

13-8 厚材の高周波方式による人工乾燥技術の開発研究

山之内 清、竜 遠 矢 良太郎 山田 式 典

1. はじめに

本研究は、減圧下での高周波加熱を利用した人工乾燥をより効率的に行う技術開発研究の、課題最終年度として、一般建築材、家具材等の柱角材や厚材を、比較的低温で短時間に、仕上がり含水率の均一な損傷のない乾燥方法を得るため、54年、55年度の試験結果を基にして実大材による乾燥試験を行ない材温推移、スケジュール化への1指標、乾燥経過、仕上がり含水率のむら防止、本装置における熱効率について結果を得たので、ここに報告する。

2. 試験方法

2.1. 供試樹種

ヤクスギ

ヒノキ

2.2. 供試材の寸法形状

ヤクスギは厚さ20~40mm, 幅310~490mm, 長さ1,650~1,665mmの形状寸法で、初期含水率66.2~176.1%, 全乾比重0.42のものを使用した。又、ヒノキは厚さ35~50mm, 幅90~240mm, 長さ2,000~2,100mmの形状寸法で、初期含水率31.6~57.4%, 全乾比重0.42のものを使用した。

2.3. 試験装置

試験装置は、当场設置の木材高周波真空乾燥装置を使用した。なお本装置の規格、寸法は下記のとおりである。

高周波発振機	出力	5.6.7Kw
	周波数	6.7MHz
	水冷式	
乾燥機缶体	径	1,000mm
	長さ	3,000mm
有効収容寸法		600×500×3,000mm
収容材積		0.9m ³ (≒3.3石)

2.4. 試験

2.4.1. 実大材の乾燥経過

54, 55年度における本装置での試験結果を基礎として、ヤクスギを真空度70mmHg, 材内設定温度45℃で図1の要領で乾燥を行ない、その乾燥経過を調べた。

2.4.2. 乾燥経過に伴う材温推移

図1の要領でベタ積みしたヤクスギの最上部材 (A), 中央部材 (G), 最下部材 (M) のそれぞれ

入口側, 中央, 奥側3カ所にアルコール温度計をセットして (図2), 真空度70mmHg, 材内設定温度45℃の条件で乾燥を行い、その乾燥経過に伴う材温推移を調べた。

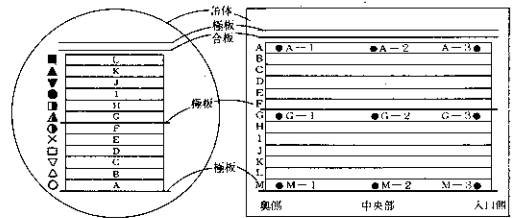


図1 試験材の配置 図2 温度計の配置

2.4.3. 仕上がり時における含水率むらの防止効果

図3の要領で、極板の下のみ及び上下両面に合板を入れ、真空度70mmHg, 材内設定温度40℃の条件で乾燥を行い、合板を入れない未処理との仕上がり含水率のばらつきを比較した。なお、試験材はヒノキを用いた。

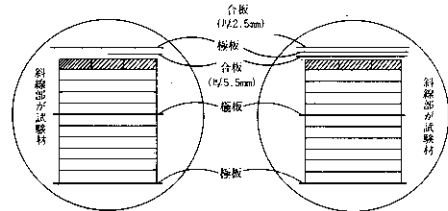


図3 合板の配置

2.4.4. 本装置における熱効率

初期含水率92~176.1%, 全乾比重0.42のヤクスギを図1の要領で乾燥を行い、この時の熱効率について算出し検討を行なった。

3. 結果と考察

3.1. 実大材の乾燥経過

ヤクスギ材の乾燥経過を図4に示し、繊維飽和点 (FSP) 以上と以下の含水率低下速度 (%/hr) を表1に示す。まず表1より、FSP以上での平均含水

率低下速度は1.14, FSP以下のそれは, FSP以上の約1/2の0.40となり, FSP以下で乾燥速度が遅くなることはいえる。又, 図4より平均初期含水率141.6%から平均仕上がり含水率8.6%に達するのに要する乾燥時間は192時間(8日間)となり, 乾燥割れ等の損傷は生じなかった。これより, ヤクスギ材の乾燥割れ等に対して安全を十分にみた真空度70mmHg材内設定温度45℃の条件による実大材の乾燥時間は従来の蒸気式I F型による乾燥時間より短縮された。

試験場 記号	乾燥速度 (%/hr)	初期含水率から F S P まで		F S P から 含水率10%まで	
		F	S P	F	S P
L		0.37		0.83	
K		1.13		0.21	
J		0.82		0.31	
I		1.04		0.36	
H		1.27		0.44	
G		2.14		0.64	
F		1.11		0.28	
E		1.13		0.38	
D		1.09		0.40	
C		1.22		0.44	
B		1.38		0.39	
A		0.96		0.17	
平均		1.14		0.40	

表1 ヤクスギの高周波真空乾燥速度(%/hr)

3.2. 乾燥経過に伴う材温推移

ヤクスギ材の乾燥経過と材温推移について図5に示す。この際, 高周波印加をON, OFF制御する白金抵抗温度センサーは, 高周波の影響の少ないベタ積み最下部のM-3の位置にさしこみ, 設定温度を45℃とした。図5より, 乾燥初期において, 実際の材内温度は, 設定温度より0~5℃程度高くなる傾向がみられ, 又乾燥末期においても, 4~10℃程度高くなる傾向がみられる。

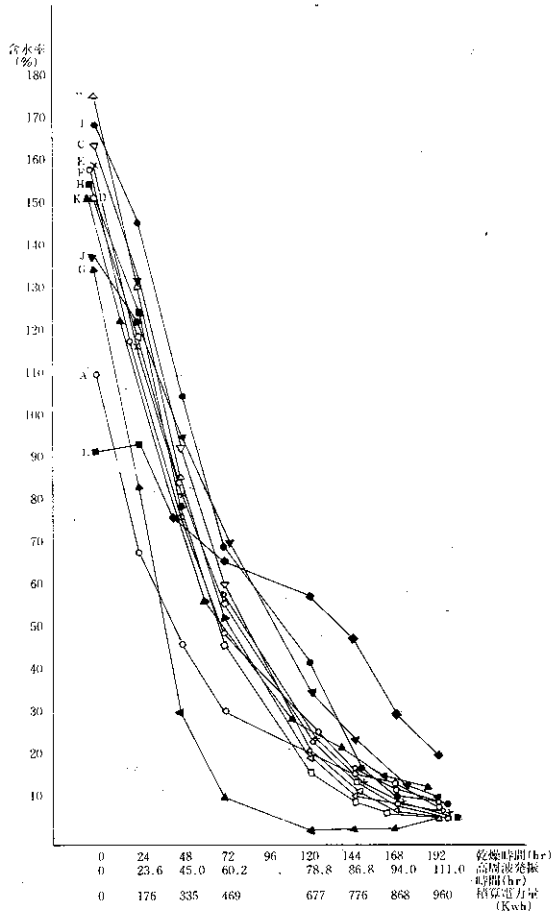


図4 ヤクスギの高周波真空乾燥経過

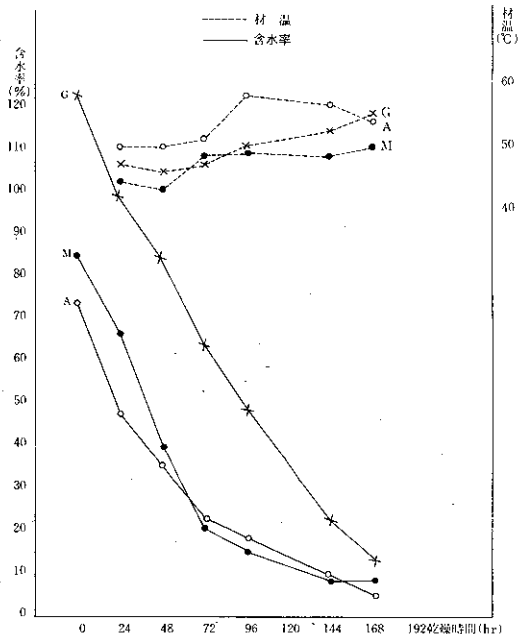


図5 乾燥経過に伴う材温推移

このことは、乾燥初期では木材に印加されたエネルギーが、水分蒸発潜熱として奪われるため材温はさほど上昇せず、設定温度付近におちつくが、乾燥末期になり材内の水分が減少し、木材に印加されたエネルギーが主に材温の上昇等に利用されやすい状態になると、材温が設定温度より更に高くなると考えられる。このように、特にヤクスギなど樹脂分が多い材や通気性が悪い材等は、材温が乾燥末期に設定温度より上がり過ぎ、材の損傷を招く要因になると考えられる。

3.3. 仕上がり時における含水率むらの防止効果

図4にみられるように、缶体内において上部極板に隣接する材は含水率低下が遅れる傾向にあるが、これは乾燥初期に脱着した水蒸気が上部極板や乾燥機上部で結露し、これが上部極板と隣接する材に吸着されるためであると考えられる。そこで、上部極板での結露を防ぐため、上部極板の下のみ、及び上下両面に合板を入れて極板を断熱処理し、上部極板に隣接する材の含水率低下の傾向を調べた結果を表2に示す。

断熱処理の有無	乾燥速度 (%/hr)	初期含水率から F S P まで	FSPから含水率 10% まで
無処理		0.10	
		0.09	0.51
	平均	0.095	0.510
極板の下 のみ断熱処理		0.18	0.25
		0.33	0.56
	平均	0.255	0.405
極板の上下両 面に断熱処理		0.73	0.24
		0.80	0.25
	平均	0.765	0.245

表2 極板の断熱処理効果

表2のとおり、初期含水率からFSPまでにおける含水率低下速度は、断熱処理のない場合に比べて極板の下のみ断熱処理を行った場合で約2.6倍、極板の上下両面に断熱処理を行った場合で約7.7倍と断熱効果により乾燥速度が速くなった。しかし、FSPから10%までは、缶体内の上部以外の材の乾燥が進み、缶体内の水蒸気量が少なくなるため上部極板で結露する量も少なくなり、さほど断熱効果は認められない。

又、この3様の断熱処理条件における試験材全ての平均含水率と標準偏差値を表3に示す。この表3からみられるように、断熱処理を行うことにより最終含水率のばらつきが小さくなるといえる。

		乾燥時間 (hr)							
		0	22.5	41.5	69.5	89.5	113.0	143	161.5
無処理	平均含水率 (%)	43.0	32.4	24.6	19.2	18.2	15.0	9.9	9.6
	標準偏差値	6.7	10.9	13.1	14.9	14.1	15.0	9.9	8.9
極板の下 のみ断熱処理	平均含水率 (%)	43.0	31.6	23.3	16.4	15.4	11.3	7.7	7.6
	標準偏差値	6.7	9.9	10.6	9.7	8.9	6.9	4.9	4.3
乾燥初期		0	24.0	48.0	72.0	95.5			
極板の上下 両面に断熱 処理	平均含水率 (%)	41.7	25.0	16.4	11.3	9.3			
	標準偏差値	4.9	4.1	2.6	2.0	1.6			

表3 極板の断熱処理による含水率のばらつき

3.4. 高周波真空乾燥スケジュールの1指標

本試験では、54年度、55年度の本装置での試験結果を基礎として、ヤクスギを真空度70mmHg、材内設定温度45℃の条件で乾燥を行なった。しかし、3.2.でわかるように、材内温度を45℃と設定しても実際の材温は乾燥初期で0~5℃、末期で4~10℃程度高くなる傾向がみられる。そこで、実際の材表面温度を乾燥初期で50℃、末期で55℃とすると真空度70mmHgにおける乾燥初期の関係湿度は76%、平衡含水率13%、末期の関係湿度は59%、平衡含水率10%となる。これを蒸気を熱源とするIF型乾燥機による乾燥スケジュールになおすと、乾燥初期で乾球温度50℃、乾湿球温度差4℃、末期では乾球温度55℃、乾湿球温度差8.5℃となる。この条件はスギ50mm厚材を蒸気乾燥する際、乾燥初期に用いる乾球温度60℃、乾湿球温度差4℃、平衡含水率13.8%という条件とほぼ等しいが末期に用いる乾球温度70℃、乾湿球温度差28℃、平衡含水率3.1%と比べると乾燥末期には蒸気乾燥に比べてかなり緩やかな条件となっている。このことより乾燥末期の乾燥速度を速めるため、末期の乾燥条件を蒸気乾燥条件並みにするには真空度40mmHg、材内温度65℃が必要となり、この場合、実際の材温が設定温度より4~10℃高くなることを考慮して、真空度40mmHg、材内設定温度55℃の条件が必要となる。しかし、このように真空度を上げると、缶体内でスパークが起きやすくなり、又設

定温度を上げると、通気性の悪い部分の異状高温につながる恐れがあり、材の損傷を引き起こす原因になると考えられ、乾燥末期に蒸気乾燥条件と同等の条件で本乾燥を行うのは困難と考えられる。しかしこのようなトラブルが生じない範囲で乾燥条件をきびしくして、乾燥が遅い末期の乾燥時間を短縮することは必要であると思う。

3.5. 本乾燥装置の熱効率

木材乾燥に必要な熱量計算値と、実際高周波発振機から極板を経て放出される高周波の熱量値を算出し、初期含水率からFSPまでと、FSPから仕上がり含水率までの高周波の木材への印加率を比較し、本乾燥装置の熱効率を検討した。

3.5.1. 木材の乾燥に必要な熱量³⁾

木材の乾燥に必要なとされる熱量は

- (1) 木材の加熱に必要な熱量 Q_1
- (2) 材中水分の加熱に必要な熱量 Q_2
- (3) 水分の蒸発に必要な熱量 Q_3

に大別され、図4で示した乾燥経過について、その熱量計算を下記のとおり行なった。

乾燥前の木材全重量	518.9kg
平均初期含水率	141.6%
仕上がり時の木材全重量	233.3kg
仕上がり時の平均含水率	8.6%
全乾時の木材全重量	214.8kg
木材に含まれている全水分量	304.1kg
乾燥による全脱水量	285.6kg
初期含水率からFSPまでの脱水量	239.7kg
FSPから仕上がり含水率までの脱水量	45.9kg
室温 20℃	木材の比重 0.3
材温 50℃	水の比重 1

以上のことより、木材の加熱に必要な熱量は、

$$Q_1 = 214.8 \times 0.3 \times (50 - 20) = 1933 \text{ (Kcal)}$$

又、材中水分の加熱に必要な熱量は

$$Q_2 = 304.1 \times 1 \times (50 - 20) = 9,123 \text{ (Kcal)}$$

となり、材中水分の蒸発までに必要な熱量は

$$Q_1 + Q_2 = 11,056 \text{ (Kcal)}$$

となる。

ここで、70mmHgにおける蒸発潜熱は約595Kcal/kgであるので、FSPまでの材中水分の蒸発に必要な熱量 (Q_3) は、

$$Q_3 = 239.7 \times 595 = 142,622 \text{ (Kcal)}$$

となる。又、FSPより仕上がり含水率までの乾燥には、結合水1kgに対し平均30Kcalの分離熱を必要

とするため、この期間で水分が蒸発するのに必要な熱量 (Q_3) は

$$Q_3 = 45.9 \times (595 + 30) = 28,688 \text{ (Kcal)}$$

となり、水分の蒸発に必要な熱量は、

$$Q_4 = Q_3 + Q_3 = 171,310 \text{ (Kcal)}$$

となる。

3.3.2. 高周波発振機から極板をとおして放

出される高周波の熱量

高周波発振機の陽極電流 0.9A

高周波発振機の陽極電圧 5KV

ここで図4より初期含水率からFSPに達するまでの高周波発振時間が69.5hr (全発振時間は111hr) であることより、その間の電力量は

$$0.9 \times 5 \times 69.5 = 313 \text{ (Kwh)}$$

となる。又、高周波発振機への入力時に対する出力時の効率を6割とし、1Kwhは860Kcalであり、又水分の蒸発までに必要な熱量 ($Q_1 + Q_2$) が110.56Kcalであるので、初期含水率からFSPに達するまでに極板から放出される熱量 (Q_4) は

$$Q_4 = 313 \times 0.6 \times 860 - 11,056 = 150,452 \text{ (Kcal)}$$

となり、同様にFSPから仕上がり時まで極板から放出される熱量 (Q_5) は、

$$Q_5 = 0.9 \times 5 \times (111 - 69.5) \times 0.6 \times 860 = 96,492 \text{ (Kcal)}$$

となる。

3.3.3. 高周波の木材への印加効率

以上のことより、初期含水率からFSPに達するまでの高周波の木材への印加効率は、

$$Q_3 / Q_4 = 142,622 / 150,452 \approx 0.95$$

となる。つまり高周波出力の95%が、実際木材の水分蒸発に利用されており、効率よく熱量が利用されているといえる。

又、FSPから仕上がり含水率に達するまでの高周波の木材への印加効率は

$$Q_3 / Q_5 = 28,688 / 96,492 \approx 0.30$$

となる。つまり高周波出力の30%しか木材の水分蒸発に利用されておらず、70%近くは材温上昇エネルギーや缶体加熱等に使われていると考えられる。

このように、FSP以下で高周波の木材への印加効率が低下するため、適正なマッチング調整が必要となるが、しかし一方では低含水率域や、極板間距離が30cm以上でも真空度40mmHg程度でスパークが生じやすくなる等、FSP以上に比べて操作が難しくなる傾向がみられる。

又、図4の乾燥事例において、全消費電力量に対する、高周波発振で使われた消費電力量とそれ以外

で使われた消費電力量の実数と比率（カッコ内）を表4に示す。

全消費電力量 960KWh (100)	高周波発振電力量 449.5kwh (52)	初期含水率(141.6%)からFSPまでの電力量 313kwh (33)
		FSPから含水率8.6%までの電力量 186.5kwh(19)
	高周波発振以外の電力量 460.5Kwh (48)	真空ポンプ電力量 422.4kwh (44)
		水冷却装置電力量 28.8kwh(3) その他9.4kwh(1)

表4 全消費電力量に対する実効使用電力

これを見ると、高周波発振機以外で常時作動している真空ポンプ等の高周波発振機以外で消費される電力量が全消費電力量の48%を占めており、特に真空ポンプの消費電力量が全消費電力量の44%と大きい比率を占めている。このため、真空ポンプの作動を設定真空度でON、OFF操作する等して、高周波発振機以外の消費電力量を少なくし、エネルギー効率を上げて乾燥コストを下げる必要があると考える。

4. おわりに

これまでの54年度、55年度の本研究の成果を踏まえて本試験を行ない、今回得られた結果は次のとおりである。

(1) ヤクスギ実大材での本乾燥試験において、FSP以上の乾燥速度はFSP以下の約3倍である。この際、乾燥割れ等の損傷に対して安全とみられる真空度70mmHg、設定材内温度45℃の条件による乾燥時間は192時間と、従来の蒸気式IF型による乾燥時間より短縮された。

(2) 乾燥経過に伴う材温推移は、乾燥初期で設定温度45℃より0～5℃程度、又末期では4～10℃程度高くなる傾向がみられる。

(3) 上部極板に断熱処理を行うことにより、上部極板に隣接する材の乾燥速度は未処理のものに比べてFSP以上で速くなり、又仕上がり時の含水率の

ばらつきが小さくなり、断熱効果が認められたが、FSP以下では断熱効果は認められなかった。

又、断熱処理を行わずに、乾燥途中で缶体中の材の平均含水率がFSP付近になった段階で、乾燥の遅れている上部極板に隣接する材を、比較的乾燥中に材温が高くなる極板の中央部へ積みかえることにより、仕上がり時の含水率ばらつきを小さくすることができた。

(4) ヤクスギ実大材の本乾燥試験で設定した真空度70mmHg、材内温度45℃という条件は、蒸気式IF乾燥スケジュールの乾燥条件に比較して、乾燥初期ではほぼ同等の条件であるといえるが、乾燥末期ではかなり緩やかな条件となる。

(5) 当场設置の本乾燥装置における、高周波の木材への印加効率を算出すると、初期含水率からFSPまでは95%と効率よく高周波が木材乾燥に利用されているが、FSPから含水率8.6%までは30%と効率は低下する。又、真空ポンプの消費電力量が全消費電力量の44%と大きな比率を占めロスが大きいため真空ポンプの作動を設定真空度でON、OFF操作にする等して、エネルギー効率を上げ、乾燥コストを下げていくことが必要であると考ええる。

5. 参考文献

- 1) 鹿児島県木材工業試験場昭和55年度業務報告書、23
- 2) 寺沢真、筒本卓造：木材の人工乾燥 106
- 3) 満久崇磨：木材の乾燥（実用木材加工全書②）228