

【研究資料】

オオシラビソの雪圧害回避戦略としての材質特性 —曲げ性能と圧縮あて材形成—

杉田久志¹・花島宏奈²・長谷川益夫³

Wood properties of *Abies mariesii* as a snow pressure damage avoidance strategy:
Static bending property and formation of compression wood

Hisashi SUGITA¹, Hirona HANAJIMA², Masuo HASEGAWA³

オオシラビソは日本海側の多雪山地の亜高山帯針葉樹林で優勢であり、多雪環境に適応している樹種とみなされる。オオシラビソの耐雪性、とくに雪圧害を回避する戦略を論議するために、材の物理的・力学的性質を測定した。富山県立山産の胸高直径 20 cm、樹高 6.5 m のオオシラビソから試験体を採材し、自然乾燥した後に材密度、曲げ特性の測定を行い、圧縮あて材の状況を調べた。材密度は他の針葉樹と比較して高い部類であり、とくに根元（高さ 0.3~0.7 m）の谷側の値が高く、この部位では発達した圧縮あて材が形成されていた。曲げヤング係数と曲げ破壊係数は他の樹種と比較して低いレベルであり、とくに根元谷側の圧縮あて材の部分の値が小さかった。一方、曲げ仕事量とヤンカ靱性係数は逆に高いレベルであり、とくに根元の山側の部位で非常に大きかった。以上のことから、オオシラビソは材が耐えられる荷重の限界値を高める方向ではなく、材の粘り強さにより荷重が限界値に達しないように塑性変形しながら多くのエネルギーを吸収する戦略を選択していること、そして塑性変形で生じた幹の傾きを修復して直立を保つのに圧縮あて材形成が貢献していることが示唆される。

キーワード：耐雪性・粘り強さ・曲げヤング係数・曲げ破壊係数・曲げ仕事量

1. はじめに

積雪環境は植生の成立を規定する重要な要因のひとつである（酒井 1977；石塚 1978；梶本ら編 2002）。少雪な太平洋側山地から多雪な日本海側山地への積雪環境傾度に沿って植生のちがいがみられること（植生背腹性）は日本の自然景観を語るうえで注目し得る特徴であり（鈴木 1952；高橋 1960；吉良ら 1976）、とくに中部地方の亜高山帯針葉樹林ではそのちがいが明瞭である（今西 1937；落合 1972；杉田 2002）。

オオシラビソ（アオモリトドマツ）はマツ科モミ属の高木で、亜高山帯針葉樹林を構成する主要樹種のひとつである。太平洋側の少雪山地ではシ

ラビソとコメツガが優勢でオオシラビソはむしろ劣勢であるが、積雪が多くなるほどシラビソとコメツガは劣勢に、一方オオシラビソは優勢になる。日本海側の多雪山地ではオオシラビソが圧倒的に優勢である（杉田 2002）。古生態学の研究においても、寒冷・少雪の気候であった最終氷期最盛期の堆積物からオオシラビソの大型遺体がほとんど報告されず、後氷期以降の温暖・多雪化に応じて勢力を拡大したと考えられている（守田 2000）。このようにオオシラビソは多雪環境に適応して繁栄している樹種とみなすことができる。

多雪という過酷な環境下においてオオシラビソがなぜ優勢になれるのか、オオシラビソは積雪

¹ 富山県農林水産総合技術センター森林研究所 〒930-1362 富山県中新川郡立山町吉峰 3 (Forest Research Institute, Toyama Prefectural Agricultural, Forestry & Fisheries Research Center, 3, Yoshimine, Tateyama Town, Toyama 930-1362, Japan)

² 富山県農林水産総合技術センター木材研究所 〒939-0311 富山県射水市黒河新 4940 (Forest Products Research Laboratory, Toyama Prefectural Agricultural, Forestry & Fisheries Research Center, 4940 Kurokawashin, Imizu, Toyama 939-0311, Japan)

³ 職藝学院 〒930-1298 富山県富山市東黒牧 298 (International College of Craft & Arts, Toyama, 298, Higashikuromaki, Toyama 930-1298, Japan)

のどの影響に対して耐えることができるのか、十分には明らかになっていない。多雪環境が樹木に及ぼすマイナスの影響には、生理的雪害と機械的雪害があり(酒井 1977), それぞれに対応していくつかの仮説が提起されている(杉田 2002; 本間 2003)。まず、生理的雪害は積雪下において低温, 多湿, 暗黒の過酷な環境が半年近くも続くことが埋雪した樹木を生理的に衰弱させるものである。とりわけ種子, 実生, 稚樹といった更新初期ステージでは病原菌に感染して死亡するリスクが高く(程 1989; 程・五十嵐 1990; 本間 1998), 定着阻害をもたらして更新成否を左右する重要なメカニズムと考えられる。オオシラビソが他の樹種に比べて菌害に対する抵抗性があり, 定着阻害が著しくないという仮説が指摘されている(杉田 2002; 杉田ら 2021, 2022) が, 十分な検証はなされていない。

一方, 機械的雪害は積雪に埋もれた幹にかかる強大な雪圧が樹木に折れ, 裂け, 根返りなどの致命的な雪圧害をもたらすものであり(四手井 1954), オオシラビソでも雪圧害を受けた事例が多く報告されている(石塚 1981; Kajimoto et al 2002; Seki et al 2005)。雪圧害を回避する戦略の違いが樹種の優占度に影響していると考えられる(杉田 2002)。山地帯で多雪環境に適応しているとみなされているブナでは, 雪圧が大きくなっても幹の変形が小さく, 幹割れ・幹折れの雪圧害もほかの樹種より少ないことが指摘されている(Homma 1997)。オオシラビソでも, 材に強度があつて他の針葉樹より雪圧に耐えられる, あるいは強度がなくても雪圧をやりすごす術があるのかもしれない。このような雪圧害回避戦略の解明のために, 亜高山帯性針葉樹の木材の物理的・力学的性質を比較検討することが望まれる。

しかしながら, オオシラビソは木材としてほとんど利用されていないため, 材質に関する研究は非常に少ない。日本産の主要樹種の材質については, 諸戸(1909), 堀岡(1954), 中井・山井(1982)などの報告があり, トドマツ, シラビソやエゾマツは測定されているが, オオシラビソは対象とされていない。主要樹種の材質特性を集録した林業試験場木材部編(1975), 森林総合研究所監修(2004)にもオオシラビソは載っていない。平井(1996)はオオシラビソの気乾密度, 曲げ破壊係数など一部のパラメータの値しか示していない。高尾ら(2021)はシラビソ, オオシラビソについ

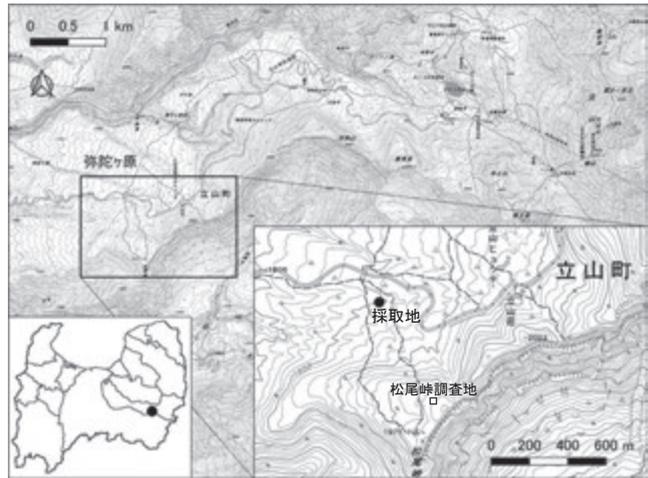


図-1 採取地の位置
地理院地図標準(国土地理院)を加工して作成

て応力波伝播速度による非破壊試験を実施しているが, 破壊を伴う強度測定はしていない。以上のように, オオシラビソの雪圧害回避戦略を評価するには材質特性の知見が不足している。

本研究では, オオシラビソの材について物理的・力学的性質, とくに曲げ特性を測定して他の樹種と比較するとともに, 傾いた樹形の修復に寄与すると考えられる圧縮材の形成について調べた。雪圧害で折れた1個体のみの測定であるが, 報告例の少ない樹種の測定事例として報告し, それをもとにオオシラビソの雪圧害回避戦略について若干の考察を行った。

2. 材料と方法

2.1 材料

供試木の採取地は, 富山県中新川郡立山町, 立山弥陀ヶ原追分付近(36° 33' 59.34" N, 137° 32' 58.52" E)である(図-1)。一帯は弥陀ヶ原火山が約10万年前に噴出した称名滝火砕流堆積物(溶結凝灰岩)に覆われ, 緩斜面が広がる(原山ら 2000)。標高は1850m, 緩斜面からガリーに向かう20°程度の西向き緩斜面である。

採取地から南東600mの松尾峠調査区(標高1980m)における気象観測結果(2004-2019)によると, 年平均気温3.0°C, 最寒月(1月)の平均気温-10.1°C, 最暖月(8月)平均気温15.8°C, 平均年最大積雪深457cm, 最大値580cm(2006年), 最小値300cm(2016年, 中島 2020a), 平均積雪日数224日(杉田ら 2021)で, 世界有数の多雪山地といえる。

一帯の植生は, ヌマガヤ・ショウジョウスケ湿原, オクヤマザサ群落, ハッコウダゴヨウ低木林などの背の低い群落が広がっている(宮脇・藤原 1976)。



写真-1 供試木 (2022/6/15)

部分的にオオシラビソ林がみられ、傾斜地では発達した林分もある(石田・中島 2008; 中島 2020b; 杉田ら 2022)が、緩斜面では樹高が低く疎林状態のものが一般的である(Mori and Hasegawa 2007; Mori and Mizumachi 2009)。

採取木は胸高直径20cm, 樹高6.5m, 高さ0.1mにおける年輪数が112のオオシラビソ林冠木である。疎林状の林分の中では最も大きな個体であり、ミネカエデ、ナナカマド、ハッコウダゴヨウと混交し、林床はオクヤマザサに被われていた。2022年6月に高さ1.3mで幹折れしているのが発見された(写真-1)。まだ緑色の葉が残っていたことから、2021/2022冬季に雪圧害で折れたと判断される。

2.2 測定方法

(1) 試験体の作製

2022年7月に供試木を地際で伐倒し、搬出した。9月に、破損した高さ0.8~1.79mと先端部の3.8m以上を除いた部分について、幹の髄が厚みの中央に位置するように厚さ25mmに板挽きし、室内で自然乾燥させた。2023年1月にそれらの板から幅25mm×厚さ25mm×長さ400mmの試験体を小割した。その際には幹の髄が試験体の中心を通るように



写真-2 曲げ試験、破壊した状態

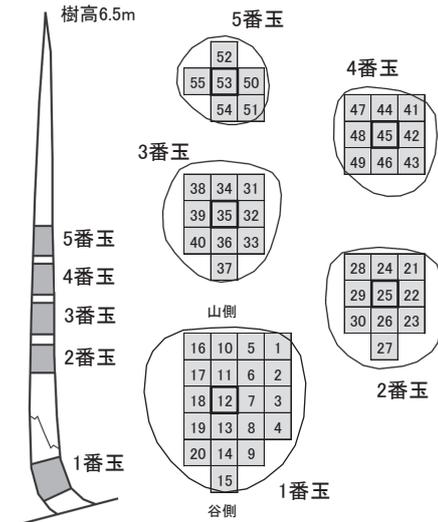


図-2 試験体の採材
幹の上から下を見た断面図、数字は試験体のNo. (表-1と対応)、太枠: 髄を含む試験体

作製した(図-2; 太枠試験体)。試験体の地際からの高さの範囲と本数は、1番玉:0.30~0.70m, 20本, 2番玉:1.83~2.23m, 10本, 3番玉:2.33~2.73m, 10本, 4番玉:2.84~3.24m, 9本, 5番玉:3.34~3.74m, 6本, 計55本である(図-2)。1番玉については斜面の傾斜方向に沿うように挽いて採材したが、2番玉以降は方向を考慮しなかった。

(2) 曲げ試験

2023年3月にJISZ2101:2009 木材の試験方法の曲げ試験に準拠して行った。試験装置は島津製作所製AG10TBを使用し、中央集中荷重方式、スパンL=350mm, 試験載荷速度10mm/minとした(写真-2)。得られた荷重-たわみ曲線(図-3)より曲げ特性を示す以下のパラメータを算出した。

a) 曲げヤング係数

(弾性変形におけるたわみにくさ)

$$MOE = (\Delta P / \Delta y) * L^3 / b / d^3 / 4$$

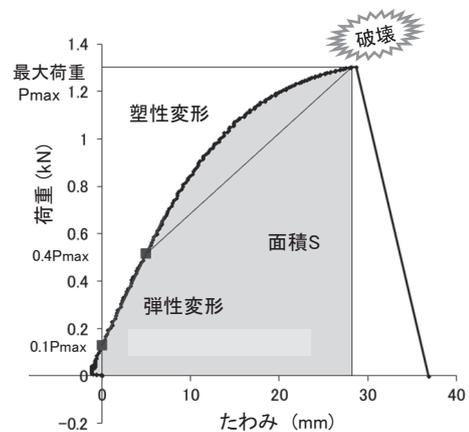


図-3 荷重-たわみ曲線

MOE: 曲げヤング係数 (kN/mm²), $\Delta P/\Delta y$: 弾性変形における直線の傾き (最大荷重の 40% と 10%の間の傾き), L : スパン (mm), b : 幅 (mm), d : 厚さ (mm)

b) 曲げ破壊係数

(破壊せずに耐えられる限界の力)

$$MOR = P_{max} * L * 1500 / b / d^2$$

MOR: 曲げ破壊係数 (N/mm²), P_{max} : 最大荷重 (kN), L : スパン (mm), b : 幅 (mm), d : 厚さ (mm)

c) 曲げ仕事量

(破壊されるまでの間に吸収されるエネルギー)

$$W = S / L / b / d * 1000000$$

W : 曲げ仕事量 ($\times 10^3$ J/cm³), S : 荷重-たわみ図の原点, 最大荷重点および最大たわみ点で囲まれた面積 (J, 図-3 のグレー部分), L : スパン (mm), b : 幅 (mm), d : 厚さ (mm)

d) ヤンカ靱性係数

(塑性変形における単位荷重あたりのたわみ)

$$Z = \Delta y / \Delta P$$

Z : ヤンカ靱性係数 ($\times 10^3$ mm/N), $\Delta y / \Delta P$: 塑性変形における直線 (最大荷重の 40% と 100%の点を結んだ直線) の傾きの逆数

(3) 材密度と含水率の測定

曲げ試験終了直後に各試験体から破壊されなかった部分を直方体で切り取った試験用試料 (長さ l は 25 mm 程度) について, 幅, 厚さ, 長さ, 気乾重量を測定し, 材の気乾密度を算出した。

$$\rho = W / b / d / l * 1000$$

ρ : 気乾密度 (g/cm³), W : 気乾重量 (g), b : 幅 (mm), d : 厚さ (mm), l : 長さ (mm)

さらに試験用試料を 105°C で 32 時間連続して乾燥させて全乾重量を測定し, 測定時の含水率を算出した。

$$m = (W - Wd) / Wd * 100$$

m : 含水率 (%), W : 気乾重量 (g), Wd : 全乾重量 (g)

(4) 平均年輪幅の算出

各試験用試料の木口面を紙やすり (#160, #320, #800) で磨いたうえでスキャナーにより 6400 dpi で画像を取り込み, GIS ソフト QGIS ver. 3.22.13 を用いて木口面に内接する直径 25 mm の円に含まれる最も古い年輪と最も新しい年輪との放射方向の間隔を測定し, 年数で除して平均年輪幅を算出した。

(5) あて材の形成範囲の評価

試験用試料からマイクロトームにより切片を作

成し, 光学顕微鏡 (ニコン ECLIPSE Ci) であて材形成状況を観察した。あて材が形成された範囲を明らかにするために, 各試験用試料の画像から褐色味の強い部分の面積の割合を求めた。解析は画像解析ソフト Adobe Photoshop Elements ver. 20.0 を用い, 明るさ -30, コントラスト 60 でグレースケール変換して白黒の 2 値化を行い, 割れの部分を白に修正したうえでピクセル数を計測した。なお, 褐色味の強い部分にはあて材以外にも晩材部や腐朽による変色部が含まれることに留意する必要がある。

2.3 解析方法

玉による測定値やパラメータのちがいを Kruskal-Wallis 検定により検討した。多重比較は Mann-Whitney の U 検定をすべての玉の組み合わせについて行い, p 値の補正は Holm 法を用いた。褐色部分面積割合と気乾密度との関係を Spearman 順位相関係数により検討した。

3. 結果

3.1 平均年輪幅

平均年輪幅はどの玉でも 1.0~1.5 mm/年をモードとする分布を示し, 有意なちがいはなかった (図-4)。これまでの報告事例と比較すると, ヒノキやシラビソとは同程度, トドマツ, スギ, アカマツ, カラマツ, モミより小さく, 値の小さい部類であった。オオシラビソの従来の報告事例と比べても, 今回の測定結果は小さかった。

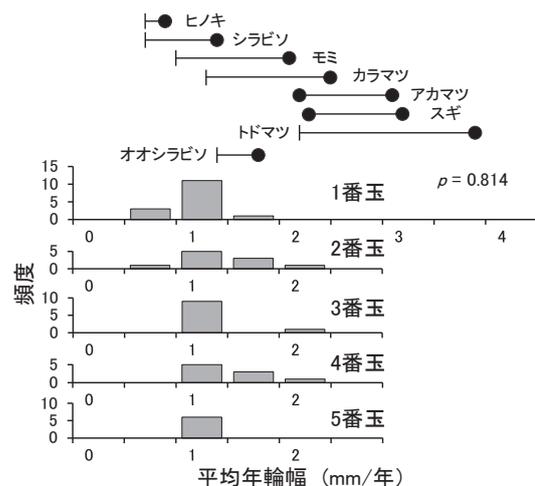


図-4 平均年輪幅の頻度分布

●: 平均値, 縦線分: 標準偏差, ●が2つあるものは平均値の範囲, 出典: 森林総合研究所監修 (2004), 玉によるちがいの有意性は Kruskal-Wallis 検定

3.2 材密度

測定時の含水率は10.8~12.6%で、JISの基準12±1.5%の範囲に納まっていた。各試験体の気乾密度を表-1に、その頻度分布を図-5に示す。2番玉以降は平均値が0.47~0.51 g/cm³で有意なちがいはなかった。1番玉は2~4番玉より有意に高く、0.65 g/cm³未満とそれ以上の二山型分布を呈した。前者は平均値0.54で2番玉以降より若干高い程度であったが、後者は平均値0.75と非常に高かった。前者は山側、後者は谷側に分布していた(図-9)。主要な針葉樹の既往の報告(森林総合研究所監修2004)と比較すると、2番玉以降の値は最も高い値を示すアカマツやカラマツと同等で、他の亜高山帯性針葉樹(オオシラビソ、シラビソ、コメツガ)の既往の報告(平井1996)ともほぼ同等であり、1番玉は非常に高い値であることが示された。

3.3 あて材の分布

試験用試料の木口面では、晩材部のみでなく早材部にも褐色味の強い年輪がみられた。各試料における褐色部分の面積割合を図-6に示す。1番玉ではその値が2番玉以降のいずれよりも有意に高く、1番玉のなかでは谷側の部分が山側よりも顕著に高かった。谷側のNo.19で切片を作り顕微鏡で見ると、仮道管が厚壁で横断面が丸味を帯び(写真-3右)、圧縮あて材の一般的な特徴(吉澤監修2016)を示し、圧縮あて材が形成されていることが確認された。2番玉以降では割合が低かったが、比較的高いところも部分的にみられた。なお、褐色部分にはあて材のみではなく晩材部や腐朽により変色した部分も含まれ、とくに腐朽によるものが1番玉山側の一部(No.1など)にみられたが、1番玉谷側の褐色部分は腐朽ではなく圧縮あて材であると推定された。褐色面積割合と気乾密度との間には明瞭な相関関係がみられた(Spearmanの順位相関 $r=0.757, p<0.0001$, 図-7)。

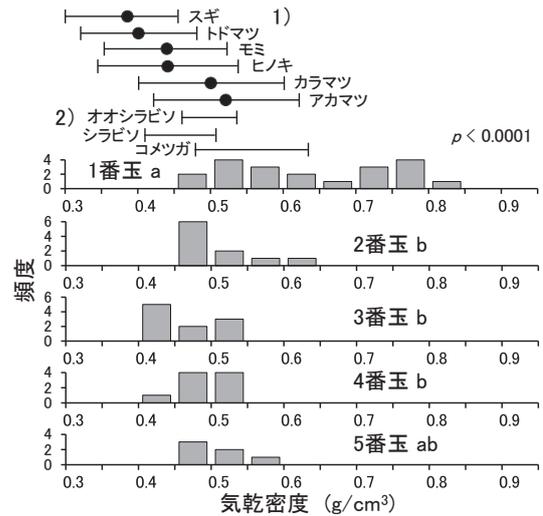


図-5 気乾密度の頻度分布

●: 平均値, 縦線分: 下限・上限値, 出典: 1) 森林総合研究所監修(2004), 2) 平井(1996), 玉によるちがいは: Kruskal-Wallis検定, 多重比較: 同じ記号が付いたものは有意なちがいが無い($p > 0.05$)

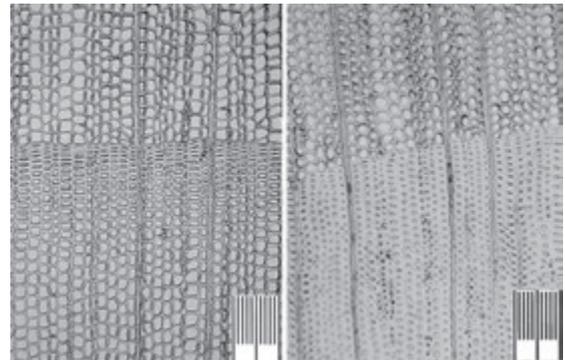


写真-3 木口面の顕微鏡写真

左: 正常材 (No. 44), 右: 圧縮あて材 (No. 19), 目盛りの最小刻み 10 μm

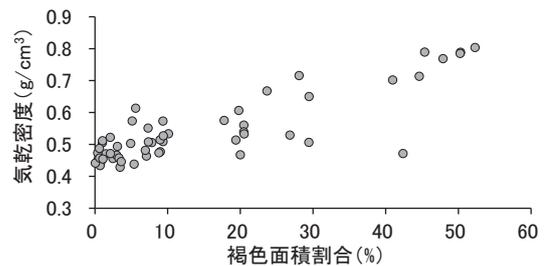


図-7 褐色部分面積割合と気乾密度との関係

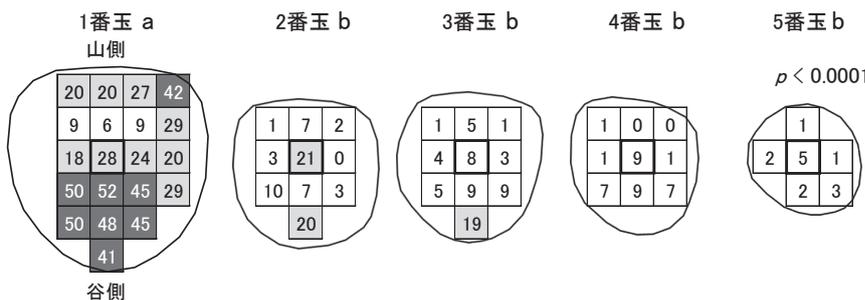


図-6 各試験体における褐色部分の面積割合 (%)

幹の上から下を見た断面図, 太枠: 髄を含む試験体, 淡いグレー: 15%以上, 濃いグレー: 35%以上, 2番玉以降の山側・谷側の方向は不明, 玉によるちがいは図-5を参照

表-1 各試験体の平均年輪幅, 気乾密度, 褐色部分面積割合, 曲げ特性パラメータ

試験体* No.	含水率 <i>m</i> (%)	平均年輪幅 (mm/年)	気乾密度 ρ (g/cm ³)	褐色面積** 比率 (%)	曲げヤング 係数MOE (kN/mm ²)	曲げ破壊 係数MOR (N/mm ²)	曲げ仕事量 <i>W</i> ($\times 10^{-3}$ J/cm ³)	ヤンカ靱性 係数Z ($\times 10^{-3}$ mm/N)	
1番玉 H: 0.3-0.7m	1	11.5	1.22	0.471	42.4	2.11	43.12	119.5	29.52
	2	11.3	1.33	0.506	29.4	2.15	44.07	91.1	22.37
	3	11.6	1.35	0.560	20.5	1.30	16.27	12.1	21.25
	4	12.2	1.13	0.650	29.5	1.33	6.90	1.6	15.96
	5	11.8	1.17	0.529	26.8	1.98	48.05	169.6	34.18
	6	11.2	1.35	0.573	9.4	2.65	47.72	90.4	18.41
	7	11.8	0.93	0.668	23.7	2.57	25.36	16.7	12.04
	8	12.3	1.95	0.789	45.4	2.07	19.46	10.7	13.16
	9	12.5	1.46	0.714	44.6	1.85	11.52	4.0	12.68
	10	11.1	1.29	0.539	20.5	2.03	46.93	283.9	50.78
	11	11.8	0.95	0.613	5.6	2.62	44.93	73.6	15.53
	12	11.6	0.53	0.716	28.1	1.74	14.43	6.9	15.76
	13	12.3	1.84	0.804	52.3	1.61	12.37	4.8	14.25
	14	11.8	1.62	0.769	47.9	1.76	8.25	2.0	12.71
	15	12.4	1.69	0.702	41.0	1.83	7.67	2.0	14.91
	16	11.5	1.35	0.467	20.0	2.26	46.39	163.9	35.24
	17	11.2	1.41	0.509	9.4	2.14	46.36	180.8	35.79
	18	11.9	1.36	0.575	17.8	2.14	20.38	13.6	16.05
	19	12.5	1.66	0.789	50.3	1.96	8.65	2.7	16.81
	20	12.6	1.89	0.785	50.3	1.73	12.21	5.4	16.77
2番玉 H: 1.8-2.2m	21	10.9	0.99	0.456	2.5	4.51	65.13	74.6	8.17
	22	11.1	1.24	0.453	0.5	4.34	62.69	79.1	8.90
	23	11.5	1.33	0.466	3.0	3.17	53.73	101.0	16.01
	24	10.9	1.48	0.464	7.1	3.82	46.05	76.9	13.52
	25	11.5	2.36	0.533	20.5	2.42	39.69	44.6	13.22
	26	11.6	1.56	0.551	7.3	2.87	35.76	31.1	10.64
	27	12.1	1.40	0.606	19.8	2.28	39.39	50.0	13.37
	28	11.0	1.24	0.471	1.5	3.97	27.17	11.9	9.26
	29	11.3	1.62	0.458	3.3	3.02	36.69	54.5	11.02
	30	12.0	1.58	0.533	10.1	2.23	20.15	16.6	15.86
3番玉 H: 2.3-2.7m	31	11.2	1.06	0.445	0.8	5.59	61.60	62.6	7.39
	32	11.1	1.24	0.428	3.5	3.92	47.23	46.2	8.38
	33	11.4	1.29	0.477	9.0	3.68	55.34	78.5	12.06
	34	11.0	1.30	0.438	5.4	4.00	41.35	29.2	8.38
	35	11.3	2.30	0.506	7.8	3.03	39.10	40.7	13.34
	36	11.4	1.28	0.474	8.8	4.15	35.74	23.8	8.79
	37	11.8	1.29	0.514	19.4	3.25	48.65	79.8	16.67
	38	11.1	1.18	0.434	0.7	4.78	33.44	21.6	7.13
	39	11.2	1.34	0.446	3.6	4.04	46.34	48.6	11.20
	40	11.8	1.49	0.503	4.9	3.55	35.48	24.1	10.06
4番玉 H: 2.8-3.2m	41	11.2	1.24	0.473	0.4	3.48	46.21	45.7	10.46
	42	11.8	1.66	0.505	1.0	3.28	52.38	86.6	14.91
	43	11.7	1.57	0.508	7.4	3.46	44.50	51.4	12.01
	44	11.2	1.12	0.441	0.1	3.34	42.06	44.2	11.64
	45	11.6	2.08	0.514	9.0	2.55	31.03	27.0	13.48
	46	12.0	1.61	0.527	9.4	3.07	32.39	23.9	11.15
	47	10.8	1.08	0.457	0.6	4.16	56.49	65.5	9.42
	48	10.9	1.34	0.454	1.1	4.34	48.57	40.4	7.40
	49	11.5	1.29	0.482	6.9	4.75	54.03	47.3	6.98
5番玉 H: 3.3-3.7m	50	12.0	1.38	0.511	1.0	4.34	32.29	16.7	7.84
	51	12.0	1.44	0.494	3.1	4.45	55.99	54.4	8.25
	52	11.4	1.17	0.487	0.6	4.50	52.77	50.7	8.31
	53	11.2	1.47	0.574	5.1	3.23	29.44	14.9	9.46
	54	12.1	1.34	0.522	2.1	4.25	41.82	28.2	7.34
55	11.4	1.09	0.471	2.1	4.34	52.95	52.3	8.23	
1番玉	平均	11.8	1.37	0.636	0.83	1.99	26.55	62.8	21.21
2番玉	平均	11.4	1.48	0.499	1.34	3.26	42.64	54.0	12.00
3番玉	平均	11.3	1.38	0.466	1.35	4.00	44.43	45.5	10.34
4番玉	平均	11.4	1.44	0.485	1.43	3.60	45.30	48.0	10.83
5番玉	平均	11.7	1.31	0.510	1.38	4.19	44.21	36.2	8.24
全体		11.6	1.40	0.542	14.62	3.09	37.72	52.7	14.44

* 図-2を参照 **明るさ-30, コントラスト60でグレースケール変換して2値化

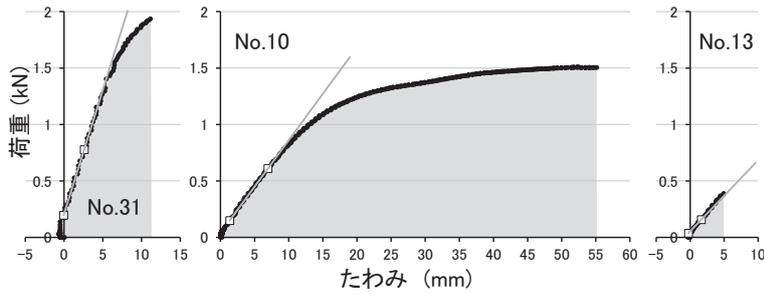


図-8 荷重-たわみ曲線の事例
 No. 31 : 3 番玉
 No. 10 : 1 番玉山側
 No. 13 : 1 番玉谷側

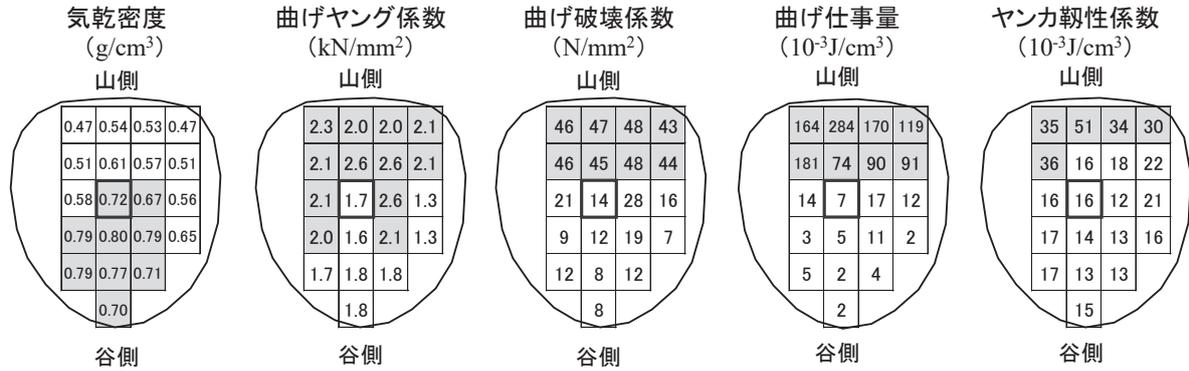


図-9 1 番玉における山側と谷側との各パラメータの値のちがい

幹の上から下を見た断面図, 太枠: 髄を含む試験体, 罫線以上の値の試験体をグレーに塗っている (閾値: 気乾密度 0.65, 曲げヤング係数 2.0, 曲げ破壊係数 40, 曲げ仕事量 50, ヤンカ靱性係数 26)

3.4 曲げ特性

荷重-たわみ曲線の 3 つの事例を図-8 に, 各試験体の曲げ特性の測定値を表-1 に, 1 番玉における各測定値の分布を図-9 に, 各パラメータの玉別の頻度分布を図-10~13 に示す。

(1) 曲げヤング係数 (図-10)

2 番玉以降は平均値 3.3~4.2 kN/mm² で差がなかったが, 1 番玉は 2.0 kN/mm² で有意に小さかった。主要な針葉樹の既往の報告 (森林総合研究所監

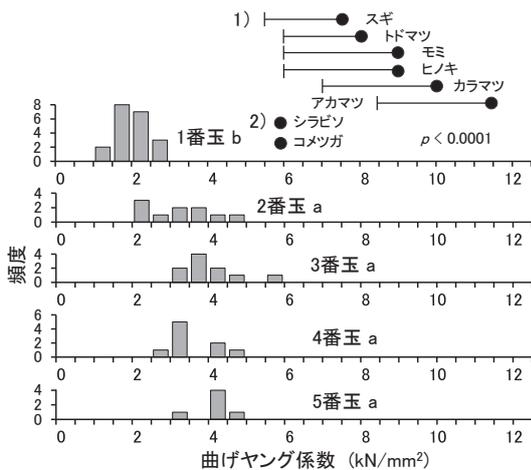


図-10 曲げヤング係数の頻度分布

●: 平均値, 縦線分: 下限・上限値, 出典: 1) 森林総合研究所監修 (2004), 2) 平井 (1996), 玉によるちがい: Kruskal-Wallis 検定, 多重比較: 同じ記号が付いたものは有意なちがいが無い ($p > 0.05$)

修 2004) と比較すると, どの玉も最も低い値が報告されているスギよりもはるかに小さかった。シラビソとコメツガの既往の報告 (平井 1996) と比較しても, 今回の測定結果は小さかった。

(2) 曲げ破壊係数 (図-11)

Kruskal-Wallis 検定では玉により差があると判定されたが, 多重比較では有意なちがいはみられなかった。2 番玉以降は平均値が 43~45 N/mm² であった。3 番玉の No.31 は荷重-たわみ曲線上で, 傾き

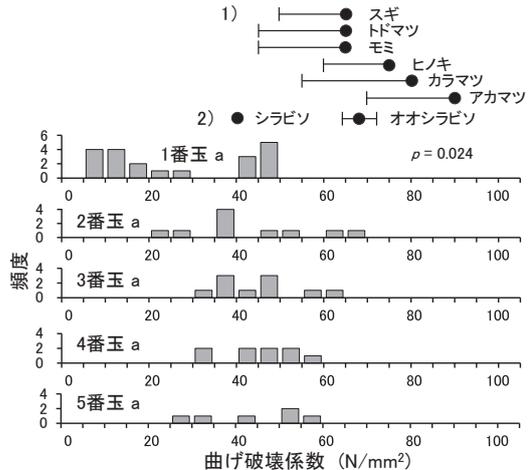


図-11 曲げ破壊係数の頻度分布

●: 平均値, 縦線分: 下限・上限値, 出典: 1) 森林総合研究所監修 (2004), 2) 平井 (1996), 玉によるちがい: Kruskal-Wallis 検定, 多重比較: 同じ記号が付いたものは有意なちがいが無い ($p > 0.05$)

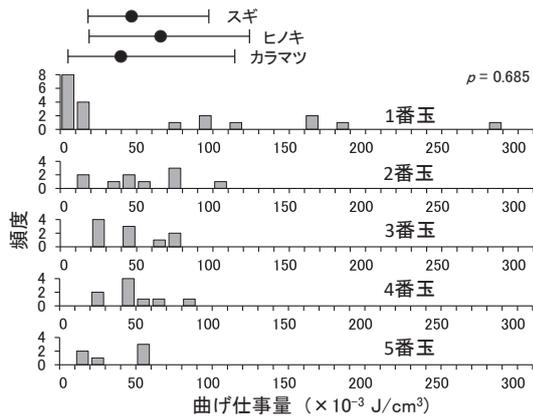


図-12 曲げ仕事量の頻度分布

●: 平均値, 縦線分: 下限・上限値, 出典: 大野ら (2010), 玉によるちがいは Kruskal-Wallis 検定

の立った直線を進み, 高い値の最大荷重に達していた (図-8)。1 番玉では二山型分布を呈し, 値の大きいものは平均値が 46 N/mm^2 で 2 番玉以降と同等であった。値の小さいものは 14 N/mm^2 と非常に低く, 幹の谷側の部位に分布しており (図-9), たとえば No.13 は荷重-たわみ曲線で直線を描く弾性域の途上で破断しており, 塑性域に到達していなかった (図-8)。主要な針葉樹の既往の報告 (森林総合研究所監修 2004) と比較すると, どの玉も最も小さい値が報告されているスギ, モミ, トドマツよりさらに小さく, 平井 (1996) が報告したオオシラビソの値よりも小さかった。

(3) 曲げ仕事量 (図-12)

玉による有意なちがいはみられず, 2 番玉以降は平均値 $36 \sim 54 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$ であったが, 1 番玉は $20 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$ 以下と $70 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$ 以上に二極分化し, 前者が谷側, 後者が山側に分布していた (図-9)。たとえば 1 番玉山側の No.10 は荷重-たわみ曲線で直線から外れて塑性域に入ってからたわみが増加してもなかなか破断せず, グレー部分の面積が非常に大きくなった (図-8)。No.31 と比較すると, No.10 は最大荷重が小さかったにもかかわらず, グレー部分の面積ははるかに大きかった。主要な針葉樹の既往の報告 (大野ら 2004) と比較すると, 2 番玉以降はスギ, ヒノキ, カラマツと同等の値であったが, 1 番玉の値の小さいものはこれらの樹種より小さく, 値の大きいものは顕著に大きかった。

(4) ヤンカ靱性係数 (図-13)

2 番玉以降は平均値が $8 \sim 12 \times 10^3 \text{ mm/N}$ で, 差がなかった。1 番玉は 2 番玉以降より有意に大きく, $15 \times 10^3 \text{ mm/N}$ にピークをもつ集団とそれよ

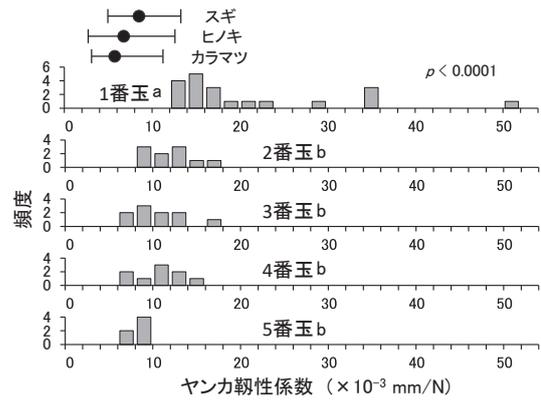


図-13 ヤンカ靱性係数の頻度分布

●: 平均値, 縦線分: 下限・上限値, 出典: 大野ら (2010), 玉によるちがいは Kruskal-Wallis 検定, 多重比較: 同じ記号が付いたものは有意なちがいが無い ($p > 0.05$)

りさらに大きく最大で $51 \times 10^3 \text{ mm/N}$ に達する集団がみとめられ, それぞれ谷側, 山側の部位に分布した (図-9)。たとえば山側の No.10 は荷重-たわみ曲線で直線から外れて塑性域に入ってから曲線が寝ており, その傾きの逆数であるヤンカ靱性係数の値が増大したことがわかる (図-8)。主要な針葉樹の既往の報告 (大野ら 2004) と比較すると, 2 番玉以降はスギ, ヒノキ, カラマツと同等ないしそれより大きく, 1 番玉はこれらの樹種より顕著に大きい値であった。

4. 考察

4.1 オオシラビソ材の曲げ特性

気乾密度の測定結果は 1 番玉谷側できわめて高い値を示し, 地際部位である 1 番玉を除外しても他の樹種と比較して高い部類であると位置づけられ (図-5), オオシラビソの既往の報告 (平井 1996) と比べても高い値を示した。この個体は年輪幅が $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ 程度と比較的狭く (図-4), さらに 1 番玉谷側を中心に圧縮あて材が形成されたこと (写真-3, 図-6) が高い材密度をもたらしたと考えられる。圧縮あて材は, 針葉樹の樹幹が傾くことにより, 正常な状態とは異なる組織・構造, 化学的・力学的性質の木部が形成されるものであり (吉澤監修 2016), 仮道管の細胞壁が厚く, 材密度が正常材より高いことが報告され (Timell 1986; 吉澤監修 2016), 本研究の結果 (図-7) もその傾向を反映している。

曲げヤング係数や曲げ破壊係数の測定結果は, 値が概ね安定していた 2 番玉以上の部分でも, 他の樹種と比較して低いレベルであり (図-10, 11),

オオシラビソの曲げ特性がむしろたわみやすく耐えられる限界の荷重が小さいことを示唆している。一方、曲げ仕事量とヤンカ靱性係数の測定結果は他の樹種と比較して逆に高いレベルであり(図-12, 13), とくに1番玉の山側で大きい値を示した(図-9)。この2つのパラメータは靱性(材質の粘り強さ, 外力に対する耐久性)を示すものであり, それが大きい値を示したことは大きく変形をする場合でも破壊しにくいことを示している。とくにヤンカ靱性係数が高かったのは, 塑性変形に入ってから粘り強く破断せずに変形を続けること(図-8)を意味している。

1番玉谷側のあて材の割合が高い部分の曲げ破壊係数の測定結果は正常材よりも著しく低く(図-11), 荷重-たわみ曲線の弾性変形の直線上で破壊が起こっていた(図-8)。この結果は気乾状態で測定したものであり, 生材の状態における力学的特性を反映していない可能性が考えられる。Panshin and de Zeeuw (1980) は北米産の針葉樹7種についてあて材と正常材で曲げ破壊係数を比較し, 生材ではすべての樹種であて材のほうが大きい, 気乾材ではあて材のほうが大きい樹種も正常材のほうが大きい樹種もあることを示している。オオシラビソでも乾燥させたために脆くなって弾性変形のうちに破壊してしまった可能性があり, 生材の状態ではもっと強度があるかもしれない。今後生材を使った強度試験を行って解析することが望まれる。

4.2 オオシラビソの雪圧害回避戦略

多雪地の樹木は, サイズが小さいうちは雪に押し倒されて埋もれるが, 幹が太くなると積雪期でも埋もれず直立できるようになる。しかしその移行期には雪圧害により幹折れや根返りなど致命的な被害を受けるリスクがあり, この危険なステージをいかに乗り切るかは個体のみではなく個体群の存続の成否をも左右する(石塚 1981; Kajimoto et al 2002; Seki et al 2005)。雪圧害を回避するための戦略としては, 曲げヤング係数や曲げ破壊係数を高めて大きい荷重に耐えるようにする方向と, 曲げ仕事量とヤンカ靱性係数を高めて破壊されるまでに多くのエネルギーを吸収できるようにする方向が考えられる。オオシラビソの測定結果では1番玉の山側の部位の曲げ仕事量とヤンカ靱性係数がスギなどに比べて非常に大きい値を示した(図-12, 13)から, 後者の戦略を選択し, 材の粘り強さにより荷重が限界値に達

しないように塑性変形しながら多くのエネルギーを吸収する戦略を選択していることが示唆される。しかしながら, 亜高山帯針葉樹林における各樹種の優占度に及ぼす材質特性の影響について議論するためには, オオシラビソのみではなく比較対象となるシラビソやコマツガの材質特性も明らかにする必要がある, これらの樹種についても測定の実施が俟たれる。

塑性変形して曲がり傾いた幹は, 雪が消えるとある程度回復するが, 元どおりの直立状態には戻らない。積層中の幹は傾きに応じて雪圧(沈降圧)を受ける(四手井 1954)ので, ひとたび傾いてしまえばより強大な雪圧を受けてさらに傾いていくことになる。それを避けるため, 樹木は直立状態に戻すように幹を立て直す必要がある。針葉樹の場合, 傾斜している樹幹の下側に圧縮あて材を形成し, 繊維方向に圧縮の成長応力を発生させて自重による曲げモーメントを相殺し, さらに傾斜した幹軸を鉛直方向へと押し上げることが知られている(Yamamoto et al 1991; Yamashita et al 2007; 吉澤監修 2016)。本研究においても, 解析したオオシラビソ個体の根元の谷側部分に顕著に発達した圧縮あて材が形成されており(図-6, 写真-3), 塑性変形して生じた幹の傾きを修復して直立を保つのにあて材形成が貢献していることが示唆される。しかしながら, 積雪に埋まって傾いた樹木において傾きの修復にあて材がどのように関わっているのか, ほとんど研究されていない。オオシラビソがどのような姿勢で雪に埋まり, 融雪後にどこまで回復し, その後あて材による圧縮でどのように修復するのか, そのような幹の傾き修復過程においてオオシラビソは他の針葉樹と異なる特性をもっているのか, このような観点からの研究が今後行われることを期待したい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり富山県農林水産総合技術センター木材研究所および森林研究所の各位には多大なご協力をいただいた。木材研究所の柴 和宏博士には材質測定方法・解析方法についてご助言をいただいた。元森林総合研究所の藤井智之博士, 元東北大学の鈴木三男博士にはあて材に関してご教示をいただいた。調査を許可くださった林野庁富山森林管理署, 環境省中部山岳国立公園立山管理官事務所, 富山県自然保護課の各位, 供試木探索にご協力いただいた富山県立山カル

デラ砂防博物館の白石俊明学芸員, 試験体の製材でお世話になった立山山麓森林組合の岡本賢治氏, 円盤の研磨をして下さった職藝学院の堀内寛氏, データ解析にあたり適切なご助言をいただいた森林研究所の大宮 徹博士にも厚くお礼申し上げます。本研究の一部はJSPS 科研費 JP23K05310の助成を受けた。

引用文献

- 程東昇 (1989) エゾマツの天然更新を阻害する暗色雪腐病菌による種子の地中腐敗病. 北大演研報 46:529-575
- 程東昇・五十嵐恒夫 (1990) エゾマツ, アカエゾマツ, トドマツ及びカラマツ種子・稚苗の暗色雪腐病菌に対する感受性. 北大演報 47:125-136
- 原山 智・高橋 浩・中野 俊・荻谷愛彦・駒澤正夫 (2000) 立山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の1 地質図幅) 218pp. 地質調査所
- 平井信二 (1996) 木の大本科 (解説編). 642pp. 朝倉書店, 東京
- Homma K (1997) Effects of snow pressure on growth form and life history of tree species in Japanese beech forest. *Journal of Vegetation Science* 8: 781-788
- 本間航介 (1998) ブナ個体群の初期更新段階における生残過程とそれを規定する要因. 植物地理・分類研究 46: 29-36.
- 本間航介 (2003) ブナ林背腹性の形成要因. 植生史研究 11(2): 45-52
- 堀岡邦典 (1954) 材質改良に関する研究 (第1報) 材質改良の基礎としての木材の材質について. 林試研報 68: 15-66
- 今西錦司 (1937) 垂直分布帯の別ち方について. 山岳 31: 269-364
- 石田 仁・中島春樹 (2008) 林分構造解析. 小島 覚編「環境変動と立山の自然(II) —立山植生モニタリング第II期調査成果報告書—», 126-153, 富山県
- 石塚和雄 (1978) 多雪山地亜高山帯の植生 (綜合抄録). 「吉岡邦二博士追悼植物生態論集」, 404-428, 仙台
- 石塚和雄 (1981) 八甲田山におけるアオモリトドマツの雪害樹形. 飯泉 茂編「アオモリトドマツ林の生態学的研究」, 39-48, 東北大学理学部八甲田山植物実験所, 仙台
- 梶本卓也・大丸裕武・杉田久志編 (2002) 雪山の生態学 東北の山と森から, 東海大学出版会, 東京
- Kajimoto T, Seki T, Ikeda S, Daimaru H, Okamoto T, Onodera H (2002) Effects of snowfall fluctuation on tree growth and establishment of subalpine *Abies mariesii* near upper forest-limit of Mt. Yumori, northern Japan. *Arctic Antarctic Alpine Research* 34: 191-200
- 吉良竜夫・四手井綱英・沼田 真・依田恭二 (1976) 日本の植生. 科学 46: 235-247
- 宮脇 昭・藤原一枝 (1976) 立山周辺の植生. 中部山岳国立公園立山黒部地区学術調査報告, 107-187, 富山県
- Mori A, Hasegawa SF (2007) Structural characteristics of *Abies mariesii* saplings in a snowy subalpine parkland in central Japan. *Tree Physiol* 27:141-148
- Mori AS, Mizumachi E (2009) Within-crown structural variability of dwarfed mature *Abies mariesii* in snowy subalpine parkland in central Japan. *J For Res* 14:155-166
- 守田益宗 (2000) 最終氷期以降における亜高山帯植生の変遷 —気候温暖期に森林帯は現在より上昇したか?—. 植生史研究 9: 3-20
- 諸戸北郎 (1909) 木材ノ強弱試験. 林試研報 6: 25-85
- 中井 孝・山井良三郎 (1982) 日本産主要樹種の性質 日本産主要 35 樹種の強度的性質. 林試研報 319: 13-46
- 中島春樹 (2020a) 気象観測. 石田 仁編「環境変動と立山の自然(IV) —立山植生モニタリング第IV期調査成果報告書—», 19-26, 富山県
- 中島春樹 (2020b) 森林動態調査. 石田 仁編「環境変動と立山の自然(IV) —立山植生モニタリング第IV期調査成果報告書—», 85-119, 富山県
- 落合圭次 (1972) 亜高山帯の森林. 中部山岳のアオモリトドマツ群団域. みどり 24(1) : 36-51
- 大野英克・亀山雄擗・鈴木寿幸・吉田佳右・松本かほる・石栗 太・横田信三・飯塚和也・吉澤伸夫 (2010) ラミナ特性や断面構成が同等の曲げヤング係数を有する異樹種異等級構成集成材の曲げ特性に及ぼす影響. 木材学会誌 56: 172-181
- Panshin AJ and de Zeeuw C (1980) *Textbook of Wood Technology*. 722pp McGraw-Hill Book Company, New York
- 林業試験場木材部編 (1975) 世界の有用木材 300 種. 日本木材加工技術協会
- 酒井 昭 (1977) 植物の積雪に対する適応. 低温

- 科学. 生物篇 34: 47-76
- Seki T, Kajimoto T, Sugita H, Daimaru H, Ikeda S, Okamoto T (2005) Mechanical damage on *Abies mariesii* trees buried below the snowpack. *Arctic Antarctic Alpine Research* 37: 34-40
- 四手井綱英 (1954) 雪圧による林木の雪害. *林試研報* 73: 1-89
- 森林総合研究所監修 (2004) 木材工業ハンドブック 第4版. 1221pp. 丸善
- 杉田久志 (2002) 亜高山帯林の背腹性とその成立機構. 梶本卓也・大丸裕武・杉田久志編「雪山の生態学 東北の山と森から」, 74-88, 東海大学出版会, 東京
- 杉田久志・中島春樹・石田 仁 (2021) 多雪山地立山松尾峠のオオシラビソ林における積雪下の地表面温度環境. *富山県森林研報* 13: 16-26
- 杉田久志・中島春樹・石田 仁 (2022) 立山松尾峠のオオシラビソ林における稚樹の定着マイクロサイトと12年間の動態. *富山県森林研報* 14: 9-18
- 鈴木時夫 (1952) 東亜の森林植生. 137pp. 古今書院
- 高橋啓二 (1960) 植物分布と積雪. *森林立地* 2(1): 19-24
- 高尾真世・小林 元・山越麻由・城田徹央・岡野哲郎・白澤絃明・荒瀬輝夫・木下 渉・野溝幸雄・酒井敏信 (2021) 亜高山帯常緑針葉樹林におけるオオシラビソ・シラビソ立木の腐朽診断. *森林立地* 63(2): 39-44
- Timell TE (1986) Physical properties of compression wood. in "Compression Wood in Gymnosperms 1", 469-596, Springer-Verlag, Berlin.
- Yamamoto H, Okuyama T, Yoshida M, Sugiyama K (1991) Generation process of growth stresses in cell walls: III. Growth stress in compression wood. *Mokuzai Gakkaishi* 37: 94-100.
- Yamashita S, Yoshida M, Takayama S, Okuyama T (2007) Stem-righting mechanism in gymnosperm trees deduced from limitations in compression wood development. *Ann Bot* 99: 487-493
- 吉澤伸夫監修・日本木材学会組織と材質研究会編 (2016) あて材の科学 樹木の重力応答と生存戦略. 350pp. 海青社, 大津

Summary

Abies mariesii is a tree species adapted to the snowy environment, making it dominant in the subalpine coniferous forests of the snowy mountains on the Japan Sea side. To discuss the snow-tolerance strategies of the species, especially for snow pressure damage avoidance, we measured the physical and mechanical properties of the wood. Testpieces of timber were collected from an *A. mariesii* tree with a 20 cm diameter at breast height and 6.5 m tall on Mt. Tateyama, Toyama Prefecture, central Japan. After air-drying, the wood density, static-bending properties, and the distribution of compression wood were investigated. The wood density was high compared to other conifers, especially on the valley side of the trunk base, where a well-developed compression wood was formed. The modulus of elasticity and rupture were low compared to other conifers, exceptionally low in the compression wood portion on the valley side of the base. Conversely, the bending work and Janka plastic modulus were high, especially on the mountain side of the base. Therefore, *A. mariesii* seems to strategically absorb a large amount of energy by plastic deformation utilizing the toughness of the wood, preventing to reach at the breakdown load rather than increasing the maximum load value. The formation of compression wood may contribute to keeping it upright by fixing the inclination of the trunk caused by plastic deformation.

Key words: bending work, modulus of elasticity, modulus of rupture, snow-tolerance strategies, toughness