

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ン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。

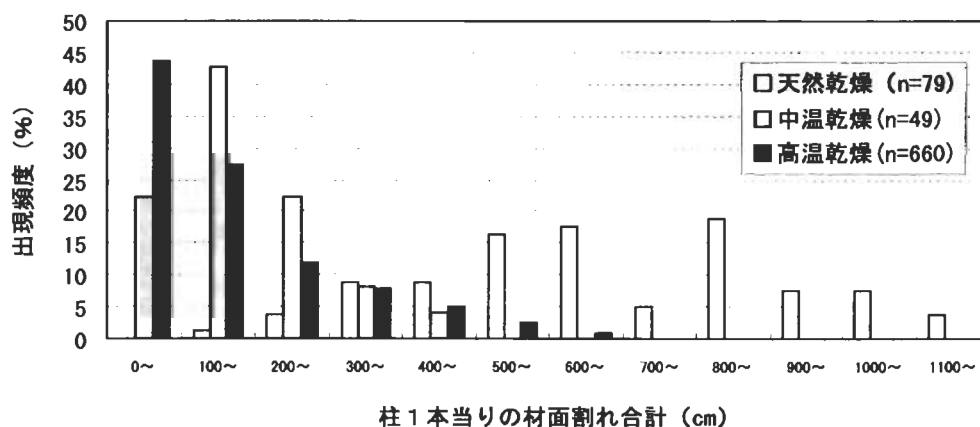


図1 乾燥方法別の3m柱1本当りの材面割れ発生量

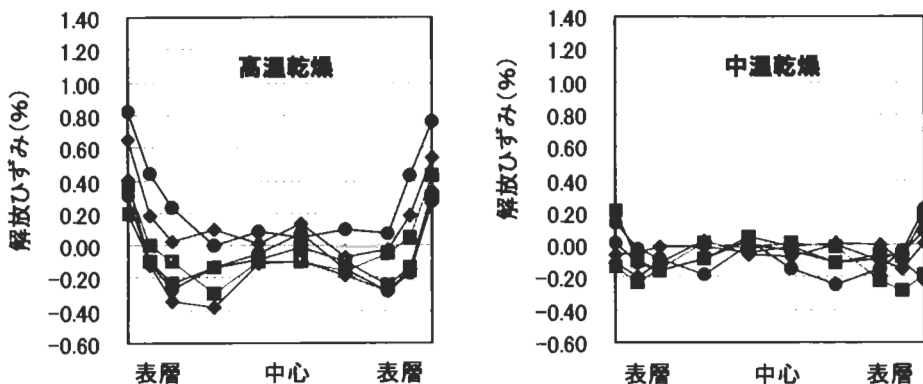


図2 高温乾燥材と中温乾燥材における解放ひずみの分布 (徳本¹⁾)

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。

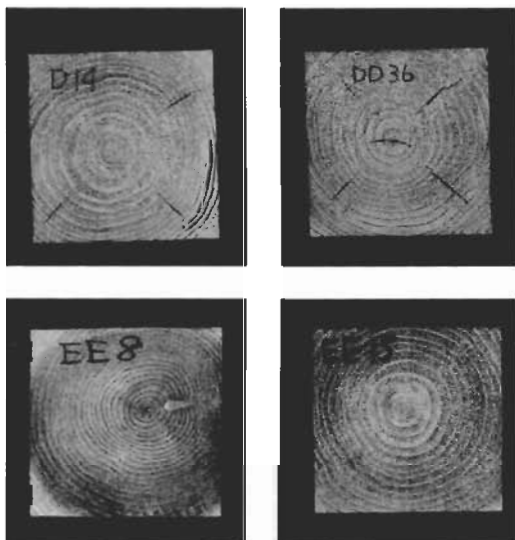


写真1 内部割れの様子

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。

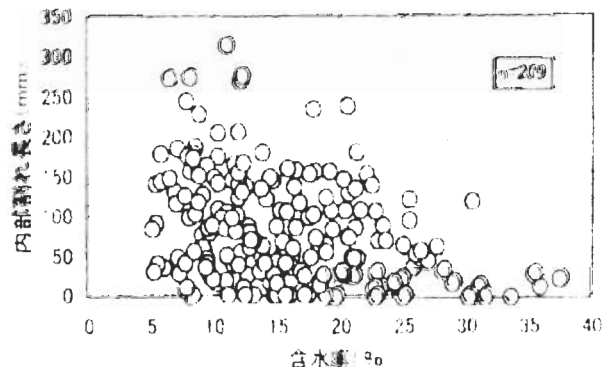


図3 高温乾燥での含水率と内部割れ長さの関係 (小田²⁾)

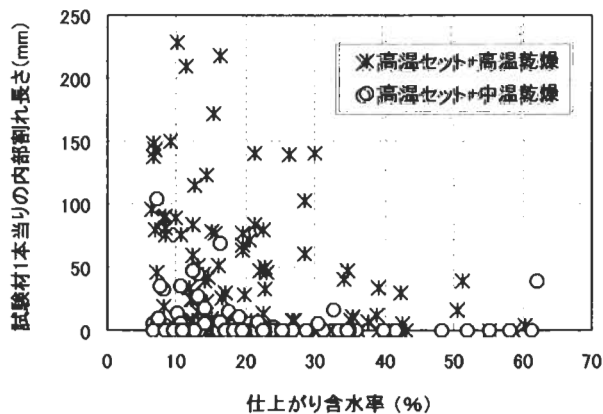


図4 スギ13.2cm正角の仕上がり含水率と内部割れの関係³⁾

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。

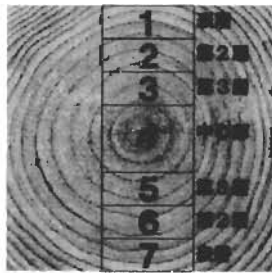
両者は高い相関関係にあり、この中で材全体の含水率とほぼ一致するのは第2層であった。つまり、全体含水率は13.2cm柱材では表層から約25mm, 11.7cm柱材では約22mm程度入った部分の含水率とほぼ一致した。このことは実用的に考えると、水分抵抗式含水率計であっても、この位置で含水率測定を行うことで、全体含水率が全乾法による含水率とかなり近い値で把握できることを示している。(但し、乾燥後1~2週間程度までの乾燥材)

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

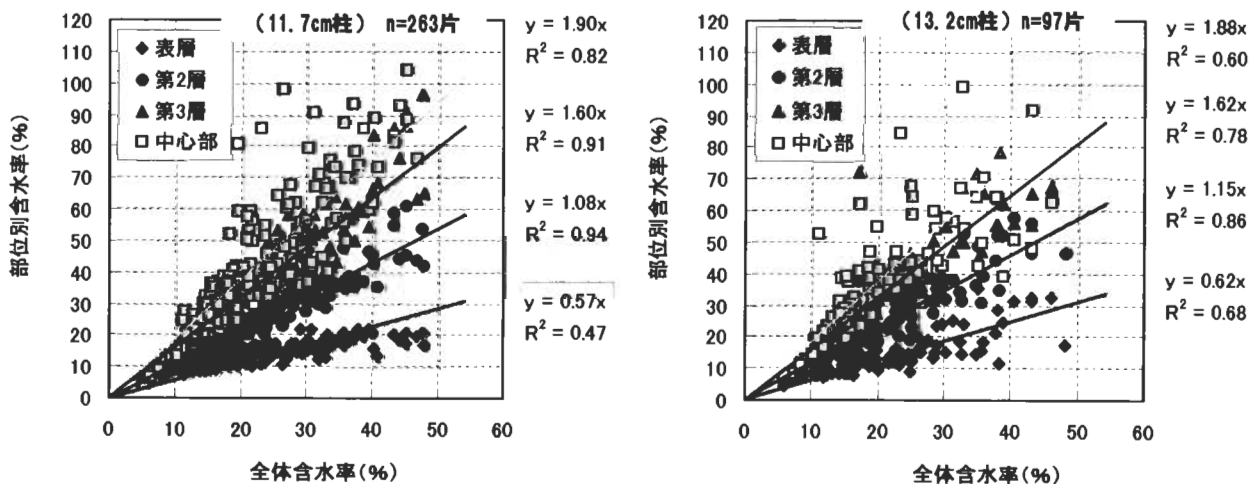


図5 高温乾燥後の水分傾斜⁴⁾

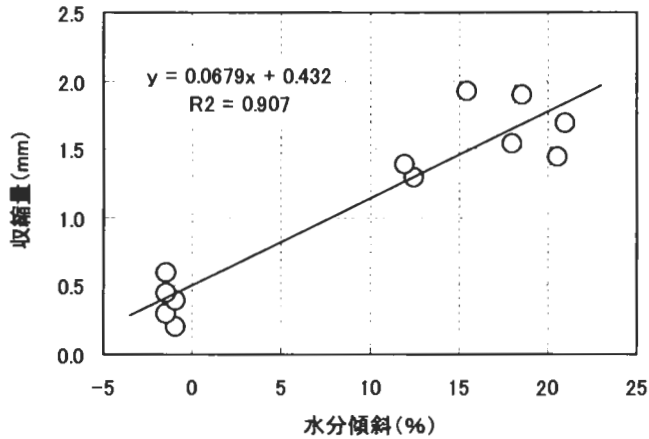


図6 乾燥後の水分傾斜と1年存置後の収縮量(山本⁵⁾)

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)

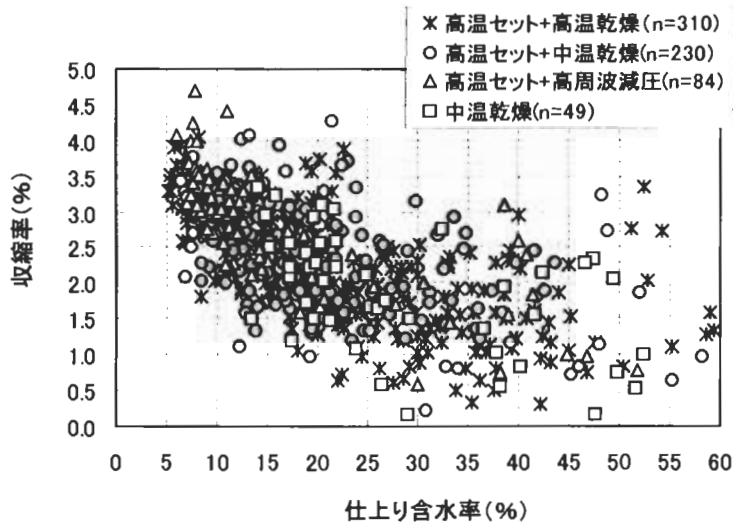


図7 高温乾燥及び中温乾燥における収縮率³⁾

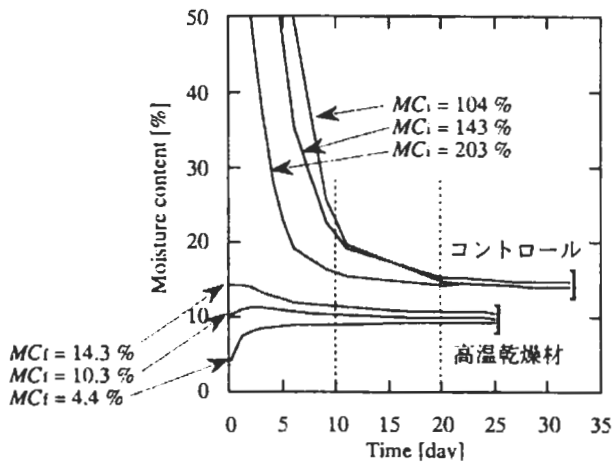
5. 平衡含水率

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られる。



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⁶⁾)

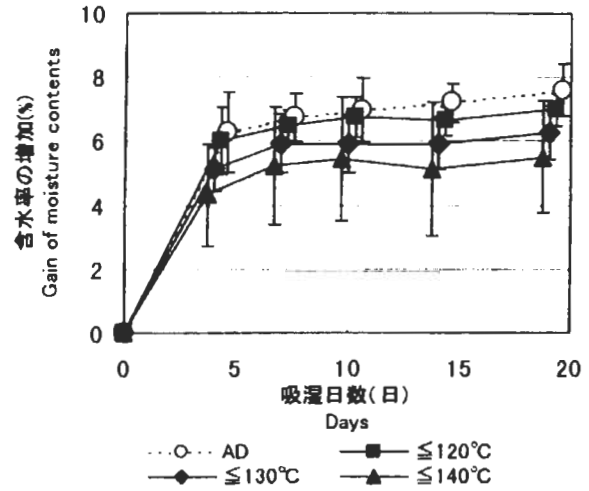
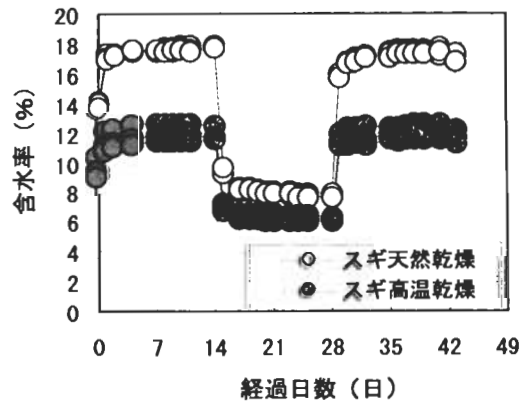
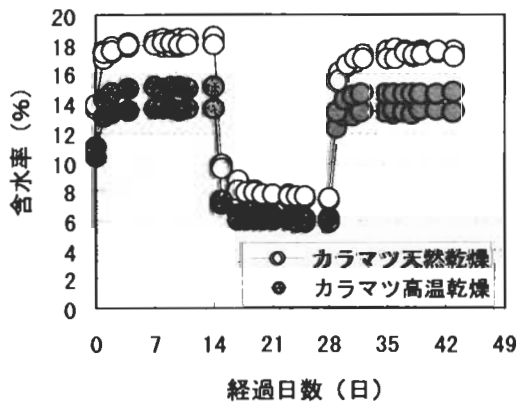


図9 高温乾燥スギの心材の吸湿性 (栗崎⁷⁾)
AD: 天然乾燥材
120°C, 130°C, 140°C: 最高乾燥温度



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⁸⁾

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。

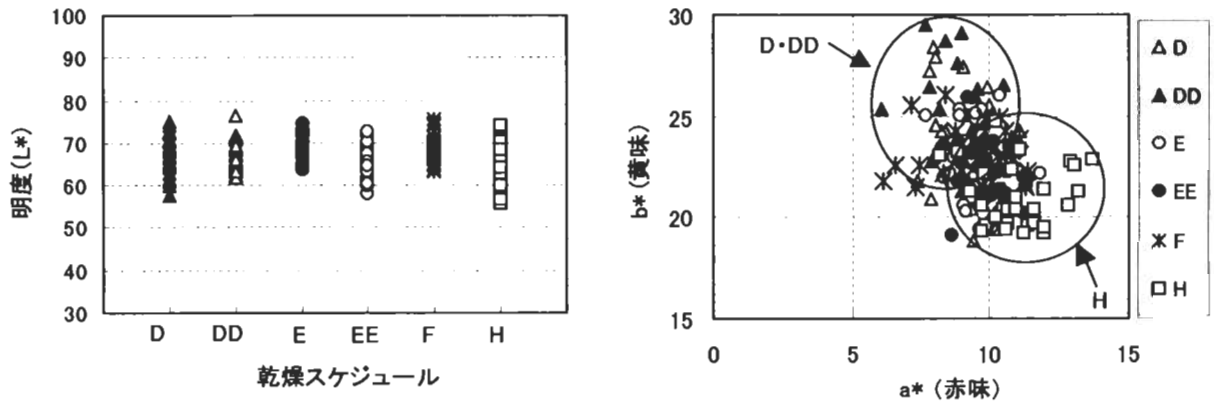
材色は、処理温度と湿度さらに時間の組合せで大きく変化するものと思われ、またこれは樹種による特性もあるものと思われる。

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⁸⁾

図 12 乾燥スケジュール別の乾燥後の彩度⁸⁾

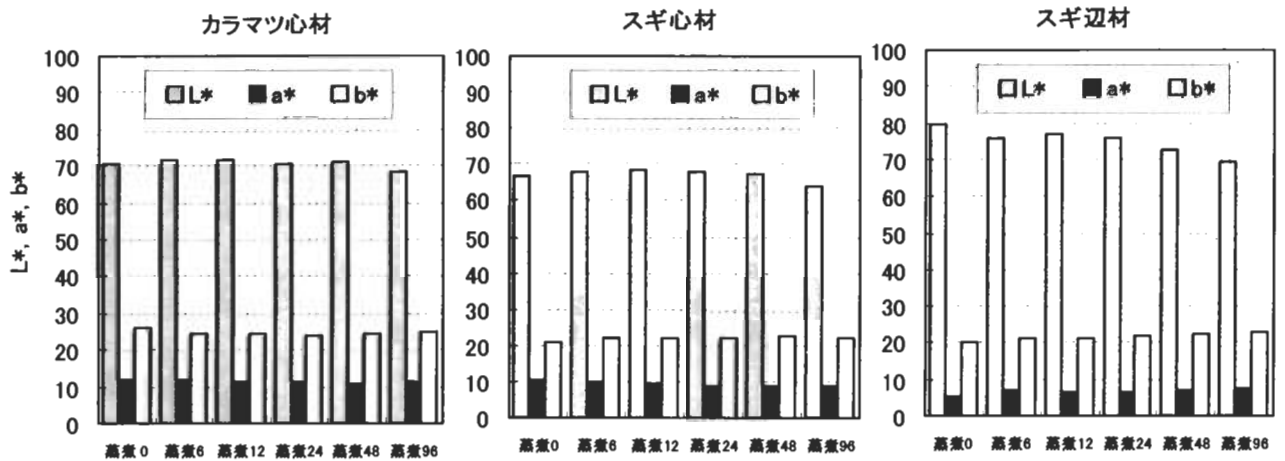


図 13 蒸煮時間の違いによる材色の差異

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⁹⁾。

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¹⁰⁾。

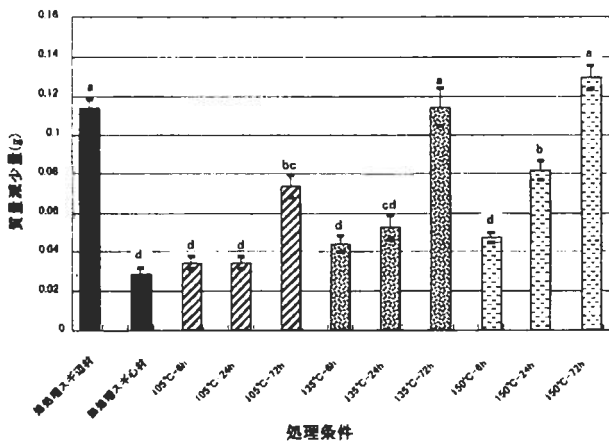
2004年、富山林技セの栗崎らは、スギとアテを用いて耐朽性と加熱温度(60℃~120℃の5条件)、湿度、加熱時間との関係を検討した。オオウズラタケの強制腐朽試験の結果、7日間の高湿加熱試験片の質量減少率は未加熱試験片<60℃<80℃であり、さらにスギ<アテであったが、100℃~120℃で1~4日間の加熱では加熱による耐朽性の低下は認められたものの、加熱条件によりスギとアテでは異なった耐朽性を示したと報告している¹¹⁾。

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¹²⁾。

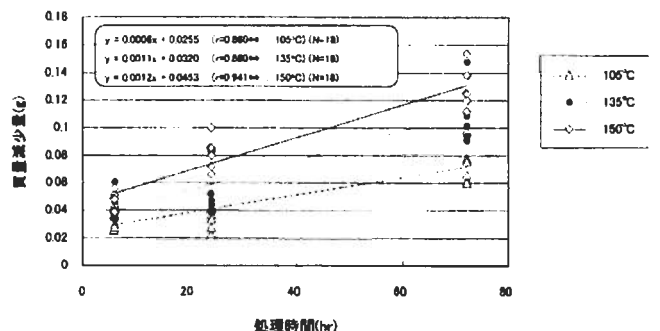
また別の報告ではあるが、森林総研の大村らは、異なる条件で熱処理したスギ無欠点心材について、シロアリの摂食による質量減少量と処理条件との関係を求めた。その結果、質量減少量は処理温度及び処理時間と正の相関が認められ、さらに質量減少量には処理時間の方が処理温度よりも大きく影響すると結論している(図14)¹³⁾。

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¹³⁾)

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¹⁴⁾。

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¹⁵⁾。

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¹⁶⁾。

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¹⁷⁾。

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¹⁸⁾。

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¹⁹⁾。

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²⁰⁾。

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²¹⁾。

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。

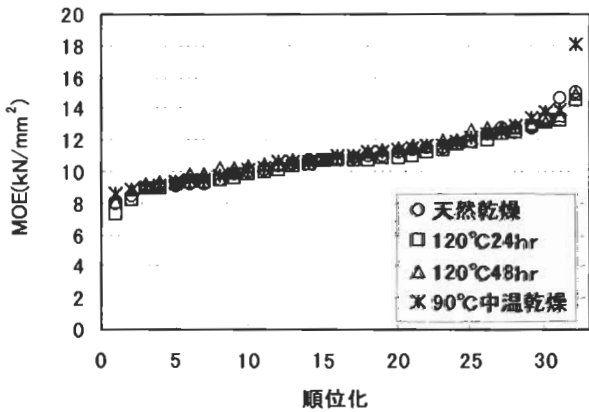


図15 カラマツ MOE の分布 (橋爪²²⁾)

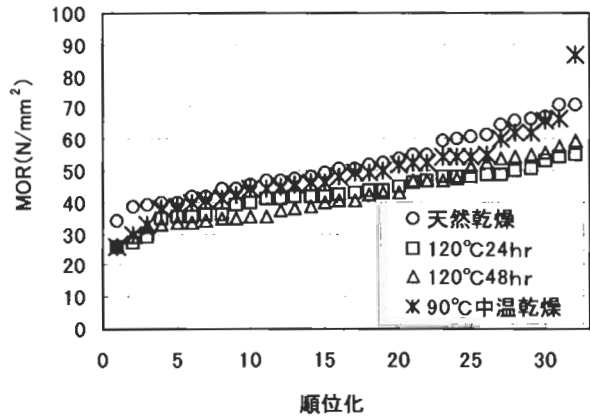


図16 カラマツ MOR の分布 (橋爪²²⁾)

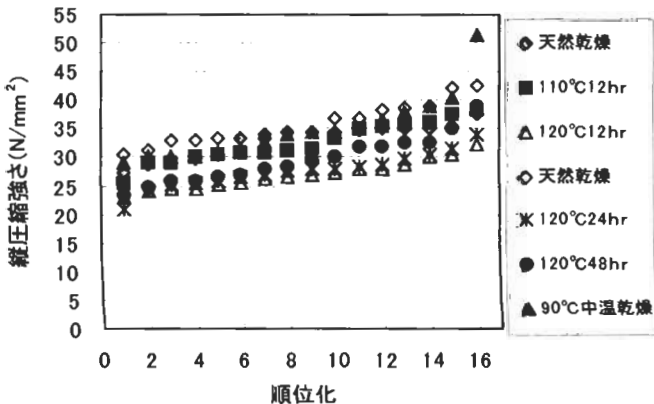


図17 カラマツ縦圧縮強度の分布 (伊東)

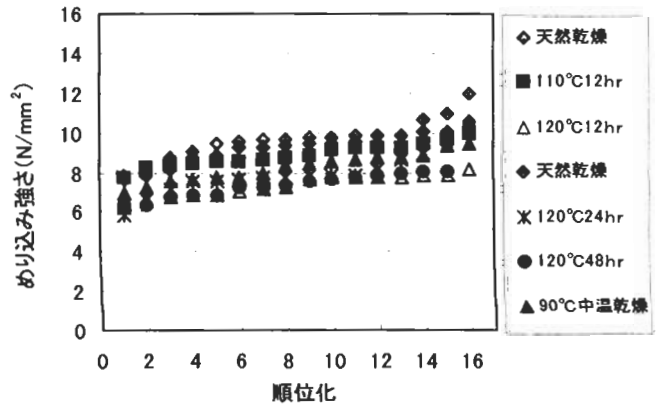


図18 カラマツめり込み強度の分布 (伊東)

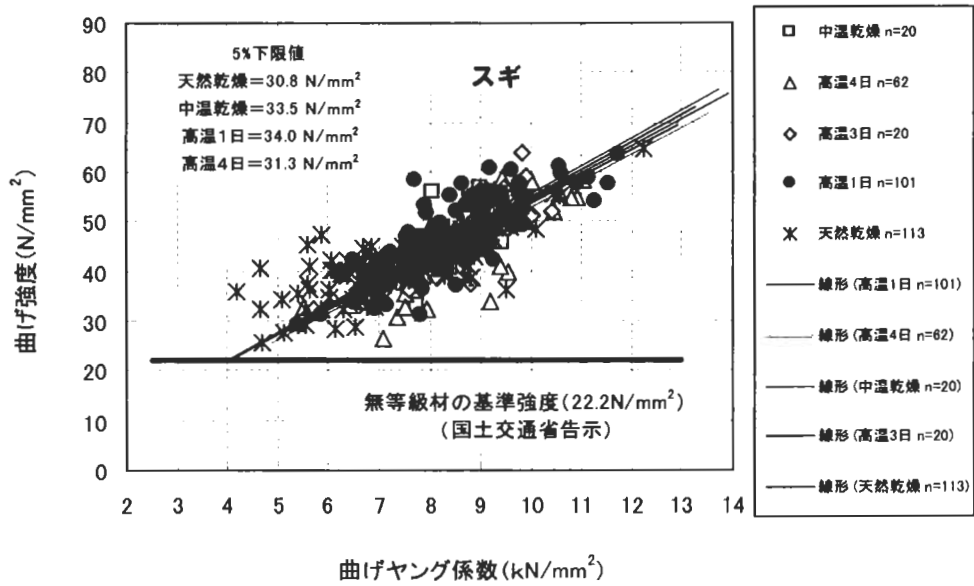


図 19 スギ高温乾燥材の曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強度 (MOR) との関係⁴⁾

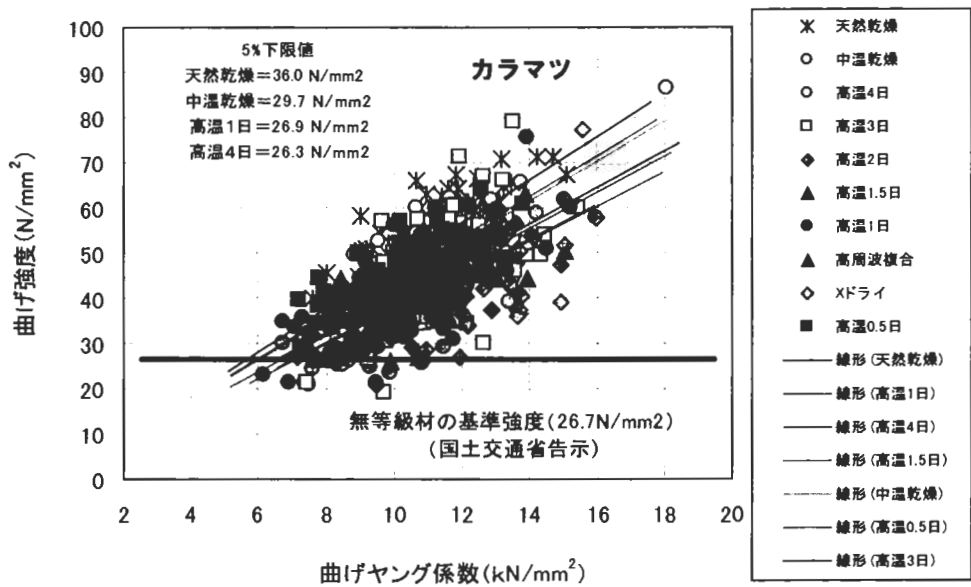


図 20 カラマツ高温乾燥材の曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強度 (MOR) との関係

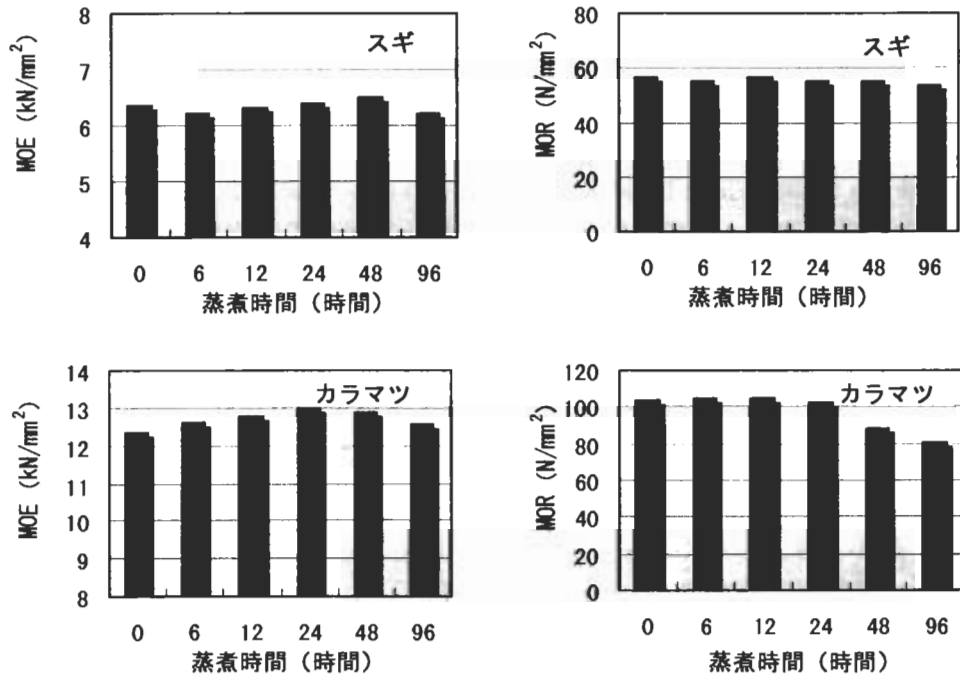


図 21 蒸煮時間の違いによる MOE と MOR (無欠点試験片)²³⁾

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

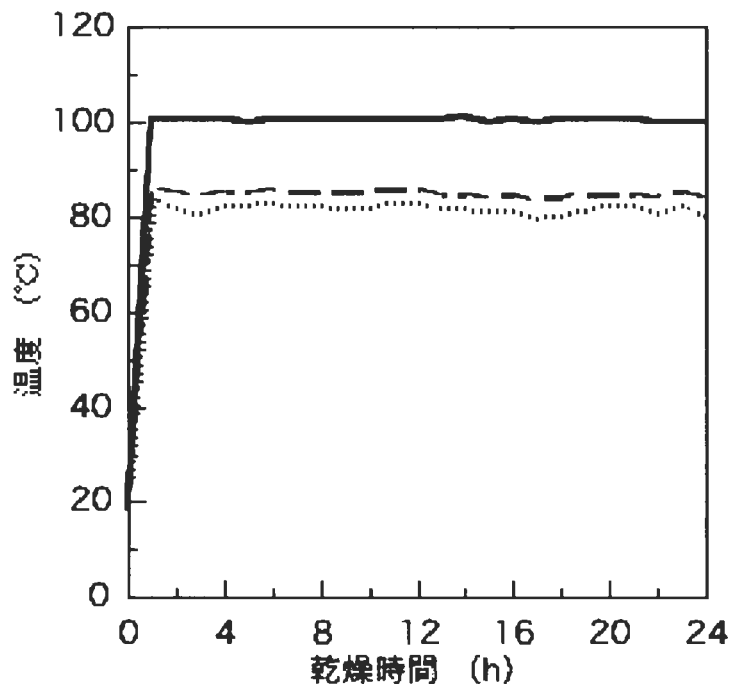


図1 高周波・蒸気複合乾燥過程における材内温度の推移

—— 中心 - - - 中間 表層

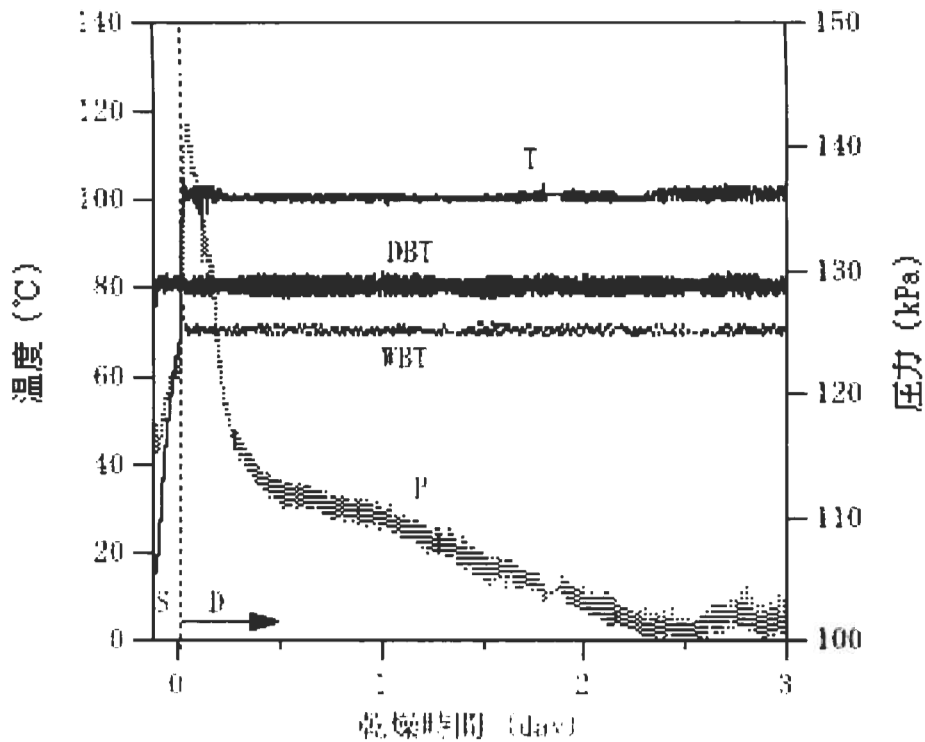


図2 材内温度および材内圧力の推移
 DBT: 乾球温度, WBT: 湿球温度, T: 材内温度, P: 材内圧力
 S: 蒸着期間, D: 乾燥期間

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

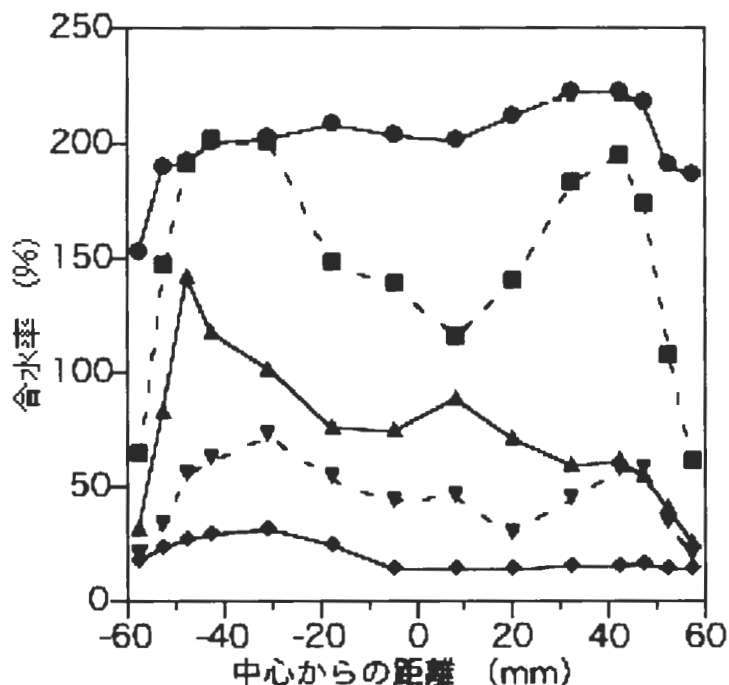


図3 高周波・蒸気複合乾燥過程における含水率分布の推移
 ●：乾燥前，■：6時間後，▲：12時間後，
 ▼：18時間後，◆：24時間後

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。

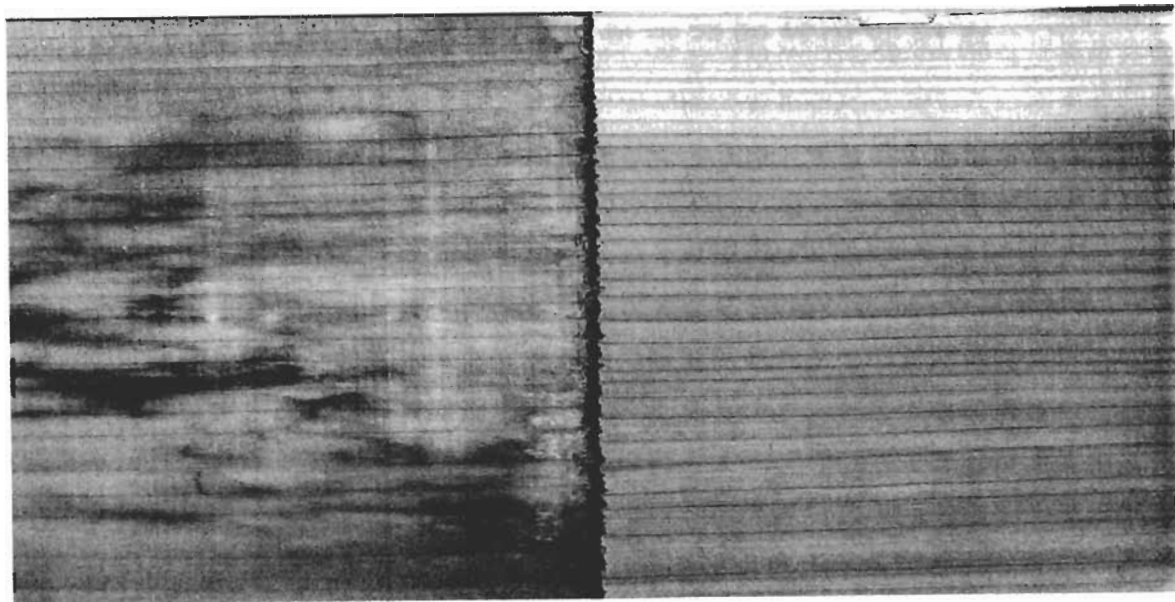


図4 乾燥後の材面

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²⁾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³⁾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⁶⁻⁹⁾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¹⁰⁻¹²⁾。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¹³⁾。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¹⁴⁾。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⁵⁾。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、山本ピニター(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¹⁾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¹⁵⁾。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¹⁶⁻¹⁹⁾を得たり、最近刊行された木材乾燥のマニュアル²⁰⁻²²⁾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ぱ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

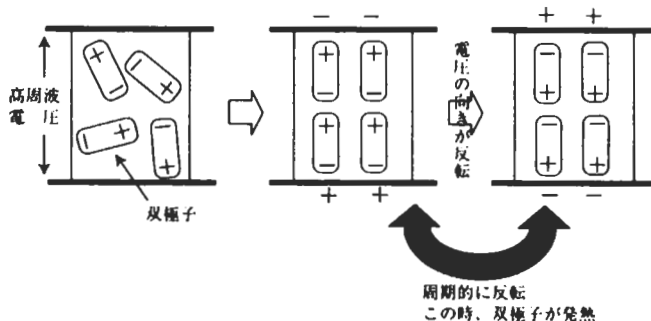
高周波加熱減圧乾燥は、減圧下で高周波加熱をしながら木材を人工乾燥する方法である。木材工業としての視点に立った場合、減圧乾燥の長所と高周波加熱のメリットを複合させた急速乾燥法である点に、最大の特徴がある。

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

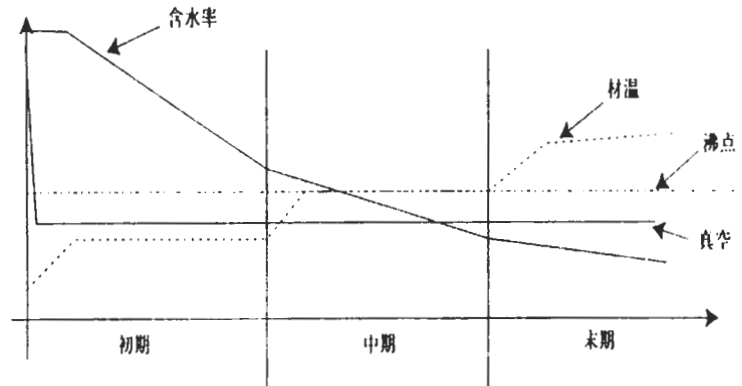
高周波加熱減圧乾燥装置を構成する基本的な要素は、木材を加熱するための高周波加熱装置、木材を収容する減圧缶体、木材より蒸発した水蒸気を凝結させ減圧度を維持する役割を果たす水分凝結器、缶体内を減圧にする真空ポンプ、凝結器や缶体で結露した水を一時的に貯留し一定量になったら排出する自動排水装置、装置全体を制御する自動制御盤である。

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¹⁾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/m³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1m³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 ³ ）	乾燥コスト（円/m ³ ）			
				設備費	人件費	燃料費	計
高周波加熱式真空乾燥 (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、13m³/1室あたり、初期含水率100%

設備費：高周波加熱式真空乾燥機（13m³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/m³、フォークリフト200円/m³、
操作管理300円/m³

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⁴⁾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/m³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/m³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/m³まで削減できることを明らかにしている²³⁾。

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 ³ ）			
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⁵⁾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 背割り有り	スギ心持ち柱材 背割り無し
前処理	天然乾燥で約10日間 （含水率約60%まで） ポリエチレンシートで被覆	天然乾燥で約10日間 （含水率約60%まで）
乾燥方法 初期加熱 減圧 材温（高周波加熱）	85℃ 5時間 （生蒸気と高周波を併用） 70Torr 15時間 55～60℃	95℃ 8時間 （生蒸気と高周波を併用） 70Torr 20時間 55～60℃
後処理	ポリエチレンシートを取る 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 ³	8,800円／m ³

試算された乾燥コストは、背割り材で7,600円/m³、無背割り材で8,800円/m³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

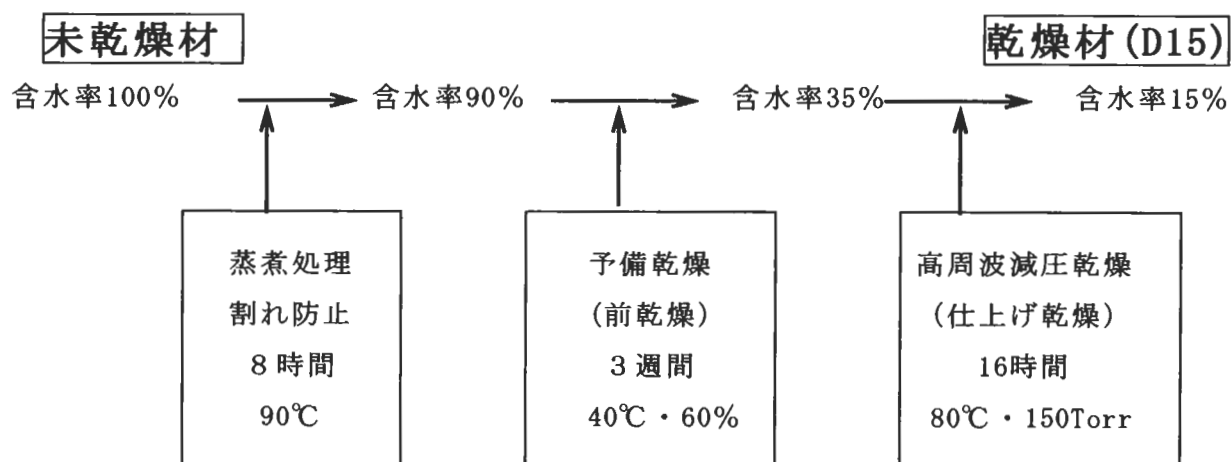
筆者らは、農林水産新技術実用化型プロジェクト研究「地域産材の低コスト乾燥技術の開発」に参加し、高周波加熱を利用したスギ材の高品質・低コスト乾燥法の開発を担当した。その結果、プレドライ（予備乾燥）と高周波加熱減圧乾燥との組合せ乾燥法を提案した。ここには、概略を示すので、詳細については報告書¹⁵⁾を参考にいただきたい。

(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/m³，中温蒸気乾燥11,000円/m³)

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1m³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/m³)

	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% 日数：約3週間
タイプB	0	4,500	4,000	8,500	予備乾燥EMC15% 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/m³
- ③予備乾燥 100円/m³/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1m³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/m³

製品単価（未乾燥材）：35,000円/m³，（乾燥材）50,000円/m³
(円/m³)

1. 養生処理	1,000
2. 収縮・狂いによる歩留まり低下 (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/m³

タイプB 8,500円+7,500円=16,000円/m³

(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。

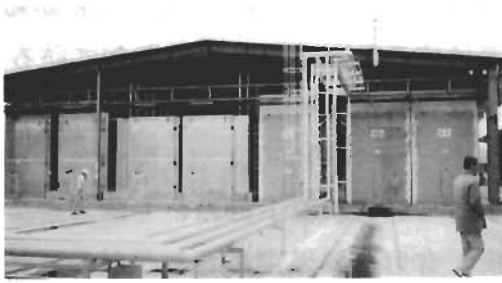


写真2 蒸気式乾燥装置
(一般材を乾燥する)



写真3 一般材のスギ・ヒノキ柱材
(通常は蒸気式であるが、特注材は高周波乾燥する場合もある)



写真4 高周波加熱減圧乾燥機



写真5 後楽園の70cm角のヒノキ材門柱
(この装置で高周波減圧乾燥した)

*この企業は、企業全体で、乾燥材生産を総合的に考えている。

7. 今後の課題と方向

7.1 高周波加熱減圧乾燥法の用途

高周波加熱減圧乾燥法は、低含水率まで急速乾燥が可能で、被乾燥材の損傷の発生も少ない極めて優れた乾燥方法である。さらに、被乾燥材の乾燥仕上がり時の断面方向の水分傾斜も少なく、使用時の寸法安定性も高い乾燥材の生産が可能である。また、一旦乾燥スケジュールを確立してしまえば、装置の制御が簡単に行えるなど操作性という点でも比較的優れ、高品質な乾燥材を高い再現性を持って生産可能であると考えられる。今後は、これらの優れた特徴を、いかに時代の流れの中で有効に活用していくかということが重要である。

品確法の施行により、住宅の瑕疵保証が義務化された今日にあっては、「信頼性の高い高品質な乾燥材」の供給が求められている。しかし、現時点における乾燥材生産は、

低コスト化を追求するあまり、高品質な状態を担保するという視点が希薄になっている面もあるように思えてならない。また、乾燥材に対する市場の要求は多種多様であるにもかかわらず、比較的限定した手法による乾燥材のみを提供するという状態に陥っているようにも思われる。今後は、乾燥材に対する多種多様な要求に対応するため、乾燥方法や仕上がりの程度も、多種多様なものがあってよいのではないかと考える。

これらの点を踏まえると、今後、高周波加熱減圧乾燥法も、利用の機会が高まる可能性を秘めた乾燥法の一つであると位置付けられる。

7.2 今後の課題

今後の課題としては、当面、高周波加熱減圧乾燥の長所を効率的に利用しながら乾燥コストの低減を図るといった点が、最も重要視されることになるであろう。このためには、以下のようなハード面とソフト面の両面における技術開発が必要である。

ハード面では、以下の項目について検討する必要があるであろう。

- ①熱効率および乾燥条件の精度を向上させるための減圧缶体の完全な保温
- ②高周波発振装置の加熱効率の向上
- ③大型装置における電極の配置方法の改善
- ④制御の完全自動化

また、ソフト面では、以下の項目について検討する必要があるであろう。

- ①現段階では不明な点も多い高周波加熱減圧乾燥のメカニズムの解明
- ②他の安価な乾燥法との組み合わせ方法の研究
- ③乾燥性をより向上させるための前処理法の究明

高周波加熱減圧乾燥のメカニズムについてはこれまでも研究がなされているが、さらに詳細なメカニズムが明らかになれば、減圧条件と高周波加熱条件との最も有効な組み合わせ方法が解明され、そのことによって高周波加熱減圧乾燥装置の用途も多様化し、企業も装置を導入しやすくなるであろう。

組み合わせ乾燥法については、天然乾燥やプレドライとの最も効率的な組み合わせ方法について、実用的視点に立った研究が継続されることが望まれる。さらに、高周波加熱減圧乾燥に先立つ前処理法として、初期蒸着処理や局所的な水蒸気爆砕処理の効率的な条件について、これまでにかなり明らかにされてはいるものの、さらなる検討が必要であるように思われる。

これらの研究が継続的に実施されるには、装置メーカーの協力と技術開発が欠かせない。わが国における高周波加熱減圧乾燥装置の導入を積極的に押し進めてきた（株）ヤスジマは、中央研究所に専任の研究職員を配置し、熱意を持った対応をしてきている。

今後も、他の装置メーカーともども、より一層の技術開発に取り組まれることを望みたい。

以上のような視点を持って研究や技術開発がなされ、これらの研究成果が総合的に活用されることによって、高周波加熱減圧乾燥がスギ材・ヒノキ材などを主体とする針葉樹構造用製材のための有力な乾燥方法の一つとして活用されるようになることを、筆者は密かに期待している。



写真6 (株)ヤスジマ中央研究所



写真7 乾燥装置などの実験機器

(引用文献)

- 1) 寺澤眞・金川靖・林和男・安島稔：木材の真空乾燥，海青社（1998）
- 2) 松本文三：木材乾燥法，産業図書（1941）
- 3) 誌上討論「高周波乾燥の実用性」，木材工業，6，193-204（1951）
- 4) 安島稔：高周波加熱式真空乾燥に関する資料，（株）ヤスジマ，（2000）
- 5) 久田卓興・齋藤周逸ほか5名：森林総合研究所平成6年度研究成果選集，16-17（1994）
- 6) 例えば，金川靖ほか2名：木材工業，33，241-246（1978）
- 7) 金川靖・寺澤眞：木材工業，39，168-172（1984）
- 8) 概論として，金川靖：木材工業，51，550-552（1996）
- 9) 総括的な論文として，谷口義昭：木材の高周波加熱減圧乾燥に関する研究，九州大学博士論文（1997）
- 10) 蔡英春ほか2名：木材学会誌，47，389-396（2001）
- 11) 蔡英春ほか2名：木材学会誌，48，73-79（2002）
- 12) Yingchun Cai, Kazuo Hayashi: 7th International IUFRO Wood Drying Conference-2001, 386-391（2001）

- 13) 野地清美：爆砕高温高周波減圧乾燥によるスギ柱材乾燥法の確立，愛媛大学博士論文（2002）
- 14) 又木義博：平成8年度～平成10年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(1)）研究成果報告書，1-66（1999）
- 15) 河崎弥生ほか2名：農林水産新技術実用化型研究成果報告書「地域産材の低コスト乾燥技術の開発」，53-62（2003）
- 16) 河崎弥生：2000（平成12年度）日本木材学会木材と水研究会シンポジウム要旨集，29-34（2000）
- 17) 河崎弥生：2002（平成14年度）日本木材学会木材と水研究会ほか4研究会合同シンポジウム要旨集，62-71（2002）
- 18) 河崎弥生：ウッドミック，17（10），48-51（1999）
- 19) 河崎弥生：平成9年度日本木材乾燥施設協会乾燥セミナー講演要旨集（1998）
- 20) 河崎弥生（分担執筆）：国産針葉樹乾燥材の生産技術マニュアル，22-25 70-71，（財）日本住宅・木材技術センター，1-104（2003）
- 21) 河崎弥生（分担執筆）：わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル，72-77 80-87，（社）全国木材組合連合会（2000）
- 22) 河崎弥生（分担執筆）：わかりやすい樹種別乾燥材生産の技術マニュアル，31-45，（社）全国木材組合連合会（2004）
- 23) （株）ヤスジマ：木材乾燥低コスト化技術研究成果報告書，172-194，木材乾燥低コスト化技術研究組合（2003）

過熱蒸気乾燥の処理条件

森林総合研究所 加工技術研究領域 木材乾燥研究室 小林功

1. 過熱水蒸気について

1. 1 過熱水蒸気とは

一般に、過熱水蒸気とは飽和水蒸気に熱を加えてできる、その圧力での飽和温度よりも高い温度を持つ水蒸気で、図1に示すような蒸気のP-v線図等を用いて説明される。

図1において、横軸は体積、縦軸は圧力である。ある温度を保ったまま気体（蒸気）を圧縮していくと、状態A→状態Bの曲線上をたどる。状態Bで蒸気が液体になり始める。状態Bとなった蒸気を飽和蒸気と呼ぶ。このBより右側の部分が過熱蒸気である。B-C間は圧力が一定のまま蒸気が順次液体になっていく過程で、飽和状態であるが液体と気体（蒸気）が混在するので湿り蒸気とも呼ばれる。状態Cに至って全ての蒸気が液体となる。Cより左側では液体状態であり、飽和液の状態と呼ばれる。

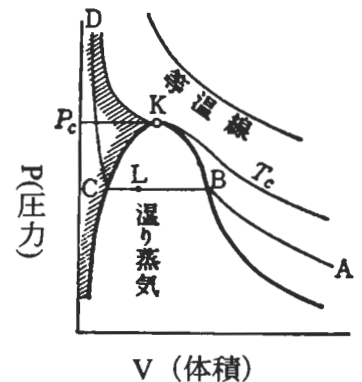


図1 P-v線図¹⁾

したがって、蒸気式乾燥機内の温度 100℃未満で相対湿度が100%に満たない（不飽和な）水蒸気も、高温乾燥機内における100℃以上の不飽和水蒸気も、本報告で触れる常圧より高い圧力下で

の不飽和水蒸気も全て過熱水蒸気である。しかし、工業的には大気圧下であれば100℃以上の蒸気が、加圧および減圧下であれば温度にかかわらず不飽和水蒸気が過熱水蒸気と呼ばれる場合が多く、本報告でもこれにならう。なお、これ以降とくに断らない場合は過熱水蒸気を過熱蒸気と表現する。

1. 2 過熱蒸気の作り方

図2に過熱蒸気を作る過程を模式的に示す。おもり W が一定の圧力であることを示しており、このおもりが重さを無視できるものであれば大気圧と同じである。この図2において、状態Dは液相の水である。これに外部から熱エネルギーを与えると、水の顕熱となって水温が上昇し、若干の膨張を示しながら沸点温度の状態C、すなわち飽和水となる。さらに熱エネルギーを加えると水の蒸発潜熱となり、水と飽和蒸気が混在した状態、すなわち湿り蒸気Lとなる。さらに熱を加えると、

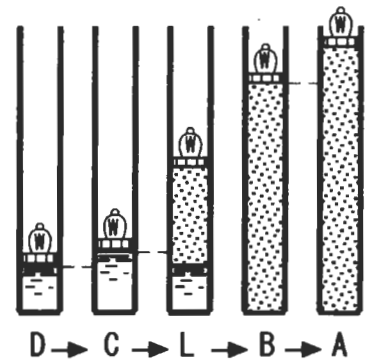


図2 一定圧力下での状態変化²⁾

と、全ての水が蒸発して液体がない状態Bとなり、さらに

熱エネルギーを加えると、このエネルギーは蒸気の顕熱となり、温度が上昇を始めて過熱蒸気の状態Aとなる。

2. 過熱蒸気の木材乾燥への応用

一般に、心持ち無背割り柱材の乾燥においては表面割れの発生を抑制することは難しい。以前からカラマツの心持ち角材については、乾球温度 105~110℃で乾燥することによって表面割れの発生が抑制できることが知られていた³⁾が、近年、スギ心持ち柱材の乾燥が重要視されるように

なって高温処理が再び注目されるようになった。たとえば、燻煙処理を用いて皮付きの生材丸太に熱処理を施し、木材内部で熱軟化を生じさせて成長応力の残留応力を緩和して製材時の挽き曲がりを低減することができる⁴⁾。また、スギ心持ち柱材の高温低湿処理では、乾燥初期に柱材の表層部にドライグセットを生じさせることによって表面割れを抑制することができる^{5, 6)}。

心持ち材の乾燥初期における表面割れは、原則的には接線方向と半径方向の収縮異方性によって発生すると考えられるが、材の温度と含水率が同時に変化するため、破壊ひずみと乾燥応力は常に変化し、発現に至るまでの過程は複雑である。表面割れの発生を抑制するためには、熱と含水率の制御によって軟化および破壊ひずみの増大と乾燥による収縮とを制御する必要があり、装置内雰囲気温度とともに湿度をも自由に制御することが有効と考えられるが、大気圧下での温度100℃以上の雰囲気では、湿度の制御範囲は限られている。たとえば、一般的な蒸気式乾燥機を用いた高温乾燥法では、乾球温度は大容量のヒーターを用いることによって上げることができるが、湿球温度は大気圧下での制御である以上100℃を超えることはできない。従って、温度を上げれば上げるほど湿度は下がる制御となる。過熱蒸気を大気圧以上の加圧下で制御し、これを木材乾燥に用いる手法は、高温域においても自由に湿度を制御することによってより効果的に表面割れを抑制しようという考えから試みてきた。今回、スギ心持ち無背割り柱材の熱処理あるいは乾燥方法に過熱蒸気を応用した試験結果について、その概要を報告する。

3. 過熱蒸気式熱処理装置

試験材を処理するために用いた過熱蒸気式熱処理装置（株）タカハシキカン製の概要を図3に示す。この装置は圧力容器の外側に内缶の加熱のためにジャケットをつけて缶体を二重缶構造とし、内缶内に過熱蒸気を作るようになっている。缶内に満たされた蒸気の膨張と木材から出る水分、さらに装置に接続した配管内における結露によって圧力が変化するので、リーク弁と蒸煮弁で圧力を調節する。缶体の寸法は、内缶が直径50cm、長さ150cm、ジャケットを含めた外径が61cm、長さ160cmである。内部ファン用のモーターは缶外に設置し、軸受け部には蒸気漏れを防ぐために耐熱性のグランドパッキンを巻いた。パッキンは軸の回転と缶内圧のため消耗が激しいので、慎重を期して試験ごとに交換した。ファンの回転数は缶内の風速が2m/s以上となるよう、インバーターで調節した。

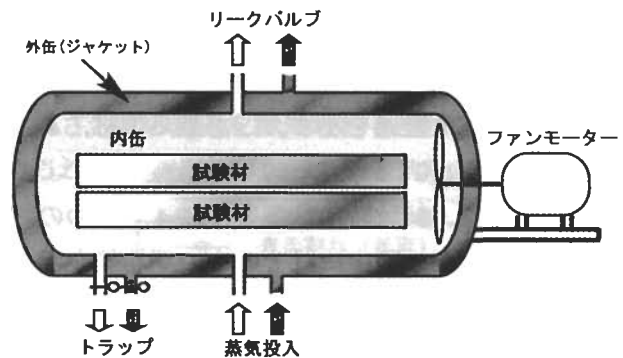


図3 過熱蒸気式木材熱処理装置の概要

図3 過熱蒸気式木材熱処理装置の概要

4. 前処理としての過熱蒸気処理の利用

4. 1 蒸気式乾燥の前処理

まず、表面割れ抑制を目的として、過熱蒸気による熱処理を乾燥前処理として試みた。試験手順を図4に示す。寸法調整した試験材をエンドマッチさせて2グループに分け、一方のグループには過熱蒸気による前処理を施し、他方は無処理のまま乾燥しないようにビニールシートで梱包して冷蔵庫に保存した。過熱蒸気処理終了後、これら処理材と無処理材を同時に蒸気式の試験乾燥機中に積み重ねて仕上げ乾燥を行い、乾燥速度と表面割れの発生状況について調べた。含水率経過については試験材を取り出して重量を測定し、表面割れは重量測定時に割れの数と長さ

定した。

一度高温にさらされた過熱蒸気前処理材が無処理材に対して持つ優位性は、すでに高温・低湿条件を経験していることであり、処理材は無処理材よりも高温・低湿に耐えることが予想された。従って、処理材と無処理材との違いを明確にするために

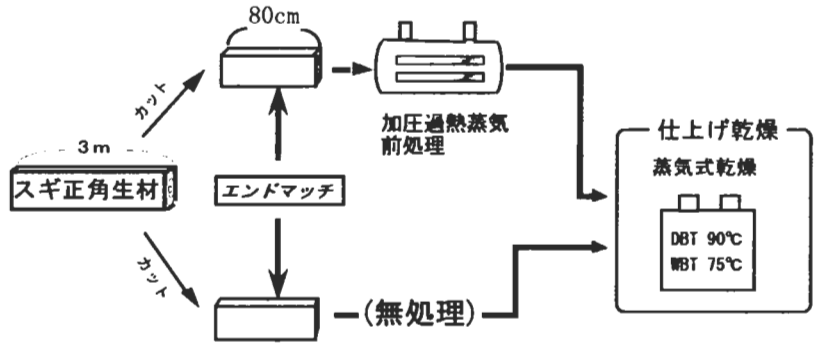


図4 過熱蒸気前処理と仕上げ乾燥

通常の乾燥スケジュールよりも厳しい条件で試験を行うこととし、乾球温度90℃、湿球温度75℃一定で試験を行った。

図5に140℃で前処理を行った際の処理の経過を示す。縦軸は缶内温度と缶内圧力（ゲージ圧）、試験材中央部での温度で、横軸は時間である。最初に中央部の温度が上がるまで、約2時間半の蒸煮を行い、その後、圧力を下げて過熱工程へと移行した。材中央部の温度は過熱処理の間、終始缶内温度よりも低く、130℃前後であった。

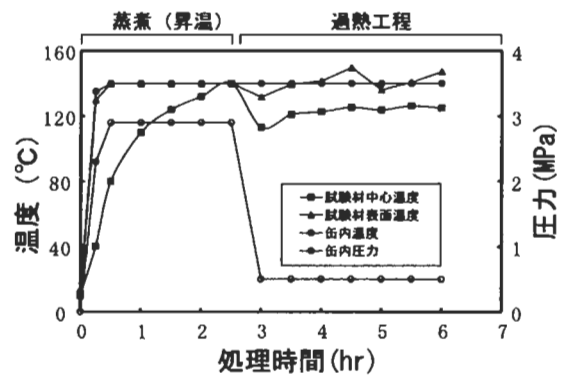


図5 過熱蒸気による前処理

処理温度/圧力：140℃/0.05MPa 処理時間：4時間

図6に過熱蒸気処理材と無処理材の蒸気式乾燥試験機による乾燥経過を示す。○が無処理材、▲、■がそれぞれ、140℃および160℃の過熱蒸気による処理材である。試験時には各条件に4本ずつの試験材を用いたが、図中にはその中の平均値を示している。試験が始まった直後の乾燥速度は無処理材の方が明らかに大きい。過熱蒸気前処理による含水率減少が非常に大きいため、含水率が20%に至るまでの乾燥時間は処理材の方が短く、約5日間程度の差が生じた。

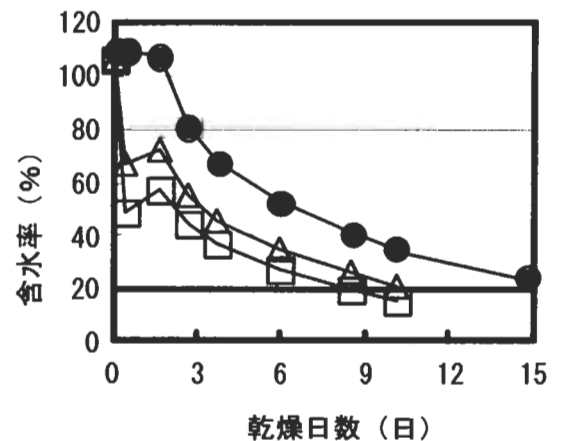


図6 処理材と無処理材の蒸気式乾燥試験

- : 無処理材
- △ : 140℃, 0.05MPa, 4hr 処理
- : 160℃, 0.05MPa, 4hr 処理

表1には、乾燥試験終了後の含水率、乾燥日数、表面割れの結果を示している。含水率は4本の試験材の平均値、表面割れは4本の試験材の合計である。仕上がり含水率にばらつきが認められるものの、処理材は無処理材に比べて表面割れが少なく、乾燥時間が短いことは明らかである。なお、表面割れについては、試験材を取り出しながら測定したため測定時に材温が下がって割れが生じる可能性もある。しかし、乾球温度90℃、湿球温度75℃（平衡含水率6%）という厳しい乾燥条件を用いたこと、無処理材、処理材ともに同じ条件で測定していること、エンドマッチ材であるにもかかわらず大きな差があらわれていることなどから、過熱処理材の表面割れが無処理材に比べて少ないという結果には変わりはないと考えられる。これらの結果より、無背割りのスギ

心持ち柱材乾燥においては、過熱蒸気前処理を導入することによってその後の仕上げ乾燥における表面割れの抑制及び乾燥時間の短縮が期待できる。

表 1. 蒸気式乾燥機による処理材と無処理材の乾燥試験の結果

前処理条件	含水率(%)			仕上がりまでの日数(日)	乾燥後の表面割れ*	
	処理前	処理後	乾燥試験後		本数	長さ(cm)
140℃/4hr	95	68	18	10	0	0
160℃/4hr	98	52	14	10	2	12
無処理	97		19	15	16	279

*4本の試験材の合計

4. 2 天然乾燥の前処理

4. 1の試験では、乾燥機の制約から材長が80cmと短いため、実大材よりも表面割れが発生しにくいと予想されること、また蒸気乾燥処理における温度条件がスギの軟化点⁷⁾よりも高い90℃を用いているため、表面割れの発生に可塑性が関与すると思われる、とくに無処理材の表面割れが過小評価されることが危惧される。従って、これらの問題点を排除し、過熱蒸気前処理の表面割れ発生に与える影響をより明確にするために、次のようにより長い試験材と低い温度条件を用いて表面割れ発生について試験を行った。すなわち、3mのスギ心持ち無背割り柱材2本を1.5mにカットし、一方に試験4. 1における140℃処理と同じ過熱蒸気処理を施して処理材とし、他方を無処理材とした。これらを同時に実験棟内の風通しのよい日が当たらないところに積み重ねて天然乾燥試験に供し、重量変化と表面割れの発生状況を観察した。なお、天然乾燥期間は約1年である。

図7に天然乾燥中の含水率経過及び表面割れ長さ合計の経過を無処理材と処理材とで比較下結果を示す。含水率の減少経過に大きな差は認められないが、表面割れの発生状況は両者間で大きな相違が認められた。処理材では最初の数日間、表面割れが増えるがその後ほとんど変化せず、一方無処理材では表面割れが増え続けた。最終的には処理材では表面割れが非常に少なく、無処理材では多いという結果になった。試験体数が2本と少ないが、蒸気式乾燥試験における結果と考えあわせると、過熱蒸気処理によって表面割れが抑制されることは明らかである。

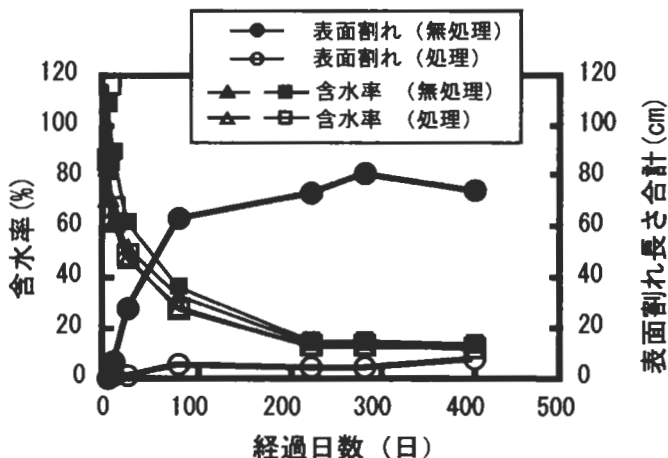


図 7 処理材と無処理材の天然乾燥試験
含水率と表面割れ発生経過

5. 過熱蒸気による乾燥

過熱蒸気処理を前処理として用いた4.1および4.2の試験では、表面割れの抑制には効果があったが、乾燥時間の短縮には若干の効果があったものの、期待したほどには大きくなかった。そこで、乾燥時間を短縮するために前処理としてではなく本乾燥の手段として100℃以上の高温過熱蒸気を用いる試験を行った。

5.1 過熱蒸気のみによる乾燥

一般的な蒸気式乾燥機による高温乾燥の場合、高温条件を乾燥後期まで維持すると内部割れが発生し、内部割れを避けるために乾燥後期に温度を下げる必要がある。この場合の内部割れの原因は、乾燥初期における表層部の乾燥が急激すぎて、表層部分の含水率傾斜が大きいために表層のみがドラインセットされ、乾燥が内層部へ進むにつれて内層部の収縮を大いに阻害するためであると思われる。高温下において湿度を高湿条件から低湿条件へ徐々に下げることによって、表層部の含水率傾斜を適切に保ち、ドラインセット層を適度な厚さで形成すれば、乾燥中期以降、温度を下げずに内部割れ、表面割れともに抑制しつつ乾燥することが可能であると考えられる。

このようにして作成したスケジュールが図8のスケジュールAである。湿度条件を飽和状態から徐々に下げてゆき、含水率80~130%の木材を3~5日程度で乾燥することを目標としている。対照試験として同じ処理装置を用いて、一般的な高温乾燥に似せた、湿度を急激に下げるスケジュールBによる乾燥試験を行った。

高温乾燥での高温低湿処理条件はDBT115~120℃、WBT90~95℃が一般的で、相対湿度は35~45%だが、

本装置の圧力制御範囲の制約により、たとえば温度115℃で実現できる最低湿度は約65%である。今回は初期蒸煮後、短時間にこの条件まで湿度を下げるスケジュールによって試験を行った。

用いた試験材は栃木県産のスギ心持ち柱材で、寸法は断面108×108mm。長さ3mの柱材から65cmの試験材

を採取して用いた。含水率傾斜の経過を調べるために、これらをエンドマッチさせた4本ずつの4グループに分け、それぞれのグループを上記スケジュールで11時間、24時間、51時間、72時間処理して取り出し、重量、含水率分布、割れなどを測定した。

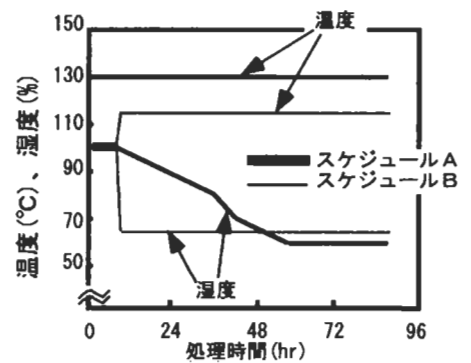


図8 過熱蒸気による乾燥試験で用いたスケジュール
A:湿度をゆっくり下げるもの
B:湿度を急激に下げるもの

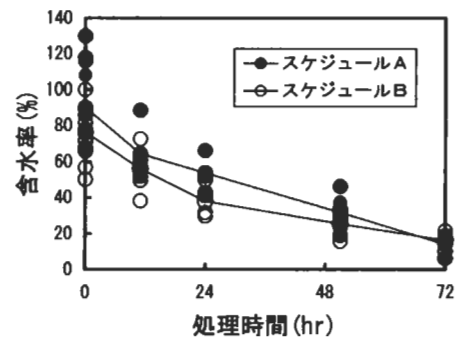


図9 過熱蒸気乾燥試験における含水率経過

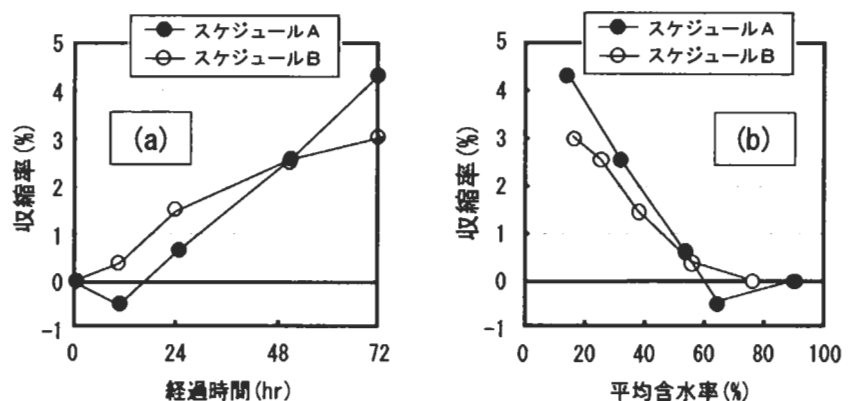


図10 過熱蒸気乾燥におけるT方向収縮率の経過

図9に、試験材の含水率経過を示す。横軸が処理時間で、乾燥初期に行った6時間の蒸煮も含まれている。縦軸は含水率である。個々のマークは●がスケジュールA、○がスケジュールBである。ラインは平均値の経過を示している。スケジュールBの方が、前半の含水率減少速度が若干大きく、後半はスケジュールAの方が速いが、初期含水率のばらつきも考慮すれば、あまり大きな違いではない。図10(a)に、含水率と試験材面のT方向収縮率の経過を示す。収縮率の測定は、全ての試験材の割れの発生していない部分を選んで2面ずつ測定した。図の縦軸は全ての試験材の平均値である。横軸は図9と同じスケールの経過時間である。スケジュールAでは乾燥初期、蒸煮開始から12時間後には寸法が伸びているが、スケジュールBでは収縮が認められる。最終的な収縮率はスケジュールAの方が大きい。仕上がり含水率が異なるので、横軸を含水率とした図を図10(b)に示す。この図でわかるように、平均含水率に対する材面の収縮率は、乾燥初期はスケジュールBがその後はスケジュールAの方が大きい。乾燥初期において湿度を急激に変化させるスケジュールBでは表層部がより大きくドラインセットを受けているためと思われる。

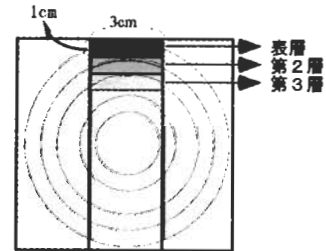


図11 含水率分布試験片の採取位置

試験材内部の含水率分布の経過を調べるために、図11に示すように試験材の中央部で表面から厚さ1cmに3枚切り取って測定した含水率分布の経過を図12に示す。スケジュール

Aでは、表面含水率が繊維飽和点(FSP:約30%)を下回るのは乾燥開始後約39時間で、第三層がFSPを下回るのは乾燥開始後約62時間である。これに対してスケジュールBでは、乾燥開始後約12時間で表面がFSPを下回り、第三層がFSPを下回るのは乾燥開始後約65時間である。すなわち、内層が収縮を始める

時期は両者に差がないが、表層が収縮を始める時期は大きく異なり、湿度を急激に変化させるスケジュールBでは、表面の収縮が長時間にわたって内層部によって抑制された

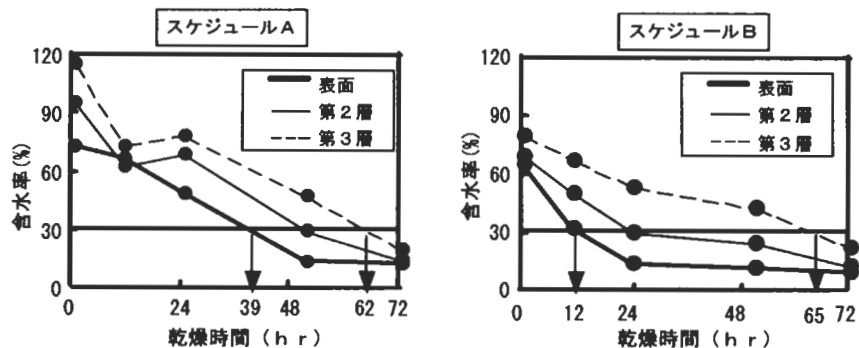


図12 過熱蒸気乾燥試験における含水率分布の経過

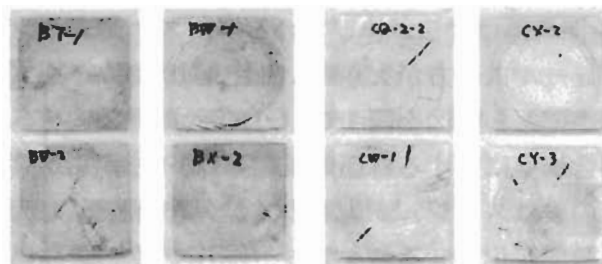
表3はそれぞれの乾燥条件に

おける乾燥終了後の含水率と表面割れの結果である。初期含水率が80%程度の試験材がほぼ3日で乾燥できた。また、どちらのスケジュールでも表面割れは少なかった。試験終了後の試験材の中央部を鋸断した断面を写真1に示す。スケジュールBでは大きな内部割れが観察されたが、スケジュールAでは初期蒸煮時に発生したと思われる髄付近の割れを除いて、ごく小さな割れが2本認められただけであった。これによって130℃と言う高温でも、湿度を適度に調節することによって表面割れ、内部割れともない高速乾燥が可能であることがわかった。

表3. 過熱蒸気による乾燥試験の結果

スケジュールの種類	温度℃	初期含水率%	終了時含水率%	乾燥時間 hr	表面割れ長さ合計 cm
スケジュールA	130	89.2	11.6	72.0	23.4
スケジュールB	115	78.2	16.4	72.0	43.2

*試験材単位長さあたりの表面割れ長さ合計



スケジュールA スケジュールB
写真1. 過熱蒸気による乾燥試験の結果
内部割れの様子

5. 2 高周波乾燥との組み合わせ

5. 1の過熱蒸気を用いた乾燥試験によって、90%前後のスギ心持ち無背割り柱材が内部割れ、表面割れともに少なく、3日程度で乾燥できた。乾燥速度はかなり改善されたが色あいが暗くなる。一般的に高含水率材を高温・高湿雰囲気長時間さらせば変色は大きくなるので、乾燥速度を維持しながら変色を抑制するためには、乾燥後期に材温を下げ、なおかつ乾燥速度を維持する必要がある。現在一般的に使われている乾燥方法の中では高周波加熱乾燥が最も低温と乾燥速度との両立が容易と考えられるので、過熱蒸気による乾燥と高周波乾燥との組み合わせを試みることにした。

用いた試験材はスギ心持ち無背割り柱材で、長さ1.4m、断面114mm×114mm、含水率は50～116%である。各試験において4本ずつ用いた。

スケジュールは、乾燥の前半において5. 1で用いたスケジュールAによる乾燥を18～22時間行って材の表層にドラインセットを形成し、その後、高周波加熱減圧乾燥へ移行する。

用いた試験条件を表4に示す。対照試験として過熱水蒸気処理を行わず、高周波のみで乾燥試験を行い、セットを形成しない状態での割れの発生状況を確認した。次に、過熱水蒸気処理条件と高周波電力の投入量を変えた試験を4回を行い、表面割れ及び内部割れの発生しない条件について検討を行った。なお、高周波乾燥における使用圧力は150mmHgである。

表4. 過熱蒸気処理と高周波加熱減圧乾燥との組み合わせ条件

試験名	過熱水蒸気処理 (ドラインセットの形成)	高周波乾燥 投入高周波電力*
対照試験	無し	10kW/m ³
試験1	130℃, 100→80%, 22hr	10kW/m ³
試験2	130℃, 100→85%, 18hr	5kW/m ³
試験3	130℃, 100→41%, 18hr	5kW/m ³
試験4	115℃, 100→70%, 48hr	5kW/m ³
試験5	115℃, 100→65%, 12hr	5kW/m ³

*木材単位体積あたりの発振機投入電力

試験の結果を表5に示す。過熱蒸気と組み合わせた全ての試験において、対照試験より表面割れが少なかった。表面割れが全く発生しなかった試験2, 3のうち、乾燥時間が短かったのは試

験3で、内部割れもないことから、今回の試験の範囲では試験3の条件が最適であったと考えられる。写真2に試験後の試験材断面と、参考までに5.1のスケジュールAで乾燥した試験材の断面の様子を示す。過熱水蒸気処理時間を短くした試験3では若干改善されたが、やはり暗い印象はぬぐえないと感じた。そこで試験4では過熱蒸気処理時の温度を115℃としてより明るい色の仕上がりになるよう試みた結果、若干の改善は見られたものの大きな改善ではなかった。そこで、試験5では、115℃処理で湿度を下げるスピードを大きくして処理時間をより短く変更した結果、材色が大きく改善された。

表5. 過熱蒸気処理と高周波加熱減圧乾燥との組み合わせ試験の結果

	トータル乾燥 時間(hr)	初期含水率 (%)	終了時含水率 (%)	表面割れ長さ 合計(cm) *	内部割れ
対照試験	48	96	7	77	少ない
試験1	49	80	7	35	多い
試験2	94	104	17	0	なし
試験3	67	79	11	0	なし
試験4	107	104	13	20	少ない
試験5	88	82	13	15	少ない

*試験材単位長さあたりの表面割れ長さ

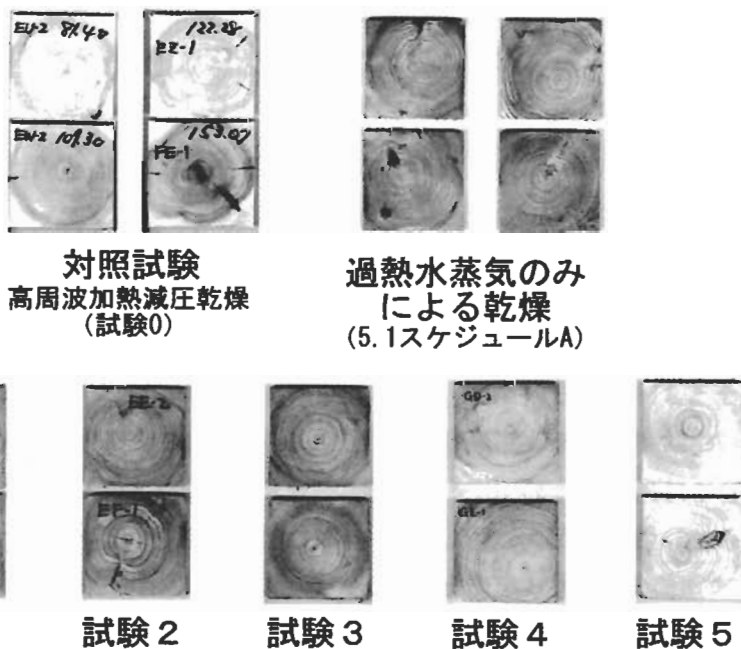


写真2. 過熱蒸気処理と高周波加熱減圧乾燥との組み合わせ
終了後の断面の様子

6. 今後の課題

スギ心持ち無背割り柱材の最適処理条件を明らかにするためには、製品の使用目的とそれに要求される品質、すなわち、強度、粘り、耐朽性、耐候性、耐火性、色、さらに割れなどとの対応付けがなされる必要がある。今回の試験では、主に割れと乾燥処理条件との関係、および結果として現れる色合いの比較だけであるが、今後、処理条件を広げるとともにこれらの品質についての評価を進める必要がある。

参考文献

- 1) たとえば 「機械工学ポケットブック」 福井伸二 編(1974) オーム社
- 2) 野邑泰弘, 伊與田浩志: 化学工学, 66, 28-34(2002)
- 3) 大山幸夫: 木材工業 30, 341-344(1975)
- 4) 奥山剛, 山本浩之, 村瀬豊: 木材工業, 43, 359-363(1988)
- 5) 徳本守彦: 平成 13 年度日本木材学会レオロジー研究会・木材と水研究会シンポジウム
要旨集, 29-33(2001)
- 6) 藤本登留: 平成 13 年度日本木材学会レオロジー研究会・木材と水研究会シンポジウム
要旨集, 34-39(2001)
- 7) 奥山剛: 木材工業, 49, 446-451(1994)

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 林産加工部 池田元吉

1. 乾燥方法がスギ心持ち柱材の強度性能に与える影響

1.1 はじめに

現在、熊本県内で行われているスギ心持ち柱材の乾燥方法の多くは、蒸気式高温乾燥機を用い材面割れ抑制のための高温低湿処理を組み込んだスケジュールによるものである。その他に、高周波蒸気複合乾燥、マイクロ波乾燥機、蒸煮減圧処理を乾燥前処理とする組合せ乾燥も行われている。

これらの方法の中には、材を 100℃以上に加熱するものがある。木材を熱にさらした場合、強度性能などの物性が変化し、その変化の程度は処理時含水率によって異なることが知られている。

県内の製材工場が高温乾燥機の導入を始めて10年程になるが、当時、乾燥方法が柱材の強度性能に与える影響について実大材の曲げ試験において検討した知見を示す。検討した乾燥方法は、当時の乾燥方法の主流であった一般熱気乾燥、県内に導入されていた“くん煙熱”処理、蒸煮減圧処理ならびに天然乾燥それに高温乾燥を加えた五つである。今回は、その時得たデータによる曲げの力に対する材の変形能に関する検討結果についても示す。

1.2 供試材と試験方法

供試材は、同一林分からの原木を動的ヤング率によって、グループ毎の動的ヤング率平均値が等しくなるよう10本ずつの5グループ(ただし天然乾燥は7本)分けた。処理時の材寸法は12×12×300cmである。各グループを表1に示す方法で処理し、処理後17ヶ月間雨のあたらない場所に放置した。ただし、くん煙加熱処理については、くん煙処理した丸太から所定寸法を製材し、その後放置した。高温乾燥の乾球温度150℃は、現在では考えられないほど処理温度が高く考察において考慮が必要である。曲げ試験後に破壊部近傍から採取した含水率測定試片を用いて、内部割れの有無を観察したが高温乾燥も含めて見られなかった。試験時の供試体含水率は、含水率が強度性能へ与える影響を無視できるほどに揃った状態であった。曲げ試験は、3等分点4点荷重方法、最大荷重までの所要時間10分間を目安に一定変位10mm/分で行っている。

表1 乾燥および処理の条件

処理区分	処理内容
一般熱気乾燥	初期蒸煮80℃ 3.5時間 乾球温度70℃一定 湿球温度68～57℃ 乾燥時間126時間
高温熱気乾燥	最高乾球温度150℃ 乾燥時間48時間
蒸煮減圧処理	容器内設定温度122℃(飽和水蒸気圧力を制御) 処理の最終段階で20分間程度減圧 全体処理時間5時間
くん煙熱処理	施設中央部中段温度50℃で15時間処理 同位置の最高温度を120℃まで上昇 同位置の温度を70時間かけて50℃まで低下
天然乾燥	資材置場(屋根付きのコンクリート床)での天然乾燥

1.3 結果と考察

曲げ試験結果および算出した長期許容応力度相当値を表2に示す。表中の有意差は、当時の人工乾燥方法の主流であった一般熱気乾燥材との対比結果である。曲げヤング率 (MOE) は高温乾燥材の値が若干高くなっているが、いずれの処理間とも有意差はなかった。曲げ強度 (MOR) と比例限度荷重比において、高温乾燥のみに有意差がみられた。MOR は高温乾燥と蒸煮減圧ではほぼ同じ値であったが、両者の変動係数は高温乾燥材 19.2%、蒸煮減圧処理 10.3%と高温乾燥の方が約2倍の大きさであった。このことは、高温乾燥の方が MOR が大きく低下する場合があることを示し、高温乾燥による破壊性状の変化が生じていることが推察させる。比例限荷重比は、高温乾燥のみに有意差があり 0.63、他の方法のそれは 0.54~0.58 であった。

各方法による曲げ強さ特性値 $F_{b0.05}$ は、いずれの方法においても E07 (機械等級材) の特性値 28.6 (N/mm^2 , $F_{b0.05-ASTM}$, 九州; 2003.10.20, 木質構造限界状態設計指針 (案)・同解説を参照, p327) より高い値であった。しかし、 $F_{b0.05}/F_{b0.05-ASTM}$ は、高温乾燥以外が 1.21~1.48 であるのに対して、高温乾燥は 0.96 と低かった。

荷重とたわみとの関係を図1に示す。同図には最大荷重時までの関係を示している。試験時の材断面寸法に若干の差があることを考慮すべきであるが、高温乾燥材の最大たわみに小さいものが多いことが分かる。同線図のデータを用い完全弾塑性モデルによる評価を行い、変形関係の特性値を表3に示す。ただし、くん煙乾燥の最大荷重 1000kgf 強のデータは評価から除いている。

高温乾燥材の σ (Pmax)、 σ_y 、 μ の値は、他の方法よりいずれも小さかった。 σ (Pmax) の変動係数は、大きい順にくん煙熱処理、一般熱気乾燥、高温熱気乾燥、蒸煮減圧処理、天然乾燥の順であった。同様に σ_y では、くん煙熱処理、一般熱気乾燥、蒸煮減圧処理、高温熱気乾燥、天然乾燥の順であった。これらの結果から、天然乾燥を除いて、材がさらされた温度の高い方が変形性能に関する性能のバラツキが小さくなる傾向が伺える。

表2 乾燥方法別曲げ強度性能

処理区分	MOE (N/mm^2)		MOR (N/mm^2)		比例限荷重比		許容応力度相当値 N/mm^2
	meam	sd	meam	sd	meam	sd	
一般熱気乾燥	6.89	0.55	50.1	6.8	0.56	0.070	12.6
高温熱気乾燥	7.03	0.89	46.4	8.9	0.63	0.060	10.1
蒸煮減圧処理	6.80	0.64	46.5	4.8	0.57	0.059	12.5
くん煙熱処理	6.74	1.12	47.4	6.1	0.58	0.063	12.2
天然乾燥	6.64	0.90	51.5	4.1	0.54	0.045	14.7

比例限荷重比は比例限荷重の最大荷重に対する比を示す
有意差は一般熱気乾燥との比較である。

表3 実大材曲げ試験における完全弾塑性モデル適用による評価

処理区分	σ Pmax		σ_y		μ	
	meam	sd	meam	sd	meam	sd
一般熱気乾燥	169.3	43.7	60.6	6.7	1.75	0.29
高温熱気乾燥	130.0	28.6	56.1	4.9	1.52	0.21
蒸煮減圧処理	154.3	24.2	60.6	5.7	1.69	0.14
くん煙熱処理	166.6	47.2	62.4	10.7	1.72	0.25
天然乾燥	161.2	18.5	61.8	3.5	1.66	0.10

σ Pmax : 最大荷重時の変位 (mm)、 σ_y : 降伏変位 (mm)

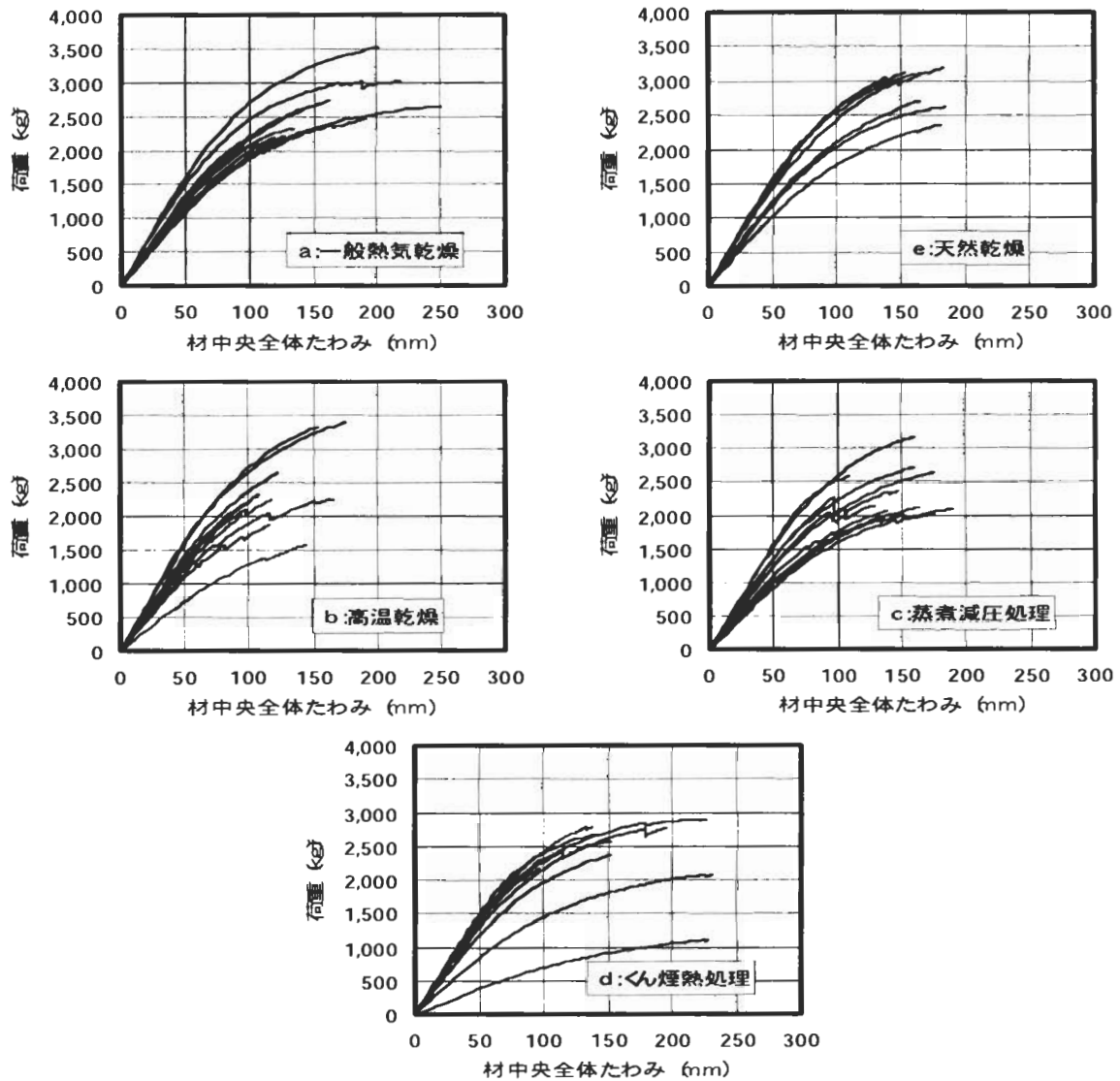


図1 荷重とたわみの関係

これらのことから、高温乾燥材では比例限以上での荷重と変形の両面で、許容量が小さくなっていることが認められる。いわゆる、【ねばり】が少なくなっている。

高温乾燥材の材質については、その生産量の増加と併せて、木材利用に関する各分野から研究報告がなされている。それらの情報を受けて、乾燥材生産現場では乾球温度は高くても 120℃程度、また材を高温にさらす時間を短くした乾燥スケジュールが採用される事例が多くなっている。よって、今回示した 150℃処理の結果から、現在主流となっている高温乾燥材の強度性能を論ずることは難しい。しかし、120℃程度の処理であっても、塑性域での強度性能に何らかの変化が生じていることが推察される。金物工法に用いられる各種接合具における接合強度など、スギ乾燥材の信頼性確保のために早急な確認が必要であろう。また、乾燥材への表示項目として、ヤング率や含水率に加えて乾燥方法、処理の温度や時間の表示も必要と考える。

2. 蒸煮減圧処理による平角材の水分変化

2.1 はじめに

スギ人工林資源の充実に伴い、スギ中目材の用途開発が大きな課題となっている。用途開発において、計量歩留まりの高い利用方法を優位とすれば、まずは心持ち平角材の需要拡大が必要であり、乾燥技術が重要な課題となる。大断面材である平角材の乾燥には、前処理との組合せ乾燥が適していると考えられる。そこで、スギ心持ち正角材の乾燥前処理に効果がある蒸煮減圧処理を平角材の前処理に適用するための処理条件の検討を進めている。ここでは、処理による水分変化についてこれまでに得た知見を示す。

2.2 供試材と試験方法

供試材として、製材寸法 $12 \times 24 \times 400 \text{cm}$ のスギ心持ち平角材から長さ 1m 材 3 本を採取した。分割時含水率は 63.4% であった。材の厚み 12cm は変えずに、 3 本中 2 本の材幅を 12cm 、 18cm に切削し、試験に供試した。 $12 \times 24 \text{cm}$ 平角を含めた 3 本を、各試験材の片方の木口をシリコンシーリング剤（耐熱温度 200°C ）でコーティング後、同時に蒸煮減圧した。処理中の管内温度、材表面温度、材繊維方向中央部で材表面から深さ 3cm と 6cm 位置の温度を K 熱電対で測定した。また、管内圧力も同時に測定した。測定は一分間隔で行った。処理後にコーティングしていない木口から 10cm 間隔で 60cm 位置までの含水率を測定した。減圧レベルは一定の 100 トールで、水の沸点は約 52°C である。使用した蒸煮減圧装置は、有効内径 60cm 、有効管長 200cm 、水封式真空ポンプ付オートクレーブ（株式会社ヤスジマ製）である。

2.3 結果と考察

処理後の材短辺方向の含水率分布を図2に示す。図の含水率は木口から 10cm 、 30cm 、 60cm 位置のものである。材表面含水率は 3 材種ともほぼ同じ値で材幅の影響は見られなかった。含水率分布形は、木口に近い 10cm では材中央部が高い山形であるのに対して、木口から 30cm 以上離れた位置では 3 材種ともに材中央部（髄部分が低い）が低い M 型を示した。また、 24cm 平角材の含水率の方が他の 2 材種より全体的に低かった。この傾向は、以前に行った蒸煮温度 160°C での実験においても同様であった。

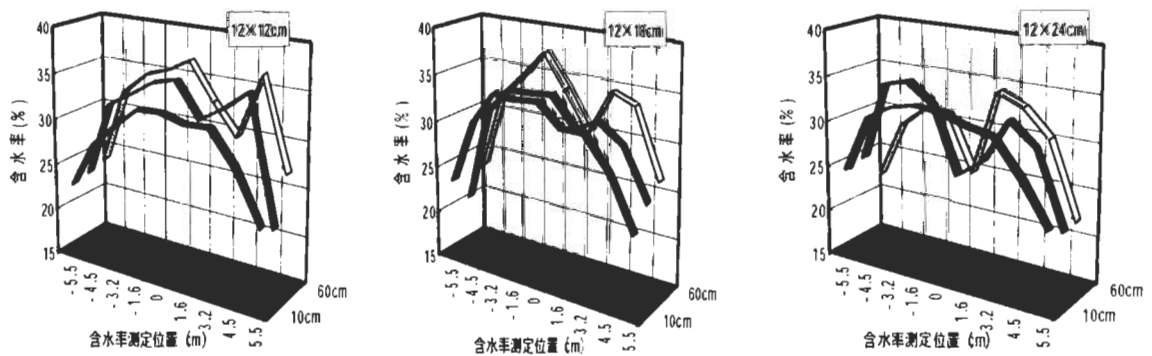


図2 処理後の含水率分布（折れ線は手前から木口からの距離 10cm 、 30cm 、 60cm ）

次に、温度測定結果の一例として、24cm 平角材における変化を図3に示す。材温の全体的な変化は、蒸煮終了と同時に急激に低下し、減圧工程では緩やかに低下している。材表面の温度変化は、減圧開始からの1時間程、下に凸の変化を示し、その後は缶内温度とほぼ同じ値で変化している。この下に凸の間には、材表面からの蒸発による水分除去が盛んであると推察される。図3の測定時刻21時、3時、9時における各材種の缶内、材表面、材表面から深さ3cmおよび6cm位置の温度を図4に示す。測定時刻21時（減圧2時間後）では、3材種とも材表面より缶内温度の方が高く、なおかつ、それらの温度は減圧下の水の沸点52℃より高いことから、材表面からの水分蒸発は続いていると推察される。測定時刻3時（減圧8時間後）以降では、各材温は沸点52℃より低く、材表面からの蒸発はないと推察され、減圧時間短縮が可能と考えられる。図2に示した含水率分布で特徴的なことは、髓付近の含水率が際立って低いことである。この含水率低下は、蒸煮中に生じた髓付近の小さい割れを通し、除圧時と減圧下に繊維方向への水分除去が生じたためと考えられる。

髓付近の含水率が低くなることは、実用機で実大材スギ平角材（13×24cm）を用いた実験においても同様に確認された。その結果の一例を図5に示す。含水率は処理AとCがほぼ等しく、処理Bの方が高い。処理条件AとCの違いは減圧時間で、処理Cの方が長い。蒸煮の温度（120℃）と時間（400分間）は等しく蒸煮後材温も共に115℃程度であった。処理Bは他の2条件より蒸煮時間が短く、最高材温は100℃程度と低く、このため他2条件と比べて減圧による水分除去量が少なくなったと推察される。蒸煮減圧処理は、缶内の水蒸気圧を制御する乾燥前方法で処理ムラの小さい、材面割れ抑制効果なども期待できる前処理であり、大断面製材であるスギ心持ち平角材の前処理に適した方法と考える。

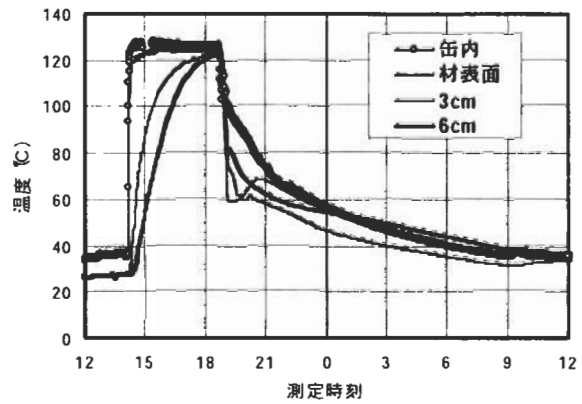


図3 処理中の温度 (12×24cm)

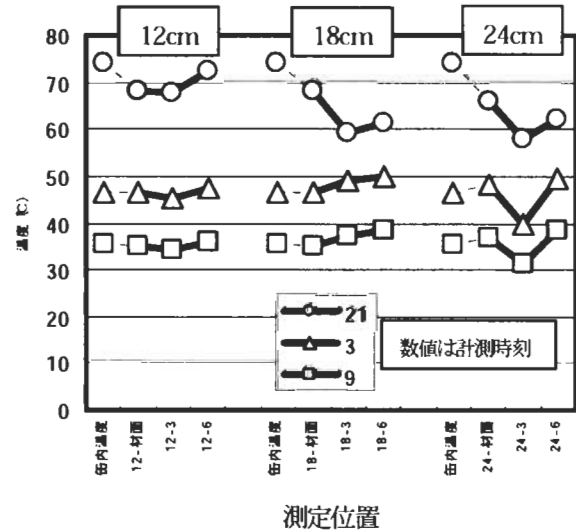


図4 減圧中の材温分布

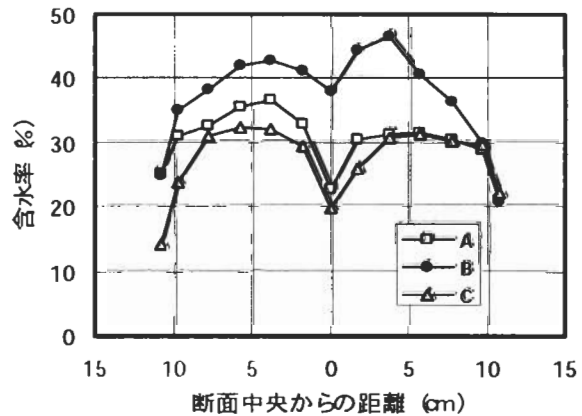


図5 実大材試験における処理直後の含水率分布

1. はじめに

乾燥材や熱処理材の強度性能に関する研究の歴史は古く、これまでに多くの研究が行われ発表されている。第52回日本木材学会大会（2002年4月）では、「乾燥材問題を考える」というタイトルで講演会およびシンポジウムが開催された。そのときの資料には乾燥と強度に関する研究分野の過去20年間の論文および報告書が5つの分野に分けられリストアップされている。このリストは、乾燥材や熱処理材の強度性能に関する研究を調べる上で大変参考になるもので、常々参考にさせて頂いている。今回この講演を引き受けるに当たり、このリストとこのリスト以降に発表された成果を表1から表3の形で整理した。以下、整理した乾燥材および熱処理材の強度性能について、簡単に触れていくこととする。

2. 小試験体に関する既往の報告

小試験体を用いた乾燥材および熱処理材に関する研究の歴史は古く数も多い。目的は実に多様で、乾燥材を強く意識したものもあれば、材質改良を狙ったもの、長期間の使用における材質変化の予測を試みたものなど様々である。以下、表1に示した小試験体に関する既往の報告について触れる。

文献1は、気乾状態の6樹種を用いて熱処理が強度性能に及ぼす影響を検討している。文献1の結果を表4および表5に示す。いずれの表もコントロールに対する百分率で示されている。曲げヤング係数は、樹種によって熱処理の影響が異なっている。例えば、ウェスタンレッドシーダーの場合、処理温度の設定が最も低い115℃でさえ処理時間が長くなるに従って低下する。一方レッドオークの場合、処理温度が155℃でさえ処理時間が長くなっても低下は僅かしか認められない。曲げ強さは、曲げヤング係数の場合とはことなり、各処理温度で処理時間が長くなるに従って低下している。また、曲げヤング係数と同様、樹種によってその傾向は異なっている。すなわち、同じ熱処理条件であっても、樹種によって傾向は異なることが示されている。また、熱処理の影響は、曲げヤング係数よりも曲げ強さで顕著に表れることを明らかにしている。

文献2は、強度的性質と乾燥温度との関係を検討している。文献2の結果を表6に示す。曲げ強さおよび曲げヤング率とも、乾球温度が高くなるに従って増加する傾向であるが、これは試験時の含水率の違いによって生じた可能性があるとし、含水率の補正を行った値も併せて示してある。補正した曲げ強さは、最も小さい値である120℃の場合、コントロールとの差は2%程度である。また、補正した曲げヤング率は、補正した曲げ強さよりも乾燥温度の影響が認められるが、その程度は大きいものではないとしている。

文献3は、文献1同様熱処理が強度性能に及ぼす影響を検討しているが、文献1よりも更に高い温度で熱処理を実施している。この研究の目的は、熱処理と強度との関係よりも、むしろ木材炭化生成物である熱処理材の耐朽性を検討することにある。文献3の結果を表7に示す。文献1と同様、曲げ強度は、各処理温度で処理時間が長くなるに従って低下し、処理温度が高くなるに従ってその傾向は顕著である。一方、耐朽性は逆の傾向となっている。

文献4は、文献1および文献3同様熱処理が強度性能に及ぼす影響を検討しているが、熱処

理する雰囲気（空気中と窒素ガス中）とで実施している。結果として、曲げヤング係数、曲げ強さおよび衝撃吸収曲げエネルギーは、処理時間が短時間のときは増加する傾向が認められるが、処理時間が長くなると減少する傾向となるとき、その傾向は窒素ガス中よりも空気中の方が顕著であるとしている。すなわち、同じ熱処理条件であっても、熱処理する雰囲気が違うことにより、熱処理の影響の度合は異なることを明らかにしている。

文献5は、文献4と同様熱処理が強度性能に及ぼす影響を検討しているが、文献4よりも設定温度の範囲が広くかつ長時間の熱処理を実施している。また、AEの検討も行っている。結果として、曲げヤング係数は、20℃から160℃の範囲では時間の影響はほとんどなく変化しないが、曲げ強さは、その範囲が曲げヤング係数よりも狭く20℃から120℃であるとしている。すなわち、熱処理の影響がある温度は、特性値によって異なりかつ減少の度合も異なることを明らかにしている。

文献6および文献7も同様に、熱処理が強度性能に及ぼす影響を検討しているが、熱処理する雰囲気（飽和水蒸気中）で実施し、曲げ試験とせん断試験を行っている。なお、せん断試験では、せん断面による違いも検討している。文献6の結果を表8、文献7の結果を表9に示す。曲げ強さおよび桁目面と板目面のせん断強さは、処理時間が長くなるに従って減少している。しかし、減少の割合は応力によって異なり、曲げ強さの方がせん断強さよりも熱処理の影響が大きくなっている。すなわち、同じ熱処理条件であっても、作用する荷重が異なることにより、熱処理の影響の度合は違うといえる。

3. 構造用断面の乾燥材から小試験体を採取した既往の報告

構造用断面の乾燥材から採取した小試験体を用いて強度性能について検討した研究も以前から行われており、小試験体と同様の傾向が認められている。以下、表2に示した既往の報告について触れる。

文献8は、断面が2by8材のベイマツを様々な乾燥条件で乾燥した後、その材から小試験体を作成して強度性能を検討している。文献8の乾燥条件を表2-1、文献8の結果を表10に示す。過熱蒸気による乾燥と高温で空気と蒸気が混合した状態で乾燥した材は、コントロールと比較して、比例限度応力、曲げ強さおよび縦圧縮強さが小さい傾向にあるが、ヤング係数はそれらと比べて乾燥の影響による低下は僅かであるとしている。また、過熱蒸気と高温で空気と蒸気が混合した状態とでは、後者の方がそれらの傾向が大きい。すなわち、構造用断面の乾燥材も小試験体に関する一連の報告と同様熱処理の影響が認められ、乾燥方法の違いによってその度合は違うといえる。

文献9および文献10は、断面が120mmのカラマツを高温乾燥と天然乾燥をした後、その材から小試験体を作成して衝撃曲げ吸収エネルギー、衝撃曲げ強さ、静的曲げ強さおよび縦圧縮強さを検討している。また、試験体の採取位置を材の四隅の外側部、四隅以外で外面に接している中間部、外面に接していない中心部に設定し、それらの違いについても検討している。その結果として、衝撃曲げ吸収エネルギーは、高温乾燥と天然乾燥との間に顕著な差は認められず、その傾向は最材位置の違いでも同様である。一方、衝撃曲げ強さおよび静的曲げ強さは、天然乾燥した材の方が高温乾燥した材よりも大きく、その傾向は外側部よりも中心部の方が顕著であったとしている。また、この傾向は、作用する荷重によって異なることを明らかにしている。

表1 乾燥材および熱処理材の小試験体に関する既往の報告

文献 樹種	学名	前処理条件	熱処理条件	熱処理装置	試験片寸法	試験条件
1	ウェスタンレッドシダー		22.8℃, 50%RH (コントロール)		6.35mm (T)	曲げ試験 スパン長139.7mm、中央集中荷重 荷重面：径目面 荷重速度：5.08mm/min
	ベイマツ		115℃ (64,128,192,255日)		12.7mm (R)	
	ポンドローサパイン	26.7℃, 30%RHで 調湿	135℃ (16,34,48,64日)	恒温槽	165.1mm (L)	
	サザンパイン		155℃ (4,8,12,16日)			
	レッドオーク		175℃ (1,2,3,4日)			
	シュガーメープル		常温下で乾燥 (コントロール)		23mm (T)	曲げ試験 スパン長280mm、中央集中荷重
2	シトカスブルース	初期含水率 134.9%	乾燥温度：60,80,100,120℃ 湿球温度：Kollmannの平衡含水率表で 3%に対応する値 乾燥時間48時間	記述なし	23mm (R)	
3	ヒノキ	Chamaecyparis obtusa	180℃ (2,4,8時間)	カラム恒温槽 (ガスク口用)	5mm (T)	曲げ試験 ※試験条件の記述なし
			200℃ (2,4,8時間)		10mm (R)	
			220℃ (1,2,4時間)		80mm (L)	
			240℃ (1,2,4時間)		※文中から推測	
4	シトカスブルース	Picea sitchensis	160℃ (0.5,1,2,4,8,16時間、空気中)	乾燥炉 反応器	7mm (T)	曲げ試験 スパン長98mm、中央集中荷重 荷重面：径目面 荷重速度：4mm/min 衝撃試験 スパン長84mm、中央集中荷重 シャルピー型 (容量30kgw・cm)
			160℃ (0.5,1,2,4,8,16時間、窒素ガス中)		7mm (R)	
					113mm (L)	
5	スブルース	Picea sp.	40℃ (8,24,72時間)	恒温槽	12mm (T)	曲げ試験 スパン長180mm、中央集中荷重 荷重面：径目面 荷重速度：2mm/min
			80℃ (8,24,72時間)		12mm (R)	
			120℃ (8,24,72時間)		240mm (L)	
			160℃ (8,24,72時間)			
			200℃ (8,24,72時間)			
6	スギ	Cryptomeria japonica	105℃ (6,24,72時間、飽和水蒸気中)	HASTチャンバー	20mm (T)	曲げ試験 スパン長240mm、中央集中荷重 荷重面：径目面 せん断試験 試験方法：JIS Z 2101 荷重面：径目面、板目面
			135℃ (6,24,72時間、飽和水蒸気中)		20mm (R)	
			150℃ (6,24,72時間、飽和水蒸気中)		270mm (L)	
7						

表2 構造用断面の乾燥材から小試験体を採取した既往の報告

文献	樹種	学名	前処理条件	乾燥条件	乾燥装置	試験片寸法	試験条件
8	ハイマツ	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	両木口面を コーティング	表2-1の通り	記述なし	50.8mm (短辺) 203.2mm (長辺) 4876.8mm (L) ※2-by 8-inch材 (secondary method)	曲げ試験 縦圧縮試験 ※ASTM D 143-48 (secondary method)
9	カラマツ	<i>Larix kaempferi</i>	生材 (なし)	天然乾燥 高温乾燥 95℃初期蒸煮、5時間 乾球温度130℃温度差50℃、48時間 95℃蒸煮、3時間	記述なし	120mm 心持正角材 3000mm (L)	曲げ試験 縦圧縮試験 衝撃曲げ試験 JIS Z 2101-1994
10							

表2-1 文献8の乾燥条件

乾燥時間	繊維飽和点以上の乾燥		繊維飽和点以下の乾燥		終了時		終了時含水率		乾燥種別	
	開始時 乾球温度 ℃	EMC %	終了時 乾球温度 ℃	EMC %	開始時 乾球温度 ℃	EMC %	最小値 %	平均値 %		最大値 %
100℃以下	116	-	116	-	76.7	7.8	10.2	12.4	15.3	コントロールA
100℃以上	153	-	153	-	76.7	7.8	9.9	12.4	16.0	コントロールB
13	73	86	86	11.3	105.6	9.7	9.4	11.1	14.3	過熱蒸気A
7	88	95	95	13.8	105.6	9.7	11.5	13.4	17.3	過熱蒸気B
18	77	95	95	13.8	107.2	8.7	9.7	12.0	16.6	過熱蒸気C
55	40	95	95	14.8	100.0	8.7	10.2	12.7	16.6	過熱蒸気D
24	77	101	101	14.8	105.6	9.7	9.6	11.6	14.1	過熱蒸気E
75	43	118	118	14.8	107.2	8.7	8.6	12.8	20.5	過熱蒸気F
52	43	95	95	14.8	103.3	7.1	10.0	13.4	19.4	高温、空気・蒸気混合A
54	41	95	95	15.0	103.3	7.1	10.1	13.0	21.0	高温、空気・蒸気混合B
53	63	116	116	14.8	103.3	7.1	8.6	10.4	14.3	高温、空気・蒸気混合C

表3 乾燥材および熱処理材の構造用材に関する既往の報告

文献	樹種	学名	前処理条件	乾燥条件	乾燥装置	試験片寸法 (乾燥時)	試験条件
11	カラマツ	<i>Larix kaempferi</i>	生材 (なし)	乾燥時間: 48時間	縦圧縮試験	135mm正角 長さ: 3000mm	曲げ試験 全スパン2700mm 3等分点4点荷重方式 荷重方向: 背割り面 荷重速度: 5mm/min ※試験時の断面は120mm正角
				A: 昇温後6時間蒸煮 乾球温度105℃、乾湿球温度差5℃12時間 昇温6時間 乾球温度110℃、乾湿球温度差10℃24時間			
12	カラマツ	<i>Larix kaempferi</i>	生材 (なし)	B: 昇温後6時間蒸煮 乾球温度105℃、乾湿球温度差5℃12時間 昇温6時間 乾球温度120℃、乾湿球温度差20℃24時間	縦圧縮試験	135mm正角 長さ: 3000mm	曲げ試験 全スパン2700mm 3等分点4点荷重方式 荷重方向: 背割り面 荷重速度: 5mm/min ※試験時の断面は105mm正角
				C: 昇温後6時間蒸煮 乾球温度105℃、乾湿球温度差5℃12時間 昇温6時間 乾球温度130℃、乾湿球温度差30℃24時間			
13	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	生材 (なし)	D: 昇温後3時間蒸煮 昇温3時間 乾球温度110℃、乾湿球温度差30℃39時間	縦圧縮試験	120mm正角 長さ: 3000mm	曲げ試験 全スパン2700mm 3等分点4点荷重方式
				E: 昇温後3時間蒸煮 昇温3時間 乾球温度120℃、乾湿球温度差30℃39時間			
14	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	生材 (なし)	高温乾燥1 130℃一定 3.5日間	縦圧縮試験	110mm正角 長さ: 3000mm	曲げ試験 住・木セクター 「構造用木材の強度試験法」
				高温乾燥2 110℃までの昇温降温繰り返し、4日間			
15	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	生材 (なし)	蒸気乾燥 70℃一定 14日間	縦圧縮試験	110mm正角 長さ: 3000mm	曲げ試験 住・木セクター 「構造用木材の強度試験法」
				蒸気式高温1 最高乾球温度125℃、乾燥日数7日			
15	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	生材 (なし)	蒸気式高温2 乾球温度120℃12時間、乾球温度95℃一定 乾燥日数11日	縦圧縮試験	110mm正角 長さ: 3000mm	曲げ試験 住・木セクター 「構造用木材の強度試験法」準拠 細長比21 材長630mm ※試験時の断面は105mm正角
				蒸気式中温 乾球温度80~85℃、乾燥日数10日			
				燻煙式 最高温度115℃、乾燥日数6日 天然乾燥			

表3 乾燥材および熱処理材の構造用材に関する既往の報告 (つづき)

文献	樹種	学名	前処理条件	乾燥条件	乾燥装置	試験片寸法 (乾燥時)	試験条件
16	ノルウェース ブルース	-	生材 (なし)	乾燥温度63~70℃、全乾燥時間216時間	蒸気式	断面：50×150mm 長さ：5250mm	剛性試験 曲げ試験 引張り試験 ※試験の詳細なし
				乾燥温度90℃59時間、全乾燥時間63時間	電力式		
				乾燥温度105℃22時間、全乾燥時間29時間	"		
				最終乾燥温度125℃、全乾燥時間12時間	"		
				乾燥温度125℃5時間、全乾燥時間22時間	"		
17	スプルース 欧州マツ	<i>Picea abies</i> <i>Pinus sylvestris</i>	人工乾燥	熟処理なし (コントロール)	断面：45×145mm	曲げ試験 EN408による 3等分点4点荷重方式	
			含水率13%	熟処理 220℃ 5時間、全処理時間 4日間	長さ：4500mm		
18	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	生材 (なし)	乾燥温度85~95℃、乾燥時間174時間	記述なし	110mm正角 長さ：3000mm	曲げ試験 住・木センター 「構造用木材の強度試験法」 せん断試験 いす型試験 中央集中荷重試験
				乾燥温度120℃、乾燥時間72時間			
				乾燥温度135℃、乾燥時間45時間			
20	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	生材 (なし)	未乾燥	記述なし	断面：55×115mm 長さ：3000mm	引張り試験 チャック間距離：1500mm ※試験時の材長は2500mm
				天然乾燥、7ヶ月			
				乾燥温度85~95℃、乾燥時間120時間			
				乾燥温度120℃、乾燥時間40時間			
				乾燥温度135℃、乾燥時間30時間			
21	カラマツ	<i>Larix kaempferi</i>	生材 (なし)	天然乾燥	記述なし	135mm正角 長さ：4000mm	曲げ試験 全スパン1800mm 3等分点4点荷重方式 ※試験時の断面は120mm正角
				高温セット処理 (120℃24時間)			
				蒸煮 6時間、120℃(湿球80℃)24時間			
				高温セット処理 (120℃48時間)			
				蒸煮 6時間、120℃(湿球80℃)48時間			
高温セット処理 (90℃220時間)							
蒸煮 6時間、90℃(湿球85~60℃)220時間							

表4 文献1のコントロールに対する曲げヤング係数の百分率

temperature (°C)	time (day)	Western redcedar	Douglas- fir	Ponderosa pine	Southern pine	Red oak	Sugar maple
115	64	98.9	98.4	104.8	100.0	108.8	103.4
	128	94.5	101.0	100.0	102.6	103.2	103.4
	192	92.3	92.8	96.6	97.4	105.1	95.6
	255	90.1	92.8	101.4	97.4	106.0	101.9
135	16	97.8	102.1	100.9	101.3	106.9	102.4
	34	93.4	94.8	97.6	97.4	105.5	102.4
	48	91.2	88.7	94.7	93.2	104.6	101.0
	64	86.8	91.7	96.6	96.6	102.8	102.4
155	4	96.7	96.9	98.1	99.1	106.0	101.9
	8	91.2	93.3	98.1	96.6	101.4	100.5
	12	87.9	89.2	95.2	94.5	101.4	100.5
	16	84.6	87.6	91.9	91.9	96.7	93.2
175	1	98.9	97.9	101.4	101.7	103.2	102.4
	2	94.5	90.7	93.3	95.3	98.1	98.5
	3	89.0	90.7	92.8	95.3	99.5	96.6
	4	78.0	88.1	88.5	87.6	94.4	89.3

※試験体数は各条件で6体。含水率補正なし。密度補正あり。

表5 文献1のコントロールに対する曲げ強さの百分率

temperature (°C)	time (day)	Western redcedar	Douglas- fir	Ponderosa pine	Southern pine	Red oak	Sugar maple
115	64	82.3	86.9	92.6	82.8	87.8	86.1
	128	70.8	88.1	82.6	75.0	72.8	75.5
	192	68.8	79.9	74.2	65.2	70.0	66.7
	255	63.5	74.4	74.2	56.4	62.0	63.9
135	16	76.0	92.3	86.8	79.9	85.0	86.1
	34	66.7	79.2	72.6	63.7	66.7	64.8
	48	63.5	72.6	67.4	52.0	59.2	60.6
	64	55.2	72.6	65.3	52.4	52.6	56.0
155	4	76.0	82.1	80.0	74.0	74.2	80.1
	8	64.6	75.6	68.4	60.8	60.1	62.0
	12	58.3	67.3	60.0	54.4	52.6	58.3
	16	51.0	64.9	55.3	44.6	48.4	48.1
175	1	79.2	83.9	81.0	76.0	74.2	76.4
	2	66.7	70.2	64.2	61.8	57.7	60.6
	3	58.3	64.9	60.0	52.9	56.3	52.3
	4	45.8	58.3	50.5	44.1	48.8	47.7

※試験体数は各条件で6体。含水率補正なし。密度補正あり。

表6 文献2の試験結果

乾球温度 (°C)	試験時の含水率 (%)	曲げ強さ (kgf/cm ²)	曲げ強さ* ¹ (kgf/cm ²)	曲げヤング率 (tf/cm ²)	曲げヤング率* ¹ (tf/cm ²)
コントロール	12.2	1016.9	1020.9	140.2	140.6
60	9.6	1113.1	1019.1	140.3	134.2
80	8.4	1156.3	1017.1	142.8	133.5
100	7.3	1207.8	1019.8	143.0	130.8
120	6.4	1228.8	1001.8	145.7	130.9

※試験体数は1条件につき、8~10本

*1: 含水率12%に補正(文献21)した値

表7 文献3の試験結果

温度 (°C)	時間 (hr)	曲げ強さ (%)
コントロール		
		100.0
180	2	94.7
180	4	83.2
180	8	75.9
200	2	74.0
200	4	65.0
200	8	52.1
220	1	62.4
220	2	50.3
220	4	37.4
240	1	40.0
240	2	23.9
240	4	9.0

※曲げ強さはコントロールを100としたときの値

表9 文献7の試験結果

	n	含水率 (%)			n	せん断強さ (N/mm ²)			
		最小値	平均値	最大値		COV	最小値	平均値	最大値
コントロール									
	20	12.1	12.6	13.2	24	6.09	8.56	10.14	10.7
105	6	11.6	12.2	12.7	2.1	5.86	8.25	10.12	13.2
105	24	11.2	11.6	12.1	2.2	5.87	7.37	9.33	11.1
105	72	10.5	11.1	11.5	2.2	5.14	6.70	8.73	11.3
ⅧⅧⅧ									
135	6	10.2	10.8	11.3	3.0	5.41	7.56	9.65	15.1
135	24	9.4	10.1	10.5	2.6	5.66	7.69	9.33	13.4
135	72	8.4	9.3	10.0	4.7	5.23	7.22	8.92	16.8
150	6	8.3	9.4	10.3	5.9	5.84	7.69	11.48	18.9
150	24	7.3	8.1	9.0	4.4	5.87	6.92	8.11	9.4
150	72	7.0	7.5	8.3	5.2	4.70	7.14	8.75	12.4
コントロール									
	20	12.0	12.7	13.5	3.0	4.35	6.11	7.95	17.3
105	6	11.3	12.4	12.9	3.3	3.78	6.02	8.55	19.5
105	24	11.2	12.0	13.0	3.9	3.71	5.90	8.91	20.2
105	72	10.5	11.1	11.5	2.3	4.17	6.12	9.61	20.0
ⅧⅧⅧ									
135	6	10.2	10.8	11.4	3.4	3.69	5.63	8.35	21.0
135	24	9.5	10.2	10.8	3.7	3.88	6.18	8.52	22.4
135	72	7.9	9.1	9.8	5.2	3.61	5.60	9.60	24.2
150	6	8.9	9.5	10.5	5.1	3.65	5.50	7.29	17.5
150	24	7.4	8.3	8.8	4.5	2.99	5.05	6.92	22.3
150	72	7.3	7.9	8.3	4.1	2.57	4.87	7.48	26.7

n: 試験体数、COV: 変動係数 (%)

表8 文献6の試験結果

温度 (°C)	時間 (hr)	n	静的曲げヤング係数 (kN/mm ²)		比例限度たわみ (mm)		曲げ強さ (N/mm ²)		最大荷重時のたわみ (mm)			
			平均値	COV (%)	平均値	COV (%)	平均値	COV (%)	平均値	COV (%)		
コントロール												
		20	5.80	9.1	33.3	9.4	2.93	7.6	54.1	10.6	7.71	15.6
105	6	20	5.49	9.3	34.0	10.8	3.06	9.3	53.9	11.8	8.05	15.4
105	24	20	5.60	8.8	35.6	8.4	3.15	7.4	51.9	8.2	7.05	12.2
105	72	20	5.83	9.1	28.7	18.9	2.48	18.0	50.7	10.5	6.65	14.0
135	6	20	5.49	9.7	34.2	13.7	3.12	13.9	51.2	8.3	6.73	13.6
135	24	20	5.49	9.0	32.3	10.6	2.97	9.0	43.8	12.4	4.96	18.4
135	72	20	5.91	10.2	33.4	10.0	2.93	6.6	45.3	10.7	4.73	10.7
150	6	20	5.64	10.0	34.8	9.0	3.15	8.3	49.0	12.2	5.60	14.6
150	24	20	5.51	8.1	31.6	12.9	2.93	10.5	40.3	13.3	4.35	17.3
150	72	20	5.28	9.2	31.5	13.3	3.05	12.4	36.4	16.7	3.76	19.0

n: 試験体数、COV: 変動係数

※含水率の補正なし

表10 文献8の試験結果

乾燥種別	静的曲げ試験						縦圧縮試験					
	試験 体数	容積 密度	比例限度応力 平均値 (N/mm ²)	標準 偏差	曲げ強さ 平均値 (N/mm ²)	標準 偏差	ヤング係数 平均値 (kN/mm ²)	標準 偏差	試験 体数	容積 密度	縦圧縮強さ 平均値 (N/mm ²)	標準 偏差
コントロール A	22	0.450	58.5	8.1	84.8	11.9	12.15	1.65	20	0.455	50.5	10.3
コントロール B	29	0.458	61.1	11.3	87.7	14.8	12.36	3.01	29	0.456	50.0	8.8
過熱蒸気 A	22	0.472	52.1	14.2	80.9	17.3	12.06	2.30	20	0.467	46.0	12.1
過熱蒸気 B	29	0.428	46.8	11.0	70.6	15.3	11.20	2.75	29	0.459	41.6	7.6
過熱蒸気 C	22	0.463	52.8	7.8	76.8	12.6	11.46	1.90	20	0.451	46.8	15.9
過熱蒸気 D	17	0.424	52.0	8.8	70.9	12.2	11.15	1.78	29	0.415	33.2	6.6
過熱蒸気 E	22	0.466	54.1	6.5	73.0	16.3	12.06	1.92	20	0.463	48.4	11.5
過熱蒸気 F	29	0.453	54.7	12.2	76.9	16.5	11.82	3.23	29	0.454	44.2	8.6
高温、空気・蒸気混合 A	17	0.424	49.3	10.0	69.3	12.1	11.77	1.96	29	0.414	36.8	6.2
高温、空気・蒸気混合 B	17	0.420	54.8	7.4	70.1	9.4	11.69	1.64	29	0.420	37.6	5.0
高温、空気・蒸気混合 C	29	0.467	50.5	10.8	70.0	15.1	10.80	2.72	29	0.466	43.7	8.3

※強度値は、含水率12%、容積密度0.460に補正した値

4. 実大材に関する既往の報告

世の中が常に変化し続ける中、乾燥材を取り巻く環境も決して例外ではなく、短時間処理かつ低コストの乾燥方法が求められることがある。その乾燥方法のひとつが高温乾燥で、永年様々な取り組みがなされ実用化されたものも相当数である。一方、構造用材として木材を利用する場合、安全性を確保できるようにその性能を正確に把握する必要があるが、建築関連法令による木材の材料強度は、中温乾燥に分類される乾燥材や天然乾燥した材の試験結果により定められている。そのため、高温乾燥材が果たしてこれまでと同等の性能なのかを検討する必要があり、近年精力的に実験が行われている。以下、表3に示した乾燥材および熱処理材の構造用材に関する既往の報告について触れる。

文献11および文献12は、カラマツ心持ち正角材の強度特性に及ぼす高温乾燥の影響について検討している。文献11の結果を表11、文献12の結果を表12に示す。乾燥条件は全て48時間であるが、5種類の異なるスケジュールが設定されている。結果として、小試験体のようなスケジュールの違いによる明確な傾向はなく、曲げ強度および縦圧縮強度は実用上の問題となる低下は認められなかったとしている。

文献13は、スギ柱材の乾燥方法別強度性能について検討している。文献13の結果を表13に示す。結果として、小試験体の一連の結果と同様、曲げヤング係数は乾燥方法別の違いは小さいが、曲げ強さは高温乾燥材の方が蒸気式乾燥材よりも小さい傾向であったとしている。

文献14および文献15は、文献13と同様スギ正角材の強度特性について検討している。文献15の結果を表14に示す。結果として、曲げ強度特性については、乾燥法による影響は明確ではなかったが、含水率が低いほど曲げ強さが低下する傾向を示したとしている。これは、これまでの知見と逆の結果であり、木材の強度を推定する場合に、従来の含水率との関係のみでなく乾燥条件や内部割れを加味する必要性を示している。一方、縦圧縮強度特性については、縦圧縮ヤング係数および縦圧縮強さともに、乾燥法による差は認められなかったとしている。

文献16は、ノルウェースプルースの曲げおよび引張り強度性能に及ぼす乾燥条件と産地別の影響について検討している。また、非破壊評価手法についても検討をしている。結果として、曲げおよび引張りヤング係数には乾燥条件と産地別の明確な差は認められなかったものの、曲げおよび引張り強さには乾燥条件と産地別の差が認められたとしている。また、曲げ試験でせん断破壊をした材の場合、高温乾燥によって発生した内部割れが多いことを示している。非破壊評価手法については、乾燥条件を加味して調整する必要があるとしている。

文献17は、文献11から文献16よりも更に高い温度で熱処理をした材の強度性能について検討している。この研究の目的は、木材乾燥というのではなく熱処理によって材質を改良した場合、従来の構造用材と同等の性能を有しているかを検討するところにある。文献17の結果を表15に示す。結果として、小試験体の一連の結果と同様、曲げヤング係数は熱処理の影響は小さいが、曲げ強さは熱処理材の方が未処理材よりも小さかったとしている。また、熱処理材の含水率は、未処理材のおよそ1/4であったとしている。

文献18および文献19は、乾燥条件が異なるスギ正角材の曲げ強度性能およびせん断強度について検討している。結果として、曲げ強度と最大荷重時の全たわみは乾燥温度が高い方が小さくなる傾向を示し、みかけのヤング係数と比例限度応力は乾燥温度の違いによる差は顕著ではなかったとしている。また、中央集中荷重方式によるせん断試験の破壊形態は、乾燥温度の上昇に伴ってせん断破壊した試験体数が増加し、実大いす型方式では内部割れの存在した試験体の最大木口割れ長さとしせん断強度との間には、負の相関が認められたとしている。この傾

向は文献16と同様といえる。

文献20は、乾燥条件が異なるスギ平割り材の縦引張り強度性能について検討している。文献20の結果を表16に示す。結果として、縦引張り強度は乾燥温度が高い方が小さくなる傾向を示し、縦引張りヤング係数と比例限度応力は乾燥温度の違いによる差は顕著ではなかったとしている。また、乾燥材と生材を比較した場合、生材の方が縦引張り強度と比例限度応力が高い結果となっている。

文献21は、高温セット条件とカラマツの曲げ強度との関係について検討している。高温セット処理の長所は材面割れの抑制効果があることであるが、ここでもその効果が確かめられている。一方、中温乾燥として位置づけられる90℃乾燥であっても乾燥時間が長いと強度に影響を及ぼすことを示している。

5. おわりに

木材の品質が問われるようになるにつれて、木材乾燥の重要性はますます注目されると考える。とりわけ、構造部材として用いる場合であれば、安全性を担保できる性能を適正に把握しているかどうかを問われるであろう。ここで取り上げた文献以外にも数多くの乾燥材の強度に関するものがあり、今回得られた木材の強度性能に対する乾燥条件の影響の知見は十分とは言い難い。また今回の知見は、試験結果を羅列し整理を試みる程度に止まり、試験方法や含水率などの補正方法の検討には至らなかった。近い将来、処理条件や強度試験のパラメータを揃えることにより、今までよりも正確な評価を世の中に示さなければならない時期が訪れるかもしれない。そのときは、木材に携わる研究者や技術者が協力し合い取り組む必要があるのでは？と感じる。

最近「高温乾燥した材は、普通の材より弱いのですか？」という質問を受ける。中には「120℃と90℃で乾燥した場合は？」というものもあるが、答えは「うーん。」から始まる。高温かつ長時間の極端な条件で乾燥や熱処理した材の強度低下は明らかであるから「乾燥条件によっては、そういうこともありえますし、そうではない場合もあります」と続けて答えている。もし質問が「断面が115 mm角の○×という木材を、120℃一定で20時間の乾燥をしたら、その材の曲げ強度は天然乾燥した材よりも小さいのですか？」であったら、「乾燥する前の材の状態や乾燥の雰囲気分からないので一概にはいえませんが、まず天然乾燥した材と変わらないと思います。」と答えるであろうが、これまでに一度も受けたことのない質問である。

謝辞

この要旨で用いた筆者の文献および表は、平成12-16年度独立行政法人森林総合研究所交付金プロジェクト「スギ材の革新的高速乾燥システムの開発」によりおこなわれたものである。

表11 文献11の試験結果

乾燥方法	試験体数	含水率 (%)	密度 (g/cm ³)	ヤング係数			曲げ強度				
				最小値 (tf/cm ²)	平均値 (tf/cm ²)	最大値 (tf/cm ²)	標準偏差	最小値 (kgf/cm ²)	平均値 (kgf/cm ²)	最大値 (kgf/cm ²)	標準偏差
A	35	12.1	0.55	64.5	94.0	124.5	13.8	234	406	592	85
B	19	11.9	0.52	72.5	102.6	123.7	13.0	263	439	692	95
C	30	7.3	0.53	65.0	95.1	150.8	15.6	237	367	642	82
D	27	8.7	0.52	78.6	100.8	133.2	13.0	313	416	572	74
E	33	10.0	0.52	64.7	100.4	137.9	16.6	238	426	623	97

表12 文献12の試験結果

乾燥方法	試験体数	含水率 (%)	密度 (g/cm ³)	縦圧縮ヤング係数			縦圧縮強度				
				最小値 (tf/cm ²)	平均値 (tf/cm ²)	最大値 (tf/cm ²)	標準偏差	最小値 (kgf/cm ²)	平均値 (kgf/cm ²)	最大値 (kgf/cm ²)	標準偏差
A	35	11.3	0.50	41.7	79.0	118.2	14.5	269.5	347.4	437.3	40.6
B	29	10.1	0.49	60.0	84.9	130.2	14.6	296.0	361.5	429.4	41.6
C	32	10.2	0.49	55.6	87.7	121.7	17.3	261.6	361.7	519.1	51.9
D	18	10.5	0.49	68.8	89.3	112.8	12.5	325.9	375.1	461.3	37.7
E	27	10.8	0.48	61.9	85.4	119.5	12.8	285.7	359.6	462.3	43.8

表15 文献17の試験結果

樹種	処理条件	厚さ		幅		含水率 (%)	ヤング係数_glob		曲げ強度			
		平均値 (mm)	標準偏差	平均値 (mm)	標準偏差		平均値 (kN/mm ²)	標準偏差	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)		
スプルース	コントロール	44.4	0.3	143.3	0.7	12.5	0.3	11.3	2.4	46.0	14.1	23.7
	熱処理	43.8	0.8	138.3	1.8	3.0	0.4	10.8	2.3	23.2	10.4	8.0
欧州マツ	コントロール	44.6	0.3	144.4	0.7	12.1	0.5	12.2	2.6	47.1	12.5	24.5
	熱処理	43.5	0.5	140.5	1.5	3.4	12.1	11.6	2.0	24.9	10.2	11.1

表13 文献13の試験結果

乾燥区分	含水率		ヤング係数		曲げ強度	
	(%)	標準偏差	平均値 (tf/cm ²)	標準偏差	平均値 (kgf/cm ²)	標準偏差
高温乾燥1	26.2	10.4	57.1	11.5	335	46
高温乾燥2	26.2	10.1	56.3	12.1	328	53
蒸気式乾燥	19.2	2.6	60.6	12.9	386	57

※200体の試験体の動的ヤング係数を全数測定し、平均値、標準偏差がほぼ等しくなるように3区分した。

表14 文献15の試験結果

乾燥区分	乾燥後の含水率		ヤング係数		縦圧縮強さ		
	12ヶ月 (%)	30ヶ月 (%)	平均値 (kN/mm ²)	変動 係数	平均値 (N/mm ²)	変動 係数	5%下限値 (N/mm ²)
高温乾燥(1)	12.5	12.4	5.92	19.2	28.4	9.09	24.1
中温乾燥	12.6	12.4	5.83	18.1	28.2	8.92	23.9
燻煙式	12.5	12.2	5.98	16.1	28.7	8.54	24.1
天然乾燥	14.4	14.5	5.68	16.9	28.8	9.44	24.6

※200体の試験体の動的ヤング係数を全数測定し、平均値、標準偏差がほぼ等しくなるように3区分した。

※変動係数の単位は、パーセント。

表16 文献20の試験結果

	n		MC	Efr -green	Efr -test	Et	σ_{pt}	σ_t
			(%)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
90°C	55	min	11.9	4.23	5.05	4.65	12.7	13.6
		ave	13.5	6.76	8.01	7.38	22.4	25.2
		max	15.7	9.25	10.72	10.11	33.0	39.9
		COV(%)	7.4	16.9	16.1	17.2	24.6	23.7
120°C	55	min	8.1	4.20	5.03	4.48	11.3	11.3
		ave	11.3	6.76	8.10	7.51	20.7	23.7
		max	15.0	9.21	10.66	10.34	29.0	46.0
		COV(%)	15.0	17.0	15.8	16.9	18.2	23.1
135°C	55	min	9.6	4.27	5.38	5.04	8.4	14.2
		ave	11.6	6.75	7.91	7.67	16.4	21.1
		max	15.8	9.25	10.85	10.63	32.8	34.1
		COV(%)	12.1	16.9	15.8	15.9	27.3	20.8
天然乾燥	55	min	14.3	4.10	4.64	4.10	13.1	13.4
		ave	15.8	6.76	7.66	7.32	22.8	26.5
		max	18.5	9.16	10.35	10.11	30.2	37.2
		COV(%)	4.6	17.0	17.1	17.6	18.9	20.1
生材状態	55	min	43.6	4.30	4.48	4.23	12.9	17.2
		ave	82.3	6.75	6.81	6.28	25.3	31.5
		max	173.9	9.02	9.00	8.30	45.0	45.5
		COV(%)	38.0	16.7	16.7	17.2	25.3	19.0

n : 試験体数

Et : 縦引張りヤング係数

COV : 変動係数

σ_{pt} : 縦引張り比例限度応力

MC : 含水率

σ_t : 縦引張り強度

Efr -green : 縦振動法によるヤング係数(仕分け時)

Efr -test : 縦振動法によるヤング係数(試験時)

文献

1. M. A. MILLET and C. C. GERHARDS : Accelerated Aging : Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115°C to 175°C. WOOD SCIENCE Vol. 4(4),193-201 (1972).
2. 鷲見博史：針葉樹材の高温乾燥に関する研究，博士論文，177-129 (1984).
3. 松岡昭四郎：熱処理材の耐久性について，第36回日本木材学会大会研究発表要旨集，31 (1986).
4. Yoshitaka Kubojima et al : Bending strength and toughness of heat-treated wood. J Wood Sci Vol.46, 8-15 (2000).
5. T. Matsumoto et al : Influence of Thermal Treatments on the Mechanical Properties of Wood. 7th International IUFRO Wood Drying Conference, 430-433 (2001).
6. 加藤英雄ら：飽和水蒸気中で熱処理したスギ小試験体の曲げ強度性能，第52回日本木材学会大会研究発表要旨集，116 (2002).
7. 加藤英雄ら：飽和水蒸気中で熱処理したスギ小試験体のせん断および縦圧縮強度，第53回日本木材学会大会研究発表要旨集，90 (2003).
8. M. Salamon : Quality and Strength Properties of Douglas-Fir Dried at High Temperatures, FOREST PRODUCT J. Vol. 13(8), 339-344 (1963).
9. 中嶋康ら：カラマツ柱材の高温乾燥（第5報）－衝撃曲げ吸収エネルギー－，第49回日本木材学会大会研究発表要旨集，133 (1999).
10. 中嶋康ら：カラマツ柱材の高温乾燥（第6報）－衝撃曲げ吸収エネルギー－，第50回日本木材学会大会研究発表要旨集，138 (2000).
11. 吉田孝久ら：カラマツ心持ち正角材の強度特性に及ぼす高温乾燥の影響（Ⅰ）－曲げ強度特性－，木材工業 Vol. 54(3), 122-125 (1999).
12. 吉田孝久ら：カラマツ心持ち正角材の強度特性に及ぼす高温乾燥の影響（Ⅱ）－縦圧縮強度特性－，木材工業 Vol. 54(6), 265-268 (1999).
13. 小田久人：宮崎県産スギ柱材の乾燥方法別強度性能，木科学情報 Vol. 6(1), 18-19 (1999).
14. 田中洋ら：乾燥方法の異なる宮崎県産スギ正角材の強度特性（Ⅰ）－曲げ強度特性－，第52回日本木材学会大会研究発表要旨集，114 (2002).
15. 田中洋ら：乾燥方法の異なる宮崎県産スギ正角材の強度特性（Ⅱ）－縦圧縮強度特性－，木科学情報 Vol. 10(4), 60-61 (2003).
16. B. Kallander et al : Influence of Drying in Temperatures Between 70°C and 125°C on Selected Wood Properties of Norway Spruce. 7th International IUFRO Wood Drying Conference, 306-311 (2001).
17. C. Bengtsson et al : Bending strength of heat-treated spruce and pine timber. IRG/WP 02-40242, 2-9 (2002).
18. 加藤英雄ら：高速乾燥システム等によるスギ乾燥材の強度及び耐久性評価，木材乾燥の研究成果・技術研究会講演要旨集，41-46 (2004).
19. 井道裕史ら：スギ製材品のせん断強度の評価－試験方法と内部割れの影響－，第54回日本木材学会大会研究発表要旨集，116 (2004).
20. 加藤英雄ら：乾燥温度がスギ製材品の縦引張り強度に及ぼす影響，第54回日本木材学会大会研究発表要旨集，117 (2004).
21. USDA, For. Prod. Lab. : Wood Handbook, USDA. For. Serv. Agric. Handbook, No.72, 1.1-23.10 (1974).

熱処理と耐久性

森林総合研究所 桃原 郁夫

1. はじめに

「住宅品質確保の促進等に関する法律(品確法)」の施行は、住宅部材として使用される木材に割れ・そり・狂いなどがなく正確な寸法制度を有する製材を必要とし、結果として寸法精度に優れる乾燥材に対するニーズを増加させた。このため、住宅の柱などに使用される木材に占める乾燥材の比率は今後も上昇を続けると予想される。一方の供給側、すなわち乾燥工場では、これまで主流だった天然乾燥・人工乾燥に加え、各種高速乾燥法を用いて乾燥時間を短縮し、乾燥コストの低減を計るところも出てきている。

乾燥材が要求される背景とそれに呼応した乾燥工場側の対応については以上であるが、当然のことながら住宅部材に対する要求は寸法精度にとどまるものではなく、コスト、供給安定性などさまざまである。そして、中でも重要なのは耐久性であろう。たとえば品確法では、ヒノキ・ヒバと同等の耐久性を有するものに区分される製材や集成材の土台であれば保存処理なしで等級3と呼ばれる75-90年の耐用を期待される木造住宅に使用できることになっている。

このように木材の重要な性質である耐久性は、主として木材の抽出成分の組成と量とによって決定されると考えられていることから、高耐久樹種の抽出成分の組成と含有量とが調べられ、様々な抗菌・抗蟻成分が報告されてきている。この抽出成分は、その名が示すとおり、水・熱水・有機溶媒などにより抽出される成分であることから、乾燥処理の際に水と共に移動し、あるいは揮発性成分として揮散してしまうなど、乾燥中に抽出成分の組成や量が大幅に変化することが予想され、その結果、

最悪の場合には耐久性が低下する可能性が懸念されている。

しかし一方、ヨーロッパでは熱処理を施すことで、耐久性に劣る早生樹に高耐久樹種並の耐久性を付与しようとする試みが続けられている。そして、これらの熱処理システムによって製造された製品は既に上市され、その一部は日本でも販売されるところまで来ている。また、日本でも類似の方法で熱処理された木材が開発され、製品化されている。

そこでここでは、これまでに報告された乾燥処理を含む熱処理が耐久性をどのように変化させのかについて解説する。

2. 熱処理の種類

2.1. 木材乾燥

木材乾燥は含水率の高い木材を使用することで生じる各種トラブルを防止することを目的におこなう処理であるため、乾燥時に発生する割れや落ち込みなどを防止するための各種人工乾燥スケジュールが開発されている。

さらに、近年では乾燥時間の短縮を目的とし、乾球温度を常に100℃以上に保つ高温乾燥が試みられている。また、木材の高付加価値化と乾燥とを同時におこなうことを目的として、各種燻煙乾燥処理、130℃に熱した廃エンジンオイルを用いる乾燥処理、あるいは100℃以上に熱したパラフィン熱媒体として使う乾燥処理が現在進行中である(松岡ら2004)。

2.2. 熱処理

通常乾燥温度(高温乾燥を含む)よりも高い温度の熱を木材に加え木材の改質を計る方法をここでは熱処理として扱う。

2.2.1. 熱処理(フィンランド)

http://www.dgfh.de/pdf/review_heat.pdf

空気を送風機で循環させながら蒸気と共に加熱する処理である。100-150℃までの乾燥工程と150℃以上で24時間処理する2段階の工程とからなる。最高温度は目的とする製品によって異なり150-240℃である。

2. 2. 2. エステックウッド処理

<http://www.s-tw.com/top.html>

乾燥材を真空ポンプで脱気した後窒素ガスを充填し、120-200℃で24時間程度高温加圧処理する方法で、木材に寸法安定性や耐朽性が付与される。

2. 2. 3. サーモウッド処理

http://www.finnforest.com/product_list.asp?path=1;558;576;619;685

フィンランドの建築技術センター(VTT)が開発した熱処理木材で、水蒸気で木材を包みながら180-250℃で加熱するところに特徴がある。

2. 2. 4. PLATO 処理

<http://www.platowood.nl/>

オランダで開発された処理で、ハイドロサーモリシス段階(160-190℃、4-5時間)、乾燥段階(通常の人工乾燥、3-5日)、養生段階(170-190℃、14-16時間)、コンディショニング段階(2-3日)の4段階から構成される。

2. 2. 5. レティフィケーション処理

http://www.bfafh.de/inst4/43/pdf/heat_fra.pdf

フランスで開発された方法で、予め含水率12%程度まで乾燥させた木材を不活性ガス存在下常圧200-260℃で10-20分加熱する処理法で、木材の高分子レベルで共有結合を形成させるところが特徴である。

2. 2. 6. オイル熱処理

http://www.bfafh.de/inst4/43/pdf/heat_ger.pdf

木材に熱を供給し、かつ空気を遮断する媒体としてオイルを用いる処理。ドイツでは菜種油、綿実油などの植物性オイルを用い、含水率6%の材を180-220℃で2-4時間処理する方法がとられている。100×100×4000mmの柱材の場合、油温の上昇・下降過程も含め18時間である。

3. 吸湿性・抗収縮能・透水性への影響

3. 1. 乾燥処理

9年間屋外暴露した人工乾燥材の含水率は天然乾燥した材の含水率よりも低い値をとる。この現象は燻煙乾燥した針葉樹材でも認められ、平衡含水率が1%前後低下する。

一方、乾燥による通道性の改善が調べられており、乾燥前のプレスチーミングが、抽出成分の減少・柔細胞の崩壊を引き起こす結果、マツ心材の吸水性を大きく改善すると報告されている(松村ら1999)。高温乾燥処理(115℃)した材では、有縁壁孔の部分的損傷や細胞壁のいぼ状層やS₃層にナノ・マイクロレベルの亀裂も浸透性向上に関与している。このような浸透性向上は燻煙乾燥したケヤキ心材の樹皮に近い部分の通気性についても確認され、燻煙乾燥が道管内の樹脂様隔壁を軟化・破壊することにより、この部分の通気性を顕著に増加させることが認められている。

3. 2. 熱処理

相対湿度95%以上の雰囲気では高温水蒸気処理(120-160℃)したスギ材の平衡含水率が無処理材に比べ大きく低下することが認められているが、この現象は相対湿度70-74%以下で処理した材では観察されない(石川ら2002)。また、160-180℃の熱処理により、表面の撥水性は反応温度の上昇に伴い上昇するが、熱処理時間が増加するに従って減少する。

3. 3. エステックウッド処理

エステックウッド処理した材を屋外に非接地暴露した場合の平均含水率は、無処理材のそれより低い値を示す。

3. 4. PLATO 処理

マツ材・ブナ材の場合吸湿性がおよそ40%程度低下する。また、それに伴い抗収縮能も50%程度向上する。

3. 5. レティフィケーション処理

膨潤性が25%(マツ)から36%(ブナ)にまで低下する。窒素雰囲気下240℃の処理を

施すことで表面の疎水性が増し、接触角がマツ材で62%、ポプラ材で86%上昇する。

3. 6. オイル熱処理

220℃で4時間オイル熱処理により無処理の材の繊維飽和点が29%から14%まで低下する。膨潤率は樹種によって異なるが平均して無処理の50%程度まで減少する。なお、その減少率はオイルを熱媒体とした場合と空気を熱媒体とした場合とでほとんど差がない。

4. 耐久性の変化

4. 1. 抗カビ性

80℃で人工乾燥したマツ材表面および天然乾燥したマツ材表面のカビの繁殖に差は認められないが、表面をプレーナーがけすることにより人工乾燥材の方がカビの繁殖が少なくなる。これは人工乾燥材の場合、低分子の糖類や含窒素化合物などの栄養分が木材の極表面だけに(0-2 mm)に存在しているのに対し、天然乾燥材の場合、より深い部分にまで栄養分が分布しているからだとされている。一方、乾燥温度による比較では、低温(65℃)で乾燥したマツ材の方が高温(115℃)で乾燥したマツ材よりも表面におけるカビの生育状態が良い。

4. 2. 耐朽性

4. 2. 1. 乾燥処理・熱処理

人工乾燥したマツ材は天然乾燥したものよりも生物劣化による質量減少率が低くなる。乾燥による耐朽性向上は、人工乾燥した材の部分によって異なり、人工乾燥したマツ材の表層と内部との腐朽され易さを土壌を用いた試験で比較したところでは、肥沃な土壌では表層・内部で腐朽の進行に差が認められないが、やせた土壌では糖や窒素が集積している表層で腐朽が早く進行するのが観察されている。同様の結果、すなわち乾燥処理による耐朽性向上は、最高温度120℃で処理された燻煙乾燥材をオオウズラタケを用いた腐朽試験で評価した際にも認められている(無処理の質

量減少率53%、処理材の質量減少率16%)が、この効果は溶脱操作をおこなうことにより完全に失われる(質量減少率52%) (山本ら2001)。一方、温度を変えて乾燥処理したヒバ材では12週間の室内腐朽試験で評価した耐朽性に有意な差は認められていない(松元ら2004, 図1)。

これに対し、熱処理が耐朽性低下を引き起こす例も知られている。樹種によっては105℃で2日間乾燥することにより60℃で乾燥するよりも低い耐朽性となる場合がある(松岡ら1960)。高温乾燥したスギ材の耐朽性が低下するという報告もある。120-140℃の高温で乾燥したスギ材のオオウズラタケに対する耐朽性は天然乾燥・中温乾燥したスギ材のそれと比べ低下する(桃原ら未発表 図2、栗崎ら2001)。ただし、後者の場合には120-140℃の範囲内だけでの比較では、温度上昇に伴い耐朽性も若干向上している。このように、処理温度と耐朽性とに正の関係があることは105-150℃で熱処理したスギ心材でも認められており(桃原ら2003、図3)、いずれの温度でも処理時間の増加に伴い耐朽性が向上する。

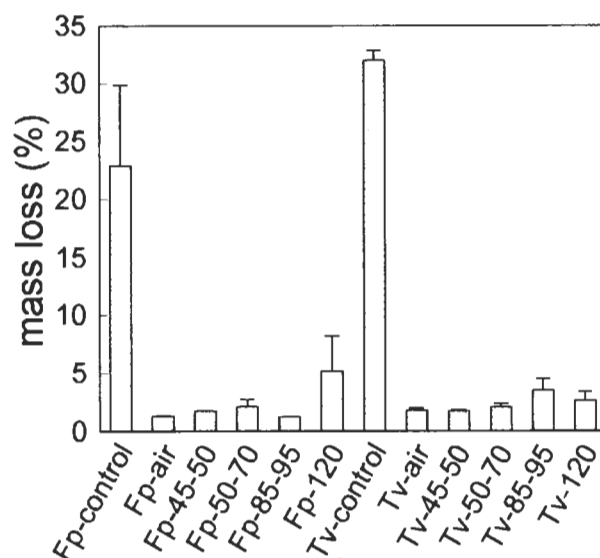


図1 能登ヒバ耐朽性に及ぼす乾燥温度の影響
Fp:オオウズラタケ、Tv:カワラタケ、数字は乾燥温度の範囲を示す、バーは標準誤差を示す(n=12)

4. 2. 2. PLATO 処理

PLATO 処理した木材の褐色腐朽菌・白色腐朽菌・軟腐朽菌に対する 16 週間腐朽試験中の質量減少率はいずれの菌の場合でも 4 % 以下だったとされている。耐朽性はハイドロサーマリスス段階の温度および養生段階の温度によっても異なり、特に褐色腐朽菌では養生時の温度が高くなるにつれて耐朽性も大きく向上する。一方、PLATO 処理材を日本の耐朽性試験法である JIS Z2101 で評価したところかなり大きな質量減少率となることが報告された(花田ら 2004)。

4. 2. 3. レティフィケーション処理

16 週間の室内腐朽試験に供したレティフィケーション処理マツ材およびブナ材の質量減少率は、それぞれ無処理材の 57%、26% となる。一方、12 週間のソイルブロックテスト後の質量減少率は、それぞれ 47 % および 28 % と高い値となる。

4. 2. 4. オイル熱処理

オイル熱処理を施したドイツウヒおよびオウシュウアカマツは処理温度が高くなるにつれてイドタケに対する耐朽性を増す。増加の程度は空気を媒体として同じ温度・時間加熱した場合よりも大きくなる。

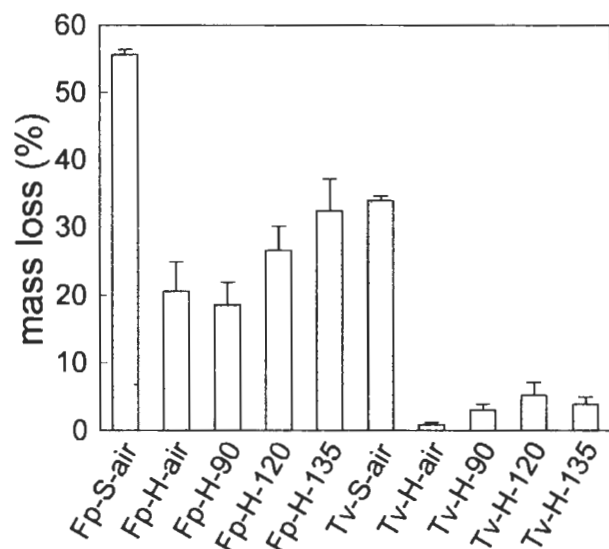


図2 乾燥温度がスギ材の耐朽性に及ぼす影響
Fp: オオウズラタケ、Tv: カワラタケ、S: 辺材、H: 心材、
末尾の文字、数字は乾燥温度
バーは標準誤差を示す (n=12)

4. 3. 耐蟻性

熱処理が木材の抗蟻性を減少させると報告されている。飽和水蒸気中で温度および時間を変えて熱処理したスギ心材(それぞれ、105 - 150 °C、6 - 72 時間)では、処理時間が 6 時間から 72 時間へと増加するのに伴い、質量減少率も増加していく(大村ら 2004、図4)。一方、心材を通常の乾燥(80 °C)および高温乾燥(120°C)で処理した場合には、乾燥温度・スケジュールによる明確な違いは認められていない(狩野ら 2004)。

105°C で恒量となるまで乾燥したユーカリ材は、21°C で真空乾燥したユーカリ材よりもシロアリの食害が増加する。

カラマツ材を 150°C で 1-4 時間水蒸気処理し同様の処理を施した他の材と共にヤマトシロアリおよびイエシロアリの選択性試験に供したところ、特に水蒸気処理したカラマツが選択的に食害される(土居ら 1999)。

5. 謝辞

本総説に引用した図は平成 12-16 年度独立行政法人森林総合研究所交付金プロジェクト「スギ材の革新的高速乾燥システムの開発」によりおこなわれたものである。

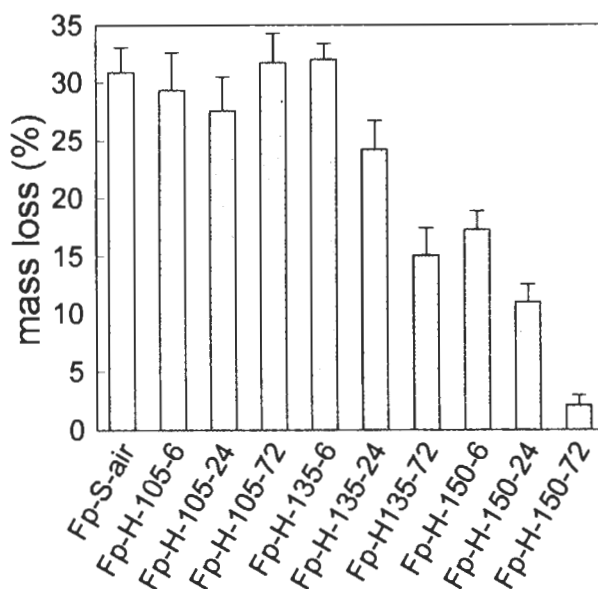


図3 高温水蒸気処理によるスギ材への耐朽性付与
Fp: オオウズラタケ、Tv: カワラタケ、
数字は処理温度と時間、バーは標準誤差を示す (n=12)

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

木質構造物の構造耐力上主要な部分の規定について法律では、建築基準法施行令46条の1項に、「構造耐力上主要な部分である壁、柱及び横架材を木造とした建築物にあっては、すべての方向の水平力に対して安全であるように、各階の張り間方向及びけた行方向に、それぞれ壁を設け又は筋かいを入れた軸組を釣合い良く配置しなければならない。」と示され、木質材料の含水率に関して特段の記述はなく、次に控える2項に「前項の規定は、次に掲げる基準に適合するものに該当する木造の建築物又は建築物の構造部分については、適用しない。」と記されているのみである。その基準とは、「構造耐力上主要な部分である柱及び横架材に使用する集成材その他の木材の品質の強度及び耐久性に関する基準」であり、昭和62年11月10日建設省告示第1898号、最終改正平成16年3月22日国土交通省告示第331号の中の七号に、「含水率の基準が15%以下(乾燥割れにより耐力が低下するおそれの少ない構造の接合とした場合にあつては、20%以下)のもの」と具体的な基準値が示されている。要するに、仕口や継手における接合部が水平耐力に影響する構法で設計する場合には、乾燥材でなければならないという規定があるのみである。

しかしながら、ユーザーからの苦情を直に引き受けることになる施工会社にとっては、きちんと乾燥された部材を必要としていることが多いにも関わらず、スギ製材は、乾燥技術が十分に確立されていないことや、材料のコストの割に乾燥コストが高いために適切に乾燥された製材が十分に供給されているとはいえない。事実、井上正文の調査によると¹⁾、平成11年度の全生産材に対する乾燥材の割合は、全国平均で10.9%との結果がでていいる。そのため、乾燥材を使いたくても未乾燥材を使わざるを得ない状況であるが、未乾燥材で構成した耐力要素の強度性能が明確でないことから、構造設計

者にとって積極的に使いたい材料とは云えないのが現状である。これらの問題を解決するためには、乾燥にともなう収縮、ゆりみ、割れ等が、構造部材の剛性や耐力にどの程度影響を与えるものであるかを把握する必要がある。

そこで、初期乾燥程度の異なるスギ製材で構成した耐力壁の水平加力実験を行い、時間経過を伴わない場合の含水率の違いが強度性能に与える影響を把握することと、時間経過に伴う乾燥が耐力壁の強度性能に与える影響を把握することを目的とした実験を試みた。

既往の研究では、米国のマジソン林産研究所²⁾によると、無欠点小試験片レベルでは含水率が1%低下すると、曲げヤング係数は2%、縦圧縮強さは6%、繊維方向せん断強さは3%、横引張強さは1.5%増加するとのデータはある。

しかしながら、製材を接合金具で接合して組立てた耐力壁の場合、接合金具周辺での乾燥収縮による割れ、やせによる強度への影響や、組立て後の乾燥収縮によるゆがみによって壁体内部に生じるであろう内部ひずみがどのように強度性能に影響を与えるかは、製材単体からのデータのみでは把握しきれない。

辻井は³⁾、釘の一面せん断試験において、未乾燥材に釘打ちしたものと、乾燥材に釘打ちしたものとを比較をし、初期剛性では、未乾燥材の方が劣るが、最大耐力に関しては、差が認められないとの報告をしている。

神谷らは⁴⁾、釘接合部の一面せん断試験において主材が未乾燥材の場合、乾燥を伴う時間経過によって初期のすべり時のせん断力の低下は大きく、主材の含水率が21%から15%の範囲では、含水率1%につきせん断耐力の低下は1.7%から3.3%と述べている。しかしながら、これも接合部の部分実験での結果であり、耐力要素である壁に関する構造性能に関しては、予想を示しているが、依然推測の域を脱していないのが実状である。

また、山田らは⁵⁾、1,820mm×2,730mmの

総 2 階建ての水平加力実験を行い、初期剛性は乾燥を伴う収縮により、生材で構成したものより含水率 18%程度で構成したものの方が高いという結果を得ているが、最大耐力に関しては乾燥による効果は明らかとなっていない。これは、筋かい壁で構成した在来工法であったため、筋かい部材にある節、目切れの欠点部分が影響

ではおよそ 1 週間程度とした。

表 1 に示すように、試験体の目標含水率をおよそ 15%, 20%, 30%, 生材の 4 条件に設定し、筋かい壁、針葉樹合板を張った壁 (以後、針葉樹合板壁と略す) において含水率と耐力との関係を調べた。

さらに、経年にもなる乾燥による構造性能

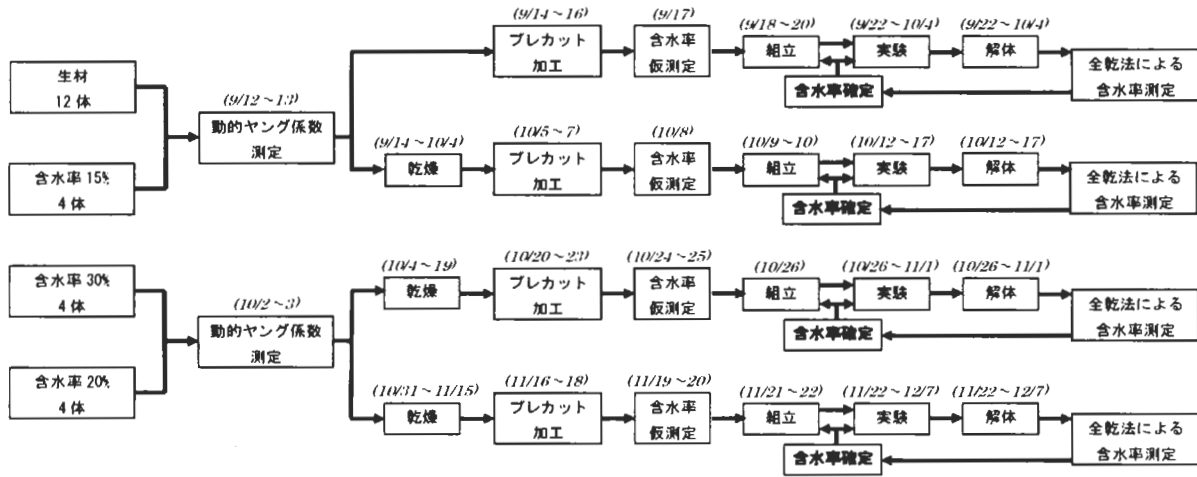


図 1. 試験体製作から製作直後の実験までの工程

注) 括弧内の数字は、月/日を示す。

して、最終的に含水率が強度性能へ与える影響に関しては残念ながら明確な結論は得られていない。

そこで、本実験では、在来軸組工法の代表である真壁 (筋かい壁) だけでなく大壁 (面材を張った壁) を用意して実験計画を立てた。以下に試験体の詳細を示す。

【試験体】

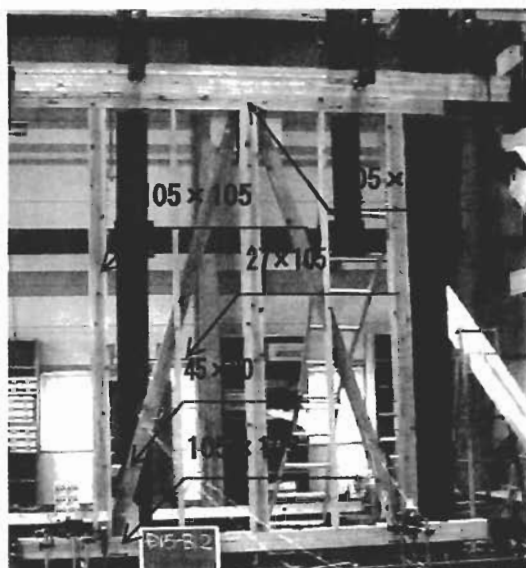
スギ材の産地はパラメータによらず、いずれも北関東産である。耐力壁の製作から製作直後の実験までの工程を図 1 に示す。耐力壁製作に必要な数の 1.5 倍程度の量を高温乾燥させた後、動的ヤング係数と含水率の 2 条件で選別を行い、極力含水率以外のパラメータの影響が出ないようにマッチングさせた壁試験体を製作した。乾燥工程の終了からプレカット工程を経て試験体製作ま

の変化を追跡するために、筋かい壁、針葉樹合板壁、OSB を張った壁 (以後、OSB 壁と略す)、せっこうボードを張った壁 (以後、せっこう壁と略す) を製作した。

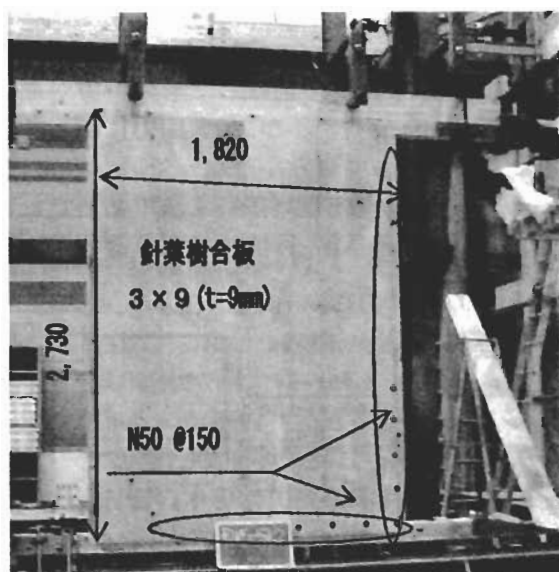
最終的な含水率は、実験終了後、直ちに試験体を解体し、壁試験体を構成した各部材の重量を測定した後、各部材の中央から切り出した木片を乾燥器に入れ、全乾重量を計測することによって、実験時の含水率と試験体製作時の含水率を逆算して求めた。試験体の詳細は、図 2 に示すように筋かい壁では、105×105mm の断面

表 1. 試験体パラメーター一覧

試験体製作		実験日				
平成 12 年 10 月		平成 12 年	平成 13 年		平成 14 年	
目標含水率	試験体種類	10 月	4 月	10 月	4 月	10 月
生材	筋かい壁	○	○			○
	針葉樹合板壁	○	○			○
	OSB 壁	○	○			○
	せっこう壁	○	○			○
30%	筋かい壁	○				○
	針葉樹合板壁	○				○
20%	筋かい壁	○				○
	針葉樹合板壁	○				○
15%	筋かい壁	○				○
	針葉樹合板壁	○				○



針葉樹合板壁



筋かい壁

図2. 耐力壁試験体

の柱、はり、土台に 27mm×105mm の断面の間柱、45mm×90mm の断面の筋かいで構成し、針葉樹合板壁、OSB 壁では、筋かいの代わりに、910×2730mm の厚さ 9mm の合板を N50 釘で 150mm 間隔で 2 枚張ったものである。せっこう壁は、910×2730mm の厚さ 9.5mm のせっこうボードを GN40 釘で 150mm 間隔で 2 枚張ったものである。接合金具は、柱のはり、土台からの引き抜け防止には、VP 金物とホールダウンボルトをすべての試験体の柱頭、柱脚に取り付けた。筋かいには、BP-2 を使用した。試験体の保管方法は、外気温に近い実験場に垂直に立てた状態で試験体により半年から 2 年間放置した。

【試験方法】

試験は、壁試験体頂部を振れ止めでサポートし、無載荷式の水平せん断加力試験で実験を行った。試験体は、製作後半年から 2 年経過していたものに関しては、壁の 4 隅のホールダウンボルトに緩みが生じていた。そこで試験条件を統一するため、加力直前に製作直後の締付けトルクと同じ 29.4kN・mm の増し締めを行った。加力スケジュールは、みかけのせん断変形角が 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50rad においてそれぞれ 3 回ずつの正負交番载荷とし、最終サイクルは、最大耐力から 8 割程度荷重が低下するまで変形を与えた。

【最大耐力と含水率の関係】

耐力壁を構成する各部材の平均含水率と最大耐力の関係を図 3 に示す。針葉樹合板壁の場合は、耐力壁製作時の含水率と最大耐力の関係には、一定の傾向は認められなかったが、実験時の含水率と最大耐力の関係では、含水率が低下すると最大耐力は増加する傾向を示した。また、製作時は耐力壁を構成する部材が生状態であっても、実験時において含水率が 15% 程度まで乾燥すると、製作時からある程度乾燥させた耐力壁と同等かそれ以上の耐力を有し、さらなる時間経過にともない乾燥が製作時の含水率より進むと、最大耐力はさらに増加することがわかった。すなわち、耐力壁の製作時の含水率がどうであれ、実験時の最終含水率が 15% 近く乾燥していれば耐力は最初からきちんと乾燥させた耐力壁と同等程度まで達することがわかった。

生材で構成した耐力壁の乾燥をともなう時間経過（製作直後、半年経過後、および 2 年経過）が最大耐力に及ぼす影響を図 4 に示す。

筋かい壁を除き、時間経過に伴う含水率の低下によって、最大耐力は上昇する傾向を示した。最終的な含水率が 15% 台まで乾燥すると、OSB 壁を除きほぼ頭打ちとなった。耐力壁の平均含水率が生材から 15% 台まで低下したときの最大耐力の増加は、筋かい壁で 1.0 倍、針葉樹合

板壁で 1.3 倍、OSB 壁 1.2 倍、せっこう壁で 1.3 倍であった。

筋かい壁の場合は、針葉樹合板壁ほど明確な傾向は認められず、実験時の含水率および耐力壁製作時の含水率が低いほど最大耐力は高くなる傾向を示した。

【初期剛性と含水率の関係】

耐力壁を構成する各部材の平均含水率と初期剛性(最大耐力の 0.1 倍と 0.4 倍の点の割線剛性) の関係を図 5 に示す。筋かい壁、針葉樹合板壁いずれも初期剛性は、実験時の含水率よりも製作時の含水率に影響を受け、製作時の含水率が低ければ初期剛性は高くなる傾向を示した。

生材で構成した耐力壁の乾燥をともなう時間経過が初期剛性に及ぼす影響を図 6 に示す。

初期剛性に関しては、生材から 15% 台まで含

水率が低下すると、面材張り壁でおよそ 1/2 まで剛性が低下し、それ以降の低下は認められなかった。筋かい壁の場合は、初期剛性の低下率は 20% 程度であった。せっこう壁に関しては、半年経過後の試験において加力トラブルが生じたため、検討から除外した。

これらの結果より静的試験においては、時間経過に伴う含水率の低下は、最大耐力を上昇させ、初期剛性は低下させるという定性的な傾向を得た。

【壁倍率と含水率の関係】

以上の結果より耐力壁の含水率と最大耐力および初期剛性の関係には、時間経過による含水率の低下が最大耐力を増加させ、初期剛性は減少させると云う相反する傾向が認められた。そこで初期剛性と最大耐力を総合的に判断する指標として壁倍率と含水率の関係を調べた。

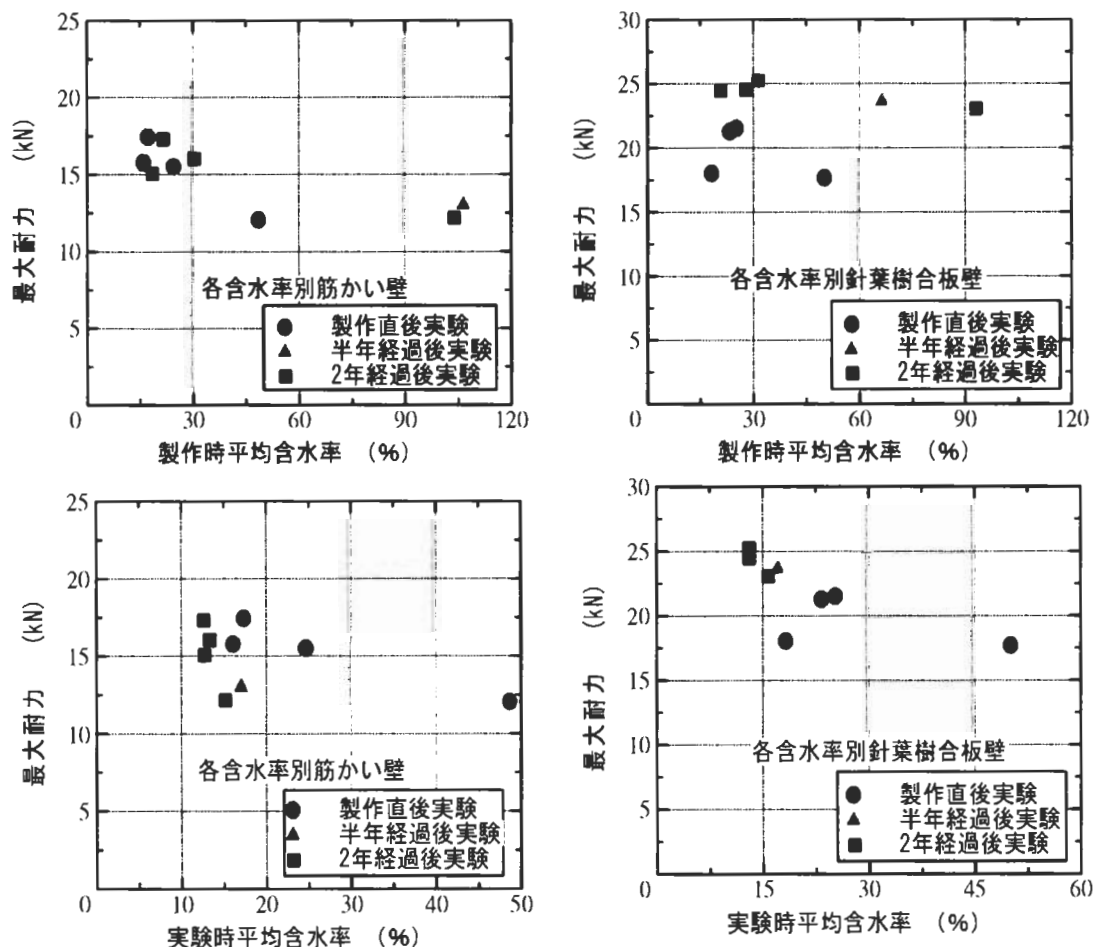


図 3. 耐力壁製作時含水率と実験時含水率が最大耐力へ及ぼす影響

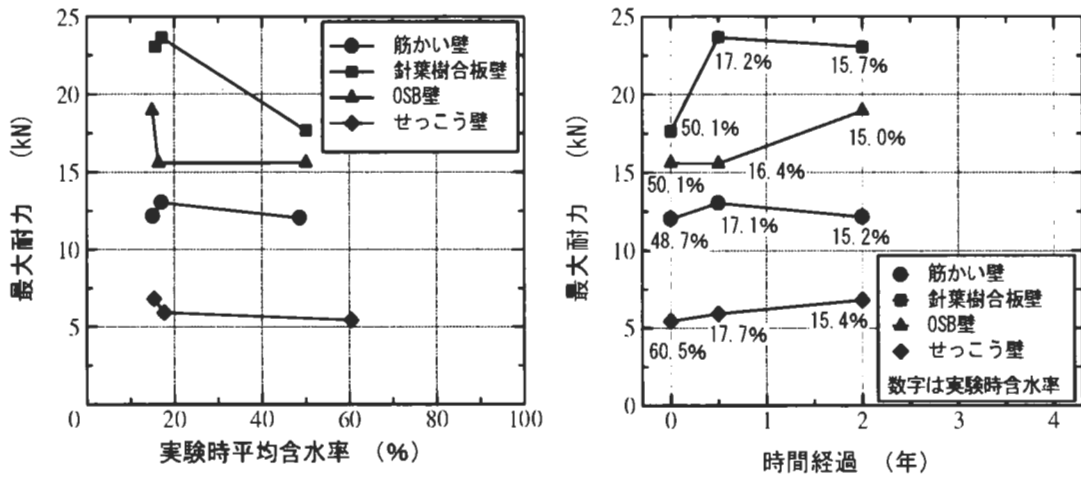


図4. 乾燥をとまなう時間経過が最大耐力へ及ぼす影響

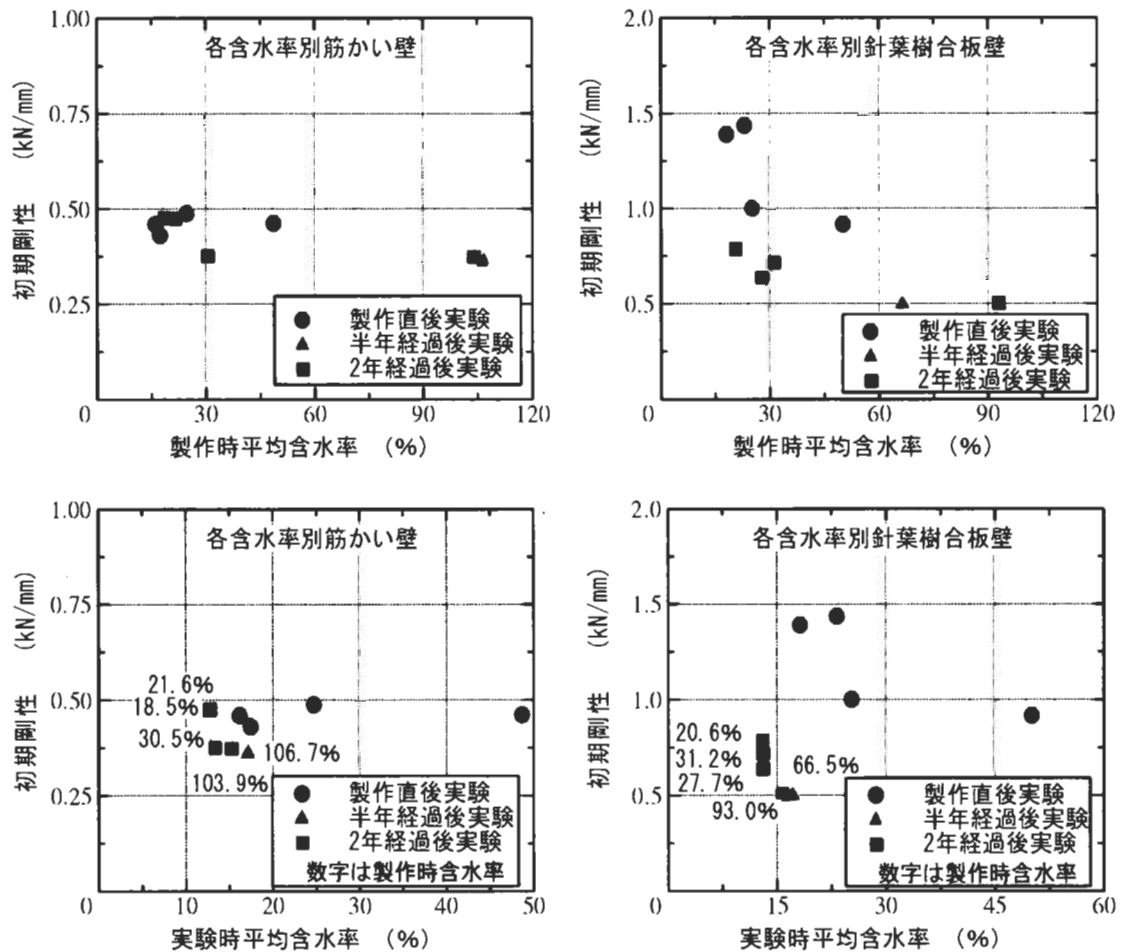


図5. 耐力壁製作時含水率と実験時含水率が初期剛性へ及ぼす影響

その結果を表2に示す。

鴛海ら⁸⁾の報告によれば、含水率の影響がない場合、面材系の耐力壁では、降伏耐力が壁倍率の算定因子であり、筋かい壁では、靱性を考慮した終局耐力が算定因子となる傾向を示す

との記述がみられる。筋かい壁の場合、1体の例外を除き壁倍率の4つの項目のうち、実験時の含水率が18%以下であれば、靱性を考慮した終局耐力が算定因子となり、18%より高いと降伏耐力が算定因子となる傾向を示した。

筋かい壁 2 (壁倍率) ありでよすべし
 (とろじはない)

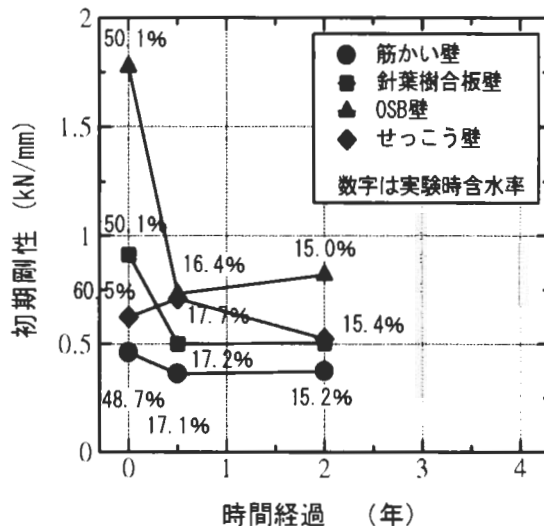
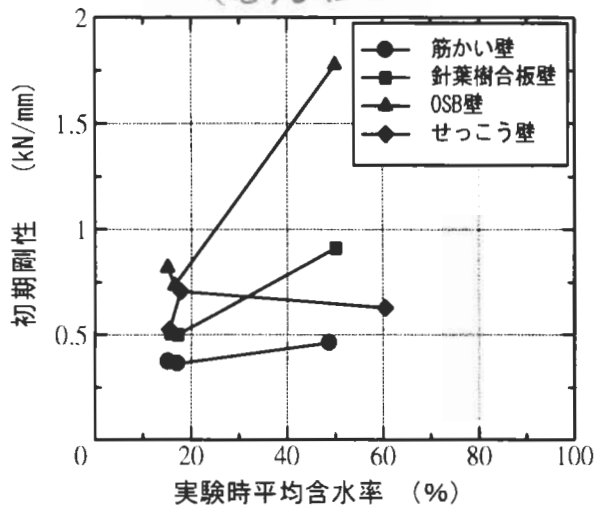


図6. 乾燥をともなう時間経過が初期剛性に及ぼす影響

針葉樹合板壁の場合は、実験時の含水率が18%以下であれば、特定変形時の耐力($R=1/120$)が算定因子となり、18%より高いと降伏耐力が算定因子となる傾向を示した。また、この境目は、ちょうど経年変化が0年(製作直

後実験)と半年以上経過後実験の間であった。

OSB壁の場合は、前項の2タイプほど明確ではないが、実験時の含水率が高く、経年変化がないと降伏耐力で壁倍率は決定される傾向が認められた。

表2. 壁倍率算定結果

試験体種類	経年 (年)	製作時平均含水率 (%)	実験時平均含水率 (%)	P(1/120) (kN/m)	P_y (kN/m)	2/3Pmax (kN/m)	0.2Pu/Ds (kN/m)	壁倍率
筋かい壁	0	86.76	48.73	4.51	3.63	4.41	4.71	1.3
	0	26.18	24.73	5.15	5.11	5.68	4.26	1.6
	0	20.81	17.43	5.25	6.16	6.38	3.60	1.3
	0	17.31	16.17	5.20	5.28	5.77	4.48	1.7
	0.5	106.7	17.13	4.00	4.89	4.78	3.56	1.3
	2	103.88	15.17	4.67	5.39	4.46	3.49	1.3
	2	30.45	13.35	4.37	5.62	5.87	4.59	1.6
	2	21.55	12.63	5.91	7.14	6.34	3.02	1.1
針葉樹合板壁	0	80.14	50.14	5.35	5.14	6.47	6.29	1.9
	0	28.8	25.3	6.57	6.45	7.88	7.24	2.4
	0	28.9	23.32	7.52	7.03	7.78	7.87	2.6
	0	19.24	18.24	6.43	5.37	6.60	8.45	2
	0.5	66.48	17.18	5.66	7.19	8.67	5.85	2.1
	2	92.96	15.73	5.58	6.43	8.44	6.54	2.1
	2	31.16	13.02	6.72	7.50	9.24	7.53	2.5
	2	20.58	12.99	6.95	7.39	8.96	7.77	2.6
OSB壁	0	91.26	50.07	5.26	4.36	5.71	6.32	1.6
	0.5	95.08	16.42	5.60	4.98	5.71	5.16	1.9
	2	90.97	14.99	5.78	5.85	6.94	5.20	1.9
せっこう壁	0	107.29	60.47	2.23	1.91	1.99	2.76	0.7
	0.5	101.33	17.71	2.61	2.11	2.17	2.99	0.8
	2	98.85	15.4	2.64	2.45	2.50	2.62	0.9

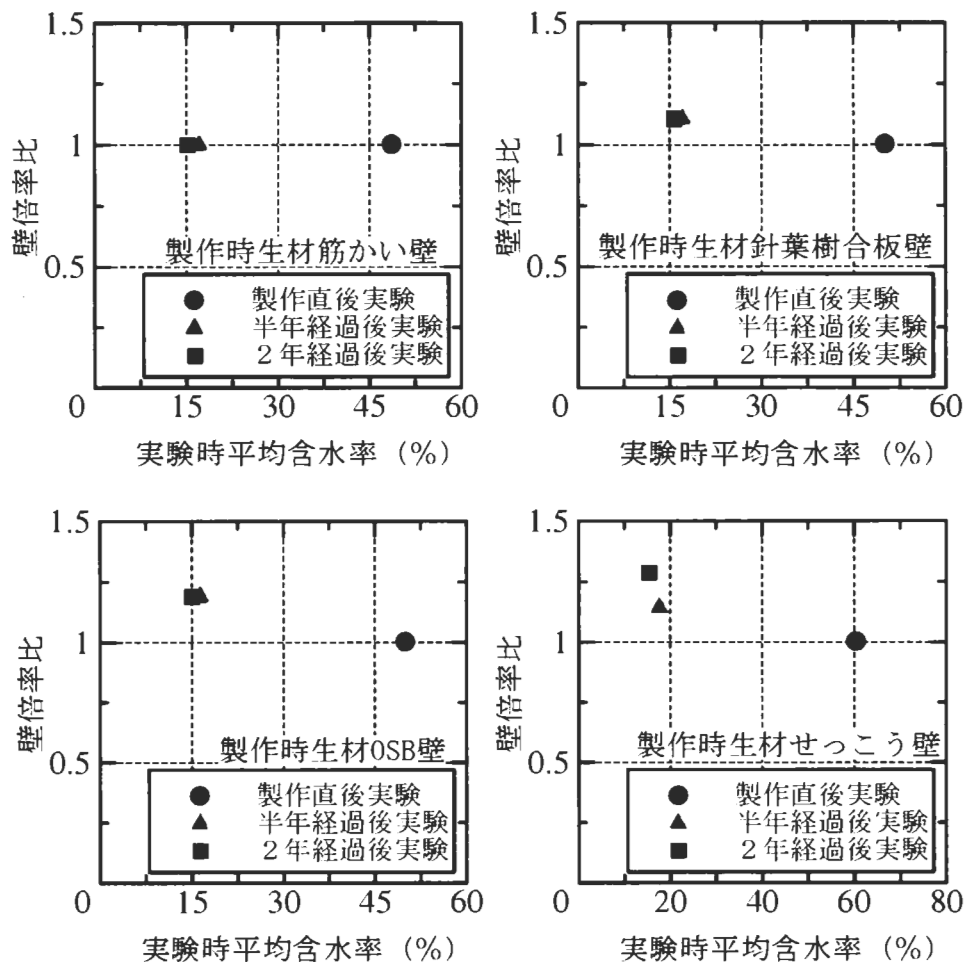


図7. 生材で構成した耐力壁の経年に伴う乾燥と壁倍率比の関係

せっこう壁の場合は、実験時の含水率や経年変化によらず、降伏耐力で壁倍率が決定された。

図7に、生材で構成した耐力壁の時間経過を伴う含水率の低下によって壁倍率がどの程度上昇するかを調べたものである。耐力壁製作直後の壁倍率に対する経年半年後、2年後の壁倍率（以後増大係数と略す）は、筋かい壁で1.0倍、針葉樹合板壁で1.1倍、OSB壁で1.2倍、せっこう壁で1.2倍であった。

この増大係数を用いて簡易設計法である壁量計算に反映させた場合どの程度必要壁量に違いが見られるかを調べた結果を以下に示す。

建築統計の昭和63年から平成11年度版までの平均の値を参考にすると、平均木造延べ床面積は、木造の床面積合計（878,226,091平方メートル）から木造建築物の数（7294236.6戸）を除いて、全国の居住専用住宅の1戸あたり平均のべ床面積は、120.4平方メートルとなる。

この値を採用して、総2階で軽い屋根の家を水平耐力要素として合板壁で構成したと想定して必要壁量を算定すると、2階では、361.2cm(15cm/m²(2階))、1階では、698.3cm(29cm/m²(1階))となる。ここで、時間経過による増大係数は、1.1倍であったことより、この値を乗じて余分に必要となる壁量を求めると2階部分では、36cm、1階部分では、70cmとなる。

この差は、きちんと乾燥しなかったことにより余力として作用した壁長さを示していることになる。

逆に初期乾燥程度が生材と乾燥材とで比較した場合には、実験時含水率が20%以下での平均壁倍率を求めると2.3倍、生材の壁倍率は、1.9倍となっていることより、その比率は1.9/2.3=0.8倍となり2階部分では、72cm、1階部分では、140cm余分に合板の材料と大工手

間が必要と計算上はなってくる。ただし、これは、仮想住宅を総2階建ての重量の軽い屋根の家に対して、すべて合板壁で耐力壁を構成したと想定した場合の必要壁量であることを書き留めて置く。

【まとめ】

面材を張った耐力壁の場合、耐力壁を構成する部材が生材であっても、時間経過とともに乾燥が進み、15%台まで含水率が低下すると、製作時から乾燥材で構成した耐力壁と同等程度の耐力を示した。しかしながら、初期剛性に関しては、およそ半分程度まで低下し、その後ほぼ一定となった。筋かい壁の場合は、最大耐力および初期剛性ともに面材を張った耐力壁ほど顕著な傾向は認められなかった。これは、筋かい材に無欠点材を使用することができなかつたため、節や、目切れの影響を受け、相対的に含水率の影響が薄れたためと考えられる。

筋かい壁の壁倍率の算定に関しては、未乾燥材で構成した場合、時間経過に伴う含水率の低下が降伏耐力より、終局耐力および靱性から決まるせん断耐力が支配的となることがわかつた。

針葉樹合板壁の壁倍率の算定に関しては、未乾燥材で構成した場合、時間経過に伴う含水率の低下で降伏耐力より、 $R=1/120$ rad時の耐力が支配的となり、始めからきちんと乾燥した部材で構成した耐力壁より壁倍率が低くなることがわかつた。

また、生材で構成した耐力壁が、経年変化とともに含水率が低下した場合の気乾状態での壁倍率の増大係数は、針葉樹合板壁で1.1倍、OSB壁で1.2倍、石こう壁で1.2倍であった。

謝辞

本研究は、農林水産省・農林水産業技術振興費「スギ材の革新的高速乾燥システムの開発」の一環として行ったものである。

本論文におけるスギ製材の目標含水率のパラメータの設定および実際の人工乾燥工程については、森林総合研究所、乾燥研究室の斎藤周逸氏に多大なるご尽力を頂きました。また、試験体の製作および実験に対しては、住友林業

の植原平氏と渡辺洋徳氏、ホラス暮らし科学研究所の上広太氏、大分県林業試験場の城井秀幸氏、高知県工業技術センターの山下実氏、石川県林業試験場の鈴木修治氏のご協力を頂きました。紙面をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 井上正文：建築構造研究の立場から、日本木材学会、組織と材質研究会・木材と水研究会・レオロジー研究会・木材強度・木質強度研究会・生物劣化研究会、乾燥材問題を考える、pp25-32, 2002. 4
- 2) Handbook 72, U.S. Department of Agriculture (22) U.S.Forest Products Laboratory, 1941. Moisture Content-Strength Adjustments for Wood. U.S.Forest Prod. Lab.Rpt. 1313, pp9
- 3) 辻井静二、後藤一雄：釘接合の耐力に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第60号、pp. 465-468, 1958. 10
- 4) 神谷文夫、平嶋義彦、畑山よし男：乾燥を伴う時間経過が接合部のせん断性能に与える影響、日本木材学会、vol29, No. 12
- 5) 山田文男、大橋好光、坂本功、松岡秀尚、凌克臣、董玉庫：乾燥度の違いによる2階建て在来軸組の水平加力実験「その1. 筋交い耐力壁タイプ」、日本建築学会、大会学術講演梗概集（九州）pp129-130, 1998. 09
- 6) 三井信宏、杉本健一、神谷文夫、城井秀幸、山下実：乾燥程度の異なるスギ製材で構成した耐力壁の強度性能—初期性能—、日本木材学会大会、第51回大会研究発表要旨集、P194(2001)
- 7) 三井信宏、杉本健一、神谷文夫：初期乾燥程度の異なるスギ製材で構成した耐力壁の強度性能、日本建築学会、大会学術講演梗概集（関東）pp293-294, 2001. 09
- 8) 鴛海四郎、後藤隆洋、清水庸介：木質系耐力壁の試験・評価方法の検証、第52回日本木材学会大会研究発表要旨集、pp195, 2002. 04