

授与番号	甲第 1890 号
------	-----------

論文内容の要旨

Comparison of susceptibility to implant failure in the lateral, posterior, and transforaminal lumbar interbody fusion: Finite element analysis

(有限要素法を用いた側方経路, 後方経路, 経椎間孔的腰椎椎体間固定術におけるインプラント不良発生の比較)

(及川亮, 遠藤寛興, 山部大輔, 千葉佑介, 及川諒介, 楊寛隆, 西田周泰, 村上秀樹, 陳献, 坂井孝司, 土井田稔)

(World Neurosurgery 令和4年掲載予定)

I. 研究目的

腰椎すべり症に対する手術療法として腰椎椎体間固定術の良好な成績が報告されてきた。術式としては, 従来後方アプローチで手術を行う後方経路腰椎椎体間固定術 (posterior lumbar interbody fusion; PLIF) や経椎間孔的腰椎椎体間固定術 (transforaminal lumbar interbody fusion; TLIF) が主に行われていた。これらは腰椎後方支持組織である, 筋肉, 靭帯, 関節包, 椎間関節への処置が必要であり, 侵襲が大きいとされた。近年, 腰椎後方支持組織への処置を必要としない側方アプローチ, 側方経路腰椎椎体間固定術 (lateral lumbar interbody fusion; LLIF) が登場したことにより, 解剖学的構造を温存したまま椎体間ケージの挿入が可能となった。これらの腰椎椎体間固定術では椎弓根スクリューによる固定が併用され, より強固な固定力を得ることができるようになった。しかし, 一方でロッドの折損, スクリューの緩みや折損といった implant failure が報告されるようになった。このような症例では再手術が必要となることがあり, 解決すべき課題である。

3次元有限要素法 (three dimensional finite element method; 3D-FEM) を用いて脊椎脊髄外科手術モデルを作成し, 後方インプラント等に生じる応力を比較検討した報告, 例えば, 腰椎椎体間固定術に関する FEM を用いた研究として, PLIF と TLIF の後方インプラントに生じる応力を比較したものなど, 2種の術式を比較した報告は多いが, LLIF, PLIF, TLIF の3種の術式の比較を行った報告はない。我々は3種類の術式を比較することで, より詳細な情報を臨床的に提供できると考えた。

本研究では, 3D-FEM を用いて LLIF, PLIF, TLIF における後方インプラントやスクリュー周囲の椎体に生じる応力を比較し, 各術式での implant failure の可能性について検討した。

II. 研究対象ならび方法

成人女性の腰椎 CT 画像を基に, Synopsys 社 (Mountain View, CA, USA) の Scan IP を用いて第3-第5腰椎, 前縦靭帯, 後縦靭帯, 黄色靭帯, 椎間板 (線維輪, 髄核) からなる3次元有限要素モデルを作成した。それに加え, MSC Software 社 (Newport Beach, CA, USA) の Patran を用いて関節包靭帯, 棘間靭帯, 棘上靭帯, 横突間靭帯を作成し, コンピュー

ター上で腰椎を再現したモデルを作成した。

Scan IP を用いてモデルの L4/5 椎間板腔に実際に臨床で使用している椎体間ケージと同じサイズの直方体を挿入し、実際の手術手技に基づいて骨や靭帯の切除を行い、LLIF、PLIF、TLIF モデルを作成した。続いて、Patran を用いて、すべてのモデルにおいて L5 の下面を完全に固定し、伸展・屈曲・側屈・回旋を再現するように L3 の上面に 400N の負荷と 7.5Nm のモーメントを加えた。この条件下で、それぞれのモデルでの後方インプラントに生じる応力とスクリュー周囲の椎体に生じる応力の比較・検討を行った。

III. 研究結果

1. LLIF モデルの後方インプラントに生じる最大応力は、伸展、屈曲、右側屈、左側屈、右回旋、左回旋の順に、60.6MPa、20.3MPa、26.4MPa、24.0MPa、47.9MPa、46.6MPa だった。
2. PLIF モデルの後方インプラントに生じる最大応力は、伸展、屈曲、右側屈、左側屈、右回旋、左回旋の順に、66.2MPa、28.8MPa、40.0MPa、56.7MPa、62.6MPa、65.9MPa だった。
3. TLIF モデルの後方インプラントに生じる最大応力は、伸展、屈曲、右側屈、左側屈、右回旋、左回旋の順に、71.2MPa、41.0MPa、45.0MPa、83.6MPa、63.2MPa、80.7MPa だった。
4. 後方インプラントに生じる応力は、LLIF、PLIF、TLIF の順に大きくなった。
5. LLIF モデルのスクリュー周囲の椎体に生じる最大応力は、伸展、屈曲、右側屈、左側屈、右回旋、左回旋の順に、66.5MPa、17.6MPa、10.7MPa、12.1MPa、35.6MPa、47.5MPa だった。
6. PLIF モデルのスクリュー周囲の椎体に生じる最大応力は、伸展、屈曲、右側屈、左側屈、右回旋、左回旋の順に、71.7MPa、26.4MPa、17.3MPa、18.8MPa、50.1MPa、51.5MPa だった。
7. TLIF モデルのスクリュー周囲の椎体に生じる最大応力は、伸展、屈曲、右側屈、左側屈、右回旋、左回旋の順に、78.0MPa、30.6MPa、21.8MPa、21.1MPa、50.9MPa、55.7MPa だった。
8. スクリュー周囲の椎体に生じる応力は、LLIF、PLIF、TLIF の順に大きくなった。

IV. 結 語

インプラント折損は応力の上昇により生じると考えられている。本研究では、後方インプラントに生じる応力は LLIF で最も小さく、PLIF、TLIF の順に大きくなった。よって、インプラント折損は LLIF で最も生じにくく、PLIF、TLIF の順に生じやすいという可能性が示唆された。

また、椎体に生じる応力上昇は骨梁の変性を引き起こすことが知られている。このため、スクリュー周囲の椎体の応力が上昇することで同部位の骨梁に変性が生じ、最終的にスクリューの緩みを引き起こすと考えられる。本研究では、スクリュー周囲の椎体に生じる応力は LLIF で最も小さく、PLIF、TLIF の順に大きくなった。よって、スクリューの緩みは LLIF で最も生じにくく、PLIF、TLIF の順に生じやすいという可能性が示唆された。

術者は術前にこれらを把握したうえで術式の選択を行い、術後も後方インプラント折損やスクリューの緩みといった implant failure 発生の可能性について把握したうえで経過観察を行う必要がある。

論文審査の結果の要旨

論文審査担当者

主査 教授 別府 高明 (脳神経外科学講座)

副査 教授 土井田 稔 (整形外科学講座)

副査 特任講師 丸山 盛貴 (整形外科学講座)

腰椎すべり症に対する外科的治療として腰椎椎体間固定術が施行される。腰椎椎体間固定術には後方経路、椎体孔経路、側方経路の3つの術式があるが、それぞれでロッドの破損やスクリューの緩みといったインプラント不良が問題となっている。インプラント不良の程度は3次元有限要素法を用いた脊椎脊髄外科手術モデルで推測できるが、3つの術式間で比較した研究は未だ存在しない。本研究では、3次元有限要素法による3次元モデルにおいて、インプラントおよび椎体に対するストレス(=応力)の程度を3術式のそれぞれで測定し比較することを目的とした。

成人女性の腰椎CT画像を元に、2つのスキャナーを用いて第3-第5腰椎の椎体、椎間板、周囲靭帯、関節包を含む3次元基本モデルを作成。さらに、実際の手術手技と同様に椎間ゲージ挿入と骨や靭帯の切除を3つの術式毎に再現し3つのモデルを作成した。モデル毎に伸展、屈曲、左右側屈、左右回旋の6通りの運動負荷を掛け、インプラントおよびスクリュー周囲椎体にかかる応力を測定し比較した。

結果として、インプラントにかかる最大応力は伸展、屈曲、左右側屈、左右回旋の6通りのすべてにおいて、椎間孔経由、後方経由、側方経由の順に高かった。また、スクリュー周囲椎体にかかる最大応力も、椎間孔経由、後方経由、側方経由の順に高かった。

インプラント損傷および椎体の変性によるスクリューの緩みは掛かる応力の上昇によって生じるとされているが、本研究によって、術式間でインプラント自体および椎体への応力の程度には差があり、椎間孔経由、後方経由、側方経由の順に最大応力が強いことが明らかとなった。この結果は臨床現場において術式選択などに応用可能で、臨床への貢献が期待できる。本研究は価値ある研究であり、学位に値する研究・論文である。

試験・試問の結果の要旨

研究方法の妥当性、統計解析の妥当性、研究結果の考察、本研究の今後の発展・展望などについて試問を行い、適切な解答を得た。学位に値する学識を有していると考えられる。また、学位論文の作成にあたっては、剽窃・盗作等の研究不正は無いことを確認した。

参考論文

- 1) 感染が原因と考えられる非外傷性骨化性筋炎の小児の1例(及川 亮、他3名と共著) 臨床雑誌整形外科, 72巻, 10号(2021): p1070-1073.
- 2) 手根管症候群に対する安全な鏡視下手術 手根管外鏡視手根管開放術(佐藤 光太郎、他7名と共著) 別冊整形外科, 1巻, 77号(2020): p141-144.