

熱帯産等早生樹種の育種マニュアル

本 論



独立行政法人

林木育種センター 海外協力部

§ 3	採種園・採穂園の造成と運営管理方法	29
3-1	採種園	29
3-1-1	実生採種園	30
3-1-2	クローン採種園	31
3-2	採穂園	33
§ 4	優良候補木の検定	36
4-1	実生での検定	36
4-2	クローンでの検定	37
§ 5	次世代化	38
5-1	育種集団の次世代化	38
5-1-1	優良候補木を用いた次世代化	38
5-1-2	優良木を用いた次世代化	38
5-1-3	次世代集団の個体数	39
5-2	生産集団の活用	39
Ⅲ	熱帯産等早生樹種の育種の実践例	41
1	インドネシア林木育種計画プロジェクト	41
2	ウルグアイ林木育種計画プロジェクト	42
3	マレーシア・サバ州	44
4	ベトナム	46
5	中国のポプラ	47
	引用文献及び参考図書	49

目 次

はじめに	1
I 林木育種の概要とその理論的背景	2
§ 1 集団選抜育種法の概要	6
1-1 優良候補木の選抜の概要	6
1-2 優良候補木の検定	9
1-3 次世代化の概要及び効果	12
1-4 林木育種における育種集団と生産集団の役割	13
1-5 林木育種における遺伝資源の役割	15
§ 2 その他の育種手法の概要	17
2-1 交雑育種法	17
2-2 栄養系分離法	17
2-2-1 実生選抜	18
2-2-2 栄養系選抜	18
II 熱帯産等早生樹種の育種の進め方	20
§ 1 育種計画の作成	20
1-1 育種目標の決定	21
1-2 育種目標の決定に関わる林業経営上の留意点	21
1-3 育種目標の決定に関わる育種技術上の留意点	22
§ 2 優良候補木の選抜	23
2-1 系統（家系やクローン等）の明らかな試験地からの選抜	23
2-2 系統が明らかでない既存林分からの選抜	27

はじめに

世界的に天然林の伐採が制限される中、依然として木質材料の消費は増える傾向にある。このような情勢を反映して、熱帯・亜熱帯地域では、持続的な林業経営を指向したアカシア属やユーカリ属等の熱帯産等の早生樹種の造林が年間約100万ヘクタールの規模で実行されつつある。これらの林業経営を効果的かつ安定的に行うために、成長が早く材質が優良で病害虫に強い造林種苗が強く求められている。

育種学は、遺伝学や統計学等の科学的な裏付けを基に、効率的に遺伝的に優れた改良種苗を得る目的で発展してきており、現在ではその成果が広く一般に認知されている。林木についても、植え付けから収穫までに長期間を要することや、植栽環境を制御しにくいこと等の特殊性を考慮した育種理論が構築され、その効果は実証されており、林業経営者が林業経営の重要な要素の一つとして林木育種について正しい知識を持つことは、効果的かつ安定的な林業経営を行う上で重要と考えられる。

林業経営上の収益性及び安全性を考慮しつつ遺伝的に優良な種苗を創出するには、それぞれの生産目標、伐期、遺伝変異、繁殖特性等の条件に応じた育種計画を、理論に基づき立案し、実行する必要がある。ところが、幅広い知識を求められる林業経営者やその他の林業関係者が、林木育種を効率的に進めるための専門的な知識を持つことは容易ではない。そこで、林業経営に林木育種をどのように取り込むべきかを判断するための最低限の知識を整理しておくことが必要といえる。ここで言う最低限の知識とは、①：林木育種を進めるにあたり必要な工程や費用等、②：林木育種によって得られる効果、及び③：①や②を理解するための林木育種に関する基礎知識である。

本マニュアルは、主に林業関係者が林業技術の基礎知識の一つとして育種の概要を学ぶために作成した。また、これから林木育種に本格的に関わる人が予備知識を身につけるために通読することも想定し作成してある。内容は、

- I. 「林木育種の概要とその理論的背景」
- II. 「熱帯産等早生樹種の育種の進め方」
- III. 「熱帯産等早生樹種の育種の実践例」

で構成されている。I. 「林木育種の概要とその理論的背景」を通読することで、林木育種の理論的背景や育種の過程を簡単に理解できるようになっている。さらに、II. 「熱帯産等早生樹種の育種の進め方」を通読することで、林木育種のそれぞれの過程の意義と相互の関連性、必要な試験の規模や期間、種苗の普及に要する期間等について熱帯産等早生樹の特性を踏まえて理解が深まるようになっている。最後に、林木育種を実践する場合の参考となるように、III. 「熱帯産等早生樹種の育種の実践例」を付記した。また、本マニュアルは本文の一部に専門的な内容を囲み記事として破線で囲んで挿入し、興味のある読者がさらに理解を深められる構成とした。

I 林木育種の概要とその理論的背景

次の写真は、インドネシアに植栽されているモルッカネムであるが、同じ種と同じ樹齢であるのに系統によって成長が随分異なっている。また、林木育種センター西表熱帯林育種技術園の試験によると、成長や葉の大きさなどの外部形態だけでなく、さし木の発根率といった生理的な特性も原産地や個体によって明らかに異なっていることがわかっている（囲み記事p.5「産地・家系・個体で異なる増殖率」を参照）。これらの様々な特性のばらつき（変異）は、もちろん環境による影響も考えられるが、親から子へと連綿と伝えられる遺伝という現象に負うところも大きい。育種は、この種内の遺伝による変異を我々人間生活のために上手に利用することに他ならない。



写真 I - 1 同樹齢でも個体によって異なる成長量
(インドネシアの実生採種園に植栽されているモルッカネム)

表 I - 1 林木と一般的な農作物との諸特性の違い（特に育種に関わる因子について）

	林 木	農作物
繁殖性	他殖性	自殖性・他殖性
個体サイズ	大	小
クローンの維持	易	難
寿命	長	短
着花齢（次世代化）に達する期間	長	短
収穫（検定）までの時間	長	短
栽培地の環境	多様	一様
栽培環境等の制御	難	易

育種は、対象とする生物の特性と生産目的を見極め、その生物と生産目的に最も適した方法で進められている。植物を対象とした育種は、稲、野菜、花卉といった農作物や林木（林業用の樹木）などで行われている。林木は、他の農作物とはかなり異なる特性を持つことから、育種の進め方も他の農作物と異なる。主な農作物と林木の特徴を表 I - 1 に示す。育種を進める上で特に重要な違いは、大部分の林木は、他殖性であり自殖や近親交配によって弱勢化する恐れがあることと、植栽してから収穫するまでに時間がかかるため検定（遺伝的に改良された度合いを確かめること）にも長期間を要することである。そこで、林木育種では、①近親交配の悪影響を避けるために十分な数でかつ検定をしなくても遺伝的によりすぐれていることが確率的に保証されるのに十分な数の優良個体を選び出し、②選ばれた十分な数の優良個体同士の（自然）交配によってさらなる遺伝的改良を進める「集団選抜育種法」という方法によって進められることが多い。この育種法の簡単な流れを図 I - 1 に示す。この育種法の特徴は、育種による改良の程度が確定されていない段階で改良種苗の普及を始め、普及を行いながらさらに遺伝的改良を進め、より改良の進んだ種苗が普及できるようになった時点で古い改良種苗からより改良の進んだ種苗の普及に切り替えることを繰り返すことである(図 I - 2)。言い換えれば、小さな波（育種の効果）を次々に繰り返すことによって結果的に大きな波（育種の効果）を得るということである。これは林木が一般に収穫や次世代化に長期を要すること等を勘案しているためである。これに対して、収穫までの期間が比較的短い一般的な農作物の育種では、育種を始めてから複数世代分の期間をかけ、育種の効果をより高く、より確実なものにしてから育種種苗の普及が始まる。つまり、集団選抜育種法による林木育種と他の農作物育種の違いは、農作物の育種は改良が完成した段階で実際の農業の現場に普及されるのに対して、林木育種は改良しながら、随時普及していく点である。

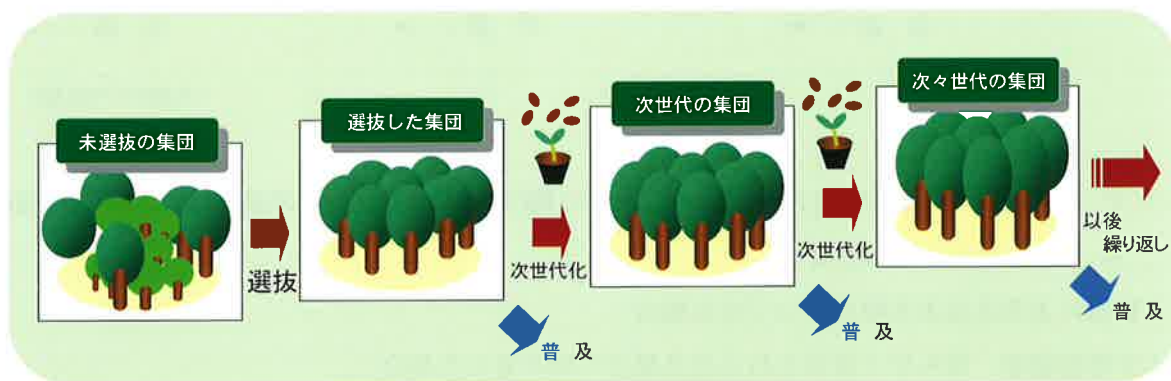


図 I - 1 集団選抜育種法の手順の概念図

林木育種では上述の集団選抜育種法のほかに、安価にかつ大量に栄養繁殖が可能な樹種については栄養系分離法が用いられる場合がある。日本の九州地方などで古くから行われているスギのさし木林業やブラジルの民間企業が行っているユーカリの組織培養苗を用いた植林などはこの例である。この育種法では、集団選抜育種法と同様に十分な数を選抜すれば検定せずに普及を始めることができるが、少数の優良なクローン品種を創出するためには、さし木等の栄養繁殖で苗木を養成し、検定林（試験

林) を造成して様々な特性の優劣を判定する必要がある。理論的には1伐期を経れば優良クローンを判別できるはずであるが、生育期間中の気象要因等の諸条件を制御することは不可能であるため、短伐期の早生樹種について少数の優良クローンを決定するには2～3伐期造林を繰り返すことでより確かな改良品種を得ることができる。

それぞれ異なる望ましい特性を持った個体同士を交配して、複数の望ましい特性をあわせ持った品種を作り出す育種手法として交雑育種法がある。交配の組み合わせは、種内のある特性を持った個体同士の交配、種間交配、さらに属間での交配と様々な形態があるが、このように人工交配により創られたものを利用する育種法を交雑育種法という。ここで注意が必要なのは、これらの育種法はそれぞれ完全に独立した概念でなく、林木の品種改良では基本的には集団選抜育種法を採りながら、交雑育種法を組み合わせる、といったような複合した方法も一般的に行われていることも明記しておく。

この「I 林木育種の概要とその理論的背景」では、読者が林木の育種手法及びその効果を理解するために、林木育種の基本となる集団選抜育種法を中心に、その進め方や得失、さらには理論的背景について解説する。

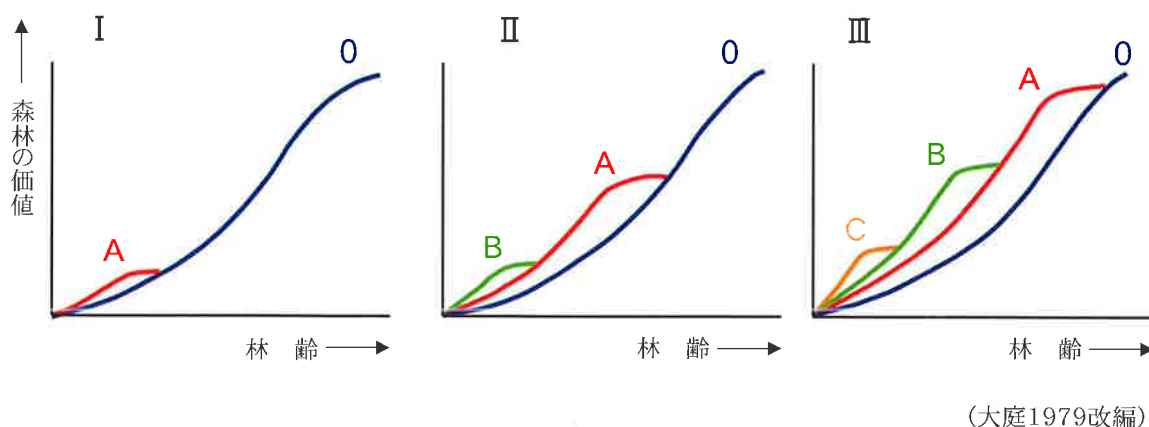


図 I - 2 植栽する苗木を改良の進んだ種苗に順次切り替えた時の森林の価値の増加

I , II , III : 更新の進行段階

0 : 植栽に未改良苗木を使用しつづける場合

A : 育種開始後、最も早く普及される改良種苗に切り替えた場合

B : 育種開始後、二番目に普及される A より改良が進んだ改良種苗に切り替えた場合

C : 育種開始後、三番目に普及されるさらに改良が進んだ改良種苗に切り替えた場合

産地・家系・個体で異なる増殖率

栄養繁殖による増殖の難易度は、樹種の間で大きな差があるだけでなく、同一樹種内であっても産地や家系によって、大きな差が認められる場合がある。また、同一個体でも、樹齢や栄養状態によって増殖の難易度が変わってくる。

西表熱帯林育種技術園で行ったアカシヤマンガウムのさし木発根性試験を例にあげる。

PNG産（パプアニューギニア産の7系統各3個体）とQLD産（オーストラリアクイーンズランド州産の8系統各3個体）の発根性を5段階評価し、産地別のさし木発根性を比較した。

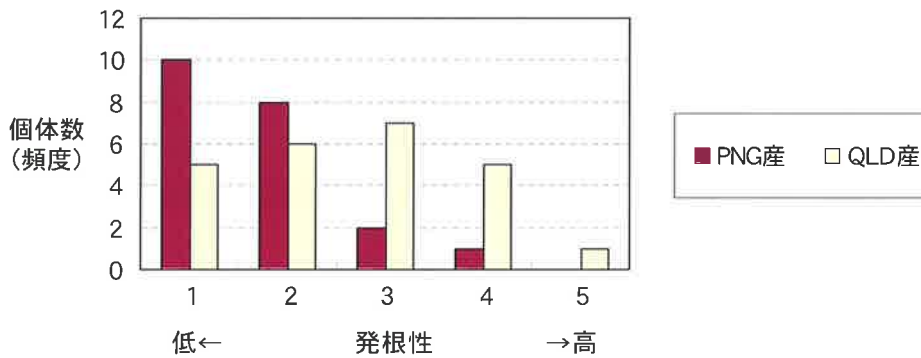


図 アカシヤマンガウムのさし木発根性

図に示したようにPNG産は、QLD産に比べ、発根性が低い個体の頻度が高い。

栄養繁殖の難易度の差は、遺伝的な因子が関与していることは明らかなが、生理学的には発根阻害物質や、植物成長ホルモンの影響等によってもたらされると考えられている。育種を進める上では系統差や個体差が少ないことが望ましいが、これらの差は、発根阻害物質の除去やホルモン処理を含む諸条件の改良によって、ある程度解消できる可能性がある。

§ 1 集団選抜育種法の概要

熱帯産の早生樹で行われている集団選抜育種法の手順の基本は、①多くの個体の中から目的とする優良候補木を多数（集団）選抜し、優良候補木の種子から次世代集団を作り、②その次世代集団からさらに優良候補木を多数（集団）選抜し、それらの優良候補木の種子から次々世代集団を作ることである。そしてそれぞれの段階で生産された種苗（改良種苗）を一般の造林に利用していく。要約すれば選抜（場合によって検定）と次世代化を交互に繰り返しながら徐々に改良種苗の品質を向上させていく方法である（図 I-1 及び図 I-2 参照）。

実際の林木育種では、選抜や次世代化のほか、検定や生産集団等様々な操作を組み合わせ、従来の改良種苗に比べて少しでも改良の進んだ改良種苗をより早く普及できるように工夫している。

この § 1 では「1-1」で優良候補木の選抜の概要について、「1-2」で優良候補木の検定について、「1-3」では次世代化の概要及び効果について解説する。さらに「1-4」では育種そのものを進めるための育種集団と、改良種苗を普及する際に用いる生産集団の役割、さらに「1-5」で林木育種における遺伝資源の役割にもふれる。

1-1 優良候補木の選抜の概要

優良候補木とは、多くの個体の中から、改良したいと考えている形質（成長性、材質、耐病性等）が他の個体に比べて優れているために選出された木のことであるが、選抜された時点では、遺伝的に優れているのか、生育環境が偶然良かったために優れているのかは明らかでない。したがって、選抜された優良候補木のクローン又は子供群が、選抜された環境と別の環境下においても優れているとは限らない。そのため、選抜時点で優れた性質を持っていても遺伝的に優れているか否かの評価が済んでいない個体は優良木ではなく優良候補木と呼ぶ。

しかし、「十分な数」の優良候補木を選抜すれば、選抜した優良候補木群がもとの集団に比べて、遺伝的に優れている確率は極めて高くなる。なお、「十分な数」は、樹種や改良の対象とする形質によって異なってくるが、これは、樹種や改良の対象とする形質によって、環境因子と遺伝因子との関与する割合が異なるためである。そこで、育種開始当初の遺伝的な情報が少ない状況のもとでは、出来る限り多くの優良候補木を選抜することが望ましい。

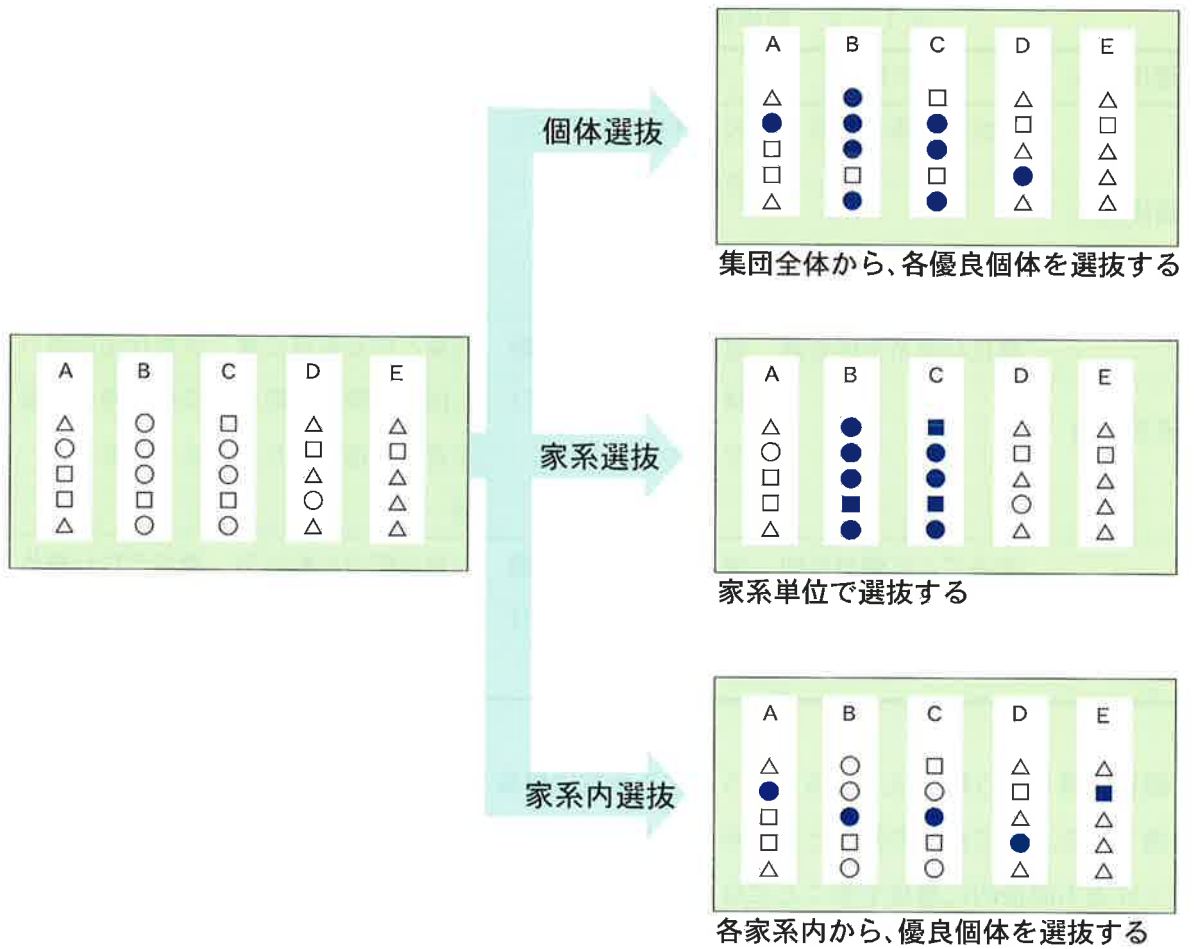
選抜の方法は大きく分けて、個体選抜、家系選抜及び家系内選抜の三つの方法がある。表 I-2 にこれらの方法の特徴を示し、図 I-3 にこれらの方法を模式的に示した。このほかに、家系選抜と家系内選抜を組み合わせた指数選抜（組み合わせ選抜）という方法もある。なお、家系は、大きく全兄弟家系（父親と母親がそれぞれ特定の 1 個体ずつの兄弟）と半兄弟家系（父親あるいは母親は特定の 1 個体であるが残りの親は不特定多数の兄弟）に分けられる。

表 I - 2 個体選抜、家系選抜及び家系内選抜の特徴

選抜方法	選抜の仕方	実行可能な集団	有効な場面	考慮すべき点
個体選抜	優良な個体を選ぶ	天然林を含めすべての森林で可能	対象となる形質に遺伝因子の関与が高いとき有効	家系管理されていない林からの選抜では選抜個体間の類縁関係が不明
家系選抜	優良な家系全体を選ぶ	家系管理された試験林(次代検定林など)で可能	対象となる形質に遺伝因子の関与が低いとき個体選抜より有効	次世代化の際の近親交配に特に留意する必要がある
家系内選抜	家系ごとに優良な個体を選ぶ	家系管理された試験林(次代検定林など)で可能	近親交配の心配がないので次世代化を繰り返すとき有効	優良でない個体も選抜せざるを得ない

実際に育種を行う際には、改良しようとする形質は樹高、胸高直径、通直性といった複数であるのが普通である。仮に育種の対象となる形質同士の相関が高ければ、1つの形質を選抜することで同時にもう片方も間接的に選抜することになるため、測定が簡単な1つの形質についてのみ選抜を行う場合もある。改良しようとする形質間の相関が高くない場合や、負の相関を示す場合には、それぞれの形質に重み(選抜指数)を付けて、その総合評価で選抜するという方法がとられている。重みは、経済的価値や遺伝的改良の可能性等を考慮して付与される。

また、1つの形質について選抜を繰り返して改良した後、別の形質を改良する順繰り選抜や形質ごとに別々に改良したのち交配により複数の形質を獲得した個体を選抜する方法などもあるが、1世代あたりの期間が長い林木には現実的な方法とはいえない。



A, B, C, D, E : 家系

○ : 選抜されない優良個体

□ : 選抜されない中庸な個体

△ : 選抜されない不良個体

● : 選抜された優良個体

■ : 選抜された中庸な個体

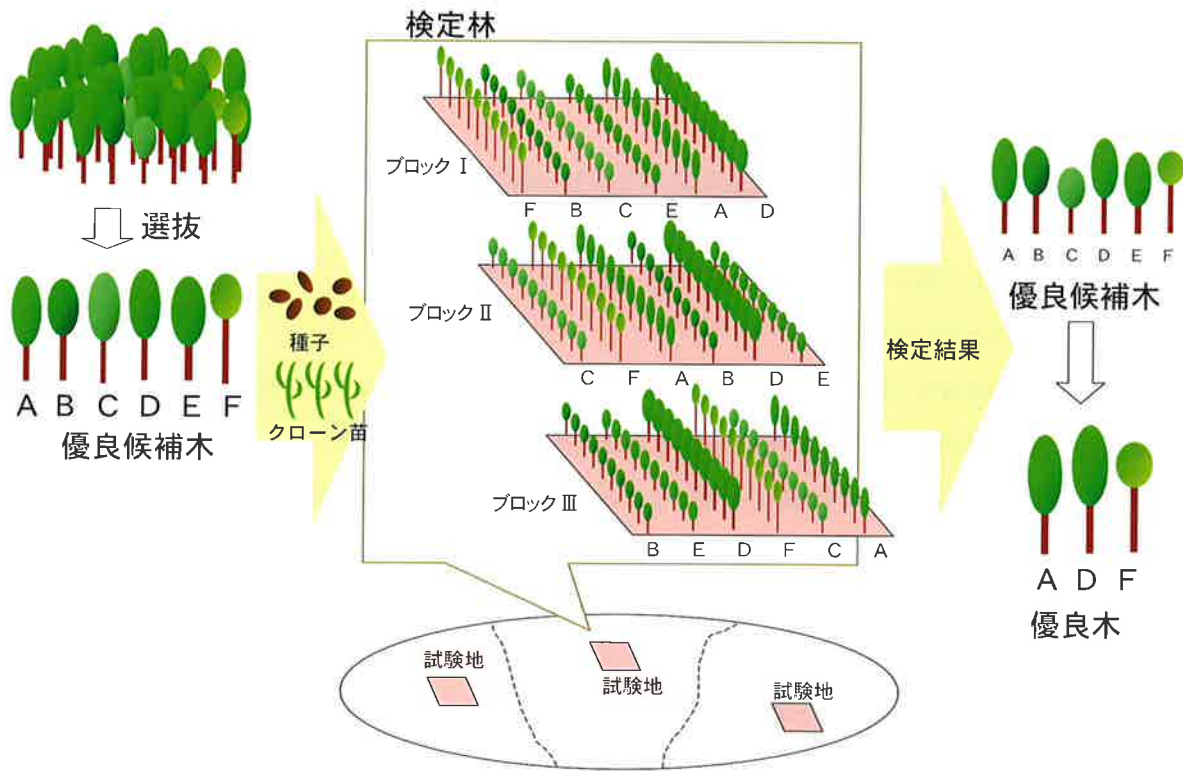
図 I - 3 個体選抜・家系選抜・家系内選抜

図は、説明のため集団数や個体数を少なくしている。

1-2 優良候補木の検定

選抜された多数の優良候補木の中から、遺伝的に優れた優良候補木のみを選別して育種に用いることによって、より高い効果が得られることは明らかである。しかし、1-1「優良候補木の選抜の概要」で解説したように、選抜した時点では、優良候補木は遺伝的にどの程度優れているかは明らかでない。選抜の効果をより高いものにするためには検定を行い、個々の優良候補木の遺伝的能力を評価する必要がある。また、検定によって、ある環境の下では優れた系統が別の環境下では劣るといった、環境因子と遺伝因子の交互作用についても評価することができる。このほかに、育種を効果的に進める上で重要な情報である遺伝率なども同時に推定することができる。検定の流れを図I-4に示す。

なお、優良木同士の子供でも遺伝的にばらつきがあるため、優良木同士の交配により次世代化した集団から優良候補木を選抜する場合も、優良木の確定には検定が必要になる。



図I-4 優良候補木の選抜から検定までの流れ

十分に信頼のおける検定結果を得るためには、より多くの検定材料が必要である。検定する材料には、優良候補木の子供群か優良候補木のクローン群が用いられる。どちらを用いるかは、大量増殖の可能性や検定の精度の他に、育種集団の次世代化の方法、育種種苗の普及・増殖方法及び検定材料を得るまでの期間等を総合的に勘案し決定することになる。

優良候補木の検定は、実験計画法に基づいて行う場合が多い。実験計画法は、近代統計学に基づいて発展したもので、良質のデータを効率よくとるための方法論である。これを行うためには以下の3つの原則を満たす必要がある。

- ① 一つの試験地の中に、複数の反復を設ける（反復）
- ② それぞれの反復内部には検定する全ての系統（全てが望ましいが実際に実行することは難しい場合が多いため、一部を除く方法を用いる場合が多い）を無作為に配置する（無作為化）
- ③ 反復内部の環境条件は、できるだけ均一にする（局所管理）

実際に育種種苗を植栽しようとして計画している地域が複数の異なる気象条件や土壌条件などにまたがっている場合は、それぞれの環境条件下に試験地を造成し、これを試験地内の反復よりさらに上位の反復と見なして検定する必要がある。樹高や材積といった収量に関する形質は多くの遺伝子が関与し環境の影響を受けやすいため、異なる幾つかの環境条件を反復として試験を実行することは必要不可欠である。この原則は育種の試験のみならず樹種の選定試験等でも同様であるが、実際にはこれらの原則を無視した試験や試験地をよく見かけるため十分に留意する必要がある。

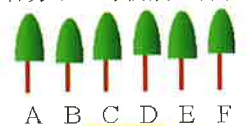
遺伝率の推定方法の例

遺伝率を推定するには様々な方法があるが、その一部を紹介する。

1 分散分析による遺伝率の推定

一般に、樹高や直径などの量的形質は、複数の遺伝子が作用しており、さらに環境による変異も作用しているため、集団全体の測定値は連続的に変化し正規分布する。この特性を利用して、集団全体の分散を環境因子による分散と遺伝因子による分散に分割することで、全分散に対する遺伝因子による分散の割合を推定できる。遺伝率とは、全分散に対する遺伝因子による分散の割合の総称で集団全体の変異に遺伝的な因子が関与している割合の重要な指標となる。遺伝率を推定するに当たっては、実験計画法に基づき、系統（家系やクローン）が管理されており、反復が設けられていることが前提であり、系統を遺伝因子、反復を環境因子、その他の因子を誤差として取り扱う。

・一つの林分から母樹別に採種して試験林をつくり、家系間の比較から推定する方法



母樹数 \times A・B・C・D・E・F：家系



母樹別実生苗

ACEBDCFE・・・
BEDAFBCD・・・
DECFAFAB・・・

試験林造成 各家系をy本ずつランダムに植栽

母樹の集団の x 個体より採種し、それぞれの実生家系を試験林に y 本ずつ植栽した時の分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	平均平方期待値成分
全体	$xy - 1$	S_0	M_0	
家系間	$x - 1$	S_1	M_1	$\sigma^2e + y\sigma^2f$
家系内	$x(y - 1)$	S_2	M_2	σ^2e

$$\sigma^2 f = \frac{1}{4} \sigma^2 A \rightarrow \sigma^2 A = 4 \sigma^2 f$$

$$\sigma^2 e = \frac{3}{4} \sigma^2 A + \sigma^2 D + \sigma^2 E$$

$$\begin{aligned} \text{遺伝率 } h^2 &= \frac{\sigma^2 A}{(\sigma^2 A + \sigma^2 D + \sigma^2 E)} \\ &= \frac{4 \sigma^2 f}{(\sigma^2 e + \sigma^2 f)} \\ &= \frac{4 (M_1 - M_2) / y}{[M_2 + (M_1 - M_2) / y]} \\ &= \frac{4 (M_1 - M_2)}{M_1 + (y - 1) M_2} \end{aligned}$$

$\sigma^2 A$: 相加的遺伝分散

$\sigma^2 D$: 優性分散

$\sigma^2 E$: 環境分散

2 親子回帰による遺伝率の推定

遺伝率の算出には①のほかに親集団に対する子集団の回帰から推定する方法もある。この方法では子供集団が伐期に達してようやく遺伝率の推定ができることになるため、長伐期の林木では育種に活用される場面は多くないが、①の方法で推定された遺伝率を確認するために使うことができる。

- 両親がわかっている場合、遺伝率は両親の平均値と子の平均値の回帰直線の傾きで表すことができる。

$$\text{遺伝率 } h^2 = b \text{ (両親の平均値と子の平均値の回帰直線の傾き)}$$

- 片親のみわかっている場合、片親の平均値と子の平均値の回帰直線の傾き b は、遺伝率の2分の1となる。

$$\text{遺伝率 } h^2 = 2b$$

(大庭・勝田 (1991) より引用)

1-3 次世代化の概要及び効果

次世代化とは、育種を進めている集団中の優良候補木や優良木から得られた種子を用いてさらに優良な集団を作ることである。次世代化の目的は、優良木同士の交配によって得られた子供群からさらに優れた優良木を選抜することで、優良遺伝子のさらなる集積を進めることにある。特に、実生苗で育種種苗の普及を行う場合には、次世代化は育種の成果を実現するために欠くことができない手段である。次世代化の方法には、人工交配と自然受粉による交配とがある。この次世代化の方法別の特徴を表I-3に示す。人工交配による方法は望ましい形質を持った優良（候補）木同士を交配できるだけでなく、近親交配の度合い等も管理できるが、集団選抜で扱う大量の優良個体を次世代化するには、交配に要する作業や交配に適した樹型管理等に大きな労力を必要とする。自然受粉による交配では、労力は少なくすむ一方、個体ごとの花粉生産量の違いや着花時期のずれ等に起因する交配に關与する花粉親の偏りや、望ましい組み合わせでの交配ができない等の欠点がある。

表 I-3 次世代化の方法別の特徴

次世代化の方法	花粉親の選択	近親交配の管理	交配の作業量
人工交配	可能	可能	膨大
自然受粉による交配	不可能	不可能*	僅少

*: DNA 分析を用いれば可能であるが、現状では人工交配より経費がかかるため不可能とした。

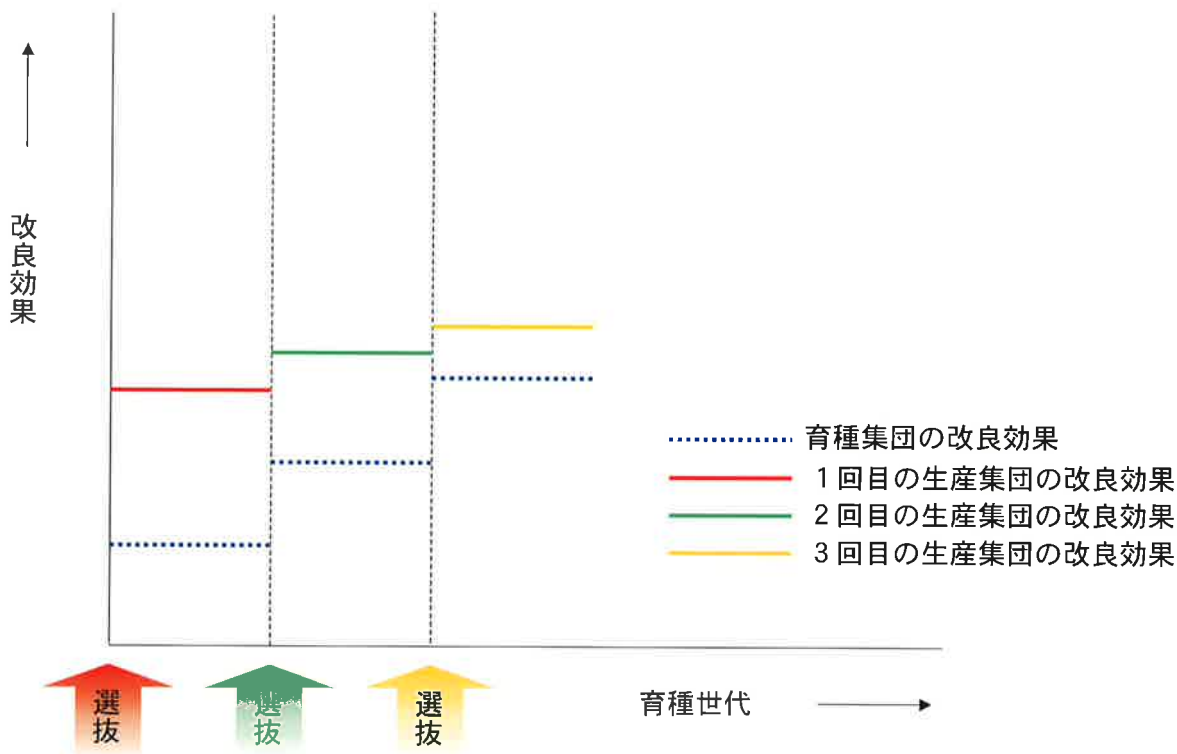
次世代化を重ねるにつれて、育種を進めている集団に改良対象の形質に關係する優良遺伝子が集積されるが、この優良遺伝子の集積には限界があり、やがては次世代化をしても改良効果が上がらなくなる。このことを選抜限界と言うが、選抜限界は同じ集団でも主に世代あたりどのくらいの個体まで選抜するかという選抜基準の設け方で異なる。最も高い選抜限界を得るためには、世代ごとの選抜基準を50%（選抜対象の50%の個体を選抜すること）に設定すればよく、選抜基準が50%より高い（選抜対象の50%未満の個体を選抜すること）とき、世代あたりの選抜基準が高いほど（選抜対象に対して選抜する個体の割合が少ないほど）、より早い世代で選抜限界に達し、選抜限界はより低くなる關係があることがRobertsonにより理論的に証明されており、トウモロコシや鶏などの他殖性の生物の一部では実証されている。つまり、一度に欲張って改良効果を高く設定してしまうと、最終的な改良効果は低いまま頭打ちになってしまうということである。しかし、収穫に長期間を要する林木で多数の世代を繰り返すことは、超長期を要するため、現実的とはいえない。そこで現実的には、育種を進める過程で得られる遺伝率などの情報を基に、作業量と期待される効果などを試算し、適正な選抜基準を決定する必要がある。

また、次世代化を繰り返す際には、近親交配を避けることに留意する必要がある。これは、一般的に他殖性の林木では、近親交配は近交弱勢（近親個体間の交配により、有害な遺伝子の効果が現れてくる現象）を招き、負の改良効果となるためである。次世代化に關与する個体数が多いほど世代を重

ねるにつれて高まる近親交配の度合いが低く、次世代化に際して人工交配を用いれば自殖や兄弟交配等の近親交配を人為的に避けることができる。また、家系内選抜は世代を重ねるにつれて高まる近親交配の度合いを比較的低くおさえることができる選抜手法である。しかし、次世代化は近親交配をさけることそのものが目的ではないので、次世代化に際しては、改良効果との兼ね合いを考慮しつつ、出来る限り近親交配が起きないように管理する。

1-4 林木育種における育種集団と生産集団の役割

集団選抜育種法では、1-3「次世代化の概要及び効果」で解説したように、複数の世代を経て高い改良効果を得ることを目的とするため、世代あたりの改良効果をあえて大きくしない。しかし、章の冒頭で解説したように、林業経営の観点からは、より早くより良い改良種苗を造林に用いる必要がある。そこで、林木育種においては、世代を重ねて改良を続けるための集団（これを「育種集団」と呼ぶ）の他に、実際に造林用の種苗を生産する集団（これを「生産集団」と呼ぶ）がつくられる。生産集団は、より早く高い改良効果が得られるように高い選抜基準で選抜した個体群で構成されている。育種集団と生産集団の改良効果の違いに関する概念図を図I-5に示す。



図I-5 育種集団と生産集団の改良効果の違いに関する概念図

破線は育種集団の改良効果の推移、実線は生産集団の改良効果の推移を示す。

生産集団では、育種集団のように次世代化を繰り返すことで高い改良効果を得るという役割がなく、当面の高い改良効果を得ることを目的とする。このため、より高い基準で優良候補木の選抜や優良木の確定を行い、育種集団に比べてより少ない個体数で生産集団を構成する。

生産集団を構成するに当たっては、育種集団より高い改良効果を持つ普及用造林種苗を得るために十分な注意を払う必要がある。例えば、① 未検定の優良候補木を用いて生産集団を構成する場合は、改良する形質に関与する遺伝因子の割合が低いときに、表現型が良いごく少数（数個体）の優良候補木を用いて生産集団を構成しても、育種集団に比べて高い改良効果があるとは限らない。したがって十分な個体数の優良候補木を用いて生産集団を構成することが望ましい。また、② 検定した優良木を用いて生産集団を構成する場合は、少なくとも次世代の育種集団とほぼ同時期に育種種苗の普及が始まるため、次世代の育種集団より高い改良効果を持つ普及用造林種苗を生産できるように、構成する優良木の種類や数などに留意して生産集団を造成する必要がある。③ 生産集団を構成するにあたり、改良種苗の供給可能な量や、造林用種苗がもつ遺伝変異が極端に狭くなりすぎないことにも配慮すべきである。

遺伝的改良度合い（遺伝獲得量）の指標の算出方法

育種の成果は育種の対象とする集団が遺伝的に改良された度合いとして表すことができるが、選抜した優良個体の表現型は、環境因子と遺伝因子双方の影響を受けているため、単純に選抜対象の集団の平均値と選抜された優良候補木集団の平均値の差を育種の成果とすることは誤りである。育種の対象とする集団が遺伝的に改良された度合いは以下の式で表すことができる。

$$\text{遺伝的改良度合い（遺伝獲得量）} = (\text{選抜された優良個体集団の平均値} - \text{選抜対象の集団の平均値}) \times \text{遺伝率}$$

この他に、選抜対象の集団の平均値と選抜された優良候補木集団の無作為交配由来の子供群の差としても、遺伝的改良度合い（遺伝的獲得量）は算出できる。

1-5 林木育種における遺伝資源の役割

育種を進める過程で育種の開始当初に全く予想しなかった新たな育種目標が追加される場合や、改良を進めている集団の近親交配の度合いが育種計画策定当初の想定より進みすぎてしまう場合等がある。このようなとき育種を進めている集団に対して新たに必要となる遺伝子を持つ外部の集団を導入する必要がある。また、林木の育種は、それぞれの時代の要請に応じ、対象樹種を定め実施されるため、新たな育種対象樹種が必要となる可能性も考えられる。以上のようなことから、国や国際機関等、林木育種を指導・支援する機関は、将来を見越した十分な育種素材の供給源を遺伝資源として保存し、必要に応じて配布する事業（ジーンバンク事業等）を行っている。

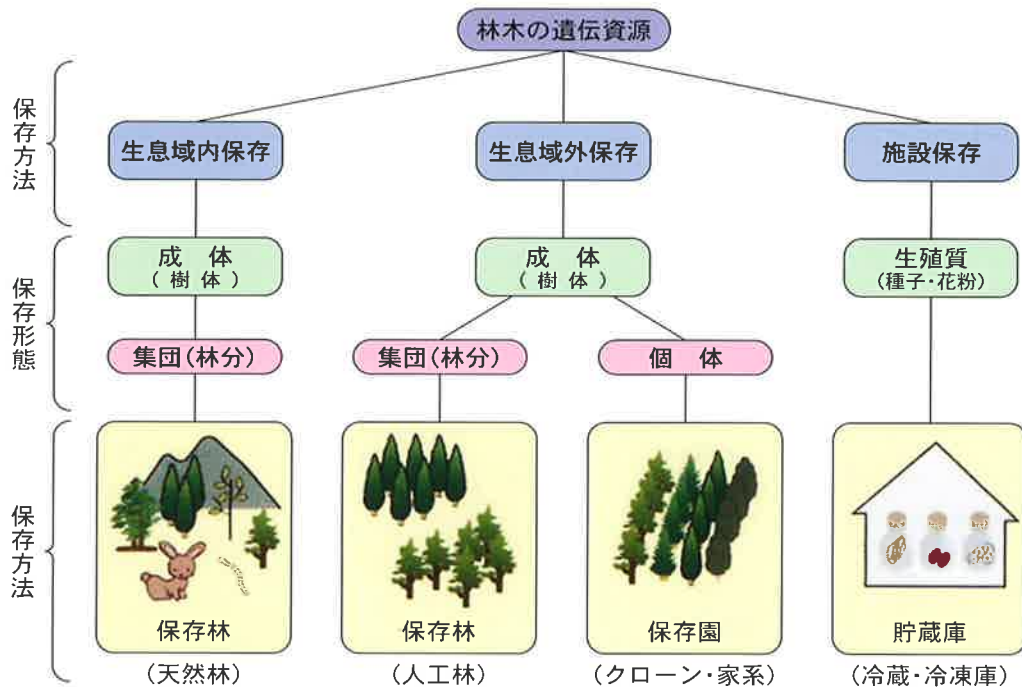


図 I-6 林木遺伝資源の保存方法と保存形態

(林木のジーンバンク事業の概要；独立行政法人林木育種センターのパフレットより転写)

遺伝資源の保存は、天然林等の元々の生息域内にそのまま保存する方法（生息域内保存）と生息域外に持ってきて成体として保存する方法（生息域外保存）、及び種子や花粉を施設内で保存する方法（施設保存）に大別される（図 I-6）。なお、施設保存は、生息域外保存の一種であるが、ここではわかりやすくするため、独立させている。どの保存方法を採用するかは、保存対象樹種の重要度や増殖や保存の難易度、保存用地の確保など様々な要因を考慮して決定されている。

遺伝資源を育種に活用するためには、それぞれの遺伝資源の遺伝的な特徴が明らかでなければならない。そのため、ジーンバンク事業では、遺伝資源の特性評価を行っている。この特性評価は、成長や材質といった現在の育種目標に直接関連する特性だけでなく、病虫害抵抗性や気象害抵抗性、生理・生態的特性など多岐にわたっている。

林分の密度効果と育種効果の関係

林木育種では、樹高、直径、材質、真円性、通直性等の形質について、遺伝的に改良された種苗が普及されることにより、育種効果が発揮されるが、施業方法の違いが発揮される育種効果に与える影響は大きい。

例えば、単木で柱材などを生産目標とする施業では、間伐などの林分の密度管理を適切に行うことで、樹高、直径に対する育種効果を十分に引き出すことが可能である。これに対して、パルプ材を生産目標とする施業では、林分全体の成長を大きくするための施業を行うため、林分の密度効果の影響により直径に対する改良効果は比較的発揮されにくい。このことから、パルプ材生産のように林分あたりの収量を重視する施業体系では、育種種苗を用いる価値が少ないと誤解されがちであるが、うっ閉までの期間を短縮できることや、密度効果の影響を受けにくい樹高等の形質の改良効果は発揮されるため、育種種苗を使うことで収穫量の向上や伐期の短縮等の利点がある。

§ 2 その他の育種手法の概要

実際の林木育種では、集団選抜育種法を基本としつつも、これによりがたい部分を補完したり、より高い改良効果をより短期間で実現するための育種手法を取り入れている。交雑育種法は§ 1の自然受粉種子の代わりに人工的に交雑された種子を用いることで、より育種目標に沿った改良を行うことが可能である。栄養系分離法は選抜した優良候補木をさし木や組織培養などで栄養繁殖し、検定により優良木を確定する育種手法であり、造林用種苗の普及も栄養繁殖で進められる。§ 2では交雑育種法と栄養系分離法の概要とその理論的背景を解説する。

これらの育種手法はそれぞれ完全に独立した概念でなく、ここに示した育種手法の分類も確立されたものではない。前段で述べたように、それぞれの育種手法の利点を複合した方法も一般的に行われていることを再度明記しておく。

2-1 交雑育種法

育種を進めていく過程で、病虫害抵抗性などの新たな形質を育種目標として既存の育種目標に付与する必要が生じる可能性がある。複数の形質を同時に育種目標として設定する場合には、選抜の段階では指数選抜が有効であることを1-1「優良候補木の選抜の概要」で既に解説した。これ以外に、新たな育種目標の付与や複数の形質を同時に育種目標として設定する場合に、次世代化の段階で用いる手法として交雑育種法がある。

一般的な農作物育種における交雑育種法は、主な対象が自殖又は栄養繁殖によって増殖が可能な植物で、ある形質について改良した品種に、別の形質について改良した他品種を交配して、新たな品種を創出する育種方法を指す。このとき、数回の交配と選抜を経て目的とする複数の特性を持った品種が創出される。他殖性の林木では、次世代化に際して望ましい特性を持った個体同士を人工交配し、目的とする品種を創出することを交雑育種法としている。

交雑育種法では、異なる望ましい特性を持った個体同士を人工交配することで、自然交配に比べて効率的に望ましい特性を併せ持つ次世代集団を創出することができる。また、自然交配で次世代化する際には個体の開花時期や開花頻度が低いこと等が原因となり、次世代の育種集団の花粉親が特定の偏った個体になることや自殖苗の割合が増えることが問題になるが、人工交配を用いるとこれらの問題を回避できる利点がある。

2-2 栄養系分離法

一般に多くの樹種は、さし木やつぎ木、とり木といった栄養繁殖が可能である。まれには栄養繁殖によってしか造林用種苗として大量増殖ができない樹種もある。また、実生繁殖と栄養繁殖両方で造林用種苗として大量増殖が可能な樹種でも、栄養繁殖した個体を造林することによって大きな利点を得られる場合がある。たとえば、ある個体を持つ望ましい特性が実生繁殖によっては効果的にその子供群に出現しない場合は栄養繁殖を用いる方が有利である。このほかにも、数少ない遺伝子が関与して

いる形質，環境の影響を受けにくい形質，又は遺伝子のホモ化によってのみ現れる形質等を育種目標とした場合には，栄養繁殖により造林用種苗として普及することが適している。このように，さし木や組織培養といった栄養繁殖によるクローンを用いる育種手法を栄養系分離法という。

ただし，栄養系分離法で創出された品種は，有性繁殖によって得られるような遺伝子型の変異が無いため，単一クローンの場合には，数伐期にわたる長期間の造林事業を進めていく過程で生ずる育種目標の変化や病虫害の発生等に対応しにくいという側面がある。可能な限り，相応の複数クローンを使用することが望ましい。また，この育種手法を採用するに当たっては，造林用種苗を速やかに栄養繁殖で増殖できる技術があることが前提で，樹種，産地，樹齢等で増殖率が異なってくることに注意する必要がある（囲み記事 p.5 「産地・家系・個体で異なる増殖率」参照）。写真 I - 2 に栄養繁殖により大量増殖した苗を造林に用いているパラグアイのイグアス造林社の様子を示す。

栄養系分離法は選抜法によって実生選抜と栄養系選抜に分けられる。



写真 I - 2 組織培養とさし木で大量増殖されたユーカリグランディスの苗
(パラグアイ イグアス造林社)

2 - 2 - 1 実生選抜

実生選抜は，実生繁殖した個体集団から優良候補木を選抜し，それを栄養繁殖して造林に用いるものである。検定を経た優良木を用いれば，優良候補木に比べてさらに高い改良効果が得られる。このため，通常の集団選抜育種法で選抜した生産集団を栄養繁殖して造林することや，交雑育種法で得られた次世代を栄養繁殖して造林することなども実生選抜といえる。

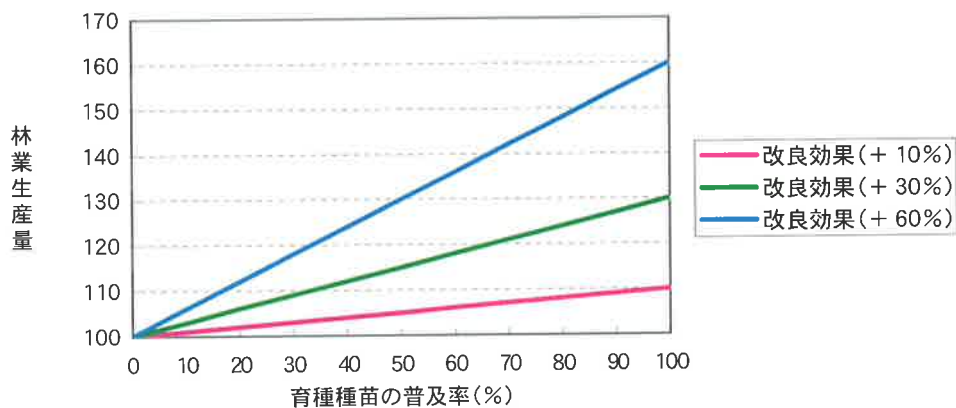
2 - 2 - 2 栄養系選抜

栄養繁殖でしか大量増殖できない樹種がまれにみられるが，これらは栄養繁殖して検定することで優良なクローンを確定し造林に用いることができる。また，近年発展が著しいDNA分析手法を用いれば，複数のクローンで構成された既存林分から直接優れたクローンを選抜することも可能であるが，林木では，今までのところ実現した例はないと思われる。

改良度合い×普及率＝林業生産性の向上率

林業に対する育種の貢献度は、種苗の遺伝的改良度合いとその普及率で決まる。

育種により改良された集団や個体を適切な増殖方法を用いて、早期に大量に普及させることにより、林業生産量は増加する。選択する増殖方法が適切でなければ、普及までに長期間を要することや、大量増殖ができないことなどの理由から、普及率は低くとどまり、林業生産量全体の増加につながらない。



図は、10%、30%、60%の改良効果を持つ育種種苗が、0～100%の普及率で、どの程度林業生産性を向上させるかを表している。縦軸の数値は、育種種苗を用いない場合を100としたときの林業生産量である。

改良された集団や個体の改良効果が高くても、普及率が低ければ生産性の向上は見込めず、改良効果は低くても、短期間で普及率が高くなれば、林業生産性は大きく向上する。したがって、改良効果だけに目をとられず、対象樹種に適した増殖方法を選択し、より早く、より多くの改良種苗を普及させることが求められる。

例えば、改良効果60%の個体を10%普及させた場合と、改良効果10%の集団を100%普及させた場合では、後者の方が林業への貢献度が高い。

さらに、前述したように、同じ種内でも、家系や個体によって増殖率が異なるため、遺伝的な要因により増殖率が極端に低い家系や個体を、育種の途中段階で除外することも選択肢の一つである。

II 熱帯産等早生樹種の育種の進め方

現在の林木育種は1930年代にスウェーデンで発展した理論が原型となっている。この理論の実行手順は、表現型により優良候補木を選抜し、選抜した優良候補木のつぎ木(場合によっては他の繁殖法)個体を用いて採種園を造成し種子生産を行うことである。この理論に基づいた林木育種が世界各国で実行され、表現型が優れた個体が優れた遺伝子型を持っている確率が高いことが確かめられた。現在ではさらに高い育種効果を得るために、選抜した優良候補木個々の子供群(あるいはクローン)を検定することで、優良木のみを採種園に用いて種子を生産する手法が取り入れられている。この理論及び林木育種法は、伐期が数十年の樹種に適用することを目的に発展したために、特に第一世代の生産集団で、比較的高い遺伝的改良効果を得ることを意図していることが特徴である。

一方、伐期が数年から十数年の早生樹種では「I章1-3 次世代化の概要及び効果」で解説した世代を重ねて改良することの利点を生かした漸進的な改良に重点をおく場合が多い。ただし、早生樹種の育種においても改良効果は比較的低いものの第一世代から改良種苗の普及を行うことは同じである。また、「1-4 林木育種における育種集団と生産集団の役割」で解説したように、育種を進めるための集団(育種集団)と造林に用いる育種種苗を生産する集団(生産集団)とを区別することで、前者による世代を重ねることによる高い育種効果の獲得と、後者によるより優れた育種種苗のより早い普及とを並行して達成するための工夫が図られている。

熱帯産等早生樹種を育種対象樹種とする場合でも、育種目標に合致した優良な個体を大量に選抜し、次世代化を繰り返すことを中心に、状況に応じて検定、人工交配、栄養繁殖等を用いてより高い育種効果を得るといふ、基本的な育種の進め方は変わらない。本章では実際の林木育種の手順に沿って、それぞれの過程で必要な事業量(規模)を示し、また留意する点を解説した。ただし、それぞれの過程で必要な事業量は育種の対象とする樹種や、育種目標等により異なるので具体的な数値を示すには至らなかった。特に熱帯産等早生樹の特性を反映した育種手法や育種の過程については、わかりやすいように文中で簡単に解説した。

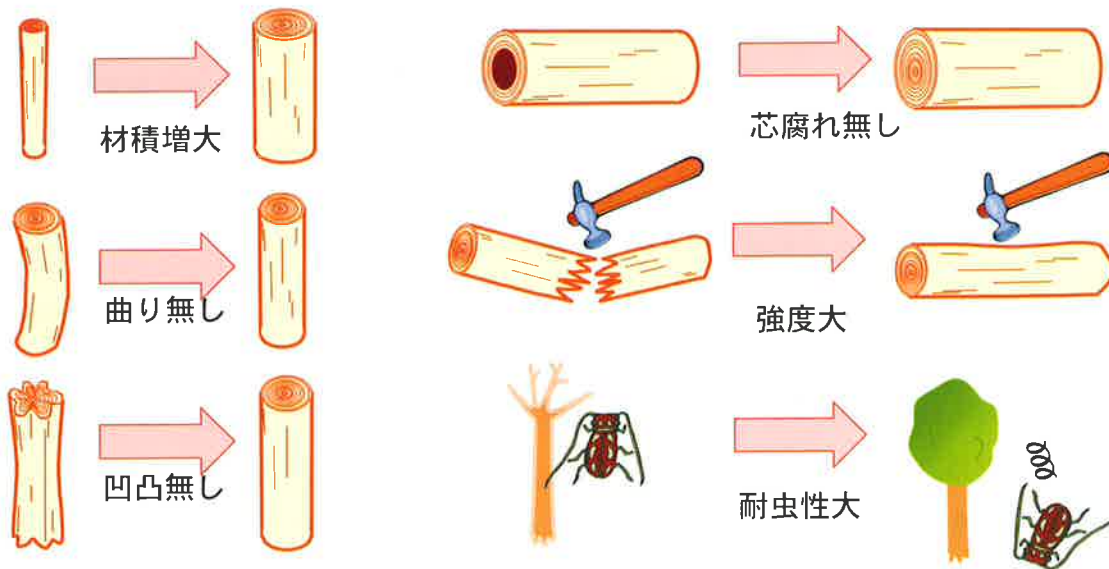
§ 1 育種計画の作成

ある地域でこれから育種を行おうとする場合、育種事業全体を統括する「育種計画」を作成することが望ましい。育種計画には、育種を進める基本方針、育種対象とする樹種、樹種ごとの改良しようとする形質(育種目標)、採用する育種方法、事業に必要な物量計画、研究計画等が定められている。これらは、ある地域における林業の動向、造林事業や苗木需要の動向、自然的条件等を考慮するとともに、当該地域や国全体の森林計画等との調和を図り、関係する機関の役割分担や連絡調整を行い、育種事業が効率的に推進できるように策定するものである。

1-1 育種目標の決定

育種目標とは、育種によって改良した品種が具備すべき特性のことで、具体的には、成長性、幹の形状、材質、病虫害抵抗性などの形質ごとに目標が設定される(図Ⅱ-1)。育種目標の決定は、実際には林業経営上の生産目標に大きく左右される。しかし、たとえ林業経営上改良が最優先される目標であっても、遺伝因子の関与が低く遺伝的改良効果の少ない形質や改良できる可能性のない形質は育種目標を設定するべきではない。

育種目標の決定に際しては、遺伝的に改良することによる林業経営上の利点、遺伝的に改良できる程度、遺伝的に改良するのに必要な費用等を総合的に勘案する必要がある。



図Ⅱ-1 育種目標が設定される様々な形質

1-2 育種目標の決定に関わる林業経営上の留意点

林木育種を行う意義は、生産目標に沿って遺伝的に改良した種苗を使うことで林業経営における生産量、収益及び生産の安定性の向上の達成を見込めるからである。これらを達成するためには、それぞれに則した育種目標を掲げる必要がある。表Ⅱ-1に林業経営上の課題とそれに対応する主な育種目標を示した。一般に育種目標を設定してから、達成されるまでには長期間を要し、途中で育種目標の変更には対処しにくい。したがって、長期の需要を見通した育種目標を設定することが望ましい。育種を効果的に進めるには、第1章で説明した林木育種の理論的な背景に基づいて実施するための知識と経験をもつ育種の担当者が必要になる。このほかに調査補助やデータ管理等に随時人手が必要になる。育種対象樹種が多岐にわたり、育種目標を設定する形質が多くなればなるほど、人件費や試験地の長期的な確保に係る費用など育種の実行に必要な費用も多くなることも考慮する必要がある。

表Ⅱ－１ 林業経営上の課題とそれを達成するための主要な育種目標

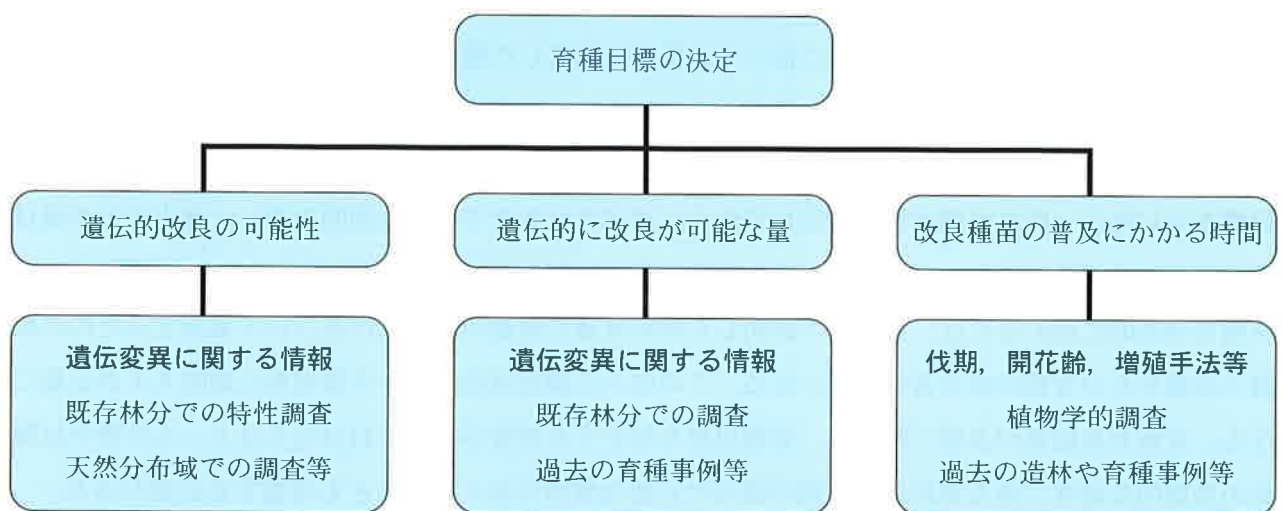
林業経営上の課題	主な育種目標
生産性の向上	材積の増大
収益の向上	材質の向上, 幹の形質の向上
安定性の向上	気象害・病虫害への抵抗性

1－3 育種目標の決定に関わる育種技術上の留意点

林業経営上示された育種目標を達成するために、それぞれの育種目標に関与する形質について、改良の可能性、改良可能な量、改良種苗の普及までにかかる時間等が育種目標の決定に関わる育種技術上の要因である(図Ⅱ－2)。ところが、新たに育種を始める場合には具体的にどの程度改良できるかは予めわからない場合が多い。過去に他の国や地域で当該樹種について育種が行われていれば、その情報を活用すればよい。各形質の遺伝変異や遺伝率等の情報が得られている場合には、これらの情報から各形質について遺伝的に改良が可能な量が類推できる。

過去に育種が行われた経緯がない樹種についても、既存林分での変異や、天然分布域の範囲等から遺伝的な変異の多少を推測することで遺伝的に改良できるか否かを類推することはできる。また、近年発達しているDNA分析によっても遺伝変異に関する情報を得ることができる。DNA分析を独自に行うには、高価な施設と運営費用が必要となるため、育種を進めるための予備調査のためのみにDNA分析施設及び運営費に投資することは現実的ではないが、外部機関にDNA分析を依頼することは可能と考えられる。

このほか、大量の個体からデータを収集する必要のある林木育種では、形質によって異なる測定に要する時間や費用も育種目標の決定に大きい影響を与える因子の一つである。



図Ⅱ－2 育種目標の決定に関わる育種技術上の留意点

§ 2 優良候補木の選抜

実際に優良候補木を選抜する際には、選抜の対象となる林分が系統の明らかな試験地であるか、または系統が明らかでない既存の造林地や天然林なのかで大きく異なってくる。§ 2では、成り立ちの違う林分ごとに状況に応じた選抜の方法について解説する。

2-1 系統（家系やクローン等）の明らかな試験地からの選抜

系統（家系やクローン等）の明らかな試験地では、育種目標とする形質について、形質ごとの遺伝率、形質間の遺伝的な関連性（遺伝相関）等の選抜に有効な情報が得られる。調査は選抜対象の全ての個体の全ての形質について行うが、測定に比較的高いコストや時間を要する形質は、当該形質と遺伝相関が高く、測定が容易な他の形質について選抜を行うことで間接的に選抜する方法が合理的である。調査は、少なくとも伐期には行う必要があるが、伐期以前に定期的に測定したデータがあれば、伐期に至る前に選抜できる可能性を検討すること、次の世代の実現された遺伝獲得量を早期に確認すること、間伐材の利用について検討すること等にデータを利用できるため、可能な限り行っておく必要がある。

測定したデータはパソコン等を利用して解析を行う。解析は全ての形質について、遺伝率、形質間の遺伝相関、環境因子と遺伝因子の相互作用等を算出し、次世代化の方法（人工交配、自然交配、次世代化の個体数等）等も考慮して選抜方法を決定する。一般的には遺伝率が高いと個体選抜が効果的であり、遺伝率が低いと家系選抜が効果的であるが、次世代化の方法や次世代集団の遺伝変異等を総合的に考慮し選抜方法を決定する。

選抜を行う場合、対象とする形質について、環境因子が無視できるほど小さい場合には、系統の測定値そのもので系統の遺伝的な優劣を決定することができる。しかし、実際には環境因子はある程度大きい場合、選抜の精度を上げるには、様々な方法で測定データから環境因子の影響を除いて（例えば、反復内全体の平均値で個体の測定データを修正する方法など）、個体や家系の相対評価を行う。

実際の林木育種は、大量の試験木及び土地を必要とし選抜のプロセスが長期にわたるため、選抜を行う時点では全ての試験地に全ての選抜対象となる系統が残っていることは珍しいことといえる。したがって長期の試験の結果、たまたま環境条件の良いところに残っていた系統が過大評価される（あるいはその逆）ことを防ぐために、欠測データを様々な方法（例えば、最小自乗推定法など）により推定した上で解析することが多い。

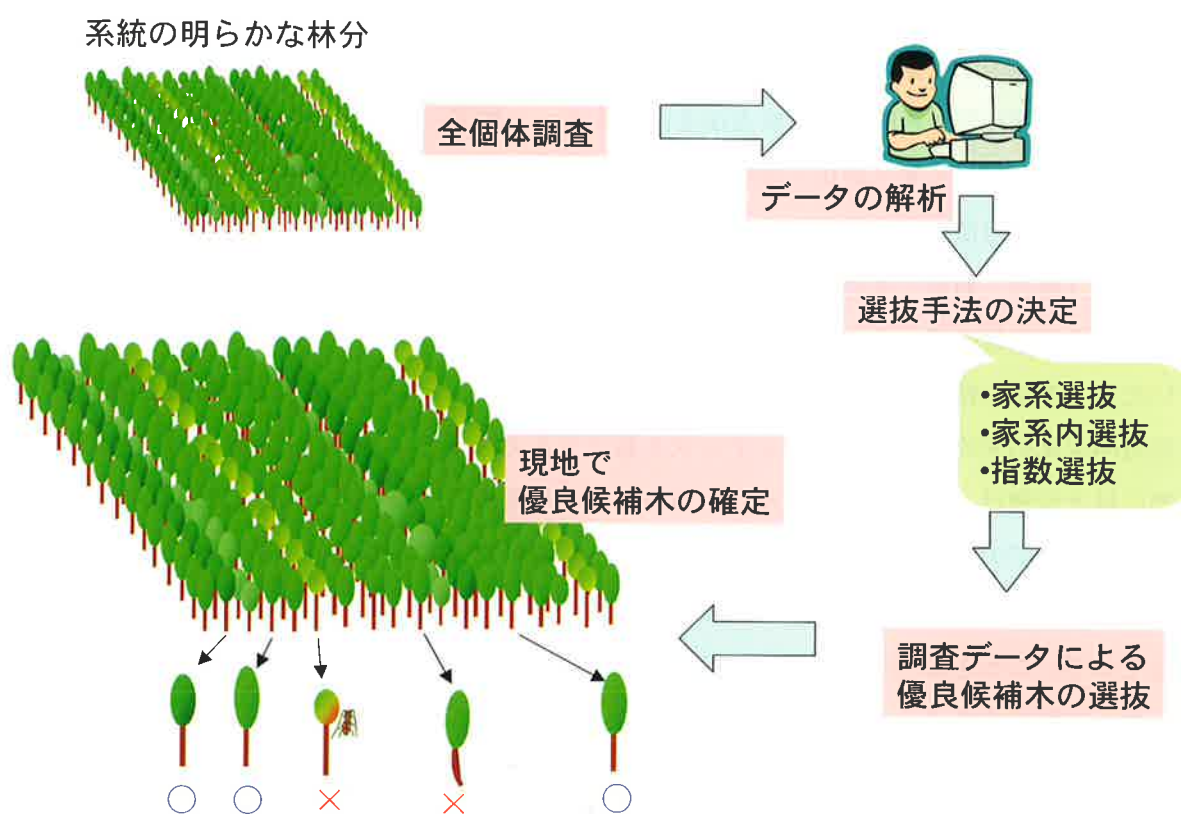
また、「I.1-1 優良候補木の選抜の概要」で説明したように、複数の形質について一度に選抜する場合は指数選抜を用いる。具体的には、形質ごとに算出した推定値に重みを付け、その総合値で系統の相対比較を行う。重み付けは、経済的な重要性や、遺伝的に改良できる度合い（遺伝率と遺伝変異）などにより行う。

データの解析を基に選抜した個体は、当然のことながら対象とした形質に関して優れていることは明らかであるが、望ましくない形質がみられる個体は選抜対象から外すことが望ましい。例えば出現

頻度の低い病虫害などは調査効率を考慮して選抜に関する調査項目に組み込まない場合もある。このように、対象とした形質が優れていても実際に病虫害を受けていれば選抜対象から外す。このように、選抜対象木をデータ解析によって絞り込んだ後、実際に現地で確認し最終的に優良候補木を確定する。

育種目標とする形質が主に材積や成長性といった量的な形質の場合は、その形質数にもよるが、選抜した個体の中から50個体程度を利用して育種集団を作れば、複数世代にわたって十分な改良効果が得られる。しかし、これらの量的な形質に加えて、少数の遺伝子や頻度の少ない遺伝子が関与している形質についても育種目標にする場合には、必要な選抜個体数は格段に多くなる。実際には、選抜本数は、次世代の育種集団あるいは生産集団で利用する本数より多くしておかなければならない。これは、産地、系統及び個体で増殖性が異なることや、選抜の誤り等に対応するためである。このため、選抜の前に次世代化の方法に応じて、着花量、着花時期、種子生産性、さし木発根性、つぎ木活着率等の増殖に関する形質について大まかに把握しておくことが望ましい。

選抜時のデータは育種を進める他の過程でも活用するため、種子源、試験地、調査時点ごとの全ての形質のデータを個体レベルで一元管理しておく。



図Ⅱ-3 系統（家系やクローン等）の明らかな試験地からの選抜作業の流れ

良い家系を選ぶか良い個体を選ぶかの選択

1 個体選抜

個体選抜は、対象とする個体の表現型値に基づいて選抜する方法である。遺伝率の大きい形質では、この方法が簡便で正確度が高いが、遺伝率の小さい形質では選抜の効果は上がりにくい。選抜された個体は優良候補木である。

2 家系選抜

家系選抜は、家系の平均値に基づき家系を単位として選抜する方法である。実験計画法に基づき、家系を因子の一つとして設計した試験地は、家系の検定を行っている試験地と見なすことができる。したがって、実験計画法に基づき設計された試験地から選抜された家系は、優良候補家系ではなく優良家系と見なすことができる。

一般に $h^2=0.4$ あたりを境として、遺伝率が大きい場合は、家系選抜は個体選抜より正確度が劣る。もし $h^2=0.1$ のように小さい場合は、個体選抜より有利になり、かつ家系内個体数 n が大きくなるにつれてその効果も著しい。

3 後代検定に基づく選抜

個体又は系統の育種価をその子供の成績から推定することを後代検定という。

後代検定による選抜の正確度は、子供が1個体のみの場合、個体選抜の1/2であるが、育種価の推定に用いる子供の数が増加するほど、選抜の正確度は高くなる。

遺伝率が低く、育種価の推定に用いる子供の数が十分に多いとき、個体選抜に比べて後代検定は効率がよい。したがって収量などの選抜に後代検定に基づく選抜が用いられるが、検定に年数がかかることに留意する必要がある。

(中島哲夫 (1987) を基に作成)

複数の育種対象形質がある場合に使う選抜手法

一般に育種では、多数の形質を同時に選抜することが要求される。

多くの特性を同時に選抜するには、選抜指数、独立淘汰法、順繰り選抜などによる方法がある。

- 1 選抜指数による方法：選抜を行う全ての形質の相対的な重要性を重回帰モデルに基づいて決定し、評価する系統の優劣を評価する方法。形質の重要性の決定に用いる因子は、経済的な重要性、遺伝的改良の可能性、両者の組み合わせなどがある。以下の説明では、例として形質の重要性の決定に用いる因子として収益を用いて説明する。

改良しようとする p 種類の形質の測定値を独立変数とし、 i 番目の系統の収益を従属変数とすると、 i 番目の系統の収益 Y_i は、次式で表せる。

$$Y_i = \mu + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_p X_{pi} + e_i$$

この重回帰式の偏回帰係数： b_1, b_2, \dots, b_p は、従属変数の観測値 Y_i とその期待値 $E(Y_i)$ の偏差平方和を最小にするようにして求めることができ、求めた偏回帰係数から選抜指数 I は、次式で表せる。

$$I = b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p$$

- 2 独立淘汰法：それぞれの形質にある淘汰基準を設け、それ以下の個体を淘汰する、又はそれ以上の個体を選抜する方法。日本では精英樹の選抜などに広く用いられている。
- 3 順繰り選抜：それぞれの形質を順に改良し、ある形質が目標とする水準に達したら、次の形質の改良に移る方法。時間がかかる。

(大庭・勝田 (1991) を基に作成)

2-2 系統が明らかでない既存林分からの選抜

既存林分から選抜する場合は、まず選抜する林分の選定を行う。天然分布域から選抜する場合、満遍なく林分を選定することが望ましい。しかし異なる複数の気候区分や土壌条件にまたがって天然分布する樹種などは、それぞれの環境条件に適応した遺伝的特性を持っていると考えられ、選抜された地域により環境に対する適応性や開花時期等が大きく異なることがある。このため、それぞれの環境条件区分ごとに育種を進めることができるようにそれぞれ十分な個体数を選抜することが望ましい。以前に産地試験などが行われていて、当該地域に適した産地が明らかであれば、その産地から重点的に選抜を行うようにする。

選定したそれぞれの林分からは、適宜設けた選抜基準に従って個体の選抜を行う。主に用いられる選抜基準は、ほぼ同一条件の環境下の周囲木と比較し、選抜対象とする形質において、統計的に有意に優れている個体を選抜することである。当然であるが、異齡混交林では成長量についての比較をするべきではない(表Ⅱ-2に日本の精英樹の選抜基準を例示した)。選抜基準を設けた時点では実際に選抜される本数を正確に予想することはできないため、実際に育種集団を構成する本数より多くなるように選抜基準を低めに設けておく必要がある。これは、次の段落で説明する遺伝変異にも十分留意する必要があるためである。選抜時のデータを一元管理しておけば、育種集団として必要な本数に合わせて、選抜基準をより高く設定し直すことは容易である。

表Ⅱ-2 日本の精英樹の選抜基準

1. 樹齡が同じ人工林→周囲のものと比較して格段に大きい個体を選出する。
 - 1) 周囲20個体の直径比較
候補木周囲の同一環境円内(半径5~10m)の約20個体の直径データをとり、それらが正規分布すると仮定して、1%又は5%(樹種による)領域に入る著しく大きな個体であること。
 - 2) 周囲3大木の材積比較
候補木周囲の直径順位第2~4位の3個体の平均材積に比して30%又は50%以上(樹種による)大きいこと。
2. 異齡混交林→周囲のものと比較して著しく形状がよい個体を選定する。
 - 1) 樹型がよいこと
 - ・幹が完満で、曲がり、よじれ、その他の欠点がないもの。
 - ・クローネが狭く、枝が細かいもの。
 - 2) 材質に欠点がないこと
 - ・材に腐朽がなく、目廻り、心割れ、その他著しい欠点を含まないもの。
 - ・枝が枯れ上がり易く、枝跡が平滑に巻き込まれているもの。

育種集団の遺伝変異の幅が広いほど後の世代での改良効果が高いため、天然林からの選抜では、育種対象とする種の遺伝変異に偏り無く、しかも効率的に選抜する観点も必要である。限られた予算で効率よく選抜するには、これまでの研究から、一つの地点から10個体程度を上限に選抜すればよいことが明らかになっている。また、事前に遺伝的に優良な産地や林分、あるいは遺伝変異が大きい産地や林分等がわかっているならばそれらの産地や林分から選抜する本数は他の産地や林分より多くすることが望ましい。

この節で述べた系統（家系やクローン等）が明らかでない既存林分からの選抜は、前節の系統の明らかな試験地からの選抜に比べ、遺伝的な情報量が少ないためにより多くの個体を選抜する必要があるが、選抜本数の増加に伴い必要経費も増大することに留意する必要がある。

クローン造林地の場合、単一クローンの一斉造林地から選抜することは無意味である。複数クローンが混植されている造林地で、クローン数が少ない場合はDNA分析などで整理した後、目標とする育種形質について「2-1 系統（家系やクローン等）の明らかな試験地からの選抜」と同様にクローンの相対評価を行い選抜すれば効率的な選抜ができる。クローン数が多い場合は実生由来の林分と同様の選抜をする。

§ 3 採種園・採穂園の造成と運営管理方法

採種園や採穂園は、育種種苗の生産に必要不可欠であるほか、育種を進める上で、次世代化や検定に活用されることもある。§ 3では、採種園・採穂園の造成と運営管理方法について増殖方法ごとに解説する。

3-1 採種園

採種園の主な役割は、造林種苗用の種子を生産することにある。つまり採種園こそが「生産集団」にほかならない。このほかに実生採種園で育種を進める場合には、次世代の育種集団を生産することや検定を行うことにも活用される。

採種園に必要な採種木の本数と面積は樹種によって異なる。例を挙げればインドネシア・ジャワ島の5年生のアカシアマンギウムの採種園はhaあたり年間約950万粒の種子を生産し、6年生のユーカリペリタの採種園ではhaあたり年間約200万粒の種子を生産した。このように樹種により種子の生産量は大きく異なり、また同一樹種でも地域により種子の生産量は大きく異なるので、過去の資料などを参考に造林種苗をまかなうのに十分な面積の採種園を造成する必要がある。

育種種苗の生産を目的とした採種園は、限られた系統（家系、クローン）数の選ばれた優良個体群を用いて設定するため、種苗の需要を賄うのに必要な規模を得るためには、同じ優良系統（家系、クローン）群で構成される区画を最低単位として、必要に応じて複数の区画を作る。採種園の設計で重視されるのは、

- ① 採種園を構成する系統（家系、クローン）間の交配機会が均等になること
- ② 安定した種子生産が行われること
- ③ 自殖や近親交配を起りにくくすること

等である。

優良系統間の交配機会を均等にするためには、区画内に無作為に優良系統を配置すること、系統間の着花量のばらつきを抑えること、着花時期の調整等が必要である。区画内の配置の無作為化はパーソナルコンピュータの表計算ソフトの乱数発生機能等を用いれば容易にできる。また、現在では、Web上からフリーの採種園設計ソフトをダウンロードし利用することも可能である（例えば、独立行政法人林木育種センターの高橋誠博士の作成した Mixed version 1.2.0; http://homepage3.nifty.com/makotot_ftbc/index.htmなど）が、使用系統数、反復数、風媒虫媒の別及び採種園の目的などに対応したソフトであるか事前に十分検討する必要がある。系統間の着果量のばらつきを解消するためには施肥やホルモン処理等が用いられるが、樹種や地域によって効果が異なるため、関係する資料の収集や独自の技術開発を行う必要がある。

高品質な種子を安定して生産するためには、施肥やホルモン処理、花芽の着生から結実までの様々なステージで起きる病虫害管理、整枝剪定等の技術を樹種や地域に応じて技術開発する必要がある。

自殖や近親交配を起こりにくくするためには、同一クローンや同一家系を同一区画内に配置することを避けることで対応する。ただし両性花を着ける樹種では同一個体内に柱頭と雄蕊が至近距離にあることから同一クローン間の植栽間隔を保つことにどの程度の意味があるのか明らかでない。

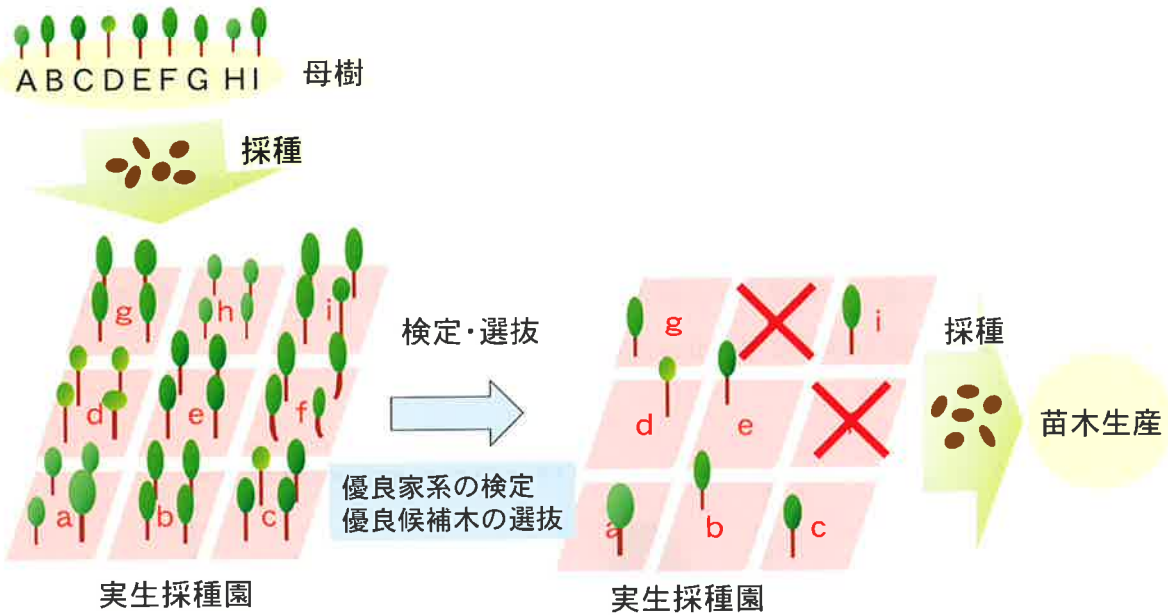
近年、DNA分析技術の発展で、採種園における花粉動態が明らかになりつつある。スギの場合、採種園外から飛来した混入花粉が30%以上を占める例があることがわかった。これを避けるためには、同じ樹種が周辺に植栽されている場所を避けて採種園を造成するといった配慮が必要である。

3-1-1 実生採種園

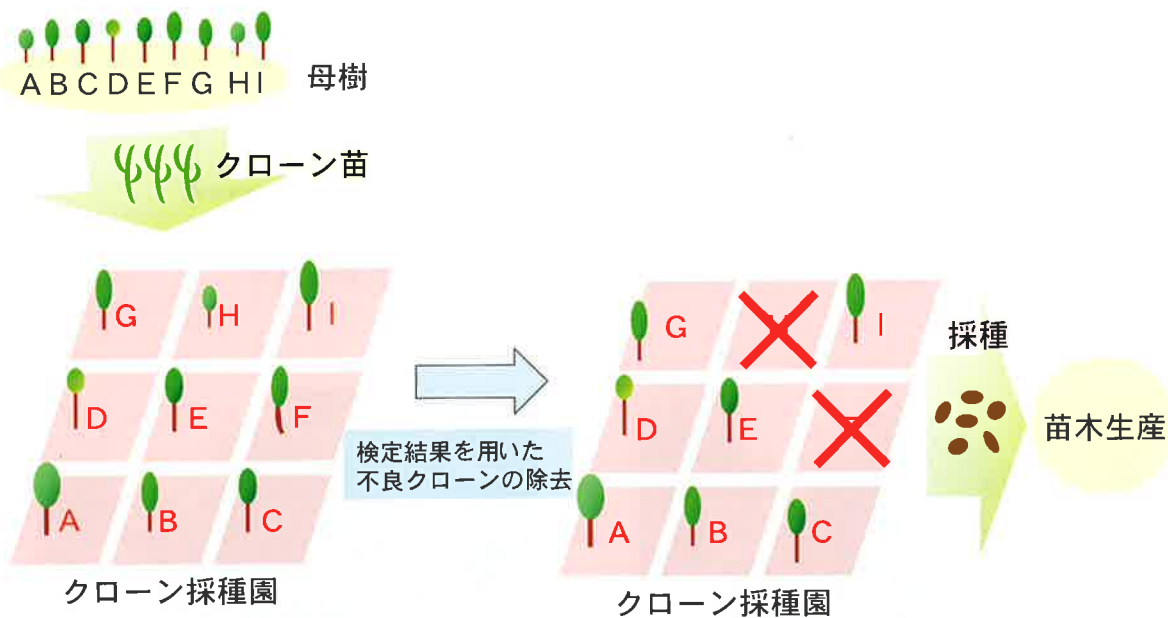
実生採種園は、実生由来の採種木によって造林種苗用の種子を生産する採種園である。多くの林木は他殖性であるため、家系内に大きな遺伝変異を持っており、家系内の個体間で交配すると次の世代で近交弱勢が発現するため、あらかじめ家系あたり十分な数の個体を植栽しておき、図II-4のように伐期までに除間伐で家系内の不良な個体を除去し近親交配が起こりにくいような個体構成に誘導することが必要である。実生採種園では一般に家系の検定や個体の選抜を進めながら種子を生産しており、優良家系の検定や優良候補木の選抜が終了した時点で育種種苗を生産できるため、伐期が短く、選抜時期までに着果する樹種では大きな利点がある。そのため多くの早生樹種で実生採種園を用いて検定・選抜・育種種苗の生産が一括して行われている。実生採種園を用いた育種手法は、安定したクローン化技術が開発されていなくても育種を進めることができる利点もある。反面、採種木が大きくなるために種子の採取が困難であることや、採種木の再配置ができない等の欠点もある。アカシアマンギウムの実生採種園を写真で示した(写真II-1)。



写真II-1 アカシアマンギウムの実生採種園(インドネシア、ジャワ島中部)



図Ⅱ－４ 実生採種園での家系の検定，優良候補木の選抜，種子生産の模式図



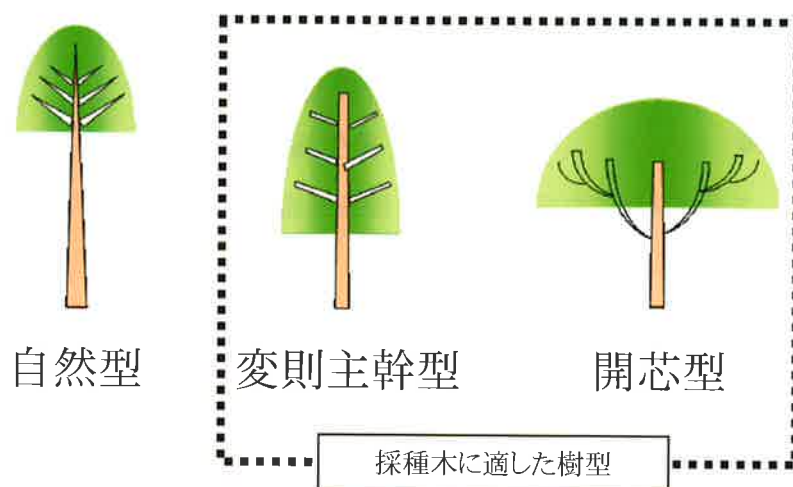
図Ⅱ－５ 優良候補木のクローン採種園の改良と種子生産の模式図

3-1-2 クローン採種園

クローン採種園は、選抜された優良個体群から多くの場合つぎ木によってクローン化した優良クローン群を用いて造林種苗用の種子を生産する採種園である。一般につぎ木は着花齢を早める効果があるため、着花までに長期を要する樹種では有効な方法である。つぎ木の他にさし木，とり木，組織培養等によってクローン化した個体を採種木として採種園に用いることもある。クローン採種園は選抜した優良候補木または検定済みの優良木によって造成するが，通常その機能は種子生産に特化する。選抜した優良候補木で採種園を造成した場合は，並行して他の場所で実生やクローンで後代検定を行い，検定結果から優良クローンのみを残して他のクローンを採種園から除去するなどして，より改良効果

の高い種子を生産できるように採種園の改良を行う（図Ⅱ－5）。このようにクローン採種園は、クローン化した任意の優良個体群を用いて、任意の配置で造成できるため、実生採種園に比べ改良効果の高い育種種苗の生産が可能になる場合がある。

クローン採種園では、樹型を任意に管理することができるので、採種や病虫害の管理に都合の良いように低い樹高で十分な種子の生産が可能になるような管理技術を樹種に合わせて開発するとより生産性が高まる。採種木に適した管理された樹型の例を図Ⅱ－6の模式図に、西表熱帯林育種技術園で実際に樹型誘導された個体の写真を写真Ⅱ－2に示す。



図Ⅱ－6 自然型の樹型及び採種木に適した樹型の例



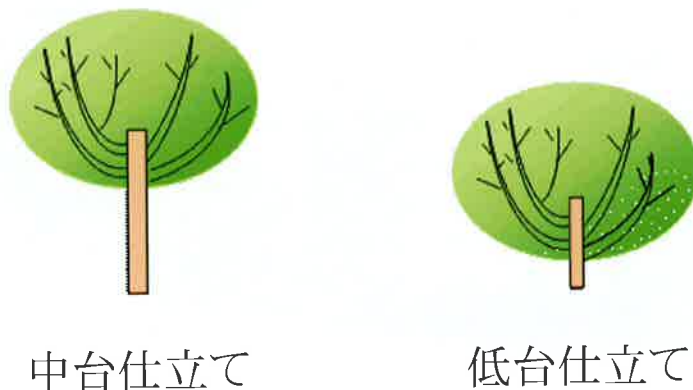
写真Ⅱ－2 樹型誘導されたアカシアマンギウム（西表熱帯林育種技術園）
左が変則主幹型，右が開芯型

3-2 採穂園

採穂園は通常は、選抜した優良候補木をクローン検定し、検定済みの優良クローンを用いて造成する。その他に種子で増やすことが困難ではあるが、栄養繁殖が容易な樹種では未検定の優良候補木群を用いて採穂園を造成することも行われる。

採穂園では、クローン採種園と異なり自殖を含む近親交配由来の種苗を生産しないように留意する必要があるため、クローンの配置は、クローンの管理が容易でクローンの特徴に応じた維持管理がしやすい列状植栽が多く用いられる。植栽間隔は単位面積あたりの穂木の生産性（ひいては苗木の生産性）が最も多くなるように設定すべきであるが、採穂園の維持管理に伴う各種作業（剪定、薬剤散布、下草刈り、施肥等）や採穂時の利便性などにも十分留意する必要がある。さし木発根率は採穂する位置の影響を受けることが知られているため、苗木の生産性を最も高めるように採穂台木の維持管理をすることが重要である。

採穂園の必要な規模は、採穂木1本あたりの専有面積及び穂の生産量、穂が苗木になる歩留まりで決まる。ベトナムのアカシアマンギウムとアカシアアウリカリホルミスの種間雑種クローンの例では採穂木1本あたりの専有面積は1m²、採穂木1本あたりの穂の生産量は年間240本であり、採穂した穂のうち、約8割が山行き苗木として利用できる。また、この例では、採穂園が最大の苗木生産量を発揮するまでに必要な年数は採穂園設定後わずか5年であり、採穂木の一部を随時順送りで更新することで採穂園としての機能を永続的に発揮できる。熱帯の早生樹種のように成長が早く、通年成長する樹種では比較的少ない採穂園面積で多くの造林種苗をまかなうことができる。採穂木に適した管理された樹型の例を図Ⅱ-7の模式図に、西表熱帯林育種技術園で行われた採穂木に誘導したアカシアアウリカリホルミス写真を写真Ⅱ-3に示す。また、ベトナムで実用化されているアカシアマンギウムとアカシアアウリカリホルミスの種間雑種のクローンで設定された採穂園の様子を写真Ⅱ-4に示した。



図Ⅱ-7 採穂木に適した樹型の例



写真Ⅱ－3 樹型誘導（低台仕立て）されたアカシアアウリカリホルミス
（西表熱帯林育種技術園）



写真Ⅱ－4 アカシア種間雑種の採穂園（ベトナム中部，QPFL 社保有の採穂園）

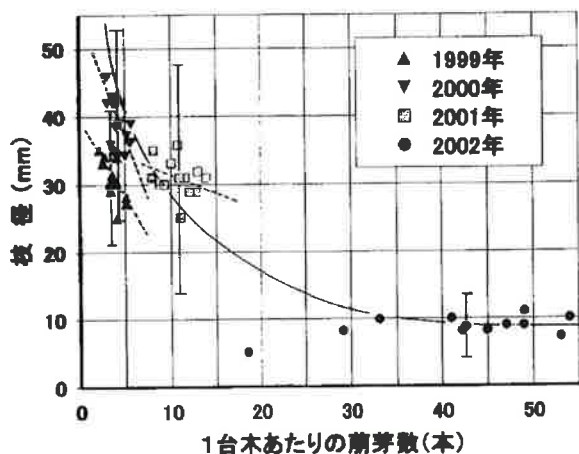
採穂木の樹型誘導

採穂園は、通常はクローン品種のさし木苗生産のために、穂木を生産することを目的に設定され、さし木発根率が高く、断幹・整枝剪定により萌芽枝を大量に発生する性質を持った樹種に適応される。

採穂園では、整枝剪定等の適切な管理を行うことにより、形質の揃った優良な穂木を恒常的に生産できる。適当な整枝剪定の時期や方法は、樹種の特性或地域の気候で異なる。

西表熱帯林育種技術園での調査では、整枝剪定の時期により穂木生産に大きな差があることが明らかになっている。下図は、西表熱帯林育種技術園内のアカシアアウリカリホルミス12家系を用いて、採穂木の整枝剪定後の萌芽枝の本数と枝径を調査したものである。1999年、2000年及び2001年は、いずれも成長旺盛期に整枝剪定を行っており、各採穂木あたりの萌芽枝は少なく枝径は太いため、さし木増殖には不適であった。一方、2002年は、成長減退期に整枝剪定を行っており、各採穂木あたりの萌芽枝数は多く、枝径はさし木増殖に適したものとなった。また、萌芽枝数と平均の枝径の間には反比例の関係がみられた。

一般に、さし木発根率は、地際に近い部位から得られた穂木ほど高くなる傾向があり、アカシアアウリカリホルミスでも発根率を高めるためには低い位置で採穂木を断幹する必要があることが報告されている(Kikuchi,1994)。ただし低い位置で断幹すれば通常は穂木の生産量が落ちることに留意する必要がある。



アカシアアウリカリホルミスの萌芽数と枝径との関係

(植木・森：林木の育種 特別号 14～16 (2003)より引用)

アカシアアウリカリホルミスの萌芽

(西表熱帯林育種技術園)

§ 4 優良候補木の検定

選抜した優良候補木群が、十分な個体数で構成されているとき、その平均値は、未改良の個体群に比べて遺伝的に優れていると考えて差し支えないが、個々の優良候補木は環境が良い場所に生育していたために偶然選抜された可能性がある。そこで、個々の優良候補木の遺伝的特性をより正確に評価し、育種集団や生産集団をより育種目標に近づけるために優良候補木の検定を行う。§ 4では、優良候補木の片親あるいは両親としての遺伝的能力を評価するために、優良候補木から得られた子供群を用いて検定する方法と、クローン化して優良候補木そのものの遺伝的能力の評価を行う方法について解説する。

4-1 実生での検定

実生での検定は、優良候補木の自然交配又は人工交配由来の子供群を用いてその両親あるいは片親の優良な子供を作る能力を確かめることを目的とする。造林用育種種苗を実生苗で供給する場合には、この検定結果はこの育種種苗の能力を直接検定することでもある。

I章の1-1「優良候補木の選抜の概要」で解説したように、成長性や材積などの量的形質は環境の影響を受けやすいため、検定を行う際には、検定対象の家系を育種種苗の普及を考えている地域内に偏りなく植栽し検定対象の形質を測定することが望ましい。検定試験地の管理は通常の造林地と同様に行うべきである。

実生での検定に最低限必要な試験設計は、検定時点で30系統(家系)程度、8反復程度、系統ごとに反復あたり1本残存しているという条件を満たす試験地が1つである。実際には、育種種苗を用いる造林地域内の異なる土壌条件や気象条件ごとにそれぞれ複数の試験地を設定することが望ましい。さらに余裕があれば、検定時に残存している系統ごとの反復内本数をより多くした方が検定精度は高まる。しかし、実生採種園を兼ねた検定であれば、生産される種子の近親交配を避けるため系統ごとの反復あたりの本数は種子生産時には1本にしておくべきである。

検定の仕方は、試験地の設計によって異なってくるが、基本的には、試験地に植栽されているすべての系統の測定値の優劣が統計学上十分な有意性があるか否かを分散分析によって判定した上で、系統の相対的な優劣を判定する。ここで重要なのは、実験計画に基づいて計画的に設計された試験地でも、遺伝変異に対して環境変異が極端に大きい場合や、測定誤差が大きい場合などでは有意な系統間差が出ず、系統の測定値の評価が行えないこともあることである。林木育種センターでは、様々な試験地の設計に対応した検定解析プログラムを用意している。

実際には検定をする本数が数百系統になることがある。この場合は、一つの試験地で全ての系統を検定するためには膨大な作業量を要するため、検定する系統を複数のグループに分けて試験地を設定することも行われる。このとき共通な複数の系統が全ての試験地に重複して植栽されていれば全ての検定対象の系統を代表する遺伝情報を得ることができ、全ての系統間の相対的な評価も可能である。

調査からデータの解析までの流れはII章の2-1「系統(家系やクローン等)の明らかな試験地からの選抜」に準ずる。

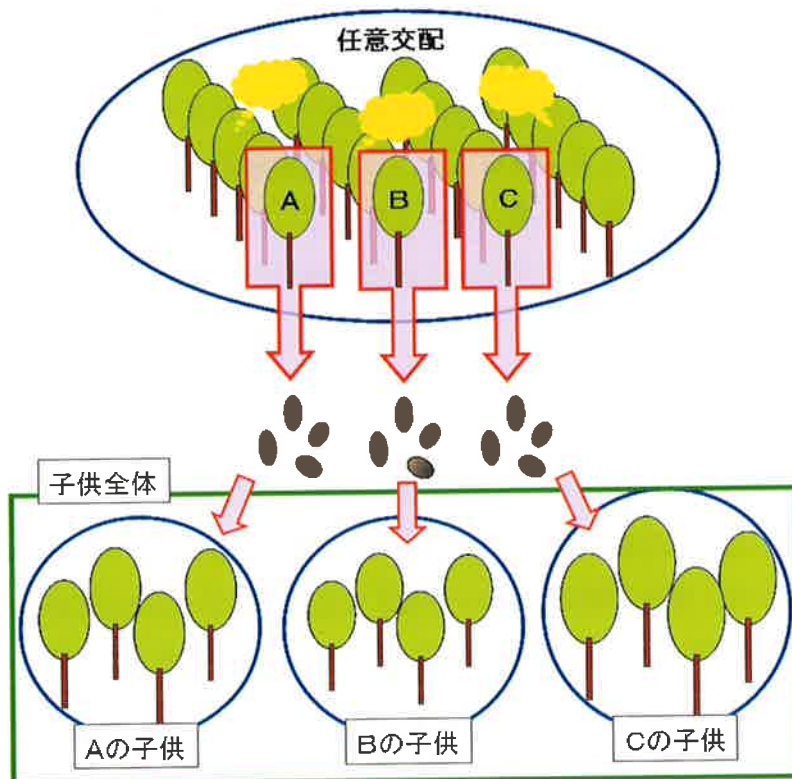
4-2 クローンでの検定

クローンを用いた検定は、選抜された優良候補木をクローン化し、同一遺伝子を持った複数の個体を異なる環境に植栽することで当該クローンの育種目標とする形質に関する遺伝的な能力を評価することである。検定試験地の管理、設定方法及びデータの解析は、前述の「実生での検定」に準ずる。

遺伝的に優れた子供を作る能力（育種価）

選抜の手法の一つに親の遺伝的な価値を子の平均値で測る手法があり、遺伝的に優れた子供を作る能力を育種価という。子供の平均値から親の遺伝的な価値を算出するためには一伐期に相当する期間が必要なため、育種価の評価には時間がかかることに留意する必要があるが、林木の育種でも重要な遺伝情報の一つである。

個体の育種価は、ある個体と集団から無作為に抽出した多くの個体とを交配させたときの平均値を集団平均値からの偏差を2倍して得られる。以下に、母樹としての個体の育種価を算出する具体例を示す。



ここで、子供全体の平均値を M 、母樹A、B、Cそれぞれの子供の平均値を M_a 、 M_b 、 M_c とすると、

$$\text{母樹Aの育種価} = 2(M_a - M)$$

$$\text{母樹Bの育種価} = 2(M_b - M)$$

$$\text{母樹Cの育種価} = 2(M_c - M)$$

となる。

§ 5 次世代化

次世代化の意義は、I章の1-3「次世代化の概要及び効果」で説明したように、次世代化を繰り返すことによって育種の改良効果が徐々に高まることである。また、有性繁殖でしか増殖できない樹種にとって、次世代化は種苗を普及する際に必須の課程である。§ 5では、育種集団の次世代化の方法と、生産集団の次世代化の方法について解説する。

5-1 育種集団の次世代化

次世代化は当該世代の優良候補木あるいは優良木の種子を用いて行うが、それぞれ自然受粉由来の種子で行う場合と、人工交配由来の種子を用いる場合がある。次世代集団に必要な個体数は各世代で予定している選抜基準に応じて決める。

5-1-1 優良候補木を用いた次世代化

未検定の優良候補木で次世代化を行う場合、何度も述べることであるが、集団全体としては選抜対象とした基の集団より優れていても、個々の優良候補木が遺伝的に優れているとは限らないので、できる限り多くの優良候補木から遺伝的な偏りが少ないように次世代化しなくてはならない。一般的には優良候補木群から直接採取した、自然受粉種子を用いて次世代化を行うが、優良候補木群中の開花頻度や、開花時期の違い等に十分留意して次世代化する必要がある。自然受粉由来の種子で行う次世代化は、伐期までにはほとんどの個体が開花する樹種では特に有効な手法であるといえる。

未検定の優良候補木群から直接、自然受粉種子を採取し次世代化に供する大きな理由の一つは、世代あたりの育種年限を短縮し、単位時間あたりの次世代化数をより多くすることで高い改良効果を得ることである。優良候補木で次世代化を行う場合、自然受粉種子を用いずに、人工交配により種子の花粉親を任意に選ぶことができれば、遺伝的に偏りの少ない種子を得ることができる。しかし、優良候補木同士の人工交配由来の種子を得るには、優良候補木をクローン化するまで、クローン化してから着果するまで、及び人工交配に要するまでの時間の和が必要となるため、少なくとも数年の年月を要することになり、特に伐期が短い熱帯早生樹では現実的な方法とはいえない。また、クローン化や人工交配の過程で増殖率の産地間差や個体間差の影響を受けて、次世代化に必要な十分な個体数を確保できない可能性は十分に考えられることである。

5-1-2 優良木を用いた次世代化

検定済みの優良木を用いて次世代化する場合は、遺伝的に優良な個体のみを用いることから、前述の優良候補木の場合に比べ、次世代の育種集団の遺伝的向上はより確実なものとなるが、優良木の検定に育種対象樹種の1伐期に相当する期間が必要であることに留意する必要がある。できる限り短時間で次世代化を進めるために、優良候補木群を検定する試験地の設定と同時に採

種園を設定しておき、検定により優良木が確定した時点で、その結果に基づき採種園を改良(除伐により不良木を除去するなど)する方法がよく用いられる。採種園産の種子に、特定の花粉親が極端に多くの交配に関わっているなどの遺伝的な偏りが無いことがわかっているならば自然交配種子を用いることができる。採種園産の種子に、遺伝的な偏りがある場合や、特定の優良個体同士の交配組み合わせでより望ましい次世代を創出したい場合は人工交配を用いる。すでに人工交配をするための採種木が仕立てられていれば、人工交配由来の種子を得るには、人工交配に要する時間の分だけ、自然受粉由来の種子に比べてよけいに時間を要することに留意すればよい。人工交配で次世代化を行えば、次世代化を繰り返す際に近親交配を意図的に回避できるという利点もある。

5-1-3 次世代集団の個体数

改良効果を徐々に高めることを目的とした次世代集団は、優良候補木を選抜するための集団でもあるため、遺伝因子(家系因子)と環境因子を分析できる実験計画に基づき設計された試験地に植栽しておくことで、効果的な次世代の選抜が可能になる。理論的には、1章の1-3「次世代化の概要及び効果」で説明したように最も高い選抜限界を得るには世代ごとの選抜基準を50%に設定すればよいが、数十世代の次世代化を経て高い選抜限界を追求することは林木においては現実的でない。現実的には、早期から改良効果を上げる必要があるため、比較的次世代化の期間が短い熱帯の早生樹種といえども、次世代化の対象となっている集団を構成する個体数に対し、次世代化した集団を構成する個体数の比率を数パーセントに設定していることが多い。さらに伐期の長い樹種では1%程度かそれ以下にするのが普通である。したがって、次世代化する個体数は次世代で選抜を予定している個体数の数十倍以上あれば良い。実際には、長期に亘る検定期間で消失する試験地や除間伐で淘汰される本数分を考慮してさらに多めに次世代化しておくべきである。次世代化する際に試験地を作らず、一般の造林地から優良個体を選ぶ方法も提唱されているが、個体の表現型でしか選抜が行えない点で不利だけでなく、選抜される個体が特定の家系由来のものに偏った場合の対処法について、今のところ効果的な解決方法はない。

5-2 生産集団の活用

生産集団は当面の改良効果に重点を置くために、次世代化を繰り返して改良効果を得るために必要なほどの大きい遺伝変異は集団内に必要としない。生産集団では育種集団の中でも特に優れた優良候補木、あるいは優良木を用いることで、改良効果のより高い種苗の生産を実現する。優良候補木によって生産集団を構成する場合、育種集団より高い選抜基準を設ける他に、家系選抜に重点を置いて選抜された優良候補木群を使うことなどが有効である。優良候補木で生産集団を構成する場合は最低でも30系統程度は必要であろう。検定済みの優良木で生産集団を構成する場合は、最も優れた優良木を用いることで最も高い改良効果が期待できるが、造林時に病虫害等から壊滅的な被害を受けないために極端に少ない家系やクローンを使つての造林は避けるべきであろう。クローン

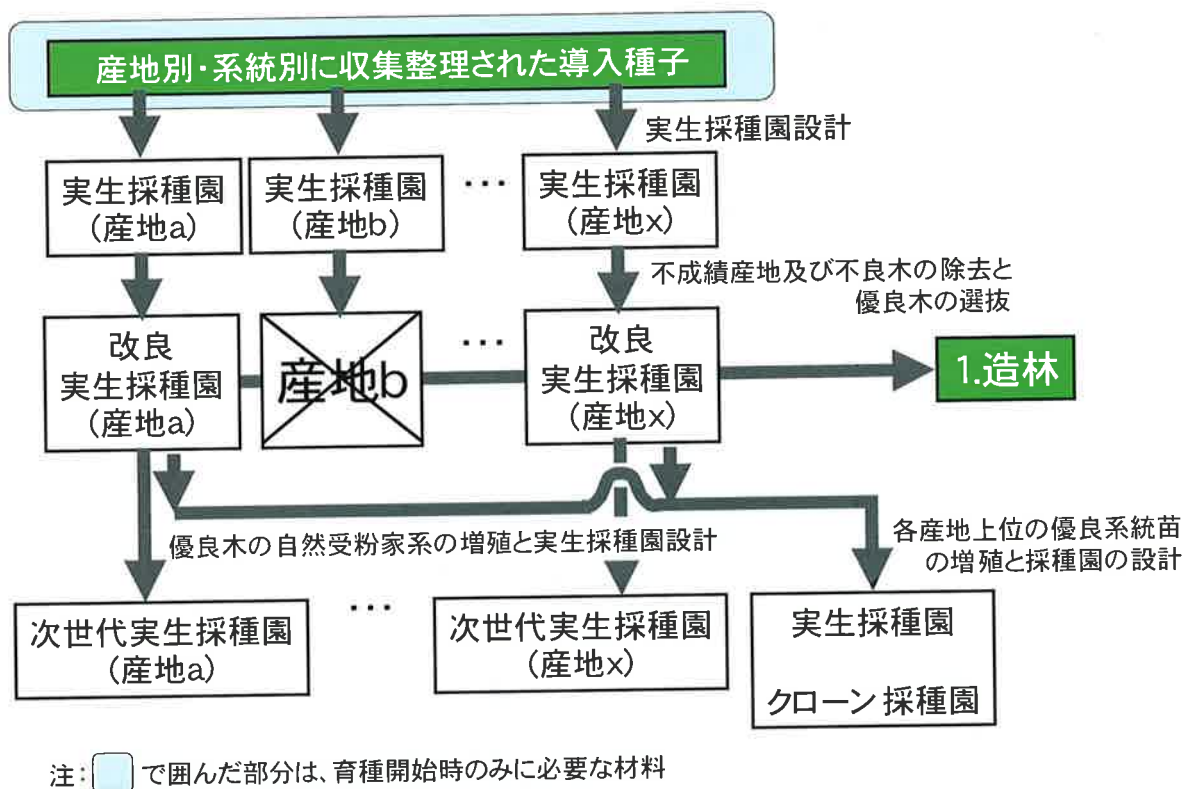
造林の場合20～30クローン程度を造林地にモザイク状に配置すれば、当該樹種の一部に発生する程度の病虫害では、造林地全体が激害を受ける可能性は少ないとされている。

Ⅲ 熱帯産等早生樹の育種の実践例

1 インドネシア林木育種計画プロジェクト

インドネシア林木育種計画プロジェクトの育種体系を図Ⅲ-1に示す。

本プロジェクトの育種対象はアカシヤマンギウム (*Acacia mangium*)、アカシヤクラシカルバ (*A. crassicarpa*)、アカシヤアウリカリホルミス (*A. auriculiformis*)、ユーカリペリタ (*Eucalyptus pellita*)等の7樹種で、1994年に6地域に37箇所の第一世代の実生採種園が樹種別、種子産地別に造成された。種子は各樹種の天然分布域から採取され、管理されているものをオーストラリアの樹木種子センター (ATSC) から購入し用いた。ここでは、プロジェクト終了期間までに、唯一次世代化が終了し、育種対象樹種の中でインドネシアでの造林需要が最も多い、アカシヤマンギウムについて紹介する。



図Ⅲ-1 インドネシア林木育種計画プロジェクトの育種体系図

Kurinobu (1997) を基に作成

アカシヤマンギウムの実生採種園は、定期調査により採種園内の不良木を除去し、植栽4年後の残存本数を植栽本数の約15%にし、植栽本数に対して約3%の優良候補木を選抜した。次世代化は、植栽後5年~6年目にかけて、優良候補木から自然交配種子を採取し、2001年に第二世代実生採種園を造成した。第一世代の実生採種園の遺伝率と選抜差から推定された遺伝獲得量は幹材積で約20%で、第二世代の1年生時点で実現された遺伝獲得量は、樹高で3.1%、胸高直径で5.2%、通直性で4.3%、多幹性で0.5%であり、材積に換算すると約13%の遺伝獲得量であった。

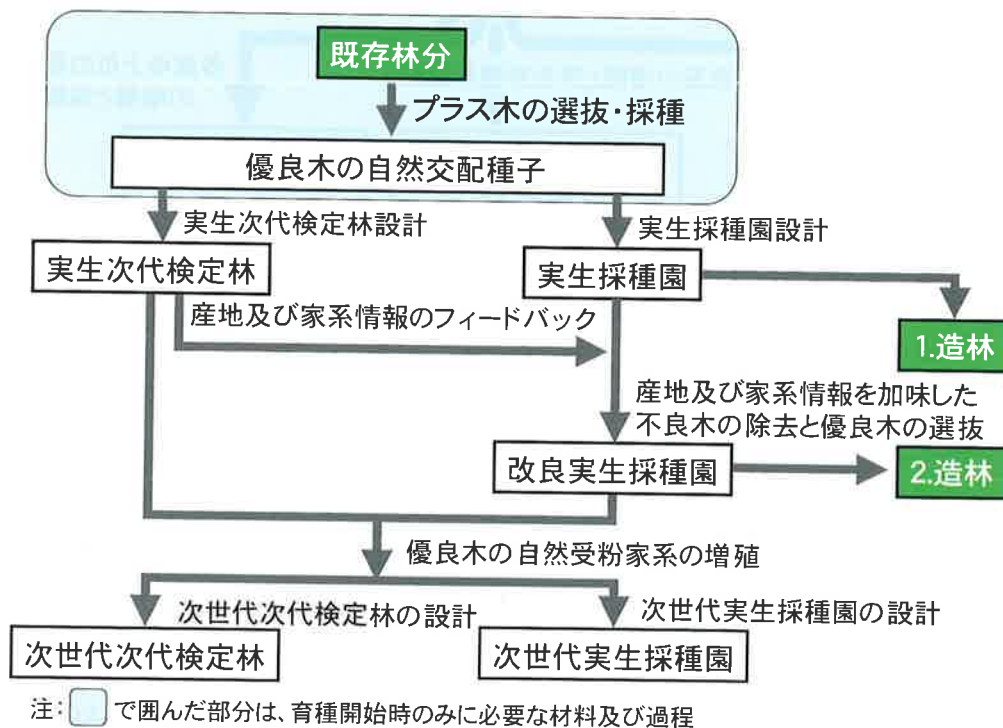
実生採種園を用いた育種の進行と並行して、優良候補木のクローン化技術の開発やアカシアアウリカリホルミスとの種間雑種創出のための人工交配が試行された。



写真Ⅲ－１ アカシマンギウム実生採種園での選抜された優良候補木と伐倒された不良個体

2 ウルグアイ林木育種計画プロジェクト

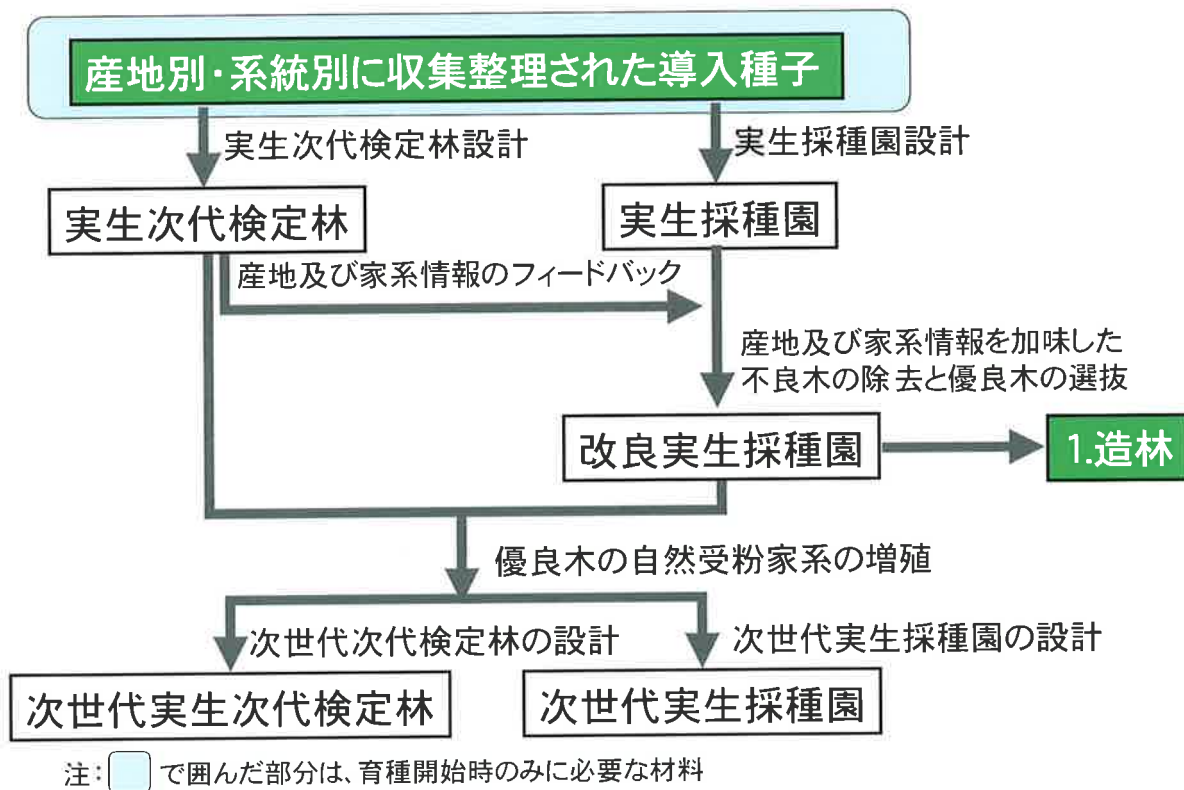
ウルグアイ林木育種計画プロジェクトの育種対象は、ユーカリグランディス (*Eucalyptus grandis*), ユーカリグロブルス (*E. globulus*), ユーカリマイデニー (*E. maidenii*), ユーカリサリグナ (*E. saligna*) の4樹種である。種子は、①既存林分で選抜した優良候補木（プラス木）から採取した自然交配種子（図Ⅲ－2）と、②オーストラリアから産地・家系別の自然交配種子を導入し（図Ⅲ－3）、それぞれ別々に育種集団を構成し育種を開始した。



図Ⅲ－2 既存林分のプラス木選抜から始まる育種体系
片寄（1998）を基に作成

①では、樹種ごとに1箇所の実生採種園と3箇所の実生後代検定林を造成し、実生後代検定林での産地・家系の相対順位を基にした不良産地及び家系、並びに採種園内での不良個体を、採種園から除去し、採種園の改良を行った。また、実生後代検定林と実生採種園で優良候補木を選抜した。

①で種子源とした、既存人工林は霜害を受けた経緯があり遺伝変異が狭い恐れがあったため、②のオーストラリアからの産地・家系別の自然受粉種子を種子源とした育種集団も①の育種集団と併せて形成され育種が実施された。育種の進め方は、種子源が異なることと①の実生後代検定林が②では産地・家系別試験林に置き換わることを除いて、①と同様である。



図Ⅲ-3 複数の産地から導入した自然交配種子から始まる育種体系

片寄 (1998) を基に作成

①で選抜された第1世代の優良候補木及び②で選抜された第2世代の優良候補木から自然受粉種子を採取し、①と②の種子を区別せずに次世代の実生後代検定林と実生採種園を造成する計画である。

最も育種の過程が進んでいるユーカリグランディスでは、1996年に実生採種園から改良種子生産を開始し、2000年に国立種子検査管理研究所から改良種子として認定された。この改良種子の遺伝獲得量は、在来種に比較し樹高で4%、胸高直径で11%と推定された。2000年～2002年に選抜した①及び②の優良候補木は521個体で、優良候補木の自然受粉家系を用いて次世代の実生採種園が造成されるとともに、組織培養による優良候補木のクローン化技術が開発され、200クローンの優良候補木が保存された。

3 マレーシア・サバ州

マレーシアでは、アカシアマンギウム、アカシアアウリカリホルミスを対象樹種として、公的機関のFRC(Forest Research Center)及びSAFODA(Sabah Forest Development Authority)、民間のサバ・ソフトウッド社において林木育種が進められている。

FRCでは、表Ⅲ－1に示すように1980年にアカシアマンギウムの導入に伴う産地試験が開始され、産地試験地が設定された。1991年にアカシアの育種プログラムを作成しアカシアマンギウムの優良候補木を300個体、アカシアアウリカリホルミスの優良候補木を39個体、それぞれ選抜した。1994年からは、アカシアマンギウムでオーストラリア・クイーンズランド州産優良候補木64個体及びパプアニューギニア産優良候補木48個体の実生後代検定を行い、第2世代優良候補木を68個体選抜している。

2004年現在では、アカシアマンギウムとアカシアアウリカリホルミスの優良候補木それぞれ76クローン及び19クローンをを用いたクローン採種園が造成されている。アカシアマンギウムでは、実生後代検定の成績上位26クローンを選出し、第2世代優良候補木の68個体とともに、商業ベースのクローン造林や育種プログラムに用いている。アカシアアウリカリホルミスの優良候補木は、次代検定はされていないが、産地試験の結果からはパプアニューギニアが通直な幹形質をもつ産地であることが明らかにされている。

アカシアマンギウムとアカシアアウリカリホルミスの種間雑種については、SAFODAが1970年にサバ州ウルクク地区で発見された両樹種の天然雑種群から選抜した30クローンで採種園を造成し、さし木による造林用種苗の供給を目指している。FRCでは、1987年にアカシアマンギウムとアカシアアウリカリホルミスの混合採種園を造成しているが、開花時期の相違等により種間雑種子がまだ生産されない状況である。また、新たに人工的に種間雑種を創出するため、FRCとSAFODAが人工交配を試行しているが、着花時期の相違やアカシアアウリカリホルミスの着花量不足のため、実現していない。

表Ⅲ－1 FRCのアカシア属に関する育種の経過

年代	記 事	備 考
1980	サバ州でアカシアマンギウムの育種開始	FAO(Food and Agriculture Organization) /UNDP(United Nations Development Programme)(1980-84)の援助
	オーストラリア及びパプアニューギニアから種子を導入 樹種試験地(アカシア属のマンギウム, アウリカリホルミス, クラシカルバ, アラウコカルバ, シンシナータ), 産地試験地, 次代検定試験地, 産地遺伝資源林分の設定 優良候補木(CPT)の選抜開始, 植物季節を加味した人工交配研究の開始	FAOとCSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)の協力
1989	選抜木間の種間雑種を生産するための花生物学の調査 採種園での種間雑種の種子生産能力の評価	ACIAR(Australian Centre for International Agricultural Research)との共同プロジェクト
1991	FRCのSimが初めてアカシア属の育種プログラムを作成, グラウンドワークが開始 アカシアマンギウムのCPT300本の選抜	
1994	半兄弟次代検定のためのCPTの種子の収集	一部にはLFC(Labuan Ferry Corporation Sdn Bhd)とSAFODAのCPTが含まれる
1997-1999	アカシア属の新たなCPTの選抜 第一世代から229本 成績上位26本 第二世代から68本 人工交配と栄養繁殖の試験の実施 次代検定林とクローン採種園の設定	FRC-TropBio Acacia Research Project



写真Ⅲ－2 マレーシア・サバ州のアカシアマンギウムとアウリカリホルミスの種間雑種の植栽試験地
左が種間雑種, 右がアカシアマンギウム

4 ベトナム

樹種・産地の適応試験は、FSIV(Forest Science Institute of Vietnam)のRCFTI(Research Center for Tree Improvement)、NFSC(National Forest Seed Company)、GIALAI Industrial Forest Plantation Company等で、大規模に実施されている。アカシア類では低地に5樹種40産地、乾燥地に10樹種、温帯地域に25樹種50産地の試験地を数箇所を設定し、ユーカリ類では5樹種50産地の試験地を10箇所に設定している。マツ類では、カリビアマツは3変種13産地の試験地を4箇所、ケシアマツは5カ国16産地の試験地を2地域に設定している。GIALAI省のGIALAI Industrial Forest Plantation Companyでも、スウェーデンの援助を受け、アカシア及びユーカリ2ヶ所40haの産地試験を実施し、適応性の評価を完了している。表Ⅲ-2にアカシア属の評価結果の事例を示す。

このように、大規模な樹種・産地試験地を実施しているが、優良候補木の選抜、採種園の造成についての現状は不明である。試験レベルでは、FSIVが、マツ類産地試験地からの優良候補木の選抜、採種園の設定及び実生後代の検定を行っている。(Le Dinh Kha *et al.* : Research on the selection, breeding and propagation of main forest tree species used in plantation / FSIVのホームページのデータを基に記載)。

表Ⅲ-2 ベトナムにおけるアカシア属の樹種・産地試験地での成長評価の事例 (樹齢9年生)

樹種	直径 (cm)	樹高 (m)	幹材積 (dm ³)
アカシアクラシカルパ	18.8	13.8	221
アカシアマングウム	16.1	15.0	191
アカシアアウリカリホルミス	16.0	15.2	192
アカシアシンシナータ	13.4	11.0	103

Le Dinh Kha *et al.* : Research on the selection, breeding and propagation of main forest tree species used in plantations より作成

アカシアマングウムとアカシアアウリカリホルミスの天然雑種については、FSIVが、選抜した優良候補木をクローン検定し、成長上位の30クローンを確定した。このうち、さし木発根性が良好な6クローンは国家推奨品種として大規模に造林されつつある。FSIVではアカシアマングウムとアカシアアウリカリホルミスの他、ユーカリ類及びマツ類の人工交配による種間雑種創出に関する試験も実施している。



写真Ⅲ－3 人工交配によるユーカリ類の種間雑種の創出 (FSIV)

左から *E. urophylla*, *E. urophylla* × *E. exserta*, *E. urophylla* × *E. tereticornis*, *E. exserta* × *E. tereticornis* 及び *E. exserta*

5 中国のポプラ

中国での米国産暖帯系ポプラ (*Populus deltoides*) の育種は、南京林業大学が中心になって実施してきた。1990年代初めに大学のポプラ研究開発センターが、北米のミシシッピ川流域から110個体の自然受粉種子を探索収集するとともに、アメリカ農務省林務局のストウェル広葉樹実験室から108クローンを導入した。導入した種子及びクローンで適応試験地を造成し、そこから優良候補木を選抜した。優良候補木はクローン検定を行い、優良クローンを確定した。次に、これら優良クローンと中国産小葉ポプラ (*Populus simonii*) の人工交配により得られた種間交雑個体を、クローン化し検定を実施した。検定は、成長及び材質形質について複数の立地条件下で行われ、それぞれの立地条件に適した優良クローンを確定した。米国産暖帯系ポプラと中国産小葉ポプラの特徴を表Ⅲ－3に示す。

表Ⅲ－3 米国産暖帯系ポプラと中国産小葉ポプラの特徴

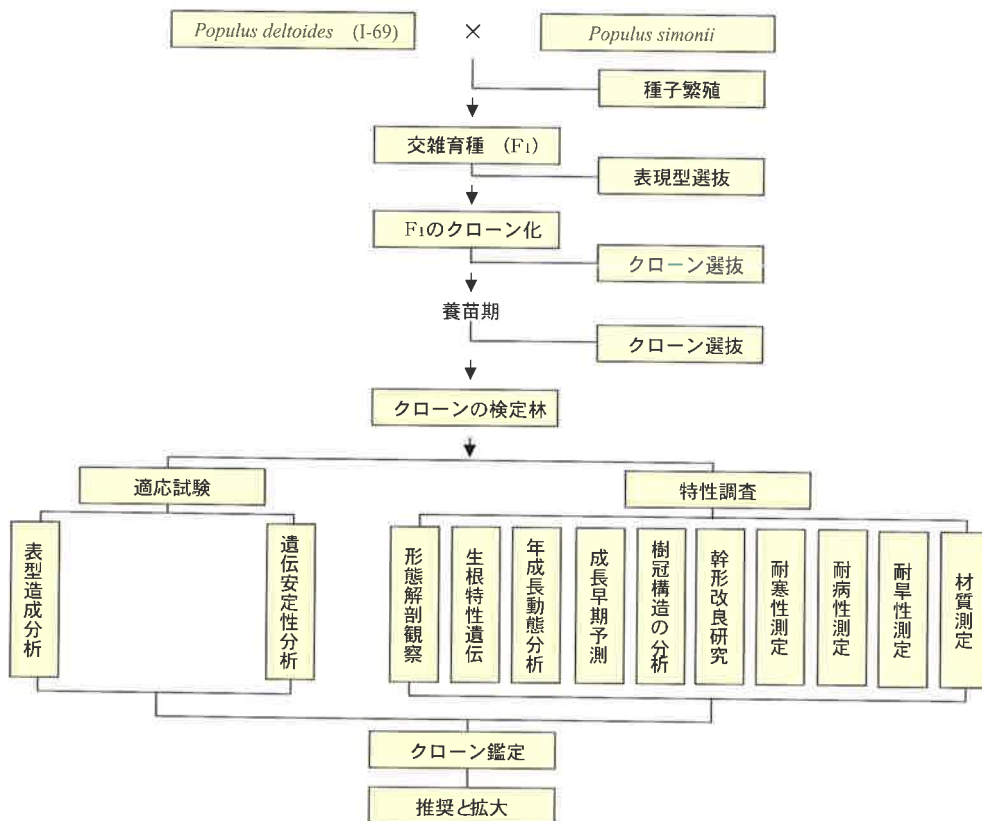
区 分	米国産暖帯系ポプラ (<i>Populus deltoides</i>)	中国産小葉ポプラ (<i>Populus simonii</i>)	種間雑種の目標
成 長	良	劣	早生
材 質	良	良	優
適応性	暖地に適応	寒地や乾燥地に適応	広い
耐病性	強	弱	強

王 (2000) および黄 (2000) を基に作成

米国産暖帯系ポプラと中国産小葉ポプラとの種間雑種を創出する過程は図Ⅲ－４に示したように、*P. deltoides* のI-69/55を雌性親に*P. simonii*のNL-80103, NL-80104, NL-80105, NL-80106及びNL-80121を花粉親とした人工交配由来の実生家系から、優良候補木を選抜し、このうちさし木増殖性が高く苗畑での成長が優れたクローンを用いてクローン検定を行い、優良クローンを確定するというものである。クローン検定での調査項目は、造林特性のみならず合板やパルプ等の利用に至る重要な形質について実施された。主な調査形質は、直径、樹高、幹の形状及び材の性質（繊維の形状、容積密度、乾燥収縮率、MOE（ヤング率）、MOR（曲げ破壊係数）、接着性に関するpH値）などである。

ポプラに関する分子遺伝学的な研究も進んでおり、病虫害抵抗性のBt遺伝子及びNP-1遺伝子、高アルカリ耐性のBADH遺伝子を特定し、これらの遺伝子を遺伝子組み換え操作により、組み込んだ品種を創出している。また各種の交雑家系を用いて、DNAの連鎖地図の作成も行っている。

以上のようなポプラ育種の取り組みの結果、最近の30年間で江蘇省の農村の平原にポプラの改良種苗によって造林された面積は178千haで、蓄積は2,361万m³、年間成長量300万m³に及ぶ。この結果、ポプラを材料としたパルプ、合板、繊維板、パーティクルボードの木材加工産業が盛んになり、一大ポプラ産業が発展している。



図Ⅲ－４ 米国産暖帯系ポプラ (*P. deltoides*) と中国産小葉ポプラ (*P. simonii*) との種間雑種を創出する過程
黄 (2000) を基に作成

引用文献及び参考図書

- ファルコナー (田中嘉成・野村哲郎共訳) : 量的遺伝学入門 (原書第3版), 539pp, 蒼樹書房, 東京, 1993
- 古越隆信・谷口純平 : 実践林業大学 XXVI 林木の育種, 223pp, 農林出版, 東京, 1982
- 黄 敏仁 : ポプラ育種研究の進展, Fast Growing Trees8 (早生樹協議会編), 8-12, 2000
- 池橋宏 : 植物の遺伝と育種, 278pp, 養賢堂, 東京, 1996
- 片寄 麟 : 海外プロジェクトの実績と現状 (1) -ウルグアイの林木育種-, 林木の育種188, 35-140, 1998
- Kikuchi, T. : Study Report, Saba Re-Afforestation Technical Development and Training Project, 1994
- Kurinobu, S. : Final Report on Seed Source Evaluation, Forest Tree Improvement Project No.63, 59pp, 1997
- 栗延 晋 : インドネシアの林木育種プロジェクトについて, 熱帯林業56, 32-41, 2003
- 大庭喜八郎・勝田 柁編 : 林木育種学, 337pp, 文永堂出版, 東京, 1991
- 中島哲夫監修 : 新しい植物育種技術, 養賢堂, 東京, 1987
- スネデカー・コ克蘭 (畑村又好, 奥野忠一, 津村善郎訳) : 統計的方法 (原書第6版), 岩波書店, 1972
- 武田元吉・山元皓二 : 育種学入門, 182pp, 川島書店, 東京, 1991
- 王 明麻 : 暖帯系ポプラの産業用原料資源の育成, Fast Growing Trees8 (早生樹協議会編), 5-8, 2000
- 吉田 実 : 畜産を中心とする実験計画法, 養賢堂, 東京, 1971
- Zobel, B. and Talbert, J. : Applied Forest Tree Improvement :, 505pp, Waveland Press, Inc., USA, 1984

平成18年12月印刷
平成18年12月発行

熱帯産等早生樹種の育種マニュアル 本 論

編集・執筆
独立行政法人林木育種センター
海外協力部

編集者 生方 正俊
執筆者 千吉良 治

発 行 独立行政法人林木育種センター
茨城県日立市十王町伊師3809-1
電 話 (0294) 39-7000(代表)
F A X (0294) 39-7306

印 刷 大成印刷株式会社
茨城県日立市東多賀町4-11-7
電 話 (0294) 36-1837(代表)
F A X (0294) 35-2779

I S B N 4 - 9 9 0 3 2 7 1 - 0 - 1
