

木材のマイクロ波乾燥（2）

吉田 弥明

2. 木材工業への応用

マイクロ波の木材への応用には乾燥への応用の他に、含水率計への応用⁶⁾もあるが、ここでは乾燥への応用について述べる。この場合、マイクロ波による木材の急速乾燥と前号に述べたような木材の誘電特性を生かした含水率の平均化に利用する方法とがある。米国においては出力50kW規模の実用装置の単板乾燥への利用が報告されているが、いまだ実用化試験の段階にあると考えた方がよく、これらの試験報告に基づいてマイクロ波利用の問題点、実用性等について述べる。

2.1 挽板の乾燥

マイクロ波をどのような形にしる乾燥に用いる場合効率・経済性からはほとんどの場合実用装置としては、熱気乾燥との併用方式が考えられており、H. レッシュ⁵⁾ W. R. マクアリスター⁷⁾らもこの方式による実用化のための一連の乾燥試験を行なっている。

レッシュはトンネル状アプリケーションを用い、比較的低温・低風速（60 , 0.15m/sec）の熱気との併用、W. R. マクアリスターらは屈曲導波式のアプリケーションを用い、高温・高速（最高143 , 2m/sec）の熱気との併用により、最高25kWのマイクロ波（915 MHz）を間欠照射し、25mm厚の針葉樹（ダグラスファー、パンドローサパイン）を乾燥している。

第3表にマクアリスターらの試験の条件と結果を示すが、これから熱気式乾燥との比較、マイクロ波の照射間隔と時間、照射出力等と乾燥速度、仕上り含水率の分布、乾燥欠点の発生等についての知見が得られている。

すなわち、挽板の熱気併用マイクロ波乾燥の場合、初期含水率約150%から8~12%の適正含水率への乾燥はほぼ2時間で可能である。しかし条件によっては欠点が生じたり、一部の心材にみられるように透過性

が悪く乾燥性が悪いものが認められる。実用的には25mm厚のパンドローサパイン挽板の場合、乾燥時間は3時間あれば欠点のない良好な乾燥が可能であり、これを従来の乾燥室による乾燥と比べると1/20程度の時間になる。マイクロ波出力を増大すれば、それにともないこれ以上の乾燥速度も得られるが、同時に内部温度も急上昇するようになり、内部の水蒸気圧が急騰し割れの原因となるので出力の増大には限界がある。

仕上り含水率はマイクロ波を用いると、内部が低く外側部が高いという熱気式の場合とはまったく逆の現象を示している。したがって乾燥にともなう応力の悪影響はほとんど考える必要はなく、むしろ先に述べたように水分の急速な蒸気化にともなう内部割れの発生の方が大きな問題である。

マイクロ波乾燥にともなう今一つの欠点は焦げである。これは随に近いような心材の混入した材を乾燥するような場合に生じる。すなわち、心材は透過性が悪いために過度の照射が必要となり材温の過熱を生じ、特に仕上り含水率を低くとった時に顕著に生じる。

以上のように、マイクロ波の出力、照射間隔、雰囲気等の影響を論じる場合には、割れ・焦げの出現がないということ为前提として、最大の効率を達成できる条件ということになる。この観点からマイクロ波乾燥の最適条件は、辺材の場合3分間に約11kw・hr/m³の照射エネルギー密度で照射し、熱気温度はF. S. P.（繊維飽和点）までは104.5 , F. S. P. 以下で21°Cとしており、透過性の悪い心材の場合は約6.3kw・hr/m³のエネルギーを3分間に照射することを奨めている。さらに表面割れについては、65.7 以上の温度は避けた方がよいとしている。

このように、熱気併用のマイクロ波乾燥は急速乾燥法として、実用的に大きな可能性がある。しかし、トンネル式にしる、屈曲導波管式（この場合2列に曲げ

木材のマイクロ波乾燥(2)

第3表 ポンデローザバイン25mm挽板のマイクロ波乾燥結果

No.	材種 ¹⁾	照射出力 (kw)	照射時間 (min)	総照射エネルギー (kw·hr/m ³)	熱風温度 (°C)	含水率(%)				総乾燥時間 (min)	乾燥欠点
						初期含水率	仕上り含水率	仕上り含水率の分布			
								外側	内部		
1	S,H	5.0	3.0	41.1	23.9	46.7	7.3	8.1	6.8	105	なし
2	S,H,P	6.0	3.0	49.2	23.9	41.2	5.4	6.8	4.0	101	なし
3	S	6.0	3.0	57.0	104.5 ⁴⁾	118.3	7.6	7.6	4.7	131	内部割れ
4	S	—	—	0.0	104.5	117.5	59.0	46.9	71.4	141	なし
5	S,H	5.0	3.0	54.1	104.5 ⁴⁾	164.0	12.8	19.3	16.4	141	なし
6	S,H	6.0 ²⁾	3.0	37.4	104.5 ⁴⁾	94.0	6.2	9.4	5.3	77	内部割れ
7	S	6.0 ²⁾	3.0	57.4	104.5	147.9	0.0	3.9	1.9	123	内部割れ, 焦げ
8	S	6.0 ²⁾	3.0	100.0	21.1	183.6	8.1	8.2	5.9	242	内部割れ, 焦げ
9	S	6.0 ²⁾	3.0	31.4	104.5	116.5	11.8	12.4	11.5	100	内部割れ
10	S	6.0 ²⁾	6.0	33.3	104.5	148.3	16.5	18.2	21.0	153	なし
11	S,H	6.0	3.0	41.5	104.5 ⁴⁾	134.7	14.9	12.2	11.6	99	なし
12	S	6.0	1.5	56.3	104.5 ⁴⁾	134.7	8.3	9.4	6.0	136	内部割れ
13	S	6.0	0.75	53.3	104.5 ⁴⁾	133.6	12.8	12.8	11.8	130	内部割れ
14	S	6.0 ³⁾	10.0	20.4	132.0 ⁴⁾	79.4	14.8	10.8	10.9	120	内部割れ
15	S	6.0 ³⁾	5.0	32.6	132.0 ⁴⁾	101.2	6.6	9.7	7.2	126	内部割れ
16	H	6.0	3.0	23.0	143.5 ⁴⁾	32.1	6.4	8.1	5.4	71	内部割れ
17	H,S	5.0	3.0	20.4	104.5 ⁴⁾	31.4	8.2	11.5	5.5	90	内部割れ
18	H,S	3.0	3.0	23.0	104.5 ⁴⁾	32.1	11.9	13.0	9.8	145	表面割れ
19	H,P	4.0	3.0	33.0	26.7	37.8	11.4	8.9	6.7	144	なし
20	H,P	4.0	3.0	22.2	29.4	0.3	14.8	12.9	12.1	93	なし
21	S,H	4.5	3.0	44.1	23.9	74.1	21.9	17.1	14.1	171	内部割れ
22	S,H	4.5	3.0	39.8	65.7	73.1	13.3	12.1	9.0	153	内部割れ, 焦げ
23	H,S	4.0	3.0	22.2	104.5	38.0	7.8	6.6	5.0	87	表面割れ
24	H,S	3.5	3.0	18.3	104.5	33.0	7.3	5.9	5.5	81	表面割れ

- 注 1) S: 辺材, H: 心材, P: 髓材を表わす。
 2) 加熱中およびF, S, P(繊維飽和点)以下で出力を増大させた。
 3) F, S, P以下で出力を増大させた。
 4) F, S, Pに達した時, 熱風温度を下げた。

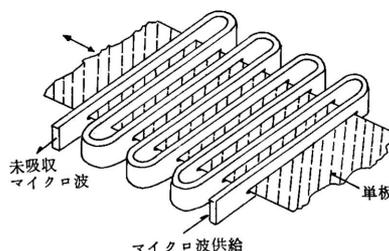
たのみ)にしる, マイクロ波アプリケーションは効率的に問題があるようで, 今後一層の研究が必要であろう。

2.2 単板含水率の平均化

前節で述べたようにマイクロ波を直接乾燥に適用するには効率・経済性から今一つ問題があり, 単板への応用の主眼は誘電的特性を利用した含水率の調整・平均化におかれている。これに関しては前出のH. レッシュらによってかなり実用的な試験³⁾が実施されているので, 少し詳しく述べる。

乾熱装置は従来の方式によって乾燥された単板をリドライするためのもので, ジェットドライヤー方式との併用である。このリドライヤーはマイクロ波照射システム, ジェット熱風供給システムおよびコンベアシステムから成っている。

マイクロ波照射システムのアプリケーションは第7図に示すような10列の屈曲導波管式で, これに単板が通過



第7図 屈曲導波管式マイクロ波アプリケーション

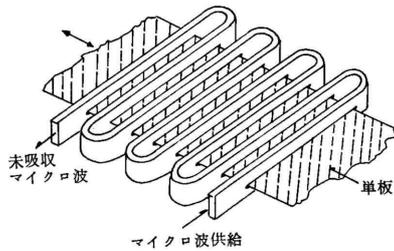
するためのスリットがあり, 4.5ft 巾の単板が供給可能である。これを1ユニットとしての915MHz, 出力25kwのマイクロ波を供給し, 2ユニット直列になぎ, 全体とし20列の屈曲, 出力50KWの装置となる。このように多列の屈曲方式をとるのはエネルギーの吸収効率の向上を計るためである。すなわち単板の含水率が高い場合は吸収がよく効率もよいが低含水率になると極端に効率が低下し, 有効アプリケーション長が4.5

ftの場合には4~5%のエネルギーしか吸収されず、
 残余はダミーに吸収されてしまう。この装置の場合ほ
 ぼ100%の効率を上げているようである。

熱風ジェットは屈曲管式アプリケータの列間に配置
 されたノズルから噴出速度900m/minで、単板の表裏
 面に約11mmの高さから吹きつけられる。この時の熱
 気温度は約220 まで変化させることができる。

単板の供給はコンベア装置によって定速で行なわれ
 るが、この他に乾燥能力・効率を高めるため、特別に
 設計されたコンベア速度自動制御装置の試験を行なっ
 ている。この制御装置は含水率の高い単板ほどマイク
 ロ波の吸収能があることを利用したもので、その模式
 図を第8図に示す。作動の概略を示すと、まづ検測針

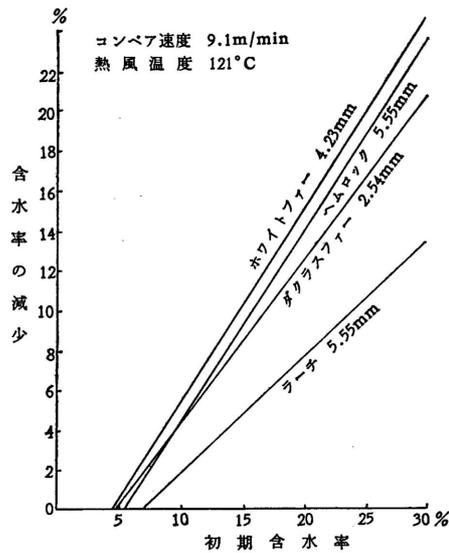
(1)で入力エネルギーを測定する一方、検測針(2)でこの
 点のエネルギーを測定する。これらの差が小さい時は
 含水率が低く、大きい時は高い。したがってこのエネ
 ルギー差を信号に変換することによって直ちにコンベ



第7図 屈曲導波管式マイクロ波アプリケータ

ア速度が制御される。さらに検測針(3)との差は再乾燥
 板の平均含水率を与える。

一般に従来の熱気式乾燥機によって乾燥した単板は
 大部分は適正水分かまたはそれ以下に乾燥されてい
 る。しかし、場合によってはスポット状あるいは帯状
 に高含水率の部分が散在するので再乾にまわさなけれ
 ばならない。このような単板のマイクロ波による再乾
 を行なったのがこの試験であり、試験条件と結果を第
 4表に示す。単板は4.5ft巾(繊維方向長さ)で連続
 的に供給し、再乾後の含水率はバラツキをも考慮して
 4.5×8ftを6つに区分し、特別設計の高周波含水率
 計で測定している。

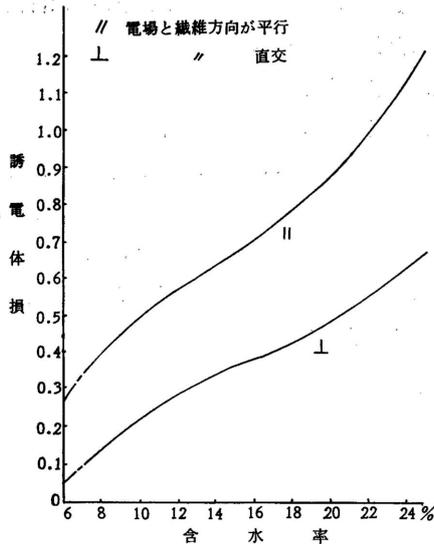


第9図 再乾初期含水率と水分の減少

第4表 単板のマイクロ波による再乾試験結果³⁾

樹種	単板厚さ (mm)	測定数	初期含水率(%)		コンベア速度(m/min)		熱気温度(°C)		仕上り含水率(%)	
			平均	標準偏差	平均	巾	平均	巾	平均	標準偏差
ダグラスファー	2.54	3612	9.2	6.0	10.0	3.0~14.6	113	32~149	5.8	1.0
ウエスタンラーク	2.54	1860	7.9	3.2	10.7	6.7~14.6	127	107~149	5.9	1.2
ウエスタンラーク	5.55	258	12.3	3.6	5.8	4.6~7.6	107	なし	8.0	1.7
ウエスタンヘムロック	4.23	828	10.3	7.4	8.4	4.6~10.7	93	32~124	6.1	0.8
ウエスタンヘムロック	5.55	318	11.1	6.9	4.6	なし	107	なし	5.8	0.8
ホワイトファー	4.23	456	12.7	9.7	10.2	9.1~12.2	117	107~135	5.0	0.7
ホワイトファー	5.55	474	10.0	4.3	11.0	9.1~12.2	110	107~121	6.3	1.0
エンゲルマンズプルース	2.54	876	8.5	4.6	7.4	4.6~10.7	117	110~124	4.5	0.9
ポンドローザバイン	2.54	1176	9.7	5.4	11.0	5.5~14.6	117	107~135	5.2	0.9

注：リドライヤーの有効長はほぼ9m



第10図 含水率と誘電体損

単板含水率とマイクロ波吸収能との関係は第9図に示すように、含水率が4%以下になるとほとんど吸収されないが、5%以上になると含水率の増加につれて吸収能は増大する。これを第10図に示した誘電体損：

・tan のグラフと比較すると非常によく一致しており、含水率によるマイクロ波の選択吸収性を示している。したがって含水率の高い部分ほど含水率は減少し平均化されることになる。

このように単板含水率の平均化は本質的にはマイクロ波によるが、熱風との併用方式によると理論的には、表面の水分をいちやく発散させマイクロ波によって発生する熱のロスを防ぐという効果が考えられる。試験結果は、樹種：4.2mm厚ホワイトファー、コンベア速度：9m/min、初期含水率：10%の場合、熱風温度を107 から165 に上げると含水率の減少程度は4.8%から5.9%への増大を示しているが、これはそれほど大きな数値とはいえない。

単板のコンベア速度は、この試験の範囲内のような速度では仕上り含水率に対してはほとんど影響がない。これはマイクロ波の選択吸収性のためである。しかし初期含水率の低いものは速いコンベア速度、高いものには遅い速度を適用すれば、乾燥能力と同時にマイクロ波の効率をも向上させることができる。

このために単板のコンベア速度の自動制御装置が考案されたことは前に述べたが、この装置を使用した結果、単板の平均コンベア速度の向上は8~100%強に達した。この装置によれば、少々の高含水率部分を含むような単板なら20秒でバラツキのない適正含水状態になる。

乾燥性についてはこの他に樹種や単板厚さの影響を受けることは当然であるが、蒸発水分量として乾燥性をみるとこれらの影響はほとんど考えなくてもよい。

マイクロ波でリドライした単板の表面性状、接着性能、剛性はまったく問題がない。むしろ表面硬化がほとんど認められず、熱気乾燥の場合よりも優れている。

3. おわりに

以上述べてきたように、マイクロ波の木材工業への利用はかなり有望だと考えられる。特にマイクロ波による単板のリドライ(含水率の平均化)は非常に有望である。すでに米国においては50KW出力規模の装置と思われるが、年間100万平方フィート(9mm厚)の生産規模の合板工場で、マイクロ波により全単板をリドライしている。この結果、乾燥能力が25%アップしたと報告されている。わが国の場合は米国と事情が異なり最適含水率の範囲も8~12%と比較的高く、技術的に多少の問題はあると考えられるが十分適用できよう。

特に道材の場合は木目・色調の関係もあり、乾燥の時に原木毎にまとめて乾燥せざるを得ないような条件のもとでは、マイクロ波リドライの適用は乾燥能力を増大させるばかりでなく、品質の向上をも期待できるとなっている昨今では、単板の含水率の管理は非常にシビアにする必要があり、一考の価値があろう。

しかしわが国のこの方面の研究は非常に少なく、さらにマイクロ波装置自体の開発にも問題があり、非常に高価である。今後は装置をも含めた研究開発が必要と考えられる。(完)

(前号で1/eとあるのは1/eの誤りです。)

文 献

- 1) 齊藤成文編, 山本孝ら, 高周波加熱, 8章木材への応用
- 2) 電気学会誘電加熱専門委員会, 高周波加熱による木材加工
木材工業, Vol. 14, 289, 1959
- 3) 牧本利夫, 松尾幸人, マイクロ波工学の基礎, 385, 広川書
房, 1970
- 4) Voss, W.A.G., Factors Affecting the Operation
of High-Power Microwave Heating Systems for
Lumber Processing, IEEE, Vol. IGA-2, No. 3,
1966
- 5) Resch, H., Über die Holzrocknung mit
Mikrowellen. Holz als Roh-und Werkstoff, 26. Jg.
Heft 9, 1968
- 6) Resch, H., Drying of Incense Cedar Pencil Slats
by Microwave Power. The Journal of Microwave
Power 2-2
- 7) McAlister, W.R., and H. Resch, Drying 1-Inch
Ponderosa Pine Lumber with a Combination of
Microwave Power and Hot Air, F.P. Jour.,
Vol. 21, No. 3., 1971
- 8) Resch, H., C.A. Lofdahl, F.J. Smith and C. Erb,
Moisture Leveling in Veneer by Microwaves and
Hot Air, F.P. Jour. Vol. 20, No.10, 1970
- 9) Agdur, B., and P. Hedvall, What is the Outlook
for Drying Paper with Micro-Waves, Paper
Trade Jour., Sept. 28, 1970
- 10) 前出文献1), 齊藤成文, 1章, 2節
- 11) 山崎浩, マイクロ波加熱, K.K. 東芝技術資料
- 12) Hippel von, A.R., Dielectric Materials and
Applications, New York 1954, Wiley
- 13) James, W.L., and D.W. Hamill, Dielectric
Properties of Douglas-Fir, F.P. Jour. Vol. 15,
No. 2, 1965
- 14) Voss, W.A.G. and W.R. Tinga, Microwave
Power Engineering and its Application,
Materials Evaluation and Measurement
techniques, Vortag a, b, Symposium on
Microwave Power, Stanford, California, 1967
- 15) Brown, W.C., J.F. Skowran and G.H. MacMasler,
The Super Power C.W. amplitron, Microwave
Jour, Oct. 1964
- 16) Lowery, D.P. and E.S. Kotak, Evaluation of
Microwave Wood Moisture Meter, F.P. Jour.,
Vol. 17, No. 10, 1967

—試験部 合板試験科—