

林木育種の成果の活用について

独立行政法人林木育種センター 理事長 田野岡 章

私が当センターに来て1年半が経過し、その事業内容について私なりの理解も進んできたと思っています。常日頃、私が林木育種に対して思い描いていることを述べてみます。

日本の林木育種は、昭和32～33年にかけて北海道から九州の各地区に5つの林木育種場が設置され、以降、精英樹などの多くの材料と膨大なデータを蓄積してきました。その育種目標は建築用材の生産に適した品種を開発するものであり、成長性、樹形のよいものに、気象害・病虫害抵抗性を付加するというものです。また時代の要請に応じ、カラマツのねじれ対策や環境保全等に対応して花粉症対策の品種、複層林施業対応品種、広葉樹の優良品種、またCO₂の吸収・固定能力の高い品種の開発などに取り組んで来ています。

私は、林木育種の本来の目的は人間が利用する木材の効率的な生産であると考えます。最近国産材の利用が増加傾向にありますが、建築用材として利用する場合でも人工乾燥、集成材など、従来とは使用方法が変化しているため、育種目標も、人工乾燥に適すると思われる水分率の安定したもの、また集成材に適すると思われる水分率・強度の安定したものを目指しています。ここで、木材の生産と利用、育成途中の森林という面から、生産者側、利用者側、及び社会一般のそれぞれが求める要件に分けて考えてみます。まず、生産者の求める要件としては①成長性、②気象害・病虫害抵抗性があります。利用者の求める要件としては③通直性、④真円・完満性、⑤水分安定性、⑥強度安定性が考えられます。社会一般の求める要件としては⑦花粉症などの環境保全対策が考えられます。また、マツノザイセンチュウ抵抗性や複層林対応性など生産者と社会一般の両者が求める要件もあり、これらの要件は時代の変化に伴って変化して来ています。そして利用者側の求める要件も変化しているのではないかと考えています。つまり、最近の集成材としての利用は③通直性、④真円・完満性の欠点をカバーするためであり、⑤水分安定性、⑥強度安定性が満たされれば十分対応可能なのではないかと考えてみると、現在の我々は①～⑦までの全てを満足するものを作ろうとしているが、必ずしもその必要はなく、目的に応じた必要な形質を付加すれば十分ではないか、つまり極端な見方をすると、強度安定性が優れたものであれば成長性を犠牲にしても良いのでは、とも思う。

仮にこのような対応が可能であるとしても、長い時間を必要とする林木育種において、今まで蓄積してきた多くの材料とデータを基に、DNAマーカーによる形質確認の手法や遺伝子組換えなどで育種のスピードアップが図れるならば全くの不可能と言うことでもなさそうな気もする。もう一つ夢物語を加えると、利用者が次に求めるものは、木材セルロースのエタノール化ではないかと想像する。糖化や発酵など技術的な困難性が言われているが、10年単位で考えると夢ではない。時代の要請に乗り遅れないように、対応を考えておく必要があろう。

遺伝子組換えを利用した新しい育種技術

遺伝子組換えは、短時間で目的とする形質のみを改良することが可能です。このことより、長時間を要する林木の育種は、遺伝子組換えを利用することにより短時間で行うことができるようになります。また、従来の交雑による方法では不可能であった、種の壁を越えた生物の遺伝子の利用も可能で、微生物などの遺伝子を林木に組込んで有用な品種を作ることができます。これらのことから、遺伝子組換えを利用した林木育種は、新しい育種技術として期待されます。

遺伝子組換えによる作物の育種は既に実用化され、2005年のデータによると米国で栽培されているダイズの87%、トウモロコシの52%は、組換え体とされています。一方、我が国の主要な造林用林木であるスギやヒノキでは、近年、遺伝子組換え手法が開発され、遺伝子組換えによる育種の基礎が整いつつある状況です。

スギやヒノキへの遺伝子導入には、7月初旬に未成熟種子を培養して得られた胚由来の細胞が適しています。遺伝子導入にはアグロバクテリウムという土壌細菌を利用します。このアグロバクテリウムは、自身の腫瘍化遺伝子などの遺伝子を植物に移入する能力を持ち、根頭癌腫病と言われる病気を引き起こします。腫瘍化遺伝子を別の目的遺伝子に置き換えると、目的遺伝子が植物に遺伝子導入されます。このことを利用して、スギやヒノキの胚由来の細胞にGFP遺伝子と抗生物質抵抗性遺伝子を導入しました。



写真-1 GFP遺伝子を導入した組換えスギ

GFP遺伝子はクラゲ由来の遺伝子で、緑色蛍光を発するタンパク質を作ります。スギやヒノキの細胞にアグロバクテリウムを感染させ、抗生物質を加えた培地でこれらの細胞を培養すると、遺伝子が導入された細胞のみが増殖を続け、GFPの緑色蛍光を発します。遺伝子導入された細胞から不定胚と呼ばれる人工的な胚を誘導し、不定胚を発芽させることにより、組換えスギやヒノキを作ることができました。

現在、雄花や花粉形成に関与する遺伝子の解明を進めています。これらの遺伝子が明らかになれば、遺伝子組換えによる雄花や花粉の形成の鍵となる遺伝子の発現抑制や、雄花や花粉形成時に発現する遺伝子やタンパク質の破壊により、花粉を形成しないスギ品種が開発できると期待しています。

一方、遺伝子組換えによる林木を実用化するためには、環境への影響を正確に評価しなければなりません。そこで、コウジカビ由来のキシログルカナーゼ遺伝子を高発現させたポプラの隔離ほ場での栽培試験を林木の野外栽培のモデルケースとして実施することにより、組換え林木の環境影響評価手法を開発することを計画しています。このポプラはセルロース含量が高くなることがこれまでの試験により明らかにされ、パルプやバイオ燃料の原料として効率的に利用できると期待しています。



写真-2 組換えポプラを栽培する予定の隔離ほ場

(センター本所 育種第一課 谷口 亨)

省力化林業を可能にする品種の開発

1. 2つの問題を同時に解決？

近年、国産材の価格低迷が続いています。しかし我が国の育林から木材生産にかかる費用は国際的にみると高すぎるともいわれており、様々な工程でコストを抑えることが必要と考えられています。

育林費に関しては、平成13年度の報告では50年生スギで1ha当たり約190万円、そのうち約5割が下刈り費とされています¹⁾。このことから、下刈り費削減の効果は非常に大きいといえます。

また、造林初期における別の深刻な問題として、シカによる苗の食害が挙げられます。これに対して雑草木の存在が、食害を軽減するとみている研究者や現場経験者がいます。

これらのことから、下刈りを省くことはまさに一石二鳥の効果が期待できそうです。そしてこのような施業を可能にするためには、それにふさわしい品種を造林することが必要になります。

2. 求められる品種像と現在行われている試験

下刈り回数を少なくすると、雑草木が繁茂します。したがって、それらとの競争に負けないくらいの初期成長の速さを持つ品種が求められます。これまでの試験結果からこの形質が最重要であると考えられます。また、雑草木に囲まれても成長を維持する「耐陰性」も必要かもしれません。

このような特徴を備えた品種を探すため、また下刈りの省略が造林木の成長等にどのように影響するかをみるため、現在、関東育種基本区と九州育種基本区においていくつかの試験が行われています。

関東森林管理局森林技術センターと共同で茨城県常陸太田市に、九州森林管理局森林技術センターと共同で宮崎県高岡市に、各々「下刈り区」と「無下刈り区」を設けた試験地を設定しています。後者では植栽後6年目に無下刈り区を一部除伐し、開放後の植栽木の成長を継続的に観察しています。また、九州森林管理局管内の熊本県熊本市と同県人吉市の試験地には、下刈り回数を変えた処理区も設けてい

ます。これらの試験地にはスギ精英樹やその子供のF₁をクローン化したさし木苗を植栽しており、有望な品種の選抜や適切な施業方法の決定が期待できます。現時点で無下刈り区でも成長がさほど落ちない品種を見出しており、別の環境での生育を含めた調査を継続しています。

3. 今後の計画

以上のような試験を今後も継続する一方で、さらに試験地数を増やしていきます。シカの食害が下刈りの程度でどのように変化するかをみるための試験も行います。また、スギ・ヒノキの初期成長の速い品種を、これまで蓄積された次代検定林データから検索し、情報提供する予定です。

さらに、他の植生との競争に強い品種とはいかなるものかを、光合成能力や木材解剖学的な側面から明らかにすることにも同時に取り組んでいきます。

なお、これらの研究費の一部は平成18年度先端技術を活用した農林水産研究高度化事業「外来野生動物等による新たな農林被害防止技術の開発」によってまかなわれています。



無下刈り試験地（宮崎県高岡市）

参考文献

- 1) 農林統計協会. 育林費結果報告平成13年度 林家経済調査. 農林水産省統計部編. (2004)

(センター本所 育種第二課 平岡裕一郎)

マツのさし木技術を利用したマツ材線虫病 抵抗性苗の生産

1. はじめに

マツ材線虫病による被害は、日本の松林に壊滅的な被害をもたらしました。この対策として西日本では昭和53年からマツノザイセンチュウ抵抗性育種事業が始まり、この事業によって抵抗性品種（アカマツ92個体、クロマツ33個体）が選抜されました。現在、これらの抵抗性クローンによって構成された採種園産の実生苗が「抵抗性マツ」として生産され、マツ材線虫病によって被害を受けた松林の再生に大きく貢献しています。

抵抗性マツは実生苗で生産しているため、親木である抵抗性クローンと同一の抵抗性を発揮できず、抵抗性が分離します。すなわち遺伝的に抵抗性が高い苗と低い苗が混在しています。そのため九州地方では、抵抗性の低い個体を取り除くため、苗畑でマツノザイセンチュウの人工接種を行い、生き残った苗だけをいわゆる「接種済み抵抗性マツ」として出



人工接種によって枯損した抵抗性マツ

荷しています。

ただしこの生産方式では、人工接種の費用がかかり、枯死した苗の育苗費用は無駄になります。また、年によって抵抗性採種園の種子の生産量及び人工接種による生存率にばらつきがあるため、高品質の抵抗性苗を安定して供給することが困難です。また、人工接種には高い活性を保ったマツノザイセンチュウ

を用いなければならないため、熟練した技術が必要になります。

こうした問題を解決するため、マツのさし木技術を利用した苗の生産方法の開発に取り組んでいます。さし木は採穂台木となる個体と同一の遺伝的性質を保持します。したがってさし木が可能であれば、遺伝的に抵抗性が高い個体だけを効率よく増殖することができます。さらに、遺伝的に均質なクローンを生産することで、マツ材線虫病の発病経過、抵抗性の遺伝様式及びメカニズムの解明といった研究に大きく寄与することが可能です。

2. マツ類のさし木は難しい

このように抵抗性マツのさし木が成功すれば経済的・科学的な利点が多いのですが、マツ類はさし木が非常に難しい樹種とされています（近藤・大賀，2002）。世界中でマツ属樹種の苗木生産がされていますが、さし木による増殖を事業化しているのはニュージーランドのラジアータマツと北米のテーダマツ程度です。日本のクロマツ・アカマツも例に漏れず、さし木関連の図書では「さし木の難易：難」と判定されています（町田，1974；森下・大山，1972）。実際に抵抗性品種でさし木を行いました。ほとんど活着しませんでした。



ほとんど発根しない抵抗性クローン（高齢木）のさし木

3. 発根性を向上する方法

高齢の抵抗性クローンではさし木増殖はほぼ不可能で、事業的に成り立つほどの発根率は望めません。ところが、さし木が困難な樹種でも若齢木では高い発根性を示すことが報告されています（小笠原, 1959）。すなわち、クロマツでは選抜された抵抗性クローンそのものをさし木するのではなく、抵抗性採種園から採種され育苗された実生（F₁）のうち抵抗性が高い個体をさし木することによって、高い発根性を発揮させることができるのです。



高い発根性を示す実生苗（F₁）のさし木

一方で、さし木発根性は様々な外的要因に大きく影響されます。例えば、使用する用土、温度や湿度等の微気象及び発根促進剤の濃度などです。こうした条件は樹種によって最適条件が異なります。例えば、スギのさし木では赤土や畑土をよく使用し、良好な発根性を示しますが、クロマツではこれらの用土ではほとんど活着しませんでした（大平ほか, 2005）。マツのさし木を成功させるには、こうした外的要因を最適化することが重要です。

4. 遺伝的要因による発根性の向上

外的要因を整え、若齢木を使用しても、ほとんど発根しない個体があります。同一家系の同じ年齢の実生でもさし木発根性には大きな個体間差が見られ、その範囲は5年生で10～90%にわたりました。発根性が低い個体は次の年にさし木しても同様に発根性が低く、こうした個体はどんなに条件を整えても

発根性が劇的に向上することはありませんでした。これは遺伝的要因が原因と見られます。したがって発根性を向上するには、環境要因を整えるだけでなく、さし木発根性に優れた個体を選抜することも重要となります。

5. おわりに

マツのさし木技術は、外的な影響を最適化することによって、選抜した個体の潜在的な発根性を最大限に発揮させることが重要です。様々な外的要因（用土、温度管理、発根促進剤など）について最適条件の検討を行い、さらに遺伝的に優れた個体又は家系を選抜することによって、事業的な生産が可能となることでしょう。実際にこれまでの研究で、発根率が80%を超える個体が見つっています。

なお、クロマツのさし木増殖に関する研究は、現在農林水産省の先端技術を活用した農林水産研究高度化事業「クロマツの第二世代マツ材線虫病抵抗性種苗生産システムの構築」によって研究費の一部をまかなうことで進めています。

引用文献

- 近藤民雄・大賀祥治（2002）九大演習林報告83, 97-113
 町田英夫（1974）さし木のすべて, 261pp, 誠文堂新光社, 東京
 森下義郎・大山浪雄（1972）さし木の理論と実際, 367pp, 地球出版, 東京
 小笠原健二（1959）京大演習林報告28, 68-72
 大平峰子ほか（2005）九州森林研究58, 155-156

（九州育種場 育種課 大平峰子）

雪害抵抗性スギ品種の開発への取り組み

日本は世界有数の積雪量が多い国として知られています。特に日本海側の山間地域の多くでは、積雪深が1 mを超え、中には2.5 mを超える豪雪地帯もあります。林業は山間部における重要な産業のひとつですが、このような多雪・豪雪地帯では、大量の降雪によって植栽木はしばしば雪害を受けます。林業用針葉樹が被る雪害は、大きく冠雪害と雪圧害に分けられます。このうち、雪圧害はさらに、根元曲がり（写真－1）と折損に分けられます。特に根元曲がりは、多雪・豪雪地帯のスギ林分に広く見られ、利用材積の歩留まりを大きく減少させるために、林業経営者にとってきわめて深刻な気象害となっています。

従来から、根元曲がりに対して雪起こし等の育林作業による防除が行われてきましたが、近年では育種による対策も効果的であることが示されています。育種によって根元曲がりが大きく改善されれば、防除を目的とした育林作業が減少し、さらに従来では山に切り捨てられていた根元部分の材を収穫できるために、林業経営者にとっては経済的なメリットが大きいと考えられます。

これまでに雪害抵抗性育種事業では、雪害激害地から根元曲がりの著しく小さい個体を雪害抵抗性候補木として選抜しました。さらに、これらの候補木を植栽した検定林が数多く設定され、定期調査を行ってきました。東北育種基本区では、このような検

定林調査の結果から、現在までにさし木8品種、実生19品種を雪害抵抗性品種として開発しました。しかしながら、抵抗性を有する品種の数はいまだ少ないため、さらに新たな品種を開発する必要があります。平成20年度には、雪害抵抗性育種事業が行われている東北育種基本区と関西育種基本区で、それぞれ10品種と7品種を目標に、抵抗性を有する品種を開発する計画となっています。

ところで、前中期計画に行われた研究により、親の根元曲がり抵抗性は子供（実生後代）に強く遺伝することが示されました。この結果は、優秀な両親から生まれた子供集団の中から、さらに優秀な個体を選抜できる可能性が高いことを示唆しています。より高い育種効果を得るためには、選抜を繰り返し、育種世代を重ねることが重要です。より効果的で効率的な選抜手法の開発を目標とし、東北育種基本区では、雪害抵抗性を有する品種の子供から、さらに優秀な子供を選抜するための技術を平成22年度に開発する計画となっています。

根元曲がりは植栽する品種を選ぶだけで、大きく改善されます（写真－2）。抵抗性を有する品種を開発し、積雪地帯のスギ林分に見られる根元曲がりの軽減に貢献できるよう、雪害抵抗性育種事業を行っていきます。

（東北育種場 育種課 宮下智弘）



写真－1 根元曲がりとそれに伴う幹曲がり被害を受けた林分



写真－2 雪害抵抗性苗（右列）は、一般苗（左列）と比べ、根元曲がり被害が少ない

複層林施業に適したスギ品種の開発に向けて ー上木を伐倒した後のスギ下木の成長ー

はじめに

複層林施業は、下刈り作業の省力化や、森林の持つ公益的機能の継続的発揮に対する期待から、注目されてきています。そのため、関西育種場では、複層林施業に適する耐陰性種苗の開発に取り組んで来ました。具体的には、①人工被陰試験により、被陰によるダメージを評価し、ダメージが小さいスギ・ヒノキ系統を耐陰性の候補系統として選ぶ（関西地区林業試験研究機関連絡協議会育種部会の共同試験）、②選んだ耐陰性の候補系統を複層林の下木として実際に植栽してみる（四国森林管理局との共同試験、林木育種技術ニュース23参照）、という2点の試験を行って来ました。

これらの試験は、「複層林施業の下木に適する耐陰性のあるスギ・ヒノキを選ぶ」という命題に対する答えを導きます。しかし、複層林の下木は永遠に被陰されているわけではありません。上木が伐期を迎えて伐採されれば、これまで下木だった植栽木は被陰を解除されます。光を制限されてきた下木は、細長く育ち、風倒しやすい型になっています。この樹型の悪さは、被陰の解除によって改善されるのでしょうか？

樹高、根元径および形状比の変化

関西育種場では、樹下植栽したスギの成長調査を継続的に行い、9年次調査直後に上木を伐採し、さらに10および11年次に調査を行いました。図-1に樹高、根元径、形状比（樹高／根元径）の推移を示します。被陰解除直前の9年次では、樹高178cm、根元径2cm、形状比87で、非常に小さく異常に細長い形状でした。被陰解除後は、樹高および根元径とも急激に成長し、11年次には、樹高246cm、根元径5cm、形状比49になりました。特に、形状比の減少は顕著でした。つまり、スギは、被陰解除により光環境が改善されることで、細長い形状を急速に改善していくことがわかりました。被陰解除直前

の178cmという樹高は、下刈り終了時に近い値です。このことから考えて、複層林の期間を10年程度に想定して、下木としてスギを植栽し、上木を伐倒すれば、下刈りが大幅に軽減でき、かつ、早急な樹型の回復が見込めると考えられます。

終わりに

今回は、関西育種場四国増殖保存園内で行った樹下植栽試験の1事例を紹介しました。「はじめに」で述べたように、複層林施業に期待される効果は大きいのですが、光環境の管理が煩雑なため、実際の林家における採用例が、それほど多くありません。現在、林木育種センター関西育種場では、耐陰性スギ・ヒノキ品種開発のための複層林試験地を増やしています。これらの試験地から得られるデータや、他機関の複層林試験地でこれまでに得られてきたデータをもとに、実際の複層林施業を念頭においた耐陰性品種の開発を目指しています。

（関西育種場 育種課 山野遼太郎）

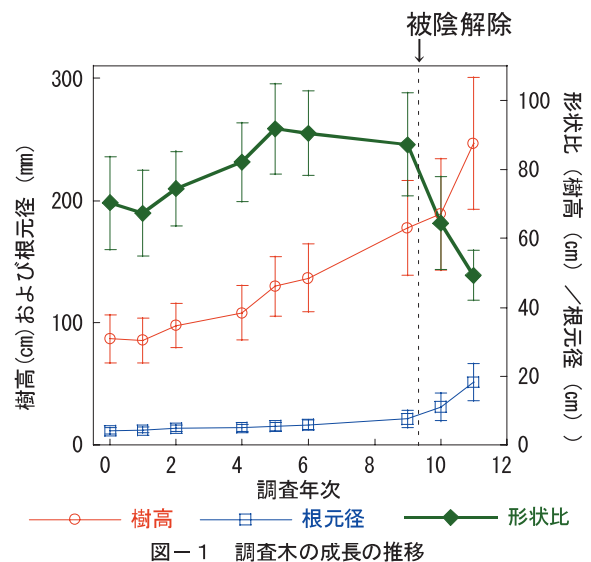


図-1 調査木の成長の推移

スポット ジーンフロー解析

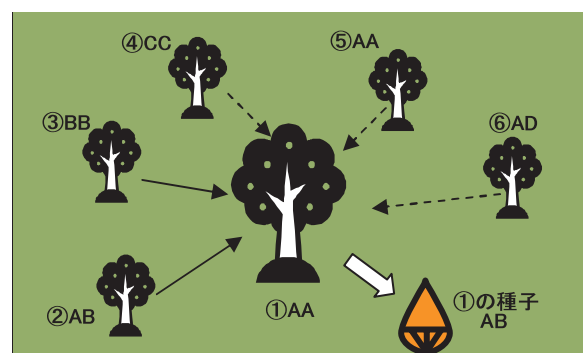
ジーンフローとは、種子・花粉散布などのプロセスを通じておこる遺伝子の動きのことです。林木におけるジーンフローの推定法のいくつかについてそれらの特徴を紹介します。

①**直接追跡法**・・・孤立木や比較的小面積の林分内の個体からの種子・花粉の散布は、特定の散布源を囲むようにして異なる距離や方向にシードトラップあるいはワセリンを塗ったスライドガラスを設置することによって種子や花粉を直接捕獲して、それらの動きを追跡することができます。また花粉の動きは、導入遺伝子や頻度が低いアイソザイム遺伝子などがマーカーとして有効な場合、その遺伝子を持つ個体の周囲の個体から種子を採取して、そのマーカーを保有しているかどうかを調べることによって追跡できる可能性があります。しかしトラップの設置場所を超えてさらに遠距離に散布された種子や花粉については評価できないといったデメリットに加え、一般的にどの個体から散布されたものが特定不可能なため、調査面積が広い場合や、散布源となりうる個体の密度の高い林分ではこの方法は使用できません。

②**親子解析法**・・・そこで、直接追跡法に代わって、より一般的な状況下でもジーンフローが推定できる方法に親子解析法があります。親子解析は、種子や実生と親候補の個体について何らかの遺伝マーカーを用いて分析して得られた遺伝子型データに基づいて両親を推定する方法です。林木において最もよく利用されているジーンフローの解析方法は既知の母樹から採取された種子の花粉親を探す方法です。その代表的な方法に、排除法と最尤法があります。排除法 (Genotypic Exclusion; Ellstrand *et al.* 1984) は、子個体とその親候補の個体とについて複数遺伝子座の遺伝子型を照合し、子の遺伝子型のもととなる配偶子を生産し得ない候補を排除してゆくというシンプルな方法です。しかしこの方法で推定を行うためには多型性が高い多数の座が必要とされます。もう一方の最尤法を用いた方法 (Most

Likely Method; Meagher 1986) は、排除法において必要とされるほどの座数と多型性がなくても可能な方法で、それぞれの親候補について任意の子個体の遺伝子型を生み出す確率を計算し、最も確率の高い個体を親個体と推定する方法です。一方、特定の親候補を親個体と推定するのではなく、算出される確率に比例して、全ての親候補に貢献度を割り振る方法 (Fraction Paternity Assignment; Devlin *et al.* 1988) も使用されています。この方法によると、同じ確率で複数候補が残った場合や、排除法で親個体の特定ができなかった場合でも、それらの個体を解析に含めて花粉飛散距離などを推定できることが利点です。

③**モデルによる方法**・・・ジーンフローに関するパラメータを推定するには、上の親子解析法で用いたような個々の親子の組み合わせの特定を行わないで、モデル化するという手法もあります。その代表的なものが Neighborhood Model (Adams *et al.* 1991; Burczyk *et al.* 1996) と TwoGener (Smouse *et al.* 2001) の二つです。これらの方法は、複数要因を評価したい場合や解析に用いる遺伝子座数や多型性が少ない場合、排除法・最尤法により得られた推定値の検証にも有効と考えられています。



排除法のしくみ ①の母樹 (遺伝子型 AA) から採取した種子の遺伝子型が AB である場合、この子の花粉親は必ず B という対立遺伝子を持つはずなので、④⑤および⑥の個体は花粉親候補ではありえない。このようにして複数の座について調べていくことにより花粉親を絞っていく。

(センター本所 探索収集課 宮本尚子)