

ER流体とその応用開発の現状

株式会社ERテック 代表取締役 井上昭夫

1. はじめに

ER(Electro Rheology)流体とは、電圧をかけると粘性が瞬時に変化し、その変化が大きくかつ可逆的である流体であり、粒子系と均一系に分類される。

前者は固体の誘電性微粒子を絶縁油に分散させた流体であり、後者は固体の微粒子を含まず液晶や極性高分子液体のように液状物質のみからなる流体である。粒子系は更に粒子に水を含む含水系と含まない非含水系に分類される。前者は主にイオ的な分極を、後者は主に電子的な分極を利用するものである。後者は粘性変化(ER効果)が前者の含水系に比べ小さく、実用化できるレベルには至っていない。

均一系流体とその用途に関しては、既に報告¹⁾しているのので、ここでは含水粒子系流体とその応用例について報告する。

2. ER流体の特徴

1990年代には多くの化学系企業がER流体の開発に取り組んだが、自動車用途への応用が難しいと分かると撤退した。現在ER流体を販売する企業は独逸²⁾や英国³⁾で僅かにあるものの、国内では弊社のみと言ってよい。そこで弊社の流体(粒子系タイプA)を例に粒子分散系ER流体の特徴を紹介する。

a) せん断応力は電界強度にほぼ比例し、せん断速度には殆ど影響されない(図1および図2)

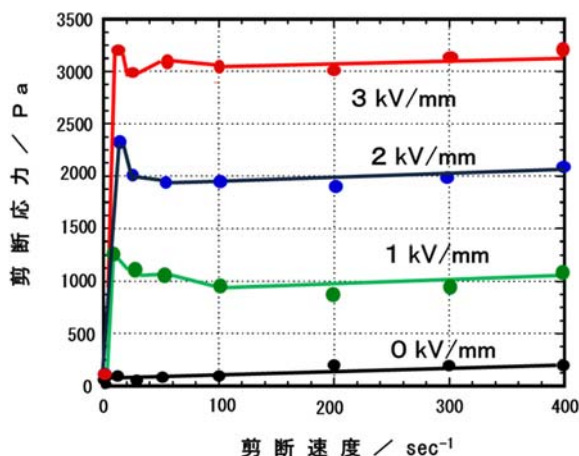


図1 ER流体のせん断応力特性

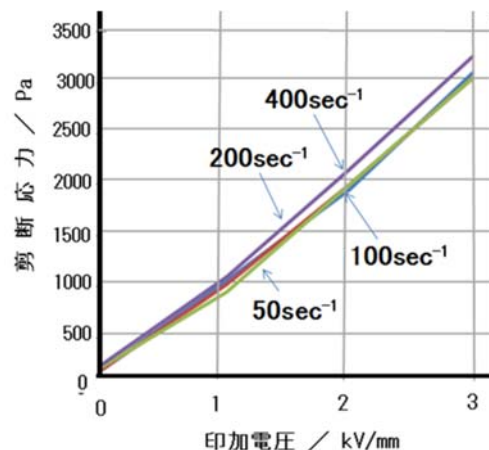


図2 ER流体のせん断速度

b) 電圧の印加で粘性が瞬時(数m秒)に変化する。電圧解除後も同様である(図3)。

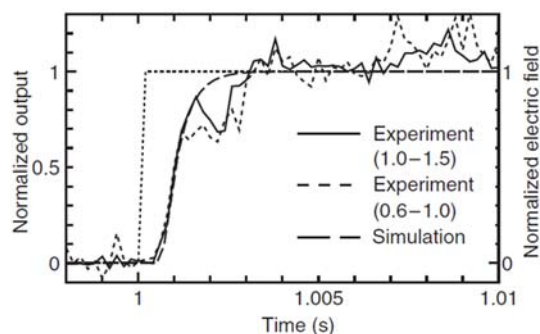
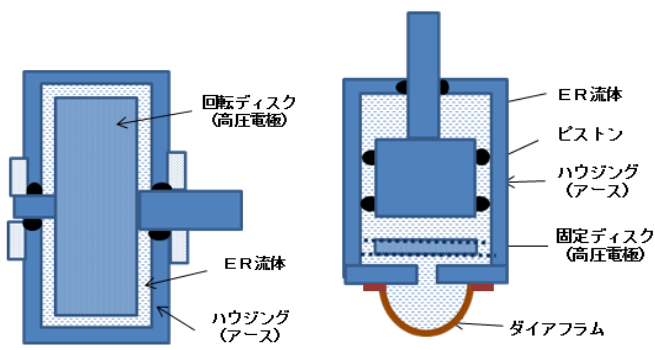


図3 ER流体の応答速度(立ち上がり)⁴⁾

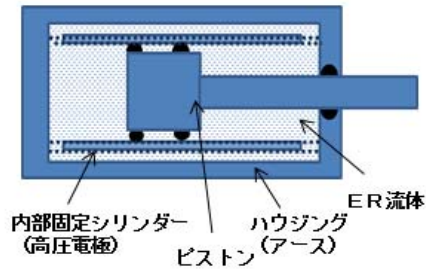
- c) 繰り返し電圧を上げ下げしても、せん断応力(トルク)にヒステリシスが殆どない。
 d) 粒子の沈降が長期間殆どなく、大気放置などによる吸湿をさせなければ性能は長期安定である。
 e) 高電圧の印加を要するが、電流は極めて僅かである(電極面積1 cm²あたり数μA以下)。
 f) 高温では電流が急激に上昇するため、安定使用は常温付近(10℃~50℃)に限られる。

3. ER流体を用いたデバイスとその特徴

流体流れは、a) せん断流れ、b) 圧力流れ、c) スクイズ流れ、の3つのモードに大別される。これら流れモードを利用するデバイスにおいて、代表的なER流体の使い方を図4に示す。



a) せん断流れモード c) スクイズ流れモード



b) 圧縮流れモード

図4 流れモードとER流体の使われ方の例

ER流体は電圧の強さで粘性を大きく、瞬時かつ可逆的に変化できるため、機械力の伝達・制御、振動や衝撃の吸収・制御、速度や位置の精密制御、力覚の提示などの用途に、クラッチ、ブレーキ、トルコン、ダンパー、マウント、バルブなど多くの制御機能付きデバイスとして応用が検討されてきた。

ER流体を用いたデバイスは下記の特徴をもつ。

1) 高応答性

電場発生には殆ど時間は不要であり、ER流体の優れた応答性(数ms以下)をフルに活かしたデバイスが容易に製作できる。そのため、高周波(数百Hz)の動きの制御にも適応できる。

2) ヒステリシスなし

ヒステリシスが殆どないため、力センサを用いたフィードバック制御が不要であり、力センサの故障による危険発生がない。

3) 樹脂化・軽量化

金属メッキで電極形成をした樹脂部品を用いることで軽量のデバイスを製作できる。写真1に樹脂製小型ER流体クラッチの外観を示す。

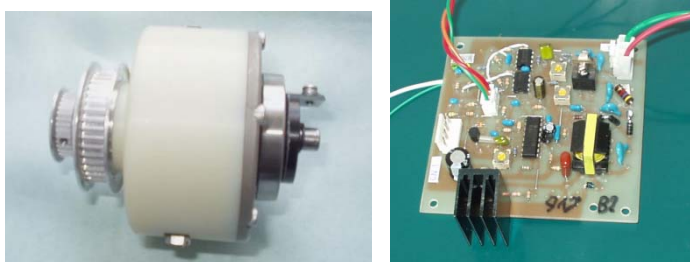


写真1 樹脂製ER流体クラッチ 写真2 高圧電源

4) 部品点数の少なさ

構成部品自体を電極にすることができる。コイルやコアなどが不要で、部品点数の少ない単純な構造のデバイスとなり、コスト低減にも繋がる。

5) 省エネルギーと電池駆動

ER流体の作動には高電圧が必要であるが、電流は極めて低く、通常のデバイスでは数W以下の消費電力で作動し、小容量の電池でも作動する。

6) 使用温度範囲

5°C以下や50°C以上では、性能が不安定になる。そのため用途は常温付近のものが望ましい。

7) 高圧電源の必要性

ER流体の作動には数kV/mmの電界強度が必要である。低い電圧で作動するには電極間隔を狭くするのが望ましい。最近は応答性に優れた小型で安価な高電圧電源(写真2)が開発されている。

8) ER流体の吸湿

吸湿性の高い粒子を用いているため、長期安定な使用には、密閉系での使用が望ましい。

4. ブレーキ/クラッチへの応用例

ブレーキ/クラッチの制動力を高めるには摩擦面積を増やすことが望ましく、多重ディスク型や多重シリンダ型(図5)が開発されている。

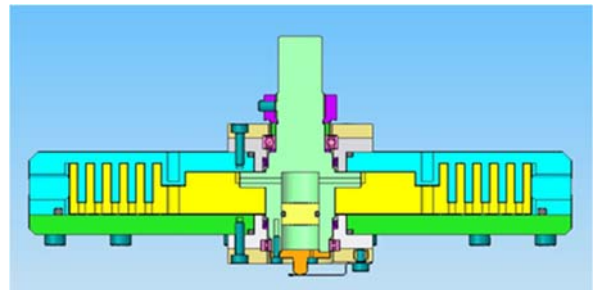


図5 多重シリンダ型ER流体ブレーキの断面図

後者は組み立て易く、電極間隔の精度も上げ易い。電極間隔を0.3mmにした外径190mmのブレーキで450Vをかけると12Nmの制動力が得られる。(図6)。

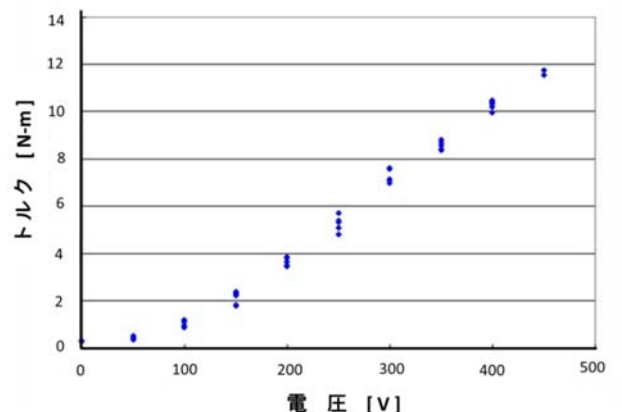


図6 ER流体ブレーキのトルク性能

複数個のブレーキが必要な場合、図7に示す同芯2軸型はコンパクト化に好ましい。最近、電極部の改良により制動力を大幅に高める技術が開発され、容積でさらに約50%小型化されている。

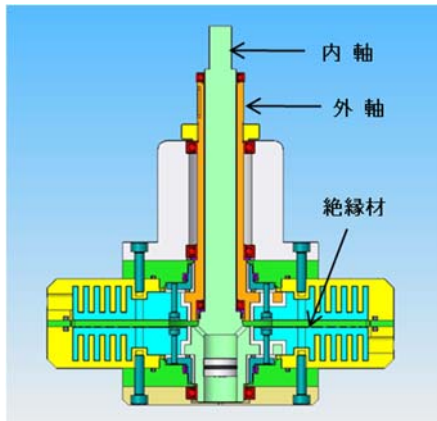


図7 同芯2軸型ER流体ブレーキ

5. ER流体ブレーキ/クラッチの応用

医療、教育、娯楽、通信などの分野に今後の発展が期待されるロボットには一般にモータが使用される。モータには制御系の故障や作動ソフトのバグなどによる暴走の恐れがあり、人間がモータを用いロボットと力のやり取りを行うには大きな危険がある。

図8に示すように人間とモータの間にクラッチを介在させることにより、安全性は大幅に向上する。そのようなクラッチの中でER流体クラッチは最も望ましい⁵⁾。

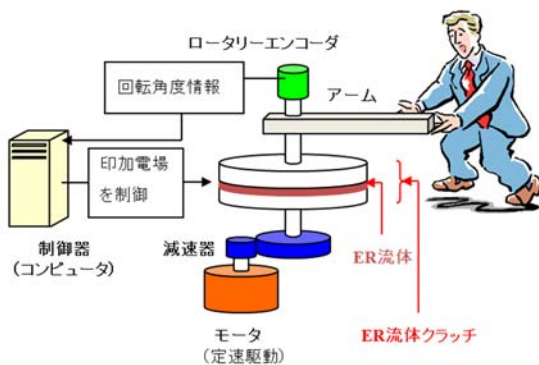


図8 クラッチを介在させたモータ駆動システム

- a) 異常発生時に、瞬時にトルク伝達を切断でき、トルクリミッタとして機能する。
- b) モータからの速度に寄らず、人間側からは必要時、軽くまた高速にアームを動かすことができる。(優れたバックドライバビリティ)
- c) 入力(モータ)側の慣性をクラッチで遮断できるので、たとえ衝突しても危険性が低い。
- d) バックドライバビリティが良いため、大きな比の減速器を用いることができ、小さなモータで大きなトルクを出すことができる。

ER流体の極めて速い応答性(数m秒)とヒステリシスが殆ど無い長所は、力覚呈示手段として最適である。図9にER流体を用いた力覚呈示の原理を示す。反対方向に回転する内外2つの入力円筒(正極)の間隙にはER流体が充填され、その中央部には出力円筒(負極)が設置されている。電圧をかけない状態では出力円筒は回転しないが、内外いずれか一方の入力円筒に電圧をかけると出力円筒はその方向に回転する。電圧の強さや印加の方向の切り替えなどにより、出力側の回転の強さや方向、振動の周波数や振幅などを自由に制御できる。

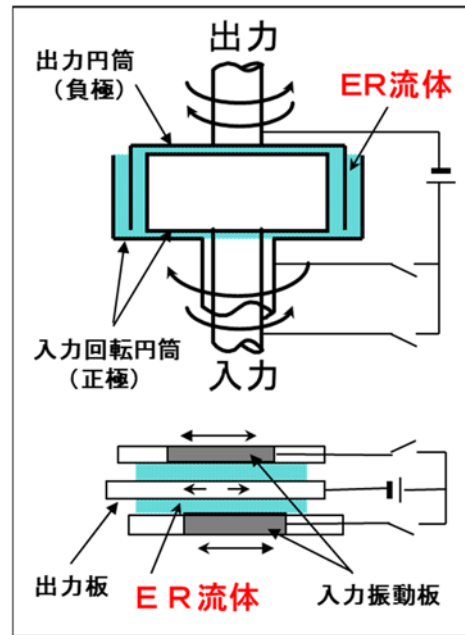


図9 ER流体を用いた力覚呈示の原理

また回転だけでなく、平行あるいは直交方向に振動する一対の入力板を用いることで、出力板を1次元あるいは2次元方向の自由な出力が可能となる。

ER流体を用いた力覚呈示は、ザラザラ/ツルツル、ネバネバ/サラサラ、ブルブル/デコボコなど様々な力覚を提示する優れた手段であると言える⁵⁾。

6. ER流体デバイスの具体的実用例

1) 上肢リハビリ訓練装置

脳梗塞で麻痺した上肢を3次元に動かしリハビリ訓練できる、モータとER流体クラッチを用いた装置(EMUL)が旭化成と大阪大学の共で開発された⁶⁾。平行リング先端のグリップを握り、画像の指示に従い力覚を感じながらゲーム感覚で上肢を自分の意志で繰り返し動かす内に、脳に新しい神経伝達回路が形成され、上肢機能が回復するという脳の可塑性に基く訓練である。その後、ブレーキのみで、より安全に力覚を表示できる安価で小型の準3次元の装置

(SEMUL)が開発された⁷⁾。弊社はその技術を引き継ぎ、同芯2軸型のER流体ブレーキとマイコンを用いた卓上型の小型・簡便化された装置を開発すると共に、訓練ソフトや訓練結果の解析表示ソフトを充実させ、医療機関、福祉施設、大学・附属病院⁸⁾等で臨床評価を重ねている(写真2)。



写真3 卓上型上肢リハビリ訓練装置 (SEMUL-2)

2) トレーニング装置

欧州では十年以上前から、応答性に優れ、速度や抗力の制御に好適なピストン型ダンパー(図10)を用いた筋肉トレーニング装置(写真4)が販売され、リハビリやフィットネスにも用いられている²⁾。

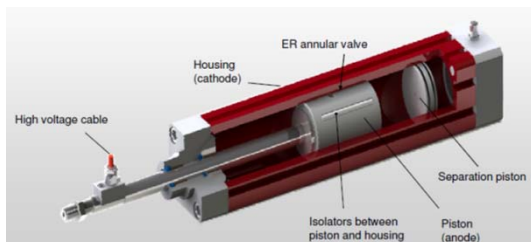


図10 ピストン型ER流体ダンパー



写真4 ERダンパーを用いたトレーニング装置

日本でもER流体ブレーキを用いた下肢トレーニング装置(写真5)が開発され、開脚や閉脚などのスライド運動を、従来の機器では難しかった広い運動領域でも訓練者のレベルに合わせた負荷や速度で訓練できる装置が開発されている⁹⁾。等速度や任意

パターンの速度や負荷の訓練も可能である。その後、更にモータとER流体クラッチを用いた受動的な訓練もできる装置が開発されている¹⁰⁾。障害者や術後者の機能回復やアスリートの運動能力強化の他、運動機能の解析評価にも利用される。



写真4 ER流体ブレーキ制御下肢トレーニング装置

3) その他の用途

1990年代多くの企業がER流体の自動車用途への応用を目指し取り組んだが、いずれも成功しなかった。流体性能の向上やデバイス構造の改良、使用環境等の変化により、欧州では再び自動車や産業機械制御への応用が検討されている²⁾(写真5)。

消費電力が少なく、移動体や可搬機器に適性を有するER流体デバイスは、福祉、介護、医療、運動などの分野でも、今後の応用が期待される。



写真5 ER流体ダンパーの乗用車および産業機械への応用

参考文献

- (1) 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, pp. 821-825 (2006)
- (2) <http://www.fludicon> (2015)
- (3) <http://www.smarttec.co.uk/erf2.htm>
- (4) K. Koyanagi, T. Terada, ” Time Response Model of ER Fluids for Precision Control of Motors ”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 21, No. 15, pp. 1517-1522 (2010).
- (5) 小柳, 古荘, 井上, “力覚提示のための高安全性アクチュエータ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 3, pp. 377-384 (2004)
- (6) 古荘, 小柳, 片岡, 笠, 井上, 竹中, ” 3次元上肢リハビリ訓練システムの開発—第1報”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 629-636 (2005)

- (7) 道免和久, 文科省科学研究, 基盤研究B, 2008年度研究成果報告書, 課題 18300186, ”リハビリロボットを併用した脳卒中片麻痺上肢のハイブリッドCI療法”
- (8) 菊池、佐藤、山辺、阿部、釘宮、大野、中元、洲上、井上、
“上肢リハビリシステム SEMUL を用いた作業療法訓練プログラム WIPE の臨床評価 “, 日本機械学会 2016 年ロボティクス／メカトロニクス講演会講演論文集, 1P1-03a3 (2016. 6)
- (9) 木村, 小柳, 向井他:”等抵抗負荷の側方抵抗レッグリーチ動作における支持脚の運動解析”, 第 39 回日本臨床バイオメカニクス学会講演予稿集 010-4(2012)
- (10) K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, A. Inoue, T. Motoyoshi, et al., “Passive Speed Control Using a Functional Clutch Driven Reversely”, Proc. 15th Int. Conf. on New Actuators, pp. 530-533 (2016).