

磁性流体混合PVAゲルを用いたアクチュエータの諸特性

小島洋一郎*・見藤 歩**・蘇武栄治***・田島 勲****

Characteristics of actuators with PVA and magnetic material

Yohichiro KOJIMA, Ayumi MITOH, Eiji SOBU and Isao TAJIMA

Abstract

This paper deals with a kind of soft machine based on gel actuator system. The actuator consists of polyvinyl alcohol (PVA) gel mixed with magnetic fluid. We called it magnetic gel actuator. PVA gel has visco-elastic properties like a human muscle. In this paper, characteristic of the magnetic gel actuator is measured against static magnetic field. As the result, PVA gel had viscosity about $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ at room temperature. And the magnetic gel actuator could resist against 780 Pa when a magnet (0.36 T) got closer to it. Furthermore it could rise up and down weights from 5 to 100 g . There is shown the possibility that magnetic gel actuator can become new soft machine actuator like muscle, bowel and so on.

Key words : Actuator, Magnetic gel, Magnetic Fluid, PVA, Visco-elasticity, Muscle

1. 緒 言

生体器官を補助・代替する装置において、柔軟性に優れた素材を使用したアクチュエータの開発が望まれている。従来、血液のような液体はポンプにより輸送できたが、食物や排泄物のような半固形物の輸送は困難であった。アクチュエータ自身が変形し動くという特性を利用すると、様々な物質を輸送する、例えば人工腸管などへ、適用される可能性があり注目されている。さらに、このアクチュエータは医用ばかりでなく、食品・環境など多種多様な工業分野に応用される可能性を有しており、今後の発展が期待されている。

本論文では、はじめに柔軟性を有するアクチュエータに使用されている高分子ゲルの概略についてまとめる。次に、著者らが提案し、研究を進めているポリビニルアルコールゲル(以下、PVAゲル)と磁性流体(1-2)を混ぜ合わせ、作製した簡易アクチュエータの基礎的な検討結果として、以下の2点、PVAゲルのみの粘性率と、簡易アクチュエータの磁場応答特性について報告する。

2. アクチュエータに使用される高分子ゲル³⁻⁶⁾

エネルギー変換に関して、人類は以前から数多くの技術を生み出してきた。熱-力学(内燃機関、摩擦)、電気-力学(モーター、発電機)、電気-光(放電発光、太陽電池)などの変換系はその一例である。このようなエネルギー変換のうち、まだ実現が困難な人工変換技術がある。それは、化学エネルギーから力学エネルギー、およびその逆に変換する系である。このシステムは、ケモメカニカルシステムと呼ばれ、ほかのエネルギー形態を経ることなしに、化学エネルギーを直接力学エネルギーに変換する系である。生体の力学エネルギー変換もほとんどケモメカニカルシステムによって行われており、高等動物の筋肉、下等動物のべん毛、繊毛、植物細胞内の原形質流動など、化学エネルギーであるアデノシン三リン酸(ATP)を用い、運動(力学エネルギー)として取り出されている。この系の特徴は、熱機関、モーターなどとは異なり、直接エネルギー変換を行うため、変換効率が非常に高いことであり、人類が作りだすエネルギー系とは比べものにならないくらい非常に効率よいエネルギー変換効率を行っている。通常の熱機関のエネルギー変換効率が $5 \sim 30\%$ であるのに対し、生体筋の場合、その効率は 60% にも達する。エンジンなどの場合、燃料を燃焼し熱のような損失の多いほかのエネルギーにいったん

* 助教授 機械工学科

** 助教授 機械工学科

*** 技 官 (技術専門職員・機械実習工場)

**** 助教授 物質工学科

変換後、力学的エネルギーとして取り出すため、当然かなりの損失が生じる。しかしケモメカニカルシステムの場合、化学エネルギーを直接、力学エネルギーに変換できるため当然効率が高くなる。

ところで、環境変化に応じて敏感に分子の形を変える合成高分子は数多く知られている。高分子鎖にイオン解離基を導入した高分子においてpH変化、水-有機溶媒の交換、塩濃度の変化などによって高分子コンフォメーションの形状を大きく変えるものがある。例えば鈴木らはポリビニルアルコールを使用した水溶液を凍結・解凍を繰り返すことによって強度、弾性に優れたゲルを作製している。そのゲルは酸・アルカリで洗浄し、多孔化することにより、高速応答性を実現している。また、このゲル状人工筋肉は、カエルの骨格筋に匹敵する $0.1\text{W}/\text{cm}^3$ の出力、および0.4秒の応答速度、1000回以上の繰り返しに対する耐久性などの優れた運動特性を有している。このように化学反応のエネルギーを直接力学エネルギーに変換し、機械的仕事を行うような物質をケモメカニカル物質という。ほかの補助動力を必要とせず、化学反応によって人工物質が力学的仕事をする例は今のところケモメカニカルシステム以外知られていない。ケモメカニカルシステムは以下のように「化学エネルギーを直接あるいは逆に、力学エネルギーを化学ポテンシャルエネルギーに変換する熱力学システム」と定義されている。このようなシステムのエネルギー源は海水や尿など安価で安全な液体を使用して得ることが可能であり、液体同士の持つわずかの温度差を利用しても得られるので、資源・エネルギーの観点からも興味深い。また、ケモメカニカルシステムは無騒音であり、燃焼に伴う排気ガスや処理が困難な廃棄物等を発生しないので環境に優しいエネルギー変換系である。合成高分子を用いこのような力学エネルギー変換材料はしなやかな機能材料として広く捉えられることができる。アクティブな軟体機械あるいは人工筋肉として各種動力源のほか、スイッチやセンサ、医用機器部品など広い分野での応用が考えられる。

3. 実験方法

PVAゲルは、PVA水溶液と四ホウ酸ナトリウム(以下、硼砂)水溶液をそれぞれ少しずつ断続的に混合し作製した。簡易アクチュエータの作製法は、水溶性磁性流体(W-40、タイホー工業株式

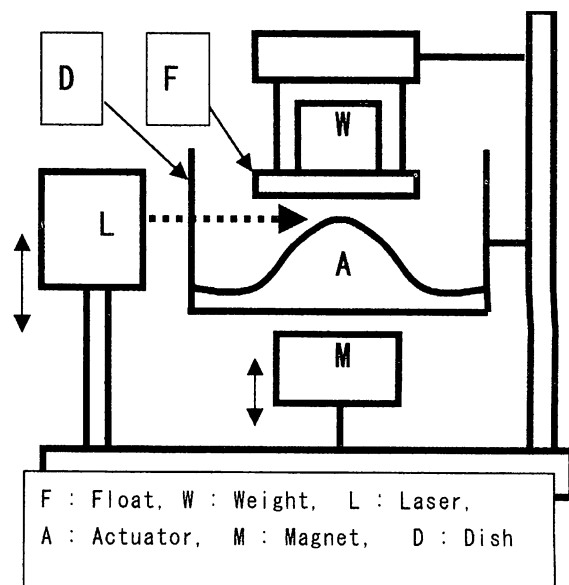


Fig.1 Experimental apparatus

社)25mlと、2%から4%までの間で調整したそれぞれの濃度のPVAゲル25mlを温めながら混合して行った。PVAゲルの粘性率は、オストワルド粘度計によって測定した。

簡易アクチュエータの動特性を調べる実験装置の概略をFig.1に示す。磁場応答特性は、試料を入れたシャーレに下側から上下に移動する0.36Tの磁石を段階的にゆっくりと近づけ、試料である簡易アクチュエータが一番隆起した点を、レーザポイントによる位置測定器を今回新たに製作し計測を行った。次に簡易アクチュエータがどのくらいの力を出せるのかを調べるために、アクチュエータ上に荷重をかけた上で磁場応答特性もさらに検討した。測定方法としては、アクチュエータ上に直径40mm、重さ2.36gのフロートを載せ、さらにその上に5gから100gまでの分銅を順次載せることで行った。

4. 実験結果および考察

PVAゲルの粘性率は、溶媒に加えるPVAの量やゲルに与える温度により変化する。PVAゲルの流動により進行波を発生させて物を動かすアクチュエータを考えた場合、取り扱い易さ及び応答スピードなど考慮する必要がある。そこでPVA濃度2~2.5%にしぼり、温度可変時の粘性率を測定した。その結果をFig.2に示した。温度の上昇に伴いPVAゲルの粘性率の低下が見られた。人工筋肉用アクチュエータの作製を前提として考えた場合には、常温から体温程度が使用温度であるので、今後の実験では粘性率の低かった2%と

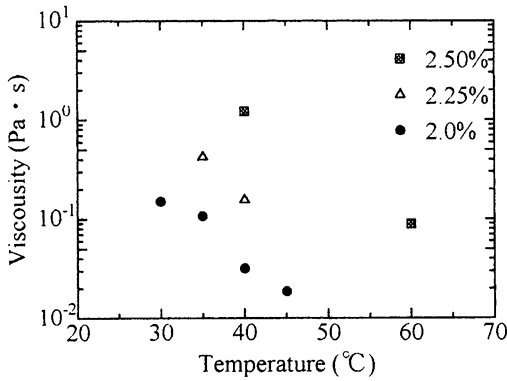


Fig.2 Temperature dependence of viscous coefficient for PVA gels

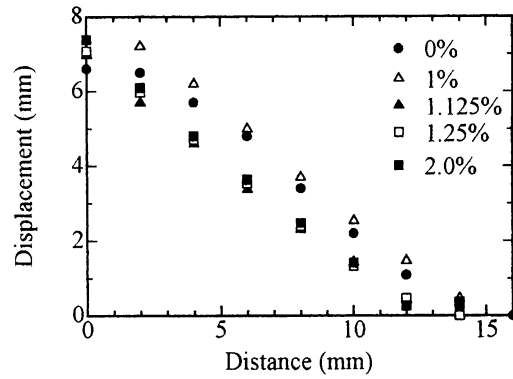


Fig.3 Responses of an actuator to Magnetic field changes

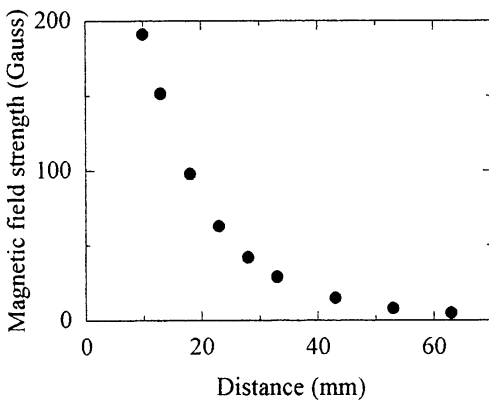


図. 磁石の磁場強度

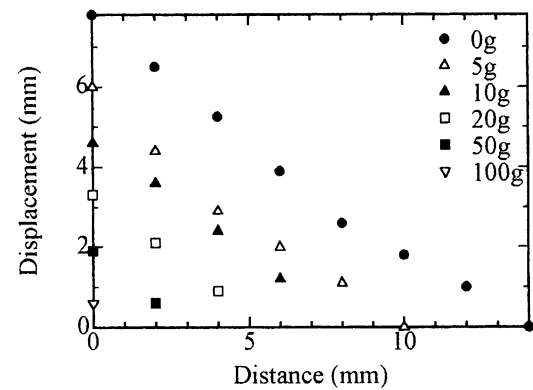


Fig.4 Relationship of an actuator to weight under magnetic field

2.25%濃度のPVAゲルを使うことにした。

それぞれゲル濃度の異なる簡易アクチュエータ（PVAゲルと磁性流体との混合物）および磁性流体（W-40のみ）の静磁場に対する応答をFig.3に示した。シャーレの厚さは約1.5mmであるので、試料と磁石の最終的な距離も同じとなる。アクチュエータ内のゲル濃度はPVA溶液に等量の磁性流体を加えているので最終的には1, 1.125, 1.25および2%の4種に設定した。磁石の磁場に対する隆起の高さは、磁性流体のみ、及び各濃度に調整したアクチュエータの間に顕著な差は認められなかった。また簡易アクチュエータでは、磁性流体で顕著に認められるスパイク現象がほとんど現れなかった。なお、今回は簡易アクチュエータの応答速度を示してはいないが、近づけた磁石を素早くシャーレから遠ざけると隆起状態から素早く元の状態に戻った。このように、磁場の印加状態により、形態が速やかに、且つ可逆的に変化するので、運動筋肉である横紋筋の代わりだけではなく、尿管、食道、血管などのぜん動運動を行う

平滑筋の代用としての応用も考えられる。

簡易アクチュエータに荷重をかけた場合の磁場応答特性をFig.4に示した。無荷重でかつ磁場をかけないとき、フロートはPVAゲルの表面張力のため沈み込むことはなかった。また、50gまでの荷重ではフロートが簡易アクチュエータ内に大きく沈み込むこともなかった。荷重に対して、100gまでのおもりを表面で支え、持ち上げられることを確認した。これは圧力値に換算すると780Paまで支持できることを示した。図には示していないが磁石を近づけて磁場を強くしていった場合と、磁石を離し磁場を弱くした場合にそれぞれの粘度により異なるが、少量のヒステリシスはあるものの十分な繰り返し応答ができることがわかった。これより簡易アクチュエータは、ただ単に静的荷重を支えることができるだけでなく、物体を持ち上げることができると実証された。なお、磁石の磁場強度をFig.5に示した。

5. 結 言

本研究では、柔軟性のあるアクチュエータに使用されている高分子ゲルについてまとめ、また、簡易アクチュエータとして磁性流体とPVAゲルの混合物を作製し、例えば医用分野などへ応用することを目指して基礎的な検討を行った。実験を通じて得られた結果を要約すると以下の4つになる。

- (1) 常温付近で静磁場に対して、磁性流体と同等の変位を持つ簡易アクチュエータが作製できた。
- (2) 簡易アクチュエータは磁場の力により、荷重を上下させることができた。
- (3) 静的荷重に対して、簡易アクチュエータ内のゲル濃度0～2%の間には移動量に大きな差違は認められなかった。
- (4) 簡易アクチュエータは磁場の力により100gまでの荷重を持ち上げることができた。

今後の課題としては、簡易アクチュエータの静的な磁場特性だけではなく、動的に変動する交流磁場を印加した時の静力学や動力学特性の検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は苫小牧工業高等専門学校地域共同研究センターの支援を受けて行なわれたことを記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 神山新一著，“磁性流体入門”，産業図書株式会社
- 2) 武富荒，近角聡信共著，“磁性流体”，日刊工業新聞社
- 3) 長田義仁，高分子，36，353（1987）
- 4) 高分子学会高分子実験学編集委員会編，“機能性高分子”，共立出版
- 5) 高分子錯体研究会編，“高分子集合体”，学会出版センター
- 6) 鈴木誠，応用物理，60.158（1991）

（平成13年11月30日受理）