

## 内装・家具に最適な県産材乾燥技術の開発

－「栈木痕」の無い板材の生産－

平成 29 年度～平成 30 年度

木材チーム 古曳 博也

### 1. 目 的

平成 22 年に施行された「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が追い風となり、全国的に国産材（地域材）の利用が進んできた。乾燥材などの製材品の需要拡大が求められるなか、人々の目にふれる場所で使うことの多い板類（以下、板材と記す）のニーズが増加している。

板材生産の際の問題点として挙げられるのが、乾燥過程で発生する栈木痕（さんぎこん）である。栈木の痕が板材の表面に残る現象で、木材の価値を著しく低下させしばしばクレームの原因となる。また、表面を厚く削っても栈木痕が消えないので歩留まり低下の要因にもなる。

本研究は、栈木痕が発生しない乾燥方法を見いだすことを目的に実施した。昨年度の試験<sup>1)</sup>で、乾燥初期に栈木を設置せずに蒸煮処理をした後、従来通り栈木を設置して乾燥を進めても栈木痕が目立たなくなるを見いだした。今年度は、蒸煮処理の影響を調べるため、小試験材を用いた乾燥試験と実大材を用いた乾燥試験を行ったので報告する。

### 2. 試験方法

#### 1) 小試験材を用いた乾燥試験

試験には、日田市内の製材所より購入した未乾燥スギ板材を用いた。板材 1 枚から乾燥試験用供試材（幅 160 mm、厚さ 30 mm、長さ 350 mm）を 5 体と、含水率測定用供試材（幅 160 mm、厚さ 30 mm、長さ 20 mm）を 6 体採取した。乾燥試験用供試材の含水率は、その両隣から採取した含水率測定用供試材の平均値（推定値）とした。乾燥方法は 2 条件で、前者は温度 65℃、湿度 23% の中温乾燥を 7 日間行う条件と、後者は恒温恒湿機 PL-2 KP 型（エスペック株式会社製）を用いて、温度 98℃、湿度 98% の蒸煮処理に近い雰囲気（以下、98℃-98% 蒸煮処理と記す）でそれぞれ 2、4、8、24 時間処理を行った後に前述の中温乾燥を 7 日間行う条件である。乾燥試験は、供試材から上板用と下板用を 2 枚 1 組としてランダムに選び、栈木は図-1 に示すように 98℃-98% 蒸煮処理時はスギ栈木、タウン栈木、アルミニウム栈木の 3 種 4 個を、中温乾燥時は、スギ栈木、タウン栈木、アルミニウム栈木の 3 種 7 個を設置した。栈木の寸法は、幅 25 mm、厚さ 25 mm である。栈木を挟んで、上板と下板を約 0.098N/mm<sup>2</sup> の圧縮力でクランプ固定した。供試材の本数は、各条件 2 体とした。

栈木痕の発生状況は、目視および測色により評価した。測色には、色彩色差計 CR-400（コニカミノルタセンシング株式会社製）を用いた。供試材の定位 4 箇所<sup>2)</sup>の L\* 値（明度）、a\* 値（正：赤方向、負：緑方向）、b\* 値（正：黄方向、負：青方向）を測定した。測色条件は、光源を D65、視野角を 10 度、測色部の直径を 8 mm とした。

#### 2) 実大材を用いた乾燥試験

試験には、日田市内の製材所より購入した未乾燥スギ板材（幅 160 mm、厚さ 30 mm、長さ 2,000 mm）を用い、その製材所が実施する板材の乾燥工程（くん煙乾燥→天然乾燥→中温乾燥）で試験を行った。くん煙乾燥に先立ち、高温蒸気式乾燥機 78/KR 8 H 型（ヒルデブランド社製）で両端 2 箇所に幅 25 mm、厚

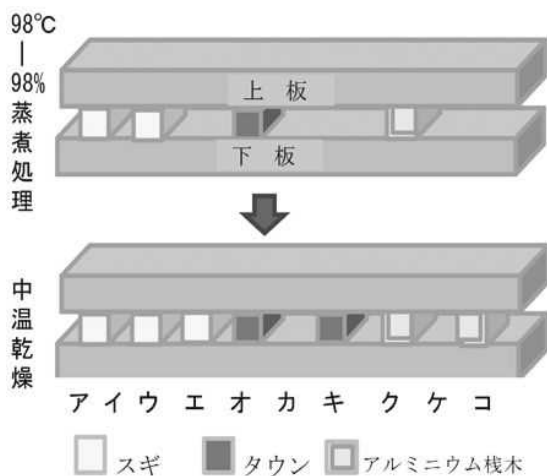


図-1 小試験材を用いた乾燥試験

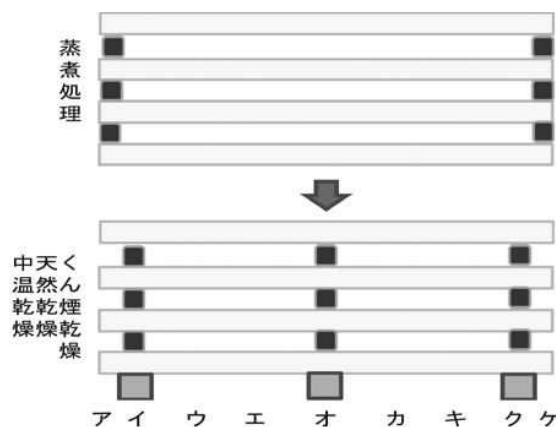


図-2 実大材を用いた乾燥試験

さ 25 mm、長さ約 1,000 mm のスギ 棧木を設置し (図-2 上段)、乾球 98°C、湿球 98°C で 8 時間 蒸煮処理したものと、比較対象として無処理のものを供試した。くん煙乾燥は、加温 9 時間後にスイッチを切って余熱 15 時間の乾燥 (最高到達温度 115°C) を 2 日間行い、その後室内で約 1 か月間天然乾燥させ、さらに最高到達温度 69°C の中温乾燥を 5 日間行った。両木口から 100 mm の位置および中央部の 3 箇所 に幅 50 mm、厚さ 20 mm、長さ約 1,000 mm の位置にスギ 棧木を設置した (図-2 下段)。供試材の本数は、各条件 6 体である。

供試材の含水率は高周波木材水分計 HM-520 (株式会社ケツト科学研究所製) で測定した。測定場所は両木口から 100 mm の位置および中央部の 3 箇所である。乾燥前および乾燥工程ごとに測定した。さらに、供試材の曲がりおよびそりも測定した。棧木痕の発生状況は、目視および測色により評価した。乾燥工程ごとおよび中温乾燥後にかんなで 1.5 mm、3.0 mm 削った後の状況を調べた。なお、削り面は 6 体中 2 体が木表側、2 体を木裏側である。測色方法は、2 の 1) のとおりである。中央部 (棧木有り、記号オ) およびその両側 250 mm 付近 (棧木なし、記号エとカ) を測定場所とした。

### 3. 結果および考察

#### 1) 小試験材を用いた乾燥試験

供試材の含水率の推移を図-3 に示す。98°C-98% 蒸煮処理を 8 時間まで行った場合はわずかに低下する程度であったが、24 時間では乾燥前と比べ約 20% も低下することがわかった。今回の試験では、いずれも繊維飽和点以上の含水率を維持していたが、温度 98°C、湿度 98% の雰囲気における木材平衡含水率は約 20% であり、乾燥時間が長くなると寸法変化や曲がり等の発生が危惧される。

棧木を設置していない場所における 98°C-98% 蒸煮処理後の材色の状況を図-4 に示す。L\* 値は、2 時間後に微増しその後は微減する傾向 (明度が増した後に減る方向) を、a\* 値および b\* 値はともに微減する傾向 (緑色および青色が増す方向) を示した。2 時間後に L\* 値が微増した原因は、水分の減少 (蒸発) に伴って表面の濡れ色が解消されたためと思われる。その後は処理時間が長くなるにつれて着色物質の生成<sup>2)</sup>が進み、徐々に暗色の方向に変化するものと考えられる。

中温乾燥後 (乾燥終了時) の材色の状況を図-5、写真-1 に示す。中温乾燥のみの場合は、棧木痕は薄く L\* 値、a\* 値および b\* 値いずれも棧木の有無に関わらずほぼ同様な値を示した。乾燥初期に低湿

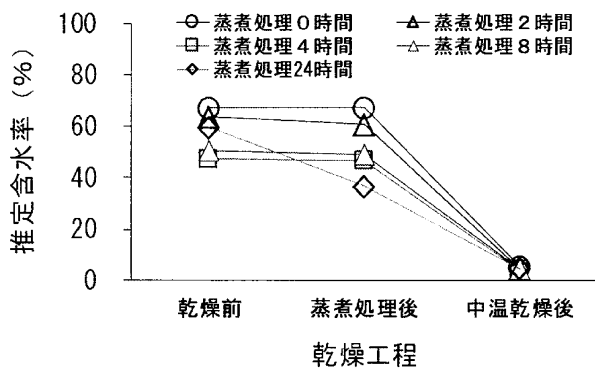


図-3 含水率の推移

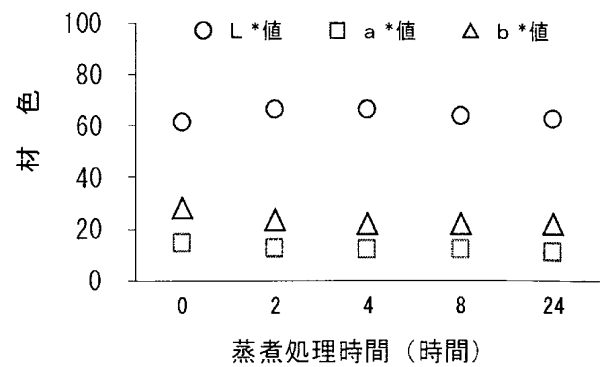


図-4 蒸煮処理後の材色 (栈木なし)

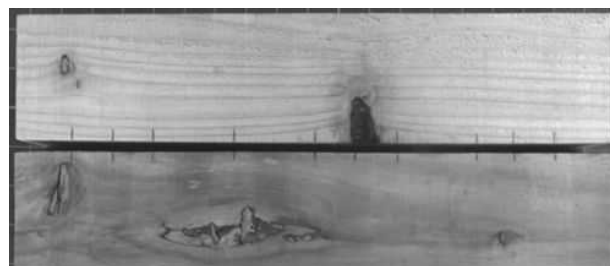
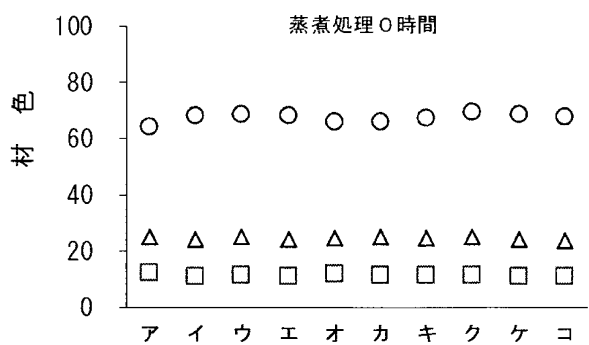
条件にすれば栈木痕の低減化に有効との報告<sup>3)</sup>もあり、低湿環境での乾燥は栈木痕の抑制には効果のあることが確認できた。乾燥初期に高湿度での高温乾燥を行い、その後に中温乾燥に移った時の状況は、アルミニウム栈木を設置した場所(記号ク)は、黒色の栈木痕がみられ、L\*値およびb\*値が微減する傾向(明度が減る方向および青色が増す方向)を示した。しかも乾燥時間が長い供試材ほどはっきりと現れる傾向を示した。98℃-98%蒸煮処理時にスギ栈木、タウン栈木を設置した場所(記号ア、ウ、オ)では、L\*値、a\*値およびb\*値に際立った増減は示さなかったが、はっきりと栈木痕がみられた。一方、高湿度での高温乾燥時には栈木を設置せず、中温乾燥からそれぞれの栈木を設置した場所(記号エ、キ、コ)では、L\*値、a\*値およびb\*値に際立った増減は示されず、栈木痕も薄くなる傾向を示した。よって、98℃-98%蒸煮処理時に栈木を設置しなかった場所は、その後に従来通り栈木を設置し乾燥を進めても栈木痕が生じにくくなることが確認できた。

## 2) 実大材を用いた乾燥試験

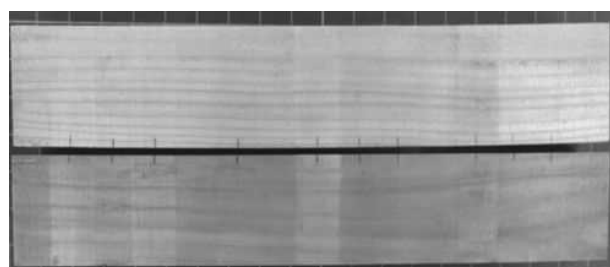
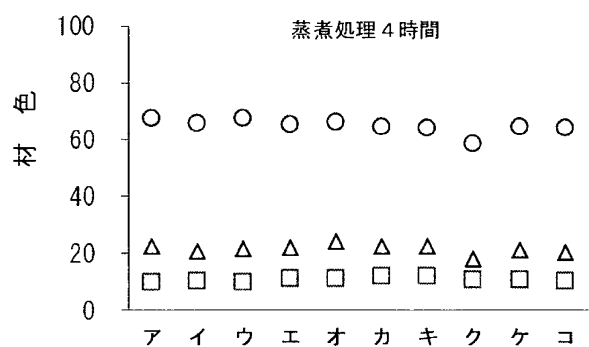
供試材の含水率の推移を図-6に示す。蒸煮処理を8時間行った供試材は乾燥前の約53%から約5%程度低下した。8時間の乾燥では実大材においても、含水率低下があまりおこらないことが確認できた。供試材の乾燥は、その後のくん煙乾燥で進み、含水率は約12~16%程度まで下がった。

乾燥に伴う変形量の推移を図-7に示す。変形量については、特に蒸煮処理時に供試材の両端だけ栈木を設置して行うために変形量が大きくなるのではないかと危惧された。しかし、今回の試験では、曲がりほとんど変わりなく、その変形量も約1.5mm程度で小さく推移する結果を示した。蒸煮処理後の含水率が、繊維飽和点以上の含水率であったことから、大きな曲がりやそり等が生じなかったものと考えられる。その後の乾燥工程では、中温乾燥後に変形する傾向を示し、曲がりおよびそりともに約2~3mm程度増加した。

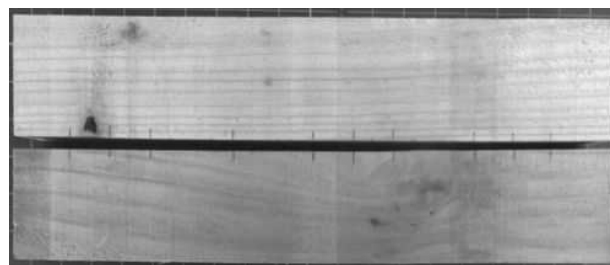
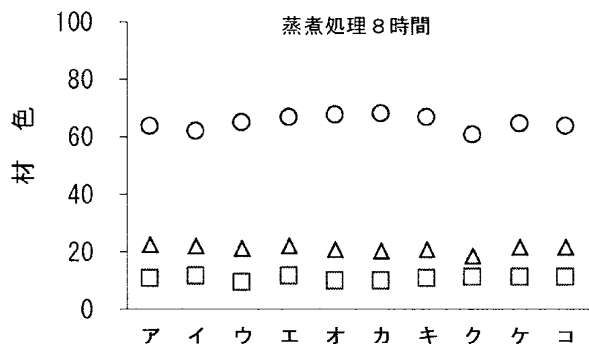
乾燥工程後の材色の状況を図-8、写真-2に示す。中温乾燥後(乾燥終了時)の材色は、蒸煮処理の有無に関わらず、すすなどの付着により全体が茶褐色の材色を呈し、栈木を設置した箇所にはっきりと栈木痕がみられた。L\*値は、栈木のない箇所(記号エとカ)の値が35~45を示して明度が低かったのに対し、栈木の設置した箇所(記号オ)の値は53~61を示し明度が高かった。栈木を設置した箇所のL\*値は、乾燥前から中温乾燥後までほぼ同程度の値で推移していた。表面を1.5mm削ったときの状況は、木表側が蒸煮処理の有無に関わらず栈木痕はみられなかった(ただし、削り残しのあるところの痕は栈木痕とみなさない)。一方、木裏側は蒸煮処理の有無に関わらずうっすらと栈木痕が確認された。両者を比較すると無処理の供試材の方が、栈木痕がはっきりしていた。



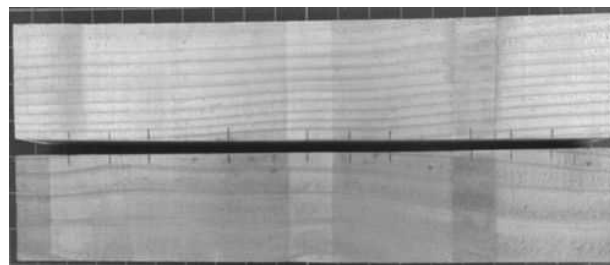
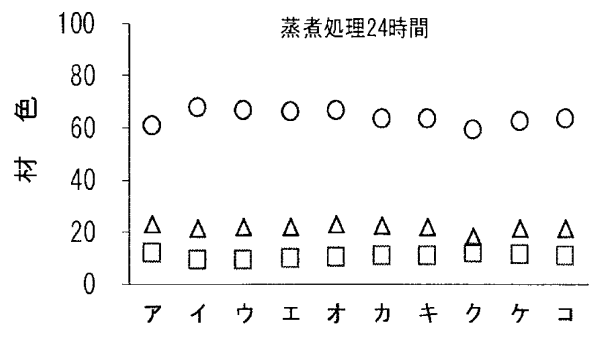
アイウ エ オカキ クケコ  
(蒸煮処理0時間)



アイウ エ オカキ クケコ  
(蒸煮処理4時間)



アイウ エ オカキ クケコ  
(蒸煮処理8時間)



アイウ エ オカキ クケコ  
(蒸煮処理24時間)

図-5 中温乾燥後の材色  
(○ : L\*値、□ : a\*値、△ : b\*値)

写真-1 中温乾燥後の材色写真

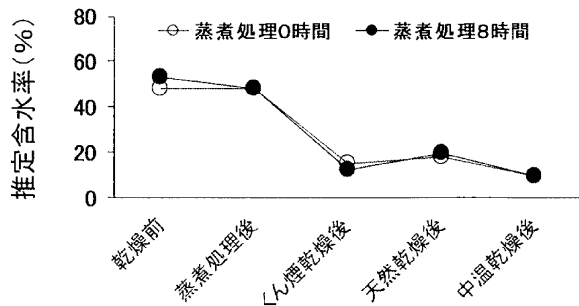


図-6 含水率の推移

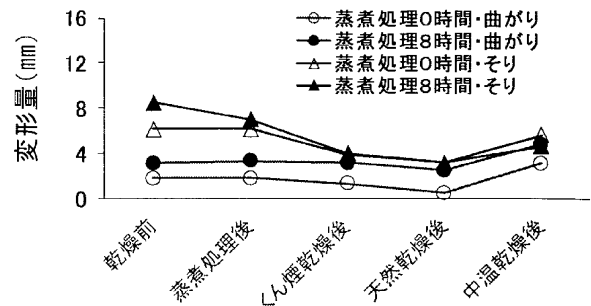


図-7 変形量の推移

木表側は辺材部が多く占め、全体的に白っぽい材色をしているため栈木痕が同化して確認されにくいに対し、木裏側は心材部が多く占め、全体的に赤っぽい材色をしているため栈木痕が目立ちやすい傾向にあるといえる。表面を 3.0 mm 削ったときの状況は、木表側は 1.5 mm 削った時と同様に栈木痕はみられなかった。一方、木裏側は無処理の供試材にはうっすらと栈木痕が確認されたのに対し、蒸煮処理を行った供試材に栈木痕はみられなかった。このことから、栈木を置かないで蒸煮処理することが栈木痕を薄くするための有効的な手段であることが再認識された。

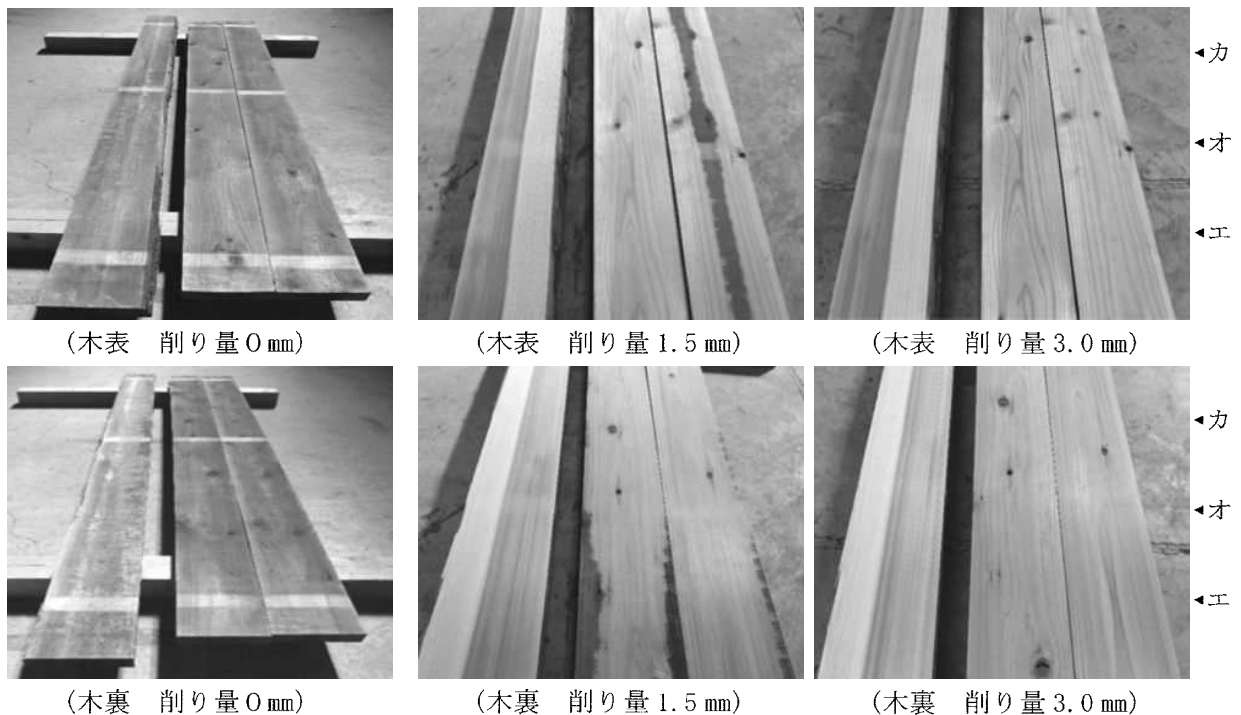


写真-2 中温乾燥後の材色写真

(各写真の左：市販のくん煙乾燥材、中：蒸煮処理8時間、右：蒸煮処理0時間)

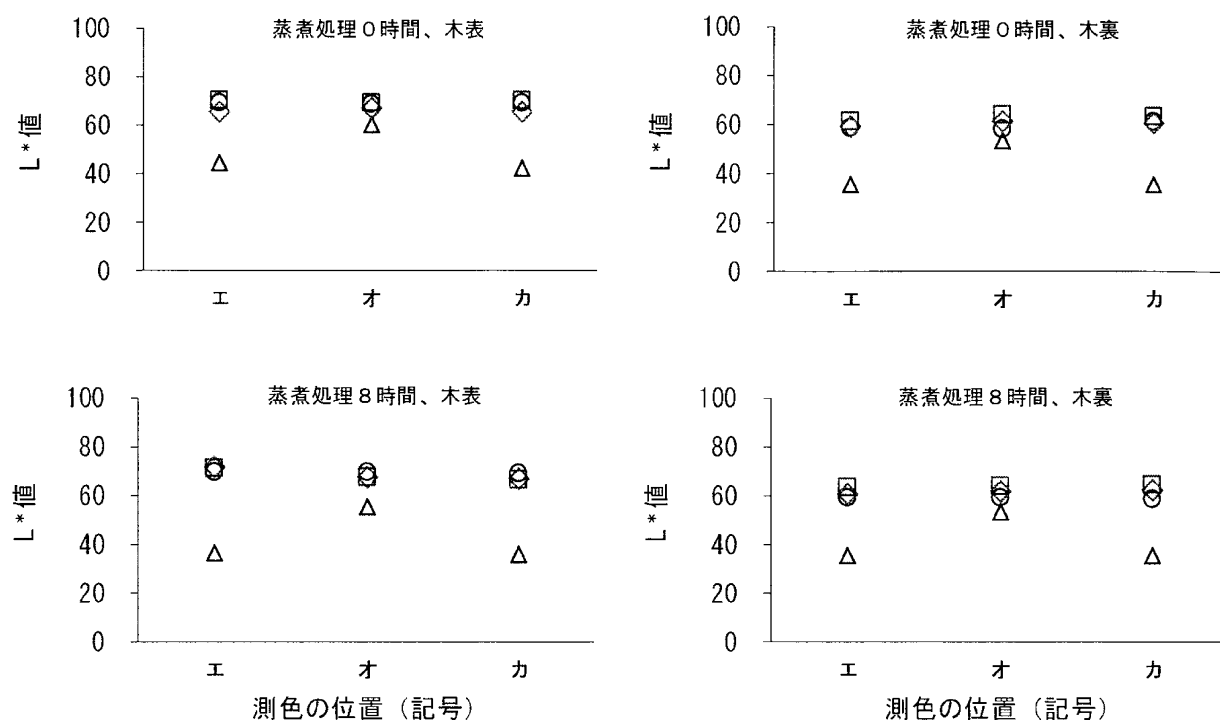


図-8 乾燥工程後の材色

(○ : 乾燥前、△ : 中温乾燥後、◇ : 削り量 1.5 mm、□ : 削り量 3.0 mm)

#### 4. まとめ

小試験体において、乾燥初期に栈木を設置せずに 98℃-98%蒸煮処理を行った場合、その後の乾燥において栈木痕は薄くなった。実大の板材を用いた乾燥試験(くん煙乾燥→天然乾燥→中温乾燥)では、すすなどの付着により乾燥終了後に栈木痕がはっきりしていたものの、表面を 3.0 mm削ってみると木表側および木裏側ともに栈木痕はみられなかった。よって、乾燥初期に栈木を設置しない蒸煮処理が、栈木痕を抑制する方法の一つになることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 古曳博也 : 大分県農林水産研究指導センター林業研究部年報(第 60 号)、17-22(平成 30 年)
- 2) 今村博之、安江保民、岡本一、横田徳郎、後藤輝男、善本知孝 : 木材利用の化学、222(昭和 58 年)
- 3) 亀山雄攄、篠崎武彦、安藤康裕、大塚紘平 : 栃木県林業センター業務報告(第 45 号)、18(平成 27 年)

## 一般流通製材を用いた大断面柱材の開発

平成 29 年度～令和元年度

木材チーム 山本 幸雄

### 1. 目的

平成 22 年に施行された「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」は、公共建築物にターゲットを絞って木材利用に取り組み、木材の需要拡大をねらいとしている。また、平成 27 年には、学校、美術館、図書館等の中規模木造公共建築が準耐火構造で建築可能になり、公共建築物への木材利用はますます進むと考えられる。中規模木造公共建築物では、柱の座屈を防ぐため 150 mm 角程度の柱が要求され、かつ 1 時間準耐火構造のため、柱を耐火被覆する又は燃えしろ設計すること等が必要になる。耐火被覆すると木材を現しで使用できず、150mm 角の柱で 60mm の燃えしろを考慮すると 270(150+60×2)mm 角の柱が必要になる。これを製材品でまかなうには、乾燥が難しく単価も上昇する等の問題が指摘されている。

そこで、本研究は一般流通製材を組み合わせて 270mm 角の柱を作製しその性能を検討することを目的に、本年度は一般流通製材 90×90×4,000mm の柱 9 本を使った合わせ柱の座屈試験と同合わせ柱の火災 1 時間後を想定した合わせ柱の試作と座屈試験を行った。

### 2. 試験方法

#### 1) 合わせ柱の座屈試験

昨年度試作した、90×90×4,000mm のスギ 9 本を半ねじコーススレッド(直径 4.2×長さ 120mm)で合わせた合わせ柱について、コーススレッドを 900mm の間隔で打ったタイプ(以下、Ⅰ型と記す)と、450mm の間隔で打ったタイプ(以下、Ⅱ型と記す)、300mm の間隔で打ったタイプ(以下、Ⅲ型と記す)各 1 体座屈試験した。

試験は、はじめに図-1 に示す座屈方向 1 に座屈たわみが生じるよう行い、次に試験体の向きを 90 度回転させ、座屈方向 2 に座屈たわみが生じるよう行った。ナイフエッジの支点間距離は 4,200mm、載荷速度は 1mm/min とした。座屈の変形量は材中央で測定した。試験には、島津製作所製実大強度試験機 UH-1000kNAR を使い、座屈の変形量は東京測器研究所製変位計 SDP-200D を用いて測定した。試験の様子を写真-1 に示す。



写真-1 座屈試験の様子

#### 2) 火災後を想定した合わせ柱の試作と座屈試験

90×90×4,000mm のスギ 9 本からなる合わせ柱の火災 1 時間後の断面を想定して、90×90×4,000mm

のスギの周りに、30×90×4,000mm のスギ4枚を半ねじコーススレッド(直径 4.2×長さ 65mm)で留めつけた試験体(図-3)の座屈試験を行った。角材と板材の留めつけは、コーススレッドを材端から200mm の位置を起点に 900mm の間隔で5本打った。試験は前述「2.1) 合わせ柱の座屈試験」と同様に行った。

### 3. 結果および考察

#### 1) 合わせ柱の座屈試験

90 mm角材の組み合わせかたを図-1に、座屈の変形量と荷重の関係を図-2に、組み合わせた 90 mm角材の縦振動から求めたヤング係数を表-1に、最大荷重(以下、 $F_{max270}$ と記す)、座屈強さ、Euler の座屈式から求めた弾性座屈荷重(以下、 $F_{ki}$ )と記す)を表-2に示す。座屈強さ及び  $F_{ki}$  は、(公財)日本住宅・木材センターの「構造用木材の強度試験マニュアル」<sup>1)</sup>の「II. 座屈試験法」(以下、マニュアルと記す)に準じて求めた。

すなわち、座屈強さについて、支点間中央部の変形量(以下、 $D$ と記す)を横軸に、 $D$ を観測荷重(以下、 $F$ と記す)で除した  $D/F$ を縦軸とする  $D-D/F$ 関係をプロットし、 $F_{max270}$  の80%から  $F_{max270}$  までの観測点の直線部分を求め、得られた直線の傾きの逆数を座屈荷重(以下、 $F_k$ と記す)とした。この  $F_k$  を試験体の横断面の面積で除し、細長比に応じて補正した値を座屈強さとした。また、弾性座屈荷重は、 $C\pi^2 EI/L^2$ で計算した。 $C$ は拘束係数で両端がナイフエッジなので1、 $EI$ は等価断面二次モーメントを考慮した合わせ柱の曲げ剛性、 $L$ はナイフエッジの支点間距離である。

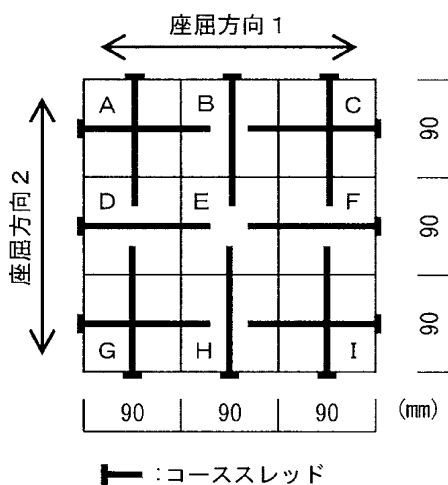


図-1 90 mm角材の組み合わせかた

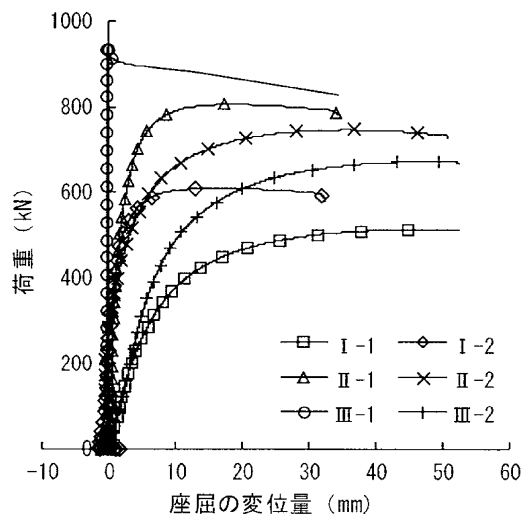


図-2 座屈たわみと荷重の関係

表-1 90×90mm 角材のヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	平均
I型	7.3	5.1	4.9	6.7	6.0	4.9	6.5	5.9	6.9	6.0
II型	5.8	8.7	7.7	6.6	11.1	9.2	9.3	7.9	7.9	8.3
III型	7.5	7.8	6.8	7.4	11.0	9.2	9.5	7.8	8.2	8.4



表-2  $F_{\max 270}$ 、 $f_{k270}$ 、 $f_{k90}$  と  $F_{k1}$

	I型		II型		III型		平均	標準偏差
	1	2	1	2	1	2		
$F_{\max 270}$ (kN)	513.0	609.4	805.8	746.1	938.8	671.4	714.1	150.4
$f_{k270}$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.3	2.5	3.4	3.2	1.3	3.0	2.5	0.8
$f_{k90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	20.4	22.7	30.8	28.5	11.8	26.7	22.8	7.5
$F_{k1}$ (kN)	1522.0	1545.0	1957.9	1974.6	2031.4	1995.6	1837.8	237.1

座屈強さの補正に用いる細長比について、横断面の面積を 270×270mm としたときのそれは 53.9、90×90mm×9本の束としたときのそれは 161.7 とした。以下、横断面の面積を 270×270mm とし計算した座屈強さを  $f_{k270}$ 、90×90mm の断面を持つ柱9本の束として計算した座屈強さを  $f_{k90}$  と記す。

昨年度、幅 89×厚さ 38×長さ 902mm(ナイフエッジの支点間距離は試験体厚さの 29 倍)のスギ3体から求めた座屈強さ(以下、 $f_{k38}$  と記す)の平均値は 7.7N/mm<sup>2</sup> だった<sup>2)</sup>のに対し、 $f_{k270}$  は 2.5N/mm<sup>2</sup>、 $f_{k90}$  は 22.8N/mm<sup>2</sup> となり、いずれの値も  $f_{k38}$  と大きく異なっている。また、最大荷重は  $F_{k1}$  の 4 割程度で、Euler の座屈式では説明できないことが分かった。

これは、材料同士をコーススレッドで留めただけでは材のせん断によるずれを止めることができていないためだと考えられる。

## 2) 火災後を想定した合わせ柱の試作と座屈試験

材の組み合わせかたを図-3に、座屈の変形量と荷重の関係を図-4に、縦振動から求めたヤング係数を表-3に、最大荷重(以下、 $F_{\max 150}$  と記す)、座屈強さ(以下、 $f_{k150}$  と記す)、Euler の座屈式から求めた弾性座屈荷重(以下、 $F_{k2}$  と記す)を表-4に示す。

$f_{k150}$  の平均値は 6.1N/mm<sup>2</sup> で  $f_{k38}$  に近い値になった。しかし、最大荷重は  $F_{k2}$  の 6 割程度で、Euler の座屈式では十分説明できないことが分かった。前述「3.1) 合わせ柱の座屈試験結果」同様、せん断による材のずれを止めることができていないことが原因と考えられる。

$F_{\max 150}$  を基準強度特性値として、木質構造設計基準・同解説<sup>3)</sup>に準じ信頼水準 75%における 95%下

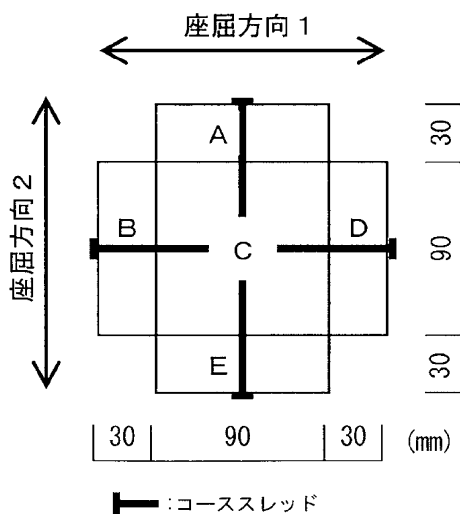


図-3 組み合わせかた

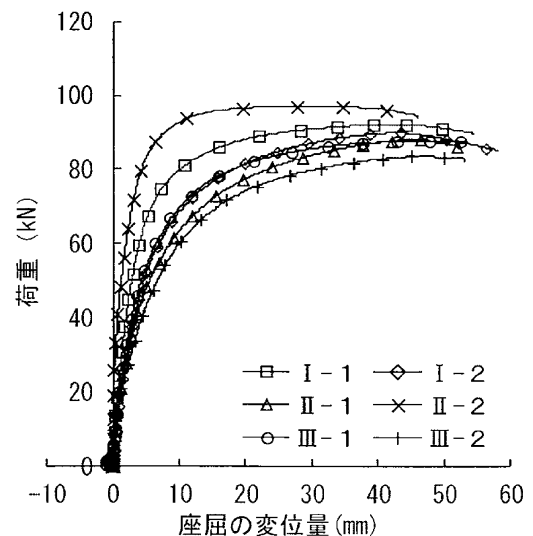


図-4 座屈たわみと荷重の関係

表-3 ヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

	A	B	C	D	E	平均	標準偏差
1	9.0	9.9	8.6	8.1	12.7	9.7	1.8
2	8.7	8.0	9.1	12.4	8.4	9.3	1.8
3	8.2	8.2	12.3	8.7	7.7	9.0	1.9

表-4  $F_{\max150}$ 、 $f_{k150}$  と  $F_{k2}$ 

	1		2		3		平均	標準偏差	5%下限値
	1	2	1	2	1	2			
$F_{\max150}$ (kN)	92.1	89.9	88.1	97.0	87.6	83.6	89.7	4.5	79.1
$f_{k150}$ (N/mm <sup>2</sup> )	6.0	6.2	6.2	6.3	5.8	5.8	6.1	0.2	5.6
$F_{k2}$ (kN)	172.4	167.2	132.1	136.6	127.7	132.3	144.7	19.7	98.7

側許容限界(以下、5%下限値と記す)を求めると79.1kNで、短期に対する許容鉛直荷重は52.7kN(79.1kN×2/3)となった。この合わせ柱を木造2階建て事務所(フローリング床、2階床の設計荷重は2,390N/m<sup>2</sup>)の1階に、鉛直荷重のみを負担する柱として使用すると想定した場合、1本の合わせ柱で床面積22.0m<sup>2</sup>負担できることが分かった。

#### 4. まとめ

90×90×4,000mmのスギ9本を半ねじコーススレッドで合わせた合わせ柱及びその合わせ柱の火災1時間後の断面を想定した試験体の座屈試験を行った。その結果、どちらの試験でも、最大荷重はEulerの座屈式から求めた弾性座屈荷重の4から6割程度で、Eulerの座屈式では十分説明できないことが分かった。これは、材料同士をコーススレッドで留めただけでは材のせん断によるずれを止めることができているためだと考えられた。

また、木造2階建て事務所の1階に鉛直荷重のみを負担する柱として使用すると想定した場合、1本の合わせ柱で床面積22.0m<sup>2</sup>負担できることが分かった。

#### 参考文献

- 1) (公財)日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル, 37-47p(平成23年)
- 2) 山本幸雄：大分県農林水産研究指導センター林業研究部年報, 33-37p(平成29年)
- 3) (一社)日本建築学会：木質構造設計基準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-, 153p(平成18年)

## 非住宅分野の木造化に対応する大断面製材品の強度性能評価

— 県産スギ平角材の乾燥方法別曲げ強度性能 —

平成 30 年度～令和 2 年度

木材チーム 河津 渉

## 1. 目的

平成 22 年に制定された「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」により公共建築物など中・大規模の非住宅分野の建築物の木造化が徐々に建築されてきている。これらの建物には平角材や短辺が 150mm 以上の大断面材（以下、大断面材等と記す）が使用されることが多い。

しかし、建築関係者の一部には乾燥による熱劣化や大断面材等の強度性能を不安視する声があり、木造化の促進を阻害する要因の一つだと考えられることからその性能を明らかにする必要がある。

今年度は、そのうち乾燥方法の違いと曲げ強度の関係を調べるために心持ち平角材の曲げ強度試験を行ったのでその結果を報告する。

## 2. 試験方法

## 1) 試験材の作成

試験材は、同じ地域で生産されたスギ平角材（仕上げ寸法：短辺 120mm、長辺 240mm、材長 4,000mm）168 本を用い、生材時に縦振動ヤング係数（以下、 $E_r$  と記す）の平均とばらつきが等しくなるよう 56 本ずつ 3 等分し、1. 高温乾燥（以下、高温と記す）と 2. 高周波蒸気複合乾燥（以下、高周波と記す）及び 3. 中温乾燥（以下、中温と記す）で乾燥した。

なお、スケジュールは表-1 のとおりとし、高温及び高周波は県内の製材所で、中温は本研究部の木材乾燥装置（東北通商(株) SDM FX 60E）を用いて同時期に乾燥した。

表-1 乾燥スケジュール

1. 高温乾燥				2. 高周波蒸気複合乾燥			
乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備考	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備考
98	98	12	蒸煮	98	98	12	蒸煮
120	90	12	高温セット	120	90	12	高温セット
105	95	36		115→95	90→80	14	降温
110	95	60	高温	90	75	8	
115	95	60		85	75	36	高周波発振
95	90	12	調湿	80	70	150	
		192	(8.0日)	80	75	8	調湿
						240	(10.0日)
3. 中温乾燥							
乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備考				
60	58→48	336	中温				
		336	(14.0日)				

乾燥後 3 か月養生した後に、(株)ATA 社製携帯型マイクロ波含水率計 MC-3200EX を用いて両木口から 50cm 及び材中央の 3 箇所含水率を測定し、その平均値が 20%を超えた材 68 本（高温 16 本、高周波 12 本、中温 40 本）は、さらに上記乾燥装置を用いて中温（乾球 60°C、湿球 40°C）で含水率が

20%以下になるまで乾燥を行った(写真-1)。その後強度試験まで1か月以上屋内で養生した。

なお、高温及び高周波の詳細は別途報告<sup>1)</sup>する。

## 2) 曲げ強度試験

曲げ強度試験には乾燥方法毎に40本、計120本を用いた。

製材の日本農林規格<sup>2)</sup>(以下、製材 JAS と記す)及び構造用木材の試験マニュアル<sup>3)</sup>(以下、マニュアルと記す)に準じて、荷重点間の節位置及び節径を測定した。

試験前に寸法(材長及び中央部の4辺)、重量、縦振動周波数及び(株)ケツト科学研究所製高周波木材水分計 HM-520 を用いて前出の3箇所を両長辺、計6箇所の含水率(以下、含水率(HM)と記す)を測定した。

次に製材 JAS 別記(4)曲げ試験及び(一社)全国木材検査・研究協会発行の「製材の品質管理の実際1(平成25年版)」の4(6)①「曲げ試験装置による曲げヤング係数の測定」に準じて、(株)島津製作所製 UH-1000kNAR を用いて、3等分点4点荷重、スパン3,600mm、載荷速度20mm/minで荷重及び変位を測定し、曲げヤング係数(以下、 $E_m$ と記す)を求めた(写真-2)。変位の測定には東京測器社製 SDP-200CT 1本を用い、荷重点間中央の材中央部下面に設置した。

曲げ強度試験は短辺を荷重面として上記と同様の設定で試験材が破壊するか荷重が最大荷重の80%以下になるまで試験を行い、最大荷重及び変位を測定し、曲げ強さ(以下、MOR と記す)及び曲げヤング係数(以下、MOE と記す)を求めた(写真-3)。変位も上記と同様に測定した。

試験終了後、木口から50cm以上離れた破壊面近くから厚さ3cm程度の試験片を切り出し、断面で平均年輪幅を測定した。試験片は上部1/5と中央部3/5及び下部1/5の3つに割り(写真-4)、それぞれ全乾法で含水率(以下、全乾含水率と記す)を測定した。



写真-1 木材乾燥装置での作業状況

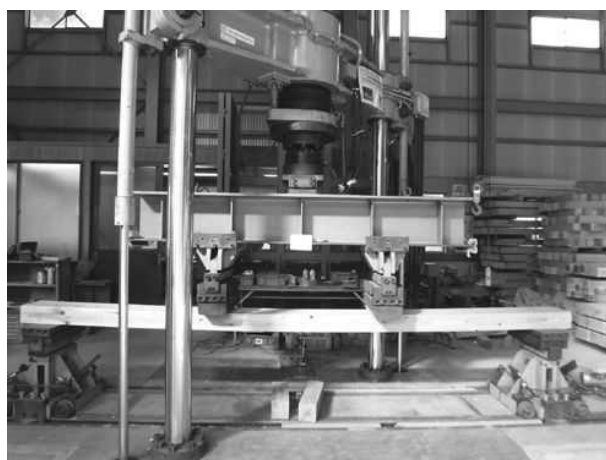


写真-2  $E_m$ の測定状況



写真-3 MOE及びMORの測定状況

### 3. 結果及び考察

#### 1) 試験材の測定

試験前の測定結果を乾燥方法毎に表-2に示す。

含水率(HM)は中温の1本を除いて20%以下に乾燥し、平均値は15%程度を示した。

なお、高温と高周波の幅が仕上げ寸法より小さくなっているのは仕上げ後に養生を行ったことで含水率が減少し収縮したためで、中温では養生後に仕上げたので収縮の影響がみられなかった。

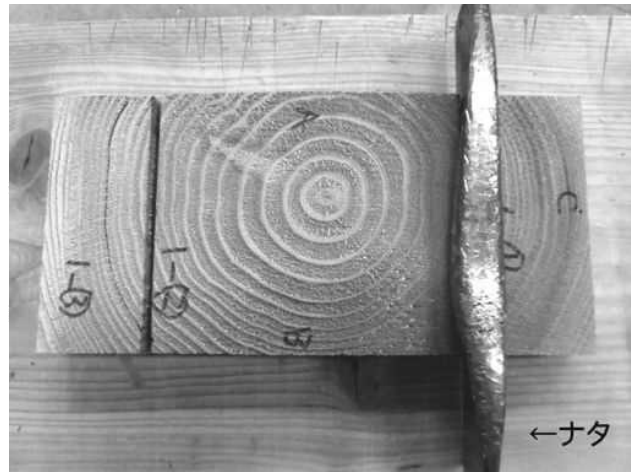


写真-4 含水率試験片作成（割材状況）

表-2 試験材の測定結果

区分	寸法 (mm)					重量 (kg)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (HM) (%)	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )		
	材長	幅		重量	密度					含水率	$E_{fr}$
		長辺	短辺								
平均値	4,000	238.0	119.5	44.2	389	14.7	6.8				
高温 最大値	4,002	239.8	120.4	48.2	422	18.8	8.8				
最小値	3,994	236.0	117.9	39.8	353	11.0	4.6				
標準偏差	1.6	1.0	0.7	2.1	16.9	2.1	1.0				
平均値	4,000	238.5	119.2	42.7	375	13.7	7.0				
高周波 最大値	4,002	240.6	120.5	47.1	414	19.8	9.1				
最小値	3,997	235.4	117.0	39.3	351	10.5	5.5				
標準偏差	1.3	1.6	1.0	2.1	16.9	2.4	0.9				
平均値	4,000	240.3	121.5	44.8	384	15.1	6.7				
中温 最大値	4,003	242.5	123.2	49.8	435	20.5	9.2				
最小値	3,990	234.8	119.4	40.5	351	11.3	4.5				
標準偏差	2.1	1.8	1.3	2.8	24.6	2.4	1.1				

#### 2) 曲げ強度試験

乾燥毎の曲げ強度試験の結果を表-3に示す。なお、 $E_m$ 、MOE及びMORはマニュアルに準じて標準試験条件に補正し、更にMOE及びMORは全乾含水率の上下1/5で測定した値を用いて含水率15%に補正（以下、 $MOE_{15}$ 及び $MOR_{15}$ と記す）した。

試験に要した時間は、平均3分51秒（最長7分22秒、最短1分29秒）であった。

試験材は製材JASの構造材甲種IIの材面の基準のうち節径比と平均年輪幅を用いて目視等級区分を行い、 $E_m$ を用いて機械等級区分を行った（表-4）。

乾燥方法毎に曲げ強さ（ $MOR_{15}$ ）を比較すると、平均値は高温32.0 N/mm<sup>2</sup>、高周波35.7 N/mm<sup>2</sup>、中温

39.6N/mm<sup>2</sup>の順で高くなり、中温と高温及び高周波との間に有意水準1%で、高温と高周波との間に有意水準5%で有意な差があった。

等級区分での本数が異なることから平均値の差の主な原因が乾燥方法によるためかは明確ではないが、高温で乾燥時間が長いほど曲げ強さが低下するとの報告<sup>4)</sup>があることから、要因の一つではないかと考えられた。

表-3 曲げ強度試験の結果

区 分	最大荷重 (kN)	E <sub>m</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	全乾含水率 (%)			気乾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	MOE <sub>15</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	MOR <sub>15</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
				全体	上下	中			
個 数	40	40	40	40	40	40	40	40	40
高 温 平 均 値	66.1	6.6	33.9	14.8	12.6	16.3	394	6.9	32.0
最 大 値	90.9	8.7	45.8	18.6	16.5	20.9	433	8.6	42.2
最 小 値	29.5	4.6	15.2	10.4	9.3	11.1	358	5.0	14.9
標 準 偏 差	12.2	0.9	6.3	2.2	2.0	2.5	18.0	0.9	6.0
個 数	40	40	40	40	40	40	40	40	40
高 周 波 平 均 値	74.4	6.9	38.1	12.7	12.3	13.0	381	7.0	35.7
最 大 値	107.8	8.9	53.7	17.1	15.3	18.4	416	9.9	47.4
最 小 値	45.1	5.3	22.6	8.3	7.9	8.4	354	5.7	19.9
標 準 偏 差	13.7	0.9	6.9	2.7	2.0	3.1	17.4	1.0	6.3
個 数	40	40	40	40	40	40	40	40	40
中 温 平 均 値	81.0	6.6	40.1	15.4	14.4	16.0	385	7.1	39.6
最 大 値	106.1	9.0	53.1	19.8	19.0	21.1	439	9.4	53.7
最 小 値	61.8	4.4	29.9	12.3	11.8	12.7	344	4.9	29.7
標 準 偏 差	13.3	1.1	6.6	2.0	1.8	2.1	25.3	1.2	6.7

表-4 製材 JAS に基づく等級区分

(単位：本)

区 分	目視等級区分 (甲Ⅱ)				機械等級区分			
	1級	2級	3級	計	E50	E70	E90	計
高 温	15	22	3	40	9	27	4	40
高 周 波	23	16	1	40	7	25	8	40
中 温	24	14	2	40	11	22	7	40
計	62	52	6	120	27	74	19	120

なお、5%下限値は高温 21.5 N/mm<sup>2</sup>、高周波 25.0 N/mm<sup>2</sup>、中温 28.6 N/mm<sup>2</sup>となり、平均値が最も低い高温乾燥でもおおむね無等級材の基準強度<sup>5)</sup> 22.2 N/mm<sup>2</sup>と同程度の値を示した。

試験材の破壊形態は1本を除き全て荷重点間の下部に引張破壊(写真-5)が生じた。また、上部に圧縮破壊(写真-6)を生じた試験材が高温4本、高周波8本、中温11本あった。引張破壊と同時にせん断破壊(写真-7)が生じるものもあった。また、荷重点間以外で破壊した材を写真-8に示す。

曲げ強さの最小値を示した試験材を写真-9に示す。この材のMOR<sub>15</sub>は14.9 N/mm<sup>2</sup>で無等級材の基準強度の2/3程度の強さであった。目視等級区分では3級に区分されたが、大きな節が多数あり、年輪



写真-5 引張破壊（下部）の状況



写真-6 圧縮破壊（上部）の状況



写真-7 引張破壊とせん断破壊の状況



写真-8 荷重点間以外での破壊の状況

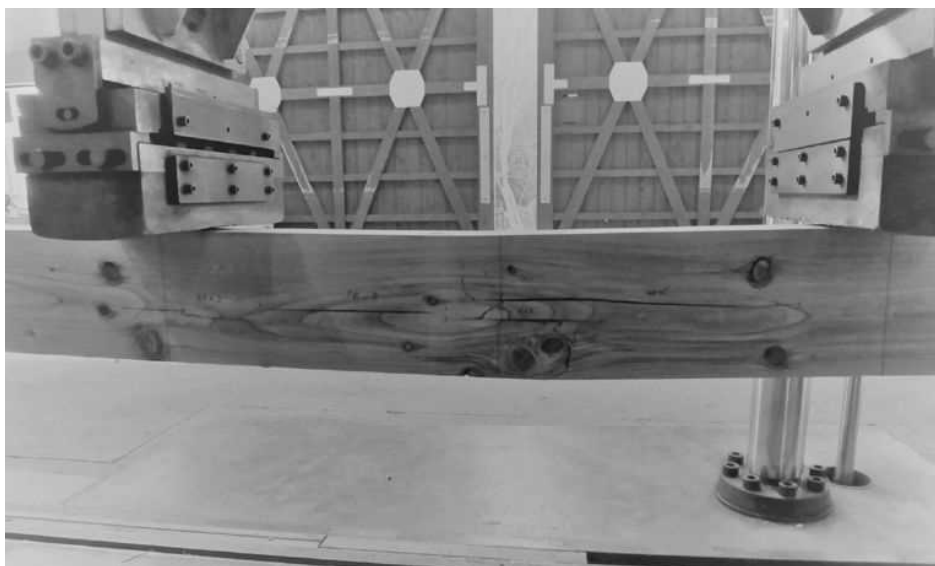


写真-9 曲げ強さ最小値示した試験体



幅が広く、荷重点間に部分的に腐朽とみられる変色もあった。

今回はこの試験材も試験から除かなかったが、こうした材が除けるような何らかの基準が必要だと考えられた。なお、この材を除いた高温の5%下限値は23.5 N/mm<sup>2</sup>となる。

次に  $E_m$  と  $E_{fr}$  及び MOE との関係を図-1 に示す。 $E_m$  と  $E_{fr}$  は極めて相関が高く決定係数が0.95を上回ったが、 $E_m$  と MOE では相関は高いものの決定係数は  $E_{fr}$  とのそれより低い値を示し、MOE が6%程度

大きかった。

また、乾燥方法毎の  $E_m$  と  $MOR_{15}$  との関係を図-2 に示す。中温は機械等級区分の基準強度及び無等級材の基準強度を下回る材はなかったが、高温と高周波では機械等級区分の基準強度を数本、無等級材の基準強度を各1本ずつ下回った。

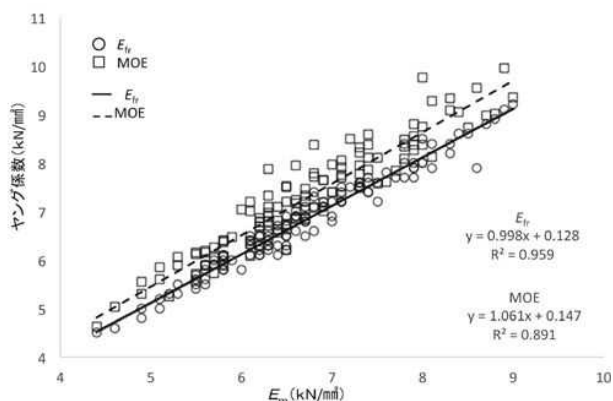


図-1  $E_m$  と  $E_{fr}$ 、MOE との関係

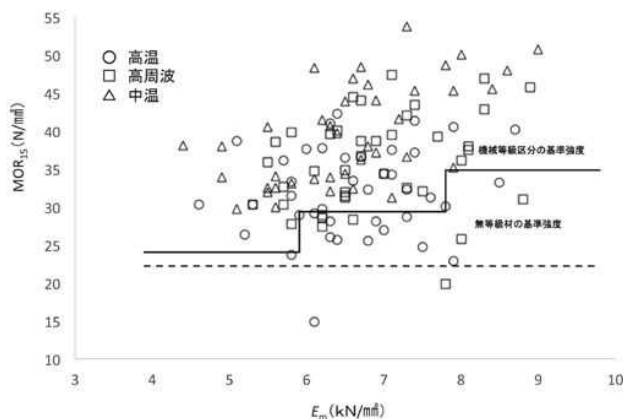


図-2  $E_m$  と  $MOR_{15}$  との関係

#### 4. まとめ

今回は県内では使用例のない中温スケジュールも使用したが、乾燥方法毎の曲げ強さの平均値に有意な差が生じた。このことから心持ち平角材の高温域での乾燥は熱劣化など何らかの影響が発生する可能性が示唆された。

今後、研究事例を増やし原因の解明と結果に応じた対応方法を検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 山田康裕：大分県農林水産研究指導センター林業研究部年報 61, p 41～p 50 (平成 31 年)
- 2) 製材の日本農林規格：平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示 1083 号制定
- 3) (公財)日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル、162pp(平成23年)
- 4) 吉田孝久、今井信：長野県林業総合センター研究報告 30、p 111～119 (平成 28 年)
- 5) 木材の基準強度  $F_c$ 、 $F_t$ 、 $F_b$  及び  $F_s$  を定める件：平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号制定



## 寸法安定性の高い高品質乾燥材生産技術の開発

平成 30 年度～令和 2 年度

木材チーム 山田 康裕

## 1. 目 的

近年、公共建築物等の中大規模建築物における構造部材として地域材が利用される機会が増加し、製材の日本農林規格（以下、製材 JAS と記す）で定める一定の含水率基準を満たした人工乾燥材の需要が高まっている。接合部に金物工法が多用される木造住宅においても、構造材に高い寸法安定性が要求されるため、製材 JAS の含水率基準 15 % 以下を示す SD15 が求められるようになってきた。

一方、増加する大径材の需要創出を図る一つの方策として、梁桁等の構造材への利用が期待されているが、こうした中・大断面材にスギ無垢材の利用促進を図るためには、品質を確保しつつ SD15 に乾燥するための技術的な課題が残されている。

本研究では、中・大断面材の効率的な乾燥方法の一つとして、蒸気式乾燥による外部加熱に高周波加熱を併用し、木材内部から加熱する高周波蒸気複合乾燥<sup>1)</sup>などを活用し、スギ平角材の乾燥技術開発を行うことを目的とした。

## 2. 試験方法

## 1) 高周波蒸気複合乾燥と高温乾燥による乾燥特性の解明

## (1) 供試材および乾燥試験

供試材は、大分県佐伯市産のスギ平角材 112 本で、製材寸法 135mm × 255mm × 4,000mm、仕上げ寸法 120mm × 240mm × 4,000mm とした。乾燥前の寸法、重量、縦振動ヤング係数（以下、 $E_r$  と記す）を測定し、 $E_r$  の平均とばらつきがほぼ同じになるように 2 グループに分け、各 56 本ずつ表-1 に示すスケジュールにより乾燥した。はじめに高周波蒸気複合乾燥、高温乾燥ともに 98 °C で 12 時間蒸煮し、乾球 120 °C、湿球 90 °C の条件下で 12 時間高温セット処理を行った。高周波蒸気複合乾燥における高周波出力は、8 W/kg とした。なお、平均含水率の目標は 15 % に設定した。乾燥終了から 1 週間後にモルダールで仕上げた材は、3 か月間屋内で養生後、材質試験に供した。

表-1 乾燥スケジュール（左：高周波蒸気複合乾燥、右：高温乾燥）

○高周波蒸気複合乾燥 (56本)				○高温乾燥 (56本)			
乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備 考	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備 考
98	98	12	蒸煮	98	98	12	蒸煮
120	90	12	高温セット	120	90	12	高温セット
115→95	90→80	14	降温	105	95	36	
90	75	8		110	95	60	高温
85	75	36	高周波発振	115	95	60	
80	70	150		95	90	12	調湿
80	75	8	調湿	合 計		192	(8.0日)
合 計		240	(10.0日)				

## (2) 材質試験

重量および含水率の測定は、乾燥後、仕上げ後、養生期間中は1か月毎に行い、含水率の測定は、材の両木口から50cm、材中央部の計3カ所を高周波木材水分計 HM-520、マイクロ波含水率計 MC-3200EX の2機種で幅面を測定した。なお、HM-520 では幅面の表裏合わせて計6カ所測定した。養生3か月後は、乾燥方法別に重量の軽いグループと重いグループから各8本を選び、図-1のように50cm、200cm、350cmの3カ所から厚さ2cmの試験片を切り出し、全乾法で含水率を測定した。材内部の含水率分布は、木口から100cm、300cmの2カ所から図-2のように試験片を切り出し、全乾法により測定した。なお、残り80本の試験材については、今年度研究課題「非住宅分野の木造化に対応する大断面製材品の強度性能評価」における曲げ試験に供試後、非破壊部より含水率用試験片を採取して全乾法により含水率を測定した。

寸法と曲がりの測定は、モルダー仕上げ後と養生3か月後に行い、寸法は材中央部の4材面と材長を、曲がりには4材面の最大矢高を測定した。

材の明るさは、木口から50cm、200cm、350cmの幅面中央部3カ所において、L\*a\*b\*表色系の明度L\*を色彩色差計 CR-400 型（コニカミノルタセンシング株式会社製）を用いて測定した。

内部割れは、両木口から10cm、50cm、100cm、150cmおよび200cmの木口断面に現れた幅1mm以上の内部割れ長さを測定し、材面割れは、両木口から10cmの部分を除く4材面に現れた幅1mm以上の割れ長さを測定した。

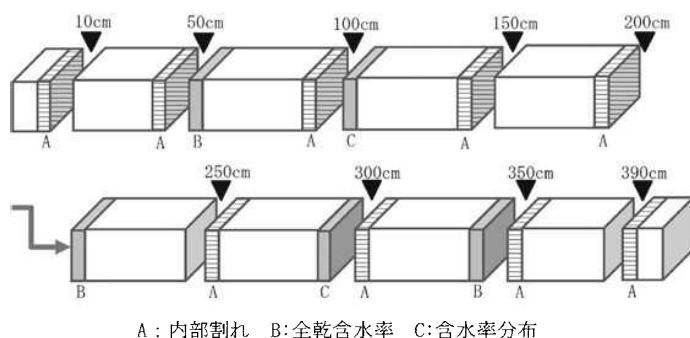


図-1 試験片サンプリング図

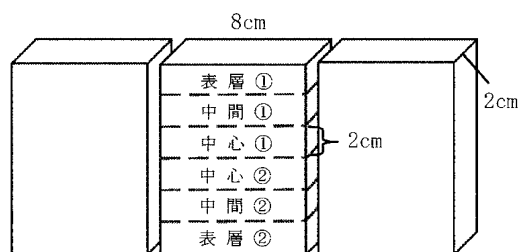


図-2 含水率分布サンプリング図

## 2) 高周波蒸気複合乾燥による促進乾燥技術の開発

### (1) 供試材および促進乾燥試験

供試材は、大分県日田市産のスギ平角材 25 本で、製材寸法 135mm × 255mm × 3,000mm、仕上げ寸法 120mm × 240mm × 3,000mm とした。寸法、重量、 $E_r$  を測定した後、98℃で8時間蒸煮し、乾球 110℃、湿球 90℃の条件で15時間高温セット処理した。高温セット処理後の材は、屋内で3か月間天然乾燥を行い、期間中は高周波木材水分計による含水率と重量を1か月毎に測定した。含水率は、高周波木材水分計により50cm、150cm、250cmの裏表面計6カ所を測定した。3か月間天然乾燥後は、促進乾燥前の内部含水率の分布を測定するため、含水率計含水率の平均値に最も近い平均木1本を選別し、木口から100cm、200cmの2カ所から図-2のとおりサンプリングし、全乾法により含水率を求めた。次に含水率の平均とばらつきがほぼ同じになるように残りの試験材を12本ずつ2グループに分け、表-2に示す高周波蒸気複合乾燥と中温乾燥の各スケジュールにより促進乾燥した。なお、高周

波蒸気複合乾燥による促進乾燥は、大分県立日田林工高等学校の高周波蒸気複合乾燥機 MDW-2SD（山本ビニター株式会社製）において、高周波出力 11W/kg で行った。

## (2) 材質試験

促進乾燥後の試験材は、寸法、重量、含水率計含水率を測定し、仕上げ後に再度同項目を測定した。含水率と内部割れ測定に供する試験片は図-3のとおりサンプリングし、材内部の含水率分布の測定は図-2のように試験片を切り出し、全乾法により測定した。

品質試験は、促進乾燥後の未仕上げ段階における含水率計含水率が 20 %以下に乾燥した試験材を対象に、前述 1) 試験と同様の方法により、心材色の明度  $L^*$ 、材面割れ、内部割れを測定した。

表-2 促進乾燥スケジュール（左：高周波蒸気複合乾燥、右：中温乾燥）

○高周波蒸気複合乾燥 (12本)				○中温乾燥 (12本)			
乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備考	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備考
80	70	1	昇温	80	70	1	昇温
80	70	42	高周波発振	80	70	162	中温
50	45	5	調湿	50	45	5	調湿
合計		48	(2.0日)	合計		168	(7.0日)

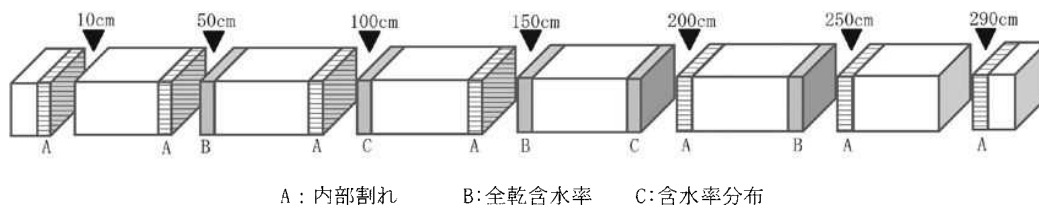


図-3 試験片サンプリング図

## 3. 結果および考察

### 1) 高周波蒸気複合乾燥と高温乾燥による乾燥特性の解明

時期別の試験材の諸元を表-3に示す。仕上げ後から養生3か月後の寸法の平均収縮率は、幅方向 0.32%、厚さ方向 0.30%、長さ方向 0.005%であり、乾燥方法による有意差はなかった。養生後の含水率と仕上げ後の寸法収縮量の関係を図-4に示す。含水率 15%付近を境界として、含水率が高い試験材ほど収縮量は大きくなる傾向にあり、含水率 15%付近では収縮がほとんどみられず、それ以下の含水率では逆に吸湿による膨張がみられた。

乾燥方法別の養生後の  $E_r$  平均±標準偏差は、高周波蒸気複合乾燥  $6.5 \pm 1.03 \text{ kN/mm}^2$ 、高温乾燥  $6.3 \pm 0.99 \text{ kN/mm}^2$  と高温乾燥がやや低かったが有意差はなく、図-5に示した仕上げ後と養生3か月後の  $E_r$  の関係についてもほとんど差はなかった。

乾燥方法別の重量変化（四分位数）は図-6のとおりであり、乾燥前から養生後の平均重量±標準偏差は、高周波蒸気複合乾燥が  $90.5 \pm 13.8 \text{ kg}$  から  $43.1 \pm 4.0 \text{ kg}$ 、高温乾燥が  $91.8 \pm 14.1 \text{ kg}$  から  $44.9 \pm 3.7 \text{ kg}$  に減少しており、乾燥方法による脱水量に差はなかった。

全乾密度から推定した乾燥方法別の含水率変化を図-7に示す。乾燥前から養生後の平均含水率±標準偏差は、高周波蒸気複合乾燥が  $101.8 \pm 31.0 \%$  から  $13.5 \pm 5.4 \%$ 、高温乾燥が  $101.3 \pm 33.5$

%から  $16.2 \pm 4.9$  %であり、高周波蒸気複合乾燥の方がやや含水率が低かった。今回の高周波蒸気複合乾燥のスケジュールでは、乾燥前含水率が 100 %以下の試験材は、1本を除いてすべて含水率 15 %以下となったが、全体に占める SD15 の割合は 60 %にとどまり、SD15 の比率を高めるためには、乾燥期間の延長や初期含水率の高い材の除外が必要と考えられた。

含水率計 2機種による平均含水率の推移を図-8 に示す。乾燥方法に関わらず、乾燥後の高周波木材水分計の含水率はマイクロ波含水率計より低かった一方、仕上げ後は逆に高くなり、養生期間中にその差は小さくなった。乾燥後と仕上げ後の含水率計含水率が逆転したことに、材表面付近の誘電率を測る高周波木材水分計の特性から、乾燥後は良く乾いた材表面の状況を、仕上げ後は材表面が削られた影響を強く反映したものと思われた。

材内部の含水率分布を図-9 に示す。平均含水率 20 %を超える含水率の高い材は、いずれも材中心が高い凸型を示した一方、高周波蒸気複合乾燥は高温乾燥と比較して材中心と表層間の差が小さく、特に含水率 10 %以下では材中心の含水率が表層よりも低い傾向がみられた。

全乾法と含水率計により測定した含水率の関係を図-10 に示す。マイクロ波含水率計は、含水率 10 ~ 30 %の範囲において全乾法含水率と強い相関があったのに対して、高周波木材水分計はややバラツキが大きく、マイクロ波含水率計と比較して相関が低かった。

仕上げ後 3 か月経過した材の曲がりの結果を図-11 に示す。製材 JAS の目視等級区分構造用製材の規格における甲種構造材（甲種Ⅱ）の基準で 1 級（0.1 %以下）となる最大矢高 4 mm 以下が 94 %を占め、2 級（0.2 %以下）5 %、規格外（0.2 %超）1 %とほとんどが 1 級に格付けされた。規格外となった試験体 1 本についても、最大矢高 12mm と機械等級区分の基準（0.5 %以下）に収まっていた。本結果から、今回のような心持ち平角材の場合、仕上げ後に規格外となる大きな曲がりが発生する可能性は小さいものと思われた。

乾燥方法別の心材色の明度  $L^*$  の比較を図-12 に示す。心材色の明度  $L^*$  の平均±標準偏差は、高周波蒸気複合乾燥  $62.4 \pm 3.5$ 、高温乾燥  $58.8 \pm 3.2$  であり、高周波蒸気複合乾燥の心材色が 1 %水準で有意に高かった。

乾燥方法別の材面割れの 1 本あたりの発生本数と割れ長さ合計を図-13 に、内部割れ長さ合計を図-14 に示す。材面割れは、1 本あたりの割れ本数および割れ長さ合計の平均で比較すると、高周波蒸気複合乾燥が 1.7 本、55cm、高温乾燥が 3.4 本、98cm となり、高周波蒸気複合乾燥の割れ発生が少ない結果となった。内部割れは、各乾燥方法ともに両木口から 10m 位置で最も多く発生しており、高温乾燥でより内部割れ発生が多い傾向がみられた。

表-3 乾燥時期別の試験材諸元（平均±標準偏差、—は未計測）

時期	乾燥方法	本数	寸法			重量 (kg)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{tr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
			幅 (mm)	厚さ (mm)	長さ (cm)				
乾燥前	高周波蒸気複合乾燥	56	255.8±0.5	136.9±0.6	408.2±2.2	90.5±13.3	633.2±91.8	6.0±0.9	101.8±31.0
	高温乾燥	56	255.6±0.6	136.7±0.6	408.8±1.8	91.8±13.7	642.8±96.0	6.0±0.9	101.3±33.5
乾燥後	高周波蒸気複合乾燥	56	250.9±3.1	132.5±2.1	407.9±2.2	55.6±8.5	408.6±53.5	—	23.3±16.2
	高温乾燥	56	250.8±2.2	132.6±1.8	408.6±1.8	57.4±6.0	421.9±41.4	—	25.3±12.4
仕上げ後	高周波蒸気複合乾燥	56	239.9±0.3	120.1±0.3	400.0±0.1	47.8±6.4	414.6±55.0	6.4±1.1	26.0±17.3
	高温乾燥	56	239.8±0.2	120.1±0.2	400.1±0.1	49.2±4.9	427.4±42.8	6.2±1.0	27.7±12.9
養生後	高周波蒸気複合乾燥	56	239.2±1.2	119.6±0.7	400.0±0.1	43.1±3.7	376.8±32.5	6.5±1.0	13.5±5.4
	高温乾燥	56	239.0±0.7	119.8±0.5	400.1±0.1	44.9±3.5	392.0±29.3	6.3±1.0	16.2±4.9

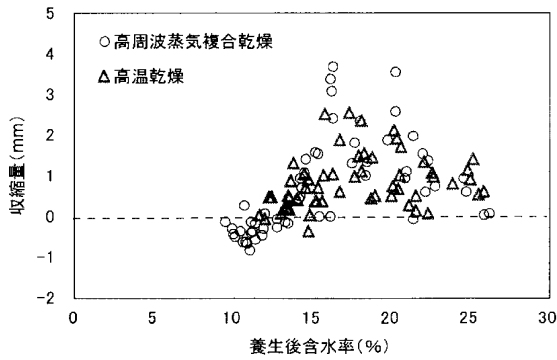


図-4 養生後の含水率と寸法変化量の関係

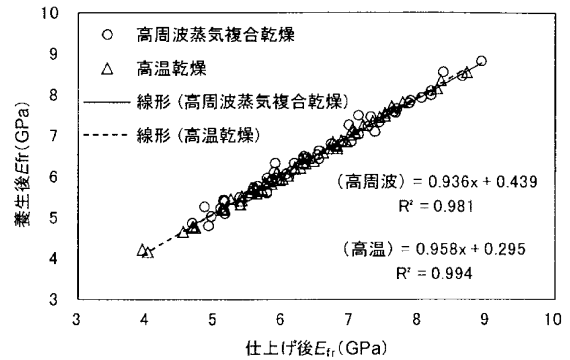


図-5 時期別の  $E_{tr}$  の関係

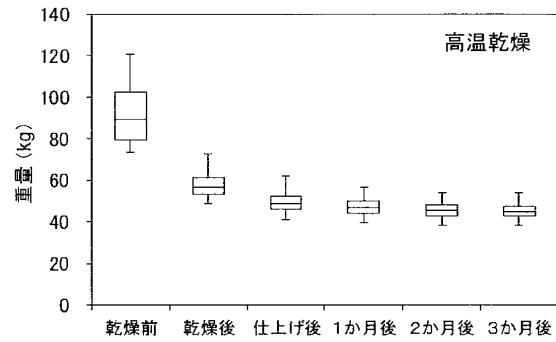
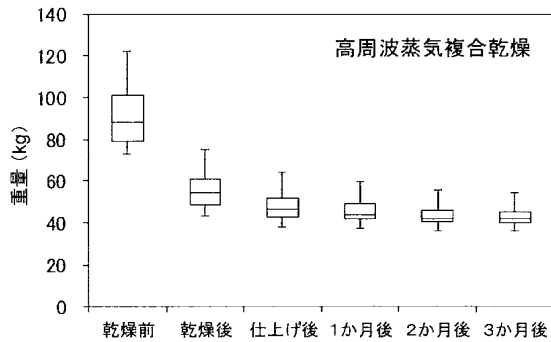


図-6 乾燥方法別の重量変化 (左: 高周波蒸気複合乾燥、右: 高温乾燥)

箱の上端、中央線、下端は、第3四分位、中央値、第1四分位を、エラーバーの上下端は最大値と最小値を表す。

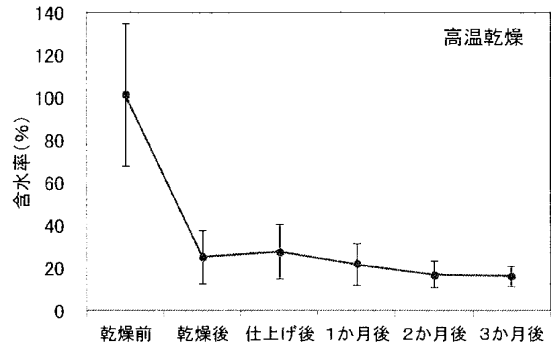
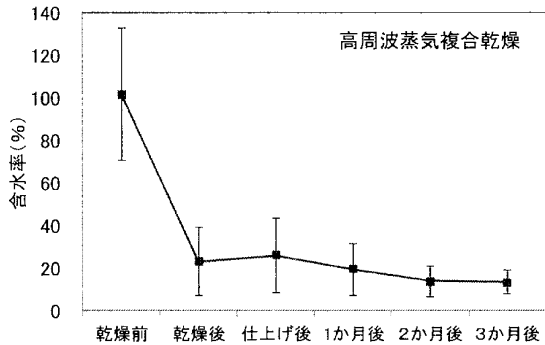


図-7 乾燥方法別の含水率変化 (左: 高周波蒸気複合乾燥、右: 高温乾燥)

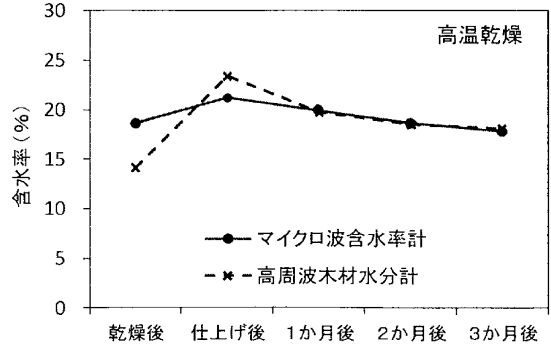
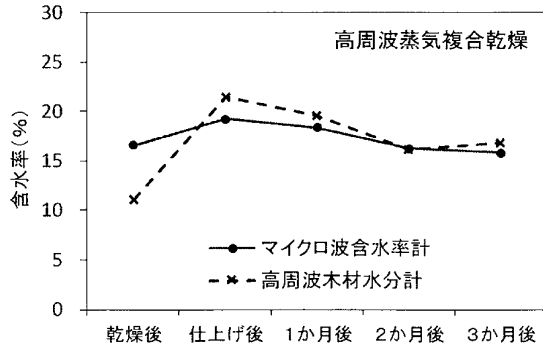


図-8 含水率計2機種による平均含水率変化 (左: 高周波蒸気複合乾燥、右: 高温乾燥)

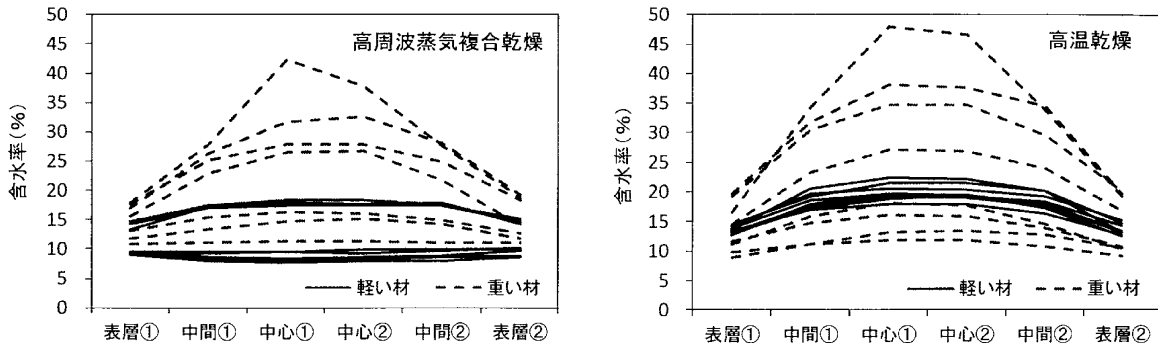


図-9 材内部の含水率分布 (左：高周波蒸気複合乾燥、右：高温乾燥)

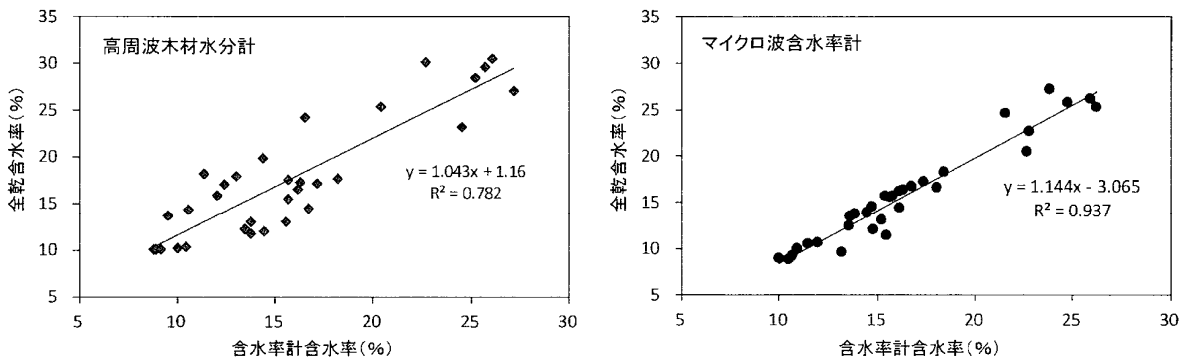


図-10 含水率計と全乾法含水率の関係 (左：高周波木材水分計、右：マイクロ波含水率計)

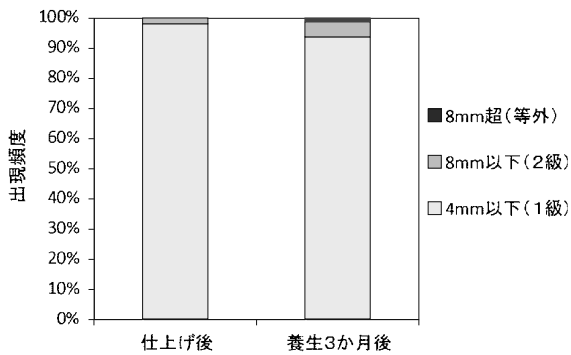


図-11 曲がりの JAS 基準に占める割合

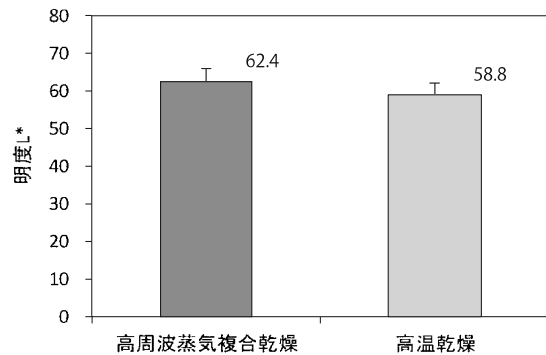


図-12 乾燥方法別の明度L\*の比較

エラーバーは標準偏差を示す

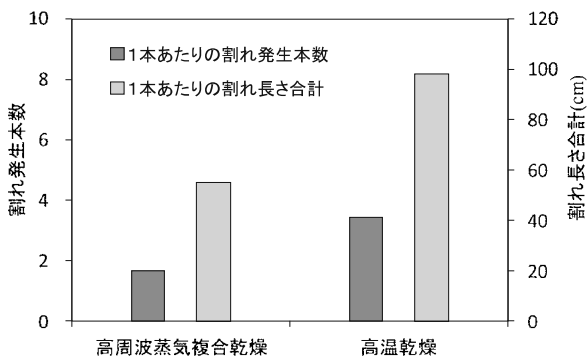


図-13 乾燥方法別の材面割れの比較

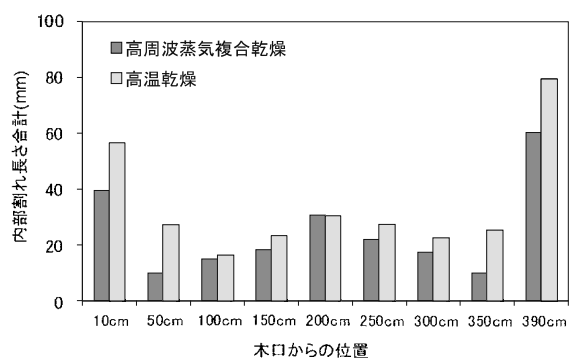


図-14 乾燥方法別の内部割れの比較

## 2)高周波蒸気複合乾燥による促進乾燥技術の開発

高周波促進乾燥材の釜出しの様子を写真-1に、時期別の重量と全乾法から推定した含水率の推移を図-15、図-16に示す。試験材の含水率は、乾燥前(最小値～平均値～最大値)39.3～89.9～135.6%、高温セット乾燥後26.2～57.2～97.9%、天然乾燥3か月後19.9～30.5～52.7%であった。各促進乾燥後の平均含水率±標準偏差は、高周波促進乾燥では $22.0 \pm 7.80\%$ と2日間の促進乾燥で含水率20%以下となったのは12本中7本であった一方、中温促進乾燥7日間では $14.0 \pm 2.82\%$ となり、すべての材が含水率20%以下となった。最終的な平均含水率は、高周波促進乾燥 $26.5 \pm 8.17\%$ 、中温促進乾燥 $19.7 \pm 3.06\%$ となり、仕上げ工程で乾燥した表層の切削と木口を切断したことによって含水率はやや増加した。

高周波を活用した促進乾燥に関する既往の研究「大分方式乾燥による平角材の最適乾燥材生産システムの開発」<sup>2)</sup>において、スギ平角材に対して高温セット処理後、3か月間天然乾燥した材に対して、乾球80℃、湿球70℃、5日間の高周波促進乾燥を行い、平均含水率20%以下に乾燥できたとの報告がある。本試験では、高周波出力を10W/kgから11W/kgに上げて2日間という短期間での促進乾燥を試みたが、本スケジュールでは12本中3本しか20%以下に乾燥できなかった。この理由に関して、高周波出力を上げたことによる品質劣化を避けるため、通常20分のインターバルを30分に延長した影響で、必要電力164.2kWhに対して消費電力98.5kWhと約60%の印加量にとどまったことが乾燥不足の主要因と考えられ、今後、品質を維持しつつ短期間でSD15に乾燥するためには、出力条件や発振インターバル時間等についてさらなる検討が必要である。一方、中温促進乾燥では、7日間の乾燥で平均含水率20%以下まで乾燥しており、高品質な中断面スギ平角材を生産する1つの方法として有効と考えられた。

材内部の含水率分布を図-17に示す。高周波促進乾燥では、促進乾燥前の含水率が高いグループの材は、促進乾燥後も材中心部の含水率が非常に高かったのに対して、含水率20%以下に乾燥した材については、表層と中心部の間に含水率差がなかった。一方、中温促進乾燥では、含水率の高いグループも一様に乾いていたが、含水率20%以下の材についても材中心部の含水率が表層より高い傾向がみられた。

含水率計と全乾法で測定した仕上げ材の平均含水率を比較した結果を図-18に示す。含水率計含水率は、高周波木材水分計とマイクロ波含水率計ともに含水率が高いほどばらつきが大きくなり、またマイクロ波含水率計の方が全乾法との相関が高かった。

乾燥方法別の心材色の明度L\*の比較を図-19に示す。心材色の明度L\*の平均±標準偏差は、高周波促進乾燥 $62.8 \pm 4.7$ 、中温促進乾燥 $63.4 \pm 4.5$ と両者の間に有意差はなかった。

乾燥方法別の材面割れの1本あたりの発生本数と割れ長さ合計を図-20に、内部割れ長さ合計を図-21に示す。材面割れは、1本あたりの割れ本数および割れ長さ合計の平均が、高周波促進乾燥1.1本、31cm、中温促進乾燥1.1本、39cmであり、どちらも割れはほとんど発生していなかった。内部割れは、写真-2に示すように高周波促進乾燥での発生は全く確認されず、中温促進乾燥においても両木口から10cm位置以外の発生はなかった。

以上の結果から、高温セットと天然乾燥3か月に高周波促進乾燥を組み合わせることで、中温促進乾燥と同等の割れの少ない高品質な乾燥材を生産できることが示唆されたが、今後、乾燥歩留まりの向上に向けてスケジュールの検討が必要と考えられた。

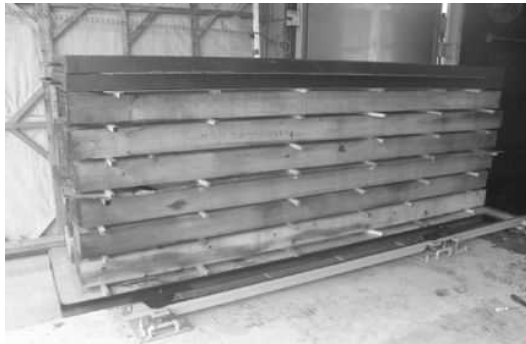


写真-1 高周波促進乾燥材釜出しの様子

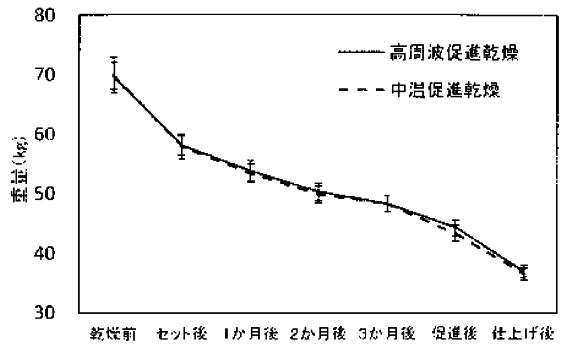


図-15 時期別の重量の推移

エラーバーは標準誤差を示す

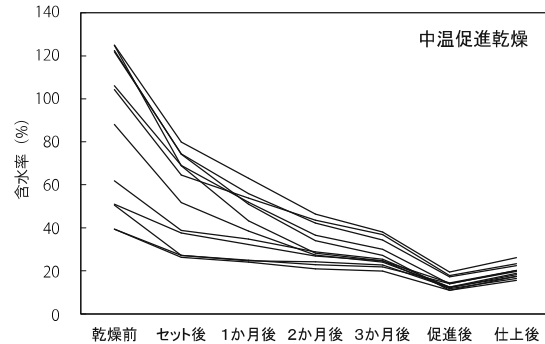
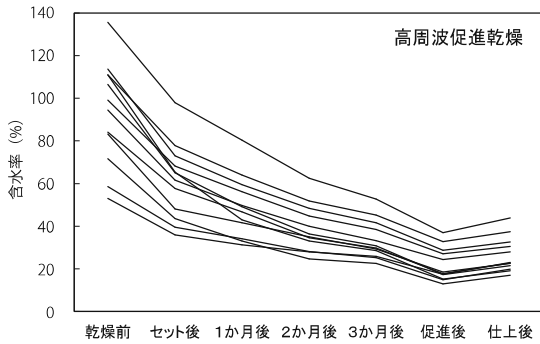


図-16 乾燥方法別の含水率変化 (左: 高周波促進乾燥、右: 中温促進乾燥)

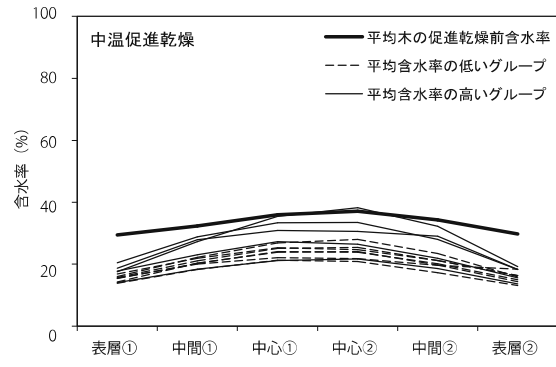
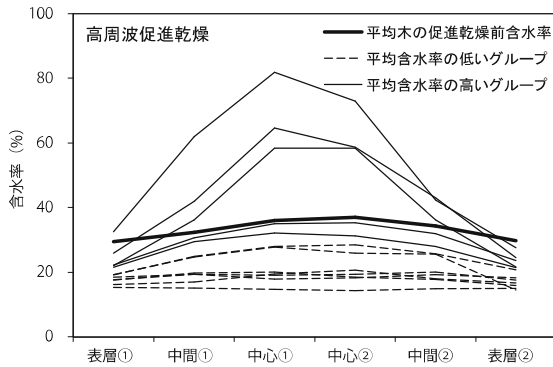


図-17 材内部の含水率分布 (左: 高周波促進乾燥、右: 中温促進乾燥)

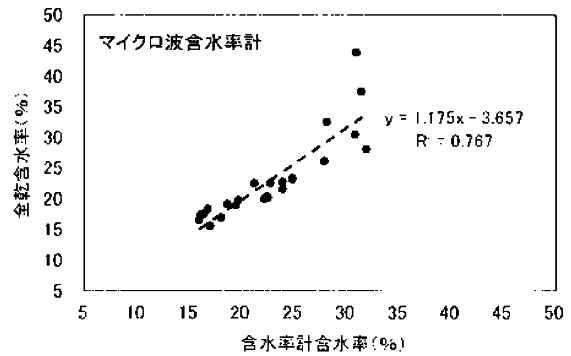
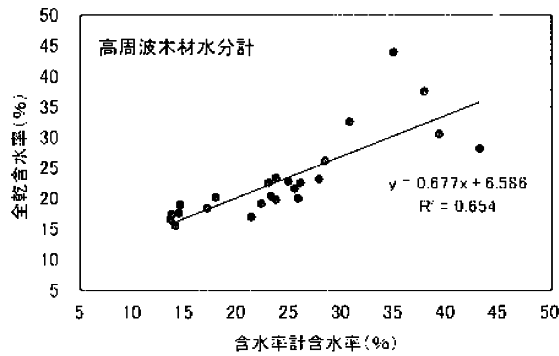


図-18 含水率計と全乾法含水率の関係 (左: 高周波木材水分計、右: マイクロ波含水率計)



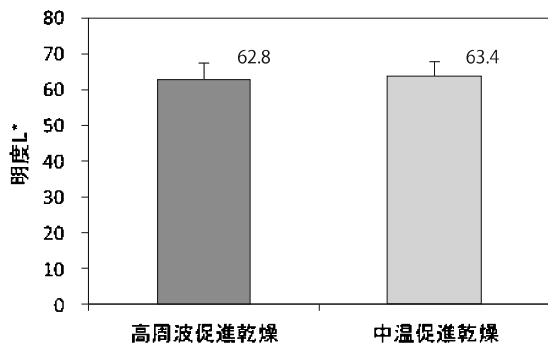


図-19 乾燥方法別の明度 L\*の比較

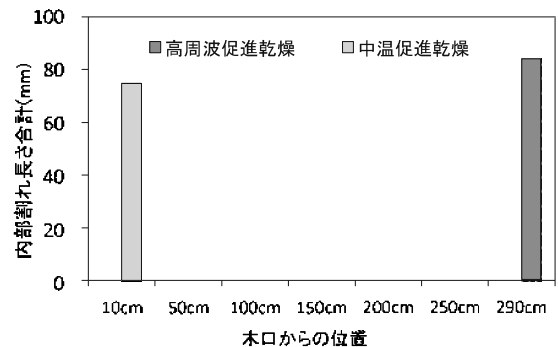


図-20 乾燥方法別の内部割れの比較

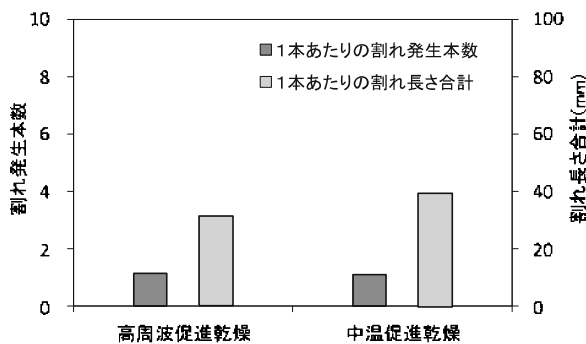


図-21 乾燥方法別の材面割れの比較

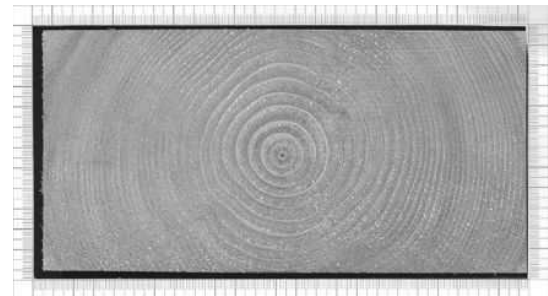


写真-2 高周波促進乾燥の木口断面(100cm)

#### 4. まとめ

##### 1) 高周波蒸気複合乾燥と高温乾燥による乾燥特性の解明

①高周波蒸気複合乾燥を行ったスギ平角材の仕上げ後から養生3か月後の寸法の平均収縮率は、幅方向0.32%、厚さ方向0.30%、長さ方向0.005%であり、高温乾燥との有意差はなかった。養生後の含水率が高い試験材ほど収縮量は大きくなる傾向にあり、含水率15%付近では収縮がほとんどみられず、それ以下の含水率では逆に吸湿による膨張がみられた。

②乾燥方法別の養生後の EFR 平均±標準偏差は、高周波蒸気複合乾燥  $6.5 \pm 1.03 \text{ kN/mm}^2$ 、高温乾燥  $6.3 \pm 0.99 \text{ kN/mm}^2$  と高温乾燥がやや低かったが有意差はなく、仕上げ後と養生3か月後の EFR の比較においても差はなかった。

③今回の高周波蒸気複合乾燥スケジュールでは、乾燥前含水率が100%以下の試験材は、1本を除いてすべて含水率15%以下となったが、全体に占める SD15 の割合は60%にとどまり、一層の乾燥歩留まり向上を図るためには、乾燥期間の延長や初期含水率の高い材の除外が必要と考えられた。

④高周波木材水分計とマイクロ波含水率計で測定した時期別の平均含水率は、乾燥方法に関わらず、乾燥後は高周波木材水分計がマイクロ波含水率計より低く、仕上げ後は逆に高周波木材水分計の値が高くなり、養生期間中にその差は小さくなる傾向がみられた。

⑤材内部の含水率分布は、乾燥方法を問わず平均含水率20%を超える材は、いずれも材中心が高い凸型を示した一方、高周波蒸気複合乾燥は高温乾燥と比較して材中心と表層間の差が小さく、特に含水率10%以下では材中心の含水率が表層よりも低い傾向がみられた。

⑥全乾法と含水率計により測定した含水率の関係について、マイクロ波含水率計は含水率10~30%

の範囲において全乾法含水率と強い相関があったのに対して、高周波木材水分計はややバラツキが大きく、マイクロ波含水率計と比較して相関が低かった。

⑦仕上げ後3か月経過した材の曲がりを区分した結果、製材 JAS の目視等級区分構造用製材の規格における甲種構造材（甲種Ⅱ）の基準で1級（0.1%以下）となる最大矢高4 mm 以下が94%を占め、2級（0.2%以下）5%、規格外（0.2%超）1%とほとんどが1級に格付けされた。

⑧乾燥方法別の心材色の明度L\*の平均±標準偏差は、高周波蒸気複合乾燥62.4 ± 3.5、高温乾燥58.8 ± 3.2と高周波蒸気複合乾燥材の心材色が1%水準で有意に高かった。

⑨材面割れは、1本あたりの割れ本数および割れ長さ合計の平均が、高周波蒸気複合乾燥1.7本、55cm、高温乾燥3.4本、98cmとなり、高周波蒸気複合乾燥の割れ発生が少なかった。

⑩内部割れは、各乾燥方法ともに両木口から10cm 位置で最も多く発生しており、高温乾燥でより発生が多くみられた。

⑪以上のことから、高周波蒸気複合乾燥によるスギ平角材の乾燥は、高温乾燥と比較して割れの少ない高品質材を生産できることが示唆された。

## 2) 高周波蒸気複合乾燥による促進乾燥技術の開発

①高温セット後に3か月天然乾燥した材に対して、高周波促進乾燥2日間と中温促進乾燥7日間を組み合わせたスケジュールで乾燥した結果、含水率20%以下に乾燥した材の割合がそれぞれ全体の25%と75%であった。高周波促進乾燥の乾燥歩留まりを上げるためには、乾燥期間の延長と合わせて、高周波出力や発振インターバル条件の検討が必要と考えられた。

②材内部の含水率分布は、含水率20%以下では高周波促進乾燥材の表層と中心部の間に含水率差がなかったのに対して、中温促進乾燥材の中心部は表層よりも高く、含水率に傾斜がみられた。

③含水率計含水率は、高周波木材水分計とマイクロ波含水率計ともに含水率が高いほどばらつきが大きくなり、またマイクロ波含水率計の方が全乾法との相関が高かった。

④乾燥方法別の心材色の明度L\*の平均±標準偏差は、高周波促進乾燥62.8 ± 4.7、中温促進乾燥63.4 ± 4.5と両者の間に有意差はなかった。

⑤材面割れは、高周波促進乾燥と中温促進乾燥ともに1本あたりの平均割れ本数が1.1本であり、割れはほとんど発生していなかった。

⑥内部割れは、高周波促進乾燥では全く確認されず、中温促進乾燥では両木口から10cm 位置以外には発生していなかった。

⑦以上のことから、高温セット処理と天然乾燥3か月に高周波促進乾燥を組み合わせることで、割れが少なく心材色も中温促進乾燥と遜色ない高品質な乾燥材を生産できることが示唆された。

## 謝辞

高周波促進乾燥試験では、大分県立日田林工高等学校林業科の江田雅之先生に高周波蒸気複合乾燥機の使用等において多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 山本泰司：木材工業56(11), 519-521(平成12年)
- 2) 豆田俊治：大分県農林水産研究指導センター林業試験場年報No.53, 22-23(平成22年)