

新素材・機能材料の適応事例

ER流体

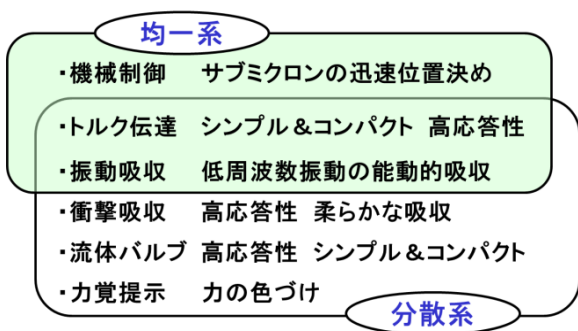
(株)ERテック 井上昭夫

1. はじめに

ER (Electro Rheological Fluid) とは、電圧の強さに応じて粘性が瞬時に変化し、その変化が大きく可逆的である流体を言う。高誘電性の微粒子を絶縁油に分散させた分散系と、高分子液晶等を媒体で希釈した均一系の2種の流体がある。

電圧を印加しない際には共にニュートン流動を示すが、印加した際には、前者はビンガム流動を、後者はニュートン流動を示す。

これら2種のER流体は、上記流動特性から、用途は第1図のように大別される。

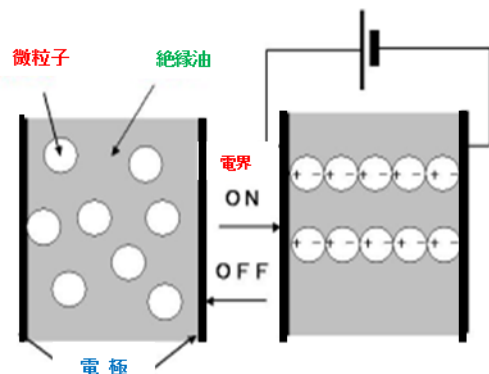


第1図 均一系と粒子系の適正用途分野

均一系ER流体およびその用途に関しては既に報告⁽¹⁾したので、本報では、今後の発展が期待されるロボット分野に広い応用の可能性を持つ分散系ER流体（以下ER流体と略す）について紹介する。

2. ER流体の粘性発現機構と特性

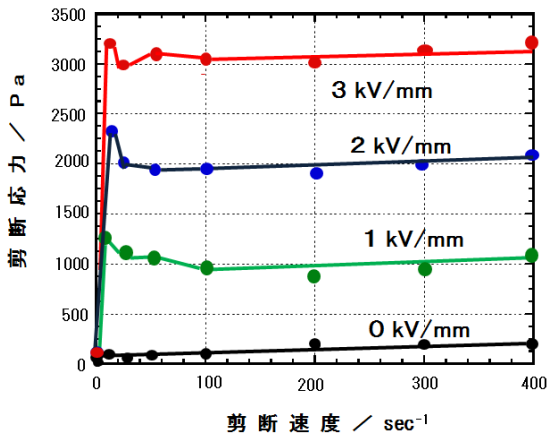
ER流体の粘性変化の発現機構としては、電圧の印加で正負に分極した粒子が互いに引き合い電界方向に形成する架橋を、せん断で離そうとする力が見かけ上の粘性を増大させるとする説が有力である。(第2図)



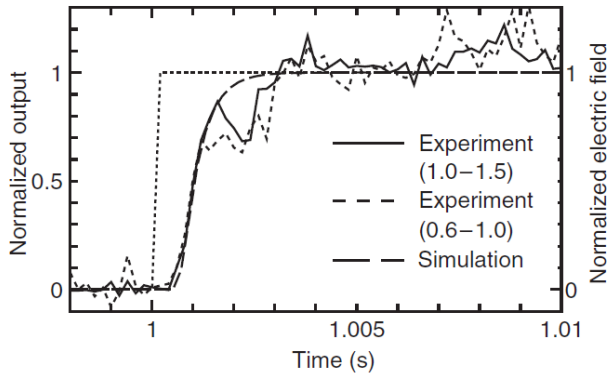
第2図 粘性増大の機構：架橋形成

ER流体（弊社タイプA）の特徴を下記する。

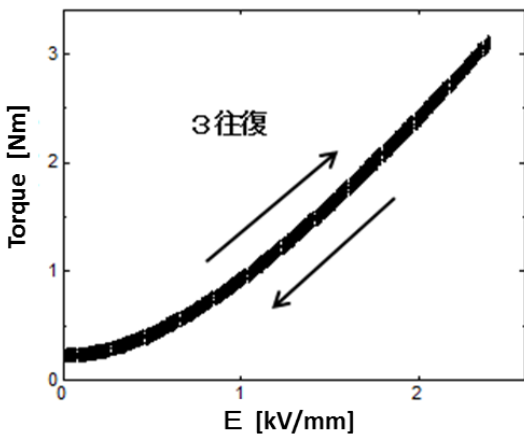
- 1) せん断応力は電界強度にほぼ比例し、せん断速度にはあまり影響されない(第3図)。
- 2) 粘性は電圧の印加で瞬時(数m秒)に変化する⁽²⁾。電圧解除時も同様である(第4図)。
- 3) 繰り返し電圧を上げ下げしても、せん断応力(トルク)にヒステリシスが殆どない(第5図)。
- 4) 粒子の沈降が殆どなく安定である。
- 5) 高電圧の印加を要するが、電流は極めて僅かである。(電極面積1cm²あたり数μA)



第3図 せん断応力に対するせん断速度および電界強度依存性



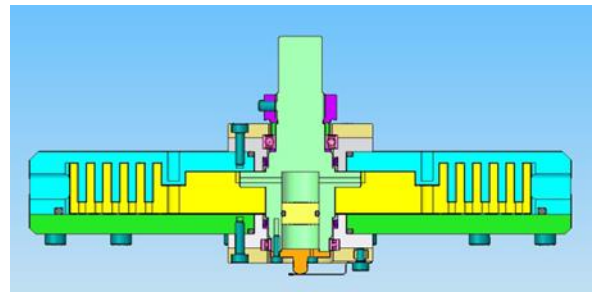
第4図 電圧印加に対するせん断応力の応答性⁽²⁾



第5図 電圧上下変化に対するトルクのヒステリシス

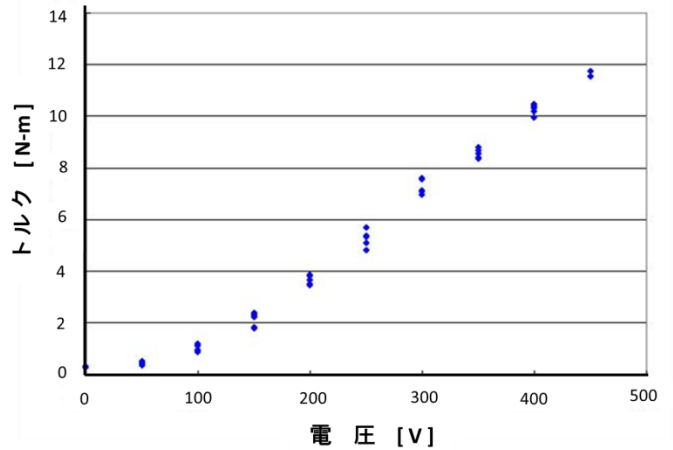
3. ブレーキ/クラッチへの応用

ブレーキ/クラッチは一般的には摩擦力を利用している。大きな制動力を得るには摩擦面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6) が開発されている。



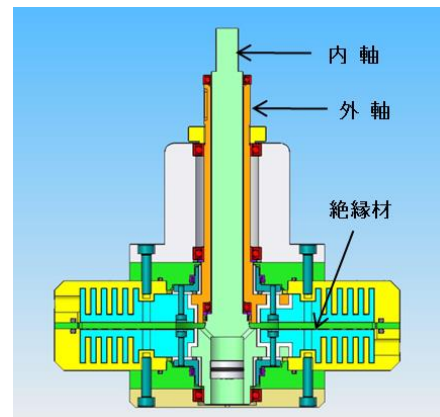
第6図 多重シリンダ型ER流体ブレーキの断面図

ER流体の粘性変化は電界強度に依存することから、電極間隔は狭い方が低い電圧で作動でき望ましい。多重シリンダ型は加工や組み立ての精度を出し易く、電極 (シリンダ) 間隔を狭く、かつ安定化できる。現在は間隔 0.3 [mm] 程度のものが主であり、450 [V] の印加で 1500 [V/mm] の電界強度が得られ、小型 (外径: 190 mm) で大きなブレーキ力を発揮する (第7図)。



第7図 ER流体ブレーキのトルク性能

1対のシリンダを絶縁材で分離すれば、コンパクトな同芯2軸型ブレーキも得られる (第8図)。



第8図 同芯2軸型ER流体ブレーキ

さらに最近、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た。写真1は同じトルク性能をもつ従来型と最新型のER流体ブレーキを示す。容積で約50%のコンパクト化が達成された。

ER流体の優れた応答性を活かすには高圧電源にも高応答が要求されが、最近、立ち上がり／立ち下りの時定数が共に10m秒以下の安価で小型のオンボード型電源が開発されている。

ER流体ブレーキ／クラッチは極めて低い電流で使用できるため、消費電力も極めて少なく（例えば8Nm級で数W以下）、またDC750V以下の使用では高電圧機器（日本電気技術者協会：電気設備電圧区分）に該当しない。

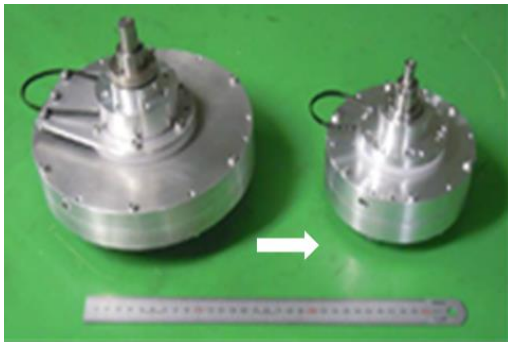


写真1 電極部の改良によるコンパクト化

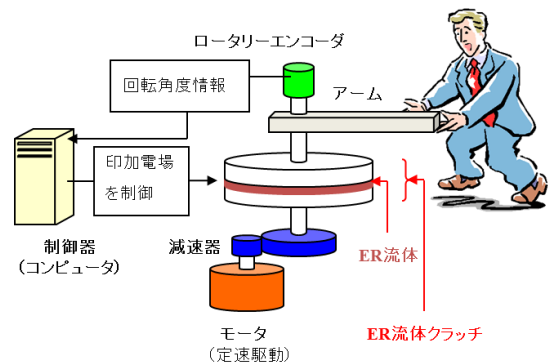
各種のクラッチの性能を比較し表1に示した。磁場発生に時間のかかるコイルを使う他のクラッチに比べ、ER流体クラッチは殆ど高圧電源の応答速度で応答する。またヒステリシスが無いので、電圧を決めれば所定の伝達力が得られることから、力制御にセンサが不要となり、安全性に優れる。

表1 各種クラッチの性能比較

	ER流体クラッチ	MR流体クラッチ	パウダークラッチ	電磁摩擦クラッチ
応答速度	数m秒	数十m秒	数百m秒	数十m秒
ヒステリシス	無し	有り	有り	無し
使用温度範囲	△	○	○	○
粒子沈降問題	無し	有り	有り	無し
カフィードバック制御(センサ)	不要	必要	必要	不可能

4. 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、モータ駆動で人間がロボットと力のやり取りを行うには大きな危険がある。第9図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⁽³⁾。

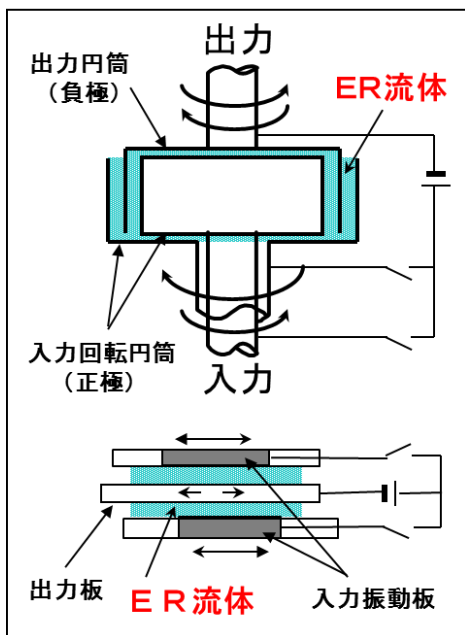


第9図 クラッチを介在させたモータ駆動システム

- 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。
- モータからの速度に係らず、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。(バックドライバビリティ)
- 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。
- 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流体の数m秒と言う極めて速い応答性と殆どヒステリシスが無いと言う長所は、力覚呈示手段として極めて好適である。第10図に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重の入力円筒(正極)の間隙にはER流体が充填されており、その中央部には出力円筒(負極)が設置されている。電圧を印加しない状態では出力円筒は回転しないが、内外円筒のいずれか一方に電圧が印加されると出力円筒はそ

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することができる。



第10図 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次元方向に出力することが出来る。ER流体を用いた力覚呈示法は、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³⁾。

5. 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のリハビリ訓練に、モータとER流体クラッチを用いた三次元に上肢運動ができる装置 (EMUL) を旭化成と大阪大学が共に開発した⁴⁾。平行リンク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づく訓練である。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) が兵庫

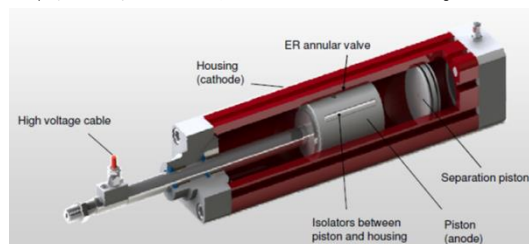
医科大学の科研費で開発された^{5) 6)}。弊社はその技術を引き継ぎ、同芯2軸型のER流体ブレーキとマイコンを用いた卓上型の小型・簡便化された装置を開発すると共に、訓練ソフトや訓練結果の解析表示ソフトを充実させて、医療機関や福祉施設で臨床評価を重ねている (写真2)。



写真2 卓上型上肢リハビリ訓練装置 (SEMUL-2)

2) トレーニング装置

ER流体ダンパーも応答性に優れ、速度や抵抗力の制御に好適である。欧州では十年以上前からピストン型のダンパー (第11図) を用いた筋肉トレーニング装置 (写真3) 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⁷⁾。



第11図 ER流体を用いたピストン型ダンパー



写真3 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4）が開発され、開脚や閉脚などのスライド運動において、従来の機器では難しかった広い運動領域に対しても訓練者のレベルに合わせた負荷や速度で訓練できる⁽⁸⁾。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⁽⁹⁾。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。

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への応用が検討されている⁽⁷⁾（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4 ER流体ブレーキ制御下肢トレーニング装置



写真5 ER流体ダンパー搭載乗用車

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) 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).
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) 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”
- (6) 菊池, 小田, 胡, 福島, 古荘, 井上：“準3次元上肢リハビリ支援システムおよびそのソフトウェアの研究開発”，日本VR学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 79-88 (2008)
- (7) <http://www.fludicon> (2015)
- (8) 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)
- (9) Y. Yamamoto, K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, A. Inoue, et al., “Verification of Device Modes of a Strength Training Machine Using an ER Fluid Brake” Proc. of the 2014 IEEE/SICE Int. Symposium on System Integration, pp. 779-784 (2014).

著者の紹介

井上 昭夫

株式会社ERテック 代表取締役