

有限要素法を用いた 自己拡張型編み込み大腸ステント解析に関する基礎検討

Basic study on Finite Element Analysis of Self-Expandable Braided Colonic Stent

小山豪士¹⁾, 須賀一博²⁾, 荒井皓一郎³⁾

Tsuyoshi KOYAMA, Kazuhiro SUGA and Koichiro ARAI

- 1) 学(工) 工学院大学大学院 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-2, E-mail: am25043@ns.kogakuin.ac.jp)
 2) 博(工) 工学院大学大学 機械工学専攻 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-2, E-mail:ksuga@cc.kogakuin.ac.jp)
 3) Hexagon (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町2-2-1 KANDA SQUARE 16階, E-mail:koichiro.arai@hexagon.com)

The aim of this study was to simulate stent deployment with high accuracy using static analysis. This paper reported on a method and its effect on normalizing the initial contact situation between the wires constituting the stent. It was suggested that the initial contact between wires could be normalized by pushing back the initial bite of the stent geometry model. It was also suggested that a compression-expansion analysis of the stent could be carried out by adjusting the penalty factor between 10 and 400 times the Young's modulus of the austenite phase of the NiTi wire.

Key Words : Finite element analysis, Static Analysis, Self-expanding braided colonic stent

1. 緒言

近年、閉塞性大腸癌の緩和治療やBTS(Bridge to Surgery)において、自己拡張型編み込み大腸ステントの利用が拡大している[1]。大腸ステントを用いた治療は、従来の治療方法に比べてQOLが向上する利点がある。一方、留置時の大腸癌組織への機械的刺激による穿孔、逸脱、再閉塞といった合併症のリスクが高まる点が課題である[2]。合併症予防のためには、ステントが展開時に大腸癌組織に及ぼす機械的刺激を定量化に評価することが不可欠である。しかし、大腸癌組織への機械的刺激を計測することは困難であるため、数値解析による評価手法の確立が期待されている。大腸癌組織への機械的刺激を数値解析を用いて評価するための第一歩は、ステントの展開挙動を精度良く数値解析で再現することである。ステントの展開挙動を数値解析するには、強い非線形性と複雑な接触を扱う必要がある。これまで、ステントの展開解析には、解の収束性の問題を回避できる動的陽解法が一般的に用いられてきた[3]。しかし、ステントの展開挙動は、静的挙動であるため静解析で解くことが望ましいとされている[4]。本研究の目的は、静解析を用いてステント展開を精度良く再現することである。本発表では、基礎検討として実施した、ステントを構成するワイヤー間の初期接触状況の正常化手法とその効果について報告する。

2. ステント形状と材料

(1) ステント形状

自己拡張型編み込み大腸ステントとして、WallFlex[5]を対象とした。ステント形状と寸法を図1に示す。ステントは、直径 $d = 0.2$ [mm]のワイヤーを螺旋状に編み込んだ形状をしている。ステントは、全長 $L = 120$ [mm]、直径 $D = 22$ [mm]である。

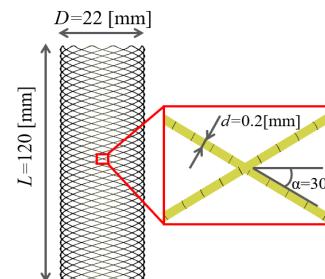


Fig.1 Stent shape and size

(2) 材料特性

ステントのワイヤーは超弾性特性を有するニチノールである。材料モデルとして、形状記憶モデル[5]を用いた。図2に材料モデルを用いた再現したニチノールの応力-ひずみ線図を示す。オーステナイト相のヤング率 E_A を53001 [MPa]、マルテンサイト相のヤング率を21500 [MPa]、ボアソン比 ν を0.3 [-]とした。その他の材料定数は、実験値を再現する様に決定した。

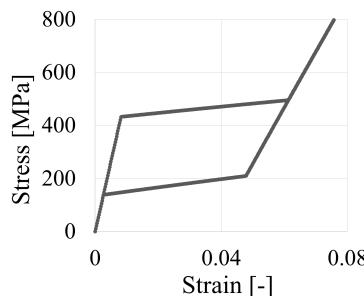


Fig.2 Stress-strain diagram of NiTi

3. 接触状況の正常化手法

(1) 要素の食い込み

ステントの形状モデルを作成するためには、螺旋状に形状変化するワイヤーを区分的に直線近似する必要がある。本研究では、ワイヤーを0.4 [mm]のはり要素を用いて要素分割した。要素分割の結果、876箇所あるワイヤー編組部の接触点のうち約60 [%]の箇所において食い込みが発生した。この食い込みにより、実際のワイヤー同士の接触が再現されなくなる。ワイヤー同士の接触が正常に再現されないことで、ステントの展開解析の際に、要素の突き抜けや要素内滑りを引き起こす。その結果、解析精度の低下や解析停止が発生する。この問題を解決するために、食い込んだ要素を押し返してモデルの食い込みを解消する必要がある。

(2) 要素の押し返しの影響

有限要素解析には、MSC Marc/Mentat[6]を使用した。締り嵌め機能を利用して食い込みの解消を試みた。初期検討段階では要素の食い込み量が不明であったため、押し返し量を1 [μm]に設定した。図3は要素の押し返し前と押し返し後の接触領域を示す。青い箇所は接触判定なし、赤い箇所は接触判定ありを示す。(a)に押し返し前、(b)に押し返し後の接触状況を、ステント中央部を拡大して示している。押し返し前に接触判定が無かった箇所において、押し返し後は接触判定がされるようになったことが分かる。押し返しによって、想定した867点の接触点のうち467点で接触が検出された。

接触判定がされた状態で、ステントの圧縮-展開解析をした。圧縮-展開解析とは、ステント直径を22 [mm]から3 [mm]まで圧縮した後、展開させ、ステントの直径と展開力の関係を評価する解析である。図4に解析結果を示す。横軸にステント直径、縦軸に展開力を示す。直径が8 [mm]未満になると展開力に大きな値のばらつきが発生した。

このばらつきの原因を押し返しの量の不足と考え、ワイヤー直径0.2 [mm]の50 [%]にあたる100 [μm]の範囲で食い込んだ要素を押し返す解析を実施した。しかし、接触している要素間における反力の急激な増大が発生し、押し返しの途中で解析が停止した。この結果から、要素を押し返す力の調整が必要と判断した。

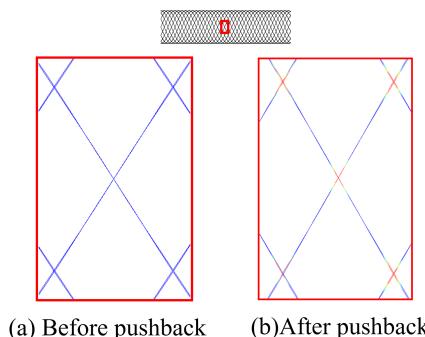


Fig.3 Contact status

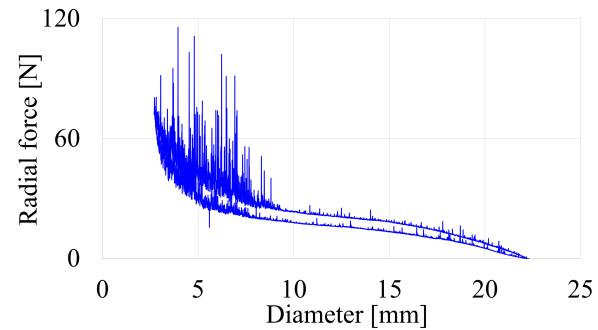


Fig.4 Effect of pushback on stent compression-expansion analysis

(3) ペナルティ係数による接触領域正常化への影響

食い込んだ要素を押し返す力を制御するためにペナルティ係数の調整を試みた。ペナルティ係数は、接触判定後の要素間剛性を規定する係数である。要素に食い込みがあれば、ペナルティ係数と食い込み量から食い込んだ要素を押し返す力が計算される。一般的に、ペナルティ係数は解析時に適用される材料のヤング率に基づいて決定される[7]。初期設定したペナルティ係数は、オーステナイト相のヤング率 E_A の約400倍であった。この設定では、解の収束性が悪化した。そこで、ペナルティ係数を E_A の1倍、10倍、40倍、4000倍、40000倍の5パターンで再設定し、押し返し解析を実施した。1倍では押し返し力が不足し、押し返し処理が機能しなかった。4000倍と40000倍では、押し返し力が過大となり、接触間に過剰な反力が生じ、解析が停止した。10倍と40倍では、押し返し処理が機能し、接触点がいずれも556点となった。

(4) ペナルティ係数の圧縮-展開解析への影響

ペナルティ係数の変化が圧縮-展開解析に与える影響を検討した。各ペナルティ係数を用いて圧縮-展開解析を実施した結果を図5に示す。赤線は E_A の10倍、緑線は40倍、青線は400倍のペナルティ係数を用いた解析結果である。10倍とした場合には接触点数は増加するものの、ステント直径が18 [mm]まで圧縮した際に要素の食い込みが発生し、解析が停止した。40倍とした場合は、直径17 [mm]までは圧縮解析できることが確認された（解析中）。この

結果から、ペナルティ係数を適用する材料の10から400倍の範囲で適用することで、初期接触状態を正常化しつつ、圧縮-展開解析の安定性を図れることが期待できる。

一方で、接触を正常化することによって展開力のばらつきは抑えることができなかった。展開力がばらつく原因は収束条件やワイヤー間の摩擦など、他の条件の影響も考えられる。これら条件の検討は、今後の課題とする。

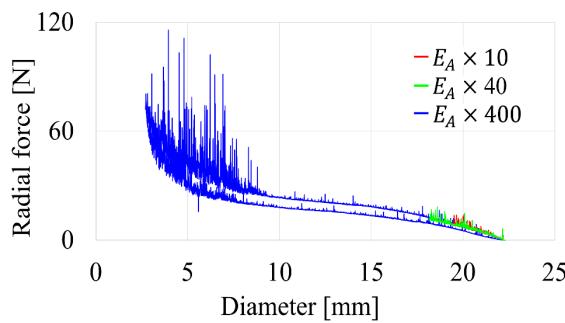


Fig.5 Effect of penalty coefficient on stent compression-expansion analysis

4. 結言

本研究の目的は、静解析を用いてステント展開を精度良く再現することである。本発表では、基礎検討として実施した、ステントを構成するワイヤー間の初期接触状況の正常化手法とその効果について報告した。ステントの形状モデルの初期食い込みを押し返すことで、ワイヤー間の接触を正常化できる可能性を示唆した。また、押し返しの際の駆動力となるペナルティ係数を、NiTiワイヤーのオーステナイト相のヤング率の10から400倍程度に設定することで、ステントの圧縮-展開解析が実施できることが示唆された。

参考文献

- [1] Kim, Eui Myung, et al., "Self-expandable metallic stents as a bridge to surgery in obstructive right-and left-sided colorectal cancer: A multicenter cohort study." *Scientific Reports* 13.1 (2023): 438.
- [2] Sagar, Jayesh., "Colorectal stents for the management of malignant colonic obstructions." *Cochrane Database of Systematic Reviews* 11 (2011).
- [3] Bernini, Martina, et al., "Recommendations for finite element modelling of nickel-titanium stents—Verification and validation activities." *Plos one* 18.8 (2023): e0283492.
- [4] Hirota, Gentaro, et al., "An implicit finite element method for elastic solids in contact., " *Proceedings Computer Animation 2001. Fourteenth Conference on Computer Animation* (Cat. No. 01TH8596). IEEE, 2001.
- [5] Marc 2024.1 Volume C: Program Input.
- [6] MSC Marc Volume A : Theory and User Information, 2024.
- [7] Wriggers, Peter. , "Computational contact mechanics", Ed. Tod A. Laursen. Vol. 2. Berlin: Springer, 2006.