

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

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**

Selecting superior Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) trees using the progeny test established in 1986

Wataru ISHIZUKA*, Hirokazu SATO*, Hirokazu KON*, Ayu NARITA*, So HANAOKA**, Ryogo NAKADA**,
Yoko FUKUDA**, Kouki KURONUMA**, and Yoshihiro TSUJIYAMA**

要旨

1986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実施した。成長関連形質として30年生時の幹材積を、材質に関連する2形質として、動的ヤング係数の指標となる33年生時の応力波伝播速度、および、材密度と関係がある33年生時のピロディン貫入量を測定し、育種価を計算した。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どれにおいても劣らない、iii) 遺伝的多様性が担保される、ように選抜基準を設け、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34個体(全検定木の4.5%)で、このうち、遺伝的多様性を考慮して選抜されたのが20個体(同2.7%)だった。本調査において、幹材積と応力波伝播速度、ピロディン貫入量にはそれぞれ負と正の相関関係が認められたため($r = -0.3017, 0.1773$)、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くなった。これら選抜個体については、幹材積で平均5.12%、応力波伝播速度で1.37%、ピロディン貫入量で0.47%の改良効果が期待できることがわかり、第2世代精英樹の候補木として今後の活用が望まれる。

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

北海道における林木育種事業が開始されて六十余年が経過する(畠山 2017)。序盤では、林分において、成長量や幹の通直性等に優れた形質を有する精英樹の選抜が精力的に実施された。以降、精英樹の次代を用いた遺伝的特性の評価(次代検定)、不良系統の除去、精英樹クローンから造林用の種苗を生産していくための採種園の造成・整備といった育種の営み(大庭・勝田 1991)が脈々と続けられてきた。北海道でも過去に造成した次代検定林の林齢が増し、適正な育種評価ができるようになってきた。そこで2010年代からは、第2世代精英樹候補木などの精英樹後代からの選抜が進んでいる(た

例えば、花岡ら 2018; 2019; 石塚ら 2015; 今ら 2016)。その中で、北海道における主要造林樹種それぞれを対象とした選抜育種が実践されて、各種の遺伝的改良が図られている。

トウヒ属の1種、アカエゾマツ(*Picea glehnii*)もその対象樹種の1つである。本種は北海道全域に自生し、ほかにサハリン、千島列島、ならびに、隔離集団として本州の早池峰山に自生することが知られる(逢沢 2017)。北海道内における造林量はカラマツ類やトドマツに次いで多く、適切なアカエゾマツの造林と施業に向けた知見も整理されている(北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場 2018)。これまで、アカエゾマツ精英樹の成長形質について、次代検定を用いた遺伝的特性の評価や(花岡・武津 2019; 来田 2000; 2002; 黒

* (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
[北海道林業試験場研究報告 第58号 令和3年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 58, March, 2021]

丸 1997), 苗畑生育時における遺伝変異性の評価が試みられた(来田ら 2001)。黒丸(1997)の報告からは, 精英樹から生産された種苗を造林に用いることの有用性をみることができ。また, 精英樹クローンをを用いた材質調査も行われており, 本種の材質関連形質は遺伝的要因の寄与が高いことや, 比較的若齢であっても適切な材質評価が可能なことが知見として蓄積している(安久津・飯塚 1998; 飯塚 2002; 飯塚ら 1999; 2000; 井城ら 2005; Tanabe *et al.* 2014)。遺伝的要因による影響は幹の通直性(曲がり)でも示され, 通直性も選抜育種にかかる対象形質となりうると報告されている(花岡・伊東 2020)。そのため, 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, 通直性をすべて加味した総合評価での選抜が実施され, 2019年度までに5つの次代検定林からのべ95個体の候補木が選抜された(花岡ら 2018; 2019; 2021)。ただし, 北海道は気候の違いなどの地域性から育種を行う区画が3つに分類されており, たとえば西南部育種区では選抜数がのべ30個体など, まだ十分な数ではない。今後, さらなる優良種苗を生産していくためには, 引き続き第2世代精英樹選抜を進め, 優れた遺伝資源の拡充を図っていく必要がある。

そこで本研究では, 1986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年を超えた個体を対象に成長・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精英樹後代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候補木として選抜できるか, また, どのくらいの形質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

対象とする検定林は, 美瑛市にある北海道立総合研究機構林業試験場(以降, 林業試)の実験林(北緯43.279度, 東経141.879度, 標高約230~240m)内にあるアカエゾマツ次代検定林P4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。検定林の造成は1986年(昭和61年)春で, 植栽にはアカエゾマツ6年生苗(2回床替え苗)が用いられた。供試材料には, 次代検定用に用意された苗(検定苗)と, 比較対象として用意された事業用苗が用いられた。検定苗については, 1967年(昭和42年)造成の道有アカエゾマツ採種園(訓子府町)に導入されたクローンを母樹(母親)とし, 1978年(昭和53年)に自然交配で得られた種子に由来する。検定苗は林業試の苗畑で養苗され, 同じクローンに由来する次代のまとまりを家系として, 家系別に管理して仕立てられた。供試家系数は18である(表-1)。事業用苗については, 道内の各地において造林用苗として用いられるアカエゾマツ種子に由来し, のべ4つの群がある。本次代検定においては, 検定苗の扱いに合わせて便宜的にC1~C4の家系と

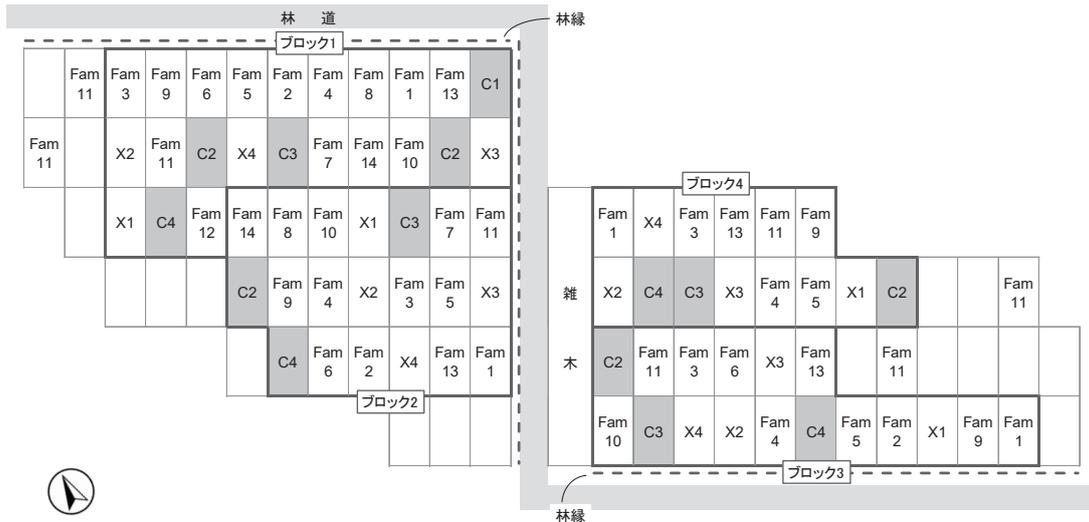
表-1 アカエゾマツ次代検定林P4の供試家系

#	ID	母親クローン
1	Fam1	東演 426
2	Fam2	東演 429
3	Fam3	東演 430
4	Fam4	東演 432
5	Fam5	旭川 104
6	Fam6	旭川 106
7	Fam7	旭川 111
8	Fam8	厚岸 101
9	Fam9	雄武 3
10	Fam10	雄武 5
11	Fam11	美深 101
12	Fam12	美深 102
13	Fam13	美深 106
14	Fam14	美深 126
15	X1	栗山 191
16	X2	栗山 192
17	X3	栗山 193
18	X4	栗山 195
19	C1	事業用(雄武)
20	C2	事業用(美深)
21	C3	事業用(旭川)
22	C4	事業用(北見)

して管理し, 植栽した(表-1)。C1が林業試の苗畑で, その他は当時の各道有林事業所の苗畑(美深町, 旭川市, 北見市)において仕立てられた。また, 本検定林の配植は7本×3列の21本を1プロットとしたプロット植栽によるものとし, 反復処理として4つのブロックを設けた後, 家系別に無作為化してプロットを割り振り, 植栽した(図-1)。植栽時は苗列間2mの本数密度2,500本/haであった。26年生となる2011年には列状間伐が1回実施された。

成長調査は, 30年生となる2015年秋に実施した。全生存木を対象とし, 樹高(H)と胸高直径(DBH)を測定した。両データが揃った後, 既存の立木幹材積推定式(細田ら 2010)にのっとり樹高と胸高直径から幹材積(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。

材質調査と曲がりの調査は, 33年生となる2018年11月に行った。対象木は検定苗が植栽されたプロットそれぞれで最大4本とし, 事前にそれぞれのプロット内で, 成長が良好で, かつ, 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, など樹幹形状等における大きな欠陥がない個体を選んだ。事業用苗は対象外とした。調査対象個体は239個体だった。さらに材質調査については, 測定値検証等の参考データとするため, 4つのブロックの外側に配植されたバッファ区より(図-1参照), Fam11に由来する家



図ー 1 アカエゾマツ1986年造成次代検定林の配植図

4つあるブロックと林道に面した林縁の情報を図中に付した。1つの区画が家系別のプロットで、網掛けしたC1～C4のプロットは事業用苗が植栽された対照プロット。

系プロット内の一部個体（15個体）も調査対象に加えた。

選抜の目的形質となる材の強度的性質に関連する項目として、FAKOPP (FAKOPP Enterprise, ハンガリー) を用いて樹幹軸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80cmと180cmに打ち込んだセンサーの一方を打撃して樹幹軸方向の振動を発生させ、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所要した時間を計測する。花岡・中田 (2019) にのっとり、測定は斜面の上下にならないよう、なるべく斜面に水平な2方向を使って繰り返した後、平均速度に換算した。これを 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 ($v = \sqrt{\frac{E}{d}}$) 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。

選抜の目的形質となる材密度に関連する項目として、木材試験器のPilodyn 6 J Forest (Proceq, スイス) を用いて、ピンの貫入量 (P_d) を調べた。調査は、地上高約1mの高さに試験器を据え、樹皮つきのままピン ($\Phi 2.6\text{mm}$) 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) にのっとり樹幹の2方向で貫入量を測定し、その平均値を算出した。これを 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、貫入量 P_d が大きいほど材密度が低いことになり、選抜において考慮すべき形質と考えられる。

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) に準じた。これによると、「根元曲がり」は地際から高さ1.2mまでの曲がりを、「幹曲がり」は地際から高さ1.2～5.2mまでの曲がりを評価する。5段階の評価値は、全く曲がりがない場合を5、少し曲がるものの採材に影響しない場合を4、それより曲がっている場合には段階別に1～3としていて、評価値5は曲がり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2名が2ブロックずつを担当し、根元曲がりと幹曲がりを評価した。

2. データ解析

以降、統計解析にあたる部分はR 4.0.3 (R Core Team 2020) を用いて実施した。まず、測定した形質間の相関関係をピアソンの積率相関係数によって求めた。解析したのは幹材積 V とそれ以外の4形質 (H , DBH , v_p , P_d) の間の関係、ならびに、材質関連形質 (v_p , P_d) の間の関係とした。

続いて、選抜の対象形質とした V , v_p , P_d については、遺伝的特性を示す指標である育種価 (子の育種価) を推定した。立木を測定して得られる値 (表現型値) は遺伝的特性のほか、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。そのため、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遺伝的特性を正確に踏まえた選抜を実施できるとされている (石塚 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調査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breedRパッケージを用い (Munoz and Sanchez 2019), 遺伝以外の影響としてブロックの効果と林縁の効果候補変数とした線形混合モデルを構築した。林縁の効果に関する変数は、プロット端の林道に面した林縁個体 (図-1 参照) の場合に 1, それ以外に 0 となる二値変数として指定した。ただし、候補変数が実際に対象形質へ影響を及ぼすかどうかはわからない。そこで、固定効果に両候補変数を組み込んだモデルを構築した後、変数減法を用いてモデル選択した。モデルのBIC (Bayesian information criteria) に基づいて、最もBICを低くする候補変数のみを残したモデルを最終的に採択して育種価を推定した。各形質のモデルで採択された固定効果は、Vが林縁の効果、 v_p , P_d はともにブロックと林縁の効果だった。推定結果に基づき、母親の育種価と狭義の遺伝率 (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ると判断されるため、5段階評価値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を実施した：

- 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。また、検定苗のうち親が精英樹クローンではない一部家系 (X1~X4; 表-1 参照) は、項目6において選抜対象から外すこととした。

机上での選抜を済ませた後、2020年11月に現地に出向き、各抽出個体に外見上の欠陥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世代精英樹候補木とした。最後に、選抜による改良効果を求めた。改良効果は林分平均に対する選抜個体の平均育種価の割合 (%) で、V, v_p , P_d のそれぞれの形質について算出した。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表す。

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。検定に供した家系のH, DBH, Vの平均はそれぞれ13.1 m, 17.1 cm, 0.1845 m³だった。事業用苗の平均と比べると、それぞれ9.9%, 9.1%, 26.2%高かった。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によるものと考えられる。5, 10年生樹高を比べた黒丸 (1997) も精英樹次代の成長の優位性を報告しており、事業用苗と比べて樹高がそれぞれ11.0%, 13.5%高かったことが示されている。本研究からはさらに、精英樹次代の優れた成長は30年生時においても変わることなく発揮されていること、材積成長で比べれば事業用苗との差はさらに明瞭であることがわかる。

本検定林では成長・材質評価に加えて、2項目 (根元曲が

表-2 アカエゾマツ次代検定林で測定した各形質の要約統計量

対象	形質	単位	個体数	家系数	平均	標準偏差	最小値	最大値
成長 (30年時)	H	m	748	18	13.1	2.0	1.3	17.7
			166	4 [†]	11.9	2.2	2.7	17.3
	DBH	cm	748	18	17.1	3.9	1.4	31.5
			166	4 [†]	15.6	3.9	2.9	24.5
	V	m ³	748	18	0.1845	0.0937	0.0005	0.7015
			166	4 [†]	0.1462	0.0782	0.0012	0.4441
材質 (33年時)	v_p	m/sec.	254	18	3986	244	3390	4684
	P_d	mm	254	18	24.4	2.3	16.5	30.5
曲がり (33年時)	根元曲がり	(5段階)	239	18	4.2	0.7	2	5
	幹曲がり	(5段階)	239	18	3.8	0.7	2	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
[†]: 比較対象とした事業用の4家系 (表-1 参照) について集計したことを示す

り・幹曲がり)で通直性の評価を行った(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もしくは5が付与されており(図-2),その割合は、根元曲がりに関しては全体の83.7%,幹曲がりに関しては全体の66.9%だった。本検定林は多雪地域に設定されており、雪圧等による曲がりの懸念もあったが、採材に関して特段に憂慮すべき曲がりは発生していないと判断された。また、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こと、植栽立地との交互作用はなかったために育種効果が期待できる形質であることを報告している。このことから、今回の選抜において、根元曲がり、もしくは幹曲がりが少なくとも評価値3以下をつける個体を第2世代候補木から排除することによって、今後、通直性に対して遺伝的な劣化が心配されるような状況も生じないと考えられた。

相関解析の結果、VはH、DBH、 v_p 、 P_d のどれとも有意な相

関を示すことがわかった(表-3)。VはHとDBHの2乗によって構成される。HとDBHの相関係数が高かったこと、ならびに、後者がVとより強い関わりを示したことは、Vの算出における構成要素と矛盾がなかった。Vについてはその一方で、 v_p と負の、 P_d と弱い正の相関を示した。あわせて、 v_p と P_d の間に負の相関があった。なお、 P_d のみ、値が小さい方向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あり、本検定林では成長・材質の両面を考慮した選抜効率が低いと解釈できた。

算出した母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)の母親クローンのうち、たとえばFam7、Fam1、Fam8、Fam12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。母親の違いによる育種価のばらつきが観察され、最大値と最小値、ならびにそ

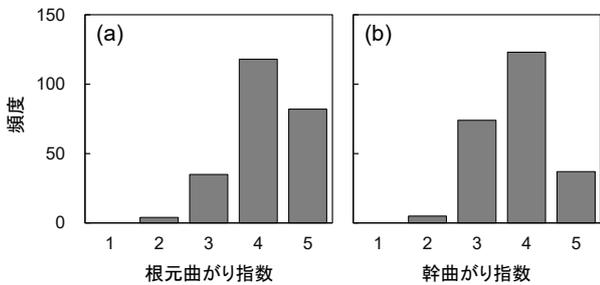


図-2 対象個体の根元曲がり指数(a)と幹曲がり指数(b)の分布

表-3 形質間の相関

変数	r	p
V vs. H	0.7465	<0.00001
V vs. DBH	0.9589	<0.00001
V vs. v_p	-0.3017	<0.00001
V vs. P_d	0.1773	0.00599
v_p vs. P_d	-0.3614	<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

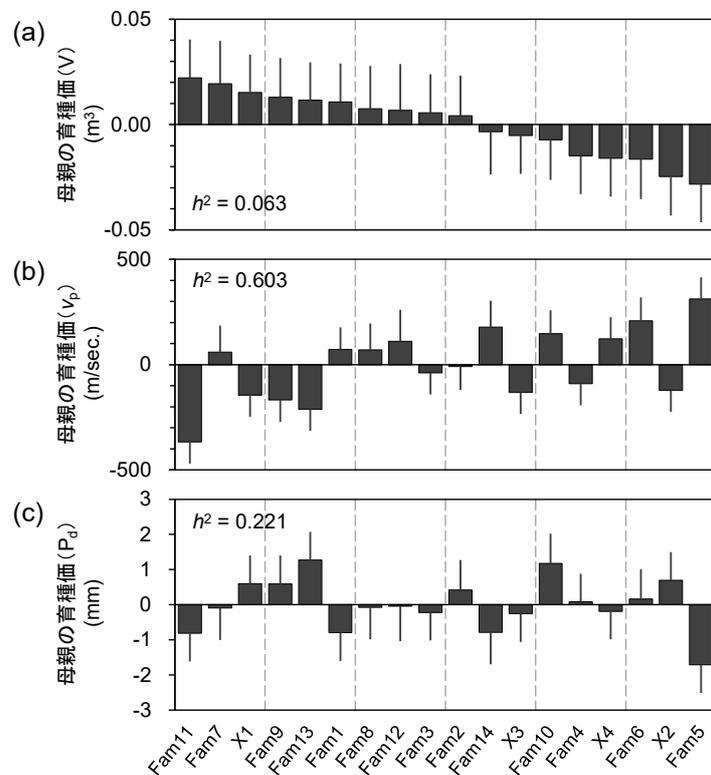


図-3 幹材積(a)と応力波伝播速度(b)ならびにピロディン貫入量(c)に対する母親の育種価の推定値と遺伝率

母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。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。

これらの林分平均値（表-2）に対する割合は、 V が0.0222 m^3 (12.0%), $-0.0283 m^3$ (15.3%), v_p が312 m/sec. (7.8%), $-363 m/sec.$ (9.2%), P_d が1.272 mm (5.2%), $-1.714 mm$ (7.0%)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効果が最も大きい形質であることがわかる。

V, v_p, P_d それぞれにおける狭義の遺伝率 (h^2) は0.063, 0.603, 0.221となった（図-3）。 h^2 は成長に関して低い一方、材質に関しては高かった。このような傾向は先行研究でも認められる（花岡ら 2018; 2019; 飯塚 2002; 飯塚ら 2000）。直径成長を表す年輪幅と、材質の一形質である容積密度を対象としてアカエゾマツの精英樹クローンを検定した飯塚（2002）は、年輪幅よりも容積密度において遺伝的要因の寄与が高いとまとめている。第2世代精英樹候補木の選抜を行った花岡ら（2018）や花岡ら（2019）の報告からは、どの次代検定林においても、樹高や胸高直径の遺伝率よりも応力波伝播速度の遺伝率が高い傾向をみることができるとともに、本研究では樹

高や胸高直径の遺伝率は求めていないために厳密な比較には留意が必要だが、本研究で示された成長に関する遺伝率は、これらの先行研究の値より低いという点も指摘できる。先行研究にて報告されるアカエゾマツの樹高や胸高直径の遺伝率は0.16~0.56で、来田ら（2001）による苗畑生育時の苗高における遺伝率も0.195~0.385である。本研究の幹材積で推定された遺伝率はこれらと比べて低いが、これは1つには評価形質の違いによる可能性がある。伸長成長と肥大成長の一方を評価する樹高や胸高直径とは異なり、幹材積は伸長・肥大両方向の成長が影響する複合的な形質であり、このことが遺伝率の低さに関わったのではないかと考えられる。そのほか、立地環境や年齢も成長関連形質の遺伝率に影響した可能性がある。次代検定林では定期調査が継続されていることから、今後、統一形質の遺伝率を検定林間、検定林内、年齢間で比較し、上記の可能性を検証していくことが求められる。

子の育種価を図-4に示すと、どの形質でもおおよそ一山型の分布となった。図中には同時に、各形質の選抜基準も示

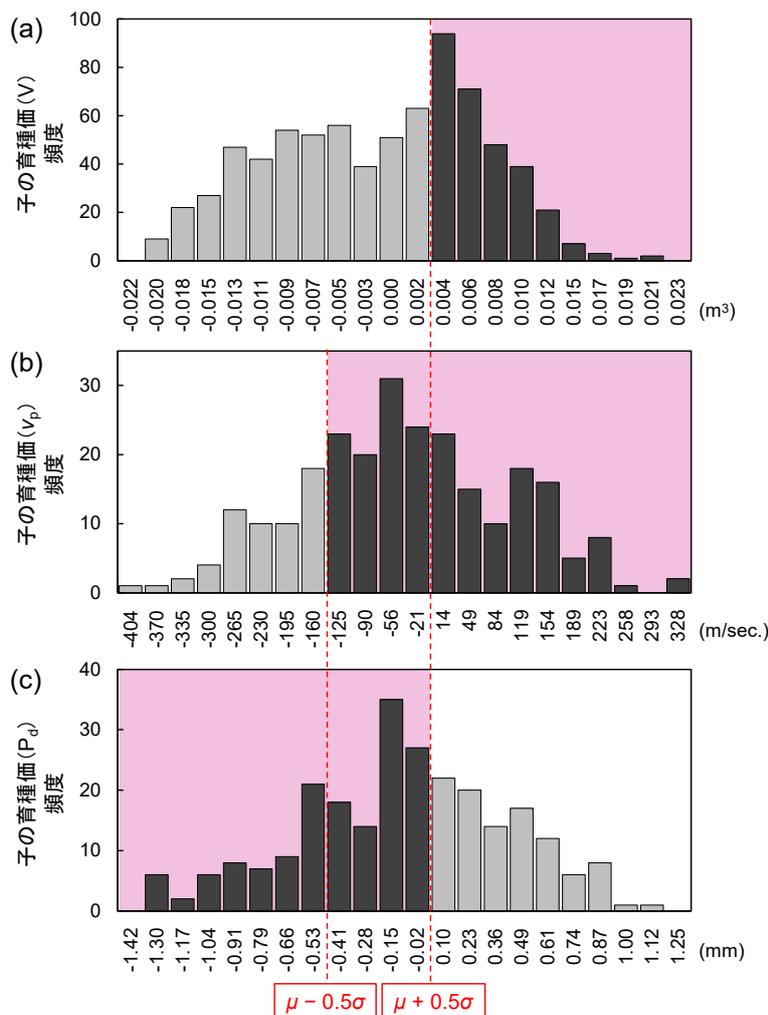


図-4 幹材積 (a) と応力波伝播速度 (b) ならびにピロディン貫入量 (c) に対する子の育種価の頻度分布と選抜基準

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、頻度分布は黒棒で示した。

した(図-4 網掛け領域)。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形質すべてが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34個体となった。これは、全形質を評価したのべ239個体の14.2%、また、P4検定林にて現存する全検定個体748個体の4.5%にあたる。選抜項目6の基準も満たし、机上選抜されたのはこのうち20個体だった。これは全形質を評価した個体の8.3%、全検定個体の2.7%にあたる。現場での確認からは、樹幹の形状が完満ではない1個体について選抜個体から外すべきであると判断されたが、家系重複がある他の候補個体と入れ替えることで対応が可能だった。入れ替え後の20個体においては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20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。選抜個体の情報は表-4に示す。本選抜の選抜率は上記に示す2.7%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 との間に明瞭な負の相関関係があり、両形質値が優れる個体が出現しにくい傾向があった(図-5)。2.7%という選抜率の低さは、主に、この拮抗する複合形質を基準に選抜を図ったことによる。なお、V、 v_p 、 P_d で算出した5段階の評価値は、育種

価の分布が正規分布であることを仮定している。そこで、模擬的な数値計算のため、選抜に用いた形質(V、 v_p 、 P_d)がすべて平均 μ 、分散 σ^2 に従う正規分布をとり、かつ、互いに無相関($r=0$)であると仮定する。この場合、評価値3、4、5に分類されるサンプルの割合はそれぞれ38%、24%、7%となる。Vにおいて評価値4以上、残り2形質(v_p 、 P_d)で評価値3以上とする選抜基準をすべて満たすサンプルの期待割合を求めると14.8%と算出される。もしも、Vと材質関連形質のどちらか1形質(計2形質)で選抜基準を設けた場合には、期待されるサンプルの割合は21.4%となる。実際の選抜はさらに通直性、遺伝的多様性も考慮した総合評価であるため、これらの数値と実際の選抜率とを比較することには留意が必要だが、相関があることによって選抜率に影響が出ているのは確かからしかった。

なお、筆者らが第2世代精英樹選抜事業の中で実施したトドマツの選抜時には、このような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なかった(石塚ら 2015)。一方、アカエゾマツにおいてクローン検定を行った先行研究によれば、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 2002;

表-4 選抜したアカエゾマツ第2世代精英樹候補木の情報と形質値

個体名称	家系プロット	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2-121	Fam2	1	9	211	14.7	23.6	0.3507	4024	25.0	5	4
アカエゾマツ北育2-122	Fam2	1	5	411	14.4	21.7	0.2934	3817	22.5	4	4
アカエゾマツ北育2-123	Fam3	1	2	201	14.5	25.0	0.3853	4000	27.0	4	4
アカエゾマツ北育2-124	Fam3	1	8	401	15.0	20.8	0.2826	3766	26.0	4	4
アカエゾマツ北育2-125	Fam8	1	12	219	14.3	20.7	0.2667	3914	25.0	5	4
アカエゾマツ北育2-126	Fam9	1	6	105	15.7	23.2	0.3632	3914	23.0	5	5
アカエゾマツ北育2-127	Fam11	1	1	404	14.8	21.3	0.2914	3984	25.5	5	4
アカエゾマツ北育2-128	Fam1	2	10	232	15.3	20.7	0.2857	4386	23.0	4	4
アカエゾマツ北育2-129	Fam2	2	1	223	16.7	24.7	0.4350	4329	22.5	4	4
アカエゾマツ北育2-130	Fam3	2	1	325	14.8	19.2	0.2399	4073	22.0	5	4
アカエゾマツ北育2-131	Fam7	2	8	129	16.1	25.2	0.4351	4396	24.5	5	5
アカエゾマツ北育2-132	Fam7	2	10	329	14.4	20.2	0.2566	3976	23.5	5	4
アカエゾマツ北育2-133	Fam7	2	14	429	13.6	18.8	0.2116	4065	23.0	4	4
アカエゾマツ北育2-134	Fam8	2	5	112	14.4	22.5	0.3140	4107	24.0	4	4
アカエゾマツ北育2-135	Fam8	2	7	212	13.1	21.0	0.2506	4193	25.5	5	4
アカエゾマツ北育2-136	Fam14	2	14	108	14.5	25.2	0.3911	4132	21.0	5	5
アカエゾマツ北育2-137	Fam1	3	2	136	14.2	23.1	0.3252	4246	25.5	5	4
アカエゾマツ北育2-138	Fam1	3	12	236	14.8	21.9	0.3070	3968	23.0	5	4
アカエゾマツ北育2-139	Fam9	3	4	437	13.8	22.4	0.2982	4167	19.5	5	5
アカエゾマツ北育2-140	Fam9	3	14	237	13.2	20.3	0.2370	4367	22.0	5	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

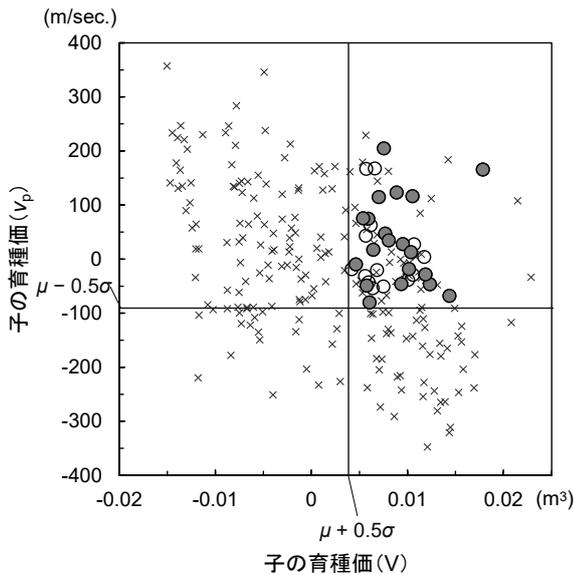


図-5 幹材積 (V) と応力波伝播速度 (v_p) それぞれの子の育種価の分布と選抜個体

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、このうち選抜された個体を灰色丸で示した。図中に引いた2本の直交する線は、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)。

飯塚ら 1999)。これらのことから、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傾向がある。トドマツにおいてはみられなかった成長と材質の関連性はアカエゾマツの種特性として捉えられるのかもしれない。ただし、生育立地の影響や年齢に伴う変化がみられる可能性もあるため、今後さらにアカエゾマツの次代検定の結果を蓄積し、再検証していく必要がある。成長と材質に関連性があり、同時に両形質の大幅な改善を図れる見込みが少ないというのがアカエゾマツの種特性であるならば、同種の育種戦略において育種目標や対象形質をどう設定するか、留意する必要があるだろう。

選抜した20個体の育種価の平均値を求めると、V、 v_p 、 P_d それぞれ0.0090、33.5、-0.138となり、改良効果は5.12%、1.37%、0.47%と、すべての形質が選抜によって改良されると見込まれた(表-5)。改良効果はVにおいて最も高かったが、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(表-5；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。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。各々の形質の改良効果は目覚ましい値ではないが、これらの取組みを重ねていくことで優良な育種素材を拡充していくことが重要である。

引用文献

逢沢峰明 (2017) 日本の森林樹木の地理的構造 (19) アカエゾマツ (マツ科トウヒ属). 森林遺伝育種 6: 160-165
 安久津久・飯塚和也 (1998) アカエゾマツ造林木の材質検定 (II)-精英樹クローンの材質-. 林産試験場報 12: 13-21
 花岡創・武津英太郎 (2019) 試験地から得られた成果の紹介-北適応北見3号検定林(アカエゾマツ)-. 北海道の林木育種 62 (2) : 16-20
 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年版: 100-102
 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
 畠山末吉 (2017) 北海道林木育種協会と60年を省みて. 北海道の林木育種 60 (1) : 6-9
 北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場 (2018) アカエゾマツ人工林施業の手引. 99 pp. 地方独立行政法人北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場, 美唄
 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

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	評価値4以上	0.0090	0.1935	5.12
v_p	m/sec.	評価値3以上	33.5	4019.4	1.37
P_d	mm	評価値3以上	-0.138	24.222	0.47

V；幹材積、 v_p ；応力波伝播速度、 P_d ；ピロディン貫入量

- 画学会誌 44: 23-39
- 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ーンの材質変異. 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ーンの成長と材質諸性質の比較解析. 日本林学会誌 82: 80-86
- 井城泰一・田村明・西岡直樹・阿部正信・来田和人・安久津久 (2005) トドマツ・アカエゾマツの立木材質の評価. 北海道の林木育種 48 (1) : 13-15
- 石塚航・今博計・来田和人 (2015) 根釧地域におけるトドマツ第二世代精英樹の選抜. 光珠内季報 176: 9-14
- 来田和人 (2000) アカエゾマツ精英樹家系の成長-良い苗木を適したところに-. 光珠内季報 119: 9-12
- 来田和人 (2002) アカエゾマツ精英樹の通信簿(特性表Ver.1). 光珠内季報 127: 14-17
- 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)
- 今博計・来田和人・石塚航・黒丸亮 (2016) 各都道府県の林業・林産業と遺伝育種の関わり (7) 北海道. 森林遺伝育種 5: 230-234
- 黒丸亮 (1997) アカエゾマツ育種種苗は事業用と比べどの程度優れているか. In: 北海道林木育種協会 (編) 北海道の森林づくりと林木育種. 北海道林木育種協会, 北海道, pp 49-50
- Munoz, F. and Sanchez, L. (2019) breedR: Statistical methods for forest genetic resources analysts. R package version 0.12-4
- 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
- 大庭喜八郎・勝田柁 (1991) 林木育種学. 337pp. 文永堂出版, 東京
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- Tanabe, J., Tamura, A., Hamanaka, M., Ishiguri, F., Takahashi, Y., Ohshima, J., Iizuka, K. and Yokota, S. (2014) Wood properties and their among-family variations in 10 open-pollinated families of *Picea jezoensis*. Journal of Wood Science 60: 297-304
- Wang, T., Aitken, S., Rozenberg, P., and 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の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 1986 in the experimental forest of Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization. Stem volume (V), a growth-related trait, was measured when trees were 30 years old. Two wood quality traits were also measured for each tree when they were 33 years old, 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. 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, 34 candidate trees (4.5% of total surviving progeny) were selected for more thorough evaluation, and ultimately 20 trees (2.7% selection rate) were selected. At this evaluation site, V was significantly, negatively correlated with v_p ($r = -0.3017$) and weakly correlated with P_d ($r = 0.1773$). Due to these relationships, the number of trees that represented both superior growth and desirable wood qualities were relatively limited. The 20 selected trees are expected to improve by 5.12% on average for V and 1.37% and 0.47% 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