

生涯教育

期待でき、症例によってはある程度、軟骨の再生も得られると報告されている。但し、骨癒合に時間がかかること、外側部の変形が強いと適応できないこと、膝蓋大腿関節には効果が及ばないことなどを考慮して、手術適応を決定しなくてはならない。

人工膝関節置換術 (TKA) : 荒廃した関節表面をすべて切除して金属、ポリエチレン、セラミックなどの人工物に置き換える手術である (図10)。除痛効果に優れ、術後の回復も早い。人工物を使うための感染のリスク、長期的には緩み (loosening) のリスクなどを考慮して適応を決定する。近年、ナビゲーションシステムを用いて、より正確に人工関節を設置する方法<sup>6)</sup> やこれまでの半分以下の皮膚切開で手術が可能な最小侵襲人工膝関節置換術 (MIS-TKA)<sup>7,8)</sup> が開発され、臨床応用されている。

【終わりに】

OA は日常臨床で極めて頻繁に遭遇する疾患である。加齢的な変化によるものであり、症状が悪化しても、変形は急激に進行することは少ないこと、逆に症状が改善しても変形そのものが治癒したのではないこと、などを患者によく説明して治療にあたるのが大切である。

文献

- 1) 松本秀男: 変形性膝関節症. 膝関節の疾患. 今日の整形外科治療指針. 第5版. (二ノ宮節夫他、編)、医学書院、pp.786-788, 2004.
- 2) 松本秀男、他: 膝蓋大腿関節の解剖・機能解剖. MB Orthop. 13(1): 1-6, 2000.
- 3) 名倉武雄、他: 変形性膝関節症患者の動作解析. -日常生活動作における関節負荷の特徴- 膝、28 (2) 14-16, 2003.
- 4) 大谷俊郎、他: 膝関節疾患の診断におけるMRI. J. MIOS, 27: 42-47, 2003.
- 5) 畔柳裕二、他: 整形外科の装具のすべて 各論3 下肢B 膝関節の装具. 整形外科看護. 整形外科看護. 9 (4): 342-346, 2004.
- 6) 須田康文、他: 人工膝関節全置換術に対するナビゲーションシステムの応用. 膝、28 (2) 76-79, 2003.
- 7) 前野晋一、他: Accuris Minimally Invasive Unicompartmental Knee System を用いた人工膝関節単顆置換術. 膝、28 (1): 105-107, 2003.
- 8) 松本秀男、他: MIS/TKA. 特殊な手術手技. 人工膝関節置換術-基礎と臨床-. (松野誠夫、他編) 文光堂. In press, 2005.

## MRIから構成した三次元FEMモデルによる 膝軟部組織の応力解析

—半月板損傷のメカニズム解明に向けて—

中嶋 一品<sup>※1</sup> 名倉 武雄<sup>※1</sup> 北原 大翔<sup>※1</sup> 桐山 善守<sup>※1</sup>  
武田健太郎<sup>※1</sup> 豊田 敬<sup>※2</sup> 松本 秀男<sup>※1</sup> 戸山 芳昭<sup>※1</sup>

Stress analysis of the knee using three dimensional FEM constructed from MRI findings.

Kazuaki NAKAJIMA, BS., Takeo NAGURA, MD., Hiroto KITAHARA, BS.,  
Yoshimori KIRIYAMA, PhD., Kentarou TAKEDA, MD., Takashi TOYODA, MD.,  
Hideo MATSUMOTO, MD., Yoshiaki TOYAMA, MD.

### Abstract

The human knee joint plays a role in transmitting and absorbing load, especially the menisci and cartilage play an important role<sup>3,4</sup>. It is assumed that the load of more than 5 times body weight could be transmitted to the soft tissue during athletic activities. Therefore, injury to the menisci or cartilage is a common problem among athletes. To analyze the mechanism of such injuries, finite element analysis is useful. Finite element analysis after meniscectomy has been discussed by several authors<sup>1,5</sup>, but simulating the process of injury has not been thoroughly investigated. This study built a finite element model (FEM) that included detailed construction of the cartilage and menisci in order to elucidate the mechanism of the meniscus injury. To reproduce the process of injury, we constructed a 3D human-knee FEM including soft tissues using 3D MRI. The model includes the femur and menisci. Loads and boundary conditions were defined as follows; undersurfaces of the menisci were fixed, only inferior-superior motion was allowed in the analysis, and a combined load of 1150 N in compression was applied to the femur at a slightly flexed position. Our findings showed that stress on the medial meniscus was slightly larger than that on the lateral meniscus. Moreover, the stress was concentrated in the posterior part of the medial meniscus. Our findings agreed with those of authors, which supports the validity of our model.

Key words : finite element model, knee joint, soft tissue, biomechanics.

※1 慶應義塾大学 整形外科

〒160-8582 東京都新宿区信濃町35

※2 西早稲田整形外科

〒169-0051 東京都新宿区西早稲田1-18-9 早稲田平井ビル

Corresponding Author : Takeo NAGURA, MD.

Department of Orthopedic Surgery, Keio University

35 Shinanomachi, Shinjuku-ku, Tokyo, 160-8582, Japan

Tel : 03-5363-3812 Fax : 03-3353-6597

E-mail address : nagura@sc.itc.keio.ac.jp

## はじめに

半月板は膝にかかる荷重を効率よく伝達し吸収することが知られている<sup>1,3,4)</sup>。半月板損傷はスポーツ障害の中でも頻度が高く、またスポーツ中に生じる場合の力学状態が明らかでないため、詳細な発生機序については十分解明されていない。こうした動作時の損傷メカニズムの解明を行うために、荷重や変位を自由に設定することができる有限要素モデルを用いた力学解析が有効である。これまで半月板切除後の有限要素モデルを用いた力学解析は行われてきたが<sup>5)</sup>、半月板損傷を詳細にシミュレートした研究はまだ行われていない。また定量的な力学解析を行うためには、骨・軟部組織の形態を考慮する必要がある。そこで本研究では半月板損傷のメカニズム解明に必要となる3次元膝有限要素モデルをMR画像より作成し、これを用いて力学解析を行った。

## 対象および方法

膝に明らかな既往および愁訴のない22歳健康男性の左膝を対象とした。MR画像は1.5T machine (Signa, GE, USA) を用いて3D GRASS T2 like 条件下で膝を軽度屈曲位に保ち撮影した。画像データの厚みは0.4mm (sagittal), 0.4mm (coronal) 0.8mm (axial) である。この画像から、画像解析ソフト AMIRA (TGS, USA) を

用いて骨・軟部組織の形状情報を手動で抽出した。2次元画像の輝度情報から骨、軟骨、半月板を分別し、コンピュータ上で手動により3次元的に再構成した。三角錐の集まりとして大腿骨、その軟骨、半月板の三次元モデルを作成した(図1)。要素となる三角錐の数はそれぞれ大腿骨が約5,000個、軟骨が約1,600個、半月板が約500個であった。この3次元形状データを用いて、有限要素計算ソフトMARC/MENTAT (MSC Software, USA) にて以下の三つの解析を行った。なお各物性値は文献値を参考に表1のように決定した<sup>2)</sup>。

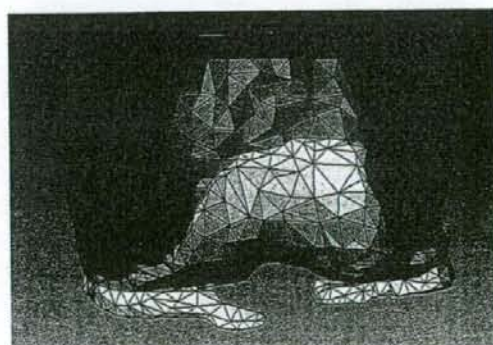


図1. The mesh model of a 3D human knee.

表1. The material properties of the tissues<sup>2)</sup>.

	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Bone	2000	0.3	1.46
Articular cartilage	15	0.1	1.2
Menisci	10	0.4	1.2

### 1. 単純圧縮負荷

作成したモデルの妥当性を検討するために単純負荷による解析を行った。

荷重及び拘束条件は以下のように決定した。拘束条件として半月板の底面全体を完全に固定した。また本研究は靭帯や筋肉の作用を考えていないので、大腿骨の動く方向を拘束し上下方向にのみ動くよう設定した。荷重は同様の研究を行う Penaら<sup>5)</sup>の条件と一致させて、軽度屈曲位で大腿骨に圧縮荷重1,150Nを加えた。この荷重値は通常歩行時にかかると考えられる。なお今回の研究では、大腿骨と半月板の接触は摩擦なしの接触問題として解析を行った。

### 2. 回旋モーメント

大腿骨を上下方向の運動を拘束し、荷重は大腿骨近位部に回旋モーメント約10Nmを加えた。

### 3. 内外反モーメント

大腿骨を前後方向には動かないように拘束し、荷重は大腿骨近位部に内外反モーメント約10Nmを加えた。

## 結 果

図2に単純圧縮時のMises相当応力分布を示す。この結果は半月板の中央の高さの断面におけるものであり、その断面上の半月板と軟骨を含む大腿骨に作用する応力分布を評価および比較できる。まず、圧縮荷重により大腿骨よりも半月板に応力集中が生じていることがわかる。

また内側半月板では、後方に応力集中が生じていることがわかり、最大値は3.5MPaであった。外側半月板では前方と後方で応力集中が生じており、最大4.2MPaの応力が前角に生じていた。表2に内側と外側半月板内の二つの異なる高さの断面において2MPa以上の応力が生じて

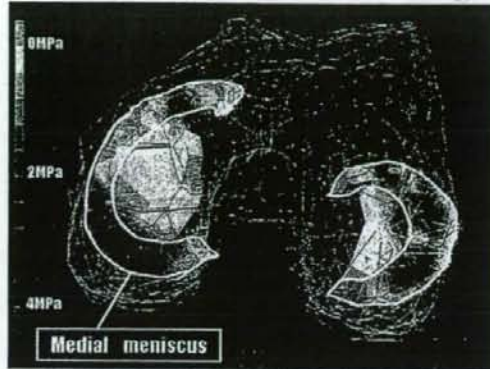
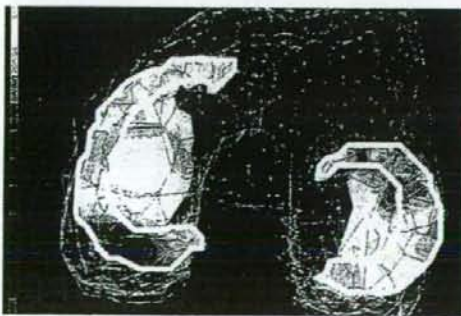


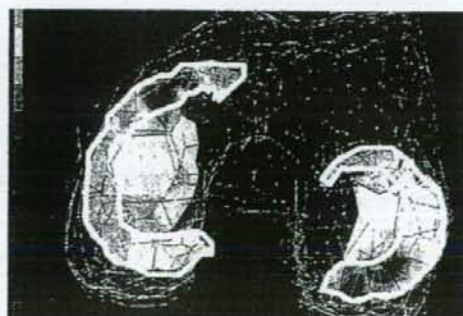
図2. The distribution of the stress in the menisci and the femur at slightly flexed position. In the figure, the menisci are indicated by white lines and the medial meniscus is shown in left side. This result is evaluated on a slice which is sectioned at middle of the meniscus in the axial plane.

表2. The loading area (mm<sup>2</sup>) with a stress more than 2MP on two different axial slices.

	Medial	Lateral
Slice1	178(22%)	78(11%)
Slice2	138(17%)	81(12%)



(a)



(b)

図3. The distribution of the stress in the menisci and the femur under the rotation moment. Figure (a) shows the distribution under the internal rotation moment, figure (b) shows the distribution under the external rotation moment.

## 2-G

## 膝の痛み

松本 秀男\*

■サマリー

膝関節疾患に対するリハビリテーションは可動域と荷重機能の両方を同時に獲得することが目標であり、正しい時期に正しいリハビリテーションを行うことが機能回復の重要な要素である。膝関節可動域訓練は関節拘縮の予防、筋や骨の萎縮の予防、関節軟骨の栄養の確保などの面からも大切であり、その目的により自動運動訓練と他動運動訓練を使い分ける。さらに荷重関節である膝関節にとって十分な筋力の回復も必要である。筋力訓練の方法は一定の関節角度を保って筋力訓練を行う等尺性訓練、一定の負荷に対抗して筋力訓練を行う等張性訓練、一定の速度で関節を動かし、これに対抗して筋力訓練を行う等速性訓練とがある。また、膝関節機能の総合的訓練として荷重歩行訓練がある。荷重歩行訓練は個々の筋力訓練に比べ実際に即した筋力訓練にもなり、また歩行のバランスを獲得する上でも大切で、外固定中でも可能な限り、早期から開始するとよい。

膝関節に疼痛をきたす疾患は外傷、炎症性疾患、腫瘍性疾患、さらには過労性障害(overuse syndrome)、加齢による変化など、極めて多彩である。従って、膝関節の疼痛をきたす疾患に対して、同一のリハビリテーションを行うことはできない。まず膝関節の解剖を理解し、それぞれの疾患に対して正確な診断を下し、リハビリテーションで解決できる点とできない点を明らかにすることが最も重要である。

膝関節の運動範囲は完全伸展位から正座ができる深屈曲位(約150°)までの広い範囲に及ぶ。さらに、屈曲位では胫骨の回旋運動などのより複雑な運動も可能である。この大きな可動性をもつ膝関節は、一方で荷重関節であることから、いずれの屈曲角度でも荷重に耐える十分な関節安定性も要求される。すなわち、膝関節の機能は運動機能と荷重機能の両方が揃うことが必須である。

従って、膝関節疾患に対するリハビリテーションでは、可動域の確保や改善、膝関節周辺の筋力の維持または獲得が最も基本となる。そして、それらの応用として荷重歩行訓練、階段昇降訓練、その他の運動能力訓練などが必要になる。

本稿では膝関節可動域訓練、筋力訓練、歩行訓練の3項目について解説し、膝関節疾患に対するリハビリテーションの適応や時期、さらには方法の選択の一助としたい。

## I. 膝関節可動域の評価と訓練

膝関節は先に述べたごとく極めて大きな可動域を有しており、その獲得は膝関節リハビリテーション

\* Hideo MATSUMOTO 慶應義塾大学整形外科、助教授

の重要な要素である。しかし、可動域制限の原因は一律でなく、訓練によって回復が可能なもの、不可能なもの、訓練の方法によっては、かえって悪化するものなどさまざまである。従って、可動域制限があるからといって、やみくもに訓練を行うのではなく、その原因を十分に検討して、その適応や方法を決定することが大切である。

## 1. 可動域制限の原因

### a. 疼痛

膝関節の可動域制限の最も大きな原因は疼痛である。物理的に可動域を制限する要因がまったくなくとも、疼痛だけで可動域制限は起こり得る。長期間続いていた可動域制限が全身麻酔をかけたときに消失する症例にもしばしば遭遇する。

疼痛の原因は膝関節全体の滑膜炎に起因する場合と関節運動に伴って軟骨表面、半月板、靭帯などに局所的に物理的な刺激が加わって生じる場合がある。また、局所性な要因も、これが繰り返されると関節全体の炎症に移行することもある。通常、関節全体の炎症に伴う可動域制限は軽度屈曲位で最も疼痛が少なく、他動的に伸展や屈曲を強制すると徐々に疼痛が増すことが多い。一方、局所的な原因による可動域制限では、一定の屈曲角度で疼痛を自覚し、それ以上の屈曲または伸展が制限されることが多い。

できるだけ広い範囲の可動域を維持することは関節軟骨の栄養を確保する面からも重要で、疼痛による可動域制限は、原因を検索するとともに可能な限り疼痛を与えない工夫をしながら可動域を確保しておく必要がある<sup>1)</sup>。しかし、炎症の強い時期に無理な可動域訓練を行うと、炎症が増悪し、かえって可動域が悪化することもある。

### b. 皮膚瘢痕

膝関節の広い運動範囲を確保するためには、皮膚にも大きな伸縮性が要求されるため、熱傷、数回の手術、不適切な皮切などによる皮膚瘢痕によっても膝関節可動域は制限される。通常、伸側の皮膚瘢痕では屈曲制限が、屈側の皮膚瘢痕では伸展障害が起

こる。また、皮膚瘢痕は皮膚そのものの伸縮性が失われるばかりでなく、皮下組織との癒着も高度な場合が多い。しかし、軽度の瘢痕では長時間持続的に可動域訓練を行うことにより、伸縮性が改善することが多い。

### c. 半月板損傷・関節内遊離体など

半月板損傷や関節内遊離体に伴う locking により可動域が物理的に障害されることがある。また、線維化した滑膜や靭帯損傷後の断裂靭帯の陥頓によっても物理的な可動域制限が起こり得る。これらの場合には他動的な、特に荷重を伴う可動域訓練は関節軟骨を損傷することがあり、非荷重の状態で可能な範囲の可動域を確保しながら、原疾患の治療を行う必要がある。

### d. 関節内癒着 (arthrofibrosis)

膝関節の外傷や手術後に生じる関節内の線維化や癒着が関節可動域制限の原因となる<sup>2)</sup>。大腿脛骨関節の癒着、膝蓋大腿関節の癒着、膝蓋上囊の線維化、内・外側谷部や顆間部の線維化などがその要素となる。また、他の原因による可動域制限が長期間続いても、関節内癒着が生じる。線維化が高度な場合には関節授動術などの手術操作が必要となるが、軽度な場合には可動域訓練が有効である。

### e. 膝関節伸展・屈曲機構の短縮

大腿四頭筋の外傷や手術による線維化、膝蓋腱の線維化や短縮などにより、膝関節伸展機構の excursion が障害されると、屈曲制限の原因となる<sup>3)</sup>。また、長期の外固定によっても大腿四頭筋の線維化や伸張性の低下、膝蓋腱の短縮などが生じる。一方、膝関節屈筋群の線維化が生じると伸展制限の原因となるが、臨床的には大腿二頭筋の線維化が原因となることが最も多い。伸筋群・屈筋群とも中枢部の筋実質の損傷が軽度な場合には、可動域訓練によって excursion が再獲得される可能性が高い。

## 2. 可動域の評価

膝関節の運動は三次元運動であり、屈伸運動のほ

か、胫骨の回旋運動なども加わるが、膝関節のROM (range of motion) といえば、通常屈伸角度のことである。可動域は通常、自動運動と他動運動の両方で評価されるが、自動運動は疼痛や意志、筋力、体型などさまざまな要素の影響を受けやすく、関節の機能評価としての指標は他動運動範囲がより客観的である。他動関節可動域は検者が徒手的に膝関節を屈伸し、その際の屈曲角度の範囲を記録するが、大腿直筋が二関節筋であるため、その短縮を伴うような疾患(大腿四頭筋拘縮症など)では股関節の屈曲角度の影響を受ける。従って、このような場合には股関節最大屈曲位で膝関節の可動域を計測する必要がある。さらに、可動域は個体差が大きいため、健側も同時に測定し、患健側差を評価に用いる。

一方、胫骨の回旋運動範囲も本来、生理的な膝関節可動域の一つと考えられるが<sup>3)</sup>、回旋運動範囲は徒手的な評価が難しいこともあり、現在のところ、その評価は一定の基準がなく、今後の問題点である。

### 3. 可動域訓練の方法

膝関節可動域訓練の目的は現在の可動域を維持することと、すでに存在する可動域制限を改善することの2つに分けられる<sup>4)</sup>。

#### a. 可動域の維持

外傷後や手術後など何らかの理由により膝関節に対する通常の負荷や運動を制限せざるを得ない場合、可動域訓練は関節拘縮の予防、筋や骨の萎縮の予防、関節軟骨の栄養の確保などのために大切である。しかし、疾患によって可動域訓練ができないもの、できて大きな外力が加えられないため、その方法を制限せざるを得ないものもある。可動域訓練は自家筋力を用いて自動で行うもの、器械や他の人の助けを借りて他動で行うものとあるが、通常、可動域維持のための訓練は、自家筋力の維持も同時に行うため自動運動で行うことが多い。しかし、自家筋力により膝関節に加わる外力を制限する必要がある場合や、十分な自家筋力がない場合、意識障害のある患者などでは他動的な可動域訓練を行う。他動的な可動域訓練は疼痛を伴わないように、また不必要な

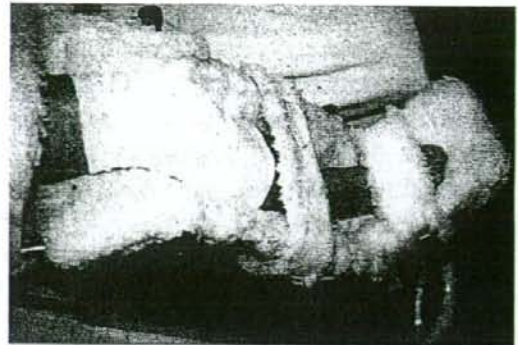


図1. CPM(continuous passive motion)装置

筋緊張を起こさないように行うことが大切である。

自家筋力の影響をできるだけ排除し、持続的に他動的な関節運動訓練が行える装置としてCPM (continuous passive motion)装置が開発されている<sup>1)</sup>(図1)。このCPM装置は運動範囲と運動速度を調節でき、必要によりベッド上で24時間可動域訓練が行えるが、現在の装置は構造上、屈曲120°位までの訓練が限界である。また、CPM装置は術後など疼痛が強い時期に可動域を確保するのに極めて有用であるが、運動範囲や運動速度はその病態や時期により適時調節することが大切である。

#### b. 可動域の獲得

一度失った可動域を改善することも可動域訓練の重要な要素である。長期間続いた関節拘縮が訓練方法を変えると、急に改善することがある。しかし、先に述べたごとく可動域制限の原因はさまざま、可動域訓練を行った方がよい場合、かえって悪い場合、行う意味のない場合などがあり、原因をよく検討してから適応や方法を選択する必要がある。

通常、可動域の獲得を目指す場合には、現有の可動域を越える外力を要するため、他動的に行うことが多い。外傷や手術後早期の関節内の線維化による可動域制限は、他動可動域訓練で改善する症例が多い。ただし、過剰な外力を加えると、疼痛や筋性防御を誘発するばかりでなく、関節内出血を惹起したり、異所性骨化を誘発することにより、結果としてかえって可動域が減少することもある。自動可動域

訓練を補助する程度の外力で、時間をかけて訓練を行うことがむしろ近道であることが多い。CPM装置も可動域改善訓練に用いられるが、屈曲方向にはある程度の外力を負荷できるが、伸展方向へは外力をほとんど負荷できない。従って、膝関節伸展訓練は徒手的に行う必要がある。

## II. 筋力訓練

膝関節は荷重関節であり、最低限歩行に耐え得る安定性、さらにスポーツ復帰などを目指す場合には、ジャンプの着地などの強度の荷重負荷やさまざまな外力の負荷に耐えられるだけの十分な安定性が要求される。膝関節の静的な安定性は主として靭帯や関節包などの軟部組織に依存するが、日常生活やスポーツ活動時には膝関節周囲の筋群がその安定性には重要な役割を演じている。

### 1. 膝関節周囲の筋群

膝関節の主な運動は屈伸運動であり、膝関節の運動をつかさどる筋群も主として伸筋群と屈筋群に分けられる。さらに膝関節屈曲位では若干の胫骨回旋運動が可能であるが、これは主として屈筋群によって行われる。膝関節伸筋群は腸骨下前腸骨棘に起始部をもつ大腿直筋、大腿骨に起始部をもつ内側広筋、外側広筋、中間広筋の計4つの筋(大腿四頭筋)より構成される。いずれも膝蓋骨に停止し、その末梢が膝蓋腱を介して胫骨粗面に付着することにより、これら4つの筋の合力が膝関節伸展力となる。この内、最も強大な大腿直筋は腸骨に起始部をもつ二関節筋であるため股関節屈曲位では膝関節伸展力は低下する。また、膝関節の終末伸展作用は主として内側広筋が受け持ったため、膝関節の伸展障害が長く続くとこの内側広筋の著明な萎縮が生じる。

一方、膝関節屈筋群は一般にハムストリングスと呼ばれ、胫骨近位内側部に停止し、膝関節の屈曲と同時に胫骨を内旋する内側ハムストリングスと、腓骨頭に停止し屈曲と同時に胫骨を外旋する外側ハムストリングスとに分けられる。内側ハムストリングスは腸骨の上前腸骨棘に起始部をもつ縫工筋、恥骨

に起始部をもつ薄筋、坐骨に起始部をもつ半腱様筋および半膜様筋の計4つからなる。外側ハムストリングスは坐骨に起始部をもつ長頭と大腿骨に起始部をもつ短頭からなる大腿二頭筋である。その他、膝窩筋や腓腹筋の内側頭、外側頭などが膝関節の屈筋としての作用を若干有するが、膝窩筋は主として膝関節後外側不安定性の制御などの静的な役割が強く、腓腹筋はむしろ足関節の底屈が主な作用である。

### 2. 筋力の評価

筋力は筋容積と深い相関関係があるため、伸展筋力は古くから簡便な方法として大腿四頭筋の太さを測る大腿周径が筋力評価の一つの指標として利用されてきた。通常、大腿周径の測定は膝蓋骨の上縁から10cmの部位で行い、この部位が大腿四頭筋全体の評価には最も有用であるとされている。また、膝関節疾患、特に伸展制限をきたすような疾患では内側広筋の萎縮が強いことが多く、この内側広筋の萎縮を最もよく反映するのは膝蓋骨の上縁から7cmの部位であるとされている。大腿周径の測定は、筋の太さがそのまま筋力を反映しないこと、腫脹があると測定値が意味をなさないこと、他の組織の太さも含まれること、再現性に問題があることなどの多くの問題点もあるが、巻き尺だけで評価が可能であり、極めて簡便な方法である。一方、屈筋であるハムストリングスの評価はそれぞれの筋腹の高位が異なるため、大腿周径などの方法で評価することは難しい。

また、古くから徒手的に筋力を5段階で評価する徒手筋力テストが用いられている。これも簡便な方法であるが、絶対値で評価できず左右差で評価するため反対側が正常であることが条件であること、一定の膝関節角度での評価しかできないこと、再現性に問題があること、などの弱点がある。

近年、筋力訓練と同時にその筋力を直接測定できる装置が開発されている(図2)。これらの装置は膝関節に伸展または屈曲方向に定量的な負荷をかけながら、これに抵抗する筋力を測定するものである。この装置を用いた筋力測定には一定の関節角度における筋力を測定する等尺性筋力測定、一定の負荷に





図 2. 膝関節筋力訓練および測定装置

対抗する筋力を測定する等張性筋力測定、一定の速度で関節を動かし、これに対抗する筋力を測定する等速性筋力測定とがある。いずれも、伸筋群および屈筋群によって発生する膝関節を軸とするトルク値として検出される。

### 3. 筋力低下の原因

膝関節周囲の筋力低下はこれを支配する神経障害、筋実質の障害などでも起こるが、長期の外固定や可動域制限、長期の疼痛などによっても廃用性の萎縮が生じ、強度の筋力低下が起こる。膝関節のリハビリテーションにより回復の見込みがあるのはむしろ後者である。

### 4. 筋力訓練の方法

筋力訓練の目的も可動域訓練と同様、現在の筋力維持を目的とする場合と一度低下した筋力の回復を目的とする場合があり、さらには現有筋力以上の筋力の獲得を目的とする場合もある。通常、外傷後や手術後に行う筋力訓練の目的は現在の筋力の維持および低下した筋力の回復を目的とすることが多い。筋力訓練の効果は筋収縮の大きさ、収縮時間、回数による影響を受けるが、疾患によっては一定以上の筋収縮を行えない場合、疼痛のために十分な訓練ができない場合などがあり、症例に合わせたメニューが必要である。特に、関節の運動範囲を制限せざるを得ない場合には筋力訓練の方法を綿密に計画することが大切である。筋力訓練の方法は筋力測定の方

法と同様、一定の関節角度を保って筋訓練を行う等尺性訓練、一定の負荷に対抗して筋力訓練を行う等張性訓練、一定の速度で関節を動かし、これに対抗して筋力訓練を行う等速性訓練とがある<sup>9)</sup>。

#### a. 等尺性訓練

関節の角度を一定に保持したまま、筋収縮を行う訓練であり、最も簡単な方法は足部にウェイトを乗せ、一定時間これを挙上、保持する大腿四頭筋訓練である。ギプスなどにより膝関節の外固定を行っている場合には特に有効である。外固定中は筋力低下が急激に進行するので、疾患に影響を及ぼさない限りこれを行うことが大切である。また屈筋群の筋力訓練としては腹臥位でベッドの柵などを利用し、これを押し上げようとする訓練が有効である。

#### b. 等張性訓練

一定の負荷に対抗して筋力訓練を行う方法で、いわゆるウェイトトレーニングがこれにあたる。膝関節の筋力訓練としては、ひもと滑車を用いて足部に重錘(外力)を負荷し、これに抗して膝を屈伸する訓練、近年開発されている膝関節筋力訓練用装置を用いて行う訓練がある。関節を動かさない疾患や可動域制限の強い場合にはこの訓練を行えないが、すべての可動域で筋力訓練ができるので、伸筋群、屈筋群とも満遍なく訓練が行える長所がある。

#### c. 等速性訓練

一定の速度で関節を動かし、これに対抗して筋力訓練を行う方法である。通常の器具ではこの訓練は難しく、膝関節筋力訓練用装置を用いて行う。他動的に関節運動を行うため、ある程度の負荷をかけて関節を動かしてもよい状態であることが条件となるが、外力に抗する減速(deceleration)方向の筋力訓練が行えることが特徴である。

## III. 荷重歩行訓練

歩行訓練は膝関節の荷重機能、可動域、体幹バランスなどの総合的訓練である。通常、高度のスポー

委員会報告

変形性膝関節症に対する手術療法：過去 10 年における手術法選択の推移  
—日本整形外科学会認定研修施設を対象とした全国アンケート集計結果—\*

日本整形外科学会変形性関節症委員会

担当理事：戸山芳昭<sup>1</sup> 委員長：中村耕三<sup>2</sup>

委員：越智光夫<sup>3</sup> 黒坂昌弘<sup>4</sup> 津村 弘<sup>5</sup> 松本秀男<sup>1</sup> 安田和則<sup>6</sup>

はじめに

近年、わが国では人口の高齢化に伴い骨粗鬆症、変形性脊椎症、変形性関節症などの運動器の変性疾患が著しく増加している。各医療機関ではこれらを治療する機会が増えるとともに、その治療に要する費用も飛躍的に増加している。現在、これらの運動器変性疾患を予防し、その医療費を抑制するために、官民一体となったさまざまな対策が講じられつつある。

日本整形外科学会変形性関節症委員会では、その一環として、まず現状を把握するため、運動器変性疾患の内、最も頻度の高い疾患の1つである変形性膝関節症について、日本整形外科学会認定研修施設を対象とした全国アンケート調査を実施した。今回、多くの医療機関にご協力いただいた調査結果をまとめたので報告する。

対象および方法

アンケート調査を行ったのは全国の日本整形外科学

**Key words:** Knee Joint, Osteoarthritis, Operative Treatment, Total Knee Arthroplasty

\*Operative Treatments for Osteo-arthritis of the Knee Joint. —Change in Procedures in the Past 10 Years—

<sup>1</sup>慶應義塾大学医学部整形外科学教室

<sup>2</sup>東京大学大学院医学系研究科外科学専攻感覚運動機能医学講座整形外科学

<sup>3</sup>広島大学大学院医歯薬学総合研究科展開内科学専攻病態制御医学講座整形外科学

<sup>4</sup>神戸大学大学院医学研究科・器官治療医学講座・整形外科

<sup>5</sup>大分大学医学部脳・神経機能統御講座整形外科

<sup>6</sup>北海道大学大学院医学研究科高次診断治療学専攻機能再生医学講座運動機能再建医学分野

会認定研修施設 2223 施設である。リハビリテーション治療を中心とし、手術的治療をほとんど行っていない施設も含んでいる。過去 10 年間の手術法の変遷を調査するため、1996 年、2001 年、2003 年、2004 年、2005 年それぞれ 1 年間に変形性膝関節症に対して行った手術症例について調査した。

まず施設のプロフィールとして、調査最終年である 2005 年における

- 1: 病院全体ベッド数
- 2: 整形外科ベッド数
- 3: 病院全体医師数(常勤医師のみ)
- 4: 整形外科医師数(常勤医師のみ)
- 5: 病院全体の手術数
- 6: 整形外科手術数

を調査した。

ついで、変形性膝関節症に対する手術症例を上述した各 1 年間について 1 月 1 日から 12 月 31 日まで順次、手術日、年齢、性別、手術方法についての記載を依頼した。手術方法は、①ジョイントデブリドマン: JD (joint débridement), ②高位脛骨骨切り術: HTO (high tibial osteotomy), ③片側人工膝関節置換術: UKA (unicompartmental knee arthroplasty), ④全人工膝関節置換術: TKA (total knee arthroplasty), ⑤その他とし、いずれかの 1 項目に○をつけ、その他については手術法について具体的な記載を依頼した。

結 果

回答があったのは調査した 2223 施設中 1020 施設

ツ復帰を目指す場合を除いて、外傷や手術後の膝関節リハビリテーションの最終段階で行うことが多い。膝関節の外傷後や手術後は、一定期間免荷を要することが多く、その後に荷重歩行訓練が必要となる。しかし、荷重歩行訓練は個々の筋力訓練に比べ実際に即した筋力訓練にもなり、また歩行のバランスを獲得する上でも大切で、外固定中でも可能な限り、早期から開始するとよい。

通常、片側の疾患では健側の筋力や可動域は正常であることが多いため、歩行器、松葉杖、平行棒などを用いて健側での片側荷重歩行から患側の荷重量を徐々に増加する。増加の程度は疾患によっても異なるが1/6荷重、1/4荷重、1/3荷重などと細かく指導しても実際の歩行時には荷重量のcontrolは難しく、せいぜい半荷重と全荷重ぐらいの区別にとどめるべきである。ただし、どうしても区別が必要な場合には体重計を利用して患者自身に荷重量の目安をおぼえさせるか、創などの問題がなければ浮力を利用した水中歩行訓練を利用する。

筋萎縮が強い場合には荷重により膝くずれ(giving way)を生じ、膝関節に過負荷がかかることがあるので、訓練当初は過伸展や過屈曲を予防する装具を装着し、筋力の回復をみながら徐々にはずしていく。また、多発外傷や関節リウマチなどで上肢にも障害がある場合には、ロフスランド杖を用いた荷重

訓練、水中荷重訓練などの工夫が必要である。

### おわりに

膝関節は可動域と荷重機能のいずれか一方が欠けても、その機能は大きく障害される。膝関節疾患の治療におけるリハビリテーションの役割は極めて大きく、正しい時期に正しいリハビリテーションを行うことが、機能回復の重要な要素である。

### 文献

- 1) Salter RB, Simmonds DF, Malcolm BW, et al: The biological effect of continuous passive motion on the healing of full-thickness defects in articular cartilage. J Bone Joint Surg, 62 A: 1232, 1980.
- 2) 松本秀男, 他: 膝関節拘縮に対する授動術について. 別冊整形外科, 22: 198-202, 1992.
- 3) Matsumoto H, Seedhom BB: Rotation of the tibia in the normal and ligament-deficient knee. —A study using biplanar photography—. Proc Instn Mech Eng (H), 207: 175-184, 1993.
- 4) 三上真弘: 関節拘縮に対する運動療法の理論. 骨・関節・靭帯, 11: 731-735, 1998.
- 5) 星川吉光: 筋力増強のための運動処方法の理論. 骨・関節・靭帯, 11: 725-730, 1998.

表1 各年の変形性膝関節症に対する手術症例数

	1996年	2001年	2003年	2004年	2005年
男	2253	2889	3779	4027	4599
女	8188	11783	14768	15777	18009
合計	10441	14672	18547	19804	22608

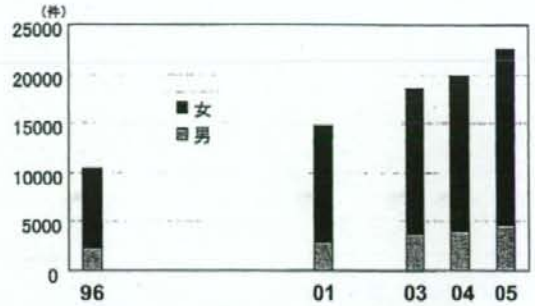


図1 各年の変形性膝関節症に対する手術症例数

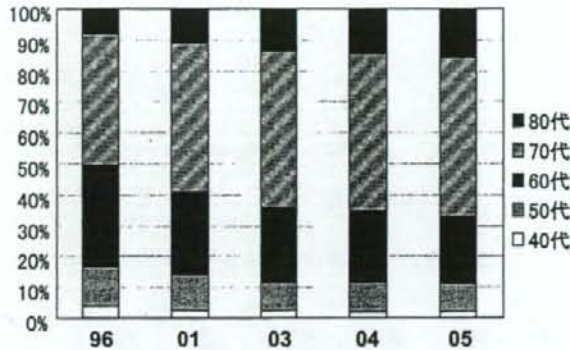


図2 各年の年代別手術症例数

(45.9%)であった。

### 1. 施設のプロフィール

この1020施設のプロフィールは、

- 1) 病院全体ベッド数：平均327.2ベッド(有効回答数995)
- 2) 整形外科ベッド数：平均50.3ベッド(有効回答数960)
- 3) 病院全体医師数：平均67.8人(有効回答数971)
- 4) 整形外科医師数：平均5.0人(有効回答数998)
- 5) 病院全体手術数：平均1909.8件(有効回答数964)
- 6) 整形外科手術数：平均457.7件(有効回答数993)であった。

### 2. 変形性膝関節症に対する手術数

変形性膝関節症に対して手術を行った症例の数は、回答のあった全1020施設合計で、1996年10441件に対し、2001年14672件、2003年18547件、2004年19804件と徐々に増加し、2005年には22608件で1996年の2.17倍に増加した(表1, 図1)。

男女比は1996年には男2253件、女8188件(1:3.6)であったのに対し、2001年男2889件、女11783件(1:4.1)、2003年男3779件、女14768件(1:3.9)、2004年男4027件、女15777件(1:3.9)、2005年男4599件、女18009件(1:3.9)であり、各年でほとんど変化していなかった(表1, 図1)。

年齢別では1996年には50歳台13%、60歳台32%、70歳台42%であったのに対し、2001年50歳台11%、60歳台27%、70歳台48%、2003年50歳台10%、60歳台24%、70歳台51%、2004年50歳台10%、60歳台23%、70歳台51%、2005年には50歳台9%、60歳台22%、70歳台51%で、わずかではあるが徐々に高齢化していた(図2)。

### 3. 各手術方法の変遷

#### ① ジョイントデブリドマン：JD

JDは、1996年2472件に対し、2001年3317件、2003年3814件、2004年3670件と徐々に増加し、2005年には3905件で1996年の1.58倍に増加した(表2, 図3)。

表2 変形性膝関節症に対する各手術法の症例数

	1996年	2001年	2003年	2004年	2005年
JD	2472	3317	3814	3670	3905
HTO	1330	964	820	848	918
UKA	267	238	413	674	793
TKA	5795	9507	12821	13790	15933
Others	577	646	679	822	1059
合計	10441	14672	18547	19804	22608

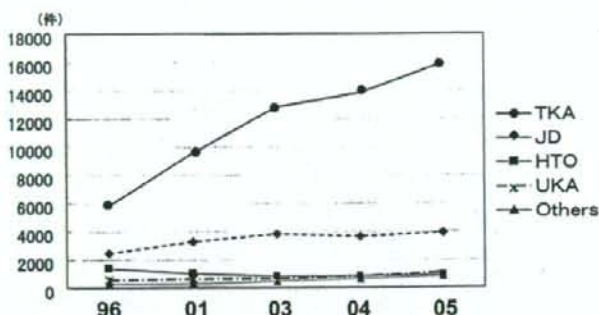


図3 変形性膝関節症に対する各手術法の症例数

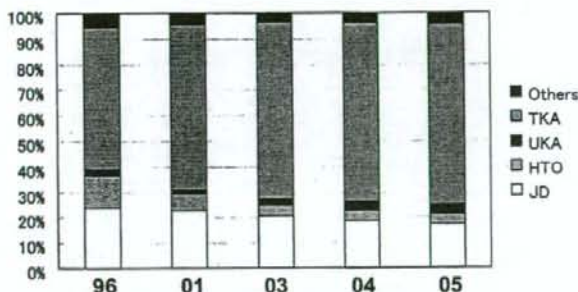


図4 それぞれの年における各手術方法の頻度

②高位脛骨骨切り術：HTO

HTOは、1996年1330件に対し、2001年968件、2003年820件、2004年848件と徐々に減少し、2005年には918件で1996年の0.69倍に減少した(表2、図3)。

③片側人工膝関節置換術：UKA

UKAは、1996年267件に対し、2001年238件、2003年413件、2004年678件と徐々に増加し、2005年には793件で1996年の2.97倍に増加した(表2、図3)。

④全人工膝関節置換術：TKA

TKAは、1996年5795件に対し、2001年9507件、

2003年12821件、2004年13790件と徐々に増加し、2005年には15933件で1996年の2.75倍に増加した(表2、図3)。

それぞれの年における各手術方法の頻度で評価すると、1996年にはJD：24%、HTO：13%、UKA：3%、TKA：56%であったのに対し、2001年JD：23%、HTO：7%、UKA：2%、TKA：65%、2003年JD：21%、HTO：4%、UKA：2%、TKA：69%、2004年JD：19%、HTO：4%、UKA：3%、TKA：70%、2005年にはJD：17%、HTO：4%、UKA：4%、TKA：70%で、JDは一定の割合を保っているものの、HTOは徐々に減少し、代わってTKA

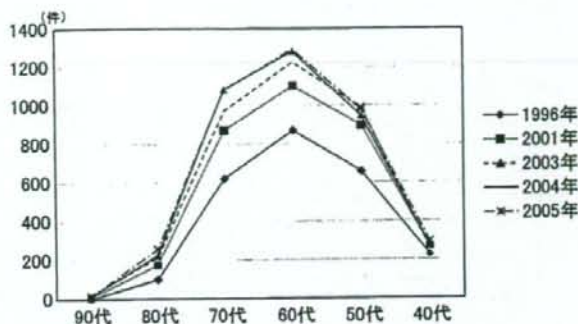


図5 ジョイントデブリードマンの年代別手術症例数

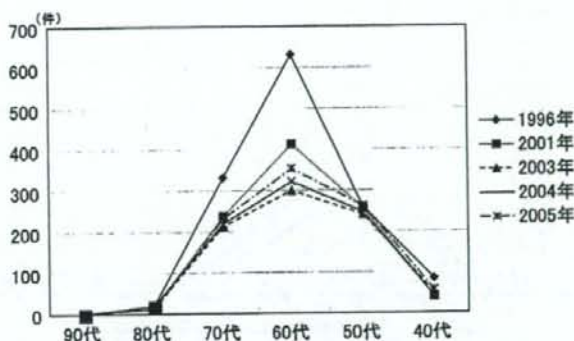


図6 高位脛骨骨切り術の年代別手術症例数

が増加していた(図4)。

⑤その他に定義された手術では滑膜切除術, 関節授動術, 関節固定術, HTO 以外の骨切り術(含, 脛骨粗面前方移行術), 抜釘術, 上記各手術後の合併症に対する手術などであったが, いずれの年も変形性膝関節症に対する全手術数の4-6%であった。

#### 4. 各手術方法の年齢分布

##### ①ジョイントデブリードマン: JD

JDは, 1996年には40歳台9%, 50歳台27%, 60歳台35%, 70歳台25%, 80歳台4%であったのに対し, 2001年40歳台8%, 50歳台27%, 60歳台33%, 70歳台26%, 80歳台5%, 2003年40歳台7%, 50歳台25%, 60歳台36%, 70歳台28%, 80歳台6%, 2004年40歳台7%, 50歳台27%, 60歳台34%, 70歳台26%, 80歳台6%, 2005年には40歳台7%, 50歳台25%, 60歳台33%, 70歳台28%, 80歳台7%で, いずれの年も60歳台にピークを認めるが, 50歳台, 40歳台でも比較的多く行われていた(図5)。

##### ②高位脛骨骨切り術: HTO

HTOは, 1996年には40歳台6%, 50歳台19%, 60歳台47%, 70歳台25%, 80歳台2%であったのに対し, 2001年40歳台4%, 50歳台27%, 60歳台43%, 70歳台25%, 80歳台2%, 2003年40歳台6%, 50歳台29%, 60歳台37%, 70歳台26%, 80歳台2%, 2004年40歳台5%, 50歳台29%, 60歳台38%, 70歳台26%, 80歳台2%, 2005年には40歳台6%, 50歳台29%, 60歳台39%, 70歳台25%, 80歳台2%で, いずれの年も60歳台にピークを認めた(図6)。

##### ③片側人工膝関節置換術: UKA

UKAは, 1996年には40歳台0%, 50歳台4%, 60歳台33%, 70歳台52%, 80歳台11%であったのに対し, 2001年40歳台0%, 50歳台3%, 60歳台21%, 70歳台61%, 80歳台14%, 2003年40歳台0%, 50歳台4%, 60歳台25%, 70歳台55%, 80歳台16%, 2004年40歳台0%, 50歳台4%, 60歳台21%, 70歳台61%, 80歳台14%, 2005年には40歳台1%, 50歳台5%, 60歳台19%, 70歳台55%, 80歳台20%で, いずれの年も70歳台にピークを認め, 80歳でも比較的多く行われているが, 40歳台, 50歳台ではきわめ

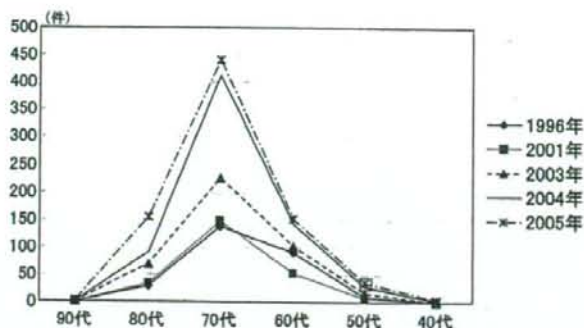


図7 片側人工膝関節置換術の年代別手術症例数

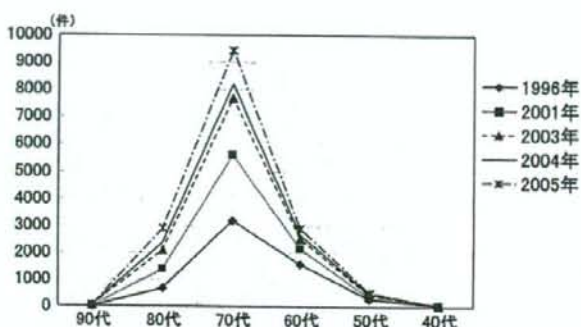


図8 全人工膝関節置換術の年代別手術症例数

て少なかった(図7)。

#### ④全人工膝関節置換術：TKA

TKAは、1996年には40歳台1%、50歳台5%、60歳台27%、70歳台55%、80歳台12%であったのに対し、2001年40歳台0%、50歳台4%、60歳台22%、70歳台60%、80歳台14%、2003年40歳台0%、50歳台3%、60歳台20%、70歳台60%、80歳台16%、2004年40歳台0%、50歳台3%、60歳台19%、70歳台60%、80歳台17%、2005年には40歳台0%、50歳台3%、60歳台18%、70歳台59%、80歳台18%で、UKAと同様、いずれの年も70歳台にピークを認め、80歳でも比較的多く行われているが、40歳台、50歳台ではきわめて少なかった(図8)。

#### まとめ

1)変形性膝関節症に対する手術症例数は1996年10441件で、その後徐々に増加し、2005年には2.17倍の22608件であった。

2)男女比は各年でほとんど変化なく、1:3.6-4.1であ

り、手術時年齢は1996年と2005年間で、わずかではあるが徐々に高齢化していた。

3)各手術方法の変遷では1996年と2005年間で、JDは1.58に増加、HTOは0.69倍に減少、UKAは2.97倍に増加、TKAは2.75倍に増加した。それぞれの年における頻度で評価すると、JDは一定の割合を保っているものの、HTOは徐々に減少し、代わってTKAが増加していた。

4)各手術方法の年齢分布ではいずれの年も同様の傾向で、JDは60歳台にピークを認めるが、50歳台、40歳台でも比較的多く行われていた。HTOは60歳台にピークを認め、比較的広い年齢層で行われており、UKAとTKAは70歳台にピークを認め、80歳でも比較的多く行われているが、40歳台、50歳台ではきわめて少なかった。

5)以上のデータは、施設によっては2005年のデータはそろっているのに対し、1996年のデータが不十分である可能性があり、その影響を一応考慮する必要がある。

(添付資料3) 変形性膝関節症患者の歩行解析・動作解析に関する原著・著書 (名倉武雄)

出典リスト

1. 名倉武雄, 畔柳裕二, 原藤健吾, 松本秀男. 高齢者の膝関節障害に対する運動・筋力トレーニングの効果—関節負荷計測による新しい判定基準の確立—. 第20回健康医科学研究助成論文集, pg. 104-109, 2005.
2. 畔柳裕二, 名倉武雄, 松本秀男, 井口傑, 戸山芳昭. 外側楔讓補高足底挿板の膝・足関節に及ぼす力学的負荷—足関節バンド固定型足底挿板の効果の検討—. 靴の医学 18(2), pg. 61-64, 2004.
3. 名倉武雄, 松本秀男, 大谷俊郎, 須田康文, 畔柳裕二, 磐田振一郎, 戸山芳昭. 変形性膝関節症患者の動作解析—日常生活における関節負荷の特徴—. 膝 vol. 28, No. 2, pg. 14-16, 2003.
4. 畔柳裕二, 名倉武雄, 松本秀男, 大谷俊郎, 須田康文, 磐田振一郎, 桐山善守, 戸山芳昭. 変形性膝関節症患者における歩行時膝関節内反角度の変化—動的FTA評価の試み—. 膝 29(2), pg. 123-126, 2004.
5. Nagura T, Matsumoto H, Kiriya Y, Chaudhari A, Andriacchi TP. Tibiofemoral Joint Contract Force in Deep Knee Flexion and Its Consideration in Knee Osteoarthritis and Joint Replacement. Journal of Applied Biomechanics 22(4): 305-313, 2006.
6. Kuroyanagi Y, Nagura T, Matsumoto H, Otani T, Suda Y, Nakamura T, Toyama Y. The lateral wedged insole with subtalar strapping significantly reduces dynamic knee load in the medial compartment. Osteoarthritis and Cartilage 15: 932-936, 2007.



# 高齢者の膝関節障害に対する運動・筋力トレーニングの効果判定 —関節負荷計測による新しい判定基準の確立—

名 倉 武 雄\*      畔 柳 裕 二\*      原 藤 健 吾\*  
松 本 秀 男\*

## EFFECTIVENESS OF THE QUADRICEPS EXERCISE IN ELDERLY PATIENTS WITH THE JOINT DISORDER —A NOVEL APPROACH TO MEASURE JOINT LOADS DURING THE ACTIVITIES OF DAILY LIVING—

Takeo Nagura, Yuji Kuroyanagi, Kengo Harato, and Hideo Matsumoto

### SUMMARY

Effectiveness of the quadriceps exercise in the elderly patients with knee osteoarthritis was evaluated using three-dimensional motion analysis system. 34 knees with osteoarthritis and 16 knees with healthy volunteers were evaluated. 17 knees out of the 34 knees had continuous quadriceps exercise following total knee arthroplasty. The knees following the exercise had larger quadriceps moment compared to the knees without the exercise during rising from maximum flexion, although there was no difference in the quadriceps strength (evaluated by MMT) between the three groups. Evaluation of the joint loads using three dimensional motion analysis is useful for the clinical evaluation of the conservative treatments such as the quadriceps exercise in the patients with joint disorders.

Key words: quadriceps exercise, elderly patients, joint loads, motion analysis.

### 結 言

変形性膝関節症は病理学的には関節軟骨の変性及び骨の新生と増殖、つまり磨耗相と増殖相の混在(変形性変化)によって特徴づけられる慢性、進行性の変形性の関節疾患と定義される。変形性膝関節症の発生原因は様々であるが、なかでも加齢と長年にわたる力学的な負荷異常(過負荷や低

負荷)は重要な因子である。変形性変化はいずれの可動関節にも発症し、加齢とともにその発症頻度は増加する。その発生頻度は当然のことながら荷重負荷のかかる関節ほど症候性になりやすいが、膝関節は通常の歩行で体重の約2.5倍と全身の中で最大の負荷がかかる関節と考えられている。すなわち膝関節は変形性変化の発生頻度が高いと同時に、その症状が最も発症しやすい関節である。

\* 慶應義塾大学医学部整形外科 Department of Orthopedic Surgery, Keio University, School of Medicine, Tokyo, Japan.

症状としては膝関節の疼痛が主であり、運動痛で始まる。症状が重くなると関節炎（疼痛、腫脹、発熱、発赤）が起こり、安静時痛も出現する。さらに症状が進むと可動域制限が出現し、運動は制限され、次第に膝の変形が強くなる。近年の人口の高齢化に伴い、変形性関節症を患っている患者数は年々増加しており、整形外科分野では最もポピュラーな疾患の一つとなっている。変形性膝関節症に罹患している患者は運動量の低下による膝周囲の筋（大腿四頭筋、ハムストリング）の筋力不足をとまなっており症状を加速させている。このような患者は日常生活動作（階段昇降、ベッドからの立ち上がり動作など）において障害を生じることが多い。また、膝関節の変形や筋力低下がさらに進行すると変形性膝関節症の病態はより進行し、日常生活における動作が困難となり、活動性が徐々に低下することでひいては寝たきりになるなど生活の質（QOL）や日常生活動作（ADL）を高い状態で保持することが困難となり、健康な生活が大きく障害されることになる。このような高齢者の膝関節障害に対しては人工膝関節置換術といった外科的療法が考えられるが患者に対する負担が非常に大きく、より侵襲が少ない効果的な保存療法の評価が重要である。現在の指導されている保存療法には、運動療法や筋力トレーニングといったものが存在するが、それらが疾患に対してどれだけ効果を発揮しているかを定量的に判定する手法は確立されていない。よって関節可動域訓練や筋力訓練といった運動がどの程度その個人に最適であり効果的であるかは不明である。保存療法や機能向上を目指すための真の運動療法や筋力トレーニングとは膝関節機能を考慮したうえで、膝関節を含めた下肢全体の運動の誘導・制動機能、及び安定性を向上させる機能訓練であり、広義には身体運動に伴うバランスと姿勢制御を統合していくことが必要なのである。本研究では3次元動作解析装置を用いて日常生活動作中の関節負荷を計測し、運動・筋力トレーニングが高齢者の関節機能改善にどのような効果を発揮するのかを定量的に判定し、さらなる機能改善を目指した運動療法及び筋力トレーニングプログラムの開発を行うことを目的とした。

## 対象と方法

関節障害を有する高齢者として片側に人工関節手術を行った変形性膝関節症17名34膝（58-81歳、平均71歳）を、また健常者についても年齢を考慮し60歳以上の8名16膝（60-65歳、平均63歳）を対象とした。いずれの被験者にも計測およびそれに伴う危険性などにつき十分なインフォームドコンセントを行い、了承を得た上で計測を行った。高齢者は手術を行った側において、術後よりリハビリテーション科による処方箋に基づき大腿四頭筋訓練（等尺性および1kg重錘を用いた等張性訓練）を行い、退院後も自主的に行うよう指導した。それぞれの訓練時間は一日15分を任意に2-3回行わせた。手術を行わなかった側および健常者には指導を行わず、これをそれぞれ訓練なし群、健常群とした。

被験者の腸骨稜、大腿骨大転子、膝関節外側関節裂隙、足関節外果、踵骨外側部第5中足骨頭に計6個の反射マーカ（CFTC, Chicago, IL, USA）を貼付した。3台の特殊カメラ（Pro-Reflex mcu120, Qualysis, Svedalen, Sweden）および床反力計（Type AM6110, Bertec, Columbus OH, USA）よりなる3次元動作解析装置（図1）を用いて、10mの平地歩行および最大屈曲からの片脚による立ち上がりを120Hzで計測した。最大屈



図1. 3次元動作解析装置

Fig. 1. Three-dimensional Motion Analysis System.

曲からの立ち上がりについては、過去の研究<sup>6,8,10</sup>と同一動作に統一し側方に高さ56cmの木製箱を設置し、これを支持として立ち上がるものとした(図2)。動作中の膝関節屈曲角度および大腿四頭筋モーメントをInverse dynamics法<sup>12</sup>を用いて算出した。訓練あり(手術側)、訓練なし(非手術側)および健常者の3群でを比較した。統計学的検討にはUnpaired Tテストを用い、有意水準 $\alpha=0.05$ で有意差ありとした。

## 結 果

計測時(術後平均16ヶ月)に訓練群では適切に筋力トレーニングが行われていることを確認した。大腿四頭筋力は高齢者全例で、明らかな筋萎縮もなく徒手筋力検査法(MMT)で5(powerful)で左右差はなかった。

膝関節屈曲角度については、平地歩行では3群間に有意差を認めなかった(図3)。最大屈曲からの起立において健常群と訓練あり群、なし群でそれぞれ有意差を認め、健常者のほうが約10度大

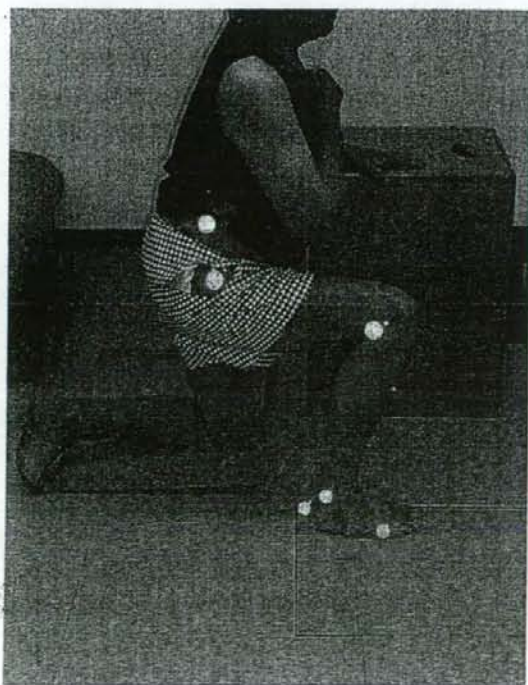


図2. 最大屈曲からの片脚起立動作  
Fig. 2. Rising from maximum flexion using one leg.

きかった(図4)。

大腿四頭筋モーメントは、平地歩行で高齢者と健常者間に有意差を認めた(図5)。最大屈曲からの起立では、3群間に有意差がみられた(図6)。

関節障害を持つ高齢者における訓練側と非訓練側の比較において有意差を認めたのは、最大屈曲

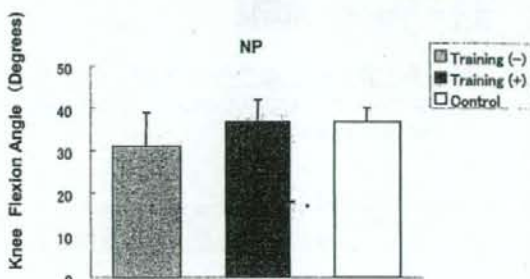


図3. 平地歩行中の膝関節屈曲角度  
Fig. 3. Knee flexion angle during level walking.\* $p<0.05$ .

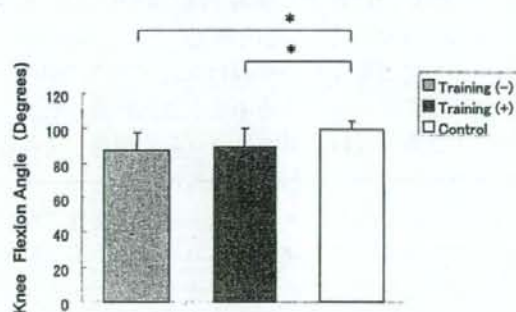


図4. 最大屈曲からの起立中の膝関節屈曲角度  
Fig. 4. Knee flexion angle during rising from maximum flexion.\* $p<0.05$ .

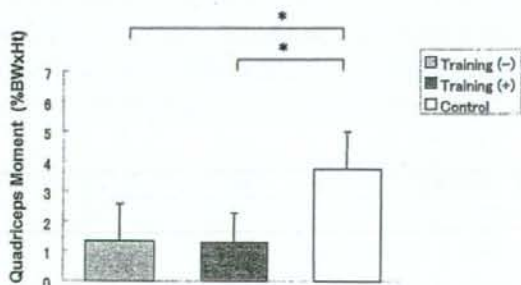


図5. 平地歩行中の大腿四頭筋モーメント  
Fig. 5. Quadriceps moment during level walking.\* $p<0.05$ .

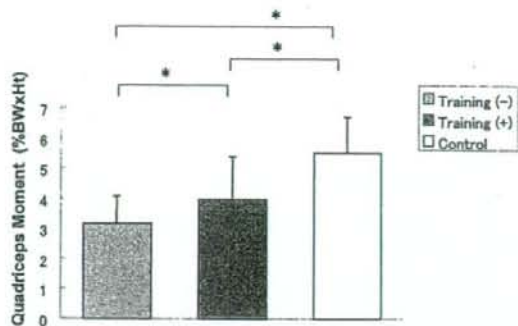


図6. 最大屈曲からの起立中の大腿四頭筋モーメント  
Fig. 6. Quadriceps moment during rising from maximum flexion. \* $p < 0.05$ .

からの起立における大腿四頭筋モーメントのみであり、あとは2群間に有意差を認めなかった。

## 考 察

動作中の関節負荷を臨床評価に用いる手法は、Andriacchiら<sup>1,2)</sup>により発表され、これまでに変形性膝関節症に対する評価をはじめ多くの研究がなされてきた<sup>3-5,7,9,11)</sup>。関節負荷のうち、動作中の指標として重要なのが今回の検討で評価に用いた大腿四頭筋モーメントである。これは膝屈曲モーメントとも呼ばれ、外力により膝を屈曲しようとする力を矢状面に投影した際算出されるモーメントである。このモーメントは、実際の動作において外力に拮抗する大腿四頭筋力に相当するため、動作中の大腿四頭筋活動の指標とされている。人工膝関節置換術後の大腿四頭筋力が臨床成績を反映することが知られていることから<sup>12,13)</sup>、大腿四頭筋の評価は臨床的機能評価の一つとして重要である。

変形性関節症を有する高齢者では、平地歩行、最大屈曲からの起立動作でも健常者に比べ膝関節屈曲角度および大腿四頭筋モーメントが減少していることが明らかになった。関節障害における大腿四頭筋モーメントはHurwitzら<sup>4,9)</sup>によって報告されているように、大腿骨-脛骨角 (Femoro-Tibial Angle : FTA) に代表される下肢のアライメントや、関節変形の重症度、疼痛などに影響を受けることが知られている。今回、より負荷の大きい最大屈曲からの起立動作において、その差が顕著であったことは、これらの関節変形や疼痛な

どの関与が大きいと考えられる。最大屈曲からの起立動作は、床上生活の多い本邦では頻度の高い日常生活の一つであり、この動作における大腿四頭筋モーメントの低下は高齢者の日常生活における活動性が低下するひとつの誘因と考えると興味深い。さらに、定期的な筋力訓練を行った側で最大屈曲からの起立動作における大腿四頭筋モーメントが有意に増大していた (図4)。これは筋力トレーニングにより動作中の大腿四頭筋活動が改善したことを示唆している。徒手検査では筋力に明らかな差を認めなくても実際の動作では筋活動に差を認めることから、本研究でもちいた動作解析装置による関節負荷の計測は、高齢者の関節障害を評価する方法として有意義であると考えられた。特に、床からの立ち上がりなど日常頻に用いられる動作において有意に筋活動を改善できる点は、等尺性および等張性の大腿四頭筋訓練の臨床上的有用性を示している。

膝関節の変形や筋力低下から生じる変形性膝関節症の治療においては、医療経済学的な観点からも手術療法や薬物療法、装具療法に頼った治療戦略よりも、運動療法による身体諸機能の改善ないしは維持によるADLの改善へのアプローチが重要であると考えられる。変形性膝関節症患者の運動療法は、従来から大腿四頭筋を中心とした膝関節伸展筋力増強トレーニングの効果が報告され、臨床現場においても重要視されてきた。しかし、その実質的な臨床効果を検証した報告はこれまで見られなかった。関節軟骨の変性などにより静的支持機構の破壊がみられる変形性膝関節症患者においては膝関節のみならず下肢全体の動的な安定性が必要とされる。そのため、局所的な筋力増強トレーニングは効果的な運動療法と考えるにくい。しかしながら、膝関節疾患の運動療法としては、通常物理療法による消炎鎮痛処置とともに局所のトレーニングである大腿四頭筋訓練を処方される場合が多い。しかし、ヒアルロン酸の関節腔内注射や非ステロイド抗炎症薬 (NSAIDs) の投与などにより膝関節痛が軽減されると、十分な四頭筋訓練がなされる前に通院を中断してしまう患者も多く見受けられる。これは、単に患者サイドの自覚の問題ではなく、トレーニングを正確に評価するシステムが確立されていないために訓練の重要