

# 熱軟化による丸竹材の整形システムの開発

寒竹慎一\*・中嶋聖充\*\*・古田裕三\*\*・中原 恵\*\*\*  
\*竹工芸・訓練支援センター・\*\*京都府立大学・\*\*\*材料科学部

## Development of the Restoration System of the Bamboo Culm Material by Thermal Softening

Shinichi KANTAKE\*, Masamitsu NAKAJIMA\*\*, Yuzo FURUTA\*\*, Megumi NAKAHARA\*\*\*

\*Bamboo Craft and Training Support Center, \*\* Kyoto Prefectural University,

\*\*\* Materials Science and Technology Division

### 要旨

丸竹材の熱軟化による整形システムを確立するため、軟化のための熱源としてマイクロ波を用いる基礎実験を行った結果、同じオープン内で、長さの異なる材（15cm, 30cm）を同時に加熱した場合、顕著な差は認められなかった。高含水率材を加熱した場合、材温が100℃に到達した時点で、気化熱により温度上昇が抑制される。高含水率におけるマイクロ波照射による含水率の減少割合は、初期含水率の影響を受けず一定である。同含水率の材を1.5, 2kW出力でそれぞれ140℃まで加熱した場合、含水率の減少割合は、ほぼ同じであることが分かった。また、飽水状態における竹材の熱軟化特性について検証を行った結果、温度上昇に伴い、竹材の相対緩和弾性率が著しく低下した。相対緩和弾性率の低下に伴い、セット率はおおよそ直線的に増加した。温度下降過程において、おおよそ60℃までは除荷時の温度低下に伴いセット率が増加する傾向が認められたが、60℃以下では温度に起因したセット率の変化は認められないことが分かった。

### 1. はじめに

造園業・建築内装業・インテリア業界では、丸竹の通直材が求められている。しかしながら、製竹業生産現場においては、かんてき・矯直しと呼ばれる丸竹整形（屈曲した部分をバーナーで加熱し竹材を軟化させ、テコを利用して整形し、整形した状態で水をかけ冷却し変形を固定する）作業を行う職人の高齢化に伴う減少や重労働で熟練の技術を必要とするため後継者が育たず深刻な状況にある。また、外国より輸入される安価な通直材により国産材のシェアが奪われつつあり、国内製竹業界は窮地に立たされている。そこで本研究では、こうした問題を解決すべく、屈曲した丸竹材を通直にする整形技術を確立し、機械化による自動化（省力化）システムを開発し、通直材の量産を目指す。

熱軟化による整形システムを確立するため、まず現状技術について調査を行った。現状技術においては、バーナーを用いた外部加熱方式を取っており、一方向加熱のため表面と内部の温度差が生じり、表皮面には焦げ跡が生じる恐れがある。焦げ跡が付いたものは商品価値が下がり、建築内装材・インテリアには使用できない等の問題点があることが分かった。このような理由から、加熱軟化時に材色変化を生じさせない方法について検討を行った。材色変化を防ぐ方法としては、電磁波を用いた

内部加熱方式が有効である。電磁波加熱の原理は、材内部に含まれる水分等の誘電体損失の大きい物質に当たると、分子摩擦により熱エネルギーに変わるというもので、物体を内部より発熱させ、材を均等に加熱できる利点がある。電磁波加熱には、高周波（周波数3MHz～300MHz）、マイクロ波（周波数300MHz～30GHz）があげられる。高周波は、電極で被加熱物を挟み密着させなければならないので、不定形で凹凸のある丸竹材を処理するには不向きである。マイクロ波については、被加熱物を照射室内に置くだけで被加熱物の形状に制約されずに加熱処理が行える。このことから、丸竹の熱軟化整形については、マイクロ波が有効であると判断し、マイクロ波照射の基礎実験を行い、長さの違いによる影響、気乾材と高含水率材の温度上昇の違い、マイクロ波照射による含水率変化について検証を行った。また、竹材軟化のメカニズムを探るため、飽水状態における竹材の熱軟化特性についても検証を行ったのでここに報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 マイクロ波照射実験

##### 2.1.1 供試竹材

供試竹材は、竹齢3～5年生の大阪府産マダケ材（胸高直径5cm前後）で、水酸化ナトリウム水溶液（0.02～

0.04%)により20~30分間煮沸処理を行い脱脂した竹材を使用した。試験片は、地上高90cm以下の部位から採取し、直径約5cm、肉厚5~8mm、繊維方向長さ15cmの節部は除いたものと繊維方向長さ30cmの中央に節部の入ったもの二種類とし、気乾材(含水率約13%)と高含水率材(含水率50~70%)を用意した。試験片は、各条件につき4本とした。

### 2.1.2 マイクロ波照射

気乾材試験片15cm(D15)、30cm(D30)を同じオープン内に入れ同時加熱を行った。マイクロ波照射装置は、新日本無線株式会社製NJE6204A(周波数2450MHz)を使用した。出力条件は、1、1.5、2kWの3条件とした。高含水率材(W15、W30)についても同様の条件とした。

### 2.1.3 温度測定

温度測定には、電磁気ノイズ耐性のある光ファイバー温度センサーを用いた。温度測定方法は、木口断面の肉厚中央部2ヶ所に直径2mm、深さ20mmの測定孔を開け、光ファイバーセンサーを挿入し、隙間充填材に放熱用シリコンを用いて測定を行った。内部温度測定装置には、NORTECH社製光ファイバー式温度計(リフレックス4)を用いて、2秒間隔で温度測定を行った。

## 2.2 含水率変化の測定

### 2.2.1 供試竹材

試験片は、2.1.1と同様の物で、繊維方向長さ30cmの中央に節部の入ったものとし、含水率約70~110%の高含水率材を用意した。試験片は各条件につき4とした。

### 2.2.2 含水率変化の測定

オープンの外上部に電子天秤(ザルトリウス株式会社製LP6200S)を設置し、オープン上部に開いた穴から垂直に垂らした糸で耐熱性のテフロンシートで包んだ試験片を宙吊りにして重量を測定した。Fig.1に示す。10秒間隔で重量を計測し含水率の変化を求めた。出力条件は、1.5、2kWの2条件とした。

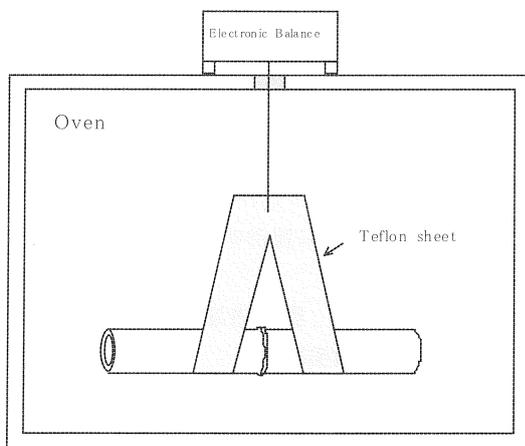


Fig.1 重量変化の測定

## 2.3 曲げ応力緩和実験

### 2.3.1 供試竹材

供試竹材は、11月に伐採された竹齢4年生の大分県産マダケ材で、水酸化ナトリウム水溶液(0.05%)により20~30分間煮沸処理を行い脱脂した竹材を使用した。試験片は、地上高340~440cmの部位から採取し、厚さ4mm×幅8mm×繊維方向長さ130mmとした。また試験片は、事前に煮沸処理により飽水状態とした。

### 2.3.2 曲げ応力緩和実験

本実験では、曲げ応力緩和測定の方法として、水中での3点中央集中荷重方式を適用した。そして、竹材の応力緩和挙動に及ぼす温度因子の影響について検討した。始めに試験片を水温20℃の水槽中にセットし、一定量のたわみ(1mm)を与えたままの状態、水温を約1℃/minの速度で90℃まで上昇させた。その際、応力値の測定を10℃間隔で行った。その後、水槽内の水を取り替えることにより20℃まで冷却し、その過程で3度応力値の測定を行った。冷却後荷重を開放し、残存たわみ量を測定した。この結果を基に、竹材の相対緩和と弾性率とセット率との関係について検討した。ここで、相対緩和と弾性率とは、実験開始時、つまり20℃での応力値を100とし、各温度での応力値を相対的に表したものである。セット率とは初期に与えたたわみ量に対する残存たわみ量の百分率である。また、温度上昇時には最高到達温度、温度下降時には除荷をする際の温度を変化させることにより、それらがセット率に及ぼす影響について検討した。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 マイクロ波照射実験

#### 3.1.1 長さの違いによる温度上昇への影響

気乾材における、1、1.5、2kWのマイクロ波照射の結果をFig.2~Fig.4に示す。長さ15cmの気乾材D15と長さ30cmの気乾材D30の内部温度上昇の相関であるが、1.5kW照射において、D15の温度上昇が若干早い傾向が見られる。各データにおいて、有意水準5%として分散分析を行った結果、1kW・2kW照射については、有意差が認められなかったが、1.5kW照射については、有意差が認められた。しかし、D15はD30に対して半分の長さであることから見て、顕著な差であるとはいえない。

次に、高含水率材(含水率50~70%)における、1、1.5、2kWのマイクロ波照射の結果をFig.5~Fig.7に示す。気乾材料と同様に顕著な差は見受けられない。各データにおいて、有意水準5%として分散分析を行った結果、有意差は認められなかった。以上のことから、気乾材・高含水率材ともに同じオープン内で、長さの異なる材を同時加熱した場合、顕著な差は現れないことが分かった。

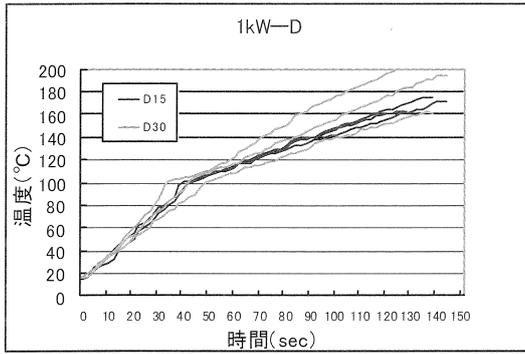


Fig. 2 1kW照射 (気乾材)

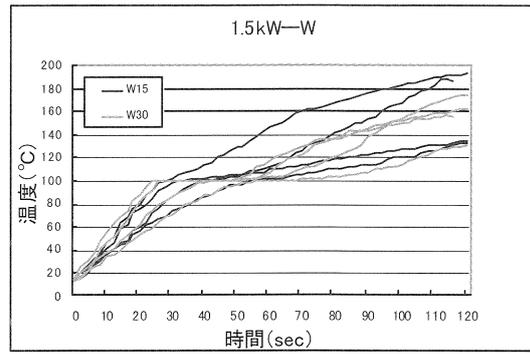


Fig. 6 1.5kW照射 (高含水率材)

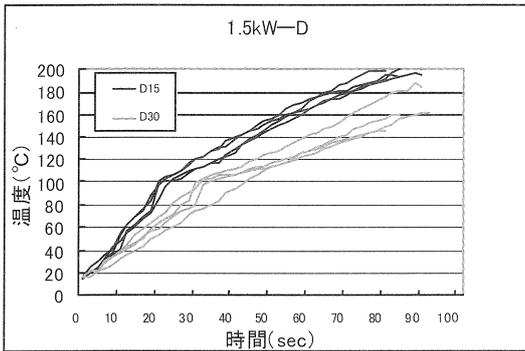


Fig. 3 1.5kW照射 (気乾材)

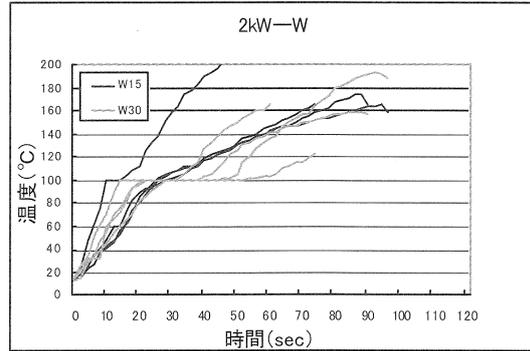


Fig. 7 2kW照射 (高含水率材)

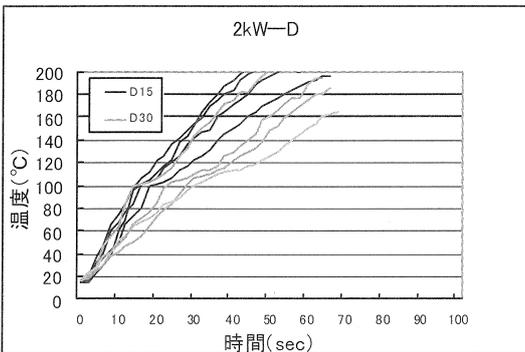


Fig. 4 2kW照射 (気乾材)

3.1.2 気乾材と高含水率材の温度上昇の違い  
 気乾材 (D30) と高含水率材 (W30) のマイクロ波照射による内部温度上昇について比較した結果をFig. 8, Fig. 9に示す. 明らかに気乾材の方が, 温度上昇が早くなっているのが分かる. 注目すべき点は, 気乾材がほぼ一直線上に温度上昇しているのに対し, 高含水率材は, 材温が100°Cに達した時点で温度上昇が抑制され, プラトー状態が現れている. これは, 材内部に含まれる水分が沸点の100°Cに達したことで, 木口より水蒸気となって蒸発し, 気化熱により温度上昇が抑制されたものと思われる.

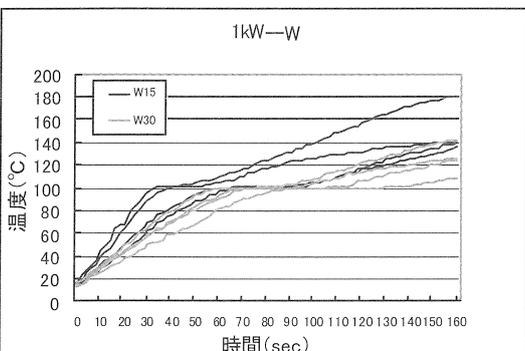


Fig. 5 1kW照射 (高含水率材)

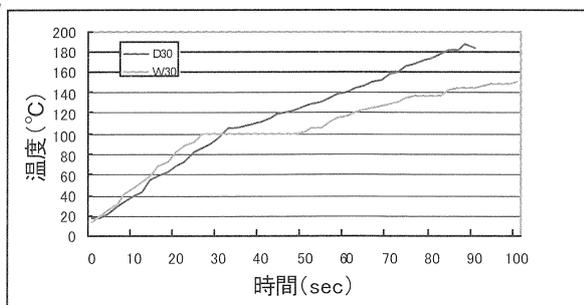


Fig. 8 気乾材と高含水率材の比較 (1.5kW)

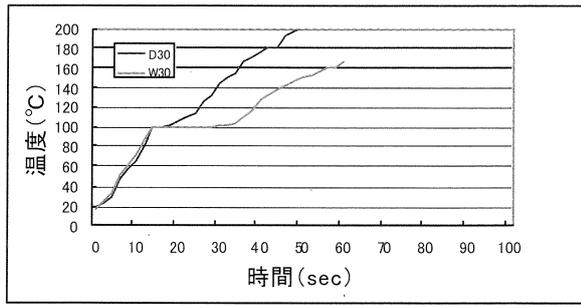


Fig. 9 気乾材と高含水率材の比較 (2kW)

### 3.2 含水率変化

#### 3.2.1 含水率変化の測定

含水率70～110%の高含水率材を用いて、マイクロ波1.5, 2kW照射による含水率変化について測定した結果をFig. 10, Fig. 11に示す. 各試験片ともに同様の含水率低下を見せるが、初期含水率のばらつきが大きいので、比較のため、初期含水率を100とした相対値で表したものをFig. 12, Fig. 13に示す. グラフが示すとおり、高含水率材におけるマイクロ波照射による含水率の減少割合は、初期含水率の差に影響を受けず一定であることが分かった.

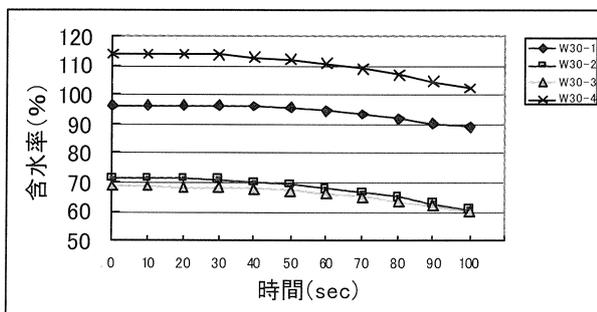


Fig. 10 含水率変化 (1.5kW)

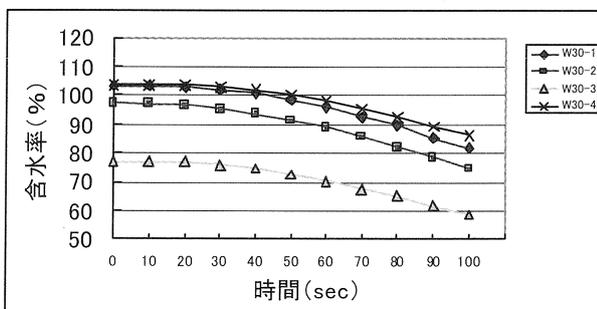


Fig. 11 含水率変化 (2kW)

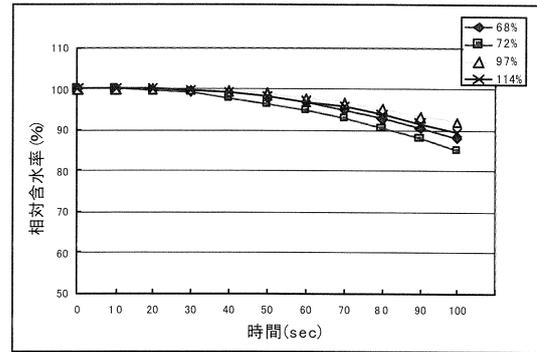


Fig. 12 相対含水率変化 (1.5kW)

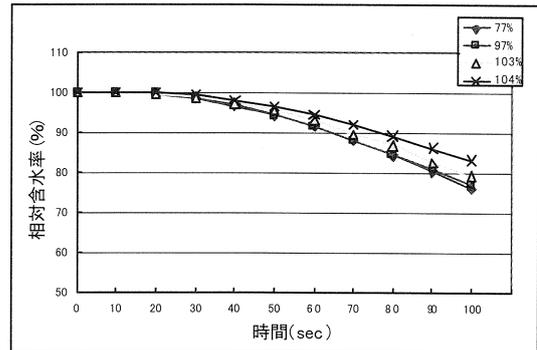


Fig. 13 相対含水率変化 (2kW)

#### 3.2.2 1.5kW, 2kW照射における含水率変化の比較

初期含水率がほぼ同等のものをピックアップして、1.5kW及び2kWにおける代表データとして比較したものをFig. 14に示す. 100秒間マイクロ波照射を行うと、1.5kWでは、含水率が約8%低下し、2kWでは、約23%低下することが分かった. 次に可塑化温度域140℃<sup>2)</sup>では、どの程度含水率が低下するのか、検証を行った. 高含水率材における1.5・2kW照射を行った結果をFig. 15, Fig. 16に示す. 1.5kWにおいては、平均約100秒間の照射で材温が140℃に到達し、2kWにおいては、平均約57秒間で材温が140℃に到達している. このことを、Fig. 14に照らし合わせると、材温140℃付近における含水率の減少は、1.5kW, 2kWともにほぼ同じ値を示している. このことから、同含水率の材を1.5kW, 2kWでそれぞれ140℃まで加熱した場合、含水率の減少は、ほぼ同じであることが推察される.

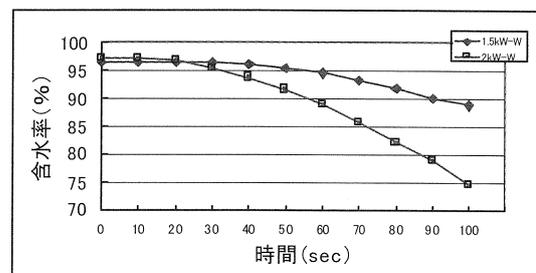


Fig. 14 含水率変化の比較 (1.5kW・2kW)

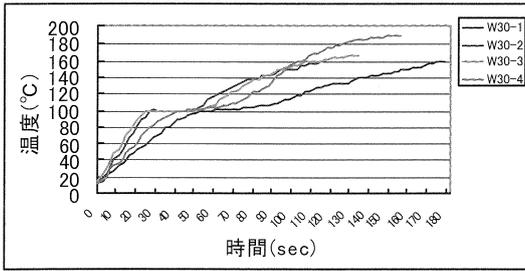


Fig. 15 高含水率材 1.5kW照射

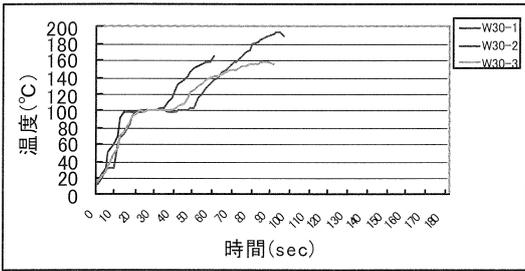


Fig. 16 高含水率材 2kW照射

### 3.3 曲げ応力緩和実験

#### 3.3.1 温度変化に伴う応力緩和とセットの関係

温度上昇・下降過程における相対緩和弾性率変化の結果をFig. 17に示す。温度上昇過程において、最高温度の90°Cに達した時点で相対緩和弾性率は、外皮側負荷時でおよそ35%、内皮側負荷時で25%まで低下している。特に60°C付近での低下が著しいことが認められた。これは、既往の研究<sup>3)</sup>より、リグニンの熱軟化によるものと推察される。温度下降過程においては、相対緩和弾性率の変化は殆ど見られなかった。冷却終了後、負荷を開放しセット量の測定を行った結果、そのセット率は外皮側負荷時でおよそ65%、内皮側負荷時で75%であった。実際の整形加工では、このセット率を考慮して変形を与えることが重要である。

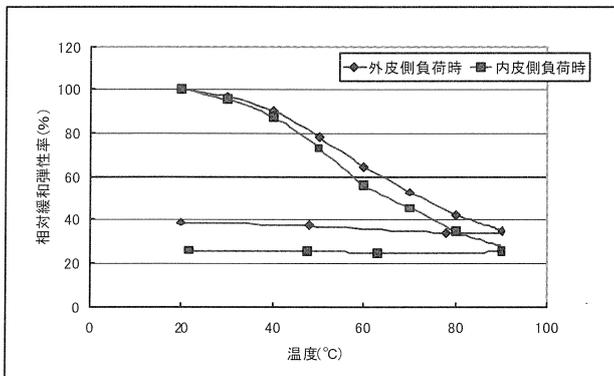


Fig. 17 温度上昇・下降過程における応力緩和挙動

#### 3.3.2 最高到達温度がセット率に及ぼす影響

最高到達温度を変化させた場合の、除荷時における相対緩和弾性率とセット率の関係をFig. 18に示す。外皮側及び内皮側負荷時ともに、最高到達温度の上昇に伴い、相対緩和弾性率は低下した。そして、相対緩和弾性率の低下に伴い、セット率がおおよそ直線的に増加する傾向が認められた。これらの結果から、竹材のセット率は、最高到達温度及び相対緩和弾性率から推測することが可能であると考えられる。

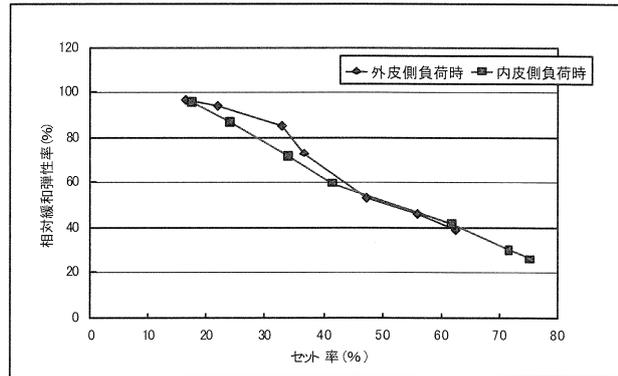


Fig. 18 相対緩和弾性率とセット率との関係

#### 3.3.3 除荷時の温度がセット率に及ぼす影響

除荷時の温度を変化させた場合の、最終的な相対緩和弾性率とセット率との関係をFig. 19に示す。除荷時の温度が60°Cから90°Cの範囲では、温度の低下に伴いセット率が増加し、その後20°Cから50°Cの範囲では、セット率の変化が見られなかった。この結果より、竹材のセットに関しては、60°Cすなわちリグニンの軟化点以下まで温度を下降させる必要があると推察される。組織構造の異なる木材についても、セットに関する冷却の重要性が報告されている<sup>4)</sup>ことから、大変興味深いデータであり、今後60°C付近での竹材の熱軟化特性について、更なる検討を行う必要がある。

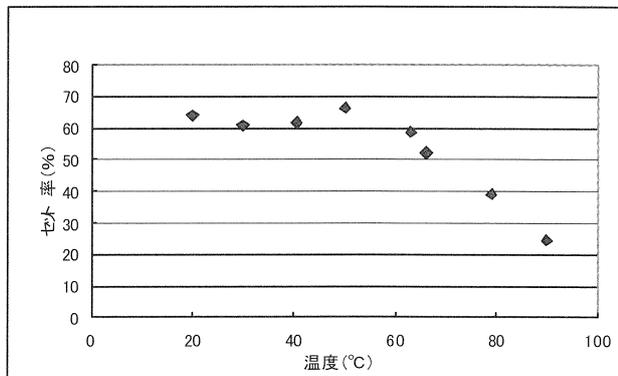


Fig. 19 除荷時の温度がセット率に及ぼす影響

#### 4. まとめ

マイクロ波照射による丸竹材加熱実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 同じオープン内で、長さの異なる材（15cm, 30cm）を同時にマイクロ波加熱した場合、温度上昇に顕著な差は認められない。
- (2) 高含水率材をマイクロ波加熱した場合、材温100℃に到達した時点で、気化熱により温度上昇が抑制される。
- (3) 高含水率材における、マイクロ波照射による含水率の減少割合は、初期含水率の影響を受けず一定である。
- (4) 同含水率の材を1.5kW, 2kWでそれぞれ140℃まで加熱した場合、含水率の減少割合は、ほぼ同じ値を示す。

竹材の熱軟化特性及びセットに関して、以下の結果を得た。

- (1) 温度上昇に伴い、竹材の相対緩和弾性率が著しく低下した。
- (2) 相対緩和弾性率の低下に伴い、セット率はおよそ直線的に増加した。
- (3) 温度下降過程において、およそ60℃までは、除荷時の温度低下に伴いセット率が増加する傾向が認められたが、60℃以下では温度に起因したセット率の変化は認められなかった。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、客員研究員として、ご指導賜りました京都府立大学の古田祐三氏に対して、ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 寒竹慎一, 小谷公人, 阿部 優: 平成11年度大分県産業科学技術センター研究報告, (2000), 143.
- 2) 森 光正: 木材学会誌, 33 (8), (1987), 630-636.
- 3) 古田祐三, 矢野浩之, 梶田熙: 木材学会誌, 41 (8), (1995), 718-721.
- 4) Ikuho Iida, Michiyasu Kudo, Jyunji Onijuka, Yutaka Ishimaru, Yuzo Furuta: "Stress relaxation of wood during the elevation and lowering processes of temperature and the set after relaxation II: consideration of the mechanism and simulation of stress relaxation behavior using a viscoelastic model", J. wood Sci. 48, (2002), 119-125.