

# 小腸と大腸の検査が同時に可能な カプセル内視鏡の自走機構の提案

電気・化学専攻 医用工学領域 2181247 武山 颯輝

(主査：和多田 雅也 教授 副査：桐生 昭吾 教授, 島谷 祐一 准教授)

## 1. 緒言

近年, 日本人の死亡原因第 1 位は悪性新生物であり, 特に大腸悪性新生物は全体の約 3 割を占める。また, 悪性新生物のステージ別 5 年生存率においてステージIIまでに発見されれば 5 年生存率は 90%以上と高い<sup>[1]</sup>。したがって, 早期発見が求められる。

現在の消化管の検査方法として内視鏡検査が上げられる。内視鏡検査では主に外形 10[mm]程度の細長い形状のビデオスコープ内視鏡が使用される。しかし, ビデオスコープ内視鏡は, 小腸の検査が不可能なことに加え, 患者に身体的及び精神的に負担を与えるという欠点が生じる。そのため, 内視鏡検査の検査受診率は未だに低いのが現状である。受診率を向上させることで悪性新生物の早期発見が可能になると考え, 患者へ低侵襲な検査方法を検討する。

近年, 新たな検査方法としてカプセル内視鏡が注目されている<sup>[2]</sup>。カプセルを飲み込むだけで消化管の蠕動運動により推進し, 患者へ苦痛を与えず小腸, 大腸の検査を行うことが可能である。しかし問題点として, カプセル内視鏡は蠕動運動に依存するため, 医師による能動的な操作が不可能な点が挙げられる。そのため, 病変部の見落としが発生しやすく検査精度が低い。よって, カプセル内視鏡が外部から操作可能な自走機構を搭載することで, 病変部の見落としの発生を防ぐことが可能となる。したがって, 本研究では, 患者に低侵襲かつ病変部の早期発見が可能となる前後左右への移動が可能となる自走機構の推進原理について提案を行う。新たな自走方法を検討しているため, 簡易機能試験機において動作確認を行なった。また, 力学モデルの構築を推進距離と時間の関係を示すシミュレーションを行い, 結果について評価を行った。

## 2. 提案するカプセル内視鏡

### 2.1 遠隔操作を用いた診断システムの提案

図 1 に理想とする小腸と大腸の検査システムの全体像を示す<sup>[3]</sup>。

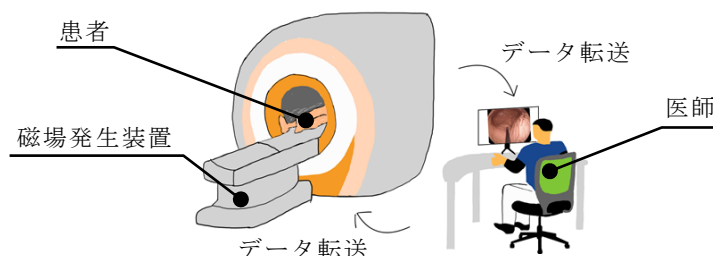


図 1 理想的な診断システムの全体像

図 1 のように MRI のような装置に患者が入り, 検査を行う。患者は通常の内視鏡検査と同様に前日は消化の良い食事を行い, 検査 8 時間前からは絶飲食を行う。また,

検査中は医師の指示に従い体勢を変える。モニターに出力された映像を見ながら磁場発生装置内の磁場を制御し、カプセル内視鏡をリアルタイムで操作を可能にする。リアルタイムで観測し、同時に診断を行うことで医師が病変部の疑いのある位置に操作ができ、撮影することができる。よって検査の精度が向上することが見込まれる。

提案する診断システムを実現するためには、自走機構を搭載した新たなカプセル内視鏡と外部磁場発生装置が必要である。本研究では、腸内環境下で前後左右への移動可能な自走機構の設計を行う。最終目標は、小腸、大腸に発生した悪性新生物の早期発見が可能となる低侵襲で検査が可能なカプセル内視鏡の自走機構の開発を行う。

## 2.2 提案するカプセル内視鏡のコンセプト

カプセル内視鏡を提案するにあたり、患者への負担がかからない大きさ必要である。一般的に消化管の中で食道と小腸の直径が 20 [mm] と最も狭いため、以下の規格で設計する。図 2 に提案するカプセル内視鏡の全体像を、図 3 に推進イメージを示す。

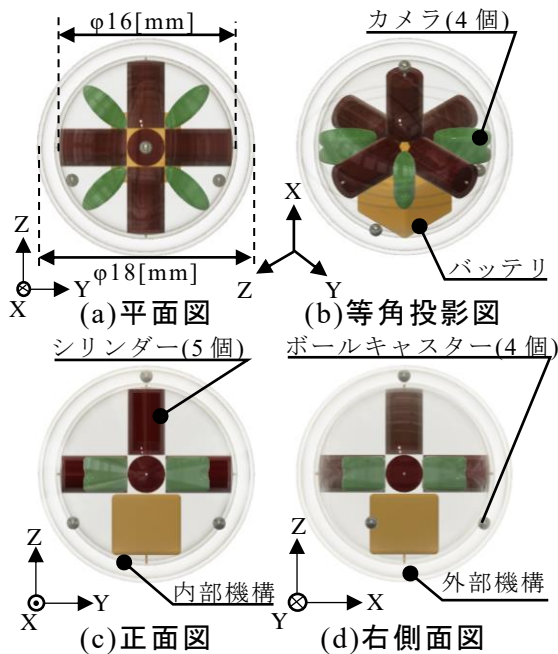


図 2 提案するカプセル内視鏡

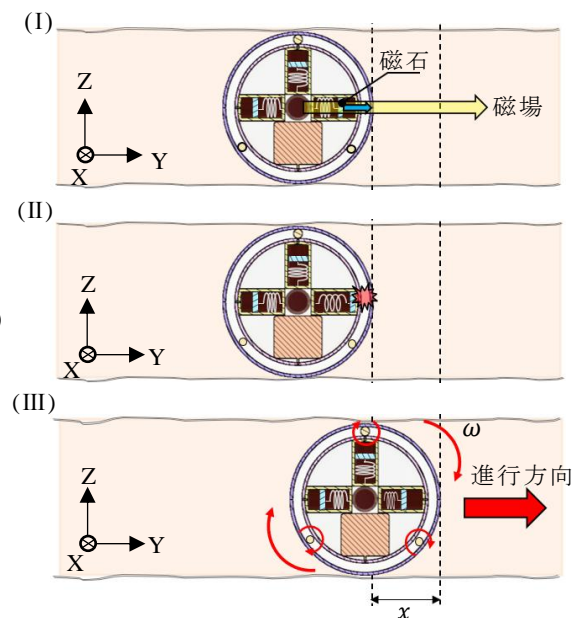


図 3 推進イメージ(x 軸断面図)

提案するカプセル内視鏡は、シリンダー、カメラ、バッテリー等の機材が搭載された内部機構と進行時に腸壁を転がり推進を行う外部機構の 2 層で構成する。内部機構と外部機構の間には、内部機構に内接する正四面体の頂点部にボールキャスターを 4 個設置する。2 重構造にすることで外部機構は回転を行い、内部機構は一定である。結果、内部機構は姿勢が保持されて、搭載されたカメラの角度が固定される。球体に沿ってカメラを設置することで 360 度の視野を確保することができ、病変部の見落としを減らすことが可能である。また、外部磁場を用いた遠隔での操作を行うため自走機構への供給は不要であり検査途中でバッテリー切れの心配が不要である。

また、図 3 より推進の原理は磁場によって内部の磁石を衝突させることで運動エネルギーが発生し内部機構の重心が移動することでカプセル内視鏡の推進力を発生させるものである。磁石の衝突によって内部機構の重心が推進方向へずれ動きボールキャスターが回転する。ボールキャスターの回転によって外部機構が転がり推進を行う。

### 2.3 内部機構が傾いたときの角度毎の推力

提案するカプセル内視鏡にはボールキャスターを搭載しているため内部機構の姿勢は基本的に水平を保つ。しかし、腸内環境の形状によって内部機構の姿勢が崩れ、衝突力が低減する恐れがある。そこで、傾いた際に働く角度毎での衝突力の大きさについて導出を行った。図4に $\theta$ と $F$ の関係を表した推進中に想定される状態を、図5に角度毎での推進力の割合について記載する。尚、今回導出モデルでは右向きに推進し、右シリンダーのみに磁場を照射したものとする。

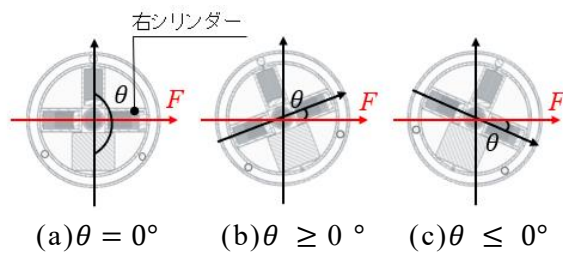


図4 推進中に想定される状態

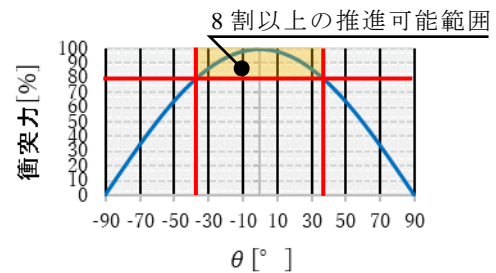


図5 角度毎での衝突力の割合

図4より推進中は内部機構の姿勢が様々な状態になることが想定される。また、図5より、本来の衝突力に対して $\pm 35^\circ$ 以内の傾きで8割以上の推進力を生み出すことが可能である。また、本機構は傾いた角度が大きくなるにつれて、元の姿勢に戻そうとする「復元力」が大きく働く。そのため、内部の姿勢が35度以上傾いたとしても、衝突をする瞬間には復元していることがある程度想定される、したがって、衝突力が8割の時を検査目標に必要な最低速度に設定することで、推進速度と検査時間の関係を表したシミュレーションの構築が可能である。

### 2.4 推進速度の目標値の検討

既存のカプセル内視鏡の検査時間は8時間以上である。一方、スコープ内視鏡は30分程度で済む。したがって、本研究では患者への負担を減らすため、検査時間は30分以内を目標とする。よって、検査目標時間から逆算を行い、推進速度の目標値を設定した。条件として、消化管の全長は9.25[m]で設定を行う。また、カプセル内視鏡が一様平面で推進することを前提とし、1秒間で必要な推進距離を下記に示す。

1分あたり： $9.25[\text{cm}] \div 30[\text{min}] = 30.83[\text{cm}/\text{min}]$

1秒あたり： $30.83[\text{cm}] \div 60[\text{s}] = 0.51[\text{cm}/\text{s}]$

1秒間で5.1[mm]以上の移動が必要

上記の条件から、5.1[mm/s]の推進速度を目標とし、目標速度に到達するために必要な磁石の衝突力の関係を示したシミュレーションを行う。

### 3. 簡易機構試験機を用いた提案するカプセル内視鏡の自走機構の動作確認

拡大モデルの簡易機能試験機を作成し、動作確認を行う。本実験の目的は、内部機構は「姿勢が一定」、外部機構は「転がり」といった機能が果たすか動作確認を行うことである。今回は、内部機構の姿勢保持の確認と推進原理の確認で2つの検証実験を行った。検証実験で使用した機器を図6、図7に示す。尚、検証実験で使用したカメラの性能は1080pの120fpsである。



(a)簡易機能試験機 (b)姿勢保持の検証① (c)姿勢保持の検証②  
図6 姿勢保持の検証で使用した機器

(d)簡易機能試験機 (e)作製した内部機構 (f)推進原理の検証  
図7 推進原理の検証で使用した機器

### 3.1 内部機構の姿勢保持検証実験の概要

目的は、図4(a)に示した理想状態を保ち、復元力が発生させるためのボールキャスターが機能するか姿勢保持の検証を行うことである。評価方法はスローモーションで撮影を行い、斜面に対して内部機構の姿勢が水平であるか確認を行う。

#### 3.1.1 姿勢保持検証実験の動作手順

①では様々な角度の斜面上でカプセルを転がす。姿勢保持が不可能な角度が確認されるまで検証を行い繰り返す。②では、濡れ雑巾を用いて凹凸を再現した障害物のある面上でカプセルを転がす。それぞれ毎回録画を行い、姿勢保持ができたかを確認する。

#### 3.1.2 姿勢保持検証実験の結果

図8に姿勢保持検証実験の結果を示す。



(a)斜面 45 度



(b)斜面 50 度



(c)凹凸の面

図8 検証実験 A の様子

結果として図8(a)(c)より、45度までの斜面と凹凸の面では図中の赤丸が水平を保っており、姿勢保持を行うことが可能であった。しかし図8(b)より、図中の赤丸が水平を維持できず、50度以上では姿勢保持が不可能であった。

簡易機能試験機の転がり摩擦は実寸モデルよりはるかに大きいため、実寸モデルに搭載した場合でも十分機能することが結果から推測される。また、復元力も大きく、ボールキャスターが十分に機能していることが判明した。

### 3.2 推力の検証実験の概要

目的は、カプセル内部にある質量物体を衝突させ、重心の移動によって推進するか検証を行うことである。評価方法は、撮影した斜面を転がる様子の動画をスローモーションで撮影を行い、内部の質量物体衝突後にカプセルが回転をして推進を行っているか確認を行う。条件として、磁場は使用せずストッパーを用いて手動で内部機構の重心移動により推進力を発生させる。

#### 3.2.1 推力の検証実験の動作手順

摩擦力が大きい荒い机の上に簡易機能試験機を置く。ストッパーを引っ張り、内部の質量物体を移動させ、ストッパーを放し、内部の質量物体を内部機構に衝突させる。

### 3.2.2 推力の検証実験の結果

図9に推力の検証実験の結果を示す。

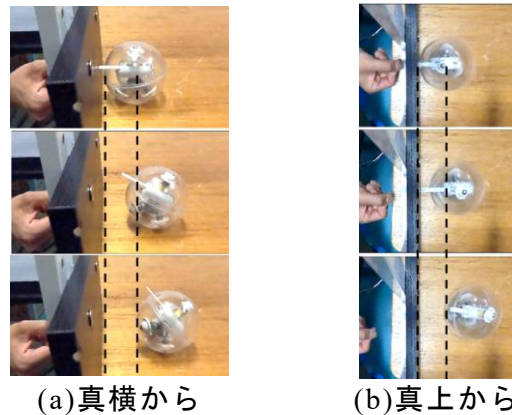


図9 推力の検証実験の様子

図9より、結果として内部の質量物体を衝突させることで内部機構の重心が移動し、ボールキャスターが外部機構へ力を伝えて回転を行った。よって、提案する推進原理で推進することが可能であることが証明された。

内部機構は回転を行ったがストッパーによる影響と質量物体を片方向のみに設置をしていたため重心が推進方向に偏っていたことが予測される。また、姿勢保持検証実験による姿勢制御では急角度の場合でも姿勢保持を行っていたことから、実際のモデルでは機能することが予測される。上記2つの検証実験より、提案するカプセル内視鏡は推進することが可能である。

### 4. 提案するカプセル内視鏡の推進力及び推進距離のシミュレーション

簡易機能試験機を用いた検証実験より、提案するカプセル内視鏡は推進することが証明された。本章では、提案するカプセル内視鏡の推進力及び推進距離を導出するためのシミュレーションを記載する。シミュレーションモデルを行う上での条件を以下に提示する<sup>[4]</sup>。

1. 移動速度：重力に考慮せず速度一定 5.1 [mm/s]以上
2. 消化管の全長：9.25[m]で一様平面
3. 提案するカプセル内視鏡の重量：10.0[g]
4. 腸壁抵抗：腸壁摩擦と粘液の抵抗を考慮
5. 深部体温：検査時の深部体温は 40[°C]
6. 粘液温度：25[°C]または 40[°C]
7. 腸壁摩擦：全面に腸壁が接する( $\mu=0.23$ )
8. 粘性抵抗：粘液の温度 40[°C]・粘度 0.16[pa/s]・流下時間 172.0[s]とする

上記の条件の下、力学モデルの構築を行うにあたり腸液の粘性抵抗力の導出を行う。腸液の粘性抵抗力  $f_v$  [N]は以下に示す腸液の圧力  $P$  [pa]とカプセルの接触面積  $A$  [m<sup>2</sup>]より導出可能である。

$$f_v = PA \quad (1)$$

$P$  [pa] は腸液の圧力、 $A$  [m<sup>2</sup>] はカプセルの接触面積とする。また、腸液の圧力は以

下に示す粘度  $\eta$  [pa・s] と腸液の流下時間  $t$  [s] より導出可能である。

$$P = \frac{\eta}{t} \quad (2)$$

$\eta$  [pa・s] は腸液の粘度， $t$  [s] は流下時間とする。両側の腸壁に接触しカプセル表面積の 100% が粘液と接触したと想定すると，(1)，(2) 式より

$$f_v = 9.4 \times 10^{-7} \quad (3)$$

となる。導出した粘性抵抗力を用いて力学モデルの構築を行う。入力値  $f$  に対してカプセルの推進距離と時間の関係を導出する。

#### 4.1 内部機構における衝突の力学モデルの構築

図 10 に外部磁場による内部機構の質量物体の衝突時の力学モデルを以下に示す。

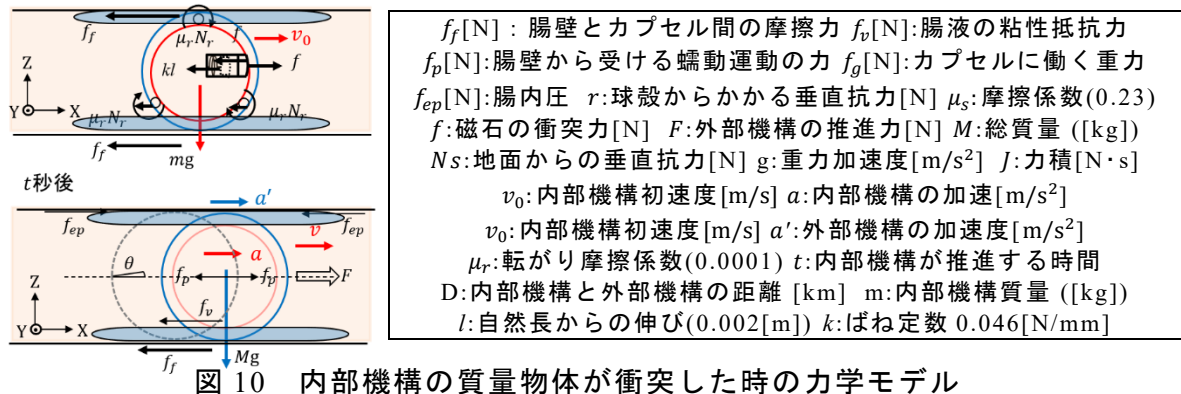


図 10 より，外部機構における運動方程式を以下に示す。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F - f_f - 2f_v \pm f_{ep} \pm f_p - 3\mu_r N_r \quad (4)$$

腸壁とカプセル間の摩擦力  $f_f$  は式(2)で表せる。

$$f_f = \mu N = \mu mg \cos \theta \quad (5)$$

粘性抵抗力は上記で示した通り式(3)で表せる。腸内圧  $f_{ep}$  は互いに打ち消し合うため消去される。また，蠕動運動が働いていない時の推進を想定しているため  $f_p$  は考慮しない。よって式(4)は(6)となる。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F - \mu mg \cos \theta - PA - 3\mu_r N_r \quad (6)$$

また，内部機構の衝突力  $f$  を以下に示す。

$$f = \frac{9.8 \times J - mv_0 - kl}{t} \quad (7)$$

(6)，(7)式より， $F$  と  $f$  の関係は

$$F = \frac{9.8(f\Delta t)^2 - kl}{mD} \quad (8)$$

となる。(8)式よりカプセル内視鏡が推進時に必要な磁石の衝突力の関係を導出した。

#### 4.2 外部機構における衝突の力学モデルの構築

磁石の衝突力により推進する 1 秒間での変位の導出を行う。図 11 に内部機構の質量物体が衝突した後の力学モデルを示す。

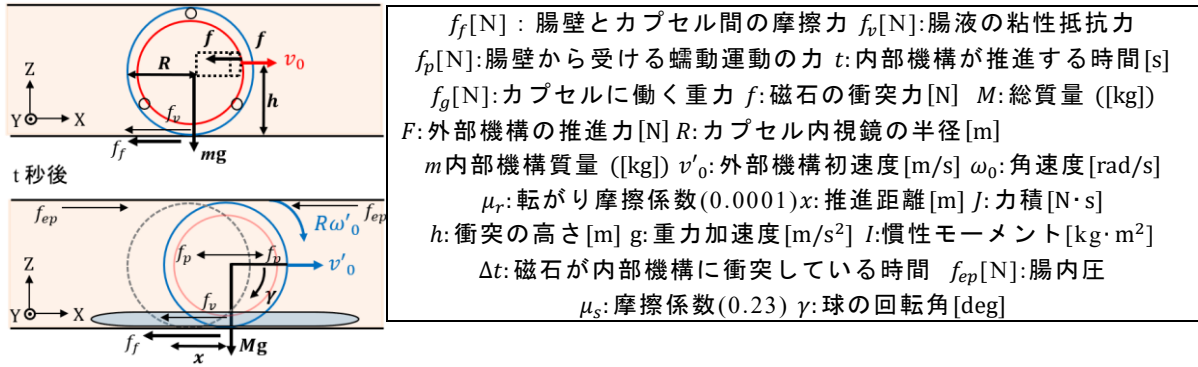


図 11 内部機構の質量物体が衝突した後の力学モデル

図 11 より、カプセル内視鏡の重心運動は

$$\int_0^{\Delta t} f dt = J = Mv_0 \quad (9)$$

となり、速度  $v_0$  で内部機構は動き始める。また、カプセル内視鏡の回転の運動方程式は

$$I \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)_{t=\Delta t} - I \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)_{t=0} = (h - R)f = I\omega_0 \quad (10)$$

となり、角速度  $\omega_0$  で回転を始める。よって衝撃力を受けた後の運動は

$$v'_0 = v_0 - R\omega_0 = \frac{1}{M}J - \frac{5(h - R)}{2RM}J = \frac{7R - 5h}{2RM}J \quad (11)$$

となり、推進距離  $x$  は

$$x = \int v_0 dt = \frac{J}{M}(t' - t) \quad (12)$$

となり、衝突後にカプセルが止まるまでの距離  $L$  [m]は

$$L = \int_0^L cd \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right) dx + f_u - \frac{1}{2}Mv^2 \quad (13)$$

と表す。 $c_d$  は空気抵抗数(0.01),  $M$ [kg]はカプセル重量,  $v$ [m/s<sup>2</sup>]は回転角速度,  $f_u$ [N]は転がり摩擦である。(12), (13)式を用いて、時間と推進距離の関係を導出する。

#### 4.3 衝突力による 1 秒後のカプセルの推進距離の導出結果

図 12 に 1 秒後のカプセル内視鏡の推進距離を、図 13 に 30 分間における時間と推進距離の関係を示す。

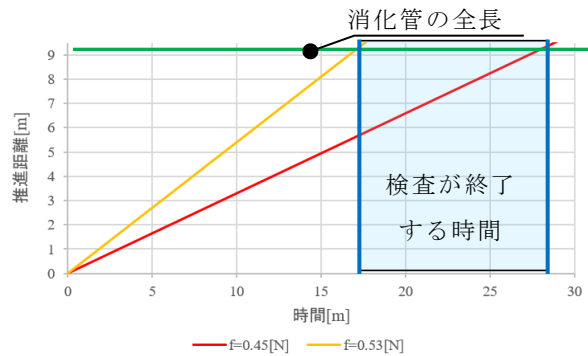
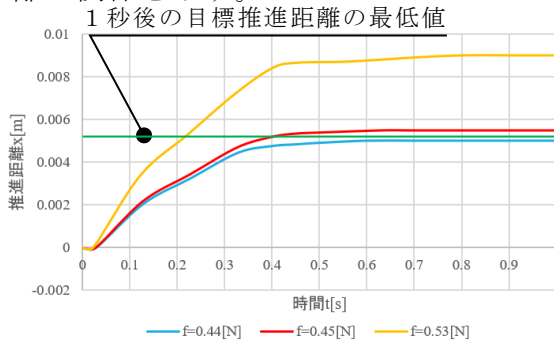


図 12 1 秒後のカプセル内視鏡の推進距離

図 13 30 分間における時間と推進距離

図 12 より、1 秒後に 5.1[mm]推進するために必要な  $f$  [N] は 0.45[N]以上であることが読み取れる。 $f$  の値が 0.01 変化するだけでも推進距離に影響を及ぼす。また、0.6 秒を過ぎた辺りから推進距離が変化を行わないため、加速をさせるためには短い間隔での磁場の照射が必要である。本稿の 2.4 節で記載した通り、提案するカプセル内視鏡は推進中において内部機構が傾くことを想定している。衝突力  $f$  が 0.45[N]の最低値(80%)に設定する場合、衝突力  $f$  は 0.53[N]で設定する必要がある。よって、 $f = 0.45$ [N],  $f = 0.53$ [N]を入力値として移動距離と時間の関係を導出する。

また、図 13 より 30 分間における時間と推進距離のグラフには 1 秒間隔で磁場を照射し 9.25[m]の一樣平面上の消化管を速度一定で推進するものとする。 $f=0.45$ [N]の場合、1 秒間隔で磁場を照射すると 5.5[mm]移動し、1 分あたり 330[mm]の推進が可能である。また、 $f=0.53$ [N]の場合、1 秒間隔で磁場を照射すると 9.0[mm]移動し、1 分あたり 540[mm]の推進が可能である。

#### 4.4 シミュレーション結果に対する考察

シミュレーション結果より、衝突力の最低値が  $f=0.45$ [N]、最高値が  $f=0.53$ [N]の場合、カプセルを飲み込んでから最速で 17 分、最遅でも 28 分で排出される。したがって上記の  $f$  値なら内部の姿勢に関わらず検査目標時間に到達する。磁場の照射間隔を短くすることでさらに推進速度を早めることが可能である。以上より、提案するカプセル内視鏡は消化管内を目標時間通りに移動することが可能である。

## 5. 結言

本稿では、大腸悪性新生物の概要、カプセル内視鏡の性能と問題点及び要求される点について考察を行い、規格の検討並びに推進速度の目標を定めた。また、新たなカプセル内視鏡の提案を行い、特に自走機構の推進原理について述べた。簡易機能試験機による 2 つの検証実験と構築した力学モデルによる動作シミュレーションによって、提案するカプセル内視鏡は消化管内を目標時間通りに移動することが可能であることを示した。

今後の展望として、磁場の照射方法及び大きさについては未着手である。そのため、本研究で提案したカプセル内視鏡が自走可能となる磁場発生装置の設計が求められる。また、実寸サイズでの機能試験機の作製及びシミュレーションの実施も求められる。シミュレーションモデルと実際の腸内環境では差異が生じることが予測されるため、細かな調整が求められる。

## 参考文献

- [1] 国立がん研究センター最新がん統計  
[https://ganjoho.jp/reg\\_stat/statistics/stat/summary.html](https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html), 2022.4.6
- [2] オリンパス株式会社 - 内視鏡で世界首位  
<http://japan.biz-directory.info/corp/olympus-med/>, 2022.7.14
- [3] Manh Cuong Hoang 1,†, Viet Ha Le 1,†, Kim Tien Nguyen 1, Van Du Nguyen 2, Jayoung Kim 2, Eunpyo Choi 1, Seungmin Bang 3, Byungjeon Kang 2,\* , Jong-Oh Park 1,\* and Chang-Sei Kim 1,\* , A Robotic Biopsy Endoscope with Magnetic 5-DOF Locomotion and a Retractable Biopsy Punch, 2020
- [4] 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”, 平成 22 年度修士論文, 2010