

## 北海道東部太平洋側地域におけるトドマツ優良個体の新規選抜

石塚 航\*・成田あゆ\*\*・今 博計\*\*・米澤美咲\*\*・来田和人\*\*  
中田了五\*\*\*・加藤一隆\*\*\*・生方正俊\*\*\*・花岡 創\*\*\*\*

### Selecting superior trees of *Abies sachalinensis* in Pacific Ocean side of eastern region of Hokkaido

Wataru ISHIZUKA\*, Ayu NARITA\*\*, Hirokazu KON\*\*, Misaki YONEZAWA\*\*, Kazuhito KITA\*\*  
Ryogo NAKADA\*\*\*, Kazutaka KATO\*\*\*, Masatoshi UBUKATA\*\*\*, So HANAOKA\*\*\*\*

#### 要旨

北海道の主要造林樹種であるトドマツの育種においては、第二世代を担う優良個体の前方選抜が進み、種苗を配布するそれぞれの地域にて第二世代精英樹候補木が拡充されている。その中で唯一、評価の適齢期に達するも未だ検定・選抜が実施されていなかった、北海道東部太平洋側地域に位置するトドマツ次代検定林（豊頃町）を対象として、40年生時の成長特性（幹材積）と43年生時の材質特性（応力波伝播速度、ピロディン貫入量）の調査を行った。続いて、これらの形質に関する遺伝的特性を評価し、成長と材質特性に優れ、かつ、通直性と遺伝的多様性について劣らないよう、総合的な選抜基準を設けて選抜を実施した。その結果、19個体が選抜基準を満たした。外見上の問題がないことの現地確認を行った後、これら全個体を優良木として指定した。選抜個体において期待される改良効果は幹材積で24.1%、応力波伝播速度で1.6%、ピロディン貫入量で1.8%となり、当該地域の優良種苗生産に貢献する第二世代としての活用が期待できる。

キーワード：精英樹選抜，林木育種，トドマツ，材積，材質

#### はじめに

人工林の主伐・再造林がこれから一層進められていく中、再造林を成功させ、より生産力の高い林を育成し、さらには、より高い価値の素材を生産するためには、再造林の最初の一手である“苗木の選択”が重要な事項になる。どのような種苗を選択すべきか、という部分には2つの要素がある。1つは植栽地の風土へ最も適した種類の種苗を選択する、いわゆる“適地適木”の実践である。なお、ここでいう適木とは、単に樹種選択にとどまらず、一樹種内でも産地の違いなど適・不適が生じうる種苗の選択のことも含めている。もう1つは遺伝的に優良な種苗の活用である（White et al, 2007）。具体的

には、林木育種の取り組みの中で選抜された、遺伝的に優れると期待できる“精英樹”の後代、すなわち、精英樹によって生産された種苗を造林に用いることである。優良種苗の活用はわが国の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」でも取り上げられており、国策として今後も推進していく事項である（経済産業省 2021）。

北海道における主要造林樹種の一つ、トドマツ（*Abies sachalinensis*）を植栽する際には、とりわけ上述2要素をともに無視することができない。なぜなら、北海道全域に広く分布する本種には明瞭な地域適応性が認められ、それを活用した育種が進められてきたからである（石塚 2023a；石塚・津山 2024）。本種は様々な形質において、生育する地域ごとの

\*（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

\*\*\*（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

\*\*\*\* 国立大学法人静岡大学農学部 Faculty of Agriculture, Shizuoka University, Shizuoka, Shizuoka, 422-8529

[北海道林業試験場研究報告 第61号 令和6年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 61, March, 2024]

気候・環境の違いに沿った遺伝的変異があることが古くより知られており、たとえば、成長量、成長／休眠の季節性、また、雪害、凍害、寒風害、雪腐病被害など諸被害への抵抗性の高さなどに変異が報告される（畠山 1981；北村ら 2021）。とくに成長・生残において適・不適が明瞭に表れるため、もとの生育地域と環境が異なる地域への植栽には適さないことが報告されている（石塚 2023a；Ishizuka and Goto 2012；Ishizuka et al. 2021）。このような地域適応性を鑑みて、北海道では需給地域区分を設定し、本種を造林利用する際には、植栽地が含まれる区分の中で選抜された精英樹の後代を用いることとしている（中田ら 2018）。

そのような、それぞれの地域向け優良種苗を用いていくには、遺伝的特性に優れた種子を生産するための採種園が必要不可欠である。優良種苗の将来にわたる安定的な生産・供給を図るため、北海道では「北海道採種園整備方針」と「北海道採種園整備計画」を改定したところである（北海道水産林務部林務局森林整備課 2022a, 2022b）。これらに基づいて道有採種園の整備を積極的かつ、長期的に進めることとしており、トドマツについては、各地域向けの採種園を順に更新していくこと、ならびに、更新・整備にあたっては、新規に選抜された優良個体を積極的に活用していくことがうたわれている。直近では、西南部向けのトドマツ採種園、および、東部向けのトドマツ採種園の新規造成に着手し、第二世代の優良個体も採種園の構成個体に加えた整備を進めている（石塚 2022, 2023b；石塚ら 2018）。なお、一般的に、採種園を構成する親木の系統数が多いほど、生産される種苗の遺伝的多様性が担保されるために望ましいといわれ（White et al. 2007）、優良個

体の拡充は大きな意義を有している。将来のトドマツ採種園産種苗の品質向上のためにも、より多くの優良個体が選抜されるように育種の取り組みを進めていくことが必要である。

これまでトドマツでは、さらなる遺伝的改良を図るため、遺伝的特性を適切に評価できる試験地である次代検定林を造成し、次代検定林における成績に基づいて検定と選抜を順次進めてきた（石塚ら 2015, 2016；中田ら 2018；大谷ら 2015；田村ら 2012, 2013, 2014）。まず、次代検定林では、精英樹を親とする子ども（次代）を植栽し、その諸形質を調査することで、家系の遺伝的な優劣について情報を得ることができる。このとき、どの親が種子親として優れていたかを評価すれば、親の検定結果に基づいて優れた親を選抜することができる。このような、親を選抜する考え方を「後方選抜」(backward selection) と呼ぶ。一方、次代の評価に基づいて、次代検定林を構成する次代そのものの遺伝的評価も可能であり、検定結果に基づいて遺伝的に優れた次代個体の選抜が可能である。このように選抜する考え方を「前方選抜」(forward selection) と呼ぶ。なお、次代検定林の調査では、兄弟個体（同一家系の子ども）についても諸形質を測定する。そのため、統計学的な解析により、兄弟個体の血縁情報と形質情報を加味した次代の評価が可能となる。これにより、観測値のみによる選抜よりも高い確度で遺伝的に優れた個体を選抜することが可能となるため、前方選抜では通常、遺伝的特性の推定が統計解析によって行われる。トドマツにおいても、一連の取り組みによって検定と前方選抜が行われ、これまでに、道内の全地域でのべ444個体の「第二世代精英樹候補木」および「優良木」が選抜され（表-1；石塚ら 2016；中田ら 2018）、

表-1 トドマツにおける第二世代精英樹候補木・優良木の選抜状況

育種区*1	需給地域区分*2	第二世代精英樹候補木 (名称*3)	優良木 (名称*3)	文献*4
東部	東部	121 個体 (北育 2-227~347)	<b>新規 19 個体</b> (優良木 98~116)	大谷ら (2015), 本報告
	根釧	-	45 個体 (優良木 53~97)	石塚ら (2015)
西南部	西南部 (太平洋側)	39 個体 (北育 2-27~65)	20 個体 (優良木 33~52)	田村ら (2013), 田村ら (2014)
	西南部 (日本海側)	83 個体 (北育 2-1~26, 66~122)	32 個体 (優良木 1~32)	田村ら (2012), 田村ら (2013)
中部	中部	104 個体 (北育 2-123~226)	-	田村ら (2014)
北海道育種基本区 [合計]		347 個体	97 個体+ <b>新規 19 個体</b> [444 個体+ <b>新規 19 個体</b> ]	

\*1 北海道育種基本区の中で 3 区分される。久保田 (2015) に従う。

\*2 トドマツの地域適応性を鑑みて、3 区分される育種区をよりよい種苗生産・配布のために 5 区分に細区分したもの。中田ら (2018) に従う。

\*3 名称の頭には樹種名「トドマツ」がつく。例：「トドマツ北育2-1」, 「トドマツ優良木1」。

\*4 このほか、第二世代精英樹候補木・優良木全体の選抜状況は石塚ら (2016) および中田ら (2018) も参照のこと。

ここからさらに「エリートツリー」や「特定母樹」が選抜された(加藤 2021)。検定と選抜は、成長や材質関連形質の評価が可能な適齢の次代検定林を対象として順次進められたが、残り1ヶ所、需給地域区分では東部に属し、東部の中でも太平洋側地域に位置するトドマツ検定林の1つが未検定であった。本試験地は植栽後40年を越え、評価の適齢期を過ぎていることから、第二世代の優良個体の拡充のためにも速やかな検定・評価が望まれる。

そこで本研究では、更新・整備が計画される採種園における構成個体としての活用、ならびに、これからのトドマツ育種戦略における活用を念頭に、北海道東部太平洋側地域において新たに優良個体を選抜し、トドマツ遺伝資源の拡充を図ることとした。そのため、道内全域より選抜された精英樹家

系によって構成されており、かつ、植栽後40年を越えた検定林を対象として成長および材質関連形質の遺伝的特性を把握するとともに、通直性や遺伝的多様性も考慮した総合評価に基づいて優良な個体を前方選抜した。この選抜を通して、どのくらい優良木を選抜できるか、期待される形質の改良効果はどのくらいか、選抜個体の由来産地の構成に偏りはあるか、を明らかにした。

## 材料と方法

### 1. 検定林概要と調査

調査ならびに選抜を実施した試験地は、豊頃町にある道有林浦幌経営区203林班80小班(北緯42.731度, 東経143.491度, 標高150~200 m)に位置するトドマツ準次代検定林A37で、北

表-2 トドマツのA37準次代検定林の供試家系

#	解析用区分*1		家系番号	母樹名	#	解析用区分*1		家系番号	母樹名
	略号	地域名				略号	地域名		
1	ES	東部太平洋側	ES-01	池田 15 号(林)	30			EE-08	厚岸 121 号(林)
2			ES-02	池田 20 号(林)	31			EE-09	厚岸 123 号(林)
3			ES-03	池田 27 号(林)	32			EE-10	厚岸 125 号(林)
4			ES-04	池田 29 号(林)	33			EE-11	別当賀 2 号
5			ES-05	池田 33 号(林)	34			EE-12	別当賀 6 号
6			ES-06	池田 34 号(林)	35			EE-13	別当賀 7 号
7			ES-07	池田 38 号(林)	36			EE-14	別当賀 8 号
8			ES-08	池田 40 号(林)	37			EE-15	別当賀 9 号
9			ES-09	池田 102 号(林)	38			EE-16	別当賀 11 号
10			ES-10	池田 111 号(林)	39			EE-17	別当賀 12 号
11			ES-11	池田 114 号(林)	40	S	西南部太平洋側	S-01	浦河 1 号(林)
12			ES-12	池田 115 号(林)	41			S-02	浦河 3 号(林)
13			ES-13	池田 116 号(林)	42			S-03	浦河 4 号(林)
14			ES-14	池田 117 号(林)	43			S-04	浦河 5 号(林)
15			ES-15	浦幌 101 号(林)	44			S-05	浦河 8 号(林)
16	EN	東部オホーツク海側	EN-01	北見 1 号(林)	45			S-06	浦河 103 号(林)
17			EN-02	北見 5 号(林)	46			S-07	浦河 106 号(林)
18			EN-03	北見 6 号(林)	47	W	西南部日本海側	W-01	苫小牧 101 号(林)
19			EN-04	北見 7 号(林)	48			W-02	苫小牧 106 号(林)
20			EN-05	北見 105 号(林)	49			W-03	留萌 2 号(林)
21			EN-06	北見 107 号(林)	50	N	北部	N-01	興部 1 号(林)
22			EN-07	北見 110 号(林)	51			N-02	興部 3 号(林)
23	EE	東部根釧地域	EE-01	厚岸 101 号(林)	52			N-03	興部 4 号(林)
24			EE-02	厚岸 107 号(林)	53			N-04	名寄 8 号(林)
25			EE-03	厚岸 110 号(林)	54			N-05	名寄 11 号(林)
26			EE-04	厚岸 115 号(林)	55			N-06	美深 8 号(林)
27			EE-05	厚岸 116 号(林)	56			N-07	美深 9 号(林)
28			EE-06	厚岸 117 号(林)	57			N-08	美深 10 号(林)
29			EE-07	厚岸 119 号(林)					

\*1 全道網羅的な解析のために5区分される需給地域区分(表-1)を7区分に細区分したものの。区分はA37準次代検定林を含む1980年造成の検定林セットを扱った先行研究(Ishizuka et al. 2021; Tsuyama et al. 2020)に従う。なお、函館地域に分類される家系がなかったため、表中には6区分しか表記されていない。

#33(EE-11 別当賀2号)~#39(EE-17 別当賀12号)は精英樹ではない。また、選抜林分の位置は、#47(W-01 苫小牧101号(林))と#48(W-02 苫小牧106号(林))がむかわ町、#49(W-03 留萌2号(林))が増毛町で、先行研究において解析用区分W(西南部日本海側)に分類したため(Ishizuka et al. 2021; Tsuyama et al. 2020)、本研究でも同一の区分に分類した。上記リストのほかに、対照として事業用苗が植栽される。

海道育種基本区における東部育種区内にある。検定林の造成は1980年（昭和55年）で、すでに第二世代精英樹選抜が終了した別地域の準次代検定林A32（新冠町）、A33（美唄市）、A38（浜中町）と同一年に同一セットの苗木を用いて造成された、トドマツの地域適応性の実態を評価することのできる大規模な試験地の一つである。植栽には、検定用として用意された苗（検定苗）と、対照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、主に北海道全域の道有林・一般民有林で選抜された第一世代精英樹の原木を母樹（母親）とし、自然交配で得られた種子に由来する。試験では母親を同一とする子どもを家系とし、苗木は家系別に管理して仕立てられた。家系数はのべ57となり、一覧（表-2）に示すとおりである。家系は親の産地によって区分した。区分の際には、1980年造成の検定林セットを扱った先行研究（Ishizuka et al. 2021；Tsuyama et al. 2020）に従うこととし、需給地域区分を細区分し、名称整理した解析用区分を用いることとした。なお、一部、精英樹ではないが、東部根釧地域において選抜された個体を親とする家系も含めた。また、事業用苗については、道内の各地で当時用いられた造林用苗と、精英樹ではない周辺木から採種して仕立てた苗が用いられた。

本検定林の配植は10本×3列の30本を1プロットとしたプロット植栽によるものとし、検定林内を3つの反復処理（ブロック）に分け、各ブロック内ではプロットを無作為配植して造成した。植栽時は苗列間1.8 mの本数密度3,000本/haであった。40年生の定期調査までに2回の列状間伐が実施され、40年生調査時にはおよそ半数のプロットが2列残存、残り半数が1列残存だった。

測定は成長調査と材質・通直性調査の2回に分けて実施した。成長調査は、40年生となる2019年秋に実施した。まず、全生存木を対象として胸高直径（D）を測定した。検定苗由来個体における調査数は1,504個体だった（表-3）。続いて、検定苗の植栽されたプロットのうち1列を対象に樹高（H）を

測定した。なお、測定列としなかった列でも選抜候補木が見出されたため、後日（後述の材質調査、現地確認時）、樹高を追加調査した。ただし、調査時の年齢に違いがあったため、同時に40年生時に測定済みの個体より無作為抽出して再測定し（N = 130）、追加調査時の樹高から40年生時樹高を推定する回帰式（ $y = 0.81296x + 2.83636$ ）を構築して適用することで、40年生時の補正樹高を求めることとした。樹高の調査個体数はのべ1,009個体となった（表-3）。樹高と胸高直径から幹材積（V；単位 $m^3$ ）を算出し、算出には細田ら（2010）の立木幹材積推定式に基づく計算プログラム（StemVolume（）関数；<https://www.affrc.go.jp/database/stemvolume/index.html>）を用いた。

材質・通直性調査は、43年生となる2022年夏に行った。対象木は、事前に成長が良い候補木を抽出し、当該プロットおよび隣接プロットで選出した個体（プロット内約3個体）とした。検定苗由来個体の調査数は260個体だった（表-3）。調査項目および測定方法については、アカエゾマツ第二世代精英樹候補木の選抜を実施した既報（石塚ら 2021；米澤ら 2023）に準じることとした。材質については、まず、樹幹軸方向における応力波伝播速度（ $v_p$ ；単位 $m/sec.$ ）を調べた。この値は材の強度的性質を示す樹幹のヤング係数に関連する形質となる。測定はFAKOPP（FAKOPP Enterprise, ハンガリー）を用いた。次に、ピロディン貫入量（ $P_d$ ；単位 $mm$ ）を調べた。この値は樹幹の材密度に関連する形質となり、デジタルPilodyn 6J Forest（Proceq, スイス）を用いてピンの貫入深さを測定した。なお、測定には $\phi$  2.5 mmのピンを用いた。通直性は根元曲がりと幹曲がり調べた。評価経験を有する2名により、全く曲がりがない場合を5、曲がり著しいものを1とした5段階の評価値を個体別に評価した。

## 2. データ解析

統計解析にあたる部分はR 4.1.1（R Core Team 2021）を用

表-3 測定した各形質の要約統計量ならびに遺伝率

対象	形質	測定数	平均	標準偏差	最小値	最大値	$h^2$
成長 40年生	D (cm)	1504	23.3	5.6	3.5	41.5	0.094
		582 <small>事業用</small>	23.5	5.2	6.2	40.4	
	H (m)	1009	18.4	3.0	3.7	26.0	0.447
	V ( $m^3$ )	1009	0.4907	0.2575	0.0030	1.4703	0.268
材質 43年生	$v_p$ (m/sec.)	260	4259	270	3546	5025	0.491
		65 <small>事業用</small>	4306	286	3460	4988	
	$P_d$ (mm)	260	26.1	2.5	17.8	35.7	0.456
		62 <small>事業用</small>	25.8	2.7	18.5	32.1	

D；胸高直径，H；樹高，V；幹材積， $v_p$ ；応力波伝播速度， $P_d$ ；ピロディン貫入量， $h^2$ ；狭義の遺伝率  
網掛けの部分は対照とした事業用苗由来個体における値。

いて実施した。まず、成長 (D, H, V) および材質 ( $v_p$ ,  $P_d$ ) の全5形質間の連関図を、corrパッケージ (<https://corr.tidymodels.org/>) を用い、全ペアの相関行列に基づいて描いた。

次に、遺伝的特性をbreedRパッケージ (Muñoz and Sanchez 2019) を用いて推定した。解析対象は選抜を実施する検定苗由来個体とし、比較対象となる事業用苗由来個体については解析しなかった。遺伝的特性の推定は、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、分散共分散の推定は制限付き最尤推定法 (REML法; Restricted Maximum Likelihood method) によった。詳細はアカエゾマツでの選抜時の報告 (石塚ら 2021) を参照されたい。なお、モデルには遺伝以外の影響としてブロック効果等を組み込むことができるが、事前検討の際、ブロックの違い等は表現型値へ影響を及ぼさないことがわかったため、遺伝効果のみで構成されるモデルで解析することとした。解析結果より、遺伝的特性として、狭義の遺伝率 ( $h^2$ )、検定する各個体の育種価 (子の育種価)、母親の育種価を推定した。

続いて、測定した全形質に選抜基準を設け、総合評価により優良な個体の前方選抜を実施した。選抜の詳細は、優良個体の選抜にかかる実施要領に基づいたアカエゾマツの選抜と同様のため、既報 (石塚ら 2021) を参照されたい。なお、V,  $v_p$ ,  $P_d$ については、育種価の分布に基づく5段階 (1~5) の評価値を求め、この相対評価で選抜基準を設けた。具体的な選抜基準は以下である：

- 1) Vの育種価が評価値4以上 (育種価が $\mu$  (平均) + 0.5  $\times$   $\sigma$  (標準偏差) よりも大きい)
- 2)  $v_p$ の育種価が評価値3以上 (育種価が $\mu$  (平均) - 0.5  $\times$   $\sigma$  (標準偏差) よりも大きい)
- 3)  $P_d$ の育種価が評価値3以上 (育種価が $\mu$  (平均) + 0.5  $\times$   $\sigma$  (標準偏差) よりも小さい)

なお、基準3にて対象とした $P_d$ は材密度と負の相関関係にある。選抜は材密度を高くする方向で実施することから、 $P_d$ の値が小さいほど優れる、すなわち高い評価となる。したがって、評価値を算出する際には、育種価の評価をVや $v_p$ とは逆方向となるように扱った。

- 4) 根元曲がり評価値4以上
- 5) 幹曲がり評価値4以上
- 6) 系統重複等の考慮 (同一家系からの選抜上限が3個体)

総合評価として、これらすべての項目の選抜基準を満たす個体を最終的な候補木として机上選抜した。机上選抜後、2023年5月に現地に出向き、候補木に外見上の欠陥がないことを確認し、これをもって本選抜とし、トドマツ優良木とした。

次に、選抜による改良効果を求めた。改良効果は育種価に基づき、林分平均に対する割合として各形質で算出した。この値は、次世代に伝わる遺伝的な効果によって、選抜個体を親とした子どもがどれだけ遺伝的改良を見込めるかを表す期

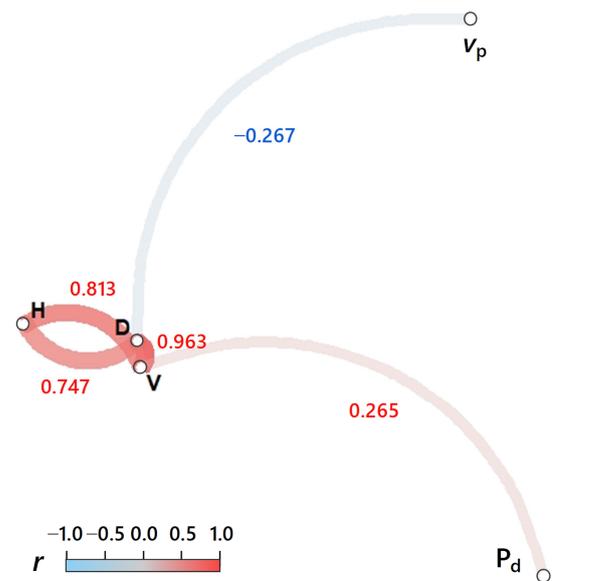


図-1 形質間の連関図

強い相関関係がある形質間で距離が近くなるよう、形質間の連関を二次元平面にプロットした。相関係数 ( $r$ ) の大きい上位5ペアについて、係数値に準じた色の実線で結び、値についても表示した。D: 胸高直径, H: 樹高, V: 幹材積,  $v_p$ : 応力波伝播速度,  $P_d$ : ピロデイン貫入量。

待値である。最後に、トドマツ優良木の情報を整理し、由来産地 (母親の選抜地域) の構成についても集計した。

## 結果と考察

検定に供した家系のD, H, Vの平均はそれぞれ23.3 cm, 18.4 m, 0.4907 m<sup>3</sup>だった。材質に関連する $v_p$ ,  $P_d$ の平均はそれぞれ4.259 m/sec., 26.1 mmだった (表-3)。全生存木を調査対象としたDでは、最小3.5 cmから最大41.5 cmまで測定値は大きくばらつき、林分内には様々なサイズの個体が存在していた。劣勢木・衰弱木も一定数存在していたものの、これらは材質調査の対象外としたため、選抜時の解析からは除外されている。Hは事業用での測定がないために言及できないが、検定用と対照とした事業用の個体との間でD,  $v_p$ ,  $P_d$ にほとんど違いはみられなかった (表-3)。

形質間の連関図からは、成長3形質間は密接に相関しあっていることが確かめられた (図-1)。また、成長 (3形質),  $v_p$ ,  $P_d$ が互いに離れた三角形の特徴的な配置を示していた。成長と $v_p$ の間には弱い負の相関が、 $P_d$ の間には弱い正の相関が認められたものの、総じて、材質2形質間、および成長と材質各形質間の関係性が弱かったことで、このような三角形の配置が示されたと解釈された。これまでに実施されたトドマツ第二世代の選抜においても、とくに成長と材質の形質間相関は認められていない (たとえば、石塚ら 2015)。複数の育種目標を設定して選抜するにあたり、本種においては、ある一形質の改良を図った際に、他の形質も付随して改良しや

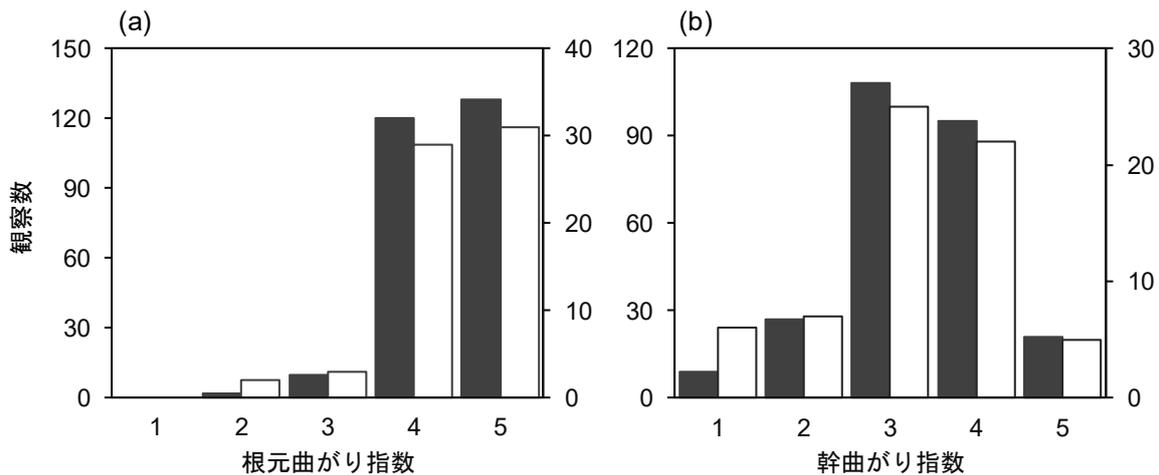


図-2 解析対象および対照個体の根元曲がり指数 (a) と幹曲がり指数 (b) の分布

頻度分布の棒色と軸は、解析対象個体（検定苗由来個体）が黒色・左側、比較対象となる事業用苗由来個体が白色・右側となる。

すい（逆に、拮抗的作用によって改良しにくい）といった事象が起りにくいと考えられた。一方で、アカエゾマツにおいては、成長と材質との間の拮抗的作用が示唆され、選抜効率が良くないことが報告されており（石塚ら 2021；米澤ら 2023）、樹種特性として整理できる可能性がある。こういった知見の集積は、今後、第三世代以降の精英樹の育種戦略を設定していく際に有用になるだろう。

推定された狭義の遺伝率 ( $h^2$ ) は  $V$  が 0.268,  $v_p$  が 0.491,  $P_d$  が 0.456 となった (表-3)。材質形質に比べて成長形質における  $h^2$  が低い傾向は一般的によく認められる。たとえば、同一家系セットの苗を用いた検定林で、根釧地域（浜中町）に造成された A38 で推定した  $h^2$  は、 $V$  が 0.399,  $P_d$  が 0.625 であった (石塚ら 2015)。 $v_p$  については解析していないものの、 $h^2$  の大小関係は本研究と同じだった。また、2021年までに実施されたアカエゾマツにおける第二世代精英樹候補木選抜の一連の取り組みにおいても、のべ 8 検定林のうち 6 検定林において、成長形質よりも材質形質のほうが高い遺伝率を示していた (花岡ら 2022)。成長のほうが材質よりも生育環境の影響を受けやすいといった特性が現れているのかもしれない。

通直性を評価したところ、根元曲がりについては、解析対象とした検定苗由来個体で最頻値が評価値 5 となり、評価値 4 以上の個体の割合が 95.4% だった (図-2)。対照とした事業用苗由来個体では最頻値が評価値 5 で、評価値 4 以上の個体の割合が 92.3% だった。幹曲がりについては、検定苗由来個体と事業用苗由来個体ともに最頻値が評価値 3 で、評価値 4 以上の個体の割合がそれぞれ 44.6% と 41.5% だった。検定苗由来個体と事業用苗由来個体との間ではほぼ傾向は変わらず、調査した A37 検定林では、根元曲がりに懸念はない一方で、幹曲がりに関してはやや懸念がある結果になった。根元曲がりは雪圧が大きくなる多雪地域において生じやすい。本検定林は寡雪地域に設定されていることから、そもそも雪圧等によ

る曲がりが生じにくかったことが、根元曲がりがほとんどみられなかった一因であると考えられた。通直性にも遺伝的影響があり、育種による改良効果が期待できる形質であることから、本研究による選抜によって、とくに幹曲がりに対しては、遺伝的な劣化を回避し、一定の改良が期待できるものと考えられた。

推定した母親の育種価を形質別に図-3 に示す。母親の並び順は全形質で同一で、解析用区分ごとに  $V$  の育種価の高い順とした。それぞれの解析用区分内において育種価は正值から負値までばらつくものの、試験地のある ES (東部太平洋側) では、正值を示す母親の数がやや多い傾向にあった。また、W (西南部日本海側) では、構成する母親数が少ないながら 3 系統とも正の育種価を、N (北部) では全母親が負の育種価を示し、特徴的な傾向だった。トドマツの成長形質には地域適応性があることが知られ、北海道東部における試験地でも、地元産の家系で成長が優れ、遠方地域由来の家系ほど劣る傾向が報告されている (石塚 2023a；Ishizuka et al. 2021；Tsuyama et al. 2020)。明瞭ではないものの、本研究の  $V$  において認められた傾向は、本種の地域適応性と矛盾するものではなかった。なお、 $V$  の育種価の順は、材質 2 形質における育種価の優劣とは関係ないようだった (図-3b, c)。これは個体ごとの形質間の連関図 (図-1) で認められたとおり、成長、材質の間に明瞭な関係性がないことを裏づける結果であった。

母親ごとに評価すると、抜きんでて全形質が秀でていた母親は存在しないものの、全形質の育種価が上位 ( $V$  と  $v_p$  で正值,  $P_d$  で負値) となる系統も存在した (図-3)。とくに、ES (東部太平洋側) の母親のうち ES-14 (池田 117 号 (林))、および、EN (東部日本海側) の母親のうち EN-02 (北見 5 号 (林)) は優良な系統として評価できる。実際、トドマツ第一世代精英樹集団を対象として、優良系統 (1.5 世代精英樹) の選抜を実施した先行研究 (中田ら 2018) において、北見 5 号 (林) が

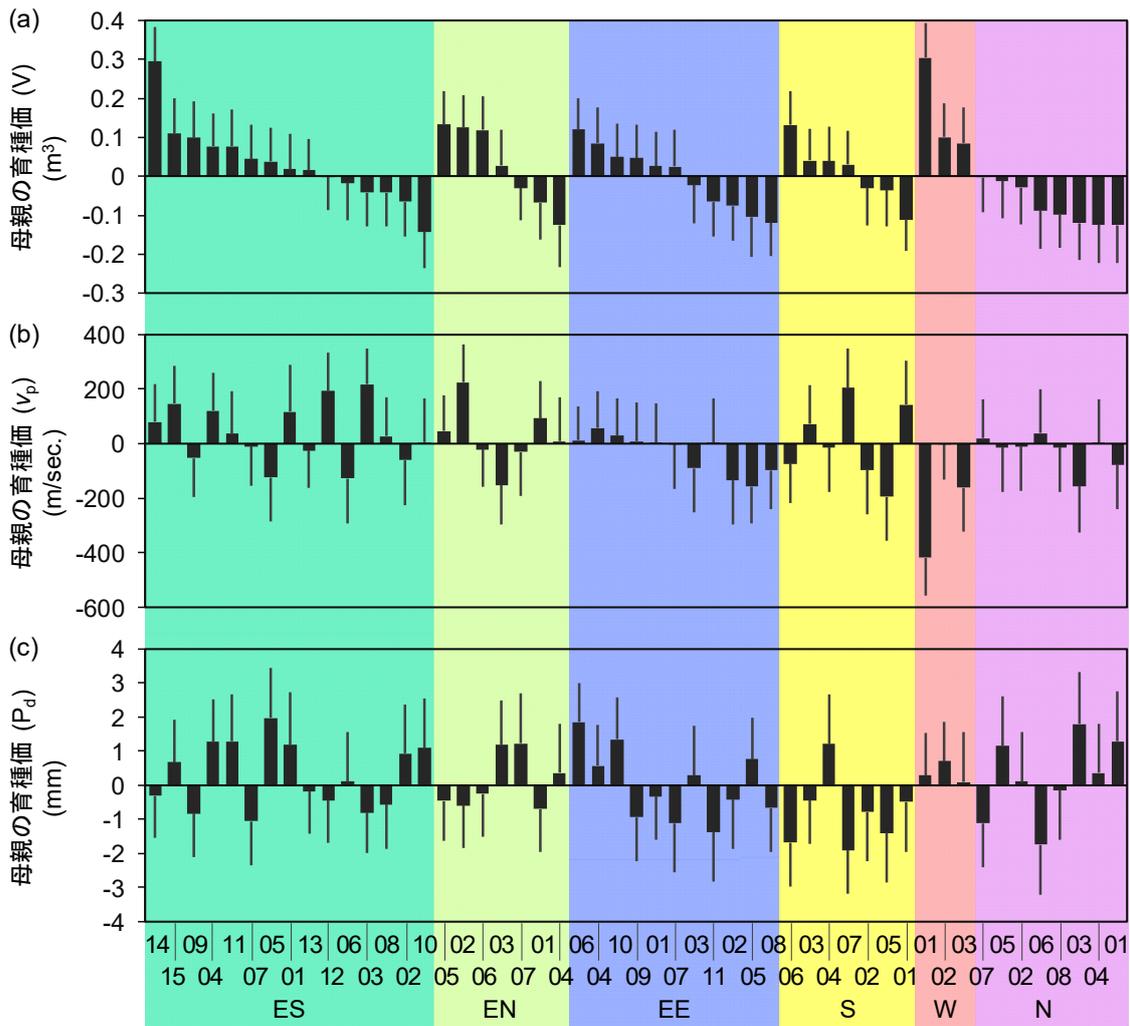


図-3 幹材積 (a) と応力波伝播速度 (b) ならびにピロディン貫入量 (c) に対する母親の育種価の推定値

母親の並び順は全形質において同一で、解析用区別で幹材積の育種価順とした。解析用区分 (略号)、ならびに番号は表-2の家系番号と対応する。エラーバーは標準誤差を示す。なお、全形質で育種価の評価がなされなかったEE (東部根釧地域) の一部の親については示していない。

優良系統として選抜され、池田117号 (林) は生残面での懸念により選抜されなかったものの、成長性において高く評価されていた。本研究における解析の結果、これら2系統の優れた成長特性を再確認できたのに加えて、材質面でも優れた特性を有していることが示されたことから、1.5世代精英樹とともに、北海道東部地域向けの採種園整備の際に積極的な活用が期待できると考えられた。なお、Vにおいて高い育種価を示したいくつかの系統のうち、W (西南部日本海側) の母親W-01 (苫小牧101号 (林)) は、とくに $v_p$ において特筆すべき欠点があると推定された。したがって、今後の採種園整備などの際には、本系統の維持や導入の是非をよく考え、劣った形質を有しない系統への置換を検討することが望ましいと考えられた。

検定苗由来個体について推定したVと材質2形質の育種価 (子の育種価) を図-4に示した。成長と材質の形質間で育種価は大きくばらつき、子の育種価の分布には明瞭な傾向がな

かった。これは、形質連関図 (図-1)、ならびに母親の育種価 (図-3) で認められた結果と矛盾しなかった。図中には、各形質の選抜基準を示すとともに、両形質で基準を満たす領域を色付きで示した。総合評価において合格するためには、図-4aおよび図-4bともに色付き領域にプロットされる (すなわち、選抜項目1~3を満たしている) 必要がある。この基準を満たした候補木の数は44個体だった。ここからさらに、通直性について考慮したところ (すなわち、選抜項目4~5を満たしている)、44個体のうち20個体が基準を満たした (図-4中の丸個体)。続いて家系の重複に関して考慮したところ (選抜項目6を満たす)、北見105号 (林) を母親とする候補木がのべ4個体いたことがわかり、うち1個体を家系重複のために除いた。したがって、机上選抜において、総合評価の全基準を満たした候補木は19個体となった (図-4中の灰色塗り丸個体)。

これら候補木について、外見上とくに欠点のないことが現

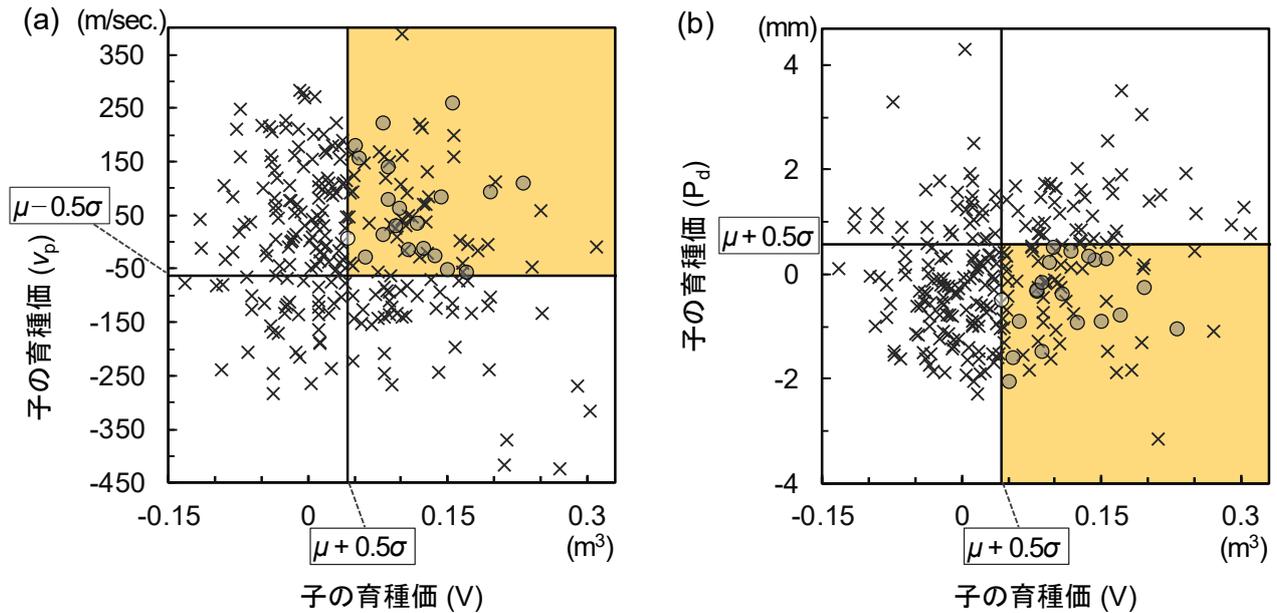


図-4 成長-材質間の子の育種価の分布と選抜個体

aが幹材積 (V) と応力波伝播速度 ( $v_p$ ) の間の育種価分布, bが幹材積 (V) とピロディ貫入量 ( $P_d$ ) の間の育種価分布。図中に引いた2本の直交する線はそれぞれの形質の選抜基準を示し、選抜基準を2形質ともに満たす個体は図中の色塗り領域にプロットされる。このうち、丸印で示した個体は成長・材質・通直性(根元曲がり, 幹曲がり)すべての選抜基準を満たした個体を示す。さらにそのうち、白抜きの1個体が家系重複のため最終的に除外した個体, 灰色塗りの19個体が最終的に選抜された個体を示す。

表-4 選抜したトドマツ優良木の情報と形質値

#	個体名称	家系 プロット	反復	立木 番号	立木 ラベル	D (cm)	H (m)	V (m³)	$v_p$ (m/sec.)	$P_d$ (mm)	曲がり評価	
											根元	幹
1	優良木 98	EE-05	1	14	644	35.9	22.0	1.1278	4515	26.8	4	4
2	優良木 99	ES-13	1	3	840	30.7	21.6	0.8353	4310	25.4	5	4
3	優良木 100	ES-13	1	18	643	33.2	22.5	1.0034	4357	27.3	4	4
4	優良木 101	ES-14	1	11	635	34.3	21.7	1.0243	4464	23.6	5	5
5	優良木 102	ES-15	1	19	836	30.9	22.1	0.8654	4132	23.2	5	4
6	優良木 103	ES-03	1	14	636	33.5	23.4	1.0615	4082	25.7	5	4
7	優良木 104	EN-02	1	11	637	34.4	20.7	0.9818	4717	27.3	5	4
8	優良木 105	EN-05	1	10	838	27.7	19.4	0.6213	4751	25.7	5	4
9	優良木 106	EN-05	1	11	837	26.8	21.4	0.6472	4556	22.7	4	4
10	優良木 107	EN-05	1	13	639	32.0	21.9	0.9111	4425	27.1	4	4
11	優良木 108	W-02	1	2	839	24.1	21.6	0.5406	4684	20.3	4	4
12	優良木 109	EN-03	1	11	642	33.7	19.2	0.8733	4435	25.7	5	4
13	優良木 110	EN-02	2	7	604	34.5	24.4	1.1687	4329	25.9	5	4
14	優良木 111	S-06	2	9	607	34.4	21.8	1.0347	4175	25.4	5	4
15	優良木 112	EN-06	2	3	843	30.0	24.2	0.9014	4211	27.2	4	4
16	優良木 113	EN-06	2	13	652	32.2	22.8	0.9640	4149	24.0	5	4
17	優良木 114	ES-07	2	4	844	28.6	20.4	0.6932	4202	24.6	5	4
18	優良木 115	ES-09	2	8	841	29.3	20.0	0.7093	4484	26.3	5	4
19	優良木 116	ES-09	2	9	842	25.0	21.1	0.5636	4662	22.6	5	4

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

表-5 選抜による改良効果

	D (cm)	H (m)	V (m <sup>3</sup> )	v <sub>p</sub> (m/sec.)	P <sub>d</sub> (mm)
選抜個体の表現型値平均	31.1	21.7	0.8699	4402	25.1
解析個体の平均との比較	134%	118%	177%	103%	96%
育種価の平均	0.8	1.5	0.1176	67	-0.5
改良効果	3.6%	8.4%	24.1%	1.6%	-1.8%

D：胸高直径，H：樹高，V：幹材積，v<sub>p</sub>：応力波伝播速度，P<sub>d</sub>：ピロディン貫入量

場で確認できたため、全19個体を優良な個体と認め、「優良木」として本選抜した。選抜個体の情報は表-4に示す。選抜率は、成長を調査した1,009個体でみれば2.0%、材質を調査した260個体でみれば7.7%となった。V、v<sub>p</sub>、P<sub>d</sub>の改良効果はそれぞれ24.1%、1.6%、1.8%となった（表-5）。すべての形質が選抜によって改良されると見込まれた。なお、P<sub>d</sub>に関しては、値が小さい方向に選抜するため、表中の記載は負値となっている。改良効果はVにおいて最も高かったが、これは選抜の基準においてVの改良が重視されているためであり、想定通りの結果だった。根釧地域において同一セットの検定林（A38）で選抜を実施した先行研究においても、Vの改良効果は材質形質の改良効果よりも高く、23.7%と報告されている（石塚ら 2015）。いずれの結果においても、優良木を種子親として用いた次世代の林分では、現在の林分よりも材積が1.2倍以上見込まれることを示し、明瞭な選抜の効果が認められた。

本研究（A37）で選抜された優良木の由来産地の構成は、東部地域のENとESに大きく偏っていた（図-5）。N（北部）産の個体は選抜されなかった。東部根釧地域で実施した先行研究（A38；石塚ら 2015）についても同様に集計したところ、地

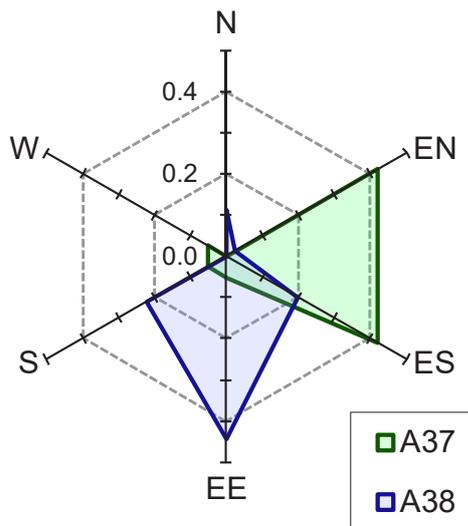


図-5 選抜された優良木の由来産地の偏り

検定林A37（本研究）およびA38（石塚ら 2015）における選抜結果を用いて、選抜個体の由来産地（母親の選抜地域）の出現頻度をレーダーチャートにて表した。各検定林で、全産地の頻度合計が1になる。

元産となるEEに偏りつつ、ES（東部太平洋側）とS（西南部太平洋側）からも一定数の優良木が選抜され、W（西南部日本海側）からの選抜はない構成だった（図-5）。A37とA38とで構成割合に明瞭な違いがあることに同時に、自生地域（地元産）から高い頻度で選抜されるという共通傾向を認めることができた。優良木の選抜は成長性・材質特性および通直性の総合評価によって行われることから、総合的な面でもトドマツの地域適応性をみることができるとの結果であった。先に述べたとおり、トドマツの産地間差異を調べた研究からは、既に成長性には自生地域（地元産）の有利性が認められており、地域適応性が発揮されていることが報告されている（石塚 2023a；Ishizuka et al. 2021）。このような地域適応性が、総合評価による選抜の取り組みにおいても維持されていたことは興味深い結果であった。

本選抜をもってトドマツ第二世代精英樹の選抜は一巡し、全道でのべ463個体の優良個体が選抜されたこととなった。選抜個体は今後、クローン増殖を図るとともに、採種園整備計画に沿って採種園への導入を図り、将来の優良種苗を生産する役割を担っていく。また、さらに諸形質の改良を積み重ねられるよう、第二世代の集団から後代の検定集団を作成し、第三世代以降の優良個体を選抜していく取り組みが求められる。クローン増殖と人工交配を進め、早期に着手していきたい。

## 謝辞

検定林における各種調査において、北海道水産林務部林務局森林整備課、十勝総合振興局森林室、北海道立総合研究機構林業試験場の職員に協力賜った。この場を借りてお礼申し上げる。

## 引用文献

- 花岡創・中田了五・石塚航・米澤美咲（2022）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。令和4年版2022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/2022/2022.html>（2023.11/24確認）
- 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。北海道林業試験場研究報告, 19: 1-91
- 北海道水産林務部林務局森林整備課（2022a）北海道採種園整

- 備方針. <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srs/new23/syubyou01.html> (2023.11/24確認)
- 北海道水産林務部林務局森林整備課 (2022b) 北海道採種園整備計画. <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srs/new23/syubyou01.html> (2023.11/24確認)
- 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: 23–39
- 石塚航 (2022) 採種園の補植設計: 北海道松前町大沢トドマツ採種園造成後の枯損と補植用の配植について. 北海道林業試験場研究報告, 59: 25–39
- 石塚航 (2023a) 樹木の遺伝的な適応の実態を知る (特集 遺伝子から見た日本の森の形). 森林技術, 976: 8–11
- 石塚航 (2023b) 成長・材質特性に優れたトドマツを選抜し, 普及を進めています. グリーントピックス, 66: 4
- Ishizuka W and Goto S (2012) Modeling intraspecific adaptation of *Abies sachalinensis* to local altitude and responses to global warming, based on a 36-year reciprocal transplant experiment. *Evolutionary Application*, 5: 229–244
- 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: 9–16
- 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—第二世代精英樹候補木の選抜—. 光珠内季報 179: 14
- 石塚航・今博計・黒沼幸樹・中田了五 (2018) 第2世代精英樹等を用いた採種園設計: 北海道松前町大沢トドマツ採種園造成の事例から. 北海道林業試験場研究報告, 55: 23–41
- Ishizuka W, Kon H, Kita K, Kuromaru M, and Goto S (2021) Local adaptation to contrasting climatic conditions in Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) revealed by long-term provenance trials. *Ecological Research*, 36: 720–732
- 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・津山幾太郎 (2024) 産地別トドマツ苗木の植栽適地を考える—適地適木の転換へ向けて—. 北方森林研究62: 5–9
- 加藤一隆 (2021) トドマツエリートツリーの開発及び特定母樹の指定. 野幌の丘から, 191: 2–3
- 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> (2023.11/24確認)
- 北村系子・石塚航・後藤晋 (2021) 日本の森林樹木の地理的遺伝構造 (31) トドマツ (マツ科モミ属). 森林遺伝育種, 10: 44–48
- 久保田正裕 (2015) 育種区と種苗配布区域について. 森林遺伝育種, 4: 10–15
- Muñoz F, Sanchez L (2019) breedR: Statistical methods for forest genetic resources analysts. R package version 0.12–4
- 中田了五・坂本庄生・西岡直樹・花岡創・来田和人・今博計・石塚航・黒丸亮 (2018) 次世代検定林の成績によるトドマツ精英樹集団からの優良系統の選抜. 森林総合研究所研究報告, 17: 155–174
- 大谷雅人・田村明・矢野慶介・西岡直樹・上田雄介・坂本庄生・植田守・佐藤重樹彦・湯浅真・井上晃・来田和人・今博計・黒丸亮 (2015) 北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木の選抜—平成26年度の実施結果—. 平成27年版2015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/2015/2015.html> (2023.11/24確認)
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- 田村明・山田浩雄・福田陽子・矢野慶介・阿部正信・竹田宣明・上田雄介・来田和人・今博計 (2012) 北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木の選抜—平成23年度の実施結果—. 平成24年版2012年報 森林総合研究所林木育種センター, 26–30
- 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・佐々木洋一・佐藤重樹彦・織田春樹・小園勝利・渡邊謙・来田和人・今博計 (2013) 北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木と準次代検定林からの優良木の選抜—平成24年度の実施結果—. 平成25年版2013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/2013.html> (2023.11/24確認)
- 田村明・山田浩雄・福田陽子・矢野慶介・竹田宣明・大城浩司・上野義人・植田守・佐藤重樹彦・湯浅真・上田雄介・佐藤新一・織田春樹・黒丸亮・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26年版2014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/2014.html> (2023.11/24確認)
- Tsuyama I, Ishizuka W, Kitamura K, Taneda H, and Goto S (2020) Ten years of provenance trials and application of multivariate random forests predicted the most preferable seed source for silviculture of *Abies sachalinensis* in Hokkaido, Japan. *Forests*, 11: 1058
- White TL, Adams WT, and Neale DB (2007) *Forest Genetics*. CAB International, London, UK.
- 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 (2023) 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. 北海道林業試験場研究報告60: 1–11

## Summary

In order to perform a forward selection of 2nd generation plus trees in Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) and increase in the size of the population of selected trees, progeny derived from several 1st generation plus trees selected from whole Hokkaido Island have been evaluated using multiple progeny test sites established in various regions. In this study, planted candidate progeny was newly measured at a progeny test site established in Pacific Ocean side of eastern region of Hokkaido that have not yet been evaluated. Stem volume ( $V$ ) was measured at 40-years old as a growth-related trait. Two wood-quality traits, that is 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, and two straightness traits, that is basal straightness and stem straightness, were all measured for candidate trees at 43-years old. Breeding values were estimated for  $V$ ,  $v_p$ , and  $P_d$ . Overall selection was performed using multiple criteria in order to select for superior growth characteristics, improve desirable wood qualities and straightness, and maintain genetic diversity. As a result, 19 superior trees were selected after the check of the outer soundness at the test site. These trees are expected to improve by 24.1% on average for  $V$  and 1.6% and 1.8% for  $v_p$  and  $P_d$ , respectively. The selected trees will compose 2nd breeding generations to produce improved stocks for afforestation in the corresponding region.

## Key words

selection, tree breeding, *Abies sachalinensis*, stem volume, wood quality