

人工股関節手術と人工膝関節手術の進歩

九州大学病院 整形外科

濱井 敏

(2024 年 第 23 回博多リウマチセミナー)

はじめに

人工股関節置換術 (THA)¹⁾と人工膝関節置換術 (TKA)²⁾は共に、進行した変形性関節症、関節リウマチの関節病変に対する優れた除痛効果と機能回復をもたらす術式として良好な長期成績が報告されている。高齢者人口の増加、さらには研究・臨床の両面における様々な進歩 (右図) に基づく術後成績の向上により、症例件数は年々増加している。

THA & TKAの進歩

- 摺動面材料
- 表面加工・形状
- 周術期Periprosthetic fracture
- 脱臼対策 (THA)
- 3D術前計画
- コンピュータ支援
- 感染・出血・DVT・疼痛対策
- 術後活動性
- 動作解析
- Smart follow up

● 摺動面材料

以前は THA や TKA を行えばある程度疼痛は改善するが、日常生活動作にかなり制限があり、また、摺動面ポリエチレンの摩耗粉による人工関節周囲の骨溶解とインプラントの弛みにより、術後 10 年程度で再置換術が必要であった。しかし、90 年代後半に、低線量照射によって高度架橋化されたポリエチレン (crosslinked ポリエチレン : XLPE) が開発され、特に THA において、極めて高い耐摩耗性と著しい骨溶解・弛みの低減に伴う長期耐容性の向上が数多く報告されている^{3,4)}。

● 表面加工・形状

THA におけるセメントレスカップでは、海綿骨を模した構造を有する highly porous metal (3D ポーラス) が開発され、粗面加工より高い初期固定性が報告されている⁵⁾。セメントレスシステムでは、fit-and-fill システムと比べて前後幅が薄く大腿骨近位部の骨組織が温存される taper wedge システムにおいて、ステム沈下や骨折リスクの低下が報告⁶⁾され、使用率は拡大している。近年、カラー付き full HA (ハイドロキシアパタイト) システムにおいて、周術期 periprosthetic fracture 率が低いことが報告⁷⁾されており (図 2)、米国における症例数が拡大、2021 年に taper wedge システムと同率となっている⁸⁾。また、セメントシステム固定は、高齢である程使用率は上がり (超高齢者: >90 歳で 31%)、全体としては 5% 程度に増加傾向にある⁸⁾。

TKA では、セメント固定が golden standard であるが、セメントインプラント界面における debonding の報告⁹⁾や長期的なセメント劣化の懸念もあり、3D ポーラスによるセ

メントレス固定の長期成績が近年期待されている。但し、セメント固定に比べて初期固定に劣り、手術手技がより繊細であり、過去のセメントレス固定における長期成績はセメント固定と比べて特に脛骨側で劣っている¹⁰⁾ことから、その適応には十分な注意を要する。

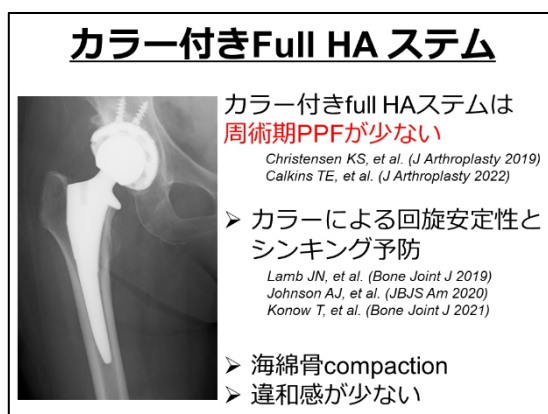


図 2：カラー付き full HA ステム

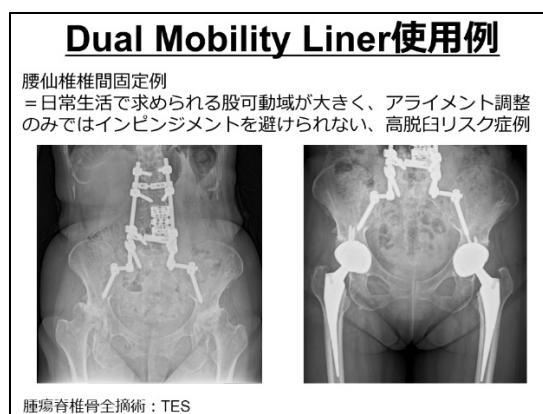


図 3: Dual mobility liner の使用例

● 脱臼 (THA)

初回 THA の脱臼頻度は 1～5%、再置換の脱臼頻度は 5～27%と報告¹¹⁾されている。Australia Registry 2015 では、再置換の原因を摺動面材料の種類で分けて検討しており、XLPE 使用例に限ると脱臼による再置換が最多となっている¹²⁾。

THA のアプローチは、後方・側方・前方アプローチなど各種の選択肢があり、筋腱組織への理解や取り扱いの技術的な工夫が進み、低侵襲化、術後早期回復、脱臼率減少などに寄与してきた。後方アプローチは軟部組織を修復することで、他のアプローチとの脱臼率・臨床スコア・再置換率に差はないことが過去に報告¹³⁾されており、最近の大規模データでも、筋腱温存型のアプローチと比較して、脱臼率と脱臼による再置換率に差はないと報告¹⁴⁾されている。

脱臼対策として、32mm 骨頭は 22mm 骨頭と 28mm 骨頭よりも有意に優れていることが報告¹⁵⁾されている。36mm 骨頭のエビデンスはまだないが、米国では 2021 年に 36mm 骨頭の使用率は 60%と最も高く、次いで 32mm 骨頭は 19%、dual mobility は 10%である⁸⁾。Dual mobility liner は、長期成績が不明なため若年者には慎重な選択を要するが、oscillation angle、jumping distance の増加により脱臼抵抗性が高く¹⁶⁾、脱臼高リスク症例に対する選択肢の一つとなっている (図 3)。

● 3D 術前計画

術前には単純 X 線を用いた 2D 計画に加えて、CT を用いた 3D 計画が広く行われている。THA では、インプラントの適切な設置は脱臼率の低下につながることを報告¹¹⁾されており、術前にインプラントのサイズ、位置、ステム前捻、オフセット、脚延長量などを

確認しておくことが肝要である（図 4）。術前の CT を用いて、予定のインプラント設置位置・角度にインプラントを配置した 3D モデルで可動域シミュレーションを行い、日常生活に必要な可動域を達成しているか否か、インピンジメントの部位なども確認することができる（図 5）。



図 4: THA の 3D 術前計画

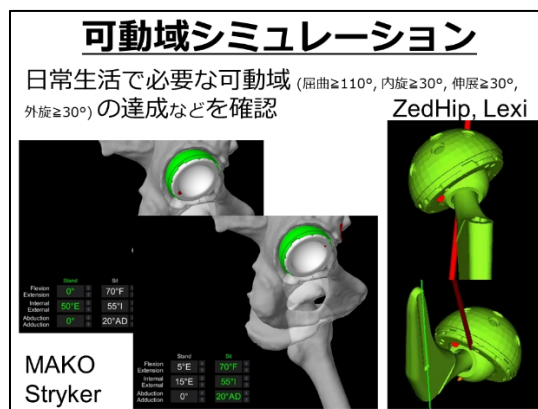


図 5: 可動域の術前シミュレーション

近年は姿勢変化に伴って生じる骨盤傾斜の変化が、立位や座位で調査・報告¹⁷⁾され、術前計画に組み込まれるようになってきている。Stiff spinopelvic mobility（立位→座位で骨盤後傾が 10 度以下）では、座位と深座位での骨盤前傾と股関節屈曲角が大きく、後方脱臼のリスクを回避するために、カップの設置角を増捻することが望ましい¹⁸⁾（図 6）。しかし、立位の骨盤前傾・股関節屈曲角に有意差はないため、過度の増捻は逆に前方脱臼が懸念され、コンピュータ支援技術の利用、インプラント可動域（oscillation angle）の高い機種が選択肢となる。

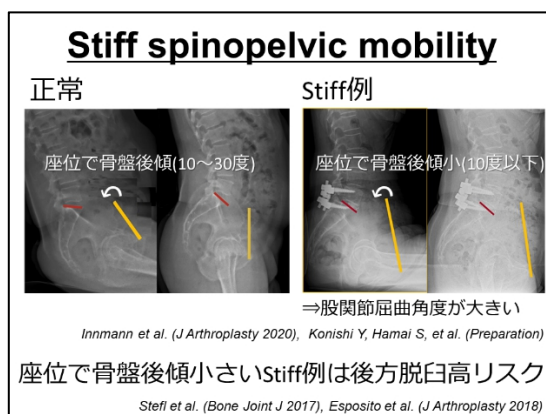


図 6: 脱臼リスクを姿勢変化で評価

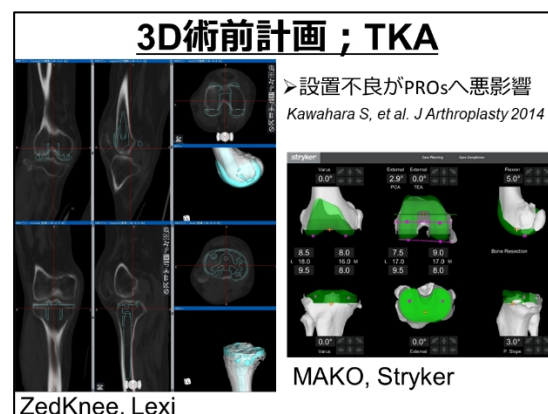


図 7: TKA の 3D 術前計画

TKA では、回旋アライメントなどでの設置不良が患者立脚型アウトカム（patient

reported outcome: PRO) の低下につながる事が報告¹⁹⁾されている。骨形態に個人差が大きく、患者個々に詳細な計画が必要であり、術前 3D 計画に基づいて骨性ランドマークと骨切りガイド・インプラントとの相対関係などを確認しておくことが望ましい(図 7)。また、TKA の患者満足度は 8 割程度と報告²⁰⁾されており、ロボット支援システムを利用した正確な手術、患者個別アライメントの達成による満足度の向上などがトピックスとなっている。Australian Registry では、2020 年のロボット支援技術併用件数は 17%と報告されており、今後の更なる増加が予測されている。

冠状面で目標とする下肢アライメントは、従来から一律にニュートラルを目標とする Mechanical Alignment (MA) 法が golden standard であるが、Howell S が報告²¹⁾した Kinematic Alignment (KA) 法や、MacDessi SJ が報告²²⁾した Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) 分類に基づいた個人で異なる生来のアライメントの再現が提唱されており、MA 法と同等以上の患者立脚型アウトカムが報告されている。生来のアライメントを再現することによって生じる術後内反アライメントの残存は従来、長期成績低下の観点から懸念されていたが、摺動面材料および表面形状の改良に伴い、これまでの所は長期生存率の低下は報告されていない。但し、フリーハンドテクニックでは想定外の内反が生じる懸念があり、各種コンピュータ支援技術 (CAOS: Computer Assisted Orthopaedic Surgery) の利用が望まれる。

● コンピュータ支援

CT based ナビゲーション (図 8)、portable ナビゲーションなど各種ナビゲーションシステムに加え、ロボット支援システム (図 9) と選択肢は広がっており、フリーハンドテクニックと比較してカップ設置角度の正確性においては概して優れている^{23,24)}。THA では、可動域の改善、脱臼リスクの低減、オフセット・脚長差の是正、跛行・違和感の改善などの、より良好な股関節機能を獲得する²⁴⁾ためには、インプラントの位置・角度を術中正確に把握・操作可能であることが望ましく、COAS は非常に有用である (図 10)。

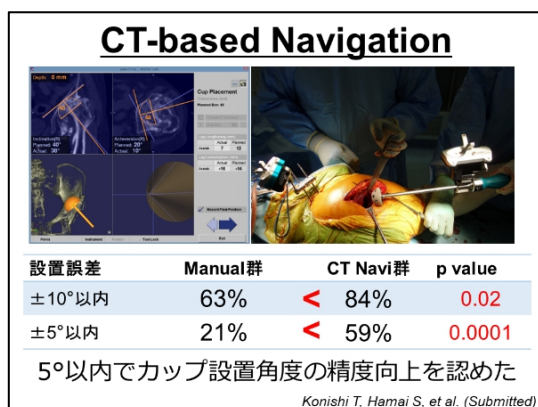


図 8: CT-based ナビゲーションの精度

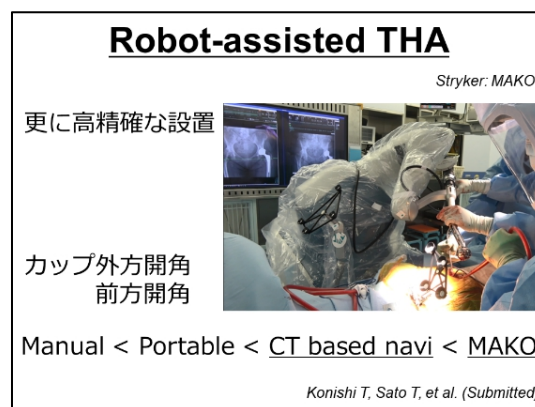


図 9: THA のロボット支援手術

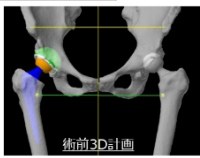
TKA のロボット支援手術では、高精度の骨切りに軟部組織バランスを加味することが可能であり、これまで良好な精度と臨床成績が報告²⁵⁾されている (図 11)。

なぜCAOSが必要か？

- virtualに現在の操作を把握
- 術前3D計画を精確に再現

➢ RoMの改善
➢ 脱臼リスクの低減
➢ オフセット・脚長差の是正
➢ 跛行・違和感の改善

良好な股関節機能を獲得するために、インプラントを望ましい位置・角度に設置する



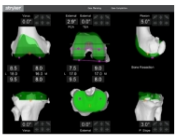
術前3D計画

Kummer, et al. J Arthroplasty 1999
Sugano, et al. JBJS Br 2007
Ashish, et al. J Arthroplasty 2007
McWilliams, et al. BJJ 2017
Konishi, Hamai, et al. Submitted

図 10: なぜ CAOS が必要か？

Robot-assisted TKA

Stryker: MAKO

高精度の骨切り
軟部組織バランスも加味

Deckey DG, et al. (BJJ 2021)
de Grave PW, et al. (AOTS 2021)

良好な臨床成績が報告

図 11: TKA のロボット支援手術

● 術後活動性

現在では疼痛の改善はもちろんのこと、日常生活動作にほとんど制限がなくなり、スポーツ復帰も可能となっている。スクワットは日常生活において重要な動作であるが、以前には脱臼やインピンジメントの発生が危惧されていた。2022 年の報告²⁶⁾では、THA 後約 70%の症例は容易にあるいは支えがあればスクワットが可能であった (図 12)。臨床成績の向上に伴い、スポーツ嗜好の中高年者において、術後のスポーツ活動への関心も近年高まっている。スポーツ参加は術前 16%から術後 31%へと倍増しており、low impact sports を中心に様々な種目に参加されている²⁷⁾ (図 13)。前述の如く、XLPE による耐摩耗性の向上、osteolysis の低減効果が報告^{3,4)}されており、これはスポーツ参加の有無、impact の程度にも関わらず、また術後 10 年以上の経過においても XLPE の摩耗量は微量であり、osteolysis も生じておらず、極めて良好な XLPE の耐摩耗性が維持されている²⁸⁾ (図 14)。

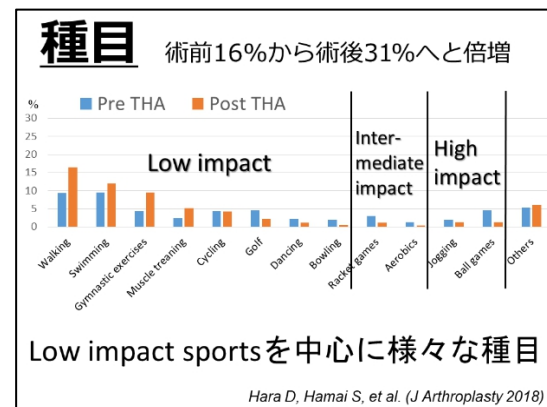
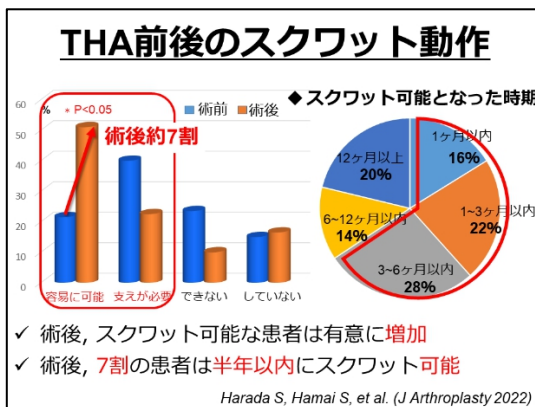


図 12: THA 前後のスクワット

図 13: THA 前後のスポーツ

TKA後にも日常生活のみならず、趣味・スポーツ活動の向上も期待される。日常生活の活動性と疼痛の改善は、low impact sportsを中心に、TKA後の趣味・スポーツ活動の向上に繋がり、更には患者立脚型アウトカムの上昇が得られる²⁹⁾ (図15)。また、2000年以降のmodern TKAにおいては、スポーツの種類や頻度が中長期成績を悪化させていないことが報告³⁰⁾されている。

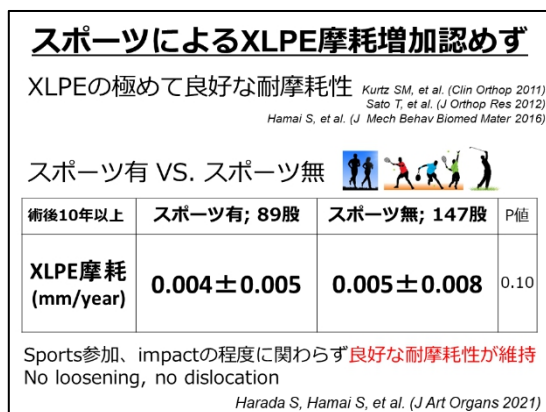


図 14: スポーツの XLPE への影響

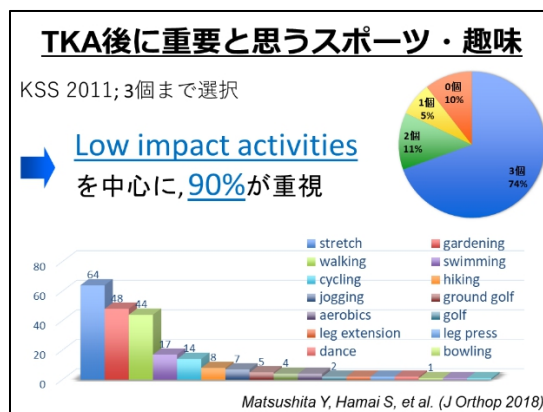


図 15: TKA 後のスポーツ

● 動作解析

生体内データを用いた動作解析によって、インピンジメントや脱臼の危険性はない安全な動作か否か、インプラント間接触を避ける安全な設置角などを検証することが可能となっている。THA 後のエアロバイクでは、過度な股関節の可動域は認めず、リハビリや日常生活での移動手段として推奨できるエクササイズと考えられている³¹⁾ (図 16)。THA 後のスクワットでは、小さなカップ前捻や過度に大きな股関節屈曲はリスクとなるが、一般的には安全な動作であり、より活動的な life style 獲得のため許可できることが示されている³²⁾ (図 17)。

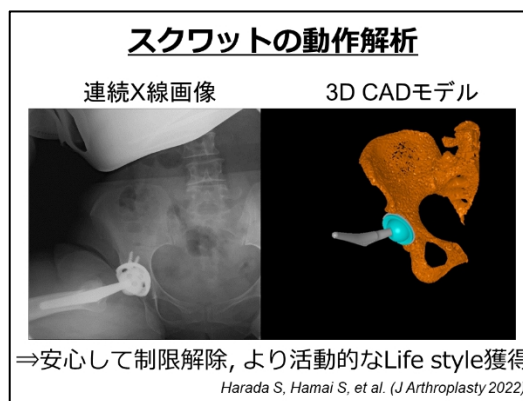


図 16: エアロバイク時の三元動作解析

図 17: スクワット時の三次元動作解析

ゴルフのドライバースイングは、同年齢の中高齢健常者と同等のスイングスピードが示されており、過度な回旋肢位は認めず、THA 後のスポーツとして許可できる³³⁾ (図 18)。臨床成績では、putting、chipping、practiceを経て、4ヶ月でcourse、復帰率98.5%、疼痛改善、プレー時間延長、ハンディキャップ向上が報告³⁴⁾されている。

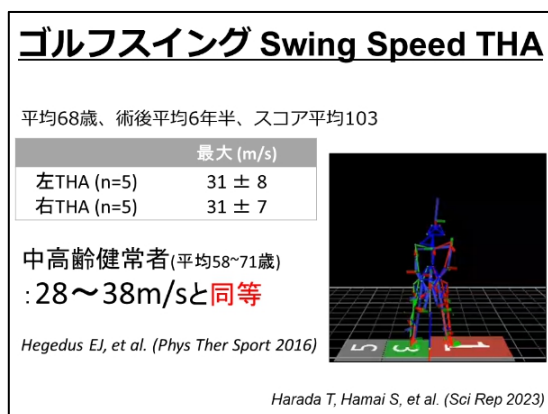


図 18: ゴルフスイング時の swing speed

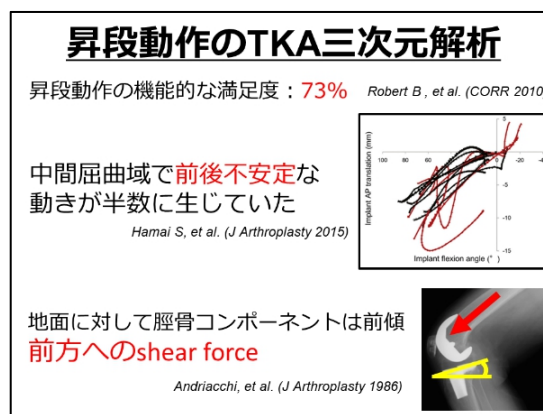


図 19: PS 型 TKA ; 昇段動作の前後不安定性

TKA では、昇段動作機能回復の満足度が 73%とさほど高くはないことが 1つの問題²⁰⁾である。動作解析の結果から、後十字靱帯置換 (posterior-stabilized: PS) 型において、昇段動作中の中間屈曲域で前後方向の不安定性が半数程度に生じており (図 19)、設計上は機能すべきポストカム機構が接触・機能していなかったことが原因と報告³⁵⁾されている (図 20)。インプラント形状の工夫として、mobile bearing 型では大腿骨・脛骨関節面間の適合性が高く、サイズミスマッチが生じないこと、bi-cruciate stabilized (BCS) 型では ACL と PCL の代償機構があり、非対称性の関節面形状で内側関節面の拘束性が高いこと、PS 型では S-curve のポストカム形状や、屈曲位の適合性が低下しにくいように大腿骨顆部の矢状面形状が gradual radius 形状とすること、などが行われている (図 21)。前後方向の拘束性の向上により、昇段動作時の前後安定性が得られ、満足度の向上に繋がることが報告され



図 20: 昇段時の TKA 三次元動態解析



図 21: 様々なインプラント形状の工夫

ている。また、前・後十字靱帯温存型（bi-cruciate retaining: BCR）は、生理的な関節動態に伴う満足度の向上が期待されているが、手術手技の困難さ、臨床成績において再置換率が高いことなどが報告³⁶⁾されており、普及は阻まれている。

● スマートフォローアップ

ウェアラブルデバイスを用いた人工関節置換術前後の患者活動性の評価など新しい手法が普及しつつある。術後の歩数は患者満足度と有意な関連が示されており、更なる成績向上のために、患者活動性をフォローアップできれば有用となる。また、歩数と死亡率の間には、年齢に関係なく関連性が認められており、高齢になると共にその関連性は強まり、少なくとも 1 万歩あたりまでは歩数が増えれば増えるほど死亡率は低下、心疾患、高血圧、糖尿病、認知症、不眠症などの発症率の低下とも関連していることが報告されている。THA では、歩数を含む活動性と患者立脚型評価は術後 3 ヶ月以内に 40%程度改善して、その後は概ね横ばいである³⁷⁾。平均値では健康日本 21 で推奨されている必要な歩数（男性 7000 歩、女性 6000 歩）を概ね越えているが、下回る症例もあり数値のフィードバックは影響因子を知り、活動性向上を図るために有用である（図 22）。また、術後中期の主観的な活動性評価と客観的な活動性評価では、同じ疾患（変形性股関節症）に対する異なる術式（寛骨臼移動術 vs. THA）において、主観的評価において有意差がなくとも、客観的評価の歩数において有意差があり、THA では無意識に活動性を控えている可能性が示唆されている³⁸⁾（図 23）。スマートフォンなどの端末でリアルタイムに身体活動を知ることが、更なる身体活動性の増加や生活空間の拡大につながると考えられ、実臨床で徐々に導入されつつある。

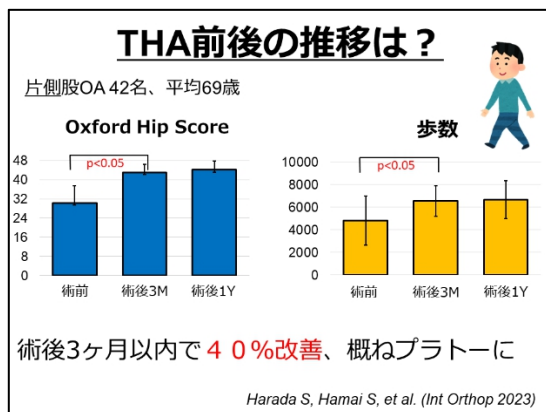


図 22: 活動量計による歩数評価

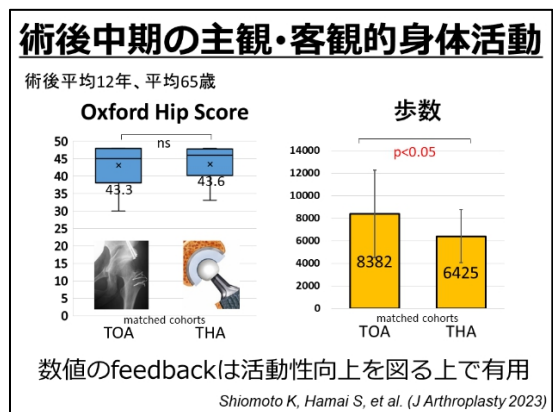


図 23: 主観的評価と客観的評価の差違

文 献

1. 人工股関節置換術: 日本人工関節学会(編), 南江堂, 2023.
2. 人工膝関節置換術: 日本人工関節学会(編), 南江堂, 2023.
3. Sato T, Nakashima Y, Akiyama M, et al. Wear resistant performance of highly cross-linked and annealed ultra-high molecular weight polyethylene against ceramic heads in total hip arthroplasty. *J Orthop Res.* 2012;30(12):2031-7.
4. Hamai S, Nakashima Y, Mashima N, et al. Comparison of 10-year clinical wear of annealed and remelted highly cross-linked polyethylene: A propensity-matched cohort study. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2016;59:99-107.
5. Goldman AH, Armstrong LC, Owen JR, et al. Does Increased Coefficient of Friction of Highly Porous Metal Increase Initial Stability at the Acetabular Interface? *J Arthroplasty.* 2016;31(3):721-6.
6. Ikemura S, Motomura G, Hamai S, et al. Tapered wedge stems decrease early postoperative subsidence following cementless total hip arthroplasty in Dorr type C femurs compared to fit-and-fill stems. *J Orthop Surg Res.* 2022;17(1):223.
7. Lamb JN, Matharu GS, Redmond A, et al. Patient and implant survival following intraoperative periprosthetic femoral fractures during primary total hip arthroplasty: an analysis from the national joint registry for England, Wales, Northern Ireland and the Isle of Man. *Bone Joint J.* 2019;101-B(10):1199-1208.
8. American Joint Replacement Registry (AJRR) Annual Report 2022.
9. Lachiewicz PF, Steele JR, Wellman SS. Unexpected high rate of revision of a modern cemented fixed bearing modular posterior-stabilized knee arthroplasty. *Bone Joint J.* 2021;103-B(6 Supple A):137-144.
10. NiemeläInen MJ, MäKelä KT, Robertsson O, et al. Different incidences of knee arthroplasty in the Nordic countries. *Acta Orthop.* 2017;88(2):173-178.
11. 変形性股関節症の診療ガイドライン改訂第2版: 日本整形外科学会診療ガイドライン委員会・変形性股関節症診療ガイドライン策定委員会(編), 南江堂, 2016.
12. de Steiger R, Lorimer M, Graves SE. Cross-Linked Polyethylene for Total Hip Arthroplasty Markedly Reduces Revision Surgery at 16 Years. *J Bone Joint Surg Am.* 2018;100(15):1281-1288.
13. Palan J, Beard DJ, Murray DW, et al. Which approach for total hip arthroplasty: anterolateral or posterior? *Clin Orthop Relat Res.* 2009;467(2):473-7.
14. Pincus D, Jenkinson R, Paterson M, et al. Association Between Surgical Approach and Major Surgical Complications in Patients Undergoing Total Hip Arthroplasty. *JAMA.* 2020;323(11):1070-1076.
15. Berry DJ, von Knoch M, Schleck CD, et al. Effect of femoral head diameter and operative approach on risk of dislocation after primary total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am.*

2005;87(11):2456-63.

16. Wyles CC, Maradit-Kremers H, Larson DR, et al. Creation of a Total Hip Arthroplasty Patient-Specific Dislocation Risk Calculator. *J Bone Joint Surg Am.* 2022;104(12):1068-1080.
17. Stefl M, Lundergan W, Heckmann N, et al. Spinopelvic mobility and acetabular component position for total hip arthroplasty. *Bone Joint J.* 2017;99-B(1 Supple A):37-45.
18. Esposito CI, Carroll KM, Sculco PK, et al. Total Hip Arthroplasty Patients With Fixed Spinopelvic Alignment Are at Higher Risk of Hip Dislocation. *J Arthroplasty.* 2018;33(5):1449-1454.
19. Kawahara S, Okazaki K, Matsuda S, et al. Internal rotation of femoral component affects functional activities after TKA—survey with the 2011 Knee Society Score. *J Arthroplasty.* 2014;29(12):2319-23.
20. Bourne RB, Chesworth BM, Davis AM, Mahomed NN, Charron KD. Patient satisfaction after total knee arthroplasty: who is satisfied and who is not? *Clin Orthop Relat Res.* 2010;468(1):57-63.
21. Howell SM, Howell SJ, Kuznik KT, et al. Does a kinematically aligned total knee arthroplasty restore function without failure regardless of alignment category? *Clin Orthop Relat Res.* 2013;471(3):1000-7.
22. MacDessi SJ, Griffiths-Jones W, Harris IA, et al. Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) classification. *Bone Joint J.* 2021;103-B(2):329-337.
23. Kiyohara M, Hamai S, Shiimoto K, et al. Does accelerometer-based portable navigation provide more accurate and precise cup orientation without prosthetic impingement than conventional total hip arthroplasty? A randomized controlled study. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2022;17(6):1007-1015.
24. Sugano N, Nishii T, Miki H, et al. Mid-term results of cementless total hip replacement using a ceramic-on-ceramic bearing with and without computer navigation. *J Bone Joint Surg Br.* 2007;89(4):455-60.
25. Deckey DG, Rosenow CS, Verhey JT, et al. Robotic-assisted total knee arthroplasty improves accuracy and precision compared to conventional techniques. *Bone Joint J.* 2021;103-B(6 Supple A):74-80.
26. Harada S, Hamai S, Gondo H, et al. Squatting After Total Hip Arthroplasty: Patient-Reported Outcomes and In Vivo Three-Dimensional Kinematic Study. *J Arthroplasty.* 2022;37(4):734-741.
27. Hara D, Hamai S, Komiyama K, Motomura G, Shiimoto K, Nakashima Y. Sports Participation in Patients After Total Hip Arthroplasty vs Periacetabular Osteotomy: A Propensity Score-Matched Asian Cohort Study. *J Arthroplasty.* 2018;33(2):423-430.
28. Harada S, Hamai S, Shiimoto K, et al. Wear analysis of the first-generation cross-linked polyethylene at minimum 10 years follow-up after THA: no significant effect of sports participation. *J Artif Organs.* 2022;25(2):140-147.

29. Matsushita Y, Hamai S, Okazaki K, et al. Recreational sports, workout and gym activities after total knee arthroplasty: Asian cohort study. *J Orthop*. 2018;16(1):41-44.
30. Crawford DA, Adams JB, Hobbs GR, et al. Higher Activity Level Following Total Knee Arthroplasty Is Not Deleterious to Mid-Term Implant Survivorship. *J Arthroplasty*. 2020;35(1):116-120.
31. Komiyama K, Hamai S, Ikebe S, et al. In vivo kinematic analysis of replaced hip during stationary cycling and computer simulation of optimal cup positioning against prosthetic impingement. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2019;68:175-181.
32. Harada S, Hamai S, Gondo H, et al. Squatting After Total Hip Arthroplasty: Patient-Reported Outcomes and In Vivo Three-Dimensional Kinematic Study. *J Arthroplasty*. 2022;37(4):734-741.
33. Harada T, Hamai S, Hara D, et al. Reverse dynamics analysis of contact force and muscle activities during the golf swing after total hip arthroplasty. *Sci Rep*. 2023;13(1):8688.
34. Pioger C, Jacquet C, Bellity JP, et al. Return to Competitive Level of Play and Performance in Regular Golfers After Total Hip Arthroplasty: Analysis of 599 Patients at Minimum 2-Year Follow-Up. *J Arthroplasty*. 2021;36(8):2858-2863.
35. Hamai S, Okazaki K, Shimoto T, et al. Continuous sagittal radiological evaluation of stair-climbing in cruciate-retaining and posterior-stabilized total knee arthroplasties using image-matching techniques. *J Arthroplasty*. 2015;30(5):864-9.
36. Pelt CE, Sandifer PA, Gililand JM, et al. Mean Three-Year Survivorship of a New Bicruciate-Retaining Total Knee Arthroplasty: Are Revisions Still Higher Than Expected? *J Arthroplasty*. 2019;34(9):1957-1962.
37. Harada S, Hamai S, Shimoto K, et al. Predictors of physical activity recovery after total hip arthroplasty: a prospective observational study. *Int Orthop*. 2023 Nov 4.
38. Shimoto K, Hamai S, Hara D, et al. Objective Activity Levels and Patient-Reported Outcomes After Total Hip Arthroplasty and Periacetabular Osteotomy: Retrospective Matched Cohort Study at Mean 12-Year Follow-Up. *J Arthroplasty*. 2023;38(2):323-328.