

平成10年度 農林水産省補助事業
利用技術推進事業・木質材料資料整備事業

乾燥技術に関する海外資料

平成 11 年 3 月

財団法人 日本住宅・木材技術センター

概 要 (要約・キーワード)

この資料は、北米北西部産樹種の乾燥シンポジウム論文集(1995)及び第5回国際木材乾燥会議論文集から抜粋翻訳したものである。論文選定に当たっては、我が国にまだ普及していない新しい技術を中心に選定した。内容は、①製材品の商品として満たすべき条件と乾燥、②乾燥の前処理としての初期含水率による選別の利点、③高温乾燥におけるブナの物理的特性への影響、④過熱蒸気乾燥および超高温乾燥が木材強度に及ぼす影響、⑤針葉樹の高周波減圧乾燥の市場における可能性、⑥加熱蒸気・減圧併用乾燥装置の設計と原理、⑦加圧減圧乾燥のパイロットプラント

<キーワード>

北米、製材品、乾燥材、含水率選別、高温乾燥、ブナ、ラジアータパイン、過熱蒸気、木材強度、高周波減圧、超高温、減圧、加圧・減圧、コスト、エネルギー、I/D、RE/V

謝辞

資料の翻訳・とりまとめに当たっては、森林総合研究所 久田卓興、黒田尚宏、斉藤周逸、小林 功、石川敦子の各氏を煩わした。ここに各氏に対して、深甚よりお礼を申し上げる次第である。

目 次

1. 製材市場における人工乾燥の重要性	1
2. 乾燥プロセス最適化のための含水率選別法	8
3. 高温乾燥における室内温湿度条件の影響	11
4. 過熱蒸気乾燥および超高温乾燥が木材強度に及ぼす影響	17
5. 針葉樹の高周波減圧乾燥の針葉樹材市場における可能性	25
6. 過熱蒸気・減圧併用乾燥装置の設計と原理	34
7. 加圧・減圧乾燥パイロットプラント	39

1. 製材市場における人工乾燥の重要性

ノアボード工業 (カナダ)

ブライアン・レスリー (Brian Leslie) 著

1970年代および80年代における北米市場の製材業は主に低コスト・大量生産の企業であった。これらの企業は価格面で競合できるように、商品の効率的な生産を目指していた。常に供給は容易に需要に合わせることができ、価格は比較的安く押さえることができた。

しかし、90年代になると、非常に異なった様相を呈するようになった。主に環境問題への関心が引き起こしたことだが、需給バランスが急速に変化し、これはその後の製材価格の不安定化と繊維コストの上昇を伴った。このことは93年から94年に、製材業を一時的に「儲かるビジネス」にする効果はあったが、製材産業の競合レベルを上げることにもつながった。1995年には、棚ぼた式のビジネス機会を利用しようとする他種の材料が参入することにより、製材価格の下落があった。しかし、価格の下落に見合ったコストの低下、とくに繊維コストの低下はまだ実現していない。低コスト化が実現すれば、そこに新しい現実が生み出され、かつてないほどに製材市場における製品の品質と性能がより重要な要素となる。いわば「品質の生産」がきわめて重要になってきており、これを実現するための重点領域の一つが木材乾燥の実践であるに違いない。

この報告では、北米における繊維(木材)供給の現況をレビューし、その価格と製造収支の両面へのインパクトについて論じている。アメリカ市場と日本における現況と製品開発に何が必要であるかという論理的な意味付けを行い、最後に製材ビジネスを成功に導くための5つの要点と、そこで乾燥が果たす役割を示している。

アメリカ森林局は、太平洋岸北西部地域における木材生産の現状が80年代の65%に低下しており、2000年までには50%にまで落ち込むとしている(図1)。また、西部の国有林がアメリカ全体の木材供給に占める割合について、1988年には23%を占めていたが、現在は6%にすぎないとしている。これらの木材生産の低下が北西地域の林産業を荒廃させてきている(図2、表1)。製造機械の生産低下からも明らかのように、雇用の低下も顕在化してきている。同時に、カナダのブリティッシュ・コロンビア州では森林の拡大的な伐採が行われ、木材生産は8,800万立米にまで増加した。この拡大伐採も終焉し、現在ではおおよそ7,200万立米まで伐採量は落ちている。今後は、さらに6,500万立米のレベルかそれ以下まで続落するものと予想される(図3)。

これらの生産低下は北米市場へ主に影響を与えてきた(図4~6)。年間に許容される余剰伐採は、需要が増加したときの緩衝剤として利用できる。しかし、それらの生産低下は、余剰伐採の効果を一時的にほとんどか全くない状況にしてしまった。この状況では、どんなわずかの需要の変化も価格の上昇や下落を加速したため、価格の極度な不安定化をもたらした。通常2×4(乱尺)の取引価格は通常\$190~\$260(カナダドル)であったが、過去3年間では\$220~\$460(カナダドル)であった。短期間に限っては、木材生産の減少を克服した人々に棚ぼた式の利益をもたらす結果となったが、中長期的には困難で克服すべき問題が生じた。現在、木材(繊維)コストは高値を維持しているものの、収益は漸次下落している(図7)。赤字を補うために生産量は上昇しており、現在工場は「より高度なレベル」で操業している。

これらの経済状態の変化をもとに、ブリティッシュ・コロンビア内陸部に位置する製材工場の収支を検証してみる（表 2）。多くの工場は表 2 の例よりも効率的である。例えば、製材歩留まりが 250 ボードフット／立米で、加工コストが \$ 85（カナダドル）／百万ボードフットであるとすると、収支プラマイゼロのポイントは \$ 270（米ドル）／百万ボードフットとなる。

今日のブリティッシュ・コロンビアにおける繊維コスト高を背景に、利ざやが絞られてきている。小径の丸太からより大量の 2×4 や 2×6 材を生産しなければならないという工場操業の現実から、収益を維持し続けることは困難である（図 8）。

ブリティッシュ・コロンビア大学林学部長のクラーク・ピンクリー氏は、「木材製品の製造者は原材料コストの上昇と、伝統的な固定価格シーリングの狭間で苦境に立たされるであろう。製品価格は、製材以外の代替する木材および非木材製品のコストによっても影響されるものであるから。」と述べている。現在の一時期を過ぎれば、これが 1990 年代後半とその先の木材産業のあり様に思える。

事実、状況は変化している。現在工場がほんの少し前まで適当な価格と考えられていたレベルで操業するとしても、かつてよりももっと高い基準で経営が行われることになる。この状況には、いくつかのポイントを指摘できる。

1. 競争する製品ほど、経済的に活性がある。
2. もはや木材は消費者にとって低廉な商品とはみなされない。
3. 木材（繊維）コストが、全生産コストのうち高い比率を占める。

これらの問題は製材市場のあり方を変え、市場に供給される製品に影響するだろう。また工場は、平均収益を上げるための新たな創造的方法を開拓しなければならないであろう。

さて、現在北米市場の現状を見ると、住宅建築がアメリカにおける木材需要の 2/3 を占めている。1990 年代における住宅新築への需要は低いにもかかわらず、木材の需要は増加している。これは主に住宅の修理やリフォームの増加によるものである（図 9）。

アメリカにおける住宅ストックを分析すると、ある驚くべき事実が明らかになる。アメリカには 1 億戸の住宅があるが、その半数は 30 年以上経過したものである（図 10 と 11）。それらのごとく 2,300 万戸が 1986～1992 年に持ち主が変わっている。このことに加えて、アメリカの人口統計における年齢分布によると、いわゆる「ベビーブーム」による需要の波がある。これらの大半は 35 才から 55 才に相当し、よりよいホームの購入や改装、修理を望む年齢層である。

アメリカにおける住宅修理やリフォームの市場は 1,000 億ドルにも達する。この市場は少なくとも 90 年代末まで成長し続けるであろう。

この分野への供給は、製材のみによって充足されるものではなく、エンジニアードウッドや非木材の代替材料、より効率的な性能基準を伴った建築システムによって置き換えられるであろう。製材に代わる製品は世紀末までに少なくとも市場の 15% を占めるようになるに違いない（図 12）。スチール工法は既に市場の 5% を占め、過去 3 年間に異常な成長を遂げた（92 年：500 ユニット、93 年：20,000 ユニット、94 年：75,000 ユニット）。スチール生産者の目的は、2000 年までにシェア 25% を獲得することだとされている。もし事実であれば、明らかに 15% を凌ぐことになる。

スチールは、その 75% がリサイクル資材から作られるために、木材よりも環境にやさしいものとして流通している。この 3 年間にスチール価格は実際 5% ほど低下したが、一方木材価格は上昇した。しかし、より大きな問題はその間で上下する価格の不安定性である。

エンジニアードウッド製品は量的に増加しているが、それは性能の予測性が高いことと性能の安定性が良いことによる。1980年代を通じて堅実な成長を遂げたが、90年代になると木材価格の上昇によってうねりが生じている。何故エンジニアードウッドが製材よりも「上等」なのか、トラス梁 15 I-ビームを例に取り、製材の 2×10 と比較してみる。システムとして I-ビームは 1 フィート当たりに含まれる繊維の量が 80% 少なく、軽くて取り扱いが容易であり、しかも強いので、長スパンが可能である。しかも、低質の木材を使って製造でき、設計値がより正確である。ただ、現在 2×10 よりわずかに値段が高いだけである。製材の床は 1 フィート当たり \$ 1.00 (カナダドル) で張ることができ、トラス梁の床は 1 フィート当たり \$ 1.15 かかる。2×10 を使い続けているビルダーもあるが、それは製材のサイズを使い慣れているためである。第 2 に、I-ビームの供給が未だ十分ではないことも原因している。

一方で、「高い木材価格が住宅価格を押し上げる」(1994 年、トロント Globe and Mail) という文献が、さらなる状況理解の一助となるかもしれない。その文献中では、次のように記されている。「広い幅の製材はコストが高く、探し出すのも大変なので、ビルダーは床とか天井用の部材を製材から木材チップから作る製品へと転換してきている・・・その材料は強く、まさに水平の床や天井ができる。マジソン製材レポート (Madison's Lumber Reporter) を出版しているローレンス・カーターは言う。“その床はキーキー音を立てない” と・・・」。何故に、2×10 の製材から作った床がフラットを保てず、さらにキーキー音を立てるとするのだろうか。もしかすると乾燥と関係することがらではないだろうか。

北米の床梁市場を見ると、製材から需要が離れる傾向をはっきりと伺うことができる。現在の床梁市場は約 40 億 FBM であり、3~4 年以内にはエンジニアードウッド製品が 40% のシェアを占めることになると予測される。製材価格の上昇、価格の変動性、効率などすべてがこの傾向に寄与する因子となろう。

その他に、製材に換わるものとして興味ある部材は、ストレススキンパネルである。このプレハブの構造パネルには、木造(軸組)システムに比べていくつか有利な点がある。エネルギーの効率が良くなり、現場での作業時間が少なく、木造(軸組)システムが 20% の製材を使うのに対して、たったの 2% しか使わない。これらの製品の成長はめざましく、ストレススキンパネルは 15~20% / 年の割合で成長するはずである。特に熟練工の不足によって、ビルダーは工場生産の部材をもっと使おうとしているからである。

さて、ここで 1) 近年製材は以前よりは非常に高い価格で取り引きされていること、2) 丸太価格が急激に上がったこと、を認識しなければならない。ブリティッシュ・コロンビア州における伐採量の低下がさらに続くと予想すると、丸太価格はさらに上昇し、下がることはないだろう。製材に取って代わろうとする製品は多く、それらのすべてが製材以上のなにがしかの利点を有している。アメリカにおいては住宅の修理やリフォームに係る大きな市場が出現しているが、消費者は高品質と性能予測が可能な製品を要求しているのである。これらの背景から、次のような 5 つのキイとなる要点を抽出できる。それらの中では木材乾燥の重要性が浮き彫りにされ、製材が将来にわたってどのように市場で競争することができるかを決定づける要因となっている。

1. 製材が高い有用性を持つものとの消費者の認識が持続しなければならない。すなわち、製品は最終用途における要求を満足しなければならず、競合する製品がある場合には特にである。

このことは床はキーキー言わず、製材は捻れず、角柱は通直であるべきことを意味する。また、DIY (日曜大工用品店) において販売される製材品が高品質と認められるべきことを意味

する。DIYの消費者を対象に林産物販売センターが行った調査(1992)によると、製品の通直性や一般的な見た目が価格より重要と考えられている。このことは、消費者は適切に乾燥された木材を欲しがり、適切に乾燥されたものにはもっと金を使っていいと思っていることを意味している。ついでながら、1994年のDIY産業による製材消費は約75億FBMであった。

2. 消費者の品質への期待には常に答えなければならない。実現されるべき高い品質基準にたまたま合致するというのではだめである。90%合致したとしても、満足すべきでなく、許容誤差ゼロの品質適合を目指したアプローチが必要である。常に正しくなければならないのである。製材消費者のうち一人でも製材を買うことによって苦い経験をしたら、代替品の勝ちである。

したがって、あらゆる荷口を正しく乾燥しなければならない。生産には都合が良いことであっても、品質を犠牲にすることは避けなさい。「いつでも正しく行え」は新鮮なメッセージではないが、現在かつてなく重要なのである。

3. 製品を正しくプレゼントするべきである。値段に見合わないようなものは誰も買わない。売場でカビのはえた材は、当然消費者に無視される。カビは木材の強さをそこなうことはないかもしれないが、消費者はねじれや曲がり、かびや斑点のある見た目の悪い製品は買わない。

商品としての製材という認識は、今やかつてより増して重要である。これは、適切な包装、運搬時の保護、細部への注意の必要性を意味する。適切に提供される商品は、その中味を消費者に強く伝えることになる。

4. 製品は使い勝手がよくあるべきである。これは、顧客がいろいろなサイズのものを必要とし、しかもサイズごとに適切に配分したかたちで必要とするようなとき、その要求に応えることができるということである。顧客がジャストインタイムの在庫調整に移行するにつれて、このことは生産予測や配達システムの改善の面で挑戦するべき課題である。これはまた、乾燥処理時間にも関係することから、乾燥スケジュールの実践方法や日数調整にも影響する。

5. 製品は社会に受け入れられるべきである。「環境へのやさしさ」への関心が社会的に広まれば、環境面における製品のメリットに基づいて商売するということが、すなわちLCA、森林保護、環境ラベリング、エネルギー問題、リサイクル問題に関心を払うことを意味する。木材業はたまたまスチールよりはるかに環境にやさしい製品に恵まれているが、それでもスチール業界は木質の枠材市場に参入している。200,000戸の住宅を作るに十分の木材が毎年廃棄されているという事実に基づくと、リサイクルの観点からして、スチール業界のほうが木材産業よりもはるかに進んでいることになる。

木材(繊維)のコストが急激に上がれば、疑いなく平均工場収入を上げるために何かしなければならぬ。さらに、ディメンションランバー市場は過成熟の兆しを示し、しかも代替の新製品の参入が進んでいる。木材産業はより付加価値の高い製品開発に目を向けるべきである。

北米木材(製材)産業は年間130億USドルの産業である。現在はスランプ状態であるが、最近市場における新しい芽生えもある。この産業は主にポンドローサパイン、ダグラスファー、ホワイトファーに依存して成長した。単一樹種に依存した体制では、生産量の低下がディメンション・ランバー取引に影響を与える結果となるので、製材業は製品とすべき新たな材を探している。その満たすべき条件は、高い有用性、品質の持続性、利便性を持ち、良いプレゼンテーションができて、しかも社会の認容されるモノである。いずれにせよ、製品の必要条件リストを挙げれば、乾燥は最重要と位置づけられている。アメリカのパネルドア業界への市場調査の際、最初

に出た話題は「購入すべき材は適切に乾燥されていなければならない」であった。適切な乾燥とは、割れがなく、ほぼ水分勾配がなく低含水率まで乾いており、曲がりが少ないことを意味する。

製造業者は様々なタイプの製材品を求めている。例えば、無節の製材、プレカット部品、フィンガージョイント材、旋盤加工用の厚板、無地の積層材やフィンガー材などである。これらカテゴリーのほぼすべての材料において、効率的な人工乾燥の必要性が浮き彫りにされている。

将来あるべき発展の方向は確立されているが、問題はどの程度早く変化が生じるかである。製材品は今後とも住宅建築の主要な材料であり続けるし、製品改良や顧客を満足させるための挑戦は続けられるだろう。しかし、一部の製品は、高い繊維コスト、低下する繊維品質、より強力な競争相手の出現による圧力の増加によって低迷するかもしれない。例えば、大寸法の床梁用製材品や、広い幅と長さを持つもの、支柱、ある種の枠材料や被覆グレードの合板の類である。これは、使用効率と高品質を追求した新製品の開発、例えば LVL やパララム、I-ジョイスト、スクリマー (Scrimber)、フォームコアパネル、寸法安定 OSB、MDF などのようなエンジニアード製品の急速な発展による。また、商品のライフサイクルがより短くなっていることにも注意を向けるべきであろう。

ビルダーがスチールフレームシステムやコンクリートフォームシステムになじむにつれて、非木材製品が市場でのシェアを伸ばし続けるだろう。現場に直配される工場生産部品の供給も増加するだろう。住宅建築の景気は今後 3～4 年はかなり安定して持続するだろう。人口が高齢化すると、修理・リフォームへの需要が新築住宅需要を上回ることになるので、引き続きリフォーム市場や DIY 市場の動向に注意を向けるべきである。

最後に、変容の苦しみをなめている一つの産業の当事者としては、この競争の激しい世界で生き残るために何をすべきかを認識しなければならない。人工乾燥は木材産業において極めて重要な役割を果たしており、生き残り戦略のポイントは「いつでも正しく行う」である。

表1. ワシントン、カリフォルニア、オレゴン、アイダホ、
モンタナ州における工場閉鎖

製材工場		合板工場		製材工場		合板工場	
1980	12	2	1988	15	7		
1981	15	5	1989	18	6		
1982	18	11	1990	34	21		
1983	11	3	1991	35	14		
1984	17	8	1992	29	14		
1985	2	7	1993	25	9		
1986	3	5	1994	21	7		
1987	14	3	1995 (4月現在)	7	2		

表2. 木材価格が製材工場の平均収益に与える影響

備考		1992	1994	1995
		カナダドル		
丸太価格	百万ボードフットあたり	204	320	320
加工費		100	100	100
合計	損得なしの場合 (米ドル換算)	304 (225)	420 (311)	420 (311)
2×4材価格	SPF材、乱尺、年平均 1995年10月時	231	340	
枠用材価格		287	394	236 330

注：丸太の製材歩留まりを立米当たり250ボードフット、加工費を百万ボードフット当たり100ドル、丸太渡し価格を立米当たり52ドル (1992年) と80ドル (1995年) として計算。

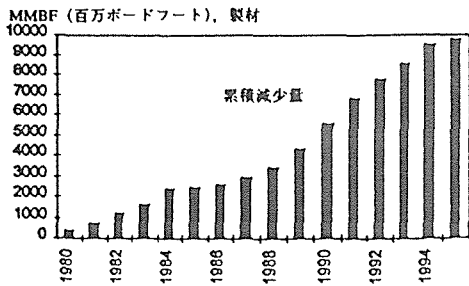


図1. ワシントン、カリフォルニア、オレゴン、及びアイダホ、モンタナにおける製材生産量の減少

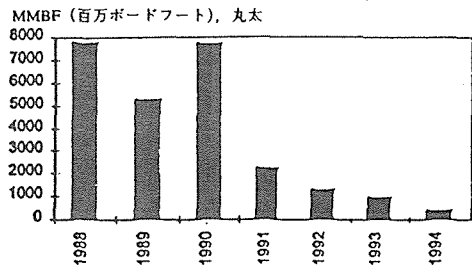


図2. ワシントン、カリフォルニア、オレゴン、及びアイダホ、モンタナ産木材の米国における取引量

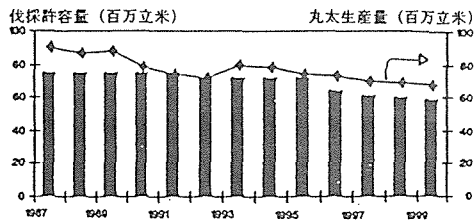


図3. ブリティッシュ・コロンビア州(カナダ)における伐採許容量と丸太生産量の径年変化

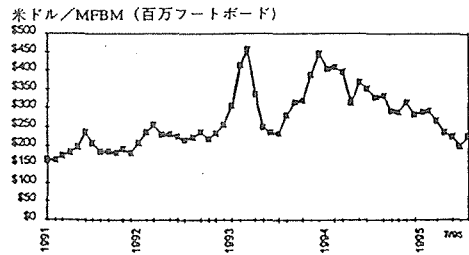


図4. 製材価格の変化

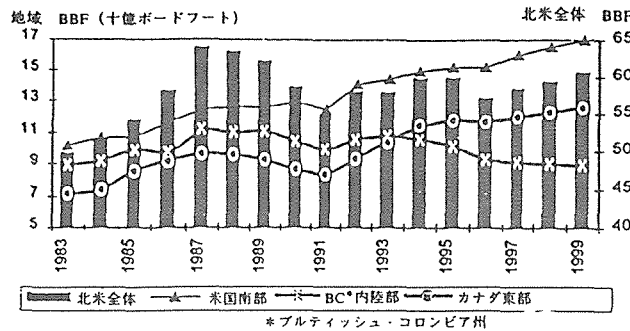


図5. 北米における製材生産量の展望

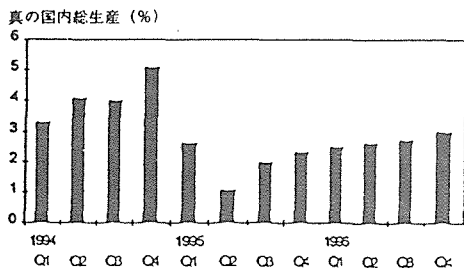


図6. 米国における四半期ごとの国内総生産の推移 (1995年の経済沈滞・不確かな1996年の展望)

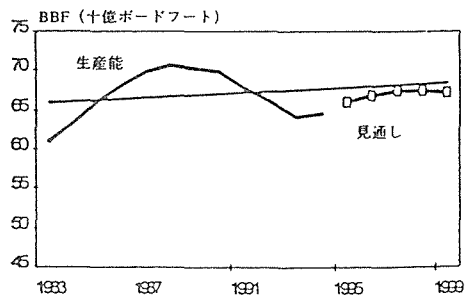


図7. 北米における生産能の推移

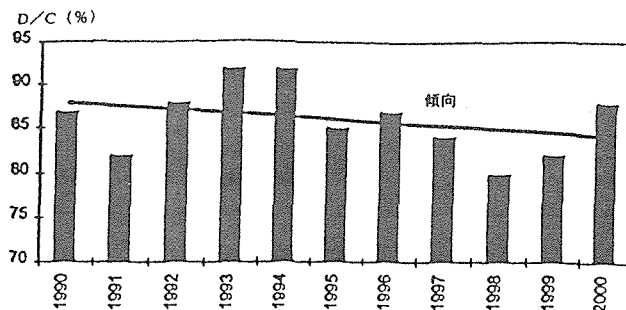


図8. D/C率(需要量/生産能)の推移(需要が弱いとD/C、価格、マージンは下がる)

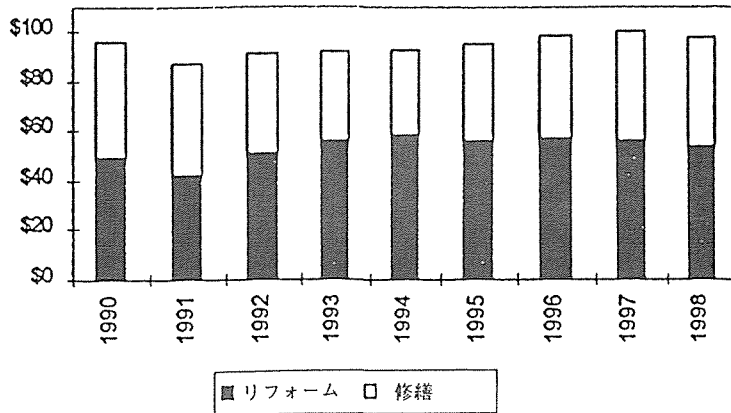


図9. 米国における住宅改装に関わる消費の推移

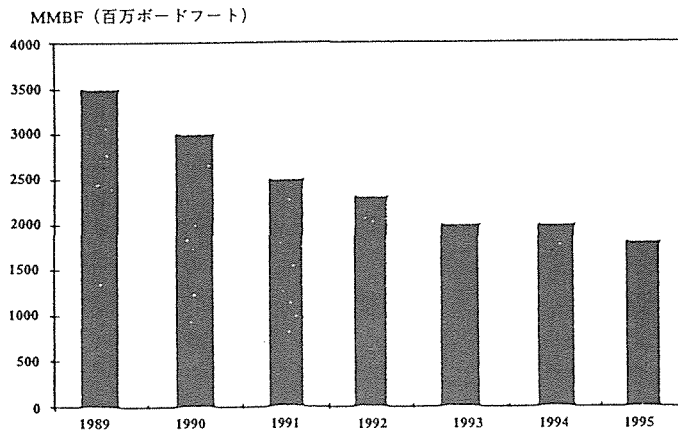


図10. 2×10と2×12材の生産の推移

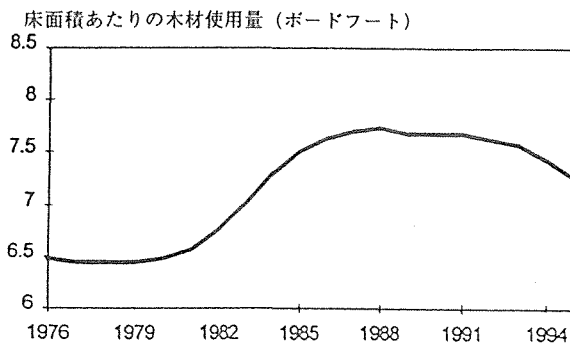


図11. 床面積あたりの木材使用量の推移

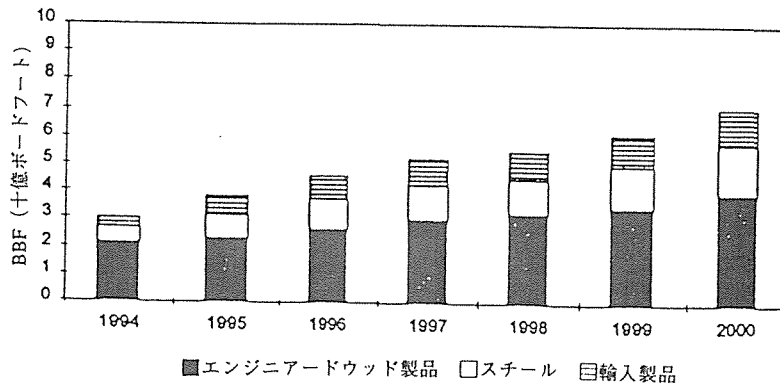


図12. 代替製品の増加

2. 乾燥プロセス最適化のための含水率選別法

MPB テクノロジー (カナダ)

ウェス・ジャムロ (Wes Jamroz) 著

木材産業にとって、生材の人工乾燥は未だ挑戦すべき領域である。これまでの科学者、技術者、装置製造者たちの多くの努力にもかかわらず、現在でも乾燥機のオペレータは「効率的な乾燥スケジュールの選択」という予測しない事態に直面するのである。最新の乾燥機(室)は、かなり進歩した温度制御器といくつかのノブ、ボタン、それに操作を調整・選択・モニターするための記録計を装備している。しかし、これらの装備すべてが木材乾燥の最終的な結果には、かなり限られた効果しか持っていない。この報告では、乾燥室に製材を入れる前に、最終的な仕上がり含水率を予測できるということを示している。

なお、ここでの解析は過去2年間にわたり行われた幅広い工場調査の結果に基づくものである。

図1は、工場で製材されたスプルースとパインの典型的な生材含水率の分布を示している。ふたつの明確な分布の相違が明らかであり、一つはスプルース/パインのもの、もう一方はスバルパイン・ファーのものである。

全乾法による含水率とオンライン水分選別機(MPB モデル 920/930)による読みとの関係も、図1から読みとることができる。スプルース/パインの含水率は7%~120%に分布し、スバルパイン・ファーについては上限が150%にまで広がっている。

この研究では、木材の含水率特性を含水率範囲(R)と平均含水率(M)によって代表させ、これら二つのパラメーターは座標システムにおける変数として使われている(図2)。選別されていないスプルース/パインの初期含水率特性は乾燥図解(図2)の右側にある分布曲線で示されている(分布7~120%、平均40%)。図2中の直線は、初期含水率分布の上限と下限に相当するふたつの点と原点(0, 0)を結び、どのように含水率の平均値が初期の含水率範囲の大きさよって変化するかを示している。これらのラインは、室内で均一な温度分布を持った理想的な乾燥室については正確であるかもしれない。しかし、現実的には、上側のラインは図中で「○市販の乾燥機」としている線に沿ったものとなろう。この乾燥原理によって、人工乾燥の過程におけるパラメーターの変化が決定される。次に具体的な方法が示されている。

木材を乾燥するとき、理想的には栈積み全体を含水率19%以下まで低下させることが望ましい。他方、8%以下まで乾燥された材はひどく過乾燥状態になり、劣化によって市場価値が実質的に低下してしまう。したがって、最適条件でSPF材を乾燥するとき、最終含水率の境界条件を範囲7~19%(平均13%)とする。すなわち、図3において、2本の平行な水平線で示された範囲が最善の目標含水率である。また、図3中には、選別しない場合に、人工乾燥過程での二つの異なった段階におけるスプルース/パインの含水率特性(分布)が示されている。第1の段階は平均含水率が15%に近い時の状態に相当する。第2の段階は平均含水率が10%に達する時の状態に相当する。両方の場合とも、最終的な仕上がりだが、初期に設定した最終含水率の要求基準に合わないことが明らかである。すなわち、一部湿ったままの材もあれば、ひどく低質化した過乾燥材も生じることになる。

このことから、含水率選別を行わない場合には、実質的に過乾燥材や未乾燥材を生じさせることなく、適切に乾燥する方法はないことが明らかである。過乾燥材の割合を減らそうとすれば、多くの材を乾燥中途のままにしておくことになる。オペレーターは、これら二つの極端な可能性の妥協策を作るほかない。乾燥室がどんなに立派に装備されようが、乾燥過程でどんな制御器を使おうが問題ではない。装置の種類の違いは、どの程度の材を過乾燥にし、どの程度を未乾燥にするかの妥協案を決めるにすぎない。このことは、図3の下側に、矢印によって示されているように、装置のオペレーター（もしくはコントローラ）が乾燥終了を平均含水率によって決定することには、限界があることを証明している。ほとんどの場合、初期の平均含水率や分布が分かっていない場合には、そのような結果は故意というよりも事故的なものとするべきである。人はただ、オペレーターが直面した事態収拾の努力に感謝するだけである。

このような状況が、生材の含水率選別を遂行することによって改善できることを、次に示す。図4で、「最適範囲」とされる2直線間の領域は、用いる乾燥条件ならびに初期特性（含水率の範囲）に依存し、目標含水率（例えば範囲7~19%、平均13%）を選択することによって決まる。

さて、図4は、生材の初期含水率が含水率選別によって、如何に最適化できるかを図解している。これから明らかなことは、平均含水率が40%ほどで、10~120%にばらついている材の乾燥を最適化するには、3つの含水率レベルに選別する必要があるということである。第1のグループは、平均含水率18%で、30%以下に選別される乾燥材である。第2は湿った材で、含水率70%以上で平均が90%のグループである。残りは、平均含水率40%ほどの中間の含水率範囲にある材である。図に示すように、それぞれに選別されたグループは、最終含水率範囲を満足させるために必要な初期含水率の設定範囲内に収めることができ、乾燥経過直線に見合った乾燥を行うことができる。

初期含水率の仕分けによって生じる主な利点は、製品仕上がりおよび生産性の向上である。スプルース/パインの人工乾燥における含水率選別の典型的な効果が、表1と表2にまとめられている。

表1. 生材選別による乾燥材生産性の改善

	製材の割合 (%)	生産性の向上 (%)
非選別	100	0
低含水率材の選別	10~25	10~25
高含水率材の選別	50~65	20~25
中間含水率材の選別	25	0
全向上割合		30~50

表2. 生材選別による仕上がり向上

	製材の割合 (%)	商品価値の向上 (%)
非選別	100	0
低含水率材の選別	7~10	1.5~3.0
高含水率材の選別	50~65	0.5~2.0
中間含水率材の選別	25	0
全向上割合		2~5

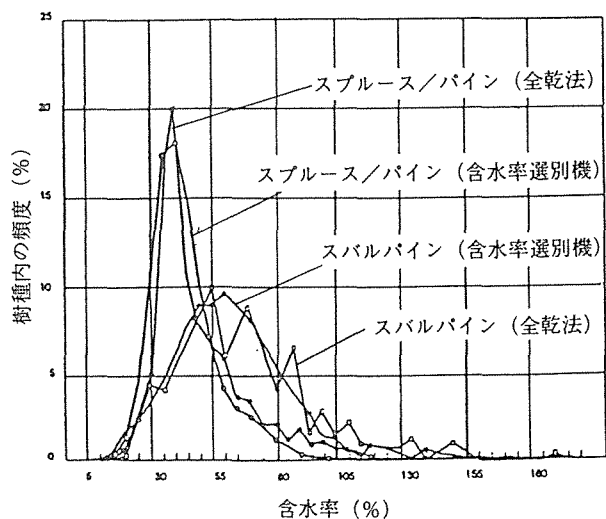


図1. 生材の含水率分布

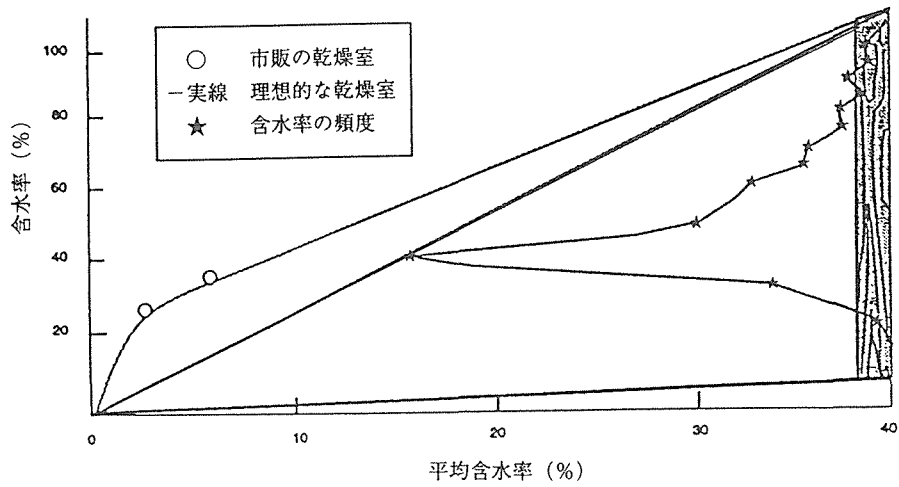


図 2. 乾燥の図解

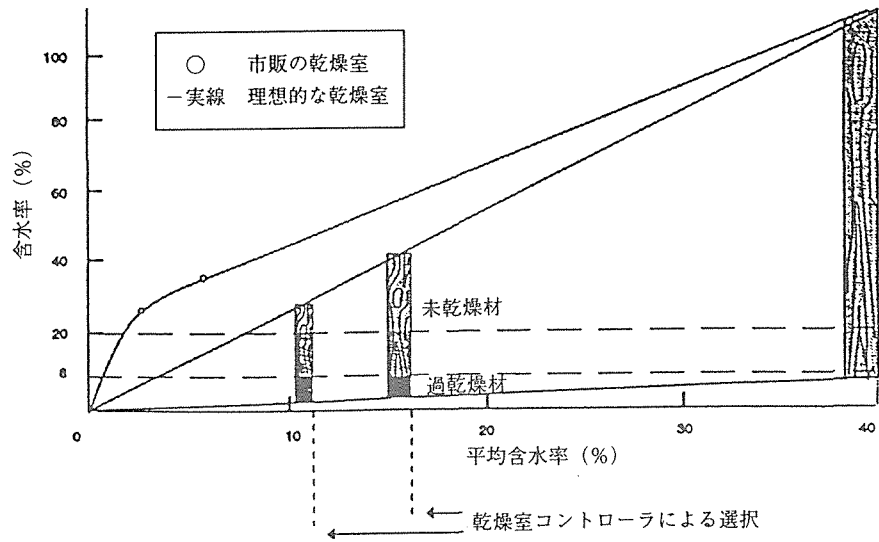


図 3. 乾燥の図解

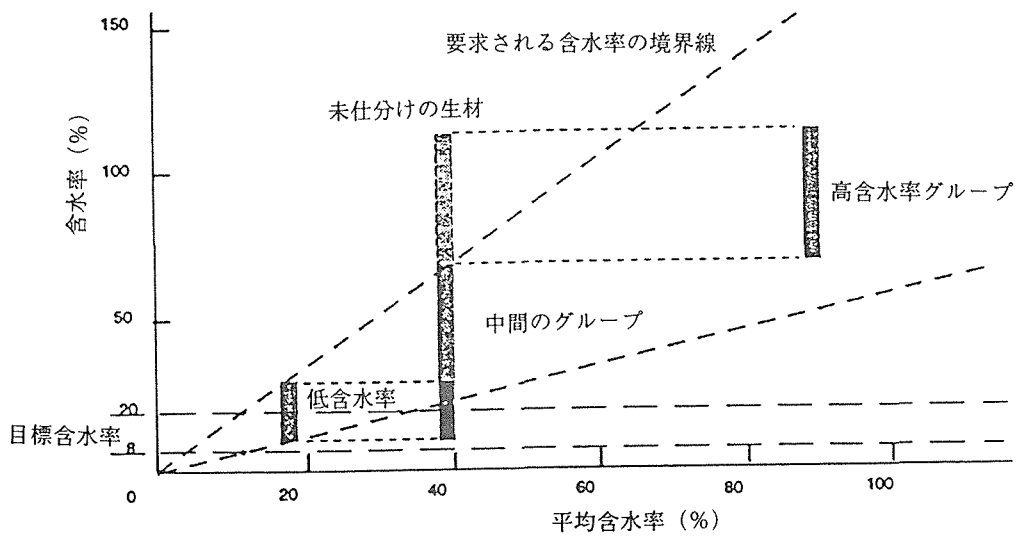


図 4. 含水率仕分けの図解

3. 高温乾燥における室内温湿度条件の影響

トランシルバニア大学（ルーマニア）

I.マリネスク（I.Marinescu）他 共著

〔緒言〕

ヨーロッパ・ビーチ（*Fagus sylvatica* L.）〔以下、ブナ材という〕はルーマニアの主要な木材資源である。200 万ヘクタール以上ある国内森林面積の 30%がブナ林でおおわれ、毎年 250 万 m³が木材として生産されている。

一般的に、針葉樹に比べて、ブナ材の乾燥は難しい。これは高密度であることと丸太の断面に材質の違う赤味の心材が存在するためである。この赤味の心材（偽辺材とも言う）は、白味部分とは異なる組織構造を持っている。それは心材部分は高密度で通常の材よりも低含水率ということである。この異質な組織構造は、乾燥中の材内応力に影響を及ぼし、割れを引き起こす原因となっている。

ブナ材の乾燥でもっとも普及しているのは蒸気加熱式乾燥である。一般的に材厚 25～40mm では乾燥温度を 60～70℃、材厚 40mm を超えるものは乾燥温度が 55～65℃で乾燥されている。近年、このような温度では乾燥時間が長くなるのが問題視されており、できるだけ乾燥時間を短縮させたいという要望がでてきている。

80℃以上の高温乾燥によるブナ材の特性を研究することはすでに終わっており、木材の乾燥過程で温度と含水率が変化することによって材性、特に機械的な強度が変化することが認められている。

乾燥温度は、木材の強度に対して非常に複雑な影響を与える。この影響は、含水率の状態と相関があるとされている。たとえば、乾燥時間、そして、前処理に蒸煮したか否かでも変化がみられる。

今回の試験の目的は、乾燥温度と蒸煮に関しては矛盾した見解も見られるため、高温乾燥におけるブナ材の物理的な特性が何に影響されるのかの方向づけをはっきりさせることである。そこで、ここでは以下の因子を取り上げ、その影響を解析した。

1. ブナ材の構造（白味材と赤味材との違い）
2. 初期蒸煮の影響（処理材と未処理材の違い）
3. 乾燥方法（天然乾燥と人工乾燥の比較）
4. 乾燥スケジュール（関係湿度の影響）

〔試験材〕

試験材は 20 本のブナ丸太を使用した。これらは材長 4～6m、直径 50～60cm の無欠点丸太であり、同じロットからでてきたものである。試験材は各丸太の中心の部分から 55 mm 厚の板材を 6 枚製材した。

図 1 に示すように、それらの試験材はいずれも白味の材と赤味の心材の両方が含まれるように、あるいは心材だけのものを作製した。全ての試験材は幅 10cm 以上で長さ 2m 以上とした。乾燥試験では、これらの丸太の半分側を、100℃で 48 時間蒸煮を行った。また、一方の試験材は蒸煮処理を行わなかった。試験材の初期含水率は心材

が 50～60%、辺材は 60～80%であった。

[乾燥スケジュール]

同じ丸太から製材した試験材は同時に乾燥し、以下のように、のべ 20 回の乾燥試験を行った。

- 1) 天然乾燥： 乾球温度 20℃、湿度 40～50%。を 2 回。
- 2) 人工乾燥： 乾球温度 80℃、90℃、100℃と関係湿度、40%、30%、50% の組み合わせた乾燥スケジュール試験を 16 回。
- 3) 人工乾燥： 過熱蒸気を用いて乾球温度は 115℃、湿度が 55%とした乾燥スケジュール試験を 2 回。

人工乾燥では図 2 の人工乾燥装置 TRL-4 を用いた。この装置には自動測定と制御システムが備えられている。代表的な試験の乾燥経過を図 3 の a.b.c.d として 4 例を示す。

[強度的特性の結果]

乾燥後の試験材は十分な時間をかけて含水率 8%に調整した。その後、主な機械的特性の試験用に小試験片を作製した。全乾密度、気乾密度、全収縮および各方向の収縮率と膨潤率、弾性係数、繊維に直角方向の引っ張り強さ、繊維に直角方向の圧縮強さ、静的、動的曲げ強さ、割裂強さ、硬度。これらを試験するために、それぞれ 10 試験体が作製され、以下の 4 種類の場合分けを行った。

1) 辺材（蒸煮あり）；2) 辺材（蒸煮なし）；3) 赤味の心材（蒸煮あり）；4) 赤味の心材（蒸煮なし）。

これらの試験材は 0.1 g の精度で秤量され、サイズは 0.01 mm の精度で測定した。強度的特性はユニバーサル試験機を使用した。試験材の形と寸法は表 1 の中に示す物理量の計算式および試験サイズに準ずるようにした。この報告では、全乾密度を図 4 と 5、図 8 と 9 は繊維方向の引っ張り強度、図 10 と 11 は繊維に直角方向の引っ張り強度、図 12 と 13 に曲げ強さを示した。

[結論]

この試験から以下のようなことが明らかになった。第一に、50 mm 厚のブナ材の高温乾燥の結果、乾燥時間は一般的な温度の乾燥よりも 4～5 倍の短縮が見込まれた。第二に、乾燥温度の上昇によって木材の密度は僅かながら増加した。そしてこのことから収縮率と膨張係数も増加した。この影響は、赤味の心材で強く見られた。しかし、40～50%の関係湿度を使用するとこの効果は減少した。第三に、高温で乾燥されたブナ材の強度的強度は、温度の増加によってわずかに影響が見られた。辺材（白太材）の強度はほとんど変化しなかったが心材では 100℃で乾燥すると強くなる傾向が見られた。第四に、関係湿度 50%で再乾燥した場合の強度は関係湿度 30%で乾燥したものよりも 8～10%大きかった。そして、初期蒸煮が影響していると思われるが、材色はレンガ色になり品質の評価は高められた。

これらのことから、高温・高関係湿度とした乾燥スケジュールによってブナ材は材厚に関係なくその生産性および機械的性能が向上する。

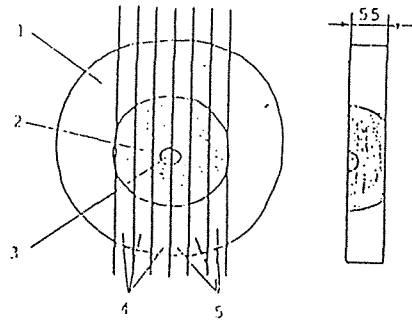
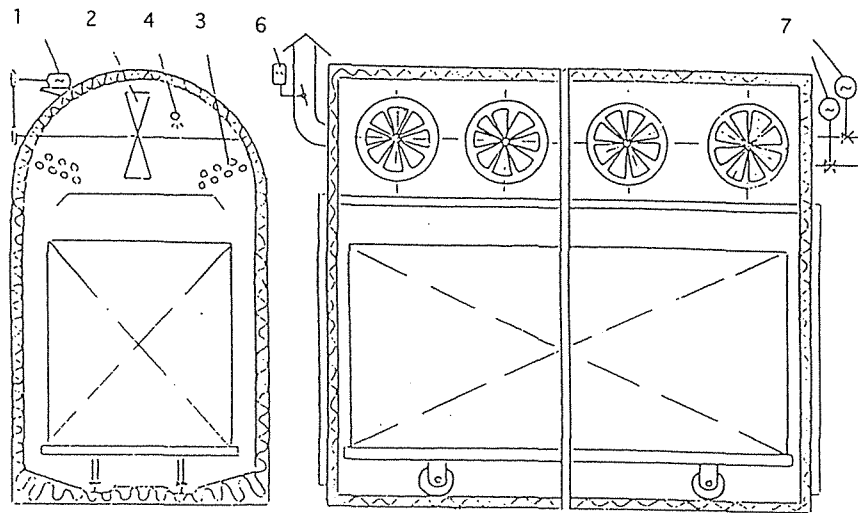


図1 木取り方法

1：白太部分；2：赤太部分；3：処理の境界線
4：蒸煮処理用の試験材；5：未処理用の試験材



正面図

側面図

性能表

装置の大きさ：

全長 4200mm
全幅 1910mm
全高 2880mm

内容量：

有効積載量 (栈木厚24mmとして)

針葉樹材 4 m³
放熱面積 80 m²
出力 6 kW
蒸気圧 2~4 bar (2.04~4.08 kg/cm²)
最高温度 140 ℃
風速 6 m/s

図2 装置の外観 (TRL-4)

1：モーター；2：ファン；3：加熱管；4：蒸煮管；5：栈積み材；6：吸排気用モーター
7：蒸気調節弁；8：含水率センサー；9：温度センサー10：平衡含水率センサー

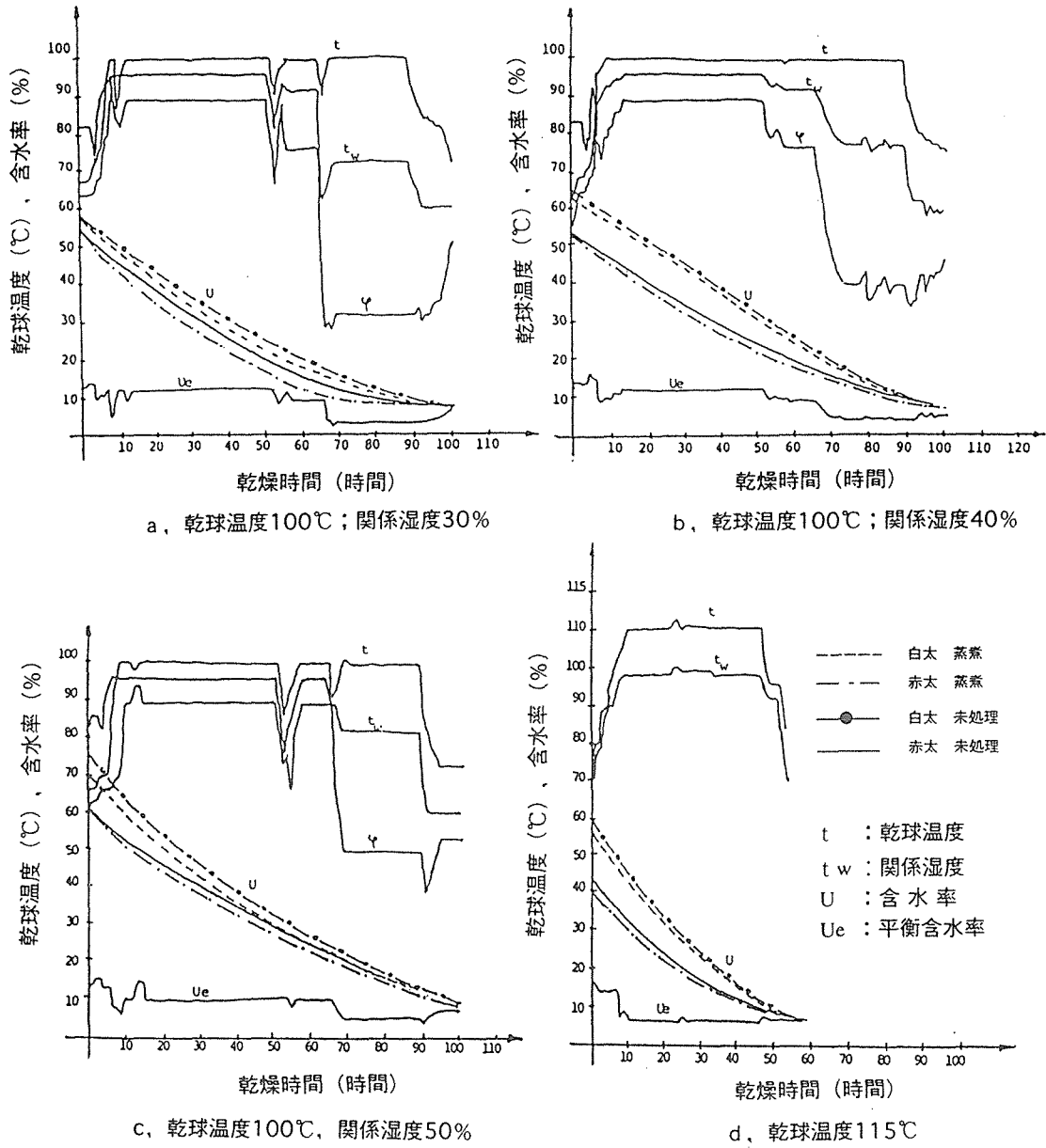


図3 高温乾燥によるブナ材の乾燥曲線

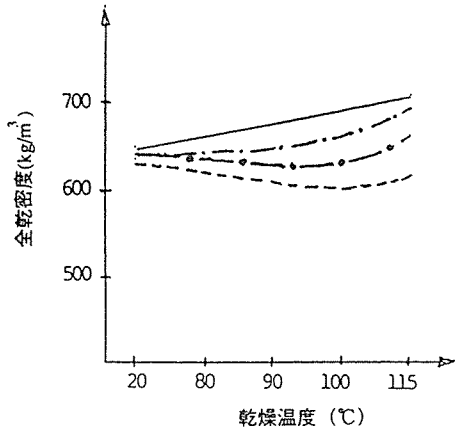


図4 乾燥温度の影響による全乾密度差

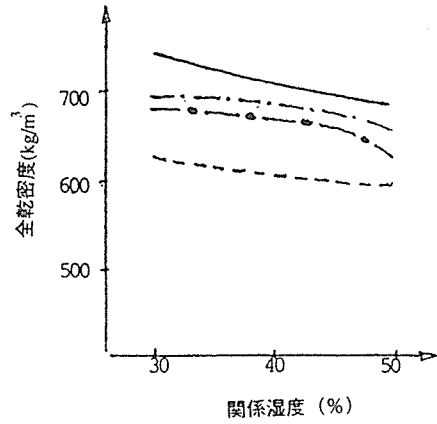


図5 関係湿度の影響による全乾密度差

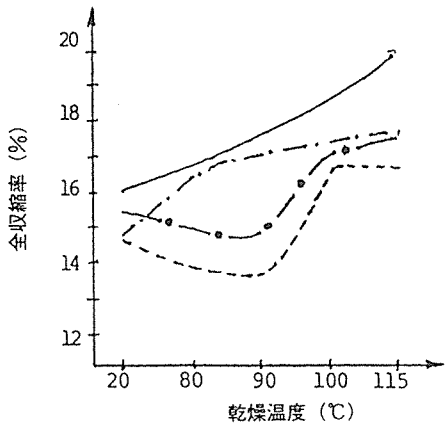


図6 乾燥温度の影響による体積収縮率の差

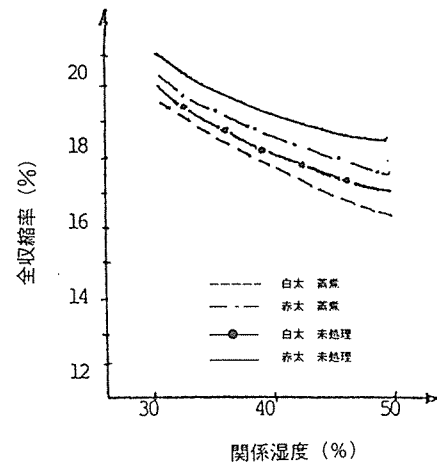


図7 関係湿度の影響による体積収縮率の差

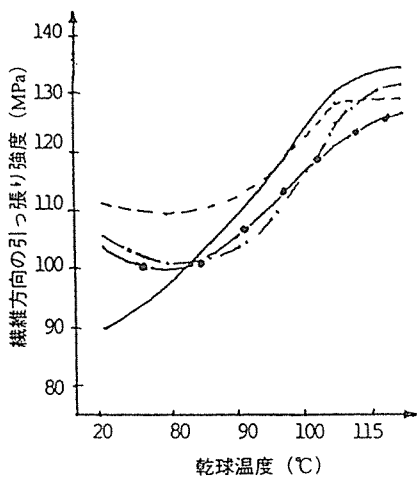


図8 乾燥温度の影響による繊維方向の引っ張り強度 (湿度 50%)

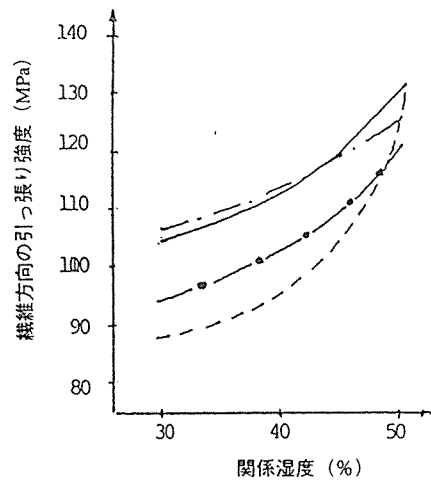


図9 関係湿度の影響による繊維方向の引っ張り強度 (乾燥温度 100°C)

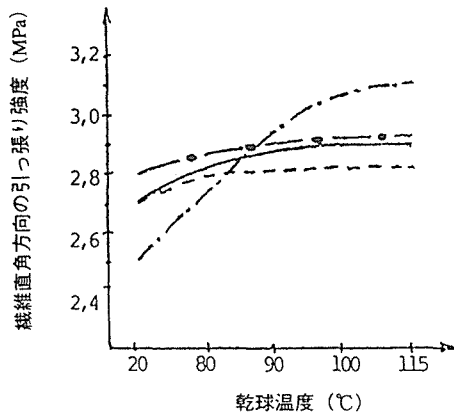


図 1 0 乾燥温度の影響による繊維直角方向の引っ張り強度 (湿度 50%)

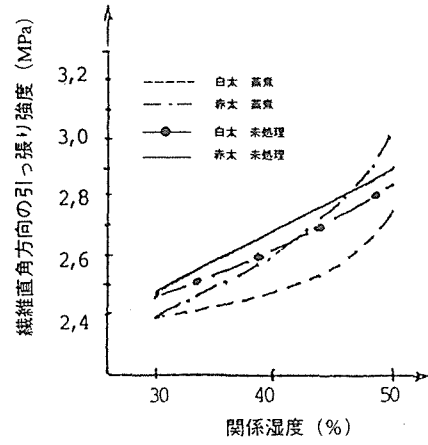


図 1 1 関係湿度の影響による繊維直角方向の引っ張り強度 (乾燥温度 100°C)

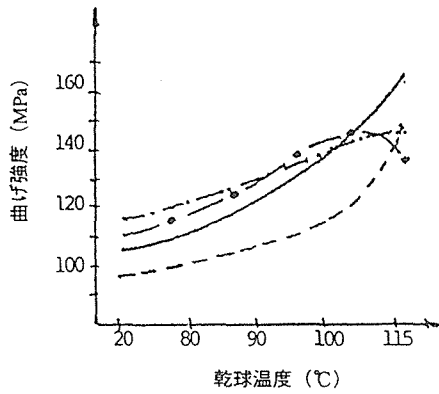


図 1 2 乾燥温度の影響による曲げ強度 (湿度 50%)

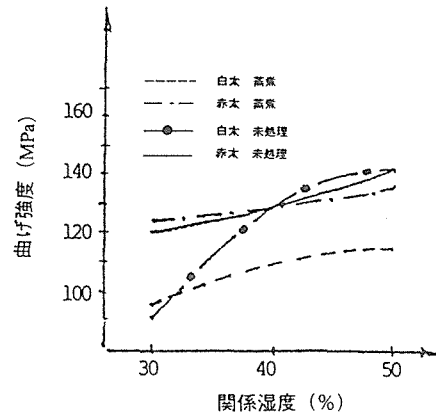


図 1 3 関係湿度の影響による曲げ強度 (乾燥温度 100°C)

4. 過熱蒸気乾燥および超高温乾燥が木材強度に及ぼす影響

ニュージーランド森林研究所

S.C.ウエストニー (S.C.wastney) 他 共著

[はじめに]

現在、ニュージーランドとオーストラリアでは圧力解放型の過熱蒸気乾燥法が、建築用ラジアータパイン材の人工乾燥法として、実用化の一步手前のところである。過熱蒸気による人工乾燥とは、乾球温度 100℃以上に設定して湿球温度を 100℃で制御することを意味している。この乾燥方法の過程では外気を全く遮断する必要があるが、圧力が過剰にならないためには蒸気を若干逃がす必要がある。

過熱蒸気の利点は、乾燥速度が早く、制御が行いやすいことである。また、エネルギーコストが安価にあげられることが挙げられる。しかし、これらの利点とは裏腹に、過熱蒸気による乾燥処理は材の暗色化、強度低下、そして装置自体の劣化を早める短所がある。

過熱蒸気中において乾燥速度が早くなることは「過熱蒸気および湿り蒸気中の一定流量条件下における水分蒸発」という研究で裏付けられ、特許申請もされている (Yoshida and Hyodo, 1970)。これによれば、約 170℃のところに過熱蒸気と湿り蒸気の蒸発速度が同じ点、すなわち「転化点温度」が存在する。また、乾燥温度がこの温度よりも下回ると、水分蒸発は湿り蒸気の方が大きく、温度がこ 170℃を超えたとき、蒸発は過熱蒸気の方が大きくなるとされている。この「転化点温度」から離れるほどこれら 2 種類の乾燥媒体による蒸発速度の差が大きくなることが明らかにされた。したがって 170℃を超える過熱蒸気で乾燥を行うと、湿り蒸気内で乾燥することよりも早い木材乾燥が期待される。

過熱蒸気による乾燥が比較的低いエネルギー消費で済む理由は、湿度制御を行うために冷たい外気を吸い込むことがないというところによる。すなわち、低密度の蒸気は通常の外気の空気よりも少ないエネルギーで乾燥装置内を循環することができるということに起因する。また、乾燥時間の短縮、熱エネルギーおよび空気循環ファンの電力を抑えることによってより乾燥コストを抑えられると考えられる。

過熱蒸気で乾燥された木材に対する最大の懸念は構造用材として最終製品に使用された場合の強度低下である。ある報告によると、木材は空気中で加熱されるよりも蒸気や水中で加熱された方が劣化が早く、特に高温で乾燥された場合には顕著であるという報告が出されている (Stamm, 1956)。さらに強度が低下することに加えて、熱分解による木材実質の減少、材色の暗褐色化、乾燥装置を腐食させる有機酸が形成されることが言われている。

この研究では、ラジアータパイン材を常圧下において、乾球温度 120 から 200℃の範囲における湿り蒸気および過熱蒸気中の乾燥速度を比較検討した。乾燥性能の評価は乾燥速度、強度性能、材色測定、そして収縮率を比較することで行った。このとき、乾燥費に係る直接費および間接費等は考慮しなかった。

この研究は二項目に分かれている。その第一は、乾燥曲線の作製と強度特性の試験である。乾燥装置には重量測定装置が内蔵されており、個々の乾燥条件について 60cm 長の試験材で試験した。強度特性は、乾燥後の試験材から得られた無欠点小試験体によって行った。第二には、実験用の乾燥装置で、一度に 150 枚の 2.4m 長の試験材を使用し乾燥試験を行った。乾

乾燥材は各乾燥スケジュール毎に強度性能を比較した。

[実験方法]

-パート A -

ここでは 6 通りの乾燥条件を 1 セットとした試験を 2 回行った。試験材のサイズは同じ材から連続的に採取された長さ 600×幅 100×厚さ 50 mm の板材である。これらは表 1 と 2 に示されるような湿り蒸気および過熱蒸気における乾燥条件で試験された。この表の中で湿球温度 100℃のスケジュールは過熱蒸気用のスケジュールとみなしてよい。

乾燥試験前に試験材は両木口をシールした。材厚はノギスで測定した。各試験の試験材は 23 枚とし、乾燥機内に積みをし、積み込みの上下には空間をとるようにした。積み込まれた試験材は重量測定装置に載荷され、重量の減少に基づく乾燥速度を測定した。

乾燥試験中はスケジュールで設定した温度に最小限の時間で上昇するようにした。装置内の風速は 9.5 m/s、最終目標含水率は 8%とした。

乾燥の仕上がり時、試験材を 4 時間半のスチーミング処理の前に 1 時間半をかけて室温に冷却した。このとき各試験材から 30mm 幅でサンプルを採取し、全乾法による含水率と全乾密度を測定した。また、試験材は最終含水率 12%に調整され、20×20mm の断面を持つ試験体を用いて繊維方向に対する静的曲げ試験と圧縮試験を行った。この試験はイギリスの規格 (BS373 : 1957) にしたがった。この方法による強度試験は比較的変動幅が小さくため試験材の性能変化がわかりやすい。各試験とも密度と容積密度および含水率を求めた。

--パート B--

表 3 のスケジュールにしたがった乾燥試験を行うため、ニュージーランド国内の 2 工場から製材された間柱材料 (L2400mm× W90mm× D35 mm) を無作為に 5 回分の試験用に分けた。各乾燥試験では、各製材工場の材が等しい数となるように、150 枚ずつ試験に用いた。乾燥試験は、表 3 の乾燥スケジュールのとおり行った。ヒートアップにかかる時間は乾燥工場における実用的な時間である。ただし、ここで行う高温乾燥のスケジュールは一般的には普及していないものである。

乾燥後の試験材は、ニュージーランドの規格 (NZS/AS 4063 : 1992) にしたがって視覚的な等級分けをした。そして、「Australian Yellow」というプログラムで操作できる「Plessey Computermatic Mark IV」というストレスグレーティングマシンを用いて機械等級区分を行った。その後区分結果から試験材を等級順にランク分けした。各乾燥試験のなかで応力等級が 4 番めにランクされた試験材は、イングレードテストによる強度試験に用いるようにした。強度特性は、ボールドウィン万能試験機を用い、オーストラリアの規格 (AS/NZS 4063) にしたがって行った。試験材は、根太材料として 2300 mm スパンで 3 点曲げ試験を行った。この広いスパンを採用したのは、荷重点間の節等の欠点の影響による強度低下が、鋭敏にできるようにするためである。このように欠点部分を含んでいる試験材をテストすることは重要な意味を持っている。それは欠点を含んだ材は無欠点の材とは異なった性能を示すからである。また欠点部分が建築構造上の欠陥を起こすことも考えられるからである。

[結果と考察]

(1) 乾燥速度

-パート A-

当初は、同じ乾燥スケジュールを用い、2回の乾燥試験で個々に乾燥速度を比較しようとした。しかし、最初の試験では、最高温度が170℃にしか到達することができなかった。このため第2回目試験ではスケジュール通りの190℃で運転するために、試験の前に乾燥機の構造や運転方法に改良を加えた。それは、乾燥機内の空間を減らしたこと、およびヒートアップの間は、装置内の風速を3 m/sに抑えたことである。

ヒートアップの時間を含めた乾燥時間と初期含水率および最終スチーミング前の含水率を表1と2に示す。図1と2に乾燥時間に対する重量減少の関係、すなわち乾燥速度を示す。

装置の改良の関係で、乾燥速度に及ぼす要因が変化したことから、同じ材料から作製された試験材の2セットによる試験をとおして、乾燥速度に影響する湿り蒸気と過熱蒸気という2条件の試験を直接比較することはできない。しかし、2回にわたる個々の試験では、次ぎような同様の傾向を示した。

それは以下のとおりの結果であった。120℃の試験では湿り蒸気内の乾燥は過熱蒸気中よりもかなり早かった。150℃の試験ではわずかに湿り蒸気の方が早かった。170℃では乾燥速度は双方とも同じ傾向を示した。190℃では、過熱蒸気による乾燥の方が僅かに早かった。これらはYoshidaとHyodoによって確認された論文の内容と合致した。

-パート B-

表3に各試験の乾燥時間の結果を示す。各試験には35mm厚の150枚の板(L2400×W90mm)を使用した。

(2) 強度的性能

-パート A-

乾燥スケジュールを変えて乾燥した各乾燥試験の23試験体の破壊係数(以下MOR)、弾性係数(以下MOE)、全仕事量(以下TW)、最大曲げ強さ(以下MCS)を解析した。これらの結果を表4と5に示す。これらは2つの対照となる乾燥試験を別々に解析したものである。解析方法は乾燥媒体の違いと温度条件を3段階にしたの2×3型計画の直交表を基にした分散分析を採用した。分散分析はSASリリースVer.6.10のソフトウェアを用い、各試験材の機械特性を一般的な線形モデルによって解析した。

最初の試験シリーズにおける6試験体の平均気乾密度は、432~459 kg/m³、二番目の試験シリーズでは455~469 kg/m³であった。このとき含水率は12%に調整した。MOEおよびTWの平均値は湿り蒸気よりも過熱蒸気の乾燥の方が変動が少なかった。しかしこれは統計的には有意な差とは言えなかった。第二回目の試験シリーズの分析では唯一MORとMCSだけが有意な差をみせた。すなわち、MORは150℃で、MCSは120℃と150℃では湿り蒸気よりも過熱蒸気で乾燥した方が低い値を示した。ただし、試験材のバラツキ(密度等)の範囲を考慮すれば、乾燥スケジュールによるMORの平均値に有意な差は認められなかった。したがって、乾燥温度の差からは機械的な特性には一定の変化傾向がみられなかった。

Bierの報告(1983)では、国内33箇所の生産現場から産出されたニュージーランド産のラジアータパインの無欠点小試験片のMOR平均値は、含水率12%において60.0~122.9のMPaであり、これらの気乾密度の範囲は380~591 kg/m³であった。

また、McNaughtはラジアータパインについて以下のような報告(1992)をしている。ラジアータパインを145℃と200℃で乾燥させたときMORとMOEの平均値を比較した場合には温度が高い方が低くなった。このときMORで6%とMOEで3%の減少で認められたのだが、統計学的には有意とは言えなかった。効果が現れなかったのは乾燥スケジュールの終

わり近くまで設定した湿球温度に達しない材温に起因したもの、としている。

Madsen は強度試験の評価をするにあたって注意を促している（1992）。それは、無欠点小試験体による強度性能は実用的には信頼をうる値を示さないということである。長い板材の機械的な性能では、節のような自然の欠点を含んでいる材と無欠点材では、一般的に異なった破壊形態を持っているからである。

-パート B-

ニュージーランドとオーストラリアの規準では、機械応力等級による MOR は強度が一番弱いところで評価される。これは天然の木理や密度などが強度に対して強調できるように設計したからである。したがって、機械ストレス等級試験によって材料の強度性能を表示することが可能である。

この試験では乾燥材は、機械等級区分により、3種類の等級に分けた。さらに、異なる乾燥スケジュールで乾燥した材の強度特性を、各応力等級の範囲で比較した。ストレス等級のカテゴリーは、F8 と F11、F5、そして、F4 と不合格品とした。大部分の試験材は、F5 等級として分類された。どの乾燥スケジュールのものでもおよそ 20 枚がこの等級に当てはまった。ここでは根太材料としての平均 MOR と MOE および最大荷重（以下 WML）の仕事を、乾燥スケジュールの違いによって分析した。

他の等級に分類された板の数は少なかったので F5 等級からの強度特性だけ表 6 に示した。F5 は構造材として利用する場合の必要最小限の等級である。F5 は一般的には高い等級（F11 と F8）より多くの欠点を持っている。イングレードテストによって乾燥スケジュールの影響による強度的な問題があるのであれば、それは、高い等級より F5 等級の中で評価できると考えられる。

強度試験の結果、平均 MOE、MOR および WML の各値は、乾燥温度、過熱蒸気および湿り蒸気による影響が明らかな差となつては見られなかった。しかしながら、乾球温度 200℃で湿球温度 100℃で乾燥した試験材には明らかに統計的に有意な強度低下がみられた。ただし、B 工場という特定の試験材の分析では、乾球温度 200℃/湿球温度 100℃で乾燥した場合の平均 MOR は他のスケジュールで乾燥した材と比較して統計的に低いとは認められなかった

だ(3) 収縮率

表 7 は生材時から全乾までの平均収縮率である。これらはそれぞれの温度で湿り蒸気および過熱蒸気で乾燥されたものを比較している。この中で統計的に有意な差が見られたのは、第 2 回目の 120℃の試験の時である。このときは湿り蒸気中で乾燥された材よりも過熱蒸気で乾燥された材のほうが収縮率が大きかった。

(4) 材色変化

同じ温度で湿り蒸気と過熱蒸気中で乾かした試験材の表面材色を視覚的に調べた。過熱蒸気中で乾燥させた場合は表面色が暗くなった。

これら材表面だけの色変化は、乾球温度 120℃、湿球温度 70℃、同じく乾球温度 105℃、湿球温度 100℃、乾球温度 120℃、湿球温度 100℃および乾球温度 160℃、湿球温度 100℃のそれぞれの乾燥スケジュールで乾燥させて分析された未発表の NZ FRI Report の報告と一致している。ただし、乾球温度 120℃、湿球温度 70℃の乾燥スケジュールではわずかな表面だけの変色で乾燥が可能であった。過熱蒸気による乾燥スケジュールでは表面が暗く変色した乾燥材となってしまう。特に 3種類の乾燥スケジュールのうち乾球温度 160℃、湿球温度 100℃の乾燥スケジュールでは確実に変色する。

【結論】

温度 120℃の場合には、過熱蒸気の中で乾燥されるものよりも湿り蒸気の中で乾燥する方が乾燥が速かった。乾燥温度が上昇すると、過熱蒸気と湿り蒸気における乾燥速度は 170℃までは似たような傾向を示した。170℃になるまでは乾燥温度を上昇させても過熱蒸気と湿り蒸気における乾燥速度はほとんど同じであった。しかし、乾球温度が 170℃を越えて乾燥させると、わずかながら過熱蒸気による乾燥の方が速かった。

同一の乾燥スケジュール試験で小試験体を使った強度試験では、2 回行った同乾燥試験のうち的一方において統計的に有意な差が認められた。それは、MOR（乾球温度 150℃）および MCS（乾球温度 120℃ と 150℃）であり、これらは過熱蒸気の方が湿り蒸気で乾燥されたものよりも低くなった。しかし、他のスケジュールの間では差が現れなかった。

ただし、この MOR の減少変化は、材料の材質のバラツキ範囲を考慮に入れても小さいものであった。今回の結果では、材料の乾燥温度による機械的な特性の変化には一貫した傾向がみられなかった。

長さ 2400×幅 90×厚さ 35 mm の試験材のイングレードテストでは、乾燥温度や媒体による機械的性能の変化に一貫した傾向はみられなかった。唯一、120℃の過熱蒸気で乾燥したときに湿り蒸気で乾燥させたときよりも大きな収縮がみられた。また、過熱蒸気中の乾燥材は、湿り蒸気を用いて同じ温度で乾燥させる場合よりも表面の変色が大きかった。

表1 第一回目の乾燥試験における含水率、温度上昇時間および乾燥時間
(試験体の数：23枚，試験体のサイズ：L600×W100×D50)

乾燥スケジュール (乾球温度 / 湿球温度) (°C)	含水率 乾燥前 (%)	含水率 乾燥後 (%)	設定初期温度 までの上昇時間 (時間)	乾燥時間 (時間)
120/70 (湿り蒸気)	135.3	4.5	0.3	17.3
150/71 (湿り蒸気)	143.2	2.4	0.6	10.0
170/72 (湿り蒸気)	138.3	5.0	1.0	7.5
120/100 (過熱蒸気)	135.6	5.5	0.3	22.2
150/100 (過熱蒸気)	139.4	4.0	0.6	9.4
170/100 (過熱蒸気)	142.6	7.3	1.0	7.2

表2 第二回目の乾燥試験における含水率、温度上昇時間および乾燥時間
(試験体の数：23枚，試験体のサイズ：L600×W100×D50)

乾燥スケジュール (乾球温度 / 湿球温度) (°C)	含水率 乾燥前 (%)	含水率 乾燥後 (%)	設定初期温度 までの上昇時間 (時間)	乾燥時間 (時間)
120/70 (湿り蒸気)	146.6	6.4	0.3	18.2
150/71 (湿り蒸気)	148.1	6.1	0.4	10.8
170/72 (湿り蒸気)	150.2	5.4	0.7	7.5
120/100 (過熱蒸気)	143.2	6.6	0.3	25.8
150/100 (過熱蒸気)	147.1	7.7	0.4	11.0
190/100 (過熱蒸気)	152.3	7.3	0.7	6.9

表3 各スケジュールにおける風速、温度上昇時間および乾燥時間
(試験材のサイズ：L2400×W90×D35)

乾燥スケジュール (乾球温度 / 湿球温度) (°C)	装置内の風速 (m/s)	設定初期温度 までの上昇時間 (時間)	乾燥時間 (時間)
140/ 80 (湿り蒸気)	6	1	10
140/100 (過熱蒸気)	7	1	11.25
160/100 (過熱蒸気)	8	0.75	8.25
180/100 (過熱蒸気)	8	0.75	5.25
200/100 (過熱蒸気)	10	0.5	3.25

表4 第一回目の乾燥試験における無欠点小試験体の機械的性能の平均値

乾燥スケジュール (乾球温度 / 湿球温度) (°C)	破壊係数 MOR (MPa)	弾性係数 MOE (MPa)	総仕事量 TW (kJ/m ²)	最大荷重 MCS (MPa)
120/70 (湿り蒸気)	83.3	9535	129.2	39.1
150/71 (湿り蒸気)	86.4	9855	115.6	38.4
170/72 (湿り蒸気)	88.4	9656	138.6	38.7
120/100 (過熱蒸気)	87.3	9542	135.9	39.2
150/100 (過熱蒸気)	85.0	9466	138.6	41.2
170/100 (過熱蒸気)	84.1	9691	144.5	38.0

表5 第二回目の乾燥試験における無欠点小試験体の機械的性能の平均値

乾燥スケジュール (乾球温度 / 湿球温度) (°C)	破壊係数 MOR (MPa)	弾性係数 MOE (MPa)	総仕事量 TW (kJ/m ²)	最大荷重 MCS (MPa)
120/70 (湿り蒸気)	91.6	9882.0	146.6	43.9
150/71 (湿り蒸気)	89.4	10235.0	148.7	42.7
170/72 (湿り蒸気)	90.8	9990.0	152.0	42.2
120/100 (過熱蒸気)	86.9	10063.0	139.3	39.0
150/100 (過熱蒸気)	85.5	9646.0	146.8	40.8
190/100 (過熱蒸気)	85.9	9578.0	136.6	40.8

表6 F5のグレード内における機械的性能の平均値
(試験材のサイズ：L2400×W90×D35)

乾燥スケジュール (乾球温度 / 湿球温度) (°C)	弾性係数 MOE (MPa)	破壊係数 MOR (MPa)	総仕事量 WML (kJ/m ²)	試験体数
140/80 (湿り蒸気)	10.1	38.7	162.5	20
140/100 (過熱蒸気)	9.8	32.0	120.8	13
160/100 (過熱蒸気)	9.7	33.7	141.9	20
180/100 (過熱蒸気)	10.0	39.3	175.4	22
140/80 (湿り蒸気)	8.9	60.5	114.0	19
140/100 (過熱蒸気)	10.0	31.5	115.4	23
160/100 (過熱蒸気)	10.1	32.4	93.1	23
180/100 (過熱蒸気)	10.1	34.5	146.9	20
200/100 (過熱蒸気)	9.4	24.4	72.1	24

表7 厚さ方向の平均全乾収縮率

乾燥スケジュール (乾球温度 / 湿球温度) (°C)	厚さ方向の平均収縮率	
	第一回目 (%)	第二回目 (%)
120/70 (湿り蒸気)	11.12	10.86
150/71 (湿り蒸気)	10.51	11.04
170/72 (湿り蒸気)	11.58	-
190/73 (湿り蒸気)	-	10.89
120/100 (過熱蒸気)	11.52	11.18
150/100 (過熱蒸気)	10.72	11.05
170/100 (過熱蒸気)	10.99	-
190/100 (過熱蒸気)	-	10.94

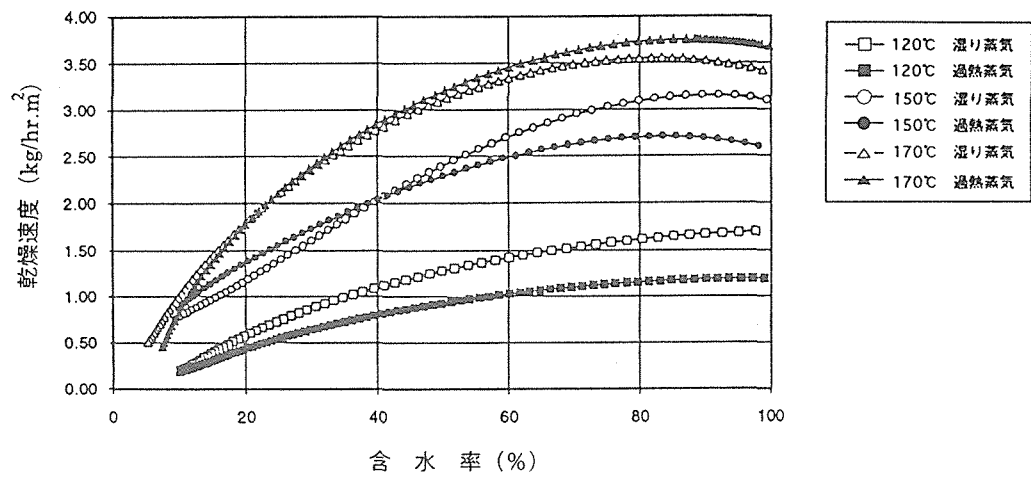


図1 乾燥温度120~170°Cにおける乾燥曲線 (第一回目の乾燥試験)

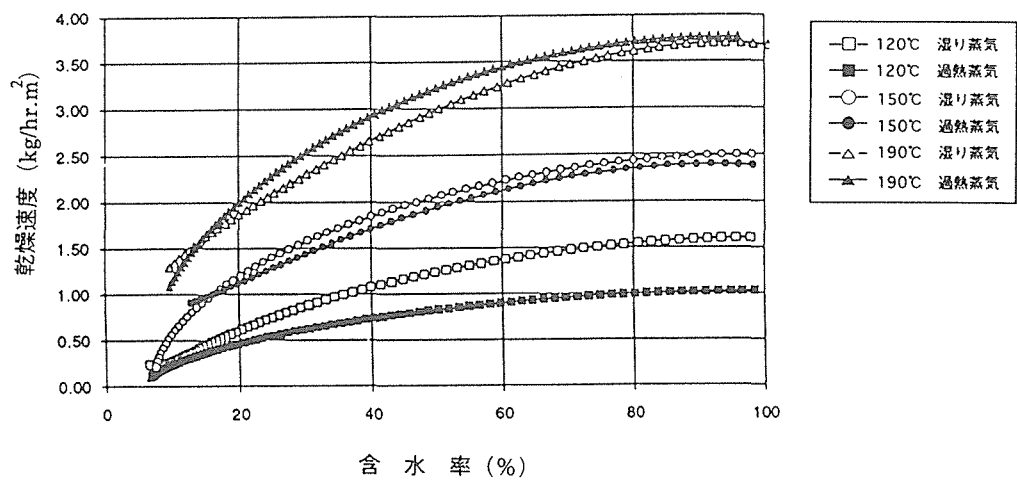


図2 乾燥温度120~190°Cにおける乾燥曲線 (第二回目の乾燥試験)

5. 針葉樹材の高周波減圧乾燥法の針葉樹材市場における可能性

ブリティッシュ・コロンビア大学 (カナダ)

ロバート・ツヴィック (Robert L.Zwick)

スタブロス・アブラミディス (Stavros Avramidis) 共著

本報告では高周波加熱源圧乾燥法 (以下 RF/V 乾燥法と呼ぶ) に必要なエネルギーと乾燥コストを、従来の蒸気式乾燥法と比較しながら紹介する。なお RF/V 乾燥法のコストは、実大装置を想定して試算している。

[経済性の検討のための RF/V 乾燥機のサイズの決定]

まず内部割れが起きない程度の入力パワーデンシティ (最大電界傾斜と呼ばれることもある) を設定する。これによって乾燥時間が決まり、乾燥機の容量を考慮して発振機の大きさを決める。RF/V 乾燥機の設備費の大部分は発振機が占めるので適切な出力を選ぶことが重要である。大きなパワーをかけると速く乾燥するが内部割れが発生するのでパワーデンシティには限界がある。この値は樹種によって異なる。なお電界傾斜に影響を与える因子は、発振電圧 (材料の誘電率に影響される)、発振周波数、電極の形状などである。

COFI での設計は収容材積 55m^3 、缶内容積 142m^3 、発振機容量 350kW で、パワーデンシティ (木材 1m^3 あたりの発振機容量: kW/m^3) は約 $6.4\text{kW}/\text{m}^3$ である。この収容材積には多くの利点があるので、この大きさをベースに経済分析を行った。というのは広葉樹用 RF/V 乾燥機は通常 2.5m^3 以下であるから、広葉樹の経済効率と比べる場合は収容材積に注意しなくてはならない。

装置の効率 (処理能力) はパワーデンシティで定まるが、これは乾燥する樹種、寸法の組み合わせ、取り除く水分量によって決定される。最も重要なことは内部割れを発生させないようなパワーデンシティを設定することである。例えばウエスタンレッドシーダーのような樹種はヘム・ファーの仲間と比べると4分の1程度のパワーデンシティにしか耐えられない。従って同じ容量の乾燥機を使うなら、ヘム・ファー用の乾燥機にはウエスタンレッドシーダー用に比べて4倍の出力の発振機を付けることができる。表1には、収容材積 55m^3 、パワーデンシティ3種、発振機出力も3種について、それぞれの場合の装置の効率について示している。表1の処理能力は、収容材積 55m^3 の装置を90%の使用率 (年間330日) で運転することをベースにしている。 $50\times 200\text{mm}$ (2×4) のウエスタンレッドシーダー最高級 (Merch) 材は他のグレード材よりも初期含水率が低かったので高い処理能力を示した。

[装置導入費試算のための乾燥機の構成]

図1に示すように、RF/V 乾燥機はいくつかの要素から構成されている。装置導入費の試算はそれぞれの構成要素の見積りを取って合計して行った。

樹種・寸法などを考慮して3つの RF/V 乾燥システムの経済性の検討を行った。これらのシステムは3種類のパワーデンシティ ($1, 2.5, 4\text{kW}/\text{m}^3$) と3つの規模の増幅器 ($50, 100, 200\text{kW}$) を備えている。装置導入費の試算は 55m^3 の装置だけでなく他の収容材

積の装置についても行った。この際、1) パワーデンシティが大きく収容材積が同じ場合、より大きな高周波増幅器と電送系をもつが、電極のサイズは変わらない、2) 収容材積の異なる同じ容量の増幅器をもつシステムの場合は交流配線は同じサイズだが、装置の基礎や減圧システムの規模は異なることを考慮した。

実際の価格はエンドユーザーと販売者との駆け引きによって決まるため、ここでの装置導入費の試算結果は RF/V 乾燥機の市販価格ではない。また、全ての開発コストは償却されたものとしている。

[RF/V 乾燥法の経済性の検討]

RF/V 乾燥機の乾燥コストは市販の針葉樹用乾燥機を想定して計算され、同時に COFI の実験報告に示された乾燥コストを参考にしている。従来の蒸気式乾燥法の乾燥コストは主に Carroll Hatch(1990)の研究にならって計算されている。この研究はヨーロッパの製品基準を満たすようにカナダの針葉樹板材について乾燥経費の製品コスト全体に占める割合を明確にするために行われ、乾燥の周辺事情と乾燥技術の全ての要素を考慮した真の乾燥コストを推測しているものとして高く評価されている。

1) 設備導入費

新しい蒸気式乾燥機を導入するための費用は 180 万ドルと考え、同様に RF/V 乾燥機の初期導入費用をほぼ 180 万ドルとする。設備導入費を固定にすると試算の過程で税金や減価償却費のように始めから決まっている項目について「単位乾燥量あたりの設備導入費」という考え方よりも誤差を小さくすることができる。180 万ドルの蒸気式乾燥機に相当する RF/V 乾燥機を作るためには、設置時の構成として 2 機の RF/V 乾燥機を導入することになる。この際、安全目（高め）の試算を行うために、2 機を一度に導入することによる割引を考えずに、2 つの RF/V 乾燥機の導入費は単純に 1 機だけ導入する場合の 2 倍とした。また RF/V 乾燥機の初期導入費の試算は、一つ一つの構成要素の価格を明確にしてこれらを足しあわせて算出した。高周波発振機の値段は 4 つのメーカーから見積もりを取り、そのうちの 2 番目に安い価格を採用した。これらはスイス、合衆国およびカナダの高周波発振機メーカーが入札で提示したものである。表 2 に、サイズ及び発振機容量別の RF/V 乾燥機初期導入費を要約している。

Carroll Hatch の報告は、2 つの棟からなる蒸気式乾燥機の設置に 180 万ドルかかると仮定している。なぜなら、これらの乾燥機は大断面材を乾燥できるようにデザインされており、蒸煮用の小さいボイラーが見積もられていたからである。蒸気式乾燥法では積積みが必要なため、収容材積は材の厚さによって変わるから、蒸気式のコストを試算する場合はこれを考慮する必要がある。そこで表 3 には収容材積-板厚の関係を示す。

2) エネルギー消費量とエネルギーコスト

水 1 kg を取り出すのに必要なエネルギーは、水分を取り除くために必要な水分に固有のエネルギーであり、Esw と呼ぶことにする。（訳者注：この「固有」という言葉は水以外の物質であれば同じ 1 kg を取り出すのに必要なエネルギーは異なるということの意味する。）これは与えられた量の水分を蒸発させるのに必要な熱エネルギーであり、木材の含水率によって変化する。（訳者注：水分だけを蒸発させるのであればこの「単位量(1kg)の水分を蒸発させるのに必要なエネルギー」は含水率によって変わらない。しかし実際には木材中の水分を取り出そうとすると、木材実質も同時に熱するために与えた熱全

てが水分を加熱するために使われるわけではない。したがって、木材内水分と木材実質との比率（すなわち含水率）によって、木材に含まれる水分を取り出すのに必要なエネルギーが異なるということ。後述されているように「木材から水1kgを取り出すエネルギー」には水分移動のためのエネルギーも含まれており、含水率が下がると水分移動はより困難になるのでこれも影響する。）

繊維飽和点（つまり含水率約30%）よりも高い含水率では E_{sw} はほぼ 0.7kWh/kg である。この値は蒸発熱と水分拡散のためのエネルギーを含んでいる。繊維飽和点以下では E_{sw} は含水率が下がるにつれて劇的に増大する。含水率15%の木材にとって結合水の E_{sw} は 0.535kWh/kg 、自由水のそれは 0.7kWh/kg であり、全部で 1.24kWh/kg である。これらのことから生材から15%まで乾燥するのに必要なエネルギーの平均値は理論的にはほぼ 0.9kWh/kg となるだろう。

COFI プロジェクトにおけるエネルギー消費の調査結果は表4に示している。この表から RF/V 乾燥機のエネルギー効率はとても良く、取り扱われた3つの中で最も良いエネルギー効率だったことがわかる。Mackay と Nielson は研究所で使うものとしては大きいサイズの乾燥機（ 24m^3 つまり 10MBFM）を使ってエネルギー消費量の調査を行った。その中の除湿乾燥機についての結果は対流式の乾燥機の割りにはとても見事だったし、いくつかの実験では脱水に要したエネルギーが理論値に近いものであった。この結果は、驚きに値する。なお、COFI の RF/V 乾燥機プロジェクトで行われた 75mm 厚板の蒸気式乾燥機試験では、 2.81kWh/kg であった。

蒸気式乾燥に必要な電力量は Carroll Hatch の報告に示されており、BC Hydro による報告とはほぼ同様の結果である。蒸気式乾燥法の電力費が驚くほど高いが、これら互いに無関係な二つの研究の結果が同じであるから間違いではないと思われる。Carroll Hatch には天然ガス消費量の見積もりも載っている。必要な電力の料金は一月当たり 6.37 ドル/kW/月で、電気代は 0.0324 ドル/kWh である。天然ガス代は 3.00 ドル/GJ である。

RF/V 乾燥機のエネルギー消費量は初期含水率に大きく影響されるので、試算ではエネルギーコストを変動コストとして扱った。RF/V 乾燥機の必要電力量はシステム全体への全入力電力量であり、[高周波発振機の出力÷変換効率+減圧システムとコントロールシステムに必要な電力]として求めた。

3) 木材の品質とその低下

RF/V 乾燥法の経済性の検討で用いられる「品質低下（欠点の発生）」の項目については樹種、寸法、グレードなど本報告第2報（4）に要約してある。RF/V 乾燥実験ではつきりしなかった項目については、同じ様な樹種・寸法・グレードのものから推定した。欠点の発生による商品価値の低下は生材の価値をベースとした百分率で表している。

大断面材を通常の蒸気式乾燥機で乾燥した場合の品質低下に関する情報はほとんどない。Carroll Hatch の報告では工場で 60mm より厚い板材を乾燥した際、最高級材(Merch)では価値が5%下がり、無欠点材では7%下がると見積もっている。しかしここでは、価値の基準が生材ではなく、乾燥材が生材より価値が高いとは考えていない。つまり、Oliveira らは、101mm 角のヘム・ファー（最高級材）を試験用の蒸気式乾燥機で乾燥するとだいたい5%の価値低下があると述べている。この値は研究室で行った正しいスケジュールによる理想的な条件で行われた試験結果である。Interfor Fraser Mills 社からのプロジェクト参加者が 101mm 角のヘム・ファーを目標平均含水率 20%以上として除湿

乾燥する場合、欠点が極端に少ないことを指摘したが、この場合は全木材のうち 10～15%もの材がまだ乾燥を終了していなかった。Garrahan と Cane は 38mm 厚以上の最高級板材（イースタンブルース、パイン、ファー）について乾燥材の売値からの価格低下について報告しており、その値は蒸気式乾燥法で 4.3～8.4%、除湿乾燥法で 7.8%である。蒸気式における価値低下は生材を基準にして表示すると、全ての樹種、全ての寸法についておおむね最高級(Merch)材で 5%、クリア材で 7%とすることにした。

収縮率の違いはこの経済性の検討では考慮されていない。なぜなら COFI プロジェクトでこれらの結果は測定手法が統一されておらず曖昧だからである。どの乾燥法でも同じ収縮率だと仮定すると、これもまた蒸気式乾燥法に有利な仮定となる。

RF/V 乾燥では変色は発生しない。参考までに言うと、蒸気式乾燥法におけるカナディアンヘム・ファーの変色（茶色化）にかかるコストは年間 500 万ドル～2000 万ドルと推定されている。変色の除去にかかる費用も、ここでの検討では考慮に入れていないので、これもまた蒸気式乾燥法に有利な条件である。

4) 運営費

変動コストのうちいくつかのものは正確に計算することができる。たとえば栈木代、包装代などである。また、駆動部の部品、メンテナンス費、人件費を固定コストとして計算することができる。蒸気式乾燥法のコスト計算では、減価償却費、税金、利息、電気代、天然ガス代、そしてメンテナンス費を決まったコストとして計算することができる。厚材の蒸気式乾燥法においてエネルギーコストを固定だとすると安全目のつまり蒸気式に有利な仮定となる。変動コストは RF/V、蒸気式ともに 4 年分の物価上昇を考慮に入れて Carroll Hatch の報告より多少高く見積もっている。

RF/V 乾燥法の運営費計算では、人件費、電気代、駆動部の部品代、包装代を変動コストとして扱った。また栈積みが必要だから栈木代は 0、人件費は蒸気式乾燥法の 20%減である。メンテナンス費は蒸気式の場合の 2 倍で一定とした。これは COFI プロジェクトで使われたタイプの発振機を使った場合の値段であり、最高級材用の RF/V 乾燥機では真空管を使わない回路が採用されているから実質的にはもっと安くなる。この研究で用いられた各コストの要約は、表 5 に示している。

[蒸気式とのコストの比較]

図 2 に示してあるのは RF/V 乾燥法と蒸気式乾燥法とのコスト比較である。材は 101×101mm ウェスタンレッドシーダーのクリア材である。これによると RF/V 乾燥法は蒸気式に比べて約 14%のコストダウンとなる。コスト改善の他に RF/V 乾燥法のより大きな魅力は、木材にパワーが正しくかけられてさえいれば結果が予測できるところである。蒸気式のエネルギーコストが高いのは乾燥時間が長かったからである。栈積みに関する費用が乾燥コスト全体から見たら小さな値であることは意外な印象を受けた。

図 3 はヘム・ファーについての比較である。ウェスタンレッドシーダーでの比較と同じく 101×101mm、無欠点材での結果である。入力パワー密度がヘム・ファーのグループではウェスタンレッドシーダーよりも高いために RF/V 乾燥コストは低くなった。結果の中で RF/V 乾燥法の最も目立つ利点は乾燥による価値の低下（つまり品質の低下）が少ないことである。しかしこの利点は 101×101mm 最高級材の製材歩留まりの予備調査と併せて冷静に検討する必要がある。弓反りや縦反りなどの製材歩留まりに大きな

影響を与える変形を減らすために RF/V 乾燥スケジュールや運転方法はさらに改良する必要があるが、今回の結果にはこれらの問題点は必ずしも反映されていない。

3つの樹種それぞれについて3つのパワーデンシティを用い、RF/V 乾燥法と蒸気式乾燥法のコストの比較をしながら経済性について検討した。いくつかのサイズのウエスタンレッドシーダー材の乾燥コストを図4に示している。厚さ 101mm、幅が不揃いなロットの乾燥コストは推定値である。なぜなら入力側のパワーデンシティのきちんとしたデータが COFI プロジェクトの報告には載っていなかったからである。2つの RF/V コストのカーブからウエスタンレッドシーダーの場合にはサイズによって RF/V 乾燥法のコストの方が高かったり低かったりするのだろうと思われる。

図5はダグラスファーと、厚さ 140mm、幅不揃いのヘム・ファーの蒸気式及び RF/V 乾燥法の乾燥コストである。このプロジェクトの最も劇的な成功の一つは、厚さ 127mm、幅不揃いのダグラスファークリア材の入力パワーデンシティを決めたことである。さらに加えて、厚さ 140mm、幅不揃いのヘム・ファー材の入力パワーデンシティもほぼ COFI プロジェクトで確立されていた。従って図に示されているコストは無駄が省かれたコストである。ヘム・ファーにはあて材があったが、厚さ 140mm、幅不揃いのヘム・ファーの乾燥による欠点は少なかった。

図6はヘム・ファーのいろんなサイズ、グレードの材についての蒸気式と RF/V 乾燥コストである。ここに出ているサイズなら他に比べて最も高い入力パワーデンシティを用いることができる。ヘム・ファーについてはかなりの数の実験を行ったので、いろいろなサイズ、グレードについてのデータが得られた。今一度言うが、RF/V 乾燥法は蒸気式に比べて約 20%のコストダウンをはかることができる。

さらに RF/V 乾燥機のサイズによる乾燥コストの違いについて比較検討した。初期導入費の見積もりは COFI プロジェクトでメーカーに出してもらった異なるサイズの発振機についての見積もりから算出してある。2つのタイプの RF/V 乾燥機についての乾燥コストが図7に示してある。これらは、ウエスタンレッドシーダーとヘム・ファーを乾かす場合のものである。当然の結果かもしれないが、乾燥機が小さい方がコストが高くなる。110m³の装置の運営費は 25m³の装置の場合の 75%である。RF/V 乾燥機の開発が進み、現場で多く使われるようになればこの程度の大きさの装置が使われるようになることは不自然ではないし、実際 COFI プロジェクトでも 110m³程度の大きさにすることは大した問題ではないように思われた。考えておくべきことは、将来的にさらに高電圧が必要になるだろうと言うことと、木材に極板をあてる必要があるため、木材の積み込み行程の自動化などの問題が発生するであろうということである。

[結論と推奨される乾燥法]

一般的に、101mm 厚以上の板材であれば RF/V 乾燥法はコストの面で従来の蒸気式乾燥法よりも競争力があるといえる。樹種、グレードによって異なるが 15~25%ほど有利であると考えて良い。また、たとえ薄板でも最高級材であれば品質の良さが市場で認められて製品価格が適正に推移すれば、蒸気式より有利になる可能性があると思われる。残念なことに、COFI プロジェクトでは RF/V 乾燥された板材の価格として、蒸気式乾燥材の市場価格と比べてどのくらい高い値段まで受け入れられるかということについて詳しい調査がなされなかったため、現段階でははっきりしたことは言えない。

RF/V 乾燥機の容量が大きいほど単位体積あたりの乾燥コストは低くなる。たとえば、110m³入る乾燥機では25m³の装置よりコストが50%低くなる。

まず最初に考えられる RF/V 乾燥法の針葉樹材乾燥への応用は、付加価値の高い製品やこれまで乾燥されなかった商品を開拓するというようなところであろうか。これまでも合衆国東部ではレッドオークの乾燥に RF/V 乾燥法がうまく用いられてきたが、しかし北アメリカでは限られた状況で限られた台数しか導入されていない。また、日本においては日本の高周波乾燥機メーカーが1977年以降これまでに100以上の装置を日本国内で販売している。電気代が極端に高い日本においてのこの数字は特筆すべきである。

RF/V 乾燥法が針葉樹板材の乾燥法としてブレイクスルーとなるかどうかは、製材業者が今後この装置を導入するかどうか見守る必要がある。

表1. 3種類の高周波パワーデンシティと年間処理能力 (収容材積 55m³)

パワーデンシティ (kW/m ³)	樹種	典型的な製品寸法と製品グレード	年間処理能力 (1000m ³ /年)(MMFB/年)
1.0	ウエスタンレッドシーダー	50×200mm (最高級材) ~ 101mm 厚、幅不揃い (クリア材)	1.8-11.6(0.8-4.9)
2.5	ダグラスファー/ヘム・ファー	101×101mm ダグラスファー (最高級材) ~ 150mm 厚、幅不揃いヘム・ファー (クリア材)	2.5-5.2(1.1-2.2)
4.0	ヘム・ファー	101×101mm (最高級材) ~ 101mm 厚、幅不揃い (クリア材)	6.1-13.8(2.6-8.0)

表2. サイズ・発振機容量別 RF/V 乾燥機の初期導入費

パワーデンシティ (kW/m ³)	乾燥機の収容材積			
	10 m ³	25 m ³	55 m ³	110 m ³
1.0	538,200	626,750	776,250	1,075,250
2.5	575,000	741,750	983,250	1,385,750
4.0	667,000	902,750	1,288,000	1,937,750

表3. 蒸気式乾燥機における板材の収容材積と板厚の関係

板厚 (mm)	乾燥機収容材積	
	(MFBM)	(m ³)
45	93	219
90	129	304
105	134	316
140	138	325
150	141	333

表4. 3種の乾燥法における水分を取り除くために必要なエネルギー

	(kW h/kg)
蒸気式乾燥機 (50mm厚 板材)	
Eburne 社が所有する乾燥機全ての平均値	2.36
Mackay と Nielson の研究	2.07
除湿式乾燥機 (50mm厚 板材)	
Fraser Mills 社 装置 No.7	1.61
Fraser Mills 社 装置 No.4	2.08
Mackay と Nielson の研究	1.08
RF/V 乾燥機 (101mm厚 板材)	
最適化された装置 (5回のテスト中最適な結果)	1.29

表5. コストの内訳(RF/V 乾燥法及び蒸気式乾燥法)

コスト	パワーデンシティ(高周波発振機 kW h/m ³)			
	1.0	2.5	4.0	蒸気式
	(カナダドル)			
固定コスト (ドル/mo.)				
減価償却	12,900	16,400	21,500	15,000
税金、利息	4,000	4,000	4,000	4,000
メンテナンス費	7,000	7,000	7,000	3,000
電気代	---	---	---	---
天然ガス代	---	---	---	---
変動コスト (ドル/m ³)				
人件費	5.08	5.08	5.08	6.35
包装代	2.11	2.11	2.11	2.11
栈木	0.00	0.00	0.00	0.42
駆動部品	5.08	5.08	5.08	5.08
電気代	----実験によって算出された--			---
品質低下	----実験によって算出された--			高級材 : 5% クリア材 : 7%

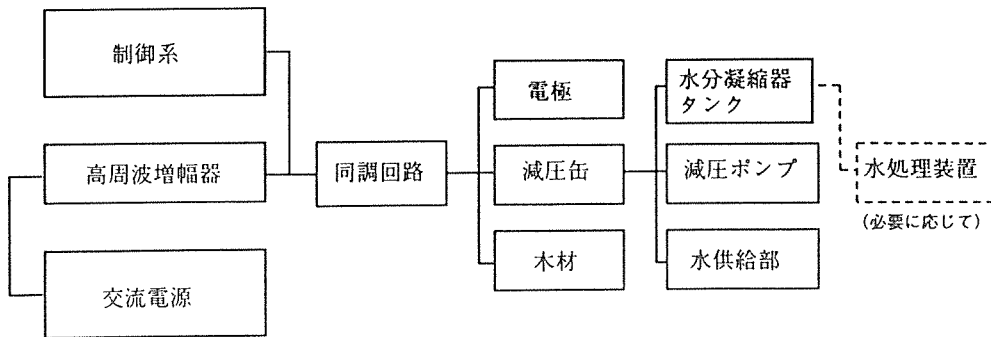
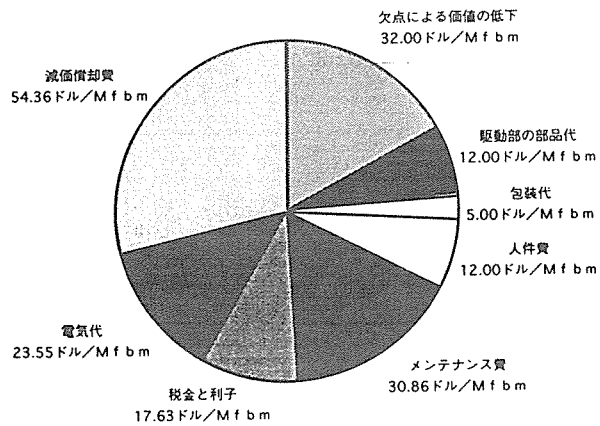


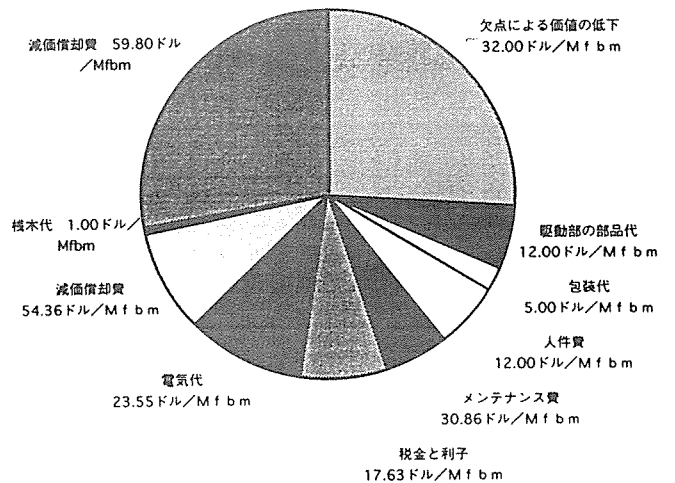
図1. 想定したRF/V乾燥システムの構成

合計79.46ドル/m³ (187.40ドル/Mfbm)



RF/V 乾燥法
乾燥日数 5.7日

合計92.56ドル/m³ (218.30ドル/Mfbm)

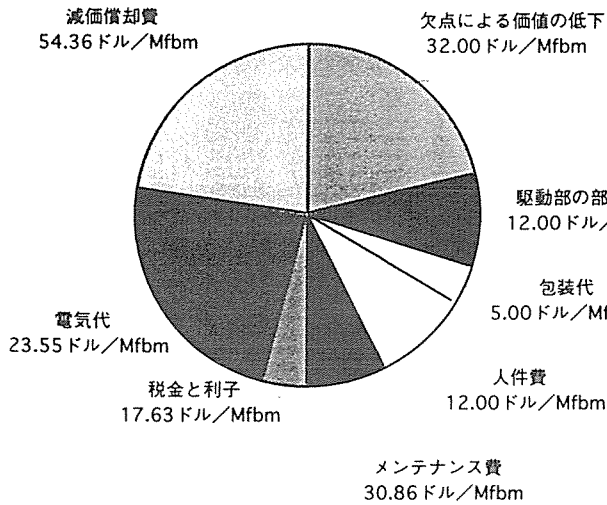


蒸気式乾燥法
推定乾燥日数 27日以上

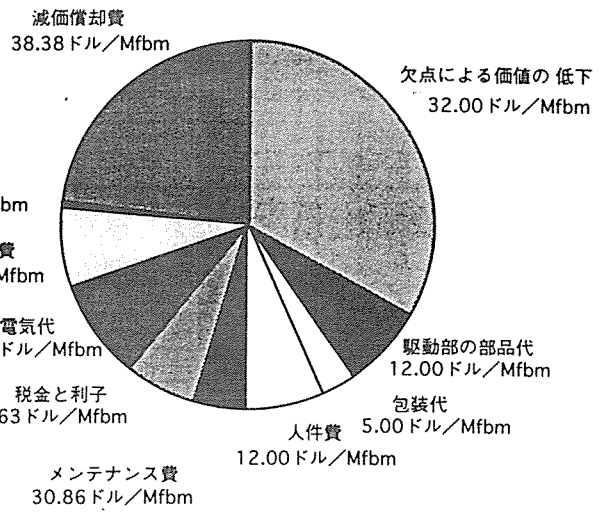
図2. ウェスタンレッドシーダー (4×4、クリア材) のRF/V乾燥法と蒸気式乾燥法とのコスト比較 (RF/V乾燥機の収容材積は55m³)

合計57.58ドル/m³ (135.81ドル/Mfbm)

合計72.92ドル/m³ (171.99ドル/Mfbm)



FR/V 乾燥法
乾燥日数 1.8日



蒸気式乾燥法
推定乾燥日数 28日以上

図3. ヘム・ファー (4×4、クリア材) のRF/V 乾燥法と蒸気式乾燥法とのコスト比較 (RF/V 乾燥機の収容材積は55 m³)

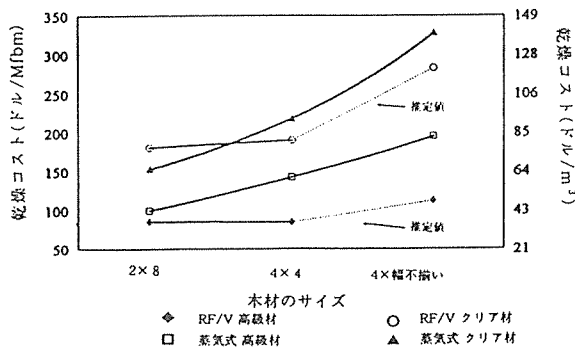


図4. ウェスタンレッドシーダーのRF/V 乾燥法と蒸気式乾燥法とのコスト比較 (RF/V 乾燥パワーデンシティ: 1.0kW/m³)

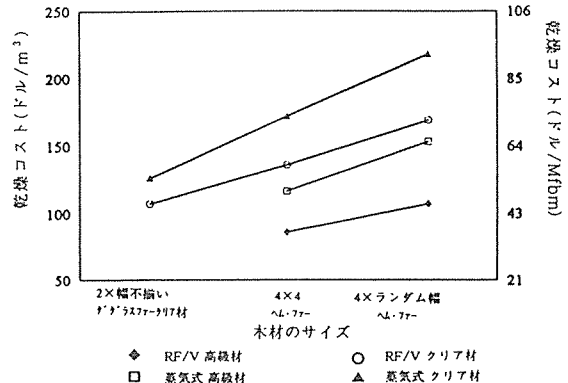


図6. ヘム・ファー (小角材) の乾燥コスト比較 (RF/V 乾燥パワーデンシティ: 4.0kW/m³)

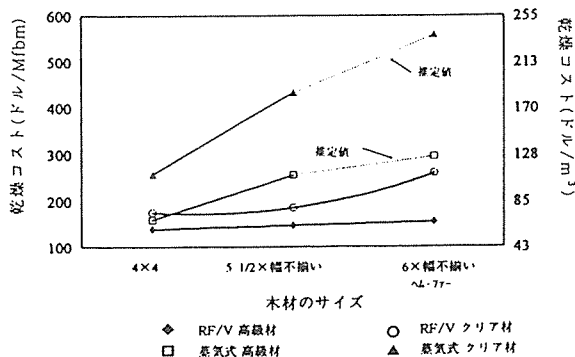


図5. ダグラス・ファー及びヘム・ファーの乾燥コスト比較 (RF/V 乾燥のパワーデンシティ: 2.5kW/m³)

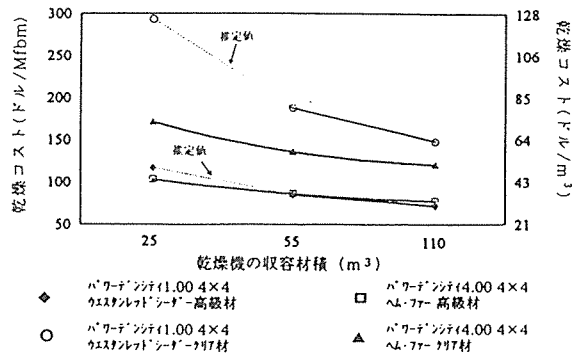


図7. 缶体の大きさが違う場合のコスト比較 (パワーデンシティも異なる)

6. 過熱蒸気・減圧併用乾燥装置の設計と原理

Iwotech (デンマーク)

エリック・スコフマン (Erik Skovmand) 著

ここではモルドラップ (Moldrup) 乾燥システムについて説明する。モルドラップ乾燥法は木材を低圧力下での過熱蒸気中で乾燥する方法で、製材及び丸太に適用できる。このシステムは樹種や材の寸法にもよるが、蒸気式乾燥法に比べて2～5倍の乾燥速度があり、50%のエネルギーの節約になる。コントロールが簡単で良い品質が得られますから、蒸気式では乾燥が難しい樹種に向くとはいえる。この方法の唯一と言っていい制約は、50℃か場合によってはそれ以上の温度に耐えられる樹種にしか使えないことである。

[モルドラップ式乾燥システム]

高速乾燥

モルドラップ式乾燥システムを使うと、ほとんどの樹種で通常の蒸気式乾燥法の2～5倍のスピードが得られる。従って投資額が相対的に安くなり、生産計画が楽になる。

省エネルギー

木材を乾燥するために必要とされる熱エネルギーは蒸気式の約半分である。

高品質な仕上がり

モルドラップ式乾燥システムは非常に精密に乾燥過程を制御するため、通常の蒸気式乾燥法では乾燥が難しかった樹種についても適切に乾燥できる。乾燥は拡散によらないので、木材からの出た水分が蒸発するときの水分傾斜が小さく、材表面の引っ張り応力や割れが少なくなる。乾燥は過熱蒸気のみによって行われるので、変色が避けられる。

操作が簡単

コンピュータによる完全自動制御であるため、たとえオペレータにほとんど木材乾燥の経験がなくても、乾燥機内は常に最適な乾燥環境が整えられる。

導入が簡単

モルドラッププラントは二つのプレハブ式で移動可能なユニットからできており、コンクリートの基礎の上に設置して、水道管、電気配線外付けのエネルギー供給装置を取り付けるだけですぐに使える。とてもコンパクトなシステムなので、もし必要であればいちど設置したものを後から移動することも簡単である。このシステムはあまり広い場所を必要としないし、簡単な基礎工事で十分である(図1)。

[機能の説明]

モルドラップ式乾燥法は密閉圧力容器(オートクレーブ)の中で行う。棧積みされた木材をオートクレーブの中に入れ、完全に容器の中の空気を取り除いてから過熱蒸気の中に入れる。木材中の水分は約35℃で蒸発し始め、乾燥は過熱蒸気対流によって行われる。過熱蒸気は沸点よりも高い温度まで過熱された水分であるから、過熱蒸気の相対湿度は100%未満である。このような雰囲気の中では十分対流があれば木材を乾燥することができる。過熱蒸気の温度が高ければ高いほど、相対湿度が低ければ低いほど乾燥速度は速

くなる（図2）。減圧することによって 100℃以下での過熱蒸気乾燥が可能になる。圧力が低ければ沸点も低くなり、これによって過熱蒸気は 50℃以下で作られる。缶内の圧力は木材から出てくる水分も考慮して、常に一定に保たれている。

モルドラップ式乾燥法は、例えば以下の表に示すような温度、圧力と平衡含水率との関係を用いてオートクレーブ内の温度、圧力をコントロールしている。木材から出た水分の蒸発のためには熱が必要であり、これは加熱管（熱交換コイル）によって供給されている。なお、加熱管の中には約 90～110℃の蒸気または熱水が通る。

温度	圧力	過熱蒸気の相対湿度	平衡含水率
(℃)	(mbar)	----- (%) -----	-----
80	480	100	22
80	360	75	13
80	240	50	7
80	120	25	4

[過熱蒸気を使う利点]

モルドラップ式乾燥システムではオートクレーブの中の空気は完全に取り除かれ、純粋な過熱蒸気だけで満たされている。過熱蒸気を使う利点は以下の通りである。

1) シンプルで精密な乾燥過程の制御が可能である。2) 青変色やカビがつかない。3) 高い熱効率。4) 水分は過熱蒸気中で蒸発。5) ビーチ、アッシュ、オークなどで変色が発生しない（なぜならこれらの変色の原因である化学反応は酸素が必要）。6) 外界の温湿度に影響されない。

[乾燥プラントの説明]

モルドラップ乾燥プラントは、以下のように構成されている。

圧力容器:標準サイズは直径が 2.6、3.0、3.5、4m、長さが 12、30m。用いる圧力は絶対圧力で 0～1 bar。木材は積み込み台に乗せて搬入する。棧積みする必要があり、棧木厚は少なくとも 19mm 必要。

積み込み台: 棧積みされた木材は積み込み台に乗せて装置内に搬入する。

IWT (ロック式ドア): オートクレーブの扉は自動開閉式の油圧式ドアで、開閉に 1 分とかからない。

断熱: 熱エネルギーの損失を防ぐために 150mm の鉋物綿と 1mm のメッキした鉄板で覆っている。

ファン: オートクレーブ内の空気を対流させるために装置にはいくつかのファンが取り付けられている。これらによって缶内風速は 20m/秒まで上げられ、これは通常の蒸気式乾燥法の 5～10 倍である。

ヒーター: オートクレーブ内を対流している過熱蒸気を加熱するために、缶内にはヒーターが設置されている。ヒーターは管の中に蒸気あるいは熱水を通して熱交換によって加熱する仕組み。

真空ポンプ: 乾燥過程の始めにオートクレーブ内の空気を完全に取り除くために真空ポンプが設置されている。

コンデンサ (凝縮器): オートクレーブ内の圧力を一定に保つために、木材から発生した水分を凝縮する必要がある、このためにコンデンサ (プレートクーラー) がついている。

制御と関連機器: 1) 木材含水率を測定して表示するための含水率計 (いくつかの木材からのデータを総合)、2) 平衡含水率計 (二枚の合板が入っている)、3) 蒸気温度を測るための温度計、4) 低圧用の圧力計、5) 乾燥中に出てきた水分量を量る水分量計。

制御システム: この乾燥システムは温度、圧力、含水率を監視するコンピュータによって制御される。温度と圧力を調節するために、圧力配管には圧力調節弁が、加熱管にはサーモスタット付きの弁がつけてある。

[乾燥プロセス]

脱気: 乾燥プロセスは、木材の周りの空気をできる限り取り除くための1～2時間の脱気行程から始まる。

加熱: 脱気後、木材は過熱蒸気によって加熱される。過熱蒸気は設定した温度に調節されていて、50～90℃である。

乾燥: 乾燥は過熱蒸気対流によって行われる。コンデンサが木材から出た水分を取り除く。乾燥時間は樹種、厚さ、初期含水率、目標含水率によって異なる。

コンディショニング: 乾燥の仕上げは含水率のばらつきを平均化するためのコンディショニングを行う。温・湿度は目標含水率よりも1～2%低い平衡含水率を持つ条件に設定し、木材の厚さ10mmにつき2時間程度行う。

終了: 外気を導入して終了する。

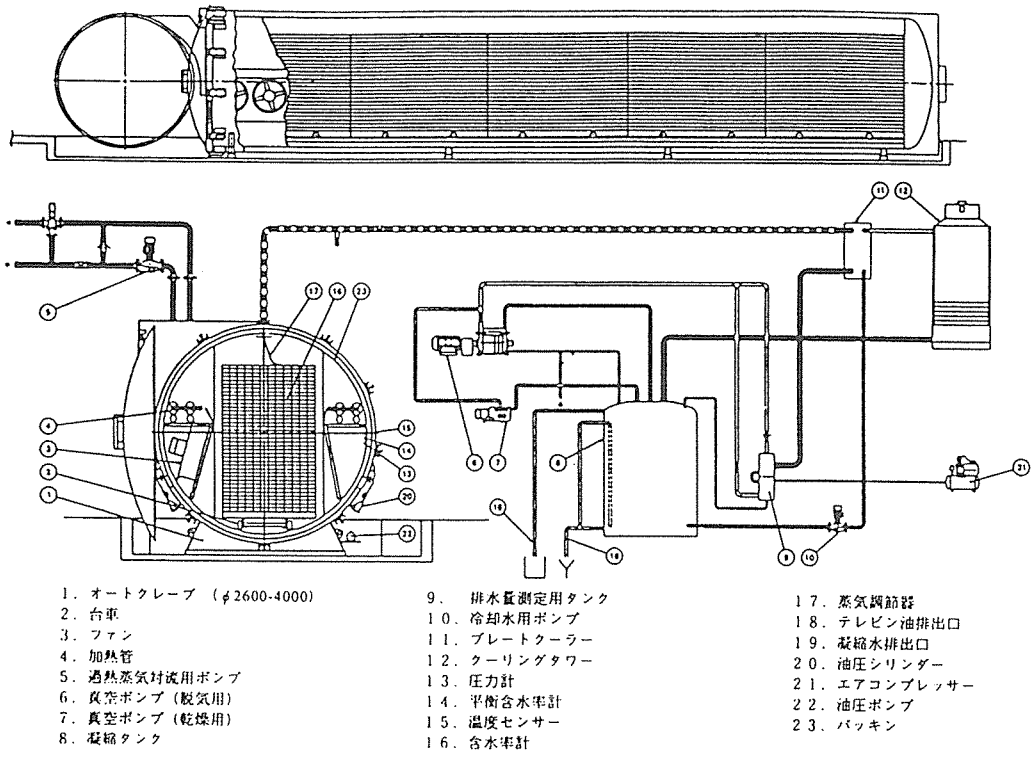


図1. Moldrup 式乾燥装置の構成

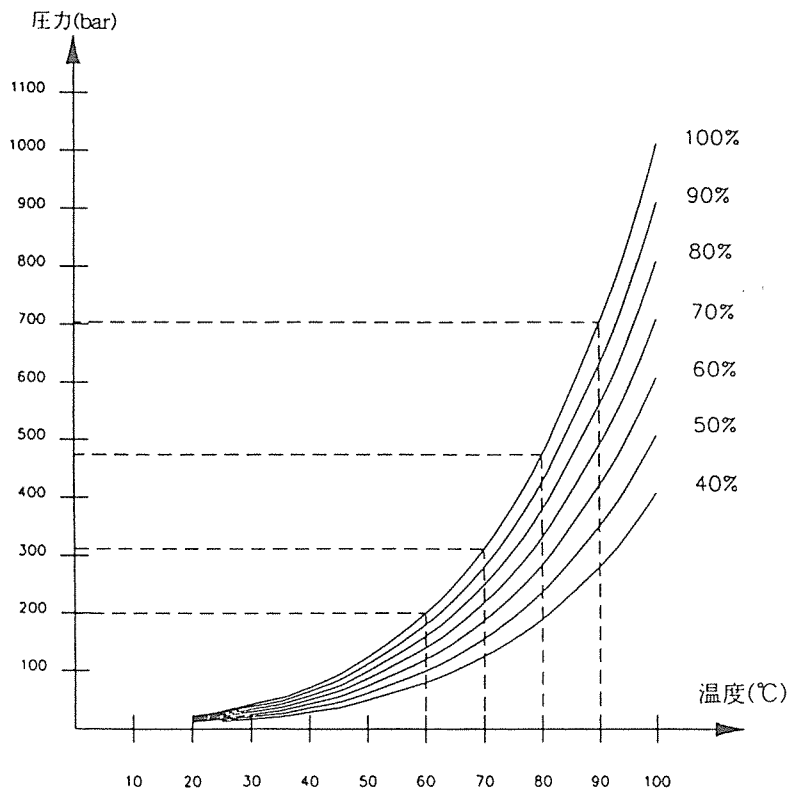


図2. 温度、圧力、相対湿度の関係

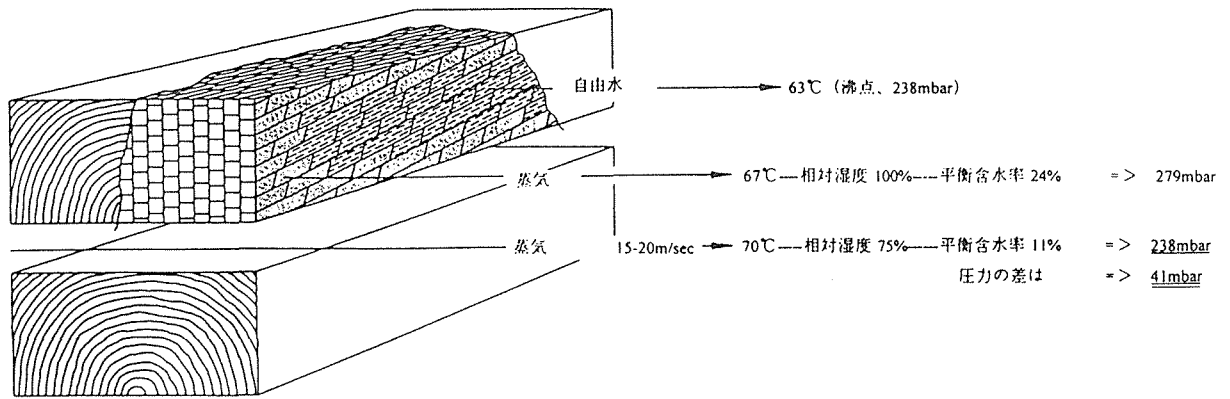


図 3.

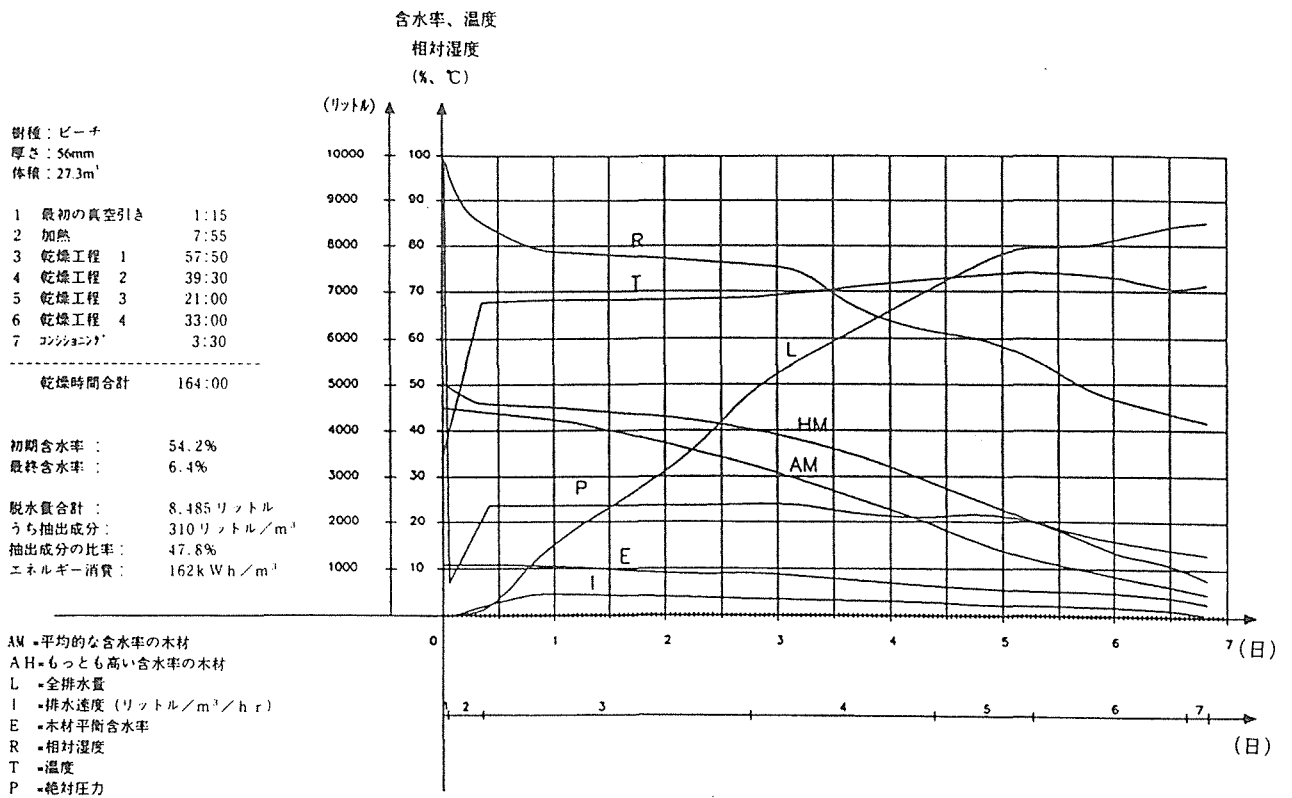


図 4. 56mm 厚ビーチ材の乾燥経過

7. 加圧・減圧乾燥のパイロットプラント

機械工学研究所（ドイツ）

M. スタール (M. Stahl) 他 著

人工乾燥期間を短縮し、水分傾斜や表面硬化、内部割れを避けるため、繰り返し I/D 処理と呼ばれる新しい方法を検討した。

[I/D 処理] I/D 処理では、まず生材に高い圧力をかけ（期間 I）、これにより空気が細胞内の樹液に溶け込む。その後の減圧期間（期間 D）で空気が広がり、気泡が木部細胞で急速に成長して液体水と樹液を追い出す。この I/D 処理を室温で約 5~20 回行う。その後、加熱して乾いた空気を繰り返し製材内部に供給し、蒸気飽和にすることで、製材の内部表面が増加し、物質移動表面が木材の巨視的表面の何倍も大きくなる。

[実験] 高さ約 12 m、直径約 25~30 cm の 100 年生スプルーを伐倒し、すぐに製材して長さ 300 cm、幅 18cm、厚さ 10 cm とした。初期含水率は約 90~100%であった。この板を含水率分布測定のために分割し、そのうちいくつかをさらに分割して詳細な情報を得るようにした（図 1）。

図 2 に実験装置を示した。コンピューターにより、I/D 時間と共に繰り返し処理が管理できる。小さなワゴンに材料を載せて乾燥機に入れ、これに樹液を集めた。樹液は特別の排気口から取り除いた [M. Stahl 1994]。

[結果] 10 分~15 時間、10 bar から始めて 20、30、40 bar と加圧し、減圧期間は約 20 分で温度は約 15~20℃とした。板の長さの乾燥速度への影響は認められなかった（図 3）。1 つの I/D ステップで 7%の水分減少が可能であり、最も早い乾燥速度は一時間で約 7%であった。圧力を増すと乾燥時間が早まり、穏やかな熱エネルギーを加えるとさらに速く乾燥した（図 4）。一般的な乾燥方法と対照的に、材の幅と長さ方向での含水率の違いが軽減されていた（図 5）。I/D 処理した梁では、未処理材より含水率傾斜が少なかった（図 6、7）。

[結論] I/D 処理は、特に高含水率域でエネルギーと時間を節約することができる。例えば、圧力 40 bar を用いた 20 回の I/D 繰り返し処理により、スプルー梁（寸法：300 cm/18 cm/ 10 cm）から約 16 kg の水を取り出すことができる。また、木材の透過性を改善する可能性もある。気圧の連続的变化により、木材中の幼虫が殺されることも試験されてきた。この事は、高温や危険な化学物質によらない木材保存の新たな可能性を示している。この I/D 処理により、低含水率で高品質の木材を、蓄積にかかるコストや危険性無しで、短い乾燥時間で生産することが可能となる。

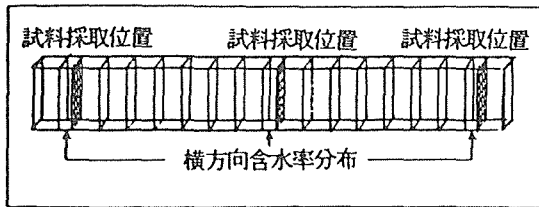


図1 スプルース梁の軸および横方向含水率分布測定のための分割の概略

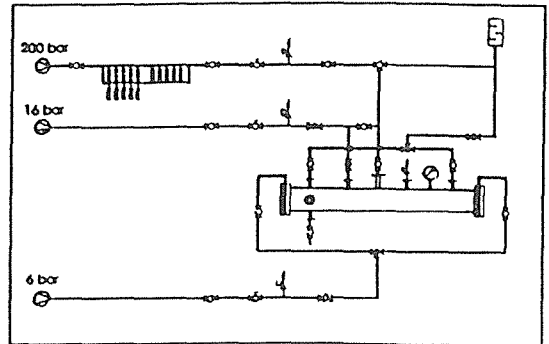


図2 I/D 処理のパイロットプラント

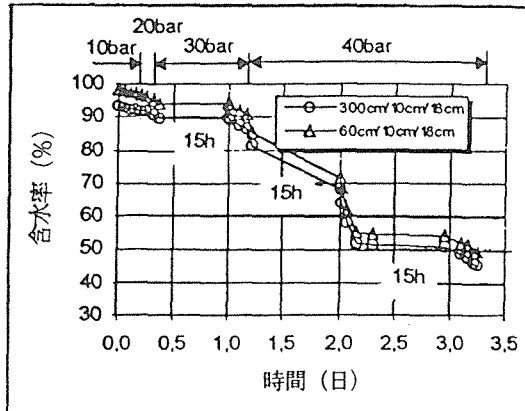


図3 長さの異なるスプルース試料のI/D 乾燥処理

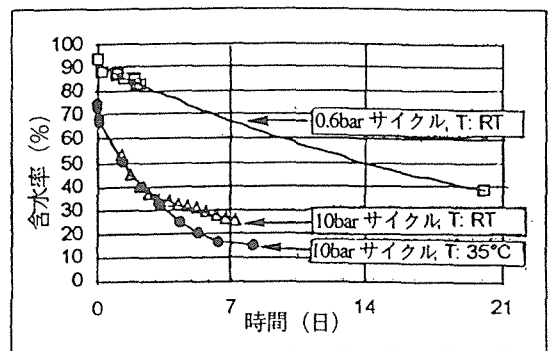


図4 低含水率域での圧力の影響

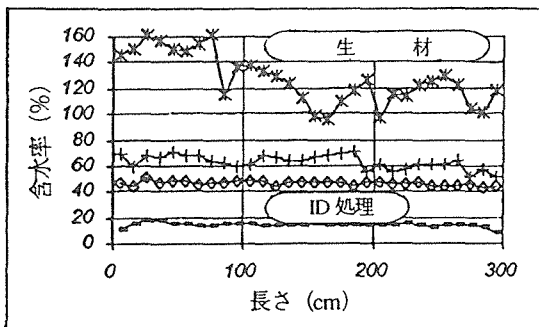


図5 スプルース梁の軸方向含水率分布へのI/D 処理の影響

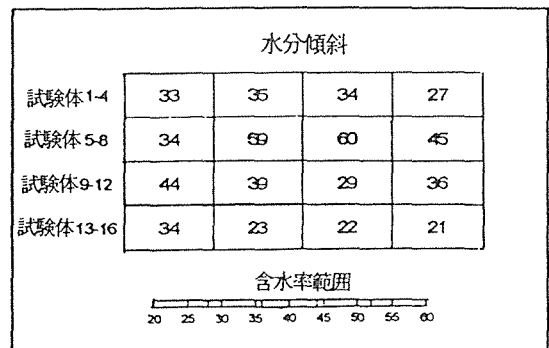


図6 I/D 処理していないスプルース梁の含水率分布

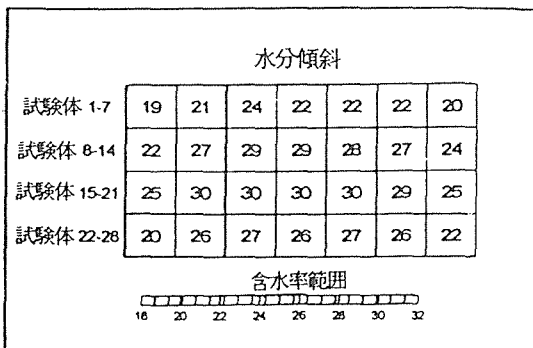


図7 10 bar 繰り返し I/D 処理したスプルース梁の含水率分布

8. キルンワイドモデルの開発

ニュージーランド森林研究所
S. パン (S. Pang) 著

既存のキルンワイドモデル (Pang and Haslett, 1995) を拡張し、棧積み内での生材含水率と密度の分布を考慮できるようにした。トンネル乾燥機と試験規模の商業用乾燥機で、ラジアータパイン辺材板を乾燥し、モデルによるシミュレーション結果と比較した。

キルンワイドモデルの拡張

キルンワイドモデルを拡張することにより、さん積みの微少距離 (dz) での熱バランスについて、次の二式を考えることができる。

$$\frac{1}{(T_G - T_{surf})} \frac{\partial T_{surf}}{\partial \tau} = \frac{(1 + \alpha_R - \alpha_{LS}) \cdot h \cdot a}{\rho_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot C_p} \quad (1)$$

$$\frac{1}{(T_G - T_{surf})} \frac{\partial T_G}{\partial z} = \frac{h \cdot a}{G \cdot (C_{PG} + Y_G^0 \cdot C_{PV})} \quad (2)$$

ここで T_G : 気流温度、 T_{surf} : 木材表面温度、 $d\tau$: 微少時間、 α_R : 熱放射と木材の受け取る対流熱の比、 α_{LS} : 熱損失、 h : 熱伝達係数、 a : さん積み単位体積あたり表面積、 ρ_s : 木材容積密度、 ε : 棧積み空隙率、 C_p : 木材の比熱、 G : 乾燥気体の比気流、 C_{PG} : 空気の比熱、 Y_G : 気流湿度、 C_{PV} : 蒸気の比熱である。木材表面温度を平均温度と仮定すると、これらは空気の温度変化と加熱過程での木材の温度変化を計算するのに用いられる。

また、水分の流れと、水分と熱のバランスについて、次の二式が得られる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = \frac{\partial \Pi}{\partial \zeta} = -f \cdot \Pi \quad (3)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \zeta} = -f \cdot \frac{\Pi}{c - \Pi} \quad (4)$$

ここで、 Φ : 含水率指標 (単位無し)、 Π : 湿度ポテンシャル、 f : 相対乾燥速度、 θ, ζ, γ : 乾燥時間、位置、空気温度のパラメーター (単位無し)、 c : 任意の乾燥条件の定数である。詳細は別の報告に示した (Pang, 1994; Keey and Pang, 1994; Pang and Haslett, 1995)。

乾燥過程は、乾燥速度が一定の期間 1、乾燥速度の減少する期間 2、速度がさらに減少する期間 3 の三つに分けられる。期間 2 と期間 3 の相対乾燥速度は次式 (5)、(6) から計算できる。これらの式は、温度 70~200℃、風速 5~9 m/s でラジアータパインを乾燥する場合の 2 次元モデル (Pang, 1996a) から得たデータの回帰式である。

減率乾燥第一段 (期間 2) について:

$$f_1 = -0.06 \cdot \Phi^3 + 0.7 \cdot \Phi^2 + 0.277 \cdot \Phi + 0.0834 \quad (5)$$

減率乾燥第二段 (期間 3) について:

$$f_2 = 0.282 \cdot \sqrt{\Phi} + 0.308 \cdot \Phi \quad (6)$$

シミュレーション結果

シミュレーション結果を図1~4に示す。計算には、測定した初期含水率と各板の密度を用いた。試験規模乾燥についてのシミュレーションでは、実際の乾・湿球温度を用いた。

乾燥が始まるとまず一定速度で乾燥する。この段階では各板の乾燥速度は、空気温度の低下と空気湿度の増加のため場所によって異なり、気流方向に沿って減少する。どの位置にある板も、含水率が臨界値（第一臨界含水率）以下になると第二段乾燥になる。最初の臨界含水率は、乾燥スケジュールによって0.7から0.9 kg/kgまで異なる（Pang and Keey, 1995）。乾燥が進むと第二臨界含水率に到達し、第三段階に入る。第二臨界含水率は、乾燥条件によって0.08 kg/kgから0.12 kg/kgまで異なる。シミュレーションでは、平均値0.1 kg/kgを用いた。

乾燥試験

試験規模の商業乾燥機とトンネル乾燥機で、ラジアータパイン辺材板を乾燥した。あらかじめ密度と生材含水率を測定し、両端をコートした試験体を23個置いて栈積みの一層とした。板は100×40 mm、栈木厚さは18 mmとした。板の長さは試験規模乾燥機用が2.3 m、トンネル乾燥機用は600 mmであった。

トンネル乾燥では、風速5 m/sで120/70℃または140/90℃とした。120/70℃乾燥では風向を3時間ごとに反転させ、140/90℃では1.5時間ごとにした。乾燥中試験体の重さを量り、これとオーブンドライの重さから各板の含水率を算出した。

試験規模乾燥機による試験では、6層の生辺材を用いた。上下でマッチした2層を、測定用に栈積み高さ中央に置いた。2層のうち、上層は含水率測定用、下層は二層間を流れる空気の温度を測定するための熱伝対保持用とした。最初の試験は風速7 m/sで140/90℃、二回目は風速5 m/sで90/60℃とした。乾燥時間7、15.5、27.5、39.5時間で含水率を測定した。栈積み内の間隔を置いた5箇所を空気温度を、20分ごとにモニターした。

結果と考察

試験規模試験機とトンネル乾燥機について予測した乾燥曲線は、測定値と非常に近かった。トンネル乾燥では、2回空気循環を反転し6時間乾燥すると、各層の一番外の2つの板が一番早く、栈積み中央の板が一番遅く乾燥した。また、初期含水率に関わらず、ほとんどの板が一定乾燥速度で乾燥し、各板の初期含水率パターンが維持されていた（図2）。

試験規模乾燥機では空気循環が一方向だったため、初期含水率分布に関わらず、空気取り入れ側に近い板は早く、空気排出側に近い物は遅く乾燥した（図4）。

栈積みの横方向の空気の温度分布もこのモデルで予測できる。試験規模乾燥について、栈積みの両側と中央の予測温度は測定結果と非常に近く（図3）、これは乾燥の初めと終わりで顕著であった。

このモデルにより、乾燥技師は乾燥の進行を把握でき、いつ乾燥を終わらせるかを含水率の観点から決定できる。現在、提案したキルンワイドモデルを応用し、気流反転の影響を検討して乾燥スケジュールを評価する研究を行っている。

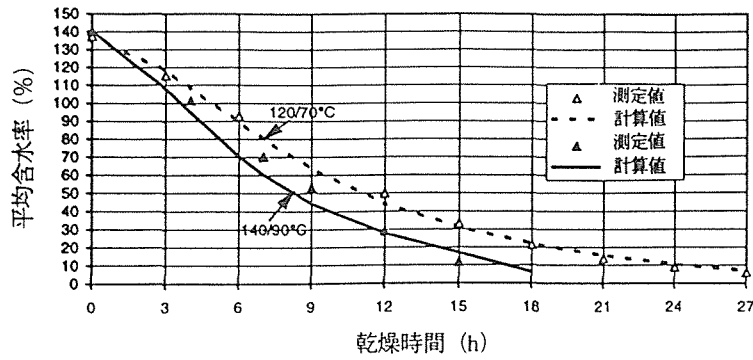


図1 トンネル乾燥機中のラジアータバイン辺材板の平均含水率（測定値と予測値）。風速：5m/s、板の寸法：100×40 mm、板の枚数：23

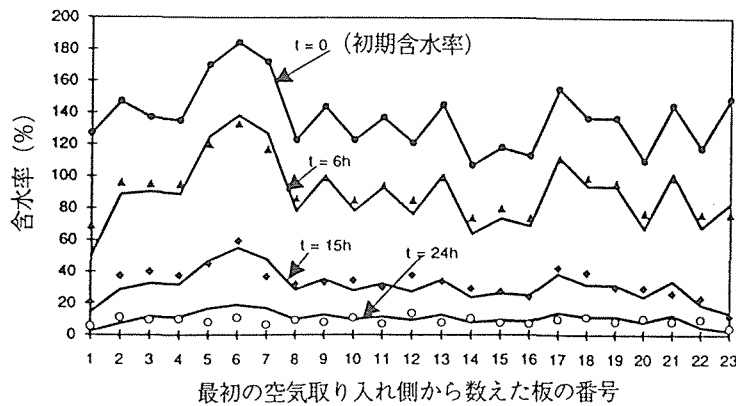


図2 トンネル乾燥機中の各板の含水率。シミュレーション結果（線）と実験データ（点）の比較。乾/湿球温度：120/70℃、風速：5m/s、板の寸法：100×40 mm

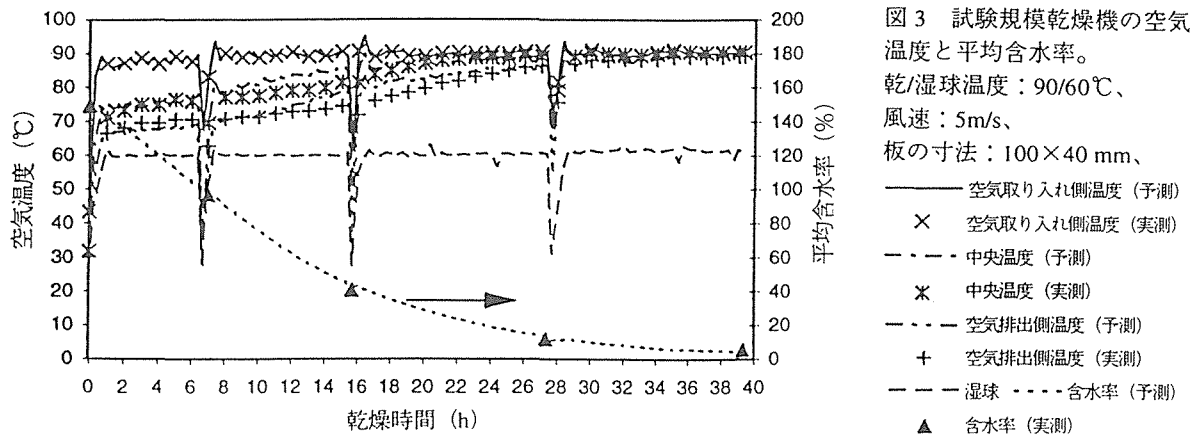


図3 試験規模乾燥機の空気温度と平均含水率。乾/湿球温度：90/60℃、風速：5m/s、板の寸法：100×40 mm、
 — 空気取り入れ側温度（予測）
 × 空気取り入れ側温度（実測）
 - - - 中央温度（予測）
 * 中央温度（実測）
 - · - 空気排出側温度（予測）
 + 空気排出側温度（実測）
 - - - 湿球 - - - 含水率（予測）
 ▲ 含水率（実測）

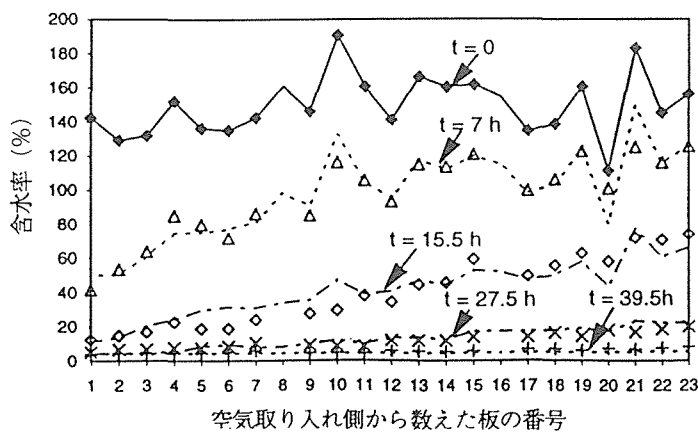


図4 試験規模乾燥機中の各板の含水率。シミュレーション結果（線）と実験データ（点）の比較。実験条件は図3と同じ。