

論文 (Original article)

複数の植栽地から得られたコウヨウザン製材品の各強度性能[†]

井道 裕史^{1)*}、小島 瑛里奈¹⁾、長尾 博文¹⁾、加藤 英雄¹⁾、松村 ゆかり²⁾、松田 陽介²⁾

要旨

複数の植栽地から入手したコウヨウザンを用いて、各種強度試験を行なった。得られた試験結果を用いて強度特性値を評価し、現行の基準強度との関係を検証した。その結果、コウヨウザンの基準強度の設定について以下の結論が得られた。製材の日本農林規格の機械等級区分構造用製材に適用する場合、曲げおよび圧縮はアカマツ他の樹種群に含めることが適当であり、せん断はスギ相当が適当である。枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格に適用する場合、甲種枠組材の特級のみの判断ではあるものの、曲げ、圧縮はJSIIIに含めることが適当であるのに対して、せん断はJSIIに含めることが適当であるため、現行規格に設定された樹種群では対応できない。めり込みについてはいずれの種類の基準強度も同様で、スギ相当が適当である。ただし、以上は限られた試験体による検討結果であり、製材の日本農林規格の目視等級区分構造用製材としての検討、枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格の甲種枠組材2級としての検討はともに行なっていない。また、せん断、めり込みは、スギの基準強度に対しても下回るものも存在した。さらに、くぎ接合部一面せん断については、密度の低い試験体はスギよりも低い性能を示す場合があった。以上のように、残された課題も多く、今後データを集めて検証を進めることが重要である。

キーワード：コウヨウザン、製材品、曲げ、縦圧縮、せん断、めり込み、くぎ接合部

1. はじめに

近年新たな林業用樹種として、早生樹であるコウヨウザン (*Cunninghamia lanceolata*) が注目されている (林野庁 2021)。現在、木質バイオマス等としての利用を目的とした造林が試みられているが、将来の構造用製材としての利用も想定し、さまざまな強度試験結果が報告されている (劉・中山 1998, 涌嶋・渡辺 2017, 渡辺ら 2017, 2019, 2021, 森林総合研究所林木育種センター 2018, 2021, 福留ら 2018, 邸ら 2019a, 2019b)。涌嶋・渡辺らは、広島県産、京都府産、千葉県産、茨城県産のコウヨウザンの正角材・平角材について曲げ強度の5%下限値を求め、無等級材の基準強度 (建設省 2000) と比較した (渡辺ら 2017, 2019, 2021, 森林総合研究所林木育種センター 2018, 2021)。その結果、広島県産材はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) の基準強度を上回り、京都府産材、千葉県産材、茨城県産材はスギ (*Cryptomeria japonica*) の基準強度をやや下回っていたなど、コウヨウザンの強度にばらつきが大きいことを明らかにした。

そこで、本研究では新たに静岡県浜松市産、茨城県つくば市産、千葉県山武市産、静岡県南伊豆町産のコウヨウザン製材試験体を用いて各種強度試験を行った。得られた試験結果を用いて強度特性値を評価するとともに、コウヨウザンの強度特性値と現行の製材に対する基準強度との関係を検証した。

2. 方法

2.1 供試木

静岡県浜松市 (静岡県立森林公園)、茨城県つくば市 (森林総合研究所)、千葉県山武市 (千葉県農林総合研究センター森林研究所) の3地域でそれぞれ試行的に植栽されていたコウヨウザンを供試木として選定した。浜松市の供試木は19本であり、地上高が約4~7mとなる部分から丸太を1本ずつ採取した。なお、浜松市の供試木は急傾斜の地位が低い林分 (林齢: 61年生、平均樹高: 21.5m、平均胸高直径: 26.8cm) に植栽されていたため、伸長成長および肥大成長のいずれにおいても良くなかった。そこで、比較的成長が良い、すなわち林分の平均樹高および平均胸高直径を超えるもののみを供試木として選別した。つくば市および山武市の供試木は2本ずつであり、地上高が約1.5m以上の部分で3mごとに複数の丸太を採取した。つくば市および山武市の各供試木について、樹高、

Table 1. つくば市および山武市の各供試木の樹高、胸高直径、容積密度数の範囲

植栽地	供試木名	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	容積密度数の範囲 (kg/m ³)
つくば市	A	24.4	56.1	300–400
	B	21.5	34.4	230–300
山武市	1	22.8	54.5	300–400
	3	22.8	39.0	250–350

原稿受付：令和4年5月13日 原稿受理：令和4年9月2日

[†] 本研究結果の一部は、第72回日本木材学会大会 (2022年3月、名古屋・岐阜) において発表した。

1) 森林総合研究所 構造利用研究領域

2) 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域

* 森林総合研究所 構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1、E-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp

Table 2. 各植栽地の丸太の諸元

植栽地 丸太本数		末口 年輪数	末口径 (mm)	見かけの密度 (kg/m ³)	縦振動法のヤング係数 (kN/mm ²)
浜松市	平均値	42.8	289	680	11.1
19本	変動係数 (%)	7.27	15.5	7.48	9.71
つくば市	平均値	34.2	328	745	9.52
5本	変動係数 (%)	13.6	22.0	16.0	7.80
山武市	平均値	38.7	358	681	11.4
6本	変動係数 (%)	16.3	15.9	6.91	9.07

胸高直径、容積密度数の範囲を Table 1 に示すとともに、3 地域の丸太の諸元を Table 2 に示す。つくば市の供試木 A、供試木 B からはそれぞれ 3 本、2 本の丸太を採取した。山武市の供試木 1、供試木 3 からはそれぞれ 4 本、2 本の丸太を採取した。容積密度数は、地上高が約 0.4 ~ 15 m の位置で概ね 3 m ごとに採取した円盤から半径方向に測定した結果のおおよその範囲である。Table 1 からわかるように、つくば市および山武市の各 2 本の供試木はそれぞれ近接して生育していたものの、胸高直径および容積密度数に差があった。ただし、いずれの植栽地においても、胸高直径が大きい供試木の方が高い容積密度数を示していた。なお、一部既報 (井道ら 2022) の丸太本数と異なるが、既報では強度試験に使用しなかった丸太も含まれており、本論文からはその丸太は除いた。

Fig. 1 のように、丸太の末口径にしたがって、桎組壁工法構造用製材の 204 材を半径方向に 4 ~ 7 枚、206 材を 1 ~ 4 枚ずつ採材した。挽き材後の製材品を積みし一定期間天然乾燥した後、一般的な蒸気加熱方式の乾燥機 (日本電化工機株式会社製、IF 型木材乾燥装置) により、処理温度 70 ~ 80°C で人工乾燥した。目標含水率は 12% とした。人工乾燥後、プレーナー加工によって規定寸法 (204 材: 厚さ 38 mm × 幅 89 mm × 長さ約 3 m、206 材: 厚さ 38 mm × 幅 140 mm × 長さ約 3 m、ただし一部の供試体で規定寸法に満たないものがある) に仕上げた。これらの供試体から、後述する曲げ、縦圧縮、せん断、めり込み、くぎ接合部の各種試験体を採取した。

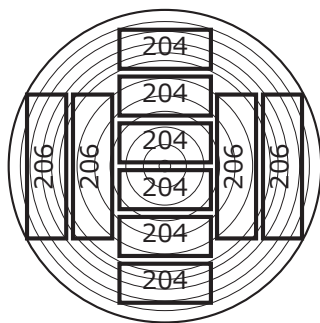


Fig. 1. 丸太断面から見た採取位置の例

また、以上の 3 地域の供試木とは別に、既報 (邸ら 2019a, b) で用いた静岡県南伊豆町 (東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林樹芸研究所青野研究林) の 4 本の供試木と同じ製材品のうち、使用しなかった部分からせん断、めり込み試験体を採取した。

2.2 曲げ試験

長さが約 3 m の 204 材供試体から長さが 1780 mm となる曲げ試験体を切り出した。206 材供試体は長さが約 3 m のものをそのまま曲げ試験体とした。浜松市、つくば市、山武市の各植栽地の丸太から、204 材はそれぞれ 99 体、32 体、27 体の試験体、206 材はそれぞれ 33 体、11 体、13 体の試験体が得られた。なお、曲げ試験時に腐れが認められた浜松市の 204 材 10 体は、既報 (井道ら 2022) では試験体として含めたが、本報では検討から除外しており、99 体中には含まれていない。すべての曲げ試験体に対して、平均年輪幅、密度、縦振動法によるヤング係数の測定を行った。また、曲げ試験時の荷重点間となる範囲 (204 材では中央の 534 mm、206 材では中央の 840 mm の長さの範囲) において、「桎組壁工法構造用製材及び桎組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格」(農林省 1974) (以下、桎組 JAS とする) の甲種桎組材の基準に準じて、中央部および材縁部の最大節径による等級区分を行なった。

非破壊試験後、支点間距離 (スパン) を材せいの 18 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式で縦使い方向の曲げ試験を

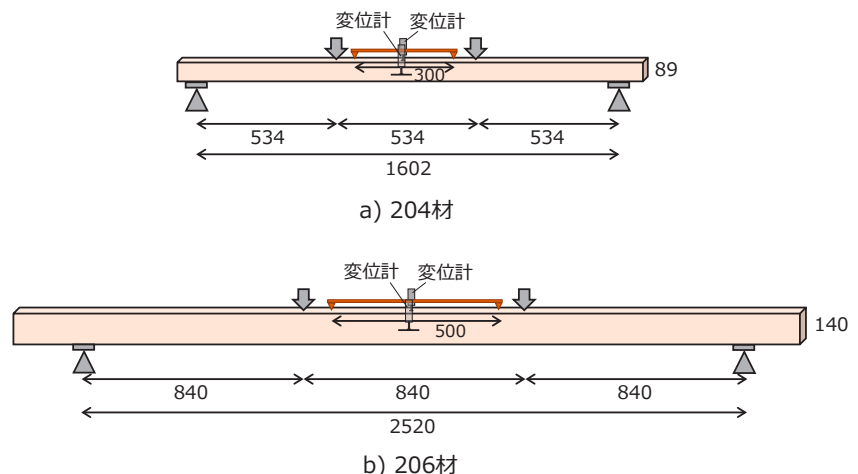


Fig. 2. 曲げ試験概要図 (単位: mm)

行なった (Fig. 2)。すなわち、材せい、荷重点間距離、スパンは、204 材でそれぞれ 89 mm、534 mm、1602 mm、206 材でそれぞれ 140 mm、840 mm、2520 mm となる。最大容量が 10 tf (約 98 kN) の材料試験機 (ミネベア株式会社製、TCM-10000) により载荷した。クロスヘッド速度は 12 ~ 13 mm/min とした。試験体の側面中央部に変位計 (株式会社東京測器研究所製、CDP-100) を設置し試験体の全たわみを測定するとともに、試験体の上部材面圧縮面上に変位計 (株式会社東京測器研究所製、CDP-10) を取り付けた袴型治具 (スパンは 204 材、206 材でそれぞれ 300 mm、500 mm) を乗せ、荷重点間における曲げたわみを測定した。試験終了後、全たわみから求めた見かけの曲げヤング係数、荷重点間のたわみから求めた真の曲げヤング係数、曲げ比例限度応力および曲げ強度を算出した。204 材の含水率は、曲げ試験前の供試体からの長さ調整の際に隣接部から長さが約 25 mm の含水率試験体を切り出し全乾法により求め、含水率試験体切り出し後速やかに曲げ試験を行った。206 材の含水率は、204 材と同様の方法で測定を行ったが、含水率試験体は後述する縦圧縮試験体の採材の際に隣接部から切り出した。

2.3 縦圧縮試験

204 材は曲げ試験体を採材した供試体の残りの部分から、長さが 225 mm となる縦圧縮試験体を採材した。206 材は曲げ試験後の曲げ試験体の破壊していない部分から、長さが 325 mm となる縦圧縮試験体を採取した。試験体の長さは「枠組壁工法建築物構造計算指針」(一般社団法人日本ツーバイフォー建築協会 2018) を参考に、長辺の約 2.5 倍としている。その結果、細長比は 204 材、206 材でそれぞれ約 20、30 となった。浜松市、つくば市、山武市の各植栽地の丸太から、204 材はそれぞれ 104 体、32 体、27 体の試験体、206 材はそれぞれ 33 体、11 体、13 体の試験体が得られた。なお、縦圧縮試験時に腐れが認められた浜松市の 204 材 5 体は検討から除外しており 104 体中には含まれていない。すべての縦圧縮試験体に対して、密度の測定を行った。平均年輪幅は曲げ試験体の値を用いたが、腐れのある試験体を除外したため平均値などは曲げ試験体とは異なる。

縦圧縮試験は、最大容量が 3000 kN の圧縮試験機 (株式会社前川試験機製作所製、A-300-B4) を用いて载荷し、最大荷重に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整して実施した (Fig. 3)。試験終了後、最大荷重から縦圧縮強度を算出した。含水率試験体は、204 材、206 材ともに曲げ試験体で用いたものと同一である。

2.4 せん断試験

204 材の曲げ試験体を採材した残りの供試体から、せん断面を柱目面 (LR 面) および板目面 (LT 面) とする JIS Z 2101 (日本規格協会 2009) に従った無欠点小試験体を作製した。また、静岡県南伊豆町 (東京大学大学院農学生

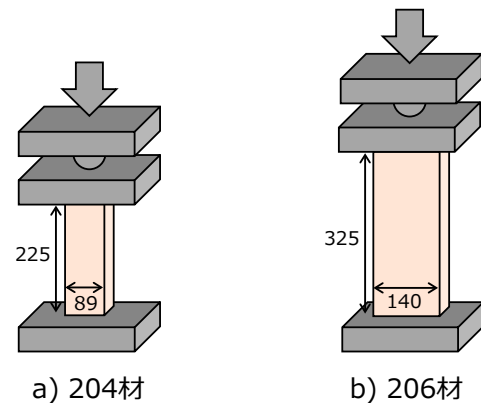


Fig. 3. 縦圧縮試験概要図 (単位 : mm)

命科学研究科附属演習林樹芸研究所青野研究林) の 4 本の供試木と同じ製材品のうち、使用しなかった部分から同様にせん断試験体を作製した。後述する除外した試験体を除き、柱目面試験体では、浜松市、つくば市、山武市、南伊豆町から、それぞれ 67 体、32 体、27 体、21 体の試験体が得られた。板目面試験体では同様に、それぞれ 93 体、30 体、27 体、20 体の試験体が得られた。いずれの試験体もせん断面積は 25 mm (L 方向) × 25 mm (R 方向または T 方向) とした。すべてのせん断試験体に対して、平均年輪幅、密度を測定した。

せん断試験は、専用の治具を用いて JIS Z 2101 に従って行なった。加力には、最大容量が 5 tf のオルセン式万能試験機 (株式会社森試験機製作所製) を用い、荷重レンジは 1 tf とした。最大荷重に達するまでの時間が約 3 分になるように荷重速度を調整した。試験終了後、最大荷重からせん断強度を算出した。ただし、せん断破壊が下部支持台に大きくかかり、圧縮荷重が加わったと思われる試験体は検討対象から除外した。含水率は、破壊後の試験体全体を用い、全乾法により求めた。

2.5 めり込み試験

204 材の曲げ試験体を採材した残りの供試体から、加力方向を接線方向 (T 方向) および半径方向 (R 方向) (加圧面はそれぞれ柱目面および板目面) とする JIS Z 2101 に従った無欠点小試験体を作製した。また、南伊豆町の 4 本の供試木と同じ製材品のうち、使用しなかった部分から同様にめり込み試験体を作製した。接線方向試験体、半径方向試験体ともに、浜松市、つくば市、山武市、南伊豆町から、それぞれ 98 体、32 体、27 体、21 体の試験体が得られた。いずれの試験体も木口断面積は 25 mm × 25 mm、長さは 75 mm とした。すべてのめり込み試験体に対して、平均年輪幅、密度を測定した。

めり込み試験は、幅 25 mm の加圧板を用いて JIS Z 2101 に従って行なった。加力には、最大容量が 5 tf のオルセン式万能試験機 (株式会社森試験機製作所製) を用い、荷重レンジは 1 tf とした。半径方向の加力は木表から行なった。加圧板の両端に変位計 (株式会社東京測器

研究所製、CDP-50)を設置し、荷重と加力時の変位を測定した。試験体の変位は両側の変位計の平均値とした。加力は平均の変位が1.25 mm (辺長の5%変形) となるまで行なった。5%変形に達するまでの時間が約2～3分になるように荷重速度を調整した。試験終了後、比例限度時の荷重から比例限度応力、5%変形時の荷重から辺長の5%めり込み強度を算出した。含水率は、破壊後の試験体全体を用い、全乾法により求めた。

2.6 くぎ接合部一面せん断試験

204材の曲げ試験体を採材した残りの供試体から、くぎ接合部一面せん断試験の軸材(主材)を作製した。試験体は「枠組壁工法建築物構造計算指針」(一般社団法人日本ツーバイフォー建築協会2018)に従い、38×89×300 mmの主材を12×100×300 mmの側材2枚で両側から挟み込むように、4本のくぎを用いて接合した。主材は長軸方向を繊維方向と一致させた。側材にはスギ構造用合板(5プライ、公称厚さ12 mm)を、くぎはCN50を用いた。試験体数は浜松市、つくば市、山武市で、それぞれ98体、

7体、8体とした。つくば市および山武市については容積密度数の比較的低かった供試体Bおよび供試体3のみから主材を得た。すべての主材において密度を測定した。

くぎ接合部一面せん断試験はインストロンタイプの引張圧縮試験機(新興通信工業株式会社製、TOM-5000X、容量49.5 kN)を用いて実施した(Fig. 4)。主材の上部より繊維方向(圧縮方向)に加力することで、くぎ接合部に一面せん断力を作用させた。主材側面の側材を取り付けていない面(長辺側)に変位計(株式会社東京測器研究所製、CDP-50)をそれぞれ一つずつ取り付け、側板に取り付けた変位ターゲットとの距離を測定することで、主材一側板間の変位を測定した。なお、主材一側板間の変位は2つの変位計の平均値とした。クロスヘッドの変位速度は2 mm/minとし、最大荷重の8割まで低減するか、変位が30 mmを超えるまで加力を行った。得られた荷重-すべり量曲線を基に、「木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017年版)」(木造軸組工法住宅の許容応力度設計改訂委員会2017)に記される完全弾塑性モデルを適用し、各強度特性値(降伏耐力、終局耐力、最大耐力、初期剛性)を求めた。主材の含水率は試験終了時の主材の長さ方向の中央部から長さが約25 mmの含水率試験体を切り出し、全乾法により求めた。

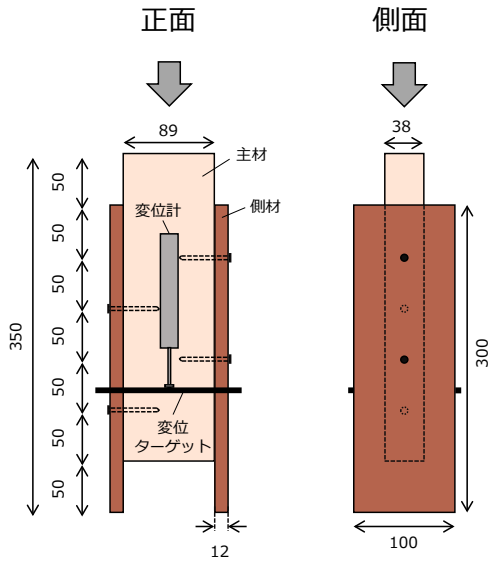


Fig. 4. くぎ接合部一面せん断試験概要図(単位:mm)

3. 結果と考察

3.1 曲げ強度

204材および206材の曲げ試験の結果をそれぞれTable 3およびTable 4に示す。見かけの曲げヤング係数および曲げ強度は、ASTM D1990 (ASTM International 2016)に従って、含水率を15%時の値に調整したものも合わせて記載した。有意水準を5%としてTukey-Kramer法による検定(以降も同様の検定による)を行なった結果は以下の通りであった。平均年輪幅の平均値は204材、206材ともに浜松市がつくば市および山武市よりも小さな値を示した。これは、浜松市のコウヨウザンが急傾斜の地位が低い場所に植栽されていたことが要因と考えられる。密

Table 3. 204材の曲げ試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m ³)	縦振動法の ヤング係数 (kN/mm ²)	含水率 (%)	見かけの曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	見かけの曲げ ヤング係数 (含水率15%調整) (kN/mm ²)	真の曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	比例限度 応力 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (含水率15%調整) (N/mm ²)
浜松市 99体	平均値	3.5	426	11.6	12.8	10.5	10.1	11.3	32.4	46.1	43.7
	最小値	1.2	363	8.34	10.8	6.92	6.60	6.80	18.2	20.3	19.9
	最大値	7.7	528	17.7	16.1	15.1	14.4	17.4	64.5	75.4	69.4
	標準偏差	1.2	33.6	1.72	0.993	1.44	1.39	1.92	8.70	13.0	12.0
	変動係数(%)	34	7.89	14.9	7.77	13.7	13.7	17.1	26.8	28.2	27.4
つくば市 32体	平均値	6.4	420	10.1	13.4	9.19	8.98	9.67	33.8	42.4	41.0
	最小値	3.2	298	7.03	11.2	6.10	5.86	6.34	16.1	17.1	17.1
	最大値	12	517	13.2	16.6	12.4	12.4	13.5	55.1	71.2	68.8
	標準偏差	2.8	60.9	1.89	1.20	1.77	1.82	2.08	11.0	13.3	12.9
	変動係数(%)	44	14.5	18.6	8.97	19.3	20.3	21.5	32.7	31.5	31.5
山武市 27体	平均値	5.3	425	11.6	14.6	10.4	10.4	11.2	37.0	50.5	50.9
	最小値	1.5	340	8.25	12.5	6.94	6.76	7.60	17.3	18.7	18.6
	最大値	12	504	15.0	23.3	13.7	13.4	14.6	58.5	81.0	87.3
	標準偏差	2.2	37.4	1.90	2.71	1.71	1.68	2.06	11.8	17.0	18.5
	変動係数(%)	42	8.79	16.4	18.5	16.4	16.2	18.3	31.9	33.7	36.3

Table 4. 206 材の曲げ試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m ³)	縦振動法の ヤング係数 (kN/mm ²)	含水率 (%)	見かけの曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	見かけの曲げ ヤング係数 (含水率 15% 調整) (kN/mm ²)	真の曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	比例限度 応力 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (含水率 15% 調整) (N/mm ²)
浜松市 33 体	平均値	2.8	451	12.2	12.8	11.3	10.9	11.7	37.7	43.6	41.3
	最小値	1.6	394	9.28	11.2	7.80	7.43	8.07	12.7	17.6	17.5
	最大値	4.0	555	17.1	16.4	18.5	17.7	17.7	71.1	82.1	75.0
	標準偏差	0.64	36.5	1.73	1.36	2.02	1.89	2.37	14.2	16.0	14.4
	変動係数 (%)	23	8.08	14.1	10.7	17.9	17.3	20.3	37.8	36.8	34.8
つくば市 11 体	平均値	4.9	436	10.9	13.0	9.59	9.30	9.81	32.8	38.1	36.5
	最小値	3.6	313	9.00	11.2	8.50	8.02	7.86	13.6	23.6	23.3
	最大値	9.5	492	13.1	14.0	11.9	11.6	12.8	53.2	61.3	58.9
	標準偏差	1.7	48.2	1.18	0.970	1.02	1.04	1.52	12.8	12.7	11.8
	変動係数 (%)	34	11.1	10.8	7.48	10.7	11.2	15.5	39.0	33.2	32.4
山武市 13 体	平均値	4.3	428	12.4	13.8	10.9	10.7	11.6	30.6	43.1	41.3
	最小値	0.90	387	9.19	11.5	8.63	8.92	9.32	12.3	17.2	17.2
	最大値	5.6	460	15.2	18.4	14.0	13.5	14.1	62.3	76.0	70.6
	標準偏差	1.2	21.6	1.66	2.38	1.44	1.20	1.43	14.7	20.0	18.2
	変動係数 (%)	27	5.03	13.4	17.2	13.1	11.2	12.4	48.1	46.5	44.0

度の平均値はいずれの植栽地でも同等であった。含水率の平均値は 206 材では違いはなかったが、204 材では山武市が他の植栽地より大きな値を示した。すべての種類のヤング係数の平均値について、204 材、206 材ともに、一部を除いてつくば市が他の植栽地より小さな値を示した。一方、比例限度応力および曲げ強度の平均値は、204 材、206 材ともに植栽地による違いは見られなかった。ただし、204 材の含水率調整を行なった曲げ強度のみ、山武市が他よりも大きいという結果となった。

本試験の主な特性値と、渡辺らが正角および平角を用いて行なった一連の強度試験を取りまとめた文献値 (森林総合研究所林木育種センター 2021) とを比較したものを Table 5 に示す。ここで、本試験の曲げ強度は含水率調整後の値を用い、5% 下限値は ASTM D2915 (ASTM International 2017) に従った順位法により、試験体数が 28 体以上あるもののみ算出した。ただし、文献値の見かけの曲げヤング係数および曲げ強度は含水率による調整は行っていない。

見かけの曲げヤング係数について、本試験の平均値の範囲は 8.98 ~ 10.9 kN/mm² であり、文献値の範囲 6.34 ~ 9.69 kN/mm² よりもやや大きい傾向であった。ただし、

文献値の含水率が本試験よりも大きく、仮に含水率による見かけの曲げヤング係数の調整を行なった場合、文献値の値が増加する点は考慮に入れる必要がある。本試験のすべての試験体の見かけの曲げヤング係数の平均値は 10.1 kN/mm² であり、「製材品の強度性能に関するデータベース データ集 < 8 >」(強度性能研究会事務局 2013) に記載された、スギ、カラマツ (*Larix kaempferi*)、ヒノキの見かけの曲げヤング係数の各平均値、7.14 kN/mm²、9.44 kN/mm²、11.0 kN/mm² と比較すると、本試験のコウヨウザンの見かけの曲げヤング係数はカラマツとヒノキの間に位置していた。

曲げ強度について、本試験の平均値の範囲は 36.5 ~ 50.9 N/mm² であり、文献値の範囲 23.3 ~ 41.5 N/mm² よりもやや大きい傾向であった。ただし、曲げ強度についても含水率の影響や、さらに寸法効果の影響もあることを考慮に入れる必要がある。本試験のすべての試験体の曲げ強度の平均値は 43.3 N/mm² であり、データベースに記載されたスギ、カラマツ、ヒノキの曲げ強度の各平均値、40.8 N/mm²、43.3 N/mm²、56.9 N/mm² と比較すると、本試験のコウヨウザンの曲げ強度はカラマツのそれに近いことがわかった。

Table 5. 曲げ試験における本試験と文献値の主な特性値の比較

植栽地	寸法型式 ・材種	幅 × せい (mm)	試験体数	含水率 (%)	見かけの曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ強度の 5% 下限値 (N/mm ²)
浜松市	204	38 × 89	99	12.8	10.1	43.7	26.2
	206	38 × 140	33	12.8	10.9	41.3	17.7
つくば市	204	38 × 89	32	13.4	8.98	41.0	18.1
	206	38 × 140	11	13.0	9.30	36.5	-
山武市	204	38 × 89	27	14.6	10.4	50.9	-
	206	38 × 140	13	13.8	10.7	41.3	-
庄原市	平角	105 × 150	43	18.6	9.69	41.5	29.5
京都市	正角	120 × 120	29	20.8	8.27	31.7	20.9
鴨川市	正角	120 × 120	30	18.0	7.04	27.1	18.4
日立市	正角	105 × 105	42	37.4	6.34	23.3	16.6

注：曲げ強度の 5% 下限値以外は平均値である。本試験 (浜松市、つくば市、山武市) の見かけの曲げヤング係数、曲げ強度、曲げ強度の 5% 下限値は含水率調整をしたものである。

文献値 (庄原市、京都市、鴨川市、日立市) は、森林総合研究所林木育種センター (2021) による。

一方、曲げ強度の5%下限値について、本試験の範囲は17.7～26.2 N/mm²であり、文献値の範囲16.6～29.5 N/mm²とほぼ重なった。本試験の曲げ強度の平均値が文献値のそれよりもやや大きかったことは異なる結果となった要因として、本試験体の曲げ強度のばらつきが大きかったことが挙げられる。

次に、枠組 JAS の甲種枠組材の基準に準じて荷重点間の中央部および材縁部の最大節径による等級区分を行なった結果、特級が大部分を占めた。具体的な特級の割合は、204 材では、浜松市、つくば市、山武市でそれぞれ82%、94%、78%であり、206 材ではそれぞれ85%、91%、92%であった。2 級を下回るものはなかった。寸法型式ごとに各植栽地の曲げ強度をまとめて5%下限値を算出したところ、204 材は24.9 N/mm²となった。206 材は17.7 N/mm²となったが寸法型式206に乗じる基準強度の低減係数で除すると17.7/0.84 = 21.1 N/mm²となる。これらの値を枠組 JAS に対応した基準強度と比較すると、スギを含む JSII に対しては、特級の基準強度28.4 N/mm²はいずれも下回るが、2 級の基準強度19.5 N/mm²はいずれも上回った。カラマツを含む JSIII に対しては、特級の基準強度22.5 N/mm²で204 材は上回るものの206 材は下回り、2 級の基準強度15.5 N/mm²はいずれも上回った。本試験の等級区分では荷重点間の節径のみでの評価など、検討の余地は多く残されているものの、本試験では特級の試験体が大部分であったことなどを踏まえると、現状の樹種群にコウヨウザンを含めるとすれば JSIII が適当であると考えられる。

さらに、枠組 JAS としてではなく、「製材の日本農林規格」(農林水産省2007)(以下、製材 JAS とする)の機械等級区分製材としての検討も行なった。204 材の含水率

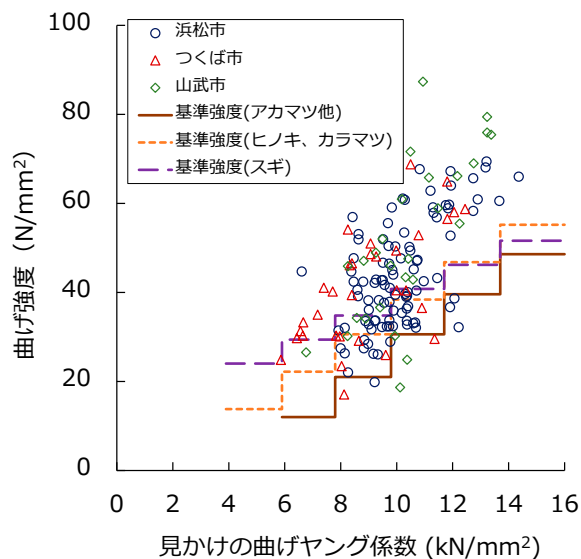


Fig. 5. 204 材の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度および基準強度との関係

注：図中の基準強度は製材 JAS の機械等級区分構造用製材による。

調整後の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度との関係を Fig. 5 に示す。製材 JAS の機械等級区分構造用製材に対応した3 樹種群の基準強度も合わせて記載した。いずれの植栽地においても、見かけの曲げヤング係数が増加するに従って曲げ強度も増加する傾向にあった。基準強度との比較では、3 樹種群の基準強度のうち一定の見かけの曲げヤング係数の範囲において最も基準強度が小さいアカマツ (*Pinus densiflora*) 他の基準強度に対して、曲げ強度が上回る割合が最も高くなっていた。すなわち、現行の樹種群にコウヨウザンの基準強度を適用させた場合、アカマツ他の樹種群が適当であると考えられる。

3.2 縦圧縮強度

204 材および206 材の縦圧縮試験の結果をそれぞれ Table 6 および Table 7 に示す。縦圧縮強度は、ASTM D1990 (ASTM International 2016) に従って、含水率を15%

Table 6. 204 材の縦圧縮試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	縦圧縮 強度 (N/mm ²)	縦圧縮強度 (含水率 15%調整) (N/mm ²)
浜松市 104 体	平均値	3.5	432	12.7	34.9	32.2
	最小値	1.2	344	10.8	25.3	23.7
	最大値	7.7	530	16.1	51.8	45.8
	標準偏差	1.2	38.9	0.995	4.99	4.66
	変動係数 (%)	34	9.00	7.80	14.3	14.4
つくば市 32 体	平均値	6.4	418	13.4	38.5	36.7
	最小値	3.2	310	11.2	25.6	23.0
	最大値	12	516	16.6	51.2	51.5
	標準偏差	2.8	62.0	1.20	7.71	8.31
	変動係数 (%)	44	14.8	8.97	20.0	22.7
山武市 27 体	平均値	5.3	429	14.6	39.3	39.4
	最小値	1.5	336	12.5	31.3	28.9
	最大値	12	532	23.3	53.7	55.5
	標準偏差	2.2	49.0	2.71	6.69	7.91
	変動係数 (%)	42	11.4	18.5	17.0	20.1

注：平均年輪幅、含水率を測定した試験体は曲げ試験で用いたものと同一である。

Table 7. 206 材の縦圧縮試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	縦圧縮 強度 (N/mm ²)	縦圧縮強度 (含水率 15% 調整) (N/mm ²)
浜松市 33 体	平均値	2.8	454	12.8	37.9	35.0
	最小値	1.6	395	11.2	25.2	26.3
	最大値	4.0	584	16.4	51.8	46.0
	標準偏差	0.64	45.3	1.36	5.38	4.74
	変動係数(%)	23	10.0	10.7	14.2	13.5
つくば市 11 体	平均値	4.9	449	13.0	42.9	39.9
	最小値	3.6	332	11.2	30.1	26.7
	最大値	9.5	503	14.0	52.5	48.7
	標準偏差	1.7	45.3	0.970	7.29	7.48
	変動係数(%)	34	10.1	7.48	17.0	18.7
山武市 13 体	平均値	4.3	428	13.8	41.5	39.8
	最小値	0.90	383	11.5	33.7	34.4
	最大値	5.6	481	18.4	52.2	47.1
	標準偏差	1.2	28.0	2.38	5.41	4.24
	変動係数(%)	27	6.53	17.2	13.0	10.7

注：平均年輪幅、含水率を測定した試験体は曲げ試験で用いたものと同一である。

時の値に調整したものも合わせて記載した。縦圧縮強度について平均値の比較を行なった結果は以下の通りであった。204 材では含水率調整の有無に関わらず、浜松市の平均値が他の植栽地の平均値よりも小さな値を示した。206 材では含水率調整をしない場合は、浜松市の平均値がつくば市の平均値よりも小さな値を示したが、山武市の平均値とは差はなかった。一方、含水率調整を行なった場合は、204 材同様、浜松市の平均値が他の植栽地の平均値よりも小さな値を示した。

本試験の主な特性値と、渡辺らが正角および平角を用いて行なった一連の強度試験を取りまとめた文献値（森林総合研究所 林木育種センター 2021）とを比較したものを Table 8 に示す。算出方法は曲げ強度と同様である。

縦圧縮強度について、本試験の平均値の範囲は 32.2 ～ 39.9 N/mm² であり、文献値の範囲 16.0 ～ 25.4 N/mm² よりも大きい傾向であった。縦圧縮強度の 5% 下限値では、本試験の平均値の範囲は 23.0 ～ 26.3 N/mm² であり、こちらも文献値の範囲 12.4 ～ 21.3 N/mm² よりも大きい傾向であった。曲げ試験体とは異なり縦圧縮試験体の文献値の含水率は 15% 前後であり、本試験の含水率調整後の含水率 15% と大きく外れているわけではない。ただし、本試験の試験体の長さが 225 mm あるいは 325 mm であるのに対して、文献値の試験体の長さは 630 mm あるいは 720 mm であり、文献値の試験体では節などの強度上の欠点の本試験体よりも含まれる割合が高かった可能性も考えられる。

次に、枠組 JAS に対する検討を行なった。寸法型式ごとに各植栽地の縦圧縮強度をまとめて 5% 下限値を算出したところ、204 材は 24.9 N/mm²、206 材は 26.5 N/mm² となり、206 材の方が 204 材よりも大きい値となった。さらに、寸法型式 206 に乗じる基準強度の低減係数で除すると $26.5/0.96 = 27.6 \text{ N/mm}^2$ となる。これらの値を枠組 JAS に対応した基準強度と比較すると、ヒノキを含む

Table 8. 縦圧縮試験における本試験と文献値の主な特性値の比較

植栽地	寸法型式・材種	幅×せい (mm)	試験体数	含水率 (%)	縦圧縮強度 (N/mm ²)	縦圧縮強度の 5% 下限値 (N/mm ²)
浜松市	204	38×89	104	12.7	32.2	25.1
	206	38×140	33	12.8	35.0	26.3
つくば市	204	38×89	32	13.4	36.7	23.0
	206	38×140	11	13.0	39.9	-
山武市	204	38×89	27	14.6	39.4	-
	206	38×140	13	13.8	39.8	-
庄原市	平角	105×150	43	15.2	25.2	21.3
京都市	正角	120×120	29	14.0	25.4	20.5
鴨川市	正角	120×120	20	14.8	23.2	17.4
日立市	正角	105×105	43	17.5	16.0	12.4

注：縦圧縮強度の 5% 下限値以外は平均値である。

本試験（浜松市、つくば市、山武市）の縦圧縮強度、縦圧縮強度の 5% 下限値は含水率調整をしたものである。

文献値（庄原市、京都市、鴨川市、日立市）は、森林総合研究所林木育種センター（2021）による。

JSI、スギを含む JSII、カラマツを含む JSIII の特級の各基準強度 24.9 N/mm²、15.7 N/mm²、20.9 N/mm² と同値あるいは上回った。本試験体は長さが短く節などの強度上の欠点が入る割合が小さかったという点はあるものの、現行の樹種群においては、縦圧縮強度が樹種群への割り当てを決定づける要因とはならないと考えられる。

さらに、製材 JAS の機械等級区分構造用製材としての検討も行なった。204 材の含水率調整後の見かけの曲げヤング係数と縦圧縮強度との関係を Fig. 6 に示す。見かけの曲げヤング係数は、同じ供試体から得られた曲げ試験結果の値を用いた。製材 JAS の機械等級区分構造用製材に対応した 3 樹種群の基準強度も合わせて記載した。いずれの植栽地においても、見かけの曲げヤング係数が増加するに従って縦圧縮強度も増加する傾向にあった。基準強度との比較では、3 樹種群の基準強度のうち一定の見かけの曲げヤング係数の範囲において最も基準強度が小さいアカマツ他の基準強度に対して、縦圧縮強度が上回る割合が最も高くなっていた。すなわち、現行の樹種群にコウヨウザンの基準強度を含めるとすれば、曲げ試験の結果と同様にアカマツ他の樹種群が適当であると考えられる。

3.3 セン断強度

柁目面（LR 面）および板目面（LT 面）のせん断試験の結果をそれぞれ Table 9 および Table 10 に示す。せん断強度の平均値の比較を行なった結果、板目面ではいずれの植栽地とも平均値に差はなかったが、柁目面では浜松市と南伊豆町の平均値に差が認められた。後述するように、せん断強度は密度との相関が高いが、浜松市と南伊豆町で密度の平均値の差が最も大きく、特に早材と晩材がと

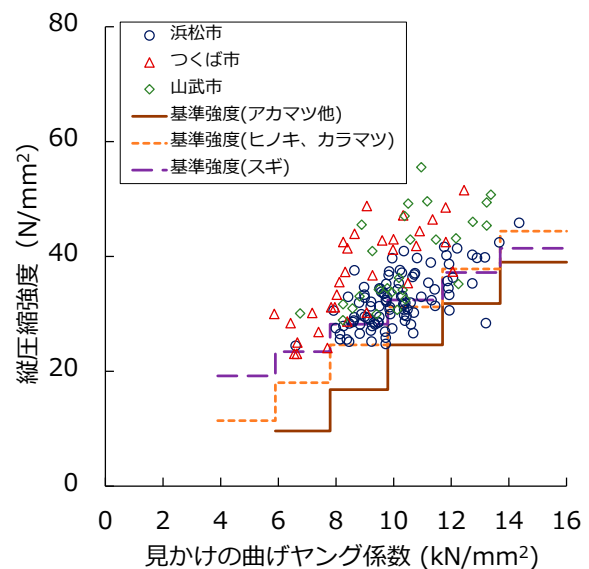


Fig. 6. 204 材の見かけの曲げヤング係数と縦圧縮強度および基準強度との関係

注：図中の基準強度は製材 JAS の機械等級区分構造用製材による。

もにせん断を受ける柁目面で強度への影響が大きかった可能性が考えられる。また、柁目面と板目面との比較では、板目面の方がせん断強度の平均値が大きい傾向にあった。

密度とせん断強度の関係について、コウヨウザンを他の樹種と比較したときの相対的位置を検討した。他の樹種(文献値)も含め、密度と柁目面のせん断強度との関係を Fig. 7 に示す。ここで用いた文献値は、スギ、アカマツ、ツガ(*Tsuga sieboldii*)、カラマツは中井ら(1982)、ヒノキは井道ら(2012)、鹿児島県のコウヨウザンは福留ら(2018)による無欠点小試験体の平均値である。渡辺ら(2021)もコウヨウザンのせん断試験を行なっているが、せん断面

Table 9. 柁目面(LR面)のせん断試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	せん断 強度 (N/mm ²)
浜松市 67 体	平均値	3.9	436	13.5	9.04
	最小値	1.3	346	12.0	6.99
	最大値	7.3	537	16.0	12.4
	標準偏差	1.5	41.3	0.944	1.23
	変動係数(%)	39	9.47	7.00	13.6
つくば市 32 体	平均値	6.2	411	10.7	8.89
	最小値	2.9	278	9.00	5.41
	最大値	15	502	12.5	11.7
	標準偏差	3.1	62.6	1.02	1.67
	変動係数(%)	50	15.2	9.56	18.8
山武市 27 体	平均値	5.6	401	10.1	8.86
	最小値	2.0	315	9.20	6.00
	最大値	13	466	12.3	11.2
	標準偏差	2.8	41.8	0.834	1.39
	変動係数(%)	49	10.4	8.23	15.7
南伊豆町 21 体	平均値	6.3	393	10.2	8.07
	最小値	1.7	347	8.80	6.80
	最大値	14	503	14.0	11.0
	標準偏差	3.6	36.2	1.23	0.904
	変動係数(%)	57	9.22	12.0	11.2

Table 10. 板目面(LT面)のせん断試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	せん断 強度 (N/mm ²)
浜松市 93 体	平均値	3.8	433	13.3	9.05
	最小値	1.3	347	11.4	5.25
	最大値	7.3	531	16.2	15.7
	標準偏差	1.5	42.2	0.996	1.39
	変動係数(%)	40	9.74	7.48	15.3
つくば市 30 体	平均値	6.0	414	10.2	9.68
	最小値	2.9	276	8.50	6.49
	最大値	15	509	12.3	13.8
	標準偏差	3.0	66.0	1.07	1.86
	変動係数(%)	50	15.9	10.5	19.2
山武市 27 体	平均値	5.6	405	9.86	9.34
	最小値	2.1	319	8.70	7.28
	最大値	15	467	11.7	12.1
	標準偏差	2.9	42.7	0.830	1.38
	変動係数(%)	51	10.6	8.42	14.7
南伊豆町 20 体	平均値	6.4	393	10.2	8.85
	最小値	1.8	345	8.90	6.51
	最大値	13	501	14.5	11.8
	標準偏差	3.6	35.4	1.29	1.47
	変動係数(%)	56	9.00	12.6	16.6

積が 105 mm × 105 mm の実大いす型せん断試験であるため、本検討には含めていない。Fig. 7 からコウヨウザンの密度はスギとヒノキの間に位置しているが、せん断強度は植栽地によってはスギを下回っているものも見られた。

次に、本試験結果からせん断の基準強度を試算した。なお、せん断の基準強度は、製材 JAS、枠組 JAS、無等級材のいずれにおいても樹種または樹种群ごとに同じ値を採用している。せん断の基準強度は、無欠点小試験体による各樹种群の基準強度値(平均値) × 下限値に対応するばらつき係数(4/5) × 強度比 α (1/2) × (1/1.5) とされている(井道 2015)。ただし、加力面の情報は無い。ここでは、各植栽地の柁目面のせん断強度の平均値をこの計算式に入力し、基準強度相当値を算出した。結果を Table 11 に示す。基準強度相当値は 2.04 ~ 2.41 N/mm² となった。製材 JAS、枠組 JAS、無等級材に対応した基準強度は、ヒノキ・カラマツおよびスギでそれぞれ 2.1 N/mm²、1.8 N/mm² であり、コウヨウザンのせん断の基準強度相当値は、概ねヒノキ・カラマツに近い。ただし、せん断の基準強度はせん断強度から比べると低く抑えられており、Fig. 7 に示した他樹種のせん断強度から同様の計算式により基準強度相当値を算出し、基準強度と比較すると基準強度相当

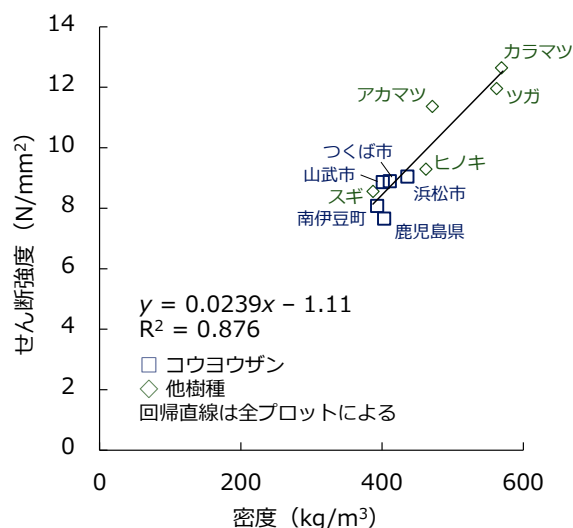


Fig. 7. 密度と柁目面のせん断強度(ともに平均値)との関係

注: スギ、アカマツ、ツガ、カラマツ: 中井ら(1982)、ヒノキ: 井道ら(2012)、鹿児島県のコウヨウザン: 福留ら(2018)

Table 11. せん断の基準強度相当値の算出

植栽地	浜松市	つくば市	山武市	南伊豆町	鹿児島県
柁目面のせん断 強度平均値 (N/mm ²)	9.04	8.89	8.86	8.07	7.65
基準強度相当値 (N/mm ²)	2.41	2.37	2.36	2.15	2.04

注: 基準強度相当値は、柁目面平均値 × (4/5) × (1/2) × (1/1.5) で求めた。
鹿児島県の試験体は、福留ら(2018)による。

値 / 基準強度は 1.2 ～ 1.6 となる。仮に各植栽地のコウヨウザンの基準強度相当値の平均値 2.35 N/mm^2 をヒノキ・カラマツおよびスギの基準強度 2.1 N/mm^2 、 1.8 N/mm^2 で除すると基準強度相当値 / 基準強度はそれぞれ 1.1 および 1.3 となり、各樹種とのバランスの点からはスギの基準強度相当が適当であると考えられる。

3.4 めり込み強度特性値

接線方向 (T 方向) および半径方向 (R 方向) のめり込み試験の結果をそれぞれ Table 12 および Table 13 に示す。比例限度応力は、接線方向、半径方向ともにつくば市の平均値が浜松市と南伊豆町の平均値よりも大きかった。山武市に対しては、加力方向によって結果が異なり、接線方向では差はなく、半径方向で差が認められた。辺長の

Table 12. 接線方向 (T 方向) のめり込み試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	比例限度 応力 (N/mm ²)	辺長の5% めり込み強度 (N/mm ²)
浜松市 98 体	平均値	3.8	426	13.9	3.83	7.65
	最小値	1.3	335	12.5	1.72	4.33
	最大値	10	541	16.6	7.45	12.8
	標準偏差	1.7	41.7	0.702	1.14	1.83
	変動係数(%)	44	9.78	5.06	29.8	24.0
つくば市 32 体	平均値	6.1	409	10.8	4.44	8.66
	最小値	2.5	279	9.23	2.03	3.56
	最大値	16	506	12.6	7.10	13.5
	標準偏差	3.1	63.0	0.982	1.39	2.67
	変動係数(%)	51	15.4	9.05	31.2	30.9
山武市 27 体	平均値	5.6	402	9.38	3.96	7.99
	最小値	2.3	313	8.40	1.97	4.19
	最大値	12	473	11.2	5.92	11.3
	標準偏差	2.7	44.6	0.699	1.04	1.93
	変動係数(%)	48	11.1	7.45	26.3	24.1
南伊豆町 21 体	平均値	6.4	386	10.2	3.52	7.25
	最小値	1.7	351	8.76	2.36	5.58
	最大値	13	479	13.7	6.05	11.9
	標準偏差	3.5	31.4	1.07	0.815	1.38
	変動係数(%)	54	8.14	10.4	23.1	19.0

Table 13. 半径方向 (R 方向) のめり込み試験の結果

植栽地 試験体数		平均 年輪幅 (mm)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)	比例限度 応力 (N/mm²)	辺長の 5% めり込み強度 (N/mm²)
浜松市 98 体	平均値	3.8	428	13.9	4.05	7.65
	最小値	1.3	348	12.6	1.80	3.99
	最大値	9.0	536	16.3	7.18	12.0
	標準偏差	1.6	41.3	0.666	1.19	1.50
	変動係数(%)	43	9.63	4.80	29.4	19.6
つくば市 32 体	平均値	6.2	406	10.4	5.23	9.89
	最小値	3.0	280	8.79	2.16	4.49
	最大値	15	496	12.0	8.99	14.6
	標準偏差	2.9	64.1	0.936	1.61	2.68
	変動係数(%)	48	15.8	8.98	30.9	27.1
山武市 27 体	平均値	5.9	403	10.0	4.20	8.40
	最小値	3.3	311	9.01	2.26	5.82
	最大値	13	476	11.6	5.59	10.7
	標準偏差	2.9	42.8	0.707	0.790	1.04
	変動係数(%)	49	10.6	7.04	18.8	12.4
南伊豆町 21 体	平均値	5.6	384	10.2	3.80	7.79
	最小値	1.4	344	9.15	2.54	5.49
	最大値	13	474	13.1	5.50	10.8
	標準偏差	3.3	30.4	0.904	0.842	1.41
	変動係数(%)	60	7.92	8.86	22.2	18.1

の 5% めり込み強度は、接線方向ではいずれの植栽地においても平均値に差は認められなかったが、半径方向ではつくば市が他の植栽地の平均値よりも大きかった。接線方向と半径方向との比較では、比例限度応力、辺長の 5% めり込み強度ともに半径方向の方が平均値が大きい傾向にあった。

せん断強度と同様、めり込みの特性値についても一般的に密度との相関が高い。そこで、文献値のデータがある接線方向の辺長の 5% めり込み強度を用いて密度との関係を Fig. 8 に示す。ここで用いた文献は 3.3 に記載したものと同じである。Fig. 8 からコウヨウザンの密度と辺長の 5% めり込み強度はともにスギの周辺に位置していた。

次に、本試験結果からめり込みの基準強度を試算した。なお、めり込みの基準強度は、せん断の基準強度と同様に、製材 JAS、枠組 JAS、無等級材のいずれにおいても樹種または樹種群ごとに同じ値を採用している。めり込みの基準強度は、無欠点小試験体による各樹種群の基準強度値 (比例限度応力の平均値) $\times$ 強度比 α (1) $\times$ 1.5 とされている (井道 2015)。ただし、加力方向の情報は無い。ここでは、各植栽地の接線方向の比例限度応力の平均値をこの計算式に入力し、基準強度相当値を算出した。結果を Table 14 に示す。基準強度相当値は $5.28 \sim 6.66 \text{ N/mm}^2$ となった。製材 JAS、枠組 JAS、無等級材に対応した基準

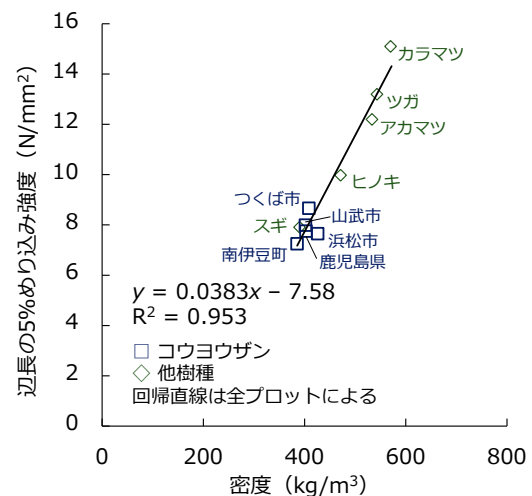


Fig. 8. 密度と接線方向の辺長の 5% めり込み強度 (ともに平均値) との関係

注: スギ、アカマツ、ツガ、カラマツ: 中井ら (1982)、ヒノキ: 井道ら (2012)、鹿児島県のコウヨウザン: 福留ら (2018)

Table 14. めり込みの基準強度相当値の算出

植栽地	浜松市	つくば市	山武市	南伊豆町
接線方向の比例限度 応力の平均値 (N/mm^2)	3.83	4.44	3.96	3.52
基準強度相当値 (N/mm^2)	5.75	6.66	5.94	5.28

注: 基準強度相当値は、比例限度応力の平均値 $\times$ 1.5 で求めた。

強度は、ヒノキ・カラマツおよびスギでそれぞれ 7.8 N/mm^2 、 6.0 N/mm^2 であり、コウヨウザンのめり込みの基準強度相当値は概ねスギに近いが、つくば市以外の植栽地ではスギの基準強度に対して下回っていた。

3.5 くぎ接合部一面せん断強度特性値

コウヨウザンを主材に、スギ構造用合板を側材としたくぎ接合部一面せん断試験の結果を Table 15 に示す。それぞれの力学特性値について平均値の比較を行った。その結果、浜松市の平均値はつくば市よりも降伏耐力、終局耐力、最大耐力で大きく、山武市の平均値はつくば市よりも終局耐力および最大耐力で大きかった。せん断強度およびめり込み特性値と同様に、くぎ接合部一面せん断試験より得られる力学特性値は一般的に主材の密度との相関係数が高く、本研究においては、浜松市、山武市、つくば市の順に主材の密度が高かった。特につくば市の密度の平均値は 315 kg/m^3 と顕著に低く、これが各種特性値の植栽地による違いに大きく影響したと考えられる。しかしながら、初期剛性については山武市、つくば市、浜松市の順に高く、密度の影響は認められなかった。これについて、既往研究より完全弾塑性モデルで得られる初期剛性は、荷重－すべり量曲線から認められる実際の性能（立ち上がりの勾配）とは異なる傾向を示す場合があることが指摘されている（小川ら 2018）。本研究においても特に主材の密度が高い試験体で、荷重－すべり量曲線の立ち上がりの勾配よりも初期剛性が低い場合が認められ、実際の挙動を初期剛性が正しく表現できていない可能性がある。この場合の初期剛性は安全側の評価となるが、くぎ接合部の初期剛性についてより適切な評価法が必要であると考えられる。

せん断強度およびめり込み特性値と同様に、くぎ接合部一面せん断試験より得られる力学特性値と密度との関係について、コウヨウザンを主材とした場合と他樹種を主材とした場合を比較した。結果を Fig. 9 に示す。ここでは最大耐力と密度との関係をスギ、ヒノキおよびカラ

マツを主材にした場合の結果（戸田ら 2016）と合わせて示した。なお、戸田らによるスギ、ヒノキおよびカラマツのデータにおける側材はカラマツスギ複合の構造用合板（5 プライ、厚さ 12 mm および 15 mm ）であり、本研究で用いたスギ構造用合板（5 プライ、厚さ 12 mm ）とは異なるが、くぎは本研究と同様の CN50 である。これらの試験体数はすべて 6 体ずつ（合板厚さ 12 mm で 3 体、 15 mm で 3 体）であった。Fig. 9 より、コウヨウザンを主材にした場合の最大耐力は、同程度の密度を有するスギおよび、比較的密度の高いヒノキおよびカラマツと比較して同程度であるかそれ以下であった。密度が顕著に小さいつくば市のコウヨウザンに関しては、他樹種および他植栽地のコウヨウザンと比較して小さい値を示し、全プロット（本試験と文献の各平均値）を対象とした回帰直線よりも下側となった。なお、降伏耐力においてもこれと同様の傾向を示した。したがって、くぎ接合部一面せん断試験より得られる力学特性値は概ねスギと同程度の性能を有すると考えられるが、試験体の密度によっては

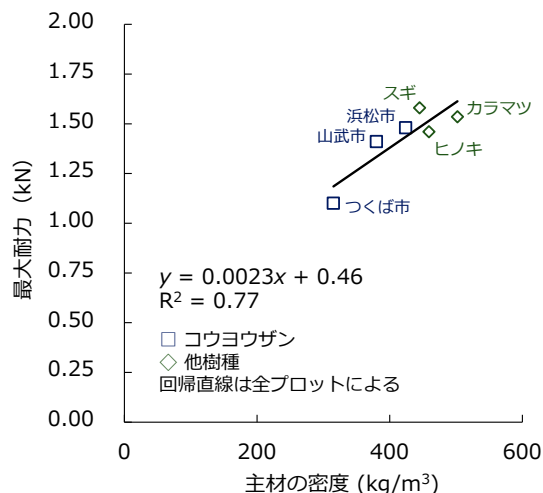


Fig. 9. 主材の密度とくぎ接合部一面せん断最大耐力（ともに平均値）との関係

注：スギ、ヒノキ、カラマツ：戸田ら（2016）

Table 15. くぎ接合部一面せん断試験の結果

植栽地 試験体数		主材の密度 (kg/m^3)	主材の含水率 (%)	降伏耐力 (kN)	終局耐力 (kN)	最大耐力 (kN)	初期剛性 (kN/mm)
浜松市 98 体	平均値	425	12.0	0.76	1.4	1.5	0.50
	最小値	338	10.5	0.52	0.98	1.1	0.19
	最大値	542	15.0	1.1	1.8	1.9	1.1
	標準偏差	36.9	0.914	0.13	0.16	0.17	0.22
	変動係数 (%)	8.67	7.61	16	11	11	45
つくば市 7 体	平均値	315	11.7	0.56	1.0	1.1	0.60
	最小値	307	10.5	0.51	0.92	1.0	0.47
	最大値	332	12.6	0.61	1.2	1.3	0.76
	標準偏差	8.29	0.626	0.033	0.078	0.085	0.097
	変動係数 (%)	2.63	5.34	6.0	7.7	7.7	16
山武市 8 体	平均値	380	15.5	0.68	1.3	1.4	0.70
	最小値	345	12.7	0.57	1.1	1.2	0.50
	最大値	434	18.3	0.82	1.5	1.6	0.88
	標準偏差	30.5	2.26	0.092	0.11	0.12	0.45
	変動係数 (%)	8.01	14.6	13	8.8	8.8	21

それを大きく下回っていた。

4. 結論

さまざまな植栽地から入手したコウヨウザンを用いて、各種強度試験を行なった。得られた試験結果から、強度特性値を評価するとともに、コウヨウザンの強度特性値と現行の基準強度との関係を検証した。

見かけの曲げヤング係数および曲げ強度は、データベースに記載されたカラマツのそれらに近い値が得られた。枠組 JAS の甲種枠組材の基準に準じて荷重点間の中央部及び材縁部の最大節径による等級区分を行なった結果、特級が大部分を占めた。枠組 JAS に対応した甲種枠組材の特級の曲げの基準強度と比較すると、コウヨウザンは JSIII (カラマツ) 相当であった。製材 JAS の機械等級区分構造用製材に対応した曲げの基準強度と比較すると、コウヨウザンはアカマツ他の樹種群相当であった。

縦圧縮強度について、枠組 JAS に対応した甲種枠組材の特級の圧縮の基準強度と比較すると、コウヨウザンは JSI (ヒノキ)、JSII (スギ)、JSIII (カラマツ) の基準値をいずれも上回った。一方、製材 JAS の機械等級区分構造用製材に対応した圧縮の基準強度と比較した結果では、曲げと同様、アカマツ他の樹種群相当であった。

せん断強度について、試験結果から試算したせん断の基準強度相当値と製材 JAS、枠組 JAS、無等級材に対応したせん断の基準強度とを比較した結果、コウヨウザンはスギの樹種群相当であった。

めり込みについて、比例限度応力から試算しためり込みの基準強度相当値とめり込みの基準強度とを比較した結果、コウヨウザンはスギあるいはスギを含んだ樹種群相当であった。

くぎ接合部一面せん断試験について、スギと同程度の密度を有する場合、コウヨウザンの最大耐力と降伏耐力はスギと同程度であったが、密度の低い試験体はスギよりも低い性能を示す場合があった。

以上の結果を踏まえて、各強度特性値において最も小さいものを安全側と捉えて、仮にコウヨウザンを現行の樹種群に含めることを検討すれば以下になる。製材 JAS の機械等級区分製材としては、曲げ試験および縦圧縮試験の結果からはアカマツ他の樹種群に含めることが適当であり、せん断試験の結果からせん断の基準強度はスギ相当の 1.8 N/mm^2 とすることが適当である。枠組 JAS としては、甲種枠組材の特級のみの観点ではあるが、曲げ試験、縦圧縮試験の結果からは JSIII (カラマツ) に含めることが適当であるが、せん断試験の結果からは JSII (スギ) に含めることが適当であるため、現行の樹種群では対応できない。めり込みについてはいずれの種類も基準強度も同様で、スギと同じ 1.8 N/mm^2 とすることが適当である。

ただし、これらは限られた試験体による検討結果であり、製材 JAS における目視等級区分製材としての検討、

枠組 JAS における甲種枠組材 2 級としての検討はともに行なっていない。さらに、せん断、めり込みは、スギの基準強度に対しても下回るものも存在した。また、くぎ接合部一面せん断については、密度の低い試験体はスギよりも低い性能を示す場合があった。以上のように課題も多数残されており、今後もデータを積み重ねて検証を進めることが重要である。

謝辞

本研究は (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト「国産早生樹種の用材利用に向けた材質・加工特性の解明」(課題番号 201905) の研究成果である。試験体の入手に際し、静岡県立農林環境専門職大学の池田潔彦教授、千葉県森林センターにご協力いただいた。丸太の非破壊試験では、長野県林業総合センターの奥原祐司さん、岐阜県森林研究所の田中健斗さん、森林総合研究所の原田真樹さんの協力を得た。森林総合研究所の齋藤周逸さんには、静岡県南伊豆町の試験体の提供および試験体の乾燥で協力を得た。せん断試験、めり込み試験では、沖縄県森林資源研究センターの井口朝道さん、青森県産業技術センター林業研究所の伊藤快さんの協力を得た。記して感謝する。

引用文献

- ASTM International (2016) ASTM D1990 – 16 Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens.
- ASTM International (2017) ASTM D2915 – 17 Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products.
- 邸 帥豪・前田 啓・信田 聡・鴨田 重裕・齋藤 周逸 (2019a) 国産コウヨウザンの乾燥特性 (第 1 報) —基礎物性の測定と人工乾燥スケジュールの推定—. 木材工業, 74(4), 146–151.
- 邸 帥豪・前田 啓・信田 聡・鴨田 重裕・齋藤 周逸 (2019b) 国産コウヨウザンの乾燥特性 (第 2 報) —板材の天然乾燥特性と人工乾燥特性—. 木材工業, 74(9), 347–351.
- 福留 重人・中原 亨・日高 富男 (2018) 早生樹材を活用した木製品の開発. 鹿児島県工業技術センター研究報告, 32, 53–60.
- 井道 裕史・長尾 博文・加藤 英雄 (2012) 大径丸太から採材された心去りヒノキ製材品および無欠点小試験体の強度性能. 森林総合研究所研究報告, 11(3), 121–133.
- 井道 裕史 (2015) 5.3 我が国のせん断、めり込み基準強度の誘導方法. 日本木材学会 木材強度・木質構造研究会編 “ティンバーメカニクス —木材の力学理論と応用—”, 海青社, 137–139.

- 井道 裕史・長尾 博文・加藤 英雄・小島 瑛里奈・松村 ゆかり・松田 陽介・齋藤 周逸 (2022) 複数地域で選定したコウヨウザン丸太から採材した枠組壁工法構造用製材の曲げ試験. 日本木材学会大会研究発表要旨集, 72, D15-P-04.
- 一般社団法人日本ツーバイフォー建築協会 (2018) 材料及び接合部の許容応力度等を定める試験・評価方法とその解説. “枠組壁工法建築物構造計算指針”, 丸善出版株式会社, 267–268, 299–306.
- 建設省 (2000) 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号. 木材の基準強度 F_c 、 F_t 、 F_b 及び F_s を定める件. (最終改正: 令和 2 年 8 月 28 日国土交通省告示第 821 号). 強度性能研究会事務局 (2013) “「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集 < 8 >”, 54pp.
- 劉 元・中山 義雄 (1998) コウヨウザン植栽木の曲げ強さ. 木材学会誌, 44(6), 387–394.
- 木造軸組工法住宅の許容応力度設計改訂委員会 (2017) 試験方法と評価方法. “木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2017 年度版)”, 公益財団法人日本住宅・木材技術センター, 289–320.
- 中井 孝・山井 良三郎 (1982) 日本産主要 35 樹種の強度的性質. 林業試験場研究報告, 319, 13–46.
- 日本規格協会 (2009) “JIS Z 2101 木材の試験方法”, 日本規格協会, 66pp.
- 農林省 (1974) 昭和 49 年 7 月 8 日 農林省告示第 600 号: 枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格. (最終改正: 令和 2 年 6 月 1 日 農林水産省告示第 1066 号).
- 農林水産省 (2007) 平成 19 年 8 月 29 日 農林水産省告示第 1083 号. 製材の日本農林規格. (最終改正: 令和元年 8 月 15 日農林水産省告示第 661 号).
- 小川 敬多・原田 真樹・渋沢 龍也・宮本 康太 (2018) 各種構造用面材を用いた釘接合部の一面せん断特性と変形状の把握. 木材学会誌, 64(4), 139–148.
- 林野庁 (2021) “令和 2 年度 森林・林業白書”, 林野庁, 36. <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/R2hakusyo/attach/pdf/zenbun-64.pdf> (参照 2022-05-12)
- 森林総合研究所林木育種センター (2018) “コウヨウザンの特性と増殖の手引き”, 森林総合研究所林木育種センター, 28pp. <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/4th-chuukiseika15.pdf> (参照 2022-05-12)
- 森林総合研究所林木育種センター (2021) “コウヨウザンの特性と増殖マニュアル”, 森林総合研究所林木育種センター, 53pp. <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/4th-chuukiseika41.pdf> (参照 2022-05-12)
- 戸田 淳二・渋沢 龍也・長尾 博文・青木 謙治・小野 泰・中島 史郎 (2016) スギ, ヒノキ, カラマツ 枠組壁工法構造用製材の一面せん断性能. 木材工業 71(3), 95–100.
- 涌嶋 智・渡辺 靖崇 (2017) コウヨウザンの材質. 森林遺伝育種, 6, 148–154.
- 渡辺 靖崇・涌嶋 智・藤田 和彦・小西 浩和 (2017) 広島県で生育したコウヨウザンの強度性能. 日本木材学会大会研究発表要旨集, 67, D17-07-1530.
- 渡辺 靖崇・涌嶋 智・藤田 和彦・小西 浩和・西川 祥子 (2019) 茨城県で生育したコウヨウザンの強度性能. 日本木材学会大会研究発表要旨集, 69, D15-P-11.
- 渡辺 靖崇・涌嶋 智・藤田 和彦・小西 浩和・西川 祥子・近藤 禎二・山口 秀太郎・生方 正俊 (2021) 京都府・千葉県で生育したコウヨウザンの強度性能. 日本木材学会大会研究発表要旨集, 71, 1-04-11.

Strength properties of Chinese fir timber collected from multiple sites

Hirofumi IDO^{1)*}, Erina KOJIMA¹⁾, Hirofumi NAGAO¹⁾, Hideo KATO¹⁾,
Yukari MATSUMURA²⁾ and Yosuke MATSUDA²⁾

Abstract

Various strength tests of kouyouzan (Chinese fir: *Cunninghamia lanceolata*) obtained from multiple sites were conducted. The test results were used to evaluate strength property and verify the relationship with the current design strength. From the verification, the following conclusions were drawn. First, for mechanical grading of structural lumber under the Japanese Agricultural Standard for sawn lumber (JAS1083), it is appropriate to include the Chinese fir in akamatsu (Japanese red pine: *Pinus densiflora*) and other species groups for bending and compression. However, the shear should be equivalent to that of sugi (Japanese cedar: *Cryptomeria japonica*). Second, although only from the viewpoint of the select structural grade of A class structural lumber, for the Japanese Agricultural Standard for structural lumber and fingerjointed structural lumber for wood frame construction (JAS0600), it is appropriate to include JSIII for bending and compression and JSII for shear. Therefore, the current species groups are not applicable. For partial compression perpendicular to grain, all kinds of design strength are the same and will be equivalent to sugi. However, these results were obtained from a limited number of specimens, and neither JAS1083 was examined as visual grading of structural lumber nor JAS0600 was examined as no.2 grade for A class structural lumber. Additionally, for the shear strength and partial compression strength perpendicular to grain, some lumber had lower strength than the design strength of sugi. Moreover, some specimens with low density exhibited lower performance than sugi in terms of one-sided shear at nailed joints. As mentioned above, many issues remain, and data accumulation for further verification is essential.

Key words : Chinese fir, timber, bending, compression parallel to the grain, shear, partial compression perpendicular to grain, nailed joint

Received 13 May 2022, Accepted 2 September 2022

1) Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Wood Properties and Processing, FFPRI

* Department of Wood Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; E-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp

