論文

Wood Bending Utilizing Microwave Heating

by

Misato NORIMOTO^{*1}, Hiroshi WADA^{*2}, Kenji HASEGAWA^{*3}, and Ikuho IIDA^{*4}^{(*)1} Wood Research Institute, Kyoto University, Uji 611^{*2} Nara Prefectural Forest Experiment Station, Takatori, Nara 635-01^{*3} Daiken Trade & Industry Co., Ltd., Shin Asahi Bldg. Nakanoshima, Osaka 530^{*4} Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Kyoto 606

Wood bending utilizing microwave heating was investigated. In the first place, a creep test for *Quercus crispula* having various moisture contents during irradiation with microwave was carried out and the effect of the initial moisture content ϕ_0 on the final creep deflection y_{ef} was examined. The relation between y_{ef} and ϕ_0 was expressed by $y_{ef}=4\sqrt{\phi_0}$. In the next place, the bending quality of nine kinds of softwoods and hardwoods was compared. The rating of the bending quality was based on the radius of curvature of a bent member. The bending quality varied among the different wood species and as a rule that of hardwoods was better than that of softwoods. *Robinia pseudo-acacia* and *Pinus taeda* could be bent to a 3 cm radius in 1 cm thickness without any compressive wrinkles and tensile failures. An attempt was also made to correlate the bending quality with the specific gravity of wood and such mechanical properties of water saturated wood specimens as modulus of elasticity, stress and strain at proportional limit and maximum load and deflection. The mechanical properties were measured by a static bending test at 20°C. A good correlation was found between bending quality and maximum deflection. Furthermore, the anatomical structure in cross section of the bent wood was examined through a microscopic examination. Regular array of cells in radial direction which is common in the untreated wood became disordered by the bending treatment, which suggests that the cell wall materials were softened remarkably during irradiation with microwave.

マイクロ波加熱による木材の曲げ加工

則元 京^{*1}・和田 博^{*2}・長谷川賢司^{*3}・飯田 生穂^{*4}

(原稿受理: 1980年7月8日)

1. 緒 言

繊維方向に長い厚さ 1 cm の乾燥した木材を、たとえば中立面の曲率半径が 5 cm になるまでしわまたは割れなどの損傷を与え

ずに曲げることとはできない。それは曲率半径が 5 cm になるためには、引張りおよび圧縮側表面歪が 10% 程度にならなければならないが、乾燥状態では木材は極めて脆く、約 2% 伸縮すると破壊するためである。しかし、適当な水分と熱を与えると木材は軟化し、破壊歪を増大させる。このことを利用して木材を曲げ加工する方法は、いわゆる曲木法と称してその歴史は古く、現在でも家具工業などで広く用いられている。

一方、水分が吸脱着している過程で木材に力が作用すると、著

^{*1} 京都大学木材研究所 〒611 宇治市五ヶ庄^{*2} 奈良県林業試験場 〒635-01 奈良県高市郡高取町^{*3} 大建工業(株) 〒530 大阪市北区中之島^{*4} 京都府立大学農学部 〒606 京都市左京区下鴨半木町

しいクリープ歪を生じることが知られている。本箱などの木製の棚板が長年使用している間に大きくそり、除荷してもその大部分が回復しないのはこの原因によるものである。従って、水分と熱による軟化に加えて水分の変化過程に生じる可塑性を有効に利用すれば、木材に大きな変形を与えることができると考えられる。著者らは、吸水した木材にマイクロ波を照射している過程で、曲げ変形を与えることによって乾燥と曲げ変形を同時に行う曲木法を検討している。本報では、マイクロ波照射過程のクリープ、樹種による曲げ性能の違い、曲げ性能と弾性率、強度、歪などとの関係、曲げ処理を受けた材の組織構造の変化について報告する。

2. 実 験

2・1 クリープ測定

同一樹幹より採取した長さ 50 cm (繊維方向 L)、幅 2 cm (接線方向 T)、厚さ 1 cm (半径方向 R) のミズナラ (*Quercus crispula* Blume) 41 本を試料に用いた。減圧して試料に吸水させ、それを室内に放置することによって試料の初期含水率 ϕ_0 を 20~110% に調整した。オープン寸法が幅 85 cm、奥行 90 cm、高さ 80 cm のマイクロ波加熱装置 (東芝製 TMB-3210 型、周波数 2450 ± 50 MHz) 内で試料を 2 点 (スパン 35 cm) で支持し、吸水時における破壊荷重の $1/6$ (3.7 kg) に相当する負荷を中央に与え、発振出力 200 V、1.6 kW のマイクロ波を照射する過程で中央部のたわみ y を 30 秒間隔で測定した。含水率 ϕ の経時変化は、別に用意した試料を用い、マイクロ波の照射の過程にそれを適当な間隔で装置より取り出し重量を測定し求めた。

2・2 曲げ性能測定

日本産広葉樹として、ハリエンジュ (*Robinia pseudo-acacia* Linn.)、ヤナギ (*Salix* sp.)、ホオノキ (*Magnolia obovata* Thunb.)、ウリハダカエデ (*Acer rufinerve* Sieb. et Zucc.)、ミズナラ、カバ (*Betula* sp.)、アカシデ (*Carpinus laxiflora* Blume)、カツラ (*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. et Zucc.)、ブナ (*Fagus crenata* Blume) の 9 種、針葉樹としてテーダー松 (*Pinus taeda* Linn.)、シトカスプルース (*Picea sitchensis* Carr.)、アスナロ (*Thuja plicata* Sieb. et Zucc.)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.)、アカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)、ウエスタンヘムロック (*Tsuga heterophylla* Sarz.)、セコイア (*Sequoia sempervirens* Endl.)、ダグラスファー (*Pseudotsuga douglasii* Carr.)、メタセコイア (*Metasequoia glyptostroboides* Hu et Cheng) の 9 種を用いた。寸法は長さ 70 cm (L)、幅 2 cm (T)、厚さ 1 cm (R) であった。あらかじめ減圧により吸水させた試料を加熱装置に入れ、出力 200 V、2.4 kW のマイクロ波を照射し、試料表面よりの水蒸気発生が著しくなる 1~2 分後に取り出し、曲率半径 r が 15 cm の木製円盤に沿って曲げた。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 が 10 cm の円盤に沿って曲げた。以後同様の操作を繰返して r を 7 cm、5 cm、3 cm の順に減少させた。その間引張り、圧縮側や側面を観察し、しわや割れ発生の有無を調べた。

2・3 荷重-たわみ測定

長さ 20 cm (L)、幅 (T) および厚さ (R) 0.5 cm の吸水させた試料を 2 点 (スパン 10 cm) で支持し、10 mm/min のたわみ速度で中央に負荷を与え、荷重 P とたわみ y の関係を求めた。測

定時の温度は 20°C であった。 P - y 図より弾性率 E 、比例限度 σ_p 、比例限度 ϵ_p 、最大荷重 P_m 、 P_m 点におけるたわみ y_m を求め、これらの値と 2・2 で測定した曲げ性能を比較した。

2・4 顕微鏡観察

曲げ性能の大きいテーダー松およびハリエンジュについて、曲げ処理を行った試料の湾曲部の引張り側および直線部より小片を切り出し、ミクロトームで表面を平滑にした後その木口表面の細胞配列の様子を反射法により顕微鏡観察した。乾燥木材の木口面を細胞に損傷を与えることなく平滑にすることは一般に困難であり、従って得られた顕微鏡写真はかなり不鮮明なものであった。なお、湾曲部圧縮側については、ミクロトーム切削により表面を十分に平滑にできず、鮮明な写真を得ることができなかった。

3. 結果と考察

3・1 マイクロ波照射過程のクリープ

木材の主成分はセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンであるが、いずれも親水性であるので木材は多量の水を保有できる。吸水した状態では木材は十分に膨潤した状態にあって、木材成分が多量に有する水素基と水分子との間に密な水素結合網が形成されていると思われる。乾燥が始まると、水分子の移動と離脱に伴って網目構造が崩れ、その結果一時分子構造に緩みを生じ、成分分子のローカルモードや側鎖の運動が活発になるものと思われる。このような状況において力が作用していると著しい変形が生じる。乾燥が更に進むと、成分分子間に水素結合が形成され始め、それに伴って活発であった分子運動が凍結されることになって変形は固定される。木材より種々の方法で単離されたリグニンおよびヘミセルロースのガラス転移温度 T_g は、乾燥状態ではそれぞれ 134~235°C、167~217°C であるが、湿潤状態ではかなり低下してそれぞれ 77~128°C、54~142°C である。しかし、セルロースの軟化点は乾燥、湿潤いずれの状態でも 220~250°C であって、前二者に比べて湿潤状態においてはかなり高い¹⁾。もし乾燥の過程で温度がリグニンおよびヘミセルロースの T_g 近辺になれば、これらの分子のミクロブラウン運動が頻繁となり、木材は一層可塑性を増すことになる。

全乾木材では、室温で 10⁷ Hz を中心に 10⁴~10¹⁰ Hz の広い周波数領域にわたって、木材成分中のマンナンおよび非晶セルロースのメチロール基ならびにリグニンのフェノールプロパン単位側鎖 γ 位のメチロール基の配向分極に基づく誘電吸収が観測される^{2),3)}。木材が水分を吸着すると、吸着水の配向分極に基づく大きな吸収がメチロール基の吸収に重なって現われ、木材の含水率が増大するにつれて、その吸収は急激に値を増加しながらより高い周波数領域に移動し⁴⁾、含水率が繊維飽和点以上になると、吸収の極大はマイクロ波領域に移動する⁶⁾。電場の振幅が一定であれば、誘電体からの発熱量は誘電損失と周波数の積に比例するので⁷⁾、高含水率の木材にマイクロ波を照射すると、単位時間当たりの発熱量は著しく大きくなる⁶⁾。

高含水率の木材にマイクロ波を照射すると、吸着水および自由水に電波が選択的に吸収されて発熱し、それに伴って材内部の蒸気圧が高くなり、水分は試料の外部へ向っての移動を開始する。その結果材の厚さが余り大きくない限り、乾燥のどの段階においても材の含水率は外周部に比べて内部で低くなるので、含水率分布は熱気乾燥の場合とは逆となる。マイクロ波加熱における材内

Fig. 1 Creep deflection (dotted lines) and moisture content (solid lines) of *Quercus crispula* during irradiation with microwave (200V, 1.6kW). Beams $1 \times 2 \text{ cm}^2$ in cross section were simply supported over a span of 35 cm and loaded with a 1/6 breaking load at the center of the span. Initial moisture content: a-101%, b-47%, c-31%.

部の温度変化過程は、まず加熱直後の温度の急上昇、繊維飽和点まで続くほぼ 100°C の状態、繊維飽和点以下に含水率が低下する段階での 100°C 以上への急上昇の3段階に分けられる。

マイクロ波照射過程のミズナラのクリープの一例を Fig. 1 に示す。縦軸は全たわみから瞬間たわみ (約 2 mm) を除いたクリープたわみ y_c と含水率 ϕ を、横軸はマイクロ波照射時間を示す。 y_c は約 20~30 秒はほとんど増加しない。この時期はマイクロ波が木材中の水分に吸収され、温度が上昇する過程であって、材温は木材成分を軟化させるに十分上昇していないと考えられる。また、 ϕ の低下が少ないことから水分移動も十分に生じていないと考えられる。その後 ϕ が直線的に減少するにつれて、 y_c は急激に直線的に増大し始める。 ϕ_0 が 101% のものでは、この時期に木口面より沸騰した水が滴り落ち、材の表面より水蒸気が激しく吹き出す。従って、材温が 100°C 前後に到達していることが分かり、水分が十分存在している状態にあるから、リグニンおよびヘミセルロースは軟化していると考えられる。更に乾燥が進むと y_c の増加の割合は徐々に小さくなって行くが、測定を停止した材の平均含水率が 12% になった時点においても、 y_c はなおわずかに増加する傾向にある。 ϕ_0 の違いによって y_c の直線域の傾きは変わらないようであるが、 ϕ_0 が大きいほど直線域が長く続き、また最終クリープたわみ y_{ef} も大きい。前述したように、マイクロ波照射過程では材の中心部に比べて周辺部で含水率は常に高く、従って大きな応力の作用する表層における変形が長く続くと思われ、その結果 ϕ_0 の大きいものほど長く変形が続くことになる。ちなみに、 y_{ef} と ϕ_0 の関係は $y_{ef} = 4\sqrt{\phi_0}$ の実験式で示された。

3・2 曲げ性能

Fig. 2 *Robinia pseudo-acacia* strip ($1 \times 2 \times 70 \text{ cm}^3$) bent using microwave heating (200V, 2.4kW).

針葉樹と日本産広葉樹を比較すると、一般に広葉樹の方が曲げやすい結果が得られた。広葉樹の中ではハリエンジュが特に曲げやすく、1~2 分間の加熱後 1 回の操作で r を 3 cm 以下にすることができた。乾燥固定の過程で、乾燥がかなり進むとわずかに r が小さくなる方へ変形が進行した。なお、引張り側、圧縮側あるいは側面にしわや割れは認められなかった。そこで r が 3 cm の円盤を 2 つ並べ、それに沿って 8 字形に変形させてみた。その結果を Fig. 2 に示す。ハリエンジュに次いでヤナギ、ホオノキ、ウリハダカエデ、ミズナラが変形しやすかった。ヤナギは 1 回の操作で r を 5 cm にすることができ、またしわや割れは認められなかった。ホオノキ、ウリハダカエデおよびミズナラは 3 回の操作で r を 5 cm にすることができたが、側面の圧縮側に軽微なしわが認められたものもあった。しかし、それは軽いサンディングで消失する程度のものであった。カバ、アカシデ、ブナ、カツラは 3 回の操作で r を 7 cm にすることができたが、ブナおよびカツラでは側面の圧縮側にわずかにしわが認められた。

一方、針葉樹ではテーダー松が極めて曲げやすく、 r を 3 cm 以下にすることが 1 回の操作で可能であった。そこで r が 3 cm の円盤に沿ってバネ状に曲げることを試みたが、その結果を Fig. 3 に示す。テーダー松に次いでシトカスプルスが曲げやすく、3 回の操作でしわや割れなしに r を 7 cm にすることができた。ヒノキ、アスナロおよびアカマツは 3 回の操作で r を 7 cm に、ウェスタンヘムロックは 10 cm にすることができたが、圧縮側にしわが認められた。セコイア、ダグラスファーおよびメタセコイアでは r を 15 cm にすることも困難であった。メタセコイア

Fig. 3 *Pinus taeda* strip ($1 \times 2 \times 70 \text{ cm}^3$) bent by microwave heating (200V, 2.4kW).

Fig. 4 Load-deflection curves for hardwoods in wet condition at 20°C. Beams 5×5 mm² in cross section were simply supported over a span of 100 mm and loaded at the center of the span. a: *Robinia pseudo-acacia*, b: *Magnolia obovata*, c: *Fagus crenata*.

とテーダー松は比重、年輪幅や材の外観が類似しているにもかかわらず、曲げやすさの点で極端に異なる結果が得られたことは興味あることである。以上の結果をもとに、曲げ性能に関するA～Eの5段階によるランクづけを行ったが、その結果をTable Iの右欄に示す。

次に、ホオノキについて r を 7 cm にして乾燥固定したものに

Fig. 5 Load-deflection curves for softwoods in wet condition at 20°C. a: *Pinus taeda*, b: *Metasequoia glyptostroboides*, c: *Picea sitchensis*.

吸水させ、それをマイクロ波を照射して r が 5 cm になるまで曲げ、乾燥固定後吸水させて再び r が 3 cm になるまで曲げることを試みた。その結果しわや割れなしに曲げることができ、従って乾湿繰り返し操作によって変形を徐々に進行させることが可能なことが分かった。

3・3 P-y 図

樹種によって曲げ性能が著しく異なることが明らかになった。そこで吸水した試料について P - y 図を求めて、それと曲げ性能

Table I. Bending quality BQ , specific gravity γ , modulus of elasticity E , stress and strain at proportional limit σ_p and ϵ_p , maximum load and deflection P_m and y_m in static bending.

Wood species	γ	P_m (kg)	σ_p (kg/cm ²)	ϵ_p (%)	$E \times 10^{-3}$ (kg/cm ²)	y_m (cm)	BQ
<i>Robinia pseudo-acacia</i>	0.81	4.5	82.6	0.312	26.5	2.42	A
<i>pinus taeda</i>	0.34	2.1	64.9	0.429	13.2	2.03	A
<i>Salix</i> sp.	0.54	5.2	160	0.252	63.6	1.47	B
<i>Magnolia obovata</i>	0.55	6.4	231	0.420	55.0	1.24	B
<i>Quercus crispula</i>	0.72	4.3	133	0.332	40.1	1.08	B
<i>Acer rufinerve</i>	0.61	7.3	359	0.488	73.6	0.91	B
<i>Carpinus laxiflora</i>	0.75	9.6	369	0.420	87.9	0.85	C
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	0.46	4.7	241	0.660	40.2	0.82	C
<i>Fagus crenata</i>	0.61	6.3	260	0.437	59.5	0.75	C
<i>Picea sitchensis</i>	0.43	3.3	172	0.257	67.0	0.69	C
<i>Betula</i> sp.	0.60	5.1	230	0.360	63.9	0.66	C
<i>Thujaopsis dolabrata</i>	0.45	6.0	271	0.352	76.9	0.66	D
<i>Tsuga heterophylla</i>	0.50	4.5	221	0.312	70.8	0.55	D
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.44	5.5	312	0.369	84.5	0.54	D
<i>Pinus densiflora</i>	0.45	4.9	241	0.398	60.6	0.52	D
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	0.23	3.7	141	0.376	37.5	0.48	E
<i>Pseudotsuga douglasii</i>	0.55	7.0	346	0.395	87.6	0.41	E
<i>Sequoia sempervirens</i>	0.51	5.1	301	0.445	67.6	0.32	E

との関連性を調べてみた。Fig. 4にハリエンジュ、ホオノキおよびブナの P - y 図を、Fig. 5にテーター松、シトカスプルスおよびメタセコイアのそれを示す。図から明らかなように、樹種によって著しい差が認められた。ハリエンジュとテーター松は針葉樹と広葉樹の違いはあるが、 P - y 図は類似している。すなわち、 y_m が他樹種に比べて著しく大きく、また y_m をすぎても肉眼的には割れあるいは座屈も見られず y が大きく進行する。ヤナギがこれに比較的似た結果を示した。一方、ブナやメタセコイアではこれらとは対照的な傾向が認められた。すなわち、これらの樹種は脆く、 P_m で引張り側から破断が生じ、また y_m が非常に小さかった。シトカスプルスでは P_m で引張り破断は生じないが、圧縮側に座屈が現われ、 y が y_m をすぎると P はかなり急激に低下した。これと類似の傾向を示したのはアスナロ、ヒノキ、ウエスタンホームロックである。Table I に気乾比重 γ 、 P - y 図より求めた y_m 、 P_m 、 σ_p 、 ϵ_p 、 E の値と曲げ性能のランクを比較している。曲げ性能と y_m との間には極めてよい対応が認められたが、 γ 、 P_m 、 σ_p 、 ϵ_p 、 E との間には特に対応は認められなかった。このことから、マイクロ波加熱による曲げ変形は第一に吸水した状態でその樹種がもつ変形のしやすさ y_m に依存し、また熱による軟化あるいは乾燥過程で付与される可塑性の程度は、吸水した状態における変形のしやすさに応じて増すと思われる。

木材は針葉樹と広葉樹に大別できる。針葉樹の構成要素の中で仮道管は90%以上を占め、その長さは約1.0~6.7 mm、断面は矩形または六角形である。一方、広葉樹は横断面に現われる道管の配列によって、その管孔が生長輪内を通じてほぼ均等に分布する散孔材、生長輪の内側に環状に配列している環孔材、半径方向に配列する放射孔材などに分類される。広葉樹の構成要素の中で、道管は約6~52%、木繊維は32~73%を占め、それぞれの長さは約0.1~1.8 mm、0.3~2.3 mm、断面は円形あるいはだ円形である。本実験で用いた広葉樹の中で散孔材はブナ、ウリハダカエデ、ホオノキ、カツラ、カバ、ヤナギ、環孔材はハリエンジュ、ミズナラ、放射孔材はアカンデである。従って、Table I から明らかなように、管孔の配列と曲げ性能との間には特に関連は認められない。針葉樹と広葉樹を比較すると、一般に針葉樹は曲げにくいといえるが、テーター松のように極めて曲げやすいものもある。以上のことから、細胞の形、配列、長さの違いが曲げ性能に支配的に関与しているとは思われない。また、曲げ性能と比重の間にも明確な相関は認められなかった。すなわち、細胞壁の比重には樹種による大差はないと考えられているので、曲げ性能は細胞壁と内腔の占める割合とも関連がないといえる。曲げやすさが細胞形態と関連がないとすれば、細胞壁を構成する化学成分の割合、その壁内における分布あるいは成分の高次の分子構造の違いに関係すると推測される。しかし、ハリエンジュやテーター松において、他樹種と異なる成分割合あるいはその分布が現在のところ認められているわけではないので、成分特にリグニンの高次構造の樹種による差異を追求することが今後の問題であろう。

3・4 細胞の形と配列の変化

弯曲部は台形断面を示した。すなわち、圧縮側で幅が広がり、引張り側で狭まった。Fig. 6はテーター松の木口面早材部の顕微鏡写真である。上は直線部の仮道管群を示しているが、それらは矩形または六角形断面をもち、半径方向（試料の厚さ方向）に規則正しく配列している。下は弯曲部引張り側の外周部に近い部位

Fig. 6 Micrograph of tracheides in early wood portion for *Pinus taeda*. Upper part : Untreated, Lower part : Treated, tension side.

Fig. 7 Micrograph of wood fibers for *Robinia pseudo-acacia*. Upper part : Untreated, Lower part : Treated, tension side.

の仮道管群を示しているが、断面の形は丸みを帯び、全体として半径方向に細長く変形している。また、細胞配列の半径方向の規則性は失われている。しかし、割れや細胞壁の落ち込みは全く観察されなかった。Fig. 7はハリエンジュの結果である。上は直線部の木繊維群を示しているが、それらは円形またはだ円形断面をもち、わずかに半径方向に規則性をもって配列している。下は弯曲部引張り側の外周部に近い部位の木繊維群であるが、細胞配列の規則性は全く失われている。また、細胞径がわずかに小さくなっているように思われる。しかし、曲げ変形によって道管断面の形の顕著な変化や放射組織の屈曲はあまり観察されなかった。以上の結果から、吸水した木材にマイクロ波を照射すると細胞壁は著しく軟化し、細胞は相互に滑りやすい状態になることが推測された。

文 献

- 1) Goring, D.A., *Pulp and Paper Magazine of Canada*,

-
- 64, T517 (1963).
 - 2) Norimoto, M., *Wood Research*, No. 59/60, 106 (1976).
 - 3) 則元 京, 中坪文明, 山田 正, 材料, **22**, 241 (1973).
 - 4) 則元 京, 山田 正, 木材誌, **23**, 99 (1977).
 - 5) Trapp, W., and L. Pungs, *Holzforsch.*, **10**, 144 (1956).
 - 6) 則元 京, 木材研究資料, No. 14, 13 (1979).
 - 7) Fröhlich, H., "*Theory of Dielectrics*", Chap. 1 (1958) Claredon Press, Oxford.