

機能性流体を用いた小形制動装置に関する研究

—二重円筒形 ER ブレーキの設計と試作—

19N3018 北野 友規

指導教員 田中 豊教授

1. はじめに

本研究では、機能性流体を用いた小形制動装置の研究、開発を行った。図1に小形制動装置の有効性を検証する場として想定しているマイクロマウス競技で見られる小形自律移動ロボットとロボットが走行する迷路のコースの例を示す。小形自律移動ロボットが迷路内を疾走するマイクロマウス競技¹⁾では、図1の左側に示すような小形ロボットが、図1の右側に示すような迷路内を斜めに走行、急角度でコーナーを曲がる必要がある。しかし近年の競技は高速化が顕著であり、モータの電流制御による速度制御や制動だけでは、もはや走行性能には限界がある²⁾。

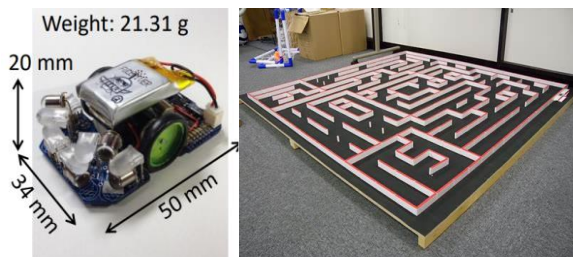


図1 マイクロマウス競技におけるロボットと走行する迷路

本研究の先行研究ではこのような小形ロボットの機械的なブレーキに代わる制動装置として、機能性流体の一種である ER 流体の性質を利用した小形制動装置 (ER ブレーキ) を提案・試作し、その性能の検討を行った³⁾。図2に先行研究で試作された多重円盤形 ER ブレーキを示す。ER ブレーキで用いる ER 流体は、電場に晒されると見かけ上の粘性が変化し、固体のように固まる (ER 効果) 機能を持つ流体である。ER ブレーキは ER 効果を、モータと連動して回転する正極金属板と筐体に固定された負極金属板との間で発生させることで動作し、モータを減速することが可能である。

先行研究³⁾では、多重円盤形 ER ブレーキから2点の課題が挙げられた。1つ目は ER ブレーキがモータを完全に停止するために必要な電圧が3.7 kV以上必要であること。2つ目にモータと連動して回転する正極部品の軸心が安定せず、ER ブレーキがうまく動作しないことである。そこで本研究の目的は、挙げられた課題に対して、正極部品の軸心を安定させること、モータの完全な停止に必要な電圧を1 kVまで低減することである。

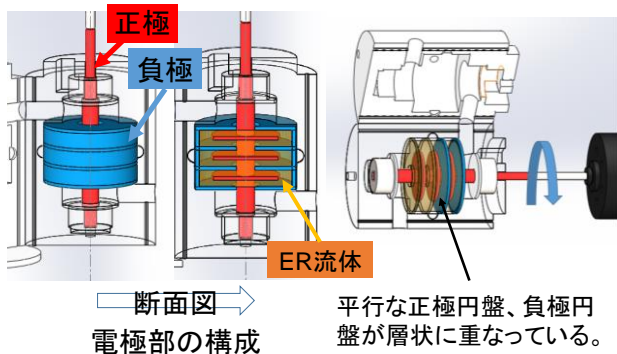


図2 多重円盤形 ER ブレーキの構造の解説図

2. ブレーキの構造と制動トルクの数学モデル

本研究では目的達成のための手段として、ER ブ

レーキの構造に二重円筒形構造を採用する。この構造は福祉機器への応用を念頭において、古庄らにより提案されたものである⁴⁾。この構造は加工や組み立ての精度が出しやすく、電極間距離を狭くしやすいため、ER 効果の増加が期待できる。図3に二重円筒形 ER ブレーキの構造と形状パラメータを示す。二重円筒形 ER ブレーキは、径の異なる円筒形状を持つ正極と負極が互いに触れ合わないよう微小な隙間をあげ、かみ合っ構成されている。正極と負極の間は ER 流体で満たされており、ER 効果を利用して、モータと連動して回転する正極の回転速度を制御する。また、形状パラメータとして電極部全体の直径を D [mm]、全体の長さを L [mm]、制動トルクの大きさに大きく関係する正極部品の直径を内側から d_1, d_2, d_3 [mm]、円筒部分が重なる箇所の長さを l [mm] とする。また電極間の隙間は $h = 0.5$ mm で固定値とする。これらのパラメータから二重円筒形 ER ブレーキの制動トルク T_B [N・mm] の数学モデルは以下の式(1)～式(4)で表される。

$$T_{B1} = 2\pi l \frac{\omega}{h} \cdot \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^3 + \left(\frac{d_2}{2} \right)^3 + \left(\frac{d_3}{2} \right)^3 \right) \cdot \mu_0 + 2\pi l \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_3}{2} \right)^2 \right) \cdot \tau_0(E) \quad (1)$$

$$T_{B2} = 2\pi(h+2) \frac{\omega}{h} \left(\frac{d_3}{2} \right)^3 \cdot \mu_0 + 2\pi \left(\frac{d_3}{2} \right)^2 (h+2) \cdot \tau_0(E) \quad (2)$$

$$T_{B3} = \frac{2\pi \cdot \omega}{4h} \left(\left(\frac{d_3}{2} \right)^4 - \left(\frac{1.5}{2} \right)^4 \right) \cdot \mu_0 + \frac{2\pi}{3} \left(\left(\frac{d_3}{2} \right)^3 - \left(\frac{1.5}{2} \right)^3 \right) \cdot \tau_0(E) \quad (3)$$

$$T_B = T_{B1} + T_{B2} + T_{B3} \quad (4)$$

ここで、 ω [rad/s] は回転系の回転速度、 μ_0 [Pa・s] は基底粘度のときの ER 流体の粘性係数であり、本研究では $\mu_0 = 0.225$ Pa・s である³⁾。また、 $\tau_0(E)$ [Pa] は電界強度 E [kV/mm] に依存した、ER 効果により発生するせん断応力である。式(1)、式(2)、式(3)は二重円筒形 ER ブレーキの制動トルクが発生する箇所を三か所に分けて、それぞれ T_{B1}, T_{B2}, T_{B3} [N・mm] として計算した数学モデルである。式(4)でも示すようにすべての和が ER ブレーキの制動トルクとしてモータに働く。

ER ブレーキの制動トルクの数学モデルは第一項目に μ_0, ω と形状によって決まる定数の積、第二項目に $\tau_0(E)$ と形状によって決まる定数の積で成り立つ。第一項目の値の大きさは ER ブレーキに電圧を印加せず、モータを回転させているときに発生している制動トルクの大きさであり、モータの通常回転時の速度を低減してしまいう効果がある。対して第二項目の値の大きさは、ER ブレーキに電圧を印加したときに上昇する制動トルクの大きさであり、電圧を印加していないとき第二項目は 0 N・mm である。また回転する正極に ER 流体のせん断応力が働くため、正極の円筒形状の直径の大きさ

は制動トルクの値に大きく関係している。径が大きくなるにつれ、第一項目のモータの通常回転時の回転速度低減量が大きくなり、第二項目の上昇する制動トルクも大きくなる。

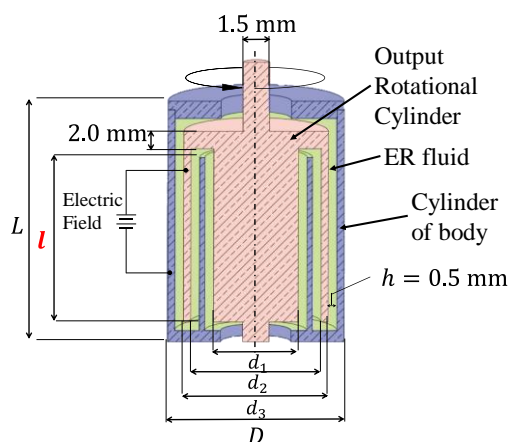


図3 二重円筒形 ER ブレーキのパラメータ

3. シミュレーションによる設計パラメータの選定

本章では、2 章の数学モデルを用いたシミュレーションによる ER ブレーキの形状パラメータごとの比較と設計パラメータの選定結果について説明する。

3.1 シミュレーション

図 4 にシミュレーションの方法を示す。シミュレーションは DC モータと ER ブレーキを接続した系を想定する。シミュレーションの時間は 0.12 s であり、2 つのフェーズに分かれる。フェーズ 1 では初期回転速度 $\omega_0 = 1466 \text{ rad/s}$ から、基底粘度による低減後の回転速度 $\omega_B [\text{rad/s}]$ までの低減の様子に着目する。フェーズ 2 では最初に ER ブレーキに 1 kV の電圧を印加し、 $\omega_B [\text{rad/s}]$ で回転するモータの回転速度が停止する様子に着目する。

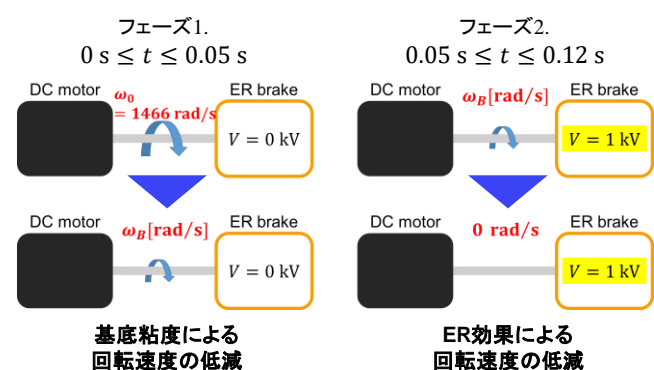


図4 シミュレーションのシチュエーション

シミュレーションによる比較は、 $l [\text{mm}]$ の値を 10 mm から 20 mm まで 1 mm ごとに変化させて行った。 l の値に対して、1 kV の印加電圧でモータの回転速度を停止させることができ、モータの通常回転時の基底粘度による低減が最も小さいときの $d_1, d_2, d_3 [\text{mm}]$ を適切な形状パラメータとして設定し、 l ごとに比較した。

図 5 に $l = 10 \text{ mm}, 15 \text{ mm}, 19 \text{ mm}$ のときのシミュレーションの結果を示す。縦軸が回転速度、横軸が時間である。シミュレーションではフェーズ 2 の ER ブレーキに電圧を印加してから回転速度がはじめて 0 rad/s になるまでの時間を ER ブレーキの応答速度として $t_r [\text{ms}]$ と定義する。時間が 0.05 s までは基底粘度に

より回転速度が低下している様子が見られ、0.05 s 以降は回転速度が 0 rad/s になるまでの低下の様子が見られる。表 1 にはシミュレーションデータをまとめた結果を示す。表 1 中の $J [\text{g} \cdot \text{mm}]$ はモータのロータの慣性モーメントも含めた回転系全体の慣性モーメントである。表 1 から l の大きさに比例して、 $\omega_B [\text{rad/s}]$ は大きな値を取り、慣性モーメント $J [\text{g} \cdot \text{mm}]$ は逆に小さな値をとることがわかる。

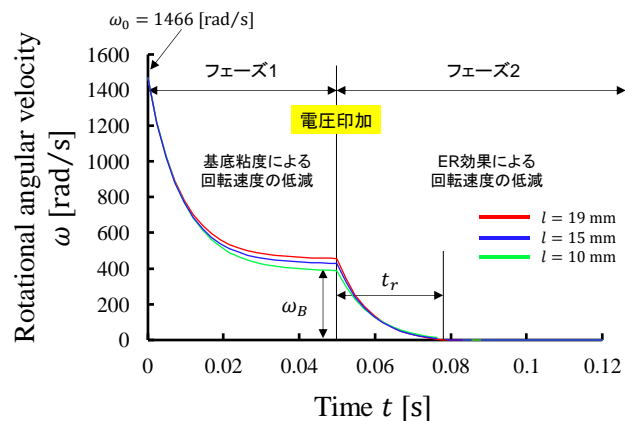


図5 シミュレーションの結果

表1 シミュレーションデータ一覧

$l [\text{mm}]$	10	12	14	15	16	17	18	19	20
$d_1 [\text{mm}]$	7	6.2	5.8	5.4	5.2	5	4.8	4.8	4.2
$d_2 [\text{mm}]$	9.6	9	8.4	8.2	8	7.8	7.6	7.4	7.2
$d_3 [\text{mm}]$	10.4	9.8	9.2	9	8.8	8.6	8.4	8.2	8.2
$\omega_B [\text{rad/s}]$	382.7	398.5	418.3	425.6	431.1	438.2	446.7	453.2	456.9
$t_r [\text{ms}]$	33.3	29.9	30.2	29.9	28.5	28.3	29	28.1	30.6
$J [\text{g} \cdot \text{mm}]$	128.9	118.4	111.6	107.6	105.4	103.2	100.9	99.9	103.2

3.2 設計パラメータの選定

3.1 節で説明したシミュレーション比較の結果から、本研究で試作する ER ブレーキは形状パラメータとして $l = 19 \text{ mm}$ を選定した。これは応答速度が最も速く、 $\omega_B [\text{rad/s}]$ が大きいことが理由である。ブレーキシステムとしてはモータの運動をより素早く制御できることが求められるため ω_B が最も大きい $l = 20 \text{ mm}$ のものは選定候補から除外した。

3.3 試作品

3.1 節、3.2 節のシミュレーションと、データの比較を行い、ER ブレーキの設計パラメータを選定し、このパラメータをもとに ER ブレーキを設計し、試作した。図 6 に実際に試作した ER ブレーキの分解図と 3D モデルの断面図を合わせて示す。部品の種類は 10 点、部品の個数は 11 個となっている。

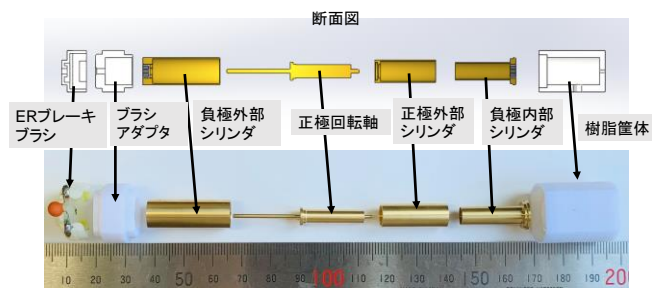


図6 ER ブレーキの試作品

4. 評価実験と考察

本章では、試作した ER ブレーキの実機実験を行うことでその性能を評価する。実験により、研究目的である軸心の安定性や、モータの完全な停止に必要な印加電圧が 1 kV まで低減できているかの確認を行う。

4.1 実験装置の構成と実験方法

図 7 に評価実験装置の構成を示す。シミュレーションと同様に DC モータと ER ブレーキが接続されている。ER ブレーキには高圧電源を接続し、任意の電圧を印加することができる。実験で用いた DC モータ (faulhaber1717T006SR) にはエンコーダが付属しており、回転速度の測定を行う。このエンコーダとモータの電源として、安定化電源を 2 機利用している。

次に実験手順を説明する。実験時間は 15 s 間である。初期状態のときモータ、ER ブレーキともに電圧は印加しておらず、時刻 $t = 2$ s のときモータに定格電圧である 6 V を印加する。次に $t = 5$ s のとき ER ブレーキに電圧を印加し、 $t = 8$ s のときに ER ブレーキの印加電源を切る。そして $t = 15$ s で実験終了とする。この実験を ER ブレーキに印加する電圧の大きさを変化させながら行うことで、ER ブレーキの性能の評価を行う。

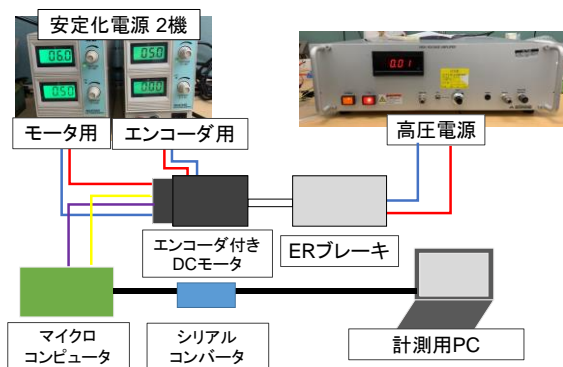


図 7 実験装置の構成

4.2 実験結果と考察

図 8 に実験で使用した DC モータ単体の回転速度の変化を示す。これは ER ブレーキを接続した DC モータとの比較のために行った。DC モータに 6 V の電圧を印加したとき 1528 rad/s で回転し、電源を切ると 2.556 s で回転が完全に止まることがわかる。図 9 には ER ブレーキに 1 kV の電圧を印加したときの回転系の回転速度の測定結果を示す。ER ブレーキを接続した状態の DC モータが 6 V の電圧を印加することで 752 rad/s の回転速度を示すことや、ER ブレーキに 1 kV の電圧を印加することで、応答速度 0.044 s でモータの回転を停止させることが可能であることが分かった。表 2 に今回の実験で得られた ER ブレーキに印加する電圧とその時の回転速度、またその回転速度まで低下するまでの制動時間を示す。全体の傾向として、印可電圧が大きいほど制動時間、応答速度が速くなることがわかる。またシミュレーションでは 0.8 kV の電圧を印加しても回転運動は停止しないという結果であったが、実験では停止していることから、シミュレーションでは ER ブレーキの制動トルクが小さく見積もられていることが分かった。また ER ブレーキに 1 kV 印加してから回転運動が停止するまでの応答時間がシミュレーションでは 28.1 ms と算出されたが、実験では 44 ms となった。この原因としては、シミュレーションでは ER 流体自体の電圧を印加してから ER 効果が発生するまでの挙動を考慮していないことが考えられる。また実験全体を通して、ER ブレーキは安定してモータと連動して回転していた。このため、ER ブレーキの回転軸の軸心は安定していることが分かった。

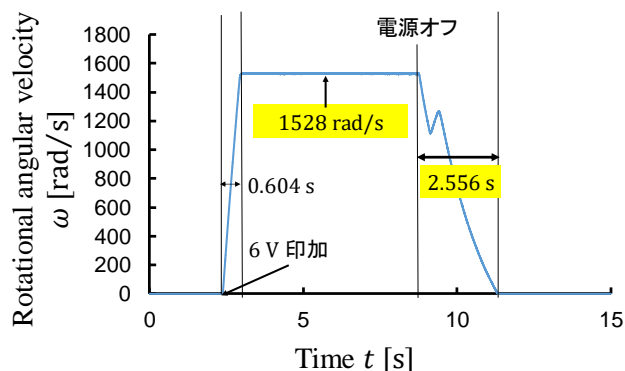


図 8 faulhaber1717T006SR の回転速度変化

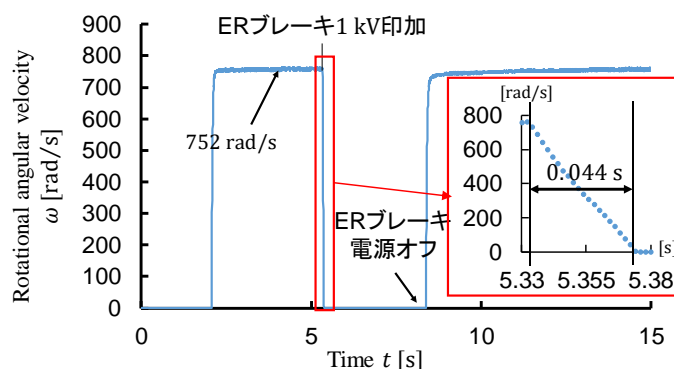


図 9 ER ブレーキに 1 kV 印加したときの回転速度変化

表 2 実験データまとめ

印加電圧 [kV]	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
制動時間 [s]	0.358	0.266	0.146	0.106	0.044
電圧印可時 回転速度 [rad/s]	742.4	647.3	423	0	0

5. おわりに

本研究では、先行研究の多重円盤形 ER ブレーキにおける課題の解決を目的とし、新たな ER ブレーキ構造を提案・試作し実験を行った。結果として軸心は実験中にも安定し、モータの完全な停止に必要な印加電圧は 0.8 kV 程度に抑えることができた。

今後は、モータと ER ブレーキの一体化を行い、ER ブレーキを搭載したモータでマイクロマウスロボットを試作、その機体を通して、ER ブレーキの有効性を実証する予定である。

参考文献

- 1) 井谷 優, マイクロマウスの歩んだ路, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.9, pp.979-982 (2009).
- 2) 小島宏一, 加藤雄資, 福井善朗, 中村文一, 開かれた環境が育むマイクロマウスの技術進化, システム/制御/情報, Vol.55, No.7, pp.265-270 (2011).
- 3) Takanori Togawa, Takuma Tachibana, Yutaka Tanaka, Jinghui Peng, Hydro-Disk-Type of Electrorheological Brakes for Small Mobile Robots, International Journal of Hydromechatronics, Vol.4, No.2, pp.99-115, (2021).
- 4) Junji Furusho, et al., Development of ER Brake and Its Application to Passive Force Display, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.13, July/August, pp.425-429,(2002).