

北海道育種基本区のカラマツ属における次世代育種集団の 基盤構築に向けての取組

育種部 育種第一課 田村 明

遺伝資源部 探索収集課 山田浩雄

北海道育種場 育種課 花岡 創・中田了五・福田陽子・西岡直樹

1 はじめに

森林総合研究所林木育種センター北海道育種場では、北海道立総合研究機構林業試験場と協力し、平成 23 年度より第二世代精英樹の選抜を開始した。平成 27 年度末までにカラマツ 3 個体、グイマツ 35 個体の第二世代精英樹候補木が選抜済みである。グイマツについては、サハリン産のオープン実生家系から選抜した 21 個体の優良木を合わせると 56 個体が、第二世代の候補木として選抜されている⁹⁾。カラマツについては、今後 50 個体程度の第二世代精英樹候補木を既存の検定林から選抜する予定にしており、これらを使って次世代の育種集団を構築することになっている。

集団の有効なサイズは、近交係数の上昇率や世代交代に伴う遺伝分散の減少に関与するパラメータであり、次世代化を進める上で重要である。5～10 世代後まで遺伝的改良を実行する場合、集団の有効なサイズは 20～80 個体が必要とされている⁷⁾¹⁰⁾。また最初の数世代での近交弱勢を回避することを考えると、40～50 個体が必要とされている⁷⁾。北海道育種基本区では、新たにカラマツとグイマツの第二世代精英樹候補木を選抜するための検定林が少ないことや、両親あるいは片親が共通の候補木が多数ある⁹⁾。しかも、採種園などの生産集団に血縁関係のない個体を導入するとなれば、育種集団を 9 つ以上の分集団に分け、各分集団において有効なサイズを確保しておく必要がある。現在予定している第二世代精英樹候補木では、次世代の育種集団を構築するのに十分ではない可能性が高いため、遺伝的獲得量の確保と近交弱勢の発現が危惧される。そのため、次世代の育種集団を構築するための選抜母集団をさらに作る必要がある。

着花制御が難しいカラマツ属では、計画的に人工交配を行い、選抜母集団を作成することが難しい。そのため、多数の精英樹が開花した豊作年に採種園から採取した自然交配種子を利用して選抜母集団を作る方法を検討した。豊作年には精英樹同士の様々な組合せの家系や個体を得ることができる。これらの個体について、採種時には母樹のみしか明らかではないが、のちに解像度の

高い DNA マーカーを使用することにより、高い精度で花粉親を推定することができる。両親が明らかになれば、自然交配で得られた実生苗を人工交配による実生苗と同様に扱うことができ、BLUP 法等で精度良く全個体の育種価を推定し、効率的に優良個体を選抜することができる。この方法は Breeding Without Breeding 法 (BWB 法)¹¹⁾と呼ばれ、人工交配を進めることが難しいカラマツのような難着花性の樹種の次世代化を進める方法の一つとして注目されている。

さらに、このような自然交配種子から育成した苗木による検定林 (オープン実生検定林) は、設定時に家系の配置を熟慮することにより、将来実生採種林として優れた種苗の生産に利用することができる。カラマツ属では、精英樹を選抜してその種子を採種できるようになるまで長時間を要する。例えば、検定林からの第二世代精英樹の選抜から、接ぎ木増殖してクローン採種園を造成し、事業的に種子生産されるまで 15 年以上、検定林を設定してからでは約 30 年を要する。この期間を短縮する方法として第二世代精英樹を選抜した実生検定林をそのまま採種園に仕立てる方法がある。海外では *Acacia mangium*⁵⁾や *Eucalyptus pellita*²⁾、国内ではクヌギ¹⁰⁾で実生採種園による循環選抜育種が進められている。つまり、オープン実生検定林の中で優れた個体、すなわち第二世代精英樹を残し、不良個体を除去しながら採種園に仕立て、これらの第二世代精英樹から種子を採種する方法がとられている。カラマツ属でこの方法を適用すると、オープン実生検定林を設定してから約 15 年後には事業的な種子生産が開始できる可能性があり、検定林から選抜した個体のクローンを作成して採種園を造成する従来の方式と比べて大幅に育種年限を短縮できる可能性がある。

育種集団の有効なサイズを確保するための他の方法としては、遺伝的組成が異なる他の育種基本区で選抜された第二世代精英樹等の育種素材を北海道育種基本区に導入することが考えられる。ただし、導入個体は、北海道の気候に適応し、成長等が優れ

た素材でなければならない。

以上のことから、今後育種集団の次世代化を進めていくためには現在の検定林等からの第二世代精英樹候補木や優良木の選抜に加え、さらに広範な母集団からの選抜が必要となると考えられる。このことから、平成23年に豊作を記録した雨紛採種園から自然交配種子を樹種別、母樹別に採取して得た実生苗を用いて選抜母集団である実生検定林を設定した。また関東育種基本区から選抜されたカラマツ第二世代精英樹候補木の接ぎ木苗を用いて、北海道育種基本区内への適応性を検証するための試験地を設定した。今後、これらの検定林等からBWB法を取り入れて第二世代精英樹を選抜し、さらに、生産集団の早期育成のため、第二世代精英樹を選抜した検定林を実生採種林に誘導する技術開発も行っていく予定である。本報では、このための検定林等の試験設計および今後の調査や施業等の進め方について検討したので報告する。

なお、育種集団の次世代化については、第一世代精英樹の特性を現在の科学的水準で再評価し、第二世代と同程度に優れていると評価できるクローンについても第二世代精英樹とともに次世代の育種集団の構成員とし、この育種集団に新たに選抜した第二世代精英樹を順次加えていき育種集団全体の育種価と遺伝的多様性を徐々に高めていく方法（ローリングフロント法）を取り入れることとする。これにより、育種集団の次世代化を、徐々にではあるが確実に進めることが可能となる（注）。

（注）本稿において言及されている、優良木の導入やローリングフロント法については、平成28年12月19日に開催された第6回林木育種技術戦略委員会において審議され、今後の育種集団の構成方法として、「育種集団については、北方針葉樹等において、エリートツリーだけでは十分な遺伝変異と改良効果を確保できない場合には、遺伝的に優れていることを条件に、優良木等の導入も行う。また、育種年限が長く着花機会が少ない北方針葉樹等の育種の高速化のため、ローリングフロントの導入を検討する。」として委員会の同意が得られている（林木育種センターホームページ

<https://www.fipri.affrc.go.jp/fibc/rinbokuikusyugijyutusenryakuinkai/senryakuinkai.html>）。

2 BWB 法を利用した実生検定林

（1）北北25号一般次代検定林

本検定林は、平成27年5月に石狩森林管理署管内の5275林班ほ小班に設定した。平成23年9月に雨紛採種園（上川

中部森林管理署管内のグイマツ雑種F₁採種園）にあるカラマツのうち、19クローン30母樹から自然交配種子を採種した。北海道で選抜された精英樹9クローン由来の185個体、本州で選抜された精英樹3クローン由来の22個体、北海道で選抜された育種母材4クローン由来の362個体、本州で選抜された育種母材3クローン由来の135個体、連年着果する変異体（FL3）の自然交配種子からの68個体を合わせた合計772個体の苗木を4ブロック（反復）でプロット植栽した。1プロットは2個体×2個体の方形植栽（植栽間隔は1.4m×1.4m）であり、プロット内の4個体は、同一母樹から採種された個体で構成される（図1）。また、プロット間の間隔は2.2mとした。プロットの配置は、採種園の設計プログラムである「Mixed」⁹⁾を用い、隣接する周囲8プロットに同一クローン産のプロットが入らないように配置した。これは、半兄弟や全兄弟など血縁関係のある個体間での交雑による近交弱勢をできるだけ回避するための配慮である。

本検定林は、BWB法で、検定結果や雑種・血縁情報をもとに雑種個体や不良個体を除去し、第二世代精英樹候補木を選抜するとともに、最終的にはカラマツの優良個体だけで構成する実生採種林に誘導して、早期に優良種苗の生産を可能にすることを目的としている。実生採種園方式は、クローン採種園方式と比べて選抜強度が低いため、遺伝獲得量は小さいが、育種年限（育種サイクル年数）の短縮を図ることができるため、時間当たりの遺伝獲得量で比較すると従来のクローン採種園方式よりも実生採種林方式の方が大きくなる可能性がある。本検定林の設定の目的を要約すると、豊作時に採種した自然交配種子を用いて設定した実生検定林を採種園に誘導する実生採種林方式が、カラマツ属においてコスト、時間当たりの遺伝獲得量、優良種苗の早期普及の観点から、実生採種園方式が有効かどうかを総合的に判断することである。また次世代の育種集団の有効な集団サイズを確保するため、この検定林からは、第二世代精英樹を10個体程度選抜することを目標にしている。

上記の目的に沿った今後の調査や施業等の進め方を、以下の通り説明する。検定林を設定してから最初の5年間は、全試験木の樹高等の初期成長や気象害等の諸被害を調査する。また5年次までに全試験木の花粉親の樹種（カラマツまたはグイマツ）の判定を行う。なお、採種した平成23年は、採種園内のグイマツにも大量の雄花が着生していたことから、母樹のカラマツにグイマツの花粉が受粉してカラマツ×グイマ

ツの雑種の種子ができていいる可能性があるため、葉緑体 DNA マーカーを用いてカラマツ×カラマツか、あるいはカラマツ×グイマツの雑種か否かを判定する⁴⁾。カラマツ×カラマツの個体については、核 DNA マーカーを用いて花粉親クローンを同定し、両親の情報を利用してカラマツ×カラマツの全個体の初期成長等の育種価を算出する。

6 年次には、カラマツ×グイマツの雑種個体を除伐するとともに、カラマツ×カラマツの全個体について、算出された初期成長等の育種価を使って、家系内の個体選抜を行う。この時、プロット内の 4 個体のうち、3 個体を除伐する。この時点で設定時の 1/4 の個体数（約 200 個体、植栽密度 700 本/ha）に減少する。

10 年次に、残存個体について樹高、胸高直径、材質等を調査し、11 年次にこれらの各形質の育種価を算出する。残存個体の位置や血縁関係を考慮しながら家系選抜および家系内の個体選抜を行い、半分の個体を除伐する。この時点で設定時の 1/8 の個体数（約 100 個体、植栽密度 350 本/ha）に減少する。

11～15 年次は、植栽密度が減少したことによって残存個体の成長や特に樹冠の採種枝の成長が促進され、着果しやすい個体サイズや樹冠になっていることが期待される。また、光環境の改善により、着花しやすい条件になっていると期待されるため、この期間中に着花量や開花時期等の特性調査を行う。

15 年次頃には、残存している約 100 個体の中で血縁関係と、これまでの各種特性調査の結果から、約 20 個体の第二世代精英樹候補木を選抜する。これらの第二世代精英樹候補木について幹へのスコアリングなどの着花促進処理を行い、自然交配種子を採種し、新たに実生検定林を設定する。第二世代候補木から採種した自然交配種子の花粉親の多くは、検定林内に残存した個体と期待され、新しく作られる検定林は、第三世代精英樹を選抜する実生検定林になる。また、この頃には事業的な種子生産が開始していることが期待される。

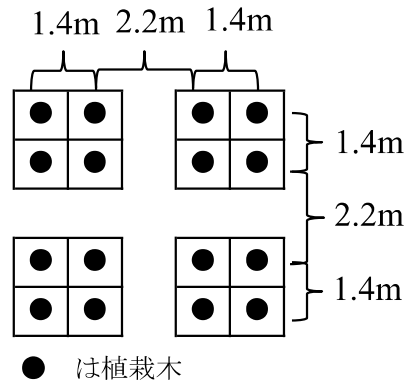
23 年次頃、第三世代の実生検定林 5 年次において初期成長等の調査を行い、その結果から家系内の個体選抜を行う。またこの解析結果を使って後方選抜を行い、最初に設定した第二世代の実生検定林に残存する 20 個体の第二世代候補木の中から 10 個体程度を選抜する。これらの個体は第二世代精英樹として育種集団に組み入れるとともに、そのまま検定林に残存させ、積極的に採種木として活用する。

28 年次頃には、第三世代の実生検定林 10 年次において、家系、家系内の個体選抜を行い、30 年次頃には第二世代の実生検定林での種子生産を完了する。

(2) 北北 27 号一般次代検定林

本検定林は、平成 23 年 8 月に雨紛採種園のグイマツから採取した種子により育成した苗木で造成した母樹別検定林である。平成 28 年 5 月に、石狩森林管理署管内の 5231 林班と・ち小班に設定された。検定林の設定目的および調査等の方針については、前述した北北 25 号とほぼ同じである。ただし、個体およびプロット間の間隔は全て 2m とし、また、周囲木 132 個体を植栽した。母樹はグイマツ 13 クローン 43 個体から採種して養苗した苗木を用いた。そのため、5 年次までに葉緑体 DNA マーカーを用いて、グイマツ×カラマツの雑種か、あるいはグイマツ×グイマツであるかの判定を行い、6 年次にグイマツ×カラマツの全個体を除去する。また核 DNA マーカーを用いてグイマツ×グイマツの全個体の遺伝子型を決定し、初期成長等の育種価を使って、家系内の個体選抜を

1) 北北 25 号の設計



2) 北北 27 号の設計

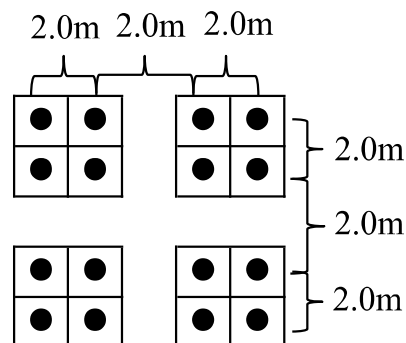


図 1. 北北 25 号および 27 号検定林のプロットの植栽方法

行う。なお、グイマツ×カラマツの雑種個体の花粉親として関与したカラマツクローンを同定することにより、将来、グイマツ雑種 F₁ 採種園の花粉親クローンとして利用した場合の初期成長に関する雑種一般組合せ能力を推定することができる。現在のところ、種内の一般組合せ能力と種間の一般組合せ能力の関係については知見が少なく⁹⁾、特に初期成長については知見が殆どない。今後、育林コスト、特に下刈りコストの削減が期待できるグイマツ雑種 F₁ 品種を開発していく上でも、重要な情報として調べておくことが望ましい。

6 年次以降の調査や施業等の方針は、北北 25 号と同様であるが、グイマツはカラマツよりも着果する年次が遅くなるため、第三世代の実生検定林の設定や事業的な種子生産の開始時期は遅くなる可能性がある。雑種の個体の割合によって変わるが、当検定林から第二世代精英樹を約 10 個体選抜する予定である。

3 関東育種基本区からの導入試験

(3) 北北 26 号遺伝試験林

北海道育種基本区で選抜予定の第二世代精英樹で構成する次世代のカラマツ育種集団は、その集団の有効なサイズが小さくなる可能性がある。そのため、本検定林は、本州産の優れた個体群の中から北海道の気候等に適応し、優れた成長や着花性を示すクローンを育種基本区の育種集団に導入し、次世代のカラマツ属の遺伝的多様性や改良効果を確保することを目的としている。

本検定林は平成 27 年 5 月に、石狩森林管理署管内の 5275 林班は・ほ小班に関東育種基本区で選抜されたカラマツ第二世代精英樹候補木 58 クローン苗木（第二世代精英樹候補木から採取した穂により育成したつぎ木苗木。以下同じ。）³⁾219 個体と、対照として北海道育種基本区選抜のカラマツ第二世代精英樹候補木 3 クローン 6 個体、計 225 個体を採種園設計プログラムの Mixed を用いて単木混交で設定した。採種園のような植栽配置にしたのは、豊作年に自然交配種子を採種し、次世代精英樹を選抜するための選抜母集団（実生検定林）を設定できるようにするためである。この場合も BWB 法で後から花粉親を同定することによって、第三世代精英樹の選抜が可能である。また、着果性を早期に評価するため、植栽間隔を 4.0m×4.0m の広めの植栽間隔で設定した。

なお、本検定林以外に、北海道育種場構内（北海道江別市）にも同一クローンのつぎ木苗木が植栽されている。最低 2 箇

所で気象害の有無、着花性や開花時期等の基礎的な特性を評価することができる。

(4) 北北 28 号遺伝試験林

本検定林は、平成 28 年 5 月に石狩森林管理署管内の 5231 林班と小班に関東育種基本区選抜のカラマツ第二世代精英樹候補木 52 クローン 208 個体と、対照として北海道育種基本区選抜のカラマツ第二世代精英樹候補木 3 クローン 7 個体、グイマツ優良木 21 クローン 67 個体、グイマツ第二世代精英樹候補木 34 クローン 138 個体、計 110 クローン 420 個体を 3 反復の単木混交で設定した。なお、本検定林に植栽した関東育種基本区から導入したカラマツ第二世代候補木クローンと北北 26 号検定林に植栽した導入クローンとは重複がない。

本検定林の設定目的は、北北 26 号と同様に関東育種基本区のカラマツ第二世代精英樹クローンの導入にあるが、グイマツの優良木を含む北海道育種基本区選抜の第二世代精英樹候補木等については、主に特性評価が目的である。北海道ではグイマツ雑種 F₁ の需要が高いため、グイマツ雑種 F₁ 採種園の母樹として推奨できる第二世代精英樹等を選定することが望まれる。特に事業的に早期に種子生産するためには、若齢でも着果し、かつ着果量が多く、雌花の開花時期がカラマツと同期するクローンの選抜が必要である。

4 考察

北海道育種基本区のカラマツ属について次世代化を進めていった場合、現在の第二世代候補木等で構成する育種集団では、遺伝的多様性と改良効果の観点から十分なサイズでない可能性があるため、新たに選抜母集団を作る必要がある。通常、第一世代精英樹同士で交配してできる育種集団林を選抜母集団とし、ここから第二世代精英樹を選抜し、次世代の育種集団を造るが、カラマツ属では、有効な着花促進技術が無いいため、選抜母集団を計画的に造ることができなかった。そこで、豊作年に採種した種子を使って母樹別に植栽し、後から DNA マーカーを使って父親を同定することによって育種集団林のように扱うことができる実生検定林を造った。また、本州産第二世代精英樹候補木を使って、北海道での適応性を評価するための遺伝試験林を造った。この試験地も選抜母集団として活用し、優良クローンがあれば北海道育種基本区のカラマツの育種集団に導入する予定である。

カラマツ属の場合、スギと比べて着花する年齢が遅い上に有効な着花促進技術が無いことから、種子が事業的に生産されるまで約 15 年を要する。つまり、次世代精英樹が選抜されても、事業的に優良種苗が生産されるのは、それから 15 年以上を要することになる。選抜から普及までの期間を短縮するための手段として、選抜母集団そのものを採種園に仕立てる方法がある。本報で紹介した実生検定林は、将来実生採種園に仕立てられるように設計している。しかし、カラマツ属の実生採種園については、日本で初めてのケースである。そのため、海外の事例も参考にしながら、実証データを蓄積し、実生採種園から生産される種苗の改良効果や、普及までの期間短縮の有効性等について示していく必要がある。

BWB 法を利用した実生検定林からの第二世代精英樹の選抜と実生採種園による普及は、難着花性の北方系針葉樹であるアカエゾマツやトドマツでも利用できる可能性がある。樹種の特性に応じた育種戦略の検討が必要であると考え。

5 謝辞

北北 25 号一般次代検定林と北北 27 号一般次代検定林を設計するに当たっては、関西育種場 三浦真弘育種研究室長、林木育種センター本所の平岡裕一郎基盤技術研究室長、高橋誠育種第一課長から有益なアドバイスを頂いた。また石狩森林管理署業務グループ森林整備官（現：上川南部森林管理署業務グループ森林整備官）菊地誠氏、北海道森林管理局 森林整備部 技術開発企画官（現：石狩地域森林ふれあい推進センター所長）藤生浩史氏には、これらの検定林設定に関して多大なるご協力を頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

6 引用文献

- 1) El-Kassaby YA, Lstiburek M : Breeding without breeding, Genetics Research 91、111-120 (2009)
- 2) Leksono B, Kurinobu S, Ide Y : Realized genetic gains observed in second generation seedling seed orchards of *Eucalyptus pellita* in Indonesia, Journal of Forest Research 13、110-116 (2008)

- 3) 宮下久哉・平岡裕一郎・三浦真弘・小野雅子・星比呂志：関東育種基本区におけるカラマツ第二世代精英樹候補木の選抜、平成 25 年度版林木育種センター年報、34-36 (2013)
- 4) Moriguchi Y, Kita K, Uchiyama K, Kuromaru M, Tsumura Y : Enhanced hybridization rates in a *Larix gmelinii* var *japonica* × *L. kaempferi* interspecific seed orchard with a single maternal clone revealed by cytoplasmic DNA markers, Tree Genetics & Genomes 4、637-645 (2008)
- 5) Nirsatmanto A, Leksono B, Kurinobu S, Shiraishi S : Realized genetic gain observed in second-generation seedling seed orchards of *Acacia mangium* in South Kalimantan Indonesia, Journal of Forest Research 9、265-269 (2004)
- 6) 大谷雅人・田村明・矢野慶介・西岡直樹・上田雄介・坂本床生・植田守・佐藤亜樹彦・湯浅真・井上晃・来田和人・今博計・黒丸亮：北海道育種基本区における第 2 世代精英樹候補木の選抜—平成 26 年度の実施結果—、平成 27 年度版林木育種センター年報、125-138 (2016)
- 7) Rosvall O and Andersson E. : Group-merit selection compared to conventional restricted selection for trade-offs between genetic gain and diversity, Forest Genetics 6:11-24 (1999)
- 8) 高橋誠：採種園設計のための Visual Basic プログラム「Mixed」の開発・評価と設計の作業効率に影響する要因、日本林学会誌 84、239-245 (2002)
- 9) 田村明・山田浩雄・福田陽子・矢野慶介・生方正俊・武津英太郎：グイマツ雑種 F1 の交配親に用いる次世代精英樹選抜の有効性、第 62 回日本木材学会大会研究発表要旨集、119 (2012)
- 10) 山田浩雄・久保田正裕・磯田圭哉：クヌギ精英樹 F1 実生採種園の家系内選抜により実現された初期成長の改良効果、日本林学会誌 93、139-142 (2011)
- 11) Yanchuk AD : A quantitative framework for breeding and conservation of forest genetic resources in British Columbia, Canadian Journal of Forest Research 31、566-576 (2001)