

学位論文題名

Biomechanical Effects of Spinal Reconstruction on Adjacent Motion Segment

(脊柱再建術が固定隣接椎間に与える生体力学的影響)

学位論文内容の要旨

緒言

脊椎 instrumentation は再建脊柱の即時安定性の獲得や変形の矯正を目的に広く用いられている。1990年代より、骨癒合率の促進や生理的脊柱配列の再建を目的に椎弓根スクリーシステムによる後側方固定術 (Posterolateral Fusion : PLF) に後方侵入椎体間固定術 (Posterior Lumbar Interbody Fusion : PLIF) を併用した脊柱再建術 (PLIF/PLF) が広くおこなわれている。しかし一方で、脊椎固定術は隣接椎間の負荷増大や早期変性を招くことが知られており、その程度は PLF 単独に比し脊柱剛性の高い PLIF/PLF でより大きいと考えられる。

再建脊柱の剛性が高まるため、固定隣接椎の可動域が増大したとの生体力学的研究や、椎弓根スクリーシステム使用後の脊椎配列の異常が隣接椎の変性変化を加速させたとの臨床報告もあるが、固定隣接椎への影響に着目し、ひとつの実験系で PLF と PLIF/PLF を比較した報告は少ない。さらに PLF 後に局所後弯が残存した場合と、PLIF 併用により生理的な脊椎配列を再建した場合において、隣接椎間に生じる変化を比較検討した生体力学試験や臨床報告例はなく、固定隣接椎間の変性のメカニズムは未だ不明な点が多い。本研究では、各種脊柱再建モデルを用い、固定隣接椎の椎間板内圧と椎弓の歪み量を測定し、隣接椎の前方、後方要素にかかる生体力学的影響を検討した。

材料と方法

新鮮仔牛屍体腰仙椎 (L2-S1) を使用し生体力学試験を行った。純粋モーメント負荷装置を用いて、非破壊性前後屈試験を行った (荷重量: $\pm 6\text{Nm}$)。固定椎間は L5-6, L6-S1 の 2 椎間とし、L4-5 を上位隣接椎間と定義した。単軸歪みゲージを L4 椎弓の L4-5 椎間関節直上左右 2 か所に貼付し、上位隣接椎の椎弓の頭尾側方向の歪み量を測定した。針型圧力計を L4-5 椎間板中央部に側面より留置し、椎間板内圧を測定した。前縦靭帯を貫通して L5-S1 椎体前面に変位計を設置し、固定椎間の可動域 (range of motion:ROM) を測定した。

健常脊柱の試験後、棘上・棘間靭帯と黄色靭帯切除、両側部分椎間関節切除、および椎間板部分切除 (後縦靭帯と後方線維輪の切離、および髄核の全摘出) を L5-6 椎間と L6-S1 椎間に行った。椎間板部分切除後、Isola spinal system の椎弓根スクリーと Brantigan Carbon I/F Cage を用いて 3 種の脊柱再建を連続的に行った。1) L5-S1 中間位椎弓根スクリー固定群 (中間位 PLF 群)、2) L5-S1 後弯位椎弓根スクリー固定群 (後弯位 PLF 群)、3) L5-S1 中間位椎弓根スクリー固定/椎体間 cage 併用群 (中間位 PLIF/PLF 群) である。PLF は椎弓根スクリー固定により、PLIF は椎体間 cage の使用により代用した。中間位 PLF 群には直線状のロッドを使用し、後弯位 PLF 群には固定椎間の後弯角は 30° となるように想定して曲げたロッドを使用した。中間位 PLIF/PLF 群には直線状のロッドと椎体間 cage を使用した。

結果

固定椎間の ROM：前屈試験では中間位 PLF 群、後弯位 PLF 群、および中間位 PLIF/PLF 群の ROM は、健常脊柱群に比し有意に低かった ($P < 0.05$)。中間位 PLIF/PLF 群の ROM は、中間位 PLF 群および後弯位 PLF 群に比し有意に低かった ($P < 0.05$)。中間位 PLF 群と後弯位 PLF 群の 2 群間に有意差はなかった。後屈試験では中間位 PLIF/PLF 群の ROM は健常脊柱群、中間位 PLF 群、および後弯位 PLF 群に比し有意に低かった ($P < 0.05$)。健常脊柱群、中間位 PLF 群、および後弯位 PLF 群の 3 群間に有意差はなかった。

椎間板内圧：前屈試験における、すべての再建群の隣接椎間板内圧は健常脊柱群に比し有意に高かった ($P < 0.05$)。中間位 PLIF/PLF 群の ROM は、健常脊柱群、中間位 PLF 群、および後弯位 PLF 群に比し有意に高かった ($P < 0.05$)。中間位 PLF 群と後弯位 PLF 群の 2 群間に有意差はなかった。後屈試験では、後弯位 PLF 群と中間位 PLIF/PLF 群の椎間板内圧が健常脊柱群に比し有意に高かった ($P < 0.05$)。健常脊柱群と中間位 PLF 群の 2 群間に有意差はなかった。後弯位 PLF 群と中間位 PLIF/PLF 群の椎間板内圧は、中間位 PLF 群に比し高い傾向にあったが統計学的に有意な差はなかった。

椎弓の歪み量：前屈試験において、すべての再建群の椎弓の歪み量が健常脊柱群に比し高い傾向にあったが、中間位 PLIF/PLF 群のみが有意に高かった。中間位 PLF 群、後弯位 PLF 群、および中間位 PLIF/PLF 群の 3 群間に有意差はなかった。後屈試験では、後弯位 PLF 群と中間位 PLIF/PLF 群の椎弓の歪み量が健常脊柱群に比し有意に高かった ($P < 0.05$)。中間位 PLF 群と健常脊柱群との 2 群間に有意差はなかった。中間位 PLF 群、後弯位 PLF 群、および中間位 PLIF/PLF 群の 3 群間に有意差はなかった。

考察

代表的脊椎 instrumentation には、sublaminar wiring や椎弓根スクリーシステムなどがある。Sublaminar wiring は上位頸椎疾患や脊柱側弯症に使用されるが、なかでも multistrand cable は従来の monofilament ワイヤーに比べ機械的に強固であり、柔軟性が高く、現在広く使用されている。しかし、その高い柔軟性により骨癒合後であっても術後に形態変化を生じ重篤な脊髄障害を呈することがあるため、その使用には注意を要する。一方、椎弓根スクリーシステムは中下位頸椎や腰椎疾患における最も強固な内固定具であり、外傷や変性疾患などによる不安定脊柱の再建に多く選択されている。しかし、術後早期に固定隣接椎の変性が進行したとの報告例が多くみられるようになった。こうした変性変化による症状は多岐にわたり、脊椎 instrumentation が広く使用される現在、解決すべき重要な問題として提起されている。

本研究では、仔牛脊柱に椎弓根スクリーと椎体間 cage を使用し脊柱再建モデルを作製し、固定隣接椎に与える生体力学的影響について検討した。その結果、PLF 単独による脊椎固定術において、固定椎間に後弯位が残存すれば上位隣接椎に過度の負荷がかかることが示唆された。さらに PLIF の併用が高い初期剛性をもたらし局所後弯を矯正する一方で、椎体間固定により、PLF 単独に比し隣接椎の早期の重篤な変性変化を惹起しうる可能性があることが示唆された。術前計画において、固定予定の隣接椎に変性変化が既に存在する場合、PLIF の併用には十分な注意が必要であると考えられる。

PLF 後に局所後弯が残存する場合、PLIF により生理的脊柱配列に矯正すべきか否かに関してこれまで報告例はなく、本研究で見出された結果が、今後脊椎外科学において、脊柱再建術を行うにあたっての手術適応を決定する重要な指標となり、また臨床試験や生体力学試験における固定隣接椎間の変性のメカニズムの解明にも貢献することが期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浪 明 男

副 査 教 授 岩 崎 喜 信

副 査 教 授 安 田 和 則

学 位 論 文 題 名

Biomechanical Effects of Spinal Reconstruction on Adjacent Motion Segment

(脊柱再建術が固定隣接椎間に与える生体力学的影響)

脊椎 instrumentation は再建脊柱の即時安定性の獲得や変形の矯正を目的に広く用いられている。1990年代より、骨癒合率の促進や生理的脊柱配列の再建を目的に椎弓根スクリューシステムによる後側方固定術に後方侵入椎体間固定術を併用した脊柱再建術が広くおこなわれている。しかし一方で、脊椎固定術は隣接椎間の負荷増大や早期変性を招くことが知られており、その程度は後側方固定術単独に比し脊柱剛性の高い椎体間固定術併用例でより大きいと考えられるが固定隣接椎間の変性のメカニズムは未だ不明な点が多い。またこうした変性変化による症状は多岐にわたり、脊椎 instrumentation が広く使用される現在、解決すべき重要な問題として提起されている。

本研究では、各種脊柱再建モデルを用い、固定隣接椎の椎間板内圧と椎弓の歪み量を測定し、隣接椎の前方、後方要素にかかる生体力学的影響を検討した。

新鮮仔牛屍体腰仙椎 (L2-S1) を使用し生体力学試験を行った。純粋モーメント負荷装置を用いて、非破壊性前後屈試験を行った (荷重量: $\pm 6\text{Nm}$)。固定椎間は L5-6, L6-S1 の 2 椎間とし、L4-5 を上位隣接椎間と定義した。単軸歪みゲージを L4 椎弓の L4-5 椎間関節直上に貼付し、上位隣接椎の椎弓の頭尾側方向の歪み量を測定した。針型圧力計を L4-5 椎間板中央部に留置し、椎間板内圧を測定した。前縦靭帯を貫通して L5-S1 椎体前面に変位計を設置し、固定椎間の可動域を測定した。健常脊柱の試験後、棘上・棘間靭帯と黄色靭帯切除、両側部分椎間関節切除、および椎間板部分切除を行った。その後、Isola spinal system の椎弓根スクリューと Brantigan Carbon I/F Cage を用いて 3 種の脊柱再建を連続的に行った。脊柱再建群は中間位椎弓根スクリュー固定群、後弯位椎弓根スクリュー固定群、及び中間位椎弓根スクリュー固定/椎体間 cage 併用群とした。

固定椎間の可動域は前後屈ともに、中間位椎弓根スクリュー固定/椎体間 cage 併用群が中間位、後弯位椎弓根スクリュー固定群に比し、有意な低値を示した。椎間板内圧、椎弓

の歪み量に関しては、前屈時、中間位椎弓根スクリュー固定/椎体間 cage 併用群が中間位、後弯位椎弓根スクリュー固定群よりも高い値を示した。後屈時には、後弯位椎弓根スクリュー固定群が中間位椎弓根スクリュー固定群に比し高値を示した。最も高い椎間板内圧、椎弓の歪み量は中間位椎弓根スクリュー固定/椎体間 cage 併用群で認められた。

今回の実験結果により、後側方固定術単独による脊椎固定術において、固定椎間に後弯位が残存すれば上位隣接椎に過度の負荷がかかることが示唆された。さらに後方進入椎体間固定術の併用が高い初期剛性をもたらし局所後弯を矯正する一方で、椎体間固定により、後側方固定術単独に比し隣接椎の早期の重篤な変性変化を惹起しうる可能性があることが示唆されると申請者より発表があった。

審査にあたり、副査岩崎喜信教授より後方進入椎体間固定術を併用する場合の適応例について、副査安田和則教授より、実験に使用した針型圧力計、歪みゲージの仕様とその使用法に関する質問と椎間板内の静水圧は実験中経時的に変化する可能性があるとのコメントがあった。主査三浪明男教授から臨床的見地より、腰椎に後弯位変形が既に存在する場合、後方進入椎体間固定術を行うにあたっての適応例や隣接椎に与える問題点についての質問があり、申請者はこれらの質問に対して今回行った生体力学実験の結果と過去の文献、申請者自身の臨床経験から適切に回答した。

この論文は、後側方固定術後に局所後弯が残存する場合、後方進入椎体間固定術により生理的脊柱配列に矯正すべきか否かに関して述べた独創的な研究であり、今後脊椎外科学において、脊柱再建術を行うにあたっての手術適応を決定する重要な指標となり、また臨床試験や生体力学試験における固定隣接椎間の変性のメカニズムの解明にも貢献す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、大学院博士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。