

トドマツ人工林材の乾燥試験(第8報)

—正角材の材温制御下におけるマイクロ波乾燥—

信田 聡 千葉 宗昭
奈良 直哉

Drying Tests of Plantation-Grown Todomatsu (*Abies Sachalinensis* Mast.) Wood (VIII)

—Drying of sawed squares with microwaves by controlling
the wood temperature—

Satoshi SHIDA Muneaki CHIBA
Naoya NARA

Sawed squares, 10.5×10.5×45cm, were dried from a green condition to an 18% moisture content under an atmospheric pressure by controlling the internal temperature of the squares, and the drying rate, the drying-caused defects, the moisture distribution in each square, and the power cost were examined in order to determine the optimum temperature condition. The results of the experiments are summarized as follows:

(1) There is practically no problem in applying thermocouples of a solid packed type to measuring the internal temperature of the squares in the course of the microwave irradiation below 100°C.

(2) The average drying rate at a wood temperature of 60°C was 0.49-0.82%/h. This was 2.5-4.1 times higher than that in the conventional kiln-drying (60-70°C).

(3) The drying time at a wood temperature of 60°C was about one third of that in the conventional kiln-drying, and in the microwave drying 23.5 to 27.7 hours was needed to dry the squares from 31.6 to 20.4%.

(4) The moisture distribution in the cross-cut plane of a square showed a pattern of "inner layer < outer layer" at a 10% moisture content level, but this pattern did not always appear when the level of moisture content was over 20%.

(5) The moisture content variance in a square was the smallest at a 20% moisture content, but it became larger according as the final moisture content was lower. On the other hand, in the conventional kiln-drying, the variance becomes smaller as the final moisture content becomes lower. At a 20% moisture content level, the variance was smaller in the microwave drying than in the conventional kiln-drying.

(6) More honeycombs were caused at a high wood temperature than at a low one. In other words, honeycombs appeared in most of the squares dried at 140°C,

but very few at 60°C.

(7) Surface checks were recognized to be fewer in the microwave drying than in the conventional kiln-drying, and no relationships were found between the wood temperature and the surface checks. Seasoning, or conditioning, however, seemed to be necessary in the microwave drying, because surface checks tended to develop either immediately or a few hours after the squares were taken out of the kiln.

(8) Charring occurred in some squares dried at 140°C as a result of uneven microwave irradiation and uneven moisture content distribution. To prevent this, the wood temperature should be controlled under 140°C.

(9) The total amount of power consumption became larger according as the drying time became longer. In other words, the lower the wood temperature was, the more power was needed. That was because more power was consumed on the other loads of the apparatus than for generating microwaves.

(10) The power cost became lower as the wood temperature became higher. When the wood temperature was 100°C, the power cost required to dry the squares from a 50% moisture content to a 20% one was 10,000 to 13,000 yen per cubic meters.

The following conclusion was reached with respect to the microwave drying of sawed squares under an atmospheric pressure by controlling the wood temperature:

(1) the wood temperature suitable for this method of drying is considered to be 100°C from a viewpoint of both power cost and drying-caused defects, and (2) improvements should be made on the whole apparatus so as to reduce power consumption.

トドマツ心持ち正角材について生から含水率18%を目標として、材温を一定にしマイクロ波乾燥を常圧下で行った。乾燥速度、割れ、含水率むら、電力コストなどを調べ、マイクロ波乾燥の適正材温条件を検討した。得られた知見は、

1) マイクロ波照射中のシース型熱電対による材温測定、誤差は100°C以下では実用上問題とならない。

2) 平均乾燥速度は材温60°Cでは0.49~0.82%/hとなり、温度条件のほぼ等しい熱気乾燥(60~70°C)の2.5~4.1倍であった。

3) 乾燥時間は、材温60°Cに制御した場合は、熱気乾燥の約1/3となり、平均含水率31.6%から20.4%まで23.5~27.7時間を要した。

4) 材内の含水率分布の型は乾燥が進むにつれて、内層<外層の傾向を示すが、含水率20%以上では必ずしもこの型を示さない。

5) 材内の含水率むらは含水率20%付近が最も小さく、含水率10%付近では逆に含水率むらは大きくなった。一方、熱気乾燥では、平均含水率が低くなるほど、材内の含水率むらは小さくなる。含水率20%付近の仕上がり状態では、マイクロ波乾燥の方が熱気乾燥よりも含水率むらは小さい。

6) 内部割れは材温が高くなるにつれ発生しやすくなり、材温140°Cではすべての材に発生した。しかし、60°Cではほとんど発生しなかった。

7) 表面割れは熱気乾燥よりも少なく、材温との関係では明確な関係は見いだせなかった。乾燥後の出炉時あるいは数時間後に発生する傾向があり調湿の必要がある。

8) 炭化は、材温140°Cで発生するケースがあった。マイクロ波の照射むらを防ぎ、含水率が部分的に全乾にならぬようにすること、及び材温を140°C以下とすることが必要である。

9) 全電力消費量は乾燥時間に比例して大きくなるため材温が低い方が大きく、この場合マイク

ロ波発振に必要な電力以外に装置内の他の負荷に消費される電力の占める割合が大きくなる。

10)電力コストは材温が高いほど安価となるが、材温100℃では含水率50%から20%まで乾燥するのに1㎡当たり1~1.3万円と試算された。

常圧下で材温制御して正角材のマイクロ波乾燥を行う場合、コスト、損傷を考慮すると、材温としては100℃付近まで上げられる条件を求めること、また装置全体の電力消費量を削減するための装置の省電力化を検討することが必要である。

1. はじめに

トドマツ人工林材の乾燥、特に水食いを含む場合の高含水率材に関して熱気乾燥による試験を実施して乾燥条件を検討してきた。現在までのところ、板材については損傷を考慮すると、与える温湿度条件は通常の条件よりも一段ゆるくする必要が認められた¹⁾。また含水率のバラツキが大きいので、均一な仕上がりを期待するためには調湿時間を十分にとることが重要である^{2), 3)}。したがって、熱気乾燥では乾燥時間の延長は避けがたく、乾燥コストは高くならざるを得ない。そこで乾燥時間を短縮するために高温乾燥を試みたところ、板材については適用可能であるが⁴⁾、正角材については、損傷に対して安全側(湿球温度を高く保つ)のスケジュールでは通常のスケジュール(中温)に比べ乾燥時間は1/2程度になるが、蒸気消費量が大きくなるため、コストをおさえるには厳しい条件を与えてゆくことが必要となる。その反面、今度は表面割れの危険が伴うことになり、正角材の高温乾燥についてはさらに検討の余地がある³⁾。

そこで、今回は、正角材の乾燥について、乾燥時間の短縮、含水率むらの除去などに関して有望と思われるマイクロ波乾燥を取り上げた。

従来のマイクロ波乾燥(常圧下)では材温を一定に保ち乾燥する報告は少ない^{5), 6)}。したがって、照射出力、照射時間が材にとって不相当であると、過度の加熱が行われ、損傷(炭化、内部割れ)が発生する問題があった^{7), 8)}。また商用電力からマイクロ波電力への変換効率が低く電力コストが高くなるため、付加価値の高い材、乾燥性の良い材以外にはマイクロ波乾燥は単独での使用は不向きであるといわれている^{9), 10)}。

しかし、マイクロ波照射を大気圧下で材温を一定に保ちながら間欠的に行い乾燥することにより、多少従

来のマイクロ波乾燥の特徴である急速乾燥のイメージは薄くなっても、正角材のような断面の大きな材では損傷を少なく乾燥できる可能性があると考えた。

今回のマイクロ波乾燥では、大気圧下で常に一定材温を保つようにマイクロ波照射をON-OFF制御しながら、含水率18%を目標にして正角材の乾燥を行い、材温及びマイクロ波出力条件を損傷との関係で検討した。また含水率むら、乾燥時間・速度、装置の消費電力量、電力コストについて調べ、熱気乾燥の場合と比較し、常圧下での材温を一定に保った場合のマイクロ波乾燥の特徴について報告する。

2. 試験方法

2.1 供試材

供試材はトドマツ心持ち正角材(10.5cm×10.5cm×45cm)で既報^{1), 3), 4)}と同じ産地の同一丸太より得られた材を用いた。1条件2体、合計20体を使用した。それらの初期含水率の平均値は34.7%である。

2.2 マイクロ波乾燥装置

本試験に使用した装置は箱型マイクロ波乾燥装置(東芝(株)製、入力AC 200V、三相、発振機総出力1.5kW、発振周波数2450MHz)で、オープン有効寸法は、幅 700mm×奥行 700mm×高さ 500mmである。材温制御はモニター用材にシース型熱電対(千野製作所製、Tタイプ、保護管材質SUS316、径 4mm、0.75級)を材中に挿入して材温測定を行い、設定材温を保持するために、これを温度調節計を含む、マイクロ波発振のON-OFF回路に接続して、照射を調節し材温制御が行えるようにしてある。オープン内には照射むらの防止のためのターンテーブルが設置してある。さらに導波管の途中にパワーモニター(入射・反射波両用)を入れマイクロ波出力のチェックができるもの

である。またオープン内気温の測定のために上述の熱電対を別にオープン内にセットしてある。乾燥中の供試材の含水率(重量)変化はオープン上部に電子天秤(ザルトリウス社製1413M P8型)を置き、これの床下からポリプロピレン製の鎖を吊り下げオープン内に導き、これに供試材を吊して測定し、一定時間ごとに自動記録すべくハンドヘルド型マイコン(エプソン社

HC-20型)を天秤に接続してある(第1図参照)。

2.3 乾燥条件

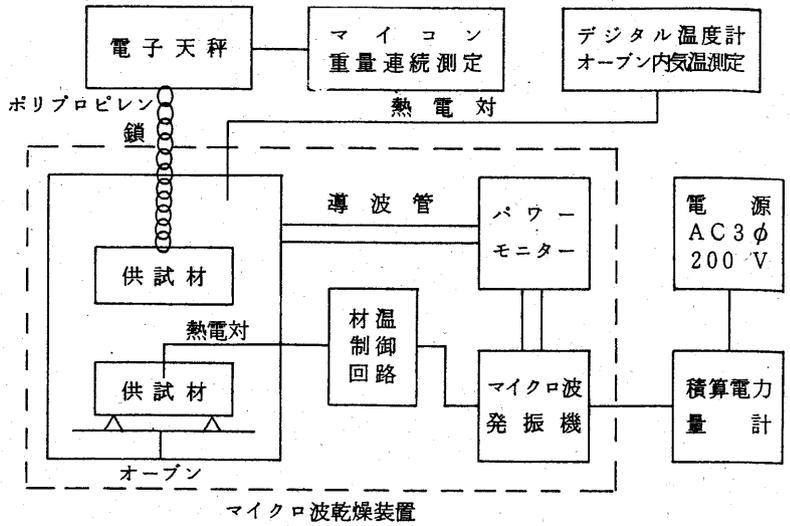
材温条件として、60℃、100℃、140℃を選定した。またマイクロ波出力条件として供試材の単位体積当たりの照射出力として50mW/cm²(出力500W)、100mW/cm²(出力1kW)、150mW/cm²(出力1.5kW)を選定した。乾燥試験は3×3=9回で、すべて常圧下で行った。またオープン内の外周空気の温湿度は成り行きにまかせた。

比較としての熱気乾燥の条件は、第1表に示すスケジュールにより恒温恒湿装置(タバイ社製、PL-2型)内に乾燥を行った。なお、供試材の両木口面は塗料塗布を行わず、そのままとし、1回の試験に2体の供試材を用いたが、1体は含水率(重量)追跡用、もう1体は材温測定用とした(第1図参照)。

3. 結果・考察

3.1 乾燥経過

第2図に天秤に吊して含水率を測定した供試材についてプロットしたマイクロ波乾燥経過図を示す。なお、材温別、マイクロ波出力別に示す。材温が高いほど含水率減少経過は急激となり恒率的な低下を示す。また熱気乾燥の曲線(破線)と比較すると、いずれも含水率減少は速く、同じ温度条件(60℃)のマイクロ波乾



第1図 マイクロ波乾燥装置概略図

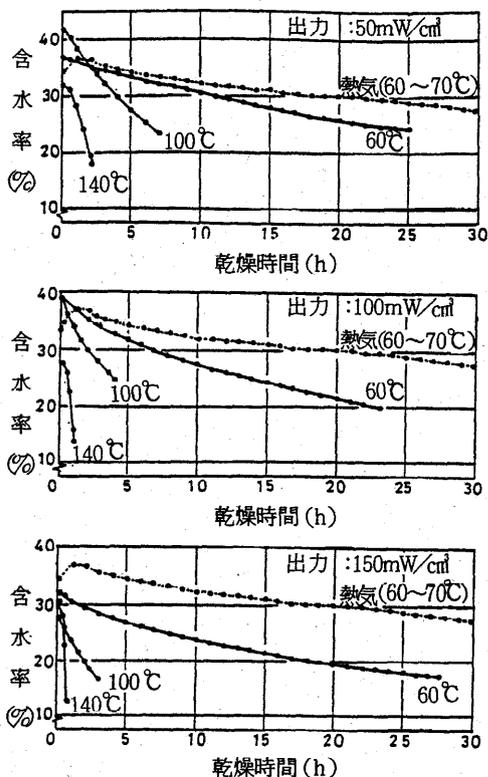
第1表 トドマツ正角材の熱気乾燥スケジュール

含水率 (%)	乾球温度 (℃)	乾湿球温度差 (℃)	備考
生~30	55	2	
30~25	60	3	
25~20	65	5	
20~18	70	5	
調湿	70	1	16時間

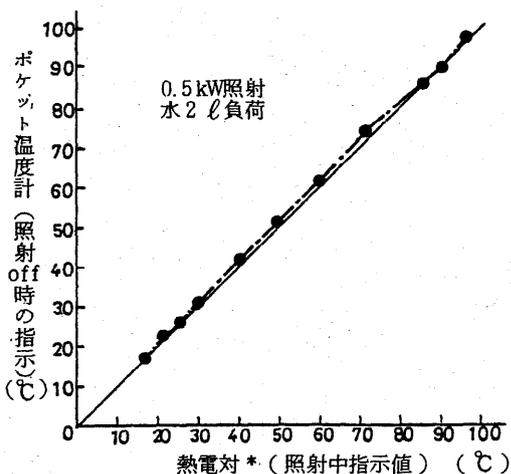
燥できさえも、熱気乾燥よりは速い。またマイクロ波出力条件が大きいかほど減少経過は急となっている。

3.2 マイクロ波照射中の材温測定について

マイクロ波照射中に熱電対により材温を測定する場合、センサーの金属部がマイクロ波による加熱を受けて正確な材温を示さないといわれている⁵⁾。とくに熱電対の保護管径が小さいほど加熱の程度が大きくなることが知られている¹¹⁾。今回使用した熱電対の保護管径は4mmであるが、この熱電対(シース型)のマイクロ波による影響を調べた。ピーカーに水2ℓを入れ、これをオープン内に置き、この水温をマイクロ波照射(0.5kW)を行いながら熱電対で測定し、水温上昇の過程において、照射を何度か中断し、別のポケット温度計(横河北辰電機製作所製、2452型)をオープン内に入れ同じく水温を測定し、照射中に使用している熱



第2図 トドマツ正角材のマイクロ波乾燥経過 (材温制御の場合)



第3図 マイクロ波照射中の熱電対の指示値比較
* : シース型T(C-C)熱電対; 0.75級, 保護管; SUS 316, φ4 mm

電対の指示値と比較した。その結果を第3図に示す。これを見ると、両者の指示値は各水温レベルではほぼ等しい。したがって、マイクロ波照射中の当熱電対によ

る材温測定値は、そのまま補正なしで使用した。

3.3 乾燥速度・乾燥時間

マイクロ波乾燥における平均乾燥速度 (%/h) と乾燥時間を第2表に示す。平均乾燥速度は、乾燥中の含水率減少量を全乾燥時間で除したものである。これを見ると、材温が高いほど乾燥速度は大きくなる。またマイクロ波出力も大きいほど乾燥速度は大きくなるが、材温に比べその影響は小さい。熱気乾燥と比較するとマイクロ波乾燥は、いずれも乾燥速度が大きく熱気乾燥の乾燥速度を1とすれば、2.5~124倍の大きさであった。とくに温度レベルが熱気乾燥の場合とほぼ等しい60°Cでの比較では、マイクロ波乾燥は、2.5~4.1倍の乾燥速度を示している。これは材内外の蒸気圧差が異なることが主な原因であり、熱気乾燥では外周空気の蒸気圧が、マイクロ波乾燥の外気の蒸気圧より高いため材内外の蒸気圧差が相対的に小さいことが考えられる。すなわち、マイクロ波乾燥中のオープン内の温度は材温が高くなると共に上昇し、第4図に示すような関係が認められた。オープン内の湿度は測定していなかったが、乾燥中は非常に高湿状態にあり、ほぼ100%近い湿度と思われる。したがって、材温60°Cにて乾燥中の外周空気の温湿度を30°C, 100%と仮定すると蒸気圧は31.8mmHgとなる。一方、熱気乾燥の場合の外周空気の蒸気圧は、乾球温度65°C, 乾湿球温度差を5°Cとすれば、およそ146.9mmHgということになる。また材中心部の蒸気圧を温度60°Cにて飽和状態にあると仮定すれば、149.4mmHgということになる。したがって、材内外の蒸気圧差(材中心部-外周空気)はマイクロ波乾燥では149.4-31.8=117.6mmHg, 熱気乾燥では149.4-146.9=2.5mmHgとなり、温度が等しくても圧倒的に大きな蒸気圧差がマイクロ波乾燥では生じている。

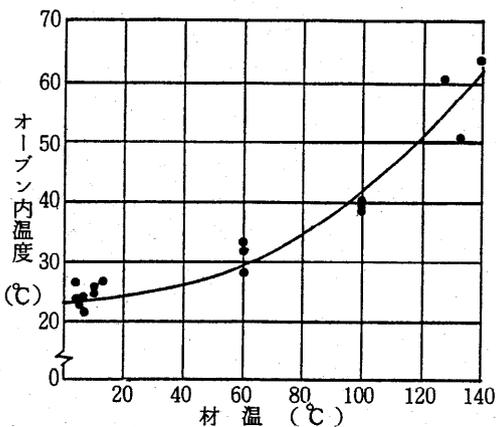
乾燥時間は第2表のように、材温制御を行う場合は、結果的にマイクロ波の間欠照射となるため、連続照射に比べて時間は長くなる。材温60°Cでは今回の条件では23.5~27.7時間、材温100°Cでは3.18~7.0時間、材温140°Cでは、0.75~2.2時間であった。マイクロ波の出力条件は、出力の高い方が、乾燥初期の材温上

第2表 トドマツ正角材のマイクロ波乾燥速度(材温を制御した場合)

	材温 (°C)	マイクロ波出力 ^{a)} (mW/cm ²)	初期含水率 ① (%)	仕上がり含水率 ② (%)	含水率差 ③=①-② (%)	乾燥時間 ④ (h)	平均乾燥速度 ③/④ (%/h)
マイクロ波乾燥	60	50	37.0	24.4	12.6	25.50	0.49(2.5) ^{b)}
		100	39.1	19.8	19.3	23.50	0.82(4.1)
		150	32.1	17.1	15.0	27.70	0.54(2.7)
	100	50	41.4	23.2	18.2	7.00	2.60(13.0)
		100	39.5	24.7	14.8	4.00	3.70(18.5)
		150	28.2	16.6	11.6	3.18	3.77(18.9)
	140	50	32.2	17.4	14.8	2.20	6.73(33.7)
		100	28.0	13.4	14.6	1.25	11.68(58.4)
		150	31.1	12.5	18.6	0.75	24.80(124.0)
熱気	60~70	—	36.9	18.3	18.6	91.00	0.20(1.0)

注) a) 材積1cm³当たりのマイクロ波出力。材積 = $10.5 \times 10.5 \times 45 \times 2 = 9923\text{cm}^3$

b) ()内は熱気乾燥の場合を1とした時の乾燥速度の比率。



第4図 マイクロ波乾燥における材温とオープン内温度の関係(常圧下)
オープン寸法 $50 \times 50 \times 70\text{cm}$ 試験時材積 9923cm^3

昇速度ならびに乾燥途中の材温保持のための所定材温までの照射時間が短くなるため、乾燥時間は短くなる。

一方、熱気乾燥(60~70°C)の乾燥時間は、91時間であった。これに比べるとマイクロ波乾燥(材温制御時)の乾燥時間は、はるかに短い。

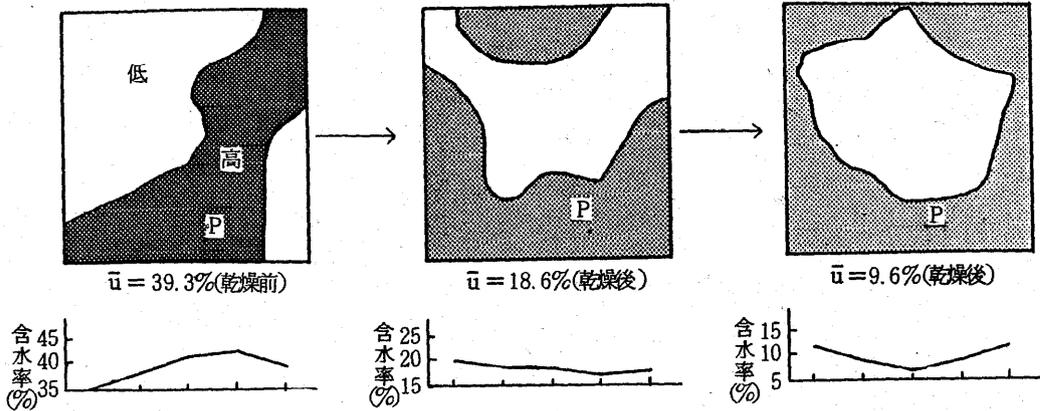
3.4 材内含水率分布

マイクロ波乾燥後の、正角材横断面内の含水率分布を測定した。その一例を第5図に示す。同図では、正角材横断面内の含水率分布を、25分割した小片含水率の値をもとにして、平均含水率の部分を線で結び、これより高い含水率部分と低い含水率部分に分けて示し

た。また通常の水分傾斜の表現方法に準じて横断面内の水分傾斜を求めて第5図の下方に示した。これを見ると、マイクロ波乾燥では、含水率が低くなるにつれて材内部の含水率が外周部よりも低くなる傾向がうかがえる。すなわち、水分傾斜の型として乾燥前はほぼ材中心部が高い凸型を示し、乾燥後は外周部が高い凹型を示すといえる。しかし、乾燥後の含水率が20%前後では、凹型の分布が必ずしも支配的ではなく、材によっては凸型あるいは全く水分傾斜のない型も現れる。また含水率が10%付近の仕上がり状態ではすべてが凹型となり材中心部が外周部よりも低い含水率分布を示していた。

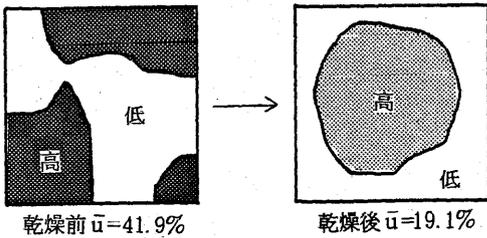
第6図には、熱気乾燥の場合の正角材の横断面内の含水率分布を乾燥前、乾燥後について示した。熱気乾燥の場合は、乾燥後は必ず材中心部の含水率が高く外周部が低い、いわゆる凸型の含水率分布を示すことが分かる。

材内の含水率むらについて、仕上がり含水率との関係で示したのが第7図である。すなわち、含水率むらとして、正角材の横断面内を中層と外層の2つに区分し、それぞれの平均含水率の差(外層-内層)を求めて、これを含水率むらとして表した。また、熱気乾燥の結果(▲)と、既報³⁾の正角材の高温乾燥試験の場合についても示してある。これを見ると、マイクロ波



第5図 トドマツ正角材横断面内のマイクロ波乾燥中の含水率分布
(マイクロ波出力 50mW/cm²材温 140℃)

水分分布図は、平均含水率を境界としてそれより高い部分、低い部分に分けて示した。
水分傾斜は、正角材横断面内の一方に5等分した切片の含水率を求め示した。
P: 随の位値, \bar{u} : 平均含水率



第6図 熱気乾燥におけるトドマツ正角材の木口面内の含水率分布 (温度 60~70℃)

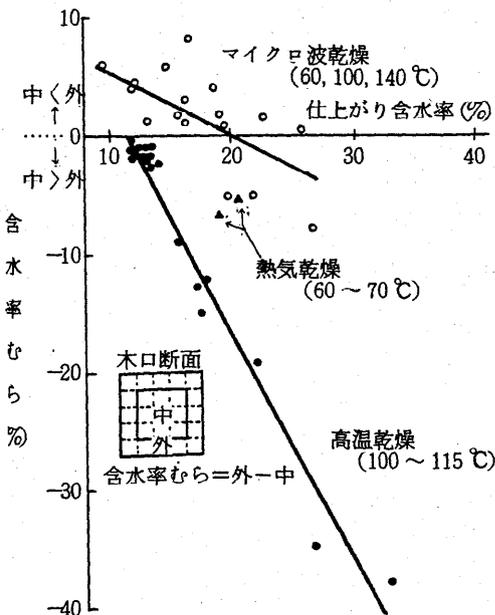
乾燥では仕上がり含水率が低くなるほど内層の含水率が外層よりも低くなる傾向にある。材内の含水率むらが少ないのは、今回の場合含水率20%付近であった。また熱気乾燥 (高温乾燥) の場合には、仕上がり含水率が低くなるほど、含水率むらは小さくなるが、最後まで内層>外層の水分分布型である。

マイクロ波乾燥と高温乾燥との含水率むらについて、仕上がり含水率の全領域について比べるとマイクロ波乾燥の方が小さいが、含水率が低くなると、例えば含水率10%付近では逆にマイクロ波の方が多少むらが大きい。そして高温乾燥の方が、個々の材の間の含水率むらのバラツキが小さい。このことはマイクロ波乾燥の場合の照射むらの改善が必要であることを示唆していると思われる。

構造材としての使用を考える場合、含水率としては15~20%を目標とするため、このレベルではマイクロ波乾燥の方が含水率むらは小さいことが結果から判断できる。

5.5 損傷について

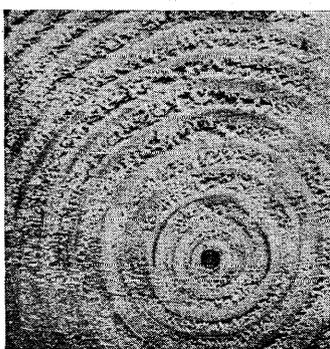
今回のマイクロ波乾燥では、定量的な割れの測定は行わなかったが、乾燥終了後の材を長さ方向の中央部で鋸断し、その切り口 (木口面) から内部割れの状態を観察した。その観察例を写真1に示す。写真は材温 60℃, 100℃, 140℃ の3つの場合で、いずれもマイクロ波出力は100mW/cm² (1kW) の例である。これを見る



第7図 トドマツ正角材の仕上がり含水率と含水率むらの関係 (マイクロ波乾燥と高温乾燥の比較)



材温：60℃



材温：100℃



材温：140℃

写真1 マイクロ波乾燥後の木口断面の様子

条件：マイクロ波出力100mW/cm²，平均仕上り含水率19.3%

と、明らかに材温が高いほど内部割れも多く発生することが分かる。140℃ではほとんどすべてに割れが発生し、100℃では材によっては発生するものもあったが、60℃ではほとんど割れない。また表面割れは、ほとんどなく、通常の熱気乾燥より少ない。ただ乾燥後、オープンから材を出してから後に材面に通る割れが発生する場合があった。適切な後処理としての調湿、養生を考える必要がある。

5.6 炭化について

写真2は、部分的に炭化の生じた正角材横断面の様子を示したものである。すなわち、この場合材温を140℃に制御したが、乾燥が進むにつれて、材内で含水率のむら、照射むらが影響し合って、炭化部を生じた。この部分の含水率は乾燥終了後には、0.5%であった。吉田ら⁷⁾が単板のマイクロ波乾燥において、単板表面温度が150℃以上ではスポット状の焦げ(炭化)を観察しているところから、この温度レベルでは、炭化の生じる危険がある。また材温測定位置は、材の中心部であったが、その部分の含水率は仕上がり時には2.3%であり(写真2の中心部に相当)、この部分には炭化は生じていなかった。この材の平均仕上がり含水率は14.7%であった。炭化の発生は含水率が0%になった後の木材実質の加熱の促進による材温の急上昇により発生すると思われる。温度レベルが、同じく140℃である他の2条件については炭化は認められず、それらの場合、材内の最低含水率は、2.7%、6.8%であり、いずれも全乾には達していない。材内の含水率のバラ

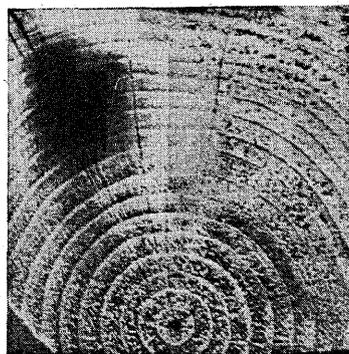


写真2 マイクロ波過照射による材の部分的炭化

条件：材温140℃，出力150mW/cm²，仕上り含水率14.7%

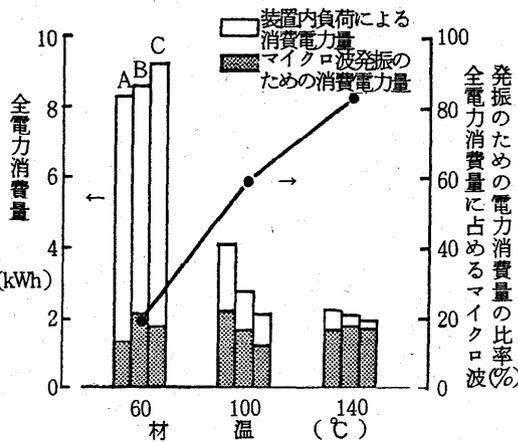
ツキが大きな材は、乾燥が進むにつれて、部分的に全乾状態になる部分が出現しやすくなり炭化の危険性がある。これを防止するには、マイクロ波の照射むらを少なくすること、材温を高く設定しないことが必要であり、少なくとも今回の結果からは140℃以上は不適である。

5.7 電力消費量と電力コスト

本装置を使用して材温を一定に保ちながらマイクロ波乾燥を行った場合の電力消費量を測定し、電力コストを算出した。すなわち、装置全体の電力消費量を第1図に示したように、装置と電源の間に積算電力量計を設置して調べた。また材温制御中はマイクロ波照射は間欠、不連続となるため、正味のマイクロ波照射時間は測定できなかった。そこで、乾燥中に連続して電

力を消費している負荷(例えば室内照明灯, 冷却ファン, ヒーター予熱, 装置内負荷など)の大きさを調べ前述の全電力消費量からこれに乾燥時間を乗じたものを差し引くことにより, マイクロ波照射のために消費した電力量を間接的に求めた。

材温条件別に, これらを求めたのが第8図である。ここでは全電力消費量(電源AC 200V, 3相)と, マイクロ波発振のために消費した電力量及びその比率を示してある。



第8図 材温制御をしたマイクロ波乾燥における材温別消費電力の内訳
 条件: 材積 9923cm³, 平均含水率 35.3% → 16.9%まで
 平均乾燥水分量 580.6g
 A: 出力50mW/cm², B: 出力100mW/cm², C: 出力150mW/cm²

示してある。これを見ると材温60℃レベルが最も全電力消費量が大きかった。この理由は, 材温が低い場合は乾燥時間が長くなり, 純粹にマイクロ波として乾燥に使用される電力よりも, 装置内の他の負荷に消費される電力の積算量が大きくなるためである。一方第8図において, マイクロ波発振のために必要とした電力量は, 材温レベルが異なっても, ほぼ等しい大きさである。これは乾燥すべき水分量が各条件ともほぼ等しくこれを乾燥するための基本的に必要なエネルギーの大きさは等しいためである。

このように材温が高くなるほど全電力消費量は小さくなり, 逆に全電力消費量に占めるマイクロ波発振に要した電力量の比率が増してくる。すなわち, 材温60℃では全電力消費量の20%, 100℃では58%, 140℃では82%の比率となった。乾燥に使用する以外の電力のムダを抑制するには, マイクロ波の連続照射が考えられるが, 連続照射の場合は, 材温を制御することができないため出力条件と材温との関係, 照射時間と材温との関係などをあらかじめ予測できるようにして, 材温が高くないような乾燥条件を確立しておかなければならない。また木材の含水率の変動を考えると, 常に炭化などの危険性が伴う。

第3表 トドマツ正角材のマイクロ波乾燥における消費電力量と電力コスト(材温を制御した場合)

乾燥条件	含水率				乾燥水分量 (g)	消費電力 ^{b)}			電力コスト ^{c)} (含水率50→20%まで乾燥する場合) (円/㎡)	
	設定材温 (°C)	マイクロ波出力 ^{a)} (mW/cm ²)	初期 (①) (%)	仕上がり (②) (%)		差 (①-②) (%)	総消費電力量 (kWh)	含水率1% 当たり (kWh/%)		水分1kg 当たり (kWh/kg)
60		50	35.3	20.9	14.4	442.4	8.35	0.58	18.87	38,579
		100	39.2	20.2	19.0	572.8	8.60	0.45	15.01	29,932
		150	31.9	15.6	16.3	531.4	9.25	0.57	17.41	37,914
100		50	40.8	18.4	22.4	708.0	4.15	0.19	5.86	12,638
		100	38.7	20.4	18.3	582.4	2.80	0.15	4.81	9,977
		150	27.5	14.5	13.0	430.6	2.10	0.16	4.88	10,643
140		50	32.9	14.9	18.0	581.9	2.30	0.12	3.95	7,982
		100	32.7	13.7	19.0	640.0	2.15	0.07	3.36	4,656
		150	39.1	13.6	25.5	736.5	1.95	0.08	2.65	5,321

注 a) マイクロ波出力=発振出力/材積 (9922.5 cm³), 発振出力は 500W, 1kW, 1.5kW

b) 消費電力量は, 装置全体の消費商用電力量として求めた。

c) 材積1m³を含水率50→20%まで乾燥する場合を仮定し次のように計算した。

$$\text{電力コスト} = \frac{\text{電力料金}(22\text{円/kWh}) \times \text{含水率差}(30\%) \times \text{含水率1\%当たりの消費量}}{\text{材積}(0.0099225\text{m}^3)}$$

第3表は、材温を制御してマイクロ波乾燥を行った場合の電力消費量と、それを基に算出した、乾燥コスト(電力コスト)を材温別、出力別に示したものである。この表の中の電力消費量は装置全体で消費した電力量である。また電力料金は22円/kWhとして電力コストを算出してある。同表には、乾燥水分量も合わせて示し、これより、水分1kgを乾燥するために要した消費電力量(kWh/kg水)及び含水率1%当たりの消費電力量(kWh/%)も算出してみた。

これを見ると、全電力消費量は、第8図で示したとおり、材温が低いほど大きく、またそれに呼応して水分1kg当たりの見かけの電力消費量も割高となっている。電力コストは、材積1 m^3 を含水率50%から20%まで乾燥する場合を仮定し、含水率1%当たりの電力消費量と、電力料金(22円/kWh)及び含水率差(50-20=30%)から試算した。材温60 $^{\circ}\text{C}$ では約3~4万円、100 $^{\circ}\text{C}$ では1~1.3万円、140 $^{\circ}\text{C}$ では0.5~0.8万円となった。通常のIF型蒸気式乾燥による場合と比較すると材積1 m^3 当たりのコストは1万円程度で抑えられれば、乾燥時間がマイクロ波乾燥の方が短いことから、十分使用していけると思われる。今回の条件では、材温が100 $^{\circ}\text{C}$ で、コスト1万円のラインに相当する。もちろん100 $^{\circ}\text{C}$ 以上の材温で常圧下でマイクロ波乾燥すれば電力コストはますます安価となるが、損傷による品質低下は明らかであるため、無条件に材温を上げるわけにはいかない。

材温制御を行いながらマイクロ波乾燥を行う場合は、乾燥時間が長くなるほど、装置内の負荷による電力消費がかさみ電力コストにひびくので、この負荷の軽減対策として装置の設計上の改善が必要である。

6. まとめ

トドマツ心持ち正角材について生から含水率18%を目標として材温制御下におけるマイクロ波乾燥を常圧下で行った。そして、乾燥速度、損傷、含水率むら、電力コストなどについて検討し、主に適正材温について調べた。以下に得られた知見を要約する。

1) マイクロ波照射中のソース型熱電対による材温

測定における誤差は100 $^{\circ}\text{C}$ 以下では実用上問題はなかった。

2) 平均乾燥速度(%/h)は材温60 $^{\circ}\text{C}$ では0.49~0.82となり、温度条件のほぼ等しい熱気乾燥(60~70 $^{\circ}\text{C}$)に比べて2.5~4.1倍大きかった。

3) 乾燥時間は、材温60 $^{\circ}\text{C}$ に制御した場合は、熱気乾燥の約1/3となり、平均含水率36.1%から20.4%まで23.5~27.7時間を要した。

4) マイクロ波乾燥における材内の含水率分布の型は、乾燥が進むにつれて、内層<外層の傾向を示すが、含水率20%以上では必ずしもこの型を示さない。

5) 材内の含水率むらは、含水率20%付近が最も小さく含水率10%付近では逆に含水率むらは大きくなった。一方、熱気乾燥では、平均含水率が低くなるほど、材内の含水率むらは小さくなる。含水率20%付近の仕上がり状態では、マイクロ波乾燥の方が熱気乾燥よりも含水率むらは小さい。

6) 内部割れは材温が高くなるにつれ発生しやすくなり、材温140 $^{\circ}\text{C}$ ではすべての材に発生した。しかし、60 $^{\circ}\text{C}$ ではほとんど発生しなかった。

7) 表面割れは熱気乾燥よりも少なく、材温との関係では明確な関係が見られなかった。乾燥後の出炉時あるいは数時間後に発生する傾向があった。

8) 炭化は、材温140 $^{\circ}\text{C}$ で発生するケースがあった。照射むらを防ぎ、含水率が部分的に0%にならぬようにすること、及び材温をあまり高くしないことが重要である。

9) 全電力消費量は、乾燥時間に比例して大きくなるため、材温レベルが低い方が大きく、この場合マイクロ波発振に必要な電力以外に装置内の他の負荷に消費される電力の占める割合が大きい。

10) 電力コストは、材温が高いほど安価となるが、材温100 $^{\circ}\text{C}$ では含水率50%から20%まで1 m^3 当たり1~1.3万円と試算される。

材温を一定に保ち正角材のマイクロ波乾燥を常圧下で行う場合、コスト、損傷を考慮しながら100 $^{\circ}\text{C}$ 付近まで上げられる条件を求め、なお装置のトータル電力消費量の削減を考え、装置の省電力化を図ることが必

要である。今後、常圧下で材温制御をしながらマイクロ波乾燥を実用化に供するためには、この外、照射むらの小さい積み方法と照射方法、乾燥末期の調湿方法、養生条件などを検討することも必要であろう。乾燥条件の改善を行えば、電力コストが割高となるため従来、付加価値の低い材料については不利であるとされているマイクロ波(高周波)乾燥ではあるが、内部加熱の特徴を生かし、例えば水食い材の均一な乾燥には適すると思われる。

文献

- 1) 信田聡ほか2名: 林産試月報, 400, 1 (1985)
- 2) 信田聡ほか3名: 同上, 394, 1 (1984)
- 3) 信田聡ほか3名: 同上, 399, 1 (1985)
- 4) 信田聡ほか3名: 同上, 401, 1 (1985)

- 5) 森光正ほか6名: 木材工業, 39 12, 14~17 (1984)
- 6) 浜野義昭: 第29回「木材と水研究会. シンポジウム要旨集」2, (1983)
- 7) 吉田弥明・田口崇: 林産試月報, 246, 4 (1972)
- 8) William R. McAlister, Helmuth Resch: F. P. J. 21, 3, 26-34 (1971)
- 9) 神長邦雄ほか3名: 静岡県工業試験場報告, 21 (1977)
- 10) 神長邦雄ほか3名: 静岡県工業試験場報告, 23 (1979)
- 11) 戸石登志彦・村中恒男: 機械設計, 21, 4, 44 (1977)

—木材部 乾燥科—
(原稿受理 昭60. 7. 11)