

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K12100

研究課題名(和文) 生体を透過した空中超音波を用いた非接触QUSによる骨構造の高精度定量評価

研究課題名(英文) Accurate quantitative evaluation of bone construction by non-contact QUS using airborne ultrasound passed through a tissue

研究代表者

平田 慎之介(Hirata, Shinnosuke)

千葉大学・フロンティア医工学センター・准教授

研究者番号：80550970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：骨粗鬆症診断の指標となる海綿骨内の音波伝搬速度(音速：SOS)を計測する手法(超音波による骨量測定：QUS)について検討を行っている。本研究では、踵のように側面が傾斜した部位のSOSを非接触で計測することを目的として、踵を透過した超音波の伝搬時間、空気中および踵内の伝搬経路長を高精度で計測する手法・機構を提案した。開発した計測システムの評価実験では、生体を模擬したサンプル内のSOSを±2%以内の精度で計測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のQUS検査では、超音波を送受信する部分に超音波検査用ジェルを塗り、踵を両側から強く挟むようにして踵内のSOSを計測するため、踵の大きさや形状によっては適切に検査を行えない場合があった。本研究で提案する非接触QUSを実現することで、対象部位の大きさや形状の制約が無く、検査時間が短く、診療コストの低い骨量測定が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Quantitative ultrasound (QUS), estimation of speed of sound (SOS) in cancellous bone, is a diagnosis method of osteoporosis. We have been studied the non-contact QUS using airborne ultrasound passed through a heel to enable the easy-repeatable and low-cost examination. In this research, methods for determination of the time of flight and measurement of the propagation path of ultrasound are proposed. Then, SOS measurement of tissue mimicking phantoms with inclined sides is performed to evaluate the proposed method.

研究分野：医用超音波

キーワード：空中超音波 非接触計測 音波伝搬速度 減衰周波数特性 QUS

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、骨粗鬆症などに起因する大腿骨や股関節の骨折は、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 (SOS) や減衰係数の周波特性 (BUA) から骨量を測定する手法 (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、QUS による骨量測定は骨粗鬆症の検診・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。さらに近年では、小児期からの定期的な検査が骨疾患の診断に有用とも言われている。一般的な QUS 装置では超音波を生体内へ効率的に伝搬させるため、送信用振動子、被検査部位、受信用振動子の間を音響特性が生体軟組織に近い物質で満たす必要がある。実際には、振動子の振動面に超音波検査用ジェルを塗り、対向する 2 つの振動子で被検査部位を強く挟むように検査を行うため、被検査部位の大きさや形状が制限されてしまう。そのため、成人用 QUS 装置による小児の検査も困難であり、人によっては成人でも適切に測定を行えない場合がある。また、機種間での振動面 (超音波カプラ) の大きさや形状の違いに起因すると思われる臨床データのばらつきも大きく、標準化への課題となっている。

(2) 本研究では、空気中から生体に超音波を照射し、生体を透過した超音波を検出・評価することで生体 (海綿骨) 内の音波伝搬特性を非接触で計測する手法を提案している。このような非接触 QUS を実現することで、被検査部位の大きさや形状の制約が無く、検査時間が短く、診療コストの低い骨量測定が期待できる。しかしながら、一般的に音響計測の分野では、空気中を伝搬する超音波は生体を、生体内を伝搬する超音波は骨などを透過しない (ほぼ全反射する) ものとして扱われている。なぜなら、固有音響インピーダンスが大きく異なる媒質間を超音波が伝搬する場合、それらの境界面において大きな反射が発生し、透過する超音波の量は極めて少ないためである。例えば、空気、水 (生体軟組織に近い)、空気と超音波が伝搬する場合、それらの境界面が (超音波が透過しやすい) 理想的な平面であると仮定してもわずか 0.11% しか超音波は透過しない。そのため、境界面が複雑で生体軟組織の中に皮質骨・海綿骨が存在する状況では、一般的な計測・信号処理手法で透過した超音波を検出、評価することは極めて困難であると考えられる。

(3) 先行研究では 擬似ランダム符号の一種である M 系列符号で変調した超音波を送信し、受信信号と使用した M 系列符号 (参照信号) との相互相関処理を行うことで、受信した超音波の信号対雑音比 (S/N) を向上させるパルス圧縮を適用する手法を提案した。M 系列パルス圧縮では、受信信号の符号列と参照信号の符号列が一致する場合にのみ大きな相関ピークが生じる、つまり時間方向の信号エネルギーが振幅方向に圧縮されるため、M 系列の符号数に応じて S/N が向上する。これまでに 17 次 M 系列符号 (131,071 個の 1 または -1) を使用することで、踵を透過した超音波の検出に成功している。

## 2. 研究の目的

非接触での SOS 計測を実現するには、生体を透過した超音波の伝搬時間 (TOF)、空気中および生体内での伝搬経路長をそれぞれ高精度で計測する手法を確立する必要がある。本研究では、対象部位を踵 (踵骨) として、図 1 のように振動子間に踵がある場合と無い場合の

TOF 差, 空気中および踵内での伝搬経路長, 空気中の SOS を計測することで踵内の SOS を求める手法について検討を行う。また, 空気中と生体内では SOS が 4 倍以上異なるため, 超音波は体表面で大きく屈折することになる。そのため, 図 2 のように踵側面の傾斜角度を計測し, 超音波の伝搬経路を適切に調整する必要がある。

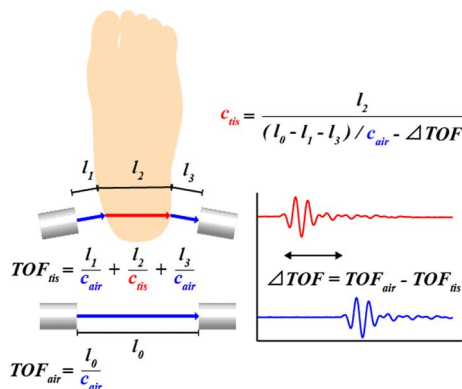


図 1: 踵内 SOS の計測方法

### 3. 研究の方法

(1) 通常, 受信信号から実際の TOF である超音波時間波形の立ち上がりを決定することは困難である。そのため, 振動子間に踵がある場合と無い場合それぞれの時間波形のゼロクロスポイントの差から TOF 差を推定する手法について検討を行う。

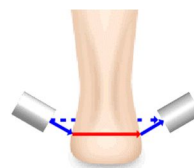


図 2: 踵を透過する超音波の屈折

(2) 伝搬経路長計測では, 振動子・踵側面間の距離を計測するレーザ距離計を振動子の両側に配置する構成を検討する。さらに, 振動子とレーザ距離計が同時に回転する機構を用いることで, 踵側面の傾斜角度も計測することができる。最終的には, 開発した計測システムの性能評価を行うため, 向かい合う側面が 1 方向に傾斜した生体模擬ファントムの SOS を非接触で計測する実験を行う。

### 4. 研究成果

(1) まず, 側面が傾斜していない寒天ファントムを作成し, ファントムを透過した超音波, 空気中のみを伝搬した超音波それぞれの TOF およびゼロクロスポイントについて評価を行った。それぞれの時間波形におけるゼロクロスポイント付近を拡大したものを図 3 に示す。比較のため, ファントムが無い場合の時間波形は前方にシフトさせている。ファントムの有無でゼロクロスポイントの間隔 (信号周期) が異なっており, 各ゼロクロスポイント差と実際の TOF 差も異なっていることがわかる。これは媒質の減衰特性や伝搬距離の違いによって, 時間波形の中心周波数が変化するためと考えられる。そこで, 各ゼロクロスポイント差の多項式近似によって実際の TOF 差に相当する “0 番目” のゼロクロスポイント差を推定する手法を提案した。

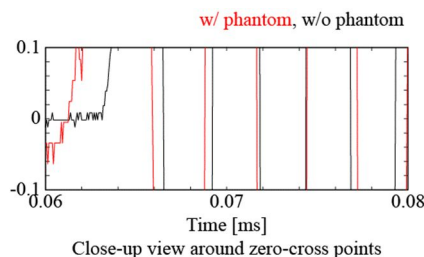


図 3: 時間波形におけるゼロクロスポイント付近の拡大図

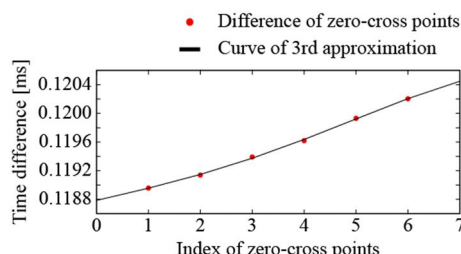


図 4: ゼロクロスポイントの多項式近似による TOF 差の推定

(2) 続いて, 図 5 のように振動子とその両側に配置したレーザ距離計が水平方向に回転する計測システムを開発した。ここでは, ファントムの側面でレーザ光が反射するように, 寒天ファントムではなく図 6 のような OST 社製 WRTMM ファントムを用いて SOS の非接触計測

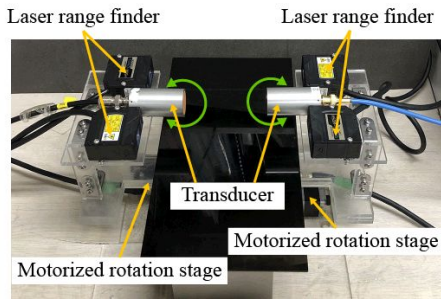


図 5: 作成した計測システム

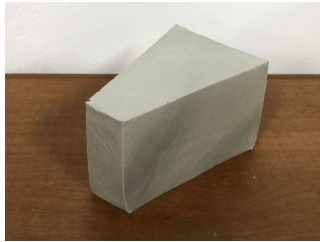


図 6: OST 社製 WRTMM ファントム

を行った。また、比較として平行な側面に振動子を接触させた状態での SOS 計測も行った。実験パラメータ、各種設定については表 1 に示す。接触および非接触で SOS を計測し、ファントムの温度による補正を行った結果を図 7 に示す。公称値 1520 m/s のファントムではそれぞれ  $1535 \pm 0.70$ ,  $1540 \pm 2.74$  m/s, 1540 m/s のものではそれぞれ  $1553 \pm 2.07$ ,  $1563 \pm 5.46$  m/s という結果が得られた。いずれの計測においても +20 m/s 程度の誤差が発生したため、その要因について考察を行った。TOF 差の計測誤差によって SOS が変化する場合、このようなオフセットではなく、ばらつき（標準偏差）として観測される。仮に、ファントムを置かない場合に振動子間の多重反射から計測する空気中の SOS が要因（実際には振動子間隔の誤差）と考えると、接触での計測において +0.8 m/s、非接触での計測において +1.2 m/s の誤差に相当する。また、レーザ距離計で計測する伝搬経路長が要因と考えると、-0.2 または +0.23 mm の誤差に相当する。このようなオフセット誤差は、計測システムにおける位置精度の向上や、既知のサンプルを用いた校正によって低減することができる。

(3) 本研究では、生体内の音波伝搬特性を非接触で計測することを目的として、向かい合う側面が 1 方向に傾斜した生体模擬ファントム内の SOS を非接触で計測するシステムを開発した。透過した超音波の TOF を高精度で推定する手法、振動子とレーザ距離計の回転機構を用いてファントム側面の傾斜角度と振動子・ファントム間距離を同時に計測する機構を提案し、SOS を ± 数 m/s の精度で計測することに成功した。

表 1: SOS 計測の実験条件

WRTMM ファントムの公称値	
SOS	1520, 1540 m/s at 29.5
減衰	0.94 dB/cm/MHz
密度	1070 kg/m <sup>3</sup>
超音波振動子	
B0.6K20N (ジャパンプローブ)	
送信する超音波	
周波数	555.5 kHz
電圧	140 V <sub>pp</sub>
M 系列符号	13 次
変調方式	正弦波 1 波/1 符号
レーザ距離計	
ZX0-LD50A61 (OMRON)	

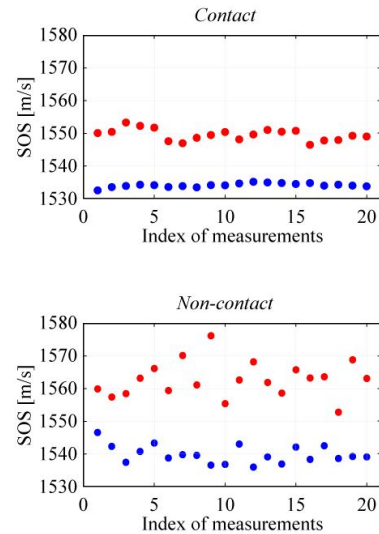


図 7: SOS の計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 平田慎之介
2. 発表標題 生体を透過した空中超音波による非接触音響特性計測
3. 学会等名 第18回千葉大学医工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Evaluation of non-contact measurement for acoustic properties in tissue-mimicking phantoms with inclined sides
3. 学会等名 The 41st Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Khanistha Leetang, Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Evaluation of ultrasonic target detection by alternate transmission of different codes in M-sequence pulse compression
3. 学会等名 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保俊朗, 平田慎之介, 蜂屋弘之
2. 発表標題 異なる音響特性を持つ生体模擬ファントムの非接触音波伝搬速度計測の評価
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Khanistha Leetang, Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Evaluation of codes selection in alternate transmission of difference codes in M-sequence pulse compression for ultrasonic target detection
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiaki Okubo, Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Comparison of contact/non-contact measurement of speed of sound for a tissue-mimicking phantom with inclined sides
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Khanistha Leetang, Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Target detection using airborne ultrasound alternately modulated by different M-sequence codes for extension of measurable distance
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保俊朗, 平田慎之介, 蜂屋弘之
2. 発表標題 側面が傾斜した生体模擬ファントムの非接触音波伝搬速度計測における精度検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Khanistha Leetang, Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Study on modulation method for alternate transmission of different codes in M-sequence pulse compression
3. 学会等名 The Acoustical Society of Japan 2019 Spring Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保俊朗, 平田慎之介, 蜂屋弘之
2. 発表標題 非接触QUSにおける周波数減衰特性の精度検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平田慎之介, 蜂屋弘之
2. 発表標題 非接触QUSにおける側面が傾斜した生体模擬ファントムに対する計測手法の検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保俊朗, 平田慎之介, 蜂屋弘之
2. 発表標題 非接触QUSにおける周波数減衰特性の計測手法の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会・日本音響学会 超音波研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Measurement accuracy of speed of sound in tissue-mimicking phantom using path-through airborne ultrasound
3. 学会等名 The 39th Symposium on Ultrasonic Electronics, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Khanistha Leetang, Shinnosuke Hirata, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Study about combination types of M-sequences in alternate transmission of different codes for pulse compression
3. 学会等名 The 39th Symposium on Ultrasonic Electronics, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinnosuke Hirata, Daisuke Hanawa, Hiroyuki Hachiya
2. 発表標題 Study about non-contact measurement of the speed of sound in a parallel-sides tissue using pass-through airborne ultrasound
3. 学会等名 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平田慎之介, 蜂屋弘之
2. 発表標題 生体模擬ファントムを透過した空中超音波による非接触音響特性計測の精度検討
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

千葉大学フロンティア医工学センター超音波グループホームページ  
<http://www.cfme.chiba-u.jp/~umi/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	蜂屋 弘之  (Hachiya Hiroyuki)  (90156349)	東京工業大学・工学院・教授    (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
英国	Imperial College London		