

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12595

研究課題名（和文）側弯症手術の低侵襲化を目指す計算機シミュレーションの高精度化

研究課題名（英文）A study of accuracy improvement of computer simulations for non-invasive scoliosis surgery

研究代表者

小関 道彦 (KOSEKI, Michihiko)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：50334503

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：脊椎アライメントが不整となる側弯症に対する外科的治療法は、患者の経済的、肉体的な負担が大きいため、手術手法の低侵襲化が求められる。本研究では、側弯症に対する最適かつ低侵襲な手術手法を実現するために必要となる基礎的な知見を得ることを目的として、実験的・解析的な検討を行った。その結果、脊椎の固さを定量的に求め、臨床で用いられる矯正器具を適用可能な模型実験手法を確立し、計算機シミュレーションによって従来手法に比べて有用な手術手法を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造的にも機能的にも複雑な機構を有する人体の脊椎について定量的な検討を行うためにはその機構を適切に模擬する必要がある。本研究で実現した成長過程にある脊椎を表現可能な模型は世界的にも例がなく、早期発症側弯症に対する手術手法を検討するためのデバイスとして重要性は高い。さらに、解析的にも成長を加味した手術シミュレーションを実現し、学術的な意義が大きい。また、本研究で確認した効果的な手術手法を用いることにより、側弯症患者の合併症リスクの低減や医療費の削減が期待される。

研究成果の概要（英文）：Scoliosis is a sideways curvature of the spine and surgical treatment for the scoliosis imposes economical and physical burdens for patients. Therefore, there is a demand for less invasive surgical techniques. In this study, we conducted experimental and analytical investigations to obtain fundamental insights necessary to achieve optimal and minimally invasive surgical methods for scoliosis. As a result, we quantitatively assessed spinal stiffness, established a model experiment method applicable to clinically used surgical devices, and confirmed the availability of our proposed surgical methods compared to conventional approaches through computer simulations.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：バイオメカニクス 脊椎側弯症 有限要素解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

脊椎アライメントが不整となる側弯症は、外見上の異常から心理的ストレスをもたらすとともに、変形が大きい場合には神経症状や呼吸器症状を引き起こすため手術適応となる。一般的な側弯症の手術方法である後方矯正固定術では、広い範囲を切開して多数の椎骨に椎弓根スクリューを挿入する必要がある。スクリュー挿入経路は脊髄・大動脈・神経根に近接しているため、誤挿入があると脊髄損傷や大動脈損傷などの致命的な合併症を生じる可能性がある。こうしたリスクを軽減するためには、より短い範囲あるいはより少ないスクリューで矯正固定すればよい。しかし、スクリュー数の削減により、矯正が不十分となるケースや、スクリュー1本あたりの負荷が増えることによる破折や逸脱・ゆるみなどが発生するケースが懸念される。

### 2. 研究の目的

側弯症に対する手術治療について、最適かつ低侵襲な固定範囲を決定するために必要となる基礎的な知見を得ることを本研究の目的とする。本研究を効率的に遂行してこの研究目的を達成するためには、目標とする低侵襲手術手法を予め想定し、それをターゲットとする検討を行うことが望ましい。筆者らの研究グループでは、成長期の終了以前に外科的手術を必要とする早期発症側弯症に対して有効と考えられる脊椎後方凸側固定術を考案している。この手術手法は、従来手法では脊椎を左右2本のロッドで固定するのに対し、片側1本だけで固定することによって大幅な低侵襲化を目指すものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、前述した脊椎後方凸側固定術をターゲットとして、以下の3つのサブテーマに分けて臨床活用可能な技術とするための基礎検討を行った。

#### (1) 脊椎固さ推定手法の開発

側弯症の診察では、立位全脊椎 X 線像に加えて側屈位の X 線像も用いられている。本研究では、これら2種類の X 線像に基づき次の手順で脊椎の固さを推定する。

患者の立位 X 線正面像から患者の側弯状態を反映した有限要素モデルを構築する。

患者の側屈時の X 線像から第7頸椎の位置を求め、それを解析モデルの第7頸椎に対して変位として設定し、解析モデルを変形(側屈)させる。

変形解析モデルが患者側屈位 X 線像と合致するよう各椎間の材料パラメータを調整する。

#### (2) 脊椎模型の構築と検証実験

筆者らが提案する脊椎後方凸側固定術の有用性および、(3)で述べるシミュレーションの信頼性を検証することを目的として脊椎模型を用いた実験的検討を行う。このために、従来の模型実験手法では本研究の目的には不十分であることを明らかにし、新たな実験手法を確立する。さらに、提案する手術手法は成長期が終了する前の脊椎を模擬する必要があるため、成長して大きくなる様子をも模擬する脊椎模型を構築する。

#### (3) 脊椎手術シミュレーション

側弯症患者の X 線 CT 画像に基づく脊椎の患者別解析モデルを構築し、それに椎弓根スクリューやロッドを付加した状態での応力解析(手術シミュレーション)を実施する。側弯症手術では、ロッドの弾性力により脊椎の配列を矯正しており、様々な固定範囲や、スクリュー挿入をスキップした場合について解析を行う。患者別脊椎模型を用いた実験結果と比較しながら解析を行うことにより、解析結果の信頼性を担保するための必要条件を探る。

### 4. 研究成果

本研究の遂行により、側弯症に対して低侵襲な手術を実施するための基礎的な知見を得るとする本研究の目的は達成されたと考える。以下に各サブテーマでの成果を整理する。

#### (1) 脊椎固さ推定手法の開発

はじめに、臨床データではなく数学的に側弯した脊椎形状を表現した有限要素モデル(概念モデル)を用いて提案手法の妥当性を確認した。まず、側弯した脊椎姿勢を図1(a)に示すように幾何学的に表現した形状を作成し、これにあわせて図1(b)に示す概念モデルを構築する。そして、概念モデルの各椎間板に様々な物性値(固さパラメータ)を与え、側方に荷重を加えることにより側弯症患者の屈曲位 X 線像を模擬した。また、各椎間板の固さパラメータが均一なモデルに対して上記と同じ頸部移動量を強制変位として与えると、腰部や胸部の変形が上記モデルとは異なる変形結果が得られる。この両者の変形の違いを比較することによって固さパラメータを定量化する。概念モデルの場合には図1(c)に示すようにほぼ100%の精度で固さパラメータを推定できることを確認した。

次に、上記の提案手法を実際の臨床データに適用した。側弯症患者の立位 X 線正面像から脊椎形状を反映した有限要素モデル（患者モデル）を構築し、患者の側屈時 X 線像から第 7 頸椎の位置を求め、それを解析モデルに対する強制変位として設定して解析モデルを変形させた。この変形モデルと患者側屈位 X 線像との違いから固さパラメータを推定した。この臨床データの場合にも、概念モデルと同様に固さパラメータの推定が可能であることを確認できた。しかし、X 線像に対する座標指定の誤差が固さパラメータの推定結果に大きく依存することが明らかとなった。これは、X 線像の読影技術に依存するものであり、各椎骨の位置を機械学習などによって一意に定めることができれば解決できると考えられる。

以上のことから、脊椎の固さを定量的に求める方法については、臨床で活用するには時期尚早であり改良の余地があるが、手法として確立できたと考えられる。

## (2) 脊椎モデルの構築と検証実験

側弯症の矯正手術を模擬する従来の実験手法では、台座上に置かれた椎骨模型を周囲からコイルバネで牽引することで脊椎の弯曲および回旋を生成していた。本研究で検証したところ、この手法では脊椎模型に不適切な荷重が加わり手術手法を力学的に評価する手法としては不適切であることが明らかとなった。そこで本研究ではまず、脊椎模型自体が復元力を有し、矯正器具が脊椎に対して及ぼす矯正力と脊椎の復元力のバランスによって術後の脊椎姿勢が決定する実験手法を確立した。

次に、成長期の脊椎を模擬するために、全長を変化させる機構を組み込んだ椎骨を並べた脊椎模型を構築した。これは、椎骨模型の内部に微小なボールネジ機構を設け、これを回転することにより椎骨の厚さを変更するものである。この椎骨模型は、成長期の小児の椎骨と同程度の大きさを実現しており、臨床で用いられる矯正器具の適用も可能となっている。

構築した脊椎模型を用いて側弯症の手術手法を模擬した評価実験を実施した。実験の様子を図 2 に示す。周囲の筋腱などによって決まる脊椎の固さを椎間板に代表させて表現した模型を構築し、模擬手術実験を実施した。脊椎を後方から固定する方法および前方から固定する方法の 2 つの術式に対して適用し、両者ともに臨床例と類似した結果を得た。そのうえで、成長期の小児に対する手術手法として脊椎後方凸側固定術が効果的であることが示唆された。

さらに、椎骨に刺入した椎弓根スクリューが抜けてしまう状況について、荷重センサを組み込んだ脊柱模型を構築し、検討を行った。その結果、スクリューとロッドの固定順序や、スクリューが右ねじであることが引き抜け力に影響を与えることが明らかとなり、脊椎の弯曲方向によってスクリューの締結順序を調整することが望ましいことが示唆された。

以上のことから、新規に開発した脊椎模型および実験手法を通して、早期発症側弯症に対する脊椎後方凸側固定術の有用性を示唆するとともに、実際の手術に活用可能な有用な情報を抽出できたと考えられる。

## (3) 手術シミュレーション

側弯症の手術を模擬したシミュレーション手法を開発した。本手法は、上述した模型実験と同様に、矯正器具が脊椎に対して及ぼす矯正力と、器具によって矯正された脊椎が元の側弯状態に戻ろうとする復元力がバランスによって術後の脊椎姿勢が決定する解析手法である。

模型実験と同等な解析結果を得られることを確認したうえで、図 3 に示すモデルによって早期発症側弯症に対する脊椎後方凸側固定術の解析を行った。海外の研究者が提案する新しい手術手法との比較を試みたところ、筆者らが提案する脊椎後方凸側固定術のほうが適用できる症例が多いことが示唆された。

さらに、本手術シミュレーションを実施するにあたり開発した脊椎の成長を模擬する解析手法を用いて肋骨と胸骨からなる胸郭を含むモデルで解析を行ったところ、側弯症の代表的な症例を模擬できた。これは、これまで特発性（原因不明）とされてきた側弯症の原因解明につながることを期待される。

以上のことから、早期発症側弯症に対する手術シミュレーションの解析手法を確立し、筆者らが提案する手術手法の有用性を確認できたと考えられる。

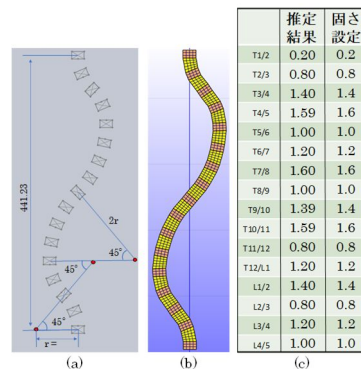


図 1 概念モデルでの解析  
(a) 幾何学的側弯姿勢  
(b) (a)に基づく概念モデル  
(c) 推定結果

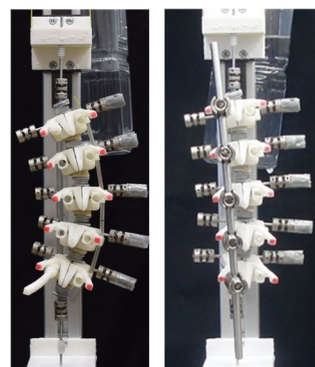


図 2 模型実験  
側弯状態（左）と凹側固定により矯正した状態（右）

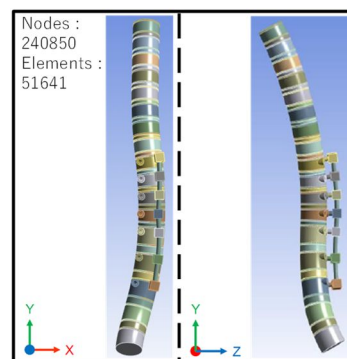


図 3 手術シミュレーションモデル  
後方から見た様子（左）および側方から見た様子（右）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中尾駿介, 高橋淳, 大場悠己, 宮岡嘉就, 小関道彦
2. 発表標題 早期発症側弯症患者の矯正固定術後の側弯憎悪に対する画像解析的検討
3. 学会等名 日本機械学会第35回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 八木康佑, 高橋淳, 大場悠己, 鎌仲貴之, 宮岡嘉就, 小関道彦
2. 発表標題 側弯症患者の脊柱形状における力学的妥当性の検討
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2023 年合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小山啓太, 高橋淳, 大場悠己, 宗像諒, 畠中輝枝, 小関道彦
2. 発表標題 脊椎の固さ推定および側弯症に対する最適な矯正固定範囲の決定
3. 学会等名 日本機械学会 第31回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 淳  (TAKAHASHI Jun)  (60345741)	信州大学・学術研究院医学系・教授    (13601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------