

2004年度 木材と水研究会、木材強度・木質構造研究会  
合同シンポジウム

## 「構造材としての乾燥材」

2004年11月15～16日

茨城

主催：日本木材学会木材と水研究会

日本木材学会木材強度・木質構造研究会

# 2004年度 木材と水研究会、木材強度・木質構造研究会合同シンポジウム 「構造材としての乾燥材」

主催：日本木材学会 木材と水研究会、強度・木質構造研究会

日程：2004年11月15日（月）、16日（火）

会場：森林総合研究所 2F 大会議室（茨城県つくば市松の里1）

## 11月15日（月）

13：30～14：00 受付

14：00～17：00 講演会

1. 蒸気式高温乾燥の処理条件と乾燥材の性質  
長野県林業総合センター 吉田孝久氏
2. 高周波・蒸気複合乾燥の条件と乾燥材の性質  
秋田県立大学木材高度加工研究所 川井安生氏
3. 高周波加熱減圧乾燥の特徴と利用状況  
岡山県木材加工技術センター 河崎弥生氏
4. 過熱蒸気乾燥の処理条件  
森林総合研究所 小林功氏
5. 乾燥法がスギ心持ち柱材の強度性能に与える影響および蒸煮減圧処理による平角材の水分変化  
熊本県林業研究指導所 池田元吉氏

17：30～19：30 懇親会

## 11月16日（火）

9：00～11：30 講演会

6. 乾燥材および熱処理材の強度性能について  
森林総合研究所 加藤英雄氏
  7. 乾燥材・熱処理材の耐朽性・耐蟻性  
森林総合研究所 桃原郁夫氏
  8. 耐力要素を構成する部材の含水率が強度性能へ与える影響について  
森林総合研究所 三井信宏氏
- 総合討論（司会 森林総合研究所 黒田尚宏氏）

見学会 11月16日（火）12：15～16：30

- 積水ハウス 関東工場（木造軸組金物工法向け専用プレカットライン）
- 埼玉県宮代町役場新庁舎

2004年度 木材と水研究会、木材強度・木質構造研究会  
合同シンポジウム

## 「構造材としての乾燥材」

## 目次

1. 蒸気式高温乾燥の処理条件と乾燥材の性質  
長野県林業総合センター 吉田孝久氏 . . . 1
2. 高周波・蒸気複合乾燥の処理条件と乾燥材の性質  
秋田県立大学木材高度加工研究所 川井安生氏 . . . 13
3. 高周波加熱減圧乾燥法の特徴と利用状況  
岡山県木材加工技術センター 河崎弥生氏 . . . 18
4. 過熱蒸気乾燥の処理条件  
森林総合研究所 小林功氏 . . . 34
5. 乾燥方法がスギ心持ち柱材の強度性能に与える影響および蒸煮減圧処理による平角材の水分変化  
熊本県林業研究指導所 池田元吉氏 . . . 43
6. 乾燥材および熱処理材の強度性能について  
森林総合研究所 加藤英雄氏 . . . 48
7. 熱処理と耐久性  
森林総合研究所 桃原郁夫氏 . . . 62
8. 耐力要素を構成する部材の含水率が強度性能へ与える影響について  
森林総合研究所 三井信宏氏 . . . 66

## 蒸気式高温乾燥の処理条件と乾燥材の性質

長野県林業総合センター 吉田孝久

### 1. はじめに

構造材の乾燥は、比較的短時間で乾燥する造作材や集成材のラミナの乾燥とは違って、断面の大きな材の乾燥のため、長時間の乾燥が必要となる。また、材の断面方向での乾燥を考えた場合、表層ではかなり短時間で乾燥が終了してしまう、いわゆる「乾熱乾燥」が行われ、一方、材内部では長時間水分を持った状態で乾燥が進む「湿熱乾燥」が行われる。特に高温乾燥の場合はこの傾向が強い。乾熱乾燥された材と湿熱乾燥された材では、当然その性質も異なるものと思われ、この二つの乾燥が同居する高温乾燥構造材の性質を知ることは容易なことではない。

ここでは、柱材を対象とした実大での高温乾燥材について、これまで行ってきた当所での試験から得られた知見と関連の文献を含めて、その特徴を列記してみた。

### 2. 材面割れと内部割れ

木材は軸方向、半径方向、接線方向で収縮の度合いが違ういわゆる異方性をもつ材料であり、このことは木材が乾燥する過程で秩序正しく収縮しないことを意味する。半径方向に比べ接線方向の収縮率は2倍も大きいため、特に心持ち柱材などでは、乾燥過程を通じて材面割れを抑えて乾燥することは非常に難しいとされてきた。

現在進められている高温乾燥は、100℃以上の高温域における木材の軟化と粘弾性特性を活かした方法であり、乾燥初期に一気に低湿度状態をつくることにより、あえて表層部と内層部に大きな水分傾斜を生じさせ、表層部に強い引張りのドライイングセットを形成させる方法で、これにより材面割れを抑制しようとしたものである。

高温乾燥では、材面割れが少なくなる(図1)と同時に、乾燥中期から末期にかけて表層部に強い圧縮応力が働くため(図2)、一旦発生した材面割れであっても乾燥が進むにつれて閉じてしまう場合も多く見られる。

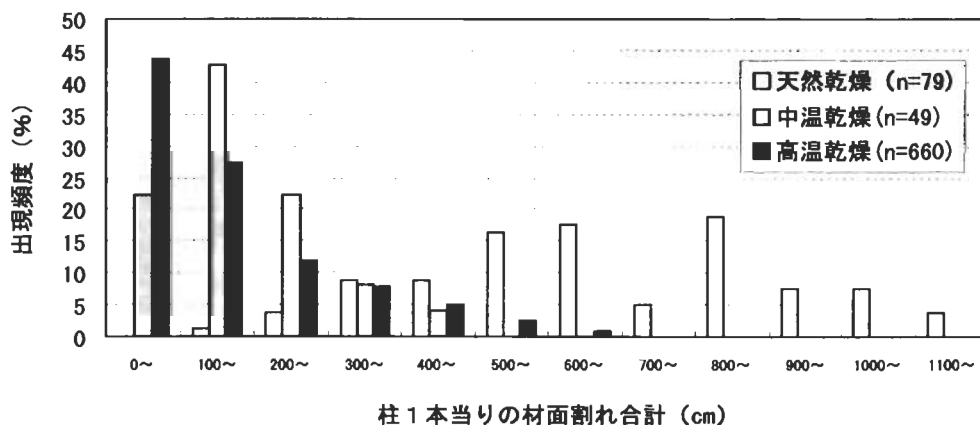


図1 乾燥方法別の3m柱1本当りの材面割れ発生量

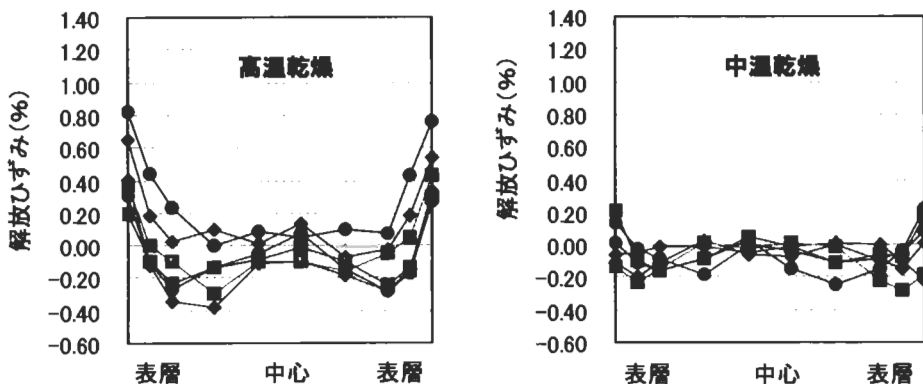


図2 高温乾燥材と中温乾燥材における解放ひずみの分布 (徳本<sup>1)</sup>)

しかし、高温のまま最後まで乾燥を続けると、含水率40%付近から内部割れの発生が確認され、乾燥の中期から末期にかけて内部割れの発生が目立つ(図3, 4)。これは乾燥中期から乾燥温度を低く保持したり、あるいは天然乾燥に移行することにより、かなり防止できることが明らかになった(写真1, 図4)。

材面割れや内部割れの発生は、乾燥温度ばかりでなく心材率や接線方向の強度性能などと関係があると思われることから、今後これらを究明し、あらかじめ被乾燥材をこれら物理的因子で選別し、それに応じた乾燥スケジュールと組み合わせることで、さらに割れを防止する確率は高くなると思われる。

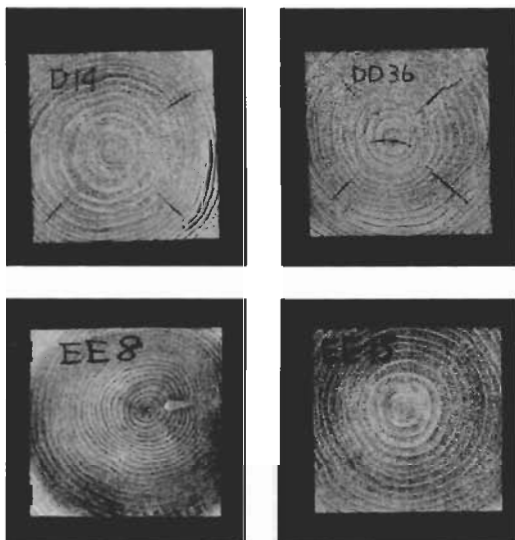


写真1 内部割れの様子

上段: 高温セット+高温乾燥

下段: 高温セット+中温乾燥

内部割れは角部に放射状に発生することが多い。高温乾燥のみでも内部割れの発生が無い材もある。

24時間程度の高温セット後に中温乾燥, 高周波蒸気複合乾燥, 高周波減圧乾燥, 天然乾燥等を組合せれば, 内部割れはかなり減少する。

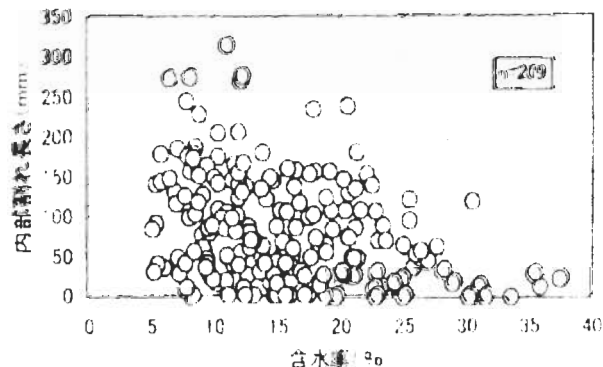


図3 高温乾燥での含水率と内部割れ長さの関係 (小田<sup>2)</sup>)

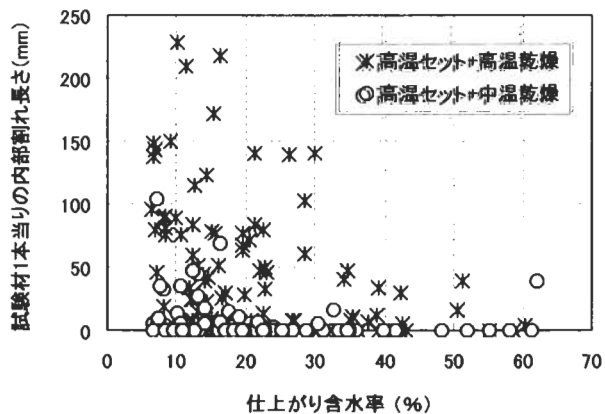


図4 スギ13.2cm正角の仕上がり含水率と内部割れの関係<sup>3)</sup>

### 3. 水分傾斜

柱材くらの断面を持った材を対象とした外部加熱方式の乾燥では、高温乾燥に限らず中温乾燥であっても、乾燥仕上がり時には大きな水分傾斜が存在してしまう。

図5に高温乾燥後の水分傾斜を、全体含水率と部位別含水率の関係で示した。

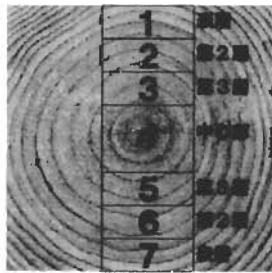
両者は高い相関関係にあり、この中で材全体の含水率とほぼ一致するのは第2層であった。つまり、全体含水率は13.2cm柱材では表層から約25mm、11.7cm柱材では約22mm程度入った部分の含水率とほぼ一致した。このことは実用的に考えると、水分抵抗式含水率計であっても、この位置で含水率測定を行うことで、全体含水率が全乾法による含水率とかなり近い値で把握できることを示している。(但し、乾燥後1~2週間程度までの乾燥材)

仕上がり含水率と水分傾斜の関係では、仕上がり含水率が低下するほど水分傾斜は小さくなるものの、乾燥材と言われるD20やD15であっても水分傾斜は存在する。

仕上がり含水率(全体含水率)が20%の場合、表層と中心部の含水率差は図5の関係式から算出すると27%程度あり、また、仕上がり含水率が10%の場合は13%程度存在する。

この水分傾斜は、乾燥材(柱材)の断面の大きさを考えると、板材と同様に乾燥装置内で調湿処理的な工程で簡単に解消できるとは思われない。このため乾燥終了後に屋外で時間をかけて養生することが良い方法と思われるが、この場合、乾燥時間の面からはかなり不利になり、業者側は簡単に納得しないであろう。

どれほどの水分傾斜であれば、その後の利用にあたって問題が生じないかは明らかではないが、水分傾斜が小さい材は大きい材よりも寸法安定性がよいことは間違いないようである(図6)。



水分傾斜測定のための試験片の分割

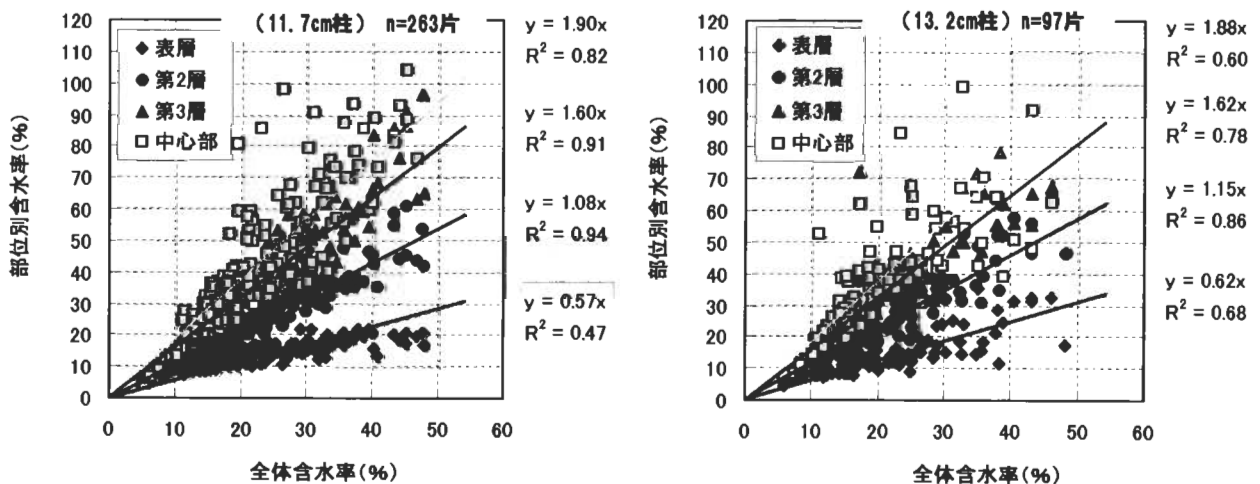


図5 高温乾燥後の水分傾斜<sup>4)</sup>

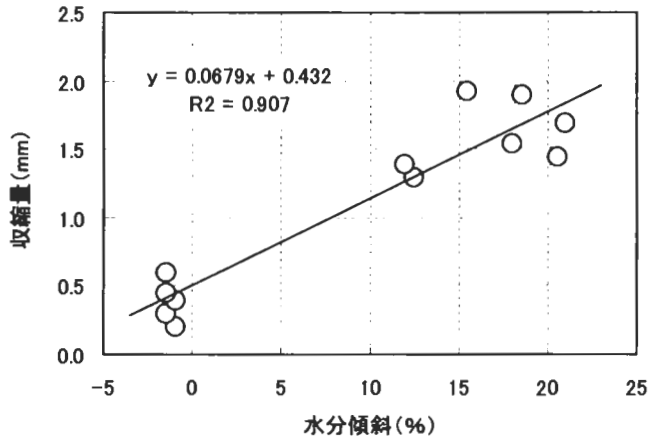


図6 乾燥後の水分傾斜と1年存置後の収縮量 (山本<sup>5)</sup>)

#### 4. 収縮率

図7に含水率と収縮率の関係を示したが、仕上がり含水率が10~20%の範囲で見ても、高温乾燥材が中温乾燥材に比べ特に大きい収縮率を示すことはなく、いずれの場合も収縮率はおよそ2~3%であった。(寸法の測定は材面割れの無い部分を計測)

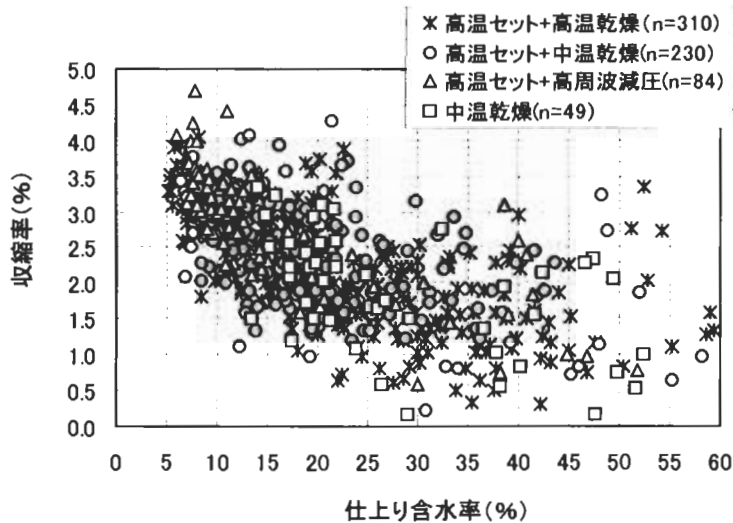


図7 高温乾燥及び中温乾燥における収縮率<sup>3)</sup>

#### 5. 平衡含水率

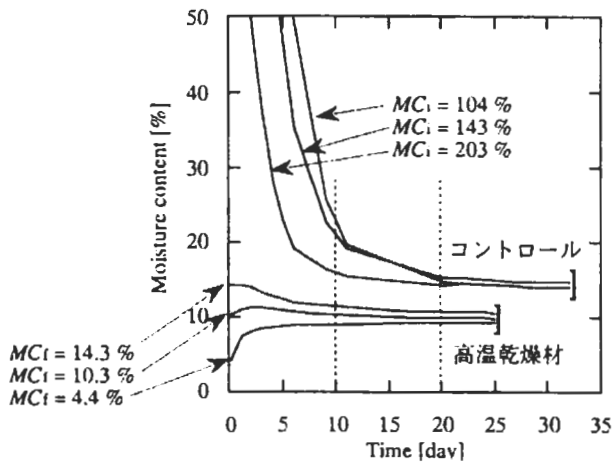
高温乾燥材の平衡含水率は低下するという報告は多い(図8, 9, 10)。

よく言われることに、24時間程度の高温セット(DBT:120°C/WBT:90°C)を行った後に天然乾燥を行った場合、天然乾燥中の乾燥速度が、生材から天然乾燥を行った材に比べ遅いということがある。これは、天然乾燥のみの乾燥では、乾燥が進むにつれ材面割れが生じ、このことが乾燥速度を速めていることも考えられるが、一方で高温乾燥材(高温セット材)の吸放湿機能が天然乾燥材と比べ低下していることにも影響があると思われる。

どういった熱処理(例えば乾熱処理とか湿熱処理)の仕方がどのように吸放湿機能に影響す



るのか、つまり寸法安定性にどう影響するのか、今後明らかにさせたい課題の一つである。これには冒頭にも述べたとおり乾熱乾燥下にある表層と、湿熱乾燥下にある中心部での吸放湿性の差異を明らかにすることも重要であると考え。



注:  $MC_i$ : 初期含水率,  $MC_f$ : 乾燥終了時の含水率  
試験材の寸法: 断面25mm×25mm, 長さ350mm

図8 試験材の調湿に伴う平衡含水率 (久保島<sup>6)</sup>)

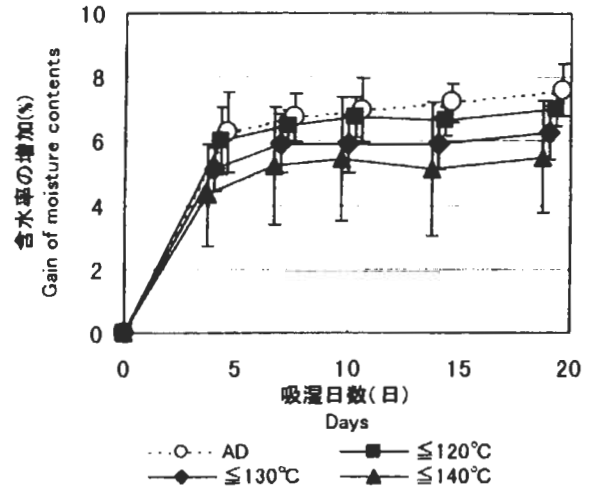
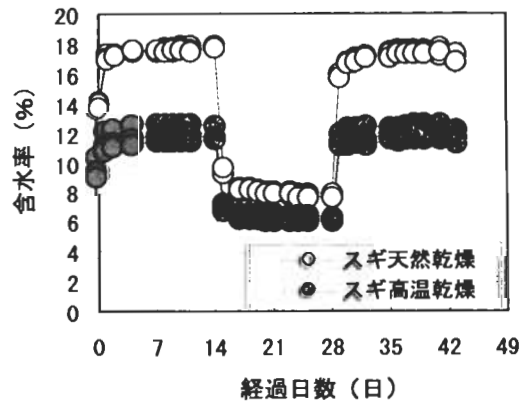
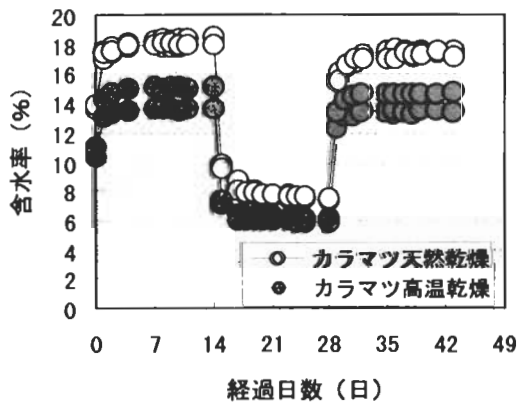


図9 高温乾燥スギの心材の吸湿性 (栗崎<sup>7)</sup>)  
AD: 天然乾燥材  
120°C, 130°C, 140°C: 最高乾燥温度



2週間毎に温度 20°C で平衡含水率 18%→6%→18%とした。

図10 天然乾燥材と高温乾燥材の吸放湿の差異<sup>8)</sup>

## 6. 材色

高温乾燥が普及して間もない頃、乾燥材の材色が黒いとかくすんだ色になる等、材色の変化を盛んに指摘された時期があった。しかし、その後の乾燥スケジュールの改良により、天然乾燥に比べ材色の変化は依然あるものの、その度合いはかなり軽減され、指摘の程度は徐々に少なくなってきているように思われる。

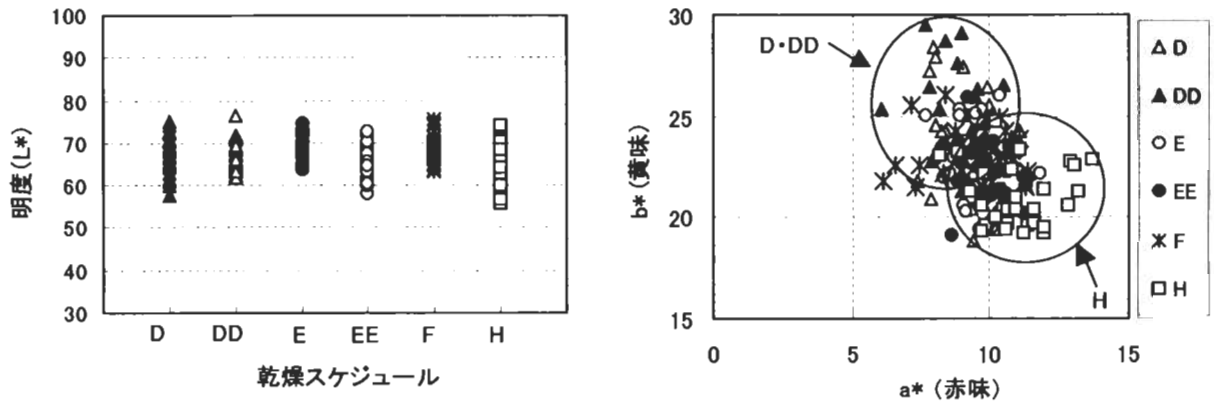
材色は、処理温度と湿度さらに時間の組合せで大きく変化するものと思われ、またこれは樹種による特性もあるものと思われる。

図 11 に高温乾燥を終了した材の表面を 3mm 程度鉋削し, この部分の心材における材色 (明度 L\*, 赤味 a\*, 黄味 b\*) を中温乾燥材との比較で示した。どの乾燥条件においても心材の明度 L\* は 65~75 の範囲にあり, 大きな差は認められなかった。

また図 12 には同様に彩度 (a\* と b\*) を示した。高温乾燥を終始続けた乾燥材 (D, DD) では中温乾燥のみでの乾燥材 (H) に比べ, 赤味が低下し黄味が増大した。いわゆる色やけの状態となった。これは目視においても明らかであった。

また, 図では示していないが, 中温乾燥材や高温乾燥材は天然乾燥材と比較すると明らかな色差が認められる。天然乾燥材の辺材は白が強調された色調であった。

図 13 は, 蒸煮時間の違いによる材色を示したものである。蒸煮時間が長くなれば材色の変化が認められ, 特にスギ辺材の明度 L\* の低下が大きい。



D: 高温セット+高温乾燥 110°C, 78 h    DD: 高温セット+高温乾燥 110°C, 102 h  
 E: 高温セット+中温乾燥 90°C, 150 h    EE: 高温セット+中温乾燥 90°C, 192 h    F: 高温セット+中温乾燥 75°C, 246 h  
 H: 中温乾燥 70~80°C, 336 h    (高温セット: 120°C, 18 h)

図 11 乾燥スケジュール別の乾燥後の明度<sup>8)</sup>

図 12 乾燥スケジュール別の乾燥後の彩度<sup>8)</sup>

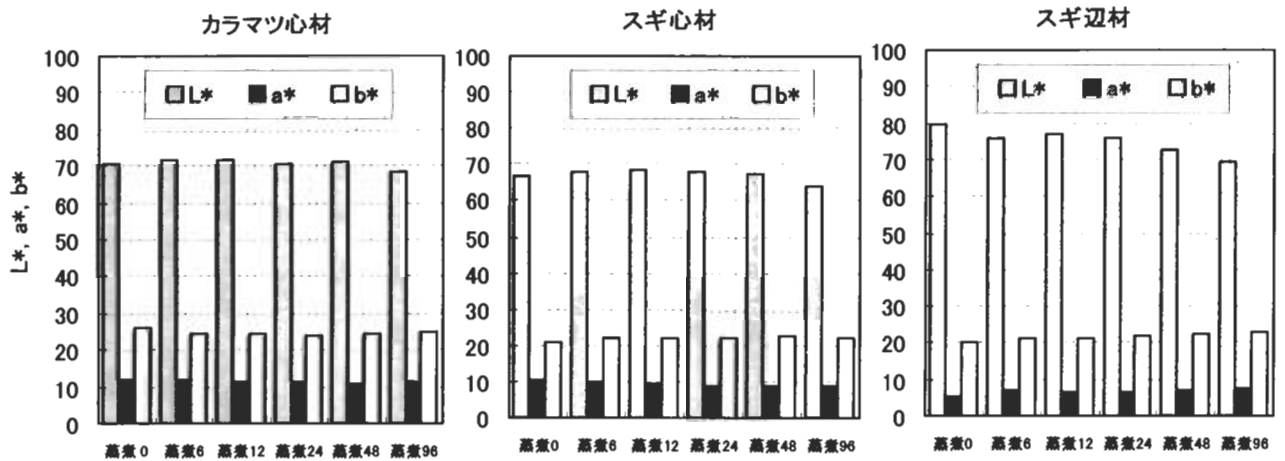


図 13 蒸煮時間の違いによる材色の差異

### 7. 耐久性 (耐朽性, 耐蟻性)

筆者らは高温乾燥材の耐蟻性や耐朽性については試験を行っていないため, 過去の木材学会大会での発表を調べてみた。2002 年, 愛媛大農の狩野らは, 乾燥過程において蒸煮処理段

階と乾燥段階のどちらの段階で耐久性に変化を生じるのかを、スギを用いて試験した。その結果、ヤマトシロアリの強制摂食試験及び選択摂食試験では、高温乾燥材の摂食量が天然乾燥材に比べて大きい、摂食量に対する蒸煮処理の影響は無かったと報告している<sup>9)</sup>。

2003年、秋田県大木高研の澁谷らは、愛媛県産スギについて乾燥条件別のヤマトシロアリ強制摂食試験を実施している。その結果、摂食量は高温乾燥材で増加するものの、耐蟻性にはさらに材に含有されるn-ヘキサン抽出物量が影響し、これが乾燥後の耐蟻性の変化に反映しているのではないかと結んでいる<sup>10)</sup>。

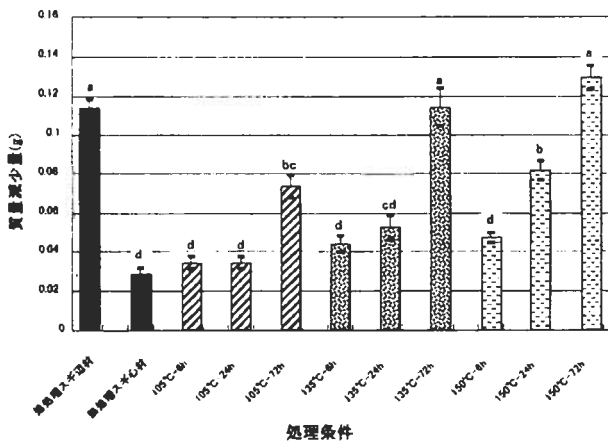
2004年、富山林技セの栗崎らは、スギとアテを用いて耐朽性と加熱温度(60℃~120℃の5条件)、湿度、加熱時間との関係を検討した。オオウズラタケの強制腐朽試験の結果、7日間の高湿加熱試験片の質量減少率は未加熱試験片<60℃<80℃であり、さらにスギ<アテであったが、100℃~120℃で1~4日間の加熱では加熱による耐朽性の低下は認められたものの、加熱条件によりスギとアテでは異なった耐朽性を示したと報告している<sup>11)</sup>。

石川林試の松元らは、能登ヒバを高温乾燥(120℃, 30時間)、中温乾燥A(85℃→95℃, 142時間)、中温乾燥B(50℃→70℃, 262時間)及び天然乾燥で乾燥し、耐朽性試験を実施した。その結果、耐蟻性(イエシロアリ)はいずれの乾燥条件であっても質量減少率は3%未満であったが、乾燥温度が高いほど質量減少率は高くなったとし、また、耐朽性(オオウズラタケ、カワラタケ)においては乾燥温度による影響は明らかではなかったが、オオウズラタケでは有意差はないが乾燥温度が高いほど質量減少率が高くなる傾向が認められたとしている<sup>12)</sup>。

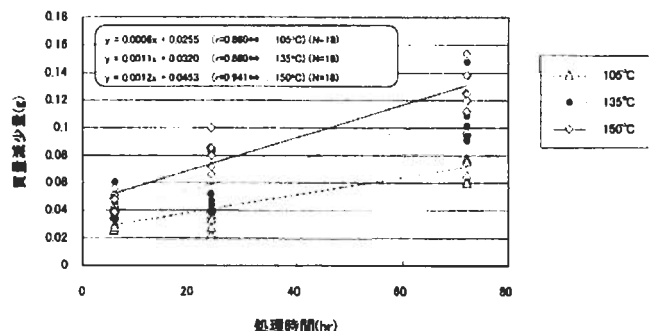
また別の報告ではあるが、森林総研の大村らは、異なる条件で熱処理したスギ無欠点心材について、シロアリの摂食による質量減少量と処理条件との関係を求めた。その結果、質量減少量は処理温度及び処理時間と正の相関が認められ、さらに質量減少量には処理時間の方が処理温度よりも大きく影響すると結論している(図14)<sup>13)</sup>。

以上の報告を見ても、乾燥温度が高くなれば耐久性が低下する傾向が視られる。

従って、耐久性を重視する部材の乾燥で高温乾燥スケジュールを採用する場合は、できるだけ高温乾燥時間を短くするような設定を行うべきと思われる。



第2図 各処理材のシロアリ試験における質量減少量 (g)  
 注1) 同じ文字の場合は互いに有意差がないことを示す (p=0.05)  
 注2) 図中のバーは平均値±標準誤差を示す



第3図 各処理温度における処理時間 (hr) と質量減少量 (g) との関係  
 注: \*\*は危険率1%で有意であることを示す

図14 スギ心材の熱処理条件とシロアリの摂食量との関係 (大村<sup>13)</sup>)

## 8. 強度性能

人工乾燥材の評価として、含水率の仕上がり状態は当然確認しなくてはならない項目であるが、乾燥の対象となる材が構造材であることを忘れ、割れや材色等外見ばかりを気にする傾向が少々感じられる。構造材として最も重要な使命である、「家を支える耐力が果たして充分かどうか」ということを並行して評価していかなくてはならない。

高温乾燥材は強度性能が低下するという報告が多いが、以下の試験結果を見れば、高温乾燥材の強度値の中に、条件として乾燥履歴、つまり乾燥温度が何度で何時間乾燥を行ったかをきちんと明記しておくことが重要であると思われる。また実大材の試験体においては、例えば強度値が低い理由が乾燥履歴による影響ばかりでなく、節による影響はどうか、心持ち材であれば未成熟材の影響はどうか等、考察においてはこの点も充分検討しなくてはならない点であると思われる。

乾燥温度と強度との関係について、以下にその報告例を列記してみた。

過去数年の木材学会大会での発表を見ると、2002年、宮崎木技セの田中らは、2条件の高温乾燥（最高温度 125℃、7日間と 120℃/12h→95℃、11日間）、中温乾燥（80～85℃、10日間）、燻煙乾燥（115℃、6日間）及び天然乾燥におけるスギ正角材の強度試験を行い、その結果、MOE は乾燥方法の違いによる大きな差は認められず、また MOR も乾燥方法による影響は明確ではないとしている<sup>14)</sup>。

森林総研の加藤らは、スギ小試験体を用いて飽和蒸気中で設定温度を 105、135、150℃、処理時間を 6、24、72 時間とし曲げ強度試験を行い、その結果、設定処理条件の温度と時間の増加に伴い、MOR と最大荷重時のたわみが減少する傾向があると報告した<sup>15)</sup>。

岩手林技セの中嶋らは、スギ正角材の高温乾燥材（110℃、4日間）、中温乾燥材（80℃、15日間）、天然乾燥材（100日間）について縦圧縮強度試験を行い、座屈応力は乾燥条件間に差異は認められないとし、また短柱縦圧縮強さは高温・中温乾燥材は天然乾燥材に比べて高いが、含水率補正をすると高温・中温乾燥材は天然乾燥材に比べて低いとしている<sup>16)</sup>。

2003年、秋田県大木高研の飯島らは、スギ平割心去り材を高温乾燥 A（120℃、48時間）、高温乾燥 B（120℃12時間→80℃、7.5日間）、中温乾燥（80℃、10日間）及び天然乾燥（3ヵ月間）で乾燥し、この材から 15mm 角材を採取し衝撃曲げ試験を実施した。その結果、衝撃曲げ吸収エネルギーの平均値は天乾=80℃>120℃B>120℃A で、5%下限値では天乾>80℃≒120℃B≒120℃A となり、80℃乾燥材であっても天乾材の 15%程度低下したと報告している<sup>17)</sup>。

信大の武田らは、スギ柱材の高温乾燥材 D（120℃→110℃、最大 3日間）、高温乾燥材 E、F（120℃→90℃and75℃、最大 9日間）、中温乾燥材（70～80℃、13日間）について曲げ強度及び接合強度（H型、T型試験体）について試験した結果、乾燥方法による MOE と MOR の差、及び接合強度の差は認められなかったとしている<sup>18)</sup>。

2004年、森林総研の井道らは、スギ柱材を 90、120、135℃で乾燥し、乾燥に伴う内部割れがせん断強度に及ぼす影響を検討した。その結果、乾燥温度の上昇に伴ってせん断破壊を生じた試験体が増加し、また実大いす型方式での試験では、最大木口割れ長さが大きくなるに従ってせん断強度が低下したことを報告している<sup>19)</sup>。

森林総研の加藤らは、スギ平割材を 90℃（120時間）、120℃（40時間）、135℃（30時間）及び天然乾燥（7ヶ月間）で乾燥し縦引張試験を実施した。その結果、ヤング係数において

は乾燥方法の違いによる差は認められなかったが、縦引張り比例限度力と縦引張り強度は、135℃乾燥材が他の乾燥条件に比べて低かったことを報告している<sup>20)</sup>。

高知森技セの盛田らは、スギ平角材を高温乾燥(120℃→105℃, 8日間)、中温乾燥(70℃→84℃, 21日間)及び天然乾燥(240日間)で乾燥し、曲げクリープ特性について検討した。その結果、高温乾燥材及び中温乾燥材の相対クリープ量は小さくほぼ同変化を示したが、天然乾燥材はこれより大きいクリープ量を示し、この差異は熱処理による材質変化が影響していると考察した<sup>21)</sup>。

これらの報告を見ても、一般的には乾燥温度が高くなれば強度性能が低下する傾向が強く、従って、強度を重視する部材の乾燥で高温乾燥スケジュールを採用する場合は、できるだけ高温処理時間を短くするような設定を行うべきと考える。

以下に我々が行った柱材の強度試験結果を示す。この結果では、「MOEはカラマツ(図15)、スギともに変わらない。MORはカラマツが低下し(図16, 20)、スギは差が小さい(図19)。カラマツの縦圧縮強度は低下する(図17)。カラマツのめり込み強度は低下する(図18)。」等であった。

図19, 20はスギとカラマツについて、MOEとMORの関係を一つのグラフにまとめたものである。カラマツはスギに比べ、高温(100℃以上)で乾燥している時間が長くなればMORの低下は大きい。つまり、カラマツは熱的影響を受け易い樹種であると思われた。

熱による影響が樹種により違いがありそうであることを示したのが図21である。これは蒸煮時間を変えてスギとカラマツについて試験したものである。グラフからスギとカラマツでは熱による影響の仕方が異なることが視える。

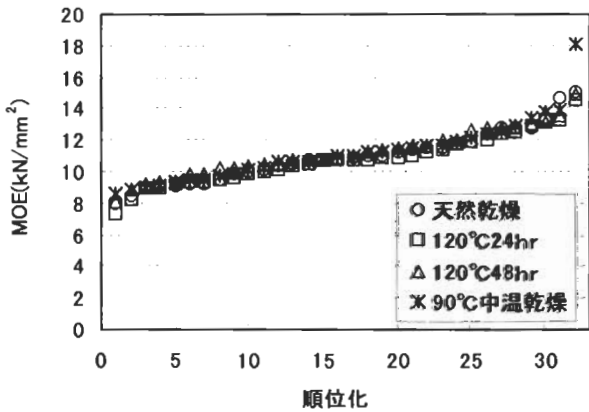


図15 カラマツ MOE の分布 (橋爪<sup>22)</sup>)

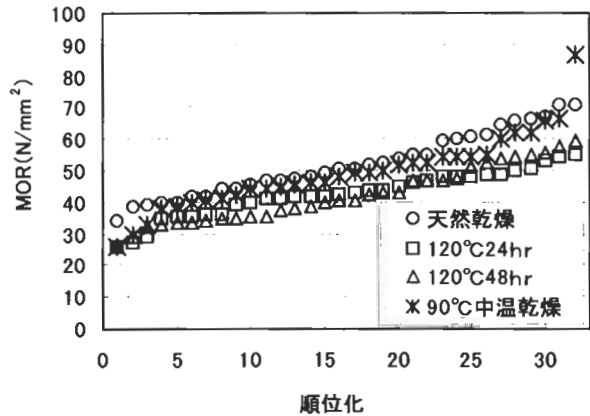


図16 カラマツ MOR の分布 (橋爪<sup>22)</sup>)

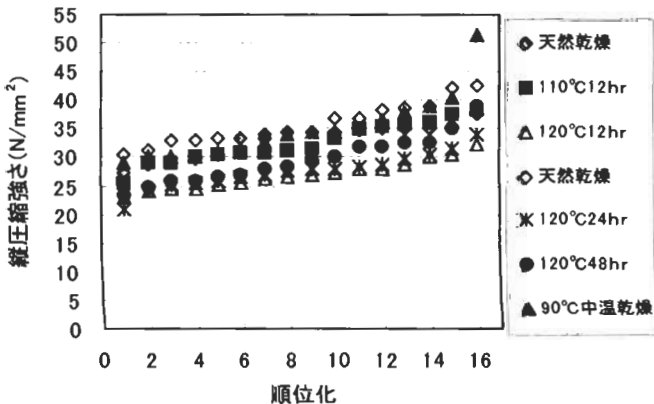


図17 カラマツ縦圧縮強度の分布 (伊東)

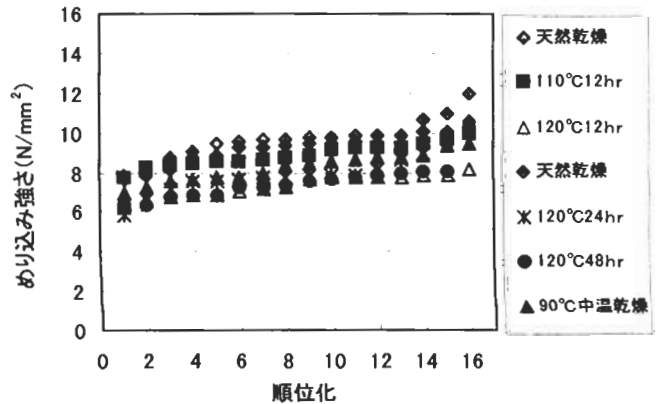


図18 カラマツめり込み強度の分布 (伊東)

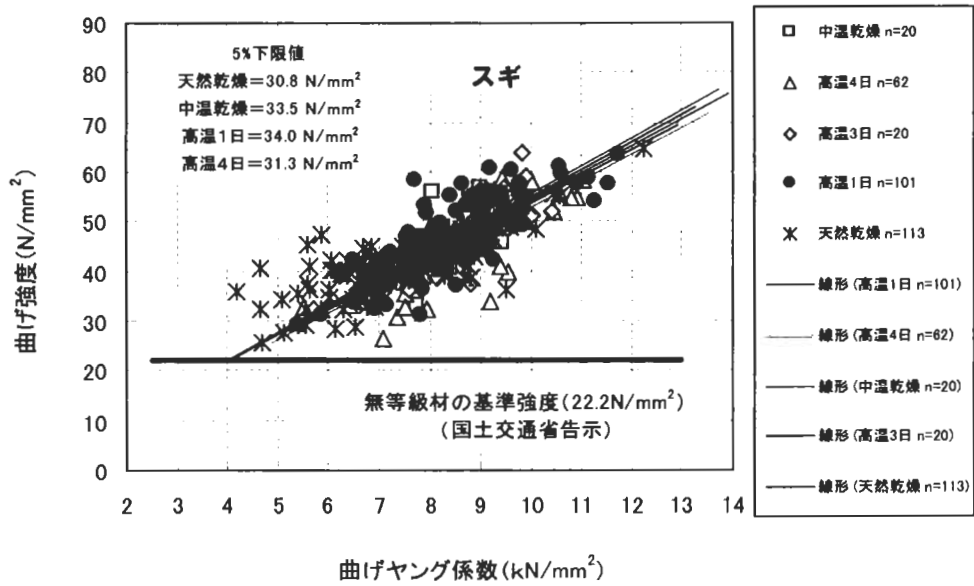


図 19 スギ高温乾燥材の曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強度 (MOR) との関係<sup>4)</sup>

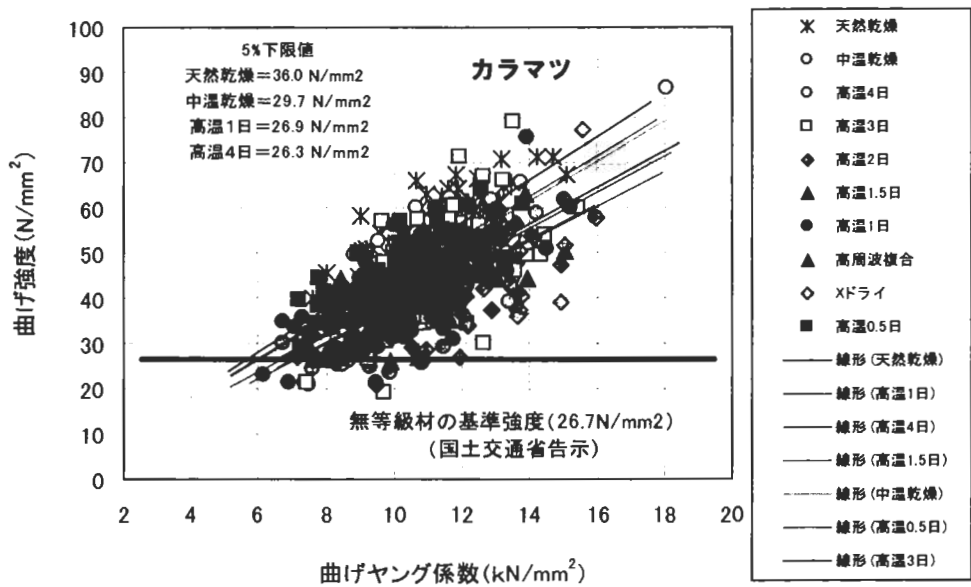


図 20 カラマツ高温乾燥材の曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強度 (MOR) との関係

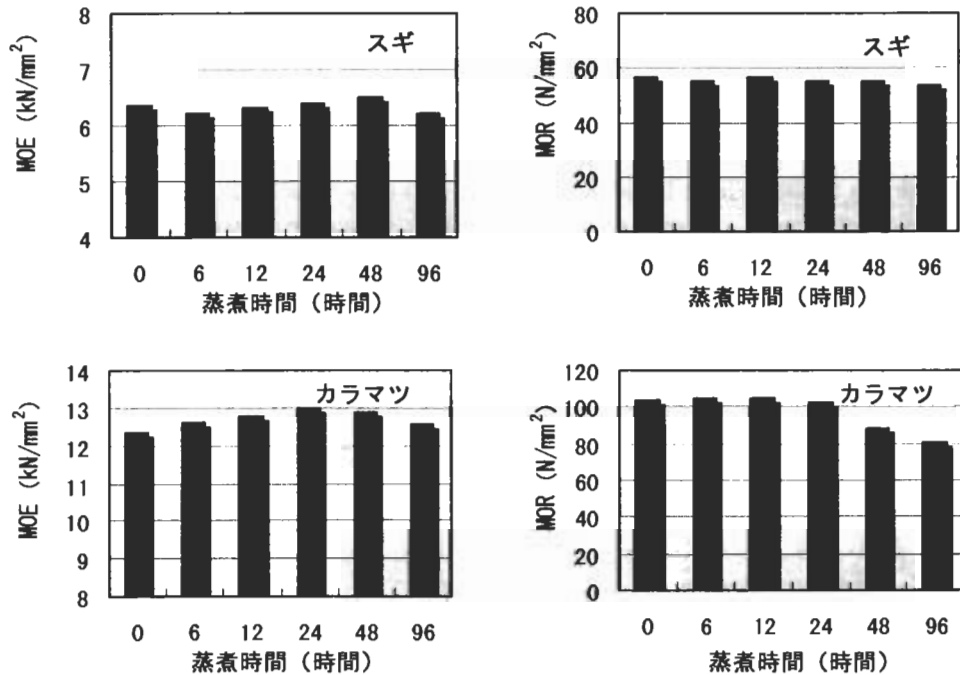


図 21 蒸煮時間の違いによる MOE と MOR (無欠点試験片)<sup>23)</sup>

高温乾燥材の強度値についてのこれまでの報告では、その比較を天然乾燥材とすることが多く見られるが、構造材の人工乾燥材がかなり多く普及していることを考えれば、比較として中温乾燥材のデータも今後多く必要になってくるものと思われる。

また、よく研究発表会や研究会で含水率補正のことが議論の場に上るが、高温乾燥材と天然乾燥材とで平衡含水率の違いがあることを考慮すると、実用では厳密な補正の必要は無くてもいいような気がするが如何なものか。

## 9. おわりに

名大の奥山先生がかつて丸太の燻煙熱処理についてこんなことをコメントしている。「その得失は処理方法によってどうにもなることである。つまり処理条件に依存する。材質の熱による変化をよく理解して、目的とする材質改良に合致した処理を行えばよい。むやみな処理を行えば、メリットは引き出せない。いかに適正な処理条件を見つけるかで結果が決まる。」

高温乾燥に関する結論も正にその通りだと思う。欠点を十分に理解しながら、メリットを引き出すことが、我々研究者に課せられた使命ではないだろうか。欠点の一部を捉えて、それを悪法と騒ぐのは如何なものかと思う。乾燥の現状の主流がその方向に動き出した以上、この流れを一気に変えることはなかなか困難であり、徐々に良い方向へと少しずつ誘導してやるのが今後の課題であると思う。

先日の木材関係の新聞に「高温乾燥は大丈夫か?」という記事が掲載されていた。「高温乾燥材は、樹脂成分が抜けてしまう上に繊維が弱くなり、ねばりや強度が低下し、パサパサの木になる。もっと木に優しい乾燥を心がけなければならない。」という主旨だ。

研究分野でのこういった報告も多いことも事実であり、使用する側に強度的な懸念が生じ

るのは当然である。ただ、こういった疑問を抱いている消費者が居る以上、現実問題として「使えるか、使えないか」という端的な結論が消費者側で最もほしい情報であり、研究の成果を迅速に現場に提供していかねばならないと痛感している。

高温乾燥が耐朽性や強度面で他の乾燥に劣るとしても、高温乾燥そのものをすべて否定するのではなく、メリットを生かした方向に導くことも重要なことである・・・。

木に優しい新しい乾燥方法も今後考えていかなければならないことは勿論であるが、今現在の技術を如何に良い方向へ、現場型技術へと改良していくことも早急に考えていかなければならない課題である。

## 参考文献

- 1) 徳本守彦, 坂口奈央, 武田孝志, 吉田孝久: 日本木材学会要旨集, 53回, 129 (2003)
- 2) 小田久人, 蛭原啓文, 迫田忠芳, 藤本登留, 村瀬安英: 木材工業, 59, 255-259 (2004)
- 3) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 武田孝志, 徳本守彦, 印出晃: 材料, 53巻, 4号, 364-369 (2004)
- 4) 吉田孝久, 橋爪丈夫: 日本木材学会要旨集, 54回, 147 (2004)
- 5) 山本泰司, 永田総司, 河崎弥生, 中尾哲也: 木材工業, 58, 457-461 (2003)
- 6) 久保島吉貴, 信田聡, 岡野健: 木材工業, 53, No.3, 115-119 (1998)
- 7) 栗崎宏, 塚本英子, 水本克夫: 木材保存, Vol.27-2, 61-66 (2001)
- 8) 吉田孝久, 橋爪丈夫: 長野県林業総合センター研究報告, 14号 (2000)
- 9) 狩野仁美, 林和男, 土居修一, 山内繁, 栗本康司: 日本木材学会要旨集, 52回, 535 (2002)
- 10) 澁谷栄, 狩野仁美, 林和男, 飯島泰男, 土居修一: 日本木材学会要旨集, 53回, 593 (2003)
- 11) 栗崎宏, 水本克夫: 日本木材学会要旨集, 54回, 371 (2004)
- 12) 松元浩, 桃原郁夫, 大村和香子, 斉藤周逸: 日本木材学会要旨集, 54回, 682 (2004)
- 13) 大村和香子, 加藤英雄, 小林功, 桃原郁夫: 木材工業, 59, No.4 (2004)
- 14) 田中洋, 荒武志朗, 小田久人: 日本木材学会要旨集, 52回, 114 (2002)
- 15) 加藤英雄, 久保島吉貴, 長尾博文, 井道裕史: 日本木材学会要旨集, 52回, 116 (2002)
- 16) 中嶋康, 東野正: 日本木材学会要旨集, 52回, 117 (2002)
- 17) 飯島泰男, 狩野仁美, 林和男, 澁谷栄, 土居修一: 日本木材学会要旨集, 53回, 594 (2003)
- 18) 武田孝志, 野田政子, 徳本守彦, 印出晃, 伊東嘉文, 吉田孝久: 日本木材学会要旨集, 53回, 92 (2003)
- 19) 井道裕史, 長尾博文, 加藤英雄, 大西裕二, 越智俊之: 日本木材学会要旨集, 54回, 116 (2004)
- 20) 加藤英雄, 斉藤周逸, 長尾博文, 井道裕史, 源濟英樹, 大西裕二, 越智俊之, YIN YaFang: 日本木材学会要旨集, 54回, 117 (2004)
- 21) 盛田貴雄, 政岡尚志, 沖公友, 山崎敏彦, 山下実, 東博文: 日本木材学会要旨集, 54回, 528 (2004)
- 22) 橋爪丈夫, 吉田孝久, 伊東嘉文: 日本木材学会要旨集, 54回, 146 (2004)
- 23) 吉田孝久, 橋爪丈夫: 日本木材学会要旨集, 53回, 131 (2003)



## 1. 高周波・蒸気複合乾燥とは？

高周波・蒸気複合乾燥（あるいは高周波・熱気複合乾燥と呼ぶ）とは、通常の蒸気乾燥（熱気乾燥）と高周波誘電加熱とを組み合わせた乾燥法である。外部加熱である蒸気乾燥と内部加熱である高周波加熱という機構の異なる2つの乾燥法を組み合わせることによって、それぞれの利点を活かしている。すなわち、この乾燥法は、1) 高周波加熱で大断面材を急速に乾燥できること、2) 熱気で雰囲気の緻密な制御ができること、などの利点を持つ。さらに、2つの乾燥法の複合効果として、1) 単独の乾燥法より乾燥速度が速いこと、2) 含水率分布が平準化されつつ乾燥が進行すること、3) 水分傾斜が小さいために割れが少ないこと、4) ランニングコストを安くできること、などが挙げられる。また、材内の水分移動に関して、蒸気乾燥では、材内水分の濃度差に基づく拡散が駆動力である。一方、高周波加熱では、材内温度の上昇に伴う材内圧力の上昇によって生じる蒸気圧差を水分移動の駆動力とする。したがって、高周波・蒸気複合乾燥では、拡散と蒸気圧差とを水分移動の駆動力として、蒸気乾燥の3～5倍程度の乾燥速度を実現している。

## 2. 高周波・蒸気複合乾燥の処理条件

### 2-1. 乾燥操作および乾燥条件

高周波・蒸気複合乾燥は、1) 高周波加熱を材の中心温度で制御する、2) 重量分別してロットに分け、1ロットずつ順番に高周波加熱する（サイクル加熱）、3) 栈木を用いず電極間にべた積みするなど、従来の蒸気乾燥とは異なる乾燥操作を必要とする。これらの操作を行うことによって、柱材や梁桁材のような大断面材でも大きい乾燥速度を得ると同時に、過熱による材の損傷を防ぐことができる。材内圧力を十分に上昇させることと、材の損傷および材質劣化を考慮して、材の中心温度は100℃程度で制御するのが標準的である。また、雰囲気温度は、蒸気乾燥の温度条件と同じであり、乾球温度で80～85℃程度にすることが多い。温度制御のためにロットの中の試験材1本に温度センサを挿入して材温をモニタする。試験材の材温を基に高周波加熱をオンオフ制御するので、試験材の選定は重要である。通常は、ロットの中で含水率が高い部類に属する材を試験材として用いる。

## 2-2. 材内の温度および圧力

高周波・蒸気複合乾燥過程における材内の温度分布の一例として、スギ正角材の中心、中間部および表層の温度推移を図1に示す。乾球温度80℃の蒸気乾燥条件で、中心温度は101℃に制御した。したがって、中心で高く、表層に向かって低くなる温度傾斜が形成される。表層温度は乾球温度よりも常に数℃高く、材内から雰囲気へと熱が移動していることを示している。さらに、材温が乾球温度より高いことから、材表面には設定値以上の乾湿球温度差が生じているので、材面からの蒸発が促進されている。

材内の温度と圧力の推移の一例を図2に示す。乾燥開始と同時に高周波加熱によって材温が上昇し、それに伴って材内圧力が上昇している。材内圧力の上昇は急激で、最大で140kPaに達するが、その後急速に低下し、乾燥の進行に伴って減少している。このように、高周波・蒸気複合乾燥では、材内温度の上昇によって材内圧力が上昇し、材内外の蒸気圧差が水分移動の駆動力となっている。材内圧力の最大値は、材の含水率や気体透過性などに影響を受けると考えられる。一辺が120mmのス

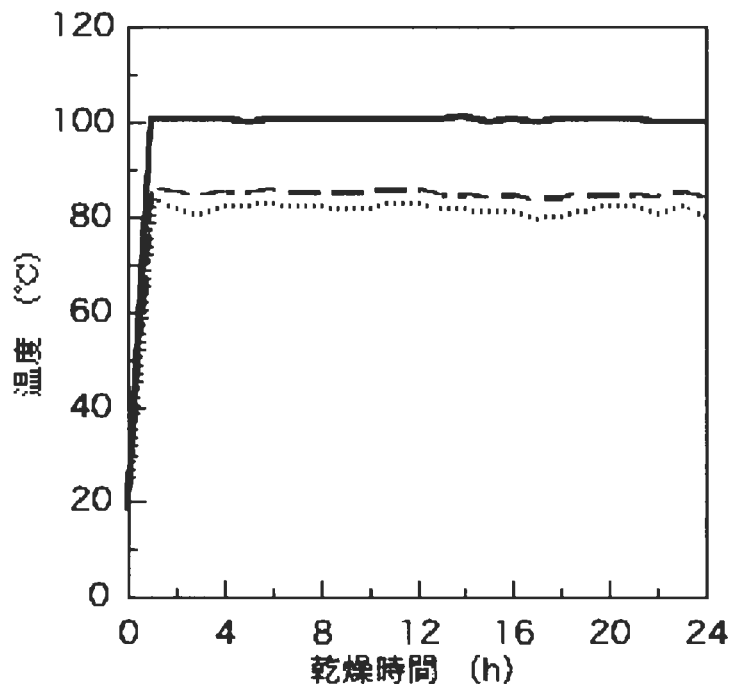


図1 高周波・蒸気複合乾燥過程における材内温度の推移

—— 中心    - - - 中間    ..... 表層

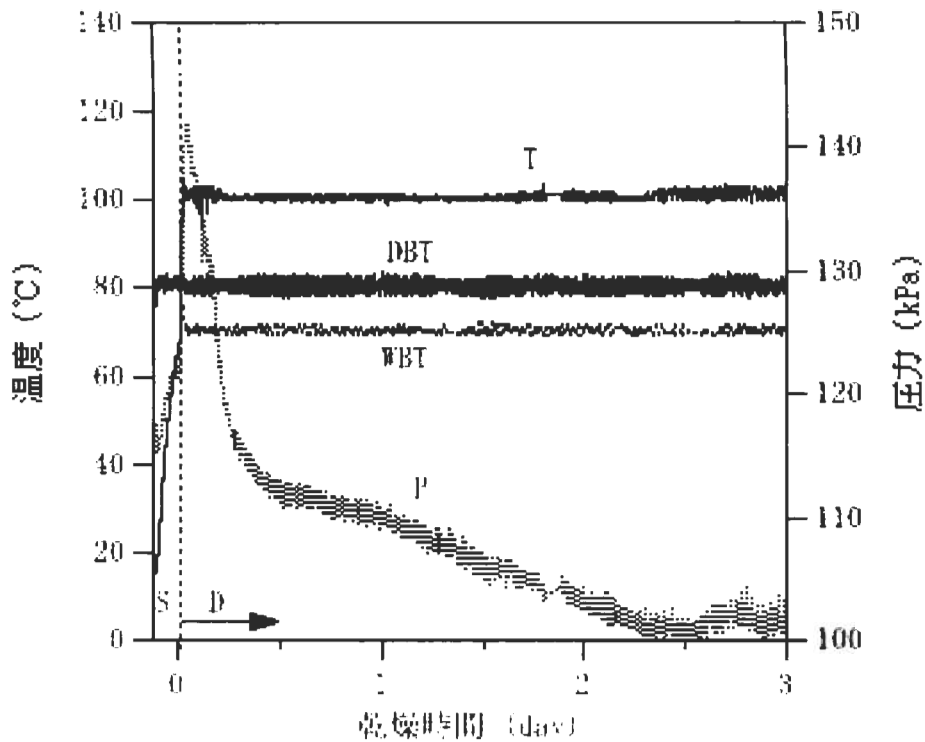


図2 材内温度および材内圧力の推移  
 DBT: 乾球温度; WBT: 湿球温度; T: 材内温度; P: 材内圧力  
 S: 蒸着期間; D: 乾燥期間

ギ正角材の生材を中心温度を 100°C で制御した場合、絶対圧力で 130~160kPa 程度の材内圧力が生じる。材内圧力の上昇は、高周波加熱を用いる乾燥法（例えば高周波真空乾燥）に共通する特徴である。

### 3. 高周波・蒸気複合乾燥材の性質

#### 3-1. 含水率分布

高周波・蒸気複合乾燥材の含水率分布の推移の一例を図 3 に示す。高周波加熱をしながら同時に蒸気乾燥を行うと、高周波加熱によって材内温度と材内圧力が上昇し、中心付近の水分が除去される。さらに、蒸気乾燥によって表層付近の水分が除去されるので、図 3 の 6 時間後のプロットのように含水率分布は M 字型を示す。高周波は含水率の高い部分に集中する性質があるので、次に M 字型の肩の部分が加熱され、含水率分布は平準化される。高周波・蒸気複合乾燥では、横断面内の含水率

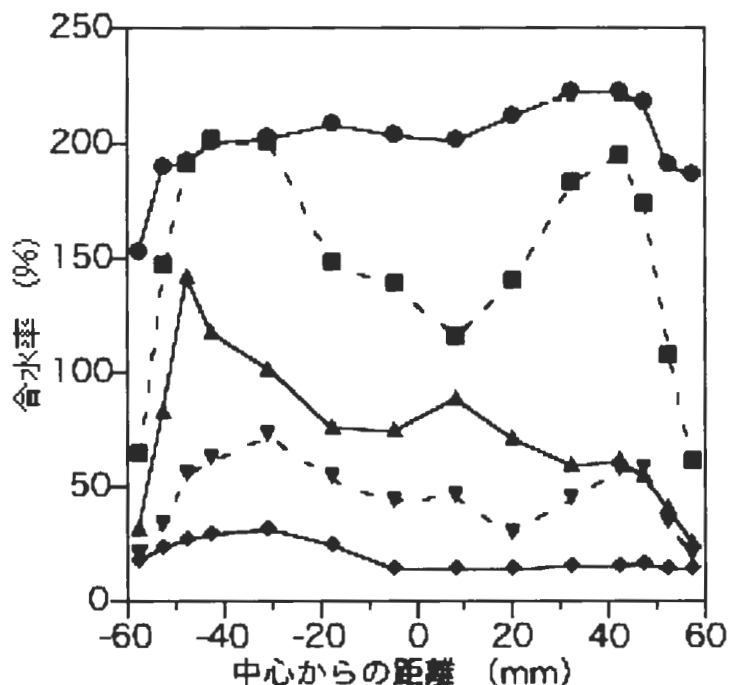


図3 高周波・蒸気複合乾燥過程における含水率分布の推移  
 ●：乾燥前，■：6時間後，▲：12時間後，  
 ▼：18時間後，◆：24時間後

分布は M 字型化と平準化を交互に繰り返しながら乾燥が進行する。最終的に含水率分布は表層から中心まで平準化される。よく乾燥した材では、中心付近の含水率が表層のそれよりやや低い傾向を示す。

### 3-2. 材面の状態

乾燥後の材表面の写真を図 4 に示す。乾燥後の材面を観察すると、図 4 (左) に示すような材面の汚染を確認できた。高周波・蒸気複合乾燥では、乾燥初期において材の内部から液相水分が流出するために、このような汚染を観察できる。とくに、べた積みされた面では、液相水分が溜まりやすいため汚れが目立つ。しかしながら、プレーナー処理を施すと材面はきれいになることから、あくまでも材表面の汚れであり、変色ではないことが確認できる。したがって、仕上げ材では問題にならない。

前項で示したとおり、高周波・蒸気複合乾燥では、含水率分布が平準化されつつ乾燥が進行するので、水分傾斜によって材表面に生じる引張の乾燥応力は小さくなることが推察される。そのため、表面割れの発生は蒸気乾燥に比べて少ない。

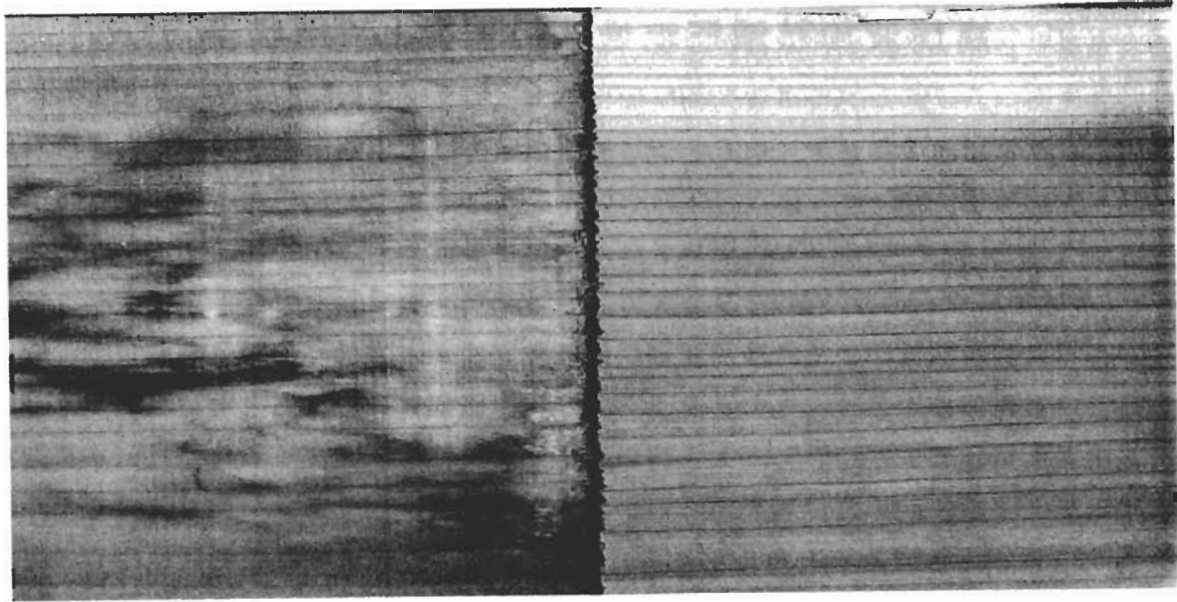


図4 乾燥後の材面

左：プレーナー処理前；右：プレーナー処理後

#### 4. まとめ

高周波・蒸気複合乾燥の処理条件と乾燥材の性質をまとめると以下のとおりである。

##### 処理条件

- 材内温度：100℃程度（材の中心）
- 乾球温度：80～85℃
- 乾湿球温度差：0～10℃
- 乾燥時間：3～4日（120mm スギ正角材の場合）
- 材内圧力：最大で130～160kPa（材内温度が100℃のとき）

##### 乾燥材の性質

- 含水率分布：大断面材でも平準化されている。
- 割れ：材面割れは少ない。内部割れはほとんどない。
- 材の表面：材内から出た抽出物で汚れている場合があるが、変色は小さい。

# 高周波加熱減圧乾燥法の特徴と利用状況

岡山県木材加工技術センター 河崎弥生

## 1. 技術開発と研究の歴史

### 1.1 先達の研究への取り組み

わが国の木材工業において、高周波加熱減圧乾燥法が本格的に使用されるようになったのは、20数年前からのことであり、蒸気式乾燥法等と比較すると歴史は浅く、装置の導入台数も格段に少ない。しかし、高周波加熱減圧乾燥法の有する特徴は、木材を乾燥するという工程においては理想的な面があり、今後も、用途拡大に向けて大きな可能性を有する乾燥方法であると考えられる。ただ、現在は、装置の技術的問題やコスト面での制約、さらには基礎的な面での研究の余地が残されていることもあり、固有の特徴を十分には活かし切れていないのが実状ではないだろうか。

わが国における高周波加熱減圧乾燥法に関する研究の歴史を見ると、この乾燥法を構成する2つの要素である高周波加熱乾燥と減圧（真空）乾燥とが、それぞれ別々に研究開発され、ある時点で、それらが合体することにより誕生した歴史を有する。つまり、高周波加熱減圧乾燥法は、木材乾燥学で定義される高周波加熱乾燥と減圧乾燥とが複合化されて成立した複合乾燥法である。

減圧乾燥については、松本文三氏が1934（昭9）年に木材真空乾燥に関する特許を取得し、1941（昭和16）年発行の著書<sup>2)</sup>に、理論から装置に至るまで詳細に記載している。これが、わが国における減圧乾燥研究の先駆けであり、その後、加熱方式として熱板加熱法等と組み合わせられることによって、実用化に至った。

一方、高周波加熱乾燥については、1941（昭和16）年に山本孝氏が研究を開始し、1951（昭和26）年には法隆寺の柱材を乾燥している。また、篠原卯吉氏らが1948（昭和23）年前後に、高周波加熱乾燥の理論確立のための基礎的実験を多数実施している。また、この当時の文献<sup>3)</sup>を見ると、船舶用材や特殊な広葉樹材が高周波加熱乾燥されていたことも記載されている。しかし、その後は、高周波加熱方式は接着等の他分野に応用されることが多くなり、木材乾燥の分野において主力の技術として多用されるという状況には至らなかった。

1975（昭和50）年の名古屋国際木工機械展に、米国のローゼ社の高周波乾燥装置が出展され、ゴルフクラブ用のカキノキ生材の超短時間乾燥が実演された。この実演を目の当たりにした技術者等の話を聞くと、まさに衝撃的な光景であったと回想している。これを機に、わが国においても、減圧缶体の専門メーカーである安島製缶（株）と高周波発振装置の専門メーカーである富士電波工機（株）が共同開発体制を取ることで、

高周波加熱減圧乾燥装置の開発が本格的に開始されることになった。

その後、装置メーカーの技術開発と併せて、金川靖氏、西尾茂氏、谷口（浜野）義昭氏らによる基礎的研究が成果を上げ、比較的短期間で実用化に成功した。高周波加熱減圧乾燥法の当初の主な用途は、家具用広葉樹材やスライス単板等の乾燥であった。これまでに、国産材や南洋材等の数多くの広葉樹に対する乾燥スケジュールが確立され、わが国の木材工業に対して大きな貢献をしてきたと高く評価される。これらの技術開発に貢献した金川、谷口氏ら諸氏の文献<sup>6-9)</sup>も、数多く発表されている。

一方、最近の約10年間においては、高周波加熱減圧乾燥法を建築用針葉樹材の乾燥に用いることを目的として、様々な基礎的研究や応用研究が行われてきた。林和男・蔡英春氏らは、スギ構造材の高周波加熱減圧乾燥における温度や圧力分布等に関する基礎研究を、精力的に行っている<sup>10-12)</sup>。金川靖氏らは低圧爆砕処理と高周波加熱減圧乾燥との組み合わせの可能性を探求し、野地清美氏らはこの手法をより効率的に用いるための基礎データを収集した<sup>13)</sup>。藤本登留氏らは、高周波加熱減圧乾燥法の丸太への応用や乾燥応力を研究した<sup>14)</sup>。また、久田卓興氏らは高周波加熱減圧乾燥と他の乾燥方法との組み合わせによって低コスト化を進めることを目的とし、天然乾燥法との組み合わせ乾燥法を提案した<sup>5)</sup>。また、(株)ヤスジマは、安島稔氏の熱意の下で、この30年間、装置の改良や乾燥スケジュールの開発などに取り組み、わが国の高周波加熱減圧乾燥を装置メーカーという立場から支えてきている。装置メーカーとしては、これ以外にも、山本ビニター(株)などもある。

これらの基礎的研究の成果や実用的データの一部は、寺澤眞氏らによって「木材の高周波真空乾燥」という著書<sup>1)</sup>に集大成されている。本書は、わが国において木材の高周波加熱減圧乾燥に関する知見を総括した、唯一の参考図書である。

## 1.2 筆者のつたない体験

筆者は、今回、浅学の身でありながら話題提供の場を与えられ、心から感謝している。高周波加熱減圧乾燥と筆者との出会いは、確か大学院生の頃であったと記憶しているが、鳥取県工業試験場を訪問し、西尾・谷口両氏が、新しい乾燥方法として高周波加熱減圧乾燥に取り組んでおられる姿を拝見したことに始まる。その頃は、ただひたすら両氏の説明を拝聴するばかりであった。その後、現在の職場にお世話になることになり、木材乾燥に関する研究機器の整備を行う際に、自ら計画するチャンスを与えられ、高周波減圧乾燥装置を導入する幸運に恵まれた。当時、公立試験場には、まだほとんど本装置は導入されていない時期であったと記憶している。高周波加熱減圧乾燥装置を使用できる機会を得て、当初は、家具用広葉樹、楽器用材などの乾燥方法を、関連企業との共同研究によって検討することが多かった。高周波加熱減圧乾燥法には、一般の蒸気式乾燥では得られない際立った特徴があり、毎日の研究が心から楽しかったことを覚えている。

そして研究成果の一部は、微々たるものではあるが実用化し、いわゆる企業の収益増加に着実に貢献していることを実感することもできた。この頃は、いささか大げさではあるが、高周波加熱減圧乾燥が魔法の乾燥方法に思えたものである。

このところ7～8年間は、建築用針葉樹材を対象としながら、日々を過ごしている。この間、林野庁のプロジェクト研究によって、プレドライ（予備乾燥）と高周波加熱減圧乾燥との組み合わせ乾燥法などについて検討を行った<sup>15)</sup>。また、本研究会や民間のセミナーなどにおいて成果の一部を公表する機会<sup>16-19)</sup>を得たり、最近刊行された木材乾燥のマニュアル<sup>20-22)</sup>においても、分担執筆で高周波加熱減圧乾燥に関する項目を担当させていただく機会を与えられた。これらの機会には、その時々の高周波加熱減圧乾燥の実状を取り上げてきた。

今回、本研究会において話題提供の場を与えられたが、日頃から、基礎研究からは遠い実務の場に身を置いていることもあり、本研究会には馴染まない雑ばくな内容とならざるを得ないことを、お許しをいただきたい。

## 2. 原理と特徴

### 2.1 原理

高周波加熱減圧乾燥は、減圧下で高周波加熱をしながら木材を人工乾燥する方法である。木材工業としての視点に立った場合、減圧乾燥の長所と高周波加熱のメリットを複合させた急速乾燥法である点に、最大の特徴がある。

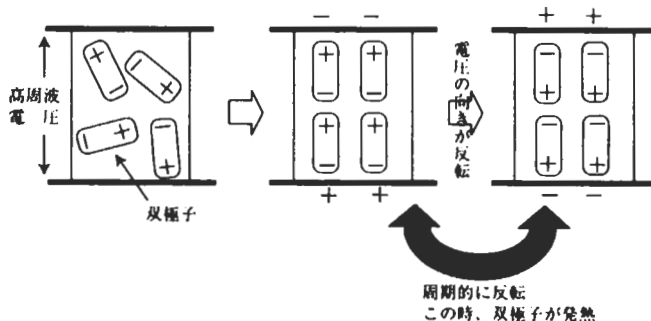
減圧された条件下に木材が置かれると水の沸点が下がり、例えば50Torr（約6.67 kPa）まで減圧した状態では、約38℃で表面の水分は沸騰し、急速に蒸発するようになる。木材は一般的に高温で乾燥するほど損傷が生じやすいため、低温で急速乾燥できることは極めて有利な点である。また、減圧下では外周部と木材内部との間の蒸気圧差が大きくなり、内部水分の表層部への移動が促進される。減圧条件として、広葉樹材では一般に50Torr前後を用いるが、建築用の針葉樹構造材では70～150Torr（約9.33～20 kPa）のような、比較的高い圧力が採用されることが多い。

一方、減圧するだけでは木材中の水分移動はすぐに減少してしまうため、継続して水分を蒸発させるには、木材を何らかの方法で加熱する必要がある。減圧下では空気を媒体とする加熱（外部加熱）は行いにくいいため、高周波による加熱（内部加熱）を利用する方法が有利である。木材や水のような永久双極子を持つ誘電体を高周波電界中に置くと、双極子の電荷に分極が生じ、永久双極子が回転変位して印加電極板と接地電極板の電荷を打ち消そうとする。しかし、高周波は周波数が大きいいため、双極子の回転運動が追従できなくなり、双極子は互いに摩擦しあって、電気エネルギーが熱エネルギーに変換される。これが高周波加熱（誘電加熱）の原理であり、誘電率が大きな物質ほど加熱



されやすい。木材実質の誘電率は2～4で、水分子のそれは81であるため、含水率が高い木材ほど発熱しやすい状態にある。

工業用に用いられる高周波の周波数は、一般的には6.7～13.56MHzの範囲にあり、木材乾燥においては6.7MHzが用いられることが多い。



第1図 高周波加熱の原理

## 2.2 特徴

[長所]

- ①急速乾燥が可能である。
- ②低い温度で乾燥できる。
- ③水分傾斜が比較的小さな状態で乾燥でき、仕上がり時の水分傾斜も小さい。
- ③割れ、落ち込み、変色などの損傷の発生が少ない。
- ④べた積み状態で乾燥でき、圧縮も可能である。
- ⑤ヤニの滲出抑制効果がある。

[短所]

- ①初期設備費及びランニングコストが高い。
- ②装置のコントロールに、比較的高い技術が必要である。
- ③木材の性質（樹種・材種など）により、向き・不向きがある。
- ④海水を含んだ材は放電しやすい。

## 3. 装置の概略と乾燥スケジュール

### 3.1 装置の概略

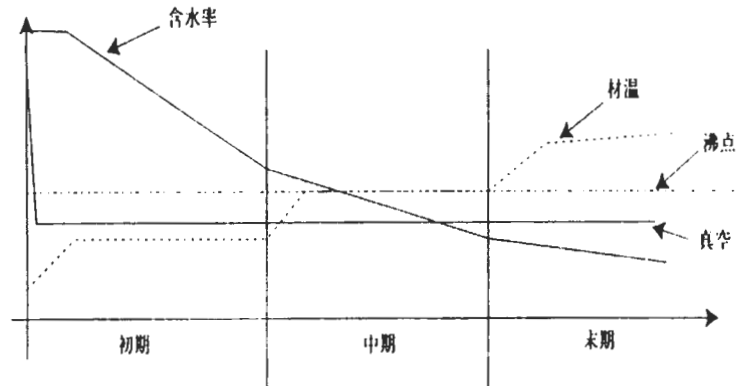
高周波加熱減圧乾燥装置を構成する基本的な要素は、木材を加熱するための高周波加熱装置、木材を収容する減圧缶体、木材より蒸発した水蒸気を凝結させ減圧度を維持する役割を果たす水分凝結器、缶体内を減圧にする真空ポンプ、凝結器や缶体で結露した水を一時的に貯留し一定量になったら排出する自動排水装置、装置全体を制御する自動制御盤である。

さらに、乾燥経過を制御するためには、缶体内及び木材中の圧力や温度を測定するセンサーが必要である。また針葉樹構造材を対象にする場合には、付帯設備として、被乾燥材の初期の温度上昇を促進するための蒸煮装置、狂い防止用の油圧による圧縮装置を装備するケースがみられる。また、最近では、低圧爆砕装置を装備した爆砕高周波減圧乾燥装置も開発されている。このように、高周波加熱減圧乾燥装置は被乾燥材の収容材積の割には、比較的複雑で大がかりな装置となるという印象を受ける。

### 3.2 乾燥スケジュール

高周波加熱減圧乾燥における乾燥スケジュールも、基本的には蒸気式乾燥等における従来からの乾燥スケジュールの基本的な考え方に準拠すればよい。しかし、高周波による加熱が高周波出力に依存するとともに、被乾燥材の誘電的な性質が乾燥の進行に伴って変化することから、乾燥スケジュールの設定方法も自ずと異なる面もある。針葉樹構造用製材の高周波加熱減圧乾燥スケジュールに関しては、現在のところ明確に理論構成されたというレベルには達しておらず、実験的データを蓄積している途上にあると判断される。

様々な樹種・材種の高周波加熱式真空乾燥スケジュールについては、既往の文献<sup>1)</sup>に明らかにされているので、それらを参照していただきたい。実用機における乾燥には、基本的にはそれらの乾燥スケジュールを用いればよいが、乾燥装置ごとに加熱条件が若干異なるため、最終的には自社の装置と被乾燥材の状況とを勘案して修正を加える必要がある。



第2図 高周波加熱減圧乾燥の一般的なスケジュールパターン

## 4. 乾燥コスト

### 4.1 スギ柱材の乾燥コストの一般的な試算

高周波加熱減圧乾燥によるスギ柱材の乾燥コストを、一定の生産条件を想定して推定した結果を第1表に示した。なお、ここではエネルギー費、人件費、設備費のみを計上し、乾燥による歩留まりの低下や損傷の発生などは考慮していない。

初期含水率100%のスギ柱材を20%まで乾燥するのに、18,500円/m<sup>3</sup>を必要とする。これに、乾燥による歩留まり低下、損傷の発生、仕上げ挽き経費等を加算すると、企業現場では、おそらく1m<sup>3</sup>あたり2万数千円の乾燥コストを計上することになるであろう。この金額は現在の乾燥材市場では高価であり、抵抗無く受け入れられることは難しいレベルにあると判断される。しかし、被乾燥材の仕上がり状態は、個体内の水分分布が小さく、強度的な劣化の可能性は少なく、変色も微少であり、他の急速乾燥法（例えば高温蒸気式など）と比較して極めて良好であると判断されることから、このレベルの仕上がりを要求するユーザーには、支持される可能性が無いとは言えない。

第1表 スギ心持ち柱材（仕上げ10.5cm角）の乾燥コストの一般的な試算

| 乾燥方式                   | 乾燥仕上げ含水率 | 乾燥日数（日） | 月産（m <sup>3</sup> ） | 乾燥コスト（円/m <sup>3</sup> ） |       |        |        |
|------------------------|----------|---------|---------------------|--------------------------|-------|--------|--------|
|                        |          |         |                     | 設備費                      | 人件費   | 燃料費    | 計      |
| 高周波加熱式真空乾燥<br>(50-60℃) | 20%以下    | 3.0     | 100                 | 5,000                    | 1,500 | 12,000 | 18,500 |
|                        | 15%以下    | 3.5     | 85                  | 5,880                    | 1,500 | 14,120 | 21,500 |

（積算根拠）

乾燥材：3m材、13m<sup>3</sup>/1室あたり、初期含水率100%

設備費：高周波加熱式真空乾燥機（13m<sup>3</sup>入り、1室）

45,000千円÷9年×1.2÷12ヶ月=500千円/月

\*設備償却期間9年、維持費は償却費の20%とした。

人件費：積み降ろし1,000円/m<sup>3</sup>、フォークリフト200円/m<sup>3</sup>、  
操作管理300円/m<sup>3</sup>

燃料費：（含水率20%以下）電気 60,000KWH×20円/月=1,200千円/月

（含水率15%以下）電気 60,000KWH×20円/月=1,200千円/月

#### 4.2 高周波加熱減圧乾燥を用いた低コスト化への取り組み

高周波加熱減圧乾燥は、被乾燥材の仕上がりは良好で高品質乾燥材の生産が望める一方で、乾燥経費が高いことが、現実的には導入を阻害している。今後、高周波加熱減圧乾燥を建築用材の乾燥に用いるためには、いずれにしても低コスト化を進める必要がある。この取り組み方法としては、何らかの前処理を行って高周波加熱減圧乾燥の長所をより発揮しやすくすること、あるいは他の安価な乾燥方法と組み合わせることによってランニングコストの軽減をはかる等の手法が考えられる。

まず、前処理と高周波加熱減圧乾燥との組合せ乾燥法については、低圧爆砕処理により木材の透過性を改善することによって、高周波加熱乾燥のスピードを速めようとする

研究がなされ、すでに実用機も数台ではあるが導入され、スギ構造材の乾燥に用いられている。

一方、他の安価な乾燥方法と組み合わせることによってランニングコストの軽減をはかる等の手法としては、天然乾燥を高周波加熱減圧乾燥の前後に組み合わせる方法や、プレドライヤーによる予備乾燥を行った後に仕上げに短期間の高周波加熱減圧乾燥を用いる方法等が、提案されている。

以下に、高周波加熱減圧乾燥を主たる乾燥法として位置づけたうえでの、低コスト化に向けた研究や技術開発の事例を紹介する。

## 5. 研究開発された低コスト乾燥法

### 5.1 局所的水蒸気爆砕処理との組み合わせ乾燥法

乾燥前処理として局所的水蒸気爆砕処理を行い、被乾燥材の透過性を向上させた上で、高周波加熱減圧乾燥を行う手法が研究開発されている。このことによって、高周波加熱減圧乾燥に要する時間が短縮され、結果的に乾燥コストの低減につながると考えられている。

本手法による乾燥コストについて、(株)ヤスジマが試算した例を第2表<sup>4)</sup>に示した。第1表に示した試算例と積算根拠が多少異なることを勘案した上で判断する必要はあるが、爆砕処理後の乾燥日数が2日間に短縮されることによって、初期含水率100%から20%までの乾燥が12,560円/m<sup>3</sup>で可能となっている。第1表に示された同一条件の値と単純に比較すると、前処理として局所的水蒸気爆砕処理を採用することによって5,940円/m<sup>3</sup>のコスト削減が可能になったことになる。このことは、局所的水蒸気爆砕処理を行うことによって顕著な乾燥時間短縮効果が得られ、爆砕処理に必要な経費をはるかに上回るコスト削減効果が得られたことを示唆している。

また、(株)ヤスジマは、木材乾燥低コスト化技術研究組合に参加し、実用機レベルの実験を行い、乾燥スケジュールなどを検討した。その結果、仕上がり状態を重視し乾燥日数を5～6日に長くしても、仕上がり含水率15%で、乾燥コストを14,000円/m<sup>3</sup>まで削減できることを明らかにしている<sup>23)</sup>。

爆砕装置付きの高周波加熱減圧乾燥装置は、すでに宮城県や青森県内の企業などに実用機が導入され、スギの管柱や平角材の乾燥に用いられている実績がある。

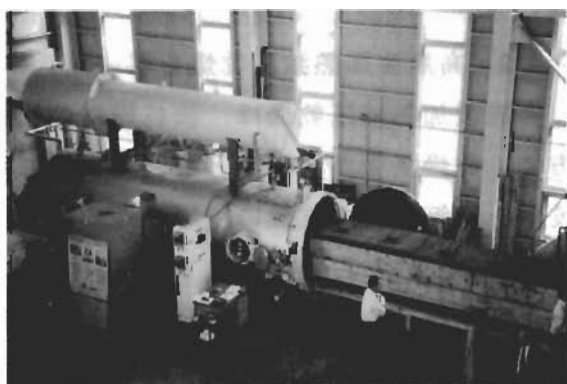


写真1 爆砕高周波加熱減圧乾燥装置

第2表 局所的水蒸気爆砕処理と高周波加熱減圧乾燥装置の組み合わせ乾燥法によるスギ心持ち柱材（仕上げ10.5cm角）の乾燥コスト

| 含水率（%） |     | 乾燥日数（日） | 乾燥コスト（円／m <sup>3</sup> ） |       |       |        |
|--------|-----|---------|--------------------------|-------|-------|--------|
| 初期     | 仕上げ |         | 直接費                      | 設備償却費 | 人件費   | 合計     |
| 150    | 20  | 3.0     | 9,500                    | 5,950 | 1,000 | 16,450 |
| 120    | 20  | 2.5     | 7,500                    | 5,450 | 1,250 | 14,200 |
| 100    | 20  | 2.0     | 6,700                    | 4,360 | 1,500 | 12,560 |
| 80     | 20  | 1.5     | 6,100                    | 3,270 | 1,700 | 11,120 |

（注）直接費には、局所的水蒸気爆砕処理に必要な蒸気代も含まれている。

### 5.2 天然乾燥との組み合わせ乾燥法

森林総合研究所の久田卓興氏らが、乾燥工程における高周波加熱減圧乾燥の利用を1日に限定し、前後に約10日間の天然乾燥を組み合わせる乾燥法を開発し、詳細を明らかにしている。本手法による具体的な乾燥処理条件と乾燥コストを第3表<sup>5)</sup>に示した。

第3表 天然乾燥と高周波加熱減圧乾燥装置の組み合わせ乾燥法によるスギ心持ち柱材（仕上げ10.5cm角）の乾燥コスト

| 処理条件                                | A  | B  |
|-------------------------------------|--|--|
| 対象材                                 | スギ心持ち柱材<br>背割り有り                                 | スギ心持ち柱材<br>背割り無し                                 |
| 前処理                                 | 天然乾燥で約10日間<br>（含水率約60%まで）<br>ポリエチレンシートで被覆        | 天然乾燥で約10日間<br>（含水率約60%まで）                        |
| 乾燥方法<br>初期加熱<br><br>減圧<br>材温（高周波加熱） | 85℃ 5時間<br>（生蒸気と高周波を併用）<br>70Torr 15時間<br>55～60℃ | 95℃ 8時間<br>（生蒸気と高周波を併用）<br>70Torr 20時間<br>55～60℃ |
| 後処理                                 | ポリエチレンシートを取る<br>棧積みし、約10日間放置                     | 棧積みし、約10日間放置                                     |
| 乾燥所要経費                              | 7,600円／m <sup>3</sup>                            | 8,800円／m <sup>3</sup>                            |

試算された乾燥コストは、背割り材で7,600円/m<sup>3</sup>、無背割り材で8,800円/m<sup>3</sup>であり、前述の局所的水蒸気爆砕処理を組み合わせる方法と比較しても、さらに低コスト化を実現している。

### 5.3 プレドライとの組み合わせ乾燥法

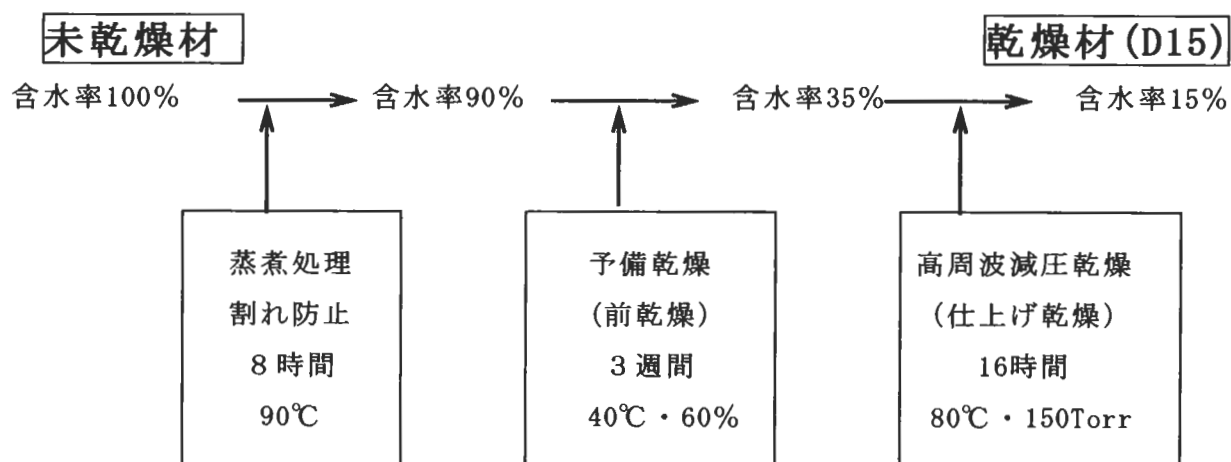
筆者らは、農林水産新技術実用化型プロジェクト研究「地域産材の低コスト乾燥技術の開発」に参加し、高周波加熱を利用したスギ材の高品質・低コスト乾燥法の開発を担当した。その結果、プレドライ（予備乾燥）と高周波加熱減圧乾燥との組合せ乾燥法を提案した。ここには、概略を示すので、詳細については報告書<sup>15)</sup>を参考にいただきたい。

#### (1) 乾燥方法の概略

含水率が約100%の生材状態のスギ柱材に、割れ防止処理（90℃蒸煮処理）を行った後、予備乾燥室（温度40℃、湿度60%）内に約3週間存置して含水率約35%まで前乾燥する。その後、約16時間の高周波減圧乾燥（材温80℃、減圧度150Torr（20 kPa））をして、日本農林規格（JAS）における最もハイグレードな乾燥材であるD15（含水率15%以下）を生産することが可能な乾燥方法である。

乾燥方法の全体的な流れを示す概念図を、第3図に示した。

- ・材料 : スギ12cm角柱材・背割り有り
- ・乾燥日数 : 22日間
- ・仕上がり : D15（含水率15%以下）



## (2) 特徴

① D15グレードの乾燥材が、比較的容易に生産可能である。

② 乾燥による変色、損傷の発生量が一般の蒸気式乾燥よりも少なく、仕上がり状態が良好である。その結果、不良率が少ない。(変色：約3割減少、材面割れ：約5割減少)

③ 人工乾燥後の寸法変化が、一般の蒸気式乾燥法よりも少ない。人工乾燥後の養生期間も短くて良い。(特に、背割り面の寸法変化は1/2以下に減少)

④ 乾燥コストは、一般の蒸気式乾燥材よりも安い。

(直接経費 本乾燥法：7,500円/m<sup>3</sup>，中温蒸気乾燥11,000円/m<sup>3</sup>)

⑤ 乾燥に要する日数は一般の蒸気式乾燥とほぼ同様であるが、材料が予備乾燥室にストックできていれば、仕上げ乾燥に要する日数が短いため、急な注文にも対応できる。

## (3) 乾燥コスト

### 1) 直接経費

① D15を生産するのに必要とされる1m<sup>3</sup>当たり直接経費は、第4表のように試算される。タイプAは予備乾燥前に蒸煮処理を行う標準タイプ、タイプBは行わない簡易タイプである。

② 蒸煮処理を行い、厳しい条件で短期間に予備乾燥を終了させた方が、全体の乾燥コストは低減される。ただし、蒸煮は高周波加熱減圧乾燥装置を用いて行うため、蒸煮が可能な装置仕様とすることが必要である。

③ 試算された乾燥コストは、「わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル(全国木材組合連合会発行)」を参考にすると、一般の中温蒸気式の11,000円よりも安価である。また、高周波加熱減圧乾燥のみによる方式の価格18,200円の半額以下である。

第4表 予備乾燥と高周波加熱減圧乾燥との組み合わせ乾燥による  
スギ12cm角柱材の乾燥経費(直接経費)

(円/m<sup>3</sup>)

|      | 蒸煮    | 予備乾燥  | 高周波乾燥 | 合計    | 備考                    |
|------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| タイプA | 1,000 | 2,500 | 4,000 | 7,500 | 予備乾燥EMC10%<br>日数：約3週間 |
| タイプB | 0     | 4,500 | 4,000 | 8,500 | 予備乾燥EMC15%<br>日数：約6週間 |

(積算根拠)

- ①スギ：13cm×13cm×3m，心持ち，背割り有り  
初期含水率 100%
- ②蒸煮8時間 1,000円/m<sup>3</sup>
- ③予備乾燥 100円/m<sup>3</sup>/日
- ④高周波加熱減圧乾燥 5,500/日，16時間

## 2) 総乾燥経費

実際の乾燥材生産には，直接経費以外に，乾燥終了後の養生，損傷の発生等にもなる歩留まりの低下，挽き直し等に係わる経費が上積みされ，乾燥経費の総価格は1m<sup>3</sup>当たり15,000円～16,000円になる。ここに示したのは，あくまで試算であって，材価等の変動によって，異なる値となる。

[直接経費以外の経費]

(積算根拠)

原木単価：18,000円/m<sup>3</sup>

製品単価（未乾燥材）：35,000円/m<sup>3</sup>，（乾燥材）50,000円/m<sup>3</sup>  
(円/m<sup>3</sup>)

---

|   |       |
|---|-------|
| 1. 養生処理   | 1,000 |
| 2. 収縮・狂いによる歩留まり低下<br>(130mm角→120mm角仕上げ・歩留まり85%) | 2,700 |
| 3. 不良材の発生（不良率5%・未乾燥材価格で販売）                      | 1,750 |
| 4. 修正挽き（モルダー使用）                                 | 1,000 |
| 5. 選別・品質管理（含水率表示等）                              | 500   |
| 6. その他（金利，地代等）                                  | 500   |
| <hr/>   |       |
| 小計  | 7,450 |

[総乾燥経費]

タイプA 7,500円+7,500円=15,000円/m<sup>3</sup>

タイプB 8,500円+7,500円=16,000円/m<sup>3</sup>

## (4) 実用化の可能性

- ①以上のことから，「プレドライ（予備乾燥）と高周波減圧乾燥との組み合わせ乾燥



法」は、高品質な乾燥材生産を容易に行うことが可能であると結論できる。したがって、高品質な乾燥材生産のための乾燥方法として位置付けることができると考えている。

②特に、スケールメリットが期待できる大規模な製材工場や共同利用施設において、実用化の可能性があると考えている。

③品確法によって高品質な乾燥材の要求が高まっている状況下においては、高品質乾燥材の生産が可能であるという点において、今後、有力な乾燥方法の一つとして導入される可能性がある。

④岡山県内においては、既に高周波加熱減圧乾燥装置を有する製材工場があり、また一方では養生処理を兼ねる形での製品倉庫（プレドライヤー）の導入を検討している企業等もある。手始めとして、これらを効果的に連動させる試みを実施することにより、関連業界の興味を喚起できると考えている。また、今後、多用な需要に対応するという視点が必要となることから、本乾燥法が採用される可能性は十分にある。

## 6. 高周波加熱減圧乾燥装置を導入している製材工場の現状

岡山県内の丸太材積で年間に4～5万 $m^3$ の国産材を製材する企業に、高周波加熱減圧乾燥装置（収容材積4.5 $m^3$ ，材積み幅1m×材積み高さ0.7m×長さ6.5m）が1機導入され、他の20数機の蒸気式乾燥装置とともに使用されている例がある。

本企業では、主力製品である一般的なスギ柱材やヒノキ柱材は、蒸気式乾燥装置を用いて人工乾燥している。この中であって、高周波加熱減圧乾燥装置は、ヒノキ材で150mm角以上の断面寸法を持つ神社・仏閣材や135mm角ヒノキ柱材の急な注文に対応する場合に、ほぼ限定して用いている。

乾燥条件は、真空70Torr（約9.33kPa），材温43℃，発振3分on-2分offで、蒸煮は行っていない。この条件で、150mm角ヒノキ材を約7日間、135mm角ヒノキ柱材を約5日間で、含水率20%以下まで乾燥している。

この企業の例は、高周波加熱減圧乾燥装置は、中小の製材工場に単独で導入される場合には乾燥コスト面で採算が採れないことが多くても、大きな製材工場においては多種多様な品揃えを可能にするという視点から、導入できる可能性が高いことを示唆するものである。今後の乾燥材生産に当たっては、単独に乾燥方法の良否を論じるのではなく、どのような品質の乾燥材を、どれだけ、どのように生産し、どのように提供していくのかという総合的な視点と経営戦略が必要である。この事例は、乾燥材生産に向けて、将来参考にすべきスタイルを示しているとも考えられる。

