

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650293

研究課題名(和文) リニア推進駆動および滞留回避機能を有する自走式カプセル内視鏡の開発

研究課題名(英文) Development of self-propelled capsule endoscope provided with liner motor promotion and stay evasion mechanics

研究代表者

森 英利 (MORI, HIDETOSHI)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：10144130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)： 滞留回避機能を付与した自走式カプセル内視鏡の開発を目的とし、スライドおよびノック方式のリニア推進駆動によるカプセル自走方式の提案、カプセル外周に与える外力の組合せにより、任意方向への姿勢制御が可能な滞留回避機能発現方法の提案を行った。いずれも設計指針に基づいて試作したカプセルを模擬腸管内で作動させ、カプセル輸送特性および滞留回避機能の操縦性について検討し、安定した移動速度や姿勢制御が可能であることを実証した。また実用化に向けた応用例として、駆動・作業カプセルを連結したカプセル列としての利用法を提案した。

研究成果の概要(英文)： For the purpose of a practical development of self-propelled capsule endoscope provided with stay evasion mechanics, liner motor promotion mechanics stemming from sliding and knocking drive methods has been proposed, and stay evasion mechanics by combining the direction of driving force applied to capsule periphery has also been designed and applied to a capsule. Prototype capsules have been developed and examined in a simulated bowel to confirm the utility of the capsule transport and the characteristic maneuverability of stay evasion mechanics. Experimental results confirmed that stable transport and attitude control of capsule can be reasonably achieved by optimizing control parameters. A capsule system using driving and working capsules has also been demonstrated for the practical usage of the proposed capsule concept.

研究分野：生体材料工学

キーワード：検査・診断システム 内視鏡 カプセル アクチュエータ

### 1. 研究開始当初の背景

一般的に汎用されているチューブ式内視鏡では、その撮像範囲が食道や胃、十二指腸、大腸などに限定されるため、さらに内部に位置する小腸における疾患の診断や治療には困難を伴っているのが現状である。小腸を対象とした内視鏡法については、現在ではダブルバルーン法とカプセル法が汎用されるに至っている。ダブルバルーン法では、小腸全体の検査を実施する場合には経口および経肛門検査の2回に分けて行うのが一般的で、発見された病変に対し必要に応じて生検、内視鏡的ポリープ切除術、あるいは腸狭窄に対するバルーン拡張術などの内視鏡的処置の可能な点が特徴的である。

一方、被験者にとってより負担が少なく、苦痛を伴わない非侵襲的検査法としてのカプセル内視鏡も注目されている。最近では、小型カメラを搭載した錠剤状カプセルを飲み込み、小腸内部全体にわたる撮像を体外に無線通信で伝送するシステムの開発が進められており、我が国でも2008年に薬事法の適用を受けて、カプセル内視鏡の本格導入が始められている。しかしながら、現在使用されているカプセル内視鏡は何れも自走することができず、消化管内においては食物と同じ器官の蠕動運動によってカプセル本体が移動するため、任意の位置や方向からの観察や制御が困難であり、その結果として診断結果の信頼性にも問題を生ずることがある。さらに消化管の運動機能そのものが低下している場合には、腸に到達するまで時間がかかり、バッテリー性能の制約から小腸の撮像ができない、あるいは憩室や狭窄部位などにカプセルが滞留したりする事例も報告されていることにより、本来診断を必要とする憩室や狭窄部位などが疑われる被験者には使用が禁忌事項とされているなど、疾患の診断や治療に対する信頼性は十分とはいえない。

以上の背景により、カプセル法はスクリーニング用、ダブルチューブ法は精密検査用と使い分けることが多いが、カメラによる撮像データの信頼性、カプセル移動走行の安全性や制御性、さらには滞留を回避する機能性などの付与が可能となれば、被験者への負担が大幅に軽減されるカプセル内視鏡の需要は今後も増加するものと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、小腸内疾患の診断や治療に供する自走式カプセル内視鏡の設計指針の確立を目的とし、設計概念に基づいたカプセルの試作と模擬腸管内におけるカプセルの搬送特性や滞留回避機能性などを観察し、その有用性の実証を行った。カプセル自走方式には、腸内壁を傷つけずに移動でき、かつ超小型化が可能なりニアモータ推進式を採用し、また滞留回避機能には、本体を前後2分割し、各々を独立制御して任意方向への併進・回転運動を可能とする方式を採用する。

カプセルは外部より速度制御・姿勢制御が可能であり、さらに本体を駆動器とすれば、治療薬剤やサンプル採取器具、各種センサーなどを運搬する作業カプセルを任意速度で牽引でき、撮像のみならず治療用としてのカプセル列利用も可能となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 自走方式の提案

消化管内壁を傷つけることなく自走させる方式として、カプセル外部に可動部を要しないリニア推進機構の適用可能性を詳細に検討した。リニアモータの超小型化技術も進歩してきており、カプセル内視鏡への応用も十分に期待できる推進方式である。

試験用駆動装置の概要を図1に示す。機体は $\phi 16 \times 60^L$ の透明PVC製薄肉円筒で、その内部には可動磁石(磁束密度400 mTのネオジウム製、 $\phi 10 \times 10^L$ )および固定磁石(フェライト製、 $\phi 10 \times 3^L$ )を装着し、外周コイルとしてエナメル線を線密度2.5本/mmで巻付けた外径 $\phi 14$ 、内径 $\phi 12$ のPVC製円筒が内蔵されている。走行試験では、外部電源より電圧6V・電流2.1Aを供給し、磁束密度5.5 mTを発生させた。なお、試験機の総重量は18gで、可動磁石の反作用力を主たる駆動力とするスライド走行とカプセルを端面に衝突させるノック走行を検討した。

駆動装置の制御には汎用のマイコンボードAKI-H8/3052Fを用い、専用マザーボード

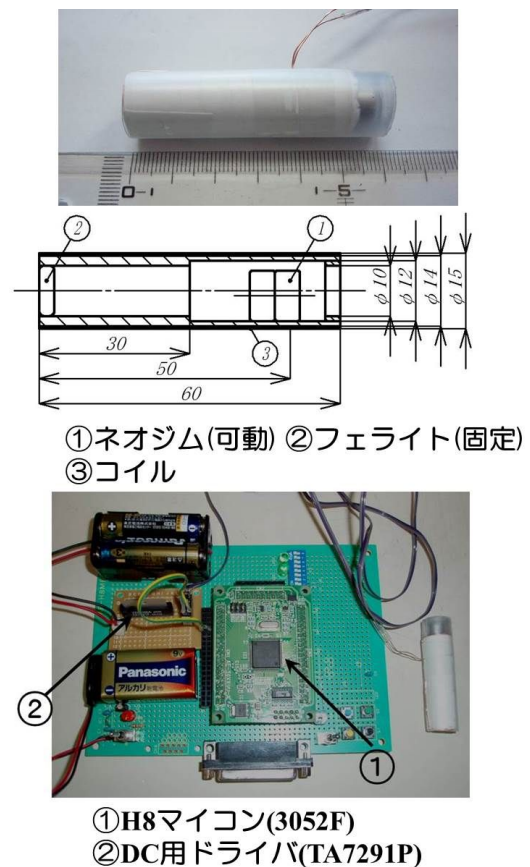


図1 自走試験機の概要と周辺機器

から制御プログラムの書き込みと実行を行った。また外周コイルに通電して発生させる磁界の制御には DC モーター用フルブリッジドライバ TA7291P を用い、可動磁石の推進力と速度の制御を行った。マイコン制御では電流をパルスで制御するため、コイルに発生する磁界をほとんど減衰させることなく維持することが可能である。本研究で提案するリニア駆動方式は可動磁石の作用・反作用を利用するため、パルス制御の発展形である PWM 制御が必要で、これによりオンパルスの通電幅を任意に変化させ、またパルス幅の変調によって電流を詳細に制御することができ、移動速度の任意調整も可能となる。ただし PWM 信号の最適周期はスライド方式とノック方式では異なるため、試行錯誤による走行試験の結果から最適周期を決定した。

### (2) 滞留回避機能の駆動および操縦特性

本研究ではカプセル本体を前後 2 分割し、その外周に互いに反対方向となる螺旋構造を施し、この前後室を各々独立して制御し、その動作の組合せにより任意方向への並進、転がりおよび回転運動を機能させることを意図した。またカプセルの操縦制御に基づく滞留回避機能の発現を目的とするため、カプセルの遠隔操作が容易なモーター駆動を採用し、姿勢制御方式が滞留回避特性に及ぼす影響を検討することとした。

図 2 には、滞留回避機能を付与するための基本的な駆動制御方法の一例を示した。外周に作用する力の組合せにより、前進、後退、左右への回転運動が可能となり、またギア比の設定により任意の速度制御も可能である。

本報で試作した試験機の概要を図 3 に示す。機体は  $\phi 50 \times 262.5^L$  の透明 PVC 製薄肉円筒で、基本設計ではカプセルを前後に 2 分割し、その表面には各々反対方向に螺旋状シリコンチューブが一定リード角(4 種類作製し、図は  $10^\circ$  の場合)で取り付けられている。ここで駆動装置として前後室には、各々独立してモーター(マブチモーター RC-260)と遊星ギアボックス(ギア比 1:4 と 1:5 のボックスユニットの組合せによって 1:4 ~ 1:400 間で 8 通りのギア比が設定可能)を装着し、モーター回転数は赤外線受信機を通した遠隔操作による電圧調整によって制御した。駆動装置の制御には汎用のマイコンボード AKI-H8/3052F を用い、専用マザーボードから制御プログラムの書き込みと実行を行った。また受信は PIC マイコン(16F84A)で行い、DC モーター用フルブリッジドライバ(TA7279AP)によるモーターの正転、逆転、停止およびブレーキ操作の制御を行った。

### (3) 走行試験用腸管モデル

腸管内模型は内径  $\phi 50$ 、外径  $\phi 60$ 、長さ 500 mm のアクリル製円筒を縦に 2/3 分割したものを使用し、その内面には約 10 mm 間隔で高さ 20 mm のシリコン製ヒダを接着し、さらに全内表面にヒトの皮膚に摩擦係数が類似する超軟質ウレタン樹脂を被覆した(図 4 参照)。

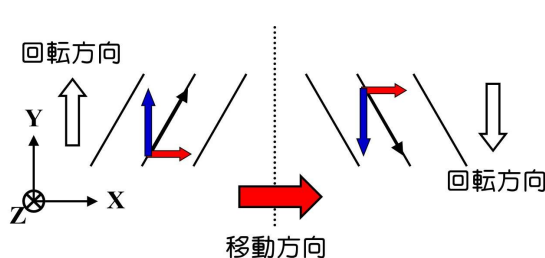


図 2 滞留回避駆動制御方法の例 (並進運動)

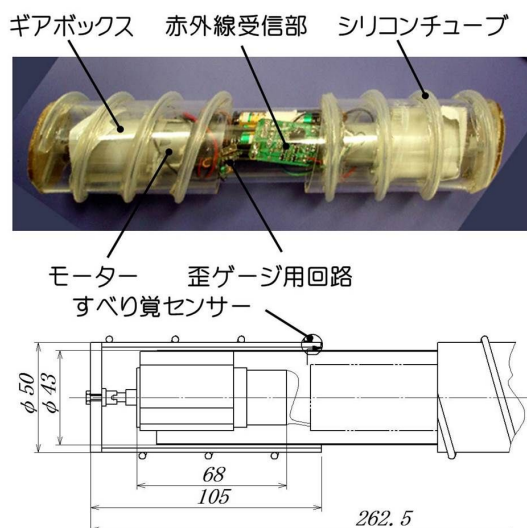


図 3 滞留回避駆動試験機の概要

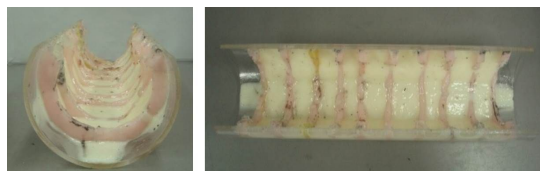


図 4 腸管内壁モデルのシリコン製製

ウレタン樹脂は、主剤(ポリオールブレンド)と硬化剤(イソシアネート)を vol.比 3:1 で混合・硬化させ、シリコン製ヒダ表面に 4 ~ 8mm の厚みで被覆した。さらに硬化したウレタン表面の摩擦係数を低減させるため、表面コート剤(イソシアネート/酢酸ブチル(40/60 vol.%))、粘性係数 30 mPa · s)を全表面に塗布した。試験機とテストコース表面との摩擦特性については、実際に内壁と接触する螺旋状部分のシリコンチューブとテストコース表面との間で実測し、静摩擦係数は 0.25、動摩擦係数は 0.018 であった。なお走行試験はビデオにて記録し、解析データに供した。

## 4. 研究成果

### (1) リニア推進駆動

走行試験では、定点をカプセルが通過に要する時間をビデオ撮像より測定し、このデータを基に試行錯誤の結果、採用した PWM 信号周期はスライド走行が前方 200 ms、後方

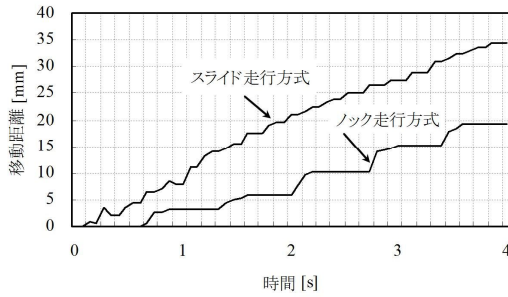


図5 走行方式と移動速度の比較

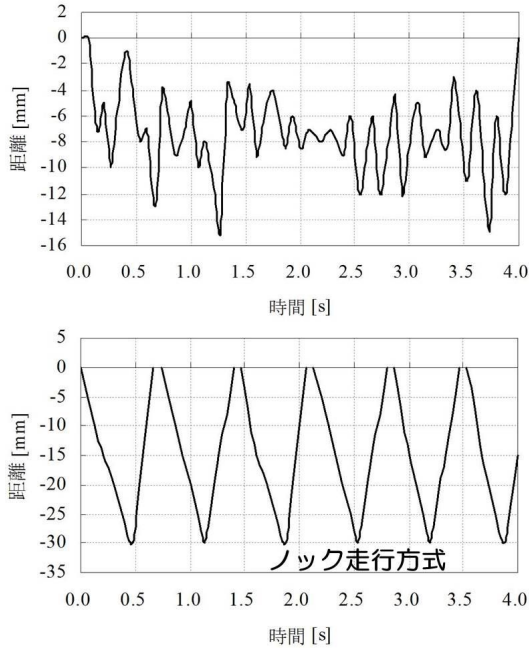


図6 可動磁石位置の経時変化

向 30 ms、ノック走行では前方向 200 ms、後方向 500 ms である。各走行方式の移動速度への依存性を図 5 に示した。これより両走行方式共に安定した移動が確保できており、往復 1 ストローク当たりの平均移動速度は 8.3 mm/s であった。また平均加速度の値から推算した最大推進力は、スライド走行では 60 mN、ノック走行では 57 mN で、両方式ともほぼ同じ値であることも確認される。なお図は最も移動速度が速い場合の実測値を表しており、PWM 信号の周期を変調すれば、移動速度を低下させることが可能である。

両走行方式における可動磁石の、試験機本体に対する相対位置の経時変化を図 6 に示した。図中の縦軸原点は、試験機本体の右端を示している。ノック走行ではストローク幅が 30 mm (試験機の中央) で固定されており、時間による変動も観測されず、腸管モデル内においても精密なストローク制御が可能であることが確認できる。一方、デューティー比の操作によって可動磁石に加速度を与えるスライド走行では、20 ストロークを 1 サイクルとして実測した移動距離は安定しているものの、1 ストローク毎の可動磁石移動速度

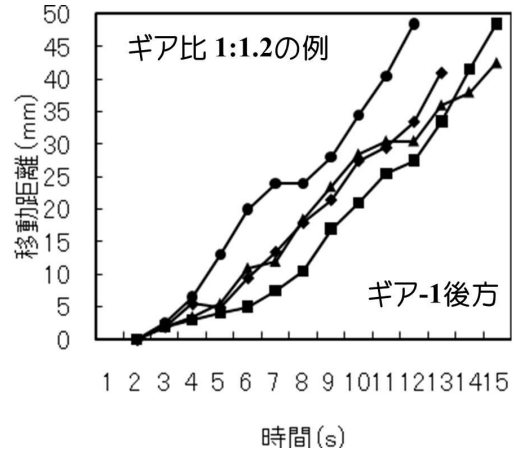


図7 並進移動距離の経時変化実測例

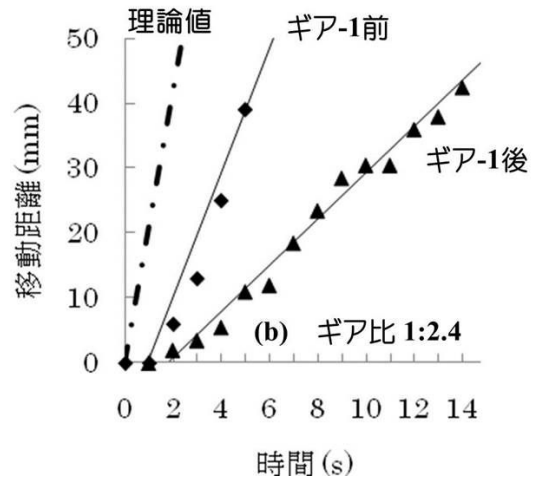
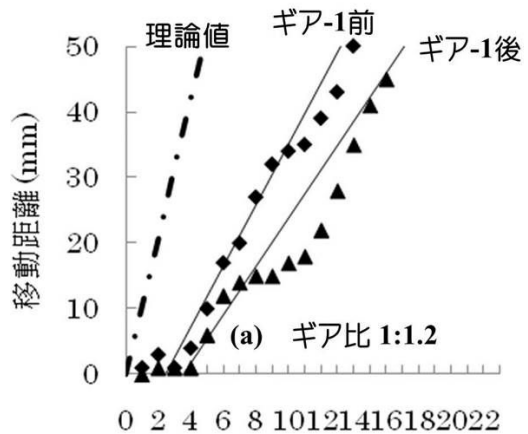


図8 ギア比の並進移動距離への影響

や移動距離には多少のバラつきが生じている。可動磁石の慣性力による影響を精度よく制御することが極めて困難であることを表しており、安定した走行を保証する制御プログラムを開発するために、電流密度や磁束密度と PWM 周期の最適値との関係を継続して検討を行っている。

(2) 滞留回避機能の操縦特性

ギア動作方向の組合せによって、不織布上を試験機が動作する様子をビデオ撮影し、並

進運動、転がり運動、回転運動が操縦性良く実現されることを確認することができた。実際の腸管内壁を模擬したテストコースでの走行は、摩擦力の違いに起因する速度変化はあるものの、走行性そのものに関しては何ら相違がないといえる。

カプセルの走行性能としては、基本的には安定した消化管内の搬送であることから、ここでは腸管を模擬したテストコースを使用し、並進運動の特性を考察することとする。すなわち走行試験として、ギア比を 1:1.2 (ギアボックス-1: 18 rpm、ギアボックス-2: 22 rpm)および 1:2.4 (ギアボックス-1: 18 rpm、ギアボックス-2: 44 rpm)とした場合の正方向への並進運動の測定結果を代表例として記す。またこのとき、ギアボックス-1 を前方とする場合と後方とする場合の2つの組合せが考えられるが、これは試験機の前進および後退運動に対応しており、その操作特性は滞留からの脱出あるいは後退して再撮像を実行させる場合に、とくに重要な示唆を与えることになる。

図7にはギア比 1:1.2、ギアボックス-1 を後方に設置した場合の試験機移動距離の経時変化を例示した。データとしては最も移動速度が速い場合と遅い場合、および平均的挙動を示した場合を例示した。テストコース表面の性状にはある程度の不均一さがあるにもかかわらず、比較的類似した移動速度を繰り返しており、安定した走行特性を示していると考えられる。他のケースもほとんど同様に安定した走行特性を示しており、駆動開始時における静摩擦の影響で多少の遅れを生ずる傾向はあるものの、試験機本体の空転やトルク不足による停止などは観測されなかった。図8には、リード角 10°の試験機を用い、ギア比を 1:1.2 および 1:2.4 とし、さらに各設定駆動条件下でギアボックス-1 を前方とした場合と後方とした場合の平均移動距離と時間との関係を点綴した。図中データの勾配より算出した平均移動速度は、ギア比 1:1.2 のとき、ギアボックス-1 を前方にした場合が 4.5 mm/s、後方に設置した場合が 3.5 mm/s、またギア比を 1:2.4 とした場合には、それぞれ 10.0 mm/s および 3.6 mm/s が得られた。ギアボックス-1 を後方に設置した場合には、ギア比の変更を行っても移動速度には大きく影響していないが、前方に設置した場合には2倍以上の移動速度となっている。これらの結果は試験機の前後室重量が異なることに起因し、重心位置の移動に伴って、腸壁と本体の接触状態および摩擦力が異なって作用したためと推察される。また螺旋リード角により移動速度が多少変化したが、ギア比の影響の方が大きいことが分かった。なお図中の理論値は、いずれも摩擦や回転の駆動に伴うエネルギー損失を無視した場合の移動距離と時間の関係を示している。

(3) 連結カプセル内視鏡の操作特性

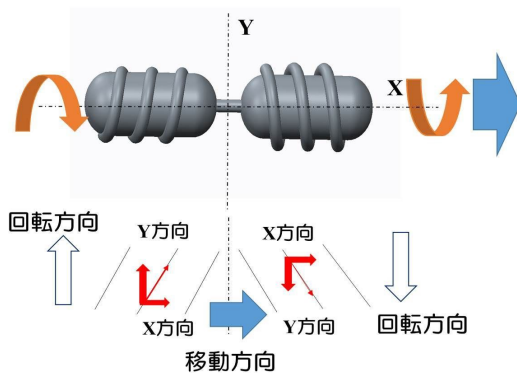


図9 連結カプセル内視鏡の操縦特性

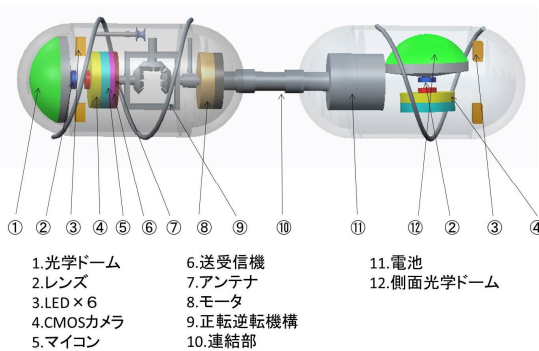


図10 連結カプセル内視鏡 (側面撮像カメラ装備)

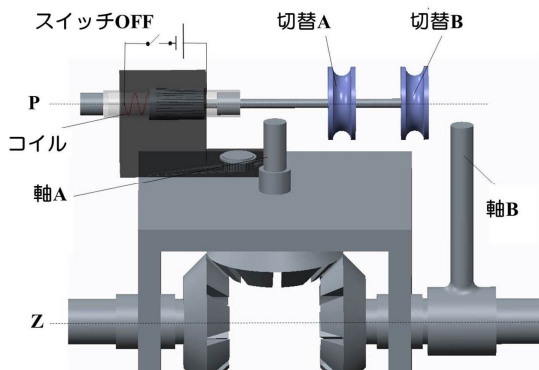


図11 ベベルギアボックス

従来のカプセルは、本体が単体であるために容量が限られ、バッテリーや撮像機器、送信機器などの装備内蔵に限りがある。収容力の余裕を確保するためにカプセルを連結すれば、駆動器カプセルの駆動力は大きく、作業カプセルには薬剤注入やサンプル採取など、目的に応じたカプセルを選択する自由度が生まれる。また連結カプセル外周の螺旋構造には(2)の滞留回避機能を付与すれば、憩室等における滞留にも対応することが可能となる。(2)に対応した X-方向並進運動発現の例を図9に示す。外周へ加える力の方向により、任意方向への前進・後退、左右への回転運動が可能となる。

図10には、作業カプセルに側方撮像用カメラを設置した作業カプセルを連結した場

合を例示した。カプセルは可撓性シャフトで連結し、駆動カプセルに配したベベルギアボックスにより正・逆回転を制御している。また図 11 のベベルギアは回転オフセットの状態、制御軸を A または B に連結すれば、各カプセルを独立制御することができる。ベベルギアで連結した簡易的なカプセル列の不織布上での作動は確認しており、現在、数種のアールをもつ腸管モデルを作製し、その操縦性についても検討を継続して行っている。

なお(1)～(3)に関するこれまでの成果をまとめ、関連学会に投稿、審査中であることを付記する。

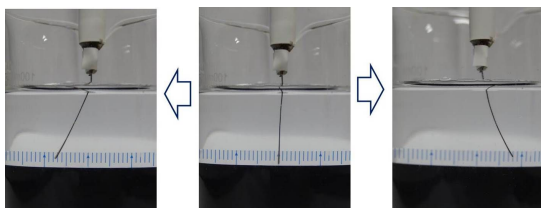


図 12 高分子アクチュエータ屈曲挙動の観察

#### (4) 能動的な可撓シャフトの作製と評価

憩室や潰瘍部位に連結カプセルが滞留し、(2)の滞留回避機能が十分に機能しない場合には、可撓シャフト部に能動性を与えて外部より任意に方向変換することが、滞留部からの脱出に有効である。ここでは、フッ素樹脂イオン交換膜(ナフィオン膜、デュボン社製)を使用した高分子アクチュエータを作製し、その適用可能性を考察した。

乾燥厚み 175 $\mu$ m の高分子膜に無電解めっき法により電極を接合し、通電試験によりアクチュエータとしての機能発現を観察した。図 12 には、通電試験(1.7V-100mA)による屈曲挙動を観察した例を示す。通電直後に最大屈曲変位を呈し、繰返し通電による変位量の安定性も確認しており、アクチュエータとしての応答性、再現性、安定性が十分であることを示している。現在、このアクチュエータを可撓シャフト部に配したカプセル列の操縦性を検討しており、その適用可能性が実証され次第、関連学会等を通じて公表する予定である。

#### 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1) 森 英利 : 「粉と人工骨」(招待講演)にて一部公表, 粉体工学会 2014 年度中部談話会研究技術討論会, 2014 年 12 月, 岐阜

2) 水野 光国, 森 英利 : 「滞留回避機能を付与したカプセル内視鏡の開発-滞留回避機能の操縦特性-」(記念講演), 第 87 回日本医療機器学会大会, 2012 年 6 月, 札幌

#### 6 . 研究組織

##### (1)研究代表者

森 英利 (MORI HIDETOSHI)  
富山大学大学院理工学研究部(工学) 教授  
研究者番号 : 10144130

##### (2)研究分担者

水野 光国 (MIZUNO MITSUKUNI)  
愛知工業大学工学部 教授  
研究者番号 : 70121366

##### (3)連携研究者

山本 辰美 (YAMAMOTO TATSUMI)  
富山大学大学院理工学研究部(工学) 助教  
研究者番号 : 60220480