

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 21 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420014

研究課題名(和文) 脊椎固定術における隣接椎間障害発生メカニズムの力学的解明

研究課題名(英文) Experimental Research on Effect of Spinal Fusion Surgery on Adjacent Segments

研究代表者

稲葉 忠司 (INABA, TADASHI)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70273349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：脊椎疾患の治療において体内固定具を使用した固定術が広く行われている。この手術では長期経過例において隣接椎間に椎間板変性やすべり症などが発生すると報告されているが、その要因は明確にされていない。そこで本研究では、イノシシ多椎間腰椎を用いた力学試験により、固定具の装着が隣接椎間の椎間可動域に及ぼす影響について検討した。その結果、変位量を規定した試験において、固定モデルの隣接椎間可動域および最大トルクは損傷モデルに比べ増加することがわかった。このことから、隣接椎間障害は、固定前と同じ角度まで運動を行った際に、固定により失われた責任椎間の可動域を補うために大きなトルクが負荷されて発生すると推察された。

研究成果の概要(英文)：The pedicle screw and rod system is widely used for surgical treatments of spinal disorders. Although the long-term clinical outcomes of their treatments have demonstrated that adjacent segmental diseases such as disk degeneration and slipping may be occasionally occurred, the cause of adjacent segmental diseases is unknown. Therefore, we conducted the bending tests using multi-segment lumbar spine of wild boar cadaver specimens. At the result of this study, the ROMs (range of motion) of adjacent segments and loaded maximum torque in the fixed model were significantly increased in comparison with the injured model under the constant angular displacement.

研究分野：材料力学・生体力学

キーワード：バイオメカニクス 脊椎固定術 隣接椎間障害 力学的評価 6軸材料試験機 脊椎不安定性 体内固定具 脊椎疾患治療

1. 研究開始当初の背景

身体運動の軸機関および支持機関である脊椎の疾患に対する診断・治療において、脊椎の剛性を把握することは、適切な治療方針・手術手技を決定する上で極めて重要である。そこで本研究では、脊椎の剛性を力学的観点より客観的・定量的に評価することを目的とし、複雑な脊椎変形挙動を6軸材料試験機を用いて実験的に調査する。特に、本科学研究費申請年度においては、損傷や疾患により生じた脊椎不安定状態を解消するための脊椎固定術において、損傷椎間への体内固定具の装着が隣接椎間にどのような影響を及ぼしているのかについて焦点を絞って研究を実施する。

2. 研究の目的

現在、各種脊椎疾患の外科的治療には、pedicle screw and rod system (以下 PS, 図1参照)を用いた脊椎固定術が幅広く行われており、さまざまな脊椎疾患の治療において PS の良好な短期成績が示されている。しかし、長期の臨床成績として、固定した椎間(責任椎間)に隣接する椎間(隣接椎間)において椎間板変性やすべりが生じる、いわゆる隣接椎間障害の発生例が多く報告されている。そのため隣接椎間障害の防止を目的として、強固な固定を行わない脊椎制動術が選択されることがある。その際に用いる脊椎インプラントの一つとして、segmental spinal correction system(以下 SSCS, 図2参照)を用いた固定術がある。この SSCS は、スクリューとロッドの連結後にも脊椎の頭尾側方向に 20deg. の可動性を許容する機構を有しており、術後の臨床成績は良好であるとされている。しかし、SSCS が隣接椎間に及ぼす影響を力学的に調査した報告は少ない。そこで、イノシシ腰椎の3椎間に対し、前後屈および左右側屈方向の曲げ試験を実施することにより、本術式の脊椎固定性および隣接椎間に及ぼす影響について実験的に明らかにすることを目的とした。



図1 pedicle screw and rod system



図2 segmental spinal correction system

3. 研究の方法

試験体には、獣害対策として捕獲され食肉に供されたニホンイノシシの屍体より摘出した腰椎(L2-L5, 図3参照)を8体用いた。-30にて冷凍保存された腰椎を自然解凍し、内的安定要素を残しながら軟部組織である脂肪や筋肉などを除去した後に、歯科用レジンによって最上位椎体(L2)および最下位椎体(L5)を取付治具に固定した。試験体モデルとして L3/4 の椎間板に前方より 1/4, 1/2, 3/4 の3カ所へ直径3mmのドリルで貫通した穴を開け、L3/4間の棘上靭帯と棘間靭帯をハサミで切離し、さらにL3/4高位の両側の椎間関節を全切除した損傷モデル、損傷椎間にPS固定を施したPSモデル、および損傷椎間にSSCS固定を施したSSCSモデルの3種類のモデルを作製した。



図3 イノシシ屍体多椎間腰椎(L2-L5)

力学試験機として、当研究室にて開発された脊椎強度測定用6軸材料試験機(図4参照)を使用した。本試験機は、手先部に6軸力センサを備えているため、x, y, z軸方向の力と各軸回りのトルクを検出することができ、さらに、検出した値を制御系にフィードバックすることにより力およびトルクによる制御を行うことも可能である。この試験機に試験体を取り付け、一平面内での純粋な曲げを表す3自由度の条件下において、前後屈方向および左右側屈方向へクロスヘッド角速度0.1deg./sにてトルクを負荷した。このとき、トルクは3椎間全体での回転角度が13deg.になるまで負荷した。なお、各々の試験は連続的に繰り返し3回行われ、3回目に得られたデータを実験結果として採用した。

各椎間の回転角度の測定は、動画計測システムを用いて以下のように行った。まず、各椎体に2箇所ずつ、計8箇所のマーキングを試験体に施した。次いで、曲げ試験実施中、2台のデジタルビデオカメラを用いて2方向から試験体を撮影した。そして、得られた動画上の各マーカーを3次元動画計測ソフトウェア(ライブラリー製 Move-tr/3D)により自動追跡することで、各椎間の変形挙動を連続的に計測した。各椎間の変形挙動から得られたトルク-回転角度曲線より、最大トルク負荷時の回転角度を椎間可動域(range of motion, 以下 ROM)と定義した。

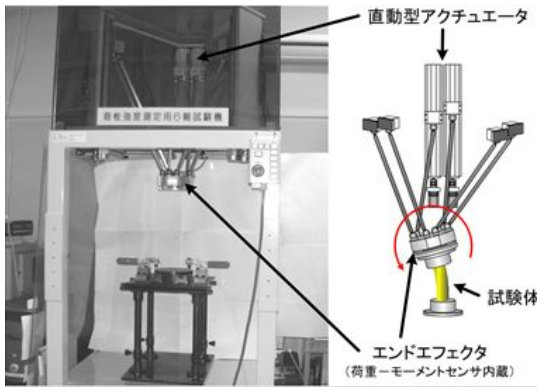


図4 脊椎強度測定用6軸材料試験機

#### 4. 研究成果

##### (1) 結果

図5(a)および(b)に、それぞれ前後屈および左右側屈方向の曲げ試験により得られた上位椎間、責任椎間および下位椎間のROMを示す。同図に示すように、前後屈および左右側屈のどちらの曲げ試験に関しても、PS固定モデルのROMは、責任椎間では損傷モデルから大きく減少し、上位・下位の隣接椎間では増加することがわかった。同様に、SSCS固定モデルのROMも、責任椎間では損傷モデルから大きく減少し、上位・下位の隣接椎間では増加すること、およびその値はPS固定モデルと同程度であることがわかった。図6(a)および(b)に、それぞれ前後屈および左右側屈方向の曲げ試験における最大トルクを示す。同図に示すように、前後屈および左右側屈のどちらの曲げ試験に関しても、PS固定モデルおよびSSCS固定モデルにおける最大トルクは、損傷モデルよりも大きな値を示すことがわかった。

##### (2) 考察

PSを用いた脊椎固定術の臨床成績は一般的に良好であるが、長期成績においては、固定隣接椎間に椎間板変性やすべり症などの症例が発生すると報告されている。この隣接椎間障害が発生する原因の一つとして、PSによる過度な固定が考えられているが、その発生原因は十分に解明されていない。その理由として、脊椎に対する生体力学的研究が主に機能的脊椎単位(functional spinal unit, FSU)で行われており、多椎間の変形挙動について各椎間レベルで解析した報告がほとんどなされていないことが挙げられる。そこで本研究では、イノシシ屍体腰椎より得られた多椎間脊椎に対して曲げ試験を行い、PS固定が隣接椎間に及ぼす影響について力学的に検討した。今回の実験結果において、PS固定モデルにおける隣接椎間のROMは損傷モデルと比較して増加していた。また、最大回転角度を与えた際の固定モデルのトルク値は損傷モデルと比較して大きかった。今回の曲げ試験では、どちらのモデルに対しても多椎間全体で同じ角度まで角変位が与えられる。よって、PS固定モデルでは、PS固定によって責

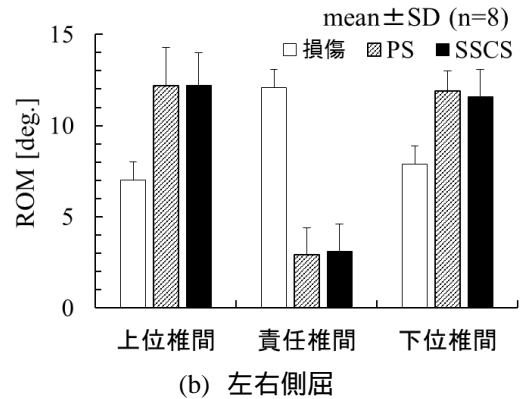
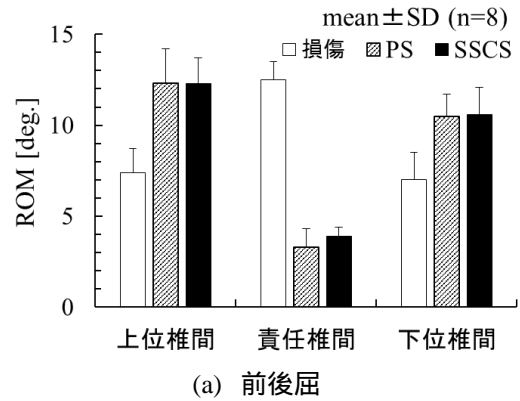


図5 曲げ試験より得られた各椎間のROM

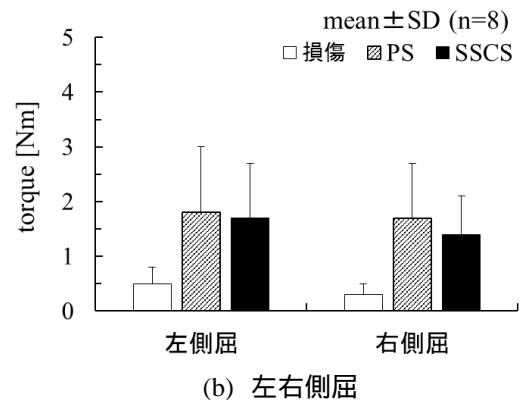
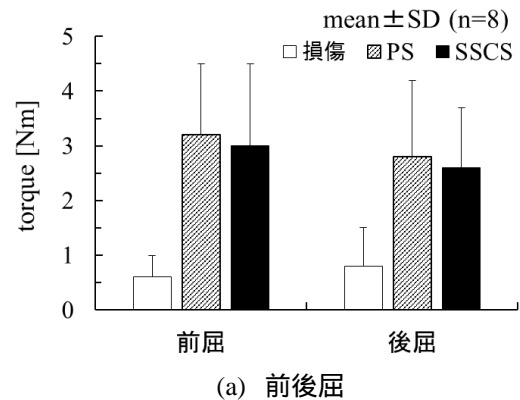


図6 曲げ試験における最大トルク

任椎間の可動域が減少した分を補うために大きなトルクが必要とされ、その結果、隣接椎間の可動域が大きくなったと考えられる。したがって、椎間板変性やすべり症などの脊

椎固定術後の隣接椎間障害は、固定前と同じ角度まで運動を行った際に、PS 固定により失われた責任椎間の可動域を補うために大きなトルクが負荷されて発生すると推察される。

SSCS は、隣接椎間障害の防止を目的とした強固な固定を行わない脊椎制動術の一つであり、スクリューとロッドの連結後にも脊椎の頭尾側方向に 20deg. の可動性を許容する機構を有する。この SSCS に関する実験結果において、SSCS 固定モデルにおける隣接椎間の ROM は損傷モデルと比較して増加しており、その値は PS 固定モデルと同程度であった。このことから、SSCS の可動性を許容する機構は、前後屈および左右側屈方向の曲げ運動に関してはほとんど機能しておらず、本術式の固定性および隣接椎間に及ぼす影響は PS 固定術と同等であると考えられる。

### (3) その他の研究成果

本科学研究費申請年度において本研究では、上述の体内固定具の装着が隣接椎間に及ぼす影響に関する研究テーマに加え、「Pedicule screw と椎体との micromovement に関する研究」、「機能的脊椎単位の回転中心に関する研究」、「PS 固定術における crosslink system の併用効果に関する研究」、「ヒト、シカ、イノシシ屍体腰椎における力学的特性の相違に関する研究」などの脊椎運動の力学的評価に関する研究テーマに取り組んだ。これらの研究成果については、以下に示す雑誌論文にて発表した。

### 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)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- (1) H. Oshino, T. Sakakibara, T. Inaba, T. Yoshikawa, T. Kato, Y. Kasai, A Biomechanical Comparison between Cortical Bone Trajectory Fixation and Pedicle Screw Fixation, *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, Vol.10, No.125, pp.1-6, 2015, 査読有.
- (2) T. A. Kyaw, Z. Wang, T. Sakakibara, T. Yoshikawa, T. Inaba, Y. Kasai, Biomechanical Effects of Pedicle Screw Fixation on Adjacent Segments, *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, Vol.24, Issue 1 Supplement, pp.S283-S287, 2014, 査読有.
- (3) 福田好秀, 土井優太, 榊原紀彦, 笠井裕二, 姜 良勲, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, Unilateral Pedicle Screw and Spinous System (UPSS) に Cross Link system を併用した際の生体力学的研究, *臨床バイオメカニクス*, 35 巻, pp.71-76, 2014, 査読有.
- (4) K. Wasinpongwanich, T. Sakakibara, T. Yoshikawa, T. Inaba, Y. Kasai, Are Deer and

Boar Spines a Valid Biomechanical Model for Human Spines?, *Journal of Spine*, Vol.3, Issue 5, pp.1-5, 2014, 査読有.

- (5) 渡部貴大, 中上祐希, 榊原紀彦, 吉川高正, 稲葉忠司, 笠井裕二, Segmental spinal correction system に関する生体力学的研究, *臨床雑誌整形外科*, 64 巻, 11 号, pp.1213-1216, 2013, 査読有.
- (6) 石倉 巨, 榊原紀彦, 王 卓, 笠井裕二, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, Pedicle screw と椎体との micromovement に関する実験的研究, *臨床バイオメカニクス*, 34 巻, pp.19-24, 2013, 査読有.
- (7) 渡部貴大, 榊原紀彦, 王 卓, 笠井裕二, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, 回旋運動による機能的脊椎単位の回転中心の変化, *臨床バイオメカニクス*, 34 巻, pp.47-52, 2013, 査読有.
- (8) Z. Wang, T. Sakakibara, T. Yoshikawa, T. Inaba, Y. Kasai, Do the Position and Orientation of the Crosslink Influence the Stiffness of Spinal Instrumentation?, *Journal of Spinal Disorders and Techniques*, Epub ahead of print, 2013, 査読有.

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) 吉岡勇徳, 榊原紀彦, 笠井裕二, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, スクリューによる棘突起間固定の固定性に関する実験的研究, 第 42 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2015 年 11 月 13, 14 日) ソラシティカンファレンスセンター (東京都・千代田区).
- (2) 井上将隆, 榊原紀彦, 笠井裕二, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, 脊椎の変形挙動における瞬間回転軸の軌跡に関する実験的研究, 第 42 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2015 年 11 月 13, 14 日) ソラシティカンファレンスセンター (東京都・千代田区).
- (3) 押野裕貴, 岡久和正, 榊原紀彦, 笠井裕二, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, Cortical bone trajectory 法の固定性に関する生体力学的検討, 第 41 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2014 年 11 月 21, 22 日) 奈良県新公会堂 (奈良県・奈良市).
- (4) 田中孝則, 岡久和正, 榊原紀彦, 笠井裕二, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, Pedicle screw and rod system 固定における圧縮荷重の有無による上下隣接椎間への生体力学的影響, 第 41 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2014 年 11 月 21, 22 日) 奈良県新公会堂 (奈良県・奈良市).
- (5) T. Inaba, T. Yoshikawa, T. Kato, T. Sakakibara, Y. Kasai, Experimental Research on Effect of Spinal Fusion Surgery on Adjacent Segments, The Fourth Japan-Switzerland Workshop on Biomechanics (September 1-4, 2014) 志摩観光ホテル (三重県・志摩市).

- (6) 笠井裕一, 榊原紀彦, 加藤貴也, 吉川高正, 稲葉忠司, 三重大学での医工連携の成果, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2013 年 11 月 22, 23 日) 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市).
- (7) 稲葉忠司, 加藤貴也, 吉川高正, 榊原紀彦, 笠井裕一, 隣接椎間障害発生メカニズムの力学的検討, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2013 年 11 月 22, 23 日) 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市).
- (8) 岡久和正, 榊原紀彦, 笠井裕一, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, ヒト・シカ・イノシシ屍体腰椎における生体力学的な相違, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2013 年 11 月 22, 23 日) 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市).
- (9) 福田好秀, 土井優太, 榊原紀彦, 笠井裕一, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, Unilateral Pedicle Screw and Spinous System (UPSS) に Cross Link system を併用した際の生体力学的研究, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2013 年 11 月 22, 23 日) 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市).
- (10) 石倉 亘, 山田正博, 榊原紀彦, 笠井裕一, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, Expandable pedicle screw の生体力学的固定性に関する実験的研究, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2013 年 11 月 22, 23 日) 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市).
- (11) 渡部貴大, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司, 榊原紀彦, 笠井裕一, 瞬間回転軸の観点からみた脊椎変形挙動, 日本機械学会第 24 回バイオフィロントニア講演会 (2013 年 11 月 1, 2 日) 同志社大学室町キャンパス寒梅館 (京都府・京都市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲葉 忠司 (INABA TADASHI)  
三重大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70273349

### (2) 連携研究者

笠井 裕一 (KASAI YUICHI)  
三重大学・大学院医学系研究科・教授  
研究者番号: 20242943