

2022 年度学部 4 年卒業論文

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—

田中ゼミ MM チーム

19N3018 北野 友規

目次

第 1 章 緒論.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	5
1.3 本論文の構成	6
第 2 章 機能性流体.....	7
2.1 機能性流体とその特徴	7
2.2 ER 流体	9
2.2.1 均一系 ER 流体	9
2.2.2 粒子分散系 ER 流体	12
2.3 第 2 章のまとめ	15
第 3 章 ER ブレーキ.....	16
3.1 ER ブレーキの動作原理	16
3.2 ER ブレーキの構造	16
3.2.1 多重円盤形 ER ブレーキ	16
3.2.2 二重円筒形 ER ブレーキ	17
3.3 第 3 章のまとめ	19
第 4 章 二重円筒形 ER ブレーキの設計	20
4.1 二重円筒形 ER ブレーキのパラメータ	20
4.2 二重円筒形 ER ブレーキのシミュレーション	21
4.2.1 制動トルクのモデル	21
4.2.2 シミュレーションの条件	27
4.2.3 シミュレーション結果の比較と試作する ER ブレーキの設計値の検討	29
4.3 試作品	30
4.4 第 4 章のまとめ	31
第 5 章 二重円筒形 ER ブレーキの評価実験	32
5.1 実験装置	32
5.2 実験方法	34
5.3 実験結果	34

5.4 考察	3 9
5.5 第 5 章のまとめ	3 9
第 6 章 結論	4 0
6.1 研究の成果	4 0
6.2 今後の展望	4 0
参考文献	4 1
謝辞	4 3
付録	4 4
実験で使用した粒子分散系 ER 流体の特性	4 4
二重円筒形 ER ブレーキの図面	4 5

図表目次

図 1 マイクロマウスの概観	2
図 2 マイクロマウス競技用迷路の構造	3
図 3 マイクロマウス競技用迷路のスタート座標とゴール座標の例	4
図 4 マイクロマウスが迷路内を走行する様子	4
図 5 多重円盤形 ER ブレーキの概観	6
図 6 機能性流体の代表例	8
図 7 粒子分散系 ER 流体と均一系 ER 流体	9
図 8 均一系 ER 流体の ER 効果	10
図 9 均一系 ER 流体のせん断応力とせん断速度の関係	11
図 10 均一系 ER 流体の電界強度とせん断応力の関係	11
図 11 粒子分散系 ER 流体の ER 効果	13
図 12 流体のせん断応力とせん断速度の関係	14
図 13 粒子分散系 ER 流体のせん断応力と電界強度の関係	14
図 14 多重円盤形 ER ブレーキの構造	17
図 15 二重円筒形 ER ブレーキの構造	18
図 16 多重円盤形と二重円筒形の比較	18
図 17 二重円筒形 ER ブレーキのパラメータ	20
図 18 二重円筒形 ER ブレーキの制動トルク	22
図 19 せん断面の微小面積 dS	24
図 20 ER ブレーキの慣性モーメント	26
図 21 シミュレーションの想定状況	28
図 22 シミュレーションの結果グラフ	29
表 1 シミュレーションデータまとめ	30
図 23 試作した ER ブレーキ	30
図 24 実験装置の構成	32
図 25 使用するマイコン(Runesus RX621)	33
図 26 使用するシリアルコンバータ(FT232RL)	33
図 27 実験方法	34
図 28 モータ(faulhaber1717T006SR)の回転運動	35
図 29 モータと ER ブレーキと接続したときの回転速度	36
図 30 ER ブレーキに 0.2 kV 印加したときの回転運動	36
図 31 ER ブレーキに 0.4 kV 印加したときの回転速度	37
図 32 ER ブレーキに 0.6 kV 印加したときの回転速度	37

図 33 ER ブレーキに 0.8 kV 印加したときの回転速度	3 8
図 34 ER ブレーキに 1.0 kV 印加したときの回転速度	3 8
表 2 実験データ	3 9

第 1 章 緒論

1.1 研究背景

ロボットはリンク、歯車などの機構、アクチュエータによる動力、様々なセンサを通した環境把握、プログラムによる制御技術、他のロボットとの情報共有によるインターネットの構築など、現代の情報技術、工学技術、制御技術などが組み合わさった、技術の結晶とも呼べるものである。こうしたロボット技術は産業分野において、生産性を向上させ、大量生産を可能にすることで、コストの引き下げ、生産物の品質の改善など多くの価値をもたらしている。また、特殊環境における作業でもロボット技術が応用されており、原子力発電所における炉の管理や、人工衛星による GPS 機能、ほかの惑星の調査用ロボットなどが例として挙げられる。

近年、こうしたロボット技術の新たな応用分野として、より人間にとって身近な環境で働くサービスロボットの開発が活発に行われている¹⁾。実際に、掃除ロボットやペットロボットといったもの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いる。生活の中で人間を支援するロボットに求められる機能は様々であるが、基本的な動作として、自律的に移動することが重要である。

こうした背景から、自律移動小形ロボットに対する様々な検討や議論は今後の生活支援ロボットの発展に必要であると考えている。この自律移動小形ロボットの实地試験場として、ロボット競技の一つであるマイクロマウス競技がある²⁾。

マイクロマウスとは、1977 年に IEEE(米国電気電子学会)が提唱したことに始まり、日本では 1980 年に第 1 回大会が開催された歴史の長いロボット競技である。ニコニコ動画などの媒体を通して盛り上がりを見せるロボット競技であり、競技参加に年齢制限がないことから、幅広い年代の技術者が世代を超えてロボットをより高性能にするための議論を交わすことで発展してきた³⁾。図 1 にマイクロマウスの概観⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾を示す。この競技は迷路内をスタートからゴールまでマイクロマウスが疾走し、そのタイムを競うものである。図 2 に迷路の構造を示し、図 3 に迷路のスタート座標とゴール座標の例を示す。また図 4 には迷路内をマイクロマウスが走行の様子を示す。迷路は 16×16 の 256 区画であり、スタートはそのうちの 1 区画、ゴールは中心の 4 区画となっている。迷路を構成する壁は高さが 5 cm、厚さが 1.2 cm である。競技規定によるとマイクロマウスの大きさは、縦横 25 cm 以内で、高さの制限はなく、床面から高さ 5 cm までの部分は 16 cm の円内に収まるようにする必要がある。競技では持ち時間の間に

5回の挑戦が認められているが、1度目の挑戦では、迷路内の構造が不明なため、マイクロマウスは探索アルゴリズムに従って、迷路のスタートからゴールまでの最短経路を導き出すことで、2度目の挑戦以降その最短経路を疾走し、最短タイムをたたき出すのである。上位のマイクロマウスの特徴としては⁸⁾、2輪DCモータで走行すること、200g程度と軽量であること、斜め走行と呼ばれる左コーナーと右コーナーが連続するルートで斜め45度に直線走行する方法が採用されていることなどがある。

近年、マイクロマウス競技は高速化が顕著であり⁸⁾、搭載しているDCモータ単体の速度制御や制動では走行性能に限界があると考えられている。よってブレーキによる足回り部品の強化が必要であると考えられるが、マイクロマウスに搭載するブレーキはコンパクトかつ軽量であり、精密かつ高速な速度制御性能を持つことが求められる。さらに、小形のアクチュエータでは物理的な環境がマクロな環境とは異なるため、複雑な機構を持つアクチュエータでは、開発し、安定化させることが難しい。以上のことからマイクロマウスの足回り部品は現状、新たな技術による部品の開発を待ち望んでいる状況である。

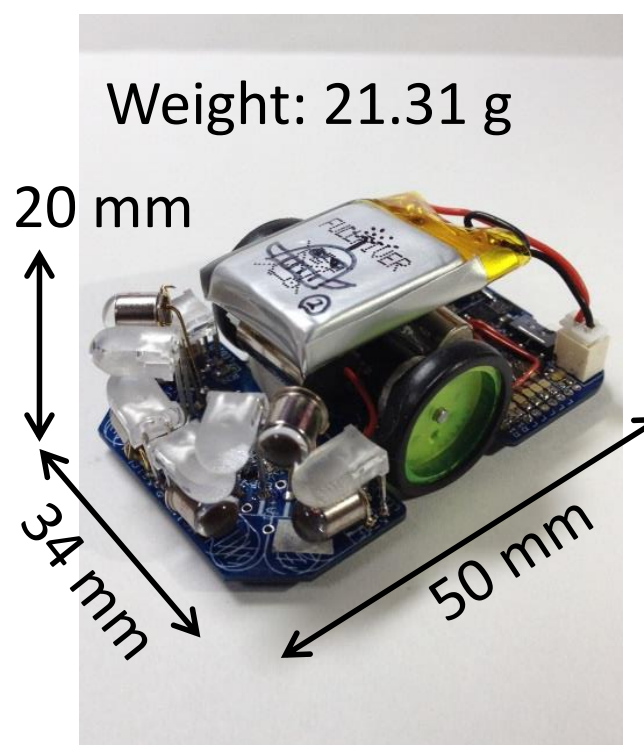


図 1 マイクロマウスの概観

出典：公益財団法人ニューテクノロジー復興財団,マイクロマウスクラシック競技規定,
https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2013/kitei_classic_since2013.html

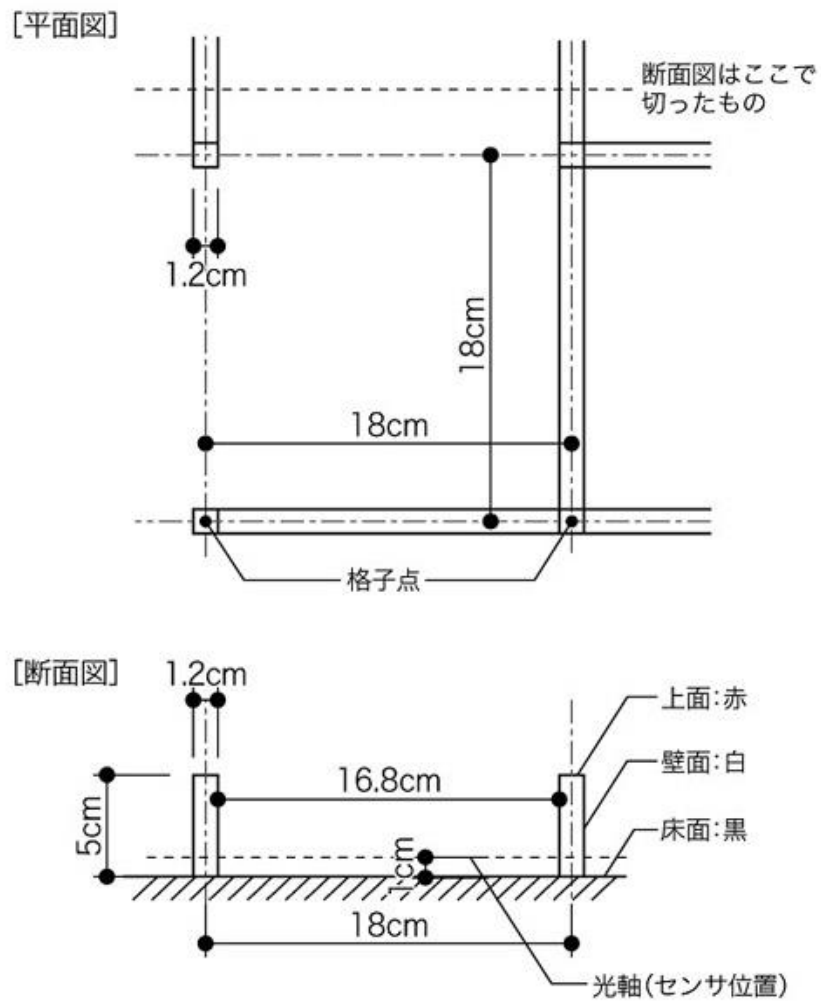


図 2 マイクロマウス競技用迷路の構造

出典：公益財団法人ニューテクノロジー復興財団, マイクロマウスクラシック競技規定,
https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2013/kitei_classic_since2013.html

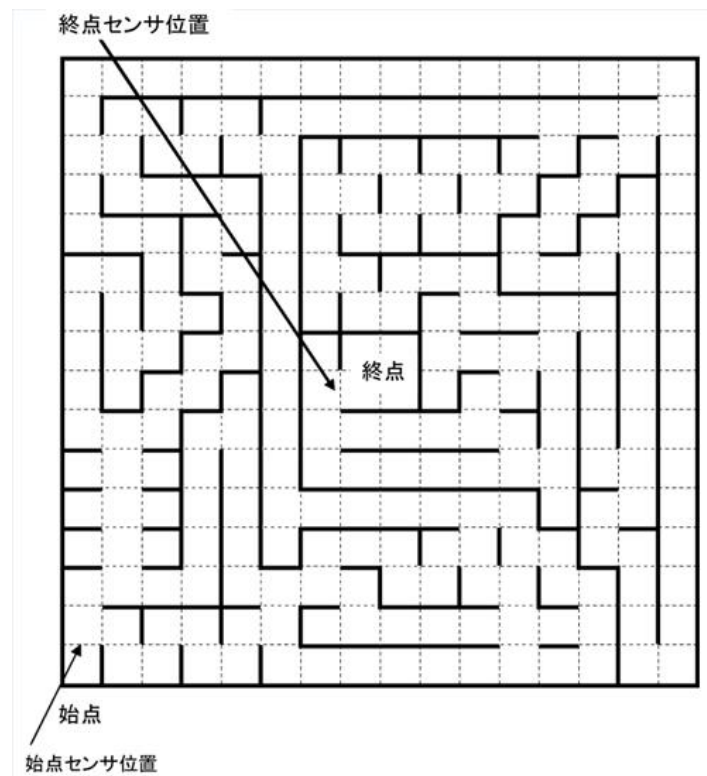


図 3 マイクロマウス競技用迷路のスタート座標とゴール座標の例

出典：公益財団法人ニューテクノロジー復興財団, マイクロマウスクラシック競技規定,
https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2013/kitei_classic_since2013.html

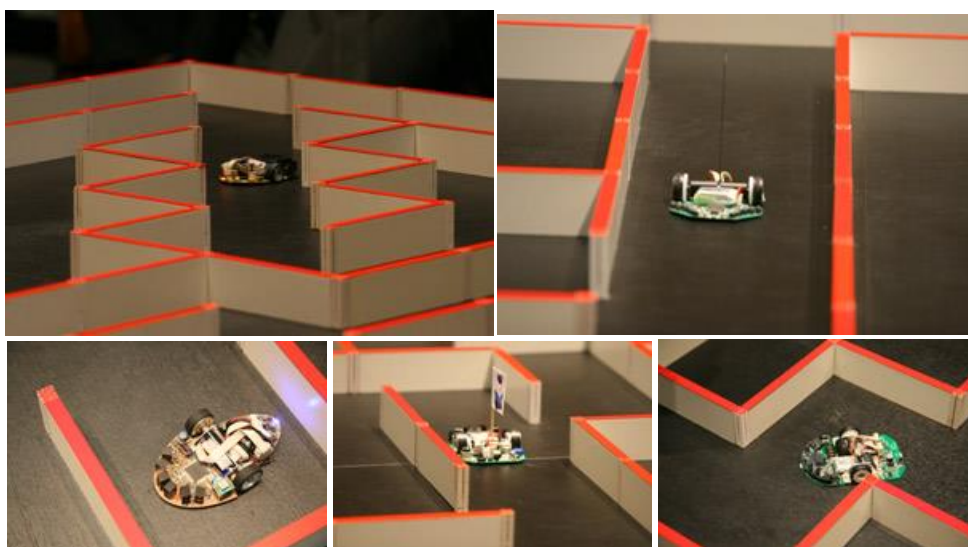


図 4 マイクロマウスが迷路内を走行する様子

出典：公益財団法人ニューテクノロジー復興財団, マイクロマウスクラシック競技規定,
https://www.ntf.or.jp/mouse/micromouse2013/kitei_classic_since2013.html

1.2 研究目的

近年、次世代の材料として、機能性流体が注目されている。機能性流体⁹⁾とは、電場や磁場など外部からの物理量によって、その物理化学的性質を機能的に変化できる流体である。機能性流体は、コンパクトかつ軽量で、大きさの割に出力が大きく、高速に応答し、簡易な構造で機能するといった特徴を機械に付与できる可能性がある。このような優れた特徴を持つ機能性流体は、工業的価値を見込まれ、制振装置や、エンジンマウント、可動部を持たないバルブ、マイクロマニピュレータなど、様々な応用研究が行われている¹⁰⁾。

本研究では、ER 流体と呼ばれる機能性流体に注目している。ER 流体とは外部からの電界の影響を受けることで、見かけ上の粘性が上昇する機能を持つ流体である。ER 流体は機能性材料の中でも注目度の大きな材料である。その理由としては¹¹⁾、1)粘度が広範囲(流体によっては固体状態にまで)にわたり、可逆的に制御できること、2)年度変化の応答性が非常によく、数百 Hz の入力信号に追従できること、3)電気信号により直接操作でき、機械システムに取り込みやすいことなどが挙げられる。この3点に加え、ER 流体は可動部を持たない簡易な構造で機能するため、小形で高機能なマイクロアクチュエータの開発に適している。以上の利点から、本研究の先行研究²⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾ではマイクロマウス競技用ロボットに ER 流体、特に粒子分散系 ER 流体の粘性抵抗力を利用した新たな制動装置の開発を行っている。先行研究で開発された多重円盤形 ER ブレーキの概観²⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾を図5に示す。

先行研究で開発された多重円盤形 ER ブレーキから挙げられた課題を整理したところ、制動力の上昇と安定性の改善が必要であると考えられた。したがって本研究では、新たな ER ブレーキの構造として二重円筒形構造を採用し、マイクロマウス競技用ロボットに搭載することを念頭に置いたブレーキを設計、開発することを通して、以上の2点の課題の解決を目的としている。

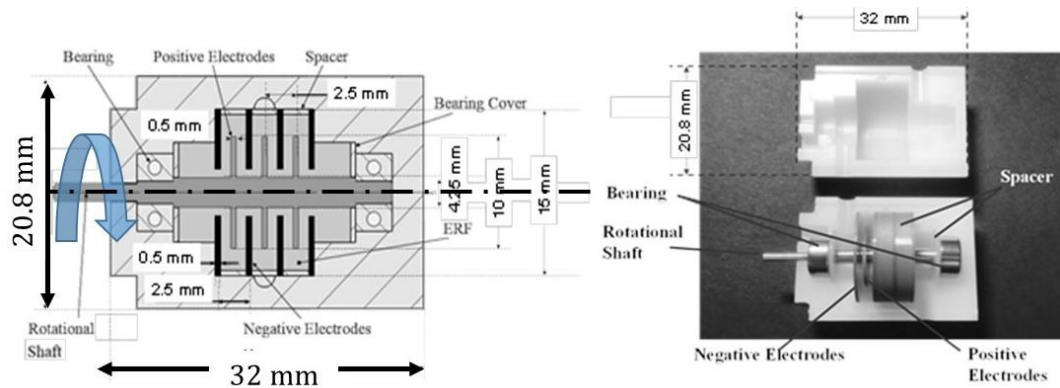


図 5 多重円盤形 ER ブレーキの概観

1.3 本論文の構成

本論文は 6 章から成る。以下にそれぞれの説明を述べる。

第 1 章「緒論」では、近年のロボット技術の応用分野の変化とそうした環境におけるロボット競技、特にマイクロマウス競技の役割について説明した。加えて、そうした背景から先行研究では機能性流体に着目し、小形制動装置の開発を行った旨を述べ、本研究の研究目的が先行研究で挙げられた 2 点の課題を解決することにあると説明した。

第 2 章「機能性流体」では、工学分野で応用可能と思われる機能性流体とその特徴を説明する。さらに本研究で注目した ER 流体について述べる。

第 3 章「ER ブレーキ」では、その動作原理について説明し、多重円盤形 ER ブレーキと二重円筒形 ER ブレーキの構造を説明し、二重円筒形構造を採用した理由について述べる。

第 4 章「二重円筒形 ER ブレーキの設計」では、二重円筒形 ER ブレーキの数学モデルとそれを用いたシミュレーションの結果について述べる。またシミュレーション結果を比較することで ER ブレーキの設計値を選定するまでの経緯について説明する。

第 5 章「二重円筒形 ER ブレーキの評価実験」では、試作した ER ブレーキの評価実験の環境や方法そして結果とその考察について説明する。

第 6 章「結論」では、本論文で新たに得られた知見をまとめ、今後の課題、展望について述べる。

巻末には、本論文で参考にした文献、研究を通して力を貸していただいた関係各位様への謝辞、そして、本論では省略した研究の枝葉の部分を付録として添付する。

第 2 章 機能性流体

2.1 機能性流体とその特徴

機能性流体とは外部からの電場や磁場の影響により、その物理的、化学的特性を変化させる機能を持つ流体である。図 6 に工学的に応用可能であると考えられている機能性流体をまとめて示す。ER 流体は前章でも説明したように、電圧を印加すると、その電場中で見かけ上の粘性を変化させる流体である。その応用として、ER クラッチ、ブレーキ、エンジンマウントや可動部を持たないバルブ、マイクロマニピュレータや ER ダンパなどがある¹¹⁾。EHD 流体と ECF(電気共役流体)は、直流高電場をかけることでジェット流が発生する流体のことである。応用研究には人工筋肉セルの開発や、ECF ポンプなど¹⁰⁾がある。磁性流体は磁場をかけることで磁気体積力を発生させる流体である。磁性流体はシール材やボイスコイルのダンパとしての実用実績がある。MR 流体とは ER 流体に対して、磁場を印加することにより粘性を変化させる流体である。つり橋のワイヤ振動抑制装置やビルなどの建築構造物の免振装置などに搭載されるなど実用実績がある。機能性エラストマー¹²⁾は ER 流体や MR 流体の特徴をゴムやゲルなどの弾性材料に付加したもので、筐体からの漏れ防止や時間経過に伴う劣化などの問題点を解決するために開発された。液晶は固体と流体の中間の物質ともいえる材料で、光学異方性を持っている。電磁力、圧力、温度に反応し、表示機などに利用されている。フッ素系流体は絶縁性が高く、高密度、低粘度、熱伝導率が高く、熱的安定性に優れている。また、化学的に不活性であり、毒性が低く安全な流体である。電子機器などの冷却に応用できる。

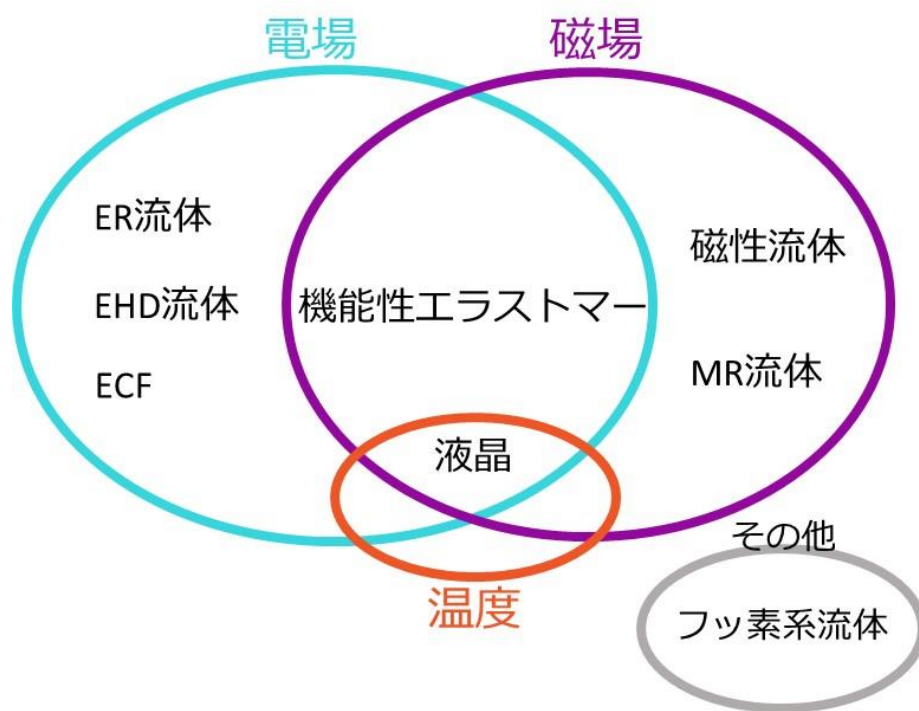


図 6 機能性流体の代表例

2.2 ER 流体

ER 流体は電界の印加により、ER 効果と呼ばれる粘性変化現象を見せる機能性流体の 1 種である。本研究で利用する ER 流体には均一系と粒子分散系の 2 種類ある。図 7 に株式会社 ER テック様から提供して頂いた均一系 ER 流体と粒子分散系 ER 流体を示す。図 7 の右のプラスチックボトルには高分子液晶系と記載されているが、これは均一系 ER 流体の一種である。これら 2 種の ER 流体は機能的には同じで、電界下で粘性を変化させる性質をもつものの、その原理は根本的に異なる。それぞれについて次の節で説明する。



図 7 粒子分散系 ER 流体と均一系 ER 流体

2.2.1 均一系 ER 流体

図 8 に均一系 ER 流体の ER 効果を表したモデルを示す。均一系 ER 流体の ER 効果の原理は誘電性の細長い液晶が電界をかけられることで、電気力線と平行な向きに配向し、液晶の向きと直角な流れを妨げるようになることである。均一系 ER 流体は材料組成の違いで様々な種類に分けられるが、大別すると低分子液晶系と高分子液晶系に分けられる¹³⁾。低分子液晶は、応答性が良好であり、比

較的弱い電界でも大きな粘性変化率を示す。高分子液晶は、低分子液晶よりさらに棒状に長い高分子の液晶をある濃度の絶縁性溶媒に溶解させた均一系 ER 流体である。電界をかけられたときの立ち上がりは速く(数十 ms)、立下りは配向構造が残り、遅れることが分かっている。図 9 に均一系 ER 流体のせん断速度とせん断応力の関係を示す。均一系 ER 流体はせん断応力とせん断速度が比例関係にあるニュートン流体挙動を示し、電界強度 E [kV/mm]が大きくなるほど、粘性係数が大きくなるのではなく、せん断速度とせん断応力の降伏点が高せん断速度側に移行することで粘度が増大している¹³⁾。図 10 には均一系 ER 流体の電界強度とせん断応力の関係を示す。電界強度が3.0 kV/mmで均一系 ER 流体の先生増大は飽和状態となる。本研究に提供された株式会社 ER テック様の高分子液晶系 ER 流体を参考にと、基底粘度は0.75 Pa・sであり、使用温度範囲は10～50℃である。

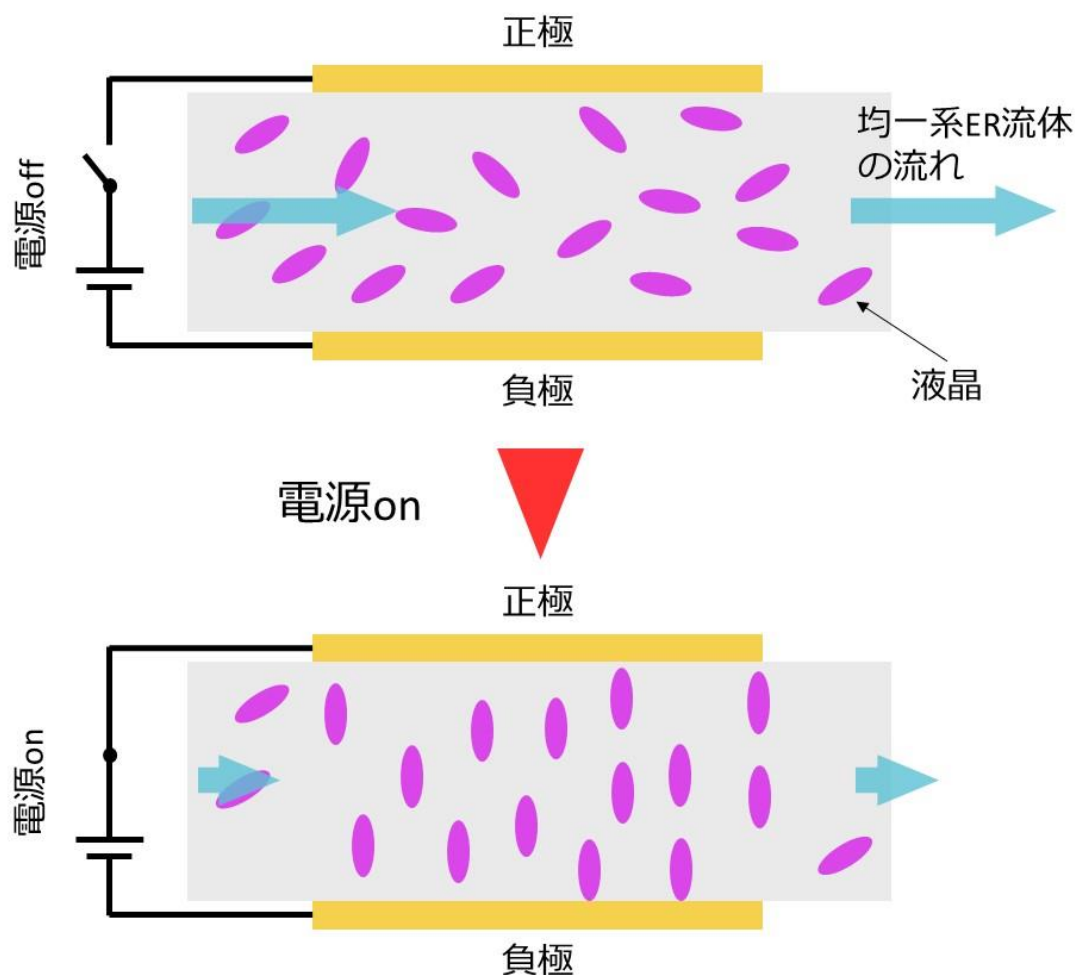


図 8 均一系 ER 流体の ER 効果

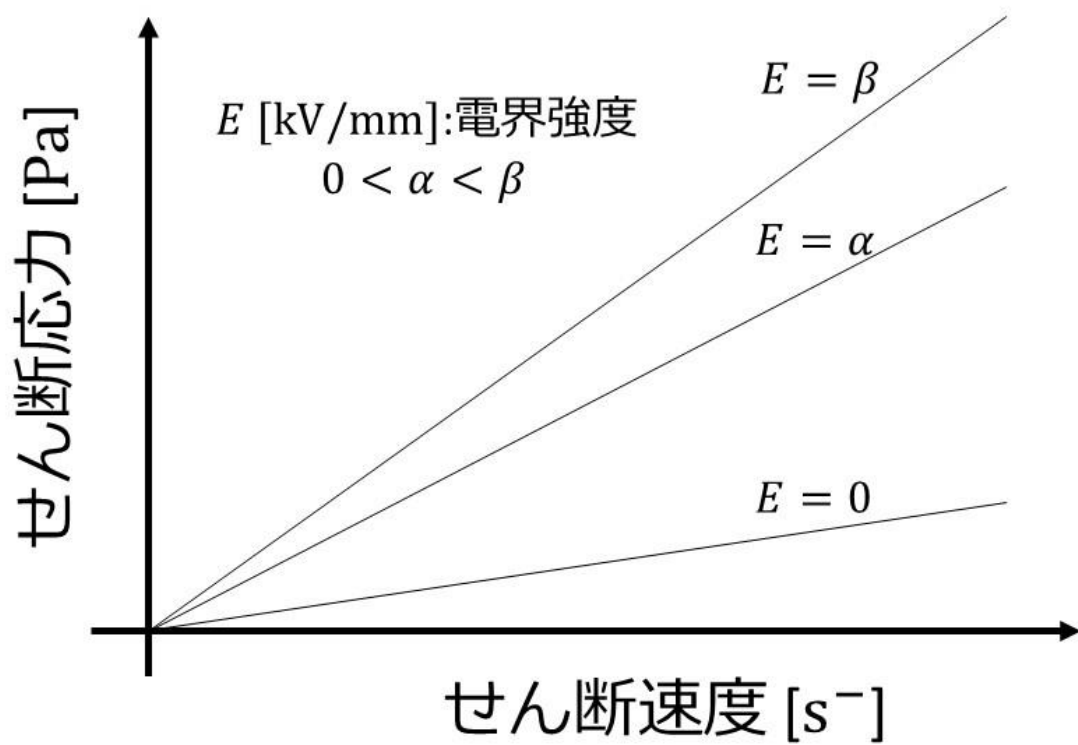


図 9 均一系 ER 流体のせん断応力とせん断速度の関係

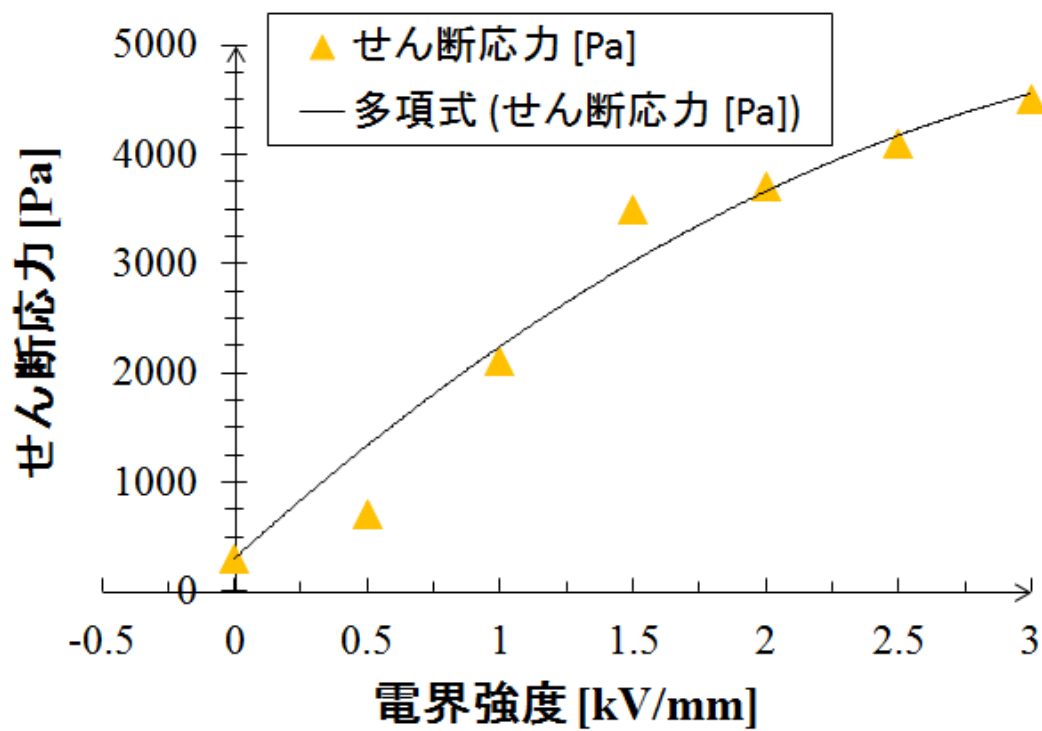


図 10 均一系 ER 流体の電界強度とせん断応力の関係

2.2.2 粒子分散系 ER 流体

図 11 に粒子分散系 ER 流体の ER 効果を表したモデルを示す。粒子分散系 ER 流体は絶縁油中に誘電性粒子が混合された懸濁液である。この流体に電界をかけると、油中の微粒子(1～50 μm)が誘電分極を起こし、粒子間の静電引力により正極と負極の間に架橋構造を作る¹⁴⁾。電極間の粒子の架橋構造はせん断に対して抵抗し、ある一定のせん断応力のところで耐えられなくなり、粒子分散系 ER 流体は流動しだす。つまり粒子分散系 ER 流体は電界をかけられることで降伏応力を発生させることで見かけ上の粘性が上がっているように変化する、ビンガム流体のような挙動をする流体である。図 12 に粒子分散系 ER 流体のせん断応力とせん断速度の関係を示す。図 13 に粒子分散系 ER 流体のせん断応力と電界強度の関係を示す。ER 流体が注目されているのは、電気－機械的力変換素子として高度な運動制御を実現できると考えられているからである¹⁵⁾。応用可能性として上肢リハビリ補助装置やトレーニングマシン¹⁶⁾、造船分野に関しては制振による客室用防音壁¹⁷⁾などが構想されている。粒子分散系 ER 流体は溶媒(絶縁油)と誘電性微粒子の組み合わせによってユニークで多様な物理的、化学的特性を持ち、標準的な比較実験の方法が確立されていないため、いまだその原理については体系化できていない¹⁸⁾。今までに開発された粒子分散系 ER 流体には、温度耐久性と ER 効果の大きさに優れる炭素質 ER 流体¹⁹⁾や、数百 kPa のせん断応力を示す PM-ER 流体などがある¹²⁾。

前節で述べた均一系 ER 流体と比較すると、粒子分散系 ER 流体は立ち上がり と 立下りの両面で応答速度が速く(数 ms～数十 ms)、基底粘度が低い。また均一系 ER 流体はニュートン流体であり、低せん断速度に対して、せん断応力が小さく流動を示すのに対し、粒子分散系 ER 流体はビンガム降伏値を超えない限りは流動せずに、電極の位置関係を固定できることから、本研究では粒子分散系 ER 流体を ER ブレーキの動力源として使用することとしている。

研究にあたり、株式会社 ER テック様から提供された粒子分散系 ER 流体タイプ A の特徴は、基底粘度が0.225 Pa・s、使用温度範囲が 0～60 °C、加えて吸湿性が高いことである。またそのせん断応力 τ [Pa]は次の方程式で示される。

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

このとき μ_0 [Pa・s]は基底粘度、 $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]はせん断速度、 $\tau_0(E)$ [Pa]は電界強度に比例する粒子分散系 ER 流体のビンガム降伏値であり、以下の式で近似できる。

$$\tau_0(E) = 317.5 \cdot E^{1.834}$$

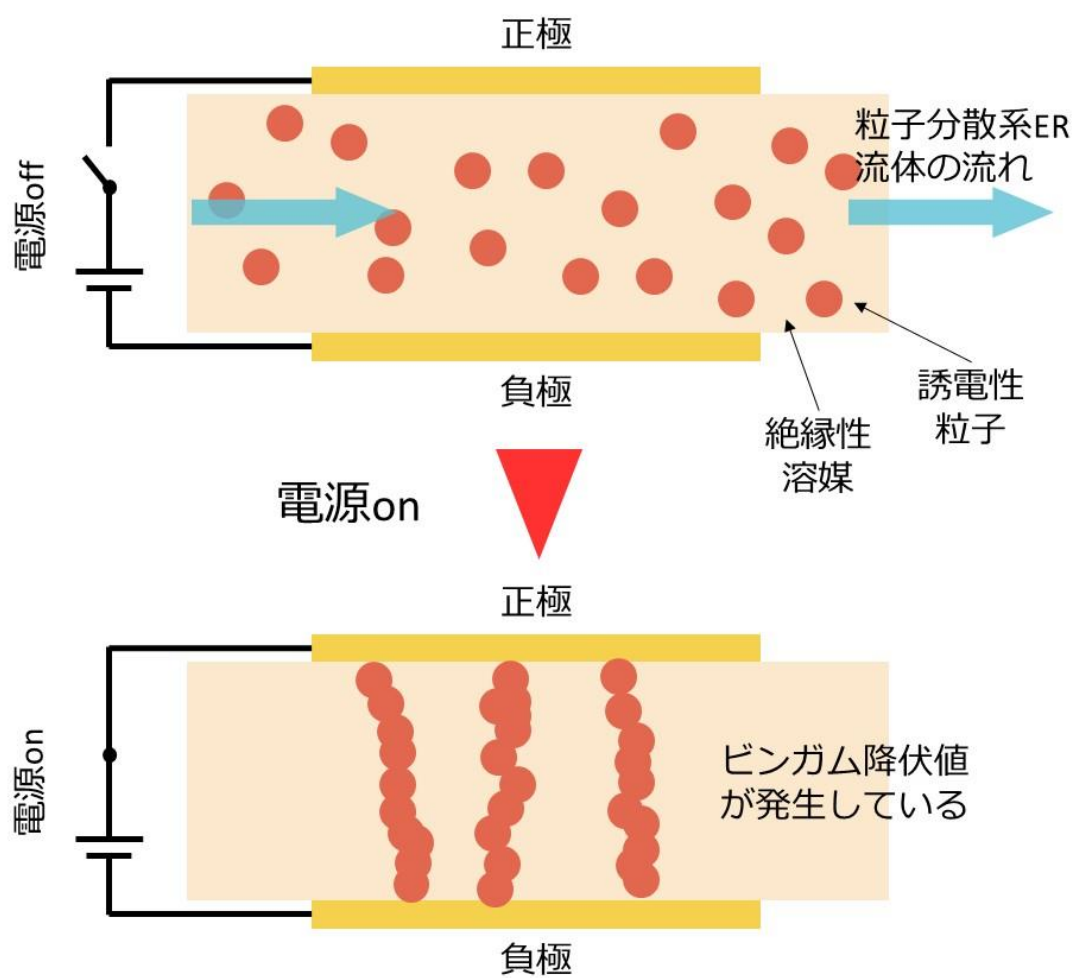


図 11 粒子分散系 ER 流体の ER 効果

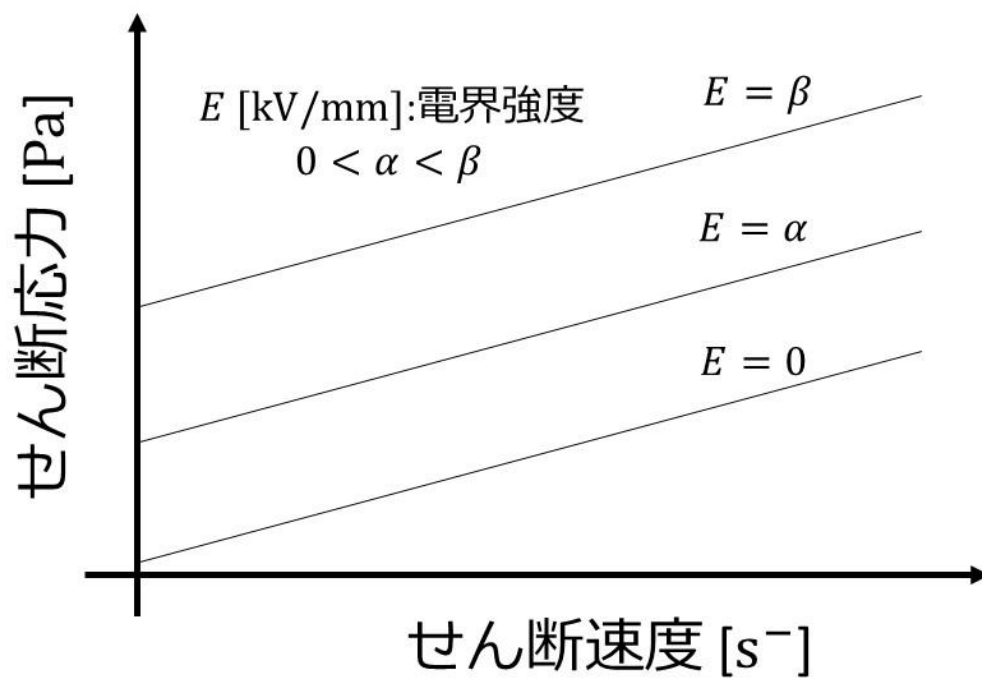


図 12 流体のせん断応力とせん断速度の関係

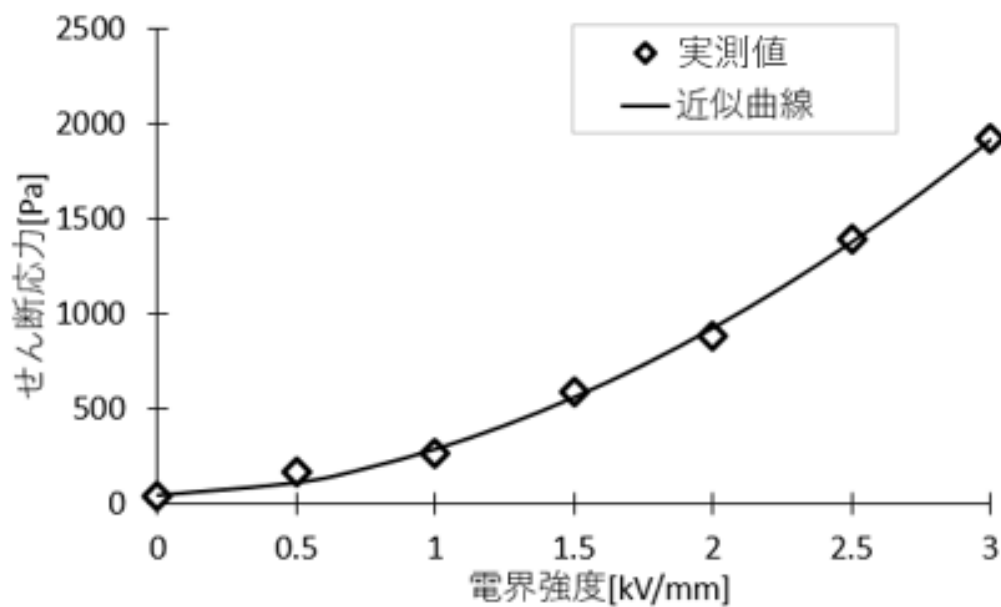


図 13 粒子分散系 ER 流体のせん断応力と電界強度の関係

2.3 第2章のまとめ

第2章では本研究で注目した工学的に応用可能であると考えられている機能性流体と、ブレーキシステムに応用できる ER 流体について実際に行われている応用研究を交えて説明した。

ER 流体には均一系 ER 流体と粒子分散系 ER 流体の2種類があり、均一系 ER 流体は棒状に長い分子構造を持つ液晶の粘度異方性を利用した粘性変化、粒子分散系 ER 流体は絶縁油中における誘電性粒子の分極による電極間の架橋構造の形成により ER 効果を持つことを説明した。

本研究では、優れた応答性と基底粘度の低さ、ビンガム流体のような挙動をすることから粒子分散系 ER 流体を使用することとした。

第3章 ER ブレーキ

3.1 ER ブレーキの動作原理

ER ブレーキはモータの回転軸と接続して使用する。ER ブレーキの内部はモータと接続されている可動正極と、筐体内で固定されている固定負極、そして正極－負極間の微小な隙間に ER 流体が充填されている状態である。ER ブレーキに電圧を印加すると内部の ER 流体は見かけ上の粘性を上げ、モータと連動して回転する正極の動きを妨げるもしくは固定する。これにより ER ブレーキはモータの運動を制動する。また、電圧の印加を止めることでモータは再び回転を始める。

3.2 ER ブレーキの構造

3.2.1 多重円盤形 ER ブレーキ

多重円盤形 ER ブレーキは先行研究で試作された ER ブレーキである。図 14 に多重円盤形 ER ブレーキの構造を示す。筐体内には赤で示す正極と青で示す負極が配置されている。平行な正極の円盤と負極の円盤がたがいに触れ合わないよう層状に重なっていて、その隙間に充填された ER 流体に電圧を印加できるようになっている。また正極の軸が外部へ伸びていて、モータと接続されることで連動して回転できるようになっている。

先行研究で試作された多重円盤形 ER ブレーキには実験を通して主に 2 点の問題点が挙げられた。1 つ目は正極が回転しているとき、その回転軸心がブレてしまうことである。これにより、電極間距離が不安定になる、更には電極同士が触れ合ってしまうことになり、ER 流体への電圧印加が不安定になる、つまり ER ブレーキの動作が不安定になってしまう。2 つ目はモータの運動を停止させるためには ER ブレーキに 3.7 kV と非常に高い電圧が必要であることである。ER ブレーキはマイクロマウスへの搭載を予定しているため、電源はマイクロマウスのリチウムイオンポリマ二次電池(7.4 V)と電圧昇圧回路を利用することになるが、電圧の昇圧にかかる時間や昇圧回路の重量や体積の面を考慮すると 1 kV までの電界強度が限界であると考えているため、モータの運動を停止させるために必要な電圧の大きさを低減することが必要である。

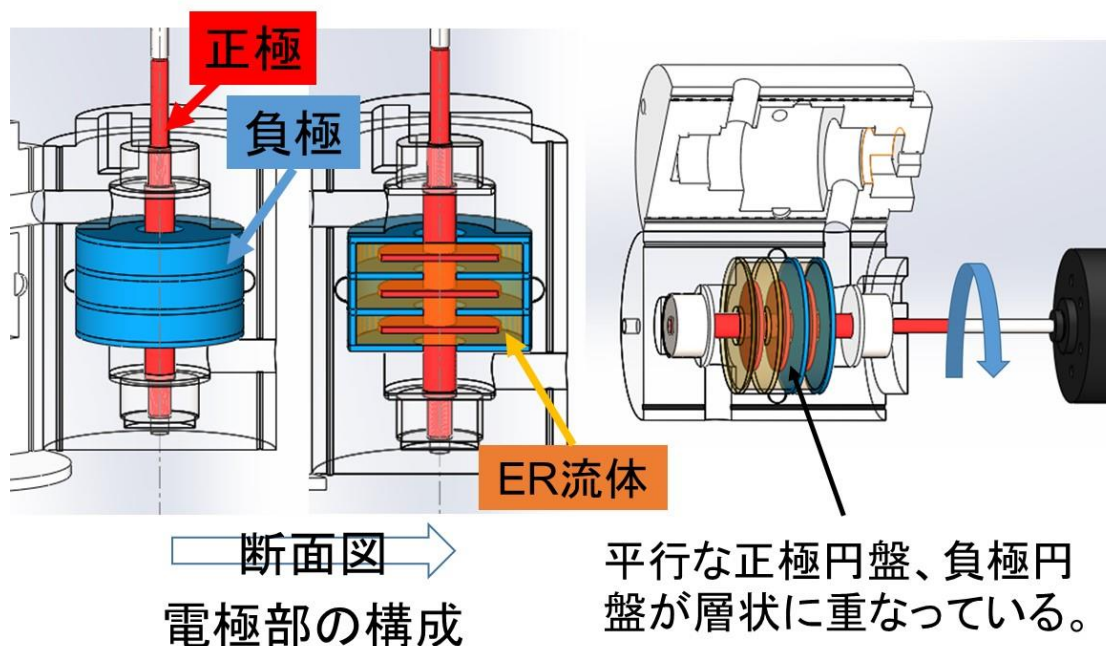


図 14 多重円盤形 ER ブレーキの構造

3.2.2 二重円筒形 ER ブレーキ

古庄ら²¹⁾は福祉機器への応用を念頭に置いて多重シリンダ形 ER ブレーキを提案した。対して二重円筒形 ER ブレーキは、多重円盤形 ER ブレーキの問題点を受け、本研究で新たに提案した構造のマイクロマウス搭載用 ER ブレーキである。図 15 に二重円筒形 ER ブレーキの構造を示す。二重円筒形 ER ブレーキの正極(赤)と負極(青)は互いに直径の少し異なる円筒形状を持っており、中心を合わせて、互いに触れ合わないようにかみ合わせて組み立てる。さらに負極で蓋をすることで正極は負極に包まれるようになる。正極は ER 流体に包まれるような状態で筐体に収まり、モータと連動して回転できるようになっている。

二重円筒形 ER ブレーキは多重円盤形で問題となった安定性と必要な電圧の大きさの問題を解決できると考えられる。図 16 に多重円盤形 ER ブレーキと二重円筒形 ER ブレーキの電極部を並べて示す。多重円盤形 ER ブレーキが不安定である原因は正極の部品が金属加工の手順の問題で複数部品からなっているからであると考えられる。これに対し、二重円筒形では軸心をなす部分は 1 つの部品でできるため、軸心の安定性を見込める。また、二重円筒形構造は軸心から比較的離れた位置でせん断応力が発生するため、多重円盤形構造よりもモータの回転方向と逆向きのトルクつまり制動トルクをより大きく正極へかけることができる。このため ER 効果による粘性抵抗力をより効率的に制動トルクとして利用でき、ER 効果のための電圧の大きさを低減させることができる。また二重円筒形構造は組み立ての精度が出しやすく電極間の距離を小さくできるため、

電圧を変えずにより大きな ER 効果が発生させることができる。以上の点より二重円筒形は多重円筒形の問題を解決できると考えられる。

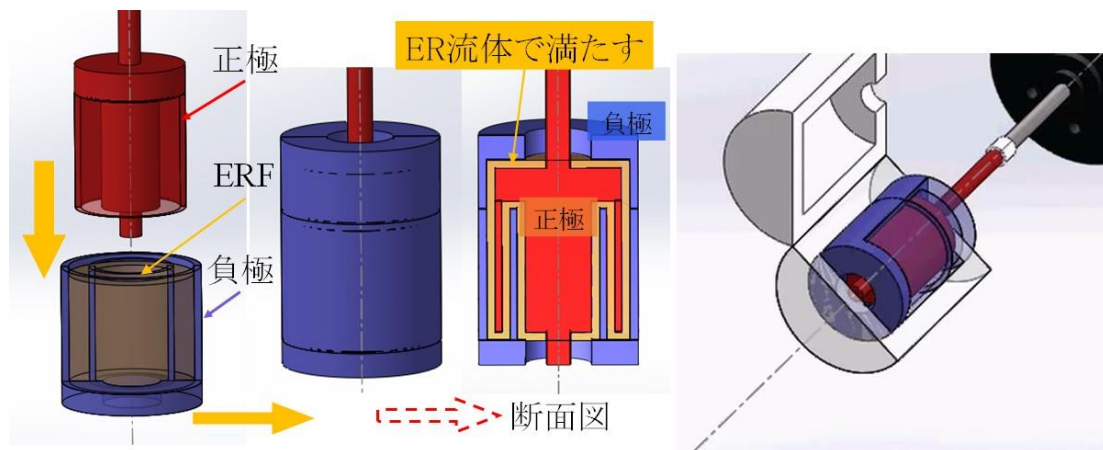


図 15 二重円筒形 ER ブレーキの構造

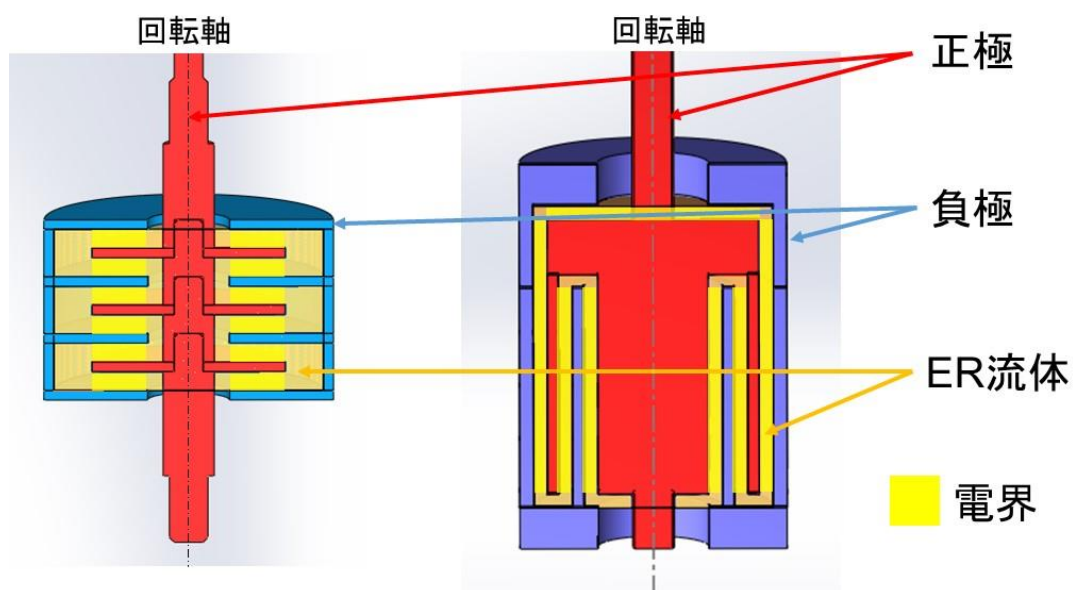


図 16 多重円盤形と二重円筒形の比較

3.3 第3章のまとめ

第3章ではERブレーキの構造について説明した。ERブレーキはER流体の粘性抵抗力を可動正極にかけることでモータを制動することができる。多重円盤形ERブレーキの構造と二重円筒形ERブレーキの構造をそれぞれ説明し、多重円盤形ERブレーキの問題の原因の考察と二重円筒形ERブレーキが問題の解決に対して有効であると思われる理由について述べた。

第4章 二重円筒形 ER ブレーキの設計

4.1 二重円筒形 ER ブレーキのパラメータ

図 17 に二重円筒形 ER ブレーキの形状パラメータに文字を振った断面図を示す。各変数について説明すると、全長を L [mm]、正極と負極が重なり合う箇所の長さを l [mm]、全体の直径を D [mm]、正極の直径を円筒のもっとも外側から順に d_3, d_2, d_1 [mm]である。また正極の回転軸と円筒構造がつながっているベッド部分の厚みは2.0 mm、正極の外部に飛び出る軸部の直径はモータの回転軸とほぼ同じである1.5 mmとなっている。また電極間の距離 h は $h = 0.5$ mmとして固定している。二重円筒形 ER ブレーキは組み立ての精度が得やすいため、多重円盤形で電極間距離が1.0 mmであったのに対して、0.5 mmまで小さくでき、ER 流体にかかる電界強度を、電圧は変えずに大きくすることができ、より強い制動力を得ることができる。

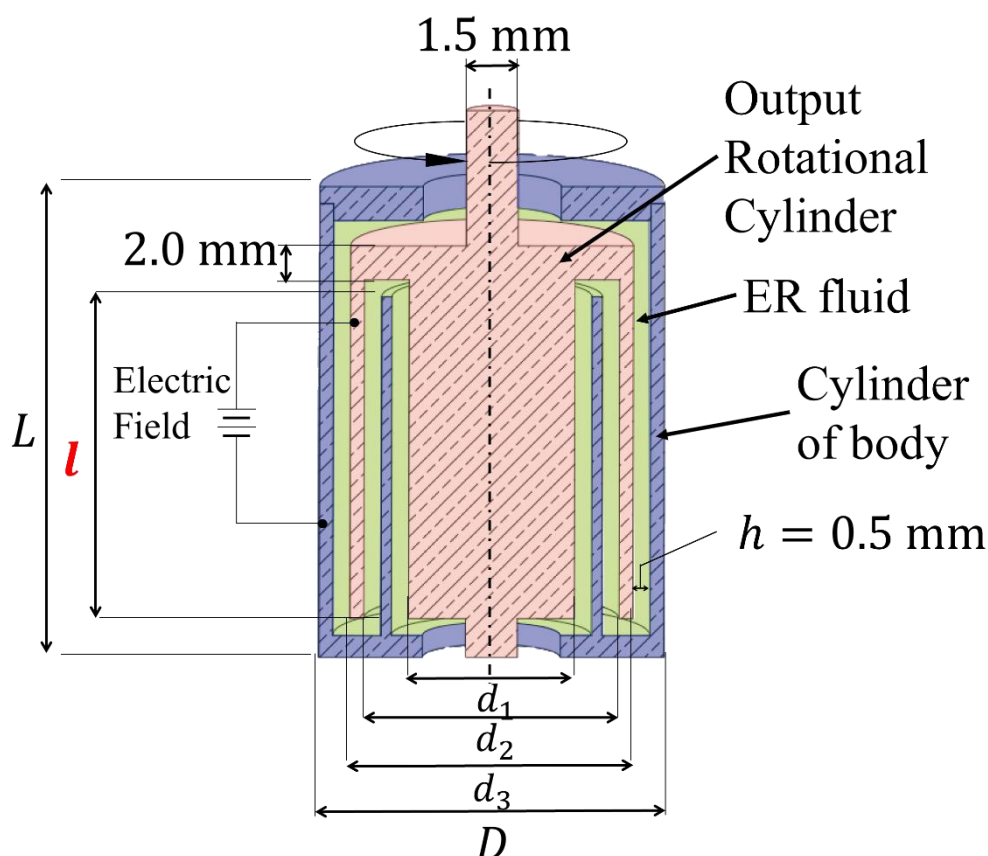


図 17 二重円筒形 ER ブレーキのパラメータ

4.2 二重円筒形 ER ブレーキのシミュレーション

ER ブレーキの設計を行うために適切な形状パラメータを調査する。形状パラメータの変化によるモータの回転運動と ER ブレーキの制動をシミュレーションで比較して設計値の検討を行った。

4.2.1 制動トルクのモデル

シミュレーションを行うために数学モデルが必要であるため二重円筒形 ER ブレーキの数学モデルの導出を行った。まず、粒子分散系 ER 流体のせん断応力 $\tau[\text{Pa}]$ は次の式(1)で表される。

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

ここで $\tau_0(E)[\text{Pa}]$ は粒子分散系 ER 流体に電界強度 $E[\text{kV/mm}]$ をかけたとき発生するビンガム降伏値であり、 $\mu_0[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ は粒子分散系 ER 流体が電圧を印加されないときに持つ基底の粘性係数（基底粘度）、 $\dot{\gamma}[\text{s}^{-1}]$ はせん断速度である。

また、ER 流体によって回転する正極に与えられる力の大きさ $F[\text{N}]$ は、ER 流体によるせん断応力 τ とせん断面の面積 $S[\text{mm}^2]$ より式(2)のように表される。

$$F = \tau \cdot S \quad (2)$$

式(1)、式(2)より ER ブレーキの制動トルク $T_B[\text{N} \cdot \text{mm}]$ の大きさは、回転軸からの距離を $r[\text{mm}]$ と置くと、以下の式(3)のようになる。

$$T_B = F \cdot r = \tau \cdot S \cdot r = (S \cdot r \cdot \dot{\gamma})\mu_0 + (S \cdot r)\tau_0(E) \quad (3)$$

ここで図 18 に二重円筒形 ER ブレーキ内部で制動トルクの働く箇所を示す。 $T_{B1}, T_{B2}, T_{B3}[\text{N} \cdot \text{mm}]$ とまとめやすさを基準に、3 か所に分けて数学モデルを構築した。それぞれの大きさの関係は $T_{B1} > T_{B2} > T_{B3}$ であり、 $T_B = 100$ とすると、比は 80:13:7 程度である。

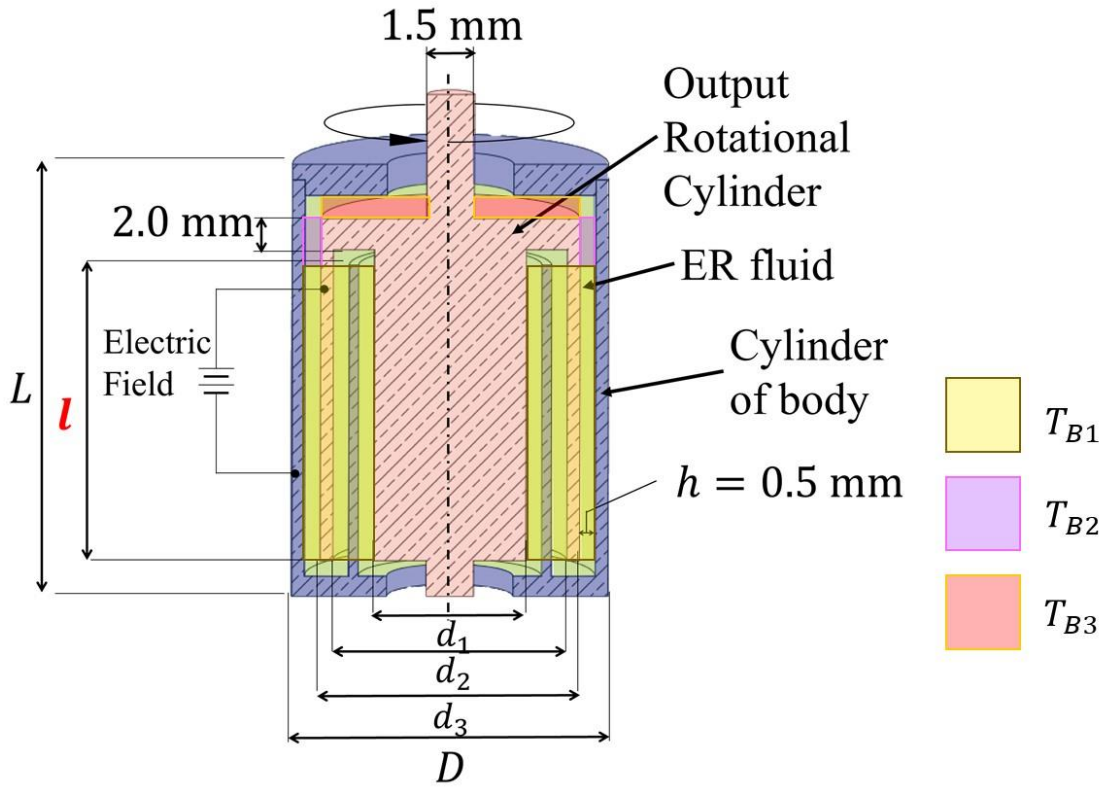


図 18 二重円筒形 ER ブレーキの制動トルク

まず T_{B1} は正極と負極のかみ合う部分で発生する制動トルクである。式(3)のように制動トルクはせん断速度、せん断面の面積、回転軸からの距離に比例する。 T_{B1} では回転軸を中心に直径 d_n ($n = 1, 2, 3$)[mm]の位置でそのせん断速度、せん断面の面積は変わり、それぞれを $\dot{\gamma}_n, S_n$ とすると、

$$\dot{\gamma}_n = \frac{\frac{d_n}{2} \cdot \omega}{h} \quad (4)$$

$$S_n = l \cdot 2\pi \cdot \frac{d_n}{2} \quad (5)$$

なお ω [rad/s]は正極の回転速度である。

式(3)、式(4)、式(5)より、 T_{B1} は以下の式(6)のように表される。

$$\begin{aligned}
T_{B1} &= \sum_{n=1}^3 \{(S_n \cdot r_n \cdot \dot{\gamma}_n) \mu_0 + (S_n \cdot r_n) \tau_0(E)\} \\
&= \sum_{n=1}^3 \left\langle \left(l \cdot 2\pi \cdot \frac{d_n}{2} \right) \cdot \frac{d_n}{2} \cdot \frac{\frac{d_n}{2} \cdot \omega}{h} \right\rangle \mu_0 + \left\langle \left(l \cdot 2\pi \cdot \frac{d_n}{2} \right) \cdot \frac{d_n}{2} \right\rangle \tau_0(E) \\
&= 2\pi l \frac{\omega}{h} \cdot \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^3 + \left(\frac{d_2}{2} \right)^3 + \left(\frac{d_3}{2} \right)^3 \right) \cdot \mu_0 \\
&\quad + 2\pi l \cdot \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_3}{2} \right)^2 \right) \cdot \tau_0(E) \tag{6}
\end{aligned}$$

続いて、 T_{B2} は正極の円筒と回転軸がつながるベッド部分と対になる負極間で発生する制動トルクである。 T_{B2} でのせん断面 S_{B2} とせん断速度 $\dot{\gamma}_{B2}$ は以下の式で表される。

$$S_{B2} = (h + 2.0) \cdot 2\pi \cdot \frac{d_3}{2} \tag{7}$$

$$\dot{\gamma}_{B2} = \frac{\frac{d_3}{2} \cdot \omega}{h} \tag{8}$$

式(3)、式(7)、式(8)より T_{B2} は式(10)のように書ける。

$$\begin{aligned}
T_{B2} &= \left(S_{B2} \cdot \frac{d_3}{2} \cdot \dot{\gamma}_{B2} \right) \cdot \mu_0 + \left(S_{B2} \cdot \frac{d_3}{2} \right) \tau_0(E) \\
&= \left\{ 2\pi(h + 2.0) \cdot \frac{d_3}{2} \cdot \frac{d_3}{2} \cdot \frac{\frac{d_3}{2} \cdot \omega}{h} \right\} \cdot \mu_0 \\
&\quad + \left\{ (h + 2.0) \cdot 2\pi \cdot \frac{d_3}{2} \cdot \frac{d_3}{2} \right\} \tau_0(E)
\end{aligned}$$

$$= 2\pi(h + 2.0) \frac{\omega}{h} \left(\frac{d_3}{2}\right)^3 \cdot \mu_0 + 2\pi \left(\frac{d_3}{2}\right)^2 (h + 2.0) \cdot \tau_0(E) \quad (9)$$

続いて、 T_{B3} は負極の蓋と対になる正極間で発生する制動トルクである。 T_{B3} はせん断面が外径 d_3 、内径1.5[mm]の中空円であり、微小面積に働くトルクを積分する形で計算する。図 19 にせん断面の微小区間の面積を示す

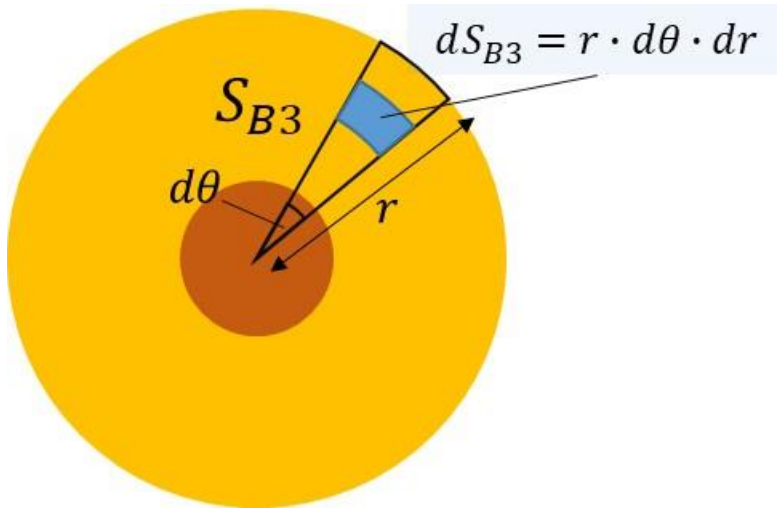


図 19 せん断面の微小面積 dS

せん断面の微小区間に働く制動トルク dT_{B3} は以下の式(10)のように与えられる。

$$dT_{B3} = dS_{B3} \cdot \tau \cdot r = r^2 \cdot \tau \cdot d\theta \cdot dr \quad (11)$$

さらにせん断速度 $\dot{\gamma}[\text{s}^{-1}]$ は以下の式(12)で示される。

$$\dot{\gamma} = \frac{r\omega}{h} \quad (12)$$

ここで円盤の $\theta[\text{rad}]$ の範囲は $0 \sim 2\pi$ 、 $r[\text{mm}]$ の範囲は $0.75 \sim d_3$ である。したがってせん断面に働く制動トルク T_{B3} は式(1)、式(11)、式(12)より以下の式(13)で示される。

$$\begin{aligned}
T_{B3} &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\frac{1.5}{2}}^{\frac{d_3}{2}} r^2 \cdot \tau \cdot dr = \tau \cdot 2\pi \int_{\frac{1.5}{2}}^{\frac{d_3}{2}} r^2 \cdot dr \\
&= 2\pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{\omega}{h} \int_{\frac{1.5}{2}}^{\frac{d_3}{2}} r^3 \cdot dr + 2\pi \cdot \tau_0(E) \int_{\frac{1.5}{2}}^{\frac{d_3}{2}} r^2 \cdot dr \\
&= \frac{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \omega}{4h} \left(\left(\frac{d_3}{2} \right)^4 - \left(\frac{1.5}{2} \right)^4 \right) \\
&\quad + \frac{2\pi \cdot \tau_0(E)}{3} \left(\left(\frac{d_3}{2} \right)^3 - \left(\frac{1.5}{2} \right)^3 \right) \tag{13}
\end{aligned}$$

以上のように、 $T_{B1}, T_{B2}, T_{B3} [\text{N} \cdot \text{mm}]$ は表され、全体の制動トルク T_B は以下の式(14)で計算できる。

$$T_B = T_{B1} + T_{B2} + T_{B3} \tag{14}$$

またモータと ER ブレーキの回転系の回転運動方程式は式(15)で表す。

$$\begin{aligned}
J\dot{\omega} &= T_m - T_f - T_B \\
&= K_p(\omega_0 - \omega) - T_B \tag{15}
\end{aligned}$$

ここで T_m は DC モータの駆動トルク、 T_f は摩擦トルク、 J は回転系全体の慣性モーメントであり、 ω_0 はモータの初期回転速度である。また K_p は DC モータの回転速度の変化とそれに伴うモータへ流れる電流の増減によるモータの駆動トルクの変化の比であり、マイクロマウスへ ER ブレーキとともに搭載することを想定している DC モータ(faulhaber1717T006SR)のカタログから、定格電圧の6 Vを印加していると考えたとき、 $K_p = 3.6 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{mm}/(\text{rad/s})$ である。ER 流体の基底粘度の高さ、電極間の距離の小ささなどからブレーキ内部の ER 流体の流れは層流であると想定される。

回転系全体の慣性モーメント $J [\text{g} \cdot \text{mm}^2]$ は DC モータの回転子の慣性モーメントが $58 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$ 、ER ブレーキの回転子である正極の慣性モーメントは5か所に分けて数学モデルを立てた。図 20 に色分けして、5 か所の慣性モーメント J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 を示す。

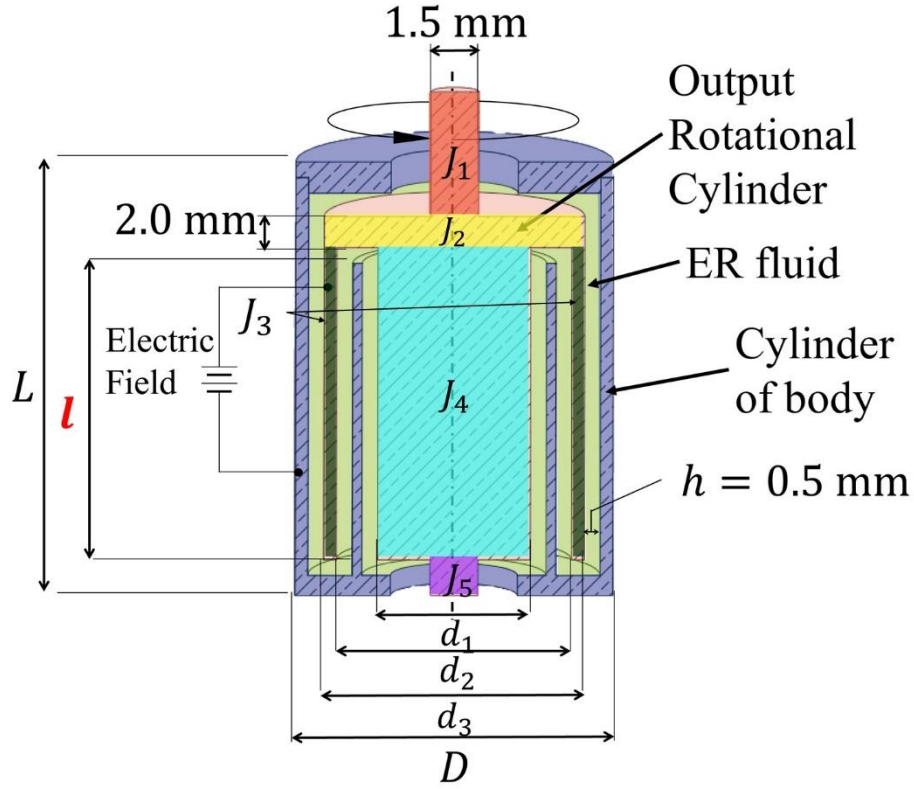


図 20 ER ブレーキの慣性モーメント

また以下の式(16)～式(20)にそれぞれの数式を示す。

$$J_1 = \frac{23\pi}{2} \cdot \left(\frac{1.5}{2}\right)^4 \cdot 8.5 \cdot 10^{-3} \quad (16)$$

$$J_2 = \pi \cdot \left(\frac{d_3}{2}\right)^4 \cdot 8.5 \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

$$J_3 = \frac{(l+h)\pi}{8} \cdot \left(\left(\frac{d_3}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2}{2}\right)^2\right)(d_3^2 + d_2^2) \cdot 8.5 \cdot 10^{-3} \quad (18)$$

$$J_4 = \frac{(l+h)\pi}{2} \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right)^4 \cdot 8.5 \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

$$J_5 = \frac{3\pi}{2} \cdot \left(\frac{1.5}{2}\right)^4 \cdot 8.5 \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

なお、 $8.5 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ はER ブレーキの材料として想定している黄銅の比重である。モータの回転子の慣性モーメント $58 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$ と式(16)～式(20)の総和が回転系全体の慣性モーメント J となる。

シミュレーションモデルでは、式(15)より計算された回転系の角加速度 $\dot{\omega}$ を積分し、角速度 ω を求め、求めた角速度 ω を式(15)にフィードバックするという流れを数 ms 単位で繰り返している。

4.2.2 シミュレーションの条件

ER ブレーキのシミュレーションを行う目的は、ER ブレーキの適切な形状パラメータを設計値として選択するための比較、検討を行うためであるが、ここでは適切であることの条件について説明する。

シミュレーションでは、はじめにER ブレーキの形状パラメータの $l[\text{mm}]$ を固定値として設定する。 $l[\text{mm}]$ を定数として、 $d_1, d_2, d_3[\text{mm}]$ の値の組み合わせを以下の条件に適うように調整する。

- 1) モータには定格電圧である6 Vを印加する。 $(\omega_0 = 1466 \text{ rad/s})$
 - 2) ER ブレーキ1 kVの電圧を印加したとき、回転系は回転を停止すること。
 - 3) ER ブレーキに電圧を印加しておらず、回転系がER 流体の基底粘度 μ_0 の影響のみをER ブレーキから受けているときの回転系の回転速度 $\omega_B[\text{rad/s}]$ が1),2)の条件を満たした上で最大であること。
 - 4) 金属加工の精度限界を考慮し、 d_1, d_2, d_3 の最小単位は0.1 mm であること。
 - 5) 金属の厚みは0.4 mm以上とし、電極間距離 $h[\text{mm}]$ は0.5 mm であること。
- これらの条件を満たすとき、 d_1, d_2, d_3 の組み合わせは一意に決定する。

また、 l はマイクロマウスに搭載することを考慮したときの大きさの許容範囲をもとに10,12,14～20 mmの範囲を調査した。10～14 mmの範囲は傾向の調査という意味合いが強く、2 mm 単位で変化させ、14～20 mmの範囲では形状パラメータの詳細な比較のため1 mm 単位で変化させている。

以上の条件をもとにシミュレーションで想定している回転系の状況を図 21 に示す。シミュレーションの時間 $t[\text{s}]$ は0.12 s 間である。そのうち0～0.05 s はフェーズ 1、0.05～0.12 s はフェーズ 2 としている。 $t = 0 \text{ s}$ のとき、モータは初期回転速度 $\omega_0 = 1466 \text{ rad/s}$ で回転しており、 $t = 0.05 \text{ s}$ で回転系はER 流体の基底粘度 μ_0 の影響により回転速度を ω_B まで低減させている。フェーズ 1 では $t = 0 \sim 0.05 \text{ s}$ の間における基底粘度による回転速度の減少を観察する。また $t = 0.05 \text{ s}$ の時点でER ブレーキには1 kVの電圧を印加する。これにより、回転系の回転速度は $\omega_B[\text{rad/s}]$ から0 rad/sへ回転を停止させる。フェーズ 2 ではこのときの回転運動の変化の様子をシミュレーション時間が終了するまで観察する。

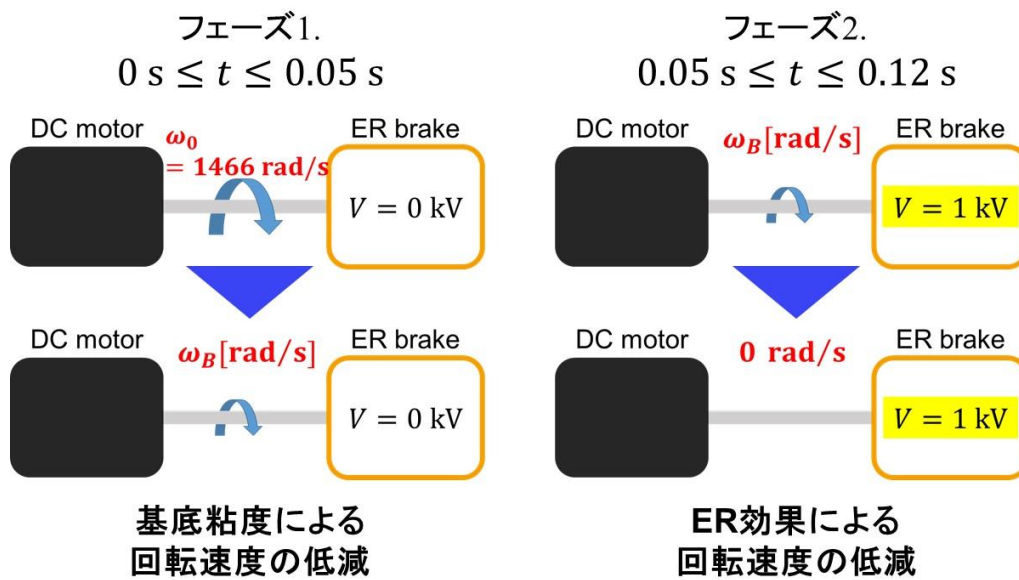


図 21 シミュレーションの想定状況

4.2.3 シミュレーション結果の比較と試作する ER ブレーキの設計値の検討

図 22 に $l = 10, 15, 19$ のときのシミュレーションの結果を示す。

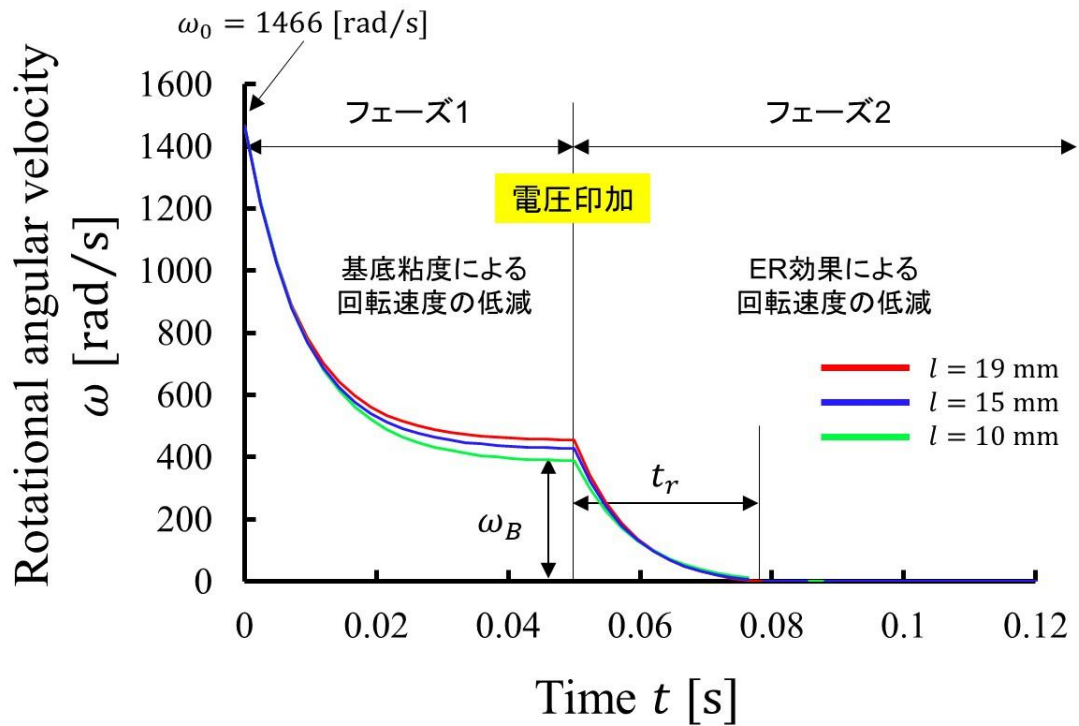


図 22 シミュレーションの結果グラフ

ここで t_r [ms] は ER ブレーキに電圧を印加してから、回転系の回転速度が初めて 0 rad/s になるまでの時間であり、ブレーキの応答速度と定義している。グラフからはブレーキの応答速度を明確に比較することは難しいが、ブレーキに電圧を印加していないときの回転速度 ω_B は l の大きいものほど速いことが分かる。次の表 1 にシミュレーションデータをまとめたものを示す。

ω_B [rad/s] は l [mm] に比例して速くなり、 t_r [ms] はまちまちではあるが、 $l = 19$ mm のときが最も短い。 J [$\text{g} \cdot \text{mm}^2$] も $l = 19$ mm のときが最も小さい。

シミュレーションの結果として二重円筒形 ER ブレーキの設計値としては、 $l = 19, d_1 = 4.8, d_2 = 7.4, d_3 = 8.2$ として決定した。

表 1 シミュレーションデータまとめ

l [mm]	10	12	14	15	16	17	18	19	20
d_1 [mm]	7	6.2	5.8	5.4	5.2	5	4.8	4.8	4.2
d_2 [mm]	9.6	9	8.4	8.2	8	7.8	7.6	7.4	7.2
d_3 [mm]	10.4	9.8	9.2	9	8.8	8.6	8.4	8.2	8.2
ω_B [rad/s]	382.7	398.5	418.3	425.6	431.1	438.2	446.7	453.2	456.9
t_r [ms]	33.3	29.9	30.2	29.9	28.5	28.3	29	28.1	30.6
J [g mm ²]	128.9	118.4	111.6	107.6	105.4	103.2	100.9	99.9	103.2

4.3 試作品

実際に試作した二重円筒形 ER ブレーキを図 23 に示す。材質は想定していたように黄銅である。樹脂筐体は PLA 樹脂を使用して 3D プリンタで出力したもの、ER ブレーキブラシは DC モータのブラシ部分をそのまま転用している。

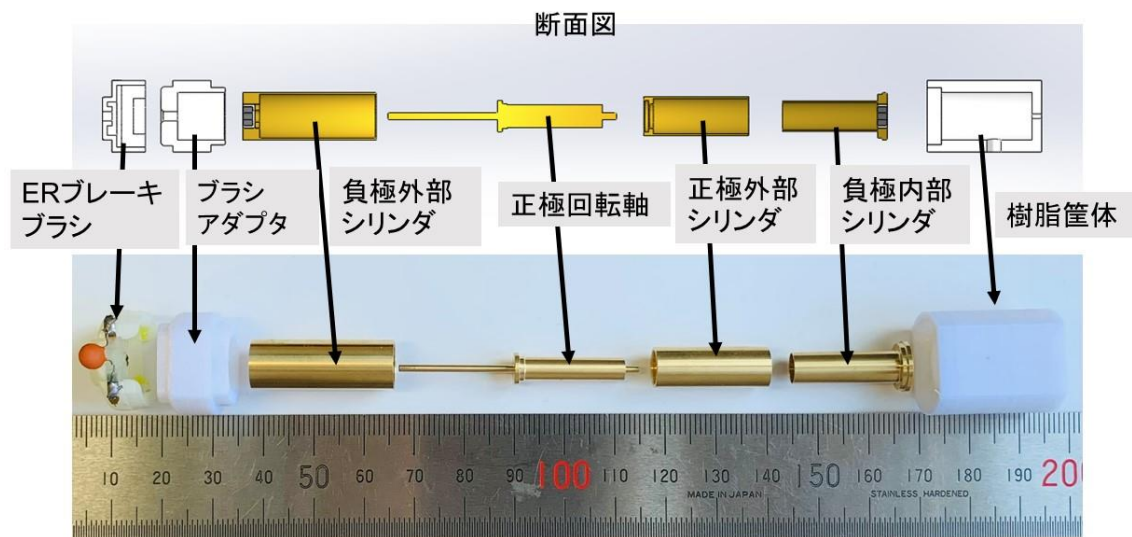


図 23 試作した ER ブレーキ

4.4 第4章のまとめ

第4章ではERブレーキの設計のために制動トルクと慣性モーメントの数学モデルを構築し、シミュレーションを行った結果について説明した。

制動トルクのモデルを回転系の回転運動方程式にあてはめ、運動方程式から角加速度を計算し、それを積分することで、回転速度を求めることができる。

シミュレーションでは設計値の適切なパラメータを定義するための条件を設けた。これにより二重円筒形ERブレーキの形状パラメータは一意に決定できる。

実際にシミュレーションでは $l = 19, d_1 = 4.8, d_2 = 7.4, d_3 = 8.2$ として設計値を決定し、適切なパラメータを得ることができた。

最終的に試作したERブレーキを図23に示した。

第5章 二重円筒形 ER ブレーキの評価実験

5.1 実験装置

図 24 に評価実験のための装置の構成を示す。中央にはエンコーダ付き DC モータと ER ブレーキが軸を機械的に接続されている。ER ブレーキの正極と負極には高電圧を印加するための電源が接続されており、エンコーダ付き DC モータ(faulhaber1717T006SR)へはモータ用の電源とエンコーダ用の電源がそれぞれ接続されている。エンコーダから回転系の回転速度を計測するためにマイクロコンピュータで回転をカウントし、シリアルコンバータでシリアル化したデータを PC に送る。PC にはターミナルソフトとして TeraTerm をインストールする。TeraTerm で受け取った回転のパルス数を MATLAB によって変換、保存し、グラフとして出力する。この MATLAB のデータを用いて性能の評価、考察を行う。

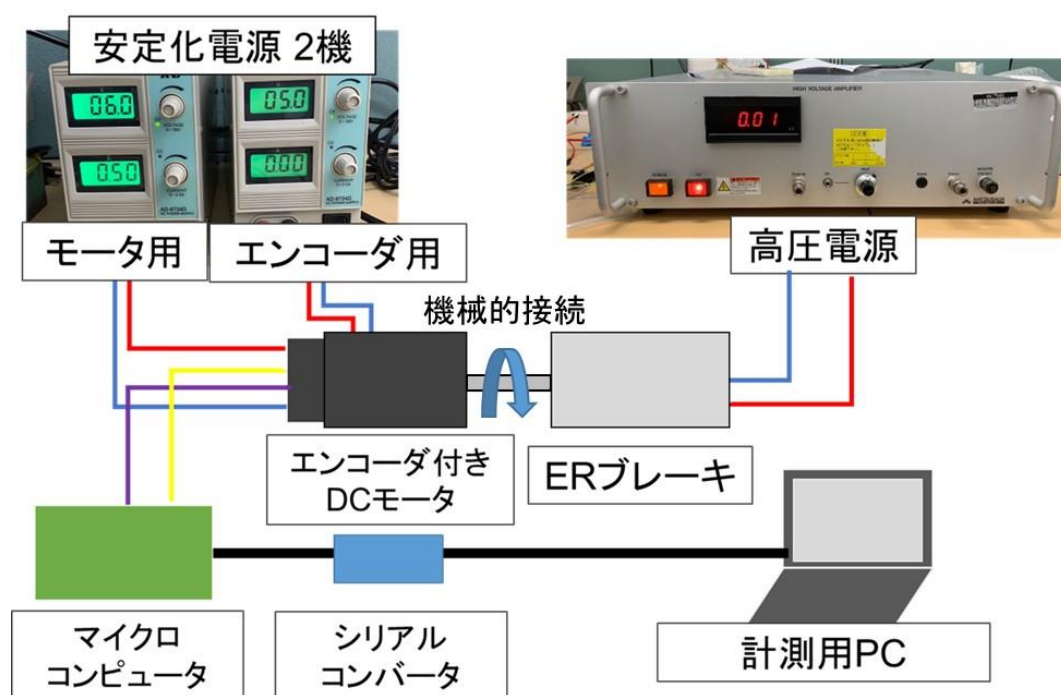


図 24 実験装置の構成

図 25 に実験で使用するマイクロコンピュータを示す。このマイコンの性能として以下の点が挙げられる。

- 1) 「位相計数」機能 2ch
- 2) 動作クロック:100MHz
- 3) 浮動小数点演算ユニット：単精度浮動小数点演算機

4) RAM:SRAM 最大 96KB

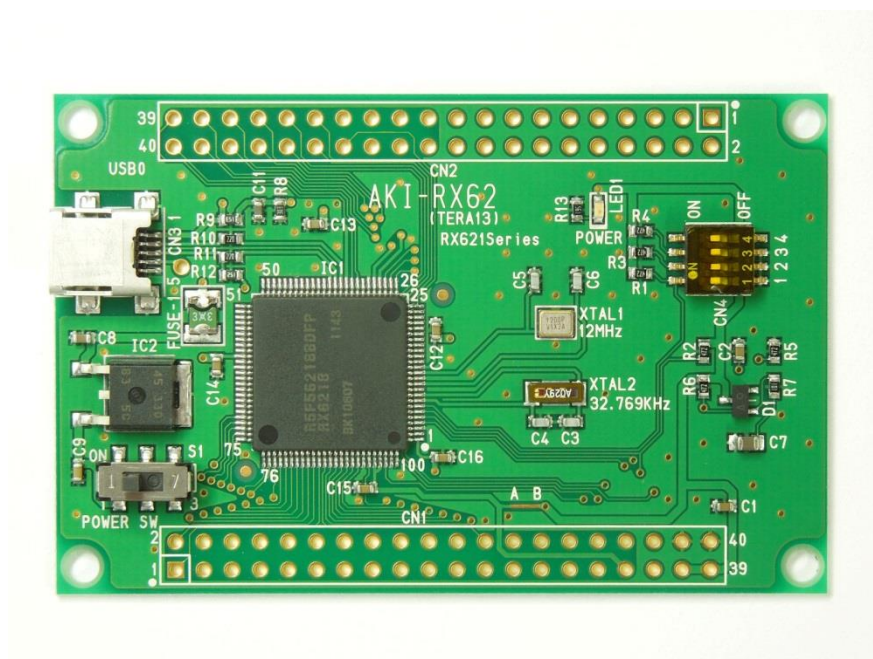


図 25 使用するマイコン(Runesius RX621)

また図 26 に使用するシリアルコンバータの FT232RL を示す。これはシリアルコンバータとしてはメジャーなもので秋月電子通商でも購入できる。



図 26 使用するシリアルコンバータ(FT232RL)

5.2 実験方法

図 27 に実験方法を示す。実験時間 $t = 15 \text{ s}$ である。初期状態 $t = 0 \text{ s}$ のときモータと ER ブレーキには電圧を印加していない。 $t = 2 \text{ s}, t = 5 \text{ s}, t = 8 \text{ s}$ の時点でアクションがある。 $t = 2 \text{ s}$ のとき、モータに定格電圧の 6 V を印加する。このとき、回転系は回転運動を始める。つづいて $t = 5 \text{ s}$ のとき、高圧電源から ER ブレーキへ電圧を印加する。ER 効果により回転系の回転速度は低減する様子が見られると考えられる。 $t = 8 \text{ s}$ のとき、ER ブレーキの電源を切る。この状態のまま $t = 15 \text{ s}$ まで回転運動の速度を計測する。

- $t = 0 \text{ s}$ のときモータ、ERブレーキには電圧を印加していない
- モータには定格電圧である 6 V を印加

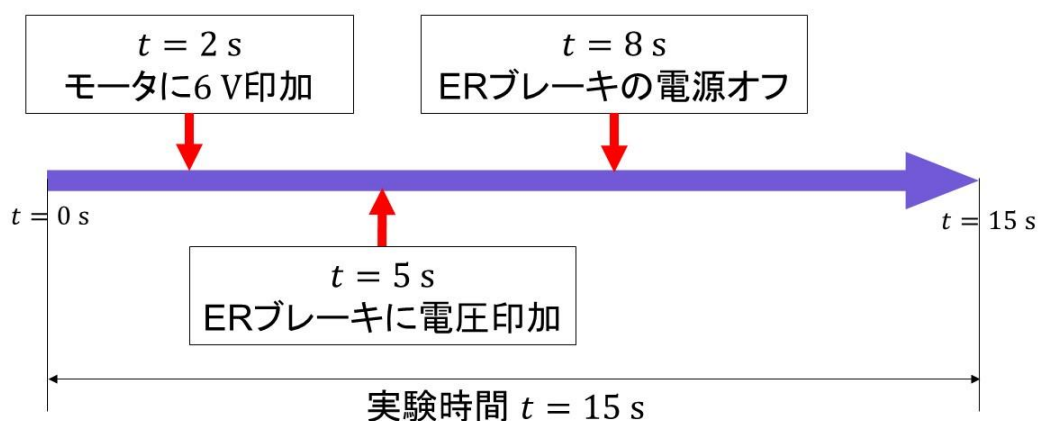


図 27 実験方法

5.3 実験結果

図 28 に ER ブレーキを接続していないときのモータに定格電圧 6 V を印加したときの回転運動を示す。 $t = 2 \text{ s}$ のとき、モータに 6 V の電圧を印加すると回転速度は 1528 rad/s まで上昇する。また、 $t = 8 \text{ s}$ のときモータの電源を切ると回転は 2.556 s で停止する。回転が停止する途中で少し回転速度が回復しているのは、モータの逆起電力によるものである。

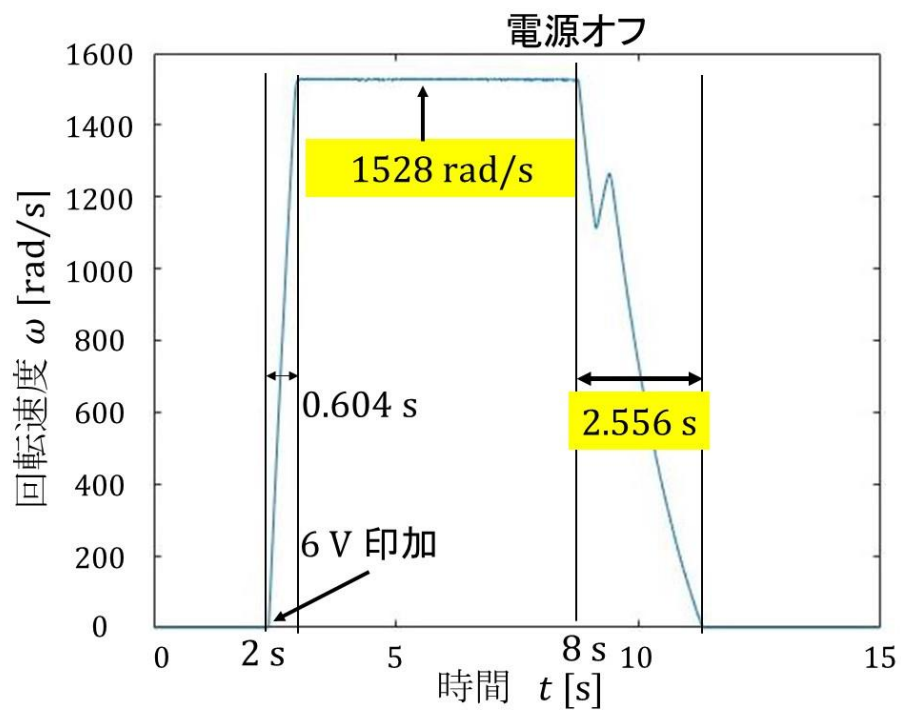


図 28 モータ(faulhaber1717T006SR)の回転運動

図 29 にはモータを ER ブレーキと接続したときの回転速度を示す。ER ブレーキと DC モータを接続すると回転速度は1528 rad/sから752 rad/sまで低減することが分かる。また、立ち上がりの時間が0.164 sと速くなっているが、これは回転の最高速度が低くなったためそれに到達する時間も短くなったためであると考えられる。

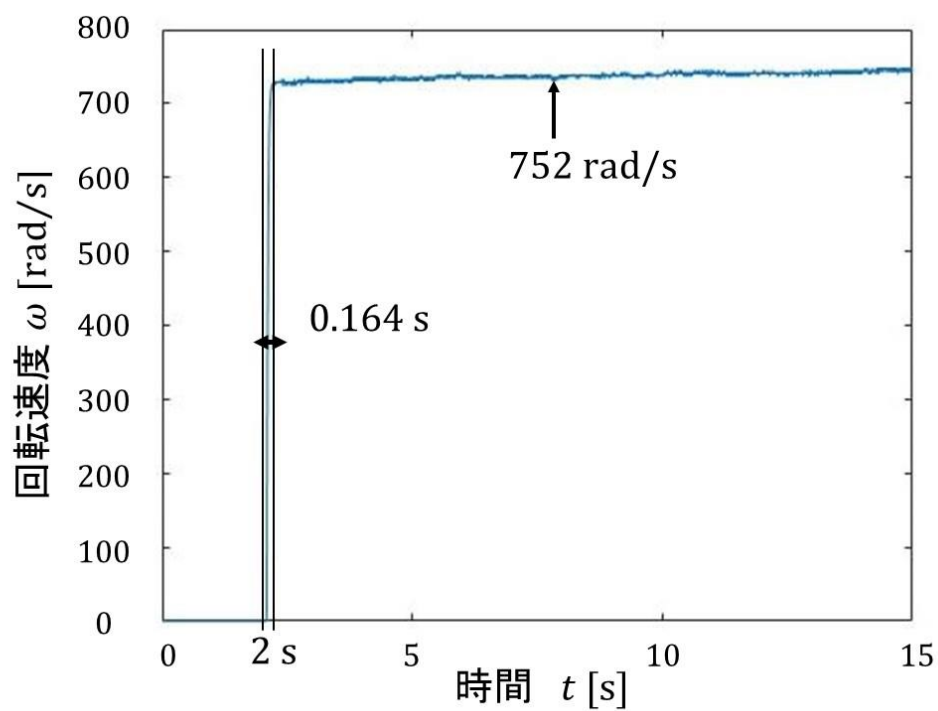


図 29 モータと ER ブレーキと接続したときの回転速度

ER ブレーキに印加する電圧は0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 kVの5通りである。図 30～図 34 にそれぞれの電圧に対する回転速度を示す。

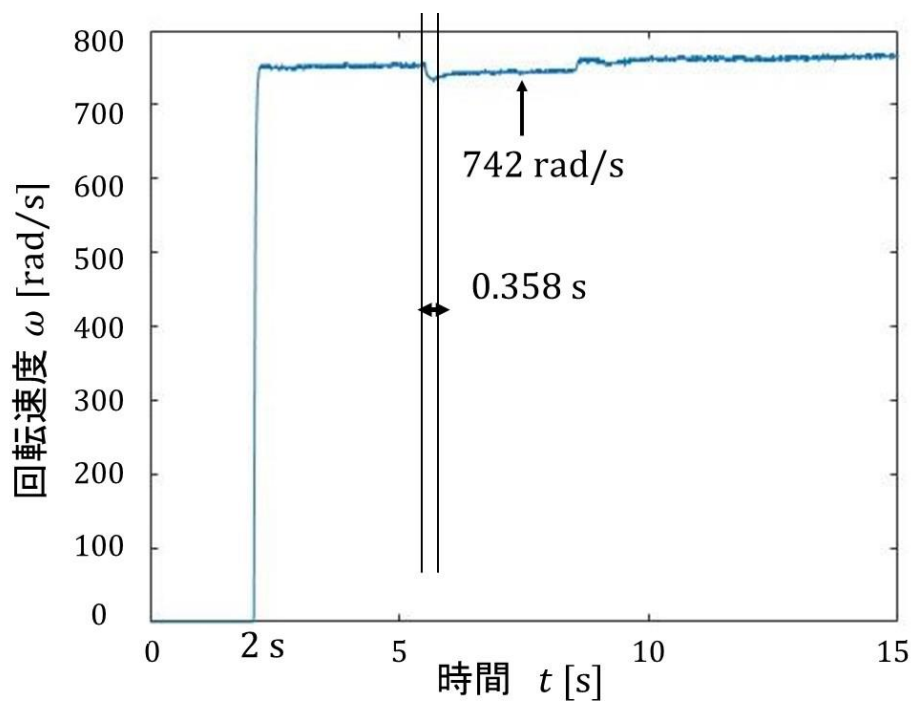


図 30 ER ブレーキに 0.2 kV 印加したときの回転運動

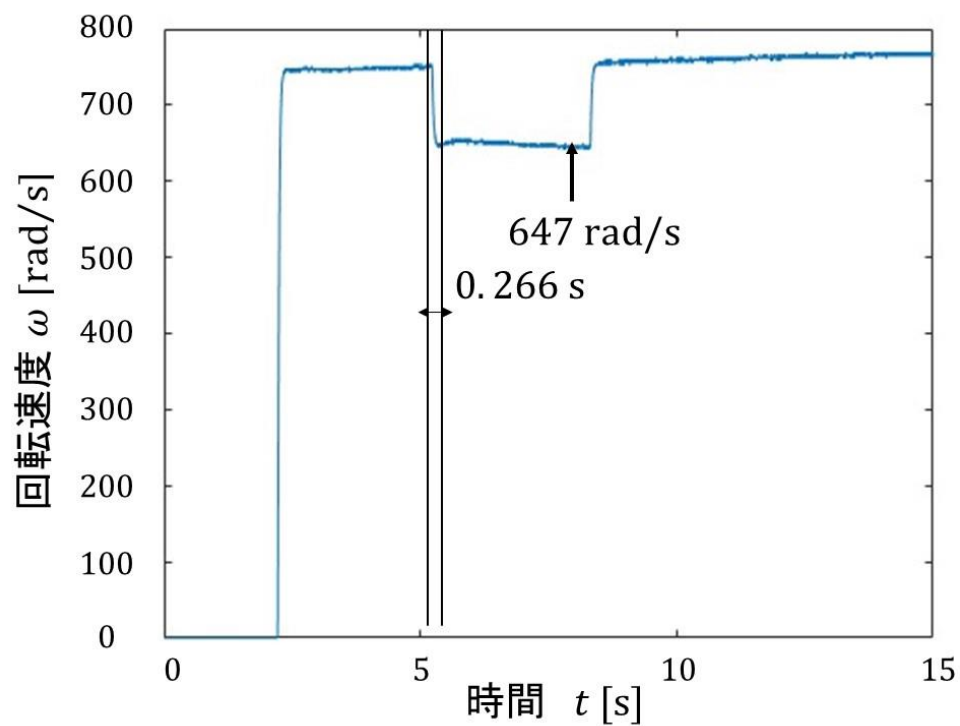


図 31 ER ブレーキに 0.4 kV 印加したときの回転速度

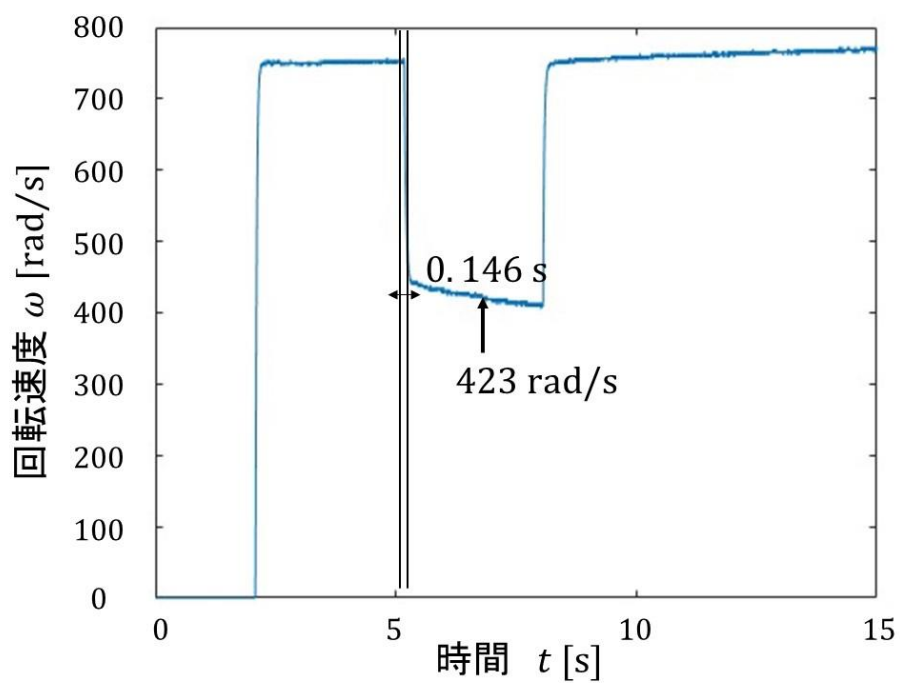


図 32 ER ブレーキに 0.6 kV 印加したときの回転速度

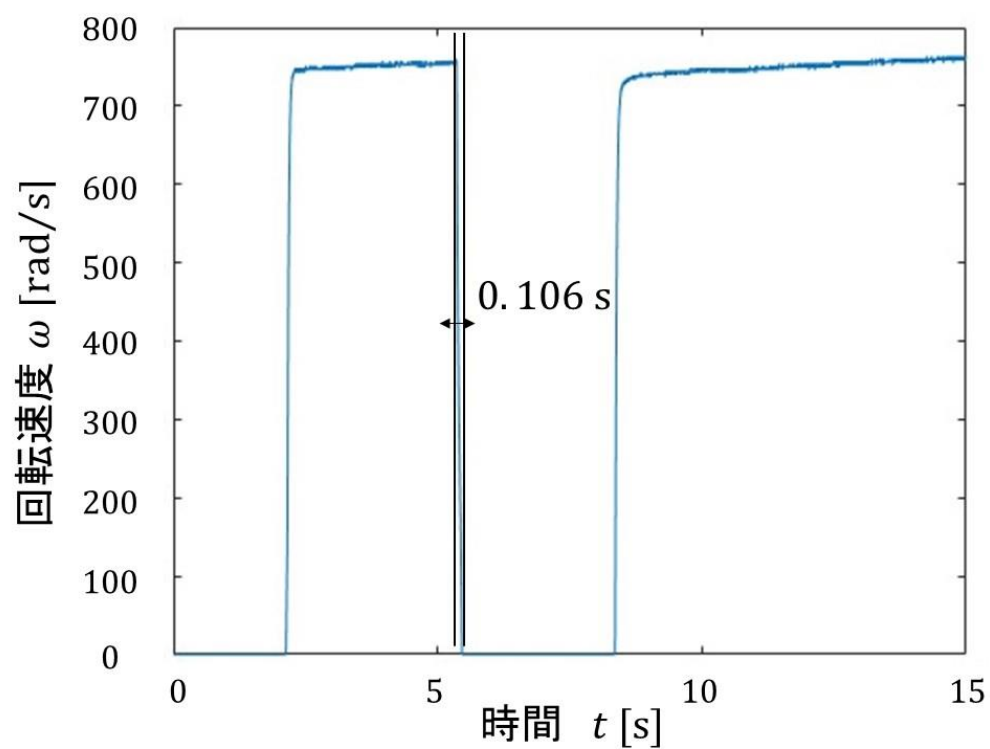


図 33 ER ブレーキに 0.8 kV 印加したときの回転速度

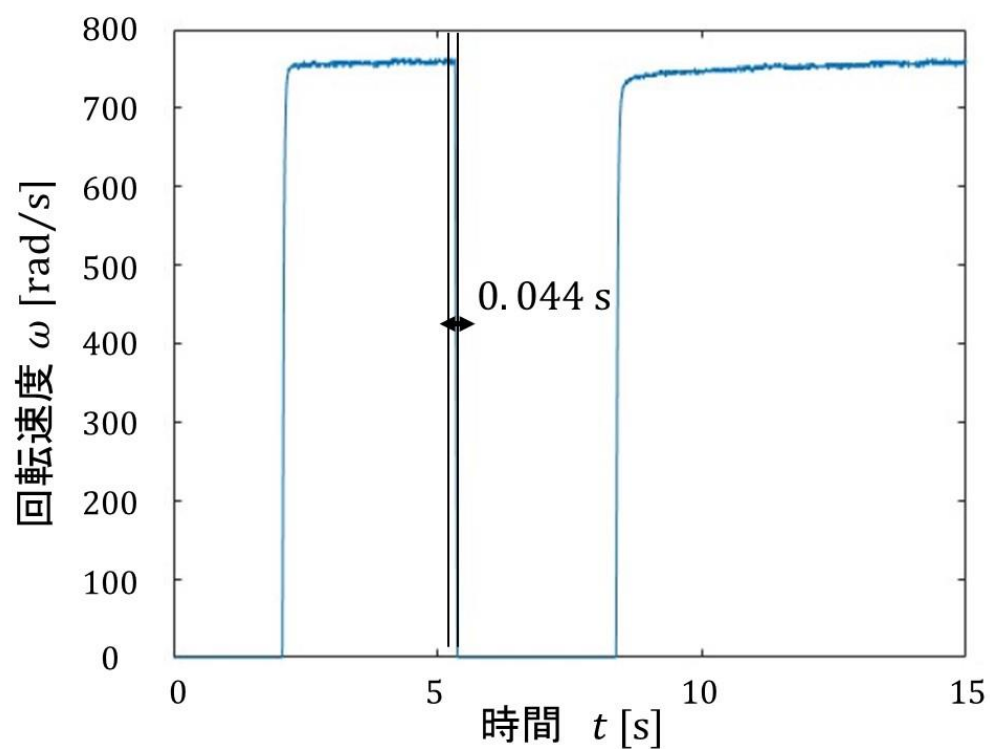


図 34 ER ブレーキに 1.0 kV 印加したときの回転速度

表 2 にデータをまとめたものを示す。制動時間は電圧を印加してから回転速度が電圧印加時回転速度へと落ち着くまでの時間である。

表 2 実験データ

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

5.4 考察

実験結果をまとめると、印加する電圧は大きくなるにつれて制動時間は短くなる。くわえて**0.8 kV**以上の電圧を印加したときの回転は完全に停止することが分かった。また実験全体を通して、軸心はぶれずに ER ブレーキの正極は安定して回転していた。また ER ブレーキを使ってモータの回転を停止させると、モータ単体の停止時間よりも**2.5 s**ほど速くなることから ER ブレーキの効果を確認できた。また、多重円盤形ではモータの回転を停止させるために**3.7 kV**必要であるのに対して、二重円筒形 ER ブレーキは**0.8 kV**以上でモータを停止させることができることから必要電圧の低減を確認できた。

これらの結果から、実験では研究目的を達成できていることが分かった。

5.5 第 5 章のまとめ

第 5 章では、試作した ER ブレーキの性能を評価する実験を行い、研究目的を達成できているかの確認を行った。

はじめに評価実験の実験装置の構成を説明した。ER ブレーキと DC モータは機械的に接続されており、エンコーダを通して回転系の回転速度を計測している。

ER ブレーキには 5 段階の電圧を印加し、その時の回転速度の低減を計測する。その結果を示し、電圧が大きくなるにつれて制動時間が短くなることや、軸心が安定していること、モータの回転を停止させるために印加する電圧は**0.8 kV**で良いことを示し、研究目的を達成していることが分かった。

第 6 章 結論

6.1 研究の成果

本研究では多重円盤形 ER ブレーキで挙げられた課題を解決することにあつた。多重円盤形 ER ブレーキにて挙げられた課題には以下の 2 点があつた。

- 1) 軸心が安定せず、ER ブレーキの制動力が安定しないこと。
- 2) 回転系の回転運動を停止させるために必要な印加電圧が 3.7 kV 以上と、マイクロマウスに搭載することを考えると大きすぎることを。

これを受けて二重円筒形 ER ブレーキではその課題の解決を研究目的としてそのシミュレーション、試作を行った。

シミュレーションでは、 $l = 19 \text{ mm}$, $d_1 = 4.8 \text{ mm}$, $d_2 = 7.4 \text{ mm}$, $d_3 = 8.2 \text{ mm}$ として設計値を決定し、適切なパラメータを得ることができた。

評価実験では試作した ER ブレーキが研究目的を達成していることを確認できた。

6.2 今後の展望

今後の展望としては、今回試作した ER ブレーキを DC モータと一体化し、高性能化を図ることを考えている。またマイクロマウスに搭載することで ER ブレーキの有効性を確認することを考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 外川 貴規, 小形自律移動ロボットのための機能性流体を用いた制動装置に関する研究, 法政大学大学院博士課程審査学位論文(2021)
- 3) 小島 宏一, 加藤 雄資, 福井 善朗, 中村 文一, 開かれた環境がはぐく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, pp265-270, 2011
- 4) 嶋原 瑞貴, 機能性流体を用いた小形制動装置に関する研究-小形ロボット用制動装置の設計と評価-, 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科卒業論文 (2019).
- 5) 佐藤 尚吾, 機能性流体を用いた小形制動装置の開発-新しいER ブレーキの設計と試作-, 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科卒業論文(2020)
- 6) 佐藤 悠太, 機能性流体を用いた小形制動装置の開発-電源回路の設計と数値シミュレーション-, 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科卒業論文 (2020)
- 7) 橘 拓真, 小形ロボット搭載用 ER ブレーキに関する研究, 法政大学大学院デザイン工学研究科システムデザイン専攻修士学位論文(2019)
- 8) 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 pp979-982, 2009
- 9) 中野 政身, 機能性流体の現状と今後の展望, 精密工学会誌 Vol.72, No7, 2006, pp813-816
- 10) 横田 眞一, 機能性流体を応用したマイクロアクチュエータ, 日本 AEM 学会誌, Vol.14.No.2(2006), pp180-185
- 11) 斎藤 剛, 杉本 旭, ER 流体の制御への応用とその歴史, J.SICE Vol.34 No.9 Sep.1995, pp702-706
- 12) 青山 藤詞郎, 柿沼 康弘, 平成 19 年度の機能性流体分野の研究動向, 慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科展望, E19-E22
- 13) 井上 昭夫, 均一系電気粘性(ER)流体の紹介と応用事例, 精密工学会誌, Vol.72, No.7, 2006, pp821-825
- 14) 花岡 良一, 堀田 浩司, 安斎 秀伸, 桜井 宏治, 黒田 真一, 直流電界下における分散系 ER 流体の内部構造と ER 特性, T.IEE Japan, Vol.119-A, No.6, 1999, pp750-757
- 15) 杉本 旭, 池田 博康, 電気粘性流体(ER 流体)の特性とロボット制御への応用について, 混相流 7 巻 1 号(1993), pp23-32

- 16) 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
- 17) 森下 信,機能性材料としての ER 流体,日本造船学会誌 第 763 号(平成 5 年 1 月)
- 18) S.S.Gawade, A.A.Jadhav, A Review On Electrorheological (ER) Fluids And It's Applications, IJERT, Vol.1, pp.1-7 (2012).
- 19) 大崎 俊行,石野 裕一,電気粘性流体の開発と応用,日本造船学会誌,第 784 号(平成 6 年 10 月),pp18-21
- 20) 杉本 旭,池田 博康,電気粘性流体(ER 流体)の特性とロボット制御への応用について,混相流 7 巻 1 号(1993),pp23-32
- 21) 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.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なご支援、終始熱心なご指導を頂いた法政大学デザイン工学部システムデザイン学科の田中 豊教授に心から感謝申し上げます。また、学会発表にあたり、発表についてのアドバイスなど丁寧にご指導を頂いた法政大学田中研究室 OB の外川 貴規氏に深く感謝申し上げます。

研究を行うにあたり、丁寧なご指導と多くの助言をいただきました、法政大学田中研究室修士2年の佐藤 悠太氏に心から感謝申し上げます。

ER ブレーキの試作にあたり、寸法の決め方など多くの助言、金属の加工をしてくださった野方電機工業の皆様に感謝申し上げます。

シミュレーションモデル作成にあたり、多く助言とご指導をいただきました、The MathWorks の皆様に感謝申し上げます。

最後に、田中研究室の先輩方、同期ともに後輩の皆様には多くの激励と助言を頂きました。協力していただいた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。謝辞にかえさせていただきます。本当に有難うございました。

付録

実験で使用した粒子分散系 ER 流体の特性

提供：株式会社 ER テック

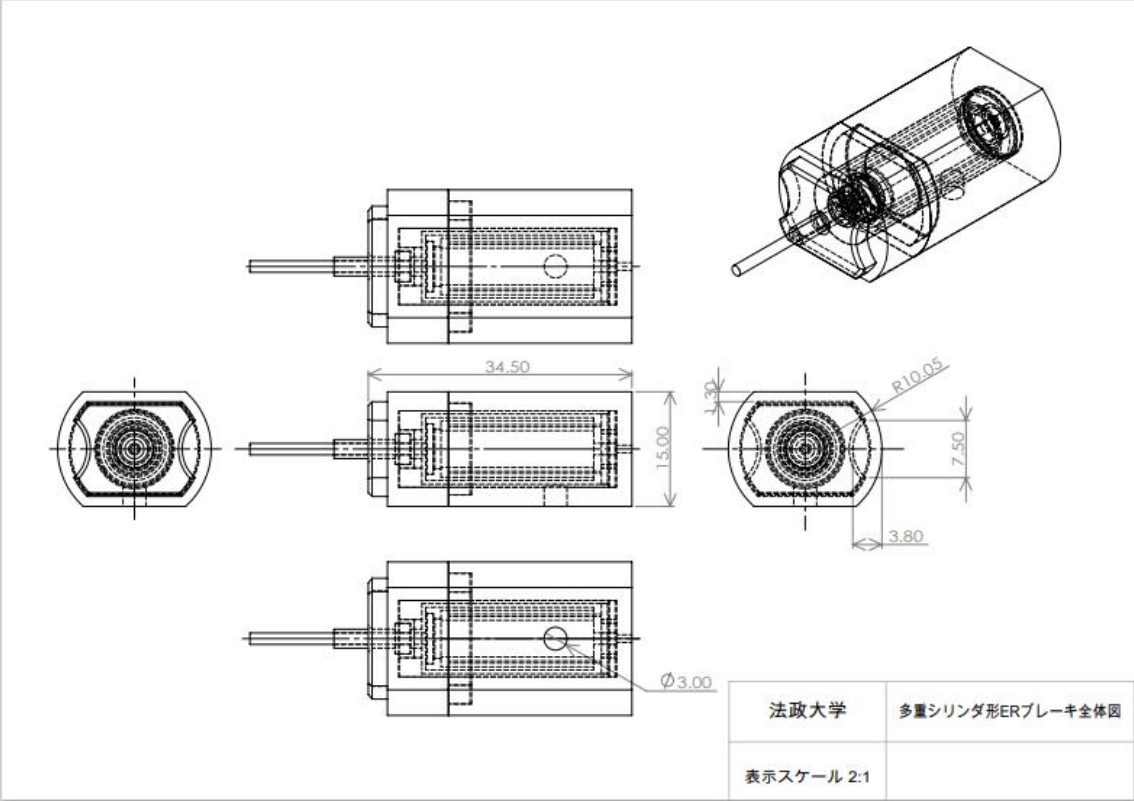
測定条件：二重円筒法 円筒径：40 mm 円筒長：30 mm

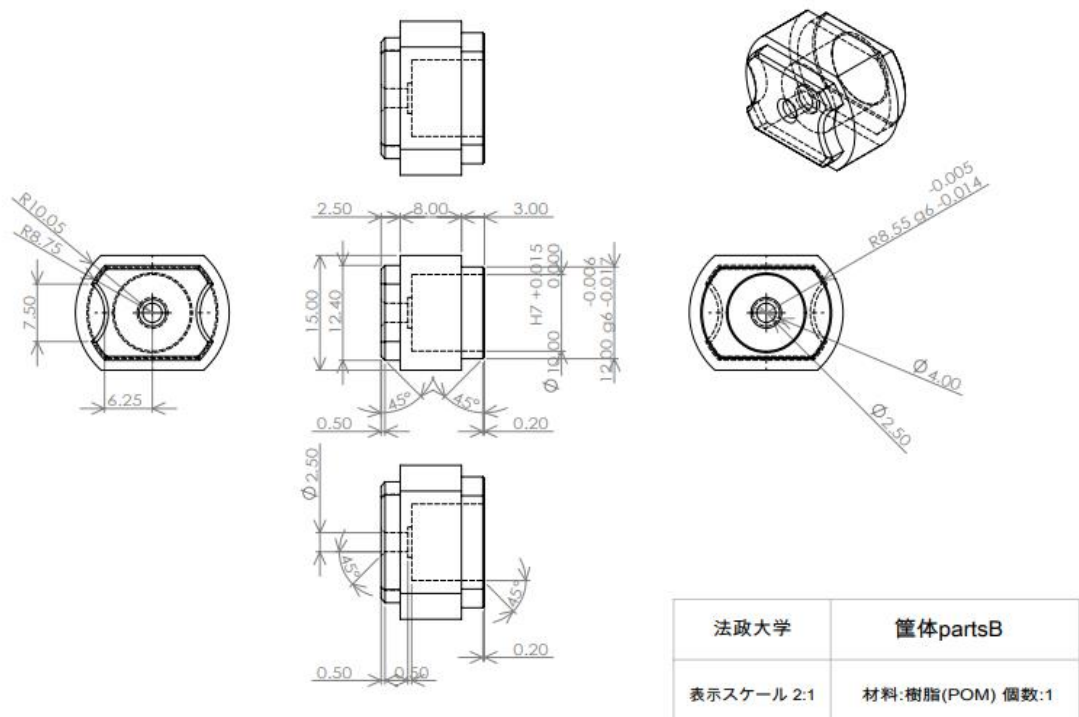
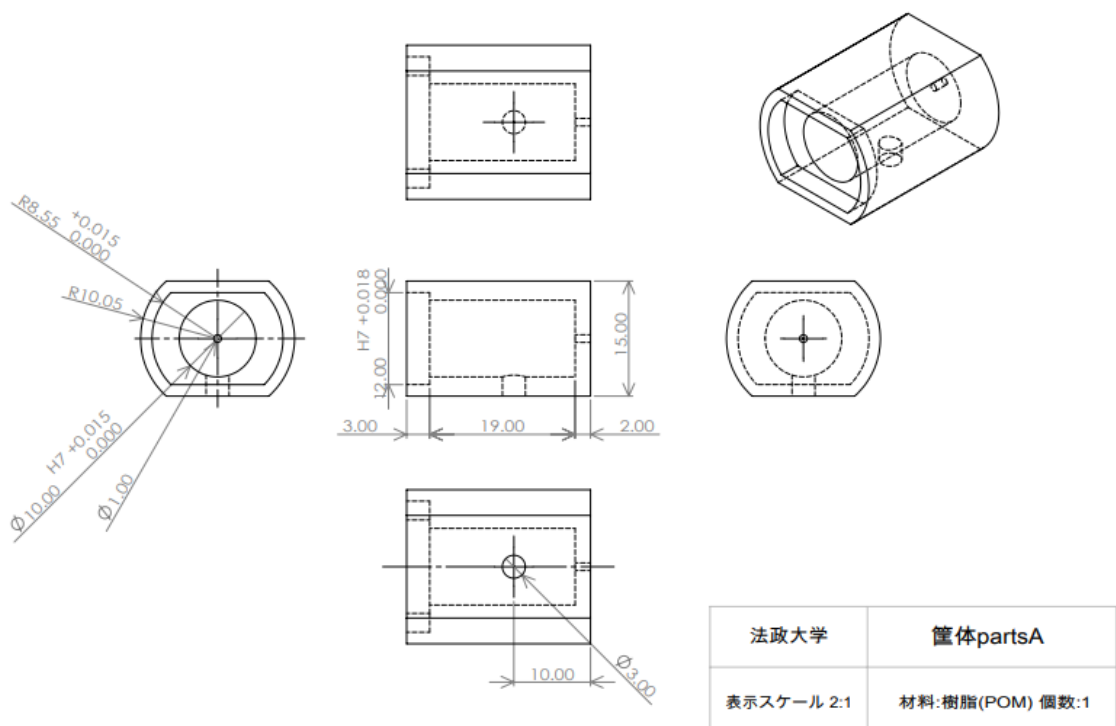
電極間隙：1.0 mm せん断速度：400 s⁻¹

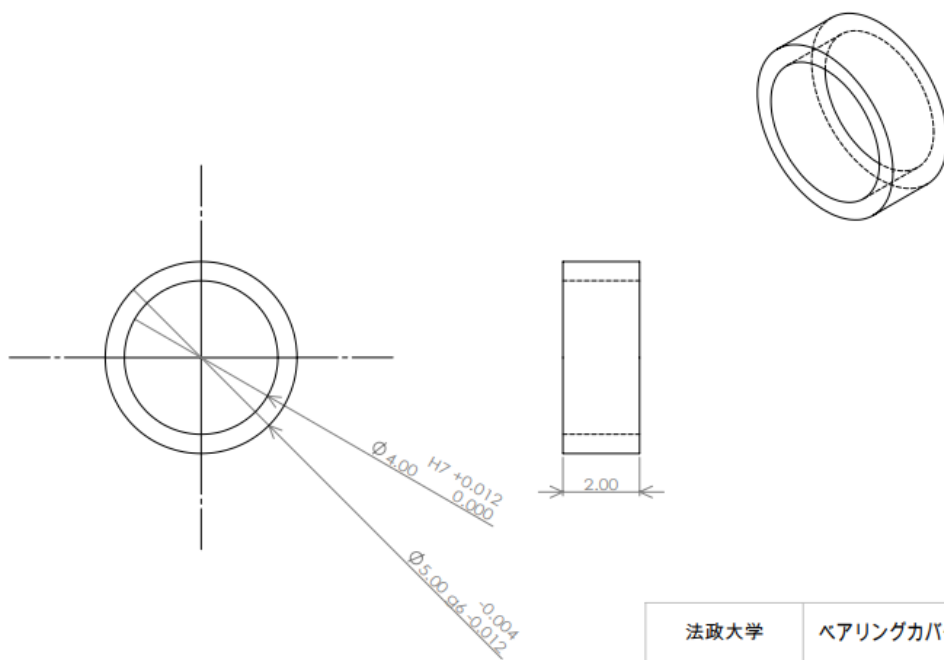
温度：常温(25℃)

印加電圧 [V/mm]	せん断応力 [Pa]	電流密度 [μA/cm ²]	流体比重
0	90	0	1.6
200	120	0	
400	180	0.01	
600	240	0.02	
800	320	0.04	
1000	420	0.08	
1200	510	0.16	
1400	700	0.41	
1600	830	0.65	
1800	1000	0.86	
2000	1190	1.1	
2200	1440	1.4	
2400	1700	1.6	

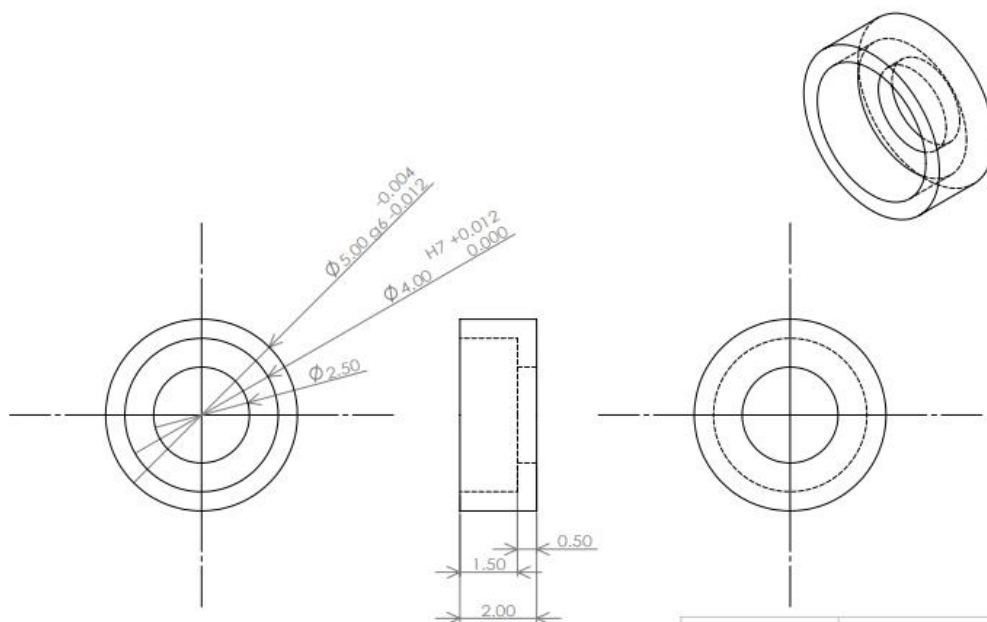
二重円筒形 ER ブレーキの図面



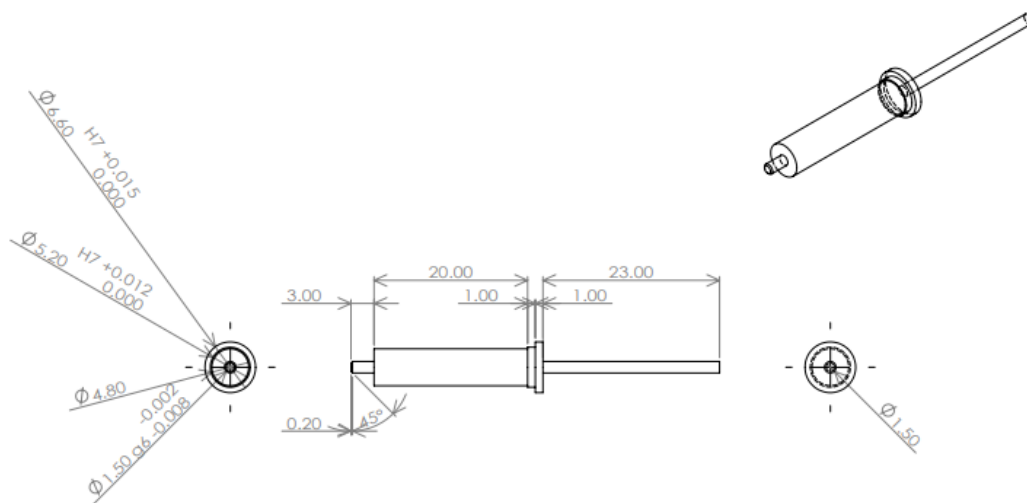




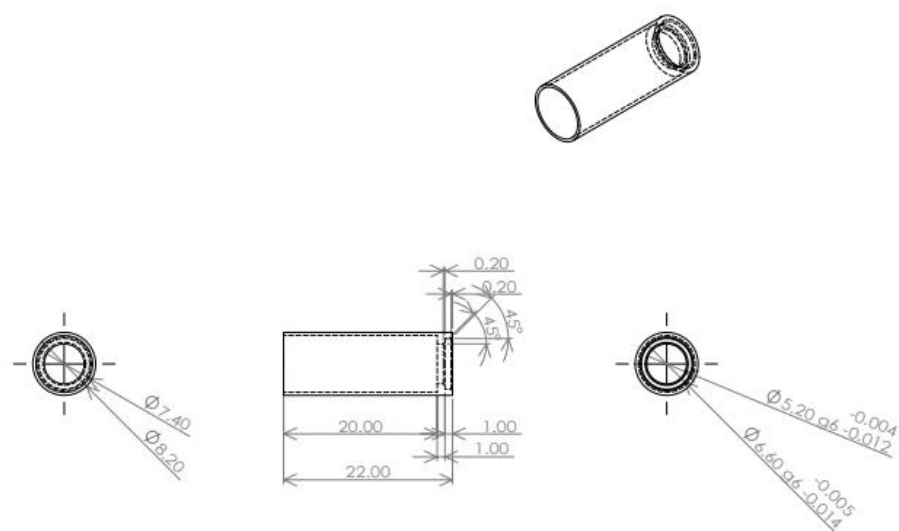
法政大学	ベアリングカバー(リング状)
表示スケール 10:1	材料:樹脂(POM) 個数:1



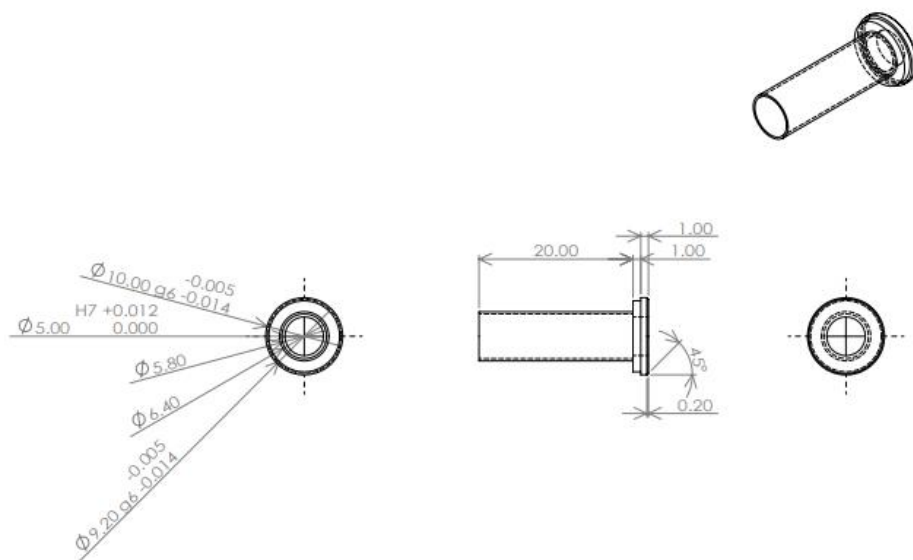
法政大学	ベアリングカバー(蓋つき)
表示スケール 10:1	材料:樹脂(POM) 個数:1



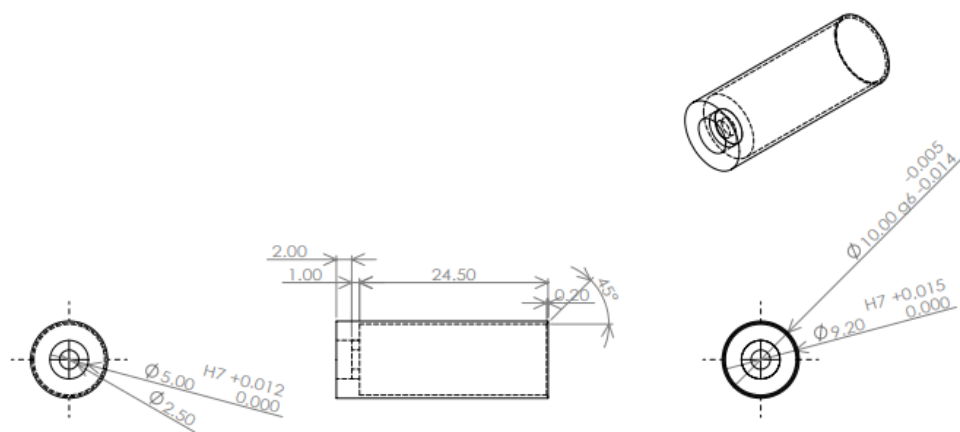
法政大学	正極軸partsA
表示スケール 2:1	材料: 銅 個数:1



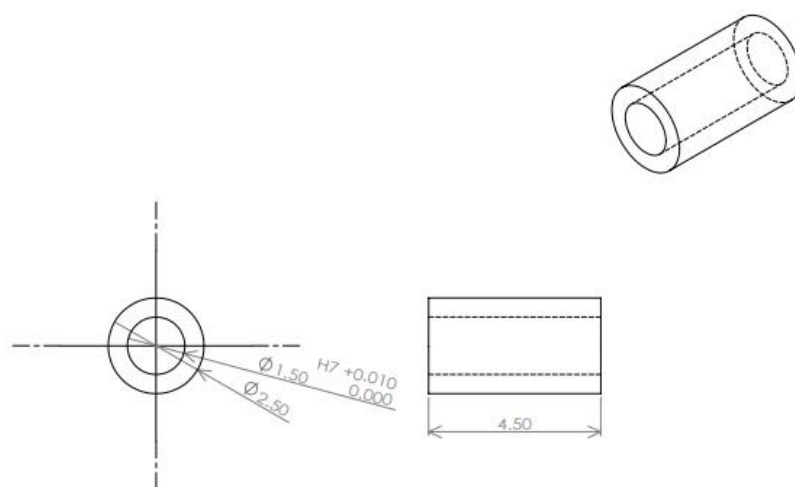
法政大学	正極軸partsB
表示スケール 2:1	材料: 銅 個数:1



法政大学	負極partsA
表示スケール 2:1	材料: 銅 個数:1



法政大学	負極partsB
表示スケール 2:1	材料: 銅 個数:1



法政大学	整流子リング
表示スケール 10:1	材料: 銅 個数:1