

学位論文題名

不安定性腰椎に対する椎弓根スクリュー使用の 後側方固定および後方進入椎体間固定の生体力学的検討

学位論文内容の要旨

I. 緒言

腰椎後方再建法は椎弓根スクリュー (pedicle screw : 以下 PS) 使用の後側方固定 (posterolateral fusion : 以下 PLF) が一般的である。良好な骨癒合率の一方で、スクリューの早期折損, 矯正損失, および偽関節発生の報告も少なくない。近年, 前方支持性の再建とより高い脊柱剛性を目的とし, 椎体間 cage 使用の後方進入椎体間固定 (posterior lumbar interbody fusion : 以下 PLIF) が普及している。しかし, 高い剛性の脊柱再建は, 隣接椎間により大きい応力をおよぼし, 早期変性を起こす可能性がある。したがって, 腰椎不安定性が再建脊柱の剛性と固定インプラントへの応力に与える影響, PLF および PLIF による隣接椎間への影響の解明は, 異なる不安定腰椎に対する再建法選択の上で重要な意味を持っている。しかし, 現在までこれに関する生体力学的研究の報告はない。

本研究の目的は, 異なる不安定腰椎に対する PLF および PLIF による再建脊柱の剛性, 固定インプラントの応力, および隣接椎間への力学的影響を比較し, PLIF を必要とする腰椎の不安定性を検討することである。

II. 材料と方法

新鮮仔牛屍体腰椎 (週齢 8-10 週, L3-L6) 10 個を使用した。椎間板, 靭帯を温存し, 傍脊柱筋群を除去した。検体を負荷装置に固定した際, L4-L5 椎間板が水平となるように L3 と L6 椎体を自動車修理用パテでマウントした。L4-L5 が固定椎間, L3-L4 と L5-L6 が上下隣接椎間である 3 椎間モデルとした。

健常脊柱の試験後, L4-L5 椎間の後方・前方要素に段階的に損傷を加えて不安定モデルを作製し, TSRH spinal system と Brantigan carbon cage を用い, 五種類の脊柱再建を行った: ①健常脊柱+PS 固定群, ②両側内側椎間関節切除 (棘上・棘間靭帯, 椎弓の一部, および椎間関節内側 1/2 の切除)+PS 固定群, ③両側全椎間関節切除+PS 固定群, ④椎間板部分切除 (L4-L5 椎間の後縦靭帯と後方線維輪の切離, および髄核の全摘出)+PS 固定群, ⑤椎間板部分切除+PS 固定/cage 併用群。①~④は異なる不安定腰椎に対する PLF を, ⑤は PLIF を想定した再建である。

刺入されたスクリュー基部の上下面とロッド中央部の前後面に一対の単軸ひずみゲージ (A と B) を貼付した。L3-L4 および L4-L5 前方に extensometer を設置し, 椎間変位を測定した。ひずみゲージおよび extensometer の出力をコンピューターで記録した。

モーメント負荷装置を用いて, 各群に前後屈試験 (荷重量 ± 6 Nm) を行った。 ± 6 Nm 負荷時の椎間変位 (mm), スクリューおよびロッドのひずみ量 ($\mu\epsilon$) により, 固定椎間 (L4-L5) の剛性値 [$=6$ (Nm) / 椎間変位 (mm)], スクリューおよびロッドの曲げひずみ量 [$=|$ ひずみ量 (A) $-$ ひずみ量 (B) $|/2$], 上位隣接椎間 (L3-L4) の変位 (前後屈運動

の中間位から荷重時の椎間変位)を算出し比較した。統計処理には反復測定分散分析と Fisher's PLSD を用い、危険率5%未満を有意と判定した。

III. 結果

1. 固定椎間 (L4-L5) の剛性値：前・後屈試験とも、椎間板部分切除+PS 固定群を除く他の再建群の剛性値は、健常脊柱群に比し有意に高かった。健常脊柱+PS 固定、両側内側椎間関節切除+PS 固定、および両側全椎間関節切除+PS 固定の3群間に有意差はなかった。しかし、この3群に比し、椎間板部分切除+PS 固定群の剛性値は有意に低かった。椎間板部分切除+PS 固定/cage 併用群の剛性値は他のすべての群に比し有意に高かった。
2. スクリューおよびロッドの曲げひずみ量：スクリューおよびロッドの曲げひずみ量を左右2本のスクリューおよびロッドの曲げひずみ量の平均値で表した。前・後屈試験時のスクリューおよびロッドの曲げひずみ量において、健常脊柱+PS 固定、両側内側椎間関節切除+PS 固定、および両側全椎間関節切除+PS 固定の3群間に有意差はなかった。しかし、この3群に比し、椎間板部分切除+PS 固定群のスクリューおよびロッドの曲げひずみ量は有意に大きかった。椎間板部分切除+PS 固定/cage 併用群のスクリューおよびロッドの曲げひずみ量は、他のすべての群に比し有意に小さかった。
3. 上位隣接椎間 (L3-L4) の変位：前・後屈試験とも、すべての再建群は健常脊柱群に比し有意に大きな変位を上位隣接椎間にもたらした。椎間板部分切除+PS 固定/cage 併用群の上位隣接椎間の変位は、健常脊柱+PS 固定群を除く他の再建群に比し有意に大きかった。

IV. 考察

PSを使用した脊柱再建にはインプラント折損、矯正損失、偽関節、および隣接椎間の変性脊柱管狭窄症の発生などの問題が伴い、いずれも治療成績の悪化を招く。これらの問題の解決には、十分な初期剛性の獲得とともにインプラントや隣接椎間へ過大な応力の回避が必要である。

本実験では、再建脊柱の剛性とスクリューおよびロッドの曲げひずみ量において、健常脊柱+PS 固定、両側内側椎間関節切除+PS 固定、および両側全椎間関節切除+PS 固定の3群間に有意差はなかった。健常脊柱に対するPS使用のPLFは、脊柱配列を保持、骨癒合を獲得、インプラント折損を回避する十分な力学的特性を有するといえる。したがって、脊柱前方の支持性が保たれていれば、手術操作による両側内側または全椎間関節切除を行った不安定脊柱に対し、PS使用のPLFは力学的に充分であり、PLIFの必要性は少ない。

一方、椎間板部分切除+PS 固定群では、健常脊柱+PS 固定、両側内側椎間関節切除+PS 固定、および両側全椎間関節切除+PS 固定の3群に比し、再建脊柱の剛性が低く、スクリューおよびロッドの曲げひずみ量が著しく増大した。この結果は脊柱前方の支持性が損なわれた場合、PS使用のPLFでは十分な脊椎安定性が得られず、かつ後方インプラントに過大な負荷が加わることを示唆する。さらに、この結果は前方支持性が破綻した例に、PS固定によるPLFではインプラント折損、前弯損失および偽関節の発生率が高い臨床報告を裏付ける。

本研究では、PS固定と椎体間cageの併用は、すべての再建法のうち、再建脊柱の剛性が最も高く、スクリューおよびロッドのひずみ量が最も低いことを示した。前方支持性が損なわれた例に対し、PLFは力学的に限界があり、前方支柱再建としてのPLIFを選択すべきであると考えられる。

脊椎固定術が隣接椎間における可動域の増大、椎間板や椎間関節の応力増大をもたらすことは、過去の生体力学実験により証明されている。また、このような力学的変化が隣接椎間の早期変性をもたらすと *in vivo* の実験で示されている。本実験では、PLIFはPLFと比較し、隣接椎間に大きい変位をもたらす、早期変性の危険性を高めることを示唆する。PLFで対処できる症例にはPLIFを用いるべきではないであろう。

本実験の結果をふまえ、さまざまな不安定性腰椎に対する適切な再建法の決定の鍵は、

その前方支持性の評価にある。そのため、腰椎変性疾患における前方支持性の評価法の早期確立が重要であると考える。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浪 明 男

副 査 教 授 安 田 和 則

副 査 教 授 渡 邊 雅 彦

学 位 論 文 題 名

不安定性腰椎に対する椎弓根スクリュー使用の 後側方固定および後方進入椎体間固定の生体力学的検討

椎弓根スクリュー（以下 PS）使用の後側方固定（以下 PLF）および後方進入椎体間固定（以下 PLIF）が腰椎後方経由の再建法としてよく用いられている。しかし、様々な腰椎不安定性に対する両固定術の使い分け、および両固定術による隣接椎間への力学的影響についてはまだ明らかではない。本研究の目的は、異なる不安定性腰椎に対する PS 使用の PLF および PLIF による再建脊柱の剛性、固定インプラントの応力、および隣接椎間への力学的影響を比較し、PLIF を必要とする腰椎の不安定性を検討することである。新鮮仔牛屍体腰椎（週齢 8-10 週, L3-L6）10 個を使用した。L4-L5 が固定椎間、L3-L4 と L5-L6 が上下隣接椎間である 3 椎間モデルとした。健常脊柱の試験後、L4-L5 椎間の後方・前方要素に段階的に損傷を加えて不安定モデルを作製し、TSRH spinal system と Brantigan carbon cage を用い、五種類の脊柱再建を行った：①健常脊柱+PS 固定群、②両側内側椎間関節切除+PS 固定群、③両側全椎間関節切除+PS 固定群、④椎間板部分切除+PS 固定群、⑤椎間板部分切除+PS 固定/cage 併用群。①～④は異なる不安定性腰椎に対する PLF を、⑤は PLIF を想定した再建である。スクリュー基部の上下面とロッド中央部の前後面に一对の単軸ひずみゲージを貼付し、インプラントのひずみ量を測定した。L3-L4 および L4-L5 前方に extensometer を設置し、椎間変位を測定した。純粋モーメント負荷装置を用いて、各群に前後屈試験（荷重量 ±6 Nm）を行い、固定椎間（L4-L5）の剛性値、スクリューおよびロッドの曲げひずみ量、上位隣接椎間（L3-L4）の変位を算出し比較した。統計処理には反復測定分散分析と Fisher's PLSD を用い、危険率 5% 未満を有意と判定した。再建脊柱の剛性とスクリューおよびロッドの曲げひずみ量において、健常脊柱+PS 固定、両側内側椎間関節切除+PS 固定、および両側全椎間関節切除+PS 固定の 3 群間に有意差はなかった。この結果より、脊柱前方の支持性が保たれていれば、手術操作による両側内側または全椎間関節切除を行った不安定脊柱に対し、PS 使用の PLF は力学的に充分であり、PLIF の必要性は少ないと考えられた。一方、椎間板部分切除+PS 固定群では、健常脊柱+PS 固定、両側内側椎間関節切除+PS 固定、および両側全椎間関節切除+PS 固定の 3 群に比し、再建脊柱の剛性が低く、スクリューおよびロッドの曲げひずみ量が著しく増大した。この結果は脊柱前方の支持性が損なわれた場合、PS 使用の PLF では十分な脊椎安定性が得られず、かつ後方インプラントに過大

な負荷が加わることを示唆する。さらに、この結果は前方支持性が破綻した例に、PS 固定による PLF ではインプラント折損、前弯損失および偽関節の発生率が高い臨床報告を裏付ける。本研究では、PS 固定と椎体間 cage の併用は、すべての再建法のうち、再建脊柱の剛性が最も高く、スクリユーおよびロッドのひずみ量が最も低いことを示した。前方支持性が損なわれた例に対し、PLF は力学的に限界があり、前方支柱再建としての PLIF を選択すべきであると考えられた。脊椎固定術が隣接椎間における可動域の増大、椎間板や椎間関節の応力増大をもたらすことは、過去の生体力学実験により証明されている。また、このような力学的変化が隣接椎間の早期変性をもたらすと *in vivo* の実験で示されている。本実験では、PLIF は PLF と比較し、隣接椎間に大きい変位をもたらし、早期変性の危険性を高めることを示唆する。PLF で対処できる症例には PLIF を用いるべきではないと考えられた。本実験の結果をふまえ、様々な不安定性腰椎に対する適切な再建法の決定の鍵は、その前方支持性の評価にある。そのため、腰椎変性疾患における前方支持性の評価法の早期確立が重要であると考えられた。

審査にあたり、副査渡邊教授から腰椎を用いた本研究の結果を他の脊椎部位、小児や老人などの違う年齢層、および変性疾患の以外の脊椎外傷や腫瘍などに適用することができるかについて、副査安田教授から実験後期に椎弓根スクリユーの固定性が悪くなる可能性と荷重量 6 Nm の選択の理由について、また、主査三浪教授から本実験に用いたケージと現在臨床に使用されている他のケージの差についての質問があった。申請者はこれらの質問に対して自己の研究結果と文献的知識に基づいて適切に回答した。

以上、本研究は腰椎不安定性に対する PLF および PLIF による再建脊柱の剛性や隣接椎間への力学的影響に関する独創的な研究であり、今後この研究成果が様々な不安定性腰椎に対する適切な再建法の選択に応用されると期待される。

審査員一同はこれらの成果を高く評価し、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）の学位を受ける資格を有するものと判定した。