

三次元剛体モデルを用いた膝関節回旋の分析

加賀谷善教¹⁾, 二見 俊郎²⁾

¹⁾ 鹿屋体育大学スポーツトレーニング教育研究センター

²⁾ 北里大学医療衛生学部理学療法学専攻

ABSTRACT

The effect of the tibial rotational movement during functional activities has not been well understood. The purpose of this study was to analyze rotational behavior of the knee using a three-dimensional rigid body model. Ten healthy young women participated in this study. Mean age, mean height and body weight were 22.9 years old, 159.7cm and 56.3kg, respectively. All subjects were obtained written consent form after explanation of procedure. The lower leg rotation with respect to the upper leg was measured during three functional movements, including single-legged squatting and landing, as well as voluntary valgus in lunged position. In single-legged squatting, lower leg showed increasing internal rotation ($9.1 \pm 3.5^\circ$) as knee flexion angle ($60.2 \pm 6.4^\circ$) increased. In landing, most of subjects were in internal rotation shortly following landing from the height of 20cm, then lower leg showed increasing external rotation before maximal knee flexion ($53.5 \pm 6.7^\circ$). All subjects showed external rotation ($6.7 \pm 2.1^\circ$) during voluntary valgus movement. Knee rotational patterns were similar to our past report. We might pay attention not only range of knee rotation of movement, but also range of knee flexion and movement speed as well.

Key words : rotational behavior during functional activities, three-dimensional rigid body model, Squatting and Landing

膝関節回旋機能, 三次元剛体モデル, スクワットと着地動作

I. はじめに

膝関節運動は、脛骨および大腿骨顆の形状により、屈曲伸展に伴い内外旋を生じ¹⁶⁾、Screw home movementとして知られる膝伸展時の下腿外旋は、屈曲 35° からの伸展で外旋量が増加すると言われている²¹⁾。また、Coughlinらはスクワット中の脛骨内旋の66%が膝屈曲 15° までに生じたと報告した³⁾。整形外科疾患にみられる変形性膝関節症やスポーツ外傷による膝関節外傷等で生じる問題は、臨床上、これらの膝関節回旋機能の破綻によるものが大きい⁴⁾。特に近年では、膝前十字靭帯（ACL）損傷の予防的観点から、膝外反や回旋に着目した運動力学的解析が行われており²⁾¹⁷⁾¹⁹⁾、Chaudhariらは、Three-link passive dynamic modelを用いた片脚着地の研究から、膝内外反位と比較してニュートラルアライメントが、ACL損傷のリスクを減少させると述べている²⁾。

我々も各種動作時の下腿回旋運動を解析し、一般

的には膝外反では下腿外旋、膝内反では内旋すると考えられているものの、症例によってその回旋様式が異なること等を報告してきた⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹⁸⁾。また臨床的には、膝関節に生じる回旋ストレスを減弱させるエクササイズやファンクショナル・テーピングを実施することで、その効果を実感しているものの⁷⁾⁸⁾¹²⁾、諸家の実験の解析手法の違いから、必ずしも膝関節の回旋機能が明らかになっているとは言い難い。

今回は、我々が行っている三次元剛体モデルを用いた膝関節回旋の分析の中で、健常成人の基礎データ収集を目的とした実験から、スクワットと着地動作の違いについて若干の考察を加えて報告する。

II. 対象と方法

対象は膝関節に外傷の既往がなく、現在も疼痛等の問題を有しない健常女子10名で、年齢 22.9 ± 2.2 歳、身長 159.7 ± 4.5 cm、体重 56.3 ± 4.8 kgであった。

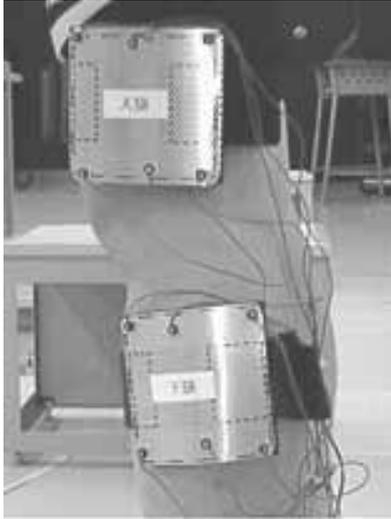


図1. カフへのマーカー装着

動作時にマーカーが数個隠れても三次元剛体モデルが作成できるよう6個のマーカーを装着した。

なお、全例ボールを蹴る側は右であった。

被験者は、左大腿および下腿に皮膚の動きによる誤差を防ぐために作製したアルミ製カフを装着し、カフ上に各々6個のマーカーを貼り付けた(図1)。三次元動作解析で用いられる機器の多くは、輝点位置測定装置であるが、皮膚の動きやマーカーの装着位置の違いにより、測定値に大きな誤差が生じる¹⁹⁾。今回、三次元動作解析に用いたOPTOTRAK (Northern Digital社製)は、輝点位置を3台のカメラで読み取る方法ではあるが、マーカーは皮膚上ではなく剛体とみなせる物に貼り、その剛体を身体に装着することで、身体そのものを剛体と仮定する。

測定課題は以下の3種目とし、十分な練習を行った後に、各々1回、50Hzで5秒間測定した。

- 1) 片脚バランスを保てる範囲内での左片脚スクワット (以下 Squatting)
- 2) 20cm台からの左片脚跳び降り左片脚着地 (以下 Landing)
- 3) 左足一歩前で膝関節角度を 40° に保つての意図的な膝外反動作 (以下 Knee in)

なお、Squattingについては動作途中で大きくバランスを崩した試行についてはデータを取り直した。Landingについても同様に、着地後バランスを大きく崩した場合には、取り直したデータを解析に採用した。

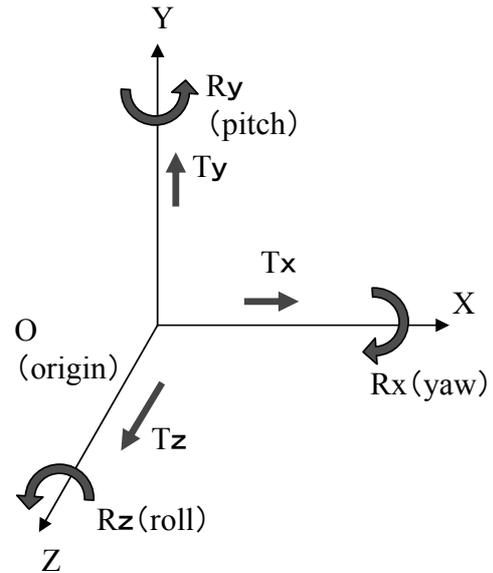


図2. Euler角

回転 (Roll, Pitch, Yaw) と並進 (Tx, Ty, Tz) の6自由度で表現される。

三次元剛体モデルの分析には、Data Analysis Package (Northern Digital社製)を用いた。三次元空間での位置変化は、投射角ではなくEuler角で求めるため、各体節の運動は回転と並進の6自由度 (Roll, Pitch, Yaw, Tx, Ty, Tz) で表現される(図2)。また、特に膝関節回旋角度に注目したため、座標変換を回旋、屈曲伸展、内外反の順とすることで回旋の誤差を最小限にした²⁰⁾。

被験者に安静立位をとらせ、X軸を矢状-水平軸、Y軸を前額-水平軸、Z軸を水平軸との垂直方向に規定し、大腿および下腿の剛体モデルを作成した。X軸上の+方向の回転を外反、-方向の回転を内反、Y軸上の+方向の回転を屈曲、-方向の回転を伸展、Z軸上の+方向の回転を内旋、-方向の回転を外旋と規定し、大腿に対する下腿の相対的角度を算出した(図3)。

統計学的解析に関して、SquattingとLanding間の膝屈曲および回旋角度の平均値の差の検定には、Wilcoxon検定を用いた。また、同一課題間の回旋量と屈曲角度、内外反角度間については相関関係を求めた。

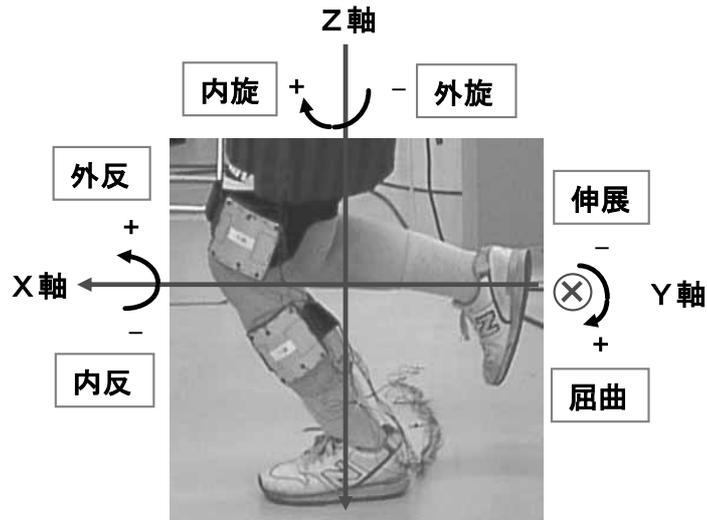


図3. 各運動方向の定義

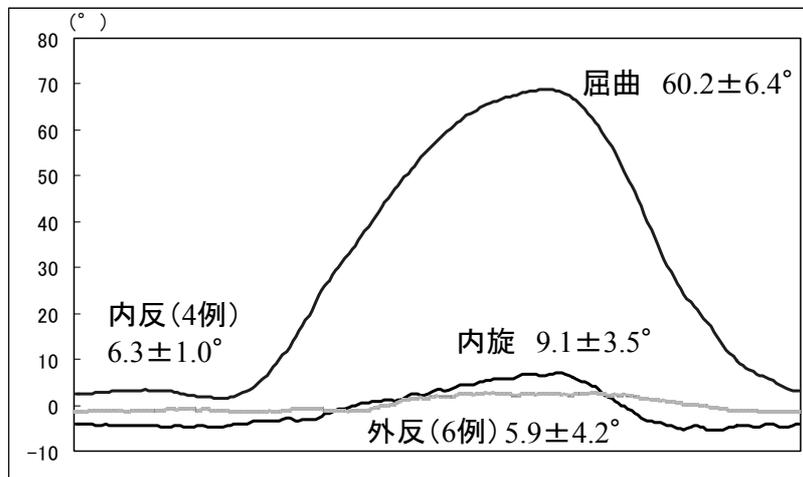


図4. Squattingの結果 (n=10)

グラフ内の数値は10名の平均だが、グラフは代表例を提示した。本症例は、68.9°の膝屈曲動作で、12.1°の内旋と4.4°の外反が認められた。

表1. 屈曲・回旋角度と回旋様式

	回旋角度	回旋様式	最大屈曲
Squatting	9.1±3.5	内旋	60.2±6.4
Landing	13.9±3.9	内旋から外旋	53.5±6.7
Knee in	6.7±2.1	外旋	41.5±5.8

単位：角度 (°)

※：P<0.01

Ⅲ. 結果

1. Squatting

膝関節屈曲範囲は60.2±6.4°で、全例が9.1±3.5°と膝関節内旋を生じた。この時、最大屈曲と

最大内旋の時期はほぼ一致し、最大屈曲から伸展に伴い膝関節は外旋した(表1・図4)。一方、内外反に関しては、外反が6例で5.9±4.2°、内反が4例で6.3±1.0°であった。

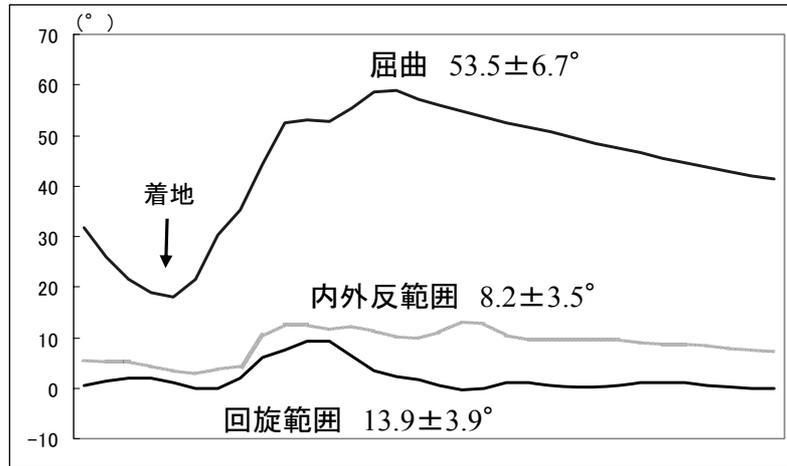


図 5. Landingの結果 (n=10)

グラフ内の数値は10名の平均だが、グラフは代表例を提示した。本症例は、膝最大屈曲までの間に、内旋から外旋に移行した。

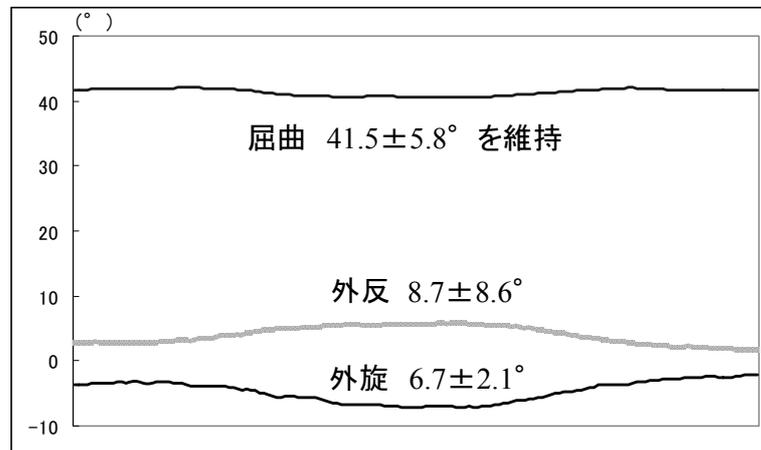


図 6. Knee inの結果 (n=10)

グラフ内の数値は10名の平均だが、グラフは代表例を提示した。本症例は、 42.3° の膝屈曲角度を維持しながら、 4.2° の外反と 5.3° の外旋が認められた。

2. Landing

着地時の膝関節屈曲角度は $16.7 \pm 4.6^\circ$ で、そこから $53.5 \pm 6.7^\circ$ まで屈曲した。着地後、ほぼ全例で膝関節は内旋し、最大屈曲までの間に、急激に外旋に運動方向が変換した。この時の回旋範囲は、 $13.9 \pm 3.9^\circ$ であった(表1・図5)。また、内外反に関しては、微細に内外反を繰り返しており、その角度範囲は $8.2 \pm 3.5^\circ$ であった。

3. Knee in

屈曲は $41.5 \pm 5.8^\circ$ を維持していた。外反角度は $8.7 \pm 8.6^\circ$ で、全例が $6.7 \pm 2.1^\circ$ と外旋を示した(表1・図6)。

4. 統計学的解析

統計学的には、Squattingに比しLandingの回旋角度は有意に大きかった($P < 0.01$)。一方、膝屈曲角度については、Squattingに比しLandingが有意に小さかった($P < 0.01$)。また、同一課題間の回旋量と屈曲角度、回旋量と内外反角度間については相関関係が認められなかった。

IV. 考察

身体動作における膝関節回旋制御のメカニズムは、脛骨大腿関節の形状や筋・靭帯による影響が大きい¹⁾¹⁵⁾²¹⁾。screw home movementに代表される膝関

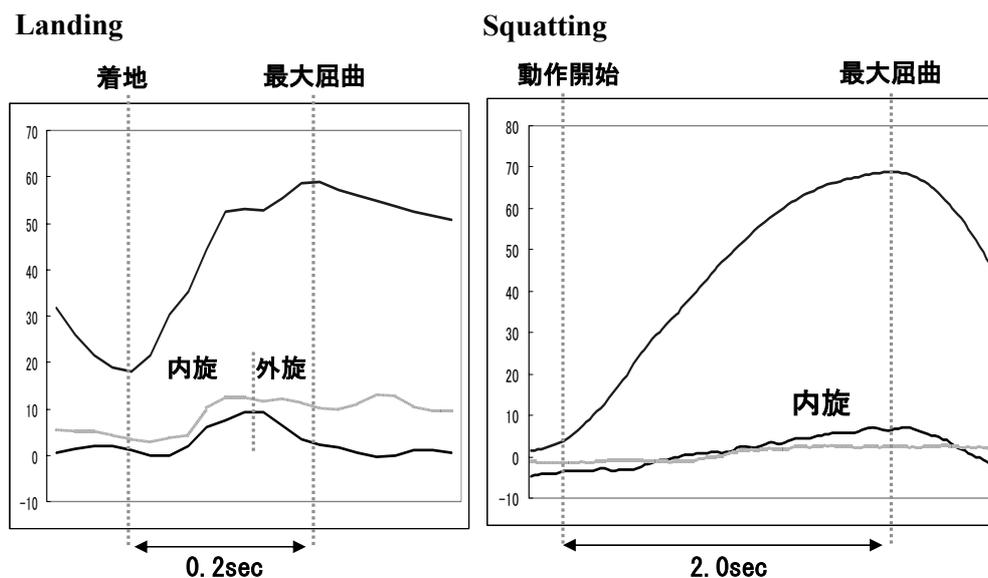


図 7. 膝屈曲時の回旋 (CKC)

節回旋機構も荷重位では内外反の影響を受けるため、その回旋様式については、明確な解答が得られているとは言い難い³⁾¹⁶⁾²¹⁾。Johalらは、MRIを用いたSquattingの解析を行い、負荷および無負荷の環境下で膝屈曲に伴い脛骨内旋が生じ、その回旋量は荷重下で大きく、かつ早期に生じたと報告した⁵⁾。

今回の結果からは、同じClosed Kinetic chainでの膝関節屈曲動作であっても、Squattingでは膝関節内旋、Landingでは最大屈曲までの間に内旋から外旋に移行することが分かった。Ishiiらは、5名の被験者の大腿骨および脛骨にK-wireを刺入し三次元動作解析を行い、膝関節屈曲60°からの膝伸展では、 $10.6 \pm 2.8^\circ$ 外旋すると報告している⁵⁾。Patelらは、10名の健常成人に対し、膝屈曲0～60°の角度でMRIを用いた荷重下での三次元動作解析を行い、脛骨内旋は膝屈曲40°で4.8°で、そこから減少したと報告した¹⁷⁾。一方、我々の実験では、約60°の屈曲範囲のSquatting時に、 $9.1 \pm 3.5^\circ$ の内旋が生じており、Ishiiの報告と類似した値となった。また、Squattingに比べ、膝関節最大屈曲角度が有意に小さいLandingの方が、回旋範囲に関しては $13.9 \pm 3.9^\circ$ と有意に大きかった。膝関節角度を一定に保ったまま、意図的に外反するKnee inでは外旋することから、膝関節の回旋は、屈曲や外反の程度や速度等に影響を受け、様々の動態を示すことが示唆された。

実際に、Squattingでは伸展位から最大屈曲までに約2秒かけているのに対し、Landingではその1/10にあたる0.2秒であった。これらのことから、Landingのように急激な膝屈曲動作では、早期に生理的内旋角度まで到達し、それ以降の衝撃吸収機構を膝外反による外旋への移行で代償していると考えられた。臨床的には、大腿および下腿の回旋量の差による膝関節の相対的回旋を的確に評価する必要性があると同時に、理学療法においても、運動方法の選択や膝関節屈曲角度、運動速度等を考慮しながら指導することが重要と思われた。今後は、衝撃負荷や運動速度の差による膝関節回旋機構を明確にすると同時に、種々の疾患群を対象に追試を重ね、膝関節の回旋機能を明らかにしていきたい。

V. まとめ

1. 膝関節に外傷の既往のない健常女子10名を対象に、三次元剛体モデルを用いた膝関節回旋機能の解析を行った。
2. Squattingに関しては、膝関節屈曲に伴い、全例が $9.1 \pm 3.5^\circ$ と膝関節内旋を生じた。この時、最大屈曲と最大内旋の時期はほぼ一致し、最大屈曲から伸展に伴い膝関節は外旋した。
3. Landingに関しては、着地後、ほぼ全例で膝関節は内旋し、最大屈曲までの間に、急激に外旋に

運動方向が変換した。

4. Knee inに関しては、全例が $6.7 \pm 2.1^\circ$ と外旋を示した。

VI. 文献

- 1) Blankevoort L et al : A mechanism for rotation restrains in the knee joint, *Journal of orthopaedic research* 14 : 676–679, 1996.
- 2) Chaudhari AM, Andriacchi TP.: The mechanical consequences of dynamic frontal plane limb alignment for non-contact ACL injury., *J Biomech.*, 39(2) : 330–338, 2006.
- 3) Coughlin KM, Incavo SJ, Churchill DL, Beynnon BD.: Tibial axis and patellar position relative to the femoral epicondylar axis during squatting. : *J Arthroplasty*, 18(8) : 1048–1055, 2003.
- 4) 林正典ほか：O A 及び R A 膝における回旋運動の動的解析，中部日本整形外科災害外科学会雑誌. 37 : 65–66, 1994.
- 5) Ishii Y: Three-dimensional kinematics of the human knee with intracortical pin fixation, *Clinical Orthopaedics and Related Research* 343 : 144–150, 1997.
- 6) Johal P, Williams A, Wragg P, Hunt D, Gedroyc W.: Tibio-femoral movement in the living knee. A study of weight bearing and non-weight bearing knee kinematics using 'interventional' MRI. : *J Biomech*, 38(2) : 269–276, 2005.
- 7) 加賀谷善教ほか：治療のためのテーピング入門，日経スポーツメディスン'92 : 93–104, 1992.
- 8) 加賀谷善教：スポーツ整形とテーピング，全国労災病院リハビリテーション技師会学術誌 : 36–43, 1996.
- 9) 加賀谷善教ほか：三次元剛体モデルを用いた膝関節回旋機能の解析，理学療法学. 27 Supple 2 : 55, 2000.
- 10) 加賀谷善教ほか：三次元剛体モデルを用いた膝関節回旋機能の解析：第2報 膝前十字靭帯再建例の分析，体力科学50 : 974, 2000.
- 11) 川村麻衣子，加賀谷善教ほか：ACL再建者の日常動作における下腿回旋の比較，北里理学療法学 4 : 43–46, 2001.
- 12) 川野哲英：ファンクショナル・テーピング，ブックハウス・エイチデイ，1988.
- 13) 小林一成：歩行分析評価と問題点，*Journal of Clinical rehabilitation* 5 : 857–864. 1996.
- 14) 熊木由美子，加賀谷善教：大腿・下腿の回旋に関する研究，北里理学療法学 3 : 69–72, 2000.
- 15) Li G et al : The effect of anterior cruciate Ligament Injury on knee joint function under a simulated muscle load: a three-dimensional computational simulation, *Annual biomedical engineering* 30 : 713–720, 2002.
- 16) Moglo KE, et al, : Cruciate coupling and screw-home mechanism in passive knee joint during extension-flexion, *J Biomech* 38 : 1075–1083, 2005.
- 17) Patel VV, Hall K, Ries M, Lotz J, Ozhinsky E, Lindsey C, Lu Y, Majumdar S. : A three-dimensional MRI analysis of knee kinematics. : *J Orthop Res*, 22(2) : 283–292, 2004.
- 18) 佐藤元成，加賀谷善教ほか：膝関節回旋運動への影響因子の検討，北里理学療法学 5 : 65–68, 2002.
- 19) Tashman S, Collon D, Anderson K, Kolowich P, Anderst W, : Abnormal Rotational Knee Motion During Running After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction, *Am J Sports Med* 32(4) : 975–983, 2004.
- 20) 鳥居俊 監訳：身体動作の運動学，N A P, 1999.
- 21) 渡辺信佳ほか：3軸GYROセンサーを用いた膝screw home movementの検討，東京膝関節学会会誌. 17 : 163–166, 1996.