絶滅危惧種ヤツガタケトウヒの木材特性の半径方向の変動^{*1}

久保島吉貴^{*2}, 勝木俊雄^{*2}, 明石浩司^{*3}, 山下香葉^{*2},
鈴木養樹^{*2}, 外崎真理雄^{*2}

Radial Variations in Wood Properties of a Threatened Species, *Picea koyamae*^{*1}

Yoshitaka KUBOJIMA^{*2}, Toshio KATSUKI^{*2}, Kohji AKASHI^{*3},
Kana YAMASHITA^{*2}, Youki SUZUKI^{*2} and Mario TONOSAKI^{*2}

A tree of *Picea koyamae*, a threatened conifer felled by a typhoon, was obtained and various properties of its wood were investigated to understand the value for lumber. Measurements were taken of grain angle and color. Mechanical properties were measured with static bending, impact bending and compression tests. Since *Picea* spp. is used for musical instruments, vibration tests were also undertaken. The results were as follows: 1) The grain was an S-helix, and the grain angle decreased toward the bark. 2) Mechanical properties did not change remarkably, but they increased partly toward the bark. Mechanical properties around the pith differed from those in other parts. 3) Mechanical properties were similar to those of other *Picea* spp. except the compressive Young's modulus in the R-direction. 4) Brightness index was high. 5) Although *Picea koyamae* has superior properties among those mentioned above, many knots exist at intervals of 300 to 400 mm. Hence, pruning is very important.

Keywords: mechanical properties, brightness index, *Picea koyamae*, pruning, threatened species.

絶滅危惧種ヤツガタケトウヒ (*Picea koyamae* Shiras.) の木材価値を確認するため木材特性を検討した。試験体には台風による風倒木を用いた。繊維傾斜角, 静的曲げ特性, 衝撃曲げ特性, 圧縮特性および材色を測定した。さらにトウヒ属が楽器に用いられることを考え, 振動特性も測定した。以下の結果を得た。1) 木理は主にS螺旋で, 繊維傾斜角は髄付近で大きく, 樹皮へ向かって減少した。2) 半径方向の力学特性の変動は, 髄付近が他の部位と異なる場合が多く, 概略あまり大きくなかったが, 一部樹皮に向かって増大する場合が認められた。3) 力学特性は半径方向圧縮ヤング率を除き他のトウヒと大差なかった。4) 白色度は他の白いと思われた8樹種よりも大きく, トドマツと同程度であった。5) これらの優れた特徴を持つものの, 節が300-400 mm 間隔で輪生するので施業 (枝打ち) がポイントとなると考えられた。

1. 緒 言

ヤツガタケトウヒ (*Picea koyamae* Shiras.) は, 胸高直径80 cm, 樹高34 m にも達するマツ科トウヒ属の常緑の高木で, 長野県と山梨県の亜高山帯から山地帯上部に遺存的に残されているだけであり, その個体数は極めて少ない。環境省のレッドデータブックでは絶滅危惧 Ib 類としてリストされている。地史的な観点から見ると現在の気候では衰退しつつある種として捉えられるが, 個々の自生地の状況を

^{*1} Received September 2, 2009; accepted December 2, 2009. 本研究の一部は第59回日本木材学会大会 (2009年3月, 松本) において発表した。

^{*2} 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan

^{*3} 飯田市美術館 Iida City Museum, Iida 395-0034, Japan

考えるとカラマツの植林など人為による悪影響も無視出来ない。

ヤツガタケトウヒはドイツトウヒときわめて近縁な種と考えられており、高い木材価値が推測される。実際に40年生のヤツガタケトウヒ人工林も造林されており、将来的には木材資源としての利用が期待されている¹⁾。

保全は材の利用と両輪となって上手く回る。例えば、ニュージーランドの代表的な輸木材ラジアタパインが好例である。ラジアタパインは北米のサンフランシスコ太平洋岸のごく限られた地域にしか自然分布していないが、木材利用のために自生地外で植栽され続ければ、絶滅と無縁であると思われる。ヤツガタケトウヒも適切に造林して多方面で利用されれば、将来的に絶滅は回避されるかも知れない²⁻⁴⁾。このように木材としての利用を念頭においた場合、力学特性を得ておくことは必要不可欠である。

今回、長野県産ヤツガタケトウヒを入手したので、木材価値を確認するため、繊維傾斜角、静的曲げ特性、衝撃曲げ特性、圧縮特性および材色を測定した。さらにトウヒ属が楽器に用いられることを考え、振動特性も測定した。

2. 実 験

2.1 試験体

長野県富士見町の八ヶ岳の西岳国有林1310林班（カラマツ沢）産、樹齢約120年、胸高直径530 mm、樹高30 mのヤツガタケトウヒの台風による風倒木を試験体に用いた。目視で節が30-40 cm間隔で輪生することが確認された（Fig. 1）。地上高4-8 mに位置し、最大直径を含む板より、繊維傾斜角測定用、静的曲げ試験用、衝撃曲げ試験用および振動試験用試験体を作製した。静的曲げ試験用試験体からフィブリル傾角測定用試験体を採取した。

静的曲げ試験用、衝撃曲げ試験用および振動試験用試験体を色彩試験用および木口面の光学顕微鏡観察にも用いた。目視で材色が白い部類に入ると思われたので、比較のために、スギ（*Cryptomeria japonica* D. Don 辺材）、ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa* Endl. 辺材）、トドマツ（*Abies sachalinensis* Mast. 心辺材区別せず）、シトカスプルス（*Picea sitchensis* Carr. 心辺材区別せず）、エゾマツ（*Picea jezoensis* Carr. 辺材）、アカエゾマツ（*Picea glehnii* Mast. 心辺材区別せず）、アカマツ（*Pinus desiflora* Sieb. et Zucc. 辺材）およびキリ（*Paulownia tomentosa* Steud. 心辺材区別せず）を材色が白い材

Larix kaempferi *Picea koyamae*

Fig. 1. A tree and a cross section of *Picea koyamae*.
Note: Maximum diameter is 428 mm.

として用いた。

2.2 繊維傾斜角

幅95 mm (T)、高さ110 mm (L)の板の直径に沿って鉋でL方向に割って繊維傾斜角を測定した^{5,6)}。

2.3 静的曲げ試験

20 mm (R) × 20 mm (T) × 320 mm (L)の寸法の試験体を作製し、スパン280 mm、クロスヘッドスピ

ード5 mm/min で材料試験機（島津製作所 AUTOGRAPH AG-5000B）を用いて3点曲げ静的曲げ試験を行い、静的曲げヤング率、静的曲げ比例限度、静的曲げ強度を求めた。試験体には温度20℃、相対湿度65%で調湿されたものを用いた。

2.4 衝撃曲げ試験

20 mm (R) × 20 mm (T) × 300 mm (L) の寸法の試験体を作製し、スパンを240 mm とし、シャルピー型衝撃試験機（前川試験機製作所 TYPE A10, 容量98.1 J）を用い、衝撃曲げ試験を行い、衝撃曲げ吸収エネルギーを測定した。試験体には温度20℃、相対湿度65%で調湿されたものを用いた。

2.5 両端自由撓み振動試験

20 mm (R) × 10 mm (T) × 260 mm (L) および 25 mm (L) × 10 mm (T) × 110 mm (R) の寸法の試験体を作製し両端自由撓み振動試験を行った。試験体を打撃することによって励起し共振周波数を得、自由振動曲線を描いた。ヤング率と剪断弾性係数を Timoshenko の撓み振動理論⁷⁾に基づく Goens-Hearmon の回帰法^{8, 9)}より算出した。自由振動曲線の振幅比より対数減衰率を求め、その値を π で除して損失正接とした。試験体には温度20℃、相対湿度65%で調湿されたものを用いた。

2.6 圧縮試験

20 mm (R) × 20 mm (T) × 40 mm (L), 20 mm (L) × 20 mm (T) × 40 mm (R), 20 mm (L) × 20 mm (R) × 40 mm (T) の寸法の試験体を作製し、2軸ゲージ（共和電業 KFG-2-120-D16-11L3M2S）を20 mm × 40 mm の4面に貼付（接着剤：共和電業 CC-35）した。前出の材料試験機を用いてクロスヘッドスピード1 mm/min で加力し、データを記録計（東京測器研究所 TDS-303および取り込みソフト TDS-7130）に取り込み、縦圧縮ヤング率、縦圧縮比例限度、ならびに縦圧縮強度、横圧縮ヤング率および横圧縮比例限度、およびポアソン比を求めた。試験体には温度20℃、相対湿度65%で調湿されたものを用いた。

2.7 フィブリル傾角

試験体中央部の年輪の晩材部から厚さ15 μ m の板目面切片を作製し、シュルツ液で処理、水洗および脱酸し、アルコールで脱水した。切片をスライドガラス上に取り、ヨウ素ヨウ化カリウム液を滴下し、続いて60%硝酸を滴下し、カバーガラスを乗せた¹⁰⁾。

傾斜角度は、撮影された写真においてヨウ素結晶の傾斜に沿って測定線を引き、仮道管の軸方向の線との間の角度を分度器で読み取った。測定数は1サ

ンプル当たり約30本であった。

2.8 木口面の光学顕微鏡観察

厚さ20 μ m の木口面切片を作製し、サフラニン染色して、アルコールシリーズで脱水、キシレンに置換した後、カナダバルサムで封入し、光学顕微鏡で観察した。

2.9 色彩試験

色彩色差計（コニカミノルタ CR-410）を用い、センサを柃目面に当て、 $L^*a^*b^*$ 表色系の指数を求めた。ヤツガタケトウヒ以外の樹種の寸法は25 mm (R) × 5 mm (T) × 300 mm であった。 $L^*a^*b^*$ 表色系とは、X, Y, Zの測定値を基にマンセル表色（人の知覚に対応した心理的な表色）に近い色相関を表現しようとして考え出された国際照明委員会（CIE）の表色系である¹¹⁾。ここで、 L^* は明度指数で、大きいほど白いことを示す。 a^* および b^* はクロマティックネス指数で、 a^* については+側が赤色方向、-側が緑色方向を示し、 b^* については+側が黄色方向、-側が青色方向をそれぞれ示す。ヤツガタケトウヒでは30体、他の樹種では10-15体用いた。試験体には温度20℃、相対湿度65%で調湿されたものを用いた。

3. 結果および考察

Fig. 2-6 に半径方向の各木材特性の変動を示す。髄からの距離 $d > 0$ がより半径の大きい側を示す。

3.1 半径方向の取り方による物性の相違

Fig. 3-6 において髄からの距離 d が正の側での力

Fig. 2. Radial variation of grain angle.

Fig. 3. Radial variation of static bending properties.
Notes: Distance from pith $d < 0$ and $d > 0$ means normal wood and compression wood, respectively.

Fig. 4. Radial variation of impact bending properties.
Note: Refer to Fig. 3.

学特性は、負の側よりも、L方向ヤング率（静的曲げ、圧縮、振動）、縦圧縮強度が小さく、損失正接が大きかった。そこでフィブリル傾角を検討すると、 $d > 0$ で $d < 0$ よりも大きかった (Fig. 7)。さらに、 $d > 0$ で木口面の細胞形状が丸味を帯びた (Fig. 8)。以上より $d > 0$ に圧縮あて材の存在が考えられる。このため上記の力学特性の傾向が得られたと推察される。また、衝撃曲げ吸収エネルギーにもフィブリル傾角の大きさが影響する可能性が考えられる。さらに、横圧縮試験では d の正負による違いが鮮明には見られなかったので、フィブリル傾

Fig. 5. Radial variation of compressive properties.
Notes: Top: longitudinal direction; Middle: radial direction; Bottom: tangential direction. Refer to Fig. 3.

角はR、T方向にはL方向ほどには影響しないと考えられる。これは、荷重方向と繊維走向のなす角が大きいと圧縮強度や圧縮ヤング率の変化が小さいこと¹²⁾ から類推される。

Fig. 6. Radial variation of vibration properties.
Note: Refer to Fig. 3.

Fig. 7. Radial variation of fibril angle.
Note: Refer to Fig. 3.

Fig. 8. Optical microscope photograph of the cross section of the specimen used for the static bending test.

Note: Distance from pith is 153 mm (Fig. 3).

剪断弾性係数 (LR 面, LT 面) は圧縮あて材のない側の $d < 0$ のほうが小さかった。このことについて考察する。剪断弾性係数と繊維傾斜角 θ に関する Jenkin の式は下記1)で表される。実験には繊維傾斜のない試験体を用いたので繊維傾斜の項 θ にフィブリル傾角を用いる。

$$\frac{1}{G_{\theta}} = \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \sin^2 2\theta + \frac{1}{G_{xy}} \cos^2 2\theta \quad 1)$$

ここで、添え字 x は L 方向, y は R または T 方向を示し, ν はポアソン比を示す。

この式から剪断弾性係数は $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲で $\theta = 45^\circ$ に関して対称であり, $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ の範囲および $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲では単調増加または単調減少する。そこで $\theta = 0^\circ$ での値と $\theta = 45^\circ$ での値を比較する。

$$G_{45} - G_0 = \frac{E_x E_y}{(1 + 2\nu_{xy}) E_y + E_x} - G_{xy} \quad 2)$$

本実験では弾性定数は Table 1 のようになるので, $G_{45} - G_0$ の値は LR 面で 0.15-0.69, LT 面で 0.11 および 0.13 となり, いずれも正であるため, すなわち $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ において G は θ に対して単調増加するため, いずれもフィブリル傾角が小さい方が剪断弾性係数は小さくなる。このようにフィブリル傾角は剪断弾性係数の増大に寄与する場合があると考えられる。なお, 剪断弾性係数がフィブリル傾角と正の相関を持つことがヤツガタクトウヒに特有の特徴かどうかは今後の検討課題である。

3.2 半径方向の変動

圧縮あて材を含まない $d < 0$ の部分における半径方向の物性の変動について述べる。

木理は主にS螺旋で、繊維傾斜角は髓付近で大きく、樹皮へ向かって減少した (Fig. 2)。この傾向は繊維傾斜角を詳細に検討した山下らの結果¹³⁾と同様であった。静的曲げヤング率、静的曲げ強度、衝撃曲げ吸収エネルギー、縦圧縮ヤング率および縦圧縮強度は髓付近では小さいほかは変動は小さかった (Fig. 3-5)。半径方向横圧縮ヤング率は変動が小さく、半径方向圧縮比例限度は樹皮付近で減少した (Fig. 5)。接線方向圧縮ヤング率および接線方向圧縮比例限度は樹皮へ向かい増大した (Fig. 5)。振動試験によるL方向ヤング率および剪断弾性係数 (LR面, LT面) は髓付近で小さいほかは変動が小さかった (Fig. 6)。損失正接 (L方向) は髓付近で大きいほかは半径方向の変動は小さかった (Fig. 6)。

3.3 他樹種との木材特性の比較

圧縮あて材材を含む側 $d > 0$ を除く力学特性の平均値 (標準偏差) を他のトウヒ (振動試験結果に関してはシトカスプルスと比較しそれ以外はエゾマツ) と合わせて Table 1 に示す。力学特性はおおむね他のトウヒと大差なく、密度と平均年輪幅との相関を調べると、静的曲げヤング率、縦圧縮ヤング率および縦圧縮強度が密度と高い相関があった以外は相関関係は認められなかった。

このように、ヤツガタケトウヒ材の力学特性がシトカスプルス材およびエゾマツ材と同様であったので、シトカスプルス材およびエゾマツ材と同様に建築材、家具材およびピアノ響板やヴァイオリン甲板などの楽器用材にも利用出来る可能性がある¹⁶⁾。ただし、ヤツガタケトウヒ材はこれらの優れた特徴を持つものの、Fig. 1 のように節が300–400 mm 間隔で輪生するので施業 (枝打ち) がポイントとなると考えられた。

また材色は他の白いと思われた材と比較してもより白く、トドマツと同程度であった (Table 2)。尚、種々の樹種の材色に関する一覧は基太村¹⁷⁾ によって報告されているが、今回のデータはそれらと異なる。これは使用した装置が刺激値直読方法によっているためと考えられる。

4. 結 論

現在絶滅危惧種に指定されているものの、実際に人工林が造林されており、将来的には木材資源としての利用が期待されているヤツガタケトウヒの木材価値を確認するため、繊維傾斜角、静的曲げ特性、衝撃曲げ特性、圧縮特性、振動特性および色彩特性を測定した。結果は以下のとおりである。

1. 木理は主にS螺旋で、繊維傾斜角は髓付近で大

Table 1. Wood properties of *Picea koyamae*.

	<i>P. koyamae</i>	Other <i>Picea</i> spp.
ρ [g/cm ³]	0.410 (0.0326) ^{a)}	0.43 ^{b)}
E_{sb} [GPa]	11.48 (0.50)	9.0 ^{b)}
σ_{sb} [MPa]	76.00 (3.44)	70 ^{b)}
W_{ib} [J/cm ²]	3.25 (0.37)	4.5 ^{b)}
E_{cL} [GPa]	12.90 (1.13)	10.7 ^{c)}
E_{cR} [GPa]	1.77 (0.33)	0.71 ^{c)}
E_{cT} [GPa]	0.80 (0.12)	0.43 ^{c)}
σ_{cL} [MPa]	39.49 (3.02)	35 ^{b)}
P_{cR} [MPa]	2.88 (0.89)	1.9 ^{b)}
P_{cT} [MPa]	2.20 (0.43)	1.2 ^{b)}
ν_{LR}	0.40 (0.058)	0.37 ^{c)}
ν_{LT}	0.45 (0.022)	0.47 ^{c)}
ν_{RL}	0.11 (0.028)	0.029 ^{c)}
ν_{RT}	0.69 (0.036)	0.43 ^{c)}
ν_{TL}	0.038 (0.0088)	0.020 ^{c)}
ν_{TR}	0.31 (0.039)	0.25 ^{c)}
E_L^{TGH} [GPa]	11.25 (1.06)	10.7 ^{c)}
E_R^{TGH} [GPa]	1.03 (0.12)	0.71 ^{c)}
G_{LR} [GPa]	0.73 (0.020)	0.500 ^{c)}
G_{LT} [GPa]	0.59 (0.017)	0.618 ^{c)}
G_{RT} [GPa]	0.034 (0.0065)	0.023 ^{c)}
$\tan \delta_L$ [10^{-3}]	7.01 (1.03)	7.4 ^{d)}
$\tan \delta_R$ [10^{-3}]	20.22 (0.90)	18.0 ^{d)}

Note Average (SD); a): All specimens. Others are specimens in the range of distance from pith $d < 0$; b): *P. jezoensis* from reference 14); c): *P. sitchensis* from reference 14); d): *P. sitchensis* from reference 15); ρ : Air dried density. E_{sb} : Static bending Young's modulus; σ_{sb} : Static bending strength; W_{ib} : Absorbed energy in impact bending; E_{cL} , E_{cR} and E_{cT} : Compressive Young's modulus in the L, R and T-directions, respectively; σ_{cL} : Compressive strength in the L-direction; P_{cR} , P_{cT} : Compressive proportional limit in the R and T-directions, respectively; ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RL} , ν_{RT} , ν_{TL} and ν_{TR} : Poisson's ratio; E_L^{TGH} and E_R^{TGH} : Young's moduli obtained by vibration test in the L- and R-directions, respectively; G_{LR} , G_{LT} , G_{RT} : Shear moduli of the LR-, LT- and RT-planes, respectively; $\tan \delta_L$ and $\tan \delta_R$: loss tangent in the L- and R-directions, respectively.

きく、樹皮へ向かって減少した。

2. 半径方向の力学特性の変動は、髓付近が他の部位と異なる場合が多く、概略あまり大きくなかったが、一部樹皮に向かって増大する場合が認められた。
3. 力学特性は半径方向圧縮ヤング率を除き他のトウヒと大差なかった。
4. 白色度は他の白いと思われた材よりも大きく、トドマツと同程度であった。

Table 2. Color values of various woods.

	L*	a*	b*
<i>Picea koyamae</i> (HS)	70.17 (3.52)	15.20 (1.36)	35.98 (2.42)
<i>Picea jezoensis</i> (S)	48.67 (2.10)	17.25 (0.94)	28.16 (2.15)
<i>Picea glehnii</i> (HS)	62.31 (1.21)	20.12 (0.43)	38.67 (1.43)
<i>Picea sitchensis</i> (HS)	52.87 (7.53)	21.68 (1.56)	29.76 (5.50)
<i>Pinus desiflora</i> (S)	62.32 (3.02)	20.78 (1.51)	39.96 (2.46)
<i>Abies sachalinensis</i> (HS)	67.80 (1.11)	14.77 (0.76)	29.76 (0.91)
<i>Cryptomeria japonica</i> (S)	54.30 (3.75)	14.39 (0.79)	28.47 (1.90)
<i>Chamaecyparis obtusa</i> (S)	54.20 (2.75)	14.06 (1.73)	28.46 (1.09)
<i>Paulownia tomentosa</i> (HS)	56.73 (2.12)	9.22 (0.78)	22.73 (1.15)

Note Average (SD) ; HS: Heartwood and sapwood ; S: Sapwood

5. これらの優れた特徴を持つものの、節が300-400 mm 間隔で輪生するので施業（枝打ち）がポイントとなると考えられた。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、中部森林管理局元島清人氏ならびに特定非営利活動法人森の座西村智幸氏、島根大学総合理工学部吉原浩准教授および北海道立林産試験場大崎久司氏の御協力を賜りました。また、中部森林管理局南信森林管理署より試験用丸太を提供して戴きました。御礼申し上げます。

文 献

- 1) 勝木俊雄：林木の育種 **207**, 17-19 (2003).
- 2) 金谷整一：かごしまウッディテック・フォーラム **21**, 32-35 (2002).
- 3) 金谷整一：木材工業 **64**(5), 210-215 (2009).
- 4) 久保島吉貴：木材工業 **63**(11), 579-581 (2008).
- 5) 三上 進, 長坂寿俊：林試研報 **276**, 1-22 (1975).
- 6) Kubojima, Y., Kanetani, S., Fujiwara, T., Suzuki, Y., Tonosaki, M., Yoshimaru, H., Ikegame, H.: *J. Wood Sci.* **54**, 443-450 (2008).

- 7) Timoshenko, S. P.: *Phil. Mag.* **6 Ser.** **41**, 744-746 (1921).
- 8) Goens, E.: *Annal. der Phys.* **5**(6), 649-678 (1931).
- 9) Hearmon, R. F. S.: *Brit. J. Appl. Phys.* **9**, 381-388 (1958).
- 10) 佐伯 浩, 徐 永吉, 藤田 稔：木材学会誌 **35**, 786-792 (1989).
- 11) 増田 稔：“日本木材学会研究分科会報告書 木材の科学と利用技術Ⅱ, 1. 自動計測の基礎と応用”, 日本木材学会編, 日本木材学会, 東京, 1991, p. 56.
- 12) 北原覚一：“木材物理”, 森北出版, 東京, 1966, pp. 133-134.
- 13) Yamashita, K., Katsuki, T., Akashi, K., Kubojima, Y.: *Bull. For. For. Prod. Res. Inst.* **9**, 19-29 (2010).
- 14) “木材工業ハンドブック”, 森林総合研究所監修, 丸善, 東京, 2004, pp. 135-195.
- 15) Kubojima, Y., Wada, M., Suzuki, Y., Tonosaki, M.: *Wood Sci. Technol.* **35**, 503-515 (2001).
- 16) “木材工業ハンドブック”, 森林総合研究所監修, 丸善, 東京, 2004, pp. 12-20.
- 17) 基太村洋子：林試研報 **347**, 203-239 (1987).