

## 消化管内走行カプセルの研究（第3報）

○桐蔭横浜大学 伊藤高廣, 岩本雄介, 小笠原プレジジョンラボラトリー 林 輝

### Traveling Capsule for Inside of Soft Tube

Toin University of Yokohama Takahiro ITO, Yusuke IWAMOTO, Ogasawara Precision Laboratory Teru HAYASHI

We have developed a traveling micro capsule, which is driven by the inertia force and friction force. It is small enough, only 7 mm in diameter and 12 mm long, it can be put in the human gullet or intestines. The capsule contains a small magnet and a coil, and electric pulse drives the magnet to move the capsule. We did the experimental investigation that the capsule can travel on a plastic material, which has similar elasticity characteristics to living body. We have made the capsule smaller in length than the one presented last time and we have measured the temperature of the capsule during the move showing no harm to human body. Using calculated results, we have arranged new input signal pattern for the capsule and succeeded to move the capsule about twice as fast as the former one. Our capsule is supposed to be useful for medical treatment as inspection, drug delivery or operation.

#### 1. はじめに

消化管の手術後に行う導通試験の時間短縮のため、慣性反力走行による滑らかな外表面をもつ走行カプセルを提案し、基礎実験と理論解析を行ってきた。今回は生体への影響を考慮して駆動に伴うカプセルの温度上昇を測定するとともに、理論解析の結果を用いて走行速度を向上させる入力波形を提案し、走行実験によって効果を確認した。

#### 2. 走行カプセルの構造と特性の概要

図1に走行カプセルの構造、図2に外観写真を示す。本体に固定したコイルに交流電流を流し、コイル内の永久磁石（質量）が移動する際の慣性反力、壁面への衝突の衝撃力、走行面とカプセル間の摩擦力との組み合わせで走行させる。

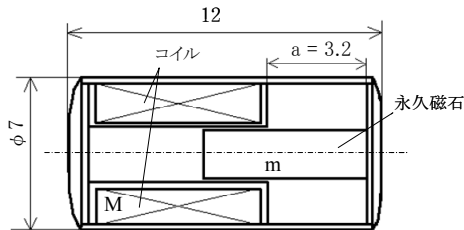


図1. 走行カプセルの構造（断面）（単位: mm）

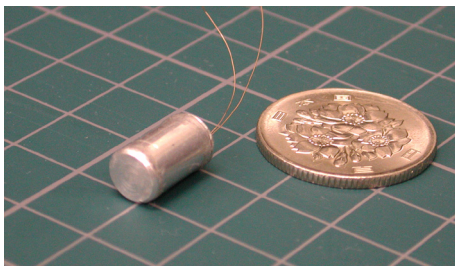


図2. 走行カプセルの外観

カプセルの移動速度  $S$  を求めるために、次式を理論解析<sup>1)</sup>によって導出した。

$$S = C_s \cdot K_s \cdots (1) \quad C_s = \frac{(2n+1) - (n+1)f}{2(n+1)\sqrt{(n+1)f-1}} \cdots (2)$$

$$K_s = \sqrt{\frac{a \cdot f_r}{2M}} \cdots (3) \quad n = \frac{M}{m} \cdots (4) \quad f = \frac{f_m}{f_r} \cdots (5)$$

$S$ :カプセルの移動速度  $C_s$ :速度係数  
 $K_s$ :カプセル形状係数  $n$ :カプセルの質量比  
 $M$ :カプセル外殻の質量  $m$ :永久磁石の質量  
 $a$ :磁石の可動範囲  $f$ :カプセルに働く力の比  
 $f_m$ :磁石とコイルによる電磁力  
 $f_r$ :カプセルと、接触する試料面との間に生じる摩擦力

#### 3. カプセル走行特性の測定実験

カプセルを生体内で用いる場合、コイルからの発熱による温度上昇が問題となる。温度上昇の少ない形態、材質を調べるため、各種カプセル走行時の表面温度を測定した。また、より速く走行させるための条件を理論解析から求めるため、カプセルに働く摩擦力と電磁力を実測した。

##### 3.1 カプセル表面温度の測定

様々なサイズ、材質のカプセル（図3）を製作し、駆動中の表面温度を測定した。カプセル外殻の材質としては、アルミニウム、アクリル、ゴムを用いた。一定時間駆動後、放熱と発熱がほぼ均衡する傾向がみられたため、駆動時間3分までのカプセル表面温度を、非接触温度計（スカイニー製 SM-220）を用いて測定、比較した（表1）。いずれも生体に影響を及ぼす程の温度には上昇しなかった。直径の小さなカプセルに比べ、直径の大きなカプセルの方が消費電力が少なく温度上昇も少ない傾向がみられた。空間の多い、太めのカプセルは空気による断熱効果で表面温度が上昇しにくいと考えられる。

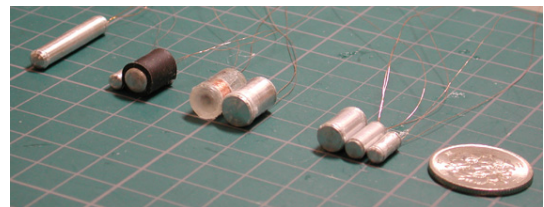


図3. 製作した各種走行カプセルの外観

表1. カプセルの表面温度（室温 23℃）

機体	1分	2分	3分	電流
A(長さ30mm)	25℃	26℃	27℃	0.1A
B(径8mm)	27℃	28℃	30℃	0.06A
C(径4mm)	32℃	35℃	36℃	0.1A
D(アクリル)	30℃	32℃	32℃	0.05A
E(ゴム巻)	32℃	35℃	35℃	0.6A

### 3.2 摩擦力 $f_r$ の測定

理論解析結果を、カプセル速度向上に利用するためには、各パラメータを実験で測定する必要がある。デジタルフォースゲージ（日本電産シンボ製 FGC-0.2）を使用し、カプセルと試料との間に働く、動摩擦力を測定した。試料には、ゴムシート、ファントム（乾燥状態／表面が湿った状態）、の3種類を用いた。図4に測定装置の概略を、表2に測定結果を示す。

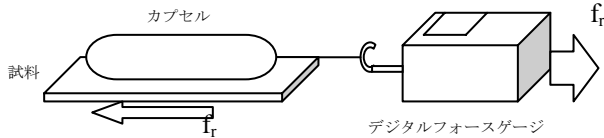


図4. 摩擦力  $f_r$  測定装置概略

表2. 摩擦力  $f_r$  の測定結果

カプセル	アルミニウム		
試料	ゴムシート	ファントム	
試料状態	乾燥	乾燥	湿
動摩擦力 $f_r$ [N]	0.027	0.015	0.016
備考	10回の平均値		

### 3.3 電磁力 $f_m$ の測定

コイルに電流を流したとき、内側の永久磁石に及ぼす力を、電圧を変化させて測定した。図5に測定装置の概略を示す。

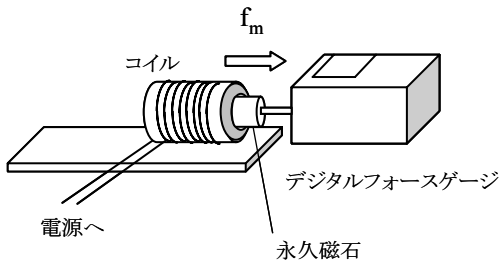


図5. 電磁力  $f_m$  測定装置概略

実験から、図6に示す電圧と電磁力の関係のグラフが得られた。電磁力は永久磁石端がコイル端近くにあるときよりも、3mm程出ている時の方が強く、図1のカプセル断面図において永久磁石のピストンが右側の壁に当たる際の電磁力の方が左側の壁に当たる際の電磁力より大きいと推定できる。この非対称性が、カプセルが一方向へ移動できる理由と考える。

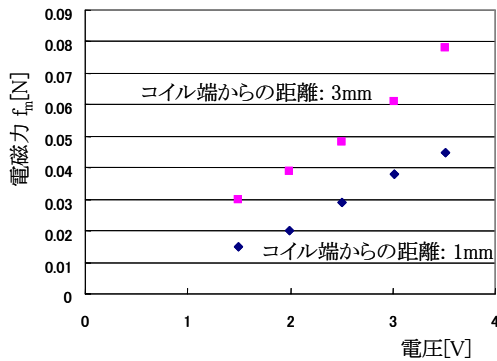


図6. 電圧  $E$ [V]による電磁力  $f_m$ [N]の特性

### 3.4 走行速度向上方法の検討

次に走行カプセルの速度向上のため、理論解析結果を基に入力波形の検討を行った。図7は前出の式(2)により得た、走

行速度特性を示したグラフである。摩擦力  $f_r$  に対する電磁力  $f_m$  の比  $f$  の値により移動方向が逆転することがわかる。一方、図6の入力電圧—電磁力特性および図7の速度特性から、カプセル内永久磁石を順方向に移動させる際に絶対値の大きな電圧を加え、逆方向に移動させる際には絶対値の小さな電圧を加えれば、カプセル本体は常に同じ方向に移動し、単純な+-対称の波形の時より大きな速度が得られると推定できる。そこで、一侧の電圧絶対値を小さくした、図8 (B)に示す、波形を入力したところ、走行速度の向上が見られた (図9)。

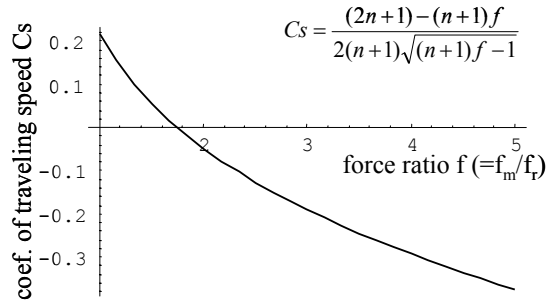


図7. 走行カプセルの速度特性 (理論)

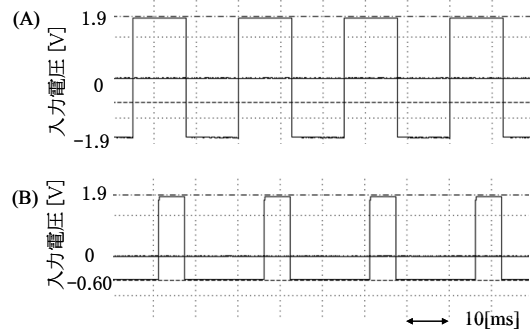


図8. 入力波形の改良

(A):従来、(B): 走行速度向上の改良後

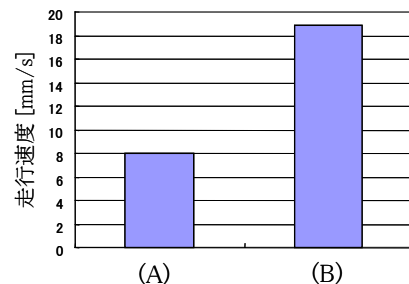


図9. 入力波形の改良による走行速度の向上

## 4. まとめ

消化管内走行用カプセルの駆動機構を提案し、理論解析と駆動実験を行った。カプセルを小型化するとともに、表面温度上昇を防ぐには空気による断熱効果のあるための形状が有利であることを見出した。理論解析結果を利用して入力波形を改良し、より速い走行速度を得ることができた。

### 謝辞

本研究は、文部科学省（日本学術振興会）科研費(17560235)の助成を得て行われたものである。

### 参考文献

- 1) T. Hayashi et al : Traveling Capsule for Inside of Soft Tube, Proceedings of Int.n Symposium on Precision Engineering and MEMS' 2002, pp. 64-70.