

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	山田桂輔
論文題目	Improving the Reliability of Ultrasound Evaluation of Articular Cartilage for Clinical Applications (関節軟骨超音波定量評価法の臨床使用を考慮した信頼性向上)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、生体関節軟骨を低侵襲かつ定量的に評価する手法の一つである超音波評価法の、臨床使用における諸問題の解決方法を提案し、その評価を行っている。</p> <p>第1章は序論であり、臨床における関節軟骨評価の必要性、関節軟骨超音波評価法の概要、その問題点等が概説されている。</p> <p>第2章では、軟骨病変による超音波伝播速度の低下を、軟骨表面からの超音波反射率から推定する方法が提案されている。様々な酵素処理によって疑似的な軟骨病変を作成し、軟骨中の音速を超音波反射率から計算し、測定された軟骨厚さをニードル法を用いて測られた軟骨厚さと比較している。その結果、音速に規定値を用いた場合に約7%の誤差が発生したが、本方法を用いることにより、測定誤差は約2%に低減している。コラーゲン線維の配行や密度などの内部構造が均一ではなく、層構造を有する関節軟骨においても、病変による音速の低下を反射率から推定し、より正確な軟骨厚さの非破壊測定が可能となり得ることが示されている。</p> <p>第3章では、探査子の保持角度指標として“Rise-to-Peak time”を提案し、生体軟骨等を用いて反射波振幅の補正を行っている。Rise-to-Peak timeは波形の立ち上がり(初期ピークの振幅50%地点)と、最小ピークの後の正のピークの時間間隔として定義されている。Rise-to-Peak timeは角度の増加と共に単調に増加し、反射面の弾性変化はRise-to-Peak timeに影響を与えないことが示された。また、様々な表面粗さを有する試料面を対象として、同様にRise-to-Peak timeを用いて反射波振幅の補正を行った結果、表面粗さが大きくなると、プローブ角度0°付近において、補正による誤差が発生した。以上のごとく、Rise-to-Peak timeは角度の指標として用いることが可能であるが、本法を応用した振幅の自動補正はかえって反射面の表面粗さの情報を見えにくくしてしまう可能性が示唆されている。自動補正ではなく“Rise-to-Peak time”を測定者に提示して、測定者支援をする手法の開発が、正確な測定のために必要であると考察されている。</p> <p>第4章では、測定者がある指標をもとに調整作業をし、指標の収束の認識を作業終了の要件としたとき、作業終了に及ぼす外乱の影響の定量化方法(Acceptance)を提案している。Acceptanceは、外乱のない状態での指標の収束値と外乱の影響下での指標の収束値の差を、指標がとりうる最大変化量で正規化したものと定義されている。その応用例として、超音波探査子の角度調整とその作業終了に及ぼす反射面の表面粗さの影響を“Acceptance”を用いて定量的に評価を行っている。反射波振幅、Rise-to-Peak timeそれぞれの指標に関してAcceptanceを計算した結果、Rise-to-Peak timeを指標とした場合には表面粗さが小さい場合には負のAcceptanceを持たず、粗さが大きい場合でも反射振幅と比較して負のAcceptanceの絶対値は小さくなることを示している。この結果より、Rise-to-Peak timeを角度指標として用いた角度調整は、従来の反射波振幅を指標とした調節と比較して、軟骨病変部の測定回避を起こしにくいと結論している。</p> <p>第5章では、超音波測定を模したユーザテストにより、Rise-to-Peak timeの呈示による角度誤差の低減、測定時間の短縮、軟骨変性部測定回避の抑制等について実測を行っている。測定者にはRise-to-Peak time、反射波振幅を模した指標、外乱の影響を受けない理想的な角度指標のそれぞれが聴覚情報として与えられ、角度調整作業を行う。結果として、Rise-to-Peak timeを角度調整時の指標として用いることにより、角度誤差、位置のずれが有意に減少することが示されている。またこのとき、外乱が変化する方向のみならず、外乱の変化しない方向にも位置ずれの減少が見られるこ</p>			

氏名	山田桂輔
----	------

とを報告している。これは、Rise-to-Peak time の提示によって、実空間から測定者の認知空間への写像過程が改善されたためと考察されている。

第 6 章では、軟骨の表面波を用いた横波速度測定法を提案し、非破壊での軟骨の異方性評価を行っている。生体軟骨を用い、表面波を生体内での関節の生理的摺動方向とその垂直方向に伝播させ、横波速度の測定を行っている。その結果、関節膝蓋面においては、関節の生理的摺動方向に伝播する横波の速度は、その垂直な方向よりも遅く、両者の間には有意な差が見られることを報告している。この横波速度の異方性は関節軟骨が受ける摺動履歴や軟骨の主要な構成要素であるコラーゲン線維の配向と関係していると考察され、非破壊での軟骨組織の異方性評価の可能性が示されている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、生体関節軟骨を低侵襲かつ定量的に評価する手法の一つである超音波評価法の、臨床使用における問題点の解決方法を提案し、その評価を行っている。その要約は以下のごとくである。

1. 軟骨病変による超音波伝播速度の低下を、軟骨表面からの超音波反射率から推定する方法を提案している。様々な酵素処理によって疑似的な軟骨病変を作成し、本法の使用によって軟骨厚さ測定の誤差が低減される可能性を示している。

2. 関節軟骨超音波評価が徒手測定であることを鑑み、測定波形の時間方向への伸長を定量化した“Rise-to-Peak time”を、超音波探査子の角度の指標として提案し、その有用性を示している。また、本法を応用した振幅の自動補正は、反射面の表面粗さの情報をかえって見えにくくしてしまうことから、“Rise-to-Peak time”を測定者に提示することによって測定を支援する手法が、正確な測定のために適切であると示唆している。

3. 検査者がある指標をもとに角度の調整作業をするとき、外乱が指標に影響を与える状況下においても、目的とする角度において指標の収束を感じて作業終了に至るか、の指標として acceptance 値を提案している。その応用例として、Rise-to-Peak time を角度指標として用いた探査子角度調整が、従来の反射波振幅を指標とした調節と比較して、軟骨病変部の測定回避を起こしにくいことを、定量的に示している。

4. 超音波測定を模したユーザテストを行い、Rise-to-Peak time を角度調整時の指標として用いることにより、角度誤差、位置のずれが減少することを示している。またこのとき外乱が変化しない方向にも位置ずれの減少が見られることを報告しており、操作対象の認知空間への写像過程が改善されたものと考察している。

5. 関節軟骨の表面波を用いた横波速度測定を行い、関節軟骨の摺動方向に伝播する横波の速度が、摺動方向に垂直な方向と比較して有意に低いことを示している。この横波伝播速度の異方性は軟骨の主要な構成要素であるコラーゲン線維の配向と関係していると考察しており、非破壊での軟骨組織の異方性評価の可能性を示唆している。

以上のごとく本論文は、臨床における超音波軟骨評価方法の諸問題に対して新しい解決方法を提案し、定量的にその有用性を評価している。その工学的アプローチは真摯であり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成23年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。