

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Investigation into the developing mechanism of idiopathic scoliosis by means of computational mechanics (計算力学的アプローチによる特発性側弯症進行メカニズムの解明)

氏 名 Han SUN (孫 涵)

論 文 内 容 の 要 旨

特発性側弯症は、椎体やそれを取り巻く筋や靭帯に際立った異常が見出されない状況で、回旋を伴う側方への彎曲を伴う脊柱の変形に関する異常として知られている。ほとんどの場合、急峻な発育を示す思春期に発症することから、成長が病因に何らかの関与をしていることは広く認められている。本論文の目的は、計算力学の手法によって特発性側弯症の病因と進行のメカニズムを解明することである。

本論文は7章から構成されている。第1章は、脊柱側弯症に関連する基礎的な文献をレビューしている。その中に、特発性側弯症の特徴、症例の分類、発症による弊害および治療法に関する知見がまとめられている。特発性側弯症の病因に関して、これまで様々な仮説と物理モデルが提案されてきた。本研究では、力学的な観点から、それらを次のような2つに大別した。(1) 椎体の成長そのものが左右非対称である。(2) 椎体の成長に伴う成長変形によってもたらされる座屈現象が側弯症の変形を引き起こす(座屈説)。座屈説に対して、我々は文献をレビューし、Dicksonらが特発性側弯症の標本を観察した結果に基づいて、胸部脊柱が平面化していることを指摘していたことに注目する。彼らは、回旋変形に対する不安定性の切っ掛けが正中面内の不均衡、すなわち、脊柱の平面化あるいは彎曲の頂点における正常な胸椎後弯の減少にあることを指摘し、その不安定性は座屈現象であると言明した。

第2章では、座屈説を検証するために、我々は椎体の成長に伴う成長変形がもたらす座屈現象を解析するための理論を示し、脊柱を簡略化した3つの板モデルを使ってその座屈現象を解析した。我々は、成長変形に伴う線形座屈現象を有限要素法によって解析し、座屈現象が発生することを確認した。さらに、本研究では、3つの板モデルの代表的な幾何学的パラメータをいくつか選び、それらを違えた有限要素モデルを用いて、座屈現象が発生するときとしないときの幾何学的パラメータ

の範囲を特定した。3つのモデルに対して解析された座屈現象が発生するときの幾何学的なパラメータの範囲を比較することより、我々は以下の結論を得た。(1) モデルの前面から奥行がおよそ10 mmの部分で成長させたときに、座屈現象が一番発生しやすい。(2) 生理的彎曲をもつモデルではまっすぐなモデルより座屈現象が発生しやすい。(3) 脊柱後部の穴構造をもつモデルは座屈現象が発生する範囲を拡大させた。これらの結果は、特発性側彎症の発生要因として座屈説が有効であることを支持する内容になっている。

第2章の結果は、しかしながら、変形を解析するときに用いられた理論では、変形が無限に小さいことが仮定されていた。そこで、座屈現象が発生した後、有限の変形が発生したときの安定性を評価するためには、それらの解析結果は使えない。そこで、第3章では、我々は、椎体の成長に伴う座屈現象が発生した後の有限の大きさの変形を求めるために、幾何学的非線形性を考慮した大変形を求めるための理論を示し、板モデルを用いて座屈現象が発生した後の変形をシミュレーションした。その際、第2章で得られた線形座屈モードが初期不整として加えられた3つの板モデルが使われた。また、本研究では、不安定な非線形座屈現象が発生した後の変形を解くために、弧長増分法が使われた。その結果、ほとんどの板モデルで座屈現象が発生した後の変形を求めることができた。それらの変形のうち、3次モードを初期不整にもつ一つの板モデルでは座屈現象が発生した後の変形が不安定になることが確認されたが、それ以外の板モデルでは、いずれも座屈現象が発生した後の変形は安定に存在することが確認された。

第4章では、第2章の結果に基づいて、簡単な板モデルの代わりに胸郭なし脊柱有限要素モデルを使って、第2章と同様の線形座屈解析が行われた。脊柱有限要素モデルは、69658の節点と59356の要素で構成された。境界条件として、仙骨のみの固定が仮定された。その結果、臨床でみられるような側彎症患者に似た変形が4次の座屈モードとして得られた。椎体において成長する領域を前方面からの奥行をパラメータにして違えた場合の解析結果を比較した結果から、前方面から奥行10mmまでの領域が成長したときに最も4次の座屈が発生しやすいことが明らかにされた。この結果は第2章で示された板モデルの結果と一致する。

第5章は、脊柱有限要素モデルを用いて、椎体の成長に伴う座屈現象発生後の変形を弧長増分法によって調べる。第4章で脊柱有限要素モデルを用いて得られた4次の線形座屈モードを初期不整にもつ脊柱有限要素モデルが使われた。しかしながら、座屈現象発生後の変形を調べた結果、臨床でみられるような側彎症患者に似た変形モードは得られなかった。そこで、脊柱モデルの横幅を1/2にして、さらに、姿勢を制御する筋の作用を考慮して、第7頸椎の前方境界における中央の節点を水平面内で固定した境界条件を付加して、座屈現象が発生した後の変形が解析された。その結果、非線形座屈現象の存在が確認された。しかしながら、それらの変形

は特発性側彎症の進行した患者にみられるような変形までには至らず、進行の病因を説明するにはあまりにもわずかであった。これらの結果より、座屈説は特発性側彎症が発症する切っ掛けを説明することはできるが、側彎症の症状が進行するメカニズムを説明することはできないとの結論に至った。

第6章では、特発性側彎症の進行のメカニズムを調べるために、骨のリモデリングによる影響が解析された。骨のリモデリングは力学的および生理的環境の変化に応じて骨が吸収したり形成したりする現象である。本研究では、第5章で得られた非線形座屈現象が発生した後の変形解析によって得られたひずみ分布に比例した骨体積の増加によって骨形成をシミュレーションする。また、そのひずみ分布に比例した骨体積の減少によって骨吸収をシミュレーションする。これらのシミュレーションの結果から、骨形成は側彎変形を矯正し、骨吸収は側彎変形を悪化させることが確認された。これらの結果は、座屈現象が発生した後のひずみに対する骨吸収が特発性側彎症の彎曲を進行させるメカニズムである可能性を示唆するものとなる。

第7章では、本研究の成果を総括し、今後の課題、展望について言及する。第2章と第4章の研究から、線形座屈モードは側彎症と類似の曲線になっていることから、座屈説は特発性側彎症の発症の病因としては有効である。しかしながら、第3章と第4章の結果から、非線形座屈現象が発生した後の変形解析からは側彎症が進行した後の大きく彎曲した曲線までは得られなかったことから、座屈説によって特発性側彎症が進行する病因を説明することは困難であると考察された。一方、第6章における骨のリモデリングの研究は、非線形座屈現象が発生した後のひずみ分布を用いて、ひずみの大きさに比例した骨吸収は側彎症の曲線を進行させることを明らかにした。したがって、本研究で得られたこれらの結果に基づいて、椎体の成長に伴う座屈現象は特発性側彎症の発症の病因になり得ること、および座屈現象が発生した後のひずみに比例した骨吸収は特発性側彎症を進行させるメカニズムになり得ることが明らかにされた。