

厚生労働科学研究費補助金 難治性疾患政策研究事業
分担研究報告書

脊柱靱帯骨化症に関する調査研究

研究分担者 氏名 所属機関 役職

西田 周泰	山口大学医学部付属病院	整形外科
鈴木 秀典	同	
船場 真裕	同	
藤本 和弘	同	
池田 裕暁	同	

研究要旨 頰椎後縦靱帯骨化症 (Cervical ossification of Posterior Longitudinal Ligament: C-OPLL) に対して後方除圧を行った場合、前方の骨化が残存、特に K- (-) の症例では、後方除圧の効果が乏しくなり、再度神経学的に悪化する症例を認める。このような症例に対しては後方固定術の有用性が報告されているが、後方固定の範囲によってどの程度の効果が得られるかは不明であり、今回有限要素法 (Finite Element Analysis: FEA) を使用して解析した。

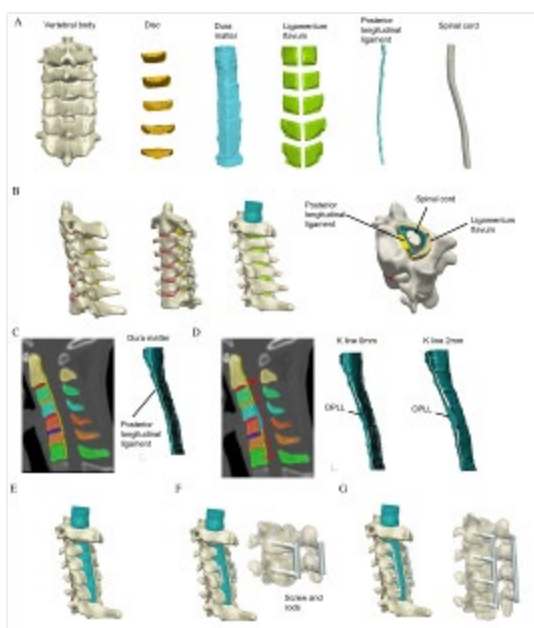
- A. 研究目的
頰椎 3D FE モデルを作成し、OPLL による術前圧迫モデル、後方除圧モデル、後方除圧固定モデルを作成し、脊髄への応力解析を行う。
- B. 研究方法
FE モデルは後弯アライメントの成人被験者の CT より作成した。FE ソフトウェア (simpleware ScanIP, version M-2017.06; Synopsys Inc, Mountain View, CA, USA) を用いて実施した。脊椎を抽出した後、海綿骨と皮質骨としてマッピングし、椎間板も作成した。前縦靱帯 (ALL)、後縦靱帯 (PLL) および靱帯 (LF) をモデルに追加した (図 1A)。C2-C7 後弯角度: 15°、cSVA: 20mm であった。要素数は 764,100、節点数は 201,837 であった。脊髄モデルは、Kameyama らの報告の各脊髄セグメントにおける平均横径と前後径を使用してモデル化した。この解析では、脊椎のさまざまな構成要素
- のヤング係数とポアソン比を文献から取得した。
- OPLL モデル
圧迫の程度には K-line を使用した。C4-C5 レベルの K-line と同等の圧迫モデル (K-line 0) と K-line を 2mm 超えたモデル (K-line 2) が作成された。
- Laminectomy (LN) モデル
C3-C6 レベルの椎弓切除モデルを作成した。
- 後方除圧固定術 (the posterior decompression fixation: PDF) モデル
LN モデルのインストゥルメンテーションは、直径 3.5mm、長さ 16mm の C4-C5 および C3-C6 LMS で構成されていた。次に、側方マスキュリーの頭部に 3.5mm のロッドが接続された。側方マスキュリーとロッドは、チタン合金 (Ti-6Al-4V) の材料特性を割り当てた。

荷重と境界条件

C2 歯状突起、頸椎、硬膜に 1.5Nm の純モーメントをかけ、屈曲・伸展を行った。C7 椎骨の下端板は固定した。解析は Patran と MARC (MSC Software, Newport Beach, CA, USA) を用いて行った。

データ解析

術前モデルとして正常、K-line 0mm、K-line 2mm、術後モデルとして LN-K-line 0mm、PDF (C4-C5)-K-line 0mm、PDF (C4-C6)-K-line 0mm、LN-K-line 2mm、PDF (C4-C5)-K-line 2mm、PDF (C3-C6)-K-line 2mm について屈曲、伸展時の脊髄応力を算出した。

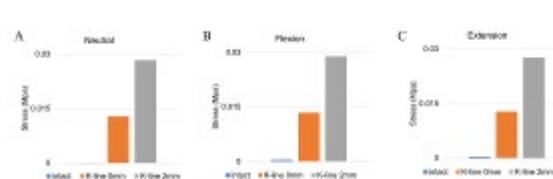


C. 研究結果

正常、K-line 0mm、K-line 2mm の比較 (術前モデル)

中立姿勢、屈曲、伸展において、圧迫が大

きくなるにつれて、正常モデルに比べて脊髄への応力が大きくなった (下図)。

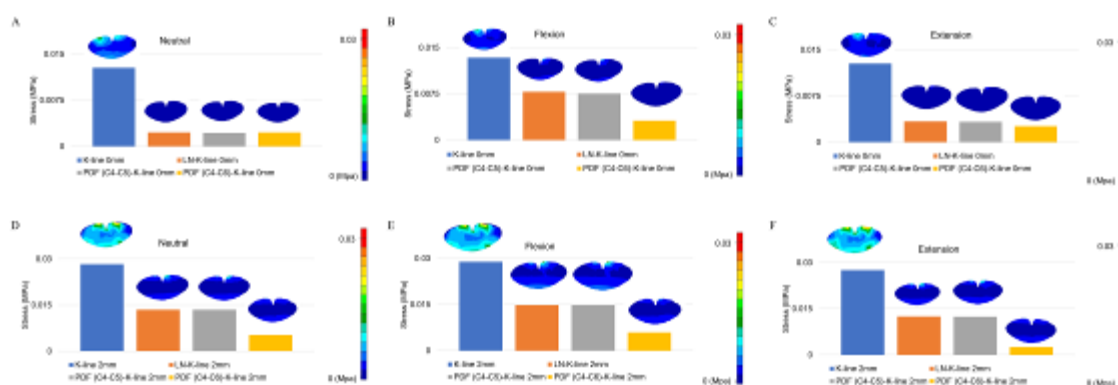


K ライン 0mm モデル

LN-K-line 0mm、PDF (C4-C5)-K-line 0mm、PDF (C4-C6)-K-line 0mm の脊髄への応力は、K-line 0mm モデルに比べてそれぞれ 82%減少した。屈曲時、LN-K-line 0mm、PDF (C4-C5)-K-line 0mm、PDF (C4-C6)-K-line 0mm モデルの脊髄への応力は、K-line 0mm モデルと比較してそれぞれ 41%、44%、77%減少した。伸展時、LN-K-line 0mm、PDF (C4-C5)-K-line 0mm、PDF (C4-C6)-K-line 0mm モデルの脊髄への応力は、K-line 0mm モデルと比較してそれぞれ 74%、74%、80%減少した。

K-line 2mm モデル

中立姿勢において、LN-K-line 2mm、PDF (C4-C5)-K-line 2mm、PDF (C4-C6)-K-line 2mm の脊髄への応力は、K-line 2mm モデルと比較してそれぞれ 52%、52%、61%減少した。屈曲時、LN-K-line 2mm、PDF (C4-C5)-K-line 2mm、PDF (C4-C6)-K-line 2mm モデルの脊髄への応力は、K-line 2mm モデルと比べてそれぞれ 49%、49%、80%減少した。伸展時、LN-K-line 2mm、PDF (C4-C5)-K-line 2mm、PDF (C4-C6)-K-line 2mm モデルの脊髄への応力は、K-line 2mm モデルと比較してそれぞれ 54%、55%、82%減少した。



D. 考察、

臨床的には、C-OPLL に対する後方除圧は、間接除圧法であり、良好な成績が報告されている。しかし、後弯アライメントや骨化の脊柱管占有率が大きい患者では、脊髓の除圧が不十分であり、臨床成績は不良という報告もある。より侵襲的ではあるが、後方固定術を加えることで、前方除圧術と固定術を併用した場合と同様の治療成績が得られることが示されている。後方固定は、後弯変形を防ぎ、頸椎の可動性を安定させる。しかし、固定椎間を短くするか長くするかは結論が出ていない。K ライン (-) は骨化占有率が高いことを示す。今回の結果では、K-line 2mm モデルは脊椎内応力が高いことがわかった。また、後方除圧により、中立姿勢、K-line 0mm、K-line 2mm では、脊椎内応力が低下する。しかし、LN と PDF (C4-C5) では、特に屈曲と伸展で脊椎内応力が増加し、K-line 2mm でより明確であり、これは過去の報告と一致している。C-OPLL の長い椎間固定は、脊髓の応力の増加を防ぐことができる。

生体力学的研究において、Cadaver では OPLL の脊髓圧迫は報告されていないが、後弯した頸椎の脊髓内圧は報告されている。

Chavanne らは、Cadaver で脊髓実質内圧を直接測定した。彼らは、頸椎後弯症では 20 度を超えると脊髓実質内圧が有意に上昇することを報告した。Winestone らは、後弯頸椎を作成し、後方除圧後の脊髓実質内圧を測定した。正常モデルでは C4-C5 の脊髓内圧は 0mmHg であったが、40mmHg まで上昇させて頸椎後弯変形を作成した。後方除圧により圧は 20% しか減少しなかった。彼らは、頸椎後弯変形における脊髓の応力に対する後方除圧の効果は比較的小さいと報告した。後弯が強くなると脊髓への応力が増加することを示した研究もある。脊髓の力／応力について検討したところ、Harrison らは、後弯では力は縦方向の引張力と横方向の負荷力に大別できると報告した。イヌの脊髓の in vitro および in vivo の研究では、22% を超える脊髓の伸長により、脊髓の間質圧が上昇した。Henderson は、脊髓の伸張損傷は、脊髓が後弯して変位し、引き伸ばされたときに引き起こされると報告した。屈曲が最も大きい頸胸椎移行部では、脊髓はその長さの 24% も伸張した。これらの結果は、臨床的に、後弯頸椎では減圧術の効果が低い理由を説明している。本研究では、術前モデルと除圧モデルの両方で、屈曲時の脊髓内応力の増加が見られた。こ

れは、後弯が進み、脊髓の引張力が増加したためと考えられる。また、C-OPLLにより局所的に後弯角度が増加した可能性もある。

FE 研究において、OPLL を用いた脊髓圧迫解析は行われているものの、脊髓のみを抽出して解析している。西田らは、OPLL のサイズが大きくなるにつれ(10%、20%、30%)、セグメント運動の増加(5°、10°、15°)に伴い脊髓の応力が増加し、固定することで椎間移動が減少し応力の増加を防ぐと報告した。しかし、脊髓と椎体が連動していないこと、圧迫が脊髓の前後径で表現されていること、アライメントが考慮されていないことなどが問題であった。本研究でK-line を用いたところ、脊髓内応力は圧迫とともに増加することがわかった。また、LN や short PDF では、脊髓内に動的要因が残存するため、脊髓応力は低下しなかった。

E. 結論

本研究では、C-OPLL と後方除圧の脊髓の生体力学的応力、およびFE解析によるPDFを検討した。K line (-) と頸椎のkyphotic alignment は脊髓内応力を上昇させ、後方除圧とshort fixation は除圧効果が低い。kyphotic な頸椎OPLL では、後方アプローチで脊椎の可動性をコントロールすることが必須である。

F. 健康危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Nishida N, Jiang F, Asano T, Tome R, Kumaran Y, Imajo Y, Suzuki H, Funaba M, Ohgi J, Chen X, Sakai T. Effect of posterior

decompression with and without fixation on a kyphotic cervicospine with ossification of the posterior longitudinal ligament. *Spinal Cord*. 2022 Oct 10

Suzuki H, Funaba M, Imajo Y, Yokogawa N, Sasagawa T, Ando K, Nakashima H, Segi N, Funayama T, Eto F, Watanabe K, Yamane J, Furuya T, Nakajima H, Hasegawa T, Terashima Y, Ikegami S, Inoue G, Kaito T, Kato S. Blunt Cerebrovascular Injury in the Elderly with Traumatic Cervical Spine Injuries: Results of a Retrospective Multicenter Study of 1512 Cases in Japan. *J Neurotrauma*. 2023 Jan 31.

(発表誌名巻号・頁・発行年等も記入)

H. 知的財産権の出願・登録状況
なし