学位論文題名

A cineradiographic study on the lumbar disc deformation during flexion and extension of the trunk.

(X線シネ撮影による体幹前後屈時の腰椎椎間板変形挙動に関する研究)

学位論文内容の要旨

腰椎は、体幹からの大きな荷重を支え、かつ大きな可動性を有するため、椎間板変性の好発部位であり、正常腰椎の *in vivo* における動態の把握は、椎間板変性の発生要因、病態を考察する上で非常に重要である。腰椎動態に関する *in vivo* での研究は、X線学的研究を中心にさまざまな観点から研究がすすめられてきたが、そのほとんどが静止位置での動態測定にとどまっており、運動中の腰椎を連続的に測定し解析した研究はこれまで報告されていない。本研究の目的は、椎間板の変形挙動に視点をおき、体幹の前屈・後屈運動にともなう腰椎の動態を連続的に測定し、これをもとに *in vivo* における各腰椎椎間板の変形挙動とその相互関係を明らかにすることである。

本研究では、腰椎疾患の既往のない健常男性8人を対象とした。各被検者に立位中間位を起点として前屈および後屈運動をそれぞれ約6秒間で行ってもらい、その間、第3腰椎から仙椎部の椎間運動を、側面X線シネ撮影(25コマ/秒)を用いて記録した。撮影された画像をから椎間板の変形を評価するため、椎間板の矢状面形状を椎間腔の4端点で近似し、さらに各椎間板(L3/4、L4/5およびL5/S1椎間板)ごとに局部座標系を決定した。すなわち、測定の対象とする椎間板の後下端点を原点O、下位椎体上縁をX軸とし、これと垂直上方にY軸を決定した。さらに、椎間板の前下端点を点A、前上端点および後上端点をそれぞれ点B、点Cとし、椎間板の変形量測定のための指標とした。立位中間位を基準とし、各変形段階における椎間板の4端点O、A、B、Cの座標をデジタイザーを用いて測定した。測定した4端点のうち、点Oと点Aは座標軸上の不動点となるため、椎間板の変形量は前上端点Bと後上端点Cの変位量から評価した。さらに、これらの測定データをもとに、体幹の前屈運動時に生じる椎間板内のひずみ状態の変化を調べるため、椎間板とそれを挟む椎体終板からなる三次元有限要素モデルを作成し、コンピュータ・シミュレーションにより解析した。有限要素法とは、材料(この場合、椎間板とそれを挟む椎体終板)を細かく分割し、個々の小部分について比較的単純な応力とひずみの関係を計算により求め、これをもとに材料全体の複雑な応力とひずみの関係を解析する力学的手法である。モデルの初期形状に関しては、横断面形状は屍体腰椎標本から得られた形状データを用い、矢状面形状は各椎間板ごとに立位中間位での *in vivo* 形状測定データを用いて決定した。これにより、作成されたモデルは各椎間板固有の矢状面形状を取り入れたことになる。材料特性については、髓

核は非圧縮性の弾性体とし、椎体終板の物性値は皮質骨と同等とみなし、また、線維輪の材料特性の異方性は、各方向に対する物性値を変えることによりモデルに組み込んだ。

解析の結果、後屈運動における椎間板の変形量は、L3/4、L4/5椎間板では小さく、とくに、L4/5椎間板ではほとんど変形が生じなかった。これに対し、前屈運動では、L4/5椎間板の変形量が最も大きく、L5/S1椎間板で最も小さかった。とくに、L5/S1椎間板の後上端点CのX軸方向（前後方向）への変位量は最も小さかった。さらに、前屈運動時、各椎間板の変形量の時間的変化は一定のパターンを示した。すなわち、椎間板は体幹の前屈開始からある時間差をおいて急激に変形し始め、前屈終了前にはほぼ一定の変形状態となった。また、各椎間板の変形開始点には時間差（位相差）が認められ、L4/5椎間板はL3/4椎間板に平均0.8秒遅れ、L5/S1椎間板はL4/5椎間板に平均0.9秒遅れて変形を開始した。さらに、有限要素法による椎間板内のひずみ解析から、各椎間板には、前屈運動中、常に前方線維輪に最大の圧縮ひずみ、後方線維輪に最大の引張ひずみ、髄核の椎体終板との界面に最大の剪断ひずみが生じていた。また、下位椎間板の変形開始時、その隣接上位椎間板は、最大前屈時の50%以上のひずみ状態が生じていた。

体幹の前屈・後屈運動は、腰椎と股関節の屈曲・伸展により行われ、腰椎と股関節の各運動間には位相差があると報告されている。すなわち、体幹の前屈運動においては、腰椎部が屈曲したのちに股関節が屈曲し始め、後屈運動では反対に股関節、腰椎の順に伸展するとされている。これに対し、これまで腰椎内での各椎間運動が相互にどのようにかかわりあうかは不明であった。本研究では、まず、前屈・後屈時における腰椎椎間板の連続的な変形挙動を明らかにした。その特性として、（1）椎間板の変形は、体幹の前屈開始と一致せず、ある時間差をおいて急激に生じる、（2）前屈終了前にはほぼ一定の変形状態となる、などが挙げられる。この特性は、腰椎レベルを問わず各椎間板に認められた。さらに、重要なことは、各椎間板の変形挙動の間に位相差を認めたことである。すなわち、各椎間板は同時に変形を開始するのではなく、L3/4椎間板が最初に変形し始め、次いである位相差をおいてL4/5椎間板が変形を開始し、さらに遅れてL5/S1椎間板の変形が生じることが明らかとなった。このような椎間板変形挙動の位相差は、従来の屍体脊椎標本を用いた*in vitro*の研究に基づいた生体力学的理論では十分に説明できず、その機序としては、生体内固有の要因、すなわち体幹筋群の相互作用などがより大きく関与するものと考えられた。

さらに、本研究で提示した椎間板変形量の解析手法および正常腰椎での椎間板変形挙動をもとに、椎間板変性あるいは脊椎固定術などの腰椎動態に及ぼす影響を生体力学的観点から明らかにすることが可能である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宮 坂 和 男
副 査 教 授 阿 部 弘
副 査 教 授 金 田 清 志

学位論文題名

A cineradiographic study on the lumbar disc deformation during flexion and extension of the trunk.

(X線シネ撮影による体幹前後屈時の腰椎椎間板変形挙動に関する研究)

腰椎は体幹からの荷重の支持に加え、大きな可動性を有するため椎間板変性の好発部位であり、正常腰椎の生体内における動態の把握は、椎間板変性の発生要因、病態を考察する上で非常に重要である。腰椎の生体内での動態に関する研究は、X線学的研究を中心にすすめられてきたが、そのほとんどが静止位置での動態測定にとどまっており、正常腰椎の連続的な動態に関しては不明な点が多い。本研究の目的は、椎間板の変形挙動に視点をおき、体幹の前屈・後屈運動における腰椎動態をX線シネ撮影により連続的に測定し、これをもとに各腰椎椎間板の連続的な変形挙動を明らかにすること、および有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションにより椎間板内のひずみ分布の連続的な変化を把握することである。腰椎疾患の既往のない健常男性8人を対象とした。下位腰椎部が撮影視野から外れないように骨盤部を保持した後、各被検者に立位中間位を起点として、それぞれ6秒間の前屈および後屈運動を行わせ、その間、下位腰椎部の椎間運動を、側面X線シネ撮影を用いて記録した。これをもとに、L3/4、L4/5、L5/S1椎間板の変形挙動を解析した。椎間板の形状を椎間腔の4端点で近似し、局部座標系を各椎間板ごとに決定し、各端点の座標値をデジタイザーを用いて測定した。さらに、この測定データをもとに、力学解析の一手法である有限要素法を用いたコンピュータ・シミュレーションにより、前屈運動時における椎間板のひずみ分布の連続的な変化を解析した。後屈運動における椎間板の変形量は、L3/4、L4/5椎間板では小さく、主としてL5/S1椎間板の変形によりなされていることがわかった。これに対し、前屈運動における椎間板の変形量は、L4/5椎間板で最も大きく、またL5/S1椎間板では前後方向への変位量（並進運動）が小さいことがわかった。さらに、前屈運動における各椎間板の変形には一定のパターンが観察され、椎間板変形は前屈開始

からある時間差をおいて急激に始まり、前屈終了前にはほぼ一定の変形状態となった。また、各椎間板の変形開始点は一致せず、L3/4椎間板とL4/5椎間板の間では平均0.8秒、L4/5椎間板とL5/S1椎間板の間では平均0.9秒の時間差を認めた。さらに、コンピュータシミュレーションによる椎間板のひずみ解析では、前屈運動中、常に前方の線維輪に最大の圧縮ひずみ、後方の線維輪に最大の引張ひずみ、髄核と椎体終板の界面に最大の剪断ひずみが生じていた。また、腰椎椎間板は、隣接する下位椎間板が変形を開始した時点で、すでに最大前屈時の50%以上のひずみ状態に達していた。従来の研究から、体幹の前屈運動は、腰椎と股関節の運動により行われ、その運動の間には位相的なずれがあることがわかっている。すなわち、まず腰椎部が屈曲しはじめ、ある程度まで前屈が進んだあとに股関節が屈曲し始めるとされている。これに対し、これまで、腰椎の中で、各椎間運動が相互にどのように関連し、腰椎全体の運動にどのように寄与するかは不明であった。本研究から、前屈運動時、腰椎の各椎間運動の間にも位相的なずれが生じていることがわかった。すなわち、腰椎の各椎間板は同時に変形しはじめるのではなく、上位の椎間板から、ある位相差をもちながら順に変形していくことが明らかとなった。このような椎間板変形挙動の位相差は、従来の屍体脊椎標本を用いた研究では十分に説明できず、その機序としては、生体内固有の要因、すなわち体幹筋群の相互作用などがより大きく関与するものと考えられた。本研究で提示された椎間板変形量の解析手法および正常腰椎での椎間板変形挙動をもとに、腰椎疾患あるいは脊椎固定術などの腰椎動態に及ぼす影響を生体力学的観点から解明することが可能であると期待される。公開発表において、主査宮坂より股関節運動が腰椎椎間運動に及ぼす影響、測定機器の改善の可能性について、阿部弘教授より加齢や性別、椎間板ヘルニアなどの疾患や脊椎固定術が腰椎動態に及ぼす影響、今後の研究の展望についての質問があった。また、金田清志教授より腸腰靭帯や椎間関節の解剖学的な差が腰椎椎間運動に及ぼす影響についての質問があった。申請者は概ね妥当な回答を行った。

本研究は、シネラジオグラフィを筋骨格系の動態解析に応用し、体幹運動に伴う腰椎椎間運動を連続的に解析した点に研究の創意・独創性がみられた。また、腰椎動態における生体内特有の現象を新たに明らかにした点で、脊椎の生体力学の分野に大きく寄与した論文であり、審査員一同、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。