

平成22年 6月15日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19700393
 研究課題名（和文） 超音波診断シミュレーションに用いる生体数値モデルの開発
 研究課題名（英文） Development of a numerical model for simulations of ultrasound assessment of bone status
 研究代表者
 細川 篤（ATSUSHI HOSOKAWA）
 明石工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授
 研究者番号：00321456

研究成果の概要（和文）：本研究ではまず、骨中を伝搬する超音波の特性、特に高速波・低速波と呼ばれる海綿骨中を伝搬する縦波の特性における変動の要因について、三次元 X 線 μ CT 画像から作製した海綿骨モデルを利用した時間領域差分法（FDTD 法）による数値シミュレーションによって明らかにした。更に、高速波・低速波の特性を再現可能な海綿骨の擬似モデルを開発した。これらの成果は、ヒトの骨状態の超音波診断をシミュレーションする事が出来る数値モデル開発の基盤となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, the variability in ultrasound propagation properties in bone, particularly the properties of “fast and slow waves” which can propagate in cancellous bone, was clarified using finite-difference time-domain (FDTD) simulations with realistic numerical models of cancellous bone, which were constructed from three-dimensional (3D) X-ray microtomographic (μ CT) images. Furthermore, an artificial cancellous bone model with a simplified structure for FDTD simulations of the fast and slow wave propagation was developed. These results laid the foundation of a simulation model for ultrasound diagnosis of human bone status.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	510,000	3,910,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：海綿骨、超音波伝搬、高速波・低速波、骨梁構造、数値モデル

1. 研究開始当初の背景

超音波は様々な医療応用が可能であり、超音波エコー診断装置による生体内部の映像化や超音波ドップラー診断装置による血流

速度の測定等、多くの技術が確立されている。他方、骨粗鬆症診断を目的とした骨状態の評価や音圧の機械的刺激による骨折治療等、研究途上の技術も多い。医療に関する研究では、

臨床前に有効性、安全性の確認を行う必要がある。その従来手法として *in vitro* 測定、生体ファントム（擬似試料）の利用、動物実験が挙げられるが、近年の計算機の発展に伴い数値シミュレーションが非常に大きな役割を果たしている。

2. 研究の目的

本研究における当初の研究目的は、超音波による骨診断のシミュレーションを可能とするヒトの四肢（手首および踵部分）の数値モデルを開発する事である。具体的な目的は、以下に示す通りである。

(1) 海綿骨中における超音波伝搬挙動を明らかにする。特に、海綿骨の内部構造（骨梁構造）と超音波挙動の関連に焦点を当て、異方性及び不均質性の影響について示す。

(2) 異方性及び不均質性が超音波挙動に及ぼす影響を再現可能な海綿骨の数値モデルを開発する。任意の骨梁構造が容易に構築出来るように、骨梁構造と直結した入力パラメータを使用するモデルを考案する。

(3) 海綿骨を取り囲む皮質骨、筋肉、脂肪、皮膚等の超音波特性から各種物理パラメータを求める。更に、海綿骨・皮質骨間、皮質骨・筋肉間、筋肉・皮膚間等、異なる二つの生体組織間の超音波透過・反射特性を解明する。

(4) 各生体組織の外形及び内部構造を模倣したヒトの四肢のモデルを構築する。具体的には、骨粗鬆症の診断箇所として測定が容易な手首及び踵部分をモデル化する。

3. 研究の方法

本研究で実施された内容は、ウシの骨試料を用いた実験及び数値シミュレーション、骨のファントム（擬似試料）を用いた実験及び数値シミュレーション、海綿骨の数値モデルの開発、ヒトの手首及び踵部分のシミュレーションモデル開発の四つに大別出来る。それぞれの具体的な研究方法は以下に示す通りである。

(1) ウシの大腿骨の様々な箇所から切り出した海綿骨試料を用いて、水浸法によって海綿骨中における超音波パルスの伝搬挙動を観測した。特に、伝搬方向に骨梁配向が強い場合に明瞭に観測出来る二種類の縦波（高速波・低速波）に着目して伝搬特性の測定を行った。海綿骨試料の三次元 X 線 μ CT 画像から骨梁構造を解析し、高速波・低速波の特性と骨梁構造の関係について検討した。

更に、試料の μ CT 画像から海綿骨の数値モ

デルを作製し、時間領域差分法（FDTD 法）によって海綿骨中の超音波伝搬のシミュレーションを行った。画像処理によって海綿骨モデルの間隙率や骨梁構造を擬似的に変化させる事で、高速波・低速波の伝搬特性と様々な構造パラメータの間の関連性について調べた。

(2) 配向が強い骨梁構造を板状の骨梁が規則的に配列した層状構造に簡略化して、海綿骨の模倣ファントム（擬似試料）を作製した。この海綿骨ファントムを用いて実験を行い、伝搬方向に垂直な骨梁あるいは間隙が高速波・低速波に及ぼす影響について定量評価を試みた。同時に、海綿骨ファントムを数値モデル化してシミュレーションを行い、その結果を実験結果と比較した。

(3) 海綿骨中の間隙を様々な径の球の集合であると仮定して、新たな骨梁構造の解析方法を考案した。この方法によって海綿骨の X 線 μ CT 画像を解析し、骨梁構造を球の径及び配置の二つのパラメータで表現した。

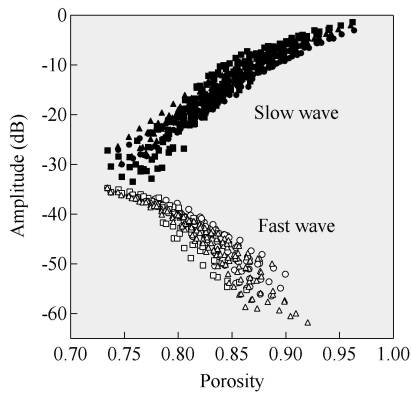
この解析結果を参考にして、骨中に球形の間隙を配置した海綿骨の簡略モデルを開発した。 μ CT 画像から作製した海綿骨モデルと上記の方法で解析して得られたパラメータ値を用いて作製された簡略モデルが等価である事を示すために、それぞれのモデルにおける FDTD シミュレーションの結果を比較した。

(4) 独立行政法人・情報通信研究機構から無償提供された電磁界解析用の数値人体モデルデータベースを利用して、超音波伝搬解析用の手首及び踵部分の数値モデルの作製を試みた。全身のデータベースから手首・踵部分を抽出し、人体組織に対応する弾性パラメータと密度の値を割り当てた。FDTD シミュレーションに必要な分割とするためにデータ補完を行い、データベースでは骨梁構造が表現されていない海綿骨部分に(3)で開発された海綿骨モデルの適用を試みた。

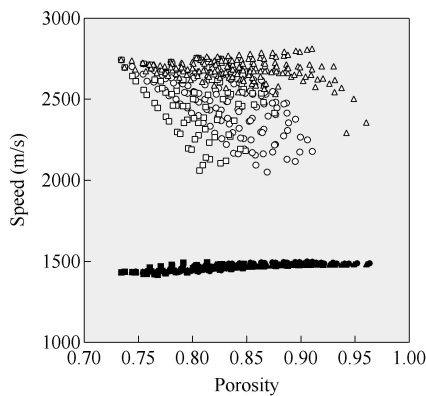
4. 研究成果

研究の方法(1)～(4)に対する成果を以下に示す。

(1) 様々な構造を有する海綿骨に対する超音波伝搬特性について、実験結果と FDTD シミュレーションの結果は良好な一致傾向を示した。即ち、FDTD 法が骨中の超音波伝搬シミュレーションに適している事が示された。この様に FDTD シミュレーションの妥当性を示した上で、高速波・低速波の伝搬特性に関する様々な数値シミュレーションを実行した。その結果の一例を図 1 に示す。



(a) 振幅



(b) 伝搬速度

図1 高速波・低速波の伝搬特性の変動

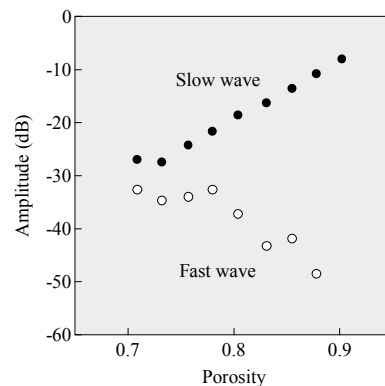
この図は、画像処理によって海綿骨モデルの骨梁を浸食させて間隙率を変化させたときの振幅及び伝搬速度の変動を示している。三通りの浸食方法が用いられ、○プロットはあらゆる方向に均一に浸食を行った場合のデータ、□プロットは主として伝搬方向に平行に浸食を行った場合のデータ、△プロットは主として伝搬方向に垂直に浸食を行った場合のデータである。□プロットと△プロットは両極端な浸食を行った場合のデータであり、図1に見られる伝搬特性の変動は骨梁構造の変化に伴う最大変動であるとみなす事が出来る。この様なデータはシミュレーションによってのみ得ることが出来、シミュレーションの有用性を示している。

更に、高速波・低速波の伝搬特性と様々な構造パラメータの間の相関係数を求め、伝搬特性の変動と骨梁構造の関係を明確にした。特に、高速波速度は伝搬方向に平行な骨梁長との関係が非常に強く、低速波振幅は伝搬方向に垂直な間隙長との関係が強い事が示された。これらは、高速波・低速波を利用して骨状態の評価を行う場合に考慮する必要がある。

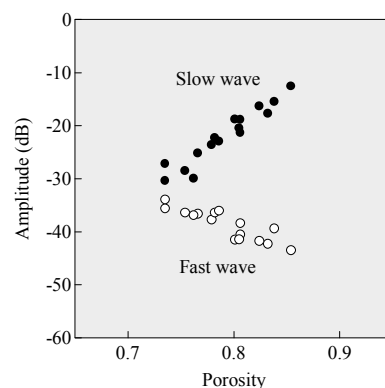
(2) 層状の骨梁構造を有する海綿骨ファントム中を、骨梁・間隙層に沿って高速波・低速波の両波が伝搬する事を確認した。骨梁・間隙層にそれぞれ間隙・骨梁が存在する海綿骨ファントムでは存在しない海綿骨ファントムと比較して、両波の振幅が小さくなる事を示した。即ち、伝搬方向に垂直な骨梁・間隙は両波の伝搬を妨げる事が分かった。海綿骨ファントムを数値モデル化して行ったシミュレーションでも同様の結果となり、垂直方向の骨梁・間隙によって生じる散乱が伝搬を妨げる要因である事も分かった。

(3) X線 μ CT画像から海綿骨の間隙を球によって分解した結果、低い間隙率と高い間隙率の両方が同程度の径の球で分解され、間隙率は球の個数に反映される事が分かった。更に、多くの箇所球の配置が集中している事から、複雑な間隙構造は集中して配置された多数の球に分解される事が分かった。

骨中に球形の間隙を配置して作製した海綿骨の簡略モデルとX線 μ CT画像から作製したモデルのシミュレーション結果の比較を図2・3に示す。

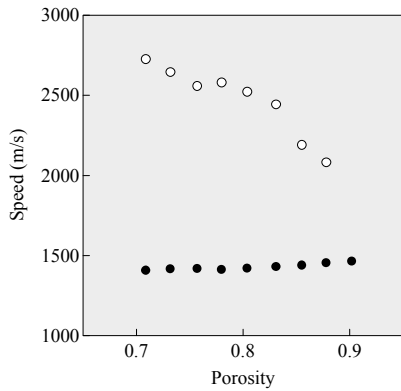


(a) 簡略モデル

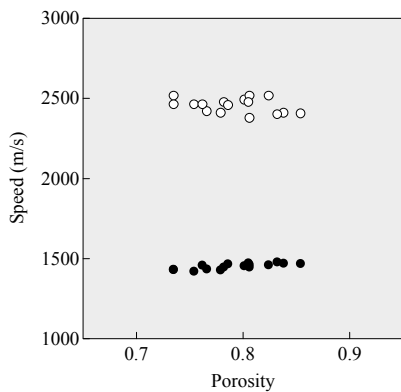


(b) μ CTモデル

図2 振幅のシミュレーション結果の比較



(a) 簡略モデル



(b) μ CT モデル

図3 伝搬速度のシミュレーション結果

図2は高速波・低速波の振幅、図3は伝搬速度を表している。簡略モデルを形成する間隙球の径及び配置は、前述の μ CT画像の解析結果を参考にして作製した。この時、骨梁構造の異方性を考慮して間隙球を配置した。間隙率は間隙球の個数のみによって調整した。 μ CTモデルは、解析で用いた μ CT画像から作製した。

簡略モデルにおいても、高速波・低速波をシミュレーションする事が出来た。図2・3から分かる様に、簡略モデルで得られた高速波・低速波の伝搬特性は μ CTモデルで得られた伝搬特性と非常に良く一致した。更に、異なる伝搬方向におけるシミュレーションを行い、簡略モデルと μ CTモデルの結果が良い一致を示す事を確認した。即ち、骨梁構造の異方性を再現する事が出来た。加えて、簡略モデルの間隙率は間隙球の個数のみによって調整する事が出来るので、個数の空間分布によって不均質構造を再現する事も容易である。以上の様に、骨梁構造の解析方法と直結し、異方性・不均質性を考慮することが可能な海綿骨の簡略モデルを開発する事が出来た。

(4) 手首及び踵部分の数値モデル作製を行う過程において、幾つかの解決すべき問題点が明らかとなった。

- ① 基にした電磁界解析用の数値人体モデルデータベースは分割間隔が大きく、単純に補完するだけでは細かい骨形状が再現出来なかったため、補完方法について検討する必要がある。
- ② 皮質骨と海綿骨の境界状態によって超音波伝搬は著しく変動する為、境界部分の影響を詳細に調べた上で、そのモデル化について検討する必要がある。
- ③ 骨の外形や体重等による応力を考慮して、海綿骨における骨梁配向や密度分布を再現する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① A. Hosokawa, "Numerical analysis of variability in ultrasound propagation properties induced by trabecular microstructure in cancellous bone," IEEE Trans. Ferroelectr. Freq. Control, Vol. 56, No. 4, pp. 738-747, 2009, Reviewed.
- ② A. Hosokawa, "Development of a numerical cancellous bone model for finite-difference time-domain simulations of ultrasound propagation," IEEE Trans. Ferroelectr. Freq. Control, Vol. 55, No. 6, pp. 1219-1233, 2008, Reviewed.

[学会発表] (計12件)

- ① A. Hosokawa, "Effect of porosity distribution in a propagation direction on ultrasound waves through cancellous bone," 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2009. 9. 22, Ergife Palace Hotel, Roma, Italy.
- ② A. Hosokawa, "Fast and slow waves propagating through cancellous bone with porosity distribution in a propagation direction," 3rd European Symposium on Ultrasonic Characterization of Bone, 2009. 9. 17, Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland.
- ③ A. Hosokawa, "Investigation of effect of trabecular microstructure on ultrasound propagation through cancellous bone using finite-difference time-domain simulations," Acoustics' 08, 2008. 7. 3,

Paris des Congrès, Paris, France.

- ④ A. Hosokawa, "Development of a simplified trabecular model and ultrasound simulation in cancellous bone," 2nd European Symposium on Ultrasonic Characterization of Bone, 2007. 7. 19, Halle University, Halle, Germany.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細川 篤 (ATSUSHI HOSOKAWA)
明石工業高等専門学校・電気情報工学科・
准教授
研究者番号：00321456

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし