

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630166

研究課題名(和文) 脊髄損傷リスク回避のための超音波反射法による脊椎内イメージングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of imaging system to avoid spinal cord injury risk by using ultrasound reflection method

研究代表者

森谷 祐一 (MORIYA, HIROKAZU)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60261591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：骨内イメージングが可能であることを確認するため、単一振動子の素子を制作し、実際の骨を用いた反射波測定実験と反射波データの取得ができるようにした。食用牛の脊椎を用いた反射波計測実験を実施し、孔底と素子間の多重反射の状況、脊椎内部からの反射波、散乱波の状況等を検討した。直接反射波除去フィルターを開発した。超音波の中心周波数を3.5MHz、10MHz、15MHzで検討し、1mmから3mmの骨厚を測定する場合、10MHzが最適であることを明らかにした。本研究で得られた結果を基に、脊椎穿孔時のモニタリングシステムと方法に関する特許出願準備を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed several different ultrasound sensors and carried out the experience using bone to confirm that it is possible to detect reflection wave from opposite surface of bone. We have investigated the reflection waves from the bottom of drilling hole, opposite surface of bone, multiple reflection between the bottom of drilling hole and sensor, and scattering waves. We have develop a filter to remove the signal induced by input pulse by using polynomial function. Three types of sensors with a center frequency of 3.5MHz, 10MHz and 15MHz were manufactured and used to detect the thickness of bone, and it has been confirmed that the sensor with a center frequency of 3.5MHz is better to detect the bone thickness from 1mm to 3mm. We are preparing for a document to obtain the patent of a monitoring system including ultrasound reflection method.

研究分野：計測工学

キーワード：超音波 反射波 脊椎

1. 研究開始当初の背景

脊椎(背骨)疾病の手術療法の一つとして後方除圧固定術がある。本手術では、エアドリルを用いたの脊椎掘削、穿孔内への金属ネジ挿入、金属棒による背骨の固定を行う(図1)。この際、掘削ドリルの先端が周囲の神経や脊髄神経根を損傷し、下半身麻痺等の極めて深刻な事態を起こすことがある。このため脊椎外科医は多数の手術経験を有する熟練者であることが必要である。もし、脊椎手術において掘削した孔の壁や孔底から、未切削部の骨の厚さや脊椎内部構造をリアルタイムに計測することが出来れば、ドリルの貫通による脊髄損傷を防止することができる。X線CTをモニターしながらの手術方法も提案されている。しかし、この方法は、衛生面、施術者への安全(被ばく)、簡便性において問題がある。高齢化に伴う脊椎の手術件数の増加、熟練医の不足、施術者への安全の見地から、脊椎内部構造のイメージングと脊椎切削のナビゲーションの双方が可能なシステムの開発が臨床現場で強く望まれている。超音波は、非侵襲性で安全性も高いことから、エコーによる腹部、心臓、乳腺等の検査で広く使われている。また、整形外科分野では、腫瘍、軟部組織小児疾患および骨粗鬆症の検査で使用されている。しかし、超音波反射法による骨内構造計測はこれまで行われていない。一方、研究代表者らは、弾性波を用いた地熱貯留層計測で実績をあげており、これまで、誘発微小地震を用いた反射法による地下構造計測法に関する研究を行い、低S/N下での微小反射波信号検出法、ならびにマイグレーション処理による反射面画像化法の開発を行ってきた。不均質媒質を対象とする地下計測で用いられている固体内部構造計測のための原理、計測システム、信号処理法は、医療分野での計測でも利用可能であり、両技術の融合による新たな計測法と計測システムの開発が望まれている。

2. 研究の目的

湿潤状態下であり、かつ厚さが数ミリメートルであれば、10 MHz以上の超音波であっても骨内を透過することが可能である。したがって、実用的な距離分解能での骨内構造計測が原理的に可能である。本研究では、申請者らのこれまでの研究成果を基礎にして、手術時の脊髄損傷リスク回避のための超音波による脊椎内構造のイメージングシステムの開発を目的とする。特に、脊椎穿孔時の孔壁や孔底から周囲の靭帯や神経根等までの距離(骨厚)、および未切削部の骨の内部構造を高精度に測定し、脊椎切削時のナビゲーションを行えるシステムの開発を目指す。

3. 研究の方法

(1) 高分子膜振動子を有する超音波送受信素子(プロトタイプ)の設計と製作

直径5 mm程度の孔に挿入可能な素子を設

計・制作する。骨内イメージングが可能であることを確認するため、まずは単一振動子の素子を制作し、実際の骨を用いた反射波測定実験と反射波データの取得ができるようにする。骨との音響カップリングを考慮して送受信素子は高分子膜とする。

(2) 脊椎を用いた計測実験とデータ取得

国内では人骨を用いた検討は困難であることから、食肉業者から入手可能な食用牛の脊椎を使用する。牛の脊椎は、人間の脊椎と同様の構造であり、サイズも近いことから実験には最適である。本実験では、エアドリルにより切削・穿孔した試料を作製し、反射波計測実験を行う。手術中の穿孔時には、孔内が水で満たされることから、反射波計測は湿潤状態で行う。

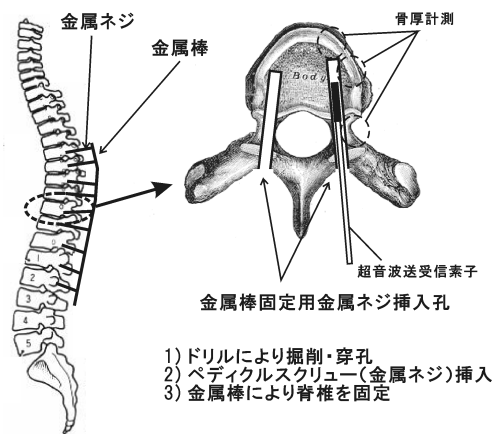


図1: 実装時の計測の概念図。

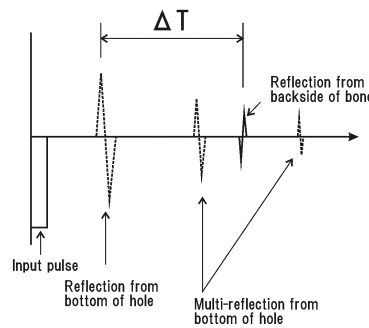
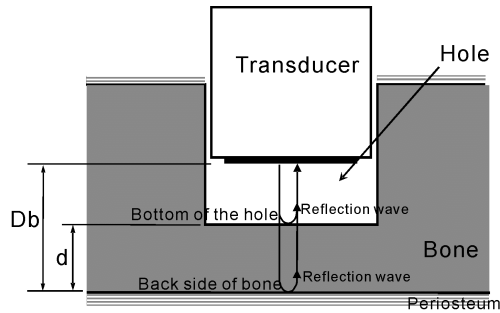


図2: 反射波計測の概念。

ゲルを満たした穿孔内に超音波送受信素子挿入し、パルス波を送信した際の孔内・骨内からの反射波、散乱波を計測する。この際、

送受信面と穿孔内の骨が接触する状態と接触しない状態、孔底面に対して角度を与えた場合等の様々な状況下でデータを取得し、素子と骨とのカップリング、孔底と素子間の多重反射の状況、脊椎内部からの反射波、散乱波の状況等を詳細に検討する。

(3) マイクロCTによる試料の解析と超音波計測による結果との比較

マイクロCT等により穿孔した試料の測定を行い、未切削の骨の部分の内部構造、骨厚を測定し、その結果と超音波による測定結果と比較、検討する。

超音波送受信素子と骨とのカップリング法、音響カップリング材、走査必要性の有無、中心周波数等の検討。

(4) 反射波抽出のための信号処理法の検討

入力パルスと反射波間の時間差が小さいことから、受信波から入力パルス除去フィルタを開発する。ここでは、多重反射波の除去が主要課題となる。これまでの予備実験では、エネルギーの大きな多重反射波が波形上に複数出現するものの、多重反射波は波形上に等時間間隔で出現しており、同定は比較的容易であることが明らかになっている。よって、多重反射波の性質を利用した除去法を開発する。多重反射波除去法、骨底からの反射波と孔底からの反射波検出法、骨底からと孔底からの反射波を分離、抽出する方法の検討を行う。

(5) 反射波を使用した骨内構造イメージング法の検討

地下探査で用いられている反射波によるイメージング法(パルス圧縮、ディフラクションスタックマイグレーション、重合)を応用した、骨構造や骨底面のイメージング(Bスキャンに相当する画像)について検討する。

(6) 骨厚計測のための装置の設計

これまでの解析結果をもとに、最適なカップリング材、ビーム幅、走査方法、中心周波数等の決定する。設計し直した超音波送受信素子を用いた、0.5 mm~0.3 mmの計測分解能を有するリアルタイム計測システムの提案する。ここでは、入力波として1~2 μ s幅のパルス波、計測周波数として10MHz程度を想定する。本研究では、費用の限界からまずは単一センサーを用いた穿孔前方監視の計測システム構築を目指す。穿孔軸方向に対して周方向のイメージングも同時に計測可能となると、施術者にとって極めて有用な情報になる。穿孔前方のイメージングも周方向の骨内イメージングも原理的に同じであるため、装置の設計は、穿孔内前方・周囲のイメージングが可能となるようなシステムを設計する。

4. 研究成果

超音波送受信素子として、直径3mmから5mmまでの複数のセンサーを作成した。送受信面

表面はベークライト製とした。牛骨を用いて、反射波計測実験を行った。実験では、牛の腰椎を使用した。反射波計測実験に先立ち、骨の弾性波速度を測定するために、センサーおよび牛骨を水中に設置し、透過法により骨内弾性波速度を計測した。測定は、皮骨部分が主となる箇所弾性波速度を測定した。その結果 2.5km/sから2.9km/sの値が得られた。次に、ドリルを使用して、直径5mm程度の穿孔を行い、作成された孔にセンサーを挿入して反射波検出実験を行った。実験では、牛腰椎およびセンサーの双方を水中に配置し、計測を行った。腰椎の位置を固定し、センサーの位置を穿孔底に設置しての測定と、センサー位置を移動しながらの測定を行った。反射波抽出においては、入力パルスと反射波間の時間差が小さいことから、誘導により受信信号に重畳する入力パルス波を除去することが必要であった。本研究では、多項式により誘導された信号を近似・予測し、センサーでの受信信号との差を取ることで、低周波成分を中心とした誘導信号を除去する方法を考案した(図3)。

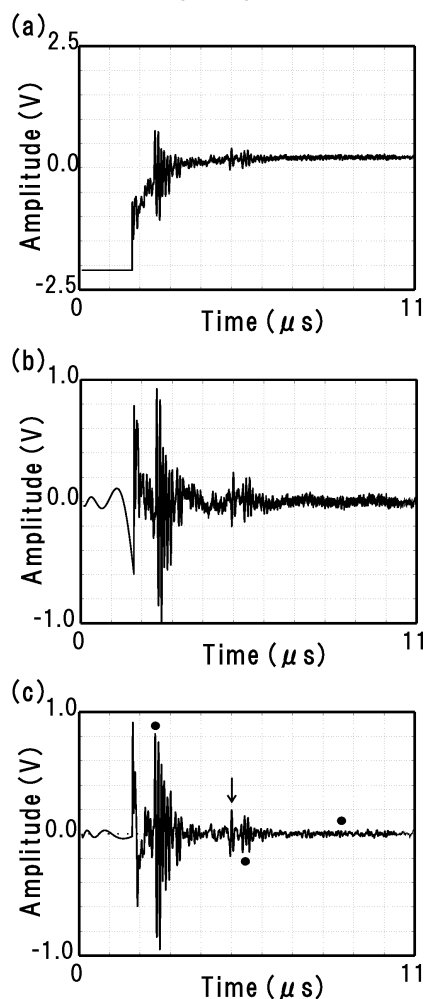


図3: 誘導された入力パルス信号をセンサー受信信号から除去するフィルタの効果。(a)生波形、(b)多項式近似波形によるトレンド除去後の波形、(c)(b)の波形をバンドパスフィルタで処理後の波形。

センサー作成の際より検討事項としていた音響カップリングの問題については、センサー表面をベークライト製とすることとし、骨の音響インピーダンスに近づけるようにし、音波のエネルギーが骨内に浸透するように工夫をした。

穿孔底から反対面までの距離（骨厚）が、0.3mm から 7mm 程度の試料に対して測定を行ったところ、90%以上の試料について、骨の反対面からの反射波を検出することが出来た。骨厚の実測データと比較したところ、1mm 以内の精度で骨厚を検出できた（図 4）。

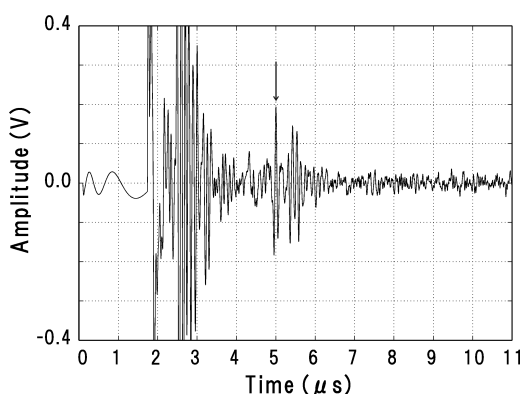


図 4：受信波形の例。矢印の部分が骨の反対側からの反射波。前後の部分は、穿孔底からの反射波と多重反射波。骨厚が 3.5mm の場合。

一方、センサーの挿入位置に依存して、穿孔底からの反射波と骨の反対面からの反射波が重畳し、判別が付かなくなる場合も発生したため、位置やセンサーを向ける方向を微調整する必要があることも明らかになった。脱気をしていない水環境下とゲルを使用した場合の 2 通りで計測を行ったが、気泡によると思われる散乱波が大きくなることもあり、この点も考慮に入れる必要があることも分かった。

製作した複数のセンサーについて、反射波測定実験を実施した。その結果、そのうちの直径が 3mm のセンサーでは、感度が小さすぎることがわかった。また、センサーの減衰比の小さなセンサーでは、穿孔底からの反射波が十分に減衰する以前に、骨反対面からの反射波が到来してしまい、両者の判別が不可能な場合があった。センサーを製作する際に、減衰比は重要なパラメーターであり、薄い骨の厚さを検出するために、出来るだけ減衰比が大きなセンサーを用いることが必要であるとの知見が得られた。

反射波振幅が小さい場合、ならびに、穿孔底からの反射波に重畳し、判別が困難な場合に、目的とする反射波を検出する方法について検討した。本研究では、穿孔底からの反射波の一部を切り取り、その波形を用いた相互相関関数を計算する方法を検討した。目的とする骨の反対側からの反射波は、穿孔底からの反射波に対して逆位相となる原理を利用

したものである。本方法を用いることにより、半自動的に目的とする反射波を検出することができるため、将来有効な方法であると考えられるが、相関関数を計算するためのデータ区間等さらに検討する必要があることが分かった。

以上のような様々な検討の結果、数 mm の厚さの骨であれば、0.5～0.3mm の分解能で反射波を検出できることが分かった。また、留意および解決すべき事項も明らかになった。

本研究で得られた成果を受けて、ペディクルスクリュー挿入を行う外科的処置のためのシステムについて検討を行った。外科手術の場で使用されているシステムに組み込むということを想定したシステムを考案し、特許申請のための書類を作成した。

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）

〔学会発表〕（計 1 件）

山田理顕・森谷祐一、「超音波を用いた骨深度測定の基本実験」、第 125 回中部日本整形外科学会・学術集会、2015 年 10 月 3 日、ウインクあいち（愛知県産業労働センター）、名古屋。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森谷 祐一（MORIYA HIROKAZU）

東北大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 60261591