

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 近藤 達也
学位 博士 (保健学)
学位記番号 新大院博 (保) 甲第 36 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 MRI による膝関節と軟部組織における生体内力学的機能に関する研究

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、コントラストの優れた画像を取得できる MRI を用いて、膝関節と軟部組織における生体内力学的機能を 3 次元的に解析することを目的にした研究である。

第 1 章「緒論」では、本研究の背景、意義および目的を述べた。膝関節の構造は複雑であり、複数の組織が膝関節の安定に寄与している。膝関節は安定性の悪い荷重関節であり、疾患の多い関節であるため、膝関節の生体内力学的機能を解析することは重要である。本研究では MRI を用いて、軟部組織を直接評価する手法の提案を行い、膝関節の安定に寄与する PCL と膝関節伸展機構の一部である膝蓋腱の変形挙動に着目し解析を行うことを述べた。

第 2 章「膝関節の構造と機能解析」では、本論文における結果を十分に考察するために必要な膝関節および PCL の基礎的な知識について述べた。さらに、膝関節を対象に行われる運動解析についても述べた。従来、PCL や膝蓋腱などの軟部組織を対象にした研究は *in vitro* で多く行われてきたが、*in vivo* における研究は不足している。*in vitro* における研究では、筋肉の緊張状態などの *in vivo* の状態を再現することが困難であるため、*in vivo* における研究が望まれる。*in vivo* における研究として、カメラや体表に貼付するマーカーを用いて関節運動を解析し、軟部組織の変形挙動を解析する手法が報告されるが、皮膚揺動や筋肉、脂肪の影響があるため、精度に限界がある。また、2 方向フルオロスコープと骨モデルを利用する手法においても軟部組織の評価は付着点位置を基準にした推定により行われていた。

第 3 章「健常膝関節の屈曲に伴う後十字靭帯の生体内特性」では、MRI を用いて *in vivo* における PCL の走行を考慮した長さの測定を行い、膝関節無負荷時における FE から屈曲に伴う PCL の走行を考慮した見かけの長さやひずみについて明らかにした。さらに、PCL の走行を評価するために PCL 仰角と PCL 偏角をそれぞれ求めた。PCL は M と L において長さおよびひずみに違いがあり、ひずみはそれぞれ、M において FE で 0.059 ± 0.031 、膝屈曲角度 60° で 0.068 ± 0.046 、L において膝屈曲角度 60° で 0.130

± 0.033 であったことを示した。

第4章「cine MRIによる膝関節動態解析」では、MRIを用いた新しい関節運動解析法を提案した。運動中に撮像した2D multi slice cine画像と3D画像のイメージレジストレーションで解析を行うため、MRI単独で解析可能であり、放射線被ばくを伴わずに骨を基準とする運動解析が可能である。短時間シーケンスで運動を撮像するため、繰り返し運動以外にも応用が可能であり、関節運動中に撮像したmulti slice cine画像は靭帯の緊張状態を評価可能であったことから軟部組織の評価が可能な手法であった。

第5章「最大努力伸展位における膝蓋腱の変形」では、第4章で提案した手法を用いて、大腿四頭筋の緊張の有無に着目し、膝蓋腱の長さ変化を測定した。先行研究としてMRIを用いて膝蓋腱の変形を解析した研究では、膝蓋腱は腹臥位の伸展位において緩むことが報告されている。一方、2方向フルオロスコープを用いて、立位屈曲運動を対象にした研究において、膝蓋腱は付着点間の直線で近似されるため、膝蓋腱の緩みは考慮されていない。本研究では健常ボランティアの右膝関節を対象に、走行を考慮して脱力時の膝蓋腱長さを測定し、最大努力伸展位における膝蓋腱の長さと比較した。第4章で示したように、短時間の撮像が可能な2D multi slice cine撮像を利用することで、長時間の維持が困難な最大努力伸展位における膝蓋腱の変形が評価できた。その結果、膝蓋腱は大腿四頭筋の脱力時に緩み、大腿四頭筋の緊張時には最大で7%程度伸びた。

第6章「結論」では、本研究で得られた結果を総括するとともに、本研究に関する今後の展望を述べている。

審査結果の要旨

膝関節は疾患の多い荷重関節であり、膝関節の機能解析を3次的に定量評価することは、人が健康的な生活を営む上で重要である。膝関節の痛みはQOLの大幅な低下を招き、歩行という基本動作に大きく影響する。また、スポーツ医学やリハビリテーションへの応用も見込まれる。これまでに行われた膝関節軟部組織の評価は生体外で行われることが多く、生体内で軟部組織を評価することは技術的に困難があった。これまでに簡易的なカメラを用いた手法やマーカーを用いた手法などにより評価した関節運動から軟部組織を評価する方法などが用いられてきたが、精度に限界があった。本研究の目的は、立ち上がりや歩きなどの基本動作に関わる膝関節の軟部組織を3次的に評価することとしている。本研究ではMRIを用いることで、これまで推定で行われていた軟部組織を直接観察し、評価した。具体的には、健常者10名を対象にMRIを用いて、*in vivo*におけるPCLの走行を考慮したPCL長さを測定し、膝関節無負荷時における膝伸展位から屈曲に伴うPCLの見かけの長さやひずみ変化について明らかにした。またPCL走行角度としてPCL仰角と偏角を求めた。その結果、PCLはMにおいては膝屈曲角度20°において最も短くなり、屈曲と伸展に伴い伸びが生じた。また、LにおいてはFEで最も短くなり、屈曲に伴い伸びが生じた。最も短くなった長さを基準とするひずみは、MにおいてFEでは 0.059 ± 0.031 、膝屈曲角度60°では 0.068 ± 0.046 、Lにおいて膝屈曲角度60°では 0.130 ± 0.033 であった。一方、従来の研究で用いられたPCL骨付着点間の直線距離による推定長さはPCLの形状を考慮していないため、長さを過小に評価することから、ひずみを過大評価することが示唆された。また、運動中の軟部組織を評価する手法として、cine MRIを用いた新しい関節運動解析法を提案した。

放射線被ばくを伴わずに、骨を基準とした運動解析が可能であり、短時間シーケンスを利用して運動を撮像することで繰り返し運動以外にも応用できる手法であった。また、関節運動中に撮像した multi slice cine は靭帯の緊張状態を評価可能であったことから軟部組織の評価が可能な手法であった。この手法を応用することで、大腿四頭筋の緊張の有無に着目した膝蓋腱の長さ変化を測定した。cine MRI と静止中に撮像した 3D MRI のイメージレジストレーションを行う解析法により、長時間の維持が困難な最大努力伸展位における膝蓋腱の変形を評価した。膝蓋腱は大腿四頭筋の脱力時に緩み、大腿四頭筋の緊張時には最大で 7% 程度伸びることを明らかにした。

本博士論文に関する研究は、国際学術雑誌 1 件、国内学術雑誌 1 件に掲載されており、関連する研究は、国内・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。