高温セット法で乾燥したスギおよびヒノキ 心持ち柱材内のドラインゲットの分布†

徳本 守彦* 帆 莉 謙 ** 武田 孝志*
安江 恒*** 吉田 孝久****

Distributions of Drying Set in Sugi and Hinoki Boxed-Heart Square Timbers Dried by the High-Temperature Setting Method

by

Morihiko TOKUMOTO*, Kenichi HOKARI**, Takashi TAKEDA*,

Koh YASUE*** and Takahisa YOSHIDA****

The distributions of drying set in Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) boxed-heart timbers without back-splitting dried by the high-temperature setting method (HTS method) are reported. The lengths of slices cut from dried timber were measured before and after recovery treatments (moistening or immersion in boiling water). By moisture and heat treatment, the dimension of each slice is restored to its original one. Therefore, the differences in lengths of slices between before and after treatment denote recovered set. The residual stresses in boxed-heart timber dried by the HTS method were also measured by a modified slicing technique with putting in a stainless pin ($\phi = 0.5\text{mm}$).

Main results are shown below.

- (1) Remarkable tension set (about 2.1%) developed in shells (slices No.1 and 10).
- (2) Hygro-recovery of drying set was observed only in the surface slices No.1 and 10 and their values were about 0.6 ~ 0.8% (28 ~ 38% of total set).
- (3) Hygrothermal recovery of drying set was observed in most of slices. The set recovery in slice No.1 and 10 were big (about 1.3 ~ 1.5%), which is equivalent to 62 ~ 72% of total set.
- (4) Boxed-heart square timbers without back-splitting dried by the HTS method were severely casehardened, that is, the shell of timber is stressed in compression and the core in tension.

Key words: Boxed-heart timber without back-splitting, Tension set, Hygro-recovery, Hygrothermal recovery, Casehardening

1 緒 言

最近、乾燥初期から高温低湿状態を保ち、材面割れの抑制と乾燥時間の短縮を狙った「高温セット法」を用いた乾燥スケジュールが用いられるようになった^{1), 2), 3)}。この乾燥法の特徴は、いきなり高温低湿条件を与えること、すなわち一気に「高温セット処理」をほどこすことにある。蒸煮処理後に高温低湿条件にさらされた柱材の表層部は、水分と熱によって軟化していると思われ、表面割れを生ずることなく、速やかにかつ顕著にテンションセットされると推定される。これがその後の柱材の乾燥挙動に決定的な影響を与えようと考えられる。

この高温セット処理による割れ抑制効果は顕著で、いったん発生した表面割れも含水率の低下にともなって閉塞することが観察される。また、高温セット処理時間が長すぎたり、高温セット処理後の高温乾燥条件を乾燥末期まで続けると、内部割れが目立って発生することも明らかになった⁴⁾。

これらの結果は、無背割り心持ち柱材に対して高温セット処理を行うとき、明らかな応力の逆転が生じ、表層部は圧縮応力を、一方内層部は引張応力をうけながら乾燥が進行することを示す。したがって、応力が逆転した時点から表面割れの危険性はきわめて小さく、また、いったん発生した表面割れも閉塞していくことになる。一方、内層部は引張応力をうけることによって内部割れの発生を招きかねない。

以上のように、無背割り心持ち柱材に有効な高温セット法の要点は、初期に高温低湿条件にさらされた柱材表層に形成されるテンションセット層にある。これが伏線となつて、心持ち柱材では起こりにくいとされてきた⁵⁾ 応力逆転が起こり、新たな問題として内部割れが現れた。

高温セット法は無背割り柱材の乾燥方法として大きな可能性を予感させるが、高温セット処理の適正条件の

† 原稿受理 平成 15 年 6 月 30 日 Received June. 30, 2003

* 正 会 員 信州大学農学部森林科学科 〒399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村, Dept. Forest Sci., Fac. of Agr., Shinshu Univ., Kamiina-gun, Nagano, 399-4598

** 住友林業(株) 〒163-0538 東京都新宿区西新宿, Sumitomo Forestry Co., Ltd., Shinjuku-ku, Tokyo, 163-0538

*** 信州大学農学部森林科学科 〒399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村, Dept. Forest Sci., Fac. of Agr., Shinshu Univ., Kamiina-gun, Nagano, 399-4598

**** 長野県林業総合センター 〒399-0711 塩尻市片丘, Nagano Pref. Forestry Res. Center, Kataoka, Shiojiri, 399-0711

決定や内部割れの抑制など解決すべき問題も明らかになった。

このような背景のもと、本論文では、高温セット法を用いて乾燥した、典型的な心持ち柱材を用いて、表層から内部に及ぶドライイングセットの分布を確認することを目的とした。

すでに、木材のドライイングセットは、それが発生した条件下におかれるとき、ほぼ復元することが示されている。⁶⁾従って、高温セット法で乾燥した柱材から切り出したスライス試片を煮沸処理するならば、ほぼ生材時寸法に戻ることが予想される。また、ドライイングセットの水分回復性および湿熱回復性から、柱材内に発生したドライイングセットを2つの成分に分けることができると考えた。

2 実験方法

2・1 試験体

高温セット法を用いて乾燥した長野県根羽村産スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) および長野県木曽産ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) の心持ち柱材 (生材寸法: 13.2 × 13.2 × 300cm) を約半年間倉庫で放置した後供試した。

スギの場合、初期蒸煮後、高温低湿 (乾球温度 120℃, 湿球温度 90℃) 条件で、24 時間の高温セット処理を施し、さらに高温乾燥 (乾球温度 110℃, 湿球温度 90℃ 48 時間) を行った。ヒノキの場合、同じ条件で高温セット処理した後に乾燥室から取り出した。その後、約半年間にわたって倉庫内に放置した試験体を用いたので、ヒノキの場合は高温セット処理後に天然乾燥を行ったことになる。両樹種ともにそれぞれ1試験体を選び、表面割れの少ない部分から長さ約 70cm の部分を切り出して供試した。

2・2 ドライイングセットの測定

長さ約 70cm の試験体の中央部から、約 12mm 厚さのセクションを切り出し、両端を約 30mm ずつ除去した中央部の 60mm の部分をドライイングセット測定用に供した

(Fig. 1)。

こうして得たセクションから、Fig. 1 に示すマーキングにしたがって、約 2.5mm 厚さのスライス試片を 10 枚切

Fig. 1. Drying set test section showing lay out of slices.

Fig. 2. Stress test block showing marking on the cross section. Strain release slice test section is indicated with arrow.

り出して、Fig. 3 に示す相対湿度スケジュールにしたがって、ドライイングセットの測定を行った。測定手順は以下のとおりで、吸水および煮沸処理以外は 20℃ 一定の恒温恒湿器内で行った。

(1) RH43% の基準状態で十分時間をかけて調湿し (状態 d1), その後ゆるやかに飽湿状態 (w1) まで吸湿させた。

(2) 再び RH43% まで徐々に乾燥し、十分に調湿し (d2), その後ゆるやかに飽湿状態 (w2) まで吸湿させた。

(3) 減圧吸水処理を施した後、30 分間煮沸し、冷却後の飽水状態の試片長さ (これを収縮率を算出する基準とする) を測定した。

(4) RH43% まで徐々に乾燥し、十分な時間調湿した (d3)。

(5) 最後にゆるやかに飽湿状態 (w3) まで吸湿させた。

このような処理過程において、吸湿-脱湿を 2 回繰り返したのち、さらに、3 回目の吸湿を行ったが、1 回目、2 回目、そして 3 回目の吸湿過程においては、恒温恒湿器を用いて段階的に相対湿度を変えながらスライス試片の寸法変化を測定した。

スライス試片の寸法測定は、デジタルダイヤルゲージ (精度 1/1000mm) 付きのマイクロメーターを用いて、その測定端子をスライス試片の両端部に押し当てることによって測定した。

以上の測定から、次式に従ってドライイングセット量を計算した。

$$\text{水分回復性セット} = \alpha_2 - \alpha_1$$

$$\text{湿熱回復性セット} = \alpha_3 - \alpha_2$$

ここで、 α_1 , α_2 , α_3 は煮沸処理後の室温における飽水状態の寸法を基準として求めた処理前 (状態 d1), 飽湿処理後 (状態 d2), 煮沸処理後 (状態 d3) のいずれも含水率 12% 状態における収縮率を表す。

2・3 残留応力の測定

ドライイングセット測定用のセクションに隣接する表面割れの無いところを選んで、Fig. 2 に示すような、およ

Fig. 3. Measuring procedure of drying set in slices cut from boxed-heart square timber.

そ 50mm 厚さの測定用ブロックを切り出して、残留応力の測定を行った。残留応力は板材に対する従来のスライス法を正角材に応用した、いわゆる「ピン打ちスライス法」を用いて測定した。長さ（繊維方向）を 50mm 程度まで小さくしても、試験体の表層解放ひずみは大きく変わらないことから、切り出した約 50mm 厚さの測定用ブロックから柱材の内部応力を推定できる。

Fig. 2 に示すように、木口面中央部に幅約 60mm の応力測定部を設定し、まず両表面から内側に 2 mm 入ったところに基準線を描き、測定線 1 および 8 とした。次に、この両表層に設定した測定線の間を 7 等分するように 6 本の測定線を描き、これらの測定線に 2 から 7 まで番号付けを行った。

このように設定した 1～8 の測定線上に、ピン間距離が約 60mm となるように、径約 0.5mm のステンレスピン（昆虫標本用）をその先端がわずかに浮き出るように打ち込んで、ひずみ測定の基準点とした。

このようにピンを打ち込んだ約 50mm 厚さの応力測定用ブロックを測定顕微鏡（Nikon 製、精度 1/1000mm）の移動測定台上に静置して、スライス切断前のピン間距離を測定した。次に、測定面を含む約 12mm 厚さのセクション（図の矢印の部分）を切り出した後、ステンレスピンが中心になるように、横切り盤を用いて余分のところを取り除きながら、厚さ約 4mm のスライス試片 8 枚を順次切り出した。

このように切り出したスライス試片は、ときに曲がり示すので、ただちに丸鋸で刻んだ溝からなる試片ホルダーに挿入した状態で、スライス切断後のピン間距離を 8 本まとめて測定した。切断後からピン間距離の測定までそれぞれのスライスで時間差があり、最初に切断したスライスでは約 15 分を要した。

このように測定したスライス切断前後のピン間距離から、次式にしたがって解放ひずみ (%) を求めた。

$$\text{解放ひずみ} = \frac{\text{切断後長さ} - \text{切断前長さ}}{\text{切断前長さ}} \times 100 (\%)$$

得られた値の正負に応じて、それぞれのスライスが柱材内で圧縮応力側あるいは引張応力側にあったことを示す。

2・4 含水率の測定

ドラインゲットの測定セクションに隣接する部分から切り出した厚さ約 12mm のセクションを含水率測定用として、セッティング量測定のスライス試片に対応するように注意しながら同一寸法のものを 10 枚切り出し、含水率測定に供試した。Fig. 3 に示した手順で処理した後、全乾重量を求めて各状態における含水率を算出した。

3 結果と考察

3・1 処理に伴う平衡含水率の変化

RH43% 条件下で十分調湿した状態 (d1) における厚さ約 2.5mm のスライス試片の含水率を Fig. 4 に示した。スライス試片は十分に薄いことから平衡に達していると思われる。スギおよびヒノキともに表層でやや低く、中心に向かって徐々に高くなっている。高温セッティング処理、さらにはこれに続く高温乾燥によって表層部の平衡含水

Fig. 4. Changes of equilibrium moisture content of slices by moistening and immersion in boiling water. See Fig. 3 for explanation of symbols.

率が低下したものと判断できる。

次に、処理に伴う変化を見ると、d1 から d2 へと平衡含水率曲線がやや平坦化していることがわかる。さらに煮沸処理によって、すなわち d2 から d3 へと、表層と内層の含水率の差が小さくなった。

d1 と d3 の曲線を比較すると、表層付近の平衡含水率が飽湿処理、さらには煮沸処理によって少し増加し、中心部と同様の値を示すように変化したことがわかる。

次に飽湿状態における表層から内層まで各スライス試片の平衡含水率の様子を見ると、乾燥状態とは異なる傾向が認められた。すなわち、上に凸の傾向がより顕著に認められるとともに、表層スライス 1 あるいは 10 の含水率が一つ内側のスライス 2 あるいは 9 よりも明らかに高いことである。いうならば、上に凸の曲線が表層部分で折れた形を呈している。

また、飽湿状態における含水率分布も吸湿処理、さらには煮沸処理によって次第に平坦化する傾向が認められる。

以上のとおり、高温セッティング処理、これに続く高温乾燥によって、とくに表層部の平衡含水率が明らかな変化を示し、この変化の様子が RH43% の乾燥状態と飽湿状態で異なることが示された。木材の平衡含水率を決める第一要因は吸湿に有効に寄与する吸着点の数、端的にいえば有効な水酸基の数であると考えられていることから判断すると、高温で処理されることによって、とくに表層部における吸着点数が減少したことが示唆される。このように、一時的に減少した吸着点が続く吸湿処理、さらには煮沸処理によってその活性を回復した可能性が考えられる。

ただし、ここでの含水率の算出は最後に求めた全乾重量に基づいているため、煮沸処理による抽出物の溶出、とくに部位による溶出量が異なっていることも考慮しなければならないので、さらに検討を必要とする。

また、飽水処理や煮沸処理による抽出成分の除去によって、スライス試片の全乾重量が小さめになり、これに起因して求めた含水率が全体的に高めに評価された可能性が残る。

3・2 スライス試片の寸法変化

柱材から切り出したスライス試片に発生したドライイングセットを測定するために、Fig. 3 に示す手順にしたがって、スライス試片を処理した。木材のドライイングセットは、応力を受けない状態で乾燥した場合の木材本来の収縮率と何らかの応力の作用下で乾燥した場合の収縮率の差として定義される。

乾燥応力によって発生したドライイングセットの吸湿による回復⁷⁾さらには圧縮大変形に関するドライイングセットの発生と回復に関する検討⁶⁾によって、ドライイングセットを受けた木材は、それが発生した条件下におかれるならば、再び、ほぼ元の形に復元することが示されている。従って、煮沸処理後のスライス試片の寸法は、乾燥前の生材時の寸法を復元している、あるいはそれに近いと考えられる。

Fig. 5 はヒノキおよびスギ柱材の表層スライス No. 10 について、1 回目、2 回目、そして 3 回目の吸湿過程における寸法変化曲線を示している。寸法変化は煮沸処理後の飽水寸法に基づく収縮率で表したので、膨潤とともに減少して 0 に漸近する。

さて、Fig. 5 を眺めると、3 回の吸湿過程におけるそれぞれの寸法変化曲線が明らかに異なっている。まず、3

Fig. 5. Dimensional changes of slice No. 10 cut from boxed-heart square timber during first, second and third adsorption process.

回目の吸湿過程の曲線 3 は、煮沸処理後に RH43% まで乾燥したスライス試片が示す膨潤過程における寸法変化を表し、木材本来の標準曲線と見なすことができる。

次に 1 回目の吸湿過程の曲線 1 を見ると、これは曲線 3 から大きく離れて位置し、高温セット処理によって、顕著なテンションセットを生じていることがうかがえる。この吸湿過程において、含水率の増加にともなってセットが水分回復するはずである⁷⁾

そして、2 回目の吸湿過程の寸法変化曲線 2 は、水分回復処理を行った後のもので、曲線 2 と 1 の差は、高温セット法で乾燥した柱材の表層スライスのテンションセットの水分回復経過を表すものにほかならない。

さらに、曲線 2 と 3 の差は煮沸処理によって、さらにテンションセットが大きく熱回復したことを示す。

以上のことから、高温セット法で乾燥したスギ、ヒノキの心持ち柱材の表層部には、顕著なテンションセットが生じていること、このテンションセットは 2 つの成分、すなわち水分回復性のものと湿熱回復性のものからなることが明らかである。

3・3 柱材内に発生したドライイングセット

Fig. 5 はスライス No. 10 の場合を例示しているが、その他のすべてのスライスについて描いた吸湿過程の寸法変化曲線 1～3 から、基準とする含水率 12% における収縮率を求めて、柱材内の各部位に対して示すと Fig. 6 のとおりである。

収縮率 α_3 は、応力を受けない状態で乾燥した場合の木材本来の収縮率にほぼ相当するものと考えられる。これは中心部が小さく、表層に向かって増加する傾向を示す。収縮率の分布は必ずしも左右対象の曲線を示していない。心持ち柱材から切り出したスライス試片の収縮方向は、中心部では放射方向に、表層では接線方向に近いが、このような対応は髓の位置によって大きく変わる。ここで用いた試験体では、中心部と表層の収縮率差は約 1% 程度であった。

このように、収縮異方性に由来して異なる収縮ポテンシャルを持った無背割り心持ち柱材を高温セット法で乾燥すると、柱材内の各スライスの収縮率は、曲線 α_1 が示すように上に凸の山型の分布に転じた。これは分布曲線 α_3 を反転した形となって、表層部が顕著なテンションセットをうけていることを示す。

次に、吸湿処理後の収縮率曲線 α_2 を見ると、吸湿処理によって回復するセットは表層スライス No. 1 と 10 に限られ、その値は 0.5% 程度であった。したがって、高温セット法で乾燥した柱材に生じた顕著なドライイングセットは、主に煮沸によって回復する成分からなることがわかる。

Fig. 6 から、水分回復性セット ($= \alpha_2 - \alpha_1$)、湿熱回復性セット ($= \alpha_3 - \alpha_2$)、および全セット量 ($\alpha_3 - \alpha_1$) の分布を示すと Fig. 7 のとおりである。また、表層スライス No. 1 と No. 10 の収縮率およびテンションセットをまとめて Table I に示した。

Fig. 7 と Table I から明らかなように、スギ、ヒノキ

Fig. 6. Changes of shrinkage of slices cut from boxed-heart square timber. Shrinkage are based on dimensions at the water-saturated state after immersion in boiling water.

ともに、表層部に平均約 2.1% に及ぶ顕著なテンションセットが生じている。飽湿処理によって回復するセットは、表層スライス No. 1 と No. 10 に限られており、その他の 2 ～ 9 層においてはほとんど回復の傾向を示さなかった。表層スライスに認められた水分回復性セット量は 0.6 ～ 0.8% を示し、表層に発生した全セットの 25% ～ 35% に相当した。一方、湿熱回復性のセットは、ほぼすべてのス

Fig. 7. Distributions of drying set in boxed-heart square timbers dried by the high temperature setting method.

ライス層に発生しているが、とくに表層部で顕著で 1.3 ～ 1.5% に達し、全セット量の 60 ～ 70% を占めた。

3・4 柱材内の残留応力

ピン打ちスライス法で測定した残留応力の分布を Fig. 8 に示した。両樹種に共通して、表層付近の狭い範囲は強い圧縮応力状態にあり、これに対して、内層は引張応力をうけていることを示す。したがって、板材の場合と同じく、心持ち柱材においても表面硬化を起こしているとい

Table I. Shrinkage and tension set of slices No.1 and 10 cut from boxed-heart square lumber dried by high temperature setting method.

	Slice number	Shrinkage			Tension set		
		Before treatment	After moistening	After boiling	Hygro-recovery	Hygrothermal recovery	Total recovered set
		α_1 (%)	α_2 (%)	α_3 (%)	$\alpha_2 - \alpha_1$ (%)	$\alpha_3 - \alpha_2$ (%)	$\alpha_3 - \alpha_1$ (%)
Sugi	1	1.66	2.34	3.92	0.68	1.58	2.26
	10	1.62	2.03	3.46	0.41	1.43	1.84
Hinoki	1	1.41	2.19	3.87	0.78	1.68	2.46
	10	1.19	1.94	2.91	0.75	0.97	1.72

Fig. 8. Residual stresses in boxed-heart square timber dried by the high-temperature setting method.

えるであろう。この様な応力分布の原因は、Fig. 7に明らかにした柱材内のドライグセットの分布、とくに表層に顕著に形成されたテンションセット層に由来することはいうまでもない。

高温セット法で乾燥したカラマツ心持ち柱材の材面応力をひずみゲージ法で測定した結果によると、乾燥後4ヶ月では依然として大きな圧縮応力が存在したが、さらに15ヶ月経過すると材面応力は小さな引張や圧縮が測定され、これは長期の温湿度の繰り返し変動によって緩和したのではないかと考えられている。⁸⁾この結果が示すように、応力の存在下で乾湿繰り返しをうけることによって、

セットの上にセットが重ね合わされて、実大材の表層応力は長期的には緩和していくと考えられる。

しかし、Fig. 7に示すように高温セット法で乾燥した柱材内に存在するセットの差は大きい。たとえ長期間にわたるといっても、常温付近の乾湿繰り返しによって、実大材内の応力分布が大きく変わるものかどうか、今後の検討が必要であろう。

4 おわりに

高温セット法を用いて乾燥したスギとヒノキの無背割り心持ち柱材内に発生したドライグセットの分布を明らかにした。得られた結果は次のとおりである。

(1) スギ、ヒノキともに、表層部に約2.1%に及ぶ顕著なテンションセットが確認された。

(2) 飽湿処理によって回復するセットは、表層スライスNo. 1とNo. 10に限られており、その他の2～9層においてはほとんど認められなかった。表層スライスに認められた水分回復性セットは、全セット量の28～38%に相当した。

(3) 煮沸処理による回復はすべてのスライス層におよび、とくに表層部で大きく現れた。表層の湿熱回復量は1.3～1.5%に達し、全セット量の62～72%を占めた。

(4) ピン打ちスライス法によって残留応力を測定した結果、表層部に強い圧縮応力が存在していることが示された。

以上の結果から、高温セット法で乾燥した心持ち柱材は、主に熱固定された表層部のテンションセットによって表面硬化をおこしていると考えられる。

参考文献

- 1) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 藤本登留, 木材工業, **55**, 357 (2000).
- 2) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 長野県林業総合センター研究報告, **14**, 3 (2000).
- 3) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 第51回日本木材学会大会研究発表要旨, 116 (2001).
- 4) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 武田孝志, 徳本守彦, 印出 晃, 材料, **53**, 364 (2004).
- 5) 寺沢 真, “木材乾燥のすべて”, p.574 (1990) 海青社.
- 6) 飯田生穂, 則元 京, 今村祐嗣, 木材学会誌, **30**, 354 (1984).
- 7) 徳本守彦, 木材学会誌, **5**, 185 (1989).
- 8) 藤本登留, 吉田孝久, 第49回日本木材学会大会研究発表要旨, 131 (1999).