



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61号

**BULLETIN
OF THE
HOKKAIDO FORESTRY RESEARCH INSTITUTE**

No. 61

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6年3月

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

March 2024

北海道林業試験場研究報告 第61号

目 次

今 博 計 長 坂 晶 子 小 山 浩 正	林冠木の開葉フェノロジーがブナの更新に及ぼす影響……………	1
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	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……………	11
研究資料		
長 坂 晶 子 山 田 健 四 速 水 将 人 長 坂 有	保持林業実証実験地における伐採前後の土壌環境の変化……………	23

Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute

No.61

Contents

Effects of canopy trees leaf phenology on regeneration of <i>Fagus crenata</i> Hirokazu KON, Akiko NAGASAKA, Hiromasa KOYAMA	1
Selecting superior trees of <i>Abies sachalinensis</i> 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	11
Research Material	23
Changes in soil environment before and after logging in the Retention Experiment for plantation FoREstry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH) sites Akiko NAGASAKA, Kenji YAMADA, Masato HAYAMIZU, Yu NAGASAKA	

林冠木の開葉フェノロジーがブナの更新に及ぼす影響

今 博計*・長坂晶子*・小山浩正**†

Effects of canopy trees leaf phenology on regeneration of *Fagus crenata*

Hirokazu KON*, Akiko NAGASAKA*, Hiromasa KOYAMA**†

要旨

ブナ稚樹は、ブナ以外の広葉樹の林冠下に分布が集中することがあり、この原因として林冠構成種の開葉時期の違いが関わっていると指摘されている。そこで本研究では、北海道南西部の3カ所のブナ林において、ブナの更新を上層の状態と関連づけて調べた。林内は林冠の状態からブナパッチ、ブナ以外の広葉樹パッチ（以後、広葉樹パッチ）、ギャップの3タイプに区分した。広葉樹パッチは日和山と宮越ではイタヤカエデとホオノキが、歌才ではミズナラが優占していた。ブナ下層木の個体数はパッチ間で有意な差があり、広葉樹パッチで最も多く、ブナパッチとギャップで少なかった。広葉樹パッチでの胸高直径階別本数分布は、ブナが他樹種の林冠下で更新していることを示していた。一方、イタヤカエデとホオノキはいくつかのギャップを修復していた。ササの現存量はギャップが最も多く、ササの現存量とササ層の下に出現するブナ稚樹の本数との間には、有意な負の関係があった。林冠下に植栽したブナ苗木のシュート伸長量は、ホオノキの林冠下が最大であり、次いでイタヤカエデの林冠下、ブナ林冠下が最小だった。これらの結果は、渡島半島のブナ林では、イタヤカエデ、ホオノキ、ミズナラなどがギャップで更新し、やがてその林冠下で更新したブナに置き換わっている可能性を示していた。

キーワード：開葉フェノロジー、ギャップ、更新、ササ、ブナ林

はじめに

極相林では林冠木の枯死や倒木によってできる林冠を欠いた空間であるギャップを、下層から成長する実生や稚樹が埋める形で森林の維持がされており、更新段階の異なるパッチがモザイク状に分布している (Watt 1947; Pickett and White 1985; 中静・山本 1987)。このようなギャップの形成に起因して始まる更新過程はギャップダイナミクスと呼ばれ、日本のブナ林でもこのように部分的な破壊と再生が繰り返されることで、ブナ林が再生・維持されていることが明らかにされている (Nakashizuka and Numata 1982a, b; Nakashizuka 1983, 1984a, b)。ギャップにおけるブナの更新は、ギャップ形成前から存在している実生や稚樹群が、ギャップ形成で被圧から開放され成長することで行なわれる。このためギャップでは高密度のブナ稚樹個体群が成立しているとされる (Nakashizuka 1987)。

しかしながら、ブナの更新研究が各地のブナ林で行なわれていく中で、ブナ稚樹の分布がギャップではなく、それ以外の場に集中する場合があることが報告されている。例えば、奈良県大台ヶ原のブナ-ウラジロモミ林では、ブナ下層木の分布がブナ林冠下、ギャップよりミズナラ林冠下に集中すること (Akashi 1996)、北海道函館のブナ林ではブナ稚樹の分布がギャップではなくイタヤカエデ、ホオノキの林冠下に偏っていること (小山ら 2007)、また宮城県栗駒山ではブナ稚樹がギャップよりもミズナラ、ホオノキの林冠下に多く出現すること (Tomita and Seiwa 2004) などが報告されている。これらの研究においてブナ稚樹がブナ以外の広葉樹の林冠下に多い理由として、林冠構成種の開葉時期の違いが影響していると考えられている。すなわちブナの開葉は他のブナ林構成種に比べて早いため (丸山 1979; 大野 1992)、開葉が遅い樹種の林冠下では、早春の一時期にギャップのような明るい環

* 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

** 山形大学農学部 †2016年3月10日逝去

[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]

境（フェノロジカルギャップ）が生じ、ブナ稚樹の生存、成長に有利に作用しているとされる（Tomita and Seiwa 2004；小山ら 2007）。

このようなブナ稚樹の空間分布構造から、小山ら（2007）はブナ以外の林冠木が攪乱等によりギャップを形成した場合にはブナが更新し、一方、ブナ林冠木がギャップを形成した場合にはブナより成長の早い広葉樹が更新する、相互置換的（サイクリック）な更新をしている可能性を指摘している。しかし、これまでの報告（Tomita and Seiwa 2004, 小山ら 2007）では、他樹種の林冠下がブナの更新にとって有利な理由は説明しているものの、稚樹調査はブナだけに限られ、ブナ以外の広葉樹については調査が行われていない。ブナと他樹種とのサイクリックな更新の存在を明らかにするためには、ギャップでの広葉樹の更新の様子を調べる必要があるが、先行研究では調査を行っていない（小山ら 2007）。さらに、他樹種の林冠下でブナ稚樹が多い現象は、大台ヶ原（Akashi 1996）、栗駒山（Tomita and Seiwa 2004）、函館（小山ら 2007）で報告があるのみであり、この現象が他地域のブナ林でも存在しているのか明らかにする必要がある。

そこで本研究では、北海道のブナ林での更新過程の把握およびブナ稚樹の空間分布の状況を明らかにするため、北海道函館のブナ林（小山ら 2007）と渡島半島の2カ所のブナ林で、①ブナ林冠下、②ブナ以外の広葉樹の林冠下、③ギャップ、でのブナを含む広葉樹の個体群構造と樹木実生の定着に影響を及ぼすササ類の調査を行った。また、上層の状態が下層のブナ稚樹の成長に及ぼす影響を明らかにするため、函館のブナ林の①～③にブナ苗木をそれぞれ植栽し、シュート成長量の調査、および光環境の測定を行った。そして北海道渡島半島のブナ林においてブナとそれ以外の広葉樹が置き換わるサイクリックな更新動態が存在しているのか検討した。

調査地と方法

1. 調査地

調査は北海道南西部の渡島半島の低山帯に位置するブナ天然林3カ所で行った（図-1、函館市日和山：標高200～240m、上ノ国町字宮越：標高280～320m、黒松内町歌才：60～100m）。調査地はいずれも道有林の保護林または国の天然記念物に指定されている。伐採等の記録は残っていないが、林冠木のサイズ構造から考えると日和山は二次林的な様相、宮越と歌才は自然林に近い状態を呈していた。各調査地に近い函館、江差、黒松内のAMeDAS観測データ（1991年～2020年）によると、調査地域の年平均気温は7.5～10.3℃、年間降水量は1,188～1,485mmである。積雪期間は12月から4月までで、最深積雪深は約1～2mである。ブナの開葉時期は4月下旬から5月上旬であり、開葉時には林床の雪は融けている。調査地全体の平均傾斜は4～13°でほぼ平滑な斜面上にある。各調査地とも林床には密度や高さが異なるがクマイザサ（以下ササと

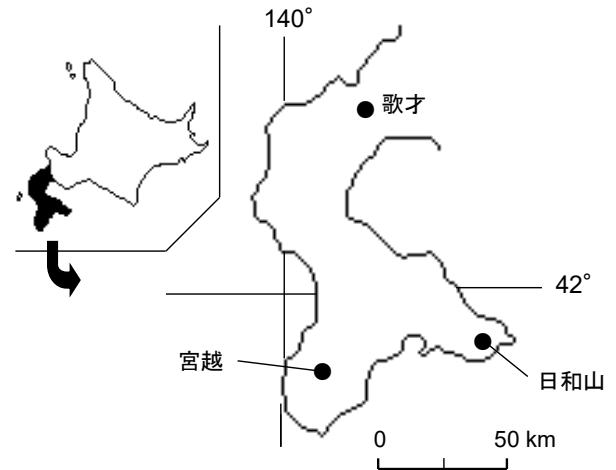


図-1 北海道南西部における3箇所の調査地の位置図

呼ぶ)が生育している。なお、日和山のブナ林は小山ら（2007）の調査地と同じ保護林内（面積8.96ha）に位置している。

2. 調査方法

(1) パッチサンプリング調査

いずれのブナ林とも林冠木が単木で倒れるギャップに起因して更新が生じていると考えた。歌才のブナ林での林冠木の平均樹冠面積が83.5m²程度であること（並川ら 2017）や、ブナ林でのギャップの多くが面積100m²未満であること（中静 2004）に基づき、ギャップに起因する更新のサイズをおおよそ100m²前後と仮定した。こうした100m²程度の範囲には、大径木なら1本、中径木なら数本が含まれる。このサイズでまとまった林冠を形成し、かつ見た目と幹直径サイズが揃っている範囲をギャップに起因する更新パッチとして認識した。これらの更新パッチについて、林冠木の有無と林冠の樹種からブナパッチ、ブナ以外の広葉樹パッチ（これ以降、広葉樹パッチと略す）、ギャップの3タイプに区分した。調査パッチは各林分で4～6haの範囲から無作為に各タイプ10個を抽出した。調査パッチの面積はパッチ中央部から8方位の距離を計測し8つの3角形により近似することで求めた。ギャップは樹高10m以上の上層木がなく、林冠の間隙の短径が5m以上の場所と定義した。1パッチあたりの面積は日和山が80±7m²（平均±標準偏差）、宮越が99±8m²、歌才が122±13m²であった。

各調査パッチで2002年8月に毎木調査と稚樹調査を行った。毎木調査は調査パッチを地面に投射した調査区を設定し、出現した樹高2m以上の高木性樹木について樹種と胸高直径および、林冠層を形成しているか否かについて記録した。稚樹調査は高木性樹木のうち当年生実生から樹高2m未満を稚樹と定め調査を行った。各調査パッチ内に2m四方の方形区を3個設置し、樹種と樹高を記録した。さらに、方形区内のササの植被率と群落高を測定した。解析では、ササの現存量は植被率（%）と群落高（cm）の積によって評価した。

更新の検討に際しては、林冠下にある個体は将来、林冠木と交代する可能性があると考え、出現個体すべてを後継樹として扱った。また、本論の中では後継樹をサイズに応じて、若木（樹高2m以上で林冠層に達していない個体）と稚樹に分けて示している。

(2) 苗木の植栽と光環境の測定

ブナパッチ、広葉樹パッチ、ギャップでのブナ稚樹の伸長成長を比較するため、日和山の調査地に苗木を植栽した。2000年4月にブナパッチ2箇所、イタヤカエデパッチ（広葉樹パッチのうち、イタヤカエデが優占する林冠下）1箇所、ホオノキパッチ（広葉樹パッチのうち、ホオノキが優占する林冠下）1箇所、ギャップ1箇所に苗木を10本ずつ植栽した。苗木は林業試験場道南支場で2年間育成した実生苗で、植栽時の苗高は30~40cmである。植栽時にササによる被圧を避けるため苗木周辺のササを刈り払った。

苗木がササ群落高を越した2006年10月に樹高（自然高）、2生育期間（2005年と2006年）のシュート伸長量を計測した。計測シュートは自然高で最も高い主軸とした。伸長量調査は、枯損個体とエゾシカの食害を受けた個体は除き、ブナパッチ7個体、イタヤカエデパッチ7個体、ホオノキパッチ6個体、ギャップ9個体を対象とした。また、葉の形質が各パッチで異なっているか評価するため、各個体から3枚ずつ葉を採集し、実験室に持ち帰った後、葉面積と乾燥重量を測定しLMA (Leaf mass per area) を求めた。各パッチでの光環境を把握するため、伸長量調査を行った苗木29本の横と林外の裸地1箇所に自動記録式の照度計（HOBOペンダントロガー）をササの桿高を超える地上1mに設置し、2006年4月27日から7月20日の間、1時間間隔で照度を測定した。各パッチがブナパッチに比べてどの程度明るいかを評価するため、パッチごとに日平均値を求め、ブナパッチとの相対値を求めた。また、林外の裸地とブナパッチとの照度比較からブナの開葉日を、イタヤカエデパッチ及びホオノキパッチとブナパッチとの照度比較から両種の開葉日をそれぞれ推定した。

3. データ解析

まず、パッチを構成する林冠木のサイズ構造に調査地間で差があるか検証するため、一元配置の分散分析と多重比較（Tukey法）により林冠構成木の直径の比較を行った。解析はブナパッチ、広葉樹パッチごとに行った。次に、ブナ後継樹（若木、稚樹）の本数密度とササの現存量が、ブナパッチ、広葉樹パッチ、ギャップで差があるか検証するため、一般化線形モデルを用いてモデルを構築した後、多重比較を行った。検証は調査地ごとに行ったが、日和山の若木、歌才の若木と稚樹についてはデータが揃わなかったため、パッチ間の比較は行わなかった。ブナ後継樹（若木、稚樹）の本数については、誤差構造をポアソン分布、リンク関数をログとし、若木

についてはオフセット項に調査面積を入れた。ササ現存量（植被率×群落高）については誤差構造をガンマ分布、リンク関数をログとした。ササが出現しなかった宮越の2パッチ（ブナ林冠下1箇所、ギャップ1箇所）については、ササ現存量を0.1として計算した。第3に、ブナ稚樹の分布に及ぼすササの影響を評価するため、説明変数をササの現存量、応答変数を稚樹のうちササ層以下（各方形区でササ高は異なる）に出現したブナ稚樹数、誤差構造をポアソン分布、リンク関数をログとする一般化線形モデルを用いた。この解析は調査地3箇所分をまとめて行い、各パッチでの3個の方形区に出現したササ層以下のブナ稚樹数の合計、ササ現存量の平均値をデータとして用いた。ブナ稚樹数を説明するモデルの選択は、ササの現存量を含むモデルと切片のみのモデルとのAIC比較により行った。最後に、日和山におけるブナ植栽木の生育状態（樹高、2生育期間2005~2006年の平均伸長量、LMA）が上層の樹種（ブナ、イタヤカエデ、ホオノキ、ギャップ）で差があるかを検証するため、一元配置の分散分析と多重比較を行った。以上の解析はR4.2.2（R Core Team 2022）を用いた。

結果

1. パッチの樹種構成とサイズ構造

広葉樹パッチを形成していた林冠構成種は、日和山で6種、宮越で5種、歌才で8種であり、うちイタヤカエデ、ホオノキ、ハリギリの3種が共通していた（表-1）。胸高断面面積合計比は、日和山と宮越ではイタヤカエデとホオノキの割合が高く、2種で全体の77~83%を占めていた。一方、歌才ではミズナラ、ダケカンバ、シナノキの割合が高く、それぞれ43%、15%、14%であった。広葉樹パッチにおける林冠構成木の平均胸高直径（±SD）は日和山で21.9±6.9cm、宮越で30.9±13.8cm、歌才で36.9±18.4cmであり、日和山では他の2林分に比べてサイズの小さい個体がパッチを形成していた（Tukey検定、 $p<0.001$ ）。また、林冠構成木のパッチ面積当たりの平均胸高断面面積合計（±SD）は日和山（22.9±7.3m²/ha）、宮越（33.5±12.9m²/ha）、歌才（44.1±14.2m²/ha）の順に大きかった。

表-1 広葉樹パッチを構成する林冠木の胸高断面面積合計割合 (%)

樹種	日和山	宮越	歌才
イタヤカエデ	44.9	53.4	11.8
ホオノキ	38.3	23.7	10.0
ハリギリ	3.9	13.1	3.9
コシアブラ	7.4	5.9	
ヤマモミジ	3.9		1.8
エゾヤマザクラ	1.6		
ウダイカンバ		4.0	
ミズナラ			42.9
ダケカンバ			14.7
シナノキ			14.0
キハダ			0.9

ブナパッチでの林冠構成木の平均胸高直径(±SD)は日和山で43.1±9.7cm, 宮越で51.3±14.7cm, 歌才で71.7±13.5cmであり, 調査地間で互いに有意な違いがあった(Tukey検定, $p<0.001$)。また, 林冠構成木の平均胸高断面積合計(±SD)はいずれも成熟したブナ林の値35m²/ha(島野・沖津1994; Yamamoto et al. 1995; 松本ら 2012)を越えており, 日和山で45.5±7.2m²/ha, 宮越で54.6±11.2m²/ha, 歌才で44.1±7.5m²/haだった。

2. 各パッチにおけるブナ後継樹の出現状況とサイズ構造およびササ現存量

3調査地におけるパッチタイプごとのブナ後継樹の出現パッチ数と平均個体数を表-2に示す。ブナ後継樹の出現パッチ数は, すべての調査地で広葉樹パッチが最も多かった。特に歌才ではブナ後継樹の出現は広葉樹パッチに限られ, ブナパッチとギャップには出現しなかった。ブナ後継樹の平均本数密度もまた広葉樹パッチで最も高かった(表-2)。日和山でのブナ稚樹の平均本数密度は広葉樹パッチで16,583本/ha

であり, ブナパッチ, ギャップに比べ6~11倍の密度と有意に高かった(Tukey検定, $p<0.001$)。一方, 宮越でのブナ稚樹の平均本数密度はパッチ間で有意な差は認められないものの, 広葉樹パッチでの平均本数密度はブナパッチ, ギャップの平均本数密度の約2倍であった。また, 宮越でのブナ若木の平均本数密度は広葉樹パッチで1,564本/haであり, ブナパッチ, ギャップでの密度に比べそれぞれ8倍, 28倍と有意に高かった(Tukey検定, $p<0.001$)。また, 歌才でのブナ若木の平均本数密度は広葉樹パッチで146本/haであった。

広葉樹パッチに出現した樹高2m以上の高木性樹木の胸高直径階別本数分布を図-2に示す。ブナ後継樹のサイズ分布は調査地間で異なった。広葉樹パッチに出現したブナ後継樹は日和山ではすべて樹高2m未満であったため, 図中には示されていない。宮越ではブナ後継樹は胸高直径0~25cmまで連続的に出現し, 特にサイズの小さな個体ほど個体数が多いL字型の分布を示した(図-2, 表-2)。歌才ではブナ後継樹は胸高直径15~20cmにピークがある一山型の分布を示し, 胸高直径5cm未満の個体を欠いていた。

表-2 各パッチタイプにおけるブナ後継樹の出現パッチ数と本数密度, ササの植被率と群落高

調査地	パッチタイプ	出現数 (/10パッチ)	平均本数密度±SE (/ha)		ササ		
			稚樹(樹高2m未満)	若木(樹高2m以上)	植被率(%)	群落高(cm)	現存量
日和山	ブナ	8	2,750 ± 580 ^a	0	41	66	0.271 ^a
	ブナ以外の広葉樹	10	16,583 ± 3,633 ^b	0	28	70	0.193 ^a
	ギャップ	6	1,500 ± 806 ^a	0	56	95	0.527 ^b
宮越	ブナ	8	2,833 ± 768 ^a	55 ± 63 ^a	9	68	0.058 ^a
	ブナ以外の広葉樹	9	5,417 ± 1,709 ^a	1,564 ± 463 ^b	20	95	0.186 ^b
	ギャップ	8	2,167 ± 995 ^a	178 ± 37 ^a	23	118	0.270 ^b
歌才	ブナ	0	0	0	69	133	0.911 ^a
	ブナ以外の広葉樹	6	0	146 ± 53	79	144	1.133 ^b
	ギャップ	0	0	0	93	177	1.637 ^c

表中の異なるアルファベットは, 各調査地の中で, ブナ後継樹の本数とササ現存量が, パッチタイプ間で互いに有意に異なることを意味する(Tukey検定, $p<0.05$)。

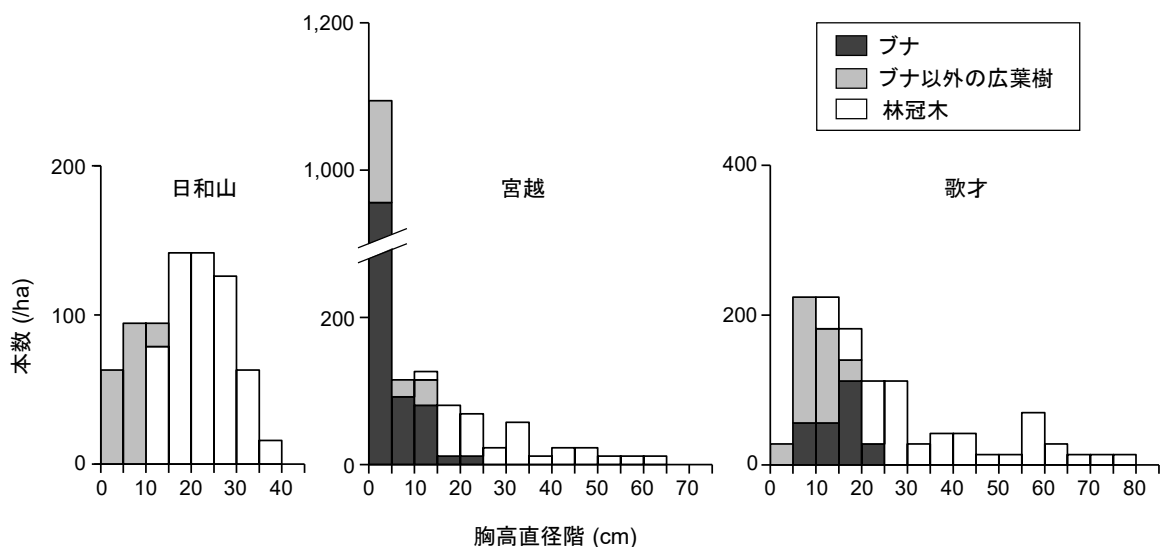


図-2 広葉樹パッチにおける樹高2m以上の高木性樹種の胸高直径階別本数分布

表-3 ギャップに出現した高木性樹木の若木（樹高：2-10m）の樹種別本数密度とその構成割合

樹種	日和山			宮越			歌才		
	本数(/ha)	SE	(%)	本数(/ha)	SE	(%)	本数(/ha)	SE	(%)
ホオノキ	51 ± 34		27	147 ± 46		15	42 ± 42		56
イタヤカエデ	129 ± 70		67	422 ± 160		44			
エゾヤマザクラ	6 ± 6		3						
キタコブシ	6 ± 6		3						
ブナ				178 ± 63		19			
コシアブラ				161 ± 51		17			
ハリギリ				28 ± 19		3			
ケヤマハンノキ				21 ± 21		2			
ダケカンバ							33 ± 23		44
合計	192			958			75		

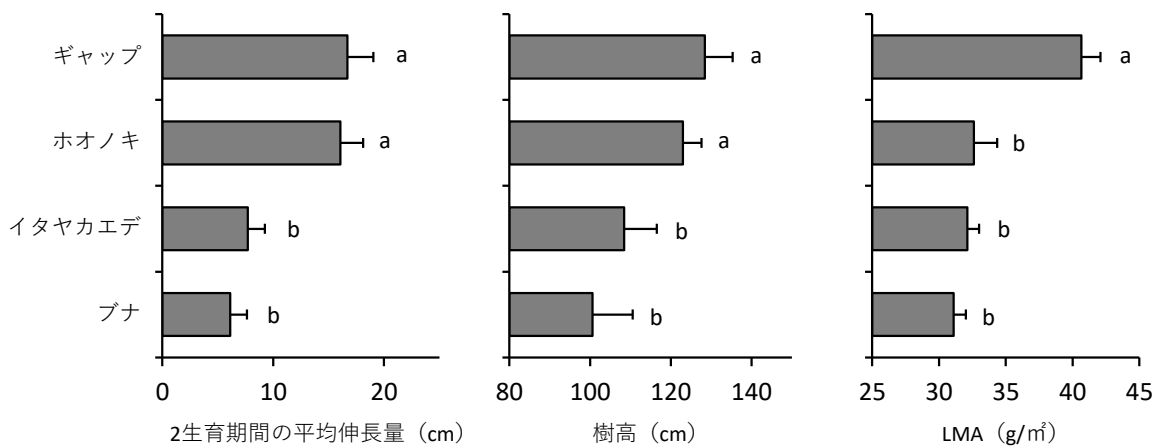


図-3 樹冠下とギャップに植栽したブナ苗木のシュート伸長量，樹高，LMAのパッチ間の比較

2000年4月に植栽，シュート伸長量は2005年と2006年の2生育期間を計測，樹高は2006年10月に計測
 図中の異なるアルファベットは，各形質が各パッチ間で互いに有意に異なることを意味する（Tukey
 検定， $p<0.05$ ）

ギャップにおいて高木種の若木が出現したパッチ数は10個中，日和山で4個，宮越で9個，歌才で2個であり，ギャップでの平均個体数は日和山で192本/ha，宮越で958本/ha，歌才で75本/haであった（表-3）。また，ギャップに出現した高木種の若木の種数は日和山で4種，宮越で6種，歌才で2種であり，うちホオノキだけが共通していた。本数割合ではイタヤカエデとホオノキが多く，2種で全体の56~94%を占めていた（ただし歌才はホオノキのみである）。また，ギャップでブナ若木が出現した調査地は宮越だけであり，出現調査区数は6個，平均本数密度は178本/haであった（表-3）。

ササの植被率は調査地間で異なり，宮越（9~23%），日和山（28~56%），歌才（69~93%）の順に高くなった（表-2）。また，各調査地ともササの現存量はパッチ間で差があり，ササの現存量はブナパッチ，広葉樹パッチよりもギャップで高かった（Tukey検定， $p<0.01$ ）。

3. ササ現存量とササ層以下に出現したブナ稚樹数との関係

各パッチでササ層以下に出現したブナ稚樹数の予測モデルとしては，説明変数にササの平均現存量を含むモデルが切片だけのモデルよりもAICが小さく（ $\Delta AIC=122$ ），モデルとし

て選択された。また，ササ現存量の回帰係数は有意な負の値を示した（ $p<0.01$ ）。

4. ブナ植栽木の生育とLMA，光環境

2000年4月にブナを植栽した日和山の各パッチにおけるブナ苗木の2生育期間（2005年と2006年）の平均伸長量は，ブナパッチで6.1cm，イタヤカエデパッチで7.7cm，ホオノキパッチで16.1cm，ギャップで16.7cmであり，ホオノキパッチとギャップでは，ブナパッチとイタヤカエデパッチに比べて，シュートの伸長量が大きかった（図-3， $p<0.05$ ）。また，2006年10月における樹高は，パッチ間で有意な違いはなかったものの平均伸長量と同じ順で大きくなった（図-3）。ギャップにおけるブナのLMAは，他のパッチに比べて有意に値が高かった（ $p<0.01$ ）。上層の種類別にみると，LMAはブナ，イタヤカエデ，ホオノキの順に大きくなったが有意な差はなかった（ $p>0.05$ ）。

林外の裸地との照度比較から推定した樹種ごとの開葉日はブナが5月11日，イタヤカエデが5月21日，ホオノキが5月26日であり，ブナとイタヤカエデでは10日間，ブナとホオノキでは15日間の差があった（図-4）。また，5月中下旬では

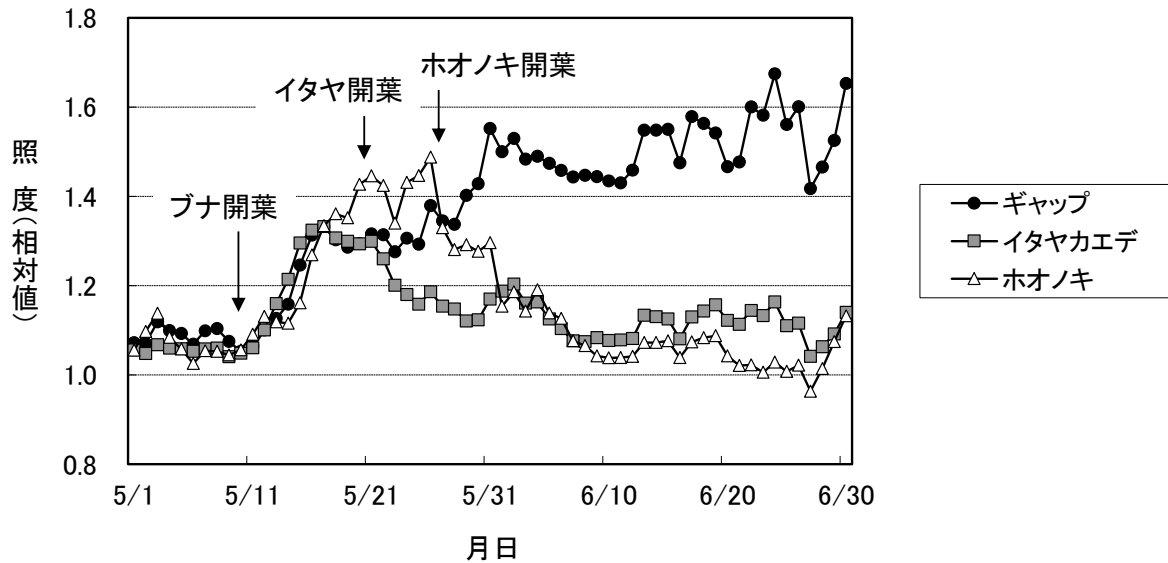


図-4 日和山ブナ林におけるイタヤカエデパッチ、ホオノキパッチ、ギャップでの照度の変化 (ブナパッチとの相対値)

縦軸の相対照度は、ブナパッチに比べて他パッチがいつどの程度明るいかを比較するため、ブナパッチの照度と対象パッチの照度との相対値 (対象パッチ/ブナパッチ) で示す。

イタヤカエデとホオノキの林冠下で照度が高く、ブナパッチに比べて1.2~1.4倍であった。さらに、開葉が終了した6月以降においても、イタヤカエデとホオノキの林冠下の照度はブナ林冠下よりも10%前後高い傾向があった。なお、ギャップの照度はブナ林冠下に比べ約50%高かった。

考察

1. ブナ以外の広葉樹林冠下でのブナ後継樹の分布

北海道渡島半島のブナ林で林冠の状態をブナ、ブナ以外の広葉樹、ギャップの3タイプに区分し、各パッチでブナ後継樹の分布を調べた結果、ブナ後継樹の出現パッチ数と平均個体数はブナパッチ、ギャップよりも広葉樹パッチで多く、林冠の状態がブナ後継樹の定着に影響を及ぼしていることがわかった。この結果は宮城県栗駒山 (Tomita and Seiwa 2004) の報告と一致しており、他樹種の林冠下にブナ後継樹が多いことが北海道渡島半島のブナ林でも確認できた。

ブナ稚樹の分布がブナ以外の樹種の林冠下に偏る理由としては、林冠構成種の開葉時期の違いが関係していると考えられている (Tomita and Seiwa 2004; 小山ら 2007)。ブナ林ではブナの開葉は他の林冠構成種に比べて早く、ミズナラより10~14日、ホオノキより14~30日早い (丸山 1979; Tomita and Seiwa 2004)。本研究でもブナの開葉はイタヤカエデより10日、ホオノキより15日程度早く、ブナ以外の林冠下では5月中下旬に明るい環境が生じていることを確認できた。また、全ての樹種の開葉が終了した後もイタヤカエデやホオノキの林冠下はブナよりも明るい状態が続いていた。こうした林冠下でのブナ稚樹の年間獲得光量はブナ林冠下に比べミズナラ林冠下で約2倍、ホオノキ林冠下で約3倍になると試算されて

おり (Tomita and Seiwa 2004)、ブナ稚樹が受ける光量の違いがブナの生存率に影響を及ぼした結果、ブナ後継樹の分布が広葉樹パッチに偏ったとされる。

また、こうした結果は、植栽したブナ苗木の成長とも一致しており、ブナ林冠下の個体よりもホオノキ林冠下の個体が高い成長を示していた。このシュート伸長量はギャップと同程度であり、ホオノキ林冠下であればブナ稚樹は順調に成長できる可能性がある。実際、宮越と歌才のブナ林では、他樹種の林冠下ではブナが胸高直径20cmを越えるまで成長しており、耐陰性が高いとされるブナは他樹種の林冠下で育つことができると本研究の結果からも考えることができる。

ブナ後継樹の定着や成長に及ぼす林冠木の影響についてはさらに詳しい調査が必要である。本研究の林分調査では、広葉樹パッチは多くが複数種によって構成されていたためすべて同一に扱ったが、開葉時期はブナ以外の林冠構成種の間でも大きく異なっている。例えば、広葉樹パッチで構成個体の12~53%を占めたイタヤカエデは落葉広葉樹の中でも開葉の早い種でありミズナラよりも10日前後早い (加藤ほか 1999)。したがって、ブナ後継樹が利用できる明るい環境はミズナラ、ホオノキの林冠下に比べイタヤカエデの林冠下でより短いと予想される。今後、開葉フェノロジーに関係する光環境がブナ後継樹に与える影響を評価するためには、林冠構成木の種類、樹種の構成比などを調べていく必要があるだろう。また、光環境以外の要因としては、菌類などの影響も考慮する必要がある。宮城県栗駒山のブナ林でブナ種子と実生の生存推移を調べた研究によると (清和 2013)、ミズナラ・ホオノキ林冠下に散布された種子は、ブナ林冠下に比べて、種子や芽生えが病原菌による死亡率が低く、実生のセーフサイトになる

ことを報告している。こうした生物的要因の影響について検討することも今後必要である。

2. 渡島半島のブナ林の更新動態

調査地のいずれでも、ブナはギャップでは順調に更新していなかった。ギャップでブナ後継樹（若木）が出現した調査地は宮越に限られ、その本数割合も出現個体全体の19%と低かった。一方、ブナ以外の高木種は、ギャップでの若木の本数密度がブナに比べて高く、渡島半島のブナ林ではギャップがブナ以外の広葉樹によって修復されていた。若木が出現したギャップでは、各調査地を通じてイタヤカエドとホオノキの割合が高く、これらの広葉樹がギャップで更新しうことを示していた。ただし、日和山と歌才ではギャップの半数以上で修復が進んでいなかった。林床にササが優占するブナ林では、ギャップが形成されても樹木の更新が妨げられることが知られているが（Kobayashi et al. 2000；中静 2004）、本調査地でも、ササが繁茂する林では、ギャップの修復が遅れていた。したがって、更新動態の検討においては、ギャップ形成だけでなくササの存在にも考慮する必要がある。

ギャップ形成後に更新する樹種の違いを説明する要因の一つに、林床で繁茂するササの一斉枯死とのタイミングがあげられる。ブナ林でのギャップダイナミクスを研究した中静（2004）によると、ギャップでブナが更新するためには、ギャップ形成前にブナの前生稚樹が存在することが必要条件であり、稚樹の発生にはササの一斉枯死が契機となる。この時、ブナがギャップで更新する前提は、ササの一斉枯死が起こった後にギャップが形成される順である。この順番が逆になり、ギャップ形成後にササの一斉枯死が起こった場合には、ブナと他樹種の広葉樹が一斉に更新し、競合することとなる。例えば、1995年に林床のチシマザサが一斉開花した十和田湖畔のブナ林で、樹木実生の動態を追跡した研究によると、ギャップでササが枯死するとブナよりも光要求性の高い樹種が優占することが報告されている（Abe et al. 2004）。こうしたタイミングの違いがギャップでの更新樹種の違いを生んでいるのかもしれない。ただし、ここでの考察はあくまでもギャップ形成とササの一斉枯死のタイミングで単純化した仮説である。実際の更新動態では、幹折れや根返りなどギャップの種類や小面積で生じるササの枯死や、あるいはササ林床ではないブナ林など、状況は様々であり更新動態は複雑だろう。

ササの一斉枯死がブナの更新の契機となっていることは、本研究の結果からも示唆された。広葉樹パッチでのブナ後継樹の個体群構造は調査地間で異なり、日和山では樹高2m未満の稚樹が16,583本/ha、宮越では稚樹が5,417本/ha、胸高直径0～25cmのブナが1,464本/ha、歌才では稚樹が存在せず胸高直径5～25cmのブナが146本/haとなっていた。この結果は、ブナ以外の広葉樹林冠下で、ブナの後継樹が特定時期に発生し、かつそれらの時期が場所によって異なっていることを示

している。日和山では比較的最近になってブナの更新が始まったこと、宮越では日和山より前に更新が始まり比較的最近まで後継樹の加入が続いていたこと、歌才では宮越より前に更新が生じ、現在は後継樹の加入はないことを示している。各調査地とも10パッチだけの結果ではあるが、ブナ後継樹のサイズが各調査地内で揃っていたことは、ある一時期にブナがブナ以外の広葉樹林冠下で更新し始めていることを示しており、その契機としてササの枯死があった可能性がある。

本研究では、1) ブナ稚樹は広葉樹パッチで多く、2) 広葉樹パッチはブナ稚樹の成長に好適な光条件が存在し、3) ギャップではブナより他樹種が優占していることを明らかにした。この結果は更新の一時点を見たにすぎないが、ブナ林冠木が倒れギャップが形成された場所で他樹種の更新が始まり、他樹種が林冠を形成した下層でブナの後継樹が育つ、というサイクリックな相互置換が生じている可能性を示唆するものであった。この確証は得るためには、ギャップ形成やササ枯死後の更新木の追跡調査、樹木の齡調査など、詳細な調査が必要だろう。

3. 融雪時期とブナの更新

これまで開葉フェノロジーの違いを利用したブナの更新が、ほとんど報告されてこなかった。ブナの更新研究は、多くの場合、人為的影響の少ない林を対象に行なわれるため、調査地はブナの垂直分布域の中でも積雪量の多い高標高域に偏っていた。例えば、これまでブナの更新が調査されたブナ林での暖かさの指数は、秋田県森吉山で54～63℃・月（浅野 1983）、秋田県十和田湖で53℃・月（Abe et al. 2002）、長野県カヤノ平で46～54℃・月（浅野 1983；島野・沖津 1994）、福島県ブナ平で44℃・月（島野・沖津 1994）など、いずれも冷温帯中・上部にあたる。一般に、日本海側多雪地の高標高域では開葉に比べ融雪が遅いため（鎌田 2001；本間 2002）、埋雪状態にあるブナ稚樹は物理的に開葉ができず（丸山 1979；大野 1992）、ブナ稚樹は他樹種の林冠下に生じる更新サイトを利用できないと考えられる。このため、開葉に比べ融雪の遅い日本海側多雪地のブナ林でのブナの更新研究では、フェノロジーの影響を検出できなかったと考えられる。しかし、日本海側でも標高の低い地域では開葉に比べ融雪が早いため（鎌田 2001；本間 2002）、こうした場所では開葉フェノロジーの違いを利用したブナの更新が存在する可能性がある。実際、開葉フェノロジーを介したブナの更新過程が、北海道渡島半島、宮城県栗駒山（Tomita & Seiwa 2004）のように豪雪地の周辺部や低標高地で観察されていることもそのことを支持している。

これまでのブナの更新研究では、ブナはギャップで更新するという認識のもと調査が行われてきたが、今回の調査結果からはそのような更新過程ばかりでないことが明らかにされた。今後、様々な林分で確かめる必要がある。

謝辞

山形大学農学部の小山浩正教授（故人）は本研究の遂行にあたり、顕著な貢献があったことから本論文では共著者として記載した。また、本研究の一部は、今（2004, 2007）で発表している。

引用文献

- Abe, M., Izaki, J. Miguchi, H., Masaki, T., Makita, A. & Nakashizuka, T. (2002) The effects of *Sasa* and canopy gap formation on tree regeneration in an old beech forest. *Journal of Vegetation Science* 13: 565–574
- Akashi, N. (1996) The spatial pattern and canopy-understory association of trees in a cool temperate, mixed forest in western Japan. *Ecological Research* 11: 311–319
- 浅野 透 (1983) ブナ林の再生過程. 大阪市立大学理学研究科博士論文
- 本間航介 (2002) 雪が育んだブナの森—ブナの更新と耐雪適応—。「雪山の生態学—東北の山と森から」(梶本卓也・大丸裕武・杉田久志編著), 57–73. 東海大学出版会, 東京
- 鎌田直人 (2001) 変動する資源を利用する群集の共存機構—種子植性昆虫群集。「群集生態学の現在」(佐藤宏明・山本智子・安田弘法編著), 169–186. 東京大学学術出版会, 京都
- 加藤正吾・山本美香・小見山章 (1999) 落葉広葉樹林の上層と下層での葉フェノロジー—1997年の荘川村六郎における解析—. *森林立地*41: 39–44
- Kobayashi, T. Muraoka, H. Shimano, K. (2000) Photosynthesis and biomass allocation of beech (*Fagus crenata*) and dwarf-bamboo (*Sasa kurilensis*) in response to contrasting light regimes in a Japan Sea-Type beech forest. *Journal of Forest Research*5: 103–107
- 今 博計 (2004) フェノロジカルギャップを利用したブナの更新. *光珠内季報*136: 12–16
- 今 博計 (2007) ブナ北限域における森林の動態. 「ベシクマスター生態学」(南佳典・沖津 進編著), 185–204. オーム社, 東京
- 今 博計 (2009) ブナにおけるマスティングの適応的意義とそのメカニズム. *北海道林業試験場研究報告*46: 53–83
- 小山浩正・今 博計・紀藤典夫 (2007) ブナ林内における稚樹の空間分布と他樹種の上層林冠との関係. *植生学会誌* 24: 113–121
- 丸山幸平 (1979) 高木層の主要樹種間および階層間のフェノロジーの比較—ブナ林の生態学的研究 (33) —. *新潟大学演習林報告*12: 19–41
- 松本健太郎・逢沢峰昭・松本陽介・大久保達弘 (2012) 関東北部高原山におけるイヌブナ・ブナが優占する太平洋型

- ブナ成熟林の15年間の森林動態. *森林立地*54(2) : 73–80
- Nakashizuka, T. (1983) Regeneration process of climax beech (*Fagus crenata* Blume) forests III. Structure and development processes of sapling populations in different aged gaps. *Japanese Journal of Ecology* 33: 409–418
- Nakashizuka, T. (1984a) Regeneration process of climax beech (*Fagus crenata* Blume) forests IV. Gap formation. *Japanese Journal of Ecology* 34: 75–85
- Nakashizuka, T. (1984b) Regeneration process of climax beech (*Fagus crenata* Blume) forests V. Population dynamics of beech in a regeneration process. *Japanese Journal of Ecology* 34: 411–419
- Nakashizuka, T. (1987) Regeneration dynamics of beech forests in Japan. *Vegetatio* 69: 169–175
- 中静 透 (2004) 森のスケッチ. 東海大学出版会, 神奈川
- Nakashizuka, T. Numata, M. (1982a). Regeneration process of climax beech forests I. Structure of a beech forest with the undergrowth of *Sasa*. *Japanese Journal of Ecology* 32: 57–67
- Nakashizuka, T. Numata, M. (1982b) Regeneration process of climax beech forests II. Structure of a forest under the influences of grazing. *Japanese Journal of Ecology* 32: 473–482
- 中静 透・山本進一 (1987) 自然撓乱と森林群集の安定性. *日本生態学会誌* 37: 19–30
- 並川寛司・斎藤 均・山田真矢 (2017) 歌オブナ自生北限地におけるブナ優占林の樹種構成と林分構造. *北海道教育大学紀要 (自然科学編)* 68(1) : 27–37
- 大野啓一 (1992) ブナ林の植物季節. 「ブナ林の自然誌」(遠藤泰彦・原正利・大場達之編), 67–71. 千葉県立中央博物館友の会, 千葉
- Pickett, S.T.A. White, P.S. (1985) *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, New York
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- 清和研二 (2013) 多種共存の森. 築地書館, 東京
- 島野光司・沖津 進 (1994) 関東周辺におけるブナ自然林の更新. *日本生態学会誌* 44: 283–291
- Tomita, M. Seiwa, K. (2004) Influence of canopy tree phenology on understory populations of *Fagus crenata*. *Journal of Vegetation Science* 15: 379–388
- Watt, A.S. (1947) Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology* 35: 1–22
- Yamamoto, S. Nishimura, N. Matsui, K. (1995) Natural disturbance and tree species coexistence in an old-growth beech-dwarf bamboo forest, southwestern Japan. *Journal of Vegetation Science* 6: 875–886

Summary

Fagus crenata seedlings are sometimes concentrated under the canopy of deciduous broad-leaved trees other than *F. crenata*, and it has been pointed out that the reason for this is the difference in the leaf opening times of the canopy species. In this research, the regeneration of *F. crenata* was examined in relation to canopy condition for three old-growth beech forests in south-western Hokkaido, northern Japan. We designated three patch types based on forest canopy condition: Fc (under the canopy of *F. crenata*), Oth (under the canopy of other deciduous tree species), and Gap. In Oth *Acer pictum*, *Magnolia obovata*, and *Quercus crispula* were prevailed at the three study sites. The number of understory individual of *F. crenata* were significantly different among patch types, and were highest in Oth and lowest in Fc and Gap. Diameter class distributions in Oth suggested that *F. crenata* regenerates constantly under the crown of other deciduous tree species. In contrast, *A. pictum* and *M. obovata* filled some gaps. The abundance of *Sasa* was highest in Gap. There was a significant negative relationship between the abundance of *Sasa* and the number of *F. crenata* seedlings that appeared below the *Sasa* layer. Under the canopy, the shoot elongation of planted *F. crenata* seedlings were greatest under the canopy of *M. obovata*, followed by canopy of *A. mono*, and lowest under the canopy of *F. crenata*. These results indicated that in the beech forests of the Oshima Peninsula, broad-leaved trees other than *F. crenata*, such as *A. pictum*, *M. obovata*, and *Q. crispula*, may be regenerating in gaps and eventually replacing beech trees.

Key words

beech forest, dwarf bamboo, gap, leaf phenology, regeneration

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)	新規 19 個体 (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+ 新規 19 個体 [444 個体+ 新規 19 個体]	

*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 μ (平均) + 0.5 \times σ (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 μ (平均) - 0.5 \times σ (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 μ (平均) + 0.5 \times σ (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

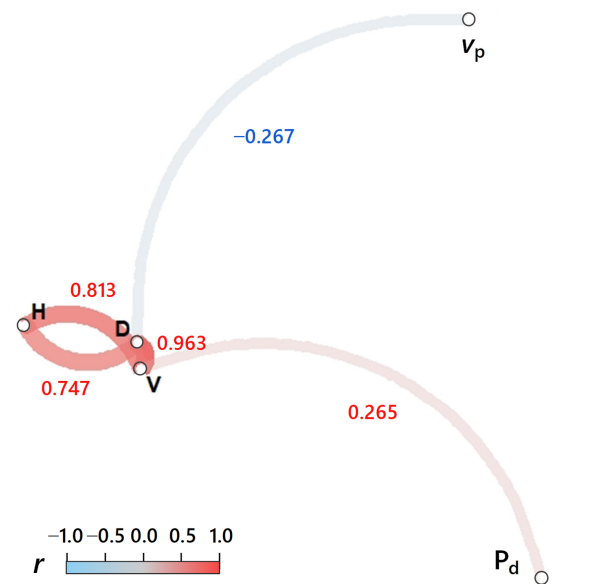


図-1 形質間の連関図

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 m³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

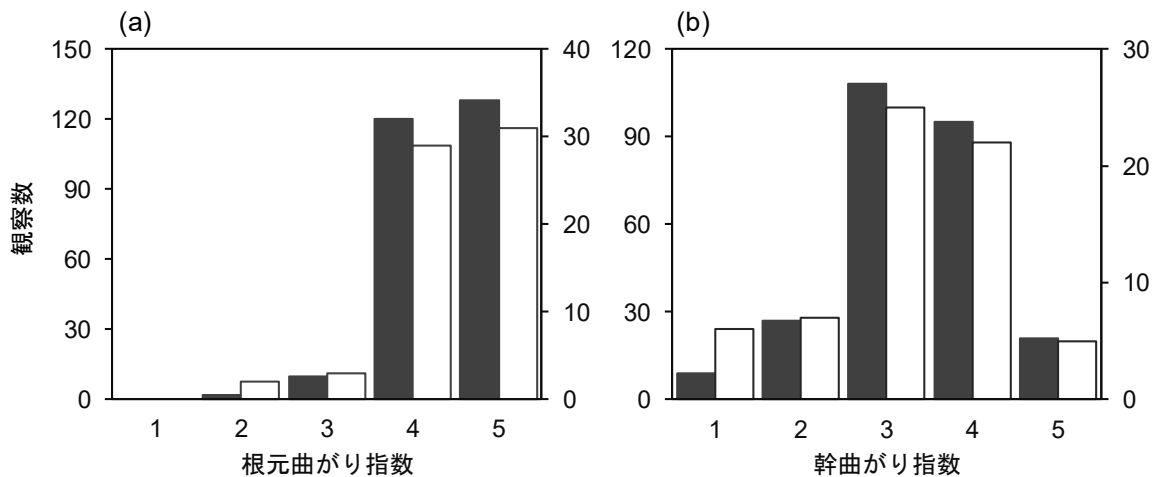


図-2 解析対象および対照個体の根元曲がり指数 (a) と幹曲がり指数 (b) の分布

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

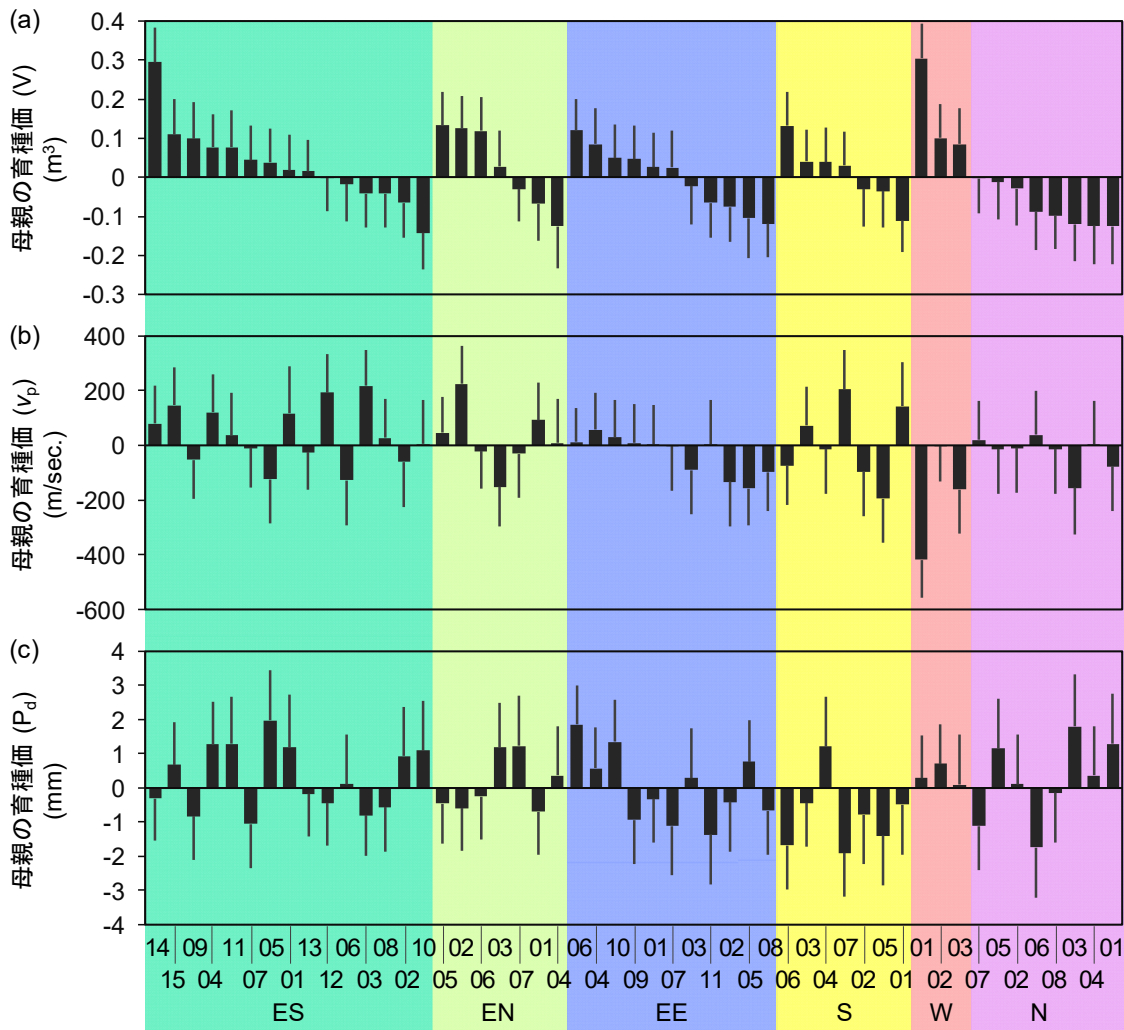


図-3 幹材積 (a) と応力波伝播速度 (b) ならびにピロディン貫入量 (c) に対する母親の育種価の推定値

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

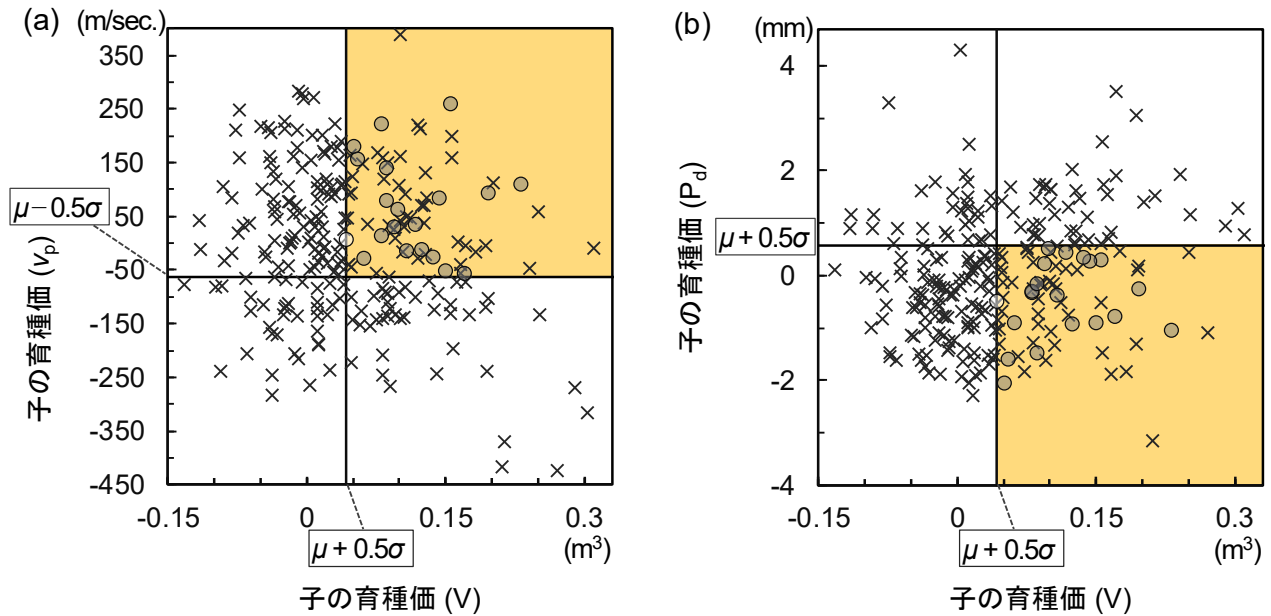


図-4 成長-材質間の子の育種価の分布と選抜個体

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 ³)	v _p (m/sec.)	P _d (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_p：応力波伝播速度，P_d：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_p、P_d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_d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

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のできる結果であった。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り出し、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

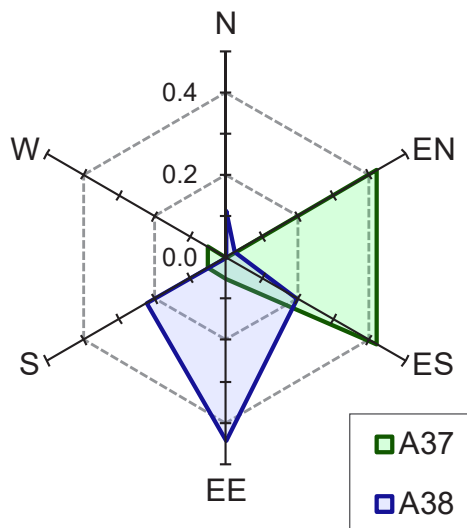


図-5 選抜された優良木の由来産地の偏り

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。

- 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

保持林業実証実験地における伐採前後の土壤環境の変化

長坂晶子*・山田健四*・速水将人*・長坂 有*

Changes in soil environment before and after logging in the Retention Experiment for plantation FoREstry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH) sites

Akiko NAGASAKA*, Kenji YAMADA*, Masato HAYAMIZU*, Yu NAGASAKA*

要旨

森林の伐採は、森林内の窒素循環だけでなく、溪流への窒素流出など、集水域内の物質循環にも大きな影響を与える。保持林業の導入は、伐採による窒素循環に対するインパクトを緩和する効果が期待される。筆者らは、森林土壌中の無機態窒素に着目し、北海道において実施された保持林業実証実験地において、施業前後の土壌中の窒素量を測定し、施業の有無や施業方法の違いによって窒素量がどの程度異なるのかデータ蓄積を図った。リター層下の鉍質土壌の全炭素量、全窒素量の分析から、有機態も含めた窒素全体の量は施業前後で変化していなかったが、無機態窒素を分析したところ、施業後、地温の上昇と併せてアンモニア態窒素 (NH_4^+-N) 量の減少と硝酸態窒素 (NO_3^--N) 量の増加が認められ、鉍質土壌に貯留されている有機態窒素の無機化から硝化に至る過程が速やかに進行していることが示唆された。保持木の有無や多寡による反応の違いは見られず、表層土壌の窒素動態という観点からは保持林業の特徴は認められなかった。

キーワード：森林土壌、土壤環境、無機態窒素、保持伐採

はじめに

窒素は植物の成長に必要な養分元素のひとつであり、自然界では単体の窒素ガスのほか、有機態（主に固体）・無機態（水溶液もしくはガス）で存在することが知られ、その形態を変化させながら固相、液相、気相を行き来し、生態系を駆動させる要素として重要な役割を担っている。森林生態系においては、窒素は大気や降水等により系外から供給されるほか、落葉落枝（リターフォール）が森林土壌中で分解され、それをふたたび樹木が養分として吸収するといった内部循環型のシステムを持っている。リターに含まれる窒素の大半は有機態として存在している一方で、樹木は水溶性の無機態窒素（主にアンモニア態窒素 NH_4^+-N と硝酸態窒素 NO_3^--N ）の形態でしか窒素を利用できないため、樹木の養分吸収には、森林土壌中での有機態窒素の無機化、硝化過程が不可欠である（図-1）。

森林の伐採は、樹木による窒素消費量の減少や落葉供給量

の減少、被陰の減少による地表面の日射・温度・湿度などの物理的環境変化をもたらすと予想される。それがひいてはO層（ A_0 層）における有機物の分解促進、有機態窒素の無機化促進など様々な変化を引き起こし、森林内の窒素循環だけでなく、溪流への窒素流出など、集水域内の物質循環にも大きな影響を与えると考えられる。保持林業（柿澤ほか2018）の導入は、上木の一部を残すことでこれらの変化を減少させ、伐採による窒素循環に対するインパクトを緩和する効果が期待されるが、保持林業を物質循環という側面から調査した研究はJerabkova et al. (2011) によるメタ解析の事例等はあるものの、まだそれほど多くはない。そこで筆者らは、森林土壌中の無機態窒素に着目し、北海道において実施された保持林業実証実験地において、施業前後の土壌中の窒素量を測定し、施業の有無や施業方法の違いによって窒素量がどの程度異なるのかデータ蓄積を図ることとした。調査は伐採前年と伐採1年後それぞれ1シーズンの概要把握に留まったが、いくつか施業方法や林相の違いを反映したと思われる結果も得られた

* 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61号 令和6年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 61, March, 2024]

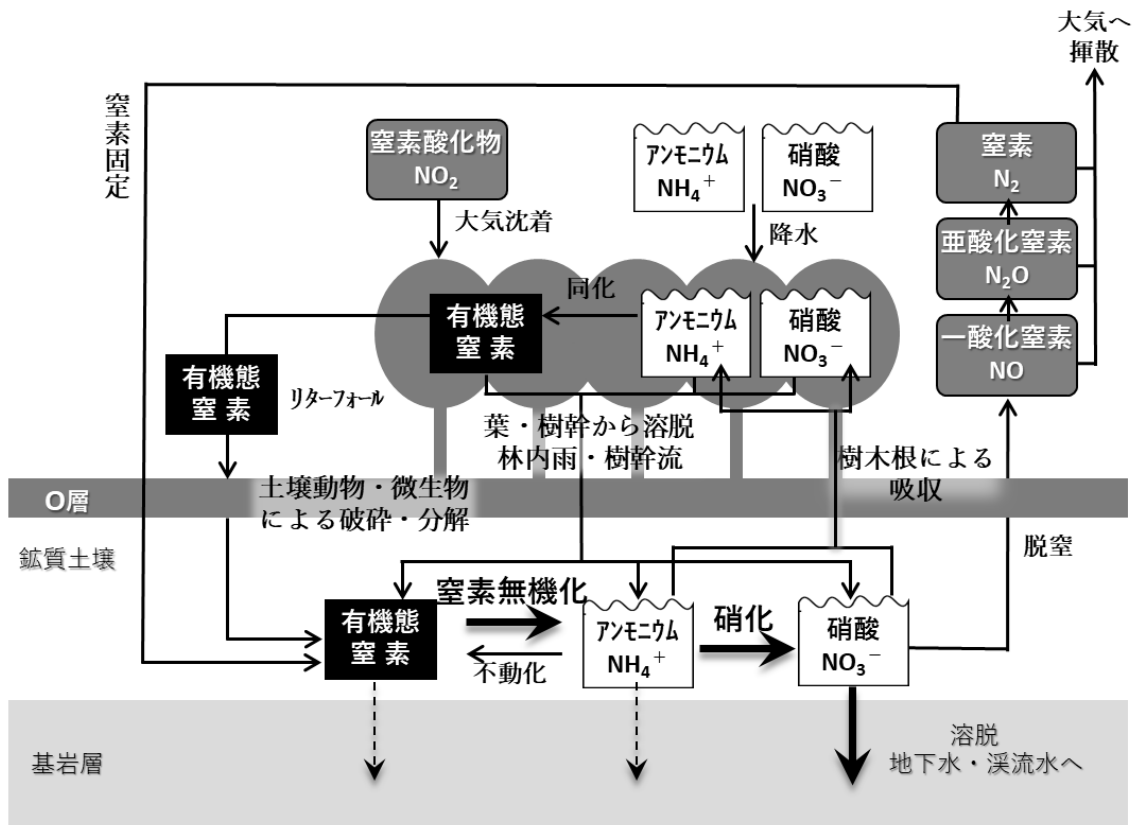


図-1 森林生態系における窒素循環

浦川 (2018) の図を基に作成したもの。本報告では、鈹質土壤中における水溶態の窒素であるアンモニ態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) と硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の動態に焦点を当てて観測を行った。

ため、研究資料として報告するものである。なお、この調査では、窒素の無機化速度を測定するための調査(レジンコア法)も試みたが、調査が適切に実施できなかった可能性があるため、その結果については本報告から除外した。

材料と方法

1. 調査地概要

北海道芦別市、赤平市、深川市にまたがる北海道有林空知管理区に設定した保持林業実証実験地(約5,887ha)において調査を実施した。実験地は第四紀初頭に活動を終了した成層火山とされるイルムケップ火山(標高864m)山麓に位置し、地質は安山岩、デイサイトなどからなる溶岩流・火砕物の互層、火山岩屑(土石流堆積物)で形成されている(河野ら1956; 日本地質学会2012)。気候的には北海道日本海側の気候区分に入るため、夏の降雨はそれほど多くないが、冬期は多雪(現地の最深積雪>2m)となり、3月下旬からの融雪増水が顕著である。

当山域では標高200~600m付近まで広くトドマツ(*Abies sachalinensis*)が植林され、高齢の林分では50年を超えている。他方、天然林は標高500m以上ではダケカンバ(*Betula ermanii*)が主体となり、低標高域では沢沿いを中心に、シナノキ(*Tilia japonica*)、ミズナラ(*Quercus crispula*)、イタヤカエデ(*Acer*

pictum)、ハリギリ(*Kalopanax septemlobus*)、ウダイカンバ(*Betula maximowicziana*)、シラカンバ(*Betula platyphylla*)、ハルニレ(*Ulmus davidiana*)、ヤチダモ(*Fraxinus mandshurica*)、オニグルミ(*Juglans mandshurica*)などの落葉広葉樹が残されている。トドマツの生育状況が不成績な林分では、これらの広葉樹が混交する。

実証実験では、8通りの実験区(トドマツ人工林伐採区6種、対照区、天然林区)を基本フレームとして3セット合計23箇所の実験区を設定し、伐採区では毎年1セットずつ、3年間で伐採処理を終了できるように計画された(明石ら2017)。本研究では、第2セットの実験区から皆伐区(CC2:対象範囲の全木を伐採)、少量保持区(SS2:人工林内の広葉樹林冠木を約10本/ha保持)、中量保持区(SM2:人工林内の広葉樹林冠木を約50本/ha保持)を選び、このほかに人工林の伐採の効果を検証するための対照区として非伐採トドマツ人工林区(PC:伐採なし)、広葉樹保持の参照とするための対照区として天然生広葉樹林区(NC1:伐採なし)を設定した(図-2、以降、略称表記とする)。またSM2では、トドマツ植栽木と混交する広葉樹が多かったことから、トドマツ主体の地点(SM2-c)と、広葉樹の多い地点(SM2-d)の2タイプを設定した。実験区における伐採作業は2015年5月中旬に実施されたため、2014年6月に伐採前の試料を、伐採作業から1年経

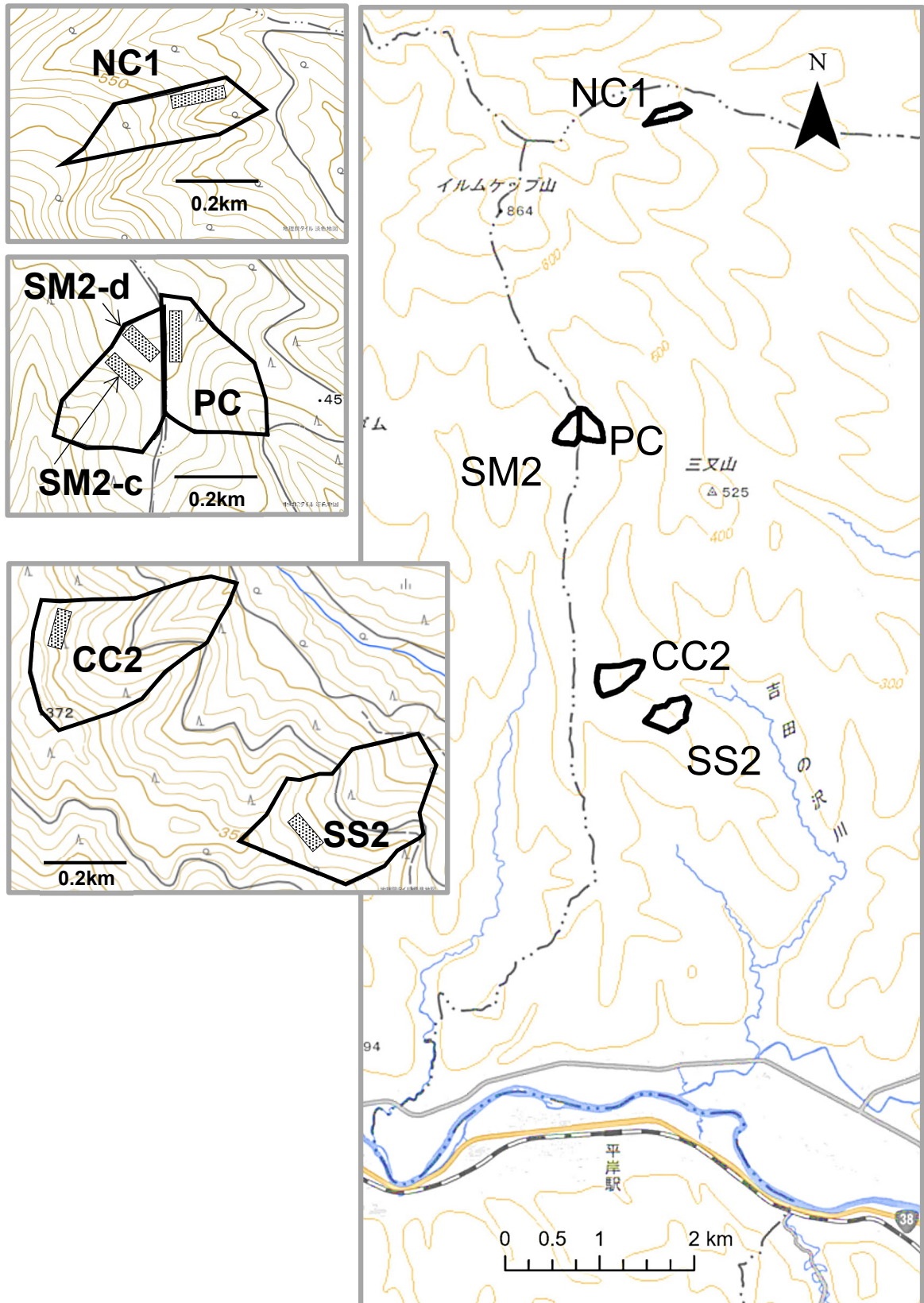


図-2 調査対象流域と土壌試料採取区域の概要

太実線は流域界を表す。土壌試料は、拡大図中に示した□の範囲内で、等高線に沿ってほぼ等間隔に5カ所で採取した。保持伐採プロジェクト全体の実験区の配置は明石ほか(2017)を参照。電子地形図25000(国土地理院)を加工して作成。

表-1 土壌試料を採取した小流域の概要と伐採時（2015年）の状況

処理区名	略称	流域概要					伐採時（2015年）の情報				
		流域面積 (ha)	平均標高 (m)	平均傾斜 (%)	地質タイプ*1	林齢*2	試験地設定時のトドマツ樹冠割合 (%)	施業面積 (ha)	伐採本数 (本/ha)	収穫材積 (m ³ /ha)	作業道密度 (m/ha)
皆伐	CC2	10.9	316	18	1	55	90%	7.9	589	354	319
少量	SS2	10.2	289	16	1	55	89%	7.1	340	271	323
中量	SM2	8.0	485	11	2	51	86%	7.1	770	356	165
非伐採	PC	5.4	478	15	2	50	68%	-	-	-	-
天然広葉	NC1	5.4	534	19	2	-	0%	-	-	-	-

*1 1：堆積岩+火山岩， 2：火山岩

*2 伐採年（2015年）時点の林齢

過した2016年5月に伐採後の試料を採取した。なお、調査対象地域における伐採前（2014年5月～2015年5月）・伐採1年後（2016年5月～2017年5月）の平均気温は7.4℃・7.3℃、期間最高気温は32℃・34℃、期間総降水量は878mm・1110mmであった（AMeDASデータ別、気象庁2023）。

伐採区における伐木運材等の施業面積はいずれも7ha程度で、流域面積に対しCC2、SS2で7割、SM2で9割の範囲で実施された（表-1）。皆伐に近い処理のSS2では伐採本数、収穫材積ともに伐採区のかなで一番少なかった一方、SM2では、伐採本数、収穫材積ともに多く、伐採区における立木の伐採本数や収穫材積が必ずしも広葉樹保持本数と対応していないことに留意しなければならないが、伐木運材に関わる作業道密度はCC2>SS2>SM2の順に高く、保持木の多寡と対応していた。伐採作業終了後、集材に引き続き枝条整理として、グラップルローダを用いて植栽予定区域に残存する伐採木の枝や頂部などが除去され、植栽の邪魔にならないよう作業道の周囲に土手状に積むなどの作業が実施された。すべての伐採区で、集材終了後から2か月以内に肩掛け式の刈払機を用いて3m×2m幅で除草が実施され、伐採翌年の5月中旬、トドマツ苗が植栽された。

2. 地温の計測、試料の採取および分析方法

伐採前および伐採1年後の調査時（2014年6月・2016年5月）に、各区の斜面上部で表層リター、およびO層下（A層上部）の鉍質土壌を採取した。具体的には、各実験区で任意に選んだ5地点において、表層リターを50×50cmの範囲で試料として採取し取り除いたのち、0～10cm深の鉍質土壌を採取した。また、採取箇所に自記記録式の温度ロガー（Onset社HOBOPendantロガー）を埋設し、各年の地中温度を1年間計測した。採取した土壌は現地地で4mmのふるいにかけて後、保冷材を入れたクーラーボックスに入れて実験室へ持ち帰り、化学分析まで4℃以下の冷蔵室で保管し、後述する土壌無機態窒素量の分析に供した。

また5試料のうち3試料については、一部を乾燥器で60℃48時間絶乾させたのち均質になるよう乳鉢ですりつぶし、

CHNアナライザー（CE440, Exeter Analytical, Inc）で試料に含まれる炭素（%C）、窒素（%N）の割合を計測した（北海道大学創成研究機構グローバルファシリティセンター機器分析受託サービスによる）。

窒素分析に供する土壌は以下のとおり前処理を実施した。

現地から回収した土壌を葉さじでよく混ぜ、葉包紙上で10.00g秤量した。2M-KCl溶液を100mlずつ入れた300mlポリ瓶に秤量した土壌を入れ、1時間振盪した後、ポリ瓶の上澄み液を5B濾紙（ADVANTEC社製）で濾過した。濾液は100mlポリ瓶に入れ、分析まで冷凍保存した。

オートアナライザーQuAAtro2-HR（BL-TEC社）を用い、採取した鉍質土壌中の無機態窒素（NH₄⁺-N、NO₃⁻-N）を分析した。

結果と考察

図-3に各調査プロットにおける伐採前、伐採1年後の表層リター重を示した。伐採前（2014年）のトドマツ人工林におけるリター重は、NC1を除きどの実験区でもおおむね500g/m²と同程度の値であったが、伐採1年後（2016年）は実験区間で大きく異なり、CC2、SM2-cでは1000～1500g/m²と伐採前の3倍近い量に増えていた。同じ伐採区でも、広葉樹主体のSM2-dではCC2、SM2-cほど増加せず、非伐採のPCと同程度であった。またSS2では伐採前後でほとんど変化していなかった。NC1も2時期の変化は認められず、250g/m²とトドマツ人工林の2分の1程度であった。

施業後（2016年春）の表層リター量が実験区によって量が異なっていた理由として伐採本数の違いが考えられた。リター量に変化が見られなかったSS2は施業面積に対し、実際に伐採した立木の本数がCC2より250本、SM2より430本ほど少なく（表-1）、発生した枝条の量が少なかった可能性がある。

図-4に伐採前（2014年6月）と伐採1年後（2016年5月）のA層土壌の炭素（%C）、窒素（%N）の割合を散布図に示した。実験区ごとの値を細かく見てみると、2014年のCC2の炭素・窒素の含有率（それぞれ6%、0.3%）に対し、SS2は倍近い値（12%、0.8%）を示すなど実験区ごとに鉍質土壌の

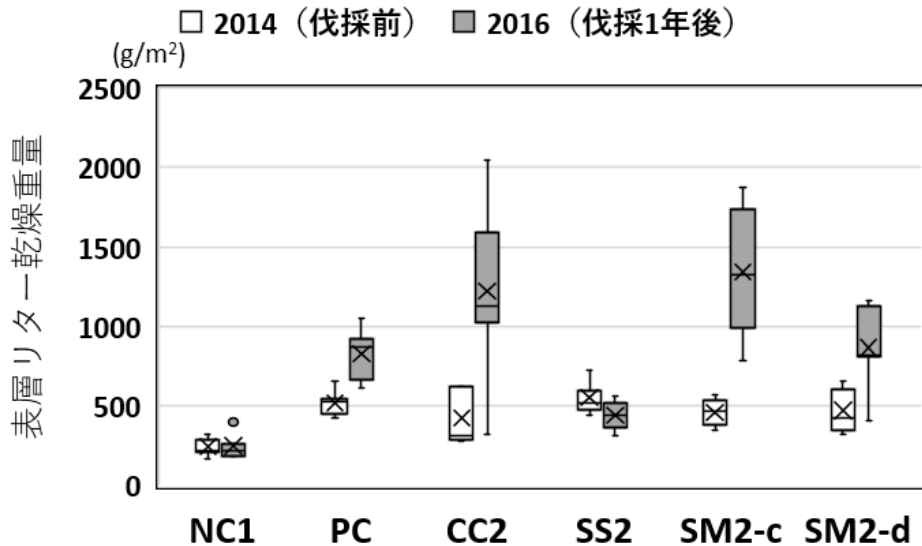


図-3 各調査プロットにおける表層リター量 (g/m²)
 50×50cmの枠を置き採取したもの。
 箱ひげの中の×は5地点の平均値を、横棒は中央値を示す。

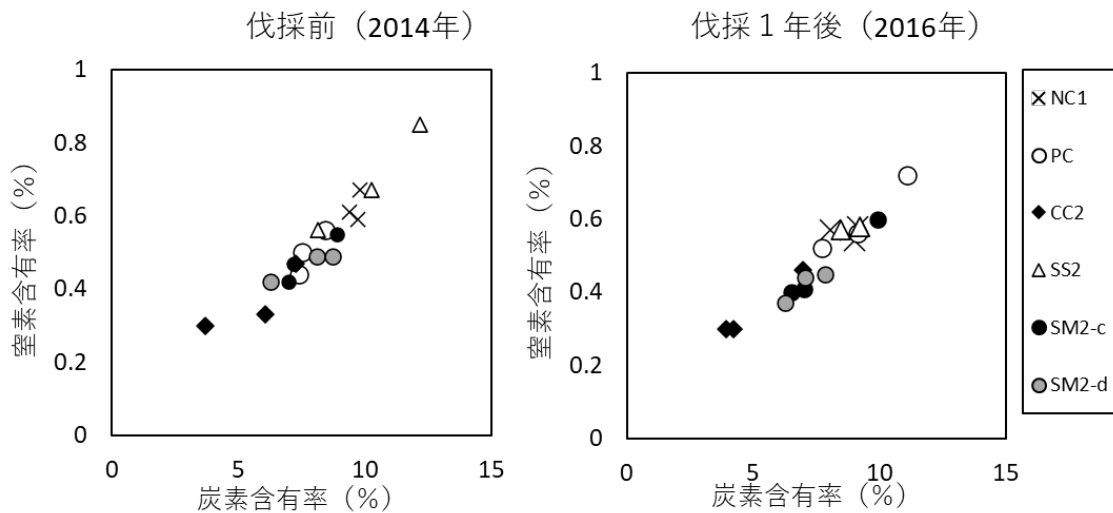


図-4 鈹質土壌 (O層下) の炭素、窒素含有率
 各サイトの試料採取地点5カ所のうち3カ所を任意に選び、採取した鈹質土壌 (O層下) の炭素含有量、窒素含有量を分析したもの。

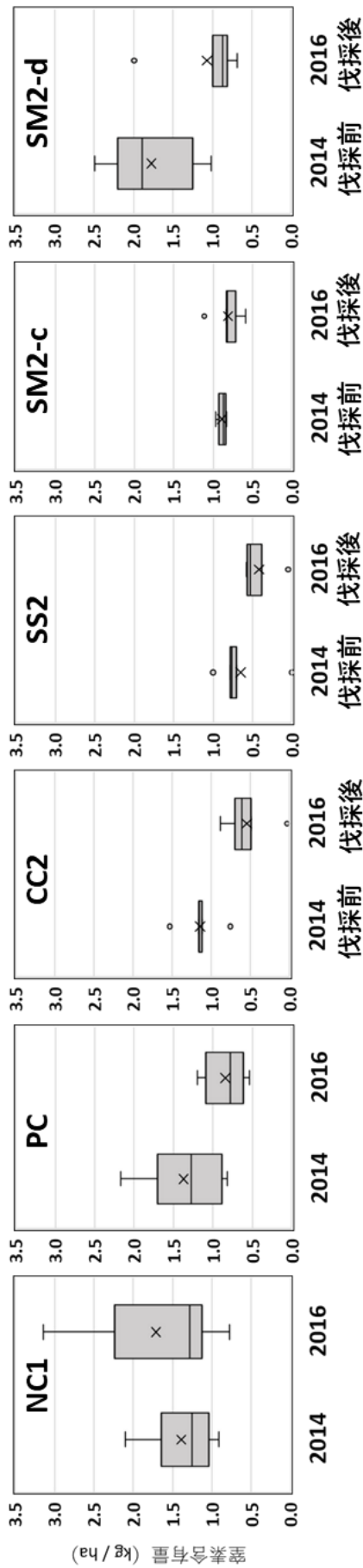
特性が異なることが示唆された。但し、どの実験区でも伐採前後の変化はほとんど見られなかった。A層土壌については、有機態も含めた窒素全体の量は施業前後で変化していなかった。炭素量・窒素量からC/N比を算出してみると、12.3~18.4の範囲となり、国内で測定された他事例と同程度の値であった(渡邊ほか 2008; 執行ほか 2017)。各年のC/N比の平均値は、伐採前(2014年)が15.6、伐採1年後(2016年)が15.7と2時期で大きな変化は認められず、A層土壌では、伐木運材等、地上部の攪乱の影響はあまり受けていないと考えられた。

図-5に伐採前後の土壌中に含まれる無機態窒素量(kg/ha)を示した。2014年(伐採前年)は、NH₄⁺-Nの値はSS2, SM2-c以外の実験区で1 kg/haかそれ以上の値を示したが、

2016年(伐採1年後)、伐採を実施した実験区では保持木の有無に関わらず1 kg/haを下回った。NC1および広葉樹主体のSM2-d(伐採前)では、NH₄⁺-Nは1.5~2 kg/haとトドマツ人工林実験区より高く、また地点間の値のばらつきがトドマツ人工林実験区より大きかった。一方NO₃⁻-Nは、トドマツ人工林の対照区としたPCでは2時期の違いはほとんど見られず1.3 kg/ha程度であったが、それ以外の実験区では、2016年にNO₃⁻-Nの値が大きくなった。NH₄⁺-NとNO₃⁻-Nの比で見ると特に施業を行った実験区で変化が明瞭で、施業前は同程度もしくはNH₄⁺-Nの割合が高かったが、施業後はNO₃⁻-Nの比率が明らかに高くなっていた。

表-2に各実験区における調査実施年の地温の概要を示し

(A) NH₄-N



(B) NO₃-N

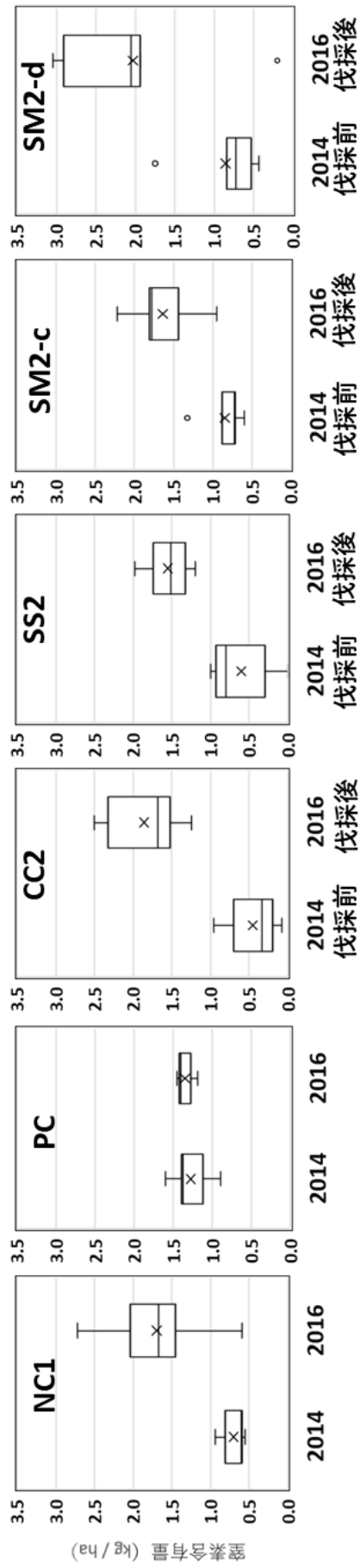


図-5 伐採前年(2014年)と伐採1年後(2016年)の試験地1haあたりの窒素含有量(kg)

上段(A): NH₄-N(アンモニウム態窒素), 下段(B): NO₃-N(硝酸態窒素)

表層リターを除いた鉍質土壌を2M-KCl(塩化カリウム)を加えて振とう, 抽出し, 分析したものを。

試料はそれぞれ, 2014年, 2016年の5月に採取した。

表-2 伐採前 (A) および伐採 1 年後 (B) における各実験区の地温の状況

処理区	土壌採取地点 の斜面方位	(A) 伐採前の地温 (°C)			(B) 伐採 1 年後の地温 (°C)		
		期間平均	期間最大	期間最小	期間平均	期間最大	期間最小
CC2	東南東	7.4	21.4	0.5	9.1	29.7	0.2
SS2	北東	7.5	23.1	0.2	8.3	23.8	0.3
SM2-c	南西	6.4	20.6	0.1	8.4	27.2	0.1
SM2-d	南西	6.9	21.6	0.2	8.5	26.9	0.5
PC	南南東	6.4	21.5	0.2	6.7	20.5	0.3
NC1	南東	6.1	21.2	-0.1	6.6	20.6	0.1

A: 2014年6月20日～2015年5月7日, B: 2016年5月24日～2017年5月17日

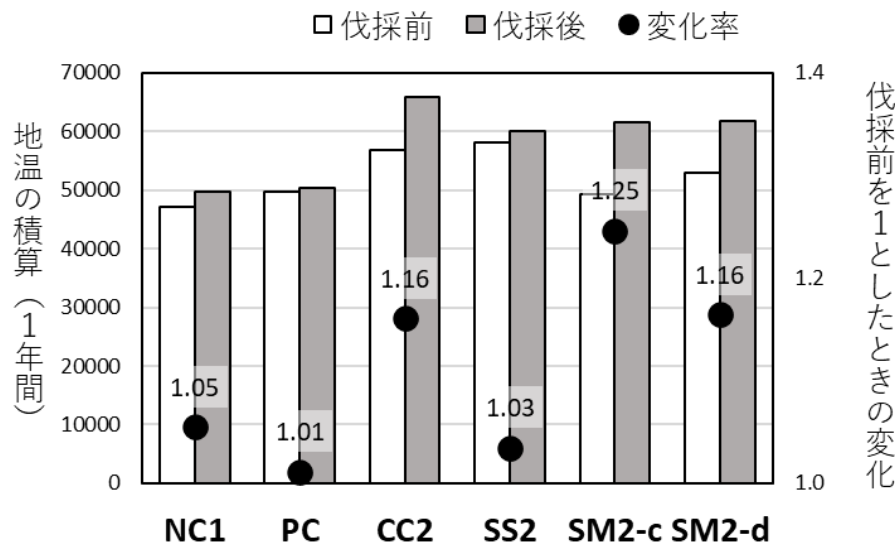


図-6 伐採前後の地温の積算値 (棒グラフ) と変化率 (●)

た。伐採前の平均地温は6.1～7.5℃, 期間最大値は20.6～23.1℃で, 実験区間のばらつきは1～3℃の範囲であったが, 伐採を実施したCC2とSM2では, NC1, PCと明らかに異なり, 平均で2℃, 最大値で7℃前後上昇し, 施業によって上木が除去された影響が顕著であった。一方SS2では, 林分の大半が同様に伐採対象となっていたにもかかわらず地温が大きく変化していなかった。これを調査期間の積算値としてみると(図-6), NC1, PC, SS2では2時期の変化がほとんどなかったのに対し, CC2とSM2では1.16～1.25倍に増加しており, 伐採後の地温上昇が明瞭であった。伐採に対する地表環境の応答については, 主伐規模の事例ではないが, 南東斜面のほうが伐採による光環境の改善効果が高いこと(村本ほか2005), 斜面方位による光環境の違いが地温上昇に直接的な影響を及ぼしていること(作田・溝上2011)などが報告されている。SS2で地温上昇が顕著に見られなかった要因として, CC2では東南東, SM2では南西斜面で試料採取を実施していたのに対し, SS2は北東斜面で試料採取していたため, 伐採による林冠開放の影響が少なく, 地温が上昇しづらかった可能性が考えられる。

以上, いずれの伐採区においても施業後に NO_3^- -N量の増加, 逆に NH_4^+ -Nは減少傾向を示し, 有機態窒素の無機化から硝化に至るプロセスが速やかに起きていた。伐採後の土壤中 NO_3^- -N量は表層土壌の窒素動態という観点からは保持林業の特徴は認められなかったが, 今回の施業は基本的に主伐に相当する伐採規模であるため, 保持伐採区(SS2, SM2)であっても除去された上木の量が皆伐と大きく変わらず, 伐採に伴う林冠の開放程度が皆伐(CC2)と大きく変わらなかったためと考えられた。

謝辞

北海道水産林務部森林環境局道有林課および北海道空知総合振興局森林室の皆様にはREFRESH プロジェクトへの助力をいただいた。道総研エネルギー・環境・地質研究所の三上英敏氏, 五十嵐聖貴氏, 木塚俊和氏, 鈴木啓明氏には無機態窒素の分析について便宜を図っていただいた。ここに記して深謝する。なお, 本研究は三井物産環境基金研究助成R12-G2-225, R15-0025, JSPS 科研費JP25252030の助成を受けた。

引用文献

- 明石信廣ら 19 名 (2017) トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験 (REFRESH) における実験区の伐採前の林分組成. 北林試研報 54: 31-45
- Jerabkova L, Prescott CE, Titus BD, Hope GD, Walters MB (2011) A meta-analysis of the effects of clearcut and variable-retention harvesting on soil nitrogen fluxes in boreal and temperate forests. Can J For Res 41: 1852-1870
- 柿澤宏昭・山浦悠一・栗山浩一編 (2018) 保持林業. 築地書館. 東京, 372pp
- 河野義礼・松井和典・清水 勇 (1956) 5 万分の 1 地質図幅説明書 歌志内. 北海道開発庁, 札幌, 52pp
- 気象庁 (2023) <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- 村本康治・野上寛五郎・高木正博 (2005) ヒノキ壮齡林の下層植生におよぼす列状間伐の影響-間伐 5 年後の種組成-. 九州森林研究58: 59-62
- 日本地質学会 (2012) 日本地方地質誌 1 北海道地方. 朝倉書店, 東京, 656pp
- 作田耕太郎・溝上展也 (2011) 帯状伐採された針葉樹人工林における伐採部林縁の微気象環境. 第122回森林学会大会発表データベース K09
- 執行宣彦・梅木 清・平尾聡秀 (2017) 東京大学秩父演習林における標高に沿った土壌特性と環境要因の関係. 演習林 (東大) 59: 223-233
- 浦川梨恵子 (2018) 土壌窒素動態の空間変動. 柴田英昭 (編) 森林と物質循環. 森林科学シリーズ8. 103-145. 共立出版. 東京
- 渡邊仁志・井川原弘一・大洞智宏・横井秀一・中川一 (2008) 未熟な土壌条件下における若齡針葉樹人工林の炭素・窒素貯留量. 岐阜県森林研研報37: 1-10

Key words

forest soil, soil environment, inorganic nitrogen, retention forestry

北海道林業試験場研究報告 No.61

発行年月 令和 6 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/forest/research/fri/index.html>
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
