高温セット法で乾燥したスギ正角材の内部応力 — 屋内保管と屋外保管の相違 —[†]

徳 本 守 彦^{*} 北 原 誠^{**} 武 田 孝 志^{*}
細 尾 佳 宏^{***} 吉 田 孝 久^{****}

Internal Stress in Sugi Square Timber Dried by the High Temperature Setting Method — Differences between Indoor and Outdoor Storage —

by

Morihiko TOKUMOTO^{*}, Makoto KITAHARA^{**}, Takashi TAKEDA^{*},
Yoshihiro HOSOO^{***} and Takahisa YOSHIDA^{****}

The high-temperature setting method, which enables rapid kiln-drying for square timber with pith, has spread in many saw mills in Japan. It has been supposed that obvious drying tension set, which is formed at the shell of timber without back-splitting, results in generation of sufficient compressive stress at the shell, and reducing surface checks significantly. In the paper, we investigated the differences in internal stress between indoor and outdoor storage with sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) square timber kiln-dried by the method. The compressive stress was expressed as released strain measured by the slicing technique. Main results were shown below.

1. Strong compressive stress was observed at the shell of the timber which was stored indoor for five years.
2. On the other hand, the compressive stress obviously decreased at the shell of the timber which was stacked outdoor and covered with a corrugated panel for six years.
3. The compressive stress might be reduced by loss of tension set which was caused by moisture variation during long outdoor storage.
4. The hygro-thermal recoverable component of set seemed to be melted, which had been assumed to be recovered only by boiling.

From the above results, the indoor storage had little effect on the compressive stress at the shell of timber kiln-dried by the method, but the outdoor storage decreased the surface stress. Further research is needed for explanation of the time-dependent change for practical uses. For practical outdoor uses, the risk of occurrence of surface checks might increase as time passes.

Key words : Sugi, Square timber with pith, Slicing technique, Released strain, Compression stress, Tension set

1 緒 言

心持ち正角材を無背割りで乾燥することを可能とした高温セット法^{1), 2)}が提案されて以来かなりの年月が経過し、現在では実用化が進められている。^{3)~7)}高温セット法で乾燥した正角材の表層には顕著な引張セット層が形成され、これによって、表層に強い圧縮応力が存在し材面割れの危険は小さいと考えられてきた。^{8), 9)}高温セット法の要である表層の圧縮応力が長期間にわたって健在であるかどうかは、高温セット法の今後にとってきわめて重要な問題である。

ここでは、高温セット法で乾燥した正角材の内部応力のその後を検討するために、乾燥後5~6年間、屋内で保管された正角材と屋外で波板の覆いのもとで積み

れていた屋外保管の正角材を供試し、内部応力分布を比較した。内部応力の指標として、スライス法による解放ひずみを用いた。

2 実 験 方 法

2・1 供試材

高温セット法で乾燥後約5年間にわたって屋内(信州大学農学部木材加工実験室)で保管された無背割り心持ちスギ正角材6体と乾燥後約6年間にわたって屋外(長野県林業総合センター)において波板で覆った積み状態で保管された無背割り心持ちスギ正角材10体を供試した。長さは1500mm~2000mm、断面寸法は屋内保管材約126mm、屋外保管材約130mmであった。

スギ正角材の乾燥に用いた高温セット法の乾燥スケ

[†] 原稿受理 平成21年7月10日 Received July 10, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 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. of Forest Sci., Shinshu Univ., Kamiina-gun, Nagano, 399-4598

^{**} 長野県森林組合連合会 〒380-0935 長野市中御所, Nagano Pref. Federation of Forest Owner's Cooperative Association, Nakagosyo, Nagano, 380-0935

^{***} 信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点 〒399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村, International Young Researchers Empowerment Center, 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 Prefect. Forestry Res. Center, Kataoka, Shiojiri, 399-0711

ジュールを Table 1 に示した。屋内および屋外保管材ともに、高温セット処理 (High-temperature setting method: HTS) 後に引き続き高温乾燥するスケジュール (HTS + high-temp. drying) および中温乾燥するスケジュール (HTS + medium-temp. drying) の 2 通りで乾燥を行った。屋内と屋外の保管材に対し高温セット処理温度、以後の高温乾燥と中温乾燥の設定温度は同一であったが、高温セット処理時間や以後の乾燥時間が異なっている。用いた試験体数は、屋外保管材では 2 つのスケジュールに対して各 5 体、屋内保管材では各 3 体であった。

2・2 内部応力の測定

2・2・1 マーキング 内部応力測定用として繊維方向約 50mm のブロックを切り出し、その木口面に、Fig. 1 に示すように、両表層から約 2mm 内側に基準線 1 と 8 を描き、その間を 7 等分するように基準線 2～7 をマーキングした。さらに、表層付近の応力勾配が大きいことを考慮し、1 と 2、7 と 8 の中間に 1.5 および 7.5 の基準線を加えた。各基準線の中央部に 40mm 間隔で $\phi = 0.5\text{mm}$ のステンレスピンを少し頭が浮きでるように打ち込んだ。

Table 1 Kiln-drying schedules and storing.

Storing	Kiln-drying method	Steam-ing	High-Temp. Sett-ing	Temp. in Subsequent kiln-drying
Out-door	HTS+ high-temp. drying	90℃ at 6h	120℃ / 90℃ 18h	110℃ / 90℃ 96h
	HTS+ medium-temp. drying			90℃/60℃ 144h
In-door	HTS+ high-temp. drying		120℃ / 90℃ 24h	110℃ / 90℃ 72h
	HTS+ medium-temp. drying			90℃/60℃ 168h

Note: "h" denotes hour. Two temperature represents dry-bulb and wet-bulb temperature.

Fig. 1 Marking of reference lines and driving the stainless pins.

2・2・2 内部応力の測定 木口面に打ち込んだステンレスピン間の距離 (L_0 , 約 40mm) を測定顕微鏡 (1/1000mm 精度) で測定した。その後、測定面側から切り取った繊維方向に約 15mm のセクションからマーキングに従って厚さ約 4mm のスライス試片を 10 枚切り出した。この際、マーキングに従って、ピンがスライス試片の中心にくるように注意した。直ちに 10 枚のスライスをホルダーに納めた状態で切断後のピン間距離 (L_1) を求めた。解放ひずみ (%) は次の式から求めた。

$$\text{解放ひずみ} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 (\%)$$

得られた値が正のとき圧縮応力、負のとき引張応力と判定した。スライス試片のホルダーは厚手の合板に幅約 4mm の 10 列の切り込みを入れたもので、スライス後の応力解放に伴う試片の曲がりを抑えるために用いた。

2・3 セット量の測定

スライス法で切り出した厚さ約 4mm の 1 試験体当たり 10 枚のスライスをを用いて、処理前、水中浸漬後および煮沸処理後の 3 状態における気乾および全乾状態におけるピン間距離およびスライス試験片の重量を測定した。ここでは、煮沸処理後の水中浸漬状態のピン間距離は、乾燥前の生材状態に近いと想定し、この値を基準とする気乾収縮率および全乾収縮率を求めた。

これら 3 状態の収縮率 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) の差からセット量を求めた。煮沸処理後と処理前の収縮率の差 ($\alpha_3 - \alpha_1$) からトータルのセット量、水中浸漬後と処理前の収縮率の差 ($\alpha_2 - \alpha_1$) から水分回復性のセット量 (moisture-recoverable set)、煮沸処理後と水中浸漬後の収縮率の差 ($\alpha_3 - \alpha_2$) から湿熱回復性のセット量 (hygrothermal-recoverable set) を求めた。

全乾処理に際して、5 枚単位でスライス試験片をホルダーに納め、全乾状態に達した時点でホルダーごとポリエチレン袋に封入し、デシケーター中で約 15 分冷却した後、封入状態でピン間距離を測定した。なお、全乾処理は、60℃で 3 時間乾燥した後、103℃で約 7 時間行った。水中浸漬処理は減圧下で約 12 時間、煮沸処理は沸騰後約 30 分間行った。

2・4 含水率の測定

解放ひずみを測定したブロックに隣接して、繊維方向約 15mm のセクションを切り出し、応力測定と同様のマーキングを施した。このセクションから、厚さ約 4mm のスライスを切り出し、全乾法によって応力測定時の含水率を求めた。

また、セット量の測定に用いた 1 試験体当たり 10 枚のスライスについて、処理前、水中浸漬後、煮沸処理後における気乾状態の含水率を同一スライス試片の全乾重量に基づいて求めた。

3 結果と考察

3・1 含水率分布

高温セット法で乾燥後約 5 年間にわたって、屋内で保管された心持ち直角材の含水率分布を Fig. 2 に示した。同図の左は [高温セット + 中温乾燥] 材、右は [高温

Fig. 2 Distribution of moisture content in Sugi square timber stored in doors for about 5 years after kiln-drying by the High-Temperature Setting method.

セット + 高温乾燥] 材の含水率を示す。ともに内層部で高く、表層に向かって減少する山形ないしは台形の含水率分布を示す。表層の含水率（スライス1, 8の平均値）と内層の含水率（スライス3～6の平均値）の差は、3.3～3.5%であり、高温セット処理後の乾燥方法による相違は小さく、含水率分布の型はよく類似した。傾向として、[高温セット + 高温乾燥] 材は山形の分布を、[高温セット + 中温乾燥] 材の分布は台形ともいえるであろう。

いずれにしろ、乾燥後5～6年経過後でも正角材内外の含水率差が明らかである。表層付近の含水率が特に低くなっているが、これは高温セット処理や高温乾燥に認められる熱処理による平衡含水率の減少による。¹⁰⁾

次に、高温セット法で乾燥後、屋外において波板で覆った積み状態で保管した無背割りスギ正角材の含水率分布を Fig. 3 に示した。スライス表層を除く内層部の含水率分布は Fig. 2 とよく類似するが、表層の平均含水率だけ約1～2%ほど屋内保管材に比較して高くなっている。

高温セット法で乾燥した正角材の表層含水率は、Fig. 2 に示すように内層に比較し低い平衡含水率を示すことはよく知られている。また、いったん減少した平衡含水率が吸湿処理や煮沸処理によって正常材の値に向かって増加する（復元する）ことが示されている。^{8) 10)} 従って、屋

Fig. 3 Distribution of moisture content in Sugi square timber stored out of doors for about 6 years after kiln-drying by the High-Temperature Setting method.

内と屋外保管材の表層含水率の相違は、屋外保管材の表層が約6年間という長期にわたって、大気的气候変化や時には風雨にさらされることによって乾湿繰り返しを受け、平衡含水率が少し高くなったことによる。

なお、内層の含水率分布が屋内と屋外でよく類似することは、屋外においても表層のみが吸湿・脱湿に係わることを示唆する。また、熱処理を受けたことによって、表層付近の水分移動が抑制されている可能性も考えられる。¹¹⁾

3・2 内部応力分布

3・2・1 屋内保管の正角材 高温セット法で乾燥後約5年間にわたって屋内保管されていたスギ正角材について、スライス法で求めた解放ひずみ分布を Fig. 4 に示した。上図は[高温セット + 高温乾燥] 材、下図は[高温セット + 中温乾燥] 材の結果を示している。横軸のスライス No. は切り出したスライスの正角材内の位置を示し、No. 1 と No. 8 は表層（表面より約2mm 入った位置）に対応し、スライス No. 4 と No. 5 は中心部に対応する。縦軸の解放ひずみの値が正であるとき圧縮応力、負であるとき引張応力をうけていたことを示す。

さて Fig. 4 には各試験体の結果とそれらの平均値を合

Fig. 4 Distribution of released strain in Sugi square timber stored in doors for about 5 years after kiln-drying by High-Temperature Setting method.

わせ示しているが、高温セット処理に続く乾燥方法が異なっても、解放ひずみ分布の基本的パターンは共通し、表層に強い圧縮応力が存在する U 字型の応力分布を示した。乾燥直後のひずみ分布⁹⁾と比較すると、やや緩和していると推定されるものの大きな相違は認められなかった。従って、屋内で保管する限り、長期間にわたって表層は圧縮状態にあり、表面割れの危険は少ないことが確認できた。

なお、[高温セット + 中温乾燥] 材に比較し、[高温セット + 高温乾燥] 材の表層の解放ひずみは小さかった。この傾向はすでに認められている⁹⁾が、セット処理後に高温乾燥した場合の内部割れの発生と関係することが考えられる。

3・2・2 屋外保管の正角材 屋外で波板の覆いのもとで、約 6 年間棧積みされていたスギ正角材の解放ひずみ分布を Fig. 5 (上図: [高温セット + 高温乾燥] 材, 下図: [高温セット + 中温乾燥] 材) に示した。Fig. 4 で示した屋内保管材と異なり、表層の圧縮応力が明らかに減少している。ただし、表層を除くと、内部のひずみ

分布には屋内外の大きな相違は認められず、この傾向は含水率分布の場合と符合している。

おそらく、表層は圧縮応力をうけた状態で大気の高湿度や風雨にさらされ、長期にわたって乾湿繰り返しをうけたはずである。これによって、表層の引張セットが回復したか、あるいは新たなセットが重ねられて、見かけ上で引張セットが減少したことなどが考えられる。

Fig. 5 の表層スライス 1, 8 の解放ひずみは明らかに負の値を示すものもあった。ただし、これはスライス法特有の問題点でもあるが、スライス法で求めた負の値が必ずしも絶対的な引張応力を示すことにはならず、これが直ちに表面割れにつながるとは考えにくい。しかし、屋外の保管あるいは屋外での使用がさらに長期に及ぶならば、表面割れの危険が徐々に高まることを予想させる。

3・3 ドライングセットの分布

長期間にわたる屋内保管材では表層の圧縮応力が健在であったが、屋外保管材では、表層の圧縮応力の明らかな減少が認められた。おそらく、表層に形成された引張セット層が屋外での乾湿繰り返しによって減少したと予想される。この点を確認するために、正角材内のドライングセットの分布を検討した。

ドライングセットはそれが発生した水分・熱条件を与えることによって回復することが知られている。¹²⁾ スライス試片を煮沸処理することによって、乾燥前の生材状態に近い寸法まで回復すると考えられる。そこで、煮沸処理後の水中浸漬状態のピン間距離に基づく気乾および全乾状態における収縮率を、処理前、水中浸漬後、そして煮沸処理後の 3 状態において求め、これらの差からドライングセット量を算出した。

得られた結果を Fig. 6 (上図: 屋外保管材, 下図: 屋内保管材) に示した。ここでは [高温セット + 中温乾燥] 材について、気乾状態で求めたセットを各 3 体の平均値で示した。なお、ここでは示していないが、全乾状態で求めたセット量は、特に表層で顕著であるが、気乾状態に比較し大きめであった。

はじめにトータルのセット量の分布を見ると、屋内と屋外ともに全体的に引張セット側にあつて、中心部から表層に向かって増加し、スライス 1.5, 7.5 あるいはスライス 2, 7 の位置にピークを示した後、表層に向かって減少する傾向を示している。このピーク後の減少傾向が屋内外で異なり、屋内保管材に比較し屋外保管材で顕著である。表層スライスの引張セット (両表層の平均値) を比較すると屋内保管材 1.08%, 屋外保管材 0.34% であつて、明らかに屋外保管材で小さかった。従って、長期にわたる屋外保管によって、高温セット法で形成された表層の引張セットが明らかに減少することが示された。

高温セット法で乾燥した正角材内のセットは、2 つの成分、すなわち単なる水中浸漬によって回復する水分回復性のセット (moisture-recoverable set), そして煮沸後に初めて回復する湿熱回復性のセット (hygrothermal-recoverable set) からなる。⁸⁾ これら 2 成分のセットの分布を同じく Fig. 6 に示した。いま、中心部を除くスライ

Fig. 5 Distribution of released strain in Sugi square timber stored out of doors for about 6 years after kiln-drying by High-Temperature Setting method.

Fig. 6 Distribution of set in Sugi square timber stored out of doors and in doors for long times after kiln-drying by High-Temperature Setting method (HTS + medium temperature drying).

ス1～3あるいはスライス8～6の領域に注目し、屋内保管材のセットの2成分の分布を見ると、両者は対称的な傾向を示している。水分回復性セットは表層に向けて減少するのに対し、湿熱回復性セットは増加している。

一方の屋外保管材では、水分回復性のセットは屋内と同様に内部から表層に向けて減少しているのに対し、湿熱回復性のセットは内層から表層に向けて増加傾向を示すものの、スライス1.5, 7.5にピークを示した後、表層に向けて明らかに減少した。

屋内保管材と屋外保管材の表層の水分回復性セットは、それぞれ-0.33%と-0.23%であり、ほぼ等しく圧縮セット側にある。これに対して、湿熱回復性のセットは、屋

内保管材の1.41%に比較し、屋外保管材では0.57%と顕著に小さかった。

以上のことから、屋外保管材の表層の引張セットの減少は、主に表層の湿熱回復性のセットの減少によるものであると考えられる。一回の水浸漬では回復しない湿熱回復性のセットであっても、屋外での過酷な温湿度条件のもとでの長期間にわたる乾湿繰り返しによって徐々に回復したものと思われる。長期間の屋外保管による乾湿繰り返しを受けて、表層に圧縮セットが発生し、これが表層におけるトータルの引張セットを減少させる可能性も考えられるが、ここでの結果はこのような推定を裏付けるものではなかった。

既報における高温セット法で乾燥したスギ正角材内のドライグセットの分布を見ると、湿熱回復性セットは、ここでの結果と同様にV字型を示した⁸⁾しかし、水分回復性セットは表層に約1%の引張セットが存在するのみで、内層部ではほとんど存在せず、結果としてトータルのセットは外側に向かって増加し、表層で最大値を示す分布を示した。ここでの結果は、水分回復性セットの分布型が大きく異なり、結果としてトータルのセットの最大値が表層から少し入ったところに現れた。このように、水分回復性のセット分布が既報の結果と異なった理由は明らかではないが、屋内保管材、屋外保管材ともに乾燥後約5～6年経過したことに関係するのかもしれない。

4 結 言

本報告では、高温セット法で乾燥後5～6年間経過したスギ正角材の屋内保管材と屋外保管材の内部応力を比較検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 高温セット法で乾燥後、約5年間にわたって屋内で保管されたスギ正角材の表層に強い圧縮応力が健在であった。
- (2) 約6年間にわたって屋外で波板で覆った積み状態で保管したスギ正角材の表層の圧縮応力は明らかな減少を示した。
- (3) 屋外保管材表層の圧縮応力の減少は、表層の引張セットの減少に起因する。
- (4) 屋外保管材表層の引張セットの減少は、煮沸によってはじめて回復すると考えられた湿熱回復性セットの減少によると考えられる。

以上のことから、約5年間の屋内保管材では表面割れの危険性は小さい。一方、屋外保管材では、表層の引張セットの減少が明らかであるが、これが直ちに表面割れにつながるものとは思われない。従って、屋内における冷暖房の効いた実際の使用条件下でも、5～6年のスパンでは表面割れの危険性が高まるとは考えにくい。しかし、さらに長期にわたると、屋外では徐々に表面割れの危険性が高まると予想される。また、屋内での使用においても、長いスパンにわたって、表層の引張セットの緩和が、きわめてゆるやかながら、進行すると考えられる。今後、実際の使用条件と関連付けながら、より長いスパンにおけるセットや応力の推移を検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) T. Yoshida, T. Hashizume and N. Fujimoto, "High-temperature drying characteristics on boxed-heart square timber of Karamatsu and Sugi -Influence of high temperature conditions with low humidity on drying properties-, Mokuzaï Kogyo (Wood Industry), Vol.55, No.8, pp.357-362 (2000).
- 2) T. Yoshida, T. Hashizume, T. Takeda, T. Tokumoto and A. Inde, "Reduction of surface checks by the high-temperature setting method on kiln drying of Sugi boxed-heart timber without back-splitting", Journal of The Society of Materials Science, Japan, Vol.53, No.4, pp.364-369 (2004).
- 3) Y. Katagiri, N. Fujimoto, S. Mameda and H. Kondo, "Effect of the pre-treatment with high temperature low humidity on the qualities of the kiln dried Sugi boxed-heart square timbers", Mokuzaï Kogyo(Wood Industry), Vol.56, No.12, pp.617-620 (2001).
- 4) Y. Katagiri, N. Fujimoto and Y. Murase, "The effect of pre-treatment time in a high-temperature and low-humidity condition on the qualities of Sugi dried boxed-heart square timber", Mokuzaï Kogyo (Wood Industry), Vol.60, No.6, pp.262-266 (2005).
- 5) K. Aota, H. Shiroy, W. Kawadu and S. Tsushima, "The relationship between early steaming, the high temperature - low humidity processing time and material quality of Sugi boxed-heart square timber", Kyushu Journal of Forestry Research, No.60, pp.33-38 (2007).
- 6) T. Takeda, T. Yoshida, A. Inde, Y. Itoh, T. Hashizume and M. Tokumoto, "Bending strength and joint performance of kiln-dried Sugi boxed-heart timber by the high-temperature setting method", Mokuzaï Kogyo (Wood Industry), Vol.59, No.7, pp.302-308 (2004).
- 7) H. Tsuchihashi and A. Nakajima, "Relation between drying conditions and strength of square posts of karamatsu in high-temperature setting method", Journal of the Hokkaido Forest Products Research Institute Vol.19, No.3, pp.22-26 (2005).
- 8) M. Tokumoto, K. Hokari, T. Takeda, K. Yasue and T. Yoshida, "Distributions of drying set in Sugi and Hinoki boxed-heart square timbers dried by the high-temperature setting method", Journal of The Society of Materials Science, Japan, Vol.53, No.4, pp.370-375 (2004).
- 9) M. Tokumoto, T. Takeda and T. Yoshida, "Effect of subsequent kiln-schedule after the high-temperature setting treatment on internal stresses of Sugi boxed-heart timber without back-splittings", Journal of The Society of Materials Science, Japan, Vol.54, No.4, pp.365-370 (2005).
- 10) E. Obataya, S. Shibutani, K. Hanata and S. Doi, "Effects of high temperature kiln drying on the practical performances of Japanese cedar wood (*Cryptomeria japonica*) I: Changes in hygroscopicity due to heating", Journal of Wood Science, Vol.52, No.1, pp.33-38 (2006).
- 11) M. Tokumoto, T. Takeda, K. Yasue, A. Oodaira and T. Yoshida, "Moisture diffusivity of the inner and outer layers of square timber dried by various methods", Abstracts of the 57th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, p.26 (2007).
- 12) I. Iida, M. Norimoto and Y. Imamura, "Hygrothermal recovery of compression set", Mokuzaï Gakkaishi, Vol.30, No.5, pp.354-358 (1984).