

カラマツ類次代検定林における初期成績とその安定性について

石塚 航^{*}・成田あゆ^{**}・今 博計^{**}

Growth performances at early stage and its stability in the progeny tests of *Larix*

Wataru ISHIZUKA^{*}, Ayu NARITA^{**}, Hirokazu KON^{**}

要旨

優良種苗の拡充や改良に有効な早期選抜を推進するには、若齢時でも精度良く遺伝的特性を評価できる技術が求められる。複数環境下で遺伝的特性がどれだけ安定して発揮できるかを示す「変動性指標」が提唱されたことから、本研究において初期成績評価時に変動性指標を適用させて、優れた成績かつ高い安定性を示す系統・個体の選抜ができるか検討した。対象としたのは、2018年に北海道内3ヶ所に新規造成したカラマツ類次代検定林で、植栽後5年時の成長（樹高、胸高直径）を対象形質として、グイマツ雑種F₁家系（のべ16家系）とカラマツ家系（のべ12家系）の遺伝的特性を評価した。3ヶ所における初期成績に基づいて遺伝的に成長に秀でたグイマツ親1系統とカラマツ4系統を見出すことができたが、算出された変動性指標を同時に考慮すると、そのうち両種それぞれ1系統が、発揮される遺伝的特性の安定性の観点から選抜しないほうが良いようだった。変動性指標の適用は、着実な選抜を進める一つの有効なアプローチとなりうると考えられた。

キーワード：選抜育種、カラマツ類、変動性指標、育種価

はじめに

造林における優良種苗の活用はより良い林分への着実な誘導につながることから、わが国の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」において推進する事項に取り上げられている（経済産業省 2021）。優良種苗の拡充や改良を進めていくためには、遺伝的に優れた個体や系統を見つけ出して選抜を図る林木の育種の取組みをより効率化・加速化させることが重要である。ここで、一般に優良な個体の選抜は次代検定の手続きの中で行われる。次代検定では、専用の試験地である“次代検定林”が設定され、候補となる系統の次代（子ども）を植栽して、統計学的手法によってその遺伝的特性が評価される（White et al. 2007）。したがって、育種の効率化・加速化を実現させるには、次代検定と選抜をより速やかに遂行するという“早期選抜”技術の確立が欠かせない。既に早期選抜に向けた研究は進みつつあり（Hiraoka et al. 2019）、いかに高い検定精度を若齢時において担保させら

れるかが早期選抜にとって重要な事項となっている。なお、選抜は、成長の良し悪しといった次代検定林での成績に基づいて行われる。また、選抜には、どの親が種子親として優れていたかを評価して、優れた親を選抜する考え方である「後方選抜」（backward selection）と、次代検定林を構成する次代そのものを評価し、次代集団の中から遺伝的に優れた個体を選抜する考え方である「前方選抜」（forward selection）の2タイプがある（高橋ら 2016）。早期選抜ではこのどちらも扱うことが可能であり、汎用的な技術である。

検定精度を高くするには、複数の次代検定林を用いた検定を実施するとともに、遺伝的特性（遺伝効果）を推定・評価する際のノイズとなる環境の効果をいかに小さく抑えるか、そして、それでも不可避な環境の効果をいかに考慮しながら遺伝効果を推定するかを考える必要がある（石塚ら 2024）。ここで、一般に測定形質（育種対象形質）の観測値を表す表現型（P）には、遺伝の効果（G）と環境の効果（E）、およびそれらの相互作用（G×E）があることが知られ、これは端的

^{*}（地独）北海道立総合研究機構 Hokkaido Research Organization, Sapporo, Hokkaido 060-0819

^{**}（地独）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
[北海道林業試験場研究報告 第62号 令和7年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 62, March, 2025]

には $P = G + E + G \times E$ の立式で表現される (鶴飼 2003)。それゆえ、上述した「環境の効果を考慮した遺伝効果推定」は、構築する遺伝モデルに $G \times E$ を組み込むことで対処することができ、これによって得られる遺伝効果 (G) に基づいて、遺伝的に優れた個体が選抜できるとされてきた。しかしながら、このアプローチには、 $G \times E$ の大きさが候補材料 (親系統や家系) によって変わりうるという前提が踏まえていない。それゆえ、たとえば大きな $G \times E$ をもつ系統がいた場合には、その系統がある一つの次代検定林において優れた遺伝的形質を示すことができたとしても、別の環境では他の系統に比べて十分な遺伝的能力を発揮できない可能性がある。したがって、高い検定精度での選抜に向けて、次代検定林の評価において「優れた成績」かどうかを評価するのに加えて、複数環境下で発揮される遺伝的特性の「安定性」についても評価できることが、より望ましいと考えられる。

これまでの、そのような遺伝的特性の「安定性」を客観的に示すことは困難であったが、統計学的解析技術 (計算手法) の発達により、近年、作物育種分野において一つの指標が提示された (Olivoto et al. 2019 ; Olivoto and Lúcio 2020)。提示されたのは、供試された環境によってどの程度、発現する遺伝的特性が変動するか (安定しないか) という “変動性指標” で、広く育種分野、森林関連分野での適用が可能であると期待され、実用例も報告されつつある (Alexandru et al. 2023 ; Liepe et al. 2024)。この指標を適用させられれば、「優れた成績」かつ「高い安定性」を示す系統の選抜も不可能ではないと考えられる。したがって、実効性のある早期選抜技術の確立を図っていく上で、検定精度を高めるための有用な

指標になると期待される。

そこで本研究では、北海道の主要造林樹種で、林木育種が精力的に取り組まれているカラマツ類 (ニホンカラマツ *Larix kaempferi* [以降、単にカラマツと表記] およびグイマツ雑種 F_1 *L. gmelinii \times L. kaempferi*) を対象に (たとえば、花岡ら 2017 ; 石塚ら 2019)、早期選抜技術の確立に向けた検討を進めることとした。具体的には、北海道内の異なる地域 3ヶ所に新規造成したカラマツ類次代検定林を対象試験地として、植栽後 5 年時の調査データをもとに下記について明らかにすることを研究目的とした: 1) 各試験地における初期成績の評価、2) 初期成績に対する変動性指標の適用可否、3) 成長性に優れ、変動性の少ない系統の選抜可能性。

材料と方法

1. 検定林概要と調査

初期成績の調査ならびに変動性指標の適用を実施する試験地として、2018年に新規造成したカラマツ類次代検定林 3ヶ所を選定した (表-1)。これらの試験地は道内 3 地域 (北見市、士別市、岩見沢市) の道有林内に造成し、育種事業では検定林番号を付して管理している。本研究では、この番号に沿って順に「検定林 G37」、「検定林 G38」、「検定林 G39」と呼ぶこととする。各試験地の面積は 0.77 ha から 1.00 ha と同一ではないが、どの試験地もその仕様 (図-1) は共通とした。すなわち、1つの次代検定林は 3つのブロック (BL1, BL2, BL3) で構成され、各ブロック内には 3列 $\times$ 4本の計 12本の苗木を植栽するプロットが配置される共通設計とした。その詳細は石塚ら (2019) に記載されたとおりである。これら試験地間

表-1 北海道内の 3ヶ所に造成したカラマツ類次代検定林の概要

検定林番号		検定林 G37	検定林 G38	検定林 G39
地域		北見	士別	岩見沢
所管		オホーツク東部	上川北部	空知
林小班		75林班32小班	311林班52小班	90林班54小班
(所在地)		(北見市若松)	(士別市温根別町)	(岩見沢市栗沢町西万字)
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
検定苗植栽数	(本)	1720	1504	1132
プロット設定数		144	126	95
内	BL1	97	59	39
	BL2	30	45	27
	BL3	17	22	29

詳細は石塚ら (2019) にて記載

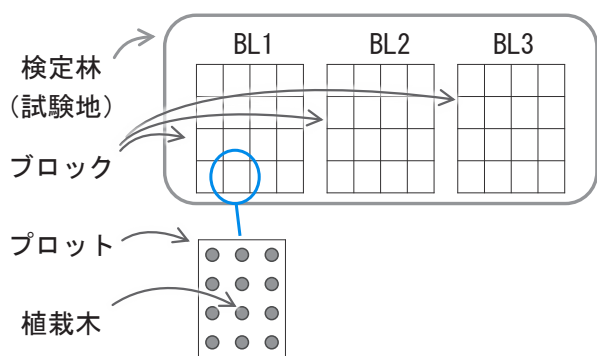


図-1 次代検定林の仕様（模式図）

概念的に、次代検定林内におけるブロックやプロット、植栽木の構造を示す。

には、地域の違いに対応した気候条件の違いのほか、現地実測により、土壌硬さや透水性、間隙率といった土壌物理性の違いも報告されている（佐藤・石塚 2020）。

本試験地に植栽した検定材料の一覧は表-2に示したとおりである。大きく3つの材料群、すなわち、主として人工交配によって得たグイマツ雑種F₁群、訓子府採種園産種子を用いたカラマツ群、および、対照として事業的に用いられている種苗等による一般群に分けられる。各群内の苗木はさらに、親が等しい子（次代）のまとまりを表す“家系”に分けられる。ここで、一般群においても便宜的に家系として管理することとし、G01～G16（グイマツ雑種F₁群）、L01～L12（カラマツ群）、C1～C5（一般群）の家系番号を付した（表-2）。

表-2 カラマツ類次代検定林へ植栽した検定材料一覧

供試材料群	家系番号	母樹記号	花粉親記号	家系情報	[]内はクローン名	採種年	播種年
グイマツ 雑種F ₁ 群	G-01	GA	LA	三笠遺伝A152×胆振1		2014	2015
	G-02	GA	LB	三笠遺伝A152×十勝35		2014	2015
	G-03	GA	LC	三笠遺伝A152×空知3		2014	2015
	G-04	GA		三笠遺伝A152×open		2014	2015
	G-05 [†]	GB	LA	中標津5×胆振1		2008	2015
	G-06	GB	LB	中標津5×十勝35		2008	2015
	G-07	GB	LC	中標津5×空知3		2008	2015
	G-08	GB		中標津5×open		2008	2015
	G-09	GB	LA	中標津5×胆振1		2004	2015
	G-10	GB	LB	中標津5×十勝35		2004	2015
	G-11	GC	LB	高山63×十勝35		2008	2015
	G-12	GC	LC	高山63×空知3		2008	2015
	G-13	GC		高山63×open		2008	2015
	G-14	GD	LB	高山64×十勝35		2008	2015
	G-15	GD	LC	高山64×空知3		2008	2015
	G-16	GD		高山64×open		2008	2015
カラマツ群	L-01	L01		訓10BL-64 (11-15)	[後志22]	2014	2015
	L-02	L02		訓5BL-2 (3-2)	[石狩16]	2014	2015
	L-03	L03		訓4BL-46 (31-25)	[空知9]	2014	2015
	L-04	L04		訓11BL-L15 (15-11)	[留萌4]	2014	2015
	L-05	L05		訓4BL-37 (49-29)	[留萌7]	2014	2015
	L-06	L06		訓3BL-22 (3-2)	[上川23]	2014	2015
	L-07	L07		訓9BL-L15 (74-31)	[幾寅10]	2014	2015
	L-08	L08		訓4BL-48 (1-3)	[十勝62]	2014	2015
	L-09	L09		訓4BL-32 (2-14)	[網走34]	2014	2015
	L-10	L10		訓4BL-36 (2-16)	[網走41]	2014	2015
	L-11	L11		訓9BL-G26 (64-33)	[中標津2]	2014	2015
	L-12	L12		訓11BL-L12 (27-7)	[根室8]	2014	2015
一般群	C-1	Lk		育種カラマツ		2014	2015
	C-2			普通カラマツ		2014	2015
	C-3			雑種F ₁		2014	2015
	C-4	Lg		グイマツ		2014	2015
	C-5 [†]			コンテナカラマツ		—	2016

[†]付きの検定材料については、データの集計・解析から除外。

これら計33家系は石塚ら（2019）の報告にあるとおり、林業試験場（美唄市）にて苗木まで育成し、2018年5月から6月にかけて各試験地へと植栽した。植栽にあたっては、設置した1つのプロットに1家系を植栽することとし、これらを検定苗（検定材料）として扱った。植栽においては、検定に供する苗木が林縁に配置されることによる成長性の違い、いわゆる林縁効果が生じないように、各ブロックの外周は検定用の苗木以外のカラマツ事業用苗木を植栽した。

植栽後は成長期に年2回の下刈り施業が行われた。活着や初期成長の追跡のため、植栽当年、植栽後2年時、3年時、5年時それぞれの秋に調査を行った。このうち、5年時調査では、まず植栽木すべてについて生残／死亡を確認した後、生残個体については、3 mもしくは5 mの測程にて1 cm単位で鉛直方向の自然高で樹高（H；cm）を測定した。同時に、デジタルノギスにて1 mm単位で胸高直径（DBH；mm）を測定した。その際、樹高が130 cmに満たない生残個体の場合にはDBHは欠損として扱った。

2. データ解析

植栽後5年時の調査データをもとに、全植栽木について生残／死亡、HとDBHを整理した。プロット、試験地、もしくは家系ごとに集計し、生残率の算出、もしくはHやDBHについてはその算術平均値を求めた。その際、有効な植栽数が確保できなかった家系（G-05；石塚ら 2019）および次代検定の趣旨にそぐわない一般群（C-5；表-2参照）は算出の対象から除いた。

続いて、HとDBHを対象として統計解析を行った。解析はR 4.4.1（R Core Team 2024）を用いて実施した。その際、苗木数の関係（石塚ら 2019）で1検定林のみにしか植栽されなかった家系（G-06、G-07、G-09、G-10、G-14、G-15；表-2および表-3参照）と、遺伝的特性を求めることが不適切な一般群の普通カラマツ（C-2；表-2参照）および雑種F₁（C-3；表-2参照）については統計解析の対象から除いた。

まず、同一試験地内の形質間相関（H vs. DBH）と、同一形質の試験地間相関（H vs. H、DBH vs. DBH）を求めた。その際、ボンフェローニ補正を行い、有意水準 $p < 0.0056$ を満たす組合せを、有意な相関があると判断した。

次に、解析の対象とするHとDBHそれぞれについて遺伝的特性の推定を行った。遺伝的特性の推定においては、共通の遺伝モデルに基づくものとし、変動性指標を提案したOlivoto et al. (2019) に従う遺伝×環境効果モデルを構築した。全3ヶ所の試験地における成績に基づいて“全体の遺伝的特性”を算出する場合のモデル構造は以下となる；

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + (\alpha\tau)_{ij} + \tau(y)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{式1})$$

ここで y_{ijk} は j 番目試験地（検定林G37、検定林G38、検定林G39の順）の k 番目ブロック（ $k = 1, 2, 3$ ）における i 番目の家系における表現型形質の値を表す。 μ は全体平均、 α_i は i

番目の家系における遺伝効果、 τ_j は j 番目の試験地における環境効果、 $(\alpha\tau)_{ij}$ は j 番目試験地の i 番目家系における遺伝×環境の交互作用、 $\tau(y)_{jk}$ は j 番目の試験地の k 番目ブロックの効果、 ε_{ijk} は誤差（残差）である。

次に、試験地ごとでの遺伝的特性を算出する場合には遺伝×環境の交互作用がなくなり、モデル構造は以下となる；

$$y_{ijk} = \mu_j + \alpha_{ij} + \tau(y)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{式2})$$

各パラメータの説明は式1と同じで、すべて j 番目試験地特有の値として推定される。

実際の解析ではまず、breedR パッケージ（Muñoz and Sanchez 2019）を用いた従前どおりの遺伝的特性を推定した（カラマツでの適用例；Chen et al. 2023）。解析ではアニマルモデルに従う最良線形不偏推定法（BLUP法；Best Linear Unbiased Prediction method）に基づき、分散共分散の推定は制限付き最尤推定法（REML法；Restricted Maximum Likelihood method）によった。式1を用いたモデルの遺伝効果として、親（系統）の育種価を得た。親の育種価は、親から子に遺伝すると期待される相加的な遺伝的特性で、モデルの変量効果に組み込んだ遺伝行列に交配組合せ（両親）の情報（表-2）を与えることで推定する。解析にかかる詳細は石塚ら（2021）に準ずる。モデルから出力された親の育種価は、樹種ごとに整理した。

続いて、測定形質がどの程度遺伝的な影響を受けるか評価する指標として、狭義の遺伝率（ h^2 ）を算出した。遺伝率は、遺伝モデルにおける分散（ V ）を用いて下記で表される；

$$h^2 = V_A / V_P \quad (\text{式3})$$

ここで V_A が相加遺伝分散、 V_P が表現型分散である。 V_P は相加遺伝分散や環境の効果による分散が含まれるため、対象形質の分散に及ぼす環境の影響が大きい場合には遺伝率は小さくなる関係がある。そこで、試験地ごとの遺伝的な影響の違いをみるため、式1に基づいて全体の遺伝率を、式2に基づいて試験地別の遺伝率を算出した。

次に、metan パッケージ（Olivoto et al. 2020）を用いた新たな遺伝的特性の推定を実施した。上記同様、BLUP法に基づくREML法での推定を行うこととし、式1に基づく線形混合モデルを構築した。遺伝効果は、育種価と全体平均の和で表現される「遺伝推定値」として得た。この値は推定方法にちなんで一般的に呼ばれるBLUP値（Olivoto et al. 2019など）として、本研究でも表すこととした。また、本研究において推定するBLUP値は全体の値と、 $G \times E$ 交互作用によって推定される試験地ごとの値とがある。これらは、解析単位となる各家系の算術平均とおおよそ類似した値をとるが、算術平均値には環境の影響等が含まれる一方でBLUP値では除外されて推定される。そこで、算術平均や各種のBLUP値を並べて出力し、比較した。

最後に、3ヶ所の試験地でどの程度遺伝的特性の発現がばらつくかという変動性指標を推定した。この値はWAASB

表ー3 各次代検定林内に設定したプロット数および植栽後5年時における生残率

家系 番号	設定プロット数（カッコはブロック内数）			生残率（％，カッコはブロック内数）			総計
	検定林G37	検定林G38	検定林G39	検定林G37	検定林G38	検定林G39	
G-01	6 (4/1/1)	4 (2/1/1)	4 (2/1/1)	85 (88/75/83)	65 (58/83/58)	73 (75/75/67)	76
G-02	7 (5/1/1)	6 (2/2/2)	6 (3/1/2)	61 (58/50/83)	74 (83/63/75)	69 (67/92/63)	68
G-03	7 (4/2/1)	3 (2/1/0)	7 (4/1/2)	62 (79/29/58)	72 (67/83/—)	67 (69/67/63)	66
G-04	8 (6/2/0)	3 (2/1/0)	8 (4/2/2)	67 (78/33/—)	61 (71/42/—)	75 (69/92/71)	69
G-06		3 (2/1/0)			81 (75/92/—)		81
G-07		2 (1/1/0)			75 (83/67/—)		75
G-08	3 (2/1/0)	3 (2/1/0)		86 (96/67/—)	83 (88/75/—)		85
G-09		3 (2/1/0)			86 (92/75/—)		86
G-10		2 (1/1/0)			58 (58/58/—)		58
G-11		6 (2/2/2)	4 (1/1/2)		75 (75/63/88)	77 (83/75/75)	76
G-12	5 (4/1/0)	3 (2/1/0)	3 (1/1/1)	93 (96/83/—)	69 (63/83/—)	69 (100/58/50)	80
G-13	6 (4/1/1)	4 (2/1/1)	3 (1/1/1)	68 (75/33/75)	79 (79/75/83)	64 (58/67/67)	71
G-14		4 (2/1/1)			71 (63/67/92)		71
G-15		3 (2/1/0)			83 (79/92/—)		83
G-16	3 (3/0/0)	3 (2/1/0)		97 (97/—/—)	78 (83/67/—)		88
L-01	5 (3/1/1)	5 (2/2/1)	4 (2/1/1)	65 (58/92/58)	85 (92/88/67)	56 (71/42/42)	70
L-02	5 (4/1/0)	3 (2/1/0)	3 (1/1/1)	85 (94/50/—)	81 (79/83/—)	89 (75/92/100)	85
L-03	5 (3/1/1)	5 (2/2/1)	7 (2/2/3)	77 (92/25/83)	92 (96/88/92)	69 (50/96/64)	78
L-04	8 (5/2/1)	6 (2/2/2)	5 (2/2/1)	69 (80/50/50)	86 (67/96/96)	55 (63/75/0)	71
L-05	8 (5/2/1)	5 (2/2/1)	4 (2/1/1)	73 (92/25/75)	88 (83/88/100)	63 (42/92/75)	75
L-06	6 (4/1/1)	5 (2/2/1)	4 (2/1/1)	74 (75/92/50)	87 (83/88/92)	83 (79/100/75)	81
L-07	4 (3/1/0)	3 (2/1/0)	2 (1/1/0)	92 (97/75/—)	89 (83/100/—)	54 (42/67/—)	82
L-08	6 (4/1/1)	3 (1/1/1)	3 (1/1/1)	69 (75/50/67)	72 (83/75/58)	69 (83/75/50)	70
L-09	6 (4/1/1)	5 (2/2/1)	4 (2/1/1)	88 (96/58/83)	70 (83/71/42)	58 (67/8/92)	73
L-10	5 (4/1/0)	5 (2/2/1)	3 (1/1/1)	18 (10/50/—)	83 (83/83/83)	78 (83/92/58)	57
L-11	8 (5/2/1)	4 (2/1/1)	3 (1/1/1)	81 (92/54/83)	88 (83/92/92)	78 (67/83/83)	82
L-12	4 (3/1/0)	3 (2/1/0)	3 (1/1/1)	77 (78/75/—)	89 (88/92/—)	78 (67/83/83)	81
C-1	5 (3/1/1)	5 (2/2/1)	3 (1/1/1)	65 (86/0/67)	87 (96/88/67)	44 (33/58/42)	69
C-2	5 (3/1/1)	5 (2/2/1)	3 (1/1/1)	78 (78/58/100)	88 (92/88/83)	72 (83/83/50)	81
C-3	8 (5/2/1)	7 (2/3/2)	4 (1/1/2)	79 (85/58/92)	82 (88/81/79)	79 (75/83/79)	80
C-4	5 (3/1/1)	5 (2/2/1)	5 (2/2/1)	63 (86/42/17)	87 (88/88/83)	87 (88/92/75)	79

ブロック内数における“—”は、当該ブロックに植栽がないことを示す。

(Weighted Average of Absolute Scores from the singular value decomposition of the matrix of BLUPs for the interaction effect between genotype and environment)と定義されており (Olivoto et al. 2019), 概要としては、育種価（試験地ごとに平均がほぼ0になる）の相対的な優劣が、試験地が変わることによってどれだけ変動するかを指標化(変動値の絶対値の加重平均)したものであり、値が0に近いほど、遺伝的特性が安定して発現していることを示す指標である。逆に、値が大きいくほど、試験地の環境によって遺伝的特性が強くみられたり、みられなかったりする傾向があることを示す。そのように変動性指

標が大きいく値を示す系統は、たとえある試験地における次代検定で優れた成績を示したと評価されても、別の環境下で同様な成績を期待できないリスクがあると示唆される。この点を議論するため、HとDBHのそれぞれにおいて、BLUP値と変動性指標の関係性を求めた。

結果

試験地とした3ヶ所の次代検定林へ植栽した検定苗の個体数は、検定林G37が1,720個体、検定林G38が1,504個体、検定林G39が1,132個体（計4,356個体）で、そのうち植栽後5

年時における生残個体数は、検定林G37が1,267個体、検定林G38が1,215個体、検定林G39が799個体（計3,281個体）だった。生残率は検定林G37が73%、検定林G38が80%、検定林G39が70%だった（図-2a）。ブロック単位でみると、検定林G37の2ブロック目における生残率（51%）が最も低かった。家系単位でみると、プロット数が限られる家系もあり一概に比較はできないが、家系によっては生残率60%弱の家系（G-10、L-10）がある一方、90%近い家系（G-16）もあった（表-3）。その他、1つのブロック内において生残率が0%を示した家系が2つみられた（L-04、C-1）。

樹高（H）、胸高直径（DBH）の平均はそれぞれ、検定林G37では536 cm、57.0 mm、検定林G38では394 cm、40.2 mm、検定林G39では293 cm、25.3 mmだった。両形質とも、検定林G37における成績が最も良く、また、検定林G37の1ブロック目が最も良い傾向があった（図-2b, c）。家系ごとの算術平均値の詳細は表-4および表-5に示したとおりであった。

同一試験地内の形質間相関は、3ヶ所すべてで補正後の有

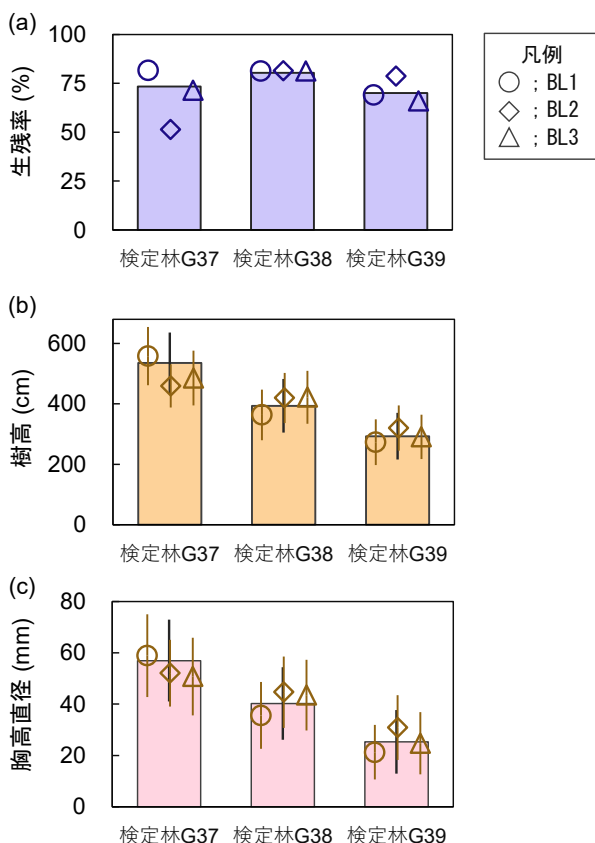


図-2 次代検定林間の測定形質の比較

植栽後5年時における生残率（a）、樹高（b）、および胸高直径（c）を検定林別に示す。棒グラフは試験地の算術平均値を示す。シンボルは試験地内のブロック（BL1, BL2, BL3）における算術平均値を示し、各ブロックとの対応は凡例に示すとおり。樹高と胸高直径のエラーバーは標準偏差を示す。

意水準（ $p < 0.0056$ ）を満たし、高い正の相関（ $r = 0.727 \sim 0.915$ ）が認められた（図-3 灰色マス）。同一形質の試験地間相関をみると、Hについては、正の相関傾向はあるものの、補正後の有意水準を満たすペアはなかった（図-3 黄色マス）。DBHについては、検定林G37と検定林G38および検定林G37と検定林G39の間において有意水準を満たす正の相関が認められ、とくに検定林G37と検定林G39の間の相関は高かった（ $r = 0.811$ ；図-3 桃色マス）。

遺伝的特性として推定した親（系統）の育種価を並べると図-4のとおりとなった。グイマツとカラマツの種間で比較すると、HとDBHともにグイマツはカラマツよりも明らかに低い育種価を示していた。グイマツ種内においては、対照となる「Lg」よりも高い育種価を示す親が3系統認められ、うち「GC」系統はHとDBHともに順位が1位だった。林分平均と育種価の比率からは、「GC」系統は「Lg」よりもH, DBHそれぞれ46%、133%形質が改良すると期待され、DBHでの改良の程度が大きかった。

カラマツ種内においては、対照となる「Lk」がDBHにおいて最も低い育種価を示した。Hでは最下位ではなかったものの、下から4番目の値を示した。また、「L09」系統はHとDBHともに順位が1位だった。上位の4系統は、順位の入れ替えはあったものの、HとDBHともに上位（1～4位）に位置していた。これら4系統は、「Lk」よりもH, DBHのそれぞれで平均15%、18%形質が改良すると期待された。

両形質の遺伝率をみると、全体でも試験地別でも、DBHのほうがHよりも高かったことがわかった（表-6）。試験地間で比較すると、検定林G37が最も高い遺伝率を示し、遺伝的特性が大きく発揮されていたことを意味した。検定林G38と検定林G39はおおよそ類似した遺伝率を示していた。

	検定林 G37	検定林 G38	検定林 G39
検定林G37	H vs D 0.727 <0.0001	H vs H 0.486 0.0159	H vs H 0.488 0.0212
検定林G38	D vs D 0.691 <0.0001	H vs D 0.906 <0.0001	H vs H 0.534 0.0087
検定林G39	D vs D 0.811 <0.0001	D vs D 0.502 0.0148	H vs D 0.915 <0.0001
			ペア形質 相関係数 (r) 危険率 (p)

図-3 同じ検定林内の形質間相関と同じ形質の検定林間相関

対戦表のうち、同じ検定林同士が対になる対角線のマス（灰色マス）は、同一検定林内の形質間相関の結果を表した。また、対角線より右上側のマス（黄色マス）は、樹高の検定林間相関の結果を、左下側のマス（桃色マス）は、胸高直径（ここではDと表す）の検定林間相関の結果を表した。また、ボンフェローニ補正後の有意水準（ $p < 0.0056$ ）を満たす組合せについては、太字で表した。

表－4 植栽後5年時の樹高 (cm) における家系別の平均値および遺伝推定値 (BLUP値)

家系 番号	算術平均			BLUP値			
	検定林G37	検定林G38	検定林G39	検定林G37	検定林G38	検定林G39	全体
G-01	492 ± 88	347 ± 57	228 ± 51	493	348	237	382
G-02	510 ± 85	386 ± 100	266 ± 56	512	383	268	406
G-03	510 ± 79	342 ± 80	245 ± 64	510	346	249	392
G-04	517 ± 76	332 ± 63	260 ± 68	518	338	261	393
G-06	—	387 ± 92	—	—	—	—	—
G-07	—	389 ± 104	—	—	—	—	—
G-08	546 ± 123	355 ± 90	—	540	362	—	418
G-09	—	428 ± 59	—	—	—	—	—
G-10	—	479 ± 77	—	—	—	—	—
G-11	—	479 ± 87	326 ± 102	—	469	331	466
G-12	601 ± 98	447 ± 64	292 ± 105	595	434	307	456
G-13	546 ± 125	377 ± 104	309 ± 88	544	381	304	423
G-14	—	413 ± 76	—	—	—	—	—
G-15	—	358 ± 94	—	—	—	—	—
G-16	542 ± 122	350 ± 106	—	543	354	—	405
L-01	476 ± 81	397 ± 75	272 ± 82	486	392	273	408
L-02	578 ± 106	373 ± 79	299 ± 60	572	379	302	429
L-03	541 ± 113	370 ± 72	318 ± 64	541	376	313	422
L-04	562 ± 69	392 ± 84	313 ± 72	558	396	311	430
L-05	492 ± 108	409 ± 61	301 ± 88	501	403	298	413
L-06	564 ± 104	435 ± 77	322 ± 62	563	431	322	450
L-07	567 ± 95	398 ± 66	304 ± 67	563	397	312	436
L-08	534 ± 84	412 ± 77	314 ± 75	537	408	310	430
L-09	621 ± 89	421 ± 81	310 ± 71	611	424	317	462
L-10	559 ± 87	434 ± 73	346 ± 56	547	433	342	459
L-11	522 ± 83	375 ± 80	318 ± 60	524	379	308	419
L-12	548 ± 62	350 ± 81	326 ± 80	545	362	316	425
C-1	534 ± 99	395 ± 77	288 ± 65	537	393	293	417
C-2	503 ± 72	361 ± 90	310 ± 69	—	—	—	—
C-3	535 ± 95	405 ± 96	296 ± 75	—	—	—	—
C-4	464 ± 122	359 ± 96	282 ± 76	479	359	277	388

表中の“—”は、値がないことを示す。

表－5 植栽後5年時の胸高直径（mm）における家系別の平均値および遺伝推定値（BLUP値）

家系 番号	算術平均			BLUP値			
	検定林G37	検定林G38	検定林G39	検定林G37	検定林G38	検定林G39	全体
G-01	45.3 ± 11.6	31.1 ± 9.1	15.4 ± 7.6	45.9	31.1	15.8	34.1
G-02	45.3 ± 12.1	37.7 ± 14.3	18.7 ± 8.6	46.9	36.7	18.7	36.9
G-03	50.2 ± 11.6	29.4 ± 11.3	18.8 ± 8.0	50.4	31.0	18.6	36.7
G-04	47.9 ± 10.0	29.4 ± 9.2	19.1 ± 11.0	48.6	29.9	18.8	35.6
G-06	—	35.3 ± 14.3	—	—	—	—	—
G-07	—	36.9 ± 16.8	—	—	—	—	—
G-08	54.3 ± 19.1	31.0 ± 12.0	—	53.7	32.4	—	38.9
G-09	—	42.4 ± 9.5	—	—	—	—	—
G-10	—	48.9 ± 9.3	—	—	—	—	—
G-11	—	48.0 ± 12.5	28.3 ± 12.9	—	47.1	29.0	47.2
G-12	63.0 ± 11.8	46.5 ± 10.3	25.1 ± 11.5	62.5	44.8	27.0	46.8
G-13	51.8 ± 17.7	37.2 ± 14.3	24.9 ± 11.1	52.5	37.1	24.2	40.2
G-14	—	42.0 ± 14.2	—	—	—	—	—
G-15	—	33.8 ± 14.5	—	—	—	—	—
G-16	56.0 ± 19.7	34.2 ± 15.0	—	56.1	34.8	—	40.1
L-01	55.1 ± 13.0	44.0 ± 9.7	21.9 ± 11.3	55.4	43.0	23.3	43.4
L-02	62.2 ± 14.0	35.6 ± 12.6	29.0 ± 10.0	61.3	37.5	28.3	44.3
L-03	54.0 ± 12.8	38.0 ± 12.1	30.3 ± 12.9	54.8	38.5	29.2	42.5
L-04	60.9 ± 10.9	39.9 ± 13.1	26.4 ± 10.9	60.1	40.5	26.9	43.7
L-05	60.0 ± 21.1	48.1 ± 13.7	27.5 ± 13.2	60.3	46.9	28.4	46.5
L-06	65.5 ± 14.2	49.1 ± 13.8	31.4 ± 12.2	64.9	48.6	31.7	50.0
L-07	62.3 ± 14.4	42.4 ± 12.0	26.5 ± 11.0	61.6	42.1	28.7	45.6
L-08	60.9 ± 13.8	46.6 ± 13.7	25.2 ± 11.4	60.5	45.1	26.9	45.8
L-09	68.0 ± 11.2	46.7 ± 13.1	31.0 ± 12.4	67.0	47.0	31.1	50.5
L-10	65.7 ± 10.4	48.0 ± 13.6	32.5 ± 12.4	62.8	47.7	32.7	49.6
L-11	60.1 ± 12.7	40.6 ± 14.2	32.0 ± 12.5	60.0	41.3	30.7	45.8
L-12	64.1 ± 9.8	33.8 ± 12.6	33.5 ± 13.8	62.4	36.9	31.5	45.6
C-1	54.7 ± 15.7	42.7 ± 13.2	24.1 ± 9.5	55.5	41.7	25.3	42.4
C-2	55.1 ± 13.0	36.6 ± 13.5	28.8 ± 13.2	—	—	—	—
C-3	54.9 ± 13.0	40.7 ± 14.1	23.9 ± 12.7	—	—	—	—
C-4	45.2 ± 17.8	32.5 ± 15.2	23.0 ± 11.7	47.3	32.8	21.9	36.1

表中の“—”は、値がないことを示す。

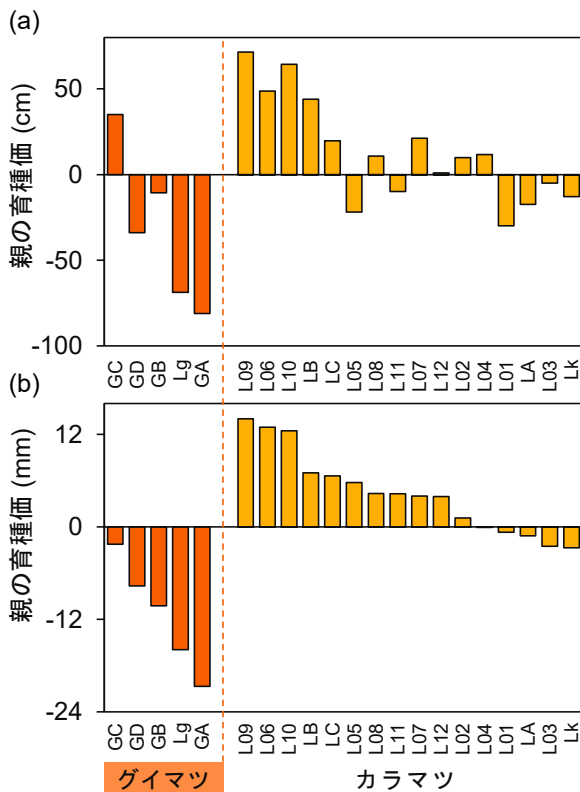


図-4 各形質における親の育種価

樹高 (a) と胸高直径 (b) それぞれで推定した親の育種価を、同一の並び順で示した。並び順は、樹種ごとに胸高直径の育種価が大きい順とした。なお、親の記号は表-2を参照のこと。表-2にて分類される供試材料群のうち、「グイマツ雑種F₁」については母親グイマツ (GA~GD) と花粉親カラマツ (LA~LC) それぞれに推定値が与えられている。

表-6 各形質における遺伝率

	H	DBH
全体	0.2927	0.8032
検定林G37	0.7142	0.9515
検定林G38	0.3497	0.4849
検定林G39	0.2192	0.4879

続いて、遺伝的特性として算出したBLUP値を、Hは表-4に、DBHは表-5にまとめた。G×E交互作用も加味して推定するBLUP値は、両形質ともにおいて、おおよそ算術平均値と対応した傾向を示していた。全体の育種価は、ほぼ、最も成績の良い検定林G37と次に成績の良い検定林G38 (図-2b, c参照) の間の値を取った。

HについてBLUP値と変動性指標の関係を可視化したところ (図-5a), 検定に供した家系のうち、G-11, L-05, L-09の3家系、および、対照のC-4が比較的高い変動性指標を示すことがわかった。うちG-11とL-09については、グイマツと

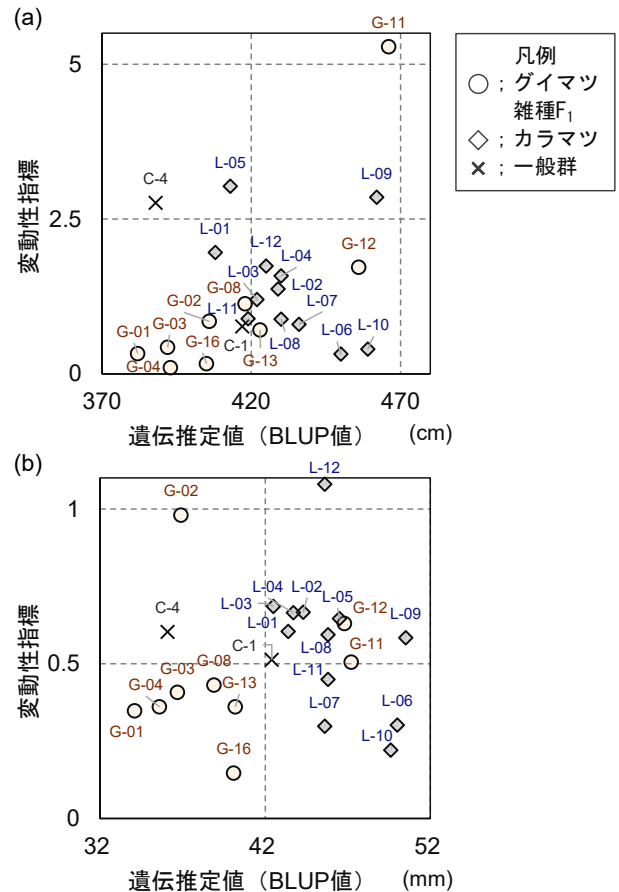


図-5 各形質における遺伝推定値 (BLUP値) と変動性指標の関係

樹高 (a) と胸高直径 (b) それぞれで推定した遺伝推定値 (BLUP値) と変動性指標を家系単位でプロットした。各点がそれぞれの家系の値で、種別は凡例に示したとおり。シンボルに付したアルファベットは家系番号を表す (表-2参照)。

カラマツそれぞれで最も高いBLUP値を示す家系だった。高いBLUP値と低い変動性指標を兼ね備えるグイマツ雑種F₁家系はなかったが、カラマツではL-06, L-10の2家系が該当した。

DBHについても同様に可視化したところ (図-5b), G-02, L-12の2家系が比較的高い変動性指標を示すことがわかった。逆に、グイマツ雑種F₁家系の中ではG-16が抜きん出て低い変動性指標を示した。高いBLUP値と低い変動性指標を兼ね備えるグイマツ雑種F₁家系はなかったが、カラマツではL-06, L-10の2家系が該当し、Hと同様の結果が示された。

考察

本研究では、北海道内3地域に造成したカラマツ類次代検定林を対象に、植栽後5年時の初期成績から遺伝的特性の評価を試みるとともに、新たに変動性指数を適用することで初期成績における安定性の評価を試みた。それぞれ、下記にて議論する。

1. 次代検定林における初期成績

これまでに造成された次代検定林では、定期調査の一環として初期の生残や成長が調べられたが、選抜齢（おおそ30年）に達するまでの個体情報・試験地の維持に資するためのデータとして主に活用されており、初期成績における遺伝的特性の報告は乏しい。カラマツ類においては、厳密に家系ごとの初期成績を比較したものはないものの、既往の報告において、グイマツ雑種 F_1 のひとつで、グイマツ中標津5号を母親として生産される「クリーンラーチ」と事業用カラマツ、グイマツ雑種 F_1 との比較を行った例がある（来田ら 2017）。この報告によれば、道内4ヶ所の植栽試験地における5年時の初期成績をクリーンラーチと事業用カラマツについて算出し、5年時の生残率は60%～80%の範囲にあること、樹高は2.6 m～5.2 mの範囲にあることが示された。本研究で対象とした3試験地（検定林G37、検定林G38、検定林G39）の林分平均でみると、生残率は70%～80%、樹高は293 cm～536 cmと類似した範囲にあった（図-2）。本試験地は、道内の地域間差として観察されうる成績の範囲にあると評価される。

生残率について試験地、ブロック、家系のそれぞれの単位でみたところ（図-2、表-3）、顕著な病虫獣害や気象害の被害を受けたものはとくになく、重大な懸念はみられなかった。ただし、局所的にやや低い生残率が示された部分もみられた。とくに検定林G37-BL2は生残率が51%と低かった。このブロックは他よりも土壌硬度が低い傾向があり（佐藤・石塚 2020）、開けた尾根の近くに設定されたブロックであることから、これらの土壌物理条件・立地条件が苗木の植栽初期の活着不良等の一要因となり、結果的に家系に関わらず生残率が低くなった可能性があった。その他、検定林G38や検定林G39では急激な葉の褐変を伴う枯損木が観察されており、ナラタケ病の罹患があった（和田ら、投稿中）。こういった局所的な枯損はあるものの、本研究で調査した植栽初期の段階であれば、まだ十分に検定に足る個体数は残っていることとなる。それゆえ、早期選抜の技術は、ある程度の枯損が不可避の次代検定林において、検定個体数の確保という点で大きな利点があると考えられる。

続いて、HとDBHの2形質より初期の成長成績を評価したところ、試験地間に明瞭な成績の違いがあることが明らかとなった。検定林G37は5年生時点において林分平均で樹高5 m、直径5 cmを超える成長を見せた一方で、検定林G39では検定林G37よりも樹高で2 m以上も低い成長を示していた。検定林G37＞検定林G38＞検定林G39の成長の順番は、当該地域（北見、士別、岩見沢）のカラマツの地位とよく整合しているようである（古家ら 2020）。また、本試験地の間隙率や飽和度といった土壌物理性を調べた報告からは、検定林G37は相対的に水はけが良い一方で、検定林G39は水はけが悪く水分過多な傾向が指摘される（佐藤・石塚 2020；一部、未発表データ）。成長の適・不適に関わる気象的な要因、立地

的な要因によって、上述のような成長差が観察されたものと考えられた。なお、次代検定林として捉える場合には、遺伝的特性が顕著に発揮されて遺伝的な優劣を評価しやすい林分が望ましく、評価する試験地の優先順位としては検定林G37が高いと評価される。

初期成績のデータを用いて、成長形質における遺伝的特性を抽出でき、親系統の育種価の大小の推定に成功した（図-4）のは画期的といえる。なかでも、カラマツ親において推定される育種価よりもグイマツ親において推定される育種価が明らかに低かった点は、成長性に劣るグイマツの特性を反映できている結果であり、種特性とよく整合すると考えられた。また、結果からは、親（系統）の育種価における上位系統が2形質間で共通していた点や、グイマツとカラマツの対照系統（「Lg」、「Lk」）が共通して下位に位置していた点が指摘できた。これは、両形質には各試験地間において高い相関が認められたこと（図-3）、および、両形質には一定以上の高い遺伝性が認められたこと（表-6）とも整合すると考えられ、若齢時において遺伝的特性が安定して推定できていることを示す傍証でもあったと考えられた。

一般に次代検定を複数の試験地で実施することによって、検定精度は高くなると考えられる（石塚ら 2024）。3ヶ所の初期成績から十分に遺伝的特性を推定できたと仮定すると、さらに以下を考察することができる。まず、とくにカラマツの胸高直径において顕著であったが、事業用として利用される対照系統が育種価において下位に位置したことからは、本研究で材料とした親の活用により、より優良な種苗の生産が可能になると考えられた。また、一貫して上位に位置した系統、具体的には、グイマツでいえば「GC」、カラマツでいえば「L09」「L06」「L10」「LB」の4系統については、優良系統の候補として選抜する（この場合は、優良な親を選ぶ後方選抜）ことが可能であると考えられた。検定精度については、今後の成長を追跡しながらさらなる知見を蓄積していく必要があるが、本研究で実施したような初期成績における検定を基に着実な早期選抜の実施が可能になると考えられた。

2. 初期成績にみられる安定性について

育種において、遺伝的に秀でた系統・家系を用いるだけではなく、複数の環境下で安定して遺伝的特性が発現することの重要性が指摘され、作物育種分野を中心に遺伝的特性の安定性／変動性の評価が提唱された（Olivoto et al. 2019; Olivoto and Lúcio 2020）。Olivotoらによって導入された変動性指標（WAASB）は、遺伝×環境交互作用（G×E）の大きさを数値化し、まだ知見は多くないものの林木分野でも適用できることが報告されている（Alexandru et al. 2023; Liepe et al. 2024）。たとえば、ルーマニアに3ヶ所設定した*Picea abies*の産地試験の解析からは、ヨーロッパ全域にわたる81産地のうち、地域外を含む12産地が、高い遺伝的パフォーマンスと高

い安定性を示すとして選抜候補になると報告された (Alexandru et al. 2023)。すなわち、有用な遺伝資源を新たに見出したという一知見である。ほかに、ドイツに3ヶ所設定した *Fagus sylvatica* の産地試験の解析からは、ヨーロッパ全域にわたる85産地のうち、西ドイツ中央山岳地域の中標高域を軸とした産地が高い安定性を示すことを報告した (Liepe et al. 2024)。すなわち、地元産種苗の有利性を知ることができたという一知見である。

本研究においても、3試験地における遺伝的特性から変動性指標が算出でき、適用可能性を示すことができた。算出した変動性指標と、環境との交互作用も加味した遺伝効果を示すBLUP値との間の関係性 (図-5) からは、遺伝的に秀でた形質を示すと推定された家系 (図中、遺伝推定値が大きい領域に位置する家系) のうち、異なる環境下でも安定して優れた遺伝的特性が発揮できると期待できる家系 (図中、変動性指標が小さい領域に位置する家系) の存在を見出すことができ、HとDBHともにL-06、L-10の2家系がこれに該当した。このカラマツ2家系については、高いBLUP値と低い変動性指標を兼ね備える優良な家系として、積極的に選抜して活用していくことが期待される。グイマツについては、高いBLUP値と低い変動性指標を兼ね備える家系は存在しなかったが、HとDBHともにG-16が低い変動性指標を示し、安定性の面で秀でた家系と評価できると考えられた。

一方で、BLUP値は高かったものの、変動性指標も高い家系の存在も指摘できた。HとDBHともにこれに該当したのがG-11、G-12、L-09、また、DBHのみで該当したのがL-12だった (図-5)。これらは、たとえある次代検定林において優れた成績を示したとしても、別の環境下で同様な成績を期待できないリスクがあり、選抜対象としないことが望まれる。前段の考察にて、初期成績の遺伝的特性からグイマツは「GC」、カラマツは「L09」「L06」「L10」「LB」系統が秀でていると指摘したが (参照: 図-3)、「GC」はG-11、G-12の2家系の親で、「L09」はL-09の親である (表-2)。したがって、たとえ成長形質において秀でた遺伝的特性を有していても、安定性の考慮から選抜しないほうが良い親がいることが示唆された。このことは、これまでの選抜体系に一石を投じる評価方法を提示する画期的な結果であると考えられた。早期選抜を考えるにあたって、複数の環境下でのばらつきの程度を考慮した選抜を実践するためには、本研究において適用させた変動性指標を導入し、BLUP値 (育種価) とともに評価軸とすることが有効であると考えられた。

林木の育種戦略へ本指標をどう導入していくかについては検証事例の蓄積を待って議論する必要があるものの、これから複数環境下に複数の次代検定林を新規造成することは、材料準備や造成コスト (人的な面を含む) の面から容易ではない。したがって、既存検定林を顧みて、過去の測定記録を丹念に解析することが有効になると思われる。他の地域・環境

下において、もしくは、他のカラマツ家系のセットにおいても、選抜の際に安定性評価を導入できるか、既存データを活用しながらさらなる知見の蓄積を図ることが望まれる。

まとめ

本研究において、初期成績をもとに遺伝的特性を評価するとともに、複数環境下における遺伝的特性の安定性についても評価し、遺伝効果と環境効果の交互作用の大小について可視化を図った。本研究で適用した指標は、林木において次の世代の優良個体の選抜を着実に進めるための有効なアプローチの一つとなりうると考えられた。すなわち、育種戦略の在り方の一つとして、①複数の環境下にて次代検定林を造成する、②若齢時の形質を選抜対象とする、③G×Eを組み込んだ遺伝モデルにより遺伝的特性を推定する、④遺伝的に優れた (高いBLUP値を示す) 系統・個体を選抜する、同時に、⑤遺伝的特性の安定性を考慮して環境によって値が変動するリスクが高い系統・個体は選抜から除く、というステップを踏むことが提言できる。なお、⑤遺伝的特性の安定性考慮については、現在進みつつある気候変動への適応策としても有効になると考えられる。安定性の高い系統の利用は、環境変化に対して頑強で、将来を通じて成長などが低下しにくい林分の誘導を可能にする (Liepe et al. 2024)。その観点でいえば、たとえ遺伝的に優れた表現型値が期待されなくても、安定性が高い系統を選抜するという育種戦略もありうる。その一方で、ある特異な環境にのみ反応するような系統を選ぶという別の評価軸もあるかもしれない。さらなる議論のためにも、知見や実践例の蓄積を期待したい。

謝辞

次代検定林の造成、維持、ならびに各種調査においては、北海道水産林務部林務局森林整備課、森林海洋環境局道有林課、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協力賜った。各種調査においては、北海道立総合研究機構林業試験場の職員の多大なる協力も賜った。この場を借りてお礼申し上げる。

引用文献

- Alexandru AM, Mihai G, Stoica E, and Curtu AL (2023) Multi-trait selection and stability in Norway spruce (*Picea abies*) provenance trials in Romania. *Forests*, 14: 456
- Chen S, Ishizuka W, Kuromaru M, and Goto S (2023) Spatial heterogeneity analysis for estimating breeding values of tree height in a hybrid larch progeny test plantation, *Journal of Forest Research*, 28: 305–311
- 古家直行・津山幾太郎・田中真哉・天野智将・山田健・宗岡寛子・猪俣雄太・佐々木尚三 (2020) 資源と需要のマッチングによる北海道人工林資源利用の保続・有効利用に

向けて. 北の森だより, 23: 8-9

花岡創・中田了五・矢野慶介・西岡直樹・田村明・今博計・石塚航・来田和人(2017)北海道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28年度の実施結果－. 平成29年版2017年報 森林総合研究所林木育種センター, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/issue/nenpou/2017/2017.html>(2024.10/21確認)

Hiraoka Y, Miura M, Fukatsu E, Iki T, Yamanobe T, Kurita M, ... Takahashi M (2019) Time trends of genetic parameters and genetic gains and optimum selection age for growth traits in sugi (*Cryptomeria japonica*) based on progeny tests conducted throughout Japan. *Journal of Forest Research*, 24: 303-312

石塚航・成田あゆ・今博計・佐藤弘和・黒丸亮・来田和人(2019)カラマツ類の苗木の成長動態と次代検定に向けた評価. 北海道林業試験場研究報告, 56: 1-13

石塚航・佐藤弘和・今博計・成田あゆ・花岡創・中田了五・福田陽子・黒沼幸樹・辻山善洋(2021)1986年造成のアカエゾマツ次代検定林における優良個体の選抜. 北海道林業試験場研究報告58: 61-69

石塚航・陳淑芬・後藤晋(2024)育種価の推定に向けた空間自己相関による立地効果の考慮. 森林遺伝育種, 13: 84-90

経済産業省(2021)2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>(2024.10/21確認)

来田和人・今博計・石塚航・黒丸亮(2017)北海道内4か所に造成したクリーンラッチ植栽試験地における5年生までの成長. 北方森林研究, 65: 47-50

Liepe KJ, van der Maaten E, van der Maaten-Theunissen M, Kormann JM, Wolf H, and Liesebach M (2024) Ecotypic variation in multiple traits of European beech: selection of suitable provenances based on performance and stability. *European Journal of Forest Research*, 143: 831-845

Muñoz F, Sanchez L (2019) breedR: Statistical methods for forest genetic resources analysts. R package version 0.12-4

Olivoto T, Lúcio ADC, da Silva JA, Marchioro VS, de Souza VQ, and Jost E (2019) Mean performance and stability in multi-environment trials I: combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111: 2949-2960

Olivoto T and Lúcio ADC (2020) metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11: 783-789

R Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing

佐藤弘和・石塚航(2020)土壌物理性から検定林の立地を俯瞰する. 北海道の林木育種, 63 (2): 25-30

高橋 誠・平岡裕一郎・武津英太郎・三浦真弘・田村 明(2016)

品種開発への前方選抜の導入. 森林遺伝育種, 5: 127-133

鶴飼保雄(2003)植物育種学 交雑から遺伝子組み換えまで. 東京大学出版会, 東京

White TL, Adams WT, and Neale DB (2007) *Forest Genetics*. CAB International, London, UK.

Summary

Early selection for the promotion of tree breeding requires assurance of testing accuracy at young ages, which can be achieved by evaluating genetic gain using multiple progeny tests. We attempted to determine whether the stability index, proposed to select superior clones and/or individuals with higher growth performance and higher stability in the progeny tests under such multiple environments, could be applied along with the evaluation of performance at young ages. Three serial progeny tests of *Larix* species established in Hokkaido at 2018 were used in this study, and genetically-based performance of growth traits, tree height and diameter at breast height, was evaluated for *L. gmelinii* × *L. kaempferi* hybrid F₁ family (totally 16 families) and *L. kaempferi* family (12 families). Based on growth performance at young ages for the three sites, we found one and four clones (plus trees) were genetically superior among *L. gmelinii* and *L. kaempferi*, respectively. However, considering the estimated stability index simultaneously, one clone from each of the two species should not be selected from the standpoint of stability. Consequently, applying stability index was considered to be as one of effective approaches to accelerate steady selection in tree breeding.

Key words

selection, *Larix* species, stability index, breeding value