

## ハイブリッド手術室でのロボット支援下側弯症手術

信州大学医学部附属病院整形外科  
大場 悠己, 畠中 輝枝, 高橋 淳

## I はじめに

## A 手術支援ロボットアームの導入

近年, ロボット手術支援システムの臨床導入が脊椎手術の領域で始まった。当科では脳神経外科と共同で2022年6月に手術支援ロボットアーム Cirq® (Cirq) (Brainlab, ドイツ) (図1) を導入した。国内では6施設目 (Cirq®に限ると3施設目) になる。2018年6月にハイブリッド手術室 (図2) に導入済みのロボットアームによる多軸透視・撮影システムである ARTIS Pheno® (シーメンス, ドイツ) (図3) と, それに連動する手術用コンピュータナビゲーション (ナビ) システム Curve® Navigation (Brainlab, ドイツ) の追加機能としての手術支援ロボットアームである。これにより術中CTナビと連動したロボット支援手術が可能となった。

## B 側弯症手術の危険性

側弯症手術では脊髄と大動脈の間にある幅数ミリの椎弓根という骨組織にスクリューを挿入することからはじまる。左右の椎弓根にスクリューを入れるため, 例えば手術範囲が15椎であれば一回の手術で30本近くのスクリュー挿入が必要となる。椎弓根スクリュー (PS) を用いることにより強力な三次元的な側弯矯正が可能となったが, その一方でPSが逸脱する (意図しない方向へ挿入される) ことによる重大な合併症の報告は後を絶たない。

## C 手術支援ロボットに期待すること

手術支援ロボットに何を期待するかは術者により様々だと思うが, われわれはPSを意図した場所により正確に挿入することを最も期待している。近年, 術中CTナビの登場により小児側弯症に対するPS挿入の安全性が向上した<sup>1)</sup>。しかし, この技術を用いてもなお一定確率でPSは意図しない方向に挿入されてしまうことがある。実際, 最近のシステムティックレビューでは, 2mm以上のPS逸脱が6.0%であるこ



図1 手術支援ロボットアーム Cirq® (筆者撮影)



図2 ハイブリッド手術室での側弯症手術準備 (筆者撮影)



図3 左) ARTIS Pheno®, 右) Curve® Navigation

とが報告された<sup>1)</sup>。つまり17本 PS を挿入すれば1本は逸脱する可能性があるということであり決して低い値ではない。

本稿では、従来のナビの限界と Cirq を導入した理由について説明する。

## II Cirq を用いた側弯症手術の概要とメリット

### A 手術の概要

当科では手術範囲の展開後に撮影された1/5線量の術中コーンビーム CT (CT) 画像をもとにナビを開始している。ナビ画面を見ながら撮影範囲内で挿入予定の全 PS のサイズと軌道を設定する。最後に Cirq を利用して設定プラン通りに2.4 mm のドリルで椎弓根内に15 mm の下穴をあける。タップと、PS 挿入は手動で行う。ナビに許容できない誤差が確認されなければ通常10-11椎までなら1回の CT 撮影で PS 挿入を行っている<sup>2)</sup>。

### B コンピュータナビゲーションの弱点

#### 1 椎骨間の動きによるズレ

ナビシステムは、取得した CT データにより仮想化された脊椎モデル上に、登録された手術器具の位置が提示される手法である。脊椎は椎骨間で可動性があるため左右に力をかけたり、道具を押し付けたりすると仮想化された脊椎モデルと実際の術野に誤差が生じる。この誤差は術野で棘突起に設置したリファレンスフレームから離れれば離れるほど大きくなり、実際にリファレンスフレームからの距離が6椎以上離れると PS の逸脱率が約5倍に上昇していた<sup>3)</sup>。

#### 2 繰り返しの外力により徐々に増大する誤差

さらに加えられた外力による誤差は徐々に蓄積(増大)していく可能性がある。そのため、ナビ開始後に PS の挿入を繰り返すほど、つまり後から挿入された PS ほど、その逸脱率が高くなる。振動によりリファレンスフレーム接続部が徐々にゆるむこともこの原因の一つであることが分かっている。事実、O-arm を用いた術中 CT ナビを用いた思春期特発性側弯症手術において、一撮影後の連続 PS 挿入数が9回を超えるとその後の PS 逸脱率が12倍になっていたことが報告されている<sup>4)</sup>。

#### 3 ナビゲーション中に避けるべき脊椎を押し動作

これらの事実から、ナビを用いて広範囲に PS を挿入する時は脊椎を押し付ける操作は最小限にすべきということが分かってきた。具体的には筋鈎で左右に筋を引く操作とプロービング操作が危険だと考えている。

さらに、いくら正確なナビであっても実際に力を加えてプロービングをしている間は椎骨間の動きによりナビ画面はあたかも内側や頭尾側に逸脱しているように見えており参考にならない。典型的には椎体がプローベで押されて挿入側に傾くように回旋するためナビ通りにプロービングすると PS は予想より外側向きに設置される傾向がある。

### C Cirq を使用する理由

Cirq を使用することで脊椎を筋鈎で左右に押す力や、プローベで前方に押し付ける作業を避けることが出来る。径2.4 mm の高回転電動ドリルで椎骨を押さずに静かに下穴を作成することで、仮想化された脊椎モデルと術野の間に誤差を生じさせることなく手術を進めていくことが可能となる。また、ロボットガイドが隙間から入ってしまえば広い視野は不要なため、筋鈎で左右に強い力をかける必要は無くなる。特に椎弓根径より太い PS の挿入を試みる時に、ロボットが作成した下穴は有利である。ロボットガイド越しのドリルで作成した下穴は、人の手で骨の硬さを感じながら行うプロービングと異なり下穴が椎弓根の中央に細く真っすぐ作成されるため椎弓根壁の骨折を防ぐことが出来る。細く真っすぐに作成された下穴をタップでゆっくりと広げていくことで椎弓根を押し広げながらスクリューを入れるペディクル・エクспанションテクニックも可能となる。

### D Cirq の弱点とピットフォール

理想的には Cirq を用いれば逸脱の可能性は基本的には無くなるはずだが、現実には甘くない。ロボット手術には電動器具の振動によるリファレンスフレームの緩み、ドリル先端が硬い皮質骨に弾かれて刺入位置に誤差が生じるスカイピング、さらには Cirq の筒が開創器、皮膚や筋膜、横突起のいずれかに押し付けられることで生じるドリルガイド先端部の不一致といった他の手術では出会わなかったピットフォールが存在する。Cirq は人間と違い融通が利かない。これらのピットフォールを忘れないことが従来のナビ手術以上に重要となる。

## III 最後 に

当科の手術支援ロボット Cirq を用いた側弯症手術について、そのメリットとピットフォールを中心に紹介した。当科では多職種からなる側弯症チームで一丸となりトラブルとその対策を繰り返しながら少しずつ使用方法を確立している。しかし Cirq の使用方法も

## 最新のトピックス

様々で、我々の現在の使用法がベストだとは考えていない。100%正確にPSを挿入する方法の確立を真剣に目指す我々の挑戦はまだ続いている。

## 文 献

- 1) 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
  - 2) 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* 3: Online ahead of print, 2023
  - 3) 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)* 45: E1357-E1364, 2020
  - 4) 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)* 43: E1463-E1468, 2018
-