

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06645

研究課題名(和文) 空中超音波による木材の乾燥応力の非破壊イメージング解析システムの開発

研究課題名(英文) Nondestructive image analysis of drying stress in wood with air-coupled ultrasonic

研究代表者

長谷川 益己 (Hasegawa, Masumi)

九州大学・農学研究院・助教

研究者番号：00372756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：空中超音波による木材の乾燥応力の非破壊測定することを目指して本研究を実施した。最初に表面波が発生する空中超音波の最適な入射角が決定できた。次に表面波の伝搬特性に及ぼす節の影響がマイクロフォーカスX線CTによる観察から確認できた。最後に表面波の伝搬速度は初期応力レベルにおいて引張応力が増加するとともにリニアに変化することが分かった。応力に対する伝搬速度の相対変化率から音弾性定数が得られ、伝搬速度を測定するだけで乾燥応力の非破壊測定できる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では木材表面を伝搬する表面波の伝搬速度は引張応力に対してリニアに変化することが明らかになった。これは伝搬速度の変化を測定することで木材表面の応力状態が予測できることを示唆するものであり、木材の乾燥応力の非破壊測定につながる学術的・社会的に意義のある研究成果である。本研究を更に継続していくことで空中超音波を利用した木材の乾燥応力の非破壊測イメージング解析システムの開発が可能になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The final objective is to establish the non-contact and non-destructive technique of drying stress in lumber by surface wave generated using air-coupled ultrasonic. The optimal incident angle was determined. Effect of knots on the propagation of surface wave was observed with micro focus X-ray CT device. Surface wave was generated on the surface of wood under tensile stress. Surface wave velocity linearly changed with tensile stress. The acoustoelastic constants were determined. These findings suggested that it is possible to measure the drying stress with air-coupled ultrasonic.

研究分野：木材工学

キーワード：非破壊評価 空中超音波 表面波 音弾性 木材 非接触 応力測定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、構造材を室内に露出させて、木組みを見せる現し工法の木造住宅や公共施設が多く見られる。現しの梁・柱材の多くは心持ち材を利用する。しかし、心持ち材は乾燥過程で乾燥応力の発生により表面割れが起こる。木材は乾燥するとき、材表面と内部の含水率の差から表面割れが発生する。このときに乾燥応力が発生する。割れの抑制には乾燥中の木材表面の乾燥応力の把握が重要である。乾燥応力をリアルタイムで非破壊測定出来れば、乾燥過程において製材全品の表面割れの抑制のコントロールが簡単にできると考えた。超音波は材料の物理的性質と密接な関係があり、工業製品の強度性能や内部欠陥の非破壊評価に使用されている。その一つに音弾性法と呼ばれる非破壊応力解析法がある。音弾性は材料内を伝搬する超音波の速度が応力により変化する現象である。音弾性法は超音波伝搬速度を計測するだけで材料内部の力学的状態を非破壊評価できる。この手法を利用して木材の乾燥応力を非破壊測定が出来ないかという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では現しの梁・柱として使用される心持ち材の表面割れを防止するために空中超音波を利用して木材表面に非接触的に発生させた表面波の音弾性効果により乾燥応力を非破壊3次元イメージングすることを最終目標としている。そこで空中超音波を利用した木材の乾燥応力の非破壊測定の可能性を探るために、木材の表面波の音弾性現象を明らかにする。また、表面波音弾性現象の含水率依存性を検討し、表面波音弾性法による実大材の乾燥応力の非破壊測定のモデル実験に向けての検討を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 供試材

スギ(*Cryptomeria japonica*)、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)、センダン(*Melia azedarach*)、ケヤキ(*Zelkova serrata*)、ファルカタ(*Albizia facataria*)を用いた。供試材の平均の気乾密度は、それぞれ 386kg/m^3 、 467kg/m^3 、 530kg/m^3 、 685kg/m^3 、 267kg/m^3 であった。

(2) 表面波の伝搬速度の測定

伝搬速度の測定は空中超音波探触子、遮音材、超音波パルスレシーバー、プリアンプ、パソコンを用いた。測定の概略図を図1に示す。物体に入射された超音波は通常は境界で透過および反射が起こる。しかし、特定の入射角で超音波を入射すると表面波が発生する。最初に表面波が発生するための空中超音波の最適な入射角の決定を試みた。空中超音波探触子を回転することで、空中超音波の入射角を変化させた。入射方向は木材の繊維および接線方向とした。設定した入射角毎に受信波の最大振幅を測定した。得られる表面波の受信波の最大振幅と入射角の関係から、空中超音波の最適な入射角を決定した。最適な入射角の決定後に繊維および接線方向の表面波伝搬速度と最大振幅を測定し、2次元分布図の作成を試みた。

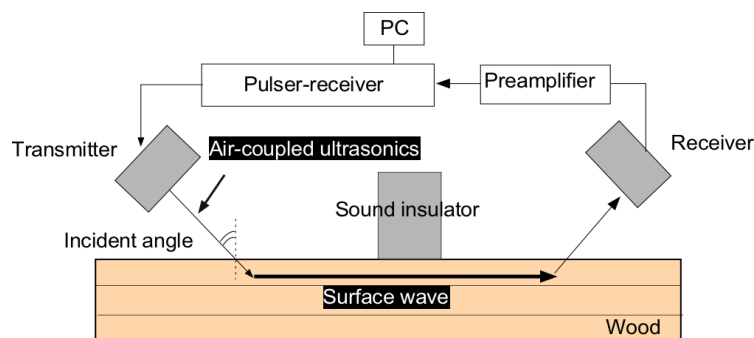


図1. 表面波伝搬速度の測定概略図

(3) 表面波音弾性現象

最初に表面波音弾性現象の把握を試みた。図2に表面波音弾性実験の概略図を示す。引張応力下の試験体に対して、空中超音波を応力軸に対して平行に入射させて、応力による表面波伝搬速度の変化を測定した。表面波の伝搬方向は繊維および接線方向とした。引張試験はインストロン型材料試験機を用いて十分に弾性範囲以下において行った。また、ひずみゲージを用いてデータロガーにより引張ひずみの測定も行い、応力とひずみの関係も取得した。得られる応力、ひずみ、伝搬速度のデータから音弾性定数を決定した。さらに飽和塩水溶液で相対湿度を制御したデシケーター内で試験体の平衡含水率を調整し、各種平衡含水率にて音弾性実験を行った。

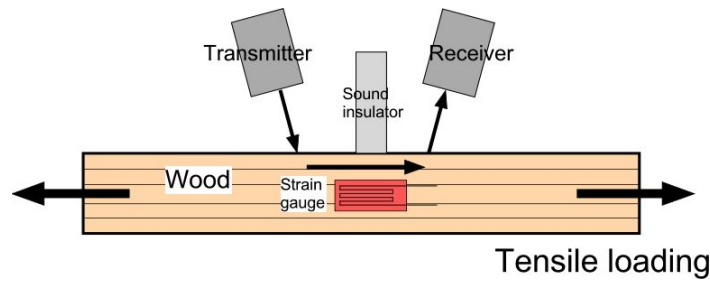


図 2 . 表面波音弾性実験の概略図

(4) マイクロフォーカス X 線 CT 装置による画像解析

マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて撮影を行った。得られた 3 次元形状データから横断面および板目面において 0.102mm 間隔で書き出したスライス画像を使用した。得られた画像を解析することで、表面から確認できない木材内部の節の状態を非破壊的に確認した。

4 . 研究成果

(1) 表面波の伝搬速度の測定

空中超音波の最適な入射角度を繊維方向および接線方向で決定できた。この入射角を設定することで木材の表層に表面波を発生させることができる。繊維方向に入射させたときの受信波形を図 3 に示す。この波形から伝搬時間を求めて伝搬速度を算出した。伝搬速度は樹種や入射方向により異なった。繊維方向の表面波の伝搬速度は接線方向より大きくなった。得られた表面波の伝搬速度は既往の接触法による研究と同程度の値を示した。伝搬速度の測定条件は樹種により密度が異なること、入射方向により組織構造との方向性が変化するため、異なった。さらに図 4 に示すように伝搬速度の 2 次元分布図が作成できた。今後は求められる伝搬速度の分解能に応じて測定間隔、探触子の周波数を検討することも必要となる。

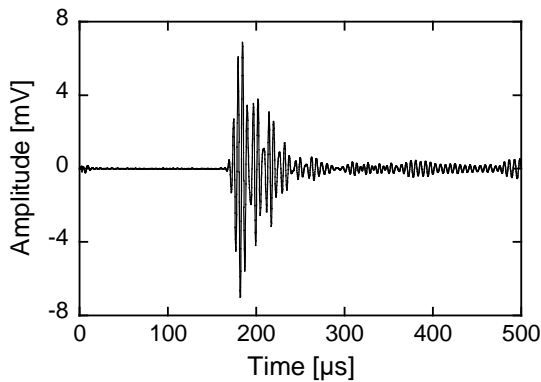


図 3 . 表面波の受信波形

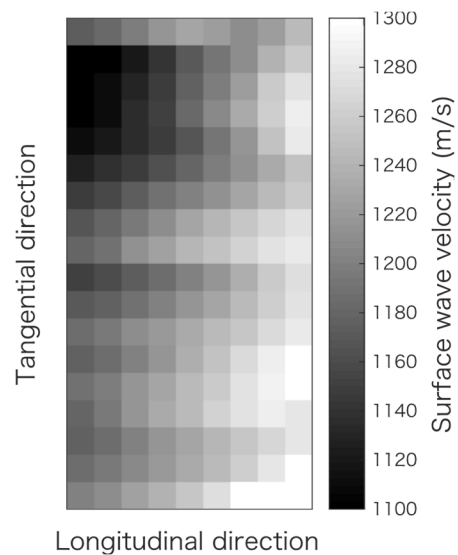


図 4 . 表面波伝搬速度の 2 次元分布図

表面波の伝搬経路内に存在する節の影響について明らかにした。表面波は名前の通り表面を伝わる超音波のため、木材内部の節の形状が大きく影響する。様々な大きさの節を持ったサンプルを用意して、材表面の節径比(節の径 / 材幅)を各種変化させることで解析した。表面波の受信波の振幅は材表面の節径比が超音波センサーに対して大きくなるにつれて、小さくなった。さらに表面波の伝搬に与える節の影響を 3 次的に解析するためにマイクロフォーカス X 線 CT 装置を利用した。図 5 に横断面と板目面の X 線 CT 画像の一例を示す。得られた 3 次元画像より木材内部の節の状態(例えば表面からのどこまで存在するか)を観察することで、板厚方向の影響についても考察することができた。

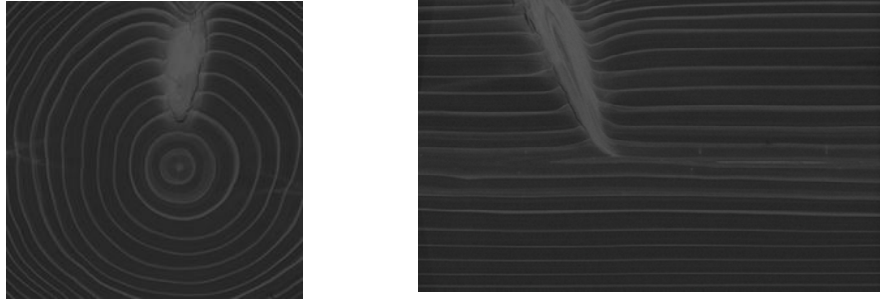


図5．試験体内部の節のX線CT画像

(2) 表面波音弾性現象

表面波の伝搬速度に及ぼす引張応力の影響を明らかにした。図6に繊維方向に平行に伝搬させた表面波伝搬速度と引張応力と引張ひずみの関係の一例を示す。表面波の伝搬速度は初期応力レベルにおいて引張応力の増加とともにリニアに変化した。その後、ある応力レベルで伝搬速度は増加から減少に転じた。この現象は既往の研究においても報告されている。接線方向に平行（繊維方向と直交）に伝搬させた表面波の伝搬速度も同様に初期応力レベルにおいて引張応力の増加とともにリニアに変化した。引張応力による伝搬速度の相対変化である伝搬速度変化率を求め、引張応力との関係を算出した。図7に両者の関係の一例を示す。両者はリニアな関係にあり、そのときの傾きが音弾性定数となる。得られた音弾性定数は従来の透過法による研究と同程度であった。音弾性定数は応力とひずみの関係におけるヤング率に相当する定数である。測定したひずみをヤング率に乗じることで応力が推定できるのと同じように、音弾性定数が既知であるとき、伝搬速度の変化を測定するだけで応力が推定できる。従って、この研究成果は乾燥応力を非破壊測定に導くことにつながる。以上のように、従来の透過法で実現不可能であった内容に関して表面波を使用することで乾燥応力の非破壊測定を可能にする初めての研究成果であり、国内外においてインパクトが高い。

様々な含水率に調整したサンプルにおいて引張応力と接線方向に伝搬させた表面波の伝搬速度の関係を測定した。初期音速および音弾性定数は含水率の影響を受けることが明らかになった。木材の乾燥過程において音弾性法を利用して乾燥応力を推定する際には測定時の含水率の影響を考慮する必要が示された。しかし、音弾性現象における応力と含水率の影響を分離するのが難しく、検討課題となった。今後は明らかになった課題を解決することで最終目標である空中超音波を利用した木材の乾燥応力の非破壊測イメージング解析システムの開発につながるであろう。

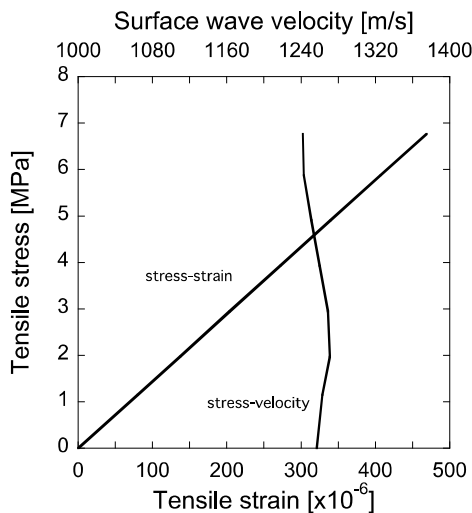


図6．引張応力とひずみと伝搬速度の関係

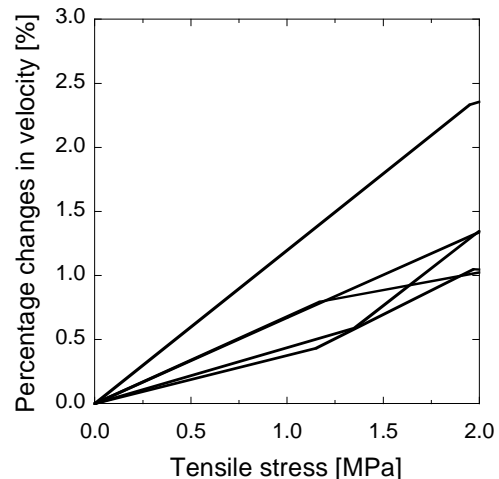


図7．引張応力と伝搬速度変化率の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masumi Hasegawa, Junji Matsumura
2. 発表標題 Propagation Properties of Surface Wave Generated on Wood
3. 学会等名 The Sixth Japan-US Symposium Emerging NDE Capabilities for a Safer World(国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川益己, 岡村博幸, 竹内和敏, 松村順司
2. 発表標題 表面波音弾性法による木材の乾燥応力測定に向けての基礎的研究
3. 学会等名 第26回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masumi Hasegawa, Hiroyuki Okamura, Kazutoshi Takeuchi, Junji Matsumura
2. 発表標題 Effect of Tensile Stress on Velocity of Surface Wave Generated Using Air-coupled Ultrasonic Sensor
3. 学会等名 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡村 博幸 (Okamura Hiroyuki) (80502244)	福岡県工業技術センター・その他部局等・研究員 (87104)	