平成 24 年度工学系共通経費による顕彰と研究助成 成果報告書

所属	機械制御システム専攻
研究者 (ふりがな)	平田 慎之介(ひらた しんのすけ)
タイトル	空中超音波による生体内音波伝搬を用いた in vivo 骨評価の検討
助 成 名	新任助教研究助成
採択金額	1,000,000 円

研究の背景

現在,生体を伝搬する超音波の減衰や速度から,伝播経路の弾性的性質や組織構造を定量的に診断する 手法は,低侵襲,X線被曝の心配がないという特徴から広く普及している.なかでも踵骨などの海綿骨内 を伝搬する超音波の速度や減衰から骨量,骨質を定量的に評価する手法は,健康保険が適用される骨粗鬆 症診断において盛んに臨床応用がなされている.一般的な超音波診断では数 MHz という周波数帯の超音波 が用いられるが,このような超音波は空気中において著しく減衰してしまう.また空気と生体など音響特 性が大きく異る媒質間を伝搬する場合,それらの境界面において大きな反射が発生してしまう。そのため 診断時には,振動子に超音波検査用ジェルを塗り被検査部位と接触させるか,水中で検査を行わなければ ならない.超音波の伝搬経路を水など音響特性が生体に近い物質で満たすことで,十分な強度の超音波を 生体内に伝搬させることができる.本研究では,空気中から生体に超音波を照射し,非接触で生体内の音 響特性を計測する従来とは異なる手法を提案し,その基礎的な検討を行なっている.

結果と考察

空気中での減衰が比較的少ない二百 kHz 以下の周波数帯の超音波を用いて, Fig. 1 のように踵を透過し

た空中超音波の測定を試みた.送信する超音波は 166.7 kHz とし, M 系列 符号を用いて振幅変調を行った.M 系列を用いるパルス圧縮では,M 系列 の次数 n によって約 3×n dB の S/N 向上が期待できる.踵を透過した超音波 は微弱であるため,まずプリアンプによって 60 dB 増幅し,サンプリング 周波数 2 MHz で PC に取り込んだ後,相互相関処理を行った.18 次 M 系 列を用いて測定を行った場合の受波信号を Fig. 2 に示す.送受信器間に何 も配置しない場合,0.21 ms 付近より受信した超音波を確認することができ る.一方,送受信器間に足を挿入した場合,0.1 ms 付近より踵を透過した 超音波が確認できる.生体内での超音波の伝搬速度は 1500 m/s 程度と空気

Transducers: both side of heel Calcaneus Heel Transducer: vibration plane

Fig. 1: Measurement method of bone properties at a heel.

中の約 4.5 倍である. そのため超 音波が約 50 mm の踵を透過した 場合,その伝搬時間は 0.11 ms ほ ど短くなると考えられる. よっ て,踵を透過し,100 dB 以上減衰 した空中超音波を測定すること ができたと考えられる.



踵内は軟組織, 踵骨を構成する皮質骨, 海綿骨などが不均質に分布するため, 骨粗鬆症診断に用いられ る海綿骨内を伝搬した超音波の抽出, 評価を行うには, 超音波の伝搬特性を解析する必要がある. そのた め有限差分時間領域法 (FDTD 法) を用いた 2 次元音場計算によって不均質な踵内の音波伝搬解析を提案 した. 音響 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. 音響 FDTD 法では, 空間グリッド Δg, 時間グリッド Δt を 適切な値に設定する必要がある. しかし Δt は最も伝搬速度の速い踵骨を基準に設定するため, 伝搬速度が 10 倍以上遅い空気中では Δg に対する Δt が非常に小さく, 位相速度の遅れによる数値分散が発生してしま う. そこで音響 FDTD 法における数値解析の誤差について定量的な評価を行った. 解析空間は Fig. 3 のよ うに幅 120 mm, 高さ 100 mm とし, Δg はまず 0.1 mm とした. 左右の境界面は Higdon2 次吸収境界条件に

よる吸収境界,上下および振動子周囲の境界面は全反射する反射 境界とした.温度 20 ℃空気の体積弾性率,密度はそれぞれ 1.42×10⁵ Pa, 1.2 kg/m³としたため,空気中の伝搬速度は 344 m/s となる.振動子より送信する信号は 166.7 kHz の正弦波 5 波とし た. Δt を適切な値である 206 ns から 20.6 ns まで小さくした場 合の,受波信号の誤差を Fig.4 に示す.なお受波信号の誤差は出 力音圧で規格化を行なっているため,送波信号と同程度の数値分 散が発生していることがわかる.しかし位相遅れによる数値分散 は Δg を十分小さくすることで低減することができる.そこで Δg

は0.02 mm とした場合の,受波信号の誤 差をFig.5 に示す.信号の立ち上がり時, 立ち下がり時のリンギング誤差を除く と,数値分散が出力音圧の数%程度まで 低減できていることがわかる.よって音 響 FDTD 法を用いて踵内の音波伝搬解析 を行う場合, Δg を 0.02 mm (波長の 1/100 程度)以下にすることで解析誤差を低減 することができる.







結論と今後の課題

踵を透過した空中超音波による非接触での踵骨評価を提案し、その基礎的な検討を行った.まず基礎実 験では、プリアンプによる 60 dB の増幅、信号処理による 54 dB (18 次 M 系列)の S/N 向上によって踵を 透過した空中超音波を測定することができた.また踵を透過した超音波の減衰を受波信号より見積もった ところ約 100 dB であった.次に踵内の音波伝搬解析を行うため、音響 FDTD 法の数値分散について検討を 行った.解析領域内における超音波の伝搬速度が 10 倍以上異なる場合、伝搬速度の遅い領域では位相遅れ による数値分散が発生してしまう.しかし空間グリッドを波長の 1/100 以下にすることで、解析誤差を出力 音圧の数%程度まで低減できることがわかった.今後は、踵骨を伝搬した超音波の抽出とその伝搬速度計 測、踵内の詳細な音波伝搬解析を行い、空中超音波による骨密度計測の可能性、有用性の検証を行う.

使用内訳書		
費目	内訳	金額
備品1	1/8インチ計測用コンデンサマイクロホン一式	444, 150
消耗品		247, 423
旅費	IUS2013(ドレスデン)	262, 140
その他	IUS2013 参加費	46, 287
合 計		1,000,000

記入上の注意: 備品は、品名ごとに記入。 差額が生じた場合は、消耗品で調整。 消耗品を購入しなかった場合は、経費の差額と補填した予算科目名を合計額の内訳欄に記入。