

超音波を用いて得られる木材の伝播速度

STUDY ON AN ULTRASONIC VELOCITY OF WOOD

速水紀文 — * 1 小林素直 — * 2
杉野未奈 — * 3 林 康裕 — * 4

Norifumi HAYAMI — * 1 Sunao KOBAYASHI — * 2
Mina SUGINO — * 3 Yasuhiro HAYASHI — * 4

キーワード：
超音波, 非破壊試験, 伝播速度, 繊維方向

Keywords:
Ultrasonic, Non-destructive test, Transmission velocity, Grain direction

To estimate the Young's modulus or internal defects of wood with a non-destructive test using an ultrasonic velocity, the factors contributing the velocity need revealing. The detailed distributions of the ultrasonic velocity, measured with a measuring instrument and particular pointed sensors, show as follows: Of the three directions of wood grain, the ultrasonic velocities increase in the order tangential, radial, longitudinal directions. In the longitudinal direction, the velocity around the pith is slower remarkably. A slit between two sensors extends the transmission path, and thus slows the ultrasonic velocity.

1. はじめに

我が国では、伝統的に木材を建築材料として用いており、多くの木造建物が存在する。近年、木造建物の地震による被害が多数報告されており、被害を減らすためには、既存の木造建物に適切な耐震診断と耐震補強を実施することが必要である。その際には、主要な構造部材の材料特性（ヤング係数や強度など）や劣化状況の把握が重要である。部材の材料特性や劣化状況は、部材ごとに解体することなく、かつ、傷がつかないよう非破壊試験から推定することが望ましい。

木材の材料特性や劣化状況を把握する非破壊試験法は様々な種類があるが^{例え}ば¹⁾、本報ではその中でも既存建物部材に対して計測可能で、携帯性に優れた、超音波を用いた非破壊試験に着目する。超音波を用いた木材の非破壊試験に関する報告は多数ある²⁻⁷⁾。試験の際には、材とセンサを密着させる必要があるが、既往の手法で用いられているセンサは円柱形をしており、木材のように材表面に凹凸がある場合には密着させることが困難である。檜垣ら⁸⁾は尖頭形のセンサを使用することで改良したが、超音波の伝播時間に関する詳細な検討は行っていない。また既往の手法では、発信する超音波の波形と受信波形を確認できないために、超音波の伝播時間の算出方法が不明瞭である。

以上を踏まえ、本報では超音波を用いた非破壊試験から、既存建物部材の材料特性や内部欠陥を推定することを目標とし、まずは計測方法や材の特徴が木材の超音波伝播速度に及ぼす影響について検討する。計測には上記の報告²⁻⁸⁾を踏まえ、尖頭形のセンサを使用する。また計測機器は、発信する超音波が確認されており、受信波形

を記録可能なものを使用した。図1(a),(b)に、超音波の伝播時間の計測法を示す。同図に示すように、木材の相対する面に発信・受信センサを設置する対面法と、木材の同一面に発信・受信センサを設置する表面法を検討する。対面法は、主に材軸直交方向の計測を行い、計測値の分布とばらつきを把握することで、今後は腐朽や内部欠陥の推定に応用できると考えている。また表面法は材軸方向の計測を行い、計測方法の検討を行った後に材軸方向の計測値の表面分布の傾向を把握する。そして、一般的に非破壊試験として用いられる打撃音法との比較を行い、表面法と打撃音法の計測値との違いを分析することで、今後は材料特性の推定に応用できると考えている。

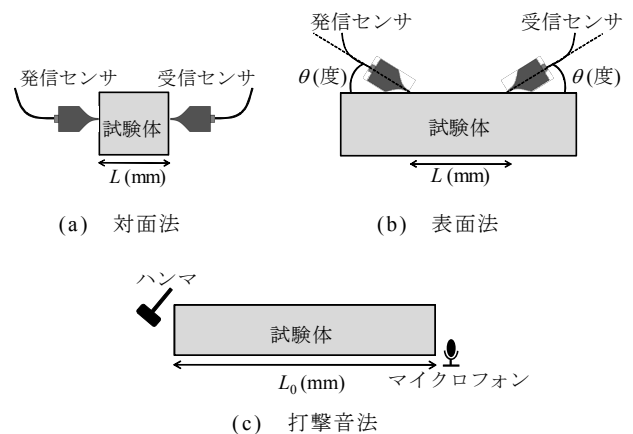


図1 非破壊試験法

¹⁾ 京都大学大学院 修士課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-2 棟 316 号室)
²⁾ 京都大学大学院 博士後期課程・修士 (工学) / (日本学術振興会特別研究員 DC1)
³⁾ 京都大学大学院 助教・博士 (工学)
⁴⁾ 京都大学大学院 教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.
²⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., M. Eng. / (JSPS Research Fellow, DC1)
³⁾ Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.
⁴⁾ Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

2. 計測機器

本報で使用される計測機器は、振動数が54kHzの既知の超音波パルスを、発信センサから5Hz間隔で繰り返し発信し、受信センサで感知した波形を記録することができる。計測に用いる超音波の発信波形は、計測機器から出力されないが、図2に示すような制御信号の形状とされている^{註1)}。また同図に、受信波形の一例を示す。式(1)に、同図中の T_1 (μs)と T_2 (μs)の関係式を示す。なお、この関係式は、超音波パルスの振動数である54kHzから定まるとされている^{註1)}。

$$T_2 - T_1 = 1/54000 \cong 18.5(\mu\text{s}) \quad (1)$$

超音波の受信波形は、利得1000として電圧(±1.5V)で計測された後、12bitでA/D変換される。本報では、受信波形は最大値を基準とした百分率(%)で示す。

超音波の伝播時間 T は、図2に示す超音波の発信時刻 T_1 から受信時刻 T_3 までの時間とした。超音波の発信時刻は、超音波を発信した時刻 T_1 とした。また、超音波の受信時刻 T_3 は以下のように定義した。受信波形には発信された超音波による信号以外にも、計測環境や計測機器によるノイズが含まれる。このため、超音波による信号が受信センサに到達する時刻を特定する上では、超音波による信号とノイズを区別する必要がある。そこで本報では、超音波を発信していない際に受信される信号をノイズとみなした。そして超音波の受信時刻は、ノイズの最大振幅値の2倍を超える値を受信センサで感知した時刻とした。なお、ノイズの振幅に対して超音波による信号の振幅が大きい受信波形をSN比の良い波形とする。

本報で使用されるセンサは、センサの直径が30～40mm程度の従来の円柱形ではなく、先端が直径4mm程度の尖頭形をしているため、測定対象物への接触面積を小さくすることができる。

3. 対面法

3.1 試験体

表1に試験体諸元を示す。本試験では、柱材や横架材に用いられるスギ、ヒノキ、ケヤキ、ペイマツの4種類の木材を用意し、1辺の長さが120～140mm程度の立方体の試験体を各1体ずつ製作した。試験体1, 2は心持ち材であり、試験体3, 4は心去り材である。試験体2にのみ背割りと直径10mm程度の節がある。

3.2 試験方法

試験方法は、試験体の各表面を10mm間隔にメッシュ分割し、相対するメッシュのそれぞれの中心に発信・受信センサを設置し、セ

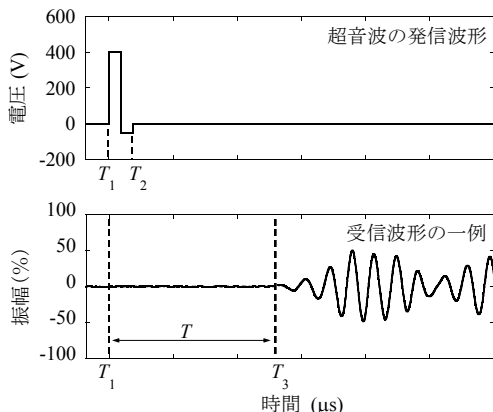


図2 超音波の発信波形と受信波形の一例

ンサ間の超音波の伝播時間を計測する。式(2)により、センサ間距離 L (mm)と伝播時間 T (μs)から超音波伝播速度 v (mm/μs)を算出する。

$$v = L/T \quad (2)$$

3.3 試験結果

表1に、材軸方向(X方向)と材軸直交方向(Y,Z方向)の超音波伝播速度 v の分布を示す。同表には併せて、各方向の超音波伝播速度 v の平均値 μ (mm/μs)、変動係数 CV を示す。なお、試験体2のY方向の超音波伝播速度 v の分布において、図中の点線で囲んだ部分には背割りがあり、計測出来なかったため、計測値は隣接する上下の計測箇所の計測値の平均値とした。また試験体2のZ方向超音波伝播速度 v の分布では、表面に節のある部分を一点鎖線で囲んだ。

全ての試験体において、X方向の超音波伝播速度 v の分布から、樹心に近い部分の計測値は小さい値となることが確認された。また、樹心から遠い部分に比べて、近い部分では樹心からの距離に対する計測値の変化が大きいことも確認された。この傾向は、試験体2のX方向の超音波伝播速度 v の分布において、樹心から離れた場所では計測値が概ね変化しないが、樹心付近では樹心に近づくほど減少して小さくなることから確認できる。Y,Z方向の超音波伝播速度 v の分布からは、年輪の半径方向よりも、接線方向の方が計測値が小さい傾向が見られた。この傾向は、試験体1のY,Z方向の超音波伝播速度 v の分布で、年輪の半径方向の計測となる材の中央部よりも、接線方向の計測となる材端部の方が小さい値となることや、試験体3の年輪の半径方向であるY方向の超音波伝播速度 v よりも接線方向であるZ方向の方が小さいことから確認できる。また、X方向の平均値 μ は4.68～5.78mm/μs、Y,Z方向の平均値 μ は1.36～2.22mm/μsであり、材軸直交方向に比べて材軸方向の平均値 μ は2～4倍程度の値となった。

Y,Z方向の超音波伝播速度 v の分布において、心持ち材である試験体1, 2に比べて、心去り材である試験体3, 4の方が変動係数 CV は小さい傾向にあった。この原因は、心持ち材では主に年輪の半径方向と接線方向の計測を行うが、心去り材ではそのどちらか一方の計測が多数を占め、計測値のばらつきが小さくなるためであると考えられる。

試験体2のZ方向の超音波伝播速度 v の分布において、センサ間に背割りのある紙面右側の計測値は、背割りのない紙面左側に比べて半分程度に小さくなる場合があった。この理由は以下のように推測される。紙面右側は年輪の半径方向、紙面左側は接線方向の計測となる場合が多いため、背割りが無い場合には、紙面右側の方が計測値は大きくなる。しかし、背割りがあるために、紙面右側では超音波の伝播経路がセンサ間距離より大きくなり、計測値が小さくなる。この影響から、紙面右側の計測値が小さくなり、紙面左側の計測値と近い値になるため、Z方向の変動係数 CV は、年輪の半径方向と接線方向による差がよく見られたY方向に比べて小さくなったと考えられる。

4. 表面法

4.1 計測方法の検討

本節では、図1(b)に示すセンサと材表面の角度 θ (度)(以下、センサ角度)やセンサ間距離 L 、節による受信波形への影響を検討する。超音波は材が不均一であったり、伝播距離が長くなると、より大き

く減衰する。減衰が大きい場合は、超音波の到達時刻がノイズの影響で不明瞭となり、計測精度が低下することが考えられる。そこで、センサ角度 θ とセンサ間距離 L を変化させた計測や、超音波の伝播経路付近に節がある場合の計測で得られる受信波を分析し、受信波形のSN比が良く、妥当な計測値の得られる計測方法を検討する。なお対面法と同様に式(2)により、表面法においてもセンサ間距離 L と伝播時間 T から超音波伝播速度 v を算出する。

(1)センサ角度

センサ角度 θ と超音波の受信波形や伝播時間 T との関係を分析する。センサ角度 θ は、センサが材表面と平行となる場合を0度とする。試験体は120mm角のスギ材を用いた。表面法で計測する際のセンサ間距離 L は680mmであり、この距離は後述するセンサ間距離 L の検討から、適切であることを確認している。本検討では、センサ角度 θ が0度、30度、45度、60度、90度の場合の計測を行った。図3にセンサ角度別の受信波形と伝播時間 T を示す。同図より、センサ角度 θ が90度の場合にのみ、伝播時間 T が大きく異なることがわかる。この原因は、センサ角度 θ が大きい場合は、受信センサに超音波が伝わりにくく、SN比が悪くなるためであると考えられる。つまり、センサ角度 θ がより小さい方が、受信波の1波目の振幅は大き

くなり、SN比の良い波形の得られる計測となる。なお比較のために、表面法の計測箇所近傍の木口面に対面法を用いた材軸方向の計測結果を併せて図3に示す。この計測値は、センサ角度 θ を45度以下とした表面法の計測値と同じ程度の値となった。

(2)センサ間距離

センサ間距離 L を変えた場合の受信波形と超音波伝播速度 v の分析を行う。超音波の伝播経路付近に節の無い120mm角のスギ材を試験体に用いて、センサ間距離 L を50mm, 100mm, ..., 2000mmと50mm刻みに計測を行った。図4に超音波伝播速度 v - センサ間距離 L 関係を、図5に $L = 100\text{mm}, 600\text{mm}, 1100\text{mm}, 1600\text{mm}$ の受信波形と伝播時間 T を示す。図4より、センサ間距離 L が450 ~ 1350mmの場合と比較して、その他の場合では超音波伝播速度 v が概ね小さくなった。図5において、センサ間距離 L が100mmの受信波形から、センサ間距離 L が短いためにSN比の良い計測となっていることがわかる。しかし、センサ間距離 L が400mm以下で超音波伝播速度 v が小さくなる理由は、以下のように推測される。超音波の受信時刻を決定するアルゴリズムの特性上、伝播時間 T が小さくなるほど、伝播時間 T に比べて、超音波が実際に到達した時刻から受信時刻までの時間が相対的に大きくなる。このため、伝播時間 T が大きくなり、超音波伝

表1 試験体諸元と超音波伝播速度の分布

番号	試験体諸元	木口面の写真	超音波伝播速度		
			X方向	Y方向	Z方向
1	スギ 心持ち材 背割り : なし 1辺の長さ : 120 mm 密度 : 0.38 t/m ³		$\mu: 4.68, CV: 0.12$ 	$\mu: 1.91, CV: 0.13$ 	$\mu: 1.87, CV: 0.15$
2	ヒノキ 心持ち材 背割り : あり 1辺の長さ : 140 mm 密度 : 0.44 t/m ³		$\mu: 5.78, CV: 0.05$ 	$\mu: 1.72, CV: 0.16$ 点線: 背割り 	$\mu: 1.36, CV: 0.13$ 一点鎖線: 節
3	ケヤキ 心去り材 背割り : なし 1辺の長さ : 120 mm 密度 : 0.64 t/m ³		$\mu: 4.88, CV: 0.02$ 	$\mu: 2.22, CV: 0.01$ 	$\mu: 1.88, CV: 0.02$
4	バイマツ 心去り材 背割り : なし 1辺の長さ : 120 mm 密度 : 0.47 t/m ³		$\mu: 5.78, CV: 0.05$ 	$\mu: 1.79, CV: 0.11$ 	$\mu: 1.64, CV: 0.05$

播速度 v が小さくなる。加えて、センサ間距離 L が短いほど、センサ間距離 L に比べて計測距離の誤差が大きいいため、計測精度を保つことが難しいと考えられる。以上より、センサ間距離 L が 450mm 以上であれば、計測アルゴリズムによる計測誤差が十分小さくなると考えられる。センサ間距離 L が 1400mm 以上で超音波伝播速度 v が小さくなる理由は、センサ間距離 L が長いために超音波が大きく減衰することで、受信波形の SN 比が悪くなり、正確な伝播時間 T の計測が出来なかったためである。これは図 5 における、センサ間距離 L が 1600mm の受信波形から確認できる。このため、センサ間距離 L が 1350mm 以下であれば受信波形の SN 比が良く、受信時刻が明瞭な計測が可能となると考えられる。以上より、センサ間距離 L が 450 ~ 1350mm の場合には、超音波伝播速度 v は概ね一定の値となり、安定した計測値が得られると考えられる。

(3) 節

超音波の伝播経路付近に節がある場合の受信波形と超音波の伝播時間 T の分析を行う。本検討では図 6(a) に示すように、節のある 120mm 角のスギ材を用いて、センサ間距離 L を 600mm と固定し、同一直線上で A:センサ間に節がない場合、B:センサ間に節がある場合、C:発信センサと節が接する場合の 3 通りの計測を行った。図 6(b) に受信波形と伝播時間 T を示す。受信波の 1 波目の振幅を比べると、A、B、C の順で小さくなった。また伝播時間 T を比べると、センサ間距離が等しく、同一直線上の計測であるため、ほぼ同じ伝播時間 T が

計測されると考えられるが、A に比べて C は 4% 程度大きい値となった。以上の結果は、A に比べて B、C は、超音波の伝播経路付近に節があるために超音波がより大きく減衰し、中でもセンサと節が接する C では超音波が最も大きく減衰することで、受信波形の SN 比が悪くなったことが一因として考えられる。以上から、超音波の伝播経路付近に節があると、計測精度が低下する可能性があると考えられる。

以上(1)~(3)より、センサ角度は 45 度程度以下、センサ間距離は 450 ~ 1350mm 程度とし、超音波の伝播経路付近に節のない計測を行う場合に、比較的安定した計測となった。

4.2 材軸方向の超音波伝播速度の表面分布の計測

4.2.1 試験体

表 2 に試験体諸元を示す。試験体は、秋田、北山、飢肥の 3 地域から各 3 本ずつ取り寄せたスギ材である。試験体の寸法は、120mm × 120mm × 3000mm であり、背割りはない。秋田産の試験体は心去り材であり、北山産、飢肥産の試験体は心持ち材である。

4.2.2 試験方法

試験体の各表面を、材軸直交方向に 20mm 間隔で 6 等分し、各区間の中心で、材中央部の材軸方向の超音波伝播速度 v の表面分布を計測する。超音波伝播速度 v の計測方法は、4.1 節の結果を踏まえて、センサ間距離 L を 600mm、センサ角度 θ は 45 度程度とした。また、表面法での計測後に、打撃音法を行う (図 1(c) 参照)。打撃音法では、

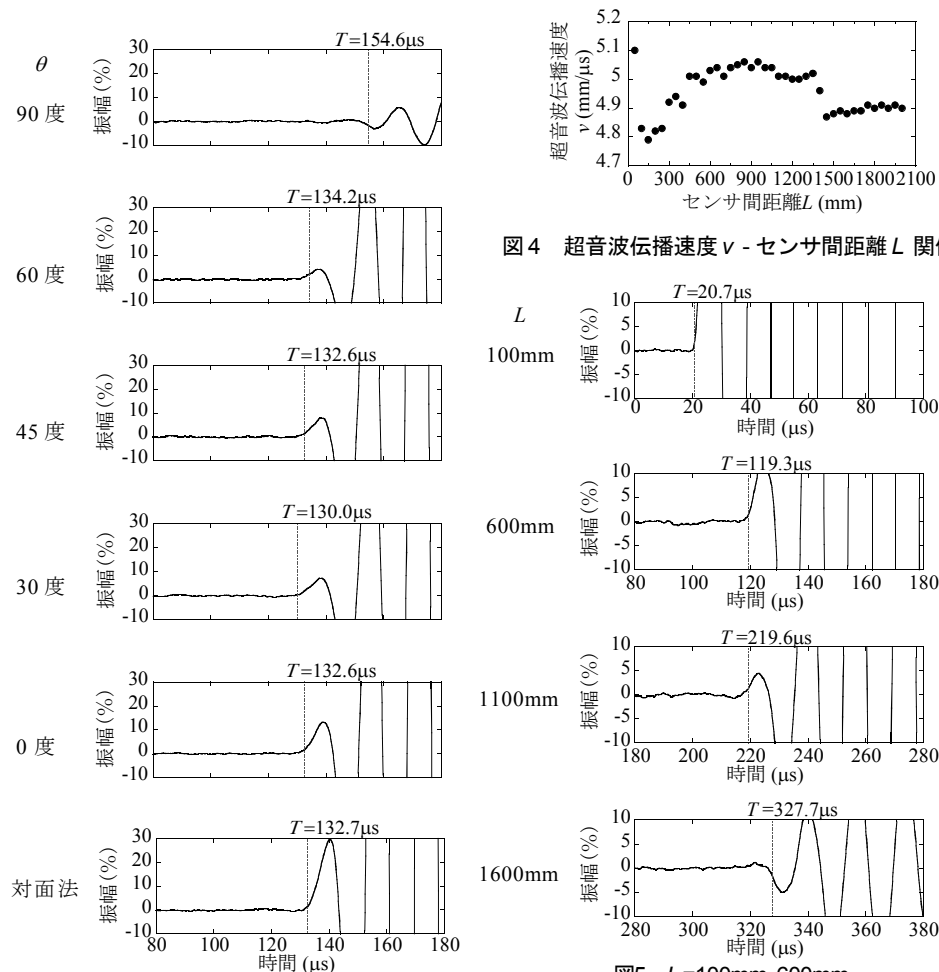


図 4 超音波伝播速度 v - センサ間距離 L 関係

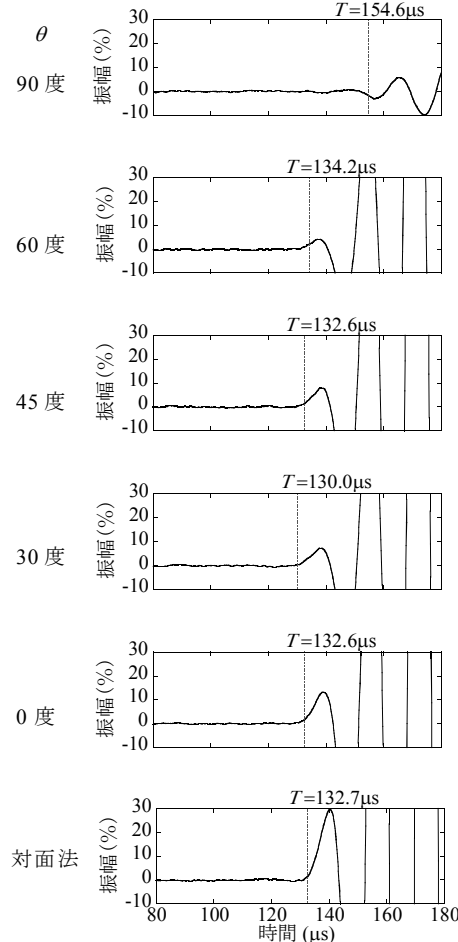


図 3 センサ角度別の受信波形

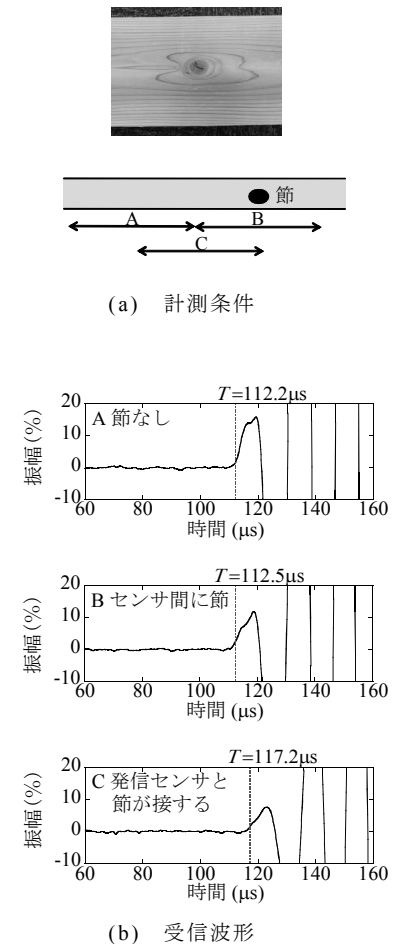


図 6 受信波形への節の影響 ($L=600$ mm)

木材の一方の木口面をハンマで打撃し、自由振動させて発生する音を、他方の木口面付近に設置したマイクロフォンで計測する。そして伝播する縦振動の固有振動数をFFTアナライザでスペクトル解析し、基本振動数 f (Hz)を求める。材長 L_0 (mm)と基本振動数 f から式(3)で求まる値を打撃音法から得られる伝播速度 v_{tap} (mm/ μ s)と定義する。

$$v_{tap} = 2fL_0 \times 10^{-6} \quad (3)$$

4.2.3 試験結果

図7に全ての材について、産地別の表面法と打撃音法の計測値の比較を示す。同図には併せて、各材の周面の超音波伝播速度 v の平均値を併せて示す。また、図8に各産地の材1本ずつについて、材

軸方向の超音波伝播速度 v の表面分布を示す。同図には併せて、各表面の超音波伝播速度 v の平均値、周面の超音波伝播速度 v の平均値、打撃音法から得られる伝播速度 v_{tap} を示し、また各表面の超音波伝播速度 v の変動係数 CV も示している。

図7より全ての材について、周面の超音波伝播速度 v は打撃音法から得られる伝播速度 v_{tap} よりも大きくなる傾向があった。そこで、図8についても超音波伝播速度 v と打撃音法から得られる伝播速度 v_{tap} の関係に着目すると、周面の超音波伝播速度 v のうち、樹心に近い位置での計測値は他の位置の計測値に比べて小さくなるため、打撃音法の計測値に近い値となった。

図7, 図8より、心去り材である秋田産の試験体に比べて、心持ち

表2 試験体諸元

試験体	産地	心持ち材/ 心去り材	密度	含水率
			t/m ³	%
A1	秋田	心去り材	0.35	9.8
A2			0.38	10.9
A3			0.43	12.3
K1	北山	心持ち材	0.45	12.5
K2			0.37	9.7
K3			0.43	10.3
O1	飢肥	心持ち材	0.41	9.8
O2			0.37	9.3
O3			0.47	10.9

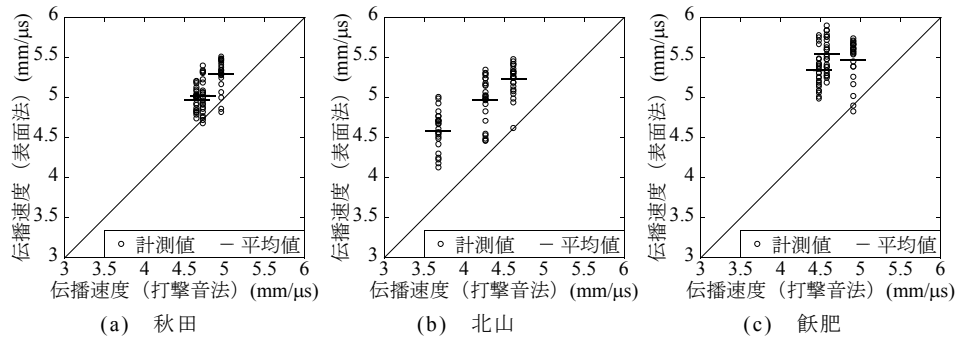


図7 産地別の表面法と打撃音法の計測値の比較

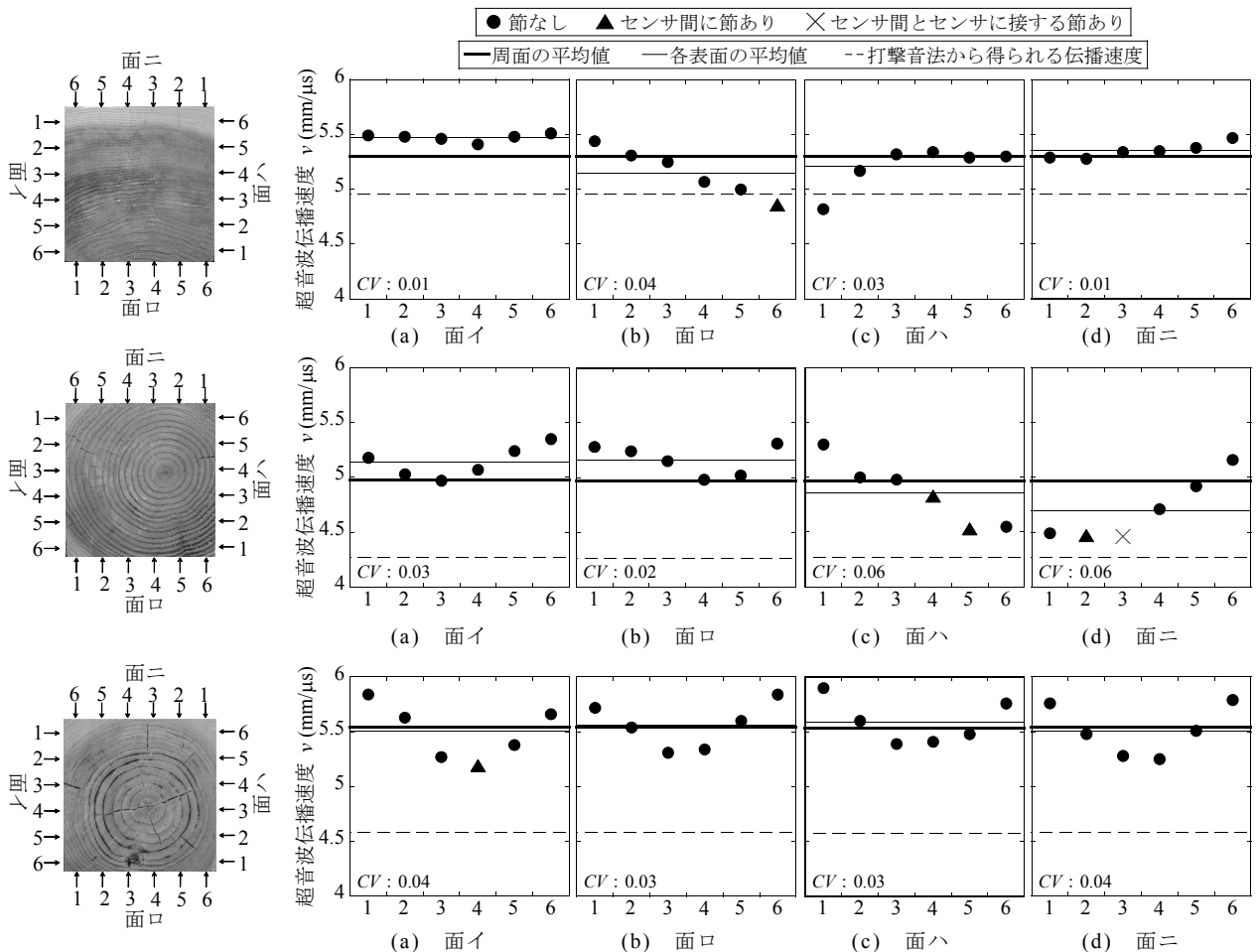


図8 材軸方向の超音波伝播速度の表面分布 (上: 心去り材(A1)・中: 心持ち材(K1)・下: 心持ち材(O1))

材である北山産、飢肥産の試験体では、超音波伝播速度 v のばらつきが大きい傾向があった。また、図8のA1では、面口の6付近を除いて、計測値の変化はK1、O1よりも比較的小さかった。一方でK1とO1から、計測値は各表面の中央部付近で小さくなる傾向があり、加えてK1の面ハの4,5,6と、面ニの1,2,3が小さくなることが確認された。この原因は対面法と同様に、樹心に近いほど計測値は小さくなるためであると考えられる。

図8より、センサ間に節がある場合の超音波伝播速度 v は、隣接する計測箇所との値と比較して、小さい値となる場合があった。この理由として、超音波の伝播経路付近に節があると、受信波形のSN比が悪くなり、超音波の伝播時間 T が大きくなることが考えられる。ただし先述の通り、隣接する計測箇所よりも樹心に近いために超音波伝播速度 v が小さくなった計測箇所もあると考えられる。

5. まとめ

本報では、超音波を用いた木材の材料特性や内部欠陥の推定を目標として、従来の円柱形ではなく、測定対象物への接触面積の小さな尖頭形の超音波センサを用い、木材の超音波伝播速度に及ぼす要因を検討した。検討する計測法は、木材の相対する面に発信・受信センサを設置する対面法と、木材の同一面に発信・受信センサを設置する表面法である。対面法では、柱材や横架材に用いられる木材から立方体の試験体を製作し、各表面を10mm間隔にメッシュ分割し、超音波伝播速度の分布を計測した。表面法では、120mm角の柱材（スギ材）を用いて、材軸方向の超音波伝播速度の表面分布を計測するとともに、打撃音法との比較を行った。得られた結果を以下に示す。

【対面法】

- ・材軸直交方向に比べて材軸方向の計測値は2～4倍の値となった。材軸方向では、樹心に近い部分で急激に減少する傾向となった。また材軸直交方向では、年輪の半径方向よりも接線方向に近い方が小さい傾向となった。
- ・センサ間に背割りがあると、半分程度に小さくなる場合があった。

【表面法】

- ・センサと材表面の角度が45度程度以下、センサ間距離が450～1350mmでは、比較的安定した計測値が得られた。ただし、センサ間に節がある場合や、センサを節と接して計測を行った場合、計測精度が低下する可能性がある。
- ・対面法と同様に、樹心に近いほど計測値は小さくなった。このため、心持ち材では、樹心に近くなる各表面の中央部付近で小さくなる傾向があったのに対し、心去り材では心持ち材に比べて計測値の変化が小さい。
- ・周面の超音波伝播速度は打撃音法から得られる伝播速度よりも大きくなる傾向があるが、樹心に近い位置での計測値は打撃音法の計測値と近い値となった。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A) NO.15H02275の補助の下で遂行した。また研究の初段階において、京都大学大学院工学研究科建築学専攻 建築保全再生学講座の大学院生、大村早紀氏から多大なご助力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 浪江和隆, 焦鍵, 杉野未奈, 多幾山法子, 林康裕: 応力波伝播法に基づく木材の完全非破壊型ヤング係数推定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第686号, pp. 833-838, 2013. 4
- 2) 三城昭義: 木材中の超音波伝播速度と水分(第1報) 木材中の超音波伝播速度に及ぼす水分傾斜の影響, 木材学会誌, 第41巻, 第12号, pp. 1086-1092, 1995. 12
- 3) 三城昭義: 木材中の超音波伝播速度に及ぼす木理角, 年輪傾角の影響, 木材学会誌, 第42巻, 第2号, pp. 211-215, 1996. 2
- 4) 三城昭義: 木材中の超音波伝播速度に及ぼす密度の影響, 木材学会誌, 第42巻, 第9号, pp. 887-894, 1996. 9
- 5) 鈴木弘志, 佐々木栄一: 木材の超音波伝播速度におよぼす繊維傾斜角の影響, 木材学会誌, 第36巻, 第2号, pp. 103-107, 1990. 2
- 6) 田島英俊, 福留重人, 山ノ内清竜: 超音波を用いた外構木材の内部劣化評価手法に関する研究, 鹿児島県工業技術センター研究成果発表会予稿集(2007), pp. 42, 2007. 11
- 7) 後藤崇志, 富川康之, 中山茂生, 古野毅: 腐朽処理した木材の超音波伝播速度及び部分圧縮強度の変化 超音波伝播速度の低下と残存強度との関係, 木材学会誌, 第57巻, 第6号, pp. 359-369, 2011. 11
- 8) 檜垣新之輔, 渡辺浩, 堤裕太郎, 角田浩嵩: 木材中を伝播する超音波の速度の測定方法の検討, 土木学会西部支部研究発表会, 第54巻, 第1号, pp. 63-64, 2010. 3

注

注1) 計測機器の開発会社からの情報に基づく。

[2016年10月5日原稿受理 2016年12月2日採用決定]