

学位論文題名

Stress Analysis of the Longitudinal Members of Anterior Instrumentations  
- Biomechanical Characteristics of Anterior One-Rod and Two-Rod Systems  
for Thoracolumbar Scoliosis -

(前方インストルメンテーションロッドの応力分析

- 胸腰椎側彎症におけるOneロッドシステムとTwoロッドシステムの生体力学的特徴に関する研究 -)

学位論文内容の要旨

変形脊柱の矯正固定後の内固定具は、矯正前の変形にもどろうとする脊柱からの外力と日常生活動作による大きな外力を骨癒合の完成まで長期間受けることになる。内固定具の特定部位への長期にわたる応力集中は折損や矯正損失の一因となりえる。従来の内固定具では折損や矯正損失が問題となっていた。本研究の目的は、これらの問題を解決するため発達した代表的な前方用内固定具で、構造の異なるone-rod system(Texas Scottish Rite Hospital System, ロッド直径 6.3mm)と two-rod system(Kaneda Multisegmental Instrumentation, ロッド直径 4.0mm)による多椎間矯正固定下の側彎症モデルに各種負荷を加え、固定検体剛性値とロッドの応力分布を測定し、両内固定具の機械特性を明解にすることである。

【材料と方法】10体の仔牛新鮮屍体胸腰椎(T10-L3)を使用した。検体の最上下椎(T10、L3)を特殊パテでマウントした後、T11/12からL1/2の各椎間板の左側繊維輪切除と髄核摘出を行い、椎間板腔に楔状のレジンスパiserを挿入してT13を頂椎とする側彎症モデルを作製した。無作為に5体ずつone-rod systemとtwo-rod systemで矯正固定した。固定範囲はT11からL2の4椎間とした。2種類の内固定具の応力測定のためone-rod systemのロッドとtwo-rod systemの前後2本のロッドに歪みゲージを設置した。設置部位はT11/12、T12/13の椎間板高位で、矢状面内でロッドの前方と後方、前額面内で左側と右側にそれぞれ4枚ずつの歪みゲージをロッドの長軸に一致して設置した。T12/T13間の変位の記録にのび計を使用し、T12とT13椎体の前面に前縦靭帯に沿って垂直に針で固定した。材料試験機を用いて非破壊力学試験を行い、10秒間のランプ入力で5回繰り返した。負荷条件は、圧縮(500N)、回旋(15度、前負荷 50N)、前屈・後屈(0.23mのモーメントアームが5 cm下降)、左右側屈(前屈・後屈に準ずる)の6種とした。各種負荷時の各椎間のロッドの歪みは動歪み測定器を介して材料試験機出力信号(軸荷重、軸変位、のび計出力、回旋角度とトルク)と同期してパーソナルコンピュータで記録解析した。結果の解析には検体の粘弾性の影響を考慮して4サイクル目のデータを用いた。検体剛性値(construct stiffness)の指標として軸荷重時の最大変位(mm)、前屈、後屈、側屈時の最大モーメント(Nm)、軸回旋時の最大トルク(Nm)を計算した。同時に軸圧縮負荷、前屈、後屈負荷時のT12/T13間ののび計の最大変位(mm)を測定した。本試験で得られたデータはそれぞれの側彎モデル作成前の検体(intact spine)のデータで標準化した(intact spine=100%)。歪み信号は各々のロッドの引張試験により歪み信号をを応力信号に

較正し、軸方向応力を差し引いた曲げ応力を後方ゲージに対する前方ゲージ、左側ゲージに対する右側ゲージの引張・圧縮とし、その合力をロッドに直交する平面上のベクトルとして表示した。検体剛性値とのび計の変位(longitudinal displacement of T12-13)の統計処理にMann-Whitney U testを、同一ロッド内のの応力値の検定はWilcoxon signed-rank testを用いた。

【結果】検体剛性値は前屈負荷でのみtwo-rod systemでone-rod systemに比べ有意に大きな剛性値を示した( $p < 0.05$ )が、他の負荷試験では有意差を認めなかった。のび計の最大変位(Maximum Anterior Longitudinal Displacement)は、前後屈時、two-rod systemでone-rod systemに比べ有意に( $p < 0.05$ )小さな値を示した。ロッドの応力分布はone-rod systemで軸回旋負荷以外のすべての負荷試験においてT12/13高位の平均曲げ応力がT11/12高位よりも高値を示し、軸圧縮、前屈、後屈負荷試験で2高位間に有意差を認めた( $p < 0.05$ )。一方、two-rod systemではすべての負荷試験においてT11/12とT12/13椎間高位の平均曲げ応力に有意差を認めず、同一高位の応力がone-rod systemに比べ低値であった。two-rod systemは2本のロッドのそれぞれの高位に均一な応力分散を示した。ロッドの応力方向はone-rod systemがすべての負荷条件でT12/13とT11/12椎間高位ではほぼ同一だが、two-rod systemではすべての負荷条件、特に軸回旋負荷で多様であった。

【考察】ほとんどのスクリーロッドシステムは矯正保持力を増すためにロッドの直径を増すことで対応してきた。なぜならロッドの剛性を増すことが矯正損失を減少させると信じられているからである。しかし、臨床的には高度の脊柱変形に対応するため、ロッドにはある程度の柔軟性が必要である。したがって理想的な側彎症内固定具は2つの相反する特徴、変形脊柱に適合させるためのロッドの柔軟性と矯正を維持するための内固定具全体の剛性を兼ね備えなければならない。単にロッドの直径を増すだけでなく、2本のロッドを組み合わせて固定具全体の剛性を得るtwo-rod systemはこれに適うものである。矯正固定後の脊柱の長期安定性の評価は非常に難しく、単なる剛性値の評価は必ずしも臨床結果を反映しない。著者は内固定具の応力分布を、特にロッドのに関して様々な荷重環境で測定した。内固定具の応力分布は長期の内固定具の機械特性を評価に有用と考える。本来、骨・スクリー界面の緩みや矯正損失に関しては骨と内固定具の界面の問題として議論すべきであるが、技術的に困難である。スクリーと連結したロッドの応力特性は骨・スクリー間の応力の評価に有用な情報と思われる。one-rod systemでは特定部位に応力集中を認め、two-rod systemがone-rod systemに比べ、より矯正損失と折損を減少させる可能性がある。

【結論】両内固定具は検体剛性値に関して前屈負荷以外ではほぼ同等だが、one-rod systemでは頂椎近傍に応力集中を認め、two-rod systemはロッドに関して均一で多方向の応力分散を示す生体力学的特徴を有していた。

特定部位への応力集中が回避されるtwo-rod systemはone-rod systemよりも矯正固定後の長期安定性保持に関して有利なシステムである可能性がある。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 田 清 志

副 査 教 授 安 田 慶 秀

副 査 教 授 加 藤 紘 之

学位論文題名

Stress Analysis of the Longitudinal Members of Anterior Instrumentations

- Biomechanical Characteristics of Anterior One-Rod and Two-Rod Systems  
for Thoracolumbar Scoliosis -

(前方インストルメンテーションロッドの応力分析)

- 胸腰椎側彎症におけるOneロッドシステムとTwoロッドシステムの生体力学的特徴に関する研究 -

本研究の目的は、従来の脊柱側弯症治療内固定具で問題となっていた折損や矯正損失を解決するため開発された代表的な前方用内固定具で、構造の異なるone-rod system(ロッド直径6.3mm)とtwo-rod system(ロッド直径4.0mm)による多椎間矯正固定下の側彎症モデルに各種負荷を加え、固定検体剛性値とロッドの応力分布を測定し、両内固定具の機械特性を明解にすることである。

【材料と方法】10体の仔牛新鮮屍体胸腰椎のT11/12からL1/2の各椎間板の左側繊維輪切除と髓核摘出を後、楔状スペーサーを挿入してT13を頂椎とする側彎症モデルを作製した。無作為に5体ずつ各内固定具で矯正固定した。応力測定のため両内固定具のロッドにT11/12, T12/13の椎間板高位で、4枚ずつ歪みゲージを設置した。T12 /T13椎間にはのび計を設置した。材料試験機を用いて非破壊力学試験を行い、10秒間のランプ入力で5回繰り返した。負荷条件は、圧縮(500N)、回旋(15度、前負荷 50N)、前屈・後屈(0.23mのモーメントアームが5 cm下降)、左右側屈(前屈・後屈に準ずる)の6種とした。各椎間のロッドの歪み、のび計出力、軸荷重、軸変位、回旋角度とトルクを記録解析した。結果の解析には検体の粘弾性の影響を考慮して4サイクル目のデータを用いた。検体剛性値の指標として軸荷重時の最大変位(mm)、前屈、後屈、側屈時の最大モーメント(Nm)、軸回旋時の最大トルク(Nm)を計算した。同時に軸圧縮負荷、前屈、後屈負荷時ののび計の最大変位(mm)を測定した。本試験で得られたデータはそれぞれの側彎モデル作成前の検体(intact spine)のデータで標準化した(intact spine=100%)。歪み信号は応力信号に較正され、ロッドに直交する平面上のベクトルとして表示した。

【結果】検体剛性値は前屈負荷でのみtwo-rod systemでone-rod systemに比べ有意に大きな剛性値を示したが、他の負荷試験では有意差を認めなかった。のび計の最大変位は、前後屈時、two-rod systemでone-rod systemに比べ有意に( $p < 0.05$ )小さな値を示した。ロッドの応力分布はone-rod systemで軸回旋負荷以外のすべての負荷試験においてT12/13 高位の平均曲げ応力がT11/12 高位よりも高値を示し、軸圧縮、前屈、後屈負荷試験で2高位間に有意差を認めた( $p < 0.05$ )。一方、two-rod systemではすべての負荷試験においてT11/12と T12/13 椎間高位の平均曲げ応力に有意差を認めず、同一高位の応力が one-rod systemに比べ低値であった。two-rod system は2本のロッドのそれぞれの高位に均一な応力分散を示した。ロッドの応力方向はone-rod systemがすべての負荷条件でT12/13 と T11/12 椎間高位でほぼ同一だが、two-rod systemでは すべての負荷条件、特に軸回旋負荷で多様であった。

【考察および結論】側彎症内固定具は2つの相反する特徴、変形脊柱に適合させるためのロッドの柔軟性と矯正を維持するための内固定具全体の剛性を兼ね備えなければならない。単にロッドの直径を増すだけではなく、2本のロッドを組み合わせることで固定具全体の剛性を得るtwo-rod systemはこれに適うものである。矯正固定後の脊柱の長期安定性の評価は非常に難しく、単なる剛性値の評価は必ずしも臨床結果を反映しない。内固定具の応力分布は長期の内固定具の機械特性を評価に有用と考える。本来、骨・スクリュー界面の緩みや矯正損失に関しては骨と内固定具の界面の問題として議論すべきであるが、技術的に困難である。スクリューと連結したロッドの応力特性は骨・スクリュー間の応力の評価に有用な情報と思われる。両内固定具は検体剛性値に関して前屈負荷以外ではほぼ同等だが、one-rod systemでは頂椎近傍に応力集中を認め、two-rod systemはロッドに関して均一で多方向の応力分散を示す生体力学的特徴を有していた。特定部位への応力集中が回避されるtwo-rod systemは矯正損失と折損を減少させる可能性があり、one-rod systemよりも矯正固定後の長期安定性保持に関して有利なシステムである可能性がある。

公开发表において副査加藤紘之教授から側彎症モデルの妥当性、及び内固定具の応力分散の長期安定性への関与と生体反応の影響についての質問があった。

次いで整形外科鑑邦芳講師から矯正固定後の応力分布の経時的变化についての質問があった。また副査安田慶秀教授より側彎症の発生機序及び矯正の理念についての質問があった。いずれの質問に対しても、申請者は実験結果や教科書、関連論文を引用し、臨床医学の知見も加え、豊富な知識に基づいて明解に回答した。

以上、本研究は、内固定具の比較試験を従来からの単純な剛性値の比較だけでなく、内固定具の応力分布を検討した点で研究の創意が見られ、one-rod systemとtwo-rod systemの機械特性を明確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、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。