

学位論文題名

人工膝関節の長寿命化に関する基礎研究

学位論文内容の要旨

関節が外傷や病的疾患によりその機能を失ったとき、最後の機能回復の手法として人工関節の全置換手術がある。近年では、股関節と膝関節を主体として人工関節置換術が施行されており、運動・荷重支持機能の回復と疼痛除去に関し顕著な恩恵をもたらしている。この人工関節は長年にわたる形状および構造設計の最適化や新材料の適用、手術法の改善などの積重ねにより、その性能は向上してきた。しかし残る最大の問題として、長期使用時におけるコンポーネントのゆるみがあげられる。膝関節においては主に、変形性膝関節症(OA)や慢性関節リウマチ膝(RA)などの重度な膝関節疾患に対して人工膝関節置換術が行われているが、その機能ならびに構造により人工膝関節の受ける力学的条件が他のどの人工関節より厳しいこともあって、現在の人工膝関節ではその寿命が10年から20年が限界で、より長寿命のものが望まれている。

人工関節のゆるみの原因として、関節接触面に使用されている超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)の摩耗毒性による骨吸収、コンポーネントと骨の接合界面上に生じる応力による疲労・き裂の発生・伸展、人工コンポーネントの挿入によって生じる骨内の応力シールドによる骨吸収などが考えられるが、その中でもUHMWPEの摩耗に起因したゆるみが最大の原因と考えられており、より長寿命の人工膝関節を開発するためにはUHMWPEの耐摩耗性改良が必要である。

UHMWPE関節板の摩耗はその力学的状態と密接な関係があるので、UHMWPE関節板の変形挙動を力学的に解明することにより、その予測が可能であると考えられる。また実際のUHMWPE関節板には膝関節の運動により符号の変化する繰返しの変動負荷が作用しているので、この現象の解明には単純押込み時の変形解析のみならず、各種動作中の負荷変動を考慮した繰返し負荷時の接触変形解析が必要である。一方、現在世界中には様々なタイプの人工膝関節が存在し、それぞれのモデルは関節接触面の形状や十字靭帯の温存について異なった開発コンセプトを持っており、これらの差により術後における両コンポーネント間の接触状態は大きく変化している。この接触状態の変化はUHMWPEの摩耗をはじめ、上記に示した人工膝関節ゆるみの原因すべてに影響を及ぼしているので、人工膝関節のタイプによる接触状態の変化を求める必要があるが、現状ではこの接触状態を直接測定することはできない。よって計算機上で人工膝関節の動作シミュレーションを行い、その接触状態を算出することは人工膝関節の開発に多大な知見を与えることになる。本論文ではこれらの検討を行うために、歩行時におけるUHMWPE関節板の変形挙動解析ならびに、人工膝関節両コンポーネント間の接触状態解析を行った。

本論文は全5章よりなっており、各章の内容を以下に示す。

第1章は本研究の緒言であり、本研究の背景、これまでの研究、本研究の目的について述べている。

第2章では、UHMWPEの摩耗メカニズム解明の第一歩として、人工膝関節におけるUHMWPE関節板と大腿骨コンポーネントを単純な形状に置き換えた状態での接触変形挙動をモデル実験すると同時に、繰返し塑性構成式を組み込んだ弾塑性有限要素法によりUHMWPE関節板の接触変形および応力解析を行い、モデル実験との比較さらに摩耗メカニズムの推定を行った。さらに摩擦方向の影響、圧力分布の検討、UHMWPEの厚さ、固定条件ならびに摩擦力の条件がUHMWPEの摩耗に及ぼす影響についての考察も行った。その結果、UHMWPE平板の摩耗に関連する力学状態はさまざまな条件の影響を受け、UHMWPEの厚さは一定値以上必要であり、またできるだけUHMWPEの変形を拘束させる固定条件がよいことがわかった。特に繰返し接触時の摩擦方向は摩耗のメカニズムまで異なる影響を及ぼし、一方向摩擦ではUHMWPE表面より、また往復摩擦では内部より摩耗が生じることがわかった。さらにこれらの違いは、繰返し接触時のクラックの進展に関与する応力値にも影響を及ぼしている。これらのことより、人工膝関節のUHMWPE関節板の摩耗挙動の評価は、実際の現象にあった往復摩擦状態で行わなければならないことが明らかになった。

第3章では、第2章における結果を実物の人工膝関節における現象に対応させるため、実際の人工膝関節形状ならびに歩行動作による荷重変動を考慮し、歩行時におけるUHMWPE関節板の変形挙動を解析した。またさらに、実物の接触面形状を基本形状とし、この形状を変えた数種類のモデルについても変形解析を行い、接触面形状のUHMWPE関節板摩耗挙動に関する影響について検討を行った。その結果、解析対象とした人工膝関節では関節板の前方隆起部の上方と隆起部直後の平坦部分の2領域で局所的な変形を受け、前方隆起部領域においては関節板表面より、また平坦部領域では内部と表面の両位置における摩耗挙動が重要であることがわかった。また関節板の力学的挙動は単に膝関節荷重の変動に対応しているのではなく、人工膝関節の接触面形状がUHMWPE関節板に生じる応力に密接に関係していることもわかった。さらにこれらの結果より、関節板の摩耗を減少させると考えられる接触面形状を提案し、同様の力学的変形解析を行い、この提案したモデルの優位性を示した。

第4章では、タイプの異なる人工膝関節を用いた全人工膝関節置換術により膝関節における接触状態がどのように変化するか、さらにその変化が関節内の応力状態に及ぼす影響を検討するため、歩行時における人工膝関節両コンポーネント間の接触状態を解析し、この結果を用いて脛骨コンポーネントと脛骨の接合界面における応力分布の計算を行った。その結果、歩行状態における動的な接触状態が算出され、接触面の形状ならびに2本の十字靭帯温存の有無により接触位置ならびに接触力も大きな影響を受け、さらにコンポーネント接合界面における応力値も著しく変化することが示された。

第5章は本研究の総括であり、本研究で得られた結論をまとめて示し、今後残された問題点についても若干述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 川 博 將

副 査 教 授 鶴 飼 隆 好

副 査 教 授 山 本 克 之

学 位 論 文 題 名

人工膝関節の長寿命化に関する基礎研究

関節が外傷や病的疾患によりその機能を失ったとき、最後の機能回復の手法として人工関節の全置換手術がある。この人工関節の性能は長年の研究により向上してきたが、残る最大の問題として長期使用時におけるコンポーネントのゆるみあげられる。膝関節においては主に変形性膝関節症（OA）や慢性関節リウマチ膝（RA）などの重度な膝関節疾患に対して関節置換術が行われているが、現在ではその寿命が10年から20年が限界で、より長寿命のものが望まれている。

人工関節のゆるみの原因として、関節接触面に使用されている超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）の摩耗毒性による骨吸収、コンポーネントと骨の接合界面上に生じる応力による疲労・き裂の発生・伸展、人工コンポーネントの挿入によって生じる骨内の応カシールディングによる骨吸収などが考えられるが、その中でもUHMWPEの摩耗に起因したゆるみが最大の原因と考えられており、人工膝関節の長寿命化のためにはUHMWPEの耐摩耗性改良が必要である。

UHMWPE 関節板の摩耗はその力学的状態と密接な関係があるので、UHMWPE 関節板の変形挙動を力学的に解明することにより、その予測が可能であると考えられる。また実際の UHMWPE 関節板には膝関節の運動により符号の変化する繰返しの変動負荷が作用しているので、この現象の解明には各種動作中の負荷変動を考慮した繰返し負荷時の接触変形解析が必要である。一方、現在世界中には様々なタイプの人工膝関節が存在し、それぞれのモデルは関節接触面の形状や十字靭帯の温存について異なった開発コンセプトを持っており、これらの差により術後における両コンポーネント間の接触状態は大きく変化している。この接触状態の変化は UHMWPE の摩耗をはじめ、上記に示した人工膝関節ゆるみの原因すべてに影響を及ぼしているので、人工膝関節のタイプによる接触状態の変化を求める必要があるが、現状ではこの接触状態を直接測定することはできない。よって計算機上で人工膝関節の動作シミュレーションを行い、その接触状態を算出することは人工膝関節の開発に多大な知見を与えることになる。

本論文ではこれらの検討を行うために、以下の事項を実施している。

- 1) UHMWPE 関節板と大腿骨コンポーネントを単純な形状に置き換えた状態での接触変形挙動のモデル実験、ならびに弾塑性有限要素法により繰返し接触時の応力解析を行い、モデル実験との比較さらに摩耗メカニズムの推定を行う。
- 2) 実際の人工膝関節形状ならびに歩行動作による荷重変動を考慮し、歩行時における UHMWPE 関節板の変形挙動を解析し、接触面形状の UHMWPE 関節板摩耗挙動に及ぼす影響について検討する。
- 3) 人工膝関節のタイプによる接触状態の変化、さらにその変化が関節内の応力状態に及ぼす影響を検討するため、歩行時における人工膝関節両コンポーネント間の接触状態解析、ならびにコンポーネント-骨接合界面における応力分布を計算する。

これらより求められた本論文の主要な成果は、以下のように要約される。

- 1) UHMWPE 平板の摩耗に関連する力学状態は、摩擦方向、解析時の圧力分布の設定、UHMWPE 平板厚さ、固定条件、摩擦力等のさまざまな条件の影響を受けることがわかった。特にこれまでは簡略化のために一方向摩擦状態での実験、解析等が行われてきたが、一方向摩擦と往復摩擦の違いは摩耗のメカニズムまで異なる影響を及ぼしている。よって人工膝関節における UHMWPE 関節板の摩耗挙動の評価は、実際の現象にあった往復摩擦状態で行わなければならないことが明らかになった。
- 2) 本研究で解析対象とした人工膝関節では 2 カ所の局所的な領域で接触および変形を受け、またそれぞれの領域で異なった深さでの摩耗挙動が重要であることがわかった。これはつまり、UHMWPE 関節板の力学的挙動は単に膝関節荷重の変動に対応しているのではなく、人工膝関節の接触面形状が関節板に生じる応力に密接に関係しているということである。さらにこれらの結果より関節板の摩耗を減少させると考えられる接触面形状を提案し、その力学的変形解析の結果から、人工膝関節の長寿命化を狙った合理的な接触面の形状設計が可能であることを示した。
- 3) 歩行状態における人工膝関節の動的な接触状態が算出され、接触面形状ならびに 2 本の十字靭帯温存の有無により接触位置ならびに接触力も大きな影響を受け、さらにコンポーネント接合界面における応力値も著しく変化することが示された。つまりコンポーネントのゆるみの問題は骨とコンポーネントの接合界面に作用する応力に依存することが予想され、これらは関節接触面形状に大きく影響されることが明らかになった。

これを要するに、著者は、人工膝関節の長寿命化に対して力学的観点より新知見を得たものであり、生体力学、生体医工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。