

最新のトピックス

TOPICS

世界最先端の低線量ハイブリッドナビゲーション側弯症手術

信州大学医学部運動機能学教室(整形外科)

大場 悠己 高橋 淳

I はじめに

CTナビゲーションシステムとは取得したCTデータにより仮想化された骨モデル上に、登録された手術器具の位置が提示される手法である。特に側弯症に対する椎弓根スクリュー (Pedicle Screw, PS) においては大動脈損傷、脊髄損傷、肺損傷や神経根損傷の危険を伴うためPS挿入のために高いナビゲーションの精度が求められる。本稿では我々がこれまでに経験してきた術前、術中CTナビゲーションを用いた側弯症手術の軌跡について概説する。

II 脊柱側弯症とは

脊柱を正面から見た場合に、捻じれを伴って側方に曲がっている状態を脊柱側弯症という。Cobb角 10° を超える側弯症の発生頻度は全体の2-3%と決して

低くない。側弯症は原因である病気がわかっているものと分からないものがある。原因の分かっている主な側弯症には椎骨に生まれつき形の異常がある先天性側弯症、様々な神経や筋肉の病気が原因で発症する神経・筋性側弯症、神経線維腫症による側弯症、マルファン症候群やエーラスダンロス症候群など間葉系疾患による側弯症がある。一方、原因の分かっていない側弯症は特発性側弯症と呼ばれ全体の80-85%を占め、思春期の女子に好発する。原因や状態により個人差はあるがこの弯曲の大きさが $40\sim 50^{\circ}$ 以上になると、外見の問題(図1左)や後の進行による健康障害の可能性から手術が必要と判断されることが多い。

III 脊柱側弯症の手術治療

高度の側弯症を矯正し進行を防止できる唯一の方法は手術である。1995年 Sukらの報告以降、各椎骨に

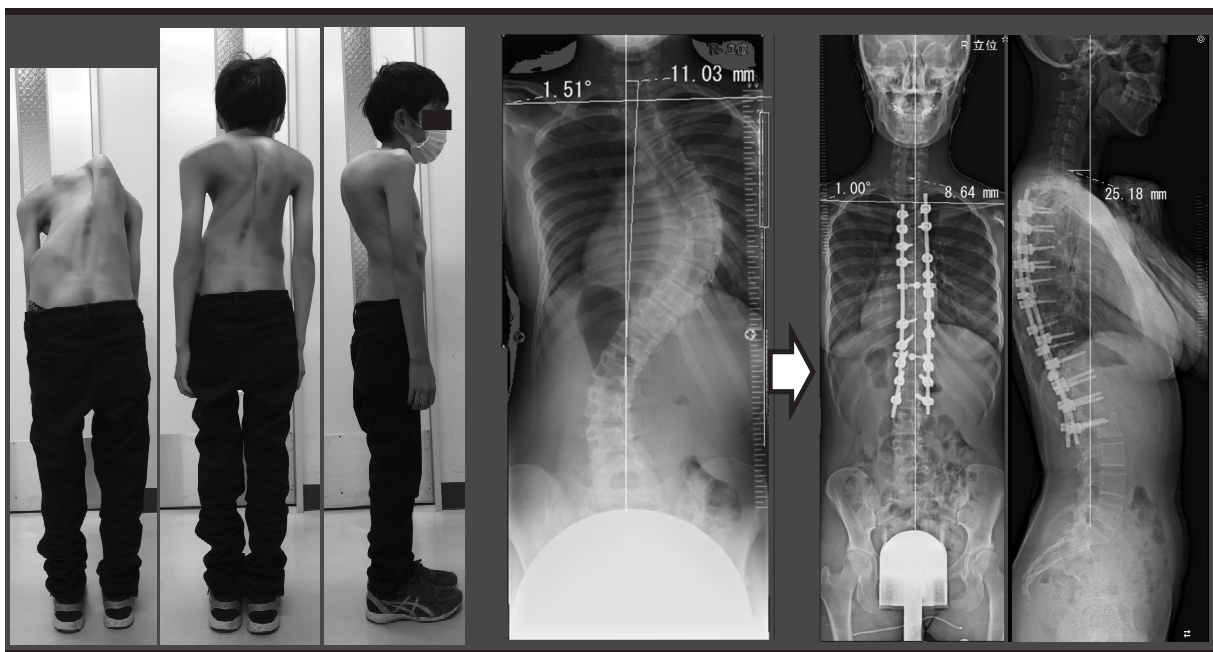


図1 小児側弯症患者

左: 脊柱側弯症患者の外見変化 右: 椎弓根スクリューを用いた脊椎後方矯正固定術

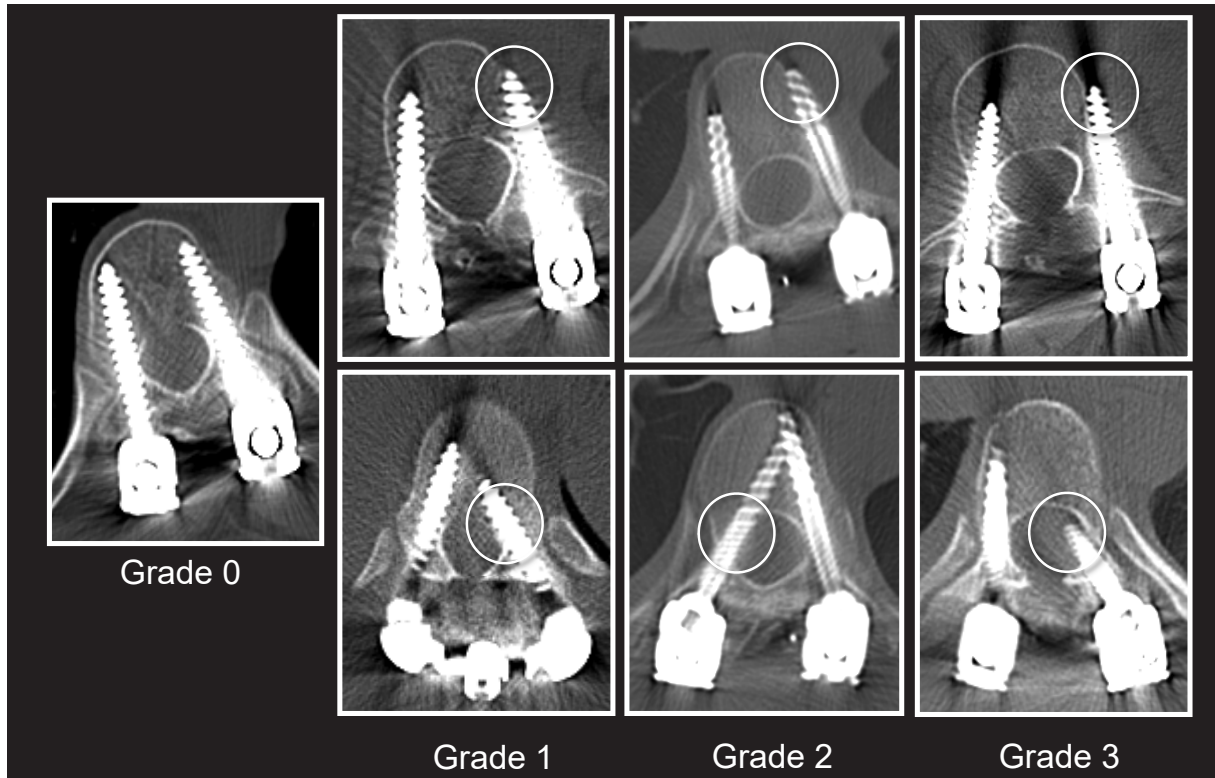


図2 PSの逸脱
Grade 2と3を合わせて主逸脱と呼ばれ、逸脱率として報告される。(文献1より改変)

後方からPSを挿入し側弯を矯正する術式が行われるようになり、現在では側弯症治療のゴールデンスタンダードとなっている(図1右)。PSを用いることで側弯の矯正だけでなく椎体回旋や胸椎後弯を含めた三次元的矯正が出来るようになった一方で、PSの逸脱(図2)¹⁾による神経、血管の重大な合併症の報告が国内外で散見される。小児の未熟で小さく、かつ疾患により捻じれた脊椎の椎弓根にPSを正確に挿入することは難しく過去の大規模な研究によりPS逸脱の確率は5.1%²⁾、PS逸脱による神経損傷の確率は0.15%と報告されている。

IV 信州大学におけるCTナビゲーションを用いた側弯症手術の歴史

当科では1996年に、日本でいち早く術前CTナビゲーションシステム(StealthStationTM)を脊椎手術に導入し、安全な脊椎手術を目指してきた。2005年には高橋らが固定範囲の長く難易度の高い小児側弯症手術にナビゲーションを応用するために複数の椎骨をまとめてレジストレーション(コンピュータ上と実体の位置合わせ作業)する方法を考案した。当時は一つの椎骨ごとにレジストレーションを行うことが常識で

あったため、手術時間を6割程度に短縮できるこの方法は革新的であり、2010年にMulti-level registration法として報告され³⁾、現在は世界で広く行われている。しかし、この方法にはCT撮影時(仰臥位)と手術時の体位(腹臥位)のズレにより、僅かだがどうしても消せないナビゲーションの誤差があった。

2018年、信州大学医学部附属病院南病棟にロボティックアームによる多軸透視・撮影システム“ARTIS pheno”(図3左)を有するハイブリッド手術室が導入された。我々はCTナビゲーションの精度をさらに高めるため、これに次世代型自動レジストレーションが可能なナビゲーションシステム“CurveTM”(図3右)を連動させ、2018年6月にハイブリッド術中CTナビゲーションによる側弯症手術を開始した(図3下)。この組み合わせでの術中CTナビゲーションは国内初であった。ハイブリッドナビゲーション手術室では術中にそのままの体位でcone beam CT(CBCT)を約「5秒で撮影、CBCT撮影後5分程度でナビゲーションが可能となる。さらに、従来のナビゲーションに必須であったレジストレーションが不要となり、CT撮影時と手術時の体位さによる誤差も大幅に改善された。さらに挿入された椎弓根スクリューの位置確認・修正

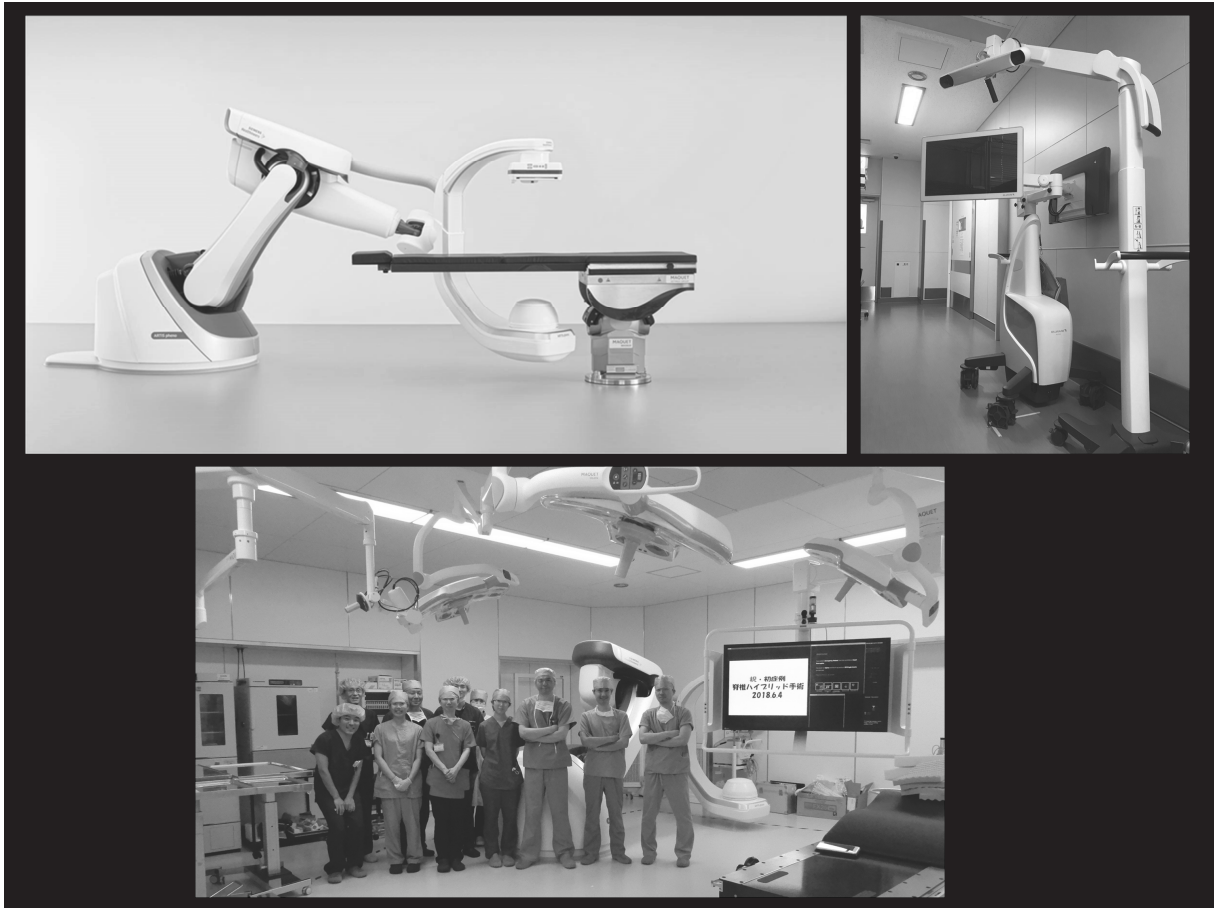


図3 ハイブリッドナビゲーションシステム
左：ARTIS pheno 右：Curve™
下：信州大学ハイブリッド側弯症手術チーム
初のハイブリッド術中CTナビゲーションによる側弯症手術を終えて。

が手術中に可能となり、逸脱している場合はアンカーを再設置できるようになった。これにより難易度の高い脊椎手術をより安全に提供できるようになったが、さらなる精度向上，時間短縮，侵襲低下のための挑戦は現在も続いている。

V ハイブリッドナビゲーション側弯症手術の安全性と低線量化

本システムを導入してからの小児側弯38例での椎弓根スクリューの2mm以上の逸脱率はわずか3.4%であり，過去のメタアナライシス²⁾よりも低率であった。この成績は第15回日本CAOS研究会でプレゼンテーションアワードを獲得し，2021年国際誌Spineに報告をした(図4)⁴⁾。

小児を対象にする手術であるため2019年より放射線量の低減に挑戦をしてきた。最初はハイブリッドナビゲーションのために撮影するCBCTの線量を通常診

断用CT撮影の1/3まで低減し，手技に影響がないことを確認した。その後1/5まで線量を低減したが通常の線量と遜色のない画質が得られており現在は1/5線量の撮影で手術を行っている(図5左)。PS挿入後の術中CBCTを用いた逸脱評価では従来と同様の逸脱率評価は行えなかったものの通常線量NDの1.8%と比較し低線量では1.7%と低線量化による逸脱率の上昇は認めなかった(図5右)⁵⁾。

VI おわりに

安全，低侵襲かつ正確で“自分の娘に対しても行いたい”と思うような側弯手術を目指すという私共の試みは，術前CTナビゲーションシステム，ハイブリッドナビゲーションシステム，低線量ハイブリッドシステムを経て超低線量ハイブリッドシステムという形になった。しかしこの目標を達成するために最も大切なことはシステムの変化でなく同じ目標に向かいチーム

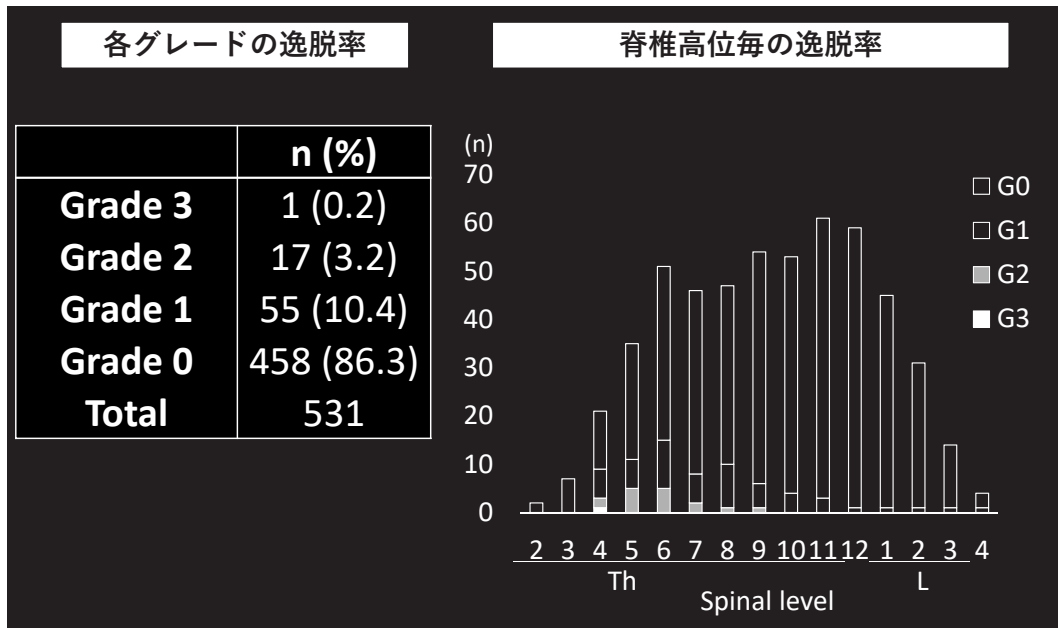


図4 ハイブリッドナビゲーションシステムを用いたPS挿入の成績
 左：各グレードの逸脱率 右：脊椎高位毎の逸脱率
 (文献4より改変)

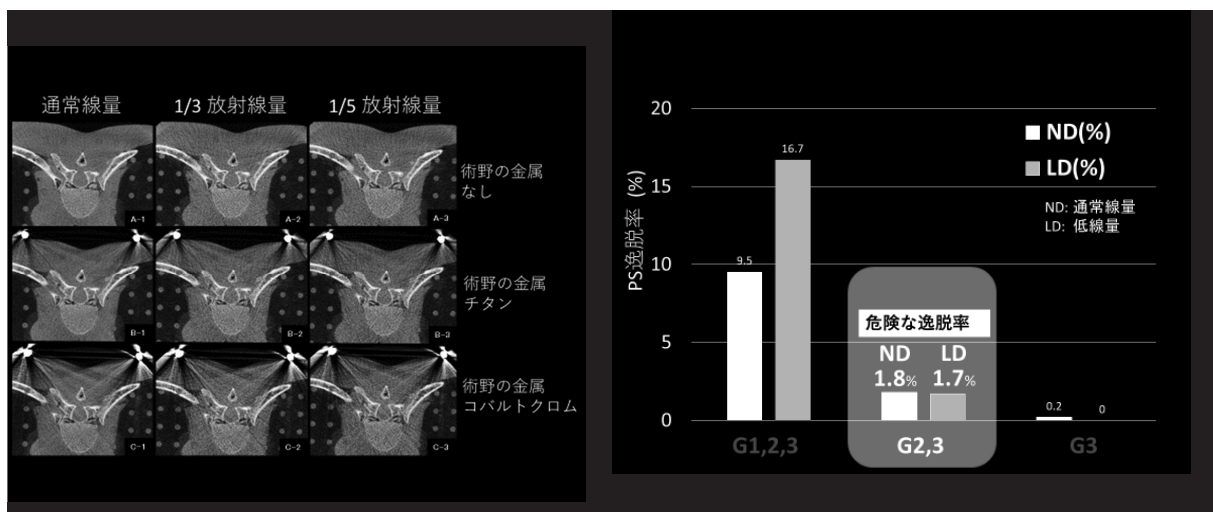


図5 低線量ハイブリッドナビゲーションシステム
 左：低線量化に伴う画質の変化。術野にある金属の存在に画質は左右される。
 右：通常線量と低線量におけるナビゲーション手術のPS逸脱率比較
 (文献5より改変)

で手術を行うことであると考えている。整形外科医、麻酔科医、診療放射線技師、看護師、臨床工学技士、臨床検査技師が良好な連携をとりながら、お互いを尊重しあうことで初めて良好な多職種連携手術が行えて

いる。超低線量ハイブリッドナビゲーション側弯症手術を支えるこのチームワークこそが信州大学医学部附属病院の最大の強みと我々は考えている。

文 献

- 1) 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

- 2) Ledonio CGT, Polly DW Jr, Vitale MG, et al: Pediatric pedicle screws: comparative effectiveness and safety: a systematic literature review from the Scoliosis Research Society and the Pediatric Orthopaedic Society of North America task force. *J Bone Joint Surg Am* 93: 1227-1234, 2011
 - 3) Takahashi J, Hirabayashi H, Hashidate H, et al: Accuracy of multilevel registration in image-guided pedicle screw insertion for adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 35: 347-352, 2010
 - 4) 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
 - 5) 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)* 46: in press
-