

## 小形ロボット用二重円筒形 ER ブレーキの提案

## Design of Double Cylindrical Type of ER Brake for Micro-robot

○学 北野 友規 (法政大) 学 佐藤 悠太 (法政大院)

学 外川 貴規 (法政大院) 正 田中 豊 (法政大)

Tomonori Kitano<sup>1</sup>, Yuta Sato<sup>2</sup>, Takanori Togawa<sup>2</sup> and Yutaka Tanaka<sup>1</sup><sup>1</sup> Faculty of Engineering and Design, Hosei University, 2-33 Ichigayatamachi, Shinjuku, Tokyo 162-0843, Japan<sup>2</sup> Graduate School of Engineering and Design, Hosei University, 2-33 Ichigayatamachi, Shinjuku, Tokyo 162-0843, Japan

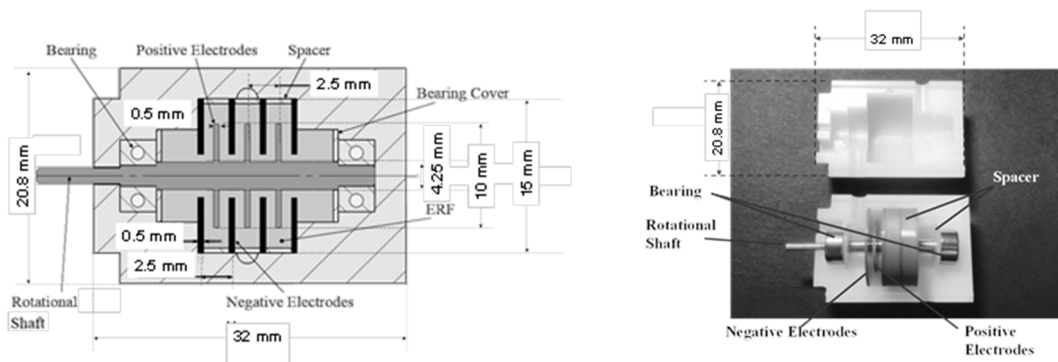
In the micromouse competition, small autonomous mobile robots run at high speed through mazes. In this competition, the robot turns sharp corners. However, the recent competition is marked by speeding up, and the motor current control brake has a limit to the drive capability. Electro-rheological (ER) fluid actuators have potential for soft braking functions in the small autonomous mobile robot, because the change in viscosity can be easily and quickly controlled by changing the electric field. In this paper, the double cylindrical type of mechanical brake device using the ER fluid for the small robot was designed. The performance of the ER braking device was verified through numerical simulation.

**Key Words:** Electro-rheological fluid, Braking device, Micromouse, Small autonomous mobile robot

## 1. はじめに

自律小形ロボットが迷路内を疾走するマイクロマウス競技会<sup>(1)</sup>では、小形ロボットが斜めに走行したり、急角度でコーナーを曲がったりする必要がある。しかし最近の競技は高速化が顕著で、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<sup>(2)</sup>。さらに最近、掃除ロボットに代表される自律小形ロボットが家庭内を走行するサービスロボットとして普及し始めており、こうしたサービスロボットに搭載できる小形制動装置を開発する必要がある<sup>(3)</sup>。

著者らはこうした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 流体を用いた小形制動装置 (ER ブレーキ) を提案・試作し、その性能を検討した<sup>(4)</sup>。研究に使用した粒子分散系 ER 流体は、電圧の変化で見かけ上の粘性を高応答で可逆的に変化させるペンガム流体として振る舞う<sup>(5)</sup>。また ER 流体は要素隙間に容易に充填できるため小形化に適している。これまで試作検討してきた ER ブレーキは Fig. 1 に示すような多重ディスク形状で、ER 流体中を回転する複数の回転ディスク電極間に生じる ER 効果を用いて制動を実現した。しかし制動に必要な十分な ER 効果を得るためにはディスクの径をある程度大きくする必要があり、複数のディスクを微小間隔で配置し、円板の軸心を合わせて組み立てることが容易ではなかった。



(a) Configuration

(b) Inner structure view of the prototype device

Fig. 1 Multi-Layered Disk Type of Electro-Rheological Braking Device<sup>(4)</sup>

本研究では、マイクロマウス競技用小形ロボットへの搭載や駆動用モータとの一体化を目指し、これまで試作した多重円板形小形制動装置に代わり、小形化と十分な ER 効果が得られる新たな構造の ER ブレーキを提案する。本稿では、ER ブレーキの構造やその数学モデル、制動特性に関するシミュレーション結果に基づく形状パラメータの選定結果について報告する。

## 2. 二重円筒形 ER ブレーキの構造と制動トルクの数学モデル

ER ブレーキを動作させるには高電圧(高い電界強度)の印可を必要とする。古庄ら<sup>(6)</sup>は福祉機器への応用を念頭ににして多重シリンダ型 ER ブレーキを提案した。この構造は加工や組み立て精度が出しやすく、電極間距離を狭く大きな ER 効果が得られる。本研究では同様な構造の二重円筒形 ER ブレーキを検討する。

本研究で用いる粒子分散系 ER 流体のせん断応力  $\tau$  とせん断速度  $\dot{\gamma}$  の関係は以下の式(1)で表される<sup>(4)</sup>。

$$\tau = \tau_0(E) + \mu_0 \dot{\gamma} \quad (1)$$

ここで  $\tau_0(E)$  は電界強度  $E$  [kV/mm] に依存する係数で、使用する ER 流体では  $317.5 E^{1.834}$  Pa,  $\mu_0$  は電圧を印加しないときの流体が持つ基底粘度で、使用する ER 流体では  $0.225$  Pa·s である<sup>(4)</sup>。

Fig. 2 に本研究で提案する二重円筒形 ER ブレーキの構造を示す。負電極の二重円筒形の管体の内部に回転する正電極の二重円筒形の回転体が挿入され、電極間の隙間に ER 流体が充填されている。ここで形状パラメータとして、円筒電極の肉厚を  $t$ 、円筒電極間の隙間を  $h$ 、外側管体円筒の外径を  $D$ 、管体の軸方向長さを  $L$ 、ER 効果が生じる回転円筒電極の軸方向長さを  $l$ 、回転円筒体の軸径を  $d$ 、回転円筒体の内円筒正電極の外径を  $d_1$ 、管体内部の円筒負電極の外径を  $d_2$ 、回転体の外円筒正電極の外径を  $d_3$  とする。

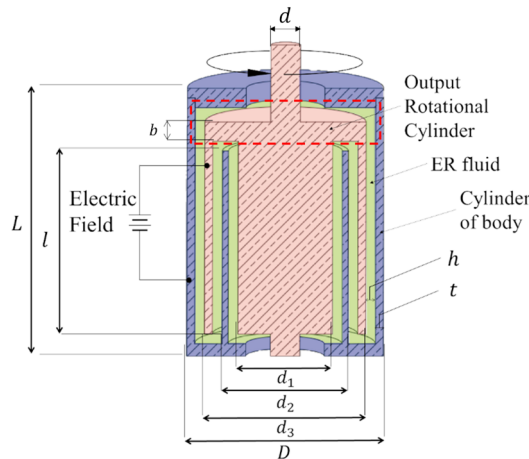


Fig. 2 Configuration of Proposed Double Cylindrical Type of ER Braking Device

正負電極間に電圧を印加すると ER 効果が生じる。Fig. 2 の構造において ER 効果が生じる部分は主に 3 か所ある。その中で最も大きな ER 効果が生じるのは円筒形電極側面間であり、その制動トルク  $T_{B1}$  は以下の式(2)で表される。

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

ここで  $\omega$  [rad/s] は回転角速度,  $E$  [kV/mm] は電界強度である。

次に大きな ER 効果が生じるのは、赤点線で囲んだ内部回転円筒体の軸方向の電極長さ  $b$  の部分である。この部分の側面にはたらく ER 効果による制動トルクを  $T_{B2}$ 、外周上部の円板部にはたらく制動トルクを  $T_{B3}$  とすれば、それぞれ次の式(3)と式(4)で表される。

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

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

したがって、Fig. 2 の構造の ER ブレーキの制動トルク  $T_B$  は、この 3 つの制動トルクの和として以下の式(5)となる。

$$T_B = T_{B1} + T_{B2} + T_{B3} \quad (5)$$

シミュレーションでは形状パラメータを変化させ大きな制動トルクが得られる設計寸法を探索した。

### 3. 制動特性のシミュレーション

DC モータに ER ブレーキを直結した時の角速度  $\omega$  の回転運動は以下の式(6)の運動方程式で表される。

$$\begin{aligned} J\dot{\omega} &= T_m - T_f - T_B \\ &= K_p(\omega_0 - \omega) - T_B \end{aligned} \quad (6)$$

ここで  $T_m$  は DC モータの駆動トルク、 $T_f$  は DC モータの摩擦トルク、 $J$  は回転系の慣性モーメント、 $K_p$  は DC モータの負荷特性から求められる係数で、使用を想定する DC モータ (1717T006SR, Faulhaber 社製) の場合、 $K_p = 3.6 \times 10^{-6}$  Nm/(rad/s) となる。また  $\omega_0$  は初期角速度で、シミュレーションでは DC モータ単体の定格最大角速度とした。

制動特性のシミュレーションにあたり、以下の条件を設定した。

- (1) 円筒電極の肉厚  $t = 0.6$  mm, 円筒電極間の隙間  $h = 0.5$  mm と固定する。
- (2) 電圧を印可しないときの基底粘度の時にできるだけ大きな角速度が得られる。
- (3) 1 kV 印可時(電荷強度  $E = 2$  kV/mm)に DC モータを停止させる十分な制動力が得られる。

シミュレーションでは、モータ単体が定格最大角速度( $\omega_0 = 1466$  rad/s)で回転している状態から、ER ブレーキを機械的に接続して ER 流体の基底粘度で減速し定常状態に落ち着いた時刻( $t = 0.05$  s)で ER ブレーキに 1 kV の電圧を印可し、DC モータが駆動トルクを発生し続けたまま ER ブレーキの制動による回転系が停止するまでを MATLAB+Simulink を用いてシミュレーションした。

Fig.3 は電極の軸方向長さ  $l$  を 3 種類( $l = 10, 15, 19$  mm)に設定した時の DC モータの応答結果の一例である。定格最大角速度から ER ブレーキの基底粘度による減速で一定に落ち着いた時の角速度  $\omega_B$  [rad/s]は、電極の軸方向長さ  $l$  が長い方が大きな値を示すことがわかる。また電圧印可後の制動による減速では、電極の軸方向長さ  $l$  が長い方が、電圧印可後停止するまでにかかる時間  $t_R$  [s]は短いこともわかる。

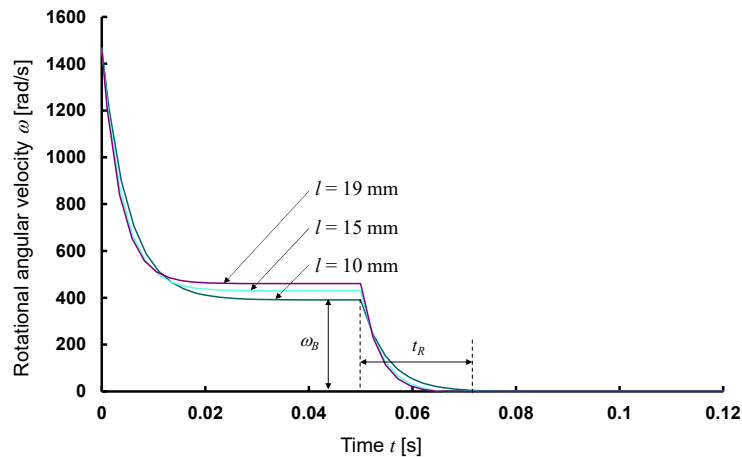


Fig. 3 Simulation results for dynamic characteristics of DC motor with ER brake

Table 1 に電極の軸方向長さ  $l$  を 10 mm から 20 mm まで変えて、十分な制動力が得られる ER ブレーキのシミュレーション結果から求めた諸元をまとめて示した。電極の軸方向長さ  $l$  を大きくした方が、基底粘度の角速度  $\omega_B$  は大きくなる。一方、応答時間は 17 mm 付近が一番短く有利であることがわかる。実際に ER ブレーキを試作するにあたり、小形ロボットへの搭載を想定し、加工精度なども考慮しながら、電極の軸方向長さ  $l$  を 19 mm、外側筐体円筒の外径  $D$  を 10 mm と選定して設計した。

Table 1 Performance of ER brake for simulation results

$l$ [mm]	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0
$D$ [mm]	12.2	11.9	11.6	11.3	11.0	10.8	10.6	10.4	10.2	10.0	9.8
$t_R$ [s]	0.0295	0.0201	0.0179	0.0176	0.0197	0.0161	0.0146	0.0140	0.0140	0.0149	0.0187
$J_B$ [g mm <sup>2</sup> ]	68.7	64.6	60.4	56.1	51.7	49.6	47.5	45.2	42.9	40.5	38.2
$\omega_B$ [rad/s]	390	395	403	413	426	430	435	442	451	460	472

#### 4. おわりに

本稿では、多重円板形小形制動装置に代わり、小形化と十分な ER 効果が得られる新たな構造の二重円筒形 ER ブレーキの構造を提案し、数学モデルを用いて制動特性をシミュレーションした。またそのシミュレーション結果から大きな制動効果が得られる形状パラメータを選定した。今後はこれらの結果に基づいて ER ブレーキの実機を試作し、その制動特性を実験的に検討する予定である。

#### 参考文献（例）

- (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) 松日楽信人, 小川秀樹, 先端技術をリードするホームロボットの開発動向, 東芝レビュー, Vol.59, No.9, pp.2-8, 2004.
- (4) 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.
- (5) 井上昭夫, 福祉機器への ER 流体の応用, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.5, pp.481-482, 2013.
- (6) 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.