

による計測値があり参考になる。

1 膝関節のバイオメカニクス

膝関節は下肢の中間に位置し、主として伸展屈曲を担当する。内側と外側の大腿脛骨関節と大腿膝蓋関節の3要素からなる。大腿骨の遠位は正面からみると平らであるが、側面からみると丸いタイヤのような形状をしている。正常の膝関節では、大腿脛骨角（膝外側角：FTA）は174°程度でややX脚ぎみである。しかしこの角度は個人差が大きい。高齢者で膝の痛みを愁訴にもつ人は多く、その大部分は内側型の変形性関節症である。それらの症例は、FTAが大きくO脚を呈している。

例題として、膝関節伸展位で片脚立位時にかかる荷重を考えてみる。図4に片足で立っている状態を示しているが、重心は接地している足底の鉛直線上にある。膝関節と重心線との関係は、股関節の内外転により随意的にかえることができるため、どこを採用するかはむずかしい。図5に股関節の内外転をかえて膝関節と重心線の位置関係がどのようにかわるかを示している（骨盤の図がないため少々わかりにくいことをご了承いただきたい）。しかし、よく用いられる仮定は、股関節中心と足関節中心を結ん

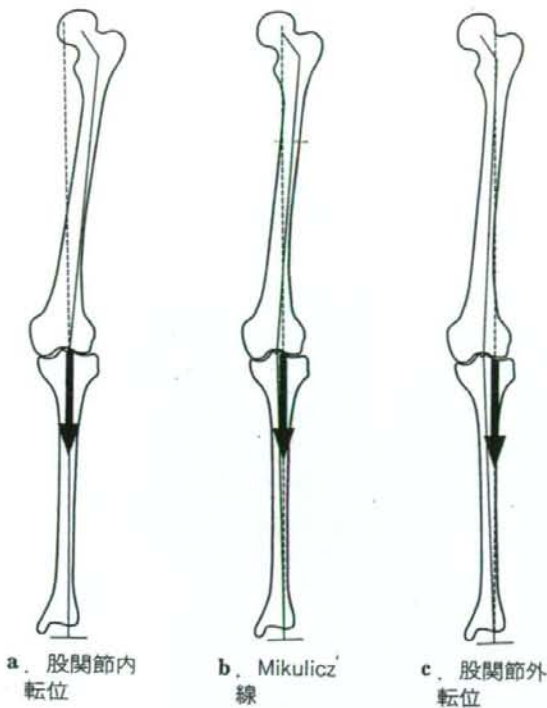


図5 股関節の内外転と重心線。股関節を内転すると重心線は膝関節の内側に寄り、外転すると重心線は外側に寄る。股関節中心と足関節中心を結んだ線はMikulicz線と呼ばれる。

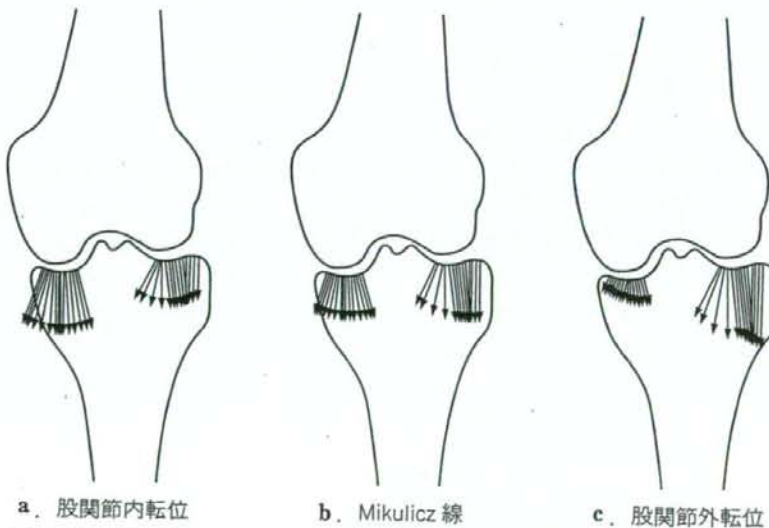


図6 重心線の変化と膝関節の圧力分布の変化。脛骨関節面に分布している下向き矢印はその場所での圧力を示す。重心線が膝関節の内側に移動すると、内側関節面に偏った圧力分布を呈する。

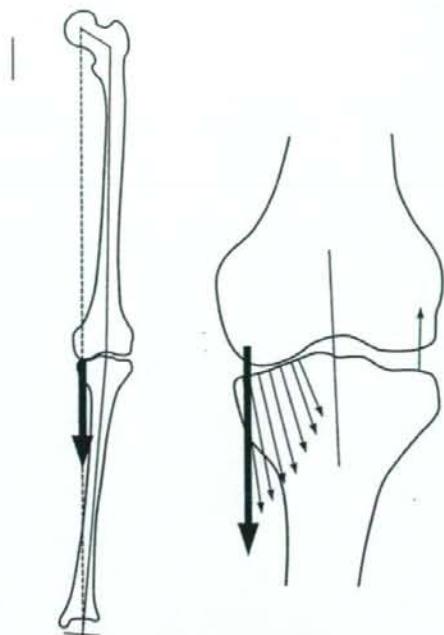


図 7. 内側型変形性膝関節症の下肢のアライメントと圧力分布。正常膝関節と比較して内側の大腿脛骨関節面に大きな圧力が生じている。

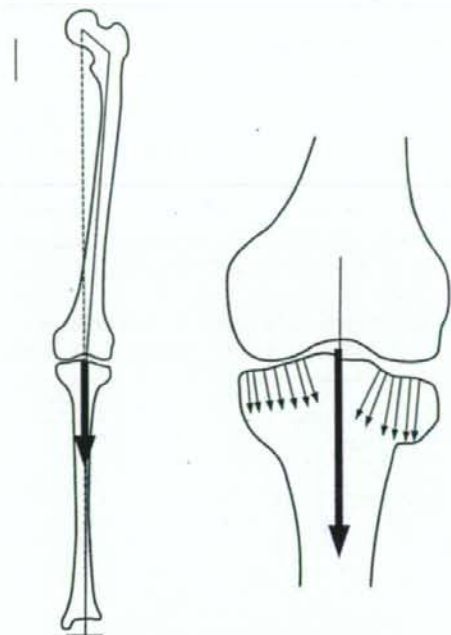


図 8. 高位脛骨骨切り術の効果。10°の矯正角で高位脛骨骨切り術を行ったときの圧力分布を示す。圧力分布は正常化している。

だ線 (Mikulicz 線) を重心線とするものである (図 5 b)。これは、股関節の解析をしたときとは違って、下肢の解析において異なる条件を用いることに違和感もあるが、股関節の肢位によらない解析ができる点で利便性がある。

正常膝関節に生じる圧力の分布が、重心線との関係でどのように変化するかを計算したものが図 6 である。計算には、剛体ばねモデルというコンピュータ上で力学解析を行うプログラムを用いた⁶⁾。脛骨関節面に分布している下向き矢印はその場所での圧力を示している。重心線が膝関節の内側に移動すると、内側関節面に偏った圧力分布を呈する。

図 7 は、内側型変形性膝関節症の下肢の図と圧力分布を示している。重心線は、Mikulicz 線に一致させている。正常膝関節と比較して内側の大腿脛骨関節面に大きな圧力が生じている。このような症例に対して、10°の矯正角で高位脛骨骨切り術を行うと図 8 のように変化し、圧力分布の正常化が実現できる⁷⁾。

膝関節を曲げているとき、体重は膝関節をさらに曲げようとするモーメントを大腿骨に与える。これと釣り合うためのモーメントは大腿四頭筋が発生する。大腿四頭筋力の作用方向は、膝蓋骨により方向をかえる。膝関節の屈曲角度により異なるが、体重の数倍という大きさの力である。興味のある方は、ぜひ解いてみていただきたい。なお、センサー付きの人工膝関節を用いた計測値も報告されているので参考になる⁸⁾。

おわりに

バイオメカニクス研究も、人工関節のデザイン・靭帯を含む生体の物性・運動時の各関節の角加速度や人体各部の加速度の測定・メカニクスと分子生物学をつなぐ研究など広範囲な分野を擁している。股関節と膝関節の荷重を中心に解説したが、若い医師たちに興味をもっていただければ幸いである。

文 献

- 1) 力武常次, 都築嘉弘: 運動と力. チャート式シリーズ新物理 I B・II, 数研出版, 東京, p16-49, 1998
- 2) Dostal WF, Anderews JG: A three-dimensional biomechanical model of hip musculature. *J Biomech* 14: 803-812, 1981
- 3) Crowninshield RD, Brand RA: A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion. *J Biomech* 14: 793-801, 1981
- 4) Bergmann G, Graichen F, Rohlmann A: Hip joint loading during walking and running, measured in two patients. *J Biomech* 26: 969-990, 1993
- 5) 津村 弘: 杖と車椅子. ゴールドスタンダード 整形外科—薬物療法と運動・理学療法, 鳥巢岳彦 (編), p178-185, 南江堂, 東京, 2003
- 6) Kawai T, Toi Y: A new element analysis of plane strain problems. *Seisankenkyu* 29: 204-207, 1977
- 7) 津村 弘: 変形性膝関節症. 膝と大腿部の痛み, 鳥巢岳彦 (編), p178-191, 南江堂, 東京, 1996
- 8) D'Lima DD, Patil S, Steklov N et al: *In vivo* knee forces after total knee arthroplasty. *Clin Orthop* 440: 45-49, 2005

*

*

*



英語抄録・口頭発表・論文作成 虎の巻 忙しい若手ドクターのために

●監修 南都伸介 ●著 上松正朗

「まず用意すること」「何をいつしなければならぬか」といった実践的な英語による抄録, 口頭発表, 論文の書き方がわかる「虎の巻」。わかりやすい図表や関連するアドバイスをもとめたコラムにより, 読み進むだけで何をすればよいか明確にわかる。付録として, 日本語論文の書き方, 英語の例文集, 類語一覧を収載。論文の執筆指導にあたるベテランドクターにもおススメの一冊。

■A5判・176頁 定価2,625円(本体2,500円+税5%) ISBN4-524-24212-0

南江堂

変形性膝関節症に対する保存的治療に関わるバイオメカニクス

池田真一*1 津村 弘*2

Abstract 変形性膝関節症は生化学的・免疫学的機序や生体力学的機序など多因子が関与して発症、進展すると考えられている。なかでも生体力学的な要素は関節軟骨摩耗の端緒および増悪因子として果たす役割が大きく、病態の理解のみならず治療法を考慮するうえで重要である。通常の片脚立位姿勢では、体中心と股関節中心の間に重心があるため、正常な下肢アライメントであっても体重は膝関節に対し内反モーメントとして作用する。さらに日本人で頻度の高い内側型変形性膝関節症では荷重線が内側に離れていくため、さらに内反モーメントが大きくなり、内側膝関節面にかかる接触圧が増大する。これに対して大腿四頭筋力は膝関節に対し外反モーメントとして働き、足底挿板は荷重線をより外側に移動させることで内側膝関節面にかかる接触圧を減少させる。病態や治療の基礎となる原理を理解することは、適切な治療とその発展に結びつくものと思われる。

Key words 変形性関節症 (osteoarthritis), 膝 (knee), 保存的治療 (conservative treatment), バイオメカニクス (biomechanics)

はじめに

変形性膝関節症の治療法として、近年人工膝関節置換術などの手術的治療が盛んに行われ良好な成績が報告されているが、高齢者を対象とすることが多く様々なりリスクを伴う。一方、保存的治療は変形性膝関節症の自然経過を変えるまでには至らないが、その進行を遅らせ症状を軽減させることはある程度可能であり、日常診療において重要な位置を占めることに変わりはない。なかでも広く行われている運動療法や装具療法は、膝関節に力学的な変化を及ぼすことで治療効果をもたら

す。その原理について、本稿ではコンピュータ上の力学解析手法である剛体バネモデルを用いて解説を進めていく。

コンピュータ力学解析

二次元剛体バネモデル¹⁾を用いて力学解析を行った。体中心、股関節中心、大腿骨頸部、膝関節の形状、膝蓋骨中心、胫骨粗面、足関節中心をディジタイザーにてコンピュータに入力し、膝関節での接触圧分布を計算した。

正常膝の下肢アライメントと膝関節の接触圧分布

二次元剛体バネモデルを用いて計算した膝外側角 (femorotibial angle ; 以下, FTA) 174°の膝関節における片脚起立時の接触圧分布を図1に示す。矢印の大きさは圧力の大きさを示しており、

*1 Shinichi IKEDA, 〒 879-5593 由布市挾間町 医大ヶ丘 1-1 大分大学医学部脳・神経機能統御講座整形外科

*2 Hiroshi TSUMURA, 同科, 教授

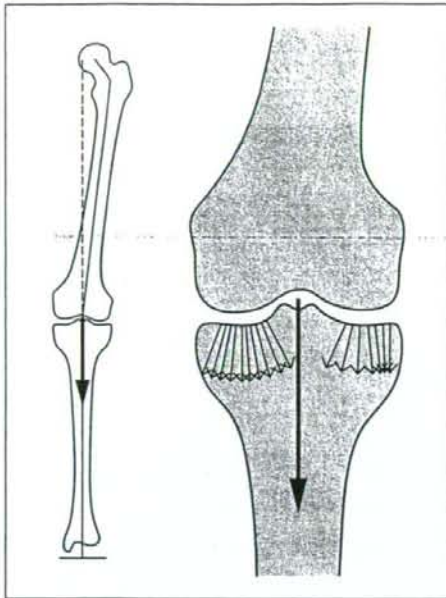


図 1. 正常膝の下肢アライメントと膝関節の接触圧分布

内外側関節面に圧力が分散されているものの内側関節面にやや強く圧力が分布している。太い矢印は合力を、破線は荷重線を示している。

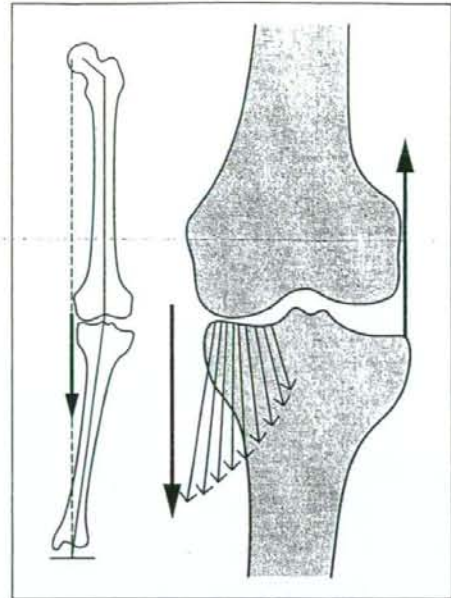


図 2. 内側型変形性膝関節症の下肢アライメントと膝関節の接触圧分布

内側関節面に強い圧力の集中を認める。外側の上向きの矢印は、外側側副靭帯に代表される外側支持組織に発生している張力を示している。

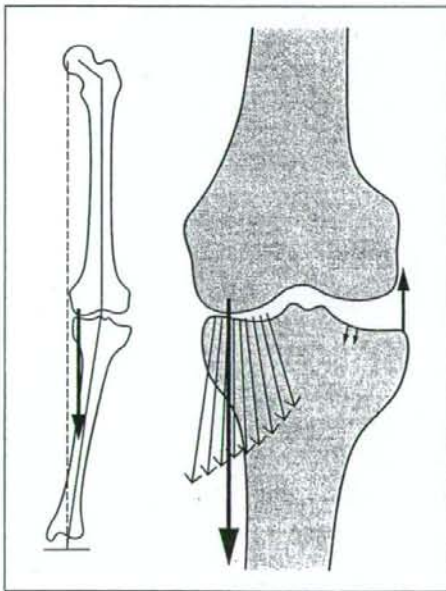


図 3.

大腿四頭筋力の効果

膝関節にかかる圧力は体重に大腿四頭筋力が加わるために大きくなるが、合力の位置が外側に移動するために接触面積が拡がり、圧分布は均一化する方向へ向かう。また外側の張力も減少する。

内反モーメントとして作用し、圧力の分布は内側関節面に偏る²⁾³⁾。なお浜田⁴⁾は、15~85歳の健常日本人の片脚立位FTAは男性176~178°、女性175~176°であり、Mikulicz線は正常膝においても内側関節面を通過すると述べている。

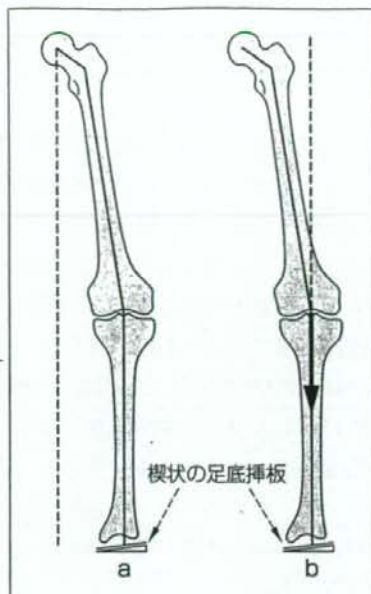
内側型変形性膝関節症の下肢アライメントと膝関節の接触圧分布

FTA 188°の内側型変形性膝関節症における接触圧分布を図2に示す。内側関節面に大きな圧力がみられ、外側は軟部組織の緊張によって支持されていることがわかる。上向きの矢印は張力を示している。破線で表した荷重線が膝関節より内側に離れるために内反モーメントが大きくなり、内側関節面にかかる圧力を増大させる³⁾。

内外側関節面に圧力が分散されているものの内側関節面にやや強く圧力が分布している。通常の片脚立位姿勢を考えると、体中心と股関節中心の間に重心がある。よって現実にはMikulicz線よりも内側に荷重線が存在する。この結果、正常な下肢アライメントであっても体重は膝関節に対して

図 4.
楔状足底挿板の効果

外側が高い楔状の足底挿板に対して素直に足を接地するためには、足底挿板の角度だけ下肢を外転する必要がある。しかしそのままでは重心が足底の直上にないために立つことはできない(a)。そのため、上半身を外側に傾けるなどして重心を外側化することが必要となる(b)。



大腿四頭筋力の効果

図 2 の内側型変形性膝関節症に対し大腿四頭筋力を作用させたときの接触圧分布を図 3 に示す。膝関節にかかる圧力は体重に大腿四頭筋力が加わるために大きくなるが、接触圧分布は均一化する方向へ向かうことがわかる。筋力の大きさにもよるが、単位面積あたりの最大接触圧は図 3 のようにむしろ減少する場合があり、外側の軟部組織の張力は減少する。胫骨粗面が膝中心よりも外側に位置し、Q 角が存在することによって、大腿四頭筋力は外反方向のモーメントとして作用する。大腿四頭筋の発生する外反モーメントが体重により発生する内反モーメントを弱め、大腿胫骨関節面にとって有利に働く³⁹⁾。運動療法による大腿四頭筋力強化の有効性を示唆する所見である。

大腿四頭筋を含めた下肢筋力強化運動の有効性は、多くの臨床研究においても証明されている。Hurley ら⁴⁰⁾は 5 週間、週 2 回のトレーニングにより大腿四頭筋力のみならず疼痛、活動性、さらに proprioception の改善も得られたことを報告し、O'Reilly ら⁷⁾は 6 か月間、家庭での運動によって筋力、疼痛、活動性が有意に改善したことから home exercise によっても十分な効果が得られるとしている。

ところで、大腿四頭筋力の低下は、膝関節痛による廃用性筋萎縮の結果として生じるだけでなく、変形性膝関節症の発症要因の一つである可能性が示唆されている。Slemenda ら⁴¹⁾は、3 年弱の縦断的研究において、膝関節痛がないものの最終観察時に X 線像で関節症性変化を生じていた女性は、変化がなかった女性に比べ、研究開始時点

で有意に膝伸展筋力が低かったことを報告した。我々は 30 歳代と 60 歳代の膝関節痛のない健康女性について、膝関節の立位単純 X 線撮影と大腿部中央の CT 撮影を行った。その結果、加齢とともに各筋断面積が減少するが大腿四頭筋優位であること、60 歳代の女性で X 線像に関節症性変化を認める者は、認めない者に比べて大腿四頭筋の萎縮がより高度であることが判明した⁹⁾。以上より、膝関節痛がない段階から積極的に筋力強化を図ることで、はじめにも述べたように、変形性膝関節症の自然経過を変えるまでには至らなくともその進行を遅らせることができるかもしれない。

楔状足底挿板の効果

変形性膝関節症に対する楔状足底挿板は外来などでよく用いられる治療法である。関節症性変化が高度でなく、FTA が 180°未満の症例において、疼痛軽減や歩行能力改善の効果が高いことが報告されている。足底挿板の効果について、静力学的には踵骨の外反化や下肢機能軸の直立化¹⁰⁾¹¹⁾が、動力学的には lateral thrust の抑制¹²⁾などが報告されている。

Yasuda ら¹⁰⁾は、片脚起立時には足底板装着により踵骨が外反化し、FTA は不変のまま大腿骨と胫骨の直立化が起こることを示し、二次元数学モデルを用いた解析で膝関節内側関節面の負荷お

よび外側側副靭帯、腸脛靭帯の張力が減少することを報告した。Todaら¹¹⁾は、距骨下関節固定付き足底板はFTAを減少させ、足底挿板と比較して除痛効果も高いことを報告した。同足底板の効果発現機序として、踵骨の外反矯正力が足関節で相殺されず膝関節まで伝導されると述べている。また緒方ら¹²⁾は、加速度解析法を応用し、内側型変形性膝関節症に対しては外側楔形足底挿板の装着により外側動揺性の大きさが減少すること、臨床症状との関連では、足底挿板による加速度ピーク値減少の割合が大きい症例ほど高い除痛効果が得られることを報告した。

内側型変形性膝関節症に対する外側楔状足底挿板の静力学的効果の原理を図4に示す。外側の高い足底挿板に対して素直に足を接地するためには、足底挿板の角度だけ下肢を外転する必要がある(図4-a)。しかしこの位置で立位を保持しようとしても重心が足底の直上にないために不可能である。そのため、図4-bのように上半身を外側に傾けバランスをとる必要が生じる。つまり足底挿板装着前に比べ重心(荷重線)がより外側に偏位することとなる。この結果、内側関節面の圧力が軽減される²⁾。現実には足底挿板の角度の一部は距踵関節などで吸収されるために効果の減弱が生じる可能性がある。

ところで、足底挿板でみられる下肢機能軸の直立化や重心(荷重線)の外側移動は、股関節の外転筋力強化によっても得ることができる。そのため、側臥位で膝関節を伸展させたまま下肢を重力に抗して挙上させる股関節外転運動が重要であり⁵⁾、大腿四頭筋訓練とあわせて行われるべきである。

まとめ

膝関節の機能や、変形性膝関節症の病態・治療に対して生体力学は深く関わっている。内側型変形性膝関節症の保存的治療のなかで、運動療法は大腿四頭筋力を増強させることで膝関節に外反モーメントを発生させ、足底挿板は荷重線をより

外側に移動させることで内側膝関節面にかかる接触圧を減少させる。病態や治療の基礎となる原理を理解することは、適切な治療とそのさらなる発展に結びつくものと思われる。

参考文献

- 1) Kawai, T., et al.: A new element analysis of plane strain problems. *Seisankenkyu.* 29: 204-207, 1977.
- 2) 津村 弘: 変形性膝関節症. 膝と大腿部の痛み. 鳥巢岳彦編. 178-191, 南江堂, 1996.
- 3) 津村 弘ほか: バイオメカニクスよりみた片側型変形性膝関節症の成因. *関節外科.* 18: 379-384, 1999.
- 4) 浜田洋志: 2方向X線写真による下肢アライメントの研究. *順天堂医学.* 37: 436-447, 1991.
- 5) 鳥巢岳彦ほか: 変形性膝関節症の運動療法. *整形外科.* 39: 217-223, 1988.
- 6) Hurley, M. V., et al.: Improvements in quadriceps sensorimotor function and disability of patients with knee osteoarthritis following a clinically practicable exercise regime. *Br J Rheumatol.* 37: 1181-1187, 1998.
- 7) O'Reilly, S. C., et al.: Effectiveness of home exercise on pain and disability from osteoarthritis of the knee: a randomised controlled trial. *Ann Rheum Dis.* 58: 15-19, 1999.
- 8) Slemenda, C., et al.: Reduced quadriceps strength relative to body weight: A risk factor for knee osteoarthritis in women? *Arthritis Rheum.* 41: 1951-1959, 1998.
- 9) Ikeda, S., et al.: Age-related quadriceps-dominant muscle atrophy and incident radiographic knee osteoarthritis. *J Orthop Sci.* 10: 121-126, 2005.
- 10) Yasuda, K., et al.: The mechanics of treatment of the osteoarthritic knee with a wedged insole. *Clin Orthop.* 215: 162-172, 1987.
- 11) Toda, Y., et al.: Effect of a novel elastically fixed lateral wedged insole on the subtalar joint of patients with medial compartment osteoarthritis of the knee. *J Rheumatol.* 28: 2705-2710, 2001.
- 12) 緒方公介ほか: 側方動揺性からみた変形性膝関節症の病態と治療. *整・災外.* 38: 11-18, 1995.

8. 大腿脛骨関節症の形態学的因子について

東京女子医科大学 リウマチ痛風センター 生体力学部門

津村 弘 森田 秀穂 姫野 信吉

群馬の森昭和病院 整形外科

竹日 行雄 三橋 隆

九州中央病院 整形外科

中川 悟

はじめに

一般に、ある疾患の病因を論じようとする時、観察される事象が原因なのか、結果なのかの判断は、きわめて困難な場合が存在する。

我々が論じようとする種々の膝関節疾患を生じる形態学的因子についても、先達らが観測してきた種々の形態異常が原因なのか結果なのかは決着がついたとは言い難い。それらの議論を省みるに、疾患の進行により、惹起される形態学的変形が、原因として存在した形態学的異常を隠蔽してしまうことが、混乱を招く要因となっていると推測される。理解し易い例をあげると、幼少時よりO脚のある症例が、加齢とともに内側型の大腿脛骨関節症を発症した場合を想定すると、FTAは症状の進行に伴って大きくなるであろう。この時、発症前に存在したFTAの異常は原因であり、その後のFTAの増加分は結果ということが出来るであろう。しかし、整形外科医が日常診療で、完成された大腿脛骨関節症を診る場合においては、原因分と結果分を分離し理解することはできないであろう。このような現象は、回旋等に関しても同様で、ここに、議論が混沌としたものになっていく理由がある。

では、これを解決するには、どのような方法が考えられるか。ひとつの方法は、同一集団を一生にわたって追跡調査することである。しかし、このやり方は、事実上不可能に近い。そこで、我々は、次のような方法をとることとした。

まず、60歳以上の年齢で、膝関節に疾患を起し

ていない人を捜すことを考えた。このような長年の風雪に耐えてもなお異常の起こっていない膝は究極の正常膝ともいふべきものであり、理想的な形状と他の外傷や疾患に冒されなかった幸運の産物といえる。このような膝と、種々の疾患に冒された膝を比較することで、形態の違いを発見できれば、原因としての形態異常に迫ることができると考えられる。ここで、このような膝の群は、通常の論文で比較されるコントロール群ではないことに注目したい。つまり、通常のコントロール群は、まだ発症していない症例を含んでいるために、一般の膝の代表かも知れないが、理想の膝の代表ではないからである。

このような考えを基礎として、草津町検診を行い、既にいくつかの興味ある知見を報告してきた¹⁾。本論文では、以下のような検討を加えたので報告する。

目 的

大腿脛骨関節症を生じる要因は、二次的には、膝関節周辺の外傷、感染性関節炎後、股関節症の反対側、など、いろいろな原因が知られている。しかし、一次的には、特別な形成不全を除けば、FTAの異常によるものが、知られているだけである。ところが、FTAの異常がなくても、内側型の関節症をおこす症例は知られていて、その原因として、我々は、大腿四頭筋力の持つ役割について注目してきた²⁾。今回、大腿四頭筋の作用方向を規定する脛骨粗面の位置異常の持つ意義について検討する。

対 象

対象は、FTAのあまり大きくない内側型変形性膝関節症の42人、61関節（以下OA群）と、コントロールとして草津町検診359例のうち何等の症状を持たないいわゆる正常膝12人、24関節（以下正常群）である。FTAがあまり大きくなく、初期の大腿脛骨関節症々例を集めることで、二次的な変化を小さくできるようにと配慮した。また、測定誤差を小さくするために、内外反動揺性、回旋不安定性のある症例は除外した。

平均年齢は、OA群で66.8歳、正常群で70.5歳である。検診は60歳以上を対象にしたため正常群で高齢となっている。

性別では、OA群では83%が女性で、正常群では全例女性である。

方 法

主な測定項目は、単純レ線正面像で、大腿脛骨外側角 (FTA)¹⁾、Femoral Angle (FA)¹⁾、Tibial Angle (TA)¹⁾、側面像で、脛骨の後傾角 (TPA)、軸射像にて、Wibergタイプである。CT像では、脛骨粗面位置と大腿四頭筋回旋角を測定した (図1)。

CT像での測定方法の詳細は、既に報告しているが、概略は次の通りである。仰臥位にてCTを撮影する。大腿部では大腿直筋が判読される横断面を、下腿では脛骨粗面の高さで横断面を撮影し、大腿骨上顆の高さのバイコンディラルラインを、基線として投影する。これから、脛骨粗面位置を外側からのパーセントで示し、大腿四頭筋の回旋角は大腿直筋と大腿骨骨軸を結ぶ線と基線のなす角度で示した。

結 果 (表1)

FTAでは、OA群で179.2度、正常群では174.9度であった。これは危険率0.1%以下で有意差が認められた。FAではほとんど差がなく、TAでは危険率1%以下での有意差を認めたが、FTAでの平均値の差は4.3度に比べ、TAの差は1.7度と小さかった。このことは、内反変形が軟骨部分で起こり、まだ骨の

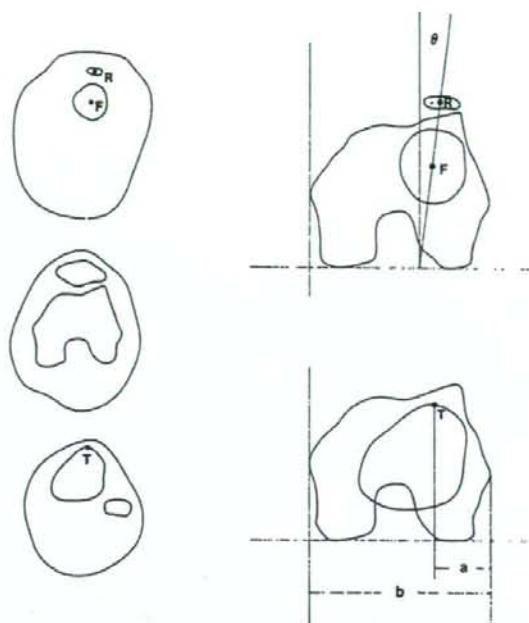


図1 大腿四頭筋回旋角と脛骨粗面位置

Rは大腿直筋の中央。Fは大腿骨の軸中心で、これらを結んだ直線とバイコンディラルライン (基線) と直交する線となす角 θ を大腿四頭筋回旋角と定義した。
Tは脛骨粗面で、基線に下ろした垂線と基線との交点の位置を外側からの百分率で表示した。(a/b \times 100)

表1 計測結果 (平均値 \pm 標準偏差)

* : P<0.001 ** : P<0.01

| | FTA* | FA | TA** | 脛骨粗面位置* |
|-----|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| 正常群 | 174.9 \pm 2.2 | 80.4 \pm 1.3 | 93.1 \pm 2.2 | 26.1 \pm 2.9 |
| OA群 | 179.2 \pm 3.1 | 80.5 \pm 1.7 | 94.8 \pm 2.7 | 32.4 \pm 4.2 |
| | 脛回旋 | TPA | Wibergタイプ** | |
| 正常群 | 19.2 \pm 19.0 | 10.6 \pm 3.6 | 1.8 \pm 0.3 | |
| OA群 | 25.7 \pm 13.8 | 11.0 \pm 2.8 | 1.5 \pm 0.4 | |

変化は出現していないか、あるいは脛骨内弯の小さな症例が選ばれていることを示して、症例の選択が適切に行われていると考えられる。

脛骨粗面の位置では、OA群で32.4%、正常群で26.1%で、OA群が、より内方にある。これも危険率0.1%以下で有意差が認められた。大腿四頭筋回旋角では、有意な差は認められなかった。Wibergタイ

ブでは、正常群でⅡ型が多く、OA群ではⅠ型が多かった。これも危険率1%以下で有意差を認めた。

考 察

これらの結果を検討すると、脛骨粗面がより内方に位置する（正常群に比べOA群では6.3%内方に位置する）ということが、内側型の大腿脛骨関節症の発症の原因になっているのではないかと推測される。しかし、先にも述べたように、これが原因ではなく結果、つまり膝が内反しているから脛骨粗面が内側にあるのではないかという疑問が生じるのは自然である。そこで、正常群のFTAがOA群と同じとしたときの脛骨粗面の位置を計算してみた。図2-aに示すように、2つの群のFTAの差は、外側関節面のどこかを中心として脛骨が内反方向へ回転しているために生じていると考えられる。従って、脛骨粗面も同様

に回転していることになる。しかし、どこを中心に回転しているかは、必ずしも同定できないため、図2のb, c, dに示すように各々の場合で計算してみるとdのように最内側を中心に回転させることが脛骨粗面を最も大きく移動させるため、このモデルで補正計算をしてみた。すると、6.3%の差が3.9%に小さくなる。しかし、この差でもなお危険率0.1%以下で有意差を認める。（実際には、図2のaのように回転していると思われるので3.9%より大きくなるであろう。）従って、脛骨粗面がより内方にあるという結果自体は、信頼できると考えられた。ここで、誤解を防ぐために付言しておくが、脛骨粗面の位置は、“より内方にある”といっても、膝全体から考えると外側にあるということである。（最外側点から32.4%の位置）また、正常群よりさらに外側に位置する群では、膝蓋大腿関節に異常が出現しやすいことを、共著者が報告している。⁵⁾

さらに、この力学的な根拠として、FTA176.5度の膝のモデルで、以下のコンピュータシミュレーションを行った。²⁷⁾

図3は、大腿四頭筋に力を入れないでたった場合である。外側側副靭帯に小さな張力が見られ内側に圧力の集中がある。

脛骨粗面が外側に位置する場合は、大腿四頭筋に200Nの筋力を加えると、図4のように、圧力は均等化する。外側側副靭帯の張力は消失している。

図5のように脛骨粗面が内側に位置する場

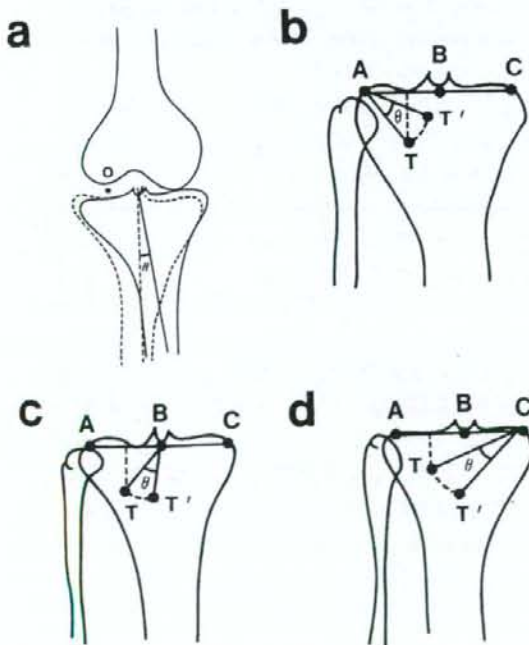


図2 脛骨粗面位置の補正計算（本文参照）

- a: OA群では実線のようにO点を中心に θ 内反していると考えられる。(O点を厳密に決定することは困難ではあるが)
- b: A点を中心に θ 脛骨粗面を回転させる。
- c: B点を中心に θ 脛骨粗面を回転させる。
- d: C点を中心に θ 脛骨粗面を回転させる。

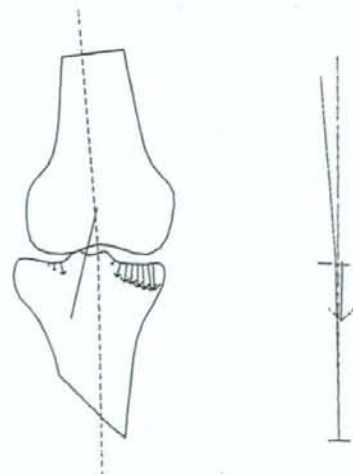


図3 大腿四頭筋=0での関節接触圧分布
内側関節面に圧力の集中がある。

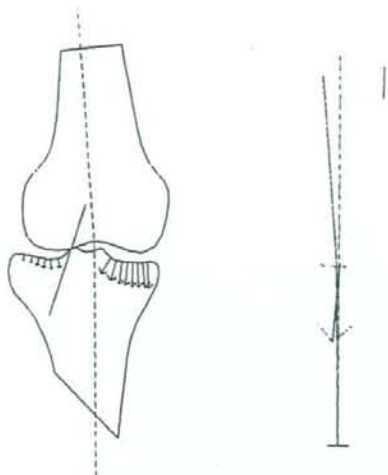


図4 脛骨粗面が外側に位置する場合大腿四頭筋に200Nの筋力を加えると、圧力分布は均等化する。

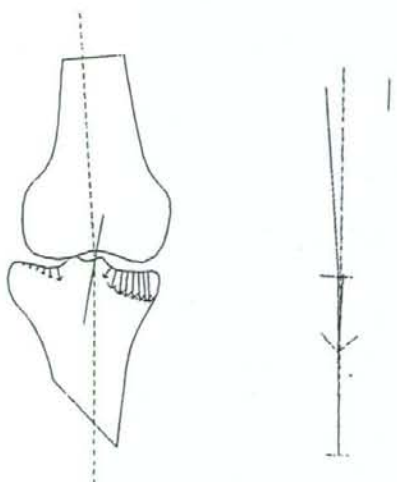


図5 脛骨粗面が内側に位置する場合同様の解析をすると、内側の圧力の集中は強くなる事が

合で、同様の解析をすると、内側の圧力の集中は強くなる事がわかる。

これらの解析により、脛骨粗面の内方化は、内側型の大股脛骨関節症を引き起こす原因となりうる事が示唆された。

まとめ

1. 内側型変形性膝関節症といわゆる正常膝との形態学的因子についてレントゲンの比較した。
2. 脛骨粗面はOA群で有意に内側に位置していた。
3. コンピュータシミュレーションでは、脛骨粗面が外方に位置しているほうが圧力分布が均一になりやすい。

文献

- 1) 廣島和夫ほか：これでわかる整形外科X線計測，金原出版，1896.
- 2) Kawai T et al: A new element in discrete analysis of plane strain problems, Seisan Kenkyu, 29: 204~207, 1977.
- 3) 三橋 隆ほか：膝蓋大腿関節症の臨床，X線の症候と発症因子としての形態異常について，日整会誌，62: S1322, 1988.
- 4) 森田秀穂ほか：膝関節における大腿四頭筋の働きについて，関節の外科，16: 68~75, 1989.
- 5) 森田秀穂：膝蓋大腿関節障害 - その原因としての形態異常について - ，関節の外科，16: 223~231, 1989.
- 6) 竹日行男ほか：脛骨結節と筋回旋からみた内側型変形性膝関節症について，日整会誌，62: S1323, 1988.
- 7) 津村 弘ほか：変形性膝関節症に対する高位脛骨骨切り術の最適角度について，整災外，28: 1605~1610, 1985.

22. 大腿脛骨関節症の形態学的因子について

—第2報—

東京女子医科大学 リウマチ痛風センター 生体力学研究部門
津 村 弘 森 田 秀 穂 姫 野 信 吉

群馬の森昭和病院 整形外科
竹 日 行 男 三 橋 隆

九州中央病院 整形外科
中 川 悟

はじめに

我々は、1987年より88年まで、群馬県草津町にて、60歳以上の住民の整形外科的検診を行った¹⁾。この検診の大きな目的のひとつは、膝関節に過去、現在とも何等の症状を持たない住民がどの程度存在するのか、また、その膝はどのような膝であるのかを調査することであった。

我々が、作業仮説として考えていたことは、そのような住民は少数でも必ず存在し、なおかつ、それらの膝は、同じ様な形態をしているにちがいないということであった。つまり、膝には理想的な形態があって、それに近いものは症状を発現しないのであろうと考えたわけである。

結論を急げば、既に共同著者の竹日²⁾、三橋³⁾、姫野⁴⁾がそれぞれ報告したように、我々の仮説は正しいと考えている。そして、理想的な膝と疾患を持つ膝との形態を比較することで、形態学的因子の意義について検討することが、本論文の主旨である。

対 象

先に述べた草津町在住の60歳以上の住民で直接検診できた359例中、片麻痺等を除いた318例(以下検診群)と、FTAのあまり大きくない内側型変形性膝関節症(以下OA群)の42人を対象とした。

この検診群318例の内、膝関節に何等の症状を持たない住民は157人270膝であった。さらに、下

肢回旋を知るためのCT像を得られた症例は12人24関節(以下正常群)であった。

OA群では、膝形態の2次的変化を最小限にする目的で、FTAの大き過ぎる症例は除外した。しかも、測定誤差を小さくするために内外反動揺性、回旋不安定性のある症例も除外されている。

平均年齢は、検診群で71.4歳、正常群で70.5歳、OA群で66.8歳である。

性別では、検診群では68%が女性、正常群では全例女性、OA群では83%が女性である。

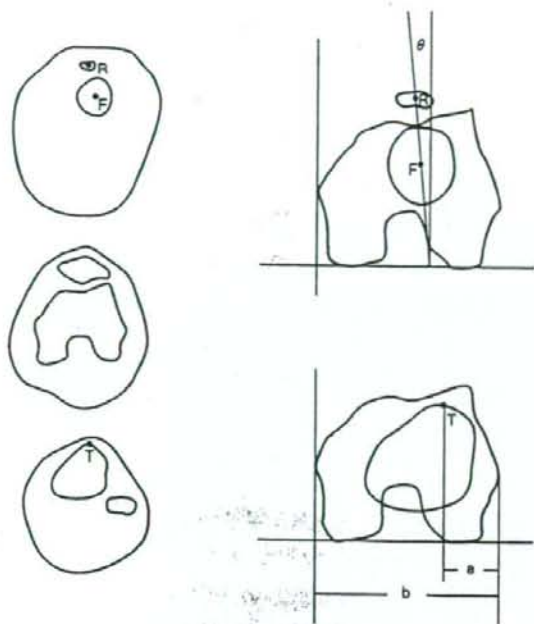
方 法

両群共通の測定項目は、単純レ線正面像で大腿脛骨外側角(FTA)、Femoral Angle(FA)、Tibial Angle(TA)⁵⁾、側面像で、脛骨後傾角(TPA)、軸射像にて、Wibergタイプ、CT像で、大腿四頭筋回旋角と脛骨粗面位置⁶⁾を測定した。

CT像での測定項目は、仰臥位にて撮影した像をもとに、図1に示すような方法で測定した。大腿では大腿直筋を判読し得る最下の横断面を、下腿では脛骨粗面の高さで横断面を撮影し、大腿骨上顆の高さのバイコンディラールラインを基線として、角度と位置を測定した。

結 果

表1には、男女合わせた全体の結果を示している。



Rは大腿直筋の中央、Fは大腿骨の軸中心を示す。RとFを結んだ直線と、バイコンディラルライン(基線)に直交する線とがなす角 θ を、大腿四頭筋回旋角と定義した。内旋を正とし、この図では正となる。(すべての群で平均値は正である。)

Tは脛骨粗面で、基線に下ろした垂線と基線との交点の位置を外側からの百分率で表示した。(a/b \times 100)

図1 大腿四頭筋回旋角と脛骨粗面位置

表1 計測結果(平均値 \pm 標準偏差)
検定は正常群とOA群間のみ

*: P<0.001 ** : P<0.01

| | FTA* | FA | TA** | TPA |
|-----|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 検診群 | 174.6 \pm 3.5 | 79.9 \pm 2.3 | 93.4 \pm 2.1 | 10.5 \pm 3.0 |
| 正常群 | 174.9 \pm 2.2 | 80.4 \pm 1.9 | 93.1 \pm 2.2 | 10.6 \pm 3.6 |
| OA群 | 179.2 \pm 3.1 | 80.5 \pm 1.7 | 94.8 \pm 2.7 | 11.0 \pm 2.8 |
| | Wibergタイプ** | 脛骨粗面位置* | 筋回旋 | |
| 検診群 | 1.7 \pm 0.5 | — | — | — |
| 正常群 | 1.8 \pm 0.3 | 26.1 \pm 2.9 | 19.2 \pm 19.0 | |
| OA群 | 1.5 \pm 0.4 | 32.4 \pm 4.2 | 26.7 \pm 13.8 | |

FTAでは、検診群で174.6度、正常群で174.9度、OA群で179.2度であった。正常群とOA群では、

危険率0.1%以下で有意差が認められた。FTAの平均値の差は4.3度であったが、FAではほとんど差がなく、TAでも有意差はあるものの差は1.7度と小さかった。

TPAでは、有意差は認めなかった。

Wibergタイプでは、正常群でII型が多く、OA群ではI型が多かった。これも危険率0.1%以下で有意差を認めた。

脛骨粗面の位置では、正常群で26.1%、OA群で32.4%で、OA群が、より内方にある。これは、危険率0.1%以下で有意差が認められた。

ここで、誤解しやすい点を指摘したい。それは、脛骨粗面が内方に変位しているといっても、正中より内側に位置しているわけではないということである。今回、観察した最内方の症例でも外側より4:6の位置にあった。

OA群にのみ男性が含まれているため、これを除いた結果を表2に示す。各数値に大きな変化はない。

表2 OA群における計測結果(平均値 \pm 標準偏差)

| | FTA | FA | TA | TPA |
|---------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| OA群 | 179.2 \pm 3.1 | 80.5 \pm 1.7 | 94.8 \pm 2.7 | 11.0 \pm 2.8 |
| OA群(女性) | 179.1 \pm 3.2 | 80.4 \pm 1.6 | 94.8 \pm 2.7 | 11.0 \pm 2.9 |
| | Wibergタイプ | 脛骨粗面位置 | 筋回旋 | |
| OA群 | 1.5 \pm 0.4 | 32.4 \pm 4.2 | 26.7 \pm 13.8 | |
| OA群(女性) | 1.5 \pm 0.4 | 32.9 \pm 4.1 | 27.5 \pm 13.8 | |

考 察

以上の結果を踏まえて、第一報にて報告、考察した論点は、次の3点に要約できる。

1) OA群では、正常群より脛骨粗面は内方にあった。FTAが大きくなると、脛骨粗面は内方に移動するが、この分を補正してもなお内方であった。

2) コンピュータシミュレーションでは、脛骨粗面が内方にあると、大腿四頭筋の外反モーメント

が小さくなり、内側に集中する圧力分布が均等化しにくい。

3) これらのことにより、脛骨粗面の内方変位は、正常なFTAを持つ症例でも、内側型大腿脛骨関節症を引き起こす可能性があることが示唆された。

脛骨粗面の内方化は膝の内反変形の結果ではないのかという疑問に対する反証と考察は、第一報に詳述した。しかし、これらの論点を省みると、さらに、いくつかの新たな疑問が生まれる。

その一つは、外側にあればあるほど良いのか、つまり、外側にあることのデメリットはないのか、ということである。

膝蓋大腿関節に痛みを訴えた女性30例52関節(以下PF群)で、同様の測定を行ってみた。その結

表3 PF群の計測結果(平均値±標準偏差)

検定は正常群とPF群間のみ

*: P<0.001 ** : P<0.01

| | FTA | FA | TA* | TPA** |
|-----|-----------|----------|----------|----------|
| PF群 | 175.1±2.2 | 79.4±2.2 | 95.0±2.3 | 8.5±3.3 |
| 正常群 | 174.9±2.2 | 80.4±1.3 | 93.1±2.2 | 10.6±3.6 |
| OA群 | 179.2±3.1 | 80.5±1.7 | 94.8±2.7 | 11.0±2.8 |

| | Wibergタイプ** | 脛骨粗面位置* | 筋回旋* |
|-----|-------------|----------|-----------|
| PF群 | 2.2±0.4 # | 21.7±4.6 | 3.3±13.3 |
| 正常群 | 1.8±0.3 | 26.1±2.9 | 19.2±19.0 |
| OA群 | 1.5±0.4 | 32.4±4.2 | 26.7±13.8 |

: 26例45膝

果を表3に示す。PF群では、年齢は、12歳から50歳まで平均で24.4歳である。この一部は、共同著者の森田が、既に報告している⁹⁾。

正常群との比較では、有意差は、TA, TPA, 脛骨粗面位置、大腿四頭筋回旋角とWibergタイプに認められた。

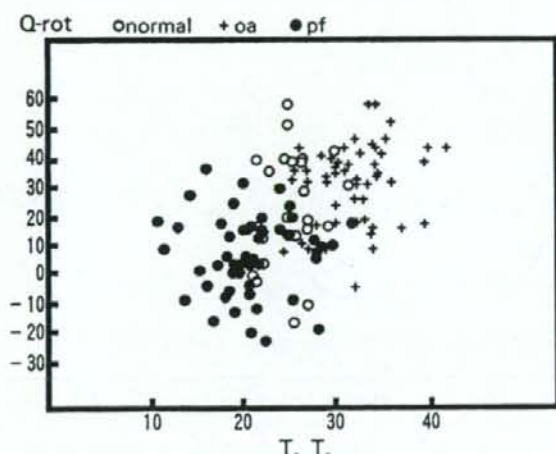
TAでは、差はあるものの小さく、FTAでは、有意差はなかった。

Wibergタイプでは、やはり、II型とIII型が多い。脛骨粗面位置でみると21.4%と正常群よりさら

に小さく、極めて外側に位置している。大腿四頭筋回旋角では、PF群で小さく大腿骨幹に対して四頭筋が外旋していることになる。

つまり、脛骨粗面が外側にあればあるほど、また、四頭筋が外旋していればいるほど、膝蓋骨の外側変移力が増大し、膝蓋大腿関節に異常を起こしてくる可能性が示唆された。

脛骨粗面は、外側にあるほど、大腿脛骨関節の圧力分布は均一化するが¹⁰⁾、膝蓋骨の外側変移力は増大する。従って、脛骨粗面の理想的な位置が存在することになる。



横軸は脛骨粗面位置、縦軸は四頭筋回旋角、左下にPF群、右上にOA群、中央縦長に正常群が分布している。

図2

図2に、横軸を脛骨粗面位置、縦軸を四頭筋回旋角とした時の、正常群、OA群、PF群の分布を示す。左下にPF群、右上にOA群、中央縦長に正常群が分布している。

今まで述べてきた大腿脛骨関節の圧力分布の違いは、大腿四頭筋力が作用してはじめて出現する⁹⁾。このような違いの蓄積が変形性関節症を引き起こすのであろうが、蓄積という言葉はあまりに漠然としていて、その過程を解明したとは言い難い。これが、もうひとつの提起したい疑問である。

変形性関節症の症例で、大腿四頭筋訓練が疼痛を緩和したり、筋電図学的に外側広筋や大腿筋膜張筋をはじめとする外側の筋群が活動しているなど、この疾患と四頭筋力の密接な関係が存在し、しかも解析された圧力分布に反映されてはいる。しかし、どのような状態が、いつ、どのくらいの期間続けば疾患として成立して来るのかは、解決されてはいない。今後とも研究が必要と思われる。

文 献

- 1) 姫野信吉他：自然集団の高齢者群における「正常」膝関節の形態について、日整会誌，63：S91，1989.
- 2) 廣島和夫他：これでわかる整形外科X線計測：金原出版，1986.

- 3) 三橋 隆他：膝蓋大腿関節症の臨床，X線の症候と発症因子としての形態異常について，日整会誌，62：S1322，1988.
- 4) 森田秀穂他：膝関節における大腿四頭筋の働きについて，関節の外科，16：68～75，1989.
- 5) 森田秀穂：膝蓋大腿関節障害—その原因としての形態異常について—，関節の外科，16：223～231，1989.
- 6) 竹日行男他：脛骨結節と筋回旋からみた内側型変形性膝関節症について，日整会誌，62：S1323，1988.
- 7) 津村 弘他：変形性膝関節症に対する高位脛骨骨切り術の最適角度について，整災外，28：1605～1610，1985.
- 8) 津村 弘他：大腿脛骨関節症の形態学的因子について，膝，15：29～32，1989.

IV. 研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

| 著者氏名 | 論文タイトル名 | 書籍全体の編集者名 | 書籍名 | 出版社名 | 出版地 | 出版年 | ページ |
|------|---|-----------|--------------------|----------|-----|------|--|
| 名倉武雄 | Point Cluster法による膝関節運動解析 | 吉矢晋一 | 関節外科 vol. 27 no. 9 | メジカルビュー社 | 東京 | 2008 | p. 100-104 |
| 赤居正美 | “可動域制限” “筋力低下” “運動障害の測定・評価” “薬物療法・物理療法” “assistive technology” “脊髄損傷” | 岩谷力他編 | 運動器リハビリテーションクルズ | 南江堂 | 東京 | 2008 | p. 116-120 157-158 167-168 178-179 212-215 232-233 329-332 |

雑誌

| 発表者氏名 | 論文タイトル名 | 発表誌名 | 巻号 | ページ | 出版年 |
|--|---|---------------------|--------|---------|------|
| 松本秀男 | 変形性膝関節症とは | Aging & Health | 4 | 7-11 | 2008 |
| 赤居正美 | 整形外科における最近の進歩と展望；リハビリテーション | 整形外科 | 59 (7) | 800-805 | 2008 |
| Nagano Y, Sakagami M, Ida H, Akai M, Fukubayashi T | Statistical modeling of knee valgus during a continuous jump test | Sports Biomechanics | 7 (3) | 342-350 | 2008 |
| Nakajima K, Kakihana W, Nakagawa T, Mitomi H, Hikita A, Suzuki R, Akai M, Iwaya T, Nakamura K, Fukui N | Addition of an arch support improves the biomechanical effect of a laterally wedged insole | Gait and Posture | 29 (2) | 208-213 | 2009 |
| Nagano Y, Ida H, Akai M, Fukubayashi T | Biomechanical characteristics of the knee joint in female athletes during tasks associated with anterior cruciate ligament injury | Knee | 16 (2) | 153-158 | 2009 |
| 大森豪 | 卒後研修講座－変形性膝関節症のリスクファクター－ | 整形外科 | 59 | 297-304 | 2008 |
| 大森豪 | 内側型変形性膝関節症の発症危険因子 | Jpn J Rehabil Med | 45 | 85-89 | 2008 |
| Omori G, Koga Y, Miyao M, Takemae T, Sato T, Yamagiwa H | High tibial osteotomy using two threaded pins and figure-of-eight wiring fixation for medial knee osteoarthritis. | J Orthop Sci | 13 | 39-45 | 2008 |

| | | | | | |
|--|--|----------------------------|-----|---------|------|
| 田中伸明、小林公一、坂本信、田邊祐治、佐藤卓、大森豪、古賀良生 | 透視X線画像を用いた膝関節の3次元位置姿勢の自動推定 | 日本臨床バイオメカニクス学会誌 | 29 | 403-408 | 2008 |
| 大森豪、渡辺博史、田中正栄、古賀良生 | 医学的リハビリテーションの進捗とエビデンスー変形性膝関節症 | Pharma Medica | 26 | 59-62 | 2008 |
| 大森豪、古賀良生、遠藤和男、渡辺博史、西野勝敏、速水正 | 大規模集団検診の縦断的調査による変形性膝関節症の発症要因と危険因子 | THE BONE | 23 | 27-30 | 2009 |
| 石谷周一、佐々木俊行、織田広司、林豊彦、中村康雄、渡辺聡、佐藤卓、大森豪、古賀良生 | 大腿骨MRモデルにおける再現性の高い解剖学的座標系の構築 | 日本臨床バイオメカニクス学会誌 | 29 | 409-414 | 2008 |
| 小林公一、田中伸明、小田川健一、佐藤卓、坂本信、田邊祐治、大森豪、古賀良生 | 2方向X線像を用いた骨および人工膝関節の3次元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 | 29 | 421-425 | 2008 |
| 佐々木俊行、林豊彦、中村康雄、大森豪、渡辺聡、佐藤卓、古賀良生 | 関節鏡ナビゲーション手術システムにおける骨モデルの鏡視画像への重ね合わせ精度評価 | 日本臨床バイオメカニクス学会誌 | 29 | 241-246 | 2008 |
| Umeda N, Miki H, Nishii T, Yoshikawa H, Sugano N | Progression of osteoarthritis of the knee after unilateral total hip arthroplasty: minimum 10-year follow-up study | Arch Orthop Trauma Surg | 129 | 149-154 | 2008 |
| Otake Y, Suzuki N, Hattori A, Miki H, Yamamura M, Yonenobu K, Ochi T, Sugano N | Hip motion analysis using multi phase (virtual and physical) simulation of the patient-specific hip joint dynamics | Stud Health Technol Inform | 132 | 339-44 | 2008 |
| Nishii T, Tanaka H, Sugano N, Sakai T, Hananouchi T, Yoshikawa H | Evaluation of cartilage matrix disorders by T2 relaxation time in patients with hip dysplasia | Osteoarthritis Cartilage | 16 | 227-33 | 2008 |

V. 研究成果の刊行物・別冊

関節外科における動作解析とその応用

Point Cluster法による膝関節運動解析

Measurement of knee kinematics using point cluster technique

名倉武雄 桐山善守

はじめに

Point Cluster法(PCT)は, Andriacchiら¹⁾により考案された表面マーカー, および光学式カメラを用いた膝関節運動計測手法である(図1)。大腿・下腿に複数のマーカーを添付することにより, 大腿骨・下腿骨の三次元位置を取得し, 膝関節の三次元運動(回転および並進運動)を計測する。本法の最大のメリットは, 表面マーカー式であるため被検者の動作を制限することなく, ささまざまな動作中の膝関節三次元運動を計測できる点である。このため, 著者らは歩行や階段昇降などの日常生活動作に加え, カットやターンなどのスポーツ動作の計測にPCTを応用してきた^{2)~5)}。本稿では, PCTの原理および計測法とその臨床的応用について述べる。

Key words

膝関節(knee joint)
動作解析(motion analysis)
関節動態(joint kinematics)
歩行(gait)

PCTの原理

本法の特徴は, ①複数(大腿9個, 下腿6個)の反射マーカーを体表に均等に貼付し, このマーカー群(cluster)の情報を基に, それぞれの体節の運動を算出することで, 1つ1つのマーカーの動きによる誤差を軽減している点, および②解析過程に力学の物理量を持ち込むことで, 皮膚のズレ・変形を補正する点にある。

① 大腿骨・下腿骨軸の定義

PCTでは自然立位(基準位置)において, 大転子, 大腿骨内顆, 外顆, 脛骨内側顆, 外側顆, 足関節内果, 外果に貼付したマーカーを基に, 大腿骨・下腿骨の解剖学的座標軸を定義する。大腿骨・下腿骨軸の原点は, それぞれ大腿骨内顆・外顆および脛骨内側顆・外側顆の midpoint とする(図2⁶⁾)。基準位置における解剖軸と大腿・下腿のマーカー群の相対位置を取得しておき, これを計測に用いる。

② 大腿骨・下腿骨相対運動の計測

実際の計測では, 大腿9個, 下腿6個のマーカー群の重心および軸の位置変化を利用する(図3^①)。すなわち, それぞれのマーカー群の運動を計測し(図3^②), 上記の基準位置において求めた大腿・下腿マーカー群と解剖学的座標軸および原点の相対位置を基に, 大腿骨・下腿骨の三次元位置を計測し, 両者の相対位