

学位請求論文の内容の要旨

論文提出者氏名	機能再建・再生科学 領域 運動機能病態修復学 教育研究分野 氏名 亀井敬太
<p>(論文題目)</p> <p>Ulnar collateral ligament dysfunction increases stress on the humeral capitellum: A finite element analysis (尺側側副靭帯機能不全は上腕骨小頭への応力を上昇させる：有限要素法による解析)</p>	
<p>(内容の要旨)</p> <p>【緒言】</p> <p>肘関節尺側側副靭帯(Ulnar collateral ligament; UCL)は、肘関節外反ストレスに対する最も重要な制御機構である。投球動作において、肘関節に強い外反ストレスが加わることによって、いわゆる野球肘と呼ばれる障害が生じる。内側型野球肘として UCL の牽引力に起因する UCL 損傷が、外側型野球肘としては腕橈関節の圧迫力が関連する上腕骨小頭離断性骨軟骨炎(Osteochondritis dissecans, OCD)が知られている。UCL 損傷は肘関節外反ストレス時の関節不安定性をもたらすが、腕橈関節の圧迫力への影響は明らかとなっていない。有限要素法は、物質の 3D モデルを小さな立体に細分化し、そこにかかる応力を数学的手法により再現する手法である。本研究の目的は、有限要素法を用いて肘関節内側のゆるみを再現し、腕橈関節の応力に対する UCL 機能不全の影響を検討することである。</p> <p>【方法】</p> <p>対象は成人男性 5 名で、肘関節屈曲 90°、前腕回内外中間位にて CT 撮影を行い、そのデータを解析に用いた。有限要素解析ソフト(Mechanical finder®, 計算力学研究センター、日本)を用いて、取得した CT データから 3D モデルを作成し、UCL をトラス要素にて再現した。上腕骨近位部を拘束し、前腕骨 1/2 部を直方体モデルにて固定した状態で 40 N・m の外反トルクが加わるように荷重を行った。正常 UCL の弾性率を 72.3 N/mm と設定して、UCL 機能不全を剛性の低下および UCL の延長による弛緩と仮定して、以下のように材料特性を設定した。UCL を模したトラス要素の剛性を 72.3 N/mm、63.3 N/mm、54.2 N/mm、45.2 N/mm、36.1 N/mm に減じることで UCL のゆるみを再現した。また、UCL が弛緩した状態を応力-ひずみ曲線の Toe region として再現し、Toe region の長さを 0.0 mm から 2.5 mm まで 0.5 mm ごとに設定した。5 つの 3D モデルそれぞれについて、剛性の変化および Toe region の長さの変化による上腕骨小頭の相当応力最大値を計測した。上腕骨小頭の応力分布について、上腕骨小頭を内側から外側へ 4 分割し、内側部を Part A、中央内側を Part B、中央外側を Part C、外側部を Part D と分類し、各部位における相当応力の平均値を求めた。剛性の変化による相当応力最大値の変化および Toe region の長さの変化による相当応力最大値の変化は Friedman 検定を用いて、上腕骨小頭の応力分布の違いの検討には one-way ANOVA 検定および Tukey HSD 法を用いて統計学的に検討した。</p> <p>【結果】</p> <p>UCL トラス要素の剛性による変化では、72.3 N/mm、63.3 N/mm、54.2 N/mm、45.2 N/mm、36.1 N/mm のモデルにおいて、上腕骨小頭の相当応力最大値はそれぞれ 155.3 ± 24.2 MPa、160.2 ± 24.2 MPa、166.2 ± 24.1 MPa、173.8 ± 23.8 MPa、183.9 ± 23.4 MPa であり、UCL の剛性が低下すると上腕骨小頭の相当応力最大値は有意に上昇して</p>	

いた($p < 0.001$)。UCL の Toe region の長さの変化では、Toe region の長さを 0.0 mm から 2.5 mm まで 0.5 mm ずつ変化させたとき、上腕骨小頭の相当応力最大値はそれぞれ 155.3 ± 24.2 MPa、 159.4 ± 25.7 MPa、 161.3 ± 24.6 MPa、 163.1 ± 23.4 MPa、 165.9 ± 23.6 MPa、 167.3 ± 25.6 MPa であり、Toe region の長さが長くなると上腕骨小頭の相当応力最大値は有意に上昇していた($p < 0.001$)。上腕骨小頭の応力分布については、UCL の剛性による変化および Toe region の長さの変化を検討したモデルのいずれにおいても、Part D における応力が最も高かった(すべて $p < 0.01$)。

【考察および結語】

UCL の剛性の低下および弛緩が上腕骨小頭の応力、特に外側部の応力を上昇させることが示された。OCD は成長期野球選手の 1-3% に発症する障害であり、繰り返す機械的刺激が増悪因子の一つである。投球動作は腕橈関節の圧迫力及び剪断力を生じるため、投球動作が上腕骨小頭に与える影響は OCD の病態検討において重要である。繰り返す投球動作は肘関節内側の不安定性をきたすことが報告されているが、その不安定性が UCL を含めた内側支持機構の剛性の低下なのか支持機構の延長による弛緩なのかはわかっていない。しかしながら、本検討により、いずれの病態においても肘関節内側不安定性が投球動作における上腕骨小頭の応力を上昇させる可能性が示唆された。また、OCD は上腕骨小頭外側壁から発症するといわれており、治癒過程のなかで外側から治癒していくとされ、進行期において OCD 病変が外側壁を含んでいる場合は予後不良とされている。本検討において、投球動作では上腕骨小頭外側部に応力が集中することが示されたが、これは OCD 患者において投球継続が上腕骨小頭外側部の治癒を妨げ、予後不良な外側壁を含んだ病変に進行させる可能性があることを示唆している。有限要素法を用いて肘関節外反ストレス時の上腕骨小頭の応力を解析した結果、UCL 機能不全がある場合には応力が上昇し、特に上腕骨小頭外側壁に応力が集中することが示された。