

- Rheumatol 17 : 647-52, 2005
- 24) 中条 仁, 遠藤博之, 小坂士朗・他 : 東北地方における変形性膝関節症の疫学. 東北整災誌 10 : 23-27, 1996
 - 25) 大森 豪, 古賀良生, 瀬川博之・他 : 変形性膝関節症に対する 21 年間の疫学的縦断調査—松代検診 2000 の経験. 膝 26 : 243-246, 2001
 - 26) 大森 豪, 古賀良生, 日向野行正・他 : 変形性膝関節症に対する疫学調査—松代膝検診の検討. 別冊整形外科 42 : 7-11, 2002
 - 27) Panush R, Hanson C, Caldwell J, et al : Is running associated with osteoarthritis? An eight-year follow-up study. J Clin Rheumatol 1 : 35-39, 1995
 - 28) Peach CA, Carr AJ, Loughlin J : Recent advances in the genetic investigation of osteoarthritis. Trends Mol Med 11 : 186-191, 2005
 - 29) Roos EM : Joint injury causes knee osteoarthritis in young adults. Curr Opin Rheumatol 17 : 195-200 : 2005
 - 30) Sandmark H, Vingard E : Sports and risk factors for severe osteoarthritis of the knee. Scand J Med Sci Sports 9 : 2790284, 1999
 - 31) Schouten JSAG, van den Ouweland FA, Valkenburg HA : A 12 year follow up study in the general population on prognostic factors of cartilage loss in osteoarthritis of the knee. Ann Rheum Dis 51 : 932-937, 1992
 - 32) Segawa H, Omori G, Koga Y : Long-term results of non-operative treatment of anterior cruciate ligament injury. Knee 8 : 5-11, 2001
 - 33) Sharma L, Song J, Felson DT, et al : The role of knee alignment in disease progression and functional decline in knee osteoarthritis. JAMA 286 : 188-195, 2001
 - 34) Slemenda C, Brandt KD, Heilman DK, et al : Quadriceps weakness and osteoarthritis of the knee. Ann Intern Med 127 : 97-104, 1997
 - 35) Sowers M, Lachance L : Vitamins and arthritis. The roles of vitamins A, C, D, and E. Rheum Dis Clin North Am 25 : 315-32, 1999
 - 36) Spector TD, Nandra D, Hart DJ, et al : Is hormone replacement therapy protective for hand and knee osteoarthritis in women? The Chingford Study. Ann Rheum Dis 56 : 432-434, 1997
 - 37) 須藤敬弘, 宮本 憲, 田島正捨・他 : 変形性膝関節症の疫学調査. 整形外科 50 : 1033-1038, 1999
 - 38) 渡辺博史, 古賀良生, 大森 豪・他 : 変形性膝関節症の自然経過と運動療法. MB Med Reha 63 : 15-21, 2006
 - 39) Yoshida S, Aoyagi K, Felson DT, et al : Comparison of the prevalence of radiographic osteoarthritis of the knee and hand between Japan and United States. J Rheumatol 29 : 1454-1458, 2002
 - 40) Yoshimura N, Nishioka S, Kinoshita H, et al : Risk factors for knee osteoarthritis in Japanese women ; Heavy weight, previous joint injuries, and occupational activities. J Rheumatol 31 : 157-162, 2004
 - 41) Zhang Y, McAlindon TE, Hannan MT, et al : Estrogen replacement therapy and worsening of radiographic knee osteoarthritis. The Framingham Study. Arthritis Rheum 41 : 1867-1873, 1998
 - 42) Zhang Y, Xu L, Felson DT, et al : Comparison of the prevalence of knee osteoarthritis between the elderly Chinese population in Beijing and whites in the United States. The Beijing Osteoarthritis Study. Arthritis Rheum 44 : 2065-2071, 2001

MEDICAL BOOK INFORMATION 医学書院

今日の診療プレミアムVol.16 ハイブリッドDVD-ROM版 新規購読専用

●DVD-ROM 2006年
定価74,550円(本体71,000円+税5%)
[ISBN4-260-00281-3]

- ・医学書院のベストセラー書籍12冊を収録
- ・インターネット時代に応じた新しいユーザーインターフェイスを追求
- ・オンラインユーザー登録でハードディスクにすべてを格納して使用可能
- ・Vol.16では収録データ4冊を最新データに更新

変形性膝関節症の痛みと運動の効果

大森 豪* 田中正栄** 西野勝敏** 齊藤麻里子**

Summary

変形性膝関節症(膝 OA)は膝関節の加齢性疾患であり、40歳以降男女とも年齢とともに発生率が上昇する。本症の発症・進行には機械的因子が大きく関与しており、疫学調査や生体力学的研究からは大腿四頭筋力低下や膝内反変形、スラスト運動などが risk factor として報告され、このことが膝 OA に対する筋力強化を中心とした運動療法の根拠となっている。しかし、通常の生活動作でも膝関節には体重の数倍の荷重負荷が作用することから、膝 OA に対する運動療法を考える場合、膝関節への荷重負荷が少ない内容を選択する必要がある。近年、普及しつつある水中運動はその点で推奨される運動と考えられる。

Lecture points

- 変形性膝関節症(膝 OA)は膝の加齢性疾患であり、発症率は60歳台では30~40%、70歳台では40~50%、80歳台では60%以上にX線上の膝 OA が認められる。
- 膝 OA の risk factor は機械的因子、生化学的因子、遺伝的因子に大別され、相互が関連しているが、現状では機械的因子の影響が1番大きいと考えられる。
- 膝 OA に影響する機械的因子としては、大腿四頭筋力低下、膝内反変形、スラスト運動などがあげられる。
- 膝 OA に対して運動療法をおこなう場合、膝関節に対する荷重負荷の影響を考慮することが重要である。

Key words

変形性膝関節症 加齢性疾患 機械的因子 大腿四頭筋力低下 荷重負荷

はじめに

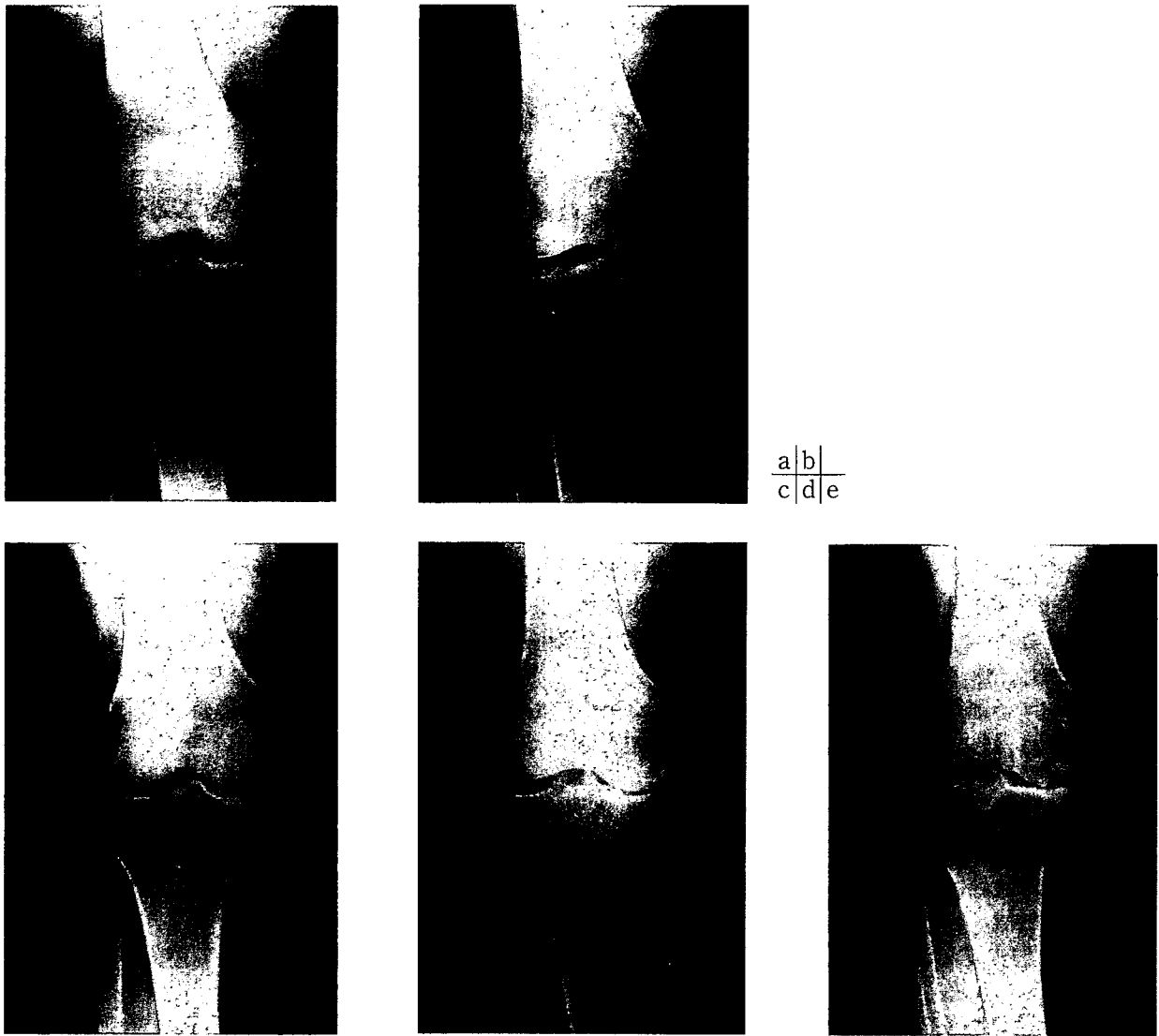
高齢化社会が進むにつれて、単に生きている期間を示す「平均寿命」から、健康で生活できる期間、すなわち「健康寿命」への関心が高まっている。従来から、健康の維持増進目的での適度な運

動はその効果が認識されているが、近年、「健康スポーツ」として中高年者に広く普及するとともに、「運動療法」として内科疾患や脳血管疾患、骨関節疾患の治療やリハビリテーションに積極的に導入されるようになってきた。

ところで、膝関節は人間の下肢の中央に位置し、

* OMORI Go/新潟大学超域研究機構

** TANAKA Masaеi, NISHINO Katsutoshi, SAITOU Mariko/新潟県健康づくり・スポーツ医科学センター



図① 内側型変形性膝関節症の X 線病期分類
 a : Grade-0, b : Grade-I, c : Grade-II, d : Grade-III, e : Grade-IV
 X 線上の病期分類で Grade-II 以上を膝 OA ありと定義している。

起立歩行やランニング、ジャンプといった日常生活や運動時に要としての重要な機能を果たしている。しかし、最近、中高年者の中で健康スポーツや運動療法に取り組んでいるが、膝の痛みが困るといった声を耳にすることが多い。その原因として一番多いのが、変形性膝関節症とよばれる膝関節の加齢性疾患である。

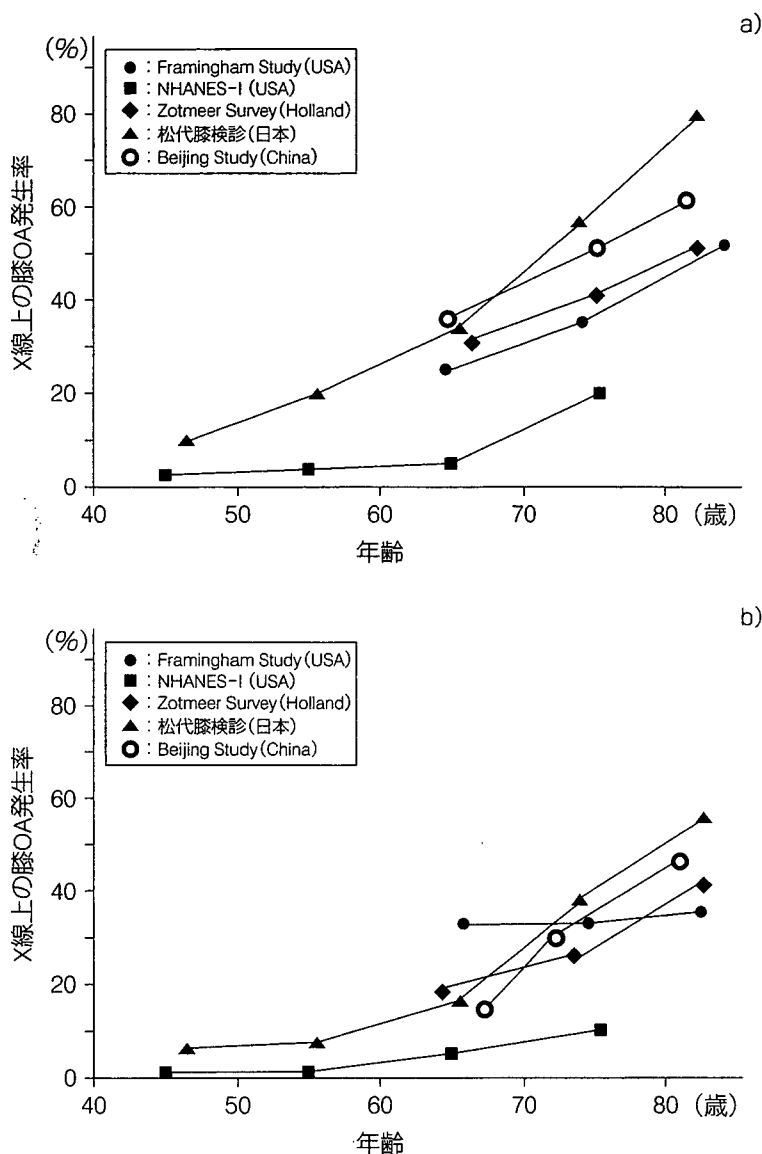
本稿では、変形性膝関節症（以下膝 OA）の病態と本症に対する運動の影響と効果について概説する。

1. 膝 OA の病態と臨床症状

1) 膝 OA の病態と発生頻度

膝 OA は、加齢によって膝関節軟骨の摩耗変性と骨棘形成、軟骨下骨の骨硬化が生じ、膝関節の機能低下と形態変化を生ずる慢性疾患である。膝 OA の診断は、後述する臨床症状とは無関係に単純膝 X 線によりなされる(図①)¹⁾。本症の発生頻度については、男女とも年齢の増加とともに 40 歳以降発症率が増加し、とくに 60 歳台では 30~40%、70 歳台では 40~50%、80 歳台では 60%

- 膝 OA はおもに内側に変形と疼痛がみられる内側型膝 OA と外側に病変がみられる外側型膝 OA があるが、日本人の場合、下肢が O 脚であるため、内側型が 90%を占める。
- 膝関節痛は、関節軟骨の摩耗・変性により露出した軟骨下骨への荷重によるストレスや半月板の変性・断裂、関節炎により肥大増殖した滑膜などにより生ずる。



図② 疫学調査による変形性膝関節症の発症率
a: 女性, b: 男性

以上に膝 OA が認められる²⁾³⁾。また、各年代では女性が男性にくらべて 1.5~2.5 倍膝 OA の割合が高くなっている (図②)。ちなみに、平成 18 年度のわが国の人口のうち 60 歳以上は約 3,450 万人であり、仮に 60 歳以上の膝 OA の発症率を 40% とすると約 1,380 万人が X 線上膝 OA と診

断されることになる。さらに、膝 OA の有症状率は約 30%といわれており、これから計算すると約 400 万人がつぎに述べる膝の痛みなどの症状を有していると推定される。膝 OA には、おもに内側に変形と疼痛がみられる内側型膝 OA と外側に病変がみられる外側型膝 OA があるが、日本人の

- 関節腫脹は、軟骨の変性摩耗や荷重による機械的ストレスに対する反応性滑膜炎により増殖した滑膜から関節液が大量に産生されて関節内に貯留することにより生じる。
- 膝 OA の発症・進行には多数の因子が関与しているが、これらは機械的因子、生化学的因子、遺伝的因子に大別される。

表① 過去に報告されている変形性膝関節症の危険因子

危険因子	X線上の膝 OA 発症への影響	相対危険度
職業活動	膝に負担がかかる労働	1.7-3.4
運動活動	強度の高い運動をおこなう選手、かつて激しい運動をおこなっていた選手	1.3-6.5
	運動強度が低い種目または趣味レベルの運動（危険度↓）	定量データなし
膝の故障	靭帯損傷、軟骨損傷、半月板損傷	5.2-14.0
	半月板切除手術	2.6-4.8
膝アライメント	内反膝変形（内側型膝 OA）	4.0
	外反膝変形（外側型膝 OA）	2.0
筋力	大腿四頭筋力低下（↑危険度）	定量データなし
喫煙習慣	喫煙習慣あり	0.7
人種	黒人女性	2.1
	日本人	1.9
	中国人（女性/男性）	1.5/0.9
肥満	高 BMI	3.2-34.7
骨量	高 BMD	1.1-2.3
栄養素	ビタミン C 摂取	0.3
	ベータカロチン	0.4
	低ビタミン D	1.02-2.9
性ホルモン	エストロゲン使用	0.3-3.3

(Omori G, 2005²⁾より引用)

場合、内側型が90%以上を占め、この背景にはもともと日本人の下肢がO脚であること（内反膝）が影響している。

2) 膝 OA の臨床症状と日常生活への影響

膝 OA の代表的な症状は、①関節痛、②関節可動域の制限、③関節腫脹である。膝関節痛は、関節軟骨の摩耗・変性により露出した軟骨下骨への荷重によるストレスや半月板の変性・断裂、関節炎により肥大増殖した滑膜などにより生ずる。疼痛は安静時には少なく、膝の屈伸や立ち上がり、歩行や階段昇降といった荷重動作時にみられる。可動域制限は膝関節周囲の筋肉や靭帯など軟部組

織の拘縮、関節軟骨の摩耗・欠損や大腿骨および脛骨自体の変形による関節形状の変化、さらには関節炎による疼痛などが原因で生ずる。おもに伸展と屈曲の制限が起こるが、伸展制限（屈曲拘縮）は脚長差による歩容の悪化につながり屈曲制限は正座やしゃがみ込み、立ち上がり動作に影響を与える。関節腫脹は、軟骨の変性摩耗や荷重による機械的ストレスに対する反応性滑膜炎により増殖した滑膜から関節液が大量に産生されて関節内に貯留することにより生ずる⁴⁾。

内側型膝 OA の場合、初期（Grade-II）では通常の日常生活では膝の愁訴は少ないが、長距離歩行や長時間の起立、さらには運動後に膝内側の軽

- 膝 OA の発症・進行に影響を与える機械的因子として、大腿四頭筋力低下、「O脚」の原因である膝内反変形、歩行時に出現するスラスト現象があることを明らかにした。
- 膝関節の支持性を獲得するためには、大腿四頭筋を中心とした膝関節周囲筋の筋力強化による膝関節への負荷軽減と関節安定性の向上が最も効果的である。

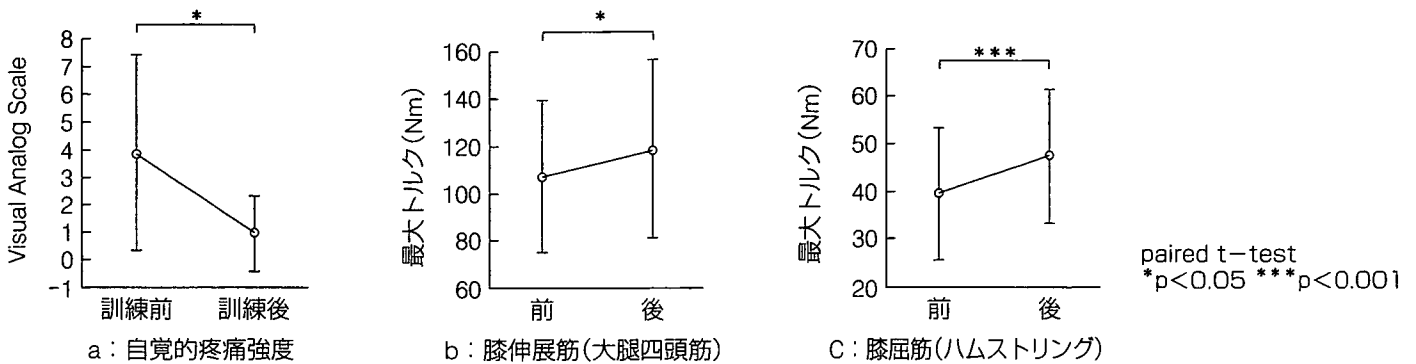


図3 8名の膝OA患者に対しておこなった水中運動の効果

- a: VAS (Visual Analogue Scale) による疼痛の変化
- b: Biodex による膝伸展筋力 (大腿四頭筋) の変化
- c: Biodex による膝屈筋筋力 (ハムストリング) の変化

い痛みが生じたり軽度の関節腫脹が出現する。中期 (Grade-III) になると日常生活動作のなかで、座位からの立ち上がりや階段昇降時などに膝痛を感じるようになり関節腫脹の頻度も多くなる。また、正座やしゃがみ込みなどの深屈曲が制限されることが多い。進行期 (Grade-IV) では、膝関節は骨の変形のために高度の内反を呈するようになる。起立歩行時だけでなく単なる膝の屈伸でも疼痛が強くなり、さらに、関節可動域制限も高度となり正座やしゃがみ動作は不可能となるだけでなく伸展制限も出現し日常生活は大きく障害される。

3) 膝 OA の危険因子としての機械的因子の重要性

膝 OA の発症・進行には多数の因子が関与しているが、これらは膝関節への荷重負荷や関節安定性などが関係する機械的因子、骨・軟骨代謝や炎症反応、栄養にかかわる生化学的因子、人種や性別にかかわる遺伝的因子に大別される。これらの因子については、これまでに疫学調査をはじめとした多くの研究によりいくつかの要因が明らかに

されているが不明な点も多い(表1)。しかし、現状では日常生活動作における膝関節への荷重負荷を中心とした機械的因子が膝 OA に最も影響を与えていると考えられる。

われわれは、新潟県の一地域において20年以上にわたり膝 OA の長期住民調査をおこない、さらに従来取り組んできた生体力学的研究を含めた検討から、膝 OA の発症・進行に影響を与える機械的因子として、大腿四頭筋力低下、「O脚」の原因である膝内反変形そして歩行時に出現する膝の「横ぶれ」を示すスラスト現象があることを明らかにした⁵⁾⁶⁾。なかでも大腿四頭筋力は疫学調査の横断的解析から40歳以降男女とも年齢とともに低下し、さらに膝 OA との関連性では膝 OA 群で大腿四頭筋力が有意に低下していた⁷⁾。また、大腿四頭筋力は膝内反変形やスラスト現象の出現とも関係していることから膝 OA に影響する機械的因子としてきわめて重要な役割を果たしており、このことが次項に述べる膝 OA に対して運動療法が推奨される1つの根拠になっている。

2. 膝 OA に対する運動療法の効果と問題点

1) 膝 OA に対する運動療法の効果

膝 OA に対する運動療法の目的は、膝関節の2つの大きな機能である「可動性」と「支持性」の回復にある。可動性の回復には、自動的および他動的な可動域訓練やストレッチによる筋肉や腱・靭帯といった軟部組織の拘縮改善がおこなわれる。これに対して、膝関節の支持性を獲得するためには、大腿四頭筋を中心とした膝関節周囲筋の筋力強化による膝関節への負荷軽減と関節安定性の向上が最も効果的であり、さらに運動による体重減少に伴う膝への荷重負荷の軽減や全身の代謝改善による膝関節への効果も考えられている。具体的な運動の内容については、患肢挙上(straight leg raising: SLR) や枕つぶしといった単純なものからウォーキング、ジョギング、ダンスなど全身運動を伴うもの、さらに、器具を用いたマシントレーニングやステーションナルバイクまでさまざまな内容があり、いずれの方法でも一定の有効性が報告されている^{8)~12)}。

2) 膝 OA に対する運動療法の問題点と推奨される方法

冒頭でも述べたように膝関節は下肢の中心に位置する荷重関節である。一般に歩行時は体重の1~2倍、階段昇降時は2~3倍、ランニング時は3~4倍、ジャンプ動作では体重の5倍以上の荷重が膝関節にかかるとされている。したがって、膝 OA の治療のみならず全身の健康増進目的や内科系疾患の治療目的で、運動療法としてジョギング、エアロビクスなどランニングやジャンプ動作を含む内容をおこなう場合、膝関節にはかなりの負荷がかかることになる。さらに、関節軟骨や半月板の変性が生じている膝 OA の場合にはその影響はさらに大きくなり、このことが中高年者において運動をはじめたのにもかかわらず膝痛で困る原

因となっている。

したがって、膝 OA を有する人の場合、膝関節に荷重負荷をかけないような運動を選択することが必要となる。具体的な内容としては、全身的運動としては低速度でのウォーキング、ステーションナルバイクなどがよく、下肢筋力に対しては SLR などが推奨される。

このなかで、近年、下肢への荷重負荷の問題が少ない運動として水中運動が広まっている。水中運動は、浮力、粘性(抵抗)、水圧といった水の特性を利用し、関節への荷重負荷軽減、水の抵抗による筋力強化、水圧による静脈還流と腫脹軽減といったメリットがある。さらには、気泡浴などによるストレス解消などの心理的効果も報告されている^{13)~15)}。われわれのおこなった調査においても3ヵ月の水中運動により膝 OA の患者さんで膝周囲筋力と疼痛の有意な改善が得られていた(図③)。また、水中運動は血圧降下やコレステロール低下など内科的疾患の治療としても有用であり、今後膝 OA を有する人の全身的な運動療法としても有用な選択肢の1つであると考えられる。

おわりに

変形性膝関節症は、健康増進や本症を含めた各種疾患の治療目的で運動をおこなう中高年者にとって障害の1つとなる。膝 OA を有する人の場合、膝関節への荷重負荷を軽減する運動を選択することが必要である。

文献

- 1) Lawrence JS, Bremner JM, Bier F: Osteoarthritis. Prevalence in the population and relationship between symptoms and x-ray changes. *Ann Rheum Dis* 25: 1-24, 1966
- 2) Omori G: Epidemiology of knee osteoarthritis. *Acta Med Biol* 53: 1-12, 2005
- 3) Felson DT, Naimark A, Anderson J *et al*: The prevalence of knee osteoarthritis in the elderly. The Framingham osteoarthritis

- study. *Arthritis Rheum* 30 : 914-918, 1987
- 4) 齊藤知行, 高橋 晃 : 変形性膝関節症. 最新整形外科学大系 17 膝関節・大腿. 越智光夫編, 中山書店, 東京, 2006, pp 218-227
 - 5) 大森 豪, 古賀良生, 日向野行正ほか : 変形性膝関節症に対する疫学的縦断調査—松代検診の検討. 別冊整形外科 42 : 7-11, 2002
 - 6) 大森 豪, 古賀良生, 遠藤和男 : 疫学調査から見た内側型変形性膝関節症の発症要因. 日整会誌 80 : 927-932, 2006
 - 7) 渡辺博史, 古賀良生, 大森 豪ほか : 変形性膝関節症の自然経過と運動療法. *MB Med Reha* 63 : 1-7, 2006
 - 8) Evcik D, Sonel B : Effectiveness of a home-based exercise therapy and walking program on osteoarthritis of the knee. *Rheumatol Int* 22 : 103-106, 2002
 - 9) Dias RC, Dias JM *et al* : Impact of an exercise and walking protocol on quality of life for elderly people with OA of the knee. *Physiother Res Int* 8 : 121-130, 2003
 - 10) Mikesky AE, Mazzuca SA *et al* : Effects of strength training on the incidence and progression of knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum* 55 : 690-699, 2006
 - 11) 池田 浩, 黒澤 尚 : 変形性膝関節症に対する歩行訓練の効果. *MB Med Reha* 63 : 45-50, 2006
 - 12) Durmus D, Alayli G, Canturk F : Effects of quadriceps electrical stimulation on clinical parameters in the patients with knee osteoarthritis. *Clin Rheumatol* 26 : 674-678, 2006
 - 13) 山本利春, 日暮 清 : 水の原理と特性. アクアティックリハビリテーション, ナップ, 東京, 2003, pp 19-26
 - 14) Wang TJ, Belza B, Elaine TF *et al* : Effects of aquatic exercise on flexibility, strength and aerobic fitness in adults with osteoarthritis of the hip or knee. *J Adv Nurs* 57 : 141-152, 2007
 - 15) Hinman RS, Heywood SE *et al* : Aquatic physical therapy for hip and knee osteoarthritis : results of a single-blind randomized control trial. *Phys Ther* 87 : 32-43, 2007

半月板の機能とバイオメカニクス

大森 豪

Key words : meniscus of the knee joint, load distribution, joint stability, biomechanics

はじめに

半月板は脛骨大腿関節面上で内側と外側に1つずつ存在し、C型の形状を有する線維性軟骨である。組織学的には、細胞成分は線維芽細胞と軟骨細胞で構成されるが量は少なく、主として細胞外の線維基質であるコラーゲン線維(I型)が外周に沿って円周状に配列するcircumferential fiberとそれに直交するように配列する少量のradial tie fiberから構成されている¹⁾²⁾(図1)。

半月板の機能については、1948年にFairbankが半月板切除術後にX線上の膝関節変形が高度に認められることから、半月板の荷重分散機能について報告したのが最初である³⁾。現在までのところ、半月板の機能としては、①荷重分散機能、②関節安定性への関与、③関節潤滑および関節軟骨への栄養供給などが指摘されているが、十分に解明されていない点も多い。

本稿では、このうち荷重分散機能と関節安定性への関与について、主にバイオメカニクスの観点から概説する。

荷重分散機能

膝関節において脛骨大腿関節は後方傾斜を伴う平面状の脛骨関節面と球状の大腿骨関節面から構成されるため、互いの接触形態は直接的には点状あるいは線状となる。半月板は脛骨プラトーの辺縁に位置し、膝関節運動に伴い前後左右に移動することにより、大腿骨顆部に対する可変性の受け皿となり、接触面積を飛躍的に増大させることで荷重分散機能を果たしている。半月板の可動性は、左右方向より前後方向で大きく、また内側半月板より外側半月板のほうが大きい。膝関節屈伸時は内外側一緒に前後方向に動き、回旋時には内外側の一方が前方、他方が後方に動くことで内外旋運動に対応している。

近年のMRIを用いた研究では、立位荷重時には内側半月板の前角部で前方に7.1mm、中節部で内方に3.6mm移動するのに対して外側半月板はそれぞれ9.5mm、3.7mmと移動量が大きくなっている⁴⁾(図2)。

このような半月板の可動性により、関節面の

図1 半月板の組織学的構造におけるコラーゲン線維の配列

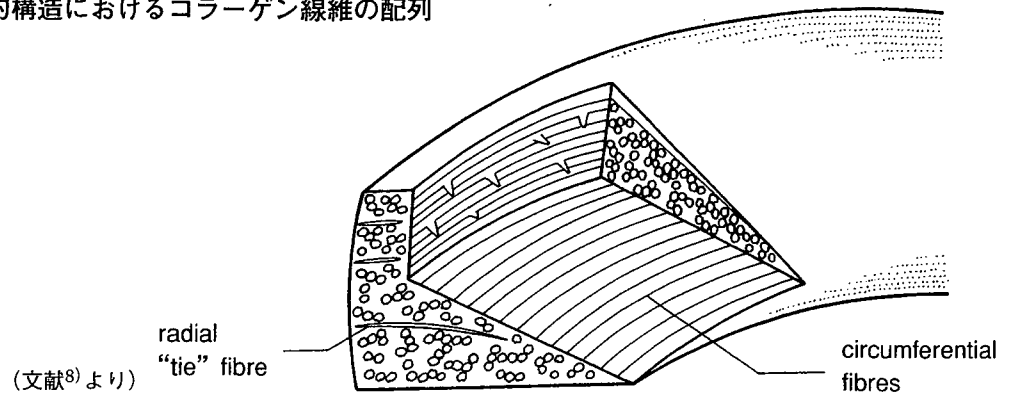
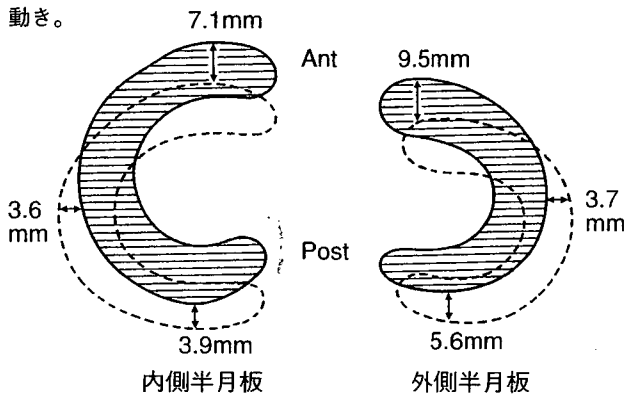


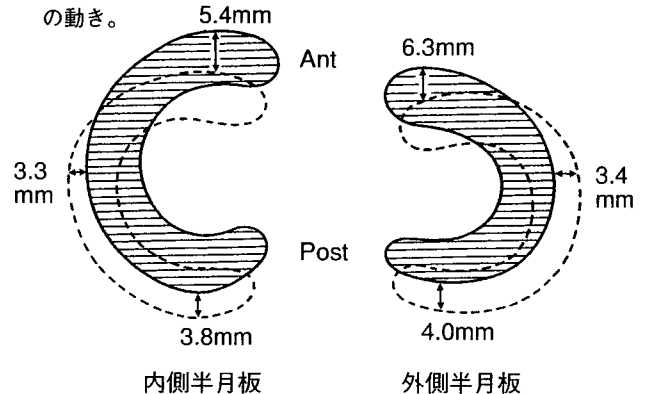
図2 半月板の可動性

(文献⁴)より

①: 立位荷重時で膝伸展(点線)→屈曲(横線)に伴う半月板の動き。



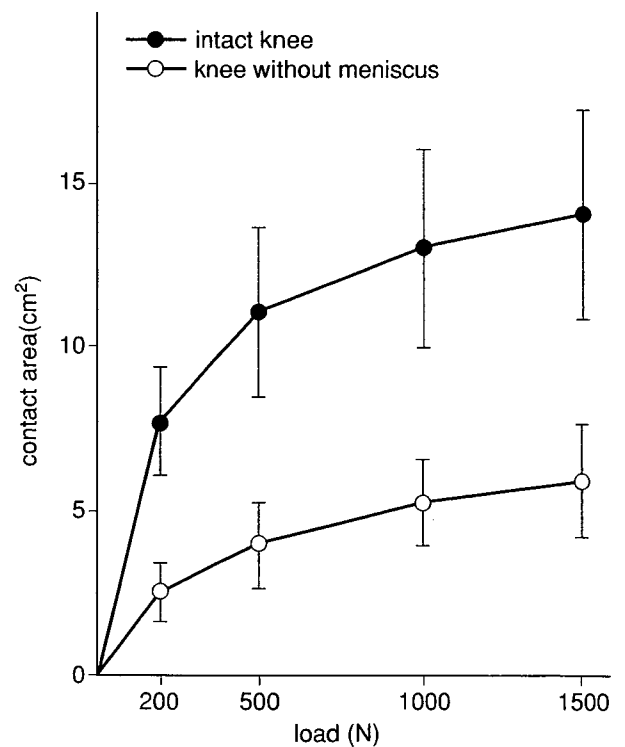
②: 坐位非荷重時で膝伸展(点線)→屈曲(横線)に伴う半月板の動き。



接触面積は増大するため荷重分散が生じ接触圧力は減少する。Ahmedら⁵)は切断肢を用いた研究で、脛骨大腿関節の接触面は伸展位から屈曲につれて減少しかつ後方へ移動すること、荷重を増加させると全体の接触面積が増加することを示した。そして、膝関節に加わる荷重のうち50~70%が半月板を介して伝達されていると述べている。

また、接触面積に関してKurosawaら⁶)は、膝伸展位において半月板切除前後で接触面積は1/3に減少し、接触圧力は逆に2~3倍に増加、膝関節の弾性係数も2.5倍に増加することを示した(図3)。Fukubayashiら⁷)は、関節接触面の約70%を半月板が占めており、内側コンパートメントより外側コンパートメントでその割合が大きいこと(図4)、さらに、半月板切除により接触圧力は2倍に増加することを示している。

図3 半月板切除による膝関節接触面積の変化



(文献⁶)より

図4 膝関節接触面における内側および外側半月板の占める割合

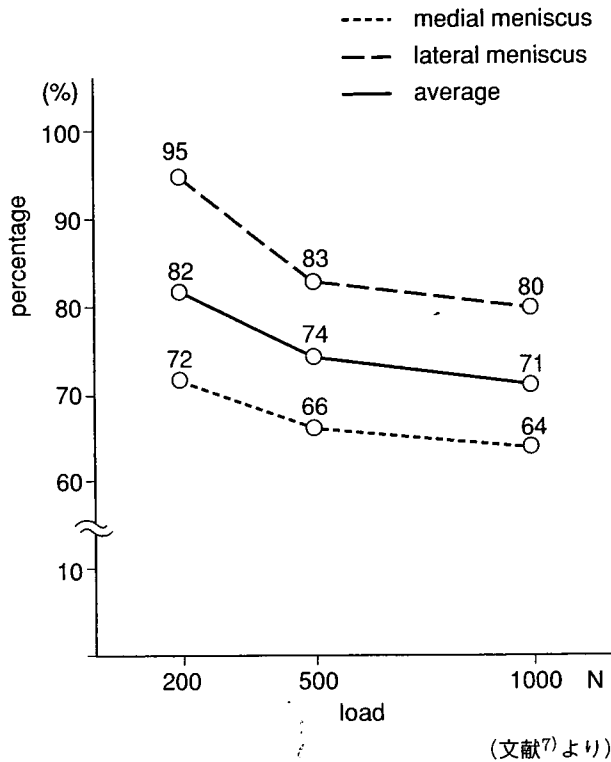
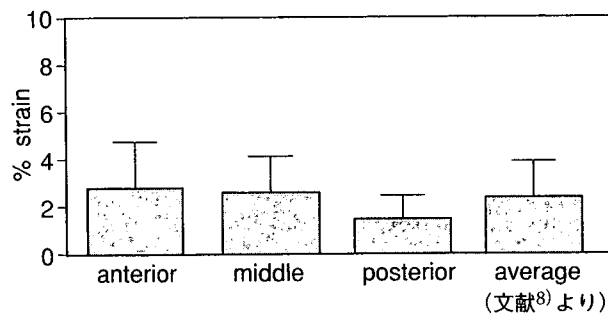
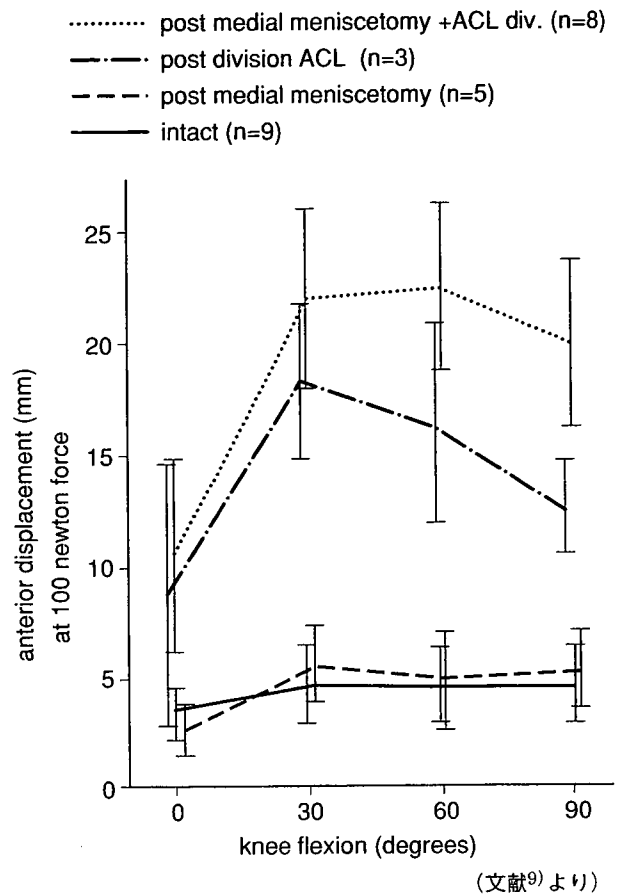


図5 膝荷重時における内側半月板各部位のhoop stress



また、荷重下の半月板では前・後角部での強固な固定と既述した半月板の円周方向に配列するcircumferential fiberにより、放射方向への移動は制限され、円周方向へのストレス(hoop stress)が生じることが知られている。切断肢を用いた研究では、hoop stressは半月板の部位や膝の屈曲角度によって異なることが示され、また、半月板損傷などでhoop stressの機構が破綻すると、半月板の荷重伝達機能に大きく影響すると考えられている⁸⁾(図5)。

図6 100Nの前方引き出しにより生じる脛骨前方移動量の変化



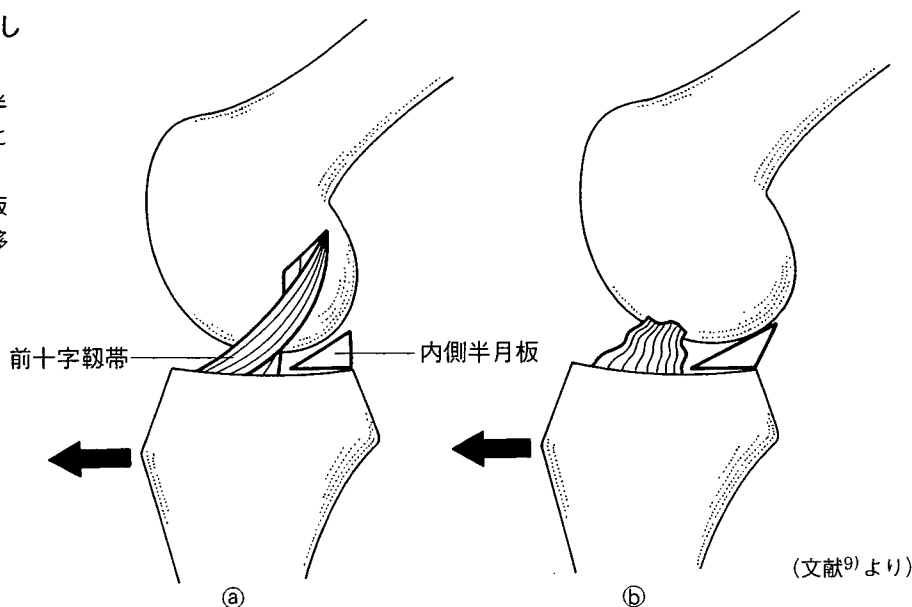
関節安定性への関与

膝関節は顆状関節であり骨性の適合性は良好ではないため、十字靭帯や側副靭帯に代表される靭帯性組織が発達し、primary stabilizerとして関節の安定性を維持している。したがって、正常の膝関節では半月板が膝関節の安定性に大きく関与することはないが、靭帯機能が低下した場合にはsecondary stabilizerとして関節安定性に寄与すると考えられている。Levyら^{9),10)}は切断肢を用いた実験を行い、前十字靭帯が正常の状態では内側半月板を切除しても膝関節の前方不安定性に変化はないが、前十字靭帯を切離した場合内側半月板切除を追加すると脛骨の前方移動量がさらに増加することを示した(図6)。これは、前十字靭帯損傷の状態では内側半月板

図7 secondary stabilizerとしての内側半月板の機能

㉑：前十字靭帯が正常な場合は内側半月板に負荷がかかる前に前十字靭帯によって前方制動が起こる。

㉒：前十字靭帯損傷時には内側半月板が楔状に大腿脛骨関節に介在し前方移動を抑制する。



(文献⁹⁾より)

が大腿骨と脛骨の間に楔状に介在して脛骨の前方移動を抑制するために生じる現象であるが(図7)、もともと膝屈伸に伴う前後移動量が大い外側半月板では同様の現象はみられない。また、内側半月板切除の影響は膝屈曲位でより大きいことから、半月板のsecondary stabilizerとしての膝関節安定性への関与は、後方関節包なども含めた部分的なものと考えられる。

また、近年の研究によれば半月板は膝関節の内外側の安定性や回旋運動にも影響を与えていることが報告されているが、いまだ明らかになっていない点も多い¹¹⁾。今後、dynamic MRIなど*in vivo*での動的な解析が進むことにより、半月板の機能に関する新しい知見が得られることが期待される。

◆ 文 献 ◆

- 1) 黒坂昌弘：半月損傷. 膝のスポーツ傷害. 医学書院, 東京, 1995, p35-67.
- 2) 滝 正徳, 木村雅史：半月板のバイオメカニクス. 最新整形外科学体系17, 膝関節・大腿. 中山書店, 東京, 2006, p310-315.
- 3) Fairbank TL：Knee joint changes after meniscectomy. J Bone Joint Surg, 30-B：664-670, 1948.
- 4) Vedi V, Williams A, Tennant SJ, et al：Meniscal

movement. J Bone Joint Surg, 81-B：37-41, 1999.

- 5) Ahmed AM, Burke DL：In-vitro measurement of static pressure distribution in synovial joints—Part 1：Tibial surface of the knee. J Biomech Eng, 105：216-225, 1983.
- 6) Kurosawa H, Fukubayashi T, Nakajima H：Load-bearing mode of the knee joint：physical behavior of the knee joint with or without menisci. Clin Orthop Relat Res, 149：283-290, 1980.
- 7) Fukubayashi T, Kurosawa H：The contact area and pressure distribution pattern of the knee. A study of normal and osteoarthrotic knee joints. Acta Orthop Scand, 51：871-879, 1980.
- 8) Jones RS, Keene GCR, Learmonth DJA, et al：Direct measurement of hoop strains in the intact and torn human medial meniscus. Clin Biomech, 11：295-300, 1996.
- 9) Levy IM, Torzilli PA, Warren RF：The effect of medial meniscectomy on anterior-posterior motion of the knee. J Bone Joint Surg, 64-A：883-888, 1982.
- 10) Levy IM, Torzilli PA, Gould JD, et al：The effect of lateral meniscectomy on motion of the knee. J Bone Joint Surg, 71-A：401-406, 1989.
- 11) 寺田宏平, 竹中 慎, 池内 健ほか：関節荷重下での膝半月板のバイオメカニクス. 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 23：185-190, 2002.

装具の基本となるバイオメカニクスとウィンタースポーツにおける装具

変形性膝関節症用装具のバイオメカニクス

—機能的装具効果の検討事例—

西野勝敏^{*1}, 長崎浩爾^{*2}, 大森 豪^{*3}
古賀良生^{*4}, 田中正栄^{*1}, 山本智章^{*5}

はじめに

変形性膝関節症(膝 OA)は、中高齢者の運動器疾患の1つである。国の重点施策である「活力ある高齢社会の実現」には、自立した生活を送るために運動器の健康を維持する必要がある。本症の発症因子の解明と適切な対応が求められている。膝 OA の発症因子について渡辺ら¹⁾は21年間の膝 OA の疫学調査から歩行立脚初期にみられるスラスト(図-1)が関与し、さらに大腿脛骨角増加による膝内反変形および膝関節屈曲拘縮による伸展制限との関連性を報告している。運動学的にはスラストによる急激な膝内反は膝関節内側への荷重負荷を増加し、膝 OA の発症と進行に影響すると考えられるが、近年では膝 OA の機能的装具による動的矯正機能としてのスラスト抑制への効果が注目されている。

膝 OA の装具には足底板やサポーター式軟性装具、継ぎ手や支柱を用いた機能的装具(膝装具)があり、その効果についてさまざまな研究がなされている²⁾。中でも膝装具については非常に多くの機種が使用されている。膝装具の効果については、疼痛改善など臨床成績の向上についての報告^{3,4)}が多くみられるが、運動学的・動力的観

点から詳細に研究した報告は少ない。運動学的・動力的効果の研究で最も多くみられるのがビデオカメラの映像やセンサーなどの検出器具を用いた分析⁵⁾である。しかし、これらは大腿骨と脛骨で構成される膝関節運動を直接評価したものではない。また、X線を用いて骨の動態変化を直接検討している報告^{6,7)}も散見されているが、測定環境から運動範囲や荷重条件に制限があり、生理的な状態を反映できていない。

われわれも膝装具の効果について詳細を把握しようとして運動学的・動力的観点でさまざまな分析を試みている。本稿では、その研究結果を紹介し今後の課題について述べる。

膝装具効果の検討

1. 三次元下肢アライメントへの影響⁸⁾

a. 方法

膝装具による下肢アライメントへの影響を検討するために、KneeCAS(株式会社 LEXI)を用いて下肢アライメントの三次元的変化を図-2の手順で解析した。まず立位荷重状態の下肢を正面と60度斜角の2方向からX線撮影する。次にX線像をコンピュータに取り込み、骨の特徴点をデジタル化したデータを基に骨モデルをX線像へ重ね合わせをして骨の三次元情報を得る。最後に図-3で示した下肢アライメントの評価パラメータを算出する。パラメータは膝関節の三次元的アライメントとして大腿脛骨角、立位屈曲角、脛骨回旋角を

*1 新潟県健康づくり・スポーツ医科学センター
*2 北陸電力科学研究所
*3 新潟大学超域研究機構
*4 新潟こばり病院
*5 新潟こばり病院

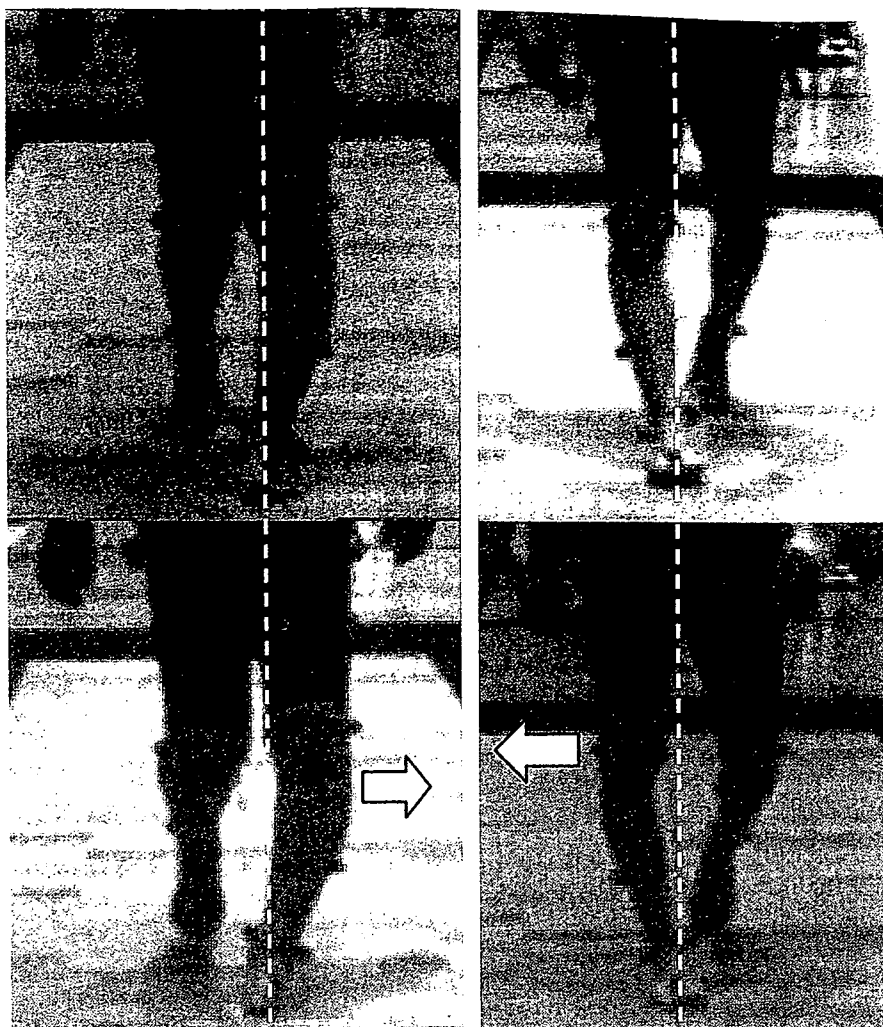


図-1 スラストの代表例
左図が女性右膝，右が男性左膝。

求めた。さらに、大腿骨頭中心と足関節中心とを結んだ線を下肢荷重線とし、この線の脛骨関節面への通過点(下肢荷重線通過点)や関節裂隙角などを評価した。

b. 対象

膝装具は、外反矯正を目的とした内側ヒンジ型(図-4a)と外側ヒンジ型(図-4b)の異なる機構の2種を用いた。被験者は全て内反膝OAの女性で、内側ヒンジ型装着群が5名(平均70.6歳)、外側ヒンジ型装着群が7名(平均68.3歳)であった。

c. 結果と考察

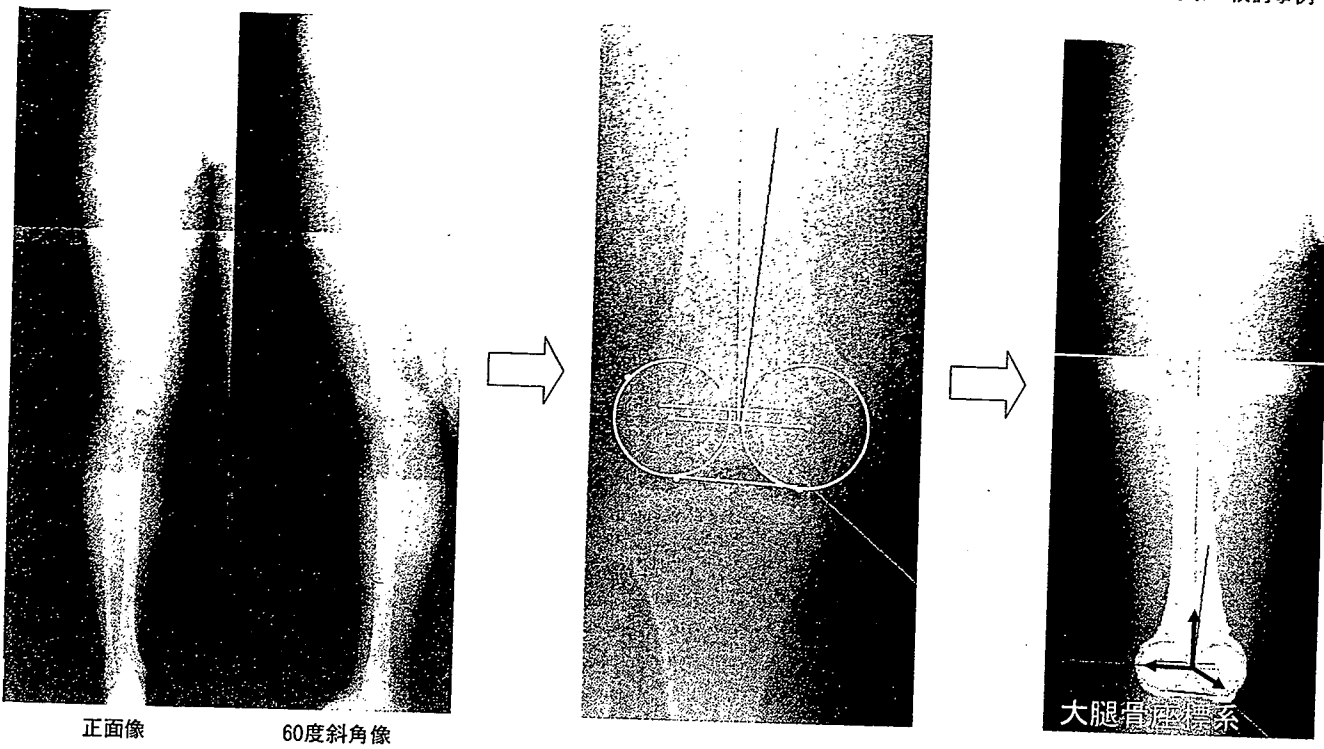
表-1に膝装具装着による下肢アライメントの評価パラメータの変化を示す。2種とも膝装具装着により、大腿脛骨角の外反、脛骨回旋角の外旋、

関節裂隙角の外反がみられ、ほぼ全てのパラメータが膝OAを矯正する方向へ変化していた。下肢荷重線通過点も膝装具によって外側へ位置したことから、膝OA特有の内側型荷重が軽減されている可能性が示された。この結果から、膝装具は下肢アライメントの異常環境を矯正する作用があることがわかったが、機構の違いによる作用機序までは検討できなかった。

2. 歩行中の膝運動への影響⁹⁾

a. 方法

動的環境での効果を検討するため、膝装具を用いた歩行を分析した。膝OAの歩行分析にはMotion capture system¹¹⁾や加速腕センサー¹²⁾などを用いた報告があるが、われわれは図-5に示す



正面像

60度斜角像

a. X線像の取り込み

b. 骨特徴点のデジタイズ

c. 骨モデルの重ね合わせ

図-2 三次元下肢アライメント解析の手順(文献8より引用)

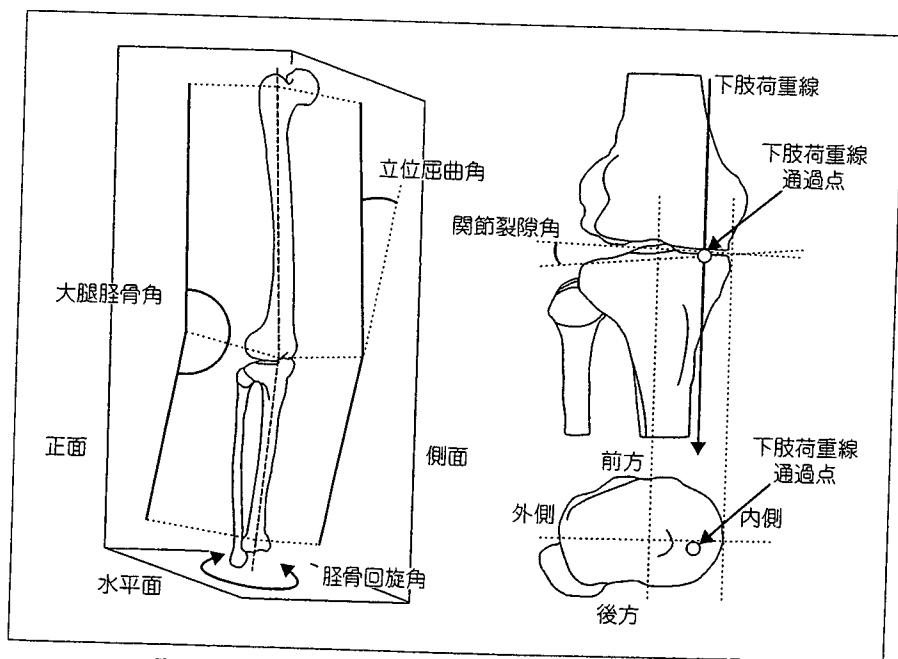


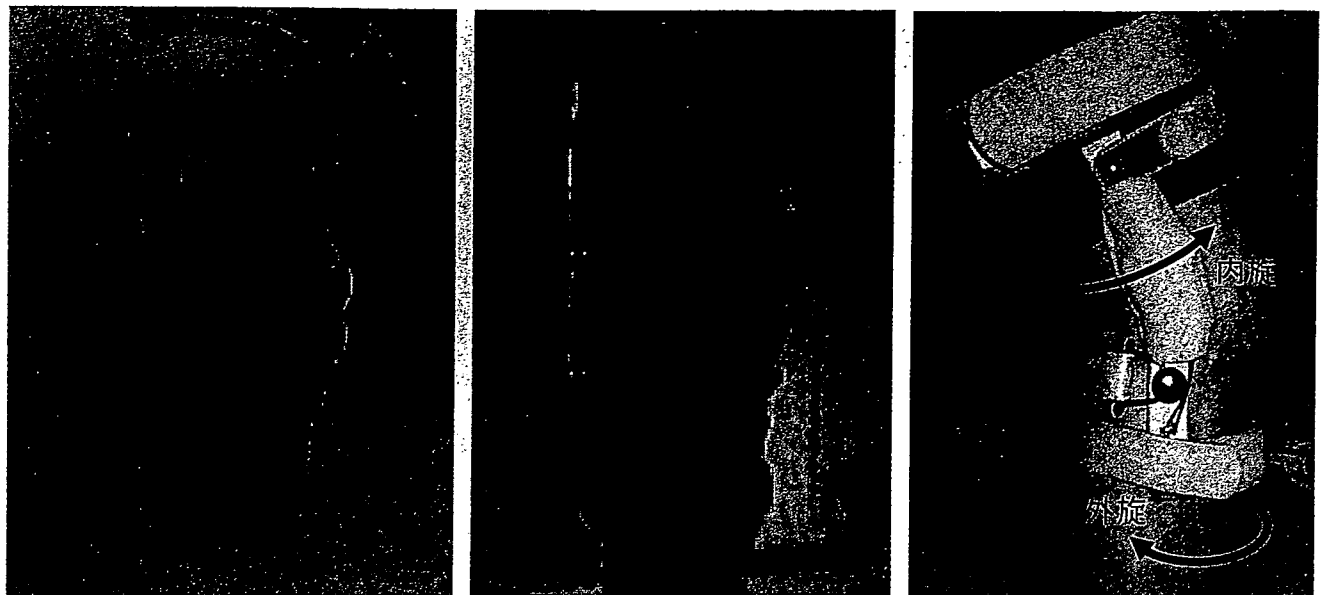
図-3 下肢アライメントの評価パラメータ(文献8より引用)

易的かつ三次元分析可能な6自由度電気角度(8~10)を用いた。この角度計を用いた先行研究(10)では、膝OAの運動範囲は狭くなる傾向にあり、スラストを脛骨の内反、外旋、内側移動をう三次元的な運動と定義した。そのため、動的

環境下での効果を運動学的に評価するには、三次元的な手法が必要不可欠である。

b. 対象

対象は、内反膝OAの女性7名(平均65.2歳)とした。用いた膝装具は外側ヒンジ型(図-4b)と



a. 内側ヒンジ型

b. 外側ヒンジ型

c. 回旋矯正型

図-4 膝 OA 用機能的装具

表-1 装具装着による下肢アライメントの評価パラメータの変化(文献8より引用)

評価パラメータ	内側ヒンジ型	外側ヒンジ型
大腿脛骨角[度]	外反 1.0 ± 1.6 度	外反 2.2 ± 2.0 度
立位屈曲角[度]	伸展 4.4 ± 2.2 度	屈曲 3.7 ± 3.3 度
脛骨回旋角[度]	外旋 2.9 ± 3.6 度	外旋 4.6 ± 7.4 度
関節裂隙角[度]	外反 1.2 ± 2.6 度	外反 2.1 ± 2.3 度
下肢荷重線通過点	脛骨面の外側前方	脛骨面の外側後方

し、膝装具の有無をヒンジ部の有無に置き換えて測定した。

c. 結果と考察

膝装具によって運動範囲が狭くなったが、とくに装着前にみられたスラストの特徴である立脚初期の内反が全対象で消失していた。この結果から、膝装具は静的環境のみならず動的環境下でも矯正作用があることが判明した。

3. 膝装具の作用機序の検討¹³⁾

a. 対象と方法

膝装具の機構の違いによる矯正への作用機序を調査するため、直接矯正を与える場所の接触圧を測定した。測定には感圧導電ゴムセンサー(イナバゴム社)を用い、膝装具が当たる皮膚表面に貼

付した。用いた膝装具は、内側ヒンジ型と外側ヒンジ型の異なる機構の2種(図-4a,b)とした。

b. 結果と考察

測定の結果、内側ヒンジ型では大腿部の外側で高い接触圧がみられたが、外側ヒンジ型では大腿部と脛部の内側で高い接触圧がみられた(図-6)。これから、内側ヒンジ型はストラップの外側への引っ張りによる三点曲げで、外側ヒンジ型はヒンジの膝への押し付けによる三点曲げの外反矯正機序を有することが推察された。しかし、ストラップやヒンジによる圧力は被験者のサイズや形態に依存するため、さらなる検証が必要と考える。

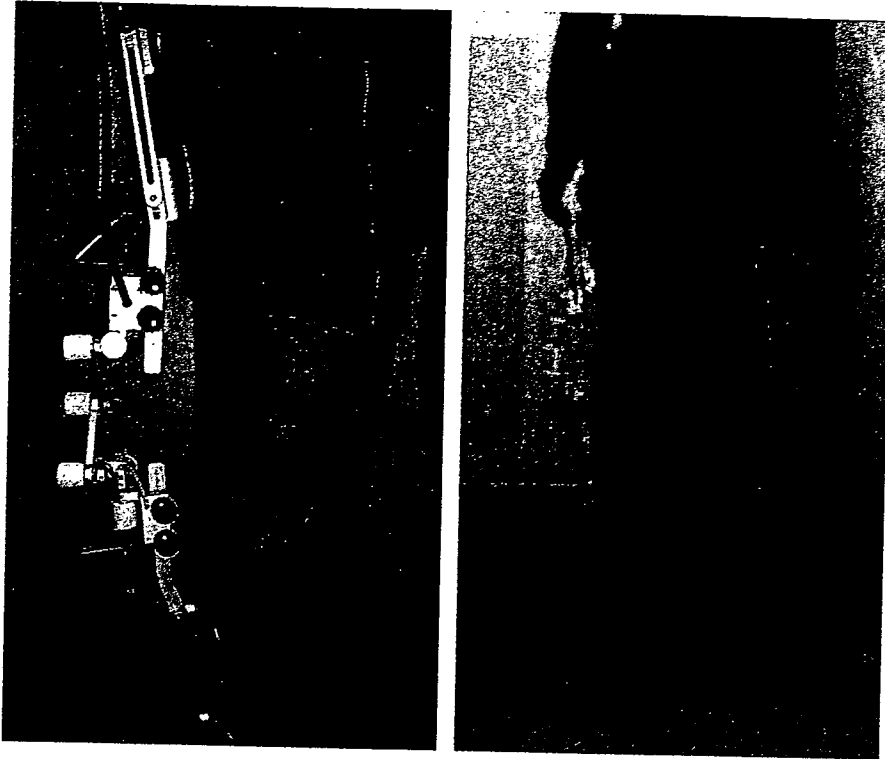


図-5 6自由度電気角度計(文献8~10より引用)

4. Motion capture system による検討

a. 方法

Motion capture system で用いる反射マーカーに硬球を埋め込み、それを下肢に貼付して2方向X線撮影する(図-7a)。このマーカーを貼付したまま、装具有無における歩行運動を測定した。Motion capture system は、VICON (Vicon Motion Systems 社)を用いた。

解析では1で述べた静的三次元下肢アライメント解析の他に、X線像上に投影された反射マーカーの位置と下肢アライメント解析で決定した骨座標系との位置関係を求めた(図-7b)。このデータと歩行運動データとを組み合わせることで歩行空間内に下肢骨を求め、大腿脛骨運動を推定した(図-7c)。この処理によって歩行中の床反力や下肢荷重線と下肢骨との関係や回旋運動などの三次元情報を算出することなどができる。

b. 対象

対象は、内反膝OA患者2名で、45歳男性1名と57歳女性1名とした。膝装具は、膝回旋運動を矯正することを目的とした回旋矯正型(図-4c)を用いた。

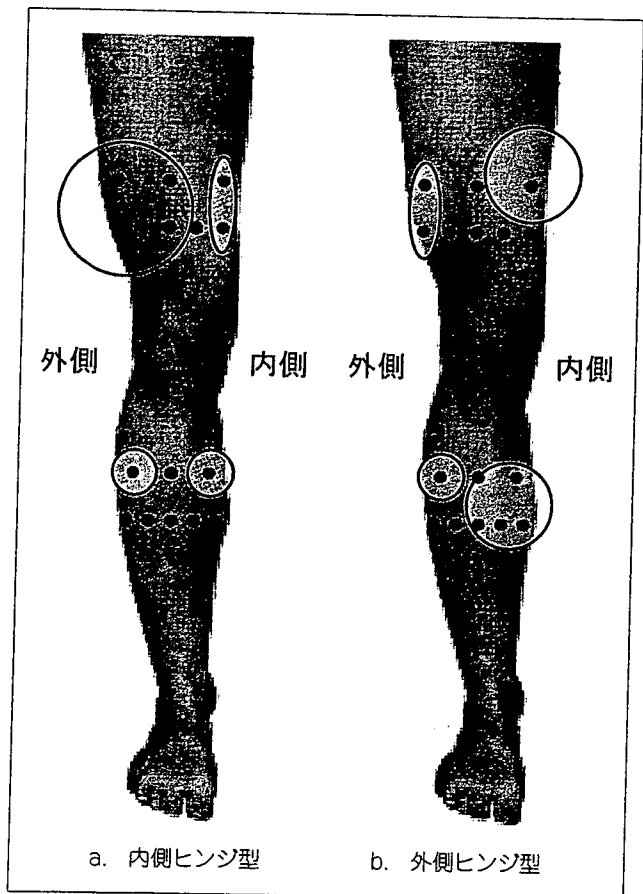


図-6 膝装具による接触圧分布(文献13を改変)
円は接触圧が生じた位置と大きさを示す。

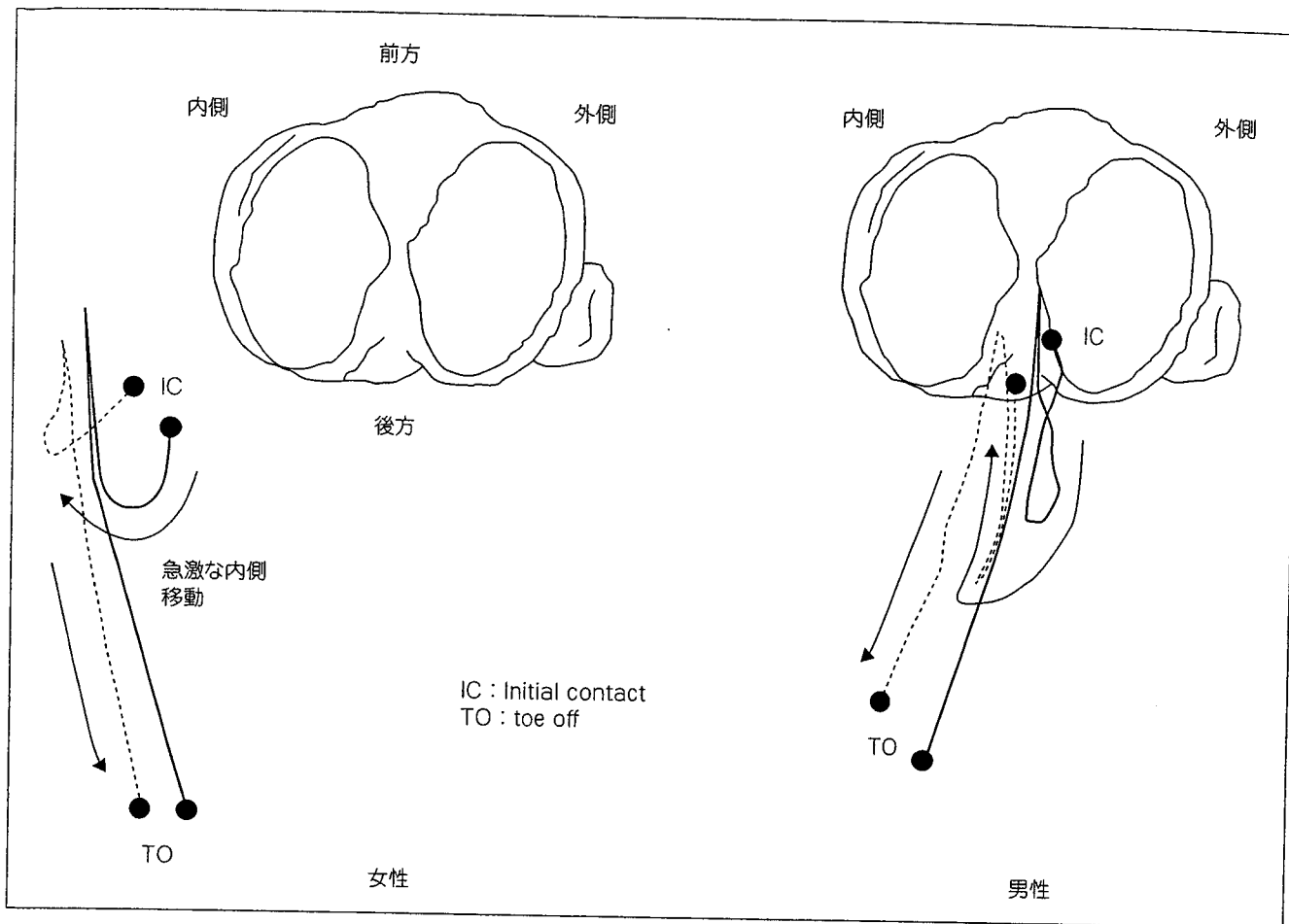


図-9 立脚期における下肢荷重線通過点の軌跡
破線が装具なし、実線が装具あり。

c. 結果と考察

静的下肢アライメントでは、装具装着により全対象で大腿脛骨角の外反(女性1.1度、男性0.3度)と下肢荷重線通過点の外側移動(女性5.6%、男性8.8%)がみられた。回旋は、女性が内旋3.0度、男性が外旋2.2度で一定の方向性がないため、静的環境における回旋矯正の効果を判定し得なかった。

動的な歩行運動の結果である図-8は、大腿骨の内外顆軸を脛骨関節面に投影したもので、この軌跡の追跡による大腿骨回旋の解析を目的とした。装具装着によって回旋が外旋方向へわずかに増加していることが判明した。図-9は、立脚期における下肢荷重線通過点の軌跡を示したものである。女性の結果では脛骨内側を大きく超えて位置しており、さらに立脚初期ではスラストがみられた。装具装着によって下肢荷重線通過点が全体的に外

側へ移動し、スラストもわずかに低減した。

これらの結果から、まだ検証例は少ないが異なる方法を組み合わせて運動と力学的環境変化を詳細に解析することで膝装具の効果を検討できる可能性があると考えている。

装具研究の今後の課題

最近の膝装具は機能性だけでなく、耐久性や軽量性、デザイン性を求めたものも出始めている。その中で機能性については疼痛軽減と膝 OA 進行の防止を目的に膝 OA 患者の利益に基づいて備えるべきものであるため、その効果について運動学的・動力学的検証を詳細に行う必要がある。検証に用いる方法も膝 OA の運動学的・動力学的特徴が三次元的に渡っていることから、三次元的手法が必要不可欠である。われわれは、この観

点から静的かつ動的環境下における膝装具の効果を三次元的に分析するために、いくつか方法論を開発して検討してきた。しかし、作用機序の検討で示したように、各個体にあった膝装具に必要な機能的要素を科学的に分析できてはいない。

高齢社会で多くの患者が生活する今日において、膝OAの増加に伴って装具の利用も増え、商業ベースにおいて多くの開発がなされている。しかし、膝OA患者に対して装具の効果を説明するだけの科学的な検討が少ないことは社会的な問題と考えている。装具開発ならびに装具療法を与える関係者は、さまざまな方法を駆使して長期的かつ詳細に分析し続ける姿勢が重要である。

謝 辞

膝装具の検討に協力していただいたアルケア社とSmith&Nephew社、(株)啓愛義肢材料販売所、(株)田村義肢製作所に感謝の意を示す。

文 献

- 1) 渡辺博史ら：変形性膝関節症の自然経過と運動療法. MB. Medical Rehabilitation 63 : 1-7, 2006.
- 2) 戸田佳孝ら：変形性膝関節症に対する装具療法研究の近年の進歩について. 整形外科 57(5) : 497-502, 2006.
- 3) Finger, S. et al. : Clinical and biomechanical evaluation of the unloading brace. The Journal of Knee Surgery 15(3) : 155-159, 2002.
- 4) Brouwer, R. W. et al. : Brace treatment for osteoarthritis of the knee : A prospective randomized multi-centre trial. Osteoarthritis and

Cartilage 14(8) : 777-783, 2006.

- 5) Pollo, F. E. et al. : Reduction of medial compartment loads with valgus bracing of the osteoarthritic knee. The American Journal of Sports Medicine 30(3) : 414-421, 2002.
- 6) Komistek, R. D. et al. : An in vivo analysis of the effectiveness of the osteoarthritic knee brace during heel-strike of gait. The Journal of Arthroplasty 14(6) : 738-742, 1999.
- 7) Nadaud, M. C. et al. : In vivo three-dimensional determination of the effectiveness of the osteoarthritic knee brace : A multiple brace analysis. The Journal of Bone & Joint Surgery 87A(S2) : 114-119, 2005.
- 8) 寺島和浩ら：変形性膝関節症に対する装具療法の生体力学的検討. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 20 : 459-463, 1999.
- 9) 大森 豪ら：変形性膝関節症用装具の効果に対する運動学的検討. 日本機械学会第4回バイオエンジニアリングシンポジウム講演論文集 : 221-222, 1995.
- 10) 古賀良生ら：変形性膝関節症の運動解析. 関節外科 16(3) : 327-333, 1997.
- 11) 瀧上秀威ら：三次元動作解析装置 VICON を用いた内側型変形性膝関節症患者の膝の歩行時側方動揺. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 17 : 213-217, 1996.
- 12) 木藤伸宏ら：加速度センサーを用いた変形性膝関節症の歩行時下腿運動の解析. 理学療法学 31(1) : 86-94, 2004.
- 13) 長崎浩爾ら：変形性膝関節症に対する装具療法の効果発現機序に関する生体力学的検討. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 21 : 247-252, 2000.

スポーツ
鍼灸
ハンドブック

経絡テストの実際とその応用

好評
発売中!

スポーツ鍼灸ハンドブック

経絡テストの実際とその応用

編著●向野義人(福岡大学スポーツ科学部)

◆スポーツ鍼灸の理論的背景から経絡テストを使いこなすためのノウハウ、さらに競技別の症例をあげた治療の実際までを、豊富なイラストでわかりやすく解説した実践ハンドブック。

◎B5判・184頁・2色刷/定価3,990円(本体3,800円+税5%) ISBN978-4-8306-5137-3

Ⓐ 文光堂 <http://www.bunkodo.co.jp> 電話113-0033 東京都文京区本郷7-2-7 tel.03-3813-5478/fax.03-3813-7241

Endochondral Ossification Signals in Cartilage Degradation During Osteoarthritis Progression in Experimental Mouse Models

Hiroshi Kawaguchi*

Sensory and Motor System Medicine, Faculty of Medicine, University of Tokyo, Tokyo 113-8655, Japan.

(Received January 26, 2008; Accepted January 28, 2008)

Osteoarthritis (OA), one of the most common skeletal disorders characterized by cartilage degradation and osteophyte formation in joints, is induced by accumulated mechanical stress; however, little is known about the underlying molecular mechanism. Several experimental OA models in mice by producing instability in the knee joints have been developed to apply approaches from mouse genetics. Although proteinases like matrix metalloproteinases and aggrecanases have now been proven to be the principal initiators of OA progression, clinical trials of proteinase inhibitors have not been successful for the treatment, turning the interest of researchers to the upstream signals of proteinase induction. These signals include undegraded and fragmented matrix proteins like type II collagen or fibronectin that affects chondrocytes through distinct receptors. Another signal is pro-inflammatory factors that are produced by chondrocytes and synovial cells; however, recent studies that used mouse OA models in knockout mice did not support that these factors have a role in the central contribution to OA development. Our mouse genetic approaches found that the induction of a transcriptional activator *Runx2* in chondrocytes under mechanical stress contributes to the pathogenesis of OA through chondrocyte hypertrophy. In addition, chondrocyte apoptosis has recently been identified as being involved in OA progression. We hereby propose that these endochondral ossification signals may be important for the OA progression, suggesting that the related molecules can clinically be therapeutic targets of this disease.

Keywords: Apoptosis; Cartilage; Chondrocytes; Endochondral Ossification; Hypertrophy; Osteoarthritis.

* To whom correspondence should be addressed.
Tel: 81-33815-5411; Fax: 81-33818-4082
E-mail: kawaguchi-ort@h.u-tokyo.ac.jp

Osteoarthritis (OA) and the experimental mouse models

OA, which affects all joints of the body, is characterized by two aspects: one is cartilage degradation shown as a joint space narrowing on radiographs, and the other is osteophyte formation at the edge of the joints (Fig. 1). Despite significant social demand for more information, risk factors of this disease identified by epidemiologic studies have to date been limited to age, obesity, trauma history, occupation, and gender (Sharma et al., 2007). These factors are closely related to the accumulation of mechanical stress to joints.

In an effort to clarify the mechanisms whereby the mechanical stress leads to OA development, experimental animal models in which joint instability is induced through surgical intervention have been developed in dogs, rabbits, guinea pigs and rats (Bluteau et al., 2002; Hayami et al., 2004; Le Graverand et al., 2002; Lorenz et al., 2005; Matyas et al., 1999; 2002; Pond et al., 1973). Considering that mouse is now the most ideal animal for the molecular study due to recent progress in mouse genetics and the availability of transgenic and knockout mice, we and others have established mechanical instability-induced OA models in mice that are reproducible and resemble human OA, using a microsurgical technique to produce instability in the knee joints. Most popular is the model developed by Glasson's group which involves destabilization of the medial meniscus (DMM) by transection of meniscotibial ligament anchoring the medial meniscus to the tibial

Abbreviations: ACLT, anterior cruciate ligament transection; ADAMTS, a disintegrin and metalloproteinase thrombospondin; COL10, type X collagen; COL2, type II collagen; DDR-2, discoidin domain receptor-2; DMM, destabilization of medial meniscus; IL, interleukin; MMP, matrix metalloproteinase; OA, Osteoarthritis; PG, prostaglandin; RANKL, receptor activator of NF- κ B ligand; TNF- α , tumor necrosis factor- α ; TRAIL, tumor necrosis factor-related apoptosis-inducing ligand.