S022026

イメージレジストレーションによる膝関節接触機構評価法の実験的検証

小林 公一^{*1}, 豊田 貴嗣^{*2}, 坂本 信^{*1}, 田邊 裕治^{*3}

Validation of In Vivo Evaluation of Contact Mechanics of Knee Joint Using Image Registration

Koichi KOBAYASHI^{*1}, Takatsugu TOYODA, Makoto SAKAMOTO and Yuji TANABE^{*1} Niigata Univ. Dept. of Health Sciences
2-746 Asahimachi-dori, Chuo-ku, Niigata, 951-8518 Japan

The purpose of this study was to validate the cartilage contact behavior in the tibiofemoral joint evaluated using an image matching technique. Two human cadaveric knees were used for this study. Each knee underwent CT scanning to create 3D femoral and tibial bone models and MR imaging to create 3D femoral and tibial cartilage layer models. Tactile pressure sensors were inserted into the medial and lateral compartments of the knee. Calibrated biplane radiographic images of the cadaver knee were obtained during axially loaded using a lever arm apparatus. The 3D positions of the femoral and tibial bone models were recovered by matching their projected outlines with the bone contours in biplane radiographs. The contact area and contact depth were determined from the intersection of the femoral and tibial cartilage layer models. The proximity was obtained between the femoral and tibial bone models. The location of the contact area corresponded to that measured with the pressure sensors. The distributions of contact depth and the proximity also corresponded to the pressure distribution. These data indicate that the image registration technique could be used to evaluate the in vivo articular cartilage contact behavior of the knee joints.

Key Words : Biomechanics, Knee, Contact, Articular cartilage, Cadaver, Image matching

1. 結 言

膝関節軟骨の接触バイオメカニクスを生体内で定量評価することは、軟骨変性を伴う変形性膝関節症の病態進行を解明する上で重要である。関節軟骨接触の生体内評価法として、イメージレジストレーションにより3次元骨・軟骨形状モデルの空間位置を規定し、軟骨モデル同士の干渉量から接触領域や接触深さを推定する方法が提案されている⁽¹⁾⁽⁴⁾。また、骨形状モデル同士の近接量分布から接触点を推定する研究も報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらの研究では大腿脛骨関節⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、足関節⁽³⁾、膝蓋大腿関節⁽⁴⁾が対象となっており、接触挙動と関節キネマティクスとの関係や膝前十字靭帯損傷の有無による接触特性の変化など有益な知見が得られている。しかしながら、イメージレジストレーションにより推定した接触領域と接触位置の妥当性について検証⁽²⁾した報告はあるものの、接触圧力分布と比較した研究はない。そこで本研究ではイメージレジストレーションにより推定した接触深さ分布と接触領域を実測した接触圧力分布と比較検証することを目的とした。ヒト切断肢を対象に、CT画像およびMRI画像から構築した骨モデルと2方向X線画像との2D-3Dイメージレジストレーション結果に、MRI画像から構築した軟骨モデルを付加することで軟骨接触領域を求めた。そして、圧力センサーを用いて直接測定した接触圧力分布と比較した。さらにCT骨モデル同士の近接量を求め、軟骨接触挙動と比較した。

2. 実験方法

ヒト切断肢（右1体、左1体）の膝関節を対象とした。CT撮影とMRI撮影を行い、3次元再構成ソフトウェ

^{*1} 正員, 新潟大学医学部 (〒951-8518 新潟市中央区旭町通2番町746番地)

^{*2} 学生員, 新潟大学大学院 (現 (株) セントラルユニ) (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050番地)

^{*3} 正員, 新潟大学工学部 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050番地)

E-mail: kobayasi@clg.niigata-u.ac.jp

アを用いて、遠位大腿骨と近位脛骨の3次元骨形状モデルを構築した。MRI画像からはさらに大腿骨と脛骨の3次元軟骨形状モデルを構築した。重錘により切断膝へ任意の圧縮荷重を作用させることが可能なレバー・アーム型の自作装置に切断膝を設置した。肢位は靱帯の硬さおよび軟骨の状態を考慮して切断膝1（右膝）は伸展位、切断膝2（左膝）は90度屈曲位とした。膝関節前方から内側および外側関節面に圧力センサー（F-scan, Tekscan, 厚さ約0.1mm, センサーセルサイズ $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ ）を挿入した。なお、切断膝2の外側は隙間が無くセンサーを挿入できなかった。

圧縮荷重は、切断膝1（伸展位）には大腿骨骨幹部から鉛直下方に3段階（14.7N, 161.7N, 220.5N）、切断膝2（屈曲位）では大腿骨顆部前面を作用点として関節面に対して垂直に4段階の荷重（14.7N, 73.5N, 102.9N, 191.1N）を作用させた。荷重を作用させたままの状態で行った2方向X線撮影を行い、得られたX画像の骨輪郭とCT骨モデルとMRI骨モデルの投影輪郭との重ね合わせにより大腿骨と脛骨の3次元位置を決定した⁽⁷⁾。3次元位置決定後の大腿骨および脛骨形状モデルにそれぞれMRI軟骨モデルをフィッティングし、軟骨モデル同士が重複した部分を接触領域とみなした⁽⁸⁾。この接触領域を圧力センサーにより得られた接触領域および接触圧力を比較することで、イメージレジストレーションによる膝関節接触状態評価法の有効性を検討した。また、軟骨モデルを付与せず、CT骨モデル同士の近接量を求め、接触領域分布と比較した。

3. 結果および考察

切断膝1および切断膝2についてCT骨モデル、MRI骨モデルの2D-3Dイメージレジストレーションによる軟骨重複量（以下、接触深さ）の分布、CT骨モデル同士の近接量分布および圧力センサーによる接触圧力分布を圧縮荷重ごとに示す（図1）。切断膝1（伸展位）において、CT骨モデルおよびMRI骨モデルとも接触深さと圧力は内側ではいずれも関節面前方に、外側は関節面中央に分布した。また、圧縮荷重が増加すると接触深さと圧力は増加し、分布領域も大きくなった。切断膝2（屈曲位）では、CT骨モデルおよびMRI骨モデルとも接触深さと圧力はいずれも関節面後方に分布した。また、CT骨モデルでは圧縮荷重が増加すると接触深さと圧力はともに増加し、分布領域も大きくなったが、MRI骨モデルでは102.9N負荷時に分布領域が減少した。CT骨モデル同士の近接量分布の位置は軟骨接触領域の位置と概ね対応した。

Fig.1 Change in contact behavior with applied compression forces. Contours of contact depth determined by image registration method using CT bone model + MRI cartilage model (A), MRI bone model + MRI cartilage model (B), proximity between CT models (C), and contact pressure distributions measured by pressure sensor (D).

イメージレジストレーションによる軟骨モデル重複量から求めた接触領域の妥当性について、Bingham ら⁽²⁾は切断膝を用い、シリコンを接触領域の周囲に充填することで接触領域の大きさと位置を比較した。その結果、イメージレジストレーションによる接触領域は実測値と非常によく対応したと報告している。しかしながら、接触圧力分布との比較・検証は行っていない。本研究結果より、接触深さ分布と実測圧力分布に対応が見られたことから、接触深さから接触圧力を定性的に推定できる可能性が示された。また、CT 骨モデル同士の近接量分布が軟骨接触領域の位置と概ね対応したことから、近接量分布の中心から接触点を推定する手法は妥当と考える。

CT 骨モデルおよび MRI 骨モデルを用いた場合ともイメージレジストレーションより得られた接触深さと、実測した接触圧力には分布領域の対応が見られたこと、CT 骨モデル同士の近接量分布と接触圧力分布が概ね対応したことから、圧縮負荷の増加に伴い接触深さ量と接触圧力はともに増加傾向を示したことから、関節における軟骨の接触状態を推定評価する手法として有用であると考えられる。今後、イメージレジストレーション誤差やモデル形状誤差による影響を検討していく。

4. 結 言

イメージレジストレーションにより軟骨接触状態を推定評価する方法の有効性を切断肢実験で検証した。イメージレジストレーションにより得られた接触深さ分布および近接量分布と圧力センサーにより得られた接触圧力分布を比較した結果、同法は膝関節における軟骨の接触状態を生体内で推定評価する手法として有効であることが示された。

文 献

- (1) Li, G., DeFrate, L.E., Park, S.E., Gill, T.J., and Rubash, H.E., "In Vivo Articular Cartilage Contact Kinematics of The Knee. An Investigation Using Dual-Orthogonal Fluoroscopy and Magnetic Resonance Image-Based Computer Models", *American Journal of Sports Medicine*, Vol.33, No. 1 (2005), pp. 102-107.
- (2) Bingham, J.T., Papannagari, R., Van de Velde, S.K., Gross, C., Gill, T.J., Felson, D.T., Rubash, H.E., and Li, G., "In Vivo Cartilage Contact Deformation in the Healthy Human Tibiofemoral Joint", *Rheumatology*, Vol.47 (2008), pp. 1622-1627.
- (3) Wan, L., de Asla, R.J., Rubash, H.E., and Li, G., "In Vivo Cartilage Contact Deformation of Human Ankle Joints Under Full Body Weight", *Journal of Orthopaedic Research*, Vol.26 (2008), pp. 1081-1089.
- (4) Van de Velde, S.K., Gill, T.J., DeFrate, L.E., Papannagari, R., and Li, G., "The Effect of Anterior Cruciate Ligament Deficiency and Reconstruction on the Patellofemoral Joint", *American Journal of Sports Medicine*, Vol.36, No. 6 (2008), pp. 1150-1159.
- (5) Anderst, W.J. and Tashman, S., "A Method to Estimate In Vivo Dynamic Articular Surface Interaction", *Journal of Biomechanics*, Vol.36 (2003), pp.1291-1299.
- (6) Anderst, W.J. and Tashman, S., "Using Relative Velocity Vectors to Reveal Axial Rotation about the Medial and Lateral Compartment of the Knee", *Journal of Biomechanics*, Vol.43 (2010), pp.994-997
- (7) Kobayashi, K., Sakamoto, M., Tanabe, Y., Ariumi, A., Sato, T., Omori, G., and Koga, Y., "Automate Image Registration for Assessing Three-Dimensional Alignment of Entire Lower Extremity and Implant Position Using Bi-Plane Radiography", *Journal of Biomechanics*, Vol.42 (2009), pp.2818-2822.
- (8) 小田川健一, 豊田貴嗣, 小林公一, 谷藤理, 笹川圭右, 佐藤卓, 坂本信, 古賀良生, 田邊裕治, 大森豪, "イメージレジストレーション法による膝関節の接触挙動解析", *臨床バイオメカニクス*, Vol. 31 (2010), pp. 349-355.