

小腸内におけるカプセル型検査機器の姿勢維持を 目的とした外部磁場により動作可能な カプセル型姿勢維持機構の提案

電気・化学専攻 医用工学領域 2181257 中村 裕亮

(主査：和多田 雅哉 教授 副査：桐生 昭吾 教授，島谷 祐一 准教授)

1. はじめに

現代の日本人における死亡原因第1位は悪性新生物である。悪性新生物とは細胞が異常増殖し，周囲の正常な細胞組織を浸潤したり，他の組織に転移したりするがんのことを指す。2018年の日本における悪性新生物の部位別罹患率では，腸が16%と最も高い^[1]。したがって，腸における悪性新生物への対策が重要であると考えられる。腸の罹患率が高い一方で，2009-2011年診断例の全がんの臨床進行度別5年相対生存率は限局(ステージI)までの発見で91.5%であり早期発見が重要である^[2]。したがって，腸の悪性新生物は早期発見が重要であると考えられる。早期発見には内視鏡検査が有効であるとされている。また，昨今は患者へ優しい検査が注目されていることから，本研究ではカプセル内視鏡検査に着目した。本稿では，研究背景，研究目的，姿勢維持機構のコンセプト，提案機構の概要について述べる。さらに，磁場印加方法の検討，印加磁束密度の検討について述べる。

2. 研究目的

カプセル内視鏡はビデオスコープ内視鏡に比べ性能が劣るという課題を有する。検査における患者への苦痛軽減には，「診断から治療」までをカプセル内視鏡検査での完結が求められる。カプセル内視鏡検査による治療までの実現には，新機能を付与したカプセル型検査機器の開発が必要だと考えられる。新機能として，自走，姿勢維持，組織採取，投薬，治療が挙げられる。組織採取や治療など他の機能の実現に繋がる動作として，本研究では姿勢維持に着目した。したがって，本研究ではカプセル型検査機器による姿勢維持を実現する機構の提案を行う。

3. 姿勢維持機構の提案

本章では，はじめに姿勢維持機構のコンセプトを述べ，コンセプトを基に姿勢維持方法の提案，目標値の設定，機構モデルの作成，動作機序について述べる。

3.1 姿勢維持機構のコンセプト

本機構のコンセプトは「外部磁場を用いた1動力源による2動作が可能な姿勢維持機構」である。本コンセプトは，本機構を用いた検査システムイメージと要求動作から設定した。本機構を用いた検査システムは，画像診断後のカプセル型検査機器による小腸内腫瘍の組織採取や治療が目的である。図1に検査システムイメージを示す。

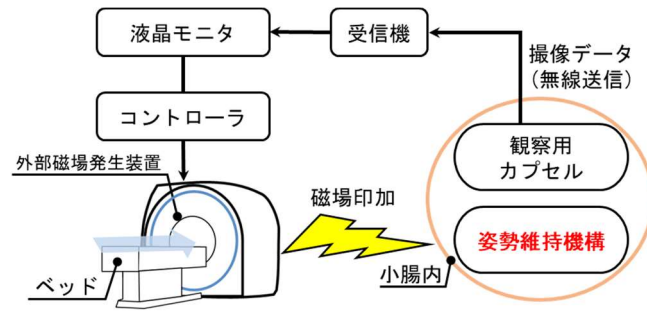


図1 検査システムイメージ

図1に示す通り、医師がコントローラを通して外部磁場発生装置を操作し、小腸内にある姿勢維持機構を操作する。本システム実現には、姿勢維持機構が外部磁場により動作可能な機構構造が求められる。小腸内における姿勢維持の要求動作として2つ挙げられる。1つ目は、姿勢維持機構と目標腫瘍の位置合わせを目的としたスクリー動作である。2つ目は、小腸内で姿勢維持を行うための機構開閉動作である。各動作はそれぞれ独立しての動作が求められる。しかし、カプセル内の空間に限りがあることから、複数の動力源の搭載は困難である。つまり、1動力源で各動作を独立して実現可能な機構構造が求められる。したがって、本研究で提案する姿勢維持機構のコンセプトを「外部磁場を用いた1動力源による2動作が可能な姿勢維持機構」と定めた。

3.2 姿勢維持方法の提案

本研究における姿勢維持を、蠕動運動による粘液の流れに逆らいカプセルの姿勢を安定させる動作と定義する。はじめに姿勢維持方法を提案する。図2に姿勢維持イメージを示す。

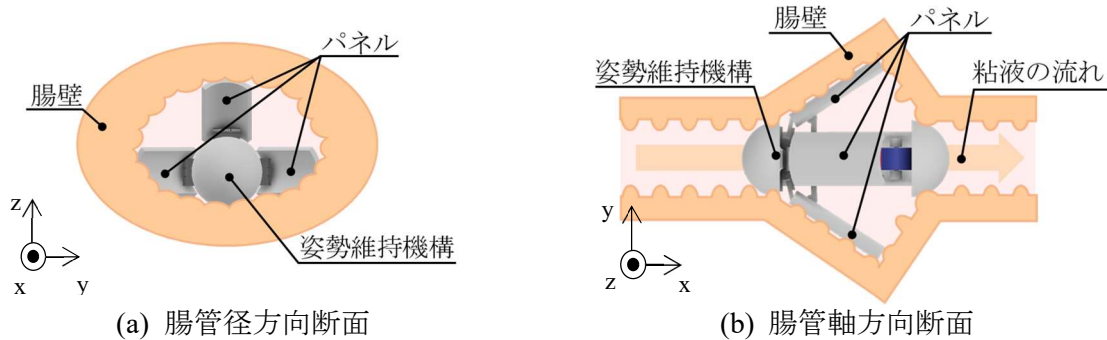


図2 姿勢維持イメージ

図2に示す通り、本機構は、3枚のパネルを傘の様に同時展開し、パネルを腸壁に接触させ、つっぱり棒の要領で姿勢維持を行う。この姿勢維持方法実現には、腸壁へ接触可能なパネル展開長、パネル3枚の同時展開可能な機構構造、小腸内圧下での機構動作が求められる。以上の必要要件を基に姿勢維持機構の目標値設定と機構モデル作成を行う。

3.3 目標値設定

本研究では、小腸内環境を考慮し3つの評価目標値を定めた。小腸内環境は一般的な検査時と同様とし、「腸内洗浄済みかつ粘液が満ちている状態」と定めた。表1に目標値を示す。

表 1 目標値

記号	名称	数値	単位
L_A	最低パネル展開長	30	[mm]
F_H	最低姿勢維持力	3.4×10^{-1}	[N]
P_C	最低パネル展開圧力	600	[Pa]

表 1 の最低パネル展開長 L_A は、パネルと小腸の接触に必要な設計目標値である。パネル展開時、対象に位置するパネル先端間の長さ L_A が小腸内径 30[mm]以上であれば、パネルが腸壁に接触するとして 30 [mm]と定めた。最低姿勢維持力は、蠕動運動により押し出される粘液への抵抗力を基に設定した^[3]。小腸内において、常に粘液によって腸管軸方向にカプセルが押し出されることを想定し、粘液への抵抗力を姿勢維持能力として定めた。最低パネル展開圧力は、小腸内圧下でのパネル展開動作を実現する目標値である。小腸内圧以上の圧力によるパネル展開により機構動作が可能だと考えられる。本研究では、より確実なパネル展開を目指し、600 [Pa]と定めた^[4]。

3.4 モデル作成

CAD にて姿勢維持機構の 3D モデルを作成した。図 3 に姿勢維持機構モデル、図 4 に機構構成部品を示す。

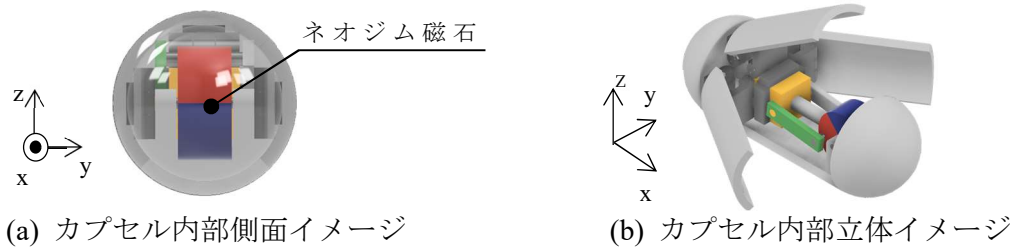


図 3 姿勢維持機構モデル

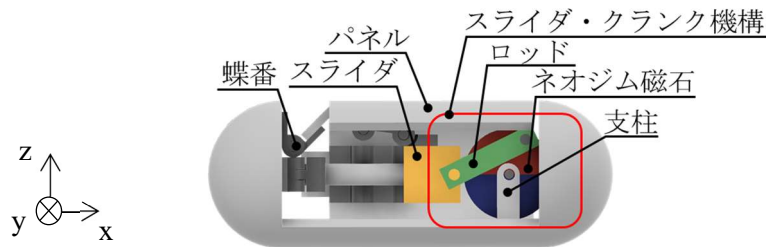


図 4 機構構成部品

動力源には、径方向着磁の外径 8 [mm]、厚さ 5 [mm]の円柱型ネオジム磁石を採用した。ネオジム磁石はカプセル内の支柱と y 軸方向の回転軸にて固定され、y 軸を回転軸とする方向のみネオジム磁石が独立して回転可能である。構造上、ネオジム磁石の x 軸回りの回転はカプセル殻全体も同様の回転動作を行い、スクリュウ動作を実現する。ネオジウム磁石が y 軸逆回りの回転を行う場合は機構開閉動作を行う。ネオジム磁石とスライダはロッドにより接続され、リンクとパネルはスライダ x 軸方向と y 軸上両側の 3 方向に設置され 3 枚のパネルの同時展開を実現する。

3.4.1 カプセル殻の寸法

本モデルは、最低パネル展開長を満たすようにカプセル殻を設計した。図 5 にカプセル殻モデル、表 2 にカプセル殻寸法を示す。

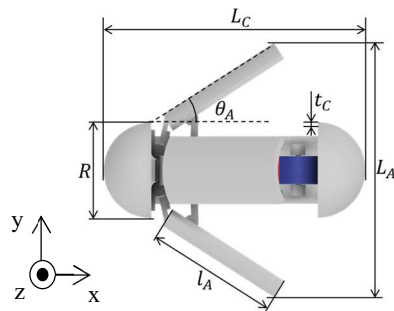


図5 カプセル殻モデル

表2 カプセル殻寸法

記号	名称	数値	単位
L_C	カプセル殻全長	35.6	[mm]
R	カプセル殻外径	13.0	[mm]
L_A	最大パネル展開長	31.0	[mm]
l_A	パネル全長	18.0	[mm]
θ_A	最大展開角度	32.9	[deg]
t_c	カプセル殻厚	1.0	[mm]

図5と表2に示す通り，最大パネル展開長が31[mm]であることから，最低パネル展開長を満たし，パネルは小腸壁に接触可能だと考えられる。また，先行研究を参考に本機構による姿勢維持力を算出した。その結果，最低姿勢維持力 F_H を超える1.79[N]の姿勢維持力が算出された。したがって，提案した姿勢維持方法が本モデルにより実現可能であると考えられる。

3.5 動作イメージの提示

図6に磁場印加方向とスクリュウ動作イメージ，図7に機構開閉動作イメージを示す。

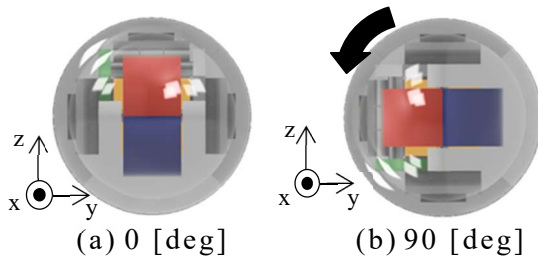


図6 スクリュー動作イメージ

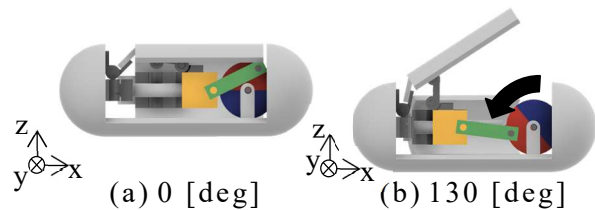


図7 機構開閉動作イメージ

図6，図7に示す通り，ネオジム磁石の回転方向の切り替えによりスクリュウ動作と機構開閉動作の2動作を目指す。スクリュウ動作は，ネオジム磁石とカプセル殻が連動して回転運動を行う。機構開閉動作は，カプセル内で独立して回転したネオジム磁石のトルクをスライダクランク機構とリンク機構を伝達し，パネルを押し出す力に変換することで実現する。各動作実現のためにネオジム磁石の回転方向の制御が求められる。3.1で述べた通り，本機構は外部磁場による制御で動作を目指す。したがって，ネオジム磁石に対する印加磁場方法の検討が必要である。

4. 磁場印加方法と印加磁場の検討

要求動作実現を目指し，磁場印加方法の検討と患者への使用を想定したコイルサイズの検討，各動作におけるネオジム磁石の必要最低トルクの算出と印加磁束密度の検討を行う。

4.1 磁場印加方法の検討

3.5で述べた機構動作の実現には，姿勢維持機構に対して，体外から3次

元空間および 3 次元方向への磁場印加が必要である。本条件を満たす磁場印加方法を選定し、本機構への磁場印加方法は 3 軸ヘルムホルツコイルと決定した。3 軸ヘルムホルツコイルは、3 次元空間および 3 次元方向への磁場印加が可能である。x 軸、y 軸、z 軸方向 3 つのヘルムホルツコイルが組み合わさり、各軸の磁界ベクトルの合成により、3 次元方向への磁場印加を実現する。

次に、外部磁場発生装置のコイルサイズを検討する。コイルサイズは、患者への使用を考慮し、MRI の円筒内径 700[mm]とヒトの肩峰高から股下の長さを引いた寸法 800[mm]を基に検討する。コイルサイズ条件として、コイル間隔を 700[mm]以上、本機構が動作可能な磁束密度を発生可能な要求磁場印加範囲を 800 [mm]×800 [mm]×800 [mm]と設定し、条件を満たすコイルを選定、モデル作成を行った。図 8 に 3 軸ヘルムホルツコイルモデルを示す。

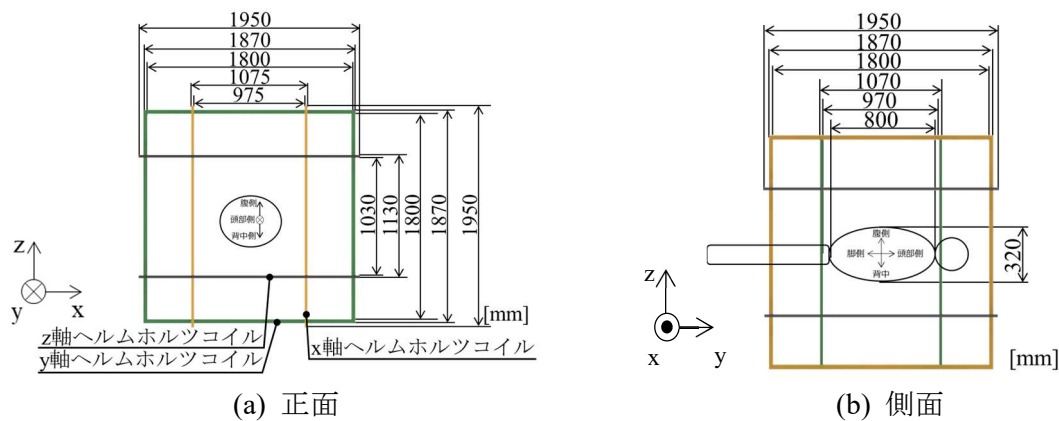


図 8 3 軸ヘルムホルツコイルモデル

本モデルは、株式会社玉川製作所の直流 XYZ ヘルムホルツコイル TM-DHA195110C-00305XYZ 型を基に作成した^[5]。図 8 に示す通り、各軸のコイル間隔は 970 [mm]以上である。つまり、患者の上半身を覆うには十分な空間である。本モデルの寸法を基に、JMAG-Designer にて磁場印加シミュレーションを実施する。

4.2 スクリュー動作における必要最低トルクと印加磁束密度の検討

スクリュー動作における簡易力学モデルを構築し、ネオジウム磁石の x 軸回り回転の必要最低トルク T_{xmin} は 9.2×10^{-4} [Nm]と算出された。必要最低トルクを要求磁場印加範囲内で出力可能な印加磁束密度の検討を目的とした解析を行う。はじめに、JMAG-Designer にて解析モデルを作成した。図 9 に解析モデル(スクリュー動作)を示す。

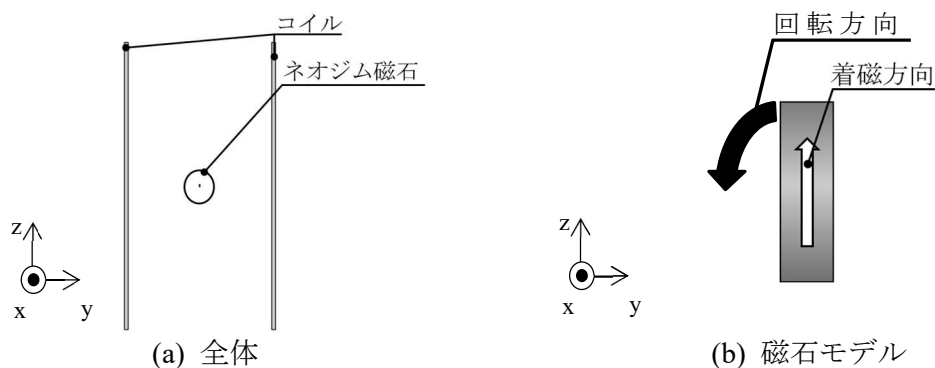


図 9 解析モデル(スクリュー動作)

図9の解析モデルを用いて、3次元磁界過渡応答解析を行った。ステップ数 10、時間 0.1 [s/ステップ]、磁石は N35SH ($\phi 8 \times 5$ [mm])と設定した。磁石に対し x 軸回り方向に回転運動を条件付け、1 ステップあたりの移動量を 10 [deg]と定めた。算出した必要最低トルク T_{xmin} を発生トルク T_x が満たすように電流を上昇させ、コイル中心に印加される磁束密度を計測する。計測した印加磁束密度 B_s は 9.9×10^{-4} [T]であった。計測した印加磁束密度 B_s を必要最低印加磁束密度 B_{smin} と仮定し、要求磁場印加範囲の各方向 800 [mm]で満たされるようにさらに電流を上昇させる。最終的に、電流が 10 [A]のとき条件を満たす印加磁束密度が得られた。図10に解析結果を示す。

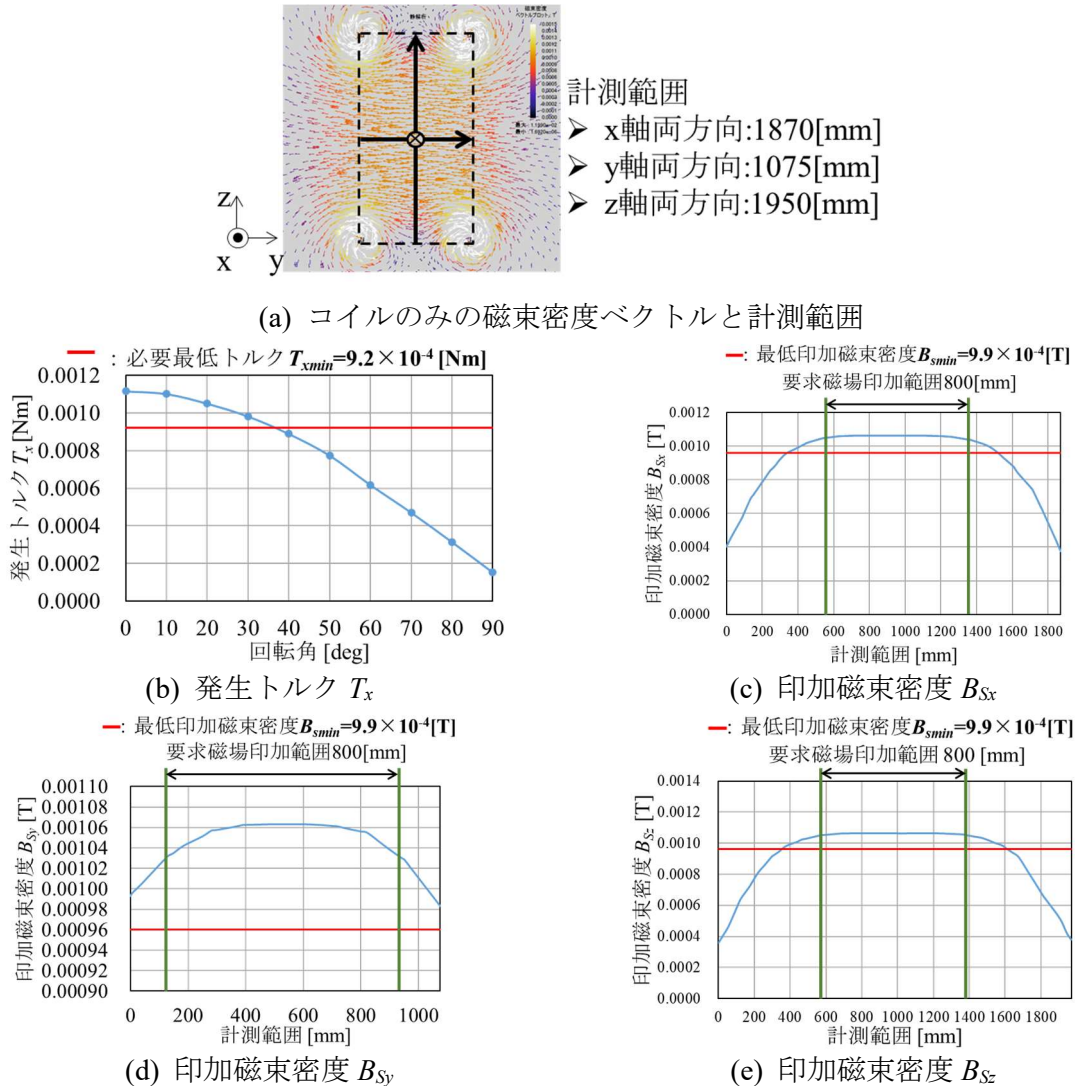


図10 スクリュー動作回転方向の解析結果

図10(b)～(d)に示した赤線は、必要最低トルク T_{xmin} と必要最低印加磁束密度 B_{smin} である。本解析から計測範囲の最大印加磁束密度 B_{Symax} が 10.6×10^{-4} [T]、発生トルク T_x が 11.2×10^{-4} [Nm]であることが分かった。各グラフにおいて最低値を超えていることが分かる。したがって、姿勢維持機構のスクリー動作は、要求磁場印加範囲内において 9.9×10^{-4} [T] $\leq B_s \leq 10.6 \times 10^{-4}$ [T]の磁束密度発生により実現可能であると考えられる。

4.3 機構開閉動作における必要最低トルクと印加磁束密度の検討

機構開閉動作における簡易力学モデルを構築し、ネオジム磁石の y 軸回り逆方向の必要最低トルク T_{ymin} は 10.6×10^{-4} [Nm]と算出された。磁石の向きを機構開閉動作方向に変更し、解析モデルを作成した。図 11 に解析モデル(機構開閉動作)を示す。

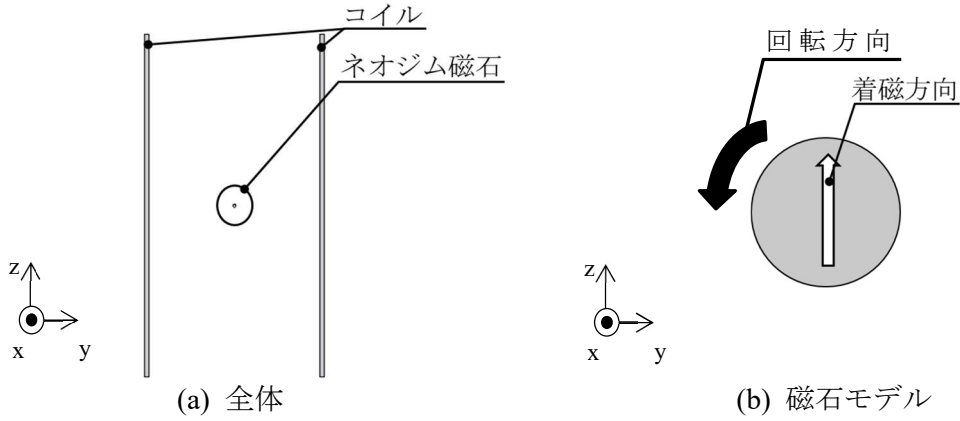
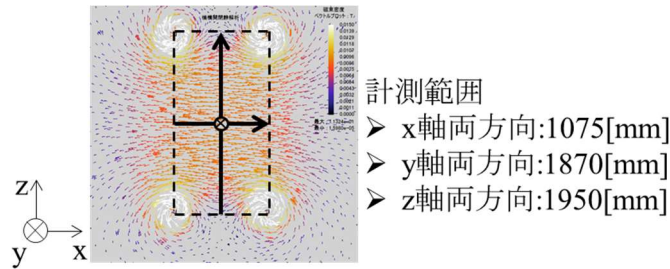
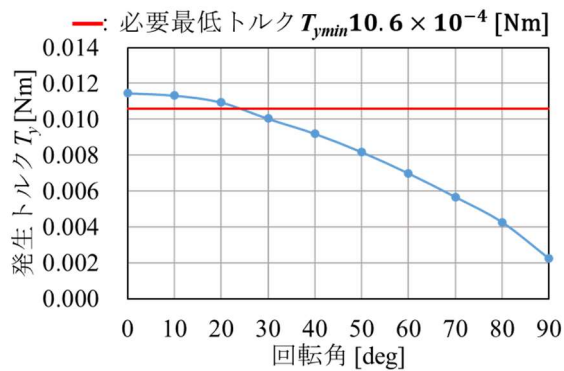


図 11 解析モデル(スクリュー動作)

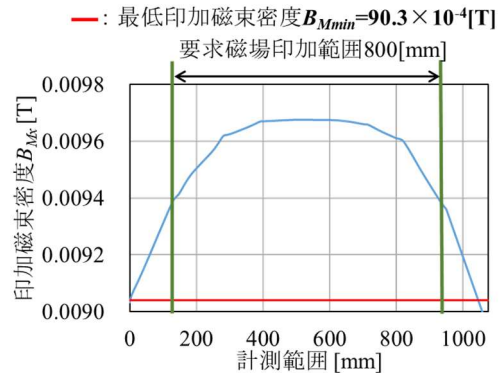
回転運動の方向のみ変更し、4.2 の解析と同様に条件設定、印加磁束密度の計測を行った。計測した最低印加磁束密度 B_{Mmin} は 90.3×10^{-4} [T]であった。最終的に、電流が 91 [A]のとき、条件を満たす印加磁束密度が得られた。図 12 に解析結果を示す。



(a) コイルのみの磁束密度ベクトルと計測範囲



(b) 発生トルク T_y



(c) 印加磁束密度 B_{Mx}

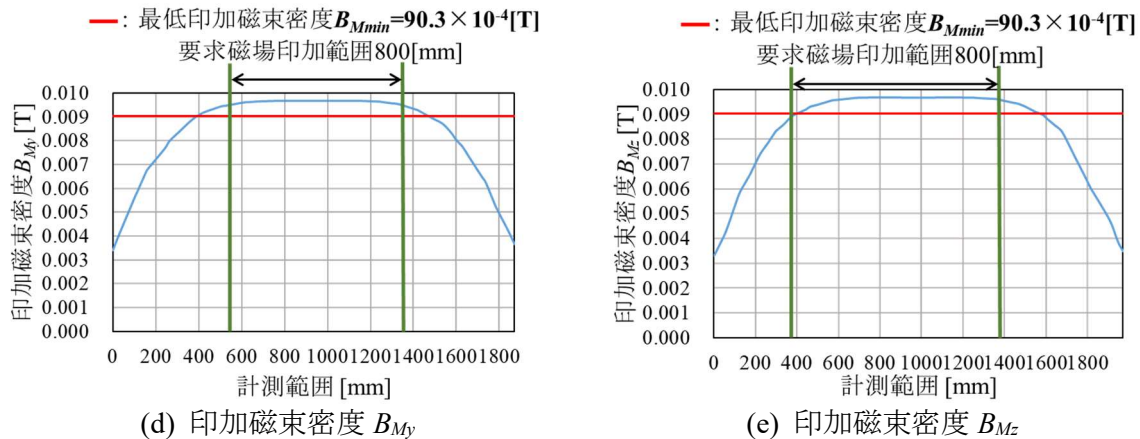


図 12 機構開閉動作回転方向の解析結果

図 12(b)～(d)に示した赤線は、必要最低トルク T_{ymin} と必要最低印加磁束密度 B_{Mmin} である。本解析から、計測範囲の最大印加磁束密度 B_{Mymax} が $96.7 \times 10^{-4} [T]$ 、発生トルク T_x が $11.2 \times 10^{-4} [Nm]$ であることが分かった。各グラフにおいて最低値を超えていることが分かる。したがって、姿勢維持機構の機構開閉動作は要求磁場印加範囲内において $90.3 \times 10^{-4} [T] \leq B_s \leq 96.7 \times 10^{-4} [T]$ の磁束密度発生により実現可能であると考えられる。

5. おわりに

本稿では、研究背景、カプセル内視鏡の概要、研究目的、姿勢維持機構のコンセプト、姿勢維持機構の提案、印加磁場の検討について述べた。本機構は、ネオジム磁石の回転によるカプセル本体のスクリュウ動作と姿勢維持機構の開閉動作の2動作の実現を目指し設計した。JMAG-Designer を用いて、各動作における磁場印加シミュレーションを行い、印加磁束密度と発生トルクから磁場印加による機構動作が可能であることが示唆された。今後は、本研究にて提案した検査システムの実現を目指し、本研究の磁場印加シミュレーションで得られた印加磁束密度を発生可能な大型3軸ヘルムホルツコイルの開発、観察用カプセルと姿勢維持機構を搭載したカプセルの制御を目指したシステムの開発、姿勢維持機構を基に搭載可能な組織採取機構や治療機構の開発が求められる。

参考文献

- [1] 厚生労働省，全国がん登録 罹患数・率 報告 2018 年
- [2] 国立がん研究センター国立がん情報センター，全国がん罹患モニタリング集計 2009-2011 年生存率報告 2020 年
- [3] 上野 孝樹ほか，”消化管内での推進を可能にするカプセル内視鏡の自走機構の検討“，第 24 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム
- [4] 大古場隆士，山崎悠貴，本田崇，”カプセル型医療機器への応用を目指したブラシ細胞診とアンカー機能のための磁気アクチュエータの提案“，T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)., p.p.106-107 (2020)
- [5] 株式会社玉川製作所，直流 XYZ ヘルムホルツコイル TM-DHA195110C-00305XYZ 型，<http://www.tamakawa.co.jp/h/dha195110c00305xyz.pdf#zoom=100>，2023.1.30