

学位論文題名

The mechanical properties of the human L4-5 functional spinal unit during cyclic loading  
- The structural effects of the posterior elements -

(繰り返し負荷中におけるヒトL4-5脊椎機能単位の  
力学的特性-後方要素の構造効果-)

学位論文内容の要旨

【緒言】ヒト腰椎の機能や腰椎疾患の病態解明および有効な治療法開発のためには生体力学的研究が必要であり、この基礎研究として脊椎機能単位 (functional spinal unit:FSU) の力学的特性の把握は非常に重要である。しかし、いまだ十分に解明されていない点が多い。そこで本研究では、可動性と荷重負担能力が大きく、臨床的に最も障害を受けやすい第4-5腰椎 (以下L4-5) FSUを対象を限定し、生理的状态に近いと考えられる連続繰り返し負荷 (引張-圧縮、ねじり) 中の力学的特性を詳細かつ定量的に評価し、力学的特性と変形量との関係、および力学的特性に及ぼす後方要素各成分の構造効果の検討を目的とした。

【材料および方法】MTS社製858 Bionix材料試験機を用いてヒト新鮮屍体 (35-67歳:平均53.5歳)から採取したL4-5FSU10個の力学試験を行った。標本は採取後直ちに二重のプラスチックバッグに入れ-26℃に冷凍保存した。実験には椎間板変性が軽度なFSUを選んで、試験直前に常温で解凍し、椎間関節および関節包と各靭帯成分を温存して周囲の軟部・筋組織は除去した。FSUはL5椎体上面を水平にしてボルトで治具に強固に固定し、これを試験機の作動軸に固定した。ねじり試験では回転中心が椎体後壁の中央にくるように調節した。負荷条件は、引張-圧縮試験は最大変位±1.5mm、負荷速度0.3mm/秒、ねじり試験は最大変位±5°、負荷速度1°/秒とし、それぞれ5サイクル連続して行った。次に、FSUと治具を作動軸に固定したままで、1)棘上・棘間靭帯、2)片側(左)椎間関節、3)両側椎間関節、4)黄色靭帯の順に後方要素の各成分を順次切除し、各々に健常FSUと同一の負荷条件で試験を行い、各成分の構造効果を確認した。試験中は実験材料を湿潤状態に保ち、各負荷試験間には常に15分の間隔をおいた。試験機に接続したパーソナルコンピュータで、連続的に送られて来る電気信号を直ちに処理して記録し、

これに接続したX-Yプロッターで荷重-変位曲線を描かせた。すべての実験でヒステリシスループを示す非線形な荷重-変位曲線が得られ、4サイクルまでには定常ループとなった。そこで4サイクル目の結果より、引張-圧縮のそれぞれで変位を0.5mmずつの小区間に分け、各区分ごとの負荷曲線勾配と除荷曲線勾配の平均値をこの区分における剛性値と定義した。ねじりでも1°ずつの区分に分けて左ねじり、右ねじり時の曲線勾配の平均値を剛性値とした。また、後方要素各成分の切除による剛性値の減少率を求めた。これらのパラメーターと変形量との関係および後方要素各成分の構造効果について考察した。統計学的検定には一元配置分散分析法とピアソンの相関係数を用いた。

【結果】 健常FSUでの圧縮剛性値は0.70~1.54MN/m、引張剛性値は0.54~0.97MN/m、ねじり剛性値は3.13~9.66N·m/deg.で、高変形領域ほど大きかった。後方要素の状態によらず、いずれの負荷においても変位が大きいほど剛性値は有意に増大した( $P<0.01$ )。全後方要素を切除すると、圧縮剛性値は0.49~1.18MN/m(減少率24~30%)、引張剛性値は0.39~0.73MN/m(減少率21~26%)、ねじり剛性値は1.84~4.50N·m/deg.(減少率42~54%)に減少した。その効果は圧縮と引張では低変形領域ほど大きく、ねじりでは逆に高変形領域ほど大きかった。後方要素の各成分では、両側椎間関節切除にて圧縮剛性は有意に減少し( $P<0.05$ )、その効果は変形領域によらずほぼ一定だった(FSU全体の約14%)。引張剛性は棘上・棘間靭帯切除後に有意に減少し( $P<0.05$ )、その効果は低変形領域ほど大きかった(16~12%)。ねじり剛性は両側椎間関節切除後に有意に減少し( $P<0.01$ )、その効果は高変形領域ほど有意( $P<0.05$ )に大きかった(33~48%)。片側(左)椎間関節切除後のねじり剛性値の減少は、どの変形領域においても右ねじりの方が大きかった。しかし、有意差はなかった。いずれの剛性値に対しても、CT写真(椎間関節レベル)での椎体後壁の接線と椎間関節面の接線がなす角度(facet angle)と両側椎間関節切除後の剛性値の減少率との間に有意な相関はなかった。

【考察】 本研究の特徴は、1)対象をL4-5FSUに限定し、2)生理的範囲内と考えられる連続した繰り返し負荷試験(引張-圧縮、ねじり)を行い、3)非線形で大きなヒステリシスループを示す荷重-変位曲線全体を近似して定量的評価する剛性値を独自に定義し、異なった状態での力学的特性を比較検討して、4)力学的特性と変形量との関係、および力学的特性に及ぼす後方要素の構造効果を検討したことである。本研究によりいくつかの新しい知見が得られた。まず、これまで報告のなかった力学的特性と変形量の関係に関し、後方要素の状態に関わらず、変位が大きいほどFSUの剛性値が大きいことが明らかになった。第二に、腰椎の力学的特性に及ぼす後方要素の効果についてである。圧縮負荷ではこれを否定する報告も多く、引張負荷での研究はなかった。ねじり負荷では、椎間関節の効果は今までも認められていたが、棘上・棘間靭帯の関与については結果が相反していた。本研究により、すべての負荷で後

方要素全体の効果は明白となり、また、圧縮剛性とねじり剛性には両側椎間関節の、引張剛性には棘上・棘間靭帯の有意な関与が明らかとなった。ねじり剛性に対する棘上・棘間靭帯の有意な効果はなかった。また、椎間関節の圧縮剛性に及ぼす効果は一定だが、ねじり剛性に及ぼす効果は高変形領域ほど大きく、一方、棘上・棘間靭帯が引張剛性に及ぼす効果は低変形領域ほど大きかった。各後方要素が各剛性に及ぼす効果と変位との関係が初めて明らかになった。さらに、全後方要素および後方要素各成分がそれぞれの剛性にどの程度関与しているか、定量的に示された。

【結語】1)生理的範囲内と考えられる連続した繰り返し負荷（引張-圧縮、ねじり）中のL4-5FSUの力学的特性と変形量の関係と後方要素の構造効果を検討した。2)後方要素および負荷の状態に関わらず、変位が大きいかほど剛性は有意に大きかった。3)全後方要素は圧縮剛性の24～30%、引張剛性の21～26%、ねじり剛性の42～54%に関与し、その効果は圧縮、引張では低変形領域ほど大きく、ねじりでは高変形領域ほど有意に大きかった。4)圧縮剛性とねじり剛性には椎間関節が、引張剛性には棘上・棘間靭帯が有意に関与していた。圧縮での椎間関節の効果はほぼ一定だが、引張での棘上・棘間靭帯の効果は低変形領域ほど大きく、ねじりにおける椎間関節の効果は高変形領域ほど有意に大きかった。

## 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 田 清 志  
副 査 教 授 宮 坂 和 男  
副 査 教 授 寺 沢 浩 一

### 学位論文題名

The mechanical properties of the human L4-5 functional spinal unit during cyclic loading

-The structural effects of the posterior elements-

(繰り返し負荷中におけるヒトL4-5脊椎機能単位の力学的特性  
-後方要素の構造効果-)

### 研究目的

ヒト腰椎の機能や腰椎疾患の病態解明および有効な治療法開発のためには生体力学的研究が必要であり、この基礎研究として脊椎機能単位 (functional spinal unit:FSU) の力学的特性の把握は非常に重要である。しかし、いまだ未解明の点も多い。そこで本研究では、可動性と荷重負担能力が大きく、臨床的に最も障害を受けやすい第4-5腰椎 (以下L4-5) FSUを対象を限定し、生理的状态に近いと考えられる連続繰り返し負荷 (引張-圧縮、ねじり) 中の力学的特性を詳細に評価し、力学的特性と変形量の関係、および力学的特性に及ぼす後方要素各成分の構造効果の検討を目的とした。

### 材料および方法

MTS社製858 Bionix材料試験機を用いてヒト新鮮屍体(35-67歳：平均53.5歳)から採取したL4-5FSU10個の力学試験を行った。標本は採取後直ちに二重のプラスチックバッグに入れ-26℃に冷凍保存した。実験には椎間板変性が軽度なFSUを選んで、試験直前に常温で解凍し、椎間関節および関節包と各靭帯成分を温存して周囲の軟部・筋組織は除去した。FSUはL5椎体上面を水平にしてボルトで治具に強固に固定し、これを試験機の作動軸に固定した。ねじ

り験では回転中心を椎体後壁の中央にした。負荷条件は、引張-圧縮試験は最大変位±1.5mm、負荷速度0.3mm/秒、ねじり試験は最大変位±5°、負荷速度1°/秒とし、それぞれ5サイクル連続して行った。次に、FSUと治具を作動軸に固定したままで、1)棘上・棘間靭帯、2)片側(左)椎間関節、3)両側椎間関節、4)黄色靭帯の順に後方要素の各成分を順次切除し、各々に健常FSUと同一の負荷条件で試験を行い、各成分の構造効果を確認した。試験中は実験材料を湿潤状態に保ち、各負荷試験間には常に15分の間隔をおいた。試験機に接続したパーソナルコンピュータで、連続的に送られて来る電気信号を直ちに処理して記録し、これに接続したX-Yプロッターで荷重-変位曲線を描かせた。すべての実験でヒステリシスループを示す非線形な荷重-変位曲線が得られ、4サイクルまでには定常ループとなった。そこで4サイクル目の結果より、引張-圧縮のそれぞれで変位を0.5mmずつの小区間に分け、各区间ごとの負荷曲線勾配と除荷曲線勾配の平均値をこの区間における剛性値と定義した。ねじりでも1°ずつの区間に分けて左ねじり、右ねじり時の曲線勾配の平均値を剛性値とした。また、後方要素各成分の切除による剛性値の減少率を求めた。これらのパラメーターと変形量との関係および後方要素各成分の構造効果について考察した。統計学的検定には一元配置分散分析法とピアソンの相関係数を用いた。

## 結 果

健常FSUでの圧縮剛性値は0.70～1.54MN/m、引張剛性値は0.54～0.97MN/m、ねじり剛性値は3.13～9.66N・m/deg.で、高変形領域ほど大きかった。後方要素の状態によらず、いずれの負荷においても変位が大きいほど剛性値は有意に増大した( $P<0.01$ )。全後方要素を切除すると、圧縮剛性値は0.49～1.18MN/m(減少率24～30%)、引張剛性値は0.39～0.73MN/m(減少率21～26%)、ねじり剛性値は1.84～4.50N・m/deg.(減少率42～54%)に減少した。その効果は圧縮と引張では低変形領域ほど大きく、ねじりでは逆に高変形領域ほど大きかった。後方要素の各成分では、両側椎間関節切除にて圧縮剛性は有意に減少し( $P<0.05$ )、その効果は変形領域によらずほぼ一定だった(FSU全体の約14%)。引張剛性は棘上・棘間靭帯切除後に有意に減少し( $P<0.05$ )、その効果は低変形領域ほど大きかった(16～12%)。ねじり剛性は両側椎間関節切除後に有意に

減少し( $P<0.01$ )、その効果は高変形領域ほど有意( $P<0.05$ )に大きかった(33~48%)。片側(左)椎間関節切除後のねじり剛性値の減少は、どの変形領域においても右ねじりの方が大きかった。しかし、有意差はなかった。いずれの剛性値に対しても、CT写真(椎間関節レベル)での椎体後壁の接線と椎間関節面の接線がなす角度(facet angle)と両側椎間関節切除後の剛性値の減少率との間に有意な相関はなかった。

## 考 察

本研究の特徴は、1)対象をL4-5FSUに限定し、2)生理的範囲内と考えられる連続した繰り返し負荷試験(引張-圧縮、ねじり)を行い、3)非線形で大きなヒステリシスループを示す荷重-変位曲線全体を近似して定量的評価する剛性値を独自に定義し、異なった状態での力学的特性を比較検討して、4)力学的特性と変形量との関係、および力学的特性に及ぼす後方要素の構造効果を検討したことである。本研究によりいくつかの新しい知見が得られた。まず、これまで報告のなかった力学的特性と変形量の関係に関し、後方要素の状態に関わらず、変位が大きいほどFSUの剛性値が大きいことが明らかになった。第二に、腰椎の力学的特性に及ぼす後方要素の効果についてである。圧縮負荷ではこれを否定する報告も多く、引張負荷での研究はなかった。ねじり負荷では、椎間関節の効果は今までも認められていたが、棘上・棘間靭帯の関与については結果が相反していた。本研究により、すべての負荷で後方要素全体の効果は明白となり、また、圧縮剛性とねじり剛性には両側椎間関節の、引張剛性には棘上・棘間靭帯の有意な関与が明らかとなった。ねじり剛性に対する棘上・棘間靭帯の有意な効果はなかった。また、椎間関節の圧縮剛性に及ぼす効果は一定だが、ねじり剛性に及ぼす効果は高変形領域ほど大きく、一方、棘上・棘間靭帯が引張剛性に及ぼす効果は低変形領域ほど大きかった。各後方要素が各剛性に及ぼす効果と変位との関係が初めて明らかになった。さらに、全後方要素および後方要素各成分の各剛性への関与が、定量的に示された。

以上、本研究は繰り返し負荷中におけるヒトL4-5脊椎機能単位の力学的特性に及ぼす後方要素の構造効果を明らかにしたものであり、博士(医学)の学位を授与するに値するものと認定された。