

# 家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化（第5報） 引張割れの防止

石原智佳\*, 三井勝也\*

Approaches to making smart of the wood bending process (V)  
Prevention of tensile failure during bending of wood

ISHIHARA Chika\*, MITSUI Katsuya\*

曲げ木の製造現場において利用が可能になった「曲げ木の可否判定プログラム」は、主として曲げ木の外周部に生じやすい引張割れを防止するために、部材厚さ、曲げ半径、帯鉄条件の相互関係の設定を簡易にする。本プログラムで重要な材条件が、蒸煮処理直後の静的曲げヤング率である。非破壊式でかつ短時間で測定可能な値であり、静的曲げヤング率と相関性がある動的ヤング率は、プログラムへの利用が期待される。動的振動試験の種類別に得られる各種動的ヤング率から、本プログラムに適するものを検討した。

## 1. 緒言

岐阜県飛騨地域は木製家具の産地であり、「曲げ木」と呼ばれる、無垢材を曲げ加工した部材を用いる特徴がある。曲げ木は1920年頃に飛騨地域に伝わった伝統技術である。木材は水分を多く含んだ高温の状態になると、軟化して曲がりやすくなる性質を持ち、この特性を活かした加工法である。軟化処理としては、水蒸気で蒸す蒸煮法が一般的である。蒸煮後、帯鉄と呼ばれる金属型にはめて曲げ、乾燥により形状を固定する。

樹種により、割れ・折れ・しわといった不良現象が生じるなど、曲げ木への適性が異なる。そこで一連の研究<sup>1)-4)</sup>において、曲げ性能を比較するなど、加工精度向上に向けた検討を行ってきた。

明らかになったこととして、曲げ木の外周側が元の長さより伸びることが挙げられる。帯鉄を沿わせて曲げることで、木材には圧縮応力のみが作用し、伸びないと思われていた。そこで、伸びを引張限界以下に抑制できれば成功率が高まることを見出し、引張割れによる不良を低減できる「曲げ木の可否判定プログラム」<sup>3)</sup>を作成した。

本プログラムでは、木材の軟化程度、引張限界、帯鉄に用いる金属の特性といった情報が必要である。木材の軟化の程度は温度及び含水率と相関性

が高い静的曲げ弾性率を指標に、引張限界は破壊ひずみを指標にした。

昨年度から行っている、非破壊式振動試験による木材の動的ヤング率の算出についても引き続き検討し、可否判定プログラムでの利用を目指した。

## 2. 曲げ木の可否判定プログラム

木材に帯鉄を沿わせて曲げる際、一体化させることが重要であるが、両者の間に隙間ができてしまうこともある。木材の引張限界ひずみを $\varepsilon_t$ 、曲げヤング率を $E_1$ 、厚さを $h_1$ とし、帯鉄の金属のヤング率を $E_2$ 、厚さを $h_2$ 、幅はいずれも等しいとすると、式(1)が成り立つ条件で、引張割れの発生頻度が減少することが確認された。

$$(1 - \varepsilon_t)E_1h_1^2 - (1 + \varepsilon_t)E_2h_2^2 - 2\varepsilon_t(rE_1h_1 + rE_2h_2 + E_2h_2h_1) < 0 \quad (1)$$

また、3層の場合は、各層のヤング率と厚さ及び木材の $\varepsilon_t$ を用い、式(2)が成り立つ必要がある。

$$(1 - \varepsilon_t)E_1h_1^2 - (1 + \varepsilon_t)E_2h_2^2 - (1 + \varepsilon_t)E_3h_3^2 - 2(1 + \varepsilon_t)E_3h_3h_2 - 2\varepsilon_t \left( \begin{array}{l} rE_1h_1 + rE_2h_2 + rE_3h_3 \\ + E_2h_2h_1 + E_3h_3h_1 \end{array} \right) < 0 \quad (2)$$

\* 試験研究部

### 3. 木材の曲げヤング率

#### 3.1 動的振動試験

これまでの研究では、曲げ試験により、静的曲げヤング率 $E_b$ を算出していたが、破壊試験であるため、曲げ木の可否判定プログラムの式に代入する値が代表値であることを懸念していた。そこで、静的値 $E_b$ と相関性がある動的ヤング率への置換を検討してきた<sup>4)</sup>。昨年度は、縦振動法から得られる動的縦ヤング率 $E_l$ と $E_b$ との相関性の検討を行った。 $E_l$ は $E_b$ よりも5~10%程度大きな値を示すと既往の報告<sup>5)</sup>であったが、蒸煮処理した材ではさらに大きな差が見られた。これには、材内で生じる水分傾斜が影響していると考えられる。

動的ヤング率にはもう一つ、曲げたわみ振動試験から得られる見かけの動的曲げヤング率 $E_g$ がある。材内が均質であれば、二つの動的ヤング率 $E_l$ と $E_g$ は等しくなることが想定される。外崎ら<sup>6)</sup>によると、スギ正角心持ち材(11×11×304cm)の気乾材では両値の比( $E_g/E_l$ )が1.1を超えないこと、また未乾燥材で内層が含水率20%を超える場合、上述の比が1.1を超えることが報告されている。

縦振動は断面全体がほぼ同じ歪みで振動し、断面内の平均的性質がヤング率に現れ、また、縦方向のヤング率であるため、梁せい方向のヤング率より高くなる。一方、曲げたわみ振動では振動面の上下で大きく歪み、中立軸付近で歪みが小さいために試験体の上下部分の性質が影響するといわれており、せん断変形の影響を含み、静的曲げヤング率値に、本質的に近い数値であると考えられている<sup>6)</sup>。

#### 3.2 曲げたわみ振動法

曲げたわみ振動試験の様子を図1に示す。試験体は、たわみ1次の節となる試験体の両端から長さの0.224倍の位置にて糸で支持する両端自由ばりとした。試験体中央の下部にマイクロホン(1/2インチエレクトレットマイクロホン UC-59 リオン製)を置き、上部を小型の木製バチで軽く打撃する。マイクロホンで収集した音をFFTアナライザ(多機能計測システムSA-A1 リオン製)で計測し、共振周波数を特定した。動的曲げヤング率 $E_g$ は式(3)により算出する。

$$E_g = \frac{48\pi^2 l^4 \rho f_0^2}{m_n^4 h^2 \times 10^9} \quad [\text{GPa}] \quad \dots (3)$$

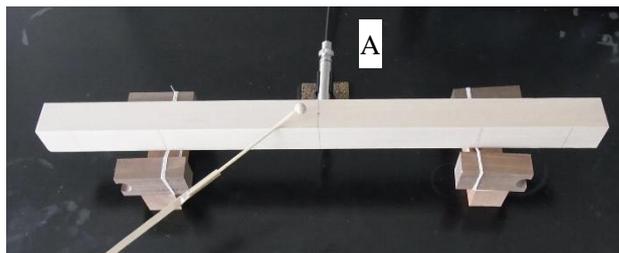


図1 曲げたわみ振動試験の様子  
A: マイクロホン

表1 FFTアナライザの設定条件

| 測定設定   |         |
|--------|---------|
| 入力レンジ  | 0.1V    |
| 周波数レンジ | 1kHz    |
| 分析点数   | 2048    |
| 窓関数    | レクタンギュラ |
| トリガ設定  |         |
| ソース    | 時間波形    |
| スロープ   | +       |
| ポジション  | 150     |
| 波形レベル  | 6.1%    |

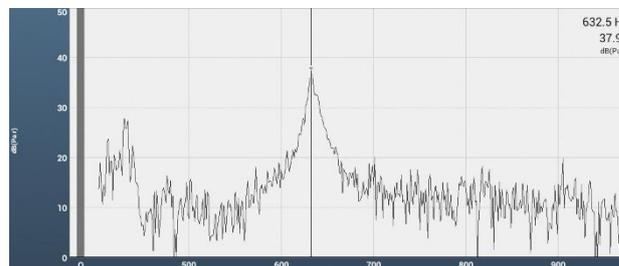


図2 曲げたわみ振動試験から得られるパワースペクトルの一例

ここで、 $l$ は試験体長さ(mm)、 $\rho$ は試験体密度( $\text{g}/\text{mm}^3$ )、 $f_0$ は共振周波数(Hz)、 $m_n$ はnモードの $m$ 値であり、両端自由1次振動では4.730となる。また、 $h$ は材の厚さである。

また、曲げたわみ振動試験時のFFTアナライザの設定条件を表1に示す。得られるパワースペクトルの一例を図2に示す。最もピーク値が高い周波数を共振周波数とする。

## 4. 結果

### 4.1 振動試験結果の比較

ブナ材において、木目方向と試験体形状が曲げ

たわみ及び縦振動試験に及ぼす影響を検討した。打撃面を柎目面と板目面とし、試験体の幅と厚さは15mmと30mmから組み合わせ、長さはいずれも260mmとした。結果を表2に示す。動的曲げヤング率 $E_g$  に関しては、幅と厚さが異なる寸法の場合、木目に因らず、幅が短い材のほうが低い値を示す。また、縦振動ヤング率 $E_l$  では、いずれも同じ値を示した。正角材の場合は、柎目面を打撃する場合に、やや低い値を示した。本研究では、二種類の動的ヤング率値がやや異なり、 $E_l$  値のほうが高くなる傾向にあった。上述の研究6)では、供試材が乾燥過程にある木材であり、表層ほど低含水率となっている材料に関する測定値であったのに対し、本研究では蒸すことを想定した吸水処理により、表層ほど高含水率となっている材料であったため、両ヤング率の大小の関係が逆になったことが考えられる。両者の動的ヤング率の特性を活かして、水分傾斜の程度とヤング率比の関係を明らかにすることで、曲げ性の評価での利用を目指す。

次に、曲げたわみ振動法による動的曲げヤング率に及ぼす含水率と温度の影響について検討した。結果を表3に示す。なお、試験体の樹種はブナ、寸

表2 ブナ 振動試験結果

気乾状態・打撃面別 (長さ260mm)

| 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 幅×厚<br>(mm) | 打撃面 | 動的曲げ<br>ヤング率<br>(GPa) | 縦振動<br>ヤング率<br>(GPa) |
|----------------------------|-------------|-----|-----------------------|----------------------|
| 0.62                       | 30×15       | 柎目  | 12.5                  | 13.9                 |
|                            | 15×30       | 板目  | 11.6                  | 13.9                 |
| 0.60                       | 15×30       | 柎目  | 9.9                   | 13.4                 |
|                            | 30×15       | 板目  | 11.6                  | 13.4                 |
| 0.77                       | 30×30       | 柎目  | 13.3                  | 18.0                 |
|                            |             | 板目  | 14.0                  | 18.0                 |

表3 動的曲げヤング率と含水率・温度の関係

ブナ材：30×30×480mm (繊維方向)

| 含水率<br>(%) | 動的曲げヤング率<br>(GPa) | 温度  |
|------------|-------------------|-----|
| 10         | 11.7              | 常温  |
| 14         | 11.1              | 常温  |
| 20         | 10.6              | 常温  |
| 20         | 8.7               | 90℃ |

法は30×30×480mm (繊維方向)、木目は追柎材とした。常温では含水率10~20%範囲では、約1GPa変化する。このことは既往の研究7)の報告と一致する。この20%含水率の試験体を、水分が変化しないようにアルミホイルで包み、100℃のオーブン内に置き、材温を95℃程度に上げたところ、ヤング率が低下したことから、高含水率・高温状態では、動的曲げヤング率も静的曲げヤング率同様に低下するといえる。

## 5. まとめ

木材の曲げ木加工において多くの不良率を占める引張割れについては、引張側の伸び変形を引張限界以下に抑制することで大幅に抑制できることが判明した。曲げ半径に応じた引張ひずみを低減させる役割が帯鉄にあり、その最適な条件も含め、相互の関係を数値的に導くための「曲げ木の可否判定プログラム」を提案した。

本プログラムにおいて、木材の曲げ性能を指標化できる静的曲げヤング率が重要な因子である。この数値と相関があり、かつ簡易的に測定できる動的ヤング率をプログラムの数値として利用を目指す。

## 参考文献

- 1) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 20, pp. 9-11, 2018.
- 2) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 21, pp. 9-11, 2019.
- 3) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 8-11, 2020.
- 4) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 23, pp. 1-5, 2021.
- 5) 久保島吉貴他：IV. 動的弾性係数の非破壊測定方法, 構造用木材の強度試験マニュアル, (公財)日本住宅・木材技術センター, 2011, pp. 59-63
- 6) 外崎真理雄他：縦およびたわみ振動試験による材内不均質性の評価 (第1報), 木材学会誌, 46 (1), pp. 20-24, 2000.
- 7) 古田裕三：第3章木材の力学的性質 第3節動的粘弾性, 木材科学講座3 木材の物理, 石丸優ら編, 海青社, 2017, p. 121.