

林木育種情報

No.21
2016.3

林業の成長産業化に向けて

審議役 安樂 勝彦

今、林業は保育・間伐主体で施業を進めることを念頭においた政策体系から主伐・再造林の政策体系に円滑な移行を図りつつあります。主伐・再造林を本格展開し、林業の成長産業化を達成するために不可欠なものとして、林業の低コスト化が課題になっています。

林業の低コスト化の具体的な取組の一つが伐採から植栽までの工程を連続して行う一貫作業システムの採用です。コンテナ苗を使うことで植栽効率が大きく向上することはもとより、活着についても厳冬期、盛夏を除けば比較的良好であり、植栽時期の自由度が高くなりました。また、低密度植栽、下刈の省力化も加わり造林・保育経費の低減に繋がっています。

コンテナ苗でもうひとつ、とても大事なことがあります。コンテナ苗にどのような苗木を使うかということです。コンテナ苗のメリットを植栽から植栽後の短期間活かしきった後、次に露呈してくるのは苗木そのものがもつ資質です。資質とは、例えば下刈の保育期を過ぎた後の成長速度や材の剛性などの形質であったり、気象害や病虫害への耐性、更には花粉発生量が少ないことなどです。

林木育種センターではこれまで多くの品種等を開発してきました。初期成長に特に優れた造林コストを抑制するエリートツリーがスギ290系統、ヒノキ176系統、カラマツ60系統の合計526系統(平成26年度末)。花粉症対策、都市近郊の森林づくりに適している成長に優れた少花粉スギが140品種、ヒノキが55品種、低花粉スギが6品種、無花粉スギが2品種。マツノザイセンチュウに強く大切な海岸林や里山の整備に適したマツノザイセンチュウ抵抗性アカマツ225品種、クロマツ171品種。雪による根元曲がり著しく少ない雪害抵抗性スギが46品種。剛性が特に優れた材質優良スギ41品種。CO₂の吸収・固定能力が高く、地球温暖化防止に更なる貢献をする幹重量の大きいスギ69品種、ヒノキ23品種、カラマツ19品種、トドマツ11品種。材のねじれが小さく、加工しやすく、狂いの少ない材質優良カラマツ229品種などです(品種数平成27年度末)。また、農林水産大臣が指定する特定母樹にグイマツ1、スギ102、ヒノキ16、カラマツ15の合計134が林木育種センターから申請し、選ばれました(平成26年度末)。これらの品種等が林業の成長産業化を達成するために全国で活用されることを期待しています。

【紙面紹介】

平成27年度に開発した新品種 2～3
 林木遺伝資源の「見える化」について 4
 小さな発見から役立つ成果
 ～ *Acacia tortilis* の発芽促進手法～ 5

ゲノム編集技術：林木育種への利用にむけた
 技術開発(2) 6
 遺伝子発現レベルからみたスギの環境適応 7
 平成27年度林木育種成果発表会の開催 8



平成 27 年度に開発した新品種

はじめに

森林総合研究所林木育種センター(以下、林木育種センター)では「森林・林業・木材産業分野の研究・技術戦略」を踏まえ、平成23年度から27年度までの5カ年間の中期計画により、①初期成長や材質に優れた品種等の林業再生に資するための品種、②花粉症対策品種やマツノザイセンチュウ抵抗性品種等の国土・環境保全に資するための品種を対象にして、新品種を開発を進めています。

平成27年度は、花粉症対策品種や第二世代の初期成長に優れた品種等、合計61品種を開発しました。ここでは、その主な概要を紹介します。

1. 花粉症対策品種

日本人の約3割がスギ・ヒノキ花粉症の症状があるという統計があります。花粉の発生源対策を推進するため、林野庁では平成29年度までに花粉症対策スギの山行き苗木を一千万本にするという目標を掲げて施策を推進しています。こういった施策にもみられるように、花粉症対策の重要性は高まりをみせています。林木育種センターでは、平成26年度までに花粉症対策品種として、成長等が優れている精英樹の中から少花粉スギ137品種、少花粉ヒノキ55品種と、またこの他に無花粉スギ2品種を開発し、採種園、採穂園に導入するための原種を都府県に配布してきましたが、今年度は、都府県がこれまでに蓄積してきたデータも含めて、花粉症対策品種としての品種開発の可能性について検討しました。今回の検討では、1)少花粉品種だけではなく、低花粉品種も含めて検討したこと、2)すでに採種園、採穂園に導入されており、早期の普及が見込まれるものを主な対象としたことが特徴です。このような検討と優良品種・技術評価委員会での審査を経て、少花粉スギ3品種、低花粉スギ6品種、合計9品種の花粉症対策品種を新たに開発しました(表1、2)。

2. 初期成長に優れたスギ品種(第二世代)

森林・林業の再生に向けた林業の成長産業化が大きな課題となっています。林木育種センターでは、下刈りコスト低減に寄与する品種として、これ

まで第1世代精英樹の中から59品種の初期成長に優れた品種を開発してきました。平成23年度から第2世代精英樹であるエリートツリーの開発を推進していますが、これまで開発されたエリートツリーを選抜母集団として、ひときわ初期成長特性の優れた第二世代の品種12品種を今年度新たに開発しました(表3)。

これまでの品種開発では、候補系統の後代の実生苗、あるいはさし木により増殖したクローン苗の成長を調査することにより選抜してきましたが(後代検定(後方選抜))、今回の品種開発では、実生による評価においては、より早期に系統評価を行うために、候補系統自身の成長やその親や兄弟などの特性を総合的に評価することにより選抜する前方選抜という手法を導入しました。

3. マツノザイセンチュウ抵抗性品種

アカマツ、クロマツは里山や海岸部の環境の保全等の役割を担い、またわが国の景観を特徴付ける重要な樹種ですが、マツ材線虫病による長年にわたる甚大な被害により大面積のマツ林が失われてきました。この被害を軽減するため、マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業を推進していますが、今年度は新たにアカマツで4品種、クロマツで17品種を開発しました(表4)。これらの内、九州育種基本区で開発された11品種は、第2世代の抵抗性クロマツ品種です。第1世代と今年度開発した第2世代の抵抗性クロマツで、その特性を比較するために、病原性の強い複数地域の線虫を混合して接種したところ、生存率はいずれも90%前後であったのに対し、健全率(線虫の人工接種後、病徴が表れない健全な苗の割合)については、第1世代に比べ、第2世代では約40%改善し、67.4%と大幅に改良されていました。今後、第2世代の抵抗性マツが普及することにより、より枯れにくい、つよいマツ林造成に貢献することが期待されます。

この他に、材質優良トドマツを10品種、幹重量(二酸化炭素吸収・固定能力)の大きいカラマツを9品種開発しています。(表5、6)

表1 少花粉スギ品種

育種基本区	番号	選抜地	品種名
東北	1	宮城県	ケ加美1号
	2	宮城県	ケ遠田2号
九州	1	大分県	県日出3号

表2 低花粉スギ品種

育種基本区	番号	選抜地	品種名
関西	1	石川県	河北1号
	2	石川県	鳳至2号
	3	石川県	鳳至6号
	4	愛媛県	周桑9号
	5	愛媛県	上浮穴1号
九州	1	宮崎県	県東臼杵15号

表3 初期成長に優れた第二世代品種

育種基本区	番号	品種名
関東	1	(F)スギ 林育2-70
	2	(F)スギ 林育2-71
	3	(F)スギ 林育2-76
九州	1	スギ九育2-136
	2	スギ九育2-137
	3	スギ九育2-139
	4	スギ九育2-142
	5	スギ九育2-147
	6	スギ九育2-162
	7	スギ九育2-165
	8	スギ九育2-167
	9	スギ九育2-177

(注) 品種名に(F)の付いているものは前方選抜で開発された品種

表4 マツノザイセンチュウ抵抗性品種

育種基本区	番号	選抜地	品種名
東北	1	岩手県	岩手(東山)アカマツ1号
	2	岩手県	岩手(東山)アカマツ12号
	3	岩手県	岩手(滝沢)アカマツ2号
	4	新潟県	新潟(上越)アカマツ23号
	5	山形県	山形(遊佐)クロマツ155号
	6	新潟県	新潟(村上)クロマツ3号
関西	1	石川県	石川(輪島)クロマツ240号
	2	石川県	石川(輪島)クロマツ246号
	3	島根県	島根(江津)クロマツ25号

九州	1	熊本県	熊本(水俣)クロマツ5号
	2	熊本県	熊本(合志)クロマツ8号
	3	熊本県	熊本(合志)クロマツ9号
	4	熊本県	熊本(合志)クロマツ10号
	5	熊本県	熊本(合志)クロマツ11号
	6	熊本県	熊本(合志)クロマツ12号
	7	熊本県	熊本(合志)クロマツ13号
	8	熊本県	熊本(合志)クロマツ14号
	9	熊本県	熊本(合志)クロマツ15号
	10	熊本県	熊本(合志)クロマツ16号
	11	熊本県	熊本(合志)クロマツ17号
	12	熊本県	熊本(合志)クロマツ18号

(注) 九州育種基本区の番号2~12については第2世代品種

表5 材質優良トドマツ品種

育種基本区	番号	選抜地	品種名
北海道	1	北海道	留辺薬106号
	2	北海道	新得112号
	3	北海道	足寄107号
	4	北海道	陸別107号
	5	北海道	陸別109号
	6	北海道	陸別124号
	7	北海道	陸別125号
	8	北海道	白糠103号
	9	北海道	白糠125号
	10	北海道	弟子屈3号

表6 幹重量(二酸化炭素吸収・固定能力)の大きいカラマツ品種

育種基本区	番号	選抜地	品種名
北海道	1	北海道	網走1号(支)
	2	北海道	空知4号(支)
	3	北海道	日高8号(支)
東北	1	北海道	日高5号(支)
	2	北海道	後志33号(支)
	3	岩手県	工盛岡2号
	4	岩手県	工遠野2号
	5	宮城県	工中新田3号
	6	長野県	岩村田9号

(注) 育種基本区は検定をした地域、選抜地は精英樹を選抜した地域を記載している。

(育種部 育種第一課 高橋 誠)

林木遺伝資源の「見える化」について

1. 林木ジーンバンク事業

林木ジーンバンク事業は、1985年から「育種素材の供給源の確保」、「絶滅に瀕している種の確保」等を目的に、遺伝資源としての林木を収集・保存する事業で、種子や花粉による保存のほか、約2万6千系統の樹木そのものを増殖して保存園などで保存（成体保存と言う）しています。将来にわたって有用で貴重な林木遺伝資源を保存し、新品種の開発や科学技術の発展に寄与する研究材料として利用されるためには、遺伝資源が戦略的に収集・保存されていることが求められます。このため、これまでに成体保存されている遺伝資源と対象種の分布域との比較を行い、成体保存の少ない地域をGIS技術により地図上で可視化し、今後、収集・保存に重点を置く必要のある地域の「見える化」に取り組んでいます。今回は、日本の主要な広葉樹であるブナとケヤキの事例を紹介します。

2. ブナ、ケヤキの収集・保存状況

ブナとケヤキの分布域は、環境省が実施した植生調査データと巨樹巨木データから作成しました。両種の分布域と成体保存されている系統の収集地点とを重ね合わせた結果、ケヤキは分布域を網羅するように成体保存されているのに対し、ブナは北海道・東北に偏っていることがわかりました（図）。今後のブナの成体保存は、南東北から長野県・岐阜県の北部にかけての地域や温暖化の影響により消滅が危惧されている西南日本の小集団から行うことが重要です。

林木遺伝資源の「見える化」は、効果的な収集・保存計画の策定に活用できるだけでなく、一般に広く公開することで、利用者が試験研究に用いる遺伝資源の来歴を地図上で具体的にイメージできるようになり、利便性の向上にも寄与するものと考えています。

（遺伝資源部 探索収集課 山田 浩雄）

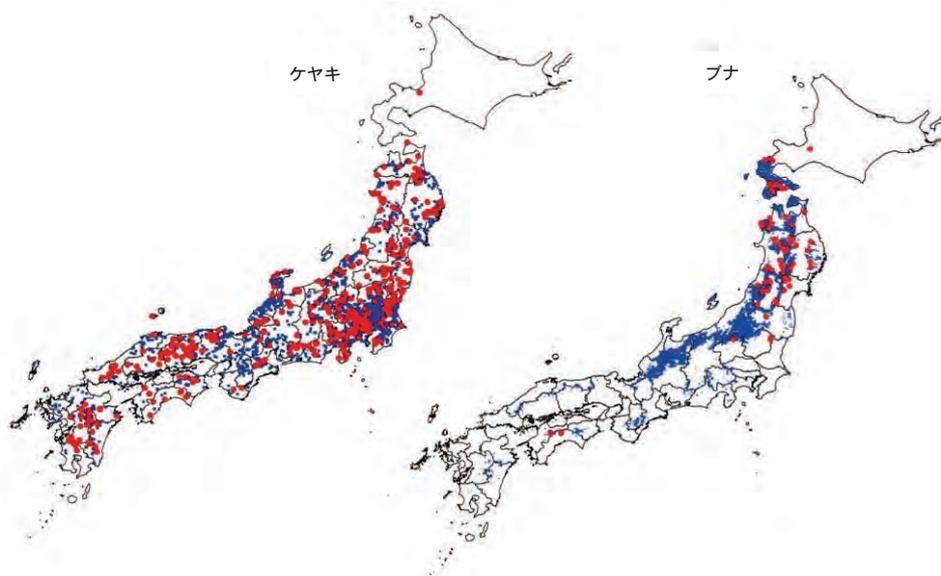


図 ケヤキ（左）およびブナ（右）の分布域（青）と成体保存されている系統の収集・保存地点（赤）

ケヤキは分布域を網羅するように収集、増殖して保存されているのに対し、ブナは北海道・東北に偏っています。

小さな発見から役立つ成果 ～*Acacia tortilis*の発芽促進手法～

1. *Acacia tortilis*とは

Acacia tortilis はアフリカから中東にかけて分布するアカシア属の樹木で、薪炭材や家畜の飼料等として幅広く活用できる樹種です。乾燥地域でも生育できることなどから、その植林への関心が高まっており、林木育種センターが支援する「ケニア国気候変動への適応のための乾燥地耐性育種プロジェクト」(JICA 技術協力事業)ではその育種改良と普及を推進しています。

2. 課題の一つであった種子の発芽促進

アカシア属の樹木は一般的に硬い殻(種皮)に覆われた種子を作り、何らかの事前処理を施さなければ種子が発芽しにくいことが知られていません。*Acacia tortilis*の種子はとりわけ小さく、種皮も非常に硬く、同属他種で報告されている処理ではあまり発芽率が改善されないことがわかりました。近年、同種において種子の発芽促進に関する論文が2つほど発表されていたのですが、結論として硫酸など危険かつ一般に入手困難な薬品を利用することを推奨しており、アフリカで普及するにあたっては、別の現実的な技術を考えなくてはならないという課題がありました。

3. 小さな発見と工夫

いろいろと試行錯誤をしていくうちに、1)種皮は深い傷をつけると吸水できて柔らかくなり、発芽可能となること、2)最初に起こる発根は必ず種子のhilum(へそ)の部分(写真a)からであること、3)種皮は吸水後も弾力性が高く、発根を阻害する可能性があることを発見しました。そこで、種子のhilumを爪切りを使って切り取れば発根効率が最大化されるのではないかと考えました(写真b)。その効果はてきめんで、この処理を施して種子を水に浸けておくと、3日程度で発根し始め、わずか6日間で供試した全ての種子で発根が確認されました。また、それをポットに

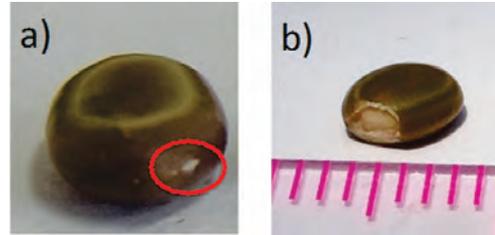


写真 *A.tortilis*の種子 a)種子のhilum(へそ)
b)爪切りで処理をした様子

移植すれば実生を得ることができました。一方、硫酸処理では14日間の観察で発根に至った種子の割合は38%でした(図)。今回、新たに考案した手法は処理時間、得苗率の両面で優れていることがわかりました。

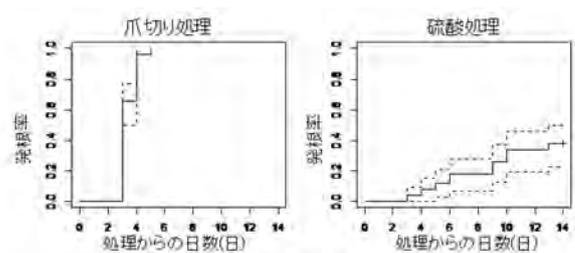


図 爪切り処理と硫酸処理における処理からの日数と発根率の比較(破線は95%信頼区間)

4. おわりに

本成果はケニア側研究者との共著論文としてアフリカの学術誌(African Journal of Biotechnology13:4457-4561)に掲載されました。本誌は無料で論文が閲覧できるオープンアクセス誌であり、誰でも自由に論文をご覧になっていただけます。種子のhilum部分から発根するという小さな発見ではありましたが、これをきっかけに安全、簡便、高効率な種子発芽促進手法を提案することができました。今後、この方法をより多くの方々に知っていただき、アフリカや中東の実際の現場で使われるようになれば嬉しく思います。

(海外協力部 海外協力課 花岡 創)

ゲノム編集技術：林木育種への利用にむけた技術開発(2)

1. はじめに

前号ではゲノム編集の原理および遺伝子組換え技術との違いについて概説しました。今回はゲノム編集技術の発展や植物での利用例、林木育種への利用と課題について紹介します。

2. ゲノム編集技術の発展

ゲノムDNAの狙った領域を特異的に改変するゲノム編集技術にはいくつかの種類がありますが、標的領域を認識するガイドRNA (gRNA) と、標的領域のDNAを切断するゲノム切断酵素Cas9の2つからなるCRISPR/Cas9というシステムが2013年に発表されると、効率の良さや利便性から瞬く間にゲノム編集技術の中心になりました。現在世界中でCRISPR/Cas9システムの改良が進められています。標的領域の破壊だけでなく、点変異型のゲノム編集や複数の標的領域を一度に編集することも可能です。標的領域に200 kbもの長い塩基配列を挿入する新技術も報告され、将来的には染色体レベルでの編集も期待されます。また、CRISPR/Cas9とは異なる原理の日本独自のゲノム編集技術の開発も進められており、知的財産権の観点からも注目されています。

3. 植物でのゲノム編集例

CRISPR/Cas9システムはすでに多くの農作物のゲノム編集に利用されており、イネ、コムギ、トウモロコシ、トマト、ジャガイモなどで、相次いでゲノム編集個体が作出されています。

木本植物では、モデル樹木と見なされるポプラにおいて、CRISPR/Cas9システムによるゲノム編集の成功例が報告されています。それらの例では、色素やリグニンの生合成酵素遺伝子を破壊することで、葉の白化やリグニン含量の低下といった、期待通りの表現型が得られました。しかし、現在までにスギなど針葉樹における実施例は報告されていません。

4. ゲノム編集技術の林木育種への利用と課題

第一の課題として、スギなどの針葉樹におい

て遺伝子を効率よく発現させるスイッチ（プロモーター）が見つかっていないことが挙げられます。CRISPR/Cas9システムを針葉樹で効率的に機能させるため、私たちはスギから利用可能なプロモーターを探索しています。また、不稔化やバイオマス増産といった、有用な形質に関与する遺伝子の探索も必要となります。

CRISPR/Cas9システムを効率良く働かせることができても、改変した林木を実用化するにはもうひとつ大きな壁があります。植物でゲノム編集を行う際には、CRISPR/Cas9システムの遺伝子を一旦遺伝子組換えにより導入するため、最終的な改変個体から導入した外来遺伝子を除去しなければなりません。その方法として、自殖等で次世代個体を作り、外来遺伝子が抜け落ちた個体を選抜する方法が用いられています。しかし、生育期間が長く、次世代個体を得るのに数年以上かかる樹木において、この方法は現実的ではありません。

動物では、gRNAやCas9タンパク質を受精卵や培養細胞に直接導入することで、ゲノム編集する技術が確立しています。この場合、導入したgRNAやCas9タンパク質は細胞の中で働いた後分解されるので、次世代個体の作出と選抜の過程を省略できます。つい最近、シロイヌナズナ、タバコおよびレタスにおいて、細胞壁を除去した細胞（プロトプラスト）に、gRNAとCas9タンパク質を直接導入することで、ゲノム編集に成功したと発表されました。いくつかの樹種ではプロトプラストからの個体再成系が報告されているため、この技術の応用が期待されます。

5. おわりに

森林バイオ研究センターでは、効率よく林木の形質を改変することができる新たな育種技術を創出するため、スギなど有用樹種におけるゲノム編集技術の開発に取り組んでいます。

(森林バイオ研究センター 七里 吉彦)

遺伝子発現レベルからみたスギの環境適応

1. はじめに

林木の成長などの形質は基本的には遺伝的に決まっていますが、環境への応答という形で、生育している個々の環境にも影響されます。スギ等の林木の環境に対する応答機構を解明することは、様々な環境の植栽地での林木の成長等を考える上で重要な課題です。また、気候変動による植栽環境の変化が予想される今日において、ますます重要になってきました。そこでスギの環境に対する応答機構の解明に発現遺伝子レベルから取り組みました。

2. 遺伝子発現の日周性と年周性

はじめに、基盤情報として、遺伝子の発現がどのように日変化や年変化するのか、マイクロアレイ法を用いて解析しました。マイクロアレイ法とは、一度に数万遺伝子の発現量を解析することができる処理能力の高い実験手法です。

2日間4時間間隔でサンプリングしたシュートの遺伝子発現を解析したところ、約7.7%の遺伝子が夏(7月)には日周性を刻んでいることが明らかになりました(図)。例えば、他の植物で主要な時計遺伝子として知られているLHY遺伝子と相同性の高い遺伝子は、明け方に発現量が増加し、夕方には減少していました。

次に年変化について実験してみると、発現遺伝子は日周性よりも大きく変動していました。夏の成長期には細胞の形成や発達に関与する遺伝子が、冬の休眠期にはストレス関連の遺伝子などが増加していました(図)。その一方で、夏にはみられた遺伝子発現の日周性が、冬(12月)にはみられなくなりました。

これらのことから、スギは、刻々と変化する環境に対し、遺伝子の発現が日周性・年周性を刻みながら環境に適応していると考えられました。

3. 環境の地域間差と応答のクローン間差

環境条件や遺伝子型が異なる場合、遺伝子発現の年周性にどのような違いがみられるのかを把握するため、同一セットのスギ精英樹が複数

箇所に植栽された試験地や複数クローンが同一箇所に植栽された試験地を用いて解析を行いました。その結果、遺伝子の発現量や発現時期には地域間やクローン間に差がみられ、成長量も異なることが分かりました。

また、自然条件下では日長と温度のように環境要因が連動して変化し、どの要因が成長等に影響しているかが分からない場合があるため、人工気象室を用いて、個別に環境を変化させてスギの反応を調べる試験も行いました。その結果、日長、温度は単独でもスギの成長に大きく影響し、またクローンによって反応(成長量)が異なることが分かりました。

これらの結果は「遺伝」×「環境」の相互作用を表しており、発現遺伝子はその調節において重要な役割を果たしているかと推定されました。

4. 今後の取り組み

環境によって発現量が変動する遺伝子のゲノム(DNA)や発現(RNA)レベルの違いは、クローンによる環境応答の違いを示している可能性があります。今後、さらに研究を進め「遺伝」×「環境」への理解を深めていくことで、将来的には遺伝子レベルから植栽環境に適したクローン(品種)の選択が可能になると考えています。

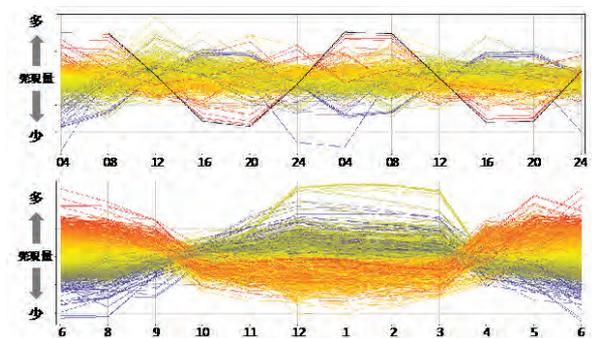


図 遺伝子発現の日周性(7月)(上)と年周性(下)

数字はサンプリングを行った時刻(上)と月(下)を示す。各線は各遺伝子を、上図の黒線はLHY遺伝子を示す。

(育種部 育種第一課 能勢 美峰)

平成27年度林木育種成果発表会の開催

平成28年2月5日(金)に、東京都江東区の木材会館において、「最先端へのアクション！進化する林木育種！～次世代品種が変える、日本の森林・林業～」をテーマに、林木育種成果発表会を開催し、都道府県等から、141名の参加がありました。



写真1 成果発表会会場の様子

宇都宮大学教授の飯塚和也氏から、「エリートツリーと木の文化」の特別講演、(地独)青森県産業技術センター林業研究所森林環境部長の田中功二氏から、「優良な抵抗性クロマツ種子の生産性の飛躍的な向上ー東日本大震災復興としての取組ー」の特別報告をいただきました。

林木育種センター・育種場からは、各研究分野の研究者から7課題について発表しました。

- 平成27年度開発品種の解説
 - 育種第一課 田村 明
- スギにおけるゲノム情報を活用した高速育種技術基盤の確立
 - 育種第一課 平岡裕一郎
- 早生樹種コウヨウザンの品種改良に向けて
 - 探索収集課 磯田 圭哉
- 環太平洋域とつながる林木育種協力
 - ー防風林早期造成のためのテリハボクの育種研究ー
 - 海外協力課 松下 通也
- 薬用系機能性樹木の生産効率化手法の開発に向けた取組
 - 森林バイオ研究センター 谷口 亨
- 木質バイオマス生産量の大きいヤナギの開発に向けた取組
 - 北海道育種場 矢野 慶介
- ヒノキエリートツリーのさし木品種開発について
 - 関西育種場 久保田正裕



写真2 特別講演中の宇都宮大学飯塚教授

また、質疑応答では、研究の普及性や品種開発に対する行政側からの要望など様々な意見が出され、参加者の林木育種への関心の高さが伝わってきました。



写真3 林木育種センター各部長等からの報告

今年度は、平成27年度林木成果発表会の締めくくりとして、「今後の林木育種の展望について」をテーマに育種部、遺伝資源部、海外協力部、森林バイオ研究センターの各部長等から、今後の取組みや将来展望について、説明しました。

国や都道府県、各研究機関・企業等から多数のご来場をいただきましたことに感謝申し上げます。

(企画部 育種企画課 栗田 喜則)

表紙タイトル写真は、林木育種センター内に設定された特定母樹等を含むスギ第2世代精英樹候補木の植栽試験地



林木育種情報 No.21

平成28年3月15日発行

国立研究開発法人 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 <http://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/index.html>