

解説

最小侵襲人工膝関節置換術 (MIS-TKA)

Minimum Invasive Surgery — Total Knee Arthroplasty (MIS-TKA)

松本 秀男¹, 東 宏一郎¹, 岩本 潤¹¹慶應義塾大学スポーツ医学総合センターHideo Matsumoto¹, Koichiro Azuma¹, Jun Iwamoto¹¹Institute for Integrated Sports Medicine, School of Medicine, Keio University

▶▶ 要旨 ◀◀

最小侵襲人工膝関節置換術 (MIS-TKA) の手術適応, 手術方法について解説する。

手術適応: 関節内の視野が限定されるため, 著しい可動域制限を伴う例, 強度の内外反変形例は適応が難しい。更に著しい骨萎縮を認める症例では, 術中に骨切り面の不整化を生じ易いため, 適応が制限される。

手術方法: 皮膚切開は7~10 cm 程度である。術後の疼痛緩和や早期の機能回復訓練を可能にするため, 大腿四頭筋に対する手術操作を最小限に留める。MIS-TKA 用に開発された手術器械を用いて視野を確保しながら, 独特の骨切り順序で手術を進める。インプラントの挿入, 骨棘の処理などは従来のTKAと同様であるが, 術中に適宜膝関節を伸展・屈曲しながら手術操作を行うこと, window technique と呼ばれる術野を動かしながら確保するテクニックを要することなどがポイントである。

▶▶ キーワード ◀◀ 膝関節, 人工膝関節置換術, 最小侵襲手術

▶▶ Key words ◀◀ knee joint, Total Knee Arthroplasty; TKA, Minimum Invasive Surgery; MIS

はじめに

変形性膝関節症 (OA) や関節リウマチ (RA) などの疾患で膝関節の変形が進むと, 日常生活動作でも著しい疼痛を伴うようになる。しかも変形が重度になると, 投薬, 注射, 装具などの保存的治療では治療が難しくなる。その際に人工関節置換術 (TKA) は変形を矯正し, 疼痛を軽減する極めて有用な手術法である。

TKA もこれまで様々な改良が加えられ, 現在かなり安定した手術成績が得られるようになった。しかし, 侵襲の大きな手術であり, 患者が比較的高齢であることも手伝って, 全身的にも様々な合併症を併発し易い。近年TKAの皮膚切開を小さくして, 更に大腿四頭筋に対する手術操作を最小限に留める最小侵襲人工膝関節置換術 (MIS-TKA) が開発された (図1)。従来のTKAにおける手術侵襲を最低限に抑えながら, これまでと同等の手術成績を得ることが目的である。大腿四頭筋などに対する侵襲は小さければ小さいほど, 術後



図1 最小侵襲人工膝関節置換術 (MIS-TKA)。小さな皮膚切開で, 大腿四頭筋の侵襲を最小限に留めたTKAである。

の疼痛軽減や早期の機能回復には極めて有利である。しかし, 術野が著しく制限されるため, それに伴う問題点をひとつずつ解決していかなければならない。本稿では, その手術適応, 手術方法を紹介する。

手術適応

MIS-TKA は小さい皮膚切開から進入し, しかも大腿

連絡者: 松本秀男 (慶應義塾大学スポーツ医学総合センター
〒160-8582 東京都新宿区信濃町35)
(受稿2009年9月30日/受理2009年12月5日)

四頭筋の侵襲も最小限にするため、関節内の視野や操作範囲が限定される。したがって、関節を動かしながら、最適な屈曲角度で手術を行う必要があるため、著しい伸展制限や屈曲制限のある症例では適応が制限される。また、長期間の運動制限などにより膝蓋腱が線維化して、膝蓋骨低位になった症例も、十分な膝関節外側部の展開が出来ないため、適応を慎重に決定する。高度の変形のために、関節内の広範囲に軟部組織の剥離や骨棘切除を要する症例も適応が難しい。特に通常は内側から関節を展開するため、外側部の剥離や骨棘切除を行うことは容易でなく、高度の外側型 OA への適応には限界があると考えられる。更に、MIS-TKA では関節内の視野を確保するためレトラクターなどによる牽引を多用するため、RA の進行例や長期臥床例などで著しい骨萎縮を認める症例では、術中操作中に骨切り面の不整化を生じやすいので適応を慎重に決定する必要がある。

しかし、MIS-TKA は、手術中に必要と判断した場合には、いつでも皮切や大腿四頭筋に対する切開を追加できる。したがって、術中必要と判断した場合には、無理をせず、通常の状態に戻す勇気を持つことが大切である。

手術方法

皮膚切開

傍膝蓋内側皮膚切開が用いられるが、従来の TKA では、その長さは短くても 12～15 cm 程度必要である。MIS-TKA では、症例によって異なり、皮下脂肪の量、関節の変形や柔軟性の程度などを考慮して決定するが、通常は膝蓋骨の内側で、膝蓋骨のほぼ上縁から関節裂隙の約 2 cm 末梢程度までとする。したがって皮膚切開の長さは 7～10 cm になる (図 2)。皮膚切開の長さは美容的見地ばかりでなく、術後の疼痛や機能

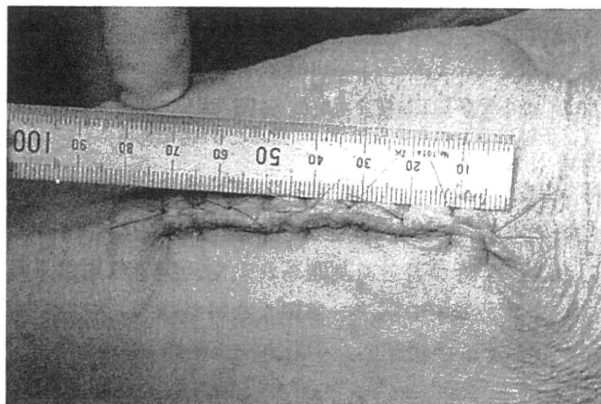


図 2 MIS-TKA の皮膚切開。膝蓋骨のほぼ上縁から関節裂隙の約 2 cm 末梢まで、皮切長は通常 7～10 cm.

回復を考えても可能であれば小さい方が好ましい。しかし、皮膚切開の 1 cm の差が術中の操作性に大きく影響するので、術前に挿入するコンポーネントのサイズなどを術前に検討して、必要なら最初から十分な皮膚切開長を確保しておくほうが、手術が容易である。

いずれにせよ、皮膚切開の長さで最も大切なことは、術中いつでも延長でき、術中に視野が十分得られなかったり、コンポーネントの挿入に困難がある場合には、無理をせず延長することである。

大腿四頭筋の処置

従来の TKA では大腿四頭筋への侵襲が大きく、これが術後の機能回復訓練のスケジュールに大きく影響して来た。したがって、この大腿四頭筋への侵襲を最小限に抑えられれば、術後の疼痛を緩和できるばかりでなく、早期の機能回復訓練が可能になる。MIS-TKA は、この大腿四頭筋への侵襲を最小限に抑えられることが大きな長所である。

まず、皮膚切開の直下で内側関節包を切開し、これを中枢方向に内側広筋の大腿直筋付着部まで進める。ここで切開を止めると Quadriceps Sparing TKA (QS-TKA) と呼ばれる大腿四頭筋に全く侵襲を加えない方法になるが、QS-TKA では、手術に必要な十分な展開が得られないことが多く、通常は内側広筋の下方 (sub-vastus approach と呼ばれる) か内側広筋の中央 (mid-vastus approach と呼ばれる) 方向に関節包切開を延長する。我々の経験では QS-TKA が可能であったのは全症例の 10% であった。これは内側広筋の大腿直筋や膝蓋骨への付着は様々なタイプがあるが、日本人は欧米人に比べて、内側広筋がより末梢に付着するタイプが多いことが原因である。

大腿四頭筋の切開を延長する目安は、関節包を切開した後、膝蓋骨を外側にシフトさせた時に、膝蓋骨が大腿骨の外側顆を乗り越えられるかどうかで決定するとよい。これが乗り越えられないようでは、後の手術操作が著しく不自由になる。また、この sub-vastus または mid-vastus 方向への延長も術中に必要となれば、展開を見ながら随時追加する。

関節の展開

MIS-TKA では視野が限られるため、関節内の展開に工夫を要する。特に骨切り方法とそれに用いるガイドは既存のものをただ小さくして行うだけではなく、根本的な変更を要する。まず、MIS-TKA では膝蓋骨の反転を行わないため、通常の TKA では 90°以上の屈曲位で行っている手術操作も伸展機構の緊張のために屈曲位では行えず、軽度屈曲位や伸展位で行ったほうが容易なことが多い。特に、脛骨近位の骨切り時に後方や外側部の十分な視野が得られにくいことがあり、

その際には伸展位にすると良好な視野が得られる。また、大腿骨前面の骨切りを行う際も、屈曲位では良好な視野が得られにくく、軽度屈曲位で行うと骨切り面を見ながら操作が出来るので安全である。いずれにせよ、術中に適宜膝関節を伸展・屈曲しながら手術操作を行うことが大切である。

更に、MIS-TKAでは視野が小さいため、window techniqueと呼ばれる術野を筋鉤やレトラクターなどで動かしながら確保するテクニックが用いられる。すなわち、膝関節内側の手術操作を行う際には内側を牽引して外側を緩め、外側の手術操作を行う際にはその反対を行う。また、先に述べたように術中に膝の屈曲角度を様々に変化させながら手術を行う。したがって、助手や手洗い看護師の役割は極めて大切であり、術前から十分に手術方法を学習し、習熟しておく必要がある。

関節包を切開したら、まず関節内の視野を確保するため、膝蓋下脂肪体の内側部を中心に一部切除する。膝蓋下脂肪体を切除すると、後に線維化や癒着を生じやすいとする報告もあるので視野を確保するだけに留め、できるだけ温存する。

骨切り

従来のTKAでは、骨切りの順序は、大腿骨、脛骨いずれも、それぞれ十分に展開してから片方ずつ行うが、MIS-TKAでは術野を確保しながら骨切りを進めるため工夫を要する。すなわち、術野を確保するための膝蓋骨のラフカット、大腿骨遠位の骨切り、脛骨近位の骨切り、大腿骨の残り4面の骨切り、これらの操作によりある程度の視野が確保できてから脛骨のステム部やキール部の骨切り、膝蓋骨の最終的な骨切りの順序で行う。また、後方の骨膜剥離や骨棘の切除、外側の骨棘の処理、RAに対する滑膜切除等も、すべての骨切りが終わってから行うと容易である。また、MIS-TKAではすべての手技を順番通り行おうとせず、できることから徐々に視野を確保しながら行う工夫も有用である。

まず、膝蓋骨を置換する場合には、視野を確保するため、その内側部だけを骨切りする(ラフカットと呼ばれる)。骨棘を切除した後、膝蓋骨の外側部はやや厚めに残しながら中央稜までを骨切りし、関節内の視野と膝蓋骨の外側への可動性を確保する。術中に牽引操作などにより膝蓋骨々切り面の不整化を生じる可能性があるため、この時点では膝蓋骨の表面を完全に露出せず、視野を確保するためのラフカットに留める。膝蓋骨の置換を行わない場合には、ラフカットは行わないが、その際には中枢方向にわずかに切開の延長が必要になるため、置換する場合にはこのラフカットをこの時点で行っておくと、より良好な視野が得られる。

次いで、側面から大腿骨遠位の骨切りを専用のガイドを用いて行う。大腿骨遠位骨切りガイドは通常の内・外側顆に当てるT字型のガイドと異なり、L字型で内側顆に当てて骨切りを行う。したがって、内側顆の軟骨や骨欠損が強い症例では、外側顆の高さを考慮して骨切りを行う必要がある。

大腿骨は遠位の骨切りを行った後、残りの骨切りは後回しにして、脛骨近位の骨切りを行う。脛骨の骨切りも専用のガイドを用いて前内方45°から行う。脛骨外側部の視野が十分に得られない症例では、脛骨の骨片を2分割して視野を確保し、徐々に切除を進める。外側部の骨切りは視野が悪いので、手術手技に習熟することが大切である。また、骨切除などは伸展位で行うと容易である。脛骨近位の骨切りが終わると、骨切除した分だけ周囲の軟部組織が緩むため、その後は比較的手術が楽になる。

これを利用して、大腿骨前面や後面、チャンファーの骨切りを行う。その際も大腿骨前面の操作は膝関節伸展位で、後面の操作は屈曲位で行うと良好な視野が得られる。大腿骨の回旋は後顆からの3度外旋位とWhiteside lineを参考に決定する。更に、脛骨のステム部やキール部の骨切り、ラフカットした膝蓋骨の最終的な骨切りを行う。

これらの操作が終了すると、膝関節後方の視野も更に良くなり、後方の軟部組織剥離や骨棘の切除、ある程度の外側の骨棘処理などが可能となるため、この時点でこれらの処置を行う。RAに対する滑膜切除を行う場合は、ここまで骨切りを進めてから行うと、膝蓋上囊の展開も良く、容易である。

インプラントの挿入

骨切りが終了したら通常通りトライアルを挿入し、アラインメントなどを確認してから、インプラントを挿入する(図3)。まず、伸展位で脛骨コンポーネントを挿入した後、屈曲位にして打ち込み、セメント固

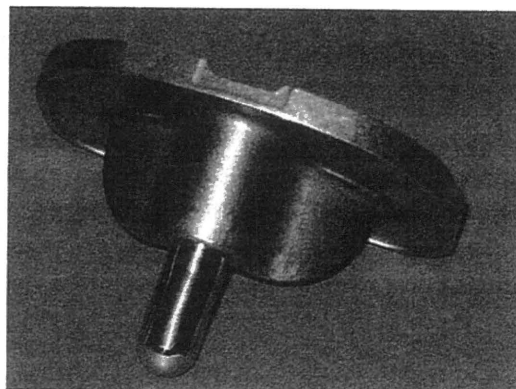


図3 MIS-TKA用の脛骨コンポーネント。ステムを後から挿入できるように設計されている。

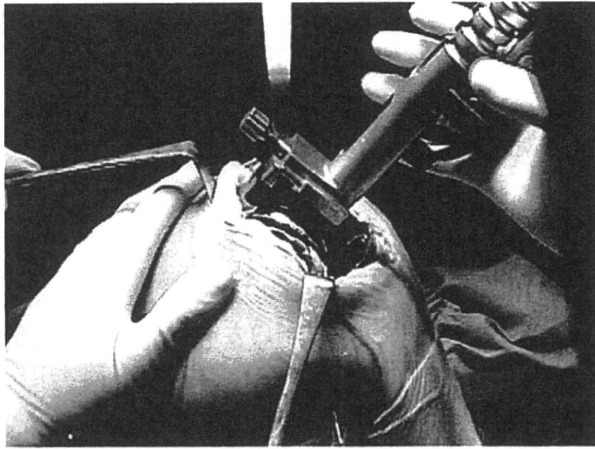


図4 大腿骨コンポーネントの挿入。軟部組織を巻き込まないように十分注意しながらインプラントを挿入することが大切である。

定を行う。次いで、大腿骨コンポーネント、膝蓋骨コンポーネントの順に挿入、セメント固定する。視野が悪い場合には、軟部組織を巻き込まないように十分注意しながらインプラントを挿入することが大切である(図4)。

後療法

術翌日より大腿四頭筋訓練とCPM装置を用いた可動域訓練を開始し、術後3～4日で荷重歩行を許可する。平地歩行訓練、階段昇降訓練、希望により自転車訓練を進め、早ければ10日前後、通常2～3週で退院とする。

おわりに

MIS-TKAはラーニングカーブが強いことが指摘されている。初心者がいきなりMIS-TKAを行うべきではなく、従来のTKAを十分に経験して、膝関節の解剖に熟知し、手術に対する心構えを習得してから行うべきである。また、十分にTKAの経験のある術者も手術器械や手技が大きく異なるため、MIS-TKAの十分な知識とトレーニングを積んでから行うべきであ

る。トレーニングの方法としては、まずMIS-TKAの器械を用いて従来の皮切で手術を行い、器械に十分慣れてから、徐々に皮切や大腿四頭筋への切開を小さくしていく。手技を習熟すれば、手術時間も徐々に短くなるので、正確な骨切りや安全な手術手技を最優先に行うことが大切である。

文 献

- Bonutti, P.M., Mont, M.A., & Kester, M.A. (2004). Minimally invasive total knee arthroplasty. A 10-feature evolutionary approach, *Orthop Clin North Am*, 35, 217-226.
- Laskin, R.S., Beksac, B., Phongjunakorn, A., Pittors, K., Davis, J., Shim, J.C., Pavlov, H., & Petersen, M. (2004). Minimally invasive total knee replacement through a mini-midvastus incision: an outcome study, *Clin Orthop*, 428, 74-81.
- 松本秀男 (2006a). 特集 最小侵襲の人工膝関節置換術 最小侵襲人工膝関節置換術の手術手技と pitfall, 整・災外, 49(2), 101-107.
- 松本秀男 (2006b). 関節手術の最前線 Part 3 最小侵襲人工膝関節置換術, 分子リウマチ, 3(3), 68-71.
- 松本秀男 (2006c). MIS-TKAと learning curve, 骨・関節・靭帯, 19(9), 797-804.
- 松本秀男 (2006d). ナースのための整形外科手術アトラス 膝関節編 第5回変形性膝関節症に対する人工膝関節置換術 MIS, 整形外科看護, 11(8), 5-9.
- 松本秀男・岩本 潤 (2009). 特集/変形性膝関節症のリハビリテーション MIS人工膝関節置換術後リハビリテーション, *MB Med Reha*, 105, 57-61.
- 松本秀男・大谷俊郎・松崎健一郎・原藤健吾・金子大毅 (2006). 大腿四頭筋温存型人工膝関節—手術技法と問題点, 整形外科, 57(1), 84-88.
- 松本秀男・大谷俊郎・須田康文・松崎健一郎 (2006). 特集 変形性関節症の保存療法と MIS II 大腿四頭筋温存型 MIS-TKA, 関節外科, 25(5), 525-530.
- Tria, A.J. Jr. (2003). Minimal incision total knee arthroplasty: early experience, *Clin Orthop*, 416, 185-190.
- Tria, A.J. Jr., & Coon, T.M. (2004). Minimally invasive total knee arthroplasty: importance of instrumentation, *Orthop Clin North Am*, 35, 227-234.

歩行解析による人工膝関節の臨床評価*

名倉武雄¹⁾ 松本秀男²⁾

Key Words : 人工膝関節, 歩行解析, 関節動態, 関節モーメント

はじめに

人口の高齢化に伴い変形性膝関節症の患者数は増加しており, わが国には潜在的なものを含めると約 3,000 万人の患者がいると推定されている。変形性膝関節症が進行し変形が高度となった関節に対しては, いまだ有効な再生医療がなく, 人工膝関節全置換術 (total knee arthroplasty ; TKA) の適応となる。このような背景から TKA は整形外科における最もポピュラーな手術の一つとなっており, 1950 年代に臨床応用されて以来, その手術数は増加している。現在では, わが国で年間約 4 万件, アメリカでは 20 万件以上の手術が行われているとされる。

近年, インプラントデザイン, 材質や手術法の改良により, TKA の進歩は目覚ましいが, さらなる成績向上のために, 実際に設置された人工関節の適切な評価手法が求められている。本稿では, 3 次元歩行解析装置による TKA 患者の臨床評価について紹介する。

3 次元歩行解析装置による患者評価

TKA の術後評価は主に X 線画像により行われるが, これは関節が静止した状態における評価であり, 関節の運動や力学的状態については評価できない。このような背景から関節の運動評価とし

て, X 線の連続画像 (透視) と CAD (computer-aid design) 画像のマッチング (2D-3D registration) を用いた TKA の動態解析 (Kinematics 解析) が盛んに行われている¹⁻⁴⁾。この手法では, TKA の運動を精密 (誤差 1 度以内) に評価することが可能であるが, 他方で, 計測できる領域が X 線透視画像の範囲に限られ, 関節に加わる力学的情報を得られない, 被曝などのデメリットがある。

3 次元歩行解析装置は, 光学カメラ, 体表マーカーと床反力計の組み合わせで患者の歩行動作を計測することで, 関節運動および関節にかかる力学的負荷 (kinetics) を同時に評価できる。X 線透視に比べ動作や計測範囲に制限がないため, 自然な動作を計測できる, 侵襲が少ないなどのメリットがある⁵⁾。特に, TKA 後に問題となるさまざまな activities of daily living (ADL) 動作 (階段昇降, 床からの立ち上がりなど) における関節負荷を計測できることは, 術後のリハビリテーション評価という観点からも意義が大きい⁶⁾ (図 1)。

3 次元歩行解析装置と表面マーカー

われわれは現在, Qualysis 社製動作解析装置 (120 Hz, カメラ 8 台), Bertec 社製床反力計および専用ソフトウェア (Qualysis Track Manager) を使用している (図 1)。カメラの台数は, 使用するマーカーの数や左右同時計測を行うかどうかにより異

* Gait analysis following total knee arthroplasty.

¹⁾ 慶應義塾大学医学部運動器生体工学寄附講座 : ☎160-8582 東京都新宿区信濃町 35
Takeo Nagura, MD : Department of Clinical Biomechanics, Keio University

²⁾ 同スポーツ医学総合センター

Hideo Matsumoto, MD : Institute for Integrated Sports Medicine, Keio University

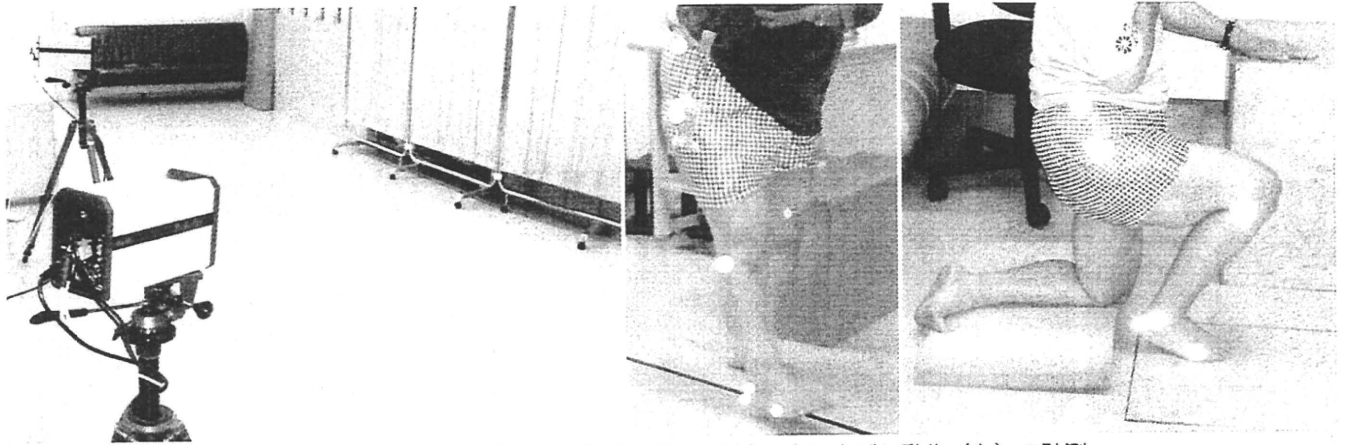


図 1 3次元歩行解析装置(左)と、歩行(中)、立ち上がり動作(右)の計測

なるが、通常の歩行計測であれば4台で十分可能である。床反力計は、安定した歩行の計測のために幅1m、長さ5~10mの歩行路の中央に設置する。左右同時に計測する場合は2台の床反力計を設置する。

TKAの術後計測を行う場合、体表マーカーを解剖学的特徴点(腸骨稜、大転子、膝、足関節の外側、第5中足骨、踵部)の6か所に添付する(図1, 中, 右)。さらに精密に下肢の関節運動を計測する場合や⁵⁾、体幹・肩などの運動を同時に計測する場合は、必要な部位に多数のマーカーを使用する。

計測に先立ち、患者の身長、体重および下肢長などの計測を行う。股関節、膝関節および足関節に関する体表計測を行い、マーカー位置より各関節中心位置を推定するための係数(joint correction factor)を取得する。実際の歩行計測では、被験者による歩行速度の違いを考慮し、自然歩行に加え、やや遅い・やや速い歩行についても計測し、データ解析の際、歩行速度のマッチングを行う。階段昇降や立ち上がり動作の計測は、被験者の計測側下肢を床反力計上に置いた状態で行う。(図1右)

表面マーカーの3次元位置データ、床反力データに上述の個体データ(身長、体重、関節補正係数)を合わせ、逆動力学計算(inverse dynamics)を行うことで、3次元平面における関節運動と関節モーメントを算出する。ほとんどの市販システムには歩行解析ソフトがオプションとして付属しているため、必要なパラメータを与えればこれらの計算はソフトが自動的に行い、時系列の関節運

動、関節モーメントおよび歩行の諸パラメーター(歩幅、歩調など)がほぼ瞬時に算出される。

健全な歩行・動作パターン(図2)

膝関節は、可動域の大きい矢状面における運動(屈曲—伸展)パターンが臨床的に重要である。歩行におけるdouble knee action(1歩行周期に2度膝の屈曲がみられる現象)は、正常歩行の特徴である。すなわち、接地時に膝伸展(ほぼ0度)、その後、軽度屈曲(約20~30度)してから再び伸展、遊脚期に向け屈曲し、離床後に最大屈曲位(60~80度)となる(図2上)。

関節モーメントでは、矢状面の膝屈曲モーメント(外力により膝に加わる屈曲方向のトルク)を観察する。健全な歩行では、接地後に正、立脚後半に負になる2峰性のカーブとなる(図2中)。スクワットや立ち上がり動作では、モーメントが立脚期(接地—離床まで)を通じて正となる。膝屈曲モーメントが正の値となるときは、大腿四頭筋がこの外力によるモーメントに拮抗している。このため、膝屈曲モーメントの計測により、動作中の大腿四頭筋活動を評価することができると考えられる(大腿四頭筋モーメント)。床からの立ち上がり動作では、膝屈曲モーメントは歩行の2~4倍となる⁷⁾。

さらに前額面の関節モーメントは、前額面における下肢アライメントを反映する。すなわち、膝内反—外反モーメント(膝を内側・外側へ曲げるトルク)は、O脚(内反)変形では膝内反モーメントが、X脚(外反)変形では逆に膝外反モー

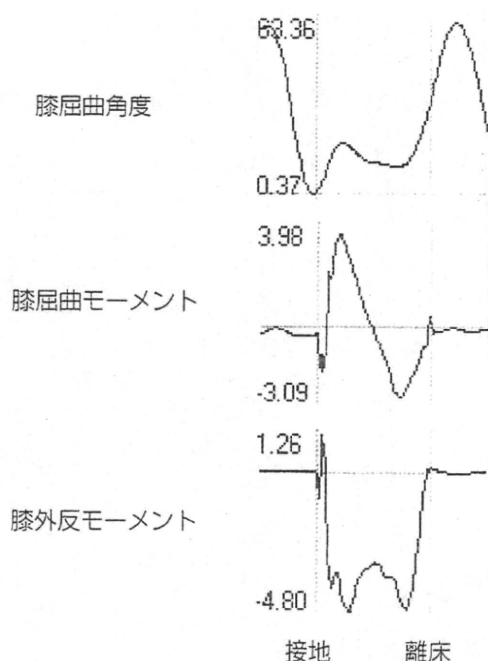


図 2 健常歩行における歩行解析データ (1 歩行周期)

ントが増加する。健常歩行では接地直後は膝外反モーメント (図 2 下), その後, 立脚期を通じて膝内反モーメントがみられる。

TKA 前後の歩行解析

TKA 後は, 3 次元平面における膝運動および関節モーメントを解析することにより, 手術により健常な歩行パターンが獲得されているかどうかを評価する。

変形性膝関節症では, 屈曲拘縮を伴っていることが多いため, 接地時の膝伸展が制限されたり, 前述の double knee action がみられないことが多い。適切な TKA が行われれば, これらに改善がみられる (図 3)。

関節モーメントでは, 膝屈曲モーメント, 膝内反モーメントの変化をみる。日本人では, 変形性膝関節症の 90% が内側型関節症であり, 内側の関節裂隙が狭小化するため下肢の O 脚変形を呈する。前述の通り, O 脚変形では歩行時に膝内反モーメントが陽性となるが, これは前額面において, 荷重により動的に O 脚変形が悪化する方向にトルクがかかっていることを示している。事実, 内側型変形性膝関節症において膝内反モーメントが大きいものは変形が進行し, 予後不良であるこ

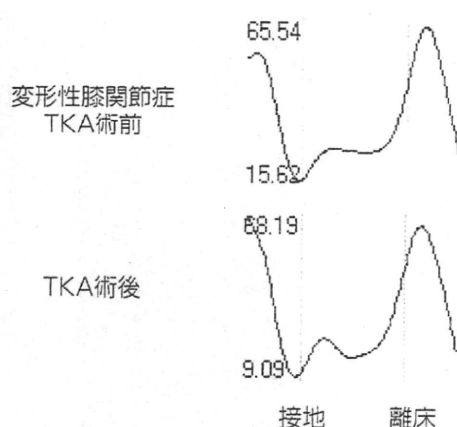


図 3 TKA 術前後の歩行時膝屈曲パターンの変化 (1 歩行周期)

とが示されている⁸⁾。また人工関節設置後では, 膝内反モーメントの増加は設置不良や変形の矯正不足と考えられる。適切な手術により, 膝内反モーメントは著明に減少する (図 4)。

TKA のデザイン, 術式と歩行特性

人工膝関節では関節そのものを切除し置換するため, インプラントのデザインは関節内に存在する靭帯 (十字靭帯) の機能を考慮しなければならない。手術に際し靭帯を温存するもの (cruciate retaining ; CR), 靭帯を完全に切除しその機能をインプラントが代償するもの (posterior stabilized ; PS) の両方があり, それぞれにメリット, デメリットがある。前者は温存された靭帯の機能が期待できる代わりに, 手術手技がやや煩雑となり, 設置時の靭帯張力を適切にバランスする必要がある。後者では, 靭帯を切除するため張力バランスなど, 手術手技がより容易である。反面, 靭帯の機能がインプラントに依存するためそのデザインが重要となり, 特に靭帯機能を代償する部分 (Post-Cam) が同部に加わる力学的負荷を十分考慮したものでなければならない⁹⁾。CR デザインと PS デザインの優劣については議論のあるところであるが²⁾, 歩行解析を行うことでこれらのインプラントの機能の違いが明瞭となる。すなわち, CR デザインでは温存された靭帯により前額面における支持性が保たれ, PS デザインに比べ膝内反モーメントが小さくなると考えられる (図 5)。

また近年, TKA の分野でも, 皮膚や筋肉の切除



大腿骨脛骨角(FTA)	202度	176度
膝内反モーメント (%身長×体重)	6.2	1.8

図 4 TKA 術前後の下肢アライメントおよび膝内反モーメント(最大値)の変化

を最小限とした minimum invasive surgery (MIS) が盛んに行われている。小さな術野で設置を行うため、適切に MIS を行うには術者の十分な経験が必要であり、専用の手術器具も欠かせない¹⁰⁾。MIS による TKA では、大腿四頭筋の切開が最小または全く行われなため、術翌日に大半の症例で straight leg raising (SLR) 運動が可能となるなど、患者の早期復帰に大きなメリットがある¹¹⁾。歩行解析では、MIS TKA 術後 2 週の時点で膝屈曲モーメントの改善がみられ、これは従来の皮切による TKA (術後 6 か月) よりも有意に大きく、MIS による大腿四頭筋機能の早期回復が明らかとなる(図 6)。

膝関節は正常で 150 度以上の可動域を有し、特に日本人ではその生活様式から膝を深く曲げる機会が多いため、インプラントデザインもこのような深屈曲を許容するものが求められる⁷⁾。もともと人工関節は欧米主流で開発が行われてきた経緯があり、椅子中心の生活様式を想定した旧来のデ

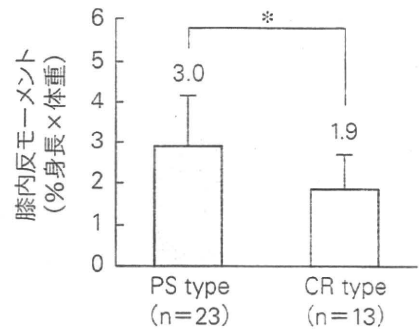


図 5 インプラントデザインによる歩行時膝内反モーメントの比較 *p<0.05 (student T-test)

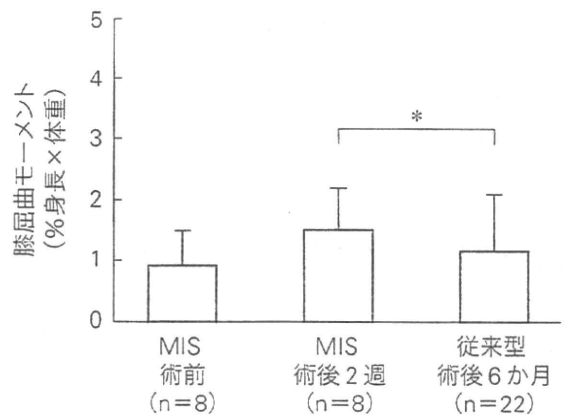


図 6 MIS TKA 術前後および従来型 TKA の歩行時膝屈曲モーメントの比較 *p<0.05 (student T-test)

ザインは、正座のような深屈曲動作を許容するものではなかった。しかし近年は、150 度以上の屈曲が可能となるインプラントが数多く登場するようになった^{1,3)}。3次元歩行解析装置により、TKA 術後の昇段・降段や立ち上がりなどの動作を計測することで、これらのインプラントの機能評価が可能である。深屈曲動作では、歩行に比べかなり大きな関節負荷が加わるため、これらの深屈曲デザインの長期成績について引き続き検証していく必要がある⁶⁾。

おわりに

インプラントの向上や MIS TKA の導入により、術後早期から積極的に歩行訓練などのリハビリテーションが行われるようになり、患者の早期退院、社会復帰が可能となっている。しかし、これらの術後プログラムについては、経験に基づき決定されているものが多く、裏づけとなる十分なエビデンスが存在していないと考えられる。例え

ま、O脚変形を有する患者では、いわゆる“ガニ足歩き”となっているため、つま先が外向きで歩いているケースが多い。TKAによりO脚変形が矯正され、下肢のアライメントがほぼ直線となっても、術後に依然つま先を外に向けた歩行を行っているものがある。このような例では膝内反モーメントが改善されずインプラントに不適切な負荷が加わっていると考えられる。このような症例では当然ながら、術後リハビリテーションで歩容改善の指導を行う必要がある。

3次元歩行解析では、患者それぞれの歩行を定量的にとらえることができるため、このような指導に必要な客観的な指標を提示することができる。本法を術前・術後の臨床検査の一つとしてルーチンに導入することで、TKA術後の実践的なリハビリテーション処方が可能になると考えられる。

参考文献

- Argenson JA, Komistek RD, et al : A high flexion total knee arthroplasty design replicates healthy knee motion. *Clin Orthop Relat Res* 428 : 174-179, 2004
- Banks SA, et al : *In vivo* kinematics of cruciate-retaining and-substituting knee arthroplasties. *J Arthroplasty* 12 : 297-304, 1997
- Bellemans S, Banks S, et al : Fluoroscopic analysis of the kinematics of deep flexion in total knee arthroplasty influence of posterior condylar offset. *J Bone Joint Surg Br* 84 : 50-53, 2002
- Hoff WA, et al : Three-dimensional determination of femoral-tibial contact positions under *in vivo* conditions using fluoroscopy. *Clin Biomech* 13 : 455-472, 1998
- Andriacchi TP, Dyrby C, et al : The use of functional analysis in evaluating knee kinematics. *Clin Orthop Relat Res* 410 : 44-53, 2003
- Nagura T, Otani T, et al : Is high flexion following total knee arthroplasty safe? Evaluation of knee joint loads in the patients during maximal flexion. *J Arthroplasty* 5 : 647-651, 2005
- Nagura T, Dyrby C, et al : Mechanical loads at the knee joint during deep flexion. *J Orthop Res* 20 : 881-886, 2002
- Miyazaki T, et al : Dynamic load at baseline can predict radiographic disease progression in medial compartment knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis* 61 : 617-622, 2002
- Nakayama K, Matsuda S, et al : Contact stress at the post-cam mechanism in posterior-stabilised total knee arthroplasty. *J Bone Joint Surg Br* 87 : 483-488, 2005
- 松本秀男 : Minimum invasive surgery (MIS) 手術の実際と注意点, 松野誠夫・他(編) : 人工膝関節置換術—手技と論点—, pp179-189, 医学書院, 2009
- 松本秀男, 岩本潤 : 変形性膝関節症のリハビリテーション—MIS人工膝関節置換術後リハビリテーション—. *MB Med Reha* 105 : 57-61, 2009



「ノーマライゼーション・障害者の福祉」2010年3月号特集目次

特集・平成22年度障害保健福祉関係予算

平成22年度障害保健福祉関係予算(案)の概要

平成22年度障害保健福祉関係予算案(厚生労働省障害保健福祉部企画課)

平成22年度予算案からみる障害者施策(小澤 温) 制度改革にふさわしい予算の根本的な組み替えを(田井久実子)

精神障害者の予算基準を見直して(山梨宗治)

平成22年度予算概要を見て(山岡 修)

子どもの「権利」「最善の利益」を根本に据えた障害児施策の整備と展望を(河合隆平)

地域で暮らしていくための施策は進んでいるのか(志賀象二)

就労関係の予算を見て思うこと(酒井京子)

■ 学術プロジェクト

変形性膝関節症患者における歩行時膝関節運動への 運動療法介入効果の検討

永野 康治¹⁾ 内藤 健二²⁾ 深野 真子³⁾ 井田 博史⁴⁾
中澤 公孝⁵⁾ 赤居 正美⁶⁾ 福林 徹¹⁾

早稲田大学スポーツ科学学術院¹⁾, 国立障害者リハビリテーションセンター²⁾,
早稲田大学大学院スポーツ科学研究科³⁾, 神奈川工科大学ヒューマンメディア研究センター⁴⁾,
東京大学大学院総合文化研究科⁵⁾, 国立障害者リハビリテーションセンター病院⁶⁾

要旨 運動療法が変形性膝関節症（膝 OA）患者の歩行時膝関節運動に及ぼす影響について検討した。膝 OA 患者 45 名を 12 週の運動療法を行う介入群 25 名、および対照群 20 名に分け、介入前後で歩行動作解析、JKOM スコア、股関節内外転筋力、膝関節屈曲伸展筋力の計測を行った。運動療法介入後、立脚中期における膝内転角度の減少、脛骨内旋角度の増加、JKOM スコアの改善、股関節内転、外転筋力の増加が見られた。

Abstract The purpose of this study was to examine the effect of exercise therapy on the knee kinematics during gait, QOL score and strength of knee and hip in people with knee osteoarthritis. Randomized controlled trial of 45 community volunteers with medial knee OA was conducted. Participants randomized into either a 12-week exercise therapy group or a control group with no intervention. The outcome was the knee abduction/adduction angle and internal/external tibial rotation angle during gait using point cluster technique. Secondary outcomes included the Japanese Knee Osteoarthritis Measure (JKOM) scores and strength of knee extension, knee flexion, hip abduction and hip adduction.

There were significantly interaction effects in the knee adduction and internal tibial rotation angle at the time of 50% stance phase, suggesting that participants in the exercise group had decreased in knee adduction angle and increased internal tibial rotation angle. Participants in the exercise group had improved the JKOM score and increased strength of hip adduction and abduction. Exercise therapy had effects on altering abnormal knee kinematics during a gait and improved the JKOM score. The increased strength of hip joint thought to be effected to the knee kinematics.

Key words : 変形性膝関節症 (knee osteoarthritis), 歩行 (gait), 運動療法 (exercise therapy)

Effects of exercise therapy on knee kinematics during gait in patients with knee osteoarthritis
Yasuharu NAGANO, PhD, RPT, Kenji NAITO, MS, Mako FUKANO, MS, Hirofumi IDA, PhD, Kimitaka NAKAZAWA,
PhD, Masami AKAI, MD and Toru FUKUBAYASHI, MD

連絡先 : 〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15 早稲田大学スポーツ科学学術院 永野康治 電話 04-2947-6853

緒 言

変形性膝関節症（以下膝 OA）の発症や進行にかかわる要因の一つとして、膝関節の力学的、運動学的な影響が挙げられる。特に膝 OA 患者は歩行時に異常運動を示し、その代表的なものが膝関節内転モーメントの増加^{9,14)}と膝の側方動揺^{12,16)}である。

膝内転モーメントについては、これまでの報告により膝 OA の特徴¹⁴⁾や進行⁹⁾に関連することが明らかになりつつある。一方、膝の側方動揺については、臨床的に異常運動が観察されるにもかかわらず、定量的には明らかにはされていない。その理由として測定方法の限界が考えられる。従来の三次元動作解析法では骨指標に皮膚マーカーを貼付して動作を計測しており、運動中に皮膚マーカーと骨運動に差異が生じる可能性がある。また、回旋・並進といった膝関節の微細運動の計測が困難であった。膝 OA 患者の側方動揺は単純な内外反ではなく、回旋や側方への並進を含んだ複合運動だと考えられる。そのため、従来の計測法では、その詳細な運動を捉えることができなかったといえる。膝 OA の発症や進行に関して、こうした側方動揺に代表される膝 OA の異常運動の面から明らかにする必要があると考えられる。

そこで近年、皮膚マーカーを用いた手法でありながら、骨運動に近い動作計測が可能であり、かつ、回旋や並進運動といった膝関節の微細運動の計測が可能であると報告されている Point Cluster 法（以下 PC 法）¹⁴⁾が注目されている。われわれはこれまでに PC 法を膝 OA の歩行解析に応用し、初期膝 OA において脛骨内旋変化量が減少すること、また、重度膝 OA について膝内転角度が増加することを報告し、膝 OA の発症、進行に膝関節微

細運動が関与している可能性を報告した¹¹⁾。内旋運動の変化については、X 線透視画像を用いた三次元膝運動解析においても、膝 OA 患者において膝屈曲時の最大内旋角度、および膝屈曲に伴う内旋変化量が減少していたことが報告されている⁵⁾。そのため、膝 OA の発生・進行の指標や、治療効果の検証にこれらの膝関節運動を捉えることが重要だと考えられる。

膝 OA に対する治療として、運動療法を中心とした保存療法が現在推奨されている¹⁾。運動療法の代表的なものは大腿四頭筋の強化である。大腿四頭筋の強化による効果については数多くの研究が報告されており、RCT を対象としたシステマティックレビューにおいても、大腿四頭筋強化が膝 OA 患者における疼痛と機能障害の改善に有効であることが示されている^{13,18)}。一方で、近年注目されているのが股関節内外転筋群の強化である。股関節外転筋力の減少が膝 OA の進行に関与しているといった報告も見られ^{3,10)}、股関節外転筋の作用により骨盤の側方動揺や対側傾斜が減少し、膝関節内転モーメントを減少させる効果があると考えられている³⁾。また、股関節内転筋も膝関節内転モーメントに拮抗して活動していると考えられている¹⁹⁾。こうした背景から、大腿四頭筋の強化とともに、股関節内外転筋の強化が膝 OA に対する運動療法として用いられることが多い。

そこで本研究では、大腿四頭筋の強化、および股関節内外転筋の強化を中心とした運動療法が、膝 OA 患者における歩行時膝関節運動に及ぼす効果を検証することとした。運動療法が膝関節運動に及ぼす影響が明らかになることで、膝 OA の進行に対する運動療法の効果を定量的に示すことが可能になり、また、さらに効率的な治療法を検討することが可能

になると考えられる。本研究の仮説は、運動療法により脛骨内旋変化量が増加し、内転角度が減少するという、膝 OA に特徴的な異常歩行動作が改善する変化がもたらされる、とした。

方法

1. 研究デザイン (図 1)

本研究は無作為対照試験として行った。対象者のサンプリングは大学周辺地区 35000 世帯を対象に新聞折り込みチラシにて募集を行った。募集条件は 45 歳から 79 歳の女性で現在膝に痛みがあることとした。募集に応じた対象者のなかから質問紙用紙による除外条件 (①現在、膝以外の下肢の疾患を有する、②下肢の手術歴をもつ、③現在、定期的な通院治療を受けている、④本研究と同様の運動療法を継続して実施している、⑤研究参加の継続が困難なその他の疾患をもつ) に適合した者を除外した後、抽選により抽出され、かつ研究参加に関するインフォームドコンセントに同意した女性 50 名を研究参加者とした。研究参加者 50 名に対して後述する JKOM スコア²⁾ の調査を行い、JKOM スコアに基づいた層分けを行い、群間のスコア差が生じることを防ぐため、層ごとに無作為に介入群、対照群、おのおの 25 名ずつに振り分けた。各群ともに介入前測定 (項目は後述) した後、介入群は 12 週の運動療法介入を行った。対照群は 12 週の観察期間とした。その後、介入後計測を行った。なお、本研究に際して国立障害者リハビリテーションセンター倫理委員会の承認を受けた。

2. 対象者

上述した運動療法介入群 25 名、対照群 25 名、合計 50 名を対象として研究を開始し、対照群は個人的事情等により研究期間中に 5

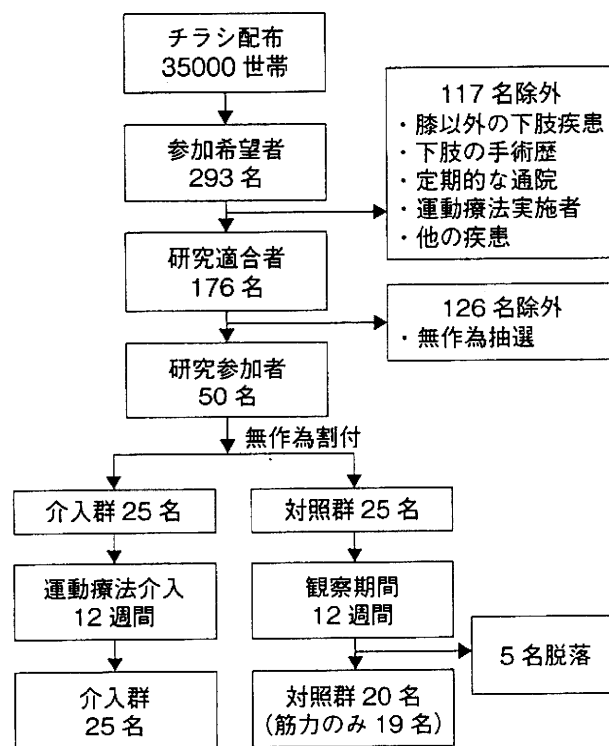


図 1 実験プロトコル

名が脱落し、20 名が対象となった。なお、対照群において後述する筋力測定結果は 1 名未測定のため、19 名を対象とした。対象者の基本情報を表 1 に示した。また、立位 X 線膝関節正面画像を撮影し、Femoro Tibial Angle (以下 FTA) および医師により重症度判定を行った。各群の FTA の結果を表 1 に示した。病期分類は Kellgren-Lawrence 法⁶⁾に基づき行った。病期は軽症から順に grade 1 が 4 名 (介入群 2 名, コントロール群 2 名), grade 2 が 9 名 (介入群 4 名, コントロール群 5 名), grade 3 が 18 名 (介入群 11 名, コントロール群 7 名) および grade 4 が 14 名 (介入群 8 名, コントロール群 6 名)であった。

3. 運動療法介入

介入群は 12 週間の運動療法介入を行った。運動療法は週 1 回の運動療法教室への参加および自宅での運動療法の継続であった。運動療法の内容は、1) 下肢伸展挙上訓練 (straight leg raising), 2) 大腿四頭筋セッティング,

表1 対象者基本情報 (平均±標準偏差)

	年齢	身長 (cm)	体重 (kg)	BMI (kg/m ²)	FTA (度)
介入群	65.2±6.4	153.9±6.7	56.4±9.9	23.8±3.6	178.4±4.5
対照群	65.7±7.7	153.1±5.4	55.9±8.9	23.5±3.4	178.3±4.7

3) 股関節内転運動 (簡易枕使用), 4) 股関節外転運動 (セラバンド使用) の4種類とし, 1日当たり10回を数セット行うように指導した. 自宅での運動は日誌にてその実施回数を記録した. また, 運動療法教室では, 上記の運動療法に加え, ストレッチ, 膝痛に関するレクチャー, 簡単なゲーム (ペタンク) を行った.

4. 測定項目

12週間の介入 (観察) 期間の前後において下記項目の測定を行った.

1) 歩行時膝関節運動

歩行時の膝関節運動, 特に本研究では大腿骨に対する脛骨の内・外転, 内・外旋運動の計測を行った.

(1) 動作課題

動作は裸足での10m自由歩行とし, 至適速度における歩行とした. 対象側は自己申告により疼痛の強い側とした. 測定に先立ち数回の歩行練習を行い動作に慣れた後, 5回の本試行を計測した. なお, ふらつき, よろめきなど対象者の通常の歩行と明らかに異なった場合, また測定者が異常を感じた場合には再計測とした.

(2) 動作計測

対象者には対象側に反射マーカー26個を, 両面テープを用いて貼付した. 貼付位置は, 左・右大転子, 大腿骨の内・外側上顆, 脛骨の内・外側顆, 内・外果, 第二中足骨頭, 端踵骨隆起点, および大腿部に10個, 下腿部に6個とした. 動作中におけるマーカーの三次元座標をHawk camera 8台からなる三次

元自動動作解析装置 (MAC 3D system, Motion Analysis 社製) を用い, サンプリング周波数200 Hzにて計測した.

(3) データ解析

得られた三次元座標データから, PC法¹⁴⁾を用い, 静止立位を基準として, 大腿骨に対する脛骨の内・外転, 内・外旋運動の計測を行った. 各運動の定義はGroodら⁴⁾の定義に従った. 各運動の歩行時立脚期における値を算出し, 立脚期を100%として正規化した. それぞれ, 接地時, 立脚期50%における値, 接地より立脚中期までの変化量を算出した.

2) 下肢筋力

膝関節の等速性屈曲伸筋力, および股関節の等尺性外転, 内転筋力の計測を行った.

(1) 膝関節伸展・屈曲筋力

BIODEX System III (BIODEX 社製) を用いて等速性膝関節伸展・屈曲筋力を測定した. 対象者を椅坐位の状態に固定し, 動作内容とそれに伴う苦痛がないことを確認したうえで, 角速度60 deg/secでの膝関節伸展および屈曲動作を全力で3回繰り返させた. 3回の試技での最大トルク (Nm) を体重 (kg) で除し, 補正されたものを最大筋力 (Nm/kg) とした.

(2) 股関節内転・外転筋力

ハンドヘルドダイナモメーターPower Track II (JTECH Medical 社製) を用いて, 等尺性股関節内転・外転筋力を測定した. 測定肢位は椅坐位とし, 股関節内外転および内旋中間位の状態から徐々に力を発揮させた. 測定は内外転それぞれ2回ずつ行い最大

値 (N) を採用した。これにモーメントアームである大腿長 (大転子から膝関節裂隙) を乗じたものを最大トルク (Nm) とした。さらにこれを体重 (kg) で除し、補正されたものを最大筋力 (Nm/kg) とした。なお、測定はすべて1名の熟練した検者により行った。

3) 疾患特異的健康関連 QOL 評価

膝 OA の総合機能評価として、日本版変形性膝関節症患者機能評価表 (Japanese Knee Osteoarthritis Measure: JKOM)²⁾ を用いた質問紙調査を行った。本研究では、総合点とし

ての JKOM スコアを用いた。

5. 統計処理

統計処理は反復測定二元配置分散分析 (介入有無 (2) × 測定時期 (2)) を用い、介入の効果を明らかにするため交互作用のみを検討した。危険率は 0.05 とした。なお、筋力の測定値については歩行計測での対象側の値を採用した。

結果

1. 歩行時膝関節運動

介入群, 対象群における歩行時膝関節運動

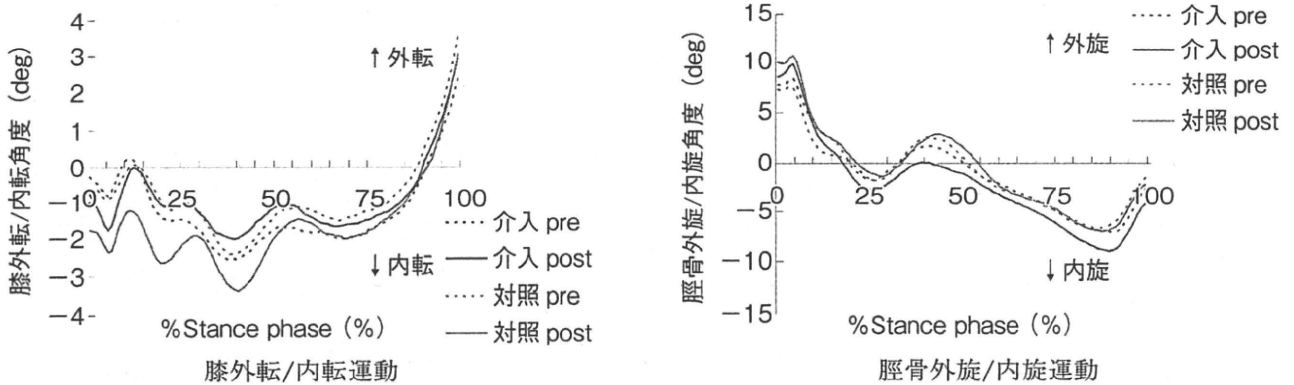


図2 介入群, 対象群の歩行時立脚相膝関節運動変化

表2 介入群, 対象群における各項目の変化

	介入群		対照群		交互作用
	Pre	Post	Pre	Post	
歩行時膝運動 (deg)					
膝内外転角度 (+ : 外転, - : 内転)					
接地時	-0.26 ± 2.29	-0.77 ± 2.64	-0.62 ± 3.13	-1.78 ± 2.73	n.s.
50%立脚時	-1.72 ± 2.38	-1.12 ± 2.31	-1.34 ± 2.88	-1.94 ± 1.82	0.018
変化量	5.05 ± 2.05	4.99 ± 1.84	4.60 ± 1.69	4.76 ± 1.68	n.s.
脛骨内外旋角度 (+ : 外旋, - : 内旋)					
接地時	7.68 ± 4.69	8.50 ± 5.51	7.26 ± 5.11	10.01 ± 6.18	n.s.
50%立脚時	0.05 ± 3.18	-1.06 ± 3.99	0.56 ± 4.86	1.60 ± 4.56	0.049
変化量	12.62 ± 5.07	15.21 ± 5.88	11.61 ± 3.76	15.13 ± 4.29	n.s.
筋力 (Nm/kg)					
膝伸展筋力	1.01 ± 0.44	1.03 ± 0.41	1.09 ± 0.43	1.05 ± 0.43	n.s.
膝屈曲筋力	0.51 ± 0.26	0.46 ± 0.21	0.49 ± 0.21	0.52 ± 0.17	n.s.
股外転筋力	1.25 ± 0.32	1.52 ± 0.33	1.32 ± 0.27	1.28 ± 0.32	<0.001
股内転筋力	1.04 ± 0.23	1.18 ± 0.23	1.01 ± 0.17	0.95 ± 0.14	0.008
JKOM スコア	43.7 ± 10.8	38.0 ± 11.0	43.1 ± 11.0	42.8 ± 13.1	0.042

の立脚期における膝内外転および脛骨内外旋の変化を図2に示した。膝内外転については、接地直後に外転し、その後立脚中期にかけて内転した後、立脚後期には再び外転する角度変化が見られた。脛骨内外旋については、外旋位で接地した後大きく内旋し、立脚中期に軽度外旋した後、再び内旋する角度変化が見られた。

膝内外転、脛骨内外旋角度について介入群、対照群における測定結果を表2に示した。膝内外転について接地時角度、内外転変化量に有意な交互作用は認められなかったが、50%立脚時の内外転角度に有意な交互作用が見られ ($p=0.018$)、介入群で内転角度が減少し、対照群で内転角度が増加する傾向が見られた。脛骨内外旋について接地時角度、内外旋変化量に有意な交互作用は認められなかったが、50%立脚時の内外旋角度に有意な交互作用が見られ ($p=0.049$)、介入群で外旋角度が減少(内旋角度が増加)し、対照群で外旋角度が増加する傾向が見られた。

2. 下肢筋力

膝屈曲・伸展筋力、股外転・内転筋力について介入群、対照群における測定結果を表2に示した。膝屈曲・伸展筋力について有意な交互作用は認められなかった。股外転・内転筋力については有意な交互作用が認められ ($p<0.001$, $p=0.008$)、介入群で筋力が増加する傾向が見られた。

3. JKOMスコア

JKOMスコアについて介入群、対照群における測定結果を表2に示した。JKOMスコアは有意な交互作用が認められ ($p=0.042$)、介入群でJKOMスコアが改善する傾向が見られた。

考 察

本研究の目的は、膝 OA 患者に対して運動療法を行い、運動療法が歩行時膝関節運動に及ぼす効果を検証することであった。本結果について、介入群と対照群の間に交互作用が見られた場合、介入の効果が見られたと考えられる。本結果では、12週間の運動療法により、歩行時立脚中期における膝内転角度が減少し、同じく立脚中期における脛骨内旋角度が増加した。同時にJKOMスコアに改善が見られ、また、股関節内外転筋力が増加していた。

膝 OA 患者に対する運動療法効果についての先行研究は多数見られるが、その多くが疾患特異的健康関連QOLの評価を行うもの^{13,18)} や、筋力強化が長期的な膝 OA の進行に及ぼす影響を検討したものであり^{3,8,10)}、運動療法が異常歩行動作に及ぼす効果を検討したもの^{7,17)} は少ない。Thorstenssonら¹⁷⁾ は、8週間の運動療法前後で歩行時膝内転モーメントの比較を行ったが、有意な変化は見られていなかった。Limら⁷⁾ は12週間の大腿四頭筋強化を中心とした運動療法により、大腿四頭筋筋力が増加し、疼痛に改善が見られたが、膝内転モーメントは変化しなかったと報告している。これらの報告は数少ない運動療法の歩行動作における効果を検討したものであるが、近年明らかになりつつある、膝関節の回旋を含めた膝 OA 患者の異常歩行時膝関節運動^{5,11)} に対する効果は検証されていない。

本結果において見られた立脚中期における膝内転角度の減少は、仮説に挙げた結果であり、膝 OA 患者に特徴的な異常歩行を改善させたと考えられる。Specognaら¹⁵⁾ はX線上での膝内転角度と、歩行時膝内転モーメントの有意な相関関係を報告している。よって、

歩行時膝内転角度の減少も、膝内転モーメントの減少、さらには膝内側構成体への圧縮負荷が軽減したことが考えられる。ただし、膝内転モーメントについて、本研究では未計測のため、今後、モーメントを含めた検討が必要であるといえる。

一方、脛骨回旋における変化は、立脚中期における脛骨内旋角度の増加であった。これは仮説に挙げた、内旋変化量の増加とは異なる結果であった。この結果について、膝 OA の進行には回旋変化量の減少が関係するものの¹¹⁾、運動療法による症状改善には内旋角度の増加という、異なる回旋運動の変化が生じる可能性が考えられる。もしくは、長期的に運動療法を継続することにより、回旋変化量の増加という、正常歩行に近い歩行を獲得できる可能性もある。今後、膝 OA 患者の膝回旋運動に対する効果を、長期的な効果検証や新たな運動療法の開発等を含めて検証していく必要があるといえる。

本結果で得られた歩行時膝関節運動の変化は、いずれも立脚中期のものであった。これは股関節内外転筋力の増加が関与していると考えられる。Chang ら³⁾ は歩行中の片脚支持期において、股関節外転筋が弱化的ることにより骨盤の対側傾斜が起こり、その結果、体幹重心線が立脚側のより内側を通るため、膝内側構成体への負荷が増加すると提唱している。さらに彼らはその裏付けとして、股関節外転内力モーメントの減少が膝 OA の進行に関連していることを前向き検討において報告した³⁾。本研究においても、運動療法によって増加した股関節内外転筋力が立脚中期に有効に活動したため、骨盤の制動が行われ、膝関節についても異常運動が減少したと考えられる。しかし、膝関節運動への影響については本結果のみでは明らかではなく、今後、筋

活動や、各関節の関節モーメント変化も含めた検討が必要であるといえる。

本研究の限界として以下の点が挙げられる。まず、運動療法による歩行時膝関節運動の変化が JKOM スコアの改善に直接的に作用したかは不明である。今後、社会的要因を含めて検討する必要があると考えられる。また、PC 法の特性として、静止立位を基準とした運動変位計測であることが挙げられる。そのため、膝 OA 進行に伴う膝関節の変形が考慮されないといえる。

結 論

膝 OA 患者に対して運動療法が、立脚中期における膝内転角度の減少、脛骨内旋角度の増加をもたらした。JKOM スコアに改善が見られた。また、股関節内外転筋力の増加が歩行時膝関節運動変化に関与していると示唆された。

謝辞 本研究は日本運動器リハビリテーション学会学術プロジェクトによる研究助成を受けて行われた。

文 献

- 1) Recommendations for the medical management of osteoarthritis of the hip and knee: 2000 update. American College of Rheumatology Subcommittee on Osteoarthritis Guidelines. *Arthritis Rheum.* 43: 1905-1915, 2000.
- 2) Akai M. et al: An outcome measure for Japanese people with knee osteoarthritis. *J Rheumatol.* 32: 1524-1532, 2005.
- 3) Chang A. et al: Hip abduction moment and protection against medial tibiofemoral osteoarthritis progression. *Arthritis Rheum.* 52: 3515-3519, 2005.
- 4) Grood ES. et al: A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee. *J Biomech Eng.* 105: 136-144, 1983.

- 5) Hamai S. et al: Knee kinematics in medial osteoarthritis during in vivo weight-bearing activities. *J Orthop Res.* **27**: 1555-1561, 2009.
- 6) Kellgren JH. et al: Radiological assessment of osteoarthrosis. *Ann Rheum Dis.* **16**: 494-502, 1957.
- 7) Lim BW. et al: Does knee malalignment mediate the effects of quadriceps strengthening on knee adduction moment, pain, and function in medial knee osteoarthritis? A randomized controlled trial. *Arthritis Rheum.* **59**: 943-951, 2008.
- 8) Mikesky AE. et al: Effects of strength training on the incidence and progression of knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum.* **55**: 690-699, 2006.
- 9) Miyazaki T. et al: Dynamic load at baseline can predict radiographic disease progression in medial compartment knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis.* **61**: 617-622, 2002.
- 10) Mundermann A. et al: Secondary gait changes in patients with medial compartment knee osteoarthritis: increased load at the ankle, knee, and hip during walking. *Arthritis Rheum.* **52**: 2835-2844, 2005.
- 11) 内藤健二ほか：変形性膝関節症患者における歩行時膝関節微細運動の特性. 第1回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会, 札幌, 2009.
- 12) Ogata K. et al: The effect of wedged insoles on the thrust of osteoarthritic knees. *International Orthopaedics* **21**: 308-312, 1997.
- 13) Roddy E. et al: Aerobic walking or strengthening exercise for osteoarthritis of the knee? A systematic review. *Ann Rheum Dis.* **64**: 544-548, 2005.
- 14) Sharma L. et al: Knee adduction moment, serum hyaluronan level, and disease severity in medial tibiofemoral osteoarthritis. *Arthritis Rheum.* **41**: 1233-1240, 1998.
- 15) Specogna AV. et al: Radiographic measures of knee alignment in patients with varus gonarthrosis: effect of weightbearing status and associations with dynamic joint load. *Am J Sports Med.* **35**: 65-70, 2007.
- 16) Takigami H. et al: An evaluation of the velocity of the lateral thrust in osteoarthritic knees with a varus deformity. *Knee* **7**: 11-15, 2000.
- 17) Thorstensson CA. et al: The effect of eight weeks of exercise on knee adduction moment in early knee osteoarthritis — a pilot study. *Osteoarthritis Cartilage* **15**: 1163-1170, 2007.
- 18) van Baar ME. et al: Effectiveness of exercise therapy in patients with osteoarthritis of the hip or knee: a systematic review of randomized clinical trials. *Arthritis Rheum.* **42**: 1361-1369, 1999.
- 19) Yamada H. et al: Hip adductor muscle strength in patients with varus deformed knee. *Clin Orthop Relat Res.* **386**: 179-185, 2001.

■ 2007 年度採択学術プロジェクト研究の概要

膝運動解析の新展開

— point cluster 法を用いた膝運動解析 —

福 林 徹¹⁾ 赤 居 正 美³⁾ 井 田 博 史⁴⁾
 内 藤 健 二³⁾ 永 野 康 治¹⁾ 深 野 真 子²⁾

早稲田大学スポーツ科学学術院¹⁾, 同大学院スポーツ科学研究科²⁾,
 国立障害者リハビリテーションセンター³⁾, 東京医科歯科大学教養部保健体育学教室⁴⁾

緒 言

近年、運動解析の分野において赤外線カメラ、解析ソフトの性能が格段に向上しているにもかかわらず、この分野における研究方法は進歩が見られていない。その理由として、特定の骨指標へ皮膚マーカーを貼布するため、皮膚の変形が加わること、また、屈曲、伸展などの粗大運動は計測可能だが、回旋、並進などの微細運動は詳細な計測ができないことが挙げられる。しかし、運動器疾患では、回旋運動などの微細運動との関連が示唆されている。特に、変形性膝関節症（膝 OA）においては、異常歩行動作を示すことが知られているが、その詳細は明らかではなく、単純な側方動揺性ではなく、回旋運動の異常が考えられる。また、膝前十字靭帯（ACL）損傷では受傷時の膝関節肢位が明らかではなく、ACLの解剖学的特徴から膝回旋運動の関与が示唆されている。そこで注目されているのが、Andriacchi ら¹⁾によって提唱された Point Cluster 法（PC 法）である。PC 法は多点皮膚マーカーを用いた膝運動解析法であり、回旋、並進運動を含めた運動において骨運動に近い計測が可能であるものである¹⁾。本プロジェクトではこのプログラムを膝 OA

患者の歩行運動解析、ACL 損傷メカニズムの解析に臨床応用し、従来の方法では得られない膝の回旋運動を中心にした微細な異常知見を明らかにすることを目的に以下の3研究を中心に行った。

研究 1：変形性膝関節症患者における歩行時膝関節微細運動の特性の検討

目的：膝 OA の運動学的特徴の一つとして立脚初期に観察される膝関節の特異的な外側への側方動揺や回旋不安定性等が挙げられているが、それを詳細に定量化した報告は見られない。そこで、本研究ではより骨運動に近い動作計測が可能である PC 法を用い、膝 OA 患者の歩行時の膝微細運動特性を抽出することを目的とした。

方法：整形外科医により膝 OA と診断された中高年女性 25 名（ 65.3 ± 6.9 歳）および若年健常女性 13 名（ 21.6 ± 1.3 歳）を対象とした。膝 OA 患者は Kellgren & Lawrence 分類に基づき G1, 2 : 6 名, G3 : 11 名, G4 : 8 名に分類された。すべての対象に対し 3 次元動作解析システム MAC 3D を用いて自由速度での平地歩行動作を計測し、PC 法を用いて立脚期における膝屈曲・膝内外転・脛骨回旋角度を算出した。統計処理は一元配置分散分

析を用い、各群間の特性を比較検討した。

結果：脛骨回旋角度に関して、健常若年群では外旋位で接地後大きく内旋し立脚期 50%時を目安に軽度外旋するといった一様なパターンを示したが、膝 OA 群ではそのパターンが不明瞭になり、接地後の内旋変化量が有意に少なかった ($16.3 \pm 3.6^\circ$ vs $12.5 \pm 5.0^\circ$, $p < 0.05$)。また、内外転角度に関して、G1, 2 および 3 の対象では共通して特異的な接地直後の外転から内転への大きな角度変化が観察された。一方 G4 では立脚期を通じた大きな内転変位を示し、立脚 50%時の内転角度に他の群との有意差が見られた ($p < 0.05$)。

考察：本研究の結果から、立脚期の生理的な脛骨回旋の阻害や病期に対応した前額面上の膝関節動揺性などが、定量的に観察された。これらの膝 OA に特異的な運動特性は動作から見た危険因子のスクリーニングや治療効果判定に役立つことが期待された。

研究 2：変形性膝関節症患者における歩行時膝関節運動への運動療法介入効果の検討

目的：膝 OA の特徴の一つとして立脚初期に観察される膝関節の特異的な外側への側方動揺 (lateral thrust) や回旋不安定性といった異常歩行動作が挙げられる。近年の研究により運動療法が膝 OA に対して有用であることが示されてきたが、異常歩行動作における影響を検討したものは少ない。そこで、本研究では PC 法を用い、運動療法が膝 OA 患者の歩行に及ぼす影響について検討した。

方法：整形外科医により膝 OA と診断された中高年女性 45 名 (65.3 ± 6.9 歳) を対象とした。対象者を 12 週の運動療法を行う介入群 (25 名)、および対照群 (20 名) に分け、介入前後で歩行動作解析、JKOM スコア、股関節内外転筋力、膝関節屈曲伸展筋力の計測

を行った。歩行動作解析では立脚期における、膝屈曲・外転・脛骨外旋角度を PC 法を用いて算出した。統計処理は反復測定二元配置分散分析を用い、トレーニング効果の検討を行った。危険率は 5%とした。

結果：運動療法介入後、介入群の JKOM スコアは改善傾向を示した。また、股関節内転筋力、外転筋力は有意に増加した ($p < 0.05$, $p < 0.01$)。歩行動作解析の結果、立脚初期には有意な差は見られなかったが、立脚期 50%における、膝外転角度、および脛骨外旋角度に群間と介入前後の交互作用が見られ (ともに $p < 0.05$)、介入群において膝内転が減少し、脛骨内旋が増加する傾向が見られた。

考察：運動療法介入後の立脚中期における膝内転角度の減少は、膝関節内側構成体への力学的ストレスを減少させる効果があったと考えられる。また、脛骨内旋角度の増加は正常な脛骨回旋運動に近づいたことが考えられる。運動療法が股関節筋力の増強、膝関節運動の変化や JKOM スコアの改善につながることを示された。

研究 3：片脚着地動作における膝自動運動成分を考慮した前十字靭帯損傷メカニズムの推定

目的：非接触型の膝前十字靭帯 (ACL) 損傷におけるリスクファクターとして膝関節における急激な変位運動が挙げられる。これまで時系列的な運動解析により脛骨内旋や外反などの受傷キネマティクスが報告されてきたが、これらにはいわゆるスクリー・ホーム・ムーブメントなど膝の屈曲に伴って不随意に起こる自動的な運動が混在していると考えられる。本研究の目的は、片脚着地動作について膝関節における自動的運動成分を定量

化し、これを実測の関節運動と比較することにより動作タスクに依存した正味の受傷メカニズムを推定することとした。

対象と方法：対象は健常女子 (23.3 ± 2.4 歳) 11 名 11 膝とし、片脚でスクワット動作および落下着地動作を行った。動作データを 3 次元自動動作計測装置により収集し PC 法により脛骨の内旋および外反角度を求めた。まず、スクワット動作データから内旋および外反角度について対屈曲角度変換関係を決定した。次に、この変換関係により落下着地時の膝屈曲角度から内旋および外反角度を求めたものを自動的運動成分値として、これを実測値と比較した。

結果：床接地時における内旋角度は実測値 ($2.62 \pm 1.23^\circ$) が自動的運動成分値 ($10.68 \pm 0.44^\circ$) に比べて優位に小さく、また接地後の内旋運動も顕著であった。外反角度についても同様に、床接地時において実測値 ($0.81 \pm 1.26^\circ$) は自動的運動成分値 ($3.40 \pm 0.34^\circ$) に比べて優位に小さく、その後の外反運動も顕著であった。

考察：着地動作における内旋および外反運動は屈曲に伴う自動的な膝関節の運動と比べて顕著に大きく、これが動作特有の受傷メカニズムとなっていることが示唆される。今回新しく用いた分析手続きにより、自動的な運動成分とは別に着地動作に依存した関節運動が受傷リスクを高めていることを確認した。

まとめ

以上の研究により、PC 法を用いることで変形性膝関節症の膝運動学的変化やその運動療法効果を示すこと、さらに着地等の高速度動作の計測が可能であり、変形性膝関節症の発症要因や前十字靭帯損傷メカニズムについ

て新たな知見が得られた。

本プロジェクトの研究内容は、以下の学会において発表されている。

内藤健二, 永野康治, 深野真子, 井上夏香, 木村知弘, 井田博史, 中澤公孝, 赤居正美, 福林 徹: 変形性膝関節症患者における歩行時膝関節微細運動の特性. 第 1 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会, 北海道, 6 月, 2009.

永野康治, 内藤健二, 深野真子, 井上夏香, 木村知弘, 井田博史, 赤居正美, 福林 徹: 変形性膝関節症患者に対する運動療法介入が歩行時膝関節運動に与える影響. 第 1 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会, 北海道, 6 月, 2009.

K Naito, Y Nagano, M Fukano, H Ida, S Torii, K Nakazawa, M Akai, T Fukubayashi: The comparison of in vivo knee kinematics between knee osteoarthritis patient and young healthy subject during normal gait — Application of point cluster technique —. International Symposium on Ligaments & Tendons-IX, Las Vegas, February, 2009.

永野康治, 内藤健二, 深野真子, 井田博史, 赤居正美, 福林 徹: 多点皮膚マーカー計測法の膝 OA 患者における歩行解析への応用 Part I — 膝 OA 患者歩行における解析法の違い —. 第 20 回日本運動器リハビリテーション学会, 東京, 7 月, 2008.

内藤健二, 永野康治, 深野真子, 井田博史, 中澤公孝, 赤居正美, 福林 徹: 多点皮膚マーカー計測法の膝 OA 患者における歩行解析への応用 Part II — 膝 OA 患者と若年健常者の比較 —. 第 20 回日本運動器リハビリテーション学会, 東京, 7 月, 2008.

H Ida, Y Nagano, T Fukubayashi and M Akai: Kinematic mechanism of anterior cruciate ligament injury excluding the effect of knee intrinsic motion. Orthopaedic Research Society 54th Annual Meeting, San Francisco, March, 2008.

井田博史, 永野康治, 福林 徹, 赤居正美: 片脚着地動作における膝自動運動成分を考慮した前十字靭帯損傷メカニズムの推定. 第 34 回日本臨床バイオメカニクス学会, 東京, 12 月, 2007.

文 献

- 1) Andriacchi TP. et al: A point cluster method for in vivo motion analysis: applied to a study of knee kinematics. *J Biomech Eng.* **120**: 743-749, 1998.