

# ブナ材の曲げ加工時に生じる割れのマイクロ波誘導加熱による抑制 Fracture Behaviour Deterrence of Beechwood in Electromagnetic Induction Heating Bending Process

荒井 一成\*・山崎総一郎\*  
Kazushige ARAI・Soichiro YAMAZAKI

## 要 旨

教育現場で行える高温多湿の曲げ加工前処理法の開発を目的に、市販のサセプタを使用したマイクロ波誘導加熱による前処理法を試みた。木材は天然の高分子物質でありパイプ状細胞の集合体である。木材の高分子は紐状のため180℃位まで温度が上がると分子レベルの軟化が得られる。そこで本研究では、エネルギー効率が高く短時間で処理可能な飽和水蒸気による100℃程度のマイクロ波加熱に加え、同時に引張面に約200℃の誘導加熱を施すことを前処理とし、トーネット法を用いない曲げ加工をブナ材で行い、引張面に生じる割れの状況を木取りごとに検証した。その結果、放射組織に沿って裂けやすい柾目材（二方柾）および追柾材、板目材に近い追柾材では、マイクロ波誘導加熱による前処理を施すことで、曲げ加工時に生じる割れを抑制できた。また板目材は目切れの大小に関わらず、100℃の飽和水蒸気による前処理だけで曲げ加工ができた。

**Key words**：マイクロ波誘導加熱，曲げ加工，サセプタ，トーネット法

## 1. はじめに

例えば断面厚10mmの木材の曲げ木を作るためには、まず曲げ木に適した樹種を選択および通直な木目の材の選択をする必要がある。曲げやすい樹種としてはホオノキ、ハリエンジュ、ミズナラ等があり、曲げにくい樹種としてはスギ、ヒバ、アカマツ等がある。曲げにくい樹種はいずれも針葉樹であり、例えば断面厚10mmのこれらの材に曲げ加工を行うと曲面の内側に皺が生じる。伝統工芸品である曲げわっぱは、数mmのスギやヒバの薄板を用いることで、積層曲げを実現している。また例えば古くから曲げ木に用いられているブナ（広葉樹）材でも通直な木目に木取りされていない場合、断面厚10mmもあると割れやすい。

樹種と通直な木目の材を選択した上で、木材の曲げ加工を容易に行うためには、前処理として、木材内部にまんべんなく「水分子を行き渡らせること」と「加熱すること」が必要である<sup>1-3)</sup>。この2つの前処理によって、木材が構成する木繊維の結合を緩め、曲げ加工が可能になる。

日常で行える曲げ加工の前処理方法には、電子レンジによるマイクロ波加熱法（熱間曲げ—内部発熱）がある。水分を十分に含ませた木材を防湿性に優れたたポ

リ塩化ビニリデン（以下PVDC、商標名「サラン」樹脂）フィルムに巻きつけてマイクロ波にあてることで加熱し水蒸気を木材内部に伝播させ、同時に木材が軟化する80℃以上に加熱する方法である。電子レンジの庫内に入る大きさに限定されるという欠点はあるが、簡易な曲げ加工の前処理方法として広く知られている<sup>1-3)</sup>。

一般に木材は含水率が30%の状態、引張荷重に対しては数%のひずみ量で、圧縮荷重に対しては10～30%のひずみ量で破壊する。図1の左3段に示すよう

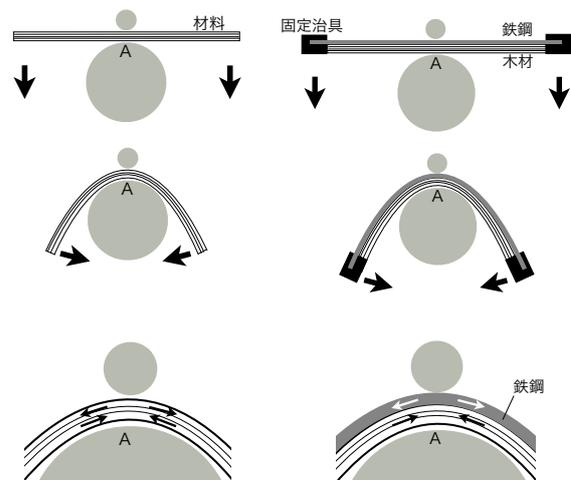


図1 曲げ加工で生じる荷重とトーネット法で生じる荷重

\*弘前大学教育学部技術教育講座

Department of Technology Education, Faculty of Education, Hirosaki University.

に、材を曲げると材には中立面を境に引張荷重と圧縮荷重が生じる。木材の場合、引張荷重に対しては極く弱い引張面（上面付近）で容易に破壊する。つまり木材を大きく曲げるには、水分と熱による前処理に加え、引張変形を抑える必要もある。この問題を解決した方法が、図1の右3段に示すトーネット法であり、鋼製の治具により木材には圧縮荷重だけが生じるようにし、木材への引張変形を抑えている。

さて木材は、セルロース（細胞壁・植物繊維の主成分、主に炭素を骨格とする有機高分子物質）、ヘミセルロース（副成分）、リグニン（高分子のフェノール性化合物、セルロースをつなぐ接着剤の役割）からなる天然の高分子物質であり、パイプ状細胞の集合体である。木材の高分子もプラスチックの高分子と同様に紐状のため、180℃くらいまで温度が上がると自由に動き、冷えて距離が縮まると分子同士が絡まり移動しにくくなる。木材は250℃以上で発火温度に達するが、約180℃で分子レベルの軟化が得られる。よって前処理としてあげた2つのうち「加熱すること」を飽和水蒸気による100℃程度の加熱ではなく、180℃程度までの加熱にしたほうが、理論上では曲げ加工が容易になる。とくに引張荷重が生じる面付近を軟化させられれば、トーネット法を用いなくても曲げ加工が可能になる、あるいはトーネット法との併用で歩留まりを高められることも推測できる。

高温を施した木材の加工では、過去にスキー板を曲げるために行われていた熱板加熱法があった。また木工家である徳永順男氏は個人工房レベルでの曲げ加工法として、濡れた布とアルミホイルで包んだ角材の上からアイロン（200℃前後）をかける前処理後にトーネット法を使う方法を開発した。ただし前者では設備が大掛かりになること、後者では材の厚さ10mm当たり10分のアイロンがけが必要であることと曲げる直前まで200℃の温度が保たれているとは考えにくいことがある。さらにギターの側板を成形するベンディングアイロンを用いた曲げ加工も熱板加熱法であるが、対象になる材は厚さ数mmの薄板に限られている。木取りや樹種に関わらず行える、より効率の良い高温多湿の前処理法の開発が期待されていた。

そこで本研究では、教育現場でも行える高温多湿の前処理法の開発を目的に、マイクロ波が照射されると約200℃に誘導加熱される市販のサセタ（小林製薬株式会社製サセタ、品名：電子レンジクッキングパック）を割れやすい引張面にあてたマイクロ波誘導加熱と従来のマイクロ波加熱を併用した前処理に、トーネット法を用いない曲げ加工をブナ材で行い、引張面に生じる割れの抑制効果を木取りごとに検証した。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試木材

供試木材には北欧産のブナ角材 25×10×480 (L) mmを利用した。ブナ材は曲げ材としてはやや曲げにくい材料であり、目切れや節により亀裂が発生することも少なくない。本研究では、あえてやや曲げにくい樹種を用い、かつ木目が通直ではない木取りで、曲げ加工時に生じる割れのマイクロ波誘導加熱による抑制効果を検証することにした。

供試木材は引張面に対し目切れ角が平均10°以内のものを目切小、15°以上のものを目切大と分類し、また引張面に対し年輪が60°~75°の柎目材、引張面に対し年輪がほぼ平行な板目材、45°前後の材を追柎材と分類した（図2）。

さらに、ブナ角材をL方向で二等分し、25×10×240(L)mmにし、一方はサセタを使用して曲げ加工を行い、もう一方はサセタを使用せずに曲げ加工を行った。それぞれの試験片数を10本、合計100本とした。

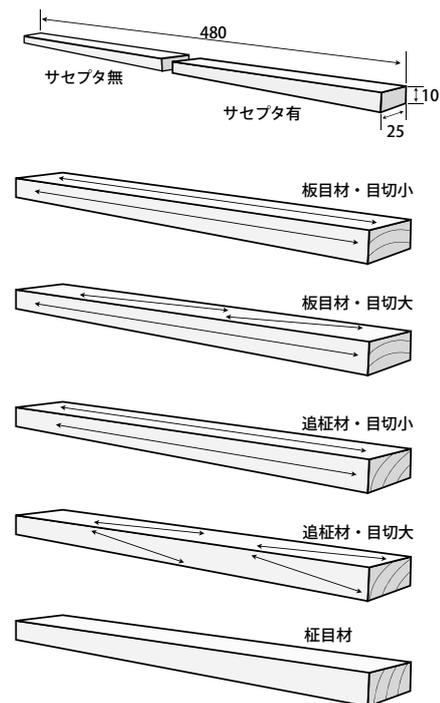


図2 木取りの方法

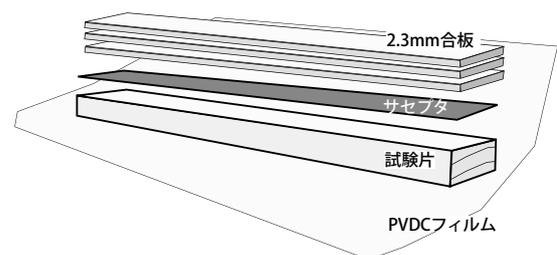


図3 前処理のための積層方法

## 2.2 実験方法

図3に示すように、まず水の中に7日間浸漬させた試験片の上にサセプタ（小林製薬株式会社：品名 電子レンジクッキングバック、サセプタ有の試験片のみ）、あて板（25×2.3×240mmの耐水合板3枚）を載せ、PVDCフィルム（旭化成ホームプロダクツ株式会社：品名 サランラップ）で、2周するように厳重に包んだ。PVDCフィルムの両端はきつく捻じった後、圧縮面にまわしセロハンテープで留めた。さらにサセプタが木材に密着するように胴周2箇所セロハンテープを巻きつけた。この試験片に500Wの電子レンジで3分間（サセプタ無の試験片には1分間）マイクロ波を照射し、前処理を完了した。サセプタ使用時の試験片の照射時間を3分間とした理由は、サセプタの温度が200℃に達する時間が3分間であったためであり、サセプタ無の試験片の照射時間を1分間とした理由は、水蒸気が膨張しラップ面が破裂する直前の時間が1分間であったためである。照射時間は違うものの両者とも本方法での必要十分の時間として設定した。

あて板3枚は、あて木としてクランプの力の分散および水分と熱の放出緩衝を目的に施された。曲げ加工と同時に3枚はいずれも界面で滑り、トーネット治具の役割にはならない。

次に図4に示すように加熱後の試験片をラップしたまますみやかに半径75mmの治具に固定した後、体重をかけていっきに曲げ、クランプで固定した。固定後は可能な限りPVDCフィルムをはがし、二日間乾燥した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 割れの発生状況

表1に試験片別の割れの発生状況、図6に木取り方向別の割れ未発率を示す。表1内の○、△、×の割れの基準は図5に示すような割れ具合を、◎は割れなしを示す。板目材では目切れの大小に関わらず、サセプタを使用した場合の方が割れの発生が一本多い。一方で追証材（目切れ角大小とも）および柾目材ではサセプタを使用した場合で、割れの発生が大きく減少し、マイクロ波誘導加熱により割れが抑制されていた。とくにサセプタ無の試験片では10本中9本で大きな割れが発生した柾目材の場合、サセプタ有の試験片では10本中7本で割れが発生しなかった。

### 3.2 板目材における割れの状態

板目材では、マイクロ波誘導加熱を加えた方が割れの発生が多くなった。割れの状態を図7に示す。

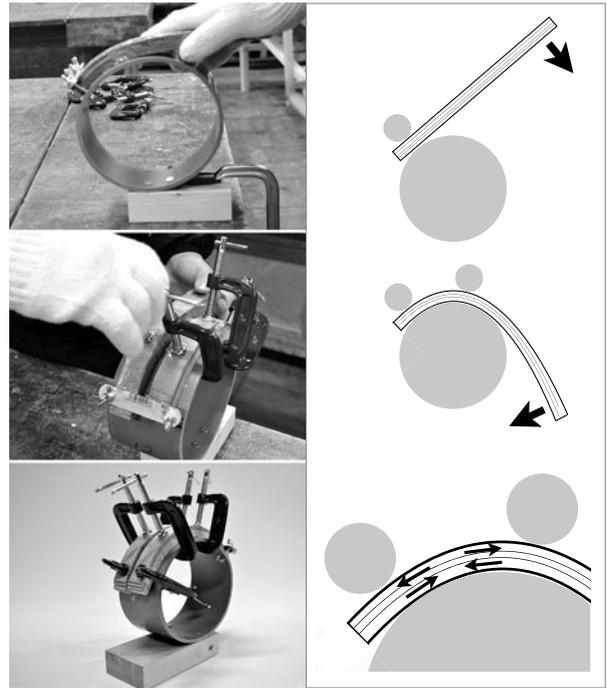


図4 曲げ加工の方法と曲げ加工で生じる荷重



図5 割れの基準

○：小さな割れ △：中間な割れ ×：大きな割れ（座屈）

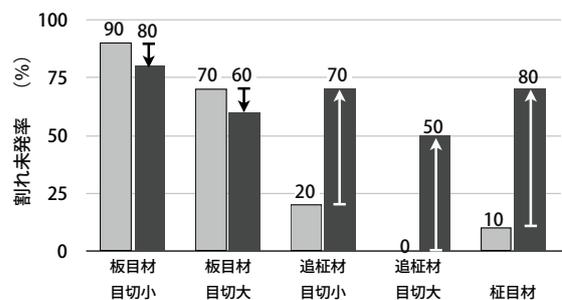


図6 木取り方向別の割れ未発率

□：サセプタ無 ■：サセプタ有

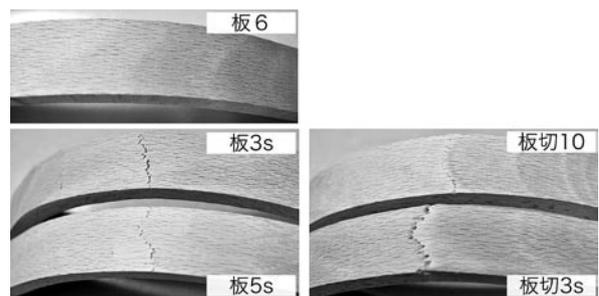


図7 板目材における割れの状態

表 1 試験片別の割れの状況

	サセプタ	板1	板2	板3	板4	板5	板6	板7	板8	板9	板10
	無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	サセプタ	板1s	板2s	板3s	板4s	板5s	板6s	板7s	板8s	板9s	板10s
	有	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○
	サセプタ	板切1	板切2	板切3	板切4	板切5	板切6	板切7	板切8	板切9	板切10
	無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	サセプタ	板切1s	板切2s	板切3s	板切4s	板切5s	板切6s	板切7s	板切8s	板切9s	板切10s
	有	○	×	×	×	○	○	△	○	○	○
	サセプタ	追1	追2	追3	追4	追5	追6	追7	追8	追9	追10
	無	×	○	○	×	×	×	○	○	×	△
	サセプタ	追1s	追2s	追3s	追4s	追5s	追6s	追7s	追8s	追9s	追10s
	有	△	○	○	△	×	○	○	○	○	○
	サセプタ	追切1	追切2	追切3	追切4	追切5	追切6	追切7	追切8	追切9	追切10
	無	×	×	×	×	△	△	△	×	×	×
	サセプタ	追切1s	追切2s	追切3s	追切4s	追切5s	追切6s	追切7s	追切8s	追切9s	追切10s
	有	×	×	○	○	×	○	○	○	○	×
	サセプタ	柁1	柁2	柁3	柁4	柁5	柁6	柁7	柁8	柁9	柁10
	無	○	×	×	△	×	×	△	×	△	×
	サセプタ	柁1s	柁2s	柁3s	柁4s	柁5s	柁6s	柁7s	柁8s	柁9s	柁10s
	有	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○
	年輪と引張面との角度	63°	70°	60°	70°	68°	75°	60°	65°	50°	60°

板目材・目切小・サセプタ無の試験片では、10本中1本しか割れが発生しなかった（図7-板6）。ところが板目材・目切小・サセプタ有の試験片では、10本中2本で大きな割れが発生した（図7-板3s 板5s）。割れが確認された場所は、板3s と板5s で板目の模様の境目が明瞭な場所ではなく特に弱いと感じる場所ではなかった。また、板目材・目切大・サセプタ無の試験片では、10本中3本に割れが発生したが、板目材・目切大・サセプタ有の試験片では、10本中4本で割れが発生した。サセプタを用いた場合の方が割れの発生率が高まった原因として、曲げ加工を施す際に感じられた「堅い」という手応えに起因する試験片の状態が考えられる。

ブナ板目材の断面には、軸方向柔細胞や細胞壁の厚い木繊維である放射組織が、放射状の帯として引張面にほぼ垂直に配列している。ブナ板目材に曲げ加工を施すとこの放射組織の厚壁を解離しようとする力がかかる。十分な水分と加熱があれば木繊維が緩み変形がゆるされる。ところが、電子レンジによるマイクロ波照射時に膨張したPVDCフィルムが約1分後に破裂するが、その破裂によりラップ内で飽和していた水蒸気が放出され、さらにマイクロ波誘導加熱によってサセプタが徐々に高温になりサセプタに接している引張面付近で試験片の乾燥が顕著になる。帯状に配列している細胞壁の厚い放射組織に水分が十分でないまま引張荷重がかかると、たとえ引張面が200℃に加熱されていても、厚壁を解離しようとする力になり、「堅い」

という手応えとともに割れる原因をつくったと推察される。

板目材・目切大・サセプタ無の試験片では、10本中1本に大きな割れ（×）が発生したが、板目材・目切大・サセプタ有の試験片では、10本中3本で大きな割れ（×）が発生した。割れが確認された場所は、板目の模様の境目で割れが生じていた（図7-板切10 板切3s）ただし換言すれば、板目材・目切大・サセプタ無の試験片で10本中7本が、板目材・目切大・サセプタ有の試験片で10本中6本が、板目模様の境目でも割れが発生しなかった。

### 3.3 柁目材における割れの状態

本研究で準備できた柁目材は、本柁目ではなく、二方柁目に分類できる柁目材である。よって、放射組織

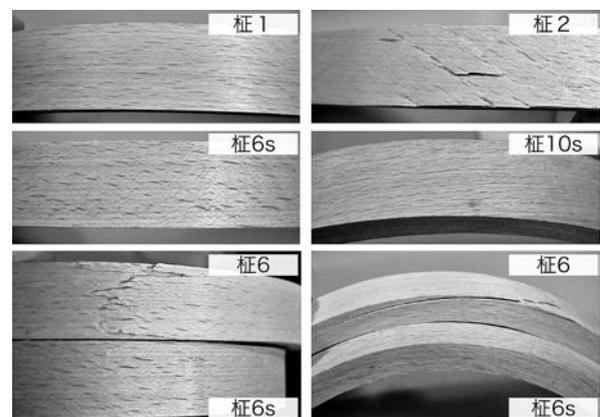


図 8 柁目材における割れの状態

が引張面に完全に並行ではなかった（引張面と年輪の角度が60°～75°）。柾目材・サセプタ無の試験片で、唯一割れが生じなかった柾目材は、引張面に対し年輪が63°でありながら放射組織が柾目面にきれいに並んでいる材であった（図8-柾1）。柾目材・サセプタ無の試験片における他の試験片では、放射組織に沿って裂けている状態が見られた。

一般的に木材は放射方向に割りやすい。よって木材を曲げる場合は、放射方向に並行に曲げるか放射方向と直行に曲げると成功しやすくなる。丸太を宍で放射方向に割り得られる本柾目の板か、あるいは、丸太を宍で放射方向に割った後、年輪に沿って宍で割って得られた板目の板が最も適している。ところがこの方法では生産性も悪く、歩留まりも悪い。

マイクロ波誘導にて200°C加熱と水分による前処理（サセプタ有）を行うと、放射組織が斜めに並んでいる柾目の試験片でも曲げ加工に成功した（図8-柾6s, 図8-柾10s）。図8-柾6柾6sで見られるように、同じ部位でも、柾目材・サセプタ無の試験片では放射組織に沿って割れ（裂け）が見られ、柾目材・サセプタ有の試験片では割れが見られなかった。今回用意した柾目材と前処理の方法では70%の未発率で歩留まりは中庸であるものの、マイクロ波誘導加熱による効果が確認できたといえよう。ただし板目材の実験で述べた、PVDCフィルムの破裂による水分の放出は柾目材の実験でも生じており、水分の放出を押える方法が確立できれば、歩留まりの向上が期待できる。

### 3.4 追柾材における割れの状態

追柾材における割れの方向は、柾目材と同様に放射方向であった（図9）。追柾材・目切小の試験片の割れ未発率は柾目材の試験片の割れ未発率とほぼ同様で、マイクロ波誘導加熱による効果が見られた。一方、追柾材・目切大の試験片の場合、割れ未発率が0%（サセプタ無）から50%（サセプタ有）に改善された。この実験でもPVDCフィルムの破裂による水分の放出を押える方法が確立できれば、歩留まりの向上が期待できる。

### 3.5 板目材に近い追柾材での割れの抑制

追柾材（目切大小とも）および柾目材において、曲げ加工時に生じる割れのマイクロ波誘導加熱による抑制が顕著であることに着目し、板目材に近い追柾材

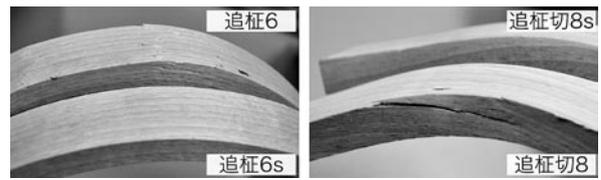


図9 追柾材における割れの状態

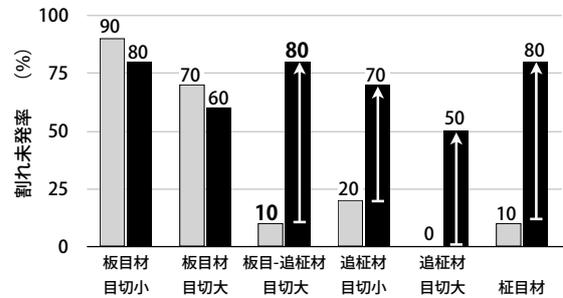


図10 木取り方向別の割れ未発率

□：サセプタ無 ■：サセプタ有

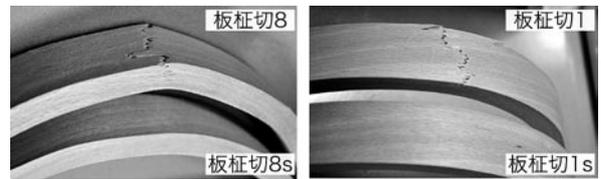


図11 板目材に近い追柾材における割れの状態

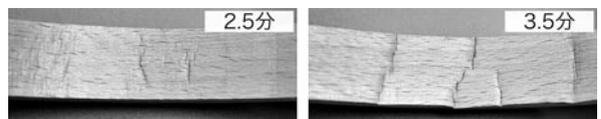
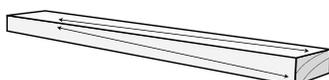


図12 圧縮面におけるマイクロ波誘導加熱の影響

（引張面に対し年輪が15°前後の材。以下、板目-追柾材）での実験を追加した。とくにサセプタ無で割れが激しい目切れの大きい材を選択して実験を行った。表2に板目-追柾材・目切大の試験片の割れの状況、図10に板目-追柾材を加えた木取り方向別の割れ未発率を示す。

板柾切5および板柾切9を除いては、どの木取りにおいてもサセプタ有で割れの抑制がみられた。割れ未発率も8割に昇り（図10）、マイクロ波誘導加熱の効果が見られた。一方で板目材・目切大と板目-追柾材・目切大での効果の違いが大きかった。わずかな木取りによって違いが生じる理由を検討する必要がある。

表2 板目材に近い追柾材での割れの状況



サセプタ	板柾切1	板柾切2	板柾切3	板柾切4	板柾切5	板柾切6	板柾切7	板柾切8	板柾切9	板柾切10
板目-追柾材 無	×	×	×	×	○	○	×	×	◎	×
目切大										
サセプタ 有	◎	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎	△	◎

### 3.6 圧縮面におけるマイクロ波誘導加熱の試行

圧縮面にサセプタを当て200°Cに加熱すると、どのような影響があるか、影響が出やすい柾目材を用い加工を試みた。2.5分間加熱した場合と3.5分間加熱した場合で、いずれも広葉樹材の圧縮面では見られない、針葉樹材の圧縮面で見られるような皺が生じた。また皺は2.5分間加熱した場合より3.5分間加熱した場合の方が大きかった。180°C以上に加熱されることで、紐状の高分子物質（組織細胞）が伸びて、その後冷却されながら圧縮されたため皺が生じたと考えられる。ブナ材におけるマイクロ波誘導加熱による曲げは、サセプタを引張面に当てることで、紐状の高分子物質（組織細胞）を伸ばし軟化させることで効果を得ていると推察される。

### 4. まとめ

1. 板目材は目切れの大小に関わらず、ラップ内に閉じこめた100°Cの飽和水蒸気で、トーネット法を用いなくても曲げ加工の成功率が高い。
2. 放射組織に沿って裂けやすい柾目材（二方柾）および追柾材（目切小）では、ラップ内に閉じこめた100°Cの飽和水蒸気による木繊維の軟化に加え、引張面をマイクロ波誘導加熱で200°C近くまで加熱させる高分子の軟化によって、引張面に生じやすい割れを抑制できた。
3. マイクロ波誘導加熱を用いることで割れの未発率が0%から50%に向上した追柾材・目切大であるが、ラッピング方法の改善によっては、未発率をより向上させることが期待できる。
4. サセプタの発熱によりPVDCフィルムの溶解があった。PVDCフィルムの耐熱温度130~150°Cであ

ることからサセプタとの接触は避けなければならない。ただし前処理直後に曲げ加工を行うため、緩衝材をつける場合でも緩衝材もいっしょに曲げられる素材である必要がある。最も容易な例として、あて板の合板の幅を試験片25mmより数mm大きくし、サセプタとフィルムの上に空気層を設けることが考えられる。

5. 100°Cの飽和水蒸気を十分に木材内部に行き渡らせるためにサセプタによる加熱水蒸気による膨張にも耐えられるようにラッピングの方法の確立も必要であろう。PVDCフィルムを今よりもさらに多重に包装することで、フィルムの破裂による乾燥を多重に防ぐ方法、あるいは電子レンジ庫内にプラスチック製の密閉容器を設置し容器内をできる限り水蒸気で満たす方法も検討したい。
6. マイクロ波誘導加熱とトーネット法の併用にて、トーネット法でも割れやすい、皺が生じやすい樹種において、割れの抑制ができることも推測でき、今後の検証が期待される。

### 文献

- 1) 青木務, 山内一弘, 森光正: 木と竹の電子レンジ加工, 兵庫県木質系住環境材研究会(財)日本合板技術研究所, 1-38, 1993
- 2) 則元京: マイクロ波加熱による木材の曲げ加工, 木材工業, 39(7), 319-324, 1984
- 3) 今田晃一, 青木務, 則元京: 技術・家庭科木材加工領域における新しい教材の開発 家庭用電子レンジによる曲げ木の製作, 日本産業技術教育学会誌, 29(3), 1-8, 1987

(2011. 8. 8 受理)