

## 916 超音波による骨の密度及び硬度測定法に関する研究

Ultrasonic measurement of bone density and hardness

○学 太田 美紀 (富山大・院) 正 石原 外美 (富山大)

正 柴田 博司 (富山商船高専) 正 五嶋 孝仁 (富山大) 非 高沢 武志 (越屋)

Miki OTA\*, Sotomi ISHIHARA\*, Hiroshi SHIBATA\*\*, Takahito GOSHIMA\* and Takeshi TAKAZAWA\*\*\*

\*Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama

\*\*Toyama National College of Maritime Technology, 1-2 Ebie Neriya, Shinminato, Toyama

\*\*\*Koshiya Co., Ltd., 4-10, 4-Chome, Ishibiki, Kanazawa-shi, Ishikawa

Key Words : Ultrasound, Biot's theory, Propagation speed, The porosity, Young's modulus, The density.

## 1. 緒言

超音波は材料中を伝播する際、その密度やヤング率の違いによって速度が変化する。また、空隙率の変化によっても速度が変化する。これらの性質を利用した骨密度測定機が実用化され市販されている。しかし従来の骨密度測定装置は骨の硬さまでは測定することができない。

材料中の速度変化を予測する理論として Biot の理論 (1956)があるが、本研究は、この Biot 理論を基礎として骨軟化度並びに骨密度の測定法を確立することを目的とするものである。

まず、試料内における超音波の伝播特性を観察・測定するための装置を作成する。そして、物性値が明らかになっている数種類の材料を用いて超音波の伝播特性を調査した。これらの測定結果と Biot 理論に基づいて、材料の密度、ヤング率、空隙率を推定する方法を考究し、提案する。ついで推定結果と測定材料の実際の密度、ヤング率、空隙率との比較を行うことによって、本推定法の精度を確かめる。

## 2. Biot 理論

Biot は、流体で満たされた多孔性物体中における 2 つの圧縮波 (fast 波, slow 波) の伝播速度として式 (1) を導いた。Biot が用いた多孔性物体モデルを図 1 に示す。ここで fast 波は固体中を伝播する超音波の速度であり、slow 波は流体中を伝播する間に干渉を大きく受け速度が遅くなった波である。

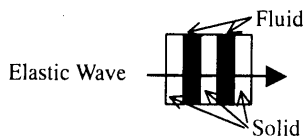


Fig.1 Biot's model.

$$V_{fast, slow}^2 = \frac{\Delta \pm [\Delta^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)]^{1/2}}{2(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)} \quad (1)$$

$$\Delta = P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} \quad (2)$$

ここで、 $P, Q, R$  は弾性係数であり、D.L.Johnson らによって簡略化され、次式で与えられる。

$$P = \frac{\beta(K_s/K_f - 1)K_b + \beta^2 K_s + (1 - 2\beta)(K_s - K_b)}{1 - \beta - K_b/K_s + \beta K_s/K_f} + \frac{4N}{3} \quad (3)$$

$$Q = \frac{(1 - \beta - K_b/K_s)\beta K_s}{1 - \beta - K_b/K_s + \beta K_s/K_f} \quad (4)$$

$$R = \frac{K_s \beta^2}{1 - \beta - K_b/K_s + \beta K_s/K_f} \quad (5)$$

ここで  $K_f, K_s, K_b$  はそれぞれ流体、材料、平均の体積弾性率であり、 $N$  はせん断係数、 $\beta$  は空隙率である。

材料の密度  $\rho_b$  は複合則を用いて、以下の式で表される。

$$\rho_b = (1 - \beta)\rho_s + \beta\rho_f \quad (6)$$

ここで  $\rho_s, \rho_f$  はそれぞれ材料と流体の密度である。

材料と物体の体積弾性率  $K_b$  とせん断係数  $N$  はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$K_b = \frac{E_s}{3(1 - 2\nu_b)}(1 - \beta)^n \quad (7)$$

$$N = \frac{E_s}{2(1 + \nu_b)}(1 - \beta)^n \quad (8)$$

ここで  $\nu_b$  はポアソン比である。また  $n$  は構造に依存した係数であり、Biot の理論ではこの係数の選定が予測制度を決定するものと考えられる。この値については後述する。

これらの式から、速度を表す関数においてすべての係数は空隙率  $\beta$ 、材料と流体のヤング率  $E_s, E_f$ 、及びそれぞれの密度  $\rho_s, \rho_f$  の関数となっていることが分かる。従って、流体で満たされた多孔性物体を伝播する超音波速度 (fast 波と slow 波) の測定と各相の密度並びにヤング率を文献等により知ることによって、その物体の空隙率  $\beta$ 、平均のヤング率  $E_b$  及び平均の密度  $\rho_b$  を予測することが可能である。

図 2 は Hosokawa, Ohtani らが Biot の理論を海綿骨に適用した一例を示したものである。図は発信器の周波数が 1MHz に対して、海綿骨中を伝播する fast 波と slow 波の伝播速度と空隙率の関係を Biot の理論から計算したものである。

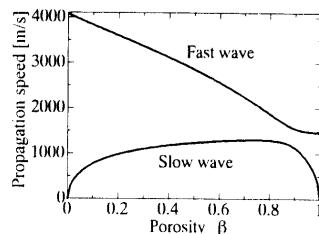


Fig.2 Biot's calculation.

## 3. 実験

## 3.1 測定装置の詳細

作成した実験装置を図 3 に示す。また用いた試験片形状を図 4 に示す。トランスデューサーから発信された超音波は試験片を通過してレシーバーで受信され、受信波形はデジ

タルストレージスコープに出力される。

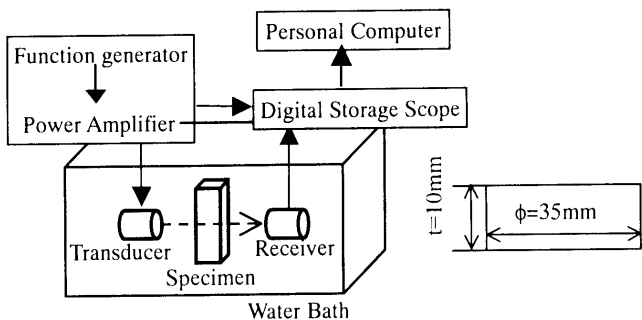


Fig.3 Experimental apparatus.

Fig.4 Specimen.

試験片は直径 35mm, 厚さ 10mm の円柱形状であり, 表面はサンドペーパーを用いて鏡面に仕上げた。用いた材料とその物理特性を表 1 に示す。トランスデューサーとレシーバーの間に挿入する試験片の枚数, 及び試験片間の間隔を変えることでマクロ的に空隙率 $\beta$  (試験片と流体の体積量の総和に対する流体の体積量)を変化させて実験を行った。また, 試験片全体のヤング率とは, 式 (6) の複合則で求められる平均密度 $\rho$ の定義と同様に, 固体部, 流体部の平均のヤング率を示している。

表 1. 物性値

	WJ2	SUS304	70%Cu-30%Zn	Al	Mg
$E$ [GPa]	53.96	197	110	70.3	45.2
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7270	8030	8500	2700	1738

### 3. 2 実験結果

#### 3.2.1 $n$ の近似式

Biot の理論を各種材料に適用する場合, 式 (7) 及び (8) 中の構造に依存した係数  $n$  を適切に与える必要がある。本研究では高分子材料, 金属等の種々の材料に対して材料中を伝播する超音波の速度とその材料のヤング率, 密度との関係を調査した。超音波の伝播速度が最も Biot の理論に適合するように  $n$  を定めた。

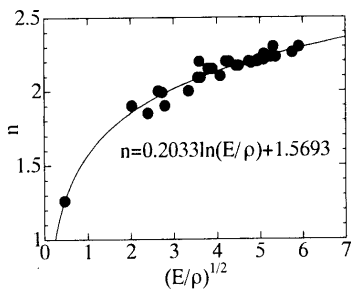


Fig.5 Relationship between  $n$  and  $(E/\rho)^{1/2}$ .

図 5 はこのように定めた  $n$  を  $\ln(E_s/\rho_s)$  の関数として表したものである。図 5 の  $n$  と  $\sqrt{(E/r)}$  の関係を近似することによって式(9)を得た。

$$n = 0.2033 \ln(E_s / \rho_s) \quad (9)$$

材料中を伝播する超音波の速度を, 式 (9) による  $n$  と Biot の理論から予測した結果と実測した結果 (文献値) を比較すると, fast 波, slow 波ともに,  $\pm 0.7 \sim 0.8\%$  の誤差の範囲で一致した。

#### 3.2.2 超音波の測定

材料中を伝播する fast 波および slow 波の一例を図 6 に示す。図 7 は波の伝播速度測定法を示したものである。図中の波形の山頂から山頂までの時間をトランスデューサー間往復伝播時間  $\Delta t$  とし, トランスデューサー距離の 2 倍を  $\Delta r$  で除することで, 試験片内部の伝播速度を測定した。

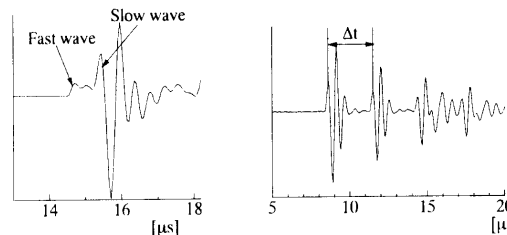


Fig.6 Waveform. Fig.7 Determination of wave velocity.

得られた結果を Biot の式による予測値とともに表 2 に示す。表より各実測値に対し予測値は  $\pm 6\%$  以内の精度で得られていることから, 材料内部を伝播する速度は Biot 理論により予測できることがわかる。

表 2. 伝播速度の実測値と予測値の比較 (ホワイトメタル)

$\beta$	fast 波			slow 波		
	予測 [m/s]	実測 [m/s]	誤差 [%]	予測 [m/s]	実測 [m/s]	誤差 [%]
0.33	2822	2838	0.566	1197	1158	3.382
0.5	2455	2460	0.222	1307	1385	5.579
0.67	2026	2026	0.041	1367	1350	1.238

### 5. 空隙率 $\beta$ , 平均ヤング率 $E$ , 平均密度 $\rho$ の予測

測定された超音波の伝播速度, 並びに式 (9) と Biot の式を用いて空隙率 $\beta$ を予測した。ついでその値を用いて平均ヤング率 $E$ , 平均密度 $\rho$ をそれぞれ予測し, 実測値と比較した結果を図 8 並びに 9 に示す。図中の実線は実測値=予測値を示し, 破線はその  $\pm 5\%$  の誤差範囲を示している。図から分かるように, 平均ヤング率  $E$ , 平均密度  $\rho$  の予測値は実測値に対し  $\pm 5\%$  以内の誤差範囲にある。

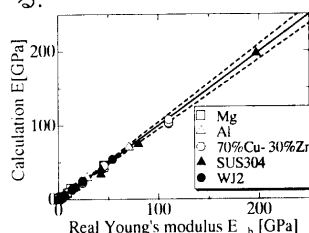


Fig.8  $E-E_p$ .

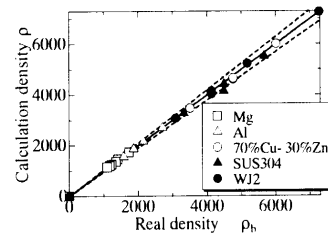


Fig.9  $\rho-\rho_p$ .

### 6. 結言

実験より得られた fast 波及び slow 波の速度, 並びに Biot の式と式 (9) の補正係数  $n$  を用いることによって物体内部の空隙率  $\beta$ , 平均のヤング率  $E$  と密度  $\rho$  を予測できる。実測値と予測値の誤差は  $\pm 5\%$  以内であった。

### 参考文献

(1)M. A. Biot, J. Acoust. Soc. Am. **28**, (1956), 168-178.  
 (2)A. Hosokawa and T. Otani, J. Acoust. Soc. Am. **101**, (1997), 558-562.  
 (3)E. R. Hughes, T. G. Leighton, G. W. Petley and P. R. White, Ultrasound in Medical and Biology **25**, (1999), 811-821.