

1990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

米澤美咲*・石塚 航*・今 博計*・佐藤弘和*・
花岡 創**・福田陽子**・辻山善洋**・玉城 聡***

Selecting superior Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) trees using the progeny test established in 1990

Misaki YONEZAWA*, Wataru ISHIZUKA*, Hirokazu KON*, Hirokazu SATO*,
So HANAOKA**, Yoko FUKUDA**, Yoshihiro TSUJIYAMA**, Satoshi TAMAKI***

要旨

1990年に北海道立総合研究機構林業試験場の実験林内に造成されたアカエゾマツ次代検定林を対象とし、優れた遺伝的特性を有する個体の選抜を行った。30年生時に、成長関連形質として幹材積を、材質関連形質として応力波伝播速度、およびピロディン貫入量を測定し、それらの育種価を計算した。また、通直性を根元曲がりと幹曲がりによって評価した。選抜はi) 幹材積の育種価を基準とした成長性に優れる、ii) 材質に関連する2形質の育種価と通直性評価のいずれにおいても劣らない、iii) 遺伝的多様性が担保される、ことを基準に、総合評価に基づいて行った。iおよびiiで設けた選抜基準をすべて満たすのは51個体（全検定木の7.4%）で、このうち遺伝的多様性を考慮して17個体（同2.5%）を第2世代精英樹の候補木として選抜した。本検定林における第2世代精英樹候補木については幹材積で21.45%、応力波伝播速度で2.00%、ピロディン貫入量で2.01%の改良効果が期待でき、今後の林木育種を推進するための育種集団の構成個体として活用される。

キーワード：精英樹選抜、アカエゾマツ、改良効果、材積、材質

はじめに

1930年代にスウェーデンで発達した精英樹選抜による林木の改良は、その後世界各地に導入された（三浦・平岡 2012）。日本では1954年に林野庁による育種計画が発足し、精英樹選抜事業が開始された。選抜された精英樹は、接ぎ木クローン化され、採種園等に植栽された。これら精英樹の次世代のうち、成長や材質、幹の通直性などの遺伝的特性が総合的に優れていると判断された個体が第2世代精英樹として選抜される。第1世代精英樹は、遺伝的背景が不明な天然林や人工林から選抜されており、成長形質については周囲木との比較により評価されているため、必ずしも育種統計による遺伝的能

力の評価を受けていたわけではない。しかし、林木の育種では、対象の個体サイズが大きいことや、長寿命である特徴から、第1世代精英樹による採種園から採種し、造林用苗木を生産しながら、次代検定林を造成し第1世代精英樹の遺伝的評価・改良を行ってきた（来田 2017）。第2世代精英樹選抜では、第1世代精英樹の次世代を次代検定林に反復を含めて植栽することで、対象形質に対する遺伝的効果を評価し、選抜することが可能となる。また評価する項目は、第1世代精英樹では成長と通直性に重きをおいて選抜が行われたことに対し、第2世代精英樹においては成長や通直性に加え、材質や集団の遺伝的多様性を考慮に入れるなど、選抜に資する測定項目も林木育種分野の研究が進むにつれて随時改良されて

*（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

**（国研）森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター北海道育種場 Hokkaido Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Ebetsu, Hokkaido, 069-0836

***（国研）森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター遺伝子資源部 Genetic Resources Department, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Hitachi, Ibaraki, 319-1301

[北海道林業試験場研究報告 第60号 令和5年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 60, March, 2023]

いる。

北海道における材質評価は、2000年代から盛んに検討されてきた。個体の強度的性質の指標には樹幹の動的ヤング率に代替する共振周波数や静的ヤング率、応力波伝播速度が着目され、容積密度の指標にはPilodyn 6J Forest (Proceq, スイス)を用いたピンの貫入量やドリル抵抗の値などが検討され(小泉 2019; 田村ら 2007など)、伐倒を伴う破壊的試験の結果と相関があることが示されてきた(井城ら 2006; 田村ら 2007; 根井ら 2008; 井城ら 2010; 田村・井城 2011)。さらに、非破壊的で効率の良い測定手法が検討され(花岡・中田 2019)、現在では後述するアカエゾマツ (*Picea glehnii*) に関しては、FAKOPP (FAKOPP Enterprise, ハンガリー)を用いた応力波伝播速度とピロディン (Pilodyn 6J Forest)を用いたピンの貫入量が材の強度的性質の測定項目として採用されている(花岡ら 2021; 石塚ら 2021)。また、通直性にかかわる根元曲がりや幹曲がりは積雪量や微地形等の環境因子に支配される程度が大きいものの、家系の遺伝的な影響も小さいながら安定して受けていると考えられ、選抜測定項目として評価されている(花岡・伊東 2020)。

アカエゾマツは北海道を代表する樹種のひとつで、北海道全域や千島列島、サハリンに自生するほか、本州の早池峰山にも小集団が確認される(Wang and Nagasaka 1997)。蛇紋岩土壌や高塩分濃度土壌、山火事跡地などほかの樹木が生育しづらい環境で優占することが知られ(Nakata and Kojima 1987; Haraguchi *et al.* 2003; Kayama *et al.* 2002)、環境適応性、病害抵抗性が比較的高いことから、北海道では寒冷多雪地、湿潤地等での造林材料として用いられ(林業試験場 2008)、2020年度の年間造林面積は278 haに及ぶ(北海道水産林務部 2022)。北海道採種園整備方針に基づくと、2041年度に必要なアカエゾマツ植林面積は1,000 haと推計されるので(北海道 2022)、種子生産量を増やしていく必要がある。その際に、道内の採種園から採取される種子を育種種子、採種園以外の普通母樹林等から山取りされた種子を普通種子と区別しているが、林業特性上優れた種苗を多く生産するためには育種種子の普及が欠かせない。アカエゾマツの育種種子生産状況は100%であり(北海道 2022)、今後も維持していく必要がある。

北海道では次代検定林に植栽されたアカエゾマツ精英樹の次世代が樹齢25年以上になり、2016年から第2世代精英樹選抜の取り組みが精力的に行われている(花岡ら 印刷中)。本種の第2世代精英樹候補木の選抜においては、成長、材質、通直性、遺伝的多様性をすべて加味した総合評価での選抜が実施され、2020年度までに、のべ140個体の候補木が選抜された(花岡ら 2018, 2019, 2021; 石塚ら 2021)。しかしながら、トドマツの第2世代精英樹候補木等の選抜数444個体(石塚ら 2016)に比べて少ないことや、北海道では育種区が西南部、中部、東部の3つに分かれており、選抜した精英樹から生産された種苗の配布されるべき地域(需給区分)が限られている

ことを鑑みると、それぞれの育種区で採種園を構成する必要がある、アカエゾマツの第2世代精英樹選抜はまだ十分ではない。引き続き第2世代精英樹選抜を進め、優良遺伝資源の蓄積を進めていく必要がある。

本研究では、1990年に造成したアカエゾマツ次代検定林において、植栽後30年時に成長・材質・通直性の調査を行うとともに、その総合評価に基づいて優良な第2世代精英樹候補木の選抜を実施することとした。この総合評価での選抜を通して、どのくらいの数の個体を選抜できるか、また、各形質でどのくらいの改良効果を見込むことができるか、を明らかにした。

材料と方法

1. 検定林概要と調査

研究対象とする検定林は、美唄市にある北海道立林業試験場(現・北海道立総合研究機構林業試験場)(以降、林業試)の実験林内にあるアカエゾマツ次代検定林P5(北緯43.279度、東経141.879度、標高約230~240m)とした。本検定林は北海道育種基本区における西南部育種区内に位置する。アカエゾマツ精英樹等の採種園および人工交配による次代を対象とした遺伝検定を行うことを目的として設定され、1990年5月に造成された。供試材料については1967年に造成された道有アカエゾマツ採種園(訓子府町)のクローンもしくは1968年から1972年にかけて造成された林業試内アカエゾマツ集植所のクローンを親とし、1981年と1983年に人工交配または自然交配により得られた種子に由来する実生苗(検定苗)を用いた。検定苗は林業試の苗畑で養生され、同じクローンに由来する次世代のまとまりを家系として、交配組み合わせ別に管理し育苗され、3回の床替えを経て7年生時に植栽された。供試家系は人工交配に由来する42家系と自然交配に由来する18家系である(表-1)。このうち興部1号(林)、興部102号(林)、弟子屈103号の3つの自然交配家系については、1981年と1983年の複数回にわたって採取された種子が用いられているが同じ家系内反復として扱った。

比較対象として用いた事業用苗については、かつて道内の各地において造林用苗として用いられていたアカエゾマツ種子に由来し、3地域の各道有林事業所の苗畑(北見市、池田町、苫小牧市)において育苗された。本次代検定林においては、検定苗の扱いに合わせて便宜的にCont-1~Cont-3の家系として管理した(表-1)。

本検定林の配植は3本×3列の9本を1プロットとしたプロット植栽によるものとし、プロット反復を設けることができるよう、検定林を4つのブロックに分割した。配植するプロット数は仕立てられた苗木の本数に応じて変え、1から最大8プロットである。プロットの配植位置は各ブロックに無作為に割り振り、育成された苗木数が少なく、1プロット分しか植栽できない家系については全て4ブロックに配植し

表-1 アカエゾマツ次代検定林P5の供試家系

家系コード	母樹	花粉親	配植番号	配植プロット数
Cross-1	興部1号(林)	北演104号*	1	2
Cross-2	興部102号(林)	北演109号*	2	3
Cross-3	興部102号(林)	北見6号(林)	3	5
Cross-4	厚岸101号(林)	弟子屈103号	4	4
Cross-5	厚岸101号(林)	北見6号(林)	5	3
Cross-6	弟子屈103号	東演430号*	6	4
Cross-7	東演430号*	王子191号*	7	7
Cross-8	東演430号*	興部102号(林)	8	2
Cross-9	北見3号(林)	王子191号*	9	4
Cross-10	北見3号(林)	東演430号*	10	4
Cross-11	北見3号(林)	北見6号(林)	11	3
Cross-12	雄武5号(林)	北見6号(林)	12	4
Cross-13	興部102号(林)	東演430号*	13	2
Cross-14	厚岸101号(林)	美深101号(林)	14	2
Cross-15	厚岸101号(林)	北演109号*	15	2
Cross-16	東演430号*	厚岸101号(林)	16	2
Cross-17	東演430号*	北見6号(林)	17	2
Cross-18	北演109号*	興部102号(林)	18	2
Cross-19	北演109号*	弟子屈103号	19	2
Cross-20	雄武5号(林)	北演109号*	20	2
Cross-21	興部102号(林)	雄武5号(林)	33	1
Cross-22	厚岸101号(林)	王子191号*	34	1
Cross-23	厚岸101号(林)	興部102号(林)	35	1
Cross-24	厚岸101号(林)	東演430号*	36	1
Cross-25	弟子屈103号	興部102号(林)	37	1
Cross-26	東演430号*	美深101号(林)	38	1
Cross-27	東演430号*	雄武5号(林)	39	1
Cross-28	北見3号(林)	興部102号(林)	40	1
Cross-29	北見3号(林)	北演109号*	41	1
Cross-30	北見6号(林)	厚岸101号(林)	42	1
Cross-31	北見6号(林)	北演109号*	43	1
Cross-32	北見6号(林)	雄武5号(林)	44	1
Cross-33	北演109号*	王子191号*	45	1
Cross-34	東演430号*	弟子屈103号	46	1
Cross-35	東演430号*	北演109号*	47	1
Cross-36	北演109号*	北見6号(林)	48	1
Cross-37	北見3号(林)	厚岸101号(林)	49	1
Cross-38	北見6号(林)	興部102号(林)	50	1
Cross-39	北見6号(林)	東演430号*	51	1
Cross-40	雄武113号*	東演430号*	52	1
Cross-41	興部1号(林)	興部1号(林)	59	1
Cross-42	興部102号(林)	興部102号(林)	60	1
Open-1	興部1号(林)	Open	21	6
Open-2	興部102号(林)	Open	22	8
Open-3	興部105号(林)	Open	23	4
Open-4	厚岸101号(林)	Open	24	4
Open-5	東演430号*	Open	25	3
Open-6	弟子屈103号	Open	26	6
Open-7	美深101号(林)	Open	27	8
Open-8	美深102号(林)	Open	28	3
Open-9	北見3号(林)	Open	29	4
Open-10	北見6号(林)	Open	30	6
Open-11	雄武2号(林)	Open	31	4
Open-12	雄武114号*	Open	32	4
Open-13	旭川108号(林)	Open	53	1
Open-14	興部2号(林)	Open	54	1
Open-15	興部3号(林)	Open	55	1
Open-16	雄武5号(林)	Open	56	1
Open-17	置戸120号	Open	57	1
Open-18	北演109号*	Open	58	1
Cont-1	事業用北見	Open	61	4
Cont-2	事業用池田	Open	62	3
Cont-3	事業用苫小牧	Open	63	3

家系コードのCross, Openはそれぞれ人工交配と自然交配によって作出されたことを示し, Contは比較対象に用いた事業用苗であることを示す。母樹と花粉親名に付した*は, 当該系統が精英樹ではないことを, さらに(林)は道有林から選抜された系統であることを示す。

た(図-1, 表-1)。植栽時は植栽間隔2mの本数密度2,500本/haであった。1991年5月に一部改植, 補植された。26年生となる2016年には本数間伐率が44%の定性間伐が1回実施さ

れた。

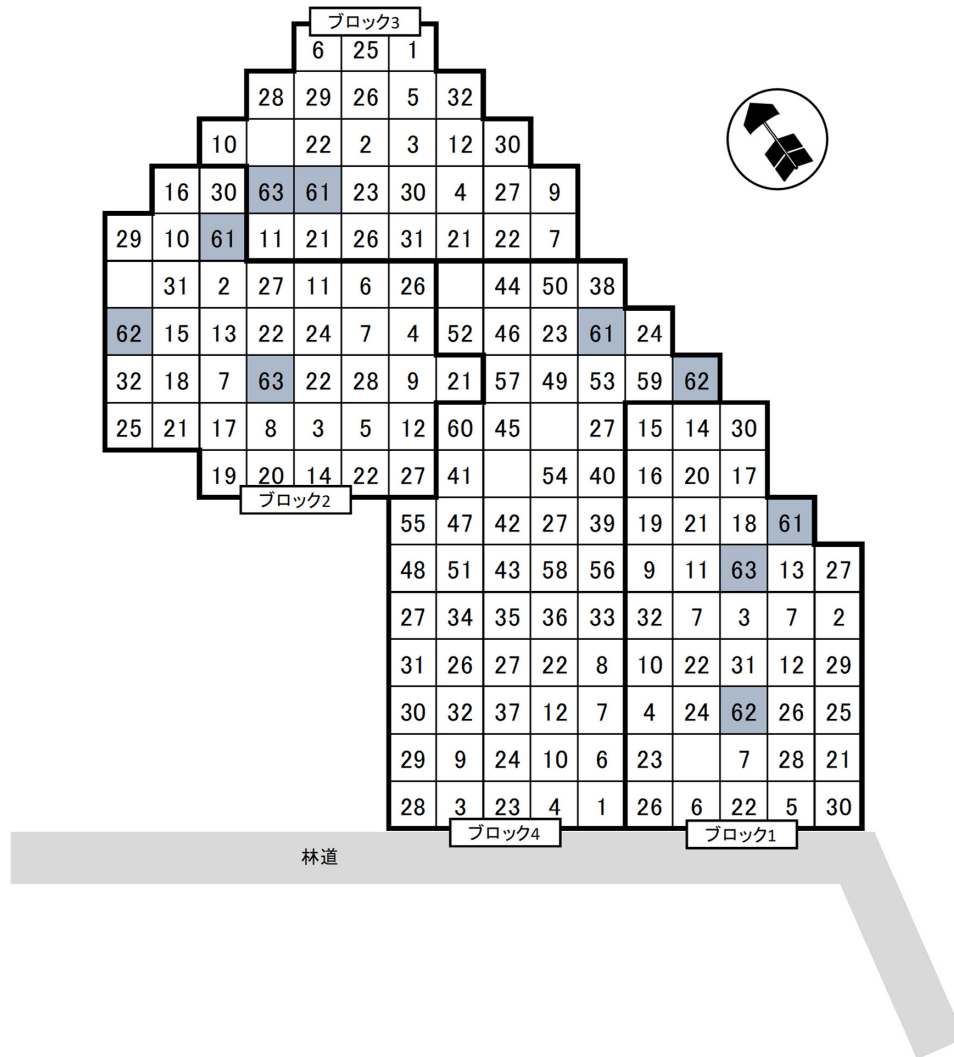
なお, 本試験林は1986年造成のアカエゾマツ次代検定林P4と隣接しており, P4検定林ではすでに選抜が済んでいる(石塚ら 2021)。立地や評価に用いた樹齢が類似していることから, 本研究では, 検定林P4における結果を一部比較対象に用いた。

調査はすべて30年生となる2019年10月28日から11月1日の間に実施した。まず, 成長量に関しては, 生存していた全734個体を対象に, 樹高(H)と胸高直径(DBH)を測定した。また, 既存の立木幹材積推定式(細田ら 2010)を用いてHとDBHから幹材積(V; 単位 m^3)を個体ごとに推定した。この幹材積を, 以降の選抜に供する成長関連形質とした。

材質と曲がりについては, 検定苗が配植されたプロットそれぞれで最大3個体を測定対象とし, 事前にそれぞれのプロット内で, 「成長が良好」「二又でない」「樹幹から多量のヤニの浸出が認められない」「樹幹上で傷が目立たない」など樹幹形状における大きな欠陥がない個体を選び, 合計385個体を調査対象とした。

選抜の目的形質とした材の強度的性質に関する項目として, ファコップ(FAKOPP)を用いて樹幹の対となる2方向における応力波伝播速度(v_p)を調べた。調査では樹幹の地上高70cmと170cmに打ち込んだセンサーの一方を打撃して樹幹軸方向振動を発生させ, 樹幹を伝播した応力波が打撃したセンサーからもう一方のセンサーへ到達するのに要した時間を計測する。花岡・中田(2019)に従って, 測定方向は斜面の上下とならないよう, なるべく斜面方向に直行する2方向における応力波伝播時間を測定し, 平均速度に換算して応力波伝播速度 v_p (m/sec.)とした。一般に, 樹幹における縦振動の速度(v)は, 材の強度的性質を表す動的ヤング係数(E)を材密度(d)で除した値の平方根に等しい($v = \sqrt{E/d}$)という関係が知られる(小泉 2019; 名波ら 1992)。そのため, 伝播速度 v_p は材の強度的性質の指標となりうる。なお, 本調査では3人の調査者がそれぞれ異なるファコップ機器を使用し, 人為的な測定誤差や機器によって生じる値の違いを鑑み, 個体ごとの使用測定機器種類も記録した。

選抜の目的形質とした材密度に関する項目として, 木材試験器のピロディンを用いて, ピンの貫入量を調べた。調査は, 地上高1.3mの高さに試験器を据え, 樹皮つきのままピン($\phi 2.6$ mm)を幹に対して水平に打ち込んだ。ピンはバネを用いて6J(Nm)の一定エネルギーで打ち込まれ, 試験器においてピンの貫入された深さ(貫入量)を測定する。 v_p と同様に, 花岡・中田(2019)に従って樹幹の2方向で貫入量を測定し, その平均値をピロディン貫入量 P_d (mm)とした。木材の密度は, 外部から加えた応力に対する応答の違いで評価できる(Wang *et al.* 1999; 山下ら 2007)。そのため, 樹幹外側の測定部分に限った評価ではあるが, P_d が小さいほど材密度が高いことになり, 選抜において考慮すべき形質であると考えられ



図ー1 アカエゾマツ1990年造成次代検定林の配植図

4つあるブロックの情報を図中に付した。1つの区画が交配組み合わせ別のプロットで、網掛けした61~63のプロットは事業用苗が植栽されたプロット。プロット内には配植番号を記載し、各配植番号における家系情報は表-1に示したとおり。空欄は別樹種植栽箇所で検定対象外とした。

る(石塚ら 2021)。

通直性の調査では、根元曲がりと幹曲がりについて調べた。両項目は、目視によって個体別に5段階(1~5)の評価値で評価した。評価の基準は花岡・伊東(2020)に従い、「根元曲がり」は地際から高さ1.2mまでの曲がり、「幹曲がり」は地際からの高さ1.2~5.2mまでの曲がり进行评估する。5段階の評価は、まったく曲がりがなく通直性に優れる場合には5、少し曲がるものの伐採に影響しない程度の場合には4、それより曲がっている場合には段階的に1~3としていて、評価値5は曲がりがなく通直性に優れることを示す。目視による評価のため、調査者の違いが影響する可能性がある(花岡・伊東 2020)。そこで本調査では、評価経験を有する1名が全対象木の根元曲がりと幹曲がり进行评估した。

2. データ解析

統計解析は全て、データ解析環境R 4.1.0 (R Core Team 2021)を用いた。まず、精英樹次代と事業用苗の比較を行うために、両者において5形質(H, DBH, V, v_p , P_d)それぞれで検定を実施した。次に、測定した形質間の関係を検証するために、幹材積Vとそれ以外の4形質(H, DBH, v_p , P_d)の関係、ならびに、材質関連形質(v_p , P_d)の相関関係をピアソンの積率相関関係によって求めた。計算にはRのcor関数を用いた。

続いて、選抜の対象形質としたV, v_p , P_d については、遺伝的能力を示す指標である育種価を推定した。立木を測定して得られる値(表現型値)は遺伝的効果のほか、その個体の生育する立地や環境条件によっても変動することが知られている。育種価の計算では、家系情報を付与することで血縁関係

によって構築されたまとまりごとに表現型のばらつきを別個に推定することができ(武津 2021), 育種価を用いた評価を行うことによって, 遺伝子型以外の影響を取り除いたうえでの遺伝的能力を踏まえた選抜を実施できる(石塚ら 2015)。また育種価は, 対象とする形質と同一の単位で, かつ, 対象集団の平均が0となるため, 次世代に伝わる遺伝的な効果によって次世代の形質値がモデルで出力した親集団の平均からどれだけ変わるかを表す期待値にもなる。育種価の推定は, 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, 分散共分散の推定には制限付き最尤推定法(REML法; restricted maximum likelihood)によった。推定の際にはRのbreedRパッケージを用いた(Muñoz and Sanchez 2019)。遺伝以外の影響として, Vに対しては, ブロックの固定効果を組み込んだモデルを構築し, v_p , P_d に対しては, 調査者(調査機器)を変量効果に組み込んだモデルを構築した。また, それらのモデルから推定した結果に基づき, 交配親と全供試個体の育種価(子の育種価)を算出すると共に, 狭義の遺伝率(h^2)も算出した。

優良個体の選抜にかかる実施要領(国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 2017)を参考に, 測定した全形質の総合評価によって優良な個体を選抜した。V, v_p , P_d については, 選抜に先立って評価値を付与した。評価値は育種価に基づいた5段階(1~5)の指標で, 値の分布に基づいて算出する。すなわち, 育種価が μ (平均) - $0.5 \times \sigma$ (標準偏差)から $\mu + 0.5 \times \sigma$ の範囲にある個体が評価値3となる。また, $\mu + 0.5 \times \sigma$ から $\mu + 1.5 \times \sigma$ の範囲にある個体が評価値4, $\mu + 1.5 \times \sigma$ 以上の個体が評価値5となる。評価値1, 2についてはそれぞれ, $\mu - 0.5 \times \sigma$ から $\mu - 1.5 \times \sigma$ の範囲にある個体, および, $\mu - 1.5 \times \sigma$ 以下の個体が指定される。た

だし, 材密度を高くする方向に選抜する P_d については, 値が小さいほど優れていると判断されるため, 5段階評価は反転させて算出した。

総合評価では, 以下の6項目の選抜基準を設けて机上選抜した;

- 1) Vの育種価が評価値4以上,
- 2) v_p の育種価が評価値3以上
- 3) P_d の育種価が評価値3以上
- 4) 根元曲がりの評価値が4以上
- 5) 幹曲がりの評価値が4以上
- 6) 系統重複等の考慮

これらすべての項目の選抜基準を満たす個体を抽出した。ここで, 項目1~3は上述のように相対評価であるのに対して, 項目4, 5は評価基準をあらかじめ設けた絶対評価である。なお, 項目6については, 今後の育種集団の遺伝的多様性の確保に配慮するため, 同一家系からの選抜は3個体に制限した。

データ解析を用いた個体選抜を済ませた後, 2021年12月に現地に出向き, 全抽出個体に外見上の欠点がないことを確認した。これをもって本選抜とし, アカエゾマツ第2世代精英樹候補とした。最後に, 選抜による改良効果を求めた。選抜個体を親とした次世代において期待される平均と, モデルで算出される対象集団における平均の差を求め, その差が対象集団における平均に占める割合を改良効果として算出した。この値は, 選抜によってどれだけ遺伝的改良が見込めるかを示す。V, v_p , P_d のそれぞれの形質について算出した。

結果と考察

成長および材質調査で得た全形質の要約統計量を表-2に示す。まず, 成長関連形質について, 検定に供した家系のH,

表-2 アカエゾマツ次代検定林で測定した各形質(30年時)の要約統計量

対象	形質	単位	個体数	家系数	平均	中央値	標準偏差	最小値	最大値	
成長	H	m	685	60	14.0		2.1	2.4	18.5	
			49	3	12.1		2.1	7.2	16.9	
	DBH	cm	685	60	19.1		3.8	3	31.1	
			49	3	16.1		3.8	9.1	22.9	
	V	m ³	685	60	0.2424		0.106	0.0015	0.6308	
			49	3	0.1584		0.106	0.0433	0.3444	
材質	v_p	m/sec.	355	60	3796		268	2959	4484	
			30	3	3843		248	3247	4386	
	P_d	mm	355	60	25.6		2.5	28.5	33.0	
			30	3	24.8		2.5	20.8	31.5	
	曲がり	根元曲がり (5段階)		355	60		4	0.7	2	5
				30	3		4	0.7	2	5
幹曲がり (5段階)			355	60		4	0.7	2	5	
			30	3		4	0.5	3	5	

H; 樹高, DBH; 胸高直径, V; 幹材積, v_p ; 応力波伝播速度, P_d ; ピロディン貫入量
網掛け部は, 比較対象とした事業用の3家系(表-1参照)について集計したことを示す。

DBH, Vの平均はそれぞれ14.0 m, 19.1 cm, 0.2424 m³だった。事業用苗の平均と比べると、それぞれ15.3, 18.4, 53.0%高く、すべての形質において有意な差がみられた (*t*検定, $p < 0.001$)。これは、優れた成長を示すとして選抜された親の育種効果が反映された結果といえる。先行研究では、隣接するP4検定林において、本研究と同じ30年生時における検定苗の成長関連形質を調査し、H, DBH, Vの平均値がそれぞれ13.1 m, 17.1 cm, 0.1845 m³であること、ならびに、事業用苗よりも9.1~26.2%高かったことが報告された(石塚ら 2021)。両検定林において事業用苗と比べた検定苗の優位性が共通していた。

一方で材質関連形質に関して、 v_p については、検定に供した家系の平均が3796 m/secであり、事業用苗の平均との違いは-1.2%であった。検定苗と事業用苗で材の強度的性質に大きな違いがなく、むしろ検定集団の方が若干低かったが、有意な違いは認められなかった (*t*検定, $p = 0.3571$)。P_dについては、検定に供した家系の平均は25.6 mmであり、事業用苗の平均と比べると3.1%大きかった。P_d値が小さいほど材密度が大きいため、評価としては v_p と同様に検定集団の方が事業用苗よりも若干劣っていたが、有意な差はみられなかった (*t*検定, $p = 0.1027$)。この結果は、検定苗の優位性が示された成長関連形質とは異なっていた。検定苗は、初期の精英樹選抜事業で選ばれた精英樹等を親としている(表-1)。当時の選抜は専ら成長について評価し、材質特性を評価項目に入れていない。材質関連形質において検定苗の優位性が示されなかったのは、おそらくこのことが一因となったと考えられる。

成長・材質評価に加えて、2項目(根元曲がり・幹曲がり)について通直性を評価した(図-2)。これら2項目において評価値1をつけた個体はみられなかった。多くは評価値4以上が付与されており、その割合は根元曲がりに関しては全体の61.3%、幹曲がりに関しては全体の63.1%だった(図-2)。比較対象とした検定林P4での評価値4以上の個体割合が根元曲がり・幹曲がりそれぞれ83.7%, 66.9%であったことを踏まえると、根元曲がりに関して選抜基準を満たす個体の割

合が小さく、遺伝による改良ポテンシャルを十分に発揮できていない、あるいは根元曲がりや微地形のような立地条件の違いにより変動する雪圧の影響を受け、曲がりが生じやすかった可能性がある。実際に花岡・伊東(2020)は、曲がりの特性に遺伝的影響がある程度現れるが、環境条件の効果が大きいことを報告している。本検定林P5は検定林P4よりも傾斜地を含むために、P4検定林に比べて高い評価値の個体が少なくなったものの、評価値4以上が多数を占めたこと、精英樹次世代と事業用苗の間でも根元、幹両曲がり指数の中央値は同じであったことなどから(表-2)、遺伝的な差が出にくい環境条件であったと考えられる。

相関解析の結果、VはH, DBH, v_p , P_dのどれも有意な相関を示すことがわかった(表-3)。相関係数は小さいながら、Vは v_p とは弱い負の相関、P_dとは弱い正の相関を示した。あわせて、 v_p とP_dの間には弱い負の相関があった。なお、P_dのみ、値が小さい方へ選抜する形質である。これらの結果より、成長に優れ、かつ、強度的性質や材密度ともに優れている個体が出現しにくいという全体的な傾向がややあり、本検定林P5では成長・材質の両面を考慮した場合には選抜効率があまり高くないと解釈できた。Vと他の形質間の相関関係は、検定林P4においても同様の傾向が認められ、供試家系が異なるにもかかわらず同じパターンを示すことは興味深く、アカエゾマツの種特性、あるいは気象や斜面方位、土壌など両検定林に共通する環境の影響があった可能性が考えられる。

表-3 形質間の相関

変数	<i>r</i>	<i>p</i>
V vs. H	0.8176	<0.00001
V vs. DBH	0.9547	<0.00001
V vs. v_p	-0.1138	0.02552
V vs. P _d	0.2686	<0.00001
v_p vs. P _d	-0.3722	<0.00001

H; 樹高, DBH; 胸高直径, V; 幹材積, v_p ; 応力波伝播速度, P_d; ピロディン貫入量

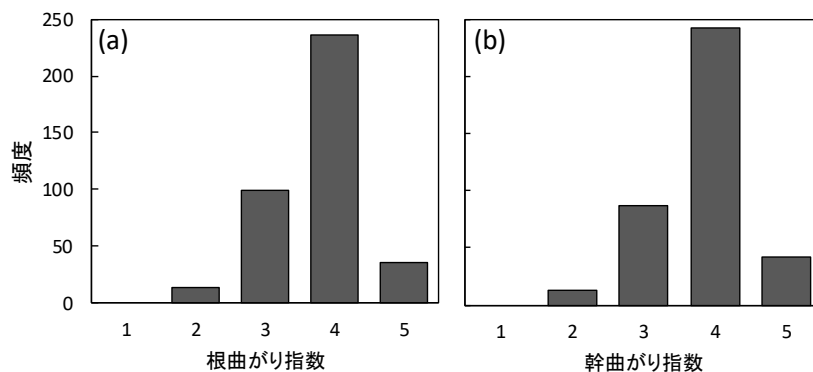


図-2 対象個体の根元曲がり指数(a)と幹曲がり指数(b)の分布
数値が大きいほど通直性に優れていることを示す。

算出した交配親の育種価を形質別に図-3に示す。Vの育種価において上位(正值)の親クローンのうち、北見6号(林)、旭川108号(林)、美深102号(林)は v_p や P_d の育種価においても上位(v_p で正值, P_d で負値)となっていた。交配親の育種価に差があり、全交配親の育種価のうち最大値と最小値、ならびにそれらの表現形値の林分平均値(表-2)に対する割合は、Vが 0.0777 m^3 (32.0%), -0.0649 m^3 (26.8%), v_p が 135 m/sec. (3.5%), -165 m/sec. (4.3%), P_d が 1.845 mm (7.2%), -1.457 mm (5.7%)となった。3形質のうち、平均に対する割合が最も大きかったのはVであり、家系の選択が林分の平均に与える影響が最も大きい形質であることがわかる。

V, v_p , P_d における狭義の遺伝率(h^2)は、それぞれ0.297, 0.194, 0.326となり(図-3), 樹高と胸高直径の遺伝率はそれぞれ0.628, 0.216となった。隣接する検定林P4を含めて、2021年度までに行われた各アカエゾマツ第2世代精英樹候補木選抜では、ほとんどの選抜において h^2 はVや樹高, 胸高直径よりも v_p で高い傾向が報告されている(花岡ら 印刷中)。それに対して、本研究では、V, v_p , P_d の3形質の遺伝率の間に著しい違いは確認されず、むしろVにおける遺伝率の高さと、樹高における高い遺伝率が認められる。樹高の遺伝率は、花岡ら(印

刷中)にて報告される、これまでに行われた各アカエゾマツ第2世代精英樹候補木選抜の樹高の遺伝率0.16~0.77の範囲の中でも高い位置にあり、来田ら(2001)による苗畑育成時の苗高における遺伝率が0.195~0.385だったことと比較しても際立って高い。Vは樹高と胸高直径の2乗値を基に計算される(細田 2010)ことから、本研究でみられたVの高い遺伝率は、樹高における遺伝率の高さに起因していると推察される。

一山型の分布となる子の育種価と各形質の選抜基準の下限値を図-4に示した。総合評価において選抜の対象となる個体は、少なくともこれら3形質すべてで選抜基準を満たす必要がある。選抜を実施したところ、設定した選抜項目1~5をすべて満たした個体は51個体となった。これは、成長のみでなく材質・曲がりを含め全形質を評価した検定個体(355個体)の14.4%, また検定林P5にて現存する全検定個体(685個体)の7.4%にあたる(表-2)。この際、V, v_p , P_d , 曲がりの4項目において、ほか3条件は基準をクリアしているものの、残りの1条件により抽出されなかった個体数はV, v_p , P_d , 曲がりの順でそれぞれ67, 13, 24, 31個体となった。 v_p , P_d の値が理由で落とされた個体が少ないのは選抜基準が評価値3以上であり、評価値4を基準とするV, 曲がりよりも基

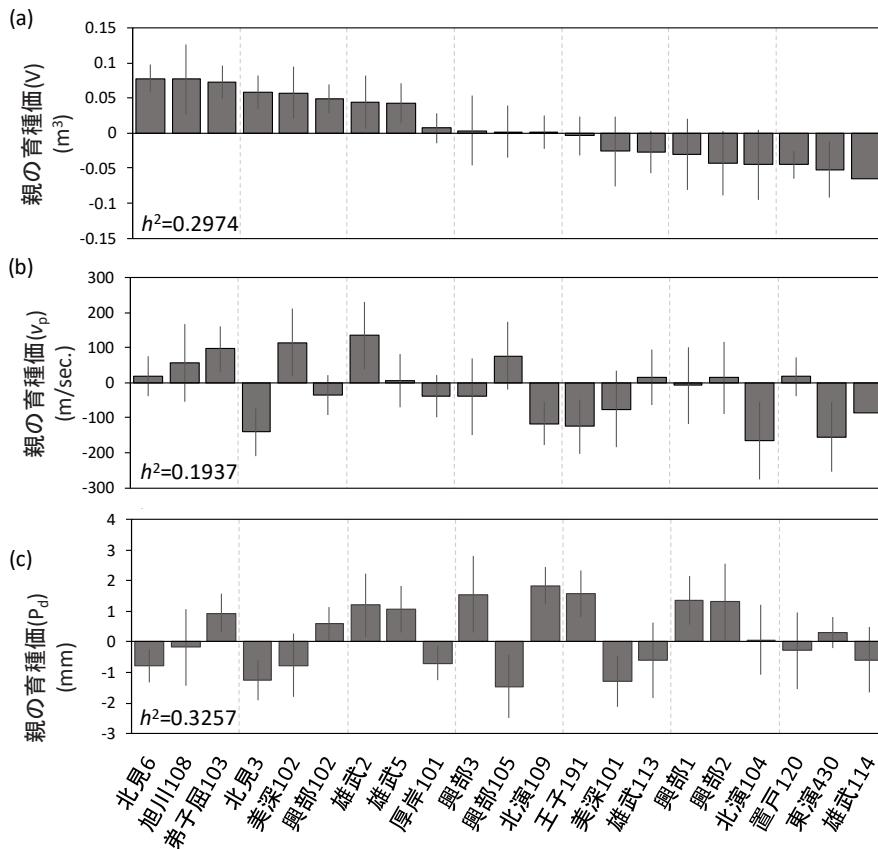


図-3 幹材積(a)と応力波伝播速度(b)ならびにピロディン貫入量(c)に対する交配親の育種価の推定値と遺伝率

親の並び順は全形質において同一で、幹材積の育種価が大きい順とした。なお、親の系統名は表-1から略称表記した。エラーバーは標準誤差を示す。図中には、狭義の遺伝率(h^2)を付した。

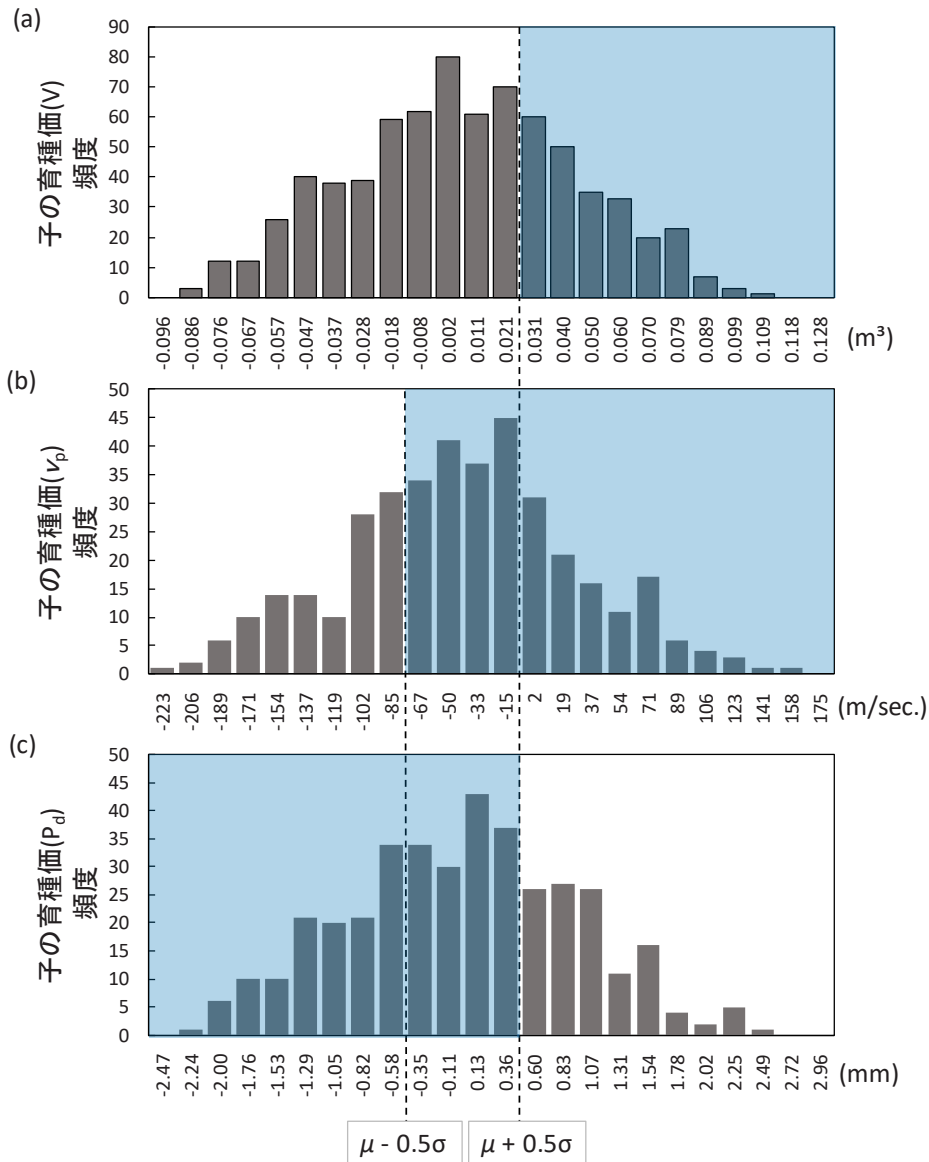


図-4 幹材積 (a) と応力波伝播速度 (b) ならびにピロディン貫入量 (c) に対する子の育種価の頻度分布と選抜基準

図中の点線は選抜基準を示し、幹材積は評価値4以上 ($\mu + 0.5\sigma$ 以上)、応力波伝播速度は評価値3以上 ($\mu - 0.5\sigma$ 以上)、ピロディン貫入量は特性値3以上 ($\mu + 0.5\sigma$ 以下；値が低い方向への選抜であることに留意)の個体が選抜対象となる。選抜基準を満たす個体が含まれる領域を網掛けとし、頻度分布は灰色の棒グラフで示した。

準が緩いことによる。51個体のうち、評価値選抜項目6の基準も満たし、机上選抜されたのは17個体だった。これは、全形質を評価した個体 (355個体) の4.8%、全検定個体 (685個体) の2.5%にあたる (表-2)。現場での確認からは、全17個体で外見上とくに欠点のないことが確かめられた。

以上の過程を経て、本検定林ではこれら17個体を優良な個体と認め、第2世代精英樹候補木として本選抜に至った (表-4)。本選抜の選抜率は上記に示す2.5%だった。本検定林の場合、成長に関する選抜形質としたVと、材の強度的性質の指標として選抜形質に用いたv_pとの間に弱い負の相関関係があり、両形質が優れる個体がそれほど出現しやすくない傾

向があった (図-5)。成長ならびに材質関連形質がともに優れた個体の選抜数が少ないという傾向は、先行研究で行われた検定林P4での選抜の事例でも共通して認められた傾向だった (石塚ら 2021)。アカエゾマツには、直径成長に優れるクローンは一般的に容積密度や動的ヤング係数といった材質関連形質に優れないという種特性がある可能性が考えられる。実際にアカエゾマツのクローン検定を行った先行研究からは、①年輪幅と材の容積密度との間に負の相関がある、②動的ヤング係数と丸太径との間に負の相関がある、③材の容積密度と動的ヤング係数との間に明確な正の相関がある、といった知見が得られている (安久津・飯塚 1998；飯塚ら 1999；飯

表-4 選抜したアカエゾマツ第2世代精英樹候補の情報と形質値

個体名称	家系 コード	反復	立木 番号	立木 ラベル	H (m)	DBH (cm)	V (m ³)	v _p (m/sec.)	P _d (mm)	曲がり評価	
										根元	幹
アカエゾマツ北育2-141	Open-3	1	3	424	18.2	24.4	0.463	4464	25.0	4	4
アカエゾマツ北育2-142	Open-8	1	7	419	17.2	24.8	0.450	4107	24.0	4	5
アカエゾマツ北育2-143	Open-4	1	7	429	17.3	23.6	0.415	4098	24.8	4	4
アカエゾマツ北育2-144	Open-2	1	9	451	17.8	21	0.349	4082	23.3	4	4
アカエゾマツ北育2-145	Open-11	2	8	699	15.1	21.5	0.306	4292	27.0	4	4
アカエゾマツ北育2-146	Cross-11	2	3	705	16.3	27	0.496	3731	24.8	4	5
アカエゾマツ北育2-147	Open-6	2	6	711	15.8	28.1	0.516	3781	27.3	5	4
アカエゾマツ北育2-148	Cross-4	2	5	715	14.1	20.1	0.253	3899	22.5	5	4
アカエゾマツ北育2-149	Cross-4	2	6	714	14.3	20.5	0.266	3521	23.5	4	4
アカエゾマツ北育2-150	Open-8	2	3	744	13.2	25.8	0.367	3724	27.0	4	4
アカエゾマツ北育2-151	Cross-12	2	1	755	16.9	23.9	0.413	4032	24.3	4	4
アカエゾマツ北育2-152	Cross-12	2	8	753	16.2	25.8	0.454	3876	23.3	4	4
アカエゾマツ北育2-153	Open-8	3	6	627	16.4	19.9	0.291	4000	22.8	4	5
アカエゾマツ北育2-154	Open-2	3	5	630	15.4	19.1	0.254	4115	23.5	4	4
アカエゾマツ北育2-155	Open-2	3	9	677	15.6	24.5	0.398	3690	24.3	4	4
アカエゾマツ北育2-156	Open-3	4	4	591	15.6	24.9	0.409	3643	26.3	4	4
アカエゾマツ北育2-157	Open-13	4	2	577	17.5	22.2	0.377	4167	22.5	4	4

H：樹高，DBH：胸高直径，V：幹材積，v_p：応力波伝播速度，P_d：ピロディン貫入量家系コードは表-1と対応する。

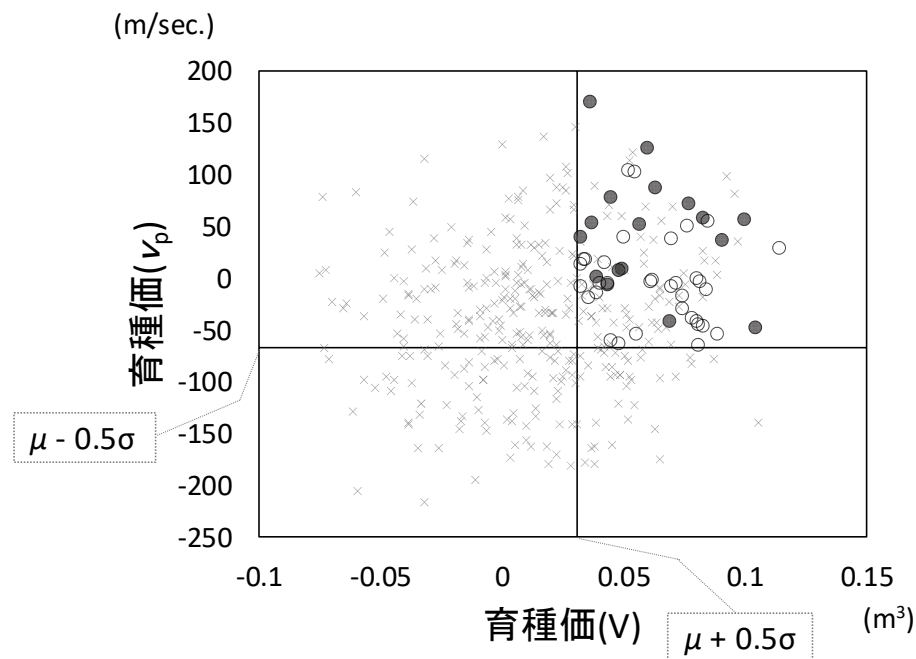


図-5 幹材積 (V) と応力波伝播速度 (v_p) それぞれの子の育種価の分布と選抜個体

図中、丸印が幹材積、応力波伝播速度、ピロディン貫入量、根元曲がり、幹曲がりの各選抜基準をすべて満たした個体を示し、遺伝的多様性を考慮したうえで最終的に選抜された個体を灰色丸で示した。図中に引いた2本の直行する線は、幹材積が評価値4、応力波伝播速度が評価値3で設けた選抜基準を示す(図-4参照)。

塚2002；根井ら 2008)。一方でトドマツ、カラマツ、スギの精英樹においては、成長関連形質と材質関連形質の間に負の相関は認められず、肥大成長と強度特性は比較的独立した形質であり成長形質と強度特性の両立した選抜が可能であると考えられている(石塚ら2015；小泉 2019)。もしアカエゾマツのみでこのように成長と材質に拮抗する関連性があるのであれば、複合形質での選抜を効率的に行えないことを意味す

るため、本種の育種目標を設定する上で留意すべき点になると考えられた。しかし、検定林P4と本検定林P5は隣接し、調査林齢も同じことから、共通する環境の影響により得られた結果という可能性もある。今後、ほかの地域でのアカエゾマツ優良個体選抜の結果が待たれる。

選抜した17個体の育種価の平均値を求めると、V、v_p、P_dはそれぞれ0.0631、43.2、-0.386となり、改良効果は21.45%、

表-5 選抜による改良効果

形質	単位	選抜基準	選抜個体の 育種価の平均	選抜個体の 形質期待値	改良効果 (%)
V	m ³	特性値4以上	0.0613	0.2837	21.45
v _p	m/sec.	特性値3以上	43.2	3880.5	2.00
P _d	mm	特性値3以上	-0.386	24.963	2.01

V；幹材積，v_p；応力波伝播速度，P_d；ピロディン貫入量

2.00%，2.01%と，すべての形質が選抜によって改良されることが見込まれた（表-5）。改良効果はVにおいて最も高く，これはVのみにおいて評価値4以上とする選抜基準を設けたため（国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 2017），成長形質の改良を重視した選抜だったことが反映されていた。一方で，材質形質に関しては，精英樹次世代と事業用苗で値が大きく変わらなかったものの（表-2），改良効果は正の値を示す結果となった。検定林P4でのv_p，P_dそれぞれの改良効果が1.37%，0.47%であったことを踏まえると，両検定林ともに材質表現型値の平均に対する標準偏差の割合がVの場合と比べて非常に小さく（表-2），全体として形質のばらつきが小さかったために改良効果が低く算出されたと考えられる。アカエゾマツは材に割れが入る問題があり（来田 2017），早材密度の低さとの関連が指摘されるため（村上ら 2022），改良効果は低くとも，引き続きP_dを選抜項目に加え，材密度の向上や欠点の低減につなげていくことが望ましい。選抜個体は今後，クローン増殖を図るとともに，第2世代精英樹として認可に至れば，採種園へと導入されて，将来の優良種苗を生産する役割を担っていく。引き続き選抜個体を拡充し，優良な育種集団を確保していくことが将来のために重要である。

引用文献

安久津久・飯塚和也（1998）アカエゾマツ造林木の材質検定（II）-精英樹クロンの材質-。林産試験場報 12: 13-21
 武津英太郎（2021）森林遺伝育種のデータ解析方法（実践編 3）BLUP法。森林遺伝育種 10: 49-53
 花岡創（2019）アカエゾマツの第2世代精英樹（エリートツリー）の選抜。北海道の林木育種 62（1）: 8-12
 花岡創・伊東宏樹（2020）アカエゾマツの根元曲がりと幹曲がりの発生に関する地域間及び遺伝的変動。森林立地 62: 39-50
 花岡創・中田了五（2019）FAKOPPおよびPilodynを用いたアカエゾマツの材質測定手法の検討。北方森林研究 67: 19-22
 花岡創・中田了五・福田陽子・今博計・石塚航（2018）北海道育種基本区におけるアカエゾマツ第2世代精英樹候補木およびカラマツ優良木の選抜-平成29年度の実施結果-。林木育種センター年報 平成30版: 100-102
 花岡創・中田了五・石塚航・米澤美咲（印刷中）令和3年度

までのアカエゾマツ第2世代精英樹候補木選抜の経過。林木育種センター年報 令和4年版
 花岡創・中田了五・辻山善洋（2019）北海道育種基本区におけるアカエゾマツ第2世代精英樹候補木の選抜-平成30年度の実施結果-。林木育種センター年報 令和元年版: 100-102
 花岡創・中田了五・辻山善洋・佐々木洋一（2021）北海道育種基本区におけるアカエゾマツ第2世代精英樹候補木の選抜-令和元年度の実施結果-。林木育種センター年報 令和2年版: 104-106
 Haraguchi A, Iyobe T, Nishijima H, Tomizawa H（2003） Acid and sea-salt accumulation in coastal peat mires of a *Picea glehnii* forest in Ochiishi, eastern Hokkaido, Japan. Wetlands 23: 229-235
 北海道（2022）北海道採種園整備方針。10pp. 北海道，札幌
 北海道水産林務部（2022）令和2年度北海道林業統計。57pp. 北海道水産林務部，札幌
 細田和男・光田靖・家原敏郎（2010）現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法。森林計画学会誌 44: 23-29
 飯塚和也（2002）北海道における針葉樹造林木の材質変異および育種に関する基礎的研究。林木育種センター研究報告 18: 81-208
 飯塚和也・安久津久・板鼻直榮（1999）アカエゾマツ精英樹クロンの材質変異。日本林学会誌 81: 325-329
 飯塚和也・林英司・板鼻直榮（2000）さまざまな採種園に植栽されたアカエゾマツ精英樹クロンの成長と材質諸形質の比較解析。日本林学会誌 82: 80-86
 井城泰一・田村明・西岡直樹・阿部正信（2006）ピロディンを用いたトドマツ精英樹等クロンの容積密度の評価。北海道の林木育種 49（2）: 1-4
 井城泰一・田村明・西岡直樹・阿部正信・石栗太・飯塚和也（2010）トドマツにおける材質形質の早期選抜と非破壊的評価法の検討。北海道の林木育種 53（1）: 12-16
 石塚航・今博計・来田和人（2015）根釧地域におけるトドマツ第2世代精英樹の選抜。光珠内季報 176: 9-14
 石塚航・今博計・来田和人・黒丸亮・矢野慶介・田村明（2016）トドマツ優良種苗の開発-第2世代精英樹候補木の選抜-。光珠内季報 179: 9-14

- 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. 林業試験場研究報告 58: 61-69
- Kayama M, Sasa K, Koike T (2002) Needle life span, photosynthetic rate and nutrient concentration of *Picea glehnii*, *P. jezoensis* and *P. abies* planted on serpentine soil in northern Japan. *Tree Physiology* 22: 707-716
- 来田和人 (2017) 北海道の林木育種60年の成果と最近10年の動向. 北海道の林木育種 60 (1): 28-33
- 来田和人・黒丸亮・内山和子 (2001) アカエゾマツ精英樹次代苗木の成長に見られる遺伝的変異. 北海道の林木育種 44 (2): 14-7
- 小泉章夫 (2019) 針葉樹造林木の材質変異. 北海道の林木育種 62 (1): 1-7
- 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 (2017) 林木育種センター品種開発実施要領-成長の優れたアカエゾマツ品種-. https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/sinhijnnsyu/yuryouhinsyu/documents/yoryo_akaezomat-su20170401.pdf (2022年12月15日確認)
- 三浦真弘・平岡裕一郎 (2012) 海外での次世代化の取り組みについて-アメリカ合衆国南東部-. 北海道の林木育種 55 (2): 9-14
- Muñoz F, Sanchez L (2019) breedR: Statistical methods for forest genetic resources analysts. R package version 0.12-4
- 村上了・大崎久司・佐藤真由美・佐野雄三 (2022) アカエゾマツ造林木における内部割れと材密度との関係. 第72回日本木材学会大会研究発表要旨集 B15-02
- Nakata M, Kojima S (1987) Effects of serpentine substrate on vegetation and soil development with special reference to *Picea glehnii* forest in Teshio district, Hokkaido, Japan. *Forest Ecology and Management* 20: 265-290
- 名波直道・中村昇・有馬孝豊・大熊幹章 (1992) 応力波による立木の材質測定(1)測定方法と応力波の伝播経路. 木材学会誌 38: 739-746
- 根井三貴・安久津久・来田和人 (2008) アカエゾマツ精英樹クローンの材質評価. 北海道の林木育種 51 (2): 9-12
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- 林業試験場 (2008) 道産木材データベース. <https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/gijutsujoho/doumoku-db/doumoku/akaezo/akaezo.htm> (2022年12月15日確認)
- 田村明・阿部正信・西岡直樹・井城泰一・辻山善洋 (2007) アカエゾマツにおける容積密度の簡易検定法の開発. 北海道の林木育種 50 (2): 10-14
- 田村明・井城泰一 (2011) カラマツ類の非破壊の材質評価法の開発と材質への環境の影響評価. 北海道の林木育種 54 (1): 5-9
- Wang ZM, Nagasaka K (1997) Allozymevariation in natural populations of *Picea glehnii* in Hokkaido, Japan. *Heredity* 78: 470-475
- Wang T, Aitken S, Rozenberg P, Carlson M (1999) Selection for height growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 434-445
- 山下香菜・岡田直紀・藤原健 (2007) ピロディンを用いた容積密度推定法とスギ生材丸太クラス分けへの応用. 木材学会誌 53: 72-81

Summary

In order to select superior Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) trees, progeny derived from several genotypes were evaluated based on data collected at a *P. glehnii* progeny test site established in 1990 in the experimental forest of Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization. Stem volume (V) was measured as a growth-related trait. Two wood quality traits were also measured for each tree, the stress wave velocity through the stem (v_p) for a surrogate of wood dynamic modulus of elasticity and the Pilodyn penetration depth (P_d) for wood density. All traits were obtained when trees were 30-year-old. Breeding values were estimated for each of these traits. Straightness around the root stump and stem straightness were also evaluated. Overall selection was performed using multiple criteria in order to i) select for superior growth characteristics, ii) improve desirable wood qualities and straightness, and iii) maintain genetic diversity. Based on our initial selection criteria, 51 candidate trees (7.4% of total surviving progeny) were selected for more through evaluation, and ultimately 17 trees (2.5% selection rate) were selected. The 17 selected trees are expected to improve by 21.45% on average for V and 2.00% and 2.01% for v_p and P_d , respectively. These selected trees will serve as important improved materials that compose subsequent breeding generations for this species.

Key words

Selection, *Picea glehnii*, improve by breeding, stem volume, wood quality