

短 報

スギ心持ち正角材の高温乾燥で表面割れの発生しやすい 条件の検討¹

土肥 基生

Examination of the condition that Surface crack is easy to occur in high temperature drying
of sugi(*Cryptomeria japonica*) square timber¹

Motoo Dohi

心持ち正角材を製材する際には、正角材の目標寸法に対し、乾燥による収縮と変形を考慮して予め歩増しを行う。また、使用する原木のサイズは末口側の木口に「丸み」が発生しない程度の最低限の直径（適寸）が必要となる。正角材の適寸原木から製材したスギ正角材と適寸を下回る原木から製材した正角材を高温乾燥したところ、後者で表面割れが多く発生した。製材適寸を下回る原木では木口面で心材の面積割合が小さい傾向にあるため、心材率と表面割れ発生を調査したところ、両者には不の相関が認められ、心材率 0.785 付近を境界として、これより小さい場合に表面割れが大きくなることを確認した。乾燥工程毎の含水率傾斜を測定した結果、心材率 0.785 を下回る場合、製材表面には含水率の高い辺材が分布しており、高温セット処理工程でより多くの水分が蒸発することで潜熱が失われ表層の材温の上昇が妨げられたと考えられ、このことが表層に有効なドラインセットを形成できなかった要因であると推察された。適寸を下回る原木を挽いた製材では、高温セット処理（乾球 120℃、湿球 90℃）時間を変化させた場合でも表面割れの程度は大きく、また表層からの乾燥速度を抑制させる目的で各種溶液等の表面塗布を行った場合でも、標準条件（高温セット処理 24 時間）で表面割れの程度は大きい結果となった。

キーワード：スギ、高温乾燥、心持ち材、心材率、表面割れ

I はじめに

本県の素材生産量のうち最も生産割合の大きい樹種はスギであり、全体の 52% を占めている。（岐阜県 2019）。これらは主として製材用途に供され、構造用をはじめとする製材品として出荷されている。近年、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」や「長期優良住宅の普及の促進に関する法律」の施行により、適切な乾燥処理を行った寸法安定性の高い乾燥材製品が消費者から求められており（岐阜県 2012）、県では、令和 3 年度までに、製材品出荷量に占める人工乾燥材の割合を 55% へ引き上げる目標を設定（岐阜県 2017）している。

スギ製材の人工乾燥の方法としては、蒸気式木材乾燥機による高温乾燥が主流である。この理由として、蒸煮により木材を軟化させた状態で一気に高温低湿処理（乾球温度 120℃、湿球温度 90℃）を行い、材表面に大きな引張セットを形成することにより、表面割れが少なく、短時間で乾燥できる方法（吉田ら 2000）が開発されたことが挙げられる。この方法では内部割れの発生が懸念されるが、高温低湿処理時間を 18 ～ 24 時間程度とし、

その後の乾燥工程を 90℃程度の中温乾燥とすることで、内部割れの発生も低減できることが明らかにされている（吉田ら 2004）。

県内の製材工場でも、この方法に準じた乾燥条件を設定することで不良品率の少ない乾燥材生産が行われている。しかし、製材する原木の条件によっては表面割れの発生による不良品率が増加するという事例が生産現場で散見される。具体的には、適寸を下回る径級の原木を挽いた場合（粗挽き製材の角に丸みが付く場合）や、長尺材の末口側で表面割れの発生が多くなるケースが挙げられる。心持ちスギ正角材を扱った既往の研究（吉田ら 2004、小田ら 2004、豆田ら 2001）では、一般的な木取りによる試験材が使用されていると考えられ、適寸を外れた原木による製材に関するデータは少ない。

そこで本研究では、スギ心持ち正角材を対象として、標準的な高温乾燥条件が適用し難い原木の条件を明らかにするとともに、このような製材に適用できる高温乾燥条件を探ることを目的として、各種乾燥条件を与えた時の表面割れの発生状況を主に評価した。

¹ 本研究の一部は、第 66 日本木材学会大会で発表した。

II 材料と方法

1. 製材条件の異なる原木を用いた高温乾燥試験

岐阜県産スギ原木（材長 3m, 末口径級 20 ~ 22 cm）15 本と、同末口径級 16 ~ 18 cm 18 本を調達し、各グループの生材重量が偏らないよう 10 本ずつを選別した。これらを髄が製材のほぼ中心となるよう 118 mm 正角に製材し試験材とした。図-1 に示すように末口側から 1m の箇所まで生材時の全乾重量測定用試験片（ $t=10\text{mm}$ ）および含水率傾斜用試験片（ $t=20\text{mm}$ ）を採取し、末口側の 1m 材を高温セット処理段階までの試験体、元口側の 2m 材を人工乾燥終了時までの試験体とした。なお末口側 1m 材は両木口を、元口側 2m 材は末口側の片木口をシリコンシーラントでコーキングした。

人工乾燥スケジュールは、初期蒸煮（ 98°C ）8 時間、高温セット処理（乾球 120°C , 湿球 90°C ）24 時間、中温乾燥（乾球 90°C , 湿球 60°C ）120 時間とした。高温セット処理後に 1m 材のみを人工乾燥機から取り出し、4 つの材面に発生した表面割れ（幅 0.5mm 以上の割れの長さ）及び重量を測定した。その後、木口から 50 cm の箇所まで全乾重量測定用試験片および含水率傾斜用試験片を採取した。2m 材は引き続き人工乾燥を継続し、乾燥終了後に表面割れ及び重量を測定した後、同様に末口側木口から 50 cm の箇所まで全乾重量測定用試験片および含水率傾斜用試験片を採取した。

含水率傾斜の測定は、各時点とも試験体の割れのない表面を選び、中心から 40 mm 幅の部分について表層から中心に向かって 5, 10, 15, 20, 25, 35, 45, 59 mm の位置で割材し試験片を得た後、全乾法で含水率傾斜を求めた（図-2）。

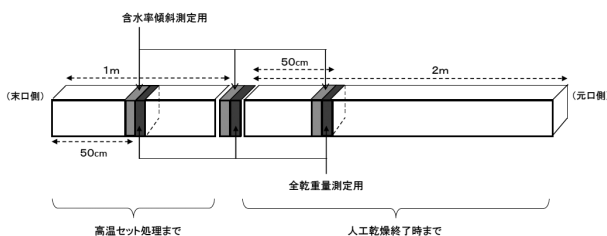
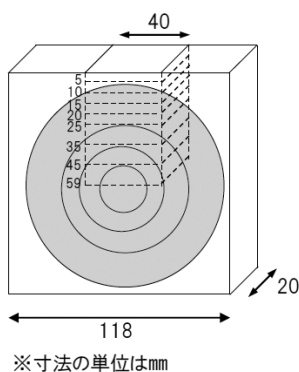


図-1 試験材の採材



※寸法の単位はmm

図-2 含水率傾斜試験片

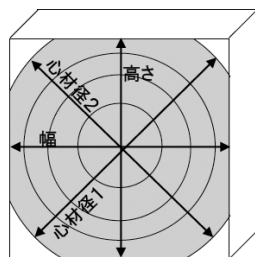


図-3 心材率測定

2. 心材率の異なる製材による高温乾燥試験

岐阜県産スギ原木（材長 3m, 末口径級 18 ~ 20 cm）12 本を調達し、髄が製材のほぼ中心となるよう 132 mm 正角に製材した。これを 75cm ずつに 4 分割し採材位置が偏らないよう原木 1 本から分割材 1 本を抽出し計 12 本を試験材とした。両側の木口面をシリコンシーラントでコーキングした後、人工乾燥に供した。乾燥スケジュールは、初期蒸煮（ 98°C ）8 時間、高温セット処理（乾球 120°C , 湿球 90°C ）24 時間、中温乾燥（乾球 $100 \sim 90^\circ\text{C}$, 湿球 $70 \sim 60^\circ\text{C}$ ）184 時間とした。乾燥終了後に、4 材面に発生した表面割れ（目視確認できる全ての割れの長さ）及び重量を測定した後、材長方向の中央部から試験片（ $t=1\text{cm}$ ）を採取し、心材率および全乾法による含水率測定に供した。心材率は、乾燥後の幅・高さ、両対角線上の心材径を測定（図-3）し、幅・高さの平均値、心材径の平均値をそれぞれ正方形の辺長、正円の直径と仮定し、計算により求めた。

3. 異なる高温セット処理条件を与えた乾燥試験

岐阜県産スギ原木（材長 3m, 末口径級 16 ~ 18 cm）から 118 mm 正角を製材した後、心材率の小さい末口側の 2m を切り出し試験材とした。高温セット処理時間別に 6 時間、12 時間、24 時間の各グループを設定し、それぞれ 6 本、10 本、10 本を用いた。また、同スギ原木（材長 3m, 末口径級 18 ~ 20 cm）から 132 mm 正角を製材した 6 本を 36 時間処理グループとし乾燥試験に供した。各グループは、製材寸法に対して径級がやや小さめの原木から製材しており、通常の高温セット条件では表面割れが発生しやすい製材条件となっている。

人工乾燥スケジュールは、初期蒸煮（ 98°C ）8 時間は共通とし、高温セット処理（乾球 120°C , 湿球 90°C ）はそれぞれ 6 時間、12 時間、24 時間、36 時間とした。セット処理後の中温乾燥（乾球 90°C , 湿球 60°C ）は 144 時間、120 時間、120 時間、96 時間とした。

乾燥終了後に試験材の 4 材面に発生した表面割れ（幅 0.5mm 以上の割れの長さ）及び重量を測定した後、木口から 1m の箇所まで試験片（ $t=20\text{mm}$ ）を採取し、全乾法により含水率を測定した。

4. 製材表面からの乾燥抑制を図った高温乾燥試験

II-1 では、製材表面に高含水率の辺材が存在する場合に高温セット処理による表面割れ抑制が得られにくい結果であった。辺材は心材と比べて乾燥速度が速い（黒田 2003）ことから、人工乾燥中の製材表面からの乾燥速度を抑制することによる表面割れ抑制を期待して本試験を実施した。

試験材は II-2 と同一の岐阜県産スギ原木（材長 3m, 末口径級 18 ~ 20 cm）12 本を用い、髄が製材のほぼ中心となるよう 132 mm 正角に製材した後、75cm ずつに 4 分割した。これを図-4 に示すとおり採材位置が偏らないよう 4 グループに振り分けた。各グループは無処理（A）、不織布掛け（B）、油性塗料塗布（C）、PEG 塗布（D）

とした。Bは、試験材の全面および木口面を市販のポリプロピレン製不織布で覆い、乾燥中に離散しないよう木口部にホチキス止めを施した。Cでは試験材の全面および木口面に市販の油性塗料（関西ペイント（株）製、木部保護塗料）を一度塗りした。Dでは、試験材の全面および木口面にポリエチレングリコールを主成分とする木材処理材（（有）ユニテックス製ブレンマー PE-400）の原液を一度塗りした。

乾燥スケジュールはⅡ-2と同様で、初期蒸煮（98℃）8時間、高温セット処理（乾球120℃、湿球90℃）24時間、中温乾燥（乾球100～90℃、湿球70～60℃）184時間とした。乾燥終了後に、4材面に発生した表面割れの長さ（t=1cm）を測定し、材長方向の中央部から得た試験片により全乾法で含水率を測定した。

1	無処理	不織布	油性塗料	PEG
2	PEG	無処理	不織布	油性塗料
3	油性塗料	PEG	無処理	不織布
4	不織布	油性塗料	PEG	無処理
5	無処理	不織布	油性塗料	PEG
⋮		⋮		
⋮		⋮		
12	不織布	油性塗料	PEG	無処理

図-4 試験材の仕分け

Ⅲ 結果と考察

1. 製材条件の異なる原木を用いた高温乾燥試験

原木径級ごとの乾燥工程毎の含水率経過を表-1に示す。乾燥工程終了後の平均含水率がφ20-22で24.7%、φ16-18で27.5%となり、一般的な製材品の含水率（15～20%）と比べ高めの仕上がりとなったが、高温セット処理工程でドライングセットが形成されていれば、乾燥工程の後半から圧縮応力により割れが閉塞する方向に進み（徳本ら2005）、ドライングセットが形成されなかった場合は、乾燥の進行とともに表面割れが拡大する方向に進行すると考えられるため、この含水率の段階で表面割れの発生状況の比較は可能であると判断した。

表面割れの結果を図-5に示す。φ20-22は製材寸法118mmに対して十分に余裕のある寸法の原木から製材しているのに対し、φ16-18では製材寸法に余裕がなく末口直径16cm丁度の原木では製材の角に「丸み」が発生するサイズである。前者の乾燥処理後の表面割れ平均長さは84mm/mであったのに対し、後者は584mm/mとなり明らかな違いが見られた。また、製材の日本農林規格（JAS）目視等級区分構造用製材乙種2級の材面割れ規格である「材長の1/6」以内に当てはめると基準値は333mmとなる。前者はすべての材がこの基準をクリアしてい

たが、後者では10本中6本でこの値を超えた。高温セット処理後から乾燥処理後にかけての割れ長さの変化を見るとφ20-22では620mm/mから84mm/mへ約1/7に減少しているのに対し、φ16-18では1200mm/mから584mm/mと約1/2の減少にとどまっていた。φ16-18ではドライングセットの形成が弱く、応力転換による割れの閉塞が発現しなかったと考えられた。

含水率傾斜の結果を図-6に示す。生材時の段階で、φ20-22は表層含水率が概ね50～100%の範囲にあり中心へ向かって値が高くなる分布を示した。φ16-18では表面から概ね20mmの深さまでの範囲で100～200%と高い値を示し、20～25mmの深さで含水率が50%程度に下がり、中心に向かっては前者と同様に50～150%程度まで高くなる分布であった。後者の特徴として高含水率の辺材が20mm程度の厚さで表層に分布することが挙げられた。高温セット終了時には両グループともに表層5mmで10%程度の含水率を示し、25mm程度まで徐々に上昇し、35mm以上では乾燥が進んでいない状況が確認された。初期蒸煮の間に含水率が変わらないと仮定すると、高温セット処理の24時間の間にφ16-18の表層から深さ25mmの範囲では、φ20-22に比べより多くの水分が蒸発し潜熱が失われ、材温の上昇が妨げられたと考えられる。このことが表層にドライングセットを形成する条件から外れた一因となったと推察された。

表-1 原木径級によりグループ分けした試験材の乾燥工程毎の含水率

原木径級	単位:% ()内は標準偏差		
	生材時	高温セット終了時	乾燥終了時
φ20-22	88.4(22.0)	39.4(12.3)	24.7(7.5)
φ16-18	122.5(17.7)	39.9(13.0)	27.5(12.5)

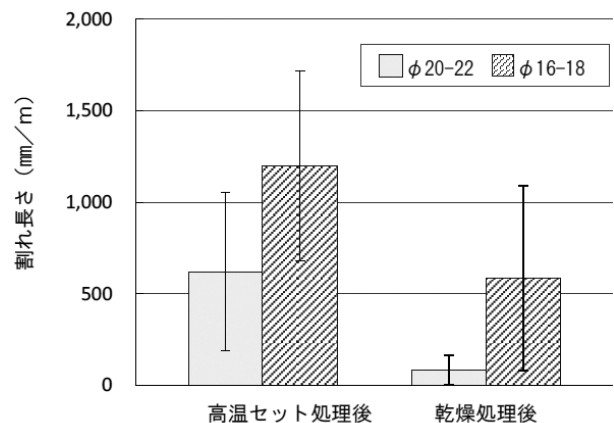


図-5 乾燥工程毎の表面割れ長さ

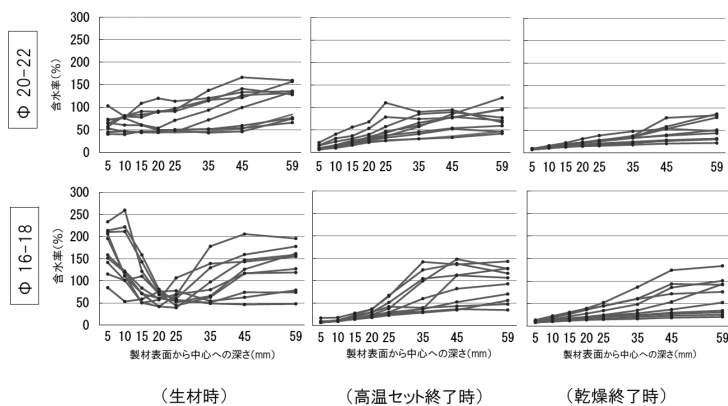


図-6 乾燥工程各段階での含水率傾斜

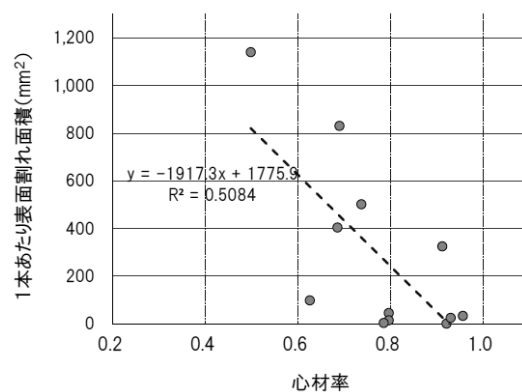


図-7 心材率と表面割れ面積の関係

2. 心材率の異なる製材による高温乾燥試験

乾燥工程終了後の含水率は、平均8.9%（最小4.9%、最大18.9%）となり過乾燥気味の仕上がりとなった。一般的な製材品の含水率（15～20%）と比べ低めの仕上がりとなったが、高温セット処理工程でドラインセットが形成されていれば、過乾燥材でも表面割れは抑制され、形成されていなければ表面割れが広がっていると考えられるため、表面割れの発生状況の比較は可能であると判断した。

心材率と乾燥後の表面割れ面積の関係を図-7に示す。縦軸は1本あたりの4材面の表面割れ面積の合計を示し、割れ面積は、割れ長さ*最大割れ幅/2（但し貫通割れは、割れ長さ*（最大割れ幅+最小割れ幅）/2）で求めた。心材率と表面割れ面積の関係には負の相関が認められ（ $p < 0.01$ ）、心材率の小さい、すなわち辺材割合の大きい製材で表面割れが多く発生することが確認できた。この結果は、Ⅲ-1でφ16-18の製材で辺材が厚く、表面割れの程度が大きかった結果と合致した。また、製材の木口断面で心材部がなす円が材面に接するとき心材率は計算上0.785となる。今回の試験材の中では12本中7本が0.785を上回っていたが、これらの内の6本は割れ面積の値が極めて小さかった。心材が製材表面に僅かでも露出する場合、心材の外側に低含水率となる白線帯が分布することを考慮すると、生材時の含水率傾斜は図-6ではφ20-22のタイプに近くなり、表面割れ抑制を狙った高温セット処理が成功する確率は高くなると考えられた。心材の露出の有無は、材面あるいは木口面を観察することで容易に判断できるため、生産現場で乾燥時の割れの発生しやすさを判断する指標として実用上有効であると考えられた。

3. 異なる高温セット処理条件を与えた乾燥試験

乾燥終了後の含水率は、6時間、12時間、24時間、36時間でそれぞれ、平均値で16.8%、22.4%、27.5%、19.1であった。乾燥終了後の表面割れの結果を図-8に示す。JAS規格で定める材面割れの許容範囲（「材長の

1/6」=166mm/m）に比べ、いずれのグループにおいても大きな値を示した。「12時間」と「24時間」の値がやや小さいが、平均含水率が高いため、更に乾燥が進むと割れ長さの値は増大する可能性が考えられる。

この試験では、乾燥速度の速い辺材が製材表面を多く占める場合に、高温セット処理時間を短くすることで、適切なドラインセットがかかることを期待したが、「6時間」「12時間」ともに期待した効果は得られなかった。ここでは表層の初期含水率の測定を行ってはいないが、Ⅲ-1と同様に、高温セット処理工程での表層からの蒸発潜熱の喪失が材温上昇を妨げたことが有効なドラインセットが形成されなかった一因と考えられた。

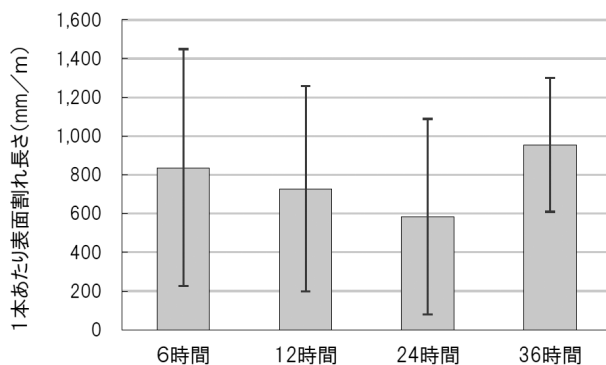


図-8 高温セット処理時間別の表面割れ長さ ※バーは標準偏差を示す

4. 製材表面からの乾燥抑制を図った乾燥試験

乾燥終了後の含水率を表-2に示す。タイプ毎の平均値は8.6%から10.4%となり過乾燥気味であったが、表面割れの発生状況の比較は可能であると判断した。

表面割れの結果を図-9に示す。無処理では1本あたり平均値が650mm/mであったのに対し、不織布、油性

表-2 乾燥終了後の含水率

	無処理	不織布	油性塗料	PEG
平均	8.9	10.4	9.3	8.6
最小値	4.9	5.0	5.5	5.4
最大値	18.9	18.4	13.9	15.9
標準偏差	4.0	4.4	3.1	3.1

単位:(%)

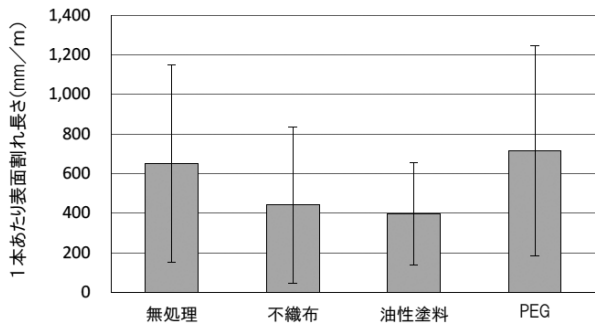


図-9 乾燥終了後の表面割れ長さの比較
※バーは標準偏差を示す

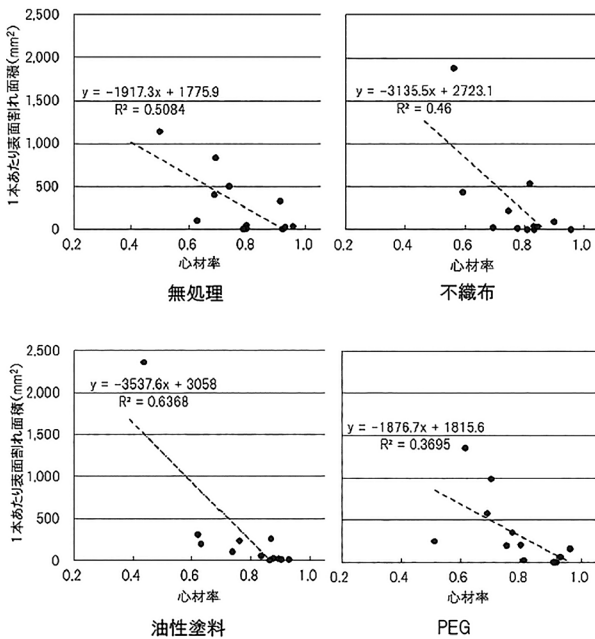


図-10 処理方法別の心材率と表面割れ面積

心材率と表面割れ面積の関係を図-10に示す。無処理、油性塗料、PEGについては心材率が低いほど割れ面積は大きくなる傾向にあり、割れを抑制する手法としては有効ではないと考えられた。不織布については、心材率の小さい(0.785以下)の材5本中の2本で割れ面積が0に近い値となったが、残り3本の割れ面積は大きく、決定的な対策であるとは言い難い結果であった。

この試験では、製材表面からの乾燥抑制を図る手段として3通りの手法を採ったが、乾燥途中の含水率の測定を行っていないため、乾燥速度の比較はできていない。しかし何れの手法においても、心材率の小さな製材で一定の表面割れが発生したことから、高温セット処理が適正に機能しなかったと考えられる。つまり何れの手法でも、乾燥初期の24時間の間で製材表層に乾燥後半で応力転換が発生するようなドラインセットを発生させることができなかったと考えられた。

引用文献

- 岐阜県林政課 (2012) 第二期岐阜県森林づくり基本計画. 岐阜県林政課
- 岐阜県林政課 (2017) 第三期岐阜県森林づくり基本計画. 岐阜県林政課
- 岐阜県林政課 (2019) 岐阜県森林・林業統計書. 岐阜県林政課
- 小田久人・蛭原啓文・迫田忠芳・藤本登留・村瀬安英 (2004) 宮崎県産スギ心持ち柱材の高温低湿乾燥における乾燥性: 木材工業 59: 255-259
- 黒田尚宏 (2003) スギの乾燥—概説. 林業技術 736: 8-13
- 徳本守彦・武田孝志・吉田孝久 (2005) スギ心持ち無背割り柱材における高温セット処理後の乾燥スケジュールが内部応力に及ぼす影響. 材料 54: 365-370
- 豆田俊治・藤本登留 (2001) スギ心持ち材の高温蒸気処理による表面割れ抑制効果について. 日林九支研論文集 54: 195-196
- 吉田孝久・橋爪丈夫 (2000) カラマツ及びスギ心持ち柱材の高温乾燥特性. 長野県林業総合センター研究報告: 3-18
- 吉田孝久・橋爪丈夫・伊東嘉文 (2001) スギ材の革新的高速乾燥システムの開発: 高温乾燥による材の表面割れ防止技術の開発. 平成12年度長野県林業総合センター業務報告: 66-67
- 吉田孝久・橋爪丈夫・徳本守彦・武田孝志・印出晃 (2004) スギ心持ち無背割り柱材の高温乾燥における高温セット法の割れ防止効果について長野県林業総合センター研究報告: 125-139

塗料ではそれぞれ 441 mm/m, 398 mm/m となり無処理をやや下回る結果であったが、製材 JAS 規格の乙種 2 級の材面割れの基準「材長の 1/6」以内に当てはめた値 125 mm/m を両者ともに大きく上回っていた。処理方法別の