

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月22日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23658147

研究課題名（和文） 空中超音波による木材の非接触式非破壊評価法の開発

研究課題名（英文） Research on non-contact and non-destructive evaluation in wood using air-coupled ultrasonic

研究代表者

長谷川 益己 (HASEGAWA MASUMI)

九州大学・大学院農学研究院・助教

研究者番号：00372756

研究成果の概要（和文）：空中超音波を利用して木材の超音波伝播速度を非接触法で測定した。伝播速度は繊維・半径・接線いずれの方向でも全乾状態から含水率の増加とともに減少した。伝播速度に与える含水率の影響を非接触的に捉えることが出来た。超音波は節や割れが表面や内部にあると透過出来ない場合があり、超音波伝播速度分布図の作成により木材内部の二次元可視化の可能性が示唆された。以上より、空中超音波は木材の内部情報を非接触かつ非破壊的に測定する有効なツールであることが示唆された

研究成果の概要（英文）：The ultrasonic wave velocity in wood was measured using non-contact ultrasonic technique. The velocities along three orthotropic directions decreased with increasing moisture content. It is possible to detect the effect of moisture content on the ultrasonic characteristics using non-contact technique. When there were some surface or internal knots and cracks in wood, ultrasonic wave could not be propagated through the wood. This finding suggested that it is possible to visualize the internal information of wood. The air-coupled ultrasonic is useful non-contact and non-destructive tool to detect the internal information of wood.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：非接触、空中超音波、非破壊評価、音弾性、応力解析、内部欠陥

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は木質構造物の新しい非破壊応力測定法として音弾性法の導入を最終目標としている。音弾性は材料内を伝播する超音波の伝播速度が内部応力によって変化する現象で、伝播速度から部材内部の応力状態を評価できる。超音波による非破壊評価法は接触式であり、送受信センサーと対象材料の界面にカップラントが必要となる。そこで、カップラントを使用しない完全非接触式の非破

壊評価法として木材に最適な空中超音波の利用を考えた。

## 2. 研究の目的

本研究は木材の内部応力の完全非接触式非破壊測定を可能にする非接触式音弾性法の開発である。本研究では、第一歩として空中超音波法の計測技術の確立と木材内部欠損の二次元可視化を目的とした。

具体的には下記の3課題について明らかにする。

1. 木材の空中超音波の計測方法の確立
2. 空中超音波伝播特性に与える木材の物理的性質の影響
3. 木材の内部欠陥の2次元可視化

### 3. 研究の方法

#### (1) 材料

①木材の空中超音波の計測方法の確立  
スギ (*Cryptomeria japonica*) とヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) から 30 (繊維) × 30 (半径) × 30 (接線) mm の立方体を樹種毎に 30 個作製した。気乾密度と含水率はスギが  $0.43 \pm 0.03 \text{g/cm}^3$ ,  $10.7 \pm 1.2\%$ , ヒノキが  $0.46 \pm 0.03 \text{g/cm}^3$ ,  $9.5 \pm 0.4\%$  であった。

②空中超音波伝播特性に与える木材の物理的性質の影響

スギ, ヒノキ, ブナ (*Fagus crenata*), ケヤキ (*Zelkova zerrata*) の気乾材から, 20 (繊維) × 20 (半径) × 20 (接線) mm の立方体を樹種毎に 10 個作製した。試験片の含水率は全乾, 気乾, 約 20%, 飽水の 4 種類とした。全乾状態は恒温乾燥機で  $105^\circ\text{C}$ , 24 時間, 飽水状態は減圧注入器にて調整した。また, 試験片の含水率を 20% に調整するために  $\text{KNO}_3$  飽水溶液の入ったデシケータ内に入れ, 温度  $20^\circ\text{C}$  で数週間養生した。調整後の平均含水率を表 1 に示す。

表 1 調整後の平均含水率

	全乾	気乾	$\text{KNO}_3$	飽水
スギ	0	10.9	18.4	207
ヒノキ	0	11.5	19.3	193
ブナ	0	11.8	19.4	114
ケヤキ	0	13.6	17.5	95

(単位: %)

③木材の内部欠陥の2次元可視化  
スギの気乾材から 100 (繊維) × 100 (半径) × 100 (接線) mm の立方体を 3 個作製した。

#### (2) 測定方法

空中超音波は木材の繊維, 半径, 接線の 3 方向にそれぞれ伝播させた。木材および空気を伝播した空中超音波を受信子で受信後, プリアンプで増幅し, 制御用パソコンに取り込んだ。測定装置は超音波パルサーレーザー (JPR-10CK), プリアンプ (PR-60A), 空中超音波探触子 (公称周波数 400 及び 200kHz,  $14 \times 20 \text{mm}$  の平面型) を使用した (図 1)。木材の超音波伝播速度 ( $V_w$ ) は式 (1) から決定した。ここで,  $L_w$  は木材中の伝播距離,  $T$

は木材を挿入したときの伝播時間,  $L_a$  は空気中の伝播距離,  $V_a$  は空気の超音波伝播速度を表す。

$$V_w = L_w / (T - L_a / V_a) \quad (1)$$

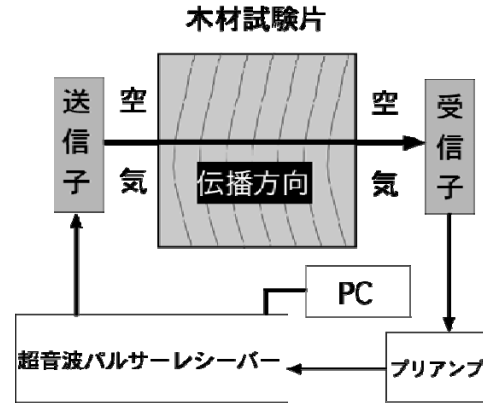


図 1 実験概略図

実験①では比較として同一試験片で接触法により伝播速度を測定した。探触子は周波数 500kHz, 直径 25.4mm を使用した。試験片と探触子の間にはカップラントとしてシリコングリースを塗布し, 輪ゴムで固定した。

実験③では探触子は木口面および板目面を 10mm 間隔でスライドしながら伝播時間を測定した (図 2)。

図 2 伝播速度の測定風景

### 4. 研究成果

#### (1) 木材の空中超音波の計測方法の確立

図 3 に探触子間に木材を挿入しないとき (空気のみ) の空中超音波の受信波形の一例を示す。探触子間距離 ( $L_{10}$ ,  $L_{40}$ ) は 10mm と 40mm である。探触子間距離が長くなると受信波形は右に移動した。両者の受信波形の第 1 ゼロクロス点より伝播時間 ( $T_{10}$ ,  $T_{40}$ ) を決定し, 式 (2) より空中超音波の伝播速度 ( $V_a$ ) を決定できた。

$$V_a = (L_{40} - L_{10}) / (T_{40} - T_{10}) \quad (2)$$

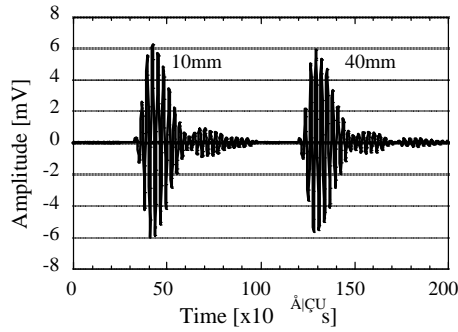


図3 空中超音波の受信波形（空気）

探触子間にヒノキを挿入したときの受信波形の一例について繊維方向の結果を例に図4に示す。3方向とも同じような受信波が得られた。受信波の第1ゼロクロス点から決定した伝播時間は繊維（L）方向が約40 $\mu$ s、半径（R）方向が約50 $\mu$ s、接線（T）方向が約60 $\mu$ sとなり、L、R、T方向の順に小さい値を示した。図3に示した探触子間距離が40mmのときの受信波形と比較すると、探触子間に試験片を挿入すると伝播時間は繊維方向で約80 $\mu$ s速くなった。これは超音波伝播速度が木材より空気の方が遅いためである。表2に3方向の伝播速度の平均値を樹種毎に示す。木材の伝播速度は $V_L$ 、 $V_R$ 、 $V_T$ の順に大きいことが知られており、今回得られた伝播速度は一般的な傾向と同じであった。

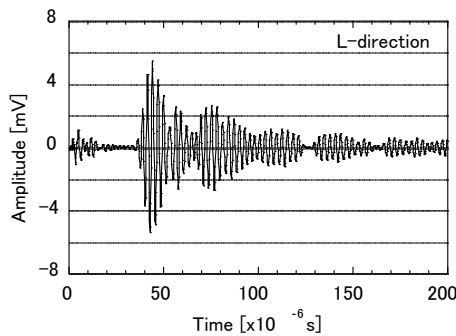


図4 空中超音波の受信波形（繊維方向）

表2 3方向の超音波伝播速度

樹種	$V_L$	$V_R$	$V_T$
スギ	3331 $\pm$ 92	1833 $\pm$ 59	1380 $\pm$ 117
ヒノキ	3658 $\pm$ 106	2216 $\pm$ 130	1256 $\pm$ 49
スギ	4310 $\pm$ 339	1863 $\pm$ 9	1388 $\pm$ 15

（単位：m/s）

非接触法と接触法による伝播速度を比較した。繊維、半径、接線いずれの方向の伝播速度も非接触法は接触法より小さい値となった（表3）。両者は0.1%水準で有意な正の相関関係（ $r=0.90$ ：ヒノキ、 $r=0.82$ ：スギ）を示した（図5）。

以上より、木材の超音波伝播速度は空中超音波を使用することで、カップラントを使用しない非接触法で測定できることが明らかになった。

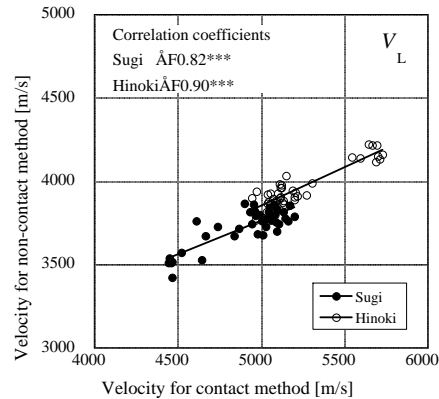


図5 非接触法と接触法の伝播速度の関係

表3 非接触法および接触法による超音波伝播速度

	樹種	繊維	半径	接線
非接触法	スギ	3728 $\pm$ 115 (3.08)	1877 $\pm$ 132 (7.02)	1403 $\pm$ 112 (8.01)
	ヒノキ	3960 $\pm$ 125 (3.16)	2354 $\pm$ 147 (6.23)	1305 $\pm$ 53 (4.09)
接触法	スギ	4909 $\pm$ 234 (4.77)	2337 $\pm$ 55 (2.36)	-
	ヒノキ	5228 $\pm$ 247 (4.72)	2379 $\pm$ 141 (5.91)	1544 $\pm$ 151 (9.79)

単位：m/s、括弧内は変動係数[%]

(2) 空中超音波伝播特性に与える木材の物理的性質の影響

図6に繊維方向に伝播させた空中超音波の伝播速度と含水率の関係を示す。伝播速度は全乾状態のとき最大値（例えばスギ：6111m/s）を示し、含水率が20%付近まで大きく減少した。その後、伝播速度は飽水状態までゆるやかに減少し、最小値（例えばスギ：2161m/s）となった。表4に繊維方向の伝播速度の平均値を含水率毎に示す。木材の繊維方向の伝播速度は繊維飽和点（含水率30%付近）まで大きく減少し、繊維飽和点を超えると変化が小さくなる。本研究でも繊維飽和点で伝播速度の測定を行えば、同様の傾向となろう。

半径方向および接線方向の伝播速度は繊維方向と同様に全乾状態から含水率20%まで同様に減少した。含水率20%から飽水状態までは樹種により増加あるいは減少した。この原因については本研究期間内には明らかに出来ず、今後の検討課題だろう。

以上のように、空中超音波を使用することで木材の含水率の変化を非接触的に計測できた。これらの研究成果は空中超音波を利用

した木材の含水率の非接触推定の可能性を示した点で意義がある。今後は実大材寸法（例えば辺長 100 mm の立方体）の試験体を対象として、含水率を経時的に変化させて、伝播速度を測定していく必要がある。

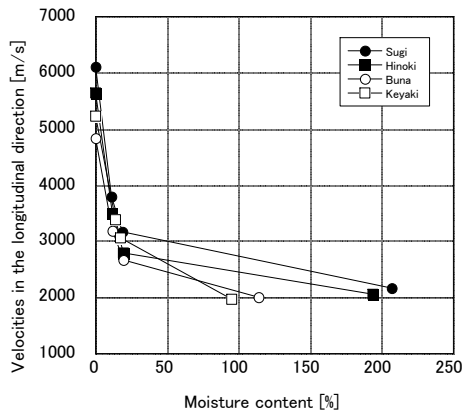


図 6 超音波伝播速度と含水率の関係

表 4 含水率毎の繊維方向伝播速度

樹種	全乾	気乾	KNO <sub>3</sub>	飽水
スギ	6111	3790	3167	2161
ヒノキ	5637	3494	2783	2053
ブナ	4828	3182	2672	2002
ケヤキ	5226	3386	3055	1972

(単位: m/s)

### (3) 木材の内部欠陥の 2 次元可視化

図 7 に長軸方向および横方向の測定結果の一例をそれぞれ示す。長軸（繊維）方向の伝播速度は 2790m/s から 4496m/s の範囲で分布した。平均伝播速度は  $4053 \pm 340$  m/s となった。長軸方向の伝播速度は髄付近で小さく、外側ほど大きい値を示した。伝播速度は木材の細胞構造と密接な関連性が報告されている。繊維方向の伝播速度は仮道管の長さとの正相関、細胞壁のマイクロフィブリル傾角（マイクロフィブリルと長軸方向とのなす角）との負相関にあることを報告している。また、横断面に節が存在するところは周辺より伝播速度が遅いことも明らかになった。

横方向の伝播速度は 1051m/s から 2005m/s の範囲で分布し、平均伝播速度は  $1490 \pm 181$  m/s となった。伝播速度は中央部が速く、外側が遅くなった。測定表面は中央部が板目、外側が柾目になっている。すなわち、超音波の伝播方向は中央部が半径方向、外側が接線方向と一致する。木材の超音波速度は半径方向が接線方向より大きい。今回はこれを反映した結果となった。また試験体表面（送信子側あるいは受信子側）に節が存在する場合は、伝播速度が遅く、あるいは、測定

が出来ない箇所 (ND) があった。

以上のように、空中超音波を利用して非接触法で木材の伝播速度分布図の作成に成功した。また、分布図からは木材の表面や内部に存在する割れや節などの欠点の情報を得られる可能性も示唆された。

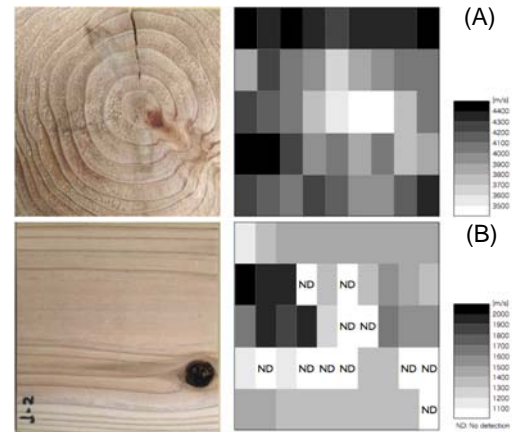


図 7 超音波伝播速度の分布図  
(A) 軸方向 (B) 横方向

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

④長谷川益己、森美咲、増留弘亮、松村順司、空中超音波による木材の乾燥応力の非接触非破壊測定に関する基礎的研究、第 9 回日本非破壊検査協会九州支部研究発表会、2013 年 4 月 19 日、北九州市

③Masumi Hasegawa、Misaki Mori、Kousuke Masudome、Junji Matsumura、Fundamental research on non-contact and non-destructive drying stress measurement in wood by air-coupled ultrasonic、2013 Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting、2013. 4. 12、Daejeon、South Korea

② Masumi Hasegawa、Studied on Nondestructive Evaluation of Wood by Ultrasonic wave、Department Seminar of Agriculture and Life Science in Chungnam University、2012. 10. 18、Daejeon、South Korea

①長谷川益己、松村順司、小田一幸、木材の超音波伝播速度の非接触測定法の検討-空中超音波の利用-、平成 24 年度日本非破壊検査協会超音波部門講演会、2012 年 6 月 21 日、

福岡市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 益己 (HASEGAWA MASUMI)  
九州大学・大学院農学研究院・助教  
研究者番号：00372756