

## 〔招待論文〕 木材工業におけるマイクロ波・高周波加熱の応用

井上 雅文<sup>1)</sup>、 山本 泰司<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 京都大学木質化学研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

<sup>2)</sup> 山本ビニター株式会社 〒543-0002 大阪府大阪市天王寺区上汐 6-3-12

E-mail: <sup>1)</sup> masafumi@kuwri.kyoto-u.ac.jp <sup>2)</sup> yamamoto@vinita.co.jp

概要：古くより木材加工にマイクロ波や高周波を使った誘電加熱が利用されている。木材工業におけるマイクロ波・高周波加熱の応用例を紹介する。

キーワード：接着、乾燥、可塑化、熱処理

### Application of dielectric heating by a microwave / high frequency in wood industry

Masafumi INOUE<sup>1)</sup>、 Yasuji YAMAMOTO<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Wood Research Institute Kyoto University Uji, Kyoto 611-0011 JAPAN

<sup>2)</sup> Yamamoto Vinita Co. Ltd. 6-3-12 Ueshio Tennoji-ku Osaka 543-0002 JAPAN

E-mail: <sup>1)</sup> masafumi@kuwri.kyoto-u.ac.jp <sup>2)</sup> yamamoto@vinita.co.jp

Abstract: Dielectric heating of a microwave and a high frequency has been used for wood processing since old days. Examples of applying a microwave / a high frequency heating in wood industry are introduced herein.

Keyword: Adhesion, Drying, Plasticization, Heat-treating

#### まえがき

マイクロ波（300 MHz～300GHz）や高周波（3MHz～300MHz）を使った誘電加熱の歴史は古く、我が国では欧米の技術が導入された昭和 20 年代初期より実用化が進められ、すでに半世紀を経た。昭和 24 年発行の「最新の高周波應用」<sup>[1]</sup>には、誘電加熱による薬品・繊維・茶・煙草などの乾燥、ゴムの加硫、プラスチックの熱成形や木竹材の接着、乾燥についての研究成果と実用例が詳細に報告されている。本著には、その当時のマイクロ波・高周波を利用した誘電加熱装置の普及状況についての調査資料（表 1）が記載されているが、合計設置台数わずか 101 台のうち 39 台（38.6%）が木竹材加工関係で、用途別では一番のシェアである。我が国の誘電加熱装置実用化の萌芽期において、木竹材関係に最も利用されていたという事実は大変興味深いものである。

昭和 30 年代に入ると、高周波ウェルダーと呼ばれる PVC シートの溶着機が急速に普及し、高周波加熱が産業界で広く使われるようになった。また、昭和 40 年代に家庭用の加熱調理機器として安価な電子レンジが開発され、昭和 50 年代に入り爆発的に普及が進み、マイクロ波加熱が一般的に認知されるようになった。その後、誘電加熱は、表 2 に示すようにプラスチック、木材、食品、セラミック、医療などの様々な分野への実用化と普及が進められ、各種産業の発展を支えてきた。現在、我が国だけでも数万台以上のマイクロ波・高周波加熱の応用装置が稼働している。ここでは、木材及び木質材料の加工分野で利用されているマイクロ波と高周波による誘電加熱、特に利用の多い高周波加熱の応用例<sup>[2]</sup>について紹介する。

表 1. 誘電加熱装置の用途別台数（昭和 23 年 6 月調査）

用途	木竹材	薬品	殺虫	繊維	ゴム	化学	その他	合計
台	39	13	10	8	5	4	22	101

表 2. マイクロ波・高周波加熱の利用分野

木材	接着
	乾燥
	可塑化
プラスチック	溶着・溶断
	成形
食品	加熱・調理
	殺菌
	解凍
医療	ガン温熱治療
	焼灼治療
繊維	乾燥
	接着
紙	乾燥
ゴム	加硫・発砲
セラミック	乾燥
その他	廃棄物処理
	プラズマ
	原子力
	殺虫・殺卵

## 2. 利用目的

木材や木質材料の製造や加工において加熱処理は欠くことのできない重要な工程である。その熱源としては、古くより蒸気、電気ヒーター、熱風などが主に使用されている。これらの加熱手段では、被加熱物は伝導・輻射・対流などによって加熱される。従って、熱伝導率が悪く、かつ被加熱物の厚みや容量の大きな木材の加熱には時間がかかり効率が悪い。マイクロ波や高周波の誘電加熱は、被加熱物そのものが発熱体となって加熱される。断面サイズの大きな木材においても

急速に均一加熱が可能であり、この点より誘電加熱に勝る熱源はないと言える。マイクロ波や高周波加熱が古くから広く木材工業で利用されてきた理由はここにある。

木材及び木質材料分野における高周波加熱の利用目的をまとめると、表 3 のように分類される。接着、乾燥、可塑化、熱処理の内、熱処理を除く三つの分野での利用の歴史は長く、前述の「最新の高周波應用」には、すでに具体的な応用例が紹介されている。現在稼働しているマイクロ波・高周波加熱応用装置の 50% 以上は接着である。接着分野は、生産性の高い実用的な装置の普及と誘電加熱に適した接着剤の開発により急速に発展した。乾燥の分野では、昭和 50 年代に普及の進んだ高周波減圧乾燥に代わり、高周波・蒸気複合乾燥が開発され、普及が進みつつある。可塑化も古くより家具分野で応用されてきた。熱処理は、新しい利用分野であり、木材及び木質材料の新しい加工技術を提案するものである。

## 3. 高周波加熱の方式

マイクロ波加熱と高周波加熱の加熱原理は同じであるが、周波数が異なるため、ハード面での加熱方法は大きく異なる。マイクロ波加熱は、金属のオープンに被加熱物を入れ、マイクロ波を照射する方式が一般的であるが、高周波加熱は、2 枚の電極板に被加熱物を挟み、ここに高周波電圧を印加して、高周波電界により加熱する。高周波加熱における電極の構成や配置は、様々なものがあり、被加熱物の種類、形状や加熱の目的によって適切なものが選定される。

表 3. 木材加工における利用目的と用途

目的	内 容	用 途
接 着	接着層を選択加熱できるので非常に効率的。生産効率が高く経済性も良い。	家具部材の幅ハギ接着、枠組接着、箱組接着、集成材接着、LVL 接着、フラッシュパネル接着など
乾 燥	短時間でかつ高品質な乾燥ができる。減圧乾燥や蒸気との複合乾燥で利用。	単板、突板の減圧乾燥 針葉樹構造材の複合乾燥
可塑化	高温加熱することで、破壊することなく曲げ、横圧縮などの塑性加工ができる。	曲げ加工、横圧縮大変形など
熱処理	急速に高温に加熱することにより、高温高圧水蒸気処理と同じ効果が発現。	圧縮木材の寸法安定化、バインダレスボードの成形

### 3.1.全体加熱方式

全体加熱方式では、2枚の平板平行電極で被加熱物を挟んだ状態で高周波を印加する。このとき被加熱物が均一なものであれば、内外部が同時に加熱され、全体がほぼ均一に加熱される。例えば単板の積層接着の場合は、図1に示すように接着層を電極板と平行に配置することで全体加熱になる。写真1は、全体加熱方式による木材の積層接着の加熱経過をサーモグラフィー撮影したものである。接着層が若干高めの温度上昇を示しているが、積層体全体が加熱されていることが分かる。

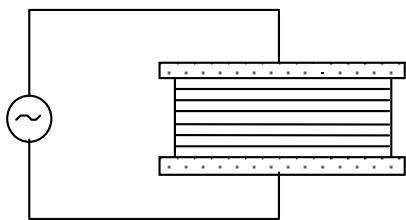


図1. 高周波全体加熱方式の構成図

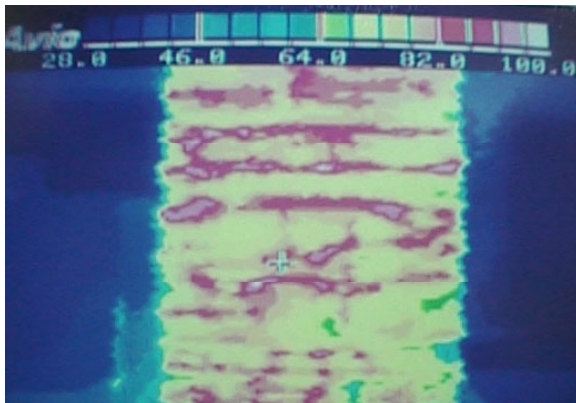


写真1. 高周波全体加熱方式による積層接着サーモグラフィー写真

試験条件

ラミナサイズ：300×105×20 mm×5ply  
樹種：米マツ，木材含水率：8%  
接着剤：水性高分子イソシアネート樹脂系  
高周波出力：3KW

全体加熱方式は被加熱物全体を均一に加熱するための方式であることから、一般的には電極板からの放熱により被加熱物の表層部の温度が低くなることを防ぐため、電極板に電熱ヒーターやスチームなどの熱源を併用することが多い。

### 3.2.選択加熱方式

選択加熱方式は全体加熱と同じように平行平板電極で被加熱物を挟んだ状態で高周波を印加するが、図2に示すように

体と接着層は電極板と垂直になるように配置する。写真2は選択加熱方式による木材接着の経過をサーモグラフィー撮影したものであるが、接着層に高周波電界が強く集中するので、木質部をあまり加熱することなく、接着層のみを選択的に加熱していることが分かる。選択加熱方式は、木材接着において極めて効果的な加熱方式であることから、最も広く利用されている。

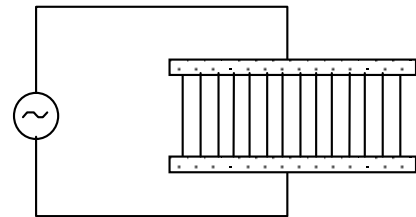


図2. 高周波選択加熱方式の構成図

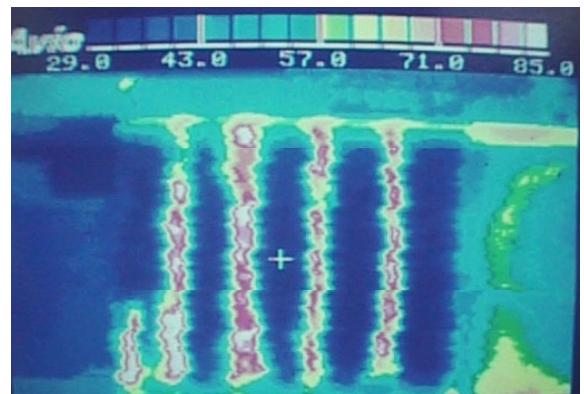


写真2. 高周波選択加熱方式による木材接着サーモグラフィー写真

試験条件

ラミナサイズ：300×105×20 mm×5ply  
樹種：米マツ，木材含水率：8%  
接着剤：水性高分子イソシアネート樹脂系  
高周波出力：1KW

### 3.3.部分加熱方式

電極の形状や大きさを変え、組み合わせることにより、加熱したい部分に高周波電界を集中させて、部分加熱できる。電極の組み合わせを並列に複数設けることで、数カ所のスポット的な同時加熱に利用されている。図3にその構成図を示す。



図3. 高周波部分加熱方式の構成図

### 3.4.表面加熱方式

グリッド電極と呼ばれる導体棒の電極を被加熱物に沿って格子状に配置し、高周波を印加すると、グリッド電極間に強い電界が生じ、被加熱物の表面層を効率よく加熱できる。図4にその構成図を示す。写真4は表面材接着の加熱経過をサーモグラフィー撮影したものである。電極と接している表面層のみが加熱されていることが分かる。

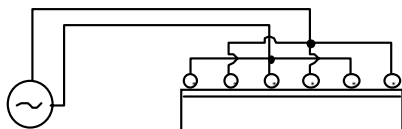


図4. 高周波表面加熱方式の構成図

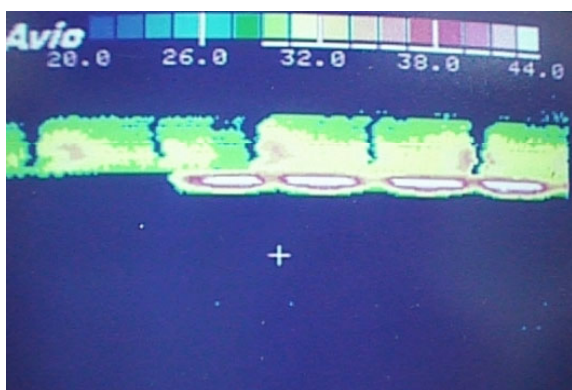


写真3. 高周波表面加熱方式による表面接着サーモグラフィー写真

試験条件  
 ラミナサイズ：400×200×20 mm (心材,MDF)  
 400×200×3 mm (面材,合板)  
 接着剤：酢酸ビニルエマルジョン  
 高周波出力：1.5KW

### 3.5.多層加熱方式

図5に示すように、バッチ処理における1回の処理量を多くし容積効率を上げるために、被加熱物を立体的に積み上げ、電極板を複数組多層に配置して、高周波を印加する。減圧や蒸気と組み合わせられ、木材乾燥に利用されている。

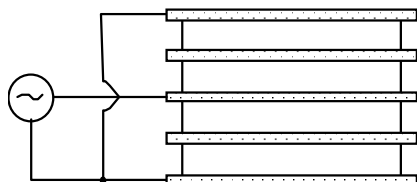


図5. 高周波部分加熱方式の構成図

## 4.接着

高周波接着加工は全体加熱方式によるLVL接着、選択加熱方式による幅ハギ、集成材接着、表面加熱方式によるフラッシュパネル接着など数多くの家具、建材の接着加工に応用されてきた。高周波応用技術で接着加工が最も利用されている理由は、木材の熱伝導率が極めて低く、一般的な加熱では接着効率が悪いのに対し、接着剤の誘電体損失が高いため、接着剤のみを効率的に加熱硬化させることが可能であり、大量生産化が容易であったためである。

### 4.1.高周波集成材加工

集成材(写真4)は、ひき板または小角材を木目方向に平行にして、厚さ、幅、長さ方向に集成接着したものである。集成材はその用途によって、建物の内部造作などの非耐力部材に用いられる造作用と、建物の骨組みなど耐力部材に用いられる構造用の2種類に大きく分けられる。構造用集成材には、強度性能を求めめるため熱硬化型のレゾルシノール樹脂を主剤とする接着剤が一般的に使用される。これをコールドプレスによる冷圧で行うと最低一昼夜プレス加圧する必要がある。また熱板温度100℃のホットプレスを用いた場合でも数十分、大きな材料では数時間を要する。これに対し、高周波選択加熱を使うことで、2分～5分程度の短時間に安定した接着が可能となり、非常に効率的である。高周波集成材プレスの普及は、集成材の品質の安定と生産能力の向上に大きく貢献している。



写真4. 集成材

## 5.乾燥

木材を加工し利用するためには、寸法の安定化のためにまず乾燥する必要がある。家具などの部材や住宅の床や壁の内装材のみならず、近年では柱材などの構造材においても乾燥材が一般的になりつつある。木材乾燥は、古くより蒸気式

熱気乾燥が主流であるが、単板などの乾燥には適するものの、断面サイズが大きくなると時間がかかる上に、割れや狂いなどの品質劣化が大きい。そこで短時間の高品質な乾燥を目的とし、高周波加熱を利用した乾燥方法が実用化され、広く利用されている。

### 5.1.高周波減圧乾燥

減圧缶体に木材を積み込み、真空度 40~100 トールの減圧下で、高周波加熱を行うことで短時間の乾燥ができる。沸点を下げることで、材温が 40~60℃程度の低温で乾燥することができるので、変色、変形や割れなどの少ない高品質乾燥が可能である。広葉樹の装飾用突板の乾燥に利用されている。

### 5.2.高周波・蒸気複合乾燥

複合乾燥は、一般的な蒸気式熱気乾燥に高周波加熱を併用し、複合化したものである。70℃~90℃程度の中温度の熱気乾燥を進めながら、水分の多い材心部を選択的に高周波加熱し 100℃程度に昇温する。外部の熱気温度が 70~90℃のため木材内に温度勾配が発生し、内外面に大きな圧力差が生じ、材心部水分が外に向かって積極的に押し出される。(図 6) この結果、乾燥の迅速化と水分傾斜が解消され均一な乾燥が実現される。難乾燥材であるスギ心持柱材を、通常の蒸気式熱気乾燥の 1/3 程度の短時間で、水分傾斜が少なくかつ変色や割れ狂いの少ない高品質の乾燥が行える。特に平角などの大断面材に対しては有効であり、これからの更なる普及が期待される。

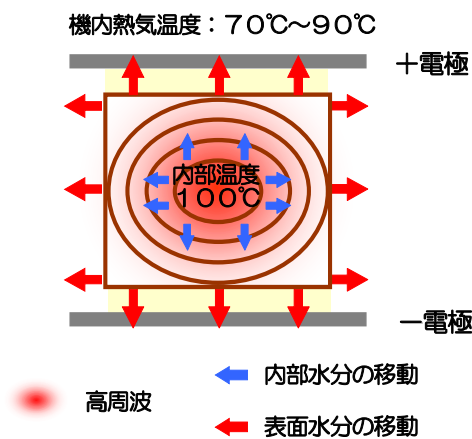


図 6. 複合乾燥のメカニズム

## 6.可塑化

木材の可塑化技術として古くは 1830 年にトーネットが薄

板を使って現在の積層曲げ成型合板のような技術を発明し、1850 年ごろには無垢の木材に熱と水蒸気を与えて柔らかくしてから鉄製の型（モールド）にはめ込み、万力で固定して乾燥させるという加工法を発明し、現在の曲げ成型技術の基礎を創ったことは広く知られている。この発明以降は各国で実用化の検討が行われ、木材の可塑化処理として蒸気や煮沸などの熱源の代わりにマイクロ波加熱や高周波加熱の応用が研究された。現在では家具の足、椅子の背もたれ、楽器の彎曲部、傘の手元、高級車のハンドルなどの生産にこの技術が応用されている。

木材の塑性加工は曲げ加工だけでなく、圧縮加工も古くから研究され、20 世紀前半にはブナやカバ材を高温圧縮した圧縮木材が実用化されている。近年、我が国では国産材や環境問題が引き金となり、スギ材などの軟質材の利用拡大を目的として、強度性能・加工性能・意匠性を向上させる圧密化技術の研究が盛んに行なわれるようになった。大断面木材の圧密化においては、水蒸気や煮沸などの処理に代わる可塑化処理として高周波加熱の利用が進められている。

### 6.1 高周波圧縮木材製造

大断面圧縮木材の製造において加熱による可塑化処理に水蒸気や煮沸などの熱源を利用すると長時間処理になる。工業的に大量生産するためには、高周波加熱による木材の短時間加熱が非常に効果的であり、処理後に乾燥などの工程を必要としないためコストダウンできる。さらに、原料に薄い板材を利用して積層接着を同時処理できることから原料コストも削減でき、現実的な製造方法と言える。写真 5 は、高周波圧縮木材連続製造システムにより製造したスギの積層圧縮木材を手すりに加工したものである。

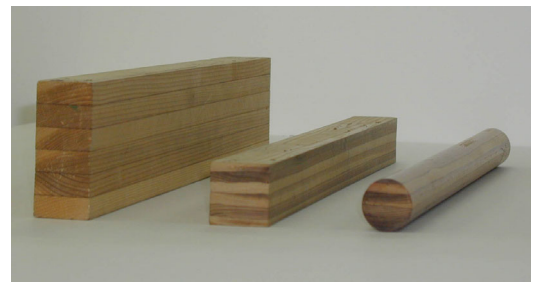


写真 5. 積層圧縮木材（手すり）

各研究機関により、変形や変形の固定化に関する基礎的な原理が把握され、実用的な製造システムが開発されたことにより、今後は圧縮木材の性能を最大限に生かした商品開発が最も重要になってくる。現在のところ用途としては、家具部材、フローリング、木製サッシ、鴨居、敷居、玄関框、木製デッキ、手すりなどが検討され、実用化に向けての努力が精力的に続けられている。加工コストが掛かる上に、圧縮により材容積が減少するため、 $m^3$ 当りの単価はどうしても割高になってしまう。このコストアップを吸収してあまりある魅力ある商品を早期に開発し、国産スギ材の利用拡大の一助となることが期待される。

## 7.熱処理

昨今の住宅環境問題から、揮発性化学物質の使用が制限されている。そのため新建材などのエンジニアードウッドの開発においても、薬品や樹脂を使用せず処理する方法が研究されている。その一例として、高周波加熱による圧縮木材の永久固定化処理と合成接着剤や化学物質などのバインダーを一切使用しないバイダレスボードやバイオマスボードと呼ばれるボードを紹介する。

### 7.1.圧縮木材の寸法安定化

木材を圧縮変形し拘束した状態で、高周波加熱を急激に行なうことで、木材中の水分が蒸発するまでに、木材内部を固定化処理可能な  $180\sim 200^{\circ}\text{C}$  に昇温させることが可能となる。この時木材内部は、高温・高圧・高含水率状態に保たれるため高温高圧水蒸気処理と同様の原理で、短時間に変形が永久固定化される。<sup>[1]</sup>水蒸気処理と比べ、耐圧容器が不要で操作、管理が簡便である。また、水蒸気処理では、木材中に外部から水蒸気を供給するため、被処理材の寸法が制限されるが、高周波加熱処理では大断面材も処理可能である。

### 7.2.バイダレスボードの製造

間伐材や代採木などの利用価値の低い木質材、建築廃材や選定枝葉などの木質系廃棄物、ケナフなどの非木材植物資源などを粉碎してチップ状にしたものを、接着剤を一切使用しないでボード成型する技術が開発され、雑草抑制材、土留め板や型枠材として利用され始めている。粉碎されたチップ材

に前処理として高温高圧水蒸気処理を行ない、主にヘミセロースを加水分解してこれを天然の高分子接着材化させる。その後、別工程で高周波加熱により  $180\sim 190^{\circ}\text{C}$  まで加熱し、圧縮成形することにより、チップ材同士を自己接着させボード化するものである。強度などの性能が低いため、使用用途が限定されるが、時代のキーワードである環境、安全、リサイクルを背景に今後の進展が期待される。



写真6. バインダレスボード

## 8.むすび

木材工業にマイクロ波や高周波加熱が利用されてから、すでに半世紀以上が経過した。近年、地球環境の保全や、国産材の有効利用に対する認識の高まりの中で、木材や木材利用に対する考え方も大きく変化しようとしている。木材からいかに効率良く、環境に適応し、利用価値の高い木質材料を生産、加工するかということがより強く求められるようになり、木材を急速に均一に加熱できるマイクロ波や高周波加熱への期待が更に大きくなるものと考えられる。

## 文献

- [1] 山本勇編，“最新の高周波応用”，(株)CQ 出版社，1949
- [2] 山本泰司，“木材工業における最近の高周波応用”，木材工業，Vol.57，No.9，P380-385，2002
- [3] 井上雅文，児玉順一，山本泰司，則元 京，“高周波誘電加熱による圧縮木材の寸法安定化”，木材学会誌，Vol.44，No.6，P410-416，1998