

# 「環境保全に貢献するスーパー樹木の開発に向けて」 公開シンポジウム報告

田原 恒・片畑伸一郎・古川原 聡・篠原健司

## 1. はじめに

地球温暖化軽減策として、森林の保全や植林が高く評価されている（写真1）。2003年12月イタリアのミラノで開催された第9回気候変動枠組条約締約国会議（COP9）では、CO<sub>2</sub>吸収源として換算する植林に組換え樹木の使用が条件付きで認められた。2025年までを視野に入れた成長に貢献するイノベーションの創造のための長期戦略指針「イノベーション25」（平成19年6月1日閣議決定）でも、「環境保全に貢献するスーパー樹木の開発」の重要性が指摘されている。林野庁は、2007年8月に「森林・林業分野における遺伝子組換え技術に関する研究開発の今後の展開方向」をプレスリリースしており、地球温暖化軽減に貢献する組換え樹木の開発のためには、ゲノム情報の基盤整備、乾燥耐性・耐塩性等環境ストレス耐性の付与技術、バイオマス生産を向上させるための成長制御技術、実用化に向けた花成制御技術等が必要であるとしている。

本シンポジウムでは、環境保全に貢献するスーパー樹木（遺伝子組換え樹木）の開発の現状と将来性について議論された。最初に、森林総合研究所の鈴木和夫理事長の開会挨拶に始まり、亀井俊水理事の司会で進化した。

## 2. 概要

### 1) 基調講演

林野庁の針原寿朗林政部長が「環境保全に貢献する樹木の新しい可能性を求めて」、理化学研究所の篠崎一雄植物科学研究センター長が「モデル植物のゲノム機能解析からスーパー樹木開発への展開」について基調講演を行った。

針原部長は、我が国のスーパー樹木の研究開発の将来を方向付けるには、国内林業の活性化と地球環境問題における国際社会との連携・協調関係を念頭に置く必要があることを述べた。また、最近の森林政策の動向を説明し、公共政策の限界から経営政策の重要性が認識されている現状のもと、「低炭素社会」の構築への取組と一体となった山村振興策が講じられているという。現在、石油からバイオエタノールをはじめとする木質バイオマスへのエネルギー転換によってCO<sub>2</sub>排出量の削減が企てられており、推進力として新ビジネスの創造を促進するための事業が展開されている。これによって、国産材の需要拡大や山村における雇用の拡大・安定化が期待されている。こうした山村再生の取組を総合的に支援する山村再生支援センターの設立も検討されており、木質バイオマス燃料使用による国内の排出量クレジット取引の枠組みを設定することで、社会的協働を生み出そうというねらいがある。こうした状況を背景に、遺伝子組換え樹木の研究では、木質バイオマスの安定供給への貢献が目標となる。具体的には、成長促進はもちろんのこと、環境ストレスや病害虫に対する抵抗性の付与が重要である。

Ko Tahara, Shinichiro Katahata, Satoshi Kogawara and Kenji Shinohara : Report of a Public Symposium on "Development of Genetically Modified Trees for Environmental Preservation"

(独)森林総合研究所生物工学研究領域



写真 1 西オーストラリア乾燥地における植林試験  
(森林総研の田内裕之森林植生研究領域長提供)

篠崎センター長は、モデル植物で先行しているポストゲノム研究の現状と将来に関する展望について概説した。遺伝子組換え樹木の開発にも利用可能な技術体系や基盤情報は、シロイヌナズナやイネなどのモデル植物で先行して構築されている。モデル植物に追随して各種作物のみならずポプラやユーカリなどの樹木でもゲノム塩基配列の概要解読が進められている。塩基配列と遺伝子機能との対応を推定するために、逆遺伝学的手法（遺伝子を選択的に破壊することで、その遺伝子の機能を解析する手法）によるモデル植物の変異体解析の情報を参照することができる。本講演では、迅速で網羅的な変異体解析を支援する技術が紹介された。近年、完全長 cDNA が大規模に収集され、これら塩基配列情報を利用した DNA マイクロアレイ（多数の DNA 断片をスライドガラス等の基板上に高密度に配置した分析器具。DNA チップともいう）により遺伝子発現の網羅的解析が進められており、遺伝子機能の同定やプロモーター（遺伝子の upstream に位置し、遺伝子の発現を調節する DNA 上の塩基配列）機能の情報を含めた複雑な遺伝子発現の調節機構の解明が期待されている。また、表現型や代謝産物の網羅的解析を可能にした技術革新と変異体リソースの整備状況についても解説した。遺伝子機能の解析を土台とするゲノム育種では、生産性の向上が主な目的とされ、炭素

固定能力の向上だけではなく、環境ストレス耐性の向上を目指した研究も盛んに行われている。また、環境応答機構の解明のために転写因子やプロモーターの解析が精力的に行われており、シロイヌナズナ転写因子の遺伝子を利用した耐乾性ユーカリの開発の成功例が紹介された。最後に、樹木においても比較ゲノム解析によって特定の機能を担う遺伝子が着目され、環境保全のみならず、木質バイオマスの生産性向上にスーパー樹木が寄与するという展望が示された。

## 2) 話題提供

話題提供では、東京大学アジア生物資源環境研究センターの小島克己教授、王子製紙森林資源研究所の河津哲上級研究員、日本製紙森林科学研究所の松永悦子主任研究員、森林総研の津村義彦室長と篠原健司が、それぞれの専門領域の立場から講演を行った。

小島教授は「熱帯荒廃地のストレスと環境造林」について講演した。地球環境保全のための森林造成は、生物生産性が極めて低いために放棄された荒廃地を対象地とすることになる。熱帯の荒廃地では、産業造林の技術をそのまま適用できないため、環境修復を目的とした「環境造林」の技術を新たに確立する必要がある。環境造林の技術は、低エネルギー投入、低環境負荷でなければならない。そのためには個別の荒廃地の環境を解析し、適合樹種を選抜し、樹木のストレス耐性機構を踏まえて造林技術を確立しなければならない。演者の研究グループは、タイに存在する砂質未熟土壌や泥炭土壌といった荒廃地を対象に研究を行っている。土壌高温が問題となる砂質未熟土壌では、高温耐性樹種を先行して造林し、土壌高温が緩和された林床に目的樹種の苗を植栽することで苗の活着が改善できるという。湛水が問題となる泥炭土壌では、湛水耐性樹種を用いた泥炭保全造林が提案された。

河津上級研究員は「酸性土壌耐性組換えユーカリの開発」について講演した。世界的に紙の需要が増大している。木質資源の安定確保のためには、不良環境で植林を可能にする技術や単位面積当たりの成

長量を増大させる技術の開発が必要である。不良環境の一つである酸性土壌では、土壌中のアルミニウムによる根の生育阻害とともに、アルミニウムとリン酸が結合することによるリン酸の吸収阻害が問題となる。クエン酸は、アルミニウムと結合してアルミニウムを無害化し、リン酸を可溶化する。クエン酸を根から多く放出するように、クエン酸合成酵素遺伝子を過剰に発現させた組換えユーカリは、酸性土壌で野生型よりもよい成長を示した。一方、組換え樹木の野外栽培には、花粉を介した組換え遺伝子拡散を防止する措置が必要である。接ぎ木（台木にのみ組換え体を使用）により苗木を作る手法や、重イオンビーム照射による不着花変異体作成の手法が遺伝子の拡散防止策となる。

松永主任研究員は「耐塩性組換えユーカリの開発」について講演した。ユーカリは、世界中で植林され、パルプ材として最も重要な樹種である。遺伝子組換え技術により耐塩性など環境ストレス耐性を付与し、ユーカリの植栽適地を拡大したいという。頂芽を含む胚軸に遺伝子導入することで、効率的にユーカリの組換え体を作成する方法を開発した。また、ユーカリにグリシンベタインやマンダリンという塩耐性に関与する物質を多量に作るように、開発した遺伝子導入法を用いてコリンオキシダーゼ遺伝子やマンダリン遺伝子をそれぞれ導入した。これらの組換え体は、特定網室において高い塩耐性が確認された。なお、一部の組換え体は、生物多様性影響の評価のため、隔離ほ場に植栽して野外試験を進めている。組換えユーカリの実用化のためには、遺伝子組換えに対する社会的理解の促進など多くの課題があり、産学官の共同体制での取り組みが必要である。

津村室長は「スギの適応的遺伝子の解析」について講演した。分布範囲の広い樹種は、異なる環境で生育している場合がある。このような樹種では、それぞれの環境において生育に有利な遺伝子型をもった個体が生き残ることになる。近年のゲノム情報の集積により、樹木でも適応的遺伝子を検出できるようになってきた。多遺伝子座の中立性検定（多くの

遺伝子を DNA マーカーとして自然集団を調べ、淘汰を受けていると考えられる遺伝子を検出する方法）を利用して、スギの適応的遺伝子の検出を試みた。解析した 151 遺伝子座のうち、4 つの遺伝子座は進化的に中立ではなく、適応的な候補遺伝子と考えられる。そのうちの 1 つは、ウラスギとオモテスギの遺伝的分化に関連している可能性がある。このようなゲノムワイドな方法により検出された環境適応的遺伝子も、遺伝子組換えのための候補遺伝子になる。

篠原は「スーパー樹木の開発に向けて」について講演した。遺伝子組換えによって、劣悪環境で生育できる環境ストレス耐性を付与し、バイオマス生産が向上するように樹木の成長を制御すれば、荒漠地の緑化や生産性の増大により地球温暖化軽減に貢献できる。世界的に組換え樹木の開発が進められており、早期開花誘導、水銀耐性付与、低リグニン化誘導などに成功し、野外試験も活発に進められている。日本では、王子製紙の耐乾燥性ユーカリや酸性土壌耐性ユーカリ、日本製紙の耐塩性ユーカリ、森林総研のオゾン耐性ポプラの開発の成功例などがあるが、野外試験の実施は 3 件と極端に少ない。なお、これまでに組換え樹木が商業植林された事例はない。組換え樹木を野外植栽するには、生態系での組換え遺伝子の拡散防止のため、遺伝子組換え技術を用いた花成制御技術や不稔化技術の開発も必要である。森林総研ではポプラの早期花成誘導技術の開発に成功しているが、花成を抑制すると花成に光合成産物が消費されなくなり、実際に利用可能な幹などのバイオマス生産向上も期待できるという。

### 3) パネルディスカッション

森林総研の中島清研究コーディネータの司会で、篠崎センター長と 5 名の話者提供者が参加してパネルディスカッションは進行し、遺伝子組換え樹木の有効性や今後の研究展開などについて議論された（写真 2）。パネリストが考える環境保全に貢献するスーパー樹木は、1) 劣悪な環境下で生育可能な環境ストレス耐性があり（荒漠地緑化）、2) 成長が早く、バイオマス生産が向上しており（CO<sub>2</sub> 吸収能力の増



写真 2 活発な議論が行なわれたパネルディスカッション

大), 3) 花粉を飛散しない(生態系への遺伝子汚染防止)などの機能を付与したものである。これらの機能を保持するスーパー樹木を作るためには、ゲノム情報の基盤を整備し、一つの遺伝子だけでなく、複数の遺伝子で新機能を付加する必要があるという。また、スーパー樹木の開発を可能にするためには、研究が先行しているモデル植物の研究者が樹木ゲノムの研究に参加するなどの研究者間の連携、あるいは国際連携も必要である。さらに、研究促進のためには、遺伝子組換え樹木の野外試験のための隔離ほ場などの基盤整備も必要となる。スーパー樹木の野外植栽のためには花成制御が不可欠であり、その点について議論が深められた。遺伝子組換えにより完全に花成制御することは非常に難しいため、花が咲いても正しく管理すれば生態系に悪影響は及ぼさないことなども証明が必要である。薬剤等を用いた安定な早期着花技術を開発し、遺伝子組換え樹木の数十年後の花成の有無を推定する新たな手法を開発する必要があるとの意見も出された。一方、日本の研究者は国際会議等に積極的に参加し発言力を強化していかないと、国際共同研究から取り残されてしまう可能性があるとの意見が会場から出された。スーパー樹木は地球温暖化軽減など人類に多大な恩恵をもたらすと期待されているが、技術的に実用が可能になったとしても、スーパー樹木の有用性だけでなく、パブリックアクセプタンスの獲得が極めて

重要であると確認された。したがって、国民の関心に的確に対応した情報提供や最新の科学的知見に基づく安全性評価の実施が必要であると締めくくられた。

### 3. おわりに

シンポジウムは森林総研の石塚和裕理事の閉会挨拶で終了した。確かに、地球温暖化軽減に貢献するスーパー樹木の開発への期待は大きい。スーパー樹木の商業植林には、目的の植林地での適性樹種を遺伝子組換えに用いること、植林地に適した造林技術を開発すること、在来樹種との交雑性に関する情報を十分に収集することなどが重要である。森林総研が樹木の遺伝子組換えを開始した頃には、利用できる遺伝子情報は限定されていた。しかし、樹木のゲノム研究の進展により、スーパー樹木の開発に利用可能な有用遺伝子の情報は急増している。また、遺伝子導入や個体再生技術の開発も着実に進歩している。現在、遺伝子組換え樹木の開発はそれぞれの研究機関で個別に進められており、同一の目的で開発された遺伝子組換え樹木の特性を比較する必要がある。こうした情報が公表されると、スーパー樹木の開発にどの遺伝子が最適なのか容易に理解でき、21世紀のスーパー樹木の開発そして事業化が加速化すると考える。