

特集 ■ アクチュエータ・テクノロジー ～ヒトとの親和性を目指して～

機能的流体アクチュエータの基礎と応用

～ ER 流体・MR 流体を用いたアクチュエータ・ブレーキの開発と
力覚提示システム等への応用～

菊池武士

KIKUCHI TAKEHITO

大阪大学



古荘純次

FURUSHO JUNJI

大阪大学

1. はじめに

脳卒中患者は約 200 万人いると言われており、また高齢者の運動機能低下も深刻な問題となりつつある。そのような中、リハビリテーション分野へのロボット技術・バーチャルリアリティ技術の導入が強く望まれている。現在、国内外のリハビリテーションロボティクス研究によって多くの福祉機器が研究・開発されている。

筆者らはこれまで、機能的流体（電場や磁場の印加により見かけの粘性が変化する流体）を用いたアクチュエータ・ブレーキの開発 [1-5]、及びそれらの応用である上肢リハビリ支援システム等の研究開発を行ってきた [6-21]。リハビリ支援システムは、人間が接触しながら使用するという意味で人間共存型システムの一つである。人間共存型システムの設計開発において、一般の機械システム以上に安全性が重要な課題となる。筆者らは、人間共存型システムにおける安全確保のもっとも基礎となる方策として、人に優しい (human-friendly な) アクチュエータを使用することが重要と考えている。その具体策の一つが本稿で紹介する機能的流体アクチュエータである。

本稿では、機能的流体アクチュエータ・ブレーキの基本構造および力覚提示システム、上肢リハビリ支援システム、義足・下肢装具等への応用事例に関して述べる。

2. 人間共存型システムにおける安全性

ISO12100 では、機械安全の基本として設計者にリスクアセスメントを要求する。リスクアセスメントとは、危険源の同定からリスクの見積もり、リスクの評価までのプロセスのことである。リスクの評価によって十分な

安全性が確保されていないと判断された場合は適切なリスク低減方策（保護方策）を講じることによってリスクを許容されるレベルまで低減させなければならない。

ISO12100 では設計者が行う保護方策として三つのステップを規定している。すなわち、まず設計段階で極力安全性を向上させ（ステップ 1: 本質的安全設計方策）、それでも排除できなかった危険源に対しては防護柵等で人が近づけないようにし（ステップ 2: 安全防護）、それでも残った危険源に対しては警報装置や説明書によって使用者に危険情報を伝える（ステップ 3: 使用上の情報）。

このように、リスクアセスメントの目的は、安全であることの証明ではなく、残存リスクやそれに対する使用上の注意を使用者に明らかにすることである [22]。

人間共存型メカトロニクス設計開発においては、上記の ISO12100 や ISO10218-1 が参考になるが、これらの汎用規格だけでは不十分であることが指摘されている [23]。例えば、リハビリロボットや手術支援ロボットのようにこれまでの適用事例が少ない場合、情報不足のためにリスク評価が曖昧で主観的になりうる。そこで、具体的なシステムの設計・開発にあたって現状では、少なくとも下記の国際・国内安全規格を満たすことが望まれる。

1. 暴走時の低運動エネルギー特性：ISO14121
2. 機構的に安全を確保する必要性：ISO12100
3. アクチュエータの出力は 80[W] 以下：労働省告示 51 号（昭和 58 年 6 月）
4. 機械の手先速度は 25[cm/s] 以下：ISO10218

また、人間共存型メカトロニクスは人間と接して使用するために、安全柵等の安全防護を設置することが出来ない場合が多い。すなわち、一般的な機械に比べて本質

的安全設計方策の重要度が非常に高い。本質的安全設計方策で重要な手法の一つがアクチュエータの出力制限であり、本稿で後に紹介する機能性流体クラッチ型アクチュエータは本質的安全設計で非常に大きな役割を果たす。

3. 機能性流体 (ER 流体・MR 流体) のメカトロニクス応用

外部の場の変化で特性が変化する流体を機能性流体と言う。機能性流体には、電場で見かけの粘性が変化する ER 流体 (Electro-Rheological Fluid)[24-26]、磁場で粘性が変化する MR 流体 (Magnetorheological Fluid)[27] が存在する。機能性流体には他にもいくつかの種類が存在するが、本稿では ER 流体と MR 流体に関して述べる。

ER 流体には、粒子分散系、液晶系などいくつかの種類が存在する。粒子分散系 ER 流体はビンガム流動的で印加電場で降伏応力を制御可能であり、速度の依存性は低い。よって我々は、高精度にトルク制御可能なクラッチ、ブレーキにこの種の流体を利用している [1][5]。液晶系 ER 流体はニュートン流動的でせん断応力-せん断速度曲線の傾き (粘性係数) を制御できる。よって、制御型ダンパへ応用可能である [26]。MR 流体は基本的には粒子分散系であり、シリコンオイル等の溶媒に磁性体粒子が分散した系である。MR 流体の流動特性は粒子分散系 ER 流体のそれと同様である [27]。

これら ER・MR 流体は、その粘性変化は高速でしかも可逆的であるため、各種メカトロニクスデバイス (クラッチ、ブレーキ、ダンパ等) に応用できる。ER 流体に関して、これまで多くの応用研究が報告されている [1][5][24-26]。MR 流体に関しては近年、ビルや橋梁の制振ダンパ、自動車のサスペンション等においてすでに実用化されている [29][30]。

以下では、粒子分散系 ER 流体と MR 流体の応用に関して述べる。デバイスの主な基本構造 (ピストンタイプ (直動)、円筒タイプ (回転)、ディスクタイプ (回転)) を図 1 に示す。いずれの方式も、ER・MR 流体の粘性変化を利用し、伝達力 (トルク) もしくはブレーキ力 (トルク) を連続的かつ高精度に制御することが出来る。入力側を固定するとブレーキ要素となり、入力側をモータ等で駆動することによりクラッチ要素となる。例えば、ER 流体クラッチでは、入力側の電極と出力側の電極間に ER 流体を充填し、両電極に電場を印加することによって電極間の流体のせん断応力を制御する。

ER 流体は数 kV/mm の電場強度に対して数 kPa のせん断応力を発生する [24]。MR 流体は約 1T (テスラ) の磁束密度に対して 10~100 kPa のせん断応力を発生する

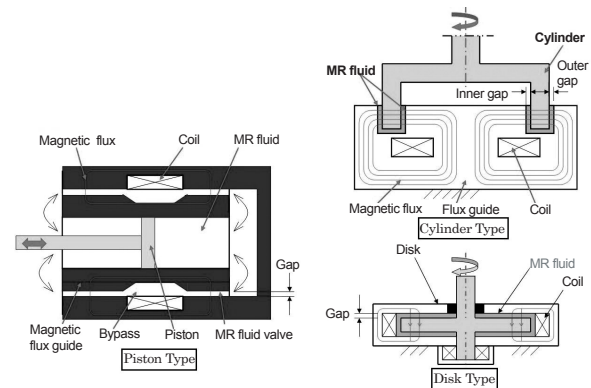


図 1 機能性流体デバイス基本構造

[27]。つまり、同一面積の伝達要素に対しては MR 流体の方が大きな伝達力を得ることができる。

どちらの流体も、流体自体の応答速度は数ミリ秒と非常に高速であるが、ER 流体が電場を利用していることによりデバイスとしての高速化も容易なのに対して、MR 流体の場合は電磁石が発生する磁場の応答遅れのために数十ミリ秒の遅れがあるのが普通である。この問題は、渦電流を考慮した設計をすれば改善できる [3][4] が、その分、コストやサイズが大きくなる。

自動車産業において ER 流体ではなく MR 流体が実用化された理由は耐熱性の差にある。現状では ER 流体が 60°C 付近で粘性変化を消失するのに対し、MR 流体は 100°C を超えても使用可能である。

自動車のような過酷な環境を考えなければ、応答性の観点から ER 流体を使用するほうが望ましい場合もある。実際のデバイスの設計においては、ディスク (もしくは円筒) の多層化の容易性、粒子の沈降や磨耗、デバイス全体のコスト、サイズ等も考慮する必要がある、使用目的によって両流体の使い分けをしているのが現状である。

4. 機能性流体クラッチ型アクチュエータと安全性の高い人間共存型システムへの応用

上記の機能性流体クラッチを従来のアクチュエータと組み合わせることにより、機能性流体クラッチ型アクチュエータを構築することができる [5]。

ER 流体クラッチ型アクチュエータ (以下、ER アクチュエータ) の概念図を図 2 に示す。ER 流体クラッチとクラッチ入力駆動部 (モータと減速機) からなるシステムである。モータは一定速度で駆動する。例えば、モータの速度を、アーム先端速度が 25cm/s 以下となるように

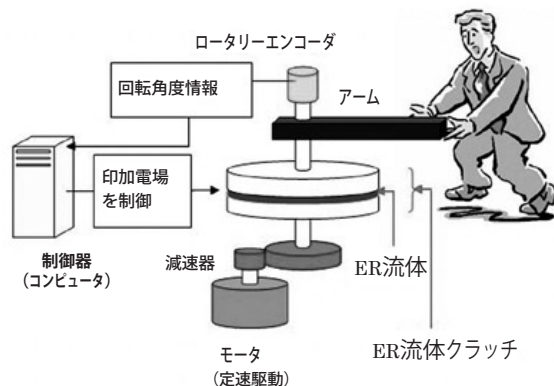


図2 流体クラッチ型アクチュエータの構成

設定しておく (ISO10218 に準拠)。このとき、制御用コンピュータの暴走やソフトウェアにバグがあっても、アクチュエータ側から人間を押す最大速度は 25cm/s 以下となり、衝突時の運動エネルギーが制限され、退避時間や安全システムが動作する時間を確保できる。一方、人間側からリハビリ支援システムを動かす際は、駆動部の慣性を切り離すことにより高速に軽々とアームを動かすことができる。

以降で紹介する上肢リハビリ支援システム等においては、ER 流体・MR 流体を用いたクラッチシステムを採用しており、アクチュエータレベルでの本質的安全性を確保している。

5. 上肢リハビリテーションシステムへの応用

ER アクチュエータを用いたアクティブ型 2 次元力覚提示システム「仁王」[10][11] を図 3 の左に示す。また、ER ブレーキを用いたパッシブ型 [12][13] を図 3 の右に示す。これらのシステムは、トルク応答が高速な ER アクチュエータ・ブレーキを使用しているため、剛性の高い壁の力覚やボールの打撃感など、良好な力覚を提示することが出来た。ブレーキを用いたパッシブ型は、人からの運動に対して人に返す力を制御するものであり、極めて安全性が高い。このパッシブ型のシステムは、日本バーチャルリアリティ学会論文賞を受賞している。これらの力覚制御機構は、以下の EMUL、セラフィ、PLEMO にも引き継がれている。

5 カ年 NEDO プロジェクト「身体機能リハビリ支援システム (1999 年度～2003 年度)」において 3 次元上肢リハビリ支援システム「EMUL」(図 4 左上)[14] を研究開発したのがリハビリ分野への本格的参入と言える。プロジェ

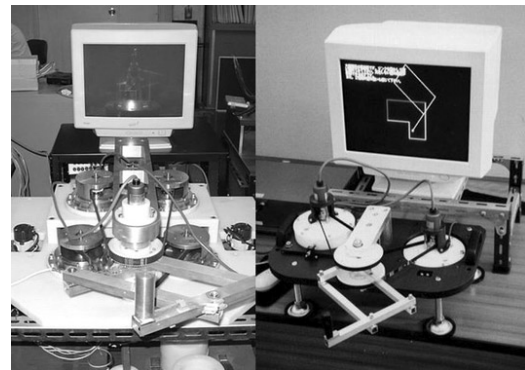


図3 ER アクチュエータ・ブレーキを用いた 2 次元ハプティックデバイス (左: アクティブ, 右: パッシブ)



図4 ER アクチュエータ・ブレーキを用いた各種上肢リハビリ支援システム

クト開始 4 年目までに旭化成グループとともにシステムを完成させた。最終年度に兵庫医科大学との共同研究で臨床評価を行い、脳卒中患者に対して訓練効果があることを確認した [31]。また、近年、森之宮病院と共同で EMUL を用いた訓練を行いながら、その時の脳機能計測を行うことで、脳活動から見た効率の良いリハビリテーションとは何かを解明しようとしている。

NEDO プロジェクト「次世代ロボット実用化プロジェクト (プロトタイプ開発支援事業)」(2004 年度～2005 年度) において、手首を含む上肢全体の協調動作のリハビリ訓練が可能な 6 自由度上肢リハビリ支援システム「セラフィ」(図 4 左上)[15][16] の研究開発を行なった。このロボットは、愛知万博のプロトタイプロボット展で実演展示を行い、好評を博した。また、セラフィは Good Design 賞も受賞した。

上記、EMUL、セラフィは 3 次元空間における自由な運動と力覚提示を実現するために機構的にも制御シス

テム的にも大きなものになっている。そこで、機構と制御システムの見直しを行い、システムの小型化、低コスト化を実現したのが PLEMO である。図 4 左下は完全パッシブ型 PLEMO-P1[17][18] である。トルク制御部に ER 流体ブレーキを用いており、機械システムからの能動的な動作がないために極めて安全である。制御自由度は作業平面の 2 次元に限定しているが、この作業平面の傾斜角を調整することによって 3 次元的な訓練も可能となっている。このプロトタイプ機を基礎として、商品化一号機の開発も行った。この商品化一号機は、兵庫医大に納品され、現在、リハビリ効果の評価を行っている。

図 4 右下はアクティブ・パッシブ兼用の Hybrid PLEMO である。上記の PLEMO-P1 と同じ準 3 次元的な機構を採用して本体の小型化を図った。また、トルク制御部には、ブレーキモードとアクチュエータモードを切り替え可能な新しい機構を採用した。

6. 義足、下肢装具への応用

大阪大学古荘研究室及び大阪電気通信大学森本、神戸学院大学中川らは、義足分野では初めての制御型義足足部を開発した(図 5 左)[19]。また、2005 年～2007 年の NEDO プロジェクトにて制御型下肢装具(図 5 右)[20]の研究開発も行った。これら義足・下肢装具では足関節のトルク制御に MR ブレーキが用いられており、歩行実験において足部の地面に対する一定のクリアランスが確保され、大腿部を持ち上げない自然な歩行が実現できていることが確認できた。MR ブレーキは軽量・コンパクトで高速にブレーキ力を制御することができ、しかも機械的な動作音がしない。

7. 足部痙性シミュレータへの応用

筆者らは MR 流体アクチュエータを用いて足部痙性シミュレータを開発し(図 6)[21]、脱力時の関節から痙性を有する関節まで、様々な関節の力覚を再現した。クロウヌス等の異常挙動をこのロボットで再現することによって、それらの神経生理学的、制御工学的なモデル構築を目指している。また、このようなロボットは、理学療法士の教育現場において実際の異常関節を力覚的に再現できることから、理学療法士らの教育にも有効であると考えている。

8. おわりに

本稿では、機能性流体の一種である ER 流体、MR 流

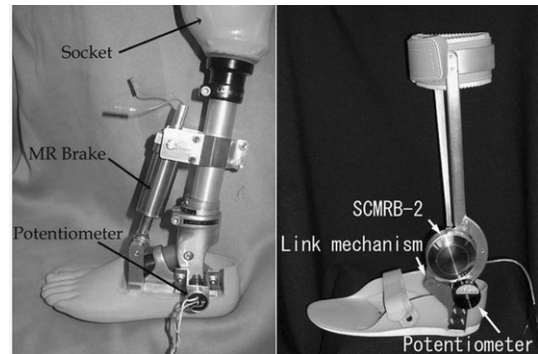


図 5 MR 流体ブレーキを用いた制御型義足・下肢装具
(左：制御型義足，右：制御型下肢装具)
* 口絵にカラー版掲載

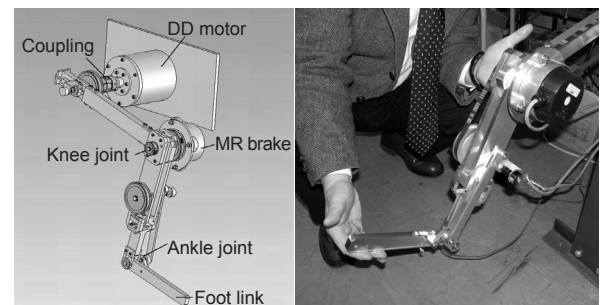


図 6 MR 流体アクチュエータを用いた
足部痙性シミュレータ

体を用いたアクチュエータとブレーキの原理、構造、応用用途に関して述べた。また、機能性流体クラッチ型アクチュエータのアクチュエータレベルでの安全性に関して解説し、その応用例として各種のリハビリ支援システムに関して述べた。MR 流体に関してはすでに自動車産業等への応用が見られるが、ER 流体に関しても材料、デバイスともに現在も研究開発が進められており、今後、実用化が期待できる。

参考文献

- [1] 古荘，魏，古賀：ER 流体を用いた低慣性アクチュエータの開発とそのバーチャルリアリティへの応用，日本機械学会第 72 期通常総会講演会論文集 (IV)，pp.265-266 (1995)
- [2] 古荘(解説)：ER 流体を用いたメカトロニクスシステム，フルイドパワーシステム (日本油空圧学会誌)，Vol.32, No.6, pp.390-395 (2001)
- [3] 武居，古荘，清田：高速応答 MR 流体アクチュエータに関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.69, No.681, pp.1342-1349 (2003)
- [4] 山口，古荘，菊池，木村：ケイ素鋼板を用いた高速応答・高出力 MR アクチュエータの開発，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.70, No.698, pp.2886-2893 (2004)

- [5] 古荘 (展望解説): ER 流体を用いたメカトロニクス機器の制御, 計測と制御 (計測自動制御学会誌), Vol.34, No.9, pp.687-691 (1995)
- [6] 古荘, 菊池 (総説): 医工連携とフルードパワー, フルードパワー (日本フルードパワー学会誌), Vol.37, No.5, pp.272-276 (2006)
- [7] 古荘, 菊池 (解説): 上・下肢リハビリテーション, 福祉機器へのロボット技術の適用, 総合リハビリテーション, Vol.35, No.5, pp.439-445 (2007)
- [8] 菊池, 古荘 (解説): 上肢・下肢リハビリテーションシステムの研究開発および VR 技術の応用, 日本シミュレーション学会誌, Vol.26, No.3, pp.160-165 (2007)
- [9] J. Furusho, T. Kikuchi: A 3-D Rehabilitation System for Upper Limbs “EMUL”, and a 6-DOF Rehabilitation System “Robotherapist”, and Other Rehabilitation System with High Safety, Rehabilitation Robotics (Edited by Sashi S Kommu), Chapter 8, I-Tech Education and Publishing, pp.115-136 (2007)
- [10] J. Furusho and M. Sakaguchi: New Actuators Using ER Fluid and Their Applications to Force Display Devices in Virtual Reality and Medical Treatments, International Journal of Modern Physics B., Vol.13, No.14-16, pp.2151-2159 (1999)
- [11] 小柳, 古荘, 小田: 仮想迷路抜け課題を応用した上肢運動機能解析に関する考察, 人間工学会誌, Vol.42, No.5, pp.295-304 (2006)
- [12] J. Furusho, M. Sakaguchi, N. Takesue and K. Koyanagi: Development of ER Brake and its Application to Passive Force Display, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.13, No.7/8, pp.425-429 (2002)
- [13] 古荘, 小柳, 董: 機能性流体ブレーキを冗長個数用いた力覚提示システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集, 1P1-2F-E4 (2003)
- [14] 古荘ら: 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発 (第1報: ER アクチュエータを用いた機構およびシステム全体の開発), 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.5, pp.123-130 (2005)
- [15] 古荘, 中山: 手首を含む 6 自由度上肢リハビリ支援ロボット「セラフィ」, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2, pp.186 (2006)
- [16] J. Furusho, et al.: Development of 6 D.O.F Rehabilitation Robot for Upper Limbs Including Wrists with High Safety, The 36th International Conference on Robotics, WE2C2 (2005)
- [17] 菊池ら: 準 3 次元リハビリテーション訓練支援システム「PLEMO (プレモ)」の開発に関する基礎研究, VR 医学 (日本 VR 医学会誌), Vol.5, No.1, pp.24-31 (2007)
- [17] 菊池ら: 準 3 次元上肢リハビリ支援システム「PLEMO (プレモ)」およびそのソフトウェアの研究開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1, pp.79-87 (2008)
- [19] 古荘ら: インテリジェント義足足継手の研究開発 (第1報, リニア型 MR 流体ブレーキの開発), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.70, No.695, pp.2163-2170 (2004)
- [20] 古荘ら: せん断型コンパクト MR ブレーキを用いたインテリジェント下肢装具の研究開発 (第1報) せん断型コンパクト MR ブレーキの開発と制御型短下肢装具への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.867-873 (2007)
- [21] 菊池, 山口, 小田, 古荘: MR クラッチを用いた足部痙性シミュレータの開発, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.1166-1167 (2007)
- [22] 杉本: 展望グローバルな安全とリスクアセスメントの構造, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.8, pp.1146-1150 (2007)
- [23] 木村 (解説): サービスロボットのリスクアセスメントとその課題, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.8, pp.1151-1154 (2007)
- [24] 小山: ER 流体の開発と応用, シーエムシー (1995)
- [25] 中野: 機能性流体の現状と今後の展望, 精密工学会誌, Vol.72, No.7, pp.813-816 (2006)
- [26] 井上: 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)
- [27] J. David Carlson: MR fluid and devices in the real world, Proceedings of the 9th International Conference on ER Fluids and MR Suspensions, pp.531-538 (2004)
- [28] 井上 (解説): 福祉・健康機器への応用, フルードパワーシステム (日本油空圧学会誌), Vol.37, No.5, pp.15-19 (2006)
- [29] J. David Carlson: MR fluid technology - commercial status in 2006, Proceedings of the 10th International Conference on ER Fluids and MR Suspensions, pp.389-395 (2006)
- [30] 出頭 茂 (解説): MR 流体とその応用, フルードパワーシステム (日本油空圧学会誌), Vol.38, No.2, pp.36-40 (2007)
- [31] 宮越, 道免, 小山, 古荘, 小柳: 脳卒中片麻痺患者に対する上肢機能訓練装置の使用経験, リハビリテーション医学, Vol.43, No.6, pp.347-352 (2006)

【略歴】

菊池武士 (KIKUCHI Takehito)

2003 年 大阪大学大学院工学研究科 修了. 同年大阪府立産業技術総合研究所に入所. 2005 年 大阪大学大学院工学研究科助手. 現在, 同大学助教. 機能性流体を用いたブレーキ・アクチュエータの研究開発およびその応用の研究に従事. 日本バーチャルリアリティ学会等の会員. 博士 (工学).

古荘純次 (FURUSHO Junji)

1970 年 大阪大学工学部機械工学科卒業, 1975 年 同大学博士課程単位取得退学. 大阪大学助手, 岐阜大学助教授, 電気通信大学教授を経て, 1996 年より大阪大学教授. ロボティクス・メカトロニクス, 上肢・下肢リハビリ訓練システム, バーチャルリアリティ, 人間共存型メカトロニクス, 機能性流体を用いたメカトロニクス, 手術支援システム等の研究に従事. 日本バーチャルリアリティ学会等の会員. 工学博士.