

学位論文題名

Biomechanical Role of the Intervertebral Disc and Costovertebral Joint in Stability of the Thoracic Spine

(胸椎安定性における椎間板・肋椎関節の生体力学的役割)

学位論文内容の要旨

[目的] 胸椎の椎間には肋骨頭関節と肋横突関節からなる肋椎関節が介在する。肋椎関節は椎間板高位にて多数の靱帯と共に椎体-肋骨-椎体間を強固に連結する。胸骨・肋骨・胸椎は円筒状の胸郭を形成し、肋椎関節を介して胸椎柱を支持するため、胸椎は頸椎・腰椎に比べ強固であるといわれる。しかし胸椎安定性に関する生体力学的研究は十分行われていない。本研究の目的は、胸椎安定性における椎間板、肋椎関節の生体力学的役割を解明することである。

[材料と方法] 新鮮ビーグル成犬屍体の胸椎胸郭複合体10個を使用した。両側の第6~8肋骨と肋間筋、胸骨を温存し、これらと第5~8胸椎(T5~T8)からなる胸郭の一部を用いた。T5椎体に負荷用ジグを装着し、検体を負荷装置に固定した。各検体に3軸(X, Y, Z)における6種のpure moment(前後屈、左右側屈、左右軸回旋)を負荷した。負荷は0.15Nm、0.30Nm、0.45Nmの3段階で加えた。2方向からの写真撮影をもとに、T6のT7に対する相対運動(負荷したモーメントと同一平面上の回旋運動[main motion]と、それに直交する2平面上の回旋運動[coupled motion])を記録した。力学試験は3回繰り返して行い、評価には第3回目の結果を用いた。運動の解析にはデジタイザーを使用し、これと接続したコンピュータで演算処理を行った。デジタイズは各3回行い、その平均値を代表値とした。得られた荷重-変位曲線より、以下の2つのパラメータを定義した。

1. Neutral Zone (NZ): 最大モーメントの除負荷後の残余変位の大きさ

2. Range of Motion (ROM): 最大モーメント負荷時の回旋角度

健常胸椎の試験後、以下の順にT6/7椎間の安定要素を段階的に破壊した損傷モデルを作製し、各モデルに同一の力学試験を行った。I) T6/7椎間板部分切除、II) 右第7肋骨頭関節切除、III) 右第7肋横突関節切除。各損傷モデルのROMとNZを算出し、各損傷の影響を解析した。本測定装置の誤差は 0.18° であった。統計処理にはWilcoxon Signed Rank Testを用い、危険率5%または10%未満を有意と判定した。

[結果] 各損傷段階におけるROMおよびNZの前段階からの増加量の平均値を算出し比較検討した。

1. Range of Motion

Main Motion

前後屈では椎間板部分切除により各々2.1度*、7.8度*増加した。

左右側屈では椎間板部分切除によりそれぞれ4.0度*、5.5度*増加した。さらに右第7肋骨頭関節切除では左側屈で8.1度*、右側屈で4.2度*増加した。

軸回旋では椎間板部分切除により左軸回旋が3.7度*、右軸回旋が3.3度*増加した。(*: $P < 0.01$)

Coupled Motion

椎間板部分切除後、前屈には右側屈と左軸回旋が伴った。右肋骨頭関節切除により、前屈に伴う右側屈と左軸回旋は各々5.8度*、2.4度*増加した。後屈には椎間板部分切除後、左側屈と右軸回旋が伴い、それぞれ5.1度*、1.6度増加した。(*: $P < 0.01$)

右側屈には左軸回旋と前屈が伴った。右肋骨頭関節切除後、右側屈に伴う左軸回旋は2.2度($P<0.05$)増加した。左側屈には右軸回旋と前屈が伴ったが、椎間板部分切除後は右軸回旋と後屈が伴った。

左軸回旋には右側屈と前屈が伴った。右肋骨頭関節切除後、左軸回旋に伴う右側屈は有意($P<0.05$)に増加した。右軸回旋には左側屈と前屈が伴った。椎間板部分切除後、これらのcoupled motionは有意に増加した。

2. Neutral Zone

前後屈では、椎間板部分切除により1.3度($P<0.01$)の増加が見られたが、その他の段階ではいずれの安定要素の破壊でもNZは増加しなかった。

左右側屈では、椎間板部分切除で5.7度($P<0.01$)、右肋骨頭関節切除で7.1度($P<0.01$)増加した。

左右軸回旋では、椎間板部分切除により2.0度($P<0.01$)増加した。

[考察] 椎間板部分切除後の前後屈、左右軸回旋および左右側屈におけるROMの有意な増加は、胸椎椎間板が3軸(X, Y, Z)に沿った回旋運動の制御に重要であることを示す。右肋骨頭関節切除後の左右側屈の有意なROM増加は、肋骨頭関節が側屈運動の重要な制御要素であることを示す。また右肋骨頭関節切除後の右側屈に伴う左軸回旋と、左軸回旋に伴う右側屈が有意に増加したことは、肋骨頭関節が軸回旋と側屈を制御する重要な安定要素であることを示す。NZは椎間板部分切除により全ての負荷において有意に増大した。右肋骨頭関節切除後は、側屈時のNZも有意に増加した。NZは脊柱構成体の剛性の指標である。よって胸椎の同一椎間における椎間板と肋椎関節の同時損傷は、後方要素が健常であっても胸椎安定性を大きく損なうといえる。

胸椎は椎体、肋椎関節、椎間板と共に強固な構成体を作るが、胸椎側弯症の矯正術や転移性胸椎腫瘍で椎間板・肋骨頭関節を切除・破壊された状態では、胸椎の安定性は大きく損なわれるため、spinal instrumentationを使用した脊柱再建が必要と考える。

[結論] 胸椎椎間板は前後屈、側屈および軸回旋の制御に重要であった。肋椎関節、特に肋骨頭関節は側屈運動の制御に重要であり、それに伴う軸回旋の制御も担っていた。椎間板および肋椎関節は胸椎の重要な安定要素であり、胸椎の椎間安定性の評価には、椎間板、肋椎関節の状態評価を要す。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 安 田 慶 秀

副 査 教 授 藤 堂 省

副 査 教 授 金 田 清 志

学 位 論 文 題 名

Biomechanical Role of the Intervertebral Disc and Costovertebral Joint in Stability of the Thoracic Spine

(胸椎安定性における椎間板・肋椎関節の生体力学的役割)

頸椎や腰椎に比べ、胸椎の生体力学的特性は今だ知られぬ点が多い。本研究の目的は、胸椎安定性における椎間板、肋椎関節（肋骨頭関節と肋横突関節から成る）の生体力学的役割を解明することである。新鮮ビーグル成犬屍体の両側第6～8肋骨、胸骨、第5～8胸椎からなる胸椎胸郭複合体を用いた。第6、第7胸椎椎体にマーカーを固定し歯科用レジンに検体を埋めset screwを用いて負荷装置に固定した。検体には鋼線を介し重鎮を用いて前後屈、左右側屈、左右軸回旋のモーメントを負荷した。3次元座標系を設定し、2方向からの写真撮影を行い、ディジタイザーと接続したコンピュータでマーカーの空間座標を演じた。T6のT7に対する相対運動を記録し、T6/7のmain motion（負荷方向の回旋運動）とそれに伴うcoupled motion（負荷方向に直交する2つの回線運動）を求め、得られた荷重変位曲線よりRange of motion（ROM）とNeutral Zone（NZ）を求めた。健常胸椎の試験後、段階的にT6/7の安定要素を破壊したモデルを作製し、各モデルに同一の力学試験を行った。段階的損傷は、①T6/7椎間板の右側部分切除、②右第7肋骨頭関節切除、③右第7肋横突関節切除の順に行った。各損傷モデルのROMとNZを前段階のそれらと比較検討し、各損傷の影響を解析した。椎間板部分切除後、全負荷方向へのROMとNZは有意に増加し、椎間板は前後屈、側屈、軸回旋の制御に重要であると考えられた。また肋椎関節、特に肋骨頭関節切除を加えると側屈運動のROMとNZは有意に増加し、肋骨頭関節は側屈の制御に重要であると考えられた。同時に肋骨頭関節の損傷は、負荷方向によっては顕著なcoupled motionを生じさせた。特にMain motionである右側屈に、coupled motionとしての左軸回旋が大きく伴ったこと、同様に左軸回旋に右側屈が大きく伴ったことは、肋骨頭関節切除がcoupled motionとしての側屈・軸回旋を制御しているものと考えられた。したがって、椎間板と肋椎関節の同時損傷は、胸椎の安定性を著しく損なうことになる。この結果は臨床の場において、胸椎側弯症の手術的矯正術を行う際、椎間板のみならず肋骨頭関節も切除することで、

側弯変形と回旋変形が有効に矯正されることを説明可能とする。

公開発表において、副査藤堂教授からヒトとイヌの解剖学的相違、この研究の仮説をたてた背景、研究結果をどのような形で臨床の場にfeed backするか、副査金田教授からは椎間板切除のみと、それに肋骨頭関節切除を加えた場合の差について、また鑑助教授からはDenisのThree column theoryが胸椎に関しても論じられるかどうか、また、主査安田教授より損傷が多椎間に及んだ場合の胸椎安定性への影響、肋椎関節切除による呼吸機能の変化、胸椎構造体の安定性における役割の比率について質問があり、申請者はこれらに誠実にかつ概ね的確に解答し得た。

この論文は、胸椎胸郭複合体を用いて生体力学的実験を行い、胸椎脊柱のMain motionのみならず、胸椎安定要素を破壊した条件におけるcoupled motionを3次元解析した独創的な研究であり、胸椎椎間板、肋椎関節特に肋骨頭関節の役割を明らかにした点で脊椎の生体力学分野に大きく寄与した。またこの研究はScoliosis Research Society（国際側弯症学会）など多くの学会においても高く評価された。この実験の手法を用いてヒト胸椎による追加試験が行われれば、胸椎の生体力学的特性をより一層解明できることが期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、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。