

学位論文審査の結果の要旨

審査区分 課・論	第737号	氏名	松田昌悟
審査委員会委員	主査氏名	谷川 雅人	
	副査氏名	河野 康志	
	副査氏名	千葉 政一	
論文題目			
Exploring the extension quantities of a medial collateral ligament pie-crusting model using a finite element method (有限要素法による膝内側側副靱帯パイクラストモデルの延長量解析)			
論文掲載雑誌名			
Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering			
論文要旨			
【目的】人工膝関節全置換術において、軟部組織バランスを整える方法として、パイクラスト法を用いる場合の延長量の解析について、3つの膝内側側副靱帯のパイクラストモデルを作成し、有限要素法より解析し、どのモデルが最も適しているかを検討した。 【方法】解析ソフトを使用し、境界条件として骨皮質のヤング率は17.7 GPa、ポアソン比0.3、靱帯のヤング率は350MPa、ポアソン比0.3とした。靱帯を単一の弾性体とし、両端を骨皮質に接着したモデルをモデルAとし、19本の細い弾性体を束として、その両端を骨皮質に接着させたモデルをモデルBとし、19本の細い弾性体の間隙にヤング率が低い弾性体を挟み込み、その両端を骨皮質に接着させたモデルをモデルCとし、それぞれのモデルについて80Nおよび120Nの力における延長量を検討した。 【結果】モデルAは10か所の切れ目を増やすごとに80Nの場合は平均0.0068mm、120Nの場合は0.010mmの延長であった。モデルBは9か所の切れ目で、80Nの場合は1.34mm、120Nの場合は2.01mmとなり、切れ目がないモデルから2倍の延長量となった。モデルCは10か所の切れ目を増やすごとに80Nの場合は平均0.34mm、120Nの場合は0.50mmの延長であった。 【考察】モデルAに切れ目を増やしても、延長量はわずかでであり、現実の靱帯の動きを再現できなかった。モデルBは19か所の切れ目を加えた時点で連続性が断たれ、解析モデルとして不適切であった。一方モデルCの延長量は切れ目の数と延長量が比例し、現実の靱帯の動きに近いものとなった。靱帯のパイクラストモデルを作成するには靱帯を単一のモデルで作成するのではなく、線維の束として、かつその間隙に間質を模したモデルを設定する必要があると考えられた。 【結論】内側側副靱帯におけるパイクラスト法の力学解析モデルにおいて、均一な弾性体として解析した場合、引っ張り力に対する延長量は現実を表現しているとは言えなかった。一方で細い弾性体同士を重ね合わせ、間隙を設けることで、線維の迂りを表現でき現実に近い延長量を得られた。 本研究は、有限要素法を用いた内側側副靱帯パイクラストモデルの伸長量の検討を行った、初めての論文であり、実際の内側側副靱帯の伸長量を再現するモデルを構築し、臨床的に意義のある成果である。このため、審査員の合議により本論文は学位論文に値するものと判定した。			

最終試験
の結果の要旨
学力の確認

審査区分 ⑨・論	第737号	氏名	松田昌悟
審査委員会委員	主査氏名	谷川雅人	
	副査氏名	河野康志	
	副査氏名	千葉政一	
学位申請者は本論文の公开发表を行い、各審査委員から研究の目的、方法、結果、考察について以下の質問を受けた。 1. 整形外科の临床上、膝関節の内側側腹靱帯の浅層(parallels fibers)と深層(oblique fibers)、これと「posterior oblique ligament:POL:後斜走靱帯」の関係 2. adhesive part はどこにあり、具体的には何を指し、また伸長率の違うパーツを組み合わせることの意味について 3. Figure 9のリネアーな反応曲線の意味 4. このMODEL-Cの今後の臨床応用の可能性 5. この業績への差読者の反応 6. 有限要素法以外のシミュレーション方法の可能性 7. 有限要素法に用いたメッシュの妥当性 8. パイクラスト法の適用例とこの研究の関連 9. シュミレーションに用いた荷重の妥当性 10. シュミレーションに用いたそれぞれのヤング率の妥当性 11. 実際の手術で用いられるナイフや針で作られる切り込みとシュミレーションとの関係 12. 今回の検討は、現在用いられているパイクラスト法との関係 13. 内側側副靱帯の伸展範囲を死体モデルやTKA中の生体膝で調べた先行研究における指標 14. 骨皮質のヤング率とポアソン比において、実際の生体において影響を与える因子 15. モデルとしては伸びる方が良いのかや、どのようなアウトカムが理想であると想定したか 16. 人工関節置換術では、パイクラスト法は手術においては実際にどのような位置づけにある手技か 17. 実臨床においては、パイクラスト法による有害事象 18. 今後の取り組みや工夫することについて これらの質疑に対して、申請者は概ね適切に回答した。よって審査委員の合議の結果、申請者は学位取得有資格者と認定した。			

(注) 不要の文字は2本線で抹消すること。

学 位 論 文 要 旨

氏名 松田 昌悟

論 文 題 目

Exploring the extension quantities of a medial collateral ligament pie-crusting model using a finite element method

(有限要素法による膝内側側副靱帯パイクラストモデルの延長量解析)

要 旨

【目的】人工膝関節全置換術において、軟部組織バランスを整える方法として、靱帯に 18 ゲージ針や尖刃で数か所切れ目を加えるパイクラスト法を用いる場合がある。過去の報告ではカダバーによるパイクラスト法の延長量の解析があるが、有限要素法による解析の報告はない。今回、3 つの膝内側側副靱帯のパイクラストモデルを作成し、有限要素法において、どのモデルが最も適しているかを検討した。

【方法】解析ソフトは ANSYS 2021 R1 (ANSYS, USA) を使用した。境界条件として骨皮質のヤング率は 17.7 GPa、ポアソン比 0.3、靱帯のヤング率は 350 MPa、ポアソン比 0.3 とした。メッシュサイズは骨皮質 5 mm、靱帯 0.5 mm で作成した。靱帯を単一の弾性体（長さ 100 mm、幅 20 mm、厚さ 2 mm）として、その両端を骨皮質に接着したモデルをモデル A とした。19 本の細い弾性体（長さ 19 mm、幅

1mm, 厚さ 2mm) を束として, その両端を骨皮質に接着させたモデルをモデル B とした. 19 本の細い弾性体の間隙にヤング率が低い弾性体 (長さ 96mm, 幅 0.1mm, 厚さ 2mm, ヤング率 175kPa, ポアソン比 0.3) を挟み込み, その両端を骨皮質に接着させたモデルをモデル C とした. パイクラストモデルは, それぞれの靱帯モデルの中央に 1mm×0.1mm の切れ目を入れ, 骨皮質の左端を固定し, 骨皮質の右端に 80N と 120N の力を x 軸の正の方向に加えた. 切れ目を入れる箇所を均等にずらしながら, 9 から 10 か所ずつ増やして, 最大 95 か所の切れ目を作成した. 切れ目を作成したモデルのそれぞれの力における延長量を検討した.

【結果】モデル A は 10 か所の切れ目を増やすごとに 80N の場合は平均 0.0068mm, 120N の場合は 0.010mm の延長であった. モデル B は 9 か所の切れ目で, 80N の場合は 1.34mm, 120N の場合は 2.01mm となり, 切れ目がないモデルから 2 倍の延長量となった. モデル C は 10 か所の切れ目を増やすごとに 80N の場合は平均 0.34mm, 120N の場合は 0.50mm の延長であった.

【考察】モデル A に切れ目を増やしても, 延長量はわずかでであり, 現実の靱帯の動きを再現できなかった. モデル B は 19 か所の切れ目を加えた時点で連続性が断たれ, 解析モデルとして不適切であった. 一方モデル C の延長量は切れ目の数と延長量が比例し, 現実の靱帯の動きに近いものとなった. 靱帯のパイクラストモデルを作成するには靱帯を単一のモデルで作成するのではなく, 線維の束として, かつその間隙に間質を模したモデルを設定する必要があると考えられた.

【結論】内側側副靱帯におけるパイクラスト法の力学解析モデルにおいて, 均一な弾性体として解析した場合, 引っ張り力に対する延長量は現実を表現しているとは言えなかった. 一方で細い弾性体同士を重ね合わせ, 間隙を設けることで, 線維の迂りを表現でき現実に近い延長量が得られた.