

平成11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 12 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、第6回国際木材乾燥会議論文集（1999）及びForest Products Journal（Vol. 49 1999）から抜粋翻訳したものであり、乾燥材の品質に関するもの、新たな乾燥方法等の論文を主体に翻訳した。内容は、①ヨーロッパにおける乾燥材の品質の規格化の動き、②乾燥材の乾燥割れ防止のための蒸気の活用、③乾燥スケジュール試験のための新たな乾燥装置、④加圧乾燥と蒸煮がラジアータパインの反りと剛性に与える影響、⑤高周波加熱システムのための新たな装置の開発、⑥米国北東部産針葉樹の乾燥処理によるVOC発生量の推定、⑦容量式及び抵抗式含水率計の精度、の7件である。

<キーワード>

表面硬化、抵抗式含水率計、容量式含水率計、乾燥割れ、乾燥応力、高周波加熱、残留応力、繊維飽和点、加圧乾燥処理、加圧蒸煮処理、低温減圧乾燥装置、高周波加熱減圧乾燥装置、VOC（揮発性有機物）、DOC（溶解化学物質）

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、斎藤周逸、小林 功、石川敦子の各氏を煩わした。ここに各氏に対して、厚くお礼を申し上げる次第である。

目 次

1. ヨーロッパにおける乾燥材品質の規格化に関する動向・・・・・・・・・・ 1
2. 乾燥材の品質改善のためのウオームアップ時における蒸気の活用・・・・・・・・ 9
3. 革新的な乾燥スケジュール試験のための新しい装置・・・・・・・・・・ 18
4. 加圧乾燥と蒸煮がラジアータパインの反りと剛性に与える影響・・・・・・・・ 27
5. 新しい高周波加熱システムの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
6. 乾燥処理によるVOC発生量の推定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
7. 容量式及び抵抗式含水率計の精度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 48

1. ヨーロッパにおける乾燥材品質の規格化に関する動向

国立森林研究所（ドイツ）

J. ウェリング (J. Welling) 著

[はじめに]

製材の多くの最終用途にかかわる品質を語る上で、乾燥材品質の向上が重要なポイントになる。取引上、強度など材質面での品質は規格や基準に則って通常仕分けされるが、乾燥材品質はそうではない。含水率は最も重要な乾燥材品質の指標であるが、この含水率をどうやって測定したかの説明はなく、パーセントや含水率範囲といった数字によって仕分けされている。通常、許容しうる割れや変形は製品規格や基準に記されているが、人工乾燥材の加工段階で問題となり、ハネの原因にもなる表面硬化については基準がない。

1994年にヨーロッパの乾燥グループが乾燥材品質評価に関する勧告を出し、その後ヨーロッパ規格委員会（CEN）に属する技術委員会 175（丸太および製材）が、将来的に現場で適当な方法で乾燥材品質を区分して適切な品質管理を行うことを目的として、一連のヨーロッパ規格の見直しを始めた。同様な活動が、オーストラリアや北米でも始められている。

[含水率の測定に関連した問題点]

含水率は、木材中の水分の木材実質に対する重量比をパーセントで表したものである。しかし、この簡単な関係を現場で求めるとなると、かなりやっかいである。規格化された含水率測定の手順、つまり ISO 4470-1981 や EN 175.13.01, Part 1（案）で記述された全乾法では、試験片の平均含水率（MCave）を求めることになる。しかし、この全乾法は時間がかかり、試験片の切り出しも必要であるため、現場では適用が困難である。

通常現場での含水率測定には、電気的手法が用いられている。抵抗式の含水率計は全世界に広まっているが、一方近年になって容量式がヨーロッパにおいて広く活用されるようになった。電気式含水率計の問題点は、必ずしも測定値が全乾値と一致しないということである。針打ち込み式の抵抗型含水率計は、針が接触する最も湿った部分の含水率を示す。この場合の読みは、打ち込みの深さが影響することになり、木材の部分的な含水率しか求められない。また、樹種や温度の補正が必要である。内蔵の補正曲線はメーカーによって異なり、測定結果が含水率だけではなく機器そのものに依存するという奇異な状況に陥る。この問題については多くの研究がなされており、この測定方法の不完全さを指摘している。現在に至るまで樹種補正曲線の整合性を図るためのあらゆる試みが失敗し、将来にわたって一般に受け入れ可能な樹種補正曲線は出現しないものと思われる。

他方、容量式含水率計の読みは、木材の密度によって大きく影響される。密度についてはある樹種の平均値のみが知られ、その値が補正に使われている。したがって、積積みや荷口内の製材密度のばらつきが大きいほど、含水率の読みの標準偏差を大きくし、含水率計による測定精度を下げることになる。

以上をまとめると、電気的手法による含水率測定はかなり多くの因子によって影響を受け、その影響の度合いを定量化することは困難である。最適な条件の下では、電気的手法を使って木

材の真の平均含水率を約 1%の精度で推定することができるが、条件が変わると誤差が容易に 2～4%にはなる。もちろんこれが乾燥材品質評価のための枠組みを設定する最適の出発点にはならない。

[表面硬化測定に関連した問題点]

乾燥材の製材後や含水率勾配の均一化処理後の変形は、ほとんどの場合乾燥の間に生じる表面硬化に基づいている。乾燥終期に適切なコンディショニング処理を行くことにより、表面硬化や残留応力、含水率勾配を低減できることはよく知られているが、工場での乾燥操作ではしばしばこの種の処理が省かれている。

EU 計上のプロジェクト「IMCOPCO（正確な木材乾燥プロセス制御と品質制御のための含水率測定システムと試験法の改善）」の下での調査結果によると、表面硬化は乾燥材品質の重要な一面と考えられているものの、木材加工業の認識不足のために表面硬化に関する問題提起はまれである。また、現場のほとんどは表面硬化の原因やどのように評価するかを理解していないし、その経験もない。したがって、表面硬化の評価基準を決めるため CEN TC175/WG1/TG（表面硬化）による取り組みが現在進行中であるが、その中でこの現状は考慮されるべきである。これ以前にも表面硬化評価を基準化するための取り組み（TRADA）が行われているが、未だ広く活用されるには至っていない。

[乾燥材品質分野での規格化の動き]

CEN の技術委員会 175 は乾燥材品質に関わる一連の基準の見直し作業を始めたが、現在の作業項目は次のようになっている。

1) EN 175-13.01（案）

丸太および製材の含水率の測定法

1) 製材の含水率決定方法（全乾法）および 2) 製材の含水率推定方法（電気的方法）

2) EN 175-xxx（案）

丸太および製材の表面硬化の評価方法

3) EN 12169（案）

数多くの製材の整合性の評価基準

4) EN 175-xxx（案）

丸太および製材の乾燥材品質の評価

CEN TC 175 は領域毎に分割された作業グループ（WG）からなるという構造上、トピックは個々の基準に分割され、検討が進められている。測定法に関する全ての基準は第一作業グループ（WG1）によって、一方丸太および製材の性質にかかわる基準は第二作業グループ（WG2）によって検討されている。これらの基準を現場に適用することを考えれば、この方法は最善策とは云えない。なぜならユーザーがあらゆる指示に従うためには、その前にいくつかの基準を理解しておかなければならないと思われるからである。さらに、ヨーロッパ規格委員会 CEN が設定した基準の記述は通常極めて短く、背景となる情報はほとんどか全く含んでいない。したがって、ヨーロッパの乾燥グループは、乾燥材品質にかかわる一連の基準に関して、以前に出された EDG 勧告と同様の骨組みを有するコメントを出す予定となっている。

[乾燥材品質の内容と評価]

含水率に関する乾燥材品質の基準とその評価システムを構築するためには、次のような様々な測定誤差の原因を考慮しなければならない。

- 1) 機器の不十分さと不適切な使い方に基づく電気的含水率測定の不確かさ
- 2) 電気抵抗と含水率との関係の本質的なばらつき
- 3) サンプリングの誤差

さらに、乾燥材品質区分において要求される含水率基準が現在現場で実用化されている乾燥技術を使って達成可能であること、また含水率基準の設定は現状の製品規格に対するニーズとユーザーの要求を保証することも必要である。

乾燥材品質に求められるものは、たとえ含水率の許容範囲が含水率のレベルによって異なっても、この含水率レベルをどうするかということよりも様々な最終用途が何を必要としているかと強く関係するものである。したがって、目的に合わせて、様々な乾燥材品質の区分を設定することが妥当と考えられ、その区分設定は目標含水率 (MC_{targ}) のばらつきによって決められるものである。

あらかじめ契約で設定された目標含水率を、現場で正確に達成することはかなり困難である。製品のあるべき平均含水率をあまりに厳密に制限することは、品質の低下につながりかねない。この問題は、乾燥操作によってはある程度目標含水率あたりで、製品の平均含水率が変動してもかまわないとするような、含水率範囲を設定することによって解決できる。

棧積みや荷口内の含水率のばらつきのあり様は、標準偏差で表すことができる。含水率の標準偏差は常に棧積みや荷口の乾燥材品質を全体的に評価するものである。大きな標準偏差は乾燥材品質が低いことを示し、一方標準偏差が小さいことは高い乾燥材品質を表わすことになる。実用的には、乾燥による目標含水率が高いほど標準偏差は大きくなることだろう。

含水率に関する乾燥材品質を決めるために、これまで様々な方法が提案されてきた。スカンジナビアの規格 (INSTA 141 (SS 232740)) は標準偏差の違いによって含水率区分を決めている。この規格の目的は工場で良しとされる乾燥操作の範囲を定めることであり、とりたてて最終用途における特別な要求に関する基準を設けていない。EDG の勧告 (1994) では、3つの乾燥材品質区分、すなわち S、Q、および E を設定している (Welling, 1995)。それぞれの区分ごとに、サンプル集団内で許容される含水率値のばらつきが目標含水率の関数として表されており、そこでは測定結果の 90% が許容範囲内になければならないとされている。

スカンジナビアの規格 (INSTA 141) は弱腰でしかも十分に明確ではないが、一方 EDG のアプローチは難しすぎて適用が不可能であると判断される。なぜなら、低含水率レベルで許容含水率範囲が極めて狭く、また実用的に目標含水率と実際の平均含水率との偏差を認めていないためである。

このように以上の二つの試みは不十分であると考えられることから、既述した EU 計上のプロジェクト「IMCOPCO」の下で、工場での乾燥操作によって得られた 100 セット以上の乾燥データが解析されつつある。このデータ解析に基づいて、乾燥材品質の評価に適した記述法 (平均含水率 MC_{targ} および標準偏差 std) と試験方法が提案されている。すなわち、工場が目標含水率を正確に達成できないという問題を克服するために、三つの異なった乾燥材品質区分 (S、Q、E) ごとに、以下のように平均含水率 (MC_{cav}) と目標含水率 (MC_{targ}) との間の許容しうる偏

差を MCtarg の関数として、次のように表している。

$$\text{区分 S : } \text{MCav} = \text{MCtarg} \pm \text{MCtarg} \times 0.06$$

$$\text{区分 Q : } \text{MCav} = \text{MCtarg} \pm \text{MCtarg} \times 0.12$$

$$\text{区分 E : } \text{MCav} = \text{MCtarg} \pm \text{MCtarg} \times 0.18$$

さらに、標準偏差が目標含水率の関数として定められている。以下の式での数値 0.3 は、低含水率レベルで標準偏差が小さくなりすぎるという問題を補正するためのものである。

$$\text{区分 S : } \text{std} = 0.3 + \text{MCtarg} \times 0.06$$

$$\text{区分 Q : } \text{std} = 0.3 + \text{MCtarg} \times 0.12$$

$$\text{区分 E : } \text{std} = 0.3 + \text{MCtarg} \times 0.18$$

現場への応用にあたって、ある目標含水率を設定した場合、乾燥材品質区分それぞれにおいてかなりの結果が合格することになる。図 1 には、平均含水率と標準偏差について、許容できる場合（合格）とできない場合（不合格）とを例示している。

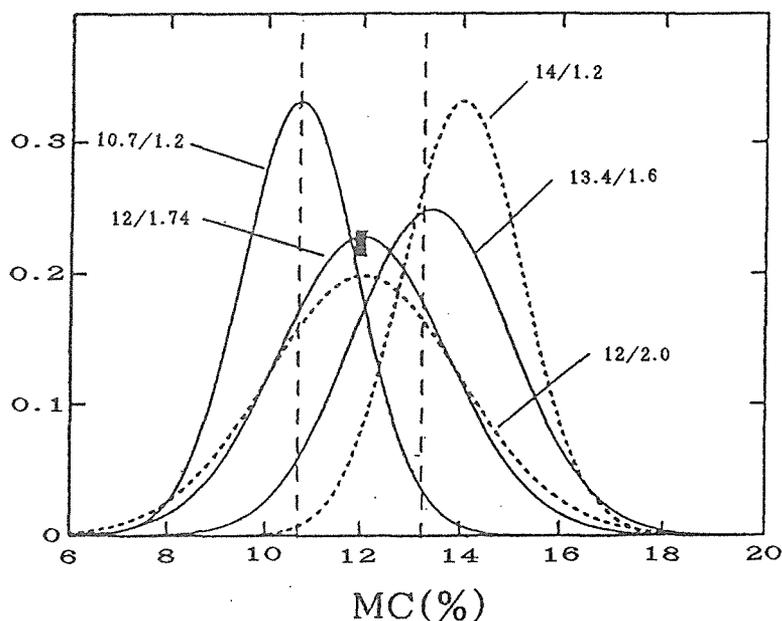


図 1 目標含水率が 12%時に乾燥材品質区分Qに適合している場合（実線）としていない場合（破線）

サンプリング手順を決める際、サンプルサイズ（試験体数）はロットの大きさ、標準偏差、含水率の信頼限界、有意差のレベルに依存して決まる。統計的な見地から、標準偏差が大きい集団は、小さい集団よりもサンプルサイズが大きくなる。現場の条件下では、このことは目標含水率と標準偏差が大きくて価値の低いロットは、最大のサンプルサイズが必要となり、現場では受け入れられないことを意味している。この問題を克服するために、平均含水率の信頼限界は、目標含水率に合わせて調整されている。前もって設定されたサンプルサイズで、有意レベルが 83%から 96%の範囲にあり、これは現場でも受け入れ可能と考えられる。

表1 乾燥材品質区分S、Q、Eにおけるサンプルサイズ（試験体数）

注：サンプル数はロットの大きさ、標準偏差、含水率の信頼限界、有意差レベルの関数

目標含水率		8			12			18		
乾燥品質		E	Q	S	E	Q	S	E	Q	S
含水率範囲 (+/-)		0.48	0.96	1.44	0.72	1.44	2.16	1.08	2.16	3.24
標準偏差		0.78	1.26	1.74	1.02	1.74	2.46	1.38	2.46	3.54
信頼限界		0.15	0.25	0.35	0.21	0.35	0.49	0.3	0.5	0.7
ロットサイズ	サンプル数	有意差レベル (%)								
100	30	0.82	0.83	0.83	0.84	0.83	0.83	0.85	0.83	0.83
500	40	0.82	0.83	0.83	0.84	0.83	0.83	0.86	0.84	0.83
1000	60	0.88	0.89	0.89	0.90	0.89	0.89	0.91	0.89	0.89
2000	70	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.93	0.91	0.90
3000	80	0.91	0.92	0.92	0.93	0.92	0.92	0.94	0.93	0.92
10000	100	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96	0.95	0.94

これとは別の試みは、乾燥材品質区分を一つとし、それを三つの含水率レベルに分割することを示唆している。その目的は、現場で行われているすべての人工乾燥操作のうち、その約 90%を良しとするような基準を設定することである。

図 2 と 3 を使って、上記の二つの提案を比較することができる。平均含水率の許容範囲に関する提案 (NQ+/NQ-) は、ほとんど乾燥材品質区分Sと等しいことが容易に見て取れる。標準偏差については、含水率区分が区分SとQの間に位置するという特色を示している (図3)。

表2 含水率区分に基づく乾燥材品質仕分け法

目標含水率	平均含水率の許容範囲	最大標準偏差
<10	±1.5	1.5
10-15	±2.0	2.0
>15	±2.5	2.5

[現場での乾燥データの評価結果]

工場で生産された乾燥材（様々な寸法の針葉樹材および広葉樹材）を用いて、約 100 の乾燥データについて平均含水率と標準偏差が解析されている。図 3 に、それぞれの結果の標準偏差がプロットされている。以上に述べた乾燥材品質区分法においては、目標含水率を使用していないので、図 2 に目標含水率のデータは示されていない。

S+: $MCav \leq MCtarg + MCtarg \times 0.18$	S-: $MCav \geq MCtarg - MCtarg \times 0.18$
Q+: $MCav \leq MCtarg + MCtarg \times 0.12$	Q-: $MCav \geq MCtarg - MCtarg \times 0.12$
E+: $MCav \leq MCtarg + MCtarg \times 0.06$	E-: $MCav \geq MCtarg - MCtarg \times 0.06$

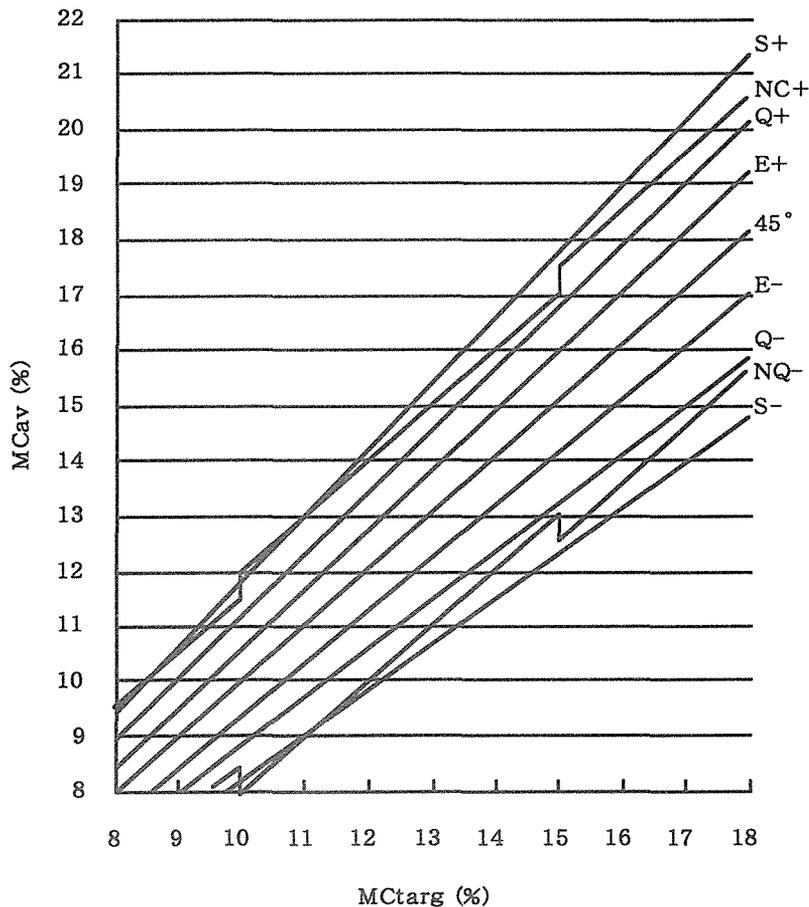


図2 三段階の含水率区分S、Q、Eおよび含水率区分決定システムにおける平均含水率 (MCav) の許容範囲

図3は、棧積みの中の約90%が両方の評価法に従っていることを示している。S、Q、Eの乾燥材品質区分によって仕分けした場合、プロットは多かれ少なかれ3つの乾燥材品質区分間に平たく分布していることが分かる。

現場の人々は目標含水率を達成すること自体が問題だと言う。しかし、様々な含水率レベルにおける平均含水率の許容範囲(表2参照)を考慮すれば、その区分内で特定のエンドユーザーによって要求される品質基準を満足させることは可能であると考えられる。

唯一残った問題点は電気式含水率測定の不正確さである。適正に校正された機器を使えば、含水率6%~14%の間で、約1%の精度が得られることが良く知られている。含水率が高くなるにつれ、精度は2%と悪くなり、さらに精度が落ちる場合もまれにある(例えばメラランチ)。表2に示された平均含水率の許容範囲を考慮すれば、実用面での電氣的測定の不正確さは多かれ少なかれこれらの範囲内に落ち着くものと思われる。

現場では全ての誤差の要因が同時に生じることもあり得るかもしれない。しかし、技術的に要求に応えることができないとはいっても、乾燥材品質区分を決めることが無意味ということにはならない。

Class S: $\text{std} \leq 0.3 + \text{MC}_{\text{targ}} \times 0.18$ NQ レベル: MC < 10: std = 1.5
 Class Q: $\text{std} \leq 0.3 + \text{MC}_{\text{targ}} \times 0.12$ MC 10-15: std = 2
 Class E: $\text{std} \leq 0.3 + \text{MC}_{\text{targ}} \times 0.06$ MC > 15: std = 2.5

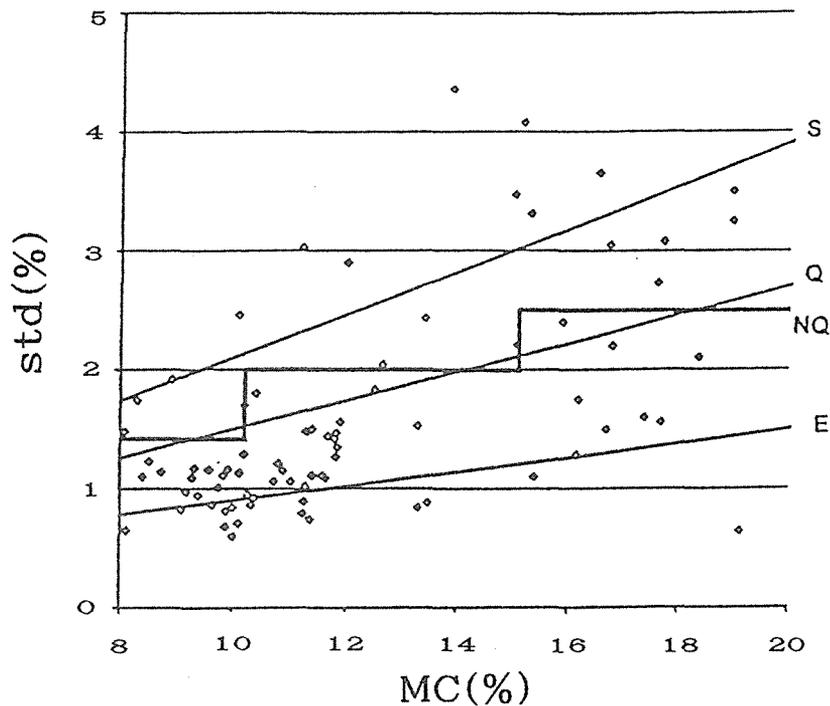


図3 約 100 回の乾燥結果に基づく乾燥材品質の区分結果
 (乾燥材の平均含水率と標準偏差)

[乾燥材品質を管理するためのサンプリング法]

あらゆる品質管理を目的とした統計的手法には、判断の偏りをなくするためのランダムサンプリング（無作為抽出）が不可欠である。乾燥材品質をコントロールするには、この前提条件が常に満足できるとは限らない。通常、棧積みや荷口から限られたパッケージのみが選択され、ランダムサンプリングのために用いられる。しかし、乾燥室内での位置、前処理等の履歴、輸送時の含水率変化の有無やその他の原因により、個々のパッケージの間で、平均含水率と標準偏差は変動するかもしれない。起草段階の CEN 規格 EN 12169 (案) (1997) では、ランダムサンプリングの手順は試験に供するパッケージの数を決め、それぞれのパッケージからランダムに試験材を選ぶというものである (表 3、図 4)。

それぞれの選択されたパッケージを開く前に、ある一定数の試験材に印付けが施される。試験官の違いによる影響をも避けるために、印付けされた試験材のみを試験に用いることとし、残りは無視する。特に乾燥材品質を評価するには、パッケージ内で外側に位置するものは対象とし

てはずしたほうが良い。

この手順がランダムサンプリングとして適当と考えられる。しかし、比較的少数のパッケージのみが使用されることになるので、このことが結果として与える悪影響の可能性についても IMCOPC プロジェクトにおいて検討されることになる。

表3 CEN 規格 EN 12169 (案) による検査パッケージ数

1ロットにおけるパッケージの数	開くべきパッケージ数
1	1
2-5	2
6-11	3
12以上	4

注：1つのパッケージで必要な標本数を満たすだけの試験体数が得られない場合は、パッケージを追加する。

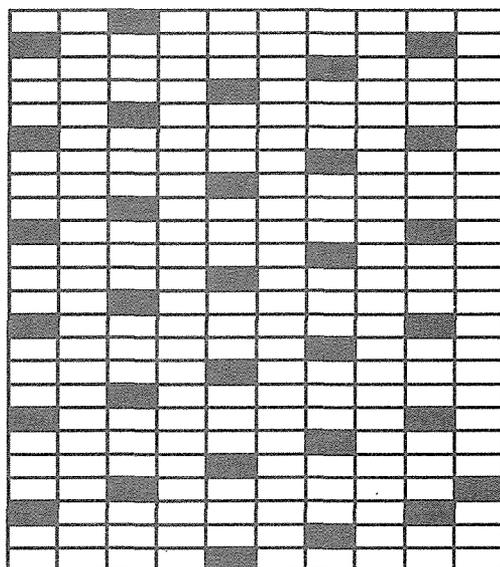


図4 パッケージ内 31 個の試験材への印付け方法

- 1 番の試験材をランダムに選択したあと、8 番目ごとの印付けされた試験材
- サンプル数を 31 にするためにランダムに追加された試験材

[まとめ]

ヨーロッパにおいては、乾燥材品質の基準と評価方法の設定に対する緊急のニーズがある。この種の基準設定は、人工乾燥材の供給者とユーザーの両方のためになるものと思われる。さらに、電気式含水率計に測定精度の点で不完全さがあるとはいえ、これは基準を設定することを制限する要因にはならない。また、人工乾燥技術の最適化や乾燥モデル評価のための乾燥試験に関しては、乾燥材品質基準が有益な指標として活用されるであろう。

2. 乾燥材の品質改善のためのウォームアップにおける蒸気の活用

Valmet-Utec Ab (フィンランド)

A. フッカ (A.Hukka) 著

[はじめに]

木材の乾燥過程における関数モデルは木材の物理現象に焦点がおかれ、その一方で乾燥装置の問題は乾燥技術者に委ねられてきた。現在、木材の乾燥にともなう物理現象の試験データは工業的な乾燥装置を設計するには不十分であると言わざるを得ない。それは乾燥装置内の温湿度条件を変化させたときに現れる各乾燥試験データのそれぞれが特定の乾燥装置の加熱と加湿で行われているからである。すなわち、木材そのものの性能を理解することが重要であるように、乾燥装置の性能というものを理解することで高品質の乾燥材を生産することができると考えられる。

従来から、乾燥割れを防ぐための基礎実験として木材中の水の拡散、木材の収縮、クリープ現象、木材の強度という項目で試験研究が行われてきている。そして、これらの現象の大部分は木材の乾燥過程の数学的なモデル解析によって証明されてきている。すなわち、長年にわたって異なる樹種と材厚による乾燥スケジュールの開発や解析を可能な限り行ってきたことによって確立されてきたのである。しかし、その一方で大きな熱容量を持ち、風速ムラのあるような実用レベルの乾燥装置では乾燥装置内の温湿度条件等の試験研究が見過ごされてきていたと考えられる。

乾燥による割れは、厚材にとっては最も注意を要することである。これは北欧各国で共通の認識である。この割れの問題は乾燥初期の温度上昇時期に注意することでおおよそ解決される。現在北欧で扱われている材の心材部分の含水率は繊維飽和点を僅かに超えているだけであるから、乾燥過程の早い段階で収縮が始まることで割れが生じる。図 1 に材の断面写真を示す。仮に製材工程と乾燥工程の間で時間がおかれたとすれば、乾燥過程に入る前に表面が割れやすい状態になってしまう。

温湿度制御の難しい温度上昇時に生じる微細な乾燥割れを避けられたら、かなりの乾燥割れを防ぐことができる。この割れの防御対策は乾燥初期における温度上昇を乾燥スケジュールどおりに制御することにかかっている。たとえば、ウォームアップ時の乾燥割れを防ぐため、水蒸気を冷温度の低い木材上で凝縮させて乾燥が進まない状態で木材を加熱することも可能なのである。

[数式による表現]

近年の数式モデルは 2 次元要素から成り立っている。その次元とは材厚と装置内の風速である。加熱空気は不定の幅を持った平面上を一定の速度で流れるとしているが、現実には乾燥装置内の空間容積を考慮しなくてはならない。

1) 木材の含水率と温度

木材内の水分は 3 種類の異なる形で構成されている。それらは、細胞ルーメン内の水分、細胞壁の結合水、ルーメン内の水蒸気である。これら材内の水分移動は熱の移動、拡散、対流、移動のような幾つかの現象が同時並行的に生じることで関係づけられている。しかしながら、木材の乾燥過程の正確なシミュレーションを行うときはモデル関数を選ぶのではなく、むしろモデル

関数中のパラメータを正しく数値的に評価することにある。

この試験では生材から乾燥する過程の材内の水分傾斜を単純な拡散方程式を用いてモデル化した。拡散式の微分係数は、含水率と温度と密度という3要素で定義した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int u dV = \int D_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} dS \quad \dots \quad (1)$$

(1)の式は含水率傾斜が生じる過程を表した積分方程式である。これと同時に木材の温度変化はフーリエの法則に則って変化し、(1)の式に良く似た(2)で表すことができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int c_p T dV = \int \lambda \frac{\partial T}{\partial x} dS \quad \dots \quad (2)$$

これら(1)と(2)の式は、水分の蒸発が木材の表面のみで行われるという関数のため、お互いには関係づけられない。また、このモデルは木材の乾燥過程を正確にはとらえていないと考えられるため加熱が異なることは全く無視しているが木材の乾燥に大きく関わる拡散係数の数値を重視している。(1)と(2)の式は従来からよく用いられている式である。数値制御の関数としてよく使われる式である。これらは境界条件が存在するが、時間的な変化によって連続的に答えがでるようになっている。

2) 木材表面の加熱と質量の移動

熱と水分の移動は木材表面における境界層の関数として表される。この関数は木材表面におけるエンタルピー密度と含水率の関係である。水分状態の変化の関数は補正係数を含んでいる。この補正係数は水分移動において木材中に抵抗があるということを考慮した値である。

$$F_u = \frac{\alpha}{c_p R_v T} \frac{\beta_w}{\beta_l} (p_v - p_{v\infty}) \quad \dots \quad (3)$$

熱移動の係数は流速の式である。また、材表面においては熱力学的な平衡があると推定され、水蒸気分圧は吸湿曲線として表される。

木材の乾燥過程で空気の加熱と水分の移動は同時に起こっている。木材の表面に影響する熱の流れは水分の状態によって異なる。

$$F_E = \alpha(T^* - T_\infty) + l_v \cdot F_u \quad \dots \quad (4)$$

数学的な観点からみると、木材表面における熱と物質の移動はあまり重要ではないと思われる。乾燥初期の温度上昇期間では凝縮水が材の表面に付着し材温は露点温度よりも下回る。この場合、木材の特性に対する補正は(3)の式から省略しても良いと思われるのがこの理由である。

3) 乾燥装置内の湿度

湿潤空気の特徴は乾燥空气中に水分がどれだけ含まれているかということによって表されてきた。従来から使用されているパラメータは空気中の含水率とエンタルピーであり、(5)、(6)の式で表されている。このとき材間の流れ速度は一定値であるとする。

$$I = (c_a + X \cdot c_v) \cdot T + X \cdot l_v \quad \dots \quad (5)$$

$$X = \frac{p_v R_a}{(p_{tot} - p_v) R_v} \quad \dots \quad (6)$$

温度が高く湿潤な空気が相対的に冷たい積み内に流入すると水の凝縮がおこる。この過程は

乾燥中におけるエンタルピーと空気中の湿度変化を表す微分方程式(7)で表される。

$$\frac{dl}{dy} = \frac{F_E(y,l,X)}{v \cdot d/2 \cdot \rho_a} \quad \dots \quad (7)$$

$$\frac{dX}{dy} = \frac{F_u(y,l,X)}{v \cdot d/2 \cdot \rho_a}$$

(7)の式は材表面からの熱と質量の変化を示す経験式から作成された(3)(4)と関係づけることができる。試験を繰り返し試験を行うことによって、これらの関数の解を求めるためには幾何学的な応用による方法が確かである。

風速、風向を考慮した積層の方法を図 2 に示す。全体の熱と湿度を計算するには装置全体の大きなエネルギーとエンタルピーバランスの推定が必要である。実際のところ空気孔により変化する僅かな空気量 ε は(8)の式で表される。

$$X_{in} = (1 - \varepsilon) \cdot X_{out} + \varepsilon \cdot X_{ext} \quad \dots \quad (8)$$

凝縮するときは湿度が与えられるわけであるが、必要とする値は、流入する加湿空気と積層みからでてくる空気の水率である。これは(9)の式で表される。

$$\frac{m}{M} = X_{in} - X_{out} \quad \dots \quad (9)$$

空気を加熱するための熱は積層みの中で冷却され、通気孔のなかのヒーターによって再加熱される。これは(10)の式で表される。

$$\frac{P}{M} = (1 - \varepsilon) \cdot (I_{in} - I_{out}) + \varepsilon \cdot I_{ext} \quad \dots \quad (10)$$

もし、空気中の湿度を水スプレーによって与えるのであれば、スプレーの水を蒸発させるための潜熱が必要となってくる。しかしながら、実際には水スプレーの水がすべて蒸発するわけではなく、加熱コイルの表面温度が低いこともあり蒸発の能力はスプレーノズルの形状や状態によるところが大きい。

4) 割れの検知

温度上昇中に割れが生じることをを見つけるために、HAN 氏が構築した応力モデルを使用した。これは予め用意した含水率減少と温度上昇曲線を入力し、必要な応力条件は、弾性応力、収縮、粘弾性クリープ、メカノソープクリープの値を代入した。これらから乾燥応力による表面割れの予知は(11)の式で表すことができる。

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma}{f} \sqrt{\frac{L}{L_{ref}}} \quad \dots \quad (11)$$

温度上昇期の割れの始まりは、この応力の最大値によって予想することができる。

乾燥期間中、深さ 3mm で試算した計算上の応力と実際の割れとの関係から最も有効な係数が解明された。しかしながら、試算された 3mm の場合では乾燥初期の極小さな表面割れを予想するのは深すぎる。そればかりか最初の 1 時間における狭い範囲で生じる引張り応力にすぎないことに注意しなければならない。

5) 制御装置

工業的な乾燥装置は通常、乾球と湿球温度を制御している。一定温度ではこの乾球と湿球の温度差が表面割れの出現に影響する。この制御をシミュレートするためには総合的な解析が必要である。特に乾燥開始は乾球と湿球の温度差が重要である。

装置の運転シミュレートでは次ぎのような過程でこの温度差を設定した。

1. 初期条件に設定するのに必要な加熱と蒸気流量を関数(9)(10)から求めた。
2. もし蒸気量がもっと必要ならば、必要蒸気になるまで温度を低くして温度差はそのままとして制御した。
3. もっと加熱が必要であれば、温度を低めにして棧積み内に流入する湿度を保つ制御をした。温度が下がる間は必要蒸気量が一定であることに着目した。
4. もし湿球温度が目標値よりも低かったり加湿装置を十分利用していない状態であったら、加熱器と加湿器を十分に使う。

ステップ 3 と 4 は乾湿球温度差は設定許容値よりも下回るが、温度は早く上昇する。2 から 4 のステップでは(7)の関数が繰り返し使われる。ステップ 4 では(9)式と(10)式が逆になるようにする。これは最大エンタルピーと含水率を可能な限り上昇させるためである。

[実験]

乾燥初期の温度上昇時期に乾燥スケジュールと表面割れの関係を試験研究するために表 1 に示すような 10 回の試験を行った。それぞれの試験は材長 1.2m の試験材を 35~40 枚用いた。試験材はエンドマッチされ、それらは同じ材から採材された。棧積み幅は 0.7m、材間風速は 4m/s である。試験前に試験材が乾かないようにするために、製材直後にビニールでくるみ、冷蔵保管した。

この装置には 12kW の能力をもったボイラーが備えられている。このボイラーを用いればあらゆる乾燥スケジュールを試験できる。

乾燥スケジュールの温度と乾湿球温度差はすべて予め入力でき、スケジュールにしたがって蒸気流入量は自動的に制御される。乾燥初期の立ち上げには様々な温度条件が考えられている。表中の 4c を除いては同じ系列の試験である。

もし、乾燥初期の温度上昇期に微小な割れが少ないならばもっと早い乾燥スケジュールを考案できると思われる。

乾燥スケジュールは乾燥後の材質が満足できる仕上がりのなかで乾燥時間が最短になる条件を選択した。試験中の乾球温度と湿球温度がデータロガーで 10 分毎に取り込まれている。試験に対するシミュレーションは実際の乾燥条件と初期含水率や密度等の材質データをあわせて解析した。

[結果]

表 1 は乾燥後に観察した割れの状況である。これは乾燥初期の温度上昇期の影響をみたものである。統計的には 1 と 2 と 4 の試験では有意な差が認められ 3 では温度上昇の影響は統計的に認められなかった。したがって、乾湿球温度差の影響はこの今回の試験研究ではよく説明できなかった。

図 3 は推定した応力に対して実験的に測定された割れの長さの関係を表している。表中 1~4 試験ではどの条件でも温度上昇期の乾湿球温度差が大きいほうが応力は大きくなった。すべての試験における最大応力は実際の乾燥中の前半に生じた。もし試験 3 を除けば、この相関関係はとも良い。しかし、異なる断面で異なる樹種はではお互いに関係づけられない結果となった。

図 4 と 5 は 50×150mm の断面を持ったパイン材を実大規模の乾燥装置で乾燥したシミュレーションである。図 4 の乾燥装置は 1 分間に 21 リットルの水スプレー噴射が可能である。図 5 の乾燥機では 500kW の蒸気ボイラーを備えている。乾湿球温度差は 4℃差と 6℃差を試験した。試験時の外気温は 20℃で、材温も同様であった。両方とも 2 時間毎に送風方向を逆転することによる影響は明らかにみられ、応力曲線から最大応力のポイントが読み取れた。

シミュレーションの結果、乾燥応力は、確かには言えないが平衡含水率と乾湿球温度差に関係があると考えられる。乾燥温度が一定でないならば、乾湿球温度差が大きければ大きいほど乾燥材の質は良くなる。なぜならば湿球温度が早く上昇すれば材表面の温度が露点よりも低い状態になり材面で結露が起こらずに乾燥するからである。図 3 からみれば蒸気の状態によって割れの割合が 15%から 10%に改善される。

図 4 と 5 は温度上昇期の 18 時間は蒸気を抑え気味で乾燥制御している。このことは最終目標含水率に達する乾燥時間を 15%超過させた。

相対的に薄い材になれば当然乾燥時間が早くなるが、材厚が増す場合は仕上がり状態を考慮に入れなければならない。マイナス 20℃の厳寒における 75×150mm のウォームアップにおける蒸煮の影響が図 6 と 7 で明らかに示されている。図 3 によれば、蒸煮の効果は乾燥時間が 8%しかセーブしていないが 50%の割れ改善効果を示している。

経済的な観点からいえば、製材品の品質によってボイラーの使用方法を変えることがよい改善方法と思われる。蒸気加熱方式の利点は乾燥装置を増設したり、乾燥材の品質も変えられる。いずれにしても実際の乾燥操作で微少な割れも発生させずにできるだけ早く乾燥することが最終目標である。

表 1 乾燥初期のウォームアップ時の蒸煮効果を試験研究するための計画表

試験	試験材の樹種とサイズ (mm)	丸太からの採材枚数 (枚)	ウォームアップ時間 (時間)	乾湿球温度差 (℃)	平均含水率 (%)	割れの発生割合 (%)	応力 (%)
1a	スプルース 50×125	2	10	6	15.8	12	110
1b	スプルース 50×125	2	10	2	16.2	1	74
2a	パイン 38×150	4	10	8	17.3	35	134
2b	パイン 38×150	4	10	2	19.8	11	104
3a	スプルース 50×125	2	18	5.5	16.7	2	84
3b	スプルース 50×125	2	10	8	16.9	3	105
3c	スプルース 50×125	2	5	2	17.1	4	65
4a	パイン 75×125	2	5	3	19.7	9	78
4b	パイン 75×125	2	10	5	18.1	19	97
4c	パイン 75×125	2	5	3	19.2	11	85

[考察と結論]

この報告の以前に一枚板を乾燥するときの数学モデルを示した。このときは計算上の応力と観察された割れの関係が良かった。ただし、この関係は試験材が違うので図 3 に示す今回の結果と

は直接関係づけられない。なぜならば、元の関数は木材の表面から深さ 3mmのところまで測定されたものを想定したからである。この試験では温度上昇期の最大応力は測定されていなかった。

最新の数式モデルでは蒸着状態における応力もまた正確にシミュレーションが可能である。また、この数式モデルは微少な割れの広がりや発生時期を予測するには標準的方法になると思われる。応力の最大値をみることは割れの場所や発生時期を予測することに有効であると考えられる。

実際の乾燥過程において多くの材の乾燥割れを測定することは不可能である。同じく温度上昇時期に表面割れを実測することも困難である。この測定のために装置から出すことさえも難しいことである。なぜなら、外気条件によって割れが生じてしまう場合が多いからである。現在の試験研究では比較的少量で明確な結果を出すようにしている。この試験研究を実用レベルに近づけることは難しいので、できるだけ多くの試験材を用いて実験を行っている。

このシミュレーションで用いた試験材は特定のサイズで試算したものである。ただし、心材と辺材の含水率の差は考慮に入れている。また、場合によっては試験材の両木口からの蒸発を考慮しなければならないこともある。さらに、この数式モデルで省略している要素がある。それは乾燥装置壁面の結露である。ただし、これらのことはお互い無視しても差し支えないと思われる。

試験研究を進めていった結果、乾燥初期の温度上昇時期に乾燥装置内の空気を湿潤状態にすると表面割れが 50%減少する。この小型の乾燥装置ではこのような結果が得られたが、この結果を直接実大装置に適用できる可能性は少ない。なぜなら実大装置では蒸気出力等の能力が大きいためからである。特に単位体積あたりの必要蒸気量は小型の乾燥装置の値からは見積もることが不可能である。ただし、シミュレーションモデルを用いたこの数式モデルからすると、装置とボイラーの能力バランスがとれていれば、どんな乾燥装置でも蒸気エネルギーを最大限に活用できると考えられる。

試験研究における実験的なデータと関数モデルを解析することで、製材品を中温域で人工乾燥を行う場合、割れの減少のみならず様々な改善につながると考えられる。基本的な常識であるが、蒸気の数量的な情報は限られてきたのである。最新のモデルは基礎研究と応用研究をリンクさせたものであり、今回使用した関数は特定の装置でそれに適合したボイラーとの組み合わせで制御可能である。

(用語)

λ :熱伝導率(W/m/K) α :熱拡散係数(W/m²/K) σ :応力(Pa) c :比熱(J/kg/K)

d :材木厚(m) f :瞬間強度(Pa) I :比エンタルピー(J/kg(乾燥空気)) L :材厚(m)

lv :蒸発潜熱(J/kg) M :流束密度(kg/s) m :蒸気流入量(kg/s) P :加熱(W)

p :圧力(Pa) R :ガス定数(J/kg/K) T :温度(K) v :風速(m/s)

X :絶対湿度(kg/kg(乾燥空気)) x :材厚さ方向座標(m) y :流れ方向の座標(m)

(上付き)

*:木材表面

(下付き)

a :空気 ext :外部 l :液水 v :水蒸気 w :木材 ∞ :自由な流れ



図1 スコツツパインの木口断面 (75×150mm)

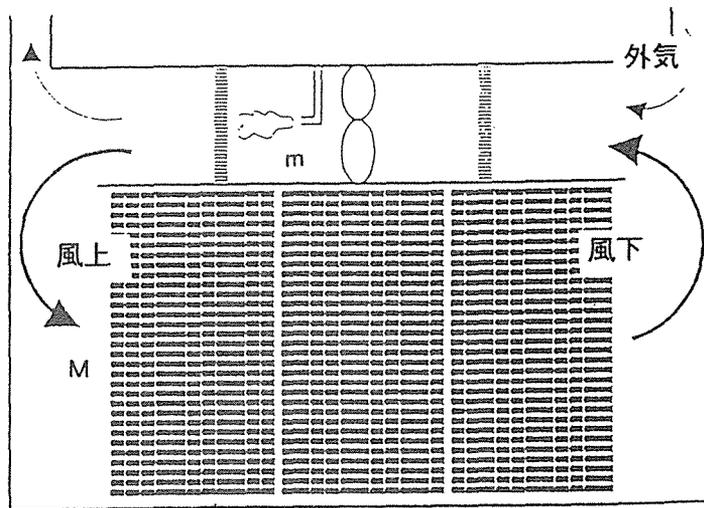


図2 乾燥装置内の送風装置と加熱装置と風向

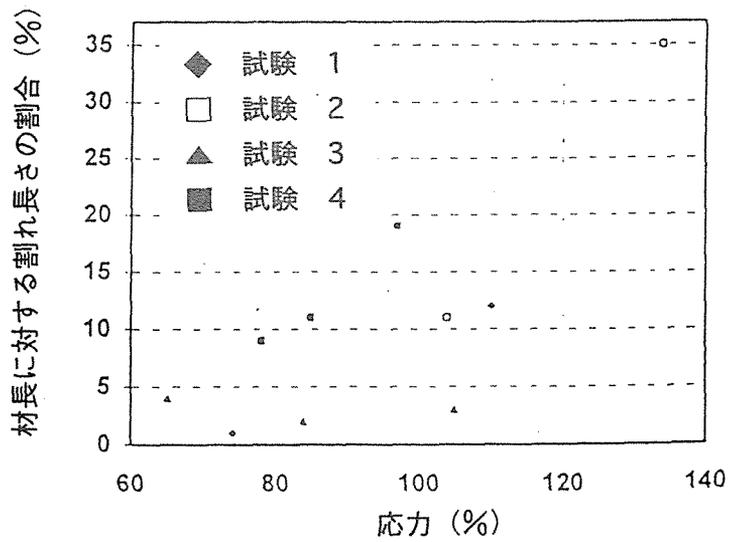


図3 製材品の割れと計算上の最大応力の関係

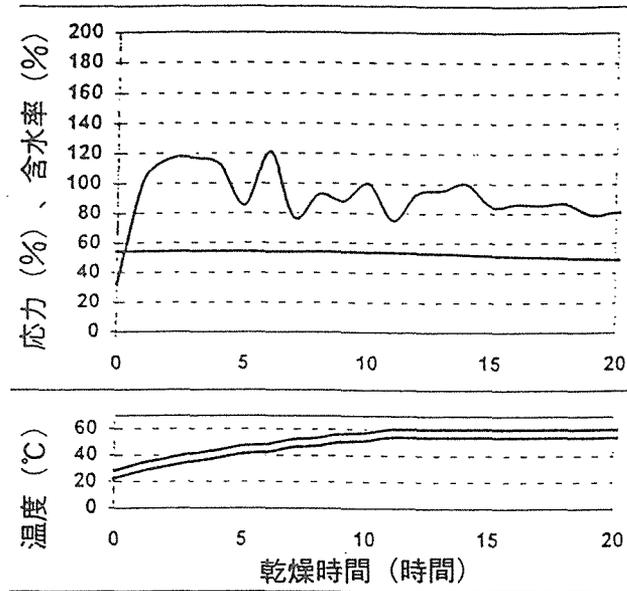


図 4 乾湿球温度差を 6°Cとし蒸煮を行わなかった場合のパイン材 (50×150mm) のウオームアップシミュレーション

上図：応力と平均含水率
 下図：乾球温度と湿球温度

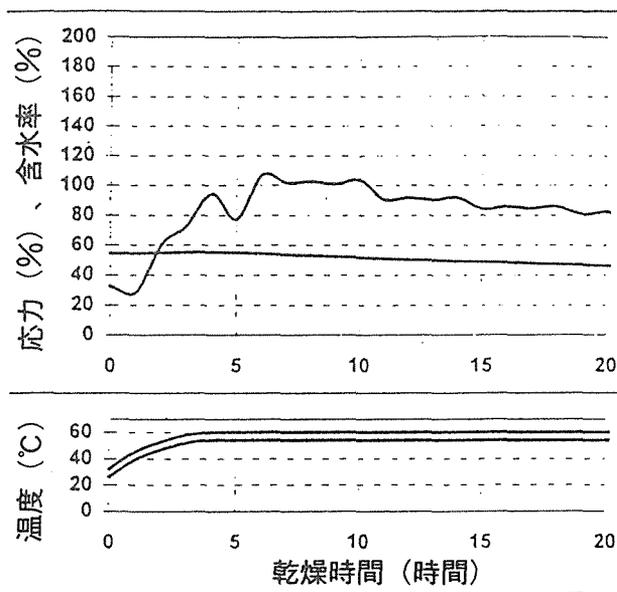


図 5 乾湿球温度差を 6°Cとし 500 kWで蒸煮した場合のパイン材 (50×150mm) のウオームアップシミュレーション

上図：応力と平均含水率
 下図：乾球温度と湿球温度

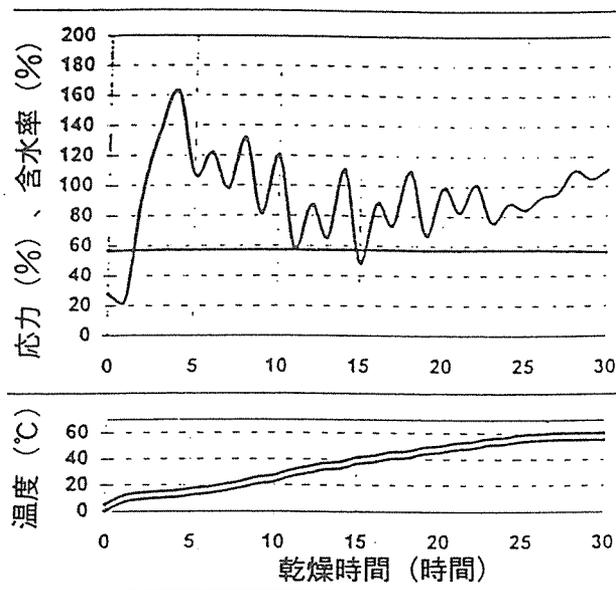


図 6 乾湿球温度差を 5℃とし蒸煮を行わなかった場合のパイン材 (75×150mm) のウオームアップシミュレーション

上図：応力と平均含水率

下図：乾球温度と湿球温度

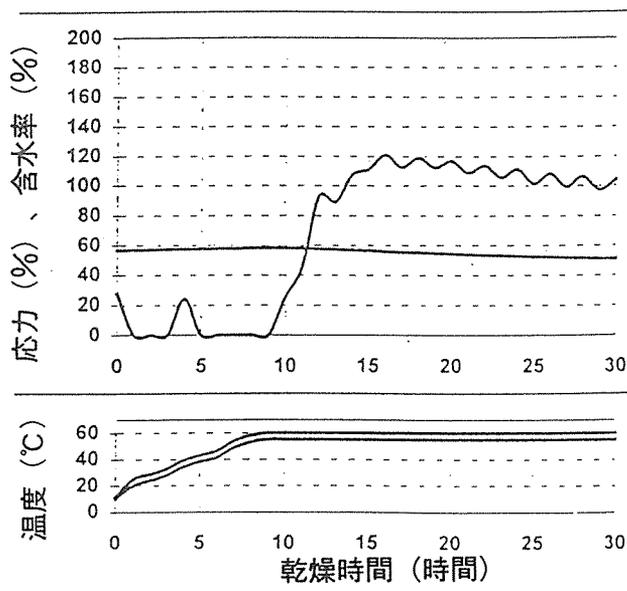


図 7 乾湿球温度差を 5℃とし 500 kWで蒸煮した場合のパイン材 (50×150mm) のウオームアップシミュレーション

上図：応力と平均含水率

下図：乾球温度と湿球温度

3. 革新的な乾燥スケジュール試験のための新しい装置

ENGREF/INRA (フランス)

パトリック・ペレ (P.Perre) 他 共著

概要

フランス林産研究所では新しい乾燥装置を考案した。この装置は乾燥温度が 30~150℃という広い範囲で運転でき、露点も 20~130℃の範囲で制御が可能である。一般的に、100℃以上の高温状態においては缶内が加圧状態になることが知られているが、この装置は耐圧力 300 (kPa) でも運転できるように設計した。また、この装置は減圧状態でも運転が可能である。

この装置の温湿度の制御は自動制御であり、乾球温度は 0.2℃以内の精度で制御可能である。さらに装置内の底にある水を蒸発させることによって缶内を加熱して、材内水分の蒸発が行われない飽和蒸気の状態を木材を 130℃まで加熱することが可能である。

この装置には過酷な条件 (高温、飽和蒸気、加圧) にも耐えられるセンサーが備え付けられている。乾球温度と湿球温度のセンサーは試験中にも校正が可能である。もちろん、荷重と気圧も測定可能である。

[はじめに]

人工乾燥とは乾燥時間を短縮することと同時に品質のよい乾燥材の生産技術を追求することである。これらを達成するためにはいくつもの技術的な裏付けが必要である。それは、加熱、熱伝導、木材の収縮に伴うひずみと応力、材質のバラツキそして最新の機器を備えた工業的な乾燥装置の技術的可能性を向上することで達成可能な技術である。特に、乾燥に伴う応力発生機構等を解明し、木材の物理的な特性を検知しながら制御を行う方法は革新的な木材乾燥法と思われる。

これはよく知られていることだが、乾燥過程では乾燥応力が反転する。この応力の反転は乾燥過程のひずみや応力、そして機械的な変化を理解するうえで重要なポイントである。また、乾燥温度と含水率の相互作用により粘弾性の挙動が変化することも事実である。

乾燥材を生産するにあたっては木材の機械的な性能が変化しないように高速に乾燥することが最も効果的といえる。このことを達成するためには、当面は高周波加熱 (マイクロ波、誘電加熱) による高温乾燥が考えられる。高周波乾燥では加圧状態における水分の移動のみならず機械的性能に影響しない温度で乾燥できる可能性がある。

高温域の乾燥試験では基礎研究が重要である。ただし、熱力学な理由から常圧状態において 100℃以上で木材に対する影響を見いだすことは難しい。しかし、100℃以上における木材の機械的な試験を行うために、我々は特別な実験装置を考案した。この新しい実験用乾燥装置は以前に用いた装置によって得られた科学的な研究成果を基に設計された。

[モチベーション]

高温高湿における試験データ（乾燥特性や曲げ強度等）は加工技術の向上に必要ではあるが試験研究例が少ないのが実状である。この理由は主に物理化学的な現象、すなわち装置の中で所定の実験条件を作り出して、かつ保つことが難しいことに起因する。たとえば、クリープ試験を水の沸点以上で行おうとすれば、材内の水分移動が必然的に生じ、吸湿現象を引き起こす。これでは、研究者が求めている試験条件とは違うものになってしまう。

この試験研究では最初の段階でクリープテストを行った。そして、この試験を繰り返し行うことによって革新的なスケジュールがイメージされた。ここで用いた新しい乾燥装置では革新的なスケジュールを完全に制御することができた。

図1は最大関係湿度表であり温度と気圧（atm）の関係で示されている。文献上では、この値と平衡含水率とから試験材の最大含水率を推定することが可能であると言われている。

試験データ解析を単純化するために図2のような形状の試験体を性能試験として用いた。片持ち梁試験の場合には、応力曲線はサンプルの形状効果の長さがほぼ同じであれば厚さに影響する。

図3は乾燥過程における試験材の表層と内部の温度と含水率の概念図である。ガラス転位温度は含水率が上昇するときというよりも低下するときのカーブで描かれる場合もある。

含水率が低い状態で乾燥された場合には、この過程は材料性能の劣化をともなうためにゆっくり進行する。ただし、乾燥による落ち込みを避けるためには、この進行速度を解析することが必要になる。

高温乾燥の場合には試験材の大部分がガラス転位温度以上に曝される。含水率が低下するとガラス転位温度が上昇するにもかかわらず、乾燥が直ちに進行する材の表面はガラス転移領域に維持されたまま曝される。このことは、どんな樹種に関しても割れが生じやすくなることにつながり、好ましいことではない。また、この現象は高温乾燥が広葉樹には適応しないことの原因にもなる。

[新乾燥装置]

この新乾燥装置は従来型の乾燥装置よりも広範囲の乾燥条件に適応できるように設計されてきた。特徴的なことは130℃以上の飽和蒸気の状態でも運転できることである。この乾燥装置はステンレスの円筒型のシリンダーを本体とし、このシリンダーは直径90cm、奥行き2mである。また、300kPa以上の高圧はもちろん減圧状態でも耐えられ、30～150℃の温度範囲で運転可能である（図4、5参照）。さらに、130℃以上の飽和状態の温度設定が可能である。関係湿度はシリンダーの下部にある水層の温度調整によって行われている。装置に付随している遠心ポンプと2基のファンは乾燥装置の運転状態に合うように設計されている。この装置のすべての部品や器具は150℃以上の加圧状態でも減圧状態でも許容できる（図6、7参照）

温度湿度の制御法はPID制御でパソコンと連動している。また、あらゆる乾燥スケジュール

の設定入力が可能である。これは庫内の温度を高性能の乾球温度と露点が測定できる 2 つのセンサーを備えているからである。さらに、材表面の変化や重量変化もパラメータとして使用可能である。図 6 のように乾燥中の重量変化を見るために、乾燥機の運転中も操作が可能なロードセルを取り付けた。

この装置の主要な利点はオートクレーブとしても活用可能ということである。この場合は温度上昇を行うために水を蒸発させる。この方法によると木材を乾燥することなく 130℃まで温度上昇させられる。前節の結果によると 100℃以上におけるクリープ試験では木材は大きな変異を示していた。このような結果は乾燥初期の段階で温度上昇が早すぎたことが関係すると思われる。実際、試験材の表面は繊維飽和点より下回り、熱の伝わり方が早くなっていた。繊維飽和点を下回っているということは応力の緩和を乾燥割れ防止に利用することが困難となってしまうことになる。

〔試験結果〕

1) 乾燥機の性能

この一連の試験研究で最初の実証されたことは、99 リットル（直径 45cm、奥行き 62cm）の容器内では 132℃以上の高温状態でも飽和状態が保てることである。100℃以上の温度条件において試験材の乾燥が進まないようする唯一の方法は、温度上昇の間は常に飽和蒸気圧を保つことである。このことはオートクレーブの試験によりすでに実証されている。

このような高温高湿の厳しい条件のなかで行う材料性能試験を行う以前に、いくつかの技術的な問題があったが、これらの問題は今回用いた装置を用いれば解決できることであり、さらに大きな容量の装置にも移行できると考えられる。

2) 材料性能試験

オーク材の場合、試験初期は直線的な粘弾性を示す結果となった。図 8 はオークの生材を 120℃で試験した結果である。温度は 30～120℃まで 10 時間で直線的に上昇させた。続いて 120℃の状態を 10 時間保ち、最後の 10 時間は直線的に温度を下げた。装置内の温度が 70～80℃に上がるまではクリープの変異はほとんどなかったが、その後は変異が大きくなった。このことは木材のガラス転位温度と関係があると思われる。その後は温度の上昇にともなって、この変異は大きくなっていった。120℃になると、温度が一定であるのにも関わらず直線的な変異を示した。この変化の様子はまるで液体のようでもある。最終的な変異の大きさは 20℃で同じ試験をしたときの約 100 倍であった。

3) 新乾燥装置による試験例

この新乾燥装置を用いた試験結果を 2 例紹介する。最初の試験は装置の水層を加熱する温度上昇を試みた。試験材は厚さ 60mm のオーク材である。熱電対は図 9 のように表面と内部という

ように測定位置を変えて取り付けた。表面の温度を測定することは大変難しい。ここで測定された表面温度とは表面と表面から1ミリの深さの範囲である。

この実験では図10のように約2時間半を経過すると設定した温度に達した。このような最初の試験は設計限界値の70%でおこなった。

今回の試験材の厚さは60mmであった。試験中に材内の温度が一定になるためには5時間を要した。この図の部位による温度傾斜は材内の熱伝導に時間差があるためである。試験前の表面と中心の温度は15℃程度で一定であった。初期の内部水分温度が一定ならば材内温度上昇は熱伝導によると考えられる。

第1回目の試験の結果を図11、12に示す。この結果は3段階の温度上昇の段階がある。第1段階は、温水で80℃に温度上昇をさせた。次の段階では、乾球温度を100℃とし、湿球温度を80℃に設定して10時間継続させた。第3段階は乾球温度110℃で湿球温度を70℃という低湿度に設定した。ここで初期の加熱期間中は乾燥が行われなかった。これは試験材の材温が水温よりも低かったことで証明できる。この期間では全体の加熱エネルギーが多くなったため材表面に凝縮が生じた。また、この間は庫内の温度はほとんど水温と同じであった。

最終段階では平衡含水率が2%程度の非常に厳しい乾燥条件であったので乾燥速度は速かった。最終の段階では、水分が繊維方向に移動することで湿球温度に追従する。このような最終段階では、どこで測定しても温度の値は乾球温度に近い値である。言い換えればこれは乾燥が終了したことを示していることにもなる。ロードセルの重量変化のデータから、最終の冷却期間には湿度が高くなり試験材に凝縮が認められた。

[今後の取り組み]

この新乾燥装置は、我々が最初に発案したときから数えて結果がでるまで4年以上前になる。設計温度範囲が広い乾燥装置なので、開発資金、技術レベルの認識度、個々の装置器具選択、センサー、法律的な規制等があったがひとつひとつ解決を行ってきた。

この新乾燥装置による最初の試験ではその性能、すなわち、あらゆる乾燥スケジュールで試験設計が可能であるということが確認できた。今後は、次ぎの段階としてロードセルのキャリブレーションの問題に取り組んでいる。当面は装置内に試験材を入れ、加圧状態における性能試験を予定している。また、高温状態における乾燥応力の試験研究をするために、沸点以上の状態における試験を計画しているところである。

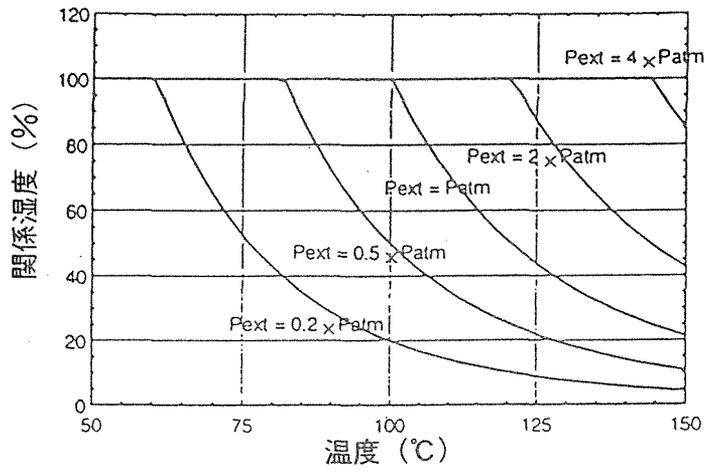


図1 各圧力における飽和水蒸気圧曲線

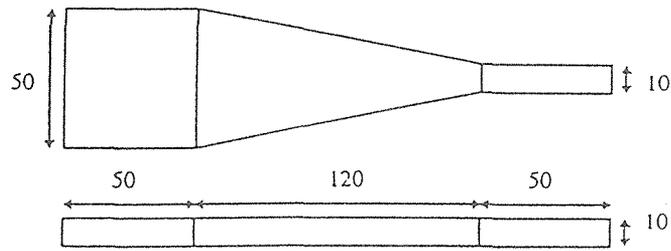


図2 試験材の形状 (単位: mm)

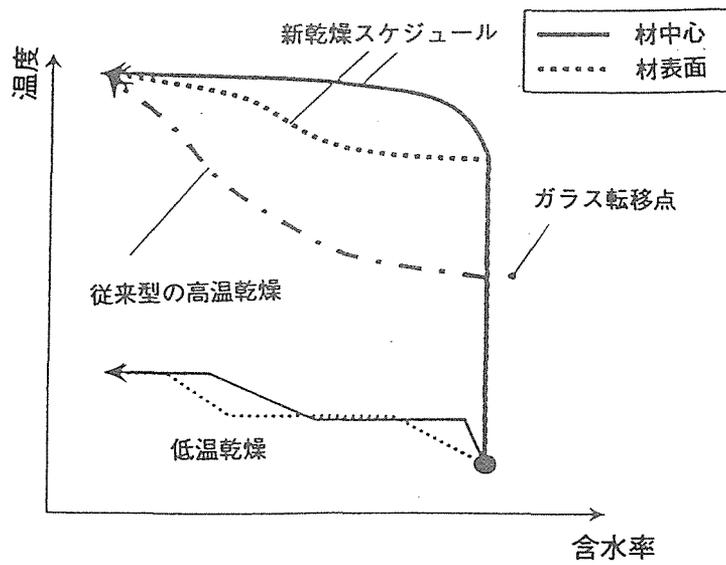


図3 乾燥過程における試験材表面と内部の温度と含水率の変化

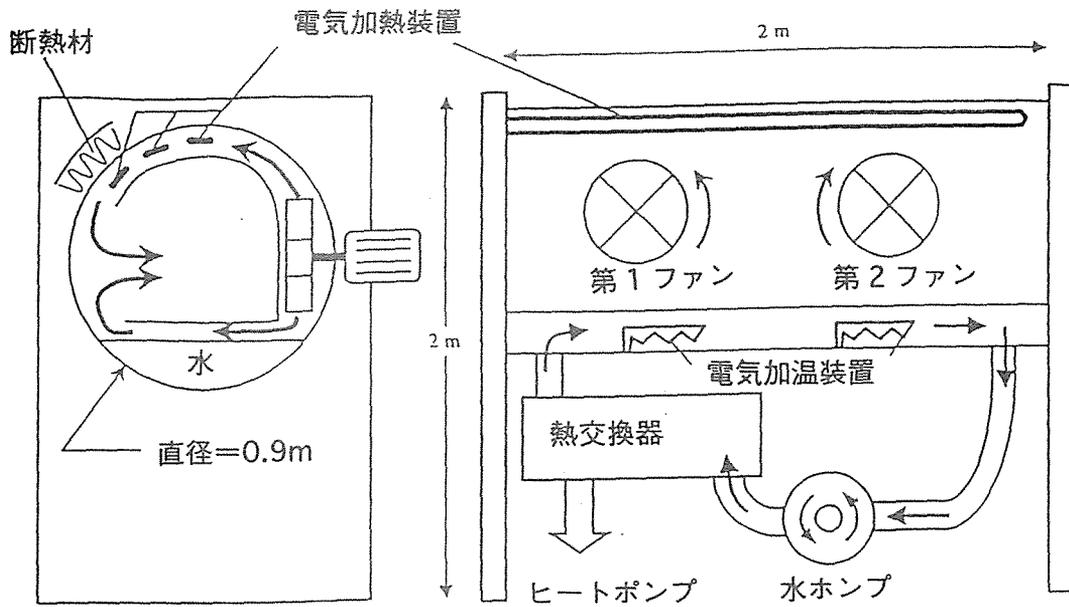


図4 新しい装置の断面および側面図

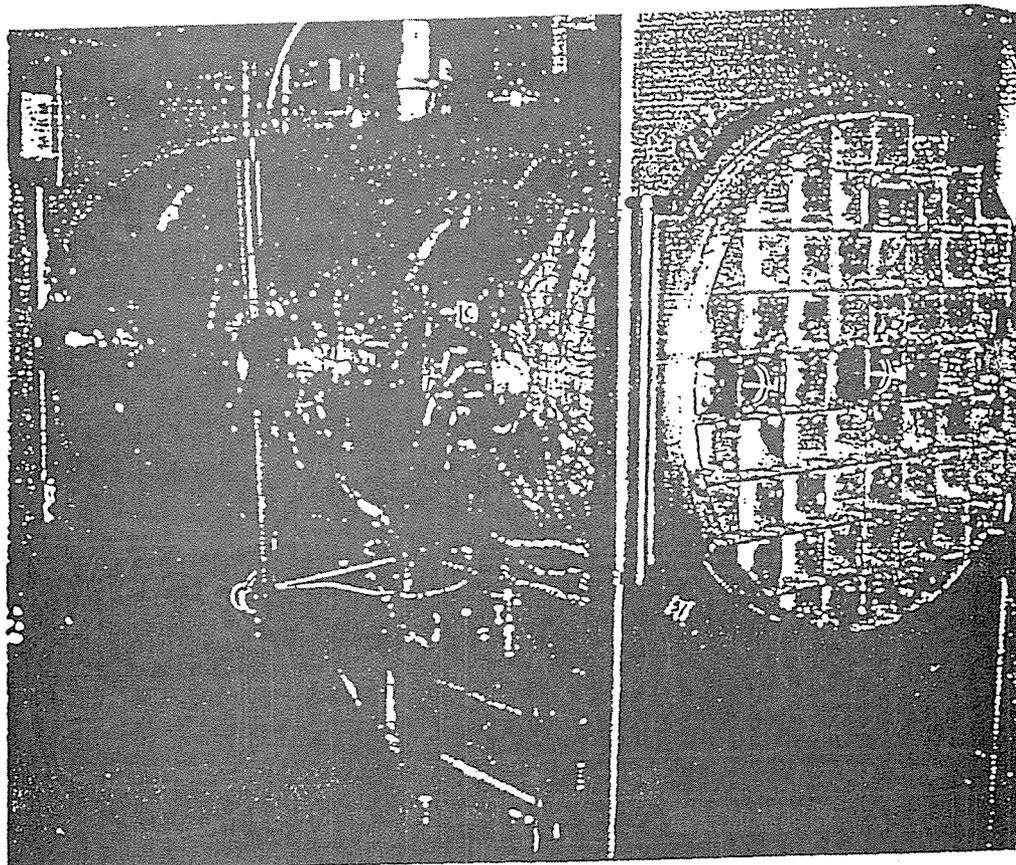


図5 装置外観

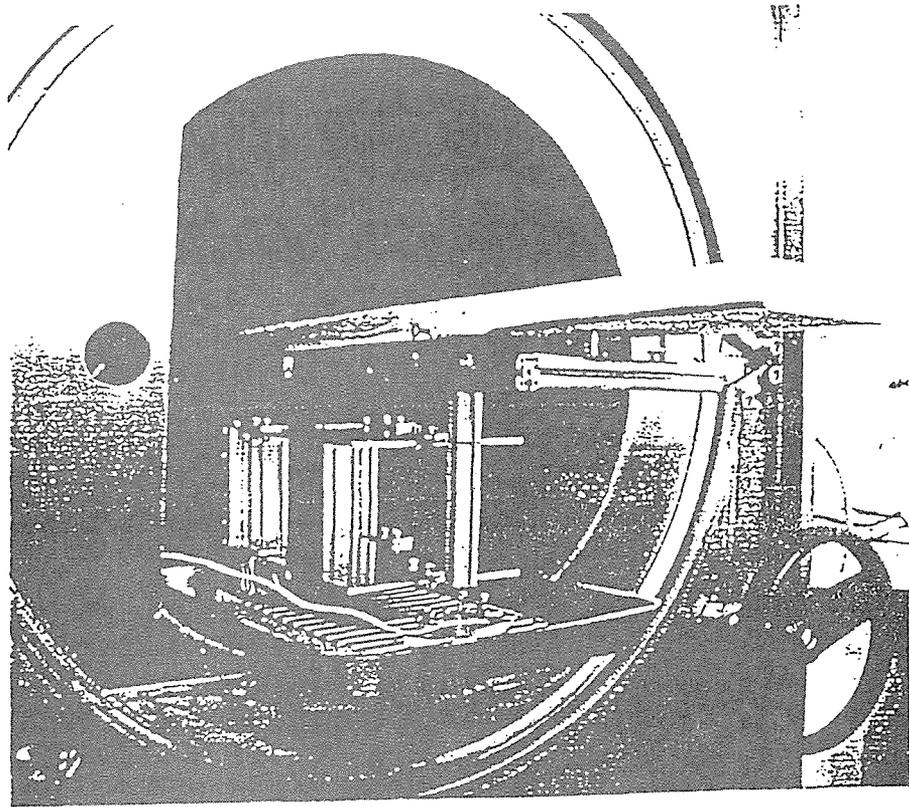


図 6 装置の内部（重量計、応力測定装置、試験材）

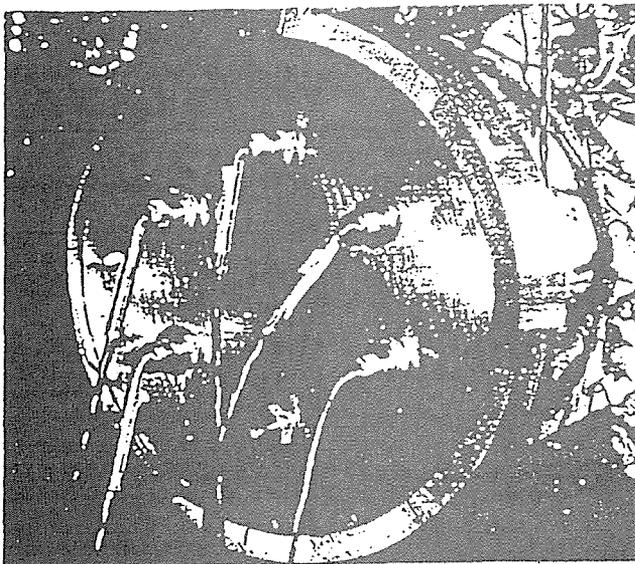


図 7 センサーを差し込んだ状態の密閉蓋

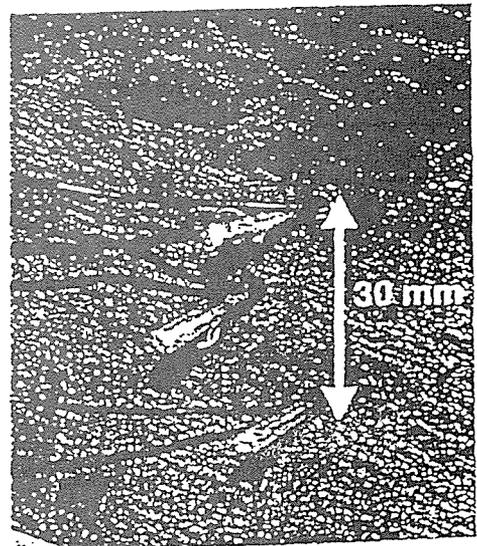


図 9 熱電対の取り付け方法

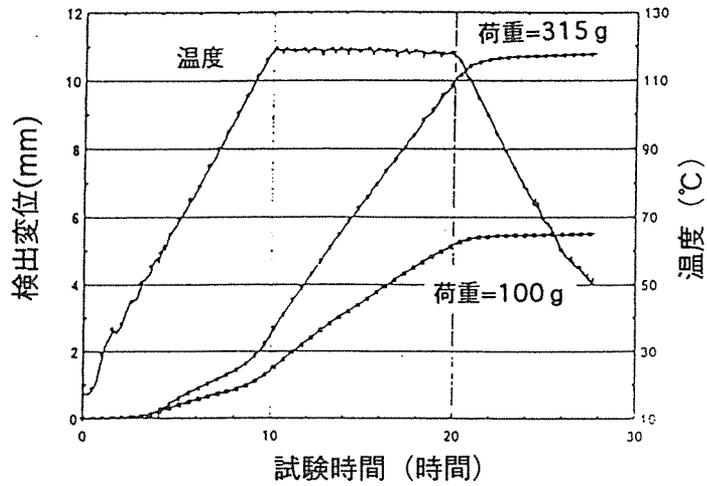


図8 オーク材のクリープ曲線(放射方向)

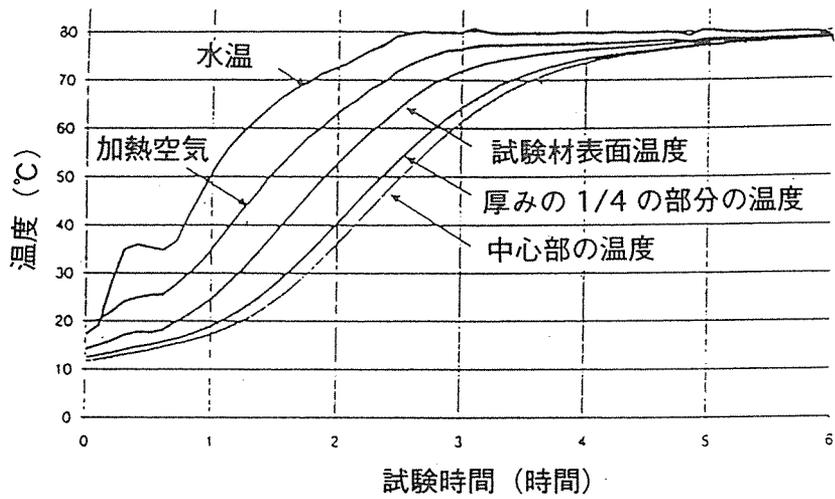


図10 水を沸騰加熱したときの加熱状態 (試験材：オーク 60mm厚)

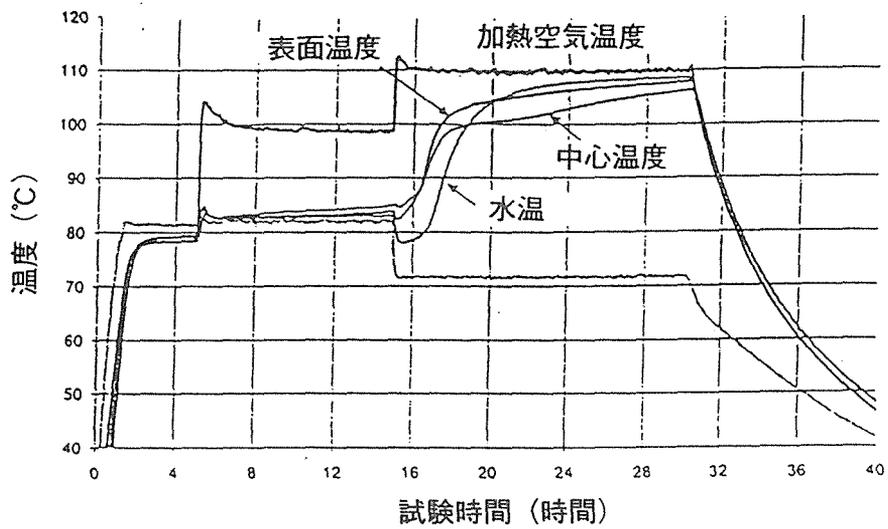


図 11 30mm 厚のスプルス材の乾燥過程

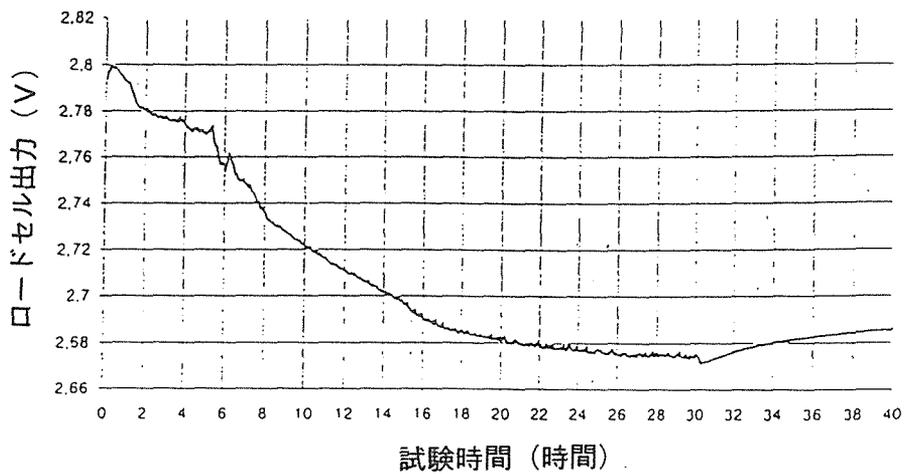


図 12 30mm 厚のスプルス材の乾燥過程におけるロードセル出力値

4. 加圧乾燥と蒸煮がラジアータパインの反りと剛性に与える影響

ニュージーランド森林研究所

ハスレット (A.N.Haslett) 他 共著

[要約]

100×40mm 板材 (ラジアータパイン) を用いて3回の試験を行った。どの試験もまず乾燥処理を行い、その後後処理として蒸煮処理を行った。これらの処理について常圧条件と加圧条件とをおりませ、加圧処理の有効性を検討した。実際の処理条件を以下に示す。なお、蒸煮処理は全て飽和蒸気を用いている。

試験番号	乾燥処理条件	蒸煮処理条件
1	常圧下での乾燥処理 (DBT160℃、WBT100℃) いわゆるHT (高温) 乾燥	常圧下での蒸煮処理3時間 (DBT100℃、WBT100℃)
2	常圧下での乾燥処理 (DBT160℃、WBT100℃)	加圧下での蒸煮処理1時間 (DBT130℃、WBT130℃)
3	加圧下での乾燥処理 (DBT160℃、WBT130℃)	加圧下での蒸煮処理1時間 (DBT130℃、WBT130℃)

乾燥処理時間は常圧条件、加圧条件、どちらもほぼ同じであるが、蒸煮時間は常圧では3時間、加圧では1時間とした。加圧処理によってかなりの暗色化が見られたが、乾燥後の残留応力は低減した。コントロール試験と比べて常圧乾燥+加圧蒸煮の試験ではねじれが25%減少し、不良品率が約3割改善された。加圧乾燥+加圧蒸煮の場合の反りは、常圧乾燥+加圧蒸煮と同程度であった。ストレスグレーディングマシンによる強度の測定を行った結果、加圧乾燥+加圧蒸煮を行った材はコントロール材に比べて剛性が12%高かった。しかし無欠点小試験体による強度試験を行ったところ、加圧乾燥+加圧蒸煮を行った材はコントロール材に比べて剛性が8%低かった。また、平均曲げ強度と平均圧縮強度にはあまり影響はなかった。結果として加圧処理は構造用板材の強度的性質にはあまり大きな影響は与えなかった。この原因は節や目切れなどの欠点の原因となって現れる材質のばらつきに加圧処理による効果が隠れてしまうものと思われる。従って常圧乾燥+加圧蒸煮が今回行った試験の中では最も適切な処理条件であると思われる。

[はじめに]

ラジアータパイン未成熟材部を用いた構造用材は、らせん木理や大きな繊維方向収縮率のために乾燥中に反りが発生し、歩留まりは6割程度となる(2)。とくにねじれは、ラジアータパイン構造用材の歩留まりを下げる最も大きな原因となっている。

これまでもいくつかの論文で、常圧下での高温乾燥によって反りが低減されることが報告されている(2,4)。これらの報告では木材に荷重を乗せたまま高温乾燥することによって、木材の変

形を拘束しつつ軟化させ、乾燥中に発生する反りを低減している。なお、ラジアータパインの軟化点に関しては、生材で約 90℃(3)、乾燥材は 130℃くらいである(6)という既存の報告がある。

Rosen ら(7)は、HT 乾燥の概念を加圧下での HT 乾燥（過熱蒸気、本研究で行った加圧乾燥と同じ考え方）にまで広げ、圧力上限が約 2.1kgf/cm² までの範囲で過熱蒸気を用いていろいろな広葉樹材について乾燥試験を行った。この報告によると、高い圧力下で平衡含水率を高く保つことによって乾燥速度を大きく保ちつつ割れなどの欠点を減らすことができる。さらに木材中から取り除かれた水分を系外へ除去する際、凝縮によって行われるので、蒸気式乾燥法のように湿度調節のために外気を取り入れてこれをさらに加熱する必要が無いので、通常の蒸気式乾燥法よりも効率的に加熱エネルギーを用いることができる。また、過熱蒸気乾燥によって乾燥速度は速くなるが、内部割れが多くなり、内部の色が暗くなることを示した。Rosen らが最終的に得た結論は加圧高温乾燥法は透過性の良い広葉樹に適しているということである。

Vermaas と Kuun(9)は、加圧蒸気式乾燥機の詳細について報告している。彼らは加圧高温乾燥法のメリットは過乾燥にならないように高速乾燥できることではなかろうかと考えた。残念なことに彼らの研究は試験室レベルでの試験を行うに至らなかった。

以前、本研究所（Forest Research）で行われた試験の報告(1)によると、乾燥後の蒸煮処理について、100℃よりも 130℃で行った方が短時間で効果的に残留応力を除去することができた。従って高温域を用いることによって材の軟化が進み、応力が効果的に除去され、さらには反りが低減する結果となる。加圧蒸気式乾燥法は、通常の高温乾燥に比べて過乾燥にせずになおかつ高速で乾燥することが期待できる。

もし加圧乾燥・加圧蒸煮の度が過ぎれば、加水分解によって材の強度的性質が低下するであろう(8)。従って加圧乾燥処理や加圧蒸煮処理が乾燥速度の増大や反りの低減に効果があるかどうかということだけでなく、どの工程が過度の熱劣化や強度的性質の低下をもたらすのかを検討することが重要である。本研究では、乾燥後の残留応力の除去、処理による反りの様子の違い、処理材の強度的性質の変化と言う見地から、加圧乾燥処理および加圧蒸煮処理と常圧下での高温乾燥とを比較検討した。

[試験方法]

加圧乾燥処理、加圧蒸煮処理の効果を調べるために 3 回の試験を行った。全部で 360 本の 3 m ラジアータパイン未成熟材の生材を厚さ 38 mm、幅 98 mm の板材にして、生材状態でストレスグレーディングマシンにかけ、得られた平均 MOE_p（実大材の MOE）によってランク付けした。その後、これらの材を平均 MOE_p とばらつきがほぼ同じになるように、90 体ずつの 3 グループと、50 体だけの 1 グループとに分けた（この 50 体のグループは乾燥後カットして無欠点小試験体として用いた）。50 体の 3 m 材は 1 枚の 3 m 材からエンドマッチさせて 60cm 材を 3 体取り、3 回の試験に供した。結局、それぞれの試験は 90 体の 3 m 材と 50 体の 60cm 材によっ

て行った。積みは 10 体×10 段となっており、そのうちの 1 段は 50cm 材の段である。

表 1 にそれぞれの試験における処理条件を示してある。どの試験でも 1 時間の昇温時間を見ている。乾燥中の風速は 12m/秒である。蒸煮中はファンを停止した。試験 1 は通常の商用乾燥機で行われている高温乾燥スケジュールと蒸煮処理である。試験 2 は乾燥スケジュール部分は試験 1 と同じで、蒸煮条件が通常よりも高い温度（飽和蒸気なので加圧蒸煮である）を用いている。試験 3 では乾燥スケジュールに加圧乾燥処理（不飽和であり、乾燥が進む条件だが常圧よりも高い圧力を用いている、いわゆる高温過熱蒸気）を用い、蒸煮は試験 2 と同じ加圧蒸煮を行っている。

乾燥装置はモルダラップシステムズ製で、3 m 板材を 100 体入れた状態で 530kgf/m² のコンクリート荷重を乗せることができる（図 1）。乾燥処理後、蒸煮処理の前に装置のふたを開けてファンを回したまま 1 時間冷却した。乾燥、蒸煮、さらに一昼夜の冷却（荷重を乗せたまま）を行った後、ストレスグレーディングマシンにて強度を測定し、抵抗式含水率計で含水率を測定した。

全ての 3 m 材は処理後に 2.4m にカットし（通常の間柱材のサイズ）各種変形を測定した。また、60cm 材から 20 体を無作為抽出して、乾燥前に木口コーティングを施しておき、これらから長さ 30mm の小試験片をそれぞれ 3 つずつ採って、断面内の乾燥応力の推定と全乾法による含水率測定に用いた。これら 3 つの小試験体のうち、ひとつは“くし形試験片”にして残留している乾燥応力の推定を行った。ふたつ目はリップソーで半分の厚さに切って二つの試験片とし、その直後に平坦な台の上に置いてカップ（幅反り）をダイヤルゲージで測定した。この二つの反りの合計をこの試験片の幅反りであるとしてこれも乾燥応力の推定に用いた。残りは全乾法による含水率の測定に用いた。

3 m 実大板材としての平均剛性（MOE_p）はそれぞれの試験材についてコンピュータによって自動化されたストレスグレーディングマシンによって測定した。材端をのぞいて 150mm ごとに測定し、これの平均値をその材の MOE_p とした。

節や繊維傾斜のばらつきのために処理の影響が不明瞭になるかも知れないので、無欠点小試験体の強度試験も行った。無欠点小試験体による試験では、静的曲げ、圧縮（繊維方向に平行）を Mack の報告(5)に沿って行った。

[結果と考察]

1. 乾燥材の仕上がり

応力と含水率— 表 2 は乾燥スケジュールと乾燥材の仕上がりについてまとめてある。各試験間の幅反りに有意差があるかどうかを確認するために分散分析と最小有意差による検定を行った。

試験材はほとんどが心材で最も高い含水率でも約 50%であったため、常圧乾燥では乾燥時間が非常に短かった。加圧乾燥では常圧乾燥に比べると平衡含水率が多少高かったが、全ての試験

で乾燥時間はほぼ同じであり、かつ終了時含水率もほぼ同じであった。またどの試験でも仕上がりが含水率のばらつきは十分小さかった。

くし形法による残留応力推定試験とリップソーによるカット後の幅反り測定試験では(表2)、常圧乾燥+加圧蒸煮(試験2)の方が常圧乾燥+常圧蒸煮(試験1)に比べて乾燥後の残留応力が少なくなっている。しかしながら、加圧乾燥+加圧蒸煮(試験3)では、常圧乾燥+加圧蒸煮(試験2)と乾燥後の残留応力は同程度であった。このことは残留応力の低減には加圧蒸煮処理が大きく寄与しており、加圧乾燥の影響は少ないことを示している。蒸煮後の残留応力が蒸煮温度を上げることによって低減していることは「温度を上げることによって材の軟化が進み、残留応力が除去されるというメカニズムが働いている」という議論を状況証拠ではあるが裏付けるものであると思われる。

Rosenら(7)の過熱蒸気乾燥(加圧乾燥)によって材が表面のみでなく内部まで多少ではあるが暗色化すると報告されているが、このことは今回の試験でも確認され、今回の試験の中では加圧乾燥+加圧蒸煮の場合が最も暗色化の程度が大きかった。この圧力処理によって生じる暗色化は建築用材としては末端ユーザーに拒否されるほどひどいとは思われなかった。

試験3では表面割れは非常に少なかった。一方、試験1及び2では表面割れは全く発生しなかった。

反り— 表3は処理によって生じた反りについての試験結果の比較である。反りの平均を分散分析と最小有意差による検定を用いて比較した。表3には各反りがニュージーランドにおける末端ユーザーの許容範囲を超えたものの比率(不良品率)も示してある。

どの試験でも反りおよび反りによる不良品率のどちらにもねじれが大きく影響していることがわかる。もっとも、これはラジアータパインである以上予想された結果ではある。反りの平均値、不良品率ともに試験1が全体的に最も良くない結果となった。3つの反りのうち、加圧処理の導入によって最も改善効果が大きかったのはねじれであった。もし、加圧処理が反りを抑制する効果を持っていると仮定するならば、乾燥工程にも、蒸煮工程にも加圧処理を用いている試験3が最も反りの低減効果が大きいはずだと考えてもおかしくないが、実際には蒸煮工程にのみ加圧処理を導入した試験2が最も反りの低減効果が大きかった。内容的には、統計的な有意差があるのは弓反りだけとは言え、試験2は試験3よりも全体的に反りが少ない傾向にあった。おそらく、試験3(加圧乾燥+加圧蒸煮)の加圧乾燥工程での最終温度が試験1の常圧乾燥(HT乾燥)と同じであったために、試験3の仕上がりが試験2(常圧乾燥+加圧蒸煮)よりも悪くなったのではないかと考えられる。

これらの結果より、反りの除去という恩恵は加圧蒸煮処理のみによると思われる、加圧乾燥工程は必要なかったと言える。このことは加圧処理の現場への適用にとって非常に重要である。というのは加圧乾燥処理を行える乾燥機は装置内に圧力がかかるために内部ファンを用いることができず外部ファンを用いるのだが、その軸からの蒸気漏れをシーリングする技術が非常に難しいた

め製作が難しく、しかもおそらくかなり高価な装置になると思われ、一方蒸煮処理を行うだけのオートクレーブであれば製作もメンテナンスも非常に容易である。従って、加圧乾燥を導入する必要が無く、加圧蒸煮だけで十分であると言うことであれば、経済的にも現場での対応のしやすさの面でも加圧処理の導入は行いやすくなるからである。

2. ストレスグレーディングマシンと無欠点小試験体による強度試験

図2は3回の試験における生材と試験終了後のストレスグレーディングマシンによる実大材の平均剛性(MOEp)の累積相対度数曲線である。図の◇、□、△がほぼ重なっていることから、生材の強度的性質はどの試験のグループもほぼ同じであったことがわかる。驚いたことに、図2を見ると試験3(加圧乾燥+加圧蒸煮)で得られた乾燥処理材が強度的に最も優れており、試験1(常圧乾燥+常圧蒸煮)が最も低い剛性を示した。

表4はストレスグレーディングマシンによるMOEpの統計処理結果である。この結果からも、加圧処理を行った材(試験2, 試験3)の平均剛性は加圧処理を行わなかったもの(試験1)に比べて高いことを示している。また試験2と3との間には有意な差は見られなかった。

表5は無欠点小試験体の試験結果である。見かけの比重(全乾重量/試験時の体積)の平均は、試験1の材が他の2回の試験に比較して若干大きかった。また終了時含水率にも試験ごとに若干の差があった。

試験2も試験3も試験1(コントロール)と比較してMOEが8%ほど低かった。従って、無欠点小試験体(20×20×300mm)によるMOEの結果とストレスグレーディングマシンによる実大材(98×38×3000mm)のMOEの測定結果との間には矛盾がある。この原因は、おそらく節を持つ実大材と持たない無欠点試験体との違い、すなわち節のある材は節のない材とは乾燥によって受ける影響が異なるためではないかと思われる。また、3mもの長さがあれば、位置によるばらつきもあるし、ストレスグレーディングマシンは決して科学的な厳密性が保証された装置ではないので、無欠点小試験体を試験した強度試験機に比べると若干信頼性が劣るのも事実である。ストレスグレーディングマシンによる測定は、乾燥工程-蒸煮-24時間冷却の後に行った。一方、無欠点試験体による強度試験は試験を行う前に試験体を貯蔵したので、その間に含水率が若干戻り、MOEが下がる結果を招いたのではないかと思われる。特に試験2は処理後の含水率過乾燥ぎみであったので、その影響も大きかったと推測される。

結局のところ、実大の構造用材には加圧処理を乾燥工程に導入しても強度的性質が顕著に向上するとは言えない。実大の構造用材が持っている節や目切れのような欠点による材質のばらつきによって加圧処理による効果は隠れてしまうのではないかと思われる。

[今後の課題]

木材は反りの“記憶”を持っており、加圧処理によってもこの記憶は残っており、乾燥後の残留応力の除去は一時的なものに過ぎないようにも思われる。ことに板材が激しい周囲の環境変化を受ける場合などは、このような印象を強く受ける。ねじれの低減が永久的なものか、一時的なものかどうかをはっきりさせるために、加圧蒸煮処理を行った材を乾湿繰り返し条件にさらして、反りを再度測定する必要がある。

ラジアータパイン板材のねじれを低減するためには、加圧処理のうち加圧蒸煮のみを用いるのが最も見込みがありそうである。ただし蒸煮圧力や処理時間については最適な処理条件を探すために更にいくつかの条件を試みる必要があるであろうが、圧力、つまり蒸煮温度は高いほど可塑化が進むので、乾燥後の残留応力もねじれも蒸煮圧力が高い方がより低減されるであろう。

加圧蒸煮は乾燥後の残留応力を除去したり、木工製品や内装材用に寸法を安定させるために利用することもできるだろう。これらのためには変色を最小限に抑えながらなおかつ十分な効果が得られる処理条件を模索する必要がある。

加圧乾燥処理のみの場合の効果も今後検討したい。例えば、蒸煮を行わずに加圧乾燥だけで処理を行う試験は、加圧乾燥処理の最中に残留応力や各種の反りが低減しているかどうかをモニタリングしながら行えば、この処理の効果がはっきりするであろう。圧力を変えて木材の軟化点よりも高い温度域で試験を行い、最適な条件を見つける必要もある。

[結果]

加圧工程を導入した2回の試験（試験2，3）では、どちらも乾燥後の残留応力とねじれが試験1に比較して低減されていた。蒸煮だけではなく、乾燥工程にも加圧処理を導入した試験3では、蒸煮処理のみに加圧処理を導入した試験2に比較して大きな効果が得られたとは言えなかった。つまり、常圧乾燥(HT 乾燥)+加圧蒸煮処理で十分残留応力の低減、ねじれの低減効果が得られた。

ストレスグレーディングマシンによる実大材の測定結果(MOE_p)と無欠点小試験体による強度試験結果から、木材の強度的性質に与える影響は加圧処理よりも節や木理がそろっていないなどの欠点を与える影響の方が大きいと思われた。ストレスグレーディングマシンによる実大材の測定では、加圧処理によって約12%の剛性の向上が見られたが、無欠点小試験体での強度試験によると約8%の剛性の低下が見られたという矛盾した結果であった。これらのことを考えあわせると、今回の試験で用いた加圧処理は、構造用材の強度的性質にとって不利な処理ではなかったとは言えるが、あまり積極的に効果的だとは言えなかった。

蒸煮処理は反りやすい未成熟材のねじれを取り除く簡単な手法としてとらえることができる。加圧蒸煮処理が実際に現場で行われるようになれば、針葉樹造林木の未成熟材部を使った製品（これは針葉樹造林木の主な利用のしかたである）の歩留まり向上に役立つであろう。

[参考文献]

- (1) Haslett,A.N. and R.Bates. 1997. Pressurized final steam conditioning. *Forest Prod.J.* 47(10):64-68.
- (2) Haslett,A.N. and D.L. McConchie. 1986. Commercial utilisation study of radiata pine thinnings for sawn timber production. *NZFRI Bull.* No.116.
- (3) Hills,W.E. and A.N.Rozsa. 1978. The softening temperatures of wood. *Holzforschung* 32(2).
- (4) Koch,P. 1971. Process for straightening and drying southern pine 2 by 4's. *Forest Prod.J.*21(5):17-24.
- (5) Mack,J.J. 1979. Australian methods for mechanically testing small clear specimens of timber. Div. Of Building Res. Tech. Pap. (Second Series) No.31. Commonwealth Scientific and Industrial Res. Organisation, Melbourne,Australia.
- (6) Mackay,J.F.G. and B.L.Rumball. 1972. Plasticizing distortion-prone softwood studs prior to high temperature seasoning. *Forest Prod.J.*22(6):27-28.
- (7) Rosen,H.N.,R.E.Bodkin,and K.D.Gaddis. 1983. Pressure steam drying of limber. *Forest.Prod.J.*33(1):17-24.
- (8) Stamm,A.J. 1956. Thermal degradation of wood and cellulose. *Industrial and Engineering Chemistry* 48(3):413-417.
- (9) Vermaas,H.F. and C.P.Kuun. 1989. Experimental pressure steam dryer for lumber. *Holz als Roh-und Werkstoff* 47(1989):234-241.

表 1. 加圧乾燥装置と棧積みの様子

試験番号	乾燥処理				蒸煮処理		
	DBT (°C)	圧力 (MPa)	EMC (%)	処理時間 (hr)	DBT (°C)	圧力 (MPa)	処理時間 (hr)
1	160	0.10	2	4.0	100	0.010	3
2	160	0.10	2	3.9	130	0.280	1
3	160	0.28	5	3.7	130	0.280	1

表 2. 終了含水率と終了後の残留応力

	試験 1 乾燥160/100°C 蒸煮100/100°C	試験 2 乾燥160/100°C 蒸煮130/130°C	試験 3 乾燥160/130°C 蒸煮130/130°C
乾燥時間(hr)	4.0	3.9	3.7
蒸煮時間(hr)	4	1	1
含水率(%)			
平均 ^a	7.4	7.5	8.5
標準偏差	1.07	0.99	1.66
応力			
くし形試験片 ^b			
ストレート	7	12	12
変形	13	8	8
幅反り(mm) ^c			
平均	0.7A ^d	0.29B	0.27B
標準偏差	0.22	0.28	0.14
色	明るい	暗い	最も暗い

a 2.4m板材の中央部、深さ約3分の1で抵抗式含水率にて測定 90体の平均値

b ストレートは残留応力無し、変形は残留応力ありの意

c 試験体20体の平均値

d 同じ大文字のアルファベットが付いたもの同士は5%有意差がない、異なるアルファベットがついているものは有意差がある。

表3. 2.4m材の狂いの比較

		反りの平均値			反りによる不良品率 ^a		
		縦反り	弓反り	ねじれ	縦反り	弓反り	ねじれ
		----- (mm) -----			----- (%) -----		
試験1	乾燥160/100℃ 蒸煮100/100℃	3.8A ^b	5.5B	5.1B	19B	1A	40B
試験2	乾燥160/100℃ 蒸煮130/130℃	3.1A	4.2A	3.8A	8A	0A	27A
試験3	乾燥160/130℃ 蒸煮130/130℃	3.1A	5.7B	4.3AB	11AB	0A	29AB

a 許容範囲：縦反り5mm、弓反り20mm、ねじれ5mm

b アルファベットは表の列内で比較し、同じアルファベット同士は5%水準で有意差がない。異なるアルファベットは有意差があることを示す。

表5. 無欠点小試験体の強度試験結果

	平均値		
	試験1	試験2	試験3
含水率(%)	10.7	9.6	10.3
見かけの比重(kg/m ³)	412	410	407
MOR(MPa)	77.46B ^a	73.2AB	70.8A
MOE(GPa)	8.452B	7.770A	7.746A
圧縮強さ(MPa)	39.8A	40.1A	39.0A

a アルファベットの同じもの同士は5%水準で有意差なし、異なるものは有意差ありの意。

表4. ストレスグレーディングマシンによるMOE_pの結果

	試験1		試験2		試験3	
	生材	処理後(8%MC)	生材	処理後(8%MC)	生材	処理後(10%MC)
----- (GPa) -----						
平均 ^a	6.719A	7.712B	6.790A	8.403C	6.703A	8.953C
標準偏差	1.591	1.643	1.864	2.208	1.762	2.360

a アルファベットの同じもの同士は5%水準で有意差なし、異なるものは有意差ありの意。

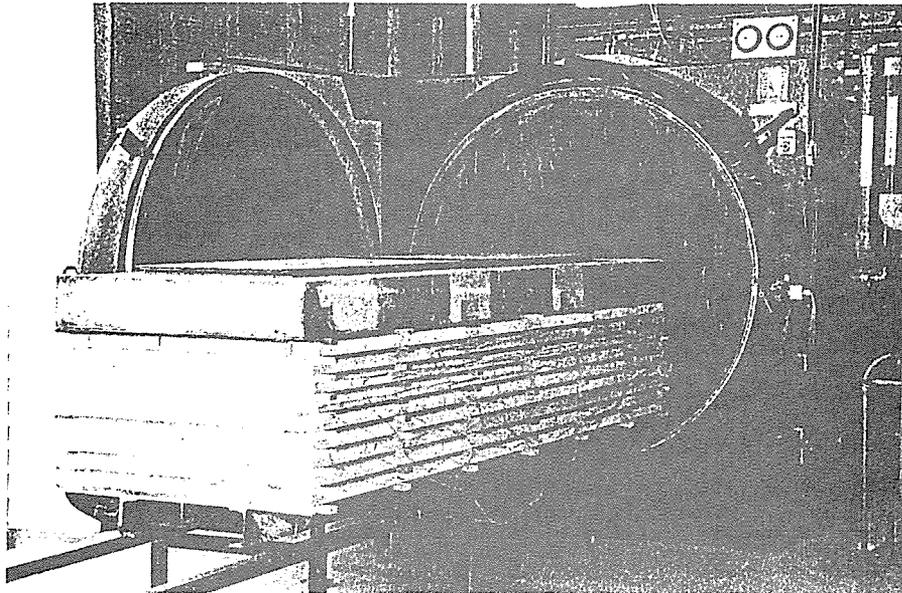


図1. 加圧乾燥装置と栈積みの様子

生材と乾燥後の平均 MOE_p の比較

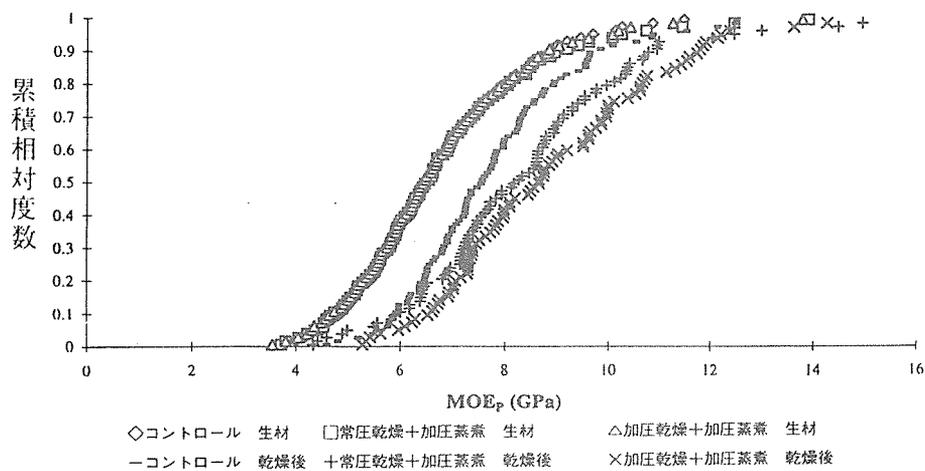


図2. 生材と処理材のストレスグレーディングマシンによる実大材の剛性(MOE_p)の累積相対度数

5. 新しい高周波加熱システムの開発

マイクロウェーブ研究所（オーストラリア）

ヌエン・トラン（Nguyen Tran）他 共著

【要約】

製材品の乾燥方法の一つとしての高周波加熱装置の開発にはまだまだ潜在的な可能性がある。

従来、木材乾燥装置として高周波加熱システムを用いる場合、減圧されたあるいは常圧の装置内に設置された電極板の間に木材を挟んで加熱・乾燥する手法がとられてきた。平行極板を使って木材を均等に効率よく加熱するためには、装置が複雑になる、費用がかかるといった商業ベースの高周波加熱乾燥機の開発にとっては弊害となる問題が発生し、なかなか開発・普及が進まなかった。また、マイクロ波乾燥装置の場合には、特に含水率の高い木材では材の奥までマイクロ波が入らないので木材と木材の間にスペースを設けて複雑な導波管を設置しなくてはならず、しかもこれによって積積み費用が高くなるようにすることは非常に困難である。

この論文では、従来のこれらの問題を解決するために缶体にくぼみをつけた新しい高周波乾燥システムについて報告する。

この装置デザインは本報告では特に難乾燥広葉樹の低温減圧乾燥装置の基盤技術として提案しているが、その他の製材品の乾燥装置や各種加熱処理装置の開発にとっても役立つであろう。

【はじめに】

近年、無線周波数帯の電磁波（高周波：RF）やマイクロ波を用いた製材品の乾燥に対する商業上の期待が増大してきている。長い間、製靴用の靴型などの比較的小さくて高品質が求められる製品について、高周波加熱減圧乾燥機（図1）が用いられてきた。また、比較的大きな装置も過去20年間の間に北アメリカ及び日本で用いられており、製品によっていろいろな温度域が使用されているが、これらの成功例はおもに特殊な製品に適用した場合である。（Wengert and Lamb 1982.; Hamano and Nishio 1988.; Avramidis, et al 1994）

マイクロ波木材乾燥機は主にロシアで作られ、用いられてきた。マイクロ波は木材の奥まではなかなか入らないので、木材間に適度な隙間を設けて複雑なマイクロ波の伝達のための機械的な工夫をする必要があるし、厚板に適用するのは難しい（Torgovnikov 1996）。装置としては非常にハイパワーなマイクロ波発生装置（マグネトロン）を用いれば単位出力あたりのコストでは安くあがるが入手しにくいいため、小～中規模程度のマイクロ波発生装置を組み合わせる場合が多い。ハイパワー用のクライストロン（速度変調管）も比較的入手は可能だが、マグネトロンよりもさらに高価である。

カナダで行われている最近の研究によって 公称容量 50m³ 規模の高周波加熱減圧乾燥装置が

開発され、半官半民的な活用法ではあるがこの4年間稼働している。この装置のように加熱媒体として高周波を用いる場合の大きな問題は、どのようにして湿った木材にエネルギーを伝えるかということである。従来の技術では一对の平行極板を用いて木材内部の水分子にエネルギーを与えて蒸発させる手法を取った。この場合、木材は極板と極板の間に挟まれ、電磁場は材の長さ方向に直角な方向に形成される(図2)。

また、平行極板を使うと装置デザインが制約されてしまう。平行極板でエネルギーの伝達を良好に保つためには、木材は極板に接触してはならない。また絶縁空間が必要なため、缶体に入れられる材の体積(場合によっては缶体の形に体積が)制限される。エネルギーの分布状況によっては(特に極板の角におけるエネルギー分布)電磁場にひずみが生じ、均等に加熱されないなどの問題が生じる。それだけではなく、大きなエネルギーを使う場合、特に減圧下で乾燥する場合には放電と局所的な加熱が問題となる。最近では性能の良い放電検知装置があるので、これを用いればこれらの問題をある程度解決できるが、非常に高価である。

CSIRO における研究によると高周波加熱減圧乾燥法によって密度の小さいユーカリ材が非常に速くかつ欠点を最低限に抑えて乾燥できることが報告されている(Rozsa and Avramidis 1966)。

また、最近の高周波エネルギーの増幅器を使った装置の開発とともに、高周波エネルギーの投入をコントロールするための同調回路の開発によって、Avramidis と Zwick(1996)による最初の商業用高周波加熱減圧乾燥機に比べると装置のデザイン・乾燥効率ともに著しく進歩した。これらの技術革新にもかかわらず、高周波を用いた乾燥機は商業ベースの乾燥機としてはなかなか主流となれずにいる。

【くぼみをつけた缶体】

本報告で紹介するプロジェクトの目的は、くぼみをつけた缶体を高周波乾燥機の缶体として用いる意義があるかどうかを明らかにすることである。この缶体はいわば予備試験用のプロトタイプで比較的小さなサイズであり、難乾燥材の試験片を乾燥するのに適したサイズである。平行極板を使わないので極板がある装置よりも多くの材料を入れることができ、また材の積み込みも楽である。また電極を材の間に通すなどの工夫は必要なく、これまでとは異なり、3軸方向にエネルギーを伝達することができる。(図3)。このことによって、収容した木材の材積が異なったり、乾燥が進むに従って材の誘電特性が変化してもこの加熱缶体を変化し続ける負荷(木材)に同調させることが容易にできる。

缶体はマックスウェルの式を用いた有限要素法によって発生する電磁場をシミュレートしてデザインされた(図4)。この式と手法によって同軸ケーブルから缶体に至る電力供給ラインの最適化も行った。最終的に設計された缶体は、高さ2 m、幅2 m、奥行き2.4 mのモジュール式(各部分が交換可能なタイプ)のもので、材の寸法さえ合えば従来の蒸気式乾燥との連携もできる

ようにしてある。エネルギー供給は缶体の後部と中央部から行っている。缶体の容量は台車に製材を乗せて搬入した場合で6 m³である。高周波の供給源は3つの発振機からなっており、これらの出力は最大 10kW で連続的に変えることができ、周波数は3～30MHz の間で自由に選ぶことができるようになっている。が、まずは 27.12MHz を用いて試験を行うことになっている。装置には投入パワーと反射波、温度分布が測定できるように制御装置、測定装置が設置されている。温度分布の測定には光ファイバー温度計を用いる。温度分布についてはいろいろなパワーを、いろいろな含水率状態の木材にかけることによって生じる温度分布を測定する。

この報告の執筆時点で缶体はすでにできあがっている(図5)。また3つの発振機はすでにテストが終了しており、パワー供給ラインも完成した。その他の各種設備については缶体の電磁シールドに関するテストが終了した後、いろいろな電磁場条件についてテストを行うことにしている(電磁シールドは事故が起きた場合に大きな問題となるので非常に重要であり、完全でなくてはならない)。この装置の効率は実際に材を入れて乾燥することによって数カ月のうちに調査する予定である。

この実験の結果は商用乾燥機の業界団体が試作機を作ることができるように、装置デザインの要点を公開することになっている。

[まとめ]

この新しい加熱缶のデザインは製材業界、他の業界を問わず、他の加熱・乾燥装置に広く影響を与えるであろう。また、減圧工程との併用によって落ち込みの生じやすい難乾燥広葉樹を化粧用ボードなみの高品質材に乾燥することができるだろう。さらに、この工程は木材のプラスチック化、大断面材などで行われる透過性の改善などの前処理とそれらに続く処理材の乾燥にも用いることができる。

[参考文献]

- Avramidis, S.; Liu, F.; and Neilson, B.J.: 1994; Radio-Frequency/vacuum drying of softwoods: drying of thick western red cedar with constant electric voltage. Forest Prod. J. 44(1):41-47
- Avramidis, S.; Zwick R.L.: 1996: Commercial scale drying of softwood lumber. Part 2. Drying characteristics and lumber quality. Forest Prod. J. 46(6)27-36.
- Hamano, Y.; Nishio, S.: 1988: Vacuum Drying of Wood with Microwave Heating. Japan Wood research Soc., Vol.34 No.6, pp.485-490.
- Rozsa, A.N.; Avramidis S.: 1996: Radio Frequency vacuum drying of eucalypt timbers. Proc. 5th Iufro wood drying conference, August 13-17 Quebec Canada.

Torgovnikov,G.:1996: Practical microwaves utilisation for timber drying. Seminar ,
The Institute of Wood Science,(Australian Branch) Melbourne Australia May 5th
14pp.

Wengert, E.M.; Lamb,F.F.: 1982: A comparison of conventional and new drying methods.
Proc. Nat. Assoc Furniture Manufacturers, joint production division meeting.

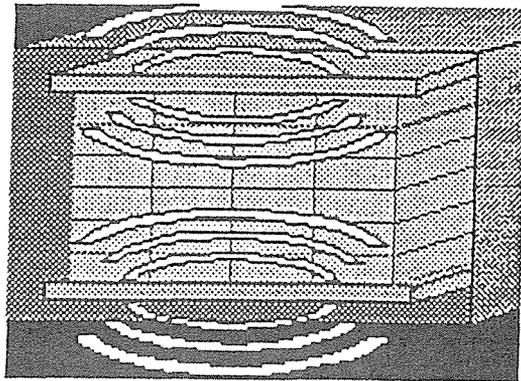


図 1. 平行極板による R F V (高周波加熱減圧) 乾燥装置の概念図

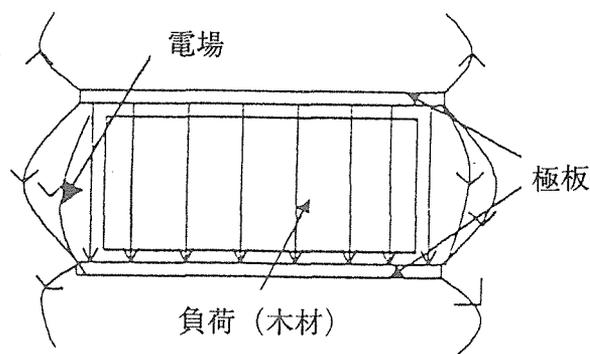


図 2. 平行極板間で形成される電磁場の様子

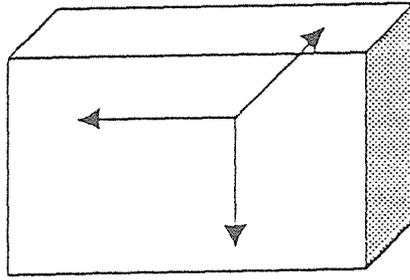


図3. マルチモードの電磁場

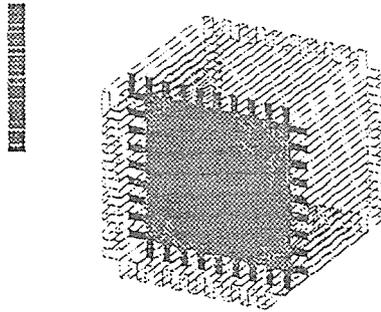


図4. 缶体内のエネルギー分布のモデル。缶体を構成する素材の誘電率は10、誘電損失は0.2である。暗く塗ってある部分は電界強度が高い部分

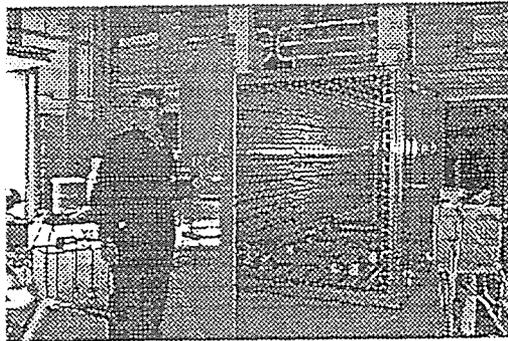


図5. RF装置とその内部の様子

6. 乾燥処理による VOC 発生量の推定

メイン大学 (アメリカ)、アメリカ農水省
R.W. ライス (R.W. Rice)、L. ジビルスケ (L. Zibilske) 著

[要約]

連邦及び州政府はここ十年ほど、木材加工のどの部分から物質が放出されるかに焦点を当ててきた。中でも乾燥機は揮発性有機物 (VOC) を放出するとして注目されている。残念なことに、放出量に関するデータは広葉樹針葉樹を問わず非常に少ない。乾燥業者はおおむね協力的で、乾燥機からの放出レベルの測定が試みられてきた。しかし、樹種や生育環境等により乾燥処理が異なるため、測定意欲がくじかれている。本研究では、乾燥過程で発生する VOC をアメリカ北東部の 5 樹種について測定した。その結果 VOC 放出量は、どの樹種でも 1MBF (千ボードフット \approx 8.467 石 \approx 2.36 m³) あたり 1.4 ポンド (\approx 635 グラム) 以下であった。この試験は実験室規模で行ったが、実用乾燥機で生材から乾燥する場合の VOC 放出量も合理的に推定できるだろう。

[はじめに]

1990 年に行われた「清潔な空気と水のための条例」の改正等により、製材乾燥過程で発生する揮発成分と凝縮物に焦点がおかれるようになった。パネルボード製造業と製材業者は、環境保護局からの許認可に関心を持っている。どちらの業者も放出物質の定量化と許可を必要とする。この許認可問題により、乾燥時に様々な樹種から放出される VOC レベルを決定することが乾燥機を選択する際の関心事となった。VOC の見積もりは、特に南部と西部の針葉樹乾燥について進んで来たが、いくつもの要因があるために複雑で、研究者間で大きな差がある。

現在のところ、アメリカ北部に生育する針葉樹についての報告は見あたらない。本研究は、アメリカ北東部に多い 5 樹種の乾燥時に発生する VOC レベルを見積もることを目的とする。試験した樹種はバルサムファー (*Abies balsamea*)、ホワイトスプルース (*Picea glauca*)、レッドスプルース (*Picea rubens*)、ブラックスプルース (*Picea mariana*)、レッドパイン (*Pinus resinosa*) である。

試験は実験室条件で行った。生材試料を一般的な乾燥と同じ条件で抽出し、比較のため、同じ丸太から取った別のサンプルを含水率 12% に調整後抽出した。溶解化学物質質量 (DOC) をそれぞれのサンプルについて測定し、1MBF (\approx 2.36 m³) あたりの発生量を見積もった。そして、生材と乾燥材の DOC レベルの違いを乾燥材 1MBF について計算し、乾燥中の VOC 発生量を見積もった。本試験では、有機生成物の特定は行わなかった。

[背景]

心材の抽出成分は、タンニン、樹脂、脂肪、ワックス、油、ゴム、その他芳香族化合物等で、VOC の原因物質である(5)。一般に、温暖な地域の樹種は抽出成分を 3~9% 含む(6)。より多くの抽出成分を含むものもあり、全乾質量の 40% を越える場合も報告されている(3)。本研究で扱った樹種の熱水抽出成分は全乾質量の 3~4% であると報告されている(6)。

抽出成分量自体はこのように異なるが、揮発成分のほとんどはモノテルペン類である(4)。揮発油は、凝縮すると主にテルペン類になり、その量は針葉樹の抽出可能成分の総量より少ない。

ドリュウとピラント (1) は、アメリカとカナダで生長する多くの針葉樹に含まれるテルペン類の量を報告している。調査した樹種のほとんどに多く含まれていたのは α -および β -ピネンであった。レッドスプリースについての報告はないが、本研究で用いたその他の樹種では、 α -および β -ピネンの占める割合は、低いもので 20.6% (ブラックスプリース)、高いもので 90.2% (レッドパイン) であった。彼らのデータから計算すると、揮発成分は木材の全乾質量の 0.02~0.34% になる。

木材そのもの及びその加工過程が様々に異なるため、乾燥中に発生する VOC の推定が不正確になる。地域、環境、遺伝的ばらつきが抽出成分量と組成に影響し、乾燥過程で発生する VOC 量に影響する。ヒリス(3)によると、この様な影響は明確に区別できないが、木材の生育環境の影響は多くの研究によって証明されている。このことは広く知られているが、どの程度 VOC 量に影響し、また本研究で用いる樹種ではどの程度の影響があるのかについては十分に検討されていない。

一般的な乾燥では、乾燥条件も発生する VOC 量に影響する。ここでは、有機物量に対する水の割合が関心事となる。乾燥過程で取り除かれる水分はかなり多く、乾燥中に何回か分析を行う必要がある。乾燥の段階ごとに発生する有機物量や排出される蒸気に含まれる有機物と水の割合が異なるため、正確な評価が困難になる。さらに、空気循環の反転、排気口の配置、吸・排気を同時に行う慣習等が正確さに悪影響を及ぼす。乾燥温度も VOC 発生量に影響する可能性がある。アメリカでは一般的に、木材乾燥は 250°F (約 120°C) 以下で行われる。温度が上がるとラジカルが形成される可能性が高くなり、VOC 減少率が増す。

もう一つの要因は、伐採から乾燥までの時間である。伐採直後から VOC も含水率も減少し始め、製材に加工される間も減少し続ける。さらに、丸太が製材に加工されると、露出表面が増して VOC 減少率が増す。丸太集積場から乾燥するまでの時間は製材工場、地域、季節によって大きく異なる。ヒリス (2) は、この期間と材の形状 (チップか 割材か) が抽出成分に含まれる不飽和脂肪酸の割合へどれだけ影響するかを測定し、期間・形とともにその量が減少することを示した。しかし、本研究で用いた樹種に関するデータは見当たらない。

[実験方法と試験体]

それぞれの樹種について、伐採直後の丸太を 10 個ランダムに選び、これらから 20 個の円盤を取り分析に用いた (図 1)。各円盤に印を付け、ラップで二重に包み、準備が整うまで冷凍保存した。

1 つの試料 (約 400g) を得るのに 5 つの円盤を使った。試料には辺材も心材も含まれる (心材の割合は 30~60%)。試料の半分は 250°F (121°C) の密閉した抽出装置に入れ、最終的に乾燥するまで抽出した。残りの半分は 104°F (40°C)、69% RH の恒温室で含水率 12~14% に調整後抽出した。後の計算のため、生と気乾状態での比重を測定した。

抽出物は分析まで 39°F (約 4°C) で保存した。10 μ l のサンプルを溶解炭素分析器 (Shidmadzu TOC 500) に注入し、抽出物に含まれる炭素量を測定した。この分析器の標

準化は、標準物質のフタル酸水素カリウム水溶液で行った。試料の溶解有機炭素を分析し、結果をフタル酸のデータと比較した。従ってここから得られた結果は、抽出された有機炭素の水への溶解度という観点から議論する。

分析した試料のうち 2 つは浮遊物質を含んでいた。この物質は細胞構成物質のようであったが、分析の際に取り除いた。どの試料の溶液でも階層構造は無かった。

選択した試料について、抽出された無機炭素を測定した。無機炭素は 100 万分の 2 を越えなかったため、区別して測定はしなかった（データは載せていない）。必要な場合は、炭素を高濃度で含む抽出成分を高純度の水で薄め、同じ試験を 5 回行った。抽出成分中の溶解有機炭素量を示す際には、希釈の影響を考慮した。

抽出と溶解有機炭素測定は、生と気乾状態で各樹種について 4 回ずつ行い、各水分状態について 20 個の溶解有機炭素データを得た。試料の内訳を表 1 に示した。

乾燥中の有機化学物質減少量は、1MBF の体積が一定（83.4ft³）で、比重、含水率および溶解有機炭素値のみが変化すると仮定して求めた。生と気乾試料について計算し、それぞれの平均値を求め、二つの値の差を乾燥中に放出される VOC の概算に用いた。

[結果と考察]

含水率と溶解有機炭素量を表 2 に示した。丸太の伐採後 2 週間以内にサンプルを調整し、分析用円盤の採取前に各丸太の両端から少なくとも約 30 cm は取り除いたが、各樹種の生材含水率は大きく異なっていた。以前行った実験から、この程度の差は異常でないと考えられる。生材の溶解有機炭素量の変動係数が大きく、特にホワイトスプルースで顕著で、4 回の抽出の溶解有機炭素量は 0.05～0.191 になっている。この差の原因は定かではないが、試料の辺材と心材の比に由来するかもしれない。スプルースでは、見た目では辺材と心材の量を判断するのは難しい場合が多い。ほとんどの木は 50 年生以上であるが、抽出に使った試料の辺材と心材の量がそれぞれ異なっていたのと同様に、年輪幅もかなり異なっていた。

同じ樹種でも溶解有機炭素量と生材含水率の相関係数はかなり違っていた。ホワイトスプルースは相関係数が-0.957、レッドスプルースが 0.921、ブラックスプルースが-0.784、レッドパインが-0.594、バルサムファーが 0.200 であった。全体として生材含水率と溶解有機炭素量に関係があるのか確かめるために分析を行った。両者の相関係数は-0.976 と非常に高い関係を示しており、平均した影響が明らかに大きい。この関係は辺材と心材の比、生育環境、あるいは伐採時期に関係があるだろう。各樹種の溶解有機炭素量の計算から得たデータを表 3 に示した。平均値で見ると、推定値は一番低いものでレッドパインの 0.683 ポンド/MBF（1 ポンド/MBF ≒ 192 グラム/m³）で、一番高いものでホワイトスプルースの 1.283 ポンド/MBF であった。推定 VOC 量のばらつきはレッドスプルースが一番大きく、0.248 ポンド/MBF から 3.013 ポンド/MBF の範囲であった。これらのデータのばらつきは、おそらくアメリカ北東部の製材工場にある丸太の多様性を模倣するように試料のサンプリングを行ったことを反映しているだろう。生データと変動係数から見て、このばらつきは乾燥の終了時というよりも生材の状態に関連していると考えられる。全体的に、ほとんどのばらつきはおそらく試料中の心材と辺材の量の違いか丸太の生育環境によるものだろう。製材を加工、栈積みして乾燥機に入れまでに、VOC の構成要素であるモノテルペンがいくらか低減すると考えられる。表 3 のデータは、非常に新鮮なサンプルで測定し、

加工過程で失われる VOC 量が最小になるように推定したものである。

実用的に重量なのは、ここで示した VOC 放出量を一年間の量に変換することである。表 4 は平均 VOC 量を外挿したもので、一年間の VOC 放出量が 100、50、25、および 10 トンになると推定される乾燥製材量を示している。例えば、ある地域で一年間に放出する VOC 量の限度が 50 トンと定められた場合、ブラックスプルスでは、乾燥製材量が 115MMBF (≒27 万 1400 m³) を越えないようにすればよい。より正確に推定するには、乾燥機とその他の VOC 発生源からの放出量とを組み合わせる必要があるだろう。

[結論]

ここで示したデータは、おそらく一般的なアメリカ北東部の樹種を乾燥する際に発生する VOC レベルをうまく予測しているだろう。平均値で見ると、乾燥による VOC 発生量は 1.4 ポンド/MBF (約 270 グラム/m³) を越えなかった。測定結果が大きくばらついている樹種もあったが、これは辺材と心材の比、あるいは丸太の生育環境を反映していると考えられる。本実験では製材工場の条件をシミュレートするようにし、ばらつきの原因を押さえるような操作は行わなかった。これらの樹種から放出される VOC の概算は他では行われていないが、他の例えばサザンイエローパインのような樹種について研究された値と同様の傾向を示した。

[引用文献]

1. Drew, J. and G.D. Pylant, Jr. 1966. Turpentine from pulpwoods of the United States and Canada. *Tappi* 49(10):430-438.
2. Hillis, W. 1962. *Wood Extractives and Their Significance to the Pulp and Paper Industries*. Academic Press, New York.
3. Hillis, W. 1987. *Heartwood and Tree Exudates*. Springer Verlag, Berlin.
4. Ingram, L.L., Jr., F.W. Taylor, V. Punsavon, and M.C. Templeton. 1995. Identification of the volatile organic compounds emitted during the drying of southern pine in pilot and laboratory experiments. *In: Measuring and Controlling Volatile Organic compound and Particulate Emissions from Wood Processing Operations and Wood Based Products*. Proc. 7301, Forest Prod. Soc., Madison, Wis.
5. Koch, P. 1972. *Utilization of the Southern Pines*. Vol. I. Handb. 420. USCA Forest Serv., Washington D.C.
6. Rowell, R. 1984. *The chemistry of solid wood*. Advances in Chemistry Series #207. American Chemical Soc., Washington D.C.

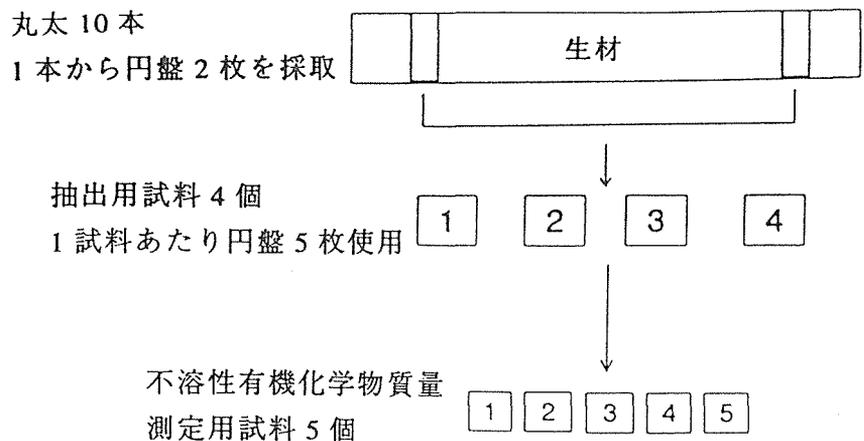


図 1. 試料採取方法

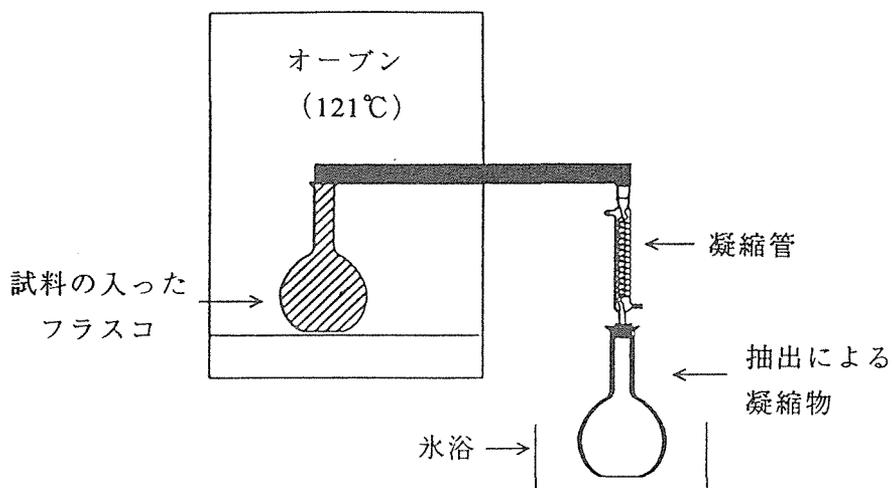


図 2. 実験装置の模式図。抽出中は装置を密閉した。

表1. 試料の内訳。

100個：生材状態で試験、100個：気乾状態で試験。

樹種数	含水率 レベル	1樹種あたりの 抽出用試料	各抽出用試料から得た 溶解化学物質質量測定試料	試料総数
5	2	4	5	200

表2. VOC放出量測定用試料の含水率 (MC) と溶解化学物質質量 (DOC)。

注：生材の変動係数は気乾材より相当大きい。

樹種	生材			
	平均MC	MC変動係数	平均DOC	DOC変動係数
	(%)			
レッドパイン	165.36	1.82	0.05	8.12
ホワイトスプルー	114.24	15.98	0.10	52.89
バルサムファー	96.42	3.60	0.11	30.66
レッドスプルー	78.98	15.58	0.12	31.16
ブラックスプルー	56.88	6.67	0.13	27.85

樹種	気乾材			
	平均MC	MC変動係数	平均DOC	DOC変動係数
	(%)			
レッドパイン	14.30	1.74	0.36	17.58
ホワイトスプルー	14.67	2.82	0.23	16.88
バルサムファー	14.00	2.66	0.22	21.76
レッドスプルー	14.52	1.87	0.27	6.37
ブラックスプルー	12.65	3.88	0.23	8.57

表3. 抽出試験結果から算出したVOC低減量。

実験No.	バルサムファー	ホワイトスプルー	レッドスプルー	ブラックスプルー	レッドパイン
	(ポンド/MBF*)				
1	1.312	1.251	1.301	0.347	0.853
2	0.815	1.246	0.333	0.715	0.725
3	1.950	2.193	0.248	1.361	0.558
4	0.468	0.442	3.013	1.044	0.597
平均	1.136	1.283	1.224	0.867	0.683
変動係数(%)	49.1	48.3	91.0	43.5	16.9

* 1ポンド/MBF ≒ 192グラム/m³

表4. 各VOC放出量に対応する乾燥製材量の推定。

樹種	VOC放出量(トン/年)			
	100	50	25	10
	(MMBF*)			
バルサムファー	176.1	88.0	44.0	17.6
ホワイトスプルー	155.9	77.9	39.0	15.6
レッドスプルー	163.4	81.7	40.8	16.3
ブラックスプルー	230.7	115.3	57.7	23.1
レッドパイン	292.8	146.4	73.2	29.3

* MMBF ≒ 2360 m³

7. 容量式および抵抗式含水率計の精度

ロンドン大学

P.J. ウィルソン (P.J. Wilson) 著

[要約]

14 樹種、30 バッチから取った試験体 441 個の含水率を容量式含水率計 (ワグナー L612) と三種類の抵抗式含水率計で測定し全乾法含水率と比較した結果、容量式が最も正確であった。抵抗式では材温を正確に補正し、3 種類とも同様の結果を得た。これらの結果は樹種や比重の設定に左右されなかった。容量式および抵抗式含水率計の誤差は同程度だったが、抵抗式の方がバッチごとの含水率の誤差が大きかった。一方、容量式は非破壊で素速く簡単に測定できた。

[はじめに]

容量式含水率計はセンサーにより含水率を迅速かつ非破壊で推定するが、針状電極を木材に打ち込む抵抗式含水率計よりも不正確だと言われることがある。しかし、ワグナー容量式含水率計は抵抗式含水率計よりも正確で使いやすいという報告もある。本研究では、イギリスの工場で保存した製材を用い、ワグナー L612 容量式含水率計と 3 種類の抵抗式含水率計の精度を比較した。

[材料と方法]

1998 年夏、イギリスの 3 箇所の貯木場 (Timbmet Ltd., オックスフォードシャー; Atkins and Cripps Ltd., ビルストン; Wood Bros. Ltd., ハートフォードシャー) にてデータを採取した。14 樹種、30 バッチ、441 個を試料とした。2 つのバッチは屋外に、それ以外はすべて工場の一般的な倉庫に保存したものである。試料の内訳を表 1 に示した。

ワグナー L612 容量式含水率計を三種類の抵抗式含水率計 (プロティメーター-デジタルティンバーマスター、ガンハイドロメット H35、デルムホルスト RDM-2S) と比較した。ここで用いた抵抗式含水率計は実験開始時に新しく用意したもので、どれもスライドハンドルと絶縁針の付いたハンマー式である。プロティメーターは材温を測定する針も備えている。実験日の最初には、できる限りそれぞれの含水率計を補正しバッテリーをチェックするようにした。

試料の一端から 18cm と 30cm の所で試験片を切り、15 分以内に質量 (精度 0.1g)、寸法 (精度 0.1mm)、および 4 種類の含水率計の示す値を記録した。三種類の抵抗式含水率計の針は、容量式含水率計の測定領域内に約 1cm 間隔で繊維方向に打ち込んだ。試験片はすべて、約 103°C で 2~4 日間恒量になるまでオーブドライして全乾質量を測定した。含水率計で測定した時点での含水率を算出し、さらに標準換算式を用いて比重をアメリカ標準 (全乾質量/含水率 12%での体積) に変換した。

抵抗式含水率計では材温と樹種の設定が必要であり、容量式含水率計では樹種または比重の設定が必要となる。一つのバッチで最低 3 つの試料の材温をプロティメーターで測定した。このバッチごとの平均材温を用い、与えられた補正表に従ってすべての抵抗式含水率計のデータを補正した。測定する樹種または比重が含水率計に設定出来ない場合は、樹

種や比重が似ているものを代わりに選んだ。それぞれの設定を表 2 に示した。

含水率計の示す値（以下、含水率計含水率）と全乾法含水率の絶対偏差（正負の符号を無視したもの）を用いて、均一性のレーベンの検定により精度を分析した。この検定は概算ではあるが、プラスの尖度の影響を受けない。

[結果]

〈測定精度〉

全乾法含水率の 2%、1%、0.5% 以内にある含水率計含水率のパーセンテージを表 3 に示した。全乾法含水率の $\pm 2\%$ および $\pm 1\%$ であるものは、抵抗式よりも容量式の方が多かった。しかし、 $\pm 0.5\%$ では両者に有意差はなかった。

4 種類の含水率計含水率と全乾法含水率との偏差の頻度分布を図 1 に示した。この図で、どの最大値も大差無いが、広がりや非対称性は容量式が最も少ない。

表 4 は、レーベンの検定結果が有意であり、容量式の絶対偏差のばらつきが他より少ないためにこれらの差が生じることを示している。

どの抵抗式含水率計の針も繊維方向に打ち込んだが、ガンメーターは繊維に垂直に差し込むようにデザインされている。このため、全乾法含水率が 20% の時、含水率計含水率は全乾法よりも最大 2% 大きな値を示し、両者の差は全乾法含水率が 10% に近づくとつれて減少することが予測される。ガンメーターによる含水率はすべて、偏り平均値（バッチ平均含水率計含水率 - バッチ平均全乾法含水率）で調整し、偏りがゼロになるようにした。しかし、このようにして調整した含水率はもはや正確ではない。

〈偏りと回帰残差変動〉

個々の偏差（含水率計含水率 - 全乾法含水率）は測定精度を示し、これは 1) 偏り、2) 回帰残差変動からなる。バッチごとの偏りは [バッチ平均含水率計含水率 - バッチ平均全乾法含水率] で定義し、表 5 に示した。どの含水率計でも、偏りは低～中程度だった。しかし、3 種類の抵抗式含水率計は正の偏り最大値が比較的高く、それぞれの絶対平均値を平均した値は容量式より 44% 大きかった。これは主に偏りが大きいバッチの頻度による。30 バッチ中、容量式で 1 バッチ、3 種類の抵抗式含水率計でそれぞれ 9、8、7 バッチの偏りが $\pm 2\%$ を越えた。それぞれの割合を比べると $\chi^2=7.8$, $df3$; $p=0.050$ となり、また 3 つの抵抗式の割合を平均すると $\chi^2=6.1$, $df1$; $p=0.013$ となる。

含水率計含水率の回帰残差変動は、含水率計に採用されている予測モデル、および全乾法含水率がどれだけ変化するかにより決定され、次のように表現される。

個々の回帰残差偏差 = [(含水率計含水率 - 全乾法含水率) - バッチ平均偏り] の絶対値。
この変動を全乾法含水率の変動と比較した (表 6)。尚、絶対偏差が最大となる 3 つのデータを除いた。容量式のデータは最も大きな回帰残差変動を示したが (表 6 の絶対平均値)、レーベントテストによると、この違いは有意でなかった ($F=2.5$; 3, $df1748$; $p=0.060$)。容量式の精度が他より高い理由は、主にバッチ偏りが少ないためであることが明らかである。

〈設定〉

表 2 に示した設定は、17 バッチ ($n=255$) について正確で、13 バッチ ($n=186$) については近似である。この 2 グループの精度を表 7 に示した。正確な設定の場合、近似設定よりもやや高い精度が得られた。即ち、全乾法含水率の $\pm 1\%$ に入る含水率計含水率は 48%

と 43%であった。容量式で設定が正確な場合、抵抗式の平均よりも正確であった（全乾法含水率の±1%に入る含水率計含水率は 56.1%と 45.2%、 $\chi^2=8.6$, $df=1$; $p=0.003$ ）。しかし近似設定の場合、有意差はなかった（42.5%と 42.8%）。

〔考察〕

容量式含水率は抵抗式含水率の平均より正確であった。抵抗式含水率計のデータは、実際の使用時よりも正確に温度補正し、例えば樹種や比重の設定など、本質的でないものの変化によって過度に影響を受けることはなかった。全体的な精度の差の原因として、バッチの含水率計含水率が全乾法含水率より一貫して高いか低い際に、バッチの抵抗式含水率の偏りが大きいことが考えられた。

バッチに起因する変動は重要であると同時に、避けることが出来ない工場環境の特徴であろう。抵抗式含水率計の結果に影響する要因は、材温や針の差込深度の誤差、木材組織の違い、無機物イオン量等であろう。容量式は測定する領域が広いため、表面がどれだけ平坦であるかということや、試験体の厚さに左右される可能性がある。しかし必要ならば、これより狭い領域を測定する機種もある。抵抗式では絶縁針を用い、容量式では関心のある試験体より小さいサイズのを測定することで、表面含水率の影響をかなり避けることが出来る。

材表面から内部への含水率傾斜は重要であり、どちらのタイプの含水率計含水率にも影響しやすい。ただし容量式含水率計の示す含水率は、表面から深さ 25mm までの含水率を反映し、より安定と考えられる。抵抗式の針は異なる深さまで差し込むことができ、それぞれ異なる含水率を与えて含水率傾斜の勾配を示す。しかし、このような操作は複雑で時間がかかり実用的でない。抵抗式含水率計で一回測定するのでさえ容量式の 4~10 分長くかかる。

容量式は材温を感知しないが、抵抗式含水率の温度補正は天候などによりかなりの誤差が出やすい。

抵抗式含水率計の示す含水率は、30 秒以上経過すると全乾法含水率の最大 1%低くなる傾向があった。本研究において含水率計含水率は、一貫して針を差し込んだ後数秒で記録したが、実際は針を差し込んでから経過する時間による誤差も確実にあるだろう。含水率計含水率値が低下する理由として、伝導率が初期にわずかに上昇することや、針周辺の木材がゆっくりと緩和し時間の経過とともに接触領域が減ることが考えられる。また、抵抗式含水率計の針が鈍感な場合、結果が不安定になった。

容量式は非破壊で比較的測定が容易である。抵抗式含水率計ではハンマープロブの乱暴な操作は使用者および装置にショックを与え、さらに接続ケーブルは挟まれやすい。また、針は材に穴を残しダメージを与える。

〔結論〕

工場の倉庫に保管された製材を測定した場合、容量式含水率計 L612 が 3 種類の抵抗式含水率計よりも良い結果を示した。容量式含水率計は比較的正確で迅速、そして測定が容易であった。さらに、例えば屋外に保管した場合、人工乾燥直後、実験室で調整した製材等の測定精度の比較が興味を持たれる。

表1. 試料の内訳。

樹種	バッチ	試験体数(n)	産地
ダグラスファー	4	60	オレゴン
イエローパイン	3	45	アメリカ
レッドシーダー	1	15	ブリティッシュコロンビア
ヘムロック	1	15	ブリティッシュコロンビア
ヨーロッパオーク	3	45	イギリス
ハードメープル	1	14	ニューヨーク州
ホワイトオーク	2	30	ペンシルバニア
ホワイトアッシュ	2	30	カロライナ
レッドアールダー	1	14	オレゴン
ヨーロッパブナ	5	71	ルーマニア
ユーティル	2	30	西/中央アフリカ
サベリ	3	45	西/中央アフリカ
セプター	1	12	東南アジア
イジグボ	1	15	象牙海岸

表2. 含水率計の樹種設定。

樹種	ワグナー (容量式)	抵抗式		
		プロティメーター	ガン	デルムホルスト
ダグラスファー	ダグラスファー	ダグラスファー	ダグラスファー	ダグラスファー* ^b
イエローパイン	イエローパイン	イエローパイン	イエローパイン	イエローパイン*
レッドシーダー	レッドシーダー	レッドシーダー	レッドシーダー	ヘムロック
ヘムロック	ヘムロック	ヘムロック	ヘムロック	ヘムロック
ヨーロッパオーク	任意 ^c	ヨーロッパオーク	ヨーロッパオーク	レッドオーク
ハードメープル	シュガーメープル	シュガーメープル	ハードメープル	シュガーメープル
ホワイトオーク	ホワイトオーク	ホワイトオーク	ホワイトオーク	ホワイトオーク*
ホワイトアッシュ	ホワイトアッシュ	ホワイトアッシュ	ホワイトアッシュ	ホワイトアッシュ*
レッドアールダー	レッドアールダー	ブラックポプラ	レッドアールダー	イエローポプラ
ヨーロッパブナ	任意 ^c	ヨーロッパブナ	ヨーロッパブナ	レッドオーク
ユーティル	任意 ^c	ユーティル	ユーティル	サクラ* ^c
サベリ	サベリ	サベリ	サベリ	サクラ* ^c
セプター	セプター	メランチ	セプター	アフリカマホガニー
イジグボ	マホガニー	アフリカマホガニー	イジグボ	アフリカマホガニー

b *の付いた行は、すべての含水率計の樹種設定が測定樹種と同一。

c 製造業者の薦める設定。比重は0.55とした。

表3. 容量式含水率計と三種類の抵抗式含水率計の精度。データ441個のうち、含水率計含水率が全乾法含水率の±2%、±1%、±0.5%以内にあるものの数とパーセンテージ。

また、抵抗式同士および3種類の抵抗式の平均と容量式の比較 (df 2, 1での χ^2 テストの結果)。

	容量式	抵抗式含水率計			比較 (χ^2)	
		1	2	3	抵抗式	容量式 vs. 抵抗式
測定値の数	363	308	311	330	3.2 有意差なし	18.9**
全乾法含水率±2%	82.3	69.8	70.5	74.8		
測定値の数	222	195	193	197	0.1 有意差なし	4.8*
全乾法含水率±1%	50.3	44.2	43.8	44.7		
測定値の数	119	127	112	129	2.0 有意差なし	0.1 有意差なし
全乾法含水率±0.5%	27.0	28.8	25.4	29.3		

** = $p = 0.000$; * = $p = 0.028$

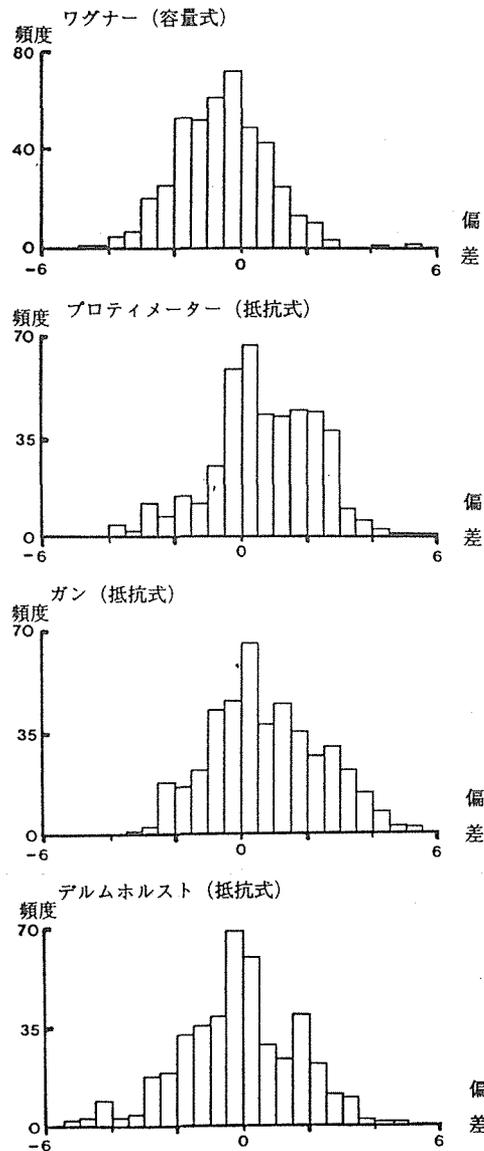


図1. 全乾法含水率と含水率計含水率の偏差の頻度分布 ($n=441$)。間隔 0.5%。

表4. 全乾法含水率と含水率計含水率の平均絶対偏差($n=441$)と
レーベンテストの結果。

	容量式	抵抗式		
		1	2	3
平均絶対偏差	1.257	1.440	1.521	1.437
レーベンテスト	df	MS	F	p
含水率計	3	5.4824	3.1	0.027
誤差	1760	1.781		

表5. 30バッチの偏り(含水率計含水率のバッチ平均値-全乾法含水率のバッチ平均値)と、
偏りの正負の最大値、平均値、および絶対平均値。

	容量式	抵抗式		
		1	2	3
負	-2.52	-2.03	-1.47	-5.26
正	1.40	3.00	4.40	2.89
平均	-0.46	0.79	0.84	-0.20
絶対平均	0.88	1.33	1.22	1.27

表6. 全乾法含水率*と含水率計含水率**の回帰残差偏差 ($n=438$)。

*全乾法含水率の回帰算差偏差=(全乾法含水率-バッチ平均全乾法含水率)

**含水率計含水率の回帰算差偏差=[(含水率計含水率-全乾法含水率)-(バッチ平均偏り)]

	全乾法*	容量式**	抵抗式**		
			1	2	3
負の最大値	-3.88	-3.16	-3.02	-2.95	-2.92
正の最大値	4.41	4.99	4.04	3.94	3.32
絶対平均値	0.675	0.744	0.656	0.706	0.641

表7. 含水率計の精度。含水率計に測定樹種を正確に設定できた場合(17バッチ)
と似た樹種を設定した場合(13バッチ)の比較。

含水率計含水率が全乾法含水率の1%以内にあるデータ数とパーセンテージ。

樹種	容量式	抵抗式			試験体数
		1	2	3	
正確な設定					255
含水率計含水率のデータ数	143	136	99	111	
全乾法含水率±1%	56.1	53.3	38.8	43.5	
近似設定					186
含水率計含水率のデータ数	79	59	94	86	
全乾法含水率±1%	42.5	31.7	50.5	46.2	