

スギ心持ち角材の高温乾燥スケジュール

誌名	愛媛県林業技術センター研究報告 = Bulletin of the Ehime Prefectural Forest Research Center
ISSN	13489534
著者名	武智,正典 越智,仁夫
発行元	愛媛県林業技術センター
巻/号	22号
巻号補足	
掲載ページ	p. 46-56
発行年月	2004年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



スギ心持ち角材の高温乾燥スケジュール

武智正典・越智仁夫*

愛媛県産のスギ心持ち正角と平角を対象に、材面割れや内部割れ等の仕上がり品質の向上を目的とした高温乾燥スケジュールの検討を行った。乾燥前処理としての蒸煮時間は $90^{\circ}\text{C} \sim 95^{\circ}\text{C}$ で 12 時間以上が望ましいが、長くすれば材面割れの抑制効果は認められるものの、その後の乾燥速度の向上は認められなかった。また蒸煮時間が長いほど、材色の変化が大きかった。実大材を用いた高温乾燥スケジュールについては、初期蒸煮の後、正角は乾球温度 120°C ・湿球温度 90°C で、24 時間、平角では乾球温度 120°C ・湿球温度 80°C で 42 時間処理し、その後は含水率の低下に合わせ、温度を低下させるスケジュールが材面割れや内部割れの抑制効果が認められた。養生後の含水率や寸法変化についても検討を加えた。実験室でのこれら乾燥スケジュール試験結果を基に、県内の乾燥工場にある蒸気式高温乾燥機(50m^3)を用い、スギ心持ち正角(仕上げ寸法 12.0cm 角、材長 3.0m)の乾燥コスト(直接費)を算出すると、約 $7,500 \text{ 円}/\text{m}^3$ であった。

キーワード — 高温乾燥、蒸煮、スケジュール、内部割れ、乾燥コスト

1. 緒言

正角及び平角のような大断面の木材を効率よく低コストで乾燥するには、従来の中温乾燥では難しく、これを解決する方法として高温乾燥法が注目されている。しかし、針葉樹の高温乾燥法については高温域における内部割れの発生、材色の変化、強度の劣化、曲がりの発生について不明な点が多いため、定まった乾燥スケジュールがないのが実状である。そこで、スギ心持ち正角と平角を対象に、これら問題点を総合的に検討を行い、低コストにつながる高温乾燥スケジュールの開発を行うことを目的とした。

また、平成 10 年の「建築基準法」の一部改正、及び平成 12 年の「住宅品質確保の促進に関する法律」の施行並びに平成 13 年の「消費者契約法」の施行等により、住宅建設を取り巻く環境は大きく変化してきている。このような背景の中、平成 13 年 11 月には「針葉樹の構造用製材」の日本農林規格(以下 JAS という)の一部改正が行われ、乾燥材の規定がさらに明確化された。そのため、最近の木造住宅では、住宅性能そのものの向上と未乾燥材を使ったクレーム等の対策のため、寸法精度が整った乾燥材を安定して供給する必要性が不可欠となっており、高温乾燥材についても、人工乾燥後の含水率変化や寸法変動等について、把握しておく必要がある。

本報告では、選別や蒸煮等の乾燥前処理技術並びに材質劣化を抑制する高温乾燥スケジュールを検討するとともに、養生期間中の含水率や寸法変化を追跡調査した。また、乾燥工場で実際に稼働している蒸気式高温乾燥機を使用して、乾燥コストを算出した。

本研究は林野庁国庫補助事業の農林水産新技術実用化型研究「地域産材の低コスト乾燥技術の開発」の一環で行ったものに、一部加筆をしたものである。なお、本報告の一部は第 51 回日本木材学会大会で発表した(越智、2001)。

本論に先立ち、本研究に関して種々ご指導頂いた森林総合研究所加工技術研究領域長 久田卓興氏(現森林総合研究所研究管理官)及び同研究所木材乾燥研究室長 黒田尚宏氏、また、試験材の調達や乾燥機の使用に関してご協力を頂いた愛媛県森林組合連合会の方々に厚くお礼申し上げる。

2. 材料と方法

2.1 乾燥前の選別技術

スギ柱材等の乾燥が困難な理由の一つが、初期含水率を含めた材質のバラツキが大きいことである。乾燥前の初期含水率のバラツキが大きいと、乾燥スケジュールの適用が困難になるとともに、乾燥終了後の含水率のバラツキが大きくなるため、乾燥前の選別が必要となってくる。選別方法としては、生材密度(重量)(三好・村口、1995)や含水率計、さらに打撃による縦振動の固有周波数や音速から算出する方法(関ら、2002)や木口面の画像解析による方法(信田ら、2000)等があるが、現場での適応性が高い生材密度による選別について検討を行った。

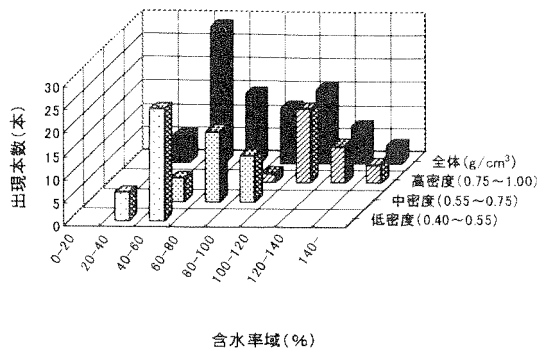
選別及び試験方法については、スギ正角(12.0cm 角・材長 4.0m ・心持ち・背割りなし)を 120 本用い、生材密度別に 3 グループに選別を行った。

低・中・高の生材密度グループの割合は $1:2:1$ になるようにし、正角の両端から 50cm 内側を切断した後、 3m の試験材を各グループ毎に図-1 のとおり 30 本採取した。グループ分けを行った試験材は、目標含水率を 20% として、表-1 の乾燥スケジュールにより乾燥を行った。

2.2 前処理技術

乾燥の前処理技術としては、乾燥速度を速めるためのものと、材の均質化を図るためのものと及び割れ等の材の損傷を低減させるためのものとが考えられるが、本報告では、材の損傷の低減のための前処理技術として、人工乾燥の蒸煮処理と天然乾燥前

の蒸煮高温熱処理の2つの方法について検討した。



図ー1 生材含水率のグループ別ヒストグラム

表ー1 乾燥スケジュール

含水率 (%)	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	平衡含水率 (%)	時間 (t)
G	95	95	-	24
G~3h	120	95	3.7	3
~50	109	95	5.8	-
50~20	105	95	7.5	-

2.2.1 蒸煮処理

2.2.1.1 蒸煮温度及び時間の検討

スギ正角(12.0cm 角・材長 4.0m・心持ち・背割りなし)10 本から、それぞれ長さ 70cm の試験材を4本連続採取し、両端をシリコンでコーティングして、エンドマッチする試験材を各試験毎に 10 本ずつ配分した。試験材は乾燥する前に幅 1.0cm、深さ 6.0cm の背割りを施した。

蒸煮の目的は、材温の急速な上昇及び内部水分移動の促進のみならず、材温が約 80℃以上になるとリグニンの軟化とヘミセルロースの分解が進むこと(奥山ら、1990)が知られており、このことが成長応力を緩和させる一因と考えられている。よって今回の試験での蒸煮温度条件は、85℃及び95℃の2条件とした。なお、試験材は適宜乾燥機から取り出し、重量と背割り幅等を測定した。

2.2.1.2 蒸煮時間による乾燥特性

スギ正角(12.0cm 角・材長 3.0m・心持ち・背割りなし)10 本から、それぞれ長さ 50cm の試験材を4本連続採取し、両端をシリコンでコーティングして、エンドマッチする試験材を各試験毎に 10 本ずつ配分した(平均初期含水率 80%、平均心材率 63%、平均年輪幅 4.6mm)。初期蒸煮温度は 95℃とし、その後乾球温度 110℃、湿球温度 95℃で乾燥終了後まで維持した。蒸煮時間は無処理・6・12・24 時間の4条件で目標含水率は 15%とした。試験材は乾燥中適時取り出し、重量と割れ(幅 1.0mm 以上、長さ 10mm 以上)等を測定するとともに、乾燥前後の材色(L*,a*,b*表色系)を色彩色差計(MINOLTA CR-300)を用いて測定した。

2.2.2 蒸煮高温熱処理

スギ正角(12.0cm 角・材長 4.0m・心持ち・背割りなし)30 本から、それぞれ長さ 1.0m の試験材を3本連続採取し、両端をシリコンでコーティングして、エンドマッチする試験材を各試験毎に 30 本ずつ配分した。前処理は蒸煮処理(95℃・18 時間)、蒸煮高温熱処理(95℃・18 時間+乾球温度 120℃、湿球温度 95℃・3 時間)と、比較のための前処理なしを併せた3条件を設定し、前処理後は天然乾燥を7ヶ月間実施した。(平均初期含水率約90%、乾燥後含水率23%~27%、平均心材率92%、平均年輪幅5.0mm)

2.3 高温乾燥スケジュールの検討(小試験体)

2.3.1 正角の高温乾燥スケジュール

2.3.1.1 正角の高温乾燥スケジュール

愛媛県産材のスギ正角(12.0cm 角・材長 4.0m・心持ち・背割りなし)20 本から、それぞれ長さ 70.0cm の試験材を4本連続採取し、両端をシリコンでコーティングして、エンドマッチする試験材を各試験毎に 20 本ずつ配分した。この試験を平成 10 年度から 12 年度にかけ4タイプずつ合計 12 タイプのスケジュールについて検討を行った。試験体の概要は平均初期含水率75~80%程度、平均心材率90~99%程度、平均気乾容積密度 0.36~0.39g/cm³ で、目標含水率は 20%とした。

2.3.2 正角の内部割れ発生時期等の検討

内部割れについて、スギ正角の小試験体を用い、発生時期等の検討を行った。試験材は、スギ正角(12.0cm 角・材長 3.0m・心持ち・背割りなし)12 本を初期含水率が同程度になるように4本ずつ3グループに分けた後、それぞれ長さ 40.0cm の試験材を6本連続採取し、両端をシリコンでコーティングした(平均初期含水率約 80%、平均心材率約 85%)。この6本を乾燥中順次取り出し、含水率(全乾法)及び内部割れ等を測定した。従って、初期含水率はそれぞれ異なっている。試験方法は、乾球温度 120℃・湿球温度 90℃一定(以下 120-90 という)、乾球温度 120℃・湿球温度 85℃一定(以下 120-85 という)、乾球温度 120℃・湿球温度 80℃一定(以下 120-80 という)の3条件とした。

また、この試験で図ー2に示すように表層の材面幅全体の収縮率及び、材面幅の中央 1/3 にピンを打ち込み、その間の収縮率の経過を測定した。

2.3.3 平角の高温乾燥スケジュール

愛媛県産材のスギ正角(12.0cm×24.0cm・材長 4.0m・心持ち・背割りなし)12 本から、それぞれ長さ 70.0cm の試験材を4本連続採取し、両端をシリコンでコーティングして、エンドマッチする試験材を各試験毎に 12 本ずつ配分し、4タイプのスケジュールについて検討を行った。

試験体の概要は平均初期含水率約 90%、平均心材率約 75%、平均気乾容積密度 0.33~0.42g/cm³ で、目標含水率を 20%とした。

2.4 高温乾燥スケジュール(実大材)

2.4.1 供試材料

2.4.1.1 正角

生材重量が 30Kg~38Kg のスギ正角(13.3cm 角・

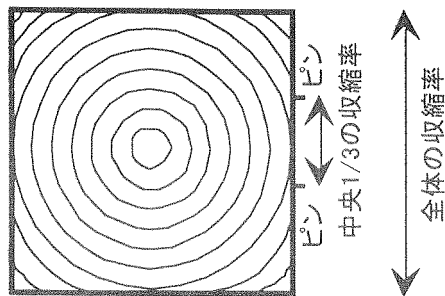


図-2 収縮率測定方法

材長 3.0m・心持ち・背割りなし)を製品市場で、高温乾燥スケジュールと中温乾燥スケジュール用に 31 本ずつ選別した(平均年輪幅 5.1mm、平均心材率 78%)。また、各スケジュール毎にエンドマッチした材長 1.0m の小試験体を4本ずつ用い、両端をシリコンでコーティングしてから、モニター材とした。

2.4.1.2 平角

スギ平角 40 本(25.8cm×14.0cm・材長4m・心持ち・背割りなし)から、重量の平均が 40 本の平均と同程度になるように選別した4本から、エンドマッチした材長 1.0m の小試験体を4本ずつ用い、両端をシリコンでコーティングしてから2本をモニター材、もう2本をダミー材とした。その後残った材の重量平均が同程度になるように 18 本ずつ 2 グループに選別し、高温乾燥スケジュールと中温乾燥スケジュールに配分した(平均年輪幅約 5.1mm、平均心材率約 84%)。

2.4.2 試験方法

2.4.2.1 正角乾燥試験

小試験体のスケジュールの試験結果を参考に、さらに時間短縮を図るため、高温乾燥スケジュールは 95℃蒸煮を 12 時間の後、乾球温度 120℃・湿球温度 90℃の高温低湿処理を 24 時間行った。その後は乾球温度を 105℃の後 95℃に下げる方法で、乾燥後期には、乾球温度を下げた調湿を実施した。比較に用いた中温乾燥は、95℃蒸煮を 18 時間後、乾球温度 95℃一定で含水率の低下に合わせ湿球温度を徐々に下げる方法で試験を行った。両スケジュールとも目標含水率は 20%とし、乾燥終了後1日経過した後、乾燥機から取り出した。なお、乾燥終了後は全乾法により任意の 15 本の含水率を測定し(これから初期含水率を推定)、残りの 16 本をそのまま室内で養生を行うものと、約2週間後にモルダールをかけるものにとそれぞれ8本ずつ振り分けた。また、全乾法で測定した 15 本はその後シリコンで木口をコーティングし、適時木口から約20cmの箇所、全乾法により養生後の水分傾斜を追跡調査するとともに、天然乾燥とモルダールをかけたものは、その後材中央の寸法、重量、曲がり、割れを約1年間にわたり適時測定した。

2.4.2.2 平角乾燥試験

小試験体でのスケジュールを参考に、高温乾燥スケジュールは、95℃蒸煮 20 時間後、乾球温度

120℃・湿球温度 80℃の高温低湿処理を 42 時間行い、その後は乾球温度を 100℃に下げる方法で、比較のための中温乾燥スケジュールは、95℃蒸煮 20 時間後、乾球温度を 95℃一定で含水率の低下に合わせ湿球温度を徐々に下げる方法で試験を行った。両スケジュールとも目標含水率は 20%とし、乾燥終了後1日経過した後、乾燥機から取り出した。なお、乾燥終了後は全乾法により任意の6本の含水率を測定し(これから初期含水率を推定)、残りの 12 本をそのまま室内で養生を行うものと、約1ヶ月半後にモルダールをかけるものにとそれぞれ6本ずつ振り分けた。また、全乾法で測定した6本はその後正角と同様に、その後の水分傾斜を追跡調査するとともに、天然乾燥とモルダールをかけたものは、その後材中央の寸法、重量、曲がり、割れを約1年間にわたり適時測定した。

2.4.3 測定方法

モニター材は乾燥中適時取り出し重量と表面割れを測定し、乾燥終了時に試験材を材中央部で割材した。また、正角実大材の乾燥後の含水率は材の中央を、平角実大材の乾燥後の含水率は木口から 0.5m、1.0m、2.0m(材中央)の位置で、全乾法による含水率と水分傾斜及び内部割れを調べた。材面割れ・木口割れ・内部割れは幅 0.5mm 以上のものを測定し、人工乾燥前後の材色の測定は 2.2.1.2 と同様の方法で行った。なお、平角については乾燥途中の材内の温度変化を熱電対で測定した。

2.5 実用規模での乾燥試験

今までの試験結果を参考に、県内の乾燥工場において、実用規模での試験を実施した。なお、現場の都合により重量選別はしていない。また、乾燥時に 1,000kg/m² のステンレス枠コンクリートを載荷した。使用した乾燥機は(株)新柴設備製の高温タイプ 50m³ の乾燥機1機(写真-1)で、乾燥前後にフォークリフトに取り付けた油圧式重量計(写真-2)で1ロット(スギ正角 13.5cm 角・材長 3.0m・心持ち・背割りなし 42 本)毎に重量を測定した。また、乾燥前に重量が最も重かったロットから 20 本を無作為に抽出し、重量と形質調査を行った後、乾燥後は機内の温度が

写真-1 乾燥機(50m³)

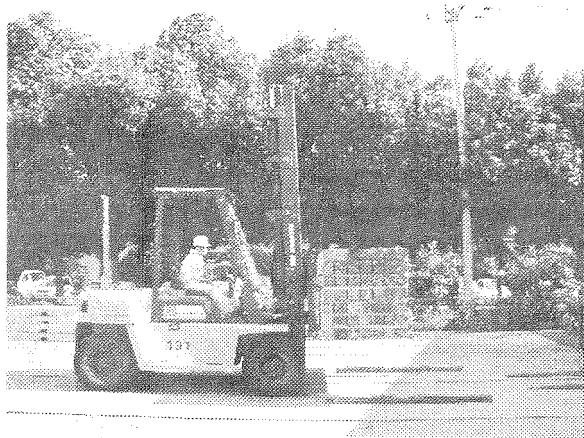


写真-2 フォークリフトでの重量測定状況

下がってから取り出し、木口から50cmの部位と中央部分で全乾法による含水率と内部割れを20本とも調査した。

3. 結果と考察

3.1 乾燥前の選別技術

表-2、3に試験結果を示した。生材密度で材を3グループに選別することにより、乾燥後の含水率のバラツキを小さくすることができた。

特に高温乾燥は中温乾燥に比べ、乾燥後のバラツキが大きいため、乾燥前の含水率のバラツキを小さくすることは、中温乾燥以上に乾燥効率の向上と、乾燥後の含水率の均一化に有効であると認められ

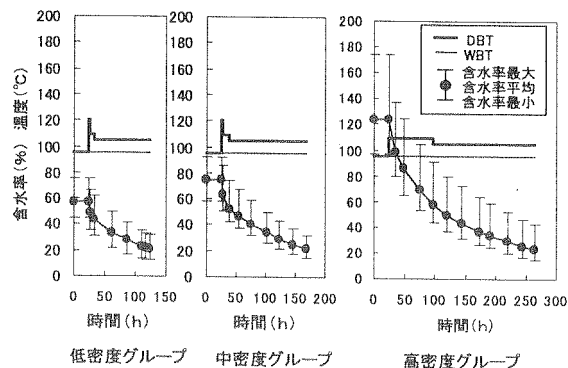


図-3 グループ別含水率減少経過(モニター材6本平均)

表-2 グループ別試験結果

グループ	生材密度(g/cm³)				初期含水率(%) 注1)			人工乾燥 時間(h)	仕上がり含水率(%) 注1)		
	本数	平均	範囲	標準偏差	平均	範囲	標準偏差		平均	範囲	標準偏差
低密度	30	0.51	0.55-0.44	0.03	60.3	31.5-100.5	16.0	124	18.2	4.3-43.7	4.3
中密度	30	0.62	0.72-0.52	0.05	78.8	51.3-144.4	17.9	168	21.4	5.3-53.0	9.9
高密度	30	0.82	1.00-0.72	0.07	126.2	85.7-183.5	25.6	264	23.5	9.1-42.9	9.3
全体	90	0.65	1.00-0.44	0.12	89.3	31.5-183.5	34.3	-	21.7	4.3-53.0	9.8

注1) 全乾法含水率

表-3 蒸煮試験体の概要

蒸煮時間	割れ発生率(%)	割れ長さ合計(cm) 注1)	割れ本数(本) 注2)	割れ長さ(cm) 注3)	内部割れ(本)
無処理	80	80.1	2.5	35.0	4
6	60	72.4	2.2	26.4	4
12	50	65.0	1.8	41.1	4
24	50	53.0	1.2	46.5	4

注1) 割れが発生した試験材の割れ長さの総合計の平均、注2) 割れが発生した試験材の割れ発生本数の平均値、注3) 割れ i 本あたりの割れ長さの平均値

る。グループ分けに関しては、高温乾燥ほどさらなる細分化が望ましいが、月間生産量や乾燥機の収容材積を考慮すると、3グループ程度が適当と思われる。

3.2 蒸煮処理

3.2.1 蒸煮温度及び時間の検討

蒸煮処理時間と背割り幅の関係を図-4に示す。今回の試験結果では、蒸煮温度の違いにより背割り幅の収縮率は、85℃で約30%、95℃は約40%となり、高温で蒸煮を行う方が材の成長応力等を緩和させる効果大きいことが窺える。蒸煮処理時間に関しては、85℃、95℃とも20時間程度が望ましいが、乾燥時間の短縮及び乾燥機的能力・コストを考慮すると、95℃で12時間でも蒸煮効果があると認められた。

3.2.2 蒸煮時間による乾燥特性

表-3のとおり蒸煮時間を長くすると、材面割れが減少する傾向を示したが、これは、軟化で破壊歪みが大きくなることと、蒸煮による成長応力の緩和がおこると材の表面付近は圧縮応力が大きくなり、このことが以後の乾燥過程において、引っ張り応力が低減され割れが抑制された結果と思われる。ただし、長時間の蒸煮処理は材の心割れの増大と、材色の変化が大きく(図-5)、コストもかかるため、蒸煮時間は長くても、24時間程度が限界と考えられる。

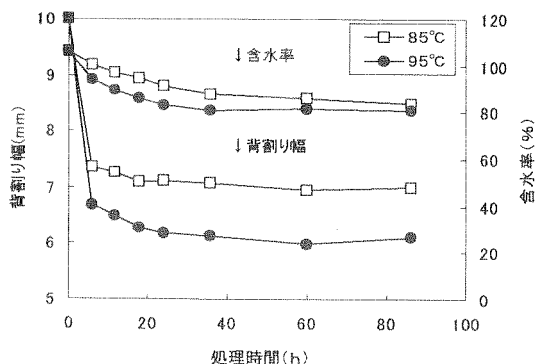


図-4 蒸煮処理時間における背割り幅の変化

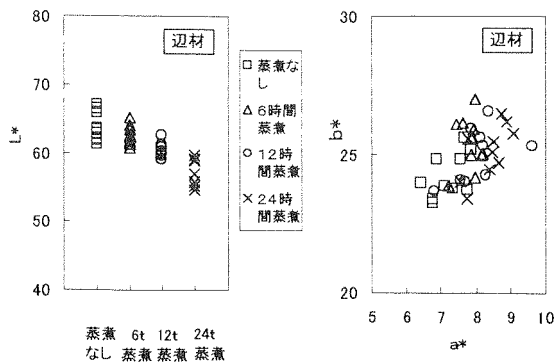


図-5 蒸煮時間による材色の変化

3.2.3 蒸煮高温熱処理

処理方法による材面割れ長さの比較を図-6に示す。材面割れ発生は無処理>蒸煮処理>蒸煮高温熱処理の順に少なくなり、乾燥前処理による材面割れ発生の抑制効果が認められ、特に蒸煮高温熱処理では、高温熱処理が3時間と短時間にも関わらず、割れ幅 2.0mm 以上のものは発生しなかった。また、この前処理により顕著な乾燥促進の効果は認められなかったが、前処理によりバラツキを抑えることが可能であった。

なお、前処理時間をさらに短縮したものでも、材面割れの抑制効果が認められている(越智,2001)。時間短縮を図ることが主目的の人工乾燥だけでなく、蒸煮や高温低湿処理を乾燥の前処理として位置づけて処理する時間を短くし、他の乾燥方法と併用して、品質やコスト及び環境をも含めた乾燥技術

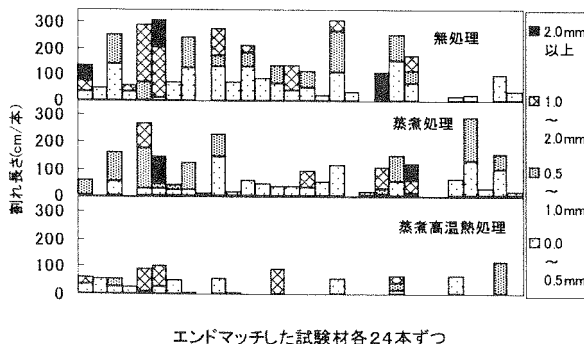


図-6 前処理方法による材面割れの比較

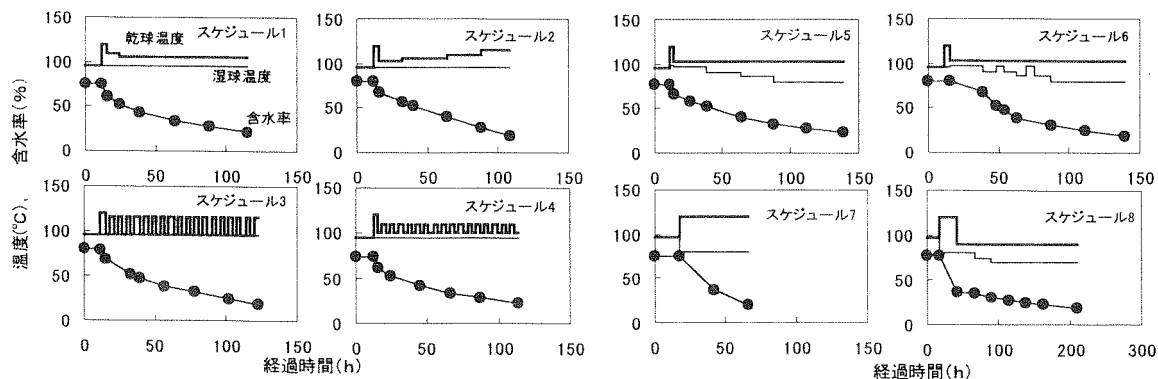


図-7 正角小試験体のスケジュール例

が重要になってくるかもしれない。

3.3 高温乾燥スケジュールの検討(小試験体)

3.3.1 正角の高温乾燥スケジュール

実施した各スケジュールタイプの一例を図-7に示す。スケジュール1と8のタイプが、乾球温度 95℃一定で湿球温度を徐々に下げる中温乾燥と比較すると、材面割れが少なく、かつ内部割れも比較的少ない良好な結果を得た。スケジュール 8 は(吉田・橋爪, 1999)が開発した方法と同じく、乾燥初期に高温低湿状態を保ち、材の表面割れを防止するスケジュールである。高温低湿処理の特徴は、熱で軟化した木材表面において、大きなドラインゲットを発生させることであるが、このドラインゲットが形成されればされるほど、内部割れは避けることが難しくなる。

内部割れ発生の原因は表層と内層での収縮率の差や、落ち込みが原因とされているが、スケジュール 8のように温度を下げると、内部割れが少なくなるなど、まだ不明確な点が多い。スケジュール8は内部割れを少なくするため、温度を途中で 90℃に下げているが、当然乾燥時間は長くなり、前述の 95℃一定の中温乾燥と比べ、時間は約 60 時間の短縮しかなかった。この温度を下げる操作をあまり慎重にすると、時間短縮が望めなくなり、高温乾燥のメリットが生かされないが、高温乾燥や内部割れ自体が材質面を与える影響を考慮すると、スケジュール8のタイプが一応の目安と考えられる。高温低湿処理の時間と温度を下げる時期等については、さらに検討する必要がある。なお、収縮率は、乾球温度 95℃一定で湿球温度を徐々に下げる中温乾燥と比較すると、統計的には有意な差は認められなかった。

3.3.2 正角の内部割れ発生時期等の検討

3.3.2.1 内部割れ試験結果

120-90 及び 120-80 の内部割れ面積の経過を図-8に示す。どちらの場合も内部割れ面積は材の平均含水率 30%付近から多くなり、20%付近になると急激に増加している。乾燥時間と含水率との関係を、120-90 の場合で表面割れが発生しなかった材の例でみると、平均初期含水率 80%のものが 12 時間後には 48%、24 時間後には 36%、36 時間後には 19%、48 時間後には 15%の含水率になり、また内

部割れは 36 時間後に表層から 1.5cm～2.0cm の距離に発生していた。

材表面からどの深さまでセットをかけるか、生材の水分傾斜も考慮し検討しなければならないが、初期含水率 80%程度のは、120-90 の処理で 30 時間程度処理が適切と考えられる。しかし、初期含水率が低いものはそれより早い段階で内部割れが発生している試験材もあるため、実用的には 120-90 で 24 時間処理が適切と考えられた。なお、120-80 では試験材が異なるため、参考ではあるが、120-80の方が 120-90 に比べ、材面割れの発生がやや大きく、湿球温度を高めることが、材面割れ抑制に有効であると示唆された。

3.3.2.2 収縮率試験結果

3.3.2.1 の試験で、120-90 で用いた試験体での収縮率測定結果を図-9に示す。乾燥開始 12 時間後(平均含水率 48%)の時点では、全体の収縮率はプラスであるが、中央 1/3 の収縮率はマイナスになっており、強い引っ張り応力が働いていることが窺える。24 時間後(平均含水率 36%)には、プラスに転じているが、全体の収縮率より少なく乾燥終了後には強い圧縮応力を受け、収縮率間には大きな差がなくなっている。これらの傾向は全ての試験材で同様であり、このことが高温乾燥で割れ難い一つの状況と思われ、セットをかける時間の参考になると思われる。

3.3.3 平角の高温乾燥スケジュール

図-10 に各スケジュールの試験結果を示す。スケジュール2は 95℃蒸煮 20 時間後、高温低湿処理を乾球温度 120℃・湿球温度 80℃で 40 時間行い、平均含水率が 30%になった時点で温度を 100℃に下げる方法で行った。スケジュール2は約 200 時間で平均含水率が 20%になり、スケジュール3及び4に比べ大幅な時間短縮が図られた。また、スケジュール全体を通して割れは少なく、特にスケジュール2は表面割れも内部割れも発生しなかったが、仕上がり含水率のバラツキは、スケジュール3及び4に比べ大きかった。

3.4 高温乾燥スケジュール(実大材)

3.4.1 正角試験結果

表-4に試験結果の概要、及び図-11 に各試験の乾燥条件とモニター材の含水率経過を示す。高温乾燥スケジュールは、初期含水率(全乾法で測定した実大材の平均から推定。以下同様)75%のものが、150 時間で 21%、中温乾燥スケジュールは初期含水率74%のものが244時間で17%となった。高温乾燥は調湿を 18 時間含んでいるため、中温乾燥も同じ時間をかけ、さらに取り出しに1日かかるとすると、高温乾燥は約8日、95℃の中温乾燥は約 12 日となり、約 35%の時間短縮が図られた。

3.4.2 平角試験結果

表-5に試験結果の概要、及び図-12 に各試験の乾燥条件とモニター材の乾燥経過を示す。平角は流通が少ないため、重量選別ができなかったこと

と、平角の生材重量や含水率のデータが少なく、高温乾燥スケジュール及び中温乾燥スケジュールとも

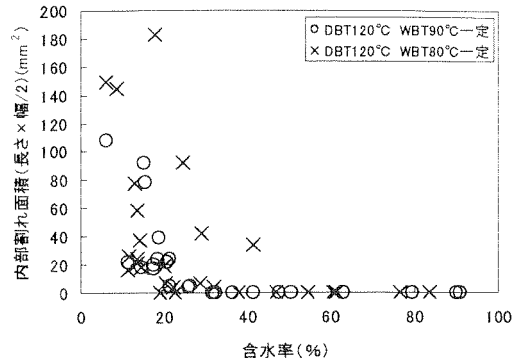


図-8 含水率による内部割れ面積の経過

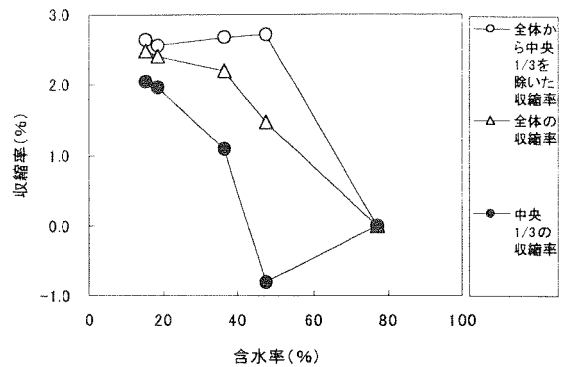


図-9 含水率による収縮率の変化

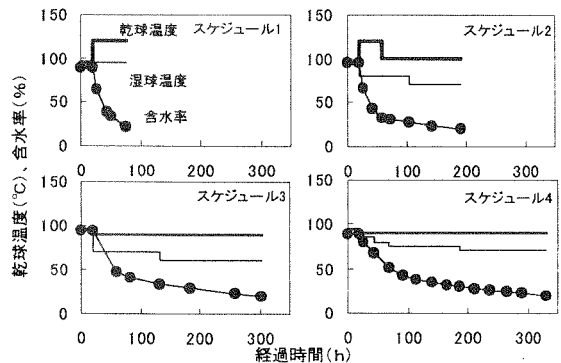


図-10 平角小試験体のスケジュール例

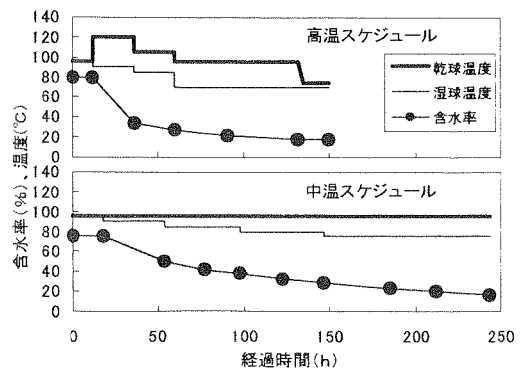


図-11 正角実大試験体の試験結果

注: 含水率はモニター材 4 本の平均

表-4 正角実大試験体の試験結果

グループ 区分	本数	生材密度(g/cm ³)			初期含水率(%) 注1)			人工乾燥 時間(h)*	仕上がり含水率(%) 注2)		
		平均	範囲	標準偏差	平均	範囲	標準偏差		平均	範囲	標準偏差
高温スケジュール	31	0.60	0.55-0.67	0.03	75.0	61.1-91.5	9.5	150	20.8	14.0-26.0	3.7
中温スケジュール	31	0.61	0.54-0.70	0.05	73.6	51.4-128.3	21.7	244	17.3	11.5-27.0	5.1

注1) 任意の15本の全乾法含水率から推定 注2) 任意の15本の全乾法含水率 * : 中温乾燥は調湿なし、降温時間を含まない。

表-5 平角実大試験体の試験結果

グループ 区分	本数	生材密度(g/cm ³)			初期含水率(%) 注1)			人工乾燥 時間(h)*	仕上がり含水率(%) 注2)		
		平均	範囲	標準偏差	平均	範囲	標準偏差		平均	範囲	標準偏差
高温スケジュール	18	0.71	0.50-0.90	0.10	129.7	94.4-169.5	31.1	200	25.3	14.2-30.9	6.0
中温スケジュール	18	0.71	0.52-0.87	0.10	124.8	99.6-146.6	16.4	378	24.2	19.9-34.3	5.3

注1) 任意の6本の全乾法含水率から推定 注2) 任意の6本の全乾法含水率 * : 調湿なし、降温時間を含まない。

選別したモニター材2本の平均初期含水率が109%と全体の平均より低かった。このため、高温乾燥は初期含水率130%のものが200時間で25%(材中央)、中温乾燥は初期含水率125%のものが384時間で24%(材中央)となり、高温乾燥が大幅な時間短縮となったが、いずれも目標の20%をクリアしておらず、乾燥が不十分であった。目標の20%にするには高温低湿処理時間を長くするか、乾燥時間をあと数日延ばす必要があると思われる。なお、モニター材のように初期含水率が100%程度のものは20%をクリアしていた。一方、材の中心温度が蒸煮温度に達するのに正角の2倍の12時間を要した。

3.5 高温乾燥の材質(実大試験結果より)

3.5.1 割れ

乾燥終了後の正角と平角の割れについて、図-13に示す。正角の高温乾燥では、中温乾燥に比べ割れ本数・割れ長さとも少なく、特に最大割れ幅は平均2mm以下であったが、内部割れが多くの試験材で発生していた。また、平角は高温乾燥と中温乾燥では、その差は少ないが、割れ幅は正角と同様に高温乾燥で小さく、内部割れに関しては、仕上げ含水率が高かったため、木口から1m付近まで発生していたが、中央では殆ど発生していなかった。このことは、高温乾燥では特に木口からの水分蒸発が多く、材中央に比べ材端から50cmの部位では、含水率が20%と材中央に比べ平均で5%低かったことが大きな原因と考えられる。

表面割れに関しては、最近住宅メーカーを中心に、厳しい基準が設けられるようになってきたが、内部割れに関しては、現在基準は設けられていない。しかし、内部割れは、モルダーをかけた時や、割れ・曲がり等により12cm角から10.5cmに寸法を落とす場合、初めて表面に現れる場合が殆どであり、今回のモルダーがけにも数本みられたため、今後内部割れに関しても厳しい要求が出されてくるものと思われる。なお、乾燥終了から約1年間実験棟室内で養生した材には、新たな割れは殆ど発生していなかった。

3.5.2 材色

正角の高温乾燥について、乾燥前後及びモルダー後の材色の変化を図-14、15に示す。高温乾燥による材色の変化は既報(久保島ら、1998)(河崎、1998)のとおりに、乾燥後の明度指数を表すL*は心材

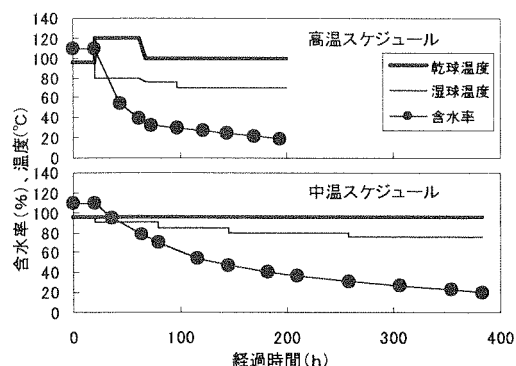


図-12 平角実大試験体の試験結果

注: 含水率はモニター材2本の平均

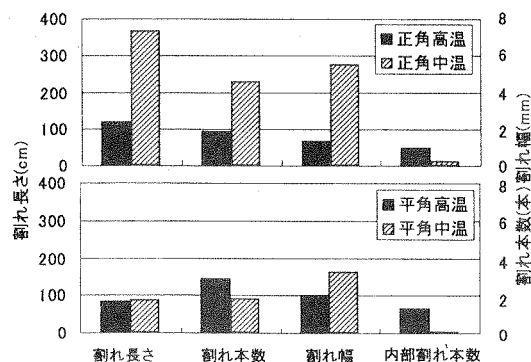


図-13 乾燥スケジュール別の割れ状況

注) 割れは材面割れ、及び木口割れを含む。
割れ長さ、割れ本数は1本当たりの平均
割れ幅は、1本当たりの最大割れ幅の平均
内部割れ本数は全乾法で行った、中央部の1本当たりの平均

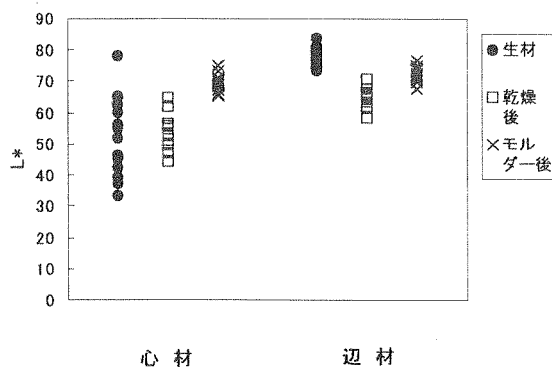


図-14 正角の乾燥後のL*の変化

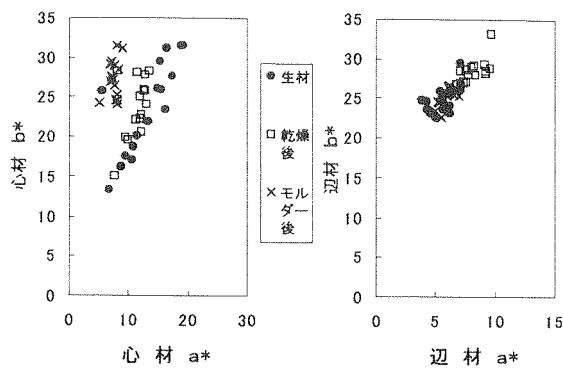


図-15 正角の乾燥後の a^* 、 b^* の変化

と辺材ではその差が少なくなり、クロマティックネス指数の a^* 、 b^* では心材の赤みが大きく減っているが、辺材は黄みが増しており、高温乾燥の特徴を表している。

しかし、モルダ後には変化が少なくなく、かつ高温の時間を短く設定したため、材色の変化は視覚的には大きいとは感じられなかった。なお、平角は 100°C 以上の温度で乾燥したため、正角より若干色差 (ΔE) が大きかった。

3.5.3 曲がり及び収縮率

表-6 に人工乾燥後の曲がりと収縮率を示す。正角の曲がりは、全て直材原木から製材されていたため小さく、JAS の 1 級を全て満たしていた。また、平角は高温乾燥の 1 体のみが曲がり原木から製材されていたため 2 級の基準であり、その他は 1 級の基準を満たしていた。収縮率は、高温乾燥と中温乾燥とは異なっているが、仕上がり含水率からすると、ほぼ妥当な収縮率と思われる。

表-6 乾燥後の曲がり及び収縮率

正角グループ			
区分	曲がり 注1) (mm)	ねじれ 注1) (mm)	収縮率 注2) (%)
高温スケジュール	1.6	0.5	2.2(0.4)
中温スケジュール	2.4	1.0	3.1(0.8)
平角グループ			
区分	曲がり 注1) (mm)	収縮率 注2) 広い材面(mm)	収縮率 注2) 狭い材面(mm)
高温スケジュール	0.6	1.4(0.4)	3.2(0.5)
中温スケジュール	1.2	1.6(0.5)	4.3(0.6)

注 1) 1 本当たりの平均値

注 2) 1 本当たりの割れていない材面の平均値、() は標準偏差

3.5.4 人工乾燥後の寸法変化

3.5.4.1 正角

正角高温乾燥では乾球温度を下げた調湿を 18 時間行ったが、同様の試験で調湿を行わない試験結果(試験方法は 2.4.2.1 と同様)との収縮率(そのまま実験棟室内で養生を行った 8 本と、2 週間後にモルダをかけた後、実験棟室内で養生した 8 本)の比較を図-16~19 に示した。収縮率は割れている面を除く 4 材面の平均値である。なお、養生期間中の含水率は、測定終了後に全乾法により求めた含水率から推定した。

調湿を行わず、そのまま養生した試験では、乾燥終了後の平均含水率が約 25% と高かったにもかかわらず、約 4 ヶ月間収縮率がほとんど変化しないか、逆に膨張したものも多かった(図-16)。その 1 年後には含水率は約 12% になり、実験棟室内の平衡含水率に達していた(図-16)。この時点での収縮率は全て 1% 以内であった(図-16)。しかし、モルダをかけたものは、その後の収縮率やバラツキが大きかった(図-17)。これは、含水率が低い外周部を取り去ったためと考えられる。

調湿を行った試験では、そのまま養生した場合(図-18)とモルダをかけた場合(図-19)との間に大きな変化はなく、特にモルダをかけたものは寸法変化も全て同様の傾向を示しており、また、収縮率も 1.2% 以内で、JAS の寸法基準を満足していた。

仕上げ含水率が高いものは、その後規定寸法を維持できなくなるおそれがあるため、仕上げ含水率は 15% 以下(できれば使用環境に応じた平衡含水率まで)にするか、十分な養生期間を置く必要があると思われる。

3.5.4.2 平角

高温乾燥した平角の人工乾燥後の収縮率の変化を図-20 に、モルダ後の収縮率の変化を図-21 に示した(そのまま実験棟室内で養生を行った 6 本と、45 日後にモルダを掛けた後、実験棟室内で養生した 6 本)。乾燥終了後から 45 日後にモルダ掛けを実施したが、この時点でまだ 26.5% (正角と同様に算出) と高く、その後の寸法変化も大きかった。特に広い材面では JAS の規定寸法を満たしていないため、仕上げ含水率を正角以上に低くする必要があると思われる。

乾燥後の寸法変化は重要な問題であり、十分な人工乾燥と調湿を行うか、養生期間を長く取る等、水分傾斜が少ない乾燥材を供給する必要がある。

3.6 実用規模での乾燥試験

3.6.1 試験結果

図-22 に乾燥スケジュールを示す。初期含水率及び仕上がり含水率を考慮し、乾球温度 105°C の時間が長くなっており、乾燥時間は 202 時間を要した。調査した 20 本の乾燥前後の含水率等を表-7 に示す。平均初期含水率 86% のものが、乾燥後には 18% であり、表面割れに関しては、表-8 のとおり全体的に少ないが他のロットではこれよりも多く、特に末口の本口割れが多くみられた。これは心材率が低いことと、乾燥前に既に割れがあったことが大きく影響していると思われる(心材率が 100% 近いものは、割れは非常に少なかった)。また、辺材の初期含水率が高い材は材面割れが多かったため、重量選別してセットをかける時間を長くするか、人工乾燥前にある程度含水率を下げておく必要があるであろう。内部割れについては、写真-3 のとおり非常に少な

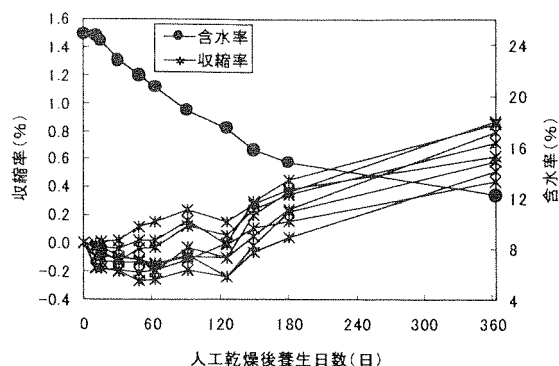


図-16 正角乾燥後の収縮率の変化(養生なし)
注:含水率は8本の平均値

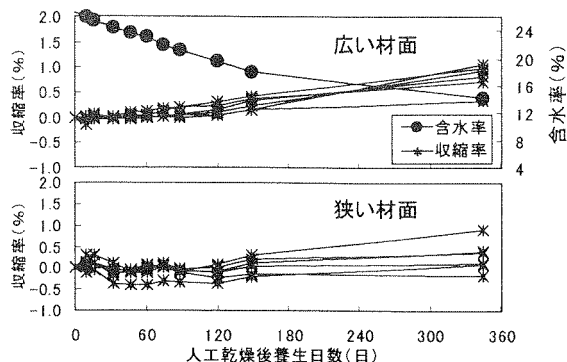


図-20 平角乾燥後の収縮率の変化
注:含水率は6本の平均値

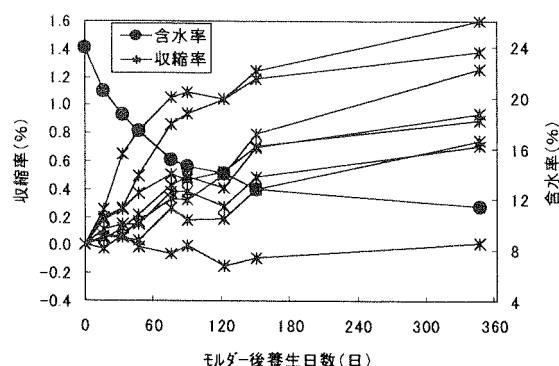


図-17 正角モルダ後の収縮率の変化(養生なし)
注:含水率は8本の平均値

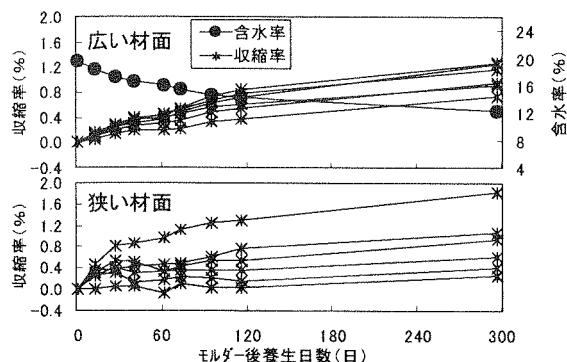


図-21 平角モルダ後の収縮率の変化
注:含水率は6本の平均値

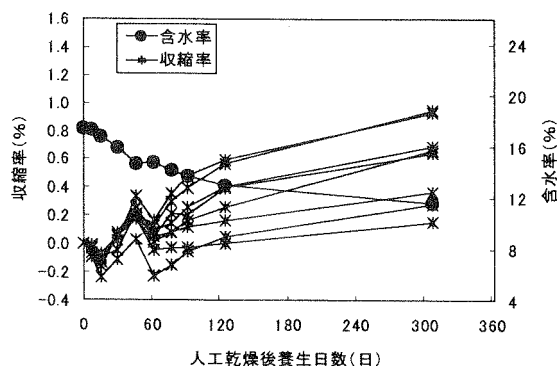


図-18 正角乾燥後の収縮率の変化(養生あり)
注:含水率は8本の平均値

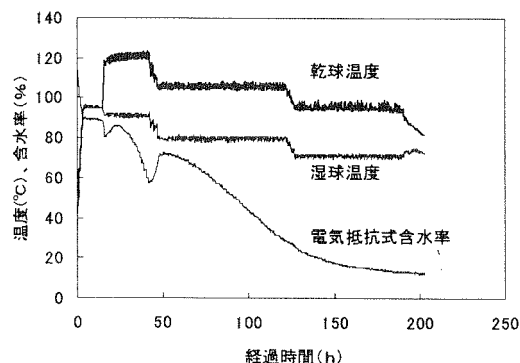


図-22 実用規模での乾燥スケジュール

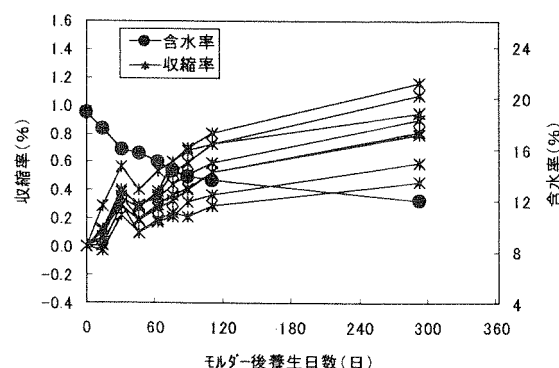


図-19 正角モルダ後の収縮率の変化(養生あり)
注:含水率は8本の平均値

く良好な結果となった。しかし、今後養生段階で含水率が下がるにつれ、内部割れはやや増大すると思われる。

3.6.2 乾燥コスト

乾燥コストを求めるため、設備費及び燃料・電気消費量を調査した。その他の経費については、乾燥工場により大きく異なるため、既存の資料(わかりやすい乾燥材の生産技術マニュアル、2000)を参考にした。

水分蒸発量は $257\text{Kg}/\text{m}^3$ (フォークリフトの重量計から脱水量を算出) で、乾燥時間が長かったため、燃料消費量は $54\text{Kg}/\text{m}^3$ と通常の高湿乾燥に比べやや多く、電力消費量は1時間当たり 14KWh と非常

表－7 含水率等試験結果

調査本数 (本)	生材 注1)			乾燥後 注1)					
	重量 (kg)	含水率 注2) (%)	含水率 注3) (%)	重量 (kg)	含水率 注2) (%)	含水率 注3) (%)	曲がり (mm)	ねじれ (mm)	収縮率 (%)
20	33.3(4.6)	68.8(11.3)	86.0(22.5)	21.2(2.2)	11.8(3.6)	17.9(6.7)	2.6(1.3)	0.9(1.8)	2.3(0.5)

注1) 数値は20本の平均値、()は標準偏差 注2) 含水率計による含水率 注3) 全乾法による含水率

表－8 表面割れ及び内部割れの試験結果

調査本数 (本)	表面割れ 注1)			内部割れ 注2)		
	本数 (本)	長さ (cm)	最大幅 (mm)	本数 (本)	長さ (cm)	最大幅 (mm)
20	1.9	61.1	1.2	1.3	3.5	0.8

注1) 表面割れは材面割れと木口割れを含み、本数・長さ・最大幅は1本当たりの平均値 注2) 内部割れがあった材の平均値

表－9 乾燥コスト(直接費のみ)

乾燥材生産量 (m ³)	乾燥仕上げ 含水率(%)	蒸発量 注1) (kg)	乾燥日数 (日)	月産 (m ³)	乾燥コスト(円/m ³)			計 (円)
					設備費	人件費	燃料費・電気代	
43.5	18	11,194	9.4	368	2,219	2,000	3,232	7,451

注1) 蒸発量はフォークリフトに取り付けた重量計から算出。

(積算根拠)乾燥日数 : 試験結果+1.0 日

月産生産量: 棧積み、棧卸しに0.5日 28日/月

設備費: 蒸気式高温乾燥機(50m³入り、3室)、貫流ボイラー式 70,000千円(消費税別)

(今回の乾燥機の調査結果より) (70,000×1.05)/9×1.2/12=816.7千円

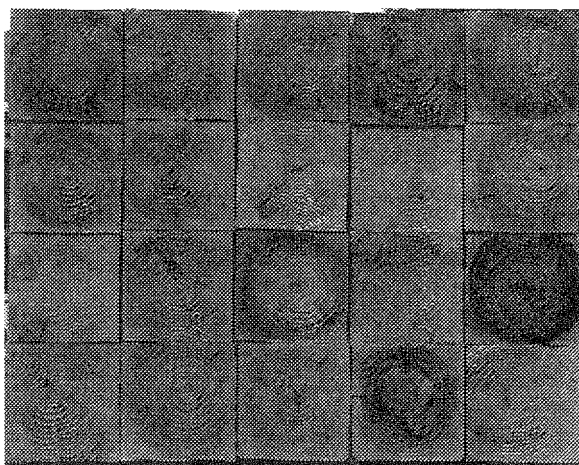
人件費: 棧積み卸し 1,500円/m³、フォークリフト 2,000円/m³、操作管理 300円/m³

燃料費: A重油 2,355リットル 38円/リットル (試験結果より)

電気代 2,839KWh 18円/KWh (乾燥機及びボイラー)(試験結果より)

に多かった。これは乾燥機の構造によるところが大きいと思われる。乾燥コストは表－9に示したように約7,500円/m³で、初期含水率や正角の仕上げ寸法が異なるが、「わかりやすい乾燥材の生産技術マニュアル」の高温乾燥コストと比較して同程度であった。

乾燥時間の短縮と材面割れの防止に重点をおけば、乾燥全期間を通して100℃以上の温度域で乾燥すればよいが、今後は耐久性及び材質劣化問題・材面割れ・内部割れ等の品質問題を考慮に入れた、目的に合う総合的なスケジュールの組立が必要であろう。



写真－3 内部割れの状況(末口から50cm)

4. 結言

スギ心持ち正角と平角を対象に高温乾燥スケジュールの検討を行った結果、以下の知見を得た。

1) 高温乾燥は中温乾燥に比べ、乾燥後の含水率

のバラツキが大きいため、乾燥前の選別が重要と認められた。

2) 蒸煮処理は、高温で蒸煮を行う方が成長応力を緩和させる効果が大きく、乾燥機的能力・コストを考慮すると95℃で12時間の処理が適切と思われた。また、長時間の蒸煮は材色を大きく変化させる原因となった。

3) 乾球温度120℃・湿球温度90℃の高温低湿処理について、内部割れを抑制するには24時間の処理が適切と考えられた。また、その後乾球温度を下げるにより、品質のよい乾燥が可能であった。

4) 乾燥後の寸法変化を少なくするためには、仕上げ含水率を15%以下にするか、十分な養生期間を置く必要があると思われた。

5) 50m³の乾燥機を使用した実用規模での試験では、初期含水率86%の材を18%まで乾燥させるのに202時間を要したが、内部割れや材面割れは少なく良好な仕上がりであった。また、その時の乾燥コスト(直接費のみ)は約7,500円であった。

参考文献

奥山 剛・山本浩之・小林 功(1990)直接熱処理によるスギ間伐材の材質変化(2). 木材工業 45(2): 63-67.

越智仁夫(2001)スギ柱材の天然乾燥における前処理効果. 第51回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, p.124.

河崎弥生(1998)高温乾燥したスギ柱材中の水分分布と乾燥後の寸法変化. 木材工業 53(4): 166-171.

久保島古貴・信田 聡・岡野 健(1998)高温乾燥に

- よるスギ柱の機械的及び色彩的性質の変化. 木材工業 **53(3)**:115-119.
- 社団法人全国木材組合連合会(2000)わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル. pp.27-28.
- 関 恵元・西野吉彦・田中千秋(2002)音速法によるスギ材天然乾燥過程における含水率の推定. 木材学会誌 **48(4)**:225-232.
- 信田 聡・安島 稔・明神光幸(2000)乾燥が遅れるスギ柱材の選別方法に関する検討. 第50回日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, p.141.
- 三好誠治・村口良範(1995)スギ正角の選別による乾燥について. 日本木材学会中国・四国支部第7回研究発表会要旨集, 広島, p.22.
- 吉田孝久・橋爪丈夫(1999)スギ柱材の高温乾燥(第1報)120°C-30°C差の乾燥. 第49回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, p.130.