

# 静電モータを用いた MRI 環境下での生体力学計測

山本 晃生<sup>\*</sup>, 一柳 圭吾<sup>\*</sup>, 横田 秀夫<sup>†</sup>, 平野 裕基<sup>\*</sup>, 樋口 俊郎<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> 東京大学 工学系研究科 精密機械工学専攻  
東京都文京区本郷 7 - 3 - 1

e-mail: {akio, yanagi, yorozu, higuchi}@intellect.pe.u-tokyo.ac.jp

<sup>†</sup> 理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット  
埼玉県和光市広沢 2 - 1  
e-mail: hyokota@riken.go.jp

**要旨** 臓器などの生体組織の力学特性を計測することをめざし, MRI による豚肝臓の変形計測を試みた. MRI 内で利用可能なモータである静電モータを用いて豚肝臓を強制的に変形させ, その変形中の様子をトリガ同期撮像法とタギング法を用いて観察した. 本報告では, 静電モータを中心とした実験装置構成について報告する.

## 1. はじめに

生体力学シミュレーションなどの研究においては, 臓器をはじめとする生体組織の力学的特性を正確にモデリングすることが重要である. しかし, 一般に臓器等は複雑な内部構造を持つため, その力学的特性を正確に把握することは難しい. そこで, 本研究では, 生体組織の力学特性モデリングを支援することを目的として, MRI 撮像下で臓器を変形させ, 変形中の内部の様子を観察することを試みた.

今回, MRI の撮像法としてはトリガ同期撮像法を用いた. トリガ同期撮像法は, 心臓のように一定周期で同じ変形を繰り返す対象物に対して用いられる. この撮像方法により一般の生体組織を観察しようとした場合, モータ等を用いて対象組織に一定周期で外力を加えて変形させることが必要となる. この際に問題となるのが, モータの選定である. 一般的に用いられるモータは, いずれも電磁力を利用して動く電磁モータであるため, MRI 内部に持ち込むことは, 安全性や撮像に与えるノイズの点から問題がある.

そこで本研究では, 非磁性モータの一つである静電フィルムモータを用いることで, 上記した問題の解決をはかった. 静電フィルムモータは静電気力を駆動力源としており, 周辺磁場との干渉が少ないことから, MR-compatible モータとして期待されている. 同様に非磁性で MR-compatible モータとして期待されるモータには超音波モータがあるが, 超音波モータは摩擦駆動であり制御が難しいとされる. それに対し, 今回用いた静電フィルムモータは同期式モータであるため制御が容易である. そのため, トリガ同期撮像法において必要とされる一定周期の繰り返し動作なども容易に実現することが可能である.

以下, 本報においては, 静電フィルムモータを中心として, 今回用いた実験構成について述べた後, 実際の撮像結果を示す.

## 2. 静電フィルムモータ

### 2-1. 構造

今回用いた静電フィルムモータは、交流駆動両電極形<sup>[1]</sup>と呼ばれる静電モータであり、フレキシブルプリント基板フィルムを主要要素として構成されている。モータの構造模式図を図1に示す。本モータは、200 $\mu\text{m}$ ピッチで電極が配置された3相帯状電極をそれぞれ有する移動子・固定子より構成され、移動子と固定子の電極それぞれに3相正弦波電圧を互いに逆順に印加することで、移動子・固定子間に生じる静電気力により駆動される。本モータは同期モータであり、駆動速度  $v$  [m/s] は印加電圧の周波数を  $f$  [Hz]として、 $v=1.2\times 10^{-3}f$  と表される。

モータの発生推力は印加電圧振幅の2乗に比例し、実用上十分な推力を得るためには通常1~2kV<sub>0-p</sub>の電圧を印加する。これにより駆動時に流れ込む電流量はmAオーダーである。推力は電極面積にも比例するため、フィルムを複数枚積層することで積層数に比例してモータ推力を増すことも可能である。本研究では2組のフィルムを積層して用いている。なお、高電圧の印加による大気中の絶縁破壊を防ぐため、駆動時には移動子・固定子間に絶縁液を注入する。

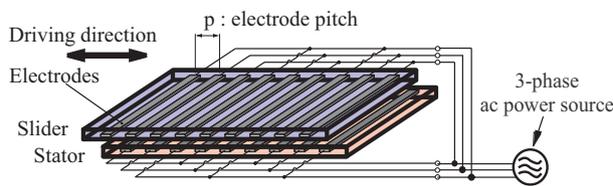


図1 交流駆動両電極形静電モータ

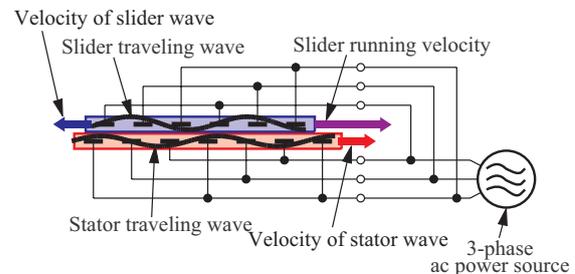


図2 動作原理図<sup>[1]</sup>

### 2-2. MR-compatibility

モータをMRI内部で利用するためには、安全性やMRI撮像への影響を十分に考慮する必要があります。例えば、内部に磁性体を有する電磁モータをMRI室内に持ち込んだ場合、MRIの強磁場に引きつけられ極めて危険であるほか、MRI磁場の影響を受けて安定に動作できない可能性があります。また、モータが動作する際には、ノイズや磁場を発生するため、それらがMRI撮像に及ぼす影響も考慮しなくてはならない。

静電フィルムモータに関しては、これまでに上記の点に関する調査を行ってきており、このモータがMRI内で安全かつ安定に利用可能であることを確認している<sup>[2]</sup>。静磁場強度1.5Tを有するMRIのガントリ近傍で静電フィルムモータを駆動させ、その推力を評価した例を図3に示す<sup>[2]</sup>。強磁場内においても通常時と同等の推力が発生できていることがわかる。

図4は、静電フィルムモータをMRIのベッド上に設置し、モータを駆動しながらMRI撮像を行ったときの画像SN比の一例である<sup>[2]</sup>。横軸の距離は、撮像に用いた頭部用コイルのコイル端からモータ設置位置までの距離を示している。モータを導入しない状態で測定したSN比は40~42dB程度であったため、コイル端から60cm以上離れた位置では、画像SN比に影響は出ていないことがわかる。モータ動作が画像SN比に影響を及ぼす程度は様々な要因によって左右されるため、図4の結果があらゆるケースに適用できるとは限らないが、この結果は本モータのMR-compatibleアクチュエータとしての可能性を十分に示しているといえる。

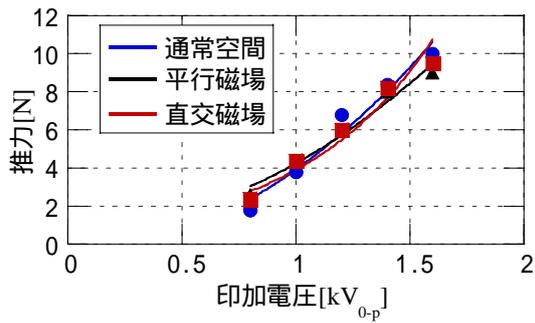


図3 MRIガントリ近傍での静電モータの発生推力<sup>[2]</sup>

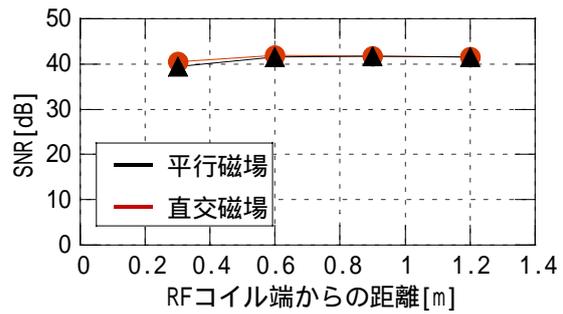


図4 静電モータ駆動中に撮像したMRI画像のSN比（駆動電圧振幅 1.4kV<sub>0-p</sub>）<sup>[2]</sup>

### 3. 撮像実験

今回、図5に示す装置を製作し撮像実験を行った。モータ部は、2組の移動子・固定子フィルムをアクリルケース内に積層したものであり、実験時には、アクリルケース内部を絶縁液（フロリナート FC-77，3M）で満たして利用した。

モータ移動子には、測定対象物の表面を押し込むための樹脂製のロッドが取り付けられている。モータ移動子中心部からロッド先端までの長さは約0.4mであり、ロッド先端には、繰り返しの押し込みによる撮像対象の損傷を緩和するため、直径38mmの樹脂製円盤を取り付けている。

この装置を図6に示すように、MRI内に設置した。撮影用被写体としては、豚の肝臓（食用雑種，Age：6ヶ月）の一部を切り出したものを用いた（図7）。

撮像時は、同期トリガを約1秒間隔で発生させた。モータはトリガに同期して、試料側へ36mm/sで12mm移動し18mm/sで初期位置まで戻るといった往復動作を126回繰り返した。なお、初期位置では、ロッド先端部が試料から離れるため、試料表面の押し込み量は12mmに満た

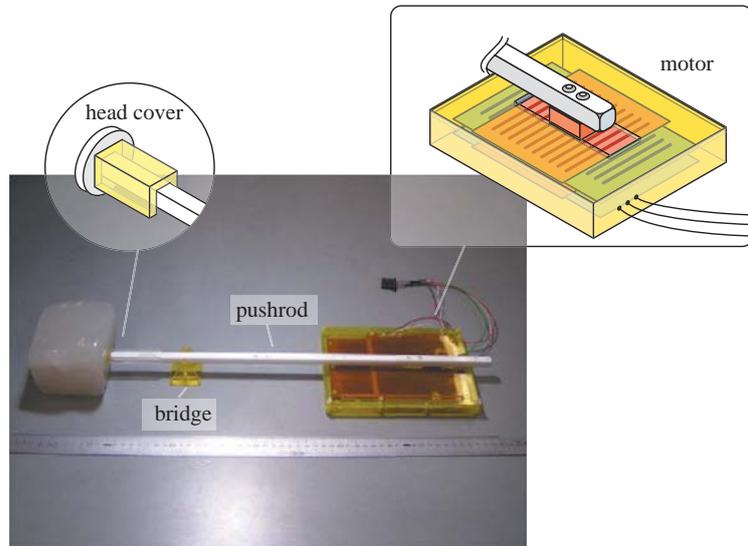


図5 実験装置  
（画面左端は評価用サンプル試料）

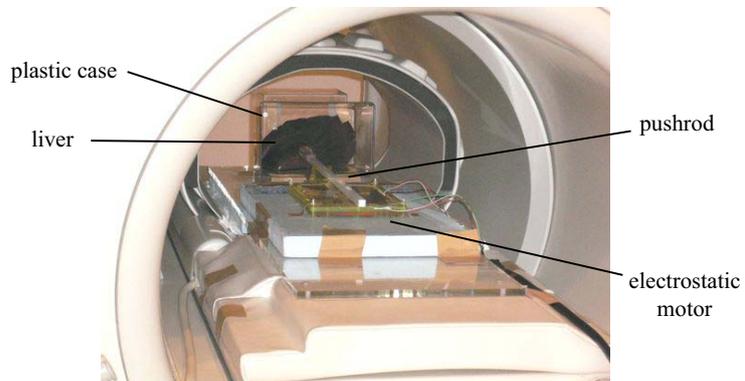


図6 測定用装置・試料設置の様子

ない．以上により得られた撮像結果を図 8 に示す．画像上のメッシュは，タギングによるものである．押し込みに応じて，対象物が変形している様子が確認できる．

#### 4. まとめ

静電フィルムモータを用いて，MRI 内部において生体試料の変形を計測することを試みた．トリガ同期撮像とタギングを用いて撮像を行ったところ，物体の変形の様子を観察することに成功した．実際に生体モデリング等に応用するには，より撮像の解像度を高めていく必要がある．今後，撮像シーケンス等の調整により高解像化をめざしたい．



図 7 測定に用いた豚肝臓

#### 参考文献

- [1] 新野，樋口，柄川，「交流駆動両電極形静電モータ」，日本ロボット学会，Vol. 15，No. 1，pp. 97-102 (1997)
- [2] 一柳，山本，樋口，今水，R. Gassert，M. Ingold，L. Sache，H. Bleuler，「MRI 環境下での高出力静電モータの駆動」，2005 年度精密工学会春季大会論文集，pp. 443-444 (2005)

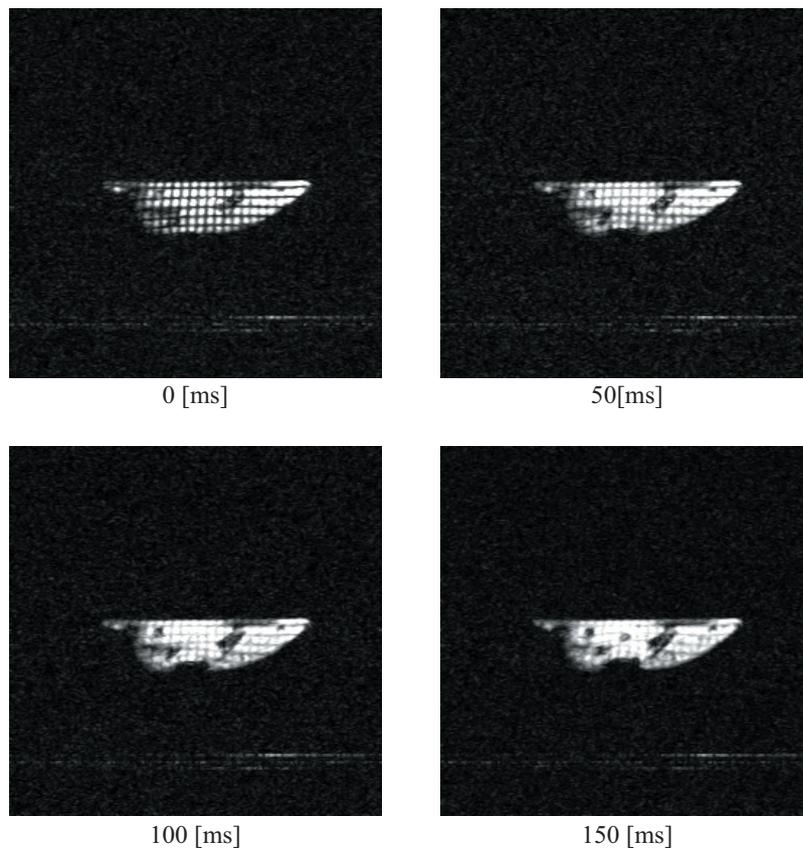


図 8 撮像結果（豚肝臓の変形）