

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19360046  
 研究課題名（和文）MRI による膝関節 3D モデルの作成とその接触領域評価および接触圧力解析への応用  
 研究課題名（英文）Reconstruction of 3D Knee Joint Model Using MRI and Its Application to Analysis of Joint Contact Mechanics  
 研究代表者  
 氏 名：田邊 裕治（TANABE YUJI）  
 所 属：新潟大学・自然科学系・教授  
 研究者番号：60143020

研究成果の概要：非侵襲、非 X 線被爆で生体関節に適用可能な MRI 情報に基づくコンピュータ支援手術システムを開発することを目的に、要素技術の確立を目指した研究を実施した。

MRI 情報から膝関節 3D モデルを再構築する方法を開発した。そして、MR 輝度信号プロファイルに基づく関節接触領域判定法を確立し、in vivo での膝関節における接触面積や接触領域の分布を求め、脛骨大腿関節および膝蓋大腿関節の運動解析や接触状態について解析した。

## 交付額

(金額単位：円)

|         | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|---------|------------|-----------|------------|
| 2007 年度 | 10,900,000 | 3,270,000 | 14,170,000 |
| 2008 年度 | 4,300,000  | 1,290,000 | 5,590,000  |
| 年度      |            |           |            |
| 年度      |            |           |            |
| 年度      |            |           |            |
| 総計      | 15,200,000 | 4,560,000 | 19,760,000 |

研究分野：生体力学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：生体力学、MRI、脛骨大腿関節、膝蓋大腿関節、接触解析

## 1. 研究開始当初の背景

正常な関節運動の理解は、関節障害と進行性の変性の分析、外傷および疾患の治療、そして治療後の回復を支援する上で重要である。関節運動の変化は、関節軟骨の変性を誘発すると考えられており、関節内の力学的環境の変化によっても、関節の退行性変化が発生することが報告されている。膝関節は人体

最大の荷重関節であり、脛骨大腿関節には歩行中には接触面に体重の約 3 から 4 倍、膝蓋大腿関節では階段を昇るとき体重の約 3 倍、深く膝関節を曲げたときには体重の約 8 倍の力がかかるといわれている。関節の内的安定性は、靭帯、腱、半月および周囲軟部組織によるところが大きい。このような複雑な力学的環境下にある膝関節の障害の治療およ

び治療後の回復の支援、退行性の膝関節疾患の発生機序を考える上で、膝関節の運動機能と接触状態を解析することはきわめて重要であり、関節の接触面積の大きさおよび接触領域の分布は重要な情報となる。

これまで関節の接触領域等を測定するために、屍体関節を用いた生体外 (in vitro) の研究が多く行われ、有用な知見が報告されてきた。これらの研究においては、関節内の接触状態を保存するという染色法および鋳型法と接触状況を接触センサでモニタリングする方法が用いられてきた。Ateshian らは、表面近接法によって求めた関節の接触領域を真値として、染色法、鋳型法および感圧フィルム法による接触領域の結果とそれぞれ比較した。その結果、染色法では接触面積を高く評価し、シリコンラバーによる鋳型法では、接触面積を低く評価し、接触センサの一種である感圧フィルム (Pressure-Sensitive Film : 以下 PSF) 法においては、妥当な接触面積を測定しているということを示している。しかしながら、切断肢の関節を用いた実験は、種々の条件でシミュレーションが可能である反面、関節負荷、筋収縮力等の設定により、結果が左右され、臨床的な意味づけが難しい場合がある。これに対して、近年、生体 (in vivo) における関節軟骨の接触状態を調べるために、MRI が有効な手段として用いられはじめている。MRI による関節の接触状態の解析は、関節軟骨同士の接触の判定が重要である。これまで行われてきた接触の判定は、画像解析ソフトにより関節軟骨の信号強度を用いる方法でも行われているが、熟練した観察者により視覚的に行う方法がほとんどである。Brechtler らは、6 体の切断膝を用いて膝蓋大腿関節を対象に MRI および感圧フィルム法による測定を同時に行い、MR 画像の目視による接触判定により求められた

接触面積が、実用上問題ないことを示しているが、客観的な関節軟骨接触の判定方法については言及していない。また、Besier らは、測定者内および測定者間で変動することを報告している。そのため、測定者に左右されない関節軟骨接触の判定方法の開発が望まれる。

## 2. 研究の目的

上記の「1. 研究の背景」を踏まえ、本研究では、

- (1)MR 画像再構築による関節の 3D モデルの作成
- (2)関節軟骨の接触の判定方法として、MR 画像の信号強度プロファイルを利用する方法の提案
- (3)PSF による測定を MRI の実験とは別に行い、両者のデータを比較することで、本手法の有効性と妥当性の検討

を主な目的とした。本報告書では、これらの中でも生体関節に対する接触解析の鍵を握る極めて重要な (2) と (3) に関する内容を中心に、以下に述べることにしたい。

## 3. 研究の方法

### (1)対象、使用機器および撮像条件

ブタの左膝関節 (n=2) を対象とし、PSF は、富士フイルム社製の超低圧タイプ、MRI 装置は Siemens 社製 Magnetom Impact Export 1.0T、コイルは CP Head coil である。撮像条件は、関節軟骨の描出を目的としているので、脂肪抑制 3D-Flash を用いた。TR (time of repetition) を 40msec、TE (time of echo) を 10msec、flip angle を 40°、加算回数 (NEX) を 1 回、スライス厚を 1.5mm、field of view (FOV) を 160×160 mm、matrix size を 512×512、band width (BW) を 130 Hz / pixel、撮像時間を約 12 分とし、矢状断面および冠状断面像を得た。画像の解析には、OSIRIS

version 4.0.7 ( University Hospital of Geneva  
www.expasy.ch /UIN )( 以下、OSIRIS ) および  
Image J ( http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html ) を  
使用した。

## (2) 解析手順

ブタの膝関節は、冷凍による関節軟骨の水分量に変化が起こらないよう凍結直後のものを用いた。撮影直前に大腿骨遠位端および脛骨近位端の関節軟骨を温存し、筋肉、半月および靭帯等の周囲軟部組織を取り除いた。その後、アクリル板で作製した自作の荷重装置内に、歯科用セメントで上下にあるガイドに大腿骨および脛骨を、それぞれを固定し、上部のスクリーンでガイドを押すことにより、関節面に力が加わるようにした。PSF に一定した濃染した領域が得られるように数回テストを行った。ブタの関節面にかかる最大の圧力は、両試料とも 1MPa 程度であった。

MRI による撮像は、それぞれの試料に対して決定した荷重を作用させ、自作荷重装置内を生理食塩水で満たし、撮像面を自作荷重装置のアクリル板面に合わせ撮像した。なお、撮像終了後に、再度 PSF を挿入し同じ大きさの荷重を作用させ、濃染した領域が撮影前に行ったものと、同じになっていることを視覚的に確認した。

PSF による接触面積は、スケールと共に濃染した PSF をデジタルカメラから約 50cm の距離に置き、斜めにならないように細心の注意を払って撮影した。その画素サイズは 1600 × 1200 である。その後、画像をパーソナルコンピュータに取り込み、濃染した領域 ( 接触領域 ) の面積を画像解析ソフトにより、2 値化法を用いて抽出し求めた。

MR 画像の測定精度は、パーシャルボリューム効果等の影響を受ける。それらの影響を加味して行わなければならない。そこで、脛骨および大腿骨の関節軟骨の信号強度とそれ

らの間隙の信号強度の比の異なる接触域を抽出し、信号強度の比毎の接触面積を PSF で求めた面積と比較する。

## MR 画像による接触面積の測定

### )MR 画像の接触域の決定方法

接触域の判定方法は、大腿骨から脛骨の関節軟骨にわたる信号強度プロファイルを用いた。信号強度プロファイルの取得方法は、図 1(MR 画像)に示すように、各スライス画像に対して、大腿骨側の関節軟骨から脛骨の関節軟骨への走査直線を設定する。走査直線は、MR 画像に対して垂直方向に設定し、走査する間隔は 1 pixel とした。得られたすべての断層画像に対して、走査直線を関節前面から後面へと 1 pixel ごとに移動し、信号強度プロファイル取得する。信号強度プロファイルの例を、図 1 (a)、(b)、(c)に示す。得られた信号強度プロファイルで脛骨側の関節軟骨の最大の信号強度を  $S_{max}$  とし、大腿骨-脛骨の間の最低の信号強度を  $S_{min}$  として、式(1)により信号強度の比  $R$  が、0.7、0.8、0.9、1.0 を下限値とするそれぞれの接触域を抽出した。

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} \quad (1)$$

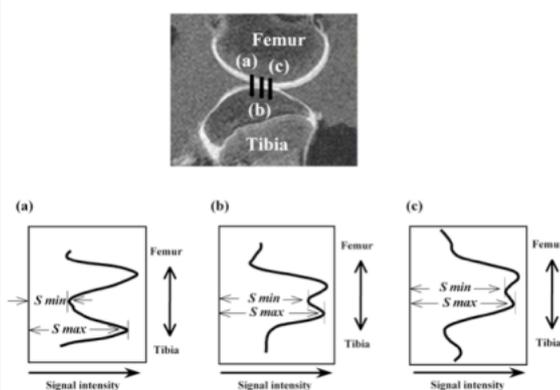


図 1 信号強度プロファイルの取得方法。下図は MR 画像の (a)、(b)、(c) に対応する信号強度プロファイル

### )接触領域の境界線図作成

撮像した冠状断面像および矢状断面像の中から、それぞれ膝関節の中央となる画像を選択したのち、選択した両断面画像が交差する直線を、それぞれの断面画像の基準線とし、基準線に基づいて冠状断面の左右方向を X 軸、矢状断面の左右方向を Y 軸とした任意の X-Y 座標を設定した。設定した基準線を一連のスライス画像に複写し、基準線から走査線までの長さ及び接触域の長さを測定した。接触域の長さを測定する方法には、幾つかの方法が提案されている。本研究では、すべての解析を手動で行っていることから、解析時間を短縮するため、接触域と決定した両端の位置に印を付け、走査直線を 3 から 6 pixel 移動させ、再度信号強度プロファイルを確認しながら、接触域上を、一方の印から走査線、走査線から走査線、最後に走査線から他方の印へと線分で結び順次長さを測定し、それらの総和を接触域の長さとした。関節軟骨の接触は、図 1 (c)に示す信号強度プロファイルのように、脛骨側の関節軟骨の信号強度が、大腿骨側の関節軟骨の信号強度より低いことを利用して識別した。

次に、冠状断面像および矢状断面像の各スライス画像より得られた関節軟骨の接触域の長さを考慮し、接触域の端点を設定した任意の X-Y 平面にプロットした。これらの操作によって冠状断面像と矢状断面像の接触領域の境界線図を作成した。このように作成した境界線図では欠損している部分があるため、両境界線図を重ね合わせて境界線図を作成し直した。得られた境界線図から接触面積を算出した。

PSF および MR 画像から得られた接触面積と接触領域の形状の検討

接触面積は、PSF から得られた数値と MR 画像の信号強度の比  $R$  毎の得られた数値を式

(2)により誤差  $err$  を求めて解析を行った。

$$err = \frac{M - P}{P} \quad (2)$$

ここで、 $M$  は MR 画像から得られた接触面積、 $P$  は PSF から得られた接触面積である。接触領域の形状については、PSF と MR 画像による接触分布図を視覚的に比較した。

なお、接触域の長さの測定には測定者による誤差が含まれているので、接触域の長さの測定から接触面積を求めるまでの操作を 5 回繰り返し、その変動も検討した。

## 4 . 研究成果

### (1)PSF および MRI による方法の再現性

試料 1 の PSF の接触領域の 2 値化画像を図 2 に示す。また、2 値化画像から接触面積を求めた。PSF の接触領域は、図 2 に示すように視覚的に再現性が保たれていた。MR 撮像前および撮像後の接触面積の変動係数は、5.0%未満であった。MR 画像より信号強度の比  $R$  毎に接触面積を求めた結果、 $R$  の増加に伴い接触面積が減少した。また、測定の変動係数は 1.5%未満であった。

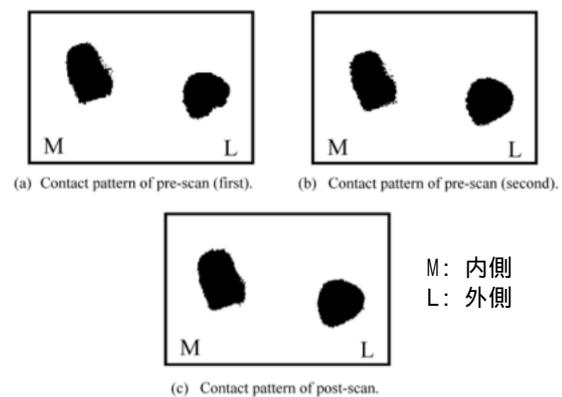


図 2 試料 1 の PSF の接触領域パターン。(a) MR 撮像前 (1 回目): (b) MR 撮像前 (2 回目): (c) MR 撮像後

### (2)接触面積の一致度の解析

誤差  $err$  と信号強度の比  $R$  との関係を図 3 に示す。また、得られた境界線図を PSF とと

もに図 4、5 示す。信号強度の比  $R$  が 0.9 の時に、誤差  $err$  がおよそ 6% 以内になった。また、図 4、5 に示すように信号強度の比  $R$  が 0.9 のとき、視覚的にも PSF と最も形状および接触領域の大きさが近かった。

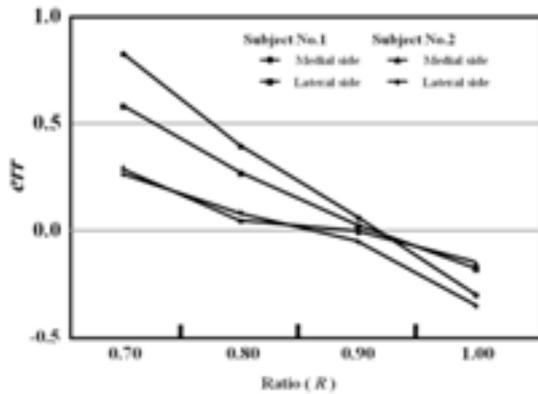


図 3 信号強度の比( $R$ )と誤差  $err$  の関係

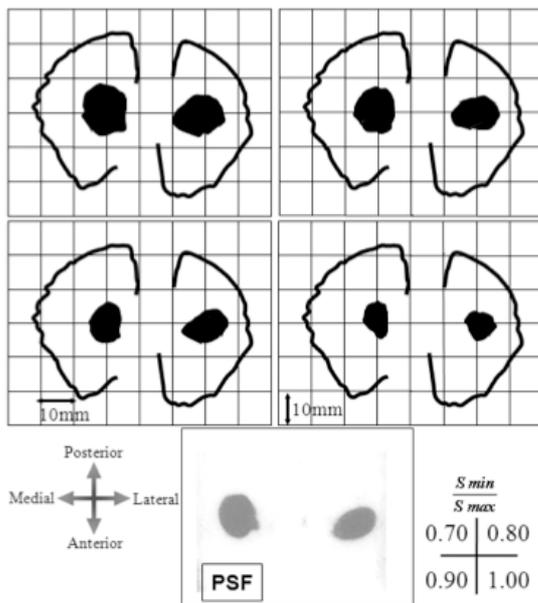


図 4 PSF と MRI より得られた接触領域の比較( 試料 1 )

### (3) 成果の総括

以上、本研究で得られた知見は、次のようにまとめられる。MR 信号強度プロファイルより得られた信号強度の比を用いて接触を判定することで、PSF と同等の精度で接触領域の評価ができる。したがって、3D 関節接触圧力の解析が RBSM や FEM などの数値解

析により可能となり、変形性関節症など関節疾患発生機序が力学的観点から解明できることが期待される。

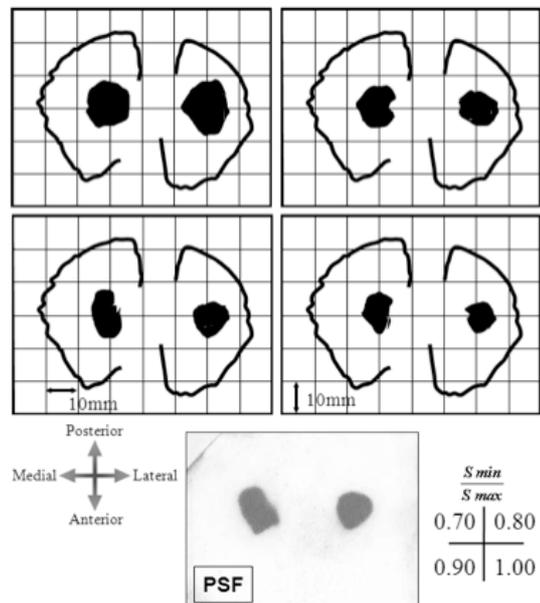


図 5 PSF と MRI より得られた接触領域の比較( 試料 2 )

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 18 件 )

Koichi Kobayashi、 Kenichi Odagawa, Makoto Sakamoto、 Yuji Tanabe、 Accuracy of Single Plane X-ray Image-Based Technique for Assessment of Knee Kinematics、 Journal of Biomechanical Science and Engineering ( 掲載決定 ) 査読有、 2009

小林公一、 田中伸明、 小田川健一、 佐藤卓、 坂本信、 田邊裕治、 大森豪、 古賀良生、 2 方向 X 線像を用いた骨および人工関節の 3 次元自動位置姿勢推定法の精度、 日本臨床バイオメカニクス学会誌、 査読有、 Vol.29、 2009、 pp.421-425.

笹川圭右、 渡辺聡、 小林公一、 坂本信、 田邊裕治、 佐藤卓、 古賀良生、 MRI と CT を用いた 3 次元骨形状モデルの精度に関する検討、 日本臨床バイオメカニクス学会誌、 査読有、 Vol.29、 2009、 pp.397-402.

田中伸明、小林公一、坂本信、田邊裕治、佐藤卓、古賀良生、大森豪、透視X線像を用いた膝関節の3次元的位置姿勢の自動推定、日本臨床バイオメカニクス学会誌、査読有、Vol.29、2009、pp.403-408.

解晨、佐藤卓、古賀良生、有海明央、田邊裕治、清徳則雄、人工膝関節置換術における大腿骨髄内アライメントロッドの術前シミュレーションと術中制御による計画的挿入法の精度検定、日本臨床バイオメカニクス学会誌、査読有、Vol.29、2009、pp.285-291.

他 13件

〔学会発表〕(計 43 件)

小田川健一、田中伸明、小林公一、坂本信、田邊裕治、1方向X線像を用いたイメージレジストレーションによる骨の絶対位置姿勢推定精度、日本機械学会第21回バイオエンジニアリング講演会、平成21年1月24日、札幌コンベンションセンター

小林公一、木村太郎、解晨、坂本信、田邊裕治、3次元下肢アライメントと下肢荷重線の関係、日本機械学会第21回バイオエンジニアリング講演会、平成21年1月24日、札幌コンベンションセンター

笹川圭右、坂本信、吉田秀義、小林公一、田邊裕治、橈骨手根関節の生体内接触メカニズムについての研究、日本機械学会第21回バイオエンジニアリング講演会、平成21年1月24日、札幌コンベンションセンター

解晨、坂本信、小林公一、湊泉、古賀良生、田邊裕治、人工股関節のソケット関節面における応力分布の数値解析、日本機械学会第21回バイオ

エンジニアリング講演会、平成21年1月24日、札幌コンベンションセンター  
Koichi Kobayashi、Nobuaki Tanaka、Kenichi Odagawa、Makoto Sakamoto、Yuji Tanabe、Image-Based Matching For Natural Knee Kinematics Measurement Using Single-Plane Fluoroscopy、3rd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics、December 9, 2008、Cheng Kung University、Tainan city、Taiwan

他38件

〔図書〕(計 1 件)

古賀良生、山本智章、速水正、山際浩史、大森豪、遠藤和男、佐藤卓、田邊裕治、坂本信、田中正栄、渡辺博史、南江堂、変形性膝関節症 - 病態と保存療法 -、2008、pp.101-104.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田邊 裕治 (TANABE YUJI)  
所属 新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号：60143020

### (2) 研究分担者

坂本 信 (SAKAMOTO MAKOTO)  
所属 新潟大学・医歯学系・教授  
研究者番号：80215657

小林 公一 (KOBAYASHI KOICHI)  
所属 新潟大学・医歯学系・助教  
研究者番号：70296317

大森 豪 (OMORI GO)  
所属 新潟大学・超域研究機構・教授  
研究者番号：70283009

### (3) 連携研究者

(該当者なし)