

踵骨－下腿の運動連鎖と変形性膝関節症の関係 —荷重位における踵骨回内外と下腿回旋の運動動態の解析—

江戸 優裕¹, 山本 澄子², 保坂 亮³, 櫻井 愛子³

¹ 文京学院大学 保健医療技術学部 理学療法学科

² 国際医療福祉大学大学院 医療福祉学研究科 保健医療学専攻 福祉支援工学分野

³ 国際医療福祉大学三田病院 リハビリテーション室

要旨

本研究の目的は、荷重位における踵骨回内外と下腿回旋の運動連鎖と変形性膝関節症（以下、膝 OA）の関係を明らかにすることである。対象は膝 OA 群 5 名（8 肢）、健常高齢群 29 名（58 肢）とした。三次元動作解析システムを用いて立位時の足部回内外運動を計測し、運動連鎖の動態を定量化した。膝 OA 群においては X 線画像と理学所見により膝関節機能を評価した。分析の結果、膝 OA 群は健常高齢群よりも足関節が背屈位で、下腿回旋が優位な運動連鎖の動態を呈することが分かった。また、膝 OA が重度で、膝関節伸展可動域制限が顕著なほど下腿回旋が優位であることが分かった。これは OA の重症化に伴う膝関節伸展制限によって計測動作時に足関節が背屈位になることで、距骨下関節軸が下腿と平行に近付いたためと推察された。足関節肢位の相違が背景に介在したことで、運動連鎖の動態と膝 OA の関係を十分言及できなかったが、運動連鎖を臨床応用する際は足関節肢位を考慮する必要があることが示唆された。

キーワード

運動連鎖、踵骨、下腿、膝 OA、距骨下関節

1. 序論

荷重位における踵骨回内と下腿内旋、および踵骨回外と下腿外旋の連動（以下、踵骨－下腿の運動連鎖）は、円滑な身体運動を生成する上で重要である。この運動連鎖の機能は、下肢に生じる回旋ストレスを踵骨の回内外に変換して吸収すること¹⁾や、逆に踵骨の回内外を下肢の回旋運動のトリガーとして伝達すること²⁾と考えられている。踵骨と下腿の間にこうした双方向性の運動面の変換機能を有することにより、踵骨－下腿の運動連鎖は足部と近位体節との運動伝達のキーポイントとして、下肢の関節疾患の理学療法において特に重要視されている。この運動連鎖の動態は大きな個人差がある³⁾が、著しく特異な動態を有する場合は動作時の下肢運動を変容させ、それによる力学的ストレスの集中から下肢関節の変性疾患の発症に関与す

る可能性がある。そこで本研究では、踵骨－下腿の運動連鎖の動態と内側型変形性膝関節症（以下、膝 OA）との関係を明らかにすることを目的とした。

膝 OA は、膝関節に加わる外力による小外傷の蓄積が軟骨基質障害と軟骨細胞の代謝変化を引き起こし、関節破壊に至る疾患である⁴⁾。膝 OA の発症や進行に関わるリスクファクターは、年齢、性別、肥満など様々な報告がされている⁵⁾が、力学的ストレスも深く関与することが分かっている⁶⁾。膝 OA 者の歩行で特に問題となるのは、立脚初期における急激な膝関節内反（以下、LT: Lateral Thrust）である⁷⁾。LT は膝関節内側コンパートメントへの圧縮応力を増大させ、膝 OA を進行させる要因となる⁶⁾。

LT の抑制には立脚初期の運動制御が重要である。立脚初期の運動制御は、様々な筋活動に加えて踵骨－下腿の運動連鎖が重要な役割を担っている。立脚初期に生じる踵骨

の回内運動は、運動連鎖の作用によって下腿の内旋運動を誘発する⁸⁾。この下腿の内旋は、下腿自体の外方傾斜を防いで前額面上で膝関節を直線的に配列させ⁹⁾、膝関節を内旋することで膝関節の骨性のロックを解除して衝撃吸収に寄与する⁸⁾とともに、前・後十字靱帯の交差を強めて膝関節を動的に安定させる¹⁰⁾。これらのことから、踵骨－下腿の運動連鎖として生じる下腿回旋が小さい場合、立脚初期の下腿内旋も小さく、それによりLTが生じることで膝OAの発症・進行に繋がる可能性があると考えられる。これを裏付けるように、菅川ら¹¹⁾は膝OA者の歩行は立脚初期の下腿内旋角速度が小さいと報告している。したがって、本研究では膝OA者は踵骨－下腿の運動連鎖として生じる下腿回旋が小さいという仮説を設定し、膝OA者と健常高齢者の運動連鎖の動態を比較した。

なお、足部の運動は多関節の複合運動から成るため、その運動方向を示す用語は国際的にも統一されておらず、研究者間で混乱を生む原因となっている^{9,12)}。したがって、本研究では足部の運動学的用語を日本整形外科学会・日本リハビリテーション医学会が制定した関節可動域表示^{13,14)}に準拠することを基本にし、3つの運動基本面上における運動として以下のように定義して用いた。すなわち、矢状面上の運動は底屈／背屈、前額面上の運動は回内／回外、水平面上の運動は内転／外転、そしてそれらの複合運動は内返し（底屈・回外・内転）／外返し（背屈・回内・外転）と定義した。

2. 方法

2.1 対象

対象は医師より膝OAであると診断を受けた5名（8肢）（以下、膝OA群）と、下肢に既往のない健常高齢者29名（58肢）（以下、高齢群）とした（表1）。膝OA群5名のうち3名は両側性の膝OAであったが、残りの2名は片側に人工膝関節全置換術を施行した既往を有するため、その2肢を除外し、対象肢は8肢とした。膝OAの重症度は、

Kellgren-Lawrence 分類（以下、K-L 分類）にて2肢がⅡ、5肢がⅢであった。

なお、全ての対象者に研究の主旨を事前に説明し、研究内容への理解と協力に同意が得られた場合に同意書を締結した。本研究は国際医療福祉大学倫理委員会の承認（承認番号：11-156）を得て行った。

2.2 運動連鎖の動態計測

計測は赤外線カメラMX-T（Vicon motion systems 社製）8台で構成される光学式三次元動作解析システムを使用した。計測システムのマーカー認識誤差は全てのカメラにおいて0.3mm未満で、サンプリング周波数200Hzで計測した。赤外線反射マーカーの貼付位置は、両側の腓骨頭・脛骨内側顆・内果・外果・踵後面・踵内側面・踵外側面・第1中足骨頭・第5中足骨頭の合計18点とした（図1）。計測動作は立位での両足部の能動的な回内外運動で、安楽な立位から両足部を同時に最大回外位まで回外させた後に、最大回内位まで回内させ、再び最大回外位まで回外させる運動を反復させた。運動速度は十分に足部回内外が行える程度の至適な速度で、一定に保つよう指示した。

計測により得られた反射マーカーの三次元位置座標データは、データ処理ソフトウェアNexus1.7.1（Vicon motion systems 社製）を用いて処理した。欠損値に対してマーカー位置の補完を行った後に、遮断周波数6Hzの2nd order Butterworth filterを適用した。その上で、プログラミング言語Body Builder Languageによって各体節に局所座標系を定義し、オイラー角を用いて下腿に対する踵骨の角度、足部に対する下腿の角度を算出した。角度データの解析区間は、踵骨回外位からの回内運動と回外運動の5往復分とした。

本研究で用いた計測動作中の踵骨回内外と下腿回旋は一定の比率で角度変化する³⁾ため、両者の関係を一次回帰式で近似し、その係数を「連鎖比」と定義した（図2）。連鎖比とは、踵骨回内外に対する下腿回旋の角度変化の比（下腿回旋角度／踵骨回内外角度）であり、運動連鎖の動

表1 対象者の内訳

	膝OA群 n=5 (8)	高齢群 n=29 (58)	p 値
性別	男性 n=1 (2) 女性 n=4 (6)	男性 n=14 (28) 女性 n=15 (30)	
年齢	70.2 ± 5.3	73.5 ± 3.3	
身長	152.6 ± 8.6	157.0 ± 7.6	
体重	67.6 ± 9.6	54.2 ± 9.2	**
	mean ± SD 2 標本 t 検定		** : p<0.01

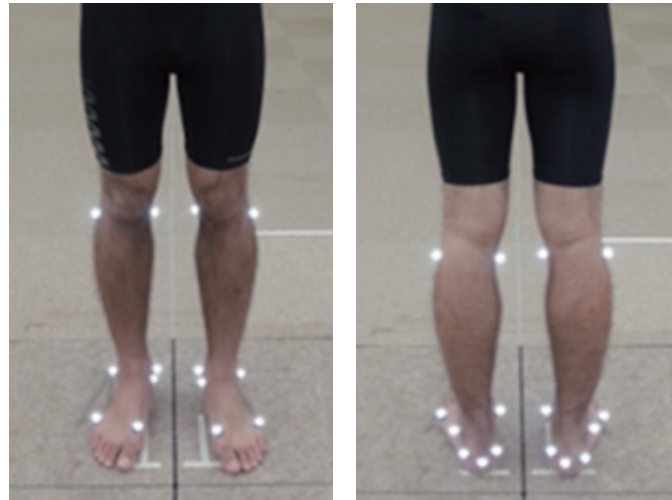


図1 マーカー貼付位置

赤外線反射マーカーは、両側の腓骨頭・脛骨内側顆・内果・外果・踵後面・踵内側面・踵外側面・第1中足骨頭・第5中足骨頭の合計18点に貼付した。

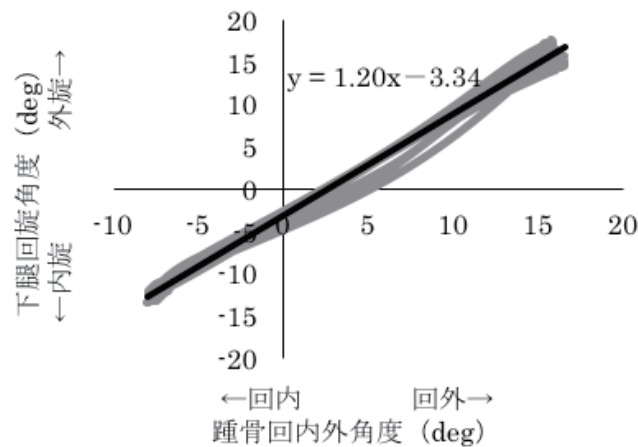


図2 運動連鎖の動態（連鎖比）の定義

代表的な1例のグラフを示した。踵骨回内外角度と下腿回旋角度の一次回帰係数を運動連鎖の動態の指標（連鎖比＝下腿回旋角度／踵骨回内外角度）と定義した。

態の指標として捉えた。また、計測動作中の足関節背屈角度の平均値を算出した。

なお、連鎖比の計測方法に関する妥当性と再現性は、次の通り計測前に確認し、問題ないと判断した。マーカーの貼付位置の妥当性は、下肢にマーカーを貼付した状態で足部中間位・回内位・回外位のCT画像を撮像し、足部回内外による下腿と踵骨のSkin movement artifact¹⁵⁾を評価した。その結果、踵骨マーカーは回外を5%、回内を21%過小評価し、下腿マーカーは外旋を13%、内旋を9%外旋位に評価した。計測動作の妥当性は、運動方向による運動連鎖の動態の相違を評価した。その結果、足部回内運動中と回外運動中の連鎖比はICC(1,1)=0.95であった。マ-

ーカー貼付位置や計測動作の再現性は、日を替えた計測による動態の相違を評価した。その結果、2度の連鎖比はICC(1,1)=0.72であった。

2.3 変形性膝関節症者の膝関節機能評価

膝OAの関節機能は以下の16項目；①K-L分類・②荷重位でのFemorotibial Angle(以下,FTA)・③Femoral Condyle - Femoral Shaft Angle(以下,FC-FS)・④荷重位でのFemoral Condyle - Tibial Plateau Angle(以下,FC-TP)・⑤Tibial Plateau - Tibial Shaft Angle(以下,TP-TS)・⑥Posterior Distal Femur Angle(以下,PDFA)・⑦Posterior Proximal Tibial Angle(以下,PPTA)・⑧Posterior Con-

dylar Offset Ratio (以下, PCOR)・⑨膝関節屈曲可動域・⑩膝関節伸展可動域・⑪足関節底屈可動域・⑫足関節背屈可動域・⑬膝関節内反ストレステスト・⑭膝関節外反ストレステスト・⑮膝関節前方引き出しテスト・⑯膝関節後方引き出しテストにより評価した。

なお、膝関節アライメントは治療のために撮影された単純X線画像を用いて、画像解析ソフトウェアImageJ1.45l(米国国立衛生研究所製)により計測した。関節可動域は他動運動とし、東大式角度計を用いて計測した。

2.4 統計学的分析

膝OA群と高齢群における連鎖比、および計測時の足関節背屈角度の比較は、Shapiro-Wilk検定とLevene検定によりデータの分布と分散を確認した上で、Welchの補正による2標本t検定、または対応のないt検定を用いた。膝OA群の連鎖比と膝関節機能の関係は、Shapiro-Wilk検定によりデータの分布を確認した上で、Pearsonの積率相関係数、またはSpearmanの順位相関係数を用いて検討した。

なお、全ての検定は左右を独立したデータとして扱い、有意水準は危険率5%($p<0.05$)で判定した。統計学的分析には統計解析ソフトウェアIBM SPSS Statistics 21(IBM社製)を使用した。

3. 結果

3.1 変形性膝関節症者と健常高齢者の運動連鎖の動態比較

連鎖比は、膝OA群 1.5 ± 0.6 、高齢群 1.0 ± 0.2 であり、膝OA群の方が有意に大きかった($p<0.05$) (図3)。計測時の足関節背屈角度は、膝OA群 7.1 ± 2.5 度、高齢群 0.4 ± 3.0 度であり、膝OA群の方が有意に背屈位であった($p<0.01$)

3.2 変形性膝関節症者における運動連鎖の動態と膝関節機能の関係

膝関節機能評価16項目のうち以下の7項目に連鎖比との有意な相関を認めた(表2)。正の相関を認めたのは、①K-L分類($rs=0.85$)・②FTA($r=0.79$)・⑫足関節背屈可動域($r=0.71$)・⑬膝関節内反ストレステスト($rs=0.87$)・⑭膝関節外反ストレステスト($rs=0.76$)・⑮膝関節前方引き出しテスト($rs=0.76$)であった。負の相関を認めたのは、⑩膝関節伸展可動域($r=-0.82$)であった。

4. 考察

膝OA群と高齢群の運動連鎖の動態比較から、膝OA群の方が高齢群よりも足関節背屈位で連鎖比が大きいことが分かった。すなわち、仮説に反して膝OA者の方が運動連鎖は下腿回旋が優位に生じていた。また、膝OA群における運動連鎖と膝関節機能の関係は、OAの重症度が高く、膝関節が屈曲・内反し、膝関節の不安定性が大きいほど、連鎖比が大きいことが分かった。

踵骨-下腿の運動連鎖は距腿関節と距骨下関節の複合運動により構成されるため、連鎖比の相違はこれらの関節軸の方向の違いを意味している。両関節の運動軸の向きは大きな個人差がある^{16,17)}ため、以下に運動軸の向きと連鎖比の関係について推論する。連鎖比は、踵骨の前額面運動と下腿の水平面運動の変換の比であるため、距腿関節と距骨下関節が前額面と水平面に成す角度、すなわち矢状面上の角度の影響を大きく受ける。まず、距腿関節は前額水平軸に近い走行をするため、連鎖比への関与は小さいと言える。実際に、距腿関節軸とほぼ一致する内外果を結ぶ線¹⁸⁾を指標とする果部外捻角度は連鎖比にほとんど関与しない³⁾。一方で、距骨下関節軸は3つの運動基本面に角度を成す走行をしており、足部と下腿の長軸に対して矢

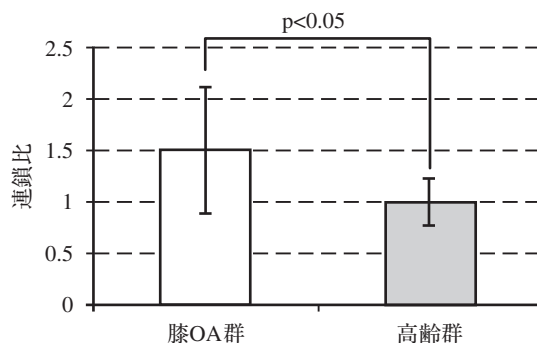


図3 膝OA群と高齢群の連鎖比の相違

表2 膝 OA 群における連鎖比と膝関節機能の関係

	r / rs	相関係数	p 値
① K-L 分類	rs	0.85	**
② FTA	r	0.79	*
③ FC-FS	r	- 0.31	
④ FC-TP	r	0.63	
⑤ TP-TS	r	0.54	
⑥ PDFA	r	- 0.00	
⑦ PPTA	rs	0.29	
⑧ PCOR	r	- 0.37	
⑨ 膝関節屈曲可動域	r	0.45	
⑩ 膝関節伸展可動域	r	- 0.82	*
⑪ 足関節底屈可動域	r	- 0.36	
⑫ 足関節背屈可動域	r	0.71	*
⑬ 膝関節内反ストレステスト	rs	0.87	**
⑭ 膝関節外反ストレステスト	rs	0.76	*
⑮ 膝関節前方引き出しテスト	rs	0.76	*
⑯ 膝関節後方引き出しテスト	rs	0.00	

r : Pearson の積率相関係数 rs : Spearman の順位相関係数

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

状面上で大きな角度を成す¹⁹⁾。この距骨下関節軸の矢状面上の角度が連鎖比に関与すると考える。すなわち、足関節の背屈などにより距骨下関節軸が下腿の長軸に近付けば下腿回旋を優位に生じさせ（連鎖比増大）、逆に足部の長軸に近付けば踵骨回内外を優位に生じさせる（連鎖比減少）と推察される。

これを踏まえて本研究の結果を見ると、膝 OA 群が高齢群よりも連鎖比が大きい理由は、膝 OA 者が膝関節伸展可動域制限によって計測動作時に下腿が前傾位、すなわち足関節背屈位であったためと考えられる。膝 OA 群においても膝関節伸展可動域制限が顕著なほど連鎖比が大きいという関係にあった。他にも連鎖比との有意な相関を認めた膝関節機能評価項目はあるが、総じて OA が重症で関節機能が低いほど連鎖比が大きいという結果であった。このことから、膝 OA 者は OA の重症化に伴う膝関節伸展可動域制限に由来する運動連鎖の動態計測時の足関節背屈位を背景因子として、連鎖比が過大評価されたと考えられる。

上述のように、計測時の足関節背屈角度が連鎖比に影響したことにより、本研究では膝 OA 群と高齢群の連鎖比を単純に比較することはできなかった。今後、足関節底背屈角度を統制した環境下での計測によって、連鎖比と膝 OA の関係について言及できると考える。そして、こうした検討をより正確に行うためにはさらに大きなサンプルサ

イズを確保する必要があると言える。また、本研究で示唆された足関節の背屈により連鎖比が増大することは、運動連鎖の観点から歩行分析や運動療法を行う際に配慮すべき点と考える。

5. 結語

荷重位の運動連鎖として生じる踵骨回内外と下腿回旋の運動の動態を解析した結果、膝 OA 群は高齢群よりも足関節背屈位で下腿回旋が優位な動態を呈することが分かった。さらに膝 OA 群の中でも OA が重症で、膝関節伸展制限が顕著なほど下腿回旋が優位であることが分かった。この背景には、膝 OA の重症化に伴う膝関節伸展可動域制限によって荷重動作時に下腿が前傾する影響があると推察した。すなわち、下腿前傾により足関節背屈位となり、矢状面上で下腿長軸と距骨下関節軸が平行に近付くことで、踵骨回内外に対する下腿回旋の変換効率が増大したものと考える。計測時の足関節背屈角度の相違が背景に介在したことで、膝 OA 群と高齢群の運動連鎖の動態を単純比較することができず、運動連鎖の動態と膝 OA の関係を明らかにすることはできなかった。しかし、運動連鎖の観点から歩行分析や運動療法を行う際は、足関節肢位を考慮する必要があることが示唆された。

引用文献

- 1) Morris JM. Biomechanics of the foot and ankle. Clinical Orthopaedics and Related Research. 1977;122:10-17.
- 2) Nicholas JA. The lower extremity and spine in sports medicine. Saint Louis: C V Mosby, 1986:395-411.
- 3) 江戸優裕, 山本澄子. 踵骨－下腿の運動連鎖の動態特性. 理学療法科学. 2012;27(6):661-664.
- 4) 斉藤知行, 腰野富久, 竹内良平ら. 変形性膝関節症の臨床病理と滑膜病変. 整形外科. 2004;55(9):1227-1232.
- 5) 福田明, 中村耕三. 変形性膝関節症の疫学—臨床疫学研究の文献的考察—. 別冊整形外科. 2002;42:2-6.
- 6) Andriacchi TP, Mundermann A, Smith RL, et al. A framework for the in vivo pathomechanics of osteoarthritis at the knee. Annals of Biomedical Engineering. 2004;32:447-457.
- 7) 古賀良生, 大森豪, 鈴木禎宏ら. 変形性膝関節症の運動解析. 関節外科. 1997;16(3):327-333.
- 8) Gotz-Neumann K (月城慶一, 山本澄子, 江原義弘ら訳). 観察による歩行分析. 東京: 医学書院; 2005.
- 9) 山崎勉, 大野範夫, 小笠桂史ら. 整形外科理学療法の理論と技術. 東京: メジカルビュー社; 1997.
- 10) 石井慎一郎. 臨床運動学からみた動作分析. 理学療法. 2002; 19(8):902-910.
- 11) 菅川祥枝, 木藤伸宏, 島澤真一ら. 内側型変形性膝関節症における歩行時大腿・下腿回旋運動の解析. 理学療法科学. 2003;31(7):412-419.
- 12) Reese NB, BandyWD. Joint range of motion and muscle length testing. Philadelphia: WB Saunders; 2002.
- 13) 日本整形外科学会身体障害委員会. 関節可動域表示ならびに測定法 (平成7年2月改訂). 日本整形外科学会誌. 1995;69(4):240-250.
- 14) 日本リハビリテーション医学会評価基準委員会. 関節可動域表示ならびに測定法 (平成7年4月改訂). リハビリテーション医学. 1995;32(4):207-217.
- 15) 持丸正明. 口伝—人体寸法・形状・運動計測編 (人体運動計測その2)—. バイオメカニズム学会誌. 2003;27(2):95-99.
- 16) Mann RA. Atlas of orthotics —Biomechanical principles and application—. Saint Louis: C V Mosby, 1975:257-266
- 17) Michaud TC (加倉井周一訳). 臨床足装具学—生体工学的アプローチ—. 東京: 医歯薬出版; 2005.
- 18) 園畑素樹, 渡辺英夫, 鶴田敏幸ら. 足関節における運動軸の検討. 整形外科と災害外科. 1994;43(2):742-745.
- 19) 坂井建雄, 松村譲児. プロメテウス解剖学アトラス. 東京: 医学書院; 2007.

The Relationship between Kinematic Chain of Calcaneus and Shank and Knee Osteoarthritis —Analysis of Kinematic Chain of Pronation / Supination Movement of Calcaneus and Rotational Movement of Shank in Standing Position—

Masahiro Edo¹, Sumiko Yamamoto², Akira Hosaka³, Aiko Sakurai³

¹ Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science Technology, Bunkyo Gakuin University.

² Department of Welfare Assistance Engineering, Majoring of Health and Medical Sciences, Graduate School of Health and Welfare, International University of Health and Welfare.

³ Department of Rehabilitation, International University of Health and Welfare Mita Hospital.

Abstract

The purpose of this study was to clarify the relationship between kinematic chain of calcaneus and shank and knee osteoarthritis. The subjects were 8 limbs of 5 patients with knee osteoarthritis and 58 limbs of 29 healthy elder adults. We measured pronation / supination movement of calcaneus and rotational movement of shank in standing position using 3D motion analysis system. Additionally, the knee function of patients with knee osteoarthritis was investigated using X-ray image and physical findings of the leg. Results of the analysis, patients with knee osteoarthritis showed dorsiflexed ankle joint position and large shank rotation compared to healthy elder adults. And also, we found large shank rotation in significant deformation of knee and limitation of range of motion of knee extension. We are reasoning that the results is derived from that decrease of the angle of major axis of shank and subtalar joint axis by dorsiflexed ankle joint position by limited range of motion of the knee extension associated with the severity of knee osteoarthritis in measurement operation. Therefore, in physical therapy which applies the kinematic chain for patients with knee osteoarthritis, it is necessary to consider the ankle joint position.

Key words —— Kinematic Chain, Calcaneus, Shank, Knee OA, Subtalar Joint

Bunkyo Journal of Health Science Technology vol.7: 1-7