

家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化（第4報） 曲げ木に適した状態判定

石原智佳*, 三井勝也*, 成瀬哲哉*

Approaches to Making Smart of the Wood Bending Process (IV) Condition Judgment Suitable for Bending Wood

ISHIHARA Chika*, MITSUI Katsuya*, NARUSE Tetsuya*

曲げ木加工において、部材厚さ、曲げ半径、帯鉄条件を指定することで、曲げの可否を判定するプログラムを作成した。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。この静的曲げヤング率と相関性があるといわれている動的ヤング率は、非破壊式でかつ短時間で測定可能な値であり、本プログラムへの利用の可能性を検討した。

縦振動法から得られる動的ヤング率と静的値には数%程度の差で相関性があるとの報告であったが、本研究から、蒸煮処理直後の材では、両値に大きな差がみられた。蒸煮による含水率増加が、材内で傾斜していることが要因であると考えられる。

1. 緒言

岐阜県飛騨地域は木製家具の産地であり、1920年頃から伝わる伝統技術「曲げ木」を用いる特徴がある。曲げ木は、木材が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活かしたものであり、軟化処理は水蒸気で蒸す蒸煮法が一般的である。蒸煮した木材に帯鉄と呼ばれる金属を当てて曲げ、型にはめたまま乾燥させて形状を固定し、曲げ木は作られる。

蒸煮直後の材は高含水率・高温状態にあり、気乾状態より曲げ弾性率が低下する。この低下具合が曲げ木の良否に影響する。そこで、この数値を利用する「曲げ木の可否判定プログラム」を作成し、前報¹⁾で報告した。

木材の曲げヤング率は、曲げ試験から算出する方法が一般的であるが、破壊試験であり、同一試験体で異なる状態の値を比較できない。一方、振動試験から求められる動的ヤング率は静的な曲げヤング率と比べて5~10%程度高い値を示すものの、両値には相関性がある²⁾といわれている。

そこで、本研究では、曲げ木の可否判定プログラムに動的ヤング率を利用し、短時間で簡易に曲げの良否を判断するための検討を行った。

2. 実験方法

2.1. 供試材料

樹種は、家具に多く用いられるブナ、ミズナラ、ホワイトオーク、ウォルナットとし、人工乾燥した板材を所定の寸法に調製した。

2.2. 縦振動試験

振動試験の様子を図1に示す。試験体は、励起された自由振動に影響を及ぼさないようにスポンジで支持し、一方の木口面から3mm程度離してマイクロホン（リオン製 1/2インチエレクトレットマイクロホン UC-59）を置き、反対側の木口面を小型の木製パチで軽くたたく。マイクロホンで収集した音をFFTアナライザ（リオン製 多機能計測システムSA-A1）で計測し、共振周波数を特定した。動的ヤング率は式 (1) により算出する。

$$E_f = (2Lf_0)^2 \rho / 10^{12} \quad [\text{GPa}] \quad \dots (1)$$

ここで、 E_f は動的ヤング率 (GPa)、 L は試験体長さ (mm)、 f_0 は共振周波数 (Hz)、 ρ は試験体密度 (g/cm^3) である。

また、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。ここでは4つのピークが見られ、各ピークの周波数は図3のように数値として把握できる。最もピーク値

* 試験研究部

が高い周波数を共振周波数とする。

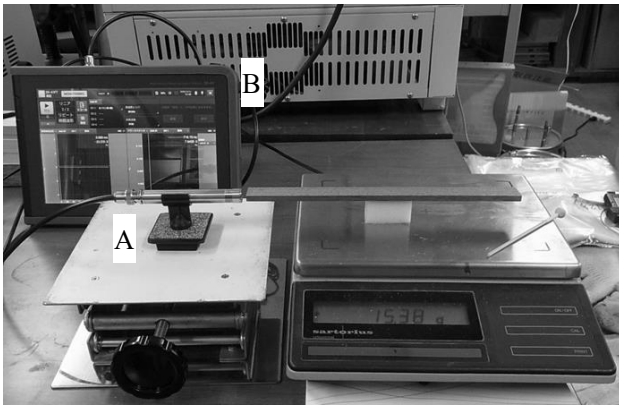


図1 振動試験の様子
A：マイクロホン、B：FFTアナライザ

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	20kHz
分析点数	2048
窓関数	レクタンギュラ
平均方法	リニア
平均回数	2回
トリガ設定	
モード	リピート
ソース	時間波形
リピート回数	2回
スロープ	+
ポジション	-512
波形レベル	-99.9%

2.3. 曲げ試験

静的曲げヤング率は油圧式万能試験機（島津製作所社製UH-100KNC）による曲げ試験の荷重-たわみ曲線に基づき、式(2)により算出する。

$$E = \frac{\Delta P l^3}{48 I \Delta y} \quad [\text{GPa}] \quad \dots (2)$$

ここで、 E は静的ヤング率 (GPa)、 ΔP は比例域における上限荷重と下限荷重との差 (kN)、 Δy は ΔP に対応するスパン中央のたわみ (mm)、 l はスパン (mm)、 I は断面2次モーメント (mm^4)、すなわち、 $I = bh^3/12$ である。

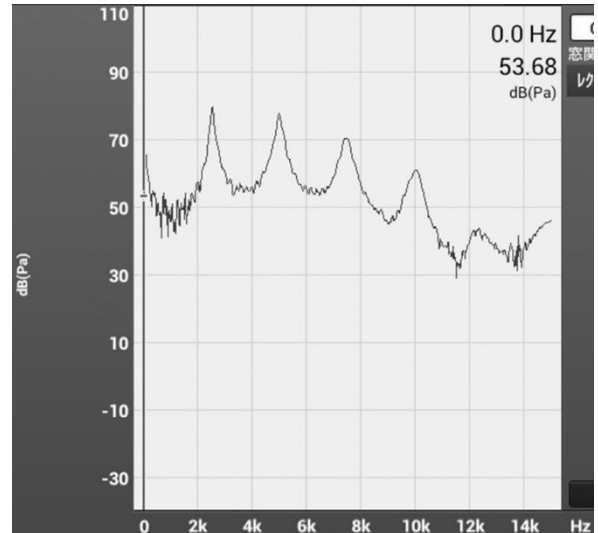


図2 縦振動試験から得られるパワースペクトルの一例

No	周波数	dB(Pa)
1	2525.0 Hz	79.96
2	4975.0 Hz	77.86
3	50.0 Hz	73.64
4	7425.0 Hz	70.65
5	7475.0 Hz	70.63
6	5350.0 Hz	64.54
7	2225.0 Hz	62.98
8	2900.0 Hz	62.18
9	2950.0 Hz	61.44
10	10025.0 Hz	61.30

図3 パワースペクトルの各ピーク値

2.4. 蒸煮処理

曲げ木加工の前処理として、木材を水蒸気で蒸す蒸煮処理を行う。小試験体であれば調理用蒸し鍋器を用い、長軸材の場合は実大材サイズのステンレス製蒸煮釜（図4）に水蒸気を送り込む。



図4 水蒸気発生装置及び蒸煮釜

3. 結果

3.1. 縦振動試験

ブナ、ミズナラ、ホワイトオーク、ウォルナットの気乾状態における縦振動試験結果を表2に示す。なお、試験体寸法は幅28mm×高さ28mm×長さ765mmとした。

表2 縦振動試験結果1
気乾状態 長軸材

	気乾重量 (g)	気乾含水率 (%)	密度 (g/cm ³)	共振周波数 (Hz)	ヤング率 (GPa)
ブナ	432	11.9	0.72	3125	16.5
ミズナラ	448	12.5	0.75	2700	12.7
ホワイトオーク	482	9.9	0.80	3050	17.5
ウォルナット	390	9.4	0.65	3150	15.1

次に、試験体寸法の影響を確認するため、小試験体に対して同様の検討を行った結果を表3に示す。なお、試験体寸法は幅20mm×高さ5mm×長さ240mmとした。

表3 縦振動試験結果2
気乾状態 小試験体

	気乾重量 (g)	気乾含水率 (%)	密度 (g/cm ³)	共振周波数 (Hz)	ヤング率 (GPa)
ブナ	17.7	11.1	0.74	9887.5	16.6
ミズナラ	18.2	10.6	0.76	10406	18.9
ホワイトオーク	16.6	9.8	0.69	9975	15.9
ウォルナット	13.9	10.1	0.58	10287	14.1

試験体サイズによる差はミズナラで大きく見られた以外はほぼ同等の値となった。縦振動法では、一つの試験体内の平均的な動的ヤング率を評価する²⁾との説明もあり、含水率差以外にも、固体内にヤング率を高めた何らかの因子があったことも考えられるが、他の形状も用意し、今後さらに検討する。

次に、表3に示した同一の試験体を用いて、動的ヤング率への温度・水分の影響を調べた。条件として、気乾状態(①)、試験体をラップに包み蒸すことで、低含水率・高温度状態にしたもの

(②)、ラップをせずに蒸すことで、高含水率・高温度状態にしたもの(③)、最後に、蒸し後に常温まで下げ、高含水率・低温度状態にしたもの(④)に調製した。なお、蒸煮は蒸し鍋器で行った。結果を表4に示す。

表4 縦振動試験結果3
含水率・温度状態別 小試験体

		含水率 [%]	共振周波数 [Hz]	ヤング率 [GPa]
ブナ	①気乾 低含水率 常温	11.1	9888	16.6
	②ラップ蒸し 低含水率 高温	11.1	9425	15.1
	③蒸し直後 高含水率 高温	18.0	8656	13.5
	④蒸し後冷却 高含水率 常温	16.8	9369	15.6
ホワイトオーク	①	9.8	9975	15.9
	②	9.8	9444	14.2
	③	16.3	8650	12.6
	④	15.9	9463	15.1
ミズナラ	①	10.6	10406	18.9
	②	10.6	10025	17.5
	③	20.0	9375	16.2
	④	19.2	9956	18.1
ウォルナット	①	10.1	10288	14.1
	②	10.1	9838	12.9
	③	17.2	9056	11.6
	④	16.4	9725	13.3

いずれの樹種においても、水分・温度状態とヤング率の関係は同じ傾向を示した。すなわち、気乾状態で最も高く、温度だけを高くした条件②では、気乾状態よりもやや低下し、蒸煮処理直後は

最も低くなり、蒸し後に冷却すると、条件②の状態よりも含水率は高いが、熱軟化の影響が消えてしまうためにヤング率が高まると考えられる。したがって、曲げ木加工では温度低下が曲げ不良に影響するといえ、加工時の温度管理が大切である。

3.2. 動的ヤング率と静的曲げヤング率

表4で示した試験体について、縦振動試験を行ってすぐに曲げ試験を行った。曲げ試験の際の荷重負荷を弾性領域内にとどめ、塑性変形が残らないようにすることで、同一試験体を用いて両者の数値を温度・水分状態別に比較することができた。結果を表5に示す。

両ヤング率を比較すると、ほぼ同等か、数%～10%程度、動的値のほうが大きくなる傾向がみられ、これまでの報告と類似傾向にある。しかし、ヤング率自体が高い傾向にある。

そこで、試験体サイズの影響を調べるため、表2に結果を示したものと同一固体を蒸煮処理した直後の静的曲げ試験の結果を表6に示す。なお、試験体サイズは幅28mm×高さ28mm×長さ765mmである。

表5と表6の結果から、静的曲げヤング率には、試験体の大きさによると思われる差がみられる。しかし、動的ヤング率の低下はそこまででない。むしろ、試験体が大きい方が、両ヤング率の差が開きすぎているように思われる。これは、試験体が大きいほど蒸煮処理による含水率増加が材表面でとどまってしまうため、全体的な平均値を評価する縦振動法では、材内部の低含水率領域である高いヤング率を評価していると考えられる。

従来の報告による「動的ヤング率は静的な曲げヤング率と比べて5～10%程度高い値を示す」という解釈は、水分状態が同じ気乾状態の材料についてはあてはまるが、蒸煮直後の水分量が材全体で一様でない状態ではあてはまらないとも考えられる。あるいは、より大きな差として相関性があることも推察される。

動的ヤング率を曲げ加工の指標に用いるには、水分状態が両ヤング率値に及ぼす影響をさらに精査する必要がある。

表5 動的ヤング率と静的曲げヤング率の比較
含水率・温度状態別 小試験体

		動的ヤング率 [GPa]	静的曲げヤング率 [GPa]	動的/静的 (比)
ブナ	①気乾 低含水率 常温	16.6	15.9	1.04
	②ラップ蒸し 低含水率 高温	15.1	14.0	1.08
	③蒸し直後 高含水率 高温	13.5	13.7	0.99
	④蒸し後冷却 高含水率 常温	15.6	15.3	1.02
ホワイトオーク	①	15.9	14.4	1.10
	②	14.2	13.8	1.03
	③	12.6	12.9	0.98
	④	15.1	15.4	0.98
ミズナラ	①	18.9	17.5	1.08
	②	17.5	16.1	1.09
	③	16.2	14.0	1.16
	④	18.1	17.5	1.03
ウォルナット	①	14.1	13.6	1.04
	②	12.9	12.0	1.08
	③	11.6	11.8	0.98
	④	13.3	12.7	1.05

表6 動的ヤング率と静的曲げヤング率の比較
蒸煮直後の状態 長軸試験体

	蒸煮後 含水率 (%)	共振 周波数 (Hz)	動的 ヤング率 (GPa)	静的 ヤング率 (GPa)
ブナ	24	2475	11.5	6.1
ホワイトオーク	18	2525	12.9	7.9
ミズナラ	24	2050	8.2	4.8
ウォルナット	20	2475	10.2	7.6

4. まとめ

木材の曲げ木加工において重要なことは、引張側の伸び変形を引張限界以下に抑制することであり、材厚さと曲げ半径の関係から必要な帯鉄厚さの条件を導くこと、あるいは、曲げ可能な材厚さと曲げ半径の関係を導くことを可能にする「曲げ木の可否判定プログラム」を昨年度作成し報告した。このプログラムで判定指標に利用する静的曲げヤング率を簡易的に導出する手法として、縦振動試験を検討した。縦振動法から得られる動的ヤング率と静的値には数%程度の差で相関性があるとの報告であったが、本研究から、曲げ木の前処理である蒸煮処理を行った直後の材では、両値に大きな差がみられた。蒸煮による含水率増加が、材内で傾斜していることが要因であると考えられる。材内の水分状態と動的ヤング率の関係について今後も検討を続ける。

参考文献

- 1) 石原智佳ほか：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, No.22, pp.8-11, 2020.
- 2) 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, pp.59-63, 2011.