



道総研

ISSN 0910-3945

北林試研報
Bull. Hokkaido
For. Res. Inst.

北海道林業試験場研究報告

第60号

**BULLETIN
OF THE
HOKKAIDO FORESTRY RESEARCH INSTITUTE**

No. 60

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

美唄市 光珠内

令和5年3月

FORESTRY RESEARCH INSTITUTE
FOREST RESEARCH DEPARTMENT
HOKKAIDO RESEARCH ORGANIZATION
BIBAI, HOKKAIDO, JAPAN

March 2023

北海道林業試験場研究報告 第60号

目 次

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	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……………	1
内 田 葉 子 小野寺 賢 介 徳 田 佐和子 和 田 尚 之 山 田 浩 二 塚 野 雅 彦 山 岸 靖	モーラップ部分林のアカエゾマツ人工林におけるフェロモントラップ…… によるヤツバキクイムシの捕獲調査	13
研究資料		
石 塚 航 今 博 計	改良型雑種採種園方式を用いたカラマツ類雑種採種園の配植設計……………	21

Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute

No.60

Contents

Selecting superior Sakhalin spruce (<i>Picea glehnii</i>) trees using the progeny test established in 1990 Misaki YONEZAWA, Wataru ISHIZUKA, Hirokazu KON, Hirokazu SATO, So HANAOKA, Yoko FUKUDA, Yoshihiro TSUJYAMA, Satoshi TAMAKI	1
A monitoring result of the spruce bark beetle, <i>Ips typographus</i> by pheromone trap in the Sakhalin spruce (<i>Picea glehnii</i>) plantation in Morappu shared forest Yoko UCHIDA, Kensuke ONODERA, Sawako TOKUDA, Hisayuki WADA, Koji YAMADA, Masahiko TSUKANO, Yasushi YAMAGISHI	13
Research Material	
Planting design of the interspecific seed orchard of larch, incorporating the modified design for hybrid seed orchard Wataru ISHIZUKA, Hirokazu KON	21

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。

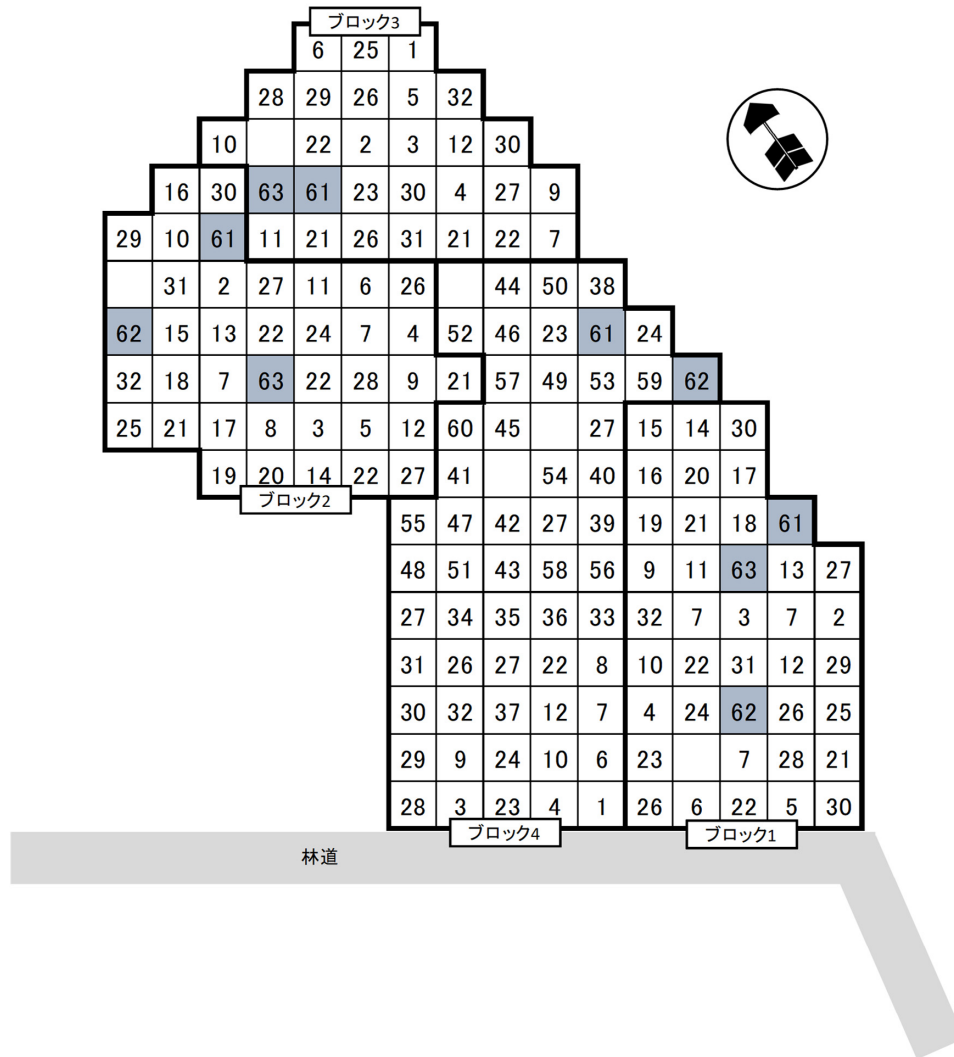
なお, 本試験林は1986年造成のアカエゾマツ次代検定林P4と隣接しており, P4検定林ではすでに選抜が済んでいる(石塚ら 2021)。立地や評価に用いた樹齢が類似していることから, 本研究では, 検定林P4における結果を一部比較対象に用いた。

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

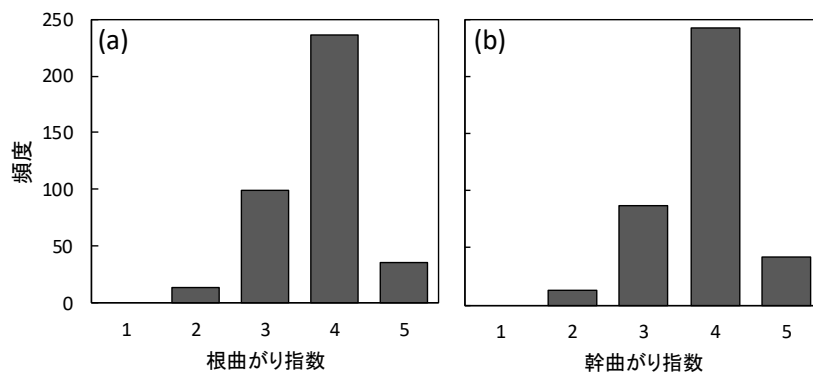


図-2 対象個体の根元曲がり指数(a)と幹曲がり指数(b)の分布
数値が大きいほど通直性に優れていることを示す。

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

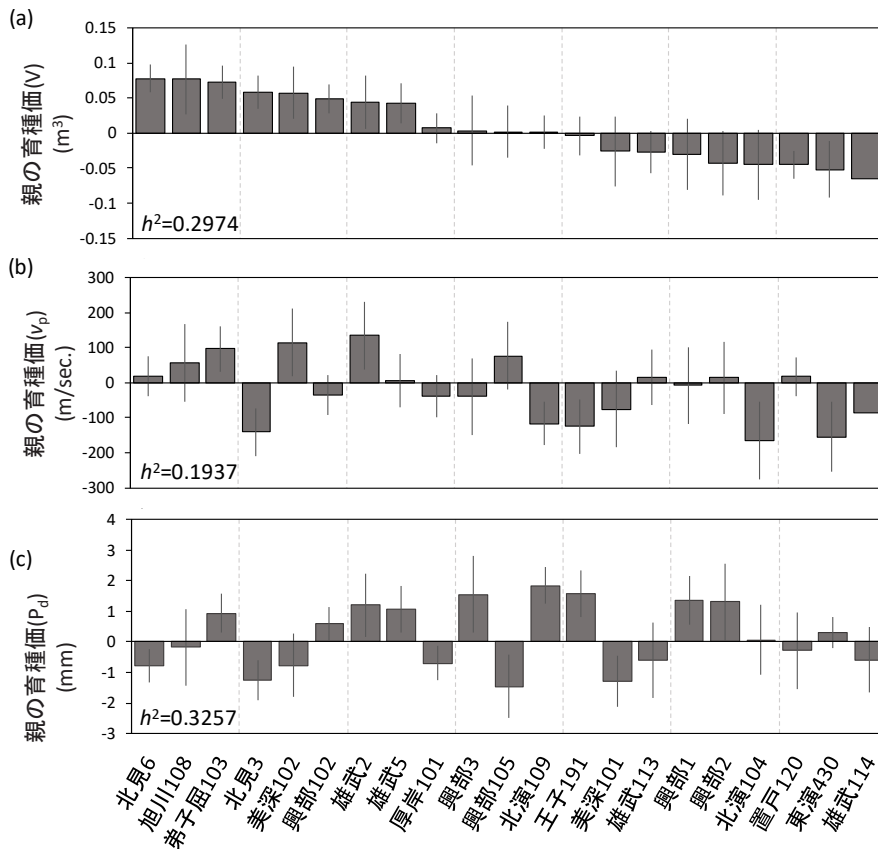


図-3 幹材積(a)と応力波伝播速度(b)ならびにピロディン貫入量(c)に対する交配親の育種価の推定値と遺伝率

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。

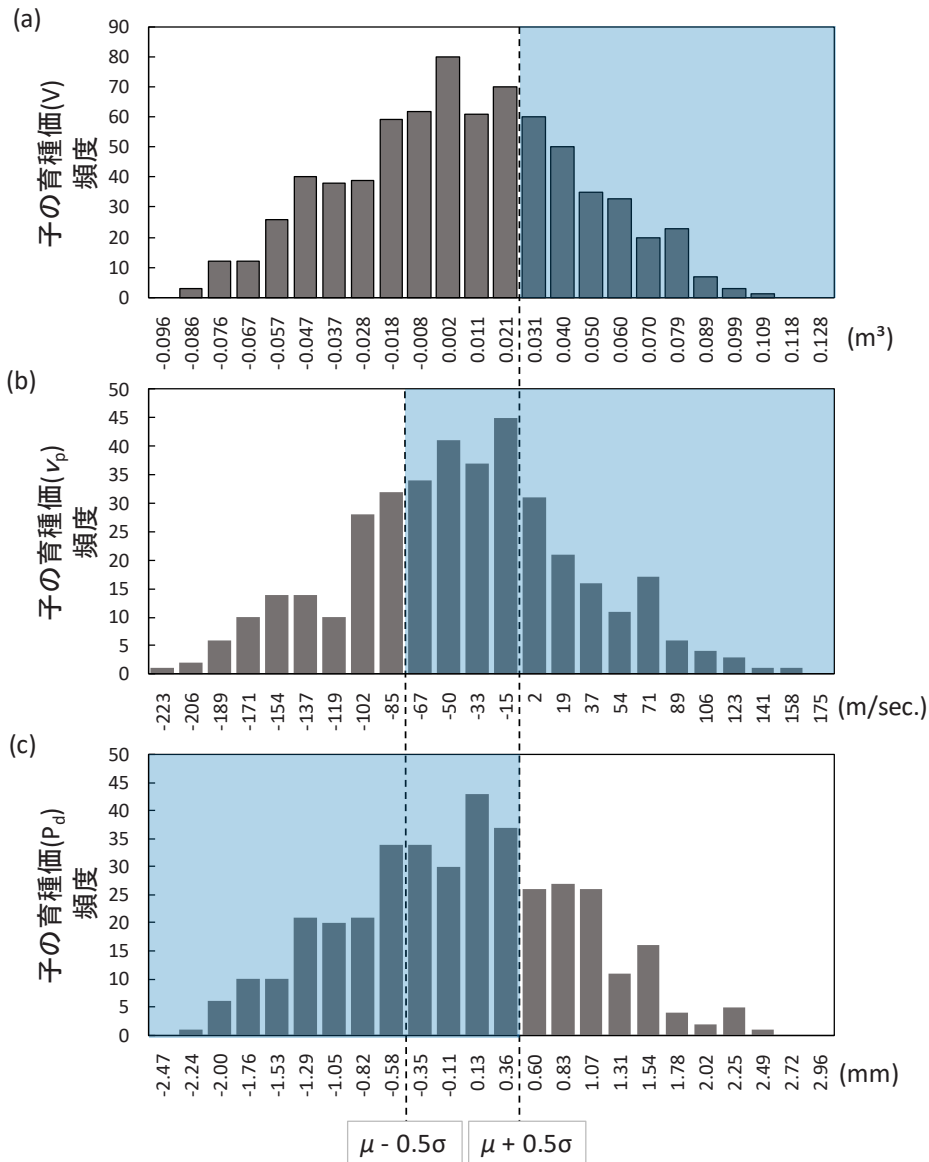


図-4 幹材積 (a) と応力波伝播速度 (b) ならびにピロディン貫入量 (c) に対する子の育種価の頻度分布と選抜基準

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。

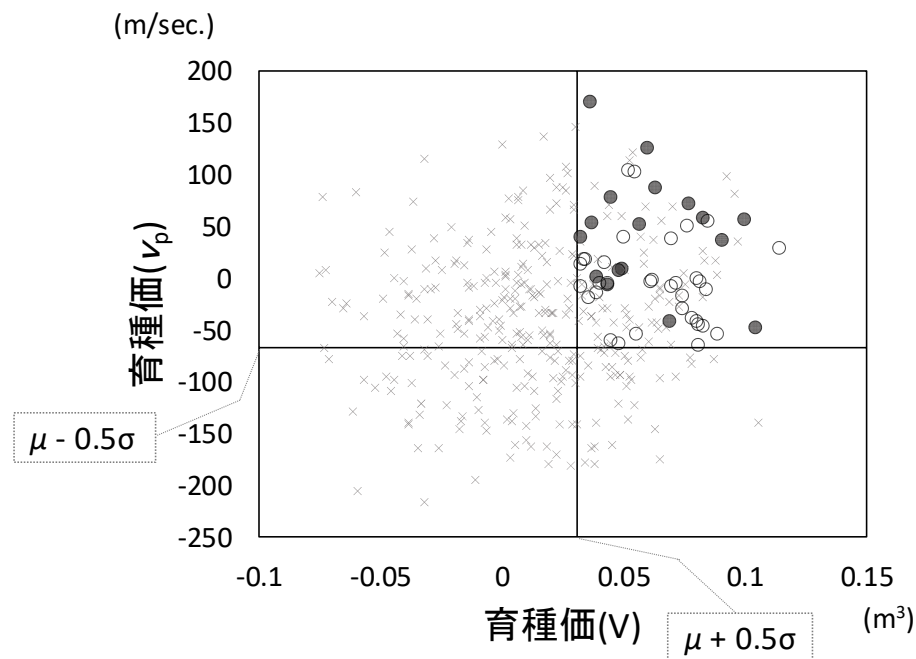


図-5 幹材積 (V) と応力波伝播速度 (v_p) それぞれの子の育種価の分布と選抜個体

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

モーラップ部分林のアカエゾマツ人工林における フェロモントラップによるヤツバキクイムシの捕獲調査

内田葉子*・小野寺賢介*・徳田佐和子*・和田尚之*・
山田浩二**・***・塚野雅彦**・山岸 靖**

A monitoring result of the spruce bark beetle, *Ips typographus* by pheromone trap in the Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) plantation in Morappu shared forest

Yoko UCHIDA*, Kensuke ONODERA*, Sawako TOKUDA*, Hisayuki WADA*,
Koji YAMADA **・***, Masahiko TSUKANO**, Yasushi YAMAGISHI**

要旨

苫小牧市と千歳市に位置する53～56年生のアカエゾマツ人工林で、2017年から生立木に対するヤツバキクイムシ被害が発生した。ヤツバキクイムシの発生数の変化を調査するため、2020年と2021年の春から秋にかけて、フェロモントラップによるモニタリング調査を実施した。2020年は6月上旬にヤツバキクイムシが最も多く捕獲され、その後は減少したものの、7月中旬から8月下旬にかけて再び捕獲数が増加する2山型の消長を示した。2021年は6月上旬の捕獲数が全体の約61%を占め、その後捕獲数は減少した。また、2021年に捕獲されたヤツバキクイムシの乾燥重量から、個体数を計測する推定式を作成した。2020年の被害後、561本のアカエゾマツを伐倒・搬出したが、2021年に新たに37本の被害木が発生した。2021年時点でヤツバキクイムシ被害が発生してから5年目を迎えており、新たな被害木の発生本数は少なくなってきた。しかし、ヤツバキクイムシの捕獲数が増加したこともあり、今後も被害は継続する可能性がある。

キーワード：ヤツバキクイムシ， トウヒ属， フェロモントラップ， 乾燥重量， モニタリング

はじめに

ヤツバキクイムシ (*Ips typographus japonicus*) はトウヒ属 (*Picea*) の穿孔性昆虫で、ヨーロッパからアジアにかけて分布する (吉田 1994)。成虫は体長約 5 mm、幅約 2 mm の円筒形で、体色は羽化したばかりの時は黄褐色で、成熟すると黒色になる (吉田 1986)。平時は伐倒木や衰弱木に穿孔する。台風などの風害後や伐採後には大発生することがあり、集中的な穿孔であるマスアタックにより生立木の枯損被害を引き起こすことが知られている (中山ら 1991)。ヤツバキクイムシは成虫が春先に交尾および産卵を行い、その年の夏に羽化した新成虫が繁殖を開始する年 2 化性、もしくは羽化した新成

虫が繁殖せずに越冬する年 1 化性の生活史を送る (上田・尾崎 2012)。

北海道では、ヤツバキクイムシは主にエゾマツ (*Picea jezoensis*) やアカエゾマツ (*Picea glehnii*) で繁殖する。ヤツバキクイムシは樹木に穿孔する際、青変菌類を伝搬し、ヤツバキクイムシのマスアタックと青変菌の作用によって樹木が枯れることが知られている (Yamaoka et al. 2000)。過去には、天然林でのヤツバキクイムシによる被害がたびたび報告された。例えば、1954年に台風によって大規模な風害が発生した後、1956年から3年間にわたりヤツバキクイムシが原因と思われる立木被害が発生し、約250万m³の被害量となった (山口 1959; 古田ら 1985)。また、東京大学北海道演習林では

* 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

** 北海道胆振総合振興局森林室 Office of forestry management, Iburi General Subprefectural Bureau, Hokkaido Government, Tomakomai, Hokkaido 053-0803

*** 現所属：北海道ニセコ町農政課 Agricultural administration, Niseko Town, Hokkaido 048-1595

[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]

1981年の台風後、1982年から5年間にわたりヤツバキクイムシによるエゾマツ類の被害が計4.4万 m^3 発生した（渡邊ら1990）。風害や伐採後の天然林に対する被害報告が多い一方で、人工林での被害を対象にした研究は限られている。例えば、1996年から2000年までの5年間では、アカエゾマツ人工林の除間伐林分におけるヤツバキクイムシによる生立木被害は40林分中3林分しか報告されず（内1林分は試験的に丸太を放置した）、また、いずれも翌年には被害は収束したことが報告された（原・林 2002）。これは、調査対象とした除間伐林が若く、ヤツバキクイムシの繁殖に適した木が少なかったことが影響したと考えられている。比較的最近の被害では、2004年に発生した台風により2006年から2009年にかけて、樽前山山麓のエゾマツ・アカエゾマツ人工林約727ha（約1,088本）が被害を受けた（上田・井口 2010）。現在、北海道のエゾマツ・アカエゾマツ人工林の齢級構成は7～10齢級（31～50年生）が面積の50%以上を占めている（北海道水産林務部 2022）。大径木ほどヤツバキクイムシによる被害を受けやすいため、高齢になるにつれて被害は起こりやすくなると考えられ、将来的に人工林でもヤツバキクイムシ被害が増加する可能性がある（原 2003）。

苫小牧市と千歳市にまたがるモーラップ部分林（愛林緑化思想高揚記念部分林）では、2007年にアカエゾマツの風倒木でヤツバキクイムシの穿孔が確認された。その後、2017年にアカエゾマツ生立木へのヤツバキクイムシ被害が報告されてから、2021年時点まで被害が継続しており、被害の拡大防止対策が講じられている。ヤツバキクイムシの生息状況を把握するため、北海道胆振総合振興局森林室と林業試験場が共同で2020年と2021年にフェロモントラップによるモニタリング調査を実施した。胆振総合振興局森林室はフェロモントラップの設置、フェロモンの交換、捕獲個体の回収を担当し、林業試験場はフェロモン成分の調合、捕獲個体の同定を担当した。モーラップ部分林でのヤツバキクイムシの被害推移やモニタリングによる捕獲個体数の変化などのデータは、今後高齢化するエゾマツ・アカエゾマツ人工林におけるヤツバキクイムシ被害の拡大・収束予測に活用できる基礎データとなる。本研究では、モーラップ部分林のアカエゾマツ人工林におけるヤツバキクイムシの被害経過を取りまとめるとともに、モニタリングの調査結果およびヤツバキクイムシの発生傾向について考察する。

モーラップ部分林の変遷

1. 概要

部分林とは国有林野に国以外の者が造林し、その収益を国および造林者が分取する森林のことを指す。モーラップ部分林は、1960年に北海道と札幌営林局（現 北海道森林管理局）の間で「愛林緑化思想高揚記念部分林」として契約を締結した。以降の管理は苫小牧林務署（現 胆振総合振興局森林室）が担当しており、契約期間は2035年までとなっている。モー

ラップ部分林は1961年に昭和天皇・皇后両陛下ご臨席のもと、全国から約1万人が参加した「第12回植樹行事並びに国土緑化大会」（第12回全国植樹祭）の会場として整備された。

2. 環境

モーラップ部分林は、苫小牧市字丸山と千歳市字モーラップにまたがって位置する道有林胆振管理区152林班51小班である（図-1）。モーラップ部分林の西側には支笏湖、南西側には樽前山（標高1,041m）、北側にはモーラップ山（標高506m）があり、標高300m前後の緩斜地に広がる約9.4haの林分である。支笏湖畔の年間の平均気温は6.9℃、年間降水量は約1,700mmである（気象庁 2022）。土壌は粗粒火山放出物未熟土壌に分類され（国土交通省 1978）、植栽地の下層植生はアキタブキ（*Petasites japonicus* subsp. *giganteus*）やクサソテツ（*Matteuccia struthiopteris*）などシダ類が多い。

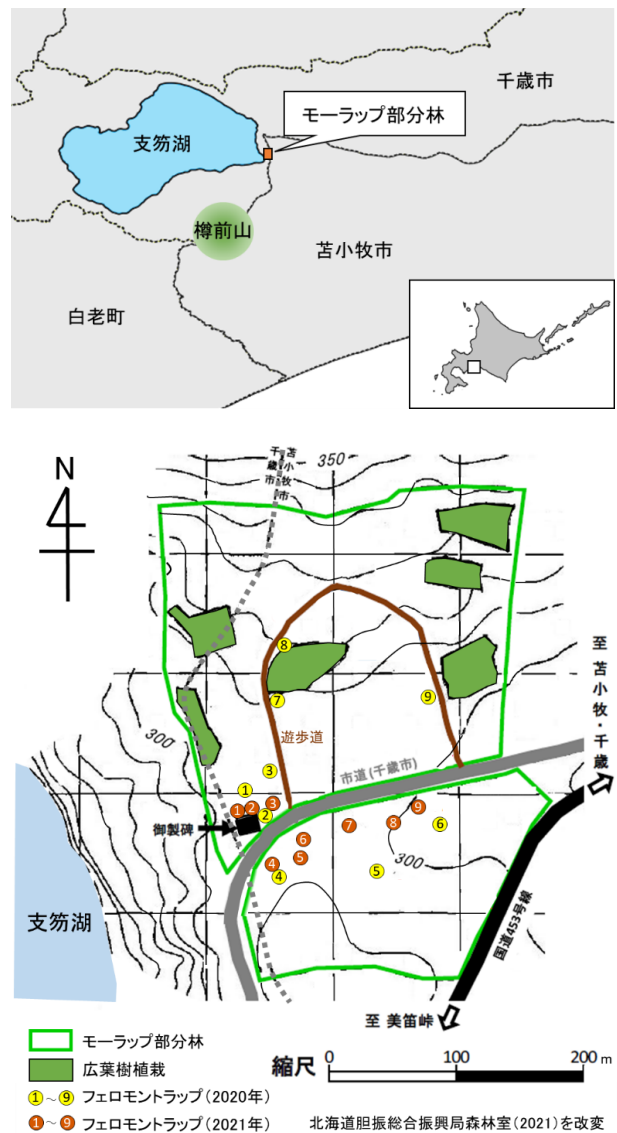


図-1 モーラップ部分林位置図とフェロモントラップ設置場所

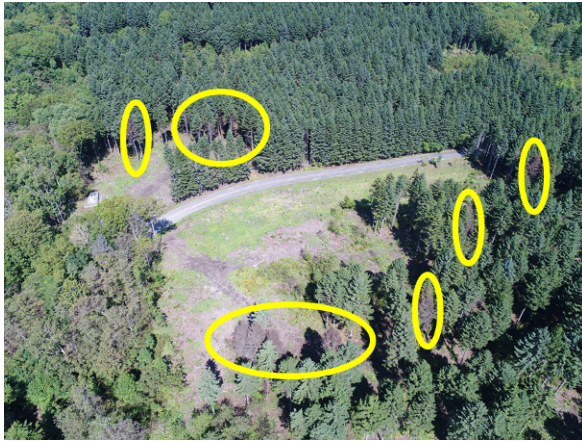


写真-1 ヤツバキクイムシによる被害木

左：モーラップ部分林の航空写真（2021年9月撮影）。円で囲んだ部分に枯死木がある。
右：ヤツバキクイムシに穿孔されたアカエゾマツ。



3. 施業経過

北海道胆振総合振興局森林室（2021）が作成した資料「モーラップ部分林の概要」に基づいて施業経過を記載する。モーラップ部分林は1960年に火入れ地拵えが実施され、翌年にアカエゾマツ36,000本の植栽（haあたり3,900本）と4,000本の補植が行われた。1962年から1964年にかけて計19,800本の補植が行われた。1961年から1968年にかけて下刈りが、1969年から1977年にかけてツル切りと除伐が実施された。1978年からは適宜間伐が実施され、2004年までに計20,034本が伐採された。2007年には、第58回全国植樹祭に合わせて、広葉樹約1,700本が記念植樹された。また、エゾシカの被害対策として、2001年にはお手植え木周囲に金網を設置し、2005年には2,400本に樹皮剥ぎの被害防止ネットを取り付けた。その後、2006年にはお手植え木周囲にエゾシカの被害防止柵（2001年設置の金網は撤去）が、2007年には植樹祭会場周囲にエゾシカの侵入防止柵が設置された。

4. ヤツバキクイムシ被害の推移

胆振総合振興局森林室が作成した資料「モーラップ部分林の概要」に基づいて被害の推移を記載する。最初にモーラップ部分林でのヤツバキクイムシの穿孔が確認されたのは2007年である。2006年の風倒被害木の集積丸太が穿孔され、生立木への被害は確認されなかった。この年、ヤツバキクイムシに穿孔された171本、材積68.3m³を林外へ搬出した。その後、しばらくヤツバキクイムシの被害は報告されていなかったが、2017年に生立木で被害が発生し、同年7月に被害木137本、材積55.5m³を伐倒・搬出した（53～56年生、被害木の平均胸高直径23.8cm、平均樹高15.8m）。その後も被害は続き、2019年3月には台風による風倒被害木含む283本、材積126.5m³を伐倒・搬出した。2021年3月には衰弱木を含む561本、材積360.3m³のアカエゾマツを伐倒・搬出した（2020年2月時点での被害木の平均胸高直径30.3cm、平均樹高18.3m）。2021年12月までに新た

に37本の被害が発生した（57～60年生；写真-1）。

モニタリング状況

1. 方法

フェロモントラップ（以後、トラップという）は黒色衝突板型トラップ（マダラコール用誘引器[®]、サンケイ化学）を用いた（写真-2）。このトラップの衝突板にフェロモンバッグ1袋を布製粘着テープで貼り付けた。フェロモンバッグは、フェロモン成分（(S)-CIS-ベルベノールを2-メチル-3-ブテン-2-オールに溶解して作成；重量比率1:99）2mlを染みこませた脱脂綿を縦7cm、横5cm、厚さ0.08mmのチャック付きポリエチレン製の袋（ユニバック[®]、生産日本社）に入れ、チャックを閉じ、ヒートシーラーで密封したものを使用した。フェロモンバッグは設置まで冷凍保存し、移動時はクーラーボックスで保管した。フェロモンバッグは日に当たらないよう、北側に向けて貼り付けた。フェロモンに誘引され、トラップに衝突したヤツバキクイムシは下の容器に落下する（写真-2、右）。トラップの容器には、粘性があり防腐効果のあ



写真-2 フェロモントラップ

左：フェロモントラップ全体。
右：フェロモントラップ本体。

るプロピレングリコール500mlを入れた。トラップは被害木近くの比較的開けた場所に設置した(図-1)。2020年は4月24日に6基設置し、9月3日に3基追加した。2021年は4月27日に9基設置した。なお、2021年のトラップは、2021年3月の被害木処理によって開けた場所に設置したため、2020年のトラップ設置場所とは異なる。トラップは支柱を用いて地上高1.2~1.5mに吊した。トラップの設置後、約2~3週間おきに捕獲個体の回収およびフェロモンとプロピレングリコールの交換を行った。なお、2020年の回収8回目のトラップNo.1~6および9回目のNo.1~9はフェロモン量が3.33mlと通常より多かった。回収には三角コーナー用水切りネットに、捕獲した昆虫を流し入れた。ネットに回収日やトラップナンバー(No.1~9)を記入した紙を入れ、ネットの口を縛り、エタノールの入ったサンプル容器に入れて保管した。2020年は10月29日(9回目)の回収時に、2021年は10月28日(10回目)の回収時にそれぞれトラップを撤去した。回収したヤツバキクイムシは回収日ごとおよびトラップごとに個体数を数えた。2021年に捕獲したヤツバキクイムシについては、回収日ごとおよびトラップごとに捕獲した全個体を80℃で24時間以上乾燥させ、電子天秤により重量を測定した。重量から個体数を推定できるか検証するため、ヤツバキクイムシの個体数と乾燥重量の回帰直線から推定式を作成した。時期によってヤツバキクイムシ個体の重量に差があるかを確認するため、回収2~6回目の各トラップからランダムに取り出した100個体あたりの重量を計測し、乾燥重量を応答変数、回収日を固定効果、トラップをランダム効果とする線形混合モデル(LMM)で統計解析を行った。その後、LMMの結果に対し、Tukeyの多重比較を用いて回収日間の乾燥重量の差について分析した。

統計解析にはR ver.4.1.1 (R Core Team 2021) を用い、lme 4 (Bates et al. 2015) と multcomp (Hothorn et al. 2008) のパッケージを利用した。

2. 結果

2020年に捕獲したヤツバキクイムシの総数は68,838個体であった(表-1)。回収2回目である5月14日~6月5日の捕獲数が最も多く(32,153個体)、総数の約47%を占めていた。6月下旬(回収3回目)までの総捕獲数は33,762個体で、7月上旬(回収4回目)以降の総捕獲数は35,076個体と、春と夏で捕獲数がほぼ同数になった。トラップ間による捕獲数の違いについては、No.3~6が比較的捕獲数が多く、No.1~2が比較的少ない傾向があった。

2021年に捕獲したヤツバキクイムシの総数は122,837個体であった(表-2)。回収3回目である5月25日~6月10日の捕獲数が最も多く(74,518個体)、総数の約61%を占めていた。6月下旬(回収4回目)までの総捕獲数は103,803個体で、7月上旬(回収5回目)以降の総捕獲数は19,034個体と、春よりも夏の捕獲数が少なくなった。トラップ間による捕獲数の違いについては、No.2, 3, 9が比較的捕獲数が多く、No.4, 7で比較的少ない傾向があった。

トラップ1基あたりの平均捕獲数を図-2に示した。両年とも6月上旬にヤツバキクイムシが最も多く捕獲され、2021年の捕獲数は2020年よりも約3,000個体多くなった。2020年では、7月中旬から8月下旬にかけて捕獲数が増加し、2山型の消長を示した。一方2021年では、6月下旬から8月上旬にかけて明確なピークは見られなかった。7月から8月にかけての夏季の捕獲数は、2020年よりも2021年の方が少なくなっ

表-1 2020年に捕獲されたヤツバキクイムシ個体数

回収日	経過日数	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	合計
1回目	5月14日	5 (0.3)	8 (0.4)	7 (0.4)	15 (0.8)	4 (0.2)	4 (0.2)	-	-	-	43 (2.2)
2回目	6月5日	3,320 (150.9)	3,449 (156.8)	5,917 (269.0)	6,024 (273.8)	5,019 (228.1)	8,424 (382.9)	-	-	-	32,153 (1,461.5)
3回目	6月25日	95 (4.8)	139 (7.0)	473 (23.7)	270 (13.5)	166 (8.3)	423 (21.2)	-	-	-	1,566 (78.3)
4回目	7月15日	708 (35.4)	787 (39.4)	1,408 (70.4)	1,041 (52.1)	1,641 (82.1)	2,899 (145.0)	-	-	-	8,484 (424.2)
5回目	8月12日	2,268 (81.0)	1,938 (69.2)	2,213 (79.0)	2,765 (98.8)	2,563 (91.5)	1,806 (64.5)	-	-	-	13,553 (484.0)
6回目	8月28日	978 (61.1)	2,001 (125.1)	3,009 (188.1)	2,106 (131.6)	2,162 (135.1)	1,970 (123.1)	-	-	-	12,226 (764.1)
7回目	9月17日	22 (1.1)	38 (1.9)	96 (4.8)	226 (11.3)	147 (7.4)	178 (8.9)	10 (0.7)	0 (0.0)	18 (1.3)	735 (36.8)
8回目	10月8日	0 (0.0)	3 (0.1)	5 (0.2)	30 (1.4)	27 (1.3)	9 (0.4)	4 (0.2)	0 (0.0)	0 (0.0)	78 (3.7)
9回目	10月29日	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
各トラップ合計		7,396	8,363	13,128	12,477	11,729	15,713	14	0	18	68,838

経過日数は前回回収日(1回目の時はトラップ設置日)からの日数を示す。No.7~9は回収6回目より後に設置されたので、回収1~6回目までのデータは無い。括弧内の数字は1日あたりの平均捕獲数(捕獲数/経過日数)を示す。

表-2 2021年に捕獲されたヤツバキクイムシ個体数

回収日	経過日数	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	合計	
1回目	5月12日	15	2	1	16	3	1	2	2	3	3	33
			(0.1)	(0.1)	(1.1)	(0.2)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.2)	(0.2)	(2.2)
2回目	5月25日	13	2,552	1,804	2,803	2,088	2,858	259	897	2,995	2,470	18,726
			(196.3)	(138.8)	(215.6)	(160.6)	(219.8)	(19.9)	(69.0)	(230.4)	(190.0)	(1,440.5)
3回目	6月10日	16	6,563	24,116	15,342	944	4,409	4,793	1,082	2,752	14,517	74,518
			(410.2)	(1,507.3)	(958.9)	(59.0)	(275.6)	(299.6)	(67.6)	(172.0)	(907.3)	(4,657.4)
4回目	6月24日	14	404	538	3,264	353	586	851	237	807	3,486	10,526
			(28.9)	(38.4)	(233.1)	(25.2)	(41.9)	(60.8)	(16.9)	(57.6)	(249.0)	(751.9)
5回目	7月15日	21	352	421	731	153	1,190	759	672	1,331	1,893	7,502
			(16.8)	(20.0)	(34.8)	(7.3)	(56.7)	(36.1)	(32.0)	(63.4)	(90.1)	(357.2)
6回目	8月5日	21	2,122	1,246	453	509	340	1,274	1,201	1,213	1,930	10,288
			(101.0)	(59.3)	(21.6)	(24.2)	(16.2)	(60.7)	(57.2)	(57.8)	(91.9)	(489.9)
7回目	8月26日	21	48	51	3	15	17	41	9	32	62	278
			(2.3)	(2.4)	(0.1)	(0.7)	(0.8)	(2.0)	(0.4)	(1.5)	(3.0)	(13.2)
8回目	9月16日	21	12	20	23	10	14	14	12	14	42	161
			(0.6)	(1.0)	(1.1)	(0.5)	(0.7)	(0.7)	(0.6)	(0.7)	(2.0)	(7.7)
9回目	10月12日	26	92	77	111	26	86	31	17	18	311	769
			(3.5)	(3.0)	(4.3)	(1.0)	(3.3)	(1.2)	(0.7)	(0.7)	(12.0)	(29.6)
10回目	10月28日	16	1	3	10	2	16	0	0	0	4	36
			(0.1)	(0.2)	(0.6)	(0.1)	(1.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.3)	(2.3)
各トラップ合計			12,148	28,277	22,756	4,103	9,517	8,024	4,129	9,165	24,718	122,837

経過日数は前回回収日（1回目の時はトラップ設置日）からの日数を示す。括弧内の数字は1日あたりの平均捕獲数（捕獲数/経過日数）を示す。

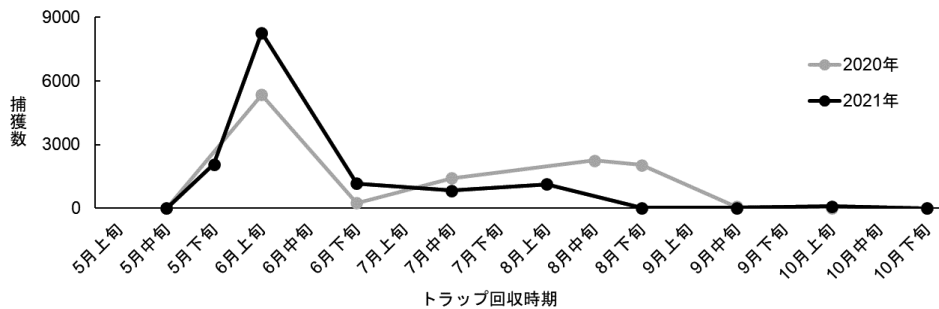


図-2 トラップ1基あたりの平均捕獲数

灰色が2020年，黒色が2021年の結果である。2020年と2021年でトラップの回収日および回収回数異なるので，各回収日を旬ごとに当てはめた。

た。2020年では最後の回収日（10月下旬）には捕獲数がゼロだったが，2021年ではトラップあたり平均4個体捕獲された。

2021年に捕獲したヤツバキクイムシにおける，100個体あたりの重量の時期による変動は，回収4回目と6回目間でのみ有意差が確認された（LMM, Tukey's test, $P < 0.01$; 図-3）。また，トラップごとに測定した個体数と乾燥重量による線形回帰の結果，次の式が得られた（図-4）。

$$N (\text{個体数}) = 229.55 W (\text{乾燥重量g})$$

時期による乾燥重量の差があったが，推定式の決定係数は0.9929と極めて高く，この式からモータラップ部分林で捕獲されたヤツバキクイムシは1gあたり約230個体であることが推定できる。

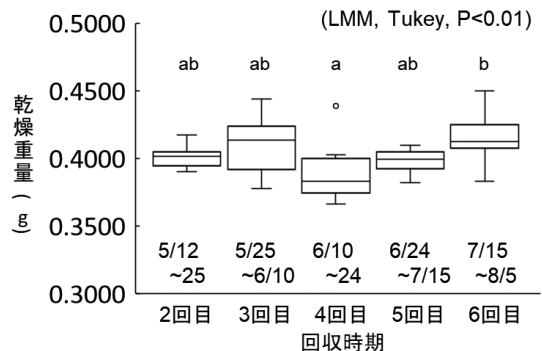
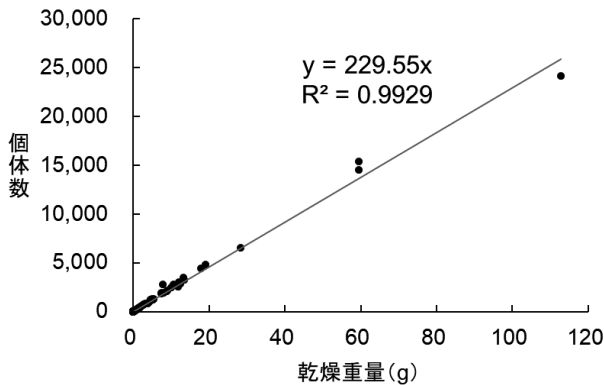


図-3 100個体あたりの乾燥重量

2021年の回収2～6回目の各トラップからランダムに100個体取り出した。1回目と7回目以降は捕獲数が少ないため，計測しなかった。異なるアルファベットは Tukeyの多重比較で有意差があることを示す。



図－4 ヤツバキクイムシ乾燥重量と個体数との関係および回帰直線

3. 考察

調査を実施した兩年とも、回収1回目（5月中旬）での捕獲数は少なく、2回目以降（5月下旬～6月上旬）に急増した。ヤツバキクイムシは20℃以上の気温が一定時間継続すると飛翔を開始する（福山・吉田1983）。支笏湖畔の気温を確認したところ、最高気温が20℃を超えた日は2020年の回収1回目までは1日、2回目までは8日であり、2021年の回収1回目までは0日、2回目までは4日、3回目までは7日であった（気象庁 2022）。このことから、気温が上がりヤツバキクイムシの飛翔活動が活発になった結果、2回目以降の捕獲数が多くなったと考えられる。

Furuta (1989) の調査によると、極めて好適な条件下の個体群は100個体あたり約0.4g、大発生の高密度な個体群では約0.3gであったと報告している。捕獲数の多い回収2～6回目における100個体あたりの乾燥重量は、 $0.3894 \pm 0.0073 \sim 0.4152 \pm 0.0061\text{g}$ （平均±標準誤差）であった。このことから、2021年のモーラップ部分林は、捕獲個体数の多い時期でも年間を通してヤツバキクイムシの生育に比較的好適な条件下にあったことが推測される。ヤツバキクイムシ個体の乾燥重量には年変動があることが報告され、生育密度のほか、繁殖場所（伐倒木か生立木か）の違いも個体サイズに影響するのではないかと推測されている（中山ら 1991）。一方で、時期による個体の重量の変動は、比較的小さいと報告されている（古田ら1985）。本調査においても時期による重量差は、回収4回目と6回目の間でのみ有意差があったが、その差は100個体あたり0.0258gほどであり、他では差が小さかった。重量から個体数を推定する推定式を作成する手法は、個体数推定の省力化を図るために有効な方法である。乾燥重量は年変動が大きいことが予想されるため、調査年ごとに推定式を作成する必要があるが、ヤツバキクイムシ個体の重量の年次内変動は比較的小さかったことから、推定式を作成することで、総重量からの年間総個体数推定およびトラップごとの捕獲重量からの時期別個体数推定に活用できると考えられる。また、今回の推定式の作成にあたり、回収日ごとおよびトラップごとの

捕獲個体数と乾燥重量を全て計測したが、推定式の決定係数は極めて高かったことから、各回収日から一定個体数を抽出しその重量を測定するなど作成過程を省力化しても、精度の高い個体数推定ができると考えられる。

モーラップ部分林では、2021年3月に衰弱木を含む561本のヤツバキクイムシ被害木を伐倒・搬出したが、2021年のモニタリング調査において前年の約1.8倍に当たる約123,000個体のヤツバキクイムシが捕獲された。大規模な被害木の処理を実施したにもかかわらず、捕獲数が増加したことから、モーラップ部分林内の他の生立木もしくはモーラップ部分林外の周辺の林分でもヤツバキクイムシが大量に繁殖していたことが推測される。その一方で、2021年の被害木は37本と比較的少なくなった。また、2021年の夏（7月上旬以降）のヤツバキクイムシ捕獲数は2020年よりも減少している。ヤツバキクイムシによる被害は通常5年目には収束すると言われている（山口ら 1963；上田・井口 2010）。2021年は生立木へのヤツバキクイムシ被害が発見されてから5年目であり、倒木や衰弱木などヤツバキクイムシの繁殖に適した資源が減少し、抵抗力のある生立木への穿孔が増えたことで、ヤツバキクイムシの繁殖力が落ちた可能性がある。

まとめ

モーラップ部分林では、2017年から2021年にかけてヤツバキクイムシによるアカエゾマツ生立木への被害が報告されてきた。2017年、2019年、2021年に計3回の被害木の伐倒・搬出が実施されたが、2021年4月から12月までに新たに37本の被害木が発生している。2020年と2021年にフェロモントラップによるモニタリング調査を実施した結果、2021年は前年よりもヤツバキクイムシの総個体数および発生ピーク時の捕獲数が増加した。2021年3月の衰弱木を含む大規模な処理により、ヤツバキクイムシの繁殖に適した樹木は減少したと考えられる一方、2021年のヤツバキクイムシ個体の乾燥重量から、モーラップ部分林はヤツバキクイムシの生育に比較的好適な条件下であることが推測された。そのため、今後もアカエゾマツの枯損被害が継続する可能性がある。

引用文献

- Bates D, Mächler M, Bolker BM, Walker SC (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67: 1–51
- 福山研二・吉田成章 (1983) ヤツバキクイムシの飛しょうと温度の関係. *日本林学会北海道支部講演集* 31: 146–148
- Furuta, K (1989) A comparison of endemic and epidemic populations of the spruce beetle (*Ips typographus japonicus* Nijjima) in Hokkaido. *Journal of Applied Entomology* 107: 289–295
- 古田公人・高橋郁雄・安藤祥一・井上真 (1985) ヤツバキクイムシ (*Ips typographus japonicus* Nijjima; Coleoptera) の

- 風害後の繁殖と大量誘殺による枯損防止. 東京大学農学部演習林報告 74: 39-65
- 原秀穂・林直孝 (2002) ヤツバキクイムシの被害対策 I - 除間伐後の生立木被害発生状況 -. 光珠内季報 126: 19-23
- 原秀穂 (2003) ヤツバキクイムシの被害対策 II - 被害の予防 -. 光珠内季報 127: 9-13
- 北海道胆振総合振興局森林室 (2021) モーラップ部分林の概要. 苫小牧
- 北海道水産林務部 (2022) 令和 2 年度 (2020年度) 北海道林業 統計. <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/kcs/rin-toukei/02rtk.html> (2022年 9 月 20 日確認)
- Hothorn T, Bretz F, Westfall P (2008) Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal* 50: 346-363
- 気象庁 (2022) 過去の気象データ検索. <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2022年 9 月 14 日確認)
- 国土交通省 (1978) 国土調査 (土地分類調査・水調査) 20 万分の 1 土地分類基本調査. https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/1_national_map_20-1.html (2022年 9 月 15 日確認)
- 中山基・古田公人・高橋郁雄・佐藤義弘・井口和信 (1991) エゾマツ天然林の伐採後の虫害枯損とヤツバキクイムシ成虫の動態. 東京大学農学部演習林報告 84: 39-52
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- 上田明良・井口和信 (2010) 樽前山麓 2004 年 18 号台風風倒地における 2009 年度ヤツバキクイムシ類被害状況. 日本森林学会北海道支部論文集 58: 125-128
- 上田明良・尾崎研一 (2012) ヤツバキクイムシの発育への温度と日長の影響. 森林総合研究所研究報告 11: 43-50
- 渡邊定元・柴田前・河原漢・芝野伸策・倉橋昭夫・佐藤義弘・穴沢力・高田功一・高橋康夫 (1990) 1981 年台風 15 号による東京大学北海道演習林の森林被害. 東京大学農学部演習林報告 27: 79-221
- 山口博昭 (1959) 風害後のクイムシ類による被害の推移. 北方林業 11: 27-31
- 山口博昭・平佐忠雄・小泉力・高井正利・井上元則・小杉孝蔵・野淵輝 (1963) 北海道の風倒地における穿孔虫の発生分散機構 (第 3 報) 立木被害の発生推移 (1956~1958 年). 林業試験場研究報告 151: 75-135
- Yamaoka Y, Takahashi I, Iguchi K (2000) Virulence of Ophiostomatoid fungi associated with the spruce bark beetle *Ips typographus* f. *japonicus* in Yezo spruce. *Journal of Forest Research* 5: 87-94
- 吉田成章 (1986) 森林害虫各論シリーズ No. 19 ヤツバキクイムシ. 林業と薬剤 94: 1-9
- 吉田成章 (1994) 1. 2. 1 ヤツバキクイムシ. 小林富士雄・竹

谷昭彦編, 森林昆虫 - 総編・各論 -, 171-178. 養賢堂, 東京

Summary

Since 2017, the infestation of spruce bark beetle (*Ips typographus*) has occurred in Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) plantation (forest age 53-56 years) across Tomakomai and Chitose cities.

Monitoring research using pheromone traps was conducted from spring to autumn in 2020 and 2021 in order to confirm changes in the number of individuals of *I. typographus*. In 2020, the number of captured *I. typographus* was highest in early June, and although it decreased after that, the number increased again from mid-July to late August. In 2021, the number of *I. typographus* in early June accounted for about 61% of the total, and the number decreased after that. In addition, we obtained a formula estimating the number of individuals from the dry weight of *I. typographus* caught in 2021. Although five years had passed since the infestation and newly attacked trees decreased in 2021, there is a possibility that the infestation will continue for a while because the number of captured *I. typographus* increased. Therefore, it is necessary to pay attention to the occurrence of *I. typographus*.

Key words

Ips typographus, *Picea*, pheromone trap, dry weight, monitoring

改良型雑種採種園方式を用いたカラマツ類雑種採種園の配植設計

石塚 航*・今 博計*

Planting design of the interspecific seed orchard of larch, incorporating the modified design for hybrid seed orchard

Wataru ISHIZUKA*, Hirokazu KON*

要旨

将来にわたるグイマツ雑種 F_1 種苗の安定供給のため、かつ、さらに優れた遺伝的特性を有する種苗の供給のため、カラマツ類雑種採種園の拡充が求められている。道有訓子府採種園のブロック2箇所にて雑種採種園を新規造成することとなったので、種子の雑種率の向上を主目的とした改良型雑種採種園方式で配植を設計した。すなわち、グイマツは単一母樹クローン列状植栽で設計し、グイマツ1列に対してニホンカラマツ2列の割合で混植させた。植栽するグイマツやニホンカラマツの系統は、これまでの林木育種事業での利用実績を踏まえて優良な系統構成となるようにし、遺伝的多様性にも配慮して配植した。

キーワード：採種園，配植設計，カラマツ類雑種，雑種率向上

はじめに

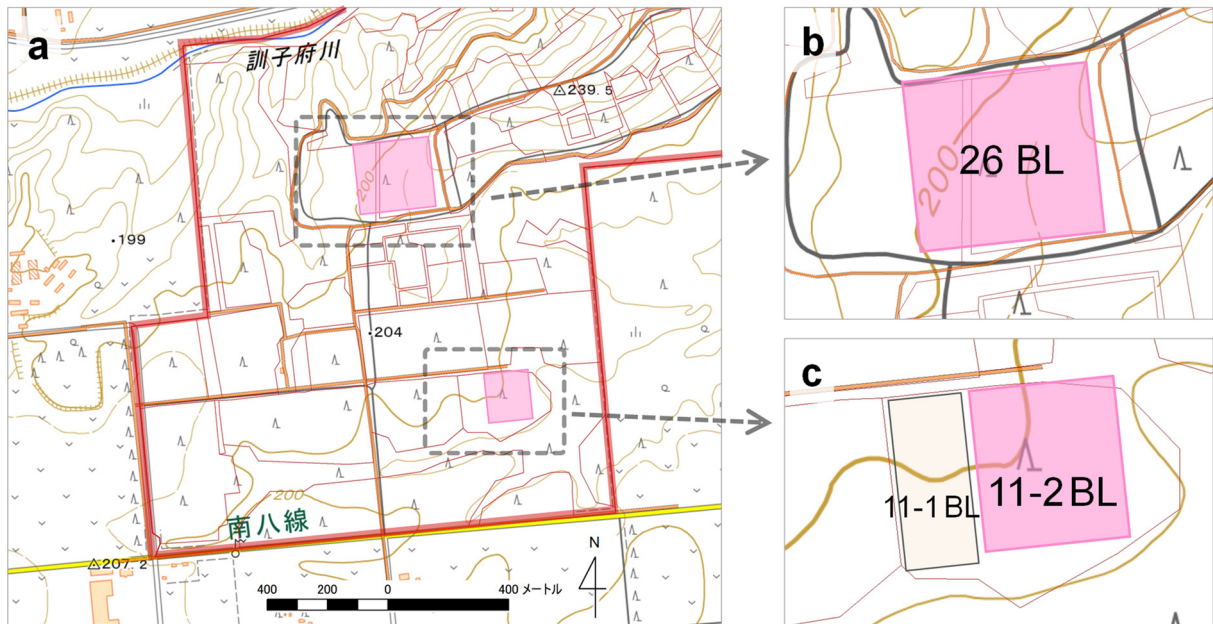
北海道では人工林資源が充実しつつあり、それらの伐採に伴う着実な再生林と同時に、脱炭素社会の実現への貢献も求められている。2021年に掲げられた「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では「優良品種による造林の普及拡大」が項目に挙げられ（経済産業省 2021）、優良な造林用種苗に対するますますの要望・需要が見込まれる。これに応えるには、優れた遺伝的特性を有する優良品種の継続的な開発とともに、優良な種苗の安定供給体制の構築が欠かせない。種子の生産は採種園が担うことから、将来にわたる安定供給を図るため、北海道では2022年3月に「北海道採種園整備方針」と「北海道採種園整備計画」を改定した（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に進めることとし、種子生産の拡充が必要な樹種については、優良な系統で構成させた採種園を造成することとしている。

北海道の主要造林樹種のうち、まだ造林需要を十分に満たしていないのがグイマツ雑種 F_1 である。グイマツ雑種 F_1 はグイマツ（母親）にニホンカラマツ（花粉親）を交雑させて得

られ、ニホンカラマツからは成長性の良さ、グイマツからは材質特性の良さ、野鼠による食害の受けにくさを受け継ぐ（倉橋 1988；松本 2022；宮木 1990）。このうち、とくに成長・材質特性に優れ、二酸化炭素固定能が高いクリーンラーチ（グイマツ中標津5号×ニホンカラマツ精英樹）については採種園整備等の普及が進められている（今 2022）。道有採種園のほか、2013年改正の「森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法」において認められた特定増殖事業者による採種園、いわゆる民間採種園でもクリーンラーチ採種園が新規造成され、2022年現在、クリーンラーチ採種園の総面積は47.47 haとなっている（北海道水産林務部林務局森林整備課 2022a）。

クリーンラーチ開発当初に試みられたのが、雑種率の向上を主目的とした植栽仕様の採種園である（黒丸ら 2003, 2009；黒丸 2021）。従来の雑種採種園では、任意交配ができるように無作為化配植（藤澤 2014）を行い、様々な系統のグイマツとニホンカラマツが入り混じるような混植がなされていた。一方、クリーンラーチは母樹となるグイマツが1系統（中標津5号）のみに限られる特徴があり、かつ、クリーンラーチ採種園は既存のニホンカラマツ採種園からの改植によって新しく造ろうとした背景があった。そこで、同一系統のクロー

* 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60号 令和5年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 60, March, 2023]



図－1 道有訓子府採種園の全体図 (a) ならびに新規造成する2箇所のカラマツ類雑種採種園用地の拡大図 (b, c)

a : 採種園用地 (網走東部管理区40林班) の外周を太線 (赤) で、園内のブロック (BL) にほぼ対応する小班の境界を細線 (赤) で示す。園内の中太線 (橙色) は作業道。b : 26 BLの用地を色付きで示す。新設につき小班界とは対応していない。c : 11 BL内において新規造成する11-2 BLの用地を色付きで示す。隣接し、既に造成が済んでいる11-1 BLの用地も参考のために示す。背景図は、国土地理院地形図 (基盤地図; <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>) をもとに、ArcGIS 10.3 (ESRI社) を用いて加工し、作成した。

ン間では交配が成功しにくいという前提のもと、既存採種園内を列状に伐開した後に、グイマツ1系統を列状で植栽するという仕様でクリーンラチ採種園を設計した。この仕様の導入により、実際に約90%と高い雑種率が実現できたほか (黒丸ら 2009; Moriguchi et al. 2008), 採種する母樹が列状に並ぶために、採種作業や、樹形維持・結実促進等の各種作業が容易となり、作業効率の点でも利点があった。そこで現在においても、民間採種園を含めて、新規造成するクリーンラチ採種園の構成はすべてこの仕様に統一されている (北海道水産林務部林務局森林整備課 2022b)。

将来にわたるグイマツ雑種F₁種苗の安定供給や、さらに優れた遺伝的特性を有する種苗の供給に資するためには、クリーンラチ採種園にとどまらず、中標津5号 (クリーンラチ母樹) 以外の優良なグイマツ系統や、優良なニホンカラマツ系統で構成されたカラマツ類雑種採種園の拡充が必要である。そこで、北海道採種園整備方針に基づいて (北海道水産林務部林務局森林整備課 2022a), 道有採種園に雑種採種園を造成することとなったので、これまでのクリーンラチ採種園造成の際に改良された設計方式での雑種採種園設計を行うこととした。本報告では、今後の採種園管理や林木育種に資するため、この方式での雑種採種園の配植設計について提示する。

改良型雑種採種園の概要

1. 採種園用地

北海道常呂郡訓子府町 (43° 44'51"N, 143° 42'12"E) に位置し、道有林網走東部管理区40林班に設定された道有訓子府採種園のブロック2箇所をカラマツ類雑種採種園の新規造成用地とした (図-1 a)。当該採種園は約60 haの面積を有し、園内が複数のブロックに分割され、様々な樹種の採種園が集約される形になっており、とくにカラマツ類の種子を生産する北海道の主力採種園として機能している。標高は約200 mで、園内はほぼ平坦で目立った傾斜や起伏はみられない。

1箇所目の採種園用地は、園内の北側に新規で設定した26ブロック (26 BL) とした (図-1 b)。もとは、林木育種事業でカラマツ類次代検定林として使用した林地であったが、第2世代精英樹候補木の選抜・増殖後に皆伐、整地したため、採種園として新規造成できるようになった用地である。面積は3.7 haで、東西200 m, 南北185 mの形状で正方形に近い (表-1)。南側および東側には作業道が敷設されており、本作業道は大型車両の走行が可能なおことから、採種時のアクセスが良好である。

2箇所目の用地は、11ブロック (11 BL) 内で2分割された区画のうち更新対象となっている11-2 BLとした (図-1 c)。11 BLは1963年に従来方式でカラマツ類雑種採種園が造成されたが、当該区画は皆伐されたため、新規植栽による更新を図ることとした。面積は1.5 haで、東西115 m, 南北125

表-1 道有訓子府採種園において新規造成するブロック2箇所と隣接ブロック(参考)の概要

項目	26 BL	11-2 BL	(参考) 11-1 BL
生産種子	グイマツ雑種F ₁	グイマツ雑種F ₁	グイマツ雑種F ₁
植栽仕様(全体)	改良型雑種採種園方式	改良型雑種採種園方式	—
(グイマツ)	単一母樹クローン列状植栽	単一母樹クローン列状植栽	単一母樹クローン列状植栽
(カラマツ)	16系統, 採種園9型設計	13系統, 採種園9型設計	20系統, 配植の型は不明
面積(ha)	3.7	1.50	0.84
植栽設計	グイマツ1条, カラマツ2条 植え(東西方向)	グイマツ1条, カラマツ2条 植え(南北方向)	グイマツ1条, カラマツ3条 植え(南北方向)
苗(行)列間	5 m(横)×10 m(縦)	5 m(横)×10 m(縦)	4 m(横)×10, 12 m(縦)
行列情報	40行×19列	25行×12列	35行×7列
行延長(m)	200	125	140
列延長(m)	185	115	62
植栽数(全体)	760本	282本	98本 [†]
(グイマツ)	240本	100本	24本 [†]
(カラマツ)	520本	182本	74本 [†]
密度(本/ha)	205	188	117

[†]:現存数で示す。カラマツについては昭和38年(1963年)に植栽後、間伐や枯損によって数を減じた。

mの形状で正方形に近い(表-1)。用地の北側には作業道が敷設されており、大型車両の走行が可能なることから、採種時のアクセスが良好である。また、同じブロック内の隣接する区画(11-1 BL)には既にカラマツ類雑種採種園の植栽が済んでおり、今回、11-2 BLの配植設計時には11-1 BLの配植情報も用いることから、参考に情報を付すこととした(表-1)。11-1 BLの面積は0.84 haで、東西62 m、南北140 mの長方形である。

2. 採種園の仕様

クリーンラーチ採種園造成の際に改良された設計方式(黒丸ら 2003, 2009; 黒丸 2021)に基づきながら、26 BL, 11-2 BLで植栽の仕様を共通させた。すなわち、列ごとに植栽樹種を分けた列状の植栽仕様とし、とくに母樹となるグイマツの植栽列については単一の系統のクローンのみを植栽する。このグイマツの植栽仕様を、以降では『単一母樹クローン列状植栽』と呼ぶ。これは、Moriguchiら(2008)が用いた“a single maternal clone”の用語や、上述の報告(黒丸ら 2003, 2009; 黒丸 2021)、ならびに、従来からの改良点を整理した上で定義した。さらに、母樹(グイマツ)については単一母樹クローン列状植栽の仕様を導入し、花粉親(ニホンカラマツ)についてはより多くの系統がまんべんなく交配親として貢献できるような配植で設計される。採種園の設計方式のことを『改良型雑種採種園方式』と呼ぶこととする。これは、種子の雑種率の向上を主目的として従来方式から改良した設計方式を指すため、クリーンラーチ採種園やカラマツ類雑種採種園の

みならず、種間(系統間)の交雑によって種子を生産する雑種採種園において広く適用可能な設計方式と定義できる。

なお、26 BL, 11-2 BLの植栽においては、グイマツ1列(1条植え)に対してニホンカラマツ2列(2条植え)の割合で列状植栽することとした(表-1)。植栽列は26 BLが東西方向、11-2 BLが南北方向とした。これは、採種時に車両を用いることを想定し、基幹となる作業道からの乗り入れが可能なるように、作業道と直行方向で設定したためである。列に沿って苗列間5 m×10 mで植栽することとした。26 BLでは40行×19列、のべ760本を植栽することとし、11-2 BLでは25行×12列、のべ282本を植栽することとした。植栽密度は26 BLが205本/ha、11-2 BLが188本/haである(表-1)。

3. 系統構成の考慮

導入するグイマツとニホンカラマツの系統のクローンについては、これまでの林木育種事業での利用実績等を踏まえて決めた。

グイマツについては、26 BLと11-2 BLとで大きく設計を変えた。まず、26 BLでは6系統を導入することとし、成長性と材質関連形質において優良な以下の系統を選定した：クリーンラーチの母樹である①中標津5号、北のバイオニア1号の母樹である②留萌1号、材質・通直性優良系統の③豊岡111号と④中標津4号、さらに、南サハリンにて採取した種子に由来する後代で、検定において優れた成績を示した⑤グイマツ優良木2号と⑥グイマツ優良木4号である(来田 2013; 来田ら 2011; 田村ら 2015)。続いて11-2 BLでは、材質・通直

性優良系統の豊岡111号の1系統のみを導入することとした。豊岡111号を親とした雑種F₁検定では、材の強度的性質の指標となる幹のヤング係数や、材の歩留まりを左右する幹の通直性（矢高）が優れており（来田ら 2011）、グイマツ同士の交配によるグイマツ第2世代精英樹選抜においても、材強度と通直性に優れた候補木の親として豊岡111号が貢献していた（来田 2013）。本系統は隣接するカラマツ類雑種採種園（11-1 BL）に既に導入されていたことから、11 BL全体において母樹が1系統に固定された、一貫した設計となった。

ニホンカラマツについては、より多くの優良な系統が花粉親として貢献し、生産される種子の遺伝的多様性がより高くなるように選出した。まず、これまでの林木育種事業での利用実績（たとえば、森林総合研究所林木育種センター北海道育種場 2019）に基づいて18系統を整理した（表-2）。内訳は、特定増殖事業者によるクリーンラーチ採種園造成（特定増殖事業）の際に導入されて利用が進む12系統、ならびに、幹重量（二酸化炭素吸収・固定能力）の大きい品種として開発品種に指定された3系統（うち1系統は特定増殖事業での選出と重複）、優良な品種として選抜・開発されたグリーン（大島 1996）と北のバイオニア1号の花粉親2系統、さらに、林業試験場や森林総合研究所林木育種センター北海道育種場（以降、北海道育種場）が実施した次代検定で優良と確かめられた2系統である。この中から、26 BLでは16系統、11-2 BLでは13系統を導入することとした。

改良型雑種採種園における配植設計

1. 26 BLの配植設計

グイマツは6列のべ240本、ニホンカラマツは13列のべ520本植栽することとして配分した。グイマツは単一母樹クローン列状植栽の植栽仕様にのっとり、1系統につき1列を無作為に抽出して配植した。ニホンカラマツについては、構成する全系統がまんべんなく親として貢献できるような適正な配植であることが求められ、採種園9型の方式に沿った配植設計が望ましいと考えた。採種園9型とは、植栽個体を中心にしてタテ、ヨコ、ナナメ全方位において接する個体について系統を考える方式をいう。採種園9型で適正配置が満たされる場合には、採種園内の任意の3×3の9マス内に同一クローン（血縁個体含む）が2個体以上存在しない（石塚ら 2018）。本ブロックにおいても、採種園9型で適正配置が満たされるようにした。なお、本ブロックの造成は複数年にかけて行うこととしたため、配植設計は順次行った。造成初期の植栽範囲については、表計算ソフトを用いた手作業で無作為化配植と同一クローンの隣接有無の確認作業を行った。植栽後半では、作業が煩雑になることを踏まえて、採種園設計支援プログラム「MIX-WEX」（高橋 2002；千葉 2014）を活用した配植設計を実施した。なお、適正配置を満たすには、既に植栽が済んだ配植についても考慮する必要が生じる。そこで、石塚（2022b）が紹介した手順ののっとり、植栽済み個体の

表-2 道有訓子府採種園の雑種採種園用ブロックへ新規導入するニホンカラマツの内訳

系統名	26 BL 配植番号	11 BL 配植番号	系統利用状況
後志30号（支）	1	32	特定増殖事業
空知10号（支）	2		特定増殖事業
十勝1号（支）	3	33	特定増殖事業
十勝19号（支）	4		特定増殖事業
十勝35号（支）	5	34	特定増殖事業
十勝75号（支）	6		特定増殖事業
十勝79号（支）	7		特定増殖事業
日高10号（支）	8	28	特定増殖事業
日高11号（支）	9	29	特定増殖事業
空知3号（支）	10	35	特定増殖事業
稚内12号	11	36	特定増殖事業
日高8号（支）	12	37	特定増殖事業、開発品種指定 ^a
網走1号（支）	13	38	開発品種指定 ^a
空知4号（支）	14	39	開発品種指定 ^a
胆振1号（支）	15	30	‘グリーン’親
諏訪16号	16		材質特性優良 ^a
上川2号（支）		40	雑種後代の成績優良 ^b
諏訪14号		41	‘北のバイオニア1号’親

特定増殖事業：特定増殖事業者による民間クリーンラーチ採種園の造成を指し、この際にニホンカラマツ12系統が選定されて導入された。

開発品種指定：幹重量（二酸化炭素吸収・固定能力）の大きい品種として指定

^a：森林総合研究所林木育種センター北海道育種場により実施

^b：林業試験場により実施

情報を考慮した配植設計を実施した。

2. 26 BLの配植設計の結果

ニホンカラマツの配植において、「MIX-WEX」を活用した範囲では、実行時の反復試行回数（初期設定10回のみ）内で適正配置を満たす解が得られた。全体を通して適正配置と

なっていることを確認した。

グイマツとニホンカラマツそれぞれの配植を合わせて得られた26 BL全体の配植図と植栽系統一覧を図-2に示す。グイマツは図中の橙色の色付きで示した列に植栽される。

植栽用の苗木は北海道育種場が準備し、2019年から5年間かけて配布を受けた。そこで、この配植図に従って、2019～

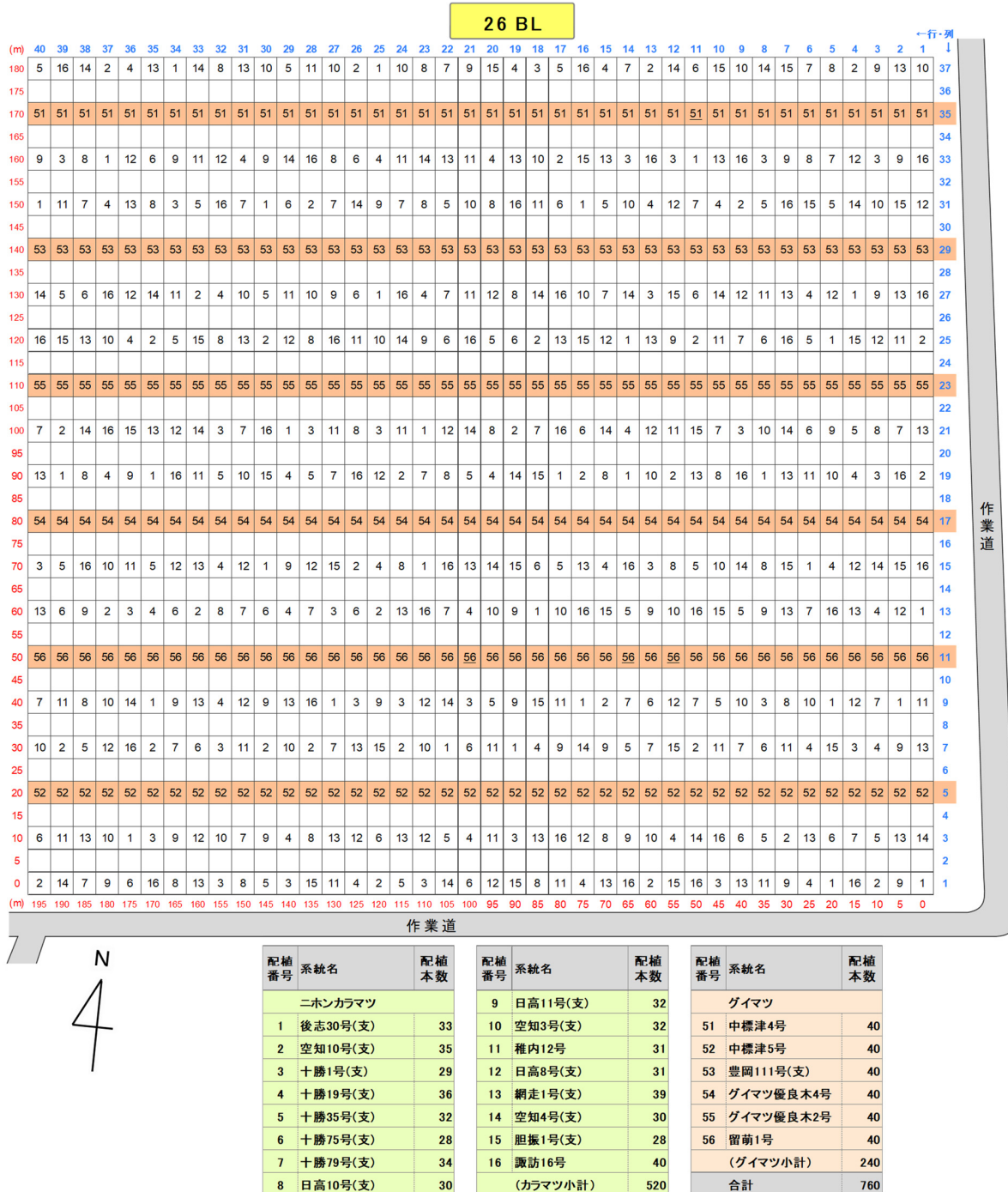


図-2 道有訓子府採種園26 BLの配植図面

番号付きのマスに1個体が植栽される。番号は系統ごとに割り当てる配植番号と対応し、図下部の凡例のとおり。色付き（橙色）の列がグイマツ植栽列。この中の一部、下線付きの個体は2022年秋時点で枯損していたことを表す。欄外の青色数字（上、右端）が各区画の行列番号を、赤色数字（下、左端）が1行目もしくは1列目からの距離を示す。

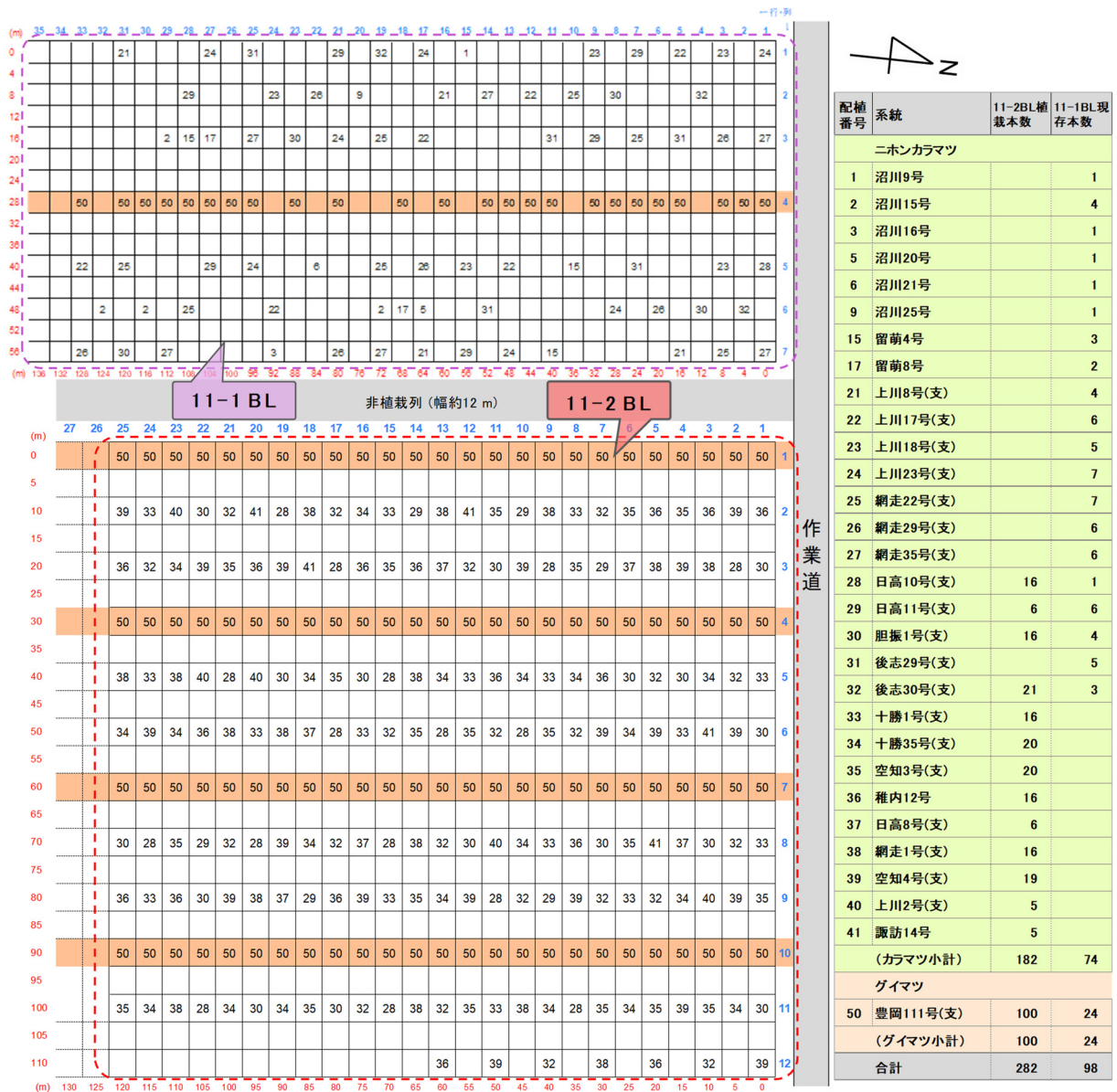


図-3 道有訓子府採種園11-2 BLおよび隣接する11-1 BLの配植図面

番号付きのマスに1個体が植栽される。番号は系統ごとに割り当てる配植番号と対応し、図中の凡例のとおり。色付き(橙色)の列がグイマツ植栽列。欄外の青色数字(上,右端)が各区画の行列番号を,赤色数字(下,左端)が1行目もしくは1列目からの距離を示す。

2022年春に植栽を実施し、また、2023年春に配植調整や補植を実施する予定である。なお、今後の管理に資する資料として、図-2はすべての植栽が反映されたあとの配植として示している。

3. 11-2 BLの配植設計

グイマツは4列のべ100本、ニホンカラマツは8列のべ182本植栽することとして配分した。隣接する11-1 BLの配植を踏まえ、グイマツは11-1 BLと接する1列目より3列おきに植栽することとした(図-3)。すなわち、11-1 BLに配植されたニホンカラマツを花粉親として効果的に機能させるための配植とした。なお、本11-2 BLは、隣接する11-1 BLと植栽

列方向を統一させたものの、苗列間等の仕様は異なる(表-1)。しかし、2つの区画間で植栽年が大きく異なり、今後の管理を同一に行うことはないと考えられ、支障は生じにくいと判断した。

ニホンカラマツについては、26 BLと同様に、採種園9型で適正配置が満たされるようにした。そのため、採種園設計支援プログラム「MIX-WEX」(高橋 2002;千葉 2014)を活用し、隣接する11-1 BLの植栽個体情報を考慮させながら(石塚 2022b)、配植設計を実施した。

4. 11-2 BLの配植設計の結果

ニホンカラマツの配植において、「MIX-WEX」実行時の反

復試行回数内で適正配置を満たす解が得られた。これをグイマツの配植と重ね、隣接する11-1 BLと合わせて示した全体の配植図と植栽系統一覧を図-3に示す。11-1 BLの配植から連続するように、グイマツ1系統（豊岡111号）の植栽列が並び、その両隣をニホンカラマツが取り囲む。

植栽用の苗木は北海道育種場が準備し、2023年に配布を受ける。そこで、この配植図に従って、2023年春に植栽を実施する予定である。

おわりに

カラマツ類雑種採種園はこれまでも改良型雑種採種園方式での造成があったが、その明確な設計の資料が今までなかった。本報告では、訓子府採種園26 BLと11-2 BLの造成に伴う配植設計の根拠を示した。これは本採種園の今後の管理に資するのみならず、これからの雑種採種園の造成・整備・管理や林木育種において広く参照できる資料となると考えられる。

一方、26 BLで導入したような、グイマツ複数系統による「単一母樹クローン列状植栽」仕様でも、想定通りに高い雑種率が得られるかどうかについては、まだ知見に乏しいのが実情である。本採種園や、造成が済んだ他採種園での雑種率の解明は今後検証すべき点である。

採種園では、常に個体の配置が明確で、系統情報を正確に辿ることが重要なため、1本1本の確実な生存と、看板等による個体情報の明確化を図る必要がある（石塚ら 2018; 石塚 2022b）。とくに雑種採種園の場合、確実な雑種F₁種子を生産させる必要があり、継続的な管理（下刈り、除伐や獣害・雪害対策）や適正な断幹、効果的な事業用採種の実行に手抜きがないよう、関係者一同での取り組みを続けていくことが重要である。

補足情報

今回配植したニホンカラマツに関しては、採種園9型での適正配置が満たされていることから、次代（生産される子ども）の遺伝的多様性と自殖リスクの低減の両方が担保されていると考えられる。優良な系統で構成させているため、将来、事業用カラマツ種子の生産の場（ニホンカラマツが母樹となり、周囲個体が花粉親となって生産された種子はニホンカラマツとして扱うことができる）として期待できる。さらに、北海道では遺伝情報を利用したカラマツ類育種が進みつつあるため（石塚 2022a）、有用な育種集団の生産の場としても期待できる。

謝辞

植栽するクローン苗木の育成において、国立研究開発法人森林研究・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の辻山善洋氏はじめスタッフの協力を賜った。採種園

用地の設定、植栽、現況調査等において、北海道水産林務部林務局森林整備課、オホーツク総合振興局東部森林室、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

- 千葉信隆（2014）ランダム配置ソフト「MIX-WEX」のご紹介. 東北の林木育種, 206: 5
- 藤澤義武（2014）林木育種の現場のABC(8)採種園（造成準備）. 森林遺伝育種, 3:179-184
- 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>（2022.11/4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>（2022.11/4確認）
- 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
- 石塚 航（2022a）日本の林木育種の過去・現在・未来：（1）カラマツ-9 カラマツ属におけるゲノムリソース情報と今後の育種への活用. 森林遺伝育種, 11: 135-140
- 石塚 航（2022b）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
- 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>（2022.11/4確認）
- 来田和人・田村 明・今 博計・内山和子・秋本正信・生方正俊・黒丸 亮（2011）グイマツ第2世代精英樹選抜に向けた次代家系の評価. 北方森林学会第60回大会, Pa-18
- 来田和人（2013）グイマツ第2世代精英樹の選抜. 光珠内季報, 167: 4-8
- 今 博計（2022）日本の林木育種の過去・現在・未来：（1）カラマツ-7 クリーンラーチの開発と普及. 森林遺伝育種, 11: 124-129
- 倉橋昭夫（1988）カラマツ属の交雑育種に関する研究. 東京大学演習林報告, 79: 1-94
- 黒丸 亮・大島紹郎・来田和人・内山和子（2003）グイマツ雑種F₁種苗のブランド化目指した新採種園方式-列状植栽した単一クローン母樹産種子の品質と雑種率-. 北海道の林木育種, 46（2）: 5-8
- 黒丸 亮・内山和子・来田和人（2009）北海道におけるカラマツ類採種園の改良の現状と展望. 北海道の林木育種, 52（2）: 1-4

- 黒丸 亮 (2021) 光珠内における林木育種の始まりから今,そしてこれから. 光珠内季報, 200: 7-12
- 松本和茂 (2022) 日本の林木育種の過去・現在・未来:(1) カラマツ-3 カラマツとグイマツ雑種F₁材の特徴と利用. 森林遺伝育種, 11: 69-73
- 宮木雅美 (1990) ハイブリッドカラマツの特性と改良. 北海道の林木育種, 53 (1): 8-11
- Moriguchi Y, Kita K, Uchiyama K, Kuromaru M, Tsumura Y (2008) Enhanced hybridization rates in a *Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi* interspecific seed orchard with a single maternal clone revealed by cytoplasmic DNA markers. *Tree Genetics & Genomes*, 4: 637-645
- 大島紹郎 (1996) グイマツ雑種F₁の優良品種「グリーン」の開発とその特性. 光珠内季報, 101: 1-3
- 森林総合研究所林木育種センター北海道育種場 (2019) 開発品種紹介 <http://www.ffpri.affrc.go.jp/hokuiku/kenkyushokai/seka/kaihatsuhinsyu.html> (2022.11/4確認)
- 高橋 誠 (2002) 採種園設計のためのVisual Basicプログラム「Mixed」の開発・評価と設計の作業効率に影響する要因. 日本森林学会誌, 84: 239-245
- 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・佐藤亜樹彦・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 (2015) 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> (2022.11/4確認)

Key words

seed orchard, planting design, hybrid larch, enhancement of hybridization rate

北海道林業試験場研究報告 No.60

発行年月 令和5年3月
編集 林業試験場刊行物編集委員会
発行 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
〒079-0198
北海道美唄市光珠内町東山
TEL (0126) 63-4164
FAX (0126) 63-4166
ホームページ <https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fri>
印刷 株式会社 総北海
旭川市工業団地2条1丁目1-23
TEL (0166) 36-5556
