

## 小形ロボット用 ER ブレーキの設計

(モータとブレーキの一体化の検討)

Design of ER Brake for Micro-robot  
(Consideration of Motor and Brake Integration)

○学 北野 友規 (法政大院) 正 田中 豊 (法政大)  
外川 貴規 (法政大院)

Tomonori Kitano<sup>1</sup>, Yutaka Tanaka<sup>2</sup>, Takanori Togawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering and Design, Hosei University, 2-33 Ichigayatamachi, Shinjuku, Tokyo 162-0843, Japan

<sup>2</sup> Faculty of Engineering and Design, Hosei University, 2-33 Ichigayatamachi, Shinjuku, Tokyo 162-0843, Japan

Electro-rheological (ER) fluid actuators have the potential of soft brake function for the small autonomous mobile robot because the ER fluid can easy and quickly control changes in viscosity by changing the electric field. In our previous paper, the double cylindrical type of mechanical brake device using the ER fluid for the small robot was designed and fabricated. In this paper, we propose an integrated structure of a small coreless DC motor and ER brake with the aim of downsizing. We experimentally investigated whether the magnetic field that drives the DC motor and the electric field required for ER brake can be effective without interfering with each other.

**Key Words:** Electro-rheological fluid, Braking device, Coreless DC motor, Small autonomous mobile robot

### 1. はじめに

掃除ロボットに代表されるサービスロボットは、将来的に家庭内や職場など日常の様々な場面で普通に存在し、大いに活躍するであろう。2019 年 7 月に経済産業省がまとめた、ロボットによる社会変革推進計画の報告書によると、今後のロボット政策の基本的考え方として、「課題先進国である日本においてロボットの社会実装を推進していくことが最重要課題である」としている<sup>(1)</sup>。さらに最近、人手不足が深刻な業務の省人化を進める狙いで、オフィスビルの管理運営にロボットを導入した事例もある<sup>(2)</sup>。

著者らはそうしたサービスロボットのような、自律移動小形ロボットの走行性能について議論することに意義を見出しており、その実地試験場として、マイクロマウス競技を位置づけている。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>(3)</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>(4)</sup>。

著者らの先行研究<sup>(5)</sup>では、こうした小形ロボットの機械的なブレーキとして、Fig.1 に示すような、機能性流体の一種である ER 流体を用いた円筒形電極構造をもつブレーキ(二重円筒形 ER ブレーキ)を提案・試作し、その性能や制動効果について実験とシミュレーションを通して検討した。

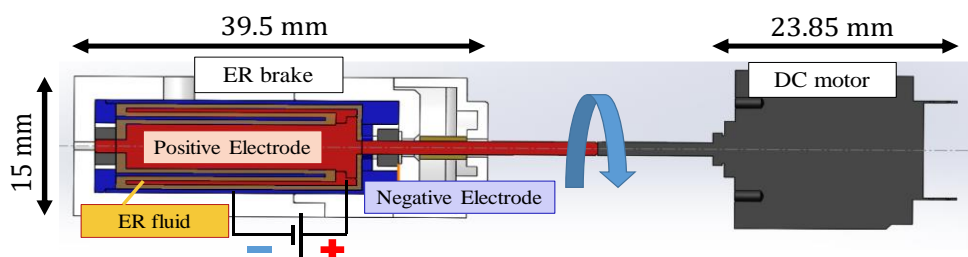


Fig.1 Configuration of Proposed Double Cylindrical Type of ER Braking Device

ER 流体は電極間に電圧を印加することで固体のように振る舞う流体である。二重円筒形 ER ブレーキの電極は Fig.1 中赤で示した円筒形状の正極と青で示した二重円筒形状の負極である。それらが触れ合わないよう微小な隙間をもって互い違いにかみ合っている。その隙間には ER 流体が充填されており、ER ブレーキに電圧を印加すると可動電極を固定することができる。

本論文では駆動用モータと ER ブレーキの小形化を目的として、コアレス DC モータと ER ブレーキの一体化構造を提案する。また、一体化構造により、ER ブレーキの駆動に要する電界と DC モータの駆動に要する磁界が互いに干渉せず、両者の効果が発揮できることを実験的に検討する。

## 2. 提案するコアレス DC モータと ER ブレーキの一体化構造

本論文で提案するコアレス DC モータと円筒形 ER ブレーキの一体化構造の概要を Fig.2 に示す。

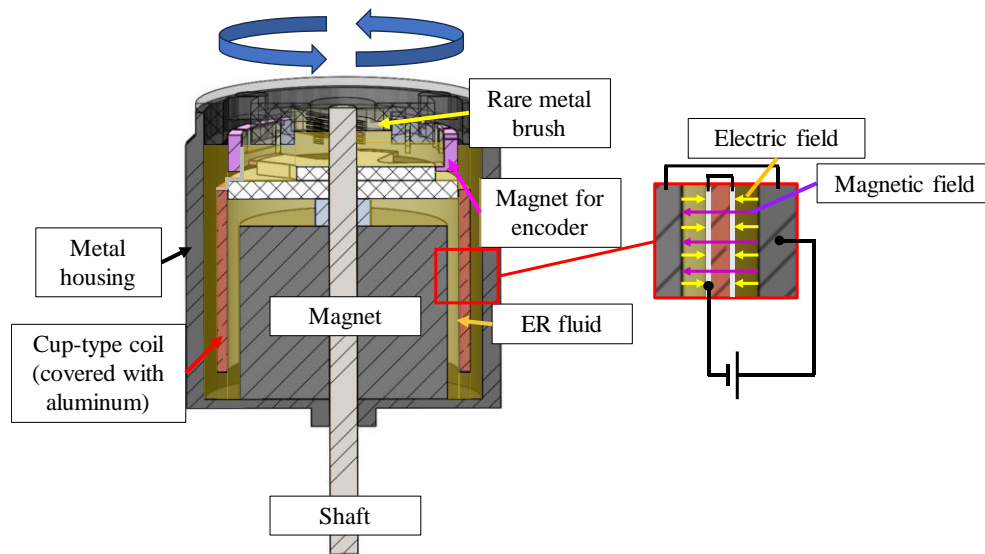


Fig.2 Configuration of Integrated ER motor

ER ブレーキと一体化したコアレス DC モータ(ER モータ)のロータであるコイルはカップ形となっている。その表面はアルミのような電気伝導率と熱伝導率に優れた材料で薄く覆われている。その厚みはコイル周囲を覆うための接着材料と合わせて、約0.11 mmである。また、ER モータのコイル周りの筐体は、磁気回路の役割も兼ねた、スチール(黒色メッキ)製である。そのため、コイル表面のアルミニウムは可動電極として、スチール製筐体は固定電極として、その隙間に電界を発生させることができる。ER 流体はその隙間に充填されている。

可動電極材料として電圧を印加するアルミニウムは透磁率が空気とほぼ同じであるため、ER モータ内部に分布する磁界に対して磁化しない。加えて安価で手に入りやすいため、ER モータの電極材料として利用する。

また、ER 流体の透磁率は、磁石を近づけて磁化しているか否かを目視で確認したところ、磁石に対して反応を示さないことから、透磁率はその原料の 7 割を占める絶縁性のフッ化オイルと同等で、空気とほぼ同じであると判断した。

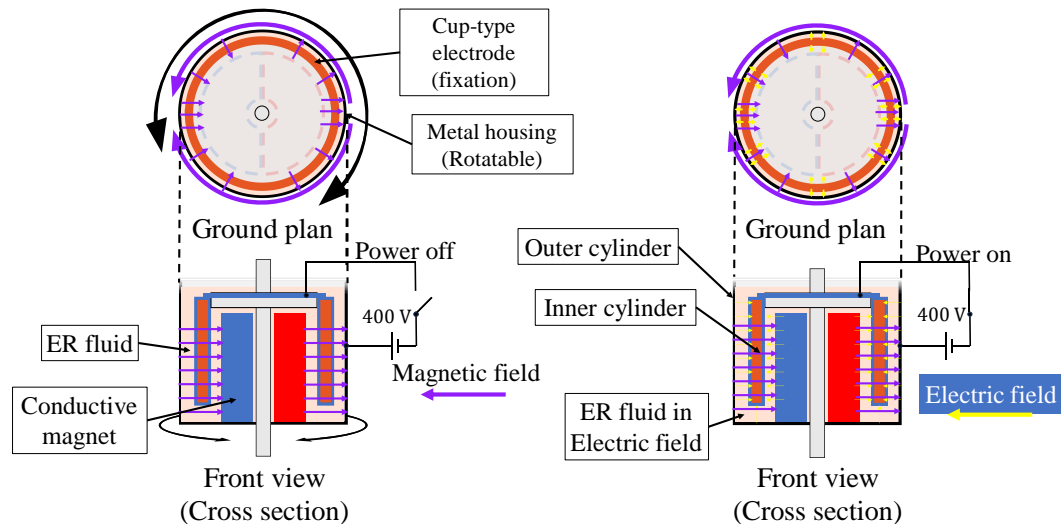
## 3. 磁界における ER 効果の検証実験

ER ブレーキの制動力は、ER 流体を円筒形の可動電極と固定電極の隙間に充填し、1 kV 程度の電圧を印加しもたらされる。ER 流体は電界下でビンガム流体のように降伏応力を発生させるため、回転する可動電極へ制動力をかけることができる。

著者らが提案する ER モータの場合、回転子のコイルが同時に可動電極としての役割を持つ。この時、ER 流体は ER ブレーキ内部とは異なり、回転方向にトルクをかけるための磁界と、制動トルクをかけるための電界の両方の影響下に置かれる。この状況下での ER 流体の挙動を明らかにするため、ER 効果の有無について実験的に検証した。

Fig.3 はその実験の状況を示している。外側の円筒電極は回転可能な状態であり、内側の円筒電極は一定の力を加えない限りは動かない程度に、弱く固定されている。また、中心の導電性磁石の N 極から金属円筒を通して、S 極へ向かう磁束が ER 流体と弱く固定されたカップ形の内側円筒電極を貫いている。Fig.3(a)の状況では、内側と外側の円筒には電圧が印加されておらず、ER 流体は基底粘度のニュートン流体のように流動する状態となっている。そのため外側円筒電極は可動状態である。

一方、Fig.3(b)では、円筒電極に電圧を印加した状態を表している。このとき ER 流体は磁界と電界下の両方に置かれている。ER 流体に印加される電界は約  $2 \text{ kV/mm}$  である。この時、外側円筒電極に力を加え、少し回転方向に動かすと、内側の円筒電極も同時に動くことが確認できた。これは ER 流体が電圧の印加により固まっているためである。このことから検証実験では ER 流体が磁界の影響下にあっても、通常通り電界の影響で降伏応力を発現させることが検証された。



(a) ER fluid in Magnetic field

(b) ER fluid in Magnetic field and Electric field

Fig.3 Aspects of an experiment to verify the ER effect

#### 4. 電界における DC モータ動作の検証

コアレス DC モータの駆動は普通のブラシ付き DC モータと同じく、回転子であるコイルに電流を流して磁化させることでトルクを発生させている。著者らが提案する ER モータ内部でも回転子は同様の原理で回転するが、異なる点は、コイルが磁界と電界の影響下にあることである。そのため、磁界と電界の両方に置かれたとき、DC モータの回転速度にどのような影響があるか、検証する必要がある。Fig.4 に回転するコアレス DC モータを電界中に置いた実験の様子を示す。

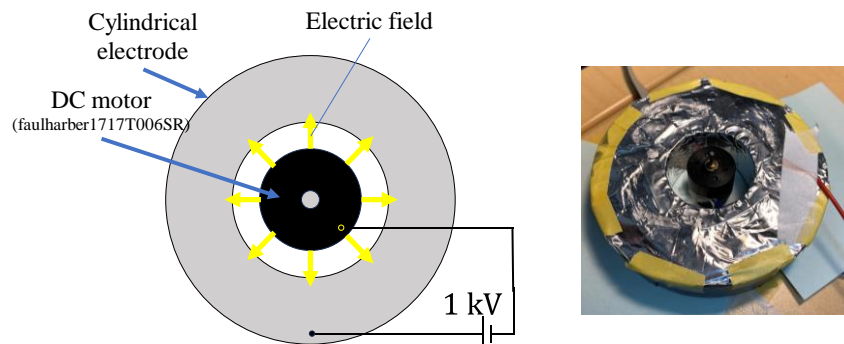


Fig.4 Rotating DC motor in Electric field

DC モータ(faulhaber1717T006SR)の筐体は金属製であり、電極として活用できる。その周囲を囲うドーナツ型の電極はビニールテープをアルミホイルで覆って制作した。この一対の電極によりモータ内部で回転するコイルを電界の影響下に置けるようになっている。

この状態でモータの回転速度を計測した結果を Fig.5 に示す。モータの回転速度は 15 秒間計測した。また、3 秒から 6 秒までと 9 秒から 12 秒までの 3 秒間は電極に電圧を印加することでコイルを電界下に置き、それ以外の時間は通常通り回転させている。通常時の回転速度と電圧を印加したときの回転速度を比較することで、電極に電圧を印加しているときの回転速度に変調が見られるかを確認した。実験の結果、回転速度に変化はエンコーダの分解能の範囲内で見受けられず、このことから電界は磁界に干渉せず、DC モータの性能は変化しないことが検証された。

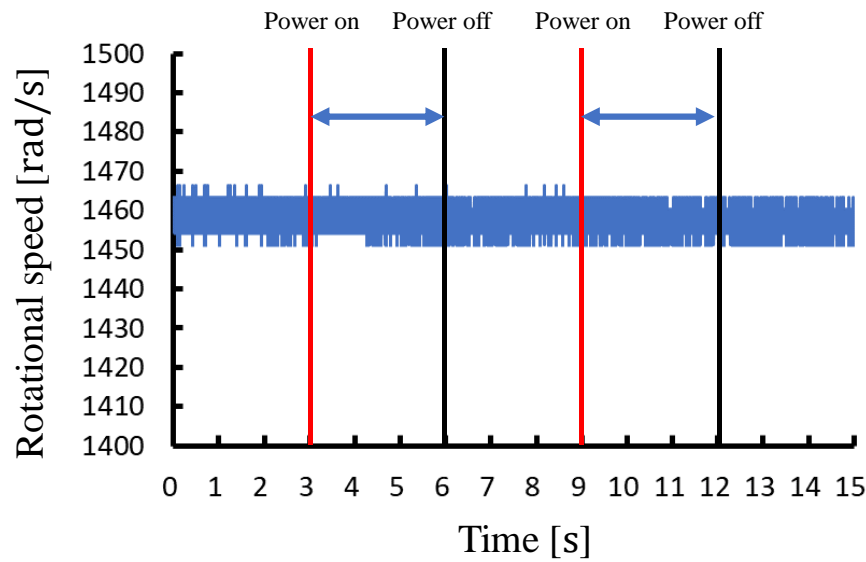


Fig.5 Rotational speed of DC motor in Electric field

## 5. おわりに

本論文ではブレーキと駆動用モータの小形化を目指し、コアレス DC モータと ER ブレーキとの一体化構造を提案した。また、一体化構造により想定される、磁界と電界の相互干渉の影響を確認するために、磁界に置かれたときの ER 流体の ER 効果の有無を調べ、ER 効果が磁界中でも働くことを確認した。続いて、コアレス DC モータのコイルが、電界中にあるとき、DC モータの回転速度への影響の有無を実験的に検討し、回転速度には特に変化が見られず、電界の影響を受けていないことを確認した。

従って、駆動に要する磁界と制動に要する電界は互いに干渉せず、ER 流体は磁界の影響を受けず、DC モータは周囲の電界の影響を受けないため、DC モータと ER ブレーキの一体化構造の実現は十分可能であると判断できる。

今後は、本論文で提案したような構造の ER モータを試作し、試作品の回転速度とブレーキとしての制動性能について検討し、ER モータを評価する予定である。

## 参考文献 (例)

- (1) ロボットを取り巻く環境変化と今後の施策の方向性 ～ロボットによる社会変革推進計画～ 7.今後のロボット政策の基本的考え方, 2019 年 7 月, [20190724\\_report\\_01.pdf \(meti.go.jp\)](https://www.meti.go.jp/20190724_report_01.pdf), 経済産業省, (2023 年 10 月 12 日参照).
- (2) 清掃や警備、配送も ロボットがオフィスの付加価値に, 日経ビジネス, 2023.01.16 号 2174, p54-56.
- (3) 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).
- (4) 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).
- (5) 北野友規, 佐藤悠太, 外川貴規, 田中豊, 小形ロボット用二重円筒形 ER ブレーキの設計と試作, 【23-4】ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 講演論文集, 1A2-F17