

1 カラマツ及びスギ心持ち柱材の高温乾燥特性

—高温低湿乾燥条件が乾燥特性に及ぼす影響と曲げ強度性能—

吉田孝久、橋爪丈夫

1.1 緒言

建築構造用材に対する人工乾燥への関心が高まる現在、高温乾燥に対して、乾燥時間の短縮や低コスト化、さらに割れの抑制効果等が期待されている。しかし、一口に高温乾燥と言っても、乾燥スケジュール（乾燥温度、湿球温度、乾燥時間）の採り方によって、その仕上がり状態は様々である^{1) 2) 3)}。

乾燥温度80℃程度の通常の柱材の乾燥では、一般に乾燥開始時には関係湿度80%以上が保持されているのが普通である。このためか、現在行われている高温乾燥スケジュールの多くは、全乾燥期間を通して湿球温度を100℃近くに保ち、できる限り湿度を高く保つケースがほとんどである。

今回採用した乾燥スケジュールは、初期蒸煮により乾燥を抑えて材温を上げた後、一気に低湿状態で乾燥を進める方法である。この方法によって、乾燥初期に材表面層部を急速に乾燥させ、高温域での熱弾性変形と引張りセットの形成により、心持ち材特有の材面割れを抑えようとした。さらに、材表面層部は低湿状態で乾燥が進むため、材色の変化が少ないことを期待した。

1.2 試験方法

1.2.1 供試材

末口径級16~20cm、長さ3mの長野県佐久地方産カラマツと下伊那地方産スギから、無背割の

表1-1 供試材の概要

樹種	本数	乾燥回数	製材寸法 (cm)
カラマツ	224本	4回	12.0×12.0×300
スギ	119本	4回	11.5×11.5×300

注) 仕上げ寸法は全て10.5cm角

心持ち正角材を得て供試材とした。寸法、本数について、表1-1に示した。

カラマツはねじれの発生が大きいいため、乾燥後の挽き直しを考慮してスギよりも大きい12.0cm正角とした。

1.2.2 乾燥スケジュール

乾燥スケジュールは、表1-2、図1-1に示したタイムスケジュールとした。乾燥時の装置内湿度は30~40%で、この条件での平衡含水率は約3%である。なお、スギについては、温度差50℃に

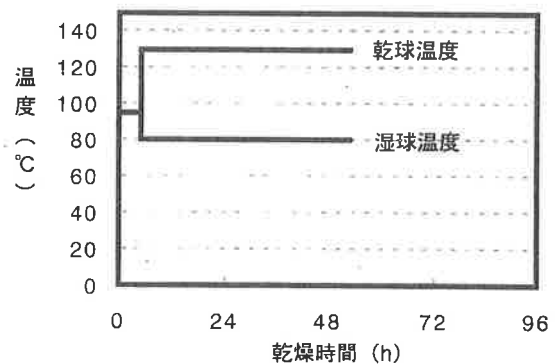


図1-1 基本型乾燥スケジュール（カラマツ）

表1-2 基本型乾燥スケジュール

樹種	時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	温度差 (°C)	備考
カラマツ	6	95	95	0	蒸煮 高温低湿条件
	48	130	80	50	
スギ	6	95	95	0	蒸煮 高温低湿条件
	72	120	90	30	

注) 蒸煮時間は装置内の温度が95℃に達してからの時間である。

設定した場合も試験した。

乾燥全てに、狂い抑制のために約3.0~3.5ton (栈木加圧2.9~3.7kgf/cm²) の荷重を積載した (写真1-1)。栈木は、熱及び圧縮によるつぶれがないよう25mm角のアルミニウム製とした。なお、材間風速は1.5~2.0m/sに設定して乾燥した。

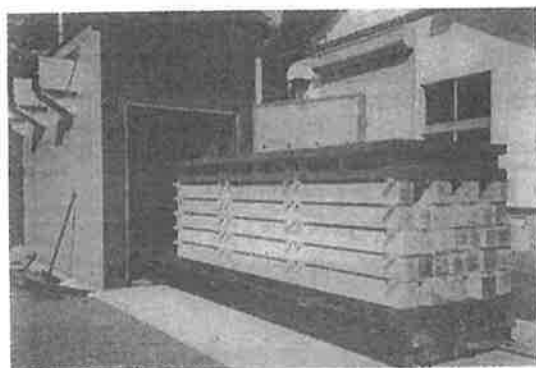


写真1-1 スギ柱材の栈積み (蒸気式乾燥装置)
25mmアルミニウム製栈木、材間風速1.5~2.0m/s

1.2.3 材温

乾燥初期の材温上昇状況を把握するため、JIS Kタイプ熱電対を用いて材温を測定した。熱電対は、材の中心部 (表面から約60mmの深部) までドリルにより穿孔し、これを挿入した後に耐熱シリコンにより密封、固定した。

1.2.4 乾燥経過と乾燥後の含水率

両木口をシリコンでコーティングし、さらにもこの上をアルミ箔で被覆した長さ1mの試験材2本を乾燥装置内に置き、重量を測定することにより含水率を追跡した。また、これと平行して、材中心部に打ち込んだ電気抵抗式含水率センサーにより含水率を測定した。

乾燥終了後の含水率は、含水率計 (カラマツはエーデス機械産業製DELTA-5、スギはケット科学研究所製MOCO2) と、全乾法により測定した。

含水率計による含水率は、乾燥材の長さ方向に80cm、150cm、220cm近辺の3箇所を測定し、この平均値とした。

全乾法による含水率は、栈積みの中から乾燥ごと数本の材を無作為に選び出し、木口から1.5m部 (長さ方向にほぼ中央部) を切断して求めた。残りの材については、およそ1年間養生後の曲げ強度試験時の含水率 (全乾法) から、換算して求めた。

また材内水分傾斜は、乾燥後と養生後に材幅方向1/3内部を、図1-2に示すように7分割あるいは10分割し、全乾法により求めた。

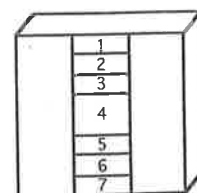


図1-2 水分傾斜測定部位 (7分割)

1.2.5 乾燥後の形質変化と内部割れの調査

乾燥前と乾燥後に、寸法 (幅、厚さ)、重量、曲がり、ねじれ、割れを測定した。

柱材の寸法は、材の長さ方向の中央部で測定し、乾燥後に測定部に割れが生じた場合は、同じ材面で割れの生じていない部分を測定した。また、これらの値から収縮率を求めた。

曲がり、発生している材面の最大矢高を、またねじれは、平面上で3点を固定し他の1点の浮き上がりを計測した (写真1-2)。

材面割れは、木口割れを含めた長さの合計で、また内部割れは、曲げ強度試験時の含水率測定試験片において、長さの合計と最大幅を計測した。



写真1-2 ねじれの測定

1.2.6 モルダ仕上げ後、及び養生後の形質変化

乾燥後の形質変化を測定した後、モルダにより10.5×10.5×300cmの柱材に仕上げた。この時点で再度、寸法、重量、含水率 (含水率計) を測定し、栈積み状態で養生した。また、およそ1年経過後に寸法、重量、曲がり、ねじれ、含水率を測定した。

1.2.7 高温低湿乾燥材の吸・放湿試験

カラマツ及びスギの高温乾燥材3本から、10.5×10.5×1.5cmの木口試験片を3枚ずつ採取し、恒温恒湿装置 (TABAI ESPEC) 内に放置した

(写真1-3)。これらの試験片の重量を、原則として1日ごとに測定し、試験終了時に全乾とした後、各測定時の含水率を算出した。

恒温恒湿装置は、開始2週間を温度20℃・湿度85% (EMC=18%)、後2週間を温度20℃・湿度30% (同6%)、最終2週間を温度20℃・湿度85% (同18%) に設定した。

なお、コントロール材として同寸法のカラマツ及びスギ天然乾燥材試験片を3枚ずつ加えた。

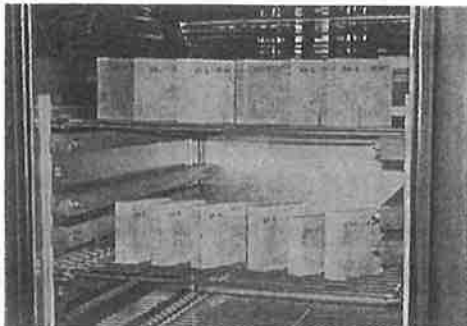


写真1-3 高温低湿乾燥材の平衡含水率の測定
恒温恒湿装置内に木口試験片を存置

1.2.8 スギ柱材の材色変化

スギ柱材25体の材色を、乾燥前(生材)と乾燥後及びモルダ仕上げ後に、色差計(MINOLTA CR-300)を用いて、 $L^*a^*b^*$ 表色系で求めた。

1.2.9 実大材曲げ強度試験

乾燥前に、FFTサウンドアナライザーを用いて縦振動数を測定し、次式により動的ヤング係数 E_{fr} (tonf/cm²)を算出した。

$$\text{ヤング係数 } E_{fr} \text{ (tonf/cm}^2\text{)} = 4 l^2 \cdot Ru \cdot f^2 / g$$

ここで l は材長、 Ru は密度、 f は固有振動数、 g は重力加速度(980cm/s²)である。

また養生後の材及びその後同スケジュールで実施した材を加えて、スパン270cm、3等分点4点荷重方式により正角材の実大材曲げ破壊試験を実施した(図1-3)。

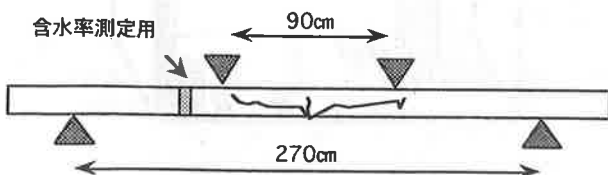


図1-3 曲げ強度試験条件と含水率測定試験片の採取位置

試験機はUH-1000KNA(島津製作所製)を用い荷重スピード10mm/minで行い、次式により曲げヤング係数MOE (tonf/cm²) (静的ヤング係数)及び曲げ強度MOR (kgf/cm²)を算出した。

$$\text{曲げヤング係数 MOE (tonf/cm}^2\text{)} = \Delta P \cdot a / (3 L^2 - 4 a^2) / (4 b \cdot h^3 \cdot \Delta Y)$$

$$\text{曲げ強度 MOR (kgf/cm}^2\text{)} = 3 a \cdot P_m / b h^2$$

ここで P_m は破壊荷重、 ΔP は比例域内における上限荷重と下限荷重との差、 ΔY は ΔP に対応するたわみ、 L はスパン、 a は支点と荷重点との距離(90cm)、 b は材の幅、 h は材の高さである。

試験後、非破壊部より長さ方向2cmの含水率測定用試験片を切り出し、全乾法により含水率を測定した。

1.2.10 実用規模での乾燥試験と乾燥経費の調査

県内の3箇所の乾燥工場において、表1-2に示した乾燥条件に準じた乾燥スケジュールで乾燥した材の仕上がり状態と乾燥経費を調査した。

乾燥材の仕上がり状態調査では、人工乾燥に供される柱材の中から30本を指定し、乾燥前後の重量と含水率(高周波含水率計MOCO2により測定)を、またこの中から10本を選定し、材長の中央部で全乾法による含水率、材内水分傾斜、割れ、曲がり調査した。

乾燥経費については、電気量と消費燃料、さらに人件費について調査し、乾燥コストを算出した。

調査対象とした工場は、工場番号1が(株)新柴設備製高温タイプ31.5m³の乾燥機1機を、工場番号2が同31.5m³の乾燥機2機を、工場番号3がヒルデブランド(株)製高温タイプ45.0m³の乾燥機2機を保有している。

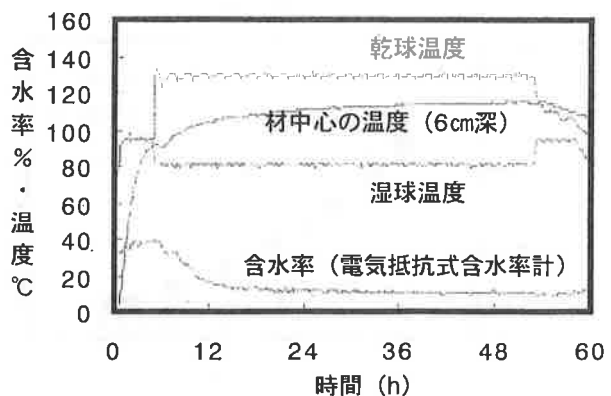


図1-4 カラマツ柱材(12.0cm)の温度上昇と電気抵抗式含水率計による乾燥経過

1.3.結果と考察

1.3.1 材温の上昇

材温の上昇状況例を乾球温度、湿球温度の状況と共に図1-4に示した。材中心部が95℃に達するのにほぼ6時間を要した。初期蒸煮時間の決定は、材中心部の温度が乾燥装置内の温度と同じになるまで行うことを前提として設定した。

満久は、初期加熱時間は一般に厚さ1cmにつき1時間、厚さが増すとこれよりやや低く見積もるのが適当であると述べている⁴⁾。本試験での12cm正角では、材中心部の温度が乾燥装置内の温度と同じ95℃になるまでに、装置内温度が95℃に達してからおよそ5時間、また21cm正角の試験ではおよそ12時間と、かなり満久に近い値が測定された。このことから、実用規模での乾燥装置で、乾燥初期の材温上昇に要する蒸煮時間の目安は、次式により決定するのがよいものと思われる。

$$T = A + H / 2$$

ここで、T：蒸煮時間、A：装置内温度が設定蒸煮温度に達する時間、H：材厚（cm）である。

実用規模での乾燥装置におけるAは、乾燥する量や乾燥する季節によっても大きく変化するため、

このことも考慮して決定すべきである。

1.3.2 乾燥経過と乾燥後の含水率

電気抵抗式含水率計で計測した乾燥経過の一例を図1-4に、全乾法で測定した乾燥経過を図1-5に示した。

初期蒸煮後、材の含水率はやや上昇し、その後高温低湿の乾燥過程にはいると、カラマツは約60時間、スギは約70時間で含水率10%付近まで低下した。

初期含水率が低いカラマツでは、乾燥全体を通じて平均でおよそ0.5%/hの乾燥速度であった。

一方スギのNo.1においては、含水率90%から30%付近までは、およそ2.0%/h、含水率30%から10%付近までは、およそ0.7%/hの乾燥速度であった。特に、温度差を開いた直後6時間では、カラマツが1.4%/h、スギのNo.1が4.4%/h、No.2が2.1%/hの乾燥速度を示した。

乾燥前後及びモルダ仕上げ後の含水率（含水率計）の出現割合を図1-6に示した。

カラマツは、含水率計での測定で1本を除いた全ての材が含水率15%以下であった。含水率計での平均値は全体で8.8%、標準偏差1.9%であった。

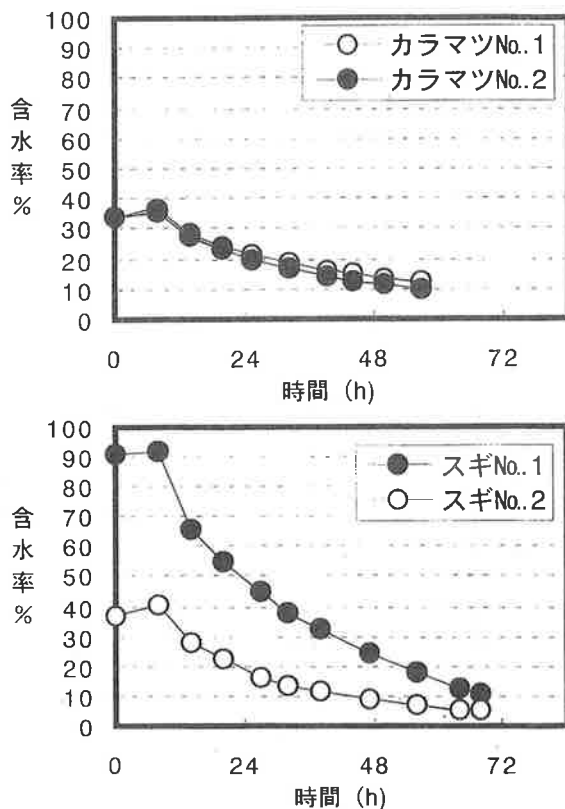


図1-5 乾燥経過（全乾法）

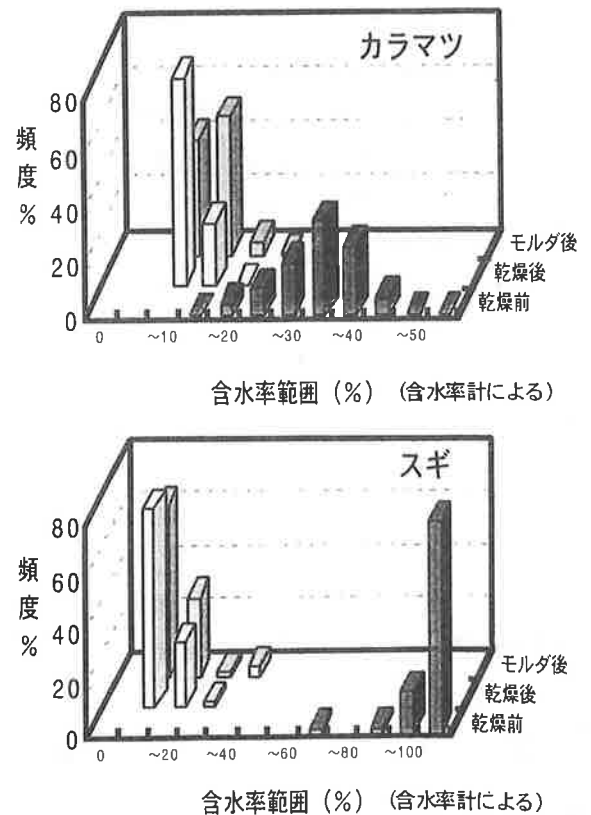


図1-6 各時点における含水率の出現頻度

全乾法での含水率（曲げ強度試験時の全乾含水率から推定した）は、平均値が11.2%、標準偏差2.8%であり含水率計の測定値より2%程高い値を示した。

これに対しスギでは、含水率計での測定で、20%を超えるものが1本、15%を超えるものが2本で、残りは全て15%以下であった。含水率計での平均値は全体で9.0%、標準偏差3.0%であった。全乾法の含水率（曲げ強度試験時の全乾含水率から推定した）は、平均値が9.9%、標準偏差5.0%であり含水率計の測定値より1%程高い値であった。

スギにおいては、含水率（全乾法）が10%以下の材が全体の73%を占め、構造材としてはかなり過乾燥材となった。実用的に、全乾法による含水率が20%以下を目標とするならば、乾燥時間は48~60時間程度でも可能であると思われる。

なお、乾燥後に目標含水率或いは目標重量に達していない材は、この乾燥方法では養生期間中に割れの延長が見られなかった。すなわち、本乾燥法で含水率が目標値に達していない材は、その後天然乾燥或いは低中温乾燥での含水率調整が可能であると思われる。

1.3.3 材内部の水分傾斜

図1-7及び1-8に乾燥後と1年間養生後の材内部における水分傾斜を示した。

カラマツの場合、乾燥後では、材表面と材中心部とに5~10%程度の水分傾斜が認められたが、材中心部付近の含水率は20%以下に仕上がった。

カラマツは、ねじれの原因となる繊維傾斜が未成熟材部（髄周辺部）ほど大きいため、この部分に水分が残っている材では、その後ねじれの発生がある。事前に行った試験での結果は、材の中心部付近に水分が残っている材は、その後ねじれの発生が見られ、その程度は材中心部に水分が多く残っている材ほど大きかった⁵⁾。今回の試験では材中心部の含水率が20%以下に上げることが前提として行ったが、これについてはほぼクリアできた。

1年間養生後の水分傾斜では、材中心部の含水率は減少し、また表面部の含水率が上昇することによって、全体として水分傾斜のない乾燥材となった。

一方スギの場合、黒心材（重い材）では乾燥後の水分傾斜が大きく、材中心部では50%以上の含

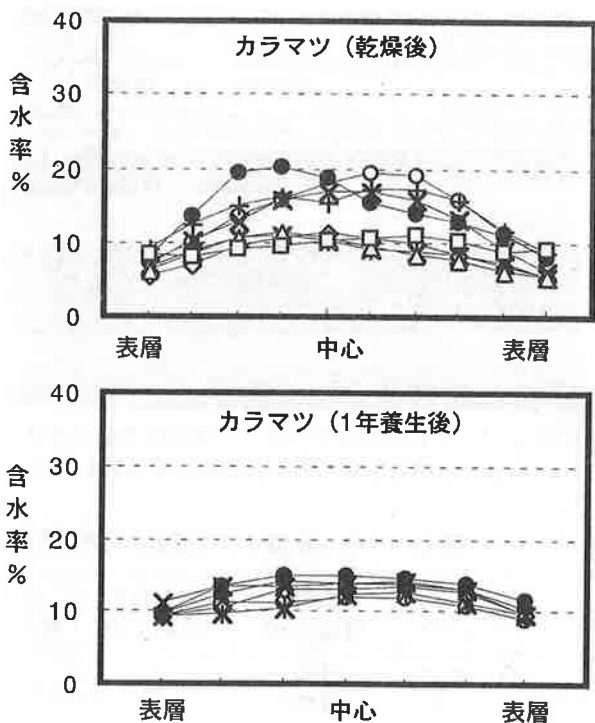


図1-7 乾燥後及び1年養生後の水分傾斜（カラマツ）

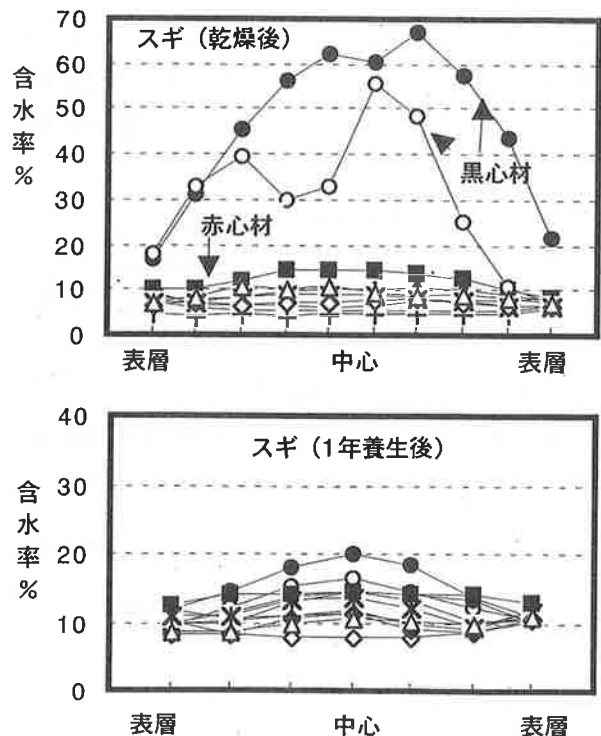


図1-8 乾燥後及び1年養生後の水分傾斜（スギ）

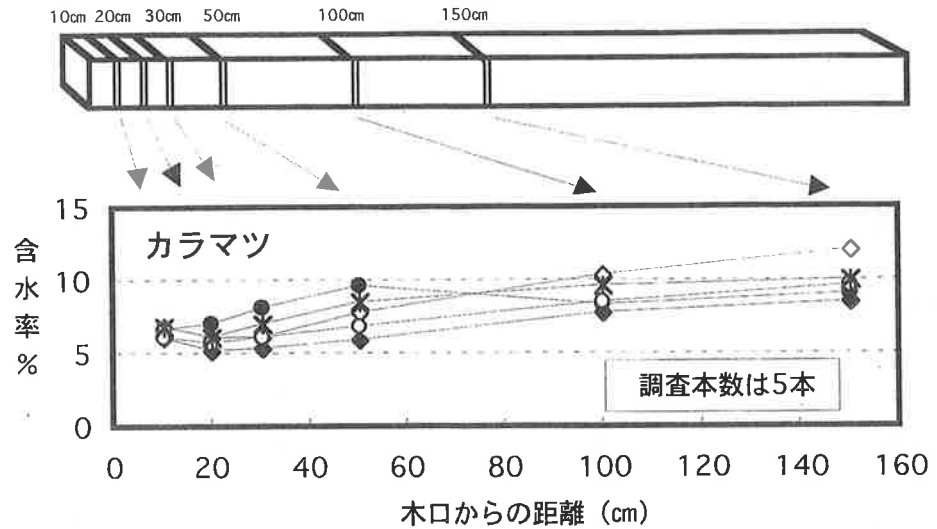


図1-9 乾燥2週間後の長さ方向別の含水率(全乾法)

含水率を示した。これに対し赤心材では、材中心部が10%程度で、水分傾斜の少ないやや過乾燥ぎみの材となった。

1年間養生後の水分傾斜では、黒心材の材中心部はおよそ20%となったが、他の材では、含水率の変動が少なく、3~4%の上昇で、平均で11%程度の含水率に落ち着いていた。

図1-9にカラマツについて、乾燥2週間後における長さ方向の含水率分布を示した。3m材の中央部1.5m部位まで徐々に含水率が上昇していることから、乾燥中の水分蒸発は、木口からもかなり多いものと思われる。また、木口から10cm部位では、乾燥後に材が吸湿して含水率がやや上昇したものと思われる。

1.3.4 乾燥後の形質変化

乾燥後の形質変化を表1-3に示した。

収縮率の平均値は、カラマツで2.92%、スギで3.17%であった。仕上がり含水率からすれば、ほぼ妥当な値であると思われる。

乾燥後の曲がりやアテに起因するものと思われる。これは個体差が大きい。カラマツの場合、全

乾燥材224本中9本が、スギの場合119本中3本が、JAS1級の許容限度である6mmを越えた。カラマツの中には、積載荷重のため曲がりや拘束され、アテの部分に横割れの認められるものもあった(写真1-4)。

ねじれは、繊維傾斜の大きいカラマツが目立って多く、その平均値は9.2mm/3mで、最小0mm~最大36mmまで大きくばらついていた。一方スギは平均値が1.5mm/3mで、利用上問題とな

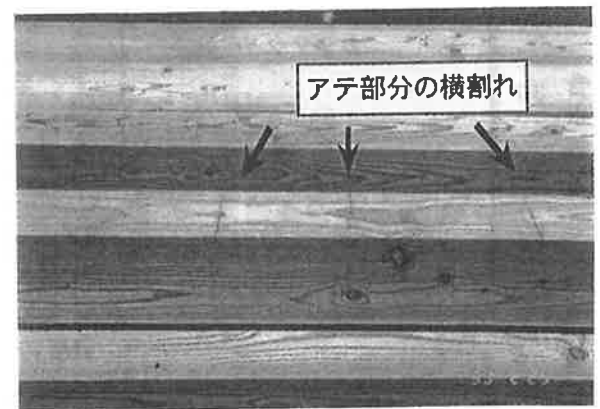


写真1-4 アテのある材では、上部積載荷重のため曲がることができず、横割れの発生する材もある。

表1-3 高温乾燥による形質変化(平均値)

樹種	含水率(1) (%)	含水率(2) (%)	収縮率 (%)	曲がり (mm/3m)	ねじれ (mm/3m)
カラマツ	11.2	8.8	2.92	3.5	9.2
スギ	9.9	9.0	3.17	2.3	1.5

注1) (1)の含水率は全乾法による。
注2) (2)の含水率は含水率計による。

表1-4 材1本当たりの材面割れと内部割れ

樹種	材面割れ 延長(cm)	内部割れ 延長(cm)	内部 最大幅
カラマツ	183	-	
スギ	142	5.9	

注1) カラマツの内部割れは未調査
注2) 内部割れ最大幅は、内部割れがある材の平均値

る値ではなかった。

カラマツについて、同乾燥スケジュールで非圧縮材50本の比較試験を行ったが、この平均値は14.1mm/3mで、圧縮材の平均値と比較すると、およそ35%の抑制効果が認められた。

1.3.5 乾燥による材面割れと内部割れ

材面割れについて、1本当りの割れ延長を表1-4に示した。

材面割れは、その延長や割れ幅が従来の乾燥方法(100℃以下の人工乾燥、天然乾燥)に比べ非常に少ないものとなり、割れの発生する面は、ほとんどが1材面のみであった(写真1-5)。

また、今回の高温低湿乾燥材の特徴として、割れ幅が狭く、また材面割れが天然乾燥材の様に髓までは到達せず、表面から1cm程度の深さにしか入っていなかったことがあげられる(写真1-6)。これは乾燥初期に発生した材面割れが、髓まで到達する前(乾燥初期の早い時期)に、材表層

部の乾燥応力が、引張りから圧縮に転じたためと考える。乾燥後の材面割れの観察では、割れの発生した後に閉じた形跡のあるものも認められた。

材面割れは、乾燥前に干割れ(ヘアークラック)が発生していたものが、乾燥時にさらに延長されることが多く、また木口割れに関しては、新しく木口を切断し、乾燥前に木口割れの無い状態にしておくと、乾燥による割れ発生はかなり抑制された。このように、材面割れや木口割れの抑制には、乾燥前の材の保管の状態、つまり製材から乾燥行程開始までに、いかに干割れを防ぐかが、大きく影響するものと考えられる。したがって、乾燥前に栈積み状態で長く置かないこと、これが無理な場合は、散水等で材面の乾燥を防ぐ等の工夫が必要であろう。

内部割れは、カラマツに関してはわずかであったが、スギについてはかなりの材に確認された(写真1-7)。内部割れの抑制方法については、内部割れが、強度性能や接合に対してどのように影響するかという問題と併せて、今後の検討課題としたい。(一部1.4項で検討)



写真1-5 材面割れの発生状況(カラマツ)

上段：天然乾燥 下段：高温乾燥

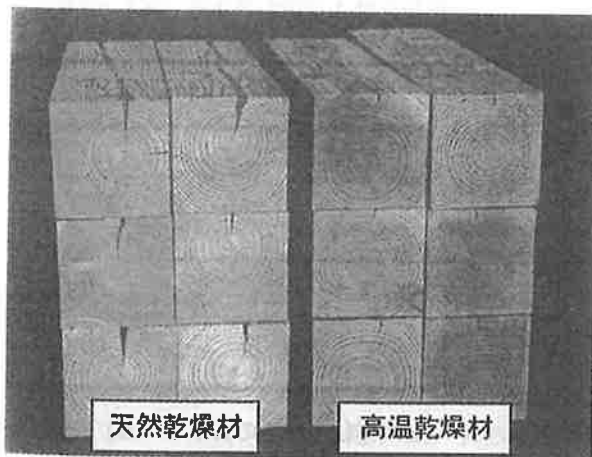


写真1-6 材面割れ深さの比較(カラマツ)

高温乾燥の割れは、浅く細い

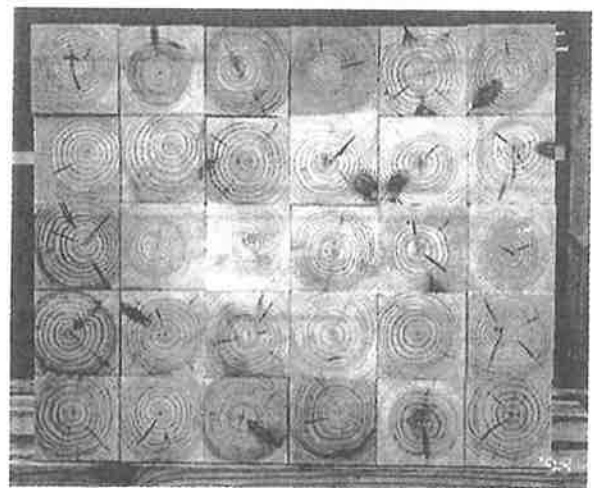


写真1-7 内部割れの様子(スギ)

1.3.6 モルダ仕上げ後及び養生後の形質変化

モルダ仕上げ後、およそ1年間の養生の間に発生した狂いの状況を表1-5に示した。

カラマツ、スギ両者とも全体としては養生期間中に吸湿し、含水率、重量、寸法がやや増加しているが、個体別にみると、吸湿しているものもあれば、放湿しているものもある。

モルダ仕上げ後の含水率(全乾法)と寸法変化の関係を図1-10に、重量変化を図1-11に示した。カラマツ、スギともに、プラス側の変化が大きく+2mm強、マイナス側では-1mm程度の变化であった。この中で、モルダ仕上げ後の含水

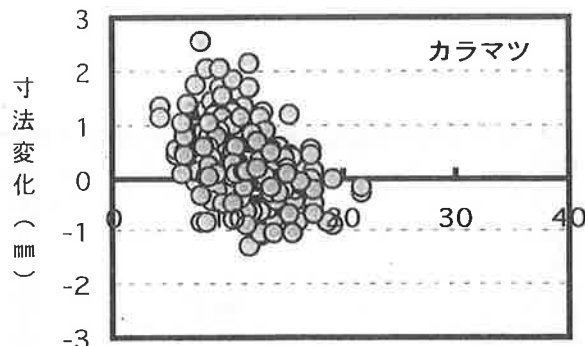
率が20%以上のものはマイナス側に-1~-2mmの動きを示した。今回の試験では全体に過乾燥ぎみであったため、養生期間中にプラス側に变化したが、この変化を少なくするためには、乾燥時間を短くするかあるいは乾燥後の調湿をある程度行った方がよいと考える。この場合、寸法変化の最も少ない含水率12%付近に調整することが望まれる。

曲がりやねじれの増加に関しては、乾燥後、材内に水分傾斜の残る材において、材中心部付近の含水率が低下するに伴って発生したか、或いは、乾燥時に3トンの荷重を棧積み上部に積載したた

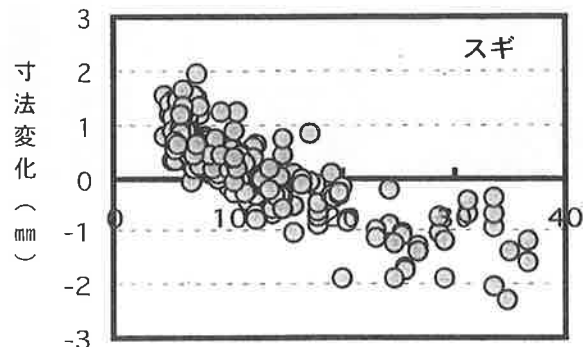
表1-5 モルダ仕上げ後、養生後の形質変化

		含水率 (%)	重量 (kg)	寸法 (cm)	曲がり (mm/3m)	ねじれ (mm/3m)
カラマツ	モルダ仕上げ後	11.2	16.35	10.505	0.0	0.0
	約1年後	11.6	16.44	10.531	2.4	1.9
スギ	モルダ仕上げ後	9.9	13.73	10.508	0.0	0.0
	約1年後	11.2	13.85	10.550	1.4	0.2

注) 含水率は全乾法による。

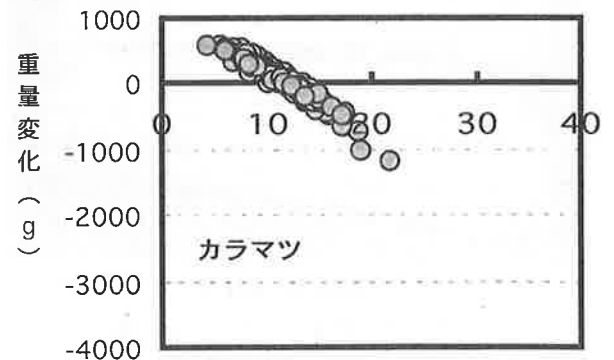


モルダ仕上げ後の含水率 (%) -全乾法-

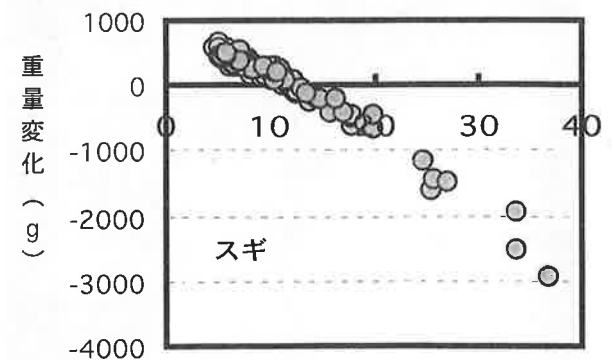


モルダ仕上げ後の含水率 (%) -全乾法-

図1-10 モルダ仕上げ後の含水率と約1年後の寸法変化の関係



モルダ仕上げ後の含水率 (%) -全乾法-



モルダ仕上げ後の含水率 (%) -全乾法-

図1-11 モルダ仕上げ後の含水率と約1年後の重量変化の関係

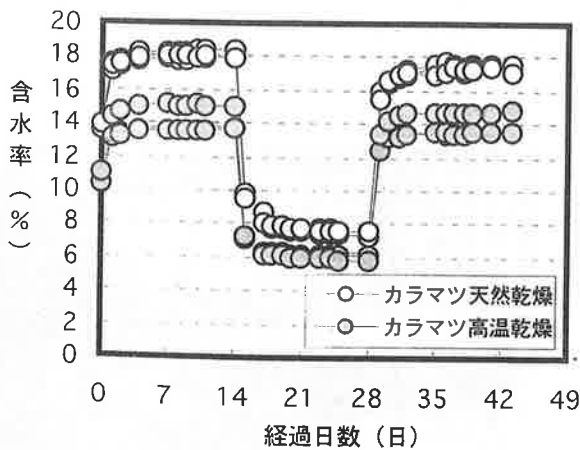
め、抑えられていた狂いが、その後養生期間中に徐々に回復したのではないかと考えられる。このことは、ねじれが、乾燥後においても養生後においても同じS巡回方向に発生する（吸湿によるものでない）ことから言える。この傾向は特にカラマツについて大きかった。

割れに関しては、新たな材面割れの発生や、既存の割れの延長はほとんどなかった。このことは、養生期間中の材面応力が圧縮応力であったことから説明される⁶⁾。

1.3.7 高温乾燥材の吸・放湿試験結果

恒温恒湿装置内の平衡含水率を18%→6%→18%と変化させた時の、これに伴う高温乾燥材の含水率変化を図1-12に示した。カラマツ及びスギの高温乾燥材の含水率は、天然乾燥材のそれに比べ4～6%低く、平衡含水率が低下していることが推測される。特にスギについては、吸湿側（高湿度条件下）でこの傾向が大きかった。

高温乾燥材の含水率や材内水分傾斜が、養生期間中に吸湿側に大きく変化しなかったのは（図1-7、1-8）、この影響が大きかったものと考えられる。またこのことは、温湿度の変化に対する寸法変化が小さいことを示唆しており、寸法安定性の改善が期待できる。



1.3.8 スギ柱材の材色変化

高温低湿乾燥による材色の変化は、カラマツ、スギともに乾燥による脱色感（特にスギの心材）はあるものの、100℃以下の中温乾燥材と視覚的にはあまり変わらない材色であった。

図1-13に、スギ柱材の辺材と心材について、乾燥前と乾燥後及びモルダ仕上げ後の測定結果を示した。

特に乾燥前と乾燥後とで変化の大きかったのは辺材の明度と、心材の彩度である。

辺材では明度が低下したが、彩度はほとんど変化がなく、一方心材では、明度がやや上昇し、彩度が低下する傾向にあった。つまり、心材では色の鮮やかさがなくなった。これを辺材と心材との色差 $\Delta E = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$ で表わすと、乾燥前で $\Delta E = 16.86$ あったものが、モルダ仕上げ後では $\Delta E = 3.24$ となり、河崎²⁾が指摘したように辺材と心材の同色化が進んだ。

モルダ仕上げ後に辺材の L^* が70以上を示し、明度の減少が小さかったことは、乾燥温度が120℃と高温であっても、乾湿球温度差が30℃を保ち続けたこと、さらには乾燥時間が比較的短かったこと等に起因するものと思われる。

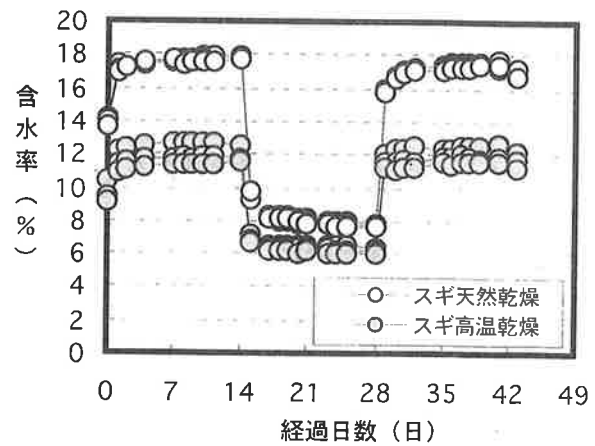


図1-12 天然乾燥材と高温乾燥材の吸・放湿の差異

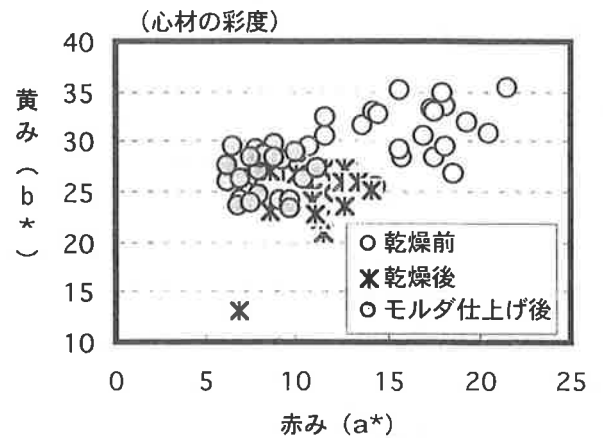
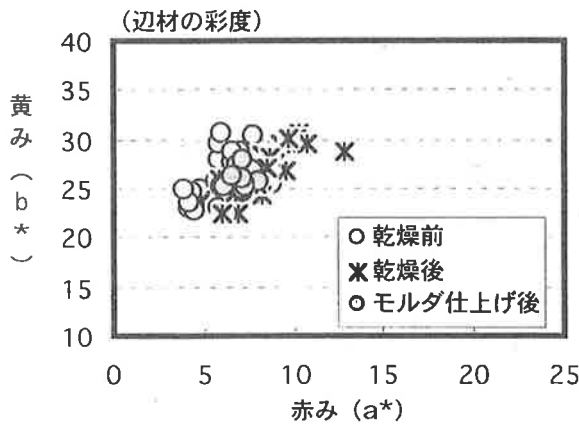
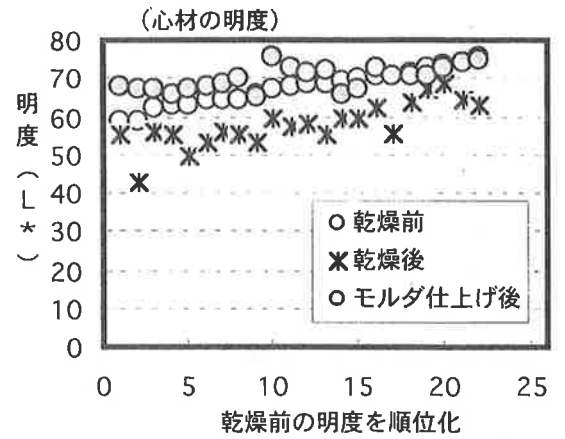
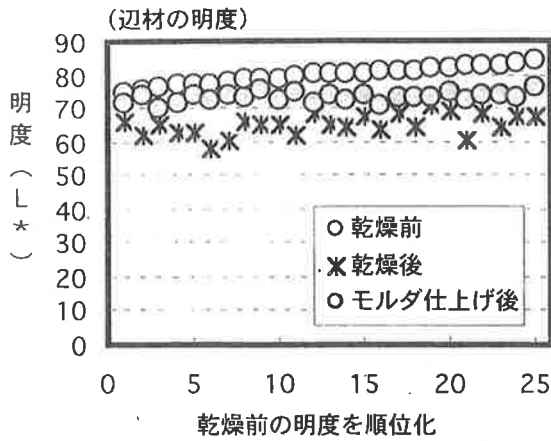


図1-13 乾燥後の材色変化(スギ)

高温乾燥材は一般に暗色化傾向にあると言われるが、この材色変化は、蒸煮時間、乾燥温度、湿球温度、乾湿球温度差、乾燥時間、さらには樹種により左右されるものと思われ、今回の結果は、高温乾燥材が必ずしも焼け色的に暗色化するとは限らないことを示した。

1.3.9 実大材曲げ強度試験結果

高温乾燥材の強度性能は、乾燥温度や乾燥時間の組み合わせにより様々であると考えられる。

表1-6にカラマツ柱材の試験結果を、天然乾燥材の試験結果と併せて示した。また、図1-14及び図1-15に高温乾燥材(130℃)の曲げヤング係数(MOE)と曲げ強度(MOR)を、生材時の縦振動ヤング係数(Efr)との関係で示した。

なお以下の結果の中で、天然乾燥材との比較を述べている部分があるが、試験値については含水率補正を行っていない。

高温乾燥材と天然乾燥材のMOEの平均値はそれぞれ114.3tonf/cm²、110.7tonf/cm²で、MORのそれは379kgf/cm²、521kgf/cm²であり、天然乾

燥材と比較して、MOEには変化は認められないが、MORは低下する傾向が認められた。

曲げ強度に及ぼす乾燥温度の依存性があるのかどうかを検討するため、高温低湿乾燥という基本的パターンは変えずに、乾燥温度を120℃として高温乾燥した材25本の強度試験を行った。この結果を前結果と併せて、曲げヤング係数MOEと曲げ強度MORの関係で図1-16に示した。

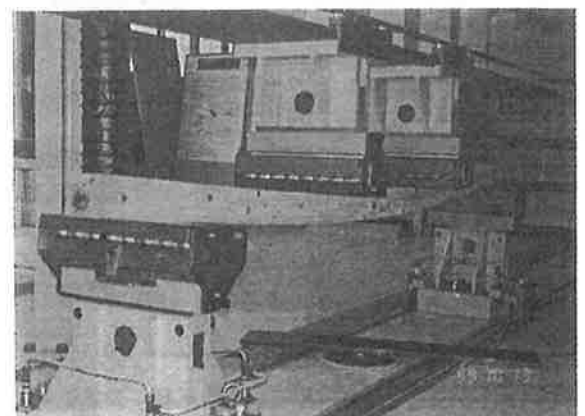


写真1-8 スギ120℃高温乾燥材の強度試験

曲げ強度性能は、天然乾燥材>120℃乾燥材>130℃乾燥材の傾向が見られ、乾燥温度依存性が推測される。この結果の信頼性については、乾燥時間の因子も加え、試験体数を増やした上で、今後検討すべき課題である。

スギ柱材については、120℃高温乾燥材と天然乾燥の結果を表1-7に、曲げヤング係数MOEと曲げ強度MORの関係を図1-17に示した。また、写真1-8に曲げ強度試験の様子を示したが、非常に粘り強い材料であった。

120℃高温乾燥材のMOEの平均値は93.9 tonf/cm²で、MORのそれは476kgf/cm²であった。これに対し天然乾燥では、MOEの平均値は88.2 tonf/cm²で、MORは471kgf/cm²であった。

高温乾燥材は強度が低下する傾向にあると言う報告もあるが⁷⁾、これは、上述したとおり乾燥温度や処理時間等に左右されるものと考えられる。今回の結果では、現在までに報告されているスギ強度⁸⁾と比較すると、上位に位置する曲げ強度結果となった。

表1-6 カラマツ柱材の曲げ強度試験結果

◎130℃48時間の高温乾燥材 (N=251)					
区分	曲げ強度 (kgf/cm ²)	曲げヤング係数 (tonf/cm ²)	平均年輪幅 (mm)	密度 (g/cm ³)	全乾含水率 (%)
平均値	379	114.3	4.51	0.482	11.6
標準偏差	97	16.0	0.75	0.036	1.2
最小値	165	66.7	2.63	0.399	8.1
最大値	669	168.1	6.73	0.613	14.8
◎天然乾燥材 (N=94)					
平均値	521	110.7	4.51	0.515	15.4
標準偏差	89	13.3	0.64	0.036	0.5
最小値	300	73.6	3.27	0.432	14.0
最大値	713	147.4	6.27	0.606	16.5

表1-7 スギ柱材の曲げ強度試験結果

◎120℃72時間の高温乾燥材 (N=140)					
区分	曲げ強度 (kgf/cm ²)	曲げヤング係数 (tonf/cm ²)	平均年輪幅 (mm)	密度 (g/cm ³)	全乾含水率 (%)
平均値	476	93.9	4.95	0.403	11.5
標準偏差	83	15.0	1.09	0.031	1.7
最小値	271	54.7	2.40	0.319	8.3
最大値	690	136.8	7.68	0.490	15.7
◎天然乾燥材 (N=37)					
平均値	471	88.2	5.59	0.409	16.5
標準偏差	76	13.2	1.38	0.024	0.7
最小値	291	61.3	2.40	0.359	15.0
最大値	659	124.9	8.34	0.462	18.2

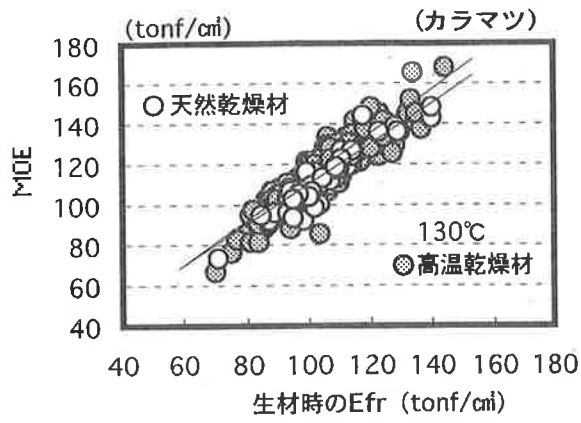


図1-14 生材時のEfrとMOEの関係

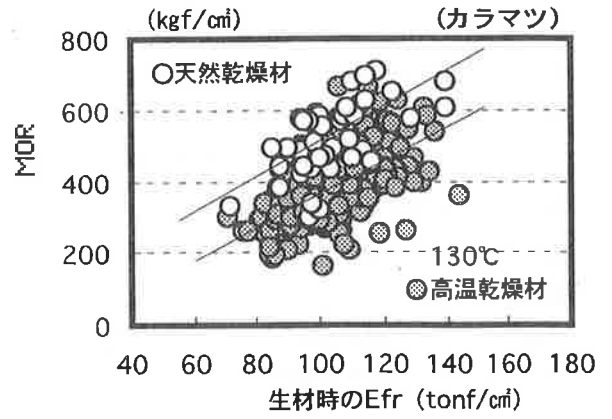


図1-15 生材時のEfrとMORの関係

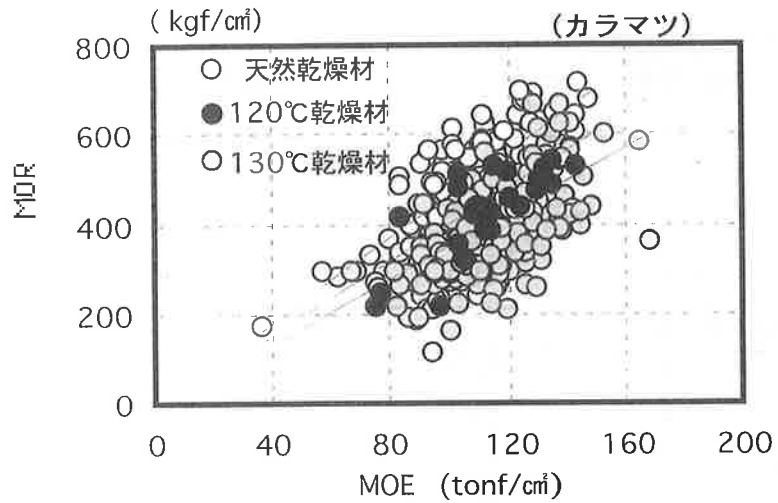


図1-16 乾燥温度別のMOEとMORの関係

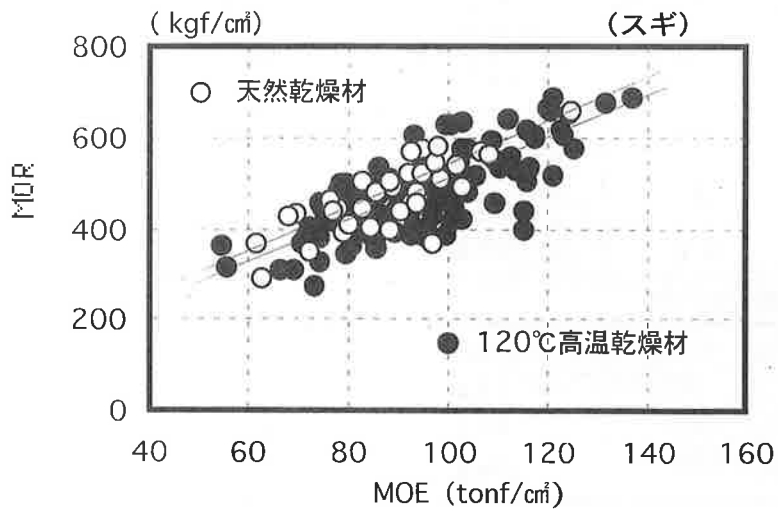


図1-17 MOEとMORの関係

1.3.10 実用規模での乾燥試験と乾燥経費の調査
調査工場別の乾燥条件と乾燥仕上がりを表1-8、1-9に、また乾燥スケジュールと仕上がり材の材内水分傾斜を、図1-18に示した。

(1) スギ柱材（工場番号1、2）

乾燥前の含水率は全体平均で60~80%であり、中には100%以上の含水率のものも存在した。MOCO2の機器特性から高含水率域では値が実際の含水率より低く表示されるため、実際には80~100%の含水率であったと思われる。

乾燥後の含水率（含水率計）は、工場番号1（13.5cm正角）では平均が14%であり、調査した柱30本は全て含水率25%以下であった。工場番号2（13.2cm正角）については、調査の中で最もよく乾いている状態であり、平均が10%で、30本全てが含水率15%以下であった。

全乾法による含水率は、工場番号1（13.5cm正角）では20%、工場番号2（13.2cm正角）では11%であった。

含水率分布の幅が最も小さいものは工場番号2であり、中心部が40%を越えている1本は、乾燥前の重量が平均よりも10kg重い42kgの材であった。工場番号1での含水率分布の幅が大きいものは、やはり乾燥前に重量が重いものであった。これらのことより、仕上がり含水率のバラツキを小さくし乾燥効率を向上させるためには、現在提唱

されている乾燥前の重量選別も、期待されるひとつの方法であろう。

材面割れの発生がほとんどなかったのは工場番号2であった。これに対しやや多く発生が見られたのは工場番号1であった。工場番号1では、製材から乾燥まで時間が長く（2週間程度）、保管場所も西日の当たる場所であり、乾燥前に材面には微細な割れが存在しており、これが乾燥によって大きく拡大延長されたためと考えられる。このように、乾燥前の微細な割れは乾燥後の割れに大きく影響してくるものと思われ、製材後直ちに乾燥するということが、割れ防止の意味から重要なことと思われる。

曲がりについては、平均で2mm/3m程度の発生であった。

(2) カラマツ柱材（工場番号3）

乾燥前の含水率は平均で36%であり、ほとんどが30~40%の範囲に分布していた。乾燥後の含水率は平均で10%であった。全乾法での含水率は平均で16%であり、10~20%の範囲にあった。しかし、乾燥材の断面が15cm角と大きいこともあり、材内含水率の分布幅は大きかった。

乾燥による材面割れは、背割り材であることから、皆無であった。また曲がり平均で4mm/3mであり、この中には13mm、16mmの大きな曲がりのものが存在した。

表1-8 乾燥の概要

工場番号	材種	寸法 (cm角×m)	乾燥製材量 (m ³)	乾燥温度 (最高)	乾燥時間 ^{注1)} (hr)	乾燥前含水率 (含水率計) ^{注2)}	乾燥後の含水率	
							(含水率計) ^{注2)}	(全乾法) ^{注3)}
1	スギ	13.5×3	32.5	120	112	69	14	20
2	スギ	13.2×3	28.7	120	116	61	10	11
3	カラマツ	15.3×4	21.6	125	122	36	10	16

注1) 冷却時間を含む。

注2) 試験材30本の平均値。

注3) 試験材10本の平均値。

表1-9 エネルギー経費

工場番号	水分蒸発量 ^{注1)} (kg/m ³)	消費電力量 (kWh)			電気代 ^{注2)} (円)	燃料消費量 (リットル)	燃料費 (円)	エネルギー費/m ³ ^{注3)} (円)
		乾燥機	ボイラー	合計				
1	194	-	-	328	5,904	1,506	69,276	2,313
2	224	-	-	401	7,218	1,250	47,500	1,907
3	129	732	207	939	16,909	1,296	47,952	3,003

注1) 試験材30本の重量低下を全材積分に換算したもの。

注2) 18円/kWhとして計算。

注3) 計算の基礎となる乾燥材の材積は表1による。

(3) 乾燥経費 (表 1-9)

1) 水分蒸発量

水分蒸発量は、乾燥前の含水率及び乾燥仕上がり含水率に大きく影響される。スギの柱材の場合、乾燥による水分蒸発量を1㎡当りに換算すると工場番号1では194kg、工場番号2では224kgであった。また、カラマツ柱材では、1㎡当たりの水分蒸発量は129kgであった。

2) 消費電力量

消費電力量は、乾燥機のプロペラファン及び吸排気ファン及び開閉モーター、ボイラー、制御盤の電力の合計であり、この中で乾燥機本体に関わる電力が総使用量のおよそ80%を占める。

乾燥1時間当たりの消費電力量を計算すると、工場番号1及び2 (スギ柱材) では2.5~3.5KWHに対し、工場番号3 (カラマツ柱材) では、7.7KWHで工場番号1及び2の2倍~3倍の消費量

であった。

これは乾燥樹種の違いでなく、乾燥装置の構造的違い (装置の大きさ、プロペラファンの数等) が影響しているものと思われる。

3) 燃料消費量

1時間当たりの燃料消費量を計算してみると、120℃で運転した工場番号1及び2については11~13 l/hであり、125℃で運転した工場番号3では11 l/hであった。

また、1㎡当たりの燃料消費量では、工場番号1では46 l、工場番号2では44 l、工場番号3では60 lであった。これらの違いは、乾燥樹種の違いばかりでなく、乾燥装置の断熱等構造的違いが影響しているものと思われる。特に工場番号3の1㎡当りの燃料消費量が大きいのは、45㎡の乾燥容量に対して1/2程度での乾燥運転であったことが原因しているのではないかと考えられる。

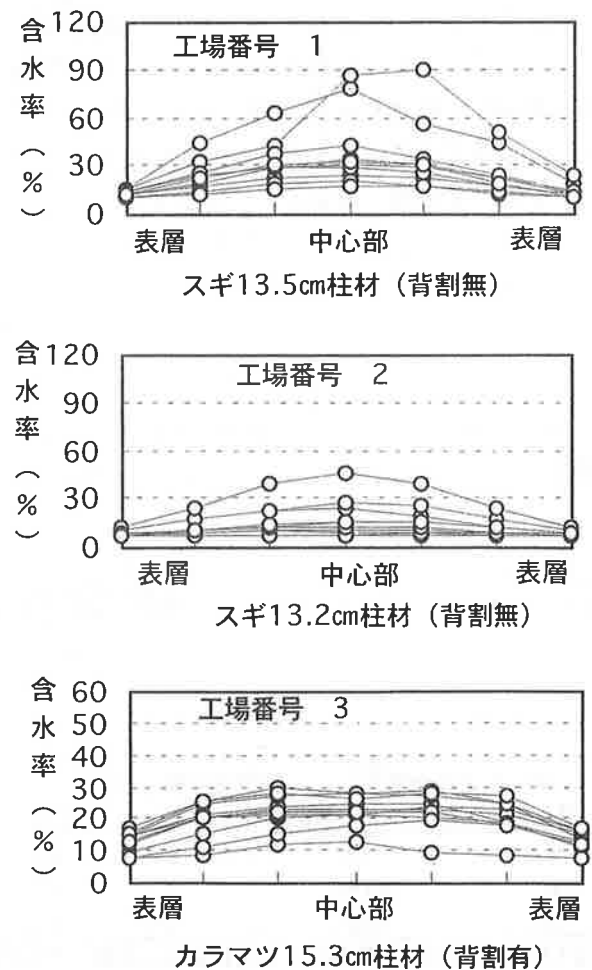
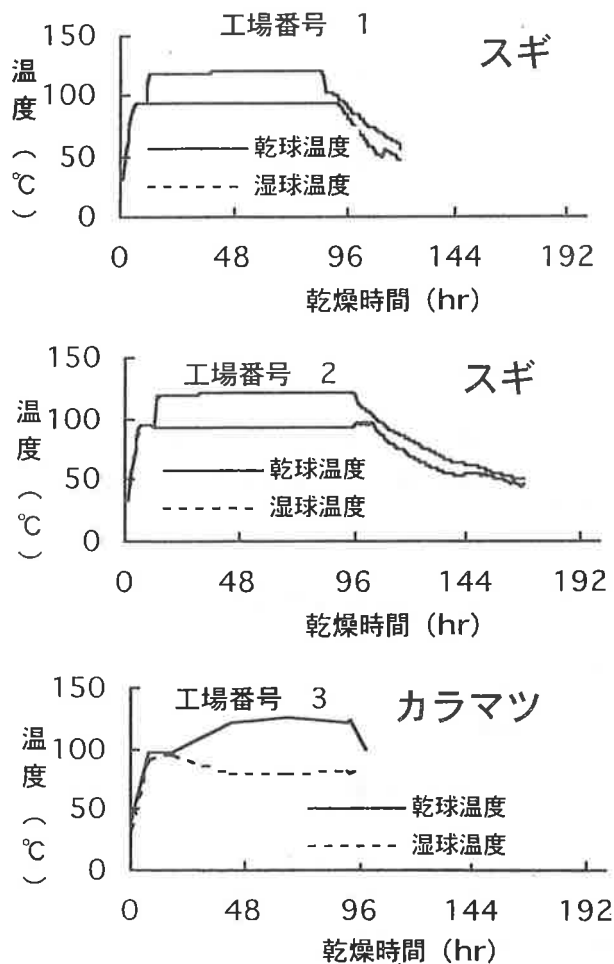


図 1-18 乾燥スケジュールと乾燥後の材内水分傾斜

4) エネルギー費 (円/㎡)

消費電力量と燃料消費量を価格換算し、1㎡当たりのエネルギー費 (円/㎡)を算出した。高温乾燥であるスギ柱材は、2,000~3,000円/㎡であり、また同じ高温乾燥のカラマツ柱材 (15.3cm) は3,000円/㎡であった。

5) 人件費

ボイラーはどの工場も貫流ボイラーであるため、これに関わる人件費はわずかである。

棧積み及び棧降ろしについては、工場番号2では、自動棧積み機及び自動棧降ろし機が設置されているため、ここにかかる人件費はわずかであった。他の工場では、棧積み及び棧降ろしに時間がかかるため、これに関わる費用は、かなりのウェイトを占めていた。

一般的な工場番号1についてみると、ひと山 (50~60本) の棧積みで2人20分を要していた。

(ここでは、人件費の単価が各工場で異なるため、㎡単価は算出していない。)

1.4 普及型スケジュールの提案

今回一連の試験結果から、乾燥仕上がりの柱材としてさらに検討を加えなければならないことは、

- (1) 全乾含水率が10%となり過乾燥すぎること。
- (2) スギに関しては内部割れが多いこと。
- (3) カラマツに関して130℃の乾燥は強度的にダメージがあること。

等が上げられる。

そこでこれらの問題点全ての改善に関して、普及型乾燥スケジュール (図1-19) を提案し、県内の企業で行ったところ、かなりの改善効果が認められた。

このスケジュールの考え方は、(1)の過乾燥であることは、乾燥の終了時期を調整すること、(2)の内部割れ防止⁹⁾と(3)の強度的ダメージの軽減については、より低い温度で乾燥することを基本にしている。

つまり、乾燥初期は材面割れ抑制をねらった高温低湿条件で乾燥し、乾燥中期から末期にかけては、内部割れ抑制のためやや低めの温度で乾燥する方法で、併せてカラマツの場合は、強度的ダメージの軽減を図るという理由から、できるだけ温度の低いスケジュールをとるというものである。

乾燥中期から末期にかけては100℃以下あるいは天然乾燥でも可能であった。

温度を低下させる時期については、内部の収縮が始まり内部に引張り応力が形成される時期がポイントと考えるが、この正確な時期あるいは、内部割れ発生原因については、今後普及型乾燥スケジュール試験と併せて検討を加えたい。

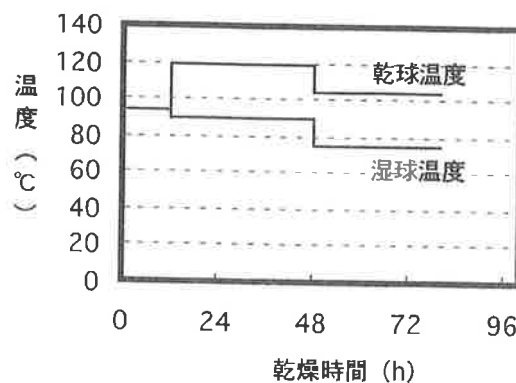


図1-19 普及型乾燥スケジュールの一例

1.5 まとめ

カラマツ及びスギ柱材の心持ち無背割り材を供試材として、乾球温度、湿球温度の組み合わせをそれぞれ130℃、80℃及び120℃、90℃の高温低湿の一定条件で乾燥した。その結果、2~3日間程度の短時間で仕上がり含水率は全乾法でカラマツが11.2%、スギが9.9%となった。また比較的材面割れが少なく、暗色化の少ない乾燥材に仕上がった。しかし、スギの場合は内部割れがやや多く確認された。

乾燥後、約1年間養生した結果では、新たに発生した材面割れはほとんど無く、寸法変化も一部を除いて±2mmの範囲に収まった。最も寸法変化の少なかった材は、全乾法含水率がおよそ12%の材であった。

高温乾燥材の実大材曲げ強度試験を実施したところ、130℃乾燥のカラマツにおいては、曲げ強度は低下する傾向にあったが、120℃乾燥のスギにおいては変化は認められなかった。なお曲げヤング係数は両樹種ともに変化は認められなかった。

民間の実用機で、本スケジュールによる乾燥試験を実施したが、寸法がやや大きかったことから、仕上がり含水率はやや高めであったが、割れの状

態等、ほぼ今回の試験と同程度に仕上がった。燃料代と電気代を合わせたエネルギー経費も、2,000～3,000円/m³であった。

以上の結果より、高温低湿乾燥は心持ち柱材の短時間低コスト乾燥法として有効であることが示唆された。

本試験を実施するにあたり、ご協力頂いた九州大学農学部藤本登留氏、実用規模での試験にご協力頂いた(株)ウッド&アースの遠山典男氏、北信地域材加工事業協の中村優一氏ほか関係者の方々に深く感謝申し上げます。

キーワード

高温低湿乾燥、カラマツ柱材、スギ柱材、材面割れ、内部割れ、平衡含水率、材色、乾燥経費、曲げ強度

参考文献

- 1) 信田 聡：北林産試報399、1-10 (1985)、北海道立林産試験場
- 2) 河崎弥生：木材工業Vol.53、No.4、166-171 (1998)
- 3) 中畠厚ら：平成8～9年度技術開発研究費補助事業成果普及講習会テキスト (1999)
- 4) 満久崇磨：実用木材加工全書－木材の乾燥(下)、233-241、森北出版株式会社 (1962)
- 5) 吉田孝久：木材工業Vol.51、No.11、546-549 (1996)
- 6) 藤本登留ら：49回日本木材学会大会 (東京) 要旨集、131 (1999)
- 7) 例えば池田元吉：第48回日本木材学会大会 (静岡) 要旨集、105 (1998)
- 8) 例えば日本木材学会、木材強度・木質構造研究会：構造用木材-強度データの収集と分析、1988.3
- 9) 三好誠治ら：愛媛県林試研報19、70-77 (1998)