

伸縮性を持つ脊椎ロッドの設計及び評価

藤原基芳*

Design and Evaluation of Elastic Spinal Rods

Motoyoshi FUJIWARA

1. はじめに

椎間板ヘルニア等の脊椎疾患のうち、重傷な場合は最終手段として脊椎固定術という手術を行う。脊椎固定術とは、上下の椎骨をプレートやスクリュー、ロッド、スペーサーと呼ばれる器具を用いて固定し、脊椎を安定させる手術である。近年は、椎弓根スクリューとロッドを用いて上下の椎骨を強固に連結する手術が多用されている¹⁾。この方法により治療の成功率は上がったが、強固に固定することにより手術をした椎間の隣接椎間に障害（すべりや狭窄、ヘルニアなど）が発生する患者の割合が上昇している。森ら²⁾によると PS (Pedicle screw, 椎弓根スクリュー(固定術後 9 年以上経過した患者 31 例中, 18 例で隣接椎間障害が発生したと報告されている。隣接椎間障害の発生によって再手術を余儀なくされることもある。

本事業では隣接椎間障害を発生しにくい、可動性を持つロッドを開発することを目標とした。身体の屈曲動作の際にインプラントの脊椎関節を繋ぐロッドに可動性を持たせる構造にして関節への負荷を減らし、剛性ロッドではなく柔らかく体の動きに追随させて繋ぐことで障害要因を減らすことを目指す。

可動性を持つロッドを実現するために回転対偶や伸縮対偶を用いたロッドが過去に販売されている。また、エラストマーを用いて伸縮性を持たせたロッドも発表されている³⁾。これらのロッドでは繰り返し負荷に対する強度に不安がある。したがって、本研究では材料を変更しないで、かつ回

転対偶と伸縮対偶を持たない構造のロッドの開発を目指した。

2. 設計及び評価の手順

2.1 目標値の設定

著者は過去のプロジェクト⁴⁾において、脊椎固定術に使用する通常の丸棒のロッドの断面積を 1/2 倍にして脊椎可動性評価試験を行った。ロッドの断面積を 1/2 倍にすると引張強度および剛性が 1/2 倍になり伸びは 2 倍になるが、脊椎の可動性にほとんど影響がなかった。また、この時の結果よりロッドの屈曲を大きくするより伸縮を大きくする方が脊椎の可動性向上に有効ではないかということが示唆された。

過去にロッドを脊椎に適用した可動性評価試験は多数行われているが、可動性評価試験時にロッドにかかる負荷及び伸縮長さは計測されていない。そこで、今年度は通常の丸棒のロッドの 1/2 倍の引張強度で、伸びが 4 倍（剛性が 1/4 倍）になるロッドの開発を目指しコンピュータ上での試作と解析を行った。

2.2 解析の方法

コンピュータ上にて伸縮性をもつロッドを設計し、静的解析により Mises 応力および伸びを評価した。設計及び解析には Autodesk Fusion360 を使用した。

三重大大学の脊椎可動性評価試験で用いている標準的なロッドは直径 5.5 mm、長さ 65 mm の丸棒である⁵⁾。手術に用いることを想定するとロッドの大きさに制約があるので、試作するロッドの最大サイズは図 1 の通りとした。ロッドの材質は手

* 電子機械研究課

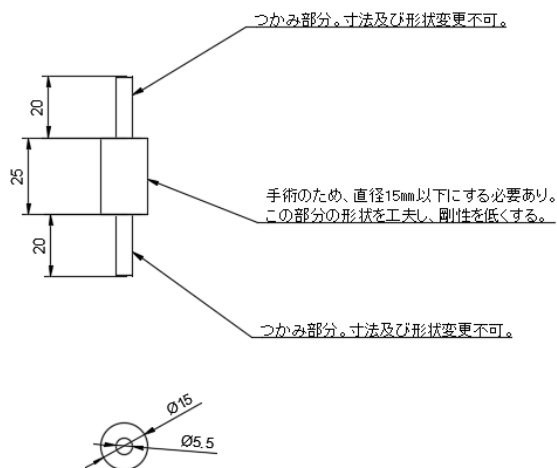


図1 試作ロッドのサイズ

術に用いられるロッドと同じ Ti6Al4V とした。

解析に用いる材料特性はヤング率 113.8 GPa, 耐力 882.5 MPa, ポアソン比 0.35, 密度 4.43 g/cm² とした。

最初に通常の丸棒を引っ張ったときの解析を行い, それをもとに試作ロッドの目標値を設定した。

3. 結果と考察

3.1 丸棒

計算の結果, 材質が耐力 882.5 MPa の Ti6Al4V, 直径 5.5 mm の丸棒の強さは約 20 kN となる。以降の解析ではロッドの下部を固定し上部を丸棒の強さの約 1/2 の力, 10 kN で引張ることとした。

解析の結果, 丸棒にかかる Mises 応力は 422 MPa, ひずみ 3.4×10^{-3} , 伸び 0.2479 mm となった。

手計算の結果, ひずみ 3.7×10^{-3} , 伸び 0.2409 mm となった。

この結果を受けて, 目標値を最大 Mises 応力 844 MPa 以下, 伸びを 0.9916 mm 以上とした。

3.2 最大サイズのロッド

解析の結果, 角張っている部分とロッドの中心部の応力が大きくなることが分かった (図 2)。この形状から応力の小さい部分を取り除いていくとロッドの中心部が残り, 通常の丸棒の形状に近づいた。最初に強度が十分に大きいロッドを試作して, 応力の小さい部分を取り除いていくと通常の丸棒の形状に近づくと考えられる。したがって, 以降の試作及び解析では最初に強度が弱いロッドを試作し, 応力が集中する部分の形状変更または補強をして強度を上げていくことにした。

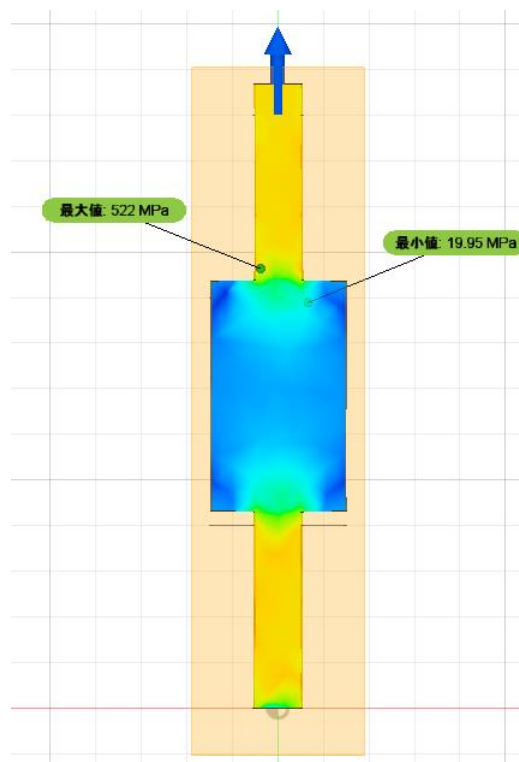


図2 最大サイズのロッドの解析結果

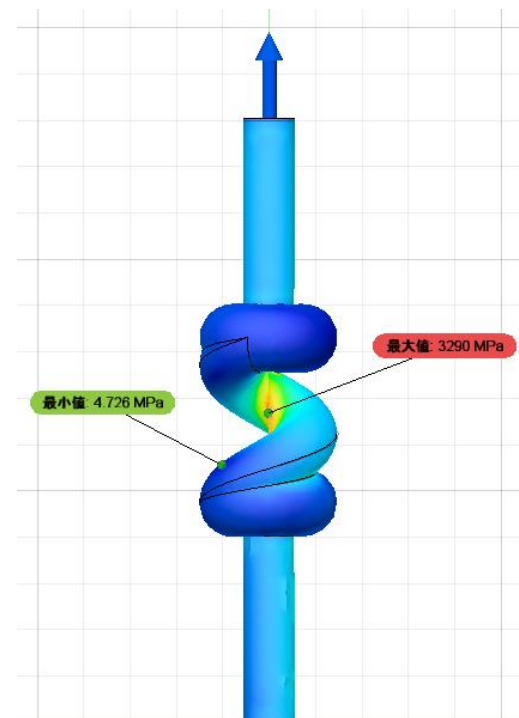


図3 コイルタイプのロッドの解析結果

3.3 コイルタイプ

最初に強度の弱いロッドを試作し, 形状変更及び補強を繰り返した。最終品の評価結果を図 3 に示す。Mises 応力の最大値は 3290 MPa, 伸び 0.2579 mm となり, 最大 Mises 応力, 伸びともに目標を達成できなかった。

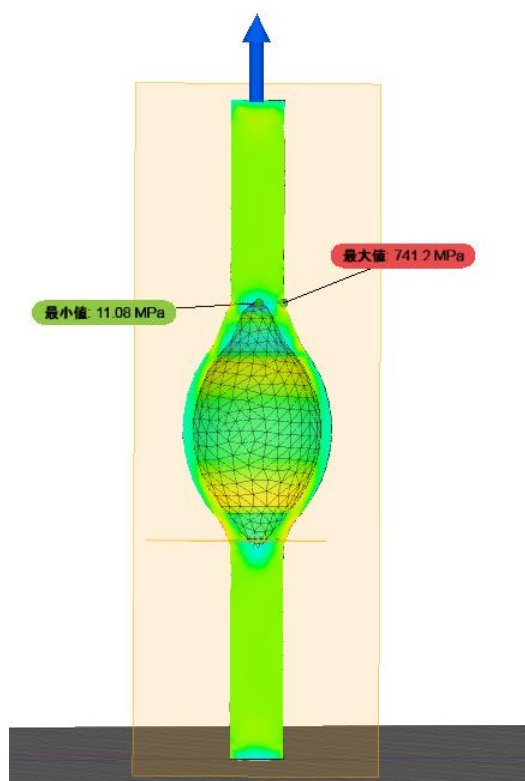


図4 中空タイプのロッドの解析結果

この形状ではロッドの中心部に大きい応力がかかることがわかった。

3.4 中空タイプ

コイルタイプでは中心部に大きい応力がかかるので、中心部が中空で周囲で応力を分担する構造を目指し、このタイプを試作した。最初に強度の弱いロッドを試作し、形状変更及び補強を繰り返した。最終品の評価結果を図4に示す。Mises 応力の最大値は741.2 MPa、伸び0.1776 mm となり、最大 Mises 応力は目標を達成したが、伸びは目標を達成できなかった。

3.5 折り曲げタイプ

最初に強度の弱いロッドを試作し、形状変更及び補強を繰り返した。最終品の評価結果を図5に示す。Mises 応力の最大値は786.7 MPa、伸び0.1325 mm となり、最大 Mises 応力は目標を達成したが、伸びは目標を達成できなかった。

3.6 一筆書きタイプ

ロッド全体を引っ張ったときに、伸縮する部分を長くするためにこのタイプを試作した。最初に強度の弱いロッドを試作し、形状変更及び補強を繰り返した。最終品の評価結果を図6に示す。引張方向から見て、断面積が通常の丸棒の1/2になる部分を長くするためにこの形状を考案した。

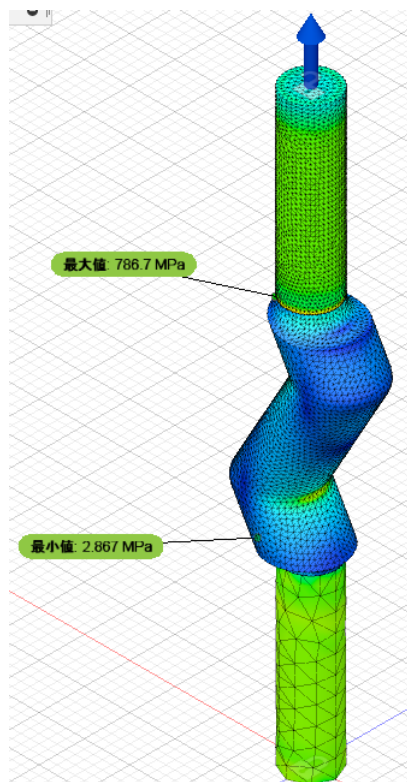


図5 折り曲げタイプのロッドの解析結果

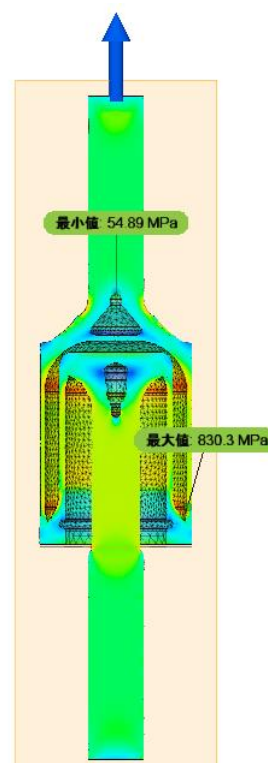


図6 一筆書きタイプのロッドの解析結果

Mises 応力の最大値は830.3 MPa、伸び0.4515 mm となり、最大 Mises 応力は目標を達成したが、伸びは目標を達成できなかった。

4. 結論

本研究では隣接椎間障害を発生しにくい可動性を持つロッドを製作するために、通常用いられている丸棒の 1/2 倍の引張強度で、伸びが 4 倍（剛性が 1/4）になるロッドの開発を目指し CAD 上での試作と解析を行った。4 タイプの試作及び解析を行ったが目標値を達成できなかった。

参考文献

- 1) 高橋敏行ほか：“腰椎変性疾患における脊椎固定術：—最新固定技術を含めた適応と方法—”. 脳外誌. 24(5), p292-300 (2018)
- 2) 森英治ほか：“腰椎変性すべり症に対する pedicle screw 併用後側方固定術の長期成績”.

日本腰痛会誌. 11(1), p198-203 (2005)

- 3) 松岡勇貴矢ほか：“脊椎固定具ロッド部の剛性の違いが脊椎の変形挙動に及ぼす影響”. 臨床バイオメカニクス 4, p13-17 (2020)
- 4) 株式会社三重ティーエルオー：“ものづくり連携支援事業プロジェクト PR レポート”.ものづくり中小企業・小規模事業者連携支援事業プロジェクト PR レポート集, 独立行政法人中小企業基盤整備機構, 平成 29 年 11 月版, p31-32 (2018)
- 5) 浦口雅隆：“脊椎運動における椎間板内圧に関する実験的研究”.三重大学大学院修士論文 (2018)