

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

吉田孝久・橋爪丈夫・徳本守彦*・武田孝志*・印出晃**

スギ柱材（132mm 正角）の高温乾燥について、乾燥スケジュール別の試験を行い以下の結果を得た。

蒸煮後の材面割れ抑制のために行う高温セット処理（高温低湿処理）時間は、材表層の含水率が20%付近まで低下する時間が必要と思われる、内部割れ発生状況と併せて判断すると、一般的には18時間程度が適当と思われた。

初期含水率60~120%の材について、その仕上がり含水率は、高温セット処理後の高温乾燥では全期間4.25日間で平均18.5%、高温セット処理後の中温乾燥では8日間で平均19.8%、中温乾燥のみでは14日間で平均25.6%であった。また、初期含水率のばらつきの大きいロットを一度の乾燥で仕上がり含水率を揃えることは、どの乾燥スケジュールであっても困難であった。

高温セット処理が長ければ長いほど乾燥時間を短縮できるが、長すぎると内部割れの発生につながった。

高温セット処理による材面割れ抑制の効果は大きかった。また高温セット処理を行った材の材面割れは、含水率が低下するほど少なくなる傾向にあった。これは材面割れが含水率の低下と伴に閉塞していくことが原因していた。

高温セット処理後に高温乾燥を続けると、内部割れは含水率が低下するに従って増大した。しかし、高温セット処理後に中温乾燥を行うことで内部割れの発生は極端に減少した。この場合、乾湿球温度差を30℃とした低湿条件であっても大きな内部割れにはつながらなかった。

キーワード：高温乾燥、高温セット、ドラインセット、材面割れ、内部割れ

はじめに

針葉樹構造用材に対する人工乾燥への関心が高まる現在、乾燥温度100℃以上の高温乾燥に対して乾燥時間の短縮や低コスト化、さらには割れの抑制効果等が期待されている。

乾燥温度80℃程度の中温域での蒸気式乾燥では、乾燥開始時では相対湿度80%以上が保持されるのが一般的であり、このため乾燥時間も長時間を必要とする場合が多い¹⁾。これに対し高温乾燥は、確立したスケジュールがなく、乾球温度や湿球温度さらには乾燥時間と言った乾燥スケジュールの採り方によって、その仕上がりが大きく変わってくる²⁾。

最近の高温乾燥では、乾燥初期から高温低湿状態を保ち、材面割れの抑制を主目的とした、いわゆる「高温セット法」あるいは「ドラインセット法」と称する乾燥スケジュールがよく使われるようになってきた。

ところが、この乾燥スケジュールにおける高温状態を乾燥末期まで続けると、内部割れが目立って発生し、このことが問題視されている。

内部割れを防止するためには、内部割れが発生する乾燥中期から末期にかけて、中温乾燥や天然乾燥あるいは太陽熱乾燥に移行することを、筆者らはいくつかの試験例から提案しているが³⁾、こ

のことを今回様々なスケジュールでの比較試験の中から実証し、より実用的な乾燥スケジュールを見出すことを目的とした。

本報告では、第1章「高温セット処理時間の決定」と第2章「高温セット法による割れ防止効果」に区分して述べる。

また、本試験は（財）日本住宅・木材技術センターの実施した国庫補助事業「木材産業技術実用化促進事業緊急対策事業」の一課題として実施したものである。

第1章 高温セット処理時間の決定

高温セット処理は、乾燥初期に100℃以上の高温下で材表層に強い引張応力を形成し（ドラインセット）、その後の乾燥において、この引張応力が材内部の収縮に伴って圧縮応力に転換し、材面割れを抑制する効果的な手法と考えられている。

そこで、第2章の試験に先立って、この高温セット処理時間を何時間に設定すべきかを予備試験として行う必要があった。

1.1 試験方法

1.1.1 高温セット条件

表-1に示すA, B, Cの3条件を設定し試験を実施した。蒸煮時間は材中心部が蒸煮温度に達すると思われる6時間に設定した。

*信州大学農学部、**ヒルデブランド（株）

これまで高温セットの温度は 120℃で行われることが多かったため、A, B 試験においてはこれまでどおりの 120℃を採用し、処理時間を 24 時間と 12 時間とした。また、C 試験においてはこれよりも温度の低い 110℃とした。

使用した乾燥装置は、収容能力約 3 m³ (12cm 角材を 7 列 8 段乾燥可能) の高温型蒸気式乾燥装置である。

表-1 高温セット処理時間決定のための試験条件

| 試験 | 蒸煮 | 高温セット 時間と乾燥温度 (DBT/WBT) | |
|----|-----------|----------------------------|----------|
| A | 6h 95℃ | 24 h | 120℃/90℃ |
| B | | 12 h | 120℃/90℃ |
| C | | 24 h | 110℃/80℃ |

*hは時間, DBTは乾球温度, WBTは湿球温度

1.1.2 供試材

供試材は、長野県下伊那郡根羽村産の樹齢約 40～60 年、末口径 18～24cm のスギより製材された 132×132×3000mm の無背割り心持ち柱材である。各試験 (3 条件) 毎 49 本ずつ全 147 本を供した。

1.1.3 測定項目と測定方法

供試材は乾燥前にできるだけ材表面を乾燥させないよう、基本的に前日製材した材を使用した。乾燥前に各形質 (長さ、幅、厚さ、重量) を調査した後、直ちに乾燥試験を開始した。止むを得ず製材・形質測定後に数日を経過する場合は、菰 (こも) を掛け、乾かないようこの上からスプリンクラーにて散水した。

乾燥終了後、幅、厚さ、重量、含水率 (全乾法)、水分傾斜、材面割れ、内部割れ、材色を測定した。

含水率測定用試験片 (横断面材) の採取位置は、図-1 に示すように木口より 100cm 入った位置を基本とし、できるだけ節を避けて採取した。水分傾斜測定用試験片は、試験毎に軽量材 (25kg 程度)、中量材 (33kg 程度)、重量材 (38kg 程度) の各 3 本について、含水率測定用試験片と隣接して採取した。

材面割れ長さは、木口から 10cm までの割れと、割れ幅 1mm 以下の割れは除外して測定し、4 材面の測定値の総延長を求めた。内部割れは、含水率測定用試験片に存在する内部割れ長さの合計とした。

乾燥過程での材温を、JIS K タイプ熱電対を用いて測定した。測定位置は、材表面より 1 cm の部

分 (表層と呼ぶ) と 6 cm の部分 (中心と呼ぶ) で行った (図-2)。測定部までドリルにより穿孔し、熱電対を挿入した後に耐熱シリコンにより密閉固定した。材温測定は、水分傾斜測定用試験片を採取した材を対象とした。

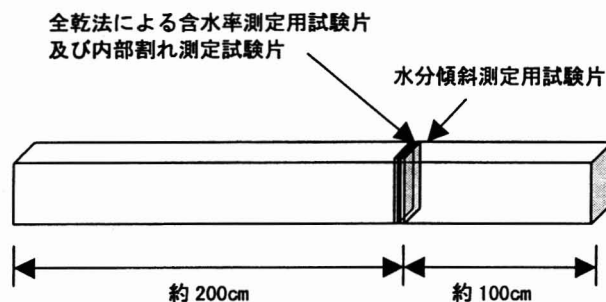
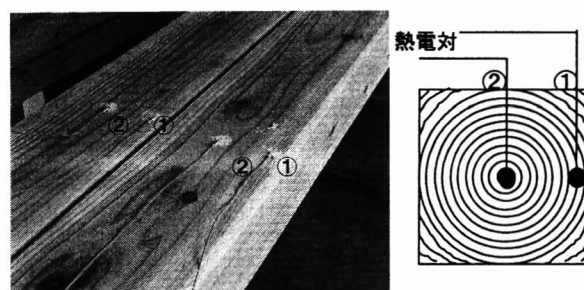


図-1 各試験片 (材) の切出し位置



①は表面から約 1cm (表層) の位置
②は表面から約 6cm (中心) の位置

図-2 材温測定の位置

1.2 試験の結果

1.2.1 材温の変化

図-3 に各試験時の乾球温度、湿球温度及び材温の変化を示した。

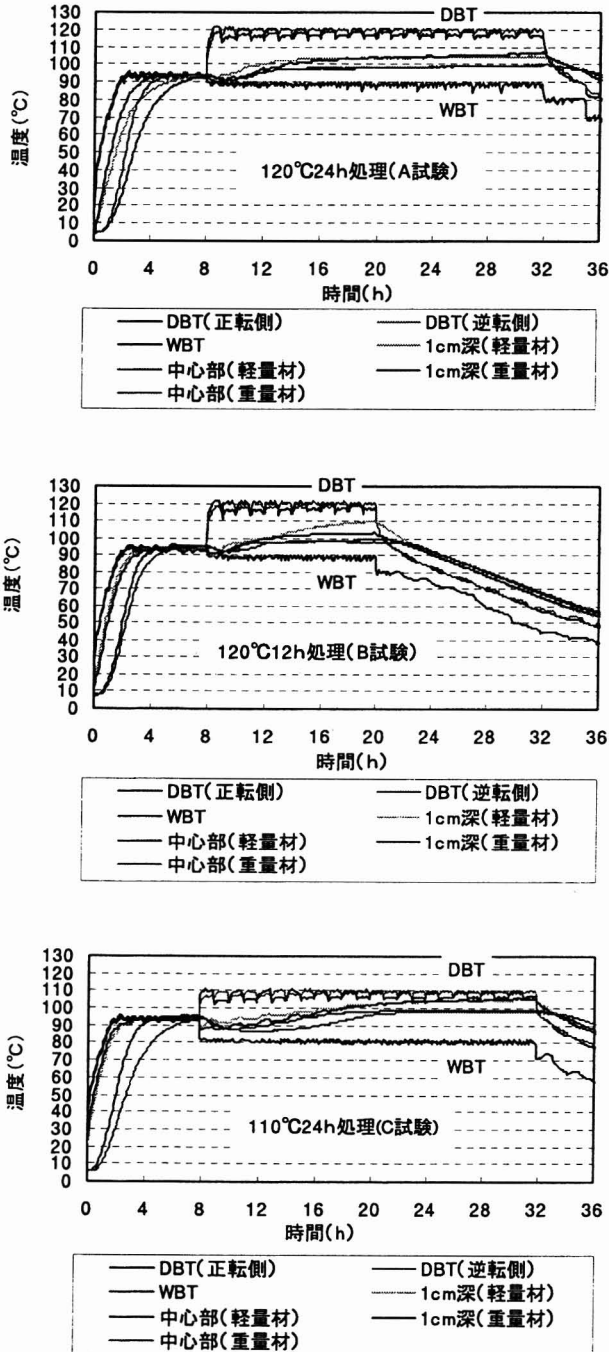
蒸煮時で材中心部の材温が蒸煮温度の 95℃に達する時間は、A, B, C 試験のどの条件でも重量材ほど長く、この場合でも装置内温度が 95℃に達してからおよそ 6 時間を要した。このことから、材中心部の温度が蒸煮温度に達する時間は、装置内温度が設定した蒸煮温度に達してから、1 時間当り表層からおよそ 1 cm の割合でこの温度に達することが確認できた⁴⁾。

高温セット処理期間に入ってから材表層の材温上昇は、120℃条件である A, B 試験でいずれも速く、蒸煮後およそ 5 時間程度で 100℃を超えた。これに対し 110℃条件の C 試験は、100℃を超えるのに 2 倍の 10 時間を要した。

一方、材中心部は、C 試験の方が A, B 試験よりも遅れて昇温するが、どの条件においても 100℃

に近づくものの処理期間中に 100℃を超えることはなかった。

以上のように、材温を上昇させるには、温度が高い方が効果的であった。



注：各グラフ上で材温を示す実線は、高温セット処理が終了した時点で、上2本の線は1cm深部の表層を、下2本の線は6cm深部の中心を示す(図-2参照)。DBT：乾球温度、WBT：湿球温度

図-3 乾燥装置内温度と材温の上昇状況

1.2.2 高温セット処理後の形質

図-4 に供試材の初期状態を初期重量と初期含水率で示した。

また、処理後の形質結果を、初期条件をできるだけ統一するため、初期含水率及び初期重量をある範囲に限定して集計し、表-2, 3, 4 に示した。

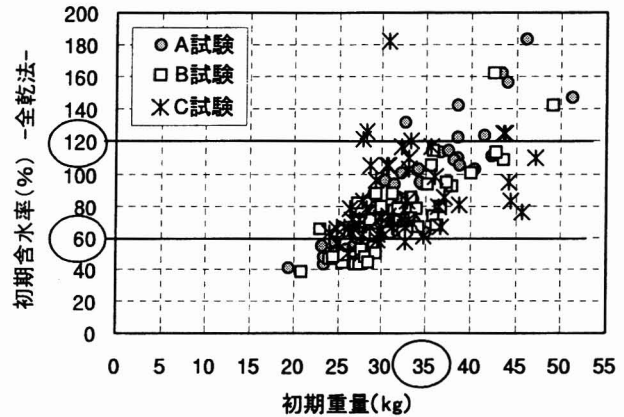


図-4 供試材の初期状態 (初期重量と初期含水率の関係)

表-2 高温セット後の形質 (初期含水率が60~120%の材)

| 試験 | 区分 | 含水率 (%) | 収縮率 (%) | 材面割れ (mm) | 内部割れ (mm) |
|----|-------|---------|---------|-----------|-----------|
| A | AVG | 42.4 | 1.22 | 1365 | 15 |
| | (STD) | (11.9) | (0.62) | (1256) | (23) |
| B | AVG | 48.5 | 0.69 | 949 | 0 |
| | (STD) | (12.0) | (0.51) | (1209) | (2) |
| C | AVG | 44.0 | 0.82 | 1332 | 2 |
| | (STD) | (12.4) | (0.55) | (1445) | (6) |

*AVG は平均値, STD は標準偏差

*初期含水率の平均値は, A=87.7%, B=80.4%, C=82.1%

表-3 高温セット後の形質 (初期重量が35kg未満の材)

| 試験 | 区分 | 含水率 (%) | 収縮率 (%) | 材面割れ (mm) | 内部割れ (mm) |
|----|-------|---------|---------|-----------|-----------|
| A | AVG | 33.7 | 1.44 | 918 | 23 |
| | (STD) | (14.0) | (0.71) | (976) | (31) |
| B | AVG | 37.7 | 0.87 | 886 | 3 |
| | (STD) | (9.1) | (0.53) | (974) | (6) |
| C | AVG | 43.8 | 1.04 | 1434 | 3 |
| | (STD) | (15.4) | (0.68) | (1531) | (11) |

*AVG は平均値, STD は標準偏差

*初期含水率の平均値は, A=70.4%, B=64.8%, C=82.3%

表-4 高温セット後の形質 (初期重量が35kg以上の材)

| 試験 | 区分 | 含水率 (%) | 収縮率 (%) | 材面割れ (mm) | 内部割れ (mm) |
|----|-------|---------|---------|-----------|-----------|
| A | AVG | 65.7 | 1.14 | 1773 | 9 |
| | (STD) | (19.7) | (0.55) | (1590) | (17) |
| B | AVG | 66.6 | 0.51 | 952 | 1 |
| | (STD) | (19.2) | (0.26) | (1573) | (3) |
| C | AVG | 51.0 | 0.62 | 1229 | 1 |
| | (STD) | (15.8) | (0.51) | (1233) | (5) |

*AVG は平均値, STD は標準偏差

*初期含水率の平均値は, A=124.7%, B=103.8%, C=95.1%

(1) 含水率と収縮率

高温セット処理後の含水率及び収縮率の分布をそれぞれ小さい順に順位化して図-5 及び図-6 に示した。

初期含水率が平均的範囲と思われる 60~120% の材 (図-4 参照) に限定した表-3 について、高温セット処理後の含水率について見ると、C>B>A 試験の順となり、A 試験が最も低い 42.4% であった。A 試験では初期含水率の平均値 87.7% と比べると半減した。低いものでは既に 20% を下回る材も見られた。

収縮率については、A 試験では既に 1% を超える材が約 7 割あり、B や C 試験に比べてかなり収縮が進んでいた (図-6)。

処理温度が同じで処理時間の違う A 試験と B 試験とで比較した場合、両者とも高温セット処理後の含水率が平均で 40% 台であるが、収縮率は A 試験が 1.22%、B 試験が 0.69% であった (表-2)。その後乾燥を続け、仮に、収縮率を 3% 程度とし

た場合 (第 2 章、図-17、仕上がり含水率を 20% の場合)、A 試験については高温セット処理後に既に全体の半分近い収縮をしていたことになる。

(2) 水分傾斜

図-7 に軽量材 (初期重量 25kg 程度)、中量材 (33kg 程度)、重量材 (38kg 程度) の区分で処理後の材内の水分傾斜を示した。

軽量材、中量材、重量材の順に水分傾斜は大きかった。表層の含水率のみに注目すると、軽量材では 20% 前後の値を示し、中量材では 20~40%、重量材では 30~60% の値を示した。

各処理別に見ると、処理温度が同じで処理時間の違う A と B 試験では、当然ながら処理時間の長い A 試験の方が水分傾斜のグラフは下側に位置するはずであるが、今回選んだ試験材からは大きな違いは見られなかった。

(3) 材面割れと内部割れ

高温セット処理時間の決定の目的は、材表層の圧力を引張応力から圧縮応力に転換し、材面割れ

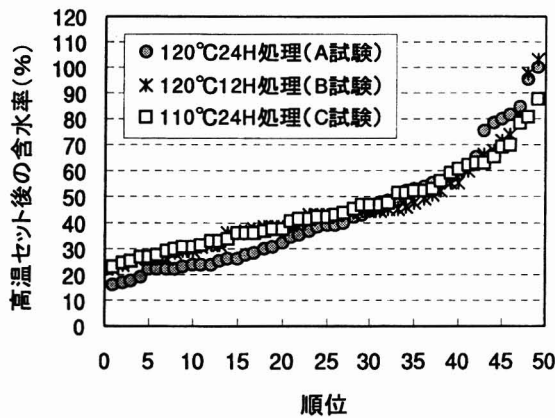


図-5 高温セット後の含水率の分布

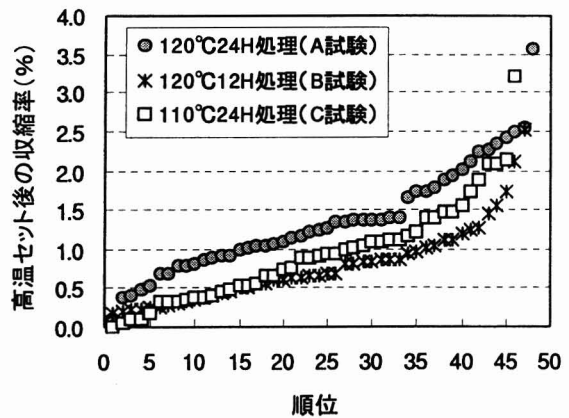


図-6 高温セット後の収縮率の分布

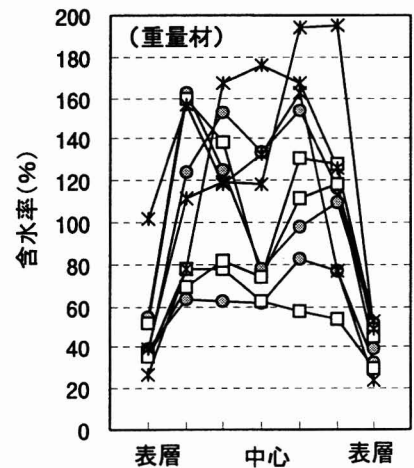
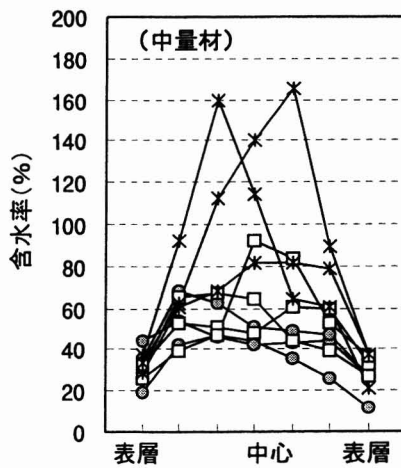
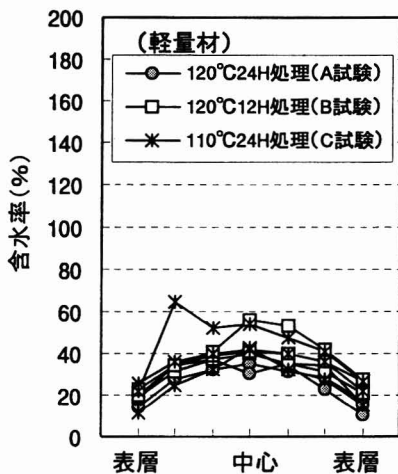


図-7 高温セット後の材内水分傾斜

を防ぐことを第一に考えたが、その他にも内部割れを高温セット処理中にできるだけ発生させないことも大きな目的の一つであった。つまり、高温セット処理時間が短いと材面割れの防止効果は小さくなり、逆に長いと内部割れが生じてしまうため、内部割れを発生させない範囲で、含水率を低下させる意味からもできるだけ長く高温セット処理を行いたいという期待があった。

従って、材面割れ及び内部割れの両者とも発生が少ない高温セット処理条件を決定することが本試験の端的な目的である。

材面割れの多い少ないを、数値で判断するのは難しいが、天然乾燥で発生する割れの長さが柱材1本当り4材面の割れ長さの総延長がほとんど3000mm以上⁵⁾であることから考えると、その半分の1500mm以下は少ない範囲と判断した。

表-2から材面割れは、AとC試験が同程度で、B試験が少なかったが、全般的に各試験において材面割れは少なかった。

乾球温度が同じ120℃のAとB試験を考えた場合、処理時間がA(24h)の半分のB(12h)は、未だ材表面には引張応力が働いており、このまま処理時間を延長すれば、材面割れの長さはA試験に近づくのではないかと推測された。

つまりB試験の場合、高温セット処理終了後であっても、材表面は引張応力の状態にあると判断され、処理時間の延長が必要ではないかと思われた。

内部割れについて、高温セット処理後の含水率と内部割れ長さの関係を図-8に示した。

含水率が低いほど内部割れは多くなり、また、A試験はBやC試験に比べて明らかに内部割れが

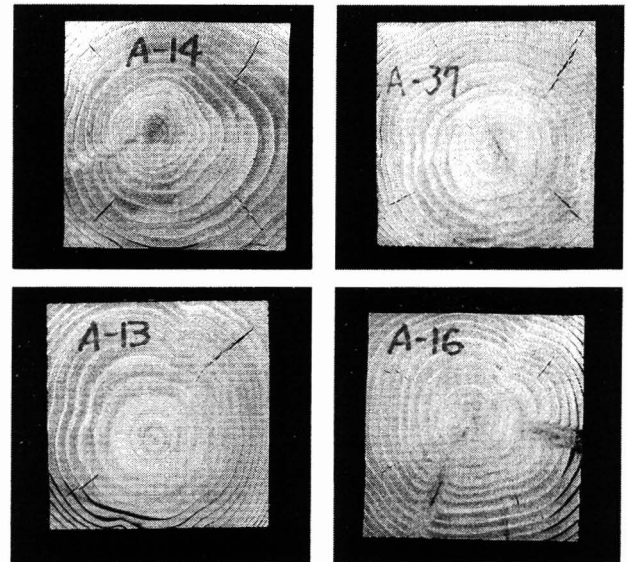


写真-1 高温セット処理後の内部割れ(大きいもの)

多かった。その程度を図中の矢印の材について写真-1に示したが、含水率が20%程度になるとかなり大きい内部割れも見られた。

(4) 応力解放ひずみ

高温セット処理後に、材表面が圧縮応力に転換していることが、その後の乾燥時での材面割れ防止につながるが、この確認には解放ひずみを測定することが最も信頼性のある方法と思われる。

このため、これについて今回の試験材の中から各条件につき6本ずつ(軽量材、中量材、重量材各2本)を徳本らが測定し、その一部を報告している。徳本は⁶⁾、A試験の処理材について6試験体のうち3体において既に表層の応力は引張応力から圧縮応力に転換していたと述べている。

また、印出は⁷⁾110℃の処理材(C試験)よりも120℃の処理材の方がよりドラインセットが形成されるが、重量材は軽量材に比べドラインセットの形成が不十分であったとしている。またB試験ではA試験に比べセットが不十分であったと述べている。

ドラインセット形成の程度は、その後の圧縮応力の大きさを左右する重要な因子であることから、A試験での処理材が最もドラインセットの形成が大きかったと判断された。

1.3 高温セット処理条件の決定

以上の結果を総合的に判断すると、同じ高温セット処理時間であれば、含水率の減少とドラインセットの形成の程度から、処理温度はC試験の110℃よりもA、B試験の120℃の方が有利であっ

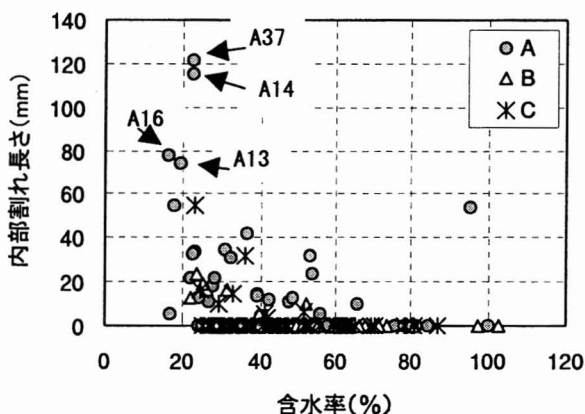


図-8 高温セット処理後の含水率と内部割れ長さの関係

た。また、同じ処理温度 120℃であれば、処理時間が 24 時間では内部割れの発生が多くなり、また、12 時間では含水率の減少が少ないと判断した。さらに解放ひずみからは、A 試験が最も材表層の圧縮応力を大きくする条件であると思われた。

従って、高温セット処理温度は 120℃、処理時間は A と B 試験の中間の 18 時間が適当と判断し、第 2 章での乾燥スケジュールに反映した。

第 2 章 高温セット法による割れ防止効果

2.1 試験方法

2.1.1 供試材

供試材は、長野県下伊那郡根羽村産の樹齢約 40～60 年、末口径 18～24cm のスギより製材された 132×132×3000mm の無背割り心持ち柱材である。各試験 (6 スケジュール) 毎 49 本ずつ全 294 本を供した。

供試材の全乾比重は 0.35～0.37g/cm³、平均年輪幅は 4.7～5.4mm であった。

2.1.2 乾燥スケジュール

乾燥試験は、D、DD、E、EE、F、H 試験の 6 スケジュールとし (表-5)、D と DD 試験は、乾燥末期まで高温乾燥するスケジュールであり E、EE 及び F 試験は高温セット処理後に中温乾燥を行うスケジュールである。また H 試験は、コントロールの意味で、乾燥初期から乾燥末期まで中温乾燥を行う従来型のスケジュールである。

D、DD、E、EE、F 試験の 5 スケジュールでは共通して蒸煮 6 時間の後に高温セット処理 (乾球温度 120℃、湿球温度 90℃、18 時間) を行い、その後 D 試験は乾球 110℃/湿球 80℃/54 時間、DD 試験は乾球 110℃/湿球 80℃/78 時間、E 試験は乾球 90℃/湿球 60℃/126 時間、EE 試験は乾球 90℃/湿球 60℃/168 時間、F 試験は乾球 75℃/湿球 45℃/222 時間の乾燥を行った。

これらに対し H 試験は、乾燥初期から末期まで中温乾燥 (乾球 70～80℃/312 時間) を行った。

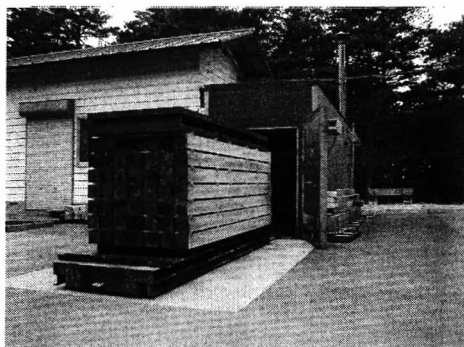


写真-2 乾燥試験の様子

表-5 乾燥スケジュール

| 乾燥スケジュール | 蒸煮 | 高温セット | 乾燥温度 DBT/WBT | 全乾燥時間 (含蒸煮) |
|----------|------------|-----------------|-------------------|-------------|
| D | 6h 95℃ | 18h 120℃/90℃ | 110℃/80℃ | 78 h |
| DD | | | 110℃/80℃ | 102 h |
| E | | | 90℃/60℃ | 150 h |
| EE | | | 90℃/60℃ | 192 h |
| F | | | 75℃/45℃ | 246 h |
| H | 24h 85℃ | — | 70～80℃ /67～68℃ | 336 h |

*h : 時間, DBT : 乾球温度, WBT : 湿球温度

使用した乾燥装置は、収容能力約 3m³ (12cm 角材を 7 列 8 段乾燥可能) の高温型蒸気式乾燥装置である (写真-2)。

2.1.3 測定項目及び測定方法

測定項目及び測定方法については、第 1 章に準じて行った。

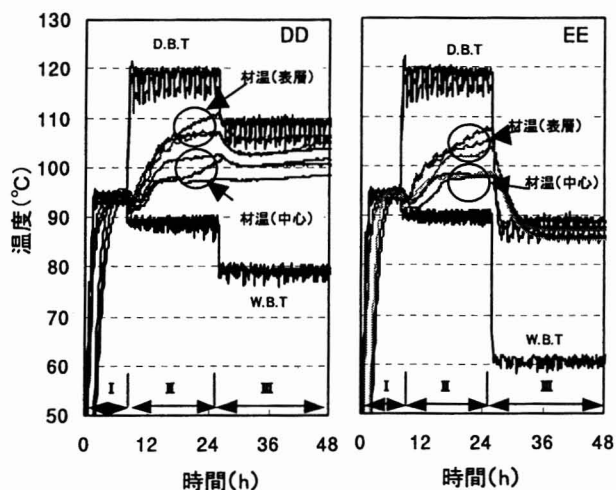
2.2 試験結果

2.2.1 材温の変化

図-9 に DD、EE 試験の結果を示した。

表層の材温変化に着目して見ると、DD 試験、EE 試験ともに 95℃の蒸煮が終わり高温セット処理に切り替わった直後は、いったん 90℃付近まで低下し以後は上昇を続けた。表層の材温は、数時間で 100℃を超えさらに上昇傾向にあった。

さらに高温セット処理を終了し、その後高温乾燥を続ける DD 試験では、材表層の温度は一旦下降したが 100℃以上を維持した。これに対し高温セ



備考 : I : 初期蒸煮, II : 高温セット, III : 乾燥

図-9 装置内温度と材温の初期上昇状況 (DD, EE)

ット処理後に 90℃の中温乾燥に移行した EE 試験では、乾球温度が 90℃に切り替わると材表面の温度は 100℃以下に急激に下降し、その後は乾球温度の 90℃とほぼ同温度で推移した。

このように高温セット処理中に表面の材温が 100℃を超えたことは、表面が軟化状態で、乾燥が急速に進んだことが推測される。またこのことは、高温セット処理中に表面にドラインセットが形成され、さらに応力転換が生じ表面が圧縮応力に転じたため⁶⁾、その後の乾燥での材面割れが抑制されたものと推測された。

2.2.2 初期重量と初期含水率

図-10 に供試材全体の初期含水率分布を、図-11 に初期含水率と初期重量の関係を示した。

各試験において、初期重量と初期含水率はかなり広い範囲にばらついているが、両者の相関はかなり高かった。

初期重量は、H 試験の超重量材 2本を除きおよそ 20~50kg の非常に広い範囲に分布していた。

また初期含水率でも、その範囲はおよそ 30~180%と広い範囲に分布していた。H 試験の 2本

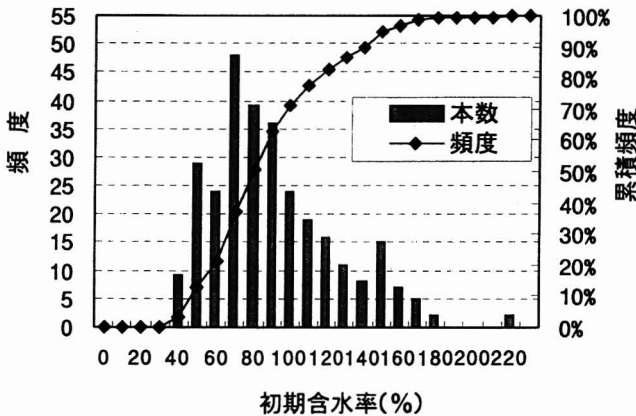


図-10 初期含水率の分布

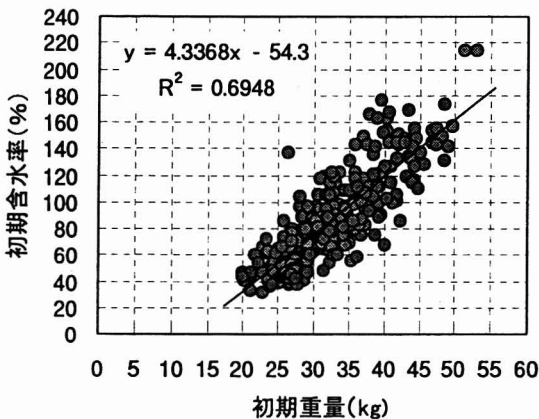


図-11 初期重量と初期含水率との関係

においては 200%を超える含水率であった。乾燥スケジュール別にみた初期含水率で、最も低い平均値を示したのが F 試験の 73.5%であり、最も高い平均値を示したのが H 試験の 98.4%であった。

2.2.3 仕上がり含水率

(1) 初期含水率と仕上がり含水率の関係

初期含水率（初期重量）と仕上がり含水率の間には高い相関が見られ、初期含水率の高い材ほど、或いは初期重量の重い材ほど仕上がり含水率が高い傾向にあった。

初期含水率の平均的値である 80~100%の材について見ると、仕上がり含水率はどの条件においてもおよそ 30%以下であった。

この点を初期重量に置き換えてみると、初期含水率 80~100%の材の重量は、およそ 35kg であり（図-11）、35kg 未満の材は、どの試験においても仕上がり含水率はおおよそ 30%以下であった。

(2) 乾燥スケジュール別の仕上がり含水率

乾燥スケジュール別にみた仕上がり含水率を比較検討するため、初期の試験材条件を統一した。

1) 初期含水率 60~120%の材について、2) 初期重量 35kg 未満と 35kg 以上の材についての 2項目で検討した。表-6 に仕上がり含水率を初期含水率とともに、また、表-7 に仕上がり含水率を初期重量とともに示した。

表-6 乾燥スケジュール別の初期含水率と仕上がり含水率（初期含水率が 60~120%の材）

| スケジュール | 初期含水率 (%) | 仕上がり含水率 (%) |
|--------|-------------|-------------|
| D | 80.6 (14.8) | 21.3 (7.9) |
| DD | 85.3 (17.9) | 18.5 (8.1) |
| E | 84.3 (17.7) | 21.0 (8.5) |
| EE | 87.8 (17.0) | 19.8 (6.3) |
| F | 82.5 (18.1) | 20.6 (7.5) |
| H | 84.4 (15.6) | 25.6 (8.4) |

注：() 内数値は標準偏差

表-7 乾燥スケジュール別の初期重量と仕上がり含水率

| スケジュール | 初期重量 35kg 未満 | | 初期重量 35kg 以上 | |
|--------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | 初期重量 (kg) | 仕上がり含水率 (%) | 初期重量 (kg) | 仕上がり含水率 (%) |
| D | 30.2 (3.6) | 20.3 (8.0) | 41.3 (3.5) | 41.1 (12.8) |
| DD | 29.8 (3.6) | 13.7 (6.2) | 42.3 (3.6) | 32.6 (5.7) |
| E | 29.0 (3.7) | 17.3 (6.1) | 40.3 (3.1) | 38.1 (13.7) |
| EE | 28.4 (4.3) | 15.0 (6.7) | 40.4 (3.2) | 31.5 (12.0) |
| F | 29.1 (3.3) | 17.1 (5.4) | 39.8 (4.6) | 29.1 (11.6) |
| H | 29.5 (3.6) | 21.7 (7.3) | 42.7 (5.0) | 46.1 (18.9) |

注：() 内数値は標準偏差

1) 初期含水率 60~120%の材の仕上がり含水率 (表-6, 図-12, 図-13)

D, DD, E, EE, F 試験について含水率は 20%前後に仕上がっているのに対し, H 試験では, 25%の仕上がりであった。

乾燥スケジュール別の仕上がり含水率の出現頻度を見ると, 高温セット処理後に高温乾燥を行う D, DD 試験, また高温セット処理後に中温乾燥を行う E, EE 試験, さらに F 試験において, 5~6割の材が仕上がり含水率 20%以下となった。また, 仕上がり含水率の基準を 25%以下に設定すると, 8割近くの材がこの範囲にあった。

これに対し中温乾燥である H 試験では, 仕上がり含水率 20%以下となるのはおよそ 3割, 仕上がり含水率 25%以下では 6割弱の材がこの範囲にあった。さらに, 含水率 15%以下の材は存在しなかった。このことから, H 試験においてはさらなる乾燥時間の延長が必要と思われた。

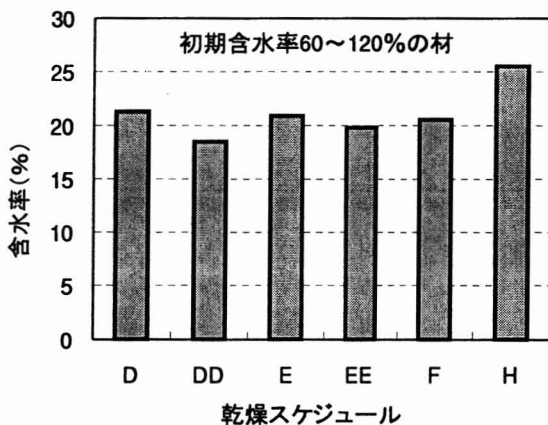


図-12 乾燥スケジュール別にみた仕上がり含水率

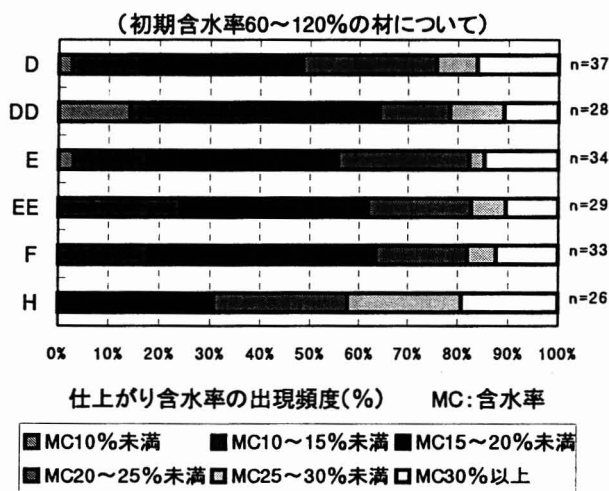


図-13 乾燥スケジュール別にみた仕上がり含水率の出現頻度

いずれの乾燥スケジュールにおいても仕上がり含水率のバラツキが大きく, 初期含水率或いは初期重量による選別が必要であると思われた。

2) 初期重量 35kg 未満及び 35kg 以上の材の仕上がり含水率 (表-7, 図-14, 図-15)

前項では, 初期含水率を限定して, 乾燥材の仕上がり含水率を検討したが, 現場での乾燥を考えた場合, 全乾法でこの初期含水率を求めるのは不可能に近い。従って初期含水率で仕上がり含水率を推定することは極めて困難であると思われる。

ここでは, 初期含水率と高い相関にある初期重量 (図-11) で仕上がり含水率を乾燥スケジュール別に検討した。

初期重量 35kg 未満の材について, 仕上がり含水率の平均値は, D と H 試験がおおよそ 20~22%であり, DD, E, EE 及び F 試験においては 13~17%であった。

仕上がり含水率の乾燥スケジュール別順位は, 前項の初期含水率 60~120%の材の仕上がりと同結果であった。

初期重量 35kg 以上の材については, 乾燥スケジュール別に初期重量に大きなばらつきがあり, 仕上がり含水率がほとんど 30%以上であったことから, 乾燥材と言える仕上がりではなかった。

次に, 乾燥スケジュール別の仕上がり含水率の出現頻度を, その仕上がり乾燥材と見なされる, 初期重量 35kg 未満の材に限定して検討した。

初期重量 35kg 未満の材について, DD, E, EE, F 試験ではおよそ 8割近くの材が仕上がり含水率 20%以下となり, H, D 試験では 5~6割の材が 20%以下の含水率となった。

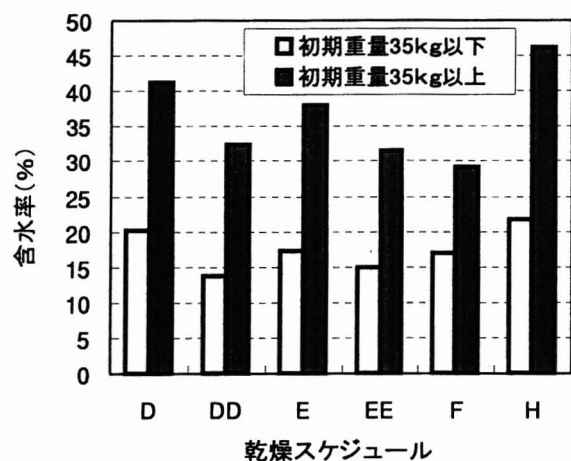


図-14 乾燥スケジュール別にみた仕上がり含水率

さらに仕上がり含水率の基準を 25%以下に設定すると、DD, E, EE, F 試験では9割以上が、D 試験では8割の材が、また、H 試験では7割強の材がこの範囲にあった。

以上の結果から、初期重量 35kg 未満の材については、割れ等を除いて仕上がり含水率のみに着目した場合は、DD, E, EE, F 試験の乾燥スケジュールが適当であると思われた。しかし、初期重量 35kg 以上の材については、どの乾燥スケジュールにおいても乾燥不足であり、乾燥スケジュールの改善が必要と思われた。

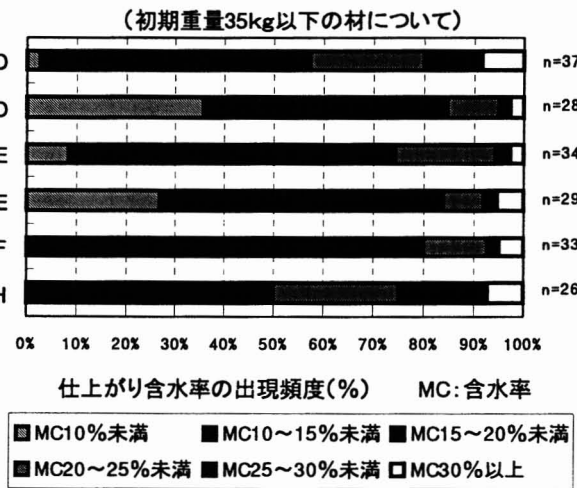


図-15 乾燥スケジュール別に見た仕上がり含水率の出現頻度

2.2.4 仕上がり含水率と水分傾斜

各乾燥スケジュールにおいて、初期重量別に軽量材 (25kg 程度)、中量材 (33kg 程度)、重量材 (38kg 程度) の各 3 本ずつについて乾燥後の材内水分傾斜を測定した。

他の一般的な乾燥方法に比べて、高温セット法による乾燥での材内水分傾斜の特徴は無く、凸型の水分傾斜を示し、仕上がり含水率が低くなるに従って材内の水分傾斜は緩くなった。

今回試験を行った 13.2cm 正角の断面を持つ材の水分傾斜は、同程度の仕上がり含水率の材と比較しても、乾燥スケジュールに関係なくほぼ同様な傾向を示した。つまり乾燥時間が最短の高温乾燥 D 試験では 3.25 日間、最長で中温乾燥 H 試験の 14 日間であったが、材内水分傾斜は、乾燥スケジュールよりも乾燥終了時の仕上がり含水率に対応していた。

そこで、水分傾斜を測定した全ての試験データ

(54 体) について、仕上がり含水率区分別に、材内水分傾斜をまとめたのが図-16 である。

仕上がり含水率に最も近い含水率を示すのは、第 2 層目 (表層から約 1.5~3.0cm 部) の含水率であった。

また、表層の含水率から全体の含水率をある程度推測することが可能であり、例えば、含水率測定が容易である表層の含水率が 12~13% であれば、全体の含水率は 20% 以下となり、この時の中心部の含水率はおおよそ 30% の値を示すと推測される。データ数が増えれば、さらに信頼性の高い値が得られるものと思われる。

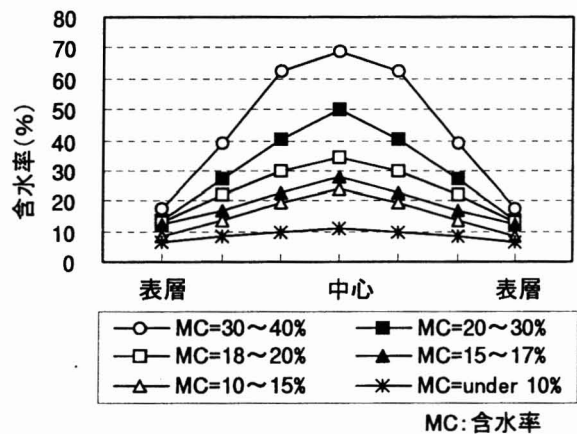


図-16 各仕上がり範囲における材内水分傾斜

2.2.5 収縮率

図-17 に仕上がり含水率と収縮率との関係を示した。

同程度の仕上がり含水率に対する収縮率のばらつきは、各スケジュールとも大きいですが、含水率 20% 付近での収縮率は 1.5~3.0% であった。また含水率 10% 付近での収縮率は 2.0~3.5% であった。

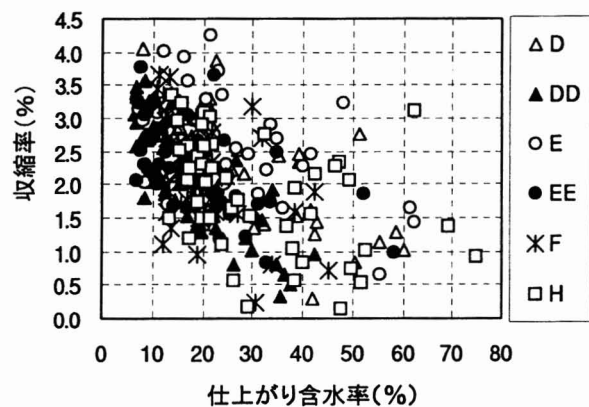


図-17 仕上がり含水率と収縮率の関係

高温乾燥である D, DD 試験と中温乾燥である H 試験を取り出して、仕上がり含水率 20% 付近の値で比較すると、両者の差は認められなかった。

スギ板材の試験では、高温ほど収縮率が大きくなるという報告もあるが⁸⁾、本試験では収縮率に与える温度の影響は少ないものと思われた。

収縮率と材面割れの関係を検討したが、両者の間には明確な関係は認められなかった (図-18)。

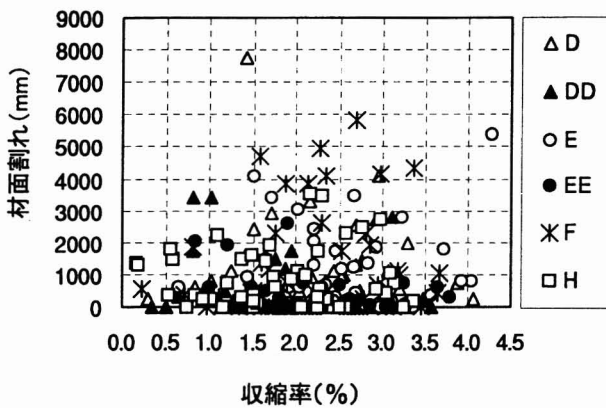


図-18 収縮率と材面割れの関係

2.2.6 材面割れ

(1) 乾燥スケジュール別の材面割れ発生量

材面割れの測定において、高温セット処理を行った材の中には、乾燥終了時に割れが閉じた形跡のあるものも認められたが、割れ幅 1 mm 以下の割れは測定から除外した。

材面割れが存在しなかった材の本数割合は、D, E 試験が 3 ~ 4 割で、乾燥時間を延長した DD, EE 試験では 5 割を超えた。乾燥時間が長くなるほど材面割れが少なくなることは、材面割れが閉塞した結果であった。これについては後段で考察する。

また、H 試験においては約 2 割の材に材面割れは存在しなかった。

図-19 に乾燥スケジュール別にみた乾燥材 1 本当りの材面割れ発生量を示した。

最も材面割れの少なかったのは EE 試験、次いで DD 試験であった。これらはそれぞれ E 試験と D 試験の乾燥時間を延長したものであり、時間を延長したことにより材面割れが少なくなったことを示している。

これら 4 者は、乾燥初期に高温セット処理 (乾球温度 120℃, 湿球温度 90℃) を 18 時間行っており、材表層に意図的に引張りのドラインセットを形成させた。従って、内部の乾燥が進み始めると材表層は圧縮応力に転じ、D 試験が DD 試験へ、

E 試験が EE 試験へとより乾燥が進むにつれて、表層の圧縮応力は大きくなり⁶⁾、このため一部の材面割れが閉塞し、結果として材面割れが少なくなったものと思われた。この材面割れの閉塞した様子は外観的にも確認された (写真-3)。

H 試験の場合、D 試験と材面割れの発生量はほぼ同じであったが、材表層の圧縮応力が弱いこと⁶⁾、仕上がり含水率が依然高いことから、さらに乾燥が進むにつれて材面割れが増す可能性も考えられた。

F 試験の場合は、高温セット処理を行っているにも関わらず、他の試験より材面割れが多かった。この原因については断定できないが、高温セット処理時間が 18 時間では、試験材の中には十分なドラインセットが形成されない材もあり、このような材に対して、乾燥後半の温度が 90℃ (E, EE 試験) より 75℃ (F 試験) の方が割れに対してその防止効果が少なかった⁹⁾ ものと思われた。

また、このように考えた場合、乾燥後半を低い温度で乾燥する場合は、内部割れはやや多くなるが、乾燥初期の高温セット処理時間をある程度延長することが必要であると思われた。

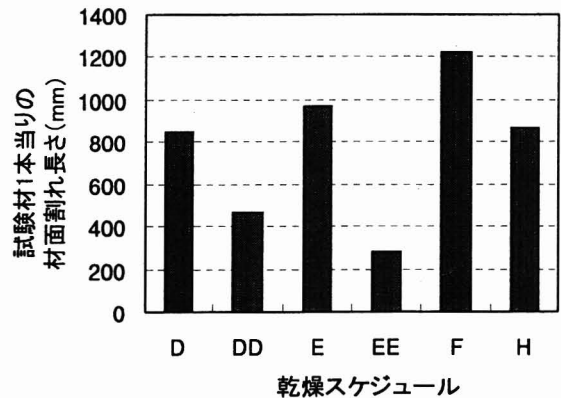


図-19 乾燥スケジュール別の柱 1 本当りの材面割れ延長 (4 材面の合計)



写真-3 乾燥中に閉塞した材面割れ

(2) 仕上げ含水率と材面割れ発生量の関係

高温セット処理を行うと、その後の乾燥で、含水率が低下するに従い材面割れが閉塞していくことが確認された。

今回行った試験のうち、高温セット処理を行ったD, DD, E, EE, F試験について、仕上がり含水率を5%区切りとし、この区分毎における材面割れの発生量を図-20に示した。

乾燥初期に発生した材面割れは、含水率20%まではこれを維持するかたちで推移し、20%を下回ると急激に減少している。この原因は前述のとおり初期に発生した一部の材面割れが閉塞した結果であると思われる。

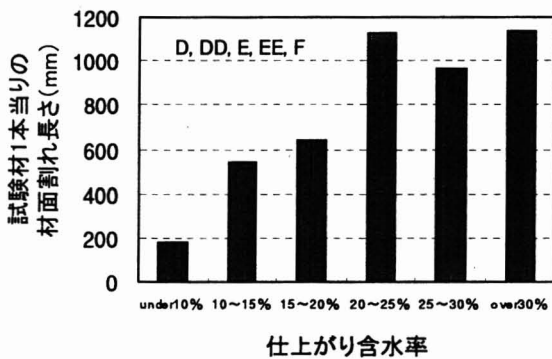


図-20 仕上げ含水率区分における材面割れ延長

水率まで乾燥したDD試験では9割近い材に内部割れが発生し、その程度も大きかった。

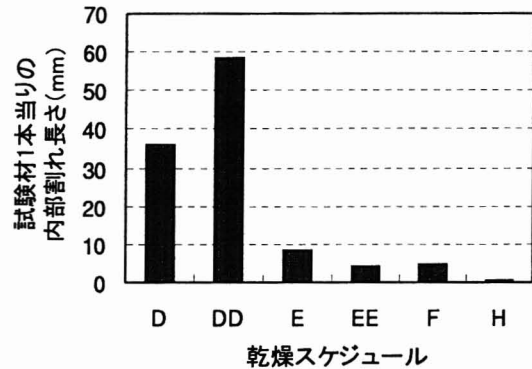
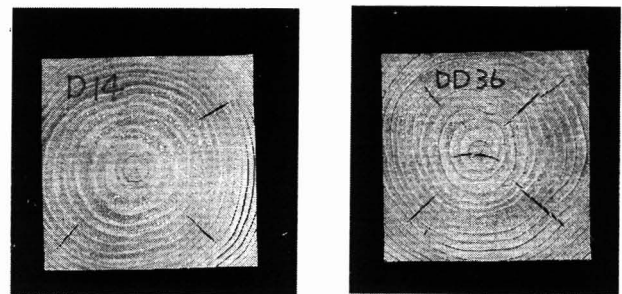


図-21 乾燥スケジュール別の内部割れ発生量



内部割れ長さ=78mm
含水率=15.7%

内部割れ長さ=150mm
含水率=9.2%

写真-4 終始高温乾燥 (D, DD試験)での内部割れの様子

2.2.7 内部割れ

図-21に乾燥スケジュール別にみた乾燥材1本当りの内部割れを示した。

内部割れが多いのは、D, DD試験であり、E, EE試験及びF試験では少なかった。H試験においては、1本にわずかに内部割れが認められただけであった。

これらの結果は、D, DD試験が乾燥末期まで100℃以上の高温を与え続けたことにより内部割れが発生し、これに対しE, EE, F試験では高温セット後に100℃以下の温度で乾燥を続けたことで内部割れが抑制できたことを示している。

H試験においては乾燥初期から100℃以下の温度(70~80℃)で乾燥を行ったことが、内部割れがほとんど発生しなかった原因と考えられた。

内部割れの発生した材の本数割合は、最も少なかったのはH試験であり、内部割れが確認されたのは1本のみであった。E, EE, F試験では、2~4割の材に程度の小さい内部割れが発生した。これらに対し、終始高温乾燥を続けたD, DD試験では、6割以上の材に内部割れが発生し、特に低含

2.2.8 割れに影響する因子

(1) 割れと動的ヤング係数

乾燥後の動的ヤング係数と材面割れの関係については、動的ヤング係数が大きいと材面割れの長さが長くなる材も見られるが、はっきりした傾向はつかめなかった。

また、動的ヤング係数と内部割れの関係についても、両者の関係は明確ではなかった。

(2) 材面割れと内部割れの関係

内部割れの多かったD, DD試験について、材面割れと内部割れの関係を図-22に示した。

材面割れが発生することにより材表面の応力が解放されれば、その後に発生する内部割れの危険が少なくなる、つまり材面割れが多ければ内部割れが少ないだろうと予想したが、材面割れと内部割れの両者ともに発生する材が多く見られ、両者の関係はあまり明確ではなかった。

しかし、この中でも材面割れの無い材は、内部割れが多い傾向にあった。

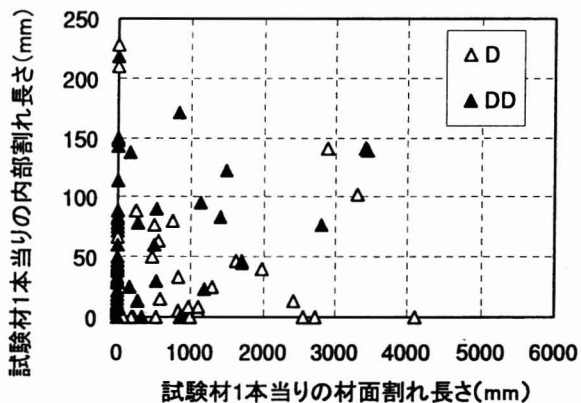


図-22 材面割れと内部割れの関係 (D, DD)

(3) 仕上がり含水率と内部割れの関係

内部割れの多かったD, DD試験と比較的内部割れの少なかったE, EE試験を取り上げ、仕上がり含水率と内部割れの関係を図-23に示した。

D, DD試験では含水率が30%を下回るあたりから内部割れが大きくなる材が目立ち、E, EE試験においても、含水率が20%を下回るあたりから内部割れが大きくなる傾向が見られた。特に、D, DD試験では、含水率が20%を下回る材の中では、大きな内部割れが存在するものが多かった。

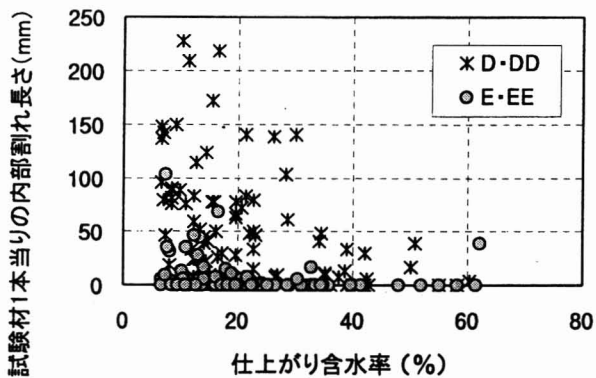


図-23 仕上がり含水率と内部割れの関係

2.2.9 乾燥後の材色

乾燥終了後、3mm程度材表面を鉋削し、この部分の心材における材色(L*, a*, b*)を乾燥スケジュール別に検討した。

どの試験においても心材の明度L*は65~75の範囲にあり、大きな差は見られなかった(図-24)。

図-25には、同様に乾燥スケジュール別の彩度(a*赤味とb*黄味)を示した。

高温乾燥であるD, DD試験と中温乾燥であるH

試験とを比較すると、D, DD試験では、H試験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、含水率試験片を採取した残り1m材を屋外にべた積みしておいたが、太陽光の当たっていた部分については、時間が経つにつれ写真-5のとおり色あせた状態になり白色化した。

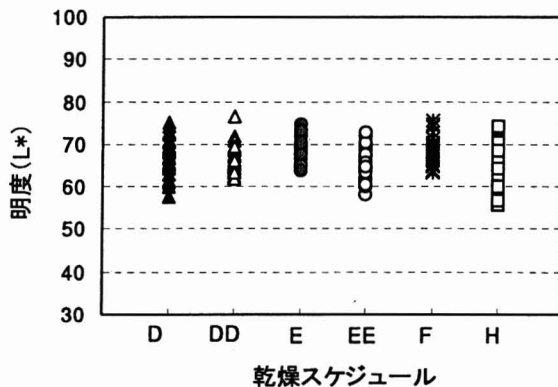


図-24 乾燥スケジュール別の乾燥後の明度

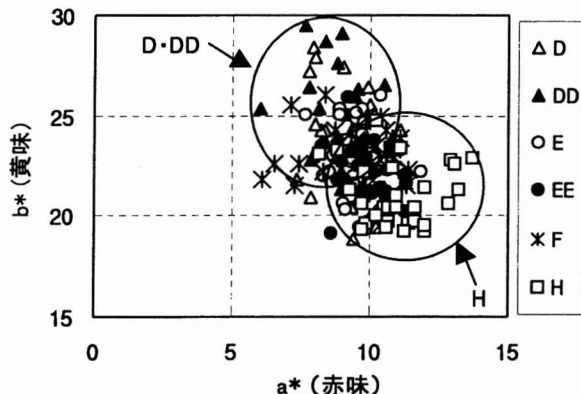


図-25 乾燥スケジュール別の乾燥後の彩度

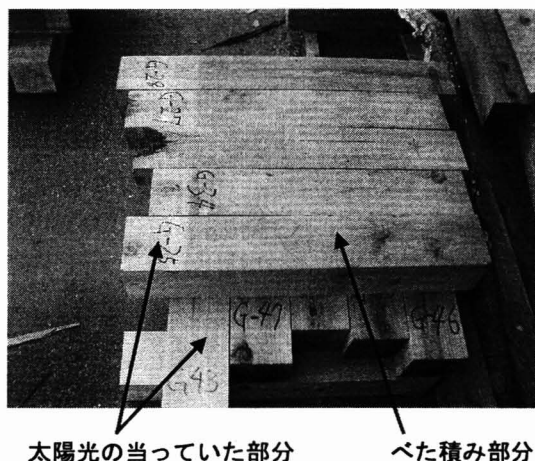


写真-5 屋外暴露材の変色

2.2.10 灯油使用量

図-26 に乾燥スケジュール別の灯油使用量を示した。

乾燥スケジュール別に仕上がり含水率が異なるため、単純な比較はできないが、H 試験の灯油使用量を 100 とした場合、D, DD, E, EE, F 試験の順に 66, 68, 78, 91, 148 であり、D 試験が最も少なく、H 試験のおよそ 2/3 の使用量であった。また、F 試験がかなり使用量の多い結果となったが、この原因については定かでない。

蒸煮と高温セット処理を除いた乾燥課程での、1 時間当りの灯油使用量を図-27 に示した。少ない順に H, EE, E, DD, F, D 試験の順であり、F を除けば乾球温度が高くなるに従い 1 時間当り使用量は多くなる傾向にあった。

D 試験における蒸煮 (95℃)、高温セット処理 (120℃)、高温乾燥 (110℃) のそれぞれの期間における灯油使用量を図-28 に示した。時間の長い高温乾燥時での灯油使用量が最も多いが、これを 1 時間当りの灯油使用量で見ると、蒸煮時で 6.4 ™/h、高温セット時で 7.9 ™/h、高温乾燥時で 3.9 ™/h の使用となり、温度の高い高温セット時が最も多く灯油を使用した。

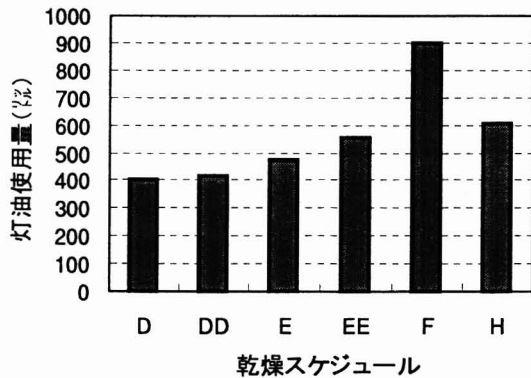


図-26 乾燥スケジュール別の全灯油使用量

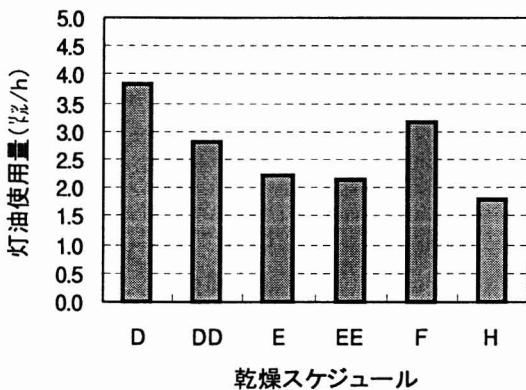


図-27 乾燥スケジュール別の 1 時間当りの灯油使用量

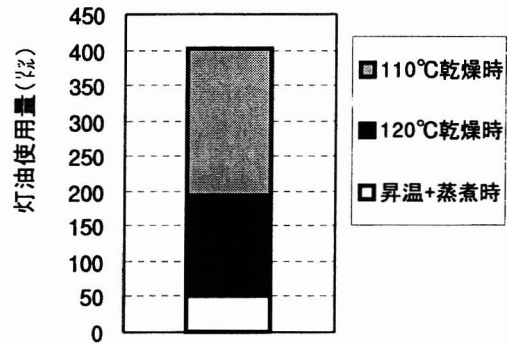


図-28 D スケジュールにおける灯油使用量の内訳

2.2.11 追加試験

今回行ったスケジュールの内、最も実用可能な乾燥スケジュールとして、乾燥時間や材面割れ、内部割れの発生量から判断すると EE 試験が最も適当と思われた。しかし、この中で問題として残されたのは初期重量 35kg 以上の材については十分な仕上がり含水率が得られなかったことである。

そこで、この問題に対して追加試験 EEE を実施した。試験本数は 49 本である。乾燥スケジュールは EE 試験のスケジュールを基本とし、乾燥初期の高温セット処理の時間と後半の中温乾燥の時間を延長することによって、初期重量 35kg 以上の材を 25% 以下の含水率に仕上げることを試みた。

EEE 試験の乾燥スケジュールは、蒸煮 6 時間の後に高温セット (乾球温度 120℃、湿球温度 90℃、36 時間) を行い、その後、中温乾燥 (乾球温度 90℃、湿球温度 60℃、174 時間) を行った。

全乾燥時間は 216 時間 (9 日間) であった。

(1) 仕上がり含水率

2.2.3 (2) 項と同様に、初期含水率が 60~120% の材に限定して、仕上がり含水率を E, EE 試験と併せて図-29 に示した。さらに、同図に初期重量 35kg 未満及び 35kg 以上の材についても示した。

EEE 試験では、EE 試験よりも高温セット処理の時間を 18 時間その後の乾燥を 6 時間延長したため、仕上がり含水率がそれなりに低下した。初期含水率が 60~120% の材については、仕上がり含水率は平均値で 15.6%、初期重量 35kg 未満の材でみると 13.7%、初期重量 35kg 以上の材では 26.1% であった。

この EEE 試験の目的であった初期重量 35kg 以上の材を、含水率 25% 以下に仕上げることは、平均値ではほぼ近い値を示したが、仕上がりは依然バラツキの多いものであった。

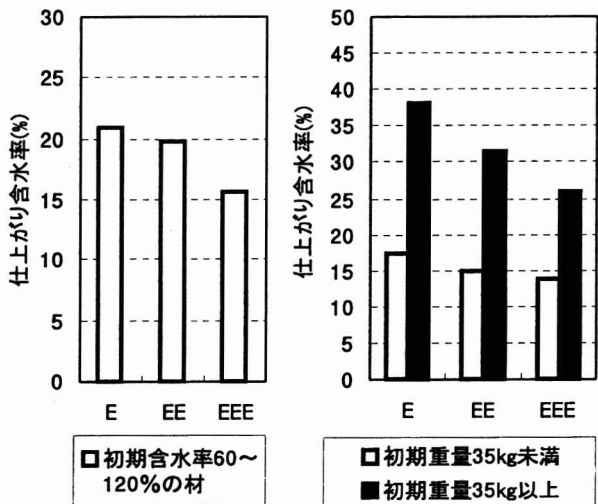


図-29 E, EE, EEE スケジュールにおける仕上がり含水率

(2) 材面割れと内部割れ

材面割れ及び内部割れの発生量を、重量区分別にE, EE 試験と併せて図-30, 31に示した。

EEE 試験における材面割れの平均値(重量区分なし)は、EとEE試験の中間的な値の727mmとなった。仕上がり含水率から考えると、EEE試験が最も低いため(図-29)、図-20に示す結果から材面割れの発生量もかなり減少していることを期待したが、結果はEE試験よりも多かった。しかし、図-20における含水率15~20%の材面割れ発生量は、600mmほどであり、この数値を考慮すると、EEE試験における727mmという値は、仕上がり含水率から考えて妥当な値と判断された。

また、初期重量が35kg以上の材では35kg未満の材に比べ材面割れの発生が多い傾向が視われた。

次に内部割れについてであるが、前段までの結果では、①乾燥中期から末期にかけて発生すること、②この乾燥中期から末期にかけて中温で乾燥すると極端に内部割れが減少すること、③高温セット処理中でも乾燥がかなり進んだ材には内部割れが確認される材がある、等が明らかにされた。

しかし、図-31のEEE試験では、EやEE試験に比べかなり多くの内部割れが発生した。これはEEE試験の一つの目的であった、初期重量の重い材(35kg以上の材)の乾燥をどうしたら効率良く進められるか、ということで高温セット処理時間をEやEE試験に比べ2倍の36時間に設定したが、このことが35kg未満の材に対し③の理由から内部割れが多く発生したものと思われた。

このことについて初期重量35kg未満と35kg以上

の材について、個々の材の内部割れの発生量を図-32に示した。

高温セット処理中に乾燥がかなり進んだと思われる35kg未満の材に内部割れが目立った。

これに対し35kg以上の材に内部割れが少なかったのは、含水率がまだ高いためであったと思われる。しかし、その後さらに乾燥を続けたとしても、中温乾燥であれば含水率が低下したとしても、これまでの結果から判断して、内部割れはそれほど大きく変化することはないと思われた。

(図-32中で、初期重量35kg以上の材について内部割れの大きい2体は、初期重量35.2kgと35.9kgで、重量区分の境にあり、これら2体については高温セット処理中にかなり内部割れが発生していたと思われる。)

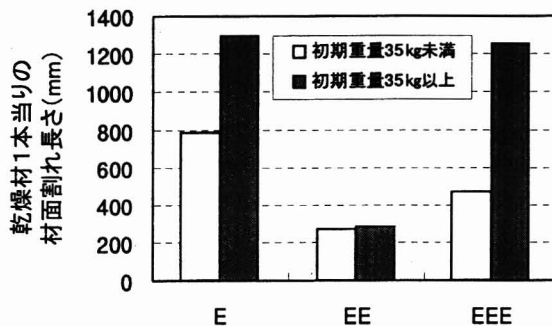


図-30 E, EE, EEE 試験における材面割れ

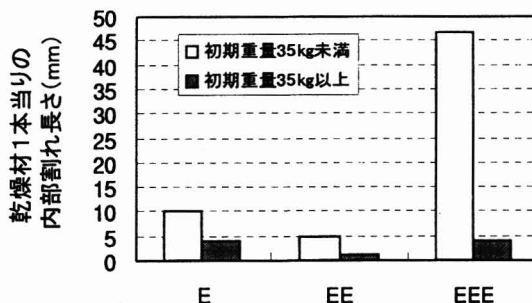


図-31 E, EE, EEE 試験における内部割れ

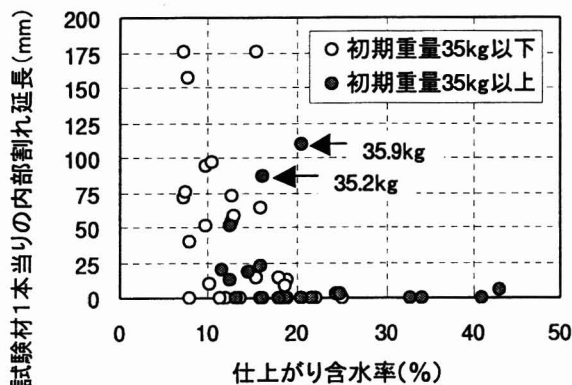


図-32 仕上がり含水率と内部割れの関係 (EEE 試験)

以上のように、EEE 試験での乾燥スケジュールは、初期重量 35kg 以上の材の乾燥に対して、材面割れ及び内部割れの抑制という点では有効であると判断されたが、仕上がり含水率では、さらに中温乾燥部分の時間を延長する必要があると思われる。

2.3 まとめ

スギ柱材（132mm 心持ち無背割り正角）の高温乾燥について、高温セット法によるスケジュール別の乾燥試験を行い、乾燥時間、仕上がり含水率、材面割れ、内部割れ等の比較検討を行い以下の結果を得た。

蒸煮後の材面割れ抑制のために行う高温セット処理（高温低湿処理）時間は、材表層が引張応力から圧縮応力に転換する時間が必要であり、これには 12 時間以上の時間が必要であると思われる。また、内部割れ発生状況と併せて判断すると一般的には 18 時間程度が適当と思われた。この場合、表層の含水率はおよそ 20%であった。

初期含水率 60~120%の材について、高温セット処理後の高温乾燥では 4.25 日間（DD 試験）で仕上がり含水率が平均 18.5%、高温セット処理後の中温乾燥では 8 日間（EE 試験）で平均 19.8%、中温乾燥のみでは 14 日間（H 試験）で平均 25.6%であった。

また、初期含水率のばらつきの大きい材を、一度の乾燥で仕上がり含水率を揃えることは、いずれの乾燥スケジュールでも困難であった。

乾燥初期の高温セット処理による材面割れの抑制効果は大きかった。また、高温セット処理を行った材の材面割れ長さは、含水率が低下するほど短くなった。これは材面割れの一部が、含水率の低下と伴に閉塞していくことが原因していた。

内部割れは、高温セット処理後の高温乾燥において多く発生し、含水率が低下するに従って増大した。しかし、高温セット処理後の中温乾燥では内部割れの発生は極端に少なくなった。

初期含水率の高い或いは初期重量 35kg 以上の材の乾燥に対しても、高温セット処理後（高温セット時間を 36 時間に延長）の中温乾燥が材面割れ及び内部割れの抑制という点では有効であると判断された。しかし、仕上がり含水率では、さらに後半の中温乾燥での時間を延長する必要があると思われる。

謝辞

この研究の機会を与えて頂き、また実施するにあたり多大なるご協力を頂いた秋山俊夫氏及び故榎原正規氏に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 大分県，“大分県産スギ乾燥材生産技術マニュアル” 29-54, (1997)
- 2) 三好誠治，西浦政隆，愛媛県林業試験場研究報告，78-87, (1998)
- 3) 例えば藤内崇，武山倫，吉田孝久，太陽/風力エネルギー講演論文集，351-354, (2002)
- 4) 吉田孝久，橋爪丈夫，藤本登留，木材工業 Vol. 55, No. 8, 357-362, (2000)
- 5) 吉田孝久，未発表資料
- 6) 徳本守彦，坂口奈央，武田孝志，吉田孝久，第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集，129, (2003)
- 7) 印出晃，榎原正規，徳本守彦，武田孝志，吉田孝久，伊東嘉文，秋山俊夫，第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集，127, (2003)
- 8) 山田範彦，永井智，村上浩二，兵庫県林業技術センター研究報告第 45 号，34-36, (1998)
- 9) 三村典彦，橋爪丈夫，吉田孝久，奥村俊介，小林大徳，向山繁人，長野県林業指導所研究報告第 1 号，19-43, (1986)

資料 内部割れの写真 (DD : 高温セット+高温乾燥と EE : 高温セット+中温乾燥の違い)

