

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04073

研究課題名（和文）脊椎強度測定用6軸材料試験機を活用した棘突起接触症の力学的特性解明

研究課題名（英文）Investigation of mechanical properties in kissing spine by using 6-axis material testing machine

研究代表者

稲葉 忠司（Inaba, Tadashi）

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：70273349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、脊椎疾患の一つである棘突起接触症に着目し、棘突起の肥大化を伴う脊椎の変形挙動を力学的観点より実験的に解析することにより、本疾患が脊椎運動へ及ぼす影響について明らかとすることを試みた。シカ屍体腰椎を対象とした屈曲・伸展方向の曲げ試験結果から、棘突起接触症では伸展方向においてのみ脊椎の剛性が高くなることが分かった。また、この剛性の増加により、棘突起接触症を伴う脊椎では、正常状態と同程度の伸展運動を行った際に、正常時よりも大きなトルクが負荷され、隣接椎間における椎間板変性やすべりなどの障害が生じやすくなると推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脊椎は複雑な構造を有しており、その運動は6自由度である。しかし、脊椎を対象とした、6自由度すべての方向の力/トルクおよび変位/角変位の計測・制御が可能な試験機は構築されていなかった。したがって、種々の脊椎疾患が脊椎運動に及ぼす影響についても十分に検討されていなかった。その結果、各疾患に対する治療、例えばいかなる脊椎固定術を施すのかについて、その選択は医師の主観や経験が支配的となっている。このような現状に対し、本研究の成果は、客観的・定量的な脊椎疾患治療を提供するための一助となるとともに、最適な治療方針の選択は過剰な治療の減少に繋がることから、医療費の削減にも貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Kissing spine is a condition in which adjacent spinous processes are in contact with each other and is considered a spinal disease that causes low back pain. The purpose of this study was to investigate the effect of kissing spine on spinal deformation by using the 6-axis material testing machine. In this study, we investigated the biomechanical effect of kissing spine on spinal deformation behavior by applying a pure torque to deer multi-segment lumbar spines in flexion and extension directions. The results revealed that in the kissing spine model, the range of motion (ROM) was smaller only in extension, i.e., the stiffness of the spine was greater than in the normal model. Furthermore, it was found that in the kissing spine model, a large torque was applied to the spine in order to compensate for the ROM between responsible vertebrae lost due to contact of the spinous processes, and the ROM in adjacent segments was increased.

研究分野：材料力学・生体力学

キーワード：脊椎運動 力学的特性 6軸材料試験機 棘突起接触症 実験的手法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 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、本科学研究費申請期間においては、脊椎疾患の一つである棘突起接触症に着目し、棘突起の肥大化を伴う脊椎の力学的特性を明らかにすることに焦点を絞って研究を実施する。

### 2. 研究の目的

脊椎は様々な安定要素から成り立っており、その一つに棘突起がある。棘突起は、椎骨の一部で脊椎の後方に位置しており、脊髄の保護や靭帯および筋肉の付着部といった役割を担っている。棘突起は加齢とともに肥大化することが報告されており、この肥大化が進行すると棘突起同士が接触する。この状態を棘突起接触症 (kissing spine) という。棘突起接触症は高齢者になるほど発生率が高く、棘突起近傍における骨折やそれに伴う痛みを生じることがある。さらに、腰部脊椎症や椎間板変性など他の痛みを伴う脊椎疾患の併発や隣接椎間障害の発生要因となることも危惧される。したがって、棘突起接触症を伴う脊椎の変形挙動を力学的観点より解析し、棘突起の肥大化が脊椎へ及ぼす影響を理解することは極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、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ことにより、棘突起の肥大化を伴う脊椎の力学的特性を明らかにすることを目的とした。具体的には、動物屍体腰椎を用いて作製した試験体に対し、屈曲・伸展方向の曲げ試験を実施することにより、棘突起接触症を伴う脊椎の剛性について検討した。また、この剛性の変化が、隣接椎間にどのような影響を与えるのかについて検討した。

### 3. 研究の方法

試験体には、獣害対策として狩猟され、食肉に供された3椎間のシカ屍体脊椎 (L3-L6) を用いた。-30℃にて冷凍保存されたシカ屍体腰椎を自然解凍し、軟部組織である筋肉や脂肪などを除去した後、その両端を硬化性樹脂である歯科用レジンにて治具に固定した。試験体モデルとして、損傷を全く加えない正常モデル (Intact)、正常モデルに対してL4/L5の棘上靭帯・棘間靭帯を切除した靭帯切除モデル (Damage)、靭帯切除モデルに対して棘突起に歯科用レジンを取り付けることにより、棘突起接触症を模擬した Kissing Spine モデル (Kissing Spine) の計3モデルを段階的に作製した。ここで、Kissing Spine モデルは、棘突起接触症患者のCT画像を参考にして棘突起同士が一点で接触するように歯科用レジンを取り付けた (図1)。

試験機には、我々が脊椎の力学的解析用に独自に開発した脊椎強度測定用6軸材料試験機を使用した (図2)。この試験機には2本1組の直動型アクチュエータが120動間隔で平行に配置された直動型パラレルメカニズムが採用されている。本試験機では計6本の直動型アクチュエータがそれぞれ独立に制御されており、試験機の有する3次元直交座標 ( $x, y, z$  軸) の各軸方向の位置座標、または各軸回りの角度の計測・制御を可能としている。また手先部に6軸荷重・モーメントセンサを備えており、3次元直交座標の各軸方向の力、または各軸回りのトルクを検出することができ、検出した値を制御系にフィードバックすることによって力およびトルクによる制御が可能である。これらのことから本試験機は空間中で任意の自由度運動を生成することが可能である。

各椎体の変形挙動の計測には、以下に示す動画計測システムを用いた。L3-L6の各椎体に2カ所ずつ合計8カ所にマーキングを施した後、試験体の変形挙動をデジタルハイビジョンカメラ (HDR-XR350V, SONY製) で撮影した。得られた動画上の各マーカーを動画解析ソフト (Move-tr/3D, ライブラリ製) により2次元平面上で自動追跡して2直線間の角度を算出することで各椎間の変形挙動を連続的に計測した。

この試験機に試験体を取り付け、各モデルに対して一平面内での純粋な曲げを表す3自由度の条件下にて屈曲・伸展方向への曲げ試験を行った。試験内容としては、まず正常モデルに対して2Nmのトルクを負荷し、発生した最大曲げ角を測定した。続いて靭帯切除モデルおよびKissing Spineモデルに対して、2Nmのトルクを負荷した試験 (以下、トルク規定試験) と正常モデルにおける最大曲げ角までの角変位を与えた試験 (以下、角変位規定試験) の2種類の条件下で試験を実施した。このとき、クロスヘッドの角速度は0.1 deg./sとし、各軸に発生する力/トルクはサンプリング周期1Hzにてコンピュータに記録した。

多椎間脊椎の各椎間における変形挙動の評価を行うため、実験より得られたトルク・角変位曲線と動画解析により得られた各椎間の変形挙動より、椎間可動域 (range of motion, ROM) および最大トルクを評価した。この際、正常モデルにおけるROMを基準として、各モデルにおけるROMの変化率を算出し、正常モデルに対してROMが増加した場合は正で、減少した場合は負の値で示した。

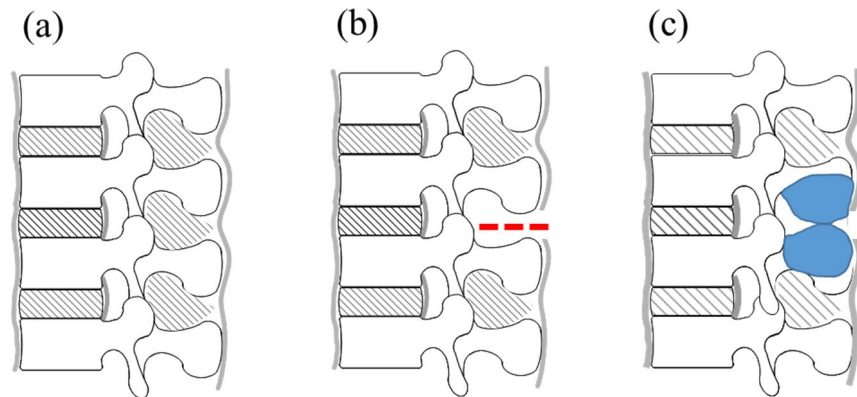


図1 試験体モデルの模式図。(a) Intact モデル, (b) Damage モデル: L4/L5 の棘上靭帯・棘間靭帯を切除, (c) Kissing Spine モデル: Damage モデルに対して棘突起に歯科用レジンを取り付けることにより棘突起接触症を模擬した。

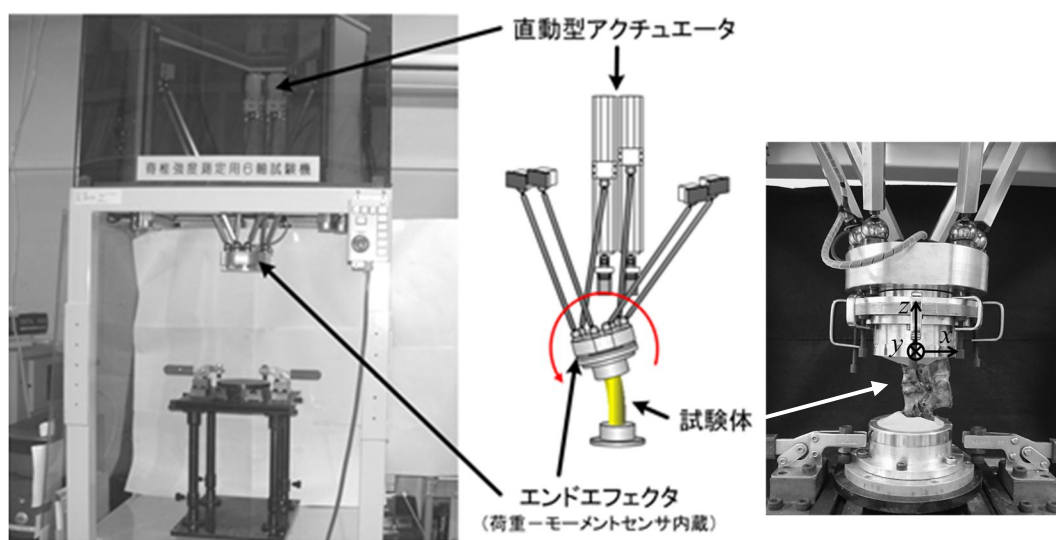


図2 脊椎強度測定用6軸材料試験機。

#### 4. 研究成果

##### (1) 結果および考察

図3(a)に屈曲方向, および(b)に伸展方向の2 Nm 負荷時に得られた各椎間のROMを示す。また, 図4(a)に屈曲方向, および(b)に伸展方向のトルク規定試験より得られた靭帯切除モデルおよびKissing SpineモデルのROM変化率を示す。これらの図から分かるように, 責任椎間であるL4/L5椎間では, 伸展時においてROMが著しく減少し, 正常モデルに対する減少率は91%であった。ROMの減少は, 脊椎の剛性の増加を意味する。この理由として, 棘突起の剛性は椎間板や靭帯に比べて極めて高いため, 伸展時において棘突起同士が接触した際にFSU後方の剛性が高くなるためと考えられた。

図5(a)に屈曲方向, および(b)に伸展方向の角変位規定試験より得られた靭帯切除モデルおよびKissing SpineモデルのROM変化率を示す。同図に示すように, Kissing Spineモデルでは, 伸展方向において, 責任椎間であるL4/L5における約93%のROM減少とともに, 上位隣接椎間であるL3/L4および下位隣接椎間であるL5/L6において, それぞれ約42%および30%のROM増加が認められた。図6に, 角変位規定試験において, 正常, 靭帯切除およびKissing Spineの各モデルに負荷された最大トルクを示す。同図に示すように, 伸展時におけるKissing Spineモデルの最大トルクは3.7 Nmと正常モデルに比べ約1.9倍の値であった。角変位規定試験では, いずれ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。このとき, Kissing Spineモデルでは, 伸展時において棘突起同士の接触により椎体の剛性が増加する。それゆえ, 正常モデルと同様の角変位を与えるためには, 正常時に比べ大きなトルクが必要となる。このトルクは, 責任椎間だけでなく, すべての椎間に一様に負荷される。その結果, 隣接椎間のROMが増加したと考えられた。

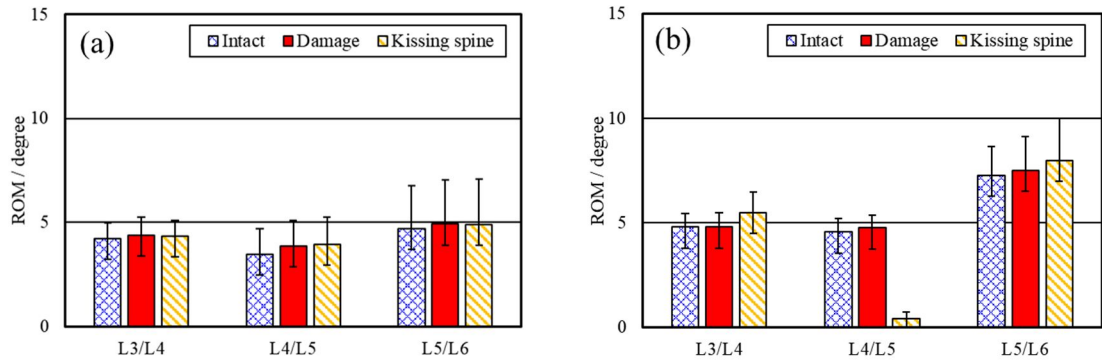


図3 2 Nm 負荷時の各椎間における ROM . ( a ) は屈曲方向 , ( b ) は伸展方向を示す .

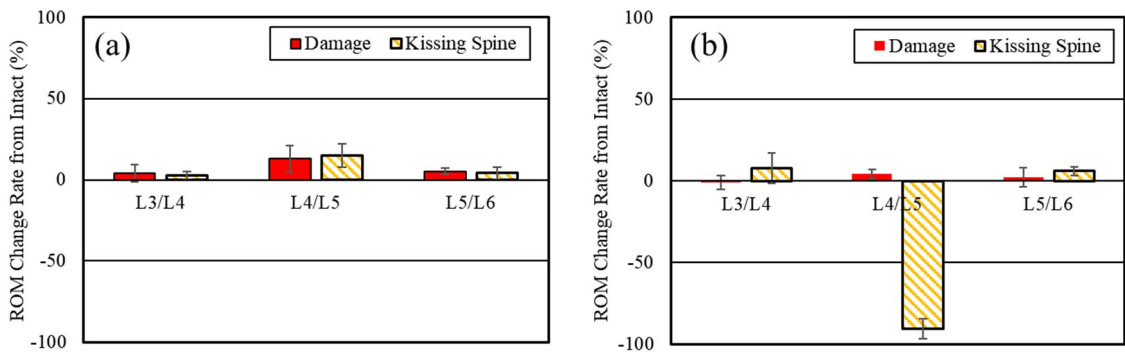


図4 トルク規定試験における Intact モデルからの各椎間 ROM 変化率 . ( a ) は屈曲方向 , ( b ) は伸展方向を示す .

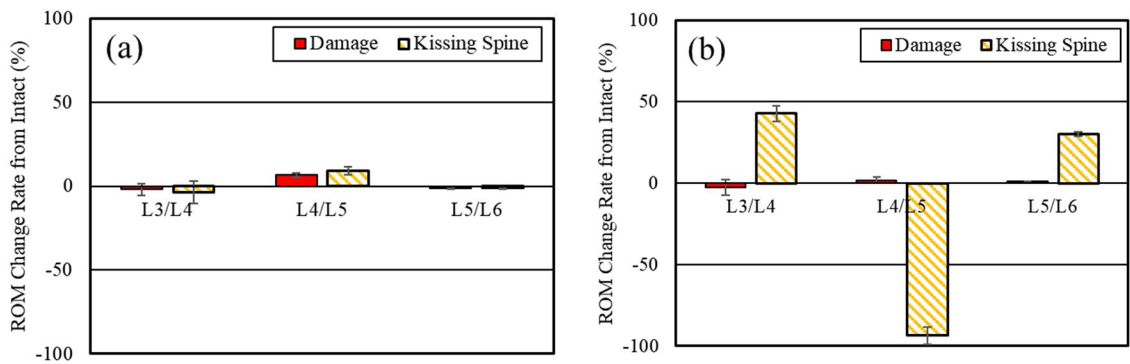


図5 角変位規定試験における Intact モデルからの各椎間 ROM 変化率 . ( a ) は屈曲方向 , ( b ) は伸展方向を示す .

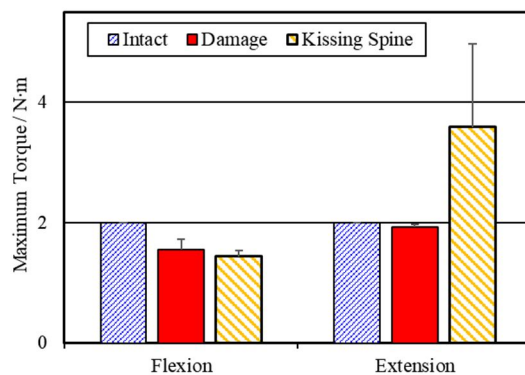


図6 角変位規定試験における最大トルク .

## (2) まとめ

本研究では、棘突起の肥大化を伴う脊椎の力学的特性を明らかに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した。具体的には、シカ屍体腰椎を用いて作製した試験体に対し、屈曲・伸展方向の曲げ試験を実施することにより、棘突起接触症を伴う脊椎の剛性について検討した。また、この剛性の変化が、隣接椎間にどのような影響を与えるのかについて検討した。その結果、棘突起接触症を伴う脊椎では、正常状態と同程度の伸展運動を行った際に、正常時よりも大きなトルクが負荷され、隣接椎間における椎間板変性やすべりなどの障害が生じやすくなると推察された。

## (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、上述の棘突起接触症を伴う脊椎の力学的特性評価に関する研究テーマに加え、「脊椎固定具の剛性の違いが脊椎の変形挙動に及ぼす影響」、「脊椎固定術が上下隣接椎間の変形挙動に及ぼす影響」、「線維輪の変形特性を考慮した脊椎の有限要素解析」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、以下の「5. 主な発表論文等」に示す雑誌論文等にて発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 松岡勇貴矢, 水野哲太郎, 吉川高正, 馬場創太郎, 加藤貴也, 正岡卓也, 藤原基芳, 稲葉忠司	4. 巻 41巻
2. 論文標題 脊椎固定具ロッド部の剛性の違いが脊椎の変形挙動に及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 pp.13-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 馬場創太郎, 水野哲太郎, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司	4. 巻 41巻
2. 論文標題 椎間板内圧の直接計測に基づいた前屈運動時の椎間板内圧に及ぼす脊椎固定具剛性の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 pp.19-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 青木一真, 水野哲太郎, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司	4. 巻 40巻
2. 論文標題 Kissing spineの変形挙動解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 pp.19-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 馬場創太郎, 水野哲太郎, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司	4. 巻 43巻
2. 論文標題 Kissing Spineが隣接椎間に及ぼす生体力学的影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 濱口航大, 池田智道, 馬場創太郎, 水野哲太郎, 吉川高正, 藤原基芳, 加藤貴也, 稲葉忠司	4. 巻 43巻
2. 論文標題 線維輪の変形特性を考慮した脊椎の有限要素解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 富永 怜, 馬場創太郎, 加藤貴也, 吉川高正, 藤原基芳, 水野哲太郎, 稲葉忠司	4. 巻 43巻
2. 論文標題 シリアルメカニズムを有した6軸力学試験機を用いた上下隣接椎間の変形挙動に関する実験的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 池田智道, 加藤貴也, 藤原基芳, 馬場創太郎, 水野哲太郎, 笠井裕一, 吉川高正, 稲葉忠司
2. 発表標題 線維輪の変形特性を考慮した椎間板の解析モデルの構築
3. 学会等名 第47回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川燦斗, 加藤貴也, 藤原基芳, 馬場創太郎, 水野哲太郎, 吉川高正, 笠井裕一, 稲葉忠司
2. 発表標題 脊椎固定術を施した腰椎と脊椎固定具の力学的評価
3. 学会等名 第47回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬場創太郎, 青木一真, 水野哲太郎, 吉川高正, 加藤貴也, 稲葉忠司
2. 発表標題 実験的研究に基づくKissing Spineが隣接椎間の変形挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 第47回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 純也, 稲葉忠司, 吉川高正, 馬場創太郎, 加藤貴也, 水野哲太郎, 笠井裕一, 藤原基芳
2. 発表標題 脊椎固定具が上下隣接椎間に及ぼす生体力学的影響
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第70期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲葉忠司, 青木一真, 笠井裕一, 水野哲太郎
2. 発表標題 6軸材料試験機を活用した脊椎運動の力学的評価
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡勇貴矢, 稲葉忠司, 吉川高正, 馬場創太郎, 加藤貴也, 笠井裕一, 水野哲太郎, 川原田純次, 正岡卓也, 藤原基芳
2. 発表標題 脊椎の変形挙動に及ぼす脊椎固定具ロッド部の剛性の影響
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 馬場創太郎, 浦口雅隆, 笠井裕一, 水野哲太郎, 加藤貴也, 吉川高正, 稲葉忠司
2. 発表標題 椎間板内圧の直接計測に基づいた椎体間固定具の剛性が曲げ運動時の椎間板負荷へ及ぼす影響
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲葉忠司, 石川燦斗, 馬場創太郎, 吉川高正, 加藤貴也, 水野哲太郎, Paholpak Permsak, 笠井裕一
2. 発表標題 日本 - タイ連携による脊椎固定術の生体力学的評価
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富永 怜, 馬場創太郎, 加藤貴也, 吉川高正, 藤原基芳, 水野哲太郎, 稲葉忠司
2. 発表標題 シリアルメカニズムを有した6軸材料試験機を用いた多椎間脊椎の変形挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱口航大, 池田智道, 加藤貴也, 藤原基芳, 馬場創太郎, 水野哲太郎, 吉川高正, 稲葉忠司
2. 発表標題 有限要素解析を用いた片側Pedicle Screw固定におけるrodに加わる負荷状態の検証
3. 学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------