

海綿骨の構造異方性と高速波音速の関係

=超音波による骨梁構造の推定=

同志社大学 宗宮 弘樹・松川 真美・大谷 隆彦

神戸市立工業高等専門学校 長谷 芳樹

応用電機株 真野 功

株堀場製作所 辻本 敏行

1. はじめに

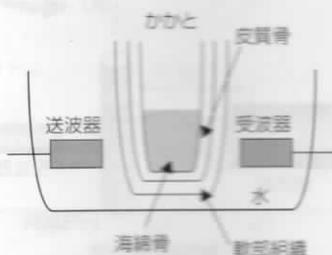
現在の骨粗鬆症診断には、X線や超音波を用いた方法が用いられている。X線を用いたDXAなどの診断方法は再現性が高く、診断基準として用いられている。しかし、X線被曝、装置が高価かつ大型であること、専門技術者や特別な施設が必要であること、などの問題により診断の簡便性が欠如しており、集団検診のようなスクリーニングの用途への利用は困難である。一方、超音波による骨粗鬆症診断方法では、これらの問題がなく、簡便な診断が可能である。また、DXA (dual-energy X-ray absorptiometry) では単に骨塩量の評価を行うのに対し、超音波では弾性的性質や、骨の内部構造のin vivo評価が可能であり、骨質情報が得られると考えられている。

しかし、現在の超音波による骨密度計の結果は、測定の実現性が低く診断基準の指標として用いられていない⁽¹⁾。第1図によく用いられる踵部を用いた超音波骨密度計の概略図を示す。骨密度計では、生体組織中の超音波の伝搬速度や減衰を測定している。しかし、図に示すように超音波の伝搬路は水中から軟組織、皮質骨、海綿骨と複雑であり、各部位

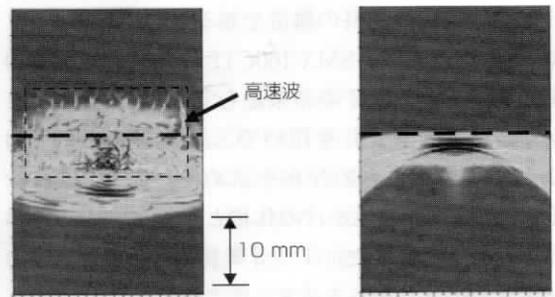
の特性の正確な測定が難しい。

一般に、手、足などの骨は皮質骨部と海綿骨部からなる。皮質骨は緻密な硬い骨で、海綿骨は多孔性の網目構造を持つ。この網目構造は固体の骨梁(trabeculae)と、その空隙部を満たす骨髓(bone marrow)で構成される。この海綿骨は骨代謝が活発であるため、骨粗鬆症に応じて骨梁構造が疎になり、症状の進行評価の指標になることが知られている⁽²⁾⁽³⁾。

現在、より確度の高い、詳細な超音波評価法を確立するために様々な研究が行なわれている。その一つとして、この海綿骨を伝搬した超音波縦波が、高速波、低速波の二種類の縦波に分離する現象の利用が報告されている^{(4)~(9)}。高速波は主に海綿骨の骨梁部、低速波は主に骨髓部を透過した波であると考えられている。第2図に水中および、海綿骨中における超音波伝搬のシミュレーション結果を示す。骨中を伝搬する波には、振幅が小さいが、速い成分(高速波)が見られる。この高速波の音波伝搬を検討すると、海綿骨部の構造や弾性的性質が評価できる可



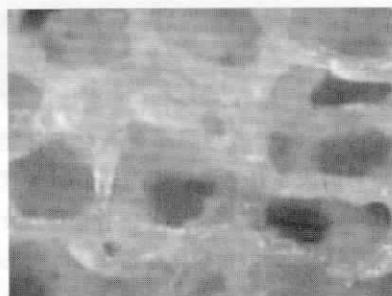
第1図 超音波骨密度計の概略

第2図 FDTDシミュレーションによる音波伝搬の可視化
(凹面振動子から1MHzの正弦波1波を送波)

能性がある。

また、第3図に示すように、海綿骨は均一な網目状構造ではなく、特定の方向に骨梁が伸び、異方性を持つ構造である。この音波の分離現象は、主に骨梁が整列した方向に沿って音波が伝搬した際に観測される。しかし、いつも音波の分離が見られるわけではない。構造はもちろんのこと、骨体積比 (BV/TV : Bone Volume/Total Volume) などパラメータは多く、音波の伝搬特性に影響を与える。

そこで、本稿ではこの複雑な海綿骨中を様々な方向に伝搬する超音波の特性について御紹介する。

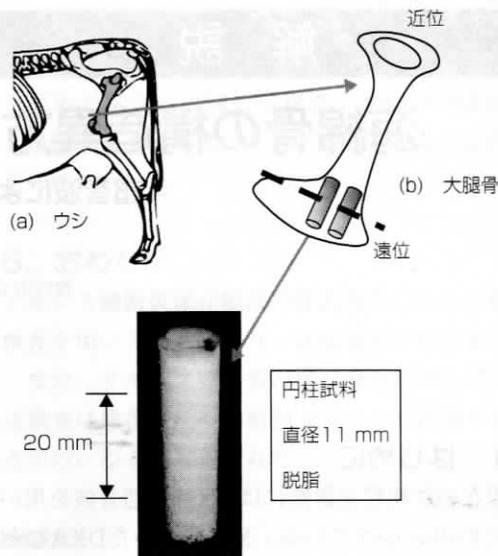


第3図 海綿骨

2. 試料

第4図に示すようにウシ大腿骨遠位骨端部より、試料を切り出した。骨髓を除去後、円柱型(直径11 mm、長さ40~90 mm)に加工をしたものを用いた。この円柱の長さ方向は骨軸方向と一致している。超音波測定では、試料を円周方向に回転させながら音速を測定することで、骨軸に垂直な面内での音速異方性を求めた。

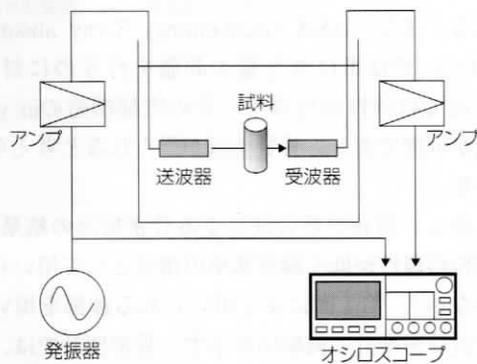
また、実際の試料の構造を知るため、X線マイクロCT装置(島津、SMX-160CTS)を用いて試料の断層画像を得た。その結果から3D-BON(ラトックエンジニアリング)を用いて、試料中のBV/TVおよび平均骨梁長さの分布を求めた。ここで、BV/TVは、海綿骨の見かけの体積と、骨梁が占める体積の比である。また、平均骨梁長さは、各方向における骨梁の平均長さを表す。



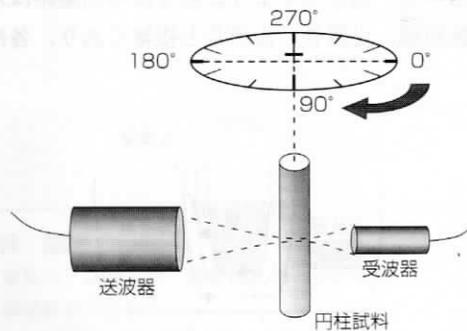
第4図 試料の作成方法

3. 実験

測定に用いた実験系を第5図に示す。脱気水中にPVDF(ポリフッ化ビニリデン)を用いた送受波器を対向させ、試料を送受波器間に設置した。送受波



(a) 実験系



(b) 試料の回転方法

第5図 超音波測定の概略

器間は60 mmとし、試料は送波器から40 mmの位置に設置した。送波器には集束型凹面送波器（東レエンジニアリング製、直径20 mm、曲率半径40 mm）を、受波には平面型受波器（自作、直径10 mm）を用いた。送波器には、発振器から5 V_{p-p}、周波数1 MHzの正弦1波をパワーアンプで20dB増幅し、印加した。水中の試料を通過した音波を受波し、プリアンプで40dB増幅した後、オシロスコープで観測した。測定では第5図に示すように、円柱試料の中心軸に対して直交するように超音波を照射し、試料を10度ずつ回転させた（音波の照射方向を変化）。さらに中心軸に平行に試料を3 mmずつ移動（音波の照射位置を変化）させ、各試料の長さに合わせて測定した。

また、高速波音速の算出方法について述べる。第6図(a)は水のみを伝搬した音波の波形、第6図(b)は、水中の骨を通過し高速波と低速波が分離した波形の一例、第6図(c)は水中の骨を通過したものの分離しなかった波形の一例である。低速波は水より伝

搬速度が遅いため、水より伝搬速度が速い場合は、分離しない場合も高速波とみなした。従って、高速波音速は分離した場合、分離しなかった場合共に、観測波形の波頭の観測時間を基準として以下の式を用いて算出した。

$$v = \frac{v_0}{1 - v_0(\Delta t/d)}$$

ここで、

v_0 : 水中の音波の伝搬速度

d : 試料の直径

Δt : 試料を送受波器間に置いた場合

と、試料を置かずに水だけの場合の観測時間差である。また、水の伝搬速度は、Greenspanの実験式より算出した¹⁰⁾。

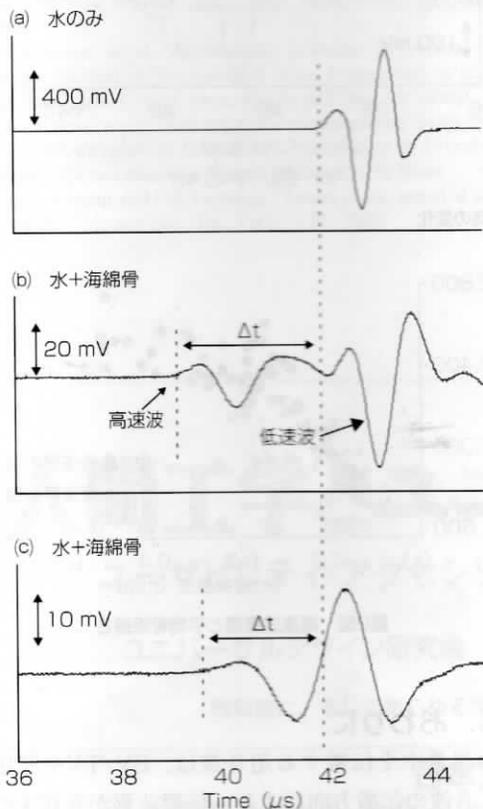
4. 結果

第8図に、一つの円柱試料中で、BV/TVの異なる部位を伝搬した音波の波形を示す。第7図(a)、(b)のBV/TVはそれぞれ0.29、0.43であり、ともに、試料を30°ずつ回転させた際の波形である。0°は試料の後位方向であり、(a)、(b)ともに、骨梁の整列した方向は10°であった。音波の入射方向が変わると、伝搬波形も変化することがわかる。また(a)、(b)ともに骨梁が最も整列した方向に音波が伝搬した際に、最も波形の観測時間が早くなり、音速は最大となった。

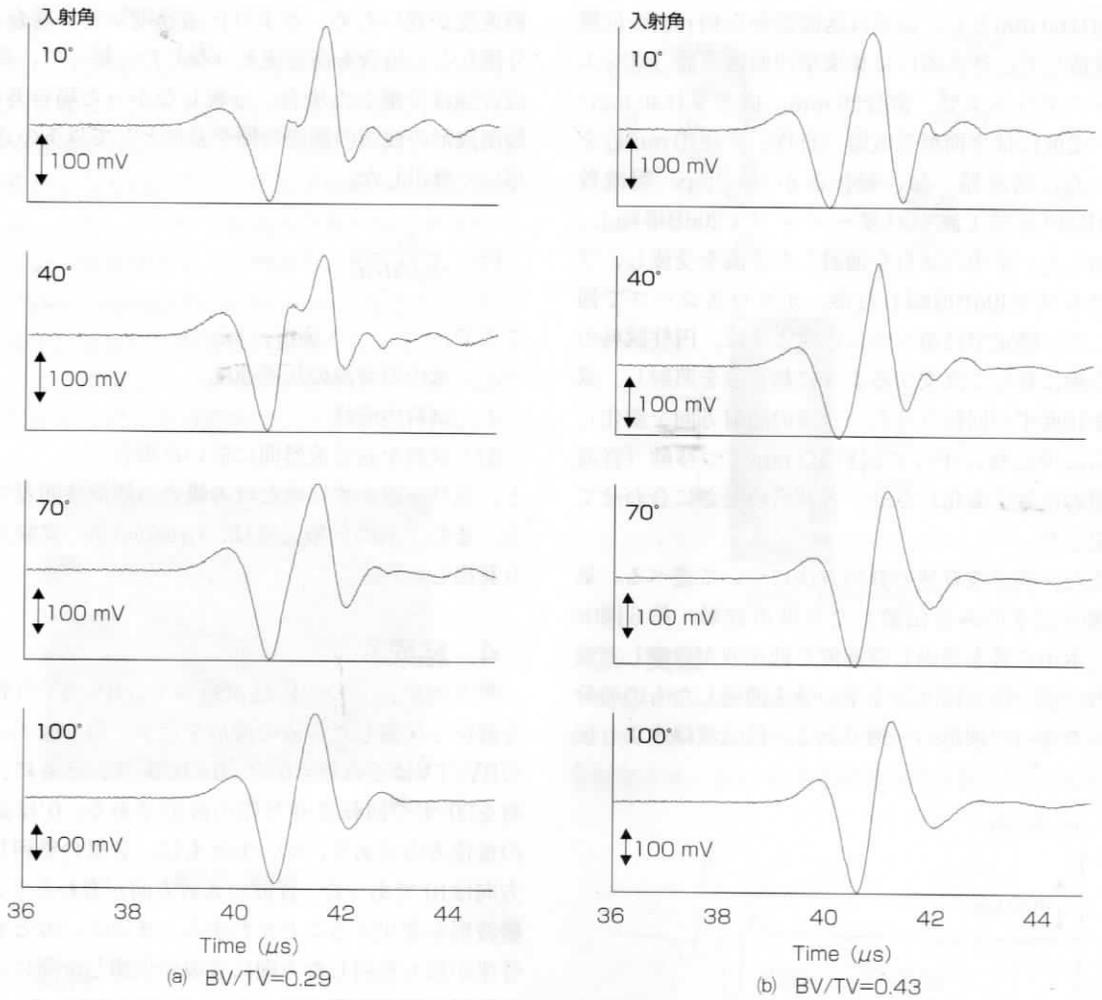
なお、(a)では10°のときにはっきりとした波形の分離が確認されたが、入射角が変わると、波形の分離が見られなくなった。また、(b)も同様に波形の変化は確認されたが、分離は見られなかった。これは、bの部位ではBV/TVが大きく、低速波の振幅が小さいためと考えられる。今回の試料ではBV/TVが0.2~0.4程度の部位においては、音波の分離が明確となった。

第8図に高速波音速の入射角依存性（異方性）と、その部位での試料のCT画像を示す。図に示すように、入射方向によって高速波音速の大きさは400 m/s程度変化した。また、図中に示した矢印は音速が最大、最小となった方向を示している。音速の最大値は、骨梁の整列する（平均骨梁長さが最大となる）方向で観測された。

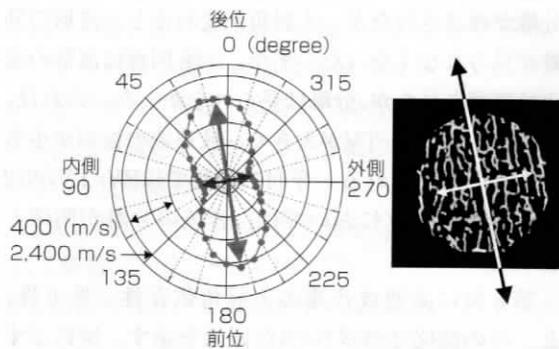
そこで、各測定部位における、高速波音速の最大、



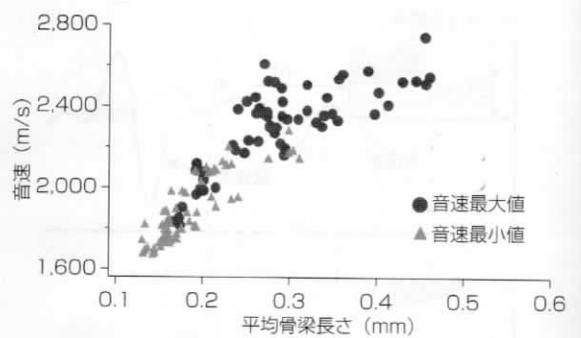
第6図 観測波形例



第7図 音波の入射方向の変化



第8図 音速の入射角依存性と骨梁構造



第9図 高速波音速と平均骨梁長さ

最小値と、その値が観測された方向の平均骨梁長さとの関係を第9図に示す。これらの方向では骨梁長さ
と高速波音速に高い相関が見出される。

5. おわりに

海綿骨中を伝搬する超音波は、BV/TVや測定部位、音波の伝搬方向により、伝搬波形が変化することが示された。また、音速の異方性と構造の異方性

がほぼ一致した。このため、in vivo測定では高速波音速から海綿骨の構造を推定することが可能だと考えられる。

なお、音波の入射方向が変わると音速が変化することから、現在の超音波骨密度計の測定の再現性の低さは、音波のわずかな入射角変化が影響している可能性も考えられる。

<参考文献>

- (1) K.Yamazaki, S.Sakata, K.Kushida and A.Nagano. "The present status of QUS techniques." *Osteoporosis Japan*, Vol.11, pp.293-296 (2003)
- (2) C.F.Njeh. "Quantitative ultrasound : assessment of osteoporosis and bone status. 1st edition." (1999) (Taylor & Francis)
- (3) J.K.Weaver and S.J.Chalmer. "Cancellous bone : its strength and changes with aging and an evaluation of some methods for measuring mineral content I. Aging changes in cancellous bone." *J. Bone Joint Surg.*, Vol.48, pp.289-298 (1996)
- (4) A.Hosokawa, T.Otani. "Ultrasonic wave propagation in bovine cancellous bone". *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.101, pp.558-562 (1997)
- (5) A.Hosokawa, et. al. "Influence of trabecular structure on ultrasonic wave propagation in bovine cancellous bone". *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.36, pp.3233-3237 (1997)
- (6) A.Hosokawa, T.Otani. "Acoustical anisotropy in bovine cancellous bone". *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.103, pp.2718-2722 (1998)
- (7) I.Mano, et. al. "Development of Novel Ultrasonic Bone Densitometry Using Acoustic Parameters of Cancellous Bone for Fast and Slow Waves". *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.45, pp.4700-4702 (2006)
- (8) Y.Nagatani, et. al. "Applicability of Finite- Difference Time-Domain Method to Simulation of Wave Propagation in Cancellous bone". *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.45, pp.7186-7190 (2006)
- (9) Y.Nagatani, et. al. "Numerical and Experimental Study on the Wave Attenuation in Bone-FDTD Simulation of Ultrasound Propagation in Cancellous Bone". *Ultrasonics*. In Press
- (10) M.Greenspan and C.E.Tschiegg. "Tables of the speed of sound in water." *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.31, p.75 (1959)

【筆者紹介】

宗宮 弘樹

同志社大学 工学研究科 電機電子工学専攻
超音波エレクトロニクス・応用計測研究室
〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷1-3
TEL : 0774-65-6300 FAX : 0774-6300

松川 真美

同志社大学 生命医科学部 情報学科 教授
〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷1-3
TEL : 0774-65-6292 FAX : 0774-65-6801

大谷 隆彦

同志社大学 名誉教授
〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷1-3

長谷 芳樹

神戸市立工業高等専門学校 電子工学科 講師
〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3
TEL : 078-795-3311 FAX : 078-795-3314

真野 功

応用電機株 技術部 メディカルプロジェクト
〒610-0101 京都府城陽市平川中道表63-1
TEL : 0774-52-0001

辻本敏行

株堀場製作所
〒601-8510 京都市南区吉祥院宮の東町2

人間工学とユニバーサルデザイン

ユーザビリティ・アクセシビリティ中心・ものづくりマニュアル

ユニバーサルデザイン研究会 編 A5判・356頁 定価:3,150円

教科書に、そしてあらゆる製品のデザイン・製品開発のガイドとして。

日本工業出版(株)

フリーダイヤル  0120-974-250 netsale@nikko-pb.co.jp