

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 2 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420260

研究課題名(和文)次世代型カプセル内視鏡に搭載する診断・治療用マイクロ磁気アクチュエータの開発

研究課題名(英文)Development of diagnostic or therapeutic magnetic micro-actuators applicable to next-generation capsule endoscope

研究代表者

本田 崇 (Honda, Takashi)

九州工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70295004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代型カプセル内視鏡に求められる2つの新機能を実現するためのマイクロ磁気アクチュエータを提案した。1つは、細胞診ブラシを擦過する診断機能で、外部磁界の印加方向を制御することで、カプセルの回転、及びブラシの突出、擦過、格納の動作を可能とする。もう1つは、薬剤散布による治療機能で、回転磁界によって送りねじ型アクチュエータを駆動し、その場にとどまるためのアンカーを拡張しながら薬剤タンクを押し込む。模擬小腸やウシ・ブタの小腸内における駆動試験の結果、いずれの機能も動作を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：This study proposed novel magnetic micro-actuators capable of two kinds of functions required for a next-generation capsule endoscope. One is a brush cytology function, in which the magnetic actuator can perform four different motions including projection/pullback/scrape modes for the brush and a rotation mode for the capsule body. Each mode is selected by the direction of external magnetic fields. The other is a drug delivery function, in which a screw type actuator can press a drug tank and extend anchors for stay. This operation is performed by a rotating magnetic field. As a result of the examination in a simulated small intestine and small intestines of cow and pig, both functions exhibited the desired performance.

研究分野：磁気応用

キーワード：カプセル内視鏡 永久磁石 外部磁界 磁気トルク 細胞診 マイクロポンプ アンカー機構

## 1. 研究開始当初の背景

2000年に発表されたカプセル内視鏡は、それまで困難であった小腸内の観察を低侵襲に可能にした画期的な医療機器として、この十年あまりで臨床に広く受け入れられるようになった。現状の機能はまだ「観察」に限定されているが、今後、その場に停止する機能や見落とし箇所に戻るような自走機能、さらには診断および治療を行うための機能がカプセル内視鏡に備われば、消化管の診断・治療の高度化、更なる低侵襲化に大きく貢献するものと期待される。

こうした背景から、カプセル内視鏡の多機能化を目指した様々な研究開発が現在、国内外で始まっている。その主流は、目的の場所へ移動する自走機能や対象物へカメラを向けるための姿勢制御に関するものである。代表的な例として、カプセル筐体外周部にらせん構造を有するカプセル内視鏡を回転磁界で駆動する自走機構が提案されている。また、胃腔用カプセル内視鏡を磁場勾配と磁気トルクによって位置や姿勢を制御する手法が医療機器メーカーから提案され、臨床応用されている。いずれもカプセル内に永久磁石を設置し、外部磁界でワイヤレス駆動しているのが特徴である。

これに対し、診断や治療の機能はいまだに基礎研究の段階であり、世界的に見ても報告例は少ない。診断や治療を行うための強力なマイクロアクチュエータとそれを駆動するためのエネルギー源に関する技術開発が遅れているためである。

## 2. 研究の目的

前章で述べたような現状に鑑み、本研究では、診断・治療機能を有する次世代型カプセル内視鏡の核となるマイクロ磁気アクチュエータの開発を目的とした。具体的な診断・治療機能として、『検査のための細胞診ブラシの擦過』と『治療のための薬剤散布』の各動作をカプセル内視鏡に付与することを想定した。マイクロ磁気アクチュエータの駆動には、すでに自走機能や位置・姿勢制御で有効性が認められている外部磁界によるワイヤレス駆動法を採用した。これによって、アクチュエータを駆動するためのバッテリーが不要となり、カプセル内の限られた空間を有効に使うことが期待される。また、ブラシの擦過や薬剤散布の動作だけでなく、診断・治療する部位にアクチュエータの位置を合わせ、その場にとどまる機能も検討する。最終的には、実際の動作環境に近い環境(模擬小腸や駆動システム)を構築し、実証実験まで実施する。

## 3. 研究の方法

### (1) 目標値の設定

はじめに細胞診ブラシの擦過と薬剤散布を行うための2種類のマイクロ磁気アクチュエータの目標値を設定する。また、小腸内圧

や小腸の蠕動運動の力など、文献値を基に位置合わせや停滞用のアンカー機構に求められる条件を調査し、目標値を設定する。数字の妥当性については研究協力者のアドバイスを受け評価する。

### (2) 細胞診ブラシ用アクチュエータ

目標値で設定したブラシのストロークと推力を満たす磁気アクチュエータを開発する。予備実験において磁石可動型のリニアアクチュエータを試作したが、カプセル内に占める体積が大きく、CCDカメラ等を搭載できなくなる問題があった。そこで本研究では、磁石を回転させてブラシを駆動する機構を採用することで省スペース化を図る。

### (3) 薬剤散布用アクチュエータ

薬剤散布用マイクロアクチュエータでは、研究代表者が開発した電磁駆動型マイクロポンプについて小型化と直列接続による高吐出圧力化を検討する。また、電磁駆動型マイクロポンプと並行して、薬剤タンクを押しつぶす薬剤散布用アクチュエータの検討も行う。

### (4) 位置合わせ機能・アンカー機構

アクチュエータはカプセル内に固定されているため、カプセル本体を回転させることでブラシや薬剤散布の位置決めを行う必要がある。回転のための機構を新たに追加せずに、カプセルを回転させる手法を検討する。また、診断・治療の機能を実現するためには、その場にカプセルをとどまらせるアンカー機能も必須と考えられる。カプセルからアンカーを拡張する機構を考案するが、細胞診ブラシや薬剤散布の動作と干渉しない駆動方法を検討する必要がある。

### (5) 3軸コイルによる駆動システムの構築

実際のカプセル内視鏡は体内で任意の方向を向いているため、駆動磁界を3次的に制御できる必要がある。3軸のヘルムホルツコイルを新たに導入し、それぞれのコイルへの通電電流を制御することで任意方向の磁界を発生させる駆動システムを構築する。その際、直流磁界だけでなく、交流磁界や回転磁界も任意方向に制御できるようにする。

### (6) 模擬小腸による評価

開発した2つのマイクロ磁気アクチュエータに対し、実際の動作環境を模擬した環境で評価を行う。シリコン製の模擬小腸だけでなく、食用のブタやウシの小腸を使用し、水圧を印加することで実際の動作環境に近づける。模擬小腸内のカプセル内視鏡が任意の姿勢でも所望の動作が可能であるか、位置合わせ機能や停止機能が動作するかを入念にチェックする。不具合がある場合には、随時改良を加えて完成度を高める。

## 4. 研究成果

本研究では、次世代型カプセル内視鏡に搭載することを想定し、外部磁界によって細胞診ブラシの擦過と薬剤散布の動作が可能なる2種類のマイクロ磁気アクチュエータの開発

を行った。いずれも機構に永久磁石を組み込み、外部磁界から磁石が受ける磁気トルクを動力とする。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

### (1) 細胞診ブラシ用磁気アクチュエータ 磁石揺動型アクチュエータ

図1に、はじめに作製した磁石揺動型アクチュエータによるブラシの駆動機構を示す。カプセル筐体の端部に、回転軸を有するNdFeB磁石を設置した。この磁石の上面にアームを取り付け、そこに弾性線としてNiTi超弾性線を固定し、さらにその先端にナイロン製のスクリーブブラシを装着した。ブラシの突出長を確保するため磁石が超弾性線を巻き込み、磁化方向を鉛直方向から45°後方に傾いている。この状態を保持する機構として、パーマロイ片をカプセル後端部に取り付け、磁気ラッチ機構を採用している。

駆動の手順は、まずカプセル径方向に回転磁界を印加し、カプセルを回転させることでブラシの位置合わせを行う。その後、カプセル長さ方向に直流磁界を印加することで磁気ラッチを解除しブラシを突出させる。引き続き、カプセル径方向に交流磁界を印加すると、磁石は回転振動しブラシを前後に擦過させることができる。

評価の結果、ブラシの突出長10mm以上、擦過に要する推力40mN以上を確保した。また、擦過では30Hz以下において約2.5-3.2mmのストロークを確保し、ウシ小腸で実施した擦過試験では十分な細胞採取量を確認した。

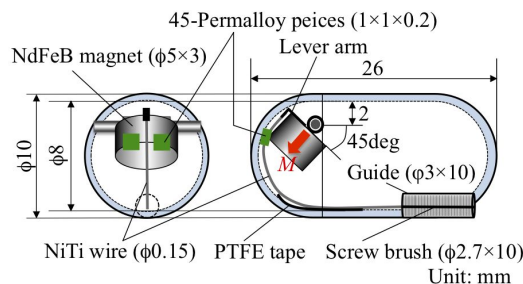


図1 磁石揺動型アクチュエータ

### 磁石回転型アクチュエータ

前述の磁石揺動型ではその場にとどまるためのアンカー機構がないという欠点があった。これを解決するために、図2のような磁石回転型アクチュエータによる細胞診ブラシ駆動機構を新たに開発した。図ではアンカーは上部のみを示し、左右のアンカーは省略して描いてある。カプセル筐体の中心軸に、両端をブッシュで支持したボルトを設置した。ボルトには、径方向に着磁されたNdFeB磁石を後方に固定し、ワッシャーを装着した六角ナットを挿入した。ワッシャーの下部にブラシを、上部と左右に拡張アンカーを取り付けている。ブラシには磁石揺動型と同じナイロン製のスクリーブブラシを採用した。アンカーは、厚さの異なる2枚の短冊状PETフィルムを重ねて先端を接着し、内側PETフィ

ルムの端部をワッシャーに、外側の端部を筐体にそれぞれ固定した。

カプセル直径方向の回転磁界を印加すると、磁気トルクによってボルトが回転し、送りねじの原理でナットはボルト上を直動する。ナットを前方に押し込むと、ブラシの突出と同時にアンカーを拡張することができる。アンカー拡張後に、回転磁界の回転方向を周期的に反転させることでブラシを前後に往復運動させることもできる。

なお、初期状態においてブラシを突出させる方向とは逆方向に回転磁界を印加すると、カプセル本体が磁気トルクによって回転する。これによってブラシの突出方向を採取部位に合わせることが可能である。

図3は、アンカーを拡張し、ブラシを最大長で突出させたときの写真である。ブラシの最大突出長は10mm、アンカーの筐体側面からの突出長は10mmであり、左右アンカー先端間の最大拡張幅は31mmになる。

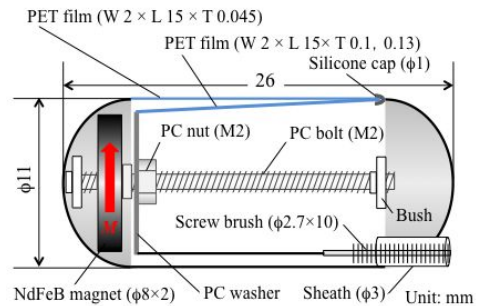


図2 磁石回転型アクチュエータ

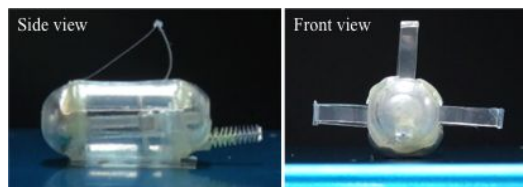


図3 ブラシ突出とアンカー拡張の様子

### (2) 薬剤散布用アクチュエータ

当初の予定では電磁駆動型マイクロポンプを直列接続し高い吐出圧力を目指したが、カプセル内に収めることが困難であることが判明したため、同時並行で進めていた薬剤タンクを押しつぶす方式に変更した。

図4にアンカー機構と薬剤散布機構を搭載した素子構成を示す。前述の磁石回転型アクチュエータを基本構成にしており、カプセル筐体内部の中心軸に、両側をブッシュで支えたボルトを設置し、径方向に磁化されたNdFeB磁石を取り付けた。ボルトには六角ナットを挿入し、回転磁界でボルトを回転させるとナットが直動する。ナットには上下左右4本の短冊状PETフィルムでできたアンカーを取り付けており(図では左右のアンカーを省略)ナットを押し込むと外側に拡張する。カプセル前方には蛇腹状の薬剤タンクがあり、アンカーを拡張した後にナットを更に進めると押しつぶせるように配置してある。蛇

腹状のタンクの容量は 0.18mL であり、カプセル先端のチューブから薬を散布する。

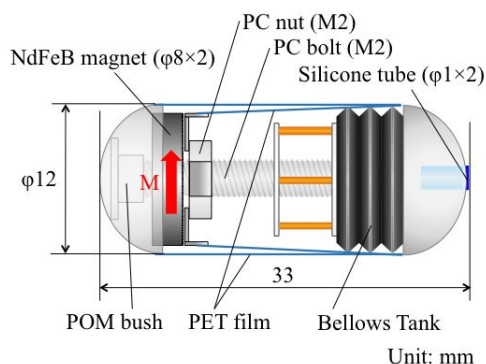


図4 薬剤散布用アクチュエータ

### (3) 駆動システムの構築

図5に、アクチュエータを駆動するための駆動システムの概要を示す。アクチュエータの駆動用コイルには、3軸のキュービック型ヘルムホルツコイルを使用した。磁界を印加できる空間は一辺100mmの立方体で、最大駆動磁界は約12kA/mである。この磁界強度は前述のすべてのアクチュエータの駆動条件を満足する。各コイルにはバイポーラ電源が接続され、ファンクションジェネレータまたはPCに接続されたシグナルプロセッサにより電流を制御する。これにより、カプセルの姿勢に合わせて任意方向に直流磁界及び交流磁界を印加することができ、更に任意の回転面に回転磁界を発生させることもできる。

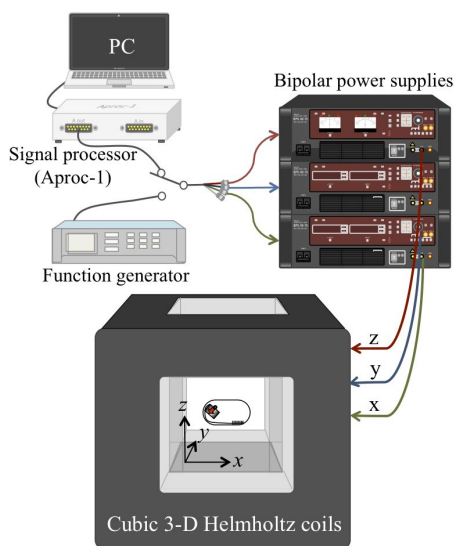


図5 3次元磁界発生システム

### (4) 模擬小腸による評価と総括

シリコンゴム製及びコラーゲン製の模擬小腸、食用のウシ小腸とブタ小腸の内部にカプセルを挿入して評価を行った。この際、小腸内圧を模擬するために、水深5cmに沈め約500Paを印加して実験を行った。その結果、細胞診ブラシの擦過、薬剤散布、アンカー拡張、カプセルの回転による位置決め各動作を問題無く行えることを確認した。

以上の結果より、外部磁界で駆動するマイクロ磁気アクチュエータを使うことにより、検査のための細胞診ブラシの擦過と治療のための薬剤散布の各機能をカプセル内視鏡に搭載するという当初の目的を達成することができた。1個の磁石による機構にも関わらず、磁界の印加方法を制御することで複数の機能を実現することができる点は、世界的にも例が無く、本研究成果のインパクトは大きいと言える。今後更なる小型化と市販のカプセル内視鏡への組み込みなどへと本研究を発展させていく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

K. Hajima, M. Yamashita, T. Honda, Performance evaluation of magnetically driven cytology brush applicable to capsule endoscopy, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol.50, No.1, pp.167-176 (2016)

DOI: 10.3233/JAE-150101

M. Yamashita and T. Honda, Fabrication of Magnetic Microactuators for Cytology Brush Built into Capsule Endoscope, Electronics and Communications in Japan, 査読有, Vol. 98, No.4, pp.27-34 (2015)

DOI: 10.1002/ecj.11648

山本陽輔、本田崇、弾性フィルムの回転振動を利用した磁気駆動マイクロポンプの直列接続とその応用、日本AEM学会誌、査読有、Vol.21, No.2, pp.190-195 (2013)

DOI: 10.14243/jsaem.21.190

山下真紀、本田崇、カプセル内視鏡に搭載する細胞診ブラシ用マイクロ磁気アクチュエータの試作、電気学会論文誌A、査読有、Vol.133, No.6, pp.351-355 (2013)

DOI: 10.1541/ieejfms.133.356

〔学会発表〕(計17件)

本田崇、羽嶋浩平、山崎悠貴、カプセル内視鏡への応用を目指した磁気アクチュエータの開発、電気学会マグネティクス研究会、2016年3月8日、東北大学(宮城県・仙台市)

羽嶋浩平、花澤雄太、本田崇、カプセル内視鏡に内蔵する磁気駆動細胞診ブラシの特性改善、平成27年度(第68回)電気・情報関係学会九州支部連合大会、2015年9月26日、福岡大学(福岡県・福岡市)

長澤真和、花澤雄太、本田崇、外部磁界を利用したカプセル内視鏡用投薬機構の開発、平成27年度(第68回)電気・情報関係学会九州支部連合大会、2015年9月26日、福岡大学(福岡県・福岡市)

村田里史、花澤雄太、本田崇、外部磁界で駆動可能なカプセル内視鏡用生検機構の開発、第39回日本磁気学会学術講演会、

2015年9月11日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

K. Hajima, M. Yamashita and T. Honda, Design and Fabrication of Magnetically Driven Cytology Brush Applicable to Capsule Endoscope, IEEE International Magnetics Conference 2015, 2015年5月13日、北京(中国)

村田里史、村瀬祐二、本田崇、生検機構を有するカプセル内視鏡の試作、第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2015年5月15日、ハウステンボス(長崎県・佐世保市)

吉村亮哉、田村聡、長澤真和、本田崇、外部磁界で駆動可能なカプセル内視鏡用アンカー機構の開発、電気学会マグネティックス研究会、2015年3月10日、金沢大学(石川県・金沢市)

本田崇、吉村亮哉、山下真紀、羽嶋浩平、村田里史、外部磁界で駆動するカプセル内視鏡用マイクロアクチュエータ(招待講演)、電気学会マグネティックス研究会、2014年8月4日、九州工業大学(福岡県・北九州市)

本田崇:外部磁界によるマイクロメカニズムのワイヤレス駆動技術、2014年度精密工学会春季大会学術講演会、2014年3月18日、東京大学(東京都文京区)

山下真紀、本田崇:カプセル内視鏡への搭載を目指した細胞診ブラシ用磁気アクチュエータの開発、第25回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2013年5月16日、箱根ホテル小涌園(神奈川県・箱根町)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

本田 崇 (HONDA, Takashi)

九州工業大学・工学研究院・教授

研究者番号: 70295004