

# 人工股関節全置換術における創意工夫

## ～モバイルCアームとの組み合わせでAugmented reality-basedナビゲーションを最大限有効活用する試み～



独立行政法人地域医療機能推進機構 (JCHO) 九州病院 整形外科

河野裕介

要旨：近年、人工股関節全置換術におけるインプラント、特にカップの正確な設置を目的としたコンピュータ支援手術が広く普及しつつある。当院ではARを用いたナビゲーションシステムを導入しているが、その使用においてレジストレーションを最重要ステップの1つと位置付けている。本稿では、ナビゲーションを最大限有効活用するためのCアームを併用したレジストレーションの検証・修正方法と、この手技によるカップ設置精度について紹介する。

### JCHO九州病院の施設概要と整形外科診療

独立行政法人地域医療機能推進機構 (JCHO) 九州病院 (以下、当院) の前身である九州厚生年金病院は、1955年に日本で3番目の厚生年金病院として福岡県北九州市八幡西区の黒崎に設立された。当時は整形外科を主体に、内科・外科の3科90床の病院としてスタートし、徐々に診療科を増やしてきました。2004年に現在の地に移転し、その後も手術室の増室や集中治療室の増床など、診療機能の拡充を図っています。2014年に病院管轄機構の移管に伴い、現在のJCHO九州病院へと改称されました。2025年には開設70年を迎え、48診療科・575床の北九州西部地区における高度急性期・専門的医療を中心とする基幹病院としての役割を担い続けています (図1)。

当院整形外科は九州大学整形外科の関連病院の1つであり、現在、10名のスタッフで脊椎疾患、関節疾患 (特に股関節、膝関節) 及び外傷を中心に、手術を主とした急性期医療を提供しています。2023年度の手術件数は895件であり、そのうち人工股関節全置換術 (Total Hip Arthroplasty: THA) は118件施行しました。本稿では、インプラント

設置精度を追求した当院のナビゲーション併用THAの創意工夫をご紹介します。

### 人工股関節全置換術と手術アプローチ → トリハンドの変遷と当院の AL-Supineアプローチ

THAは「The operation of the century」とLancet誌に掲載され、20世紀で最も成功した整形外科手術とも評されています。高い除痛効果に加え、関節可動域や脚長差の補正なども可能であり、変形性股関節症をはじめとする股関節疾患を抱える患者に大きな福音をもたらしてきました。1960年代に英国で現在の人工股関節システムの原型ともいえる概念が考案され、その後も材料工学の進歩に伴うインプラントの改良や手術手技の進歩により、現代のTHAでは20〜30年以上の耐久性も期待されるようになってきています。それに伴い、かつては60歳が目安とされていた手術年齢の下限も低年齢化しています。2022年度は国内で年間約8万件のTHAが施行されており、その症例数は毎年増加傾向を示しています。

THAにはいくつかの手術アプローチがあり、かつては股関節後方の筋腱を切離して関節に進入する後方アプローチが主流でした。2012年度の日本人工関節学会の資料によると、後方アプローチが50%を占め、次いで側方アプローチが34%、前方アプローチはわずかに15%と報告されました。それが10年後の2022年度の同学会のレジストリーデータでは、後方アプローチは32%、側方アプローチは15%にそれぞれ減少し、前方アプローチが53%と過半数を超えるまでに増加しています。

このデータからも示されているように、近年のト



図1 JCHO九州病院の外観



図2 当院で使用しているTHAインプラントの一例 (ジョンソン・エンド・ジョンソン社)

レンドは前方系のアプローチにシフトしています。当院では、2016年に仰臥位前外側アプローチ (AL-Supineアプローチ) を導入し、現在、90%以上のTHAにAL-Supineアプローチを適応しています。このアプローチの主なメリットとして、①筋間アプローチ (最小侵襲手術 (MIS)) に分類される手術であり、筋肉を切らない手術と表現されることもあります) により術後の機能回復が早い、②短外旋筋群などの後方軟部組織を温存できるため関節安定性が高く (Ⅱ脱臼抵抗性が高く)、術後の動作制限が不要、③仰臥位手術であること (カップの設置が安定する、Cアームを入れやすくインプラント設置をリアルタイムに画像で確認できる、脚長さの確

認が容易、体位をとる時間が節約できる、麻酔科医や手術室スタッフが患者管理しやすい)、などが挙げられます。一方、側臥位で行う後側方アプローチと比較すると、大腿骨側の操作性がやや落ちる点は、デメリットかもしれません。現時点では、大腿骨骨切り術後のTHA、高位脱臼股に対する大腿骨短縮骨切り併用THA、人工股関節再置換術などは後側方アプローチの対象としていますが、当院では常に手術手技のupdateに努めながらAL-Supineアプローチの適応を拡大しています。

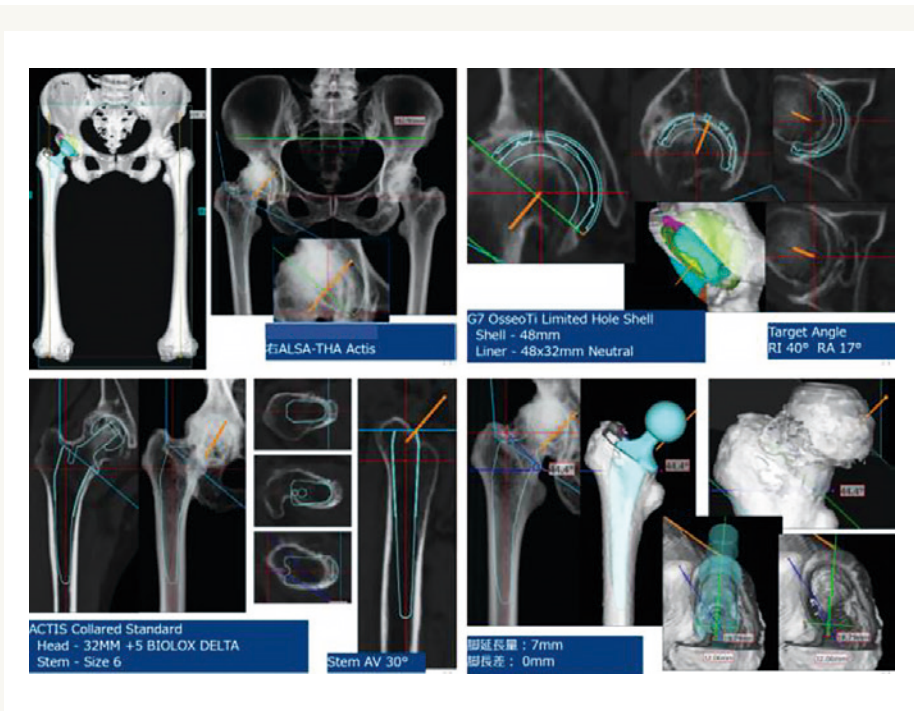


図3 3次元術前計画ソフトウェアZedHip (Lexi社) を使用した当院の3D術前計画

THAのインプラントを正確に設置するためにポータブルナビゲーションの普及

THAのインプラントは主にカップ、ライナー、ヘッド、ステムから構成されており (図2)、その



中でもカップとステムの設置位置・設置角度が重要です。従来は単純X線画像から2次元で術前計画を立てていましたが、必ずしも撮影の股位が一定では

なく、奥行きも評価できないため、経験の浅い術者における2D術前計画にはどうしても限界があります。さらに、THAの原因疾患として最多の変形性

股関節症ですが、日本人においては寛骨臼形成不全に由来する割合が高いことが知られています。寛骨臼形成不全の股関節では骨形態に男女差や大

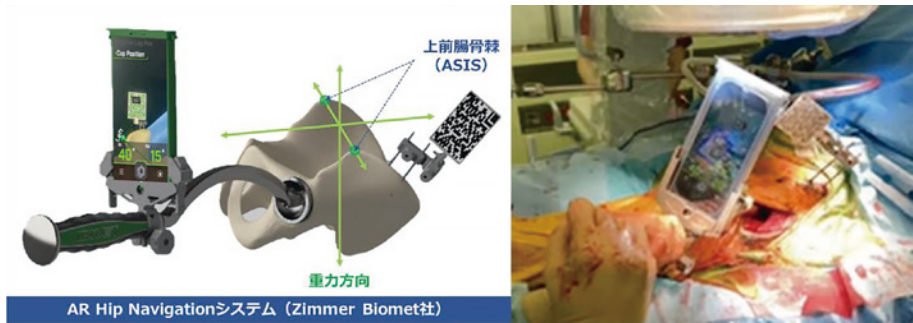


図4 AR Hip Navigationシステム (ジンマー・バイオメット社)

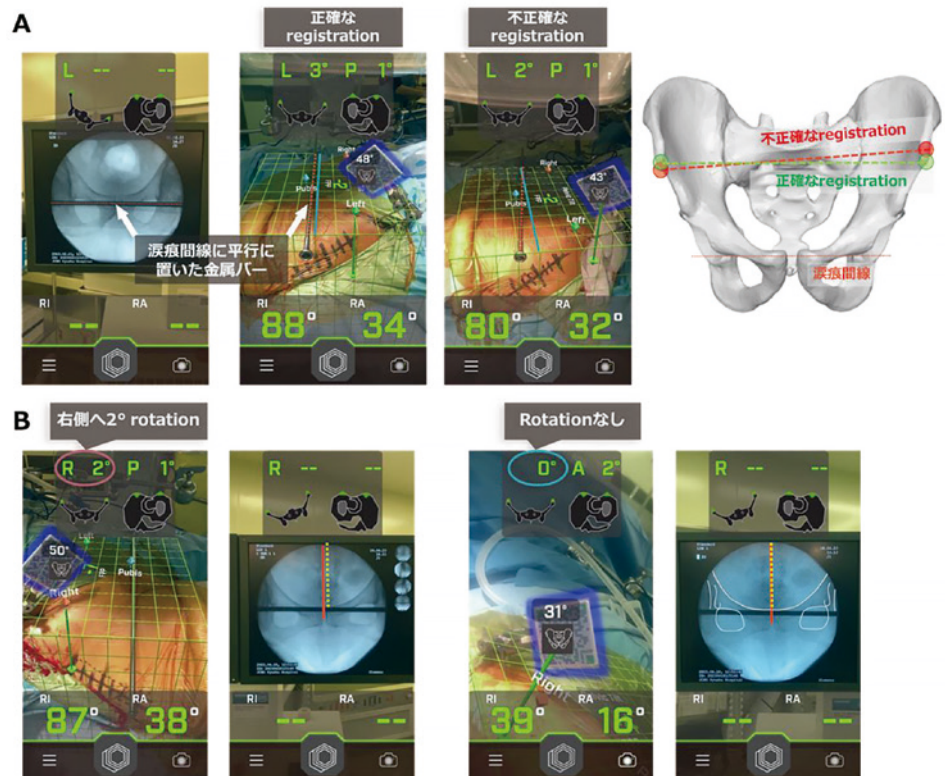


図5 Coronal plane(A)とAxial plane(B)におけるregistrationのvalidation

大きなバリエーションが存在することから、画一的な術前計画ではなく、症例毎に個別の術前計画を立てることが望ましく、現代のTHAではCT画像を利用した3次元での術前計画を行う施設が増加しています。専用の3D術前計画ソフトを使用すれば、骨盤・大腿骨それぞれに定義された3次元座標系を基準に最適なインプラントやサイズの決定、また設置位置を自在に設定でき、さらには術後の可動域をシミュレーションすることもできるため、非常に有用です<sup>2)</sup>。

近年では、脊椎と骨盤の関係や立位、座位での骨盤傾斜を考慮したインプラント設置角度が提唱されており、当院では全ての症例で1mm・1単位での3D術前計画を立案して手術に臨んでいます(図3)。適切な位置にインプラントを設置する目的は、摺動面の摩擦や脱臼、腸腰筋インピンジメントなどの合併症と関連し、また脚長差による歩行機能低下や患者満足度低下などにもつながり得ることから、良好な術後成績を獲得するための非常に重要な因子であるからです。

3D術前計画を立てたとして、その計画を術野でいかに正確に再現できるかも大切なポイントです。ナビゲーションを使用しないマニュアルでのインプラントの設置においては、術者の経験や感覚に依存するところが少なからずあり、特に側臥位手術では術中の体位のずれなどの影響も加わり、ある程度の設置のばらつきは避けられないものでした。この課題を解決する手段として発展してきたのが、コンピュータ支援手術(Computer Assisted Surgery: CAS)です。本邦では2000年代にCT-basedナビゲーションが薬事承認され、良好な設置精度が報告されましたが、高いコストなどの問題により、導入は大学病院など一部の施設に限られていました。

当院では、従来のマニュアルカップ設置における目標値からの絶対値誤差は5°~6台でしたが、2011年に開始した側臥位手術における独自の工夫“レーザーガイドテクニク”によって、その誤差が3台に改善したことを報告しました<sup>4)</sup>。

その後、2010年代中盤から比較的安価かつ簡単に導入できるポータブルナビゲーションシステムが各社から次々に上市され、本邦での初回THAにおけるナビゲーション使用率は、2012年度の6.3%から2022年度には27.8%に急増しました。正確なカップ設置を求める術者のニーズを満たし、かつコストパフォーマンスに優れたポータブルナビゲーションがCASを国内で急速に普及させている一因と考えられます。

### イメージ併用ナビゲーションの手術テクニクとカップ設置精度

当院では、ポータブルナビゲーションの中でも拡張現実(Augmented Reality: AR)技術を応用したAR Hip Navigationシステム(以下、AR Hip Zimmer Biomet社、図4)を2022年に導入しました。このシステムは、THAにおけるカップ設置の指標となるRadiographic inclination (RI)とRadiographic anteversion (RA)という2つの角度をリアルタイムに表示して術者をサポートします。ナビゲーションの機種によりレジストレーション方法はさまざまですが、AR Hipでは仰臥位で両側の上前腸骨棘(A SIS)を体表から触れてレジストレーションすること、A SISを結ぶ軸(多くはカップ設置の基準線となる涙痕間線と平行)、重力方向の軸、及びそれらと直行する軸からなる座標系(Functional Pelvic Plane: FPP座標系)が

設定されます(図4)。レジストレーションが完了すれば、腸骨稜に立てたマーカーをカップハンドルに装着したPhoneのカメラで認識することで術中の骨盤の動きもトラッキングできるため、常にFPP座標系基準のカップの角度(RIとRA)を確認しながらカップを打ち込むことができます(図4)。

一度のレジストレーションでA SISが正確にポイントできれば良いのですが、例えば肥満症例などでは骨ランドマークが触れにくく、必ずしも正確なポイントでレジストレーションできない可能性があります。不正確なレジストレーションは設置の誤差に直結するため、レジストレーションは最重要ステップの1つとして位置付けています。当院では、AR Hip導入当初より「レジストレーションをモバイルCアーム(外科用X線撮影装置)で検証する」ことを行ってきました。ここで確認するポイントは、coronal planeにおける誤差、axial planeにおける誤差の有無です。以下にその概要を記します。

#### ① Coronal planeの検証

レジストレーションしたA SISを結ぶ線と、透視下に涙痕間線に平行に置いた金属バーの位置関係を、Phone画面上で確認します(図5A)。これが平行であれば次のステップに進みますが、平行でなければその誤差が直接RIの誤差に影響するため、レジストレーションをやり直します。注意点として、涙痕間線に置くバーは骨盤のローテーション(画面上のRもしくはLの角度)を考慮しておく必要があります。頭側・尾側から振って見てもグリッドラインとバーが同様に平行であることを確認します。

#### ② Axial planeの検証

骨盤のローテーションを徒手的に調整して、iPhone画面上のR/Lの角度を0度(ローテーションが正中)とした時のイメージ画像を確認します



図6 Cアームをカップ中心に調整し、RI/RAの見え目とAR Hip表示値に乖離がないかダブルチェック

があったことから、現在でも術中カップ設置時にCアームを入れてダブルチェックを行っています<sup>5)</sup>(図6)。レジストレーション手技の安定とともにその乖離は次第になくなってきましたが、この手法によって、カップ設置角の誤差の絶対値は $RI=1.6^{\circ}\pm 1.4^{\circ}$ 、 $RA=1.8^{\circ}\pm 1.4^{\circ}$ という、2を下回る精度が達成できました。文献的には仰臥位手術におけるポータブルナビゲーションのカップ設置誤差は $2^{\circ}\sim 4$ 台とされています<sup>7)</sup>ので、当院のデータは比較的良好な精度です。角度に関しては、CT-basedナビゲーションに匹敵する精度と言えらると思います。

### 本稿のまとめと将来の展望

カップ設置のアウトライナーを減らす目的でナビゲーションを用いるのであれば、通常の手技でも一定の成果が期待できると思われます。しかし、当院では入念に検討した3D術前計画を術野でいかに正確に再現できるかにこだわり、精度を追求した手術を行うことが安定したTHAの長期成績を得るための必要条件の一つと考えています。AR Hipでは、モバイルCアームとPhoneの画面を通してレジストレーションがvalidationできるため、レジストレーションに誤差があればそれを修正、もしくはレジストレーションの誤差を考慮に入れた設置をする<sup>6)</sup>ことでナビゲーションの有用性を最大限に引き出すことができ、術前計画を再現する一助となります。

本稿では、ポータブルナビゲーションに関する現時点での当院の手技とその精度をご紹介しましたが、THAにおけるCASはますます発展していくことが見込まれます。最先端のテクノロジーの一端として、術前計画の骨切除とカップ設置を高度に再現す

るロボティックアーム手術支援システムやAIを搭載した次世代のCT-basedナビゲーションなどは、既に一部の施設で臨床応用されています。これらのシステムでは、CTとマッチングさせることでカップの角度だけでなく位置情報も得られるため、さらに正確な手術が可能になるかもしれません。また、現時点ではやや実用性に欠けるシステム側のナビゲーションについても今後の発展が期待されます。

### 参考文献

- Learnmonth ID, Young C, Rorabeck C. The operation of the century: total hip replacement. *Lancet* 2007;370:1508-1519.
- 河野裕介、中島康晴：「関節温存のための変形性股関節症治療戦略」病態評価 寛骨臼形成不全股の骨形態評価 Monthly Book Orthopaedics 2022;35:1-10.
- Kohno Y. CORR Insights®: What are the sex-based differences of acetabular coverage features in hip dysplasia? *Clin Orthop Relat Res* 2022;482:1984-1986.
- Kohno Y, Nakamura T, Fujii M, Shin S, Hara T. A laser guide technique: a novel method for accurate acetabular cup alignment in total hip arthroplasty. *Sci Rep* 2022;12:18247.
- 河野裕介、中村哲郎：ALSアプローチTHAにおけるイメージガイド下カップ設置角の精度 日本人工関節学会誌 2022;52:463-464.
- 河野裕介、蛭原宗大：AR Hip Navigationを最大限有効活用するためにイメージ併用レジストレーションの有用性～Hip Joint 2024;50:68-73.
- Hasegawa M, Naito Y, Tone S, Sudo A. Comparison between accuracy of augmented reality computed tomography-based and portable augmented reality-based navigation systems for cup insertion in total hip arthroplasty. *Sci Rep* 2024;14:8332.

※ ※

河野裕介（このの・ゆうすけ）●07年神戸大学医学部医学科卒業。九州大学 整形外科入局後、関連病院を経て13年九州大学大学院入学、17年学位取得（医学博士）。同年より米国スタンフォード大学 整形外科留学、19年帰国後よりJCHO九州病院 整形外科（現職）。

(図5B)。恥骨結合と仙骨・尾骨の位置関係、骨盤腔・閉鎖孔の見え方、Köhler's line・Year dropの左右差などを参考にFPPであることを確認して、手術を開始しています。

AR Hip導入当初50例の自験例では、許容範囲内の正確性(1°～2°以内)が得られていたのは29例(58%)であり、残りの21例(42%)では複数回レジストレーションを要しました。この42%のケースでは、ナビゲーションを信じてカップを設置した場合、レジストレーションの誤差がそのまま設置の誤差につながった可能性があります。

さらには、導入初期のケースではAR Hipの表示値とイメージでのカップの見え方に乖離を認める例