

【要約】

Mechanical effects of wrist position at the wrist joint: a finite element analysis

(手関節肢位が手関節に与える力学的影響について -有限要素解析による検討-)

千葉大学大学院医学薬学府

先端医学薬学専攻

(主任：大鳥精司教授)

野本 堯

《Introduction》

手関節の解剖学的構造は複雑で、8個の手根骨が橈骨および尺骨と関節を形成している。この構造により、広範な可動域と繊細な動作を可能にしている一方で、日常的に大きな負荷にさらされている。手関節への負荷が関節内でどのように伝達・分散されるかについては、長年にわたり研究が行われてきた。しかし、掌背屈および橈尺屈による手根骨の配列変化が、midcarpal joint や橈骨手根関節への負荷分布に与える影響については、未だ不明な点が多い。本研究の目的は、FEAを用いて手関節の各肢位における応力分布を評価し、関節角度の変化が応力分布に与える影響を明らかにすることである。

《Materials & Methods》

対象は10体の新鮮凍結屍体から10上肢を得た。除外基準は、前腕と手部の手術歴、外傷、変形性手関節症、2mm以上のulnar varianceとした。2上肢が除外基準に該当し、8上肢が解析の対象となった。死亡時平均年齢は89.79±7.32歳(74~98歳)であった。

手関節掌背屈位での把握動作を模擬したモデル(以下掌背屈モデル)を作成するため、橈尺屈0°で、掌屈30~背屈30度の15度毎に計5肢位撮影した。手関節橈尺屈位での把握動作を模擬したモデル(以下橈尺屈モデル)を作成するため、Grip位で掌側を水平な台に置いた状態で、橈屈15~尺屈20度の5度毎に計8肢位撮影した。FEAにはMECHANICAL FINDER (Research Center of Computational Mechanics, Tokyo)を用いた。

CTデータから1献体に対して13種類のモデルを作成し、8献体で計104モデル作成した。橈尺骨中央部から中手骨まで骨の関心領域(ROI)を抽出して使用した。3Dモデルは一辺が1mmの四面体要素へ分割し、骨表面の応力解析のために0.3mmのシェル要素を表面に設定した。骨の不均一性を考慮するため、各要素の材料特性は、Matsuyamaらが提案した方程式(Young率 $E=1530.6\sigma^{1.9213}(\sigma>0)$, $E=0.001(\sigma=0)$)。Poisson比は0.4とした。骨と骨の間には軟骨の領域を設定した。中手骨近位、手根骨、橈骨遠位端、尺骨頭のROIを2mm拡大し、ROIを軟骨と交換し、骨間の全空間を軟骨で満たした。軟骨のYoung率は10MPa、Poisson比は0.49とした。軟骨要素の降伏応力は、破壊を避けるために十分に大きく設定した。

橈骨手根関節、尺骨手根関節の軟骨と橈尺骨(橈尺骨遠位と軟骨)の境界面を接触解析し、摩擦のない接触(摩擦係数 $\mu=0$)を使用した。軟骨と骨の接触は接触解析部以外を接着性とみなした。橈尺骨幹部中央を完全拘束した。把握動作での負荷を想定し、中手骨の長軸方向に指ごとに異なる荷重(母指21.3N, 示指10N, 中指8.9N, 環指7.3N, 小指6.4N: 計53.9N)を加えた。

近位手根列、橈骨遠位端、尺骨頭の相当応力、最小主応力、最大主応力の応力分布を、掌背屈角度ごとに、加えて橈尺屈ごとにコンター図で評価した。各肢位別に各部位の応力の平均値を抽出し、各肢位とNeutral position(掌背屈モデルにおいては掌背屈0°, 橈尺屈モデルにおいては橈尺屈0°)との増減割合(%)を部位別に統計的に比較した。

橈骨遠位端を月状骨窩と舟状骨窩、さらに掌側と背側のROIに分割し、各部位の相当応力の平均値を用いて全部位合計値との割合(%)を算出した。掌背屈角度ごとに、加えて橈尺屈角度ごとに、月状骨窩と舟状骨窩、掌側と背側で統計的に比較した。

統計学的手法として、Repeated-Measures ANOVAを実施した。有意差が認められた項目につ

いて、holm 法の多重比較検定を実施した。有意水準は 5%とした。

《Results》

掌背屈モデルにおける関節面応力分布

橈骨遠位端について：相当応力については、関節面中央部に応力が集中し、掌背屈角度の増加に伴い応力値が上昇した。最小主応力については、掌屈位では背側に、背屈位では掌側に応力が集中した。最大主応力については、橈骨遠位端中央部に応力が集中し、掌背屈角度の増加に伴い応力値が上昇した。尺骨頭・三角骨について：相当応力並びに最小主応力は、掌屈すると三角骨掌側と尺骨頭に応力集中し、背屈すると三角骨背側と尺骨頭に応力集中した。舟状骨・月状骨について：相当応力並びに最小主応力は、背屈すると舟状骨の腰部に、掌屈すると舟状骨は背側に応力集中、月状骨は反対に背屈すると背側に、掌屈すると掌側に集中した。最大主応力は月状骨において、掌屈すると関節面と外れた部分（背側）も応力が集中し、背屈すると掌側に移動した。

各部位の応力平均値を **Neutral position** と比較した結果、尺骨頭と三角骨は掌屈でも背屈でも、相当応力、最小主応力、最大主応力すべてにおいて増加していた。月状骨と舟状骨においては、いずれの応力においても、大きな変化はなかった。

橈骨遠位端の相当応力を月状骨窩と舟状骨窩で比較すると、舟状骨窩領域が全体の 60~66%を占めた。掌側と背側で比較すると、背屈すると掌側に、掌屈すると背側に応力が増加した。

橈尺屈モデルにおける関節面応力分布

相当応力と最小主応力について、橈骨遠位端では橈屈すると月状骨窩にかかる力が減少し、尺骨頭および三角骨と月状骨背側部（尺骨頭と相対する箇所）への負荷が上昇した。尺屈すると、尺骨頭に掛かる力が減少し、月状骨窩に掛かる力が増加した。最大主応力について、橈骨遠位端では尺屈すると、月状骨窩掌側に掛かる力が上昇した。

各部位の応力平均値を **Neutral position** と比較した結果、月状骨、三角骨、尺骨頭は橈屈していくと、相当応力と最小主応力が上昇し、尺屈していくと減少した。

橈骨遠位端の相当応力を月状骨窩と舟状骨窩で、そして掌側と背側で比較したが、応力分布は殆ど変化しなかった。

《Discussion》

掌背屈モデルの結果

掌背屈モデルでは、応力分布は掌背屈に伴い多彩な変化をしていた。橈骨遠位端においては、掌屈位では背側に圧縮応力が加わったことで中央に引張応力が加わり、背屈位では掌側に圧縮応力が加わり中央に引張応力が加わったことが推測された。その引張応力が相当応力の増加に寄与していた。Rikli らは健常人の橈骨手根関節にセンサーを埋め込み、手関節中間位で 31N、自動屈曲で 107N、自動伸展で 197N かかったと報告している。しかし、センサーは引張応力を計測できないため、本研究で計測された引張応力を考慮すると実際はそれ以上に負荷が掛かっていると思われた。舟状骨窩領域は月状骨窩領域よりも大きい負荷を受けていた。過去の報告では、

Neutral position での荷重伝達率は概ね舟状骨窩の方が高値であり、同様の結果となった。掌背屈 30°の範囲でもこの比率が維持されており、常に舟状骨の方が月状骨よりも高い負荷を受けていることが推測された。月状骨においては、橈骨と接触する部位に応力集中し、舟状骨は異なる応力分布を示した。舟状骨の応力の平均値は掌背屈によって変化しなかったが、背屈位で舟状骨腰部に応力が集中していた。Majima らは、3次元剛体バネモデルを用いた研究を行い、背屈 90° では舟状骨近位部が橈骨と有頭骨に固定され、大菱形骨によって舟状骨遠位部が外力を受けることによって、曲げ応力により腰部骨折を起こす可能性があるとして報告している。本研究でも舟状骨の有頭骨関節面の圧縮応力が背屈位で増加しており、背屈によって舟状骨が固定され曲げ応力により腰部骨折を引き起こす可能性を裏付ける結果となった。

橈尺屈モデルの結果

橈尺屈モデルでは、掌背屈モデルと比べ、橈骨遠位端の応力分布の変化は小さかった。橈骨遠位端よりも月状骨、三角骨、尺骨頭の応力分布の変化が大きかった。月状骨、三角骨、尺骨頭の相当応力と最小主応力は橈屈に伴い応力が集中した。応力の平均値の比較した結果からもこの傾向が裏付けられ、特に尺骨頭は統計的に有意であった。橈屈時には月状骨が尺側に偏位し、月状骨が尺骨頭に接触することで圧縮応力が増加したと考えられた。橈骨遠位端においては、最小主応力はどの肢位においても殆ど変化なく、相当応力と最大主応力は尺屈に伴い月状骨窩掌側の応力が集中した。尺屈位では月状骨が橈側に移動し、尺骨頭との接触面が減り月状骨窩との接触面が増加したためだと考えられた。Hara らはキャダバーに感圧導電性ゴムセンサを用いた研究を行い、尺骨頭を介した荷重伝達は橈屈で増加したと報告しており、本研究と結果は一致した。月状骨が尺骨頭に衝突する病態として尺骨突き上げ症候群、それに伴う月状骨骨嚢胞が連想される。Rhee らは健常人の 10.4%が月状骨骨嚢胞を有する一方で、尺骨突き上げ症候群患者では 57.6%が有すると報告している。本研究の結果から、この嚢胞形成は橈屈の際に月状骨-尺骨頭の接触圧が増加することによって引き起こされると考えられた。しかし、尺屈により尺骨の荷重が増すという報告もあり、さらに議論が必要である。

《Conclusion》

有限要素解析により、手関節の角度の変化に伴う応力分布の変化が明らかになった。