

林木育種情報

No.38
2021.11

林木育種の成果の普及と育種技術のさらなる高度化

育種部長 高橋 誠

今年度より第5期中長期計画(令和3～7年度)が始まりました。今中長期計画では、林木育種に関連する分野は、重点課題「多様な森林の造成・保全と持続的資源利用に貢献する林木育種」に一元的に位置づけられました。この重点課題の全体概要については、林木育種情報の前号で紹介させていただきました。今回はその重点課題における林木育種関連の取組について述べさせていただきます。

まず、エリートツリーの開発と特定母樹としての普及についてです。エリートツリーの開発は、平成23年度から本格化し、令和2年度末現在、スギ、ヒノキ、カラマツ、トドマツで合計1,054のエリートツリーが開発されています。林木には世代時間が長い、個体サイズが長大、しばしば近交弱勢を示すなどの生物学的な特徴があるため、遺伝的多様性を維持しつつ有用形質の改良を進める集団選抜育種をベースに改良を進めていきます。形質が優れた育種素材のプールの充実を図ることに留意しつつ、エリートツリーの選抜とそれらを用いた次世代育種集団の作出を進めます。また、特定母樹の普及にあたっては、特定母樹のよさを理解していただくことが、普及促進のために重要と考えています。このため、展示林の造成や初期成長等の有用形質の特性情報の充実を図っていきます。

林木育種では、林業生産性に直接関係する成長や材質の形質に加え、スギ、ヒノキでは花粉発生

源対策と関係する雄花着生性や無花粉形質、アカマツ、クロマツではマツノザイセンチュウ抵抗性等の形質の改良もこれまで進めてきました。これらの形質の改良は社会的にみても依然重要です。前中長期計画期間中には、都道府県と連携して品種開発を進めることにより、多数の無花粉スギ品種やマツノザイセンチュウ抵抗性品種等を開発することができました。今後も、都道府県等と連携しつつ、効果的に品種開発を進めていきます。

今後、成長性と無花粉性などの複数の形質を同時に改良することを必要とする育種ニーズや気候変動適応等の新たなニーズへの対応が必要になっていくと考えられます。育種を効率的に、即応的に進めるためには、ゲノム情報を活用した育種の高速化が有効です。第4期中長期計画期間には、無花粉形質のDNAマーカーの開発による無花粉スギ育種の高速化等の成果を挙げることができました。今後、スギでは高速育種のさらなる高度化のため、またスギ以外の樹種ではゲノム情報を活用した高速育種が可能となるようにするため、ゲノム情報の基盤を整備するとともに、対となる表現型の評価精度を高めるための技術開発にも多面的に取り組んでいきます。

今後も我が国の森林整備に林木育種分野から貢献すべく調査・研究を推進して参りますので、引き続き皆様の御理解と御協力をよろしくお願い申し上げます。

【紙面紹介】

- 次世代の作出に向けた非破壊的測定法による
スギ材質の選抜効率の検証……………2
- カラマツ採穂木仕立ての取組……………3
- 「ガールスカウト・丸和早生樹の森」植樹祭
～国民参加の早生樹の森林づくり～……………4
- キハダ広域産地試験地……………5

- ケニア JICA プロジェクト育種コンポーネントの成果……………6
- (続)隣り合う細胞が辿る異なる運命
～木部繊維は細胞壁の堆積量を感じする～……………7
- 林業研究・技術開発推進ブロック会議育種分科会と
特定母樹等普及促進会議を開催……………8
- 【プレスリリース】世界初 スギのゲノム編集技術を開発
～針葉樹の品種改良の期間を大幅に短縮する新技術として期待～……………8



国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所林木育種センター

Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute

次世代の作出に向けた非破壊的測定法による スギ材質の選抜効率の検証

1. はじめに

材質は、重要な育種対象形質です。スギでは、建築材の剛性の指標となるヤング率等を対象に改良を進めてきました。また、地球温暖化対策の必要性が高まる中、政府は2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを昨年宣言しました。このため、今後カーボンニュートラルを達成するために森林の吸収源としての役割が重要であり、森林による二酸化炭素の吸収・固定能力の最大化を図るため、成長量と並んで、材質形質の一つである容積密度が重要となります。

今回、今後の効率的な材質の推進にかかる成果が得られましたので、その概要をご報告します。

2. スギ第一世代精英樹の材質のクローン値と育種価との比較

ヤング率や容積密度等の材質を評価する方法は様々ありますが、林木育種における材質の評価に当たっては、これまで、測定労力の軽減等が図れる非破壊的測定法としてヤング率ではFAKOPPによる応力波伝播速度の測定、容積密度ではPilodynによるピロディン陥入量の測定を用いてきました(写真)。

これまでのスギ第一世代精英樹クローンを利用した研究において、応力波伝播速度とピロディン陥入量は、それぞれヤング率と容積密度との相関が高く、またこれらの形質は遺伝的要因に支配されていることが明らかにされています。一方で、スギ第一世代精英樹クローン間で人工交配を行うために親を選択する際に、クローン系統内の複数個体の平均値(以下、クローン値と記す)を親の遺伝的能力の評価値(育種価)と同義に使用できるか、その詳細は不明でした。

そこで、林木育種センター場内に植栽された18年生のスギ第一世代精英樹人工交配家系45家系549個体を対象に、応力波伝播速度とピロディン陥入量を測定し、得られた値から親系統の育種価を推定しました(育種価の推定法はBLUP法を用いました：林木育種情報No.2、p.14を参照)。次いで、親系統の育種価と、既往研究¹⁾において得られている親系統クローンのクローン値の相関性を検証しました。

その結果、人工交配家系から予測された親の



写真 (左)応力波伝播速度の測定、(右)ピロディン陥入量の測定

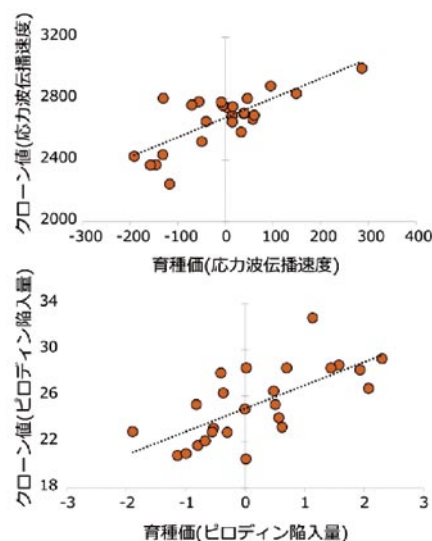


図 クローン値と育種価の相関関係

(上)応力波伝播速度、(下)ピロディン陥入量。系統数=25

下記のYasuda et al. (2021) Annals of Forest Science 78 (2) : 50に掲載した図を一部改変して引用。

育種価と親系統のクローン値との間に有意な正の相関関係が認められました(図、相関係数は応力波伝播速度とピロディン陥入量それぞれ0.75、0.69)。これにより、クローン値に基づいて交配親を選択することの有効性を確認できました。材質形質の後代検定には少なくとも20年以上の年月が必要となりますが、今回ご紹介した結果は後代検定を実施する前に、改良を進められることを意味し、既存の育種集団の材質形質評価情報から新たな世代作出の交配に供試する優れた親を選択することが可能になると考えています。本研究の詳細については、Yasuda et al. (2021) Annals of Forest Science 78 (2) : 50を参照願います。

既往研究¹⁾：三嶋ら(2011)．木材学会誌57 (5) : 256-264.

(育種部 育種第一課 安田 悠子)

カラマツ採穂木仕立ての取組

1. はじめに

林木育種センターでは、現在エリートツリー(第二世代精英樹)の選抜を進めており、カラマツでは令和2年度末現在109系統が開発されています。これらのエリートツリーは今後の種苗生産やさらなる品種改良のための育種素材であり、これらのためのつぎ木によるクローン増殖に必要な穂木を安定的に供給することが重要です。このため、長野増殖保存園ではカラマツ採穂木の樹形誘導方法の検討を行いつつ、採穂園の整備を進めています。

今回の樹形誘導では、初回の断幹とともに剪定を行いました。断幹位置の高さは1.2mとし、剪定は幹から20cm程度の枝の基部を残しました。また、翌年以降は新たに伸長した枝の付け根付近の2～3芽を残して剪定することとしました。今回は、これらの樹形誘導試験結果の概要を紹介します。

2. 断幹及び剪定後の状況

断幹・剪定は成長休止期の2～3月に実施し、その年の7～8月に芽吹き状況を撮影しました(写真1・2・3)。これらは同一の個体を同じ位置から撮影したものです。各写真の説明に記した樹高と根元径(写真3のみ胸高直径)は断幹・剪定前の値です。



1年目



3年目

写真1 つぎ木4年後(植付3年後)に実施した例
(樹高3.1m、根元径3.1cm)

写真1のつぎ木4年後の個体は、実施当年から幹の上から下までバランスよく新芽が伸びました。3年目になると枝数も増え、より多くの採穂ができる樹形となっています。

一方、写真2のつぎ木3年後に実施した個体では、断幹部付近では新芽の伸びが確認できませんが、中段の枝では、一つの芽のみがよく伸びた状況で、下段では伸びが十分ではありませんでした。2年目も、上段の芽は伸び枝数も増えていましたが、中下段では上段ほど伸びがない状態でした。

次に、写真3のつぎ木6年後の個体ですが、



1年目



2年目

写真2 つぎ木3年後(植付1年後)に実施した例
(樹高2.3m、根元径2.5cm)


断幹・剪定直前



1年目

写真3 つぎ木6年後(植付4年後)に実施した例
(樹高4.3m、胸高直径3.2cm)

幹からの枝の発生は上部に移り、断幹部付近以下の枝は少なく、地際に近い部分では下方に垂れ下がった枝となりました。また、剪定して幹に残す枝は年数が経ったものになるため、その後の成育が懸念されましたが、実施後には幹及び剪定枝に新芽の伸びが確認できました。

3. まとめ

断幹とともに剪定を行う効率的な作業に加え、実施1年目からバランスのとれた樹形に整え、穂木を早期に、また、安定的に供給できる時期を探った結果、樹体がある程度成育してから断幹・剪定を実施することが望ましいと考えられました。また、つぎ木6年後の個体サイズについても、樹形誘導は可能であると考えられました。今後の成育状況や採穂量の推移等、まだ課題もありますが、引き続き観察を継続していく予定です。まだ一部ではありますが、採穂量は、枝先端から長さ4cm部の径が2～3mmのものとした場合、つぎ木5年後に断幹・剪定を実施した個体で、1年後に採穂できた荒穂数は平均で約20本(7～38本、n=5)でした。
(育種部 原種課 長野増殖保存園 藤原 優理)

「ガールスカウト・丸和早生樹の森」植樹祭

～国民参加の早生樹の森林づくり～

1. 早生樹の森

林木育種センターでは、林野庁関東森林管理局千葉森林管理事務所が推進している「協定締結による国民参加の森林づくり」に協力して、ガールスカウト千葉市協議会及び有限会社丸和建材社と共同で、「ガールスカウト・丸和早生樹の森」(以下、早生樹の森)を造成し、早生樹の育成試験を開始しました。試験を開始するにあたり、関係者による植樹祭を開催しました。

早生樹の森の造成地は、千葉県君津市の戸崎国有林で、周囲には他の国民参加の森林も造成されています。早生樹の森には、成長の早い樹種の中から、中国原産の針葉樹「コウヨウザン」、ケヤキの代替材として家具等にも用いられる「センダン」、北米原産で街路樹としても多く植栽される「ユリノキ」、漢方薬として古くから利用されてきた「キハダ」、中国原産で赤みを帯びた材が特徴の「チャンチン」の5樹種を植栽しました。

2. 植樹祭

植樹祭は5月22日に開催しました。丸和建材社の皆さんが植栽場所に苗木を配り終えたところに、ガールスカウトの子供たちも合流しました。最初に林木育種センターから、植える樹種や植え付け方法について説明した後、実際の植栽に取り掛かりました。丸和建材社ではこれまでも多くの植樹を行ってきたというだけあって、慣れた手つきでどんどん植栽していきました。ガールスカウトの子供たちもしっかりと根付くように丁寧に植栽していました。

早生樹の森は、単なる植栽試験ではなく、森づくりの過程を通して森林とふれあい、その利用について学び考え、環境に対する理解を深める環境教育も目的としています。今後は成長調査や管理作業を行うなかで、子供たちにも早生樹を植える意義などを学んでもらいたいと考えています。

(遺伝資源部 保存評価課 磯田 圭哉)



ガールスカウトの子供たちも頑張って植えました



丸和建材社の屈強な男性陣による植栽



早生樹の森の植樹祭に参加したガールスカウト千葉市協議会、有限会社丸和建材社、千葉森林管理事務所等のみなさん

キハダ広域産地試験地

1. キハダとは

キハダはミカン科の落葉高木で、国内では北海道から九州までの山林内に自生し、朝鮮半島、中国の北部及び東北部、ロシア連邦アムール州にも分布します。樹木としてはあまり有名ではありませんが、漢方薬であるオウバクの原料といえどご存知ではないでしょうか。オウバクはキハダの内樹皮で、鮮やかな黄色をしています(写真)。主要な薬効成分はベルベリンというアルカロイドで、健胃剤、整腸剤として古くから利用されてきました。

現在、日本で消費されている漢方薬の原料の約8割を中国からの輸入に依存しており、オウバクではその割合は98%に及びます。日本国内での漢方薬製剤の消費量は増加傾向にありますが、中国においても経済発展にともない需要が増加しています。特にキハダは乱獲が原因となって個体数が減った結果、中国国内では絶滅危惧種に指定されていて、将来的には中国からの輸入が制限されることが懸念されます。

そこで林木育種センターでは、国産キハダの造林需要に備えるため、遺伝資源の収集保存、国内の遺伝的多様性の調査、産地試験地の造成などによる基礎データの蓄積を進めています。

2. キハダ広域産地試験地の設定

キハダは寒冷な北海道から温暖な九州までの広い範囲に分布しているため、地域ごとの気候等に適応して遺伝的に分化していると予想されます。そこで、キハダの分布域をできるだけ網羅するように、林木育種センターと全国の育種場の管内に生育する個体から種子を収集し、育てた苗木を全国5ヶ所の試験地に植栽しました(図)。例えば九州産のキハダは、北海道の試験地では寒さに耐えられず、枯死するかもしれませんが、逆に北海道産のキハダは、成長が遅いために、九州の試験地では雑草との競争で枯死するかもしれません。このような産地ごとの特徴から、キハダの環境適応性が明らかになるこ

とが期待されます。

3. 今後の課題

実際にキハダを植栽してみると、新たな課題が見えてきました。例えば、今着目しているのは病虫害の蔓延です。もともとキハダは山林内に比較的まばらに自生します。個体数が少なく「疎」な状況では病虫害が発生しても隣の個体へと移る頻度が低く、大きな問題にはなりにくい傾向があります。一方、今回造成した試験地のようにキハダが「密」な状況では、発生した病虫害がすぐさま近くの個体へと移れるので、被害が全体に拡大しやすいようです。そこで今後は、病虫害防除についても検討していきます。



写真 キハダの内樹皮



図 キハダ広域産地試験地

(遺伝資源部 探索収集課 稲永 路子)

ケニア JICA プロジェクト育種コンポーネントの成果

1. はじめに

ケニアは、アフリカ東部に位置する国で、国土の約8割が乾燥地・半乾燥地であり、森林面積は国土の約6% (FAO世界森林資源評価(FRA) 2020)に過ぎず、薪炭材の利用や農地転用により森林荒廃が進んでいます。更に、ケニアは乾燥地・半乾燥地が多いため地球温暖化の影響を受けやすいと考えられています。このため、ケニア政府は森林率を2030年までに10%にする目標を掲げ、公共・私有地などでの植林を進め、併せて住民生活向上を目指しています。

林木育種センターでは、2017年から2021年まで「ケニア国持続的森林管理のための能力開発プロジェクト」の育種コンポーネントを受託し、住民による植林に用いる郷土樹種を対象とした耐乾燥性育種に受入担当機関のケニア森林研究所(KEFRI)とともに取り組みましたので、その結果を紹介します。

2. プロジェクトの成果

(1) メリアの優良母樹・個体の選定

主に建材や家具材として利用されるメリアを対象に、前プロジェクトで造成した2つの採種園と8つの次代検定林から樹高や胸高直径などのデータを取得して成長量等を分析し、メリアのプラス木の特性表を作成しました。これにより



メリア検定林
(マリマンティ)

民間レベルの植林を進めるための採種園の設定や、育種集団の次世代化における母樹の選定などへの貢献が期待できます。また、このデータを基に劣勢クローンなどの間伐による採種園の改良(1.5世代化)を行うことをKEFRIに提案しました。この間伐が実施されると、材積で17%の改良効果が得られると評価され、住民等に供給される種子の価値向上が期待されます。

更に、メリア検定林4年目の測定結果の分析

により、優良なメリア第2世代の個体選抜を実施しました。この選抜により14%の材積の改良効果が見込まれると評価され、第2世代の採種園の造成に向け前進しました。なお、この成果は、当初計画に含まれておらず、成長及び開花が早いメリアの特性により可能となりました。

(2) アカシアの優良木の選定

家畜の飼料や薪炭材として利用されるアカシアを対象に、前プロジェクトで造成したアカシアの2つの採種林から樹高や胸高直径などのデータを取得して成長量等を分析しました。アカシアは、つぎ木などのクローン増殖の技術開発ができていないことから、プラス木候補木からの実生により採種林を造成し、間伐を繰り返し優良木の選定を行う方法を取っています。

現在のところ、個体間の成長差が明確に出ていないことや開花に至っていないことから、第1回目の間伐は定量的(対角線状、50%)に実施しました。この間伐により樹間が広がり開花が促進されることから、構成個体の着果等の特性に基づいた定性的な間伐を次回以降に期待しています。また、KEFRIが間伐後のアカシアの材質調査を積極的に行っており、この結果も優良木選抜に活かされることが期待されます。



アカシア採種林の間伐
(キツイ)

3. おわりに

上記のほか、さし木などの増殖技術開発の取組を更に継続していく必要があり、増殖技術の技術移転を行いました。また、メリアの人工交配試験の取組を通して人工交配技術の技術移転を行いました。全体として、プロジェクト目的であるKEFRIにおける耐乾燥性林木育種のための能力の改善が図られました。

(指導普及・海外協力部 海外協力課 高濱 美樹)

(続) 隣り合う細胞が辿る異なる運命 ～木部繊維は細胞壁の堆積量を感知する～

1. 一つ一つの木部繊維で異なる遺伝子セット が機能し細胞壁(二次壁)が堆積する

木材は大量の細胞が幾重にも積層した超集合体です。木材を構成する細胞は広葉樹と針葉樹では異なっており、広葉樹では木部繊維、道管要素、軸方向柔細胞、仮道管、放射柔細胞などがあります。このうち木部繊維は特に厚い細胞壁を持っており、樹木に物理的な強度を付与しています。2019年の記事(林木育種情報 No.32, p7)で、二次壁形成のキー遺伝子である *NST/SND* 転写因子遺伝子(ポプラには4遺伝子保存されている)を完全に失ったポプラ4重変異体について紹介しました。この変異体では約99%の木部繊維で二次壁が失われ、自立することができず地面を這うように成長します。このように4重変異体は非常に極端な形質を持ちます。私達は、野生型(4つの *NST/SND* 遺伝子が機能している個体)と4重変異体の中間的な形質を示す3重変異体を新たに作製し、その木部組織構造を詳細に観察しました。その結果、3重変異体では約10%の木部繊維で二次壁が失われ、残りの約90%の細胞では二次壁の形成が維持されました。しかし、二次壁を形成した木部繊維でも細胞壁の厚さは約32%薄くなっていました。これらの結果は、(1)一つ一つの木部繊維では機能する *NST/SND* 転写因子が異なること、(2)4つの *NST/SND* 遺伝子が協調的に機能することで二次壁の厚さが厚くなること、を示唆しています。木材を顕微鏡で観察すると、個々の木部繊維は非常に類似した構造をしています。一方で、今回の結果は一つ一つの木部繊維が異なる遺伝子セットを使い二次壁の性質を細かく調整していることを示唆しています。

2. 木部繊維は細胞壁の堆積量を感知する

上記で紹介した3重変異体と4重変異体は「二次壁を持つ木部繊維と持たない木部繊維が組織内に混在する」点で、自然界の樹木とは全

く異なる特徴を有しています。このような特徴的な性質を持つ樹木をうまく活かすことにより、これまで当然のこととわれてきた既知の知見に新たな視点を提供することができます。

今回、私達が注目したのは樹木が幹の傾斜に応答して樹形を維持するために形成する「あて材」です。あて材は針葉樹と広葉樹では特徴が異なっており、広葉樹が形成するあて材(引張りあて材)では二次壁の内側にG層というセルロースに富んだ細胞壁を形成することが知られています。不思議なことに、G層は必ず二次壁の内側に形成されます。そこで、私達は3重変異体と4重変異体を傾けて育て、G層形成の有無を観察しました。その結果、3重変異体でも4重変異体でも、二次壁を持たない木部繊維はG層を形成せず、二次壁を持つ木部繊維はG層を形成することを発見しました(図)。この結果は、G層の形成開始には二次壁の堆積が必要であること、つまり一つ一つの木部繊維は二次壁が堆積したことを感知してG層の形成を行っていることを示唆しています。これにより、これまでの研究で報告されてきた「二次壁+G層」という知見に、「個々の木部繊維は二次壁の堆積量を感知してG層の形成が開始する」という新たな視点を提供することができました。本成果の詳細は、Takata, Tsuyama, *et al.* (2021) *Plant Journal*, 108, 725-736. をご参照ください。

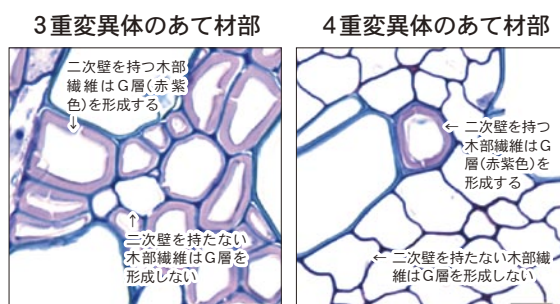


図 3重変異体と4重変異体でのあて材形成

Scale = 10 μ m

(森林バイオ研究センター 高田 直樹)

林業研究・技術開発推進ブロック会議育種分科会と特定母樹等普及促進会議を開催

9月から10月にかけて、林業研究・技術開発推進ブロック会議育種分科会を、林野庁と(国研)森林研究・整備機構の共催により開催しました。この会議は、林野庁、林木育種センター、都道府県等の連携による林木育種の推進を目的として毎年、北海道、東北、関東・中部、近畿・中国・四国、九州の5ブロックで開催しています。今年度も新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から、オンライン開催の方法で行いました。

林木育種センターからは、優良品種の開発・普及の状況等に加え、昨年度公表した「用土を用いない空中さし木法によるスギさし木コンテナ苗生産マニュアル」、「コウヨウザンの特性と増殖マニュアル」を作成したこと等について説明しました。

また、北海道、東北、近畿・中国・四国ブロックについては、この会議と併せて特定母樹等普及促進会議を開催し、特定母樹の普及等について議論を行いました。

このほか、関西育種場ではオンライン会議ではありますが林木育種技術講習会を開催し、ヒノキミニチュア採種園の管理方法として、断幹・剪定について説明しました。特に、今回の講習会では、会議資料の説明だけでなく、実際に関西育種場内のヒノキ採種園にある採種木を使い、スマートフォンで動画を撮影しながら(写真)、その映像をオンライン会議の参加者にリアルタイムでお見せするという方法で行いました。どうしても会議資料だけでは伝えきれない、実際の採種木を使った剪定方法を見せることにより理解を深めることができましたようです。

なお、関東地区特定母樹等普及促進会議は7月にオンラインで開催し、主にスギ特定母樹等の選抜状況や改良効果について説明し、林野庁、都県等の関係機関、民間事業者が参加し、意見交換を行いました。

表紙タイトル写真

福島県林業研究センター、福島森林管理署、福島県農林種苗農業協同組合と林木育種センターが共同で設定したスギエリートツリーの共同植栽試験地。現在、7年生。成長は良好で、植栽2年後にエリートツリー由来の実生苗の平均樹高は約2mに到達しました。



写真 スマートフォンを使った動画配信の様子

【プレスリリース】

世界初 スギのゲノム編集技術を開発
— 針葉樹の品種改良の期間を大幅に短縮する新技術として期待 —

令和3年8月31日、森林バイオ研究センターでプレスリリースを行い、日本経済新聞や日本農業新聞ほか業界紙などでも取り上げられました。

林木の品種改良には交配と優良系統の選抜からなる地道な作業が必要で、世代の更新(次世代化)に10年単位の時間を要します。一方、DNA切断酵素を利用して、狙った遺伝子領域だけを特異的に改変する「ゲノム編集技術」は、育種期間を大幅に短縮する新技術として注目されてきましたが、針葉樹での利用はこれまでに報告されていませんでした。森林総合研究所森林バイオ研究センターは、森林総合研究所、農研機構、横浜市立大学と共同で、CRISPR/Cas9システムをスギに最適化することで、世界で初めて針葉樹のゲノム編集に成功しました。

本研究成果は、国際科学雑誌『Scientific Reports』オンライン版(8月10日付)に掲載されました。

プレスリリースの詳細は、当センターホームページからご覧いただけます。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/research/documents/sugigenomu.pdf>

(企画部 育種企画課 橋本 光司)

林木育種情報 No.38

令和3年11月30日発行

国立研究開発法人 森林研究・整備機構

森林総合研究所林木育種センター

〒319-1301 茨城県日立市十王町伊師 3809-1

TEL: 0294-39-7000(代)

FAX: 0294-39-7306

ホームページ <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/index.html>