

# 磁性流体を用いた人工筋肉型アクチュエータの基礎開発

Fundamental Development of Artificial Muscle Type Actuator using Magnetic Fluid

鈴木 真ノ介, 原 拓弥\*

Shin-nosuke SUZUKI, Takuya HARA

## 1. はじめに

近年、電動義手やロボットハンド、マニピュレータ開発の分野において、人間の動きに近い自然で柔軟な動作を行うソフトアクチュエータが注目を集めている。研究が盛んなソフトアクチュエータの例として空気圧や高分子材料を用いたものがあるが、生物の筋肉と比較すると様々な面で劣っている<sup>(1)</sup>。

その一方で、現在主流のアクチュエータとしてはモータに代表される電磁力を利用したものが多い。そこで、本研究では磁力により変形する性質を持つ磁性流体を用い、ソフトアクチュエータの柔軟性と電磁式アクチュエータの汎用性を併せ持つ新たなアクチュエータの開発を目的とする。

## 2. 設計方針および原理

開発するアクチュエータの設計方針として、人体の手指関節をモデルとし、その筋肉構造を模倣した。これは生物の筋肉がパワー、効率、柔軟性、自己修復性等に優れ、かつ、人間の動きに近い動作を行うソフトアクチュエータの理想型と考えたためである。これを基に開発した本アクチュエータを“人工筋肉型アクチュエータ”と呼ぶ。

ここで、筋肉の代替となる動作媒体である人工筋肉には磁性流体を用いる。磁性流体とは油や薬品等の媒体溶液に磁性体微粒子を分散させたコロイド溶液で、外部から磁界を印加することで変形する性質を持つ。また、磁性流体は液体であるため、ゴムのような伸縮する素材に封入して磁性流体チューブ（以下、チューブ）として用い、外部磁界による変形を筋肉の収縮に見立てることとした。

\*2008年度小山高専電子システム工学専攻修了

本研究で提案する人工筋肉型アクチュエータの概要を図1に示す。本アクチュエータでは、チューブを筋肉、リンク機構を持つアームを関節と想定し、磁性流体は電磁石により変形させるものとする。駆動用電磁石に電流を流すとチューブは収縮し、電流を止めるとアームに搭載されたばねの反力により元の状態に戻る。これにより関節の屈伸運動を行う。なお、バネの代わりにチューブをもう1つ用い、関節を伸張方向に動作させることで、生物の関節のような屈伸運動をすることも可能である。

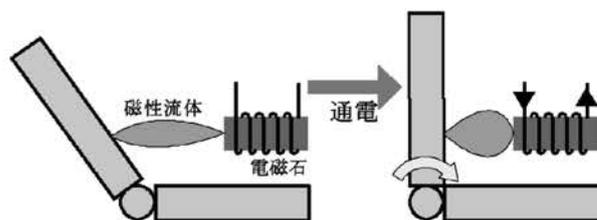


図1 人工筋肉型アクチュエータ

## 3. 磁性流体の基礎特性<sup>(3)</sup>

### 3-1. 実験装置の製作

人工筋肉型アクチュエータ開発の基礎段階として、磁性流体の磁気的な基礎特性を把握しておく必要がある。そこで、磁性流体単体での伸縮量の測定が可能で、磁石を配置することでその引力・斥力による直線往復動作が可能な直動型スライド機構を設計・製作した。本装置を図2に示す。

本装置は、アクリル製の筐体に二本のステンレスシャフトを平行に配置し、ハンドルを回すことで極性が変わる磁石Aとシャフト上をスライドする磁石Bが設置されている。ハンドルを回し磁石Aの極性を変えることで、磁石AB間に働く引力・斥力が切り替わる。なお、使用した磁石

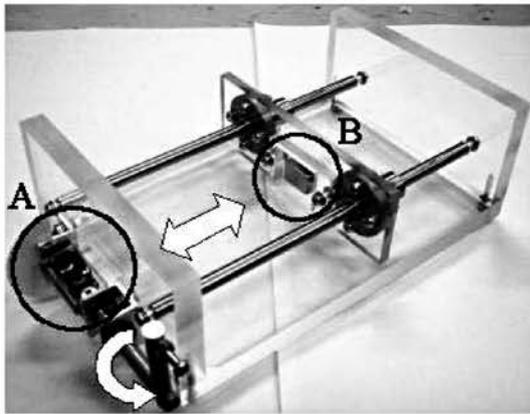


図2 直動型スライド機構

はネオジウム系金属永久磁石(NdFeB,  $10 \times 15 \times 5$ [mm], 端面磁束密度 $0.34$ [T])である。

なお、チューブ内の動作媒体としては、磁性流体の中でも磁性体微粒子の割合が大きく、磁界による変形の大きいMR流体（シグマハイケミカル, E-600）を用いた。また、それを封入するゴム素材には、一般的なゴム風船等と比べて、強度・伸縮性の高い手術用ゴム手袋の指部分を使用した。

### 3-2. 基礎特性の測定

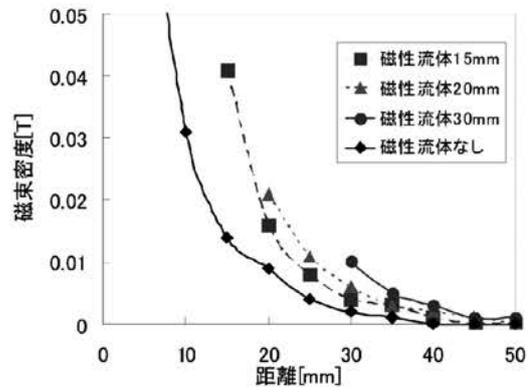
#### (1) 磁束密度

アクチュエータの動作媒体として磁性流体を用いるにあたり、磁性流体の有無による磁極間の磁束密度分布を測定した。図2の機構を用いて、磁石Bから $5$ [mm]間隔の地点にガウスメータ（Sypris T&M社, 5180型）のプローブを挿入し、各測定地点における磁束密度を測定した。実験の様子を図3(a)に示す。ここでは、磁石Bと測定点の間への磁性流体の有無と、チューブの大きさによる比較を行った。

測定結果を図3(b)に示す。いずれの結果においても、同一距離における磁束密度は、磁性流体を挿入した場合が磁性流体なしの場合に比べ増加しており、チューブが大きいほど磁束密度が増加していることが分かる。なお、各グラフの始点が0でないのは磁石Bと測定地点の間にチューブがあるために、プローブを挿入できないためである。この結果より、磁性流体を挿入することで、より遠方での磁束密度分布を高めることが可能である。また、チューブが大きいほど磁束の到達する距離は伸びるが、チューブの



(a)測定方法



(b)距離-磁束密度特性

図3 磁極間磁束密度の測定

大きさ以下に縮むことは不可能なので、可動域は小さくなる。そのため、可動域を大きくする場合には、 $15$ [mm]のチューブを使用し、遠方での磁束密度を要する場合には $30$ [mm]のチューブを使用するといった、使用箇所によってチューブの選定を行う必要がある。

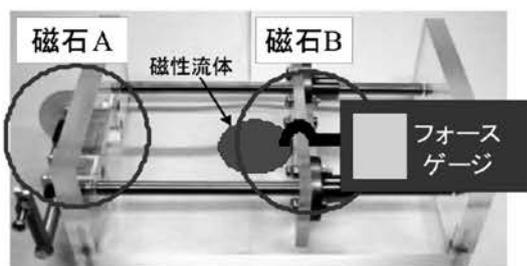
#### (2) 磁極間引力

アクチュエータ性能の指標として、応答速度や容積に並んで重要とされるのが発生力である。そこで、図2の機構の磁極間に生じる発生力を、図4(a)のようにデジタルフォースゲージ（株イマダ, ZP-200N）を用いて測定した。磁石AおよびBを引力が生じる向きに固定し、測定間隔は磁石Bを磁石Aから $5$ [mm]間隔とした。

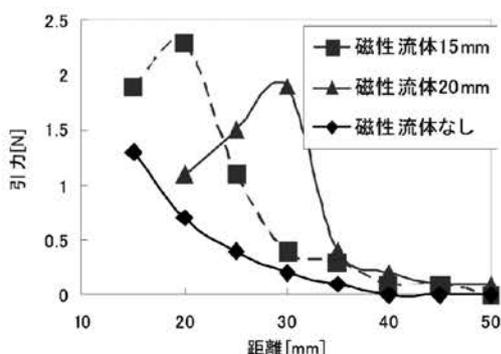
測定結果を図4(b)に示す。磁束密度特性と同様に、磁性流体を挿入することでより大きな発生力が得られた。直径 $15$ [mm]の磁性流体を用いた際に最大発生力 $2.3$ [N]が得られており、

200[g]程度のアームであれば動かすことが可能である。また、磁性流体を挿入した場合、最も近い距離よりも少々離れた位置で引力が最大を示している。これは、磁石AB間の引力に加え、磁石Aに引っ張られ変形したゴム手袋自体の弾性力の影響と考えられる。また、チューブを大きくすると最大発生力の低下が確認された。これはチューブの自重により磁極B側の重量が増加したためと考えられる。前述の磁束密度への影響も含め、発生力を大きくするにはチューブが小さいほうがよいと考えられる。

なお、今回の実験では、磁石間引力だけでなく斥力も測定したが、磁石ABを斥力が生じる向きに設置してもチューブと磁石間には引力が働き、チューブを挿入することで斥力が弱まった。このことから、磁性流体をアクチュエータの動作媒体として用いるには、基本的に引力による変形を利用した構成にする必要がある。



(a)測定方法



(b)距離－引力特性

図4 磁極間引力の測定

#### 4. 人工筋肉型アクチュエータ

##### 4-1. 試作機の製作

基礎特性の測定で得られた結果を基に、関節の屈伸動作を目的とした人工筋肉型アクチュエータの試作機を設計・製作した。原理で述べた基本的な構造を基に設計したアクチュエータを図5に示す。なお、原理では主にバネを用いた方式について述べたが、より生物の関節構造に近いものとして、屈伸運動にそれぞれチューブを用いる方式を採用した。また、印加磁界については、原理では電磁石による方法を述べたが、試作機では強力な磁界を容易に印加できるよう、直動型スライド機構と同様のネオジウム系磁石を用いた。

素材としては骨格・関節となるリンク機構をもつアーム部分と、土台を含めたメイン部分には軽量で強度が高いアルミニウム合金を用いた。動作媒体となる磁性流体は、直径20mm程度の小さな球状のチューブ(図5①)を3つ繋げる形にして、可動域の拡大を図った。これは磁性流体を1つの大きなチューブに封入すると、磁束密度は大きくなる一方で可動域が狭まることや、重量がかさみチューブ自体の移動量が小さくなることを防ぐためである。これらチューブは、指の根元にあたる部分に配置された回転磁極(図5②)によって駆動される。磁石が上を向くと、屈指筋にあたるチューブに引力が作用し、アームが屈曲運動を行う。また、磁石が下を向けば、逆に伸指筋にあたるチューブに引力が働き、アームが伸張運動を行う。このとき、磁石が向いていない方向には、磁石片側に貼付された磁性体により閉磁路を作り消磁することで、等価的に磁界のON/OFF動作を行う。

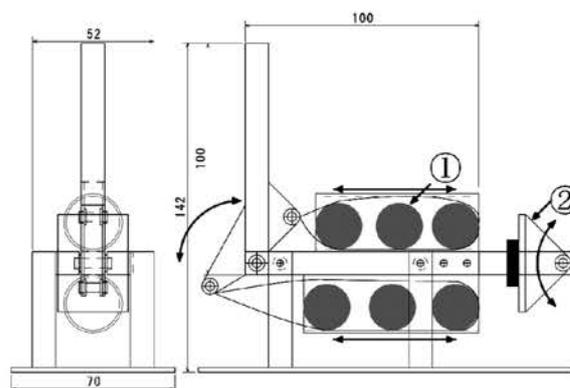


図5 試作アクチュエータ設計図

以上の設計指針に基づき製作した試作機の外観を図6に示し、その屈曲動作を図7に示す。製作したプロトタイプを用いて動作確認実験を行ったが、回転磁極を上下どちらに動かしても、指屈筋・指伸筋にあたるチューブの変形量が少なく、アーム部分を上下させるまでに至らなかった。原因として、チューブの変形不足が挙げられる。これは、筋肉として用いている3つのチューブが、磁界印加時に末端のチューブのみが変形し、筋肉全体として変形しなかった。この点を改善するべく、アクチュエータの改良を行った。

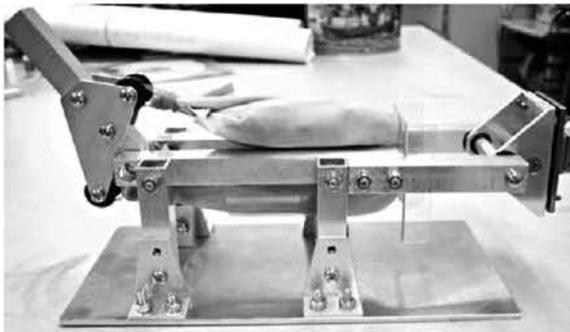


図6 プロトタイプアクチュエータ

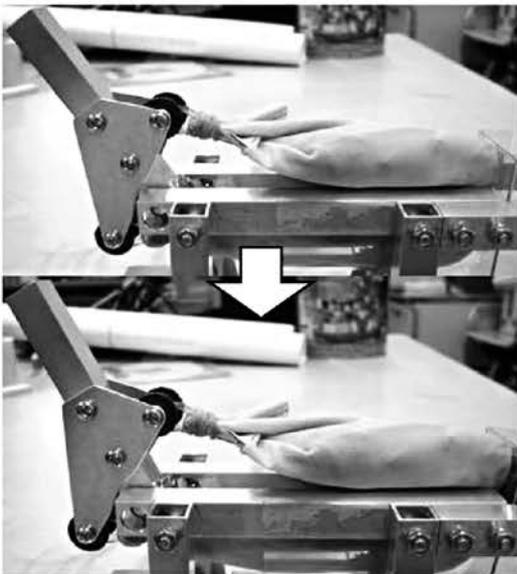


図7 プロトタイプアクチュエータの屈曲動作

#### 4-2. 改良型アクチュエータ

試作機での動作不良をふまえて、改良型の設計を行った。改良型の設計図を図8に示す。

まず、チューブの変形不足を改善するために3つのチューブを1つにし、小型化したチューブ

(図8①)を用いることにした。これにより、磁界印加時にチューブの末端だけでなく全体が変形するようになり、同時に重量も小さくなるため変形量が大きくなると考えた。次に、磁極側のアームの長さを短縮した。これは、3つ使用していたチューブを1つにしたため、結果的にチューブの長さが短くなるためである。また、チューブに印加する磁界の面積を増やすため、回転磁極(図8②)についてもチューブを囲むように磁石をコの字型に配置するといった改良を行った。

改良したアクチュエータを用いて、動作確認実験を行った結果、前述のアクチュエータより大きな可動範囲が得られた。その様子を定量的に把握するために、アームの可動範囲と発生力を測定した。可動範囲は定点からのカメラ撮影と画像編集により測定し、発生力はデジタルフォースゲージを用いて、図9のように測定した。測定結果を表1に示す。実験の結果、可動範囲は約48[degree]であった。屈伸時の動作を図10に示す。アームの出力に関しては、屈曲・伸張の両動作において約0.6[N]となった。基礎特性測定のために製作した直動スライド機構では約2.3[N]の出力を得られていたが、今回はその25%程度の出力しか得ることができなかった。原因として、直動型スライド機構では高さ方向の動作がない水平動作であったため、アームやチューブの重量の影響を受けにくかったことが考えられる。

#### 4-3. 考察

今回の実験から、磁性流体を用いた人工筋肉型アクチュエータを製作するために必要となる要素、問題となる箇所が多く発見された。

まず、アクチュエータを構成する筐体については、軽量であることが求められる。今回の実験で得られた出力は、アクチュエータとしては低いため、これを駆動媒体とするためには筐体を出来る限り軽量にする必要がある。

次に、動作媒体となるチューブについては検証すべき点が多い。試作機では3つの連なったチューブを使用し、改良型では1つのチューブを使用した。そのどちらも手術用ゴム手袋の先端に磁性流体を封入した、球状に近い形状のもの

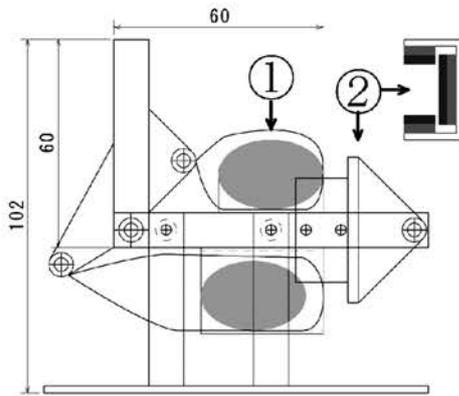


図8 改良型アクチュエータ設計図



図9 改良型の動作確認実験

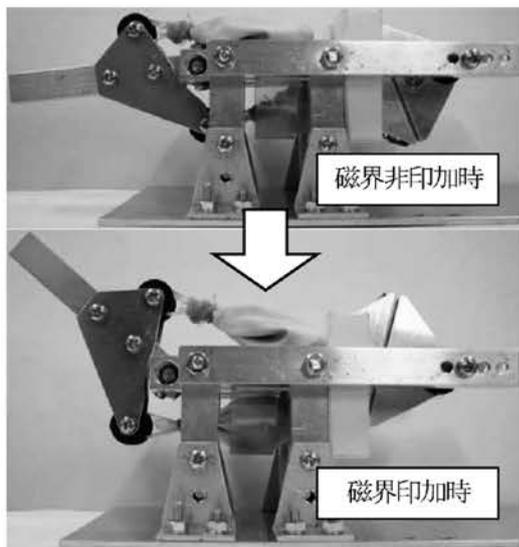


図10 改良型の屈伸動作

である。今回の実験では、磁界を印加した際に磁石に引き寄せられたのはチューブの末端部分のみであった。末端だけでなくチューブ全体が変形するようになれば、変位量が大きくなり可動範囲の拡大や発生力の増加も見込まれる。変形に耐え得る強度と柔軟性を兼ね備えた素材ということで使用した手術用ゴム手袋だが、柔軟性についてはこれ以上の素材が求められる。

表1 改良型アクチュエータの性能測定

可動範囲 [degree]	48.1
屈曲時最大出力 [N]	0.59
伸張時最大出力 [N]	0.61

磁性流体を駆動させるための回転磁極については、磁石の配置や磁極の形状についての検討が必要である。改良型ではチューブを覆うようにコの字型の磁極を使用し、結果として可動範囲等の向上に繋がったが、チューブを覆っている部分が少ないため覆う部分の大きさを変えて実験してみる必要がある。また、原理同様の電磁石による磁界印加についても検証する必要がある。

また、本研究で使用してきた磁性流体についても、取扱う上で注意すべき点がいくつか挙げられる。磁性流体は強磁性体微粒子を媒体となる薬品・油等に均一に分散させたものであるが、周囲の温度の低下や時間経過で微粒子と媒体が分離してしまうことがあった。分離しても、50℃程度に加熱して攪拌することで回復するが、低温の環境下では定期的な加熱・攪拌を必要とするため、アクチュエータの駆動媒体とするには保守管理の手間が生じるため、分離を回避する駆動方法や封入法の検討も必要である。

### 5. まとめ

本研究では、ソフトアクチュエータの柔軟性と電磁式アクチュエータの汎用性を併せ持つ、新たなアクチュエータの開発を目的として、磁性流体を用いて人体の関節・筋肉構造を模倣した人工筋肉型アクチュエータを提案した。

研究の初期段階として、磁性流体の磁気的な基礎特性を把握するために直動型のスライド機構を製作し、磁性流体の有無による磁極間磁束密度、磁極間引力特性を測定した。その結果、磁性流体を用いることで磁極間の磁束密度を高め、発生力を増加させることが可能であった。また、挿入する磁性流体チューブは可動域・発生力の面から必要最小限の大きさがよいと推定される。

基礎特性の結果から、人間の手指関節をモデルとして、磁性流体を用いた人工筋肉型プロトタイプアクチュエータの製作を行った。さらに実験と再設計を行った改良型のアクチュエータ

では関節の屈伸動作が実現でき、約48[degree]の可動範囲と、約0.6[N]の出力を得ることができた。

今後は、アクチュエータ本体の構造や加工法を改善すると共に、磁性流体チューブの形状や大きさ、材質についてもさらに検討する必要がある。

## 6. 参考文献

- (1) 矢野智昭：「多自由度アクチュエータ」  
電気学会誌, Vol.127, No.5, p.294 (2007)
- (2) 横田眞一：「アクチュエータから見た機能性流体」日本ロボット学会誌, Vol.4, No.4, p.25 (2006)
- (3) 原拓弥, 鈴木真ノ介：「磁性流体を用いた人工筋肉型アクチュエータの基礎開発」  
ROBOMECH2008(DVD-ROM), 2P2-H11 (2008)

小山工業高等専門学校 電気情報工学科  
E-mail : shin-s@oyama-ct.ac.jp

「受理年月日 2009年9月15日」