

論 文 内 容 の 要 旨

**Stress Analysis of the Proximal Tibia using Finite Element Method  
after Unicompartmental Knee Arthroplasty**

有限要素法を用いた単顆人工膝関節置換術後の脛骨近位部応力解析

日本医科大学大学院医学研究科 整形外科学分野

大学院生 佐野みほろ

Journal of Nippon Medical School 第 87 卷 第 5 号 (2020) 掲載予定

単顆人工膝関節置換術(UKA)は全人工膝関節置換術(TKA)に比較して十字靭帯や逆側顆部のコンパートメントが温存されるために膝の正常な運動機能を損なわないといった長所がある。一方でインプラントの破損や loosening などの理由で短期間のうちに TKA に再置換される例も報告されている。インプラントのデザイン・材料や下肢アライメント異常そして脛骨上への設置位置の違いによってインプラントへの剪断応力として働きインプラントの破損や loosening が引き起こされる。

有限要素解析は整形外科分野において人工関節の開発のために先進的に用いられてきた。UKA 後の脛骨近位部応力解析についても報告がなされているがいずれも脛骨近位部の海綿骨を均一材料と仮定したものであり最適化したモデルではない。

そこで本研究の目的は脛骨近位部の海綿骨を不均一で異方性の物質であると仮定し 1)インプラントの2つのタイプ、2)術後アライメント、3)脛骨の被覆、4)脛骨の骨切りレベルについて調べることであった。

## 方法

負荷のかかった状態での脛骨近位部の応力分布を調査するために二次元有限要素解析を行った。矯正不足による内反アライメント、中間位の中間アライメント、過矯正による外反アライメントを設定した。1)安定性良好なインプラントを想定した強固な境界面の線形解析 2) loosening を想定しギャップ要素を適用した非線形モデル解析を行った。物質特性は海綿骨: 300-3,000MPa、皮質骨:15,000MPa、UHMWPE:500MPa、Co-Cr-Mo:200,000MPa とした。非線形モデルにおいて、モデルの安定性(ヤング率は  $10^{-6}$ MPa)のための二つのトラス要素は、解析の分散を避けるために脛骨の内側端と外側端にとった。ギャップ要素の摩擦係数は 0 でヤング係数は  $10^{-6}$ MPa とした。

## 結果

- 異なる術後アライメントにおける応力分布: 内反アライメントでは、高い応力と大きなゆがみがインプラントの下に観察された。そして、この傾向は総 UHMWPE タイプにおいてより顕著であった。外反アライメントでは、応力集中は脛骨トレイの外側部に見られ、この傾向は非線形モデルにおいて、顕著であった。

- 異なる脛骨被覆における応力分布: スタンダードモデルと比較し、被覆の狭いモデルにおいて、応力集中は内顆の内側縁に認められた。

- 異なった高位での脛骨骨切りにおける応力分布: 低い骨切りレベルのスタン

ダードモデルと比較し、このモデルでの応力分布は、スタンダードモデルにおける応力分布と著しく異なることはなかった。

・インプラント下の海綿骨の評価：全ての総 UHMWPE タイプの UKA において、メタルバックタイプに比べて、どのアライメントにおいても応力がペグ周囲に見られた。Loosening のあるモデルにおいて、応力はペグの内側、脛骨トレイの外側部、両方に認められ、中央部の応力は減じていた。

狭い被覆の UKA、低い骨切りレベルでの UKA のケースでは、応力は内顆の内側縁で高かった。

## 考察

FEM は、許容されうる誤差範囲の推測のために、インプラントの機械的問題、その固定メカニズムなどを予測するのに有効である。現在の研究では、矯正不足はニュートラルアライメントに比較して、海綿骨により多くの応力集中がかかり、また、過矯正は脛骨高位と脛骨トレイの外側部の下部の骨密度の低い骨に応力が増えたが、これらの発見は臨床結果に反映されている。インプラントの幅は、応力分布にほとんど影響を及ぼさないと予測されており、この予測は TKA の有限要素解析と類似している。临床上、インプラントの被覆は TKA において loosening にほとんど影響を及ぼさないとされているが、本研究では応力集中が内顆内側縁で認められたから長期的には危惧される。強度の内反変形は UKA 禁忌であるが、脛骨骨切りラインは皮質骨に届かない。本研究の結果では皮質骨に近い骨切りラインは皮質殻周囲の海綿骨において応力集中を引き起こすことを示唆している。それゆえ、UKA においても TKA と同様に最大限に骨を残すことが推奨される。Loosening モデルにおいて応力集中はペグの内側と、脛骨トレイの外側部に見られ、この結果は一度 loosening が起きると loosening と骨破壊がこれらの部位から広がることを示唆している。

## 結語

2次元有限要素解析は UKA 後の脛骨近位の応力分布の解析に用いられた。この研究では、メタルバックインプラントは、総 UHMWPE インプラントより応力分布の面で優れている。UKA においては、適切な術後アライメントが得られなければいけない。骨切りラインは良好な機械的性質を持つ関節ラインに近い海綿骨に設定し多くの骨を残すべきである。