



Title	高生体適合性インプラントを用いた脊柱側弯症手術の有限要素解析を用いた矯正予測に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	館, 弘之
Description	配架番号 : 2837
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第15903号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92116
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	TACHI_Hiroyuki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医 学） 氏 名 舘 弘之

学 位 論 文 題 名

高生体適合性インプラントを用いた脊柱側弯症手術の有限要素解析を用いた矯正予測に関する研究

(A study on surgical outcome prediction of scoliosis surgery using anatomically pre-bent rods using a surgical simulation system with finite element analysis)

【背景と目的】

思春期特発性側弯症は、脊柱に三次元的な変形をもたらす小児筋骨格系疾患であり、側弯コブ角が 45° を超える重度の特発性側弯症患者には、将来的な腰痛、更には呼吸機能低下などの併存症を防ぐために矯正手術が行われる。AIS における最適な手術戦略とは、脊椎可動椎間を最大限に温存しつつバランスの取れた姿勢を獲得できるように、最大限の変形矯正を行うことである。従来の特発性側弯症への手術治療は側弯コブ角である冠状面における矯正だけでなく胸椎後弯である矢状面の矯正を考慮した 3 次元矯正であったが、われわれは積極的に脊柱配列を作り変える時空的観点を取り入れた 4 次元解剖学的脊柱再建術を開発した。それに伴い術中の側弯配列に基づかずに本来の解剖学的脊柱配列を想定した 11 種類のプリベントロッドを開発が可能となった。解剖学的脊柱再建術に最適なプリベントロッドを使用することでロッド折損のリスクが低下し、患者負担の軽減や手術時間の短縮等も期待される。これらに加え椎弓根スクリューやロッドに加わる応力分布の把握が手術成績に関わる重要な要素と考える。

過去には手術手技のシミュレーションにより術後結果予測と生体力学的な解析を行った研究があるが術前の脊柱変形や手術方法を考慮していないものが多い。われわれは術前の個別の脊柱変形と矯正方法を考慮しプリベントロッドを組み込んだ世界初の動的有限要素シミュレーションプログラムを開発した。

本研究では、思春期特発性側弯症に対する 4 次元解剖学的脊柱再建術において Notch-free プリベントロッドを組み込んだ特発性側弯症の有限要素手術シミュレーションソフトの出力結果と術後矯正結果の比較検討を行った。

【対象と方法】

有限要素解析ソフト ANSYS をベースとして当科で開発されたプリベントロッドを組み込んだ動的シミュレーションプログラムを用いて解析を行い、胸腰椎/腰椎シングルカーブを除く思春期特発性側弯症 47 例の矯正効果を評価した。患者ごとに、術前 CT の DICOM データから作成された STL の各椎体モデルから脊柱の有限要素モデルを構築し、手術シミュレーションを実行した。手術シミュレーションを行う際、仙骨を固定し T1 を頭尾側に自由に回転および並進できるような拘束条件を定義した。多椎間関節切除により関節面等の後方要素同士の接触を固定椎間内で無視できるように設定し、矯正時のロッドの接続・回転操作については、ロッドとスクリュー間のバネ長をゼロにすることで 2 本のロッドがスクリューヘッドに接続されることをシミュレートした。凹側ロッドの背側に外力を徐々に加えることでロッドを 90° 回転させた。また、その際に、実際の手術で用いられたものと同

じ形状のロッドを 11 種類のプリベントロッドから選択した。シミュレーション実施後、側弯主カーブおよび代償性カーブコブ角、胸椎 T5-12 後弯角、頂椎回旋角を含めた各種パラメータを計測した。術前立位 X 線と CT、術後 1 週で得られた術後立位 X 線および CT でも同様のパラメータを測定し、術後画像とシミュレーションモデル、術前画像間で相関係数、平均絶対誤差、平均平方二乗誤差を計測し予測精度を評価した。ロッド挿入前に胸椎後弯にあたる弯曲部のなす角度を設置前ロッド角とし、術後 CT とシミュレーションから得られたロッド形状を同様に抽出し術前後のロッド角とロッド角変化量をロッド角解析として比較検証した。さらに、ロッドにかかる内部ストレスと、椎弓根スクリューとロッド接触面の間にスクリューの軸に沿う応力を引き抜き応力と定義し、応力解析も行った。

【結果】

術前の立位 X 線と CT またはシミュレーションモデル間には冠状面および矢状面パラメータで有意差があったが、術後の立位 X 線、CT、シミュレーションモデル間では冠状面および矢状面ともに有意差は認められなかった。術前の主カーブ及び代償性カーブコブ角、胸椎 T5-T12 後弯角、頂椎回旋角や術後ロッド角で、シミュレーション画像と術後 CT 画像との間に有意な相関を認め、予測誤差は平均絶対誤差、平均平方二乗誤差ともに 5 度以内であった。術後ロッド角変化量は、シミュレーションモデル、術後 CT いずれでも凹側で有意に高値であり、過去の報告と一致していた。また、ロッドでは凹側カーブ頂椎周囲と固定椎体上下端に内部応力が集中し、スクリューでは凹側胸椎カーブ頂椎に引き抜き応力が集中していた。

【考察】

本研究で、われわれが開発した有限要素解析を用いたシミュレーションを行うことで 4 次元解剖学的脊柱再建術による AIS の変形矯正とインスツルメントに与える応力に関して評価することができた。47 人の AIS 患者と 11 種類のプリベントロッドおよび術前後の情報を用いることで、変形矯正による幾何学的な側面のみでなく生体力学的な結果も解析可能であった。シミュレーションによる術後結果予測は術後 CT と比較し、5 度以内の予測精度でありプリベントロッドを使用したシミュレーションにおいて矯正位予測とロッド変形が可能であることを証明した。本研究はシミュレーションモデルがロッドの形状変化を予測できることを示した最初の研究である。シミュレーションモデルでは臨床的に報告されているように凹側ロッドの形状変化が有意に起こっており、また術前のロッド角が胸椎後弯形成に有用であることもしめされた。ロッドの形状変化と有限要素解析から、ロッドカーブ頂点と上下端周囲に応力が集中しており、これらは過去の報告とも一致していた。過去の報告と比較し、ロッド内部ストレスやスクリュー引き抜き応力は低値であり、われわれの行っている 4 次元解剖学的矯正の安全性が示唆された。

【結論】

高生体適合性医療機器である Notch-free プリベントロッドは、生体内設置後のロッド角変化量が少なく術後に獲得される胸椎後弯が大きいこと、およびシミュレーションソフトによる予測結果は術後矯正結果と比較して誤差が少ないことを明らかにした。側弯症手術においてプリベントロッドを仕様したシミュレーションが可能であり、高い精度の予測が可能であった。また、安全性に配慮した手術計画を行うことで、ロッド折損等の合併症をへらし患者負担を減じることが可能と考える。