

# 変形性膝関節症患者のシミュレーション的解析を用いた 膝関節内反モーメントと側方剪断力の減少

## *Reduction of Knee Adduction Moment and Lateral Joint Reaction Force of Knee Osteoarthritis Patients by Simulation Analysis*

大見 武弘<sup>1,2)</sup> 山田 拓実<sup>1)</sup>

TAKEHIRO OMI, RPT, MSc<sup>1,2)</sup>, TAKUMI YAMADA, RPT, PhD<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Human Health Sciences, Tokyo Metropolitan University

<sup>2)</sup> Tokyo Medical and Dental University: 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8519, Japan TEL +81 3-5803-4721  
E-mail: ohmi.spt@tmd.ac.jp

*Rigakuryoho Kagaku 33(6): 883-886, 2018. Submitted May 15, 2018. Accepted Jul. 4, 2018.*

**ABSTRACT:** [Purpose] The purpose of this study was to perform simulation analysis to assess the gait modification required to reduce mechanical stress on the knee joint. [Participants and Methods] The gait of 9 women with osteoarthritis (OA) of the knee joint was assessed using a 3-dimensional motion analysis system and 4 force plates. Simulation analysis was performed after 20% reduction in the lateral ground reaction force using musculoskeletal modeling software. Knee adduction moment (KAM) and lateral joint reaction force (LJRF) were compared before and after analysis, and the reduction rates of KAM and LJRF and other parameters were compared using the Spearman-Rho correlation coefficient. [Results] After simulation analysis, KAM was reduced by 6.3% and LJRF by 15.9%. The reduction rate for KAM negatively correlated with the knee joint varus angle during gait. [Conclusion] The results suggest that simulation analysis could be useful for elucidating the mechanisms associated with decreases in KAM and LJRF, and could be used for walking guidance in clinical practice for patients with knee OA.

**Key words:** simulation analysis, knee adduction moment, lateral joint reaction force

**要旨:**〔目的〕 目的は、シミュレーション的解析により膝関節メカニカルストレスを減ずるための歩行修正の知見を得ることとした。〔対象と方法〕 変形性膝関節症女性患者9名を対象に三次元動作解析装置とフォースプレートを用いて歩行解析した。シミュレーション的解析は筋骨格モデルソフトを用いて側方床反力を20%減少させた。解析前後で外部膝関節内反モーメント（KAM）と側方剪断力（LJRF）を比較し、それぞれの減少率と各パラメータとの間で相関分析した。〔結果〕 解析後にKAMは6.3%、LJRFは15.9%減少した。KAMの減少率は歩行時膝内反角度と有意な負の相関を示した。〔結語〕 シミュレーション的解析は、KAMやLJRFを減少させるメカニズムの解明に役立ち、予防指導や歩行修正の根拠として用いられる可能性が示唆された。

**キーワード:** シミュレーション的解析、膝内反モーメント、側方剪断力

<sup>1)</sup> 首都大学東京大学院 人間健康科学研究科

<sup>2)</sup> 東京医科歯科大学 スポーツ医歯学診療センター：東京都文京区湯島1-5-45（〒113-8519）TEL 03-5803-4721

## I. はじめに

変形性膝関節症 (osteoarthritis of knee joint: 以下、膝 OA) は膝関節の疼痛と機能障害を主症状とする運動器疾患である。本邦における単純 X 線画像上の膝 OA 患者は、男性 840 万人、女性 1560 万人、合計 2400 万人になると推定されている<sup>1)</sup>。膝 OA は要介護や要支援を必要とする疾患の上位にあり、高齢社会では加齢に伴う膝 OA の予防は重要な課題である。膝 OA は年齢、性別、メカニカルストレスの増大、他の系統因子などの素因と損傷、過負荷、不安定性、肥満、遺伝性などが関与して発症・進行する<sup>2)</sup>。

膝関節への過度なメカニカルストレスは、関節軟骨の破壊につながる<sup>3)</sup>。関節モーメント、関節パワー、床反力などがメカニカルストレスとして先行研究で扱われている。膝 OA 患者の動作解析時に多用されているメカニカルストレスの代表値の一つに、膝関節内反モーメント (knee adduction moment: 以下、KAM) が挙げられる。KAM の増加は膝関節内側コンパートメントの負荷の増大を意味する<sup>4)</sup>。KAM が増加すると膝 OA の進行リスクも増加するといわれ<sup>5)</sup>、単純 X 線画像上での膝 OA の重症度の予測因子<sup>6)</sup>としても挙げられている。臨床では、歩行の立脚初期に膝が外側に動揺する lateral thrust の出現により KAM が増大していると判断できる<sup>7)</sup>。膝 OA 患者の歩行時の KAM は健常者よりなる対照群より大きいとされている<sup>7,8)</sup>。KAM を減らす歩行修正には、立脚側の toe-out 角度の増大、体幹の支持側への傾斜、歩行速度の低下、歩行補助具の使用等がある<sup>9)</sup>。そのうち、立脚側の toe-out 角度の増大、体幹の支持側への傾斜は、床反力ベクトルと膝関節中心との距離を小さくする歩行戦略である。

外力である床反力には3つの因子、力と方向(3方向成分)、および床反力作用点があり、それらは歩隔や歩行速度の影響を受け、KAM を変化させる。歩行修正による膝関節メカニカルストレスに対する影響を量的に分析するとき問題となるのは、変数を独立してコントロールすることの困難性である。本研究は、シミュレーション的解析により膝関節メカニカルストレスを減ずるための歩行修正の戦略の知見を得ることを目的とした。三次元動作解析装置とフォースプレートから得られた歩行データを使用し、シミュレーション的に側方床反力のみ減少させ膝関節メカニカルストレスを計算した。

## II. 対象と方法

### 1. 対象

本研究の対象は地域在住の内側型膝 OA と診断された女性 9 名で、全員歩行補助具を使用せずに歩行が自立していた。対象は、年齢  $70.0 \pm 5.0$  歳、身長  $150.0 \pm 4.0$

cm、体重  $63.8 \pm 8.7$  kg、BMI  $28.4 \pm 4.6$  kg/m<sup>2</sup> (平均値  $\pm$  標準偏差) であった。膝 OA 以外の疾患で運動機能に影響を及ぼしている者、認知機能が著しく低下している者、研究参加の同意が得られなかった者は除外した。本研究はヘルシンキ宣言に則り行った。研究の開始に当たり首都大学東京荒川キャンパス研究安全倫理委員会の承認を得た(承認番号 14107)。またすべての対象者には研究の意義、目的と、研究の参加の有無により不利益が生じないことを十分説明し、書面にて同意を得た後に実施した。

### 2. 方法

計測には、サンプリング数 100 Hz の赤外線カメラ 10 台を用いた三次元動作解析装置 VICON NEXUS (VICON 社製) および 1000 Hz のフォースプレート 4 枚 (Kisler 社製) を用いた。Point Cluster 法に準拠して、対象の骨盤と両下肢に直径 9 mm の赤外線反射マーカーを 56 個 (左右の上前腸骨棘、上後腸骨棘、大転子、大腿部 (片側 9 個)、大腿骨外側顆、大腿骨内側顆、脛骨外側顆、脛骨内側顆、下腿部 (片側 6 個)、踵骨、腓骨外果、脛骨内果、第二中足骨頭、踵外側部、載距突起) 貼付した。計測動作は静止立位と自由歩行とした。

自由歩行では、対象がフォースプレートに自然に接地できるようにした後で約 8 m の歩行路で実施した。歩行速度は対象の任意の速度とし、歩幅や歩き出しは規定しなかった。得られた静止立位と自由歩行のデータを筋骨格モデル作成ソフト Software for Interactive Musculoskeletal Modeling (以下、SIMM, MusculoGraphics 社製) に取り込んだ。SIMM にて骨盤、大腿、下腿、足部のセグメントからなる下肢モデルを作成した。モデルには各下肢に Hill タイプの 36 筋を付着させた。各セグメントは骨盤帯、股関節、膝関節、距腿関節、距骨下関節で関節され 28 の自由度とした。

SIMM のモデルを用いて歩行速度、歩隔、ステップ長、KAM が最大値のときの膝関節の内反角度 (以下、膝内反角度)、KAM の最大値を算出した。膝関節メカニカルストレスは KAM に加えて、筋張力を考慮した関節間力に注目した。その理由は、関節間力は、脛骨の鉛直圧縮力や側方や前方剪断力のメカニカルストレスを表しうるからである。関節間力は体節間浸透力と関節モーメントから推定される筋張力から求められる。KAM と同様に、SIMM のモデルから側方剪断力 (lateral joint reaction force: 以下、LJRF) の最大値を算出した。

次に、三次元動作解析装置とフォースプレートから得られた歩行データを使用し、シミュレーション的に側方床反力のみ減少させ膝関節メカニカルストレスを計算した。三次元動作解析装置とフォースプレートから得られた歩行データの三次元座標データと床反力の鉛直・進行成分は不変とし、側方床反力のみ 20% 減少させた。

20%減少させた側方床反力を用いて、逆動力学的解析を行い、KAMとLJRFの最大値を算出した。KAMは身長と体重、LJRFは体重でそれぞれ正規化した。

統計分析として、シミュレーション的解析前後のKAMおよびLJRFをWilcoxonの符号付順位検定と比較した。KAMおよびLJRFのシミュレーション的解析前後の変化率と歩行速度、歩隔、ステップ長、膝内反角度、および側方床反力のスカラー量との関係を検討するためにSpearmanの順位相関係数を算出した。統計解析は、SPSS ver.19 (IBM社製)を用い、有意水準は5%とした。

### III. 結果

シミュレーション的解析前の歩行データを表1に示す。KAMは $0.38 \pm 0.08$  Nm/m/kgからシミュレーション的解析後に $0.36 \pm 0.08$  Nm/m/kgとなり、 $6.26 \pm 3.99\%$ の有意な減少がみられた ( $p=0.02$ ) (表2)。

表1 シミュレーション的解析前の歩行解析データ

膝内反角度 (°)	$6.3 \pm 3.0$
歩行速度 (m/s)	$0.9 \pm 0.3$
歩隔 (cm)	$11.8 \pm 6.4$
歩幅 (m)	$0.5 \pm 0.1$
ケイデンス (steps/min)	$106.9 \pm 11.3$
側方床反力 (N/kg)	$0.7 \pm 0.2$

平均値 ± 標準偏差。膝内反角度：KAMが最大値のときの膝関節内反角度。

表2 シミュレーション的解析前後のメカニカルストレスの変化

	解析前	解析後
KAM* (N/m/kg)	$0.38 \pm 0.08$	$0.36 \pm 0.08$
LJRF* (N/kg)	$2.13 \pm 0.86$	$1.77 \pm 0.73$

平均値 ± 標準偏差。KAM：knee adduction moment, LJRF：lateral joint reaction force. \*： $p<0.05$ .

表3 シミュレーション的解析前後の変化率と歩行パラメータの相関

	KAM 変化率	LJRF 変化率	膝内反角度	歩行速度	歩隔	歩幅	ケイデンス	側方床反力
KAM 変化率	1	0.2	-0.8*	-0.1	0.6	-0.2	0.1	0.3
LJRF 変化率		1	-0.1	0.2	0.1	0.1	0.6	-0.1
膝内反角度			1	-0.3	-0.6	-0.1	-0.2	-0.1
歩行速度				1	-0.5	0.9	0.6	0.3
歩隔					1	-0.6	-0.1	-0.1
歩幅						1	0.6	0.3
ケイデンス							1	-0.2
側方床反力								1

KAM：knee adduction moment, LJRF：lateral joint reaction force, 膝内反角度：KAMが最大値のときの膝関節内反角度。  
\*： $p<0.05$ .

KAMの変化率は膝内反角度と有意な負の相関を示した ( $\rho = -0.79$ ,  $p=0.02$ ) (表3)。LJRFは $2.13 \pm 0.86$  N/kgからシミュレーション的解析後に $1.77 \pm 0.73$  N/kgとなり、 $15.90 \pm 11.60\%$ の有意な減少がみられた ( $p=0.01$ )。LJRFの変化率と有意な相関を示すパラメータはなかった (表3)。

### IV. 考察

本研究は、側方床反力の減少が膝関節ストレス (KAMとLJRF) に対する影響を明らかにするため、シミュレーション的解析により検討した。その結果、側方床反力を20%減少させると、KAMは6.3%、LJRFは15.9%減少した。KAMの減少率は膝内反角度と有意な負の相関を示した。LJRFの減少率と有意な相関を示すパラメータはなかった。

KAMの大きさは床反力ベクトルとレバーアームの長さによって決定される。膝OAの症状のある膝は、症状のない膝と比較して、自由歩行において内側への床反力のスカラー量が約5%小さく、レバーアームは約20%大きい<sup>10)</sup>。KAMが最も大きくなる時期は、レバーアームが最も長くなる時期と一致している<sup>10)</sup>。KAMのレバーアームを短くするための代償的な歩行戦略は体幹を側屈させることである<sup>9,11,12)</sup>。健康成人において支持脚側への10°体幹側屈を伴う歩行は、体幹正中位での通常歩行と比較してKAMの第1峰を約60%減少させることができる<sup>9,12)</sup>。しかし、歩行立脚期での体幹の支持側側屈は歩容の悪化や歩行の柔軟性を減少させる可能性が指摘されている<sup>12,13)</sup>。KAMを減少させる別の歩行修正戦略として、立脚期のtoe-outが挙げられている<sup>9)</sup>。自然歩行から平均11.4%のtoe-out歩行は、KAMの第1峰のレバーアームを6.7%、KAMを11.7%減少させ、第2峰ではそれぞれ22.9%、4.4%減少させる<sup>14)</sup>。歩行速度に関しては、健康成人では自然歩行から歩行速度を15%遅くすると、KAMが約10%減少すると報告されている<sup>15)</sup>。しかし、日常での歩行速度の低下は、身体機能の低下を惹起し、長期的には要介護や生命予後の低下に

つながる。そのため、高齢者に多い膝 OA の歩行修正としては不適切である。KAM の減少は歩行補助具の使用でも検証されている。健側に杖をつくことで KAM を約 10% 減少させることが可能とされている<sup>16,17)</sup>。本研究の結果はこれら先行研究よりも小さな減少率であった。

本研究では、側方床反力を 20% 減少し、鉛直・進行成分は不変とした。これは床反力ベクトルを垂直に近づけている。すなわち、膝関節の前額面のレバーアームを短くしている。歩行時の膝関節前額面におけるレバーアームは、膝 OA に罹患している膝では罹患していない膝と比較して 1.12 倍となり、KAM のピーク値と強い相関関係（膝 OA が進行した膝  $r=0.77$ 、膝 OA が進行していない膝  $r=0.57$ ）が示されている<sup>10)</sup>。本研究では、KAM の減少率と膝内反角度との間に有意な負の相関がみられた。この説明としては、膝内反角度と側方床反力の間に相関関係がみられなかったことから、膝内反角度の大きい膝では膝関節前額面におけるレバーアームが大きく、側方床反力を 20% 減少させた時のレバーアームの減少率が小さくなるのが要因であると推測された。

LJRF は大腿骨が脛骨を身体の外側に押す力を表している。LJRF は膝関節側方制御する組織への負荷の根拠となることができると考えられる。すなわち LJRF は KAM と同様に膝 OA を進行させるメカニカルストレスの一つとして考えられる。本研究の結果から膝 OA 患者の歩行時のメカニカルストレスを減少させることが示唆された。

本研究の限界と課題としては、側方床反力減少率が 20% の 1 種類の検討であったことである。今後、数種類の減少率を用いて検証を進める必要がある。

本研究は、シミュレーション的解析を用いて KAM を減らすための歩行修正の戦略の知見を得ることを目的に行った。その結果、側方床反力を 20% 減少させると、KAM は 6.3%、LJRF は 15.9% 減少した。KAM の減少率は歩行時膝関節内反角度と有意な負の相関を示した。これは、膝内反角度が大きい膝では前額面上の床反力レバーアームが大きいために要因であると推測された。シミュレーション的解析により、歩行時の KAM と膝内反角度との相関係数が 0.095 から 0.452 に増加しており、本研究の解析手法は側方床反力が膝 OA 患者における膝関節メカニカルストレスに与える影響を理解する根拠の一助となり得る可能性が示唆された。

**利益相反** 本研究における公開すべき利益相反はない。

#### 引用文献

- 1) Muraki S, Oka H, Akune T, et al.: Prevalence of radiographic knee osteoarthritis and its association with knee pain in the elderly of Japanese population-based cohorts: the ROAD study. *Osteoarthritis Cartilage*, 2009, 17: 1137-1143.
- 2) Englund M: The role of biomechanics in the initiation and progression of OA of the knee. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 2010, 24: 39-46.
- 3) Andriacchi TP, Koo S, Scanlan SF: Gait mechanics influence healthy cartilage morphology and osteoarthritis of the knee. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91: 95-101.
- 4) 木藤伸宏: 変形性膝関節症に対する理学療法. *理学療法京都*, 2010, 39: 49-53.
- 5) Miyazaki T, Wada M, Kawahara H, et al.: Dynamic load at baseline can predict radiographic disease progression in medial compartment knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*, 2002, 61: 617-622.
- 6) Sharma L, Hurwitz DE, Thonar EJ, et al.: Knee adduction moment, serum hyaluronan level, and disease severity in medial tibiofemoral osteoarthritis. *Arthritis Rheum*, 1998, 41: 1233-1240.
- 7) Hurwitz DE, Ryals AB, Case JP, et al.: The knee adduction moment during gait in subjects with knee osteoarthritis is more closely correlated with static alignment than radiographic disease severity, toe out angle and pain. *J Orthop Res*, 2002, 20: 101-107.
- 8) Kaufman KR, Hughes C, Morrey BF, et al.: Gait characteristics of patients with knee osteoarthritis. *J Biomech*, 2001, 34: 907-915.
- 9) Simic M, Hinman RS, Wrigley TV, et al.: Gait modification strategies for altering medial knee joint load: a systematic review. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2011, 63: 405-426.
- 10) Hunt MA, Birmingham TB, Giffin JR, et al.: Associations among knee adduction moment, frontal plane ground reaction force, and lever arm during walking in patients with knee osteoarthritis. *J Biomech*, 2006, 39: 2213-2220.
- 11) Hunt MA, Birmingham TB, Bryant D, et al.: Lateral trunk lean explains variation in dynamic knee joint load in patients with medial compartment knee osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*, 2008, 16: 591-599.
- 12) Mündermann A, Asay JL, Mündermann L, et al.: Implications of increased medio-lateral trunk sway for ambulatory mechanics. *J Biomech*, 2008, 41: 165-170.
- 13) Simic M, Hunt MA, Bennell KL, et al.: Trunk lean gait modification and knee joint load in people with medial knee osteoarthritis: the effect of varying trunk lean angles. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2012, 64: 1545-1553.
- 14) Jenkyn TR, Hunt MA, Jones IC, et al.: Toe-out gait in patients with knee osteoarthritis partially transforms external knee adduction moment into flexion moment during early stance phase of gait: a tri-planar kinetic mechanism. *J Biomech*, 2008, 41: 276-283.
- 15) Robbins SM, Maly MR: The effect of gait speed on the knee adduction moment depends on waveform summary measures. *Gait Posture*, 2009, 30: 543-546.
- 16) Kemp G, Crossley KM, Wrigley TV, et al.: Reducing joint loading in medial knee osteoarthritis: shoes and canes. *Arthritis Rheum*, 2008, 59: 609-614.
- 17) Chan GN, Smith AW, Kirtley C, et al.: Changes in knee moments with contralateral versus ipsilateral cane usage in females with knee osteoarthritis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2005, 20: 396-404.