

椎弓切除術の解析に向けた L4-L5 腰椎有限要素モデルの開発 Development of L4-L5 lumbar finite element model for analysis of laminectomy

○遠藤翼¹, 松本光司², 中西一義², 内木場文男³, 渡邊満洋³

*Tsubasa Endo¹, Koji Matsumoto², Kazuyoshi Nakanishi², Fumio Uchikoba³, Mitsuhiro Watanabe³

Abstract: To develop new method of laminectomy, a finite element analysis model was prepared. The L4-L5 lumbar analysis model was created by using lumbar three-dimensional computed tomography image, and then added each element in stages to perform numerical analysis. It was observed that the nucleus pulposus and capsular ligament inhibit movement during flexion, and the nucleus pulposus and anterior longitudinal ligament inhibit movement during extension. The motion angle of lumbar spine was larger in the model with bilateral laminectomy than in the model with unilateral laminectomy.

1. 緒言

椎弓切除術とは腰痛時における外科的治療法の一つであり、脊椎後方の椎弓を切除し、肥厚した靭帯を除去することで神経の圧迫を解除する外科的治療法である。この治療法はブロック注射などの保存的治療では改善されない場合に施されるが、椎弓の切除により後方支持性が低下するリスクがあるため、より侵襲の少ない手術方法が模索されている。

手術方法の検討は一般的に献体された遺体が用いられているが、献体不足や倫理的課題、再現性等が課題として挙げられている。数値解析は実際の現象をコンピュータで再現するため、これらの課題の解決策として期待されている。数値解析を効率良く正確に行うためには、適切な解析モデルの構築が不可欠である。

本研究では、椎弓切除術の手術方法を数値解析によって検討できる腰椎の解析モデルを構築することを目的に、実際の腰椎の動作を再現可能な解析モデルの作成に取り組んだ。さらに、作成した解析モデルに片側椎弓切除術 (UL) 及び両側椎弓切除術 (BL) を施し、可動域の妥当性を評価した。

2. 解析モデルの作成

作成した腰椎の解析モデルを Fig. 1 に示す。本研究では、5つの椎骨で構成される腰椎の中でも最下部の L4-L5 腰椎モデルの作成を行った。解析モデルの外形は、腰椎疾患や強い変性がない、32歳女性の腰椎の 3D-CT 像を基に、Autodesk Fusion 360 を使用して作成した。各椎骨は厚さ 1 mm の皮質骨 (CorB と表記) で囲った海绵骨 (CanB と表記) と椎弓で構成した。椎骨間の椎間板は線維輪 (Annulus と表記) と髄核 (NUC と表記) の二重構造とし、NUC の体積は椎間板全体の半分とした。また、Annulus は線維体を配置して強化した。靭帯

は、前縦靭帯 (ALL と表記)、後縦靭帯 (PLL と表記)、関節包靭帯 (FC と表記)、黄色靭帯 (FL と表記)、棘間靭帯 (ISL と表記)、棘上靭帯 (SSL と表記) の 6 種を作成し、靭帯の特徴的な動作を再現するために軸方向の引張力にのみ抵抗するトラス要素で作成した。各構造は六面体メッシュで分割し、各材料部位の特性は文献値^{[1],[2]}を用いた。

各構造の動作への影響を調べるために、L4-L5 と Annulus のみで構成した解析モデルをもとに、NUC, ALL, PLL, FC, FL, ISL, SSL を段階的に加えて解析を行った。なお、全ての構造がそろった解析モデルを Intact モデルとした。また、椎弓切除術の効果を調査するために、UL 及び BL したモデルの動作解析を行った。後方から観察した Intact, UL, BL モデルを Fig. 2 に示す。UL モデルは Intact モデルから L4 の左側の FL と椎弓の一部を除去して作成し、BL モデルは FL, ISL, SSL と椎弓の一部を除去して作成した。

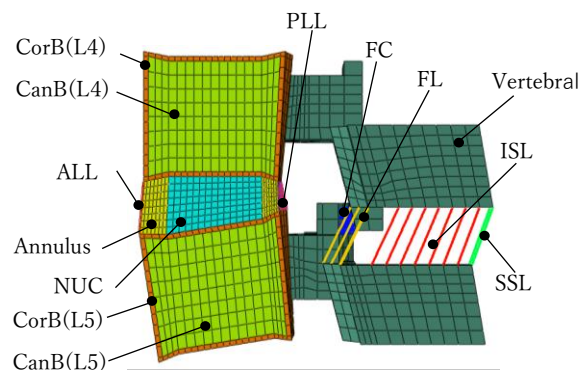


Fig. 1 Cross-section of the L4-L5 lumbar vertebrae model

3. 解析方法

作成した解析モデルに対して負荷を加え、動作範囲を実際の腰椎の文献値^[3]と比較した。動作の解析には

1: 日大理工・院 (前)・精機 2: 日大医・教員 3: 日大理工・教員・精機

Abaqus CAE による有限要素法を用いた。まず、L5 椎体の底面を固定し、L4 上面中央を起点として 2.5 Nm のモーメントを加え、屈曲の動作を再現した。負荷による動作の程度は、その可動域により評価した。可動域は、負荷を加える前後の椎体間の角度差を用いて評価した。測定された可動域と実際の腰椎における L5 椎骨に対する L4 椎骨の可動域を比較し、作成した解析モデルの各構造の妥当性を検討した。

4. 結果及び考察

作成した各種解析モデルに屈曲の動作を加えた際に生じた可動域を Fig. 3 に示す。赤棒及び水色棒で示されているものはそれぞれ本研究で作成した解析モデルによって得られた可動域及び文献^[3]で示されている実際の人体における腰椎の可動域の値である。また、水色棒に付してあるエラーバーは個人差による可動域の上限と下限を示している。数値解析によって得られた可動域は、すべての条件で実際の人体の可動域の個人差に収まっており、各種解析モデルの大小関係と同様な傾向が認められた。

Intact, UL, BL モデルに屈曲の動作を加えた際の可動域と Intact モデルのからの増加率を Table 1 に示す。いずれも得られた可動域は Intact モデルよりも大きな値であり、さらに UL モデルよりも BL モデルの可動域のほうが大きかった。椎弓切除術は神経の圧迫を骨の一部と靭帯を除去して腰椎を動作しやすくすることによって緩和する手術であるため、除去する骨や靭帯が多い BL は UL よりも可動域は大きくなると考えられる。したがって、本研究で得られた結果は妥当であり、本解析モデルは椎弓切除の手術を検討するための解析モデルとして適していると考えられる。

5. 参考研究

[1] Matsumoto, K., Shah, A., Kelkar, A., Parajuli, D., Sudershan, S., Goel, V. and Sairyo, K.: Biomechanical evaluation of a novel decompression surgery: Transforaminal full-endoscopic lateral recess decompression (TE-LRD), North American Spine Society Journal, 5, 100045, 2021.
 [2] Schmidt, H., Heuer, F., Drumm, J., Klezl, Z., Claes, L., Wilke, H.J.: Application of a calibration method provides more realistic results for a finite element model of a lumbar spinal segment, Clinical Biomechanics, 22, 4, 377-384, 2007.
 [3] Heuer, F., Schmidt, H., Klezl, Z., Claes, L., Wilke, H.J.: Stepwise reduction of functional spinal structures increase range of motion and change lordosis angle, Journal of

Biomechanics 40, 2, 271-280, 2007.

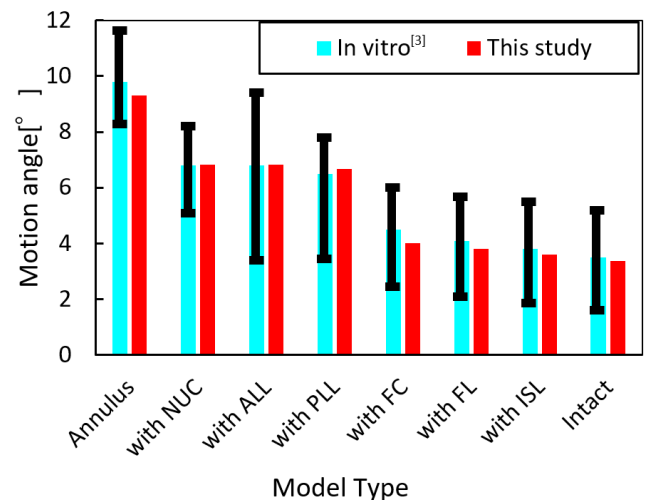
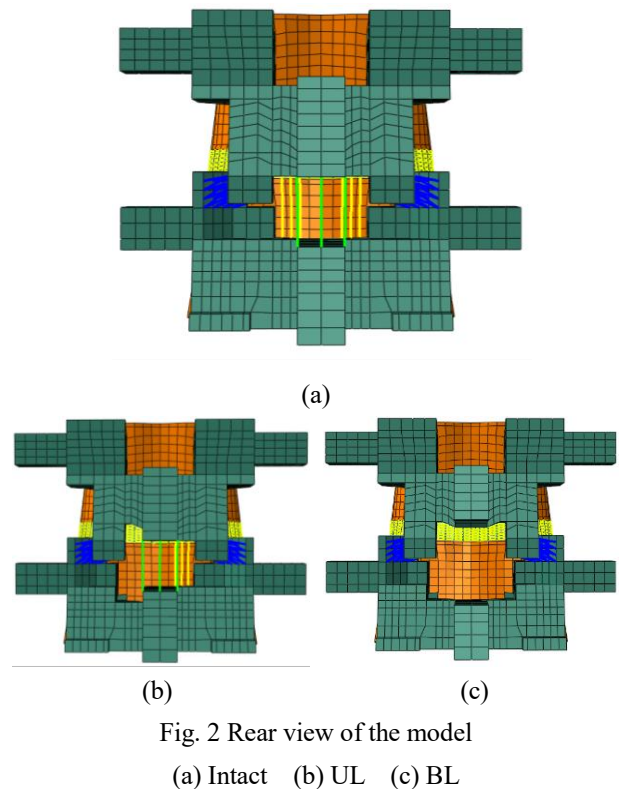


Fig. 3 Motion range in flexion

Table 1 Motion angle and angle increase rate

Model Type	Intact	UL	BL
Motion angle [°]	3.875	3.879	5.426
Increased angle from Intact [%]		0.12	40.01