

学 位 論 文 題 名

正常手関節における 3 次元力学的解析

— 剛体バネモデルを用いた理論的解析 —

学位論文内容の要旨

(目的) 手関節疾患の病態を把握し、それに対する適切な治療法を選択する上で、手関節の力学的解析を行うことは極めて重要である。この解析について、近年、各種のトランスデューサーを用いた屍体実験による手関節の力学的解析が盛んに行われている。しかし、計測の複雑さより、小関節を含めた手関節全体における応力解析を行った報告はない。さらに、実験モデル作製の困難さより、靱帯に関する解析は靱帯切離実験による手根不安定性の発現に関するものや、各靱帯の力学的特性を求めたものが大部分であり、手関節靱帯の張力分布に関する実験的研究は行われていない。本研究の目的は、過去の実験的研究および理論的解析の問題点を解決すべく正常手関節の 3 次元手関節剛体バネモデルを開発し、それを用いて正常手関節全体の関節応力分布、靱帯の張力分布、各手根骨のkinematicsについての解析を行うことにより、その力学的特徴を知ることである。

(対象および方法) 本研究では、正常新鮮屍体上肢10体のCT画像データを基に、個々についての 3 次元手関節モデルを作製した。モデル作製の方法は、最初に横断面CT画像データよりオリジナルプログラムを用いてコンピューターグラフィック上で 3 次元骨モデルを作製した。次に、各CT画像において関節を構成する隣接した 2 つの骨間の中央点をデジタル化することにより関節曲線を作製し、それらを重ね合わせるにより 3 次元関節面モデル (計 27 関節) を作製した。これらの関節面はメッシュ状としてあらわされ、各スクエアには後述する圧縮バネを置くものと仮定した。作製した関節面モデルは骨モデルにスーパーインポーズし、最後に計 48 の靱帯を解剖学的位置に入力することにより、3 次元手関節解剖学的モデルを作製した。応力計算には、骨は剛体、関節軟骨および靱帯はそれぞれ圧縮バネ、伸張バネと仮定する剛体バネモデル (Rigid Body Spring Model, 以下RBSM) の理論を用いた。実際の関節および靱帯における応力(F)は、一定の荷重条件下での各要素 (剛体) の変位に基づき、各バネの変形 (D) とバネ定数すなわち関節軟骨および各靱帯の剛性値 (K) の積 ($F=KD$) により求められる。本解析の荷重条件はgrasp positionを想定し、計 143N の外力を中手骨に加えた。関節軟骨および三角線維軟骨 (以下, TFC) の剛性値は 22.6 N/mm とし、各靱帯の剛性値は、従来より報告されてきた実験値を用いた。これらのデータをモデルに入力し、独自に開発した 3 次元RBSM用ソフトウェアにて応力計算を行った。本研究では、(1) 各関節列における応力分布比 (Percentage of Joint Force Transmission, 以下%JFT), (2) 最大関節圧 (Joint Peak Pressure, 以下PP), (3) 靱帯張力比 (Percentage of Tensile Force Distribution, 以下%TFD), (4) 各手根骨の 3 次元的kinematics (変位および回転) についての解析を行った。

(結果) 各関節列における%JFTは、橈骨手根関節およびTFCでは、橈骨舟状関節で44%, 橈骨月状関節において31%, TFCで25%であった。手根中央関節においては、舟状大菱形小

菱形関節で27%，舟状有頭関節では23%，月状有頭関節において34%，三角有鉤関節で16%であった。橈骨手根関節におけるPPは，橈骨舟状関節では3.8MPa，橈骨月状関節においては2.7MPaであった。手関節掌側および背側における各靱帯の%TFDは，掌側においては橈骨月状靱帯で最大で26.0%であった。背側では，橈骨三角靱帯において最大で14.8%，舟状月状靱帯で12.8%，舟状三角靱帯において10.7%であった。Grasp positionを想定した荷重条件下における近位手根列の各手根骨の3次元変位は，舟状骨と月状骨では尺側／掌側／近位方向に変位していた。しかしながら，回転方向に関しては舟状骨は掌屈を生じ，月状骨は背屈する傾向を認めた。遠位手根列では，各手根骨はほぼ同様の変位および回転傾向を示し，橈側／掌側／近位方向への変位傾向を認め，回転方向に関しては背屈する傾向を認めた。

（考察）Shortらは，屍体実験において，橈骨手根関節および尺骨手根裂隙における応力分布比は橈骨舟状関節で50%，橈骨月状関節で29%，TFCにおいて21%と報告している。今回の理論的解析により得られた結果は，従来報告されてきた実験値と概ね一致するものであった。一方，Viegasらの実験より，手根中央関節の応力分布比は，舟状大菱形小菱形関節で24%，舟状有頭関節では24%，月状有頭関節において32%，三角有鉤関節で20%であり，本研究結果とほぼ一致するものであった。これら過去の実験データとの比較検討より，今回開発した3次元理論的モデルによる応力解析およびその結果は十分に信頼性のあるものと考えられた。靱帯の張力分布に関する解析結果においては，正常手関節の掌側では橈骨月状靱帯が，背側では橈骨三角靱帯が力学的に最も重要な靱帯であると考えられた。手根骨のkinematicsから得られたデータでは，舟状骨と月状骨は橈骨に対して尺側に変位する傾向があることが明らかになった。これらのデータと橈骨月状靱帯および橈骨三角靱帯の走行の解剖学的特徴より，これらの靱帯は舟状骨および月状骨の尺側への変位を防ぐ機能的役割を担っていると考えられた。手根骨のkinematicsに関する実験的研究は多く行われてきたが，一定の荷重条件下におけるkinematicsに関しては，実験手技上の困難さもあり明らかなではない。本研究においては，3次元理論的モデルにより日常動作において頻回に行われるgrasp positionを想定した荷重条件下での手根骨の3次元kinematicsの傾向を解析することが可能であった。本解析結果より近位手根列においては，各手根骨は尺側／掌側／近位方向に変位していたが，回転方向に関しては舟状骨は掌屈，月状骨は背屈する傾向が認められた。これは，日常生活動作における荷重条件下においても舟状骨と月状骨はdorsal intercalated segmental instabilityをきたすような条件下にあることを示すものと考えられる。一方，遠位手根列における各手根骨は変位，回転とも同様の傾向を示し，近位手根列の手根骨の変位方向とも異なる結果であった。これらの結果より，遠位手根列は機能的にも近位手根列とは区別した一機能単位としてとらえることが可能であると考えられた。本研究は，初の3次元理論的モデルを用いた手関節における力学的解析である。本モデルを用いることにより，手関節全体における関節および靱帯の応力解析と手根骨のkinematicsについての解析を同時に行うことが可能であり，従来の実験的研究における手技上の制限を克服することが可能であった。さらに，得られた解析結果は過去の屍体実験のデータとも良く相関しており，正常手関節における解析においては十分に信頼性のあるものと考えられた。将来的には，本モデルに個々の疾患に関するデータを入力することにより，各種の手関節疾患に対する術前プランニング等にも応用することが可能になるであろう。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 田 清 志
副 査 教 授 加 藤 紘 之
副 査 教 授 安 田 和 則

学 位 論 文 題 名

正常手関節における 3 次元力学的解析

ー 剛体バネモデルを用いた理論的解析 ー

近年、各種のトランスデューサーを用いた屍体実験による手関節の力学的解析が盛んに行われている。しかし、計測の複雑さより、手関節全体の応力解析を行った報告はない。本研究の目的は、過去の実験的研究の問題点を解決すべく正常手関節の 3 次元手関節理論的モデル（剛体バネモデル）を開発し、それを用いて正常手関節全体の力学的解析を行うことにより、その力学的特徴を知ることである。

本解析では、正常新鮮屍体上肢10体のCT画像データを基に、個々についての 3 次元手関節モデルを作製した。モデル作製の方法は、最初にCT画像データよりオリジナルプログラムを用いてコンピューターグラフィック上で 3 次元骨モデルを作製した。次に、各CT画像において関節を構成する隣接した 2 つの骨間の中央点をデジタイズすることにより関節曲線を作製し、それらを重ね合わせるにより 3 次元関節面モデルを作製した。作製した関節面モデルは骨モデルにスーパーインポーズし、最後に計48の靱帯を解剖学的位置に入力することにより、3 次元手関節解剖学的モデルを作製した。応力計算には、骨は剛体、関節軟骨および靱帯はそれぞれ圧縮バネ、伸張バネと仮定する剛体バネモデル（Rigid Body Spring Model, 以下RBSM）の理論を用いた。荷重条件はgrasp positionを想定し、計143Nの外力を中手骨に加えた。関節軟骨および靱帯の剛性をモデルに入力し、独自に開発した3次元RBSM用ソフトウェアにて応力計算を行った。

各関節列における応力分布比は、橈骨手根関節および三角線維軟骨（以下、TFC）では、橈骨舟状関節で44%、橈骨月状関節において31%、TFCで25%であった。手根中央関節においては、舟状大菱形小菱形関節で27%、舟状有頭関節では23%、月状有頭関節において34%、三角有鉤関節で16%であった。手関節掌側および背側における各靱帯の張力分布比は、掌側においては橈骨月状靱帯で最大で26.0%であった。背側では、橈骨三角靱帯において最大で14.8%、舟状月状靱帯で12.8%、舟状三角靱帯において10.7%であった。

Shortらは、屍体実験において、橈骨手根関節およびTFCにおける応力分布比は橈骨舟状関節で50%、橈骨月状関節で29%、TFCにおいて21%と報告している。本解析により得られた結果は、従来報告されてきた実験値と概ね一致するものであり、今回開発した 3 次元理論的モデルによる応力解析およびその結果は十分に信頼性のあるものと考えられた。靱帯の張力分布に関する解析結果より、正常手関節の掌側では橈骨月状

靱帯が、背側では橈骨三角靱帯が力学的に最も重要な靱帯であると考えられた。手根骨のkinematicsから得られたデータでは、近位手根列は橈骨に対して尺側に変位する傾向があることが明らかになった。これらのデータと橈骨月状靱帯および橈骨三角靱帯の走行の解剖学的特徴より、これらの靱帯は近位手根列の尺側への変位を防ぐ機能的役割を担っていると考えられた。本モデルを用いることにより、手関節全体における関節および靱帯の応力解析を同時に行うことが出来、従来の実験的研究における手技上の制限を克服することが可能であった。さらに、得られた解析結果は過去に計測可能であった実験データとも良く相関しており、正常手関節における解析においては十分に信頼性のあるものと考えられた。

公開発表に際し、副査の加藤教授から、モデル作製に新鮮屍体を用いることの利点、過去の実験的研究と比較した際の本研究結果の意義、本モデルの臨床応用の可能性について、副査の安田教授から、モデル化に関して靱帯および関節軟骨の剛性値をどのように決定したか、荷重条件の妥当性について、主査の金田教授からは、過去の屍体実験における応力解析の具体的方法について、整形外科教室加藤助手から、本解析方法の術前プランニングへの応用について質問があった。申請者は何れに対しても研究結果と文献を引用して妥当な回答を行った。

審査員一同は、本研究が3次元理論的手法を用いることにより初めて手関節全体の関節応力および靱帯張力を明らかにした成果を高く評価し、申請者が博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有すると判定した。