

エレクトロロジー(ER)流体 — 福祉・介護機器用途での実用化までの道程 —

井上 昭夫 Akio Inoue

旭化成株式会社 電子応用研究所 部長

略 歴：1969年早稲田大学大学院修士課程高分子専攻修了、工学博士。同年旭化成工業(現旭化成)株式会社入社。研究開発本部でフィルム、機能膜などの研究開発を経て、現在に至る。

専 門：機能性高分子

著 書：『電気粘性(ER)流体の開発』(シーエムシー社)、『静電気ハンドブック』(オム社)(いずれも分担執筆)



笠 潮 Ushio Ryu

旭エンジニアリング株式会社 システム機器事業部 事業部長

略 歴：1971年東京工業大学大学院機械工学修士課程修了。同年旭化成工業株式会社入社、工務本部延岡工務部配属。以来繊維製造装置の開発に従事、1998年旭エンジニアリング株式会社に出向、現在に至る。



エレクトロロジー(ER)流体は古くから知られており、シンプルでコンパクトなクラッチやダンパーなど、多くの用途に長らく期待されてはいたが、実用化が難しかった。材料(ER流体)側の性能改良と応用(装置・ソフト)側の工夫が一体となることで、歩行器のブレーキやリハビリ訓練装置のクラッチとして、ようやく実用化が可能になった。

1. はじめに

エレクトロロジー(電気粘性: Electro-Rheological: ER)流体とは、電場の印加によって粘弾性(レオロジー)特性が大きく変化し、その変化が瞬間的かつ可逆的である流体をいう。このような流体は、シリカや澱粉など、わずかに水を含んだ微粒子(粒径: 数~数十 μm)を鉱物油やオリーブ油などの絶縁油に分散させた系で1940年代後半に発明され、発明者の名に因んでWinslow流体と呼ばれた¹⁾。その後一時Electro-Viscous流体とも呼ばれたが、コロイド液が粒子表面の静電的な力によって粘性を持つElectro-Viscous効果と区別するために、1980年代頃から現在のER流体と呼ばれるようになった。ER流体は粘度が電場の強さに応じて瞬時に変化できることから、発明の当初から応答のよいコンパクトなブレーキやクラッチなど、機械部品への応用が期待された。特に1980年代半ばに自動車用途への応用の可能性が報告されてからは、流体およびその応用に関する研究開発が急増し、1990年代半ばには国内だけでも1年に100件を越す特許が出願されるという状況が続いた。しかし自動車用途は、性能、コスト(システムとして)、信頼性などの面で実用化にはきわめて高い障害があること、ER流体以外の手段が出てきたこと、さらには、自動車以外の用途市場が細かく小さいことなどがわかるにつれて、流体を開発する企業も急減

した。また性能面でも、微粒子の沈降や性能の安定性不足(耐久性や温度特性)など、いくつかの問題も残った。しかし流体開発3社が中心となって用途開発のために設立したERコンソーシアム²⁾のホームページならびに講演会活動、あるいはレオロジー学会や機械学会の中に設立されたER流体研究会^{3)~5)}の活動などのお陰もあって、流体性能の改良や使用面での工夫も進み、ER流体は回転切断機の速度制御⁶⁾や歩行器の車輪ブレーキ、リハビリ装置のクラッチとして実用され始めた。

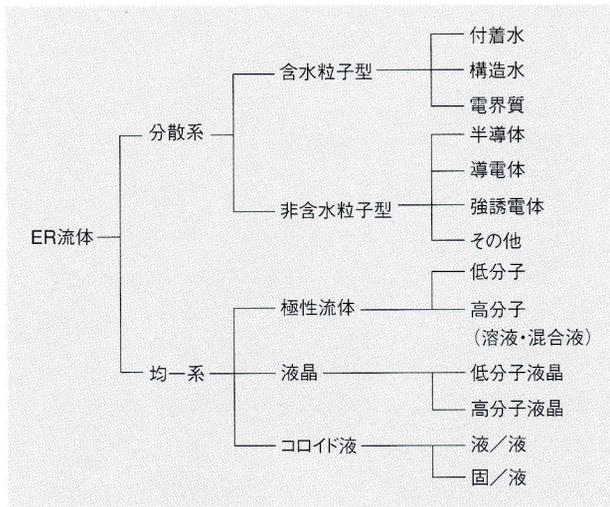
ところでER流体は、磁場の印加によってレオロジー特性が変化するマグネトロロジー(磁気粘性: Magnetorheological: MR)流体とよく比較される。MR流体は、鉄粉などの常磁性体微粒子(粒径: 数~数十 μm)を媒体に分散させた流体で、ER流体と同時期に発明され、同様の用途への応用が考えられてきた。この流体は金属微粒子を分散させたものであるため、沈降がER流体よりも激しく、実用化には大きな問題があった。しかしER流体と同様、流体面や使用面での改良が進み、トラックの運転座席の振動を抑えるダンパーや地震や風による揺れから橋を守るダンパーとして実用され始めた。

本報告では、ER流体の種類や特徴、MR流体と比較した性能、福祉・介護機器用途での実用に至るまでの道程などを紹介する。

2. ER流体の種類と特徴

Winslowによる発明以来、微粒子を分散させた分散系であるER流体は、先述の問題点の解決を目指して、微粒子や分散媒体の面から多くの研究が行われてきた。とりわけ微粒子は、電場による粘性変化(ER効果)の大きさや性能の安定性に大きく影響することから、多くの種

表1 ER流体の分類



類が提案されている。表1は微粒子の面から見たER流体の分類で、含水粒子型と非含水粒子型に大別できる。

前者はさらに、シリカや澱粉、イオン交換樹脂などのような付着水を持つ微粒子、ゼオライトやスメクタイトなどのような構造水を持つ微粒子、ポリエチレンオキシド分子の末端に高級炭化水素エーテル基を有するアクリル酸ポリマーやアミノ酸ポリマーなどのような電解質から成る微粒子に分類できる。後者はさらに、カーボンやポリアニリンなどのような半導体の微粒子、表面を絶縁性の薄膜でコートした金属や導電性ポリマーの微粒子、その他に分類できる。一般に含水粒子型には、ER効果は大きい温度依存性が大きいという欠点があり、非含水粒子型にはその逆の性質がある。

一方、微粒子を用いない均一系流体も古くからER効果が検討されてきたが、いずれも効果は小さく、ほとんど顧みられなかった。筆者らは、それらの液体の中でも比較的ER効果の大きい液晶物質に注目し、さらに高いER効果を得るには、電場の印加によって配向した液晶分子(ドメインと呼ばれる分子の集合体)がせん断力によって容易に崩れてしまわないように、ドメインを高分子鎖で結び、ネットワークを形成させることを考えた。複数個の液晶性基がシリコンの高分子鎖にぶら下がった側鎖型液晶ポリシロキサン(以下LCPと呼ぶ)を用いて検討した結果、きわめて大きなER効果が発現することを見つけた⁷⁾。この液晶性基の分子構造を、図1に示す。

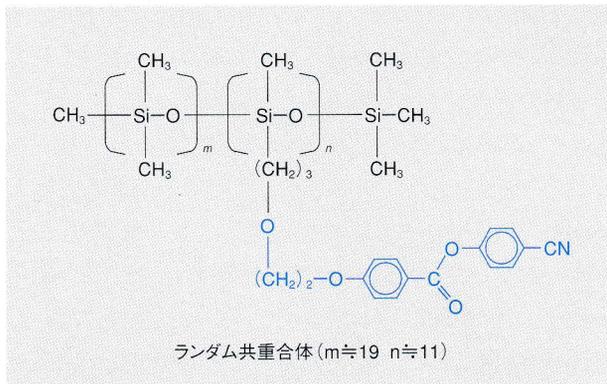


図1 側鎖型液晶ポリシロキサンの分子構造

ER効果の発現機構に関しては、2年に1度開かれるER/MR流体国際会議などでも多くの研究が報告されているが、分散系、均一系共に、まだ確定的な理論はない。分散系の場合、電場の印加によって微粒子間に架橋が形成され、せん断をかけるとその架橋が切れたり再結合したりを繰り返す現象が観察される。図2に、媒体で数倍に希釈したER流体の電場印加前後の様子を示す。電場の印加によって微粒子表面に生じた正負の分極電荷が、クーロン力によって微粒子間に電場方向の架橋を形成し、その結合力によって粘性が増大する。この説は、流体が電場の印加時にビンガム流動を呈することや、ER効果が電場の強さのほぼ2乗に比例することなどを説明するには好都合であるが、電極と微粒子の界面の滑り、架橋形成速度と応答速度、電流の必要性などの点に、単純には説明できない問題も残る。MR流体でも、磁場をかけると磁場方向に架橋が生じる現象が観察されるた

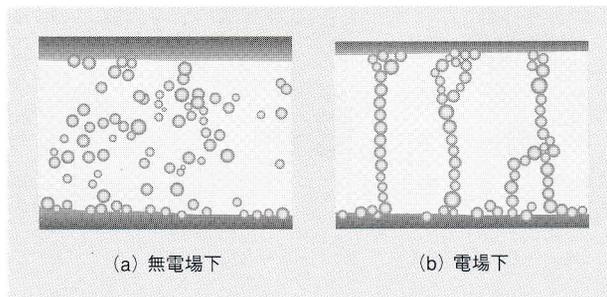


図2 分散系ER流体のER効果発現機構

め、粘性増大の機構は分散系ER流体の場合とほぼ同様であり、磁場分極した微粒子どうしの吸引力によって粘性が増大すると理解されている。

一方、LCPを用いた均一系ER流体は、LCP単独では粘性が高すぎて電場に対する応答がよくないため、変性シリコーン油などの希釈剤で希釈して使用する。電場をかけた際の粘性変化の挙動は、LCPの組成(シロキサン鎖長と液晶性基の含有率の分布)によって大きく異なる。鎖長や液晶性基の含有率の分布がシャープなLCPを用いたER流体(タイプA)は、ER効果は大きいが60°C程度で消失する。一方、分布がブロードなLCPを用いたER流体(タイプB)は、ER効果は小さいが150°C程度までほぼ一定倍率(電場印加と非印加時の粘度の比)で発現する。これら2つのタイプの流体には、応答速度や光学的観察結果にも大きな差が見られる。ER効果の発現機構が異なると考えられ、いくつかの機構が提案されている。中でも図3に示すような機構、すなわちタイプAではドメインの配向状態の変化⁸⁾、タイプBでは希釈媒体中に形成されたLCPのドロプレットの変形と架橋⁹⁾、が有力である。タイプBのドロプレットの電場印加による形状変化は、光学顕微鏡下でも容易に観察されるが、タイプAには構造が観察されない。なお、タイプBは応答速度が遅く(秒単位)、ER効果がタイプAの半分程度と低いため、実用的にはタイプAが用いられる。

3. ER流体の性能

分散系と均一系のER流体の最も大きな性能の違いは、図4に示すように、電場を印加した際の流動挙動にある。分散系はビンガム流動を示し、均一系はニュートン流動に近い挙動を示す。粘性変化は、分散系の場合、電場の強さのほぼ二乗に比例するが、LCPを用いた均一系の場合、電場の強さは降伏点の位置に影響する。なお、MR流体も磁場の印加によって分散系ER流体と同様にビンガム流動を示す。

表2に、分散系および均一系(タイプA)のER流体、およびMR流体の一般的な性能の比較を示す。電場や磁場

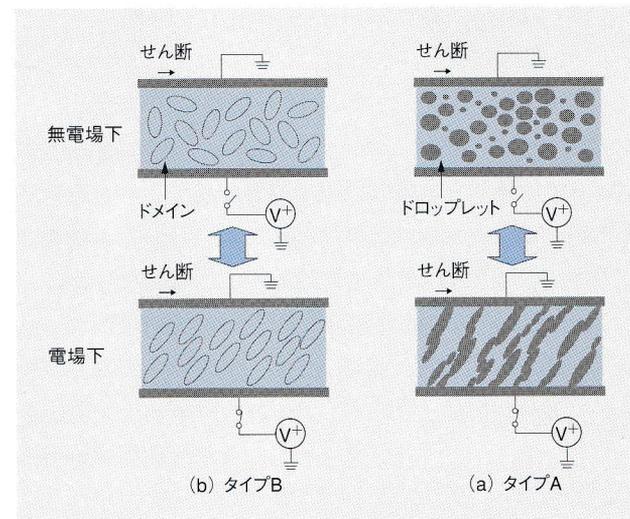


図3 均一系のER効果の発現機構(ドメインとドロプレット)

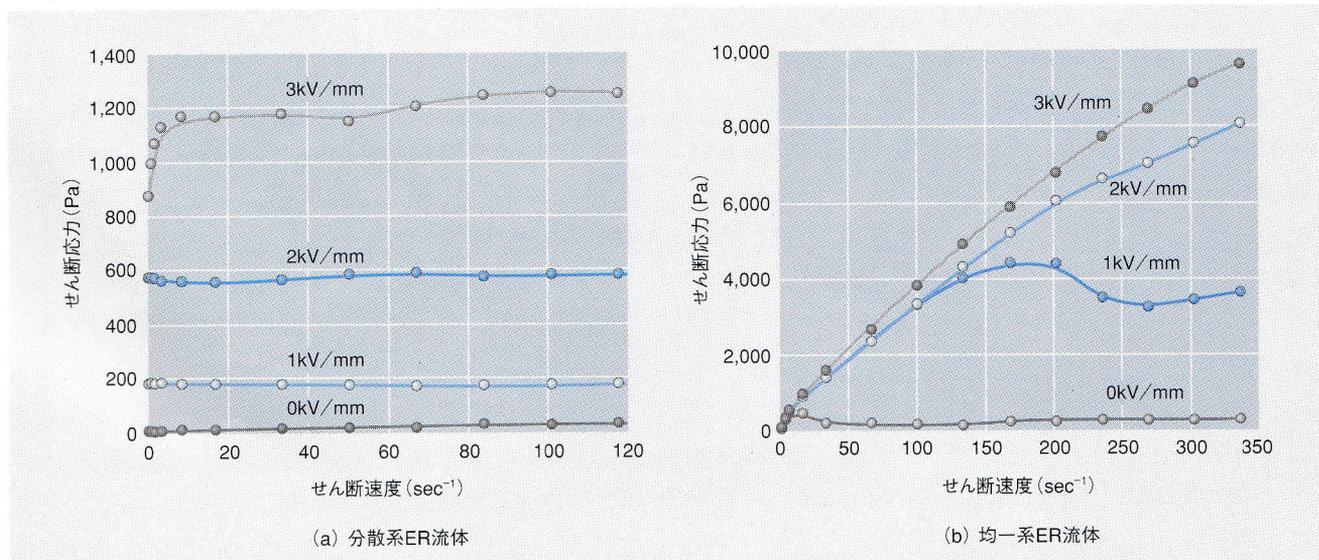


図4 電場印加時の流動挙動

表 2 各種流体の性能比較

特性	分散系ER流体	液晶系ER流体	MR流体
流動挙動(印加時)*1	ビンガム	ニュートン	ビンガム
流体基底粘度(Poise)	10 ⁻¹ ~10 ⁰	~10 ⁰ ~	10 ⁰ ~10 ¹
印加電界強度(V/mm)	~10 ³ ~	10 ² ~10 ³	(10 ⁰ ~10 ¹)
印加磁場強度(T)	—	—	10 ⁰ ~10 ¹
降伏せん断応力(Pa)*2	10 ² ~10 ³	10 ³ ~10 ⁴	10 ⁴ ~10 ⁵
応答速度(sec)	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻³
電流密度(A/cm ²)*3	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵	>10 ⁻⁶	10 ⁻¹ ~10 ⁰
消費電力(W/cm ²)	10 ⁻³ ~10 ⁻²	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	10 ⁻¹ ~10 ⁰
使用温度範囲(°C)	10~60	10~60	-40~120

*1 電場/磁場印加時

*2 電圧印加2kV/mm・剪断速度300s⁻¹(ER流体)
磁場印加0.3T(MR流体)

*3 電極面積あたり

の印加による降伏せん断応力の増加は、通常の使用条件で、MR流体が分散系ER流体より約2桁大きい。均一系ER流体はニュートン流体であるため、ビンガム流動をする分散系ER流体と単純に比較するのは難しいが、高せん断速度領域では分散系ER流体より約1桁大きい。応答速度は、分散系では数ミリ秒であるが、基底粘度の

高いLCP均一系では一桁以上遅い。いずれのER流体も高い電場の印加が必要であるが、電流密度はきわめて低く、消費電力はきわめて小さい。一方、MR流体は数Vの電圧で作動するが、電流密度が高く、消費電力が大きいので、連続使用には除熱手段の検討が必要である。使用温度範囲は、MR流体の方がER流体より広い。均一系ER流体には、粒子の沈降や凝集、電極や粒子の磨耗といった問題はないが、分散系ER流体やMR流体では、これらが大きな問題となる。しかし、最近では、チクソトロピックな分散媒体の使用やスポンジなどの柔らかい3次元構造体に流体を含ませるなどの方法によって、これらの問題の解決が計られている。

4. 特徴と応用

ER流体は、電場の強さによって応答よく粘性を制御できることから、シンプルでコンパクトな機械部品への応用が期待されてきた。表3に期待用途と作用機構を、図5にその作動原理をモデル的に表す。

クラッチやダンパーには、分散系、均一系のいずれのER流体も使用できるが、バルブや力覚呈示装置などの

表 3 ER流体の期待用途の分類と作用機構

分類	用途例	作動機構
クラッチ (機械力伝達・制御)	<ul style="list-style-type: none"> ・トランスミッション ・クラッチ ・テンションコントローラ ・ブレーキ ・トルクコンバータ 	<ul style="list-style-type: none"> ・一定間隔の一对の電極間に詰められたER流体に電圧をかけて流体の粘性を変化させ、伝達されるトルクを調整する。一方を固定しておけばブレーキにもなる。
ダンパー (機械的エネルギーのダンピング)	<ul style="list-style-type: none"> ・ダンパー ・摩擦ダンパー ・ショックアブソーバ ・建物免振装置 ・軸受け ・マウント ・スポーツ用具 	<ul style="list-style-type: none"> ・電極を設けたオリフィスでつないだテニスボールと風船の中にER流体を満たしたもので例えると、テニスボールの硬さ(バネ定数や粘性)はオリフィスの絞り具合、すなわち電界の強さで制御できる。 ・粘性のない状態にしたダッシュポットのバネにエネルギーを貯えた後、ダッシュポットの粘性を上げて貯えたエネルギーを粘性で消散させる。
位置決め (位置・速度の制御)	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボット制御 ・マスタースレーブ ・精密位置決め装置 ・シリンダ ・切断機 ・工作架台 	<ul style="list-style-type: none"> ・ER流体の粘性変化を電界で変化させることにより、連結した移動軸の動きを調整する。位置・速度などのセンサ信号と電界の強さを連動させる。
バルブ (油空圧制御)	<ul style="list-style-type: none"> ・流体バルブ ・サーボバルブ ・リリース弁 ・振動発生器 ・シリンダ 	<ul style="list-style-type: none"> ・油圧オイルの代わりにER流体を使用し、配管に電極を設けることにより、流体の粘性変化で流量と圧力をコントロールする。

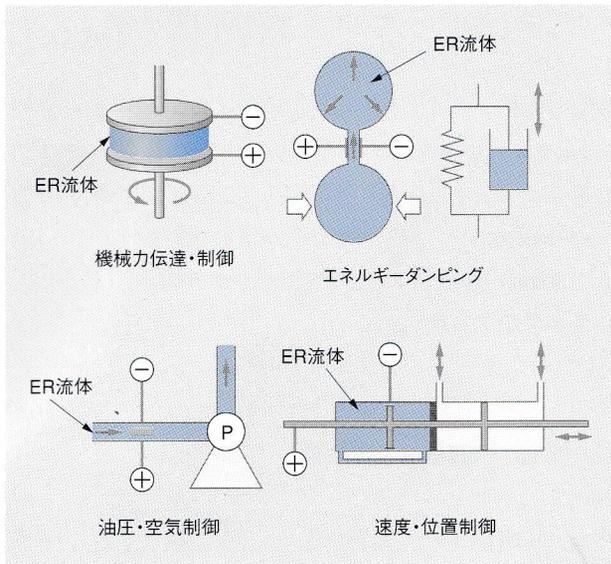


図5 モデル的に示した用途別動作原理

用途には、静止状態(ゼロせん断)で一定のせん断応力の発生が必要であるため、ビンガム流動をする分散系流体が望ましく、位置や速度の制御には、速度に比例した抑制力が発生するニュートン流動をする均一系流体が望ましい。

これまでER流体について多くの応用が検討されてきたが、実用化に至ったものは、きわめて少ない。その原因の一つに、応用における問題点の解決を流体の性能改良に期待しすぎたことが挙げられる。筆者らは幸いにして、材料開発部門とエンジニアリング部門が綿密に協力し合うことができ、応用基礎研究において大学の機械制御系研究室の地道な協力が得られ、また評価機関にも恵まれたこともあって、異分野の人間が一体となって開発を進めることができたため、後述のような歩行器やリハビリ装置の開発、実用化が可能となった。

ここでは、歩行器のブレーキのプロトタイプとなった2重円筒型のER流体ブレーキの開発を例に、実用化に向けてのキーポイントとなった工夫点を紹介する。図6に、そのブレーキの断面構造を示す。回転円筒電極(金属製、外部筒外径:60mm、内部筒外径:46mm、電極幅:40mm)は、ベアリングを介してシャフト部から負極側の電極端子に接続され、外筒(樹脂製)に内蔵された固定円筒電極(金属製)は、ボルトを介して正極側の電極端子に接続されている。外筒には液漏れ防止用のフロート弁が取り付けられている。ER流体(LCP均一系、約14ml)が、電極間隙(0.3mm)に充填されている。

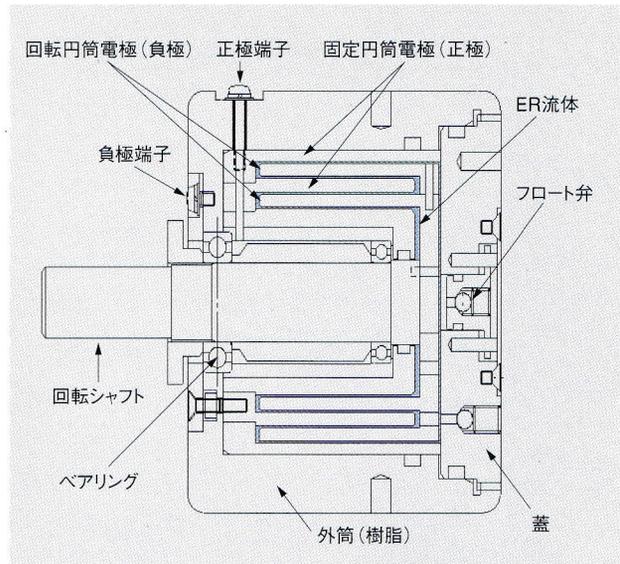


図6 プロトタイプER流体ブレーキの断面構造

ここで生じた問題は、狭い電極間隙(0.3mm)を一定に保つ部品製作の精度はともかく、グリース状のER流体をどうやって狭い電極間隙に空気の混入なく充填するか(空気が少しでも混入すると、絶縁破壊を起こしやすくなる)や、温度変化に伴う流体の体積変化による液漏れをどうやって防止するかといった、一見つまらないことのように思えるが、ER流体ブレーキの性能安定化に重要なものばかりであった。そうした問題点と解決のための工夫を、参考までに列記する。

- 1) 空気混入のない流体の完全充填: 流体を加熱して、チャンネリングしないよう真空下で低速で充填した。
- 2) シャフト隙間からの液漏れ防止: 温度変化による液の膨張・収縮をフロート弁で吸収した。
- 3) 電極端部からの絶縁破壊の防止: 先端放電を避けるため、電極角部を面取りし、絶縁被膜コートを施した。
- 4) 回転電極からの端子の取り出し: ケース内の絶縁物質を除去し、ベアリングを介して通電した。
- 5) Oリングシール回転抵抗の低減: シャフト径を小さくし、Oリング材質を選定した。

そのほかに、電場の強さを制御するために一定電圧をパルス幅変調で印加したのも、きわめて有効な工夫であった。材料側や使用側の連携によるこのような工夫の積み重ねにより、計算値とほぼ等しいブレーキ力を繰り返しの安定性や耐久性よく発揮し、消費電力もきわめて小さい



図7 ER流体ブレーキ付き歩行器

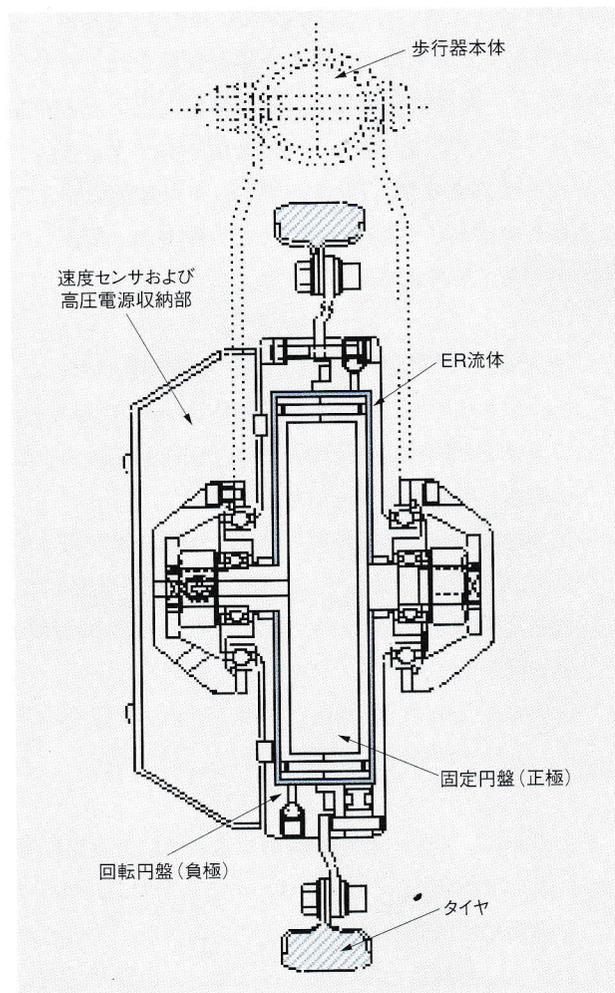


図8 歩行器用ブレーキ部の断面構造

実用的なER流体ブレーキが得られるようになった¹⁰⁾。

☆ER流体：図4に流動特性を示したLCP均一系流体
(電場 2 kV/mm、剪断速度300/secで剪断応力8,000Pa)

☆ブレーキ力(トルク)：電場の強さにほぼ比例、600V
(2 kV/mm)の印加で8 Nm(ほぼ計算値)

☆電流値：電場600V(2 kV/mm)で200 μ A、したがって消費電力は0.12W

5. 福祉・介護機器への応用

ER流体(LCP均一系)を用いたブレーキは、わずかな消費電力で大きなブレーキ力を発揮することから、移動体への応用を模索していたところ、兵庫県立福祉のまちづくり工学研究所から、歩行器への応用の提案があった。従来の歩行器は乗り降り時などにスリと動くので、高齢者や障害者とその速度に追いつけずに転倒しやすい。そこで、異常な動きを検知して瞬時に自動的にブレーキが効く歩行器を共同で開発することになった¹¹⁾。

図7はER流体ブレーキを後車輪に内蔵した歩行器で、図8はそのブレーキ部の断面構造である。

ER流体ブレーキシステムは、車輪に内蔵されたER流体ブレーキ、その側面に設置された磁気速度センサと高電圧発生器(最大1,000V)、肘掛の前に設置されたDC 6Vの2次電池を内蔵した制御器から成る。速度センサの信号に従って制御器のCPUが所定の電圧信号を高電圧発生器に送り、所定の電圧がER流体ブレーキに印加される。ER流体ブレーキは、直径10cm(車輪の直径は20cm)、幅2cmの固定円盤(正極)とその軸を共用して回転する外筒円盤(負極、タイヤと結節)から成り、その間隙(0.3mm)にER流体が充填されている。この間隙に600V(ER流体には2 kV/mm)を印加すると、約6 Nmのブレーキ力が得られる。これは体重60kgの人が全体重を歩行器にかけて12度の坂道を降りる際に制止できる強さである。

この歩行器には4つの機能がある。一つ目は、静止させた状態で安心して乗り移れること、二つ目は、歩行中に姿勢を崩し、歩行器がスリと滑って所定の速度を超えると、直ちにフルブレーキで止まること、三つ目は、坂道などで歩行器が自然に加速しだした際に、所定の速

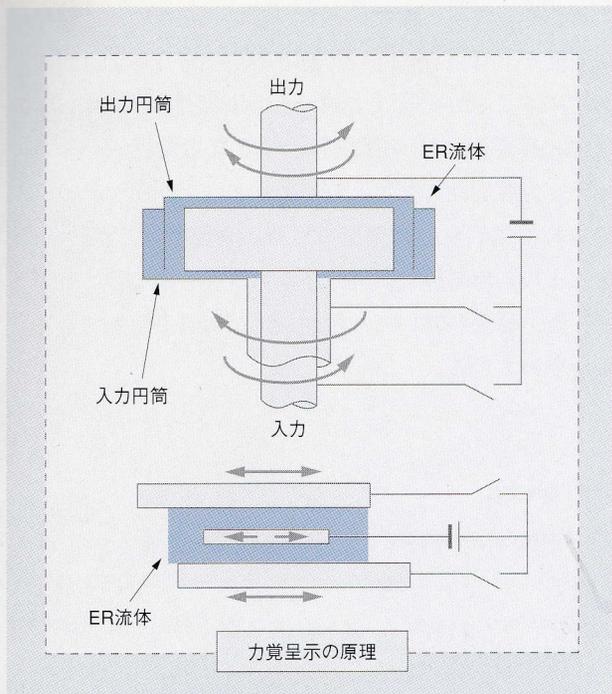


図9 VR力覚呈示装置の作動原理

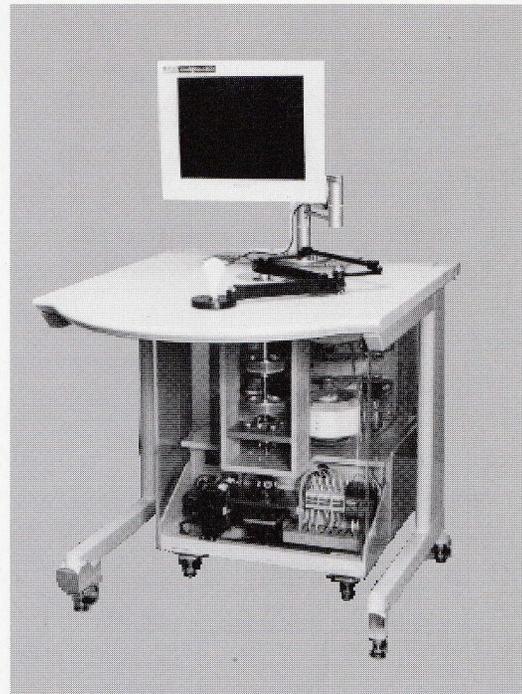


図10 リハビリ装置の写真

度以上にならないようハーフブレーキがかかること、四つ目は、歩行抵抗(ブレーキ力)を所定の値に設定して歩行訓練機として使用できることである。これらの機能や速度は選択できる。この歩行器はすでに発売されており、パーキンソン病、体幹失調症、脳梗塞による片麻痺などの患者や、虚弱高齢者などの歩行支援に役立ち始めている。

一方、分散系ER流体を用いたクラッチは、きわめて優れた応答性を示すことから、バーチャルリアリティ(VR)の力覚呈示装置への応用が期待されている。図9に、その原理を示す。一つのモータで反対方向に回転する一對の同心入力円筒(正極)とその中間に設置した出力円筒(負極)の間にER流体が充填されている。出力させたい方向に回転する入力円筒と出力円筒の間に電場を印加すると、その間のER流体の粘性が増大して電場の強さに応じた出力が伝達される。電場のかけ方次第で出力の強さや方向を瞬時に制御できるため、任意の周波数や振幅の振動なども表現できる。なお、回転ではなく反対方向に振動する一對の平行基板を入力にすれば、中間に置いた出力基板から直線方向の出力も可能となる。パウダークラッチやコアレスモータなどもこのような力覚呈示装置に利用できるが、ER流体クラッチは、高電圧(電流値は低い)が必要であるものの、これらに比べてヒステリシスや静止摩擦が少なく、応答、トルク/慣性比、

低速での安定性などに優れている¹²⁾。

ER流体クラッチを用いた力覚呈示装置は、ゲーム機器など娯楽用途も期待できるが、使用者が限定されるリハビリ訓練や筋力訓練の装置への応用をまず試みた。従来このような用途にはサーボモータが使用されてきたが、モータには制御異常による暴走などの問題があり、モータの力が直接人間、特に障害者や高齢者に及ぶのは危険である。ER流体クラッチをモータと人間の間に介在させることにより、①モータの異常時に瞬時に力の伝達を遮断できる、②ER流体の降伏応力以上の力は滑りにより出力されない、③クラッチ以降の出力系をモータと切り離して軽量化できるため、出力の慣性モーメントを小さくできる、④ER流体クラッチは電場を強くすることで低速回転でも大きな出力を伝達できるため、容量の小さなモータで済むなど、特に安全面でのメリットが大きい。図10は、大阪大学(古荘研究室)の指導を得て弊社グループが開発した2次元作動の上肢リハビリ装置である。訓練者は画像を見ながら上肢を平面的に動かしてゲーム感覚で訓練でき、訓練結果は次の訓練にフィードバックされる。脳梗塞による片麻痺患者や頸椎損傷者の上肢リハビリ訓練への利用を最初の目的としているが、この装置は現在NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の「身体機能リハビリ支援システム」のプロ

ジェクトで、さらに前後左右上下の3次元に広範囲に、自動、他動、自動介助の各モードで作動できるよう大幅な機能拡大と訓練ソフトの充実を図っている¹³⁾。

6. 未来に向けて

ER流体を長期間安定に使用する技術は、いったん開発されると、次の進展が比較的速い。歩行器用のER流体ブレーキは、高圧電源と速度センサが車輪の固定円盤の中空部に内蔵された、きわめてコンパクトで安定なブレーキ内蔵型車輪が開発され、力覚呈示装置用のER流体クラッチも、電極基板をドーナツ型の多重板にしたり、軸シール抵抗を低減するために磁性流体シール法を採用するなど、いくつかの工夫を取り入れることにより、空転トルクがより低く、高トルクを出力できるコンパクトなものが開発されている。

ER流体ブレーキはきわめて小さな消費電力で作動することから、小型移動体のブレーキに好適であり、福祉・介護機器では歩行器に次いで車椅子、病人搬送用ベッドなどへの応用が期待され、さらには産業用小型車両や搬送ローラシステム、省エネ型のブレーキ付きモータなどへの展開も期待されている。一方、ER流体クラッチは、安全性や力覚呈示性能を生かして、筋力回復・維持・向上のための筋肉訓練装置、VRの力覚呈示装置としてゲーム機器や通信、教育、医療などのマン・マシンインターフェース、人間共存型のロボットシステムなどへの展開が期待される。

今後このような用途や、ダンパーやバルブなど古くから期待されている用途に広く普及させていくには、ER

流体のさらなる性能改良と使いこなしのための関連技術の開発を、材料(流体供給)側と応用側が一体となって進めていくことが必要である。ER流体に関しては、分散系には長期耐久性やER効果のさらなる向上、均一系には使用温度範囲の拡大と温度特性の向上が望まれる。これらの性能改良には地道な努力が必要であるが、ER流体および応用の開発研究は今なお世界各地で行われており、近い将来いろいろな場面で応用機器を目にできることを願っている。

引用・参考文献

- 1) W.M.Winslow : *J.Appl.Phys.*, 20, 1187 (1949).
- 2) ER コンソーシアム : <http://www.mmjp.or.jp/ER-COIN/JORTIUM/>
- 3) 日本レオロジー学会「エレクトロレオロジー研究会」主査：土井正男，幹事：小山清人
- 4) 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門 A-TS15-9「メカトロニクスと機能性流体に関する研究会」委員長：古荘純次
- 5) 日本油空圧学会「機能性流体の油空圧への応用に関する研究委員会」委員長：中野政身
- 6) 浅子佳延ほか：「機能性流体の油空圧機器への応用に関する研究会報告書」，日本フルードパワーシステム学会 (2002年9月発行予定)。
- 7) A.Inoue and S.Maniwa : U.S. Pat. 5,354,489, or *J.Appl.Polym.Sci.*, 55, 113 (1995).
- 8) A.Inoue and et al. : *MRS Bulletin*, 23 (8), 43 (1998).
- 9) K.Tajiri and et al. : *J. Rheol.*, 41 (2), 335 (1997).
- 10) A.Inoue and et al. : Proc. 8th Int. Conf. on ERF/ MRS held Nice, France, ed. By G. Bossis (World Scientific, Singapore, in press).
- 11) 中川昭夫ほか：日本機械学会2000年度年次大会講演予稿集，講演番号1322 (2000)。
- 12) 古荘純次：計測と制御，34 (9)，687 (1995)。
- 13) NEDO医療福祉機器技術研究開発事業「身体機能リハビリ支援システム」13年度成果報告書 (印刷中)。

用語解説

【歩行器】4脚の歩行介助用具。車輪の付いたものは、正式には歩行車と言う。歩行車には手動のブレーキが付いたものがあるが、自動ブレーキのものはこれまで例がない。

【せん断】“ずり”あるいは“shear”とも言う。変形の一形式で、一般に、物体上にとった2直線のなす角を変化させ、しかも体積を変化させないもの。

【ビンガム流動】せん断応力 σ が σ_y (降伏値)を超えない間は流動が起らず、 σ_y を超えると $(\sigma - \sigma_y)$ に比例したせん断速度を生ずる流動。

【ニュートン流動】せん断応力がせん断速度に比例する流動を言う。

【せん断速度】間隙 d [m]の一对の平行基板の間に挟んだ物体に、間隙を一定に保ちつつ、速度 V [m/sec]でせん断を加えた際の V/d [1/sec]。

【チクソトロピック】振とうと静置により可逆的に繰り返されるゾル-ゲル転移現象をチクソトロピーと言い、このような現象を示すことをチクソトロピックと言う。

【上肢リハビリ装置】肘・肩のリハビリ装置。主に脳卒中や脊椎損傷の患者のリハビリに利用される。モータ直結駆動で2次元作動するものは、米国MITですでに実用化されている。