

マイクロ波加熱による曲木の細胞壁の変形

今村 祐嗣*・則元 京**・林 昭三***

Cell Wall Deformation in Wood Bending by Microwave Heating

Yuji IMAMURA*, Misato NORIMOTO**
and Shozo HAYASHI***

1. は じ め に

マイクロ波加熱を利用した曲木法では、飽水状態にある木材を乾燥と同時に曲げ加工するため、従来の方法に比較してより大きな変形が可能となる^{1,2)}。一方、曲木の組織構造を観察すると、試料断面の周辺部での細胞形状の変化と並んで、圧縮側の細胞壁には曲げ変形の大きさや供試材固有の曲げやすさの程度に応じて、それぞれ異なった形態変化が認められた³⁾。形態変化は、変形初期の細胞壁内表面上のらせん状の隆起とそれに続く壁自体の波状のしゅう曲としてみられるが、いわゆる圧縮破壊と異なり細胞壁に均等に分散して生じており、また壁層内の剝離や細胞壁を横切る破壊は存在しなかった。さらに水分の吸収によって曲げ加工した材は直材に戻り、同時に細胞壁の変形はほとんど消失するのが観察された。これらの結果から、マイクロ波加熱に利用した曲木では、細胞壁のマトリックス成分が軟化し、容易に生じた変形が固定された状態にあると解釈された。

この報告では、針葉樹材に限って明らかにした前報³⁾での観察結果を、さらに曲げ加工および水分回復の程度（曲率半径）と対応させて検討するとともに、広葉樹材についても形態変化を観察した。

2. 曲げ加工法および組織観察法

供試材は、針葉樹材としてテーダマツ (*Pinus taeda* L.), ラクウシヨウ (*Taxodium distichum* RICH.), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) およびスギ (*Cryptomeria japonica* D. DON) の4種、広葉樹材ではヤナギ (*Salix* sp.), ケヤキ (*Zelkova serrata* MAKINO), イタヤカエデ (*Acer mono* MAXIM.), キササゲ (*Catalpa ovata* D. DON), ホオノキ (*Magnolia obovata* THUNB.), アオダモ (*Fraxinus lanuginosa* KOIDZ.) およびヤマナラシ (*Populus sieboldii* MIQUEL) の7種である。

曲げ加工に供した試験体の寸法は、厚さ 1 cm (R), 幅 2 cm (T), 長さ 70 cm で、あらかじめ減圧して飽水状態まで吸水させておいた。これをマイクロ波照射装置（出力 200 V, 2.4 kW）の中に入れ、木材表面からの水蒸気発生が著しくなる 1～2 分後に取り出し、半径 r が 15 cm の円盤状の治具に試料の板目面を沿わせて曲げた。続いてその形状を保ったまま再びマイクロ波を照射し、1～2 分後に取り出し $r=10$ cm の治具を使って曲げた。以後同様の操作を繰り返して r を 7, 5, 3 cm の順減少させた。従って最終の曲

* 木材防腐防虫実験施設 (Research Facility for Wood Protection)

** 木材物理部門 (Research Section of Wood Physics)

*** 木材生物部門 (Research Section of Wood Biology)

げ操作に使用した治具の半径 r が、曲木の圧縮側表面での曲率半径に該当することになる。

樹種毎の曲げやすさの程度は、破壊の起こらない最小の治具の半径で評価したが、テーダマツが 3 cm まで、ラクショウが 5 cm まで、ヒノキが 7 cm までそれぞれ曲げ加工可能であった。スギは 10 cm まで曲げ加工できたが、圧縮側に軽微なしわが認められた。広葉樹材では、ヤナギとケヤキは 5 cm まで、イタヤカエデ、アオダモおよびホオノキは 7 cm まで、キササゲとヤマナラシは 10 cm まで曲げ加工できた。これらの曲げ加工材より観察用試料を得た。

水分吸収による回復材については、水を満たした容器を置いたデシケータ中に曲げ加工した材を入れ、適宜取り出して回復状態を記録するとともに、観察用小試片を切り出した。形態変化の観察には、走査電子顕微鏡 (SEM, Hitachi S-500) を用い、鋭利な刃物で切り出した表面に金コーティングを施して検鏡した。

3. 針葉樹材における曲げ加工および水分回復の程度と形態変化

元来、針葉樹材より広葉樹材の方が曲げ加工に適しているが、組織の構成が単純なことや細胞壁構造に関する知見が豊富に得られていることから、まず針葉樹材について曲げ加工および水分回復の程度 (曲率半径) と形態変化を検討した。

供試材の中では最も曲げやすく、 $r=3$ cm の治具で曲げ加工できたテーダマツを用い、樹幹の隣接する部位より採材した試料を選び、半径の異なる 4 種類の治具 ($r=15, 10, 5, 3$ cm) で曲げ加工した。Fig. 1 の a および a' は $r=15$ cm, b は 10 cm, c は 5 cm, d および d' は $r=3$ cm の治具による曲木の、それぞれ圧縮側表面近辺での様子を示したものである。

a では仮道管壁内表面に、らせん状の小さな隆起が分散して生じている。これを拡大したのが、a' であるが、隆起は S らせんに配向し、前報³⁾ で述べたように 2 次壁中層のマイクロフィブリル配列とほぼ直角に近い角度で交差している。また隆起は細胞間層で分けられる一つの仮道管壁としての形態変化に留まっており、隣接仮道管壁には何ら関係をもっていない。

ところで、縦圧縮の初期に出現する形態変化として取り上げられてきた slip plane あるいは microscopic compression failure といわれるものは、主として偏光顕微鏡下で検出されしかもその多くは晩材細胞壁の縦断切片で観察されてきた。縦断切片上で測定した slip plane の傾角は $60\sim 70^\circ$ を示すが、壁内表面上では横方向に走ることが多い⁴⁾。したがってマイクロ波加熱による曲木にみられる前掲の S らせんの隆起は、slip plane などとは形態を異にしているといえる。

曲木の曲率半径が小さくなるにつれて、らせん状の隆起の幅が増大しかつ数多く出現してくる (Fig. 1 の b, c)。しかしこの場合も、隆起は木材の組織構造の変異点とされる仮道管の放射組織との交差域、あるいは先端付近に集中する傾向はなく、仮道管壁に均等に生じているのが認められる。さらに曲率半径が小さくなると、仮道管壁自体が波状にしゅう曲してくる。 $r=5$ cm の曲木の圧縮側表面近辺では、一部に弱い波状のしゅう曲がみられるにすぎないが (Fig. 1 の c), $r=3$ cm の曲木ではうねりの程度が著しくなる (d)。普通の圧縮破壊においても、同様の波状変形観察がされるが、この場合はある個所に集中して生じ応力の増加とともに発達する様子を呈する。なお、Fig. 1 の a から d は曲率半径の変化に対応した曲木の圧縮側表面近辺の形態変化をみたものであるが、これは同時に $r=3$ cm の曲木の中立面付近から圧縮側表面にかけての仮道管壁の様子の変化に対応しているといえる。

Fig. 1 に示した観察結果は、いずれも同一樹種について曲率半径を変化させたものであるが、同じ半径の治具で曲げ加工を行なっても樹種あるいは樹幹からの採材部位に基づく曲げやすさの程度により、その形態を異にしている。すなわち比較的曲げにくい方に属するスギを $r=10$ cm の治具で加工した曲木では、すでに仮道管壁が波状にしゅう曲した (Fig. 2)。またこのしゅう曲は仮道管壁に均等に生じているのではなく、集中して発生する傾向がみられる。さらに壁内表面上の隆起は、テーダマツの場合に比較して少なく、

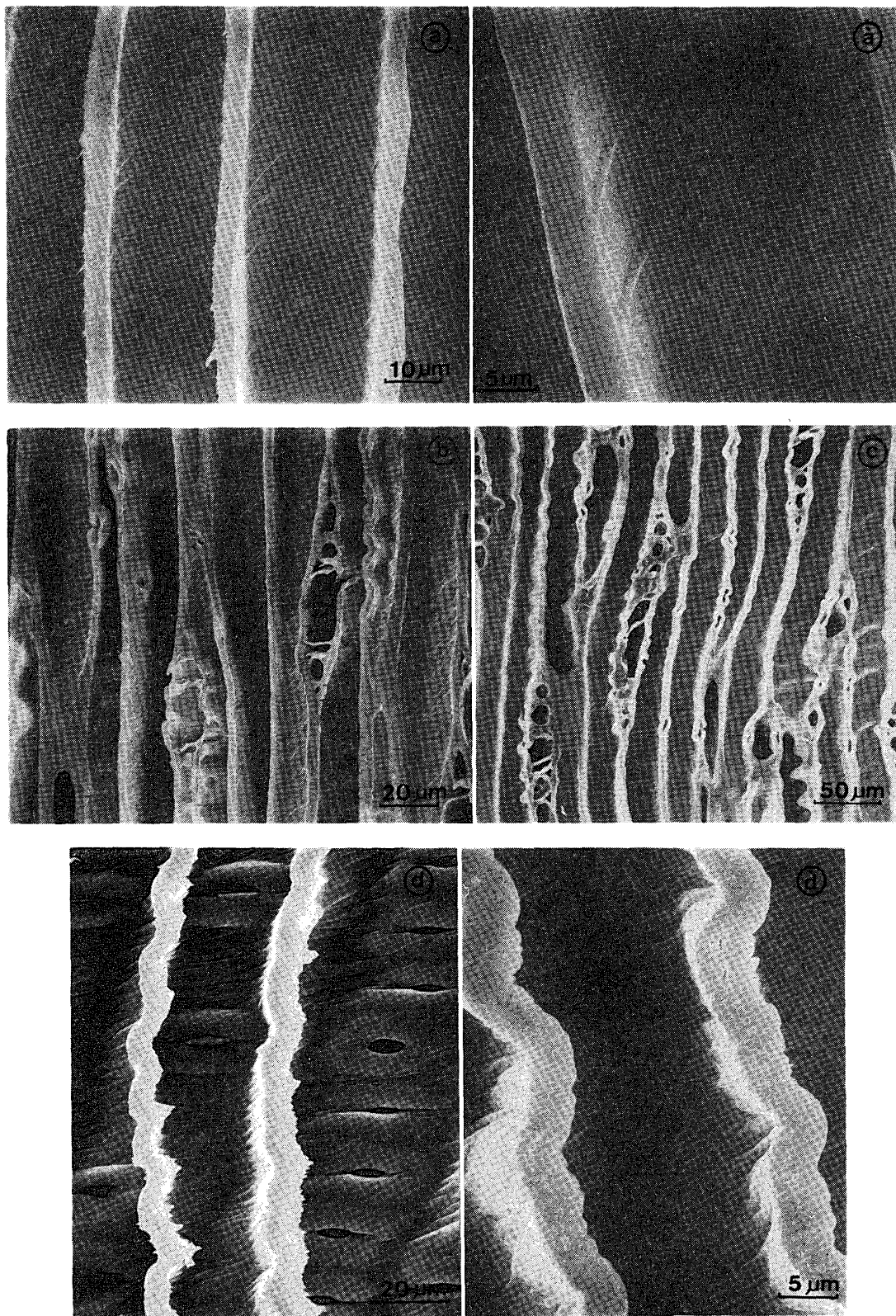


Fig. 1 曲率半径の異なるテーダマツ曲木の圧縮側表面近辺での仮道管壁の形態
 (a～cは板目面, dはまさ目面)。
 (a: $r=15$ cm, b: $r=10$ cm, c: $r=5$ cm, d: $r=3$ cm)

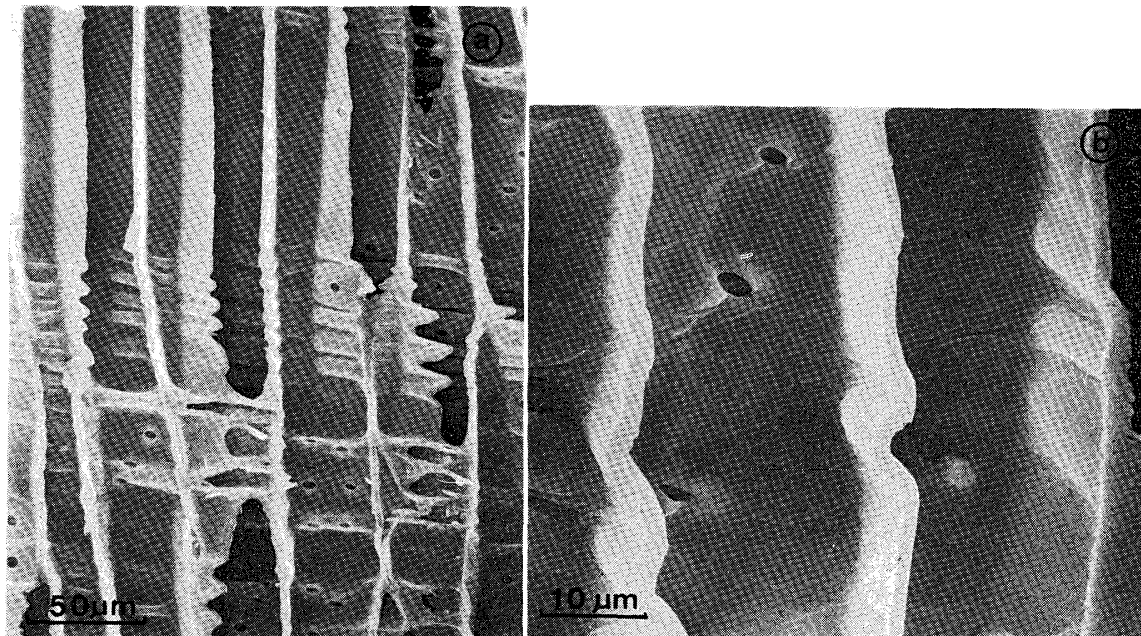


Fig. 2 スギ曲木 ($r=10$ cm) の圧縮側表面近辺での仮道管壁の形態 (まさ目面)。

しかも長軸方向に対して水平に近い角度を示している。木材の曲げ加工の難易に影響する諸因子のうち、大きく関与しているのは細胞壁の S_2 層のミクロフィブリル傾角であるといわれている⁵⁾。前述したように、曲げ加工で発生したらせん状の隆起と S_2 層のミクロフィブリル配列とがほぼ直交している。曲げにくい材では S_2 層のミクロフィブリルの傾角が小さく、したがって圧縮に伴う壁の隆起は水平に近くなると考えられる。

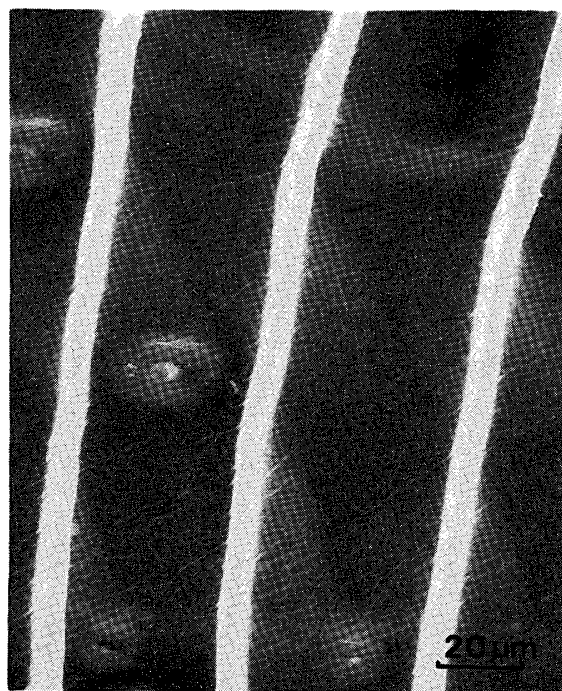


Fig. 3 テーダマツ曲木 ($r=3$ cm) の水分回復後の仮道管壁の形態 (まさ目面)。

さて、マイクロ波加熱を利用して一定の曲率半径に曲げ加工した材が、水分を吸収すると直材に戻るのはいすでに指摘の通りである⁶⁾。 $r=3\text{ cm}$ の治具で加工したテーダマツの曲木を、水を満たしたデシケーター中に約1ヶ月放置しておく、と、曲率半径 30 cm にまで回復する。回復材の圧縮側表面近辺の様子を示したのが Fig. 3 である。Fig. 1 の d と比較すると、波状のしゅう曲はもちろん壁内表面上の隆起もほとんど消失し、わずかに小さならせん状の隆起のみ残っているのがうかがえる。

水分を吸収して曲木が直材に戻る過程を検討するため、 $r=7\text{ cm}$ の治具で加工したヒノキの曲木を上記の

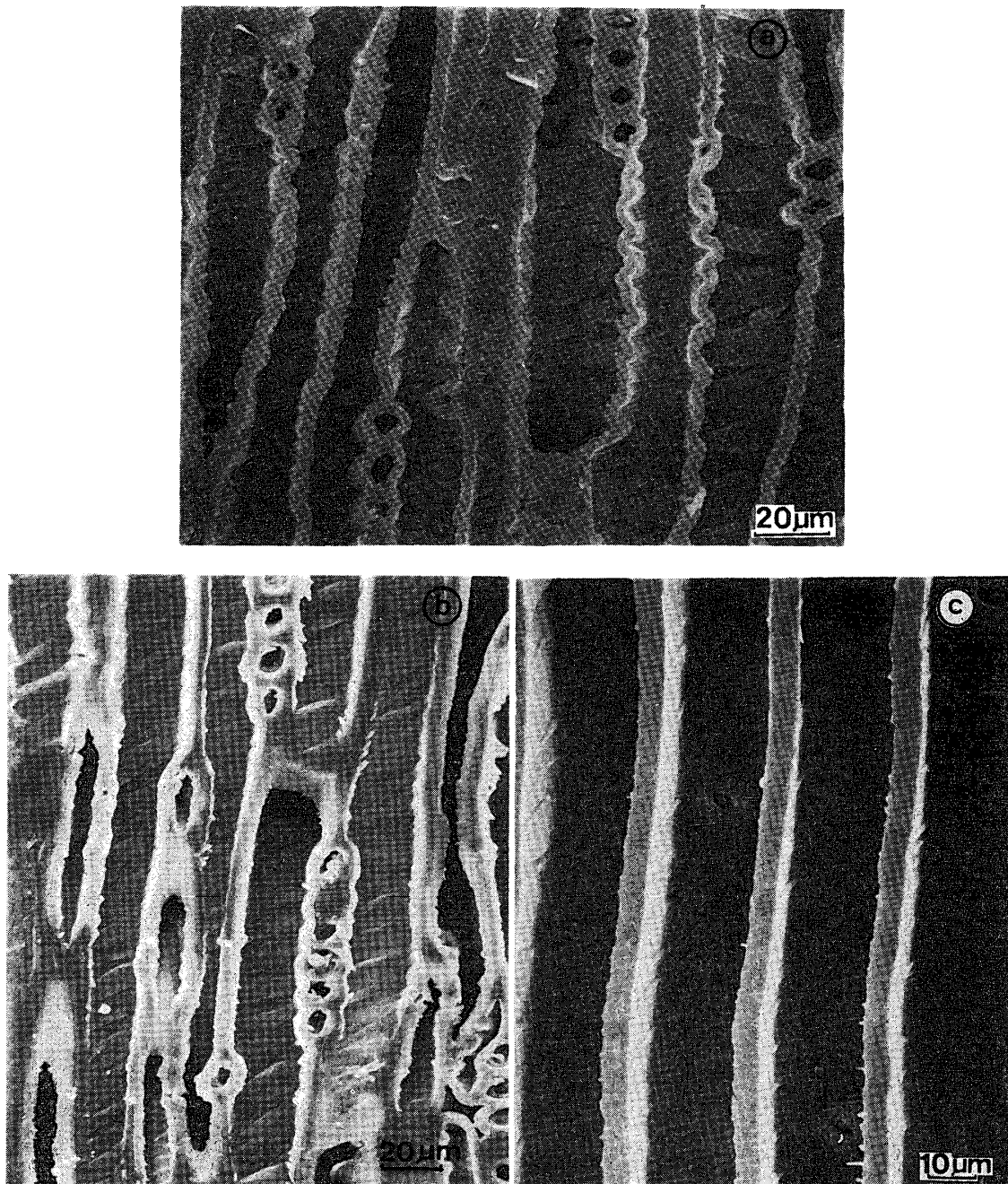


Fig. 4 ヒノキ曲木 ($r=7\text{ cm}$) の水分回復に伴う形態変化 ($a \rightarrow b \rightarrow c$) (a, b は板目面, c はまさ目面)。

デシケーター中に入れ、適宜小試片を切り出しその時の曲率半径と組織構造の変化を対応させてみた。観察はいずれも圧縮側表面近辺について行なったが、Fig. 4 の a は回復操作以前の様子、b は 3 日後に取り出し曲率半径が 10 cm の時、c は 2 週間後の曲率半径 25 cm の時の形態を示している。b では仮道管壁の波状のしゅう曲は消失し壁内表面上の隆起のみられるが、c になると小さな隆起がわずかに分散しているだけになる。したがって、曲げ加工を行なう際にみられたのと全く逆の形態変化が回復過程にも認められるといえる。

ところで、回復材においても残存していた分散した小さな隆起は、曲木を煮沸して直材に戻したもののにおいてもみられた。また偏光顕微鏡のクロスニコル下でもかすかな複屈折を示すことから、圧縮変形の初期に形成された座屈を伴うミクロフィブリルの変形と考えられ、回復材においても消失しないと思われる。

4. 広葉樹材での形態変化

多くの樹種についてのマイクロ波加熱による曲木適性の検討から、広葉樹材における環孔材と散孔材の区別あるいは構成要素の種類と分布の違いなどが、材の曲げやすさの程度に影響することはないとされている²⁾。観察に供した樹種の中でも、 $r=5\text{ cm}$ の治具で曲げ加工が可能であったヤナギとケヤキは、それぞれ散孔材と環孔材であり、一方ヤナギに木部組織の構成が似ているヤマナラシは $r=10\text{ cm}$ までしか曲げ加工できなかった。

さて、長方形断面をもつ材を曲げ加工すると、引張り応力を受ける側の幅は狭まり、圧縮応力を受ける側のそれは広がって断面は台形に変形する。針葉樹材の曲木では、これに伴って仮道管の木口断面の形状が変化しているのが、試料断面の周辺部で観察された³⁾。広葉樹材においても、特に道管の木口断面の形が変化し、壁内表面に縦じま状のしゅう曲が認められる場合があった。このような細胞壁の変形は、大径の孔圍道管をもつ環孔材で顕著であった。

Fig. 5 は供試した広葉樹材の中では、曲げやすい方に属したヤナギと曲げにくい方に属したヤマナラシ

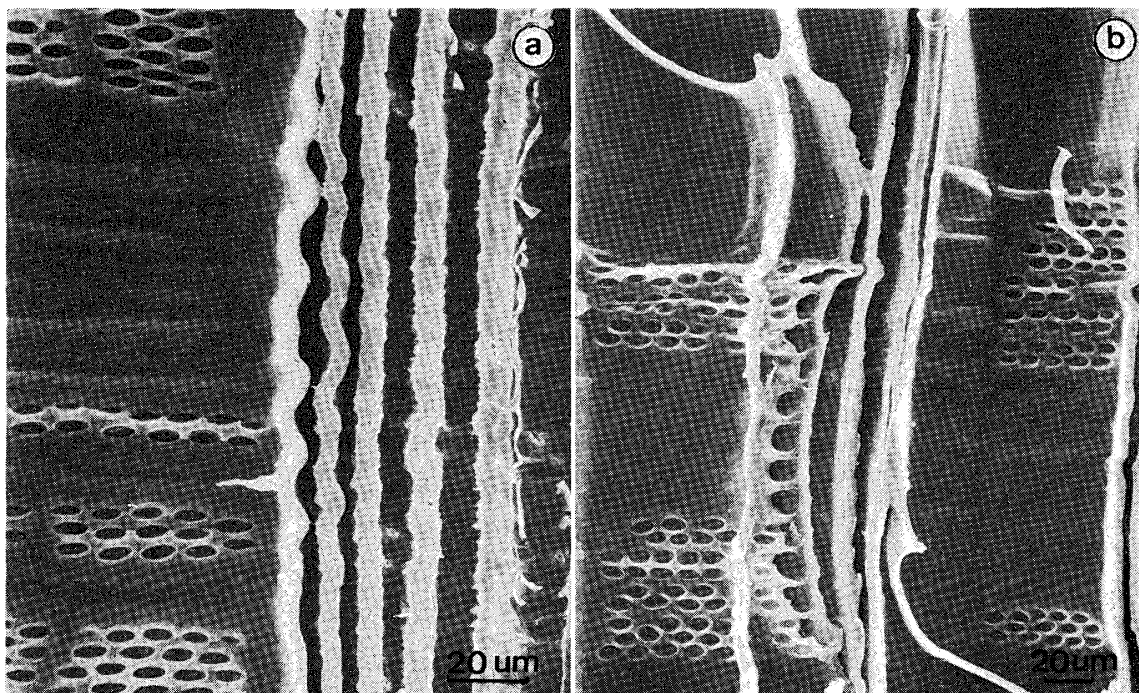


Fig. 5 広葉樹材曲木の圧縮側表面近辺での形態（まさ目面）。
a : ヤナギ ($r=5\text{ cm}$), b : ヤマナラシ ($r=10\text{ cm}$)

について、曲木の圧縮側表面近辺のまさ目面を観察した SEM 写真である。いずれの場合も、道管壁および木部繊維の細胞壁は波状にしゅう曲している。また壁内表面上には隆起状のものがみられる。前節における針葉樹材の曲木での観察とあわせて、曲げ加工初期のより小さな圧縮ひずみは壁内の隆起状の変形が、それに続くより大きい圧縮ひずみは壁自身が波状にしゅう曲して吸収していると考えられる。したがって、曲げ加工の程度は、圧縮側の細胞壁が波状にしゅう曲するまで可能であると推定される。

Fig. 5 の a と b を比較すると、ヤナギでは変形が細胞壁にはほぼ均等に分散して生じているのに比べ、ヤマナラシではある個所、特に放射組織との交差域に集中して発生している傾向がうかがえる。針葉樹材におけると同様、広葉樹材においても曲げやすい材では、変形が分散して生じるといえる。

さて、道管と木部繊維の壁内表面をみると、圧縮されて生じた形態変化の様子が異なっている。道管壁には概して横方向の大きな変形が生じているのに対し、木部繊維壁には針葉樹仮道管壁に出現したのと同様のらせん状の隆起が著しい。Fig. 6 はホオノキ曲木 ($r=7\text{ cm}$) の圧縮側表面近辺と中立面付近を対比したものであるが、b の写真に示されるように細胞壁の変化は、道管壁より先に木部繊維壁に生じている。すなわち、道管と木部繊維とは圧縮変形に伴う形態変化の仕方が異なると考えられる。

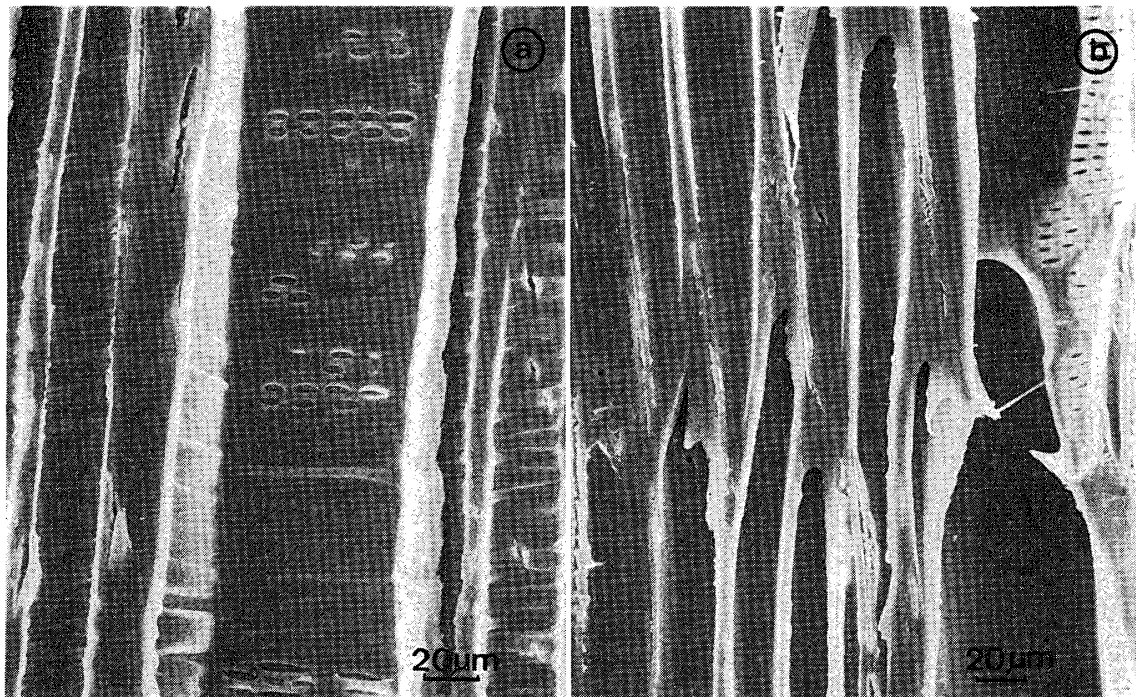


Fig. 6 ホオノキ曲木 ($r=7\text{ cm}$) の圧縮側表面近辺 (a) と中立面付近 (b) の形態の変異 (まさ目面)。

Fig. 7 はイタヤカエデ曲木 ($r=7\text{ cm}$) の引張り側と圧縮側の道管壁をみたものである。圧縮側の道管壁では、本来備わっている細かいらせん肥厚の間隔が狭まっているのが観察される。また壁孔の孔径が狭まっている例もあり、道管要素壁では多数存在する壁孔のためミクロフィブリルの配列が著しく乱されており、このため圧縮による形態変化も仮道管や木部繊維とは様相を異にし、壁の隆起を伴わずとも圧縮ひずみが吸収できることを示していると思われる。

一方、木部繊維壁は繊維状仮道管あるいは真正木繊維にかかわらず、針葉樹仮道管壁と似た形態変化を呈した。Fig. 8 はアオダモ曲木 ($r=7\text{ cm}$) の圧縮側近辺のまさ目面をみたものであるが、厚壁の木部繊維には顕著な肥厚状の隆起が生じている。Fig. 9 は $r=10\text{ cm}$ のキササゲ曲木の圧縮側表面近辺と中立面付近

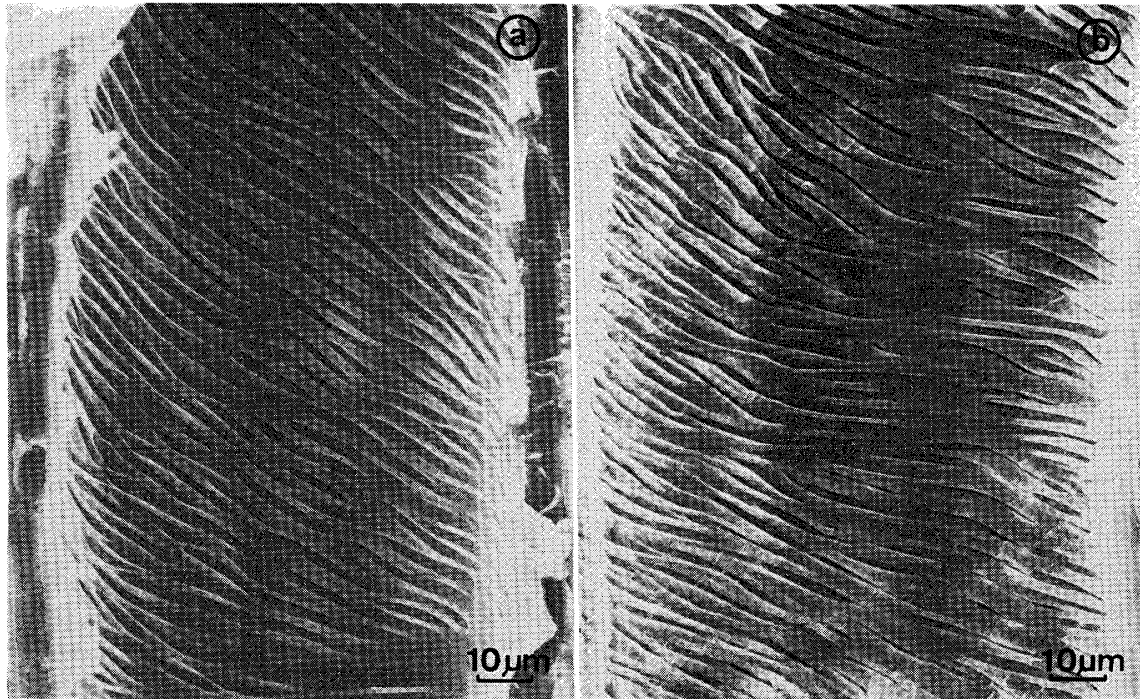


Fig. 7 イタヤカエデ曲木 ($r=7$ cm) の引張り側 (a) および圧縮側 (b) の道管壁。

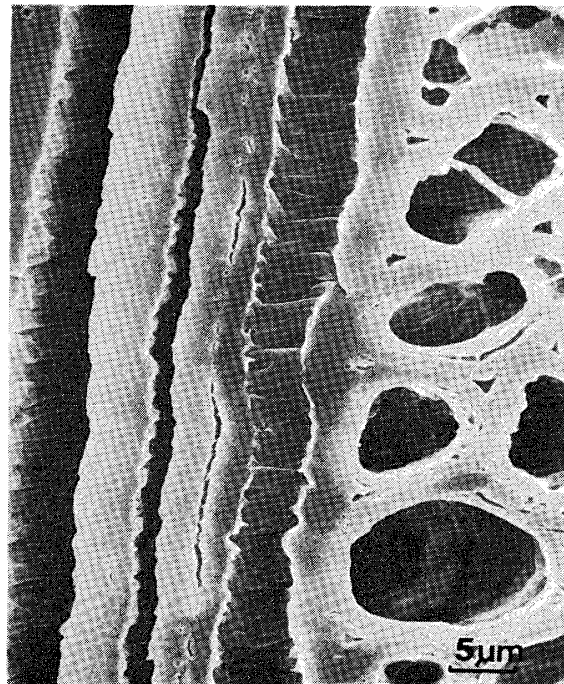


Fig. 8 アオダモ曲木 ($r=7$ cm) の圧縮側表面近辺での木部繊維および放射組織細胞の形態 (板目面)。

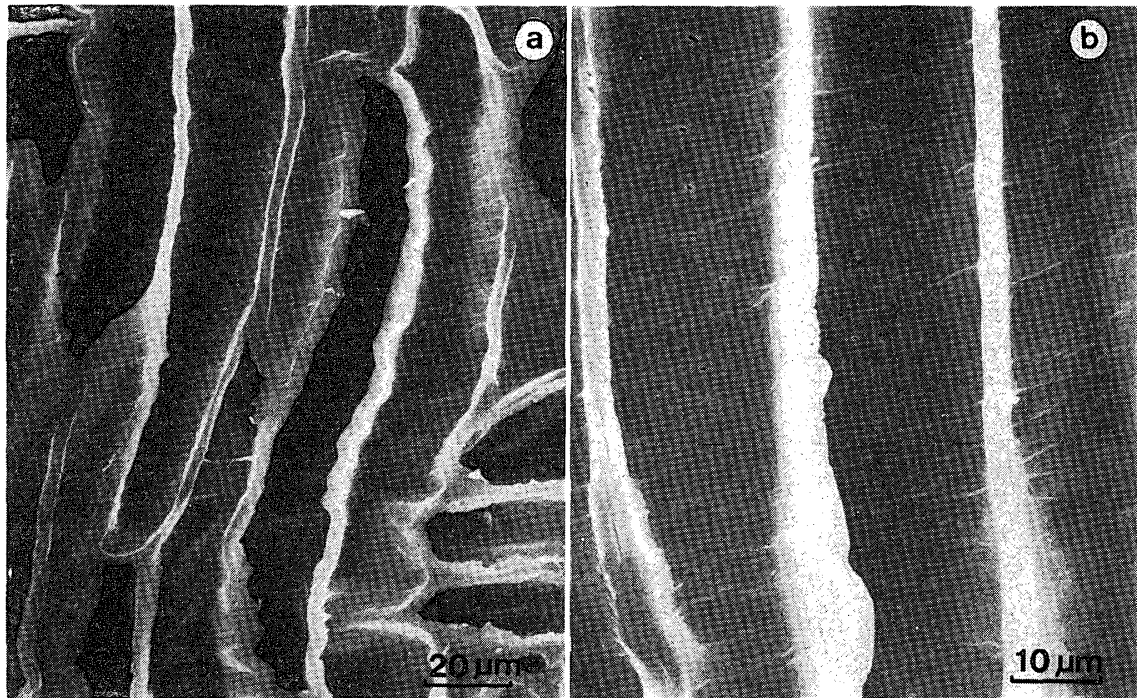


Fig. 9 キササゲ曲木 ($r=10$ cm) の圧縮側表面近辺 (a) と中立面付近 (b) の木部繊維 (a, bともまさ目面)。

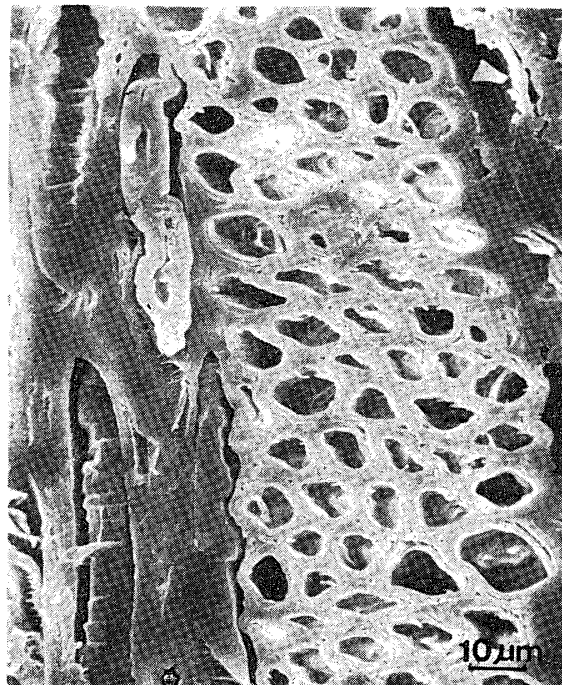


Fig. 10 ケヤキ曲木 ($r=5$ cm) の圧縮側表面近辺の放射組織細胞の形状変化 (板目面)。

の様子を示したものである。細胞壁の波状の変形に先立って、らせん状の隆起が生じるという傾向に変わりはないが、壁内表面上の隆起の出現は曲げにくい材の場合は少ない傾向にある。

ところで、広葉樹材では一般的に放射組織細胞の構成割合が、針葉樹材に比較して高い。曲げ加工に際して、圧縮側にある放射組織細胞はその長軸方向に対して横圧縮の応力を受けることになる。Fig. 10 はケヤキ曲木での例であるが、放射組織細胞の接線断面の形状が変化しているのがみられる。細胞間層で剥離などが生じることはなく、壁が軟化して起こった変形が固定された状態にある。この放射細胞の断面形状の変化は、マイクロ波加熱を利用した横方向の木材の曲げ加工に際しての細胞形状の変化⁷⁾と同様に考えることができる。

マイクロ波加熱を使った曲げ加工法は、乾燥時の水分子の離脱に伴う一時的な分子構造の緩みによる変形現象を利用したものであるが、この場合材の周辺部の含水率が常に内部に比べて高く、かつヘミセルロースやリグニンという細胞壁のマトリックス物質が十分軟化するまで温度が上昇していると考えられる²⁾。このことから曲げ加工によって細胞壁は著しい変形を起こして固定されていると解釈できる。この見方は、本報告での組織構造面からの観察より裏づけられるが、さらに木材の微細構造の面から変形現象を考えていくことが、曲げ加工法の検討には必要であろう。

文 献

- 1) 則元 京：木工機械，No. 104，10～13（1981）
- 2) 則元 京ほか3名：日本レオロジー学会誌，**8**，166～172（1980）
- 3) 今村祐嗣ほか3名：木材誌，**28**，743～749（1982）
- 4) 佐伯 浩：材料，**22**，894～902（1973）
- 5) 則元 京：日本レオロジー学会誌，**9**，169～175（1981）
- 6) 青木 務，則元 京：木材研究・資料，No. 17（投稿中）
- 7) 飯田生穂，則元 京，今村祐嗣：木材研究・資料，No. 17（投稿中）