

宮崎整形外科研究会誌

第 31 号 2026

宮崎整形外科懇話会

論文目次

第 91 回宮崎整形外科懇話会（日時：令和 7 年 12 月 20 日（土） 場所：宮崎県医師会館）

外傷性・医源性橈骨神経麻痺に対して腱移行を行った 2 例 戸田 雅、ほか … 1

小児陳旧性外傷性股関節脱臼の観血的整復後に生じた大腿骨頭壊死に対して
内反骨切り術を施工した 1 例 山下 紀美子、ほか … 4

第 92 回宮崎整形外科懇話会（日時：令和 8 年 6 月 20 日（土） 場所：宮崎市民プラザ）

自動型 TKA ロボット CUVIS-joint の初期導入における使用経験 小島 岳史、ほか … 7

外反膝に対するロボット支援人工膝関節置換術における
ギャップバランスングの再現性とアライメント矯正精度の検討 石田 翔太郎、ほか … 10

ロボット支援 TKA におけるラーニングカーブの検討
人工膝関節置換術の主術者経験がない術者による RA-TKA 211 例の単一術者シリーズ
柏木 悠吾、ほか … 15

外傷性・医源性橈骨神経麻痺に対して腱移行を行った 2 例

宮崎市郡医師会病院 整形外科 戸田雅 榊昂典 大野鉄平 池尻洋史 森治樹
 藤元総合病院 整形外科 矢野浩明
 小林市立病院 整形外科 上通一師

はじめに

橈骨神経麻痺は外傷性、医源性、特発性に生じ、発症部位によって drop hand や drop finger などの症状を呈する。神経剥離や神経縫合、神経移行、神経移植などの治療法があるが、今回機能再建として Riordan 変法による腱移行を施行した 2 例を経験したため報告する。

症 例

症例 1：65 歳男性

現病歴：高さ 2m の脚立から転落し受傷した。初診時身体所見として右肘痛あり、手指運動可能で麻痺を含む神経症状は認められなかった。単純 X 線画像で尺骨鉤状突起骨折と外側側副靱帯付着部の裂離骨折を認め、CT 検査で関節内への尺骨鉤状突起骨片の迷入を認め、右肘関節脱臼骨折、右肘外側側副靱帯損傷の診断で受傷 4 日目に手術（関節内骨折観血的手術＋靱帯修復術）施行した。Kaplan extensile approach で進入し、関節内骨片を摘出し Lasso technique を用いて同骨片も併せて尺骨鉤状突起を 2 号エチボンド糸で固定した。また外側側副靱帯は JuggerKnot を用いて靱帯修復を行った。

術翌日から drop hand、橈骨神経領域の痺れ出現したが、保存加療での改善を期待してリハビリ開始し、術後 1 か月経過後も

改善ないため cock-up 装具を作成した。骨折術後 5 か月で神経剥離術を施行したところ、術中所見として橈骨神経は大部分がエチボンド糸により結紮されており、部分断裂となっていた。連続性が維持されている神経束を剥離したが断裂した遠位端は認められなかった。術後リハビリを継続したが改善なく、手指伸展機能の改善希望あったため骨折術後 9 か月で腱移行術（Riordan 変法）を施行した。

手術（Riordan 変法）：前腕掌背側に皮膚切開し皮下を鈍的に展開（図 1A）。前腕掌側では長掌筋（palmaris longus, 以下 PL）、橈側手根屈筋（flexor carpi radialis, 以下 FCR）、円回内筋（pronator teres, 以下 PT）を、前腕背側では長母指伸筋（extensor pollicis longus, 以下 EPL）、総指伸筋（extensor digitorum communis, 以下 EDC）、短橈側手根伸筋（extensor carpi radialis brevis, 以下 ECRB）を同定した（図 1B）。EPL 腱を筋腱移行部で切離した後に短母指外転筋腱の下を通して掌側に移動させ PL と interlacing suture を行った（図 1C）。腱付着部で切離した FCR 腱を開窓した骨間膜を通して背側に移動させ EDC に腱移行し（図 1D）、腱付着部で切離した PT 腱は橈側皮下を通して ECRB に腱移行を行った（図 1E）。ただし PT の腱長が不足していたため ECRB を筋腱移行部で切離したのちに縫合した。

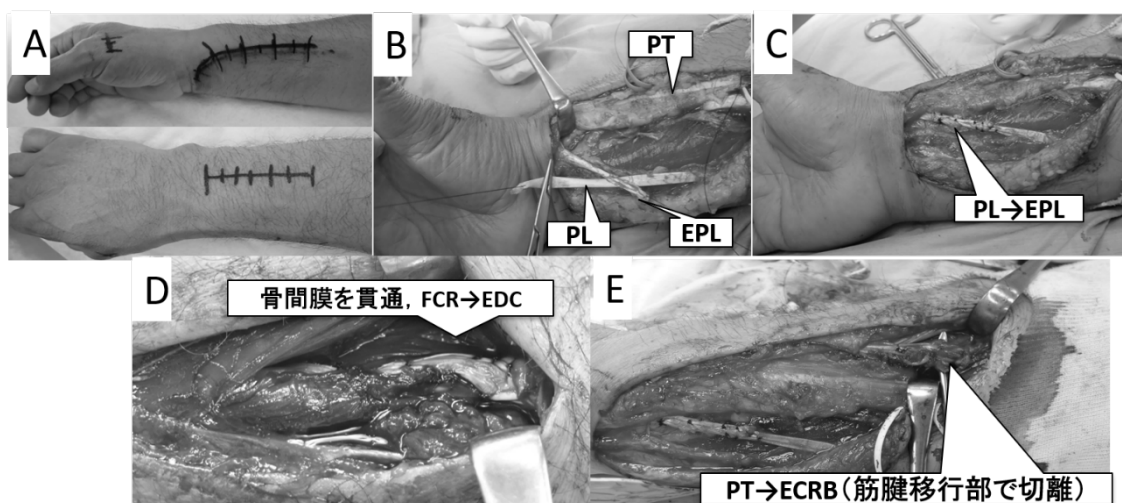


図 1. A: 前腕掌側背側に皮切を置いた。B: 掌側皮切より PL, FCR, PT を同定。C: PL を EPL に腱移行。

D: FCR を骨間膜を貫通させて背側に移動させて EDC に腱移行。E: PT を腱移行部で切離した ECRB に腱移行。

術療法：術後 1 週までシーネ固定し，術後 1-3 週でアウトリガー装具での自動屈曲他動伸展を行い，以降自動伸展を開始した．術後経過：腱移行 6 か月での所見として手関節自動背屈 55° / 掌屈 25°，示指 MP 関節伸展 0°，中指 MP 関節伸展 -5°，環指 MP 関節伸展 -2°，小指 MP 関節伸展 -10°，母指 MP 関節伸展 0° / IP 関節伸展 0°，母指 CM 関節掌側外転 68° / 橈側外転 32° と完全伸展 / 母指外転可能となった．ただし握力が右 11.1 kg，左 47.4 kg と改善不足であり Hand20 は 77.5 点であった．

症例 2：40 歳女性

現病歴：交通事故で受傷し左上腕骨骨幹部骨折の診断．受傷時より drop hand と橈骨固有感覚領域の痺れ感を認め，橈骨神経麻痺を認めた．また肘屈曲 MMT3-4 の筋皮神経麻痺も認めた．受傷 4 日で手術（骨折観血的手術，髓内釘）施行したがその際橈骨神経走行の確認は行わなかった．術後リハビリで筋皮神経麻痺は改善したものの橈骨神経麻痺は残存し（図 2 A），骨折術

後 6 か月で抜釘時に橈骨神経の走行確認を行ったところ，骨折部レベルでの橈骨神経の断裂を認め遠位断端は確認できなかった．手指伸展機能再建希望あり，骨折術後 1 年 1 か月で腱移行（Riordan 変法）を施行した．手術（Riordan 変法）：事前に PL の欠損を認めたことから環指の浅指屈筋腱をドナー腱として用いた．また ECRB は筋腱移行部での切離を行わず腱移行した．その他は症例 1 と変わらず腱移行を行った（図 2 B, C, D）．術療法：術後 3 週までのシーネ固定後から手関節，MP 関節の ROM 訓練を開始した．

術後経過：腱移行 5 か月の所見として，手指伸展は制限なく可能となり握力右 20.0 kg，左 8.5 kg であるものの Hand20 は 35 点まで改善した（図 2 E）．術後 10 か月で Hand20 が 64 点まで悪化したものの，DASH-JSSH は 23 点，簡易上肢機能評価 97 点など良好であった．ただし術後 1 年で手関節尺屈変形あり装具作成を行った．まだ環指に軽度弾発現象出現したが経過観察している．

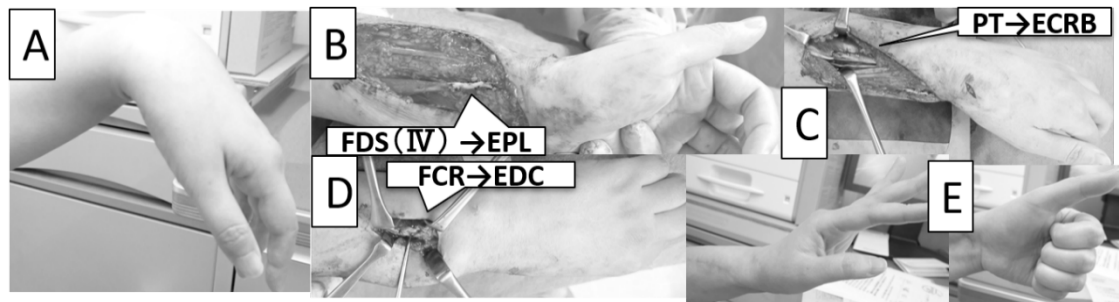


図 2. A:術前の下垂手. B: PL 欠損例のため FDS(Ⅳ)を EPL に腱移行. C: PT を ECRB に腱移行.

D: FCR を骨間膜を通過して背側に移動させたのちに EDC と腱移行. E: 術後手関節 / 母指外転機能の回復を認めた.

考 察

Riordan 変法は，Riordan により発表された橈骨神経麻痺に対する腱移行術である Riordan 法⁷⁾を津下らに変更/改良した方法²⁾で，EDC に骨間膜を通して背側に移動させた FCR を，EPL に PL を，ECRB に PT を移行する方法であり，術後長期経過でも良好な手関節及び手指伸展機能は維持されたと報告されている⁵⁾．

本研究では PT の腱長不足や PL 欠損例のため代替方法を施行したほか，長母指外転筋を用いての滑車作成は行わず，EPL は第 1 区画走行腱の下を通過させて PL と腱縫合した．bow string なく母指外転や手指伸展機能回復できていた．ただし握力改善が不良であり hand20 の score 高値に影響していると考えられる．握力改善不良の原因として，橈骨神経麻痺発症からの腱移行施行行までが 9 か月，13 か月といずれも長期間であることが考えられた．

骨折に伴う神経損傷の 65 - 90%以上の症例が数か月の経過で回復するとされるが⁶⁾，10%程度の割合では神経断裂例も存在

するという報告もある¹⁾．また術後神経損傷を生じた際，機能を改善するために最も必要なことは治療までの時間短縮であり，可能な限り早期に病変の確認と修復すべきと報告されており³⁾，建部らは然るべき時期に超音波検査を行い，断裂あれば早急に，断裂不明でも 3 か月経過して改善傾向認めない場合は神経展開すべきと提唱している⁴⁾．症例 1 では術後神経症状出現後早期に超音波検査ならびに神経展開まで行うべきであったし，2 症例とも神経展開時に神経縫合困難と判断した段階で腱移行術を行えるように準備すべきであったと考える．

結 語

2 例の橈骨神経麻痺症例に対して Riordan 変法腱移行を行い，手指関節伸展機能改善を得られた．神経麻痺を生じた際に適切な時期に検査，加療を行うべきである．

利益相反の開示

本研究発表に関連し，開示すべき COI 関係にある企業等はあ

りません。

文 献

- 1)DeFranco MJ, Lawton JN. Radial nerve injuries associated with humeral fractures. J Hand Surg Am. 31: 655-663, 2006
- 2)津下健哉ほか. 橈骨神経麻痺に対する腱移行術. 整形外科. 20: 1516-1518, 1969
- 3)Kretschmer T, et al. Evaluation of iatrogenic lesions in 722 surgically treated cases of peripheral nerve trauma. J Neurosurg. 94: 905-912, 2001
- 4)建部将広ほか. 骨折治療における医原性神経損傷. 骨折 42 (2): 680-682, 2020
- 5)石田治ほか. 橈骨神経麻痺に対する Riordan 変法の有用性. J Jap Orthop Ass. 73 (2): s228, 1999
- 6)Ramachandran M, et al. Clinical outcome of nerve injuries associated with supracondylar fractures of the humerus in children. J Bone Joint Surg Br. 88: 90-94, 2006
- 7)Riordan DC. Surgery of the paralytic hand., Inst. Course Lecture. 16: 79, 1959

小児陳旧性外傷性股関節脱臼の観血的整復後に生じた 大腿骨頭壊死に対して内反骨切り術を施行した 1 例

宮崎市立田野病院 整形外科 山下紀美子 北島潤弥 矢野浩明 渡邊信二
宮崎大学医学部 整形外科 中村嘉宏

要 旨

小児外傷性股関節脱臼では、診断および整復の遅延が大腿骨頭壊死の発生に関与し、整復後も骨頭変形や関節適合性の低下に対する治療を要することがある。今回、受傷後 4 か月を経過した陳旧性脱臼に対し、観血的整復後に生じた大腿骨頭壊死を大腿骨内反骨切り術により治療した 1 例を報告する。症例は 12 歳女児で、サッカー中の転倒後に右膝関節痛を主訴として近医を受診し、右大腿四頭筋腱断裂疑いとして保存的に加療されていたが、受傷 4 か月後に脚長差を指摘されたことを契機に右股関節脱臼と診断された。徒手整復が困難であったため外科的脱臼法を用いて観血的整復および関節包修復を行ったところ、整復前 MRI では明らかな骨頭壊死所見を認めなかったものの、術後 3 週から求心性が低下し、6 週で外側亜脱臼と骨頭扁平化を認めた。外転 25 度で関節適合性が改善するとともに、外側健常域により荷重部の約 3 分の 1 を確保できると判断し、求心性の改善と健常域への荷重移動を目的として 25 度の内反骨切り術を施行した。同術後 2 年では大転子高位、脚長差および跛行が残存したが、骨頭圧壊の進行や明らかな関節症性変化は認めなかった。小児の膝痛における股関節疾患の鑑別の重要性に加え、陳旧性脱臼後の骨頭壊死に対しては、年齢や壊死範囲を踏まえ、関節適合性と健常荷重域の確保を考慮した治療方針を検討する必要があると考えられた。

はじめに

小児外傷性股関節脱臼は比較的にまれな外傷であるが、整復が遅延すると大腿骨頭壊死や成長障害を生じ、その後の股関節機能に長期的な影響を及ぼすことがある。小児では寛骨臼の軟骨

成分および関節包を含む軟部組織の柔軟性を背景として、比較的低エネルギーの外傷でも脱臼を生じ得る一方、年長児ではスポーツに伴う外傷などが受傷機転となる¹。とりわけ脱臼から整復までの時間は骨頭壊死の発生に関連することから²、本疾患の診療では早期診断に基づく迅速な整復が重要となる。しかし、股関節疾患に伴う疼痛が膝部や大腿部に出現する場合には、訴えの部位と病変部位の不一致が診断を困難にし、脱臼の陳旧化につながる可能性がある。

今回われわれは、右膝関節痛を主訴として受傷から診断まで 4 か月を要した 12 歳女児の陳旧性外傷性股関節脱臼に対し、観血的整復後に生じた大腿骨頭壊死を大腿骨内反骨切り術により治療した。整復後の骨頭形態の変化と動態撮影による関節適合性の評価を踏まえた治療経過を提示し、診断遅延の背景および骨頭壊死に対する関節温存治療の意義について文献的考察を加えて報告する。

症 例

患者は 12 歳女児で、サッカー中に転倒して受傷した後、右膝関節痛を主訴に近医を受診した。右大腿四頭筋腱断裂が疑われたため保存的治療の方針で経過観察されていたが、受傷から 4 か月後に理学療法士から脚長差を指摘され、単純 X 線検査により右股関節脱臼と診断された。徒手整復が試みられたものの整復困難であったことから当院へ紹介され、初診時には右膝関節痛および脚長差を認める一方、杖を使用せず歩行していた。

初診時の単純 X 線像では右股関節脱臼を認め、CT では寛骨臼骨折および関節内への骨片介在を認めないものの、脱臼した大腿骨頭上方に異所性骨化を伴う偽臼蓋形成を認めた (図 1)。

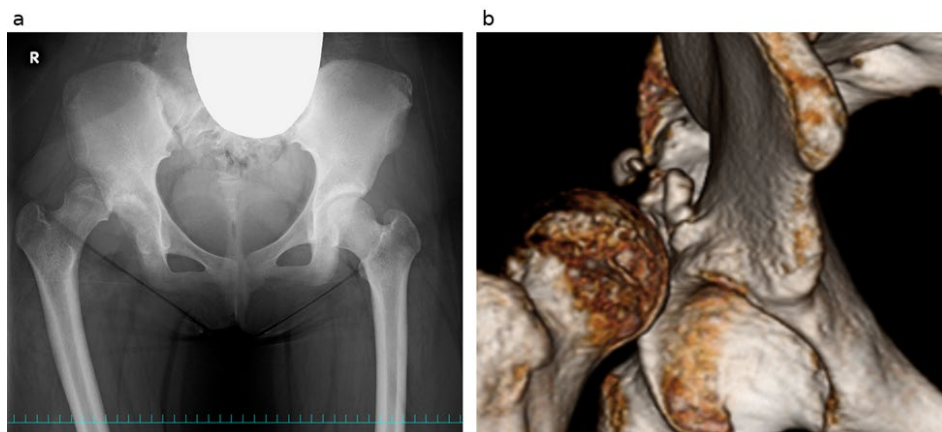


図1. 初診時の単純 X 線像および 3D CT 像。

a: 右股関節脱臼を認める。b: 大腿骨頭上方に異所性骨化を伴う偽臼蓋形成を認める。

MRI では骨頭内に明らかな壊死を示唆する信号変化を認めなかったが、原臼蓋内および骨頭上方に軟部組織を認めたことから (図 2)、受傷後 4 か月を経過した陳旧性外傷性股関節脱臼と診断し、徒手整復の不成功と軟部組織の介在を踏まえて観血的整復を選択した。



図 2. 整復前 MRI T1 強調像。

骨頭内に明らかな壊死を示唆する信号変化は認めない。原臼蓋内および骨頭上方に軟部組織を認める。

追加治療に際して動態撮影による関節適合性の評価を行ったところ、中間位で認めた亜脱臼は外転 25 度で改善し、同肢位では骨頭外側の健全域により荷重部の約 3 分の 1 を確保できると判断した (図 4)。この所見に基づき、骨頭の求心性を改善するとともに健全域へ荷重を移すことを目的として、25 度の大腿骨内反骨切り術を施行した。

内反骨切り術直後には軽度の亜脱臼が残存し、求心性は十分ではなかったが、外転筋訓練を行う経過で徐々に改善し、同術後 3 か月の単純 X 線像では関節適合性の改善と骨頭圧壊の進行がないことを確認した (図 5)。術後 2 年の時点では、大転子高位および脚長差に伴う跛行が残存する一方、骨頭の球形性はおおむね保たれており、圧壊の進行や明らかな関節症性変化は認めなかった (図 6)。

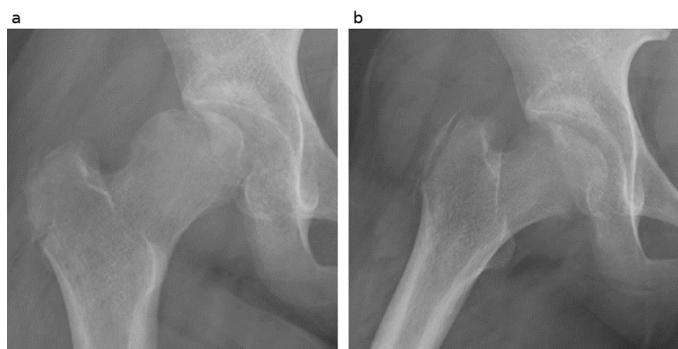


図 4 内反骨切り術前の動態撮影。

a: 中間位。b: 外転 25 度で求心性が改善する。外側健全域により荷重部の約 3 分の 1 を確保できると判断した。

手術は側臥位で外科的脱臼法を用いて行い、関節を展開したところ、偽臼蓋部に異所性骨化を認めた。大腿骨頭の色調は不良であったが、ドリリングによる出血を認めており、原臼蓋内の介在軟部組織をデブリドマンした後に骨頭を整復し、損傷した関節包を修復した。術直後の単純 X 線像では良好な求心性が得られたものの (図 3a)、術後 3 週から求心性の低下を認め、6 週には外側亜脱臼と骨頭扁平化が明らかとなったことから、大腿骨頭壊死に伴う形態変化と判断した (図 3b、c)。

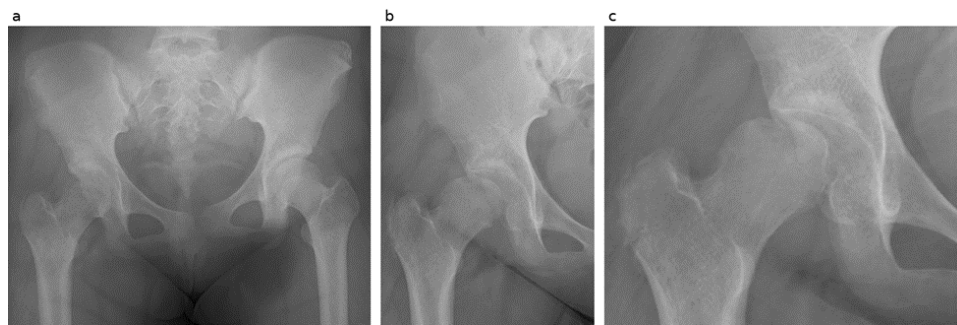


図 3 観血的整復後の単純 X 線像。

a: 整復術直後。b: 術後 3 週で求心性が低下している。c: 術後 6 週で外側亜脱臼と骨頭扁平化を認める。

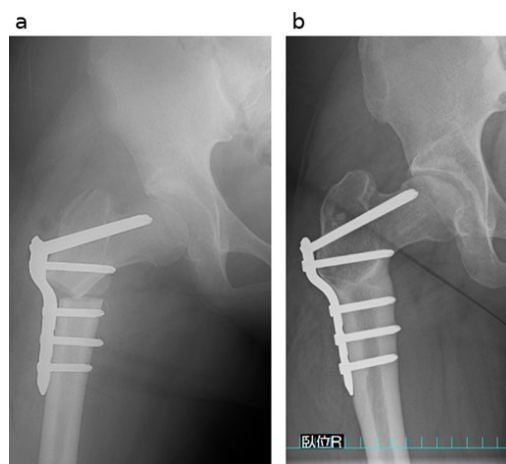


図 5 内反骨切り術後の単純 X 線像。

a: 術直後は求心性が十分ではない。b: 術後 3 か月では関節適合性が改善し、骨頭圧壊の進行は認めない。

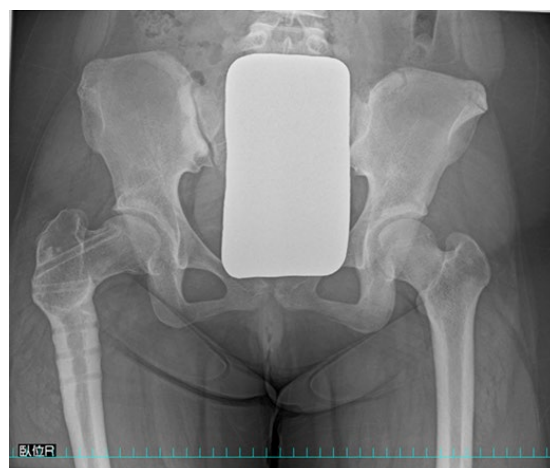


図 6 内反骨切り術後 2 年の単純 X 線像。大転子高位および脚長差を認めるが、骨頭圧壊の進行や明らかな関節症性変化は認めない。

考 察

本症例では、膝関節痛を主訴として経過観察され、受傷 4 か月後に脚長差を指摘されたことを契機に股関節脱臼と診断された。Ledwith らは大腿骨頭すべり症 116 例のうち 34 例 (29%) で初診時に診断が見逃され、股関節痛の欠如および大腿部痛が見逃しと関連したと報告している³。対象疾患は異なるが、疼痛部位と病変部位の不一致は本症例の診断遅延を考えるうえでも重要である。当院初診時には杖なし歩行が可能であったことも踏まえ、外傷後の膝痛が持続する場合には、歩行能力のみで股関節病変を除外せず、股関節可動域、歩容および脚長差を含めて評価する必要がある。

整復遅延は骨頭壊死の主要な危険因子であり、Mehلمان らは小児外傷性股関節脱臼 42 例で壊死発生率を 12%、整復まで 6 時間を超えた場合のリスクを 6 時間以内の約 20 倍と報告している²。また、Kumar らの陳旧性小児後方脱臼 18 例（受傷から受診まで平均 16 週）では、観血的整復後に全例で壊死を認めた一方、17 例で短期的に良好な機能成績が得られており⁴、壊死リスクの高さのみで整復の意義を否定すべきではない。急性期と陳旧例では症例背景が異なりリスクを直接比較できないが、後者では整復後の壊死を念頭に置いた管理が求められる。本症例でも整復前 MRI に明らかな壊死所見を認めず、術中ドリリングで出血を確認したにもかかわらず、整復後早期に骨頭扁平化を来した。長期間の脱臼に伴う血流障害が関与したと考えられるものの、受傷から整復後に至る各段階の影響を明確に区別することは困難であり、術前画像や局所的な出血所見のみで予後を判断せず、整復後も求心性と骨頭形態を継続的に評価する必要がある。

小児の外傷後骨頭壊死に対する関節温存治療では、骨頭の白蓋内被覆を確保し、関節適合性の改善と変形の抑制を図る containment の概念が参考となる。Vontobel らは転子間骨切り術や寛骨臼周囲骨切り術の検討と、骨成熟までの経過観察の必要性を指摘している⁵。一方、Momii らは 11 歳男児の外傷性開放性前方脱臼後の壊死に対し、造影 MRI による再血行化の評価を併用した免荷治療で良好な経過を報告している⁶。外傷後壊死は血管損傷、脱臼期間および残存成長により病態が異なるため、ベルテス病の治療方針を一律に適用せず、年齢、壊死範囲および再血行化の可能性に応じて治療を選択する必要がある。

本症例では、外転 25 度で求心性が改善し、骨頭外側の健常域により荷重部の約 3 分の 1 を確保できると判断したことから、関節適合性の改善と健常域への荷重移動を目的に内反骨切り術を選択し、containment に加えて壊死部への荷重軽減を図った。Hamanishi らは成人の特発性骨頭壊死に対する弯曲内反骨切り術で、術後健常荷重面が 40% を超える症例の良好な成績を報告している⁷。この基準を小児の外傷後壊死に直接適用することはできないが、健常域の位置と荷重面に占める割合は、動態撮影による関節適合性とともな術式選択の重要な評価項目と考えられる。

内反骨切り術後は外転筋訓練を行う経過で求心性が改善し、術後 2 年まで骨頭圧壊の進行や明らかな関節症性変化を認めなかった。一方、大転子高位および脚長差に伴う跛行が残存したことから、画像上の安定性に加え、近位大腿骨形態や脚長の変化が外転筋機能に及ぼす影響も継続して評価する必要がある。本報告は 1 例、術後 2 年の観察に限られ、長期的な関節症進行の抑制や術式の有効性を一般化することはできないものの、陳旧性脱臼後の骨頭壊死に対する関節温存治療において、関節適合性と健常荷重域の双方を評価する意義を示す症例と考えられた。

結 語

受傷後 4 か月を経過した小児陳旧性外傷性股関節脱臼の観血的整復後に生じた大腿骨頭壊死に対し、外転位での関節適合性と健常域の位置を評価して内反骨切り術を施行し、術後 2 年まで骨頭圧壊の進行や明らかな関節症性変化を認めなかった。小児の膝痛では股関節疾患を鑑別に含めることが重要であり、陳旧性脱臼後の骨頭壊死に対しては、containment を基礎としながらも、年齢や壊死範囲に応じて健常域への荷重移動を考慮した関節温存治療を検討する必要がある。

利益相反の開示

本報告に関して開示すべき利益相反はない。

文 献

- 1) Herrera-Soto JA, Price CT. Traumatic hip dislocations in children and adolescents: pitfalls and complications. J Am Acad Orthop Surg. 2009;17(1):15-21.
- 2) Mehلمان CT, Hubbard GW, Crawford AH, Roy DR, Wall EJ. Traumatic hip dislocation in children. Long-term followup of 42 patients. Clin Orthop Relat Res. 2000;(376):68-79.
- 3) Ledwith CA, Fleisher GR. Slipped capital femoral epiphysis without hip pain leads to missed diagnosis. Pediatrics. 1992;89(4 Pt 1):660-662.
- 4) Kumar S, Jain AK. Neglected traumatic hip dislocation in children. Clin Orthop Relat Res. 2005;(431):9-13.
- 5) Vontobel BJ, Hocevar Z, Jakob RP. Avascular necrosis following traumatic hip dislocation in an 8-year-old boy. Arch Orthop Trauma Surg. 1994;113(2):83-85.
- 6) Momii K, Hamai S, Motomura G, et al. Revascularization of the necrotic femoral head after traumatic open anterior hip dislocation in a child: a case report. J Med Case Rep. 2019;13:254.
- 7) Hamanishi M, Yasunaga Y, Yamasaki T, et al. The clinical and radiographic results of intertrochanteric curved varus osteotomy for idiopathic osteonecrosis of the femoral head. Arch Orthop Trauma Surg. 2014;134(3):305-310.

自動型 TKA ロボット CUVIS-joint の初期導入における使用経験

橘病院 整形外科 小島岳史 柏木輝行 柏木悠吾 石田翔太郎 前之原悠司 吉田尚紀
宮崎大学医学部 整形外科 亀井直輔

はじめに

変形性膝関節症に対する人工膝関節置換術 (TKA) において、正確な骨切りと適切なアライメントの獲得、および良好な軟部組織バランスの再現は、インプラントの長期耐用性と患者満足度を向上させるための必須条件である。従来のマニュアル TKA では、術者の経験や解剖学的バリエーションにより設置精度にばらつきが生じる可能性があった。

これらの課題を克服するため、近年ロボット支援 TKA が世界的に普及している。ロボット支援技術はインプラント設置の精度やアライメントの再現性を大幅に向上させることが実証されている (El Motassime ら, 2026)。ロボット支援 TKA は、骨切りやインプラント設置の再現性を高め、目標アライメントからの逸脱 (outlier) を減少させるのに有用と報告されている。米国では 2030 年までに TKA の約 70% がロボット支援下で行われるとの予測もあり (Khan ら, 2025)、日本国内でもその導入数は急速に増加している。また、ロボット支援 TKA は従来法と同等の短期臨床成績や合併症の低さを示すことも報告されており (Alturki ら, 2026)、臨床における有用性が広く認められつつある。

手術支援ロボットは、術者が骨切り操作を行う「半自動型 (M AKO や CORI など)」と、ロボットアームが自動で骨切りを行う「自動型 (active 型)」に分類される。当院では 2021 年より半自動型ロボットを使用してきたが、2025 年 10 月、韓国 CU REXO 社が開発した日本初の自動型 TKA ロボット「CUVIS-joint」を導入した。本システムは、術前 3D-CT 計画に基づきロボットアームが自動で骨切りを行うため、術者は動作の監視と安全管理に専念できるのが最大の特徴である。

本研究の目的は、日本第 1 号機として導入された CUVIS-joint を用いた TKA の初期導入症例における短期臨床成績および設置精度を調査し、自動型ロボット支援システムの有用性と安全性、導入初期における課題について検討することである。

対象と方法

対象は、2025 年 10 月から 2026 年 4 月までに、当院において CUVIS-joint を用いて初回片側 TKA を施行した 27 例 32 膝である。患者の内訳は男性 11 例、女性 16 例、手術時平均年齢は 74.1 歳であった。原疾患は、変形性膝関節症が 26 例 (31 膝)、関節リウマチが 1 例 (1 膝) であった。

手術は全例、内側膝蓋下アプローチを採用し、インプラントは

京セラ社製「Initia PS」をセメント固定で設置した。術前計画は mechanical alignment を基本方針とし、大腿骨コンポーネントは機能軸に対して 90° (目標 FCA: 90°)、脛骨コンポーネントは内反 1° (目標 TCA: 89°) を目標に計画した。

術中は、大腿骨および脛骨に光学式トラッカーピンを固定し、3D-CT データとの照合 (レジストレーション) を行った後、術中ギャップ調整にて計画を最終決定した。骨切りは、術者監視のもとロボットアームが自動で実行した。

評価項目は、術後下肢アライメント (HKA)、大腿骨前額面設置角度 (FCA)、脛骨前額面設置角度 (TCA) とし、目標計画値から $\pm 3^{\circ}$ を超えるものを outlier と定義した。また、皮膚切開から閉創までの全手術時間、およびロボット特有工程 (トラッカー設置、レジストレーション、ギャップ調整、自動骨切り) の所要時間を測定し、術者の学習曲線 (learning curve) を評価した。臨床成績は、術前と退院時 (術後約 3 週) の KSS および KOOS を用いて評価した。周術期合併症の有無についても調査した。

統計解析には術前後の臨床スコアの比較には対応のある t 検定を適用した (有意水準 $p < 0.05$)。

結 果

1. 術後アライメントおよび設置精度

術後 HKA は平均 $180.0^{\circ} \pm 2.8^{\circ}$ と良好であった。各コンポーネント設置角度は、FCA が平均 $89.0^{\circ} \pm 2.0^{\circ}$ 、TCA が平均 $88.9^{\circ} \pm 2.0^{\circ}$ であった。目標値から $\pm 3^{\circ}$ を超える outlier は、FCA で 21.8% (7/32 膝)、TCA で 18.8% (6/32 膝) に認められ、平均値は良好なものの、初期症例において一定のばらつきが観察された。

2. 手術時間および学習曲線

全手術時間は、整形外科 16 年目で初めて手術支援ロボットを用いた術者が 96.1 分、整形外科 2 4 年目でこれまでに他社製のロボットを用いた経験のある術者が 93.3 分と、術者間に有意差はなかった。症例数を重ねるに従い全手術時間は明確に短縮し、学習曲線が確認された。ロボット関連工程の合計時間は平均 36.2 分であり、こちらも症例数を経るごとに短縮した (表 1)。

表 1. 工程ごとの手術時間

手技	平均時間(分)
展開	9.4 分
アンテナ設置	4.0 分
レジストレーション	4.4 分
ギャップ調整	7.4 分
骨切り	20.4 分
骨除去・トライアル	14.2 分
セメント・閉創	34.0 分

3. 臨床成績および周術期合併症

KSS（膝関節スコア）は術前から退院で有意に改善した（ $p < 0.01$ ）。KOOS スコアも、疼痛項目において退院時に有意な向上が確認された（ $p < 0.01$ ）。周術期合併症として、トラッカー固定ピン刺入部における脛骨ピンサイト骨折を 1 例（3.1%）に認めたが、免荷加療にて良好に骨癒合した。術後感染、症候性深部静脈血栓症（DVT）などの重篤な合併症は認めなかった。

考 察

本研究における短期成績では、KSS および KOOS の有意な改善と重篤な合併症の不在が示され、CUVIS-joint を用いた TKA の安全性と治療効果が確認された。この結果は、インドでの CUVIS-joint 500 例の多施設共同研究で術中トラブルや重篤な合併症がなかったとする報告（Chandrashekar ら, 2023）とも整合しており、自動骨切りシステムの安全性は高いレベルで担保されていると言える。

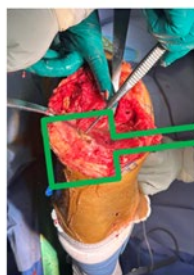
一方で、本研究での設置精度評価において、FCA で 21.8%、TCA で 18.8%とアウトリヤー率が既報よりも比較的高かった点は注目すべき課題である。ロボット支援 TKA はマニュアル法と比較して設置の再現性を高め、outlier の減少に有用であると多くのランダム化比較試験で報告されており（Alrajeb ら,

2024; Riantho ら, 2023; Ruangsomboon ら, 2023）、CUVIS-joint でも計画値に対して極めて正確な設置が可能とされる（Londhe ら, 2023）。当院の初期導入段階で outlier が一定数生じた要因として、以下の二点が考えられる。

第一に、導入初期のレジストレーションや評価手技における学習曲線の影響である。骨切り自体はロボットが自動で行うものの、トラッカー設置や 3D データとのマッピング照合、術後評価プローブの当て方などは術者の手作業に依存する。Londhe ら（2024）は、ロボット支援 TKA 導入初期における手術チームの心理的緊張が効率や精度に干渉する可能性を指摘しており、手技全体の習熟不足による微細な測定誤差がアライメント結果に影響した可能性がある。

第二に、骨切り終了後の手作業による仕上げ（manual finishing）の影響である。CUVIS-joint は安全バウンダリーを超えない制御仕様のため、境界部や骨の奥に残存骨片や軟部組織が付着しやすく、術者が平鑿などを用いて最終的な除去を行う必要がある（図 1）。この仕上げ操作で骨切り面に微細な形状変化が生じ、コンポーネント設置角度に影響を与えた可能性がある。Dundon ら（2026）も、ロボットを使用しても術者の仕上げ技術がアライメント再現性に影響しうると述べており、自動骨切りシステムにおいても手作業工程の習熟が極めて重要であることが示唆される。

CUVIS骨切り後



自験例

脛骨アライメントに
いちばん関与しそうな
硬いGardy結節部が残る

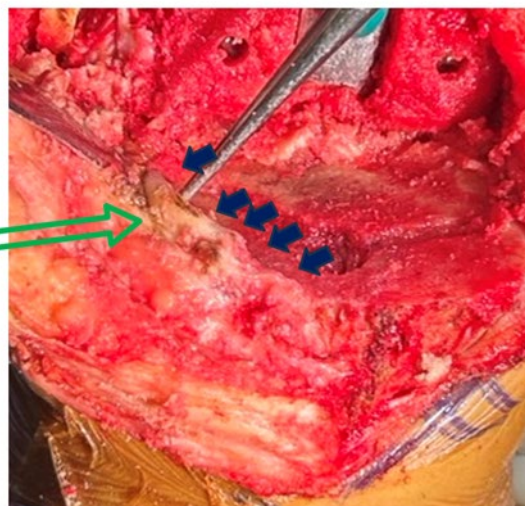


図 1. 骨切り後の残存骨片

手術時間に関しては明確な短縮傾向がみられ、学習曲線が存在した。先行研究（Alrajeb ら, 2024; El Motassime ら, 2026）でも指摘されているように、ロボット導入初期の手術時間安定化には一定の習熟期間が必要とされており、当院の初期実績（ロボット関連工程 36.2 分）も今後の手技の慣れやチームの習熟によってさらに短縮できる余地がある。

本研究の限界として、単施設での初期導入 32 膝と少数例であること、評価が短期（退院時約 3 週）に限られていること、従来法や他ロボットとの比較対照群がないことが挙げられる。今後は症例数を重ね、長期成績の追跡や対照比較を通じて、自動型ロボット TKA の臨床的優位性を検証していく必要がある。

結 語

自動型 TKA ロボット CUVIS-joint を用いた TKA は、初期導入症例において安全であり良好な短期成績をもたらした。設置精度をさらに向上させ、outlier を減少させるためには、自動化された骨切り工程だけでなく、術中マッピング精度や骨切り後の手作業による仕上げ工程（manual finishing）を含めたシステム全体への手技の習熟が極めて重要である。

利益相反の開示

申告すべき利益相反なし

文 献

- 1) Alrajeb R, Zarti M, Shuia Z, Alzobi O, Ahmed G, Elmhi regh A : Robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials, *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 34:1333-1343, 2024
- 2) Alturki AA, Almugren TS, Alhandi AA, Alhadlaq KH, Alsaeed AA, Almutairi G, et al : Outcomes of Bilateral Staged TKA in Patients Who Underwent both Conventional TKA and Robotic TKA: A Single Surgeon's Experience, *Orthopedic Reviews*, 18(1):160598, 2026
- 3) Chandrashekar P, Babu KA, Nagaraja HS, Hiral SG, Karthikeyan S, Bajwa S : Intra-operative Safety of an Autonomous Robotic System for Total Knee Replacement: A Review of 500 Cases in India, *Indian Journal of Orthopaedics*, 57(11):1800-1808, 2023

- 4) Dundon JM, Uffer J, Treviño N, Lewis S, Brown N, Lombardi P : Accuracy and reproducibility of posterior tibial slope restoration in robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: A comparative analysis across alignment strategies, *Journal of Orthopaedics*, 76:274-278, 2026
- 5) El Motassime A, Tanzi Germani G, Sangaletti R, Andriollo L, Cinelli V, Benazzo F, et al : Imageless robotic assisted TKA: a systematic review, *Journal of Orthopaedics*, 75:154-162, 2026
- 6) Khan ST, Emara AK, Zhou G, Koroukian SM, et al : Robotic-assisted total knee arthroplasty in the USA: nationwide adoption trends towards 70 % by 2030, *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 68:103069, 2025
- 7) Londhe SB, Shetty S, Vora NL, Shah A, Nair R, Shetty V : Evaluation of the safety and efficacy of the fully automated active robotic system in robotic assisted total knee arthroplasty, *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 37:102106, 2023
- 8) Londhe SB, Rudraraju RT, Shah RV, DeSouza C, Shetty V, Khan FS, Bajwa S : Analysis of robot-specific operative time and surgical team anxiety level and its effect on alignment during robot-assisted TKA, *Journal of Robotic Surgery*, 18:86, 2024
- 9) Riantho A, Butarbutar JCP, Fidiarianto K, Elson E, Irvan I, Haryono H, et al : Radiographic Outcomes of Robot-Assisted Versus Conventional Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials, *JBJS Open Access*, 8(2):e23.00010, 2023
- 10) Ruangsomboon P, Ruangsomboon O, Pornrattanamaneewong C, Narkbunnam R, Chareancholvanich K : Clinical and radiological outcomes of robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials, *Acta Orthopaedica*, 94:60-79, 2023

外反膝に対するロボット支援人工膝関節置換術における ギャップバランスの再現性とアライメント矯正精度の検討

橋病院 整形外科 石田翔太郎 柏木輝行 小島岳史 吉田尚紀 柏木悠吾 前之原悠司

はじめに

外反膝変形は初回 TKA 全体の約 10-15%を占め、内反変形とは異なる技術的課題を有するとされる。病態としては外側コンパートメントの骨欠損、外側軟部組織（腸脛靭帯・外側側副靭帯）の拘縮、内側側副靭帯（MCL）の弛緩が挙げられ、これらが軟部組織バランスおよびコンポーネント設置を複雑にする。さらに外反膝では外側顆低形成により後顆軸傾斜角（PCA）が増大するため、後顆軸を回旋設置の基準とした場合に大腿骨コンポーネントが内旋傾向となるリスクがある。Lee らは外反膝に対するナビゲーション支援 TKA において、大腿骨遠位外側角が後顆軸基準の大腿骨コンポーネント回旋角の主要な予測因子であることを報告しており（平均回旋角 $6.1 \pm 2.0^\circ$ ）、外側顆低形成の定量的評価の重要性を示している。Krackow らは固定性外反変形を有する TKA 例において、変形のタイプに応じた軟部組織解離法の重要性を報告しており、Keblish は外側アプローチによる外反膝 TKA の手技を示している。Whiteside は選択的な軟部組織解離法を提唱し、変形の程度に応じた解離戦略の有用性を示した。Ranawat らは重度外反変形に対する TKA の臨床成績を報告し、変形の重症度が手術の難易度と直接関連することを指摘している。

一方、術後の機械軸アライメントとインプラント生存率の関係については議論が続いている。Bonner らは 15 年の長期経過観察において、術後機械軸アライメントとインプラント生存率との関連は従来の報告より弱い可能性があることを報告しており、アライメントの意義については一定の留意が必要である。Cherian らは機械軸・解剖軸・運動学的軸のいずれを基準とすべきかについて包括的に整理し、各アライメント概念の臨床応用における利点と限界を論じている。

ロボット支援 TKA (RA-TKA) は CT ベースの三次元術前計画により、経上顆軸（transepicondylar axis : TEA）を直接可視化できることに加え、術中の定量的ギャップ評価を可能とし、複雑な変形矯正における術者の感覚的判断への依存を軽減できる可能性がある。Kayani らはロボット支援 TKA の導入における学習曲線が手術時間に関しては 7 例程度で収束する一方、インプラント設置精度には学習曲線の影響が乏しいことを報告している。Wininger らは手術経験数の多い術者が施行する TKA 全症例においては RA-TKA と manual TKA で目標アライメント達成率に有意差はないが、外反膝など難易度の高い症例では RA-TKA が目標アライメント達成においてより有利となる可能性を示した。当院では 2022 年より Mako® robotic system

を導入し、これらの課題の解決を図ってきた。しかしながら、外反膝におけるギャップバランスの再現性に着目した報告は少ない。そこで本研究は、外反膝における RA-TKA の矯正結果および再現性を検討した。特に、ポリエチレンインサート厚を術中ギャップバランスの一致度の指標として着目し、異なる経験年数を有する術者間でのアライメント結果についても検討した。

対象と方法

本研究は当院倫理委員会の承認を得て実施した後ろ向き観察研究である。全例で文書による同意を取得した。2024 年 4 月から 2026 年 3 月までの間に、外反膝変形（術前 HKA $\geq 180^\circ$ ）を有し、CT ベースロボットシステム（Mako®, Stryker 社製）を用いて RA-TKA を施行した症例を対象とした。同側膝の既往手術歴を有する症例、炎症性関節炎、画像データが不完全な症例は除外した。

全手術は 2 名の術者により施行された。術者 A は整形外科手術歴 23 年・ロボット支援 TKA 手術歴 5 年（10 膝）、術者 B は整形外科手術歴 10 年・ロボット支援 TKA 手術歴 2 年（7 膝）であった。全例において CT ベースの術前計画を行い、目標 HKA を $177-183^\circ$ に設定した。全例でセメント固定型 posterior-stabilized 型インプラントを使用し、膝蓋骨は置換しなかった。主要評価項目は、術後 HKA、目標アライメント達成率（ $177-183^\circ$ ）、大腿骨コンポーネント角（FCA）・脛骨コンポーネント角（TCA）、およびギャップバランスの一致度の指標としてのポリエチレンインサート厚とした。両術者間での術後 HKA の再現性についても評価した。術前後顆軸傾斜角（PCA）はロボット術前計画データより記録した。連続変数は平均±標準偏差で示した。術前後の比較には対応のある t 検定を、術者間の比較には対応のない t 検定を用いた。正確な p 値を全データで示し、 $p < 0.05$ を統計学的有意とした。統計解析には Python（SciPy v1.11）を使用した。

結果

外反膝 17 膝（16 例、うち両側例 1 例）を解析対象とした。手術時平均年齢は 74.9 ± 6.9 歳（範囲 62-86 歳）であり、女性 12 例（75%）、男性 4 例であった。術前 HKA は 180.4° から 196.2° の範囲であり（平均 $186.5 \pm 5.4^\circ$ ）、術前 PCA の平均は $4.0 \pm 1.8^\circ$ （範囲 $0.4-7.4^\circ$ ）であった。術者 A が 10 膝、術者 B が 7 膝を施行した（表 1）。

表1. 患者背景およびアライメント矯正結果

項目	結果
症例数	17 膝／16 例（両側 1 例）
性別（女性／男性）	12／4
年齢（歳）	74.9 ± 6.9（範囲 62-86）
術前 HKA（°）	186.5 ± 5.4
術前 PCA（°）	4.0 ± 1.8（範囲 0.4-7.4）
術者 A（経験／施行数）	整形外科歴 23 年・ロボット歴 5 年／10 膝
術者 B（経験／施行数）	整形外科歴 10 年・ロボット歴 2 年／7 膝
手術時間（分）	76.3 ± 15.1（範囲 56-114）
術後 HKA（°）	179.1 ± 1.9
HKA 矯正量（°）	7.4（95%CI 4.3-10.5、p < 0.001）
目標達成率（177-183°）	88.2%（15/17 膝）
術後 FCA（°）	89.2 ± 2.1
術後 TCA（°）	89.3 ± 1.7
9mm インサート率	100%（17/17 膝）
術者間差（術後 HKA）	2.2°（95%CI 0.6-3.9、p = 0.011）

術後 HKA は術前 $186.5 \pm 5.4^\circ$ から $179.1 \pm 1.9^\circ$ へ有意に改善した（矯正量 7.4° 、95%信頼区間 4.3-10.5、 $p < 0.001$ ）。目標 HKA（177-183°）の達成率は 88.2%（15/17 膝）であり、目標を逸脱した 2 膝（ 176.2° 、 176.3° ）はいずれも目標範囲境界から 1° 以内であった。FTA は術前 $168.0 \pm 5.9^\circ$ から術後 $175.8 \pm 3.1^\circ$ へ改善し（矯正量 7.8° 、95%信頼区間 4.8-10.9、 $p < 0.001$ ）、術後 FCA は $89.2 \pm 2.1^\circ$ （範囲 84.1-92.1°）、TCA は $89.3 \pm 1.7^\circ$ （範囲 87.2-93.3°）であり、冠状面におけるコンポーネント設置は良好であった（図 1～6）。全 17 膝（100%）において、術前変形の程度（HKA 180.4 - 196.2° ）や術者に関わらず、術中 9mm ポリエチレンインサートでギャップバランスが得られた（図 7）。平均手術時間は

76.3 ± 15.1 分（範囲 56-114 分）であり、術者 A は平均 71.1 ± 12.3 分、術者 B は平均 83.7 ± 16.4 分であった（ $p = 0.090$ 、図 5）。

術後 HKA は術者 A の施行例で平均 $180.0 \pm 1.7^\circ$ 、術者 B の施行例で平均 $177.8 \pm 1.4^\circ$ であった。術者間で術後 HKA に統計学的有意差を認めたが（ $p = 0.011$ ）、両術者ともに目標範囲（177-183°）内またはその近傍のアライメントを一貫して達成しており、両群間の平均差は 2.2° （95%信頼区間 0.6-3.9°）であった（図 8）。PCA については術者間で有意差を認めなかった（術者 A： $3.7 \pm 2.0^\circ$ vs 術者 B： $4.5 \pm 1.5^\circ$ 、 $p = 0.419$ ）。術中・術後早期の合併症は認めなかった。

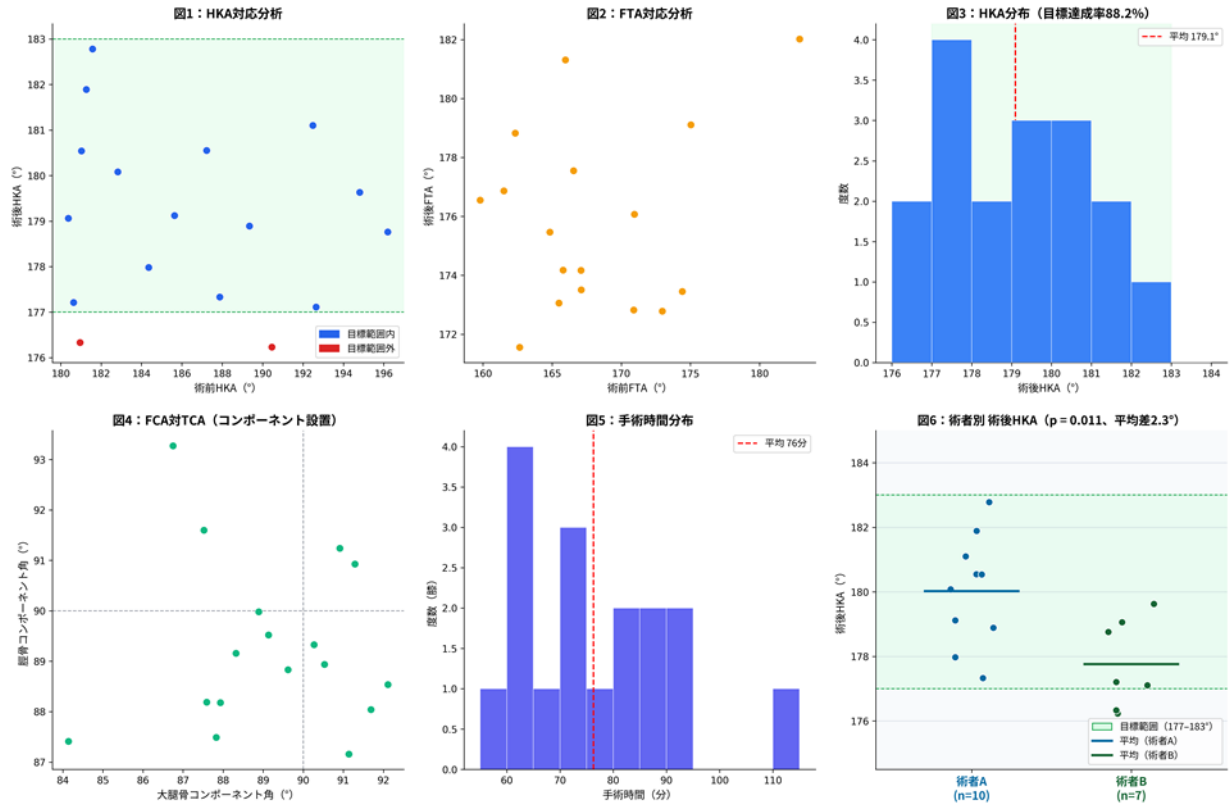


図1～6. 統計学的解析結果。

図 1:術前後 HKA 対応分析、図 2:術前後 FTA 対応分析、図 3:術後 HKA 分布(目標達成率 88.2%)

図 4:FCA 対 TCA(コンポーネント設置)、図 5:手術時間分布、図 6:術者別術後 HKA($p = 0.011$ 、両術者ともに目標範囲を達成)。

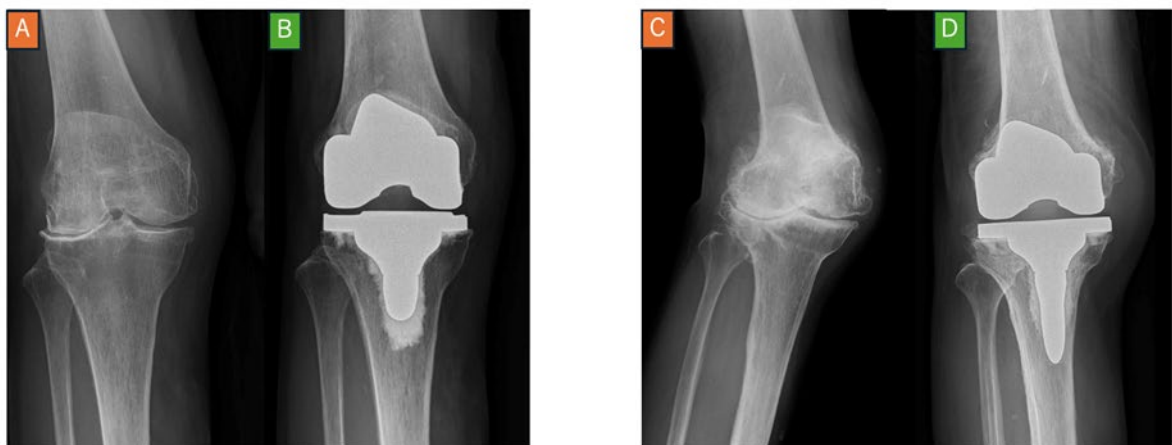


図 7. 代表症例の X 線画像。

(A, B)軽度外反膝(86 歳女性、右膝):術前 HKA 182.8° →術後 180.1°、インサート 9mm(術者 A 施行)。

(C, D)重度外反膝(81 歳女性、右膝):術前 HKA 196.2° →術後 178.8°、インサート 9mm(術者 B 施行)。

変形の程度が異なる両症例とも、同一の 9mm インサートでギャップバランスが得られた。

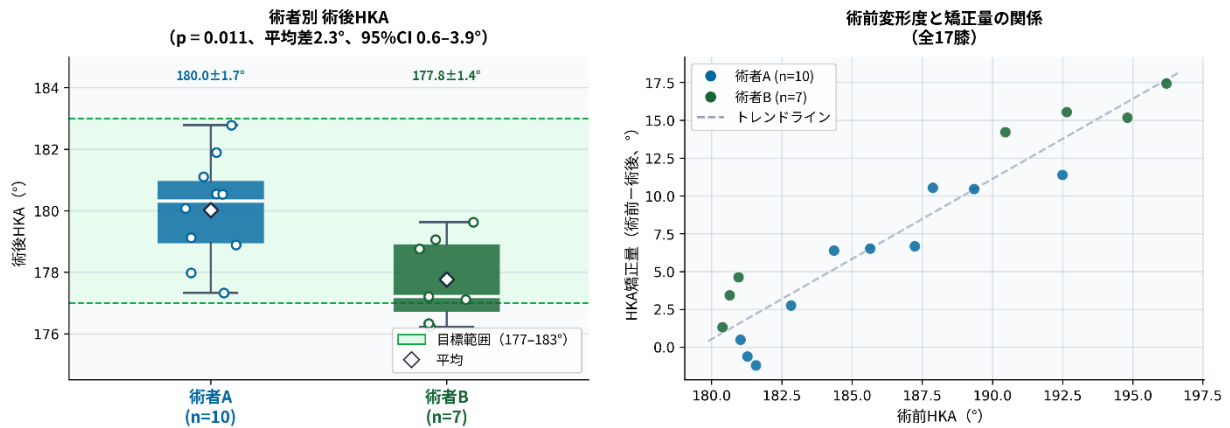


図 8. 術者間アライメント再現性と HKA 矯正量の関係。

左: 術者別の術後 HKA (箱ひげ図)。術者間で有意差を認めたが ($p = 0.011$ 、平均差 2.2° 、95%CI $0.6-3.9^\circ$)、両術者ともに目標範囲 ($177-183^\circ$) 内またはその近傍のアライメントを達成した。

右: 術前 HKA と HKA 矯正量の散布図。

考 察

本研究では、RA-TKA が外反膝において確実なアライメント矯正を実現することが示された。術後 HKA は $186.5 \pm 5.4^\circ$ から $179.1 \pm 1.9^\circ$ へ改善し ($p < 0.001$)、目標達成率は 88.2% であった。手術時間 (76.3 分) についても、術前 CT 計画によるワークフローの標準化を反映している可能性がある。

特徴的な所見は、全 17 膝において術前変形の程度 (HKA $180.4-196.2^\circ$) に関わらず全例で 9mm ポリエチレンインサートが使用された点である。Cherian らが整理した複数のアライメント概念を踏まえると、ロボットによる定量的ギャップ評価は、術中軟部組織バランスの客観的評価に寄与した可能性がある。Whiteside が提唱した選択的軟部組織解離の考え方とも整合し、ロボット支援下での定量評価がこの判断をより客観的に支援している可能性がある。

本コホートの術前 PCA 平均 $4.0 \pm 1.8^\circ$ は、外反膝における外側顆低形成の影響を反映している可能性があり、Lee らが外反膝 TKA において報告した大腿骨コンポーネント回旋角 (平均 6.1°) と合わせて、外側顆低形成が大腿骨回旋設置に与える影響の大きさを示している。CT ベースの術前計画は大腿骨経上顆軸 (transepicondylar axis: TEA) を直接可視化することを可能にし、後顆軸への依存を回避することで、回旋設置の誤りを低減する可能性がある。

術者間では術後 HKA に統計学的有意差を認めたが ($p = 0.011$ 、平均差 2.2° 、95%信頼区間 $0.6-3.9^\circ$)、整形外科手術歴 (23 年 vs 10 年) およびロボット支援 TKA 経験 (5 年 vs 2 年) が大きく異なる両術者ともに、目標範囲内またはその近傍のアライメントを達成した。Kayani らが報告したロボット支援 TKA の学習曲線 (手術時間については 7 例程度で収束し、インプラント設置精度には学習曲線の影響が乏しいこと) を踏まえると、

本研究で観察された術者間差も、経験年数の差にもかかわらずアライメント精度自体は両者ともに高い水準で維持されていたことを支持する所見と考えられる。Wininger らが示したように、全症例での比較では RA-TKA と manual TKA の目標アライメント達成率に有意差はないが、外反膝など難易度の高い症例に絞った場合は RA-TKA が有利となる可能性がある。本研究の結果はその知見と整合するものであるが、術者間差が完全に消失するものではなく、RA-TKA が異なる経験レベルの術者間における技術的バリエーションを軽減し得るという解釈はあくまでも示唆にとどまる点に留意が必要である。

Bonner らの長期経過観察では、術後機械軸アライメントとインプラント生存率の関連は従来想定されていたよりも弱い可能性が指摘されている。本研究はアライメント矯正の再現性に着目したものであり、長期的な臨床アウトカムとの関連については今後の検討課題である。

本研究にはいくつかの限界がある。後ろ向きデザイン、単施設での検討、症例数が少ないこと ($n=17$)、機能的アウトカムデータが欠如していることが、本研究結果の外的妥当性を制限する。今後、より長期の経過観察と機能評価スコアを含めた検討により、本研究で示されたアライメントおよびギャップバランスの臨床的意義を確認する必要がある。

以上より、RA-TKA は外反膝において、再現性の高いギャップバランス (全例 9mm インサート)、および異なる経験レベルの術者間における一貫した成績を実現した。これらの結果は、技術的難易度の高い外反膝変形の治療において RA-TKA が有用な選択肢となる可能性を示唆するものである。

利益相反

開示すべき利益相反なし。

文 献

- 1) Bonner TJ, Eardley WGP, Patterson P, Gregg PJ : The effect of post-operative mechanical axis alignment on the survival of primary total knee replacements after a follow-up of 15 years, J Bone Joint Surg Br, 93 : 1217-1222, 2011
- 2) Cherian JJ, Kapadia BH, Banerjee S, Jauregui JJ, Issa K, Mont MA : Mechanical, anatomical, and kinematic axis in TKA: concepts and practical applications, Curr Rev Musculoskelet Med, 7 : 89-95, 2014
- 3) Kayani B, Konan S, Huq SS, Tahmassebi J, Haddad FS : Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning, Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 27 : 1132-1141, 2019
- 4) Keblish PA : The lateral approach to the valgus knee. Surgical technique and analysis of 53 cases with over two-year follow-up evaluation, Clin Orthop Relat Res, 271 : 52-62, 1991
- 5) Krackow KA, Jones MM, Teeny SM, Hungerford DS : Primary total knee arthroplasty in patients with fixed valgus deformity, Clin Orthop Relat Res, 273 : 9-18, 1991
- 6) Lee SS, Lee YI, Kim DU, Lee DH, Moon YW : Factors affecting femoral rotational angle based on the posterior condylar axis in gap-based navigation-assisted total knee arthroplasty for valgus knee, PLoS One, 13 : e0197335, 2018
- 7) Ranawat AS, Ranawat CS, Elkus M, Rasquinha VJ, Rossi R, Babhulkar S : Total knee arthroplasty for severe valgus deformity, J Bone Joint Surg Am, 87 Suppl 1 : 271-284, 2005
- 8) Whiteside LA : Selective ligament release in total knee arthroplasty of the knee in valgus, Clin Orthop Relat Res, 367 : 130-140, 1999
- 9) Wininger AE, Lambert BS, Sullivan TC, Brown TS, Incavo SJ, Park KJ : Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty Can Increase Frequency of Achieving Target Limb Alignment in Primary Total Knee Arthroplasty for Preoperative Valgus Deformity, Arthroplast Today, 23 : 101196, 2023

ロボット支援 TKA におけるラーニングカーブの検討

人工膝関節置換術の主術者経験がない術者による RA-TKA 211 例の単一術者シリーズ

橋病院 整形外科 柏木悠吾 柏木輝行 小島岳史 石田翔太郎 前之原悠司 吉田尚紀

要旨

ロボット支援人工膝関節置換術 (robotic-arm-assisted total knee arthroplasty: RA-TKA) は、従来法と比較して骨切り精度や下肢アライメントの再現性を高めることが期待される⁷。一方、その learning curve は主に manual TKA 経験を有する術者を対象に報告されてきた^{3,6,10}。本研究では、manual TKA の主術者経験がない術者が、経験豊富な RA-TKA 術者の継続的な第一助手・指導下で行った RA-TKA 211 例を対象に、手術時間および術後アライメント精度の経時的変化を探索的に検討した。手術時間は症例 86 を探索的転換点として有意に短縮し、対数回帰および Spearman 順位相関でも連続的な短縮傾向を認めた。一方、アライメント精度については後期に outlier 率の低下を認めたが、連続的改善の統計学的裏付けは限定的であった。RA-TKA は若手術者教育の有用な足場となる可能性があるが^{4,5}、技術習熟の評価には手術時間のみではなく、アライメント精度、outlier、合併症、術中判断を含めた多面的評価が必要である。

はじめに

RA-TKA は、術前 CT を用いた三次元計画、術中の骨切り制御、軟部組織バランスの可視化により、従来法と比較して骨切り精度や下肢アライメントの再現性を高めることが期待されている⁷。新規手術技術の導入においては、術者がどの程度の症例経験を経て手術効率や精度を安定させるか、すなわち learning curve を把握することが重要である。既報では、manual TKA 経験が豊富な術者が RA-TKA を導入した場合、手術 workflow への適応は比較的早期に得られると報告されている^{6,10}。また、非フェローシップ訓練術者における RA-TKA の learning curve も報告されているが¹、これらの多くは manual TKA の主術者経験を有する術者を対象としている。RA-TKA の learning curve に関する系統的レビューでも、対象術者の背景や評価項目の違いにより結果の解釈には注意が必要とされている³。したがって、manual TKA の主術者経験がない術者が、最初から RA-TKA を学ぶ過程は十分に明らかではない。

対象と方法

本研究は単施設・単一術者による後ろ向き観察研究である。対象は 2022 年 8 月から 2026 年 1 月までに施行した初回 RA-TKA 連続 211 例であり、全例で Mako Robotic-Arm Assisted System および Stryker Triathlon implant を使用した。手術時間

と術後合併症は全 211 例で評価し、術後立位全下肢 X 線が取得可能であった 195 例を HKA 解析対象とした。16 例は立位全下肢 X 線が取得不能であり、アライメント解析から除外した。執刀医は研究開始時点で卒後 3 年目、整形外科専攻開始後 4 か月であり、manual TKA の主術者経験はなく、manual TKA の第一助手経験が 26 例であった。全 211 例において、経験豊富な RA-TKA 術者が第一助手として参加し、必要に応じて口頭指導を行った。本研究は独立した初心者導入ではなく、経験者の継続的監督下における training の learning curve として解釈する必要がある。

手術時間は皮切から最終縫合までと定義し、術前 CT 計画、麻酔、体位、手術室セットアップ時間は含めなかった。アライメント精度は、術者が術前・術中計画で設定した planned HKA target と術後 HKA 角の差として評価した。absolute HKA error は planned HKA target と術後 HKA 角の差の絶対値とし、overall outlier は planned target から内反・外反いずれかの方向に 3° を超えて逸脱した症例、varus outlier は planned target より内反方向に 3° を超えて逸脱した症例と定義した。近年は mechanical alignment のみならず、kinematic alignment、restricted kinematic alignment、phenotype-based alignment など多様なアライメント概念が議論されており⁹、本研究では中立 180° からの逸脱ではなく、各症例の planned target からの逸脱として評価した。

統計解析

Learning curve の探索的評価として post hoc CUSUM 分析を用いた。CUSUM 分析では、連続変数では各症例の値と全体平均との差、二値変数では各症例のイベント発生と全体イベント率との差を症例順に累積し、曲線の最大偏位を探索的転換点として扱った。これは事前に許容・不許容成績や判定限界を設定する正式な LC-CUSUM ではなく、あくまで記述的・仮説生成的な解析である²。手術時間については、CUSUM で得られた転換点をもとに Welch の t 検定で前期・後期を比較し、対数回帰、Spearman 順位相関、多変量線形回帰により連続的変化を評価した。absolute HKA error については CUSUM、Welch の t 検定、対数回帰、Spearman 順位相関を用いた。overall outlier および varus outlier については、CUSUM で得られた位相比較を Fisher の正確確率検定で行い、varus outlier については BMI 調整ロジスティック回帰により連続的な発生リスクの変化を評

価した。HKA 測定の検者間信頼性は ICC を用いて評価した⁸⁾。

結 果

対象 211 例の平均年齢は 75.9±7.7 歳、男性 63 例、女性 148 例であった。平均 BMI は 26.5±4.2kg/m²、平均術前 HKA 角は 171.5±6.3° であり、中立軸から平均約 8.5° の内反変形を有していた。HKA 解析は 195 例 (92.4%) で可能であり、平均観察期間は 13.2 か月 (2.6~37.8 か月) であった。

手術時間の post hoc CUSUM 分析では、症例 86 を探索的転換点として認めた (図 1)。手術時間は 1~86 例で 72.9±20.2 分、87~211 例で 57.2±11.2 分と有意に短縮した ($p<0.001$) (表 1)。対数回帰では症例数の蓄積と手術時間短縮の間に有意な関連を認め ($R^2=0.48$, $p<0.001$) (図 2)、Spearman 順位相関でも有意な負の相関を認めた ($\rho=-0.58$, $p<0.001$)。多変量線形回帰では、年齢、BMI、術前変形を調整後も症例番号の対数は手術時間短縮と独立して関連した。これらの結果は、既報で示されてきた RA-TKA 導入後の手術時間短縮傾向と整合する

6,10)。

absolute HKA error の post hoc CUSUM 分析では、放射線評価可能症例の 68 例目、実手術番号では 75 例目に相当する探索的転換点を認めた (図 3)。absolute HKA error は前期 $2.27\pm 2.00^\circ$ 、後期 $1.67\pm 1.43^\circ$ であった (表 1)。一方、対数回帰および Spearman 順位相関では、absolute HKA error の明確な連続的低下は認めなかった。varus outlier の CUSUM 分析では、放射線評価可能症例の 143 例目、実手術番号では 156 例目に相当する探索的転換点を認めた。varus outlier は前期 21/143 例 (14.7%)、後期 1/52 例 (1.9%) と低下した ($p=0.010$)。overall outlier も前期 34/143 例 (23.8%)、後期 4/52 例 (7.7%) と低下した ($p=0.013$)。ただし、BMI 調整ロジスティック回帰では varus outlier の連続的低下は統計学的有意に至らなかった (OR per 10 cases=0.930、95%CI 0.856~1.011、 $p=0.088$)。術後合併症として表在性 SSI を 2 例 (0.95%) に認めたが、深部 PJI、症候性 DVT/PE、インプラント周囲骨折、MUA、神経血管損傷は認めなかった。

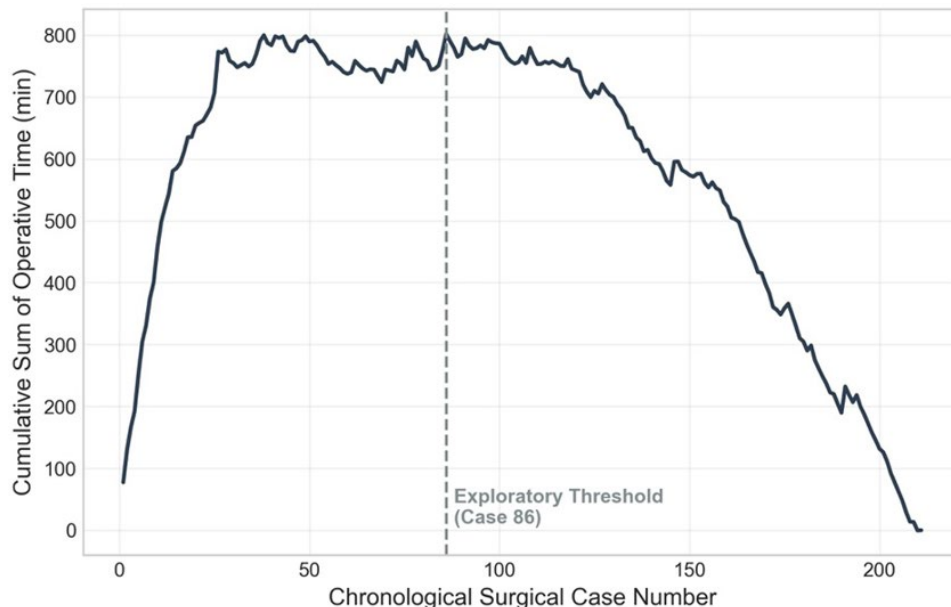


Figure 1. Exploratory CUSUM Analysis: Operative Time

図 1. 手術時間の探索的 CUSUM 解析。症例 86 を探索的転換点として認めた。

表 1. earning curve 解析のまとめ

評価項目	転換点	前期	後期	統計解析	p 値
手術時間	86 例	72.9±20.2 分	57.2±11.2 分	Welch の t 検定	<0.001
absolute HKA error	68 例	2.27±2.00°	1.67±1.43°	Welch の t 検定	0.031
overall outlier >3°	143 例	34/143 (23.8%)	4/52 (7.7%)	Fisher の正確確率検定	0.013
varus outlier >3°	143 例	21/143 (14.7%)	1/52 (1.9%)	Fisher の正確確率検定	0.010
varus outlier 連続トレンド	—	—	OR per 10 cases 0.930	BMI 調整ロジスティック回帰	0.088

注: CUSUM で得られた転換点はいずれ post hoc の探索的閾値であり、位相比較は記述的・仮説生成的に解釈する。

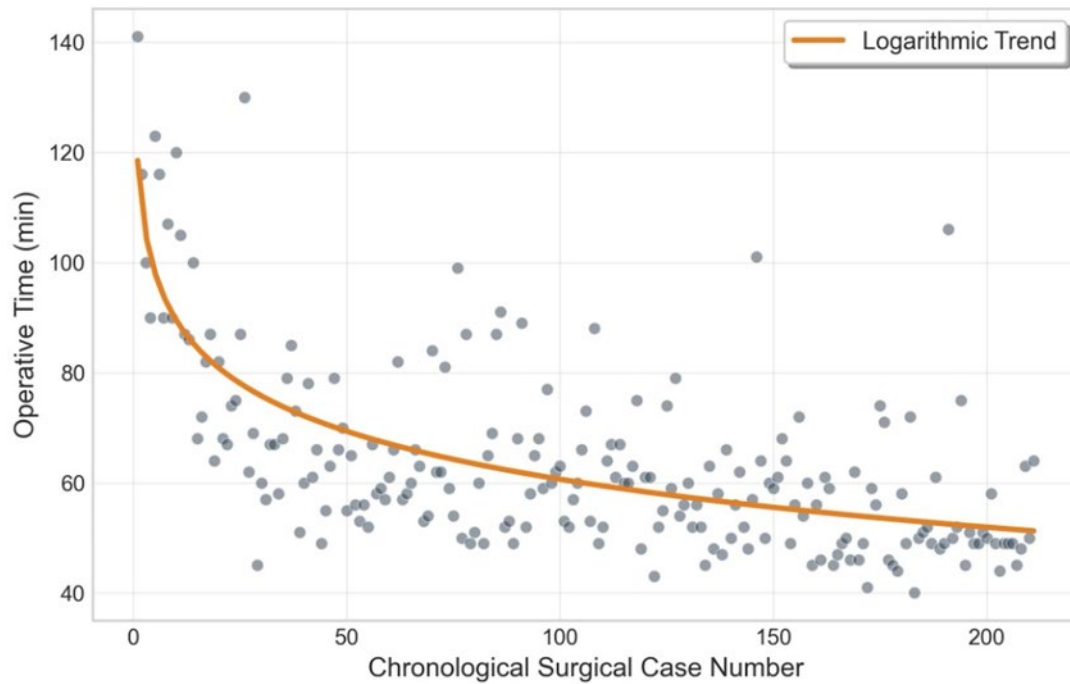


Figure 2. Learning Curve: Operative Time

図 2. 手術時間の learning curve。症例数増加に伴う手術時間短縮を対数回帰で示す。



Figure 3. Exploratory CUSUM Analysis: Radiographic Accuracy

図 3. アライメント精度の探索的 CUSUM 解析。absolute HKA error では放射線評価可能症例 68 例目、outlier では 143 例目に探索的転換点を認めた。

考 察

本研究では、manual TKA の主術者経験がない術者による監督下 RA-TKA において、手術時間は症例経験とともに明確かつ連続的に短縮した。これはロボット workflow への適応、器械操作への慣れ、手術手順の定型化、助手・器械出し・ロボット

サポートとのチーム連携、さらに展開、軟部組織処理、セメント、インプラント設置といった TKA の基礎的手技の習熟が複合的に反映された結果と考えられる。

一方で、アライメント精度については、CUSUM で設定した位相比較では後期に outlier 率の低下を認めたものの、連続的ト

レンド解析では手術時間ほど一貫した改善を示さなかった。RA-TKAは骨切り精度を高めるが、最終アライメントは骨切りだけで決定されるわけではない。展開、軟部組織バランス、cementation、implant seating、残存屈曲拘縮、術後立位撮影時の肢位など、複数の要素がplanned HKA targetの達成に影響しうる。また、現代TKAでは患者固有のアライメントを考慮する考え方も広がっており⁹⁾、本研究のoutlierは中立位からの逸脱ではなくplanned targetからの逸脱として解釈すべきである。

RA-TKAの教育的意義は、ロボットが手術を代替することではなく、術前計画、骨切り量、アライメント、gapなどを数値化・可視化し、指導医と若手術者が同じ情報を共有しながら術中判断を言語化できる点にある。骨切りの再現性が一定程度担保されることで、若手術者は展開、軟部組織処理、インプラント設置といった基礎的手技に集中しやすく、TKAの複雑な学習課題を段階的に分解できる可能性がある。RA-TKAでは研修医や若手術者の関与が手術時間を不必要に延長せず教育に利用できる可能性が報告されており^{4,5)}、本研究の結果も、経験豊富な術者の監督下であればRA-TKAが教育的足場となりうることを示唆する。ただし、本研究では教育効果そのもの、術中判断能力、ステップ別手技能力を直接測定していないため、この解釈は仮説生成的である。

限 界

本研究にはいくつかの限界がある。第一に、単一術者・単施設・後ろ向き研究であり、症例構成や施設の指導体制の影響を受ける。第二に、全例で経験豊富なRA-TKA術者が第一助手として関与しており、独立した初心者導入の安全性を示すものではない。第三に、CUSUM 閾値はpost hocに設定されたものであり、位相比較は記述的・仮説生成的に解釈する必要がある²⁾。第四に、術後HKAの測定信頼性は中等度であり、3° 閾値付近では誤分類の可能性がある⁸⁾。第五に、後期でBMIが低下しており、case-mix shiftがoutlier率の低下に関与した可能性がある。第六に、術中gap data、final plan adjustment、component-level alignmentなどの詳細なロボットデータは解析できていない。

結 語

manual TKAの主術者経験がない術者による監督下RA-TKA 211例において、手術時間は症例経験とともに明確に短縮した。一方で、アライメント精度については後期でoutlier率の低下を認めたものの、連続的改善は統計学的に限定的であった。RA-TKAは、手術の安全性・正確性を補助しながら、若手術者にとって有用な教育的足場となる可能性がある。しかし、技術習熟の評価には、手術時間だけでなく、アライメント精度、outlier、合併症、術中判断を含めた多面的評価が必要である。

利益相反の開示

本論文に利益相反はない。

引用文献

- 1) Ali M, Phillips D, Kamson A, Nivar I, Dahl R, Hallock R : Learning curve of robotic-assisted total knee arthroplasty for non-fellowship-trained orthopedic surgeons、Arthroplasty Today、13 : 194-198、2022
- 2) Biau DJ, Williams SM, Schlup MM, Nizard RS, Porcher R : Quantitative and individualized assessment of the learning curve using LC-CUSUM、British Journal of Surgery、95 : 925-929、2008
- 3) Cacciola G, Bosco F, Giustra F, Risitano S, Capella M, Bistolfi A, et al. : Learning curve in robotic-assisted total knee arthroplasty: a systematic review of the literature、Applied Sciences、12 : 11085、2022
- 4) Deckey DG, Verhey JT, Rosenow CS, Doan MK, McQuivey KS, Joseph AM, et al. : Robotic-assisted total knee arthroplasty allows for trainee involvement and teaching without lengthening operative time、Journal of Arthroplasty、37 : S201-S206、2022
- 5) Duensing IM, Stewart W, Novicoff WM, Meneghini RM, Browne JA : The impact of robotic-assisted total knee arthroplasty on resident training、Journal of Arthroplasty、38 : S227-S231、2023
- 6) Kayani B, Konan S, Huq SS, Tahmassebi J, Haddad FS : Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning、Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy、27 : 1132-1141、2019
- 7) Kayani B, Konan S, Tahmassebi J, Pietrzak JRT, Haddad FS : Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved early functional recovery and reduced time to hospital discharge compared with conventional jig-based total knee arthroplasty: a prospective cohort study、Bone & Joint Journal、100-B : 930-937、2018
- 8) Koo TK, Li MY : A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research、Journal of Chiropractic Medicine、15 : 155-163、2016
- 9) MacDessi SJ, Griffiths-Jones W, Harris IA, Bellemans J, Chen DB : Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK)、Bone & Joint Journal、103-B : 329-337、2021
- 10) Vermue H, Luyckx T, Winnock de Grave P, et al. : Robot-assisted total knee arthroplasty is associated with a learning curve for surgical time but not for component alignment, limb alignment and gap balancing、Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy、30 : 593-602、2022

宮崎整形外科研究会誌

第 31 号 2026

発 行 日：令和 8 年 10 月

発 行 者：宮崎整形外科懇話会

編集責任者：亀井直輔・黒木修司

製 作：宮崎大学医学部整形外科学教室

〒889-1692

宮崎県宮崎市清武町木原 5200