

氏名・(本籍)	飯田 純平 (神奈川県)
専攻分野の名称	博士(医学)
学位記番号	医博甲第 1018 号
学位授与の日付	令和 2 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	医学系研究科医学専攻
学位論文題名	Calculation of intervertebral disc pressure in the thoracic and lumbar spine in elderly women with kyphosis using a novel musculoskeletal model with isolated thoracic vertebrae and rib cage (胸椎と胸郭を分割した新たな筋骨格モデルを用いた、脊柱後弯高齢女性における胸腰椎の椎間板圧の算出)
論文審査委員	(主査) 橋本 学 教授 (副査) 河谷 正仁 教授 中永 士師明 教授

学 位 論 文 内 容 要 旨

Calculation of intervertebral disc pressure in the thoracic and lumbar spine in elderly women with kyphosis using a novel musculoskeletal model with isolated thoracic vertebrae and rib cage

(胸椎と胸郭を分割した新たな筋骨格モデルを用いた、脊柱後弯高齢女性における胸腰椎の椎間板圧の算出)

申請者氏名 飯田 純平

研 究 目 的

脊柱後弯変形は加齢とともに進行し、バランス低下・易転倒性・腰背部痛の原因となり生活の質を低下させる。脊柱後弯変形の進行には、椎体骨折や椎間板変性、体幹筋力の低下が寄与するとされるが、詳細な機序は未だ明らかにされていない。

これまでの脊椎の生体力学的研究は、健常者の椎間板内に圧センサーを挿入する研究、屍体標本の機能的脊柱単位(2椎体・1椎間板)を用いた力学実験、有限要素モデルや筋刺激モデルを用いた応力解析が広く行われてきたが、侵襲性や再現性、正確性などの点で課題が残されていた。さらに胸郭も含む脊柱全体の構造は複雑であり、脊柱変形患者の精密な動態に関する研究は極めて少ない。本研究の目的は、胸椎・胸郭を分割し、筋走行をより生理的に表現することで、生体内の環境をより正確に評価できる3次元筋骨格モデルを構築し、脊柱後弯変形に伴う椎間板内圧の変化を算出することで、成人脊柱変形の病態を非侵襲的に究明することである。

研 究 方 法

・モデル構築：モデル解析ソフトである Anybody Modeling System の汎用モデルを使用した。汎用モデルでは、胸郭がひとつの剛体で定義され、筋走行は点と点を結ぶ Via-Point 法で表現されている。本研究では、胸郭を 12 個の胸椎・10 対の肋骨・胸骨に分割し、多方向に可動できる関節を定義した。また、健常者の核磁気共鳴画像をもとに、328 本の筋の起始・停止を生体内により近く定義した。さらに筋を楕円体に沿わせることで、位置ベクトルを変化させて、骨格表面や軟部組織の表面を生理的に走行する、Wrapping 法を取り入れた。この新たに構築したモデルに立位姿勢をとらせ、逆動力学解析により椎間板内圧を計測し、文献値との相関係数と比較してモデルの精度を検証した。

・脊柱変形解析：対象は、骨粗鬆症を有する高齢女性 10 名(80.0±6.5 歳)である。立位側面単純レントゲンで第 7 頸椎から第 1 仙椎までの脊柱アライメントを計測し、新たに構築したモデルに入力した。逆動力学解析で椎間板圧縮力を算出し、これに変換式を用いて、椎間板内圧を算出した。各椎間での椎間板内圧と脊柱矢状面

アライメント(第 7 頸椎前方偏移, 胸椎後弯, 腰椎前弯)の相関係数を求めた。また、脊柱後弯変形の評価として重要とされる第 7 頸椎前方偏移を基準に正常群・後弯群にわけ、椎間板内圧と患者背景を比較した。

研 究 成 績

・モデル構築：in vivo で計測された椎間板内圧と、モデルで算出した椎間板内圧の相関係数は胸椎で 0.9104, 腰椎で 0.8095 (p<0.05), 二乗平均誤差は胸椎で 0.1551, 腰椎で 0.2307 と精度の高いモデルであった。

・脊柱変形解析：T1-2, T2-3, T3-4, T4-5, T5-6, T6-7 の椎間板内圧は第 7 頸椎前方偏移と正の相関を示し, T3-4, T4-5, T5-6 の椎間板内圧は腰椎前弯と負の相関を示した。第 7 頸椎前方偏移で分けた正常群・後弯群の 2 群間では, T1-2, T2-3, T3-4, T4-5, T5-6 (上位胸椎)において, 後弯群で有意に大きな椎間板内圧を認めた。また, 脊柱後弯群はより高齢で, より低身長であった。

結 論

胸椎・胸郭を分割し、筋走行をより生理的に再現し、全脊柱をより忠実に再現した 3 次元筋骨格モデルを構築した。in vivo での計測値との比較によるモデル検証では、生体値と近似した。このモデルによる高齢者の生体内力の算出により、脊柱後弯群で、上位胸椎に有意に高い椎間板内圧を示した。椎間板内圧は上位胸椎で、第 7 頸椎前方偏移と正の相関を、腰椎前弯と負の相関を示した。

従来の脊椎バイオメカニクス研究では、非侵襲的で、生体内環境を十分に反映したモデル解析や、再現性のある脊椎動態の再現は極めて困難であったが、本研究で新たに開発したモデルでは、被験者ごとの脊柱アライメントを適用させた生体内力を、非侵襲的に解析することができる。今後は、体幹モデルと下肢モデルと結合し骨盤・下肢アライメントを含めた解析により、総合的な成人脊柱変形治療への臨床応用を目指したい。

学位（博士一甲）論文審査結果の要旨

主 査： 橋本 学

申請者： 飯田 純平

論文題名：**Calculation of intervertebral disc pressure in the thoracic and lumbar spine in elderly women with kyphosis using a novel musculoskeletal model with isolated thoracic vertebrae and rib cage**

(胸椎と胸郭を分割した新たな筋骨格モデルを用いた、脊柱後弯高齢女性における胸腰椎の椎間板圧の算出)

要旨

著者の研究は論文内容要旨に示すように、胸椎・胸郭を分割、筋走行をより生理的に表現することで、生体内の環境をより正確に評価できる3次元筋骨格モデルを構築し、実際に患者の脊柱アライメントデータを入力することで脊柱後弯変形に伴う生体内力変化を算出することで、成人脊柱変形の病態を非侵襲的に究明したものである。

これまでの脊椎の生体力学的研究は、健常者の椎間板内に圧センサーを挿入する研究や、屍体標本の機能的脊柱単位（2椎体・1椎間板）を用いた力学実験、有限要素モデルや筋刺激モデルを用いた応力解析が広く行われてきたが、侵襲性や再現性、正確性などの点で課題が残されていた。さらに胸郭も含む脊柱全体の構造は複雑であり、脊柱変形患者の精密な動態に関する研究は極めて少ない。著者らは、新たに構築した精密な3次元筋骨格モデルについて報告し、そのモデルを用いた解析で、脊柱後弯変形に伴う生体内力変化について検討した。

本研究の斬新さ、重要性、実験方法の正確性、表現の明瞭さは以下のとおりである。

1) 斬新さ

胸腰椎が分割され、正確な筋走行を再現した3次元筋骨格モデルは過去の報告が少ない。また患者個々の脊柱アライメントに応じた逆動力学解析も極めて少ない。本研究は、生理的筋走行を再現し、胸郭を分割、厳密な検証を行ったモデルを用いて、低侵襲かつ正確に生体内力を算出している。また、実際の患者の立位側面レントゲン像を用いた解析を行うことで、

患者各々における生体内力を評価している点も斬新な点に挙げられる。

2) 重要性

脊柱後弯変形の進行は、身体的・精神的な生活の質を低下させるため、その病態生理の解明が期待されている。また、その治療においても胸腰椎を含んだ後方固定術が選択されるため、その生体内力を解析することが重要である。本研究では、脊柱後弯変形の病態生理を示していることや、患者各々の脊柱アライメントにおける生体内力を正確に算出できることを示し、患者の状態に応じた臨床応用も期待できる。

3) 実験方法の正確性

先行研究において、新たに構築した3次元筋骨格モデルでの算出値と、過去に報告された生体内での計測値を対比させ、相関係数・二乗平均誤差を算出することで、モデルの正確性の適切な検証が行われた。また、各評価項目の測定を同一検者で行い、測定に関する検者間のバイアスを除去している。本研究ではこれらの検証されたモデルを用いて計算された値が用いられているため、より生体内の実測値に近似した値が算出されたことが裏付けられている。さらに、全ての結果は統計学的検討が加えられており、実験方法は客観的で正確性がある。

4) 表現の明瞭さ

本研究の持つ意味、解析に用いた新たな3次元筋骨格モデルについての概要、各種計測方法、評価項目、得られた結果、考察は簡潔かつ明瞭に記載されている。

以上述べたように、本論文は学位を授与するに十分値する研究と判定する。