

積雪条件に着目したトドマツ成木の枝特性の地域間差の検討

森林総合研究所北海道支所
北海道大学大学院農学研究院
森林総合研究所
北海道立総合研究機構林業試験場

菅井 徹人
澤田 圭・佐々木 義久
牧野 礼・橋田 光
石塚 航

はじめに

近年の気候変動の影響に伴って、冬の環境条件に顕著な変化が認められている⁽¹⁾。この現象は既に北海道でも報告されており、将来的には地域特異的に降雪量の減少や大雪や暴風雪頻度の増加、湿雪化や土壌の凍結融解頻度の増加等が予想されている⁽²⁾。このような冬の環境変動の影響は森林の気象害リスクの増加につながることを懸念される。北海道では人工林の半分の面積がトドマツであり、多くのトドマツ林は主伐期を迎えている。また、伐採後の再造林においてもトドマツを広範囲にわたって利用することが予想されている⁽³⁾。このため、主伐期を迎えたトドマツの成木や植栽苗木に対して、冬の環境変動が及ぼす影響を評価し、気象害リスクを見据えた森林管理を推進することは重要である。

予想される北海道の冬の環境変動が森林に与える影響として、降雪の変化に伴う雪害リスクの増加が挙げられる⁽¹⁰⁾。なかでも幹折れや根返り、枝折れといった冠雪害は樹体の部分的、または中心的な部位の損傷につながるため、強力な自然選択として作用していると考えられる。また、多雪地域である北部や日本海側西部、内陸部では少雪化が進む一方、少雪地域である東部では湿雪化や大雪・暴風雪頻度の増加が予想されている⁽⁶⁾。特に、北海道に広く分布するトドマツは自生する局所環境に対して遺伝的に適応していることが知られ、積雪条件に対する適応関連形質に種内変異が認められる⁽¹⁾。このため、少雪環境への適応が期待される東部地域のトドマツ集団は、この地域で予想される湿雪や暴風雪に対して脆弱である可能性があり、将来の冬の環境に適応できなくなることが懸念される。

これまで行われたトドマツの雪害抵抗性に関する研究では、拡大造林時の苗木や幼齢木の甚大な雪害が背景にあり、その実態が精力的に評価されてきた⁽¹⁾。一方、苗木や幼齢木と比べると、成木の調査には多大な労力や実験作業等のコストが必要となることもあるため、成木の雪害抵抗性や種内変異については不明な点が多い。本研究では、成木の枝の形質に注目した。葉や種子をもつ枝は適応度に関わる重要な器官でありながら、力学特性や雪害抵抗性との関連、それらの種内変異に関する知見は比較的少ない⁽³⁾。本研究では枝の力学特性を評価する上で、枝の樹皮とあて材に着目した。従来の研究では、枝の力学特性に対し樹皮が影響する可能性が指摘されていたが⁽¹¹⁾、評価した例は少ない⁽⁹⁾。一方、針葉樹では一般に圧縮あて材が枝の底面に形成され

ており、枝全体に対する応力の分散に寄与していると考えられる⁽¹²⁾。なかでも圧縮あて材には木材主成分のリグニンが比較的多く含まれており⁽¹²⁾、これは枝の力学特性に寄与する可能性がある⁽⁹⁾。以上を踏まえると、枝の力学特性に地域間差が認められた場合、その差が生じた要因は樹皮やあて材と関連する可能性がある。

本研究では、由来地域の異なるトドマツ成木の枝の形質を比較することを目的として、枝の力学特性やリグニンを含む化学成分を試験的に測定した。本研究では、枝の形質は環境条件にも影響されながら、成熟に伴い顕著な地域間差が認められると予想し、主に枝齢に応じた形質の変異パターンを評価した。

材料と方法

1) 試験材料

本研究の対象は、昭和 37 年に造成された北海道新冠町の道有採種園内に植栽されたトドマツ(約 60 年生)である。本採種園では、北海道の配布地域ごとに選抜した精英樹のクローンを、それぞれの地域ごとに区画を分けて植栽し、そこから当該地域向けの種子を生産している。そのため、本採種園からは、生育環境は同一であるが、由来先の産地が異なるトドマツの枝を採取できる。本研究で対象としたトドマツの産地数は 9 で、本研究ではこれらを 3 つの地域にまとめて扱うこととした。対象サンプルに関する詳細は表-1 にまとめた。一般に、樹冠下部では光が不足し枝が枯れることから、本研究では樹冠上部の枝を採取した。

表-1 試験対象としたトドマツ成木の枝サンプル情報

地域	産地	個体数	平均枝齢	総節間数
北部	名寄	1	3	3
	美深	3	5.2	19
西南部	浦河	2	4.5	8
	苫小牧	2	4.9	11
	倶知安	1	3.5	4
東部	北見	2	5.2	12
	十勝	1	4.5	2
	池田	1	4	5
	浦幌	1	4	5

Tetsuto SUGAI (Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Sapporo 062-8516), Kei SAWATA, Yoshihisa SASAKI (Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589), Rei MAKINO, Hikaru HASHIDA (Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687), Wataru ISHIZUKA (Forest Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, 079-0198)

Investigation of the regional variation in branch phenotypes of mature Sakhalin fir focusing on snowfall condition

対象とする成木の樹高は約 25 m 前後で、このうち約 15 ～20 m の高さから日当たりの良い枝を約 0.8 m 前後の長さで採取した。採取は 2022 年 8 月下旬から 9 月上旬に行い、鎌付きカーボンロッド（竹谷商事, CH04-020S）を用いた。採取した枝を実験室に運んだ後、主軸のみを残して、輪生枝や節間枝は全て切除した。鎌による採取によって節間の途中で破損した部位は取り除いた。その後、節間数、節間枝数、各節間長と末端・幹元側の直径を測定した。トドマツの枝は輪生枝によって節間数が明瞭に識別でき、節間数は枝の年数を指標する。本研究では、最先端の節間を 1 年生として枝齢を測定した。また、枝の直径は 2 方向で測定した値の平均値とした。

2) 枝の力学特性及び重量割合

枝を対象とした荷重試験は上田・田中（1997）の手法を参照した⁽¹⁾。本試験では野外における枝の振る舞いを理解するため、樹皮を剥がずに生枝を試験に供した（図-1）。枝は湾曲が緩やかな試料を用いた。枝は極力、直線状態を維持したまま、片持ち梁条件で固定した。その後、合板で作成した張り板の中間位置に変位計（KYOWA, DTH-A-10）を取り付け、これを試料に設置した。枝試料は円柱形状であるため、変位計を安定した状態で設置するためにハタガネを利用した（図-1）。試験は枝齢ごとに行った。節間の片端を固定位置、逆端を荷重位置とした。荷重量を電気信号として記録できるセンサーロードセル（KYOWA, LTZ-50KA-P）を利用し、荷重による応力とたわみの線形的な関係を直に確認しながら試験を行った。またロードセルの重さによって荷重以前に極端なたわみが生じる場合は、数十グラム程度の分銅を複数利用して荷重した。本試験では枝下面のみで荷重を行った。枝齢ごとのヤング係数（ E ）は、節間両端の平均直径（ d ）に基づく断面二次モーメント（ $I, \pi d^4/64$ ）、枝の固定位置から荷重位置までの距離（ L ）、枝の固定位置からたわみの測定位置までの距離（ a ）、張り板の長さ（ s ）、荷重（ P ）とたわみ（ δ ）の線形関係時における傾き（ P/δ ）を用いて、以下の式から算出した。力学特性を評価後、枝は各節間に解体し剥皮前の新鮮重と体積、

$$E = \frac{1}{12I} \times \left(L + \frac{3a}{2} \right) \times s^2 \times \frac{P}{\delta}$$

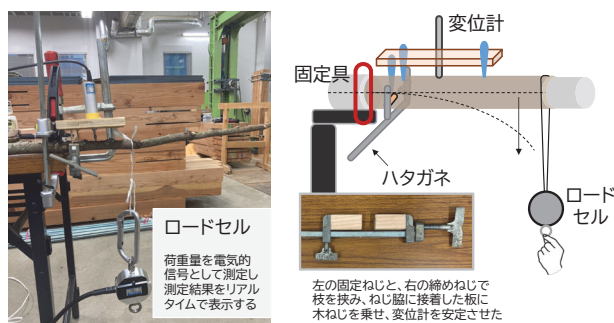


図-1 ロードセルを用いた片持ち梁荷重試験デザイン
（左）実際の様子の撮影写真と（右）模式図を示す。

また剥皮後の木部の新鮮重と体積を測定した。試料の体積は浮遊法で測定した。その後、試料をドライオープンで乾燥し、木部と樹皮の乾燥重量を測定した。体積と重量の関係から生枝密度と木部密度を算出し、その差を樹皮密度とした。

3) 枝の化学成分

美深産の 6 年生枝と北見産の 9 年生枝を 1 本ずつ用いた。各枝は節間数に応じて幹元、中央、枝先の 3 部位に分けた。すなわち 6 年生枝では 2 年分の節間、9 年生枝では 3 年分の節間を枝先から幹元にかけて各部位に分けた。枝を剥皮した後、節間ごとに粗粉碎した。その後、試料を部位ごとに混合した。混合試料を更に微粉碎し約 1 mm の粒径状の木粉とした。この木粉はソックスレー法に従い、エタノールとベンゼンの混合液（1:2 v/v）を用いて、脱脂木粉とした。得られた残差の重量を有機溶媒可溶性成分として測定した。脱脂木粉はクラークソン法に従い、クラークソンリグニンと濾液に分離し、前者の重量を測定した。濾液の吸光度を測定し、酸可溶性リグニンの重量を算出した。リグニン吸光係数は 110 l/g・m、測定波長は 205 nm とした。各成分の重量値から木粉試料中の重量割合を算出した。

4) データ解析

解析は統計分析ソフト R for Mac（v.4.2.1）で行った。本研究では、測定した形質を個体は区別せずに解析した。枝齢と各形質の関係はピアソンの積率相関で評価した。本研究では枝の成熟、つまり枝齢数の増加に伴い形質に地域間差がみられるかどうかを検証することを主な目的とする。そこで、主に枝齢に対する相関係数の絶対値に基づき事後解析する形質を選抜した。事後解析では、線形モデルにおいて形質（ P ）に対し、枝齢（ Y ）と由来地域（ G ）の効果に加え、由来地域と枝齢の交互作用（ $Y \times G$ ）があるかどうかを解析した。解析は尤度比検定に基づき、以下に示した交互作用のあるモデルと交互作用のないモデルの違いを評価することとした。これらのモデルでは、 ε を正規分布の誤差とした。モデル間に有意な違いがみられた場合、枝齢による形質の変化が地域で異なると判断される。

$$P = Y + G + \varepsilon$$

$$P = Y + G + Y \times G + \varepsilon$$

また由来地域による形質の違いを評価するために上のモデルのうち枝齢と由来地域の交互作用項を含むモデルを用いて、lsmeans パッケージの Tukey の多重比較を行った。

結果

1) 枝の木部と樹皮の重量割合

枝全体の新鮮重量に対する木部と樹皮それぞれの乾燥重量の割合、また木部と樹皮それぞれの水分重量の割合を示した（図-2）。全体平均の値として、木部の乾燥重量が約 31.4%、樹皮の乾燥重量が約 11.2%、木部の水分が約 32.9%、樹皮の水分が約 24.5%であった。枝齢に対し樹皮の乾燥重量の割合は正（ $r=0.37$ ）、木部の水分は負（ $r=-0.63$ ）、また乾燥重量の木部に対する樹皮の割合（以降、樹皮/木部

とする)は正の相関を示した ($r = 0.35$)。枝齢による樹皮/木部の増加パターンは由来地域間で有意に異なった (Deviance 差 = 0.33, $p < 0.01$, 図-3)。

2) 枝齢と形質間の関係

枝齢と形質 (ヤング係数, 木部と樹皮を分離する前の生枝全体の密度, 分離後の木部密度と樹皮密度, 節間枝数)の相関解析の結果を表-2 に示した。枝齢に対し, 生枝密度 ($r = 0.44$), 木部密度 ($r = 0.32$), ヤング係数 ($r = 0.67$) は正の相関を示した。枝齢による木部密度 (Deviance 差 = 39584, $p = 0.05$), ヤング係数 (Deviance 差 = 8869, $p = 0.07$)

の増加パターンの地域間差については有意な傾向が認められなかった (図-4)。一方, 多重比較の結果, 北部のヤング係数は東部より有意に低かった ($t = 2.86$, $p < 0.05$)。

3) 枝を構成する化学成分

枝の化学成分表をまとめた (表-3)。年数が異なる試料を用いたものの, クラースンリグニンの含有量は美深産と北見産で同等の値を示した。美深の枝先のみ 31.8%とやや低かったものの, 全体的に 34%前後だった。一方で, 有機溶媒可溶部や酸可溶性リグニンの含有量は極めて微量であったが, 幹元から枝先にかけて増加する傾向があった。

考察

ヤング係数の変異パターンから, 枝が成熟に伴って高い

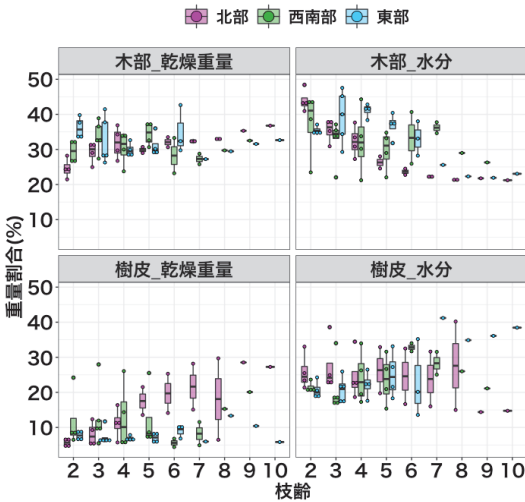


図-2 由来地域の異なるトドマツ枝の重量割合

枝全体の新鮮重量に対する各割合。各点は節間ごとの実測値, また箱ひげ図は第3四分位数, 中央値, 第1四分位数ごとで区切られ, 棒の端は最大値と最小値を示す。

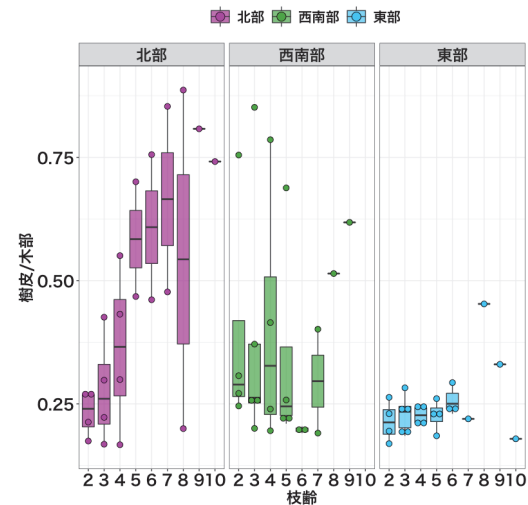


図-3 由来地域の異なるトドマツ枝の樹皮 : 木部比

点は節間ごとの実測値, 黒横棒は中央値, また箱ひげ図は第3四分位数, 中央値, 第1四分位数ごとで区切られ, 棒の端は最大値と最小値を示す。

表-2 枝齢と枝形質及び形質間の相関解析

数字は相関係数を示す。

	生枝 密度	木部 密度	樹皮 密度	節間 枝数	ヤング 係数
枝齢	0.44	0.32	0.03	0.13	0.67
生枝密度		0.67	0.15	-0.14	0.34
木部密度			-0.63	0.10	0.19
樹皮密度				-0.29	0.11
節間枝数					0.04

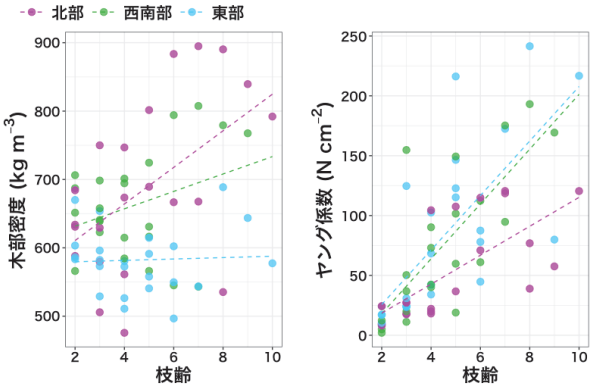


図-4 枝齢に対する木部密度及びヤング係数

点線は線形モデルにより推定された回帰線を示す。

表-3 枝の部位別の化学成分表

数字は試料中の重量割合 (%) を示す (各地域で $n=1$)。

産地 (地域)	部位	有機溶媒 可溶部	クラースン リグニン	酸可溶性 リグニン
美深 (北部)	幹元	1.30	34.49	0.39
	中央	1.64	35.01	0.45
	枝先	4.85	31.86	0.82
北見 (東部)	幹元	2.86	34.60	0.42
	中央	2.35	35.11	0.47
	枝先	3.18	33.81	0.57

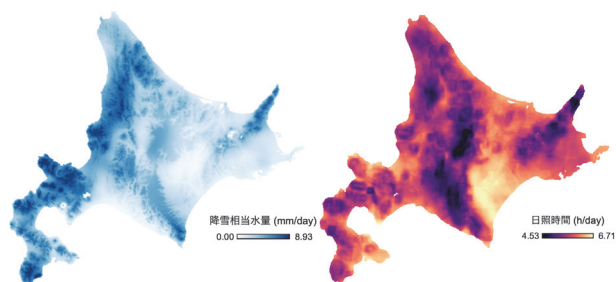


図-5 季節や地域に特異的な道内の気象環境

(左) 1～3 月の降雪相当水量と、(右) 4 月の日照時間の過去 40 年平均の日平均 1 km メッシュマップを示す⁽⁹⁾。

剛性を示す様子を確認した。同様の結果はカラマツの樹皮を剥いだ枝を対象に行われた実験でも報告されている⁽¹¹⁾。一方、枝全体の新鮮重量に対する木部の乾燥重量と水分の合計割合は約 36% であり、ヤング係数との相関係数は木部密度や樹皮密度と比べて、生枝密度が最も高い値を示した(表-2)。このため、樹皮が枝の力学特性に与える影響は無視できない可能性がある⁽¹¹⁾。

また、枝ではあて材が形成されやすい⁽¹²⁾。あて材では正常材に比べリグニン含有量が高く、ヤング係数が低いことから⁽¹²⁾、あて材が形成されやすい幹元の枝ではリグニン含有量も高いと予想される。本研究ではこれを支持する結果は得られなかったが、測定値は過去に報告された結果と同等であり⁽⁷⁾、定量法自体に問題はなかったと考えられる。

枝齢による形質の変化パターンが由来地域で異なったのは樹皮/木部のみであり、他の形質では有意な差が検出されなかった。このため、成熟に伴い顕著な形質の地域間差が認められるという本研究の予想は概ね支持されなかった。本研究では十分な試料数を確保できておらず、確実なデータに基づかない議論は避けるべきだが、この点を踏まえた上で、本試験で検出された地域間差の意義を考察した。枝齢に応じて乾燥重量の木部に対する樹皮の割合が増加する地域では、枝全体が成長する際、樹皮への炭素分配量が比較的多くなるため、木部より樹皮の力学特性が劣る場合は枝のヤング係数が低くなる可能性がある⁽¹¹⁾。また、枝のヤング係数の地域間差については、対象の由来地域の環境と関連づけて推測した。北海道の北部は多雪地域である一方、東部は少雪地域として知られている(図-5)。冬の間、長期的かつ高頻度に樹冠が雪で覆われやすい多雪地域では、柔軟でしなりやすい枝を形成することが積雪に伴う枝折れ回避に有効かもしれない。逆に少雪地域では、剛性が高い枝を形成するため、枝葉に着雪した雪が維持されやすいかもしれない。ここで、北海道の東部では、晩冬から早春における日照時間が比較的に長くなる傾向が認められる。

(図-5)。また、冬季の低温条件下では強光がトドマツの葉に生理的ストレスを与える可能性も示唆されている⁽¹⁰⁾。このため、少雪地域では剛性の高さを介して着雪が維持された枝が、強光ストレスの回避に有効かもしれない。いずれの点も、今後の研究で慎重に検証する必要がある。枝の形質に及ぼす環境と遺伝の効果を精査するためには、枝周辺の環境や、対象の遺伝子情報も重要になるだろう。

謝辞

本研究は、森林総合研究所交付金プロジェクト「トドマツにおける冠雪害抵抗性の地域間差の解明」(課題番号 1 イ bPS3) により実施した。実験に際しご協力いただいた樹木抽出成分研究室の皆様に御礼申し上げます。

引用文献

- (1) 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. 北林試研究報告, **19**: 1-91.
- (2) 北海道水産林務部: 北海道採種園整備方針, <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/srs/new23/syubyou01.html>. (2022 年 12 月 16 日アクセス)
- (3) 勝島隆史 (2020) 冠雪害における着雪現象と樹木力学. 森林科学, **88**: 12-15.
- (4) 三好由華・神代圭輔・吉田裕三 (2017) 木材の物性研究からみえるリグニン. 材料, **66**: 697-706.
- (5) 農業・食品産業技術総合研究機構: 農研機構メッシュ農業気象データ, https://amu.rd.naro.go.jp/wiki_open/doku.php?id=start (2022 年 12 月 16 日アクセス)
- (6) Ohba M. and Sugimoto S. (2020) Impacts of climate change on heavy wet snowfall in Japan. Climate Dynamics, **54**: 3151-3164.
- (7) 奥山寛・三宅基夫・寺沢実 (1998) カラマツ, トドマツおよびシラカンバの各部位から製造した未晒クラフトパルプの性質. 帯広畜産研究報告, **16**: 41-50.
- (8) 札幌管区气象台: 北海道の気候変化, <https://www.data.jma.go.jp/sapporo/bosai/publication/kiko/kikohenka/kikohenka.html> (2022 年 12 月 16 日アクセス)
- (9) Shibui H. and Sano Y. (2018) Structure and formation of phellem of *Betula maximowicziana*. IAWA Journal, **39**: 18-36.
- (10) 菅井徹人・石塚航 (2022) 冬の環境変動がトドマツに与える影響. 北海道の林木育種, **65**: 28-33.
- (11) 上田恒司・田中康子 (1997) 枝の材質に関する研究 1 カラマツ枝材の曲げヤング係数. 北大農学演習林報告, **54**: 253-266.
- (12) 吉田正人 (2016) あて材形成による樹形のコントロール (吉澤伸夫編, あて材の科学. 海青社出版, 大津, 351pp), 247-253.