

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750184

研究課題名(和文) 空中超音波を用いた生体内伝搬速度計測による in vivo 骨評価

研究課題名(英文) in vivo bone assessment based on measurement of ultrasonic propagation speed by airborne ultrasound

研究代表者

平田 慎之介(Hirata, Shinnosuke)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：80550970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：骨粗鬆症診断を目的とした超音波骨量測定では、超音波検査用ジェルを介して超音波振動子を踵側面に接触させて踵骨内の音波伝搬速度や減衰特性を計測する。本研究では、空気中から超音波を照射し、踵を透過した超音波を検出・評価することで、非接触で骨量測定を行う手法について検討を行った。空気中、生体、空気中と音響特性が大きく異なる物質間を伝搬し、著しく減衰した透過波を検出するため、擬似ランダム符号の一種であるM系列を用いたパルス圧縮を適用した。さらに、踵側面における超音波の屈折を考慮し、振動子の向きを制御することで、80～90 dB減衰した透過波の検出に成功した。

研究成果の概要(英文)：Quantitative ultrasound, measurement and evaluation of ultrasonic propagation speed or attenuation characteristics, is one of the diagnosis methods of osteoporosis. In this research, non-contact measurement of the propagation speed in a heel using airborne ultrasound which passed through the heel has been studied. The passed-through ultrasound is extremely attenuated due to a large reflection from surfaces between air and the heel. Therefore, pulse compression using an M-sequence, which is one of the binary pseudo-random sequences, is employed for improvement of the signal-to-noise ratio of the passed-through ultrasound. Furthermore, ultrasonic transducers are inclined with considering the surface inflections by scanning of the shape of the heel. In in vivo experiment, then, passed-through ultrasound, whose attenuation are from 80 to 90 dB, can be detected by the proposed method.

研究分野：複合領域

キーワード：空中超音波 生体内音波伝搬 非接触骨評価 M系列パルス圧縮

### 1. 研究開始当初の背景

近年、骨粗鬆症などに起因する大腿骨や股関節の骨折が、高齢者が寝たきりとなる原因の10%以上を占めている。骨粗鬆症による骨折リスクを低減するには、早期の発見・治療が必要であり、継続的な骨量測定が極めて重要である。海綿骨内を伝搬する超音波の速度(Speed Of Sound: SOS)や減衰係数の周波数特性(Broadband Ultrasound Attenuation: BUA)から骨量を定量的に評価する手法(Quantitative UltraSound: QUS)は、X線被曝の心配がなく、装置や検査方法も簡便であるといった利点がある。そのため、超音波を用いた骨量測定は、健康保険が適用される骨粗鬆症の検診・スクリーニングにおいて盛んに臨床応用がなされている。

一般的に使用されている QUS 装置では、数 MHz ~ という周波数帯の超音波が用いられる。このような帯域の超音波は、空気中において著しく減衰してしまうため、送信用振動子、被検査部位、受信用振動子の間を、水など音響特性が生体に近い物質で満たす必要がある。実際の臨床現場では、振動子の表面に超音波検査用ジェルを塗り、対面する2つの振動子で被検査部位を挟むように検査を行っている。そのため、非検査部位が制限される、大きさ・形状によっては検査が困難といった問題が生じている。

そこで本研究では数十~百数十kHzという空気中での減衰が比較的少ない周波数帯の超音波を用いた非接触での骨量測定を提案している。空気中より超音波を非検査部位に照射し、生体内を透過した超音波を検出・評価することで、海綿骨内の SOS や BUA を計測し、非接触で骨量を推定することができる。しかし、生体を透過する超音波は、空気中、生体軟組織、踵骨、生体軟組織、空気中と音響特性(特に固有音響インピーダンス)が大きく異なる物質間を伝搬するため、各境界面において大きな反射が発生し、その透過波は著しく減衰してしまう。また、超音波はその波長より十分小さな媒質が不均質に分布する生体内を複雑な経路で伝搬するため、波形に重ね合わせや歪みの影響で、一般的な信号処理では SOS や BUA を正確に計測することが困難と考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、擬似ランダム符号の一種である M 系列を用いたパルス圧縮によって、透過波の信号対雑音比(Signal to Noise Ratio: SNR)を大幅に向上させる手法について検討を行う。パルス圧縮では、周波数掃引変調した信号や疑似ランダム符号でコード化した信号などを送信し、受信信号と送信信号に対応する参照信号との相互相関処理を行う。相互相関処理によって受信信号のエネルギーがパルス状に圧縮されるため、送信信号の長さや帯域幅に応じて SNR が向上する。

また、有限差分時間領域(Finite-Difference

Time-Domain: FDTD)法を用いた踵内の音波伝搬解析を行い、超音波が空気中、生体軟組織、踵骨内を伝搬する過程を検証し、効率的な音波伝搬手法について検討を行う。FDTD法とは、音波伝搬に関する運動方程式、連続の式の微分項を差分に置き換え、逐次時間積分を行うことで音場を計算する手法である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 踵の音響特性の計測・評価

本研究開始前の基礎検討では、使用していた振動子の帯域幅は数%と非常に狭く、時間幅の短いパルス波を送信することが困難であった。そこで、まず帯域幅を30%程度に広げた振動子を使用した図1のような計測システムを試作した。そして、M系列パルス圧縮を用いて受信信号のSNRを大幅に向上させ、被験者の踵を透過した超音波の検出する in vivo 実験を実施した。複数の被験者に対して実験を行い、踵の透過減衰など基礎的な音響特性の計測・評価を行った。



図1 送信・受信用の振動子を対向させた計測システム。

#### (2) 生体模擬ファントムを用いた精度検証

試作した計測システムにおける SOS の計測精度を検証するため、生体模擬ファントムとしてエタノール水溶液を用いた実験を行った。エタノールの濃度を変えることで SOS が異なる複数のファントムを作成し、図2のポリカーボネート容器に入れて、振動子間に配置した。そして、ファントムの有無による TOF の差とファントムの幅、空気中の SOS を用いてファントム内の SOS を計測した。



図2 エタノール水溶液を入れたポリカーボネート容器。

### (3) FDTD 法による音波伝搬解析

FDTD 法による数値シミュレーションでは、時間差分の分解能(サンプリング時間)は SOS の最も大きい媒質を基準に設定する必要がある。しかし、解析領域内での SOS 差が大きい場合、SOS の小さい領域において分散誤差が発生してしまう。本研究では、空気中と踵骨内の皮質骨の間に 10 倍以上の SOS 差が生じるため、この分散誤差を低減する必要がある。さらに、空気、生体軟組織、踵骨内の皮質骨および海綿骨から構成されるシミュレーションモデルを用いて踵内の音波伝搬解析と透過減衰の推定を行った。

### (4) 踵の形状を考慮した計測手法

踵の透過減衰を低減するため、踵の表面形状を考慮した計測手法を検討した。振動子が対向する計測システムでは、図 3 のように踵に入射した超音波がその表面で屈折するため、もう一方の振動子で透過波を受信できていない可能性が考えられる。そこで、振動子の回転・傾斜を行うことができるように計測システムを改良した。さらに、3 次元スキャナを用いて被験者の踵を計測し、その表面形状に合わせて振動子の向きを制御する手法を検討した。

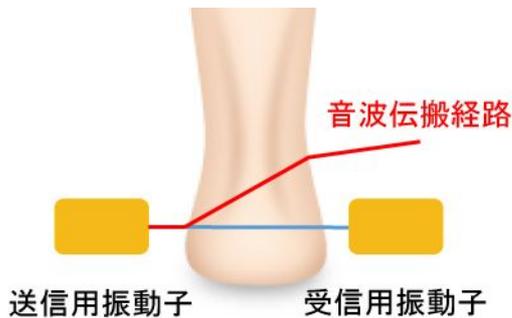


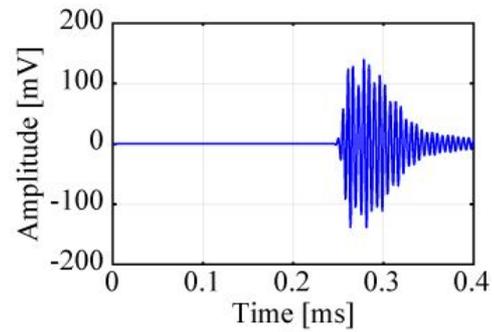
図 3 踵表面で屈折する音波の伝搬経路。

## 4. 研究成果

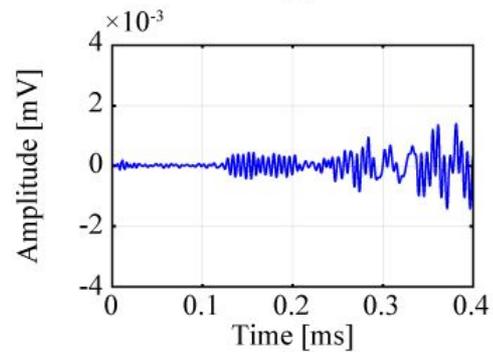
### (1) 踵の音響特性の計測・評価

対向させた送信・受信用の振動子の間に被験者の踵を配置して、踵の内側の振動子から M 系列変調超音波を送信し、外側の振動子で透過した超音波を受信した。使用する M 系列の次数を 19 次まで上げる(SNR は 57 dB 向上)ことで、図 4 のように踵を透過した超音波を確認することができた。振動子間に何も配置しない場合、超音波の伝搬時間(Time Of Flight: TOF)は約 0.26 ms であったが、生体内は空気中より SOS が大きいいため、踵を配置した場合の TOF は約 0.12 ms となった。

しかしながら、計測した踵の透過減衰は 100~120 dB と被験者によって大きくばらつき、減衰の大きな被験者では透過波の立ち上がりを計測できず、踵内の SOS を計測できなかった。生体の固有音響インピーダンスから見積った理想的な透過減衰は約 80 dB であり、何らかの要因で透過波が減衰してしまっていると考えられる。



(a)



(b)

図 4 相互相関後の受信波形, (a) 振動子間に何も配置しない場合, (b) 振動子間に踵を配置した場合。

### (2) 生体模擬ファントムを用いた精度検証

生体模擬ファントムとして濃度の異なるエタノール水溶液を入れたポリカーボネート容器を振動子間に配置し、提案手法によってそれぞれの SOS を計測した。各ファントムで 10 回ずつ実験を行い、その平均値を計測値とした。計測したエタノール水溶液の SOS とその文献値を表 1 に示す。検証実験の結果、計測値と文献値との誤差は最大でも 2 % 以下となることがわかった。

表 1 計測したエタノール水溶液の SOS とその文献値

濃度[%]	計測値[m/s]	文献値(誤差)[m/s]
0	$1.48 \times 10^3$	1483 (0.2 %)
10	$1.56 \times 10^3$	1564 (0.3 %)
20	$1.62 \times 10^3$	1628 (0.5 %)
30	$1.62 \times 10^3$	1623 (0.2 %)
40	$1.56 \times 10^3$	1565 (0.3 %)
50	$1.54 \times 10^3$	1495 (1.7 %)
60	$1.44 \times 10^3$	1430 (0.7 %)
70	$1.38 \times 10^3$	1363 (1.2 %)
80	$1.32 \times 10^3$	1303 (1.3 %)
90	$1.26 \times 10^3$	-
100	$1.17 \times 10^3$	1180 (0.9 %)

### (3) FDTD 法による音波伝搬解析

まず、解析領域内で SOS が 10 倍以上異なる場合の FDTD 法において、分散誤差の定量的な評価と低減手法の検討を行った。SOS 差

による分散誤差は、空間差分の分解能(グリッド幅)に応じて減少するため、最も SOS の小さい空気中においてグリッド幅を1波長あたり100グリッド以上にすることで分散誤差を数%程度まで低減することができた。

続いて、踵骨内の海綿骨における骨梁の走行方向を考慮した音波伝搬解析を行った。図5のように骨梁が超音波の伝搬方向に平行な場合と垂直な場合の受信信号を評価した結果、透過減衰は平行な場合で約85 dB、垂直な場合で約100 dBとなった。また、どちらの場合でも、骨密度の増加に伴い減少する傾向となった。実際の実験では、平行な骨梁と垂直な骨梁が混在しているが、受信信号から確認できる透過波は主に平行な骨梁を伝搬した超音波であると思われる。

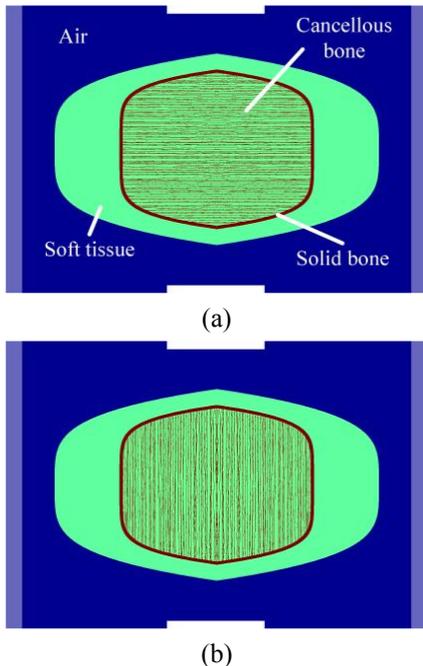


図5 空気，生体軟組織，踵骨内の皮質骨および骨髄から構成されるシミュレーションモデル, (a) 骨梁が横向きに走行, (b) 骨梁が縦方向に走行。

(4) 踵の形状を考慮した計測手法

まず、図6のように被験者の踵の形状に合わせ、送信・受信の振動子を回転・傾斜させることができる計測システムを試作した。振動面の中心を回転中心として、振動子の向きを別々に制御することができる。

続いて、図7のような踵の表面形状データから計測部位の角度を算出した。そして、空気中から踵内への屈折と踵内から空気中への屈折を考慮し、透過した超音波が受信の振動子に到達するように振動子の回転・傾斜角度を算出した。振動子を対向させた場合と傾斜・回転させた場合の相関後の受信波形を図8に示す。透過波の振幅が大幅に増加し、全ての被験者において透過減衰が80~90 dBとなった。しかしながら、超音波の伝搬経路が直線ではなくなったため、TOF から SOS

を計測するには、踵の幅に加えて空気中の伝搬距離も求めなければならない。

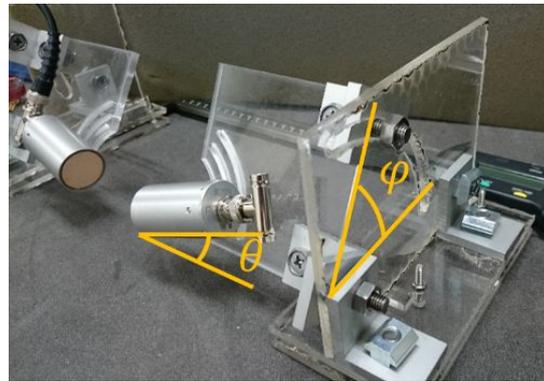


図6 振動子の回転・傾斜機構を有する計測システム。

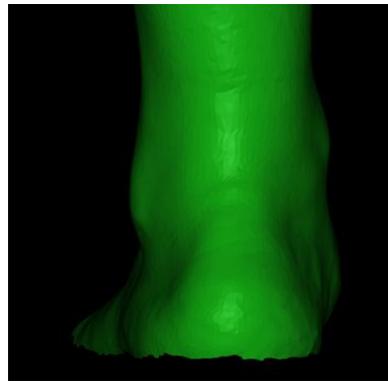


図7 3次元スキャナで取得した踵の表面形状データ

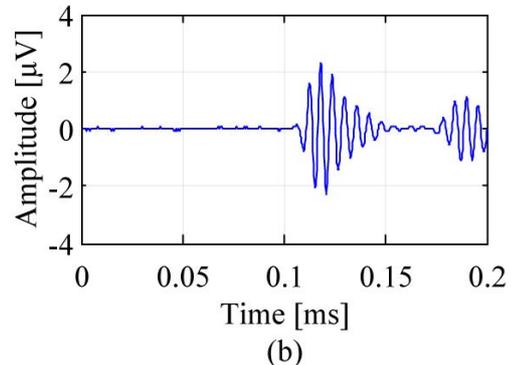
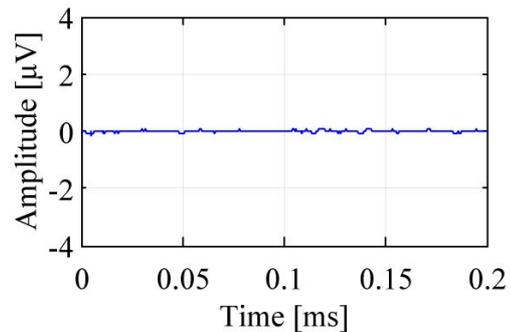


図8 相互相関後の受信波形, (a) 振動子を対向させた場合, (b) それぞれの振動子を傾斜・回転させた場合。

## 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 2 件)

S. Hirata, H. Hachiya, “Truncation- noise characteristics of finite- length M-sequence,” Acoustical Science and Technology, 査読有, Vol. 36, No. 3, pp. 254-261, May, 2015.

DOI: 10.1250/ast.36.254

S. Hirata, L. Haritaipan, K. Hoshiya, H. Hachiya, N. Niimi, “Non-contact measurement of propagation speed in tissue-mimicking phantom using pass-through airborne ultrasound,” Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 53, No. 7S, 07KC17, July, 2014.

DOI: 10.7567/JJAP.53.07KC17

[学会発表](計 10 件)

埴大祐, 平田慎之介, 蜂屋弘之, “踵の形状を考慮した踵内の非接触音響特性計測の検討,” 日本音響学会 2016 年春季研究発表会, pp. 1263-1264, 桐蔭横浜大学, 横浜, Mar. 9-11, 2016.

寺島光一, 平田慎之介, 蜂屋弘之, 新実信夫, “手首を透過した空中超音波による骨内音響特性計測の検討,” 日本音響学会 2015 年春季研究発表会, pp. 1183-1184, 中央大学, 東京, Mar. 16-18, 2015.

寺島光一, 平田慎之介, 蜂屋弘之, 新実信夫, “非接触音響特性計測を目的とした生体を透過した空中超音波の検出,” 電子情報通信学会 技術報告, Vol. 114, No. 422, pp. 39-43, 同志社大学, 京都, Jan. 28-29, 2015.

S. Hirata, K. Terashima, H. Hachiya, N. Niimi, “Evaluation about propagation characteristics of pass-through airborne ultrasound for ultrasonic bone assessment,” The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 35, pp. 433-434, Meiji University, Tokyo, Japan, Dec. 3-5, 2014.

S. Hirata, K. Terashima, L. Haritaipan, H. Hachiya, N. Niimi, “Non-contact measurement of propagation characteristics in human wrist using pass-through airborne ultrasound,” 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 1396-1399, Hilton Hotel, Chicago, USA, Sep. 3-6, 2014.

L. Haritaipan, K. Hoshiya, S. Hirata, H. Hachiya, N. Niimi, “Study about accuracy of non-contact measurement of propagation velocity in tissue mimicking phantom using pass-through ultrasound,” Acoustic Society of Japan 2014 Spring Meeting, pp. 1327-1328, Nihon University, Tokyo, Mar. 10-12, 2014.

S. Hirata, L. Haritaipan, K. Hoshiya, H.

Hachiya, N. Niimi, “Non-contact measurement of acoustic characteristics in tissues using a pass-through airborne ultrasonic wave for ultrasonic bone assessment,” The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Doshisha University, Kyoto, Japan, Vol. 34, pp. 227-228, Nov. 20-22, 2013.

平田慎之介, 蜂屋弘之, “音響 FDTD 法を用いた空中超音波の踵内伝搬解析に関する検討,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, pp. 1263-1264, 豊橋技術科学大学, 豊橋, Sep. 26, 2013.

S. Hirata, K. Kiso, K. Hoshiya, H. Hachiya, N. Niimi, “Study about the propagation of airborne ultrasonic wave through a heel for bone-density estimation,” 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 990-992, Prague Congress Centre, Prague, Czech Republic, July 21-25, 2013.

平田慎之介, 蜂屋弘之, “空中超音波の生体内音波伝搬における FDTD 法を用いた数値解析,” 電子情報通信学会 技術報告, Vol. 113, No. 68, pp. 35-39, 機械振興会館, 東京, May 27, 2013.

[その他]

ホームページ

<http://www.us.ctrl.titech.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

平田 慎之介 (HIRATA, Sinnosuke)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：80550971