

# 関節の遊びを有する三次元筋骨格靭帯膝モデルの開発

◎石川雄己<sup>1</sup>, 安琪<sup>1</sup>, 田村雄介<sup>1</sup>, 岡敬之<sup>2</sup>, 浅間一<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻,

<sup>2</sup> 東京大学大学院医学系研究科 22 世紀医療センター関節疾患総合研究講座

◎Yuki Ishikawa<sup>1</sup>, Qi An<sup>1</sup>, Yusuke Tamura<sup>1</sup>, Hiroyuki Oka<sup>2</sup>, Hajime Asama<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Precision Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,

<sup>2</sup> 22nd Century Medical and Research Center, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo

## 1. 序論

膝関節の不安定性により、関節構造の変性と歩行障害を惹起することが臨床研究にて示唆されているものの、疾患予防につながる評価システムは確立していない。この一因として医師による評価のばらつきが挙げられており、工学的なアプローチによるモデルの構築と評価の標準化は疾患予防に必須の課題である。膝関節は骨性の運動制限が少ないため、関節運動学的アプローチのように関節の遊びを考慮したモデルの構築は発症メカニズムの解明に不可欠となる<sup>1)</sup>。

膝関節の自由度と可動域を制限する要素として、靭帯は大きな影響を与えている。過去にも膝の靭帯の研究は行われているが、関節の遊びを考慮し、三次元で靭帯を表現したモデルは数が少なく、妥当性の検証も十分とは言えない。このため、現状のモデルでは疾患予防に役立つ情報を提供することはできない。本研究では、関節の遊びを考慮した三次元筋骨格靭帯膝モデルを作成し、各靭帯が与える影響を検討することで、モデル構築のための基礎データを提示する。

## 2. 膝関節

膝関節は、大腿骨・脛骨・膝蓋骨から成り、内側大腿脛骨関節・外側大腿脛骨関節・膝蓋大腿関節の3つの関節から構成されている。関節面には関節軟骨と半月板が存在し、関節可動域と動態に影響を与える。関節包は関節全体を覆い、特に上下方向の関節可動域と動態に影響を与える。

筋は大腿四頭筋(内側広筋・中間広筋・外側広筋)

が膝関節を伸展させ、大腿二頭筋(短頭・長頭)・半膜様筋・半腱様筋・縫工筋・薄筋・腓腹筋が屈曲させる。大腿四頭筋は、大腿二頭筋と協調し膝関節を安定させるよう働く。靭帯は主に前十字靭帯(ACL), 後十字靭帯(PCL), 内側側副靭帯(MCL), 外側側副靭帯(LCL)の4つがある。靭帯は面を形成して骨に付着しており、靭帯束も複数存在する。

## 3. モデル

三次元筋骨格靭帯モデルの作成と検証には、SIMM (MusculoGraphics 社)を使用する。このソフトウェアは、筋骨格モデル、動態データと床反力データを与えることで、筋力などを計算することができる。靭帯膝モデルはSIMMの既存筋骨格モデル(右脚)をベースに作成する。しかし、既存モデルの関節自由度及び可動域の設定では個別に靭帯の影響を調べることができない。このため、体節と関節の設定を変更し、関節自由度を従来の1自由度から6自由度になるよう設計した。また、膝関節の関節中心などの機構も再現したモデルを作成した。靭帯は図1の通り付加した。付着位置に関しては解剖学的位置を参照し作成した<sup>2)</sup>。靭帯の束数と機械的特性は Shelburne らと Blankevoort らの文献値を参照した<sup>3)4)</sup>。

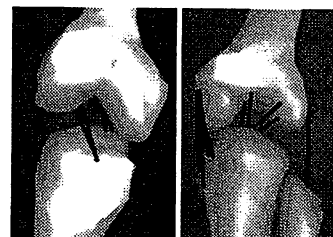


図1 靭帯付着位置(左;前方から, 右;後方から)

各靱帯の影響を見るため、モデルは既存モデル(Base), 全ての靱帯を付与したモデル(Intact), 4靱帯の内一つを付与しないモデルの計6つを使用する。SIMMのサンプル歩行(右脚接地から次の右脚接地まで)の身体座標データと床反力データを入力し、膝関節への影響が大きいと考えられる外側広筋と大腿二頭筋長頭の筋力を出力する。

#### 4. 結果と考察

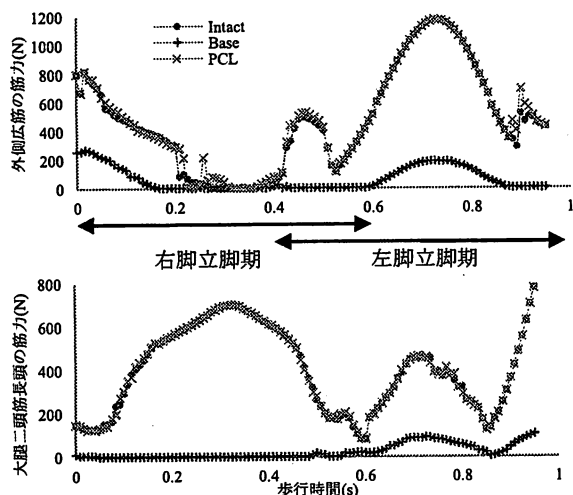


図2 外側広筋・大腿二頭筋長頭の筋力の変化

図2はBase, Intact, PCLを付与しないモデルに対して、横軸に歩行時間(s), 縦軸に筋力(N)をとったグラフである。シミュレーションは6つのモデルに対して行ったが、各靱帯を付与しないモデルはIntactとほぼ変わらない結果となったためPCL以外は割愛した。

BaseとIntactを比較すると、右脚遊脚期におけるピークが一致した。しかし、大腿二頭筋では、右脚立脚後期でBaseにないピークが見られた。Baseに比べIntactは筋力が全体的に大きくなった。これは関節の自由度を増やした結果、安定させるための力が増えたためと考えられる。これらより、モデルとして一定の再現性はあるが、関節の設計や靱帯の設計にはさらなる工夫が必要であると言える。

外側広筋の筋力が変化する際に、Intactに比べPCLを付与しないモデルでは筋力が小さくなった。PCLが膝関節での動きを制限したためと考えられ

る。しかし、PCLを含め靱帯の影響は非常に小さくしか表れなかった。原因は入力したデータが歩行データであり、靱帯をあまり使用しない動きであったことや正常な歩行の一例のみだったことが考えられる。

#### 5. 結論・今後の展望

三次元筋骨格靱帯モデルを作成し、各靱帯の影響を調べた。歩行運動では靱帯の影響は小さいことが分かった。今後は靱帯切断屍体実験の結果などを利用し、妥当性の検証を順動力学で行いたい。また、歩行データ以外の運動でシミュレーションを行い、モデルの精度を上げたい。

#### 謝辞

株式会社ナックイメージテクノロジーの藤田氏には膝関節作成にあたり多大な御協力をいただきましたことを明記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 博田節夫: 関節運動学的アプローチ AKA, 医歯薬出版, pp. 1-13, 32-36, (1990).
- 2) Bousquet G., Le Beguec P., Girardin P.共著 塩田悦仁, 井原和彦, 弓削至共訳: 図解・膝の機能解剖と靱帯損傷, 協同医書出版社, pp. 1-49, (1995).
- 3) Shelburne K. B., Kim H. J., Sterett W. I. and Pandy M. G.: Effect of Posterior Tibial Slope on Knee Biomechanics during Functional Activity, Journal of Orthopaedic Research, Vol. 29, No.2, pp. 223-231, (2011).
- 4) Blankevoort L. and Huiskes R.: Ligament-Bone Interaction in a Three-Dimensional Model of the Knee, Journal of Biomechanical Engineering, Vol.113, No.3, pp. 263-269, (1991).

〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1  
 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻  
 浅間研究室 石川雄己  
 Tel: 03-5841-6486  
 E-mail: ishikawa@robot.t.u-tokyo.ac.jp