

国産針葉樹材の高付加価値化技術の高度化

目 的

現在、木材需要の大半は、住宅分野に関するものであるが、木造住宅率の低下などにより、近年の木材需要は停滞している。一方、わが国の造林地から産出されるカラマツをはじめとするスギやヒノキなどの針葉樹は、今後その供給量を増大する見通しにある。また近年の急激な円高傾向などにより、国産材は輸入材に比べ著しく競争力を低下させている。

そこで、これらの資源を有効利用するとともに、国産材を取り扱う木材産業の収益向上を図るため、木材についての高付加化技術の改良や開発を図ることが緊急に必要となっている。このような背景をふまえて、今後の針葉樹材の生産見通し及び木造住宅の品質向上の点から重要な問題である柱材の乾燥技術の開発、及びこれに付随する各種の調査・試験を実施し、国産針葉樹材の高付加価値化技術の高度化を図る。

本研究は国の補助事業「大型プロジェクト研究」として実施したものである。またここでの報告は「建築用針葉樹材の乾燥技術の開発」という課題について以下各章に分けて記した。

- I. 流通段階における実態調査
- II. 建築現場における実態調査
- III. 木造住宅部材の含水率調査
- IV. 仕上げ含水率状態とその後の形質変化の分析
- V. 心持ち柱材の乾燥スケジュールの確立
- VI. 乾燥前処理方法の検討 葉枯らし材の材質試験
- VII. カラマツ建築材の乾燥に伴う寸法変化について
- VIII. スギ板材の人工乾燥（低温、中温、高温）
- IX. カラマツ材の乾燥温度別による強度特性

V 心持ち柱材の乾燥スケジュールの確立

— 高 温 乾 燥 —

吉 田 孝 久
橋 爪 丈 夫

要 旨

カラマツ、ヒノキ、スギ柱材の乾燥時間の短縮をねらいとした95℃の高温乾燥についてその効果を検討した。その結果、カラマツ及びヒノキの12cm正角背割材は初期の生材含水率が低いこともあって、乾燥開始3日後で含水率15%を下回り、調湿も含めて4日間で乾燥を終了した。またスギ12cm正角背割材は、初期含水率が高かったにもかかわらず、乾燥開始5日後で含水率20%を下回りかなりの時間短縮ができた。一方このスギ背割材に対して無背割材は、乾燥開始12日目においても含水率は低下せず、この時点で含水率30%を下回る程度であった。

1. 試験の目的

今後その供給量の増大することが期待される国産針葉樹材の高付加価値化を図るため、その一施策として、木造住宅の品質向上の点から重要な問題である柱材の乾燥技術の開発をカラマツ、ヒノキ、スギについて行う。

通常柱材の蒸気式乾燥は、70~80℃程度の中温域での乾燥が一般的であり、この温度で乾燥した場合、カラマツやヒノキのように比較的生材含水率の低い材はおよそ9日間、スギのように生材含水率の高い材は19日間と長期間を要するため、経済的にみて満足のいく乾燥が出来ないのが現状である。したがって、柱材の乾燥時間短縮を念頭においた95℃の高温乾燥についてその効果を検討した。

2. 試験の方法

(1) 供試材

カラマツ、ヒノキ及びスギの末口径18~20cm、長さ3mのJAS1等素材より12cm正角(柱材)を製材しこれを供試材とした。カラマツ20本、ヒノキ20本及びスギ20本については背割り材とし、また圧縮の効果を検討するために、このうち半数の供試材に総荷重1トンの圧縮を加えた。スギについてはさらに圧縮無しは無背割り材20本の高温乾燥試験を実施し、乾燥特性について背割り材との比較の中で検討した。供試材の条件を表-1に示す。

表 - 1 供試材の条件

| 条件 区分 | 第1回乾燥 | | | | 第2回乾燥 | | 第3回乾燥 |
|----------|-------|-----|------|-----|-------|-----|-------|
| | カラマツ | | ヒノキ | | スギ | | スギ |
| | 背割り材 | | 背割り材 | | 背割り材 | | 無背割り材 |
| | 圧縮 | 非圧縮 | 圧縮 | 非圧縮 | 圧縮 | 非圧縮 | 非圧縮 |
| 本数 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 |

(2) 乾燥スケジュール

乾燥温度は乾燥時間の短縮の意味から表-2に示す高温乾燥スケジュールを採った。カラ

マツ、ヒノキに関しては比較的材面割れに強いことから、乾球と湿球の温度差を初期5℃から末期17℃としたが、スギについては、材面割れが発生しやすいことから、含水率35%までは温度差5℃以下つまり湿度80%以上を保つようにした。乾燥装置は、当センターの7石入I F型蒸気式である。

(3) 検討内容

乾燥前及び乾燥後に重量、幅、厚、曲がり、背割り幅を測定し、形質変化の検討を行った。また含水率の平均的経時変化及び含水率の材内分布の変化を調査するため、供試材とは別に試験材を用意し、これにより経時的に含水率の調査を実施した。

さらに、柱材の中心部の温度上昇状況を調査するため、供試材の1本に熱電対を材面から5cmの深さと材面から3cmの部分に埋め込んだ。

表-2 乾燥スケジュール

| 第1回乾燥 | | | 第2回乾燥 | | | 第3回乾燥 | | |
|---------|-----------|----------|---------|-----------|----------|---------|-----------|----------|
| 含水率 (%) | カラマツ・ヒノキ | | 含水率 (%) | スギ (背割有) | | 含水率 (%) | スギ (背割無) | |
| | 乾球温度 (°C) | 温度差 (°C) | | 乾球温度 (°C) | 温度差 (°C) | | 乾球温度 (°C) | 温度差 (°C) |
| 生~30 | 95 | 5 | 生~35 | 95 | 5 | 生~35 | 95 | 4 |
| 30~25 | 95 | 8 | 35~25 | 95 | 7 | 35~30 | 95 | 5 |
| 25~20 | 95 | 12 | 25~15 | 95 | 10 | 30~25 | 95 | 7 |
| 20~15 | 95 | 17 | 調湿 | 95 | 0 | 25~20 | 95 | 10 |
| 調湿 | 95 | 0 | | | | | | |

★ 初期蒸煮は5時間実施

★ 調湿は6時間実施

3. 試験の結果

(1) 材温上昇状況

図-1にカラマツ柱材及びスギ柱材の蒸煮による材温上昇状況を示す。この材温上昇は、被乾燥材の初期の材温や含水率、それと棧積み本数等により影響されるもので、特に被乾燥材の初期材温の低い冬季にはだいぶ時間のかかるものと予想される。カラマツ柱材の場合は10月の試験であり、スギ柱材は12月の試験である。

グラフ上には乾燥装置内の室温も同時に示したが、この室温の上昇については両者ともおよそ1時間半で上限の96℃に達している。一方、材温の上昇についてみると、カラマツ、スギとも同様なS字曲線を示し、室温と同じ96℃近くになるには、カラマツ柱材でおよそ3時間、スギ柱材でおよそ3時間半を要した。

カラマツ心去り無背割り材における同様な試験(1)についてみると、この試験時期は1月であったが室温上昇に約1時間半、中心部材温上昇に約6時間を要した。これをみると室温上昇については季節的な変動は見られないが、材温上昇となると冬季の厳寒期ではやや時間がかかり、背割りの影響もかなり大きいことが伺える。

また、材面より5cm深さ(材中心部付近)の材温上昇は、背割りからの熱の伝達があったせいか材面より3cm深さの部分での温度上昇よりおよそ10分~15分程度の遅れであった。

材温上昇については以上のような結果となったが、材温が最高温度に達する後半に上昇率が急激に低下することから、柱材を代表とした断面の大きい材の人工乾燥には、材温を夜間に一

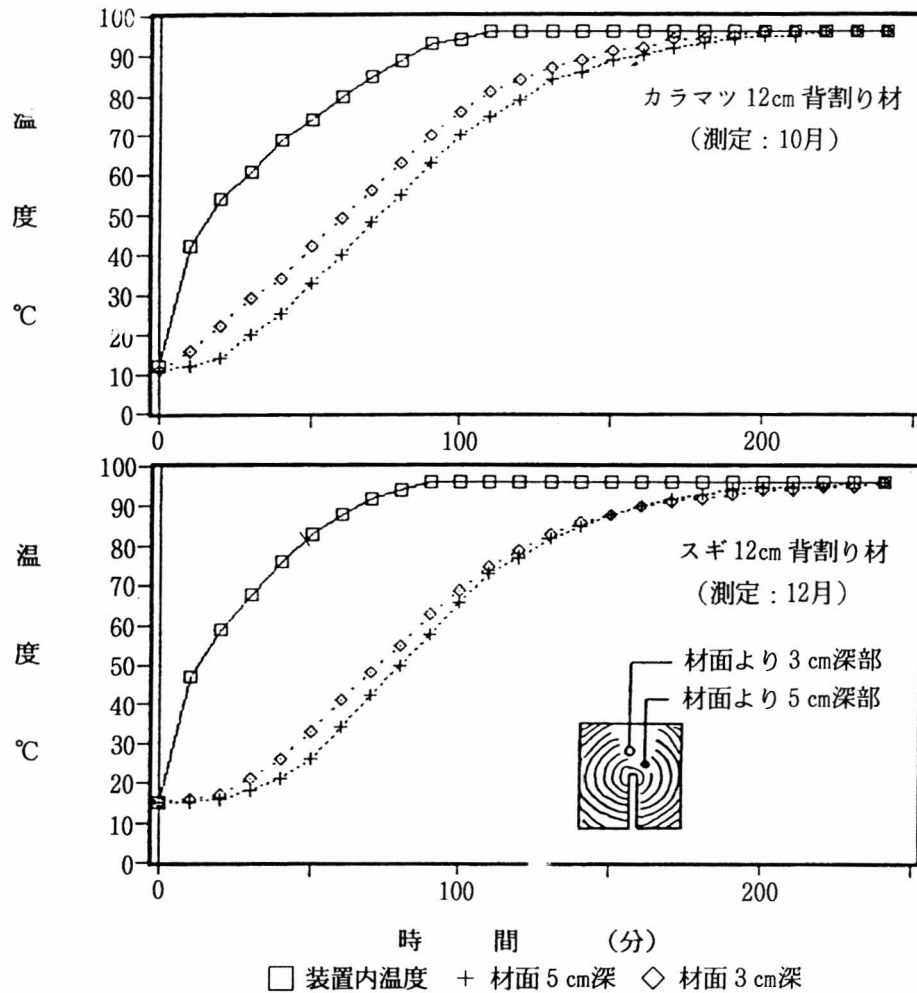


図-1 蒸煮による材温上昇

端低下させてしまう間欠運転よりも、連続運転のほうが時間短縮の点で効果が高いものと判断される。

(2) 乾燥経過

① 背割り材について

カラマツ、ヒノキ（第1回乾燥）の人工乾燥による含水率経過を図-2に、スギ背割り材（第2回乾燥）の含水率経過を図-3に示した。

カラマツ、ヒノキ柱材は、心材が多いことから製材直後の生材含水率は、30～45%程度と低い値を示す。5時間初期蒸煮後の乾燥は、温度差5℃（湿度82%）から始めたため含水率の低下は大きかった。乾燥開始後、含水率は1時間当り0.31%の割合で低下し、乾燥3日後には平均含水率は全乾法でカラマツは12.7%、ヒノキは12.6%となった。

スギ柱材については、カラマツやヒノキに比べ初期含水率が高く、赤心材と称するもので70%程度、黒心材と思われるものでは100%を越えていた。乾燥開始後、初期の含水率低下は1時間当り黒心材で（含水率100.6%から59.4%まで）1.72%、赤心材で（含水率66.4%から39.4%まで）1.13%であり、乾燥末期では1時間当り黒心材で（含水率26.2%から18.8%まで）0.32%、赤心材で（含水率19.8%から14.9%まで）0.21%であっ

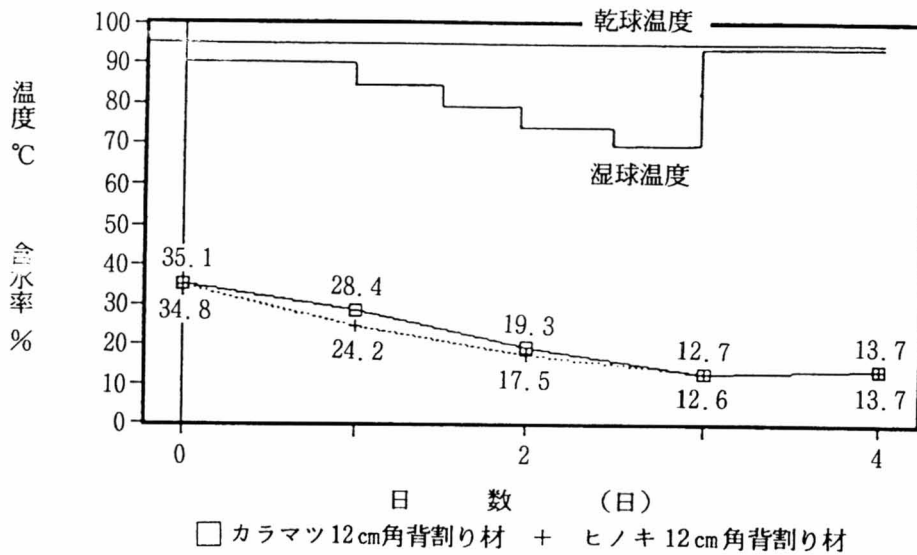


図-2 カラマツ・ヒノキ 12cm 背割り材の乾燥経過

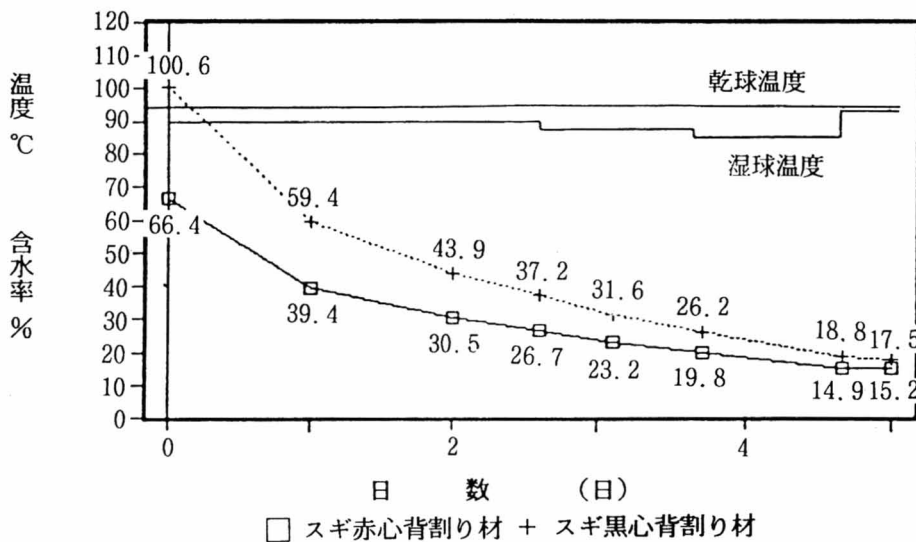


図-3 スギ 12cm 背割り材の乾燥経過

た。乾燥開始後5日間で黒心材は18.8%、赤心材は14.9%となった。

ここで乾燥速度についてカラマツ及びヒノキ柱材とスギ柱材を比較してみると、乾燥末期の同含水率域ではほぼ同じ値を示している。したがって、ここでは樹種の違いによる水分移動の難易の差は確認されず、カラマツ・ヒノキ柱材とスギ柱材の乾燥初期の含水率の差が、直接乾燥時間の差に結び付いたものであると言える。

いずれにしても背割り柱材の乾燥時間は、樹種別を問わず一般的に行われる中温域の乾燥のおよそ1/3の時間で乾燥することができた。

② 無背割り材について

スギ無背割り材(第3回乾燥)の含水率経過を図-4に示した。試験材の初期含水率は、黒心材で125.8%、赤心材で89.5%であった。乾燥開始後、初期の含水率低下は1時間当り黒心材で(含水率125.8%から85.0%まで)0.85%、赤心材で(含水率89.5%から

65.5%まで) 0.50%で、前述の背割りのある柱材に比較してその速度は約1/2に低下している。乾燥終期では1時間当たり黒心材で(含水率47.5%から34.8%まで) 0.18%、赤心材で(含水率37.1%から26.3%まで) 0.15%でありやはり背割り柱材に比べ約1/2に低下している。したがって、全体の乾燥時間をもても、乾燥開始後12日間を経過した時点での含水率は、黒心材で34.8%、赤心材で26.3%と乾燥が終了した段階までには至っていない。

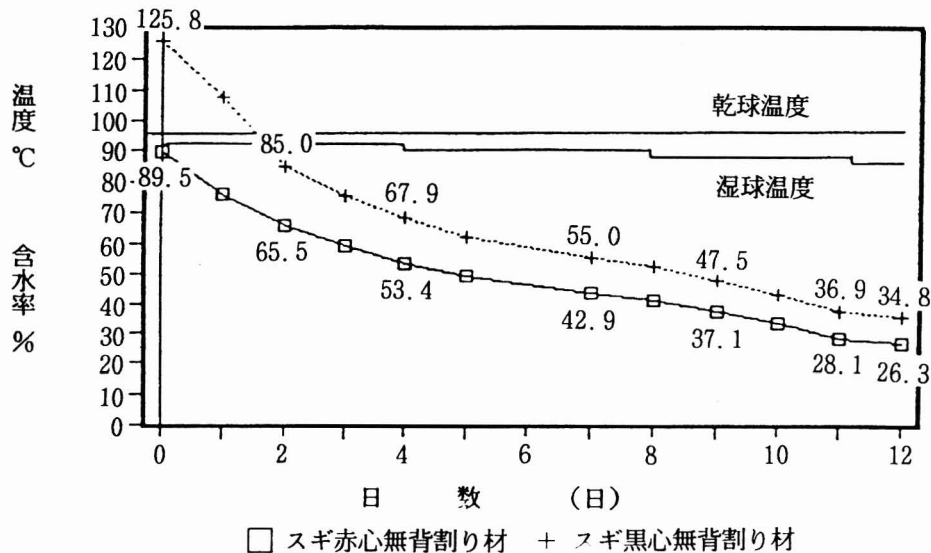


図-4 スギ 12cm 無背割り材の乾燥経過

これらの結果より背割りの有無により乾燥速度は大きく左右されることがわかる。一般的な中温域での乾燥では、乾燥速度に及ぼす背割りの影響はほとんどないと言われるが、高温乾燥に関しては、背割りの効果は材面割れ防止のみならず、乾燥時間の短縮に大きく貢献するものと思われる。このことについては、次の材内含水率の変動の項で詳しく検討する。

(3) 材内含水率の変動

カラマツ、ヒノキの人工乾燥経過に伴う材内含水率分布を図-5、6に、スギ背割り材の含水率分布を図-7、またスギ無背割り材の含水率分布を図-8に示した。

木材の乾燥は通常では材表面からの水分蒸発が材内部よりも優先するため、材内部の乾燥は厚材になればなるほど材表面に比較してかなり遅れる。このことは図のすべてが示しているとおりでである。

まず図-5 (カラマツ背割り柱材) と図-6 (ヒノキ背割り柱材) についてみると、材表面及び背割り部分からの水分蒸発は速く、乾燥3日後には含水率10%を下回るまでに乾燥している。ここに背割りからの水分蒸発も盛んに行われていることが確認できる。これに対して材内部の乾燥は遅れ、乾燥3日後の時点で含水率は20~30%の状態にある。この水分傾斜を緩和するために行った乾燥末期の蒸煮により、材表層部は吸湿し、また材内部は乾燥が進んだ状態となり、乾燥終了時にはこの水分傾斜はかなり緩和された。

次に図-7 (スギ背割り柱材) についてみると、材表面の乾燥は速く、3日後には20%を下回っている。また、背割り部からの含水率低下がみられ、これは材全体の平均含水率の低下に大きく寄与している。乾燥終了時の含水率分布で含水率の最も高い部分は、黒心材、赤心材共に材表面から5cm入った部分であり、黒心材が35.9%、赤心材が20.1%であった。また含

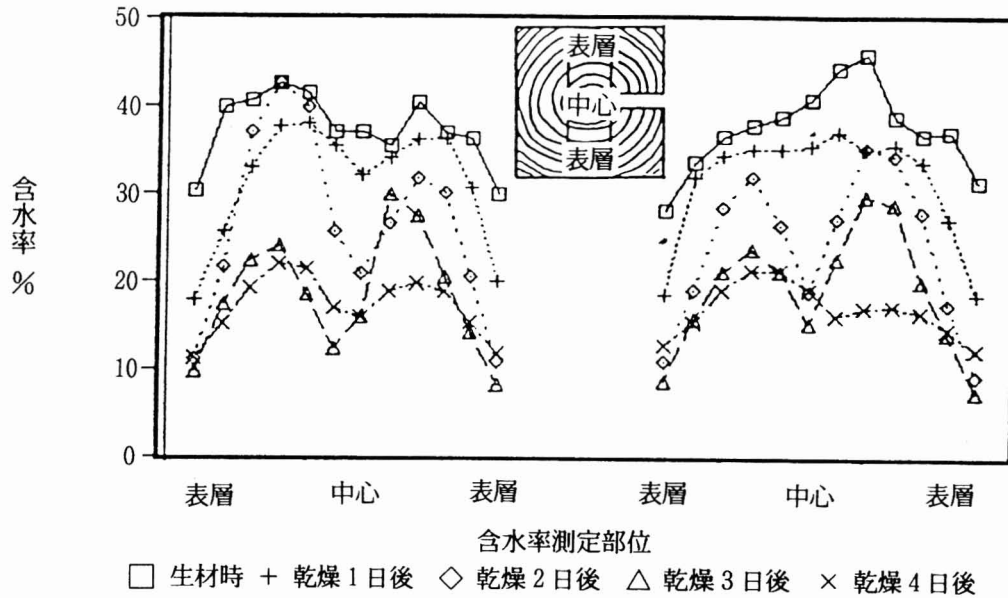


図-5 カラマツ 12cm 背割り材の材内含水率分布

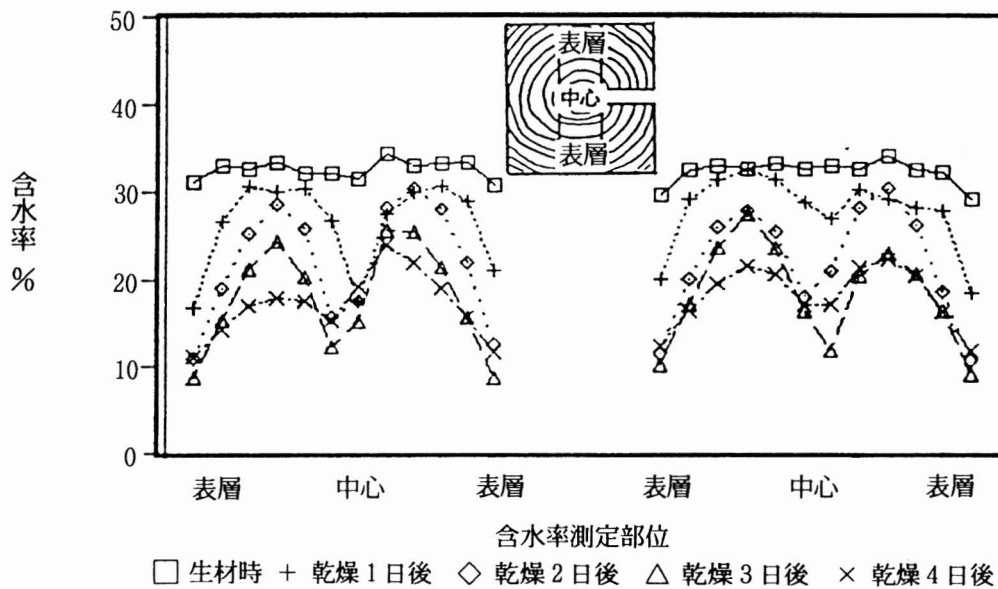


図-6 ヒノキ 12cm 背割り材の材内含水率分布

水率の最も低い部分は両者共に材表層部で、黒心材が10.6%、赤心材が9.8%であった。

以上は背割り材についての材内含水率分布についてであるが、これに対して図-8のスギ無背割り柱材では、図に示すようにはっきりと背割り材との違いがうかがえる。材中心部が乾燥が遅れることが特に無背割り材においては顕著であることがわかる。材表面の乾燥は速く、乾燥2日後には20%に達していた。これに対し、材の中心部では乾燥開始4日後においても乾燥初期と変わらない含水率状態であった。材中心部の含水率はその後もあまり低下せず、乾燥末期の11日目においても80%~100%の状態であった。この時点で材の表層部の含水率は10%程度に減少していた。

一般に柱材の背割りの効果は、材面割れの防止のみに期待されがちであるが、今回の高温乾燥においては乾燥速度を速めるという大きな効果はもちろん、材内部の水分傾斜の緩和にも大きく貢献していることがわかった。ただし、これには十分な材間風速が必要であると考えられる。

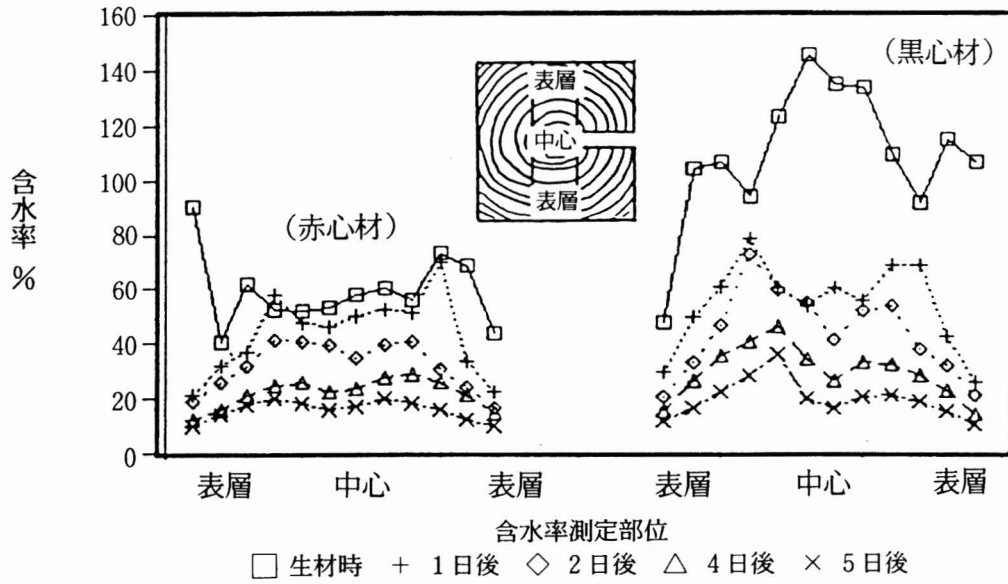


図-7 スギ 12 cm背割り材の材内含水率分布

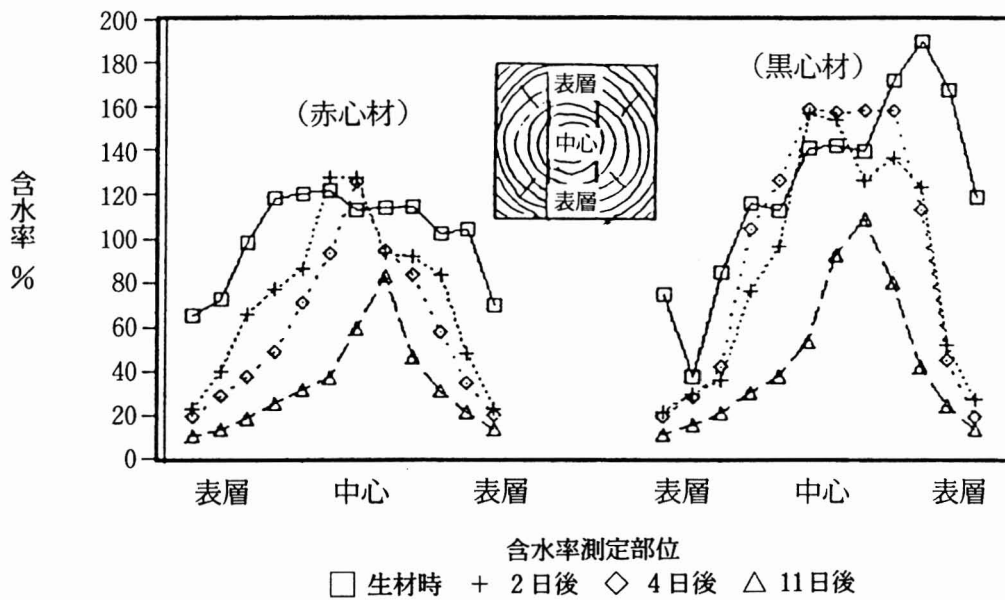


図-8 スギ 12 cm背割り材の材内含水率分布

(4) 乾燥による形質変化

乾燥による形質変化を、カラマツ、ヒノキ、スギの背割り柱材について表-3及び図-9に、スギ無背割り材については表-4に示した。

表-3 人工乾燥による形質変化(背割り材)

| 樹種・条件 | 形質 | 収縮率(%) | | 曲がり (mm/3m) | ねじれ (mm/3m) | 背割り幅 (mm) | 比重 (乾燥材) | 含水率(%) (含水率計) |
|-------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|
| | | 厚 | 幅 | | | | | |
| カラマツ | 圧縮 | 3.71 (0.66) | 2.61 (0.33) | 1.89 (3.21) | 7.00 (5.56) | 12.23 (2.14) | 0.45 (0.02) | 11.0 (0.9) |
| | 非圧縮 | 3.91 (0.42) | 3.49 (0.44) | 3.44 (1.57) | 7.67 (4.08) | 12.86 (1.57) | 0.45 (0.04) | 10.8 (1.3) |
| ヒノキ | 圧縮 | 3.04 (0.29) | 2.41 (0.54) | 0.33 (0.94) | 0.89 (1.29) | 9.97 (0.76) | 0.51 (0.03) | 13.2 (1.0) |
| | 非圧縮 | 2.76 (0.28) | 2.78 (0.36) | 1.78 (1.99) | 0.11 (0.31) | 10.14 (0.85) | 0.47 (0.03) | 11.9 (0.6) |
| スギ | 圧縮 | 3.31 (0.77) | 2.31 (0.91) | 3.56 (2.31) | 1.78 (1.87) | 12.61 (2.43) | 0.40 (0.03) | 12.8 (3.1) |
| | 非圧縮 | 3.41 (0.74) | 3.15 (0.79) | 4.33 (2.79) | 2.66 (1.94) | 11.94 (1.58) | 0.38 (0.04) | 10.7 (1.4) |

- ★ 生材時の背割り幅は2.2mmである。
- ★ 使用した含水率計はDELTA-5である。
- ★ スギは平成元年度、カラマツ及びヒノキは昭和63年度の試験結果である。
- ★ ()内は標準偏差

(%), (mm/3m)

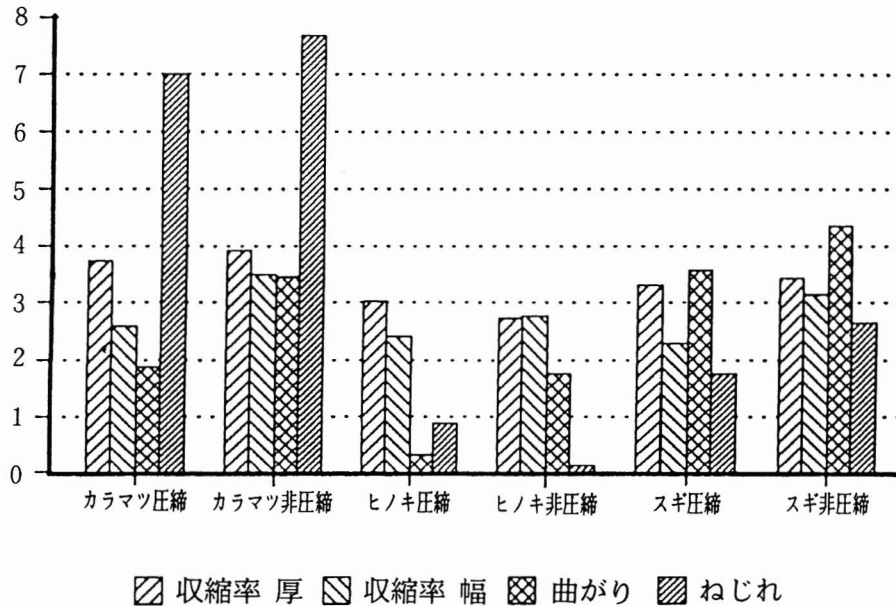


図-9 乾燥後の形質変化(12cm背割り材)

① 収縮率

背割り柱材に関して、収縮率の平均はカラマツ2.6~3.9%、ヒノキ2.4~3.0、スギ2.3~3.4%となった。この時点の含水率は11~13%(含水率計)である。これを林産物の日本農林規格設定等調査事業報告書(2)の中の各樹種柱材の天然乾燥による収縮率との比較で見ると、同等かやや大きい値となった。ちなみに報告書には「樹種、材種で多少の差はある

表-4 人工乾燥による形質変化（スギ柱材：背割り無し） - 非圧縮 -

| 樹種・条件 | 形質 | 収縮率 (%) | 曲がり (mm/3m) | ねじれ (mm/3m) | 比重 (乾燥材) | 割れ (cm) | | 含水率(%) (含水率計) |
|--------------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | | | | | | 材面割れ | 木口割れ | |
| スギ (無背割材) | | 2.76 (0.87) | 3.85 (2.01) | 3.05 (2.11) | 0.39 (0.03) | 90.0 (136.0) | 111.6 (84.2) | 10.8 (1.6) |

- ★ 使用した含水率計は DELTA-5である。
- ★ 割れの入らなかった材は 20 本中 4 本である。
- ★ () 内は標準偏差

が、およそその値として、含水率 25% までの収縮率は 1.4% 程度、含水率 20% までのそれは 2.0% 程度、含水率 15% までのそれは 3.1% 程度と見てよいようである」と報告している。今回の結果のように収縮率がやや大きくなると考えられるのは、高温乾燥であったことから材の熱軟化が生じ、これにより収縮し易い状態になったものと思われる。

無背割りのスギ柱材については、収縮率の平均は 2.8% となり背割り柱材と比較しほとんど変わらない値を示した。

以上の結果に基づき、もし仮に収縮率を 3% として 12 cm 正角の乾燥材を得る場合、製材寸法は 12.4 cm に、収縮率を 4% とした場合、12.5 cm にとらなければならないことになる。さらに挽直しを前提にした製材寸法を考えるのであれば、これに樹種別に曲がりとねじれの上乗せを考慮しなければならない。

② 曲がり及びねじれ

曲がりについては、非圧縮のものでカラマツ 3.4 mm/3m、ヒノキ 1.8 mm/3m、スギ 4.3 mm/3m となり、ヒノキは他の 2 樹種に比較して極端に少ない。スギが最も大きかったが、これは生長応力に起因しているものと思われる。

ねじれについては、非圧縮のものでカラマツ 7.7 mm/3m、ヒノキ 0.1 mm/3m、スギ 2.7 mm/3m となり、心持ち材となるとカラマツのねじれは大きい。

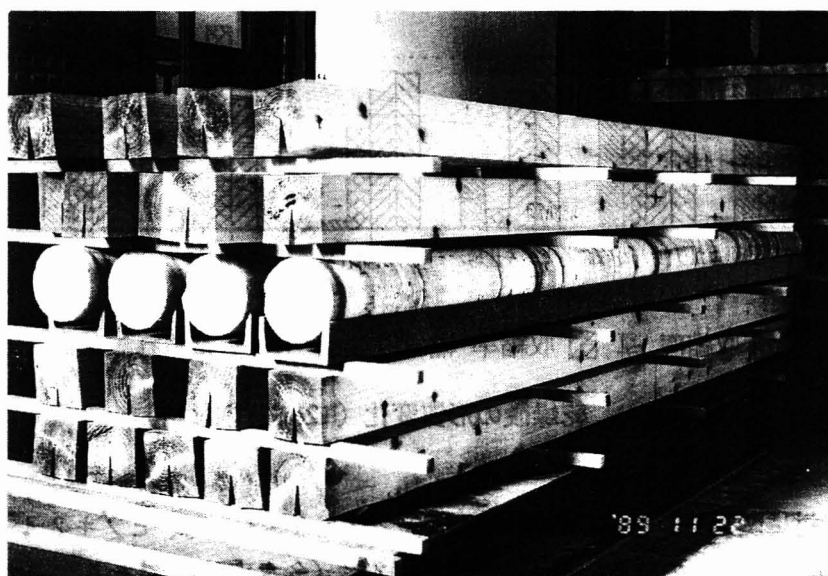


写真-1 乾燥による背割りの開き

曲がり、ねじれに関しての、スギ背割り材とスギ無背割り材との間にはほとんど差はない。圧縮の効果について検討してみると、曲がりに関してその発生方向をみるとカラマツ、ヒノキは背割り側に発生する傾向が強い。これは背割り側の乾燥度が対面側より低いことが影響しているのではないかとと思われるが、発生量は圧縮によりかなり抑制されている。ところがスギに関しては背割り側に限らず4材面様々に曲がりがあり、これを圧縮方向のみの材面に限って検討すると圧縮材と非圧縮材との間には差が生じなくなる。スギは生長応力の大きい材としては有名であるが、今回の試験荷重1トンではこの応力を封じ込めることは難しい。

ねじれに関しては、数値的にはスギのみが効果があったように思えるがそれほどの効果ではなく、カラマツ及びヒノキに関してはほとんど効果がなかった。ねじれの大きいカラマツについては、ねじれ抑制について大きな課題が残された。

③ 割れと背割り幅

背割り材の割れの発生は、カラマツ、ヒノキともに皆無であったが、スギについては、供試材20本のうち4本にそれぞれ1本ずつ材面割れが発生し、その長さは11 cm、17 cm、27 cm、37 cmであった。またスギの無背割り材は、供試材20本のうち16本に多くの割れが発生した。

以上の結果より、割れ発生抑制には背割りが十分に効果があり、またカラマツとヒノキに関しては高温乾燥の効果も大きいものと思われる。これは、割れ抑制に関して、高温乾燥が有利であることが正割材のカラマツ(3)とヒノキ(4)について確認されていることから判断される。スギに関しても高温乾燥の効果を期待したが完全に防止することはできず、スケジュール的改善、特に湿度コントロールに課題を残した。

乾燥前の背割り幅2.2 mmは乾燥後には非圧縮材でカラマツが12.9 mm、ヒノキが10.1 mm、スギが12.0 mmに開いた。これらの開きと無背割り材に割れが多いことから割れ抑制に対する背割りの効果は明かである。

(5) スギ高温乾燥材の材色

今回採用した高温乾燥スケジュールでは、樹種別を問わず乾燥後の材色はいわゆる焼け色に変色し、これは挽直しの範囲では解決できないものである。カラマツの場合はやや褐色系の強い色に、ヒノキの場合はピンク系統が全体に白色系に変化し、またスギの場合は黒褐色系に変化する。特にスギの材色変化に関しては第8章のスギ板材温度別人工乾燥で詳しく検討する。

参考文献

- (1) 吉田孝久他 第37回日林中支論1989 カラマツ大断面材の天然乾燥及び人工乾燥について
- (2) 林産物の日本農林規格設定等調査事業報告書 平成2年 (財)日本住宅木材技術センター
- (3) 吉田孝久他 カラマツ材の人工乾燥 長野県林業指導所研究報告第1号
- (4) 吉田孝久他 ヒノキの乾燥試験について－6 cm心持ち正割材の乾燥－ 第35回日林中支論
- (5) 建築用針葉樹材の人工乾燥 (社)全国木材協同組合連合会
- (6) 建築用針葉樹材の乾燥に関する資料集 (財)日本住宅木材技術センター
- (7) 建築用針葉樹乾燥技術研修会テキスト (財)日本住宅木材技術センター
- (8) 木材の人工乾燥 寺沢眞 筒本卓造 (社)日本木材加工技術協会