

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26462236

研究課題名(和文) 思春期特発性側弯症患者に対する後方矯正固定術に必要なスクリューの数の最適化

研究課題名(英文) Optimization of the number of screws required for posterior correction and fixation for adolescent idiopathic scoliosis patients

研究代表者

高橋 淳 (TAKAHASHI, Jun)

信州大学・学術研究院医学系・准教授

研究者番号：60345741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、側弯症矯正手術で椎弓根に刺入するスクリューに生じる力学負荷を実験的・解析的に算出することを目的として検討を行い、以下の成果を得た。1) 椎骨間を固定するロッドを回転させて側弯状態を後弯状態に矯正する際には、矯正範囲の両端には椎弓根スクリューを椎骨に押し付ける荷重、隣接スクリューには椎骨から引き抜く荷重が発生すること。2) ロッドを椎弓根スクリューに固定する際には、その締結順序が力学負荷に大きく影響し、スキップにより負荷が低減する場合もあること。3) そして、X線CT画像に基づき、患者別の椎骨模型を作成する手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Pedicle screw fixation is a surgical treatment option for adolescent idiopathic scoliosis and other severe spinal deformities. This study examined the mechanical states present in surgical instruments consisting of pedicle screws and a rod using experimental and analytical research procedures. The major outcomes of this study are follows: 1) The pedicle screws on both ends of the fusion area were pushed to the vertebrae, and the adjacent pedicle screws were loaded in the extracting direction. 2) The mechanical stress placed on screws depended on their spacing and securing order. For skip pedicle screw fixation, the mechanical stress exerted on the screws was lower than that on screws inserted into consecutive vertebrae. 3) In addition, this study established a fabrication method of patient-specific vertebral models based on X-ray CT images.

研究分野：脊椎外科

キーワード：思春期特発性側弯症 後方矯正固定術 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

思春期特発性側弯症は思春期の女兒の約1～2%に見られる頻度の高い疾患である。思春期特発性側弯症の矯正手術は近年、後方から可及的すべての椎骨に椎弓根スクリューを刺入して矯正する方法 (Segmental Pedicle Screw Fixation) が主流になっている。大きなカーブ、固いカーブには多くのスクリューを刺入する必要があるが、小さなカーブ、軟らかいカーブには多くのスクリューを刺入する必要はない。このため、不要なスクリューはスキップすることが望ましい。しかし、椎弓根スクリューをスキップすると、スクリュー1本あたりの負荷が高まり、破損や逸脱が生じる可能性があるとして予想されるが、このリスクについて力学的な観点から定量的な検討は行われていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、思春期特発性側弯症に対する椎弓根スクリューを用いた後方矯正固定術において、1)どの程度のスクリューの数が必要か、2)減らすことのできる椎体レベル、3)全ての椎骨に椎弓根スクリューを刺入する場合と、刺入する椎骨を減らした場合の力学状態の差異について、模型を用いた実験および数値シミュレーションと人体データを組み合わせて明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究の流れを図1に示す。本研究では簡単な脊椎モデルに対する実験的検討・解析的検討から徐々に患者別モデルに近づけることにより、信頼性の高い結果を得る。

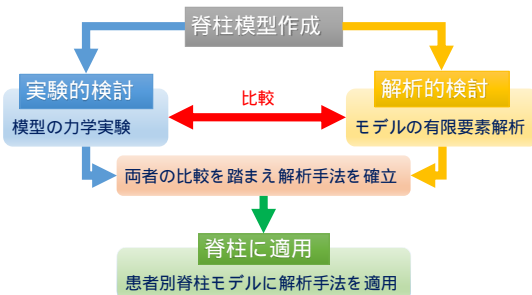


図1 本研究の流れ

側弯症矯正手術は、以下の手順で実施される。

1. 椎弓根へのスクリューの刺入
2. 適切な後弯が得られるようあらかじめ曲げたロッドを椎弓根スクリューヘッドに仮固定
3. ロッドを90度回転
4. セットスクリューにより椎弓根スクリューヘッドにロッドを最終固定

本研究では、以上のステップにおいて、椎骨および椎弓根スクリューに対する力学的負荷が最も高まるのは3)ロッド回転時、およ

び4)ロッド固定時であると考え、これら二つの力学状態について実験的・解析的な検討を行った。

(1) ロッド回転時の力学状態

図2に示す模型を作成した。本模型は、7つの硬質樹脂による椎骨要素を柔軟な結合要素で連結したものであり、片側にコイルスプリングを入れて側弯症を模擬している。この脊柱模型に対して、チタン製の椎弓根スクリューを刺入し、ロッド回転時のノイズを低減することを目的としたベアリングを介して湾曲したロッドを接続する。脊柱模型の中央あるいは両端をバイスで固定した状態でロッドを回転させる際の力学状態を、椎弓根スクリューに貼付したひずみゲージで計測する。

全ての椎骨に椎弓根スクリューを刺入した場合と、椎弓根スクリューをスキップする場合について、力学状態を比較した。

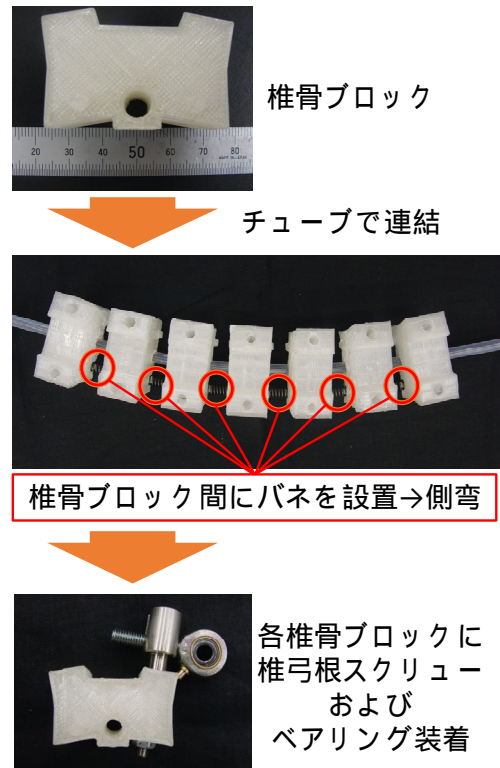


図2 脊柱模型

(2) ロッド固定時の力学状態

前項と同様の模型を用いて実験を行う。ただし、実験に用いた模型には側弯させるためのコイルスプリングは挿入せず、また、ロッドはベアリングを介さずに直接的に椎弓根スクリューヘッドに固定する。

椎弓根スクリューにロッドを固定するセットスクリューの締結順序および、椎弓根スクリューのスキップが力学状態に及ぼす影響について比較した。

(3) 患者別模型の作成

ここまでの検討で用いた模型は、脊柱を一般化して検討することを目的として椎骨をできるだけ単純化した形態としたが、側弯症

の症状は患者によって大きく異なるため、力学状態も患者ごとに検討する必要がある。

そこで、側弯症患者の臨床データ(X線CT画像)に基づいて、患者別の椎骨模型の作成手順について検討を行った。

4. 研究成果

(1) ロッド回転時の力学状態

ロッドを回転させて側弯状態を後弯状態に矯正する際には、図3において緑色の棒グラフで示すように、矯正範囲の両端には椎弓根スクリーを椎骨に押し付ける荷重、隣接スクリーには椎骨から引き抜く荷重が発生すること。また、椎弓根スクリーをスキップすると、図3において橙色の棒グラフで示すように本来その場所に生じるはずの負荷が隣接スクリーに移動することが分かった。

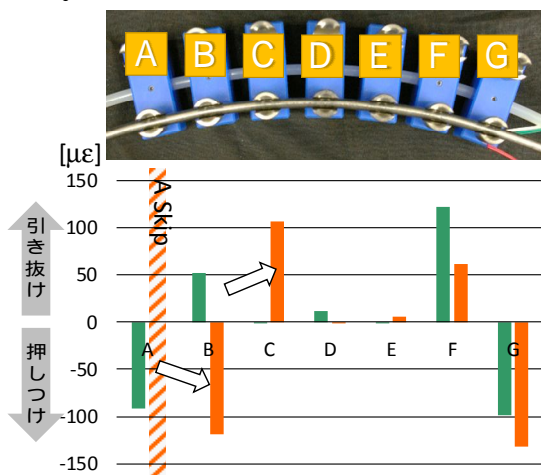


図3 力学負荷 (ロッド回転時)

(2) ロッド固定時の力学状態

ロッドを椎弓根スクリーに固定する際には、図4に示すようにその締結順序が力学負荷に大きく影響することが分かった。図4は頭側から順にロッドを締結する場合を示しているが、中央から締結する場合にも最初に締結するスクリーに生じる力学負荷は他よりも優位に小さかった。

また、図5に示すようにスキップにより負荷が低減する場合もあることが明らかとなった。この原因として、全ての椎骨のスクリーを締結すると、各椎骨の変位誤差を吸収するための力学負荷が全ての椎弓根スクリーに加わるのに対し、スキップすることによって椎骨の変位誤差は椎間板によって吸収され、椎弓根スクリーが担う力学負荷が減少するのではないかと考えられた。

さらに、実験に用いた脊椎模型に関する数値シミュレーションを実施し、ロッドを固定する際には椎弓根スクリーのヘッドには開かれる力が生じていることが明らかとなった。また、力学実験で計測したスクリーに生じたひずみデータと数値シミュレーションを併用することによって、荷重方向を試算する逆問題解析も実施した。

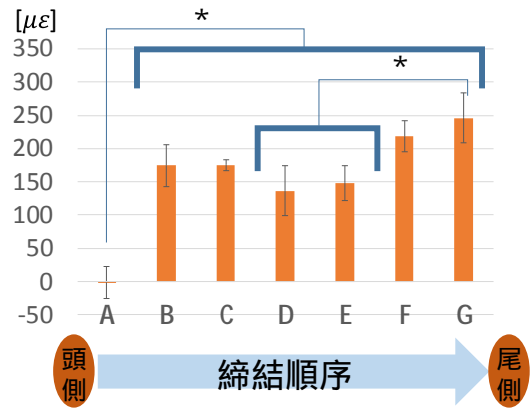


図4 力学負荷 (ロッド固定時)

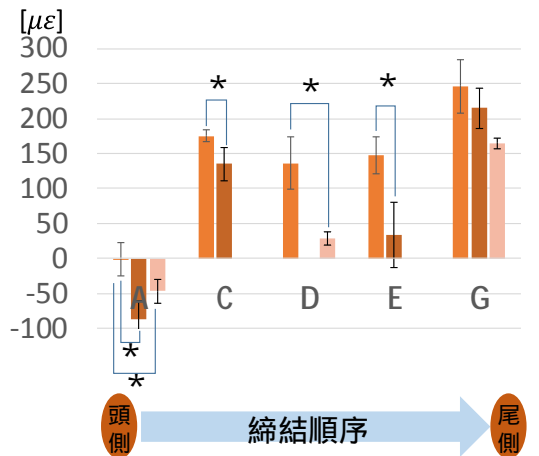


図5 スキップ時の力学負荷 (ロッド回転時)

(3) 患者別模型の作成

側弯症患者のX線CT画像に対して画像処理を施し、一つ一つの椎骨を抽出した上で、3Dプリンタにより個々に作成した5つの椎骨模型を並べたものを図6に示す。得られた模型は、側弯症患者特有の左右非対称な椎骨形状をしており、本研究で確立したX線CT画像に基づく患者別椎骨模型の作成手法の有用性が示唆された。

今後、このような患者別模型を用いた検討を行うことにより、側弯症に対する外科的治療に対して患者別の詳細な力学情報を提供可能となると期待される。

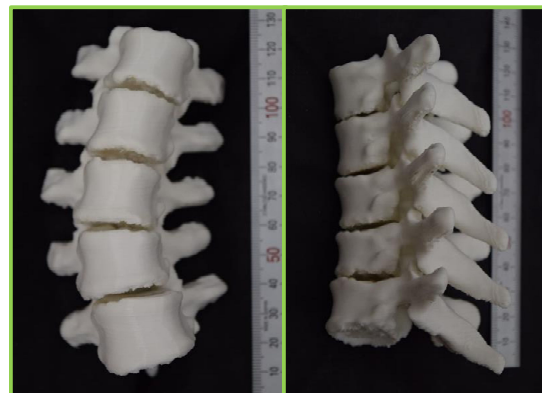


図6 X線CT画像に基づく患者別椎骨模型

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計9件)

野口大輝, 鈴木敬裕, 佐藤翼, 小関道彦, 二木俊匡, 高橋淳, 加藤博之: 弯症手術における椎弓根スクリューに生じる力学負荷の計測; 日本機械学会 北陸信越支部第54期総会・講演会、2017年3月9日、金沢大学(石川県金沢市)

佐藤翼, 野口大輝, 小関道彦, 神澤広樹, 二木俊匡, 高橋淳, 加藤博之: 思春期特発性側弯症の矯正固定術に対する実験的・解析的検討; 日本機械学会 北陸信越支部第54期総会・講演会、2017年3月9日、金沢大学(石川県金沢市)

Michihiko KOSEKI, Tsubasa SATO, Hiroki KANZAWA, Jun TAKAHASHI, Toshimasa FUTATSUGI and Hiroyuki KATO: Mechanical Analysis of Pedicle Screw Fixation for Adolescent Idiopathic Scoliosis; 16th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME2016), 2016年12月7日, Singapore (Singapore)

佐藤翼, 小関道彦, 神澤広樹, 高橋淳, 二木俊匡, 加藤博之: 思春期特発性側弯症に対する後方矯正固定術における椎弓根スクリューの力学負荷はセットスクリュー締結順序に依存する; 第50回日本側彎症学会、2016年11月17日、京都国際会館(京都府京都市)

小関道彦, 佐藤翼, 神澤広樹, 二木俊匡, 高橋淳, 加藤博之: 思春期特発性側弯症に対する後方矯正固定術における椎弓根スクリューの力学負荷はスキップによって低減する; 第31回日本整形外科学会基礎学術集会、2016年10月14日、福岡国際会議場(福岡県福岡市)

小関道彦, 鈴木敬裕, 高橋淳, 二木俊匡, 加藤博之: 3Dプリンタによる患者別脊柱模型を用いた思春期特発性側弯症手術における力学負荷計測; 第127回中部日本整形外科災害外科学会・学術集会、2016年9月30日、まつもと市民芸術館(長野県松本市)

佐藤翼, 澤柳瑠比, 神澤広樹, 二木俊匡, 高橋淳, 小関道彦, 加藤博之: 思春期特発性側弯症の矯正固定術に対する実験的・解析的検討; 日本機械学会 北陸信越支部第53期総会・講演会、2016年3月5日、信州大学(長野県長野市)

大塚ゆりな, 二木俊匡, 高橋淳, 加藤博之, Pataky Todd, 小関道彦: 脊椎疾患に対する外科的治療の応力解析シミュレーション; 日本機械学会 第28回バイオエンジニアリング講演会、2016年1月9日、東京工業大学(東京都目黒区)

佐藤翼, 神澤広樹, 二木俊匡, 高橋淳, 小

関道彦, 加藤博之: 脊椎側弯症の矯正固定術に対する実験的・解析的検討; 日本機械学会 北陸信越支部第52期総会・講演会、2015年3月7日、新潟工科大学(新潟県柏崎市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 淳 (TAKAHASHI, Jun)
信州大学・学術研究院医学系・准教授
研究者番号: 60345741

(2)研究分担者

羽二生 久夫 (HANIU, Hisao)
信州大学・学術研究院医学系・准教授
研究者番号: 30252050

小関 道彦 (KOSEKI, Michihiko)
信州大学・学術研究院繊維学系・准教授
研究者番号: 50334503

加藤 博之 (KATO, Hiroyuki)
信州大学・学術研究院医学系・教授
研究者番号: 40204490

二木 俊匡 (FUTATSUGI, Toshimasa)
信州大学・医学部附属病院・助教(診療)
研究者番号: 80646539