

人工膝関節における最小侵襲手術とコンピュータ支援手術の進歩

三浦, 裕正
九州大学病院リハビリテーション部

岩本, 幸英
九州大学大学院医学研究院整形外科

<https://doi.org/10.15017/8821>

出版情報：福岡醫學雑誌. 98 (12), pp.411-417, 2007-12-25. 福岡医学会
バージョン：
権利関係：

総 説

人工膝関節における最小侵襲手術とコンピュータ支援手術の進歩

¹⁾九州大学病院 リハビリテーション部

²⁾九州大学大学院医学研究院 整形外科
三浦 裕 正¹⁾, 岩本 幸 英²⁾

はじめに

人工膝関節 (Total Knee Arthroplasty ; TKA) は, 高度に障害された膝関節表面を人工物で置き換えることによって, 疼痛を軽減し, 関節機能を回復させる術式である. 2005 年の日本国内での人工関節市場調査によると, 年間約 4 万 5 千件の TKA が実施されており, 近年, 手術症例数は飛躍的に増加している. 本格的な人工関節デザイン形状が提案されてから, 現在までたかだか 40 年の歴史しかないが, これまでに材質, デザインの変更や手術手技, 手術器械の改良などを経て, 現在では安定した長期成績が得られる極めて有効な術式として認知されている. またこのような TKA の長期成績の向上と相俟って, 最近では最小侵襲手術 (MIS : minimally invasive surgery) とコンピュータ支援手術 (CAOS : computer assisted orthopaedic surgery) を用いた TKA が注目を集めている. 本稿では, TKA の基本的知識と共に, MIS と CAOS の現状について概説する.

1. TKA の基本知識

i) TKA の歴史

TKA は, 1940 年に Campbell が金属で大腿骨遠位端を被覆するタイプの中間挿入物を使用したことに始まる. 1951 年には Walldius がアクリル製, 後に金属で蝶番型の TKA を開発し, 1953 年には Shiers も同様の蝶番型を発表した. しかし, 本来複雑な動きを示す膝関節において, 蝶番型のように単軸運動で大腿骨側と脛骨側のコンポーネント間を拘束するタイプを使用すると, コンポーネントと骨との界面に過度のストレスが集中する. このことに加えアクリルや金属どうしの組み合わせなど材質の問題もあり, 蝶番型では高率に失敗例を生み出す結果に終わった. その後, デザイン開発は, 表面置換型でコンポーネント間の拘束性を軽減したタイプが主流となり, 特に 1974 年に Insall により報告された Total Condylar Knee は, 極めて良好な長期成績を収め, 現行の TKA デザインの原型となっている¹⁾. 本人工関節の成功以来, デザイン, 材質や手術手技等の改良, 変遷を経て, TKA はさらに進化を遂げ, 現在では, 術後 10 年~15 年で 90%以上の survival rate を有する優れた再建法としての信頼性を確立している²⁾³⁾.

ii) TKA の基本構造

TKA の基本構造は, 大腿骨, 脛骨, 膝蓋骨のそれぞれのコンポーネントより構成される (図 1). 人工関節の材質に求められる特性は, 荷重に耐えうる機械的強度, 摺動面の耐摩耗性, 生体親和性, 加工性などである. これらの条件を満たす材料として, 現在では Co-Cr-Mo 合金, チタン合金, セラミックスと超高分子量ポリエチレンの組み合わせが主流である. 異物である人工物を骨と固着させる方法は, セメント (polymethylmethacrylate) を用いるタイプと, セメントを使用しないセメントレスタイプに大別される. セメントタイプは初期固定性に優れ, 骨質の不良な症例でも良好な固定性が期待できるが, 再置換手術が

Hiromasa MIURA¹⁾, Yukihide IWAMOTO²⁾

¹⁾ Rehabilitation Medicine, Kyushu University Hospital

²⁾ Department of Orthopaedic Surgery, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University

Progress of Minimally Invasive Surgery and Computer Assisted Orthopaedic Surgery in Total Knee Arthroplasty

必要となった場合には、骨欠損が大きくなる点が問題となる。一方、セメントレスタイプではインプラント表面に多孔構造を持つポーラスコーティングやハイドロキシアパタイトコーティングを行なうことにより骨組織を誘導する方法が採用されている。

iii) 機種を紹介

TKA の機種には大別すると後十字靭帯を温存する CR (cruciate retaining) タイプと、切離する PS (posterior stabilized) タイプが存在し、PS タイプでは安定性を得るためにポスト・カム機構を備えている。それぞれ、変形や不安定性の程度に応じて、使い分けられている。

デザインに関しては、摩耗量は接触面圧と摩擦移動量の積に依存するため、接触面圧が低い方が、摩耗には好条件となる。接触面圧は接触面の形状に依存し、解剖学的デザインを有する TKA においては、通常ポリエチレンの降伏強度を越える接触面圧が作用していると考えられている。そのため再置換症例では時に delamination と呼ばれる表層の剝奪や破壊がしばしば観察される。一方、適合性を高めることは接触面圧の低減につながるが、逆に、インプラントと骨界面でのストレスを増加させ、ゆるみを惹起するという危惧が生じる。そこで、従来からのポリエチレンインサートがベースプレートに固定されたいわゆる fixed bearing type に対し、ポリエチレンインサートとベースプレート間に可動性を持たせた mobile bearing type が新たに開発され、臨床応用されている。mobile bearing type は、摺動面の適合性を高めることにより接触面圧を低減し、ポリエチレンインサートとベースプレート間の可動性によって、界面でのストレスの集中を抑制している⁴⁾。

iv) 適応と手術成績

人工関節は変形性関節症や関節リウマチによる高度の関節破壊が存在し、強い疼痛や可動域制限、あるいは不安定性などの機能障害を伴う症例に対し適応となる(図2)。ゆるみや摩耗による耐用年数の問題から、一般的に60歳あるいは65歳以上が適応とされる。ただし、関節リウマチでは、若年者においても高度の関節破壊が見られることがあり、QOL向上のためには人工関節置換術を余儀なくされることも多い。人工関節は除痛効果と関節機能の改善に優れ、後療法が短期間で済む利点があり、人工股関節(Total Hip Arthroplasty; THA)、TKAともに10年以上の長期成績でも90%を越える安定した成功率が報告されている。

人工関節の長期成績を低下させる要因は、コンポーネントのゆるみやポリエチレンの摩耗が主体である。現行の人工関節は金属あるいはセラミックと超高分子量ポリエチレンの組み合わせを摺動面の材質として

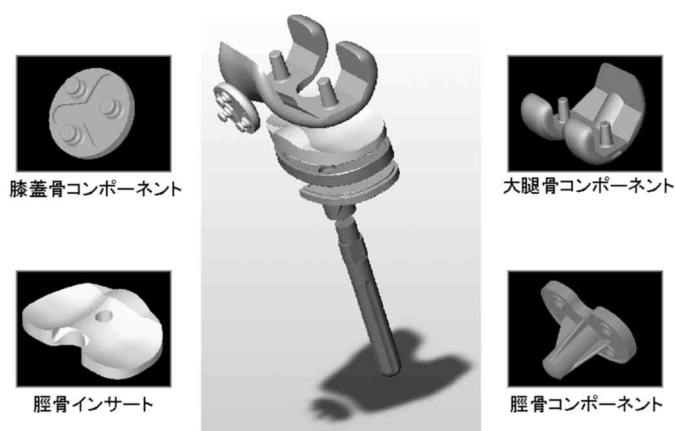


図1 TKAの基本構造

合金である大腿骨および脛骨コンポーネント、超高分子量ポリエチレンの脛骨インサート、膝蓋骨コンポーネントより構成される。

選択しているが、比較的良好な潤滑条件下にある THA においても、ポリエチレンの摩耗は不可避の現象である。生体内においてポリエチレン摩耗粉はマクロファージに貪食され、TNF α 、IL1、IL6 等のサイトカインが放出されることにより、破骨細胞が活性化され骨吸収が惹起され、ひいてはコンポーネントのゆるみにつながる危険性がある。

v) 合併症

人工関節手術は通常バイオクリーンルーム内で、かつ face mask を装着して行われるが、深部感染は 0.5~10% 程度の頻度で発生する。一旦感染を起こすと難治性であり、インプラントの抜去を余儀なくされることも多い。抜去後、病巣の徹底的な搔爬と洗浄、さらに抗生剤含有セメントの充填により感染が鎮静化したことが確認できれば、再置換術を実施する。

他の合併症として、近年では術後の深部静脈血栓症と、それに続発する肺塞栓症の問題が注目を浴びている。静脈造影にて診断した深部静脈血栓症の発生頻度は、TKA で 40~84% と報告されており、かなりの高頻度に及んでいる。一方、致死性肺塞栓症の頻度は 0.2~0.7% 程度と報告され、わが国ではさらに発生頻度は低いものの、早期診断と予防対策の重要性が強調されている⁹⁾。

2. MIS-TKA

i) MIS とは

MIS とは、できるだけ小さな皮切で、生体組織の損傷を最小限にして行う手術を意味する。現在、世界的に MIS の大きな潮流が存在し、外科領域においては、腹腔鏡や胸腔鏡など内視鏡手術が広く行われるようになってきている。

一方、整形外科領域での鏡視下手術は 1980 年代より膝関節を中心に急激な進歩を遂げ、現在では標準的な治療法として肩関節、手関節、股関節など広範囲に適用が広がっている。脊椎外科領域においても内視鏡下椎間板ヘルニア摘出術 (micro endoscopic discectomy, MED) が注目を集めている。これらの低侵襲手術への流れは、近年の早期リハビリテーションや入院期間短縮の必要性など医療経済的な要因もからんで、ますます加速しつつあり、この流れが TKA にも波及していると言える。

従来、TKA では 15~20 cm ぐらいの大きな皮膚切開を加え、内側傍膝蓋アプローチなどで膝関節を大きく展開して、全貌を視野に置きながら手術をおこなっていた。前述したように長期成績は良好であるが、術後の疼痛と機能回復まで時間がかかることが患者の不満であり、大腿四頭筋の切離と膝蓋骨の翻転により長時間の過緊張を強いるために伸展機構への永続的な障害を引き起こす可能性も指摘されており、Silva らは術後 2 年においても 30.7% の大腿四頭筋力低下が認められたと報告している⁶⁾。

ii) MIS の歴史

TKA における MIS は、1999 年に Repicci が発表した MIS-UKA (単顆関節置換術) が端緒となっている⁷⁾。UKA は内側あるいは外側コンパートメントに局限した関節症に対して行われる術式であるが、TKA に比較し長期成績がやや劣るとの認識から敬遠される傾向にあったが、デザインの改良に加え、MIS-UKA が出現したことにより再認識されるようになり、現在では適応の拡大と共に、UKA では MIS が標準的な

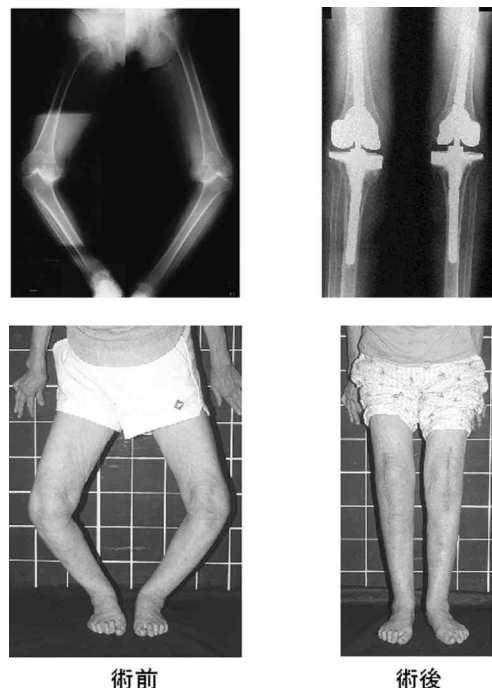


図 2 関節リウマチ患者に対する TKA

左：術前において著明な内反変形を認める。
右：TKA 術後、変形は矯正され、疼痛は消失、機能的にも良好であり、患者の満足度は極めて高い。

術式となっている。一方、TKAについてはTria, Laskin らがに最初に導入して以来⁸⁾⁹⁾、徐々に拡大しつつあり、現在では多くのメーカーが MIS-TKA 用の専用治具を開発、提供している。

iii) MIS の定義

MIS の定義は一般的には皮切の大きさで決定される傾向にあり、通常 7~10 cm 程度の皮切で行われているが、MIS の本来の意義は膝伸展機構への侵襲を最小限にし、また大腿四頭筋の虚血につながる長時間の膝蓋骨回転をおこなわないことにあると考えられる。そして MIS 用に作られた専用の器械を使用することも重要な要素である。解剖学的に内側広筋斜走部 (VMO) の膝蓋骨付着位置はタイプ I~III に分類され、タイプ I は膝蓋骨上縁より近位で終わるもの、タイプ II は膝蓋骨上縁レベルに付着するもの、タイプ III は膝蓋骨上縁より遠位レベルに付着するものとおおまかに定義されている。MIS 手技では VMO への侵襲を極力さけることが望ましいが、膝蓋骨を側方へスライドさせるためには、膝蓋骨上縁レベルまでの関節包切開を必要とすることが多く、VMO の付着位置によっては一部筋の切離を余儀なくされる場合もある。

iv) MIS-TKA の長所、短所

MIS には、手術後の痛みが少なく離床時期が早い、入院期間が短い、美容的に優れるなど多くの利点がある。しかし、最小侵襲手術は高度な技術が要求され、その手術に習熟した外科医が細心の注意をはらって行うべき手術であると言える。短所として、手術時間の延長は不可避であるが、手技に慣れれば十分 1 回のターニケット時間で終了可能である。またインプラント設置異常が時に指摘されるが、我々の初期の症例でやや側方に偏位する傾向を認めたのみで、設置角度やアライメント自体は従来法と同等の精度であった。創治癒に関しては、やや発赤や遷延癒合を認めることがあるが、二次縫合が必要になったケースはない。症例の選択は慎重に行うべきであり、骨粗鬆症の強い症例や肥満、骨格の大きい症例、また拘縮の著明な症例は適応外と考えた方がよい。

v) 従来法との比較

我々は、MIS24 膝と内側傍膝蓋アプローチの従来群 43 膝の短期成績について比較検討した¹⁰⁾。術前の年齢、性別、体重、可動域、術前 Knee Society Score の各項目について 2 群間でマッチングを行った。検討項目は、COMBIT CB2 を用いた術前術後の膝伸筋、屈筋トルク、伸展下肢挙上、90°膝屈曲、T 字杖歩行の達成日および visual analogue scale (VAS) による疼痛評価である。術後経過観察期間は MIS で 16 ケ月 (7-28 ケ月)、従来群で 14 ケ月 (7-24 ケ月) であった。皮切は MIS 群で 8.8 cm、従来群 14.3 cm であった。

MIS 群と従来群間で、術後 1, 2 週における伸筋トルクを比較すると、MIS 群で有意に高い値を認めた。また伸展下肢挙上、90°膝屈曲、T 字杖歩行の達成日はいずれも MIS 群で有意に早期であり、VAS も MIS 群で有意に低値を示していた。X 線評価においては、大腿骨コンポーネント、脛骨コンポーネント共にアライメントに関して両群間に有意差を認めなかったが、MIS 群において脛骨コンポーネントの内側変位の発生率が有意に高かった。

以上のように MIS は従来法と比較し、術後早期の疼痛軽減と機能改善が得られ、美容的にも優れていたが、脛骨コンポーネントの挿入に関しては内側変位に注意すべきと考えられた。

3. CAOS

i) 従来法の問題点

人工関節にインプラントを正確に挿入することは、長期成績を安定させるために極めて重要な要素である。一般的に経験を積んだ術者は、経験の浅い術者と比較して、正確な手術が可能であるが、それでも結果にはある一定のばらつきが生じることは否めない。従来法での冠状面アライメントの決定には、大腿骨

では髓内ロッドを、脛骨では髓外ロッドが用いられることが多く、大腿骨側では髓内ロッドを基準にして、術前X線で計測しておいた機能軸と解剖軸の角度差をつけて、機能軸に垂直に遠位の骨切りをおこなう。一方、脛骨は髓外ロッドを機能軸に平行に設置しそれを指標に機能軸に垂直に骨切りをおこなう。しかしながら、従来法では、ロッドの設置位置が術者の操作に依存するため、3度以上のアライメント異常が25%前後に認められ、その精度は決して良好とは言えない¹¹⁾。また大腿骨回旋アライメントに関しても、内外側上顆を触知する方法では、3度以上のアライメント異常がやはり25%に発生することが報告されている¹²⁾。臨床的には3度以上の冠状面のアライメント異常が存在すると、長期成績が有意に悪化することが報告され¹³⁾、またコンポーネントの回旋アライメントに関しても膝蓋骨のトラッキング異常や脱臼が指摘されている¹⁴⁾。近年、より理想的なコンポーネントの設置を目指す目的で、コンピュータナビゲーションシステムの開発と臨床応用が進んでいる。コンピュータナビゲーションとは、術者の経験や勘に依存した要素を排除し、誰が行っても正確なコンポーネントの設置を可能にする術式であり、基本的に術前CTを利用するCT-basedと、CTを使用しないimage-freeに大別される。

ii) 原理および使用手順

当科ではCT-basedコンピュータナビゲーションシステムを導入している。本システムの概要はまず、術前計画として患肢の股関節、膝関節、足関節の中心部周辺のCTを撮影し、3次元再構築モデルを作成する。大腿骨骨頭中心、足関節中心から設定した軸情報をもとに、骨切り量、インプラントのサイズ、前後方向、回旋の調節を行う。次にレジストレーションと呼ばれるコンピュータ内の骨モデルの座標データと、実際の骨表面座標の位置合わせのための操作を行うために、リファレンスクランプを骨幹部に設置し、ポインターで、骨表面を任意に最大20カ所ポイントする。システムがこれらの赤外線反射球の3次元座標を認識することによって、実際の骨表面形状と3次元画像上の位置情報を一致させる。実際のナビゲーションでは、システムによって術前計画に基づいた骨切りの誘導が行われる。骨切りに際しては、カッティングブロックアダプターを骨切りガイドのスロットに差込むことで、青色の骨切り面情報が画面に表示され、術前計画による黄色の骨切り面と重なるようにガイドの位置を調整し、固定した後、骨切りを実施する。

iii) 精度検定

我々は、屍体膝および臨床例を用いて、CT-basedコンピュータナビゲーションシステムの精度を検定しているので、得られた知見について述べる¹⁵⁾。屍体下肢9肢13膝を対象にCTを撮影し、BrainLAB社製Vector Visionを用いて大腿骨、脛骨とも骨切りを行ない、冠状面におけるコンポーネント設置の精度について検討した。冠状面での骨頭中心、足関節中心とのずれを計測し、予定アライメントとの角度誤差に換算した。平均角度誤差は、大腿骨側で0.3度内反(0.0~0.8)、脛骨側で-1.1度外反(-2.6~1.1)であり、いずれも3度以内の誤差範囲に収まっていた。

次に臨床例を用いた精度検定では2002年1月から2006年2月までに同一機種を使用した69関節を対象とした。ナビゲーションは35関節、従来法は34関節である。アライメントの評価は立位下肢全長および26症例についてはCTによる検討を追加した。

冠状面アライメントの精度では、180度を目標としたHip Knee Ankle angleの平均値はナビゲーション180.8度、従来法182度であり、理想範囲には91.4%および70.6%と有意にナビゲーションが理想範囲に収束していた。90度を目標とした大腿骨側の冠状面アライメントは、ナビゲーションで89.4度、従来法で88.5度であり、理想範囲には91.4%および70.6%と有意差を認めた。同様に90度を目標とした脛骨側の冠状面アライメントは、ナビゲーション89.8度、従来法89.5度であり、理想範囲には94.3%および73.5%と有意差を認めた。矢状面のアライメントの精度については、90度を目標とした大腿骨側の計測で、ナビゲーションは89.6度、従来法は85.4度であり、理想範囲は88.6%および44.1%と有意差を認めた。

回旋アライメントの精度についても、ナビゲーションが優れており、大腿骨側での理想範囲はナビゲーションで88.5%、従来法で64.7%と有意差を認めた。脛骨側に関しても理想範囲はそれぞれ76.9%および38.2%と有意差を認めた。

iv) 考察

冠状面アライメントにおける精度については、CT-based, image-freeに関わらず、従来法に比較して、良好な精度が報告されている^{16)~19)}。本研究の結果も90%以上が理想範囲内に収束しており、ほぼ同等の結果であった。大腿骨側の矢状面アライメントにおける精度についても、ナビゲーションシステムのほとんどが良好な精度を報告している²⁰⁾²¹⁾。本研究においても従来法に比較し著明にアライメント異常を減少させていた。従来法における髄内ロッドは、刺入位置及び刺入方向によってアライメントが不正確となる可能性があると考えられる。

回旋アライメントにおける精度については、これまでimage-freeナビゲーションシステムの報告のみであったが、精度が向上するという報告の反面²²⁾²³⁾、従来法と変化はないという報告も散見される²⁴⁾²⁵⁾。これはimage-freeでは回旋精度を解剖学的ランドマークをポイントする手技に依存することが一因と考えられる。それに対して、今回のCT-basedナビゲーションシステムの精度は大腿骨、脛骨ともに著明にアライメント異常を減少させていた。

ナビゲーションの利点を列挙すると、従来法に比べばらつきがなく正確であること。特に、変形の強い症例などの髄内ロッドの使用が好ましくない場合に有効であり、髄内ロッドを使用しないため、髄内から脂肪などの塞栓物質の放出を抑えることができる。一方、欠点として、システムが大変高価であること。手術時間がやや長くなること。CT-basedでは被爆の問題が不可避である。また術中のシステムの故障やリファレンスフレームの固定がゆるんでしまうといった可能性もある。

4. 将来の展望

MISは臨床的にも医療経済的にも有用な術式ではあるが、一方では、術野の制約により、術者の高度の技術、長期のラーニングカーブが要求され、ややもすると術後の下肢アライメント不良、コンポーネントの設置位置不良、軟部組織へのダメージ、手術時間の延長、ひいては術後成績の悪化などの危険性をはらんでいる。これらの問題点を解決するためには、MISとCAOSとの融合をはかり、両者の特長を補間する技術を確認することが不可欠であると考えられる。これらの新規技術の融合により、手術侵襲の極小化と、安全かつ正確なTKA手術の実現が可能となる。また、手術時間の短縮も期待され、従来の手術のように髄内ロッドを大腿骨や脛骨の髄腔内に挿入する必要性もなくなるため、人工関節置換術の重篤な合併症である肺塞栓血栓症の予防にもつながる。さらに早期リハビリテーションの実施は、患者の機能回復に大きな利点をもたらす、入院期間のさらなる短縮化にもつながることが期待される。

今後、以上のような手術法の革新とデザインや材質のさらなる改良によって、患者に優しく、より機能的で長期耐用性を有するTKAの実現が可能になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Insall J, Ranawat CS, Scott WN and Walker P: Total condylar knee replacement: preliminary report. Clin Orthop 120: 149-154, 1976.
- 2) Colizza WA, Insall JN and Scuderi GR: The posterior stabilized total knee prosthesis. Assessment of polyethylene damage and osteolysis after a ten-year-minimum follow-up. J Bone Joint Surg 77-A: 1713-1720, 1995.
- 3) Ranawat CS, Flynn WF, Jr, Saddler S, Hansraj KK and Maynard MJ: Long-term results of the total condylar knee arthroplasty. A 15-year survivorship study. Clin Orthop 286: 94-102, 1993.
- 4) Buechel FF and Pappas MJ: Long-term survivorship analysis of cruciate-sparing versus cruciate-sacrificing knee prostheses using meniscal bearings. Clin Orthop 260: 162-169, 1990.

- 5) 肺血栓塞栓症/深部静脈血栓症(静脈血栓塞栓症)ガイドライン作成委員会, 肺血栓塞栓症/深部静脈血栓症(静脈血栓塞栓症) ガイドライン. 整形外科手術. 東京, Medical Front International Limited, 2004.
- 6) Silva M, Shepherd EF, Jackson WO, Pratt JA, McClung CD and Schmalzried TP: Knee strength after total knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 18: 605-611, 2003.
- 7) Repicci JA and Eberle RW: Minimally invasive surgical technique for unicondylar knee arthroplasty. *J South Orthop Assoc* 8: 20-27, 1999.
- 8) Tria AJ, Jr and Coon TM: Minimal incision total knee arthroplasty: early experience. *Clin Orthop* 416: 185-190, 2003.
- 9) Laskin RS and Beksac B: Minimally invasive total knee replacement through a mini-midvastus incision: an outcome study. *Clin Orthop* 428: 74-81, 2004.
- 10) Tashiro Y, Miura H, Matsuda S, Okazaki K and Iwamoto Y: Minimally Invasive versus standard approach in total knee arthroplasty. *Clin Orthop* 463: 144-150, 2007.
- 11) Mahaluxmivala J, Bankes MJ, Nicolai P, Aldam CH and Allen PW: The effect of surgeon experience on component positioning in 673 Press Fit Condylar posterior cruciate-sacrificing total knee arthroplasties. *J Arthroplasty* 16: 635-640, 2001.
- 12) Kinzel V, Ledger M and Shakespeare D: Can the epicondylar axis be defined accurately in total knee arthroplasty? *Knee* 12: 293-296, 2005.
- 13) Ritter MA, Faris PM Keating, EM and Meding JB: Postoperative alignment of total knee replacement. Its effect on survival. *Clin Orthop* 299: 153-156, 1994.
- 14) Berger RA, Crossett LS, Jacobs JJ and Rubash HE: Malrotation causing patellofemoral complications after total knee arthroplasty. *Clin Orthop* 356: 144-153, 1998.
- 15) Nabeyama R, Matsuda S, Miura H, Mawatari T, Kawano T and Iwamoto Y: The accuracy of image-guided knee replacement based on computed tomography. *J Bone Joint Surg* 86-B: 366-371, 2004.
- 16) Perlick L, Bathis H, Tingart M, Perlick C and Grifka J: Navigation in total-knee arthroplasty: CT-based implantation compared with the conventional technique. *Acta Orthop Scand* 75: 464-470, 2004.
- 17) Nizard RS, Porcher R, Ravaud P, Vangaver E, Hannouche D, Bizot P and Sedel L: Use of the Cusum technique for evaluation of a CT-based navigation system for total knee replacement. *Clin Orthop* 425: 180-188, 2004.
- 18) Bathis H, Perlick L, Tingart M, Luring C, Zurakowski D and Grifka J: Alignment in total knee arthroplasty. A comparison of computer-assisted surgery with the conventional technique. *J Bone Joint Surg* 86-B: 682-687, 2004.
- 19) Bolognesi M and Hofmann A: Computer navigation versus standard instrumentation for TKA: a single-surgeon experience. *Clin Orthop* 440: 162-169, 2005.
- 20) Bathis H, Perlick L, Tingart M, Luring C, Perlick C and Grifka J: Radiological results of image-based and non-image-based computer-assisted total knee arthroplasty. *Int Orthop* 28: 87-90, 2004.
- 21) Haaker R. G, Stockheim M, Kamp M, Proff G, Breitenfelder J and Ottersbach A: Computer-assisted navigation increases precision of component placement in total knee arthroplasty. *Clin Orthop* 433: 152-159, 2005.
- 22) Stockl B, Nogler M, Rosiek R, Fischer M, Krismer M and Kessler O: Navigation improves accuracy of rotational alignment in total knee arthroplasty. *Clin Orthop* 426: 180-186, 2004.
- 23) Chauhan S. K, Scott R. G, Bredahl W and Beaver RJ: Computer-assisted knee arthroplasty versus a conventional jig-based technique. A randomised, prospective trial. *J Bone Joint Surg* 86-B: 372-377, 2004.
- 24) Siston RA, Goodman SB, Patel JJ, Delp SL and Giori NJ: The high variability of tibial rotational alignment in total knee arthroplasty. *Clin Orthop* 452: 65-69, 2006.
- 25) Matziolis G, Krockner D, Weiss U, Tohtz S and Perka C: A prospective, randomized study of computer-assisted and conventional total knee arthroplasty. Three-dimensional evaluation of implant alignment and rotation. *J Bone Joint Surg* 89-A: 236-243, 2007.

(参考文献のうち、数字がゴシック体で表示されているものについては、著者により重要なものと指定された分です。)