

論文の内容の要旨

論文題目 2D/3D レジストレーション法を用いた膝関節の3次元動態解析

氏名 河野 賢一

日本をはじめとしたアジア地域では床に座ったり、お祈りをしたり、ヨガをしたりするなど日常生活動作において膝関節を深屈曲させることがしばしばみられる。しかしながら、正常膝の日常生活動作におけるキネマティクス（運動学：物体の質量やそれに加わる力を考慮せずに幾何学的に分析された運動）はほとんど明らかにされていない。本研究の目的は生体内3次元動態解析を行って正常膝の深屈曲動作の3次元動的な動態情報を正確かつ定量的に把握することである。我々は仮説として正常膝関節における大腿骨・脛骨間の回旋角度、内外反角度、前後移動、kinematic pathway（膝関節内外側の前後移動を同時に表現したもの）は動作によって異なるのではないかと考えた。

対象は健康成人男性4名8膝とした。側面方向からX線透視装置によってスクワット動作、正座動作、胡坐動作を撮影し、2D/3D レジストレーション法を用いて3次元動態解析を行った。この手法は撮影画像から輪郭強調画像を抽出し、CTから作成した3次元骨モデルを合わせることで空間的位置を推定するというものである。各屈曲角度における脛骨に対する大腿骨の回旋角度、内外反角度、脛骨骨軸に垂直な平面上における大腿骨内側陥凹（内側）及び外側上顆（外側）の前後移動、kinematic pathway を評価した。スクワット、正座、胡坐動作における回旋角度、内外反角度、前後移動については二元配置分散分析及び事後比較 (Tukey-Kramer test) によって解析した。3動作における屈曲0度から屈曲150度までの回旋量、内外反量、前後移動量については一元配置分散分析及び事後比較 (Tukey-Kramer test) によって解析した。p値が0.05未満を有意差ありとした。

スクワットは平均-2.8度 (SD 1.3度) から145.5度 (SD 5.1度) まで屈曲していた。屈曲0度から40度では脛骨に対する大腿骨の急峻な外旋がみられ、平均13.8度 (SD 3.0度) に達していた。屈曲40度からは徐々に外旋し合計で平均22.4度 (SD 6.1度) に達した。正座では膝関節は平均100.6度 (SD 3.7度) から155.7度 (SD 3.0度) まで屈曲していき、脛骨に対して大腿骨が20.2度 (SD 7.2度) 外旋した。胡坐では膝関節は平均4.9度 (SD 4.4度) から147.5度 (SD 4.2度) まで屈曲していった。屈曲10度から100度までは平均11.2度 (SD 6.9度) 大腿骨が内旋していた。屈曲100度から150度では大腿骨の外旋がみられ、22.4度 (SD 7.0度) に達した。深屈曲領域（屈曲100度から150度）における大腿骨の外旋量は胡坐の方がスクワットに比べ有意に大きかった ($p = 0.041$)。内外反角度についてはスクワットと正座で有意差はみられなかった。しかしながら、胡坐は屈曲140度以降内反位になっており、平均-13.5度 (SD 3.7度) に達した。内側の前後移動については、スクワットでは屈曲0度から40度まで内側が11.1% (SD 6.4%) 前方へ移動した。屈曲40度からは34.2% (SD 2.8%) 後方へ移動した。正座では有意な前後

移動はみられなかった。胡坐では屈曲 0 度から 30 度まで 13.8% (SD 4.3%) 前方へ移動し、屈曲 30 度から 120 度では 35.1% (SD 7.3%) 後方へ移動した。屈曲 120 度から 150 度では平均 5.4% (SD 8.3%) 前方へ移動した。三動作間では屈曲 30 度から 110 度にかけて胡坐が有意に後方にあった。外側の前後移動についてはスクワットでは屈曲 0 度から 150 度で外側が 78.7% (SD 11.0%) 後方へ移動した。正座では屈曲 100 度から 150 度で 40.2% (SD 10.2%) 後方へ移動した。一方で胡坐は屈曲 0 度から 100 度では有意な動きはみられず、屈曲 100 度から 150 度で 51.0% (SD 12.3%) 後方へ移動した。三動作間では屈曲 20 度から 130 度でスクワットの外側が有意に後方にあった。スクワットでは内外側の移動の違いにより、屈曲 0 度から 40 度では内側を基点に外側が移動する **medial pivot pattern** を示し、屈曲 40 度から 100 度及び屈曲 100 度から 150 度では内外側共に後方移動する **bicondylar rollback** がみられた。正座では **medial pivot pattern** がみられた。胡坐では内外側の動きの違いにより屈曲 0 度から 100 度までは外側を基点に内側が移動する **lateral pivot pattern** がみられ、屈曲 100 度からは **medial pivot pattern** がみられた。

正常膝のスクワットについてはこれまで静的動作（一連ではない動作）による評価によって大腿骨が緩やかに外旋するということが報告されているが、本研究ではキネマティックパターンに違いがみられた。屈曲 0 度から 40 度まで大腿骨の急峻な外旋がみられ、屈曲 40 度からは緩徐な外旋がみられた。浅い屈曲領域での急峻な大腿骨の外旋は **screw-home motion**（前十字靭帯や大腿骨内顆の関節面形状によって引き起こされる脛骨の内旋（大腿骨の外旋）運動）を表していることが示唆され、中間屈曲領域から深屈曲領域までの緩徐な外旋は **rollback**（大腿骨の後方移動）を表していることが示唆された。このことから、同じスクワット動作であるにも関わらず、静的評価（一連ではない動作の評価）と動的評価（一連の動作の評価）ではキネマティクスに違いがみられることが明らかとなった。三動作間でも屈曲に伴う回旋パターンは有意に異なっていた。さらに深屈曲領域では胡坐における大腿骨の回旋量はスクワットと比較し有意に大きくなっていった。このことから正常膝関節の回旋運動は深屈曲動作によって異なり、回旋幅も大きいことが示唆された。内外反では、深屈曲領域において胡坐では内反位であった。このことから胡坐では深屈曲領域で膝関節に大きな内反ストレスがかかっていることが示唆された。胡坐では屈曲 100 度まで **lateral pivot pattern** を示していた。特に屈曲 30 度から 100 度では内側の後方移動がみられていた。このことより胡坐動作においては正常膝の内側コンパートメントは緩んでいることが示唆された。いくつかの研究では **medial pivot** を誘導する人工膝関節の臨床成績が良好であると報告されているが、本研究の結果を踏まえると、人工膝関節全置換術後の膝のキネマティクスの目標を正常膝のキネマティクスとするのであれば、**lateral pivot** を引き起こすような動作も可能とするデザインを考慮しなければならないと考えられた。深屈曲領域において、スクワットは **bicondylar rollback** を示したが、正座と胡坐では **medial pivot pattern** を示した。このことからスクワットのような荷重動作では大腿骨がより後方へスライドしやすいことが示唆された。

本研究では、2D/3D レジストレーション法により正常膝の生体内 3 次元動態解析を行い、深屈曲動作が異なることでキネマティクスも異なることを明らかにした。特に胡坐では中間屈曲領域で大腿骨が脛骨に対して内旋し、kinematic pathway も屈曲するにつれて lateral pivot pattern から medial pivot pattern に変化しており、スクワット及び正座のキネマティクスとは大きく異なっていた。