

ダグラス ファー 2''×4'', 2''×6'' 材の 高温乾燥に関する研究

鷺 見 博 史¹⁾

Hiroshi Sumi: Study on High Temperature
Drying of Douglas-fir Dimension Lumber

要 旨：輸入木材のうち、最も重要な樹種の1つであるダグラス ファー 2''×4'', 2''×6'' 材について、標準的と考えられている通常の乾燥スケジュール、それよりやや高い温度（中温）と高温（110℃）とを組合せた乾燥スケジュール、および110℃一定の高温乾燥スケジュールにより実験し、乾燥時間や乾燥による損傷の程度を実務的な立場から検討した。すなわち、割れ、狂い等による品質低下の程度を JAS（枠組壁工法構造用製材の日本農林規格）に準じて検討し、データの総合的な評価により、高温乾燥スケジュール適用の可能性を検討した。

中温・高温組合せスケジュールによる乾燥時間は、標準的スケジュールによるその約1/3、高温スケジュールでは約1/5にまで短縮できる。また損傷のうち、割れ（主として木口割れ）は、温度が高いほど増大する傾向にあるが、JASの許容範囲から見ると、各スケジュール間に明確な差は認め難い。収縮率については、半径方向でやや温度影響が見られ、高い温度ほど収縮率は増大する。狂いについては温度影響があまり明確でない。死節のほとんどのものは高温乾燥によって脱落するが、材の用途によってはさほど大きな問題にならないと考えられる、などが、本研究によって明らかになった。また、ダグラス ファー 2''×4'', 2''×6'' 材では、110℃の高温乾燥が十分可能であり、それにより、乾燥コストが大幅に減少できるであろうことを見出した。

目 次

はじめに	2
I 高温乾燥に関する既往の研究	2
I-1 概 要	2
I-2 乾燥中の木材の物理的挙動	3
I-3 木材の機械的・化学的性質	4
I-4 乾燥操作および条件	4
I-5 乾燥装置および関連器機	4
II 実験方法	5
II-1 原木および試験材の調整・配分	5
II-2 乾燥装置	6
II-3 実験手順および乾燥スケジュール	6
II-4 各種測定の方法および器機	9
III 実験結果および考察	10
III-1 試験材の乾燥経過	10
III-2 乾燥による損傷	14
III-3 高温乾燥スケジュール適用への検討	23
IV ま と め	24

文 献	25
Summary	27

はじめに

わが国は毎年、海外からばく大な量の木材資源を輸入している。北米から輸入される針葉樹材の中では、ベイマツ(ダグラスファー)、ベイツガ(ウエスタンヘムロック)が特に主要なもので、北米(カナダを含む)からの全輸入量に占める両樹種のそれは、約75%にもものぼると言われる²⁸⁾。これらの木材は原木丸太および製材品(2"×4"などの規格材)の形で輸入されることが多く、柱、はりなどの耐力部材として、現在わが国の木造建築の中に占める地位はきわめて大きい。

建築材として用いられる針葉樹材の人工乾燥は、わが国の建築方式(在来工法)ではあまりその必要性がなかったが、近年、在来工法の改良や、枠組壁工法(ツー・バイ・フォー工法)の推進が計られるにつれ、従来の現場加工方式から工場生産方式へと次第に変わりつつある。このような生産方式の変化により、針葉樹材の人工乾燥は、その生産工程の中で、従来よりかなり重要な地位を占めるようになってきた。

乾燥コストを低減するため従来からさまざまな試みがなされているが、針葉樹材に対しては、乾燥時間短縮のために100°C以上の高温乾燥が有力な手段の1つであると考えられている。しかし、高温のためには材の損傷や乾燥装置の損耗の危険も大きいと考えられ、これらについての具体的なデータの蓄積と、諸問題の解決策、乾燥技術などの確立が急がれている。

アメリカ合衆国林産研究所では、木材資源の有効かつ経済的な利用方法の確立を目指し、高温による人工乾燥に関する研究を積極的に推進している。

筆者は、昭和49年9月より1年間、同研究所に滞在し、E. L. SCHAFER, J. M. McMILLENの両氏の指導により、ダグラスファー材の高温乾燥に関する研究を実施したので、ここにその内容、成果などを報告したい。本研究は、枠組壁工法の基本寸法となる2"×4"、2"×6"(以下、寸法型式204、206で表わす)材を、(1)標準的な通常のスケジュール、(2)75~95°Cの温度(中温)と110°C(高温)を組合わせたスケジュールおよび、(3)110°C一定の高温スケジュールにより乾燥し、現場実務の観点から、適正な乾燥条件の推定と高温乾燥の可能性を調べることを目的としている。そのために、各乾燥条件による乾燥時間や品質低下などを検討した。品質低下の検討は、損傷の程度をJAS(枠組壁工法構造用製材の日本農林規格)にもとづいて行った。

この研究の実行や成果の発表について、ご指導やご便宜を頂いた上記両氏のほか、実験装置の運転や測定に協力頂いたR. S. BOONE, A. VILLARREALの両氏、試料の調整に協力頂いたJ. E. WOOD氏、その他木工室、試料搬送関係などの方々にもご協力をいただいた。ここに心から感謝の意を表する。

I 高温乾燥に関する既往の研究

I-1 概要

高温乾燥とは、一般に100°C以上の温度を用いた乾燥を指し、熱源には過熱蒸気を用いるのが最も経済的とされている。この方法には2通りのものが考えられている。1つは乾燥装置自体を気密構造とし、

装置内を過熱蒸気で充満させ、一般には、装置内蒸気圧を 1 kg/cm^2 以上に保ちながら乾燥する方法である。いま1つは過熱蒸気と空気との混合体を熱媒体として乾燥するもので、装置は必ずしも気密構造である必要はない。通常、乾燥条件(温湿度)の制御は乾球温度と湿球温度の操作により行うが、その際すでに求められている乾球、湿球温度と木材の平衡含水率との関係¹⁴⁾¹⁸⁾がしばしば利用される。しかし、前者の方法では乾燥装置内に空気が存在しないため、湿度の制御に湿球温度を操作することは不能であり、単に乾球温度のみの制御で操作を進めることになる。後者の方法では通常の乾燥と同様、温度、湿度の制御が可能である。

木材の高温乾燥は必ずしも新しい考え方ではなく、すでに19世紀の後半に高温乾燥が考え出され、1890年代にはドイツ²⁾および米園においてそれぞれの方法による特許が出されている。第1次世界大戦中には米園の太平洋岸地域でいくつかの工場が実用化していたが、乾燥装置の損耗劣化が甚だしいという理由でほとんど消滅した。しかし、第2次世界大戦後、ドイツにおいて再び高温乾燥が見直されることになり、次々と研究成果が発表された。それと前後してカナダ、米園、欧州各地でも再評価の機運がたかまるとともに、相次いで研究結果が報じられるようになった。従来の研究結果から高温乾燥に関して概略的な現象や諸種の問題点があきばりになってきたが、具体的な樹材種に対するデータを欠くため、これらの成果が直ちに実用化に向けられるまでには到っていない。わが国におけるこの種の研究は、その歴史的経過からみてほとんどなされていないと言ってもよく、わずかに2~3の文献が散見されるにすぎない²⁴⁾³⁰⁾。この意味からも基礎的研究と平行して、実用的なデータの集積が急がれる。従来の研究で明らかになっている主要な点を項目別に挙げると以下ようになる。

I-2 乾燥中の木材の物理的挙動

高温乾燥では木材表面と外周空気との蒸気圧差はきわめて大きいので、材面からの水蒸気の移動速度は大となる。従って、通常の乾燥の場合よりも木材内の水分傾斜は急となり、乾燥終了時においても水分傾斜がかなり急なままであるのが普通である。乾燥中の急な水分傾斜は、材内応力増大の原因となる。乾燥応力は、割れ、落込み、狂いなどの損傷をひきおこす。とくに水分移動の不良な材にあっては、過度の応力は細胞破壊やはなはだしい損傷の原因となる。比較的水分移動の良い材の場合には、発生応力も小さく、高温の方が応力緩和が大きいこともあって、損傷の危険は少ない。イエロー パーチを用いた高温乾燥実験で、表層部の塑性変形量は低温乾燥の場合の半分になり、内部のそれは逆に約4倍になることが報じられている⁴⁾。水分移動の不良な材(とくに広葉樹)や、ウォーターポケットや局部的に異常に高含水率の部分を持つ材では、落込みや内部割れが発生しやすく、収縮率も通常の乾燥の場合より1.5~2.0%高くなる⁴⁾²¹⁾。しかし、一般には高温乾燥によってあまり著しい収縮率の増大はないようである⁵⁾⁹⁾。

材の形状については、材の厚さが小さくなるに従って乾燥速度が増大することが知られている。すなわち、20 mm 厚材の乾燥速度が $1.5\sim 2.5\%/hr$ に対し、40 mm 厚材のそれは $0.5\sim 1.0\%/hr$ という報告がある¹²⁾。前述のように、温度の上昇とともに乾燥速度は増大するが、温度と乾燥時間との関係では

$$z_2 = \frac{z_1}{\left(\frac{\theta_2}{\theta_1}\right)^2} \dots \dots \dots (1)$$

なる式が知られている¹⁸⁾。ここに z_1 は 90°C (θ_1) 以下での乾燥時間、 z_2 は 100°C (θ_2) 以上での乾燥時間である。

100°C 以上での温湿度—平衡含水率関係図が、R. KEYLWERTH¹⁴⁾ および W. G. KAUMAN¹³⁾ らによって

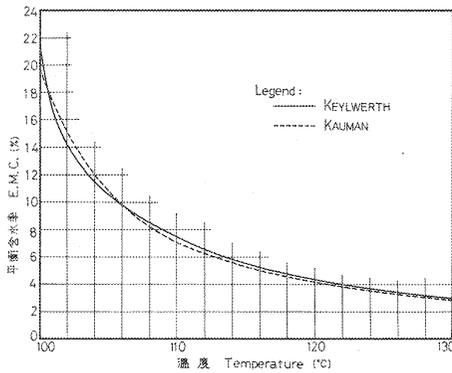


Fig. 1 1気圧下における100°C以上の温度と最大平衡含水率との関係
Maximum equilibrium moisture content for superheated steam at atmospheric pressure¹⁸⁾¹⁴⁾.

は、やや温度の影響があると考えられ、C. J. KOZLIK は1 $\frac{3}{4}$ " (45 mm) 角材のダグラス ファーで、通常の乾燥の場合の25%減、ヘムロックで15~19%減と報告している¹⁹⁾。

乾燥時間や乾燥温度の程度によって材の光沢度の低下、変色、樹脂の浸出(樹脂の多い材)などが生じるが、表面の飽削によって容易に解消する場合が多い⁶⁾。

材の耐候性に関して、レッド シダの薄片板の実験結果では、温度影響がほとんどないと発表されている²⁰⁾。

I-4 乾燥操作および条件

高温乾燥を開始するに当たり、できるだけ短時間のうちに装置内温度および材温を100°C以上に上昇させる必要がある。このウォーム・アップ期間には、材の乾燥が行われないように乾湿球温度差は小さく保つのがよいとされ、たとえば、ダグラス ファーのディメンジョンランバーでは1~2°Cが望ましいとする報告がある²⁰⁾。装置内温度分布のむらを防ぎ、木材の含水率のばらつきを少なくするために風速を増大させるのがよいとされ、乾燥速度に対する風速の効果は、乾燥の初期の段階で、風速約2.0 m/secのとき乾燥速度が3.8%/hr に対し、風速4.6 m/secでは乾燥速度が6.8%/hrなる結果がある⁸⁾。前項でもふれたように、乾燥の終了したままの材では材内の水分傾斜は急であり、材間の含水率のばらつきも大きいので、イコーライジングやコンディショニングなどの後処理が不可欠である。その際、材温を100°C以下に下げないと所要の湿度条件が得られないので、通常は材温を90°C以下まで下げてから行う。適正な乾燥条件(スケジュール)は樹材種や乾燥装置のタイプなどによって異なり、また、温度の与えかた(たとえば温度を一定に保つか、変化させながら上昇させるか、さらに低温と高温を組み合わせるかなど)も適宜選択して採用する必要がある。

I-5 乾燥装置および関連機器

高温乾燥に用いられる装置は、通常の乾燥装置より機材の損耗が著しいため、炉体や部材には劣化しにくい材質のものを選ばねばならない。耐火れんが、セラコッタ等の無機材料や、アルミニウム、真ちゅう、銅等の腐蝕しにくい金属材料を適宜選択することが望まれる。熱ロスを減少させるための断熱材、ライニング等にも、通常の乾燥装置以上に注意を払わねばならない。

作られている(Fig. 1)。常圧下で100°C以上の木材の平衡含水率は極めて低く、例えば乾球温度110°Cの場合には、平衡含水率の取り得る最大値はせいぜい7.5%前後にすぎない。

高温乾燥した材の含水率は比較的安定しており²⁷⁾、外周空気条件に対応する実際の木材の平衡含水率は1~2%低めとなる⁸⁾。また、吸湿量も通常の乾燥材よりかなり低い²⁹⁾³¹⁾。

I-3 木材の機械的、化学的性質

機械的性質のうち曲げ、圧縮強さ、ヤング係数、せん断強さなど、一般には高温にさらされている時間が短い場合には、あまり著しい低下はないようである¹⁰⁾²⁹⁾³¹⁾。靱性(タフネス)について

高温乾燥では乾燥開始時に大量の生蒸気を使用して材温および装置内温度を短時間に上昇させなければならぬが、このためにある程度大容量のボイラが必要となる。J. L. LABELL²³⁾によれば、乾燥初期の室温から 99°C までの温度上昇 (ウォーム・アップ) は、針葉樹材の場合 1 インチ材で 2 時間、2 インチ材で 3 時間が適当だと指示している。乾燥全体の蒸気消費量については、高温乾燥では乾燥時間が短縮されるために、通常の乾燥の場合の 30~80% 減ですむと言われる²⁾。

乾燥中における材の狂い (とくに曲がり, そり, ねじれ) は、樹材種によってその発生程度も異なるが、必要に応じて棧積材に緊締具を使用することもあり、そのために種々の方式が考案されている¹¹⁾¹⁷⁾²²⁾²⁴⁾。

II 実験方法

II-1 原木および試験材の調整, 配分

供試丸太はオレゴン州西部地区産のダグラス ファー (*Pseudotsuga menziesii*, 2 次林構成木, 樹齢 70~80 年) 12 本である。容積密度数 (全乾重量/生材容積) は 0.32~0.52 g/cm³, 平均 0.42 g/cm³ である。丸太の形状は最長 14.7 m, 平均長 11.1 m, 最大元口径 75 cm, 平均元口径 59 cm で、セカンド グレイドの優良材である。これらの丸太を長さ 245 cm (8' 1¹/₄") または 250 cm (8' 2¹/₂") に玉切りし、53 本のボルトとした (Photo. 1)。これらのボルトには一連の番号を付し、土砂を取除くため水洗いしたのち、丸鋸製材機で 204 および 206 の 2 通りにだら挽きした。製材寸法は、乾燥後の製品規格に合致し得るよう、公称 2" については最小 1³/₄" (44.5 mm), 4" については最小 3⁷/₈" (98.4 mm), 6" については最小 5⁷/₈" (149.2 mm) を目標とした。参考までに、製材後に実測した結果、204 材の全平均寸法は 45.5 mm (T)×98.8 mm (W), 206 材のそれは 45.5 mm (T)×149.4 mm (W) であった。製材した板の枚数は 204, 206 それぞれ 770 枚, 487 枚であった。これらの材は 204, 206 それぞれ別個に 1A-1, 1A-2, 1A-3……の如く一連番号を付したのち、乱数表を用いて 5 つのグループに配分した。配分の手順と方法は次の通りである。

1. 53 本のボルトから製材した材の中から、各ボルトにつき 204, 206 それぞれ 3 枚ずつ計 159 枚を乱数表を用いて抽出し、No. 1 から No. 159 までならべる。

2. 抽出した材 (204, 206 各 159 枚) は、新たに乱数表を用い、試験材用 (Test piece) として各 30 枚ずつ 5 つのグループに配分する。残りの 204, 206 各 9 枚は、後日横切りして、長さ 28" (約 71 cm) のコントロール・サンプルを製作するため、一時、保存しておく。コントロール・サンプルは棧積材全体の含水率を代表させるものであるため、初期含水率が高いもの、中庸のもの、低いものが適当に混っていることが必要で、先に選抜した各 9 枚の中に適当なものがない場合は、残余の材の中から適宜抽出してさし替える。

3. それぞれ 5 つのグループの棧積は、前記試験材 (30 枚×2) を含めて 204, 206 材がそれぞれ 122 枚, 92 枚, 計 214 枚になるように、残余の材の中から選び出して追加する。

4. 1-3 で配分した残りの材は、予備材として

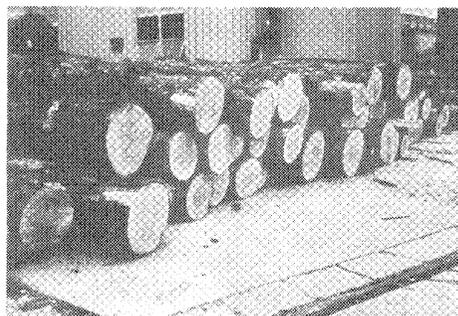


Photo. 1 原木 (玉切り材)
Bolts

別に保存しておく。

配分した各グループの材はビニールシートで密封したのち、温度 2.2°C、関係湿度 82% のコールドルームに保管しておき、乾燥実験のつど取り出して用いた。なお、乾燥実験に当たり、1回のコントロール・サンプルの使用枚数は、204, 206 それぞれ4枚、計8枚である。

II-2 乾燥装置

使用した乾燥装置は Irvington-Moore 社製（米国）で、容量 1,500 B. F. (3.5 m³) の IF 型乾燥装置である。この装置は、骨格、壁体はアルミニウム製、断熱材にはグラスファイバーを用いた組み立て式で、トラックはシングルトラック型、ベルト駆動式ファン（3基）により、材間風速は 0~800 ft/min (0~4.1 m/sec) が無段階可変である。乾燥温度および湿球温度は自動調節計で制御し、記録は Honeywell 社製自記記録計（ペン書き）を用いた (Photo. 2)。

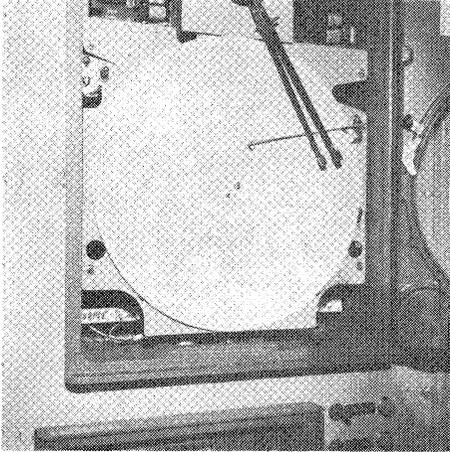


Photo. 2 自記記録計
Automatic recorder

II-3 実験手順および乾燥スケジュール

乾燥実験は、一定温度の高温乾燥(死荷重あり) 1回、中温・高温組み合わせ乾燥(以下、中温・高温乾燥と略す) 2回(死荷重あり、なし各1回)、通常のスケジュールと同じ温度による乾燥(以下、低温乾燥と略す) 2回(死荷重あり、なし各1回)の計5回である。乾燥スケジュールおよび諸条件を Table 1, 2 に示す。スケジュールの選定に当たり、低温乾燥には、米国林産研究所が示している標準スケジュール(コード: T 10-A 3)²⁶⁾を若干修正した T 10-E 3 スケジュールを採用した。中温・高温乾燥および高温乾燥のスケジュールは、既往の文献¹⁵⁾¹⁶⁾を参考とし、供試材の材質を考慮して作成したものである。「中温」の定義については、米国カリフォルニア州の乾燥研究会議事録²⁵⁾に見られる Elevated Temperature を和訳したもので、200~212°F (93.3°C~100°C) の温度を指すようである。スケジュールの操作は、コントロール・サンプル(204, 206 各4枚)のうち最も乾燥の遅れたもの2枚の平均含水率に基づいて行った(Photo. 3)。通常の丁寧な乾燥では、乾燥後処理として、イコーライジング、コンディショニングなどの調湿処理を行う。しかし、本実験では乾燥終了時の積材含水率が著しくばらついているため、その定義から見て、コンディショニングに相当する処理はイコーライジングの一部と考えるのが妥当で、2回の調湿はそれぞれイコーライジング I, II と呼ぶのが良いと思われる。この称呼法は、前出の J. M. McMILLEN 氏が提唱しているものであるが、本報告ではその考え方をそのまま採用した。なお最終の平均仕上がり含水率は 11% を目標とした。この目標値は、最も乾燥の遅れた材の最終含水率が 15% 以下になるとの推定のもとに設定した。JAS (梓組壁工法構造用製材の日本農林規格)³⁵⁾には乾燥材の含水率は 19% が基準となっているが、米国の規格では建築上の必要に応じて特記仕様のある場合に含水率 15% の基準値が定められている。本実験の目標含水率はこの基準値に準じた。荷重には、立方体のコンクリートブロック(1個あたり重量 66.7 kg) 30個を用い積積上部に均等に並べ、乾燥材の狂い(特に上段部の材)を防止することを意図した。

Table 1. 人工乾燥スケジュール
Kiln drying schedule

低温乾燥* Conventional temperature				
含水率 M.C. (%)	乾球温度 D. B. T. (°C)	湿球温度 W. B. T. (°C)	平衡含水率 E. M. C. (%)	備考 Remarks
～ 60	60.0	57.2	15.8	
60 ～ 50	60.0	56.1	13.8	
50 ～ 40	60.0	53.9	11.4	
40 ～ 35	60.0	51.7	9.6	
35 ～ 30	62.8	51.7	8.0	
30 ～ 25	65.6	51.7	6.9	
25 ～ 20	71.7	57.2	6.8	
20 ～	76.7	63.3	6.9	
イコーライジング Equalizing	79.4	66.7	7.1	E I
イコーライジング Equalizing	84.4	79.4	11.5	E II
中温・高温乾燥* Elevated-High temperature				
含水率 M.C. (%)	乾球温度 D. B. T. (°C)	湿球温度 W. B. T. (°C)	平衡含水率 E. M. C. (%)	備考 Remarks
ウォームアップ Warm up	—	—	—	0.5 hr
～ 60	76.7	72.2	12.4	
60 ～ 45	82.2	75.6	10.0	
45 ～ 30	96.1	—	—	湿球用バルブ閉 ダンパー閉 W. B. T. no control Vents closed
30 ～	110.0	—	—	同上
イコーライジング Equalizing	93.3	82.2	7.2	E I
イコーライジング Equalizing	90.6	85.0	10.9	E II
高温乾燥** High temperature				
時間 Time (hr)	乾球温度 D. B. T. (°C)	湿球温度 W. B. T. (°C)	平衡含水率 E. M. C. (%)	備考 Remarks
3	—	—	—	ウォームアップ Warm up
8	110.0	87.8	4.0	
11	110.0	—	—	湿球用バルブ閉 ダンパー閉 W. B. T. no control Vents closed
0.75	—	—	—	クーリング Cooling
3	98.9	87.8	7.1	イコーライジング I Equalizing I
0.75	—	—	—	クーリング Cooling
3	90.6	85.6	11.3	イコーライジング II Equalizing II

* 含水率スケジュール M.C. schedule

** タイムスケジュール Time schedule

注：① 温度は華氏を摂氏に換算したもの。

Notes: Temperatures are converted from Fahrenheit to Celsius.

② イコーライジング I は最も乾燥の進んだ試験材の含水率が7%になったとき開始、最も遅れた試験材の含水率が21%になったとき終了。

Equalizing I starts when driest sample reaches 7% M.C., and finishes when wettest sample reaches 21% M.C.

③ イコーライジング II は平均含水率が11%のとき終了。

Equalizing II finishes when average M.C. reaches 11%.

Table 2. 乾燥条件諸元
Drying condition

乾燥条件 Drying condition		荷重 ¹⁾ Load (g/cm ²)	材間風速 ²⁾ Air velocity (m/sec)	風向切換え時間 間隔 Interval of changing air direction (hr)	乾燥材枚数 Nos. of lumber	
					寸法型式 Nominal dimension	枚数 Number
低温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	0	2.0~2.3	6	204(2"×4") 206(2"×6")	122 91
	荷重あり Restraint	880	2.0~2.3	6	204(2"×4") 206(2"×6")	122 92
中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	0	3.6~4.1	6	204(2"×4") 206(2"×6")	122 92
	荷重あり Restraint	880	3.6~4.1	6	204(2"×4") 206(2"×6")	122 92
高温 High Temp.	荷重あり Restraint	880	3.6~4.1	3	204(2"×4") 206(2"×6")	122 91

- 1) 栈木単位面積当り平均荷重 (総荷重 : 2,000 kg).
Average dead pressure per 1 cm² area of stickers (Total load : 2,000 kg).
- 2) 吹出し側にて測定。
Measured at leaving-air side.

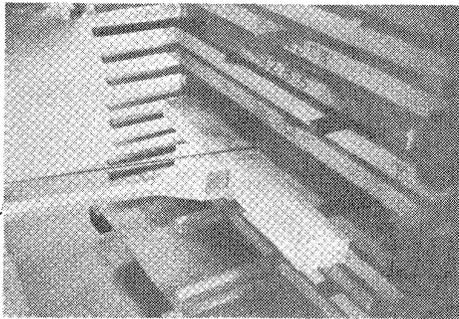


Photo. 3 コントロール・サンプル
Control sample

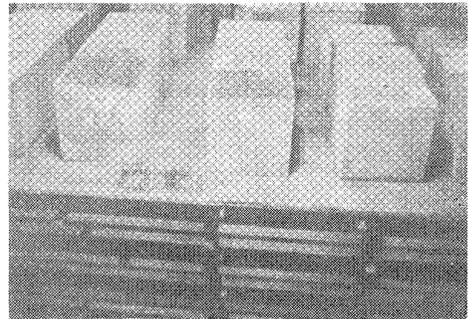


Photo. 4 コンクリート・ブロック (荷重)
Concrete blocks (Restraint).

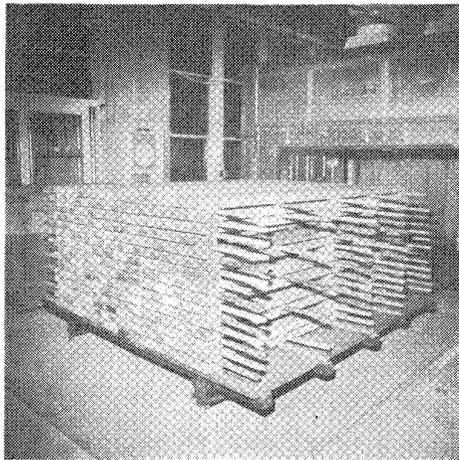


Photo. 5 栈積材
Drying pile

総荷重は 2 ton, 栈木単位面積当たりの平均圧縮荷重は約 880 g/cm² である (Photo. 4)。栈積みは 204 材の段と 206 材の段とを交互に配置させ、総計 60 枚の試験材は同一寸法の材の置かれた段に対応させながらランダムに分散配置させた。すなわち、最下段 206, 第 2 段目 204, 第 15 段目 206, 最上段当て板, 合計 16 段である。したがって 1 回の乾燥実験で使用した材の枚数は 204 材が 7 段で 122 枚, 206 材が 8 段 92 枚, 計 244 枚である (Photo. 5, Fig. 2)。なお, 栈積幅は 6 ft. (1.8 m), 栈積長さ (材長) は 8 ft. (2.4 m) である。栈木は厚さ 1 インチのものをを用い, 栈木間隔は 2 ft. (60 cm) とした。コントロール・サンプルは栈積みの両側 (風上, 風下) に 4 枚ずつ (204, 206 各 2

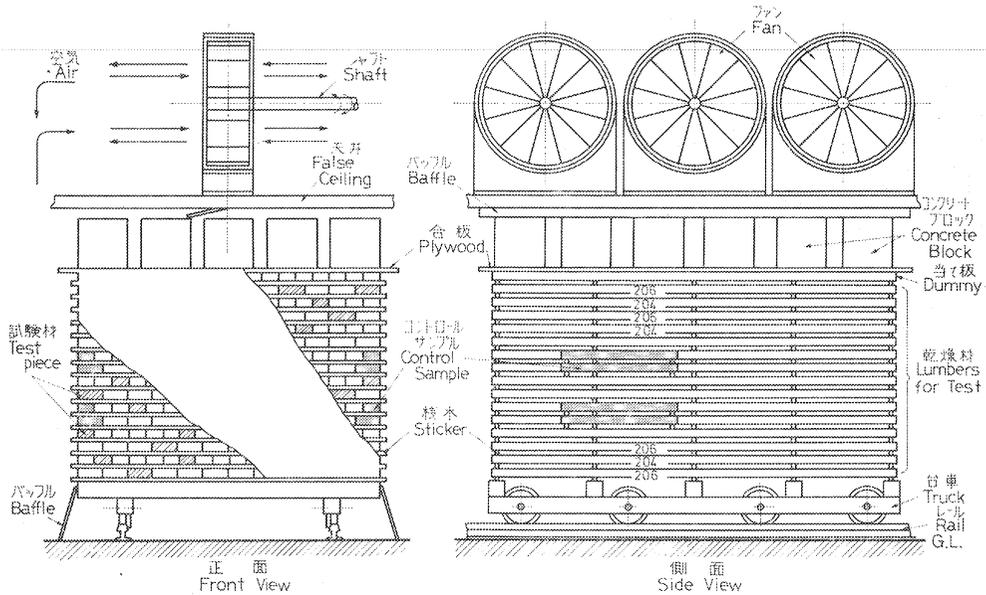


Fig. 2 栈積材の状態
Kiln drying pile.

枚) 配置した。風向の切換えはタイマーで自動的に行った。乾燥を開始するに当たっては、前日からあらかじめ乾燥室全体を 60~70°C 程度にプリヒートしておき、乾燥開始時のウォーム・アップ時間の短縮を計った。

II-4 各種測定の方法および機器

II-4-1 含水率の測定

初期含水率の測定は試験材 (204, 206 各 30 枚) について、両木口より小試片を切り取り、全乾法で算出した。仕上がり含水率については、試験材の半数で、材の中央付近 1 か所を全乾法により測定した。更に、参考のために乾燥を終了した全栈積材の含水率を電気抵抗式含水率計 (各 1 か所) にて測定した。

II-4-2 収縮率の測定

試験材 (204, 206 各 30 枚) の収縮率を、長さ、厚さ、幅方向について各 1 か所測定して求めた。厚さ、幅の測定には 1/100 mm 精度のダイヤルゲージ付測定器、長さについては、最小目盛 1/32 インチの測定尺を用いた。試験に用いた材は、柾目、板目、追柾の混在したものであるため、木取り方によってそれぞれの収縮率は当然異なる。したがって、ここでは乾燥条件間の比較をするために、正板目部分で測定した板目材の数値のみを取上げて集計する。この実験では、各試験材とも各々の仕上がり含水率での収縮率として求めたが、含水率がばらついているため、一定含水率での収縮率に補正した上で、乾燥条件との関係を検討する必要がある。既往の文献から同樹種の平均収縮率を求め、これを用いて、目的の仕上がり含水率 (11%) と各試験材含水率との差に対して、実測した収縮率を修正した。

II-4-3 割れの測定

乾燥後に試験材 (204, 206 各 30 枚) の割れを観察した。木口割れについては、木口より順に 1 インチずつ鋸断して、割れの深さを測定した。深さの集計では、両木口における割れのうちいずれか最長のもの

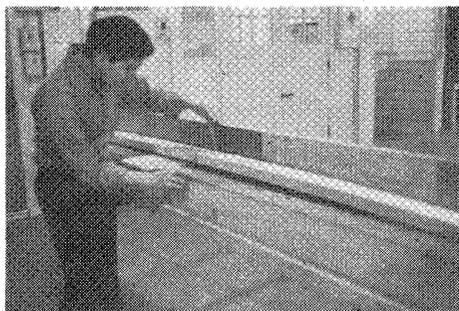


Photo. 6 狂い測定台
Measuring instrument for warping.

をその材の割れ深さとした。表面割れを含むその他の割れも、深さおよび長さを測定した。

II-4-4 狂い（ねじれ、曲がり、そり）の測定
乾燥前および乾燥後に試験材（204, 206 各 30 枚）について測定した。測定には Photo. 6 のような狂い測定台を用い、曲がり、そりについては長さに対する矢高を、ねじれについては材面の 3 つの隅（3 点）を平面上にすえたときの残りの隅（点）の平面からの距離を、くさび形すきまゲージにて 1/32 インチ（約 0.8 mm）の精度で求め

た。なお、幅ぞりについては測定を行わなかった。狂い量の集計では、乾燥によって増大した狂い量を求めることから、乾燥前の値と乾燥後の値との差を求めた。また、乾燥材の等級づけについては、乾燥終了時の狂い量をもって検討した。

II-4-5 乾燥応力の測定

試験材の半数について櫛型試験法により残留応力の状態を観察し、その程度を①なし、②非常に軽微、③中庸、④はなはだしいの 4 段階に分類した。

なお低温乾燥（荷重なし）および中温・高温乾燥（荷重あり）では各 8 枚のコントロール・サンプルのみしか測定しなかった。

II-4-6 その他

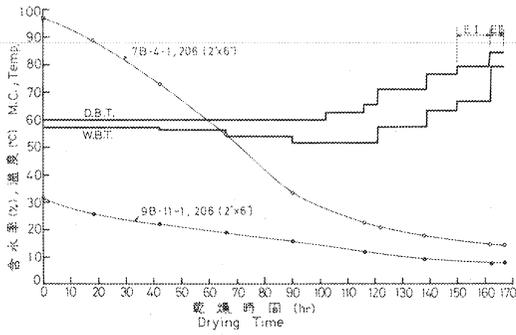
節ぬけ、変色などを乾燥終了後に肉眼で観察した。

III 実験結果および考察

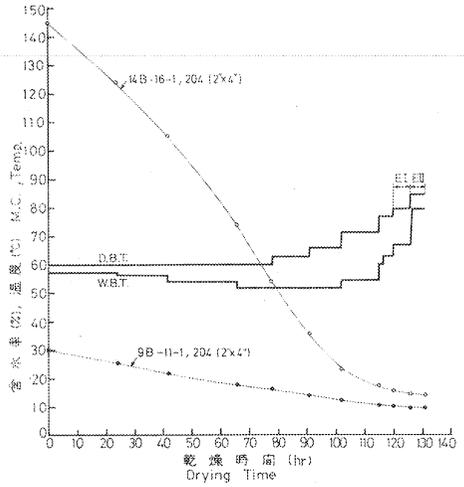
III-1 試験材の乾燥経過

III-1-1 乾燥経過図

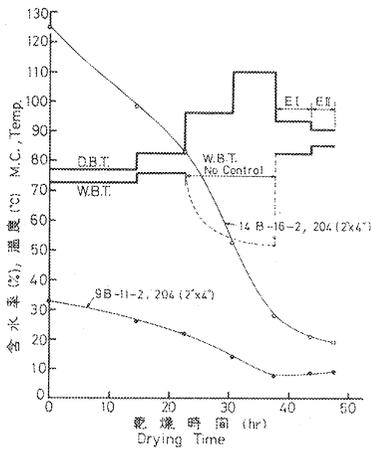
各条件の試験におけるコントロール・サンプルの乾燥経過を Fig. 3-(a)~(e) に示す。ここに示した乾燥曲線は、各試験とも 8 枚のコントロール・サンプルのうち、最も乾燥の進んでいるものおよび遅れているもの各々 1 枚ずつで代表させてある。コントロール・サンプルには、初期含水率の高いもの（90~150%）、中庸のもの、低いもの（30%前後）を適当に選んで、204 材 4 枚、206 材 4 枚、計 8 枚を積材の両側に 4 枚ずつ設置した。本実験のように、初期含水率の非常に高いもの、低いものの混合積材では、スケジュールの操作を乾燥の遅れた（一般に初期含水率の高いもの）サンプルの乾燥経過に基づいているため、総じて乾燥時間が大きくなる。工場など現場では初期含水率の高い辺材と、低い心材とを分離、仕分けして人工乾燥するか、人工乾燥の前に天然乾燥を実施するなどの方法をとれば、人工乾燥に要する正味の時間は大幅に軽減されるであろう。とくに高温乾燥の場合には高温度にさらされる時間が長いほど、ある種の材の損傷が著しく増大する場合も考えられ、一考を要する問題である。また、寸法の異なる材を同一のスケジュールで乾燥した場合、損傷の程度に著しい差の出ることが予想される。既往のデータや本実験での結果から、材の幅に関しては、204 および 206 のグループ、208 および 210 のグループ、それ以上のグループ程度に仕分けして人工乾燥に供するのが有利と思われる。厚さの異なる場合でも、通常の



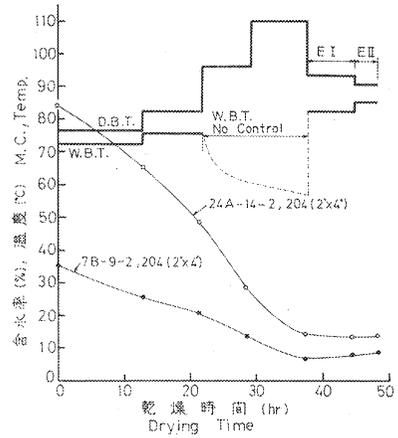
(a) 低温乾燥 (荷重なし)
Conventional Temp. (No Restraint)



(b) 低温乾燥 (荷重あり)
Conventional Temp. (Restraint)



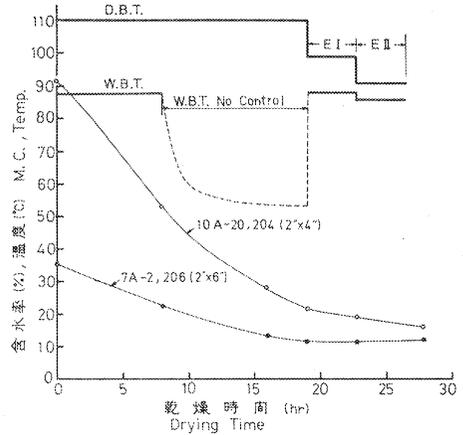
(c) 中温・高温乾燥 (荷重なし)
Elevated-High Temp. (No Restraint)



(d) 中温・高温乾燥 (荷重あり)
Elevated-High Temp. (Restraint)

(e) 高温乾燥 (荷重あり)
High Temp. (Restraint)

Fig. 3 コントロール サンプルの乾燥経過図
Drying process of control samples.



スケジュール乾燥と同様、適当なグループに仕分けすることが望まれる。

III-1-2 含水率

204, 206 とも、それぞれ各棧積材につき 15 枚の試験材について全乾法で初期含水率、仕上がり含水率を測定し、比較のため全乾燥材について、電気抵抗式含水率計にて 1 か所ずつ（中央部）仕上がり含水率を測定した。Table 3 に、全乾法によって測定した試験材（半数）の初期および仕上がり含水率と、含水率計による仕上がり含水率とを対比して示した。同表から、2 通りの方法による平均仕上がり含水率を見ると、低温乾燥（荷重あり）、高温乾燥（荷重あり）および中温・高温（荷重なし）がやや高めになっており、平均含水率 11% を得るには、更に 4~5 時間、乾燥時間を延長しなければならないことが推定できる。中温・高温（荷重あり）の平均仕上がり含水率は、同一の温度スケジュールによる他の実験（荷重なし）と乾燥時間はほぼ同じであるにもかかわらず、11% より約 2% 低めであった。これは初期含水率の違いによるものと考えられる。含水率計の検出針打込み深さは、材の平均的な含水率を示すと思われる、表面から 9.5 mm の位置（厚さの 1/4）とした。含水率計の指示値と全乾法による含水率との比較をするため、204, 206 それぞれ 75 枚（各棧積につき 15 枚）の試験材について調べると、

- ① 204 の場合：全乾法の平均含水率 10.8%，電気抵抗式含水率計の平均含水率 11.9%，
- ② 206 の場合：全乾法の平均含水率 11.4%，電気抵抗式含水率計の平均含水率 11.9% であった。

Table 3. 初期および仕上り含水率
Initial and final moisture content

条 件 Drying condition	寸法型式 Nominal dimension	全 乾 法 Oven-dry method		含 水 率 計 Moisture meter	
		初期含水率 ¹⁾ Initial M. C. (%)	仕上がり含 水率 ¹⁾ Final M. C. (%)	仕上がり含 水率 ²⁾ Final M. C. (%)	標準偏差 S. D.
低 温 (荷重なし) Conventional Temp. (No Restraint)	204(2"×4")	44.1	10.4	9.5	1.33
	206(2"×6")	42.3	10.7	9.7	1.71
低 温 (荷重あり) Conventional Temp. (Restraint)	204(2"×4")	46.1	12.3	12.9	3.06
	206(2"×6")	44.1	12.7	13.3	3.52
中温・高温 (荷重なし) Elevated-High Temp. (No Restraint)	204(2"×4")	44.0	10.5	12.6	3.70
	206(2"×6")	54.9	12.1	12.6	3.16
中温・高温 (荷重あり) Elevated-High Temp. (Restraint)	204(2"×4")	42.7	9.2	10.6	2.36
	206(2"×6")	37.9	9.3	10.6	2.69
高 温 (荷重あり) High Temp.(Restraint)	204(2"×4")	42.4	11.5	13.7	3.51
	206(2"×6")	43.4	12.4	13.3	3.66
平 均 Mean		44.2	11.1	11.9	2.87

- 1) 試料枚数は各条件、型式寸法につき15枚。
The number of test pieces per drying condition, per nominal dimension is 15 pieces.
- 2) 試料枚数は204材は122~126枚、206材は91~96枚。
The number of test pieces per drying condition is 122~126 pieces for 204 and 91~96 pieces for 206.

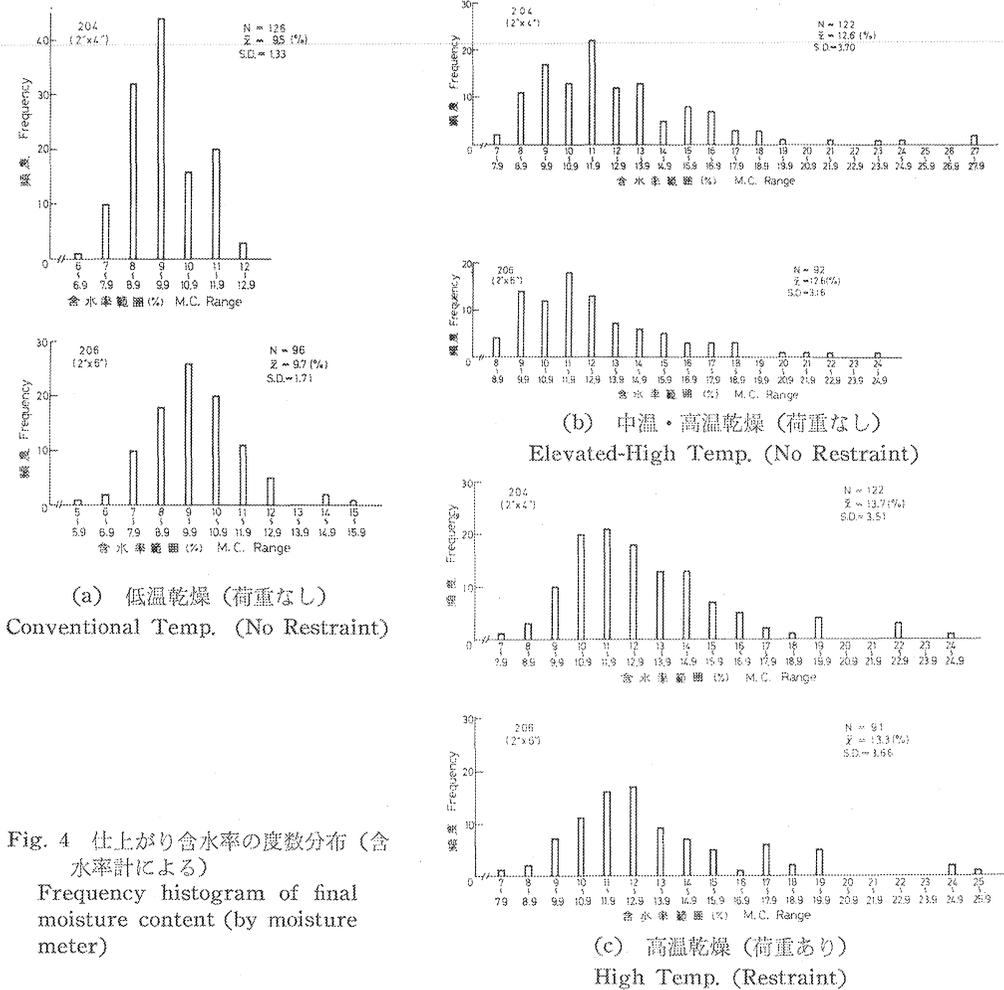


Fig. 4 仕上がり含水率の度数分布 (含水率計による)
Frequency histogram of final moisture content (by moisture meter)

含水率計による測定は乾燥終了後、材を室温まで冷却した直後に行ったものであり、全乾法による仕上がり含水率の測定は、更に1~2日室内に放置した後、原則として含水率計での測定箇所と同じ部分を鋸断して行ったものである。このような測定時期のずれと、計器の指示値が高含水率域(概ね15%以上)ではやや低めに出るなどの理由で、全乾法による測定値と、計器による測定値が、若干異なったものと考えられる。Fig. 4-(a)~(c)に、含水率計で全個体測定した仕上がり含水率の度数分布の一例を示す。同図により、各条件での仕上がり含水率の全体的な傾向が把握されよう。

III-1-3 乾燥時間

Table 4 に各条件別の乾燥時間およびその比率を示した。ここで示した乾燥時間には、ウォーム・アップおよびクーリング時間を含んでいる。さて、低温乾燥の所要時間(2回の平均値)を100としたとき、中温・高温乾燥(2回の平均値)では32.2(約68%減)、高温乾燥では19.8(約80%減)となり、高温乾燥では著しい時間の短縮が見られる。前項でもふれたように、低温乾燥(荷重あり)、中温・高温乾燥(荷重なし)および高温乾燥(荷重あり)の各々の乾燥時間を5時間延長させたとして仮定して数値を修正す

Table 4. 乾燥時間の比較
Drying time

乾燥条件 Drying condition	低 温 Conventional Temp.		中温・高温 Elevated-High Temp.		高 温 High Temp.
	荷重なし No Restraint	荷重あり Restraint	荷重なし No Restraint	荷重あり Restraint	荷重あり Restraint
乾 燥 Drying	150	120	37.5 ¹⁾	38 ¹⁾	22 ¹⁾
イコーライジング I Equalizing I	12	6	6	7	3.75 ²⁾
イコーライジング II Equalizing II	5	5	4	3.5	3.75 ²⁾
計 Total (hr)	167	131	47.5	48.5	29.5
平均 Mean (hr)	149.0		48.0		29.5
平均の比 Ratio	100		32.2		19.8
比(修正値) ³⁾ Corrected ratio	100		33.3		22.8

- 1) ウォームアップ含む。
Includes warming-up hours.
- 2) クーリング 0.75 hr 含む。
Includes cooling-down 0.75 hr.
- 3) 低温 (荷重あり), 中温・高温 (荷重なし) および高温 (荷重あり) の乾燥時間を 5 時間延長したと仮定した場合。
Added 5 hrs. to drying time of Conventional Temp. (Restraint), Elevated-High Temp. (No Restraint) and High Temp. (Restraint) drying.

ると、乾燥時間比は 100 : 33.3 : 22.8 となるが、さきの計算値と大差はない。

乾燥条件別の所要熱消費量を知る 1 つの目安として、乾燥室内温度 (θ_1) と室外温度 (θ_2) との差と、時間との積、すなわち、

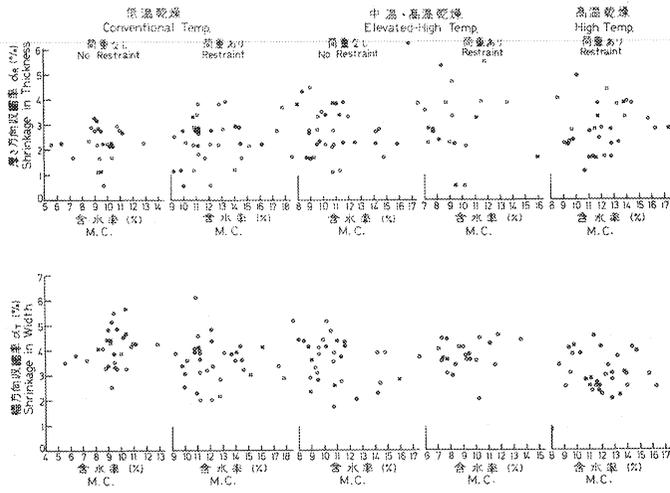
$$H = (\theta_1 - \theta_2) \cdot t \dots\dots\dots (2)$$

について検討した。この場合、壁体の面積、熱貫流率をはじめ、乾燥材積、木材中の水分量、熱損失等々は、各条件とも共通して同一の値であるとの仮定に基づいている。計算結果は、低温乾燥の場合、 $H=5,640$ 、中温・高温乾燥 $H=2,550$ 、高温乾燥 $H=1,690$ であり、これらの比は 100 : 45 : 30 となる。一般には、「高温乾燥では、時間は短縮されるが、蒸気消費量は逆に増大する」との誤った考え方がある。これは、総消費量と単位時間当たりの消費量とを明確に区別しないところに原因があるようである。ちなみに、上述の H の値を t で除した単位時間当たりの値は、それぞれ 42, 68, 89 となる。

III-2 乾燥による損傷

III-2-1 収縮率

収縮率は板目材のみを取上げて測定した。厚さ (Radial) 方向収縮率については、長さおよび幅方向中心部の正板目部分で 1 か所、幅 (Tangential) 方向収縮率については、長さ方向中心部で 1 か所測定したものである。測定結果を Fig. 5 に示す。測定値はすべて仕上がり時点の数値であり、前述したように、各材の仕上がり含水率はまちまちのため、測定した数値をそのまま比較検討するのは無理である。そのため、実測値をある一定の含水率水準での数値に補正した方がよいと考えられる。補正にあたり、各材の仕上がり含水率は、電気抵抗式含水率計による値とし、ある一定含水率とは、イコーライジングの最終条件に対応する平衡含水率 11% とした。また、補正の数値については、既往の文献のデータから、厚さ方向については含水率 1% あたりの平均収縮率 0.16%、幅方向については 0.25% によった³³⁾。このよう



●印：204 (2"×4"), ○印：206 (2"×6")
 含水率は電気抵抗式含水率計による。Moisture content was measured by an electric meter.

Fig. 5 厚さおよび幅方向収縮率と含水率との関係
 Relation between shrinkage and moisture content.

Table 5. 厚さ方向の収縮率
 Shrinkage in thickness (Radial)

寸法型式 Nominal dimension	条 件 Drying condition		実測収縮率 Measured shrinkage (%)	含水率 ¹⁾ Moisture content (%)	補正収縮率 ²⁾ Corrected shrinkage (%)				試料数 Nos. of test piece
					平均 Mean	最大 Max.	最小 Min.	標準 偏差 S. D.	
204 (2"×4")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	2.43	9.5	2.19	2.96	0.88	0.94	11
		荷重あり Restrained	2.51	12.2	2.70	4.32	0.88	0.91	14
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	2.85	10.7	2.81	3.97	1.35	0.84	16
		荷重あり Restrained	2.91	9.5	2.66	4.91	1.89	1.01	8
高 温 High Temp.	荷重あり Restrained	2.57	12.0	2.79	4.96	1.08	1.13	17	
206 (2"×6")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	2.12	9.4	1.87	2.89	0.82	0.71	14
		荷重あり Restrained	2.44	13.3	2.76	4.74	1.12	1.24	22
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	2.57	11.6	2.67	4.87	1.07	1.00	19
		荷重あり Restrained	3.55	9.4	3.30	5.62	1.68	1.27	13
高 温 High Temp.	荷重あり Restrained	3.26	12.6	3.52	6.04	1.91	1.10	16	
平 均 Mean				11.0	2.73				

- 1) 電気抵抗式含水率計による。
Measured by an electric moisture meter.
- 2) 平均収縮率0.16%によって補正。
Corrected by average shrinkage 0.16% per 1% moisture content change.

Table 6. 幅方向の収縮率
Shrinkage in width (Tangential)

寸法型式 Nominal dimension	条 件 Drying condition		実測収縮率 Measured shrinkage (%)	含水率 ¹⁾ Moisture content (%)	補正収縮率 ²⁾ Corrected shrinkage (%)				試料数 Nos. of test piece
					平均 Mean	最大 Max.	最小 Min.	標準 偏差 S. D.	
204 (2"×4")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	4.45	9.4	4.04	5.49	2.65	0.79	13
		荷重あり Restraint	3.70	12.2	4.01	5.45	2.30	1.01	14
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	3.54	10.7	3.47	4.46	1.84	0.83	16
		荷重あり Restraint	3.74	8.7	3.20	4.30	2.30	0.65	8
	高 温 High Temp.	荷重あり Restraint	3.17	12.0	3.42	5.57	2.51	0.86	17
	206 (2"×6")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	3.78	9.4	3.39	5.10	2.10	0.86
荷重あり Restraint			3.56	12.7	3.99	7.09	2.10	1.13	22
中温・高温 Elevated-High Temp.		荷重なし No Restraint	3.54	11.6	3.69	5.36	1.66	0.98	18
		荷重あり Restraint	3.83	9.5	3.45	5.04	1.88	0.88	14
高 温 High Temp.		荷重あり Restraint	3.06	12.6	3.47	5.23	2.08	0.90	16
平 均 Mean					10.9	3.61			

1) 電気抵抗式含水率計による。

Measured by an electric moisture meter.

2) 平均収縮率0.25%によって補正。

Corrected by average shrinkage 0.25% per 1% moisture content change.

にして得た実測値および補正収縮率を Table 5, 6 に示す。厳密に言えば、乾燥条件のいかにかわら
ず同率の補正係数を用いたところに問題があるが、各材の実際の仕上がり含水率は11%からあまりかけは
なれていないと考え、この方法を採用した。長さ方向の収縮率は、数値が非常に小さいのでここでは省い
た。

Table 5, 6 を見ると、厚さ方向収縮率では低温乾燥（荷重なし）、幅方向では中温・高温乾燥（荷重あ
り）の 204 材がやや小さい収縮率を示している。参考のため 2～3 の文献¹³⁾ から含水率 11% 時の収縮率
を拾うと、厚さ収縮率 2.7%，幅収縮率 4.1%，4.3% なる数値がある。これら文献のデータと補正収縮
率とを比較すると、幅方向の補正収縮率が全体にやや低めである。この原因が、乾燥条件の差違によるも
のか、ここで採用した補正方法によるものか、または仕上がり含水率の測定法に起因するかは明らかでは
ない。乾燥条件間の比較のため、低温⇔中温・高温、低温⇔高温の組合せで t-検定した結果、厚さ方向の
場合、206 材の低温⇔中温・高温で「有意（5%水準）」、低温⇔高温で「非常に有意（1%水準）」、幅方
向の場合、204 材の低温⇔中温・高温および低温⇔高温で「有意（5%水準）」であり、他の組み合わせ
はすべて有意差がなく、温度条件と収縮率との間にはあまり明確な傾向が見られなかった。しかし、測定
試料数が少ないので、検定結果でそのまま結論付けるのは危険であろう。むしろ、厚さ方向収縮率につい
ては温度が上昇するにしたがってやや増大する傾向にあるが、幅方向収縮率については明確な傾向が見ら
れない、とするのが妥当と思われる。

Table 7. 木口割れの温度影響
Effect of temperature to end checking

寸法型式 Nominal dimension	条 件 Drying condition		木口割れ深さ ¹⁾ Depth of end checking (mm)		t-検定 t-test	t 値 t value	自由度 ²⁾ d. f.
			平 均 Mean	標準偏差 S. D.			
204 (2#×4#)	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	22.0	22.8	低 温 Conventional Temp. ↓ 中温・高温 Elevated-High Temp.	5.86**	118
		荷重あり Restraint	30.5	27.0			
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	68.6	47.0	低 温 Conventional Temp. ↓ 高 温 High Temp.	14.00**	88
		荷重あり Restraint	70.3	59.5			
	高 温 High Temp.	荷重あり Restraint	110.9	30.9			
	206 (2#×6#)	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	32.2	22.1	低 温 Conventional Temp. ↓ 中温・高温 Elevated-High Temp.	5.33**
荷重あり Restraint			37.3	44.1			
中温・高温 Elevated-High Temp.		荷重なし No Restraint	66.0	40.9	低 温 Conventional Temp. ↓ 高 温 High Temp.	8.43**	88
		荷重あり Restraint	72.8	32.5			
高 温 High Temp.		荷重あり Restraint	101.6	37.1			

** 1%水準で有意。

Significant at the 1% level.

1) 試料数は30枚。インチをミリメートルに換算した。

Number of test pieces is 30. Inches are converted into milli-meters.

2) 自由度=試料数-2

Degree of freedom=Test piece number-2.

III-2-2 割 れ

乾燥割れは概して木口面の割れが目立つ程度で、2~3の例外（とくに樹心部の材）を除いて、表面割れは問題にならない程度であった。木口割れの程度を評価するために、ここでは木口面より順次1インチずつ鋸断してゆき、その材の最長木口割れが消えた時の鋸断長さ（インチ数）を割れの深さとした。Table 7 に測定結果を示すが、低温乾燥の場合が最も小さく、高温度下に置かれる時間が長くなるほど割れの深さが大きくなるように見られる。Table 7 には低温条件と他の条件との t-検定結果も示したが、いずれも「非常に有意（1%水準）」であった。

日本農林規格 (JAS)⁸⁵⁾ によれば、木口割れが他の面に及ぶいわゆる「貫通割れ」でない限り、割れ深さ（繊維方向）に関する規定はなく、上述の方法による結果は直ちに JAS 規定の対象項目となり得ない。測定結果を JAS 規定（割れ長さ）に対応させて分類、評価した結果を Table 8 に示す。本研究で観察された割れは、上述のように、数枚の材に生じた表面割れを除いて大部分が木口割れであった。その木口割れは内部へは進行するが、材面に及ぶことはまれであった。Table 8 に明らかのように、JAS の

Table 8. 割れの JAS による評価
Evaluation of drying checkings by JAS

寸法型式 Nominal dimension	条 件 Drying condition		特級, 1級またはコンストラク ションに該当する枚数 Number of test pieces classified to Sel. Str., No. 1 or Const.			備 考 Remarks
			貫通割れ Split	木口割れ End check	表面割れ Surface check	
204 (2"×4")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	30	30	30	全く割れのないもの9枚
		荷重あり Restraint	30	30	30	全く割れのないもの7枚
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	30	26	30	全く割れのないもの4枚, 表面割れ3枚(樹心部)
		荷重あり Restraint	30	30	30	全く割れのないもの3枚, 表面割れ全くなし
	高 温 High Temp.	荷重あり Restraint	30	27	29	表面割れ合計長さ60cm以上のもの(2級)1枚, 木口割れ(2級)3枚
		荷重なし No Restraint	30	30	29	表面割れ2本の合計長さ61cmのもの(2級)1枚
206 (2"×6")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	30	30	30	全く割れのないもの9枚, 表面割れ全くなし
		荷重あり Restraint	30	30	30	全く割れのないもの1枚
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	30	30	30	表面割れ3本の合計長さ60cmのもの(2級)1枚
		荷重あり Restraint	30	30	29	表面割れ全くなし
	高 温 High Temp.	荷重あり Restraint	30	28	30	表面割れ2枚, 貫通割れあるも材幅以下1枚
		荷重なし No Restraint	30	30	30	

注: 試験材枚数は各条件とも30枚。

Note: The number of test pieces per condition is thirty.

等級付けによる結果では, いずれの乾燥条件の場合でも大部分が特級もしくはコンストラクションに格付けされ, いずれの条件でも等級低下は軽微とみなしてよく, 割れに関してはそれほど大きな問題にならないと考えてよいように思われる。

III-2-3 狂 い

狂いは, ねじれ, 曲がり, そりの3つに大別される。狂いの測定結果を Table 9 に平均値, 最大値, 最小値等で示した。同表からも推察されるように, ねじれの大きさは乾燥条件によってはっきりした差が見られないようである。ちなみに, 低温↔中温・高温および低温↔高温の組み合わせで有意差検定した結果, いずれも有意差が認められなかった。しかし, 荷重については, いずれの乾燥条件においてもその効果は認められるようである。荷重はとくに積上段の材のねじれ, そりに効果があるとされているが, 本実験では, 積上段のねじれ, そりへの効果を立証すべき有効なデータが得られなかった。曲がりについても乾燥条件, 荷重ともにその影響があまり見られないようである。ねじれ, 曲がりと同様にして, そりの測定結果を検討したが, この場合は, 高い温度条件での乾燥ではそり量が小さいことがうかがわれ, 温

Table 9. 乾燥による狂いの増加量
Amount of warpings increased by drying

寸法型式 Nominal dimension	条 件 Drying condition		ねじれ Twist (mm)				曲がり Crook (mm)				そり Bow (mm)			
			平均 Mean	最大 Max.	最小 Min.	標準偏差 S. D.	平均 Mean	最大 Max.	最小 Min.	標準偏差 S. D.	平均 Mean	最大 Max.	最小 Min.	標準偏差 S. D.
204 (2"×4")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	1.7	7.1	0	1.6	1.1	11.9	-5.6	2.9	2.2	5.6	0	1.6
		荷重あり Restraint	1.7	4.8	0	1.5	1.0	10.4	-1.5	2.2	-0.1	4.8	-4.1	1.8
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	2.0	7.1	0	1.7	0.8	4.1	-3.3	1.7	0	6.4	-3.3	2.1
		荷重あり Restraint	1.2	5.6	0	1.3	1.3	11.2	-1.0	2.7	0.2	4.1	-3.3	2.0
	高 温 High Temp.	荷重あり Restraint	1.5	4.8	0	1.4	0.8	5.6	-0.8	1.2	-0.1	3.3	-3.3	1.6
206 (2"×6")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	2.3	12.7	0	3.0	1.8	6.4	-4.1	2.4	2.9	11.2	0	2.4
		荷重あり Restraint	1.4	4.1	-0.8	1.2	1.0	3.3	-0.8	1.1	0.3	4.8	-3.3	1.6
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	2.3	7.9	0	2.2	1.4	23.6	-2.5	4.5	-0.4	2.3	-7.1	2.1
		荷重あり Restraint	2.0	6.4	0	1.7	1.3	11.2	-0.8	2.3	0.6	4.3	-4.8	2.0
	高 温 High Temp.	荷重あり Restraint	2.2	5.6	0	1.9	0.8	4.1	-1.5	1.4	0.4	7.1	-2.5	2.0

- 注：① 狂い増加量は乾燥後狂い量から乾燥前狂い量を差引いたもの。材の長さは 8 ft. (244 cm)
Notes: Amount of warping means difference of amount before and after drying. Length of test pieces is 8 ft. (244cm).
② 試料数は各条件とも30枚。
Number of test piece is 30.
③ 数値はインチから換算した。
Values were calculated by conversion from inches.

Table 10. 日本農林規格による狂いの許容範囲
Grading limit of warpings by Japanese Agriculture Standard (JAS)

単位：mm

狂いの種類 Type of warping	寸法型式 Nominal dimension	甲種 枠組材 Type A Dimension lumber				乙種 枠組材 Type B Dimension lumber		
		特級 Sele. Str.	1級 No. 1	2級 No. 2	3級 No. 3	コンストラクション Const.	スタンダード Stand.	ユーティリティ Util.
ねじれ Twist	204	9.5	9.5	13	19	9.5	13	19
	206	14.5	14.5	19	19	14.5	19	29
曲がり Crook	204	4.9	4.9	12.2	12.2	4.9	12.2	12.2
	206	4.9	4.9	12.2	12.2	4.9	12.2	12.2
そり Bow	204	6.5	6.5	10	13	6.5	10	13
	206	6.5	6.5	8	13	6.5	8	13

注：数字は長さ 2.4 m 材に対するもの。
Note: The numbers are corresponded with 2.4 m-long dimension lumber.

Table 11. 狂いによる乾燥材の等級 (JAS 基準)
Grading of dried lumber by warpings (JAS)

寸法型式 Nominal dimension	条 件 Drying condition		特級, 1級, またはコンストラクションに該当するもの Number & percentage of test pieces classified to Sel. Str., No. 1 or Const.						備 考 Remarks
			ねじれ Twist		曲がり Crook		そり Bow		
			本数 Number	百分率 Percent	本数 Number	百分率 Percent	本数 Number	百分率 Percent	
204 (2"×4")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	30	100	28	93.3	30	100	曲がり 2級, 3級 2枚
		荷重あり Restraint	30	100	29	96.7	30	100	曲がり 2級, 3級 1枚
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	30	100	29	96.7	28	93.3	曲がり 2級, 3級 1枚 そり 2級 2枚
		荷重あり Restraint	30	100	29	96.7	30	100	曲がり 2級, 3級 1枚
206 (2"×6")	低 温 Conventional Temp.	荷重なし No Restraint	29	96.7	27	90.0	30	100	ねじれ 2級 1枚 曲がり 2級, 3級 3枚
		荷重あり Restraint	30	100	30	100	30	100	
	中温・高温 Elevated-High Temp.	荷重なし No Restraint	30	100	28	93.3	30	100	曲がり 2級, 3級 2枚
		荷重あり Restraint	30	100	29	96.7	30	100	曲がり 2級, 3級 1枚
	高 温 High Temp.	荷重あり Restraint	30	100	29	96.7	29	96.7	曲がり 2級, 3級 1枚 そり 2級 1枚

注：試験材枚数は各条件とも30枚。
Note: The number of test pieces per condition is thirty.

度影響が認められるようである。低温乾燥ではそり量は大きいですが、荷重をかけることによりかなり抑制されるものと見られる。しかし、中温・高温乾燥では、荷重の有無にかかわらずそり量が小さいので、荷重の効果はほとんどないと見なしてよいようである。また、高温乾燥においては、1回だけの実験から荷重の効果を検討することはできないが、中温・高温乾燥の場合と同様、そり量は小さく、荷重の効果はほとんどないものと推定される。参考のため、低温↔中温・高温および低温↔高温の組み合わせでそり量の有意差を検定したところ、荷重のない場合の低温↔中温・高温に1%水準での有意差が見られ、他の組み合わせでは有意差は認められなかった。

乾燥材の狂いについて、その許容範囲が JAS⁸⁵⁾によって示されている。いま、材長 2.4 m に対応する狂いの許容範囲を JAS から抜粋すると、Table 10 のようになる。Table 10 の基準値を測定結果(乾燥後狂い量)に当てはめて一覧表にしたのが Table 11 である。ねじれについては、206 材の低温乾燥(荷重なし)で、1枚が(30枚中)2級に該当するほかは、材寸法、乾燥条件にかかわらず、すべて特級、1級もしくはコンストラクションに該当した。それも、2~3の試験材を除いては特級、1級またはコンストラクションに該当する。曲がりは他の狂いと比較するとやや等級低下の枚数が多いが、いずれにせよ、どの乾燥条件でも90%以上の試験材が特級、1級またはコンストラクションに該当する、と言える。本実験では仕上がり含水率の上限を JAS 基準(含水率19%)より低くおさえてあるので、これらは、実際にはかなり厳しい条件での評価になっているものと考えられる。

これら数パーセントの試験材の等級低下は、主として乾燥条件の影響より、むしろ材質や木取りの影響による方が強いように思われる。したがって、乾燥実務の面から見たとき、とくに乾燥条件による差があるとは言い難く、他の損傷と同様、狂いもあまり大きな問題とならないように考えられる。

III-2-4 節 抜け

低温乾燥では、乾燥終了後に生き節はもちろんのこと、大半の死節も脱落しなかった。しかし、中温・高温、および高温乾燥では、ほとんどの死節が脱落した。これまで述べてきた乾燥の欠点は、いずれも軽微で、これによって品質の等級が減じられることはほとんどなかった。しかし、節に関する限り、JAS に照し合わせても、抜け節がかなり品質低下をもたらす因子となり、原木の等級(節の大小、多寡)がそのまま乾燥材品質に反映するおそれがある。節抜けを防止するには、現在のところ、低温、高湿で乾燥するより良法はなく、これは、高温乾燥研究の今後に残された重要な課題となるであろう。

III-2-5 変色(焼け)

高温乾燥では、材色のうすいものや色調を重んずる部位に用いられる材などでは、「焼け」が問題となる。本実験では、低温乾燥では焼けはほとんど無視できる程度であったが、中温・高温および高温乾燥では材色の褐変が著しかった。しかし、本実験の乾燥スケジュールでは、褐変が材内にまで及ぶことはなく、乾燥後に1mm厚程度プレーナがけすればほとんど解消される。

III-2-6 乾燥応力

5回の乾燥実験の後に、全部のコントロール・サンプルについて中央部を鋸断し、櫛型試片による乾燥応力の状態を観察した。乾燥応力の残留程度は、Fig. 6のような基準によった。測定結果はそれぞれの仕上がり含水率と対比させて Table 12 に示す。ここに示した含水率は全乾法によったものである。Table 12 から明らかなように、各コントロール・サンプルの含水率はばらついているため、応力状態もまちまちであるが、一般に含水率の高い材の残留応力は、中庸(M)もしくは基だしい(S)に属するよ

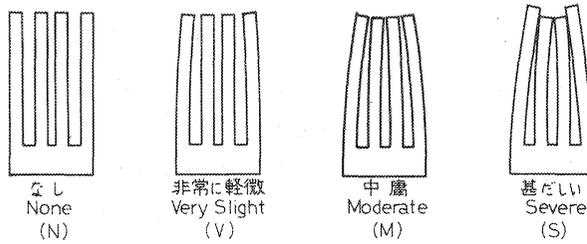


Fig. 6 櫛型試片による乾燥応力の区分
Grading of casehardening by prong test-piece.

Table 12. コントロールサンプルの乾燥応力
Casehardening of control samples

寸法型式 Nominal dimension	低 温 Conventional Temp.				中温・高温 Elevated-High Temp.				高 温 High Temp.	
	荷重なし No Restraint		荷重あり Restraint		荷重なし No Restraint		荷重あり Restraint		荷重あり Restraint	
	含水率 M. C. (%)	応 力 Stress	含水率 M. C. (%)	応 力 Stress	含水率 M. C. (%)	応 力 Stress	含水率 M. C. (%)	応 力 Stress	含水率 M. C. (%)	応 力 Stress
204 (2"×4")	13.6	M	12.9	V	13.9	V	4.6	N	12.0	V
	9.4	N	9.4	N	9.3	N	12.5	N	18.4	M
	10.3	V	13.8	V	17.1	M	9.5	N	11.9	V
	9.5	N	11.5	N	10.9	N	11.0	N	15.9	S
206 (2"×6")	10.3	N	14.3	S	14.4	V	10.6	N	20.9	S
	11.3	V	10.0	N	8.8	N	7.9	N	11.9	V
	9.3	N	12.7	M	11.4	V	14.5	S	11.1	M
	13.3	S	10.9	V	9.1	N	15.8	N	15.1	S

注：含水率は全乾法にて測定した。

Note: Moisture content was measured by oven-dry method.

うである。試験材の半数（1条件当たり 204, 206 各 15 枚）についても同様の方法で残留応力を調べた。その結果を Table 13 に示す。上述したような仕上がり含水率と応力の程度との関係は、Table 13 でも言えるようである。一般には、低含水率になるにつれて応力は増大すると考えられている。しかし、本実験の場合、乾燥の早い材に対してはイコーライジング処理がそのままコンディショニング効果を与えたのに反し、乾燥の遅れた材に対しては、乾燥経過の一部としての効果しかなく、このような結果になったものと考えられる。概して、206 材は 204 材に比べて同一の乾燥条件であっても仕上がり含水率が高く、M または S に属する材の割合が多くなっている。乾燥温度条件による違いについては、各材の仕上がり含水率を同一にそろえた上でなければ正確な比較がむつかしいが、著しい差異はないものとみなしてよいようである。Table 1 に示した乾燥条件に限って言えば、206 材に対する調湿操作（ここではイコーライジング）は応力除去に関しては不十分であり、応力除去を目的とした、更に 2～3 時間のコンディショニング操作が必要であろう。

III-2-7 落込み

乾燥終了後、各乾燥条件とも 204, 206 材各 15 枚について、材の中央部を鋸断し、内部割れの観察とあ

Table 13. 試験材の乾燥応力
Casehardening of test pieces

寸法型式 Nominal dimension	204 (2"×4")						206 (2"×6")					
	低 温 Conventional Temp.		中温・高温 Elevated- High Temp.		高 温 High Temp.		低 温 Conventional Temp.		中温・高温 Elevated- High Temp.		高 温 High Temp.	
条 件 Drying condition	荷重あり Restraint		荷重なし No Restraint		荷重あり Restraint		荷重あり Restraint		荷重なし No Restraint		荷重あり Restraint	
荷重の有無 Load	荷重あり Restraint		荷重なし No Restraint		荷重あり Restraint		荷重あり Restraint		荷重なし No Restraint		荷重あり Restraint	
番 号 Number	含水率 M. C. (%)	応力 Stress	含水率 M. C. (%)	応力 Stress	含水率 M. C. (%)	応力 Stress	含水率 M. C. (%)	応力 Stress	含水率 M. C. (%)	応力 Stress	含水率 M. C. (%)	応力 Stress
1	12.5	N	9.5	V	12.5	V	14.7	S	9.1	M	13.5	S
2	9.8	N	9.0	V	11.9	M	17.8	S	15.9	S	13.1	S
3	13.3	V	9.5	N	8.1	N	12.6	S	12.7	S	13.4	S
4	12.0	N	16.1	S	12.3	V	14.0	S	11.9	S	14.2	S
5	12.5	N	12.5	V	16.5	S	13.3	M	10.6	M	13.3	S
6	13.5	V	8.0	N	8.9	V	10.7	N	8.6	V	15.0	S
7	11.1	V	9.7	M	9.1	V	9.3	N	9.5	V	12.8	S
8	10.4	N	7.9	N	13.1	V	12.8	M	8.9	V	9.1	M
9	9.8	N	10.3	N	11.4	V	10.5	N	15.1	S	11.0	S
10	12.5	V	14.7	S	14.2	M	12.4	S	8.8	M	9.0	V
11	15.4	M	12.3	S	10.9	V	10.5	N	14.3	S	13.9	S
12	15.1	M	9.1	M	10.3	M	11.5	V	15.6	S	9.9	M
13	14.1	M	10.7	S	9.6	N	16.2	S	9.5	N	9.3	M
14	11.0	N	8.8	N	9.5	N	11.1	N	16.3	S	10.1	V
15	11.9	N	9.1	V	14.3	V	13.0	M	14.1	S	18.6	S
平 均 Mean	12.3	/	10.5	/	11.5	/	12.7	/	12.1	/	12.4	/

注：含水率は全乾法にて測定した。

Note: Moisture content was measured by oven-dry method.

わせ、落込みの状態を調べた。節のまわりや繊維の不整な局部的部分を除いては、いずれの乾燥条件でも、内部割れをはじめ木材組織の異常な収縮もしくは落込み現象は全く見出されなかった。一般には、広葉樹材の多くのもや針葉樹材の一部では、初期含水率の高い材を乾燥初期から高温を用いて乾燥したとき、落込みが発生するとされている。しかし、ダグラス ファーを用いた本実験に関する限り、落込みの危険はなかった。

III-3 高温乾燥スケジュール適用への検討

本実験では、乾燥条件として従来から標準的とされている乾燥スケジュール（低温）と、最高温度を110°Cとする、いわゆる高温スケジュール、それに標準スケジュールよりやや高い温度と高温とを組み合わせたスケジュール（中温・高温）を選んだ。また、風速については、低温スケジュールでは、材間風速2 m/sec 前後、その他のスケジュールでは約4 m/sec とした。人工乾燥での経済性は、主として乾燥時間と乾燥によって生ずる損傷とのかね合いから判断されなければならない。したがって、適正な高温乾燥スケジュールの定義も、高温乾燥による得失の評価基準や許容範囲によって異なってくるはずである。いま、限られた試料、限られた設定条件で得られた結果のみに基づいて最適スケジュールを算出することは不可能に近いが、より適当と思われる乾燥スケジュールの推定は可能であろう。

乾燥時間に関しては、低温スケジュールの場合、イコーライジングを含めて約 150 時間に對し、中温・高温スケジュールが約 50 時間、高温スケジュールが約 30 時間であった (Table 4)。この点のみから見れば、高温スケジュールが最も有利であることが明らかである。損傷に関しては、概念的には高い温度での乾燥は、種々の損傷増大のおそれが大きいと考えられるが、本実験に関する限り、収縮率、割れ、狂い、変色等のために、著しく乾燥材質の等級が減じられるという結果は得られなかった。損傷の種類によっては、高い温度の方が低温よりやや増大するものもあるが、逆に有利なものもあり、いずれにしても、その程度は最終製品として十分許容される範囲と考えられる。ただ、節抜けについては高い温度を使用するほど不利になるが、製品の使用目的に応じて、この問題の重要度が判断されることになる。

以上の測定結果を総合し、ダグラス ファー 204, 206 材に対する、実務的に適当と思われる次のような高温スケジュールが考えられよう。

- ① 乾球温度 110°C 一定の高温乾燥スケジュール。乾燥初期には湿球温度を可能な限り高く保つ。
- ② イコーライジング、コンディショニング等の調湿処理を行う。

なお、前述した既往の研究結果にかんがみ、材間風速は通常の乾燥の場合より大きくし、できれば 4 m/sec 以上が望まれる。また、乾燥開始時のウォーム・アップは、乾湿球温度差を小さく (5°C 以下) 保ちながら、2~3 時間で完了するのがよいようである。原木の等級が低い場合や、ダグラス ファー以外の樹種で落込みやすい材では、乾燥初期の高温度は避けるとともに、狂いを抑制するために作業性のよい緊締具または荷重の利用も考えられる。

IV ま と め

本研究では、204, 206 のダグラス ファー材を、標準的な乾燥スケジュール (低温)、やや高い温度 (75~95°C) と高温 (110°C) とを組み合わせたスケジュール (中温・高温)、および 110°C 一定のスケジュール (高温) の 3 種類で実験し、乾燥時間や損傷による品質低下の程度を種々の角度から検討した。本研究で明らかになった主要なものは、下記のとおりである。

- (1) 乾燥時間は温度が高くなるにしたがって短縮される。すなわち、低温乾燥時間を 100 としたとき、中温・高温乾燥のそれは 32~33、高温乾燥では 22~23 になる。
- (2) 収縮率については、厚さ方向では乾燥温度が高いほどやや増大する傾向にあるが、幅方向では、温度条件による明確な差は見られない。
- (3) 乾燥割れの主要なものは木口割れである。木口割れの深さは高温ほど大きく、低温<中温・高温<高温の順になる。割れによる品等の低下を JAS に準じて評価したとき乾燥条件による差異はほとんど見られない。
- (4) 狂いのうち、ねじれに対する温度の影響はほとんどない。荷重をかけた場合のねじれ抑制効果は若干みられるが、JAS に準じて品等の差を見たとき、荷重の有無によるねじれの程度に差はない。曲がりに対しても温度の影響はほとんどない。荷重の効果もほとんど見られない。そりに関しては、高温ほどそり量が少ない。高温では、そり量が比較的軽微なため荷重の効果はみられないが、低温では荷重をかけることにより、そり量の減少が期待できる。実験したいずれの乾燥条件においても、JAS の許容限界から見ればほとんど差はなく、等級の低下は少ない。
- (5) 節抜けに関しては、高温になるにしたがって節が抜けやすくなり、これが製品品質を低下させる

原因となる。

(6) 変色は、材が高温にさらされる時間が長くなるほど褐変の程度が増大する。しかし、乾燥後に材表面を1 mm程度鉋削することにより解消が可能である。

(7) 中温・高温、高温スケジュール乾燥にあっても、落込みやそれに起因する内部割れはほとんど見られない。

(8) 乾燥時間および乾燥による損傷を考慮して、ダグラス ファー優良材 (204, 206) に対する実用的な乾燥スケジュールは、① 乾球温度 110°C 一定の高温乾燥スケジュールで、乾燥初期には湿球温度を可能な限り高く保つ。② 調湿処理 (イコーライジング、コンディショニング) は十分に行う、を基本として考えることができる。

なお、ウォーム・アップは乾湿球温度差を小さく (5°C 以下) 保ちながら 2~3 時間で完了するのがよく、材間風速はできれば 4 m/sec 以上がよい。

高温乾燥の問題点としては、抜け節による品質低下、乾燥装置および作業性の問題などが重要な課題として残されている。扱う樹材種が異なれば、それぞれの材料に特有な新たな問題が生じることは当然である。

文 献

- 1) American Institute of Timber Construction: Timber Construction Manual, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Inc., N. Y., p. 2・6, (1974)
- 2) Anonymous: Early Kiln For Drying Wood With Superheated Steam Excluding Atmospheric Air——— Abstract of German patent No. 100287 by MÖLLER and PFEIFER, Dec. 5, 1897, USDA, FPL Trans. No. 162, 2 pp., (1953)
- 3) CALVERT, W. W.: High-temperature kiln drying of eastern Canadian species, FPRS Contribution No. P-105, Ottawa, 6 pp., (1965)
- 4) CECH, M. Y.: Development of drying stresses during high-temperature kiln drying, For. Prod. J., 14, 2, pp. 69~76, (1964)
- 5) CECH, M. Y.: High-temperature kiln drying of spruce joists, For. Prod. J., 21, 10, pp. 55~60, (1971)
- 6) CECH, M. Y. and D. R. HUFFMAN: High temperature drying of mixed spruce, jack pine, and balsam fir, Dept. of Env., Canadian For. Serv. Pub. No. 1337, Ottawa, 15 pp., (1974)
- 7) CHRISTENSEN, F. J. and J. F. G. MACKAY: The future and practical application of high-temperature seasoning of plantation softwoods, Aust. For. Ind. J., Nov., pp. 55~58, (1972)
- 8) COMSTOCK, G. L.: Shrinkage of coast-type Douglas-fir and old-growth redwood boards, U. S. For. Serv. Res. Paper FPL 30, 19 pp., (1965)
- 9) ESPENAS, L. D.: Shrinkage of Douglas-fir, western hemlock, and red alder as affected by drying conditions, For. Prod. J., 21, 6, pp. 44~46, (1971)
- 10) HUFFMAN, D. R.: Kiln drying aspen studs, For. Prod. J., 22, 10, pp. 21~23, (1972)
- 11) JOHNSTON, D. D.: Effect of mechanical restraint during drying on the subsequent distortion of timber, For. Prod. Res. Lab., Princes Risborough, 3 pp., (1959)
- 12) KARLSEN, O.: Kiln seasoning of timber at temperature above 100°C, Norsk Skogindustri, 5, 5, Norway, pp. 138~140, Aust. CSIRO Trans. No. 1592, 5 pp., (1951)
- 13) KAUMAN, W. G.: Equilibrium moisture content relations and drying control in superheated

- steam drying, For. Prod. J., 6, 9, pp. 328~332, (1956)
- 14) KEYLWERTH, R.: Fundamentals of high-temperature drying of wood, Holz-Zentralblatt, No. 76, Sept. 23, FPL Canada Trans. No. 60, 1953, (1949)
 - 15) KIMBALL, K.E. and D.P. LOWERY: Quality of studs kiln dried by high and conventional temperatures, For. Prod. J., 17, 9, pp. 81~85, (1967)
 - 16) KOCH, P.: Drying southern pine at 240°F.....Effect of air velocity and humidity, board thickness and density, For. Prod. J., 22, 9, pp. 62~67, (1972)
 - 17) KOCH, P.: Serrated kiln sticks and top load substantially reduce warp in southern pine studs dried at 240°F, For. Prod. J., 24, 11, pp. 30~34, (1974)
 - 18) KOLLMANN, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe I, Springer-Verlag, Berlin, pp. 451~483, (1951)
 - 19) KOZLIK, C.J.: Effect of kiln conditions on the strength of Douglas-fir and western hemlock, For. Res. Lab., School of Forestry, Oregon State Univ. Rept. D-9, 32 pp., (1967)
 - 20) KOZLIK, C.J.: High-temperature drying of Douglas-fir dimension lumber, For. Res. Lab., School of Forestry, Oregon State Univ. Information Circ. No. 22, 32 pp., (1967)
 - 21) LADELL, J.L.: High-temperature drying of yellow birch, For. Prod. J., 6, 11, pp. 469~475, (1956)
 - 22) LADELL, J.L.: High-temperature kiln drying of eastern Canadian softwoods.....Drying guide and tentative schedules, FPL Canada, FPL Tech. Note No. 2, 18 pp., (1957)
 - 23) MACDONALD, B.F. and H. MACLEAN: Effect of high temperature on the durability of western red cedar, FPRB Contribution No. P-103, Vancouver, 2 pp., (1965)
 - 24) 大山幸夫ら：乾燥による割れの防止試験(2), 北林産試月報, No. 9, pp. 1~4, (1975)
 - 25) OSTER, H.: High temperature drying of western softwood, Unpublished Rept. at the Central Calif. Dry Kiln Club, North Fork, Calif., May, (1964)
 - 26) RASMUSSEN, E.F.: Dry Kiln Operator's Manual, USDA Forest Prod. Lab., Agric. Handbook No. 188, p. 131, (1961)
 - 27) RICHARD, D.B.: High temperature drying of southern hardwoods, Agric. Exp. Stn. of the Alabama Polytechnic Institute Circ. 123, 11 pp., (1958)
 - 28) 林業試験場編：新版木材工業ハンドブック, 丸善, p. 1057, (1973)
 - 29) SALAMON, M.: Quality and strength properties of Douglas-fir dried at high temperature, For. Prod. J., 13, 8, pp. 339~344, (1963)
 - 30) 佐藤庄一, 星出 昭：ヘムロック角材の乾燥試験について, 木材工業, 24, 6, pp. 277~280, (1969)
 - 31) SCHOVA, A.E.: The influence of high temperature drying of beech on its mechanical properties, The Wood Working Industry, No. 4, USSR., pp. 13~14, USDA FPL Trans. No. 489, 5 pp., 1962, (1962)
 - 32) U.S. For. Prod. Laboratory: Warp reduction.....Introduction of the spring fastening for pressure of a lumber pile by drying, USDA For. Serv. Res. Note FPL-0108, Sept., 2 pp., (1965)
 - 33) U.S. For. Prod. Laboratory: Wood Handbook, USDA For. Serv., Agric. Handbook No. 72, pp. 3・9~3・11, (1974)
 - 34) WENGERT, E.M. and R.C. BALTES: A pinned sticker to reduce crook in kiln drying lumber, For. Prod. J., 24, 8, pp. 23~24, (1974)
 - 35) 全国木材組合連合会編：枠組壁工法構造用製材の日本農林規格並びに解説, 全木連, pp. 147, (1974)

Study on High Temperature Drying of Douglas-fir Dimension Lumber

Hiroshi SUMI

Summary

Douglas-fir dimension lumber (2"×4", 2"×6") was kiln dried by three categories of schedule—conventional temperature (Conventional temperature), combination of elevated and high temperature (Elevated-High temperature), and constant high temperature (High temperature) schedule. The quality of lumbers dried by the respective schedules was examined from a viewpoint of application for commercial drying.

The important results obtained in this study are as follows:

1. The drying time can be reduced considerably by use of a higher temperature. Assuming the drying time by Conventional temperature is 100, that by Elevated-High temperature is 32~33, and that by High temperature is 22~23.

2. Concerning the shrinkage, there seems to be a slight tendency that shrinkage in thickness (radial) by Conventional temperature drying is somewhat smaller than that by higher temperature conditions. But it will be better to say that the tendency between shrinkage in width (tangential) and temperature is not clear.

3. End checking is a major problem in the drying checkings. In other words, other checkings (surface checking, split) did not offer any serious problem in this study. End checkings tend to develop deeper into the lumber (along fiber direction) with increasing temperature, and its relation is expressed by the following unequal equation: Conventional temp. < Elevated-High temp. < High temp.

According to JAS, lumbers dried by any drying condition can scarcely be degraded due to their checkings as a result.

4. Twist is hardly influenced by drying temperature. Twist can be reduced to some extent by means of restraint of the pile during drying. The amount of twist, however, is nearly equal irrespective of the restraint (with or without) when the degree is evaluated by JAS.

Crook is influenced neither by drying temperature nor by restraint, obviously. On the other hand, bow can be more diminished by higher temperature drying conditions because the degree of bow is almost negligible in this case. The amount of bow can be expected to be reduced by restraining of the pile in Conventional temperature drying. As the above-mentioned warpings (twist, crook and bow) are remarkably small, it will be reasonable to say that their degree is not significant among the respective drying temperature conditions. In addition, quality of lumbers dried under these conditions can hardly be degraded according to the grading rule of JAS.

5. Knots, especially dead knots, tend to leave from the lumber after Elevated-High and High temperature dryings, which will cause serious degradation of the lumber quality in the general high temperature drying in future.

6. Browning (toasted color) as one of the lumber discolorations is also an important problem in high temperature drying. The longer the high temperature drying time is, the severer

the degree of discoloration is. However, it will be possible to eliminate the problem by dressing the surface of the lumber by about 1 mm thick.

7. Both collapse and honeycombing developed from the collapse scarcely occur in Elevated-High or in High temperature drying.

8. Considering the defects and the drying time, a commercial high temperature schedule for Douglas-fir dimension lumber (upper grade) can be established on the following fundamentals;

- i) constant high temperature drying at 110°C (D. B. T.) with high relative humidity in early stage of drying, and
- ii) sufficient steam treatments (equalizing, conditioning) after drying.

In addition, it is recommended that wet-bulb depression should be kept below 5°C during the warm-up period, which should be finished within 2~3 hours. The velocity of air flow should be above 4 m/sec, if possible.

A variety of problems in both drying materials and drying facilities should be fully considered and solved as soon as possible in order to adopt a high temperature drying on a commercial base. Though the former problems may be clarified by many experimental studies gradually, the latter ones should be mainly solved by effort and decision of individual enterprises. Anyway, it can be said that a high temperature drying may produce many advantages in future.