

長野県産カラマツ大径材から製材された心去り平角材の乾燥特性及び強度性能の解明

奥原祐司・吉田孝久・今井信^{*1}・山口健太^{*2}

今後、生産の増産が見込まれるカラマツ大径丸太の強度性能と、この大径材から製材された心去り平角材の乾燥特性及び曲げ強度性能を把握し、その利用有効性について検討した。

(1) 素材の大 (140 本) の縦振動ヤング係数の平均値±標準誤差は $12.0 \pm 0.13 \text{ kN/mm}^2$ 、中 (41 本) は $13.8 \pm 0.25 \text{ kN/mm}^2$ となり、現在の本県の素材の大及び中のカラマツ丸太の縦振動ヤング係数の平均は $E_f 130$ になると推測する。(2) 2 丁取りした心去り平角材の一方を蒸気圧力併用式乾燥ともう一方を蒸気式乾燥した結果、平均含水率は 12.6%と 15.0%となり、蒸気圧併用式乾燥は約 3 割以上の時間短縮が期待できる。また、強度性能については、目視等級の基準強度を満足し一部の試験材を除けば機械等級も満足した。(3) 2 丁取りした心去り平角材をガラスハウス乾燥した結果、約 6 カ月間で含水率 15%を下回り、強度性能では目視等級及び機械等級区分の基準強度をほぼ満足した。(4) 丸太の縦振動ヤング係数とそこから製材された 2 本の平角材の縦振動ヤング係数の平均値には相関関係が認められた。しかし、個々の平角材の曲げヤング係数では丸太の曲げヤング係数と必ずしも一致しない場合もあった。(5) 1 本の丸太から製材された実大材試験体と無欠点試験体について、実大材試験体の曲げヤング係数は無欠点試験体の範囲内にあり、また、実大材試験体の曲げ強さは 4 割強 (正角材に対しては約 2 割) 寸法効果により低下していた。

キーワード：カラマツ、心去り、平角材、中温乾燥、ガラスハウス乾燥

目次

緒言

第 1 章 丸太の強度性能

- 1.1 供試材
- 1.2 試験方法
- 1.3 結果と考察

第 2 章 蒸気式と蒸気圧力併用式乾燥特性の比較

- 2.1 供試材
- 2.2 試験方法
- 2.3 結果と考察

第 3 章 ガラスハウス乾燥の特性

- 3.1 供試材
- 3.2 試験方法
- 3.3 結果と考察

第 4 章 丸太と製材品の強度性能の関係

- 4.1 供試材
- 4.2 結果と考察

第 5 章 半径方向の強度性能

- 5.1 供試材
- 5.2 試験方法
- 5.3 結果と考察
- 5.4 無欠点試験体と実大材試験体の比較

まとめ

結言

緒言

長野県内人工林の過半を占めるカラマツ林は、13 齢級がピークとなる成熟期を迎えており、今後、伐採量の増大が見込まれるカラマツ大径材からは曲げヤング係数が高い丸太の生産が想定される。しかし、現在の主な用途は合板であり、構造用製材としての利用は少ない。

県内の製材工場で製造可能な心去り平角材は高い曲げヤング係数の活用を図り、かつ、高温セットによる割れ防止も不要なことから乾燥コスト面から有望と考えるが、建築材料をはじめとした用途には、その材質を把握しておく必要がある。平角材は、乾燥時間が長時間になることからコスト低減を目的に高温乾燥による強度低下¹⁾を考慮する必要がある。しかし、カラマツ心去り材における乾燥特性や強度性能に関わる文献は少ない(例えば 2, 3, 4)。

本報告では、第 1 章では、現在の本県のカラマツ丸太の強度性能を把握し、第 2 章では、乾燥方法の違いによる乾燥時間の短縮や強度性能を検討した。第 3 章では、人工乾燥と天然乾燥の中間に位置する低コスト乾燥方法として化石燃料に依存しないガラスハウスを使用した乾燥⁵⁾及びその強度性能を検討した。第 4 章では丸太と製材品の強度性能の関係を検討し、第 5 章では無欠点試験片による大径材の半径方向の強度分布や実大材との強度比較を行い、今後の心去り平角材の利用方法を探った。

^{*1}元 林業総合センター木材部、^{*2}現 北アルプス地域振興局林務課

第1章 丸太の強度性能

1.1 供試材

長野県産のカラマツ（産地：東信，中信，北信）の素材の日本農林規格（以下，JAS と標記）における中及び大の素材 181 本を対象とした。なお，番玉の区分はしていない。

1.2 試験方法

素材の JAS の縦振動ヤング係数試験に準じて山土場及び製材工場の土場で調査した。丸太の測定方法は，両木口の短径及び長径並び材長をコンベックスにより 1 mm 単位，固有振動数は ATA 社製 HG-2020 変形タイプ等により 0.1Hz 単位，重量はクレーンスケールにより 0.5 kg 単位で測定した（写真 1-1）。なお，次式により，見かけの密度（ ρ ）及び縦振動ヤング係数（ E_{fr-L} ）を計算した。また，第 1 章以降のデータの分析には Microsoft® Excel® for Microsoft 365 MSO 64 ビット及び 4Steps エクセル統計（第 4 版）を使用し，2 群の比較には，F 検定により等分散性の有無を確認した後，対応のない t 検定（両側検定）によって確認し， $p < 0.05$ を統計的に有意であると判断した。

また，相関関係については，正規性の検定により正規分布の有無を確認（ $p < 0.05$ ）し，ピアソンの相関係数またはスピアマンの順位相関係数の検定（両側検定）によって確認し， $p < 0.05$ を統計的に有意であると判断した。

$$\rho = \frac{W}{D^2 \times \frac{\pi}{4} \times L \times \frac{1}{10000}}$$

ρ : 見かけの密度 (kg/m^3)

W : 各本の重量 (kg)

D : 両木口の最大径と最小系の平均を平均した値 (cm)

π : 3.14 とする。

L : 材長 (m)

$$E_{fr-L} = [(2 \times f_L \times L)^2 \times \rho / n^2] / 10^9$$

E_{fr-L} : 縦振動ヤング係数 (GPa 又は $10^3 \text{N}/\text{mm}^2$)

L : 材長 (m)

f : 振動数の n 次の固有振動数 (Hz)

ρ : 見かけの密度 (kg/m^3)

n : 固有振動数の次数

1.3 結果と考察

今回の供試材の産地割合は，東信地域 76%，中信地域 13%，北信地域 11% であり，素材の割合は大が 77%，中が 23% であった。素材の大及び中の測定結果を表 1-1 及び 2 に示す。

素材の JAS の縦振動ヤング係数区分による分布を図 1-1 及び 2 に示す。素材の大で最も多かったのは Ef130 であり，全体の 39% を占めており，次いで Ef110，Ef150 であった。素材の中で最も多かったのは Ef150 であり，全体の 56% を占めており，次いで Ef130 であった。

見かけの密度と縦振動ヤング係数の関係を図 1-3 に示す。素材の大についてスピアマンの順位相関係数の検定を用いた結果，両者の相関係数が 0.25 となり正の相関が認められ（ $p < 0.01$ ），また，素材の中について，ピアソンの相関係数の検定を用いた結果，両者の相関係数が 0.45 となり正の相関が認められた（ $p < 0.01$ ）。よって，見かけの密度が増加すると縦振動ヤング係数も増加することが示唆された。

末口年輪数と縦振動ヤング係数の関係を図 1-4 に示す。素材の大及び中の末口年輪数と縦振動ヤング係数の相関関係について，スピアマンの順位相関係数及びピアソンの相関係数の検定を用いた結果，両者には相関が認められなかった。よって，長伐期により高齢化しても必ずしも縦振動ヤング係数は増加しないことが示唆された。

今回の試験結果から素材の最大の縦振動ヤング係数の平均値は $12.0 \text{kN}/\text{mm}^2$ ，標準誤差は $0.13 \text{kN}/\text{mm}^2$ ，中の縦振動ヤング係数の平均値は $13.8 \text{kN}/\text{mm}^2$ ，標準誤差は $0.25 \text{kN}/\text{mm}^2$ となり，現在の本県の素材の大及び中のカラマツ丸太の縦振動ヤング係数の平均は Ef130 になると推測する。



写真 1-1 測定状況

現在のカラマツ丸太の主な用途は構造用合板であるが、高い縦振動ヤング係数のカラマツ丸太は広く活かれているとは言い難い。今後は、縦振動ヤング係数の測定等のコスト高の問題は残るが、ヤング係数に対応したカスケード利用を推進する必要がある。

なお、この供試材の一部から得られた平角材と丸太の関係は第 4 章の丸太と製材品の強度性能の関係の中で検討した。

表 1-1 素材の大的測定結果

| | 末口 (cm) | | 年輪数 (年) | 元口 (cm) | | 長さ (m) |
|----------|---------|------|---------|---------|------|--------|
| | 短径 | 長径 | | 短径 | 長径 | |
| 平均値 | 38.4 | 39.9 | 66 | 43.8 | 45.5 | 4.256 |
| 最大値 | 52.5 | 55.0 | 92 | 61.0 | 65.5 | 5.315 |
| 最小値 | 30.3 | 32.5 | 44 | 34.5 | 36.5 | 3.982 |
| 標準偏差 | 3.2 | 3.2 | 11.5 | 4.9 | 5.4 | 0.4 |
| 変動係数 (%) | 8.3 | 7.9 | 17.5 | 11.2 | 11.9 | 8.5 |
| 供試体数 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 |

| | 重量 (kg) | 固有振動数 (Hz) | ρ (kg/m ³) | E_{fr-L} (kN/mm ²) |
|----------|---------|------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 平均値 | 418.3 | 489 | 705 | 12.0 |
| 最大値 | 747.5 | 600 | 927 | 16.5 |
| 最小値 | 259.5 | 341 | 528 | 8.5 |
| 標準偏差 | 105.9 | 56.5 | 89.6 | 1.5 |
| 変動係数 (%) | 25.3 | 11.6 | 12.7 | 12.8 |
| 供試体数 | 140 | 140 | 140 | 140 |

表 1-2 素材の中の測定結果

| | 末口 (cm) | | 年輪数 (年) | 元口 (cm) | | 長さ (m) |
|----------|---------|------|---------|---------|------|--------|
| | 短径 | 長径 | | 短径 | 長径 | |
| 平均値 | 24.1 | 25.1 | 48 | 27.1 | 28.1 | 4.092 |
| 最大値 | 29.5 | 32.5 | 57 | 33.0 | 36.5 | 4.145 |
| 最小値 | 17.0 | 17.0 | 33 | 20.5 | 20.5 | 4.03 |
| 標準偏差 | 2.6 | 3.0 | 5.4 | 2.8 | 3.1 | 0.0 |
| 変動係数 (%) | 10.8 | 11.8 | 11.2 | 10.3 | 10.9 | 0.6 |
| 供試体数 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 |

| | 重量 (kg) | 固有振動数 (Hz) | ρ (kg/m ³) | E_{fr-L} (kN/mm ²) |
|----------|---------|------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 平均値 | 182.0 | 502 | 821 | 13.8 |
| 最大値 | 300 | 585.9 | 996 | 18.0 |
| 最小値 | 110.5 | 414.1 | 660 | 9.9 |
| 標準偏差 | 46.1 | 30.8 | 90.9 | 1.6 |
| 変動係数 (%) | 25.3 | 6.1 | 11.1 | 11.6 |
| 供試体数 | 41 | 41 | 41 | 41 |

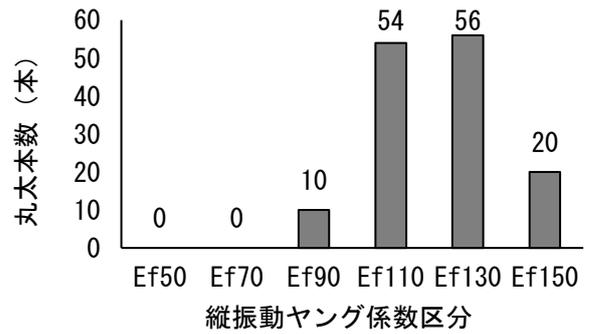


図 1-1 素材の大的縦振動ヤング係数分布

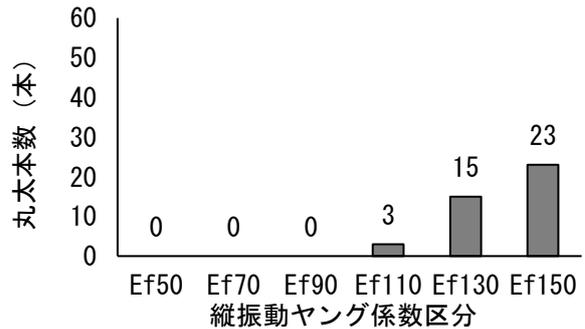


図 1-2 素材の中の縦振動ヤング係数分布

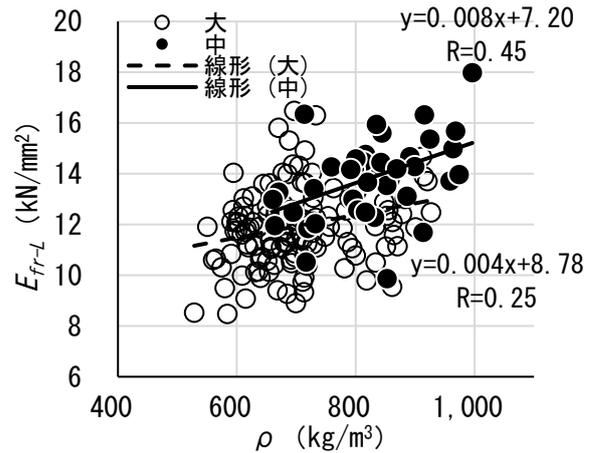


図 1-3 ρ と E_{fr-L} の関係

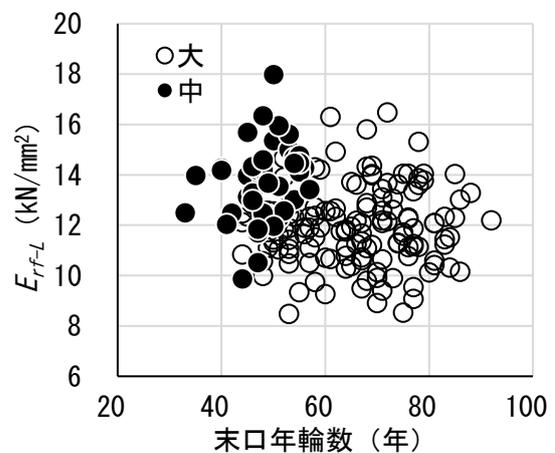


図 1-4 末口年輪数と E_{fr-L} の関係

第2章 蒸気式と蒸気圧力併用式乾燥特性の比較

試験の概要を表 2-1 示す。

表 2-1 試験区分

| | | |
|------|-----------------|---------|
| 樹種 | カラマツ（心去り平角材） | |
| 製材寸法 | 135×255×4,000mm | |
| 乾燥方法 | 蒸気式 | 蒸気圧力併用式 |
| 乾燥温度 | 90℃ | 90℃ |
| 丸太本数 | 12本 | |
| 製品本数 | 12本 | 12本 |

2.1 供試材

東信地域のカラマツ丸太 12 本（写真 2-1）を第 1 章の 1.2 試験方法により測定した。

図 2-1 に示した木取りにより心去り平角材（135×255×4,000 mm）を 2 本ずつ、計 24 本を側面定規で製材した。



写真 2-1 供試材（丸太）

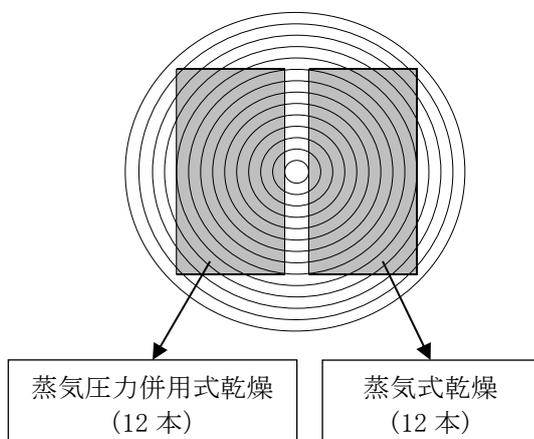


図 2-1 木取り図

2.2 試験方法

2.2.1 乾燥試験

図 2-1 のとおり 1 本の丸太から製材した 2 本の平角材について一方を 90℃の蒸気圧力併用式中温乾燥（以下、蒸気圧力併用式と標記）とし、もう一方を 90℃の蒸気式中温乾燥（以下、蒸気式と標記）を行った（写真 2-2）。

乾燥スケジュールを表 2-2 及び 3 に示した。しかし、初期に設定した乾燥スケジュールでは目標含水率の 15%以下とならなかったため、表中での再乾燥を両者 90℃/60℃3.5 日間の蒸気式中温乾燥を追加で行った。

乾燥前後に寸法，質量，縦振動ヤング係数，含水率計による含水率を測定し，乾燥後の形質変化を蒸気圧力併用式と蒸気式の結果について比較検討した。また，全乾法による含水率，水分傾斜の測定は，曲げ強度試験後の非破壊部から切り出して実施した。

表 2-2 乾燥スケジュール（蒸気圧力併用式）

| 項目 | 乾球温度 (°C) | 湿球温度 (°C) | 温度差 (°C) | 圧力 (kPa) | 時間 (h) |
|------|--------------|--------------|-------------|-------------|-----------|
| 蒸煮 | 95 | 95 | 0 | 0 | 12 |
| 中温乾燥 | 90 | 60 | 30 | -70 | 216 |
| 再乾燥 | 90 | 60 | 30 | -70 | 84 |

312時間

13日間

表 2-3 乾燥スケジュール（蒸気式）

| 項目 | 乾球温度 (°C) | 湿球温度 (°C) | 温度差 (°C) | 時間 (h) |
|------|--------------|--------------|-------------|-----------|
| 蒸煮 | 95 | 95 | 0 | 12 |
| 中温乾燥 | 90 | 60 | 30 | 336 |
| 再乾燥 | 90 | 60 | 30 | 84 |

432時間

18日間

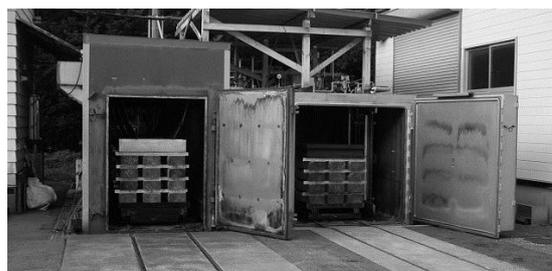


写真 2-2 左：蒸気式乾燥機

右：蒸気圧力併用式乾燥機

2.2.2 強度試験

試験体は、120×240mm の断面に整形し実施する予定だったが、ねじれの発生が想定よりも大きかったため、115×235×4,000mm に整形して行った。

試験方法は、(財)日本住宅木材・技術センターの「構造用木材の強度試験マニュアル」に準じて、実大材曲げ強度試験機 UH-1000kNA (島津製作所製) を用い、下部支点間距離 3,900 mm, 上部荷重点間距離 1,300 mm の 3 等分点 4 点荷重方式で実施した。なお、上部及び下部支点の形状はフラットである。載荷方向はエッジワイズとし、上下の方向はランダムとした。載荷速度は 15 mm/分とした(図 2-2)。曲げ強さ (f_m)、曲げヤング係数 (E_m)、縦振動ヤング係数 (E_{fr}) は以下の式により求めた。また、データの分析は第 1 章 1.2 試験方法と同様とし、乾燥方法の違いによる曲げヤング係数、曲げ強さ、含水率、全乾密度について比較検討した。

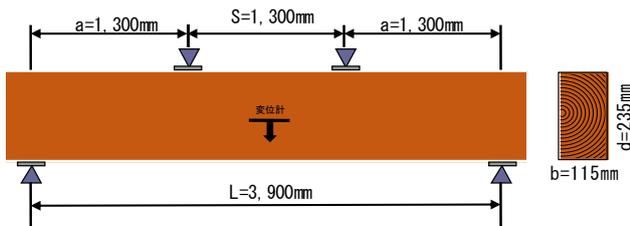


図 2-2 曲げ試験方法

$$f_m = \frac{aF_{ult}}{2Z}$$

a : 支点から荷重点までの距離 (mm)

f_m : 曲げ強さ (N/mm^2)

F_{ult} : 最大荷重

Z : 断面係数, 矩形断面では $bd^2/6$, ただし b は材幅

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)(F_2 - F_1)}{48I(W_2 - W_1)}$$

E_m : せん断影響を含んだ曲げヤング係数 (kN/mm^2)

a : 支点から荷重点までの距離 (mm)

I : 断面 2 次モーメント, 矩形断面では $bd^3/12$

$F_2 - F_1$: 荷重変形曲線の直線部分の荷重の増分。

F_1 は $F_{ult.est}$ (最大荷重) の約 10%, F_2 は約 40%

$W_2 - W_1$: $F_2 - F_1$ に対応する変形の増分

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho / 10^9$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数 (kN/mm^2)

l : 材長 (m)

f : 振動数の 1 次の固有振動数 (Hz)

ρ : 見かけの密度 (kg/m^3)

2.3 結果と考察

2.3.1 丸太の特性

丸太の各測定結果を表 2-4 に示す。産地は東信地域であり、丸太は素材 JAS の大の素材であった。

素材 JAS の縦振動ヤング係数により区分した分布を図 2-3 に示す。最も多かったのは Ef110 であり、全体の 75% を占めており、次いで Ef130 であった (写真 2-3)。

表 2-4 丸太の各測定結果

| | 末口 | | | 元口 | | 長さ (m) |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | 短径 (cm) | 長径 (cm) | 年輪数 (年) | 短径 (cm) | 長径 (cm) | |
| 平均値 | 38.2 | 40.1 | 56 | 44.9 | 47.3 | 4.120 |
| 最大値 | 42.0 | 42.3 | 64 | 48.1 | 53.2 | 4.169 |
| 最小値 | 30.3 | 38.0 | 50 | 40.9 | 41.9 | 4.072 |
| 標準偏差 | 3.1 | 1.5 | 4.2 | 2.6 | 3.2 | 0.03 |
| 変動係数 (%) | 8.2 | 3.7 | 7.4 | 5.8 | 6.8 | 0.7 |
| 供試材数 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

| | 固有振動数 (Hz) | 重量 (kg) | ρ (kg/m^3) | E_{fr-L} (kN/mm^2) |
|----------|------------|---------|---------------------|--------------------------|
| 平均値 | 497 | 400.0 | 680 | 11.4 |
| 最大値 | 532 | 466.0 | 756 | 12.4 |
| 最小値 | 478 | 343.5 | 637 | 10.5 |
| 標準偏差 | 16.3 | 35.8 | 34.2 | 0.6 |
| 変動係数 (%) | 3.3 | 8.9 | 5.0 | 4.8 |
| 供試材数 | 12 | 12 | 12 | 12 |

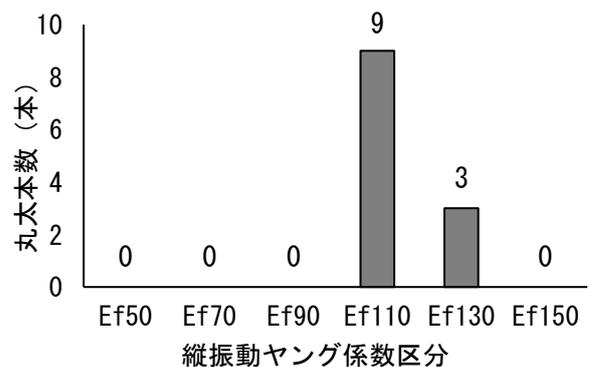


図 2-3 丸太の縦振動ヤング係数の分布



写真 2-3 No. 2 及び 8 供試材

2.3.2 乾燥試験

乾燥前の各測定値を表 2-5 及び 6 に示す。曲がり及び反りの測定箇所は図 2-4 のとおりである。曲がり、ねじれ、割れは無く、反りは、24 本中 16 の平角材に発生し、その発生方向は全て木表側に現れた。

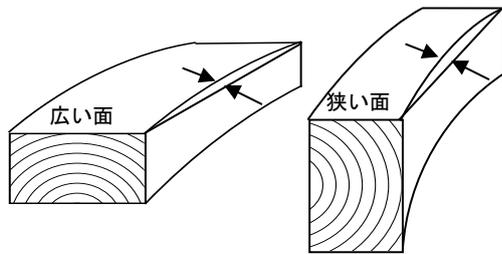


図 2-4 曲がり (左図), 反り (右図)

表 2-5 乾燥前の各測定値 (蒸気圧力併用式)

| | Efr (kN/mm ²) | 曲がり (mm) | 反り (mm) | ねじれ (mm) | 割れ (mm) | 含水率計 含水率 (%) |
|----------|------------------------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------------|
| 平均値 | 11.24 | 0.0 | 2.6 | 0.0 | 0.0 | 43.3 |
| 最大値 | 12.23 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 51.0 |
| 最小値 | 10.11 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 34.5 |
| 標準偏差 | 0.73 | 0.0 | 2.2 | 0.0 | 0.0 | 4.9 |
| 変動係数 (%) | 15.34 | - | 1.2 | - | - | 8.9 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

表 2-6 乾燥前の各測定値 (蒸気式)

| | Efr (kN/mm ²) | 曲がり (mm) | 反り (mm) | ねじれ (mm) | 割れ (mm) | 含水率計 含水率 (%) |
|----------|------------------------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------------|
| 平均値 | 10.71 | 0.0 | 2.8 | 0.0 | 0.0 | 44.2 |
| 最大値 | 12.19 | 0.0 | 5.0 | 0.0 | 0.0 | 58.5 |
| 最小値 | 8.87 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 33.5 |
| 標準偏差 | 1.10 | 0.0 | 1.9 | 0.0 | 0.0 | 6.1 |
| 変動係数 (%) | 9.75 | - | 1.5 | - | - | 7.3 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

含水率の経過を表 2-7 及び 8 に示す。再乾燥前の推定平均含水率±標準偏差は、蒸気圧力併用式は 9.5 日間で 17.6±4.0%，蒸気式は 14.5 日間で 20.3±2.8%であった。本試験では目標含水率 15%としていたが、今回の含水率がやや高いため追加で 3.5 日間の再乾燥を行った。再乾燥後の全乾法による平均含水率±標準偏差は、蒸気圧力併用式

で 12.6±3.4%，蒸気式で 14.9±2.7%となった。これにより蒸気圧併用式は 13 日間、蒸気式は 18 日間となり蒸気圧併用式は蒸気式に比べて、実際の乾燥日数や含水率の差等から判断して約 3 割以上の時間短縮が期待できる。なお、含水率が 15%の以上の試験材は、蒸気圧併用式が 12 本中 2 本、蒸気式が 12 本中 5 本であったが、蒸気圧併用式と蒸気式の含水率の平均値には、有意差は認められなかった (p=0.09)。

表 2-7 含水率経過 (蒸気圧力併用式)

| | 乾燥前 (%) | 乾燥後 (%) | 再乾燥後 (%) |
|----------|------------|------------|-------------|
| 平均値 | 45.8 | 17.6 | 12.6 |
| 最大値 | 56.1 | 25.4 | 20.3 |
| 最小値 | 38.0 | 12.3 | 7.4 |
| 標準偏差 | 5.9 | 4.0 | 3.4 |
| 変動係数 (%) | 12.9 | 22.4 | 27.1 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 |

表 2-8 含水率経過 (蒸気式)

| | 乾燥前 (%) | 乾燥後 (%) | 再乾燥後 (%) |
|----------|------------|------------|-------------|
| 平均値 | 47.3 | 20.3 | 14.9 |
| 最大値 | 55.0 | 25.8 | 19.8 |
| 最小値 | 43.0 | 17.1 | 11.6 |
| 標準偏差 | 3.8 | 2.8 | 2.7 |
| 変動係数 (%) | 8.0 | 13.6 | 17.9 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 |

乾燥後の水分傾斜の例を図 2-5 に示す。乾燥方法の違いによる水分傾斜の形状に大きな違いは見られず、全体含水率が高いほど水分傾斜も大きかった。

乾燥後の形質変化を表 2-9 及び 10 に示す。材面割れは、蒸気式に比べ蒸気圧併用式の方が多かったが、これらは、本来、割れが発生する木表側ではなく木裏側の髓付近に多く発生していた。また、髓が直線的ではないことから製材時に蒸気圧併用式の方に髓部分が含まれた試験体が多かったことや、仕上がり含水率の違いが木裏側に髓割れが発生した原因と推測される (写真 2-4)。

曲がりや反りの発生量については、挽き直し修正により使用可能な範囲にあったが、ねじれについては、既往の心持ち材の平角材より少なかった。

た。ねじれが 20 mm/4m を超える材にあっては修正挽きによっても削り残しが出る材があった（写真 2-5）。

乾燥方法の違いによる全乾密度を比較した結果、有意差は認められなかった（ $p=0.287$ ）。

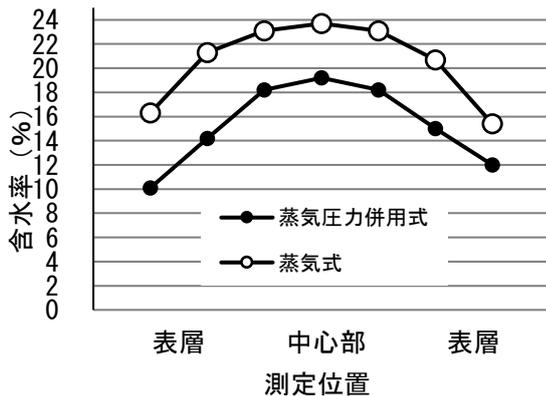
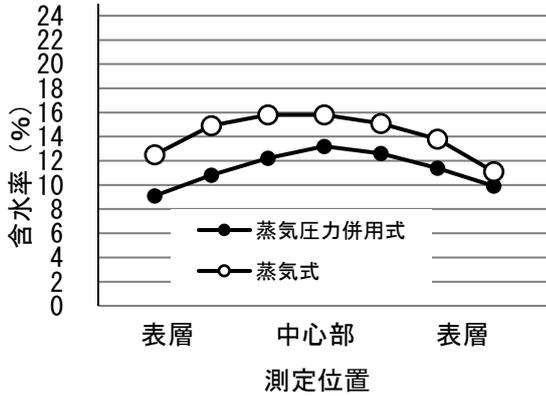


図 2-5 水分傾斜

表 2-10 乾燥後の各測定数値（蒸気式）

| | 曲がり (mm) | 反り (mm) | ねじれ 狭(mm) | ねじれ 広(mm) | 割れ (cm) |
|---------|-------------|------------|--------------|--------------|------------|
| 平均値 | 2.4 | 2.9 | 5.8 | 11.5 | 5.7 |
| 最大値 | 12.0 | 6.0 | 16.0 | 25.0 | 68.0 |
| 最小値 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 0.0 |
| 標準偏差 | 3.9 | 1.7 | 5.3 | 7.9 | 19.6 |
| 変動係数(%) | 161.2 | 59.3 | 90.4 | 68.6 | 346.4 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

| | 全乾密度 (kg/m ³) | 平均年輪幅 (mm) |
|---------|------------------------------|---------------|
| 平均値 | 495 | 4.0 |
| 最大値 | 540 | 4.8 |
| 最小値 | 467 | 2.6 |
| 標準偏差 | 26.7 | 0.6 |
| 変動係数(%) | 5.4 | 14.2 |
| 試験体数 | 12 | 12 |



写真 2-4 木裏側の髓割れ

表 2-9 乾燥後の各測定結果（蒸気圧力併用式）

| | 曲がり (mm) | 反り (mm) | ねじれ 狭(mm) | ねじれ 広(mm) | 割れ (cm) |
|---------|-------------|------------|--------------|--------------|------------|
| 平均値 | 2.6 | 5.5 | 6.7 | 13.1 | 215.8 |
| 最大値 | 10 | 11 | 12 | 27 | 389 |
| 最小値 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 標準偏差 | 3.0 | 3.4 | 4.0 | 8.0 | 110.9 |
| 変動係数(%) | 114.9 | 62.3 | 59.4 | 61.4 | 51.4 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

| | 全乾密度 (kg/m ³) | 平均年輪幅 (mm) |
|---------|------------------------------|---------------|
| 平均値 | 500 | 4.1 |
| 最大値 | 521 | 4.7 |
| 最小値 | 473 | 3.4 |
| 標準偏差 | 14.3 | 0.4 |
| 変動係数(%) | 2.9 | 10.3 |
| 試験体数 | 12 | 12 |

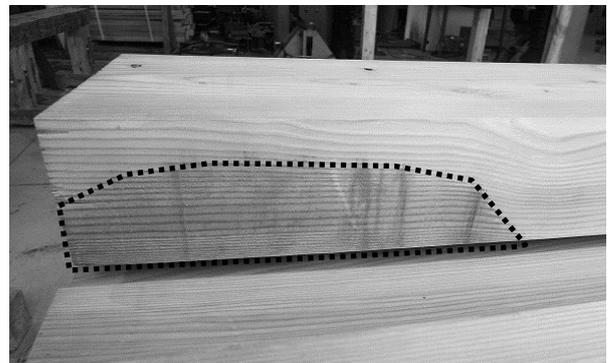


写真 2-5 狭い面の削り残し

2.3.3 曲げ強度試験

曲げ強さ (f_m) や曲げヤング係数 (E_m) 等の結果を表 2-11 及び 12 に示す。

曲げヤング係数の平均値±標準偏差は、蒸気圧力併用式乾燥材 12.46±0.93kN/mm²、蒸気式乾燥材 11.21±1.60kN/mm²であった。乾燥の違いによる曲げヤング係数について、せん断破壊及び目まわり等 (写真 2-6 及び 7) を除いたデータで比較した結果、有意差は認められなかった (p=0.028)。

曲げ強さは蒸気圧力併用式乾燥材で 48.6±11.2 N/mm²、蒸気式乾燥材で 40.4±9.0N/mm²であった。

曲げ強さと曲げヤング係数の関係を図 2-6 に示す。なお、せん断または、目まわりによる破壊は三角の白抜きの表示とした。

乾燥方法の違いはあるが、平成 12 年 5 月 31 日建設省告示 1452 号 (以下、告示と標記) の目視等級区分構造用製材 (以下、目視等級区分と標記) のカラマツの基準強度を両乾燥材とも満足し、また、せん断破壊や目まわりによる破壊等の試験材を除けば機械等級区分構造用製材 (以下、機械等級区分と標記) の基準強度もほぼ満足した。

表 2-11 曲げ強度結果 (蒸気圧力併用式)

| | E_{fr} (kN/mm ²) | E_m (kN/mm ²) | f_m (N/mm ²) |
|----------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 平均値 | 13.41 | 12.46 | 48.6 |
| 最大値 | 15.07 | 14.54 | 62.4 |
| 最小値 | 11.86 | 11.12 | 26.0 |
| 標準偏差 | 0.87 | 0.93 | 11.2 |
| 変動係数 (%) | 6.52 | 7.47 | 23.0 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 |

表 2-12 曲げ強度結果 (蒸気式)

| | E_{fr} (kN/mm ²) | E_m (kN/mm ²) | f_m (N/mm ²) |
|----------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 平均値 | 12.25 | 11.21 | 40.4 |
| 最大値 | 14.07 | 13.24 | 56.2 |
| 最小値 | 9.60 | 7.88 | 26.6 |
| 標準偏差 | 1.51 | 1.60 | 9.0 |
| 変動係数 (%) | 12.30 | 14.25 | 22.3 |
| 試験体数 | 12 | 12 | 12 |

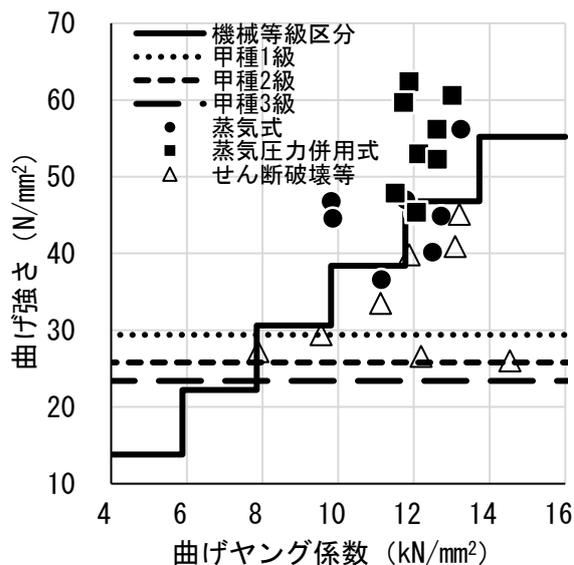


図 2-6 曲げヤング係数と曲げ強さの関係



写真 2-6 せん断破壊



写真 2-7 目まわりによる破壊

第 3 章 ガラスハウス乾燥の特性

試験区分を表 3-1 に示す。

表 3-1 試験区分

| | |
|------|-----------------|
| 樹種 | カラマツ (心去り平角材) |
| 製材寸法 | 120×255×4,000mm |
| 乾燥方法 | ガラスハウス乾燥 |
| 乾燥温度 | -0.5~40℃ |
| 丸太本数 | 11 本 |
| 製品本数 | 19 本* |

※ 丸太 11 本の内 10 本から平角を製材し、内 1 本は乾燥用テストピースとして使用

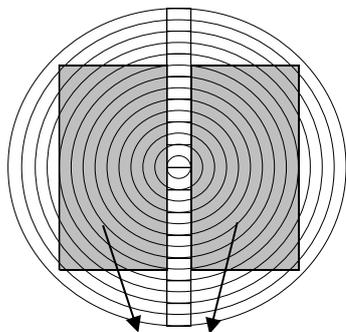
3.1 供試材 (実大材曲げ試験体)

木曽森林管理署管内 (王滝 2060-0 ろ 02-0) において林齢 96 年生の林分から生産されたカラマツの丸太 11 本 (写真 3-1) を第 1 章の 1.2 試験方法により測定した。

図 3-1 に示した木取りにより 10 本の丸太から心去り平角材 (120×255×4,000mm) を 2 本ずつ、計 20 本を側面定規で製材し、丸太 No. に-1 及び-2 を追記した。



写真 3-1 供試材 (丸太)



ガラスハウス乾燥 (20 本)

図 3-1 木取り図

3.2 試験方法

3.2.1 乾燥試験

製材後は、ヤニ滲出防止のため、蒸気式乾燥機で 90℃蒸煮を 12 時間実施し、その後、ガラスハウス内に静置し、2019.2.8 から 2020.1.27 まで乾燥を実施した (写真 3-2)。乾燥状況を確認するため、試験材 20 本の内、3 本の試験体 (No.4-2, 10-1, 11-2) の質量を定期的に測定し、平衡含水率に達した後に No.11-2 を端部から 1m の部分で全乾法による含水率試験片等 (図 3-2) を切り出し、残りの約 3m 試験材の切断面にはシリコンによりシーリングした後、他の試験体と同様に屋外に静置し、3 カ月間養生を実施後長さ方向の水分傾斜を測定した (図 3-2)。また、ガラスハウスの温湿度を計測するため、3 個の温湿度計を上段、中段、下段に設置した (図 3-3)。なお、ガラスハウスは、背面が建物の外壁を利用し、正面口はビニールによる巻き上げ式、天井及び側面はガラス製となっており、ファン等の送風装置はないが、天井窓があり開閉可能である。



写真 3-2 ガラスハウス乾燥機

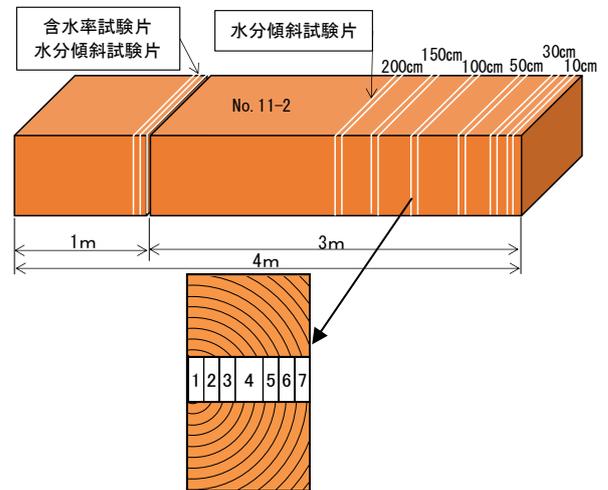


図 3-2 含水率及び水分傾斜試験片

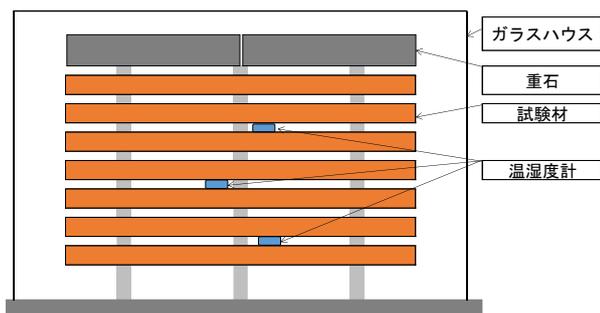


図 3-3 ガラスハウス正面図

3.2.2 曲げ強度試験

図 3-4 のとおり実施 (写真 3-3) し、追加でヨークを用いて上部荷重点間のたわみ量も測定した (写真 3-4)。また、载荷方向はエッジワイズ、かつ、木表側を全て東向きに統一して実施した。曲げ試験前に上部荷重点間において、製材の JAS の目視等級区分の規格である甲種構造材の基準の II 種に準じて節による等級区分を行った (写真 3-5)。

また、データの分析は第 1 章 1.2 試験方法と同様に行い、曲げヤング係数、曲げ強さ、含水率、全乾密度について比較検討した。

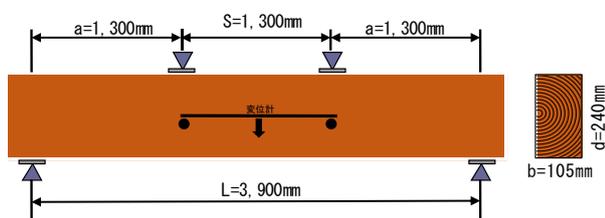


図 3-4 曲げ試験方法

曲げモーメントが一定になる荷重点間のたわみ量からせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数 (E_b) は以下の式により求めた。

$$E_b = \frac{al^2(F_2 - F_1)}{16I(W_2 - W_1)}$$

E_b : 曲げモーメントが一定になる荷重点間のたわみ量からせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数 (kN/mm^2)

I : 断面 2 次モーメント, 矩形断面では $bd^3/12$

a : 荷重点と支点の距離 (mm)

l : 荷重点内の変位量測定区間の長さ (mm)

$F_2 - F_1$: 荷重変形曲線の直線部分の荷重の増分。

F_1 は $F_{\text{ult.est}}$ (最大荷重) の約 10%, F_2 は約 40%

$W_2 - W_1$: $F_2 - F_1$ に対応する変形の増分

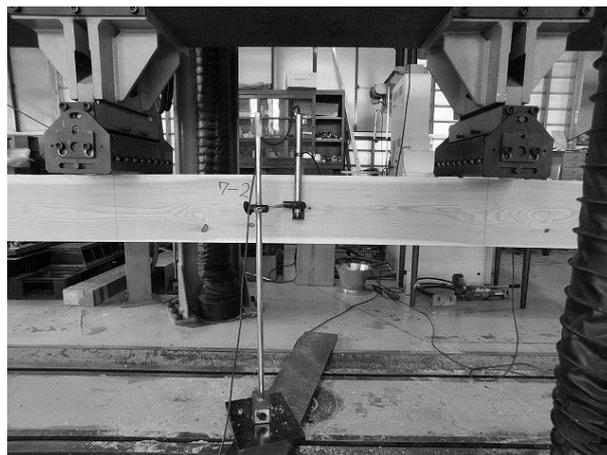


写真 3-3 木表側で全体のたわみ測定

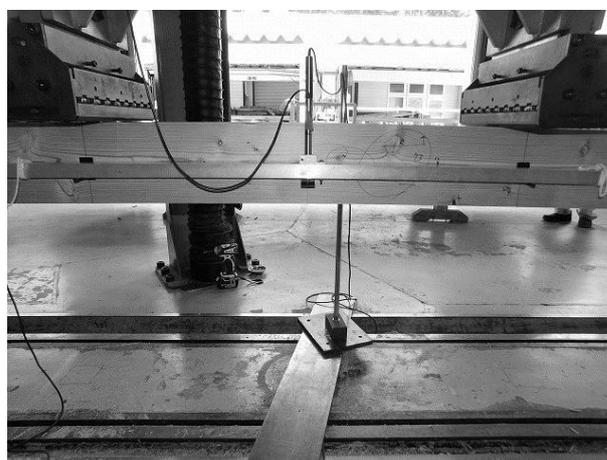


写真 3-4 木裏側で荷重点間のたわみ測定 (ヨーク)

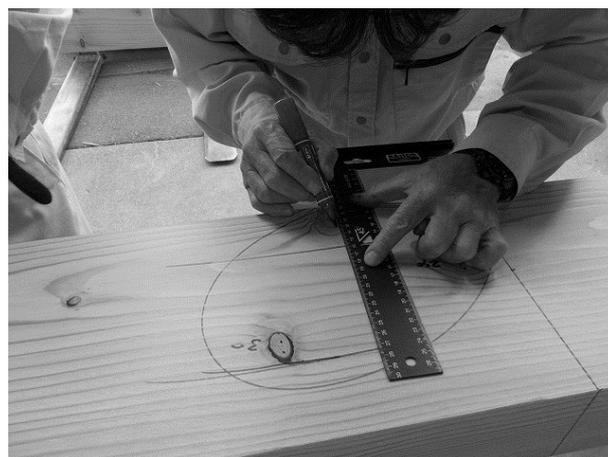


写真 3-5 荷重点間の節の測定

3.3 結果と考察

3.3.1 丸太の特性

丸太の各測定結果を表 3-2 に示す。産地は中信地域であり、全供試材が素材 JAS の大の素材であった。素材 JAS の縦振動ヤング係数により区分した分布を図 3-5 に示す。最も多かったのは Ef110 であり、全体の 45% を占めており、次いで Ef150 であった。

写真 3-6~9 に縦振動ヤング係数区分の木口写真を示す。目視により縦振動ヤング係数の高低を判断することは困難であった。



写真 3-6 Ef90 の供試材

表 3-2 丸太の各測定結果

| | 末口 | | | 元口 | | 長さ (m) |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| | 短径 (cm) | 長径 (cm) | 年輪数 (年) | 短径 (cm) | 長径 (cm) | |
| 平均値 | 40.5 | 41.9 | 77 | 43.9 | 45.6 | 4.145 |
| 最大値 | 37.8 | 38.0 | 71 | 41.2 | 41.5 | 4.09 |
| 最小値 | 47.0 | 50.0 | 86 | 48.5 | 51.0 | 4.18 |
| 標準偏差 | 2.9 | 3.4 | 4.5 | 2.4 | 3.2 | 0.03 |
| 変動係数(%) | 7.2 | 8.0 | 5.8 | 5.4 | 7.1 | 0.6 |
| 供試体数 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |



写真 3-7 Ef110 の供試材

| | 固有振動 数 (Hz) | 重量 (kg) | ρ (kg/m ³) | E_{fr-L} (kN/mm ²) |
|---------|----------------|------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 平均値 | 459 | 502.9 | 832 | 11.4 |
| 最大値 | 402 | 424.0 | 787 | 12.4 |
| 最小値 | 502 | 673.0 | 870 | 10.5 |
| 標準偏差 | 32.7 | 78.1 | 31.4 | 0.6 |
| 変動係数(%) | 7.1 | 15.5 | 3.8 | 4.8 |
| 供試体数 | 11 | 11 | 11 | 11 |



写真 3-8 Ef130 の供試材

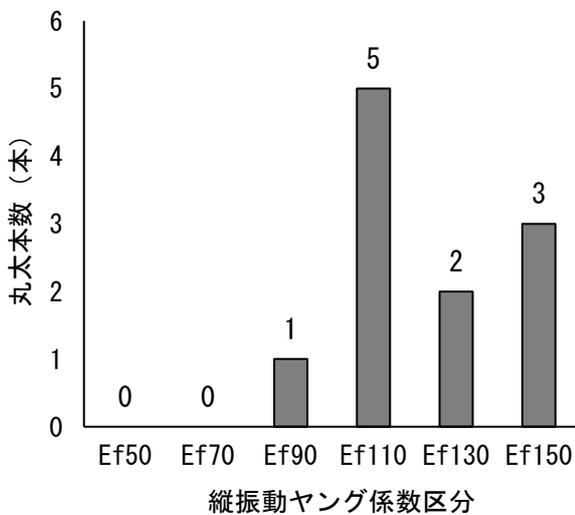


図 3-5 丸太の縦振動ヤング係数の分布



写真 3-9 Ef150 の供試材

3.3.2 乾燥試験

乾燥前の各測定結果を表 3-3 に示す。縦振動ヤング係数（平均値±標準偏差，以下同様）は $11.88 \pm 1.58 \text{ kN/mm}^2$ ，曲がり は $0.4 \pm 0.8 \text{ mm}$ ，反りは $3.5 \pm 2.1 \text{ mm}$ であった。

テストピース 3 本の全乾法による含水率の経過を図 3-6 に示す。3 本の内 2 本（No.4-2 及び 10-2）が約 90 日で含水率 15% を下回った。残りの 1 本（No.11-2）は約 180 日で下回った。

乾燥開始後約 350 日（約 12 カ月）経過後の水分傾斜を見ると中心部の含水率は 15% を下回っていた（図 3-7）。テストピースの全乾密度を表 3-4 に示す。最も乾燥の遅い No.11-2 の全乾密度は 484 kg/m^3 であり，これはテストピースの中では中間の値の試験材であった。今回の試験結果から乾燥の遅い材も含めて約 6 カ月間で含水率 15% を下回ると推測される。

約 350 日（約 12 カ月）経過後の木口から長さ方向（10, 30, 50, 100, 150, 200 cm）の水分傾斜を図 3-8 に示す。木口から長さ方向に 50 cm 以降はほぼ同じ水分傾斜になった。なお，参考までにガラスハウス内の 2019.4.18～2020.4.18 の一年間の温湿度結果を表 3-5 に示す。

全試験材の約 12 カ月後の含水率等の測定結果を表 3-6 に示す。含水率（平均値±標準偏差，以下同様） $12.3 \pm 0.2\%$ ，全乾密度 $492 \pm 24 \text{ kg/m}^3$ ，平均年輪幅 $3.50 \pm 0.74 \text{ mm}$ であった。

約 6 カ月間で全試験材が含水率 15% を下回っており，製材の JAS（構造用製材 SD15）の基準を満足していた。

表 3-3 乾燥前の各測定結果

| | Efr (kN/mm^2) | 曲がり (mm) | 反り (mm) | 含水率計 含水率 (%) |
|---------|-----------------------------|-------------|------------|--------------------|
| 平均値 | 11.88 | 0.4 | 3.5 | 43.2 |
| 最大値 | 14.40 | 3.0 | 8.0 | 56.0 |
| 最小値 | 9.06 | 0.0 | 0.0 | 29.0 |
| 標準偏差 | 1.58 | 0.8 | 2.1 | 6.6 |
| 変動係数(%) | 13.32 | 205.2 | 59.0 | 15.3 |
| 試験体数 | 20 | 20 | 20 | 20 |

表 3-4 テストピースの全乾密度

| No. | 4-2 | 10-1 | 11-2 |
|-----------------------------|-----|------|------|
| 全乾密度 (kg/m^3) | 537 | 469 | 484 |

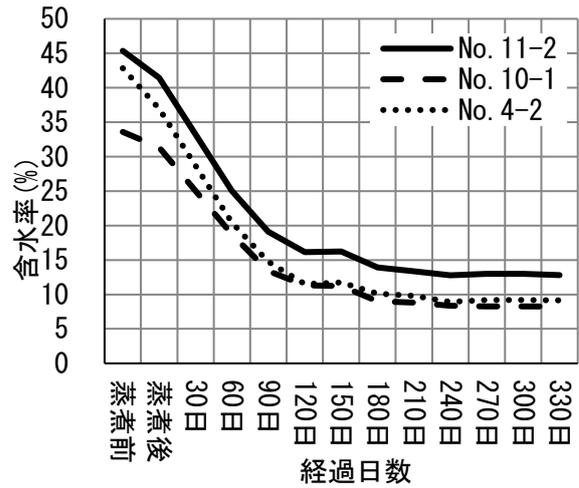


図 3-6 含水率の経過図

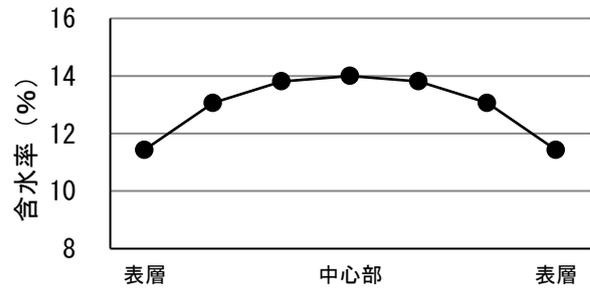


図 3-7 水分傾斜（約 12 カ月後）

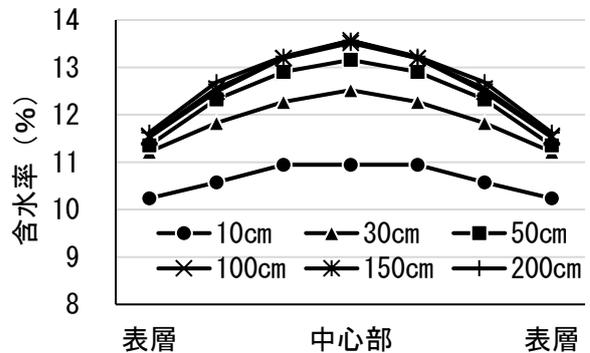


図 3-8 長さ方向の水分傾斜（約 12 カ月後）

表 3-5 ガラスハウス内の温湿度

| 温度 (°C) | 平均値 | 下段 | 中段 | 上段 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 平均値 | 16.8 | 16.2 | 16.7 | 17.4 |
| 最大値 | 39.5 | 38.1 | 39.2 | 41.6 |
| 最小値 | -5.1 | -5.7 | -5.2 | -4.5 |
| 標準偏差 | 9.13 | 9.04 | 9.13 | 9.26 |
| 変動係数 (%) | 54.42 | 55.74 | 54.55 | 53.27 |
| データ数 | 8784 | 8784 | 8784 | 8784 |
| 湿度 (%) | 平均値 | 下段 | 中段 | 上段 |
| 平均値 | 55.5 | 57.3 | 55.7 | 53.6 |
| 最大値 | 97.0 | 97.8 | 95.6 | 97.5 |
| 最小値 | 14.2 | 14.7 | 14.5 | 13.1 |
| 標準偏差 | 15.87 | 16.30 | 15.29 | 16.20 |
| 変動係数 (%) | 28.58 | 28.43 | 27.46 | 30.25 |
| データ数 | 8784 | 8784 | 8784 | 8784 |

表 3-6 含水率等測定結果

| | 含水率 (%) | 全乾密度 (kg/m ³) | 平均年輪幅 (mm) |
|---------|------------|------------------------------|---------------|
| 平均値 | 12.3 | 492 | 3.5 |
| 最大値 | 12.7 | 539 | 5.2 |
| 最小値 | 11.7 | 465 | 2.6 |
| 標準偏差 | 0.2 | 24 | 0.7 |
| 変動係数(%) | 2.0 | 4.8 | 21.2 |
| 試験体数 | 19 | 19 | 19 |

乾燥後の形質変化を表 3-7 に示す。

曲がり及び反りは、使用上問題ない数値であった。また、ねじれは、S 旋回と Z 旋回があったが、使用上問題ない数値となった。

表 3-7 乾燥後の各測定結果

| | 曲がり (mm) | 反り (mm) | ねじれ 広(mm) | ねじれ 狭(mm) |
|---------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 平均値 | 0.6 | 2.6 | 3.9 | 2.2 |
| 最大値 | 3 | 8 | 15 | 7 |
| 最小値 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 標準偏差 | 1.1 | 2.3 | 4.7 | 2.4 |
| 変動係数(%) | 176.7 | 88.9 | 119.0 | 111.7 |
| 試験体数 | 19 | 19 | 19 | 19 |

3.3.3 曲げ強度試験

上部荷重点間の節の等級を図 3-9 に示す。2 級及び 3 級が全体の 90%であった。しかし、曲げ試験の結果、上部荷重点間の外の節で破壊された試験材があり、これは、狭い材面の径比 70%を超える節であったことから、この試験材は格外とした(写真 3-10)。

曲げヤング係数 (E_m , E_b) 及び曲げ強さ (f_m) 等の結果を表 3-8 に示す。それぞれの平均値±標準偏差は、曲げヤング係数 (E_m) 12.29±1.62kN/mm², 曲げヤング係数 (E_b) 13.04±1.93kN/mm², 曲げ強さ (f_m) 51.1±10.7 N/mm², また、曲げヤング係数 (E_m) と曲げ強さ (f_m) の関係を図 3-10 に示す。なお、図中の×の凡例は、格外及び荷重点外の節から破壊した試験体である(写真 3-11)。

平角の縦振動ヤング係数 (E_{fr}) と曲げヤング係数 (E_m) の関係を図 3-11 に示す。構造用木材の強度試験マニュアル⁶⁾にあるとおり E_{fr} の方が高くなり、13.0~4.4%の範囲(平均値±標準偏差 8.2±2.3%)となった。また、相関係数が 0.988 となり両者には極めて強い正の相関があり ($p < 0.01$), カラマツの心去り平角材の E_{fr} を測定する

ことで曲げヤング係数を推定することが可能であると示唆された。

平角材の曲げヤング係数 (E_m) と曲げヤング係数 (E_b) の関係を図 3-12 及び 13 に示す。 $E_b > E_m$ となった(1つの試験体を除く)。

全乾密度と曲げヤング係数 (E_m) の関係を図 3-14 に示す。ピアソンの相関係数により確認したところ両者の相関係数 0.57 となり正の相関が認められた ($p=0.01$)。

平均年輪幅と曲げヤング係数 (E_m) の関係を図 3-15 に示す。ピアソンの相関係数により確認したところ両者の相関係数 0.47 となり負の相関が認められた ($p=0.07$)。

ガラスハウス乾燥を実施した結果、節の等級の違いはあるが、告示の目視等級区分の基準強度を満足し、また、一部の試験材を除けば機械等級区分の基準強度もほぼ満足した。

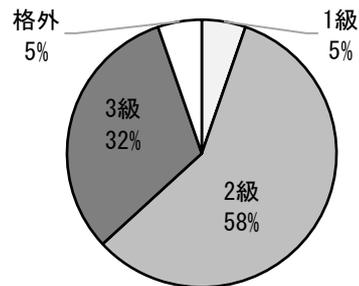


図 3-9 節等級区分



写真 3-10 荷重点外の狭い面の節 (例外)

表 3-8 曲げ試験結果

| | 全乾密度 (kg/m ³) | E_{fr} (kN/mm ²) | E_m (kN/mm ²) | E_b (N/mm ²) | f_m (N/mm ²) |
|---------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 平均値 | 492 | 13.30 | 12.29 | 13.04 | 51.1 |
| 最大値 | 539 | 16.41 | 15.06 | 16.02 | 70.7 |
| 最小値 | 465 | 9.98 | 9.39 | 9.42 | 33.2 |
| 標準偏差 | 23.8 | 1.79 | 1.62 | 1.93 | 10.7 |
| 変動係数(%) | 4.8 | 13.49 | 13.21 | 14.80 | 20.9 |
| 試験体数 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |

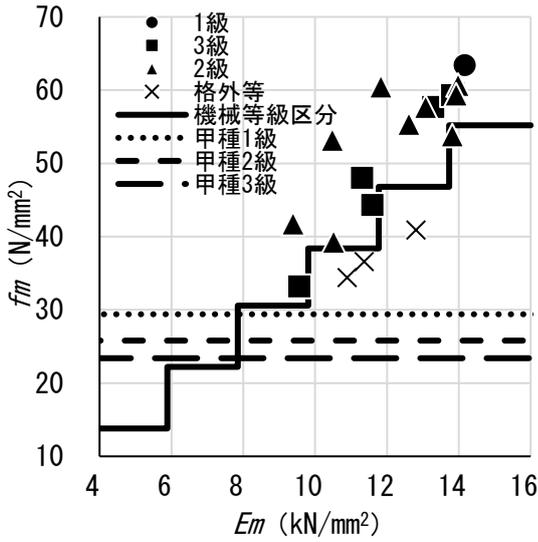


図 3-10 E_m と f_m の関係

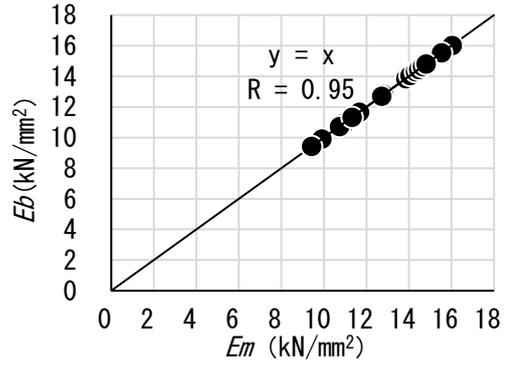


図 3-12 E_m と E_b の関係

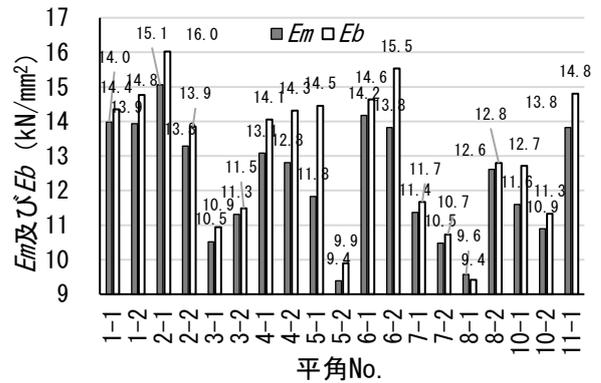


図 3-13 各平角の E_m と E_b の関係

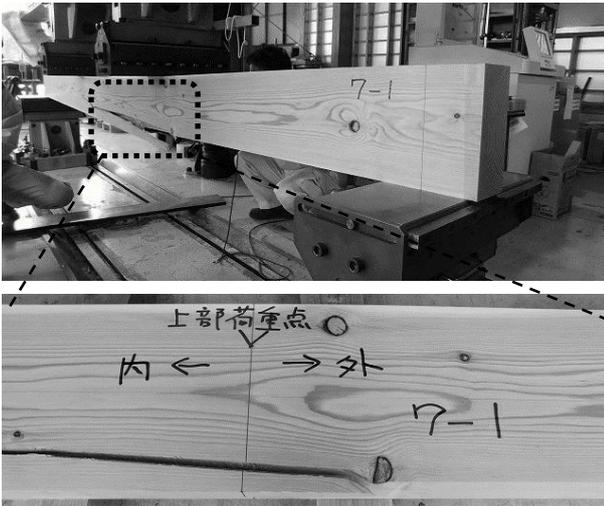


写真 3-11 荷重点外からの破壊

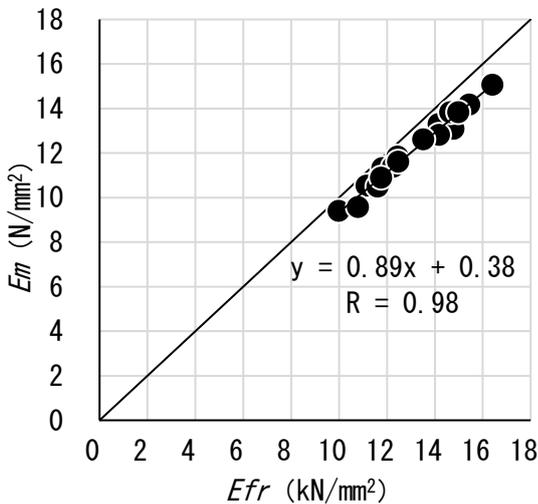


図 3-11 E_{fr} と E_m の関係

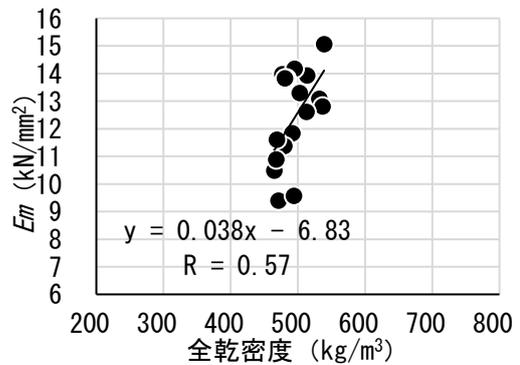


図 3-14 全乾密度と E_m の関係

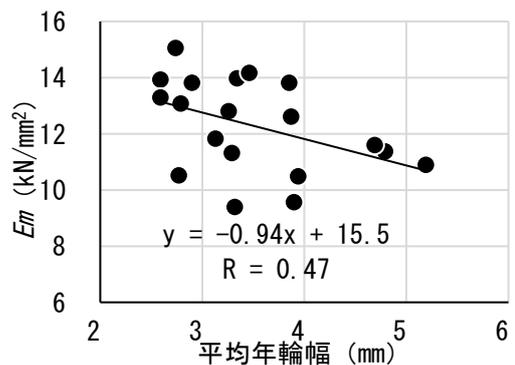


図 3-15 平均年輪幅と E_m の関係

第 4 章 丸太と製材の強度性能の関係

4.1 供試材

第 2 章及び第 3 章の丸太と平角材の強度性能の関係について検討した。

4.2 結果と考察

第 3 章の丸太 9 本から製材された平角材 18 本について、曲げヤング係数 (E_m) 及び全乾密度を 図 4-1 に示す。1 本の丸太から 2 本の心去り平角材を試験材としたがこのときの両者の曲げヤング係数は、ほぼ同じではないかと予想したが、丸太によってはかなり差が出る試験材もあった。例えば試験体の No.2, 5, 8 の曲げヤング係数の差はそれぞれ 1.77kN/mm^2 , 2.44kN/mm^2 , 3.04kN/mm^2 であった。これらの大きな曲げヤング係数の差は全乾密度と同様の差が見られたことから (図 4-2), 全乾密度の影響が大きいと考えられる。

1 本の丸太から製材された 2 丁取りの平角材について、両者の関係を見ると、木取りの状況から見ても未成熟材部と成熟材部の割合が大きく異なることは無かった (写真 4-1)。また、丸太状態では偏心や曲がりもほとんど見られなかった。

2 丁取りの心去り平角材であっても両者のヤング係数の標準偏差が 1.62kN/mm^2 となった (表 3-8)。これは、節による影響も考えられるが要因は不明である。

2 丁取りされた平角材について、曲げ強さ (f_m) を 図 4-3 に示す。両者には大きな差がみられる試験材が多かった。曲げ強さが低い No.2, 5, 8 については、曲げヤング係数の差が曲げ強さに影響したことは推測できる。他の材については、節の位置が材縁や狭い面の下部支点側にある場合に多く存在した試験材が低い数値になったことから節の大きさや位置が影響したと推測される。

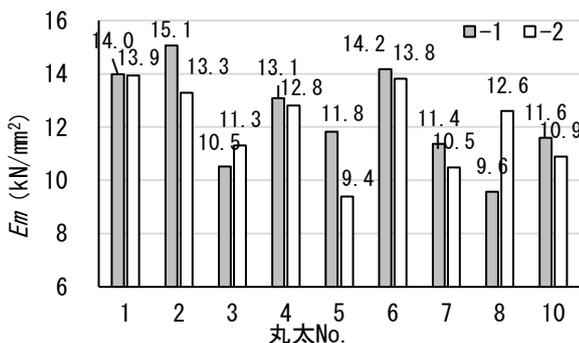


図 4-1 各丸太の曲げヤング係数 (E_m)

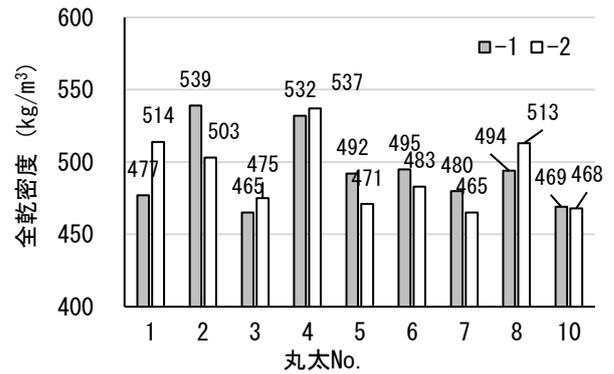


図 4-2 各丸太の全乾密度

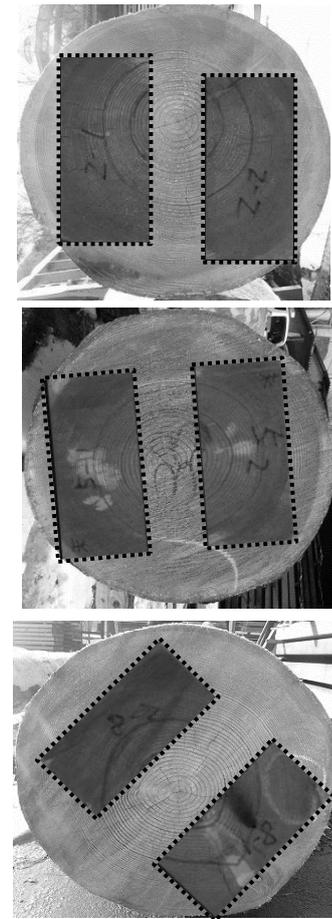


写真 4-1 上から No. 2 (元口), 5 (末口), 8 (元口)

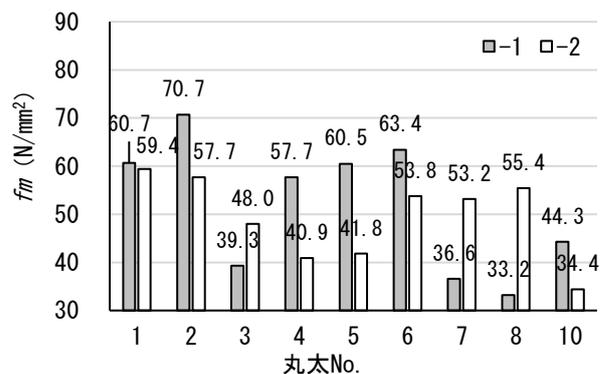


図 4-3 各丸太の曲げ強さ (f_m)

第2章及び第3章の試験体を合計した丸太と平角材の平均した縦振動ヤング係数 (E_{fr}) を図4-4に示す。

丸太は全て大の素材であり、丸太と平角材の縦振動ヤング係数についてスピアマンの順位相関係数の検定により確認したところ相関係数0.67となり両者には正の相関が認められた ($p < 0.01$)。よって、丸太の縦振動ヤング係数が高いほど2丁取りされた平角材の平均縦振動ヤング係数が高くなることが示唆された。しかし、個々の平角材の E_{fr} を見ると必ずしも丸太の縦振動ヤング係数と同値にはならず2本の平角材には縦振動ヤング係数の高低の差が大きい試験体が複数存在した。丸太よりも低い縦振動ヤング係数の平角材が多かった原因は不明である (図4-5)。

2丁取りされた平角材の縦振動ヤング係数は、丸太の縦振動ヤング係数よりも低い材が多く見られた。

丸太の末口平均直径と平角材の縦振動ヤング係数の関係を図4-6に示す。末口平均直径と平角材の縦振動ヤング係数についてピアソンの相関係数の検定により確認したところ両者には相関関係は認められなかった ($p = 0.72$)。よって、本試験結果では丸太が大の素材の場合、未成熟材よりも成熟材の割合が多いと想定されるが、製材される心去り平角材の縦振動ヤング係数が高くなるとは限らないと思われる。

丸太の末口年輪数と平角材の縦振動ヤング係数の関係を図4-7に示す。末口年輪数と平角材の縦振動ヤング係数についてピアソンの相関係数の検定により確認したところ両者には相関関係は認められなかった ($p = 0.15$)。よって、本試験結果では長伐期により高齢化した丸太から製材される心去り平角材の縦振動ヤング係数が高くなるとは限らないと思われる。

以上のことから、カラマツ林を長伐期により大径化することで必ずしも高い曲げヤング係数の丸太が生産されるとは限らず、そこから製材される心去り平角材も必ずしも丸太同様の曲げヤング係数が得られるとは限らない。丸太よりも高いヤング係数の平角材も得られるが、むしろ曲げヤング係数が0~2kN/mm²低めの平角材が得られる可能性が高い。

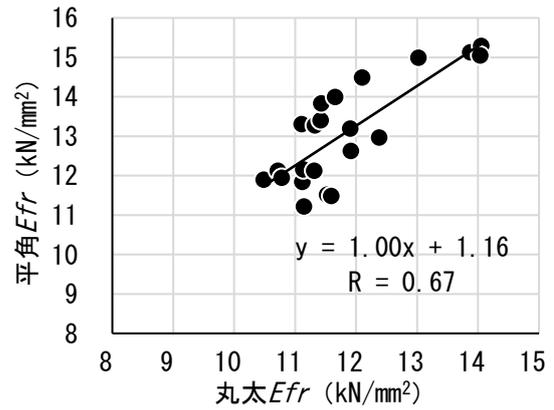


図4-4 丸太と平角材の E_{fr} 関係

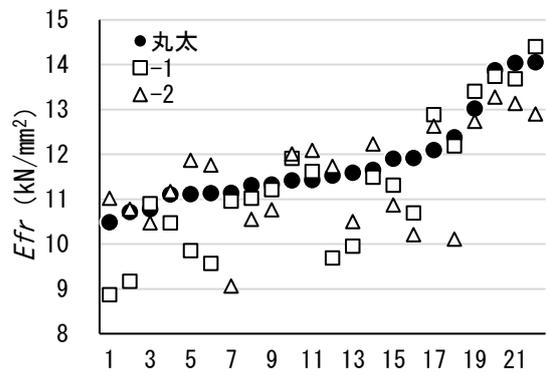


図4-5 順位化した丸太及び平角材の E_{fr} の関係

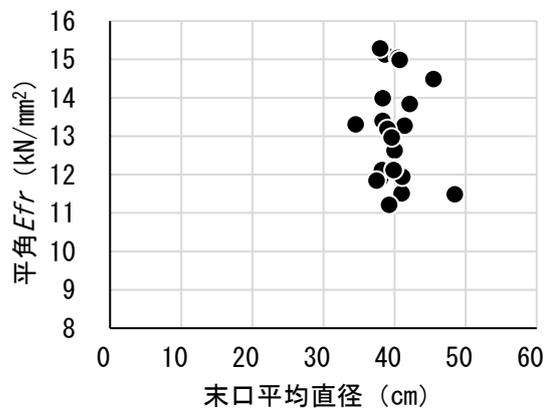


図4-6 末口平均直径と平角の E_{fr} の関係

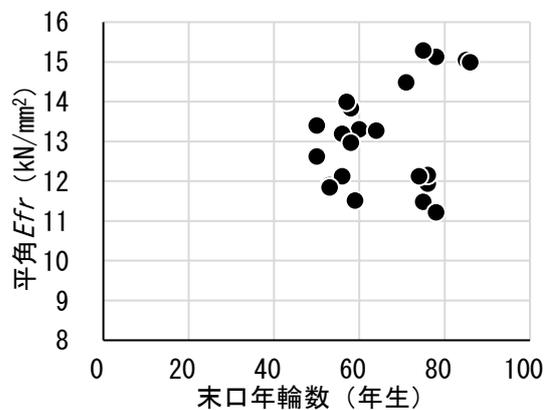


図4-7 丸太の末口年輪数と平角の E_{fr} の関係

第 5 章 半径方向の強度性能

5.1 試験体（無欠点試験体）

第 3 章の丸太から図 5-1 のとおり髓を含む板材（450～500×50×4,000 mm）10 枚を製材し、その後、板材のまま屋内において 2019 年 2 月から 2020 年 4 月までの 1 年 3 カ月間天然乾燥を実施した。

天然乾燥後、図 5-2 のとおり末口及び元口の木口面から長さ方向に 1,000 mm でクロスカット後、髓で板材を 2 分割した。分割した板材に試験材の幅 30 mm と帯鋸の刃の幅 2 mm を書き入れて、試験材ごとに年輪を測定する標本を作製した。なお、最小と最大の年輪を平均したものを各試験材の平均年輪とした。板材を小割し、28.5×28.5×456 mm（一部、25.7×25.7×456 mm）に整形後、恒温恒湿室内（温度 20℃、湿度 65%、EMC11.8%）で 11 カ月間調湿した。

試験材は、末口と元口を区分し髓側から樹皮側に向かって昇順に No. を付与した（写真 5-1）。

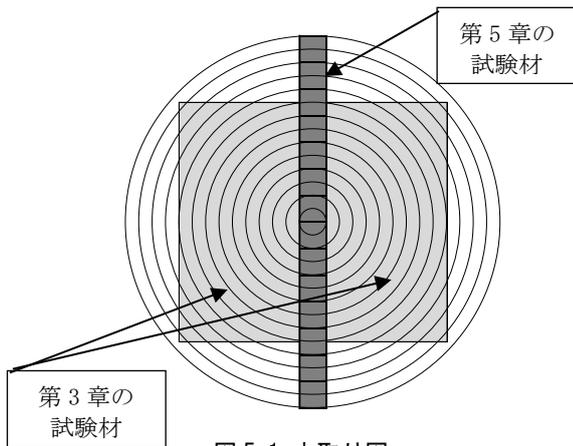


図 5-1 木取り図

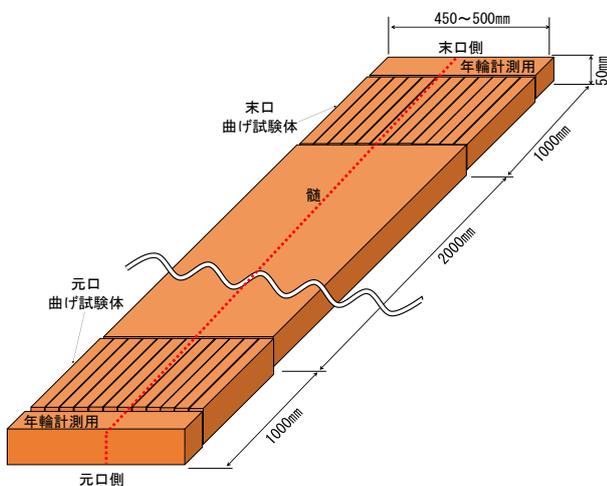


図 5-2 試験材の配置図

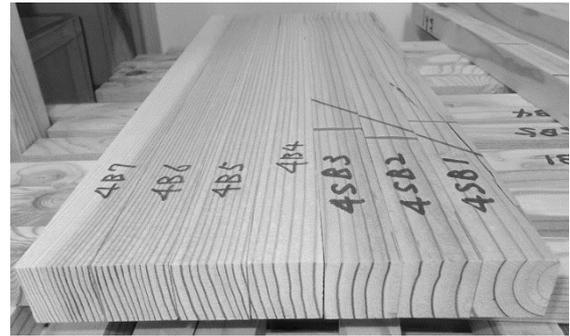


写真 5-1 試験材

5.2 試験方法

JIS Z 2101(2009)曲げ試験に基づき中央集中荷重 3 点曲げ方式、支点間距離 399 又は 360 mm、載荷速度は 5 mm/min で実施した（図 5-3）。なお、スパン中央部のたわみ量は、ストローク値を使用し、次式により曲げ強さ（ σ_b ）と見掛けの曲げヤング係数（ E_{b-ap} ）を計算した。

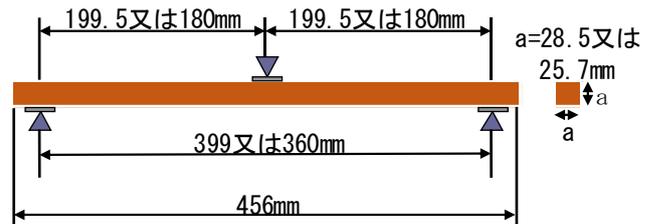


図 5-3 曲げ試験方法

$$\sigma_b = \frac{P_m l}{4Z}$$

σ_b : 曲げ強さ (N/mm²)

P_m : 最大荷重 (N)

l : 支点間距離 (mm)

Z : 断面係数 $Z = \frac{a^3}{6}$ (mm³)

$$E_{b-ap} = \frac{\Delta P l^3}{48 I \Delta y}$$

E_{b-ap} : 見掛けの曲げヤング係数 (kN/mm²)

l : 支点間距離 (mm)

I : 断面 2 次モーメント $I = \frac{a^4}{12}$ (mm⁴)

ΔP : 最大荷重における約 40% と約 10% との差 (N)

Δy : ΔP に対応するスパン中央のたわみ (mm)

5.3 結果と考察

試験結果を表 5-1 に示す。また、見掛けの曲げヤング係数 (E_{b-ap}) と曲げ強さ (σ_b) の関係を図 5-4 に示す。スピアマンの順位相関係数の検定により両者の相関係数は 0.93 となり、極めて強い正の相関があると認められた ($p < 0.01$)。

平均年輪と見掛けの曲げヤング係数を図 5-5 に示す。平均年輪が 20 年前後で傾きが大きく変化しており、試験体の隣接部付近における仮道管長の半径方向の分布と同様の結果となった⁷⁾。

年輪が 40 年以降の高い部分では、見掛けの曲げヤング係数が低下している試験材が複数あった。

平均年輪幅と全乾密度及び見掛けの曲げヤング係数の関係を図 5-6 及び 7 に示す。木材の物理⁸⁾の図 2-2 様々な樹種の年輪幅と密度の関係と同様の結果となったが、丸太でのこの外側の部分は平角材の製材時に切り落とされることから、使用上問題ないと思われる。写真 5-2 の場合、樹皮側に最も近い No.3A9 とその隣接する No.3A8 の見掛けの曲げヤング係数の差は 2.32kN/mm²あり、晩材の厚さを見ると No.3A9 < No.3A8 となりこのことが要因と推測される。また、No.3A1 の E_{b-ap} が最も低い 3.72kN/mm²となり、これは早材部が厚く、晩材部が薄いことが要因と推測される。

表 5-1 試験結果

| | σ_b (N/mm ²) | E_{b-ap} (kN/mm ²) | 含水率 (%) | 全乾密度 (kg/m ³) | 平均年輪幅 (mm) |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|------------|------------------------------|---------------|
| 平均値 | 74.6 | 9.80 | 13.3 | 471 | 4.2 |
| 最大値 | 115.1 | 15.35 | 14.1 | 632 | 11.6 |
| 最小値 | 32.4 | 3.72 | 12.2 | 348 | 1.0 |
| 標準偏差 | 17.7 | 2.52 | 0.3 | 64 | 2.3 |
| 変動係数 (%) | 23.7 | 25.69 | 2.3 | 13.6 | 55.2 |
| 試験体数 | 242 | 242 | 242 | 242 | 242 |

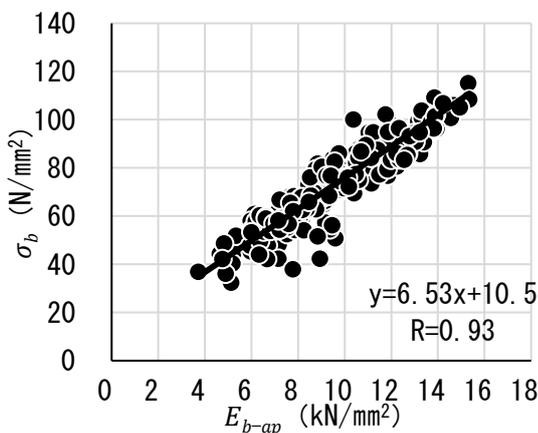


図 5-4 E_{b-ap} と σ_b の関係

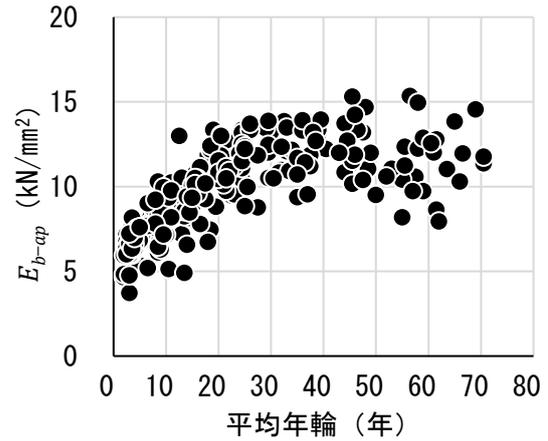


図 5-5 平均年輪と E_{b-ap} の関係

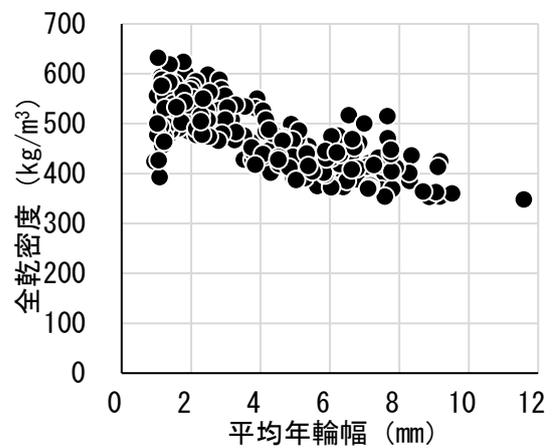


図 5-6 平均年輪幅と全乾密度の関係

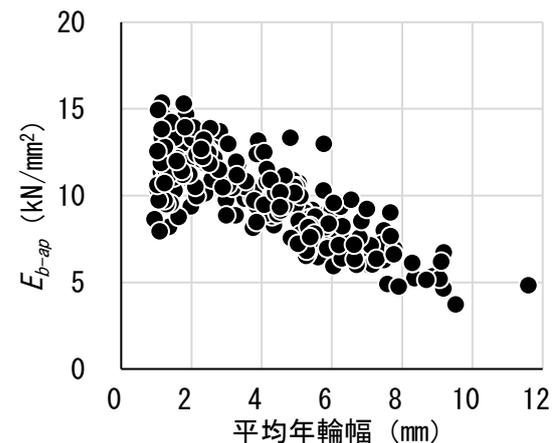


図 5-7 平均年輪幅と E_{b-ap} の関係

全乾密度と見掛けの曲げヤング係数の関係を図 5-8 に示す。スピアマンの順位相関係数の検定により相関係数が 0.85 となり両者には極めて強い正の相関があると認められた ($p < 0.01$)。

また、末口側と元口側の試験体の見掛けの曲げ

ヤング係数の有意差は認められなかった (P=0.17)。よって、4m 材での両端付近の見掛けの曲げヤング係数はほぼ変わらないと推測する。

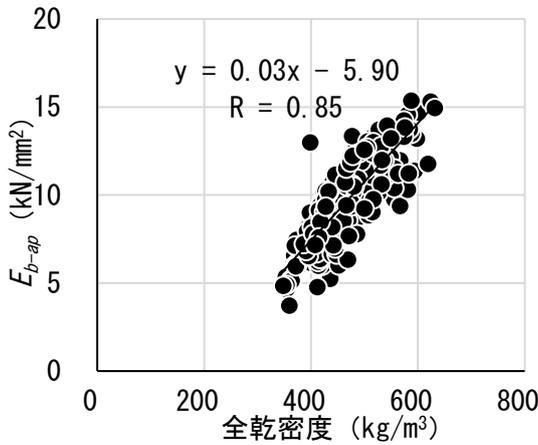


図 5-8 全乾密度と E_{b-ap} の関係

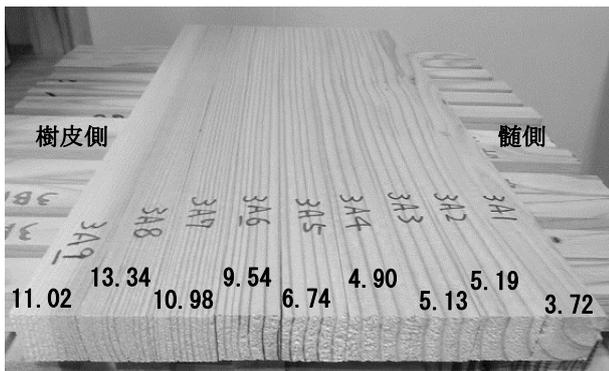


写真 5-2 試験体と見掛けの曲げヤング係数

5.4 無欠点試験体と実大材試験体の比較

見掛けの曲げヤング係数と曲げ強さの関係を図 5-9 に示す。なお、図中には既往の心去り正角材 (120×120 mm, 天然乾燥) を追加した。

実大材試験体の見掛け曲げヤング係数は、無欠点試験体の範囲内にあった。

一方、実大材試験体の曲げ強さは、それぞれの近似式に実大材試験体の見掛けの曲げヤング係数の平均値 12.29kN/mm^2 を代入した結果、無欠点試験体の 4 割強低下していた。また、心去り正角材と同様に比較した場合、約 2 割低下していた。このことは、実大材の有する節などの欠点により低下したと思われる (寸法効果)。なお、今回の実大材の平角の材幅は 105 mm であったが、曲げ強度に対して材幅による寸法効果を考慮する必要はないと考えられている⁹⁾。このように製材 JAS の構

造用製材の基準曲げ強度についても寸法に対する低減率を適応することが必要と考える。

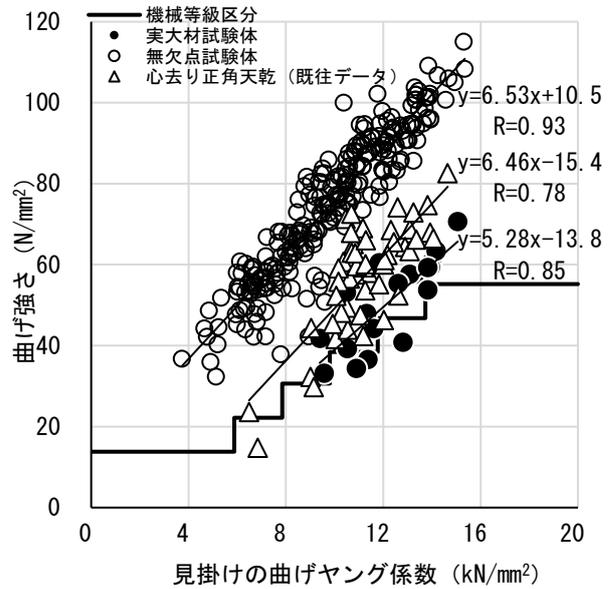


図 5-9 無欠点試験体と実大材試験体の比較

まとめ

第 1 章 丸太の強度特性

県産 (地域割合が東信 76%, 中信 13%, 北信 11%) のカラマツ丸太 (素材の割合が大 77%, 中 23%) 181 本の縦振動ヤング係数を試験した。その結果、見かけの密度が増加すると縦振動ヤング係数も増加することが示唆された。また、素材の大の縦振動ヤング係数の平均値 12.0kN/mm^2 、標準誤差 0.13kN/mm^2 、中の縦振動ヤング係数の平均値 13.8kN/mm^2 、標準誤差 0.25kN/mm^2 となり、現在の本県の素材の大及び中のカラマツ丸太の縦振動ヤング係数の平均は E_{f130} になると推測する。

第 2 章 蒸気式と蒸気圧力併用式乾燥特性の比較

東信地域のカラマツ丸太 12 本 (大の素材) を心去り平角材 (2 丁取り) に製材し、一方を 90°C の蒸気圧力併用式乾燥 (13 日間) と、もう一方を 90°C の蒸気式乾燥 (18 日間) を行った。その結果、平均含水率は、蒸気圧力併用式 12.6%、蒸気式 14.9% となり、蒸気圧力併用式を行うことにより約 3 割以上の乾燥時間短縮が期待できる。形質は使用上問題なかった。また、強度性能のついては、乾燥方法の違いはあるが、 90°C の中温乾燥材は、告示の目視等級区分のカラマツの基準強度を満足し、また、一部の試験材を除けば機械等級区分の基準強度もほぼ満足した。

第3章 ガラスハウス乾燥の特性

木曽森林管理署管内において林齢96年生の林分から生産されたカラマツの丸太10本（大の素材）から心去り平角材（2丁取り）に製材し、ヤニ滲出防止のための蒸煮を12時間行った後に、ガラスハウス内に静置し、2019.2.8から2020.1.27まで乾燥を実施した。その結果、約6カ月経過で含水率15%を下回りJAS（構造用製材SD15）の基準を満足していた。形質変化は使用上問題なかった。また、強度性能では節の等級の違いはあるものの、告示の目視等級区分の基準強度を満足し、一部の試験材を除けば機械等級区分の基準強度もほぼ満足した。

第4章 丸太と製材品の強度性能の関係

第2章及び第3章の試験体を合計した丸太と2丁取りした平角材については、丸太の縦振動ヤング係数が高いほど2丁取りされた平角の平均縦振動ヤング係数が高くなることが示唆された。しかし、個々の平角材の縦振動ヤング係数を見ると必ずしも丸太の縦振動ヤング係数と同値にはならず2本の平角材には縦振動ヤング係数の高低の差が大きい試験体が複数存在した。また、今回の試験では、丸太の末口平均直径及び末口年輪数と縦振動ヤング係数とに相関関係が認められなかったことからカラマツ林を長伐期により大径化することで必ずしも高い曲げヤング係数の丸太が生産されるとは限らず、そこから製材される心去り平角材も必ずしも丸太同様の曲げヤング係数が得られるとは限らない。

第5章 半径方向の強度性能

実大材試験体の曲げヤング係数は、無欠点試験体の曲げヤング係数の範囲内にあった。一方、実大材試験体の曲げ強さは、無欠点試験体の4割強（正角材に対しては約2割）低下していた（寸法効果）。このことは、実大材の有する節などの欠点により低下したと思われる、製材JASの構造用製材の基準曲げ強度についても寸法に対する低減率を適応することが必要と考える。

結言

本県の現在の大径カラマツ丸太の強度性能とそこから製材された心去り平角材について乾燥特性と強度性能についてある程度の知見を得た。数値

の信憑性を高めるためにも、今後も継続した試験が必要と考える。

謝辞

本試験を行うに当たり、データ入力等にお手伝い頂いた当センター非常勤職員の蒲原静子氏に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 柴田直明・吉田孝久・山内仁人, 安全・安心な乾燥材生産技術の開発(Ⅱ), 長野県林業総合センター研究報告第29号, pp.75-94, (2015)
- 2) 橋爪丈夫, 長野県産カラマツ構造材の強度特性に関する研究, 長野県林業総合センター研究報告第13号, pp.16-30, (1998)
- 3) 吉田孝久・奥原祐司・今井信・山口健太・柴田直明・田畑衛・山内仁人・山岸信也, カラマツ大径材から得られる心去り正角材(2丁取り)の乾燥特性及び強度特性の解明, 長野県林業総合センター研究報告第33号, pp.49-64, (2019)
- 4) 奥原祐司・今井信・吉田孝久・山口健太, 3心去り無垢梁桁材の乾燥特性及び強度特性の解明, 長野県林業総合センター研究報告第35号, pp.124-139, (2021)
- 5) 吉田孝久・伊東嘉文, 高温セット処理を行った柱・桁材の太陽熱乾燥, 長野県林業総合センター研究報告第24号, pp.171-184, (2009)
- 6) (公財)日本住宅・木材技術センター, 構造用木材の強度試験マニュアル(第4版), pp.59-78, (2013)
- 7) 細尾佳宏ほか, カラマツ大径材の強度特性と仮道管長の半径方向分布, 第71回日本木材学会大会ポスター発表, 1P67, (2021)
- 8) 石丸優・古田裕三・杉山真樹(編), 木材科学講座3木材の物理(改訂版), p.40, (2022)
- 9) 長尾博文・井道裕史・加藤英雄・三浦祥子・下田優子, スギ製材の曲げ強度に対する寸法効果(材せいと材幅の影響), 木材学会誌 Vol.60 No.2, pp.100-106, (2014)