木材の曲げ成型加工における不良現象の低減化に関する研究

石原智佳、長谷川良一

Study on decreasing defect phenomena in the bending forming of wood

Chika ISHIHARA, Ryoichi HASEGAWA

飛騨家具には昔から匠の技である「曲げ木」が特徴的に取り入れられてきた。家具用部材の曲げ成型加工に適した樹種として良質なブナやナラが多用されてきた。しかし近年の材料不足やデザインの多様化を背景に、外国産材であるレッドオークやチェリー、ウォールナット等も用いられるようになった。その結果、ブナやナラでは見られなかった「不良現象」が課題となってきた。不良現象として、曲げ側に出るシワや座屈などが挙げられる。また、幅はぎ接着した集成材も背板・座板・肘等の部材として曲げ加工されて使われているが、接着層での目切れも課題となっている。

本研究では、これらの不良現象を低減化するための検討を行った。その結果下記のことが明らかになった。1）レッドオークの曲げでは浅いシワが頻発し、チェリーとウォールナットでは木目や節のせいでねじれや座屈が多く生じた。曲げ半径が大きい部材には利用できるが、それ以外には不向きであることから、さらなる検討を要する。　2）樹種や材密度により水分吸湿量に差があり、曲げ加工前の処理として浸水の有効性が認められた。　3）幅はぎ接着した板に関しては、接着後の養生環境やその期間を適切に管理する必要性が認められた。

1. 緒言

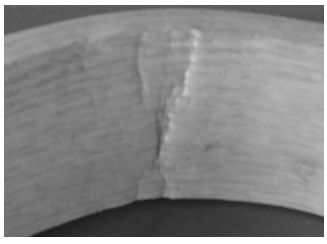
飛騨高山の家具の特徴のひとつに、曲げ成型加工がある。背板・座板・肘部・脚部等に曲げ木が取り入れられている。曲げ木は蒸して軟らかくなった材を型にはめて曲げ、乾燥することで変形を固定する工程から成る。曲げ木に適した樹種として、国産のブナやナラが古くから多用されてきたが、近年では材料不足やデザインの多様化を背景に、レッドオーク・チェリー・ウォールナットなどの外国産材も用いられるようになっている。しかし曲げ加工工程において、ブナ･ナラでは見られなかったシワや割れ（図1)、座屈等の頻発が課題となっている。そこで本研究では、曲げ木に用いられている樹種の曲げ特性等を把握し、不良現象を低減化するための検討を行った。

また、幅はぎ接着により一枚板となった材料の曲げ加工においては、接着層での切れが課題となっており、これについても検討を行った。

2. 曲げ木への適応性

2.1 曲げ木加工の検討

曲げ木に適しているとして用いられてきた樹種（ブナ）と近年用いられるようになってきた樹種（レッドオーク・チェリー・ウォールナット）との間に、曲げ加工における違いがあるのかどうかをトーネット法（曲げ加工は圧縮応力のみで行うのが望ましいため、木材の引張側に帯鉄を当てて一体化し、木型に沿って曲げる方法）にて検討した（図2)。



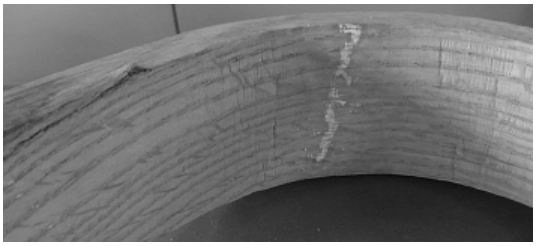


図1　曲げ木の圧縮側に出たシワ・割れ

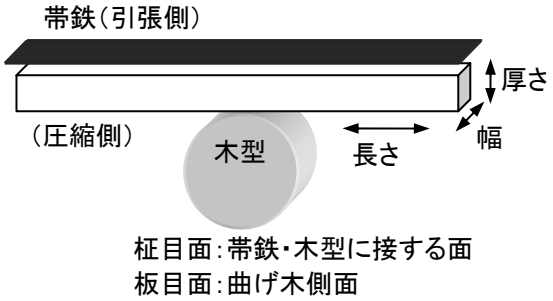


図 2　トーネット法による曲げ木

材の条件は次のとおりである。長さ 600㎜、幅 30㎜、厚さは実際の家具部材で用いられている 10・20・30㎜とした。前処理として一晩水に浸けておき、厚さ 10 及び 20㎜の材は 1 時間蒸した直後、また厚さ 30㎜の材は 2 時間蒸した直後に曲げた。なお、材は密閉容器内に入れ、沸騰水の蒸気（98℃）で蒸した。

曲げ木の検討条件は、材の厚さと曲げ半径を各種組み合わせた（表 1)。

結果を表 2-1 から表 2-4 に示す。なお、曲げ時の含水率及び全乾密度は変形固定後に 105℃で 24 時間乾燥した全乾重量から求めた。

表 1　曲げ木加工の検討条件

条件	厚さ(s) mm	曲げ半径(圧縮側)(r) mm	s/r
①	10	60	0.17
②	10	150	0.07
③	10	350	0.03
④	20	60	0.33
⑤	20	150	0.13
⑥	20	350	0.06
⑦	30	150	0.20
⑧	30	350	0.09

表 2-1　曲げ木の結果（ブナ）

条件	見た目	全乾密度 (g/cm^3)	曲げ時の含水率(%)
①	良好	0.57	49
②	良好	0.55	41
③	良好	0.57	46
④	—	—	—
⑤	良好	0.58	34
⑥	良好	0.58	37
⑦	良好	0.58	44
⑧	良好	0.58	37

表 2-2　曲げ木の結果（レッドオーク）

条件	見た目	全乾密度 (g/cm^3)	曲げ時の含水率(%)
①	—	—	—
②	—	—	—
③	—	—	—
④	ややシワ	0.65	13
⑤	ややシワ	0.72	23
⑥	良好	0.68	21
⑦	ややシワ ねじれ	0.65	21
⑧	良好	0.62	20

表 2-3　曲げ木の結果（チェリー）

条件	見た目	全乾密度 (g/cm^3)	曲げ時の含水率(%)
①	引側:割裂 圧側:良好	0.46	34
②	良好	0.45	28
③	良好	0.45	30
④	支点で座屈	0.46	27
⑤	シワ 節で座屈	0.45	23
⑥	良好	0.45	24
⑦	支点で座屈 深いシワ	0.47	22
⑧	良好	0.48	21

表 2-4　曲げ木の結果（ウォールナット）

条件	見た目	全乾密度 (g/cm^3)	曲げ時の含水率(%)
①	引側:割裂 圧側:良好	0.61	24
②	良好	0.62	22
③	良好	0.61	24
④	ややシワ	0.63	23
	ややシワ	0.57	30
⑤	良好	0.61	16
	ややシワ	0.57	29
⑥	良好	0.61	18
	良好	0.56	29
⑦	シワ	0.64	14
	ややシワ	0.57	28
⑧	良好	0.64	16
	節で座屈	0.57	28

浸水処理及び蒸し時間は、厚さ別にした以外はほとんど同じであったが、樹種により曲げ時の含水率が異なり、特にブナで高かった。また、ウォールナットの条件④～⑧における吸湿性では密度による差が見られた。吸湿量に関しては次項(2.2)で見る。

ブナはいずれの条件でもきれいな曲面に仕上がった。レッドオークでは曲げ半径 350㎜ の場合（⑥・⑧）は良好だったが、それ以外では小さなシワ・ねじれが目立った。チェリーでは薄い材でも曲げ半径が 60㎜（①）にまで小さくなると引張側で木目に沿って割裂した。また、曲げの支点となる長さ方向の中心部や節様の木目部位において座屈が生じやすく、曲げ半径が大きい場合以外には曲げ木に不向きであることがうかがえた。ウォールナットでは浅いシワが頻発した。

チェリーとウォールナットでは共通して、木目や節が影響してねじれや座屈が生じることから、木取りの重要さがあらわれた結果である。したがって、大きな曲げ半径の部材ならば利用可能であるが、それ以外では不良品になる割合が高すぎると考えられる。これらの不良品となった条件に対しては、曲げ時の含水率や曲げ速度等の観点から更なる検討を要する。

実際のレッドオークの家具用部材で不良品とされるものを観察したところ、s/r が 0.14、0.17 等で圧縮側のシワが多く見られた。

2.2 吸湿量

曲げ加工時までの浸水及び蒸し時間は厚さごとにほぼそろえたが、樹種間で含水率にばらつきがある（表2-1～2-4）。そこで、蒸し時間に伴う含水率変化を測定した。材料の長さは60㎜(繊維方向)、幅・厚さはともに30㎜とした。ステンレス製の蒸し器で材を蒸し、一定時間ごとに重量を測定した。測定終了後、105℃で24時間乾燥させた状態を全乾とし、含水率計算を行った。2時間での吸湿量を含水率増加量（⊿MC）とし、全乾密度に対して図示した（図3)。なお、初期含水率は約7%であった。

樹種別に見ると、全乾密度が小さいほど含水率増加量が多い傾向がみられる。また、レッドオークとウォールナットでは、密度によっては吸湿しにくい場合もみられた。曲げ加工時の含水率として17%くらいは必要なため、これらの樹種では蒸す前の処理としての浸水は効果的であることがわかる。

レッドオークでは曲げ加工後の「ふくれによる厚みの増加、ばらつき」が課題となっているが、他樹種と比べても吸湿性に大差はない。組織構造として、道管の直径が他樹種よりも著しく大きいことが見た目で明らかであり、大きな原因とも考えられ、この点は今後検討する。

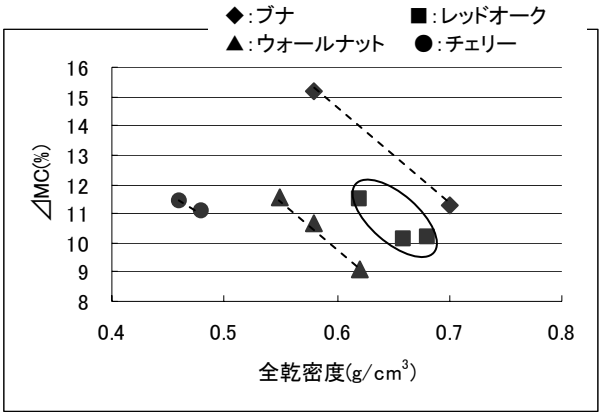


図3　樹種別に見た吸湿量

2.3 縦圧縮強さと曲げ特性について

既往の報告[1)2)]において、「蒸煮試験片の縦圧縮破壊ひずみから曲げ半径の限界を求め、プレス式曲げ加工実験で確認した結果、両者がほぼ一致し、曲げ木適正樹種の選定に有効的な方法である」とされている。なお、曲げ限界については、引張側の伸びを無視して、次式（①）により算定されている。

$$\frac{s}{r}=\frac{-\varepsilon c}{1+\varepsilon c} \quad \cdot\cdot ①$$

s：厚さ　r：曲げ半径　εc：圧縮ひずみ

表1に曲げ木加工の条件として、s/r を記載しているが、ここで s/r別のトーネット法による曲げ木結果と、縦圧縮破壊試験での破壊時の圧縮ひずみを上式①に当てはめて算出した s/r値を比較検討する（表3)。なお、縦圧縮破壊試験はJIS Z 2101「木材の試験方法」に準拠し、試験体[30×30×60（繊維方向）㎜]をステンレス製の蒸し器で30分蒸した直後に行った。荷重速度は8㎜/minとした。

レッドオークとチェリーの破壊試験においては、破壊荷重に至るまでに横圧縮変形に移行し変形し続ける傾向が見られ、明確な縦圧縮破壊ひずみを測定することが困難であった。その結果、トーネット法では曲げ不良となるs/r値を超えた値が計算上では算出されたと考えられる。したがって、樹種によっては①式から曲げ木への適合性を判別することはできないため、他の指標となるものの検討が今後の課題である。

表3　s/r値と曲げ性の比較

s/r	ブナ	レッドオーク	チェリー	ウォールナット
0.03	○	—	○	○
0.06	○	○	○	○
0.07	○	—	○	○
0.09	○	○	○	△
0.13	○	△	×	△
0.17	○	—	×	×
0.20	○	×	×	△
0.33	—	△	×	×
εc →s/r	0.24	0.46	0.23	0.20

○:良好　△:ややシワ
×:割れ・座屈・深いシワ

3. 幅はぎ接着板の曲げ加工

3.1 現状と課題

レッドオークの長さ約50cm（繊維方向）、厚み約3cmの板を5～6枚幅はぎ接着した板（幅約45cm）を繊維方向に平行にプレス機で曲げ加工（曲げ半径1200mm）してできた座板において、接着層で割烈が生じる不良が頻発している。そこで、改善のための検討を行った。

現状の工程は、(1)幅はぎ接着（接着剤：鹿印ピーアイボンド6000両面塗布）、(2)養生室にて約1週間保管、(3)密閉した蒸し器の中（約80℃）で25分間蒸し、(4)型にはめて曲げ、(5)50分間高周波乾燥を行い、(6)型からはずした状態で1週間養生する、という流れである。

3.2 検討項目1：養生条件

養生室の温度状態を調査した（図4：5月、図5：11月）。夜間の温度は20℃付近にまで低下し、週末は20℃以下が続くことがわかった。年間を通しては、さらに低温であることが予想される。使用接着剤は水性高分子－イソシアネート系であり、低温ほど最終接着強度に至るまでに時間を要するため、温度に応じた養生日数を設定する必要がある。

3.3 検討項目2：養生期間

レッドオークを5枚幅はぎ接着した板（繊維方向約50cm×幅約45cm）において、各接着層の接着強さと養生期間（3日・7日・17日）の関係性を調べた。なお、養生温度は22℃とした。接着強さはJIS K 6852の「接着剤の圧縮せん断接着強さ試験方法」に準拠して行った。

接着した板それぞれにI～Vまで番号を付け、各層での値を図6に示す。7日経過した後はやや強くなるかほぼ変わらない結果となったことから、約20℃では少なくとも1週間の養生が望ましいと考えられる。季節によっては20℃以下になる養生室ではさらに長めの期間が必要である。

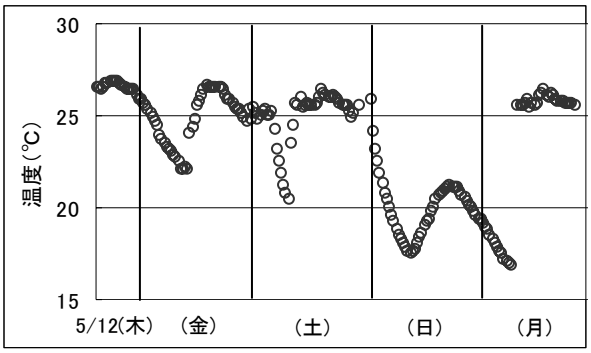


図4　養生室の温度変化（5月）

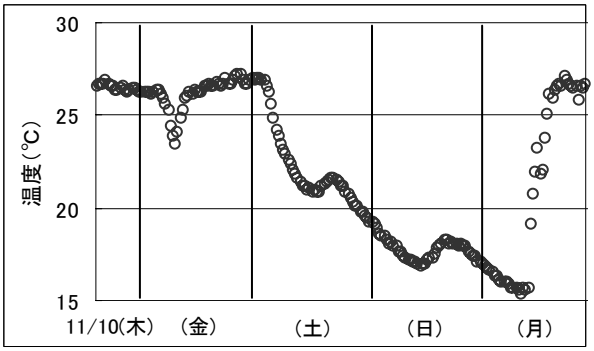


図5　養生室の温度変化（11月）

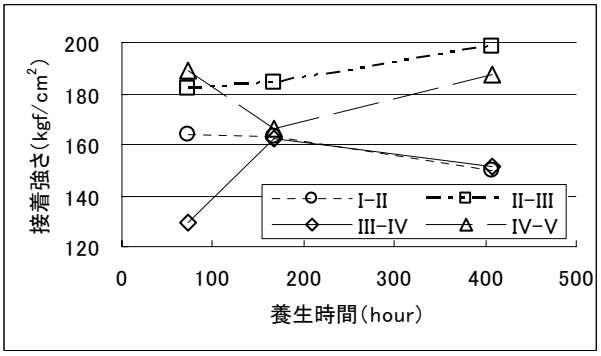
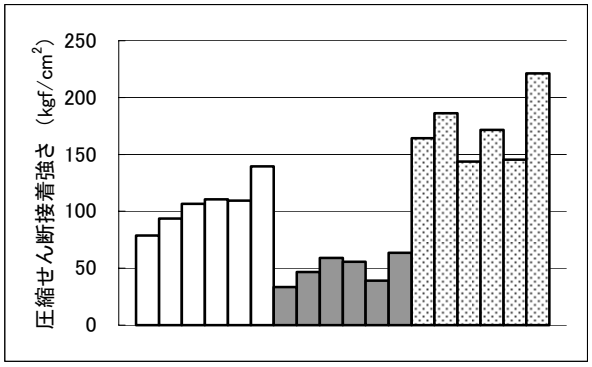


図6　養生時間にともなう接着強さの変化

3.4 検討項目3：接着剤

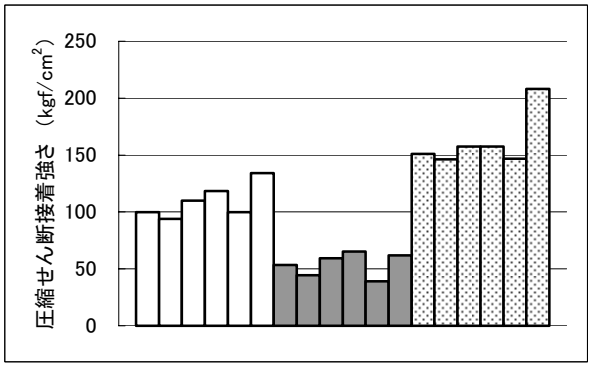
同じ水性高分子－イソシアネート系のもので難接着樹種に適するとされる2種類の接着剤の効果を試験した。一つ目の鹿印ピーアイボンド5300は、構造用・造作用集成材の積層接着に適しているとされ、特に高比重な広葉樹材で安定した性能が得られるとされている。二つ目の鹿印ピーアイボンド5340は、針葉樹構造用集成材の幅はぎ、積層接

着向けとされている。これらの接着剤でレッドオークを接着し、2週間の養生後にJIS K 6852に準拠して接着強さを測定した。試験は、耐水試験、煮沸繰返し試験、常態試験を行った。また、レッドオークは全乾密度別の3種類（以後、R1：0.63g/cm^3、R2：0.68g/cm^3、R3：0.71g/cm^3）で比較した。ボンド5300の結果を図7に、同5340の結果を図8に示す。多くの条件において、柾目面接着よりも板目面接着のほうが接着強さは高い傾向にあった。また、密度に関しては大差ないが、一部で高密度な材で高い強さを示した。また、図6の結果と常態試験の板目接着の結果が条件で一致するが、ボンド5300が示す強さのほうがやや高いか同じくらいと見られる。実際に座板製造の際にこれらの接着剤を使用したところ、接着層での目切れ頻度が減少してきた傾向にあり、接着剤別の効果についても今後検討を続けたい。



□：耐水　■：煮沸繰返し　▨：常態
各試験項目の棒グラフ
左からR1：柾目面接着、板目面接着、R2：同、R3：同

図7　ピーアイボンド5300の接着強さ



□：耐水　■：煮沸繰返し　▨：常態
各試験項目の棒グラフ
左からR1：柾目面接着、板目面接着、R2：同、R3：同

図8　ピーアイボンド5340の接着強さ

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 近年新に曲げ木用樹種の加工性を実験評価した結果、レッドオークは大きな曲げ半径では良好な曲面が得られたが、小半径になるとシワが出やすい。チェリーとウォールナットでは木目の流れや節の影響を受けやすく、ねじれや座屈が頻発した。
2) レッドオークに関しては、曲げ加工後の厚みのばらつきや、ふくらみが問題となっている。吸湿性は他樹種と大差ないが、道管組織が他樹種よりも著しく大きいことが一要因とも考えられる。
3) 幅はぎ接着した板の曲げ加工に際して、接着層に出る目切れが問題となっているが、接着後の養生温度やその期間が接着強さに大きく影響するため、適切な管理が望まれる。また、樹種に合った接着剤の再検討も必要である。

謝辞

試験材の提供や製造工程の見学等、研究にご協力いただいた企業の皆様に感謝いたします。

接着剤を提供していただきました（株）オーシカ様に感謝いたします。

参考文献

1) 田中重盛　南方材の曲げ加工に関する研究（第 1 報）岐阜県工芸試験場業務報告, pp. 18-22, 1975.
2) 田中重盛　南方材の曲げ加工に関する研究（第 2 報）岐阜県工芸試験場業務報告, pp. 16-21, 1976.