

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	福井 杜史之
論文題目	Development of a method for estimating moisture content in green wood using vibrational properties (振動特性を用いた生材の含水率推定方法の開発)		
(論文内容の要旨)			
<p>乾燥前の丸太や角材の含水率は個体によってばらつきがあることが知られている。スギに代表されるように心材含水率が異常に高い値を取りうる樹種では、含水率のばらつきは特に大きくなる。乾燥前の丸太や角材の含水率を測定できれば、個体に応じた乾燥スケジュールの細かな調整や乾燥の前段階での仕分けが可能になるため、効率的な木材の利用につながる重要な技術となる。しかし、木材は密度が一定の材料ではないことから、重量測定では木材自体の重量と含まれる水分を分けることができない。そこで本研究は、丸太や乾燥前の角材といった繊維飽和点以上の含水率を持つ生材の含水率推定方法を開発し、その方法の推定精度について調べることを目的とした。</p> <p>第1章では、関連する文献を総括し、本研究の目的を明確化した。まず、含水率推定手法について既往の知見を整理した。木材の誘電率や、電磁波の透過や反射率を用いた含水率推定法が実用化されているが、密度や繊維傾斜などの影響を受けやすいという欠点以外に、繊維飽和点を超える高含水率域での測定精度が大幅に悪化する点、測定深度が深くない点から、本研究で目的とするような未乾燥の丸太や角材の含水率推定方法にはなりえないことが明らかになった。また、共振周波数や応力波伝播速度は比動的ヤング率の関数であるため繊維飽和点以上で含水率依存性があったが、比動的ヤング率が含水率だけでなく個体のヤング率にも依存するため、汎用的な推定指標にはなりえなかった。次に、比動的ヤング率と損失係数の負の相関に着目し、既往の研究を整理した。この相関は繊維傾斜やマイクロファイブリル傾角、未成熟材などが含まれていても成り立つこと、繊維飽和点以下であれば任意の含水率で成り立つこと、樹種依存性がほとんど見られないことが確かめられた一方で、主に無欠点気乾小試験体での知見しか得られていないことが明らかとなった。</p> <p>比動的ヤング率と損失係数の相関を用いれば、木材の物性値の影響を極力排除した、含水率にのみ依存する指標を作ることができると考えられた。そこで本研究では、この相関をもととした繊維飽和点以上の含水率推定方法を開発し、その推定精度について検証することを目的とした。</p> <p>第2章では、含水率推定手法の説明と推定式の導出を行った。繊維飽和点以上ではヤング率と損失係数に変化はなく、比動的ヤング率のみが見かけの密度の影響で含水率の増大とともに減少することが知られており、このことを利用して、比動的ヤング率と損失係数の相関の回帰直線は含水率が増大するほど傾きが同じまま切片が小さくなると計算できた。この関係を用いて、回帰直線の切片から含水率推定式が導出された。この手法では繊維飽和点における回帰直線、対象物の比動的ヤング率と損失係数が必要となることが分かった。また、比動的ヤング率と損失係数を振動実験から求めるための計算方法が説明された。</p> <p>第3章では、丸太に本手法を応用する前段階として、比動的ヤング率と損失係数の相関が欠点を持つ気乾材や生材においても成立するか、また生材における相関とその樹種依存性が気乾材で報告された傾向と一致するかどうかを調べた。心持ち、節、繊維傾斜といった欠点を有した気乾と生材のスギ角材を試験体としてたわみ振動試験から相関を求めたところ、欠点を持っていてもそれぞれ気乾と繊維飽和点において相関が成立することが分かった。一方で、生材小試験体のたわみ振動試験から、生材の相関は既往の研究で調湿された気乾試験体によって測定された繊維飽和点付近の相関と異なり、また気乾試験体では報告されていない樹種依存性も見られた。これは生材の</p>			

損失係数が乾燥履歴のある材の損失係数と異なるためだと考えられた。

第4章では、スギ、ヒノキ、トドマツの3樹種の丸太のべ85本の平均含水率を推定した。推定には、第三章で生材小試験体から樹種ごとに求めた比動的ヤング率と損失係数の相関の回帰直線と、丸太のたわみ振動試験から得た比動的ヤング率と損失係数を用いた。実測した丸太の平均含水率と推定含水率の間には平均で25.9%の系統誤差と、±15.7%の推定誤差があった。系統誤差は回帰直線を作成した小試験体の支持方法と丸太の支持方法の違いに起因すると考察された。本研究の目的は丸太の選別であり、この精度は含水率が大きくばらつく樹種が対象であれば十分であると考えられた。また、樹種依存性を考慮せずに全ての樹種に同じ回帰直線を使用すると推定精度が大幅に低下することが分かった。

第5章では、スギ丸太の振動試験で観察された縦振動とたわみ振動の損失係数の違いの原因について考察した。縦振動から求めた損失係数のほうがたわみ振動から求めた損失係数よりほとんどの場合大きく、お互いに相関はなかった一方で、その差は辺心材の含水率差に起因する見かけの密度の差と正の相関があることが分かった。見かけの密度の差が縦振動に及ぼす影響を明らかにするため、内部に密度差を有する円柱モデルの厳密な縦振動方程式を解き、振動時に発生する軸方向とせん断方向それぞれのひずみエネルギーを計算したところ、見かけの密度差が増大するほどせん断由来のひずみエネルギーも増加することが明らかとなった。軸方向、せん断方向それぞれの損失係数を既往の文献から仮定して、見かけの密度差がある場合の縦振動損失係数の、密度差がない場合に対する増大率を計算したところ、35本のスギ丸太の縦振動とたわみ振動から測定された損失係数の比と概ね一致した。このことから、縦振動の損失係数は辺心材の含水率差に強く影響を受けることが示された。

第6章では、本研究の含水率推定手法に縦振動で測定した比動的ヤング率と損失係数を代入した場合、推定含水率と心材含水率に相関があることを、第5章と同じ35本のスギ丸太を用いて示した。第5章で説明した通り縦振動とたわみ振動の損失係数に差があり、辺心材含水率差が大きいほど縦振動損失係数は大きくなる。本手法の含水率推定式では損失係数に代入する値を大きくすると含水率の推定値は小さくなる一方で、辺心材含水率と心材含水率に差がある場合、心材含水率は平均含水率よりも小さいと言えるため、縦振動から求めた推定含水率は心材含水率と相関が高くなると推定された。特に、樹皮が剥がれて乾燥し始めていると考えられる辺心材含水率が120%以下の丸太を除いた29本のスギ丸太での決定係数は $R^2 = 0.78$ となり、高い精度での心材含水率推定の可能性が示唆された。

以上のように、本学位論文では、比動的ヤング率と損失係数の相関を用いた繊維飽和点以上の含水率推定方法を提案し、丸太のような生材の平均含水率を十分な精度で推定することが可能であることが示された。さらに縦振動にみられる特徴的な損失係数をもとに心材含水率を精度よく推定できる可能性も示唆された。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し

審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は未乾燥の木材の含水率推定方法の開発を目的として、木材の振動特性値を用いた含水率推定式を導出し、さらにこの式を用いることで針葉樹丸太のたわみ振動から含水率を精度よく求められることを実証した。また、丸太の縦振動による心材含水率推定の可能性も示した。評価すべき点は以下の通りである。

1. 既往の研究で、主に気乾材での存在が確かめられていた比動的ヤング率と損失係数の強い負の相関を繊維飽和点以上の含水率に応用することで、基準となる繊維飽和点における相関の回帰直線と、含水率測定対象の木材の比動的ヤング率と損失係数のみを用いた含水率推定式を導出した。このように本論文は、繊維飽和点以上の範囲においても非破壊の含水率推定が行えることを理論的な背景から説明するものである。
2. 提案した含水率推定手法をもとにスギ、トドマツ、ヒノキの3樹種の丸太の含水率を推定した。その結果、樹種ごとの回帰直線を用いることで標準偏差が $\pm 15.7\%$ の精度で含水率を推定することができた。このように本論文では、丸太のたわみ振動の振動特性値は平均含水率の推定に利用できることを明らかにし、実大材の乾燥前選別手法としては十分な推定精度を有することを示すものである。
3. スギ丸太のたわみ振動と縦振動で異なる損失係数が測定されることを明らかにし、その差が半径方向の辺心材含水率差に起因する辺心材密度差によってせん断応力が縦振動で発生するためであることを、厳密な運動方程式の計算から推定した。さらに、たわみ振動と縦振動から得られる損失係数の計測値の差が辺心材含水率差と相関を持つことを用いて、心材含水率を推定できる可能性も示した。このように本論文では、丸太の縦振動は丸太の心材含水率の推定に利用できる可能性があることを明らかにした。

以上のように、本論文は振動特性値を用いて丸太など未乾燥の木材の含水率の推定式を導出することに成功し、本手法を用いて一定の精度で含水率の推定が可能であることを実大材料である丸太を用いて示した。さらに丸太の縦振動の特徴的な振動特性を発見し、これを用いた心材含水率の推定可能性も示した。これらの知見は乾燥前における木材の強度分級の可能性を示し、製材製品の付加価値向上に資するものであり、林産加工学、生物機能材料学、生物材料設計学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和6年1月16日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降（学位授与日から3ヶ月以内）