

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007-2008
 課題番号：19580185
 研究課題名（和文） 乾燥機中に栈積みした木材の個別含水率の高周波 CT モニタリング法開発
 研究課題名（英文） Development of high frequency CT monitoring of moisture contents of individual timbers piled in kiln
 研究代表者
 祖父江 信夫 (SOBUE NOBUO)
 静岡大学・農学部・教授
 研究者番号：50023495

研究成果の概要：

乾燥機内部に栈積みした木材の含水率を、高周波 CT 技術を用いて推定する方法を研究した。小試験体と実大スギ正角材による乾燥実験を行い、乾燥中の木材インピーダンスの変化を観測した。得られた栈積みの積算含水率に逆計算法を適用して個別木材の含水率を推定した。推定含水率は、繊維飽和点以上の高含水率範囲でばらつきが大きかったが、商業的な含水率検査で重要な 15-20% 以下では推定含水率と全乾法含水率の差は減少した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：ウッドエンジニアリング

科研費の分科・細目：(分科) 林学 (細目) 林産科学・木質工学

キーワード：木材乾燥、水分計測、高周波、モニタリング

1. 研究開始当初の背景

実際の木材乾燥では、天然乾燥、人工乾燥を問わず栈積み状態で行われ、乾燥経過の検査のために途中で栈積みを崩すことはない。

人工乾燥では、一般に樹種や寸法ごとに定めた標準プログラムにしたがって乾燥室内の空気乾・湿球温度を時間管理する方法が取られる。一度、乾燥作業に入ったら、基本的には終了まで個別の木材の含水率のモニタリングは行われない。乾燥途中の木材の含水率情報を利用する方法を併用した人工乾

燥制御は、産業的なレベルでも一部の乾燥機で行われている。たとえば、1-2個の被乾燥材に電気抵抗を測るピンを打ち込み直流抵抗式水分計で含水率を推定する方法や栈積み中に配置したコントロール材の質量変化をロードセルで計測して含水率を推定する方法がある。

従来法の問題点

いずれも、モニタリングが実施されても限られたサンプルによるものであり、栈積み全

体の乾燥の様子を把握することはできない。実際の木材乾燥においては初期含水率のむらがおおきく、またスギにおいては黒心材と呼ばれる乾燥速度の遅い材料もいっしょに乾燥が行われる。乾燥の適正な終了時期をどうするか判断が難しい。しかも、一度開始したら乾燥機に立ち入ったり、栈積み崩して木材を抜き取ることもできない。このような現状から、解決すべき課題は次の3点に集約される。

- (1)木材の栈積み崩さないでもモニタリングできる
- (2)栈積み全体の木材の含水率について個別の含水率のばらつきを把握する
- (3)リアルタイムのモニタリング

2. 研究の目的

この研究の目的は、人工乾燥機内部に栈積みされた木材個別の含水率を栈積み崩さないでモニタリングするために、高周波のCT技術を用いて推定する方法を開発することである。効果的な電極の形状と配置、インピーダンス計測方法（適正周波数帯）、栈積み木材の個別含水率の計算法（数値逆計算法）など、計測法の確立と一連の高周波CT法の数値処理法の開発を行う。その検証のため、小試験体を用いた天然乾燥によるモデル実験と産業用人工乾燥機を用いた実大製材による乾燥実験を行う。

3. 研究の方法

(1) 小試験体6段6列の栈積みによるモデル実験

試験体はスギ生材から小試験体36本を作製した。寸法は、断面3.0cmX3.0cmX66.0cmである。

乾燥条件は、RC棟南側実験室で気象条件の成り行きで自然乾燥させた。初期含水率は、53%-193%であった。

栈積みは36本の試験体を6段6列に無作為に配置し、厚さ1.0cmの栈木を挿入して積み上げた。試験体の水平方向の間隔は1.0cmである（図1）。

実験装置：

電極は図2に示すように、供給側はフラット電極、検出側はガード電極付きの分割電極（6分割）を用いた。アルミニウム平板から作製した。分割電極を順番に切替えてインピーダンス計測器に接続し、栈積みの各行・列方向の計測を行った。

電気特性は、インピーダンスメータを用い、インピーダンス Z と位相 θ を次の周波数で計測した。500Hz, 1kHz, 2.5kHz, 5kHz, 10kHz,

25k, 50k, 100k, 250k, 500kHz。

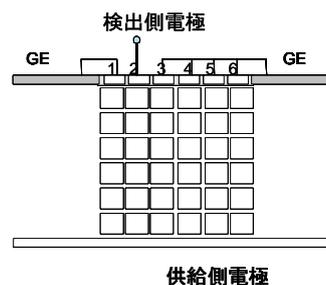


図1 栈積みおよび電極配置図

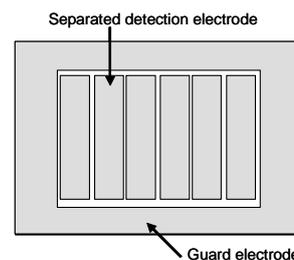


図2 検出側の電極形状

(2) スギ実大材の人工乾燥への適用

試験体にはスギ正角生材（心持ち材）、寸法10.5cm×10.5cm×300cmを36本用いた。初期含水率は40%-152%（平均値74%）である。

栈積み方法は次のようにした。通常の実大柱材の乾燥に用いる栈積み方法を採用した。栈木厚さは2.5cm、水平方向の試験体の間隔は2.5cmとした。栈木の挿入は、両端および130cm、230cmの位置に、格段に4本ずつ挿入した。個別木材の栈積み位置は実際の栈積みをも想定して、初期含水率にかかわらずランダムにした。

電極は図2と同様な形状で、実大試験体に合わせてスケールアップした（図3）。栈積み中央部に2対の電極対を直交させて配置した。電気特性は、インピーダンスメータを用い、インピーダンス Z と位相 θ を次の周波数で計測した。500Hz, 1kHz, 2.5kHz, 5kHz, 10kHz, 25k, 50k, 100k, 250k, 500kHz。

実機による人工乾燥は長野県林業総合センターで実施し、(株)新柴製高温人工乾燥装置を用いた。乾燥スケジュールは、長野県林業総合センターによる高温低湿処理を施した高温乾燥スケジュールを用いた。

乾燥終了時に試験体中央から木口試験体を取り出し、全乾法含水率を測定した。また、乾燥終了時に5個の試験体を抽出し、試験体断面における含水率傾斜を測定した。



図3 実大材の積積みと電極対

4. 研究成果

(1) 小試験体モデル実験

積積みの行・列方向のインピーダンス (100kHz) は、乾燥の進展につれて増加した (図4)。検出側電極に接する行・列のうちインピーダンスが他に比べて小さい行・列 (V06, H01) が観測された。

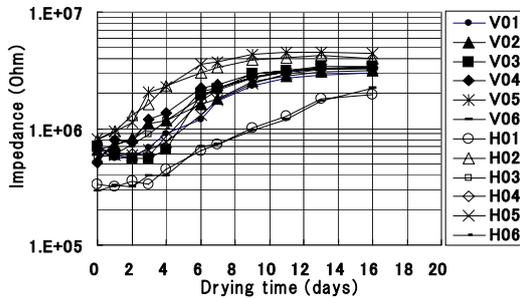


図4 乾燥過程のインピーダンス変化

乾燥全期間を通じて行・列方向の積算含水率とインピーダンスにも同様の傾向が現れた (図5)。検出側電極に接する木材の乾燥の遅れが原因と考えられる。隣接する行・列ではインピーダンスが増加し、その原因としてインピーダンスの小さい電極への電流の流れ込みによる電流の減少効果が考えられる。

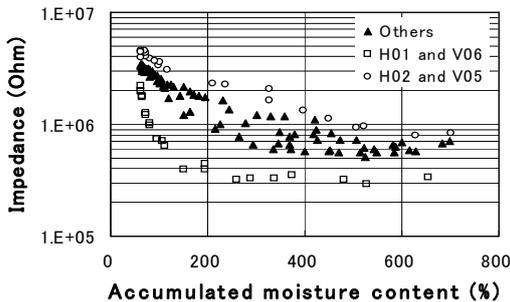


図5 インピーダンスと行・列方向の積算含水率の関係

これらを3グループに分類し、それぞれのグループでは行・列方向の積算含水率とインピーダンスの間に相関の高い実験式が得られた (図6)。

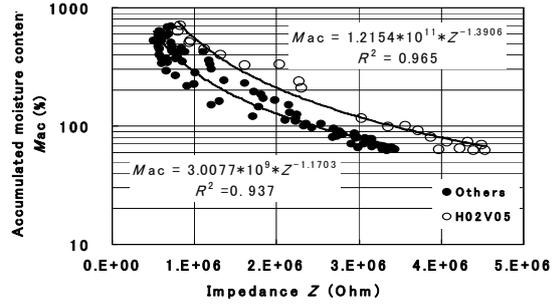


図6 積算含水率とインピーダンスの関係

ここで得られた行・列方向の積算含水率から個別木材の含水率を推定するために、逆計算法 (アコースティックトモグラフィ問題) を適用した (図7)。試行錯誤により、行・列方向の積算含水率を満足するような個別木材の含水率 $U_{11} \sim U_{66}$ の最適値が収束するまで計算を実行し、Excel(Microsoft)による計算では2-3回の繰り返しで収束した。

U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}	U_{16}	U_{H1}
U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{24}	U_{25}	U_{26}	U_{H2}
U_{31}	U_{32}	U_{33}	U_{34}	U_{35}	U_{36}	U_{H3}
U_{41}	U_{42}	U_{43}	U_{44}	U_{45}	U_{46}	U_{H4}
U_{51}	U_{52}	U_{53}	U_{54}	U_{55}	U_{56}	U_{H5}
U_{61}	U_{62}	U_{63}	U_{64}	U_{65}	U_{66}	U_{H6}
U_{V1}	U_{V2}	U_{V3}	U_{V4}	U_{V5}	U_{V6}	

図7 個別木材含水率(U_{ij})と行・列方向の積算含水率(U_{Hi}, U_{Vj})

全乾燥期間における推定含水率と全乾法による含水率の関係を図8に示す。

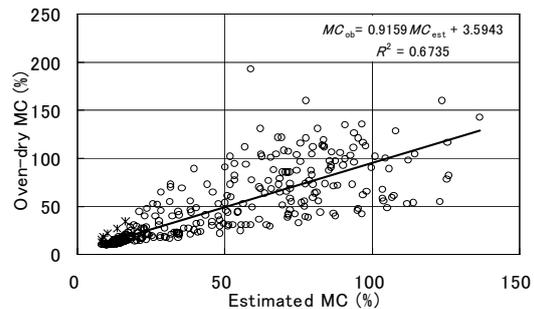


図8 全乾燥期間における個別木材の推定含水率と全乾法含水率の関係

直線回帰の決定係数は0.67で、傾斜もほぼ1になった。含水率が高い状態では、大きなばらつきを示すが、含水率が低下するにつれてばらつきは小さくなった。実際の木材乾燥工程において重要な乾燥終了時期の判断に必要な情報は繊維飽和点 (含水率約30%) 以下であり、通常の仕上がり含水率目標は15%から20%における含水率である。この付近で

の含水率推定は良好であることがわかる。

ばらつきのもう一つの要因として、逆計算のアルゴリズムに起因する誤差である。適用したアコースティックトモグラフィー問題は、特異的に含水率が大きい試験体が存在するとそれを含む行・列の含水率の推定結果を過剰に評価する傾向がある。

(2) スギ実大材の人工乾燥への適用

実機人工乾燥機を用いた製材乾燥におけるインピーダンス (10kHz) の経時変化を図 9 に示す。乾燥スケジュールの進行による含水率変化に対応したインピーダンスの増加が観測されている。乾燥の遅れに起因するインピーダンスが小さい値を示す積込みの行が観測されている。

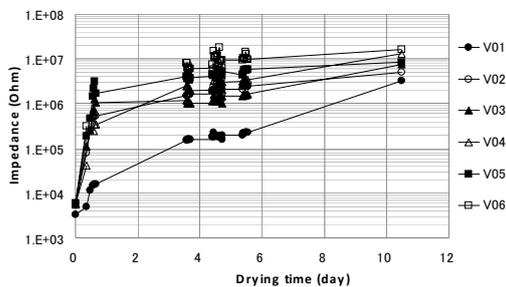


図 9 乾燥過程のインピーダンス変化

小試験体と同様に、積込みの行・列方向の積算含水率とインピーダンスの関係を図 10 に示す。ただし、実機乾燥では途中経過における含水率の実測データは得られない。

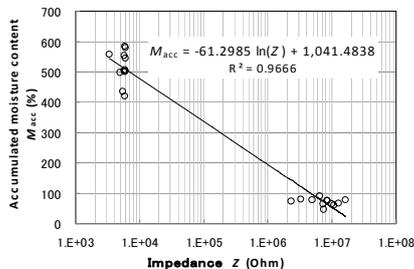


図 10 積算含水率とインピーダンスの関係

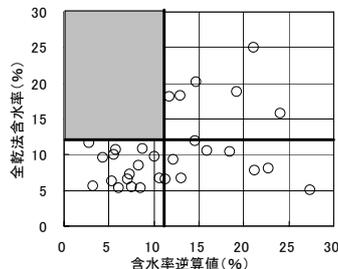


図 11 全乾含水率と逆算含水率の関係

実機乾燥による逆算含水率のばらつきは、小試験体に比べてかなり大きいですが、全体の含

水率の低下は確認できる。全試験体の平均含水率は、全乾法で 12%、逆計算法で 11% となった。ばらつきの増加の要因として、試験体内部の水分傾斜が考えられる。図 12 のように、乾燥終了時の含水率傾斜は想像以上に大きい。

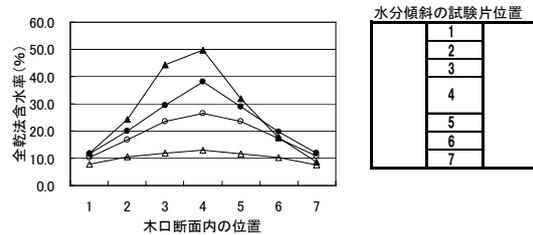


図 12 乾燥後の製材の断面水分分布

(3) 結論

積積みした木材の行・列方向のインピーダンスは、乾燥の進行に伴う含水率変化を反映していた。行・列方向のインピーダンスから積算含水率に換算する実験式を導き、逆計算法によって個別木材の含水率を推定する方法を導いた。

小試験体実験で推定された含水率は、繊維飽和点以上の含水率の高い範囲でのばらつきが大きかったが、人工乾燥材における含水率検査として重要となる含水率 15-20% では、十分に狭まった。

実大スギ製材の人工乾燥では、推定含水率のばらつきは大きかった。インピーダンスによるモニタリング手法が有効なことがわかったが、含水率の推定精度の向上には残留する製材内部の断面水分分布の影響の考慮、逆計算のアルゴリズムの改善が必要なことがわかった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

- ① **SOBUE Nobuo**: Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substance (ISEMA) 2009, Monitoring of individual moisture content of piled timbers during drying by impedance tomography method, 4 June 2009 Helsinki (Finland)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

祖父江 信夫 (SOBUE NOBUO)

静岡大学農学部・教授

研究者番号：50023495

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし