

## 綜 説

## 脊柱変形手術と脊椎ロボット手術の歴史

大場 悠己\* 池上 章太 上原 将志 畠中 輝枝  
黒河内大輔 福澤 拓馬 笹尾 真司 高橋 淳

信州大学医学部運動機能学教室

## History of Spinal Deformity Surgery and Robotic Spine Surgery

Hiroki OBA, Shota IKEGAMI, Masashi UEHARA, Terue HATAKENAKA

Daisuke KUROGOCHI, Takuma FUKUZAWA, Shinji SASAO and Jun TAKAHASHI

Department of Orthopaedic Surgery, Shinshu University School of Medicine

**Key words:** robotic surgery, pedicle screw, computer navigation

ロボット手術, 椎弓根スクリュー, コンピュータナビゲーション

## I はじめに

本邦では2021年に脊椎疾患に対するロボット支援下手術が開始された。現在、国内で独立行政法人医薬品医療機器総合機構（PMDA）の認可を受けて使用可能な機種は3つである。現在国内では限られた数施設がこの3機種のいずれかを使用している状況だが、使用施設は増えつつある。当院では2022年5月より手術支援ロボットを導入し、これまでに約100人の側弯症患者にロボット手術を行ってきた<sup>1)</sup>。ロボット手術の導入は、椎弓根スクリューの挿入精度を向上させ、その逸脱や誤挿入による致命的な合併症のリスクを低減させた。本稿では、最初に脊柱変形に対する治療の歴史とコンピュータナビゲーションの進歩について概説した後に、脊椎ロボットについて、その構造と成績、開発の歴史について述べる。

## II 脊柱変形治療の歴史

何故脊椎ロボットが誕生し、脊椎ロボットには何が期待されているのだろうか。それを理解するためには、側弯症をはじめとする脊柱変形に対する治療の変遷を知らなければならない。歴史的に脊柱変形の治療は牽引、ギプス、装具などの非手術的に行われていた<sup>2)-4)</sup>。初めての脊椎固定術は1911年に Hibbs らにより報告さ

れた<sup>5)</sup>。これは剥離術と全身ギプスによる治療である。本邦では1942年に川村らが脊椎後方固定術の報告を初めて行っている<sup>6)</sup>。脊柱変形に対しては1954年に Allan らが変形の凹側に上下に伸びる手術器具（Turnbuckle）を設置し、これを徐々に伸長させる術式を報告した<sup>7)</sup>。1958年には Gruca らがこれにバネを追加した Turnbuckle distractor を報告<sup>8)</sup>、本邦では1960年に鈴木らが骨折治療用のプレートで棘突起を挟む術式を報告した<sup>9)</sup>。しかしこれらの術式はいずれも固定力が乏しく矯正はほとんど得られなかった。1962年に Harrington らが変形した脊柱の上下の椎弓や椎間関節に金属のフックを刺し込み、フックに連結した金属の円柱状の棒（ロッド）を上下に牽引するハリントンロッドを報告した<sup>10)</sup>。これにより初めて脊柱変形に対する矯正手術が可能となり、その後数十年にわたりこの治療が脊柱変形治療の標準的治療となった。

ハリントンロッドによる矯正は冠状面の変形には有効であったが、頭尾側への牽引力だけでは脊柱の回旋変形や矢状面変形には矯正力を加えることが出来なかった。脊柱変形は単純に左右に曲がるだけでなく三次元的に捻じれて曲がることが多いため<sup>11)</sup>、自然な脊椎の形を再獲得するためには三次元的に力を加えられるアンカーの設置がどうしても必要であった。

1963年に Roy-Camille らが報告した椎弓根スクリュー（図1）は脊柱変形の治療を別次元に到達させた。椎骨に後方（椎弓）から前方（椎体）まで深く挿入された椎弓根スクリューが脊柱に強い固定力と強制

\* Corresponding author: 大場悠己 〒390-8621  
松本市旭3-1-1 信州大学医学部運動機能学教室  
E-mail: obal@hotmail.co.jp



図1 第9胸椎の椎弓根径の計測（左），椎弓根スクリュー挿入後（右）

力を加えることを可能にしたためである<sup>12)</sup>。しかし、椎弓根スクリューは狙い通りの軌道で挿入されないと神経や血管などを損傷する危険性が高いため、細く捻じれた側弯患者の胸椎レベルに用いるには危険過ぎると考えられていた。1995年、Sukらが小児側弯症に対する椎弓根スクリューを用いた脊椎後方矯正固定術を報告した<sup>13)</sup>。固定範囲のほぼ全ての椎骨に左右から椎弓根スクリューを挿入してから矯正をするこの方法は脊柱変形を三次元的に矯正することを可能にした。報告から約30年経つが、今でもこの方法が脊柱変形に対する標準的治療である<sup>14)-17)</sup>。

一方で、特に胸椎高位の左椎弓根は内側に脊髓、外側に大動脈が位置するため、スクリューの逸脱（誤挿入）による致命的な合併症の報告は少なくなかった。椎弓根スクリューの逸脱による合併症は、神経根の障害、髄液漏、大血管の穿孔、あるいは脊髓の永久損傷に至る<sup>18)</sup>。また固定端の椎弓根スクリューが正確に挿入されていないと後にスクリューが緩む危険性が高まることを当科の上原らが報告している<sup>19)</sup>。

### Ⅲ コンピュータナビゲーションの誕生と進化

脊柱変形に対する椎弓根スクリューの挿入は、当初はX線透視を併用して行われていたが術者の過度の放射線被ばくが問題視された。例えば第2胸椎から第4腰椎まで固定する場合、15椎体の左右の椎弓根に合計30本の椎弓根スクリューを挿入することになる。1本あたり僅か1分の透視時間であっても、患者や術者は合計30分間の透視に曝されることになる。そのため、

過度の放射線被ばくを避けながら脊柱変形の手術を行うためにフリーハンドテクニックが開発された。これは解剖学的ランドマークをもとに透視を用いず椎弓根スクリューを挿入するテクニックで、現在も広く用いられている。しかし、その椎弓根スクリューの逸脱率は1.7～30%と決して低くない<sup>20)-22)</sup>。

1990年代より椎弓根スクリューの逸脱による重篤な合併症を予防する手段として、事前に撮影されたコンピュータ断層撮影（CT）を用いたコンピュータナビゲーションシステムを採用する施設が増加した<sup>23)</sup>。当科では1996年に日本でいち早く脊椎手術に術前CTナビゲーションシステムを導入した<sup>24)25)</sup>。Härtlらは、世界中の脊椎外科医3348人を対象とした調査において、80%の回答者がCTナビゲーションの利点に賛同していることを明らかにした<sup>26)</sup>。実際にCTナビゲーションを用いた脊椎手術は、用いない手術と比較して、椎弓根スクリューの挿入精度を高め<sup>27)</sup>、術者の放射線被ばくを減少させる<sup>28)</sup>という報告がある。

2010年代に入るとコンピュータナビゲーションに革命が起きた。術中に撮影したCT画像をそのままナビゲーションに使用する術中CTナビゲーションの誕生である<sup>29)</sup>。これは事前に撮影されたCT画像を用いたナビゲーションと異なり術野でのポイントレジストレーションが不要だけでなく、体位による椎間位置変化が無いと、ナビゲーションの精度も高まった。2018年4月に当科でもハイブリッド手術室で術中CTナビゲーションガイド下の脊椎手術が開始された<sup>30)</sup>。当科ではこれまでに椎弓根スクリューの逸脱率を上げ

ずに術中 CT 撮影の線量を1/5まで低減し<sup>31)</sup>、リファレンスフレームの設置位置や撮影方法の工夫により1撮影で挿入可能な椎骨数を6椎から11椎に拡大し<sup>32)</sup>それぞれ報告してきた。

2023年に我々が行った小児側弯症についてのシステムティックレビューでは脊椎全体と変形の頂点周囲における椎弓根スクリューの逸脱率はそれぞれフリーハンドテクニックでは9.5%と19.3%であったのに対して術中CTナビゲーションでは6.0%と8.4%と精度が有意に上昇していることが確認された<sup>33)</sup>。しかしこれは、最新の技術を用いることで椎弓根スクリューが逸脱する危険性が低下したと同時に、最新の技術を用いても椎弓根スクリューが逸脱する危険性が依然6%あることを再認識する結果とも言えた。これらの経過を経て、椎弓根スクリュー挿入の安全性をさらに高める道具として脊椎手術支援ロボットが注目されるようになった。

2024年9月、日本脊椎インストゥルメンテーション学会の脊椎ロボットシンポジウムで、このことを象徴する場面があった。ロボット手術に最も期待すること

は何かと問われた場面で、壇上の全演者が『椎弓根スクリュー挿入精度のさらなる向上』と即答したのである。

#### IV 脊椎手術ロボットシステム

ここまで、脊柱変形手術における椎弓根スクリューの必要性と危険性、椎弓根スクリューを安全に挿入するために開発されたコンピュータナビゲーションの有効性と限界、脊椎ロボットに期待されることについて説明をしてきた。ここから本題である脊椎ロボットについて説明をする。現在国内で使用可能な脊椎手術支援ロボットは3機種である(表1)。

PMDAが定義する手術用ロボットナビゲーションユニットは、脊椎手術における椎弓根スクリューの挿入時に用いる装置を示す。本品は、画像処理解析装置、術者用コンソール等から構成されるコンピュータ技術に基づいている。具体的には脊椎ロボットのシステムはコンピュータナビゲーションシステムに連動する形で用いられる。例えば当院ではハイブリッド手術室(図2)でのハイブリッドナビゲーションシステムに

表1 国内で使用可能な脊椎手術支援ロボット

商品名	メーカー	PMDA 承認日
Excelsius GPS ガイド機能付きナビゲーションシステム®	Globus Medical 社, Audubon, PA, USA	2020年1月
Cirq®ロボットアームシステム	Brainlab 社, Munich, Germany	2021年1月
Mazor X ロボットシステム®	Medtronic 社 and Mazor Robotics 社, Memphis, TN, USA	2021年3月



図2 ハイブリッドナビゲーションシステム(ロボティックC-arm ARTIS Pheno)

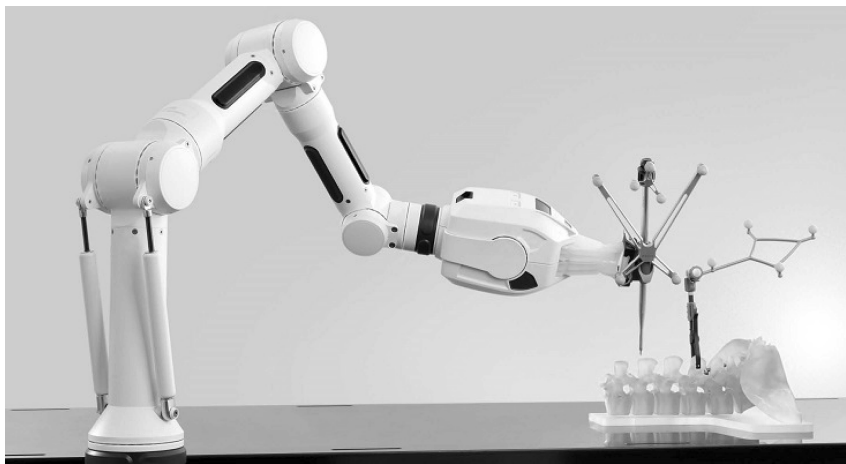


図3 Cirq ロボットアームシステム



図4 Cirq を用いた椎弓根スクリュー挿入 (筆者撮影)

追加する形で手術支援ロボット Cirq<sup>®</sup> (図3) を導入した。

カメラから赤外線を照射し、手術器械に装着されたミラーマーカからの反射光を捉えて位置を把握するシステムが基本構造である。術中に撮像されたCT画像とコンピュータ上の画像を統合して、実際の手術野をコンピュータ画面上に投影する。そこで挿入するスクリューの挿入位置、サイズ、方向を術者が確認し手術プランをコンピュータに登録する。登録終了後にプラン通りの位置にロボットアームが誘導される。ロボットアームは中空となっているため先端が脊椎に押し当てられ固定されると、ロボットアーム越しに径

2.4 mm の電動ドリルで椎弓根内に骨孔を作成することが可能となる。我々は安全のため電動ドリルで作成する骨孔の深さは15 mm までに制限している。後は術者が骨の感触を感じながら骨孔をタップで広げて、予定サイズの椎弓根スクリューを挿入する (図4)。

当科では手術支援ロボット Cirq<sup>®</sup> を導入してから現在までの2年半、椎弓根スクリューの挿入難易度が最も高く、かつ最高の安全性が求められる小児側弯症手術に使用し続けている (図5)。当科の脊椎ロボット導入初期6か月の椎弓根スクリュー挿入精度は94 %であったが、現在は97.4 %まで精度が上昇した<sup>1)</sup>。幸いこれまでに脊椎ロボットによる大きな合併症は経験





図5 ハイブリッド手術室での側弯症手術（筆者撮影）

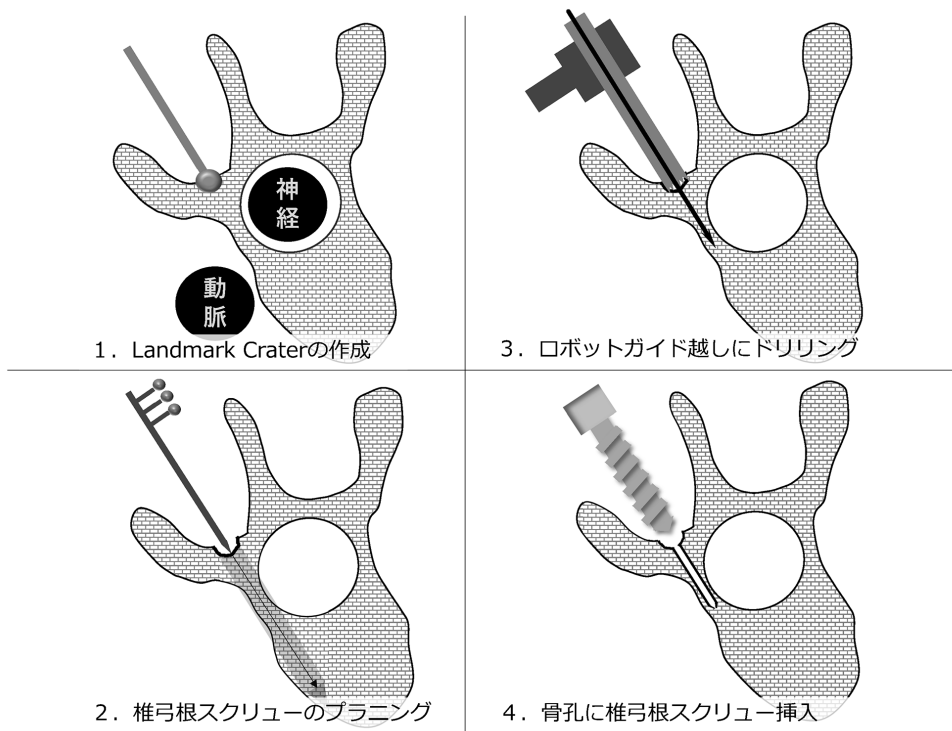


図6 Landmark Crater 法

していない。放射線照射量は導入当初の1/5まで低減し<sup>31)</sup>、術中CTの撮影回数も大幅に減少した<sup>32)</sup>。最も大きな変化は術中CT撮影直後に全ての椎弓根スクリュー挿入予定部にプランニングと同時に挿入部の指標となる溝を作成する方法（Landmark Crater 法）<sup>1)</sup>を考案したことである（図6）。

#### V 脊椎手術ロボットシステムの有効性

脊椎手術ロボットは現時点では限定されたわずかな施設での使用にとどまっております。脊椎外科医の大多数はこの技術を利用していない。しかし近年、脊椎手術ロボットの使用は少しずつ増加しており、その研究報告

表2 国内で使用可能な人工関節領域の手術支援ロボット

商品名	メーカー
Mako <sup>®</sup>	Stryker 社, Fort Lauderdale, FL, USA
NAVIO <sup>™</sup>	Smith & Nephew 社, Watford, UK
CORI <sup>®</sup>	Smith & Nephew 社, Watford, UK
ROSA <sup>®</sup>	Zimmer Biomet 社, Warsaw, USA

は急速に増えている。

2011年, Kantelhardt らにより脊椎ロボットはフリーハンド法と比較して有意にスクリュー挿入の精度が高かったことが報告された (94.5% vs 91.4%)<sup>34)</sup>。また, Schatlo らは, 脊椎ロボットの椎弓根スクリュー挿入精度は83.6%であり, フリーハンド法の79%より有意に高かったことを報告した<sup>35)</sup>。一方 Kim らは脊椎ロボットとフリーハンドの椎弓根スクリュー挿入精度を比較する無作為化比較試験を行い, 脊椎ロボットを使用しても椎弓根スクリューの挿入精度に差はないことを報告した。しかし, Kim らは同じ研究内で脊椎ロボットの使用により近位椎間関節の損傷は減少したことも報告しており一定の評価はしていた<sup>36)</sup>。

さらに近年, 脊椎ロボットの椎弓根スクリュー挿入精度に関するシステムティックレビューとメタアナライシスがいくつか発表されている。Gao らは, メタアナライシスにより脊椎ロボットはフリーハンド法と比較して, 椎弓根スクリューの挿入精度がわずかに改善したことを報告した (オッズ比1.00~1.06)<sup>37)</sup>。Fan らは無作為化対照試験だけを対象としたメタアナライシスにおいて, 許容できる椎弓根スクリュー設置のオッズはフリーハンドテクニックに対して脊椎ロボットで1.17-2.08であった<sup>38)</sup>。Li らは脊椎ロボット椎弓根スクリュー逸脱の相対リスクは0.21で, 脊椎ロボットがフリーハンドより正確であることを報告している<sup>39)</sup>。

しかしその一方で, 脊椎ロボットのフリーハンドテクニックに対する優位性が確認できなかったとするいくつかの報告もある。Marcus らは, 1308本の椎弓根スクリューを挿入法により比較した結果, 脊椎ロボットとフリーハンドテクニックで精度に差はないことを報告した<sup>40)</sup>。また Liu らは, 1105本の椎弓根スクリューを対象としたメタアナライシスにおいて, 脊椎ロボットとフリーハンドテクニックで精度に差はないことを報告した<sup>41)</sup>。

さらに Yu らは, 3,625本の椎弓根スクリューを解析し, 脊椎ロボットによる精度は95.5%でフリーハンド

テクニックの92.9%と比較して有意な改善がないばかりか, 脊椎ロボットの使用により手術時間が長くなったことを報告した<sup>42)</sup>。

これら複数のシステムティックレビューの結果から, 現時点では脊椎ロボットの使用がどの術者にとっても従来の技術よりも正確に椎弓根スクリューを挿入できることを証明するにはエビデンスの確実性は十分でないと言える。

## VI 脊椎疾患に対するロボット手術の歴史

最後にロボット手術の歴史を振り返る。ロボット手術は2000年, ダビンチ手術システムが承認されたことがその始まりである。ダビンチシステムは泌尿器科のみならず婦人科領域や外科にも適応が拡大している。それ以降, 各種のロボットシステムが各分野に広まり, 2018年には本邦でも保険適用範囲が拡大した。本邦の整形外科領域で最初にロボットシステムが導入されたのは人工関節領域である。2017年以降, 複数の人工関節を支援するロボットが使用可能になった (表2)。

一方, 脊椎領域ではロボット支援システムは大きく出遅れ, 本邦のみならず米国でも近年まで普及を認めなかった。脊椎ロボットは, Mazor Surgical Technology 社 (Caesarea, Israel) が2004年に Spine Assist<sup>®</sup>を, そして2011年に Mazor Renaissance<sup>®</sup>をそれぞれ販売した。これらのシステムが普及しなかった理由の一つにスカイピングの存在がある<sup>43)</sup>。スカイピングとは固くて斜めな面にドリリングをする際にドリルの横滑りによりドリル挿入部がずれる現象を指し, ドリリング部がロボットアームで隠されるロボット支援下脊椎手術では発見が遅れる危険性が高い。わずかな軌道のズレが脊髄損傷や大動脈穿孔につながる椎弓根スクリュー挿入においてこの現象は多くの術者にとって大きな懸念点となった。

その後 Mazor Surgical Technology 社は Mazor Robotic (Caesarea, Israel) に社名を変更し, Medtronic 社に買収された。2016年には Mazor X Stealth Edition<sup>®</sup>

が発売された。ROSA Spine<sup>®</sup>は Zimmer Biomet 社が開発し、2016年1月FDAの承認を受けているが、現在のところ日本では使用されていない。Cirq<sup>®</sup>ロボットアームシステムは、Brainlab社 (Munich, Germany) が脳神経外科手術用ナビゲーションシステムのアドオンシステムとして開発した。2020年12月にFDAで承認され、2021年1月に日本国内で薬事承認を取得した。ExcelsiusGPSは、グローバス社が2017年にFDAの承認を得て、2020年1月にPMDAが認可した。まとめると、現在のところ日本で使用できる脊椎ロボットは MazorX Stealth Edition, Cirq, ExcelsiusGPSの3機種である。2025年3月に当科の高橋淳が会長を務める日本CAOS (Computer Assisted Orthopaedic Surgery) 学会のシンポジウムでは3機種それぞれの手術成績が各施設から報告される予定である。

## Ⅶ おわりに

脊椎ロボットはあくまで手術を安全に行うための道具の一つであり、その使い方次第で安全性は大きく変

わる。間違いなく素晴らしい道具ではあるが、術者がロボットに使われるようなことは決してあってはいけない。術者は挿入された椎弓根スクリューに対する全責任は自分にあることを決して忘れず、責任をもってロボットを操作し1本1本のスクリューを挿入すべきである。

私達は現状が脊椎ロボット手術のゴールだとは考えていない。脊椎ロボットを利用して椎弓根スクリューの逸脱率を低減する我々の挑戦は、逸脱率が0%になるその日まで終わらない。

## Ⅷ 謝 辞

本稿の執筆の機会を与えて下さった委員・関係者の皆様に深謝申し上げます。また安全な脊椎ロボット手術を行うためにご支援とご協力をいただいている脊椎班の皆様、麻酔科の皆様、看護師の皆様、放射線部の皆様、臨床工学技士の皆様、臨床生理検査技師の皆様、ブレインラボ社の加藤 覚さんに深謝申し上げます。

## 文 献

- 1) Oba H, Ikegami S, Uehara M, et al: Impact of landmark crater creation on improving accuracy of pedicle screw insertion in robot-assisted scoliosis surgery. Eur Spine J Online ahead of print, 2024
- 2) Knoeller SM, Seifried C: Historical perspective: history of spinal surgery. Spine (Phila Pa 1976) 25: 2838-2843, 2000
- 3) Moe JH, Kharrat K, Winter RB, et al: Harrington instrumentation without fusion plus external orthotic support for the treatment of difficult curvature problems in young children. Clin Orthop Relat Res 185: 35-45, 1984
- 4) Sielatycki JA, Mitchell K, Leung E, et al: State of the art review of new technologies in spine deformity surgery-robotics and navigation. Spine Deform 10: 5-17, 2022
- 5) Hibbs RA: An operation for the progressive spinal deformities. NY Med J 93: 1013, 1911
- 6) 河村謙二: 脊椎カリエスに対する肋骨移植による固定強直手術法並にその成績について. 日整会誌 17: 139-142, 1942
- 7) Allan FG: Scoliosis, operative correction of fixed curves. J Bone Joint Surg 36-B: 145, 1954
- 8) Gruca A: The pathogenesis and treatment of idiopathic scoliosis; a preliminary report. J Bone Joint Surg AM 40-A: 570-584, 1958
- 9) 井上駿一: 脊柱側弯症の治療. 整形外科 20: 224-230, 1969
- 10) Harrington PF: Treatment of scoliosis. Correction and internal fixation by spine instrumentation. J Bone Joint Surg AM 44-A: 591-610, 1962
- 11) 南昌平: 側弯症治療の最前線 手術編 後方固定の歴史. pp 18-28. 医薬ジャーナル社, 東京. 2014
- 12) Kabins MB, Weinstein JN: The history of vertebral screw and pedicle screw fixation. Iowa Orthop J 11: 127-136, 1991
- 13) Suk SI, Lee CK, Kim WJ, et al: Segmental pedicle screw fixation in the treatment of thoracic idiopathic scoliosis. Spine (Phila Pa 1976) 20: 1399-1405, 1995
- 14) Kim YJ, Lenke LG, Bridwell KH, et al: Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? Spine (Phila Pa 1976) 29: 333-342, 2004
- 15) Suk SI, Kim WJ, Lee SM, et al: Thoracic pedicle screw fixation in spinal deformities: are they really safe? Spine

(Phila Pa 1976) 26 : 2049-2057, 2001

- 16) Kim YJ, Lenke LG, Kim J, et al : Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis. Spine (Phila Pa 1976) 31 : 291-298, 2006
- 17) Kosmopoulos V, Schizas C : Pedicle screw placement accuracy : a meta-analysis. Spine (Phila Pa 1976) 32 : E111-120, 2007
- 18) Lonstein JE, Denis F, Perra JH, et al : Complications associated with pedicle screws. J Bone Joint Surg Am 81 : 1519-1528, 1999
- 19) Uehara M, Takahashi J, Ikegami S, et al : Pedicle Screw Loosening After Posterior Spinal Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis in Upper and Lower Instrumented Vertebrae Having Major Perforation : Spine (Phila Pa 1976) 15 ; 42 : 1895-1900, 2017
- 20) Beck M, Mittlmeier T, Gierer P, et al : Benefit and accuracy of intraoperative 3D-imaging after pedicle screw placement : a prospective study in stabilizing thoracolumbar fractures. Eur Spine J 18 : 1469-1477, 2009
- 21) Lonstein JE, Denis F, Perra JH, et al : Complications associated with pedicle screws. J Bone Joint Surg Am 81 : 1519-1528, 1999
- 22) Parker SL, McGirt MJ, Farber SH, et al : Accuracy of freehand pedicle screws in the thoracic and lumbar spine : analysis of 6816 consecutive screws. Neurosurgery 68 : 170-178, 2011
- 23) Otomo N, Funao H, Yamanouchi K, et al : Computed Tomography-Based Navigation System in Current Spine Surgery : A Narrative Review. Medicina (Kaunas) 58, 2022
- 24) 江原宗平, 上村幹男, 伊東秀博, 木下哲也, 湯澤洋平, 高橋 淳 : 脊椎外科におけるナビゲーションシステム. 整形災害外科 42 : 59-63, 1999
- 25) 上村幹男, 伊東秀博, 木下哲也, 湯澤洋平, 高橋 淳, 江原宗平 : ナビゲーションシステムの利点と問題点. 脊椎脊髄ジャーナル 12 : 97-102, 1999
- 26) Härtl R, Lam KS, Wang J, et al : Worldwide survey on the use of navigation in spine surgery. World Neurosurg 79 : 162-172, 2013
- 27) Naik A, Smith AD, Shaffer A, et al : Evaluating robotic pedicle screw placement against conventional modalities : a systematic review and network meta-analysis. Neurosurg Focus 52 : E10, 2022
- 28) Pennington Z, Cottrill E, Westbroek EM, et al : Evaluation of surgeon and patient radiation exposure by imaging technology in patients undergoing thoracolumbar fusion : systematic review of the literature. Spine J 19 : 1397-1411, 2019
- 29) Oba H, Ebata S, Takahashi J, et al : Pedicle Perforation While Inserting Screws Using O-arm Navigation During Surgery for Adolescent Idiopathic Scoliosis : Risk Factors and Effect of Insertion Order. Spine (Phila Pa 1976) 15 ; 43 : E1463-E1468, 2018
- 30) Oba H, Ikegami S, Kuraishi S, et al : Perforation Rate of Pedicle Screws Using Hybrid Operating Room Combined With Intraoperative Computed Tomography Navigation for Adolescent Idiopathic Scoliosis : Impact of Distance From the Reference Frame and Other Risk Factors. Spine (Phila Pa 1976) 15 ; 45 : E1357-E1364, 2020
- 31) Tanikawa Y, Oba H, Fujii M, et al : Intraoperative Cone Beam CT in Hybrid Operation Room for Pediatric Scoliosis Patients : Comparison of Pedicle Screw Violation Rate at Normal and Low Radiation Doses. Spine (Phila Pa 1976) 15 ; 47 : E507-E513, 2022
- 32) Oba H, Ikegami S, Uehara M, et al : Reduction in CT scan number with the reference frame middle attachment method in intraoperative CT navigation for adolescent idiopathic scoliosis. Eur Spine J 32 : 3133-3139, 2023
- 33) Oba H, Uehara M, Ikegami S, et al : Tips and pitfalls to improve accuracy and reduce radiation exposure in intraoperative CT navigation for pediatric scoliosis : a systematic review. Spine J 23 : 183-196, 2023
- 34) Kantelhardt SR, Martinez R, Baerwinkel S, et al : Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement. Eur Spine J 20 : 860-868, 2011



- 35) Schatlo B, Molliqaj G, Cuvinciuc V, et al: Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-guided pedicle screw insertion for degenerative diseases of the lumbar spine: a matched cohort comparison. *J Neurosurg Spine* 20: 636-643, 2014
- 36) Kim HJ, Jung WI, Chang BS, et al: A prospective, randomized, controlled trial of robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery. *Int J Med Robot* 13, 2017
- 37) Gao S, Lv Z, Fang H: Robot-assisted and conventional freehand pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Eur Spine J* 27: 921-930, 2018
- 38) Fan Y, Du JP, Liu JJ, et al: Accuracy of pedicle screw placement comparing robot-assisted technology and the free-hand with fluoroscopy-guided method in spine surgery: An updated meta-analysis. *Medicine (Baltimore)* 97: e10970, 2018
- 39) Li HM, Zhang RJ, Shen CL: Accuracy of pedicle screw placement and clinical outcomes of robot-assisted technique versus conventional freehand technique in spine surgery from nine randomized controlled trials: a meta-analysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 9, 2019
- 40) Marcus HJ, Cundy TP, Nandi D, et al: Robot-assisted and fluoroscopy-guided pedicle screw placement: a systematic review. *Eur Spine J* 23: 291-297, 2014
- 41) Liu H, Chen W, Wang Z, et al: Comparison of the accuracy between robot-assisted and conventional freehand pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 11: 2273-2281, 2016
- 42) Yu L, Chen X, Margalit A, et al: Robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery—a systematic review and a meta-analysis of comparative studies. *MRCAS* 14: e1892, 2018
- 43) Joseph JR, Smith BW, Liu X, et al: Current applications of robotics in spine surgery: a systematic review of the literature. *Neurosurg Focus* 42: E2, 2017

(R 6. 10. 11 受稿)

---