

安定性を強化しておくことが重要になってくる。筋力訓練では筋力の維持・増大を目的におこなわれるが、膝 OA においては患者自身が自宅で容易にできる訓練が適している。リハビリテーション医学の進歩とともに、訓練方法に関しても研究が行われた。筋力訓練には等尺性運動、等張性運動、等速性運動、経皮的電気刺激法などがあるが、膝 OA の疾患特殊性からいって等尺性運動が適している。

我々は膝 OA 患者に 2 種類の筋力訓練を指導している。仰臥位下肢伸展挙上訓練と側臥位股関節外転訓練である。前者に関しては諸家の報告や我々のこれまでの研究結果からも有効性が十分示された。後者についてはいまだ不明な点が多く、検討する余地が十分あると考えている。

#### B. 研究の必要性

膝 OA に対して行われる保存療法には、薬物療法、運動療法、装具療法などがあるが、その中でも運動療法は治療にも予防にも有用な方法であると考えられ、大腿四頭筋の筋力強化に注目した論文は散見されるが、股関節外転筋の筋力強化に関しては十分な検討は行われていない。股関節外転筋の筋力強化により膝 OA の疼痛が緩和されるばかりでなく、それ以上進行させないための二次的予防につながると考えている。さらに歩容が安定するなど動的なバランスがよくなり転倒防止に貢献できると確信している。

#### C. これまでの研究

健康人において股関節外転運動を膝、足関節の肢位の違いや重錘の有無でそれぞれ中殿筋、大腿直筋、外側広筋、大腿筋膜張筋の働きを表面筋電計にて検討した。その結果、膝関節完全伸展と足関節最大背屈が最も重要であり、効率的な大腿直筋の筋力訓練が可能

となることがわかった。

さらに健康人 10 名を対象に 1 日 100 回、毎日右股関節外転訓練をおこなった。2 週ごとに 0.5Kg の重錘を加えていき、計 8 週間おこなった。2 週ごとに表面筋電計で中殿筋、大腿直筋、外側広筋の最大筋力と、6kg の同一負荷による股関節外転運動 1 回あたりの筋活動量を測定し、さらに足底圧測定器 (Foot scan) で足底圧と足圧中心を計測した<sup>14)</sup>。結果は大腿直筋、外側広筋ともに 4 週までは順調に筋力は増強したがその後、低下していく傾向がみられた。一方中殿筋は順調に筋力は増強した。また被験者に 6kg の同一負荷を加え、股関節外転運動 1 回あたりの筋活動量を測定した結果、他の 2 筋にくらべ中殿筋の筋活動は増強した。以上の結果より訓練により中殿筋の筋力は増加し、筋収縮しやすくなる (使われ易くなる) ことが予測された。

足底圧測定器による検討では歩行時の左右のふらつきおよび片脚起立時の足圧中心の偏位には有意差はなかった。しかしながら歩行時の左右のふらつきに関しては確かに減少傾向であり、効果がうかがえた。また歩行時には足圧中心は左右両側とも外側に偏位する傾向が見られ、訓練側であった右側は有意に外側に偏位した。

以上の結果を踏まえて、股関節外転訓練が転倒予防に有効であるか検討した。

#### D. 目的

膝 OA の患者 100 例について、筋電図学的変化や重心偏位についての検討を加えるものである。

目的：膝 OA に対して股関節外転筋筋力強化が有効であることを証明することにある。EBM を確立し膝 OA の保存的治療を確固たるものにする。

**デザイン:** 本研究は、無作為割付前向き臨床研究としてデザインされている。研究の対象を満たす患者に対して、研究医師が患者同意書を提示して同意が得られた患者を 2 つのグループのいずれかに無作為に割り付け、登録を行う。合計 100 例を登録し、1 つのグループを 50 例として追跡調査する。

#### E. 研究方法

膝 OA の患者を無作為に 2 つのグループに割り付ける。一方のグループに対しては、次に述べる要領で股関節外転筋訓練を行わせる。側臥位となり、膝を伸展させたまま、下肢全体を持ち上げ 3 秒程度静止させろす（この運動に関しては当院リハビリテーション室において直接指導をおこなう）。この運動を一日 100 回、8 週間行わせる。重錘などの負荷は行わない。予定通り行えたかどうかは患者自身で記入する日記で管理する。開始時/4 週間後、8 週間後、12 週間後、6 ヶ月後、1 年後の膝関節の可動域と水症の程度を確認し、立位単純 X 線写真正面像を撮影し、さらに筋電図学的評価と重心動揺に関する評価を行う。詳細は、筋電図学的評価は、表面筋電計（MyoSystem, Noraxon 社製）を用い、中殿筋、大殿筋、外側広筋、大腿直筋、の筋活動電位を測定する。同社のソフトウェアにより最大収縮力や筋収縮量を推定する。重心動揺の評価には、F-scan（ニッタ社製）を用いて、歩行時と片脚起立時の重心動揺を記録する。

（倫理面への配慮）

大分大学の倫理委員会審査をうけることにより、研究等の対象となる個人の人権擁護を最大限におこなう。具体的には

- 個人情報外部に漏洩しないよう匿名化する。

- 得られたデータは、学会や学術雑誌で発表する以外には研究組織外には公表しない。

学会や学術雑誌で発表する際にも、個人のプライバシーに十分配慮する。

#### F. 研究結果

静的バランスを 4 週では被検者の 80% が片脚起立時間が延長し、片脚起立時間と股外転筋の変化で有意差 ( $P < 0.05$ ) を認めたが大腿四頭筋との有意差は認めなかった。4 週以降、経時的に片脚起立時間は伸びたが、筋力に優位な増強はなかった。開始時の片脚起立時間によりグループ A (30 秒以下) グループ B (31 秒～60 秒) グループ C (61 秒～120 秒) に分類した。開始時の下肢筋力はグループ  $A < B < C$  であったが、起立時間と股外転筋の向上率はグループ  $A > B > C$  の順であった。また訓練する被験者ほどグループ B や C に属する傾向があった。さらに足底圧測定器による歩行時の重心の動きは外側にシフトする傾向が約 50% にみられたが、これも外転訓練の施行回数との関係があった。また開始時には重心の奇跡がばらばらであったのに対して 12 週後はまとまってきており、歩行時の安定性を示唆した。フォースプレートによる重心と左右バランスでは重心の触れの動きが少なくなり、左右のバランスも改善傾向にあった。（図 1）

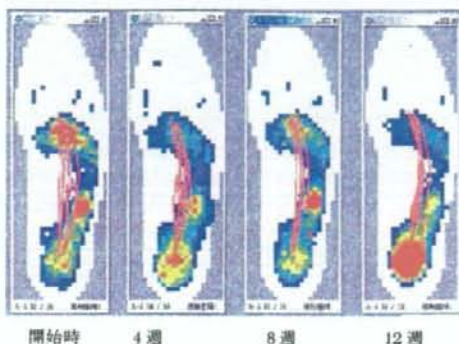


図1 70歳 女性 K-L分類Ⅲ Foot scan  
(ニッタ株式会社)による足底圧の検討。  
経過とともに重心は外側にシフトし、ばらつきがなくなっていることがわかる。

#### G. 結論

膝 OA に対して行われる保存療法には、薬物療法、運動療法、装具療法などがあるが、その中でも運動療法は先に述べた各段階で治療にも予防にも有用な方法であると考えられ、大腿四頭筋の筋力強化に注目した論文は散見されるが、股関節外転筋の筋力強化に関しては十分な検討は行われていない。

歩行時の膝関節の荷重状態を考えると、重心は身体の中央にあるため立脚期には内反(内側が圧迫され外側が開く方向の)モーメントが生じている。上半身を立脚側に引く力は、股関節外転筋が発生していて、この力が強ければ重心は外側化し内反モーメントは小さくなることが予測される。その結果、疼痛の軽減や歩容の安定が期待できる。EBM に則った運動量を指導することにより膝 OA のより効果的な保存的治療がなされると、薬物療法、装具療法にかかる医療費は減少するであろうし、外科的治療にかかる医療費も削減できると考えている。また転倒防止に役立つことで大腿骨近位部骨折の発生率の抑制に寄与すると考えている。

『運動器慢性疾患に対する運動療法』

大分大学医学部附属病院リハビリテーション部准教授

片岡晶志

大分大学医学部整形外科 教授

津村 弘

はじめに

変形性膝関節症は、高齢者の ADL, QOL を低下させる大きな要因となっている。疼痛はもとより、平地歩行では歩行距離が短くなり、速度も遅くなる。また階段の使用に関して質問すると、ほとんどの患者は「手すりを使用している」か「避けている」という返事である。平成 16 年の厚生労働省の国民生活基礎調査において、変形性関節症は要支援となる原因では第 2 位の 17.5% を、要介護となる原因では第 5 位の 8.9% を占めていることが報告されている<sup>1)</sup>。

膝 OA の保存的治療法の中で、初期、中期、末期のいずれの時期にも必要であり、効果が期待できるものに運動療法が挙げられる。薬物療法や装具療法で膝関節の疼痛や腫脹が消失しても筋肉の萎縮は回復しないであろうし、関節軟骨の破壊や滑膜炎の再発を予防するためにはこの萎縮した筋肉を再教育し、dynamic な安定性を強化しておくことが重要になってくる。膝 OA の筋力訓練は筋力の維持・増大を目的におこなわれるが、その目的を遂行するためには毎日できてかつ手軽に自宅で行える必要がある。本編では日々の診療で我々が患者に指導している側臥位股関節外転訓練について詳述する。

#### 下肢アライメント

日本人の一次性変形性膝関節症のうち、内反型は全体の 90% を占めている。長嶺らは解剖学的な特徴として①大腿骨骨幹部での外彎 ②脛骨中枢（関節面）での強い内反 ③脛骨関節面中心は脛骨骨幹部中心線より内側に偏位 ④脛骨遠位は近位に対して内捻をあげている<sup>2)</sup>。すなわち欧米人にくらべ脛骨関節面の内反が大きく、年齢がすすむにつれて外側の支持機構がゆるみ不安定性が増強するとともに、大腿骨骨幹部が外彎し、膝関節を中心とした内反が増強すると説明している。

また正常膝での両脚起立時には下肢機能軸は両膝関節のそれぞれ中央を通り内外側に均等に荷重されるが、片脚起立時には重心は体中心と股関節中心の間にあることは実感できる。これは 2 次元剛体パネモデルを用いた FTA17° の膝関節における片脚起立時の接触圧分布において内外側関節面に圧力が分散されてはいるものの、内側により強く圧力がかかっていることでもわかる。正常な下肢アライメントでも体重は常に、膝関節に対して内反モーメントとして作用している<sup>3-6)</sup>。

一方大腿四頭筋は外反モーメントとして働くことが知られている。これまでの研究で 1) OA 群では正常群より脛骨粗面は内方に存在。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る。3) 脛骨粗面の内方変位は正常な FTA をも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。4) 脛骨粗面の内方変位は内反変形の結果ではなく、原因である。5) 脛骨粗面の位置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、膝蓋骨の外側偏移力は増大する。従って脛骨粗面の理想的な位置が存在する<sup>7-8)</sup>。

## 訓練方法

膝関節周辺の筋肉のみならず中殿筋や大殿筋、大腿筋膜張筋を強化することを目的とする。側臥位にて、①足関節を最大背屈させ、膝関節を伸展し、②脚を外転位に挙上させ、一旦静止する。このときやや前方に挙上しないことが大切である。③ゆっくりと下ろし、④全身の力を抜きリラックスする。1回の運動を4拍子のリズムにし、一定テンポで行う。これを数回にわけてもよいので1日100回を目標に指導している。(図2)

## 大腿四頭筋への効果

ランツ下肢解剖書によれば股関節外転時に最も働く筋は中殿筋であり、次に働く筋は大腿直筋であると記載されている<sup>9)</sup>(図3)。健常者を対象に行った実験では、外転訓練時に足関節を背屈しかつ膝関節をしっかり伸展させることが重要であることがわかった。膝関節を意識してしっかり伸展した場合に比べ30度屈曲した場合には大腿四頭筋の働きの減少する。日常診療において、膝蓋骨骨折の術後にSLRができなくても股関節外転訓練をおこなっていれば、いつのまにかSLRが出来るようになったと患者が満足している状況に遭遇することもランツ下肢解剖書のデータから理解できる。二次元剛体パネモデルを用いた実験でも内側型変形性膝関節症に対して大腿四頭筋を作用させると、膝関節にかかる圧力は大きくなるが、接触圧分布は均一化傾向を示し、さらに外側の軟部組織の張力も減少する。これは脛骨粗面が外側に存在しQ角が存在することにより大腿四頭筋が外反力として働くためである。これが体重により発生する内反モーメントを相殺する。大腿四頭筋強化が膝OAに効果をしめす根拠の一つである<sup>6)</sup>。

## 股関節外転運動のメカニズム

股関節外転訓練により骨盤が安定化しさらに大腿四頭筋の筋力が増強する。これらはすべて膝OAにpositiveに働く。さらに楔状足底挿板と似たメカニズムにより効果をもたらす<sup>13)</sup>。安田らは楔状足底挿板の効果のメカニズムについて解剖学的FTAに変化はないが、機能的下肢軸が直立化し膝関節内側関節面に作用している過大な負荷を減少させることによると報告している<sup>10-11)</sup>。つまり外側の高い足底挿板に対して足を接地させるためには、足底挿板の角度分だけ股関節を外転する必要があるが、それでは立位不可能であるため上半身を外側に傾けてバランスをとる必要がある。これにより荷重線が外側にづれて内側関節面の圧力が軽減される。一方Todaらは距骨下関節まで固定した足底挿板を装着するとFTAが変化し下肢機能軸が外側にシフトすることで、内側関節面に作用している過大な負荷を減少させると報告している<sup>12)</sup>。

## これまでの研究

健常人において股関節外転運動を膝、足関節の肢位の違いや重錘の有無でそれぞれ中殿

筋、大腿直筋、外側広筋、大腿筋膜張筋の働きを表面筋電計にて検討した。その結果、膝関節完全伸展と足関節最大背屈が最も重要であり、効率的な大腿直筋の筋力訓練が可能となることがわかった。

健康人 10 名を対象に 1 日 100 回、毎日右股関節外転訓練をおこなった。2 週ごとに 0.5Kg の重錘を加えていき、計 8 週間おこなった。2 週ごとに表面筋電計で中殿筋、大腿直筋、外側広筋の最大筋力と、6kg の同一負荷による股関節外転運動 1 回あたりの筋活動量を測定し、さらに足底圧測定器(Foot scan)で足底圧と足圧中心を計測した<sup>14)</sup>。その結果予想に反して中殿筋最大筋力は経時的な増加が見られなかった。つまり訓練開始後 2 週目に最大値を示したが、その後は徐々に減少した。また大腿直筋では訓練開始後 2 週目に減少したが、その後は経時的に最大筋力は増加し、訓練開始前より有意に増加した。さらに外側広筋ではゆるやかな増加傾向があり、開始から 6 週までで有意差を認めた(図 4)。また被験者に 6kg の同一負荷を加え、股関節外転運動 1 回あたりの筋活動量を測定した結果、最大筋力の測定結果では経時的な変化が見られなかった中殿筋において、筋活動量では顕著な増加が見られた。一方大腿直筋、外側広筋では、筋活動量は減少傾向にあった(図 5)。つまりこのことは訓練しても中殿筋の筋力は増加しにくい、訓練によってより使われやすくなる(収縮しやすくなる)ことが予測された。

足底圧測定器による検討では歩行時の左右のふらつきおよび片脚起立時の足圧中心の偏位には有意差はなかった。しかしながら歩行時の左右のふらつきに関しては確かに減少傾向であり、効果がうかがえた。また歩行時には足圧中心は左右両側とも外側に偏位する傾向が見られ、訓練側であった右側は有意に外側に偏位した。

現在 150 名の変形性膝関節症の患者に対して介入研究をおこなっている。現在結果待ちの状態であるが、これまでで分かったことは、股関節外転訓練によって片脚起立時間が有意に延長することである。片脚立位時間が転倒・転落と有意に相関していることは報告されており、股関節外転訓練により骨盤・下肢が安定し転倒しにくくなると思われる。

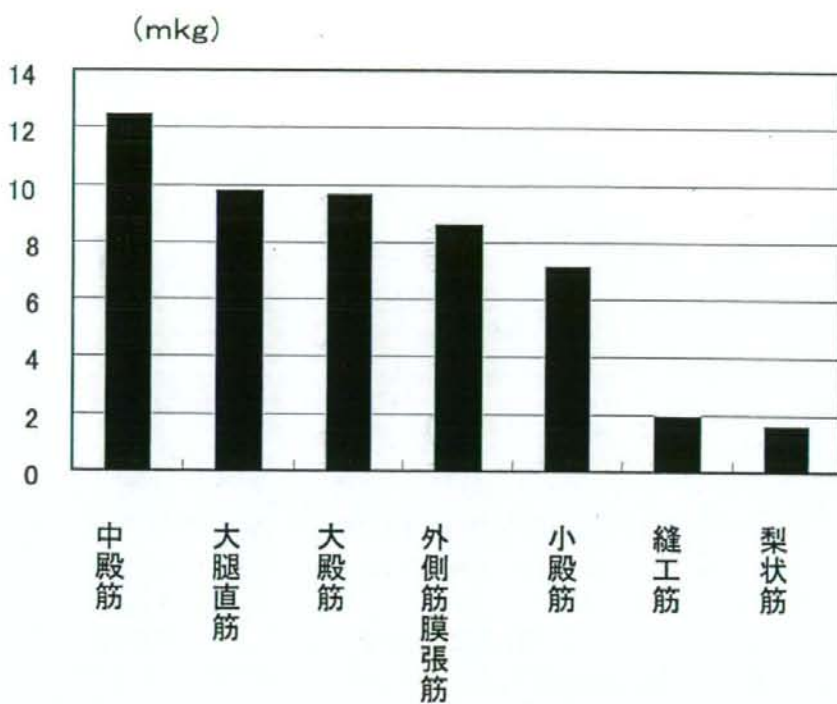
おわりに

股関節外転訓練は自分でおこなってみると、結構つらい運動であることがわかると思う。これを 100 回患者に指導して果たして自宅で行ってくれるか不安になってくる。しかし指導する医師がこの訓練がつらいことがわかっていれば、訓練のやり方や工夫、つらいときの対処方法など経験談としてアドバイスしやすい。まずは指導する医師に試していただきたい。

文献

- 1) 厚生労働省：平成16年国民生活基礎調査の概況  
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa04/4-2.html>
- 2) Nagamine R, et al. :Anatomic variations should be considered in total knee arthroplasty J Orthop Sci5:232, 2000.
- 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 18:9, 1999.
- 4) 津村 弘：関節のバイオメカニクス 九州リウマチ 26:1, 2006.
- 5) 津村 弘：膝関節と股関節のバイオメカニクス 整形外科 57:1259, 2006.
- 6) 池田真一ほか：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 MB Orthop 20:95, 2007.
- 7) 津村 弘ほか：大腿脛骨関節症の形態学的因子について 膝 15:29, 1989.
- 8) 津村 弘ほか：大腿脛骨関節症の形態学的因子について—第2報— 膝 16:98, 1990.
- 9) J. Lang ほか：ランツ下肢臨床解剖学 180:1979.
- 10) 安田和則ほか：変形性膝関節症に対する楔状足底板の効果—その静力学的機序に関する検討. 臨床整外 14:677, 1979.
- 11) Yasuda K, et al. :The mechanics of treatment of the osteoarthritic knee with a wedged insole. Clin Orthop 215:162, 1987.
- 12) 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, 2001
- 13) 鳥巢岳彦ほか：変形性膝関節症の運動療法 整形外科 39:217, 1988.
- 14) 山下 香美ほか：股関節外転訓練は変形性股関節症に有効か？—健常者による実験的研究— 第16回大分県リハビリテーション医学会誌 4:30, 2006.





ランツの下肢解剖より改変した。正常位から外転50度までの作業能を示した。(図1)



リラックスした状態から始める



足関節を最大背屈し、膝を完全伸展する



そのまま挙上し、一旦とめる。挙げすぎないように指導する。



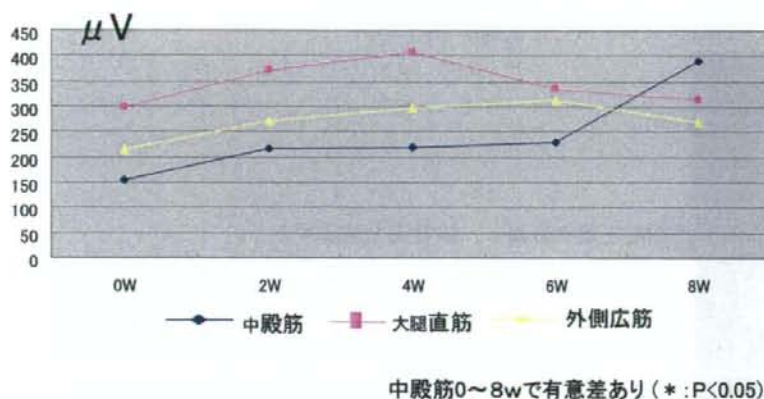
ゆっくり下ろす。



リラックスし、一旦力を抜く。これを1日100回指導する。

図2 股関節外転運動の詳細

## 最大筋力の経時的変化(平均)



## 同一負荷(6kg重錘)での筋活動量の変化

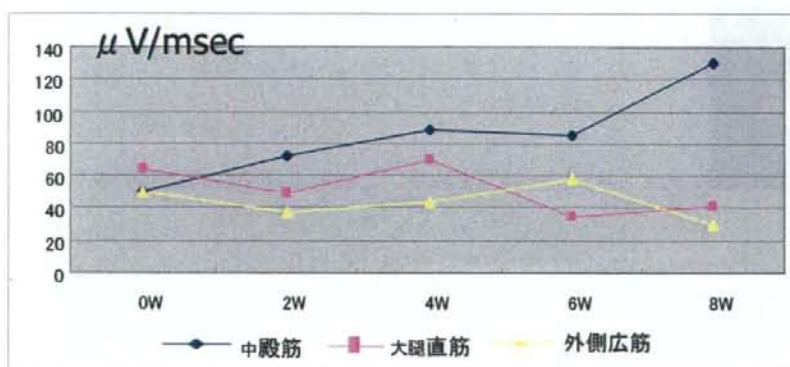


図3 表面筋電計測定結果

## 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

津村 弘 吉田盛治 家坂一穂 鳥巢岳彦

## はじめに

変形性膝関節症には、半月や靭帯の損傷あるいは大腿骨顆部の骨壊死に引き続き発症する二次性のものもあるが<sup>1)</sup>、本稿ではバイオメカニカルな視点から成因を考えることが目的であるため、対象を通常一次性と考えられている関節症に限定する。一次性膝関節症のなかで大腿脛骨関節面の内側か外側の一方に初発した変形性膝関節症を片側型変形性膝関節症とよぶが、進行すれば亜脱臼となり両方の大腿脛骨関節面に変化が及んでいく。

片側型変形性膝関節症の成因を考えるうえで、下肢のアライメントが重要であり<sup>2)</sup>、なかでも膝外側角 (femorotibial angle; FTA) は最も重要な要素である。内反した膝関節では内側型の、外反した膝関節では外側型の変形性関節症をきたす。しかし、FTAの異常だけではすべてが解明できるのであろうか。われわれは、大腿四頭筋のもつ膝関節に対する外反モーメントに着目し、研究を進めてきた。本稿では、60歳以上の住民検診で確認できた愁訴のない膝関節(過去、現在とも疼痛や水腫がなく、かつX線写

**Key words:** osteoarthritis of the knee, biomechanics, etiology

真上も eminentia の先鋭化以外の所見がない膝関節)をもつ群と内側型変形性膝関節症の群を比較し、その違いをバイオメカニカルに解析することにより、内側型変形性膝関節症の成因を考察する。外側型に関しては、頻度も2%程度<sup>2)</sup>と少なく一連の解析とは異なる<sup>3)</sup>ため別稿に譲る。

## 対象

変形性膝関節症の病期分類である北大分類の stage II までの内側型変形性膝関節症の女性32名53膝(以下、OA群)と60歳以上の住民検診にて確認できた愁訴のない膝関節をもつ集団(以下、対照群)女性94名160膝を対象とした。

この60歳以上の住民検診は、1987年12月～1988年2月まで、群馬県草津町にて行った。約500名の全住民のうち、359名を直接検診できた<sup>5), 8), 12), 13)</sup>。このうち、解析対象は骨折などの外傷の既往や片麻痺のある住民を除いた319名とした。その構成は、男性101名、平均年齢70.9歳(60～86歳)、女性218名、平均年齢71.2歳(59～93歳)であった。この319名の両膝関節について、診察と3方向のX線写真撮影を行った。このなかで、過去・現在とも疼痛・水腫なく、X線写真上も eminentia の先鋭化以外に変化のない膝関節は、270関節(42%)に観察された。その内訳は、男性110関節(54%)、女性160関節(37%)

Biomechanical aspect of etiology for the unicompartmental osteoarthritis of the knee

H. Tsumura, S. Yoshida, K. Iesaka, T. Torisu: 大分医科大学整形外科

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

であった。この女性160関節(94名)を対照群とした。この群は、通常対照群として選択される若年者の集団とは異なり、長年の使用に耐えた膝関節の群であると考えられる。

## 方法

### ■ X線計測

OA群と対照群の全例について、膝関節正面のX線写真から、FTA、FA、TAを測定した。また、OA群の全例と対照群のうち協力の得られた女性12名に対して下肢のCT撮影を行った。大腿直筋が写っているスライス、大腿骨の両顆部が写っているスライス、脛骨粗面が写っているスライスを重ね合わせて計測する。その詳細を、図1に示す。基準線は大腿骨の両後顆を結んだ線とする。大腿直筋の中央Rと大腿骨の軸中心Fを結んだ線と基準線に直交する線とのなす角を大腿四頭筋回旋角とし、脛骨粗面Tから基準線に下ろした垂線と基準線との交点の外側からの位置を百分率で表したものを脛骨粗面位置とした。計測値の平均値の差の検定は、t検定を用いて行った。

### ■ コンピュータ力学解析

2群の比較から得られた形態の違いが、膝関節に与える力学的影響を調べるため、二次元剛体バネモデル<sup>4)</sup>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、脛骨粗面、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。

## 結果

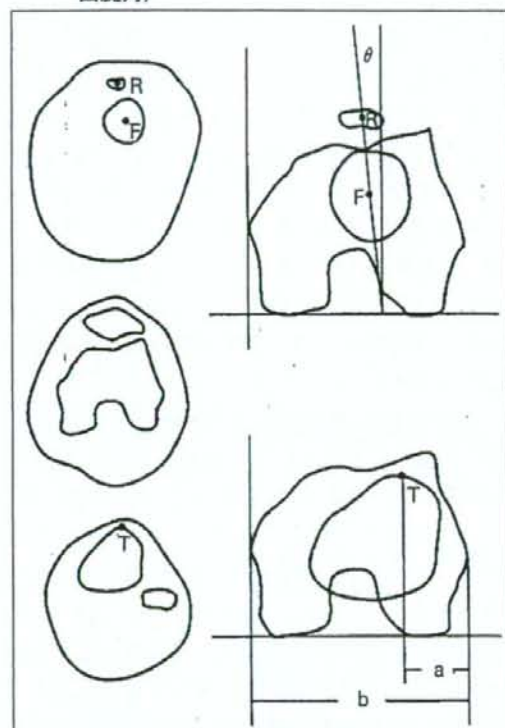
### ■ X線計測

表1に、X線写真上で計測したFTA、FA、TAを示している。FTAは、対照群で173.4°、OA群

で179.1°であった。対照群のFTAの標準偏差は2.5と小さかった。

表2は、CT画像上で計測した脛骨粗面の位置と大腿四頭筋の回旋を示している。脛骨粗面の位置は、対照群で外側から26.1%、OA群では32.9%の位置にあり、2群間に危険率0.1%以下で有意差を認め、OA群でより内方に存在していた。大腿四頭筋の回旋は正常群で内側19.2°、OA群で27.5°であったが、有意差を認めなかった。

図1 CT上での計測(脛骨粗面位置と大腿四頭筋回旋角)



大腿骨の両後顆を結んだ線を基準線とする。大腿直筋の中央Rと大腿骨の軸中心Fを結んだ線と基準線に直交する線とのなす角を大腿四頭筋回旋角とした。脛骨粗面Tから基準線に下ろした垂線と基準線との交点の外側からの位置を百分率で表したものを脛骨粗面位置とした。

表1 X線計測値の比較

	年齢*	FTA*	FA*	TA*
対照群	69.5±6.8	173.4±2.6	79.4±2.0	93.2±1.9
OA群	65.8±7.9	179.1±3.2	80.5±1.6	94.8±2.7

ただし、表内の数字は平均値±標準偏差。\* : p<0.001, + : p<0.01.

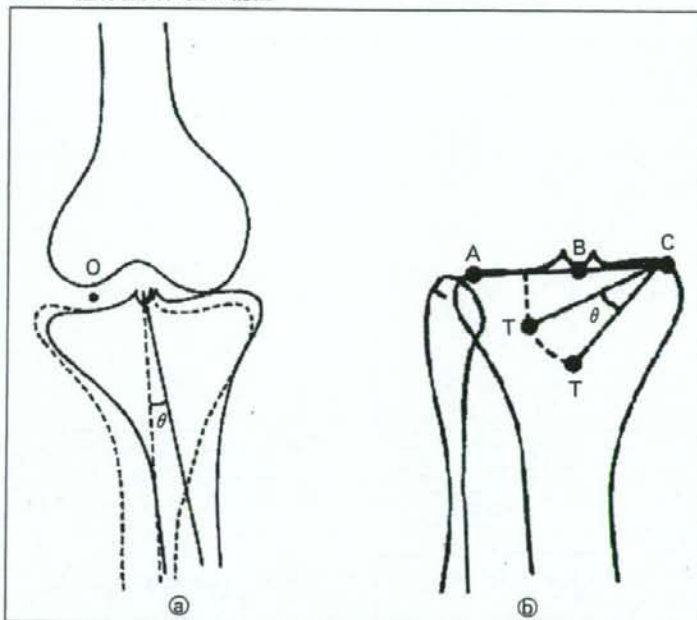
表2 CT計測値の比較

	年齢	FTA*	脛骨粗面位置*	大腿四頭筋回旋度
対照群	70.5±6.2	174.9±2.1	26.1±2.9	19.1±19.0
OA群	65.8±7.9	179.1±3.2	32.9±4.1	27.5±13.8

ただし、表内の数字は平均値±標準偏差。\* :  $p < 0.001$ 。

対照群の値は、表1と異なり12名24関節のものである。

図2 脛骨粗面位置の補正



㉑ : OA群の内反による脛骨粗面位置の変化分を補正した。㉒ : 内反がどこで起こっているかを正確に知ることは困難なため、変化が最も大きくなるC点を中心に回転させ補正した。

た。

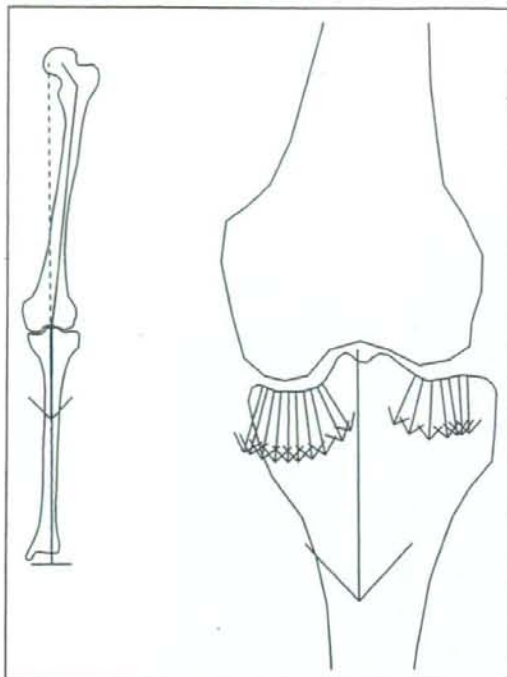
OA群で膝関節が内反しているため、脛骨粗面が内方に位置するのではないかという疑いもあるため、図2に示すようにFTAの変化分を補正して再検討したが、やはり0.1%の危険率で有意差を認めた。このことから内側型変形性膝関節症では、単にFTAの変化だけでなく脛骨粗面の位置異常があることが判明した<sup>12)</sup>。

#### ■コンピュータ力学解析

二次元剛体バネモデルを用いて計算したFTA174°の膝関節における接触圧分布を図3に示している。矢印の長さは圧力の大きさを示しており、内側関節面と外側関節面ではほぼ均

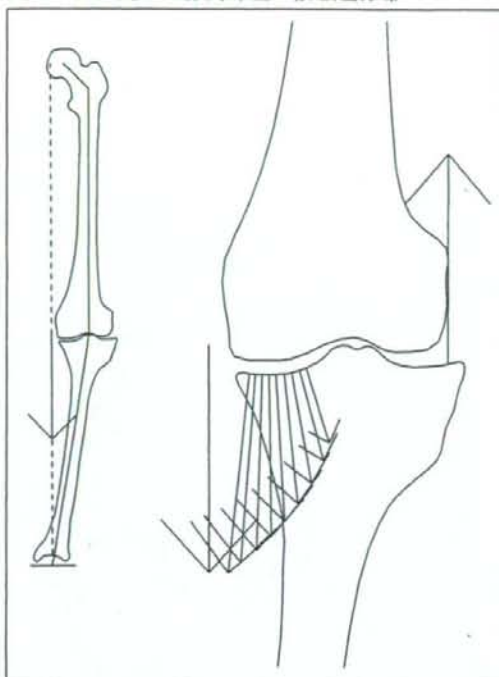
等に力がかかっていることがわかる<sup>9)11)</sup>。これに対し、FTA188°の内側型変形性膝関節症における圧力分布を図4に示す。内側関節面に大きな圧力がみられ、外側は軟部組織の緊張によって支持されていることがわかる。上向き矢印は張力を示している。ただし、これらの解析は、股関節中心よりやや内側に重心があることを想定し体重のみを荷重して計算している。図4の内側型変形性膝関節症に対し大腿四頭筋力を作させた場合を解析してみると、図5のように膝関節にかかる力は筋力分が加わるため大きくなるが、全体の接触圧分布は均一化していることがわかる。筋力の大きさにもよるが、最大の

図3 正常膝関節の接触圧分布



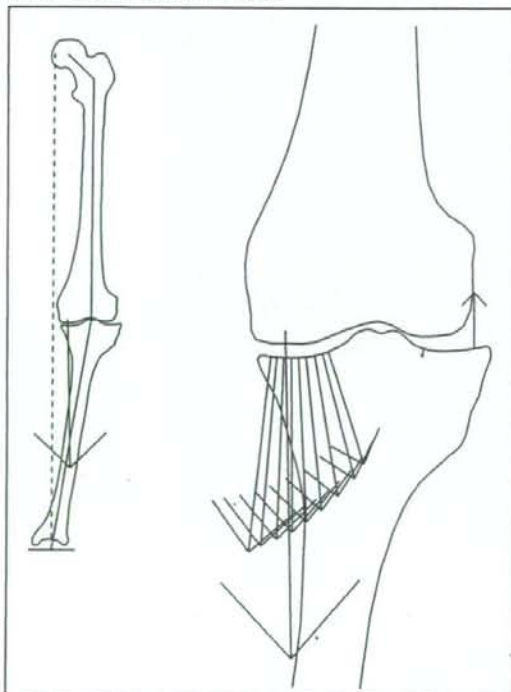
内側、外側の関節面とも均一に圧力が分布している。

図4 内側変形性膝関節症の接触圧分布



内側の関節面に大きな圧力の集中と外側の軟部組織の緊張がみられる。

図5 大腿四頭筋力の効果



大腿四頭筋力を働かせると、膝関節にかかる荷重全体は大きくなるが、接触範囲は広がり、最大圧はかえって減少する。

圧力は図5のように、むしろ減少する場合もある。

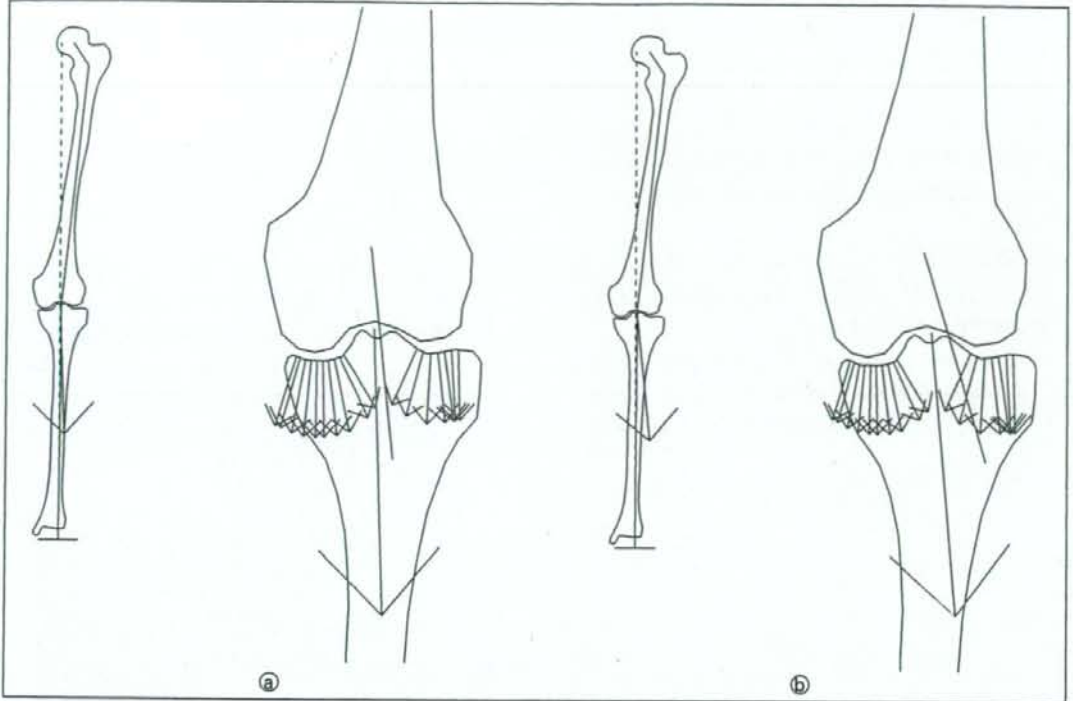
脛骨粗面の位置を変化させ、大腿四頭筋力を作用させた場合の接触圧分布を図6に示す。脛骨粗面が外方にある図6⑥の場合では、圧力は外側へも分布しており、接触圧分布全体は均一化した。

### 考察

内側型変形性関節症の成因は、従来FTAの異常にばかり捉われてきた。しかし、本研究で、軽度の変形性膝関節症の群と高齢でも疼痛などの症状および既往のない群では、脛骨粗面の位置に差があることが明らかとなった。脛骨粗面の位置が、膝蓋大腿関節に影響を与えることは周知であるが<sup>13)</sup>、大腿脛骨関節にも影響を与えることが判明した。

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り、FTA173°前後の正

図6 脛骨粗面の位置



Ⓐは脛骨粗面が内方にある場合、Ⓑは外方にある場合を示す、Ⓒで接触圧分布はより均一化していることがわかる。

常なアライメントであっても、体重は膝関節に対しては内反モーメントとして作用し、内側関節面にやや強く圧力が分布する。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る作用をもつ。この外反モーメントは、脛骨粗面の位置が外方にあるほど大きくなる。ある程度のQ角が存在していることは、大腿脛骨関節面にとっては力学的に有利な状態であり、このことが、前述した検診結果を裏づけていると考えられる。

逆に、脛骨粗面が正常より内方に位置すれば、FTAが $173^\circ$ 程度であっても、膝関節の外反モーメントが不足し、内側関節面に圧力が集中し変形性関節症に至るとい病態が存在することが示唆された。内側関節裂隙の狭小化がいったん出現すれば、FTA大きくなり、さらに内側関節面への圧力の集中は増大し変形性膝関節症は進行すると思われる。

また、外反モーメントの不足という点から考

えると、大腿四頭筋力の低下も、同様に内側関節面への圧力の集中をもたらす。大腿四頭筋訓練により筋力が強化されれば、外反モーメントは増加し、膝関節の安定性と接触圧分布は改善される。このことが、大腿四頭筋訓練が、変形性膝関節症の疼痛を軽快させる理由である<sup>10),14)</sup>。

#### 参考文献

- 1) Cao, E. Y. S., et al.: Biomechanics of malalignment. Orthop. Clin. North America, 25: 379-386, 1994.
- 2) Coventry, M.B., et al.: Proximal tibial varus osteotomy for osteoarthritis of the lateral compartment of the knee. J. Bone Joint Surg., 69-A: 32-38, 1987.
- 3) Grelsamer, R. P., et al.: Current concepts review unicompartmental osteoarthritis of the knee. J. Bone Joint Surg., 77-A: 278-292, 1995.



- 4) 姫野信吉ほか：股関節の求心性評価とその臨床への応用. Hip Joint, 7: 183, 1981.
- 5) 姫野信吉ほか：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.
- 6) Hsu, R. W. W., et al.: Normal axial alignment of the lower extremity and load bearing distribution. Clin. Orthop., 255: 215-227, 1990.
- 7) Kawai, T., et al.: A new element in discrete analysis of plane strain problems. Seisan Kenkyu, 29: 204, 1977.
- 8) 持田 睦：住民検診による高齢者膝関節のX線学的解析—特に変形性膝関節症発生に関する検討—。東京女子医科大学雑誌, 65: 84-96, 1995.
- 9) 王 享弘ほか：変形性膝関節症におけるwind-swept deformity. 関節外科, 10: 1121-1129, 1991.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 津村 弘ほか：大腿脛骨関節症の形態学的因子について. 膝, 15: 29-32, 1989.
- 13) 津村 弘ほか：大腿脛骨関節症の形態学的因子について—第2報—. 膝, 16: 98-101, 1990.
- 14) 和田 真ほか：変形性膝関節症患者の筋力と大腿四頭筋訓練. 整・災外, 37: 459-464, 1994.

津村 弘\*\*

[整形外科 57 巻 9 号 : 1259~1264, 2006]

はじめに

整形外科も研究ではゲノム全盛であるにもかかわらず、臨床ではボーンソーで骨を切り、ハンマーを振っている。整形外科手術の大部分は、人工関節置換術を行うにせよ、骨切り術を行うにせよ、骨の形態をかえるなど物理的な変化を人体に与えることで目的を全うしている。このように運動器疾患の病態や治療を学ぶには、物理的な知識（とくに力学的な知識）は有用である。本稿では静力学の基礎の復習から、股関節や膝関節のバイオメカニクスへの応用を解説する。バイオメカニクスにも広範な領域が

あるが、関節にかかっている荷重というもっとも基礎的な部分を取り扱う。

■ 力と力の釣り合い

力とは、物体の運動の状態や物体の形をかえる作用をもつものと定義される。力は、大きさと方向をもっているためベクトルであり、その単位は  $N$  (ニュートン) で表される。  $1N$  は  $1\text{ kg}$  の質量に  $1\text{ m/秒}^2$  の加速度を与えることができる力である。力が働く点を作用点、力の方向を含む直線を作用線と呼ぶ。剛体（変形しない理想的な物体）に複数の力が作用する場合、合成することができる。図1に力の合成の例を

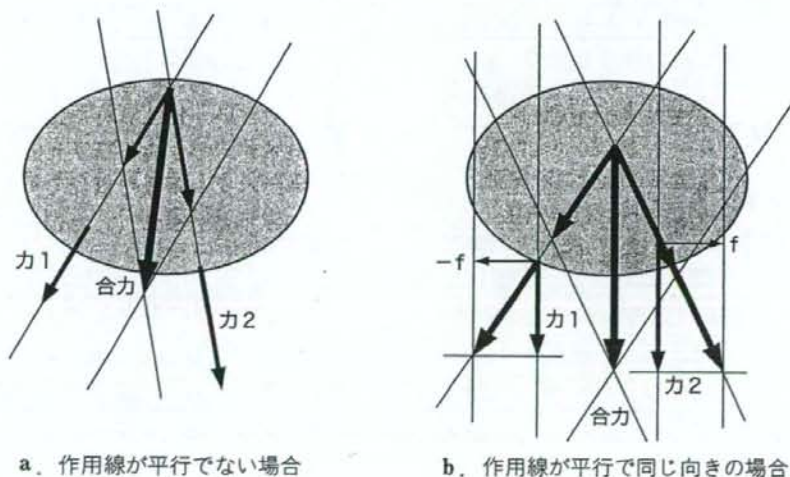


図1. 力の合成の例

Key words : biomechanics, hip joint, knee joint, pressure distribution

\* Fundamentals of the biomechanics in hip joint and knee

\*\* H. Tsumura (教授) : 大分大学整形外科 (Dept. of Orthop. Traumatol., Faculty of Medicine, Oita University, Yufu).

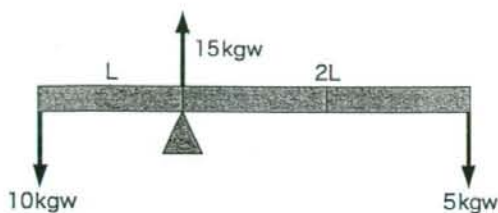


図 2. 天秤の釣り合い

示す。作用線が平行でない場合は、その交点まで力のベクトルを移動し、平行四辺形法により合力を求めればよい(図1a)。平行で同じ向きの場合は、2つ力の作用点を結んだ直線を作用線とする同じ大きさで反対向きの力( $f$ と $-f$ )を仮想的に足す(図1b)と、それぞれの作用点での力は平行ではなくなり、図1aの方法で合成することができる。 $f$ と $-f$ は相殺しあうため、剛体に影響を与えない。また、任意の $f$ で同じ結果となる<sup>1)</sup>(平行で反対方向の場合は、やや複雑であるため割愛する)。

回転軸のある剛体に加わる力は、剛体を回転させる能力をもっている。この能力をモーメントと呼ぶ。モーメントは、回転軸から作用線までの距離と力の積で表される。

物体に複数の力が作用していても、運動の状態が変化しない場合がある。このとき、作用している力は釣り合いの状態にあるという。剛体に作用する力( $F_1, F_2 \dots F_n$ )が釣り合っていれば、それらを合成した力は0となり、さらに、それらの力が与えるモーメント( $M_1, M_2 \dots M_n$ )の和も0となる。

$$F_1 + F_2 + \dots + F_n = 0$$

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$$

図2に天秤の釣り合いの問題を示す。支点の右側の長さは $2L$ 、左側は $L$ とする。右側に5kgwの錘をおいたとき、天秤が釣り合うためには、左に10kgwの錘をおく必要がある。支点には、上向きに15kgwの力が加わる。上向きを正とすると、力の釣り合いとモーメントの釣り合いは次のようになる。

$$5 \text{ kgw} + 10 \text{ kgw} = 15 \text{ kgw}$$

$$5 \text{ kgw} \times 2L = 10 \text{ kgw} \times L$$

未知の変数がある場合、この2つの式を方程式として、計算することができる。

## 2 圧力・応力とひずみ

関節のように2つの物体が接触しているような状態で、一方を固定し他方に力かけると、その接触面で力が伝達される。このとき、接触している面の面積により、単位面積あたりに伝達される力が変化する。力を面積で除した値を圧力という。圧力の単位は、Pa(パスカル)で $1\text{m}^2$ あたり $1\text{N}$ の力である場合が $1\text{Pa}$ となる。股関節などで生じている圧力は、MPa(メガパスカル)のオーダーである。

力は、物体の形をかえる能力をもっていることを、前項の最初に述べた(先の計算の剛体は変形しないことを仮定している)。新しい消しゴムを机の上におき、上から手で軽く押しみると縦に少しつぶれ、横に少し広がるであろう。手を離すとともに戻るであろう。大きな力を加えれば、壊れてしまうに違いない。どのくらいの力でどの程度縦につぶれるかを示す値をYoung率(ヤング率、縦弾性係数、単位:Pa)と呼び、そのときどのくらい横に広がるかを示す値をPoisson比(ポアソン比)と呼ぶ。これらの値は、物体の種類によりそれぞれ異なっている。力を加えているあいだ、消しゴムは変形している。これをひずみと呼ぶ。加えている力を取り去るとともに戻るということは、消しゴムの中にもとに戻るための力が蓄えられていると考えられる。これを応力と呼ぶ。応力とひずみは一定の関係があり、ひずみが大きければ応力も大きい。加えられた力はベクトル量で表現されるが、ひずみは三次元的に生じていることから、ベクトル量ではなく、行列で表現されるテンソル量である(したがって応力もテンソル量である)。

## 3 股関節のバイオメカニクス

股関節は下肢の付け根にあり、体を支える重要な関節である。正常形態の股関節では、骨性のおおいが大きい球関節であり、自由に回転することができる。関節それ自身はきわめて摩擦抵抗の低い構造であるので、安定的に肢位を保持することはできない。関節包や靭帯による支えは、可動域の限界部分で起るので、通常的位置での安定は筋の働きによっている。股関節を

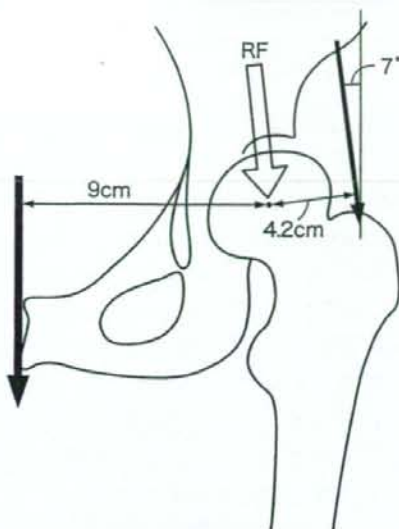


図 3. 片脚立位時の股関節にかかる力 RF を推定する (本文参照).

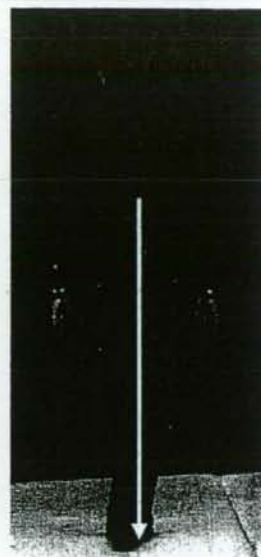


図 4. 片脚立位時, 重心は足底の鉛直線上にある.

跨いで骨盤と下肢をつなぐ筋肉は、中殿筋や大内転筋などの大きな筋をはじめとして、約 21 の筋が知られている<sup>2)</sup>。立位保持や歩行のさいこれらの筋の収縮が細かに調節され、目的に即した行動を可能にしている。ある瞬間にどのように筋力が作用しているかを推定することは、筋の数が自由度より多いため、一意的な解は存在しない。しかし、筋電図やセンサーを入れた人工関節を用いて筋力や股関節にかかる荷重を推定する研究が数多く行われている<sup>3,4)</sup>。

例題として、片脚立位時に股関節にかかる力を簡単なモデルを用いて計算してみる。図 3 に片側の股関節の正面像を示す。体重は 60 kg とする。1 下肢の重さは体重の約 1/6 であることが知られているので、50 kg の荷重がかかることがわかる。おおむね重心は体の中央に存在するので、骨盤は接地側の股関節を中心に反対側に回転しようとする。姿勢を保持するためには、股関節より外側の筋が力を発生させて逆方向のモーメントを与えなければならない。これは、股関節の外転筋として知られる中殿筋などが担当する。ここでは、大転子と腸骨を結ぶ直線に筋の作用線が存在すると仮定する。

$50 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/秒}^2 = 490 \text{ N}$  (重力加速度をかけることにより N に換算)

外転筋力を F とすると、モーメントの釣り

合いから、

$$490 \times 9 = F \times 4.2$$

となり、

$F = 1,050 \text{ N}$  となる。これは、片脚立位を保持するには、外転筋は体重の 2 倍程度の筋力を発生する必要があることを意味している。外転筋の作用線の傾きをもとに、筋力を水平成分と垂直成分に分けると、

$$\text{水平成分 } 1,050 \times \sin(7^\circ) = 128 \text{ N}$$

$$\text{垂直成分 } 1,050 \times \cos(7^\circ) = 1,242 \text{ N}$$

となる。

股関節にかかる荷重 RF を考えると

$$RF^2 = (128)^2 + (490 + 1,242)^2 = 3,016,208$$

となり、RF は約 1,736.7 N となる。体重 60 kg (588 N) をもとに考えると 2.95 倍であり、片脚立位だけで体重の 3 倍の荷重が股関節にかかっている。

この計算の過程を考えれば、片側の股関節の免荷を計る場合、反対側に杖をつくのが有効であることはすぐに理解できるであろう<sup>5)</sup>。また、大転子の外側化や股関節中心の内方化も荷重を減少させることになることも理解できるであろう。歩行時の股関節にかかる荷重については、Bergman らのセンサーを入れた人工骨頭