

変形性膝関節症の発症機序に関する生体力学的検討

Biomechanical Analysis on the pathogenesis of Knee Osteoarthritis.

長崎 浩爾* 古賀 良生** 寺島 和浩*** 原 利昭**** 大森 豪*****

Abstract

The three-dimensional knee joint motion data during level walking were obtained from 34 males and 33 females using a 6-degree-of-freedom electrogoniometer. Normal motion pattern of active flexion (full extension to 20deg. flex.), active extension (20deg. flex. to full extension) and early stance phase during gait cycle were evaluated to find the physical difference based on sex and age.

Adduction and internal rotation (male 85.3%, female 66.7%) were shown in the normal motion pattern during active flexion of the knees while abduction and external rotation (male 91.2%, female 90.9%) were found in the pattern during active extension of the knees. The screw home motion is detected during active extension (male 61.8%, female 90.9%). Adduction and internal rotation (male 97.1%, female 81.8%) were shown in the normal motion pattern during early stance phase. Females tend to change the pattern of motion with weight bearing. Adduction at early stance phase and abduction under active flexion are shown in females by 12.9%. On the other hand, there is the pattern change by only 2.9% in males. This gender difference seems to be related to a general tendency of joint laxity in females.

Key words: Knee joint motion, Gait analysis, 6-degree-of-freedom electric goniometer, gender differences

*NAGASAKI, Koji [新潟国際情報大学 情報文化学部 体育非常勤講師]

**KOGA, Yoshio [新潟こばり病院整形外科]

***TERAJIMA, Kazuhiro [新潟大学 工学部]

****HARA, Toshiaki [新潟大学 工学部]

*****OMORI, Go [新潟大学 医学部]

緒言

高齢人口の増加に伴って整形外科の日常診療において退行性変性疾患が増加している¹⁾。なかでも関節の生活習慣病の一種である変形性膝関節症（以下膝OA）は、程度の幅は大きい但我国の65歳以上の高齢者で約80%、80歳以上の高齢者ではほぼ100%に見られる²⁾。そしてそのほとんどが内反変形を呈する内側型であり、発症率は男性に比して女性が高い。この膝OAは症状の進行によりscrew home motionと言われる膝関節最終伸展時における脛骨の外旋の破綻や歩行立脚初期における下腿の側方動揺性であるthrust等の異常運動の発現を伴うことが知られている³⁾が、これらの異常運動と膝OAが女性に多く発症することとの関連は不明である。

そこで、本研究では我々が独自に開発した3次元膝関節運動解析システムを用いて健常者における性別及び加齢に伴う膝関節運動変化を解析し、膝OA発症機序について運動学的に検討した。

対象及び方法

測定対象として、20～50歳代の健常男性34名（20歳代10名、30歳代10名、40歳代9名、50歳代5名）、女性33名（20歳代9名、30歳代7名、40歳代9名、50歳代8名）、計67名を考慮した。

膝関節の運動は大腿骨に対する脛骨の相対運動として解析する膝関節3次元運動解析システムによって評価した。

このシステムによる膝関節運動の測定は、被験者の大腿と下腿の皮膚上にストラップを用いてアルミニウムプレートを固定し、これに6自由度電気角度計（測定精度：並進±0.5mm、回転±0.5度）を連結させて行う。この角度計の大腿側と下腿側の端には角度計の位置と方向を規定するためのマーカーが設置してある。測定後は膝関節最大伸展位でFuji Computed Radiography（以下CR）による前後と側面の2方向X線撮影と共に角度計の初期値の設定を行う。X線撮影にはX線フィルム面の座標を規定するためのプレーンマーカーが付設してあるカセット台を使用し、それにX線照射点を算出するためのフレームマーカーを設置して行う（図1(a)、(b)）。次に図2(a)、(b)に示すようにCRのX線画像をコンピュータ上に表示し、2枚のフィルムで構成される3次元空間の規定に必要なX線画像上のプレーンマーカー及びフレームマーカーの位置、角度計の位置と方向を規定するための角度計のマーカー、大腿骨と脛骨の

解剖学的座標系を設定するための解剖学的参照点のデジタイズを行う。解剖学的座標系の参照点は、大腿骨では内外側顆部をそれぞれ長方形に近似して求めるその中心(A)、(B)と骨幹部内外側の皮質骨外縁に直線(直線1~4)を当てはめて2直線の間で定める骨軸とする。脛骨では内外側顆間隆起頂点と大腿骨の場合と同様な方法(直線5~8)で定める脛骨骨軸とする。以上の手順を前後、側面像について行うことによって2枚のフィルムで構成される3次元空間と角度計のマーカの位置と方向、そして解剖学的参照点の位置が規定できる。次いで

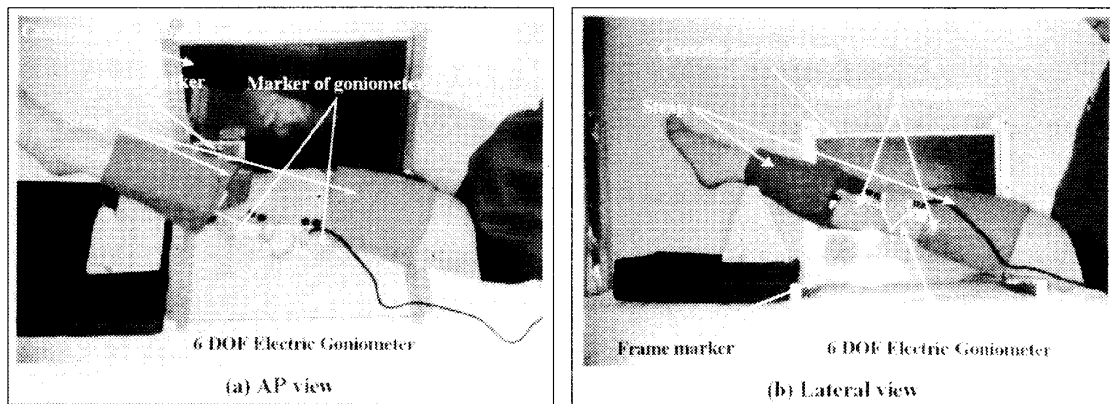


図1 Experimental set-up for bi-planar X-rays using CR system. (a) AP view. (b) Lateral view.

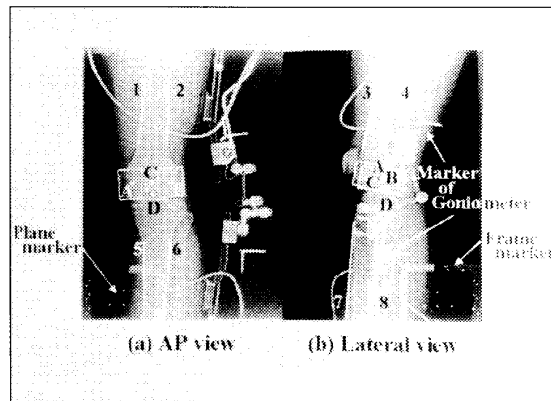


図2 X-ray images for digitization of markers and anatomical landmarks for anatomical coordinate systems.

(a) AP view. (b) Lateral view. 1,2,3,4: The midline of these lines are used for detection of the femoral bony axis. 5,6,7,8: The midline of these lines are used for detection of the tibial bony axis. (A, B): The center of medial and lateral femoral condyles. The center of these landmarks are drawn by an approximation to a rectangle. (C): The midpoint of a line drawn between the medial and lateral condyle (A, B). Also this point is the origin of the femoral coordinate system. (D): The midpoint of a line drawn between the medial and lateral tibial intercondylar eminences. This point is the origin of the tibial coordinate system.

解剖学的参照点から解剖学的座標系を設定する。大腿骨座標系は大腿骨内外側顆の中心2点(A)、(B)を通る直線上にX軸を定め、その2点の中心(C)を座標系原点とする。Y軸はX軸を規定する直線と骨軸から求め、Z軸はX軸とY軸に直交するように規定する。脛骨座標系は原点を内外側顆間隆起頂点を結ぶ線分の中点(D)とし、脛骨骨軸と平行な線上にZ軸、大腿骨座標系X軸に平行な直線上にX軸、X軸とZ軸に直交する直線上にY軸を規定する。これで角度計の大腿側マーカ―と大腿骨座標系及び下腿側マーカ―と脛骨座標系の相対的位置関係が定められ、角度計で求めた座標変換行列から大腿骨座標系に対する脛骨座標系の運動を解析することが可能となる 4)、5)。

評価対象とした膝関節運動は、被験者自身による膝関節の屈曲伸展運動である自動屈曲伸展運動（以下自動運動）と歩行であり、それぞれ3回以上測定して最も安定した測定結果を用いた。なお、自動運動は座位で被験者自身が膝関節を最大伸展させた状態から約90度まで屈曲させ、再び最大伸展させる過程を考慮した。着目した運動要素は、6自由度パラメータ（屈曲伸展、内外反、内外旋、内外側、前後、遠近位）のうち、膝OAの異常運動であるscrew home motion破綻とthrust発現の要因に特に関連すると考えられる屈曲伸展に対する内外反と回旋であり、それらについて以下の方法で検討した。

図3には自動運動における運動パターンとscrew home motionの判定方法、図4には歩行の運動パターンの判定方法を示した。自動運動では、最大伸展位から20度屈曲位までの区間に着目し、伸展から屈曲、屈曲から伸展の内外反・回旋変化をそれぞれ最小二乗法により直線に近似した。そしてその直線の傾きから運動パターンを判定し、運動の特徴を検討した。さら

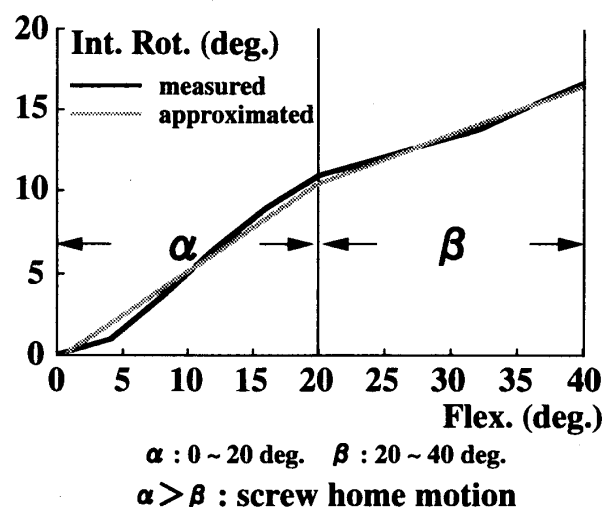


図3 Definition of knee motion pattern and screw home motion.

に、最大伸展に至る際に外旋すると定義されるscrew home motionについては、伸展時の回旋変化から判定した。このとき屈曲20度から最大伸展までの区間を α 、屈曲20度から40度までの区間を β としてそれぞれを最小二乗法により直線に近似してその傾きを比較し、 α が β よりも大きい場合にscrew home motionと判定した。

歩行では、踵接地から図4に示したdouble knee action第1ピーク時点Pまで（以下歩行初期屈曲）の内外反及び回旋変化に着目した。そして自動運動と同様の方法で運動パターンを判定し、運動の特徴をとらえた。さらに歩行初期屈曲における最大屈曲角度と歩行時最大屈曲角度、及び一歩行周期に対する歩行初期屈曲の割合についても検討した。

次に荷重による膝関節運動の変化を検討するため、内外反、回旋について自動運動屈曲と歩行初期屈曲を比較した。その際、自動運動屈曲では歩行初期屈曲の屈曲角度変化と同様の屈曲角度変化を示す過程を考慮した。内外反、回旋変化量は自動運動の運動パターンの判定方法と同様にして直線に近似した際に算出される傾きによって求め、それら傾きを比較した。

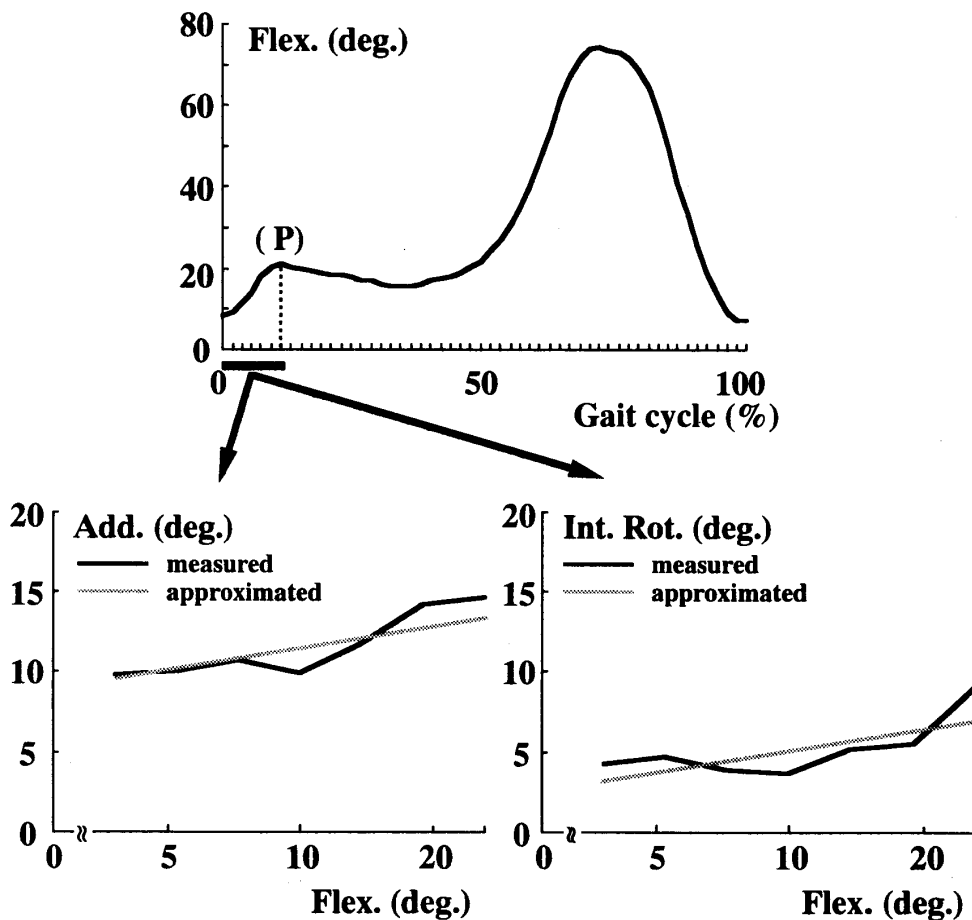


図4 Definition of knee motion pattern during early stance phase in gait cycle.

結果

1. 自動運動

図5には自動運動最大伸展位から20度屈曲位までの区間における運動パターンを分類し、その割合を性別に示した。

自動運動屈曲において男性94.1%、女性78.8%に内反を認め、そのうち内反かつ内旋が男性85.3%、女性66.7%であった。外反は男性5.9%、女性21.2%に認め、それらは全て外反かつ内旋であった（図5(a)）。

自動運動伸展においては男性97.1%、女性90.9%に外反を認めた。そのうち外反かつ外旋は男性91.2%、女性90.9%でほとんどが外反・外旋であった。また内旋は男性5.9%に認めたが、女性は100%が外旋であった（図5(b)）。

自動運動では、屈曲時は内反・内旋、伸展時は外反・外旋の運動パターンを最も多く認めた。なお、自動運動において加齢による特徴的な変化は認めなかった。

さらに自動運動伸展時における屈曲20度から最大伸展(α)と屈曲40度から屈曲20度(β)の外旋量について $\alpha > \beta$ の場合をscrew home motionとして検討したところ、男性61.8%、女性90.9%にscrew home motionを認めた。また、 α と β の傾きの差から最大伸展終末で女性の方がより大きく外旋する性差（男性： 0.1 ± 0.2 度、女性： 0.2 ± 0.2 度、 $p < 0.05$ ）を認めた。しかし、screw home motionを認めたもののみを対象として比較したところ性差は認めなかった。また、screw home motionの発現率と年齢の関係を検討したところ若年男性にscrew home motionの発現率がやや低い傾向を認めたが、女性においては加齢に伴う違いを認めなかった。

2. 歩行

図6には歩行初期屈曲における運動パターンを分類してその割合を性別に示し、表1、2にはその際の最大屈曲角度と歩行時最大屈曲角度及び一歩行周期に対する歩行初期屈曲の割合を性別に示した。

内反は男性97.1%、女性90.9%に認め、外反は男女共に少なく、男性よりも女性で僅かに多く認めた。また、回旋は男性ですべてが内旋であったのに対して、女性では外旋を認めた。なお、加齢に伴う特徴的な運動の変化は男女共に認めなかった。

さらに歩行初期屈曲における最大屈曲角度（男性： 19.6 ± 6.4 度、女性： 17.8 ± 6.5 度、ns）と歩行時最大屈曲角度（男性： 70.8 ± 7.4 度、女性： 69.6 ± 7.6 度、ns）、一歩行周期（100%）

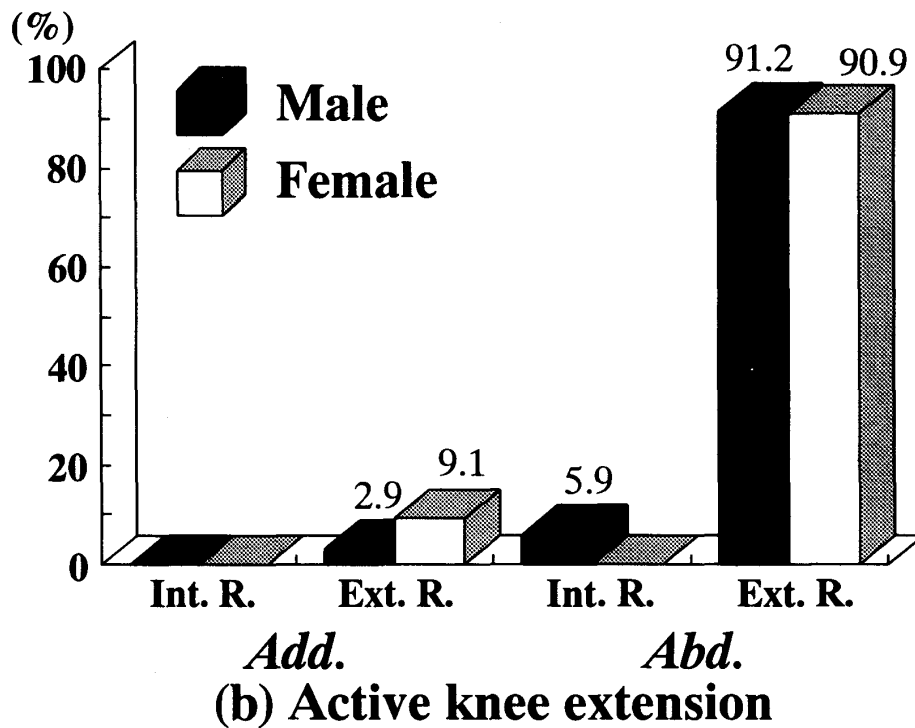
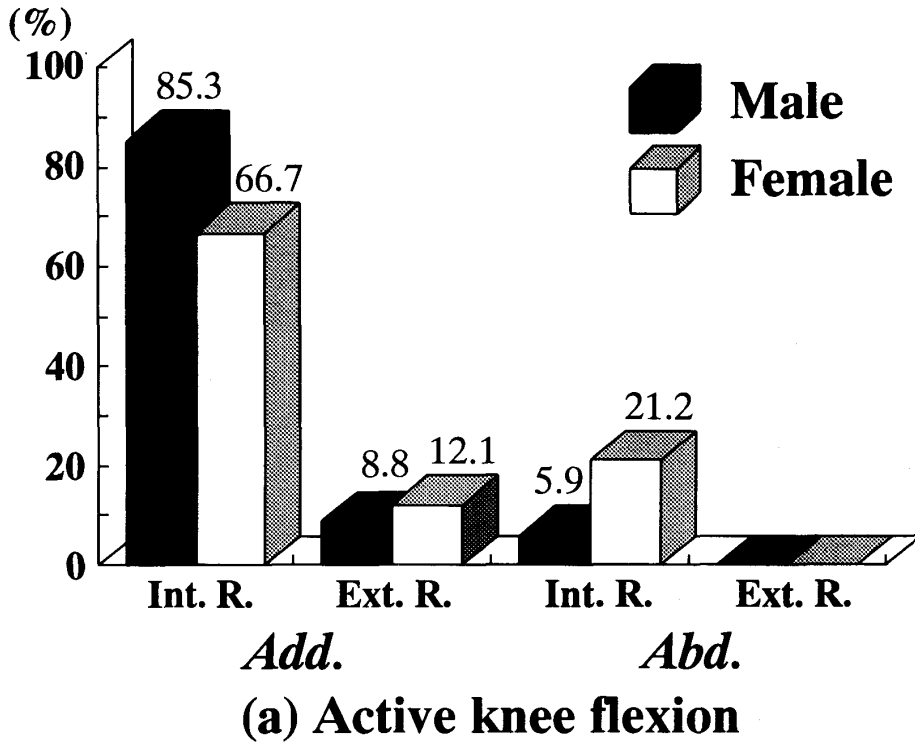


図5 Gender difference in knee motion during active motion.
 Add.: Adduction, Abd.: Abduction, Int. R.: Internal rotation, Ext. R.: External rotation.

に対する歩行初期屈曲の占める割合（男性：14.7±2.5%、女性：15.9±3.3%、ns）について検討したところ、性差及び年齢差は認めなかった。

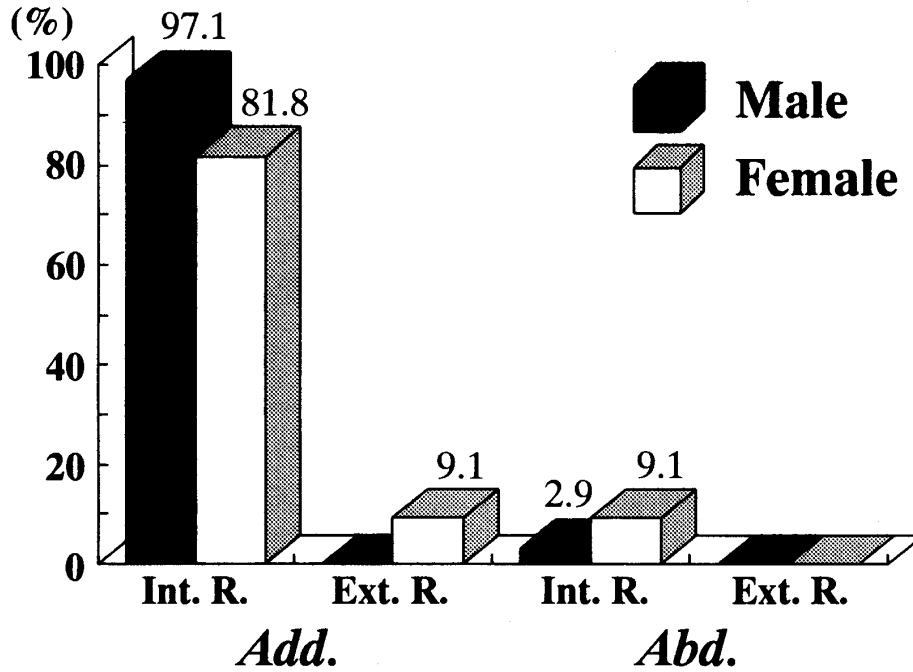


図6 Gender difference in knee motion during early stance phase of gait cycle. Add.: Adduction, Abd.: Abduction, Int. R.: Internal rotation, Ext. R.: External rotation.

表1. The characteristic of double knee action (deg.).

	First peak flexion angle	Maximum flexion angle
Male	19.6±6.4	70.8±7.4
Female	17.8±6.5	69.6±7.6
Unpaired t-test	ns	ns

Mean ± S.D.

表2. The percentage of early stance phase against gait cycle (%).

	Early stance phase / gait cycle
Male	19.6±6.4
Female	17.8±6.5
Unpaired t-test	ns

Mean ± S.D.

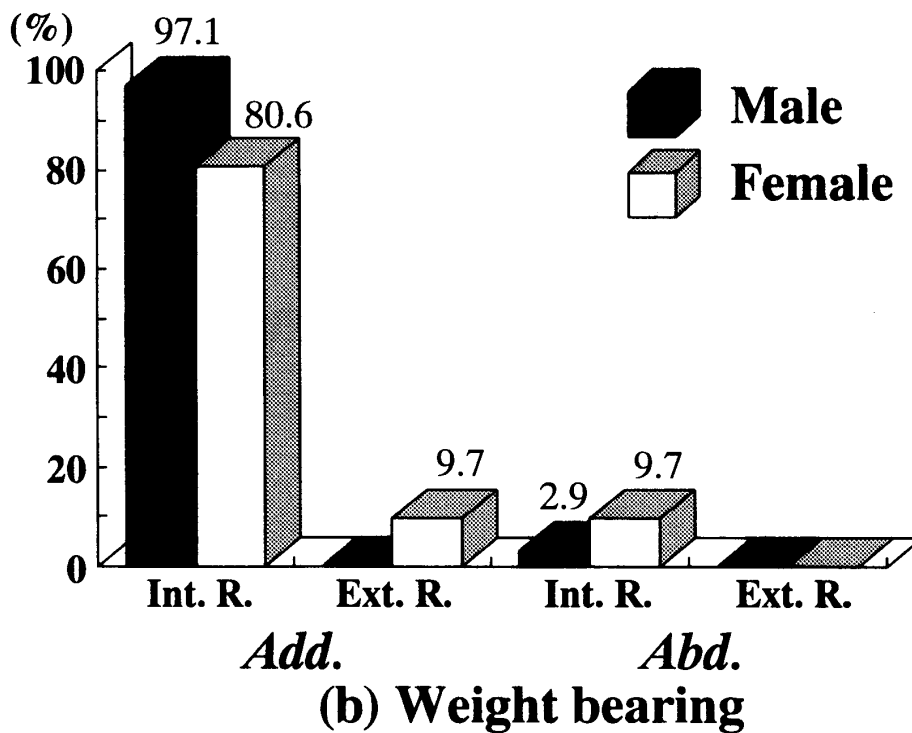
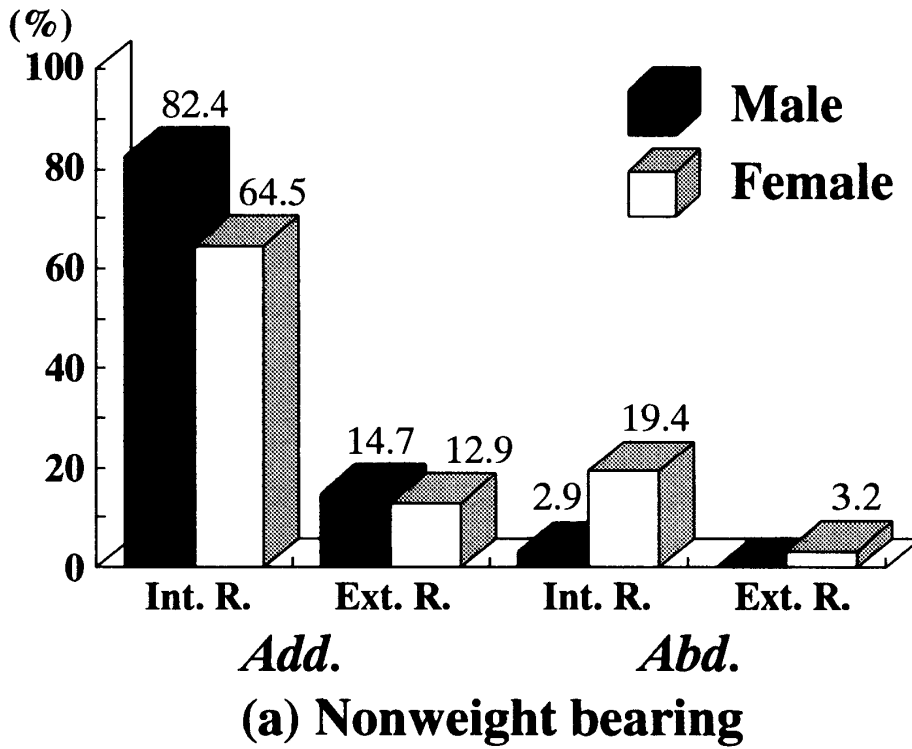


図7 Gender difference in knee motion pattern with/without weight bearing.
Add.: Adduction, Abd.: Abduction, Int. R.: Internal rotation, Ext. R.: External rotation.

3. 荷重による膝関節運動の変化

3-1. 内外反について

図7には自動運動屈曲と歩行初期屈曲における運動パターンを分類してその割合を性別に示し、図8には内外反について自動運動屈曲と歩行初期屈曲を比較した典型例をそれぞれ示した。また、表3には自動運動屈曲と歩行初期屈曲の内外反と回旋の変化量を性別に示した。

自動運動屈曲での内反は男性97.1%、女性77.4%に認め、女性で内反が少なかった。一方、歩行初期屈曲での内反は男性97.1%、女性90.3%に認め、女性で内反が増加した。これを被験者個々で検討したところ、男性2.9%、女性12.9%が荷重によって外反から内反を示すようになり、その割合は男性と比較して女性に多く、さらに自動運動屈曲時よりも歩行初期屈曲の内反量の方が大きくなったものは男性23.5%、女性54.8%であった。その内反変化量は、自動

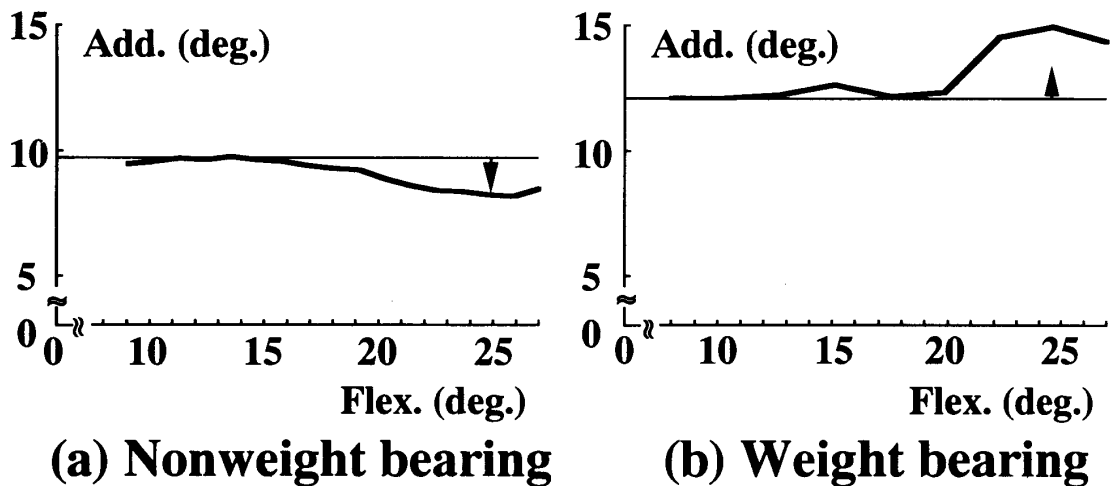


図8 In gait motion flexion follows adduction. On the other hand, without weight bearing knee flexion follows abduction in same amount flexion.

表3. Gender difference of changing amount of adduction and internal rotation during early stance phase in gait cycle.

(a) Amount of change of adduction movement with/without weight bearing (deg.).

	Active motion	Gait
Male	0.4±0.2	0.3±0.2
Female	0.2±0.3	0.3±0.3
Unpaired t-test	p < 0.01	ns

Mean ± S.D.

運動屈曲で性差を認め（男性： 0.4 ± 0.2 度、女性： 0.2 ± 0.3 度、 $p < 0.01$ ）、歩行初期屈曲では性差を認めなかった（男性： 0.3 ± 0.2 度、女性： 0.3 ± 0.3 度、ns）。

3-2. 回旋について

自動運動屈曲での内旋は男性85.3%、女性83.9%であり、歩行初期屈曲での内旋は男性100%、女性90.3%であった。男女共に歩行初期屈曲で内旋するようになり、特に男性ではすべてが内旋であったのに対して女性では外旋を認めた。その内旋の変化量は自動運動屈曲において性差を認めなかった（男性： 0.2 ± 0.2 度、女性： 0.2 ± 0.2 度、ns）が、歩行初期屈曲では性差を認め（男性： 0.6 ± 0.3 度、女性： 0.3 ± 0.3 度、 $p < 0.01$ ）、女性の方が男性に比して内旋の変化量が少なかった。また、男性79.4%、女性54.8%で荷重によってより大きく内旋した。

考察

膝OA発症要因に関する研究は数多く行われているが、膝関節運動を運動学的な観点から3次元的に検討した報告は少ない(6)、7)。我々は3次元膝関節運動解析システムを用い、膝OAの進行に伴ってscrew home motionが破綻し、歩行時にthrustが発現することを報告してきた。しかし、このような異常運動と膝OAが女性に多く発症することとの関連は不明であるため、健常者の膝関節運動解析を行い、その性差と年齢差を検討することによって膝OA発症機序を運動学的に検討した。

本研究において最も着目すべき点は、膝関節の自動運動屈曲と歩行初期屈曲の運動を測定して荷重による変化を性別に比較検討したことである。結果から男性の膝関節運動は荷重によってほとんど変化しないが、女性の膝関節運動は荷重によって外反から内反へ変化するかあるいはより大きく内反することが明らかとなった。この性差は筋力、関節柔軟性等の性差が関与しており、これらの要因によって膝関節に不安定性が生じ、結果的に内側に欠損を来たして内側型膝OAに結びつく可能性を有すると推察している。

Harringtonら8)は健常者、膝OA患者の関節に作用する力について検討し、荷重は静的な立位状態よりも歩行時の方が大きく、一般的な傾向として力は膝関節の内側を通るように伝達されると指摘している。また寺島ら7)は健常女性と膝OA女性患者の歩行時における3次元荷重線を推定し、膝関節が伸展状態にある踵接地直後における荷重線は、健常者では膝関節外

側、膝OA患者では膝関節内側に位置するとして膝OA患者の膝関節内側部に過大な荷重が作用していると推測している。これらはそれぞれ動的な荷重の通過位置と膝関節への影響を示唆したものである。本研究で明らかになった動的荷重による膝関節運動の外反から内反への変化あるいは内反量の増加からも荷重線の内側変位が推察される。

また、回旋について大森ら⁹⁾は進行期膝OA患者の脛骨関節面形状と膝関節運動から回旋運動は脛骨関節面の欠損部拡大に伴って立脚歩行初期では主として内旋、約20%に外旋が見られ、最終的には内旋が消失していくことを報告している。今回の結果では歩行初期屈曲で女性にのみ外旋を認め、多くに見られた内旋の変化量には性差を認めた。これらの現象が生ずる要因については不明であるが、膝OAに結びつく運動学的要因となる可能性もあり、着目すべき点と考えている。

今回の検討は膝関節運動解析のみのものであったが、今後は下肢アライメントや加齢によって著しく低下する筋力やそれを維持するためのトレーニング等との関連についても検討する必要があると考える。

結言

健常者の膝関節運動を3次元的に解析し、膝関節運動の一般的なパターンは自動運動屈曲では内反・内旋、伸展では外反・外旋、歩行初期屈曲では自動運動屈曲と同様に内反・内旋であることを明らかにした。また、自動運動の最終伸展時に生じるscrew home motionは女性において検出率が高いことも示した。さらに自動運動屈曲と歩行初期屈曲を比較し、荷重によって女性の膝関節が大きく内反することを明らかにするとともに、それが内側型変形性膝関節症の運動学的素因になりうることを明示した。

文 献

- 1) 古賀良生、大森 豪、鈴木禎宏、寺島和浩、長崎浩爾：変形性膝関節症の運動解析。関節外科、Vol. 16, no. 3, 79-85, 1997。
- 2) 林 泰史：骨関節。健康運動指導士養成テキストII、161-172、第一出版、1999。
- 3) 石井 卓、古賀良生、高橋美徳、寺島和浩、原 利昭：変形性膝関節症の歩行解析。整形

- 外科バイオメカニクス、Vol. 13, 143-146, 1991。
- 4) 寺島和浩、原 利昭、古賀良生、永田武史：CRシステムを用いた膝運動三次元解析システムの開発。整形外科バイオメカニクス、Vol. 13, 213-217, 1991。
 - 5) 寺島和浩、土屋裕治、原 利昭、石井 卓、古賀良生：CRを用いた膝運動三次元解析システムの信頼性についての検討。整形外科バイオメカニクス、Vol. 13, 219-223, 1991。
 - 6) 寺島正二郎、清水雅晴、寺島和浩、原 利昭、古賀良生、佐々木孝善：健常者における膝3次元運動解析。日本臨床バイオメカニクス学会誌、Vol. 15, 379-382, 1994。
 - 7) 寺島和浩、清水雅晴、寺島正二郎、原 利昭、古賀良生：歩行時の三次元荷重線の推定。日本臨床バイオメカニクス学会誌、Vol. 15, 369-373, 1994。
 - 8) Harrington, I.J. :Static and dynamic loading patterns in knee joints with deformities. *J.Bone and Joint Surg.*, 65-A: 247-259, 1983。
 - 9) 大森 豪、古賀良生、寺島和浩、寺島正二郎、高橋英明、鈴木禎宏：進行期変形性膝関節症における脛骨関節面形状と膝関節運動の関連。日整会誌、69, 1995。