

学 位 論 文 題 名

Biomechanical Role of the Posterior Elements,
Costovertebral Joints,
and Rib Cage in the Stability of the Thoracic Spine

(胸椎安定性における後方要素、肋椎関節、および胸郭の生体力学的役割)

学位論文内容の要旨

「目的」 胸椎の椎間には肋横突関節と肋骨頭関節からなる肋椎関節が介在する。椎間板高位で2椎体を連結する肋骨頭関節は胸椎の重要な安定要素のひとつである。さらに、肋椎関節周囲には多数の靭帯が存在し、椎体-椎体間、肋骨-椎体間を連結する。これらの靭帯群や筋により連結された胸骨・肋骨・胸椎が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。しかし、胸椎に関する生体力学的研究は頸椎・腰椎に比し遅れており、胸椎安定性における各安定要素の役割は十分解明されていない。本研究の目的は、胸椎安定性における後方要素、肋椎関節、および胸郭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郭8個を使用した。両側の第6～8肋骨と胸骨を温存し、これと第5～8胸椎からなる胸郭の一部を用いた。力学試験には検体へpure momentの負荷が可能な自作の負荷装置を使用した。T8椎体を負荷装置に固定し、T5椎体に負荷用ジグを装着した。各検体に3軸における正と負の計6種のモーメント(前後屈、左右側屈、左右軸回旋)を負荷した。各負荷は最大0.45Nmを0.15Nmずつの3段階にわけて行った。T6、T7椎体にマーカーを装着し、負荷したモーメントの軸方向からの写真撮影により、T6のT7に対する相対運動のうち負荷したモーメントと同一平面における回旋(main 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つのパラメーターを定義した。

1. Neutral Zone (NZ): 相反する正負のモーメントの除負荷後の残余変位の大きさ

2. Range of Motion (ROM): 相反する正負の最大モーメントの負荷時の回旋角度
健全胸椎の試験後、以下の順に段階的にT6/7の安定要素を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) 後方要素切除(T6/7)、II) 両側第7肋椎関節切除、III) 胸郭破壊。II)ではT6/7の安定要素である第7肋椎関節は破壊されたが、第6、第8肋

骨と胸骨からなる胸郭の円筒状構造は残存した。III)では、胸骨は正中および肋間高位で切断され、肋骨間の連結は消失した。すなわち、全ての肋骨は自由端を有し、胸郭の円筒状構造は破壊された。これら各損傷モデルのROMとNZを比較検討し、各損傷の影響を解析した。本測定装置の誤差は 0.1° であった。また、統計処理にはWilcoxon Signed Rank Testを用い、危険率5%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

前後屈では後方要素切除により 3.8° 、両側肋椎関節切除ではさらに 1.9° ROMが増加したが、胸郭破壊の影響は小さかった。後方要素切除後に最も大きくROMが増大した。左右側屈では後方要素損傷により 0.7° 、両側肋椎関節損傷では 2.1° 、胸郭損傷では 0.9° ROMが増加した。両側肋椎関節切除後の増加が著明であった。左右軸回旋では後方要素切除で 0.9° 、両側肋椎関節切除で 2.9° 、胸郭破壊で 2.3° ROMが増加した。両側肋椎関節切除と胸郭破壊後に大きくROMが増大した。

2. Neutral Zone

前後屈では、いずれの安定要素の破壊でもNeutral Zoneはほとんど増加しなかった。左右側屈では、後方要素切除で 0.8° 、両側肋椎関節切除で 2.9° 、胸郭破壊で 1.8° Neutral Zoneが有意に増加した。最後に左右軸回旋では、後方要素切除の影響はほとんど無く、両側肋椎関節切除で 1.6° 、胸郭破壊で 1.7° Neutral Zoneが増加した。左右側屈と軸回旋では後方要素切除によりNeutral Zoneはほとんど増加しなかったが、両側肋椎関節切除と胸郭破壊後に大きく増大した。

「考察」本実験における、後方要素切除後の前後屈ROMの著明な増大は、胸椎後方要素が前後屈運動の制御に重要であることを示す。したがって、胸椎後方除圧で両側椎間関節を含めた後方要素を切除した場合、術後不安定性による神経症状の悪化や後弯増強の防止には、instrumentation使用の脊柱再建が必要と考える。また、胸椎後弯・後側弯変形の矯正術における椎間関節切除の併用は、矯正効果の増大に有用であることをうらづける。

本実験では、肋椎関節と胸郭は、前後屈・左右側屈・左右軸回旋のすべてにおいて胸椎の安定性に寄与していたが、特に側屈と軸回旋の制御に際し重要であった。今日まで、胸椎安定性における肋椎関節の役割が論じられることは少なかったが、肋椎関節は胸椎の非常に重要な安定要素といえる。また、脊柱側弯症の矯正に際し、肋椎関節切除の合併により側屈と軸回旋のROMが増大し、矯正率が向上する可能性がある。

本実験では、後方要素切除後+両側肋椎関節切除により全ての負荷におけるROMとNeutral Zoneが大きく増大した。これより、胸椎の同一椎間における後方要素と肋椎関節の同時損傷は、胸椎安定性を大きく損なうといえる。Panjabiらは、胸椎は後方要素+後縦靱帯+後方椎間板損傷もしくは前縦靱帯+前方椎間板損傷のみでは生理的負荷に耐え得るが、

これらに肋椎関節損傷が加わると胸椎は生理的負荷により破壊されると報告した。Feiertagらは、胸椎の椎間板切除のみでは可動域の増加は小さく、これに肋椎関節切除を加えると前後屈・側屈の可動域は有意に増大すると報告した。本実験結果とこれらの報告を総合すると、前方もしくは後方要素の損傷に肋椎関節損傷が加わると胸椎安定性の損失は大きいと考えられる。よって、転移性脊椎腫瘍などで肋椎関節が破壊された場合の除圧術には、前方法・後方法を問わずinstrumentation使用の脊柱再建の併用が望ましいと考える。

「結論」胸椎後方要素は主に前後屈の制御に重要であった。肋椎関節と胸郭は、全ての回旋運動の制御に関与していたが、特に側屈と軸回旋の制御に重要であった。肋椎関節と後方要素の同時損傷は、全ての回旋負荷に対する胸椎安定性を著しく損なう。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、頸椎や腰椎と異なり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 加 藤 紘 之

副 査 教 授 金 田 清 志

学 位 論 文 題 名

Biomechanical Role of the Posterior Elements, Costovertebral Joints, and Rib Cage in the Stability of the Thoracic Spine

(胸椎安定性における後方要素、肋椎関節、および胸郭の生体力学的役割)

胸椎の椎間には肋椎関節が介在し、肋椎関節周囲の靱帯群は椎体-椎体間、肋骨-椎体間を連結する。胸郭は肋椎関節を介して胸椎柱を支持する。しかし、胸椎安定性における肋椎関節や胸郭などの安定要素の役割は十分解明されていない。本研究の目的は、胸椎安定性における後方要素、肋椎関節、および胸郭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胸郭8個を使用した。両側の第6～8肋骨と胸骨を温存し、これと第5～8胸椎からなる胸郭の一部を用いた。力学試験には検体へ純粋なモーメントの負荷が可能な自作の負荷装置を使用した。各検体に前後屈、左右側屈、左右軸回旋のモーメント（最大0.45 Nm）を負荷した。T6、T7椎体にマーカーを装着し、負荷したモーメントの軸方向からの写真撮影により、T6/7のmain motionを記録した。力学試験は3回繰り返し、評価には第3回目の結果を用いた。得られた荷重-変位曲線より、以下の2つのパラメーターを定義した。I Neutral Zone (NZ)：相反する正負のモーメントの除負荷後の残余変位の大きさ、II Range of Motion (ROM)：相反する正負の最大モーメントの負荷時の回旋角度。健常胸椎の試験後、以下の順に段階的にT6/7の安定要素を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) 後方要素切除(T6/7)、II) 両側第7肋椎関節切除、III) 胸郭破壊。II)ではT6/7の安定要素である第7肋椎関節は破壊されたが、胸郭の円筒状構造は残存した。III)では、全ての肋骨は自由端を有し、胸郭の円筒状構造は破壊された。これら各損傷モデルのROMとNZを比較検討し、各損傷の影響を解析した。本測定装置の誤差は 0.1° であった。また、統計処理にはWilcoxon Signed Rank Testを用い、危険率5%未満を有意と判定した。

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。Range of Motion：前後屈では後方要素切除により3.8度、両側肋椎関節切除ではさらに1.9度ROMが増加したが、胸郭破壊の影響は小さかった。左右側屈では後方要素損傷により0.7度、両側肋椎関節損傷では2.1度、胸郭損傷では0.9度ROMが増加した。左右軸回旋では後方要素切除で0.9度、両側肋椎関節切除で2.9度、胸郭破壊で2.3度ROMが増加した。NZ：前後屈では、いずれの安定要素の破壊でもNZはほとんど増加しなかった。左右側屈では、後方要素切除で0.8度、両側肋椎関節切除で2.9度、胸郭破壊で1.8度NZが有意に増加した。最後に左右軸回旋では、後方要素切除の影響はほとんど無く、両側肋椎関節切除で1.6度、胸郭破壊で1.7度NZが増加した。

本実験における、後方要素切除後の前後屈ROMの著明な増大は、胸椎後方要素が前後屈運動の制御に重要であることを示す。本実験では、肋椎関節と胸郭は、全ての回旋運動において胸椎の安定性に寄与していたが、特に側屈と軸回旋の制御に際し重要であった。肋椎関節は胸椎の非常に重要な安定要素といえる。また、脊柱側弯症の矯正に際し、肋椎関節切除の合併により側屈と軸回旋のROMが増大し、矯正率が向上する可能性がある。本実験では、後方要素切除後＋両側肋椎関節切除により全ての負荷におけるROMとNZが大きく増大した。よって、胸椎の同一椎間における後方要素と肋椎関節の同時損傷は、胸椎安定性を大きく損なうといえる。

胸椎後方要素は主に前後屈の制御に重要であった。肋椎関節と胸郭は、全ての回旋運動の制御に関与していたが、特に側屈と軸回旋の制御に重要であった。肋椎関節と後方要素の同時損傷は、全ての回旋負荷に対する胸椎安定性を著しく損なう。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、頸椎や腰椎と異なり肋椎関節の状態評価を要す。

公開發表において、主査安田教授から犬と人の解剖学的相違や荷重条件の違い、靱帯および胸椎棘突起の力学的役割について、副査加藤教授から本実験モデルが想定した疾患、及びその臨床応用について、副査金田教授から胸郭を完全に温存した実験との相違について、法医学寺沢教授から生体の胸郭の力学試験について、整形外科大学院生数名から動物モデルの妥当性、荷重条件の決定方法、靱帯や関節の切除順の影響、可動域の変化量の臨床的意義について質問があった。申請者は参考文献を引用し、本学位論文の結果と照らし併せて十分な考察を行った上で、豊富な知識に基づいて明解に回答した。

以上、本研究は胸郭を温存した胸椎を用いて生体力学的実験を行った独創的な研究であり、後方要素、肋椎関節および胸郭の役割を明らかにした点で脊椎の生体力学的分野に大きく寄与した。さらに、この実験の手法をもちいて追加実験を行うことにより胸椎の生体力学的特性をさらに解明することができると期待される。

審査員一同はこれらの成果を高く評価し、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。