

学位論文題名

A Biomechanical Assessment of Spinal Segmental Instability

Quantitative and Qualitative Evaluations

（脊椎不安定性に関する生体力学的研究

定量的，定性的評価法の検討）

学位論文内容の要旨

1. 序 論

近年，腰痛が現代病として社会問題となっている。腰痛患者の20～30％に脊椎不安定性が認められるといわれている。一般的に脊椎不安定性とは，脊椎間の異常な可動性と定義される。これまで，数多くの脊椎不安定性に関する判定法が報告された。しかし，従来の判定基準は，脊椎可動域の個体間差やレベル間差を考慮していないため，あらゆる個体に適用できるものではなかった。

脊椎不安定性の主な原因には，損傷や変性による椎間板機能低下が挙げられる。すなわち，椎間板の変形状態を見極めることによって，脊椎不安定性を評価できる可能性がある。本研究では，脊椎動態に重要な役割を担っている椎間板の形態とその運動機能との関係から，個体間差やレベル間差に影響されない脊椎不安定性の定量的評価法について検討した。さらに，腰椎の運動様式をより詳細に評価するため，脊椎動態を定性的に評価する手法を検討し，正常腰椎と不安定腰椎との変形状態の相違を明かにした。

腰椎の支配的運動は，前・後屈時の矢状面内運動といわれている。しかし，付随する回旋・側屈運動の程度については報告者間に相違がある。そこで，本研究の予備実験として，腰椎の3次元ゴニオメーター（CA-6000 Spine Motion Analyzer）を用いて測定した。被験者には，脊椎疾患のない正常男性15人（19～23歳）を選んだ。その結果，前・後屈時の矢状面運動は平均10.8°と大きく，回旋や側屈といった付随運動はその1/25に過ぎなかった。このことから，本研究では，腰椎部の支配的運動である前・後屈時の矢状面運動に焦点を絞り検討を進めた。

2. レントゲン側面機能撮影による椎間板計上と変位測定

腰椎の矢状面内の動態の測定には、側面レントゲン機能撮影を用いた。X線源とフィルムの距離は2 m50cm, X線源の電圧は110 k V, 電流は140mAs を基準とした。X線源の位置は、L 2 / 3 椎間板レベルとした。撮影体位は、立体中間位, 最大前屈位, 最大後屈位とした。得られた画像には骨輪郭の不明瞭な部分があった。そこで、画像を北海道大学医学部附属病院の画像処理システム(PACS)に組み込まれている FCR(Fuji Computer Radiography)を用いてコンピューター画像処理を行った。

得られた画像をもとに、椎間板に隣接している上部脊椎下面前方端点と後方端点および下部脊椎上面前方端点と後方端点の4点から椎間板矢状面形状を近似した。各椎間板レベルに、椎間板下面後方端点を原点、椎間板下面に沿って前方にx軸、それに垂直にy軸とした座標系を定義した。4点の座標値をディジタイザーで測定し、その座標値をもとに、椎間板形状と変形量を算出した。測定誤差の評価には、各椎間板の上面と下面のなす角を測定した4端点の位置座標から計算し、その角度変化の総和と観察領域における最上位椎間板上面と最下位椎間板下面の角度変化との差を誤差とみなした。その結果、前屈時には平均2.4%、後屈時には3.9%の誤差が確認された。この程度の誤差は、容認できると考えた。

3. 脊椎不安定性の定量的評価法

脊椎可動域の異なる13人を被験者に選択した。内訳は、若齢者群5人(19-24歳, 168-178cm, 58-66kg), 高齢者群8人(51-59歳, 168-175cm, 60-85kg)である。被験者全員に脊椎奇形がないことを確認した。しかし、高齢者群の5人に、レントゲン画像上、椎間板変性像が認められた(Kellgren 分類 Grade1: 6レベル, Grade2: 3レベル, Grade3: 1レベル)。

まず、正常椎間板の形状と変形特性を検討するため、以下の2項目を基準に正常椎間板レベルと異常椎間板レベルの判定を行った。すなわち、従来の不安定性の判定基準である Nachemson の基準を上回り、かつ画像上の変成像が明かなレベルを異常椎間板レベル、その他を正常椎間板レベルと判定した。その結果、高齢者群の従来の基準で異常と判定された部位の椎間板が異常な部位と判定された。

立位中間位における正常椎間板矢状面形状は、下位椎間板レベルほど前方が高く後方が低いくさび形形状を示した。また、最大前屈時の正常椎間板の変形量は下位ほど大きかった。後屈時には、このような関係は認めなかった。椎間板形状と前屈時の変形量を詳細に検討するため、椎間板形状評価係数と椎間板変形率を導入した。椎間板形状評価係数は、椎間板のくさび形の度合を

表す指標である。高齢者群の変形量は若齢者群の約70%と、変形量には個体間差があるため、各椎間板レベルの変形量の全腰椎椎間板変形量に対する割合である椎間板変形率を導入した。正常椎間板における形状評価係数と椎間板変形率を直線で回帰すると、強い正の相関関係を認めた($r = 0.879$)。この関係に個体間差やレベル間差はなかった。一方、異常椎間板の分布は、正常椎間板の分布から遠く離れた領域に分布した。

異常椎間板の正常椎間板分布からの逸脱度が、不安定性の指標となる可能性がある。そこで、各椎間板の正常椎間板分布からの逸脱度を評価するため、各椎間板の回帰残差を正常椎間板の回帰直線をもとに算出した。正常椎間板の回帰残差は、回帰直線を中心に正常正規分布に従った。そこで、各椎間板の不安定度を、各椎間板の回帰残差と正常椎間板の残差の標準偏差の割合で表示した。その結果、正常椎間板は $\pm 1.8\sigma$ の間にあるのに対し、異常椎間板は $+1.8\sigma$ 以上と大きな値を示した。そして、不安定度に従い、その値は大きくなった。

4. 脊椎不安定性の定性的評価法

物体内の変形状態を表す工学的手法の一つにひずみ分布がある。本研究では、不安定性の定性的評価のため、各椎間板内に生じるひずみ分布を算出し、正常腰椎と不安定腰椎の変形状態の相違を検討した。椎間板内のひずみの算出には、通常有限要素法解析で用いられる4節点アイソパラメトリク形の形状関数と、大変形解析で用いられるLagrangeのひずみを用いた。

総ての椎間板レベルが正常と判断された8人の被験者を正常腰椎群とした。正常腰椎群の前屈時における各椎間板内ひずみ分布には、個体によらず一定の傾向を認めた。すなわち、等ひずみ線の分布は、どのレベルでも均一となり、圧縮も引張もかからない。 $\varepsilon_y = 0$ の位置は、下位レベルほど後方に移動した。また、せん断ひずみの分布では、 $\varepsilon_{xy} = 0$ の位置は、下位レベルほど前方に移動した。しかしながら、異常椎間板を有した不安定腰椎群5人のひずみ分布パターンは、正常とは明かに異なった。異常椎間板レベルのみではなく、その他のレベルの等ひずみ線の分布状況も、レベル毎に異なる不均一な分布となった。 $\varepsilon_y = 0$ や $\varepsilon_{xy} = 0$ の位置も、正常腰椎群で見られた規則性は認められなかった。

5. 考 察

脊柱変形量には、個体間差やレベル間差が存在するが、椎間板の形態に応じ前屈時の変形量が各レベルに分散される関係は、あらゆる個体に共通している。脊椎不安定性とは、変性や損傷により、脊椎動態と解剖学的形態の密接な関係が破綻した状態だということができる。

6. 結 論

本定量的評価法は、従来の判定手法とも矛盾せず、不可能であった脊椎不安定性の定量的評価を可能にした。椎間板内ひずみ分布によって、正常腰椎の一定の変形様式が確認された。不安定腰椎では、異常椎間板レベルだけではなく、周囲の椎間板レベルの変形状態も正常とは明かに異なった。

学位論文審査の要旨

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

この研究は、腰痛の原因の一つとして重要な、脊椎不安定性の新しい生体力学的評価法を検討したものである。従来の評価法では、脊椎可動性の個体間差やレベル間差が考慮されていなかったため、適応に限界があるだけでなく、不安定の度合いを評価できない欠点があった。また、脊椎動態を定性的に評価する手法も確立されているとはいえなかった。この研究の特徴は、脊椎動態に大きな役割を担う椎間板の変形状態に焦点をあて、個体間差やレベル間差に影響されない新しい脊椎不安定性の定量的評価法を検討したことである。また、脊柱の変形状態を固体力学の観点から観察し、椎間板に生ずるひずみ分布によって定性的に評価する手法を開発したことも、この研究の独創的特徴である。

この研究では、予備実験として、3次元ゴニオメーターを用い、脊柱腰椎部の3次元動態を明らかにした。その結果、脊柱腰椎部の支配的運動は、前後屈時の矢状面内運動であり、その際の前額面内、横断面内の運動は無視できる程小さいことが判明した。その結果を踏まえ、本実験では、13人の年齢の異なる被験者の腰椎側面レントゲン機能撮影を用いて、各椎間板レベルの椎間板形状と椎間板変形量を立体中間位を基準にして算出した。定量的評価法では、椎間板のくさび形状と前屈時変形量の関係に着目し、統計学的手法を用いて、各椎間板レベルの不安定度（S値）を定量化した。定性的評価法では、有限要素法で用いられる4節点アイソパラメトリック形の形状関数を用い、大変形解析で用いられるLagrangeのひずみ式によって、各椎間板レベルの変形状態を算出した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 腰椎下位レベルほど、正常椎間板の矢状面形状はくさび形形状となり、前屈時の変形量が大きかった。椎間板変形量には年齢間差や椎間板レベル間差を認めたが、各椎間板レベルの全腰椎変形量に対する割合では、年齢による差を認めなかった。論文中、申請者は、後屈時の検討も行ってた。後屈時に、前屈時のような一定の傾向を認めない理由に、複雑な形態を持つ後要素の影響を挙げた。

2. 正常椎間板レベルで確認された椎間板形状と椎間板変形率との関係は、個体間差ひやレベル間差に依存しなかった。異常な可動性を有する椎間板レベルでの不安定度は、正常レベルの分布からの逸脱度（S値）で定量的に評価できるとした。年齢やレベルに依存しない正常な椎間板の形態と機能を明確にした上で、異常可動性の程度が客観的に評価された。

3. 従来の脊椎動態の評価は、剛体力学によるものであった。この研究の定性的評価法では、固体力学という新しい視点から脊柱の変形状態を評価した。正常腰椎群の前屈時には、一定の変形様式を示すのに対し、不安定腰椎群では、不安定なレベルのみでなく、その周囲のレベルの変形状態も正常とは異なった。この手法によって、各椎間板内における、圧縮、引張、せん断変形といった変形状態が、一目瞭然となった。従来の手法では、変形様式を視覚的に表現することが不可能であったが、申請者の手法により変形様式の視覚化（visualization）が可能となった。

この研究は、脊柱の変形に重要な役割を果たす軟組織の椎間板の形態とその機能との関係に着目し、従来不可能であった脊椎不安定性の定量的評価を可能にした上、固体力学という新しい観点から複雑な脊柱の変形様式を視覚的に表示した。口頭発表に際し、宮坂和男教授から椎間板の面積の変化について、椎間板レベル間におけるS値の逸脱状況、阿部弘教授から椎体のずれ（translation）はどのようにとらえられるのか、各疾患への応用、高度な変性の場合にも申請者の手法が適応可能であるか否か、S値と症状との関連、田代邦雄教授からMRIでの椎間板変性の度合との関連、頸椎への応用などについて、それぞれ質問があったが、申請者は概ね妥当な解答をした。その後、申請者は、阿部弘教授、宮坂和男教授から個別に審査を受けた。個別の審査の中では、椎体の前後方向のずれ（translation）や椎体間の角度変化（angulation）も、申請者の手法で総て評価可能であることが強調された。個別審査後、各教授から合格と判定された。

本研究は、脊椎不安定性の生体力学的評価法について検討し、新しい定量的、定性的評価の手法を提案したものである。本手法は、従来不可能であった不安定度の定量的評価を可能にした上、不安定腰椎における異常な変形状態の詳細な評価も可能にした。近年、腰痛が社会問題となっており、その重要な原因の一つに脊椎不安定性がある。この研究は、脊椎不安定性の評価に新しい工学手法を取り入れた独創性豊かな研究であり、この分野では新知見を示した。よって、博士の学位に値すると認定した。