

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 Ranasinghe Rajapaksha Wasala Mudiyanseelage Surangika Imanthi Wadugodapitiya  
学位 博士 (保健学)  
学位記番号 新大院博 (保) 甲第 37 号  
学位授与の日付 令和 2 年 3 月 23 日  
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
博士論文名 A study on stiffness of the joint capsule and collateral ligaments of the knee using ultrasound strain elastography

論文審査委員 主査 小林 公一  
副査 笹本 龍太  
副査 李 鎔範  
副査 坂本 信

博士論文の要旨

本研究は、ストレイン超音波エラストグラフィ (Strain ultrasound elastography: SE) を用いて、ヒト膝の軟部組織である関節包および側副靭帯の剛性を生体内で評価する方法論を確立するとともに、膝の屈曲-伸展動作に伴う両軟部組織の剛性変化を解析することを目的としたもので、博士論文は以下の 5 章から構成されている。

第 1 章「Introduction」では、本論文の理解のために膝関節の解剖や力学的機能について概説するとともに、膝関節包および膝側副靭帯の力学的特性に関して検討された以前の研究について述べた。さらに、超音波エラストグラフィの種類や原理を示し、本研究で使用した SE の独自の測定手法と特徴について論ずることにより、本研究の背景、意義および目的を述べた。

第 2 章「Study of stiffness of the anteromedial knee joint capsule at varying knee angles using strain elastography」では、生体内における膝関節包の剛性を評価するために、SE を用いて、健常 20 代男性 10 名と女性 10 名に対する右膝関節包前内側部の剛性を明らかにした。対象は、健常男性 10 名 (平均年齢: 22.63 ± 1.02 歳, 平均 BMI: 21.84 ± 2.46 kg/m<sup>2</sup>) および女性 10 名 (平均年齢: 21.6 ± 0.8 歳, 平均 BMI: 19.40 ± 1.73 kg/m<sup>2</sup>) の右膝関節包の前内側部とし、測定肢位は膝屈曲角度 0° , 45° , 90° , 120° とした。医療用超音波診断装置の超音波リニア型プローブに音響カプラを装着し、SE による膝関節包のストレイン・レシオ (Strain ratio: SR) を測定した。SR とはカプラの ROI 内のひずみに対する関節包の ROI 内のひずみとの比であり、関節包の SR が小さいほど剛性は高いことを示している。膝屈曲の各肢位でそれぞれ 3 回ずつ測定し、膝屈曲に伴う SR の変化について測定した。なお、あらかじめ膝屈曲角度 0° (伸展位) における検者 2 名による測定を行い、検者内誤差と検者間誤差を統計的手法により算出し、本測定の信頼性が十分であることを確認した。実験結果から、膝関節包の strain ratio 値は同一被検者内の各肢位でおおよそ一定の値を示し、膝関節屈曲角度が大きくな

るにつれて剛性が高くなることが明らかとなるとともに、男性よりも女性の方が関節包の剛性は低いことを示した。

第3章「Study of stiffness of the medial collateral ligament at varying knee angles using strain elastography」では、SEを用いて膝関節屈曲角度変化に伴う内側側副靭帯 (Medial collateral ligament: MCL) の剛性変化を生体内において評価することを目的とした。MCLは浅部内側側副靭帯 (superficial MCL: sMCL) と深部内側側副靭帯 (deep MCL: dMCL) の2束からなっており、dMCLは、さらに半月大腿靭帯 (Menisco-femoral ligament: MF) と半月脛骨靭帯 (Menisco-tibial ligament: MT) に分かれている。対象は健常20代の男女各10名とし、肢位は膝屈曲角度 $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 、 $120^{\circ}$ とした。測定部位は右膝内側部とし、脛骨結節より45mm内側方向、膝蓋骨中心より50mm内側方向とした。本研究では、sMCLを近位部 (Proximal)、中間部 (Middle)、遠位部 (Distal)、dMCLをMFとMTに分割して剛性を測定した。SEでは、超音波診断装置のリニア型プローブに音響カプラを装着し、プローブを皮膚表面から1秒間に2回程度の繰返しの圧迫力を作用させ、靭帯のSRを測定した。本実験では、男性の膝屈曲角度 $0^{\circ}$  (伸展位) における検者2名による測定を行い、検者内誤差と検者間誤差を統計的手法によって算出し、本測定の信頼性をあらかじめ確かめた。その結果、級内相関係数 ICC (1, 3) および ICC (2, 3) は0.6以上であることから、本測定手法から得られたSR値の信頼性は十分であると判断した。膝関節屈曲角度の増加に伴い、sMCLのSRの値は大よそ増加し、剛性は低くなる結果を得た。すなわち、MCLは膝伸展に伴って緊張し、剛性が高くなることが確認された。また、近位部は $0^{\circ}$  ~  $60^{\circ}$ 、中間部は $0^{\circ}$ 、遠位部では $0^{\circ}$  ~  $30^{\circ}$  において男女間の有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められ、女性のSR値は男性より高い、すなわち、女性のsMCLは男性と比較して剛性が低い結果が得られた。MFのSRは男女の差はほとんどみられなく、有意差は認められなかった。一方、MTのSRは女性の方が男性より高く、 $60^{\circ}$  ( $p < 0.01$ )、 $90^{\circ}$  および  $120^{\circ}$  ( $p < 0.05$ ) で有意差が認められ、女性のMTは男性よりも剛性が低いことを明らかにした。

第4章「Study of stiffness of the collateral ligaments at varying knee angles using strain elastography」では、SE法を用いて、健常男性18名 (合計36本の靭帯) の膝屈曲角度変化に伴う内外側の側副靭帯であるMCLおよび外側側副靭帯 (Lateral collateral ligament: LCL) の生体内における剛性変化を解析した。測定肢位は仰臥位で膝屈曲角度 $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 、 $120^{\circ}$ とした。本研究ではsMCLを近位部、中間部、遠位部に、dMCLはMFとMTに分割して剛性を測定した。また、LCLについては、sMCLと同様に近位部、中間部、遠位部に分割して解析を行った。本研究では、膝屈曲角度 $0^{\circ}$  (伸展位) における検者2名による測定を行い、検者内誤差と検者間誤差を統計的手法によって算出し、いずれの測定部位においても ICC (1, 3) および ICC (2, 3) は0.6以上であることから、本測定手法から得られたSR値の信頼性は十分であると判断した。膝関節屈曲角度の増加に伴い、sMCLおよびdMCLのSR値は大よそ増加し、剛性は低くなる結果を得た。すなわち、MCLは膝伸展に伴って緊張し、剛性が高くなることが確認された。また、LCLは膝屈曲から伸展過程を通して変動しながら剛性が高くなる挙動を示した。LCLは膝屈曲から伸展過程を通して、変動しながら剛性が高くなる挙動を示すことを明らかにした。

第5章「Conclusions」では、本研究で得られた結果を総括するとともに、本研究の有用性を述べた。

### 審査結果の要旨

ヒト膝関節は、体内において最大かつ最も複雑な運動機能を有することから、疾患が多い関節である。膝関節の安定性には関節包や靭帯等による軟部組織の影響が大きく、これら軟部組織は疼痛を発生する重要な部位でもある。

本研究では初めに、生体内における膝関節包の剛性を評価するために、SEを用いて、健常20代男性10名と女性10名に対する膝関節包前内側部の剛性を明らかにした。実験結果より、平均SRは膝伸展位 $0^{\circ}$ では男性が $1.65 \pm 0.15$ 、女性が $1.58 \pm 0.16$ 、屈曲 $45^{\circ}$ では男性が $0.88 \pm 0.15$ 、女性が $0.91 \pm 0.15$ 、屈曲 $90^{\circ}$ では男性が $0.49 \pm 0.10$ 、女性が $0.60 \pm 0.14$ 、屈曲 $120^{\circ}$ においては男性が $0.32 \pm 0.11$ 、女性が $0.42 \pm 0.12$ であり、男女のSRの有意差は膝屈曲角度が $90^{\circ}$ と $120^{\circ}$ において認められたと述べている。これは、男性と比較して女性の関節包の方が剛性は低いことを示しており、アキレス腱や膝蓋腱においても同様の傾向があり、エストロゲンの影響と推測した。また、男女ともに関節屈曲角度の増加に従って膝関節包のSRは小さくなり剛性は高くなる結果を得た。これは、関節屈曲に伴い関節包前方に作用する張力が増加し、剛性が上昇したためと結論付けている。

一方、SEを用いて膝関節屈曲角度変化に伴うMCLの剛性変化を生体内において評価した研究では、健常20代の男女各10名の膝屈曲5肢位に対するMCLの剛性の変化を検討した。その結果、MCLのSR値は膝屈曲から伸展にしたがい減少して、剛性が高くなることを示した。また、女性のMCLのSRの値の方が男性より高くなる、すなわち、剛性が低いことを明らかにしている。

SE法を用いた膝屈曲角度変化に伴うMCLおよびLCLの剛性変化の解析では、MCLのSRは膝屈曲から伸展にしたがい減少して、剛性が高くなることが示した。さらに、LCLは膝屈曲から伸展過程を通して、変動しながら剛性が高くなる挙動を示すことを明らかにしており、力学的機能が不明であった靭帯の特徴を生体内において初めて明らかにした貴重な結果である。

本博士論文に関する研究は、国際学術雑誌2件に掲載されており、関連する研究はすべて4件の国際会議で発表されている。

以上の本論文は、博士（保健学）の博士論文として十分な内容を有するものと判定した。