

ヒノキ柱材の人工乾燥試験

河崎弥生・金田利之・見尾貞治

1. はじめに

現在、建築用構造材の人工乾燥の必要性が強く叫ばれている。この時期に合わせたように、平成3年1月31日付で「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」が告示され、7月31日施行の予定になっている。この新JASの中で、乾燥材に関しても、“乾燥材とは、含水率25%以下のものを指す”との新たな規定も定められた。この規定では、さらに5%ごとに3段階(D 25、D 20、D 15)に区分されている。今後は、この乾燥規定を達成した乾燥材が必要者側から求められることになる。しかし、それに対応する乾燥技術、特に人工乾燥スケジュールが、コスト面を含めて確立されているとはいえない。

現在、人工乾燥を行う上で問題となっているのは、柱材に限定すれば、必要とされる乾燥時間が長いことと、それに伴う乾燥コスト高である。この傾向はスギ材でとくに著しいとされる。しかし、ヒノキ材についても、程度の差こそあれ問題がすべて解決されているわけではない。そこで、今回、ヒノキ材について、3条件のスケジュール試験を行い、人工乾燥時間の短縮と可能な限りのローコスト化への道を模索した。

第1表 供試丸太の概要

2. 方法

1) 供試材料

岡山県北部の中国山地沿いに産した丸太を原木市場で購入した。その概要を第1表に示す。これらを13cm角に製材し、3mm幅の背割りを入れた。

測定項目	測定値			標準偏差	変動係数
	最大値	最小値	平均値		
長さ(cm)	304.5	299.8	301.8	1.57	0.52
末口直径(cm)	21.8	18.5	20.19	1.45	5.70
末口年輪数	49	35	41.54	4.77	11.48

試験個体数は1乾燥条件当り11本で、合計33本である。各乾燥条件当りの材料の内訳は、乾燥試験用が10本で、残りの1本は8分割して含水率分布の変化の測定用に充てた。

2) 手順および方法

①初期含水率と含水率分布の測定

製材直後に、試験材の両木口から約20cm入った位置で、厚さ約3cmの試験片を3枚採取した。これらは、初期含水率測定に2枚、含水率分布測定に1枚用いた。残った約250cmの材は、両木口を酢酸ビニル系の接着剤でコーティングした後、スケジュール試験に供した。

②乾燥装置

当センターに設置されている10石入りIF型蒸気式人工乾燥装置を使用し、昼夜連続運転で乾燥試験を行った。

③乾燥方法

第2表に示す3条件のスケジュールにより試験を行った。生材状態から約13%の仕上げ目標含水率まで7段階のステップで変化させ、最後に約1日の調湿を行った。ここでのスケジュール作成の基本的な考え方は以下の通りである。

予備試験で得られた除湿式用の基本的スケジュールに、本県内で多く実施されている除湿式乾燥法で実施されているスケジュールとを勘案し、最初に、低温タイプのスケジュールを作成した。次に、この低温スケジュールの各ステップの平衡含水率を求め、予め初期～末期間を15℃差に取り7段階のステップを切つてある中温・高温スケジュールの乾球温度に対応するように平衡含水率を平行移動し、乾湿球温度差を決定した。

この方法を採用した背景は、現在の除湿式スケジュールは蒸気式スケジュールの各ステップにおける平衡含水率を基にして考案されたという経緯があったためである。ここでは、人工乾燥スケジュールを考える際、乾燥方式が異なる場合、或る方式で確立されたものが他の方式に応用できるか、また応用できたとして互換性を持たせるにはどうしたら良いか、という課題を踏まえた試みを行っている。したがって、従来行われているスケジュール試験における基本的セオリーを逸脱している面は多分にある。

第2表 ヒノキ板材の乾燥に対する、3種類の人工乾燥スケジュール

Step	含水率 (%)(%)	低温スケジュール		中温スケジュール		高温スケジュール		平衡 含水率 (%)
		乾球温度 (°C)	乾湿球 温度差 (°C)	乾球温度 (°C)	乾湿球 温度差 (°C)	乾球温度 (°C)	乾湿球 温度差 (°C)	
1	生~30	35	3.3	45	3.5	60	3.5	14.8
2	30~26	35	3.7	47	4.0	62	3.7	14.2
3	26~22	40	5.0	50	5.0	65	5.0	12.7
4	22~20	40	5.9	53	6.5	68	6.3	11.1
5	20~18	40	7.8	56	8.5	71	8.0	9.6
6	18~16	45	10.0	60	11.0	75	10.0	8.3
7	16~	45	13.5	60	15.0	75	14.4	6.4
8	調湿	45	5.5	60	6.0	75	5.0	12.0

④測定項目

7.水分測定

日本住宅木材技術センター認定機種の高周波式水分計（デルター5）を使用し、背割り面を除く3材面を測定した。測定箇所は各面の両木口から50cm内部に入った部分の2カ所、計6カ所である。

イ.重量測定

電子天秤で1g単位まで計量し、全乾法による初期含水率の数値から推定して含水率の算定に供試した

ウ.寸法測定

デジタルノギスで4材面の断面寸法を測定した。測定箇所は水分測定と同一の箇所である。ただし、背割り面の測定も行ったので計8カ所となる。また、背割り面については、背割り幅を鋼尺で測定した。

エ.割れなど

木口割れと材面割れの発生状況と長さを測定した。さらに、材中央部の矢高を測定し、曲がりとした。

オ.水分分布

当初3m材を8分割して得られた試片をエンドコーティングし、他の試験材とともに乾燥機に入れ、乾燥時間の経過とともに、一個ずつ適宜取り出して推移を調べた。

分割方法は、表層から4層までは5mm厚、5層目は2cm厚に切断し、中心部までの残りの部分を6層目とした。水分分布測定用の試験片を採取した残りの部分は、さらに2個に切断しエンドコーティングして、1つを1週間後、残りを3週間後に、同様な方法で分割し、水分分布の推移の測定に供した。

3. 結果

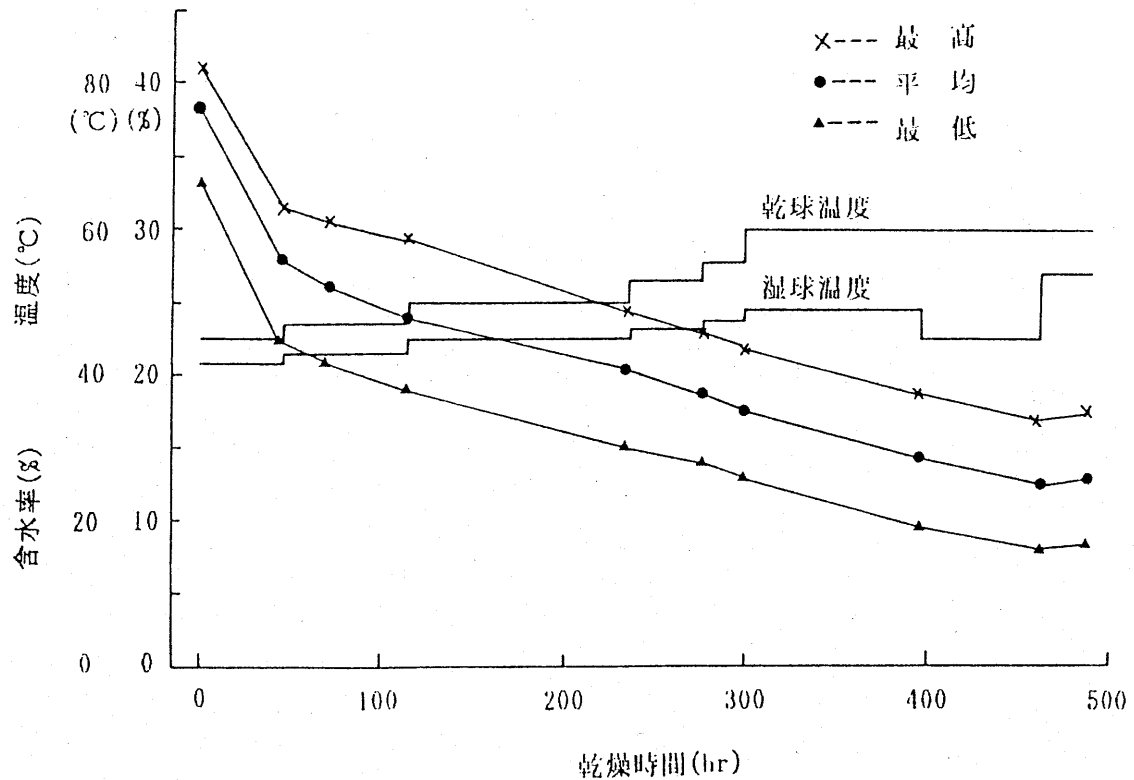
1) 乾燥経過

乾燥経過の一例として中温スケジュールの状況を第1図に示す

平均の初期含水率が約38%だったものを25%まで乾燥させるのに要した時間は約94時間、20%までが244時間、15%までが374時間であった。また、初期の段階で存在した含水率のバラツキは、乾燥末期になってもなかなか減少せず、調湿によってもイコーライジングが不完全であった。このような傾向は、他のスケジュール条件においても同様に見られた。

低温・中温・高温の3スケジュール試験における、仕上げ目標含水率を達成するのに要する乾燥時間を、第3表に示す。ここには、全乾法での測定と高周波式水分計での測定の両方の結果が示してある。なお、時間はロットの平均含水率を基にして算定した。したがって、“ロット全体”あるいは“JAS規格をクリアーするための90%以上の確率”で基準を満たすといった概念とは異なる。

乾燥日数は、仕上げ目標含水率25%（D25）を全乾法で達成するのに、低温で約7日、中温で



第1図 中温スケジュールにおける人工乾燥経過

第3表 仕上げ目標含水率の達成に要する乾燥時間

仕上げ 目標	乾燥範囲 (%)(%)	低温スケジュール		中温スケジュール		高温スケジュール	
		全乾法	水分計	全乾法	水分計	全乾法	水分計
D 25	生~25	162 h 6.8 d	108 4.5	94 3.9	58 2.4	80 3.3	46 1.9
D 20	生~20	340 14.2	234 9.8	244 10.2	156 6.5	160 6.7	88 3.7
D 15	生~15	552 23.0	420 17.5	374 15.6	282 11.8	234 9.8	182 7.6

(注) h (上段) は時間を、d (下段) は日数を表す。

約 4日、高温で 3日強を必要とする。これを水分計測定によると、低温で 4日半、中温で 2日半、高温で約 2日である。同様に、D 20を全乾法および水分計測定法によって達成するのに、それぞ

れ、低温で約14日および約10日、中温で約10日および6日半、高温で7日弱および4日弱である。さらに、D 15の場合は、低温で23日および17日半、中温で15日半および約12日、高温で約10日および7日半である。以上の乾燥必要時間を、低温スケジュールに対する中温・高温スケジュールの比率として整理し、第4表にまとめた。

全乾法で測定した場合、低温に対する乾燥時間の比率は、中温で60~70%、高温で40~50%である。これを、水分計で測定した場合は、全乾法による比率よりさらに数パーセント低い値となる。

乾燥経過について少し詳細に検討すると、中温スケジュールの場合、含水率25%程度までの初期の段階における乾燥時間の短縮効果は著しい。しかし、乾燥中期以後は効果が減少する。これに対し、高温スケジュールでは、初期の段階から末期まで、一貫して顕著な効果が見られる。

第4表 低温スケジュールでの乾燥時間に対する、
他スケジュールでの乾燥時間の比率

仕上げ 目標	乾燥範囲 (%)(%)	低温スケジュール		中温スケジュール		高温スケジュール	
		全乾法	水分計	全乾法	水分計	全乾法	水分計
D 25	生~25	100.0	100.0	58.0	53.7	49.4	42.6
D 20	生~20	100.0	100.0	71.8	66.7	47.1	37.7
D 15	生~15	100.0	100.0	67.8	67.1	42.4	43.3

第5表 3種類の乾燥スケジュールにおける欠点発生量の推移

仕上げ 目標	乾燥範囲 (%)(%)	低温スケジュール			中温スケジュール			高温スケジュール		
		材面割れ		曲り (mm)	材面割れ		曲り (mm)	材面割れ		曲り (mm)
		発生率 (%)	長さ (mm)		発生率 (%)	長さ (mm)		発生率 (%)	長さ (mm)	
D 25	生~25	23.3	78.3	1.95	46.6	39.6	3.05	23.3	44.3	1.80
D 20	生~20	23.3	104.3	2.05	50.0	40.1	4.75	26.7	52.6	2.15
D 15	生~15	33.3	180.7	2.95	53.3	91.6	6.20	33.3	57.5	2.80

(注) 材面割れ：発生率は無背断面における発生の割合で、長さは1本当りの平均値を表す。
曲がり：4材面に発生した量を合計した値で表す。

2) 欠点発生量の推移

第5表に、各スケジュールにおける材面割れおよび曲がりの発生量を、乾燥時間ごとに整理して示した。

①材面割れ

発生率で見ると、低温20~30%、中温50%前後、高温20~30%であった。発生率の計算では、発生数を(3材面×供試体本数)の積で除しているため、実数をおおまかに言うならば、低温・高温条件の場合には1材面、中温の場合で1~2材面に割れが発生したということになる。また、発生のかたを見ると、大半が節に起因するものであり、無節部から単独に発生した材面割れはほとんど観察できなかった。

発生率の推移は、乾燥後期に若干高くなる傾向があるが、大半は乾燥初期に生じている。

発生した材面割れの長さは、低温条件の場合が一番長く、中温、高温の順に短かった。ここで示したのは、あくまで発生した材面割れの平均値であるため、材質的要因によって生じたと思われる大きな割れも含めている。したがって、分布のピークは第5表に示した数値よりも低いところにある。

材面割れの長さの推移を見ると、乾燥初期から徐々に進行する傾向が、乾燥後期まで続いた。

材面割れが発生する可能性を、1本の材についておおまかに言うならば、背割りが無い3材面の中の1材面において、節に起因する約5~10cm程度の割れが生じる程度と言える。

②曲がり

結果から見ると、中温条件が一番大きく、低温と高温が同程度であった。この程度であれば、例えば一番大きかった中温15%仕上げの場合でも、初期木取りが13cmあるため、後述する収縮率を勘案しても、仕上げ挽き時に除去しようと考えられる。

曲がり量の推移については、乾燥が進むにしたがって増大する傾向にある。

曲がり量と木取りの関係では、一般に、髓が中心にない場合に曲がり大きいと言われている。今回の試験でも、その傾向が若干うかがわれた。しかし、そうでないものもあり、木取りから、一定の曲がり方あるいは曲がり量を推定する手がかりを得るには至らなかった。

3) 収縮率の推移

第6表に、各乾燥スケジュールにおける乾燥範囲ごとの収縮率を示す。背割り面および背割りが無い3材面の平均を示してある。

無背割り面の収縮率は、中温が一番小さく、高温・低温の順に大きかった。

背割り面の収縮率は、背割りが開くため、当然負の値を示す。すなわち、見かけ上、寸法が増大することになる。寸法の増大が大きい順は、高温 > 中温 > 低温 であった。

収縮の進行状況は、柱材の場合は、当然水分傾斜を有するため、必ずしも理論的に言われるような含水率と直線的な関係になっていないように思われた。

第6表 3種類の乾燥スケジュールにおける収縮率の推移

仕上げ 目標	乾燥範囲 (%)(%)	低温スケジュール		中温スケジュール		高温スケジュール	
		無背割面 平均 (%)	背割面 (%)	無背割面 平均 (%)	背割面 (%)	無背割面 平均 (%)	背割面 (%)
D 25	生~25	0.95	-1.20	0.85	-1.00	0.90	-1.40
D 20	生~20	1.80	-1.80	1.35	-1.75	1.65	-2.45
D 15	生~15	2.75	-2.20	2.15	-2.45	2.65	-3.50

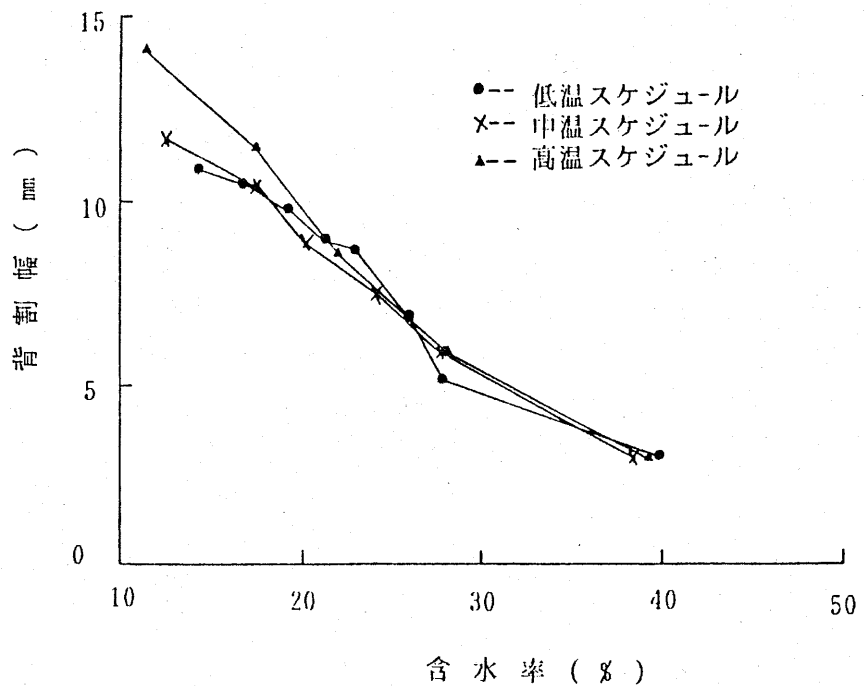
(注) 負の値は材の膨潤を意味する。

4) 背割り幅

第2図に、各乾燥スケジュールにおける背割り幅の推移を示す。

高温条件において、乾燥末期に背割り幅の増大が著しく、他の条件とかけ離れた値を示した。しかし、乾燥中期までは乾燥条件間でそれほど差がなかった。

ある一定のバラツキ範囲があることを前提にすれば、十分に、背割り幅を含水率測定を目安として使用できると判断される。



第2図 各乾燥スケジュールにおける背割り幅の推移

5) 人工乾燥過程における水分分布の推移

第3図に、人工乾燥過程における水分分布の推移の1例を示す。ここでは、中温スケジュール

の場合が示されている。測定値は全乾法による。

乾燥開始前の水分分布は、心材率が高いためにフラットな状態である。

乾燥初期の段階には、表層部と中心部で大きな水分傾斜が生じている。乾燥開始後 2日程度では、表層より 3cm程度までしか乾燥が及ばない。

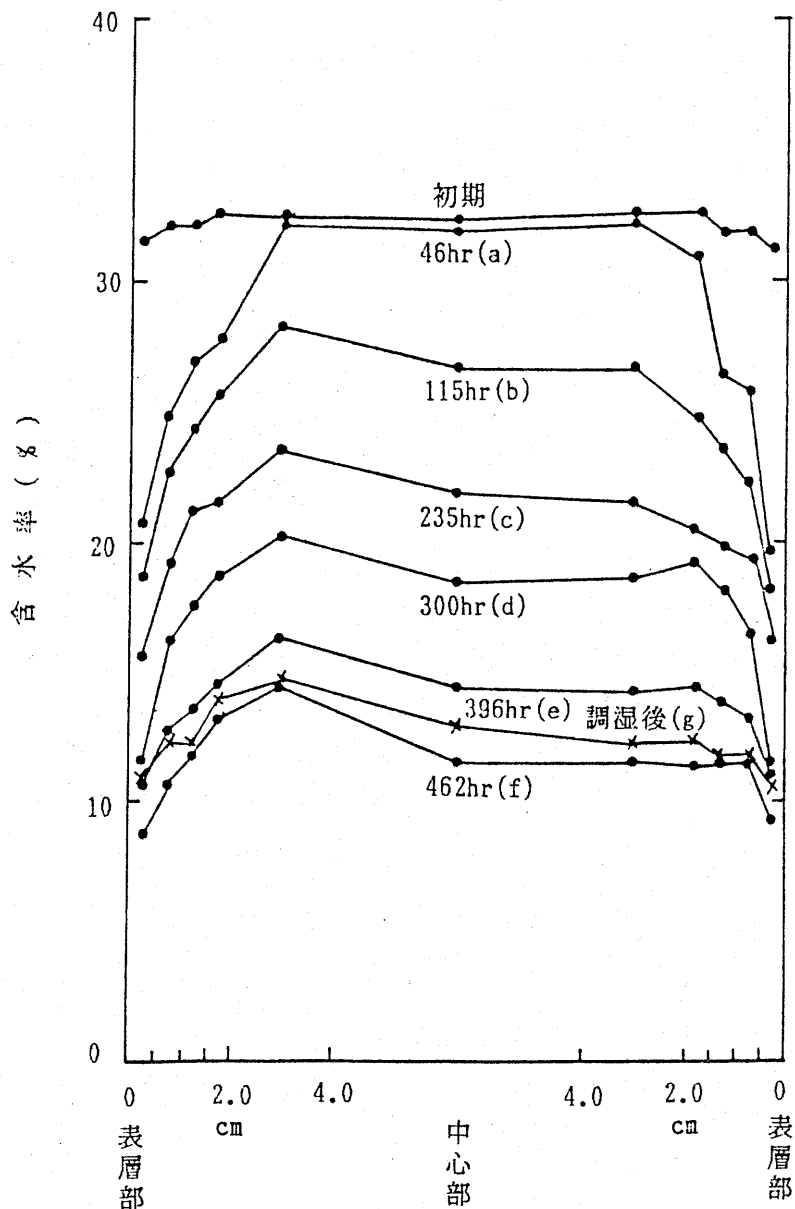
それ以後、乾燥日数が経過するにしたがって、徐々に内部においても乾燥が進むようになるが、依然として表層部と中心部では大きな水分傾斜が存在している。

乾燥末期になると、水分傾斜の程度が緩和されるが、5~6%の差は存在する。

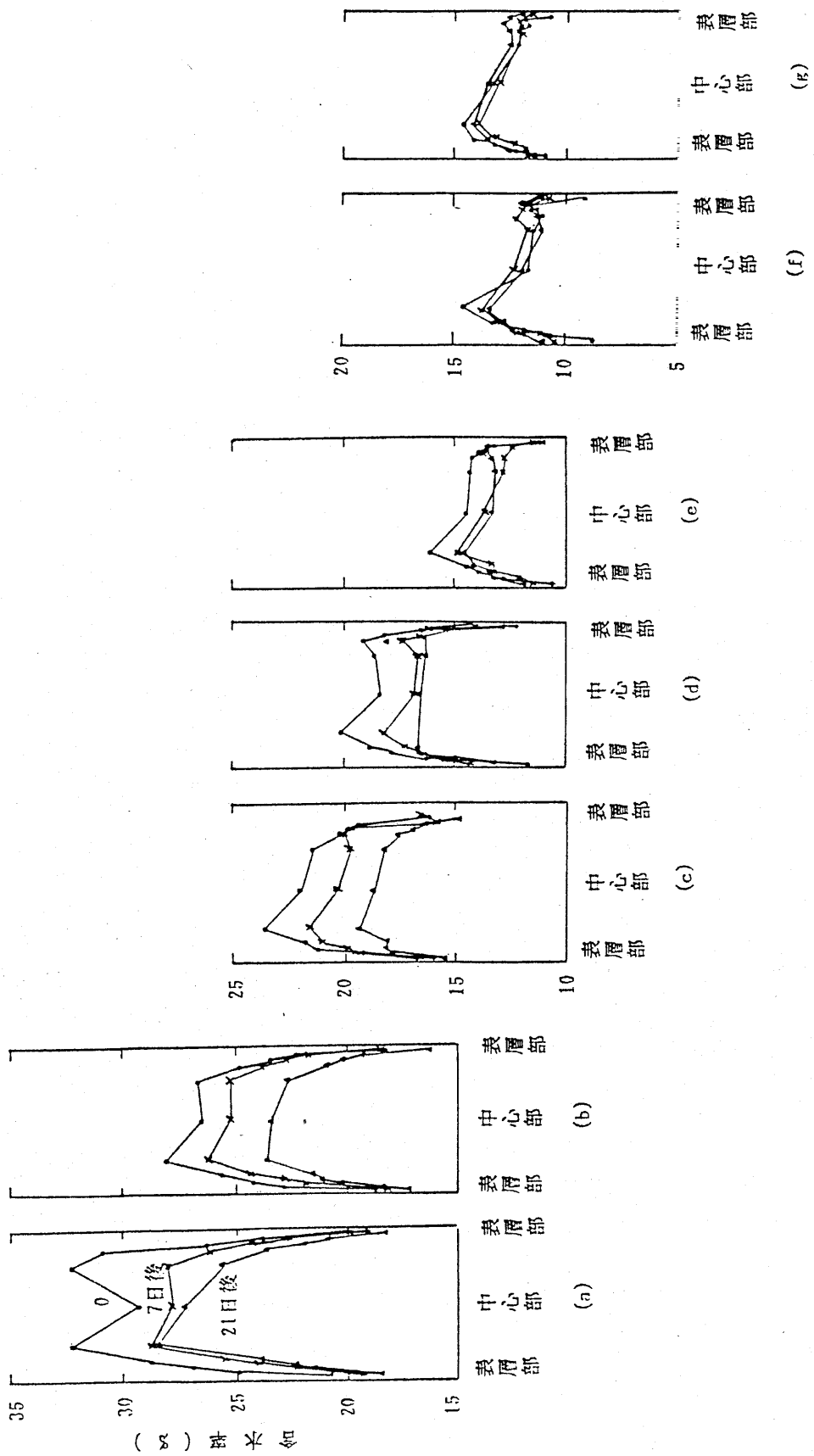
調湿によって、水分傾斜は2~3%程度まで低減される。

上述したような水分分布の状況と、高周波式水分計の測定値とを勘案すると、人工乾燥過程における水分計の指示値は、表層より 6~7mm程度内部までの部分の含水率を表していると考えられる。換言すれば、表層より1.0~1.5mm程度の部分の平均含水率を示していると言える。ただし、乾燥末期においては、さらに 5mm程度内部までの水分状態を表していると判断される。

6) 仕上げ含水率の異なる材の屋内養生による水分分布および平均含水率の推移



第3図 人工乾燥過程における水分分布の推移



第4図 仕上げ含水率が異なる材の屋内放置による水分分布の推移

人工乾燥の途中で適宜取り出した試験材を、1週間後および3週間後に分割して求めた水分分布の変化を第4図に示す。また、第7表にはその時々平均含水率を示す。なお、ここでの試験材には、エンドコーティングを行ったとは言え、短尺材であったため、寸法効果が生じている可能性はいなめない。

仕上げ含水率20%程度までは、屋内放置により、材表面および材内部の両方に含水率の低下がみられる。減少の程度は、表層に近い部分よりも中心部の方が若干大きい。ところが、仕上げ含水率が20%を下回る頃より、屋内放置することで、表層に近い部分はかえって含水率が高くなり、中心部が低くなる状況が見られる。つまり、水分傾斜がより小さくなる方向へ動く。また、仕上げ含水率が15%を下回る材では、1週間放置することによって水分傾斜が数パーセントにまで減少する。

平均含水率の低下を見ると、30%を若干下回る程度の仕上げ含水率の材は、1週間で4%、3週間では5%程度の減少が見られる。それ以下の20%程度までの仕上げ含水率の材は、1週間で約1%、3週間で3%程度の減少が見られる。

20%から15%程度の仕上げ含水率の材は、初期の1週間のみに約1%の低下が見られ、その数はほとんど変化しない。15%を下回る材では、ほとんど変化しないか若干高めになる。

第7表 仕上げ含水率の異なる材の平均含水率の推移

試験材	乾燥時間 (hr)	全乾法による平均含水率			水分計による平均含水率		
		仕上げ時 (%)	1週間後 (%)	3週間後 (%)	仕上げ時 (%)	1週間後 (%)	3週間後 (%)
a	46	30.2	26.5	25.4	19.3	14.3	17.5
b	115	25.6	24.3	22.2	20.5	16.3	18.0
c	235	21.3	19.9	18.1	15.5	16.4	15.5
d	300	18.0	16.6	16.5	14.0	13.3	14.6
e	396	14.2	13.3	13.5	11.8	12.9	12.4
f	462	11.9	12.1	12.0	10.5	12.9	11.9
g	調湿後	13.0	12.9	13.1	8.9	12.6	13.5

さらに、第7表には、高周波式水分計で測定した場合の屋内放置による含水率の推移も同時に示してある。

乾燥経過の結果の項で前述したように、一般に、全乾法と比較して、水分計測定値の方が低く表示される。

放置することにより、全乾法で仕上げ含水率20%程度までの材は、水分測定値が低下したり上昇したりする時期はあるが、全体的には低下する。

全乾法で仕上げ含水率20%を下回る材においては、放置することによって、若干の昇降はある

ものの、3週間程度の放置後には、水分計測定値は上昇する。

4. 考察

以上の結果から考えると、現在の時点で最も多く導入され実用に供されている除湿式乾燥機による乾燥よりも、短時間で乾燥できる可能性が見出せたと考えられる。すなわち、高温条件を設定することができる蒸気式乾燥機により人工乾燥を行えば、大幅に時間短縮が可能であり、しかも、その際、材の損傷も少ないことが確認できた。

一般に、高温で乾燥を行った場合、材の変色が問題視されることが多い。今回の試験の結果、目視ではあるが、確かに表層部は変色の度合いが大きいのが、二度挽きの段階で確実に取り除かれる範囲にとどまると判断された。従来、“建築用材については除湿式乾燥が最も適する”という考え方が一部で強く主張されてきた。その根拠は、“材の損傷が少なく、変色も少ない”といったものであったと思われる。しかし、実状は、初めて人工乾燥機を導入することが大半であった製材業界にとって、ボイラーが不用で取り扱い方法が容易であった点によるところが大きいように判断される。また、人工乾燥の程度が甘い、例えば、ヒノキ柱材の場合、水分計測定値で20%程度の含水率の材を生産するには恰好の乾燥方法であった。現実には、1週間程度の人工乾燥サイクルで運転している企業が多い。しかし、ユーザー側からは、良質な人工乾燥材が大量に求められる時代が到来している。新JASにおいて、新たに質的ランク付けが規定されたのも、このような時代背景を受けたものである。したがって、乾燥材の質と量の確保は焦眉の課題である。この課題の解決策を考える時、当然、乾燥時間の短縮というハードルを越えなければならない。すなわち、量の確保には乾燥施設の充実という点も十分考えられるが、1回の乾燥サイクル時間の短縮も当然必要である。また、質の確保という点においても、時間短縮が可能な方法にのっとった状況であれば、低い含水率まで乾燥できる余裕が生じるためである。

以上の点を考慮に入れた場合、果して、現在の除湿タイプの乾燥方法のみで今後の乾燥材をめぐる展開についていけるかどうか疑問が残る。無論、この場合でも、特殊用材等における除湿乾燥方式を否定するものではない。今回の試験結果から判断すると、除湿乾燥における乾燥温度より高温域での人工乾燥は十分可能であり、今後の方途を考える上で位置付けしうると考える。

ここでもう1点、乾燥コスト面を考慮しなければならない。今回は当センターの試験機による試験であったため正確な言及はできない。ただ、あくまで参考であるが、今回の試験においては、ボイラーの燃料代自体は3条件間でそれ程差がなく、ファン等の電気代については、高温条件の方が安価であった。これをそのまま除湿乾燥と比較することは単純にはできないが、除湿乾燥における末期の含水率低下が著しく少なくなることを考えると、今回の方式の方が直接経費においてコスト安である可能性が高い。また、1サイクルの乾燥日数の短縮という点は、施設の減価償却が早いばかりでなく、材自体の資本回転率が高まるという点において極めて有利である。

今回の試験の目的であった“異なる乾燥方法の間でスケジュールに互換性を持たせる”という試

みについては、明確に言及できない。すなわち、実験結果としては、平衡含水率による水平移動である程度対応できたと言えるが、詳細に見ると、乾燥経過として滑らかさを欠く部分が存在したり、欠点の発生限界に対して十分な考察ができない点がある。ただ今回の実験で、従来明らかにされているように、乾燥時間 "t" と温度 "θ" との間に

$$\log t = a - b \cdot \theta$$

の関係式が成立するという点については、ある程度の結果が得られた。しかし、理論的に言って、水分拡散係数と温度の関係、水分傾斜に伴う水蒸気圧勾配の生じ方、乾燥過程において材が非定常状態である点等を考えた場合、果して、平衡含水率をもとにした考え方が適当であるか疑問が残る。

従来広葉樹の板材については、乾燥スケジュールの立て方について十分に理論考察がなされるとともに、多くの実験が繰り返されることで、様々な状況に対応可能であったと思われる。しかし、建築用材、特に心持ちの厚材については、必ずしも理論的な考察が十分になされているとは言えないように思われる。したがって、スケジュール自体が未だ経験則による手さぐりの状況を脱していないと考えられる。今後、何らかの試みが必要である。

最後に、文中で何度も指摘した全乾法と高周波水分計による含水率測定値のずれの問題を考察する。高周波水分計の場合、今回使用した "デルター5" のように、日本・住宅木材技術センター認定機種であっても、水分傾斜がある材では、平均含水率を表示しているとは言えず、かなり低めの含水率を指示する。一般に、厚材が多い建築用構造材を人工乾燥した場合、かなりの養生期間を置かない限り、水分傾斜は消滅しないと考えられる。新JASにおける含水率の測定方法は、「全乾重量法によって含水率を測定する。ただし、全乾重量法以外の方法によって試験の適合基準を満足するかどうかが明らかに判定できる場合は、その方法によることができる。」と規定されている。この規定を現実に即して考えてみると、全乾重量法は困難を伴うから、"ただし～" 以下の文章を援用して、実際には水分計を使用するということになる。ここで、水分計の指示値の意味が問題になる。新JASの文章によると、適合基準を満足するかどうかが判定できれば良いのであって、仮に絶対値がずれていても、何らかの適切な補正が可能であれば使用できると判断される。前述したように、絶対値は平均含水率より低く表示されている場合が多いと考えられるため、水分計の値をそのまま乾燥規定の合否判定に使用するのであれば問題が残ると思われる。したがって、今後、水分計を新JASの合否判定に使用するのであれば、何らかの補正方法を明らかにする必要がある。

部分的な議論として、"建築構造材では、乾燥性能も表層部分のみで十分" という考え方がある。強度性能等に含水率が与える性能的問題等の議論は別として、少なくとも、表層部のみ乾燥では、その後寸法変化が生じることは実験結果より明らかである。今回の新JAS制定の大きな柱の1つが規定寸法の導入であったことを考えると、的確な乾燥材の生産が望まれるところであろう。

以上、ヒノキ柱材の人工乾燥試験の結果について述べた。今後は、今回指摘した問題点を踏まえながら、引き続き試験を行う予定である。