問題点と目指すべき戦略を明らかにしました。

森林景観復元と順応的管理

森林の復元において、樹木が大気中の二酸化炭素を固定することによる気候変動緩和機能を重視するなら、成長が早く最終的に大きな木になる樹種を植栽し、長期間維持するのが効率的です。生物多様性保全のためには、対象地域原産のさまざまな樹種を種内の遺伝的多様性にも配慮して植栽し、長い期間、維持することが大切になります。その一方、地域の人々の生計向上を重視するなら、長くとも植栽から数年で収穫ができるよう配慮しな

ければなりません。また農地や宅地のように森林以外の土地も合わせて検討する必要があります。

このようにさまざまな目的を同時に満たすためには、それぞれの目的に応じた活動を実施する場所を含む、広い地域の土地を管理する計画が必要です。たとえば生物多様性の回復や保全のためには、残存する自然林の劣化を防ぐほうが、劣化したところを修復するよりも効率的なことがあります。この場合は、樹木の植栽ではなく、そのための資金や労力を残存する自然林の保全に向けるべきでしょう。また複数の利害関係者がいる中で開発と保全を両立させるには、あらかじめ設定した目標にこだわるのではなく、現場の状況や社会条件の変化を細やかに確認し目標と活動の修正を繰り返す管理が必要です（これを順応的管理といいます）。

木を植えるより大切なこと

熱帯地域にある発展途上国の多くでは、森林減少や森林劣化を引き起こす要因への政策的な対応が十分にはできていません。こうした国々では、国際目標の本来の目的である気候変動緩和、生物多様性保全よりも、地域の人々の暮らしをよくするための政策改革を急がねばなりません。大規模な植栽活動を行うのは、それを達成してからにすべきです。拙速な植林事業は森林を劣化させたり、地域の人々の生活を破壊したりする恐れがあります。

詳しくは藤間剛（2015）荒廃熱帯林の修復には、景観レベルの順応的管理とガバナンスの改善が必要 森林総合研究所研究報告、14（4）：193-200をご覧ください。

表1 熱帯林修復事業の問題点

| | |
|-------|--|
| 土地利用 | 森林が切り開かれたところが農地として利用されていて、樹木を植える土地がない。 |
| 資金 | 木を植えるために必要な資金が提供されない。 |
| 長期計画 | 木を植えたところを長期にわたって管理するための計画および資金がない。 |
| 植栽技術 | 現地の環境に適した樹種がわからない。その樹種の苗木がない。 |
| 技術支援 | 木を植え育てるための技術指導や支援がない。 |
| 再 荒 廃 | 植えた木が伐られて農地にされる。植えた木が火災で焼失する。 |

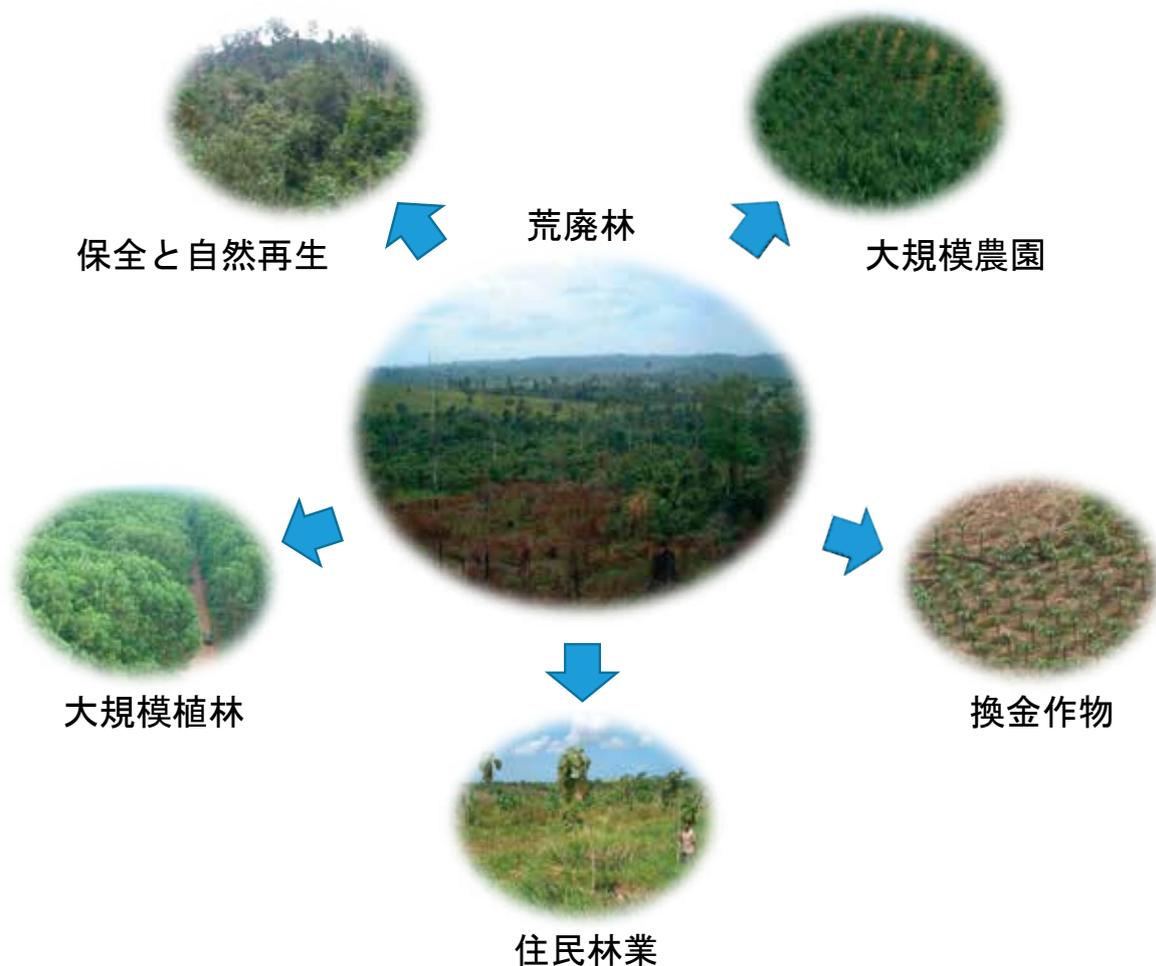


図1 荒廃した熱帯林を復元するためのさまざまな土地利用オプション
熱帯林を修復するには、木を植えるだけでなく、他の土地利用を含めた地域レベルの計画が大切

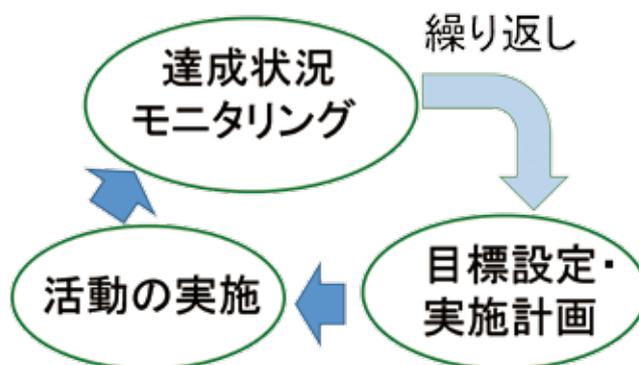


図2 順応的管理
長期間にわたり、現場の状況や社会条件の変化を確認しながら、目標と活動の修正を繰り返す。

熱帯雨林の光合成能力は樹木の高さで決まる

植物生態研究領域
高知大学

田中 憲蔵
市栄 智明

要 旨

熱帯雨林の炭素固定能を正確に把握することは、地球規模での炭素収支を推定するために不可欠です。しかし、多様な樹木からなる熱帯雨林の炭素固定能を正確に推定することは困難です。そこで、マレーシアの熱帯雨林に設置された高さ約 90m の林冠観察用クレーンを用いて、低木から樹高 50m を超える巨木まで 100 以上の樹種について、個葉の光合成速度を測定しました。その結果、熱帯雨林では熱帯季節林と異なり、樹高が高いほど個葉の光合成能力が増加することを発見しました。これは、降水量の多い熱帯雨林の林冠の葉は、昼間に蒸散で失った水分を夜間に十分吸水して翌日の乾燥ストレスに対応できるためでした。この知見は熱帯雨林の炭素収支を高い精度で推定することに貢献します。

熱帯雨林の炭素固定能と葉へのアクセス

熱帯雨林は大量の炭素を蓄積し、気候変動の緩和に貢献しています。将来、気温や降水量が変化した際に熱帯雨林がどう応答するのか予測するためには、樹木の葉の光合成能力を正確に評価する必要があります。しかし、熱帯雨林は、薄暗い林床から強い日光を受ける林冠まで複雑な構造と環境を持ち、さらに樹木の種数も膨大なため（図 1）、多数の樹種の葉に直接アクセスして光合成能力を調べることはこれまで非常に困難でした。本研究では、科学技術振興機構によりボルネオ島に設置された高さ約 90m の林冠観察用クレーンを利用して、樹高 50m の木の梢端も含めて詳細な調査を行うことにしました（図 2）。

温帯林や熱帯季節林との違い

温帯や熱帯季節林での研究から、背の高い樹木は梢の先の葉まで水を吸い上げることが難しいため、樹高がある程度以上高くなると光合成が低下することがわかっていました。しかし、熱帯雨林の 100 以上の樹種について、樹高 1m の小さい木から 50m を超える巨木までを含めて光合成を測定したところ、樹高が高くなると光合成速度は増加し、高木ほど炭素をたくさん固定できることがわかりました（図 3）。

高木でも光合成が低下しない原因として、年中湿った熱帯雨林の気候が関係しているようです。葉は日中、二酸化炭素を吸収するために気孔を開きますが、同時に大量の水が失われて乾燥ストレスを受けます。熱帯雨林の樹木も日中は強い乾燥ストレスを受けていますが、夜明

け前には根からの吸水によってストレスから回復していました（図 4）。つまり、熱帯雨林では、大量の水を消費しても夜間に水分を十分補給できるため、高木の林冠でも光合成の低下が起こりにくいことがわかりました。

気候変動の影響

将来、熱帯雨林地域では、干ばつの頻発や気温の上昇が危惧されています。夜間に水を補給できる熱帯雨林の樹木でも、強い乾燥に上手く適応しきれない可能性があります。例えば、1997 年にボルネオ島を襲った 100 年に一度の大干ばつでは、多数の高木が枯死しました。将来、もしこのような干ばつが頻発すると、多くの樹木が枯死し、大規模な森林の劣化が引き起こされる危険があります。一方、測定した樹木の中には節水型の樹種もみられたことから、今後は更に樹種ごとの特徴を解析することで、気候変動のより詳細な影響評価が可能になると思われる。

本研究は、環境省総合地球環境研究推進費「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究 (S-9)」と JSPS 科 研 費 (JP24405032, JP24688017) による成果を含んでいます。

詳しくは Kenzo T. *et al.* (2015) Height-related changes in leaf photosynthetic traits in diverse Bornean tropical rain forest trees. *Oecologia*, 177:191-202 をご覧下さい。



図1 ボルネオ島の熱帯雨林

種の多様性が高く、わずか50ヘクタールに1000樹種以上が出現します。これは日本列島に生育する全樹種数に匹敵します。



図2 林冠観察用クレーンのゴンドラに乗り調査を行っている様子

地上から約40mの高さです。

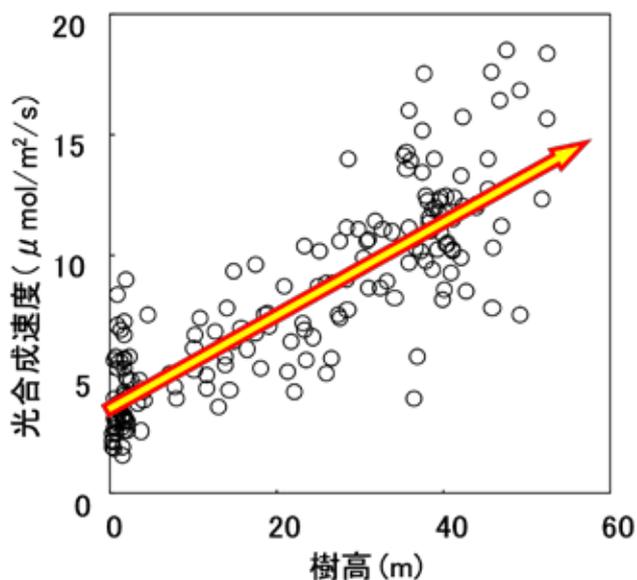


図3 樹高と個葉の光合成能力の関係

樹種に関係なく、矢印のように樹高が高くなると1枚の葉の光合成速度がほぼ直線的に上昇します。

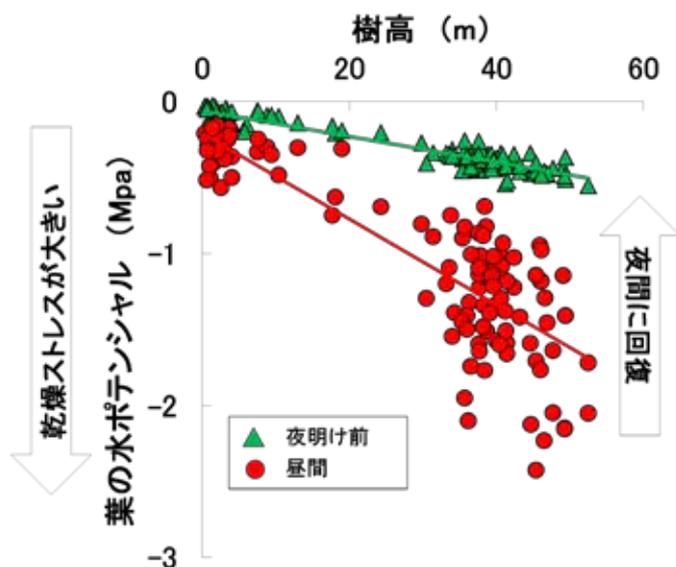


図4 乾燥ストレスからの素早い回復

昼間は蒸散による水消費のため、葉は強い乾燥ストレスを受けています（下向き矢印）。しかし、土壌が常に湿潤なため、根からの吸水により夜明け前には満水状態にまで回復しています（上向き矢印）。

森林の蒸発散量を簡易な手法で広域推定する

水土保持研究領域
研究コーディネータ
筑波大学
東京大学

澤野 真治
坪山 良夫
堀田 紀文
鈴木 雅一、田中 延亮

要 旨

日本の水源地帯は主に森林で覆われているため、利用可能な水資源量の分布を把握するには、降水量に加え森林の蒸発散量を広域で評価する方法が必要です。これまで、森林の蒸発散量は、各地の森林における流域試験^{*}や微気象観測の結果を用いて推定されてきましたが、多様な気候条件のもとで森林の蒸発散量を統一かつ簡易に推定する手法は確立されていませんでした。そこで、本研究では、一般に利用可能な気象データを用いて、比較的簡易な計算により森林の蒸発散量を推定する新しい手法を開発し、全国 25 地点の流域試験での結果を高い精度で再現できることを確認しました。

水資源量の分布を調べる

亜寒帯から亜熱帯まで多様な気候区分に広がる日本では、年降水量や月別の降水量の割合が地域によって大きく異なります。また、最近は同じ地域でも年によって雨や雪の降り方が大きく変わり、この傾向は温暖化が進むとさらに強くなると予想されています。このような状況に適応し、持続的な水利用を実現するには、まず利用できる水が、どこにどれくらいあるかという情報が欠かせません。ある地域で利用可能な水量の上限は、降水量から蒸発散量を引いた値であり、それを水資源賦存量と呼びます（図 1）。日本の水源地帯は主に森林で覆われているため、水資源賦存量の分布を把握するためには、森林の蒸発散量を広域で評価する方法の確立が必要です。

森林からの蒸発散を調べる水文観測と広域推定

森林の蒸発散量の推定には、森林流域の水収支（蒸発散量＝降水量－流出量）に基づく方法、林冠上の微気象観測による推定、蒸散や地面蒸発など林内の水の動きを個別に測定して積み上げる方法などが用いられてきました。しかし、これらの方法は、調査が行われた場所しか得られていないデータを利用する場合もあり、それ以外の場所や広い範囲に適用するのは容易ではありませんでした。そこで、本研究では、一般に利用可能な気象データと既往の森林蒸発散量推定手法をもとに、多様な気

候帯に分布する森林の蒸発散量を、統一かつ簡易に推定する手法を開発しました。

森林からの蒸発散量を簡易に推定する

新しい手法は、気温、日射量、降水の 3 つの気象要素を用いて森林の蒸発散量を計算します。この手法を全国 25 地点の流域試験地を対象に適用したところ、水収支の観測により推定した森林の蒸発散量分布の季節変化や年総量を良好に再現できました（図 2）。また、この手法に、測候所の観測値を基に作られた 1km グリッドの気象データを適用することで、我が国における森林の蒸発散量分布を簡易に推定することを可能にしました（図 3）。今後、推定手法の検証と改良をさらに進め、わが国の森林における水資源賦存量の分布や気候変動の影響評価に活用していきます。

本研究は、農林水産技術会議プロジェクト「農林水産分野における地球温暖化対策のための緩和及び適応技術の開発」による成果の一部です。

詳しくは Sawano, S. et al. (2015) Ecological modelling, 309-310:93-109, DOI : 10.1016/j.ecolmodel.2015.04.011 をご覧ください。

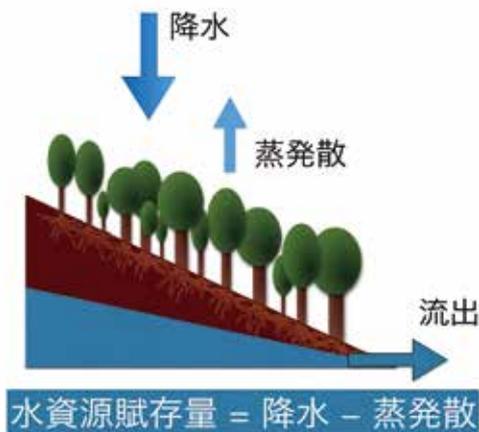


図1 森林における水循環の概要

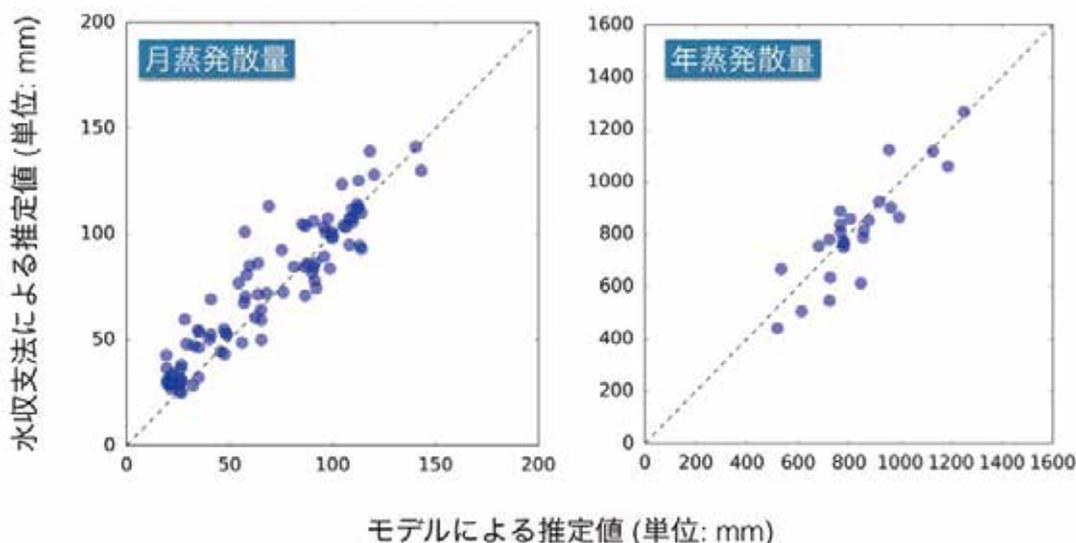


図2 新たに開発した手法の推定精度検証結果

日本全国 25 地点の森林水文試験地を対象にした検証では、蒸発散量の季節変化や年量を良好に再現できました。

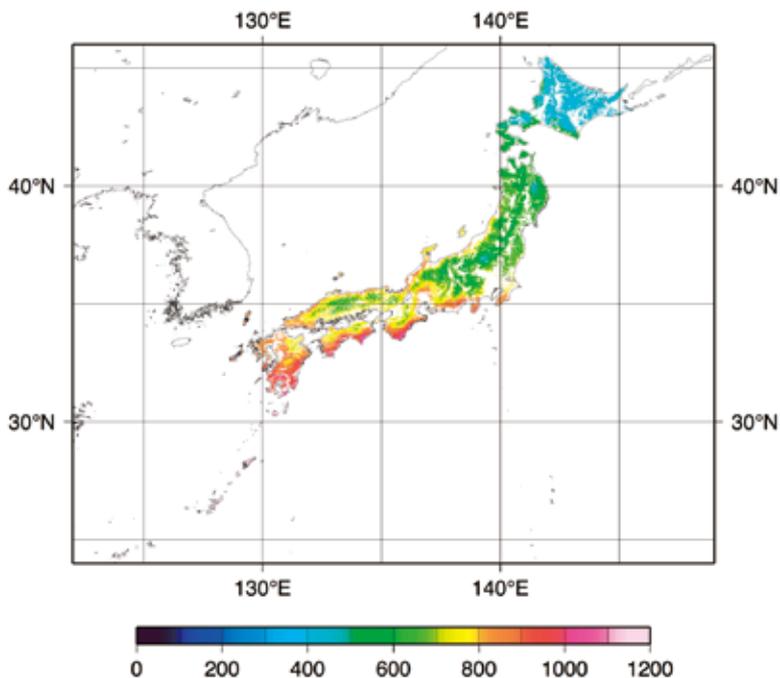


図3 森林蒸発散量の地理的な分布

年蒸発散量の分布は、1981年から2010年までの1kmグリッドの気象データを用いて年単位に積算した結果を30年分の平均値として示しています。

年蒸発散量 (単位: mm)

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

渓流水のケイ酸濃度が季節によって変わる仕組み

立地環境研究領域
九州支所

釣田 竜也、大貫 靖浩
壁谷 直記

要 旨

ケイ酸 (SiO_2) は河川や沿岸生態系のケイ藻類にとって重要な栄養塩の一つです。その濃度が山地渓流水で季節変化する仕組みを九州の森林小流域を対象に調べました。この流域は毎年夏に雨が集中する特徴があり、この時期に渓流水のケイ酸濃度が低下していました。また、この低下は地下水のケイ酸濃度の低下と同時に起きていることが分かりました。さらに、この流域は土壌が薄いため、土壌中に大きな地下水帯ができていくことが分かりました。このような流域では、夏の大雨の時にケイ酸濃度が低い土壌水の流入によって地下水のケイ酸濃度が低下するため、渓流水のケイ酸濃度の低下が続いたと考えられます。

渓流水中のケイ酸 (SiO_2) の役割

ケイ酸は土壌や岩石が風化する過程で水に溶け出し、山地渓流水に比較的高い濃度で含まれる物質です。河川水のケイ酸濃度の低下は、沿岸域のケイ藻類などの植物プランクトンの種組成を変化させ、食物連鎖によって貝や魚の生産量にも影響する要因であることが指摘されています。川の始まりである山地渓流水でケイ酸濃度の変化がどのように起こるのか、その仕組みを理解する事は森と海のつながりを考える上で重要です。

渓流水のケイ酸濃度の季節変化

今回研究対象とした九州の森林小流域では、毎年夏に雨が集中する特徴があり、この時期に渓流水のケイ酸濃度が低下していました (図 1)。また、この変化は渓流の湧水点のすぐ上で観測した地下水の濃度変化と一致しており、渓流水と地下水のケイ酸濃度の低下が同時に起きていることが分かりました。渓流水の流出量とケイ酸濃度の関係を調べると、流出量が増大する夏にケイ酸濃度が低下する傾向が認められました (図 2)。

雨水から渓流水へのケイ酸濃度の変化

この流域内で雨水や土壌水のケイ酸濃度を観測し、雨水から土壌水、地下水を経由して渓流水に至るまでのケイ酸濃度の変化を調べました。その結果、雨水や落葉層を通った直後の水にはケイ酸がほとんど含まれないことや、土壌の浅い部分にある水のケイ酸濃度は地下水や渓流水に比べて低い濃度であることが分かりました (図 3)。

夏期に渓流水のケイ酸濃度が低下する仕組み

この流域の土壌の厚さは地下水が貯まりやすい部分で薄いため、土壌中に大きな地下水帯ができていくことが分かりました。このような特徴の流域では、夏の大雨でケイ酸濃度の低い土壌水が地下水に流入したとき、地下水のケイ酸濃度が低下しやすいと考えられます。この低下は夏の間は無降雨の時も含めて続くため、それが影響して、渓流水のケイ酸濃度も夏の間低下した状態が維持されたと考えられます。土壌が厚く大きな地下水帯のある流域では、このような渓流水の濃度変化はあらわれにくいと予想されます。

河川へのケイ酸の供給に土壌が果たす役割

ケイ酸が土壌水に溶け出すには時間がかかるので、河川へのケイ酸の供給の維持には、一時的に雨水を地中に蓄えてゆっくりと流下させる厚い土壌が必要です。豪雨・急傾斜地域にある日本の森林は土壌浸食のリスクが潜在的に高いため、土壌保全に配慮した森林の管理は河川や沿岸域へのケイ酸の安定供給の面からも重要です。

本研究は、JSPS 科研費 (JP24780162) 「森林土壌中の粗大孔隙を流れる選択流の溶質移動特性と発現機構の解明」による成果の一部です。

詳しくは釣田竜也 他 (2015) 九州北部の森林小流域における土壌から溪流への水質変化、地形、36: 173-193 をご覧下さい。

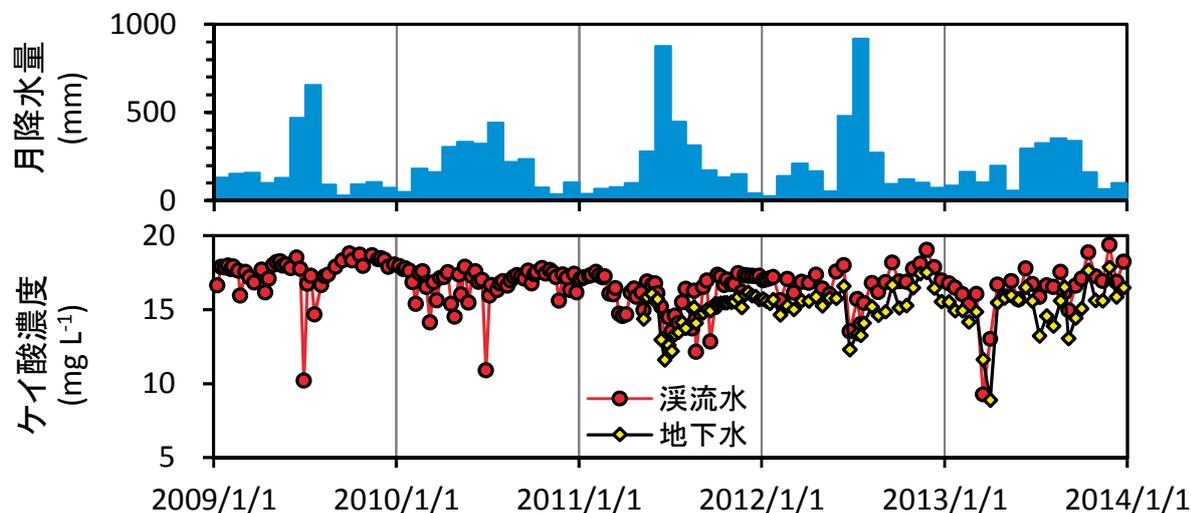


図1 九州の森林小流域における降水量分布（上）と地下水及び溪流水のケイ酸濃度の季節変動（下）
 溪流水のケイ酸濃度は、夏の大雨の時期に低下していました。この季節変化は、地下水の変化と一致していました。

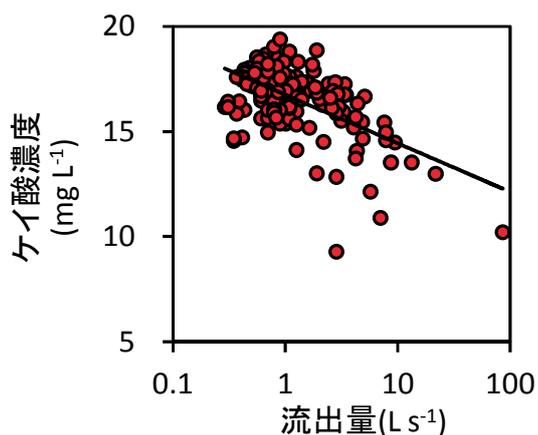


図2 溪流水の流出量とケイ酸濃度の関係
 溪流水の流出量が増大する夏にケイ酸濃度が低下する傾向が認められました。

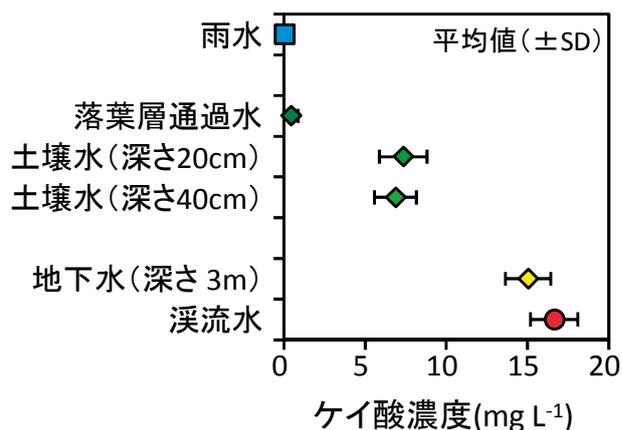


図3 雨水から溪流へのケイ酸濃度の変化
 ケイ酸濃度は雨水から溪流水に向かって徐々に上昇していました。

海岸林再生に向けたクロマツの通年植栽

東北支所

八木橋 勉、中村 克典、齋藤 智之、松本 和馬（現国際環境研究協会）
八木 貴信、柴田 銃江（現企画部）、野口 麻穂子、駒木 貴彰

要 旨

東北地方の津波被害後の海岸林の再生事業では、植栽が大面積にわたるため、作業時期を分散させることができる通年植栽が求められています。そこで、宮城県仙台市において、クロマツの通年植栽の可能性を検討するため、厳冬期の1月を除き、2ヶ月おきに通年でクロマツコンテナ苗を植栽する試験を行いました。その結果、いずれの植栽時期でも越冬後の生存率が98%以上と高く、成長にも大きな問題はみられませんでした。今後、より多くの地域で検証する必要がありますが、コンテナ苗を用いれば、クロマツは、厳寒期を除いて通年植栽できる可能性が示されました。

クロマツ海岸林の再生に向けて

クロマツ苗の植栽に適した時期は、開葉前の春と成長終了後の秋とされていますが、東北地方では植栽後に厳しい冬を迎えるため、秋の植栽は避けられていました。このため、厳しい寒さが収まった春に植栽作業が集中し、事業量の偏りが大きくなる問題がありました。植栽が大面積になる海岸林の再生事業では、植栽時期を分散させる必要があり、植栽時期を選ばない苗が求められます。そこで、細根を含む根系が保たれているため、植栽時のストレスが少ないとされるクロマツコンテナ苗を用いて通年での植栽の可能性を検討しました。

植栽時期の違いによるコンテナ苗の生存と成長

仙台市の荒浜地区において、コンテナ苗を厳冬期の1月を除いて2013年11月から2ヶ月おきに翌年の9月まで、時期を変えて植栽し、その生存と成長を調査しました。

植栽翌春（11月植栽は翌々春）の2015年4月時点の生存率は、ほぼ100%で、生存率からみた場合、問題はありませんでした（図1）。次に成長の面ですが、植栽時と1成長期が終了した2014年11月に、それぞれ樹高と幹の地際部の直径を測定しました（図2）。5月植栽、7月植栽、9月植栽の苗は、植栽後にほとんど樹高成長はみられませんでした。これは植栽するまでの育苗中にすでに樹高成長をほぼ終えていたためであり、成長が悪かったということではありません。直径成長は、7月植栽までは2014年の成長中に増加がみられま

たが（図3）、9月下旬植栽では、直径成長はみられませんでした。これは、9月下旬植栽では、2014年の成長期がすでに終了していたためと考えられ、次の年に成長すると考えられます。

注意の必要な植栽時期

これらの結果から、生存率だけでなく、成長面からみても、ほぼ通年での植栽が可能であると考えられました。しかし、東北地方では、海岸であっても、厳冬期には積雪や土壌凍結の影響があり、作業を行うことは困難です。また、真夏に関しては、本研究事例では7月下旬の植栽でも、翌春に100%生存していました。ただし、真夏の海岸の環境は過酷な場合も多く、植栽を行う場所や、その年の降水量にも左右されることが考えられますので、真夏の植栽は、環境条件を検討した上で実行する必要があります。

本研究は、森林総合研究所交付金プロジェクト「東日本大震災で被災した海岸林の復興技術の高度化」の成果を含みます。また、本研究は、森林総合研究所東北支所と東北森林管理局による「仙台海岸におけるコンテナ苗植栽時期試験地に関する協定書」に基づいて行いました。

詳しくは、八木橋勉・中村克典・齋藤智之・松本和馬・八木貴信・柴田銃江・野口麻穂子・駒木貴彰（2015）クロマツコンテナ苗の当年生苗利用と通年植栽の可能性．日本森林学会誌 97: 257-260 をご覧下さい。



図1 クロマツコンテナ苗の越冬後の様子

植栽翌春（11月植栽は翌々春）の2015年4月時点の生存率は、98%以上と高く、植栽時期に関わらず健全な状態を保っていました（写真は11月植栽の区画）。

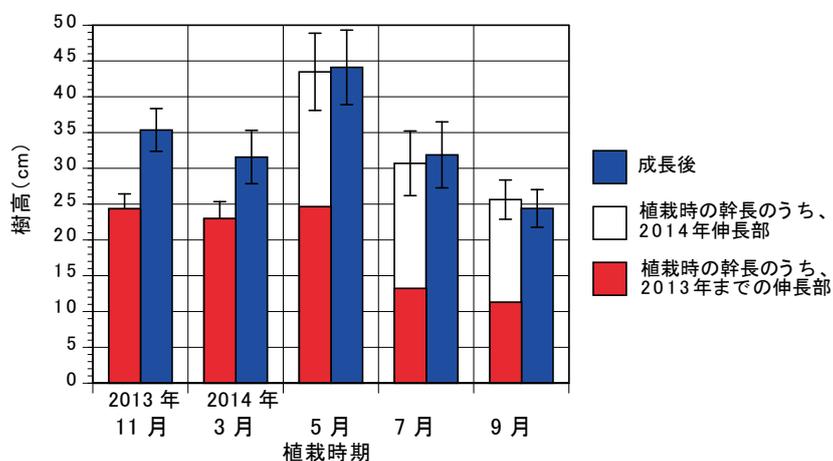


図2 コンテナ苗の植栽時と2014年の成長期終了後の幹長（文献より改変）

5月下旬以降の植栽では、樹高成長は育苗中にほぼ終了していました。

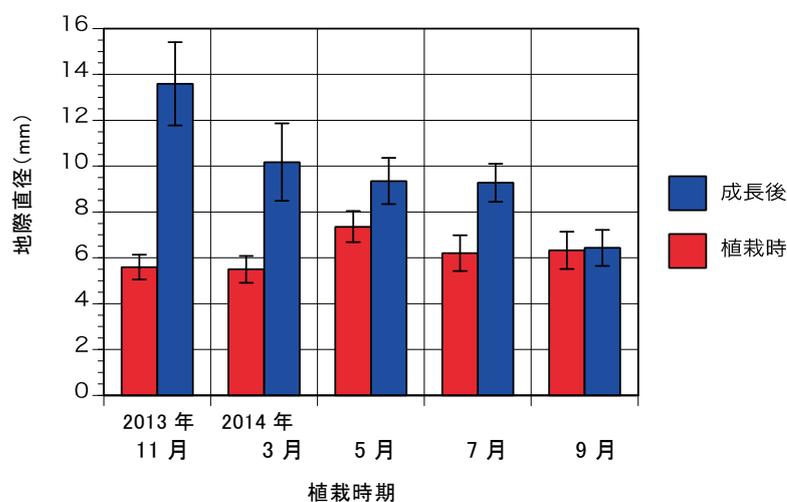


図3 コンテナ苗の植栽時と2014年の成長期終了後の地際直径（文献より改変）

9月下旬植栽では、2014年の成長期はすでにほぼ終了しているため、直径の成長はありませんでしたが、他の植栽時期のものは直径が増加しました。

樹木の被害から竜巻の強さを知る

気象環境研究領域 鈴木 覚、野口 宏典、南光 一樹、勝島 隆史
静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター 加藤 徹、渡井 純

要 旨

近年、竜巻の認知件数が増加しています。竜巻は短い時間、ごく狭い範囲に発生し、既存の気象観測網で強さを測定することが難しいため、家屋などの被害状況から竜巻の強さを評定してきました。樹木も竜巻によって幹折れや根返りなどの被害を受けることがあり、樹木の被害と竜巻の強さを対応づけるため、被害形態ごとに被害をもたらす風速を推定できるようにしました。その結果、竜巻等突風の強さの基準として気象庁が策定した日本版改良藤田スケールに樹木の被害が指標として採用されました。これにより、樹木の被害から竜巻等突風の強さを精度よく評価できるようになりました。

樹木の被害と竜巻等突風の強さとの関係

竜巻等の突風が樹木や森林を襲った場合、主に、幹が折れる「幹折れ」、根ごとひっくり返る「根返り」、枝が折れる「枝折れ」の被害形態がみられます(図1)。私たちは多数の樹木の幹の直径や樹冠の大きさ等を測定し(図2)、樹木の幹や根が耐えうる限界の強さと樹木に作用する風力を計算しました。限界の強さに風力が達すると樹木に被害が発生します。そのときの風速が被害を発生させる風速になります。針葉樹と広葉樹は樹形や幹の強度が異なるため、別々に被害形態と風速との対応関係を作りました。また、幹や枝が腐っている場合は小さい風速で被害が発生するため、腐朽がある場合も考慮しました(表1)。

「針葉樹」と「広葉樹」が被害指標に

竜巻の強さを評定するにあたって、まず、何がどのような被害を受けたかという状況を把握し、その状況をもたらす風速を推定します。次に、推定した風速の大きさに応じて強さを6段階にランク分けします。「何が」に相当するものを被害指標と呼びます。我が国に先んじて米国やカナダで竜巻等突風の強さの基準である改良藤田スケールが開発されました。そこにも樹木は被害指標に含まれていますが、樹木の被害と竜巻の強さとの関係に科学的根拠が明確でなく、広葉樹と針葉樹の違いもそれほど考慮されていませんでした。私たちは針葉樹と広葉樹の区別、および健全な樹木と腐朽のある樹木の区別を

行い、科学的な根拠をもって樹木被害と風速を対応づけました。今回作成した樹木被害と風速の対応関係が日本版改良藤田スケールに採用された結果、全部で30項目ある被害指標の中に「針葉樹」と「広葉樹」の2項目が入りました。

被害指標としての樹木

樹木以外の被害指標は家屋等の人工物です。そのため、樹木は田園地帯や森林などの人工物が少ない場所では数少ない被害指標として特に重要です。また、樹木は世界中に分布するので、世界各国に共通した汎用の被害指標として活用できる可能性もあります。科学的根拠に基づく精度の高い樹木被害データは、竜巻研究、竜巻対策の有効な基礎データになると考えられます。

本研究は、JSPS 科研費 (JP26450219) 「竜巻強度を樹木被害から簡便に推定する手法に関する研究」による成果です。

詳しくは、鈴木覚 他 (2015) 日本版改良藤田スケールの開発－樹木の DI と DOD の提案－、日本風工学会誌、40 (2) :127-128 及び気象庁 (2015) 日本版改良藤田スケールに関するガイドライン (http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kentoukai/kaigi/2015/1221_kentoukai/guideline.pdf) をご覧下さい。

枝折れ



根返り



幹折れ



図1 竜巻による樹木の被害

(2012年5月6日つくば市で発生した被害)

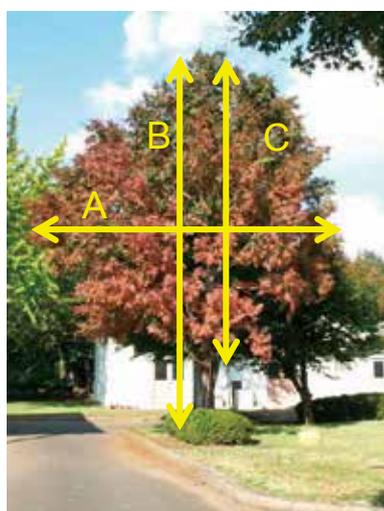


図2 樹形や幹直径の測定例

樹冠の幅 (A)、樹高 (B)、樹冠の長さ (C) などを計測して風が吹いた時にかかる風力を推定しました (左)。幹の直径を高さごとに測定し、それぞれの断面に作用する力を計算しました (右)。

表1 被害の形態に対応した風速の例 (針葉樹と広葉樹の代表値)

| 被害の形態 | 風速(m/s) | | | |
|---------------------------------|---------|-----|-------------|-------------|
| | 針葉樹 | 広葉樹 | 針葉樹 腐朽あり | 広葉樹 腐朽あり |
| 直径 2cm~8cm の枝折れ | 25 | 30 | 15 | 20 |
| 根返り。幹に亀裂や折れがなく、根系が浮き上がって倒伏又は傾斜。 | 40 | 45 | — | — |
| 幹折れ。幹に亀裂又は折損。 | 50 | 60 | 20 | 30 |

時間変化がなく、均一に樹木に吹いた場合に換算した風速です。そのため、現実に吹いた風速とは異なります。(日本版改良藤田スケールに関するガイドラインからの抜粋)

小笠原で急速に広がる樹木病害「南根腐病」の 防除に向けた実態解明

みなみねぐされびょう

森林微生物研究領域
東北支所

太田 祐子 (現日本大学)、服部 力、佐橋 憲生、
秋庭 満輝
升屋 勇人

要 旨

近年、小笠原諸島の樹木が次々に枯死しています。これは、シマサルノコシカケというきのこによって引き起こされる病気、「南根腐病」が原因です。調査の結果、南根腐病は小笠原諸島内の各地で発生しており宿主^{*}範囲も広範であるものの、植生によって発生しやすさに差があることがわかりました。病原菌の遺伝的多様性が高いことから、この菌は侵入種ではなく元々小笠原に生息していた菌であると推測されました。近年の急激な被害拡大には何らかの環境変化が関わりと考えられました。

南根腐病とは

近年、南西諸島および小笠原諸島などの亜熱帯域の島々において、「南根腐病」の被害が広がっています。南根腐病はサルノコシカケの仲間であるシマサルノコシカケが引き起こす病気で、被害木は根が腐り、多くの場合枯死にいたります。日本以外では、東南アジア、アフリカ、中南米等の熱帯および亜熱帯地域において、プランテーションの栽培樹木、街路樹、公園の緑化木など人為影響の大きい環境下で植栽された樹木を中心に被害が報告されています。

小笠原では固有種や希少種といった貴重な樹種にも被害が広がっているため、いかに被害を軽減するかが大きな課題になっています。しかし、被害対策に当たっては、小笠原に多数生息する貴重な生物の保全にも十分配慮した方法が必要です。こうした地域では、薬剤を使用するのではなく、病原菌の特性や生態を上手に利用した環境に悪影響を与えない病気の管理が求められています。

被害実態と菌の伝播様式

小笠原諸島では、父島、母島、兄島、弟島で南根腐病の被害が確認され (図 1)、特に父島と母島ではほぼ全域から被害が見つかりました。宿主樹木の種類を調べたところ、固有種 15 種を含む 29 科 41 種 (1 草本植物含む) という多様な樹種に病気を引き起こすことが明らかになりました。しかしながら、病気はどこにでも発生する訳ではなく、病気の発生しやすい植生としにくい植生があること (図 2)、すなわち南根腐病の発生には環境要因が関わりが分かりました。

小笠原の南根腐病は急激に被害が拡大したことから、最近になって他地域から侵入したのではないかと疑われていました。侵入から間もないとすれば、遺伝子が変化

する時間も短いため、その地域の遺伝構造は単純なはずで、そこで、小笠原諸島の父島と母島および南西諸島の個体群の遺伝構造を分析したところ、父島および母島の個体群はいずれも遺伝的多様性が高いことが明らかになりました。南根腐病の病原菌は元々小笠原に分布していて、何らかの環境変化によって近年急激に被害が拡大した可能性が示されました。

病気の伝播様式としては、胞子が飛散することによって伝播する「胞子感染」と、病気の根が健全な根に接触することで感染を広げる「根系感染」の二つの方法をとることがわかりました。胞子は春～秋にかけて長期にわたって継続的に飛散することから、胞子感染リスクの高い期間が長いことも明らかになりました。

防除法開発に向けて

本研究で南根腐病の被害拡大には、環境要因が関わっていること、胞子による感染の危険性が高いことなどがわかってきました。今後、被害の発生しやすい環境要因や菌の生態について解析を進め、環境に悪影響を与えることなく南根腐病から小笠原の貴重な樹木を守る手法の開発に活かします。

本研究は、JSPS 科研費 (JP25292096) 「亜熱帯島嶼域における南根腐病菌の病理学特性の解明とその制御」および公益社団法人発酵研究所一般助成金による研究成果です。

詳しくは、Akiba *et al.* (2015) PLOS ONE 10 (10) :e0141792、及び、Sahashi *et al.* (2015) Australasian Plant Disease Notes 10:33 をご覧ください。

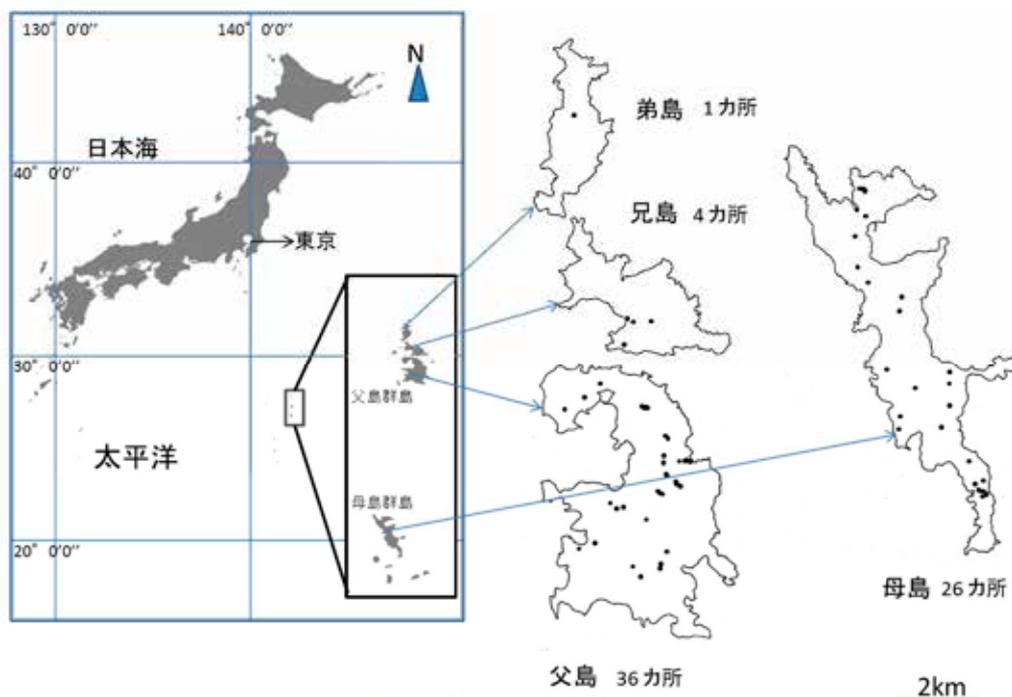


図1 小笠原における南根腐病の分布

父島、母島、兄島、弟島の広い範囲で南根腐病がみつかりました。

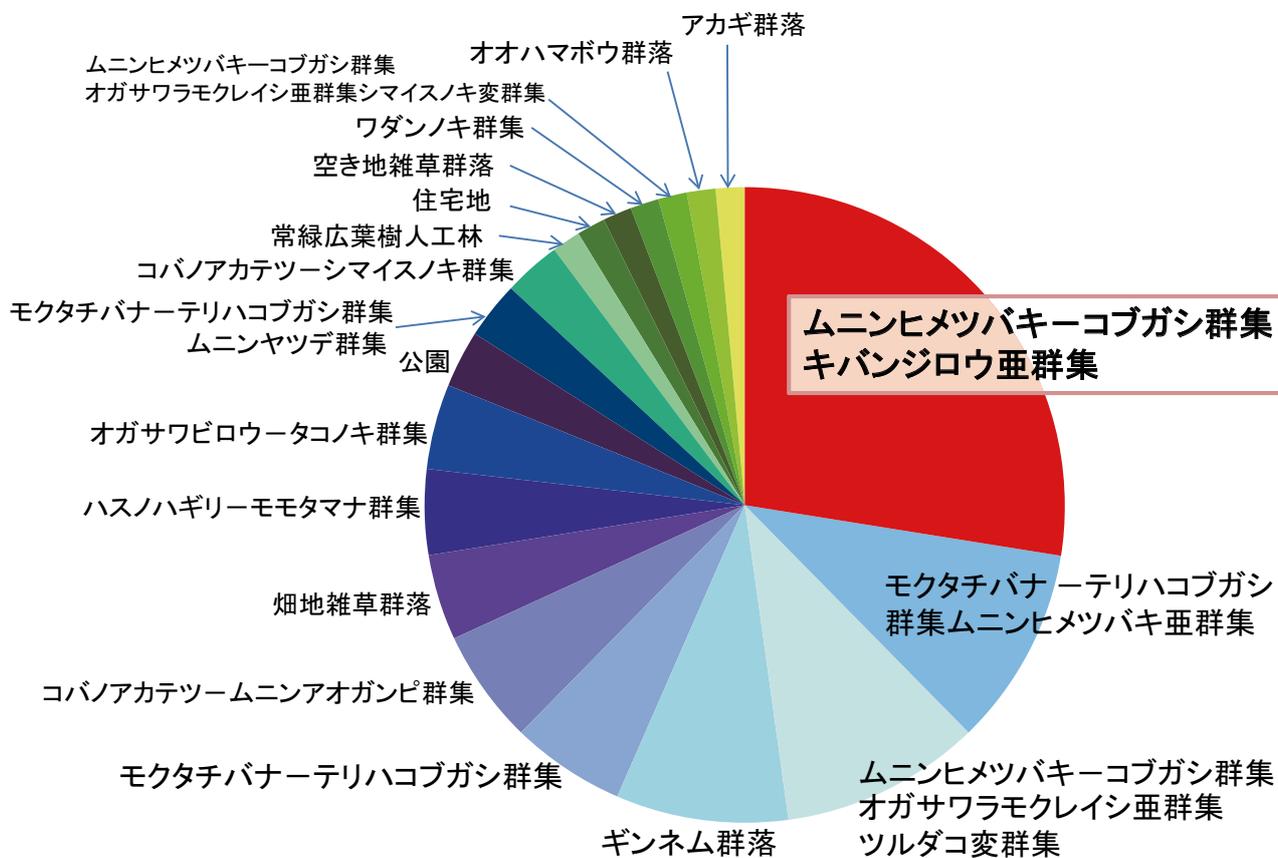


図2 南根腐病被害地の植生区分

南根腐病の被害地は、「ムニンヒメツバキコブガシ群集キバンジロウ亜群集」(円グラフの赤で表示) に多く発生していました。

シカとカモシカの糞をすばやく識別

東北支所
野生動物研究領域
関西支所

相川 拓也
堀野 真一
市原 優

要 旨

シカとカモシカの糞を簡単かつ迅速に識別する手法を開発しました。糞の表面に付着している両種の DNA を検出することにより識別する方法です。この DNA 識別法では、専門的な技術や機器を一切必要とせず、また、短時間で識別できることから、これまで DNA の操作を行ったことがない、より現場に近い人でも容易に扱うことができます。この糞識別法を利用することで、シカとカモシカが混在する地域においても、シカの生息状況が正確に把握できるようになります。

シカ生息調査におけるこれまでの問題点

近年、シカ（図 1）は東北地方北部にも出没するようになり、農業や林業における被害の拡大が懸念されています。シカの分布や生息密度を把握する手法のひとつに、糞の数を調査する方法があります。ところが、シカの糞はカモシカの糞とよく似ており見た目では区別がつかないため、東北地方のようにカモシカが多く生息している地域では、糞の数だけでシカの生息状況を正確に把握することができません。糞に含まれる DNA を検出して両種を識別する方法が既に開発されていましたが、その作業には長い時間と熟練が必要でした。

糞の識別方法

私たちはこれまでとは異なる新しい DNA 増幅技術を採用し、シカとカモシカ両種の糞を簡単、迅速かつ正確に識別できる手法を開発しました。この識別法は以下の 3 つのステップで完結します。

1. 糞からの DNA の抽出

野外に落ちている糞を拾ってきます（図 2）。糞の表面を爪楊枝の先端で軽くこすり、それを DNA 抽出用の液に浸します（図 3）。このチューブを 60℃ で 10 分間、その後 90℃ で 5 分間保温します。この操作により、糞の表面に付着していた動物の DNA が液体中に溶け出します。

2. DNA を増やす

糞からの DNA が溶け込んだ溶液（図 3）の一部をシカ用の検査液（A）とカモシカ用の検査液（B）のそれぞれに加え（図 4 左図）、これらのチューブを 60℃ で

60 分間保温します。この処理によって、DNA 抽出液中に溶けていたシカあるいはカモシカの DNA が検査液内で増えていきます。

3. 目視による判定

検査した糞が、シカとカモシカどちらのものかの判定は、DNA が増えるにつれて変化する検査液の色で判定します。シカ用の検査液（A）が緑色に変化していれば、この糞はシカのものであることを、また、カモシカの検査液（B）が緑色に変化していれば、この糞はカモシカのものであることを示しています（図 4 右図）。

本識別法の特徴

従来の DNA 識別法で 6～8 時間程度要していた時間が、わずか 75 分で完了することから、これまでよりも大幅な時間短縮が実現できました。また、一般的な DNA 解析に不可欠な、特殊な機器や専門的な知識が不要であるため、これまで DNA を扱ったことがない人でも、簡単に利用することができます。さらに、検査液の色で判定できるので、シカなのかカモシカなのかという結果が一目瞭然です。本識別法により、シカとカモシカの分布が重なっている地域でも、シカの生息状況を正確に把握できるようになります。さらに、本手法ではシカとカモシカ両種の糞を正確に識別できることから、シカだけでなくカモシカの生息調査にも利用することができます。

詳しくは、Aikawa, T. *et al.* (2015) *Mammalian Genome* 26: 355-363, DOI 10.1007/s00335-015-9572-0. をご覧下さい。



図1 シカ

東北地方では近年急速に分布が拡大しています。

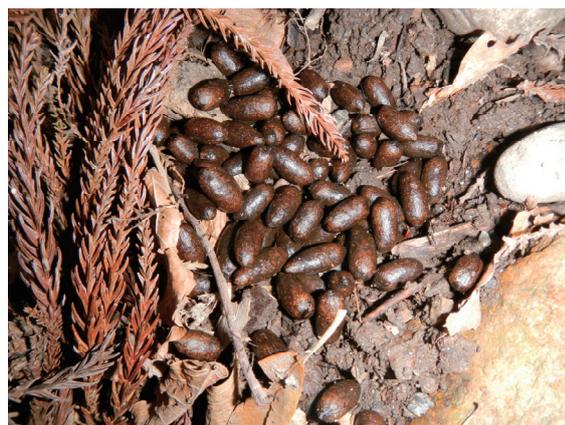


図2 落ちている糞

このままでは、シカの糞かカモシカの糞かわかりません。

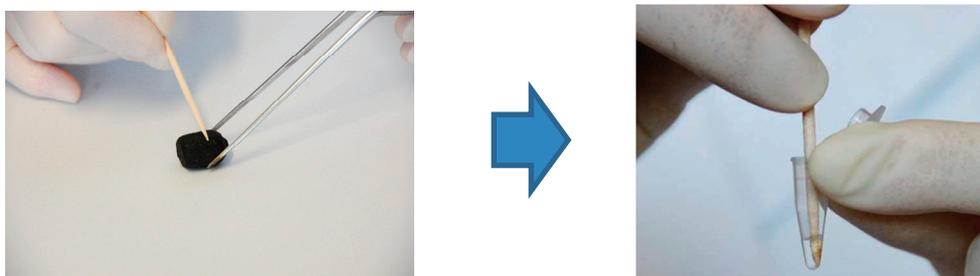


図3 糞の表面を爪楊枝の先でこすり（左図）、それを DNA 抽出用の液に浸します（右図）

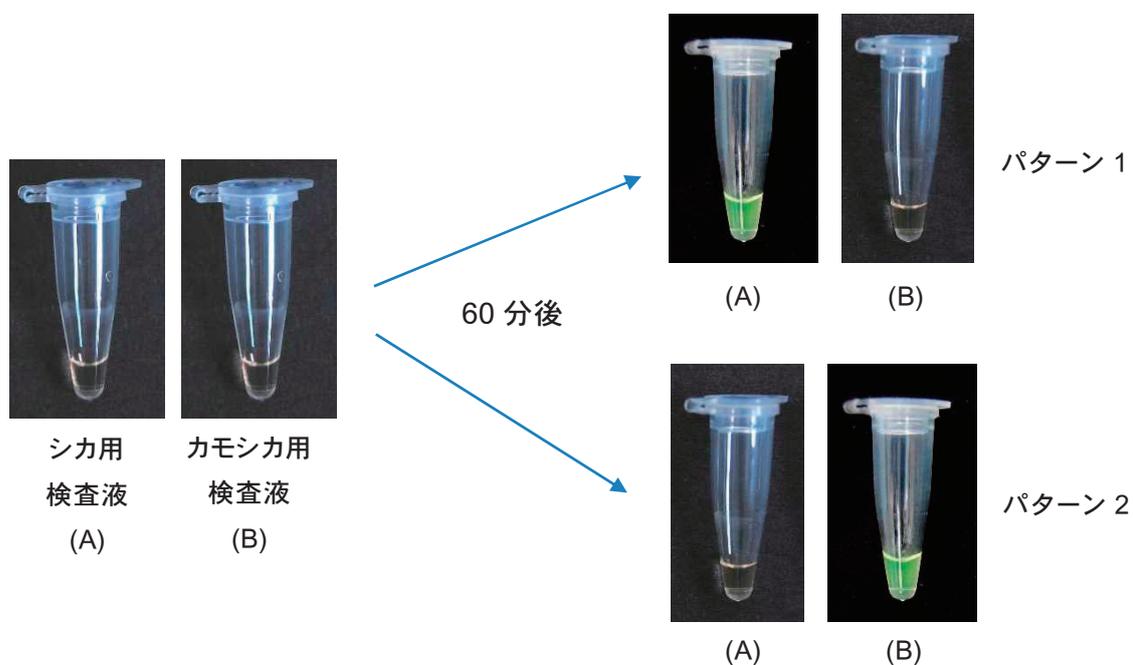


図4 検査液と目視による判定

シカ用検査液 (A) とカモシカ用検査液 (B) の2つの検査液を作り、これらに図3の液を少量加えます (左図)。60℃で60分後、目視で結果を判定します。検査液 (A) が緑色に光った場合、この糞はシカのものであることを (パターン1)、一方、検査液 (B) が緑色に光った場合、この糞はカモシカのものであることを示します (パターン2) (右図)。

人にも生物多様性にもやさしい森林づくり

森林昆虫研究領域
温暖化対応推進拠点
林業経営・政策研究領域

岡部 貴美子
古川 拓哉
岩永 青史

要 旨

2015年のパリ協定によって、気候変動枠組み条約に加盟する全ての国は温暖化防止に取り組むことになり、途上国の森林の減少・劣化の防止による温室効果ガス排出削減を目的とした REDD+ 活動の実施国が増えると予想されます。日本政府は二国間協定によって、途上国で REDD+ を推進する準備を進めています。REDD+ は熱帯林の多様な生物を守るために有効であると期待されますが、これまで森林を利用してきた人々が不利益をこうむらないようにし、別の場所で森林が減少しないよう配慮する必要があります。そこで悪影響を未然に防ぐために提案されたセーフガードにどう取り組むべきかについて分析し、生態系サービスに着目することの重要性を示しました。

セーフガードの基礎知識

REDD+ 活動では、2010年の気候変動枠組み条約第16回締約国会議（UNFCCC/COP16）で合意（カンクン合意）された7つの配慮事項（項目 a～g；図1）をセーフガードと呼びます。REDD+ の実施国は資金支援を受けるために、セーフガードへの取り組みや進捗具合を報告する義務があります。セーフガードでは、実施国の主権を尊重し、批准した国際条約や国の法制度、森林管理に関する計画に対して配慮することが求められています。また、森林と深くかかわってきた歴史を持つ先住民やその地域に暮らす人々の権利を尊重し、REDD+ 活動に関する情報を公開し、人々の参加をうながす必要があります。これらの人々が森林から受ける恩恵は増強されるべきであり、このような恩恵と深いかわりのある生物多様性の保全が求められます。天然林は特に重要視されます。これらの配慮すべき項目は互いに密接に関連しており（図1）、このような配慮に基づく活動を推進することで、森林保全の継続と周辺地域への悪影響防止も達成されると期待されます。

セーフガードへの取り組み方

カンクン合意によるセーフガードは、様々な国の様々な状況に配慮しながら検討されたものですが、具体的に何をすべきか、誰がどのように結果を評価するかなどは決定されていません。しかしながら国際社会の合意によれば、日本の事業者が途上国で REDD+ 活動を行う場合

もセーフガードに配慮する必要があります。そのため、既に実施された事例の収集と、国際的に認められている関連の認証制度のガイドラインなどに基づき、実施者のためのチェックリストを開発しました。チェックリストは取り組みにおける「事前調査」、「計画」、「進捗確認と報告」の3段階で、何をすべきかを示しています。更に成功事例や工夫についての情報を得るために、合わせて事例集を活用することを推奨します（図2）。

環境セーフガードに配慮した REDD+ における森林管理

環境セーフガードであるカンクン合意の項目 e は、REDD+ 活動において生物多様性および生態系サービスの保全と増強を求めています。そこで期待されるセーフガードに対してどのような森林管理をすべきかを、熱帯林の管理の実例や熱帯林での研究成果を基に、表にまとめました（表1）。このような森林管理のポイントを活用することで、炭素蓄積保全と生物多様性保全の両立が期待できます。

本研究は、林野庁委託事業「森林保全セーフガード確立事業」による成果です。

詳しくは、Thompson, I.D., Okabe, K. *et al.* (2014) *Biodiversity and Conservation* 23: 2613–2635. 及び、林野庁 (2016) REDD+ のためのセーフガード・ガイドブック. 林野庁. をご覧下さい。

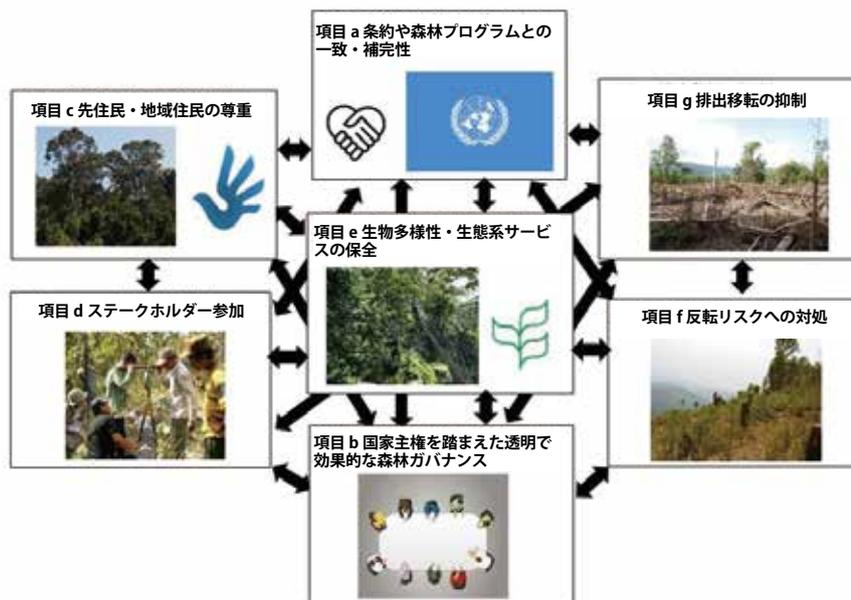


図1 カンクン合意による7つのセーフガード項目と相互関係

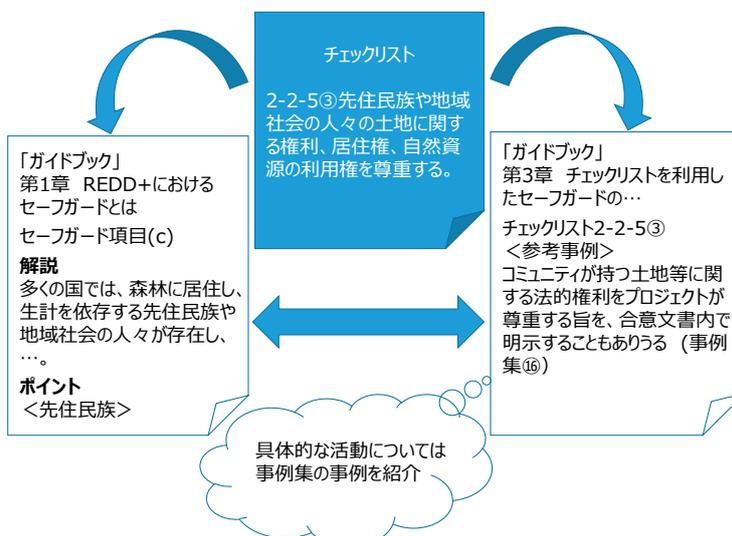


図2 REDD+ のためのセーフガードガイドブックとチェックリスト、事例集の使い方

表1 REDD+ 活動において炭素蓄積の増加と生態系サービスの増強にとってコベネフィットをもたらす植林

| 生態系サービス | 早生樹・外来種植林 | 望ましい森林管理 |
|----------|--|---------------------------------|
| 木材生産 | 混交林、下層植生の増強 | 混交による土壌改良、天然林樹種の利用、低インパクト伐採 |
| 病害虫制御 | 天然林樹種の利用、生態系の連結性強化 | 天敵生息地の維持、枯死木の維持、近縁種を隣接しない |
| 物質循環及び分解 | 枯死木やリターの維持 | 枯死木やリターの維持、必要に応じて土壌を供給、天然林樹種の利用 |
| 種子分散 | 利用不可 | 天然林樹種の利用、種子分散者生息地の維持 |
| 花粉媒介 | 利用不可 | 天然林樹種の利用、地域送粉者群集の生息地保全 |
| 水質・水量 | 水消費量の多い樹種を避ける、立木間隔の縮小、堆積リターの維持、混交林、間隔の狭い列状収獲 | 択伐や低インパクト伐採、リターの質的向上、溪畔林伐採の回避 |

シカの採食圧で野鳥におこる変化の広がりをとらえる

関西支所

関 伸一

要 旨

草食動物のシカは植物を食べますが、もちろん鳥を食べるわけではありません。ところが、シカが増えすぎた森林では数が減ってしまう鳥がいます。例えば、茂みを好むウグイスは、シカが森林の下層にある植生を食べつくした場所ではすみ場所を失って減少します。しかし、その間接的関係の広がりを広域で対応づけるのは困難でした。そこで、関西地域で進められてきた、シカによる植生への影響の広がりを下層植生衰退度という簡易な指標で地図化する試みを活用して鳥の種構成との関係を解析したところ、この指標に応じて鳥の種類や個体数に違いが生じていることを明らかにしました。全国的にさらなるシカの個体数増加が予測される中、森林の生物多様性保全のためにシカによる間接的な影響の広がりを評価する手法として有効と考えられます。

草食のシカの動物への影響

シカは草食動物で、もっぱら植物を食べます。ほかの動物を食べることはめったにありません。ところが、シカが増えすぎた森林では減ってしまう動物がいます。例えば、ウグイスのように茂みを好む鳥は、ササや低木の茂みがシカに食べつくされてしまうことで、すみ場所を失って減ってしまうのです。このような間接的な影響によって減少する動物は鳥だけではなく、昆虫や土壌動物、ノネズミのような小型のけものなど様々な動物も森林の下層の茂みを利用しているからです。シカの増加は森林環境の変化をとらえて、生物多様性に強く影響しています。

シカと鳥との間接的関係をとらえる

シカが増えたときに鳥の種類や数がどのように変わるのか、決まった場所で長年観察していればその変化はひと目でわかります。しかし、その関係を広域でとらえるのは、それほど簡単なことではありません。「このごろ、ウグイスの声を聞いてない。そういえば、このあたりでシカが増えたなあ。これはシカのせいだ!」という短絡的な決めつけは科学的ではないからです。さいわい関西地域の府県では、広葉樹林の下層にある低木やササがシカに食べられて減ってしまった状況を下層植生衰退度という簡易な指標で評価し、広域的に地図化する取り組みが進められています(図1)。もし、この指標に応じた鳥の種類や個体数の変化が確認できれば、指標はシカの増加による鳥への間接的影響の広がりをとらえる手がかりとなります。

下層植生の食べつくしが鳥に影響

そこで、下層植生衰退度が評価されている兵庫県北西部の落葉広葉樹林 42ヶ所で鳥の種類と個体数を調べました(図2)。この結果、下層の茂みが残っている場所とシカに食べられて少なくなった場所とでは、鳥の種構成が大きく異なることが分かりました。特に、下層植生が衰退した場所では、ウグイスやコルリ、ソウシチョウなどの茂みを好む鳥が少なくなっていました(図3)。また、茂みが食べつくされてから時間が経った森林では、種構成の違いがよりいっそうはっきりしていました。下層植生衰退度によって評価されたシカによる植生への影響は、鳥の種類や個体数の構成への間接的な影響を評価するにも利用できると考えられます。

生物多様性保全のための間接的な影響評価

現状では、シカの個体数は全国でさらに増加すると予測されています。森林の生物多様性保全のためには、シカが他の動物に及ぼす間接的な影響の広がりを地域スケールで評価する手法が必要とされています。下層植生衰退度と鳥の種構成との関連性評価はそのような手法の一つとなりそうです。

詳しくは Seki, S.I., Fujiki, D., Sato, S. (2014) Forest Ecology and Management, 320:6-12. をご覧ください。



図1 下層植生衰退度（図2も参照）が異なる森林の様子と下層の茂みに依存する鳥・ウグイス
下層植生衰退度は数値が0から4へと大きくなるほど衰退程度が高い（図2も参照）

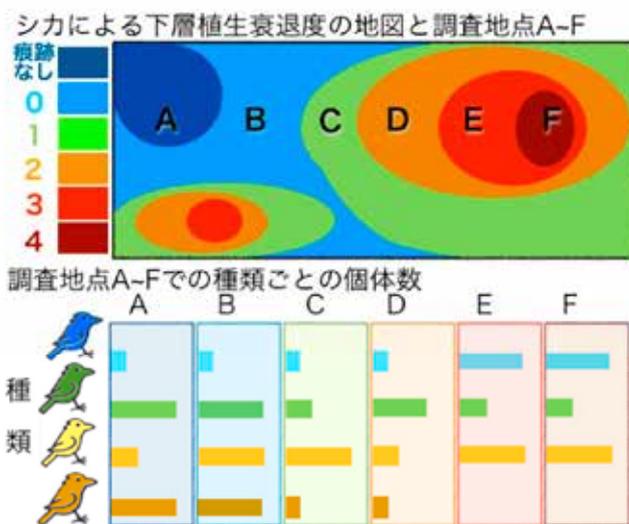


図2 研究のデザイン
シカによる下層植生への影響の広がりに応じて、鳥の種類や個体数が変化するかどうかを調べます。

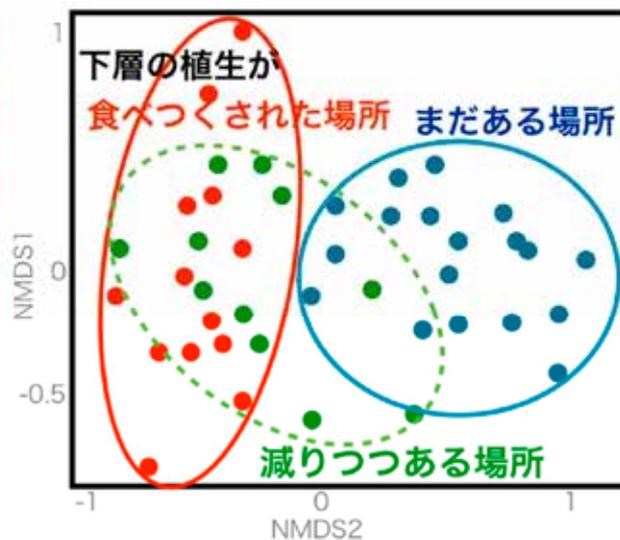


図3 調査地点ごとの鳥の種構成の類似度の分布
各点は調査地点を表し、軸は二次元で図示するために分析方法により便宜的に設定したもの。

前方選抜による初期成長に優れた第二世代品種の開発

林木育種センター

田村 明、高橋 誠、倉本 哲嗣、
加藤 一隆、平岡 裕一郎、星 比呂志

要 旨

林業の成長産業化のためには、育林経費の中で大きなウエイトを占める下刈り経費を削減することが重要です。エリートツリー^{*}（第二世代精英樹^{*}）は、これまで普及の主体であった第一世代精英樹よりも成長が優れており、これらの中から初期成長に優れた品種を開発することによって下刈り期間の更なる短縮が期待できます。今回、前方選抜という方法を使って初期成長に優れた第二世代スギ品種を 3 品種開発しました。この方法は、選抜個体そのものや親、兄弟等の血縁個体の検定データを使って選抜する方法です。我が国の林木育種で初めてとなる選抜方法であり、従来の品種開発方法と比べて大幅に開発期間を短縮することが可能です。

初期成長に優れた第二世代品種の必要性

我が国の森林・林業において、林業の成長産業化が重要な課題となっています。とりわけ諸外国に比べて高額の育林コスト、特に下刈り等の造林初期のコスト削減が重要です。このため、初期成長が従来より優れた第二世代品種を早急に開発することが必要です。

前方選抜とその特徴

これまでの品種開発では、候補となる個体の実生苗^{*}（実生苗は、次の世代であるため、候補個体の「後代」と呼ばれます）の成長等を調べ、その結果から優れた品種を選抜する方法（後方選抜）で行ってきました。後方選抜は、選抜の確度は高いですが、後代の成長を調べるのに長い期間がかかります。これに対して前方選抜は、選抜の候補となっている個体やその親、兄弟等の血縁関係のある個体の調査結果（検定データ）から、当該個体の遺伝的能力を表す指標である育種価^{*}を推定して優れた個体を選抜する方法です（図 1）。後代の成長調査等を行わずに済むので、短期間で品種を開発することができ、時代のニーズに応じた品種を早期に開発できます。この方法はすでに海外の林木育種先進国で採用されていますが、我が国の林木育種に適用したのは今回が初めてです。

前方選抜による品種開発

関東育種基本区において、スギのエリートツリーの中から前方選抜を用いて、5 年次の樹高の育種価が優れた 3 個体を品種として開発しました（図 2）。開発品種から生産される後代の苗木の 5 年次樹高の改良効果を試算したところ（表 1）、「初期成長に優れた第二世代品種（F）スギ林育 2-76 号」は、その後代において、第一世代精英樹の樹高平均値（3.04m）と比較して 6.2%（20cm）高くする能力があると推定されます。加えて、開発品種の後代の苗木は、同じ種類の開発品種で構成される採種園から生産されるため、花粉親からも優れた性能をもらい受けることとなります。よって、例えば、初期成長に優れた第二世代品種（F）スギ林育 2-76 号と 2-70 号の交配でできる苗木（後代）は、5 年次において第一世代精英樹の樹高平均値に比べて平均 11.4%（36cm）向上することが期待できます。今回開発した 3 品種は、いずれも特定母樹^{*}に指定されており、初期成長に加えその後の成長や材質等も優れており、林業の成長産業化に貢献する品種として期待できます。

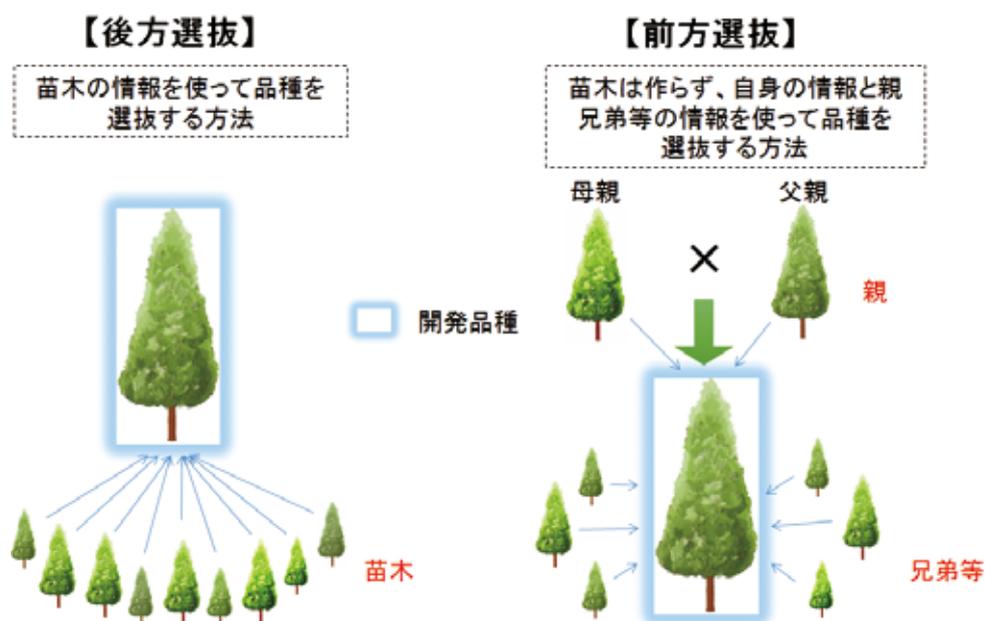


図1 後方選抜と前方選抜の概念図



図2 前方選抜で開発した初期成長に優れた第二世代品種
左からスギ林育2-70号、スギ林育2-71号、スギ林育2-76号

表1 前方選抜による初期成長に優れた第二世代品種の5年次樹高（初期成長）の改良効果

| 開発品種名 | 育種価 (m) | 第一世代精英樹に対する改良効果 (%) |
|---------------|---------|---------------------|
| スギ林育2-70号 | 0.33 | 5.2 |
| スギ林育2-71号 | 0.31 | 4.9 |
| スギ林育2-76号 | 0.39 | 6.2 |
| 第一世代精英樹の全個体平均 | 0.00 | |

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

ゲノム情報を利用した育種高速化技術の体系化

| | |
|-------------|---|
| 林木育種センター | 平岡 裕一郎、三嶋 賢太郎、能勢 美峰、坪村 美代子、大平 峰子、 花岡 創、山野邊 太郎、高島 有哉、高橋 誠、星 比呂志 |
| 森林バイオ研究センター | 平尾 知士 |
| 九州育種場 | 栗田 学、武津 英太郎、倉本 哲嗣 |
| 東北育種場 | 井城 泰一 |
| 九州大学 | 渡辺 敦史、田村 美帆 |

要 旨

スギをはじめとする林木の遺伝的改良においては、林業上重要な成長や材質などの特性を把握する必要があります。しかしそうした特性は木材として利用できる樹齢になるまでわからないため、調査には数十年の年月が必要でした。そこで、スギのゲノム情報を利用してこの時間を大幅に短縮することを目指しました。多数のスギ精英樹^{*}からゲノム情報を網羅的に収集し、成長などの形質を予測する数式モデルを作成しました。数式による予測と若齢時の実際の測定値を総合評価することにより、成長の良好な精英樹を短期間かつ高精度で選抜することが可能となりました。ゲノム情報の活用により、林木育種の高速化が実現しつつあります。

林木育種の高速化

スギなどの林木は、植えてから伐採・利用できるまで数十年もの長い期間を要します。これまでに品種改良(育種)によって、成長の早いもの、木材の性質が優れたもの、花粉が少ないもの、あるいは病虫害に強いものといった様々な優良品種が開発されてきましたが、これには非常に長い年月が必要でした。しかし、求められる品種をより早期に開発しニーズの変化にすばやく対応するには、育種に要する期間を短縮する、つまり林木育種の「高速化」を行う必要があります。その切り札として考えられているのが、ゲノム情報を利用した育種です。

ゲノム情報を利用した林木育種

ゲノムとは、生物の設計図である DNA がもつすべての遺伝情報のことです。異なる個体間では DNA の塩基配列^{*}が少しずつ違っています。この DNA の違い(DNA 多型)が、成長等の形質の良し悪しと関係しています。こうした DNA 多型情報を使えば、個体のもつ特徴を予測することができ、育種に要する期間を大幅に短縮することができると考えられます。実際、近年発達した DNA 解析技術を背景として、家畜や作物ではこうした手法による育種の研究が行われています。そこで我が国の主要な造林樹種であるスギにこの手法を試みました。

形質を予測する数式モデルの作成

スギのゲノム情報として、DNA 多型情報を探し出し、数百の精英樹について7万箇所以上の多型的な部位を調べました。これら精英樹の成長や材質等の形質を測定し、ゲノム情報と合わせて解析し、ゲノム情報から形質値を予測する数式モデルを作成しました(図1)。

植栽 20 年後の形質を 5 年目で予測

作成した数式モデルを使って予測した値と、実際に測定した値との間には正の相関関係が認められ、適用した精英樹の集団によっては比較的高い相関が得られました(表1)。この相関係数が大きいほど、モデルの精度が良いことを表します。作成した数式モデルを使って実際に成長に優れた精英樹が選抜できるどうかを明らかにするため、植栽後 20 年経過したときの材積を改良するよう様々な方法で選抜を試行し、選抜によって集団の平均値がどの程度向上するか(改良効果)を比較しました(図2)。その結果、ゲノム情報による予測に加えて若齢時(植栽後 5 年)の実際の測定値も用いて選抜すると、表1で相関係数が高かった集団 B では基準方法の 9 割以上、相関係数がやや低かった集団 A でも 7 割程度の改良効果が得られました(図2②)。つまり、ゲノム情報を活用することで、育種期間を短縮しつつ、高い精度での選抜が可能になるといえます。一方、ゲノム情報による予測のみで選抜した場合(図2③)は、若齢時の測定値も用いた場合(図2②)と比べて改良効果がやや小さい結果となりました。ゲノム情報のみでの予測精度を高めることで、育種期間をより短縮できると考えられますので、今後の研究により精度を向上させていくことが重要といえます。

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「森林資源を最適利用するための技術開発」のうち「新世代林業種苗を短期間で作出する技術の開発」による成果です。

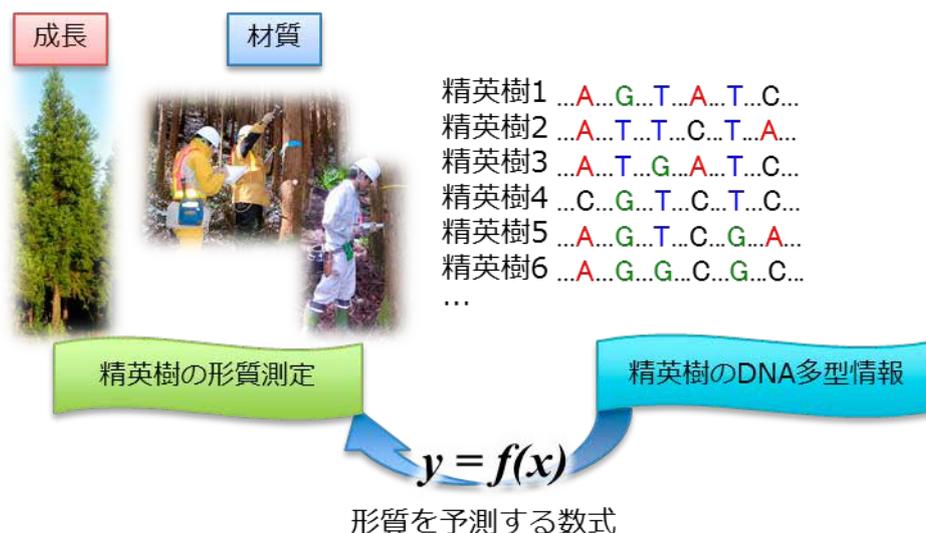


図1 ゲノム情報から形質を予測する

表1 予測した形質値と実測値との相関係数

| | 10年次 成長指標 | 20年次 成長指標 | 材の剛性 の指標 | 材密度の 指標 |
|--------|--------------|--------------|-------------|------------|
| 精英樹集団A | 0.277 | 0.324 | 0.305 | 0.361 |
| 精英樹集団B | 0.540 | 0.644 | 0.693 | 0.491 |

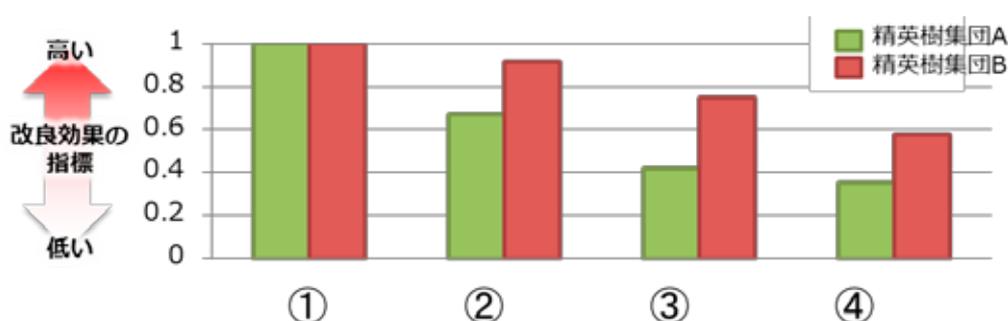


図2 選抜方法ごとの20年次材積の改良効果の比較（集団の上位10%を選ぶと仮定）

縦軸は選抜方法ごとの改良効果の相対値を表し、値が1に近いほど直接選抜したとき

(①)に近い効果が実現されることを意味します。

- ①実際の20年次の材積とゲノム情報を使って選抜した場合（基準方法：指標=1.0）
- ②実際の5年次の成長とゲノム情報を使って選抜した場合
- ③ゲノム情報のみを使って選抜した場合
- ④実際の5年次の成長のみを使って選抜した場合

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

スギ雄花形成に関わる遺伝子を特定し花粉症対策に活かす

林木育種センター
九州育種場
九州大学

坪村 美代子
栗田 学
渡辺 敦史

要 旨

社会問題化しているスギ花粉症への取り組みとして、花粉の少ないスギや無花粉スギなどの花粉症対策品種の開発が求められています。花粉症対策に貢献する優れた品種を効率的に作るためには、花粉を作り出す雄花の発達過程を詳しく理解することが重要になります。今回私たちは、スギの雄花ができ始める 8 月から花粉が飛散する 3 月まで、雄花の切片を観察し、その形態的な特徴からスギ雄花の発達段階を 10 のステージにわけ、各ステージで働く遺伝子を明らかにしました。この成果は、花粉形成に関連した遺伝子に着目した新たな花粉症対策品種の早期選抜技術の開発につながります。

研究の背景

社会問題化しているスギ花粉症への取り組みとして、花粉の少ないスギやまったく花粉を出さないスギなどの花粉症対策品種の開発が進められています。スギは木材生産を目的に植栽される林業樹種であるために、花粉の量だけでなく、より早く大きくなる特性や、より良質な木材を生産するための特性を持たせることも考慮して品種の開発を進めることが重要になります。成長や材質に優れた花粉症対策品種を開発するにあたって、雄花や花粉が少ない個体を「遺伝子」に着目して選ぶことができれば、これまで 15 年以上かかっていた花粉の少ないスギ品種などの開発期間を大幅に短縮できる可能性があります。そこで今回、新たな品種を早期に選抜する技術の開発につながる基盤情報の整備を目的に、スギの雄花の発達過程で働く遺伝子について情報の集積を行いました。

スギ雄花の発達ステージの決定

スギの雄花が形成されてから花粉が飛散するまでの間に、スギの雄花や花粉はどのように発達するのでしょうか？その過程を明らかにするため、スギの雄花が形成された 8 月から花粉の飛散が確認された 3 月までの 8 ヶ月間にわたり、定期的に雄花をサンプリングし、切片を作製して組織観察を行い、その形態的な特徴からスギの雄花の発達段階を 10 のステージに区分しました(図 1)。

各発達ステージで発現する遺伝子の解析

スギの雄花の発達に伴い、どのような遺伝子が働いて

いるかを明らかにすることは、花粉症対策品種の開発を行う上で、研究のターゲットとする遺伝子を選定する際の重要な情報となります。今回、DNA マイクロアレイ解析*と呼ばれる技術を使って約 2 万種類の遺伝子の各ステージでの発現量を解析した結果、そのうち約 8 千種類の遺伝子がステージ間で発現量が異なることが分かりました(図 2)。また、これら約 8 千種類の発現量の変化から 10 段階に区分したステージは、4 区分にまとめられることがわかりました(図 3)。

今回決定したスギの雄花の発達ステージと各ステージで発現する遺伝子の情報を基に、各遺伝子が雄花の発達や花粉形成に果たす役割を明らかにしていきたいと考えています。そして、それら雄花の発達や花粉形成に重要な働きをする遺伝子を指標にした花粉の生産性の評価手法の開発を目指し、成長等の林業特性が優れかつ花粉症対策にも高い効果を発揮する品種の早期開発へとつなげていきます。

本研究は、農林水産省「森林資源を最適利用するための技術開発」、林野庁「無花粉スギと精英樹の人工交配による新品種開発とその早期判定技術の開発」、JSPS 科研費 (JP26850103)「スギ雄性不稔原因遺伝子の単離—多様な無花粉スギリソース整備に向けて—」による成果です。

詳しくは、Tsubomura, M. *et al.* (2016) *Tree Physiology* doi:10.1093/treephys/tpw001 をご覧ください。

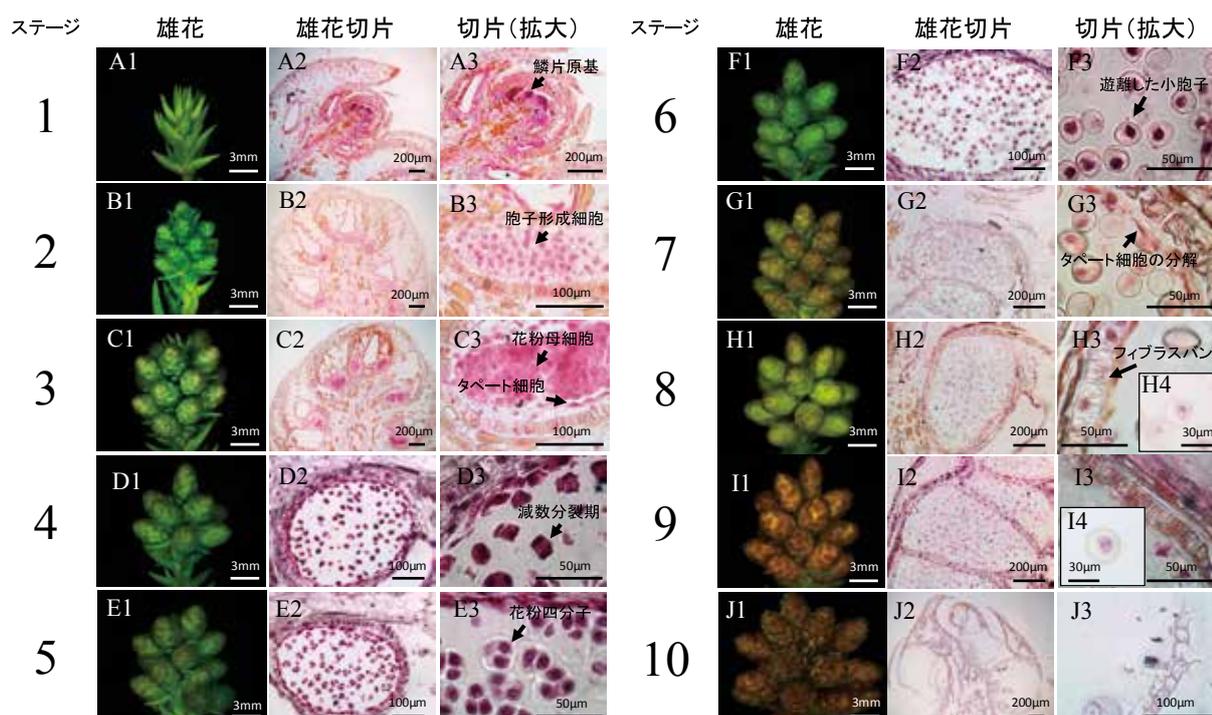


図1 スギ雄花の発達ステージ

各ステージの指標となる形態を以下に記載します。

- ステージ1 (A1-A3)：鱗片の原基が確認されます (写真は 8/9 に採取した雄花)。
- ステージ2 (B1-B3)：鱗片の基部に、孢子形成細胞の形成が確認されます (写真は 9/6 に採取した雄花)。
- ステージ3 (C1-C3)：花粉母細胞とタペート細胞が確認されます (写真は 10/5 に採取した雄花)。
- ステージ4 (D1-D3)：減数分裂期の花粉母細胞が確認されます (写真は 10/11 に採取した雄花)。
- ステージ5 (E1-E3)：花粉四分子が確認されます (写真は 10/12 に採取した雄花)。
- ステージ6 (F1-F3)：遊離した小胞子が確認されます (写真は 10/13 に採取した雄花)。
- ステージ7 (G1-G3)：タペート細胞の分解が確認されます (写真は 10/25 に採取した雄花)。
- ステージ8 (H1-H4)：フィブラスバンドが確認されます (写真は 11/8 に採取した雄花)。
- ステージ9 (I1-I4)：花粉内に 2 つの核が確認されます (写真は 12/22 に採取した雄花)。
- ステージ10 (J1-J3)：花粉の飛散が確認されます (写真は 3/26 に採取した雄花)。

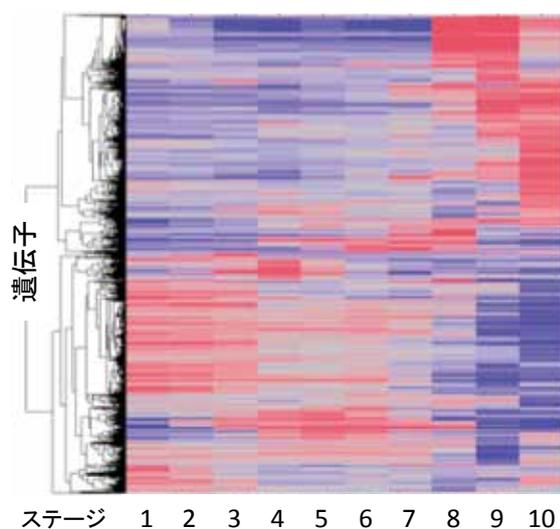


図2 マイクロアレイ解析による遺伝子の発現解析

ステージ間で異なる発現量を示した約 8 千種類の遺伝子の、ステージごとの発現量の変化を示します。縦軸が遺伝子の種類を示し、横軸がステージを示しています。線の色は発現量を表し、赤色が濃いほど発現量が多いことを示し、青色が濃いほど発現量が少ないことを示しています。

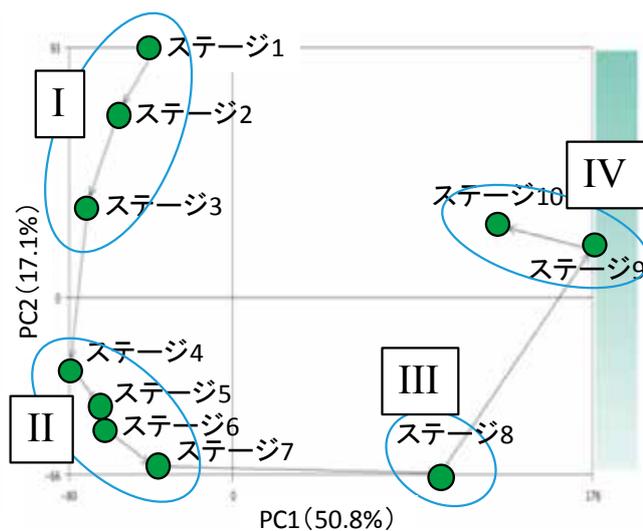


図3 発現遺伝子に基づく 10 ステージの主成分分析

発現遺伝子のパターンをもとに、10 のステージのグループ分けを行いました。大きくわけて 4 区分 (I: ステージ 1～3、II: ステージ 4～7、III: ステージ 8、IV: ステージ 9～10) に分類できることがわかりました。

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

抵抗性クロマツで海岸防災林を再生する

東北育種場
 林木育種センター
 生物工学研究領域
 青森県産業技術センター林業研究所
 宮城県林業技術総合センター
 福島県林業研究センター
 キリン株式会社
 宮城県農林種苗農業協同組合

織部 雄一郎、宮本 尚子
 山野邊 太郎
 丸山 毅
 田中 功二
 今野 幸則
 川上 鉄也、小澤 創
 大西 昇
 太田 清蔵

要 旨

東日本大震災で被災した海岸周辺部では、住環境改善や営農復興のため、潮・風・飛砂への防備機能を備えた海岸防災林を再生する必要があります。このためには耐塩性に優れたクロマツの植栽が必須であり、マツノザイセンチュウ（マツ材線虫病の病原体）に抵抗性を有することが求められますが、東北産の抵抗性クロマツ苗木の供給量には限りがあり、再生計画の一部では、西日本等の温暖地産種苗の導入も検討されています。そこで抵抗性クロマツについて、当研究所と県および民間との共同研究により、東北産クロマツ苗木の飛躍的な生産性向上技術と温暖地産種苗の寒冷な東北への導入技術の開発に取り組み、海岸防災林の再生現場に苗木を大量に供給するシステムを構築しました。

抵抗性クロマツ種子生産の飛躍的向上

東北産抵抗性クロマツについて、植物成長調節物質である 6-ベンジルアミノプリン（BAP）^{*}の投与方法、濃度と時期の適正条件を探索した結果、種子を生産する採種園における種子の増産率は、採種木 1 本当たりでは 29.6 倍に、採種園を継続的に経営する条件（例：成長調節物質投与は 2 年に 1 回、1 回に投与する範囲は樹体の半分まで等の制限）の下では、採種園全体としては 3.0 倍に向上しました。エタノールを用いた種子選別法については、従来法の 1/4 の時間で充実種子をほぼ 100 % 判別でき、種子の選別が現場でも利用できることを実証しました。人工交配機を用いた簡易な人工交配（SMP）^{*}によって、採種園の種子生産性は自然交配に比べ 3.4 倍に向上し、目的とする花粉親との交配が成功する確率は 94% に達しました。これらの成果により、極めて高い種子充実率とマツノザイセンチュウ抵抗性を保持した優良種子の生産技術を開発できました。

抵抗性クロマツのクローン苗木の増殖

寒冷な東北でも特定の抵抗性クロマツについては、バーミキュライトとパーライトを 8 対 2 の割合で混合した用土で作ったさしつけ床を冬季に加温することで得苗率が 50% を超えることを明らかにし、事業規模でさし木苗を生産する技術を確立しました。また、抵抗性クロマツのクローン苗の新たな大量生産法として、東北産抵抗性クロマツの未熟な種子から作製した不定胚形成細胞

（PEM）^{*}を経て誘導した不定胚^{*}を発芽・発根させて、クローン毛苗を大量に増殖する技術も開発しました。

東北地方への抵抗性苗木の導入

温暖地産の抵抗性クロマツの裸苗とコンテナ苗を東北の海岸部と内陸部に導入して、活着状況、初期成長と気象害の発生状況を調査し、環境への順応性を把握しました。また、温暖地産の抵抗性クロマツの種子を植栽場所に近い場所で育苗し、その苗木を東北の太平洋沿岸部に植栽し、活着状況と初期成長を調査しました。これらの種子および苗木の導入試験の結果について検討し、温暖地産の抵抗性クロマツの種子と苗木を寒冷な東北に導入・順化するための指針を示しました。

成果の普及

開発した技術・ノウハウについては、生産現場で実証試験を実施して実用性について確認した上で指導・普及のためのマニュアルを作成しました。今後は、この取り組みの成果を海岸防災林の再生に役立ててもらえるよう、このマニュアルを使って苗木生産者や行政担当者等に講習等を実施していきます。

本研究は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業（実用技術開発ステージ）「東北地方海岸林再生に向けたマツノザイセンチュウ抵抗性クロマツ種苗生産の飛躍的向上」による成果です。



図1 抵抗性クロマツ種子生産の飛躍的向上

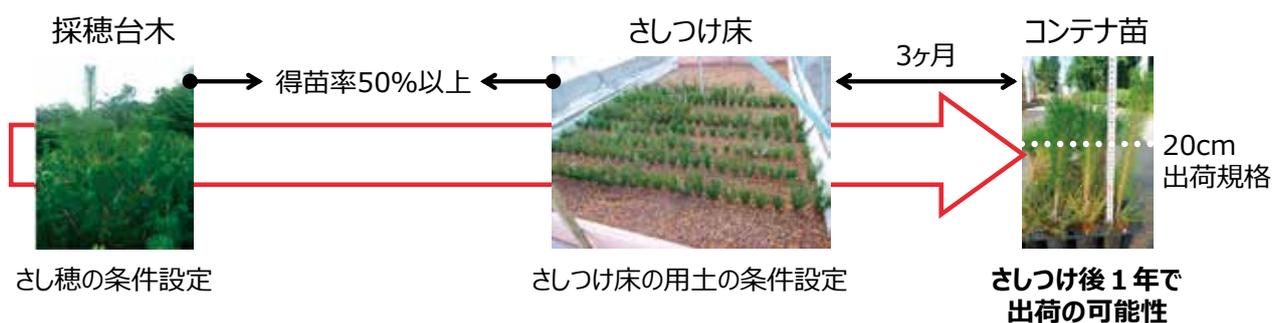


図2 抵抗性クロマツのクローン苗木の増殖

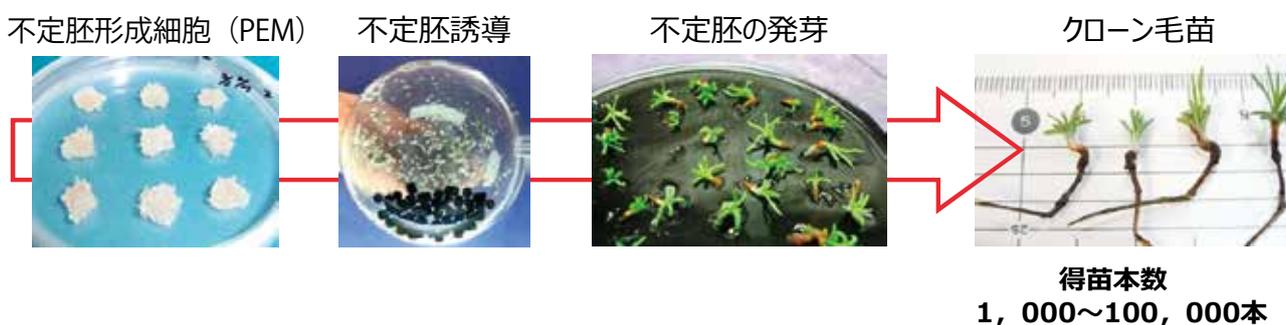


図3 未熟種子由来の不定胚からの組織培養苗の大量増殖

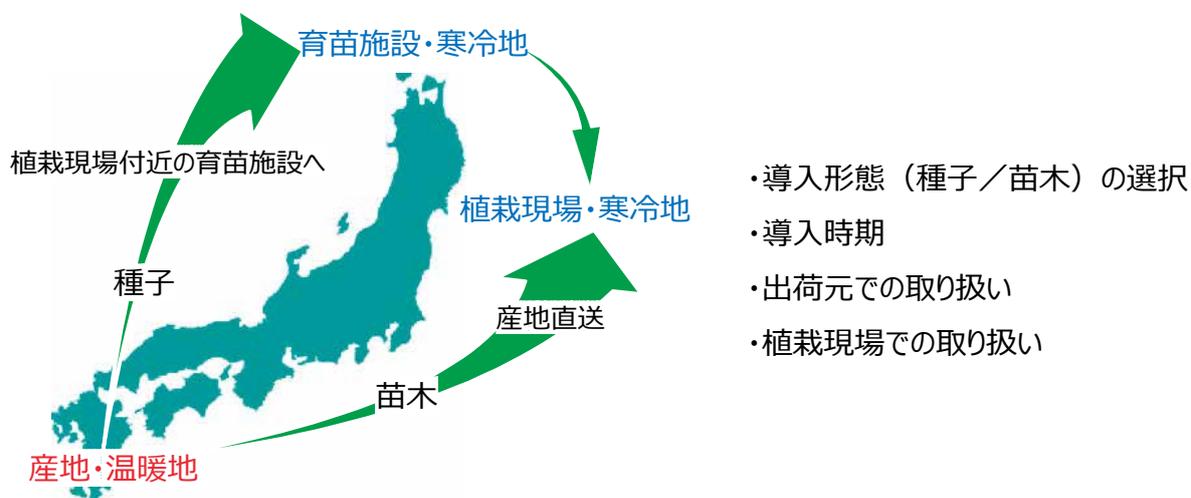


図4 東北の海岸防災林再生現場への導入指針

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

移植試験地でわかったアカマツの地域特性

森林遺伝研究領域
元北海道支所

永光 輝義、島田 健一
金指 あや子

要 旨

樹木は、地域の環境に適応した遺伝的性質を持ち、異なる地域に移植すると成長量が低下すると考えられています。そのため、林業種苗法では、日本のアカマツ種苗は、南から北への移動が禁じられています。この規制の妥当性を評価するため、広島県（南）と岩手県（北）の産地のアカマツ種苗を相互に移植し、30年間の成長量を調べました。その結果、南から北へ移植した場合のみで植栽面積あたり幹の断面積が33%低下し、現行の種苗移動規制の妥当性が示されました。今後は、アカマツの遺伝的性質の地域間の違いを更に明らかにしていく必要があります。

樹木の地域適応と種苗移動規制

樹木は、地域の環境に適応した遺伝的性質を持ち、異なる地域に移植すると成長量が低下すると考えられています。そのため、林業種苗法によって、スギ、ヒノキ、アカマツ、クロマツの種苗の移動が規制されています。日本のアカマツ種苗は、南から北への移動が禁じられています（図1）。しかし、この規制の妥当性を示す科学的証拠はありませんでした。

相互移植試験と30年間の成長量

そこで、1967年に広島県（南）と岩手県（北）の産地の種苗を、それぞれその近くに設置した試験地へ相互に植栽しました（図2）。そして、南産地から南試験地に、北産地から南試験地に、南産地から北試験地に、北産地から北試験地に移植したアカマツの30年間の生存率と樹木サイズを調べました（図3）。間伐後の生存率は、北産地から北試験地に移植した場合が最も高く（90%）、南産地または北産地から南試験地に移植した場合が中程度（78~84%）、南産地から北試験地に移植した場合が最も低く（67%）になりました。また、幹平均直径は、南試験地（21~24 cm）が北試験地（17~18 cm）よりも大きくなりました。これらのことから、生存率と樹木サイズから求めた成長量となる植栽面積あたり幹の断面積は、南産地から北試験地に移植した場合（75 m²ha⁻¹）で他の場合（104~119 m²ha⁻¹）に比べて33%低下しました（図4）。

試験地の気象条件

北試験地は南試験地とくらべて、気温が低く、降水量が少なく、日照時間が短く、風が強く、雪が多いことがわかりました。また、折れたり曲がったりした幹の割合は南試験地より北試験地で高く、北試験地の気象条件の厳しさが示唆されました。

種苗移動規制の妥当性

相互移植試験により、日本のアカマツは、南から北へ移植すると成長量が33%低下することが明らかにされ、現行の種苗移動規制の妥当性が示されました。これらのことから、日本のアカマツは、南北の地域の環境に適応した遺伝的性質を持つ可能性が高く、厳しい北の気象条件に移植した場合に成長量が低下すると考えられます。今後は、アカマツの遺伝的特性の地域間の違いを更に明らかにしていく必要があります。

詳しくは、Teruyoshi Nagamitsu, Ken-ichi Shimada, Ayako Kanazashi (2014) A reciprocal transplant trial suggests a disadvantage of northward seed transfer in survival and growth of Japanese red pine (*Pinus densiflora*) trees, *Tree Genetics & Genomes*, 11:813–1614-2942 をご覧下さい。

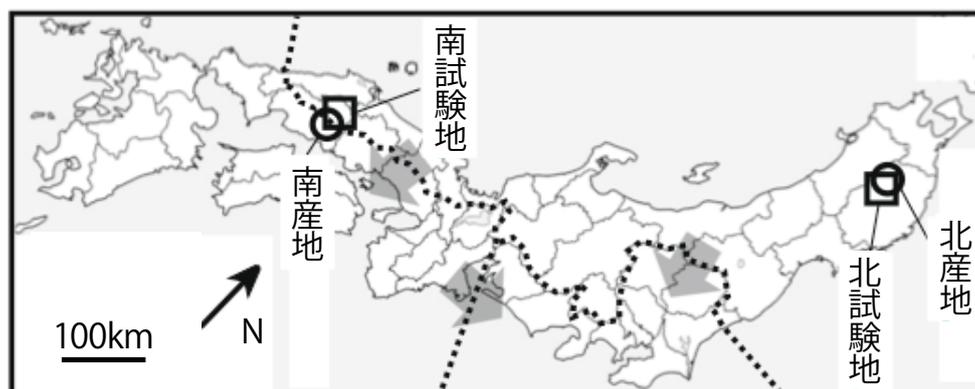


図1 日本のアカマツの種苗配布区の境界（点線）と許可されている移動方向（灰色矢印）および広島県（南）と岩手県（北）の産地（○）の種苗を植栽した試験地（□）
種苗は、北から南へ移動できますが、南から北へは移動できません。



図2 広島県の試験地の植栽状況

103区画（12m四方）のそれぞれに、2m間隔で36本のアカマツ苗が1967年に植えられました。



図3 広島県の試験地の生育状況

40年生で樹高約15mに達しています。

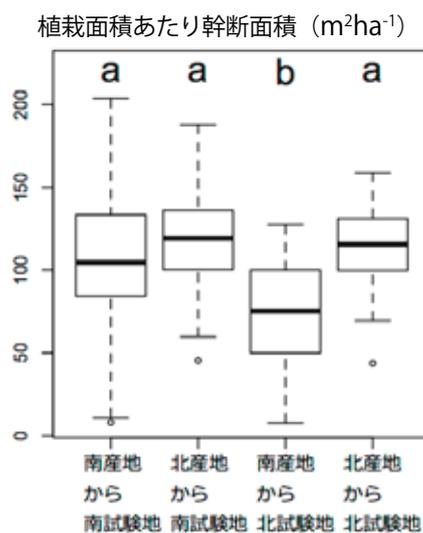


図4 産地と試験地の4つの組み合わせにおける、約50反復の区画での、植栽面積あたり30年生樹木の幹断面積の箱ひげ図
aとbとの間には、統計的に有意な差があります。

ストレスで誘導されるガラクチノール合成酵素遺伝子 (GoIS) は植物の気孔開閉に関与することを発見

生物工学研究領域

バイオマス化学研究領域
住友林業株式会社
林木育種センター

宮澤 真一、西口 満、田原 恒、
毛利 武、横田 智、丸山 毅
掛川 弘一
古川原 聡
楠城 時彦

要 旨

植物は葉の表面にある気孔を開くことで二酸化炭素をとりこみますが、同時に気孔を通して多くの水を失います。気孔の開閉メカニズムを明らかにすることは、乾燥などのストレスに対して耐性をもつ植物を開発する上で重要です。そこで私たちは、植物のストレス耐性を強化させる遺伝子であるガラクチノール合成酵素遺伝子 (GoIS) に着目して研究を行いました。GoIS を人工的に増やした遺伝子組換えポプラを作製し、乾燥ストレスとの関係を調べたところ、GoIS が水の通導性を抑え、気孔を閉じやすくすることで、植物体からの水の蒸発を防ぐという新たな知見を見出しました。

乾燥地の緑化によって地球温暖化を緩和

砂漠のような極端な乾燥地域を除いても、世界の陸地面積の約 3 割以上、約 50 億ヘクタールが乾燥地に相当します。このうち 5～10 億ヘクタールが人為的影響による荒廃地といわれています。荒廃地を森林に転換した場合、年間約 5～10 億トンの純炭素固定量が見込めます。石油などの化石燃料の消費によって放出される炭素量は、地球全体で年間約 90 億トンに達することから、荒廃地を緑化することができれば、化石燃料に由来する炭素量の約 6～11%を再固定できる計算になり、地球温暖化を緩和する有効な手段になると期待できます。荒廃地を森林に回復させる有力な方法の一つが乾燥や塩ストレスに強い植物の開発です。

ストレス耐性を強化させる遺伝子候補：ガラクチノール合成酵素遺伝子 (GoIS)

植物は乾燥、塩、低温といったストレスにさらされるとガラクチノール合成酵素遺伝子 (GoIS) の発現量を増やし、ガラクチノールやラフィノース族オリゴ糖類(ラフィノース、スタキオースなど)の合成を活発化させます(図 1)。遺伝子組換え技術によって、GoIS の発現を人工的に増やしたシロイヌナズナでは、乾燥に対して強くなることが報告されています。ガラクチノールやラフィノース族オリゴ糖類は細胞の浸透圧の調節やタンパク質の保護などの機能があるといわれていますが、どうし

て GoIS を増やすと乾燥に対して強くなるのか、具体的な仕組みはよくわかっていませんでした。

遺伝子組換えポプラでわかった GoIS の新たな機能

私たちはポプラ (*Populus nigra* var. *italica*) の葉から 6 種類の GoIS 遺伝子を単離し、中でも *PnGoIS2* 遺伝子が乾燥や塩ストレスに強く応答することを発見しました(図 2)。*PnGoIS2* の発現を人工的に増やした遺伝子組換えポプラを作製し、植物体内の水の通りやすさ(通導性)や葉の気孔開度(どれぐらい気孔を開いているかの指標)などを解析しました。その結果、遺伝子組換えポプラは、植物体内の水の通導性が低下し、気孔も開きにくくなっていることが明らかになりました(図 3 左)。さらに、組換えポプラでは、水を与えない状態で枯れてしまう葉の枚数が少ない傾向がありました(図 3 右)。これらの結果は、GoIS が樹体内の水の流れをコントロールする重要な遺伝子であることを示しています。組換えポプラを使って GoIS の機能がさらに明らかになれば、ストレスに強い樹木の開発につながると期待できます。

本研究は、森林総合研究所交付金プロジェクト「高バイオマス生産性と高ストレス耐性を付与した組換え樹木の開発」による成果です。

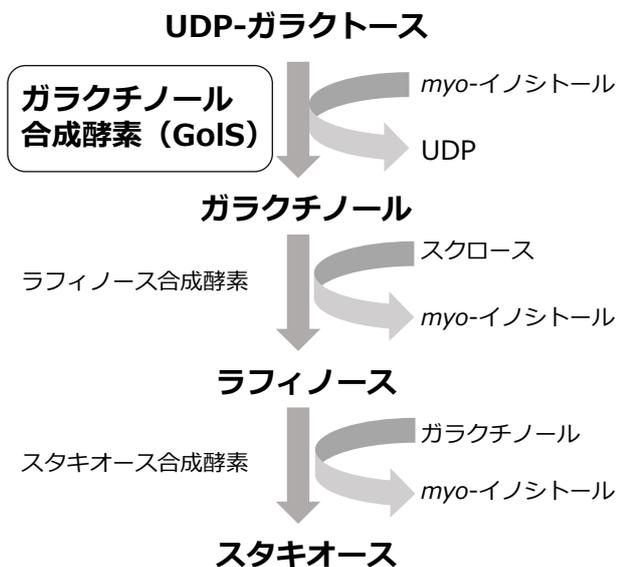


図1 ガラクチノール合成酵素 (GoIS) が関わる代謝経路

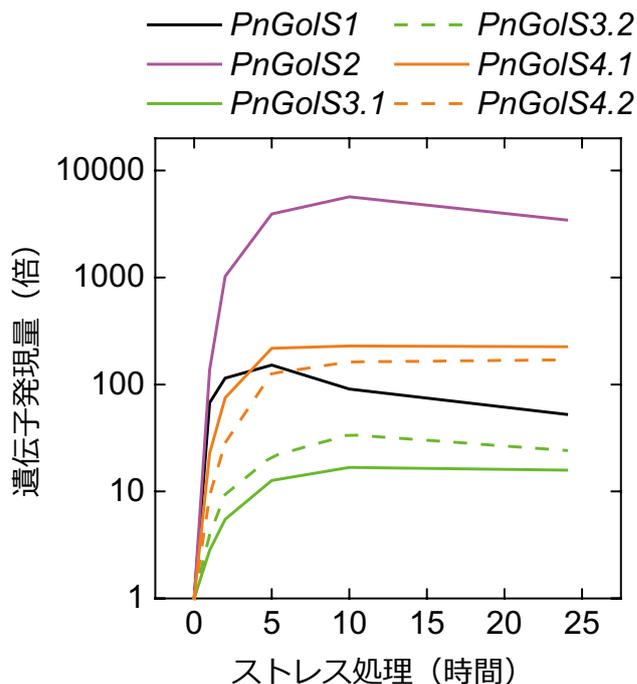


図2 ポプラの葉片を乾燥させたときの GoIS 遺伝子群の発現量変化 (処理前の発現量を1)

PnGoIS2の増加が特に大きく、結果は塩ストレスでも同様でした。

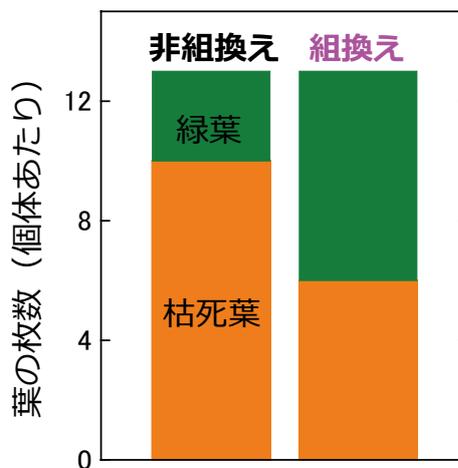
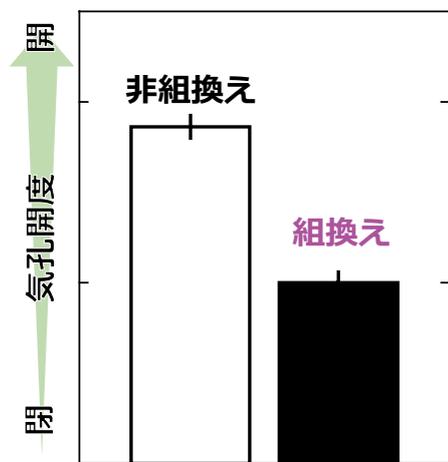


図3 PnGoIS2を過剰に増やした組換えポプラは気孔が開きにくく (左)、また、2週間水を与えずに育てても、枯死する葉の数が少ない傾向がありました (右)。

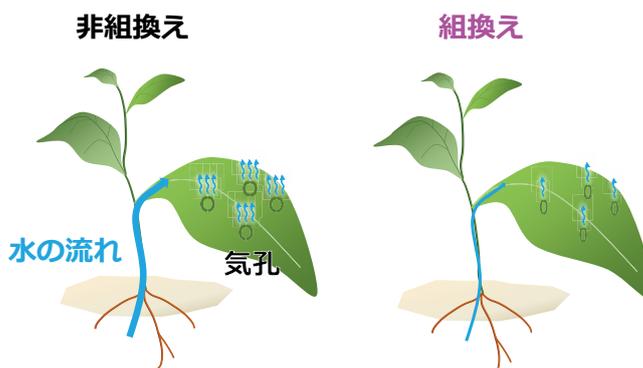


図4 PnGoIS2を過剰に増やした組換えポプラは、気孔が開きにくく、水分の蒸発が少ないと推察されます。

マツと共生するきのこ、ヌメリイグチがサクラで育つ

きのこ・微生物研究領域
 生物工学研究領域
 信州大学

村田 仁、根田 仁
 丸山 毅、横田 智
 山田 明義

要 旨

森林総合研究所では、広葉樹をマツタケの宿主^{*}とすることに成功しています。この現象が他の菌根^{*}性きのこでも起きるか否かを調べるため、マツ科針葉樹だけに共生するとされていた菌根性食用きのこ「ヌメリイグチ」を、マツタケで実績のあった広葉樹セドロとオオシマザクラに無菌培養系で感染させました。その結果、ヌメリイグチはセドロには感染しませんでした。オオシマザクラには根に共生器官を形成し、ヌメリイグチ菌糸もオオシマザクラも良く成長しました。本研究から、マツ科針葉樹に特異的に共生すると考えられていた菌根性きのこのなかには広葉樹とも共生し、その成育を活性化する種があることが明らかになりました。

研究の背景

ヌメリイグチは、マツ科針葉樹に特異的に共生する菌根性きのこの代表とされていました(図1)。このような菌根性きのこは、マツの根の表面を被うとともに根組織に侵入した後、「菌根」と呼ばれる共生器官を作って生育し、子実体(きのこ)を発生させます。これまでに、私たちは、マツタケが中南米に分布する広葉樹セドロ(センダン科)と日本の広葉樹のオオシマザクラ(バラ科)に感染できる培養技術を開発しました。この技術により、林地での人工栽培が難しかったマツタケ栽培に、組織培養苗を使った施設園芸的な栽培法の道が拓けたのです。そこで、この無菌培養系を使うことで、マツ科針葉樹のみと共生すると考えられていた他の菌根性きのこも広葉樹で育てられるのではないかと考え、優秀な食用菌であるヌメリイグチを使って同様の実験を行いました。

ヌメリイグチはオオシマザクラと共生する

マツタケの実験で用いた、花崗岩土壌(山砂)に最低限の栄養源を添加した培地に、セドロまたはオオシマザクラの無菌培養苗とヌメリイグチ菌糸を移植し、他の微生物が入らない状態で約4ヶ月間、一緒に培養しました。その結果、ヌメリイグチ菌糸はセドロの根の表面には菌糸の鞘を形成するものの、根の組織には侵入せず、菌糸もセドロも生育しませんでした。しかし、オオシマザクラ

ではセドロの場合と異なり、ヌメリイグチはオオシマザクラの根の組織に侵入し菌糸集落を形成したうえ(図2)、感染したオオシマザクラも大変良く育ちました(図3、表1)。

成果の意義と発展性

セドロ、オオシマザクラとの共生に成功したマツタケの研究からは、培養条件を整えば、マツ科樹種を宿主にする菌根性きのこでも様々な広葉樹の根に侵入し、共生するのではないかと考えられました。しかし、同じくマツ科に共生するきのこであるヌメリイグチでの結果から、広葉樹と共生はするものの、宿主とする樹種を選ぶものもあることが分かりました。

今回用いた組織培養苗を使った施設栽培法を用いれば、無菌条件できのこ菌糸と樹木苗との間に良好な関係を結ばせることができます(栽培条件等詳細は論文でご確認ください)。様々な菌根性きのこ組織培養が容易な樹種との組み合わせを試みることで、野外での樹木への感染や菌根苗の移植が困難な菌根性きのこの、施設園芸的な人工栽培技術開発に役立つと考えられます。

詳しくは、Murata *et al.* (2015) *Mycoscience* 56:606-611 をご覧下さい。



図1 ヌメリイグチの子実体

マツ科針葉樹と菌根共生する代表的なきのこです。柄の基部にマツの根や菌根がついています。また、傘の裏にはマツタケのようなヒダが無く、スポンジ状の無数の穴が開いているのが特徴です。

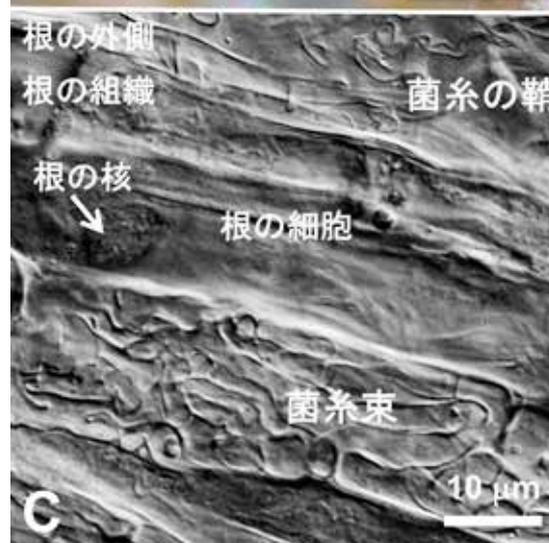
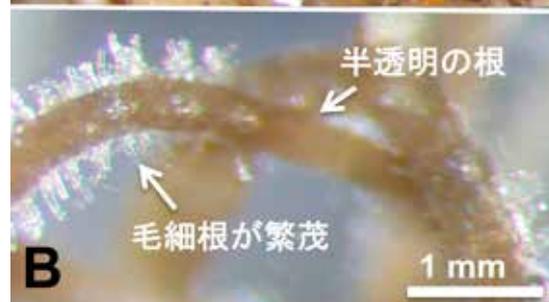
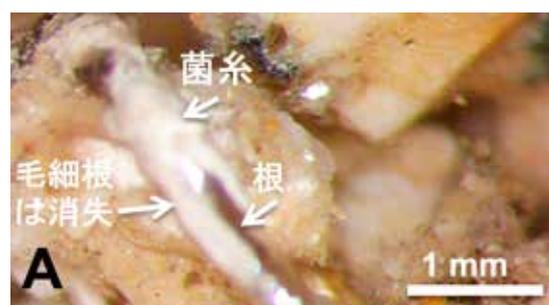


図2 ヌメリイグチーオオシマザクラ感染苗の根

A: 接種個体、B: 非接種個体、C: 接種した根の顕微鏡写真
接種した個体の根の表面は毛細根が消え、菌糸で覆われました。菌糸は根の組織にも侵入します。

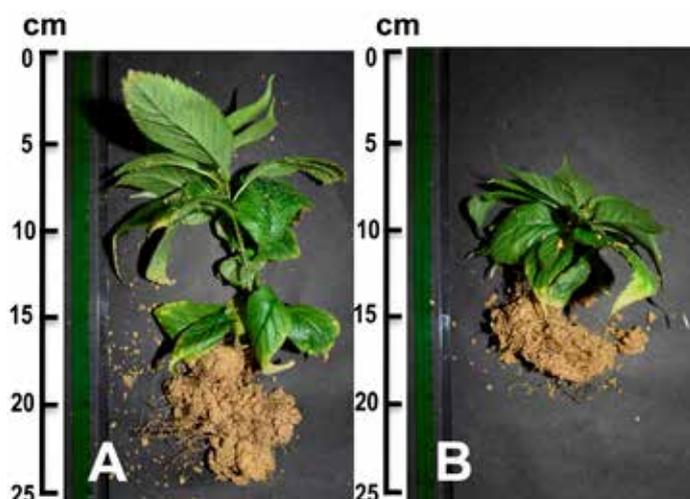


図3 ヌメリイグチを接種したオオシマザクラ (A) と接種しなかったオオシマザクラ (B)

ヌメリイグチを接種したオオシマザクラは大変よく成長しました。

表1 ヌメリイグチ接種によるセドロとオオシマザクラの全培養期間における成長量

| 植物 | ヌメリイグチ | | 有意差 |
|----------------|--------|------|-----|
| | 非接種 | 接種 | |
| セドロ | | | |
| 総乾燥重量(mg) | 73 | 77 | 無 |
| 茎・葉／根の比率 | 2.35 | 1.88 | 無 |
| オオシマザクラ | | | |
| 総乾燥重量(mg) | 591 | 777 | 有 |
| 茎・葉／根の比率 | 4.75 | 3.69 | 有 |

各試験区6個体ずつの平均値と有意差を示します。「茎・葉／根の比率」は総乾燥重量の比率を示し、数字が大きいくほど、茎・葉の量が根の量に対して多くなります。

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

イネの遺伝子を使ってポプラの木質バイオマスの増産に成功

森林バイオ研究センター
産業技術総合研究所

高田 直樹、谷口 亨
坂本 真吾、光田 展隆

要 旨

地球温暖化抑制のため、二酸化炭素など温室効果ガスの削減が緊急の課題となっています。樹木は何十年、何百年と成長するなかで、木質として大量のバイオマスを蓄積します。本研究では、木質生産を制御するイネの遺伝子を利用し、木質バイオマスを増産させる技術を開発しました。さらに、その技術をポプラへ応用することによって、樹木の成長に影響を与えることなく木質の生産性を向上させることに成功しました。本研究で開発した技術によって、将来的には樹木の炭素貯蔵能力の向上と木質由来のバイオマスやバイオエタノールの増産が期待できます。

研究の社会的背景

地球温暖化を抑制するために、温室効果ガスの中長期的な削減が求められており、石油などの化石燃料の代替として、植物由来の燃料や材料の開発が進められています。樹木は温室効果ガスである二酸化炭素を光合成により吸収し、炭素として長期間固定し続けることができます。地球上に存在するバイオマスの中で最も多くを占める木質バイオマスは、長期的な炭素の貯蔵庫として、同時に、食糧と競合しない第二世代のバイオエタノールやバイオマスマテリアルの原料として普及が期待されています。このため、樹木の木質バイオマスの生産性を向上させることは、重要な課題です。

木質バイオマスを増産させる技術

木質の実体は植物が産みだす細胞壁であり、細胞壁の堆積量を増やすことによって木質を増強することができます。モデル植物であるシロイヌナズナ^{*}では、NST1 転写因子^{**}と NST3 転写因子^{**}が木質生産を制御しており、その相同遺伝子であるイネの OsSWN1 転写因子^{**}は木質生産を非常に強く活性化します。そこで、OsSWN1 遺伝子を木質の構成要素である木部繊維^{**}で発現させる遺伝子コンストラクト^{**}を作製し(図 1)、シロイヌナズナに導入しました。その結果、組換えシロイヌナズナでは、木部繊維の細胞壁が厚くなり、さらに通常では木質生産が起きない部位でも木質の蓄積がみられました。これは、木質バイオマスが増産されたことを

意味します。

木質バイオマス増産技術のポプラへの応用

木部繊維は、広葉樹の木材で多くの割合を占める主要な構成要素です。そこで、シロイヌナズナで確立された技術をポプラの木部繊維へ応用し、遺伝子組換えによる木質バイオマスの増産を試みました。作成した組換えポプラを鉢上げして詳細に調べたところ、成長への悪影響は確認されず(図 2)、木部繊維の細胞壁の厚みが増加していました(図 3)。また、茎の平均密度は非組換えポプラと比較して約 4 割向上し、木材強度も約 6 割高くなっていました。

今後の展望

本研究で開発した技術によって、樹木の炭素貯蔵能力の向上や木質バイオマスの増産、強度の高い木材の開発につながります。今後は、木質に含まれるリグニンを改変する技術などを組み合わせることにより、バイオエタノールの原料となる糖の抽出効率の向上を目指します。

本研究は、戦略的創造研究推進事業(先端的低炭素化技術開発:ALCA)「ゼロから創製する新しい木質の開発」による成果です。

詳しくは Sakamoto, S. *et al.* (2015) Scientific Reports, 6:19925 をご覧下さい。

木部繊維で遺伝子発現を誘導する領域

イネ由来の木質生産を促進する転写因子

プロモーター

OsSWN1

図1 木質を増強する遺伝子コンストラクト

木部繊維で遺伝子発現を誘導する領域（プロモーター）にイネ由来の木質生産を促進する転写因子遺伝子（OsSWN1）を連結しました。



図2 非組換えポプラと組換えポプラの生育状況
組換えポプラの3系統は非組換えポプラと同様に成長します。

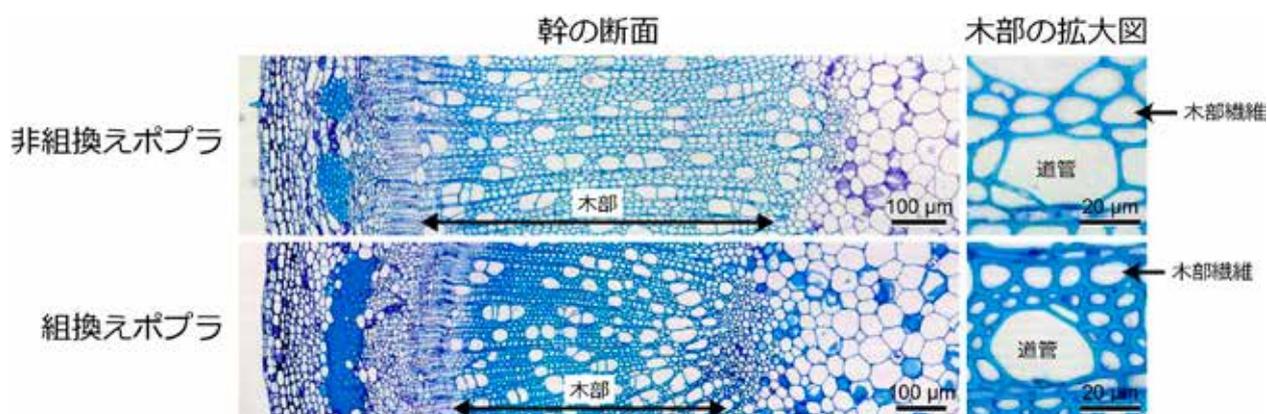


図3 非組換えポプラと組換えポプラの幹の断面
組換えポプラでは非組換えポプラと比較して、木部繊維の細胞壁が厚くなります。

※については、巻末の用語解説をご覧ください。

用語解説

林床被覆率 (P8)

森林内で落葉か下草がどれだけ地面を覆っているかの割合。

土壌侵食量 (P8)

降雨量に応じて移動する細土（直径 2mm 以下の土）の量。

油圧ショベル (P10)

油圧シリンダーにより作動するアームの先端にバケットなどを取り付けて土木作業などを行う自走式機械です。バケットをグラブプルなどに交換して、林業作業にも使用します。

植込み (P10)

ササの繁茂などによって天然更新が不良な天然林において、後継樹を確保するために行う更新補助作業法で、伐採後にできた林冠疎開面などに苗木を植栽します。

伐根植 (P10)

天然林施業における更新補助作業「植込み」の一種で、伐根の周囲に苗木を 4 本～6 本程度植栽する方法です。伐根によってササの繁茂が抑制されるので、通常刈りは行いません。

平角 (P18)

横断面が長方形で、その短辺が 7.5cm 以上の角材のことで、木造住宅の梁や桁に使われることが多い製材品のことです。

ヤング率 (P20)

材料に負荷を与えた時の変形のしにくさ。材料の強度と統計的な相関関係を有しています。

HWP (伐採木材製品) (P22)

国際的な気候変動対策の枠組みでは、各国が、住宅等に使用している木材製品に貯蔵されている炭素を各国の温室効果ガス吸収量として計上できます。木材製品による炭素貯蔵量の増加が地球温暖化防止に効果を持つことが、国際ルールの中で評価されています。

ポリエチレングリコール (PEG) (P28)

エチレングリコールが重合した構造をもつ高分子化合物。無毒とされる安全性の高い薬剤で、化粧品等、様々な製品に用いられる。

熱可塑性 (P28) (P34)

加熱すると柔らかく成型しやすくなり、冷やすと再び固くなる特性で、プラスチック加工に有利な性質。

木質ペレット (P30)

粉碎した木材をペレタイザーとよばれる装置で円柱状に圧縮、成型した固形燃料で、薪やチップに比べて体積当たりのエネルギーが高く輸送効率に優れるほか、扱いやすく、ストーブなどの小型燃焼機器でも自動運転が可能などの特徴があります。

トレファクション (P30)

従来の炭化温度 (600～1,000℃) よりも低い温度 (250～300℃) で、酸素を遮断して行う熱処理のことを指します。元来の意味はコーヒー豆などの「焙煎」です。

外熱式ロータリーキルン (P30)

外熱式ロータリーキルン：円筒を横に倒したような形の加熱装置で、筒の外から熱を加えます。目的により炭化、焼却、ガス化などに使われます。

アントラキノン (P32)

ソーダ法、クラフト法などのパルプ蒸解法において少量添加する触媒。脱リグニンの促進、炭水化物の安定化という効果があり、パルプ蒸解時のアルカリの節減、パルプ収率向上につながる。

混練型 WPC (P34)

木粉と PP などの熱可塑性プラスチックをプラスチックの熔融温度以上で練ることで混合し、プレス成形法、押し出し成形法、射出成形法などで任意の形状に成形した材料です。

波長 (P36)

波の山から山（あるいは谷から谷）までの距離。光は波の性質を持っている。

一般化線形混合モデル (P38)

観測された数値のほか、個体差や場所差などの数値以外の効果を反映されることができると拡張モデル。

流域試験 (P44)

降水量と流出量の差から蒸発散量を推定する方法。河川最上流の数ヘクタールから数平方キロメートルの流域を対象にすることが多い。

宿主 (P52) (P72)

菌類などの寄主または共生の対象となる生物。

エリートツリー (P60)

第一世代精英樹の後代の中から優れたものを選抜した第二世代の精英樹あるいはそれ以降の世代の精英樹の総称。

精英樹 (P60) (P62)

品種改良や優良種苗の生産を目的として、主として人工林から成長等が優れた個体を選抜したもの。スギでは、北海道～九州の国有林と民有林から約 3,700 本が選抜されている。

実生苗 (P60)

種子から育成した苗。

育種価 (P60)

その個体が親として子に樹高や材質などの性能を伝えることが出来る能力（遺伝的能力）で、数値が大きいほど遺伝的な改良効果が大きい。例えば、樹高について、優良個体 A（育種価は +1m）と優良個体 B（育種価は +2m）の交配からできる後代は、遺伝子の半分が後代に伝わることから、個体 A の育種価の 1/2 と B の育種価の 1/2 を合わせた 1.5m が、平均的な個体よりも向上することが期待できる。

特定母樹 (P60)

「森林の間伐等の促進に関する特別措置法」の平成 25 年 5 月の改正により創設された、特に優良な苗木を生産するための種子や穂の採取に適する樹木であって、特に成長が優れたものとして農林水産大臣が指定するもの。

用語解説

塩基配列 (P62)

DNAなどの核酸を構成するヌクレオチドの並び順で、A、T、G、Cの4文字で表される。

DNA マイクロアレイ解析 (P64)

数万種類の遺伝子の部分配列 (DNA 断片) をガラス等の基板上に配置したもの (DNA マイクロアレイ) を使って、各細胞や組織で発現している遺伝子の種類を網羅的に解析する技術のこと。

6-ベンジルアミノプリン (P66)

BAP (6-benzylaminopurine の略) ともいう。植物の成長を調節する作用を持つサイトカイニン系合成植物ホルモンの一種。マツ類では、本来雄花のつく位置に雌花の着生を誘導する効果が報告されている。

簡易な人工交配 (P66)

SMP (Supplementary Mass Pollination の略) ともいう。交配袋などで隔離せずに雌花に花粉を吹きつける人工的な受粉作業。

不定胚形成細胞 (P66)

PEM (Proembryogenic Mass の略) ともいう。不定胚を形成する能力をもつ未分化な培養細胞。

不定胚 (P66)

受精卵と同様な形態的变化の過程を経て植物の体細胞から生ずる一種の胚で、完全な植物体に誘導することが可能である。

菌根 (P72)

植物と菌類との共生体。菌類の菌糸が植物の根の表面や内部に侵入し、根の細胞から栄養分を受け取る。植物は菌根のはたらきで、水、無機養分の吸収能力が高まる。

シロイヌナズナ (P74)

植物の遺伝子研究分野において用いられているモデル植物。

NST1、NST3 転写因子 (P74)

シロイヌナズナの木質生産に関わる遺伝子の働きを制御しているおおもとの調節タンパク質。

OsSWN1 転写因子 (P74)

イネの木質生産を担う遺伝子群の働きを制御している転写因子。NST1、NST3 転写因子とアミノ酸の並び (配列) が類似している相同転写因子。

木部繊維 (P74)

木部組織に見られる細長い細胞で、細胞壁が厚く堆積する。

コンストラクト (P74)

生物で遺伝子を機能させるために、プロモーターと遺伝子、その他遺伝子発現に必要な要素を組み合わせて構築した DNA。

森林総合研究所

平成 28 年版 研究成果選集

| | |
|---------|--|
| 発行日 | 平成 28 年 8 月 |
| 編集・発行 | 国立研究開発法人 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 | http://www.affrc.go.jp |
| 印刷所 | 株式会社 総合印刷新報社 つくば支店 茨城県つくば市松代 2-2-1 電話 029(863)1888 |

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。



平成28年版

研究成果選集

2016

国立研究開発法人 森林総合研究所

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

