

カラマツ類の苗木の成長動態と次代検定に向けた評価

石塚 航*・成田あゆ*・今 博計*・佐藤弘和*・黒丸 亮*・来田和人**

Growth and survival of larch juvenile and evaluation for progeny trials

Wataru ISHIZUKA*, Ayu NARITA*, Hirokazu KON*, Hirokazu SATO*, Makoto KUROMARU*, and Kazuhito KITA**

要旨

カラマツ類における優良な個体と系統の選抜を推進し、加速させるためには、効率的な次代検定が求められる。それには若齢時の成長把握や、次代検定に向けて留意すべき点の把握が欠かせない。そこで、グイマツ×ニホンカラマツ（カラマツ）の人工交配家系（雑種F₁群）とカラマツ精英樹間の自然交配家系（カラマツ群）の苗木を用いて、苗畑での育苗段階における成長と生残の推移を調査するとともに、次代検定林を3ヶ所（北見、士別、岩見沢）に造成し、検定材料を確保するという観点から考察を行った。播種後3年間の苗木数と苗木の成長の推移を家系ごとに把握し、種子の発芽率は採種年と家系により大きく異なること、毎年の床替えを経ても、異なる苗齢の成長形質間に相関が認められること、雑種F₁群内で成長に特に秀でる家系はどの苗齢でも共通したこと、カラマツ群内のほとんどの家系の成長は、苗齢が上がるにつれて事業用カラマツの成長よりも明瞭に秀でるようになったことがわかった。雑種F₁群の成長や発芽率には、花粉親よりも母樹の違いが大きく影響する傾向があった。交配・採種年や母樹の考慮、また、種子を得やすい自然交配家系の利用は苗木数の確保に寄与するとみられ、植栽できた検定林数に直結したことから、効率的な次代検定のための重要な事項だと考えられた。

キーワード：家系間差, カラマツ, グイマツ雑種F₁, 林木育種, 次代検定

はじめに

林木育種では、まず、自然集団から選抜した優良な個体を母集団とし、その子どもを検定材料として用いた次代検定を実施することで遺伝的特性の評価等を行う。評価の際には統計学的な解析手法を用い、これによって遺伝的に優れた個体や系統を見つけ出して選抜を図る。さらに、次の交配世代を用いながら次代検定と優良な個体・系統の選抜を繰り返すことで、遺伝的な改良を進めていく（大庭・勝田 1991；White et al. 2007）。検定可能な大きさに達するまでに時間のかかる樹木においては、従来、このような次代検定と選抜の手続きには時間を要していた。今後、優良な個体・系統の選抜の推進と加速によって林木育種を進展させるためには、十分な検定材料の確保、早期選抜の枠組みの確立、選抜手法の高度化

を通じて、より効率的な次代検定と選抜を図る試みが重要になっている。

次代検定を着実に遂行するためには、その基盤となる検定林の造成や、検定林に植栽された検定材料の詳細な動態の追跡や把握、そして適切な統計学的手法を用いた遺伝的特性の評価が必須であることは言うまでもない。さらに、より効率的な次代検定を実現させるためには、上記に加えて若齢時の成長把握や、次代検定に向けて留意すべき点の把握も欠かすことができないと考えられる。それには、人工交配や自然交配による検定材料の作出、苗畑での検定材料の育苗、検定林への苗木の植栽（以降、山出し）といった一連の手續きを取り扱う必要がある。

その中でも特に、育苗段階における成長動態、すなわち苗木高といった苗木の成長形質の推移や発芽から山出しに至るま

* 北海道立総合研究機構林業試験場 Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido, 079-0198

** 北海道立総合研究機構林業試験場道北支場

Dohoku Station, Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, 300 Homare, Nakagawa, Hokkaido, 098-2805

[北海道林業試験場研究報告 第56号 平成31年3月 Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 56, March, 2019]

での苗木数や生残率の推移に関する知見の集積は有用である。これまでにトドマツの産地別苗木や標高別苗木を用いて苗畑での成長動態を詳細に調査した報告からは（畠山 1981；倉橋・濱谷 1981），異なる産地や標高に由来するトドマツが由来地に沿った遺伝的特性を有しており，苗木の段階から成長の優劣や諸々の被害・ストレスへの抵抗性が異なるという，林木育種的にも生態遺伝学的にも貴重な知見が得られている。また，ニホンカラマツ（以降，カラマツ）について，採種園自然交配種子に由来する苗木の成長動態を調査した報告からは（梶ら 1979），家系による成長特性の違いが苗畑での樹高成長に認められることが示され，大きなばらつきがあるものの，苗畑で成績が良い家系が検定林への植栽後初期の成績も良いという傾向が示されている。しかしながら，このような知見は，播種から山出しまでの経時的な追跡調査とデータ整理を必要とし，次代検定に向けた一連の取り扱いにおいて体系的に把握しきれていないのが実情である。

今回，カラマツ類の次代検定を新たに実施するため，グイマツ×カラマツの人工交配等による雑種 F_1 家系とカラマツ精英樹間の自然交配家系を供試材料とし，一般的な山出し用苗の育苗体系の中で苗木の育成を行った。その中で，これからの次代検定に向けて，播種から山出しまでの成長動態を把握することとした。本報告では，家系単位での成長特性をまとめるとともに，検定材料を確保するという観点に立って，次代検定に向けた苗木の評価を行った。具体的には以下を検討することとした：①発芽から山出しまでの育苗段階における成長・苗木数・生残率の推移は，家系単位でどうなっているか，②異なる苗齢の家系別成長形質の間にはどの程度の相関があるか，③初期の家系間差から遺伝的な優劣をみることができるか，④検定林の造成において，検定材料を確保するという観点でどのような点を考慮すべきか。

材料と方法

1 供試材料

グイマツ×カラマツの人工交配，または自然交配によって作出された種間雑種第一世代家系（以降，雑種 F_1 群）とカラマツ精英樹間の自然交配によって作出された家系（以降，カラマツ群），および，一般事業用の苗木生産に用いられる種子に由来する苗木（以降，一般群）を供試材料として用意した。これらは，北海道における他の一般事業用の種子保管方法にならない，使用するまで北海道が所有する種子貯蔵庫（気温+2℃，湿度40%）にて種子の状態で保管した。

(1) 雑種 F_1 群

雑種 F_1 群として，人工交配と自然交配によって作出された全19交配家系を設定し，G-01～G-19の家系番号を付した（表-1）。人工交配はのべ3回行い，2004年には美唄市の北海道立総合研究機構林業試験場（以降，林業試）構内にあるグイマツクローン集植所，2008年には林業試道北支場（中川町）

にある道有採種園内，2014年には林業試の所管するグイマツ遺伝資源評価林（三笠市）で行った。2004年はグイマツ精英樹3系統とカラマツ精英樹2系統を交配させて種間雑種の種子を得た。2008年にはグイマツ精英樹3系統を，2014年にはグイマツの優良木1個体を，それぞれカラマツ精英樹3系統と交配させて種間雑種の種子を得た。ここで，グイマツ優良木1個体とは，同試験地に植栽されたグイマツの中より『第2世代精英樹候補木と同等以上の性能を有する』（田村ら 2014）として2013年に選抜された個体である。この個体は，1989年にサハリン南部のドリックス市近郊のグイマツ母樹SO5より直接採集した種子に由来し，林業試苗畑にて播種，育苗の後，1993年にグイマツ遺伝資源評価林に植栽された，来歴のわかる有用な遺伝資源である（黒丸 1990）。

また，道有採種園とグイマツ遺伝資源評価林にて行った人工交配の際には，同時に自然交配によって作出された種子も得た。道有採種園はカラマツ類雑種採種園に指定されており交配母樹の周囲はカラマツに囲われる。グイマツ遺伝資源評価林は周囲をカラマツ，グイマツ，それらの種間雑種に囲われる。これらは通例に従い，グイマツを母樹としたopen家系（open pollinated families；White et al. 2007）として雑種 F_1 群の1家系として本報告でも扱うこととした（表-1の花粉親がopenの家系）。

(2) カラマツ群

カラマツ群として，カラマツ精英樹間の自然交配によって作出された全12家系を設定し，L-01～L-12の家系番号を付した（表-1）。これらは，2014年秋，道有採種園（訓子府町）にて，十分な着果が認められる複数のカラマツ精英樹を選び，母樹別に採種したものである。すべて植栽後50年以上経過した成木であった。一部，配植上のクローン名の真偽が不明な個体があったことから，表-1の母樹情報欄には採種個体の位置を掲載することとし，位置情報で今後の母樹管理を行うこととした。すべて自然交配による種子で，花粉親は不特定だが，採種園内に植栽された周囲のカラマツ精英樹のクローンが大多数だと見込まれる。すべてopen家系として扱った。

(3) 一般群

一般事業用の苗木生産に用いられる種子に由来するカラマツ類苗木，のべ5種類を一般群として追加することとし，C-1～C-5の番号を付した（表-1）。C-1は，育種カラマツとして流通する苗木とした。これは，2014年に道有採種園（訓子府町）から事業用として収穫された種子由来のカラマツ苗木で，複数のカラマツ精英樹のクローンの種子を混合（バルク）したものである。C-2は，普通カラマツとして流通する苗木とした。これは，採種園や採種母樹林に指定されていない普通林から同年に事業用として収穫された種子由来のカラマツ苗木である。さらに，同年に道有採種園（訓子府町）の中のカラマツ類雑種採種園23ブロックにおいて，不特定多数のグイマツ精英樹のクローンより採種された種子に由来する

表-1 供試材料の家系情報

供試材料群	家系番号	母樹苗木種別(一般群の場合)	[系統名]	花粉親	採種年	採種場所
雑種F ₁ 群	G-01	三笠遺伝A152 (3BL-4PL-7)	[グイマツ優良木07]	胆振1	2014	三笠遺伝資源評価林
	G-02	三笠遺伝A152 (3BL-4PL-7)	[グイマツ優良木07]	十勝35	2014	三笠遺伝資源評価林
	G-03	三笠遺伝A152 (3BL-4PL-7)	[グイマツ優良木07]	空知3	2014	三笠遺伝資源評価林
	G-04	三笠遺伝A152 (3BL-4PL-7)	[グイマツ優良木07]	open	2014	三笠遺伝資源評価林
	G-05	中標津5		胆振1	2008	林業試 道北支場
	G-06	中標津5		十勝35	2008	林業試 道北支場
	G-07	中標津5		空知3	2008	林業試 道北支場
	G-08	中標津5		open	2008	林業試 道北支場
	G-09	中標津5		胆振1	2004	林業試 クローン集植所
	G-10	中標津5		十勝35	2004	林業試 クローン集植所
	G-11	高山63		十勝35	2008	林業試 道北支場
	G-12	高山63		空知3	2008	林業試 道北支場
	G-13	高山63		open	2008	林業試 道北支場
	G-14	高山64		十勝35	2008	林業試 道北支場
	G-15	高山64		空知3	2008	林業試 道北支場
	G-16	高山64		open	2008	林業試 道北支場
	G-17	豊岡111		胆振1	2004	林業試 クローン集植所
	G-18	豊岡111		十勝35	2004	林業試 クローン集植所
	G-19	札幌1		胆振1	2004	林業試 クローン集植所
カラマツ群	L-01	訓10BL-64 (11-15)	[後志22]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-02	訓5BL-2 (3-2)	[石狩16]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-03	訓4BL-46 (31-25)	[空知9]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-04	訓11BL-L15 (15-11)	[留萌4]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-05	訓4BL-37 (49-29)	[留萌7]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-06	訓3BL-22 (3-2)	[上川23]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-07	訓9BL-L15 (74-31)	[幾寅10]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-08	訓4BL-48 (1-3)	[十勝62]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-09	訓4BL-32 (2-14)	[網走34]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-10	訓4BL-36 (2-16)	[網走41]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-11	訓9BL-G26 (64-33)	[中標津2]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
	L-12	訓11BL-L12 (27-7)	[根室8]	open	2014	道有採種園(訓子府町)
一般群	C-1	育種カラマツ			2014	道有採種園(訓子府町)
	C-2	普通カラマツ			2014	普通林
	C-3	雑種F ₁			2014	道有採種園(訓子府町)
	C-4	グイマツ			2014	道有採種園(訓子府町)
	C-5	コンテナ育苗普通カラマツ			—	

花粉親がopenの家系は自然交配由来であることを示す。雑種F₁群のG-01~G-04ならびにカラマツ群については、母樹とした個体のID番号や位置情報、系統名([]書き)を付した。カラマツ群の場合、採種園のブロックと配植番号、植栽行列番号、配植図上の系統名を付すこととし、たとえばL-01ならば、「訓10BL」が道有採種園(訓子府)の10ブロック、「64」が配植番号64、「11-15」が11行15列目に植栽されたクロン個体が母樹であることを示す。

苗木のうち、苗木サイズや苗木形態に基づいて種間雑種として選苗された苗木(Kita et al. 2014)をC-3、グイマツとして選苗された苗木をC-4とした。当該ブロックにはグイマツとカラマツが単木で混植されており、花粉親の多くは周囲のカラマツ精英樹のクロンと見込まれるが、一定の割合でグイマツ花粉も混じる(Moriguchi et al. 2008)。そのため、一般事業用の苗木生産の現場においても、上述した種間雑種とグイマツの2種が選苗されて区別されている(参考: Kita et al. 2014)。そこで、本供試材料においても、通常の育苗体系ののちとして、2種類(C-3とC-4)を設けることとした。最後に、C-5はコンテナ容器を用いて育成した普通カラマツとし、これは後述する次代検定林1ヶ所への植栽のために後で追加した群である。

2 育苗の過程

播種から山出しまでの育苗は、一般的な山出し用苗の育苗体系に沿って行った。すなわち、苗木を用意して春に直接播種し、1年ごとに掘り取りと植え替え(床替え)を実施した。その都度、苗木の大きさに合わせて苗床に植え付ける密度を管理した。通常カラマツ苗は3年目春に山出しするが、検定林造成の都合上、本供試材料は4年目春に山出しをした。

(1) 1年目(2015年)

林業試において2015年4月から、C-4、C-5を除く種子の低温湿層処理(24時間の吸水と3週間の低温処理)を行った。同年5月上旬、この種子を林業試苗畑に設定した播種床へまきつけた。播種床はあげ床とした。雑種F₁群の種子は量的に限られたことから、各家系2反復の播種区画を設けて全粒

を播種した。各家系の播種種子重は表-2に示すとおりである。カラマツ群と一般群については播種区画を3反復設け、合計7.5~10gの種子を播種した。播種の際、仕立て本数400本/m²となるようにした。発芽が揃うまでは育苗シートで覆い、発芽当年の成長期にはトンネル状にした寒冷紗で覆い直射日光を避けた。得られた苗木は播種床に据え置いたまま冬越しさせた。

(2) 2年目(2016年)

2016年4月中旬、播種床の消雪後に全ての苗木を掘り取った。5月中旬に苗床へ植え付けるまでの間、苗木は雪室にて保管した。その際、前年の反復の違いをなくすため、家系ごとに全反復の苗木を1つに混合させた。C-3として扱った苗木については、この掘り取りの際に苗木サイズや苗木形態に基づいた選苗を行い(Kita et al. 2014)、種間雑種と判断された苗木をC-3とした。選苗によって、同時にC-4に相当するグイマツ苗木も生じたが、十分な数を確保できなかったため、一般群のC-4として扱わないこととした。なお、通常の一般事業での苗木生産においては、雑種とグイマツとを区別するための選苗とは別に、小さな苗木や不良な苗木を取り除くための選苗がこの段階で行われる。その際には、苗高・地際径に閾値が設けられ、閾値以下の苗木が除かれることとなる。しかし、本供試材料は、遺伝的特性の把握が目的であることから、小さな苗木等を除くための選苗は行わないこととした。

苗木の植え替えは、長さ20m、横幅1mのあげ床を13本用意し、1列6本植えの設計(苗木密度36本/m²)で実施した。種子のまきつけ時と同様、雑種F₁群は2反復、カラマツ群は3反復で植え付けることとした。雑種F₁群は各反復へ生残した苗木の半数ずつを植え付け、カラマツ群は1反復あたり最大108本を植え付け、余剰の苗木は以降の試験に用いなかった。一般群はC-1とC-3で4反復、C-2で3反復用意し、1反復あたり108本を植え付けた。ただし、植え付け時に端数が生じた場合、修正しないで植え付けたために、家系によっては厳密に108本ではないものもある。植え付け後、秋までそのまま育苗した。11月上旬に全ての苗木を苗床から掘り取り、越冬のために苗畑内に仮植床を用意して寝かせて仮植した。

(3) 3年目(2017年)

2017年5月、長さ20m、横幅1mのあげ床を新たに24本用意し、1列4本植えの設計(苗木密度16本/m²)で仮植した苗木の植え付けを行った。2年目と同様、家系ごとに全反復の苗木を1つに混合させた後、雑種F₁群は2反復、カラマツ群と一般群は3反復を用意し、各反復へ等分した苗木を植え付けた。ただし、1反復あたり最大の苗木数は96本とした。それを超える数の苗木数があった場合には、4反復目として苗床の余りに植え付けた。また、このときに、供試材料と同齢のグイマツを道内の苗木生産者から購入し、これをC-4として扱い、苗床に植え付けた。植え付け後、秋までそのまま

育苗した。9月から11月にかけて、生存数をもとに設計した次代検定林への山出し計画に沿って、家系ごとに掘り取り、出荷用の束にまとめた。これらの苗木は苗畑内に用意した仮植床に寝かせて仮植した。

(4) 4年目(2018年)

2018年4月の消雪後、全苗木を掘り取った。翌月以降の山出しに向けて、植栽先の検定林ごとに、苗木は家系単位で林業試の雪室にて保管した。この際に、コンテナ育苗したカラマツの苗木を一般群C-5として追加した。C-5は、苗齢が他の供試材料よりも1年若く、2016年春に150ccコンテナ育苗容器に直接播種(苗木の仕立て密度約300本/m²)して林業試において育成し、翌2017年に苗木の植え替えを実施し、密度約200本/m²で育成したものである。C-5については、選苗を行って一般事業用のコンテナ苗木として出荷される規格(2号苗;苗高25cm以上、地際径4mm以上)に達した苗木を供試材料とした。

3 苗木の成長動態調査と解析

家系ごとに各時点の苗木数を調査した。2015年の夏(7月)時点の苗木の生残数は「1年目夏発芽数」とした。2015年、2016年、2017年の秋(9~10月)の生残数はそれぞれ、「1年目秋苗木数」「2年目秋苗木数」「3年目秋苗木数」とした。また、2016年の春に植え付けた苗木の全数を記録し、これを「2年目春苗木数」とした。さらに、2018年の春に、検定林への山出した苗木の全数を記録し、これを「4年目春苗木数」とした。なお、4年目春苗木数は得苗数に等しい。

1年目夏発芽数と家系別の播種種子重から、家系ごとの「1年目夏発芽率」を集計した。その際、播種した種子重より播種した種子粒数へと換算する必要があるが、これは、家系ごとの重量あたり種子数を用いて推定した(石塚、未発表)。なお、2015年7月における発芽数の調査以降もわずかながら発芽が継続したが、ほぼ発芽が済んでいたことから、本報告において、1年目夏発芽率は発芽率をほぼ代替する値とみなすこととした。

次に、苗木の生残率を家系ごとに集計した。2年目春の植え付け以降における苗木数の推移は枯損によってのみ生じるが、1年目から2年目にかけての苗木数の推移には、2年目春の掘り取り・植え付け作業において余剰苗が除かれた分が含まれるため、苗木の生残を正しく表現することができない。そこで、本報告では、2年目以降の生残率を扱うこととした。2年目春苗木数を母数(2年目春を起点)として、2年目秋苗木数、3年目秋苗木数、4年目春苗木数を用いた生残率を算出し、それぞれ「2年目春~秋生残率」、「2年目春~3年目秋生残率」、「2年目春~4年目春生残率」として定義した。

続いて、各年の秋時点での苗木の成長形質を調査した。2015年、2016年の秋(10月)には、苗高(H, 単位cm)と地際径(D, 単位mm)を測定し、「1年目秋苗高」、「1年目秋

地際径]、「2年目秋苗高」、「2年目秋地際径」とした。苗高と地際径から2015年、2016年それぞれのD²H(単位cm³)を算出し、これらも成長形質とした。2017年の秋(9月)には、苗高のみを測定し、「3年目秋苗高」とした。測定は各家系の反復ごとに無作為に抽出した40本を対象とし、集計はすべて家系別で実施した。そのため、苗齢が異なる形質同士の値は、同じ個体の反復測定による値ではないとみなした。

各形質の集計の後、各家系の成長特性について、Whiteら(2007)を参考に評価した。まず、家系別の成長形質について、異なる苗齢間での相関を求めた。続いて、3年目秋苗高を基準とし、1年目秋、2年目秋それぞれの形質の中で3年目秋苗高と最も相関が高かった形質を用いて、樹種ごとに家系順位を算出し、育苗期間3年間における推移をみた。

雑種F₁群はさらに、各家系の両親の特性についても評価した。雑種F₁群の19家系は、母樹6系統と花粉親3系統の間での人工交配、もしくは花粉親が特定されない自然交配によっている(表-1)。そこで、発芽率と苗高を対象とし、母樹や花粉親が異なることの影響をみることにした。発芽率は1年目夏発芽率を、苗高は育苗期間の最終時点で測定した3年目秋苗高を用いた。解析においては、林木育種の通例に従い(大庭・勝田 1991; Kita et al. 2009)、遺伝率の指標となる母樹の分散成分と花粉親の分散成分を人工交配家系について算出するとともに、各系統の効果量を推定した。その際、採種年が揃っていないことから(表-1)、播種までの種子の保管期間の違いも対象とした形質に影響すると想定されたため、種子保管期間(単位:年)の効果を組み入れることにした。具体的には下記のモデル構造をとる一般化線形混合モデルを組んで解析した:

発芽率 or 苗高 = f{種子保管期間 + e(母樹) + e(花粉親)} + e

ここで、種子保管期間は固定効果、母樹と花粉親はランダム効果、式末尾のeは残差であることを示す。解析はR(R Core Team 2018)を用いた。

4 次代検定林造成に向けた苗木生産の評価

育成した苗木を供試材料として、カラマツ類次代検定林を道内3地域(北見市、士別市、岩見沢市)に新規造成し、検定林ごとに管理番号(順にG37、G38、G39)を付した。検定林への供試材料の植栽は2018年5~6月にかけて実施した。検定林の概要は本報告末尾につけた付表に示すとおりである。検定林造成に先立って、前年秋までに、各造成予定地の下見、地拵えの確認、測量、プロット設計と現地でのプロット外周のライン張りを済ませた。植栽にあたっては、林業試験構内の雪室にて保管する苗木を植栽前日に植栽地へと運搬し、木陰に(ない場合にはアルミシートで陰をつくって)仮植した。各検定林内には3ブロックが設定され、さらにブロックの中にプロットを設計した。1プロット内には3列×4本の計12本の苗木を植栽する設計とし、1プロットに1家系を配植す

るものとした。また、各ブロック内に各家系1プロット以上が割り当てられることを基本とした。検定林・ブロック内の家系の配植は無作為化によって決めた。

端数として検定林へ植栽できなかった苗木については、三笠市に設定したカラマツ類試植地へ植栽した。植栽は2018年5月16日に実施し、縦20m、横50m方形区へ苗列間2.5m間隔で、無作為化による単木混交の配植設計で実施し、162本が植栽された。

次代検定林へ植栽された供試材料はすべて検定材料として扱い、将来その成長等における遺伝的特性を調べ、統計解析を経て優良個体を選抜する。この選抜の精度を上げるためには、1つの家系の検定材料がすべての次代検定林へ植栽されていることが望ましく、さらに、すべての次代検定林の各ブロックに少なくとも1プロットが割り当てられていることが望ましい。これらの条件を満たすには、今回設計した次代検定林の場合であれば108本(3ヶ所×3ブロック×12本)以上の苗木が必要なことになる。しかしながら、実際にはこの条件を満たさない家系がみられたことから、検定材料を確保するという観点に立って、次代検定に向けた苗木生産の評価を行うこととした。今回、苗木の育成から山出し、検定林造成までの一連の手続きを経たが、検定材料の確保に関わるのは、播種した種子数だけではなく、どれだけの数が発芽したか、および、どのくらい生残率が高かったかがあると予想された。そこで、得られた全苗木数を表す指標となる1年目夏発芽数と、床替え後からの生残率(2年目春~秋生残率、2年目春~4年目春生残率)が、実際に造成できた検定林の数に関連しているかを検討した。

結果と考察

1 成長動態

家系別の播種種子重、播種後3年間の各時点の苗木数を表-2に、発芽率と各時点の生残率を表-3に示す。雑種F₁群の1年目夏発芽数については1本(G-19)から318本(G-04)

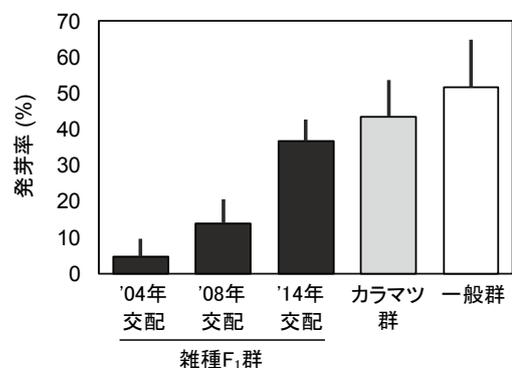


図-1 供試材料の群別および交配年別の発芽率

雑種F₁群のみ群内で交配年が異なるため、交配年別で集計した。エラーバーは標準偏差。発芽率は播種量と夏時点の発芽数から推定した値を用いた。

表-2 家系別の播種量と各時点の苗木数および検定林への植栽情報

家系 番号	播種	1年目夏	1年目秋	2年目春	2年目秋	3年目秋	4年目春	植栽	設定プロット
	種子重 g	発芽数 本	苗木数 本	苗木数 本	苗木数 本	苗木数 本	苗木数 本	検定林数 箇所	総数 (12本/plot)
G-01	3.4	220	221	211	210	173	173	3	14
G-02	3.3	307	304	294	282	228	228	3	19
G-03	3.0	257	248	247	234	206	206	3	17
G-04	5.0	318	306	302	291	246	234	3	19
G-05	2.2	21	17	14	11	7	7	0	0
G-06	2.2	54	62	55	47	40	40	1	3
G-07	1.2	46	44	44	35	29	29	1	2
G-08	23.7	171	174	152	110	82	79	2	6
G-09	2.3	59	58	58	58	44	43	1	3
G-10	4.0	59	59	59	59	34	31	1	2
G-11	4.0	217	211	195	181	181	120	2	10
G-12	8.0	198	187	176	170	140	139	3	11
G-13	12.3	271	256	221	197	159	159	3	13
G-14	3.9	87	78	77	73	52	52	1	4
G-15	3.9	73	71	68	53	37	37	1	3
G-16	10.2	166	145	141	113	77	77	2	6
G-17	3.1	17	17	17	16	12	12	0	0
G-18	2.3	10	10	10	9	7	7	0	0
G-19	2.9	1	2	2	1	0	0	0	0
L-01	7.5	573	520	324	322	191	170	3	14
L-02	7.5	773	733	325	319	132	132	3	11
L-03	9.0	1155	1052	325	322	224	206	3	17
L-04	9.0	613	612	324	317	228	228	3	19
L-05	7.5	641	608	324	311	204	204	3	17
L-06	9.0	759	685	324	306	190	181	3	15
L-07	7.5	958	877	324	312	113	113	3	9
L-08	7.5	616	553	327	316	145	150	3	12
L-09	9.0	870	669	324	312	191	189	3	15
L-10	7.5	669	635	321	317	164	163	3	13
L-11	9.0	590	619	324	323	187	185	3	15
L-12	9.0	950	842	326	326	131	127	3	10
C-1	9.0	1051	823	431	414	156	156	3	13
C-2	9.0	677	546	324	317	162	157	3	13
C-3	10.0	1131	796	435	423	238	233	3	19
C-4	—	—	—	—	—	187	184	3	15
C-5	—	—	—	—	—	—	72	1	6

播種量と苗木数は、設定した全反復の合計値。設定した反復数は、雑種F₁群（家系番号頭文字がG）が2反復、カラマツ群（家系番号頭文字がL）が3反復、一般群（家系番号頭文字がC）は1年目が3反復、2年目以降はC-1とC-3が4反復、C-2が3反復。各反復へおおよそ等分の種子や苗木が配分されるようにした。

まで、発芽率については0.1% (G-19) から43.7% (G-02) までと、家系によって大きく異なった (表-2, 3)。また、カラマツ群の1年目夏発芽数については573本 (L-01) から1,155本 (L-03) まで、発芽率については30.9% (L-04) から68.8% (L-03) までと、雑種F₁群と同様に家系によって大きく異なった。秋の苗木数でも同様に、雑種F₁群で2~306本、カラマツ群で520~1,052本の範囲で大きなばらつきがあった。家系によっては1年目秋苗木数のほうが1年目夏発芽数よりも多い場合もあったがわずかだった (表-2)。供試材料の群別および交配年別で1年目夏発芽率を集計したのが図-1

である。2014年産の種子を用いた場合には40%前後の発芽率が得られたが (2014年交配の雑種F₁群およびカラマツ群)、2004年と2008年に交配した雑種F₁群の家系の平均発芽率はそれよりも低かった。これは、交配の実施後、長期の種子保管を伴ったために、保管期間中に種子の発芽能力が失われたか、著しく低下したことに主に起因すると考えられた。

2年目春の植え付けを起点とした、2年目春~秋生残率の平均 (±標準偏差) は、雑種F₁群、カラマツ群、一般群の順に87.8±12.1%, 97.7±1.7%, 97.0±0.7% となった (以降、同じ順で示す; 表-3)。同様に、2年目春~3年目秋生残

表-3 家系別の発芽率と2年目春を起点とした生残率

家系 番号	1年目夏	2年目春～秋	2年目春～3年目秋	2年目春～4年目春
	発芽率 %	生残率 %	生残率 %	生残率 %
G-01	33.7	99.5	82.0	82.0
G-02	43.7	95.9	77.6	77.6
G-03	40.9	94.7	83.4	83.4
G-04	28.4	96.4	81.5	77.5
G-05	4.7	78.6	50.0	50.0
G-06	11.8	85.5	72.7	72.7
G-07	19.2	79.5	65.9	65.9
G-08	17.1	72.4	53.9	52.0
G-09	13.1	100.0	75.9	74.1
G-10	7.4	100.0	57.6	52.5
G-11	16.6	92.8	92.8	61.5
G-12	14.1	96.6	79.5	79.0
G-13	27.1	89.1	71.9	71.9
G-14	6.1	94.8	67.5	67.5
G-15	4.9	77.9	54.4	54.4
G-16	16.6	80.1	54.6	54.6
G-17	1.4	94.1	70.6	70.6
G-18	1.2	90.0	70.0	70.0
G-19	0.1	50.0	0.0	0.0
L-01	41.0	99.4	59.0	52.5
L-02	42.1	98.2	40.6	40.6
L-03	68.8	99.1	68.9	63.4
L-04	30.9	97.8	70.4	70.4
L-05	39.4	96.0	63.0	63.0
L-06	41.3	94.4	58.6	55.9
L-07	57.1	96.3	34.9	34.9
L-08	39.7	96.6	44.3	45.9
L-09	40.1	96.3	59.0	58.3
L-10	49.1	98.9	51.1	50.8
L-11	31.3	99.7	57.7	57.1
L-12	40.5	100.0	40.2	39.0
C-1	67.0	96.1	36.2	36.2
C-2	35.1	97.8	50.0	48.5
C-3	52.8	97.2	54.7	53.6

生残率はすべて2年目春を算出の起点とした。これは、1年目から2年目にかけての苗木数の推移には余剰苗が除かれた分が含まれる一方、2年目春の植え付け以降における苗木数の推移は枯損によるのみ生じるためである（本文参照）。なお、C-4（グイマツ）およびC-5（コンテナ育苗普通カラマツ）は経時的な測定データがないため省略した。

率は 66.4 ± 19.4 %, 54.0 ± 11.2 %, 47.0 ± 7.9 %となり、2年目春～4年目春生残率は 64.1 ± 18.3 %, 52.6 ± 10.4 %, 46.1 ± 7.3 %となった。2年目春～秋生残率はどの供試材料群においても高く、健全な生育を示した。しかし、その翌年の枯死を加味した生残率（2年目春～3年目秋生残率）が目立って低くなり、特にカラマツ群と一般群で低かった。原因は不明であるが、床替えの際の掘り取り、仮植、植え付けといった作業による苗木の損傷や衰弱の他に、掘り取られてから植え付けられるまでに要した時間（種群ごとで作業スケジュールが異

なる）、もしくは、作業時や作業後の土壌状態や気象条件等が関わるものと思われる。

各苗齢の成長形質（樹高と地際径）の家系平均を表-4に示す。苗齢別の樹高と地際径の平均（±標準偏差）を集計すると、雑種F₁群、カラマツ群、一般群の順に、1年目秋苗高の場合には 12.2 ± 5.2 cm, 14.5 ± 3.7 cm, 12.3 ± 3.2 cmとなった。1年目秋地際径では 1.9 ± 1.1 cm, 2.1 ± 0.6 cm, 1.9 ± 0.6 cm, 2年目秋苗高では 46.1 ± 16.4 cm, 43.9 ± 11.3 cm, 47.3 ± 14.4 cm, 2年目秋地際径では 6.6 ± 1.9 cm, 7.3 ± 1.6 cm, 7.3 ± 1.7

表－4 家系別の発芽後3年間の成長(平均±標準偏差)

家系 番号	1年目秋	1年目秋	2年目秋	2年目秋	3年目秋
	苗高 cm	地際径 mm	苗高 cm	地際径 mm	苗高 cm
G-01	15.3 ± 3.4	1.9 ± 0.6	52.2 ± 14.6	7.1 ± 1.7	63.3 ± 21.2
G-02	15.5 ± 3.1	1.7 ± 0.5	48.0 ± 13.1	6.5 ± 1.9	64.0 ± 21.0
G-03	14.2 ± 3.7	1.8 ± 0.5	49.8 ± 13.7	6.8 ± 1.7	68.3 ± 17.9
G-04	12.3 ± 4.2	2.5 ± 2.8	49.5 ± 14.4	6.9 ± 1.8	61.9 ± 21.6
G-05	7.8 ± 5.7	1.7 ± 0.8	40.5 ± 13.6	6.2 ± 1.8	37.1 ± 12.7
G-06	10.7 ± 5.6	1.8 ± 0.8	43.8 ± 16.4	5.9 ± 2.0	65.5 ± 18.0
G-07	12.4 ± 5.1	2.3 ± 0.8	40.8 ± 11.8	5.5 ± 1.7	57.7 ± 14.6
G-08	12.1 ± 4.3	1.9 ± 0.6	37.9 ± 14.8	5.4 ± 1.7	64.3 ± 19.8
G-09	17.5 ± 3.9	2.8 ± 0.6	70.6 ± 13.2	8.1 ± 1.6	75.9 ± 19.9
G-10	18.7 ± 5.1	3.0 ± 0.8	78.3 ± 13.3	9.1 ± 2.2	81.7 ± 11.7
G-11	10.7 ± 4.0	1.7 ± 0.6	45.9 ± 11.5	6.5 ± 1.7	64.1 ± 18.9
G-12	9.4 ± 3.9	1.6 ± 0.5	38.4 ± 12.9	6.3 ± 1.6	58.4 ± 20.2
G-13	9.0 ± 4.3	1.4 ± 0.6	36.6 ± 11.6	6.1 ± 1.9	52.1 ± 18.8
G-14	10.1 ± 3.6	1.6 ± 0.7	39.9 ± 10.2	6.1 ± 1.7	51.0 ± 15.8
G-15	7.8 ± 5.1	1.4 ± 0.7	32.8 ± 12.4	6.0 ± 1.7	41.7 ± 12.3
G-16	10.7 ± 4.5	1.9 ± 0.6	30.5 ± 15.0	5.4 ± 2.2	48.6 ± 19.4
G-17	12.7 ± 3.9	2.7 ± 0.9	63.6 ± 12.7	7.9 ± 1.5	60.9 ± 14.7
G-18	9.6 ± 4.5	2.1 ± 0.8	61.7 ± 11.2	8.4 ± 1.6	57.4 ± 6.9
G-19	6.4 ± 4.9	1.7 ± 0.4	64.0	10.9	—
L-01	16.5 ± 3.2	2.3 ± 0.6	45.0 ± 9.7	7.6 ± 1.5	53.4 ± 15.8
L-02	14.2 ± 3.2	2.0 ± 0.6	39.9 ± 7.9	7.1 ± 1.3	42.1 ± 11.1
L-03	13.1 ± 2.9	2.0 ± 0.5	45.5 ± 8.3	7.7 ± 1.7	54.1 ± 13.8
L-04	12.7 ± 4.0	2.0 ± 0.6	40.8 ± 9.4	7.2 ± 1.5	52.3 ± 14.5
L-05	13.4 ± 2.6	1.9 ± 0.6	49.1 ± 8.9	7.5 ± 1.6	68.4 ± 18.1
L-06	14.9 ± 3.7	2.2 ± 0.7	37.2 ± 11.0	6.8 ± 1.5	49.1 ± 19.1
L-07	14.0 ± 3.1	1.7 ± 0.6	45.0 ± 12.2	7.3 ± 1.8	49.3 ± 16.0
L-08	16.0 ± 3.5	2.4 ± 0.5	47.0 ± 12.5	7.3 ± 1.4	50.4 ± 15.5
L-09	13.2 ± 3.6	1.7 ± 0.5	37.5 ± 13.1	6.5 ± 1.7	47.5 ± 15.7
L-10	15.0 ± 3.9	2.0 ± 0.7	45.6 ± 11.8	7.5 ± 1.7	50.9 ± 13.5
L-11	15.9 ± 3.7	2.1 ± 0.6	50.8 ± 10.3	7.8 ± 1.8	58.3 ± 14.9
L-12	14.8 ± 3.7	2.3 ± 0.6	43.2 ± 10.6	7.4 ± 1.7	50.3 ± 14.8
C-1	11.4 ± 2.5	1.8 ± 0.5	43.0 ± 11.1	7.1 ± 1.6	43.7 ± 14.5
C-2	12.9 ± 3.7	2.1 ± 0.6	40.5 ± 12.1	7.2 ± 1.7	36.1 ± 13.7
C-3	12.8 ± 3.1	1.8 ± 0.7	56.7 ± 12.9	7.7 ± 1.6	59.6 ± 15.1
C-4	—	—	—	—	39.1 ± 9.6

C-5(コンテナ育苗普通カラマツ)は経時的な測定データがないため省略した。

表－5 家系別平均値を用いた形質間の相関係数(r値)と有意確率(p値)

上段:r値	1年目秋			2年目秋		
	苗高	地際径	D ² H	苗高	地際径	D ² H
2年目秋苗高	0.546	0.729	0.771			
	0.002	<0.001	<0.001			
3年目秋苗高	0.451	0.470	0.544	0.723	0.361	0.595
	0.012	0.009	0.002	<0.001	0.050	0.001

太字は各苗齢の形質で最も強い相関であることを示す。

cm, 3年目秋苗高では60.8±20.8 cm, 52.3±16.6 cm, 47.8±17.7 cmとなった。3年目秋の正確な地際径の値はないが、過半数がグイマツ雑種F₁1号苗規格(苗高35cm以上, 地際径7mm以上), カラマツ2号苗規格(苗高35cm以上, 地際径7mm以上)を超えていた。なお, 今回は試験用の育苗のため,

床替え時にサイズを基準とした選苗を行っていない。規格に達しない苗木があったのは主にこのことに起因する。

異なる苗齢の成長形質間における, 家系平均値の相関を表-5に示した。毎年の床替えにも関わらず, 異なる苗齢の成長形質間には正の相関関係が認められた。ただし, 2年目秋地際径と3年目秋苗高については, 有意水準 $p < 0.05$ では有意とは言えず($p = 0.050$), 苗高成長に優れる家系が肥大成長にも優れるという傾向は必ずしも明瞭ではなかった。また, 3年目秋苗高に最も高い相関を示した1年目秋の成長形質はD²Hで($r = 0.544$), 2年目秋の成長形質は苗高だった($r = 0.723$)。本研究では家系ごとに無作為抽出で成長形質を測定しており, 異なる苗齢間で同一個体が反復測定されたわけではない。それにも関わらず, 家系ごとの値に高い相関関係が検出されたということは, 育苗段階の初期から成長に関する

家系間の遺伝的特性が発揮されていることを示唆する。さらに、発芽当年に関しては、苗高のみよりも地際径を統合した成長形質であるD²Hのほうが、その後の苗木の苗高により深く関わっていると考えられた。

上述した、3年目秋苗高と高い相関を示した1年目秋D²Hと2年目秋苗高を用いて家系順位の推移を示すと、特に雑種F₁群において、上位家系と下位家系との間での大きな変動がないことがわかる(図-2)。上位の2家系(G-09, 10)はどの年次の形質においても変わらなかった(図-2A)。また、3年目秋苗高で下位の4家系(G-05, 14, 15, 16)は、1, 2年目でも家系順位が低い傾向があった。カラマツ群の場合、3年目に上位の家系は2年目でも上位である傾向があったが、1年目の順位はそれらより大きく変動した(図-2B)。なお、図-2Bには、カラマツ家系の順位に一般群の育種カラマツ(C-1)と普通カラマツ(C-2)を含めて示した。育種カラマツ(C-1)の場合、1年目は最下位で、3年目は下位より3番目の結果だった。また、普通カラマツ(C-2)

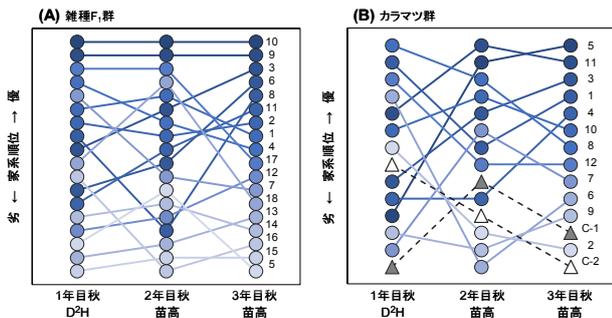


図-2 3年間の成長形質における家系順位の推移

3年目秋苗高を基準とし、1年目、2年目それぞれの形質の中で3年目秋苗高と最も相関の高い形質を各時点の成長形質として用い、家系順位の推移を示した。パネルAが雑種F₁群、パネルBがカラマツ群を示す。カラマツ群の算出の際、一般群より育種カラマツ(家系番号C-1; 灰色三角印)と普通カラマツ(家系番号C-2; 白抜き三角印)のデータも含めた。3年目秋苗高の右に家系番号(表-1参照; GやLは省略)を付した。

場合、1年目に中間の順位に位置したが、2, 3年目に順位を下げ、3年目は最下位だった。普通カラマツは、遺伝的に改良されていない親木から生産される種苗のため、3年目の結果は遺伝的特性が反映された結果であると考えられた。逆に、1年目は苗木サイズの小ささゆえに測定時の誤差が他の苗齢よりも大きいことや、播種床の微環境の違い等に起因する発芽遅れの影響など、遺伝的特性以外の要因を排除しきれなかった可能性もあると考えられる。2年目以降で育種種苗の優位性が現れることは田島(1991)にも述べられ、一貫していた。また、遺伝的に改良された家系の苗木が普通カラマツの苗木よりも成長に秀でることは、採種園産自然交配苗を用いた梶ら(1979)の結果とも一貫する。すなわち、苗齢が上がるにつれ、カラマツ群内のほとんどの家系の成長は一般群で用いた育種カラマツや普通カラマツの成長よりも明瞭に秀でるようになったものとまとめられる。

続いて、母樹と花粉親の影響について評価した。まず、雑種F₁群の1年目夏発芽率について、図-3に母樹と花粉親

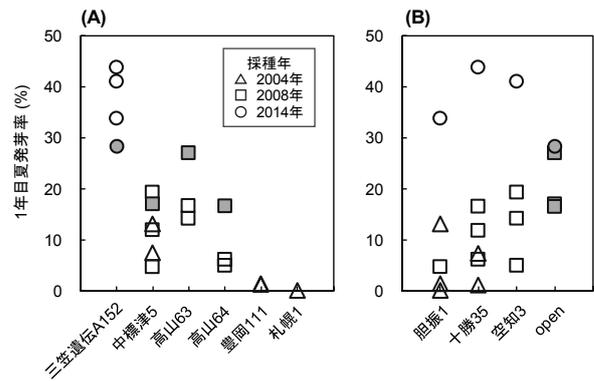


図-3 雑種F₁群における母樹と花粉親別の発芽率

パネルAが母樹となったグイマツの系統ごと、パネルBが花粉親となったカラマツの系統ごとに、1年目夏発芽率を示した。灰色塗りの丸は自然交配によって作出された家系であることを示す。また、採種年の違いは、パネルAの凡例に示すとおり、シンボルの違いによって示す。

表-6 雑種F₁群の人工交配家系における、発芽率に関する種子保管期間、母樹、花粉親の効果の解析結果

変数	推定係数	標準誤差	p値	分散成分	ランダム効果内の水準	効果量
切片項	36.264	5.009	0.007 **		母樹(ランダム効果)	
種子保管期間	-3.109	0.610	0.010 **		三笠遺伝A152	3.672
母樹(ランダム効果)				16.46	中標津5	1.207
花粉親(ランダム効果)				0	高山63	0.417
残差				35.46	高山64	-4.320
					豊岡111	-0.359
					札幌1	-0.616
					花粉親(ランダム効果)	
					胆振1	0
					十勝35	0
					空知3	0

別の値を示す。母樹が異なることによる発芽率のばらつき(図-3A)は、花粉親のそれ(図-3B)よりも大きいとみられたが、ここには採種年が異なることの影響(図-1)も含まれているように見える。人工交配家系を対象とした統計解析の結果からは、確かに、種子保管期間が短いほど発芽率が良い傾向があり(表-6)、採種年の違いが影響を及ぼしていた。採種年の違いを加味した上で母樹と花粉親それぞれの分散を推定すると、母樹については分散成分が16.46で、残りの全分散の31.7%を占めた一方、花粉親については分散成分が0で、分散に全く寄与しなかった(表-6)。母樹の効果量推定値からも、母樹が異なることによって発芽率に違いがあったことがわかる。

次に、3年目秋苗高について、図-4に母樹と花粉親別の値を示す。発芽率と同様に、母樹が異なることによる苗高のばらつき(図-4A)は、花粉親のそれ(図-4B)よりも大きいとみられたが、中標津5号を母樹に用いた場合の挙動は他とは異なり、苗高が大きいものも小さいものも含まれた。図からはまた、人工交配か自然交配かによって苗高が異なる

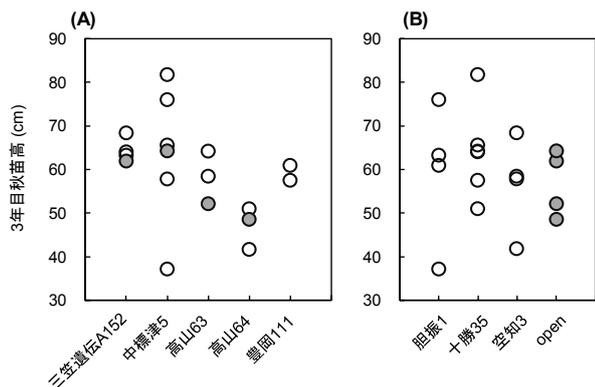


図-4 雑種F₁群における母樹と花粉親別の苗高

パネルAが母樹となったグイマツの系統ごと、パネルBが花粉親となったカラマツの系統ごとにより3年目秋苗高を示した。灰色塗りの丸は自然交配によって作出された家系であることを示す。

という傾向はないとみられた。人工交配家系を対象とした統計解析の結果からは、種子保管期間の効果は有意ではなく、母樹については分散成分が39.27で、全分散の23.5%を占めた一方、花粉親については分散成分が0.01よりも小さく、全分散に占める割合は限りなく0%に近かった(表-7)。すなわち、苗高においても花粉親の効果はほぼみられず、母樹が異なることによる影響が大きかったことがわかった。

これらより、1年目夏発芽率と3年目秋苗高とともに、花粉親よりも母樹の効果が大きく、母樹の選択はそれぞれの値の高低に影響するとまとめられる。本結果のみではこの理由を断定することは難しいが、一つの可能性として、次代検定林の成長データを解析したKita et al. (2009)に示されるように、母樹として用いたグイマツ精英樹の系統内における遺伝的な差異が、花粉親として用いたカラマツ精英樹の系統内における遺伝的な差異よりも大きかった可能性が挙げられる。もしくは、母樹の特性のほうが次代の形質により現れやすかった、という可能性も挙げられる。とくに発芽段階の形質に関しては、母樹とした個体の種子成熟段階での健全状態や周囲環境が影響するという、いわゆる母樹効果があるという報告がある(Kvaalen & Johnsen 2008)。本研究においても、特に発芽率に関して認められた母樹間差異は、これに起因した可能性がある。

2 次代検定に向けた苗木生産の評価

検定材料を統計学的手法に基づいて評価し、将来の選抜精度を担保するためには、それぞれの家系が3つの検定林の各ブロックに少なくとも1プロット(12本)植栽されることが望まれる。すなわち、今回の設計で言えば各家系108本以上の苗木が必要なことになる。カラマツ群と一般群については各検定林の全ブロックへプロットを設定し、検定材料となる苗木を植栽することができた(表-2;ただし、G-39への植栽のためだけに追加したC-5は除く)。その一方、雑種F₁群については、3検定林すべてにプロットを設定できたのは19家

表-7 雑種F₁群の人工交配家系における、苗高に関する種子保管期間、母樹、花粉親の効果の解析結果

変数	推定係数	標準誤差	p値	分散成分	ランダム効果内の水準	効果量
切片項	54.357	8.790	0.113		母樹(ランダム効果)	
種子保管期間	0.801	1.131	0.598		三笠遺伝A152	4.801
母樹(ランダム効果)				39.27	中標津5	1.422
花粉親(ランダム効果)				<0.01	高山63	0.483
残差				128.08	高山64	-5.188
					豊岡111	-1.519
					花粉親(ランダム効果)	
					胆振1	<0.001
					十勝35	<0.001
					空知3	<0.001

系中6家系のみだった。残り13家系は苗木が不足し、そのうち9家系は植栽できた検定林数が限られ、3家系は検定林ではなくカラマツ類試植地のみへの配分となり、1家系はどこにも植栽できなかった。

そこで、雑種F₁群の家系別に、造成検定林数に関連する要因を探るため、得られた全苗木数を表す指標となる1年目夏発芽数、ならびに、床替え後からの生残率（2年目春～秋生残率、2年目春～4年目春生残率）との関係を見た（図-5）。生残率に関しては、床替え後1年間における値は造成検定林数と関係がないようだったが（図-5A）、床替えから山出しにかかる育苗期間の生存率が低い場合には検定林数を制限する傾向が読み取れた（図-5B）。3検定林を造成するためには、図-5Bに基づく、概して必要となる苗木数の2倍以上、すなわち、およそ220本以上の苗木を最初に確保しておく必要があると指摘できる。当然、苗木数は多ければ多いほど良いが、人工交配の場合、交配できる雌花数に限りがある上に交配作業とその後の球果・種子管理に労力を必要とする（倉本・藤澤 2013a, b）。発芽した苗木数が山出しする苗木数の2倍以上という数値は今後の検定林造成にあたって1つの具体的な目標値となると考えられた。検定林の設計次第で植栽数も変わるため、あらかじめ検定林の造成計画を立案して植栽数を見込み、その2倍以上の苗木を最初に確保できるようにすべきだと指摘できる。

ちなみに、図-5では、発芽数と2年目春～秋生残率との間には有意な相関関係がなかったが（ $p = 0.396$ ）、2年目春～4年目春生残率との間には有意な相関関係が認められ（ $p = 0.031$ ）、得られる苗木数が少ないほど生存率が低い傾向があった。これは育苗管理に起因した可能性があった。育苗管理の中で無視できない枯損が生じたことは前述したとおりである。苗畑での作業は家系、ないし反復を単位として行うことから、その単位ごとで若干数の枯損が不可避であったとしたら、ある家系・反復における総苗木数が少ない場合ほど生

残率は低くなる。これはたとえば、掘り取り後の仮植時に、束の一番上の苗木が乾燥で枯損した場合（家系・反復ごとに束がある）や、掘り取り作業の起点となる端の個体が根の損傷によって枯損した場合（家系・反復ごとに作業起点がある）などが想定される。仮に単位ごとに2本の枯損がみられるとすると、総苗木数100本の場合の生残率は98%だが、総苗木数10本の場合だと生残率は80%となる。このような場合に本結果に示される傾向の説明がつくと考えられた。

さらに、今回実施した交配組合せや得られた知見（図-1, 3等）を総合して、次代検定に向けた苗木生産の評価についての考察を展開すると、以下の3点が指摘できる。1つは、人工交配実施後に長期の種子保管を伴うような場合に、発芽率低下ゆえに多くの苗木数を得るのが困難なこと、である。効率的な次代検定に向けた苗木の確保のためにも、人工交配から播種・育苗はなるべく滞りなく行ったほうが良いと指摘できる。関連してもう1点、母樹による発芽率の違いについても推定されたことから、多くの苗木数を得るには、母樹の選択も影響しうることが指摘できる。本研究では、どう母樹を選択するかは言及はできないが、個体間で樹形、樹勢や着花の多さにはばらつきがあるため、配慮して人工交配することが有効かもしれない。最後の1点として、人工交配家系よりも同一母樹の自然交配家系の利用のほうが、効率的に多くの苗木数を得るのに適していることが指摘できる。雑種F₁群では、同一の母樹内では人工交配家系よりも自然交配家系の播種量が多い傾向があり（表-2；G-04, G-08, G-13, G-16）、これは自然交配に由来する種子のほうが得やすいことに起因する。それゆえ、自然交配家系のほうが苗木数の確保に有効である。自然交配家系は花粉親が不特定であるのが欠点だが、母樹の遺伝的特性を効率的に評価することができる点では系統選抜の際の利点と言われる（White et al. 2007）。また、採種園内での精英樹間の交配が担保されるのであれば、DNA解析によって事後的に交配両親を見出すことができ、統計的な遺伝的特性の評価と、精度高い次代検定につながる。このような育苗プログラムの高度化はBreeding without breeding (BWB) 法とも呼ばれて着目される方法でもある（El-Kassaby & Lstiburek 2009）。本報告のカラマツ家系については、このような背景の下、自然交配家系が用いられている（表-1）。自然交配による苗木の確保は次代検定に向けた効率的な検定材料の作出につながるため、今後の次代検定においてさらに活用していく余地があると考えられた。

まとめ

本報告では、カラマツ類の人工交配家系ならびに自然交配家系について、苗畑への播種から苗木を検定林へ植栽するまでの経時的な成長動態を追跡した。種子の発芽率は採種年に加えて家系によっても異なり、これには母樹の違いが影響したとみられた。また、苗畑での育苗の過程では、毎年床替え

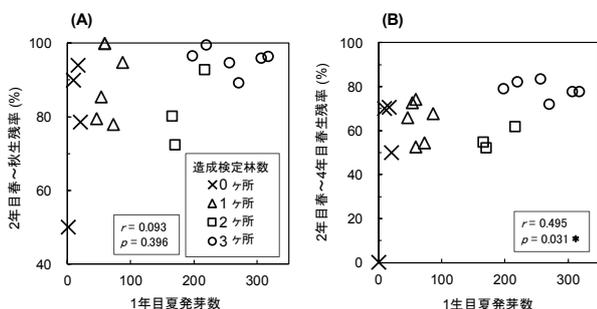


図-5 雑種F₁群の1年目夏発芽数と各時点の生残率の関係および次代検定林造成箇所数

パネルAの凡例に示すとおり、各家系の検定林造成箇所数をシンボルの違いによって表した。生残率について、パネルAでは2年目春～秋生残率を、パネルBでは2年目春～4年目春生残率を用いた。各パネル内には相関係数とその有意確率を付した。

付表 新規造成したカラマツ類次代検定林3ヶ所の概況

検定林番号 (地域)	G37 (北見)	G38 (士別)	G39 (岩見沢)
設定年月	2018年5月	2018年5月	2018年6月
所管	オホーツク東部	上川北部	空知
林班		75	311
小班		32	52
海拔高 (m)	200~230	180~210	400~430
試験地面積 (ha)	0.997	0.77	1.00
プロット面積 (ha)	0.6912	0.6048	0.456
植栽密度 (本/ha)	2500	2500	2500
苗間 (m)	2	2	2
列間 (m)	2	2	2
植栽設計本数 (本)	2498	2042	2249
実植栽数 (本)	2609	2075	2491
検定苗植栽数 (本)	1720	1504	1132
一般苗植栽数 (本)	889	571	1359
反復数 (BL)	3	3	3
プロット数			
合計	144	126	95
BL1	97	59	39
BL2	30	45	27
BL3	17	22	29
補足			
場所	北見市若松	士別市温根別町	岩見沢市栗沢町西万字
前林相	トドマツ人工林	トドマツ人工林	トドマツ人工林
造成前の施業	皆伐, 地拵え	皆伐・風倒木整理, 地拵え	皆伐, 地拵え

を行ったものの、苗木の成長形質に家系間の遺伝的特性がある程度現れていたこと、ならびに、種間雑種となる人工交配家系では、母樹の効果が花粉親の効果よりも大きいことが明らかとなり、将来、次代検定の早期化・効率化を図る上で有用な示唆を得た。また、このようなデータは、突発的な異常気象など生育環境の変化や異なる育苗管理体制下での苗木応答を理解するための比較材料としても価値をもつと考えられる。これからも基礎資料として、初期の成長動態の集積を図っていくことは重要である。

さらに、検定林造成を実施する上では、いかに検定材料を確保するかが重要な課題だと指摘できたが、交配母樹の選択は次代の成長のみならず、検定材料を確保するという面においても関与する要因であることがわかり、いつどのような母樹を対象に人工交配作業を行うかは十分配慮すべき点であるとともに、自然交配の活用も検討すべきであるとまとめられた。

謝辞

供試材料の収集にあたり、(有)佐々木産業、(有)石田農園にご協力いただきました。検定林造成にあたり、北海道水産林務部林務局森林整備課、道有林課、オホーツク総合振興局東部森林室、上川総合振興局北部森林室、空知総合振興局森林室の職員にご協力いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

引用文献

- El-Kassaby Y.A. and Lstiburek M. (2009) Breeding without breeding. *Genetics Research*, 91: 111-120
- 畠山末吉 (1981) トドマツの産地間変異の地域性に関する遺伝育種学的研究. 北海道立林業試験場研究報告, 19: 1-87
- 梶勝次・畠山末吉・石倉信介 (1979) カラマツ採種園自然交配種家系の苗畑および植栽当年の生長. 北海道立林業試験場研究報告, 17: 39-50

- Kita K., Uchiyama K., Ichimura Y., Moriguchi Y., Tsumura Y., Kuromaru M. (2014) Verification of a phenotypic discrimination method for hybrid larch seedlings using DNA markers. *Journal of Forest Research*, 19: 461–468
- 倉橋昭夫・濱谷稔夫 (1981) トドマツの垂直分布に伴う変異. *東京大学演習林報告*, 71: 101-151
- 倉本哲嗣・藤澤義武 (2013a) 実生苗の養成技術－クロマツの人工交配技術－. *森林遺伝育種*, 2: 109-112
- 倉本哲嗣・藤澤義武 (2013b) 人工交配技術－スギ－. *森林遺伝育種*, 2: 154-157
- 黒丸亮 (1990) サハリン南部におけるグイマツ遺伝資源の収集. *北海道林業普及協会 林業技術研究発表大会論文集*, 110-111
- Kvaalen H. and Johnsen Ø. (2008) Timing of bud set in *Picea abies* is regulated by a memory of temperature during zygotic and somatic embryogenesis. *New Phytologist*, 177: 49–59
- Moriguchi Y., Kita K., Uchiyama K., Kuromaru M., Tsumura Y. (2008) 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
- 大庭喜八郎・勝田柁 (1991) 林木育種学, p337. 文永堂, 東京
- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- 田島正啓 (1991) 繁殖技術 (大庭喜八郎・勝田柁編, 林木育種学), 116-130. 文永堂, 東京
- 田村明・山田浩雄・福田陽子・矢野慶介・植田守・阿部正信・竹田宣明・大城浩司・々木洋一・佐藤亜樹彦・織田春紀・小園勝利・渡邊謙一・来田和人・今博計 (2014) 北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木と優良木の選抜－平成25年度の実施結果－. 平成25年度版林木育種センター年報, <http://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/issue/nenpou/2014.html>
- White T.L., Adams W.T., Neale D.B. (2007) Genetic testing - mating designs, field designs and test implementation. In White T.L., Adams W.T., Neale D.B. *Forest genetics*, 357–393. CAB International, London, UK

Summary

Understanding the growth characteristics for breeding resources since early stage as well as understanding the key-points for conducting a progeny trial will contribute the development and the acceleration of forward/backward selection in tree breeding programs. In this study, we measured growth and survival of seedlings in a nursery using crossed progeny of hybrid F_1 larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) and open pollinated progeny produced from the plus trees of *L. kaempferi*, which were

introduced into progeny trials established in three regions (Kitami, Shibetsu and Iwamizawa). The trends over time of growth and numbers of seedlings were revealed with following findings; the germination rates were different among year of seed-collection and families, the growth-related traits of each of the families were correlated among years even under an annual transplanting, the top-raking families were constant among years in F_1 progeny populations, the superior growth of *L. kaempferi* progeny than that of seedlings derived from the commercial seeds became apparent with the lapse of years. For F_1 progeny populations, the selection of mother trees influenced both the growth and the germination rate, rather than the selection of father trees. The number of seedlings available for progeny trials will be affected by the consideration of crossing year and mother trees, and/or an application of open pollinated families of which seeds can be collected easily. They would be the key-points for conducting progeny trials effectively, because the sufficient number of seedlings enabled to establish multiple progeny trials.

keywords

inter-family difference, *Larix*, hybrid F_1 larch, tree breeding, progeny trial