

北林試研報
Bull. Hokkaido
For. Res. Inst.

北海道林業試験場研究報告

第58号

**BULLETIN
OF THE
HOKKAIDO FORESTRY RESEARCH INSTITUTE**

No. 58

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3年3月

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

March 2021

北海道林業試験場研究報告 第58号

目 次

大野泰之	ウダイカンバ人工林における径級分布の推定……………	1
	—林齢, 地位, 収量比数の違いがワイブル分布のパラメータに及ぼす影響—	
雲野明 南野一博 石川祐介 明石信廣	多雪地における獣害防止ネットの破損とその対策……………	9
新田紀敏 明石信廣	イルムケツ山塊(北海道空知地方)の維管束植物相……………	19
佐藤弘和	作業路・土場における土の締固めの違い……………	35
今博計 来田和人 黒丸亮	クリーンラーチ挿し木苗の得苗率低下に影響する要因……………	41
石塚航 菅井徹人	形態形質と内部構造からみたトドマツ苗木の当年生葉の……………	51
	発達と遮光処理に対する応答	
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	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……………	61

Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute

No.58

Contents

Estimation of diameter distribution of <i>Betula maximowicziana</i> artificial stands: effects of stand age, site index, and relative yield index on Weibull parameters Yasuyuki OHNO	1
Reduction of snow damage to net fences controlling deer damage in heavy-snow regions Akira UNNO, Kazuhiro MINAMINO, Yusuke ISHIKAWA, and Nobuhiro AKASHI	9
Flora of Mts. Irumukeppu, Sorachi Region, Hokkaido, Japan Noritosi NITTA and Nobuhiro AKASHI	19
Differences in soil compaction between skid trails and landing areas. Hirokazu SATO	35
Factors affecting reduced productivity of hybrid larch (<i>Larix gmelinii</i> var. <i>japonica</i> × <i>L. kaempferi</i>) cv. Clean Larch cutting propagation Hirokazu KON, Kazuhito KITA, and Makoto KUROMARU	41
Needle development and shade response of Sakhalin fir seedlings, based on morphological traits and anatomical structure of leaves Wataru ISHIZUKA and Tetsuto SUGAI	51
Selecting superior Sakhalin spruce (<i>Picea glehnii</i>) trees using the progeny test established in 1986 Wataru ISHIZUKA, Hirokazu SATO, Hirokazu KON, Ayu NARITA, So HANAOKA, Ryogo NAKADA, Yoko FUKUDA, Kouki KURONUMA, and Yoshihiro TSUJIYAMA	61

ウダイカンバ人工林における径級分布の推定 －林齢，地位，収量比数の違いがワイブル分布のパラメータに及ぼす影響－

大野 泰之*

Estimation of diameter distribution of *Betula maximowicziana* artificial stands: effects of stand age, site index, and relative yield index on Weibull parameters

Yasuyuki OHNO*

要旨

ウダイカンバ人工林の径級分布を林分レベルの属性情報（林齢，地位：SI，収量比数：Ry）から予測するため，10－46年生の38林分を対象にワイブル分布を適用し，パラメータ（位置パラメータ：a，尺度パラメータ：b，形状パラメータ：c）を最尤法により決定した。決定したワイブル分布と観測値との間で適合度検定を行った結果，33林分において適合性が確認された。ワイブル分布のパラメータに影響する林分レベルの因子を抽出するため，一般化線型モデル（GLM）による解析を行った。パラメータa，cでは林齢，SI，Ryを含むモデルがそれぞれ選択され，パラメータbでは林齢を含むモデルが選択された。GLMの結果は，ウダイカンバ人工林におけるワイブル分布の形状が林齢とSI，Ryに応じて変化することを示していた。ウダイカンバ人工林の径級分布を把握するための簡便な方法として，構築したモデルの有効性を議論した。

キーワード：ウダイカンバ人工林，径級分布，ワイブル分布，地位，収量比数

はじめに

ウダイカンバ (*Betula maximowicziana*) 林の密度管理と収穫予測を行うための主要なツールとして，収量－密度図（渋谷・菊沢 1988）と林分密度管理図（猪瀬ら 1991）がある。この二つの図は，それぞれに異なる次の特徴を持っている。収量－密度図は全層間伐を想定したツールであり，単材積の大きい立木から順番に積算した材積（Y，積算材積）とその本数（N，積算本数）との関係（Y－N曲線）を用いて収穫予測を行う。収量－密度図では林分の混み合いの程度が林分緊密度（ α ）によって判断される（Kikuzawa 1983, 菊沢 1983b）。一方，林分密度管理図は下層間伐による保育管理に対応しており，上層木の平均樹高の推移とそれと連動した林分材積，本数の動きから予測を行う。密度管理図では林分の混み合いの程度が収量比数（Ry）によって判断される。

収量－密度図と密度管理図の違いは得られる情報にも認められる。収量－密度図による収穫予測では，胸高直径階ごと

の立木本数の推定が可能である（菊沢 1983a, 渋谷・菊沢 1988）のに対し，密度管理図から得られる情報は平均胸高直径であり（猪瀬ら 1991），径級ごとの本数の推定には対応していない。生産目標の立案など，森林管理の方針を決める場合，平均直径の表示だけでは不十分であり，胸高直径階ごとの本数分布（以下，径級分布と記す）が必要とされる機会が多い（菊沢1983a, 阿部 1980）。このため本研究では，ウダイカンバ林の密度管理図の情報から径級分布を推定する方法について検討した。

林分の径級分布にはL字型や逆J字型，単峰型などの形状が認められ，これらの分布形は確率密度関数によって定量的に記述することができる（Cao 2004）。例えば，トドマツ人工林では，Hozumi (1971) のベータ（Beta）型の確率密度関数から導かれたY－N曲線から径級分布が決定された（清和ら 1982）。立木の胸高直径データから径級分布を決める関数として，ワイブル分布の有効性も報告されてきた。ワイブル分布は多様な分布形に柔軟に対応し，パラメータの推定が比較的

* 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58号 令和3年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 58, March, 2021]

容易である (Cao 2004)。そのため、様々なタイプの森林を対象にパラメータが決定され、径級分布に対する適合性も確認されてきた (Cao 2004)。また、ワイブル分布のパラメータは林齢 (和田ら 1990, 松本ら 2011) や除間伐 (石橋ら 1992)、小班の大きさ (國崎 1998) など、林分レベルの属性情報と関連することも明らかにされた。このようなワイブル分布の形状と属性情報との関係は収穫予測に活用され、スギ、ヒノキ人工林では径級ごとの収穫予測が可能となっている (牧本・西山 2005, 松本ら 2011)。しかし、これらの報告では、ワイブル分布のパラメータは単一の属性情報との関係からしか解析されていない。つまり、複数の情報との関連性については考慮されてこなかった。

本研究では10-46年生のウダイカンバ人工林 (38林分) を対象に、ワイブル分布のパラメータを林分ごとに決定し、その適合性を評価した後、ワイブル分布のパラメータを林分レベルの属性情報から推定するためのモデルを構築した。ウダイカンバは光・水分要求性の高い樹種であるため、モデル構築では光・養水分の資源と関係する可能性がある収量比数 (Ry) や地位指数 (SI)、林齢との関係に着目して解析を行った。そして、構築したモデルを用いて林分ごとの径級分布を推定し、精度検証を行った。

材料と方法

北海道内のウダイカンバ人工林 (22市町, 38林分) を対象に調査を行った。調査林分の林齢は10-46年である (表-1)。調査林分における除間伐などの施業履歴は不明である。い

ずこの林分もウダイカンバが優占し、不成績造林地は含まれていない。各林分に方形プロット (0.01-0.25ha) を設定し、植栽木を対象に胸高直径 (DBH) と樹高 (H) を測定した。なお、ウダイカンバとともにシラカンバが植栽されていると思われる林分が4箇所、認められたが、シラカンバの本数は少なく、ウダイカンバのDBHとの違いがなかったことから、これらを含めて集計・解析を行った。

表-1 調査林分の概況

項目	平均	最小値	最大値
林齢 (年)	32	10	46
胸高直径 (cm)	17.1	8.0	29.7
樹高 (m)	17.2	9.0	26.1
立木密度 (本/ha)	865	250	2225
林分材積 (m ³ /ha)	143	27	391
地位指数 (m)	21.3	16.5	27.9
収量比数	0.79	0.24	1.55

地位と収量比数は猪瀬ら (1990) をもとに算出。

調査林分における平均DBHと平均H、林分材積の範囲 (最小値-最大値) は、それぞれ17.1cm (8.0-29.7cm), 17.2m (9.0-26.1m), 143m³ (27-391m³/ha) であった。猪瀬ら (1990) の方法を用いて算出した地位指数 (SI) と収量比数 (Ry) の範囲は、それぞれ16.5-27.9m, 0.24-1.55であった。通常、Ryは1を超えないとされているが、ウダイカンバ林の最多密度

表-2 林分ごとに決定したワイブル分布の位置 (a)、スケール (b)、形状パラメータ (c) と適合度検定の結果

ID	a	b	c	df	χ ² 値	ID	a	b	c	df	χ ² 値
1	8	4.842	2.465	3	7.1	20	4	8.165	2.834	5	6.8
2	11	5.961	2.484	5	3.6	21	4	7.305	2.569	4	8.5
3	10	5.590	2.441	5	13.2 *	22	6	3.256	2.438	2	4.6
4	11	4.848	2.626	4	9.6 *	23	7	5.498	3.727	6	11.1
5	14	5.790	2.501	4	2.0	24	15	7.463	2.499	5	4.0
6	7	7.801	2.909	6	3.4	25	15	7.854	1.841	7	2.1
7	8	8.623	2.329	8	6.1	26	19	7.995	2.397	6	4.5
8	19	4.745	1.601	5	6.5	27	9	8.737	1.969	7	7.3
9	11	5.746	1.912	5	7.9	28	16	8.582	2.409	6	2.3
10	16	9.719	2.229	7	6.5	29	16	7.309	1.920	8	3.2
11	4	7.667	2.788	5	5.7	30	9	6.028	2.262	7	3.0
12	7	3.426	2.704	4	2.8	31	11	8.532	2.644	6	6.5
13	4	6.264	3.041	5	13.4 *	32	13	6.696	2.522	6	13.6 *
14	13	4.515	2.226	3	3.2	33	21	9.721	2.220	8	4.5
15	13	9.147	2.665	7	5.1	34	15	7.902	2.592	6	4.6
16	10	5.757	2.534	5	10.2	35	9	7.355	2.145	6	7.6
17	5	4.656	3.261	6	9.1	36	14	7.748	2.128	8	3.0
18	2	6.625	3.455	4	11.3 *	37	19	7.161	2.753	5	3.8
19	2	8.817	2.329	8	12.8	38	12	11.184	3.030	7	8.5

df: 自由度, *: p < 0.05

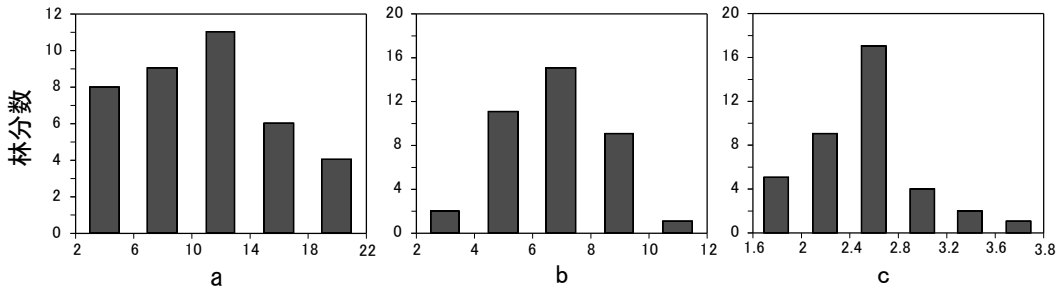


図-1 ワイブル分布の位置 (a), 尺度 (b), 形状パラメータ (c) の頻度分布

表-3 ワイブル分布の位置 (a), 尺度 (b), 形状パラメータ (c) をそれぞれ応答変数とする一般化線形モデルの結果：説明変数とその係数, 赤池情報量基準 (AIC), 決定係数 (R²)

応答変数	切片	目的変数			AIC	R ²
		林齢	地位指数	収量比数		
a	0.0079 (0.4271)	0.0342* (0.0054)	0.0798* (0.0798)	-0.6205* (0.2630)	194.4	0.743*
b	1.5272* (0.1259)	0.0126* (0.0126)	NS	NS	145.2	0.295*
c	1.4485* (0.1832)	-0.0095* (0.0027)	-0.0194 (0.0108)	0.2339 (0.1437)	37.7	0.318*

括弧内の数値は標準誤差を示す。* : p < 0.05
NSはモデルに選択されなかったことを示す。

曲線の作成には二次林のデータが使用され、ウダイカンバ以外の樹種が除かれたものが使われている (猪瀬ら 1990)。そのため、林分材積が過少になっており (猪瀬ら 1990)、このことが最多密度曲線にも影響している可能性がある。本研究では、林分間における混み合いの程度の順番に影響はないと判断し、Ryの値をそのまま解析に使用した。なお、解析には R version 4.0.2 (R Core Team 2020) を用いた。

各林分の径級分布の記述には下記のワイブル分布を適用し、パラメータを決定した。

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right\}$$

ここでf(x) は確率密度、xはDBHである。a, b, cは、それぞれ位置パラメータ、尺度パラメータ、形状パラメータである。本研究では阿部 (1980) の方法に従ってaを設定し、パラメータb, cを最尤法によって決定した。a, bはそれぞれ調査林分の最小直径階、平均胸高直径と関連するパラメータである。cは最も重要なパラメータであり、径級分布の形を決めている。c < 1 の場合は逆J字型曲線、c = 1 で指数分布、1 < c < 3.6 で分布が左側に偏り、c ≈ 3.6 で正規分布、c > 3.6 で右側に偏った分布形をとる。林分ごとに決定したワイブル分布の適合性を評価するため、観測値との間でχ²検定を行った。

調査林分の径級分布の形状に関連する林分レベルの属性情報を明らかにするため、パラメータa, b, cをそれぞれ応答変数とし、林齢と地位指数 (SI), 収量比数 (Ry) を説明変数と

する一般化線形モデル (GLM) による解析を行った。このGLMでは、Cao (2004) が提案した回帰式と対応するようにリンク関数をlog, familyをgaussianに設定した。変数選択には赤池情報量基準 (AIC) を用い、AICが最小となるモデルをそれぞれ選択した。

結果

林分ごとに決定したワイブル分布のパラメータを表-2に示す。ワイブル分布の適合度をχ²検定によって評価した結果、5%水準で有意になった林分は38箇所のうち5箇所であった。図-1にワイブル分布のパラメータの階級別の頻度分布を示す。a, bの最頻階級とその範囲 (最小値, 最大値) は、それぞれ10-14 (2, 21), 6-8 (3.2-11.1) であった。cの最小値と最大値は1.6, 3.8であり、最頻階級は2.4-2.6であった。

一般化線形モデル (GLM) による解析の結果、パラメータa, cでは林齢と地位指数 (SI), 収量比数 (Ry) を含むモデルが選択され、bでは林齢を含むモデルが選択された (表-3)。パラメータa, b, cのモデルにおける決定係数は、それぞれ0.743, 0.295, 0.318であった。選択された目的変数を用いて林齢とパラメータa, b, cとの関係を図-2に示した。林齢とSIはaに対して正の効果を持ち、Ryは負の効果を与えていた (表-3)。同じ林齢、SIの場合、Ryの低下にともないaの値は大きくなっていった (図-2)。一方、cに対して林齢とSIは負の効果を持ち、Ryは正の効果を与えていた。cの値は林齢と

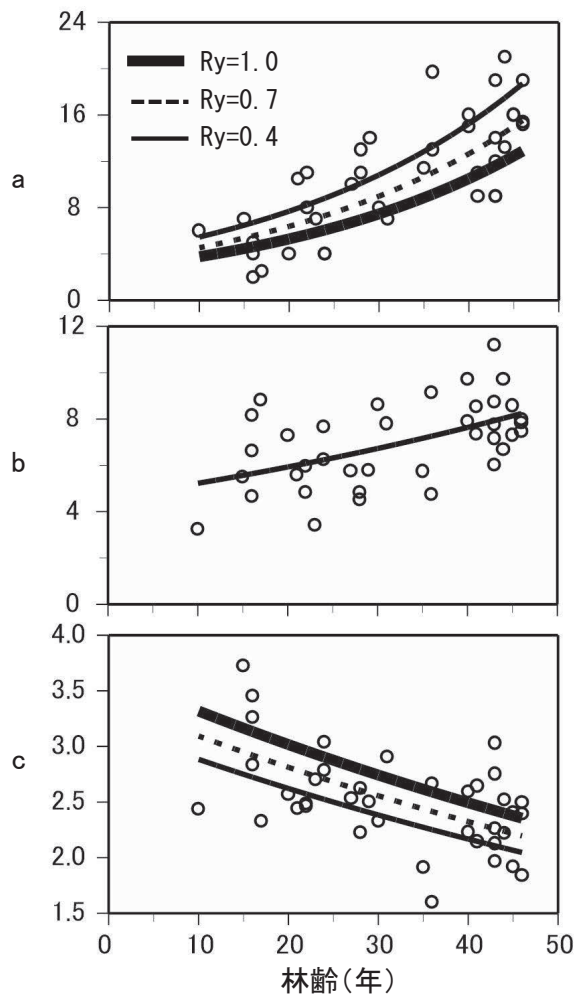


図-2 林齢とワイブル分布の位置 (a), 尺度 (b), 形状パラメータ (c) との関係

図中の線は、表-3の係数を用いて算出した各パラメータの予測値を示す。a, cでは地位指数を20とし、3段階の収量比数(Ry)の条件で予測した。

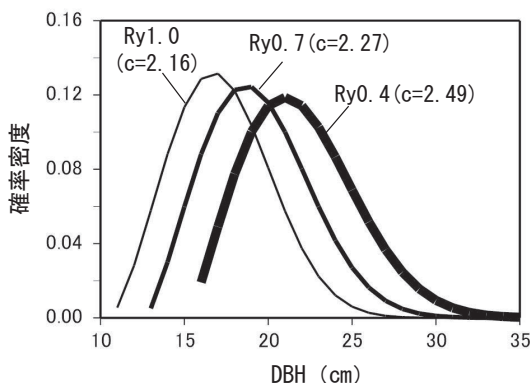


図-3 推定したワイブル分布のパラメータから作成した40年生時のDBHと確率密度との関係

図中の線は表-3の係数を用いて算出した各パラメータの予測値から描いた確率密度を示す。林齢と地位指数をそれぞれ40年、20とし、3段階の収量比数(Ry)の条件で予測した。cの値は形状パラメータであり、 $1.6 < c < 3.6$ の範囲では値が大きいほど左偏性が強い。

ともに低下し、林齢と地位が同じであれば、Ryが小さくなるほどcが小さくなっていった。林齢はパラメータbに対し正の効果を持ち、林齢とともにbは大きくなっていった。

GLMで得られたモデル(表-3)を用いてパラメータa, b, cをそれぞれ推定し、図-3にワイブル分布(確率密度)を例示した。この例示では、林齢を40年、SIを20、Ryを0.4, 0.7, 1.0の3段階とし、推定を行っている。すべてのRyにおいて、径級分布は単峰型を示しているものの、Ryが小さい条件ほど確率密度のピークは大きなDBH階級に移行していた。また、Ryが小さい林分(Ry0.4)ほどc(形状パラメータ)の値が大きくなっていった。

調査林分ごとに決定したパラメータ(表-2)から描いたワイブル分布(決定値)とGLMで得られたモデル(表-3)から推定したワイブル分布(推定値)を比較した(図-4)。ここではランダムに選んだ6カ所の林分について図示している。林分#1のように、決定値と推定値が比較的、一致しているものがある一方、#30のように両者の間に大きな乖離が認められる林分が存在した。

考察

決定したワイブル分布と観測値との間で適合度検定を行った結果、5%水準で有意差があった林分は38林分のうち5箇所であった(表-2)。つまり、残りの33林分(87%)ではワイブル分布が適合していたことを示している。この割合はトドマツ人工林で報告されている値(阿部1980)と同等であり、天然林で報告されている値(約60%, 和田ら1990)よりも高い。このことから、ワイブル分布はウダイカンバ人工林の径級分布を記述するうえでも有効であると判断できる。

ワイブル分布のパラメータに関連する林分レベルの属性情報(要因)として、これまで林齢(牧本・西山2005, 松本ら2011)や立木密度(清和ら1982)などとの関係がそれぞれ個別に解析されてきた。本研究では複数の要因が複合的にパラメータと関連することを示した(表-3, 図-2)。bと林齢との間には正の関係が認められた。bは平均DBHと関連するパラメータであり、同様の結果は北海道の針広混交林においても報告(和田ら1990)されている。健全なウダイカンバ人工林では、植栽木の平均DBHは林齢とともに増加する(大野2008)ため、bはこの動きと連動したものである。

パラメータaに対して林齢と地位(SI)は正の効果を持ち、収量比数(Ry)は負の効果を与えていた(表-3, 図-2)。この理由の一つとして施業履歴があげられる。aは調査林分の最小直径階と関連するパラメータであるため、除伐などによる小径木の伐採は直接的にaを大きくする(阿部1980)。一般に林齢が同じであれば、SIが高い(樹高成長が旺盛な)林分ほどRyは高くなるため、このような林分が除間伐の対象となり、小径木の伐採によってaの値が大きくなった可能性がある。また、ウダイカンバの成長・死亡特性も林齢やRyを介し

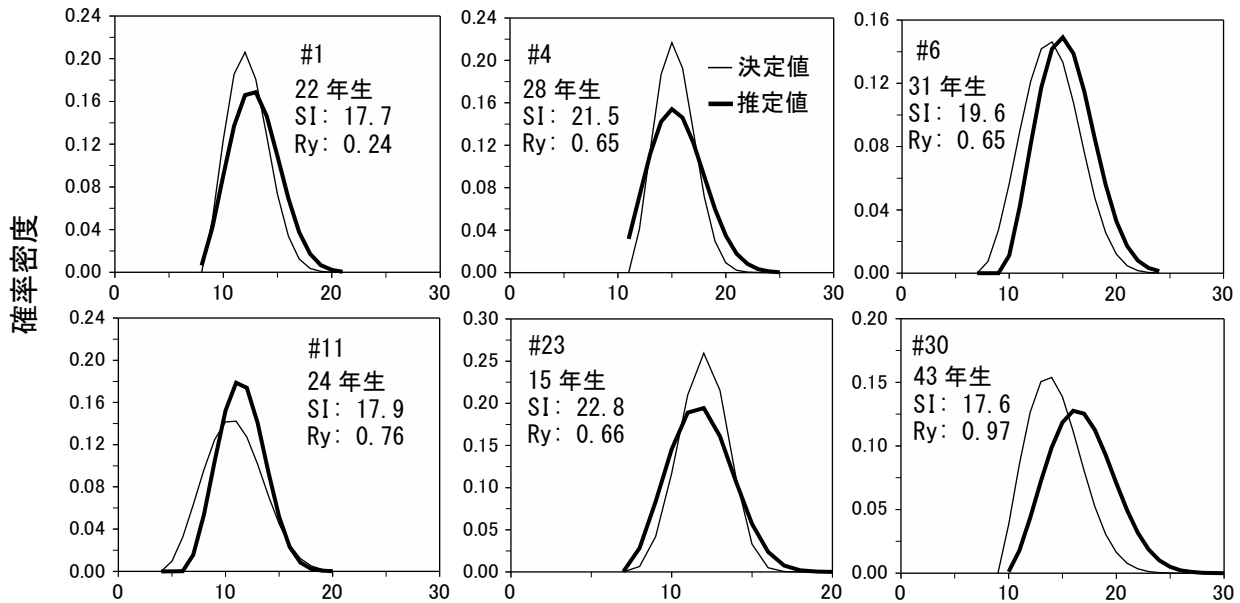


図-4 パラメータの決定値と推定値から描いたワイブル分布の比較

図中の番号は調査林分のIDを示す。決定値は林分ごとに決定したワイブル分布（表-2）であり、推定値は表-3の係数を用いて推定したワイブル分布である。SI, Ryはそれぞれ地位、収量比数を示す。

てaに影響していた可能性がある。ウダイカンバの成長は個体間競争の影響を受け、とくに小径木ほど競争効果によって肥大成長が制限される（Ohno et al. 2009, 2010, 大野 2011）ため、林齢とSIが同じ場合、Ryの高い林分ではaが小さくなるものと推察される。また、発達途中の段階にあるウダイカンバ林では小径木ほど死亡率が高い（菊沢ら 1981）ため、林分の発達（林齢の増加）にともなう小径木の死亡によってもaの値が大きくなるものと考えられる。

観察されたパラメータcの範囲は1.6-3.8であり、最頻階級は2.4-2.6であった（表-2, 図-1）。このことは、ほとんどの林分の径級分布が左側に偏った形（ $1 < c < 3.6$, 左偏性）であり、正規分布（ $c=3.6$ ）、右側に偏った分布型（ $3.6 < c$ ）を示す林分が非常に少なかったことを示している。林齢はcに対して負の効果をもっていた（表-3）。同様の傾向はスギ人工林（松本ら 2011）において報告されている。観察された範囲では林齢の増加とともにcが小さくなるため、このことは径級分布の左偏性が林齢とともに顕著になることを意味している。また、SIとRyもcに関連する要因として選択され、SIとRyはcに対してそれぞれ負、正の効果を示していた（表-3, 図-2）。つまり、林齢が同じ場合、SIが高く、Ryが低くなるほどcの値は小さくなる（左偏性が強くなる）ことを示している。観察されたcの変動パターンはウダイカンバの成長特性によって説明することができる。ウダイカンバの肥大成長は個体のサイズに依存し、期首のDBHが大きい個体ほど大きな成長量を示す（大野 2011）。そのため、大きな個体ではより大きなDBHの階級に進捗しやすい一方、サイズの小さな個

体は同じ階級にとどまる時間が長くなる。その結果、林齢とともに径級分布の左偏性が高まった（右側の裾野が長くなった）ものと考えられる。また、肥大成長におけるサイズ依存の程度は、林分の組み合わせの程度によって異なる。強度間伐が行われてきた林分と無間伐林分との間でウダイカンバの肥大成長量が比較された事例では、明瞭な成長量の違いが大きなサイズクラスで認められたのに対し、小さなサイズクラスでは林分間における成長量の違いは顕著なものでなかった（大野 2011）。つまり、Ryの低い林分ではサイズの大きなウダイカンバが旺盛に成長する一方、サイズの小さな個体の成長量はRyの高い林分との差が小さく、これらの個体は同じ階級にとどまることになる。そのため、Ryの低い林分ではcの値が小さくなり、径級分布の形が左側に偏ったものになるものと推察される。このことを明らかにするためには、ワイブル分布のパラメータと個体スケールでの成長・死亡パターンとの対応関係を明らかにする必要がある（Lima et al. 2016）。

スギ人工林におけるシステム収穫表では、林齢から推定したワイブル分布のパラメータ（a, b, c）が収穫予測に反映されており、径級ごとの立木本数が出力されるアルゴリズムになっている（松本ら 2011）。つまり、径級分布の形状は林齢のみに依存し、Ryなどの違いによる径級分布への影響は考慮されていない。本研究では、林齢とともにRyとSIもワイブル分布のパラメータに影響することをウダイカンバ人工林において明らかにした。このことは、収穫予測技術の高度化に展開できる可能性を示している。

ウダイカンバ林の密度管理図による収穫予測では、得られ

る情報が平均胸高直径に限定されているが、本研究の結果と組み合わせることで径級別の収穫予測へと発展できる可能性も示している。林齢、SI、Ryから推定したパラメータを用いて記述したワイブル分布（確率密度）では、同じ林齢の場合、Ryが小さい林分の径級分布ほど大きなサイズクラスに移動していた（図-3）。この傾向はウダイカンバ林における間伐試験の結果や収量-密度図を用いた予測（新田・菊沢 1987, 渋谷・菊沢 1988, 滝谷ら 1996）と一致しており、推定した径級分布がウダイカンバ林の動態を反映しているものと判断できる。ただし、パラメータを推定するモデルの決定係数（ R^2 ）は、aで0.743と高かったものの、bとcの R^2 はそれぞれ0.295, 0.318と低かった。また、推定したワイブル分布は林分ごとに決定したものと必ずしも一致していない（図-4）ため、今回の結果を用いて径級分布を推定する場合には、目安としてとどめておくことが適切であろう。今後、データを拡充し、精度の向上を図る必要がある。

引用文献

- 阿部信行（1980）トドマツ人工林の施業法に関する研究（Ⅱ）-道有林におけるトドマツ人工林の収穫予想表の作成-。北林試研報18: 71-93.
- Cao QV（2004）Predicting parameters of a weibull function for modeling diameter distribution. *Forest Science* 50: 682-685.
- Hozumi K（1971）Studies on the Frequency distribution of the weight of individual trees in a forest Stand III. a beta-type distribution. *Jap J Ecol* 21: 152-167.
- 猪瀬光雄・小林文男・小木和彦・佐野 真（1991）ウダイカンバの林分密度管理図。北方林業43: 34-37.
- 石橋 聡・猪瀬光雄・佐野 真・小木和彦（1992）数理モデルによる森林成長の樹種・地域特性の解明（Ⅶ）-ワイブル分布を用いたカラマツ人工林の直径分布の変化-。北方森林学会誌40: 164-166.
- Kikuzawa K（1983）Yield-density diagram; compactness index for stands and stand components. *For Ecol Manage* 7: 1-10.
- 菊沢喜八郎（1983a）北海道の広葉樹林。北海道造林振興協会、札幌。
- 菊沢喜八郎（1983b）林分の緊密度とそれを応用した収量-密度図の改良-。北林試研報 21: 1-7.
- 菊沢喜八郎・高橋幸雄・水井憲雄・浅井達弘・福地 稔・水谷栄一（1981）ウダイカンバ林の生長量。日林北支講 29: 46-48.
- 國崎貴嗣（1998）小班面積の違いがスギ人工同齡単純林の直径分布形に及ぼす影響。東北森林科学会誌 3: 1-5.
- Lima RAF, Batista JLF, Prado PI（2015）Modeling tree diameter distributions in natural forests: an evaluation of 10 statistical models. *Forest Science* 61: 320-327.
- Lima RAF, Muller-L HC, Prado PI, Condit R（2016）How do size distributions relate to concurrently measured demographic rates? Evidence from over 150 tree species in Panama. *Journal of Tropical Ecology* 32: 179-192.
- 牧本卓史・西山嘉寛（2005）長伐期林の収穫予測システムの開発。岡林試研報21: 43-52.
- 松本光朗・中島 徹・細田和男（2011）システム収穫表LYCSの改良。日林試93: 187-195.
- 新田紀敏・菊沢喜八郎（1987）山火事跡広葉樹二次林の育成試験 -成長量と間伐の効果-。日林北支論 35: 153-155.
- 大野泰之（2011）落葉広葉樹林におけるウダイカンバ成木の衰退の要因解明に関する研究。北林試研報告 48: 1-46.
- 大野泰之・勝矢晃敏・竹本 論（2008）樹冠長・枝下高を指標としたウダイカンバ大径材の生産技術。光珠内季報 149:1-5.
- Ohno Y, Umeki K, Terazawa K, Yasaka M, Watanabe I, Takiya M（2010）Competition as a predisposing factor of crown dieback in a secondary forest of *Betula maximowicziana* in Hokkaido, northern Japan. *J For Res*15: 161-168.
- Ohno Y, Umeki K, Watanabe I, Takiya M, Terazawa K, Yasaka M, Matsuki S（2009）Basal area growth and mortality of *Betula maximowicziana* affected by crown dieback in a secondary forest in Hokkaido, northern Japan. *J For Res* 14: 37-43.
- R Core Team（2020）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・菊沢喜八郎・久保田泰則（1982）トドマツの密度試験（Ⅱ）-材積・直径の頻度分布形と密度について-。北方森林学会誌 30: 44-46.
- 渋谷正人・菊沢喜八郎（1988）ウダイカンバ林の収量-密度図。北方森林学会誌 36: 124-126.
- 滝谷美香・梅木 清・小山浩正・寺沢和彦（1996）ウダイカンバ間伐試験地における葉量および林分構造の10年間の推移。北方森林学会誌 44: 86-88.
- 和田茂彦・竹内典之・川村 誠・酒井徹朗（1990）森林の動態に関する研究（Ⅲ）:北海道演習林の天然林について。京大演報62: 96-107.

Summary

The Weibull distribution was applied to predict the diameter distribution of the *Betula maximowicziana* artificial forests by stand-level variables (i.e. stands age, site index: SI, relative yield: Ry). Weibull parameters (a: location, b: scale, c: shape) were determined for 38 stands (10 to 46 years of age). The goodness of fit test (the chi-square test) showed that the determined Weibull distributions fitted in 33 of the 38 stands. A generalized linear model (GLM) was performed to detect the variables that affect Weibull

parameters. For parameter a and c, stand age, SI, and Ry were selected in the final model respectively. For b, stand age was selected in the final model. The results of GLM indicated that the shape of the Weibull distribution will change depending on the stand-level variables. We discussed the availability of the constructed models as a simple method for predicting the diameter distribution of the monarch birch artificial forests.

Key words

Betula maximowicziana artificial stands, Diameter distribution, Weibull distribution, Site index, Relative yield index

多雪地における獣害防止ネットの破損とその対策

雲野 明*・南野一博**・石川祐介***・明石信廣****

Reduction of snow damage to net fences controlling deer damage in heavy-snow regions

Akira UNNO*, Kazuhiro MINAMINO**, Yusuke ISHIKAWA***, and Nobuhiro AKASHI****

要旨

エゾシカ被害防止用に設置された林業用の獣害防止ネットにおいて、積雪による破損被害が北海道の多雪地で発生している。そこで、積雪による獣害防止ネットの破損を抑え、侵入防止柵の耐久性を向上させるための方法を検討した。その結果、最大積雪深が1 mを超えるような多雪地では、支柱間隔を2.5～3 m、吊りロープの固定位置を木口にする、ネットの上部4目程度はイザナスを使用する、支柱の中間部でネットを固定しないことで、ネットの破損を軽減できることが明らかとなった。ただし、ネットの破損を完全に防ぐことはできないため、定期的な見回りと保守点検が必要である。

キーワード：獣害防止ネット，エゾシカ被害，多雪地，破損の軽減，耐積雪性

はじめに

2014～2018年度の北海道内エゾシカによる森林被害の実面積（国有林を除く）は減少傾向にあるが1,908～3,403haとなり、依然として大きな被害水準で推移している。被害は胆振・日高・釧路管内で多いが、他の地域でも被害が増加し、拡散している状況にある（北海道水産林務部林務局森林整備課2019）。

これまで、加害種であるエゾシカの個体数を減らすため、銃器やワナによる捕獲が取り組まれているほか、林業被害対策として、食害防止策（忌避剤散布、苗木食害防止用保護チューブや食害対策防護ネットの設置）・角こすり被害防止策（枝条巻き）・造林地への侵入防止策（侵入防止柵の設置）など、様々な手段が講じられている。

侵入防止柵については、2012～2014年度の設置延長が700kmを超えて、それ以降も毎年設置され続けている（北海道水産林務部林務局森林整備課2013, 2015, 2016）。北海道の

造林地に設置されている侵入防止柵のほとんどは、金網ではなくステンレス線入りポリエチレン製の獣害防止ネットで施工されている。侵入防止柵は造林地内からシカを排除することで被害を完全に防除できる一方、ネットが破損するとそこが通り道となり、柵の効果が失われてしまう。本州では侵入防止柵の破損の原因として、動物の潜り込み、落石や土砂崩れ、倒木などが指摘されているが（大島ほか2014, 酒井2018）、北海道では破損の原因として積雪があり、特に積雪の多い地域でネットの落下やネットの破損などが生じている。そこで本研究では、積雪による獣害防止ネットの破損を抑え、侵入防止柵の耐久性を向上させるための設置方法やネットの素材に関し検討を行った。

方法

1. 試験地概要

以下の3つの試験地を設定した。a) 美唄光珠内試験地：北

* 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

** 現所属：北海道立総合研究機構 Hokkaido Research Organization, Kita19-jo Nishi11-chome, Kita-Ku, Sapporo 060-0819

*** ナカダ産業株式会社 Nakada Industrial Co. LTD, Shikoro 880-3, Shimada, Shizuoka 428-0019

**** 北海道立総合研究機構林業試験場道北支場

Dohoku Station, Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Nakagawa, Hokkaido 098-2805

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

表-1 使用した獣害防止ネットの仕様

ネットの種類	使用位置	材質	織度(dtex)*	本数
従来ネット	最上段の網糸	イザナス	1,760	4
		ポリエチレン	440	120
	上記以外の網糸	ポリエチレン ステンレス線	440 (0.29mm)	60 4
新開発ネット	上部4目または1m	イザナス	1,760	6
		ポリエチレン	440	52
	上記以外の網糸	ポリエチレン ステンレス線	440 (0.29mm)	60 4

*:糸の太さを表し、1 dtexは10,000mの重さが1gの糸を示す、ステンレス線は太さを示す

海道美唄市光珠内町東山，北海道立総合研究機構林業試験場構内，標高は50m。平坦地に一直線に侵入防止柵を設置した。
b) 石狩厚田試験地：北海道石狩市厚田区嶺泊，標高130m，傾斜15度，斜面方位W。侵入防止柵は造林地を取り囲むように設置した。積雪の斜面方向への移動を考慮し，各仕様（表-1）のネットを斜面方向に対して直交する部分と平行する部分が同程度になるようにいくつかに分けて設置した。
c) 美唄東明試験地：北海道美唄市東明，標高90～100m，傾斜約25度，斜面方位SE。侵入防止柵は造林地を取り囲むように設置した。2016年11月と2017年11月に設置した柵（表-2）は斜面方向に対して直交に設置した。2012年に設置した柵は，斜面方向に対して直交する部分と平行する部分がある。アメダスの美唄観測所において，試験を実施した2015～2019年度の最大積雪深は，それぞれ131 cm，53 cm，167 cm，104 cm，63 cmであった。

2. 設置した侵入防止柵の構造

北海道で一般的に設置されている侵入防止柵の構造を図-1に模式図で示す。支柱は長さ3.65m以上で末口おおむね12cm以上の地域材を用いる。支柱高の30%以上を埋設することで十分な安定を保つ。また，ネットの地上高を2.5mにすることで飛び越えによるエゾシカの侵入を防ぐ。獣害防止ネットはステンレス線入り（全面）で高耐久性のものを使用し，網目は100mm×100mm以下である。地表からのエゾシカによる潜り込みを防ぐため，ネットは地面にアンカーピンで固定し，ネットを支柱に固定する資材（ステーブル）で支柱1本につき，4か所以上で固定する。本研究では，図-1の上端で吊りロープを固定しているステーブルの位置を吊りロープ固定部，上から2か所目のステーブルの固定位置をネット中間固定上部，上から3か所目のステーブルの固定位置をネット中間固定下部と呼ぶ。

本研究では支柱には丸太を使用し，ネット高は2.5m，ネットの網目サイズは100mm×100mm，ネットや吊りロープの固定には長さ43mm，太さ4mmで返しのある鉄製のステーブルを使用した。各試験地における侵入防止柵の仕様を表-2に示す。吊りロープ固定位置は，支柱の上部側面にステーブルで固定した場合を支柱側面，支柱の上から木口面にステーブルで固定した場合を木口とした。支柱間隔は2.5～5mとした。ネット中間部の固定は，支柱側面の2か所をステーブルで固定した場合を中間あり，固定しなかった場合を中間なしとし

表-2 各試験地の侵入防止柵の仕様

試験地名	設置年	観察年度	支柱間隔 (m)	吊りロープ 固定位置	吊りロープ	ネット*5	ネット固定	調査対象とした支柱の本数
美唄光珠内	2015	2015	2.5	支柱側面	ポリエチレン	従来	中間あり	7
			2.5	木口			中間なし	7
			4	支柱側面			中間あり	5
			4	木口			中間なし	6
			5	支柱側面			中間あり	6
			5	木口			中間なし	5
	2016	2016-2017	2.5	ワイヤー	新開発	中間あり	5	
			2.5	ポリエチレン	従来	中間なし	6	
			4	ワイヤー	新開発	中間あり	6	
			4	ワイヤー	新開発	中間なし	5	
			5	ポリエチレン	従来	中間なし	5	
	2018	2018-2019	2.5	ワイヤー	新開発	中間なし	5	
			2.5	ポリエチレン	従来	中間あり	14	
			2.5	木口	ポリエチレン	新開発	中間なし	20
			4	ワイヤー	新開発	中間なし	10	
石狩厚田	2015	2015-2019	3	木口	ポリエチレン	従来 新開発	中間あり	16*1 21*2
			2012	2017-2018	支柱側面	ポリエチレン	従来*3	中間あり
美唄東明	2016	2016-2019	2.5	木口	ポリエチレン	新開発	中間あり	20
			2017	2017-2019	木口	ワイヤー	新開発*4	中間なし

*1:一部の支柱が傾きネットがゆるんだ支柱を調査か所から除外したため2019年度のサンプル数は10

*2:一部の支柱が傾きネットがゆるんだ支柱を調査か所から除外したため2019年度のサンプル数は20

*3:上段1目分のみ2倍の太さのポリエチレンを使用

*4:上段1目分のみイザナスを使用

*5:ネットの仕様は表-1参照

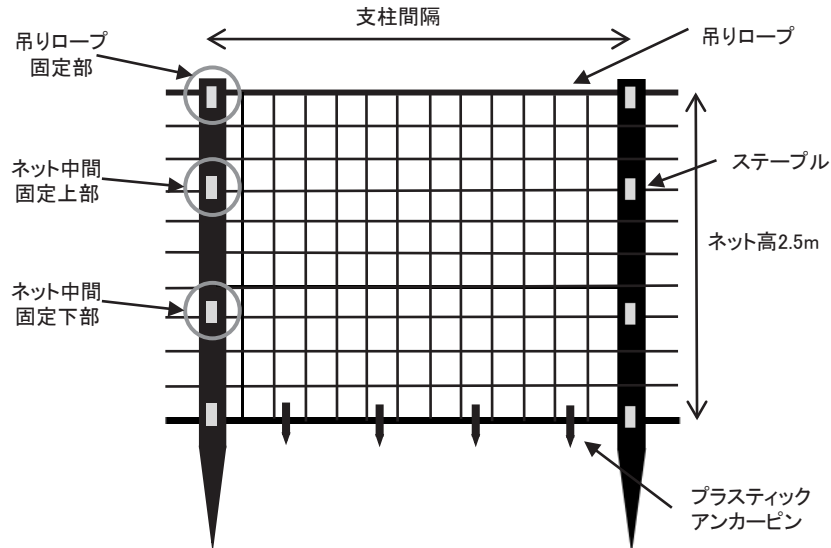


図-1 北海道で一般的に設置されている侵入防止柵の模式図
本研究においてもこの構造に準じて設置した。

た。積雪による獣害防止ネットの破損は積雪期に生じるため、本研究では年度で表記した。例えば2015～2016年の冬に生じた破損は、観察年度2015年に生じた被害とした。吊りローブの仕様は、ポリエチレン：10mm、ワイヤー：亜鉛メッキ鋼より線（1.4mm×7本、外径4.2mm）である。ネットは素材の異なる2種類を用いた。その仕様は表-1に示す。本研究では、道内で一般的に使用されているステンレス線入りのポリエチレンネットを従来ネット、超高分子量ポリエチレン繊維であり高強度・高弾性率を持つイザナス®（東洋紡株式会社）をネットの上部に使用したネットを新開発ネットと呼ぶことにする。

複数年継続して観察した獣害防止ネットに関しては、積雪前の秋に吊りローブの落下のみ補修した。ただし、美唄東明試験地に2012年に設置した従来ネットは破網してできたネット中間固定部の穴をローブでくくることによりエゾシカの侵入を防ぐ補修を行った。

3. ネットの破損状況調査

ネットの破損は、吊りローブ固定部が外れてネットが脱落する「落下」と、ネットの網目が破れる「破網」に区分して調査を行った。破網や落下は支柱付近で生じるため、支柱を調査か所とし、コーナーとなる支柱、傾いた支柱、ネットの端にあたる支柱は、調査対象から除外した。石狩厚田試験地のネットに関しては、一部の支柱が傾きネットがゆるんだ支柱を調査か所から除外したため2019年度は調査か所数が減少した。獣害防止ネットの破損状況を積雪前に確認し、翌年の融雪後、再度破損状況を確認してその年の破損を判定した。被害状況調査の期間は表-2の観察年度である。美唄光珠内試験地においては、積雪期間中、約1か月に1度ネットの破損状況を調査した。また、破網してできた穴の大きさは、破網

した部分を三角形または四角形ととらえ、底辺と高さを測定し面積を算出した。

4. 積雪深の測定

各試験地内に積雪深を表す積雪板と自動撮影カメラ（ハイカムSP108-J、株式会社ハイク）を設置し、積雪深を記録した。自動撮影カメラは4時間毎に1枚写真を撮影するように設定し、撮影された画像から積雪板の目盛りを読み取り、1日単位で積雪深を記録した。また、美唄光珠内試験地においては、最も近いアメダス観測所である美唄の積雪深のデータも参考とした。

5. 統計解析

以上の調査より、①吊りローブの固定位置（支柱側面・木口）によるネットの落下率と吊りローブ固定部の破網率の違い（美唄光珠内2015年度、美唄東明2017年度）、②支柱間隔による破網率の違い（美唄光珠内2017年度）、③従来ネットと新開発ネットの破網率の違い（石狩厚田2017年度）と破網してできた穴のネットの種類による大きさの比較（石狩厚田2018年度）をそれぞれ行った。積雪期を経ることでネット固定部には強い力が働き、一部のネットではネットの繊維に損傷がみられたこと、また試験地により積雪状況が異なることから、設置方法やネットの比較は同じ設置年と同じ試験地内で行った。ただし、美唄東明試験地における①吊りローブの固定位置（支柱側面・木口）によるネットの落下率と吊りローブ固定部の破網率の違いに関しては、吊りローブ固定部に劣化等がみられなかったので、設置年度の異なるネットで比較した。また、石狩試験地や美唄東明試験地では造林地を取り囲むように侵入防止柵を設置したため、斜面方向や傾斜の違いによる影響が考えられたが、予備解析では大きな影響は認められ

なかったため、データはまとめて分析した。

統計解析について、美唄光珠内試験地のデータは支柱間隔の違いなど複数の条件で統合的に検討するためMantel-Haenszel test, 美唄東明試験地のデータはFisher's exact test, 石狩厚田試験地のデータの破網率の違いについてはFisher's exact testを、破網してできた穴の大きさについては線形モデル (LM) を用いて比較した。統計解析にはR 4.0.2 (R Core Team 2020) を使用した。

結果

1. 吊りロープの固定位置とネットの破損状況

美唄光珠内試験地2015年度と美唄東明試験地2017年度の結果から、吊りロープを支柱側面で固定すると積雪によりステーブルが抜けてネットは落下してしまうが、木口で固定することでネットの落下防止となることが明らかとなった (図-2, 美唄光珠内試験地2015年度: Mantel-Haenszel test, $\chi^2=23.62$, $df=1$, $p<0.001$, 美唄東明試験地2017年度: Fisher's exact test, $p<0.001$)。支柱間隔を2.5mと短くしても支柱側面で固定すると、多くの支柱でネットの落下が発生した。美唄東明試験地

において木口で固定した1か所でネットの落下が生じたが、ステーブルの脱落ではなく、支柱の木口の端で吊りロープを固定していたため、木口が割れたことによるものであった。

美唄光珠内試験地2015年度の吊りロープ固定部の破網状況は、木口で固定した場合、支柱間隔5mで5か所中2か所、支柱間隔4mで5か所中2か所、支柱間隔2.5mで7か所中2か所であった。一方、支柱側面に固定した場合は、吊りロープが落下するため、吊りロープ固定部での破網はなかった。このように吊りロープを木口に固定すると支柱側面に固定した場合より明らかに多くの破網が発生した (Mantel-Haenszel test, $\chi^2=5.31$, $df=1$, $p=0.021$)。一方、美唄東明試験地2017年度において支柱側面に吊りロープを固定し落下したネットの吊りロープ固定部の新しい破網は43例中1か所、木口で固定した場合は破網しなかった (Fisher's exact test, $p=1$)。

2. 支柱間隔と破網率の関係

美唄光珠内試験地2017年度において、ネットを同じ方法で設置した支柱について支柱間隔の影響を調べると、支柱間隔が短い方がネットの破網が少ない傾向を示した (図-3,

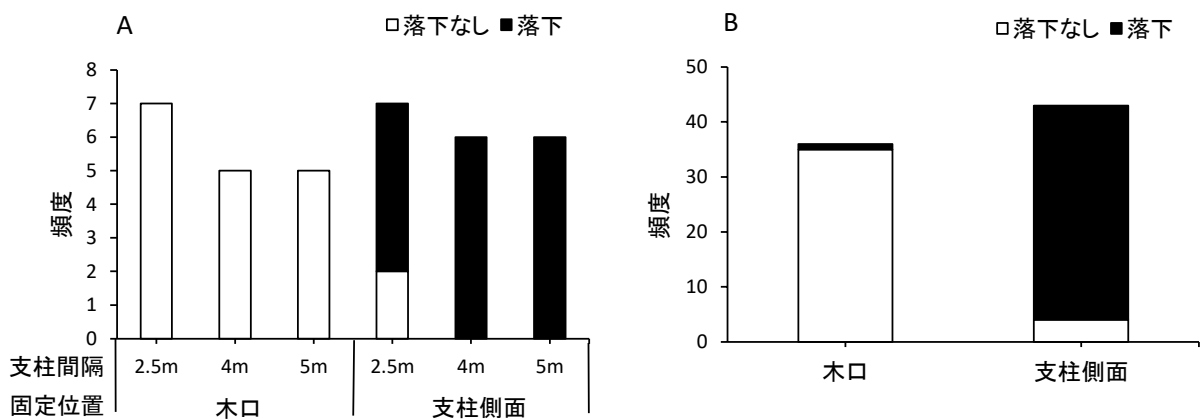


図-2 吊りロープ固定位置と吊りロープ落下の関係

A: 美唄光珠内試験地2015年度, B: 美唄東明試験地2017年度

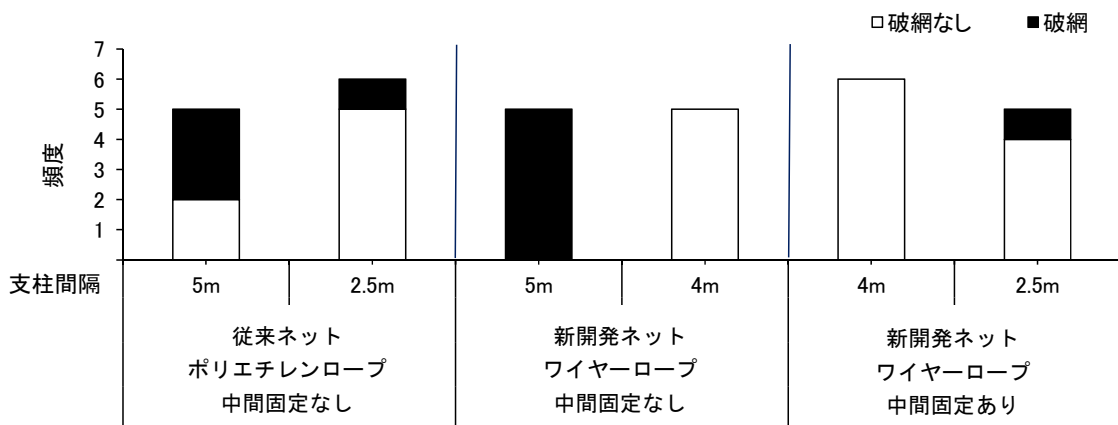


図-3 支柱間隔とネットの破網の関係 (美唄光珠内試験地2017年度)

横軸の侵入防止柵の仕様は、表-2 参照

Mantel-Haenszel test, $\chi^2=4.25$, $df=1$, $p=0.039$)。この時、ネット中間固定なしの場合は吊りロープ固定部、ネット中間固定ありでは、支柱中間固定部で破網した。また、全く破網が生じなかった支柱間隔4mでは、ネット中間固定なしで1か所、ネット中間固定ありで2か所の木口が割れて、吊りロープが落下していた。支柱間隔2.5mと5mの結果からは明らかに支柱間隔は短い方が破網は少なかったが、支柱間隔2.5mでも防ぐことはできなかった。

3. ネットの種類による破網状況

石狩厚田試験地では新開発ネットと従来ネットを同じ条件で設置し、継続して複数年調査した。1冬経過後、両ネット共に吊りロープ固定部やネット中間固定下部の破網数は少な

かった。しかし、ネット中間固定上部においては、新開発ネットでは全く破網しなかったのに対し、従来ネットはすべて破網した(図-4)。3冬経過すると、新開発ネットでも破網数は増加したが、ネット中間固定上部と下部では従来ネットより破網数は少なかった(Fisher's exact test, 吊りロープ固定部： $p=0.091$ ，ネット中間固定上部： $p=0.012$ ，ネット中間固定下部： $p=0.006$)。吊りロープ固定部に関しては統計的な有意差はなかったが、破網率は新開発ネットで52.3%，従来ネットで81.3%であった。

1冬経過後に破網した部分は、新開発ネット、従来ネットともに網目が1か所切れただけの小さな穴であったが、4冬経過後には図-5に示したように大きな穴がみられるようになった。4冬経過後の破網してできた穴の大きさは、吊りロープ固定部やネット中間固定下部では新開発ネットと従来ネットに有意な差はなかったが、ネット中間固定上部では新開発ネットの方が従来ネットより明らかに小さかった(図-5, LM, 吊りロープ固定部： $p=0.084$ ，ネット中間固定上部： $p<0.001$ ，ネット中間固定下部： $p=0.322$)。吊りロープ固定部にできた新開発ネットの穴の大きさの最大値は1,268 cm^2 ，従来ネットは9,360 cm^2 と従来ネットの方がはるかに大きく、従来ネットにできた穴のうち、新開発ネットの最大値以上の大きな穴が生じたのは10か所中5か所で、従来ネットでは大きな穴ができた場所が多かった。

破網はすべてネットを固定したすぐ下の部分で発生していた。積雪期を経過しても破網しなかったネットの固定部分を観察すると、従来ネット、新開発ネット共に繊維の損傷が見られた。従来ネットは一部のポリエチレン繊維が破断し、先にステンレス線が破断しているものが見られた(写真-1A)。新開発ネットは、繊維の破断がなくても、ネットの結び目に毛羽立ちが生じ、変形していた(写真-1B)。

吊りロープ固定部の破網してできた穴が広がる方向は、垂直方向ではなく水平方向だった。3冬経過後に吊りロープから垂直方向に破網した編み目数は、新開発ネットは破網した11か所すべてで上から1目のみであり、従来ネットは破網した13か所のうち1か所のみ上から2目までで、他は上から1目のみであった。そのため、破網してできた穴は横長になった(写真-2)

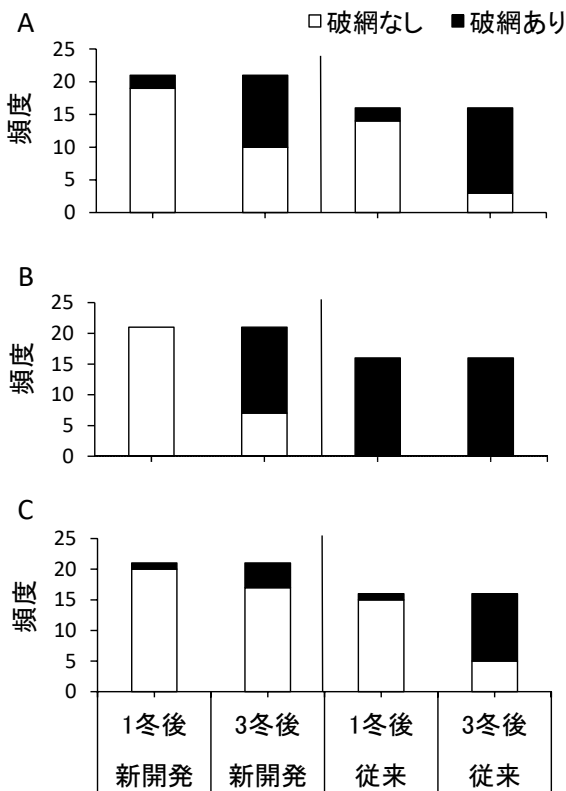


図-4 吊りロープを支柱の木口で固定した場合の固定部のネット破網数の変化(石狩厚田試験地2017年度)
A: 吊りロープ固定部, B: ネット中間固定上部, C: ネット中間固定下部

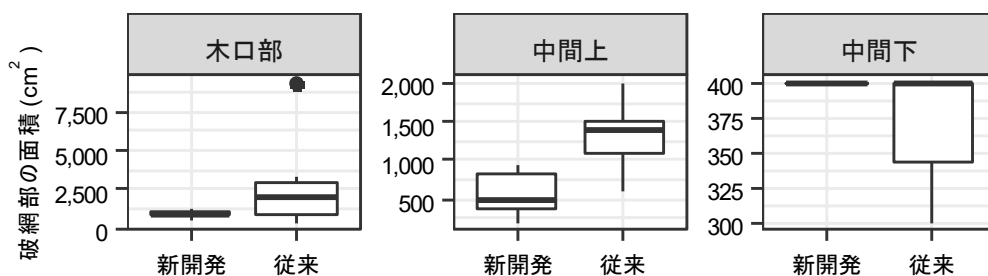


図-5 設置4冬後の破網してできた穴の大きさ(石狩厚田試験地2019年4月調査)

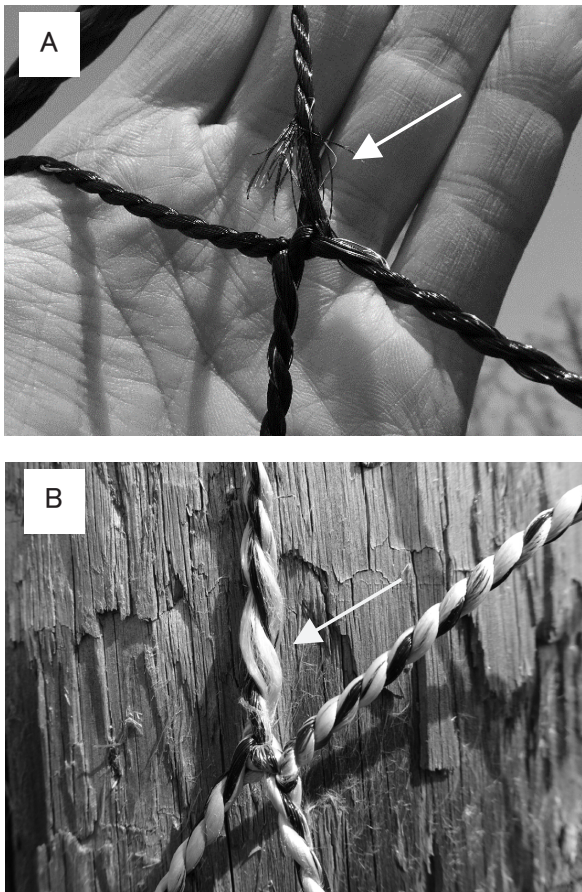


写真-1 ネット固定部直下のネット損傷の様子 (石狩厚田試験地)

A: 完全に破網しなかったが、積雪による引っ張りによりステンレス線が切れた従来ネット,
 B: 破網しなかったが、積雪による引っ張りにより繊維が毛羽だった新開発ネット



写真-2 設置後3冬経過した吊りロープ固定部の破網が横方向に広がった様子 (石狩厚田試験地)

4. 積雪深の影響

美唄光珠内試験地2017年度では、積雪深は12月20日に120cm, 1月30日に136cmと変化したが、2月8日までは破損は発生していなかった(図-6A)。2月8日~3月6日の間にネットの破網または吊りロープの落下のほとんどが発生した。この期間は最大積雪深150cmを挟んだ期間であった。美唄光珠内試験地2018年度では、2月13日に積雪深が最大の132cmとなり、従来ネットのみで2月14日~3月14日の間に破網が生じた(図-6B)。

2016年度と2019年度は雪が少なく、最大積雪深は52cm~86cmですべての試験地で破網が生じなかった(図-7)。一方、2015年度、2017年度、2018年度は雪が多く、最大積雪深は124cm~185cmですべての試験地で1か所以上のネットの破網や落下が観察された。

考察

1. 吊りロープの固定位置によるネットの破損状況の違い

北海道が定めたエゾシカ侵入防止柵の設置要領に掲載されている図では、吊りロープの固定位置は支柱側面になっている(図-1)。しかし、支柱側面で固定すると、積雪の多い地域ではステーブルが抜けてネットは落下しやすかった。残念ながら支柱間隔を2.5mまで狭くしてもネットの落下は防げなかった。一方、吊りロープを木口で固定することでネットの

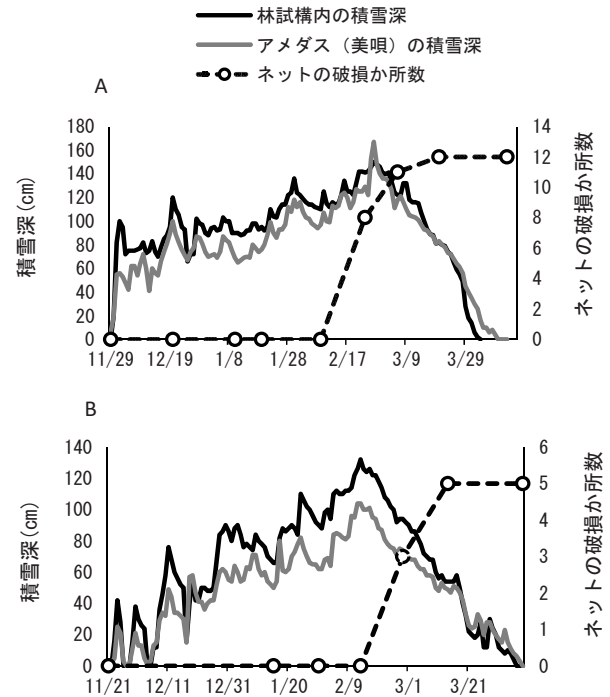
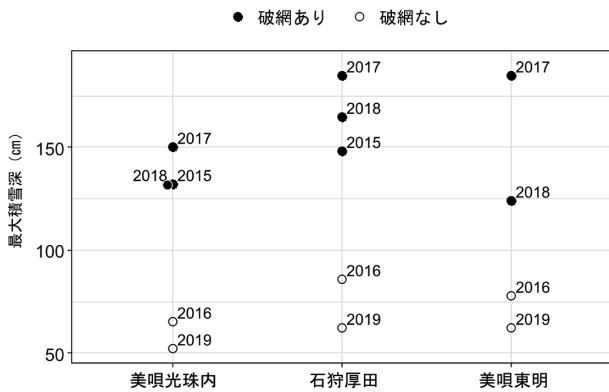


図-6 積雪深と破損か所数の推移

A: 2017年度美唄光珠内試験地, B: 2018年度美唄光珠内試験地。破網または落下か所数は観察した全ネットの合計



図ー7 最大積雪深とネットの破網の関係
数字は年度を示す

落下は防ぐことができたが、吊りロープ固定部でネットの破網が発生した。このようにネットの落下は吊りロープを支柱の木口で固定することで防げるが、その固定部で破網が生じるので、これを軽減する方法を探索する必要がある。ネットが落下するとシカが容易に造林地内に侵入可能となるのに対し、ネットの破網は破網でできた穴が小さい場合や高い場所にできた場合はシカの侵入を阻止できるため、まずはネットの落下を防ぐ必要がある。

一方で、支柱側面で固定し落下したネットは、破網前にステーブルが抜けてネットが落下するため、吊りロープ固定部の破網はほとんどなかった。冬期にエゾシカによる被害がなく融雪後すぐに補修できる場所であれば、吊りロープを支柱側面で固定し支柱中間部でネットを固定しない設置方法は、多雪時にネットを落下させることで破網を防げるため、選択肢の1つとなるだろう。このような落下を前提とした管理方法は、多雪地における牧柵の雪害防止対策として推奨されている(細川1988)。

2. 支柱間隔と破網の関係

木口で吊りロープを固定した美唄光珠内試験地の2017年度の結果では、支柱間隔は短い方が破網数は少ない傾向を示した。支柱間隔4mにおいては破網がみられなかったが、これは木口の割れによるネットの落下があったことが影響している可能性がある。支柱間隔2.5mでも破網を完全に防ぐことはできないが、既に事業的に2.5~3.0mで設置されている事例もあること、三重県林業研究所が発行した新植造林地におけるシカ食害対策に関するパンフレット(三重県林業研究所2012)においても、強度の面から2.5~3mでの設置を推奨していることより、多雪地では支柱間隔は2.5~3mが妥当であろう。支柱間隔を短くすると支柱の本数が増え設置コストが増加する。しかし、侵入防止柵は1か所でも破損するとそこがシカの侵入口となり被害は造林地全体に及ぶため、破損防止に伴う設置コストの増加は、侵入防止柵を有効に使う上で必要な経費

である。

3. ネット中間固定で発生する破網の影響

吊りロープを木口部で固定しネットの落下がなくても、支柱中間部でネットを固定すると固定した直下でネットが破網し(図-4)、ネットの中間部分に穴が生じる。エゾシカの跳躍力を観察した結果、柵の高さが2.2m以上あればエゾシカが飛び越えないことが確認されている(川島ほか2011)。北海道で設置されている一般的な造林地の侵入防止柵は2.5mの高さがあるため、ネットの落下や吊りロープのゆるみがない限り、シカは破網した部分またはネットの下からもぐりこんで造林地内に侵入するしか方法はない。また、本州のニホンジカにおいては、ネットの飛び越えよりネットに生じた小さな隙間やネットの下から潜り込んで侵入を試みる事例が報告されている(尾崎2001, 高山ほか2008)。そのため、ネット中間部での破網やネットを地際で固定しているアンカーピンの抜け対策が重要である。エゾシカの飼育場での観察から、小さな隙間からの侵入は高さ2m以下で生じるため(川島ほか2011)、破網による穴は2m以下に発生しないようにすべきである。エゾシカは地表近くに水平方向に25cm幅で設置した隙間に首まで入れて、後ろ足で体を押し込むように通り抜けることができる(若菜ほか2003)。また、地上から175cm付近に開いた高さ25cmの横長の三角形の隙間をすり抜けることができる(川島ほか2011)。石狩厚田試験地で4冬経過後のネット中間固定上部で破網した部分の大きさは、新開発ネットでは $572 \pm 255 \text{cm}^2$ (平均 \pm SD)、従来ネットでは $1,324 \pm 463 \text{cm}^2$ となり、特に従来ネットは破網した面積を仮に正方形に見立てると1辺が約36cm程度の大きな穴となり、シカの侵入経路になる可能性があるとして推測された。このようにネット中間部で固定すると固定した直下で破網するため、固定しない方がいいだろう。今回調査をした3か所では、ネットを支柱中間部で固定しないことで不都合な点は観察されなかった。しかし、ネット中間部の固定が落枝やシカによる潜り込みなどの物理的な衝撃に対し、ネットの破損や地際のアンカーピンの抜けを防ぐ効果を発揮している可能性がある。支柱中間部でネットを固定してもネットの破網が生じない積雪の少ない地方におけるネット中間部の固定効果に関しては、今後、検討すべきである。

4. 新開発ネットの効果

超高分子量ポリエステル繊維として高強度・高弾性率を持つ繊維であるイザナスを使った新開発ネットは、従来ネットより積雪による破網が少なく(図-4)、破網しても穴の大きさは小さかった(図-5)。大きく開いた破網部はシカの侵入経路になるため(若菜ほか2003)、多雪地では破網か所が少なく、開いた穴の大きさが小さい新開発ネットを推奨する。このような高強度・高弾性率を持つ繊維はほかにもあり、今後

コスト面も考慮し、別の素材を検討する余地があるだろう。

新開発ネット、従来ネットともにステーブルで固定したすぐ下の部分は、積雪の沈降により強い力で引っ張られるため、ネットの破網がなくても繊維の損傷がみられた。従来ネットで使用されているステンレス線はシカによる噛み切り防止のため混入されているが、積雪荷重には耐えることができず、ポリエチレン繊維より早く切れてしまうこともあった。このように新開発ネット、従来ネット共に、ネットの破網が生じなくても繊維の損傷が起こるため、設置経過年数が増えるに従い、破網か所が増え、破網した部分の穴の大きさが大きくなった。

吊りロープ固定部の破網は新開発ネット、従来ネットとともに横に広がるため、破網部が小さいうちは破網した穴の最低高が地上高2m以下にはならず、小さな隙間からの侵入が高さ2m以下で生じることを示した川島ほか(2011)の結果から、シカは侵入できないと推測された。ただし、従来ネットのように破網部が大きくなると破網した穴が垂れ下がるため、シカが侵入する可能性がある。石狩厚田試験地の隣接地に設置されている従来ネットは、吊りロープが木口で固定され、2020年10月で設置後7年が経過している。このネットは当初は支柱の中間部2か所で固定されていたが、数年後に中間部の固定は外され、中間部に開いた穴は補修されている。2020年10月現在、吊りロープ固定部だけに破網があり、29か所中11か所で穴の最低高がエゾシカ侵入の目安である地上高2m以下となっていた。破網しにくい新開発ネットを使うことで穴は小さくなり、破網部からの侵入を、より長期間防ぐことが可能となるだろう。

イザナスを使用した新開発ネットは従来ネットよりコスト高ではあるが、吊りロープ固定部の破網は横に広がることからネット上部の一部だけイザナスを使うことで経費を削減できる。石狩厚田試験地において経過観察した新開発ネットでは上から1目のみしか破網しなかったが、従来ネットでは上から2目まで破網したものがあるので、2017年度までの結果をもとに2018年に美唄光珠内試験地に設置した新開発ネットは、安全を見込んで上から4目までイザナスを使用した。このように、まずは目安として4目程度を推奨するが、さらに検討の余地がある。

5. 積雪深の影響

美唄光珠内試験地2017年度と2018年度の結果から、ネットの破網は2月以降に生じていた。上の時期は最大積雪深を記録する時期と一致する。最大積雪深が破損に影響を与えていると推測されたことから、最大積雪深と破網の関係を調べると、52cm～86cmの場合は破網が生じなかった一方、124cm～185cmでは1か所以上のネットの破網が観察された。このようにネットの破網が生じる閾値は、最大積雪深が86cm～124cmの間にあると推測された。これらから、およその目安

として最大積雪深が1mを超える地域ではネットの破網が生じる可能性があるとし唆され、積雪に対する破網の影響を回避する対策が必要であろう。

斜面の積雪が沈降する際、鉛直方向に沈むと同時に斜面方向へ移動するため、傾斜地に設置された獣害防止ネットには2方向の力が働く(日本建設機械化協会1988)。そのため急傾斜地に設置されたネットにかかる引張り荷重は平坦地より複雑になると推測される。2013年に北海道水産林務部林務局森林整備課保護種苗グループ(現保護種苗係、未発表)がまとめた資料では、20°以上の急傾斜地で破損被害が急増することが報告されている。本研究では設置場所の傾斜に関する影響は評価できなかったため、今後、検討する必要がある。

6. 試験結果に基づく新しい設置方法の効果(美唄光珠内試験地2018年度)

これまでの結果をもとに、最も効果的と思われる侵入防止柵の設置方法は支柱間隔2.5m、吊りロープの固定位置を木口とし、新開発ネットをネット中間固定なしで設置することである。この新しい設置方法と従来の設置方法である従来ネット・ネット中間固定ありで、破網数を比較したところ、1冬経過後の2019年4月には、新しい設置方法ではネットの破網がなかったのに対し、従来方法では、ネット固定中間上部14か所のうち、5か所で破網が生じた。2019年度は積雪が少なかったため、新たな破網は発生しなかった。

このように支柱間隔を2.5mと短くして積雪による荷重を分散させ、吊りロープの落下を防ぐため吊りロープの固定部を木口にすることで、ネットの落下や固定部の破網を少なくすることができた。また、ネットの上部には強度のあるイザナスを使うことで吊りロープ固定部での破網を防ぎ、支柱の中間部でネットを固定しないことで、ネットの中間に穴が空くのを防ぐことができ、これまでの結果で提案された新たな侵入防止柵の効果を再確認できた。

このような仕様でネットを設置しても積雪による破損は完全に防ぐことはできない。また、ネットの破損の原因は積雪によるものだけではなく、シカがネットに絡まることや倒木による破損などほかの原因によっても破損する(酒井2018)。そのため定期的な獣害防止ネットの見回りと保守管理が重要である(大島ほか2014)。また、シカそのものを減らす積極的な捕獲を進めるべきである(酒井2018)。

謝辞

本研究はナカダ産業株式会社からの受託研究として実施した。試験を実施するにあたり、空知森林組合には試験地の選定にご協力していただき、北海道指導林家の鈴木巖氏、美唄市の織田顕氏には試験地を提供していただいた。北海道水産林務部林務局森林整備課保護種苗係からは侵入防止柵に関する情報を提供していただいた。一般社団法人北海道開発技術

センター野呂美紗子博士からは有益な文献を紹介していただいた。サージミヤワキ株式会社には自動撮影カメラをお借りした。試験地の設定にあたり、ナカダ産業株式会社、林業試験場企画調整部企画グループの方々の助力を得た。保護種苗木保護グループの方々には有益な助言やコメントをいただいた。厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- 北海道水産林務部林務局森林整備課 (2013) 平成24年度北海道森林保護事業実績書. 103pp
- 北海道水産林務部林務局森林整備課 (2015) 平成25年度北海道森林保護事業実績書. 103pp
- 北海道水産林務部林務局森林整備課 (2016) 平成26年度北海道森林保護事業実績書. 104pp
- 北海道水産林務部林務局森林整備課 (2019) 平成30年度エゾシカによる林業被害. <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srs/2018ezosikahigai.pdf> (2020年10月17日現在)
- 細川吉晴 (1988) 積雪寒冷地における放牧施設に関する研究: VII. 平坦地の牧柵の越冬試験. 日本草地学会誌 34: 201-217
- 川島正人・島貫雅俊・碓正広・伊藤康幸 (2011) 北海道の高速道路におけるエゾシカ侵入防止対策の取り組みについて. 「野生生物と交通」研究発表会講演論文集 10: 23-30
- 三重県林業研究所 (2012) スギ・ヒノキをニホンジカから守る - 新植地におけるシカ被害対策 -. <https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000173602.pdf> (2020年10月17日現在)
- 日本建設機械化協会編 (1988) 新編防雪工学ハンドブック. 527pp. 森北出版, 東京
- 大島千和・滝口潤・佐藤尚弘・山田守・大澤学 (2014) 全国の治山事業におけるシカ被害対策の実態と侵入防止柵の変状原因. 日本緑化工学会誌 39: 406-411
- 尾崎真也 (2001) 兵庫県におけるニホンジカによる幼齢造林木被害とその防除. 兵庫県立森林・林業技術センター研究報告49: 10-23
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- 酒井敦 (2018) 皆伐・再造林地におけるシカ防護柵の実態と被害対策. 水利科学 349: 101-113
- 高山耕二・内山雄紀・赤井克己・花田博之・伊村嘉美・中西良孝 (2008) 牧場採草地へのニホンジカ侵入に対する防護柵の影響. 鹿児島大学農学部農場研究報告30: 11-14
- 若菜千穂・原文宏・竹腰稔 (2003) エゾシカの運動能力に関する基礎的研究 - 鹿実験牧場における実験結果 -. 「野生生物と交通」研究発表会講演論文集 2: 81-84

Summary

Because snow damage occurs in net fences controlling deer damage in heavy-snow regions, measures to improve the snow resistance of net fences were studied. When the ropes for fixing the nets were fixed on the side of the post, the nets fell because of the snow. The fall of the nets could be prevented by fixing the ropes on the top end of the posts, but some nets were cut off at the net fixing part. When the post spacing was narrow, the net damage was small, but even with a post spacing of 2.5 m, the net damage could not be completely prevented. When the nets were fixed in the middle of the post, the nets were cut off at the net fixing part. Therefore, it is better not to fix the net in the middle of the post. The net made of IZANASTM and polyethylene was less damaged than the net made of stainless steel wire and polyethylene. The net damage mainly occurred after February. There was no damage when the maximum snow depth was 52–86 cm; however, damage occurred when the maximum snow depth was 124–185 cm. Therefore, it is necessary to take measures against the damage in areas where the maximum snow depth exceeds 1 m.

Key words

net fence, deer damage, heavy-snow regions, net damage reduction, snow resistance

イルムケップ山塊（北海道空知地方）の維管束植物相

新田紀敏*・明石信廣**

Flora of Mts. Irumukeppu, Sorachi Region, Hokkaido, Japan

Noritosi NITTA* and Nobuhiro AKASHI**

要旨

北海道空知地方北部にあるイルムケップ山塊の維管束植物相を調査した。確認されたのは479分類群、99科、289属、461種、2雑種で、希少種は1.7%の8分類群、外来種は12.7%の61分類群であった。

キーワード：空知地方、イルムケップ山塊、維管束植物、植物相

はじめに

イルムケップ山塊は石狩平野最北部、空知地方の赤平市、芦別市、深川市、滝川市にまたがり、地元では音江3山とも呼ばれるイルムケップ山（標高864m）、沖里河山（同802m）、音江山（同795m）などからなる孤立した山系である（図-1）。同山塊は、第四紀初頭までに形成された火山で、中～酸性の安山岩・デイサイトからなる（中川ら 1993）。中腹は広く同質の火山砕屑岩類に覆われ、山麓部に堆積岩が見られる（佐川ら 1988）。

森林域のかなりの割合が北海道有林となっており、北海道立総合研究機構林業試験場をはじめ大学や他の研究機関が共同で、この道有林を利用して人工林の生産性を考慮しながら生物多様性に配慮した主伐更新方法を開発することを目指した保残伐施業の実証実験（以降、保残伐実験とする）を広範囲で行っている（明石ら 2017）。

本調査はこの実験の一環として、保残伐施業による植生の変化を検討するための基礎資料として本地域の植物相を明らかにすることを目的に行われた。また、本調査地を含む空知地方北部・石狩川左岸はこれまでに公表されている植物相の調査報告がなく、当地域の植物相を明らかにすることは北海道全体の植物相を考えるためにも重要である。

調査地と調査方法

本調査は保残伐実験を行っている区域を囲み、山頂へ至る地域で行った。具体的には道有林へ通じる奥大谷沢林道（赤平市）、福住林道、吉田の沢林道、豊岡林道（芦別市）および菊丘林道（深川市）の入林ゲートからイルムケップ山、沖里河山へ至る、およそ南北11km、東西5kmの範囲である（図-1）。林相は山塊の中腹以下はトドマツ人工林を主体とし、

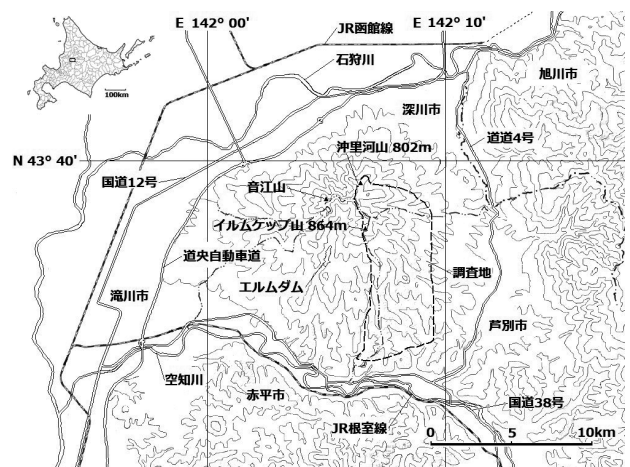


図-1 調査地位置図（電子地形図25000（国土地理院）を加工して作成）

* 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

** 北海道立総合研究機構林業試験場道北支場

Dohoku Station, Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Nakagawa, Hokkaido 098-2805

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

その間および周囲に残された天然林、沢沿いの湿性地、林道沿いの草場が含まれる。上部はダケカンバを主体とした広葉樹の疎林で、林床は密生したチシマザサに覆われる。各山頂および主稜線付近は風衝低木林及び草場が見られる。全体にエゾシカによる食害は目立っていない地域である。

気象は、隣接地にある芦別地域気象観測所（アメダス：標高90m）の観測値（平年値1981～2010年、最大積雪深は1982～2010年）によると年降水量1,092mm、平均気温7.3℃、最大積雪深81cmであるが、調査地は標高が110m～864mの範囲にあるため上部は山地的な気象要素が強くなると考えられる。

調査期間は、予備調査の2012年8月から2020年9月まで積雪期を除いて不定期であるが季節を網羅するように、主に保残伐実験に関する調査等に並行して行った。

調査は林内および林道・登山道をできる限り調査地全域を観察するように歩き、出現種、生育環境を記録するとともに原則として標本を採集し、必要に応じて写真撮影を行った。植物目録は採集した標本を基に作成した。証拠標本は北海道大学総合博物館（SAPS）へ納める予定である。

同定・分類

同定はシダ植物は倉田・中池（2004）、梅沢（2015）、海老原（2016, 2017）、種子植物は佐竹ら（1981-1982）、滝田（2001）、梅沢（2007, 2018）、大橋ら（2015, 2016a, 2016b, 2017a, 2017b）によって行ったが、木本類は佐藤（2017）、カヤツリグサ科は星野ら（2011）、イネ科は長田（2002）、ラン科は中島（2012）、外来種は清水ら（2001）、清水（2003）によって補った。一部は専門家に確認を依頼した。

分類は、生育を確認した維管束植物について、種・亜種・変種・品種・雑種のそれぞれを1つの分類群とした。和名、学名は原則的に松井・高橋（2015）により、米倉・邑田（2012）を参考に補足した。科の配列はAPGIV分類体系（大橋ら2016b）に沿った。

結果

表-1に示したとおり、植栽種1種を含め479分類群の植物を記録し、99科、289属、461種、2雑種であった。内訳はシダ植物50分類群（16科、28属、48種、1雑種）、裸子植物7分類群（2科、5属、7種）、被子植物422分類群（81科、256属、406種、1雑種）であった。科ごとに見るとキク科が45分類群で最も多く、イネ科40分類群、カヤツリグサ科23分類群、バラ科22分類群、タデ科14分類群、ラン科とシソ科13分類群が多く、この7科で170分類群となり全体の35.5%を占めた。

この中で特筆すべきものとして、オシダとシラネウラボシの自然交配種であるネイチウラボシを道内で初めて記録した（新田・明石2017）。また、比較的最近記載された種であり、河川を挟んで隣接する旭川市神居山が基準産地であるカムイレイジンソウ（Kadota 2012）をイルムケツ山～沖里河山の稜

線上で確認した。

著者のうち新田は、本調査地の約50km南に位置する美唄山（標高987m）および美唄市内の里山における植物相を報告している（新田2016, 2019）。この美唄市内の2調査の結果は、重複を除いて497分類群であり、美唄山の頂上付近ではかなりの高山植物が見られることを考慮すると、本調査の結果はこれと同程度の種多様性を示していると考えられる。

確認できた希少種は環境省のレッドデータブック（環境省2015）に掲載されているものが4分類群、北海道のレッドデータブック（北海道2001）に掲載されているものが7分類群延べ9分類群で、これらが全体に占める割合は1.9%だった。この結果は、北海道レッドデータブックの掲載植物が511分類群であり、道内の自生植物を3,300分類群（松井・高橋2015に新知見を追加）とすると、15.5%に達するのと比較してかなり少ない。これは本調査地が高山帯や湿地、超塩基性岩地などの特殊な立地環境に分布する脆弱な分類群が少ないためと考えられる。確認された希少種は、国、道ともに絶滅危惧種に挙げているのは、サルメンエビネ 環境省：絶滅危惧II類（VU）、北海道：絶滅危惧種（En）、ヤマシヤクヤク 環境省：準絶滅危惧（NT）、北海道：希少種（R）の2種だった。そのほかは国VUのエゾミズタマソウ、コモチミミコウモリ、北海道：絶滅危惧種（Vu）のフクジュソウ、クリンソウ、Rのオクエゾサイシン、コフタバラン、キタササガヤだった。

北海道内の外来種をまとめた北海道ブルーリスト2010（北海道2010）によって判定した外来植物は61分類群で12.7%であった。キク科の20分類群44.4%が最も多く、イネ科の9分類群22.5%、マメ科の5分類群62.5%、タデ科の4分類群28.6%が多かった。この結果は、北海道ブルーリスト掲載植物635分類群の9.6%に当たり、北海道ブルーリスト掲載植物の自生植物に対する割合の19.2%よりは少なくなっている。土地利用としては攪乱の多い人工林であるが、市街地や農耕地とはある程度隔離されており、林床は被陰される確率が高い森林であるため、光要求度の高い分類群が多い外来種の侵入はある程度押さえられている結果と考えられる。また、この中には自生が比較的珍しいセイヨウオダマキ、ルブリフォリアバラ、ヤグルマギクという園芸由来の植物が含まれている。意図的に持ち込まれたとは考えられない山中で確認しているため、人里からの種子を散布する何らかの導入経路が予想され、動物散布や林道敷砂利への混入などが考えられるものの断定できるものはなかった。

謝辞

本研究の一部は三井物産環境基金の研究助成「人工林において生物多様性保全と木材生産は両立できるか？—保残伐実験による検証と普及方法の提案—」及び「保残伐による森林景観の持続的管理手法の提案」を受けて実施した。種の同定に当たり、北海道大学総合博物館の高橋英樹教授（当時）お

よび首藤光太郎助教にはSAPSでの標本閲覧の便宜を図っていただいた。また、五十嵐博氏、内田暁友氏、海老原淳博士、門田裕一博士、佐藤広行博士、藤田玲氏、堀江健二博士にはいつもながら大変有益な助言をいただいた。お礼申し上げます。

引用文献

- 明石信廣・対馬俊之・雲野明・長坂晶子・長坂有・大野泰之・新田紀敏・渡辺一郎・南野一博・山田健四・石濱宣夫・滝谷美香・津田高明・竹内史郎・石塚航・福地稔・山浦悠一・尾崎研一・弘中豊・稲荷尚記(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. 北海道林業試験場研究報告54: 31-45
- 海老原淳(2016-2017) 日本産シダ植物標準図鑑I・II, 475, 507pp. 学研, 東京
- 北海道(2001) 北海道の希少野生動植物 北海道レッドデータブック2001. 309pp. 北海道環境生活部自然環境課, 札幌
- 北海道(2010) 北海道ブルーリスト2010. 北海道環境生活部自然環境課. <http://bluelist.hokkaido-ies.go.jp/> (2020年10月30日確認)
- 星野卓二・正木智美・西本真理子(2011) 日本カヤツリグサ科植物図譜. 778pp. 平凡社, 東京
- Kadota, Y.(2012) Systematic Studies of Asian *Aconitum* (*Ranunculaceae*) XIV. Four New Species of Subgenus *Lycotomon* from Hokkaido, Northern Japan. *J. Jap. Bot.*87(1): 2-21
- 環境省(2015) レッドデータブック2014—日本の絶滅のおそれのある野生生物—植物I(維管束植物). 646pp. ぎょうせい, 東京.
- 倉田悟・中池敏之(編)(2004) 新装版日本のシダ植物図鑑分布・生態・分類全8巻. 東京大学出版会, 東京
- 松井洋(編)・高橋英樹(監)(2015) 北海道維管束植物目録. 283pp. 自費出版.
- 中川光弘・後藤芳彦・新井計雄・和田恵治・板谷徹丸(1993) 中部北海道, 滝川地域の中新世—鮮新世玄武岩のK-Ar年代と主成分化学組成: 東北日本弧—千島弧, 島弧会合部の玄武岩単成火山群. 岩鉱88: 390-401
- 中島陸子(2012) 日本ラン科植物図譜. 395pp. 文一総合出版, 東京
- 新田紀敏(2016) 美瑛市光珠内(北海道空知地方)の森林植物相. 北海道林業試験場研究報告53: 49-66
- 新田紀敏・明石信廣(2017) ネイチワラビの発見. 北方山草34: 75-76
- 新田紀敏(2019) 美瑛山(北海道空知地方)の維管束植物相. 北海道林業試験場研究報告56: 21-30
- 長田武正(2002) 増補日本イネ科植物図譜(オンデマンド版). 777pp. 平凡社, 東京
- 大橋広好・門田裕一・木原浩・邑田仁・米倉浩司(編)(2015) 改訂新版日本の野生植物1. 666pp. 平凡社, 東京
- 大橋広好・門田裕一・木原浩・邑田仁・米倉浩司(編)(2016a) 改訂新版日本の野生植物2. 640pp. 平凡社, 東京
- 大橋広好・門田裕一・木原浩・邑田仁・米倉浩司(編)(2016b) 改訂新版日本の野生植物3. 604pp. 平凡社, 東京
- 大橋広好・門田裕一・木原浩・邑田仁・米倉浩司(編)(2017a) 改訂新版日本の野生植物4. 608pp. 平凡社, 東京
- 大橋広好・門田裕一・木原浩・邑田仁・米倉浩司(編)(2017b) 改訂新版日本の野生植物5. 760pp. 平凡社, 東京
- 佐川昭・松井和典・山口昇一(1988) 北海道イルムケツプ火山音江山溶岩のK-Ar年代と古地磁気. 地質調査所月報39(6): 423-428
- 佐竹義輔・大井次三郎・北村四郎・亘理俊次・富成忠夫(編)(1981-1982) 日本の野生植物I-III. 平凡社, 東京
- 佐藤孝夫(2017) 増補新装版北海道樹木図鑑. 351pp. 亜璃西社, 札幌
- 清水矩宏・森田弘彦・広田伸七(編)(2001) 日本帰化植物写真図鑑. 全国農村教育協会, 東京
- 清水建美(編)(2003) 日本の帰化植物. 480pp. 平凡社, 東京
- 滝田謙讓(2001) 北海道植物図譜. 1452pp. 自費出版, 釧路
- 梅沢俊(2007) 新北海道の花. 462pp. 北海道大学出版会, 札幌
- 梅沢俊(2015) 北海道のシダ入門図鑑. 145pp. 北海道大学出版会, 札幌
- 梅沢俊(2018) 北海道の草花. 399pp. 北海道新聞社, 札幌
- 米倉浩司(著)・邑田仁(監)(2012) 日本維管束植物目録. 379pp. 北隆館, 東京

Summary

We examined the vegetation of Mts. Irumukeppu in Sorachi Region, Hokkaido, Japan from 2012 to 2020, and observed 479 taxa (including sp., subsp., var., forma and hybrid), 99 families, 289 genera, 461 species and 2 hybrids of vascular plants.

Key words

Sorachi Region, Mts. Irumukeppu, vascular plant, flora

表-1 イルムケツ山塊維管束植物目録 (2012-2020)

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
ヒカゲノカズラ科 Lycopodiaceae				
1		ホソバトウゲシバ	<i>Huperzia serrata</i> (Thunb.) Trevis.	
2		ヒカゲノカズラ	<i>Lycopodium clavatum</i> L.	
3		マンネンスギ	<i>Lycopodium dendroideum</i> Michx.	
ハナヤスリ科 Ophioglossaceae				
4		エゾフユノハナワラビ	<i>Botrychium multifidum</i> (S.G.Gmel.) Rupr. var. <i>robustum</i> (Rupr. ex Milde) C.Chr.	
5		ナツノハナワラビ	<i>Botrychium virginianum</i> (L.) Sw.	
トクサ科 Equisetaceae				
6		スギナ	<i>Equisetum arvense</i> L.	
7		ミズドクサ	<i>Equisetum fluviatile</i> L.	
8		トクサ	<i>Equisetum hyemale</i> L.	
ゼンマイ科 Osmundaceae				
9		ゼンマイ	<i>Osmunda japonica</i> Thunb.	
10		ヤマドリゼンマイ	<i>Osmundastrum cinnamomeum</i> (L.) C.Presl var. <i>fokiense</i> (Copel.) Tagawa	
キジノオシダ科 Plagiogyriaceae				
11		ヤマソテツ	<i>Plagiogyria matsumurana</i> Makino	
コバノイシカグマ科 Dennstaedtiaceae				
12		オウレンシダ	<i>Dennstaedtia wilfordii</i> (T.Moore) Christ ex C.Chr.	
13		ワラビ	<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn subsp. <i>japonicum</i> (Nakai) Á. et D.Löve	
イノモトソウ科 Pteridaceae				
14		クジャクシダ	<i>Adiantum pedatum</i> L.	
15		イワガネゼンマイ	<i>Coniogramme intermedia</i> Hieron.	
ナヨシダ科 Cystopteridaceae				
16		ウサギシダ	<i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newman	
チャセンシダ科 Aspleniaceae				
17		トラノオシダ	<i>Asplenium incisum</i> Thunb.	
18		コタニワタリ	<i>Asplenium scolopendrium</i> L.	
ヒメシダ科 Thelypteridaceae				
19		ミゾシダ	<i>Stegogramma pozoi</i> (Lag.) K.Iwats. subsp. <i>mollissima</i> (Fisch. ex Kunze) K.Iwats.	
20		ミヤマワラビ	<i>Thelypteris phegopteris</i> (L.) Sloss. ex Rydb.	
21		オオバシヨリマ	<i>Thelypteris quelpaertensis</i> (H.Christ) Ching	
イワデンダ科 Woodsiaceae				
22		イワデンダ	<i>Woodsia polystichoides</i> D.C.Eaton	
コウヤワラビ科 Onocleaceae				
23		クサソテツ	<i>Matteuccia struthiopteris</i> (L.) Tod.	
24		コウヤワラビ	<i>Onoclea sensibilis</i> L. var. <i>interrupta</i> Maxim.	
25		イヌガンソク	<i>Pentarhizidium orientale</i> (Hook.) Hayata	
シシガシラ科 Blechnaceae				
26		シシガシラ	<i>Blechnum niponicum</i> (Kunze) Makino	
メシダ科 Athyriaceae				
27		サトメシダ	<i>Athyrium deltoideifrons</i> Makino	
28		ミヤマメシダ	<i>Athyrium melanolepis</i> (Franch. et Sav.) H.Christ	
29		エゾメシダ	<i>Athyrium sinense</i> Rupr.	
30		ヤマイヌワラビ	<i>Athyrium vidalii</i> (Franch. et Sav.) Nakai	
31		ヘビノネゴザ	<i>Athyrium yokoscense</i> (Franch. et Sav.) Christ	
32		イッポンワラビ	<i>Cornopteris crenuloserrulata</i> (Makino) Nakai	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
33		ホソバシケシダ	<i>Deparia conilii</i> (Franch. et Sav.) M.Kato	
34		ハクモウイノデ	<i>Deparia orientalis</i> (Z.R.Wang et J.J.Chien) Nakaike	
35		オオメシダ	<i>Deparia pterorachis</i> (H.Christ) M.Kato	
36		ウスゲミヤマシケシダ	<i>Deparia pycnosora</i> (H.Christ) M.Kato var. <i>mucilagina</i> M.Kato	
37		ミヤマシケシダ	<i>Deparia pycnosora</i> (H.Christ) M.Kato var. <i>pycnosora</i>	
オシダ科 Dryopteridaceae				
38		リヨウメンシダ	<i>Arachniodes standishii</i> (T.Moore) Ohwi	
39		オクヤマシダ	<i>Dryopteris amurensis</i> (Milde) Christ	
40		オシダ	<i>Dryopteris crassirhizoma</i> Nakai	
41		ネイチワラビ (オシダ×シラネワラビ)	<i>Dryopteris crassirhizoma</i> × <i>D. expansa</i> (<i>D.</i> × <i>neichii</i> Nakaike, nom. nud.)	種間雑種
42		シラネワラビ	<i>Dryopteris expansa</i> (C.Presl) Fraser-Jenk. et Jermy	
43		ミヤマベニシダ	<i>Dryopteris monticola</i> (Makino) C. Chr.	
44		ホソバナライシダ	<i>Leptorumohra miqueliana</i> (Maxim. ex Franch. et Sav.) H.Itô	
45		ホソイノデ	<i>Polystichum braunii</i> (Spenn.) Fée	
46		イワシロイノデ	<i>Polystichum ovatopaleaceum</i> (Kodama) Sa.Kurata var. <i>coraiense</i> (H.Christ ex H.Lév.) Sa.Kurata	
47		サカゲイノデ	<i>Polystichum retrosopaleaceum</i> (Kodama) Tagawa	
48		ジュウモンジシダ	<i>Polystichum tripterum</i> (Kunze) C.Presl	
ウラボシ科 Polypodiaceae				
49		オシャグジデンダ	<i>Polypodium fauriei</i> Christ	
50		エゾデンダ	<i>Polypodium sibiricum</i> Sipliv.	
マツ科 Pinaceae				
51		トドマツ	<i>Abies sachalinensis</i> (F.Schmidt) Mast.	
52		カラマツ	<i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carrière	外来種
53		ドイツトウヒ	<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	外来種
54		アカエゾマツ	<i>Picea glehnii</i> (F.Schmidt) Mast.	植栽種
55		エゾマツ	<i>Picea jezoensis</i> (Siebold et Zucc.) Carrière	
イチイ科 Taxaceae				
56		ハイイヌガヤ	<i>Cephalotaxus harringtonia</i> (Knight ex Forbes) K.Koch var. <i>nana</i> (Nakai) Rehder	
57		イチイ	<i>Taxus cuspidata</i> Siebold et Zucc.	
マツブサ科 Schisandraceae				
58		チョウセンゴミシ	<i>Schisandra chinensis</i> (Turcz.) Baill.	
センリョウ科 Chloranthaceae				
59		ヒトリシズカ	<i>Chloranthus quadrifolius</i> (A.Gray) H.Ohba et S.Akiyama	
ウマノスズクサ科 Aristolochiaceae				
60		オクエゾサイシン	<i>Asarum heterotropoides</i> F.Schmidt	道R
モクレン科 Magnoliaceae				
61		コブシ	<i>Magnolia kobus</i> DC.	
62		ホオノキ	<i>Magnolia obovata</i> Thunb.	
サトイモ科 Araceae				
63		コウライテンナンショウ	<i>Arisaema peninsulae</i> Nakai	
64		アオウキクサ	<i>Lemna aoukikusa</i> Beppu et Murata	
65		ザゼンソウ	<i>Symplocarpus renifolius</i> Schott ex Tzvelev	
シュロソウ科 Melanthiaceae				
66		ツクバネソウ	<i>Paris tetraphylla</i> A.Gray	
67		クルマバツクバネソウ	<i>Paris verticillata</i> M.Bieb.	
68		エンレイソウ	<i>Trillium apetalon</i> Makino var. <i>apetalon</i>	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
69		クロミノエンレイソウ	<i>Trillium apetalon</i> Makino var. <i>apetalon</i> f. <i>atropurpureocarpum</i> Makino	
70		アカミノエンレイソウ	<i>Trillium apetalon</i> Makino var. <i>rubrocarpum</i> J.Samej.	
71		オオバナノエンレイソウ	<i>Trillium camschatcense</i> Ker Gawl.	
72		バイケイソウ	<i>Veratrum oxysepalum</i> Turcz.	
	イヌサフラン科 Colchicaceae			
73		ホウチャクソウ	<i>Disporum sessile</i> D.Don ex Schult. et Schult.f.	
	サルトリイバラ科 Smilacaceae			
74		シオデ	<i>Smilax riparia</i> A.DC.	
	ユリ科 Liliaceae			
75		オオウバユリ	<i>Cardiocrinum cordatum</i> (Thunb.) Makino var. <i>glehnii</i> (F.Schmidt) H.Hara	
76		キバナノアマナ	<i>Gagea nakaiana</i> Kitag.	
77		オオバタケシマラン	<i>Streptopus amplexifolius</i> (L.) DC.	
	ラン科 Orchidaceae			
78		サルメンエビネ	<i>Calanthe tricarinata</i> Lindl.	国VU/道En
79		ギンラン	<i>Cephalanthera erecta</i> (Thunb.) Blume	
80		ササバギンラン	<i>Cephalanthera longibracteata</i> Blume	
81		サイハイラン	<i>Cremastra appendiculata</i> (D.Don) Makino var. <i>variabilis</i> (Blume) I.D.Lund	
82		エゾスズラン	<i>Epipactis papillosa</i> Franch. et Sav.	
83		アケボノシユスラン	<i>Goodyera foliosa</i> (Lindl.) Benth. ex C.B.Clarke var. <i>laevis</i> Finet	
84		ミヤマズラ	<i>Goodyera schlechtendaliana</i> Rchb.f.	
85		クモキリソウ	<i>Liparis kumokiri</i> F.Maek.	
86		ノビネチドリ	<i>Neolindleya camtschatica</i> (Cham.) Nevski	
87		シロバナノビネチドリ	<i>Neolindleya camtschatica</i> (Cham.) Nevski f. <i>leucantha</i> Toyok.	
88		コフタバラン	<i>Neottia cordata</i> (L.) Rich.	道R
89		オオヤマサギソウ	<i>Platanthera sachalinensis</i> F.Schmidt	
90		ネジバナ	<i>Spiranthes sinensis</i> (Pers.) Ames var. <i>amoena</i> (M.Bieb.) H.Hara	
	アヤメ科 Iridaceae			
91		アヤメ	<i>Iris sanguinea</i> Hornem.	
92		ヒトフサニワゼキショウ	<i>Sisyrinchium mucronatum</i> Michx.	外来種
	ヒガンバナ科 Amaryllidaceae			
93		ギョウジャニンニク	<i>Allium victorialis</i> L. subsp. <i>platyphyllum</i> Hultén	
	キジカクシ科 Asparagaceae			
94		マイヅルソウ	<i>Maianthemum dilatatum</i> (A.W.Wood) A.Nelson et J.F.Macbr.	
95		ユキザサ	<i>Maianthemum japonicum</i> (A.Gray) LaFrankie	
96		オオアマドコロ	<i>Polygonatum odoratum</i> (Mill.) Druce var. <i>maximowiczii</i> (F.Schmidt) Koidz.	
	ツユクサ科 Commelinaceae			
97		ツユクサ	<i>Commelina communis</i> L.	
	ガマ科 Typhaceae			
98		ガマ	<i>Typha latifolia</i> L.	
	イグサ科 Juncaceae			
99		イ	<i>Juncus decipiens</i> (Buchenau) Nakai	
100		ヒロハノコウガイゼキショウ	<i>Juncus diastrophanthus</i> Buchenau	
101		コウガイゼキショウ	<i>Juncus prismatocarpus</i> R.Br. subsp. <i>leschenaultii</i> (J.Gay ex Laharpe) Kirschner	
102		クサイ	<i>Juncus tenuis</i> Willd.	
103		スズメノヤリ	<i>Luzula capitata</i> (Miq.) Miq. ex Kom.	
	カヤツリグサ科 Cyperaceae			
104		シラスゲ	<i>Carex alopecuroides</i> D.Don ex Tillich et Taylor var. <i>chlorostachya</i> C.B.Clarke	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
105		ヒラギシスゲ	<i>Carex augustinowiczii</i> Meinsh. ex Korsh.	
106		ショウジョウスゲ	<i>Carex blepharicarpa</i> Franch.	
107		ナルコスゲ	<i>Carex curvicolis</i> Franch. et Sav.	
108		カサスゲ	<i>Carex dispalata</i> Boott	
109		オクノカンスゲ	<i>Carex foliosissima</i> F.Schmidt	
110		ヒロバスゲ	<i>Carex insanae</i> Koidz.	
111		カワラスゲ	<i>Carex incisa</i> Boott	
112		ヒゴクサ	<i>Carex japonica</i> Thunb.	
113		アオスゲ	<i>Carex leucochlora</i> Bunge	
114		イトアオスゲ	<i>Carex leucochlora</i> Bunge var. <i>filiculmis</i> (Franch. et Sav.) Kitag.	
115		ゴウソ	<i>Carex maximowiczii</i> Miq.	
116		ピロードスゲ	<i>Carex miyabei</i> Franch.	
117		ヒメシラスゲ	<i>Carex mollicula</i> Boott	
118		ミノボロスゲ	<i>Carex nubigena</i> D.Don ex Tilloch et Taylor subsp. <i>albata</i> (Boott ex Franch. et Sav.) T.Koyama	
119		ミヤマシラスゲ	<i>Carex olivacea</i> Boott subsp. <i>confertiflora</i> (Boott) T.Koyama	
120		ヒメスゲ	<i>Carex oxyandra</i> (Franch. et Sav.) Kudô	
121		サップロスゲ	<i>Carex pilosa</i> Scop.	
122		サドスゲ	<i>Carex sadoensis</i> Franch.	
123		アズマナルコ	<i>Carex shimidzensis</i> Franch.	
124		オオカワズスゲ	<i>Carex stipata</i> Muhl. ex Willd.	
125		ウシクグ	<i>Cyperus orthostachyus</i> Franch. et Sav.	
126		アブラガヤ	<i>Scirpus wichurae</i> Boeck. f. <i>concolor</i> (Maxim.) Ohwi	
イネ科 Poaceae				
127		ヤマヌカボ	<i>Agrostis clavata</i> Trin.	
128		コヌカグサ	<i>Agrostis gigantea</i> Roth	外来種
129		エゾヌカボ	<i>Agrostis scabra</i> Willd.	
130		ハイコヌカグサ	<i>Agrostis stolonifera</i> L.	外来種
131		スズメノテッポウ	<i>Alopecurus aequalis</i> Sobol. var. <i>amurensis</i> (Kom.) Ohwi	
132		コウボウ	<i>Anthoxanthum nitens</i> (Weber) Y.Schouten et Veldkamp var. <i>sachalinense</i> (Printz) Yonek.	
133		ハルガヤ	<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	外来種
134		ヤマカモジグサ	<i>Brachypodium sylvaticum</i> (Huds.) P.Beauv. var. <i>miserum</i> (Thunb.) Koidz.	
135		ホガエリガヤ	<i>Brylkinia caudata</i> (Munro ex A.Gray) F.Schmidt	
136		タカネノガリヤス	<i>Calamagrostis sachalinensis</i> F.Schmidt	
137		カモガヤ	<i>Dactylis glomerata</i> L.	外来種
138		メヒシバ	<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koeler	
139		アキメヒシバ	<i>Digitaria violascens</i> Link	
140		イヌビエ	<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P.Beauv. var. <i>crus-galli</i>	
141		ケイヌビエ	<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P.Beauv. var. <i>aristata</i> Gray	
142		オオニワホコリ	<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P.Beauv.	
143		ウシノケグサ	<i>Festuca ovina</i> L.	
144		ドジョウツナギ	<i>Glyceria ischyro-neura</i> Steud.	
145		ヒロハノドジョウツナギ	<i>Glyceria leptolepis</i> Ohwi	
146		カラフトドジョウツナギ	<i>Glyceria lithuanica</i> (Gorski) Gorski	
147		キタササガヤ	<i>Leptatherum japonicum</i> Franch. et Sav. var. <i>boreale</i> (Ohwi) Ibaragi et Yonek.	道R
148		ススキ	<i>Miscanthus sinensis</i> Andersson	
149		ミヤマネズミガヤ	<i>Muhlenbergia curviaristata</i> (Ohwi) Ohwi var. <i>nipponica</i> Ohwi	
150		オオネズミガヤ	<i>Muhlenbergia huegelii</i> Trin.	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
151		ヌカキビ	<i>Panicum bisulcatum</i> Thunb.	
152		ハナクサキビ	<i>Panicum capillare</i> L.	外来種
153		スズメノヒエ	<i>Paspalum thunbergii</i> Kunth ex Steud.	
154		クサヨシ	<i>Phalaris arundinacea</i> L.	
155		オオアワガエリ	<i>Phleum pratense</i> L.	外来種
156		ヨシ	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	
157		スズメノカタビラ	<i>Poa annua</i> L.	
158		ヌマイチゴツナギ	<i>Poa palustris</i> L.	外来種
159		イチゴツナギ	<i>Poa sphondylodes</i> Trin.	
160		オオスズメノカタビラ	<i>Poa trivialis</i> L.	外来種
161		チシマザサ	<i>Sasa kurilensis</i> (Rupr.) Makino et Shibata	
162		クマイザサ	<i>Sasa senanensis</i> (Franch. et Sav.) Rehder	
163		ヒロハノウシノケグサ	<i>Schedonorus pratensis</i> (Huds.) P.Beauv.	外来種
164		アキノエノコログサ	<i>Setaria faberi</i> R.A.W.Herrm.	
165		キンエノコロ	<i>Setaria pumila</i> (Poir.) Roem. et Schult.	
166		オオエノコロ	<i>Setaria × pycnocomma</i> (Steud.) Henrard	種間雑種
ケシ科 Papaveraceae				
167		クサノオウ	<i>Chelidonium majus</i> L. subsp. <i>asiaticum</i> H.Hara	
168		エゾエンゴサク	<i>Corydalis fumariifolia</i> Maxim. subsp. <i>azurea</i> Lidén et Zetterlund	
メギ科 Berberidaceae				
169		ルイヨウボタン	<i>Caulophyllum robustum</i> Maxim.	
170		サンカヨウ	<i>Diphylleia grayi</i> F.Schmidt	
キンポウゲ科 Ranunculaceae				
171		カムイレイジンソウ	<i>Aconitum asahikawaense</i> Kadota	
172		エゾレイジンソウ	<i>Aconitum gigas</i> H.Lév. et Vaniot	
173		エゾトリカブト	<i>Aconitum sachalinense</i> F.Schmidt subsp. <i>yezoense</i> (Nakai) Kadota	
174		ルイヨウショウマ	<i>Actaea asiatica</i> H.Hara	
175		アカミノルイヨウショウマ	<i>Actaea erythrocarpa</i> (Turcz. ex Ledeb.) Fisch. ex Freyn	
176		フクジュソウ	<i>Adonis ramosa</i> Franch.	道Vu
177		ニリンソウ	<i>Anemone flaccida</i> F.Schmidt	
178		ミドリニリンソウ	<i>Anemone flaccida</i> F.Schmidt f. <i>viridis</i> Tatew.	
179		アズマイチゲ	<i>Anemone raddeana</i> Regel	
180		エゾイチゲ	<i>Anemone soyensis</i> H.Boissieu	
181		セイヨウオダマキ	<i>Aquilegia vulgaris</i> L.	外来種
182		エゾノリュウキンカ	<i>Caltha fistulosa</i> Schipcz.	
183		サラシナショウマ	<i>Cimicifuga simplex</i> (DC.) Wormsk. ex Turcz.	
184		キツネノボタン	<i>Ranunculus silerifolius</i> H.Lév. var. <i>glaber</i> (H.Boissieu) Tamura	
ツゲ科 Buxaceae				
185		フッキソウ	<i>Pachysandra terminalis</i> Siebold et Zucc.	
ボタン科 Paeoniaceae				
186		ヤマシャクヤク	<i>Paeonia japonica</i> (Makino) Miyabe et Takeda	国NT/道R
カツラ科 Cercidiphyllaceae				
187		カツラ	<i>Cercidiphyllum japonicum</i> Siebold et Zucc. ex Hoffm. et Schult.	
ユズリハ科 Daphniphyllaceae				
188		エゾユズリハ	<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq. subsp. <i>humile</i> (Maxim. ex Franch. et Sav.) Hurus.	
ユキノシタ科 Saxifragaceae				
189		トリアシショウマ	<i>Astilbe odontophylla</i> Miq.	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
190		ツルネコノメソウ	<i>Chrysosplenium flagelliferum</i> F.Schmidt	
191		ネコノメソウ	<i>Chrysosplenium grayanum</i> Maxim.	
192		チシマネコノメソウ	<i>Chrysosplenium kamtschaticum</i> Fisch. ex Ser.	
193		マルバネコノメソウ	<i>Chrysosplenium ramosum</i> Maxim.	
194		ズダヤクシュ	<i>Tiarella polyphylla</i> D.Don	
ブドウ科 Vitaceae				
195		ノブドウ	<i>Ampelopsis glandulosa</i> (Wall.) Momiy. var. <i>heterophylla</i> (Thunb.) Momiy.	
196		ヤマブドウ	<i>Vitis coignetiae</i> Pulliat ex Planch.	
マメ科 Fabaceae				
197		ヤブマメ	<i>Amphicarpaea bracteata</i> (L.) Fernald subsp. <i>edgeworthii</i> (Benth.) H.Ohashi	
198		イヌエンジュ	<i>Maackia amurensis</i> Rupr. et Maxim.	
199		コメツブウマゴヤシ	<i>Medicago lupulina</i> L.	外来種
200		シロバナシナガワハギ	<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall. subsp. <i>albus</i> (Medik.) H.Ohashi et Tateishi	外来種
201		シナガワハギ	<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall. subsp. <i>suaveolens</i> (Ledeb.) H.Ohashi	外来種
202		ムラサキツメクサ	<i>Trifolium pratense</i> L.	外来種
203		シロツメクサ	<i>Trifolium repens</i> L.	外来種
204		クサフジ	<i>Vicia cracca</i> L.	
バラ科 Rosaceae				
205		キンミズヒキ	<i>Agrimonia pilosa</i> Ledeb. var. <i>japonica</i> (Miq.) Nakai	
206		アズキナシ	<i>Aria alnifolia</i> (Siebold et Zucc.) Decne.	
207		オオヤマザクラ	<i>Cerasus sargentii</i> (Rehder) H.Ohba	
208		オニシモツケ	<i>Filipendula camtschatica</i> (Pall.) Maxim.	
209		ノウゴウイチゴ	<i>Fragaria iinumae</i> Makino	
210		エゾヘビイチゴ	<i>Fragaria vesca</i> L.	外来種
211		オオダイコンソウ	<i>Geum aleppicum</i> Jacq.	
212		カラフトダイコンソウ	<i>Geum macrophyllum</i> Willd. var. <i>sachalinense</i> (Koidz.) H.Hara	
213		ズミ	<i>Malus toringo</i> (Siebold) Siebold ex de Vriese	
214		シウリザクラ	<i>Padus ssiiori</i> (F.Schmidt) C.K.Schneid.	
215		ヒメヘビイチゴ	<i>Potentilla centigrana</i> Maxim.	
216		エゾノミツモトソウ	<i>Potentilla norvegica</i> L.	外来種
217		オオタカネバラ	<i>Rosa acicularis</i> Lindl.	
218		ルブリフォリアバラ	<i>Rosa rubrifolia</i> Vill.	外来種
219		エゾイチゴ	<i>Rubus idaeus</i> L. subsp. <i>melanolasius</i> Focke	
220		ナワシロイチゴ	<i>Rubus parvifolius</i> L.	
221		エビガライチゴ	<i>Rubus phoenicolasius</i> Maxim.	
222		ヒメゴヨウイチゴ	<i>Rubus pseudojaponicus</i> Koidz.	
223		ホザキナナカマド	<i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A.Braun var. <i>stellipila</i> Maxim.	
224		ナナカマド	<i>Sorbus commixta</i> Hedl.	
225		マルバシモツケ	<i>Spiraea betulifolia</i> Pall.	
226		エゾシモツケ	<i>Spiraea media</i> F.W.Schmidt var. <i>sericea</i> (Turcz.) Regel ex Maxim.	
グミ科 Elaeagnaceae				
227		ナツグミ	<i>Elaeagnus multiflora</i> Thunb.	
クロウメモドキ科 Rhamnaceae				
228		エゾノクロウメモドキ	<i>Rhamnus japonica</i> Maxim.	
ニレ科 Ulmaceae				
229		ハルニレ	<i>Ulmus davidiana</i> Planch. var. <i>japonica</i> (Rehder) Nakai	
230		コブニレ	<i>Ulmus davidiana</i> Planch. var. <i>japonica</i> (Rehder) Nakai f. <i>suberosa</i> (Turcz.) Nakai	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
231		オヒョウ	<i>Ulmus laciniata</i> (Trautv.) Mayr	
	アサ科 Cannabaceae			
232		カラハナソウ	<i>Humulus lupulus</i> L. var. <i>cordifolius</i> (Miq.) Maxim. ex Franch. et Sav.	
	クワ科 Moraceae			
233		ヤマゲワ	<i>Morus australis</i> Poir.	
	イラクサ科 Urticaceae			
234		アカソ	<i>Boehmeria silvestrii</i> (Pamp.) W.T.Wang	
235		ヤマトキホコリ	<i>Elatostema laetevirens</i> Makino	
236		ムカゴイラクサ	<i>Laportea bulbifera</i> (Siebold et Zucc.) Wedd.	
237		ミズ	<i>Pilea hamaoi</i> Makino	
238		アオミズ	<i>Pilea pumila</i> (L.) A.Gray	
239		エゾイラクサ	<i>Urtica platyphylla</i> Wedd.	
	ブナ科 Fagaceae			
240		ミズナラ	<i>Quercus crispula</i> Blume	
	クルミ科 Juglandaceae			
241		オニグルミ	<i>Juglans mandshurica</i> Maxim. var. <i>sachalinensis</i> (Komatsu) Kitam.	
	カバノキ科 Betulaceae			
242		ケヤマハンノキ	<i>Alnus hirsuta</i> (Spach) Turcz. ex Rupr.	
243		ダケカンバ	<i>Betula ermanii</i> Cham.	
244		ウダイカンバ	<i>Betula maximowicziana</i> Regel	
245		シラカンバ	<i>Betula platyphylla</i> Sukaczew var. <i>japonica</i> (Miq.) H.Hara	
246		サワシバ	<i>Carpinus cordata</i> Blume	
247		ツノハシバミ	<i>Corylus sieboldiana</i> Blume	
248		アサダ	<i>Ostrya japonica</i> Sarg.	
	ウリ科 Cucurbitaceae			
249		アマチャヅル	<i>Gynostemma pentaphyllum</i> (Thunb.) Makino	
250		ミヤマニガウリ	<i>Schizopepon bryoniifolius</i> Maxim.	
	ニシキギ科 Celastraceae			
251		ツルウメモドキ	<i>Celastrus orbiculatus</i> Thunb.	
252		コマユミ	<i>Euonymus alatus</i> (Thunb.) Siebold f. <i>striatus</i> (Thunb.) Makino	
253		ツルマサキ	<i>Euonymus fortunei</i> (Turcz.) Hand.-Mazz.	
254		マユミ	<i>Euonymus hamiltonianus</i> Wall. subsp. <i>sieboldianus</i> (Blume) H.Hara	
255		ヒロハノツリバナ	<i>Euonymus macropterus</i> Rupr.	
256		ツリバナ	<i>Euonymus oxyphyllus</i> Miq.	
257		オオツリバナ	<i>Euonymus planipes</i> (Koehne) Koehne	
258		クロツリバナ	<i>Euonymus tricarpos</i> Koidz.	
	カタバミ科 Oxalidaceae			
259		コミヤマカタバミ	<i>Oxalis acetosella</i> L.	
260		カタバミ	<i>Oxalis corniculata</i> L. var. <i>villosa</i> (M. Beib.) Hoheacker	
261		エゾタチカタバミ	<i>Oxalis stricta</i> L.	
	ヤナギ科 Salicaceae			
262		ドロノキ	<i>Populus suaveolens</i> Fisch.	
263		ヤマナラシ	<i>Populus tremula</i> L. var. <i>sieboldii</i> (Miq.) Kudô	
264		バッコヤナギ	<i>Salix caprea</i> L.	
265		イヌコリヤナギ	<i>Salix integra</i> Thunb.	
266		エゾヤナギ	<i>Salix rorida</i> Laksch.	
267		タチヤナギ	<i>Salix triandra</i> L. subsp. <i>nipponica</i> (Franch. et Sav.) A.K.Skvortsov	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
268		オノエヤナギ	<i>Salix udensis</i> Trautv. et C.A.Mey.	
	スマレ科 Violaceae			
269		オオタチツボスミレ	<i>Viola kusanoana</i> Makino	
270		ミヤマスミレ	<i>Viola selkirkii</i> Pursh ex Goldie	
271		フイリミヤマスミレ	<i>Viola selkirkii</i> Pursh ex Goldie f. <i>variegata</i> (Nakai) F.Maek.	
272		ツボスミレ	<i>Viola verecunda</i> A.Gray	
	オトギリソウ科 Hypericaceae			
273		トモエソウ	<i>Hypericum ascyron</i> L.	
274		オトギリソウ	<i>Hypericum erectum</i> Thunb.	
	フウロソウ科 Geraniaceae			
275		ゲンノショウコ	<i>Geranium thunbergii</i> Siebold ex Lindl. et Paxton	
	アカバナ科 Onagraceae			
276		ヤナギラン	<i>Chamerion angustifolium</i> (L.) Holub	
277		ミヤマタニタデ	<i>Circaea alpina</i> L.	
278		エゾミズタマソウ	<i>Circaea canadensis</i> (L.) Hill subsp. <i>quadrisulcata</i> (Maxim.) Boufford	国VU
279		タニタデ	<i>Circaea erubescens</i> Franch. et Sav.	
280		イワアカバナ	<i>Epilobium amurense</i> Hausskn. subsp. <i>cephalostigma</i> (Hausskn.) C.J.Chen, Hoch et P.H.Raven	
281		カラフトアカバナ	<i>Epilobium ciliatum</i> Raf.	
282		エゾアカバナ	<i>Epilobium montanum</i> L.	
283		ホソバアカバナ	<i>Epilobium palustre</i> L.	
284		アカバナ	<i>Epilobium pyrricholophum</i> Franch. et Sav.	
285		メマツヨイグサ	<i>Oenothera biennis</i> L.	外来種
	ウルシ科 Anacardiaceae			
286		ヌルデ	<i>Rhus javanica</i> L. var. <i>chinensis</i> (Mill.) T.Yamaz.	
287		ツタウルシ	<i>Toxicodendron orientale</i> Greene	
288		ヤマウルシ	<i>Toxicodendron trichocarpum</i> (Miq.) Kuntze	
	ムクロジ科 Sapindaceae			
289		ヤマモミジ	<i>Acer amoenum</i> Carrière var. <i>matsumurae</i> (Koidz.) K.Ogata	
290		ハウチワカエデ	<i>Acer japonicum</i> Thunb.	
291		アカイタヤ	<i>Acer pictum</i> Thunb. subsp. <i>mayrii</i> (Schwer.) H.Ohashi	
292		エゾイタヤ	<i>Acer pictum</i> Thunb. subsp. <i>mono</i> (Maxim.) H.Ohashi	
293		ミネカエデ	<i>Acer tschonoskii</i> Maxim.	
	ミカン科 Rutaceae			
294		キハダ	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr.	
295		ウチダシツルシキミ	<i>Skimmia japonica</i> Thunb. var. <i>intermedia</i> Komatsu f. <i>intermedia</i> (Komatsu) T.Yamaz.	
296		ツルシキミ	<i>Skimmia japonica</i> Thunb. var. <i>intermedia</i> Komatsu f. <i>repens</i> (Nakai) Ohwi	
	ニガキ科 Simaroubaceae			
297		ニワウルシ	<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	外来種
298		ニガキ	<i>Picrasma quassioides</i> (D.Don) Benn.	
	アオイ科 Malvaceae			
299		ジャコウアオイ	<i>Calamagrostis sachalinensis</i> F.Schmidt	外来種
300		シナノキ	<i>Tilia japonica</i> (Miq.) Simonk.	
301		オオバボダイジュ	<i>Tilia maximowicziana</i> Shiras. var. <i>maximowicziana</i>	
302		モイワボダイジュ	<i>Tilia maximowicziana</i> Shiras. var. <i>yessoana</i> (Nakai) Tatew.	
	ジンチヨウゲ科 Thymelaeaceae			
303		ナニワズ	<i>Daphne jezoensis</i> Maxim.	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
アブラナ科 Brassicaceae				
304		ハルザキヤマガラシ	<i>Barbarea vulgaris</i> R.Br.	外来種
305		タチタネツケバナ	<i>Cardamine fallax</i> (O.E.Schulz) Nakai	
306		コンロンソウ	<i>Cardamine leucantha</i> (Tausch) O.E.Schulz	
307		オオバタネツケバナ	<i>Cardamine regeliana</i> Miq.	
308		タネツケバナ	<i>Cardamine scutata</i> Thunb.	
309		エゾワサビ	<i>Cardamine yezoensis</i> Maxim.	
310		エゾスズシロ	<i>Erysimum cheiranthoides</i> L.	外来種
311		イヌガラシ	<i>Rorippa indica</i> (L.) Hiern	
312		スカシタゴボウ	<i>Rorippa palustris</i> (L.) Besser	
313		キレハイヌガラシ	<i>Rorippa sylvestris</i> (L.) Besser	外来種
ビャクダン科 Santalaceae				
314		ヤドリギ	<i>Viscum album</i> L. subsp. <i>coloratum</i> Kom.	
タデ科 Polygonaceae				
315		ソバカズラ	<i>Fallopia convolvulus</i> (L.) Á.Löve	外来種
316		ツルタデ	<i>Fallopia dumetorum</i> (L.) Holub	外来種
317		オオイタドリ	<i>Fallopia sachalinensis</i> (F.Schmidt) Ronse Decr.	
318		ミズヒキ	<i>Persicaria filiformis</i> (Thunb.) Nakai ex W.T.Lee	
319		イヌタデ	<i>Persicaria longiseta</i> (Bruijn) Kitag.	
320		ハルタデ	<i>Persicaria maculosa</i> Gray subsp. <i>hirticaulis</i> (Danser) S.Ekman et T.Knutsson var. <i>pubescens</i> (Makino) Yonek.	
321		タニソバ	<i>Persicaria nepalensis</i> (Meisn.) H.Gross	
322		イシミカワ	<i>Persicaria perfoliata</i> (L.) H.Gross	
323		ハナタデ	<i>Persicaria posumbu</i> (Buch.-Ham. ex D.Don) H.Gross	
324		ミゾソバ	<i>Persicaria thunbergii</i> (Siebold et Zucc.) H.Gross	
325		ネバリタデ	<i>Persicaria viscofera</i> (Makino) H.Gross	
326		ミチヤナギ	<i>Polygonum aviculare</i> L.	
327		ヒメスイバ	<i>Rumex acetosella</i> L.	外来種
328		エゾノギシギシ	<i>Rumex obtusifolius</i> L.	外来種
ナデシコ科 Caryophyllaceae				
329		オオヤマフスマ	<i>Arenaria lateriflora</i> L.	
330		ミミナグサ	<i>Cerastium fontanum</i> Baumg. subsp. <i>vulgare</i> (Hartm.) Greuter et Burdet var. <i>angustifolium</i> (Franch.) H.Hara	
331		ノハラナデシコ	<i>Dianthus armeria</i> L.	外来種
332		アライトツメクサ	<i>Sagina procumbens</i> L.	外来種
333		ナンバンハコベ	<i>Silene baccifera</i> (L.) Roth var. <i>japonica</i> (Miq.) H.Ohashi et H.Nakai	
334		マツヨイセンノウ	<i>Silene latifolia</i> Poir. subsp. <i>alba</i> (Mill.) Greuter et Burdet	外来種
335		ウシハコベ	<i>Stellaria aquatica</i> (L.) Scop.	
336		シラオイハコベ	<i>Stellaria fenzlii</i> Regel	
337		コハコベ	<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	
338		ミヤマハコベ	<i>Stellaria sessiliflora</i> Y.Yabe	
339		ノミノフスマ	<i>Stellaria uliginosa</i> Murray var. <i>undulata</i> (Thunb.) Fenzl	
ヒユ科 Amaranthaceae				
340		アオゲイトウ	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	外来種
341		シロザ	<i>Chenopodium album</i> L.	
342		ウスバアカザ	<i>Chenopodium hybridum</i> L.	外来種

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
ミズキ科 Cornaceae				
343		ウリノキ	<i>Alangium platanifolium</i> (Siebold et Zucc.) Harms var. <i>trilobatum</i> (Miq.) Ohwi	
344		ミズキ	<i>Cornus controversa</i> Hemsl. ex Prain	
アジサイ科 Hydrangeaceae				
345		ノリウツギ	<i>Hydrangea paniculata</i> Siebold	
346		ツルアジサイ	<i>Hydrangea petiolaris</i> Siebold et Zucc.	
347		エゾアジサイ	<i>Hydrangea serrata</i> (Thunb.) Ser. var. <i>yesoensis</i> (Koidz.) H. Ohba	
348		イワガラミ	<i>Schizophragma hydrangeoides</i> Siebold et Zucc.	
ツリフネソウ科 Balsaminaceae				
349		キツリフネ	<i>Impatiens noli-tangere</i> L.	
350		ツリフネソウ	<i>Impatiens textorii</i> Miq.	
351		シロツリフネ	<i>Impatiens textorii</i> Miq. f. <i>pallescens</i> (Honda) H. Hara	
サクラソウ科 Primulaceae				
352		コナスビ	<i>Lysimachia japonica</i> Thunb.	
353		クサレダマ	<i>Lysimachia vulgaris</i> L. var. <i>davurica</i> (Ledeb.) R. Knuth	
354		クリンソウ	<i>Primula japonica</i> A. Gray	道Vu
ハイノキ科 Symplocaceae				
355		サワフタギ	<i>Symplocos sawafutagi</i> Nagam.	
マタタビ科 Actinidiaceae				
356		サルナシ	<i>Actinidia arguta</i> (Siebold et Zucc.) Planch. ex Miq.	
357		ミヤママタタビ	<i>Actinidia kolomikta</i> (Maxim. et Rupr.) Maxim.	
358		マタタビ	<i>Actinidia polygama</i> (Siebold et Zucc.) Planch. ex Maxim.	
ツツジ科 Ericaceae				
359		ウメガサソウ	<i>Chimaphila japonica</i> Miq.	
360		ハナヒリノキ	<i>Eubotryoides grayana</i> (Maxim.) H. Hara	
361		シヤクジョウソウ	<i>Hypopitys monotropa</i> Crantz	
362		コイチヤクソウ	<i>Orthilia secunda</i> (L.) House	
363		イチヤクソウ	<i>Pyrola japonica</i> Klenze ex Alefeld	
364		ジンヨウイチヤクソウ	<i>Pyrola renifolia</i> Maxim.	
365		コヨウラクツツジ	<i>Rhododendron pentandrum</i> (Maxim.) Craven	
366		ウスノキ	<i>Vaccinium hirtum</i> Thunb. var. <i>pubescens</i> (Koidz.) T. Yamaz.	
367		アクシバ	<i>Vaccinium japonicum</i> Miq.	
368		ナツハゼ	<i>Vaccinium oldhamii</i> Miq.	
369		オオバスノキ	<i>Vaccinium smallii</i> A. Gray	
370		コケモモ	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	
アカネ科 Rubiaceae				
371		エゾノヨツバムグラ	<i>Galium kamschaticum</i> Steller ex Roem. et Schult.	
372		クルマバソウ	<i>Galium odoratum</i> (L.) Scop.	
373		オオバノヤエムグラ	<i>Galium pseudoasprellum</i> Makino	
374		オククルマムグラ	<i>Galium trifloriforme</i> Kom.	
375		ツルアリドオシ	<i>Mitchella undulata</i> Siebold et Zucc.	
376		オオキヌタソウ	<i>Rubia chinensis</i> Regel et Maack f. <i>mitis</i> (Miq.) Kitag.	
リンドウ科 Gentianaceae				
377		フデリンドウ	<i>Gentiana zollingeri</i> Fawc.	
378		ツルリンドウ	<i>Tripterospermum japonicum</i> (Siebold et Zucc.) Maxim.	
キョウチクトウ科 Apocynaceae				
379		イケマ	<i>Cynanchum caudatum</i> (Miq.) Maxim.	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
380		ガガイモ	<i>Metaplexis japonica</i> (Thunb.) Makino	
	ムラサキ科 Boraginaceae			
381		オニルリソウ	<i>Cynoglossum asperrimum</i> Nakai	
	ナス科 Solanaceae			
382		イガホオズキ	<i>Physalistrum echinatum</i> (Yatabe) Makino	
383		ヤマホロシ	<i>Solanum japonense</i> Nakai	
384		イヌホオズキ	<i>Solanum nigrum</i> L.	史前帰化
385		アメリカイヌホオズキ	<i>Solanum ptychanthum</i> Dunal	外来種
	モクセイ科 Oleaceae			
386		ヤチダモ	<i>Fraxinus mandshurica</i> Rupr.	
387		ミヤマイボタ	<i>Ligustrum tschonoskii</i> Decne.	
388		ハシドイ	<i>Syringa reticulata</i> (Blume) H.Hara	
	オオバコ科 Plantaginaceae			
389		オオバコ	<i>Plantago asiatica</i> L. var. <i>desiuscula</i> Pilg.	
390		ヘラオオバコ	<i>Plantago lanceolata</i> L.	外来種
	ゴマノハグサ科 Scrophulariaceae			
391		ビロードモウズイカ	<i>Verbascum thapsus</i> L.	外来種
	シソ科 Lamiaceae			
392		クサギ	<i>Clerodendrum trichotomum</i> Thunb.	
393		ヤマクマバナ	<i>Clinopodium chinense</i> (Benth.) Kuntze subsp. <i>glabrescens</i> (Nakai) H.Hara	
394		クマバナ	<i>Clinopodium chinense</i> (Benth.) Kuntze subsp. <i>grandiflorum</i> (Maxim.) H.Hara	
395		イヌトウバナ	<i>Clinopodium micranthum</i> (Regel) H.Hara var. <i>micranthum</i>	
396		ミヤマトウバナ	<i>Clinopodium micranthum</i> (Regel) H.Hara var. <i>sachalinense</i> (F.Schmidt) T.Yamaz. et Murata	
397		ナギナタコウジュ	<i>Elsholtzia ciliata</i> (Thunb.) Hyl.	
398		チシマオドリコソウ	<i>Galeopsis bifida</i> Boenn.	
399		オドリコソウ	<i>Lamium album</i> L. var. <i>barbatum</i> (Siebold et Zucc.) Franch. et Sav.	
400		コシロネ	<i>Lycopus cavaleriei</i> H.Lév.	
401		エゾシロネ	<i>Lycopus uniflorus</i> Michx.	
402		ヒメジソ	<i>Mosla dianthera</i> (Buch.-Ham. ex Roxb.) Maxim.	
403		ウツボグサ	<i>Prunella vulgaris</i> L. subsp. <i>asiatica</i> (Nakai) H.Hara	
404		ツルニガクサ	<i>Teucrium viscidum</i> Blume var. <i>miquelianum</i> (Maxim.) H.Hara	
	ハエドクソウ科 Phrymaceae			
405		ミゾホオズキ	<i>Mimulus nepalensis</i> Benth.	
406		ハエドクソウ	<i>Phryma leptostachya</i> L. subsp. <i>asiatica</i> (H.Hara) Kitam.	
	モチノキ科 Aquifoliaceae			
407		ハイイヌツゲ	<i>Ilex crenata</i> Thunb. var. <i>radicans</i> (Nakai) Murai	
408		ツルツゲ	<i>Ilex rugosa</i> F.Schmidt	
409		アカミノイヌツゲ	<i>Ilex sugerokii</i> Maxim. var. <i>brevipedunculata</i> (Maxim.) S.Y.Hu	
	キキョウ科 Campanulaceae			
410		ソバナ	<i>Adenophora remotiflora</i> (Siebold et Zucc.) Miq.	外来種
411		ツルニンジン	<i>Codonopsis lanceolata</i> (Siebold et Zucc.) Trautv.	
412		タニギキョウ	<i>Peracarpa carnosus</i> (Wall.) Hook.f. et Thomson	
	キク科 Asteraceae			
413		ノブキ	<i>Adenocaulon himalaicum</i> Edgew.	
414		ブタクサ	<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	外来種
415		ヤマハハコ	<i>Anaphalis margaritacea</i> (L.) Benth. et Hook.f.	
416		ゴボウ	<i>Arctium lappa</i> L.	外来種

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
417		オオヨモギ	<i>Artemisia montana</i> (Nakai) Pamp.	
418		エゾゴマナ	<i>Aster glehnii</i> F.Schmidt	
419		エゾノコンギク	<i>Aster microcephalus</i> (Miq.) Franch. et Sav. var. <i>yezoensis</i> (Kitam. et H.Hara) Soejima et Mot.Ito	
420		アメリカセンダングサ	<i>Bidens frondosa</i> L.	外来種
421		ヤブタバコ	<i>Carpesium abrotanoides</i> L.	
422		ノッポロガンクビソウ	<i>Carpesium divaricatum</i> Siebold et Zucc. var. <i>matsuei</i> (Tatew. et Kitam.) Kitam.	
423		ミヤマヤブタバコ	<i>Carpesium triste</i> Maxim.	
424		ヤグルマギク	<i>Centaurea cyanus</i> L.	外来種
425		コバナアザミ	<i>Cirsium boreale</i> Kitam.	
426		タカアザミ	<i>Cirsium pendulum</i> Fisch. ex DC.	
427		アメリカオニアザミ	<i>Cirsium vulgare</i> (Savi) Ten.	外来種
428		ダンドボロギク	<i>Erechtites hieraciifolius</i> (L.) Raf. ex DC.	外来種
429		ヒメジョオン	<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	外来種
430		ヒメムカシヨモギ	<i>Erigeron canadensis</i> L.	外来種
431		ヨツバヒヨドリ	<i>Eupatorium glehnii</i> F.Schmidt ex Trautv.	
432		ヒヨドリバナ	<i>Eupatorium makinoi</i> T.Kawahara et Yahara	
433		ブタナ	<i>Hypochaeris radicata</i> L.	外来種
434		ハナニガナ	<i>Ixeridium dentatum</i> (Thunb.) Tzvelev subsp. <i>nipponicum</i> (Nakai) J.H.Pak et Kawano var. <i>albiflorum</i> (Makino) Tzvelev f. <i>amplifolium</i> (Kitam.) H.Nakai et H.Ohashi	
435		イワニガナ	<i>Ixeris stolonifera</i> A.Gray	
436		ヤマニガナ	<i>Lactuca elata</i> Hemsl.	
437		トゲチシャ	<i>Lactuca serriola</i> L.	外来種
438		エダウチチチコグサ	<i>Omalotheca sylvatica</i> (L.) Sch. Bip. et F. W. Schultz	外来種
439		コモチミミコウモリ	<i>Parasenecio auriculatus</i> (DC.) J.R.Grant var. <i>bulbifer</i> (Koidz.) H.Koyama	国VU
440		ヨブスマソウ	<i>Parasenecio hastatus</i> (L.) H.Koyama subsp. <i>orientalis</i> (Kitam.) H.Koyama	
441		ミミコウモリ	<i>Parasenecio kamtschaticus</i> (Maxim.) Kadota	
442		アキタブキ	<i>Petasites japonicus</i> (Siebold et Zucc.) Maxim. subsp. <i>giganteus</i> (G.Nicholson) Kitam.	
443		コウゾリナ	<i>Picris hieracioides</i> L. subsp. <i>japonica</i> (Thunb.) Krylov	
444		コウリントランポポ	<i>Pilosella aurantiaca</i> (L.) F.Schultz et Sch.Bip.	外来種
445		キバナコウリントランポポ	<i>Pilosella caespitosa</i> (Dumort.) P.D.Sell et C.West	外来種
446		ヤマニガナ	<i>Pterocypsela elata</i> (Hemsl.) C.Shih	
447		オオハンゴンソウ	<i>Rudbeckia laciniata</i> L.	外来種
448		ハンゴンソウ	<i>Senecio cannabifolius</i> Less.	
449		ノボロギク	<i>Senecio vulgaris</i> L.	外来種
450		メナモミ	<i>Sigesbeckia pubescens</i> (Makino) Makino	
451		セイタカアワダチソウ	<i>Solidago altissima</i> L.	外来種
452		オオアワダチソウ	<i>Solidago gigantea</i> Aiton subsp. <i>serotina</i> (Kuntze) McNeill	外来種
453		アキノキリンソウ	<i>Solidago virgaurea</i> L. subsp. <i>asiatica</i> (Nakai ex H.Hara) Kitam. ex H.Hara	
454		オニノゲシ	<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill	外来種
455		ネバリノギク	<i>Symphyotrichum novae-angliae</i> (L.) G.L.Nesom	外来種
456		セイヨウタンポポ	<i>Taraxacum officinale</i> Weber ex F.H.Wigg.	外来種
457		オニタビラコ	<i>Youngia japonica</i> (L.) DC.	
ウコギ科 Araliaceae				
458		ウド	<i>Aralia cordata</i> Thunb.	
459		タラノキ	<i>Aralia elata</i> (Miq.) Seem.	
460		コシアブラ	<i>Chengiopanax sciadophylloides</i> (Franch. et Sav.) C.B.Shang et J.Y.Huang	
461		オオチドメ	<i>Hydrocotyle ramiflora</i> Maxim.	

No	科名	和名	学名	備考 (希少・外来種)
462		ハリギリ	<i>Kalopanax septemlobus</i> (Thunb.) Koidz.	
463		トチバニンジン	<i>Panax japonicus</i> (T.Nees) C.A.Mey.	
セリ科 Apiaceae				
464		アマニユウ	<i>Angelica edulis</i> Miyabe ex Y.Yabe	
465		オオバセンキュウ	<i>Angelica genuflexa</i> Nutt.	
466		エゾノヨロイグサ	<i>Angelica sachalinensis</i> Maxim.	
467		エゾニユウ	<i>Angelica ursina</i> (Rupr.) Maxim.	
468		シャク	<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	
469		ミツバ	<i>Cryptotaenia canadensis</i> (L.) DC. subsp. <i>japonica</i> (Hassk.) Hand.-Mazz.	
470		ノラニンジン	<i>Daucus carota</i> L.	外来種
471		オオハナウド	<i>Heracleum lanatum</i> Michx.	
472		ヤブニンジン	<i>Osmorhiza aristata</i> (Thunb.) Rydb.	
473		ウマノミツバ	<i>Sanicula chinensis</i> Bunge	
474		ヤブジラミ	<i>Torilis japonica</i> (Houtt.) DC.	
ガマズミ科 Viburnaceae				
475		レンブクソウ	<i>Adoxa moschatellina</i> L.	
476		エゾニワトコ	<i>Sambucus racemosa</i> L. subsp. <i>kamtschatica</i> (E.L.Wolf) Hultén	
477		オオカメノキ	<i>Viburnum furcatum</i> Blume ex Maxim.	
478		ミヤマガマズミ	<i>Viburnum wrightii</i> Miq.	
スイカズラ科 Caprifoliaceae				
479		オトコエシ	<i>Patrinia villosa</i> (Thunb.) Juss.	

絶滅危惧植物 (RDB) 区分 国 VU: 絶滅危惧II類, NT: 準絶滅危惧 道 En: 絶滅危惧種, Vu: 絶滅危急種, R: 希少種

作業路・土場における土の締固めの違い

佐藤 弘和*

Differences in soil compaction between skid trails and landing areas.

Hirokazu SATO*

要旨

集材作業において高性能林業機械の走行に伴う土の締固めは、地表流の発生や土壌侵食を引き起こす原因になりうる。本研究では、作業路、土場ならびに林地を対象に土の乾燥密度や簡易貫入試験による N_c 値の比較を行い、土の締固め程度を評価した。林業機械が走行する作業路面に形成された「わだち」および土場では乾燥密度が高い値を示し、締め固められている状況が明らかになった。 N_c 値の鉛直プロファイルでは、土場および切土のり面側のわだちにおいて10~20cmの深さに硬盤が形成された。わだちと土場は、林業機械の走行による土壌の締固めを強く受けていた。

キーワード：土の締固め、土壌貫入抵抗、乾燥密度、作業路、土場

はじめに

林道、林業専用道、森林作業道作業路ならびに土場（以下、「林内路網」という）は、車両系の高性能林業機械（以下、「林業機械」という）による伐採作業の効率化にとって必要不可欠な生産基盤である。しかし、林内路網で生じた路面侵食、のり面崩壊、路肩崩壊に起因した土砂が河川の濁水化を引き起こすことがある（呉・井上, 1998；吉幸ら, 2001；臼田ら, 2014）。林内路網のうち作業路は仮設道であり、林業機械が常時走行することはない。現地確認によると、作業路は支障木の伐倒と草本の除去ならびに路面がならされるなどして作設される。林道などと異なり、路面に砂利が敷かれることがないため、路面において植生回復しない限り、基岩または基岩由来の風化土壌が露出している。このような状態の作業路では、降雨によって林道等と同様に土砂流出を引き起こすことに繋がる（長坂ら, 2011）。

作業路の作設では、概してバックホウやグラブを装着した建設用車両が用いられるが、その後の林業機械の走行とあわせて「表層土壌の締固め」が生じる。作業路は簡易な構造であることが多いが、集材におけるフォワーダの利用などから切土・盛土を伴う構造となる作業路もある。特に、盛土の場合には、走行による締固めのほかにバックホウを使った

転圧も締固めにかかる力として加わる。土の締固めは、浸透能や透水係数の低下（Ole-Meiludie and Njau, 1989）を招き、地表流が発生しやすい。

林業機械などの車両走行による土壌物理性への影響、特に土壌硬度に着目した研究は海外で多数報告されている。作業路における土壌硬度に関する情報は、浮流土砂流出の抑制を図る上で重要な意味を持つが、国内における研究事例は少ないとされている（佐藤, 2006）。先行研究では、路面に形成された林業機械の履帯（クローラ）または車輪（ホイール）の通過によって路面にできる凹状地形である「わだち」と、両輪（左右）のわだちの間にある空間（以下、「わだち間」という）における土壌硬度の違いが評価されている（Dickerson, 1976；Allbrook, 1986；Ole-Meiludie and Njau, 1989）。わだちは路面流水に対して水路の役割となり、路面侵食に繋がりやすい。利用が終わり放置されている作業路内にできた、わだちやわだち間の土壌硬度を測定することは、作業路における土の締固め程度が把握でき、路面侵食を防ぐことに繋がると考えた。あわせて、海外の事例では作業路（skid trail）と土場（landing）での締固め状態を同時に比較した例があり（Hatchell *et al.*, 1970；Miller and Sirois, 1986）、本研究でもこれに倣うことにした。

本研究では、作業路面、土場および攪乱を受けていない林

* 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58号 令和3年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 58, March, 2021]

地(対照)において土壌貫入抵抗および乾燥密度(bulk density)をそれぞれ測定し、車両走行による土の締固め状況を報告する。

調査地概要

調査地は、オホーツク総合振興局西部森林室が所管する道有林に作設された作業路と、これに隣接した林地ならびに作業路が接続している土場である(図-1)。

作業路は、間伐作業時に作設されたものである。調査時における作設経過月数は1ヶ月である。路面では、草本および腐植を含む層が除去されたことにより鉱物質の土が露出している。路面勾配は図-1に示した縦断形状の左側を基点として、下り勾配が9.5~18.5°、上り勾配が5~9°である。作業路の作設と集材作業に用いた車種および走行回数は不明である。ただし、わだちの形状から、バケットサイズが0.45m³クラスのクローラ型車両機(車重は10,000~15,000kg程度)が走行したことは確認できる。本論では、切土のり面側にあるわだちを「切土のり面側わだち」、盛土のり面側にあるわだちを「盛土のり面側わだち」として区別する。あわせて、「両わだち」と記載した場合は、両側のわだちのことを指す。両わだちの間(路面中央部に相当)は、「わだち間」と称する。切土のり面のり面の高は測定していないが、調査時に現場を撮影した写真から、1m程度であったことが確認できる。同じく、写真から盛土のり面側の斜面において土が盛られている痕跡を確認した。

作業路に接続している土場の表面は砂利で覆われておらず、植生がみられない。表層土は、作業路の近傍にあることから同じとみなした。調査測線における土場の勾配は1.5~7.5°である(図-1)。土場の一部では、履帯の走行跡が残っていた。

作業路が通っている林地の上層木はトドマツが主体であり、林床はササが繁茂している。切土のり面の上部斜面に位置する林地において、作業路に並行するように調査測線を設けた。同調査測線の勾配は、路面勾配とほぼ同等である。なお、盛土のり面側の林地では、場所によっては切土した際の土砂が堆積している様子があったため、調査測線を設けなかった。

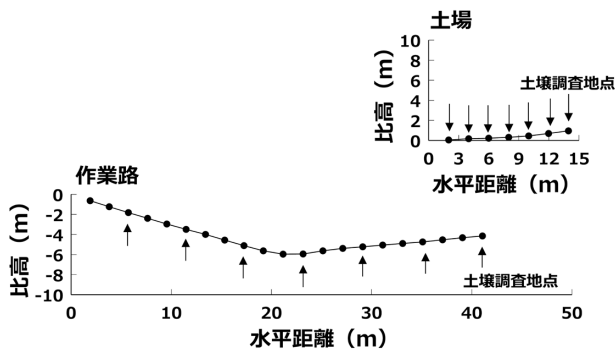


図-1 土場と作業路における地形断面と土壌調査地点(矢印)

研究方法

土場、作業路(両わだちとわだち間)、林地で簡易貫入試験器(坂田電機製)により、貫入抵抗値をそれぞれ測定した。測定日は、2002年9月25日である。貫入試験は測線上に7箇所の計測点を設けて実施し(図-1)、貫入抵抗をNc値で評価した。Nc値とは、5kgの重りを0.5mの落差をつけて自由落下させ、先端コーン直径0.025mのロッドが0.1m土中に挿入されるのに要した打撃回数で表される。測定深度は、ロッドの引き抜きやすさなどを考慮し、0.5mまでとした。ただし、ロッドの挿入が困難と判断されたため、土場と切土のり面側わだちで深さ0.5mに達する前に測定を止めた計測点もある。Nc値の単位はdrop 0.1m⁻¹であるが、文中において単位の記載は省略する。

逢坂(1994)は、5 ≤ Nc < 10に該当する「下層土層」で根の伸長が阻害されると報告している。石塚ら(2002)は、ヒノキ人工林の根系断面面積合計の制限要因となる土層の硬さはNc値10~20であると考察している。太田(1998)は、Nc=20に対応する深さを連ねた面を水文学的基盤としている。これらを踏まえ、各計測点レベルにおいて、0~0.1m, 0.1~0.2m, …, 0.4~0.5mの深さ別に、カテゴリー区分、①Nc < 5, ②5 ≤ Nc < 10, ③10 ≤ Nc < 20, ④Nc ≥ 20を設定し、これらに該当する計測点数を整理した。

あらかじめカラ状態の重量(W₀)を量った容量100mLの採土円筒を用いて、土場と作業路(両わだち、わだち間)、林地の表層土から不攪乱試料をそれぞれ採取した(繰り返し数は7)。なお、腐植の土粒子密度が鉱物質の土より低いことが乾燥密度の違いに反映されることから、林地では最表層にあるO層とA層(層厚数cm)を排除し、その下部に位置する鉱物質層を採取した。

実験室に持ち帰った採土円筒については、湿潤状態の重量(W₁)を電子はかりで測定した後、自然循環式乾燥器を用いて105℃で24時間乾燥させ、除熱後に電子はかりを用いて乾燥後重量(W₂)を測定した。これより、乾燥密度B_d(Mg m⁻³)と重量含水率θ(%)は、以下の式でそれぞれ求められる。

$$B_d = \frac{W_2 - W_0}{100}$$

$$\theta = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100$$

乾燥密度は単位体積(m³)あたりの乾燥土の重量、重量含水率は全重量に対する水分重量の比(百分率表示)である。重量含水率から含水比w(%)を以下の式で求めた。

$$w = \frac{\theta}{100 - \theta} \times 100$$

含水比は固相の質量に対する水分質量の比で、百分率で表す。

土場、切土のり面側わだち、盛土のり面側わだち、わだち間、ならびに林地それぞれの間における乾燥密度の違いについては、TukeyのHSD検定により評価した。

結果

1. Nc値の鉛直プロファイル

両わだち、わだち間、土場、林地におけるNc値（中央値）の鉛直プロファイルを図-2に示す。対照とした林地のNc中央値は5未満であった。両わだち、わだち間、土場のNc中央値は、すべての深さにおいて林地より高い値を示した。深さ0.1m以深において最も高いNc中央値を示したのは切土のり面側わだちであり、深さ0.1m以深のNc中央値は15以上21.5以下であった。土場のNc中央値は、6~13の範囲であった。盛土のり面側わだちでのNc中央値は、6以下であった。わだち間でのNc中央値は、3以上8以下であった。

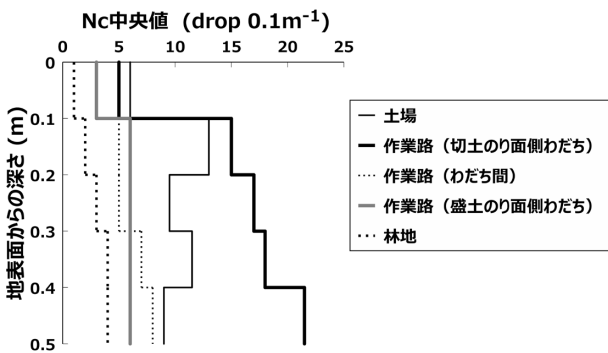


図-2 土場、作業路、林地におけるNc中央値の鉛直プロファイル

各計測点のNc値からカウントした、カテゴリー区分、①Nc < 5, ②5 ≤ Nc < 10, ③10 ≤ Nc < 20, ④Nc ≥ 20に該当する計測点数を表-1に示す。土場および切土のり面側わだちでは、Nc ≥ 20の該当数が他の区分に比べて多く、③と④のカテゴリーは深さ0.1m以深から出現していた。わだち間では、半数を超える計測点において0.1m以深のNc値が②のカテゴリーと該当したが、③と④のカテゴリーとなる計測点は2点を除いてなかった。盛土のり面側わだちでは、Nc値が5以上10未満となった計測点は半数を占めたが、③と④のカテゴリーに該当する計測点はなかった。林地では、0.2m以深で②のカテゴリーと該当する計測点があったものの、③と④のカテゴリーに該当する計測点はなかった。

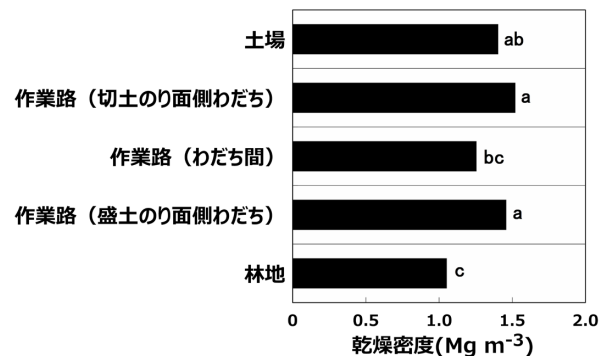


図-3 土場、作業路、林地における乾燥密度
アルファベットは5%有意差を示す

表-1 各カテゴリーに該当するNc値が出現した計測点数

	深さ (m)	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5
土場						
① Nc < 5		3/7	3/7	0/6	0/6	0/5
② 5 ≤ Nc < 10		4/7	0/7	0/6	2/6	3/5
③ 10 ≤ Nc < 20		0/7	3/7	3/6	3/6	2/5
④ Nc ≥ 20		0/7	1/7	3/6	1/6	0/5
切土のり面側わだち						
① Nc < 5		3/7	0/7	0/7	0/7	0/6
② 5 ≤ Nc < 10		4/7	1/7	0/7	0/7	0/6
③ 10 ≤ Nc < 20		0/7	5/7	5/7	4/7	3/6
④ Nc ≥ 20		0/7	1/7	2/7	3/7	3/6
わだち間						
① Nc < 5		7/7	3/7	3/7	2/7	1/7
② 5 ≤ Nc < 10		0/7	4/7	4/7	5/7	4/7
③ 10 ≤ Nc < 20		0/7	0/7	0/7	0/7	2/7
④ Nc ≥ 20		0/7	0/7	0/7	0/7	0/7
盛土のり面側わだち						
① Nc < 5		7/7	1/7	0/7	1/7	2/7
② 5 ≤ Nc < 10		0/7	6/7	7/7	6/7	5/7
③ 10 ≤ Nc < 20		0/7	0/7	0/7	0/7	0/7
④ Nc ≥ 20		0/7	0/7	0/7	0/7	0/7
林地						
① Nc < 5		7/7	7/7	4/7	5/7	6/7
② 5 ≤ Nc < 10		0/7	0/7	3/7	2/7	1/7
③ 10 ≤ Nc < 20		0/7	0/7	0/7	0/7	0/7
④ Nc ≥ 20		0/7	0/7	0/7	0/7	0/7

※該当数/計測点数で表記。各欄7サンプルであるが、一部ロッドが挿入困難なため打ち切ったものがある。

2. 乾燥密度

土場、両わだち、わだち間、林地における乾燥密度 B_d を図-3に示す。土場、両わだちの乾燥密度は、ともに 1.4 Mg m^{-3} を超えており、林地の値 1.0 Mg m^{-3} に比べて $p < 0.05$ で有意に高い値を示した。わだち間の乾燥密度 1.3 Mg m^{-3} は、土場と林地の中間の値であり、両わだちとは有意に異なっていた。

3. 乾燥密度と含水比の関係

各測定地点における乾燥密度と含水比 w の関係を図-4に示す。両わだちの含水比は、ともに5~17%の範囲にあった。含水比が高い地点ほど、両わだちの乾燥密度は低くなる傾向であった。わだち間でも、含水比が高い地点ほど乾燥密度が低くなる傾向であった。林地と土場の含水比は、1点(含水比27.7%)を除いて両わだちと同程度の範囲にあった。

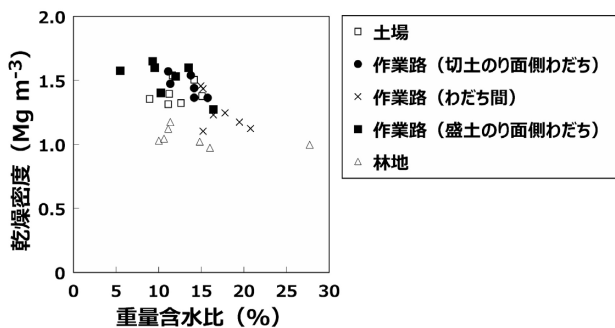


図-4 土場、作業路、林地における乾燥密度と重量含水比の関係

考察

1. Nc値から推察される作業路と土場における土の締固め状況

Nc中央値の鉛直プロファイル(図-2)では、両わだち、土場、林地における土壌硬度(貫入抵抗)の違いが明瞭であった。林地では、Nc中央値が深さに関わらず5未満を記録したことから、根の伸長阻害が生じるような土ではない。これより、人為的な影響を受けていない土については、攪乱を受ける前から硬い土ではないと判断される。人為的攪乱を受けている土場と両わだちでは、深さ0.1m以深でのNc中央値が5以上となり(図-2)、切土のり面側わだちに至っては深さ0.4m以深で20を超えていた(表-1)。土場および切土のり面側わだちでは、車両走行による強い土の締固めが生じていたことは明らかである。さらに、水文学的基盤の観点からみると、土場および切土のり面側わだちでは、浅いところで深さ0.1~0.2mの層が水文学的基盤に相当する(表-1)。わだちの表層部にある水文学的基盤上に飽和帯が形成されると、含水比の増加に繋がり路面の泥濘化も懸念される。

土場における深さ0.1m以下のNc中央値は、切土のり面側わだちより低い値であった(図-2)。土場では、計測点によ

てNc値が70以上の箇所やNc値が10を超えない箇所が記録されていた。作業路では車両(建設用車両や林業機械)の履帯による走行がわだちに限定されるのに対し、土場内では特定の場所を何度も往復せずに走行箇所が分散されるため、締固めの度合いが場所によって異なっていたことが示唆される。

盛土のり面側わだちのNc中央値は、深さに関わらず切土のり面側わだちより低い値であった(図-2)。盛土のり面側わだちでは履帯による踏圧を受けるが、走行のないわだち間と同程度のNc中央値であった。すなわち、盛土のり面側ではもとの土層のNc値が顕現していたことも示唆される。そのような状況を仮定すると、切土のり面側わだちでは相対的に深くまで締固めの影響を強く受けたことになる。両わだちにおいて、車両走行時の車重のかかり方に違いがあったことも推測される。

もうひとつ両わだちのNc値の鉛直プロファイルが異なっていた原因として、切り土で生じた土砂を盛土のり面側に堆積させたことがあげられる。すなわち、盛土され転圧を受けた路面では一度土を崩してから成型しているため、もとの地盤(地山)が有する強度に比べて弱く、深さ0.5mまでの貫入抵抗値が低くなったと推察できる。

両わだちにおけるNc中央値の鉛直プロファイルについて、2つの理由を提示したが、ここではどちらの原因に起因しているかはわからない。ただし、同じわだちといっても、切土側と盛土側ではわだち内部(特に深さ0.1m以深)の硬度分布に違いがあることが明らかになった。

2. 乾燥密度から推察される作業路と土場における土の締固め状況

本研究では、両わだちの乾燥密度が林地の値に対してともに1.4倍であった(図-3)。土場の乾燥密度は、林地の値に対して1.3倍であった。車両走行や地表攪乱によって乾燥密度が増加した報告は多数みられる。Hatchell *et al.* (1970)では、作業路と土場での乾燥密度が対照に比べてともに1.5倍増加した。Dickerson (1976)では、わだちで乾燥密度が20%増加した。Ole-Meiludie and Njau (1989)では、トラクターのわだちで乾燥密度が29%増加した。先行研究と同様に、両わだちや土場の表層部(採土位置が0.1m深以内)では車両走行による締固めが生じており、林地に比べてわだちや土場の乾燥密度が高いことに繋がっている。

車両走行を受けていないわだち間においては、林地の乾燥密度に対して1.2倍程度の増加に留まっていた。Dickerson (1976)では、わだち間の乾燥密度が10%増している。Ole-Meiludie and Njau (1989)でも、わだち間で乾燥密度が増加している。わだち間では履帯による直接的な走行がない。他地域で作業路作設の様子を現地観察した際、排土板による路面のならしやバケットを使った路面転圧が行われていた。同様の作業が行われた場合、路面のならしや転圧がわだち間に

残ることで乾燥密度が増加した可能性がある。すなわち、わだちでは作設時の転圧+履帯による踏圧、わだち間では転圧のみが、路面にかかる主たる力ということになる。ただし、Allbrook (1986) は、わだちでの乾燥密度は22%増加したが、わだち間では有意な変化がみられなかったと報告しており、必ずしもわだち間では転圧がかけられるとは限らない。

3. 乾燥密度と水分環境の関係

調査日からの先行降雨を札幌管区气象台提供によるアメダスデータで確認すると、2002年8月19～21日に総降水量75mmが観測されたが、9月25日(調査日)までの約1ヶ月間では、日降水量が最大でも4mm、期間内の総降水量が20mmとかなり少なかった。先行降雨の量からみれば、採土を行った調査日は乾燥状態にあったといえる。しかし、作業路の含水比は5～16%と計測点間で違いがあった(図-4)。これは、各計測点の水分状態(排水過程)が、土の締め固め度合いの違いで変化していることを示唆する。

先行研究では、わだちにおいて強度の締め固めが生じると、粗孔隙の減少と細孔隙の増加が起こり(Allbrook, 1986)、透水係数も減少する(Gent Jr. *et al.*, 1983)。これらの現象は、締め固められた土壌では林地土壌に比べて孔隙量が減少する一方で孔隙から排水されにくい、すなわち水移動がしにくい(保持されやすい)環境となることを意味する。

両わだちとわだち間における乾燥密度と含水比の関係は、含水比が低いほど乾燥密度が高い傾向であった(図-4)。乾燥密度の増加とは、乾燥重量(「土粒子重量」に相当)の増加である。各計測点における土粒子密度が同じと仮定すると、乾燥密度の増加は土粒子体積の増加または孔隙の体積(孔隙量)の低下に結びつく。重量含水比が低下するのは、分母である土粒子重量の増加か、分子である水分重量の低下によって起こる。締め固めによって乾燥密度が高くなった両わだちでは、わだち間に比べると締め固めによる土粒子重量(含水比の分母の値)の増加が起こっている。両わだちにおける水分重量がわだち間と同じであれば、含水比は低い値となる。

さらに、わだちでは、路面上を地表流が流れやすい。林道の事例ではあるが、長塚ら(2014)は林道における水流出量を計測した結果、林道からの総流出量に対して路面に生じた地表流が85～89%寄与していることを明らかにしている。路面外に排水されなかった降水は作業路の路体(地山)に浸透するが、地表流が発生しないわだち間に比べて孔隙内に保持される水分重量(含水比の分子の値)が少なくなるため、含水比が低下することも起こりうる。

攪乱を受けていない林地では、計測点の間に乾燥密度の増減傾向がなかった。林地では、各計測点における土粒子重量の違いより、孔隙中に含まれる水分重量の違いそのものが重量含水比に反映していたことが推察される。また、有機物の含水比(代表値)が80%以上であることを考慮すると(熊城

ら, 2004)、有機物含有量が含水比に影響する可能性もあるが、本研究ではO層とA層を除去して採土したことで、乾燥密度に対する有機物含有の影響(試料の軽量化)が少なかったと考えられる。なお、三田地(2013)によれば、含水比20%以下は、砂質土の自然状態に該当する(ただし、試験地の土は完全な砂の層ではなく、土を捏ねると壤土のように棒状になる)。この試験地で採取したわだちや土場と比べて林地土壌での乾燥密度が低いのは、有機物が含まれることによる違いではなく、土粒子重量の違いであると判断した。林地土壌では土粒子体積が少なく孔隙量(特に粗孔隙)が多いために、土中に浸透した水は排水されやすい。林地では採土した層に浸透した水量が同じとしても、特に粗孔隙量の違い(ばらつき)が排水量の違いに反映しやすいことが示唆される。

林地より締め固められている土場において、乾燥密度と含水比の間に明瞭な増減傾向はなかった。計測点は測線上に設定したが、土場では常に測線沿いに走行するとは限らないため、締め固め度合いが面的にばらつき、増減傾向がはっきりしないことが示唆される。ただし、これ以上の理由はわからない。土場での含水比と乾燥密度の関係については、測線ではなく面的に採土・分析する必要がある。

本研究では、含水比をもって両わだちとわだち間における土壌水分を比較したが、作業路内(路体)の土壌水分と土壌硬度の関係については不明な点も多い。今後研究を進めるのであれば、飽和(不飽和)透水係数の計測および各計測点における水ポテンシャル(水理水頭)の経時測定により、作業路における空間的・時間的な水分環境を把握する水文地形学的なアプローチもある。路盤や路体内の土壌水分環境に関する知見は、路面での植生回復、路面流水や路面侵食の発生、路面の泥濘化といった車両走行の安全性や使用後の状態回復(林地の状態に戻す)を考慮する上での重要な情報となりうる。

謝辞

現地調査では、道総研林業試験場の長坂有氏と調査地を所管している皆様に御協力いただいた。ここに記し、感謝の意を表します。

引用文献

- Allbrook, R.F.(1986) Effect of skid trail compaction on a volcanic soil in central Oregon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1344-1346.
- Dickerson B.P. (1976) Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 965-966.
- Gent, J.A., Jr., Ballard, R., and Hassan, A.E.(1983) The impact of harvesting and site preparation on the physical properties of Lower Central Plain forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 595-598.
- Hatchell GE, Ralston CW, and Foil R.R.(1970) Soil disturbances in logging. Effects on soil characteristics and growth of loblolly

pine in the Atlantic Coastal Plain. J. For. 68: 772-775.

石塚公人・逢坂興宏・土屋 智 (2002) ヒノキ人工林における樹木根系分布に与える土層の硬さの影響. 日緑工誌 28 (1) : 146-149.

熊城正治・林田師照・安川郁夫 (2004) 『図解土木講座 土質力学の基礎 (第二版)』. 技法堂出版 : 141pp.

Miller, J.H. and Sirois, D.L. (1986) Soil disturbance by skyline yarding vs. skidding in a loamy hill forest. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1579-1583.

三田地利久 (2013) 『土質力学入門』. 森北出版 : 248pp.

長坂 有・今 博計・長坂晶子・棚橋生子・佐藤弘和 (2011) 森林施業後の林床被覆の違いが表土流出に及ぼす影響. 日林北支論 59 : 137-139.

長塚結花・五味高志・平岡真合乃・宮田秀介・恩田裕一 (2014) 林道路面の浸透能と水流出特性. 日林誌 96 : 315-322.

太田猛彦 (1998) 森林山腹斜面における雨水の流出について. 水文・水資源学会誌 1 (1) : 75-82.

呉 在萬・井上章二 (1998) 林道開設地における渓流水の浮遊砂濃度の変化. 森林学誌 13(3) : 161-168.

Ole-Meiludie, R.E.L. and Njau, W.L.M. (1989) Impact of logging equipment on water infiltration capacity at Olmotonyi, Tanzania. For. Ecol. Manage. 26: 207-213.

逢坂興宏 (1994) 花崗岩斜面土層の発達過程と安定性に関する研究. 静岡大学農学部演習林報告 18 : 1-44.

佐藤弘和 (2006) 浮遊土砂の流出抑制に配慮した森林管理方法. 日林誌 88(1) : 50-59.

白田寿生・古川邦明・鈴木秀典・小倉 晃 (2014) 森林作業道における濁水流出防止対策の検討-沈砂池の効果-. 森林学誌 29(2) : 97-100.

吉幸 朗・長澤 喬・森田紘一・中尾博美 (2001) 高密度道路網を基盤とする機械化間伐作業林分における土砂流出について. 森林学誌 16 : 191-202.

Summary

Soil compaction caused by forestry vehicles on skid trails can cause surface flow and soil erosion at the road surface. To evaluate the degree of soil compaction on skid trails, we measured bulk density and soil penetration resistance (N_c) in different parts of skid trail ruts (cutslope, fillslope, and between ruts), the landing area, and forest land (control). Soil bulk density was higher on trail ruts and the landing area than on forest land or inter-rut. The vertical profile of N_c values showed a hard layer at depths of 0.1~0.2m on trail-rut cutslopes and on the landing area. Thus, vehicles strongly compacted soil on the ruts and landing area.

Key words

soil compaction, penetration, bulk density, skid trails, landing

クリーンラーチ挿し木苗の得苗率低下に影響する要因

今 博計*・来田和人*・黒丸 亮*

Factors affecting reduced productivity of hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) cv. Clean Larch cutting propagation

Hirokazu KON*, Kazuhito KITA*, and Makoto KUROMARU*

要旨

クリーンラーチ挿し木苗生産における生産開始以来の得苗率の推移を行政資料から把握するとともに、得苗率低下の原因把握を目的として、全生産者を対象に、生産スケジュール、挿し木苗の発根等の生産実態を調査した。生産が始まった最初の2年間は、得苗率（成苗数/挿し穂数）は70%程度だった。生産者数が増加した2006年以降は、得苗率は30%まで落ち込んだ。得苗率の低下は、挿し床での育苗と苗畑への移植後の期間に生じていた。挿し付けは4月下旬から8月下旬まで長期間にわたって行われていたが、挿し付け時期は発根率と根量に影響しており、挿し付け時期が遅くなるほどそれぞれ減少した。根量の減少は、苗畑に移植した後の生存と成長にも影響していた。これらの結果から、挿し木苗生産の低下は、挿し付け時期の遅れによって生じていると考えられる。

キーワード：クリーンラーチ、発根率、緑枝挿し、移植、栄養繁殖

はじめに

北海道立総合研究機構林業試験場は、北海道山林種苗協同組合と北海道水産林務部林務局森林整備課と共同でグイマツ雑種F₁の挿し木増殖技術を開発し、2002年と2011年の2回にわたり生産の手引きを作成した（北海道山林種苗協同組合・北海道立林業試験場2002, 北海道水産林務部・北海道立総合研究機構林業試験場2011）。2004年から始まったクリーンラーチ（グイマツ雑種F₁の優良家系）の挿し木苗生産はこの手引きに基づいて行われており、生産数は年々増加し2019年には約16万本に達した。しかし、挿し付けた穂のうち成苗まで育った割合（得苗率）は20~30%の水準に留まるなど、生産性が低迷している。そのため、挿し木苗生産を取りやめる生産者も現れ始めている。需要の高いクリーンラーチ苗木を増やすためには、得苗率の低下をもたらす要因を明らかにして、生産者へ改善策を提示することが喫緊の課題となっている。

北海道でのクリーンラーチの挿し木苗生産は、カナダ北東部で開発されたハイブリッドカラマツの挿し木生産技術を参考に、3年かけて行っている（Morgenstern 1987, 黒丸・来田

2003, Tousignant et al. 2007a, b)。1年目は挿し穂を採る母株（以下、挿し穂台木と呼ぶ）として用いる実生幼苗を育成している。現在、胆振管内の生産者がクリーンラーチの実生幼苗の生産を担っており、ここで育てられた1年生幼苗が2月に挿し木苗生産者に配布されている。2年目は挿し穂台木の育成と採穂、挿し付け、発根、床替えまでの育苗が行われる。挿し木用土は、ピートモス、パーミキュライト、鹿沼土等を配合したものが使われ、挿し床にはプラスチック製の育苗箱を用いている。挿し付ける穂は伸長中の新梢であり、育苗箱を農業用ハウスやハウスに設置したトンネル内に置き、穂を3カ月間ほど育て発根させる。発根した幼苗は8月下旬から11月に育苗箱から掘り取り発根苗が選別される。発根苗は苗畑に床替えるか、もしくは床替えせずに育苗箱に戻し越冬する。3年目は、雪融け後、育苗箱で越冬した発根苗の苗畑への床替え作業が行われる。床替え苗は秋もしくは翌年の春に掘り取って出荷する。なお、生育が悪く出荷サイズに達しない苗については、さらに1年間育成される。

クリーンラーチ挿し木苗の得苗率低下に影響する主な要因は発根にあると考えられてきた。クリーンラーチの挿し付け

* 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58号 令和3年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 58, March, 2021]

当年秋における根の乾燥重量は0.1g程度であり（来田ら2019）、実生幼苗と比べて根系の発達が貧弱である。一般に、挿し木苗の根量が少ないと、苗畑に植栽した後の生存率が低下するため（米道ら2018）、苗生産にあたっては発根率だけでなく発根量も重要である。ヨーロッパカラマツの挿し木で炭素の動態を調べた研究によると、根に含まれる炭水化物の83～90%が挿し付け後の光合成産物に由来しているとされ（Pellicer et al. 2000）、挿し木は光合成をしながら稼いだ資源を根の形成に投資している。クリーンラーチでは挿し付けが5～8月の長期間に及ぶが、挿し付け時期が遅いほど生育期間が短くなるため、発根率が低下したり根量が少なくなる可能性がある。また、根量の低下が苗畑への床替え後の活着率や成長量を下げ、結果的に得苗率を下げているのかもしれない。

そこで本研究では、クリーンラーチ挿し木苗生産の得苗率低下の要因を明らかにすることを目的に、2つのアプローチにより取り組んだ。1つは、得苗率の低下が育苗過程のどの段階にあるのかを把握するため、挿し穂台木の育成から苗畑での育苗まで挿し木に関する行政資料の整理を行った。もう1つは、挿し付け時期が得苗率の低下に影響しているか検証するため、全生産者を対象にした生産スケジュールの聞き取り、挿し床と床替え床での成績調査、一部の生産者での発根調査を行った。

調査方法

1. 挿し木育苗過程における評価

苗木生産の失敗が育苗過程の2年目から3年目のどの段階で生じているかを把握するため、配布された挿し穂台木数

(a)、採穂した挿し穂台木数 (b)、挿し穂数 (c)、床替数 (d)、苗畑への床替数 (d'), 裸苗の成苗数 (e) について、北海道水産林務部林務局森林整備課が保管する「クリーンラーチ生産と山出し実績集計表」を整理し、以下の5つの項目を評価した（表-1）。

- A：台木使用率 (b/a)
- B：台木1本当たりの採穂数 (c/b)
- C：床替率 (d/c)
- D：苗畑床替え後の得苗率 (e/d')

Aは挿し穂台木の育成環境、特に水分管理や病虫害管理の適切性、Bは挿し穂台木の育成環境、特に植栽密度や栄養条件の適切性、Cは挿し付け後の挿し床管理の適切性、Dは苗畑における育成の適切性の評価を示す。2013年春から、幼苗の一部をコンテナに移植して育てるコンテナ苗生産が始まったが（2014年春出荷）、ここではクリーンラーチ苗生産の主流である苗畑に焦点をあてるため、裸苗を対象に解析した。なお、一部の生産者では2年生以上の挿し穂台木（多年生台木）を利用して生産が試みられているが、成苗にほとんど至っていないことから、集計では、1年生台木を利用した挿し木苗生産のデータのみを扱った。

データは生産が始まった2004年春の台木配布から2019年春の山出しまでの期間を集計した。

2. 生産実態調査

生産者ごとの詳しい生産実態を把握するため、2017年に挿し木生産を行った全17者を対象に、育苗2年目2月における台木の配布から3年目5月の床替えまでの各育苗工程で扱った時期、数量について聞き取り及び現地調査を行った（表-

表-1 クリーンラーチ挿し木苗生産の年別の生産経過一覧

台木配布年	生産者数 (者)	配布台木数 (a) (本数)	使用台木数 (b) (本数)	挿し穂数 (c) (本数)	床替数*1 (d) (本数)	苗畑床替数 (d') (本数)	裸苗成苗数*2 (e) (本数)
2004	1	500	500	5,330	5,059	5,059	3,985
2005	2	2,150	2,143	23,124	21,546	21,546	15,200
2006	12	3,100	2,794	26,800	21,529	21,529	8,194
2007	11	5,048	4,367	57,468	44,584	44,584	21,433
2008	15	8,450	7,279	89,879	66,765	66,765	31,150
2009	12	14,400	13,211	177,849	135,514	135,514	57,532
2010	12	20,300	20,250	269,395	153,748	153,748	64,910
2011	14	19,446	19,088	224,740	140,635	140,635	64,310
2012	15	22,013	21,684	266,508	143,650	143,650	48,428
2013	21	36,850	30,503	469,470	239,405	239,405	90,280
2014	17	48,750	44,713	551,372	298,443	298,443	114,380
2015	17	36,650	34,825	360,720	272,579	258,450	110,160
2016	17	43,050	35,789	467,513	295,577	244,877	141,810
2017	17	44,850	-	505,730	271,020	150,120	52,850
2018	16	44,000	-	734,221	332,429	190,531	89,810

*1 苗畑とコンテナに床替えした本数

*2 苗木生産者が振興局へ提出している得苗数（見込み本数）であり、出荷本数ではない。

表-2 挿し木苗生産における聞き取り内容

項目	内容
(1) 挿し穂台木と挿し付け時期	移植先, 移植時期, ハウス内での暖房使用, 苗畑での植栽密度, 挿し付け日, 挿し付け本数
(2) 床替	堀取り選苗時期, 幼苗の保管場所, 床替え時期

表-3 生産実態調査の概要

生産地域	生産者	生産調査	挿し床		床替床	備考
			発根・頂芽形成の推移	生育終了期の成績	生存成績	
道央	A					※1
道央	B	○	○	○	○	
道央	C	○		○	○	
道央	D	○	○	○	○	
道北	E	○		○	○	
道北	F	○	○	○	○	
道東 (オホーツク)	G	○		○	○	
道東 (オホーツク)	H	○		○	○	
道東 (オホーツク)	I	○				※2
道東 (オホーツク)	J	○		○	○	
道東 (オホーツク)	K	○		○	○	
道東 (オホーツク)	L	○		○	○	
道東 (十勝・釧路)	M	○		○	○	
道東 (十勝・釧路)	N	○				※3
道東 (十勝・釧路)	O	○	○	○	○	
道東 (十勝・釧路)	P	○		○	○	
道東 (十勝・釧路)	Q	○		○	○	

※1, 調査協力が得られなかった。

※2, 多年生台木から挿し木を実施していたため, 得苗等の解析から除外した。

※3, コンテナ容器で挿し木をしていたため, 得苗等の解析から除外した。

2)。なお, 1者からは回答が得られなかった(表-3)。

(1) 挿し穂台木の育成と挿し付け時期

現在, 挿し穂台木は2通りの方法で育成されている。台木をポットに移植し農業用ハウスで育てる方法と, 台木を苗畑に移植し育てる方法である。育成方法は, 各生産者の生産スケジュールにあわせて選ばれているが, 採穂までの育成日数については明確でない。ここでは採穂までに要する育成日数を把握するため, 育成日数と移植時期, 移植先, ハウスでの暖房使用との関係を調べた。また, 12者については前年の2016年の移植時期, 移植先, 採穂までの育成日数についても記録が得られたので解析に含めた。なお, 解析では挿し穂の採取長が他の生産者に比べて極端に短かった1者については除外した。

挿し穂となる一次枝の成長は, 隣接する台木との距離に影響を受けるため, 苗木の密度は挿し穂として利用できる枝数の減少要因となりうる。ポット苗では育成段階に応じて密度

を調整できるが, 苗畑では調整できない。そこで苗畑における適切な台木の植栽密度を把握するために, 密度と台木1本当たりの採穂数との相関関係を求めた。

また, 挿し付けの時期別数量を把握するため, 挿し付け日と挿し付け本数を聞き取りした。

(2) 床替え

床替えは挿し付け当年の8~9月もしくは翌年の4~5月に行われる。床替え時期が早いほど, 得苗率は向上するが(黒丸・来田2003), 寡雪地域では秋に床替えを行うと冬季の土壌の凍上により苗の倒伏が発生する可能性が高い。現在, 生産者がいつ床替えをしているのかを把握するため, 床替え時期, 堀取り選苗時期, 幼苗の保管場所について聞き取りした。

3. 一部生産者における成績調査

(1) 挿し床での発根・成績調査

挿し付け時期が発根に及ぼす影響を把握するため, 2017年

6月下旬から8月上旬に挿し付けた穂の発根状況を継続的に調べた。調査は道央のD生産者（挿し付け日：6月28日）、道北のF生産者（7月20日）、道東のO生産者（7月26日）、道央のB生産者（8月10日）の各施設で行った。なお、挿し穂台木の育成は、D生産者とF生産者はハウス、O生産者とB生産者は苗畑で行っていた。まず、各施設で育苗箱を1つ選び、箱内の挿し穂を行列番号により識別した。1箱あたりの挿し穂数は100本前後であり、その内40本を調査対象とした。穂の抜き取りは根を痛めないよう、ピンセットや薬匙等を使って行った。観察後は育苗箱に埋め戻し灌水した。また、穂の伸長の停止と発根の関係を調べるため、穂先の頂芽形成の有無についても記録した。これらの調査は、挿し付け4週間後、6週間後、8週間後、10週間後を目処に行った（ただし、14日おきではなく数日の誤差がある）。挿し付け時期が発根に及ぼす影響は、挿し付けから56日目（8週間後）の発根率を比較して評価した。なお、51日目で調査を打ち切ったD生産者では、37日目から51日目までの発根率の傾きから56日目の発根率を推定した。

また、生育終了期の挿し床での成績を把握するため、1年生の挿し穂台木を用い育苗箱で挿し木生産を実施していた14者（表-3）を対象に成長調査を行った。2017年10月から11月に、各生産者において1つの育苗箱から無作為に50本を選び苗長と根元径を測定した。また、根量の測定を行うため、10本を掘り取り実験室に持ち帰った後、茎葉（T）、根（R）に切り分け、乾燥機において80℃で3日間乾燥させた後、それぞれの部位の重量を計測しT/R率を求めた。挿し木幼苗（1年生）のT/R率の評価は、宮崎（1966）が報告したカラマツ実生苗（1年生）のT/R率と比べることで行った。挿し付け時期が根量に及ぼす影響については、挿し付け日と生育終了期の根の平均乾燥重量との相関関係から評価した。また、根の平均乾燥重量と床替率との相関関係も求めた。なお、床替率データが得られなかった2者については、相関分析から除外した。

(2) 床替後の成績調査

苗畑に床替えた後の成績を把握するため、(1)で根量の測定を行った14者を対象に、苗木の根量調査と、苗木の生存・成長調査を行った。対象は2016年に挿し付けられ2017年4月から6月に苗畑に床替えられた苗木である。2016年5月から6月に、各生産者において床替え後の苗畑に調査区を設定し、苗木50本の苗長と根元径を測定した。また、根量調査のため、調査した50本とは別に苗木10本を掘り取った。生育終了期の10月から11月には、春に調査した50本の生存確認と、苗長、根元径の測定を行った。また、根量調査のため、50本の中から10本を無作為に選び掘り取った。各調査時に掘り取った苗は、実験室に持ち帰った後、茎葉、根に切り分け、乾燥機によって80℃で3日間乾燥させた後、重量を計測しT/R率を求めた。

春の床替え時の根量が生育終了期の得苗に及ぼす影響を明らかにするため、床替え時の根の平均乾燥重量と出荷基準を満たした規格苗（苗長30cm、根元径6mm以上）の本数割合との相関関係を求めた。

結果

1. 挿し木育苗過程における評価

挿し木苗の生産者数は、実証試験を兼ねていた生産開始1～2年目（2004～2005年）までは2者であったが、本格的な事業化が図られた3年目から急増し2013年には21者に達した（表-1）。調査を実施した2017年は17者、2020年現在では18者が生産を行っている。挿し穂台木の配布数も当初は数千本であったが、徐々に増加し2013年以降は4万本前後で推移していた。こうした状況の中、台木使用率は80%を越える水準で推移しており、集計データのある2004年から2016年までの13年間の平均（±標準偏差）では92.6±6.4%であった（図-1）。また、台木1本当たりの採穂数は、13年間の平均（±標準偏差）で12.2±1.5本であり、年変動はあるものの2007年以降はほとんどの年で目標の12本（北海道水産林務部・北海道立総合研究機構林業試験場2011）を越えていた。

一方、床替率は生産開始2年目までは90%台だったものの、3年目に80%台、4～6年目には70%台、7年目には60%を下回っており、年々低下をたどった（図-2）。2018年の床替

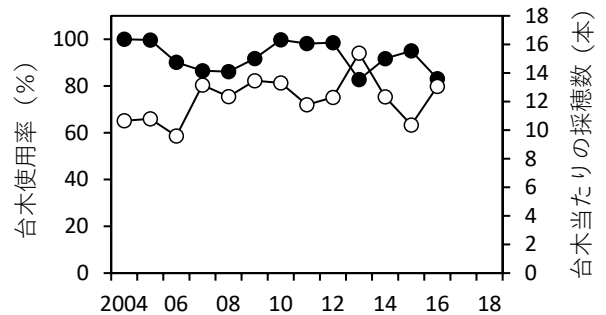


図-1 台木使用率（●）と台木当たりの採穂数（○）の推移

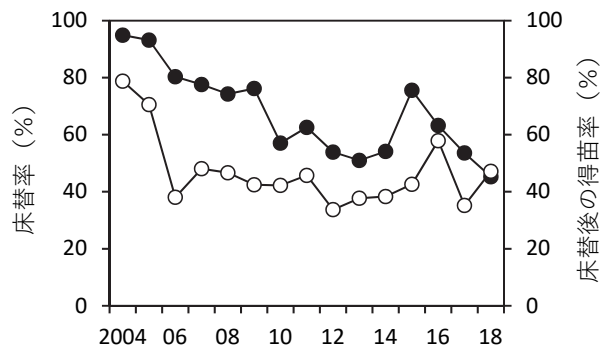


図-2 床替率（●）と苗畑への床替後の得苗率（○）の推移
横軸は台木配布年であり、その台木から採穂された苗の床替率と得苗率を示している。

率は過去最低の45.3%に達していた。また、苗畑床替え後の得苗率は、生産開始2年目までは70%台だったが、3年目に急減していた(図-2)。3年目以降の得苗率は33.7~57.9%の範囲にあり、平均(±標準偏差)は42.8±6.5%だった。

2. 生産実態調査

(1) 挿し穂台木

挿し穂台木の移植先は、2016年は苗畑が6者、ハウスが6者であり、ハウスの内1者は暖房を用いていた。2017年の台木の移植先は、苗畑が7者、ハウスが9者(内、暖房使用が1者)だった。移植時期はハウスでは2月中旬から4月下旬に行われ、苗畑では4月上旬から5月上旬に行われていた(図-3)。ハウスでは、台木は全生産者とも農業用ハウスのトンネル内に置かれ、保温のためフィルムやシートで覆って管理されていた。暖房を用いた加温育成では移植から採穂までの日数は2016年が61日、2017年が71日だったが、同時期(3月5日~3月15日)に移植後、加温せずに育成した場合は平均99.5日(最短90日、最長115日)を要しており、加温による育成期間の短縮効果は大きかった(図-3)。また、4月中旬(4月13日と4月20日)に移植しハウスで育てた場合は、移植から採穂までの日数は平均52.0日と最短だった。一方、苗畑で育てた場合は、移植から採穂までの平均日数は76.9日(最短66日、最長95日)と、最低でも2カ月以上かかっていた。

苗畑での挿し穂台木の植栽密度は、1㎡当たり16本から50本まで様々だった。台木の植栽密度と台木1本当たりの採穂数との関係は、密度が高くなるほど採穂数が減少する負の関係が認められた(図-4、相関係数 $r = -0.91, p < 0.01$)。密度が20本/㎡以下の時は、14本以上採穂できたが、32本/㎡を越えると採穂数が目標の12本を下回っていた。

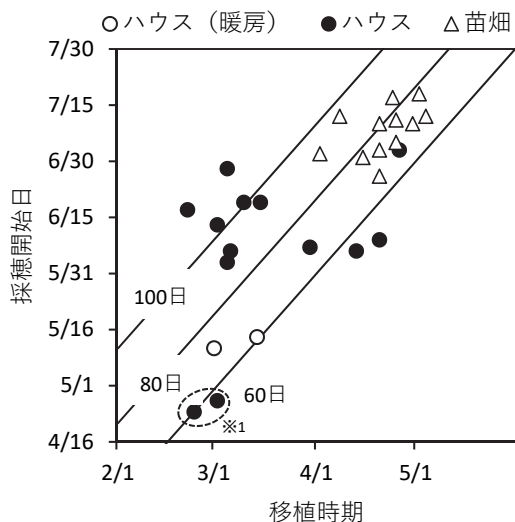


図-3 移植先別の挿し穂台木の移植時期と採穂開始日との関係

直線は移植から採穂までの育成日数を示す。
※1、採穂が短い生産者の記録(2016年と2017年)

(2) 挿し付け時期と数量

挿し付け時期は4月下旬から8月下旬まで長期間にわたっていた(図-5)。生産者ごとの挿し付け期間は、最短が3日間、最長が73日間で平均では33日間であり、複数回にわたって採穂・挿し付けを行っていた。5月中に挿し付けていた生産者は2者、6月上旬に挿し付け始めた生産者も2者だけであり、残り11者の挿し付け開始時期は6月中旬以降だった。挿し付けの数量が増えるのは6月に入ってからで、7月上旬までに挿し付け本数全体の50.1%が挿し付けられていた(図-6)。

(3) 床替え

聞き取りを行った15者のうち、挿し付け当年に床替えしているのは2者だけであった。床替え時期は8月9日と9月9日である。13者は翌年の春に床替えていたが、7者が挿し床のまま越冬しており、越冬前に挿し床から苗木を掘り取り選苗していたのは6者だった。掘り取り時期は10月12日から12月10日であり、選別後の苗は育苗箱にもどして露地もしくは倉庫で越冬させていた。

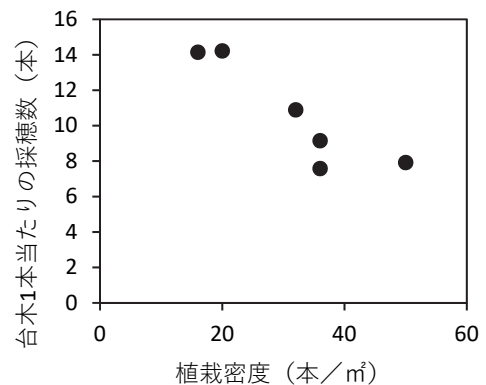


図-4 苗畑での植栽密度と台木1本当たりの採穂数の関係
挿し穂台木を苗畑でのみ育成する6者を示す。
2年生以上の挿し穂台木から挿し木している生産者は除く。

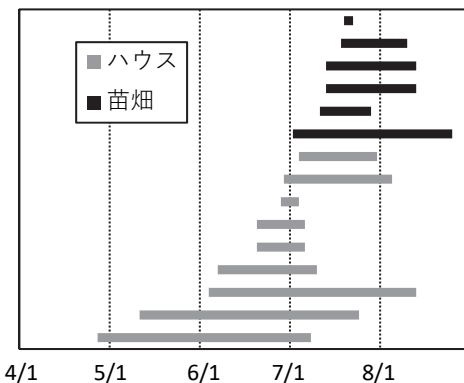


図-5 挿し穂台木の育成場所と挿し付け期間
A生産者とI生産者を除く

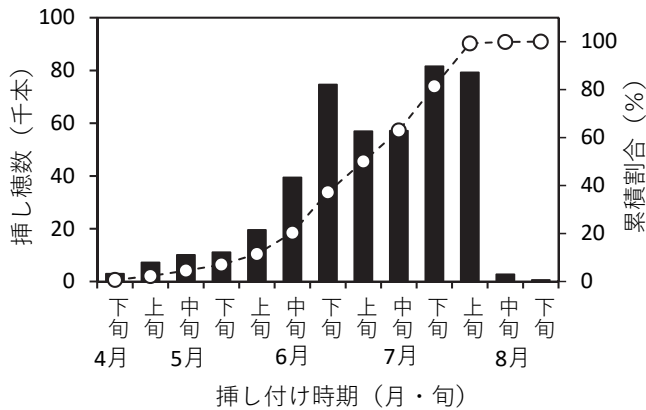


図-6 2017年の時期別の挿し穂数と累積割合
A生産者と1生産者を除く15者分を集計 (約44万本)

3. 一部生産者における成績調査

(1) 挿し床での発根・成績調査

挿し付けからの日数と発根率の関係を図-7に示す。挿し付け時期が早いほど、発根が早く始まる傾向が認められ、挿し付け56日目の発根率は、6月28日挿し付けで96.8%、7月20日挿し付けで75.0%、7月26日挿し付けで56.5%、8月10日挿し付けで37.8%であった。一方、頂芽形成率は、挿し付け

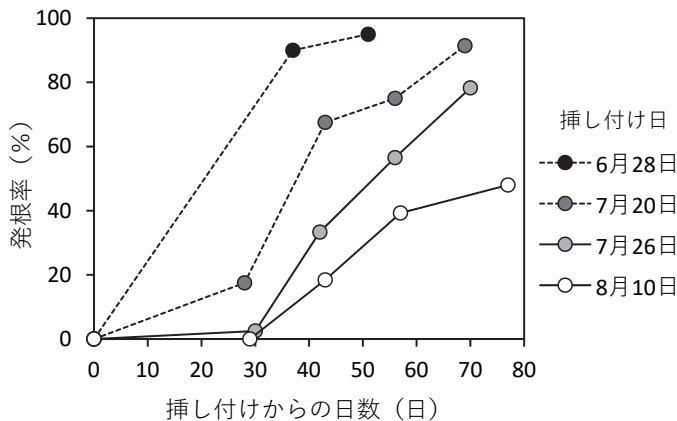


図-7 挿し付け時期の異なる穂の発根率の推移

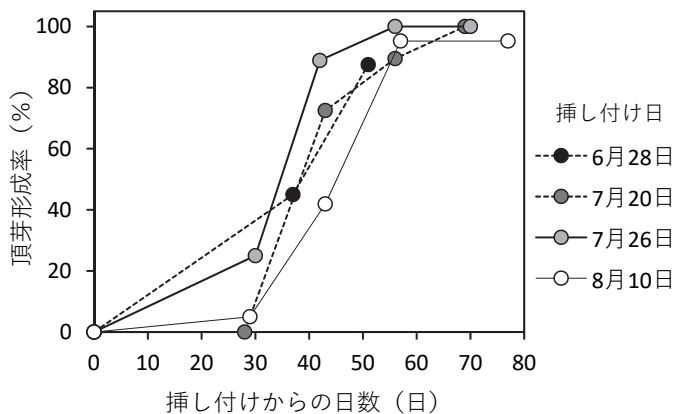


図-8 挿し付け時期の異なる穂の頂芽形成率の推移

時期に関係なく、同様の形成パターンを示し、挿し付け56日目には90%前後に達した (図-8)。

生育終了期 (10~11月) の挿し床での苗の根量 (乾燥重量) は、生産者間で大きくばらついた。一部の生産者では挿し床の管理に失敗し、発根に失敗したり根量が少なかったりしたが、全体の傾向としては、挿し付け時期が遅くなるにしたがって根量が少なくなった (図-9, 相関係数 $r = -0.69, p < 0.01$)。また、各生産者の床替率 (床替数/挿し穂数) は12.9~94.1%の範囲にあった。挿し床での苗の根量 (乾燥重量) と床替率との間には有意な正の相関関係はなかったが (図-10, $r = 0.35, p > 0.05$)、根の平均乾燥重量が0.03g以下では、床替率が30%を下回っていた。

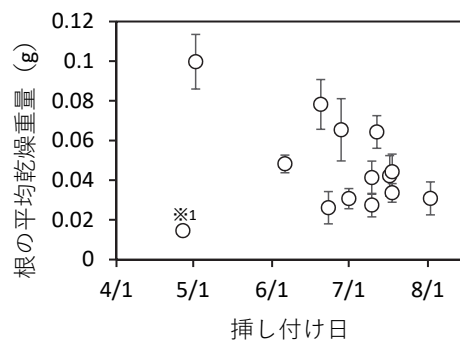


図-9 挿し付け日と生育終了期の根量との関係

※1, 挿し床の管理に失敗したため、解析から除外した。

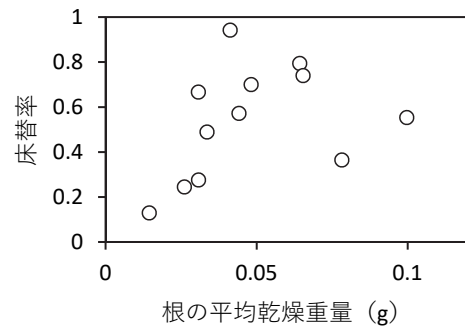


図-10 生育終了期の平均根量と床替率の関係

床替率が不明な2者は図示していない。

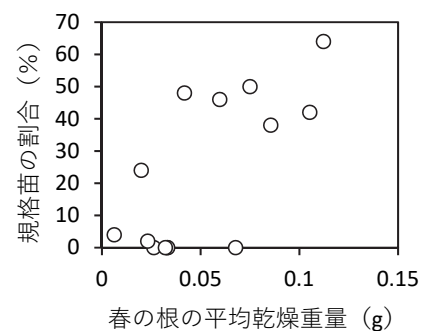


図-11 床替え時の根の平均乾燥重量と規格苗の本数割合との関係

(2) 床替後の成績調査

床替え後の苗畑で生育終了期（10～11月）に苗長30cm、根元径6mmの出荷規格を満たした苗の割合は、春の床替え時の根量（乾燥重量）が少ないと低下する傾向を示していた（図-11、相関係数 $r = 0.72, p < 0.01$ ）。また、根の平均乾燥重量が0.04g以下では、ほとんど得苗が見込めなかった（ただし、1者だけ得苗率が24%に達した）。

生育終了期の床替苗（2年生）の地下部と地上部の乾燥重量の関係は、直線で近似でき（ $R^2 = 0.96$ ）、T/R率は苗木サイズに関わらず近似直線の傾き1.317に収束した（図-12）。一方、挿し木幼苗（1年生）では両者の関係はばらつきが大きく（ $R^2 = 0.72$ ）、T/R率は1.530であり、カラマツ実生苗（1年生）のT/R率1.256に比べると、地上部に対して根量が相対的に少ない苗が多かった。

考察

生産開始以来の得苗率の推移を行政資料から分析した結果、挿し穂台木の使用率は平均92.6%、台木1本当たりの採穂数は平均12.2本であり、いずれも高い水準にあった。このことから挿し穂台木の育成管理は適切に行われているといえた。一方、挿し穂のうち発根して苗畑等に床替えられた割合（床

替率）は、年々減少し2018年には過去最低の45.3%まで低下しており、挿し床での育苗が上手くいっていないことを示していた。また、発根苗を苗畑に床替えた後の得苗率も平均42.8%と低かった。以上から、育苗2年目と3年目の各段階で、それぞれ得苗率の低下を招く原因があると考えられるため、各段階における問題点と対策を以下に整理する。

1. 得苗率低下の原因

(1) 挿し穂台木の育成と挿し付け時期

カラマツ類の緑枝ざしにおける挿し付け適期は、5月上旬から7月中旬にあるとされ、カナダ北東部ではこの期間中に複数回の採穂・挿し付けが行われている（Tousignant et al. 2007b）。また、挿し穂台木の育成は、5月上旬には挿し付けできるよう2月下旬からハウス内で開始されている。林業試験場が提案したクリーンラーチの挿し木苗生産においても、挿し穂台木の育成をハウス内では3月上旬から、苗畑では4月下旬から開始し、挿し付けを5月下旬から7月上旬の間に行うよう推奨してきた（北海道山林種苗協同組合・北海道立林業試験場2002、北海道水産林務部・北海道立総合研究機構林業試験場2011）。しかし、今回の生産実態調査の結果、7月上旬までに挿し付けた本数は全体の50.1%であり、約半数が適期を越えて挿し付けられていることがわかった。

挿し付け時期が7月中旬以降になる原因について、大きく二つのことが関係していると考えられた。一つは、挿し穂台木の育成方法である。聞き取り調査によると、複数の生産者では、ハウスで育てるよりも苗畑で育てた方が、穂の径が大きく良好な挿し穂を得ることができ、その後の成績が良くなると述べている。そのため挿し穂台木を苗畑に移植する生産者は半数ほどいた。しかし、苗畑での育成は雪融け後の4月下旬～5月上旬に始まるため、採穂できるのは7月上旬以降になっていた（図-5）。1回だけ採穂・挿し付けするのであれば、このスケジュールで問題はないが、ほとんどの生産者は、台木から芽吹いた穂を可能な限り採穂するため、挿し付け期間は30日以上にわたることも多く、結果として、7月中旬以降にも挿し付けが行われていた。ただし、挿し穂台木をハウスで育成した場合でも、7月頃から挿し付けを開始する生産者がいるなど、台木をハウスで育成する利点が生かされていないかった。

挿し付け時期が7月中旬以降になるもう一つの原因は、挿し付け作業を行う人員の問題である。クリーンラーチの挿し木苗の生産は、林業用種苗や緑化樹を育てる生産者が行っている。そのため挿し付け適期である5月から6月上旬は繁忙期にあたり、5月は山行き苗の出荷、床づくり、播種、カラマツ類の床替え、6月は出荷、トドマツ、アカエゾマツの床替えなどの作業に追われる。生産者によっては6月中旬頃から人員の余裕が生まれるが、それまでは挿し付け作業に労力を回せない状況が続く。実際、5月に挿し付けていた生産者

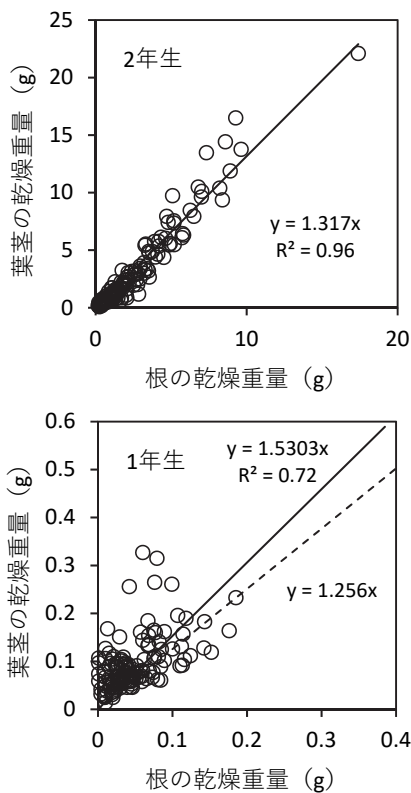


図-12 挿し木幼苗（1年生）と床替苗（2年生）の地上部と地下部の関係

1年生の図で示す点線は、1年生のカラマツ実生苗の地上部と地下部の関係（T/R率、宮崎1966）を示している。

は、ハウス内で暖房を用いた1者と採穂長が短い1者に限られ、挿し付けを6月上旬に開始した生産者も2者だけだった。また、繁忙期を避けて挿し付けていることは、台木の移植時期と採穂開始日との関係からも確認できる。例えば、4月中旬にハウスで育成開始した挿し穂台木では、移植から採穂までの日数は52日であり、6月上旬に挿し付けることができる(図-3)。したがって、3月上旬にハウスで育成開始した挿し穂台木では、少なくとも5月中には採穂可能な状態にあると考えられるが、実際に採穂されるのは移植から90日以上経過した6月上中旬であり、挿し付け時期をずらしているといえた。クリーンラーチの挿し木苗生産は、生産量の多い裸苗やコンテナ苗よりも後回しにされ、適期に挿し付けられないことで得苗率が低下し、そのことがさらに作業の優先順位の低下につながるという悪循環に陥っていると考えられた。

(2) 床替え苗の根量

床替え後の得苗率(成苗数/床替え数)は、床替え時期により違いがあり、挿し付け当年の8月上旬に床替えした場合では得苗率が66~71%であるのに対して、翌春4月下旬に床替えした場合では18~25%と大きく低下する(黒丸・来田2003)。そのため林業試験場では、当年夏に床替えるスケジュールを第一に推奨してきたが、床替えを挿し付け当年に行った生産者は15者のうち2者だけであった。生産者への聞き取りでも、多くの生産者は当年床替えすることで得苗率が上がることを理解していたが、当年8月から9月上旬に床替えを行うには、6月上中旬までに挿し付けを行う必要があるため、結果として翌春に床替える生産者が多数になっていると考えられた。

挿し付け翌春に床替えた時の得苗率は、床替え時点での根量が影響していて、根量が多いほど得苗率が増加した(図-11)。また、根量は挿し付け時期が遅いほど少なくなることから(図-9)、挿し付け時期が得苗率に影響しているといえた。一般に、カラマツ類では条件が良ければ挿し付け後8週後にはほとんどの穂が発根する(黒丸・来田2003)。今回の調査でも、6月28日に挿し付けた穂では、8週後には発根率が96.8%に達していた(図-7)。しかし、挿し付け時期が7月下旬を過ぎると、発根率の傾きが明らかに低下し、最終的な発根率も低下していた。これは9月を過ぎると気温が下がり、発根に適さない環境になることが原因と考えられた。また、発根しても生育期間が短くなるため、挿し付け時期が遅いほど根量も少なくなっていると思われる(図-9)。一方、挿し穂の頂芽形成は、挿し付け時期とは関係なく一定の時期が来たら形成しており(図-8)、穂の伸長が止まり頂芽を形成することと発根は連動していないことがわかった。

挿し木幼苗(1年生)の根量の少なさは、地上部重量との割合からも見ることができる(図-12)。一般に、地上部と地下部の重量比は樹種により一定になることが知られている(小田島1972, 佐藤1995)。今回の調査でも、床替床で1シー

ズン育成した挿し木苗(2年生)は、地上部と地下部への資源配分はバランスを保っていた。こうした資源配分が幼苗でも同じと仮定すると、挿し木幼苗(1年生)については、明らかに根の割合が少ないといえた。根量が少なくバランスが崩れた幼苗は、床替え後の活着率が低く、成長も抑制されるため、規格苗に達する割合が低くなると考えられた(図-11)。通常、生産者は発根した苗をすべて床替えするため、床替率は60%を保っていても、根量の少なさが原因で床替え後の得苗率が40%程度になっているのだろう。

2. 今後の対策

(1) 挿し穂台木の育成

現状では、挿し付けを7月上旬までに終わらせることが、成績の向上に結びつくと考えられる。そのためには、挿し穂台木の育成から見直す必要がある。挿し付けを7月以降に行う生産者の多くは、挿し穂台木を苗畑で栽培している。もし、苗畑で挿し穂台木を育成するならばマルチやトンネルを使った促成栽培により解決できる可能性がある。苗畑栽培では、4月の台木移植から採穂までの平均日数は76.9日(最短66日, 最長95日)かかり、最低でも2カ月以上かかっているが、同時期にハウスで育てた場合は52日で採穂できる(図-3)。北海道の林業用樹種の苗をマルチやトンネルで育てた事例はほとんどないが、資材費用も安価なため事業的にも実行できる可能性がある。実際、上川地域の生産者では雪融け後すぐに苗畑のパイプハウスにフィルムを張って挿し穂台木を育成する促成栽培に取り組み、採穂時期の早期化に成功している。挿し穂台木の促成栽培については、今後検討すべき事項である。

苗畑での台木の植栽密度については改善の余地があった。一部の生産者では、台木の植栽密度をカラマツ幼苗の移植と同じように1m²当たり30~50本としていたが、密度が高くなることで台木1本当たりから得られる採穂数は減少してした(図-4)。今回の調査から、採穂数が最大になる台木の育成密度は20本/m²程度であり、側枝が伸長できる十分な空間を確保することが、台木の生産性を上げることにつながると考えられた。

(2) 挿し床

苗畑での床替え後の成績低下は、根量が少ないことが影響していたが、それ以外の原因として、裸苗の状態で床替えしていることも影響していると考えられる。挿し床である育苗箱から苗を掘り取り苗畑へ移植する過程では、根の損傷が生じる。損傷を受けた苗は、床替え後の乾燥ストレスに弱く、活着や成長の低下につながる。こうした植え痛みによる問題は、セルトレイ(プラグ)を用いた挿し木により改善できる可能性がある。農業用資材には固化培土がトレイに収まったものが販売されており、中には挿し木用に挿し穴が空いたものもある。こうした資材を使うことで、選苗や移植時にかかる苗

のストレスを緩和でき、床替え後の成績が向上することが期待できる。実際、ねぎ、キャベツ、トマト、キュウリなど野菜苗のほとんどがセルトレイで栽培されており、裸苗を移植していた方法に比べて移植後の畑での活着が大きく改善している。ただ、野菜用のセルトレイは深さが45mmであり、現在挿し木で使用している育苗箱の深さ70~75mmに比べると浅く、クリーンラーチの挿し木にとって十分な深さ、容量なのか検討しなければならないが、こうした視点からの取り組みも必要になるだろう。

謝辞

本研究を実施するにあたり、北海道水産林務部林務局森林整備課保護種苗グループの齊藤智裕氏、柳谷奈緒氏、各（総合）振興局林務課職員には現地調査、試料の採取にご協力いただいた（所属は当時）。北海道山林種苗協同組合の出口隆氏、竹本諭氏には生産データの整理にご協力いただいた。厚くお礼申し上げます。本研究の一部は生物系特定産業技術研究支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）、研究課題名：カラマツ種苗の安定供給のための技術開発（H28~30）」によった。

引用文献

- 北海道山林種苗協同組合・北海道立林業試験場（2002）グイマツ雑種F₁幼苗からのさし木増殖の手引き. 14pp.
- 北海道水産林務部・北海道立総合研究機構林業試験場（2011）さし木増殖の手引き. 13pp.
- 来田和人・今博計・石塚航・黒丸亮（2019）グイマツ雑種F₁優良家系「クリーンラーチ」のコンテナ挿し木育苗方法の開発. 森林遺伝育種 8 : 8-14.
- 黒丸亮・来田和人（2003）グイマツ雑種F₁幼苗からのさし木増殖法. 北林試研報40 : 41-63.
- 宮崎榊（1966）図説・苗木育成法. 470pp. 高陽書院, 東京.
- MORGENSTERN, E.K. (1987) Methods for rooting of *Larch* cuttings and application in clonal selection. For. Chron. 63: 174-178.
- 小田島洸（1972）民営苗畑におけるカラマツ山行苗生産の慣行技術と苗木形質. 光珠内季報12 : 12-19.
- PEER, K.R. and GREENWOOD, M.S. (2001) Maturation, topophysis and other factors in relation to rooting in *Larix*. Tree Physiol. 21: 267-272.
- PELLICER, V, GUEHL, J-M, DAUDET, F-A, CAZET, M, RIVIERE, LM and MAILLARD, P (2000). Carbon and nitrogen mobilization in *Larix × eurolepis* leafy stem cuttings assessed by dual ¹³C and ¹⁵N labeling: relationships with rooting. Tree Physiol. 20: 807-814.
- 佐藤孝夫（1995）樹木の根系の成長に関する基礎的研究. 北林試研報32 : 1-54.
- TOUSIGNANT, D., LAMHAMED, M.S., COLAS, F., RIOUX, M., LEMAY,

P., and ROBERT, N. (2007a) New technological developments in cutting propagation for increased forest productivity in Quebec. Ministère des ressources naturelles et de la faune, Carrefour de la recherche forestière, Québec, Québec, Canada. 19-20 Sept. 2007, 6 p.

TOUSIGNANT, D., TREMBLAY, L., RIOUX, M., GUAY, JY., BONNEAU, A., and RIOUX, C. (2007b) Saint-Modeste Nursery. Field Trip Guide. Larix 2007: International Symposium of the IUFRO Working Group S2.02.07.

米道学・軽込勉・久本洋子・後藤晋（2018）アカマツ・アイグロマツ挿し木苗の発根指数と吸水量および植栽後の針葉発生数と生存・枯死の関係. 日録工誌43（4）：611-613.

Summary

To understand the reason for reduced productivity of cutting propagation of Clean Larch, we examined the production schedules and rooting of cuttings in 16 nurseries. For the first two years of production, the rate of production of cuttings (the number of seedlings/cuttings) was approximately 70%; however, after 2006, when the number of producers increased, the rate of production fell to 30%. Production failure occurred both in the propagation bed and during the period after transplantation to the field. Softwood cuttings were taken from late April through late August. The season when cuttings were taken affected both the percentage of rooting and the root biomass, both of which declined with time. Differences in root biomass were reflected in the survival and growth of cuttings after transplantation to the field. Thus, the reduced productivity of cutting was caused by delay of the production schedule.

Key words

Clean larch, percent rooting, softwood cutting, transplanting, vegetative propagation

形態形質と内部構造からみたトドマツ苗木の当年生葉の発達と遮光処理に対する応答

石塚 航*・菅井徹人**

Needle development and shade response of Sakhalin fir seedlings, based on morphological traits and anatomical structure of leaves

Wataru ISHIZUKA* and Tetsuto SUGAI**

要旨

急激な光条件変化に対するトドマツの馴化応答を把握するため、苗畑にて展葉が済んだタイミングで遮光処理を行い、トドマツ苗木における当年葉の形態形質と内部構造の変化を、成長期間を通して観察した。比較のために用意したアカエゾマツ、エゾマツ苗木とともに、展葉開始後から定期的に当年葉をサンプリングし、形態形質として葉面積あたりの葉重(LMA)を測定した。また、6～10月にかけて4時点のトドマツサンプルについて解剖切片を作成して葉の内部構造を画像解析した。どの樹種も6～7月上旬にLMAが増加したものの、遮光下のトドマツは光条件下のものよりも有意に値が低く、LMAの増加が抑えられていた。この傾向はアカエゾマツでも観察された。遮光下のトドマツ苗木における葉厚や葉肉細胞厚に対する柵状組織厚の割合はどの時点でも一定だった。一方、通常の光条件下におけるそれらは徐々に増加し、10月時に有意差が検出された。以上の観察より、LMAは遮光に対して速やかな応答がみられること、柵状組織厚の割合といった内部構造の変化は数ヶ月遅れて生じたことがわかった。LMAに認められた速やかな馴化応答は、内部構造ではなく葉厚による応答が担う可能性が示唆された。

キーワード：光環境変化, 馴化応答, LMA, 柵状組織, 針葉樹

はじめに

モミ属の1種、トドマツ (*Abies sachalinensis*) は北海道全域に自生し、北海道の森林における蓄積が最も多い樹種である(北海道水産林務部 2020)。現在は年間おおよそ500万本の苗木需要があるが、既存のトドマツ人工林が伐期を迎えつつあることから、今後も造林用苗木の需要増加が見込まれており、さらなる優良種苗の安定供給が求められている(北海道 2017; 北海道水産林務部 2020)。また、トドマツはトウヒ属のアカエゾマツ (*Picea glehnii*) やエゾマツ (*P. jezoensis*) とともに北海道の極相林を構成する主要種でもあり、これら3種は北海道を代表する常緑針葉樹である。これらの樹種は、その光応答特性として高い耐陰性を有することが古くより知ら

れており(高橋 1969)、この特性によって樹冠下のような光条件の優れない環境でも生育が可能である(藤村・坂上 1977; 坂上・藤村 1981)。高い耐陰性を実現するには暗い光条件下での効率的な光吸収・利用が求められるが、これは形態や個葉の内部構造、色素含有量などによる応答が担っている(彦坂 2016; 小池 2005)。

それと同時に、光条件の“急激な変化”に対する応答、すなわち馴化応答についても、トドマツや北米の林業用樹木で同じモミ属の一種 *A. amabilis* を用いて調べられている(Brooks et al. 1994; 1996; Kitao et al. 2018; 2019)。トドマツの研究からは、急激に明るくなる場合には、樹冠下で生育するトドマツの馴化応答が間に合わずストレスになること(Kitao et al. 2018)、なかでも冬期の林冠木伐採は、稚樹の翌年の成長に負

* 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

** 北海道大学大学院農学研究院植物栄養学研究室

Plant nutrition laboratory, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, 060-8589

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

の影響を及ぼすことが示された (Kitao et al. 2019)。一方、急激に明るくなる変化に速やかに応答できる樹種も知られる。そのような樹種は、攪乱や倒木によるギャップ形成に依存した生活史戦略をとっており (Oguchi et al. 2018)、速やかな応答は、成熟後の陰葉が光条件変化に対して高い馴化応答を示すことに起因する (Oguchi et al. 2003)。

また、光条件の急激な変化として、上記とは逆に、急に暗くなる状況も考えられる。たとえば自己被陰や、人工造林後の下層植生による被陰、天然更新下での近隣の植生・競合他種による被陰である (Brooks et al. 1994; 1996)。*A. amabilis* を用いた研究からは、被陰に対して個葉レベルで速やかな応答ができることが報告される (Brooks et al. 1996)。トドマツや耐陰性の高い他樹種も、急激に暗くなる光条件変化に対して高い馴化応答を示す可能性があり、たとえば、被陰に対する成長面での応答に関する知見 (福地ら 1982; 水井ら 1979)、被陰に対する個葉形質の応答に関する知見 (野口ら 2003; 高橋 1969) が蓄積されている。しかしながら、先行研究からは、個葉レベルで変化に追従するような速やかな馴化応答がみられるのかはわからない。その理解のためには、実際に周囲植生の出現や展葉に伴う被陰を模した遮光実験によって検証することが有効である。その際、主たる応答が期待できるのは成熟過程にある当年葉であることから (Kitao et al. 2018; Oguchi et al. 2003)、当年葉の展開とその後の発達の過程を経時的な追跡によって明らかにしつつ、その中で急激に暗くなる光条件変化がどのような個葉形質に、どのような時間スケールで影響を及ぼすか知る必要がある。

個葉形質として代表的な機能パラメータに挙げられるのは「葉面積あたり葉重」(以降、LMA; Leaf Mass per Area) である (彦坂 2016)。この形質は個葉の発達に伴って変化し、明るい環境で展開した葉ほど高く、暗い環境下ほど低くなることが知られるため、光条件変化に対しての馴化応答を担うと考えられる主要な候補形質である。ただし、LMAにおける応答がみられたとしても、このパラメータのみからでは、厚みといった葉組織そのものの形態形質を変化させたのか、葉組織内における内部構造、たとえば葉肉細胞内において細胞間隙がない柵状組織と細胞間隙が多い海綿状組織の比率を変化させたのかなど、具体的な応答メカニズムに迫ることはできないため、葉重と密接に関わる葉内部構造の把握も必須である。これら個葉の形態形質、内部構造の応答把握を通して、速やかな馴化応答についての基礎的知見を得ることは、今後の造林用苗木の管理、造林後の保育、もしくは天然更新施業のそれぞれを考える上で有益な知見となる。

そこで本研究では、トドマツ苗木における当年葉の形態形質と内部構造について、成長期間を通して観察し、遮光処理によって急激に暗くさせた際の応答を調べた。ここから、トドマツ当年葉は、光条件変化に対して形態形質の変化、もしくは内部構造の変化によって速やかに応答できるのかを明ら

かにした。また、調査個体数に限りはあるが、遮光実験に供したアカエゾマツ、エゾマツの苗木についても当年葉の形態形質の1成長期間を通じた変化や遮光応答を測定し、比較したので報告する。

材料と方法

1. 試験デザイン

試験は北海道美瑛市にある北海道立総合研究機構林業試験場(以降、林業試)の苗畑において、2019年に実施した。トドマツについては、同じ苗畑で野外の通常光条件下で生育させていた4年生苗(2019年の成長期には5年生となる)から選定した。系統別で試験することとし、新冠採種園の2014年産種子に由来する母樹別苗木群のうち、トドマツ精英樹の美深1号、函館4号、池田5号、厚岸115号の4系統をそれぞれ母樹とする苗木を2本ずつ選んだ。2019年4月18日に床替えのために掘り取った際、対象個体を雪室(暗室)に仮置きした。アカエゾマツ、エゾマツについては、同様に苗畑で生育させた8~10年生苗から対象を選定し、本遮光処理試験の比較として用いた。これら2樹種は東京大学北海道演習林が収集した種子に由来し、林業試の苗畑へ複数年にかけて播きつけたもので、複数回の床替えを経る中で健康な苗木のみを混合して育苗していたため、正確な苗齢は不明だった。各樹種で健康な苗木を2本ずつ選び、5月13日に雪室(暗室)に仮置きした。

5月17日に、耕うんした畝に約0.5 m × 3 mの区画を2つ設定し、それぞれの区画へトドマツ4本、アカエゾマツ1本、エゾマツ1本ずつを植えた。エゾマツについては、植えつけの時点で冬芽の芽鱗がほころび始めて開葉段階へと入っていた。苗木は通常の苗畑での育苗方法にのっとって生育させた。灌水は行わず、植えつけ後に一度のみ、個体あたり約8 gのオスモコートエグザクト(N16-P9-K12)スタンダードを元肥として与えた。

設定した2区画のうち1つを「遮光群」、もう1つを「通常条件群」として設定した。当年葉の展葉が済んだタイミングを見計らって、遮光群については2重にした遮光ネット(10%透過率の寒冷紗)で覆い、遮光処理を施した(図-1)。遮光開始日は6月20日であった。通常条件群は、対照処理にあたり、通常の苗畑における光条件下で生育させるため遮光等の光条件の変化を伴う処理をしなかった。試験は降雪直前の11月上旬まで継続した。7月から10月にかけて30分ごとに気温と照度をデジタルロガー(HOBO Pendant Temperature/Light, Onset Computer Corporation, アメリカ)を用いて測定した。月の初日から末日までのデータが揃う8~9月について集計すると、通常条件群の日平均気温が21.2°C、日中(7時~17時)平均照度が35,119 Luxで、遮光群のそれらは19.5°C、324 Luxであった。すなわち、本試験の遮光群の個体は99%遮光されたことになる。

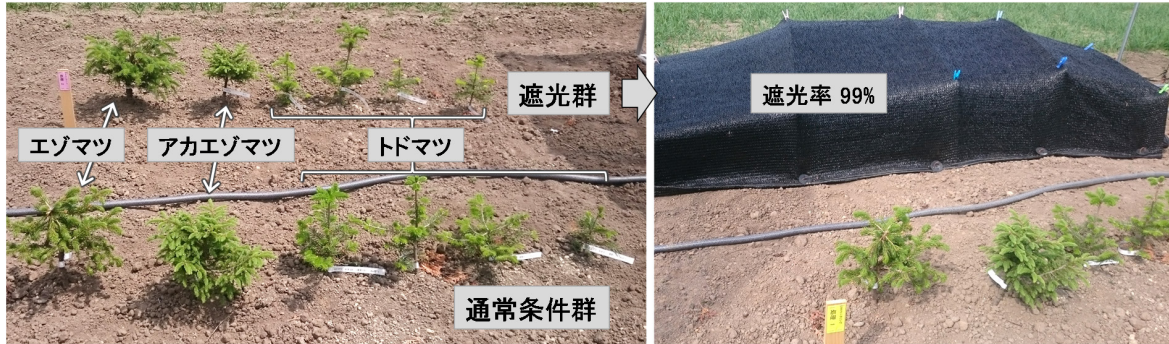


図-1 通常条件群と遮光群の様子
 写真はともに2019年6月20日に撮影し、左写真は遮光処理を実施する直前の苗木の様子。

2. 葉形態の測定

当年葉の葉形態について、成長期を通じた推移と遮光処理の影響を把握するため、定期的な観察、ならびに葉面積と葉重の測定を実施した。測定日は2019年5月22日、5月30日、6月7日、6月14日、6月20日（遮光処理の直後に実施）、7月7日、7月18日、8月1日、8月21日、9月3日、9月17日、10月2日、11月6日のべ13回だった。各測定にあたっては、全個体について側枝を対象として当年シュート（枝）を1枝剪定した。安定して平均的な葉形態形質値が得られるように、頂端部を除いた枝側面、また、なるべく枝中央付近より当年葉を摘葉して供試材料とした(図-2)。5月中のサンプリングのみ未展葉個体があったため、これらは欠損として扱った。

なお、同一個体での経時的なモニタリングを行っているものの、毎回のサンプリングにおいて1枝を選んで剪定する手法のため、個体内におけるシュート状態の違いを含んだ測定であることに留意されたい。

葉形態の測定では、サンプリングと同一日のうちに当年葉の葉面積 (LA; Leaf Area) を測定した。図-2にあるように、シュートより十分量の葉を摘葉し、針葉同士が重ならないように並べたのちにスキャナを用いてデジタル画像を取得した。展葉段階にある葉、すなわち6月14日までのサンプリングに関しては、柔らかく微細な展葉したての針葉を扱うのに適した小型デジタルスキャナ (MSC10, KING JIM, 日本) を使い、380dpi設定でデジタル画像化した (取得した針葉数は最

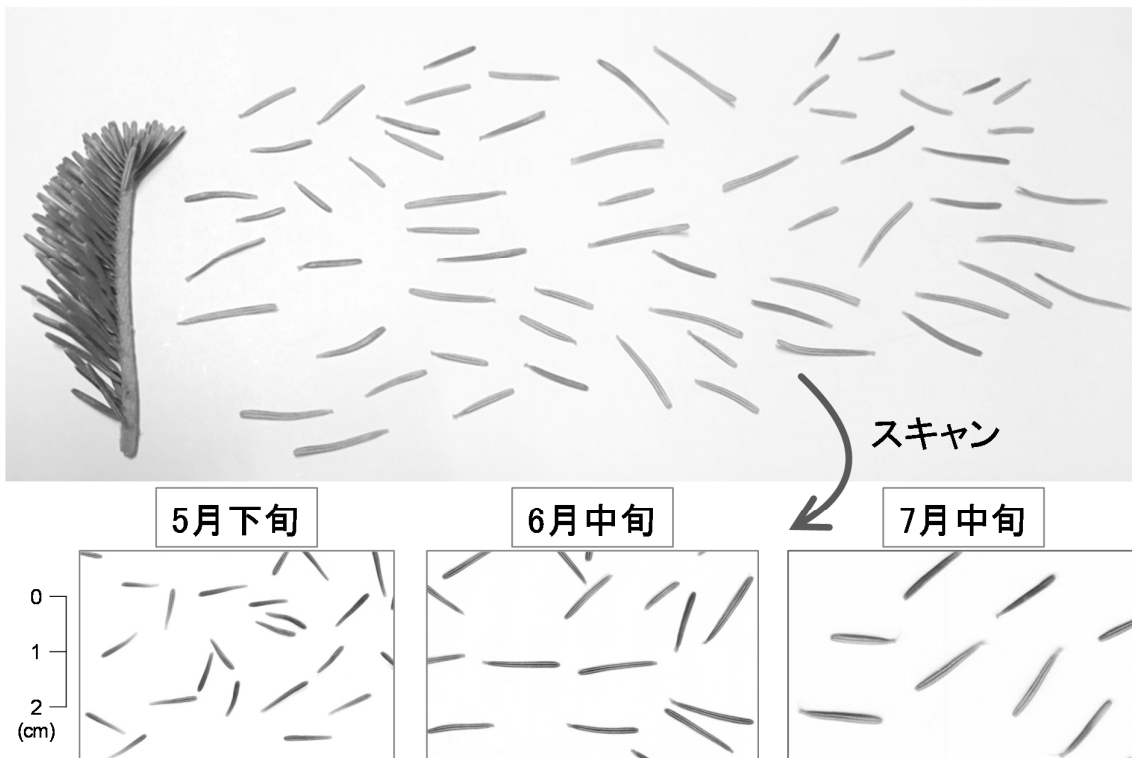


図-2 当年シュートのサンプリングとスキャンした針葉の様子
 トドマツの例で、上段の写真は2019年6月7日のサンプリング時に撮影。通常条件群の1個体について時期別にスキャンした葉画像の一部を下段に並べて示す。画像スケールは共通し、左に示すとおり。

小23枚～最大100枚、平均50枚)。6月20日以降のサンプリングに関しては、針葉が大きく厚く発達してきたことから小型デジタルスキャナで扱いにくくなり、卓上型デジタルスキャナ(CanoScan LiDE 90, CANON, 日本)を用いることとし、300dpi設定でデジタル画像化した(取得した針葉数は最小20枚～最大93枚、平均42枚)。なお、9月17日のサンプリングに関しては、調査の都合上、小型デジタルスキャナを用いて、卓上型デジタルスキャナの場合と同等の針葉数を画像化することとした(最小21枚～最大57枚、平均41枚)。得られたデジタル画像は、葉の重なりがないことを確認したのち、葉面積測定ソフトLIA32(<http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/>)を用いてサンプリング回毎・個体毎の葉数と総葉面積(mm²)を算出した。これらより、平均個葉面積(mm²)を求めLAの値とした。

画像化して葉面積を測定した葉は、その後通風乾燥機(乾燥器GT-80, アルプ, 日本)により80℃下に最低3日間据置して乾燥させたのちに微量型電子天秤(CPA224S, sartorius, ドイツ)を用いて乾燥重量(0.1mg単位で測定)を測定した。総葉面積と乾燥重量から葉面積あたり葉重(LMA: Leaf Mass per Area, g m⁻²)を算出した。本指標は、値が大きいほど葉断面における細胞数が多いことを表し、一般的に、葉の展開とその後の葉の発達に沿って徐々に値が大きくなる。LMAが高くなった際の解釈は1つではなく、厚みのある葉が形成された場合、もしくは、厚さは変わらず細胞が充填して中身の詰まった葉が発達した場合が想定される。そこで、成長期を通じたLMAのモニタリングに加えて、以下のように葉内部構造についても観察し、LMA応答に関連する要因を探った。

3. 葉内部構造の画像解析

トドマツのみを対象として、同一個体から葉をサンプリングするため、あらかじめ遮光群と通常条件群の2区画それぞれで3個体を観察対象として選んだ。サンプリングしたシュートのうち、形態測定後に残っている葉の中から、枝中央付

近の状態の良い葉を約4枚抽出し、当年葉の内部構造を観察・解析した。本調査は時系列に沿って、6月20日(植栽35日後)、7月18日(植栽63日後)、8月21日(植栽97日後)、10月2日(植栽139日後)の合計4回実施することとした。初回(6月20日)は展葉が済んだタイミングであり、遮光処理を開始した直後である。葉はサンプリング直後に30%のエタノールが入ったチューブに入れ、解剖切片を作成するまで-80℃で冷凍保存した。観察にあたっては、まず、葉の試料から滑走式凍結マイクローム(ESM-350, ERMA, 日本)を用いて10μm厚の切片を切削し、無染色のまま光学顕微鏡(WR851-1, MAXLAPTEK, 中国)で観察し、デジタルデバイス(iPhone 8, Apple, アメリカ)で撮影した。解剖切片は針葉の葉身の中央付近で作成することとし、観察に適した切片が得られるまで切削を繰り返した。

作成した切片画像から画像解析ソフト(ImageJ, NIH, アメリカ)を用いて葉断面における内部構造の測定を行った。測定対象としたのは、図-3に示す葉断面の中央部分、維管束をまたぐように葉の表面・裏面と直行する方向(図-3点線)の構造である。測定部分において、葉表面の表皮組織厚(TE: thickness of epidermis tissue layer)、葉表面の表皮組織末端から維管束までの柵状組織厚(TP; thickness of palisade tissue layer)、葉の表裏の表皮組織を除いた葉肉細胞厚(TM; thickness of mesophyll cell layer)、全体の針葉厚(TN; thickness of needle leaf layer)の4つの構造を特定し、それぞれの両端を結んだピクセル距離を求めた。これらをもとに、全体の葉厚に対する占有割合や、葉肉細胞厚に対する柵状組織厚の占有割合について、以下のとおりに定義して算出した:

$$\text{Mesophyll cell (\%)} = \text{TM} \div \text{TN} \times 100,$$

$$\text{Palisade tissue (\%)} = \text{TP} \div \text{TN} \times 100,$$

$$\text{Epidermis tissue (\%)} = \text{TE} \div \text{TN} \times 100,$$

$$\text{Palisade/Mesophyll (\%)} = \text{TP} \div \text{TM} \times 100.$$

なお、技術的課題ゆえに、ピクセル距離は実際の長さへ変換できなかった。

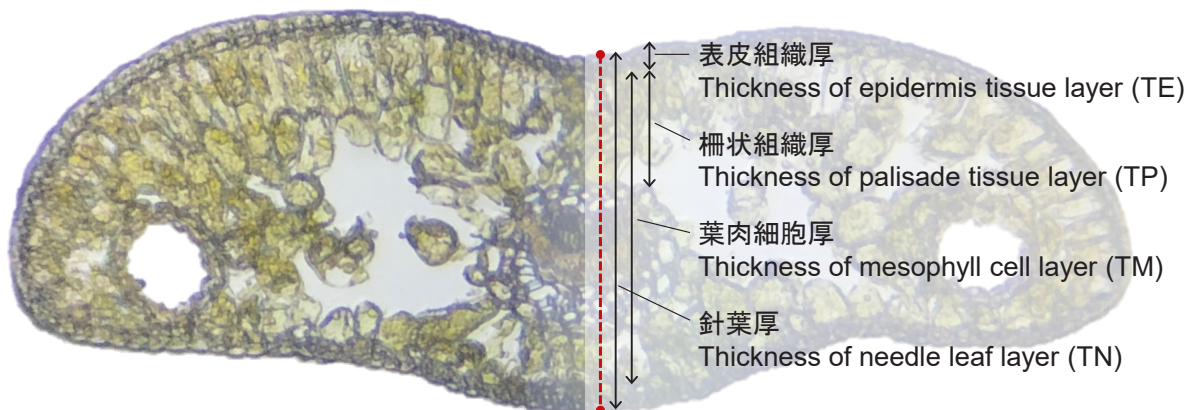


図-3 トドマツ当年葉の切片画像と測定対象とした各構造

葉断面の中央部分(点線箇所)において全構造を計測し、2点間距離(ピクセル数)を厚さの相対値として扱った。

4. 処理差の解析

各処理で個体反復があるトドマツのみを対象とし、統計解析によって遮光処理の効果の有無を解析した。解析はR 4.0.0 (R core team 2019) を用い、処理の違い (遮光群と通常条件群) を固定効果とした一元配置分散分析 (ANOVA) による。また、解析対象とした形質は、葉形態についてはLMAとLA、葉内部構造については全体の葉厚に対する占有割合 (Mesophyll cell, Palisade tissue, Epidermis tissue) と葉肉細胞厚に対する柵状組織厚の割合 (Palisade/Mesophyll) とした。本研究では同一個体の経時的なサンプリングを実施しているが、全形質がデータセットとして揃う、6月20日 (植栽35日後)、7月18日 (植栽63日後)、8月21日 (植栽97日後)、10月2日 (植栽139日後) の4時点における形質値を解析対象にした。なお、それぞれの測定はシュートをサンプリングする破壊的調査であり、同一個体であっても測定枝が異なり、時系列に沿って疑似反復のデータとなっていると判断されたことから、4時点のデータを包括せず、それぞれの時点において独立して分散分析を実施することとした。

結果

1. 形態形質の発達と処理差

3樹種における成長期を通した当年葉のLMAの時系列変

化を図-4に示す。エゾマツについては遮光群の個体において9月3日時点で枯死が観察されたため、以降の測定はできなかった (図-4C)。その他の個体については、遮光群と通常条件群とによらず、成長期間を通してすべて健全だった。

通常条件群におけるトドマツ当年葉のLMAは、展葉直後には 35 g m^{-2} 前後で横ばいだったが、展葉が済んで以降に大きな変化が認められ、7月7日時点では $89.9 \pm 8.0 \text{ g m}^{-2}$ にまで増加していた。その後も成長期を通して微増し続ける発達パターンを認めることができ (図-4A)、11月6日時点における値は $127.7 \pm 10.7 \text{ g m}^{-2}$ だった。一方、遮光群におけるトドマツ当年葉のLMAは、遮光処理を開始して以降の変化が明瞭ではなく、7月7日と11月6日時点の値はそれぞれ $56.4 \pm 4.4 \text{ g m}^{-2}$ 、 $66.8 \pm 5.6 \text{ g m}^{-2}$ だった。通常条件群と比較すると、それぞれ0.6倍、0.5倍だった。

分散分析の結果、LMAについて4時点ですべて有意な処理効果 ($p < 0.05$) が認められた (表-1)。遮光処理開始直後である6月20日時点のLMAは通常条件群、遮光群がそれぞれ $43.2 \pm 1.3 \text{ g m}^{-2}$ 、 $61.5 \pm 1.7 \text{ g m}^{-2}$ で遮光群のほうが高い値だった。しかし、それ以降では群間の順位が逆転し、3時点のすべてで通常条件群 (平均 $95.0 \sim 116.2 \text{ g m}^{-2}$) のほうが遮光群 (平均 $56.1 \sim 66.0 \text{ g m}^{-2}$) よりも高いLMAを示した。

アカエゾマツの当年葉におけるLMAでは、トドマツと類似

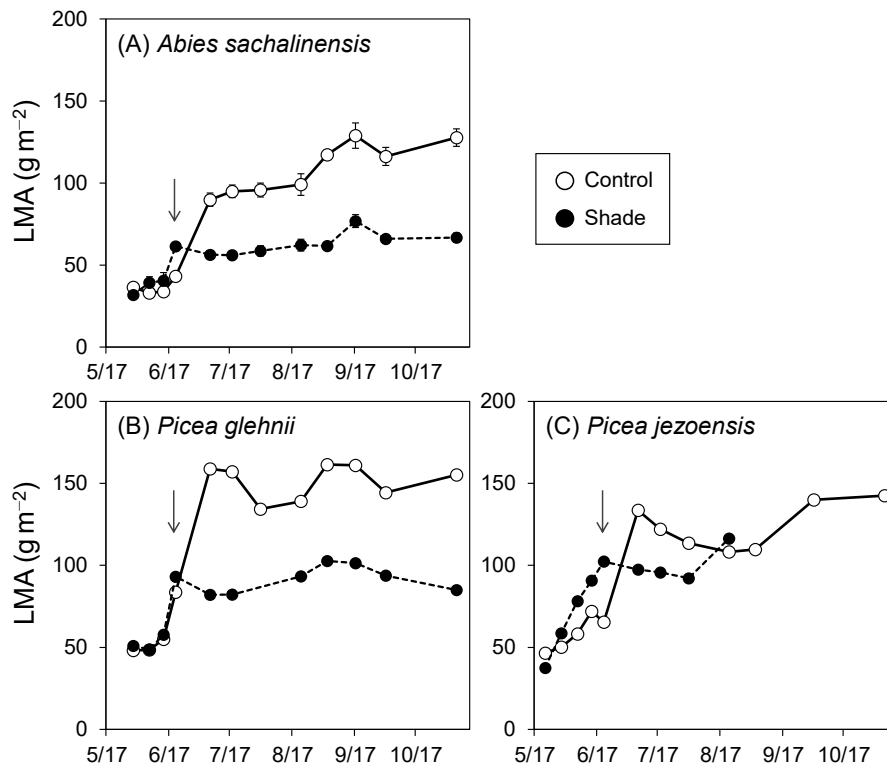


図-4 異なる光条件におけるLMAの季節推移

開葉後から成長期間を通した、トドマツ (A: *A. sachalinensis*)、アカエゾマツ (B: *P. glehnii*)、エゾマツ (C: *P. jezoensis*) における葉面積あたり葉重 (LMA) の推移を示す。白丸・実線は通常条件群、黒丸・破線は遮光群の値で、反復測定のあるトドマツについてはエラーバーで標準誤差を示す。横軸は日付で、起点を植栽日とした。遮光を開始した日を矢印にて示す。

表-1 トドマツの当年葉形態に関するANOVA

Date	LMA (g m^{-2})				LA (mm^2)			
	df	MS	F-value	p-value	df	MS	F-value	p-value
6/20	1	670	222.4	< 0.0001	1	0.095	0.007	0.935
7/18	1	3030	63.41	< 0.0001	1	0.006	0.000	0.989
8/21	1	2731	18.08	0.005	1	0.000	0.000	0.998
10/2	1	5045	56.60	0.0003	1	0.822	0.070	0.801

日付は2019年。LMAは葉面積あたり葉重を、LAは個葉の葉面積を解析に用いた結果であることを示し、dfは自由度(degree of freedom)を、MSは平方平均(Mean Square value)を示す。

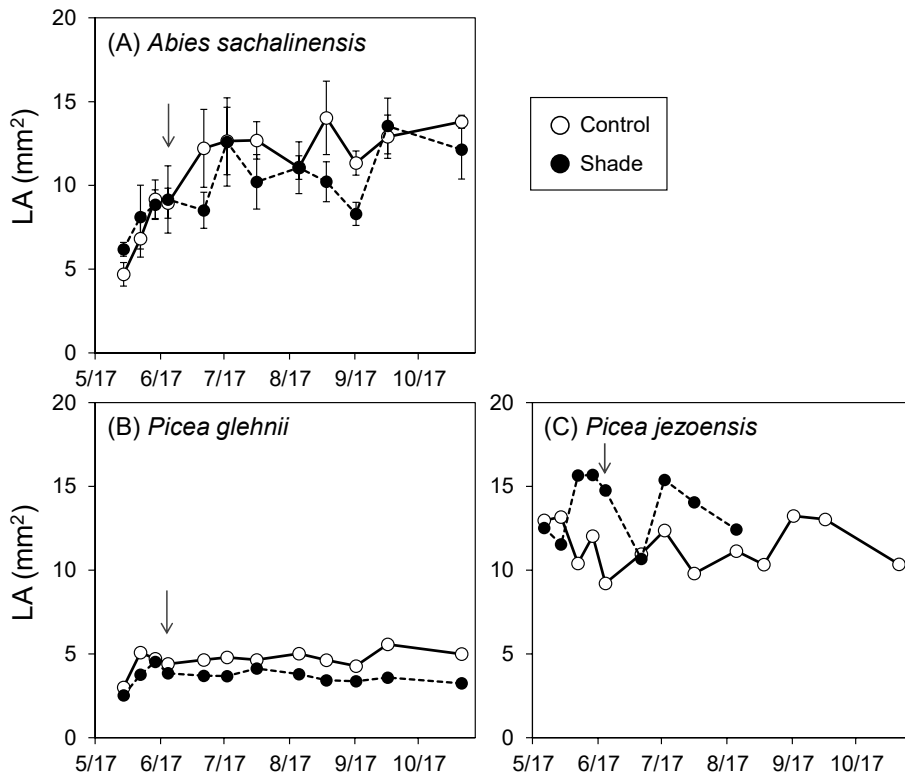


図-5 異なる光条件における個葉面積の季節推移

開葉後から成長期間を通した、トドマツ (A)、アカエゾマツ (B)、エゾマツ (C) における個葉の葉面積の推移を示す。白丸・実線は通常条件群、黒丸・破線は遮光群の値で、反復測定のあるトドマツについてはエラーバーで標準誤差を示す。横軸は日付で、起点を植栽日とした。遮光を開始した日を矢印にて示す。

した経時変化を示した(図-4B)。上述したトドマツと推移パターンの共通性が認められ、展葉の完了後、6月中旬～7月上旬にかけて顕著なLMAの増加が認められること、遮光された個体についてはLMA増加が頭打ちとなることがわかった。一方、7月7日以降のアカエゾマツのLMAは、通常条件群が134.3～161.5 g m^{-2} 、遮光群が82.1～102.7 g m^{-2} で、トドマツの通常条件群でみられたような7～11月期におけるLMAの微増は不明瞭だった。エゾマツについては、本種の展葉が早かったこともあり、通常条件群の個体で6月初旬～7月上旬にかけてLMAの増加が認められた(図-4C)。7月7日以降のエゾマツのLMAは、通常条件群が108.3～142.5 g m^{-2} 、遮光群が92.2～116.4 g m^{-2} で、遮光した個体のLMAが若干低い傾向があるものの処理条件間で類似した。ただし、上述のとおり、遮光群の個体は成長期間途中で枯死した。なお、ア

カエゾマツ遮光個体の8月1日サンプルと、エゾマツ9月17日サンプルについては、葉の乾燥重量が大きかったために、算出されたLMAはそれぞれ146.8 g m^{-2} と239.2 g m^{-2} と外れ値となった。これらのサンプルについては、サンプリングシュートの状態に依存した異常値とみなし、欠損扱いとした。

成長期を通した当年葉のLAの時系列変化を図-5に示す。トドマツについては、7月7日時点でほとんどLAの増加は頭打ちとなる推移パターンであった(図-5A)。通常条件群のLAは、7月7日時点で $12.2 \pm 4.7 \text{ mm}^2$ だったのに対して、6月14日時点ではその75%にあたる $9.2 \pm 2.3 \text{ mm}^2$ となっており、植えつけから約30日で葉面積の約75%が形成を済ませていたことを示した。LAについて分散分析を行った結果、4時点のいずれにおいても、処理の効果は有意ではなかった(表-1)。すなわち、遮光処理をしたことでLAに変化が認めら

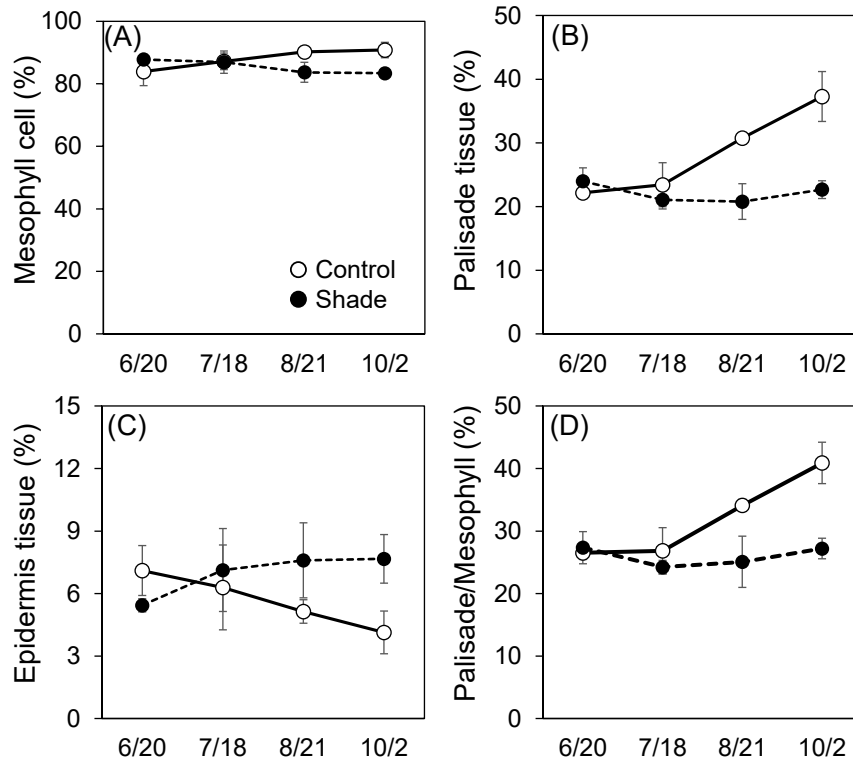


図-6 異なる光条件における当年葉内部構造の季節推移

トドマツ当年葉を対象として、針葉厚に対する葉肉細胞厚 (A)、柵状組織厚 (B)、表皮組織厚 (C) それぞれの割合と、葉肉細胞厚に対する柵状組織厚の割合 (D) を示す。白丸・実線は通常条件群、黒丸・破線は遮光群の値で、エラーバーは標準誤差。横軸は日付で測定日の順に並べた。6/20が遮光開始直後の値。

れたわけではなかった。

本試験では、個葉サイズの小さいアカエゾマツ、ならびに開葉が早かったエゾマツのLAについては、時系列推移が不明瞭であった (図-5 B, C)。アカエゾマツについては、遮光処理後一貫して、通常の光条件下よりも遮光下でLAが小さい傾向が観察された。

2. 内部構造の発達と処理差

トドマツ当年葉において、通常条件群のMesophyll cell (葉肉細胞厚の割合) は、時系列に沿った増加傾向があり、最終的には平均90%に至っていた (図-6 A)。一方、遮光群のそれは減少傾向を示し、最終的には平均83%に低下していた。分散分析の結果、4時点のうち最後 (10月2日) のサンプルにおいて有意な処理間の違いが検出された (表-2, $p < 0.05$)。

通常条件群のPalisade tissue (柵状組織厚の割合) も時系列に沿った増加傾向を示し、最終的には平均35%に至っていた (図-6 B)。一方、遮光群のそれは、約20%強の割合のまま推移し、通常処理群と明瞭に異なった。分散分析の結果、有意な処理の効果が後半の2時点において検出された (表-2, $p < 0.05$)。

Epidermis tissue (表皮組織厚の割合) については、Mesophyll cellにおいて認められた傾向とは逆転した傾向があり、通常条件群においてのみ時系列に沿って減少するパターンがあった (図-6 C)。いずれの処理・時点においても平均10%以下で推移したが、ばらつきが相対的に大きかったこともあり、有意な処理の効果は検出されなかった (表-3)。

Palisade/Mesophyll (葉肉細胞厚に対する柵状組織厚の割合) における応答は、Mesophyll cellやPalisade tissueにおいて

表-2 トドマツの当年葉内部構造 (葉肉細胞・柵状組織) に関するANOVA

Date	Mesophyll cell				Palisade tissue			
	df	MS	F-value	p-value	df	MS	F-value	p-value
6/20	1	22.40	0.73	0.44	1	5.00	0.72	0.44
7/18	1	0.10	0.00	0.96	1	8.33	0.39	0.56
8/21	1	63.30	4.03	0.12	1	149.23	11.83	0.03
10/2	1	83.08	7.43	0.05	1	320.6	12.37	0.03

日付は2019年。Mesophyll cellは針葉厚に対する葉肉細胞厚の割合を、Palisade tissueは針葉厚に対する柵状組織厚の割合を解析に用いた結果であることを示す。表中の記載は表-1に準ずる。

表-3 トドマツの当年葉内部構造（表皮細胞・柵状組織／葉肉細胞）に関するANOVA

Date	Epidermis tissue				Palisade/Mesophyll			
	df	MS	F-value	p-value	df	MS	F-value	p-value
6/20	1	4.15	1.81	0.25	1	1.04	0.09	0.78
7/18	1	1.04	0.09	0.78	1	10.31	0.47	0.53
8/21	1	9.05	1.70	0.26	1	122.68	4.64	0.10
10/2	1	18.69	5.18	0.09	1	281.1	13.71	0.02

日付は2019年。Epidermis tissueは針葉厚に対する表皮組織厚の割合を、Palisade/Mesophyllは葉肉細胞厚に対する柵状組織厚の割合を解析に用いた結果であることを示す。表中の記載は表-1に準ずる。

認められた傾向と一貫していた。すなわち、通常条件群においてのみ時系列に沿った顕著な増加が認められ（図-6D）、遮光群のみが平均25%前後の値で推移した。有意な処理の効果は、サンプリングの最終時点においてのみ認められた（表-3, $p < 0.05$ ）。

考察

トドマツでは異なる光強度に対する葉の形態形質、内部構造の応答が、野外に生育する実生・稚樹を中心に報告されるが（Kitao et al. 2018；野口ら 2003；高橋 1969）、光条件変化に対するそれらの馴化応答について、当年葉の発達に伴った形態形質や内部構造の変化とともに把握する試みはなかった。個体数は限られるものの、本報告は急激に暗くなる光条件変化に対する速やかな当年葉の馴化応答についての基礎的知見となる。

トドマツ当年葉の1成長期間を通じた観察より、遮光処理によるLMA増加の顕著な抑制（図-4；表-1）、ならびに、柵状組織の発達抑制（図-6；表-2, 3）が明らかになった。一方、LAにおいては処理に関連した差異は観察されず、光条件変化に対して当年の個葉サイズでは応答しえないこともわかった（図-5；表-1）。これは、展葉が済んだタイミングで遮光処理を実施したため、遮光開始までに個葉サイズが規定されていたものと考えられた。トドマツは固定成長型の樹種に分類されており、前年の夏期の光条件で葉の枚数が規定される特性を有する（Kimura et al. 1998）。シュート形態が決まっていることから、葉サイズといった形態的特性は展葉が済んでから変化させることが困難で、柔軟な応答ができないことを示唆する。

LMAの経時的測定より、通常の全天の光条件下に生育するトドマツは、成長期を通して個葉あたりの重量を大きくしていく推移パターンを認めることができた（図-4A）。それに対して、急激に暗くなることで、経時的な推移パターンが変わり重量の増加が止まる応答がもたらされていた。重量変動は葉厚の変化と内部構造の変化の2通りに解釈される。本研究では、葉の内部構造において、通常の光条件下の個体は成長期を通して徐々に柵状組織の割合を増加させる推移パターンがあることを明らかにすると同時に、暗くなる方向への光条件変化によって柵状組織の相対的な発達が止まるという応

答があることも明らかにした（図-6B, D）。柵状組織の発達は葉組織内における細胞間隙の減少、すなわち細胞の充填につながるため、重量の増加と深く関わる。しかしながら、LMAについては遮光後すぐの段階で通常条件群と遮光群間で違いが生じていたものの、柵状組織の発達については成長期終盤になって2つの群間の違いが現れており、重量の増加と柵状組織の発達それぞれに応答が認められるタイミングに時間的な相違があったことは特筆すべきである。このことはすなわち、重量変動の馴化応答は内部構造の変化だけでは説明できないことを意味する。本研究では技術的課題ゆえ厚さの値が得られなかったために示唆にとどまるものの、速やかな重量変動は、おそらく針葉全体の厚みの変化、ないし葉厚の発達制御が寄与したものと考えられた。一方で、通常は季節を通じたLMA増加がみられる中で、遮光下の個体のLMAが低く維持されていた点に関しては、柵状組織の発達抑制によって矛盾なく説明できると考えられる。

なお、柵状組織の相対的な発達は、透過する光の効率的な獲得や葉緑体ごとのCO₂濃度の勾配を緩衝する効果があり、最大光合成速度の増加に寄与すると一般に考えられている（寺島 2013）。光条件が優れない場合には光合成速度をおさえて光補償点を小さくする必要があるので、光条件変化に伴い、柵状組織といった内部構造が変化することは順応的な応答といえる。ただし、常緑葉では展葉後の葉緑体の充填が遅いことが知られていて（Miyazawa et al. 1998）、葉緑体の充填と葉組織の内部構造の発達は連動している可能性も指摘されることから（Oguchi et al. 2003）、内部構造の変化は光条件の変化に対する速やかな応答には不向きな機構かもしれない。トドマツは、1成長期内の数ヶ月といった時間スケールで光条件の変化に応答し、成長期後半や翌年において効率的な光合成応答を実現している可能性がある。今後の研究では、本研究で示された内部構造変化と光合成能といった生理的特性の関連性についても評価する必要がある。

また、個葉形態の構造特性は種間差が大きく、その制御タイミングも種によって異なることが指摘される（Oguchi et al. 2018）。前年のうちに内部構造が規定される樹種の場合、もしも良好な光条件下に生育するならば、翌年も展葉直後から効率的に資源獲得ができるような制御がはたらいて有利なことが期待されるが、突発的な被陰といった光条件変化へは順応

できず不利になる。一方、展葉後の光条件に合わせて可塑的に内部構造を変化させられる種特性を有する場合には上記の有利／不利は逆転し、光条件の変化に対してより適応的となる。本研究ではその観察数が限られるが、アカエゾマツはトドマツとはほぼ同様な応答が観察され、類似した光条件への馴化応答を有するとみられた。一方で、エゾマツの場合には遮光下の個体でもLMAが増加していく傾向があり、他種とは異なる応答を示した。同種は光条件の変化に順応できなかった可能性があり、実際に成長期の途中で遮光下の個体が枯死した。エゾマツは展葉が早かったため、この応答がフェノロジーの違いによるのか種特性によるのかは不明だが、同所的に生育する3種の生態を理解する上で興味深い応答である。本試験は、3種の展葉が済んだタイミングで実施しており、近隣個体の展葉、もしくは周囲の植生の繁茂による被陰を模している。このことから、特定のタイミングでの被陰に対する種間差の存在が示唆される。被陰のタイミングがずれた場合にも一貫した種間差があるのか、今後のさらなる検証が求められる。

まとめ

本研究では北方系の針葉樹3樹種の苗木を対象とし、とくにトドマツに着目しながら、個葉の形態形質と解剖学的な内部構造について遮光処理に対する応答を観察した。トドマツの当年葉は、急激に暗くなる光条件変化の直後に顕著なLMA増加の抑制がみられ、速やかな馴化応答があることがわかった。また、成長期を通じたゆるやかな応答ではあるが、同種では遮光によって柵状組織発達の抑制もみられ、適応的な内部構造変化も生じることが示唆された。葉内構造と対応させた生理機能に関して知見が整理されているが(寺島 2013)、葉の細胞サイズや組織発達を制御する遺伝的機構はモデル植物による研究例が多く(市橋 2016)、木本種での理解は進んでいない。トドマツは様々な機能的形質に遺伝的な変異がみられることが報告されており(Eiga and Sakai 1987; 畠山 1981; Ishizuka et al. 2015)、その遺伝的基盤についても基礎的な情報が整備されつつあることから(Goto et al. 2017)、遺伝的機構に迫る好適材料として期待できる。著者らは、トドマツの産地別苗を用いて、光条件変化への応答に関するさらなる実験的検証、ならびに、応答の地域差を調べており、環境応答とその意義について、現象面・遺伝的機構の面からさらなる解明を進めている。

謝辞

形態形質の測定にあたっては菅野瞳氏にご協力いただき、内部構造の測定にあたっては、北海道大学農学研究院の渡邊陽子博士から実験指導をいただきました。ここに記して感謝いたします。本研究はJSPS科研費(19K06150)、特別研究員奨励費(18J2031908)の援助を一部受けた。

引用文献

- Brooks, JR., Hinckley, TM., and Sprugel, DG. (1994) Acclimation responses of mature *Abies amabilis* sun foliage to shading. *Oecologia* 100: 316–324
- Brooks, JR., Sprugel, DG., and Hinckley, TM. (1996) The effects of light acclimation during and after foliage expansion on photosynthesis of *Abies amabilis* foliage within the canopy. *Oecologia* 107: 21–32
- Eiga, S. and Sakai, A. (1987) Regional variation in cold hardiness of Sakhalin fir (*Abies sachalinensis* Mast.) in Hokkaido, Japan. *In*: Li, P. H. (Ed.) Plant cold hardiness. Alan R. Liss Inc., New York, pp 169–182
- 藤村好子・坂上幸雄 (1977) トドマツの比葉面積 (Specific leaf area) の変動. 日本林学会北海道支部講演集 25: 22–23
- 福地稔・水井憲雄・菊沢喜八郎・水谷栄一 (1982) トドマツ人工林の天然下種更新 (III) 固定試験地における8年間の稚苗の推移. 北海道林業試験場研究報告 20: 21–29
- Goto, S., Kanegae, H., Ishizuka, W., Kitamura, K., Ueno, S., and Hisamoto, Y. (2017) Genetic mapping of local adaptation along the altitudinal gradient in *Abies sachalinensis*. *Tree Genetics & Genomes* 13: 104
- 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: 1–87
- 彦坂幸毅 (2016) 植物の光合成・物質生産の測定とモデリング. 127pp. 精興社, 東京
- 北海道 (2017) 北海道採種園整備方針. 10pp. 北海道, 札幌
- 北海道水産林務部 (2020) 平成30年度北海道林業統計. 100pp. 北海道水産林務部, 札幌
- 市橋康範 (2016) 葉の進化発生学的研究について考える. *植物科学最前線* 7: 288
- Ishizuka, W., Ono, K., Hara, T., and Goto, S. (2015) Influence of low- and high-elevation plant genomes on the regulation of autumn cold acclimation in *Abies sachalinensis*. *Frontiers in Plant Science* 6: 890
- Kimura, K., Ishida, A., Uemura, A., Matsumoto, Y., and Terashima, I. (1998) Effects of current-year and previous-year PPFDs on shoot gross morphology and leaf properties in *Fagus japonica*. *Tree physiology* 18: 459–466
- Kitao, M., Harayama, H., Han, Q., Agathokleous, E., Uemura, A., Furuya, N., and Ishibashi, S. (2018) Springtime photoinhibition constrains regeneration of forest floor seedlings of *Abies sachalinensis* after a removal of canopy trees during winter. *Scientific Reports* 8: 6310
- Kitao, M., Kitaoka, S., Harayama, H., Agathokleous, E., Han, Q., Uemura, A., Furuya, N., and Ishibashi, S. (2019) Sustained growth suppression in forest-floor seedlings of Sakhalin fir associated with previous-year springtime photoinhibition after

a winter cutting of canopy trees. *European Journal of Forest Research* 138: 143–150

小池孝良 (2004) 樹木生理生態学. 280pp. 朝倉書店, 東京

Miyazawa, S., Satomi, S., and Terashima, I. (1998) Slow leaf development of evergreen broad-leaved tree species in Japanese warm temperate forests. *Annals of Botany* 82: 859–869

水井憲雄・菊沢喜八郎・浅井達弘 (1979) トドマツ人工林の天然下種更新 (I) 4年間の稚苗消長について. 北海道林業試験場報告 17: 13–22

野口麻穂子・香山雅純・吉田俊也・小池孝良 (2003) 冬山造林を行った地域におけるトドマツ前生稚樹の光合成特性. *日本林学会北海道支部論文集* 51: 36–38

Oguchi, R., Hikosaka, K., and Hirose, T. (2003) Does the photosynthetic light-acclimation need change in leaf anatomy?. *Plant, Cell & Environment* 26: 505–512

Oguchi, R., Onoda, Y., Terashima, I., and Tholen, D. (2018) Leaf anatomy and function. *In: Adams III, W. W. and Terashima, I. (Eds.) The leaf: a platform for performing photosynthesis.* Springer, Cham, pp 97–139

R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing

坂上幸雄・藤村好子 (1981) トドマツ・アカエゾマツ苗の光合成速度, 呼吸速度の季節変化. *日本森林学会誌* 63: 194–200

高橋邦秀 (1969) 天然生トドマツ稚苗の葉の解剖学的性質とクロロフィル含有量について. *日本林学会北海道支部講演集* 17: 69–72

寺島一郎 (2013) 植物の生態 -生理機能を中心に-. 268pp. 裳華房, 東京

Summary

In order to understand the acclimation responses of Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) to rapid changes in light environment, the shade-treatment group of fir seedlings were covered by a blackout curtain after leaf spreading, and the morphology and anatomy of current needle leaves were evaluated along the growth period. The LMA (leaf mass per area) of fir was measured using the current leaves obtained in time-interval sampling that started from the timing of bud flush. The LMA of Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) and Yezo spruce (*P. jezoensis*) were also measured for preliminary comparison. For fir seedlings at four time points from June to October, sections of leaves were made to determine its anatomical structure by image analysis. A distinct increment in LMA was observed in all species from June to early July, whereas the LMA of fir seedlings under shade treatment significantly lower than that under the control group (ambient light). Consistent LMA was also

observed in Sakhalin spruce. For fir seedlings under shade treatment, almost constant values were obtained in two anatomical traits throughout our monitoring period: (i) the proportion of palisade tissue thickness to needle leaf thickness and (ii) the proportion of palisade tissue thickness to mesophyll cell thickness. In fir seedlings in the control group, these values increased over time, and a significant difference was observed from the samples in October (4th sampling). Based on the results, the observed morphological change in leaves seems to be responsible for the rapid acclimation response to shade. Moreover, because the timing of anatomical change in cell or tissue was later for a few months than that of the morphological change, it is suggested that the control of the development of leaf thickness is the possible mechanism of rapid acclimation response.

Key words

change of light condition, acclimation, LMA, palisade tissue, conifer

1986年造成のアカエゾマツ次代検定林における優良個体の選抜

石塚 航*・佐藤弘和*・今 博計*・成田あゆ*・花岡 創**・中田了五**・
福田陽子**・黒沼幸樹**・辻山善洋**

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

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

要旨

1986年に北海道立総合研究機構林業試験場の実験林内に造成されたアカエゾマツ次代検定林を対象とし、優れた遺伝的特性を有する個体の選抜を実施した。成長関連形質として30年生時の幹材積を、材質に関連する2形質として、動的ヤング係数の指標となる33年生時の応力波伝播速度、および、材密度と関係がある33年生時のピロディン貫入量を測定し、育種価を計算した。通直性を根元曲がりと幹曲がりによって評価した。選抜は、i) 幹材積の育種価を基準とした成長性に優れる、ii) 材質に関連する2形質の育種価と通直性評価のどれにおいても劣らない、iii) 遺伝的多様性が担保される、ように選抜基準を設け、総合評価に基づいて行った。iおよびiiで設けた選抜基準をすべて満たすのは34個体(全検定木の4.5%)で、このうち、遺伝的多様性を考慮して選抜されたのが20個体(同2.7%)だった。本調査において、幹材積と応力波伝播速度、ピロディン貫入量にはそれぞれ負と正の相関関係が認められたため($r = -0.3017, 0.1773$)、成長ならびに材質関連形質がともに優れた個体の選抜数が少なくなった。これら選抜個体については、幹材積で平均5.12%、応力波伝播速度で1.37%、ピロディン貫入量で0.47%の改良効果が期待できることがわかり、第2世代精英樹の候補木として今後の活用が望まれる。

キーワード：精英樹選抜、アカエゾマツ、改良効果、材積、材質

はじめに

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

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

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

* (地独) 北海道立総合研究機構林業試験場 Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido, 079-0198

** (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター北海道育種場

Hokkaido Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Ebetsu, Hokkaido, 069-0836

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

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

そこで本研究では, 1986年に造成したアカエゾマツ次代検定林において, 植栽後30年を超えた個体を対象に成長・材質・通直性の調査を行うとともに, その総合評価に基づいて優良な精英樹後代の選抜を実施することとした。この総合評価での選抜を通して, どのくらいの数の個体を候補木として選抜できるか, また, どのくらいの形質の改良効果を見込むことができるか, を明らかにした。

材料と方法

1. 検定林概要と調査

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

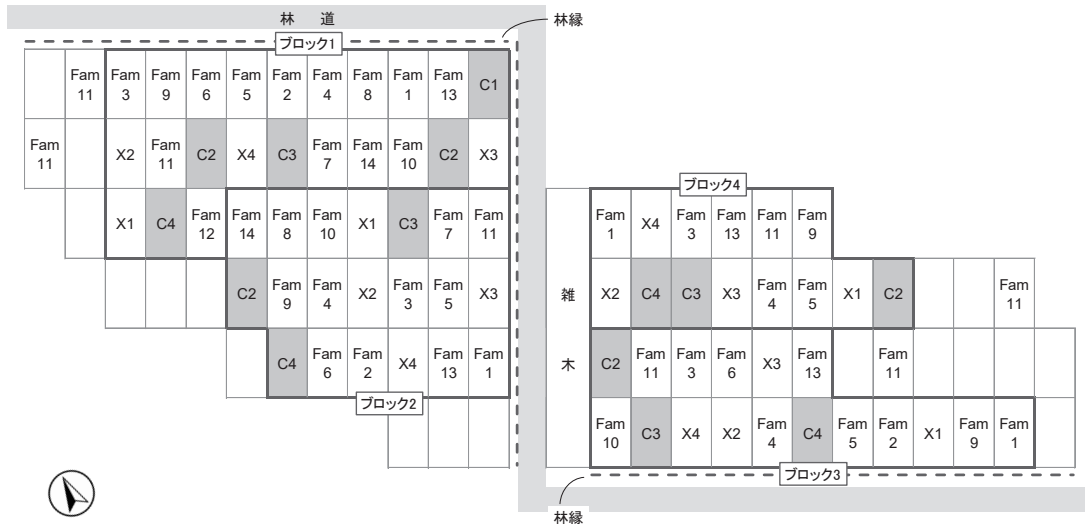
表-1 アカエゾマツ次代検定林P4の供試家系

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

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

成長調査は, 30年生となる2015年秋に実施した。全生存木を対象とし, 樹高(H)と胸高直径(DBH)を測定した。両データが揃った後, 既存の立木幹材積推定式(細田ら 2010)にのっとり樹高と胸高直径から幹材積(V; 単位 m^3)を個体ごとに推定した。この幹材積を, 以降の選抜に供する成長関連形質とした。

材質調査と曲がりの調査は, 33年生となる2018年11月に行った。対象木は検定苗が植栽されたプロットそれぞれで最大4本とし, 事前にそれぞれのプロット内で, 成長が良好で, かつ, 二又でない, 樹幹から多量のヤニの浸出が認められない, 樹幹上で傷が目立たない, など樹幹形状等における大きな欠陥がない個体を選んだ。事業用苗は対象外とした。調査対象個体は239個体だった。さらに材質調査については, 測定値検証等の参考データとするため, 4つのブロックの外側に配植されたバッファー区より(図-1参照), Fam11に由来する家



図ー 1 アカエゾマツ1986年造成次代検定林の配植図

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

系プロット内の一部個体（15個体）も調査対象に加えた。

選抜の目的形質となる材の強度的性質に関連する項目として、FAKOPP (FAKOPP Enterprise, ハンガリー) を用いて樹幹軸方向における応力波伝播速度 (v_p) を調べた。調査では樹幹の地上高80cmと180cmに打ち込んだセンサーの一方を打撃して樹幹軸方向の振動を発生させ、樹幹を伝播した応力波が打撃したセンサーからもう一方のセンサーへ到達するのに所要した時間を計測する。花岡・中田 (2019) にのっとり、測定は斜面の上下にならないよう、なるべく斜面に水平な2方向を使って繰り返した後、平均速度に換算した。これを v_p (m/sec.) とした。一般に、樹幹における縦振動の速度 (v) は、材の強度的性質を表す動的ヤング係数 (E) を材密度 (d) で除した値の平方根に等しい ($v = \sqrt{\frac{E}{d}}$) という関係が知られる (小泉 2019; 名波ら 1992)。そのため、伝播速度 v_p は材の強度的性質の指標となりうる。

選抜の目的形質となる材密度に関連する項目として、木材試験器のPilodyn 6 J Forest (Proceq, スイス) を用いて、ピンの貫入量 (P_d) を調べた。調査は、地上高約1mの高さに試験器を据え、樹皮つきのままピン ($\Phi 2.6\text{mm}$) を幹に対して水平に打ち込んだ。ピンはバネを用いて6J (Nm) のエネルギーで打ち込まれ、試験器においてピンの貫入された深さ (貫入量) を測定する。 v_p と同様に、花岡・中田 (2019) にのっとり樹幹の2方向で貫入量を測定し、その平均値を算出した。これを P_d (mm) とした。木材の密度は、外部から加えた応力に対する応答の違いで評価できる (Wang *et al.* 1999; 山下ら 2007)。そのため、樹幹外側の測定部分に限った評価ではあるが、貫入量 P_d が大きいほど材密度が低いことになり、選抜において考慮すべき形質と考えられる。

通直性の調査では、根元曲がりと幹曲がりについて調べた。両項目は、目視によって個体別に5段階 (1～5) の評価値

で評価した。評価の基準は花岡・伊東 (2020) に準じた。これによると、「根元曲がり」は地際から高さ1.2mまでの曲がりを、「幹曲がり」は地際から高さ1.2～5.2mまでの曲がりを経る。5段階の評価値は、全く曲がりがない場合を5、少し曲がるものの採材に影響しない場合を4、それより曲がっている場合には段階別に1～3としていて、評価値5は曲がりなく通直性に優れることを示す。目視による評価のため、調査者の違いが影響する可能性がある (花岡・伊東 2020)。そこで本調査では、評価経験を有する2名が2ブロックずつを担当し、根元曲がりと幹曲がりを経る。

2. データ解析

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

続いて、選抜の対象形質とした V , v_p , P_d については、遺伝的特性を示す指標である育種価 (子の育種価) を推定した。立木を測定して得られる値 (表現型値) は遺伝的特性のほか、その個体の生育する立地や環境条件によっても変動することが知られている。そのため、育種価を用いた評価を行うことによって、遺伝子型以外の影響を取り除いたうえで遺伝的特性を正確に踏まえた選抜を実施できるとされている (石塚 2015)。また育種価は、対象とする形質と同一の単位で、かつ、対象集団の平均が0となるため、次世代に伝わる遺伝的な効果によって次世代の形質値が調査集団の平均からどれだけ変わるかを表す期待値にもなる。育種価の推定は、アニマルモデルに従う最良線形不偏推定法 (BLUP法: best linear unbiased prediction method) に基づき、分散共分散の推定には制限付き

最尤推定法 (REML法; restricted maximum likelihood) によった。推定の際にはbreedRパッケージを用い (Munoz and Sanchez 2019), 遺伝以外の影響としてブロックの効果と林縁の効果候補変数とした線形混合モデルを構築した。林縁の効果に関する変数は、プロット端の林道に面した林縁個体(図-1参照)の場合に1, それ以外に0となる二値変数として指定した。ただし、候補変数が実際に対象形質へ影響を及ぼすかどうかはわからない。そこで、固定効果に両候補変数を組み込んだモデルを構築した後、変数減法を用いてモデル選択した。モデルのBIC (Bayesian information criteria) に基づいて、最もBICを低くする候補変数のみを残したモデルを最終的に採択して育種価を推定した。各形質のモデルで採択された固定効果は、Vが林縁の効果、 v_p , P_d はともにブロックと林縁の効果だった。推定結果に基づき、母親の育種価と狭義の遺伝率 (h^2) も算出した。

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

総合評価では、以下の6項目の選抜基準を設けて机上選抜を実施した：

- 1) Vの育種価が評価値4以上
- 2) v_p の育種価が評価値3以上

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

これらすべての項目の選抜基準を満たす個体を抽出した。ここで、項目1~3は上述のように相対評価であるのに対して、項目4, 5は評価基準をあらかじめ設けた絶対評価である。なお、項目6については、今後の育種集団の遺伝的多様性の確保に配慮するため、同一家系からの選抜は3個体に制限した。また、検定苗のうち親が精英樹クローンではない一部家系 (X1~X4; 表-1参照) は、項目6において選抜対象から外すこととした。

机上での選抜を済ませた後、2020年11月に現地に出向き、各抽出個体に外見上の欠陥がないことを確認した。これをもって本選抜とし、アカエゾマツ第2世代精英樹候補木とした。最後に、選抜による改良効果を求めた。改良効果は林分平均に対する選抜個体の平均育種価の割合 (%) で、V, v_p , P_d のそれぞれの形質について算出した。この値は、選抜によってどれだけ遺伝的改良が見込めるかを表す。

結果と考察

成長および材質調査で得た全形質の要約統計量を表-2に示す。検定に供した家系のH, DBH, Vの平均はそれぞれ13.1 m, 17.1 cm, 0.1845 m³だった。事業用苗の平均と比べると、それぞれ9.9%, 9.1%, 26.2%高かった。これは優れた成長を示すとして選抜された親の育種効果によるものと考えられる。5, 10年生樹高を比べた黒丸 (1997) も精英樹次代の成長の優位性を報告しており、事業用苗と比べて樹高がそれぞれ11.0%, 13.5%高かったことが示されている。本研究からはさらに、精英樹次代の優れた成長は30年生時においても変わることなく発揮されていること、材積成長で比べれば事業用苗との差はさらに明瞭であることがわかる。

本検定林では成長・材質評価に加えて、2項目 (根元曲が

表-2 アカエゾマツ次代検定林で測定した各形質の要約統計量

対象	形質	単位	個体数	家系数	平均	標準偏差	最小値	最大値
成長 (30年時)	H	m	748	18	13.1	2.0	1.3	17.7
			166	4 [†]	11.9	2.2	2.7	17.3
	DBH	cm	748	18	17.1	3.9	1.4	31.5
			166	4 [†]	15.6	3.9	2.9	24.5
	V	m ³	748	18	0.1845	0.0937	0.0005	0.7015
			166	4 [†]	0.1462	0.0782	0.0012	0.4441
材質 (33年時)	v_p	m/sec.	254	18	3986	244	3390	4684
	P_d	mm	254	18	24.4	2.3	16.5	30.5
曲がり (33年時)	根元曲がり	(5段階)	239	18	4.2	0.7	2	5
	幹曲がり	(5段階)	239	18	3.8	0.7	2	5

H: 樹高, DBH: 胸高直径, V: 幹材積, v_p : 応力波伝播速度, P_d : ピロディン貫入量
[†]: 比較対象とした事業用の4家系 (表-1参照) について集計したことを示す

り・幹曲がり)で通直性の評価を行った(図-2)。これら2項目において評価値1をつけた個体はみられなかった。多くは評価値4もしくは5が付与されており(図-2),その割合は、根元曲がりに関しては全体の83.7%,幹曲がりに関しては全体の66.9%だった。本検定林は多雪地域に設定されており、雪圧等による曲がりの懸念もあったが、採材に関して特段に憂慮すべき曲がりは発生していないと判断された。また、花岡・伊東(2020)は、曲がりの特性に遺伝的影響がある程度現れること、植栽立地との交互作用はなかったために育種効果が期待できる形質であることを報告している。このことから、今回の選抜において、根元曲がり、もしくは幹曲がりが少なくとも評価値3以下をつける個体を第2世代候補木から排除することによって、今後、通直性に対して遺伝的な劣化が心配されるような状況も生じないと考えられた。

相関解析の結果、VはH、DBH、 v_p 、 P_d のどれとも有意な相

関を示すことがわかった(表-3)。VはHとDBHの2乗によって構成される。HとDBHの相関係数が高かったこと、ならびに、後者がVとより強い関わりを示したことは、Vの算出における構成要素と矛盾がなかった。Vについてはその一方で、 v_p と負の、 P_d と弱い正の相関を示した。あわせて、 v_p と P_d の間に負の相関があった。なお、 P_d のみ、値が小さい方向へ選抜する形質である。これらの結果より、成長に優れ、かつ、強度的性質や材密度ともに優れている個体が出現しにくいという全体的な傾向があり、本検定林では成長・材質の両面を考慮した選抜効率が低いと解釈できた。

算出した母親の育種価を形質別に図-3に示す。Vの育種価において上位(正值)の母親クローンのうち、たとえばFam7、Fam1、Fam8、Fam12は v_p や P_d の育種価においても上位(v_p で正值、 P_d で負値)となっていた。母親の違いによる育種価のばらつきが観察され、最大値と最小値、ならびにそ

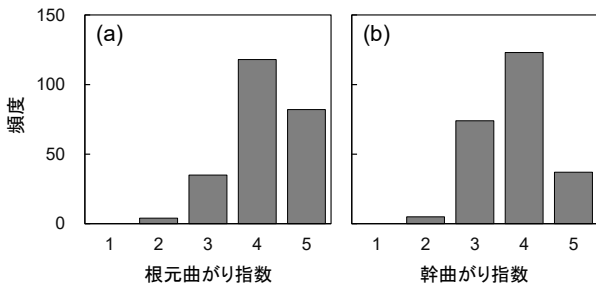


図-2 対象個体の根元曲がり指数(a)と幹曲がり指数(b)の分布

表-3 形質間の相関

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

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

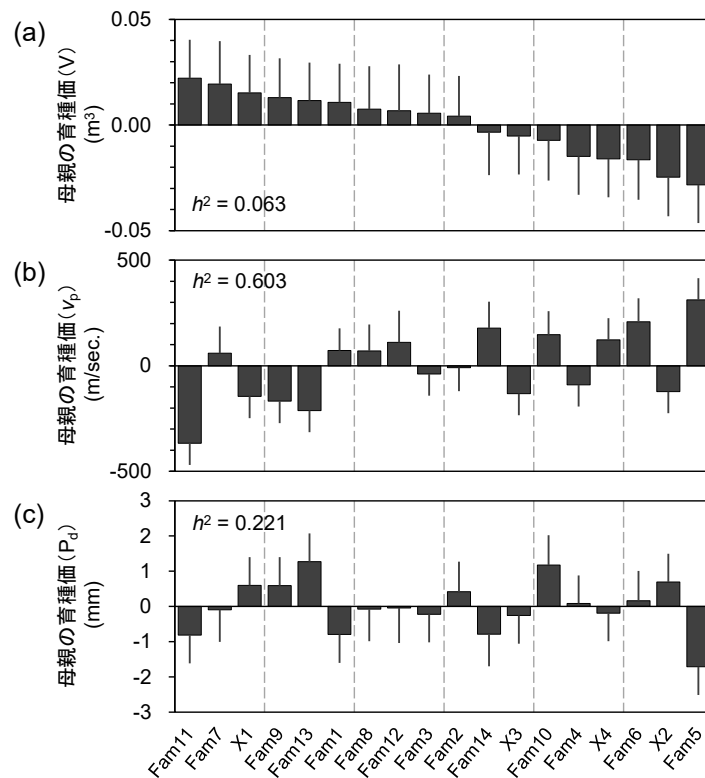


図-3 幹材積(a)と応力波伝播速度(b)ならびにピロディン貫入量(c)に対する母親の育種価の推定値と遺伝率

母親の並び順は全形質において同一で、幹材積の育種価が大きい順とした。エラーバーは標準誤差を示す。図中には、狭義の遺伝率(h^2)を付した。

これらの林分平均値（表-2）に対する割合は、Vが0.0222 m³（12.0%）、-0.0283 m³（15.3%）、v_pが312 m/sec.（7.8%）、-363 m/sec.（9.2%）、P_dが1.272 mm（5.2%）、-1.714 mm（7.0%）となった。3形質のうち、平均に対する割合が最も大きかったのはVであり、家系の選択が林分の平均に与える効果が最も大きい形質であることがわかる。

V, v_p, P_dそれぞれにおける狭義の遺伝率（h²）は0.063, 0.603, 0.221となった（図-3）。h²は成長に関して低い一方、材質に関しては高かった。このような傾向は先行研究でも認められる（花岡ら 2018; 2019; 飯塚 2002; 飯塚ら 2000）。直径成長を表す年輪幅と、材質の一形質である容積密度を対象としてアカエゾマツの精英樹クローンを検定した飯塚（2002）は、年輪幅よりも容積密度において遺伝的要因の寄与が高いとまとめている。第2世代精英樹候補木の選抜を行った花岡ら（2018）や花岡ら（2019）の報告からは、どの次代検定林においても、樹高や胸高直径の遺伝率よりも応力波伝播速度の遺伝率が高い傾向をみることができるとともに、本研究では樹

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

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

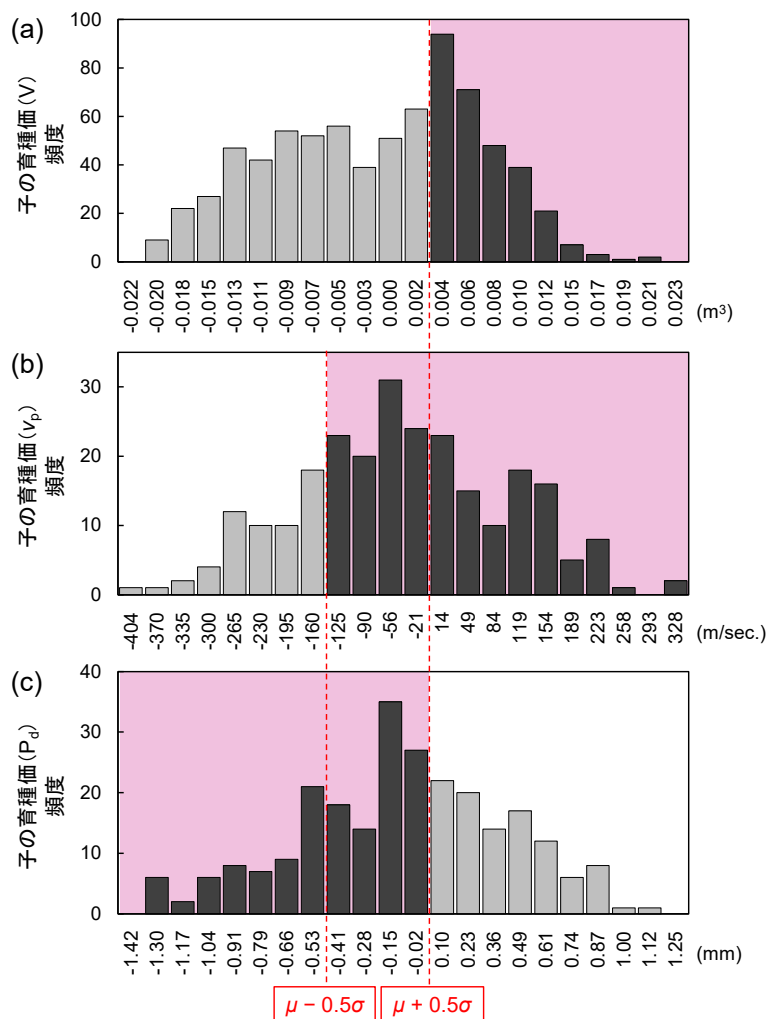


図-4 幹材積 (a) と応力波伝播速度 (b) ならびにピロディン貫入量 (c) に対する子の育種価の頻度分布と選抜基準

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

した(図-4 網掛け領域)。総合評価において選抜の対象となる個体は、少なくともこれら3形質すべてが選抜基準を満たす必要がある。選抜を実施したところ、設定した選抜項目1~5をすべて満たした個体は34個体となった。これは、全形質を評価したのべ239個体の14.2%、また、P4検定林にて現存する全検定個体748個体の4.5%にあたる。選抜項目6の基準も満たし、机上選抜されたのはこのうち20個体だった。これは全形質を評価した個体の8.3%、全検定個体の2.7%にあたる。現場での確認からは、樹幹の形状が完満ではない1個体について選抜個体から外すべきであると判断されたが、家系重複がある他の候補個体と入れ替えることで対応が可能だった。入れ替え後の20個体においては外見上とくに欠点のないことが確かめられた。

以上の過程を経て、本検定林ではこれら20個体を優良な個体と認め、第2世代精英樹候補木として本選抜に至った。選抜個体の情報は表-4に示す。本選抜の選抜率は上記に示す2.7%だった。本検定林の場合、成長に関する選抜形質としたVと、材の強度的性質の指標として選抜形質に用いた v_p との間に明瞭な負の相関関係があり、両形質値が優れる個体が出現しにくい傾向があった(図-5)。2.7%という選抜率の低さは、主に、この拮抗する複合形質を基準に選抜を図ったことによる。なお、V、 v_p 、 P_d で算出した5段階の評価値は、育種

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

なお、筆者らが第2世代精英樹選抜事業の中で実施したトドマツの選抜時には、このような成長関連形質と材質関連形質の間に負の相関は認められなかった(石塚ら 2015)。一方、アカエゾマツにおいてクローン検定を行った先行研究によれば、①年輪幅と材の容積密度との間に負の相関がある、②動的ヤング係数と丸太径との間に負の相関がある、③材の容積密度と動的ヤング係数との間に明確な正の相関がある、といった知見が得られている(安久津・飯塚 1998; 飯塚 2002;

表-4 選抜したアカエゾマツ第2世代精英樹候補木の情報と形質値

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

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

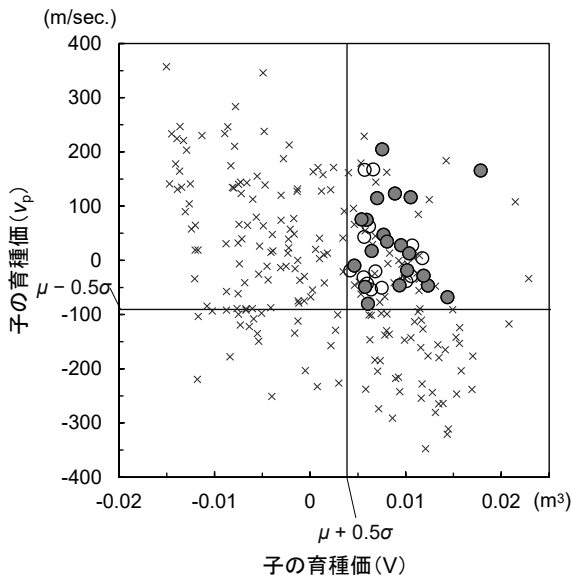


図-5 幹材積 (V) と応力波伝播速度 (v_p) それぞれの子の育種価の分布と選抜個体

図中、丸印が幹材積、応力波伝播速度、ピロディン貫入量、根元曲がり、幹曲がりの各選抜基準をすべて満たした個体を示し、このうち選抜された個体を灰色丸で示した。図中に引いた2本の直交する線は、幹材積が評価値4、応力波伝播速度が評価値3で設けた選抜基準を示す(図-4参照)。

飯塚ら 1999)。これらのことから、直径成長に優れるクローンは、一般的に容積密度や動的ヤング係数といった材質関連形質に優れない傾向がある。トドマツにおいてはみられなかった成長と材質の関連性はアカエゾマツの種特性として捉えられるのかもしれない。ただし、生育立地の影響や年齢に伴う変化がみられる可能性もあるため、今後さらにアカエゾマツの次代検定の結果を蓄積し、再検証していく必要がある。成長と材質に関連性があり、同時に両形質の大幅な改善を図れる見込みが少ないというのがアカエゾマツの種特性であるならば、同種の育種戦略において育種目標や対象形質をどう設定するか、留意する必要があるだろう。

選抜した20個体の育種価の平均値を求めると、V、 v_p 、 P_d それぞれ0.0090、33.5、-0.138となり、改良効果は5.12%、1.37%、0.47%と、すべての形質が選抜によって改良されると見込まれた(表-5)。改良効果はVにおいて最も高かったが、これはVのみにおいて評価値4以上とする選抜基準を設けたため(表-5；国立研究開発法人森林研究・整備機構森林

総合研究所 2017)、成長形質の改良を重視した選抜だったことが反映されていた。選抜個体は今後、クローン増殖を図るとともに、第2世代精英樹として認可に至れば、採種園へと導入されて、将来の優良種苗を生産する役割を担っていく。各々の形質の改良効果は目覚ましい値ではないが、これらの取組みを重ねていくことで優良な育種素材を拡充していくことが重要である。

引用文献

逢沢峰明 (2017) 日本の森林樹木の地理的構造 (19) アカエゾマツ (マツ科トウヒ属). 森林遺伝育種 6: 160-165
 安久津久・飯塚和也 (1998) アカエゾマツ造林木の材質検定 (II)-精英樹クローンの材質-. 林産試験場報 12: 13-21
 花岡創・武津英太郎 (2019) 試験地から得られた成果の紹介-北適応北見3号検定林(アカエゾマツ)-. 北海道の林木育種 62 (2) : 16-20
 花岡創・伊東宏樹 (2020) アカエゾマツの根元曲がりと幹曲がりの発生に関する地域間及び遺伝的変動. 森林立地 62: 39-50
 花岡創・中田了五 (2019) FAKOPPおよびPilodynを用いたアカエゾマツの材質測定手法の検討. 北方森林研究 67: 19-22
 花岡創・中田了五・福田陽子・今博計・石塚航 (2018) 北海道育種基本区におけるアカエゾマツ第2世代精英樹候補木およびカラマツ優良木の選抜-平成29年度の実施結果-. 林木育種センター年報 平成30年版: 100-102
 花岡創・中田了五・辻山善洋 (2019) 北海道育種基本区におけるアカエゾマツ第2世代精英樹候補木の選抜-平成30年度の実施結果-. 林木育種センター年報 令和元年版: 100-102
 花岡創・中田了五・辻山善洋・佐々木洋一 (2021) 北海道育種基本区におけるアカエゾマツ第2世代精英樹候補木の選抜-令和元年度の実施結果-. 林木育種センター年報 令和2年版: 104-106
 畠山末吉 (2017) 北海道林木育種協会と60年を省みて. 北海道の林木育種 60 (1) : 6-9
 北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場 (2018) アカエゾマツ人工林施業の手引. 99 pp. 地方独立行政法人北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場, 美唄
 細田和男・光田靖・家原敏郎 (2010) 現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法. 森林計

表-5 選抜による改良効果

形質	単位	選抜基準	選抜個体の育種価の平均	選抜個体の形質期待値	改良効果 (%)
V	m ³	評価値4以上	0.0090	0.1935	5.12
v_p	m/sec.	評価値3以上	33.5	4019.4	1.37
P_d	mm	評価値3以上	-0.138	24.222	0.47

V；幹材積、 v_p ；応力波伝播速度、 P_d ；ピロディン貫入量

- 画学会誌 44: 23-39
- 飯塚和也 (2002) 北海道における針葉樹造林木の材質変異および育種に関する基礎的研究. 林木育種センター研究報告 18: 81-208
- 飯塚和也・安久津久・板鼻直榮 (1999) アカエゾマツ精英樹クローンの材質変異. 日本林学会誌 81: 325-329
- 飯塚和也・林英司・板鼻直榮 (2000) ささまざまな採種園に植栽されたアカエゾマツ精英樹クローンの成長と材質諸性質の比較解析. 日本林学会誌 82: 80-86
- 井城泰一・田村明・西岡直樹・阿部正信・来田和人・安久津久 (2005) トドマツ・アカエゾマツの立木材質の評価. 北海道の林木育種 48 (1) : 13-15
- 石塚航・今博計・来田和人 (2015) 根釧地域におけるトドマツ第二世代精英樹の選抜. 光珠内季報 176: 9-14
- 来田和人 (2000) アカエゾマツ精英樹家系の成長-良い苗木を適したところに-. 光珠内季報 119: 9-12
- 来田和人 (2002) アカエゾマツ精英樹の通信簿(特性表Ver.1). 光珠内季報 127: 14-17
- 来田和人・黒丸亮・内山和子 (2001) アカエゾマツ精英樹次代苗木の成長に見られる遺伝的変異. 北海道の林木育種 44 (2) : 14-7
- 小泉章夫 (2019) 針葉樹造林木の材質変異. 北海道の林木育種 62 (1) : 1-7
- 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 (2017) 林木育種センター品種開発実施要領-成長の優れたアカエゾマツ品種-. (https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/sinhijnnsyu/yuryouhinsyu/documents/yoryo_akaezomat-su20170401.pdf)
- 今博計・来田和人・石塚航・黒丸亮 (2016) 各都道府県の林業・林産業と遺伝育種の関わり (7) 北海道. 森林遺伝育種 5: 230-234
- 黒丸亮 (1997) アカエゾマツ育種種苗は事業用と比べどの程度優れているか. In: 北海道林木育種協会 (編) 北海道の森林づくりと林木育種. 北海道林木育種協会, 北海道, pp 49-50
- Munoz, F. and Sanchez, L. (2019) breedR: Statistical methods for forest genetic resources analysts. R package version 0.12-4
- 名波直道・中村昇・有馬孝豊・大熊幹章 (1992) 応力波による立木の材質測定 (1) 測定方法と応力波の伝播経路. 木材学会誌, 38: 739-746
- 大庭喜八郎・勝田柁 (1991) 林木育種学. 337pp. 文永堂出版, 東京
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- Tanabe, J., Tamura, A., Hamanaka, M., Ishiguri, F., Takahashi, Y., Ohshima, J., Iizuka, K. and Yokota, S. (2014) Wood properties and their among-family variations in 10 open-pollinated families of *Picea jezoensis*. Journal of Wood Science 60: 297-304
- Wang, T., Aitken, S., Rozenberg, P., and Carlson, M. (1999) Selection for height growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships. Canadian Journal of Forest Research 29: 434-445
- 山下香菜・岡田直紀・藤原健 (2007) ピロディンを用いた容積密度推定法とスギ生材丸太のクラス分けへの応用. 木材学会誌 53: 72-81

Summary

In order to select superior Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) trees, progeny derived from several genotypes were evaluated based on data collected at a *P. glehnii* progeny test site established in 1986 in the experimental forest of Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization. Stem volume (V), a growth-related trait, was measured when trees were 30 years old. Two wood quality traits were also measured for each tree when they were 33 years old, the stress wave velocity through the stem (v_p) for a surrogate of wood dynamic modulus of elasticity and the Pilodyn penetration depth (P_d) for wood density. Breeding values were estimated for each of these traits. Straightness around the root stump and stem straightness were also evaluated. Overall selection was performed using multiple criteria in order to i) select for superior growth characteristics, ii) improve desirable wood qualities and straightness, and iii) maintain genetic diversity. Based on our initial selection criteria, 34 candidate trees (4.5% of total surviving progeny) were selected for more thorough evaluation, and ultimately 20 trees (2.7% selection rate) were selected. At this evaluation site, V was significantly, negatively correlated with v_p ($r = -0.3017$) and weakly correlated with P_d ($r = 0.1773$). Due to these relationships, the number of trees that represented both superior growth and desirable wood qualities were relatively limited. The 20 selected trees are expected to improve by 5.12% on average for V and 1.37% and 0.47% for v_p and P_d , respectively. These selected trees will serve as important improved materials that compose subsequent breeding generations for this species.

Key words

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

北海道林業試験場研究報告 No.58

発行年月 令和3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 <http://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
