

# 木材のマイクロ波乾燥（1）

吉田 弥明

## はじめに

木材の乾燥は、まず表面の含有水分が蒸発し、その結果生じる表面と内部との水分傾斜によって水分の拡散移動がおこり、乾燥が進行する。木材では、ふつう加熱空気の伝熱により、表面の水分を蒸発させ、水分傾斜をおこさせている。この熱気乾燥では、加熱空気は材に熱を伝達させ水分を蒸発させると同時に、その水蒸気を除去するというはたらきもしている。この場合、表面からの蒸発速度と内部の拡散速度のバランスをとることが必要で、ここにいろいろな技術上の問題がおこってくる。殊に比較的厚い板材や角材の乾燥の場合には、このバランスをとることが難しく、応力が生じて材の損傷をきたす。木材はいったん均一に加熱され適切な温湿度条件が設定されれば、速やかに損傷なく乾燥させることが可能である。このために乾燥室内を高湿・高温にし初期の表面からの拡散を抑制すると同時に、熱伝達率を増大させる方法がとられている。しかし、この方法は木材自体の熱伝導が悪いこともあって、乾燥速度が小さく、かならずしも経済的に優れているとはいえない。

一方、高周波電界の中に木材をおけば発熱することはよく知られており、わが国においても山本<sup>1)</sup>らによって木材工業への利用が総括されている。現在でも、特殊なものの乾燥や、エッジグレーイング等に利用されている。高周波加熱は交番電界による分極の結果生じる分子摩擦によって発熱するために、木材の表面からの距離や熱伝導とは無関係に瞬間的に加熱することができる。したがって高周波加熱の場合は内部を直接加熱することにより、木材内部の蒸気圧を高め水分の外への移行をうながし乾燥が進行する。このため高湿の環境条件下であっても乾燥速度が低下するようなこともなく、応力を発生させるような水分傾斜も生じないことから、比較的厚い板材等の乾燥においても、損

傷のない、しかも急速な乾燥が可能である。しかしながら、過大な高周波電力を供給した場合には、内部の水分が急激に熱せられ、内部の蒸気圧の急上昇によって爆発的に破壊するような場合も生じる。

従来、このような高周波加熱に用いられた周波数は2~40MHzで、7MHz付近、および13.56MHzが最もよく使われているようである<sup>2)</sup>。木材の加熱・乾燥にあたっては、木材各部の温度を均等に上昇させ、含水率を均等に減少させるためには、高周波電界の強さが均等に木材に作用するようにしなければならない。しかし、非常にうすい板、高含水率の物質および損失特性の少ない木材のような物質では、この2~40MHzの周波数の範囲での加熱は技術上かなりの困難をともない、十分に加熱することができず、利用上多くの制約を受け特殊な用途にのみ用いられてきた。

このような欠点なしに、良好な加熱をおこなうために、より高い周波数を利用することが考えられ、マイクロ波（極超短波）と呼ばれる第1表<sup>3)</sup>に示すような周波数帯の適用が検討されるようになった。マイクロ

第1表 工業用高周波の例

周波数 (MHz)	波長	呼称
13.56 ± 0.05%	約22m	中短波
27.12 ± 0.6%	約11m	短波
4.68 ± 0.05%	約7m	超短波
915 ± 25	32.8cm	極超短波 マイクロ波
2450 ± 50	12.2cm	
5800 ± 75	5.2cm	

波の技術は第2次大戦中、軍用レーダーとして急激な発達をとり、戦後その技術がまず食品工業に利用され、レーダーレンジとして現在の電子レンジが市販された。現在マイクロ波の高出力発振管（ジェネレータ）の開発により、その応用分野は宇宙通信から食料品工業、調理、ウレタンの硬化、磁性インクおよびエマ

ルジオンフィルムの乾燥，薬品工業等数多くの分野に広がっている。

木材工業の分野にあつては，単板および板材の乾燥，単板の含水率の均一化等さまざまな検討がなされている。本文は超短波加熱の基礎知識と木材工業の分野における利用の可能性について，今後の方向をも含めてとりまとめたものである。まずその1として基礎事項についてしるし，次回に木材工業の分野における応用についてのべる。

## 1. マイクロ波加熱の基礎

### 1.1 マイクロ波

マイクロ波については第1表にも示したが，これについてははっきりした定義がないが，波長1m以下の電波（電磁波），すなわち周波数300MHz以上のものについていっているようである。わが国では，工業用，科学用，医療用電波として次の6種の電波が規定されている。

13.56MHz $\pm$ 0.05%	27.12MHz $\pm$ 0.6%
40.68MHz $\pm$ 0.05%	2450 $\pm$ 50MHz
5800 $\pm$ 75MHz	22,125 $\pm$ 125MHz

最初の3周波数は短波の領域でラジオヒーターとして従来の高周波加熱に用いられてきたものである。残余の3電波がマイクロ波領域に入るもので，このうちわが国では2450 $\pm$ 50MHzの電磁波が，食品加熱や医療用として用いられている。欧米においてはマイクロ波領域でもう一つの915 $\pm$ 25MHzも許可されている。この915 $\pm$ 25MHzの電磁波は2450 $\pm$ 50MHzのものに比べて大型の加熱に適しており，大規模な工業加熱装置に用いられるものと考えられる。

### 1.2 加熱原理

金属や電解溶液のようにその中に自由に移動できる多量の荷電粒子をもったものの加熱は，ある電界強度を受けた時に荷電粒子の流れによって生じる摩擦によって生じる。この関係はオームの法則として，われわれがよく知っていることである。

一方荷電粒子をほとんどもたない絶縁体，あるいはこれに近い木材のような物質では上に述べたような発

熱機構はとることができない。しかしこれらの多くの物質は，分子としてみると電気的に一様ではなく，いわゆる正の部分と負の部分をもった永久双極子構造をもっている。このような双極子に外部電界が存在しない場合は，分子は電気的に自由な状態にあり，熱運動によって1つ1つ任意の方向を向き分極しておらず，マクロ的な見方をすると電気的に中性である。しかし，いったん電界の中におかれると正負の部分に分極して分子は回転することになる。この分子の回転の時に起こる摩擦によって熱が発生する。この回転しようとする力は電界の強度が強い程大きく，発熱も大となる。しかし，電界が変化しなければ発熱は印加の瞬間だけにとどまってしまう。

したがって，直流電界では連続して発熱させることはできず，電界の向きが徐々に逆転するような交番電界すなわち高周波電界によらなければ発熱は持続しない。この場合，単位体積，単位時間あたりの発熱量は誘電体の大きさ，形状には無関係に電界強度，および電界方向の逆転数すなわち周波数に比例するであろうことは容易に理解できる。実際には，周波数が高くなると双極子の回転運動に対し抵抗（摩擦）が働き，そのために分子の転位は電界の変位に追従できなくなるという誘電体損の理論により，発熱に置換されるエネルギーは，次式のようになる。<sup>10)</sup>

$$W = 2 \pi f E^2 \epsilon_r \tan \delta (W/cm^3) \dots\dots\dots(1)$$

f : 周波数 (Hz) , E : 電界強度 (V/cm) ,  $\epsilon_r$  : 誘電率 ,  $\tan \delta$  : 損失角 ,  $\epsilon_r \tan \delta$  : 誘電体損

(1)式によると，発熱量はf, E, および  $\tan \delta$  の増大にかかっている。しかしE, およびfはそれぞれ技術上の問題がある。 $\tan \delta$  は材料の性質によるものであって，その材料の加熱特性を知る上で十分検討されなければならない。

### 1.3 浸透の深さ

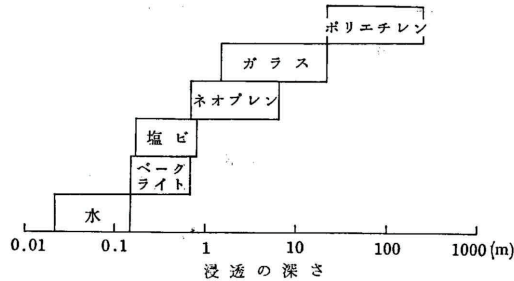
物体にマイクロ波が照射されると一部は反射されるが，その大部分は吸収されて熱エネルギーに変換される。この時マイクロ波の電界強度は波が進むにつれて指数関数的に減衰していく。したがって，このマイクロ波がある距離をすすめば電界強度は1/eに減衰す

る。この距離を浸透深さとしている。この時電界強度は  $1/e$  になるので、(1)式により、エネルギー密度は  $(1/e)^2 = 0.136$  になるので、実質的に電波はこの点でほとんど吸収されつくしていると考えて差し支えない。

浸透の深さは、マイクロ波をよく吸収する物質、すなわち  $\tan \delta$  (誘電体損)の大きい物質ほど減衰率が大きく、したがって浅くなり、次式が成立する<sup>4)</sup>。

$$\alpha = \frac{1.5 \times 10^{10}}{\pi f \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta} \text{ (cm)} \dots \dots \dots (2)$$

周波数2450MHzでの代表的な物質の浸透深さを第1図<sup>11)</sup>に示すが、木材については含水率により大きく変動し、これについては後述する。この図をみると可視光線 ( $f = 10^9 \text{MHz}$ ) では透明な水が、マイクロ波領



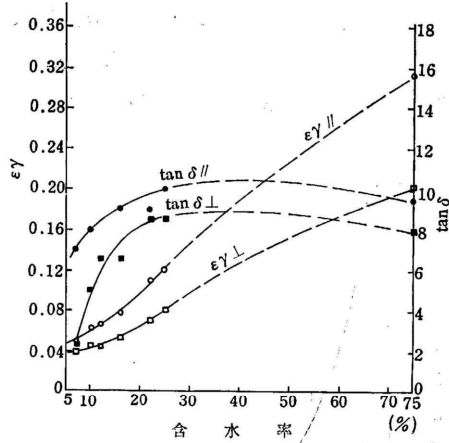
第1図 各種物質の浸透深さ (f = 2450MHz)

域では最も透過しにくい物質となる。しかし水温が上昇すれば浸透深さは大きくなり、100 で約14cmとなる

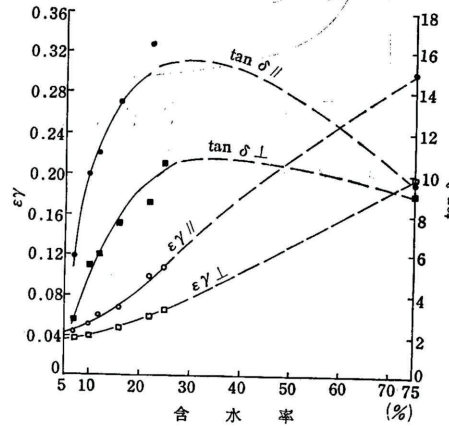
1.4 木材の誘電的性質

(1)式からも判るように、木材の誘電的性質を知ることができれば、ある程度の乾燥特性を予想することが可能である。従来比較的低い周波数領域における木質物に関する研究は多々なされているが、マイクロ波領域における研究は少なく、A. R. V. Hippel<sup>12)</sup>, W. L. JamesとD. W. Hamill<sup>13)</sup>, およびW. A. G. Voss<sup>14)</sup>の報告があるだけである。そのうち、入取できたW. L. JamesおよびD. W. Hamillの報告から、マイクロ波領域における木材の誘電的性質について述べる。

彼らは含水率6~30%のダグラスファーについて、周波数1000, 3000, および8530MHzのマイクロ波によって、 $\epsilon_r$  および  $\tan \delta$  を測定し、第2, 3図に示すような結果を得ている。これらの結果から含水率との関係をみると図でもわかるように  $\epsilon_r$  と  $\tan \delta$  と



第2図 ダグラスファーの  $\epsilon_r$  と  $\tan \delta$  (f = 1,000MHz)



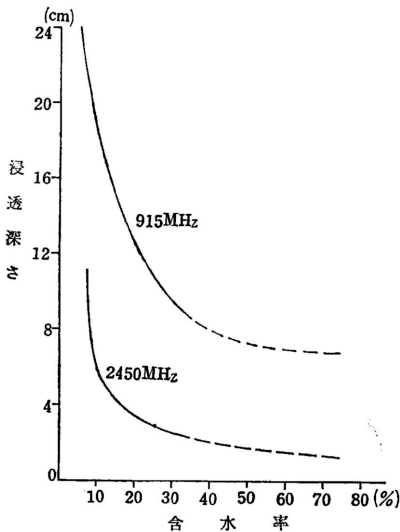
第3図 ダグラスファーの  $\epsilon_r$  と  $\tan \delta$  (f = 3,000MHz)

に電界方向が繊維方向と一の場合が直角の場合より大きい。  $\epsilon_r$  は、ほぼ繊維飽和点で一寸落ち込みを見せながら増大していく。  $\tan \delta$  は繊維飽和点付近にピークを持つ凸形の曲線を描き、繊維飽和点以下で急速に低下し、さらに6~8%の含水率になると、立上りが急になり、マイクロ波による含水率の平均化の可能

性を示唆している点で注目される。

さらに、R. Helmut<sup>5)</sup>はW. L. JamesおよびD.

W. Hamillのデータからの修正値によって、先に述べた電界強度が1/eになる浸透深さを、915MHzおよび2450MHzのマイクロ波について(2)式により算出し、第4図に示すような結果を得ている。これによると915MHzの波は2450MHzの波より木材深部まで浸透することができ、含水率が減少すれば、また浸透深さは増大する。したがって、木材含水率が高くなれ



第4図 マイクロ波の浸透深さの計算値 (ダグラスファー)

ば、吸収エネルギーが大きくなり、単位体積あたりの発熱に置換されるエネルギーは大きくなる。

915MHzのマイクロ波は、深部まで浸透し、エネルギーの分散がよいという利点があるが、波長が長いために、2450MHzのものより導波管やオープンの断面を大きくする必要があり、大型の乾燥装置が入りとなる。木材の温度が誘電特性に与える影響については余り知られていないようであるが、報告<sup>14)</sup>によると、ダグラスファーについておこなわれた試験では、温度の上昇にともない  $\tan \delta$  は増加するようであるが、非常に少なく浸透深さはほとんど変わらないようである。

### 1.5 加熱・乾燥装置

加熱・乾燥に用いられるマイクロ波装置には、被加熱・乾燥物に応じて、各種の方式のものがあるが、一般的には次に示すような主要部から成っている。

#### (1) 電力供給装置

発振管(ジェネレーター)が必要とする電圧を供給する部分で、数千Vの印加電圧を要する。付属設備としてトランスによる出力調整機構を兼ね備えている。

#### (2) 発振管

主としてマグネトロンと呼ばれる発振管が加熱用に用いられているが、この他にクライストロン、更に大容量のアンプリトロンがある。わが国では、2450MHzの周波数しか利用されておらず、第2表<sup>11)</sup>に示すような種類のマグネトロンが発売されている。これからも判るように2450MHzのマグネトロンの出力は最大5

第2表 マイクロ波加熱用市販マグネトロン

管名	出力(W)	メーカー
2M75	200	新日本無線
M4542A	200	東芝
2M65	800	新日本無線, 東芝
2M66	800	新日本無線, 東芝
2M52	800	新日本無線, 東芝, 日本電気
2M21	1000	東芝
2N89	1400	新日本無線, 東芝
2M61	1400	東芝
M4514B	2500	東芝
2M60A	5000	東芝

KWにしか及ばない。しかし、先に述べた915MHzの周波数では、50KWまで得られる。このマグネトロンの効率は78~86%に<sup>4,5)</sup>達する。

マイクロ波出力管の価格について、W. C. Brown<sup>15)</sup>らは1964年段階で、次のように言っている。発振管の製造が本格的な生産ラインにのった場合、価格は周波数範囲1,000~10,000MHz, 1KWオーダーの発振管でKWあたり110弗(39,600円), 100KWオーダーの発振管では同じく20弗(7,200円), 1,000KWオーダーの発振管では同じく7弗(2,520円)と予想している。これが、そのままわが国にあてはまるとは考えられないが、将来、100KWオーダーの発振管が使われるようになるとすれば、少なくともKWあたり現在の1/5のコストになる。

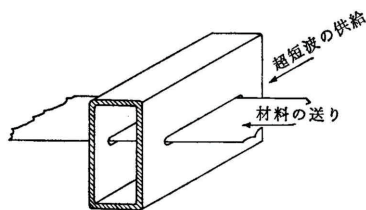
#### (3) 導波管

発振管と加熱・乾燥空間部を連結するもので、これによってマイクロ波が伝搬される。この導波管が同時に加熱・乾燥空間として働く場合が多い。

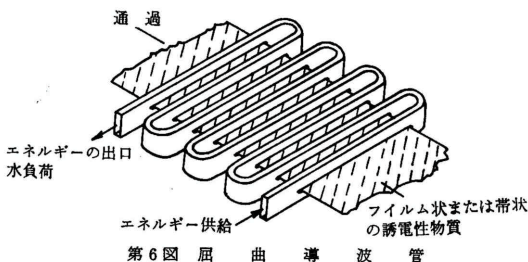
#### (4) 加熱・乾燥部

マイクロ波による加熱・乾燥は前項からも示唆されるように、伝搬進行中の電界の中、および定まった方形空間の定常波の電界中との2つの方式がある。

第1の方法は、導波管を兼ねる空間の中をマイクロ波が進行し、その中に被加熱物をおけばマイクロ波を吸収して加熱される。基本的には第5図に示すように非常に簡単な装置であり、比較的薄い帯状のものや板状のものに適している。実際には効率をよくし、完全にマイクロ波を吸収させるために第6図のような屈曲



第5図 長方形導波管の切断面



第6図 屈曲導波管

導波管方式またはこれらの多重組合せ方式が用いられる。

しかし、この導波管の形状は周波数によって決まった寸法をとり、その時管内の最大エネルギー密度は高さ1/2の点、中央線に沿って発生する。また、スリット巾は電波の漏洩がない限り大きくできるが、これは

波長に左右され、それ程大きくできない(数cmのオーダーである)。

第1の屈曲導波管方式にはスリット巾の制限があり、被加熱物の形状に制限がある。このような場合には、ステンレス等で密閉した方形空間すなわちオープンが用いられる。現在、食品加熱に用いられている電子レンジはこの型で、すでにわが国でも20,000台近くが使用されているものと思われる。

マイクロ波は導波管を通じてこのオープン内に入り、オープン形状により共振して、定常的なマイクロ波電界を生じる。その結果エネルギー密度に濃淡を生じ、加熱のバラツキを生じる、これを防ぐために、ステラファンと呼ばれる金属の回転翼によってこの波を乱し均一化させるか、または誘電質のものを内部で動かして乱反射させる方法がとられている。

#### (5) ダミー(空だき安全装置)

マイクロ波装置を空転させた時のマイクロ波、または運転中一部吸収されないマイクロ波が、マグネトロンの方に逆反射して損傷する場合も生じるので、これを防ぐためにダミーを用いる。多くの場合は水が用いられる。

#### (6) コンベアおよび通風装置

コンベア装置等で電界にさらされるものについては、マイクロ波を吸収しない非金属材料で作らなければならない。

加熱・乾燥に際し、発生する水蒸気は取り除く必要がある。オープン等において壁面に水蒸気が結露し、このために効率の低下も生じると考えられる。この防止のためには速やかに発生した水蒸気を逸散させるような工夫がなされなければならない。一般には通風ファンが具備されているが加熱空気等との組合せを考えれば、より一層の効果が期待される。

(文献は次号でまとめて掲載します)

- 試験部 合板試験科 -

(原稿受理 46.12.14)