木材の音波伝ば特性の含有水分依存性[†]

小 玉 泰 義*

Velocity and Damping of Ultrasonic Waves in Wood with Various Moisture Contents

by

Yasuyoshi KODAMA*

Properties of the sound transit through wood have been investigated to estimate the moisture content (MC) of wood by the ultrasonic method. In this paper, velocities and damping of longitudinal and transverse waves were measured. The heartwood of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and Hinoki [*Chamaecyparis obtusa* (S. and Z.) Endl.] were used in the MC range of the oven-dried to green conditions.

The velocities of ultrasonic waves were reduced as the MC increased. The decrease in ultrasonic velocity per unit moisture content was larger for Hinoki than for Sugi. In the range of MC more than the fiber saturation point (FSP), the ultrasonic velocity was represented by a function of specific gravity. The wood species used were approximately equal in the decrease in velocity per unit specific gravity.

A ratio of the velocity of transverse waves to that of the longitudinal waves tended to increase with increasing MC. In the case of Sugi, the ratio was approximately constant in the range of MC more than the FSP.

Damping of ultrasonic waves increased with increasing MC at the FSP or above. Furthermore, the damping of longitudinal waves was larger than that of transverse waves.

Key words: Ultrasonic velocity, Damping of wave, Longitudinal wave, Transverse wave, Wood

1 緒 言

木材の物理的性質の含水率依存性を利用して含水率を推定する種々の方法が検討されている¹⁾。特に、電気抵抗および誘電率を利用した木材含水率計は実用化されている。しかし、これらの含水率計は2つの方法で差はあるものの、いずれかの方式でも繊維飽和点（以下FSPと略す）以上の含水率では測定精度の点で問題を残している。一方、現在のところ実用化には至っていないが、弾性波や超音波の伝ば速度から含水率を推定する方法がある。JamesらはDimension Lumberの乾燥過程における超音波の音速を測定し、乾燥によって音速が低下することや、水分傾斜が音速に影響することを認めている²⁾。しかも超音波の伝ば速度はFSP以上でも変化することを示している。このことから超音波の音速を測定する方法は実大材の含水率推定にも利用できる可能性がある。この方法は、その他の方法（たとえばX線を用いる方法）と比較すると測定装置や方法が簡便である。そのことから、超音波の伝ば速度を測定する方法は現場測定に適した方法として検討する価値がある。

本研究では、超音波を利用することで木材の含水率がどの程度推定できるかを判断する基礎的な資料を得る目的で、木材の半径方向を透過する超音波の速度と減衰を全乾状態から生材状態にいたる含水率範囲で調べ、含有水分による影響を検討した。また、超音波は縦波と横波で木材の実質と含有水分に及ぼす影響に違いが生じる可能性があるため、縦波と横波について音速と減衰を測定した。

2 供試材料および試験方法

供試材料は岡山県内で伐採されたスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)ならびにヒノキ [*Chamaecyparis obtusa* (S. and Z.) Endl.] の心材部である。試料は全乾状態の寸法が、9 mm（繊維方向）×89 mm（半径方向）×34 mm（接線方向）の直方体に木取りした。

40°Cで減圧乾燥を十分に行ったあと、以下に示す湿度条件で平衡したときの音速と減衰を順次測定した。調湿ならびに測定はすべて20°Cの温度条件で行った。湿度条件は、0%RH（五酸化リン）、56%RH（硝酸マグネシウム飽和水溶液上）、90%RH（硫酸亜鉛飽

[†] 原稿受理 平成3年4月24日 Received Apr. 24, 1991

* 正 会 員 岡山県木材加工技術センター 〒717 岡山県真庭郡勝山町勝山, Okayama Wood Tech. Inst., Maniwa-gun, Okayama, 717

和水溶液上), 98 %RH (蒸留水上) の雰囲気中ならびに蒸留水への 30 秒間, 40 分間, 70 時間浸漬の 7 条件である。蒸留水に浸漬した場合は, 水分傾斜の影響を少なくするため, ポリエチレンの袋に包み, 蒸留水上の飽和雰囲気中で 3 日間放置した後測定に供した。

測定は超音波パルス伝ば法で行った。超音波探傷器 [共栄技研(株)製, テムニグノス 501] を用い, 発信周波数 200 kHz の超音波パルスを試験体の半径方向に透過させた。トランスデューサはジルコン酸チタン酸鉛系のセラミック (PZT) の厚み振動子とすべり振動子を用いた。超音波探傷器の発信信号と受信信号をデジタルストレージスコープ [岩通電子(株)製, DS-6612] に入力し, 両者の信号の時間差を $1\mu\text{s}$ 単位で読み取った。音速と減衰はそれぞれ式 (1) および式 (2) で計算した。

$$C = L \times 10^3 / T \quad (1)$$

$$D = 10 \times \log(V/V_0) \quad (2)$$

ここに, C : 音速 (m/s)

L : 超音波の伝ば距離 (試片の半径方向長さ) (mm)

T : 伝ば時間 (μs)

D : 減衰 (dB)

V : 各含水率における受信信号の電圧の最大振幅 (mV)

V_0 : 五酸化リン雰囲気中で平衡したときの受信信号の電圧の最大振幅 (mV)

なお, 同一量の木材実質で, 全乾状態の試験片に対してどの程度減衰したかを求めるため, 本報告では式 (2) で減衰を定義した。

試験片にはトランスデューサの構造により波の進行方向に対して平行 (縦波) と垂直 (横波) の 2 種類の超音波の振動が与えられる。トランスデューサの縦波と横波の発信を確認するため, JIS Z 2345 に準拠した STB-N1 標準感度試験片の音速を測定した。厚み振動子を用いた場合, 音速は 5847 m/s で, 標準値と一致した。すべり振動子の場合の測定値は 2577 m/s で, 標準値の 3230 m/s と比較するとやや低い値であった。しかし, STB 試験片内での減衰はこの場合無視できる程度であるからすべり振動子を用いた場合は横波が観測されていると判断できる。

3 結果と考察

含水率の増加にともなう音速の変化を Fig. 1 に示す。音速は含水率の増加と共に減少した。さらに, FSP 以上の含水率では, その減少は緩慢になった。

含水率の増加にともなう減衰の変化を Fig. 2 に示す。変動が大きいものの, 平均値と比較すると FSP 以上の含水率で減衰が大きくなった。また, 各含水率における減衰の平均値と比較するとスギの場合縦波の方が

横波よりも減衰が大きい傾向がみられた。

蒸留水飽和雰囲気中で平衡状態に達したときの平均含水率はスギで 27.7%, ヒノキで 25.7% であった。この含水率は FSP とは少し異なる値である。しかし, この含水率以下では木材実質部に結合水が存在し自由

Fig. 1. Relationship between ultrasonic wave velocity and moisture content. ○: longitudinal wave. ●: transverse wave.

Fig. 2. Relationship between damping of waves and moisture content.

Symbols are the same as in Fig. 1.

水は存在しない状態であり、この含水率以上では木材実質部が結合水で満たされ自由水も存在する状態であると仮定して、境界を設定した。以下、この状態を見かけの FSP と呼ぶことにする。みかけの FSP を境として、それ以下の含水率とそれ以上の含水率で2つの含水率の範囲に分け、それぞれの範囲で音速と含水率の単回帰分析を行った。回帰直線 $y = ax + b$ (y : 音速, x : 含水率) の回帰係数 a , 回帰定数 b および相関係数 r を求めた結果を Table I に示す。それぞれの含水率の範囲で、音速は含水率の増加と共に直線的に減少すると見なしても、比較的高い相関関係が認められた。また、単位含水率あたりの音速の減少はヒノキの方がスギより大きかった。

Gerhards³⁾ は、15~150% の含水率で、応力波の伝ば速度に及ぼす含水率の影響を検討した。そして、FSP 以上の含水率では、応力波の伝ば速度と比重が

Table I. Regression coefficient (a), intercept of regression line (b), and correlation coefficient (r) for different species.

x	y	Sugi			Hinoki		
		a	b	r	a	b	r
MCb	C_p	-13.27	2501	-0.77	-17.57	2308	-0.95
MCf	C_p	-3.79	2202	-0.98	-4.02	1947	-0.96
MCb	C_s	-9.67	2242	-0.65	-12.76	2088	-0.81
MCf	C_s	-3.21	2062	-0.95	-3.60	1816	-0.91

Legend: MCb: Moisture content above FSP.

MCf: Moisture content below FSP.

C_p : Ultrasonic wave velocity of longitudinal wave.

C_s : Ultrasonic wave velocity of transverse wave.

Fig. 3. Relationship between ultrasonic wave velocity (longitudinal wave, C_p) and specific gravity (ρ). ○: Sugi. ●: Hinoki.

ら計算によって求めたみかけのヤング係数は、含水率の増加と共に増加することを述べている。このことは FSP 以上の含水率の範囲では十分に細長い棒にそった縦波に関する式 (3) が適用できないことを示している。

$$C_p = (E \cdot g \cdot 10^3)^{0.5} \cdot \rho^{-0.5} \quad (3)$$

ここに、 C_p : 縦波の音速 (cm/s)

E : ヤング係数 (kgf/cm²)

g : 重力の加速度 (cm/s²)

ρ : 比重 (g/cm³)

静的なヤング係数が FSP 以上の含水率ではほぼ一定であると考え合わせると、その挙動の相違は自由水が木材実質と同じ振動を行っていないためであると考えられる。すなわち、自由水が存在することによる比重の増加が音速に与える影響が式 (3) の場合とは異なっていると考えられる。そこで、みかけの FSP 以上の含水率範囲で音速と比重の単回帰分析を行った結果を Fig. 3 に示す。回帰直線の式は、スギは式 (4) で表され相関係数は -0.98 であった。ヒノキは式 (5) で表され相関係数は -0.95 であった。

$$\log C_p = -0.413(\log \rho) + 3.145 \quad (4)$$

$$\log C_p = -0.411(\log \rho) + 3.136 \quad (5)$$

ここに、 C_p : 縦波の音速 (m/s)

ρ : 比重 (g/cm³)

音速は比重の関数で表され、両者の間には比較的高い相関関係が認められた。また、単位比重あたりの音速の減少は両樹種ではほぼ同じ値であった。みかけの FSP 以上の含水率でのヤング係数を E^* とすると、本実験の測定条件の場合、みかけの FSP 以上の含水率での音速は式 (6) で表された。

$$C = E^* \rho^{-0.41} \quad (6)$$

ここに、 C_p : 縦波の音速 (m/s)

ρ : 比重 (g/cm³)

横波と縦波の音速の比 (C_s/C_p) の含水率による変

Fig. 4. Relationship between the ratio of ultrasonic wave velocity (C_s/C_p) and moisture content.

化を求めた結果を Fig. 4 に示す。変動が大きかったが、FSP 以下の含水率では、音速の比は上昇傾向にあった。一方、FSP 以上の含水率では変動は小さくなり、特にスギではほぼ一定の値になった。固体中の横波音速の公式を適応し、 C_s が式 (7) で表されると見なせば、 C_s/C_p は $(G/E)^{0.5}$ となる。

$$C_s = (G \cdot g \cdot 10^3)^{0.5} \cdot \rho^{-0.5} \quad (7)$$

ここに、 C_s : 横波の音速 (m/s)

G : せん断弾性係数 (kgf/cm²)

g : 重力の加速度 (cm/s²)

ρ : 比重 (g/cm³)

せん断弾性係数とヤング係数は共に、FSP 以下の含水率では含水率の増加と共に減少し、FSP 以上の含水率で一定になることが知られている。⁴⁾ その事実から、 $(G/E)^{0.5}$ の値は FSP 以上で一定になることがわかる。Fig. 4 はその結論を支持するものである。

4 結 言

スギおよびヒノキの半径方向の音速と減衰を全乾状態から生材状態までの含水率状態で測定し、以下の結果を得た。

(1) 音速は含水率の増加と共に減少した。単位含水率あたりの音速の減少は、ヒノキの方がスギより大きかった。

(2) みかけの FSP 以上の含水率では音速は比重の関数で表された。単位比重あたりの音速の減少はスギとヒノキではほぼ同じであった。

(3) 減衰は FSP 以上の含水率で大きくなった。また、縦波の方が横波より大きい傾向にあった。

(4) 縦波と横波の音速の比は含水率の増加と共に上昇する傾向にあった。しかし、スギでは、FSP 以上の含水率ではほぼ一定になった。

(平成 3 年 4 月 4 日 第 41 回日本木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) (社)日本木材加工技術協会関西支部, 木材用水分グレーダーの開発研究会報告書, p. 58 (1990).
- 2) W. L. James, R. S. Boone and W. L. Galligan, *Forest Prod. J.*, **32** (9) 27 (1982).
- 3) C. C. Gerhards, *ibid.*, **25** (4) 51 (1975).
- 4) F. Kollmann and W. A. Côte, "Principles of Wood Science and Technology, 1. Solid Wood", p. 309 (1968) Springer-Verlag, Berlin