

単板のマイクロ波乾燥

吉田 弥明 田口 崇

1. はじめに

マイクロ波の木材工業への応用については米国のレスシェラが一連の試験^{1), 2), 3), 4)}をおこなっているが、わが国ではブロック材についての乾燥試験⁵⁾が報告されているにすぎない。マイクロ波も高周波領域に入る電磁波の一種であるから、加熱原理は従来用いられている周波数帯の高周波誘電加熱の場合と同様である。マイクロ波の場合には周波数が極めて高く(915MHz, 2450 MHz)、波長が短いために従来の高周波誘電加熱にみられたような調整・操作の煩雑さがなく、取扱いが比較的簡単であり、電界強度が低くてすみ危険性も少ない。またマイクロ波領域における木材の誘電的性質⁶⁾を考えると特徴的な乾燥の可能性があり、興味ある応用が考えられる。この度、小型の実験装置によって単板の試験乾燥をおこない、乾燥速度、乾燥欠点および効率(エネルギー効率)について検討し、マイクロ波の利用について基礎的な知識を得たので報告する。なお、本試験の一部は第22回日本木材学会大会で発表した。

2. 実験装置

市販のバッチ式小型電子レンジを出力調整ができるように改造したもので、方形をしたオープン本体と出力調整部とから成っている。その概略仕様は第1表に示すとおりである。

マイクロ波は上底右方から導波管を通してオープン内に照射される。この時オープン形状による定常波の発生を防ぎ、加熱の不均一性をなくす目的でステラファン

と呼ばれる回転乱反射板、および換気のための小型ファンが組み込まれている。

3. 試験方法

上に述べたマイクロ波乾燥オープンによって、ロータリー切削のラワン単板を乾燥した。試験条件は第2表に示すように、マイクロ波出力140, 370, 660W, 単

第2表 乾燥条件

出力 (W)	単板		同時乾燥 枚数 (枚)	条件数
	厚さ (mm)	巾×長さ (cm)		
140	0.9	24×24	1	9
	2.55			
	4.5			
370	2.55	24×24	1	18
	4.5	12×24		
		12×12		
660	2.55	12×24	1	3
			3	
			5	

板厚さは剥きだしで0.9, 2.55, 4.5mm, 単板寸法24×24, 12×12cm, 同時乾燥枚数1, 3, 5枚と変えて乾燥した。乾燥供試枚数は1条件あて3枚、あらかじめ100%の含水率に調湿して用いた。

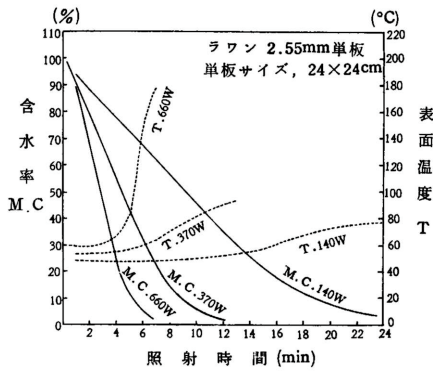
マイクロ波の照射は測定の都合上、1~4分の間欠照射を等間隔におこない、照射間隔ごとに含水率モニターのための重量測定、表面温度の測定、乾燥欠点の発生状況の観察をおこなった。温度の測定は安立計器の接触型表面温度計 HP-4F型によって、オープンから取出した直後おこない、単板面の最高温度を記録した。

4. 試験結果および考察

マイクロ波による単板乾燥時の含水率の減少経過と表面温度の上昇経過との一例を2.55mm厚, 24×24cm

第1表 マイクロ波乾燥装置の仕様

入力	2KVA
出力	100~700W
周波数	2450±50MHz
内容積	380W×300D×240Hmm
発振管	東芝マグネロン 2M66



第1図 乾燥単板の含水率減少と表面温度の上昇経過

寸法の単板について示せば第1図のとおりである。試験結果を24×24cm寸法の単板グループについて示せば第3表のとおりである。

4.1 乾燥速度

乾燥経過は第1図に示したように、他の乾燥方法の場合と同じくF.S.P(繊維飽和点)までは直線的に、F.S.P.以下では指数函数的な含水率の減少経過を示す。ただ最初に見られる平坦な部分が他の乾燥法の場合とは異なり極めて少なく、温度上昇が瞬間的

第3表 マイクロ波乾燥結果

		0.9		2.55		4.5		
		10	5	10	5	10	5	
照射時間 (min)	出	140	10.0	12.0	18.8	22.0	33.5	37.5
		370	4.6	5.4	8.8	10.2	14.2	16.5
		660	2.9	3.4	5.2	6.0	8.2	9.5
表面温度 (°C)	力	140	47	49	68	73	90	92
		370	55	60	68	75	142	157
		660	62	67	100	150	160	180
焦げ	(W)	140	—	—	—	—	—	—
		370	—	—	—	—	(+)	(+)
		660	—	—	—	(+)	(+)	(+)

(-)無し, (+)軽微, (++)中庸, (+++)発煙

第4表 a および b の値

単板厚さ(mm)	出力(W)		140		370		660	
	a	b	a	b	a	b	a	b
4.5	2.8	0.040	7.0	0.120	12.6	0.220		
2.55	5.0	0.085	10.0	0.195	20.0	0.390		
0.9	10.0	0.140	20.0	0.330	40.0	0.535		

に達成され、すぐ水分の蒸発が始まることを示している。

このカーブはF.S.P.を含水率30%として、これより高含水率の部分でマイクロ波の照射時間と含水率との間には $y = -ax + k$ 、これより低含水率の部分で $\log y = -bx + k$ なる関係が成立するとして、そ

第5表 a および b の分散分析結果

(a)

要因	変動	自由度	不偏分散	分散比	寄与率 (%)
出力	515	2	258	8.87 *	43.9
単板厚さ	406	2	203	6.98 *	33.4
残差	116	4	29	—	22.7
全変動	1037	—	—	—	—

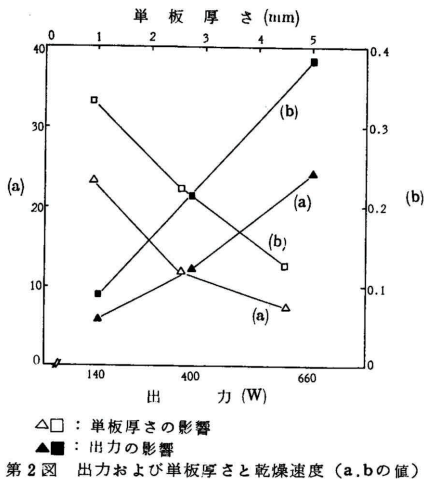
(b)

要因	変動	自由度	不偏分散	分散比	寄与率 (%)
出力	1299	2	649	21.35 **	60.0
単板厚さ	652	2	326	10.72 *	28.6
残差	122	4	30	—	11.4
全変動	2073	—	—	—	—

**危険率 1%で有意
*危険率 5%で有意

それぞれの含水率の減少曲線から勾配 a, および b を求めれば、第4表に示すようになり、これらは乾燥速度を表す指標となる。この a および b と出力および単板厚さとの関係をみるために出力と単板厚さを要因として2元配置によって分散分析をおこなえば第5表のような結果になり、それぞれ1および5%の危険率で有意差があり、効果グラフを描けば第2図のようにな

る。すなわち、出力の増大、単板厚さの減少によって a, b とともに増加し乾燥速度は大きくなる。特に b に対しては出力の寄与が大きく F.S.P. 以下の乾燥には出力が大きく響くことを示している。



第2図 出力および単板厚さと乾燥速度 (a, bの値)

4.2 表面温度

単板の表面温度は第1図でみるように含水率が約30%すなわち F.S.P. 以下になると急激に上昇し、出力が大きくなればなるほどその立ち上りは急になる。したがって到達する最高温度も第3表でみるように出力、単板厚さの増大とともに高くなり、2.55mm単板では出力660W、4.5mm単板では370W以上になると100°Cを越える。表面温度はまた面内の部位によってかなりのバラツキを持っており、平均含水率が低くなるとこの傾向は著しくなり、ついにはスポット状の焦げが生じるようになる。この原因としては勿論出力が大きいということもあるが、一部にはマイクロ波の照射形式・オープン形状等にも問題があると考えられる。単板材質のバラツキは今回の試験のようにある程度材質をそろえた小面積のものでは考えられない。

4.3 乾燥欠点

マイクロ波乾燥の欠点としては第3表に示したように単板の焦げが発生した。これは前述した単板の表面温度の上昇と大きく関連し、表面温度が150°C以上になると発生し、多くは1ヶ所、時には2ヶ所直径2~3cmのスポット状に発生し、ひどくなると発煙するようになる。特にマイクロ波出力、単板厚さが大きい場合に集中的に発生する。マクアリストラー⁴⁾は仕上り含水率5%以下になると焦げの発生の危険性を指摘しているが、今回の試験のように条件によっては仕

上り含水率10%程度でも焦げの発生が認められた。

しかし、その他の内部割れや表面性状に関する欠点は認められなかった。くるとについては単板面積がオープンの関係上、24×24cmと小さく、言及することに無理はあるが同一単板でおこなった熱風乾燥式の場合に比べるとほとんど発生しなかった。

4.4 乾燥効率

ここで乾燥効率というのは照射したマイクロ波エネルギーに対する乾燥に要するエネルギーの計算値との比率で(1)式のように表わすことができる。

$$\alpha \text{ (乾燥効率)} = \frac{Q_c}{Q_A} \times 100 \text{ (\%)} \dots\dots\dots(1)$$

ここで Q_c は乾燥水分から算出した熱量、 Q_A は照射されたマイクロ波エネルギーを熱量に換算したもので、 Q_c はさらに木質の加熱に必要な熱量 Q_1 、含有水分の加熱に必要な熱量 Q_2 、仕上り含水率になるまでの水分の蒸発に必要な熱量 Q_3 との和で、それぞれ次のように表わすことができる。

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ (cal)} \dots\dots\dots(2)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= cr_0v_0 (T_2 - T_1) \text{ (cal)} \\ Q_2 &= r_0v_0 (T_2 - T_1) \frac{m_g}{100} \text{ (cal)} \\ Q_3 &= qr_0v_0 \frac{m_g - m_r}{100} \text{ (cal)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

c : 木材の比熱 (cal/g·°C), q : 水の蒸発潜熱 (cal/g), r_0 : 全乾比重 (g/cm³), v_0 : 全乾容積 (cm³), T_1 : 単板初期温度 (°C), T_2 : 蒸発温度 (°C), m_g : 単板初期含水率 (%), m_r : 仕上り含水率 (%)

一方、実際に照射されるエネルギーは熱量に換算すると次のように表わすことができる。

$$Q_A = 14.4Wt \text{ (cal)} \dots\dots\dots(4)$$

W : マイクロ波出力 (W), t : 照射時間 (分),
 ここで $c=0.324$, $v_0=v_g$ (生材容積), $T_1=20^\circ\text{C}$, $T_2=100^\circ\text{C}$, $q=539\text{cal}$ とすれば, (1)式は次のように表わすことができる。

$$\alpha = \frac{(25.9 + 6.19m_g - 5.39m_r) r_0v_g}{14.4Wt} \times 100 \text{ (\%)} \dots\dots\dots(5)$$

第6表は第1図に示したようなそれぞれの乾燥曲線から各仕上り含水率につき(5)式により求めたものである

第6表 乾燥効率

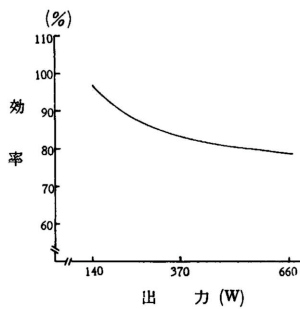
** 単板厚さ (mm)	** 仕上り含水率 (%)	出力 (W)**		
		140	370	660
0.9	30	102.3	83.1	75.4
	15	92.4	70.9	64.1
	8	78.2	63.3	59.2
2.55	30	111.4	95.1	89.9
	15	101.7	86.7	86.0
	8	93.3	77.5	77.9
4.5	30	108.4	96.8	90.0
	15	96.8	89.8	83.5
	8	89.8	80.8	75.7

**危険率1%で有意

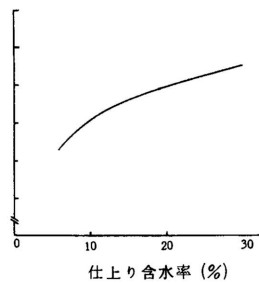
第7表 乾燥効率の分散分析結果

要因	変動	自由度	不偏分散	分散比	寄与率 (%)
出力	1798	2	899	102**	39.4
仕上り含水率	1365	2	682	77**	29.7
単板厚さ	1192	2	596	68**	25.9
残差	175	20	9	—	5.0
全変動	4530	—	—	—	—

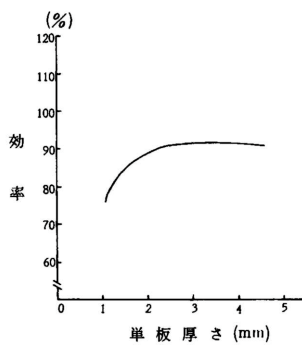
**危険率1%で有意



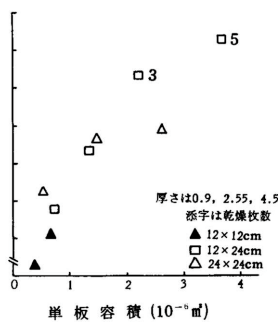
第3図 出力と効率



第4図 仕上り含水率と効率



第5図 単板厚さと効率



第6図 単板容積と効率

る。この時の供試単板は24×24cmの寸法のものである。これをマイクロ波出力、単板厚さ、仕上り含水率を要因にとって3元配置の分散分析をおこなった。その結果を第7表に示したが、いずれの要因も危険率1%で有意である。第3～5図にこれらの影響をみるための効果グラフを示した。

第3図からマイクロ波出力の影響をみると出力140Wでは100%に近い効率を示すが、660Wになると80%以下に低下し、出力の増加にともない効率が低下していくことを示している。これは第1図、第3表でも明らかのように出力の増加にともない照射エネルギーの一部が熱に消費されるためと考えられる。しかし出力の増大により乾燥速度も増大することを考えれば、この過熱が乾燥時間を短縮させていると考えられる。

仕上り含水率の影響は第4図でみるように、仕上り含水率が低くなると効率は低下する。仕上り含水率30%では効率95%と略100%に近いが、これ以下の含水

率では80%以下にまで低下する。これは木質と水との結合がF.S.P.以下ではかなり強固であることを示しており、これを蒸発させるためには高いエネルギーが必要なことを示している。これは第1図でも示したように含水率30%を境にして単板表面温度が急騰することからもうかがうことができる。したがって含水率30%以下の単板の乾燥では効率は大きく低下するものと考えられる。

第5図から単板厚さの影響をみると0.9mm単板では約75%、2.55、4.5mm単板になると略90%の効率を示している。0.9mm厚のように薄い単板の効率が低いのは照射マイクロ波が通り抜けてしまい、完全吸収はできずダミーに吸収されるためと考えられる。したがって今回の試験に用いたような方形パッチ式オープン形状ではさけられないとも考えられ照射方式の検討が必要と考えられる。

さらに単板容積と効率との関連をみたのが第6図である。この図は、マイクロ波出力370W、仕上り含水率8、15、30%のときの

効率の効果をみたもので、同一寸法の単板で容積が異なるのは厚さが異なるためである。これによると効率は容積にほぼ比例して高くなるが、容積が等しい場合には表面積が大きい方が効率が高くなることを示している。中には効率が113%に達するものもある。これは v_0 （全乾容積）の代りに v_s （生材容積）を用いたこと、定格出力の決定方法等のために100%を越える結果になったものと考えられるが少なくとも条件によっては効率は100%にすることができることを示している。

以上の結果、エネルギーロスとしてはダミーに吸収されるエネルギーロスと熱に消費されるエネルギーロスとである。第1のダミーに吸収されるロスはおブンの形式・形状、および被乾燥材の容積・形状を選べば解消できるものと考えられるが、第2の過熱のためのエネルギーは、F.S.P.以下の乾燥、急速な乾燥にはさけることができない。乾燥速度についていえば前述したように出力の増大につれて増加するが、効率は低下する。したがってそれぞれの場合に応じた最も効率のよいスケジュールを組むことが必要となる。

5. 実用化の可能性

本試験の結果から、マイクロ波乾燥の実用化を推察するために、乾燥能力 $1\text{ m}^3/\text{hr}$ を達成するために必要なマイクロ波出力を先の(5)式から試算してみた。ただし、初期含水率70%、仕上り含水率10%、全乾比重0.5、効率80%、全乾容積と生材容積は等しいものとする。この時、必要出力は約300KWに達する。現在わが国ではこのような大出力の発振管は開発されておらず、既存の発振管の多重組合せでも困難である。

わが国の実用プラントについて言えば、発振周波数2450 MHzのものでは1ユニットの最大出力は4 KW（入力12 KVA）で発振部のみで120万円程であり、この機種1ユニットあたりの乾燥能力を計算すると $0.0138\text{ m}^3/\text{hr}$ で、厚さ1 mm、 $95 \times 190\text{ cm}$ （ 3×6 尺サイズ）の単板にして8枚/hrにしすぎない。また発振周波数915 MHzのものでは出力25 KW（入力32 KW A）のものがあり、これによると1ユニットあたり $0.173\text{ m}^3/\text{hr}$ である。この機種にしても1ユニット発振部のみで500万円のオーダーであり、マイクロ波による一貫した乾燥は特殊な場合をのぞき、経済的に困

難である。

今後の方向としては、木材の誘電的性質からみて単板含水率の平均化への応用が有利と考えられる。現に米国ではこの目的に出力50 KW規模のプラントが稼働しているといわれ、従来のドライヤーに付属させることによって25%の能力増になったと報告されている³⁾。当試験科でもこの面の試験に着手しているが、いずれにしても発振管、オープンを含むハードな部分の開発も重要である。

6. まとめ

小型のバッチ式マイクロ波乾燥装置によってラワンロータリー単板の乾燥試験をおこない次のような結果が得られた。

- 1) 乾燥速度は出力の増大とともに大きくなり、特にF.S.P.以下の乾燥においてはこの影響が大きい。
- 2) 単板の表面温度は出力の増大、単板厚さの増大にともない高くなり、さらには今回使用したオープンでは部分的なバラツキがあり、特に低含水率になる程この傾向は著しい。
- 3) 乾燥欠点としてはスポット状の焦げが発生した。これは表面温度の上昇と大きく関連し、 150°C 以上になると発生する。
- 4) エネルギー効率はマイクロ波出力、仕上り含水率、単板厚さ、乾燥容量に関連し、第3～6図に示すような影響を受けるが、条件によっては出力に対して100%の効率を上げることができる。

文 献

- 1) Resch, H: *Drying of Incense Cedar Pencil Slats by Microwave Power*, The Journal of Microwave Power 2-2 45~49, 1967
- 2) Resch, H: *Über die Holz Trocknung mit Mikrowellen, Holz als Roh- und Werkstoff*, Jg. 26, Heft 9 25 1968.
- 3) Resch, H, C.A., Lofdahl, F.J. Smith, and C. Erb, *Moisture Leveling in Veneer by Microwaves and Hot Air*, F.P.J., Vol. 20, No. 10, 50~58, 1970.
- 4) McAlister, W.R. and H. Resch: *Drying 1-inch Ponderosa Pine Lumber with a Combination of Microwave Power and Hot Air*, F.P.J., Vol. 21, No. 3, 23~34, 1971.
- 5) 荒木邦夫他3名: *木材ブロックのマイクロ波乾燥*, 木材工業 Vol. 27, No. 1, 19~21, 1972.
- 6) James, W.L. and D.W. Hamill: *Dielectric Properties of Douglas Fir*, F.P.J., Vol. 15, No. 2, 51~56, 1965.

—試験部 合板試験科—

(原稿受理 47.5.10)