

曲げ木への影響因子の解明に関する研究 針葉樹の曲げ木加工性

石原智佳*

Research into the factors affecting bending wood
Bending ability of softwoods

ISHIHARA Chika*

本報告では、飛騨の家具で特徴的な曲げ木について、一般的に利用されている広葉樹を対象にした既往の研究に基づき、針葉樹であるヒノキとスギの加工性を検討した。広葉樹で通常行われる水蒸気による軟化処理では、針葉樹は蒸気乾燥に転じてしまい温度管理が必要であること、曲げ木加工では、引張側の割れ不良が起きやすく、これを防ぐ方法として厚みを増した帯鉄の利用が有効であることなどが明らかになった。

1. 緒言

岐阜県飛騨地域は木製家具の産地であり、部材の一部を伝統技術である「曲げ木」で製造する特徴がある。この曲げ木の工程は、木材に多くの水分を含ませて高温にする軟化処理、型に沿って曲げる加工処理、形状を固定する乾燥処理から成る。

樹種は従来、ブナ、ミズナラ、ビーチ、ホワイトオーク、ウォルナット等の広葉樹が主だったが、近年では、地域材の利用促進の流れでクリも利用されるようになり、早生樹であるセンダン・ハンノキ・ホオノキ等の利用に向けた研究も進められている¹⁾。また、資源量が豊富なスギ、ヒノキ等の針葉樹を曲げ木に用いる試みが広がってきている。

針葉樹の曲げ木加工は割れやすく難しいと言われており、製品化されているものはスギを数ミリ厚さにスライスした単板を重ね合わせで曲げる加工方法で仕上げられている。無垢材に関する研究報告は少なく、割れやすい原因など詳細が不明である。そこで本研究では、従来の広葉樹や早生樹に対する既往の研究で得られた知見を基に、ヒノキとスギの曲げ木への適応性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

ヒノキおよびスギの天然乾燥材を供試材とした。常温環境下で数年間保管し、気乾状態になった板材から軟化処理試験用、曲げ試験用、引張試験用、および曲げ木加工用の試験体を採取した。各試験用の試験体寸法は下記のとおりとした。

軟化処理および曲げ試験用の材は、繊維方向(L) 320mm×放射方向(R) 20mm×接線方向(T) 20mmとした。引張試験用材は、L 240mm×R 5mm (厚さ) ×T 20mm (幅) の板材から中心部の幅が5mm になるように半径約560mmの円状に両側面を削り出した。また、標線間距離は50mmとした。曲げ木加工用材は、L 260mmの板目材と柃目材の2種類で、厚みは10mmあるいは15mm、幅は30mmとした。

供試材の試験時における含水率は各試験終了後に行った全乾処理で得た全乾重量を基に算出した。

2.2 軟化処理試験

曲げ木加工の前処理として材の軟化が必要である。製造現場で行われる一般的な方法では、材を水蒸気で蒸して高温・高水分状態にする。本報告では蒸し処理のほか、煮沸による処理についても検討した。材の吸湿挙動を観察するために、重量測定を行った。測定法は、**図1**に示す木箱内を水蒸気で満たし、箱上部に設置した床下秤量型天びんから**図2**のとおり吊るした試験体の重量を測定し、データを自動収集した。なお、重量は含水率に変換した。

* 試験研究部

蒸し過程では、蒸気量を温度に換算し、温度変化に伴う含水率変化という観点からも検討した。天びんから吊るした試験体の近くにセットしたT型熱電対で温度を測定し、データを自動収集した。



図1 軟化処理（蒸し箱）の様子



図2 蒸し過程における重量測定の様子

2.3 曲げ試験

気乾状態および軟化処理した材の曲げ試験を行い、曲げ強さおよび曲げヤング率を算出した。曲げ試験は三点曲げ方式で、荷重は板目側と柾目側から荷重速度 30 mm/min でそれぞれ加えた。また、支点間距離は280mmとした。

2.4 引張試験

既往の研究により、曲げ木加工の際に生じる引張側の割れ不良の要因が引張強さの低さであることが明らかになっている^{*2)}。そこで、スギとヒノキの引張強さを算出するために、引張試験を行った。荷重速度は3mm/minとした。

2.5 曲げ木加工実験

曲げ木加工は図3に示すように、治具に材を固定して行う。具体的には材の裏側を帯鉄と呼ばれる金属板に当て、材の伸びを抑えるために材の片側あるいは両端にスペーサーを挟んだ状態で加工する方法が一般的である。



図3 曲げ木加工用治具（帯鉄）

試験体は所定の含水率まで蒸すか煮沸する方法で軟化処理を行った。なお、煮沸については浸水後に蒸す場合よりも短時間で内部まで含水率を上げて軟化させるためである。その後、帯鉄に固定し、曲げ半径150mmの曲げ型に沿って曲げた。用いた帯鉄は厚さ1.5mmのSUS板で、枚数による効果の有無についても検討した。

3. 結果及び考察

3.1 軟化処理試験

ヒノキの吸湿挙動（含水率変化挙動）を蒸気の設定条件別に図4に示す。いずれの条件も水から加熱を始めたため、蒸気発生までの30分間はほぼ吸湿が進まない。条件1は一般的な広葉樹の軟化条件と同様に、勢いよく出続ける水蒸気に材が包まれる条件である。経過を観察したところ、沸騰後からは吸湿せずに乾燥していく様子が見られた。スギも同様であったことから、針葉樹の場合、蒸気が強すぎると乾燥してしまい、広葉樹とは蒸し方を変える必要性が判明した。

条件2では、蒸気乾燥が進んだのち（60分後）、蒸気量を減らすと、やや吸湿し、さらに少ない蒸気量にする（120分後）と、吸湿が順調に進む様子が見られた。

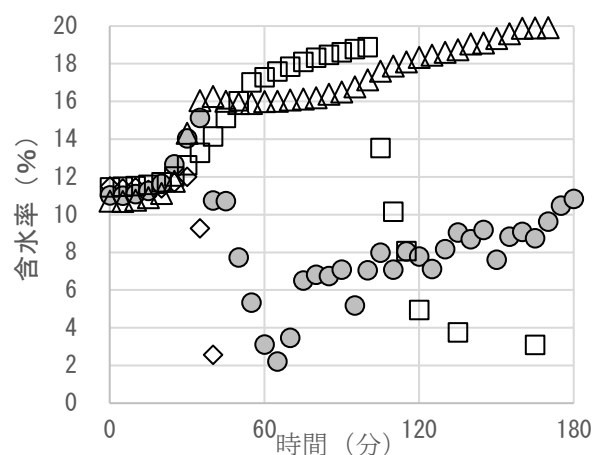


図4 ヒノキの吸湿挙動

◇：条件1、●：条件2、□：条件3、△：条件4

条件3では沸騰(30分経過時)後に蒸気量が少ない状態にすると吸湿が進み、停滞した頃(50分後)に蒸気量を増やすと吸湿が再開し、強いままでは乾燥に転じた(100分後)。条件4では沸騰(30分)後、蒸気を弱め吸湿が進んだのち(40分後)、蒸気量を増やし、また減らす(95分後)と吸湿が進む様子が見られた。

つぎに蒸気量の強弱を具体的に表すために、蒸し箱内の温度に伴う吸湿挙動を観察した。予備実験において、ヒノキの場合、沸騰後82~87℃の蒸気を維持することで吸湿が続くこと、スギの場合、沸騰後87℃付近で吸湿が停滞することが判明した。

具体的な温度を目安に、温度調節による蒸気量の変化に伴う含水率変化を観察した結果として、ヒノキを図5にスギを図6にそれぞれ示す。

ヒノキについて、沸騰後も強い蒸気を維持すると加熱開始約50分で87℃に至る。この温度より高温になると蒸気乾燥に転じてしまうため、蒸気量を減らし、温度を維持することとしたが、蒸気量が減った影響で120分過ぎから温度が下降し、これに伴い吸湿せずに乾燥し始め、165分からは含水率が停滞した。そこで200分時に蒸気量を増やすと、吸湿が再開し、230分時には87℃まで昇温し、吸湿が続くことも観察された。以上から、含水率は温度に追従して変化するといえる。

スギについて、加熱開始約40分で88℃に至る。蒸し初期はこの温度を下回ると吸湿が進まず、戻すにつれて含水率も増加に転じるが、90℃付近では吸湿と乾燥をさまよう傾向にある。いったん蒸気を少なくし、100分時からの温度低下に伴いやや吸湿したが、18%付近で停滞を続けた。240分時から蒸気を増やすと吸湿に一転した。以上から、スギの場合は、大量の蒸気では高温すぎるため、一旦60℃付近まで降温させ、再度昇温させることを繰り返して徐々に吸湿を進めることが効果的と考えられる。

蒸気による軟化処理については、広葉樹は強い蒸気で満たし続けることが必要であるが、ヒノキ・スギともに、87℃以上では吸湿できず乾燥してしまうこと、降温後に再度蒸気を当てる際に吸湿が進む性質を活かすべきであると考えられる。

3.2 曲げ試験

広葉樹の曲げ木加工では、軟化時に曲げヤング率がどの程度であれば適切な加工が可能であるかを調べ、必要な蒸し時間を設定した^{*3)}。そこで、本報告でも軟化処理後の曲げ強さと曲げヤング率を算出した。値は密度の影響を大きく受けるため、密度が近い材で比較できるように代表値とし、結果を表1に示す。

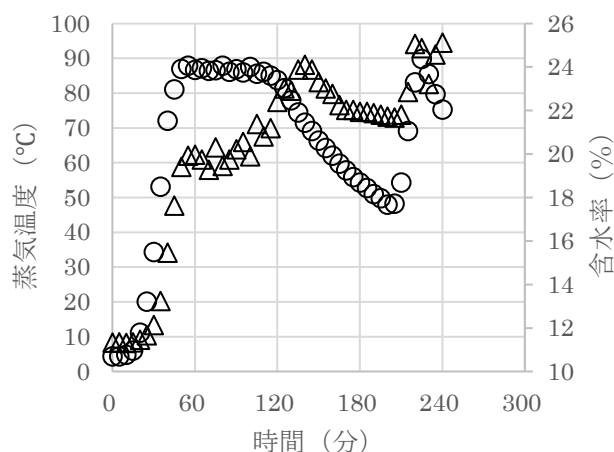


図5 ヒノキの蒸気温度と含水率変化の相関

○：蒸気温度、△：ヒノキ材の含水率

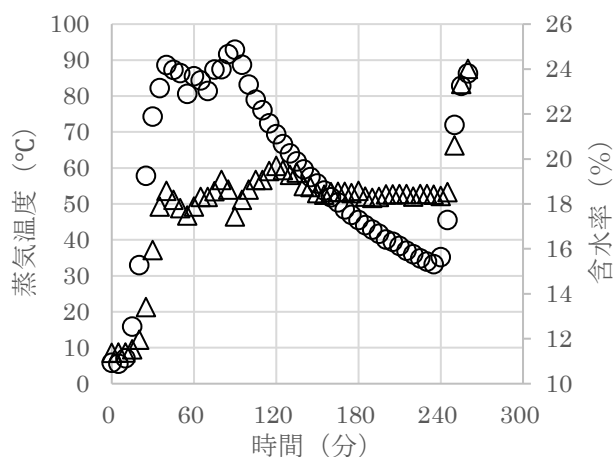


図6 スギの蒸気温度と含水率変化の相関

○：蒸気温度、△：スギ材の含水率

広葉樹の場合、ヤング係数を曲げ木の可否判定に活用でき、良好な曲げ木が可能になる目安として、蒸し処理後の値が気乾状態の4~5割の値にまで低下することであった。

ヒノキ・スギともに気乾状態のヤング係数が広葉樹に比べて低いということもあり、蒸し処理では6~7割にしか低下しなかった。そこで、さらに軟化させる目的で材を一晩浸水させた状態から蒸したところ、気乾状態の5~6割の値に至った。

3.3 引張試験

ヒノキとスギの気乾材及び蒸し処理材について引張試験を行った。それぞれ10試験体の平均結果を表2に示す。引張ひずみは曲げ木に適した広葉樹の5~6割であり低い傾向にある。

表1 曲げ試験の結果

	気乾状態		蒸し処理		浸水後 蒸し処理	
ヒノキ	板目	柵目	板目	柵目	板目	柵目
気乾 密度 (g/cm ³)	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
含水率 (%)	11	11	18	18	35	35
曲げ 強さ (MPa)	81	83	40	37	44	40
ヤング 係数 (GPa)	7.2	7.5	5.5	4.5	3.8	4.1
スギ	板目	柵目	板目	柵目	板目	柵目
気乾 密度 (g/cm ³)	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
含水率 (%)	11	11	20	20	30	30
曲げ 強さ (MPa)	61	83	46	49	42	41
ヤング 係数 (GPa)	6.5	9.4	6.5	6.6	5.2	4.8

表2 引張試験の結果

	気乾状態	蒸し処理
ヒノキ	板目	板目
含水率 (%)	12	20
引張ひずみ	0.010	0.013
スギ	板目	板目
含水率 (%)	12	20
引張ひずみ	0.010	0.012

3.4 曲げ木加工実験

表3に結果をまとめて示す。目的は曲げ木加工が可能な条件の見出しであり、曲げ木の可否を元に、各試験の結果と関連付けて考察する。また、板目・柵目材ともに同じ傾向であったため、詳細な数値表記は板目材のものとした。

水蒸気で蒸す軟化処理では、ヒノキ・スギ共に10mm厚さ材を含水率20%まで蒸して曲げ木加工した場合、引張側で割れ不良が起きた。既往の研究において、各種広葉樹は同様の条件で良好な加工が可能であった。ここで、さらに軟化させるために煮沸処理するとヒノキ・スギ共に10mm厚さ材で曲げ木加工が可能となった。したがって、ヒノキ・スギでは広葉樹よりも内部まで水分を浸透させる必要があると考えられる。

つぎに15mm厚さ材を煮沸処理して曲げ木加工した場合、1.5mm厚さの帯鉄ではヒノキ・スギ共に引張側で割れ不良が起きた。そこで、広葉樹で認められた帯鉄厚さによる引張側の割れ防止効果^{*)}を活用し、同じSUS板を2枚重ねた3mm厚さの帯鉄を用いると、スギは引張割れが起きるが、ヒノキは曲げることができた。

また15mm厚さのスギ材については、3枚重ねの4.5mm厚さの帯鉄で良好に曲がった。水分を多く含んだスギのほうがヒノキよりも引張ひずみが小さい傾向が見られたことから、より厚い帯鉄が効果的であったと考えられる。なお、帯鉄厚さを4.5mmにして加工した際の含水率が同じ15mm厚さの加工時よりも高くなってしまったが、繊維飽和点以上の含水率であるため、強度特性には大きく影響していないと考えられる。

表3 曲げ木加工実験の結果

樹種	材厚 (mm)	軟化 方法	曲木時 含水率 (%)	帯鉄 厚さ (mm)	曲木 可否
ヒノキ(板目)	10	蒸し	20	1.5	× 引張割れ
	10	煮沸	35	1.5	○
	15	煮沸	40	1.5	× 引張割れ
	15	煮沸	40	3	○
	15	煮沸	50	4.5	○
スギ(板目)	10	蒸し	20	1.5	× 引張割れ
	10	煮沸	35	1.5	○
	15	煮沸	40	1.5	× 引張割れ
	15	煮沸	40	3	× 引張割れ
	15	煮沸	50	4.5	○

帯鉄は曲げ木にかかる圧縮応力を高めるため、スギではシワができてしまった。広葉樹では曲げた際の材伸びに起因する引張割れを防ぐために治具と材の隙間を埋めるスペーサーを必要とするが、厚い帯鉄でスギを曲げる際にはあえて隙間を空け、圧縮応力を小さくすることでシワを防ぐこともできた。曲がった状態のヒノキを図7にスギを図8に示す。



図7 ヒノキの曲げ木
(材15mm厚、帯2枚)



図8 スギの曲げ木
(材15mm厚、帯3枚 スペーサーを除けた状態)

4. 結言

本報告では曲げ木について、広葉樹を対象にした既往の研究に基づき、針葉樹であるヒノキとスギの加工性を検討した。水蒸気による軟化処理では、広葉樹と異なり、常に強い蒸気下での処理は不向きであり、温度の上限に注意を払った蒸気の当て方が必要であることが推察された。

曲げ木加工については、ヒノキ・スギともに、広葉樹で可能であった蒸し軟化処理では引張側の割れが生じてしまい、さらに軟化する蒸煮処理で曲げ木が可能になった。また材が厚くなると蒸煮処理のほか、厚い帯鉄を沿わせて引張割れを防ぐ方法が効果的であることが示された。

参考文献

- 1) 杉山真樹他、国産広葉樹材の用材利用拡大に向けた研究成果普及の取組、第76回日本木材学会大会要旨(R17-P2-07)、2026.
- 2) 石原智佳他、曲げ木に適した状態判定、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 23、pp. 1-5、2021.
- 3) 石原智佳他、許容曲げ半径の推定に関して、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 18、pp. 30-33、2016.
- 4) 石原智佳他、引張割れの防止、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 24、pp. 1-3、2022.