

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 医用計測システム

April 1998 ■ No.16

超音波による海綿骨特性の測定

Ultrasonic Measurement of Trabecular
Bone Characteristics

須崎琢而
Takuji SUZAKI

(Pages 25-28)

株式会社 堀場製作所

超音波による海綿骨特性の測定

Ultrasonic Measurement of Trabecular Bone Characteristics

須崎琢而

要旨

急速な高齢化の進展に伴い、骨粗鬆症が重大な社会問題となっている。最近、骨粗鬆症の診断法として超音波法が注目されているが、従来の放射線法との相関が必ずしも十分にとれていない。筆者らは、海綿骨の超音波伝播特性を解析し、骨構造情報を含む新しい骨粗鬆症の超音波診断法の可能性を見出した。

Abstract

With increasing trends toward a graying society, osteoporosis has gone beyond a mere disease, and has become a social problem. Of late, the ultrasonic method has attracted attention as a diagnosis of that disease, but correlation between the ultrasonic method and the conventional radiation method have been established only to an insufficient degree. As a result of analysis of the ultrasonic propagation characteristics of trabecular bones, the authors have found a novel ultrasonic method which is designed to diagnose osteoporosis and which also serves as a means of providing bone structure information.

1. はじめに

社会の高齢化に伴い骨粗鬆症患者は増加の一途をたどり、現在500万人ともいわれ、この疾患は社会的にも重大な問題になってきている。

ところで骨粗鬆症は加齢に伴って進行する骨の脆弱化によって、特に脊椎椎体骨折、橈骨遠位端骨折、大腿骨頸部骨折などが発症しやすくなった疾患と定義されている。

この疾患の診断法は従来からX線等の放射線を用いるDEXA(dual X-ray Absorptiometry)、SPA(Single Photon Absorptiometry)で骨量を測定するのが主流である。これはX線等の骨を含む生体組織での透過・吸収が正確に定量測定できることから、患者の骨塩量を客観化する診断法として定着している。

一方、骨の強度は骨量のほかに骨質が大きく関与しているため、骨量定量法が必ずしも有効ではないという最近の考えと、DEXA等の被爆の問題から、最近、超音波測定法による骨粗鬆症診断が注目を集めている。

しかし、従来の超音波測定法による骨粗鬆症診断では、測定法自体は構造を含めた骨質を計測す

るにもかかわらず、ここに重点を置かず、むしろDEXAと同様の骨量定量として計測・表示しているため、必ずしもDEXAによる測定値と良好な相関が得られない場合がある。

今回、骨粗鬆症で骨折し易い大腿骨頸部や橈骨遠位端に豊富に存在し、骨粗鬆症による骨の減少を顕著に反映する骨組織といわれている海綿骨に注目し、その超音波伝播特性を調べた。その結果、従来の測定原理と異なり、骨構造パラメータをも包含し得る理論に基づく、新しい超音波方式の骨粗鬆症診断法の可能性が示唆されたので紹介する。

2. 従来の超音波式測定法および測定対象

2.1 従来の測定原理

現在市販されている主な超音波方式の骨量測定装置の基本的測定原理は下記に説明するように、ひとつは超音波伝播速度(SOS)であり、もうひとつは超音波減衰係数(BUA)を用いるものである。

(1)SOS(Speed of Sound)

超音波伝播速度は下記の関係式から判るYoung

率と物質の密度によって規定される。

$$\text{Young 率} = K \times \text{Density}$$

$$\text{SOS} = (K \times \text{Density})^{1/2}$$

K: 物質固有の定数

一般に骨密度の増加に伴って Young 率が増加し、音波は弾性の低い硬い骨ではより速い伝播速度を示す。このことから、より骨量の多い骨ではより大きい超音波伝播速度を得ることになる。

この SOS 測定原理により骨粗鬆症の骨量減少を測定する。

(2) BUA (Broadband Ultrasound Attenuation)

1984年 Langton によりこの基本的概念が紹介された¹⁾。超音波はある密度をもった物質を透過する際には吸収によりその振幅が減少するが、この減衰する程度は透過する音波の周波数に依存する。この減衰率 VS 周波数の傾き (dB/MHz) が骨硬度を反映し、骨密度が高い程この傾き BUA (dB/MHz) が大きくなることを利用する。すなわち骨粗鬆症で骨量が減少するとこの BUA が小さくなるのでこれを診断のパラメータとして用いる。

2.2 測定対象

市販されている超音波方式の骨量測定装置の測定対象は踵骨が多い。骨の主体をなす骨質のうち海綿骨は皮質骨に比べ骨梁表面積が極めて大きく骨の代謝回転が早いことから、骨の減少の開始に対する反応が早期に出現する骨組織であると考えられている。

踵骨は海綿骨が比較的多く含まれているところから測定対象に選ばれている。

3. 海綿骨の超音波伝播特性

私たちは 2.2 項に記述した理由により骨の減少の開始に対する反応が早期に出現する点、骨粗鬆症で骨折し易い箇所すなわち脊椎椎体、橈骨遠位端、大腿骨頸部には特徴的に多く含有されている点から海綿骨の特性と骨粗鬆症の関係に注目し基礎的実験から始めた。

3.1 基礎実験システム

牛の大腿骨の下端部から切り出した海綿骨を実験材料として用いた。図 1 に示す測定系で水中 (24) に海綿骨の試料を設置しパルス音波を送波した後、試料を伝播した超音波波形をハイドロホンによって観測した。

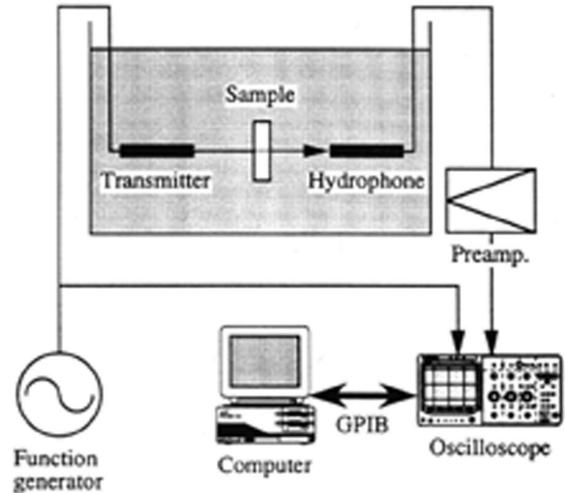


図 1 基礎実験に用いた測定系

Experimental arrangement for observing the propagation of ultrasonic pulse in trabecular bone specimen

3.2 実験での測定結果

一般的には海綿骨の試料を伝播した超音波波形は図 2(B) に見られるように一見、一波のみの波形であるが、骨軸方向 (Z 軸方向) に試料を設置すると図 2(A) のように二波の波形が観察される。この二波のうち、速い方の第一波 (今後、高速波と呼ぶ) の音速は 1800m/s で海綿骨の骨質の音速に近い。また遅い方の第二波 (今後、低速波と呼ぶ) の音速は 1400m/s で液体の骨髄部の音速に近い。

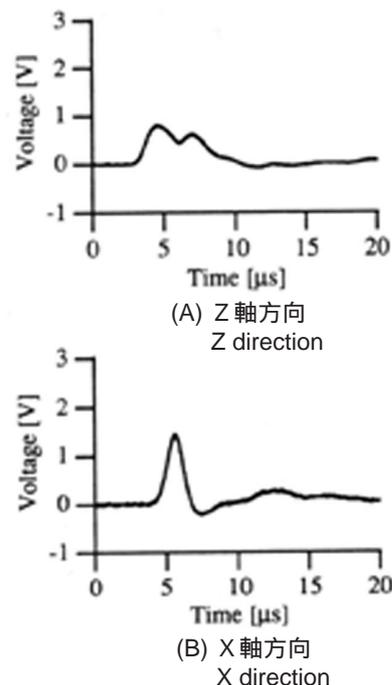


図 2 ハイドロホンによる伝播波形の観測

Received waveforms traveling through trabecular bone of high density

3.3 伝播波形の解析

海綿骨は多孔性構造を形成する骨質部とその内腔を満たす骨髓部から構成される。

一方, Biotは多孔性飽和媒質中の音波伝播理論を提案し, 高速波と低速波の二つの圧縮波(縦波)の存在を予測していた^{2,3)}。

今回, 私たちが見出した正弦波送波による典型的な海綿骨伝播波形(図3)をこのBiotの理論式に適用してみたところ, 比較的よく適合することが判った(図4)。すなわち伝播波形の二波と海綿骨の密度(体積比)との密接な関連が裏付けられた。

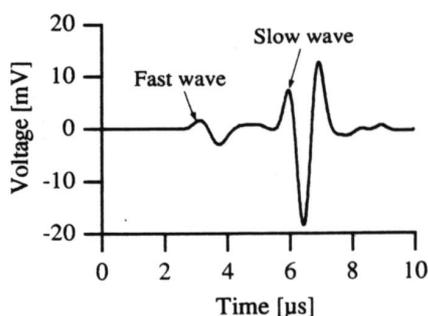


図3 Z軸方向に音波を伝播させて観測される波形^{4,5)}
Pulsed waveform at 1MHz traveling through trabecular bone

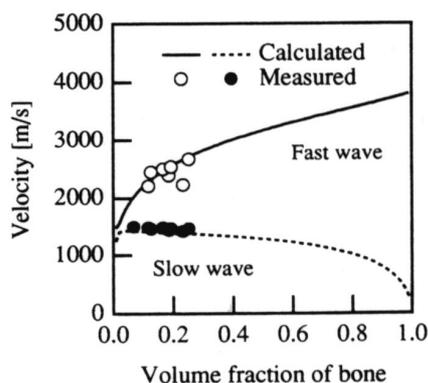


図4 高速波および低速波の位相速度と体積比の関数(計算値と測定値)^{4,6)}
Propagation speeds of fast and slow waves in trabecular bone at 1MHz as a function of bone volume fraction

< 伝播波形 >

$$v_{(fast, slow)} = \frac{2(HM - C^2)}{(M + H_m - 2C \rho_f) \pm J}$$

$$J = [(M + H_m - 2C \rho_f)^2 - 4(HM - C^2)(\rho_m - \rho_f^2)]^{1/2}$$
 ただし, H, C, M は Biot により導入された等価的な弾性定数。

< 骨密度 >

$$\rho = (1 - \phi) \rho_s + \phi \rho_f$$
 ただし, ϕ : 間隙率, ρ_s : 固体の密度, ρ_f : 流体の密度

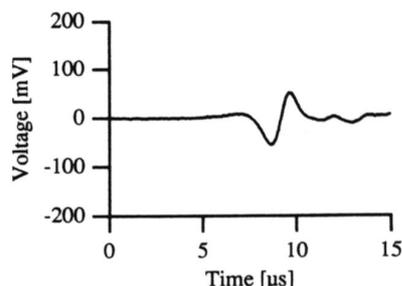
4. in situ 橈骨中の伝播波形

4.1 骨粗鬆症患者の伝播波形

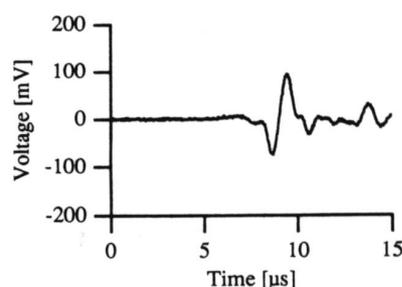
私たちは上記基礎実験後, 実際に被験者として健常者と骨粗鬆症患者の橈骨遠位部において超音波伝播波形を測定した。

なお計測は二乗余弦波の送波波形を電気入力し送波用トランスデュ - サより送波し, 送波用と同型の受波トランスデュ - サで受波した。

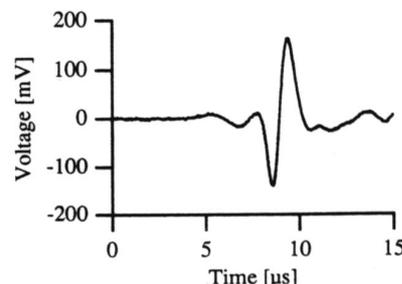
健常者(22才, 男性)の例を図5(A)に示すが, 橈



(A) 健常者(22歳, 男性)
Normal man (age:22)



(B) 骨粗鬆症患者 A (58歳, 女性)
Osteoporotic patient A (Woman, age:58)



(C) 骨粗鬆症患者 B (74歳, 女性)
Osteoporotic patient B (Woman, age:74)

図5 骨粗鬆症患者の波形
Ultrasonic waveforms observed on normal man and osteoporotic patients

骨中の超音波伝播波形は極性反転した正弦波一波に近い波形であることが判る。

一方，骨粗鬆症患者A(58才，女性)および骨粗鬆症患者B(74才，女性)の超音波伝播波形を図5(B)(C)に示す。

骨粗鬆症患者の波形には正弦一波の前に小振幅の低周波の波が見られる。また，患者A，BのDEXAでの測定値は各々0.745 g/cm²，0.574 g/cm²と患者Bの方が骨量が少なかった。そこで骨量の少ない患者Bの波形は患者Aに比べ第2波の振幅が大きいことも判る。

4.2 骨構造と伝播波形の関係

健常者と骨粗鬆症患者の橈骨中の超音波伝播波形の変化について，前述の基礎実験結果に基づいて次のように解釈することができる。

健常者の骨梁は網目状である(図6(A))ため，高速波と低速波の速度が接近し時間的に重畳するため，一波のように見える(図5(A))。骨粗鬆症が発症すると，縦走する骨梁のみ残る(図6(C))。この骨梁方向に超音波が伝播すると，高速波と低速波の速度差が大きくなり，それら二波は時間的に分離して観測できる(図5(B))。さらに骨粗鬆症が進行すると，骨梁幅が減少し骨髄の割合が増加する(図6(D))。その結果，低速波の振幅が大きくなる(図5(C))。

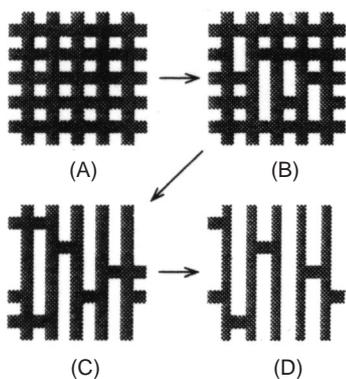


図6 加齢による骨量減少の機構⁶⁾

(A) (B) (C) (D)
Change of trabecular pattern by aging

このように，健常者と骨粗鬆症患者の橈骨中の超音波伝播波形の相違は，骨梁減少にともなう骨梁の構造変化によるものと考えられる。

5. まとめ

- (1) 動物の海綿骨を用いた基礎実験より，海綿骨中の超音波伝播波形に高速波と低速波の二波が存在することを初めて見出した。これは多孔性飽和媒質中の音波伝播を論じたBiotの理論予測によく合致することが判明した。この結果は超音波伝播波形が海綿骨の密度を反映することを示すものである。
- (2) 健常者と骨粗鬆症患者の橈骨遠位部を対象に超音波伝播波形を測定した結果，両者の伝播波形に明確な相違が見られた。この波形の差はBiotの理論に基づいて骨梁減少にともなう骨梁の構造変化によるものと解釈できた。
- (3) 今回の基礎実験結果および骨粗鬆症患者等を用いた測定結果は，従来の超音波方式の骨量測定装置と異なり，新しい理論に基づいた海綿骨の構造変化も絡んだ密度を測定できることを示唆した。

謝辞

本研究は同志社大学工学部の大谷 隆彦 教授および細川 篤 博士と共同で，また臨床面を京都府立医科大学，整形外科教室高井信朗講師のご協力で行なったものである。各先生に深謝致します。

参考文献

- 1) Langton, C.M. et al, Eng. Med. 13, 89-91(1984).
- 2) M.A. Biot, J. Acoust. Soc. Am. 28, 168-178(1956).
- 3) M.A. Biot, J. Acoust. Soc. Am. 28, 179-191(1956).
- 4) 細川, 大谷, 須崎, TECHNICAL REPORT OF IEICE US95-96.
- 5) 細川, 大谷, 平田, 日本音響学会論文集, 1035-1036, 1994
- 6) 細川, 大谷, 平田, 吉岡, 高井, 日本音響学会論文集, 1033-1034, 1995.

須崎 琢而

Takuji SUZAKI, Dr.Sci.

医用システム総括部 シニアマネジャー
理学博士
超音波式骨塩計の開発



