

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN

FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

フルードパワー システム

Nov.2016 Vol.47 No.6

日本フルードパワーシステム学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「機能性流体を活用した
フルードパワー技術の実用化最前線」

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目 次

特集「機能性流体を活用したフルードパワー技術の実用化最前線」

【巻頭言】

「機能性流体を活用したフルードパワー技術の実用化最前線」発行にあたって 中野 政身 264

【総論】

機能性流体の研究開発と実用化の動向 中野 政身 265

【解説】

自動車用MR流体ダンパの研究 齋藤 啓司 272

超小型EV向けMR流体ブレーキの開発 中野 政身, 古川 仁, 道辻 善治 275

建築物の免震・制振用MR流体ダンパの開発 袖山 博 279

ナノMR流体の特長とハプティクスへの応用 野間 淳一 282

MR流体ブレーキを用いた筋力トレーニングロボットの開発
高頭 静夫, 石井 博, 白石 俊彦, 高杉紳一郎, 岩谷 徹 285

ER流体とその応用開発の現状 井上 昭夫 289

リハビリテーション長下肢装具用電子制御EAM膝ブレーキの開発
安齊 秀伸, 山本 澄子, 三井 和幸, 安井 匡 293

釣用リールにおける磁性流体シールの応用 小原 武恵 296

【ニュース】

第4回フルードパワーに関する日中国際共同ワークショップ
(The 4th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power) 開催報告 伊藤 和寿 299

【会議報告】

インドフルードパワー技術セミナーに参加して 眞田 一志 302

ROBOMECH2016におけるフルードパワー技術研究の動向 田中 豊 304

【教室】

入門講座「エネルギー工学」第二回：火力発電と再生可能エネルギー 江間 敏 307

【トピックス】

補助人工心臓開発と大学発ベンチャー 進士 忠彦 310

【研究室紹介】

東京工業大学 工学院 鈴森・遠藤研究室 鈴森 康一 313

【企画行事】

平成28年春季フルードパワーシステム講演会報告 金 俊完 317

【会告】

Professor Dr.-Ing Wolfgang Backéご逝去のお知らせ 320

平成28年度 オータムセミナー

「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」開催のお知らせ 323

論文集の掲載形態の変更について 323

共催・協賛行事のお知らせ 325

書籍案内 オーム社刊「油圧・空気圧回路～書き方&設計の基礎教本」 326

資料一覧 327

フルードパワーシステム第47巻総目次 331

その他 319, 324, 334

■表紙デザイン：山本 博勝 (株)豊島

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM**Contents****Special Issue “the Cutting Edge of Practical Use of Fluid Power Technologies
Exploiting Functional Fluids”****[Preface]**

On the Special Issue “the Cutting Edge of Practical Use of Fluid Power Technologies Exploiting Functional Fluids”	Masami NAKANO	264
--	---------------	-----

[Survey]

Trends in Research & Development and Practical Use of Functional Fluids	Masami NAKANO	265
---	---------------	-----

[Review]

Study on Magneto-Rheological Fluid Damper for Automobile	Keiji SAITO	272
Development of MR Fluid Brake for Super-Compact Electric Vehicle	Masami NAKANO, Hitoshi FURUKAWA, Yoshiharu MICHITSUJI	275
Development of Magneto-Rheological Fluid Dampers for Seismic Vibration Control of Buildings	Hiroshi SODEYAMA	279
The Feature of Nano-MR Fluid and the Applicability to Haptics	Jun-ichi NOMA	282
Development of a New Integrated Robot for Resistance Training of Muscles using Magneto-Rheological fluid	Shizuo TAKATOH, Hiroshi ISII, Toshihiko SHIRAISHI, Shin-ichiro TAKASUGI, Toru IWATANI	285
ER Fluid and Recent Development of the Applications	Akio INOUE	289
Development of EAM Brake Device for Knee-Ankle-Foot-Orthosis	Hideobu ANZAI, Sumiko YAMAMOTO, Kazuyuki MITSUI, Tadashi YASUI	293
The Applicability of the Magnetic Fluid Sealing in Fishing Reels	Takeshige OHARA	296

[News]

Report on The 4th Japan-China Joint Workshop 2016	Kazuhisa ITO	299
---	--------------	-----

[Conference Report]

Fluid Power Technical Seminar 2016	Kazushi SANADA	302
Research Trend of Fluid Power in ROBOMECH2016	Yutaka TANAKA	304

[Lecture]

An Introductory Course of Energy Engineering : 2. Thermal Electric Power Generation and Renewable Energy	Satoshi EMA	307
---	-------------	-----

[Topics]

Development of Ventricular Assist Devices by University Initiated Venture	Tadahiko SHINSHI	310
---	------------------	-----

[Laboratory Tour]

Suzumori & Endo Laboratory, School of Engineering, Tokyo Institute of Technology	Koichi SUZUMORI	313
---	-----------------	-----

[JFPS Activities]

Report on JFPS Domestic Conference in Spring, 2016	Joon-wan KIM	317
--	--------------	-----

[JFPS News]

319, 320, 323, 324, 325, 326, 327, 331, 334

巻頭言

「機能性流体を活用したフルードパワー技術の実用化最前線」 発行にあたって

著者紹介



なか の まさ み
中野政身

東北大学流体科学研究所
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
E-mail: m-nakano@fmail.ifs.tohoku.ac.jp

1982年早稲田大学大学院博士後期課程修了、同年山形大学助手、助教授を経て、1997年同教授、2008年東北大学教授。機能性流体とその応用、流体関連振動・騒音などの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会（理事）、日本機械学会（フェロー）などの会員。工学博士

ER (Electro-Rheological) 流体、液晶、EHD (Electro-Hydro-Dynamic) 流体・ECF (Electro-Conjugate Fluid), MR (Magneto-Rheological) 流体、磁性流体及び機能性ソフトマテリアルなどは、電場や磁場などの外場に反応して流体の物理化学的性質が変化する機能性流体である。これらの機能性流体を作動媒体とする各種のフルードパワーシステムは、機能性流体固有の特徴的な機能性を効果的に活用することによって、従来にはない機能を付与できると同時に、かつ小型・高出力化、簡便化、高速化、知能化、低廉化、高い信頼性や安全性の確保などの点で卓越した優位性を実現できる可能性を有する。本学会誌では、Vol.42, No.1 (2011年1月号) 特集号「機能性流体テクノロジーの最前線」¹⁾において、これらの機能性流体に関する種々の分野における最新の研究開発の動向について各種の機能性流体毎にレビューを行うとともに、いくつかの実用化あるいは実用化に近い開発事例を紹介している。

その後5年程度経過していることと、機能性流体を活用した機器の実用化の事例が多方面で展開されてきていることから、本特集号では、機能性流体を活用したフルードパワー技術・機器の実用化に焦点を絞り、実用化を目指して開発され、実用化に至った、あるいは実用化に近い事例を紹介する。

まず総論として、中野政身（東北大学）には、機能性流体の研究開発と実用化の動向と題して、各種の機能性流体毎にその機能性を概説し、研究開発の動向および機能性流体を活用した機器の実用化、製

品化の現状をレビューしていただいた。

解説としては、まず、齋藤啓司氏（KYB）には、国内で自動車用に研究開発しているMR流体ダンパについて紹介いただいた。同じく、自動車用途へのMR流体の応用として、超小型EV向けに開発されたMR流体ブレーキについて、中野政身（東北大学）、他に解説いただいている。袖山博氏（三和テック）には、建築構造物の免震・制振用に開発されたMR流体ダンパについて、その基本的な情報を含めて、その設置例や近年の研究開発の動向を紹介いただいた。野間淳一氏（栗本鐵工所）には、直径100nm程度の鉄ナノ粒子分散MR流体の特長とその特長を活かしたハプティクス分野への応用の可能性について解説いただいた。MR流体ブレーキのリハビリ分野への応用・製品化の例として、高頭静夫氏（竹井機器工業）、他にはMR流体ブレーキを活用した上肢・下肢の筋力トレーニングを支援するロボットについて紹介いただいた。ER流体とその応用開発の現状と題して、井上昭夫氏（ERテック）には、粒子分散系ER流体の特徴とともに、その応用機器や実用化例について紹介いただいた。安齊秀伸氏（藤倉化成）、他には、ER流体粒子をゲルに分散して固化した電気的吸引材料を活用して開発したリハビリテーション長下肢装具用電子制御膝ブレーキを紹介いただいた。最後に、小原武恵氏（グローブライド）には、磁性流体の新たな製品化事例として、防水用途で開発された磁性流体シールの釣用リールへの実用化について解説いただいた。

末筆ながら、ご多忙の中をご執筆いただいた著者の皆様に厚く御礼を申し上げる。また、会員の方々には、機能性流体のフルードパワー技術への適用及び実用化に関する最新情報の提供に資することができれば、望外の喜びである。

参考文献

- 1) 特集号「機能性流体テクノロジーの最前線」, フルードパワーシステム, Vol.42, No.1, (2011)

(原稿受付: 2016年10月25日)

機能性流体の研究開発と実用化の動向

著者紹介



なか の まさ み
中野 政 身

東北大学流体科学研究所
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
E-mail: m-nakano@fmail.ifs.tohoku.ac.jp

1982年早稲田大学大学院博士後期課程修了。同年山形大学助手、助教授を経て、1997年同教授。2008年東北大学教授。機能性流体とその応用、流体関連振動・騒音などの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会（理事）、日本機械学会（フェロー）などの会員。工学博士

1. はじめに

21世紀の技術革新をもたらす原動力の一つとして、新物質や新材料、特に高機能材料があげられる。本稿で取上げる機能性流体（Functional Fluids, Smart Fluids）も高付加価値製品の創出という観点から産業及び工業技術面において大きなブレークスルーをもたらすポテンシャルを有している。その機能性流体とは、流体を人工的に調製してある機能を強調しかつ外部から加える物理量（電磁場・光・温度など）を制御することによって、その物理化学的性質を機能的に変化できる流体を指しており、工学的に応用可能な機能性を発揮する流体の総称である。現状では、電場や磁場に反応して粘弾性のレオロジー特性が変化するER流体（Electro-Rheological Fluids）やMR流体（Magneto-Rheological Suspensions）、磁気体積力を発生する磁性流体（Magnetic Fluids, Ferrofluids）、直流高電圧を印加するとジェット流が発生するEHD（Electro-Hydro-Dynamics）効果を示す流体、電磁的に流動場を制御可能な機能性プラズマ、そして電場や磁場に反応して粘弾性特性などの変化や変形が生ずる機能性ソフトマテリアルなどがあげられる。

これまで、これらの機能性流体に関して、その創製と機能性の評価、そして機能発現メカニズムの解明とマルチスケール流動特性の把握など流体力学的な観点からのアプローチとともに、その固有の機能性を工学的に有効に活用し、高速性、簡便性、コン

パクト性、さらには知能性などの有意な特徴が付与された先進機械デバイスおよびシステムの研究開発が活発に行われてきている。具体的には、ブレーキ、クラッチなどによる制動・動力伝達制御、ダンパによる振動の抑制、可動部の全くないバルブやEHDポンプなどによるアクチュエータやマイクロモータの構築と制御など、さまざまな方面に応用可能であり、多方面で活発に研究・開発が進められてきている^{1)~8)}。

本稿では、フルードパワー技術に応用展開のポテンシャルを有している機能性流体として、ER流体、MR流体、磁性流体、およびEHD流体・ECFを取り上げ、それらの研究開発の動向を概観するとともに、実用化の動向として実用化・製品化に至った事例や実用化に近い開発事例を紹介する。

2. ER 流 体

2.1 ER流体の研究開発の動向

外部電場の作用のもとで流体の内部構造が変化しそのレオロジー的性質が大きく変化する現象をER効果（Electro-Rheological Effect）といい、そのような機能を有する流体をER流体と呼ぶ。ER流体は、特にその粘性を数ミリ秒のオーダーで電氣的に可逆的かつ連続的に変化できるため、電気信号によって直接「力」、「圧力」、「流量」などの信号に変換し制御できる特筆すべき機能を有している。これまで、様々な種類のER流体が発見され、また新たに開発されてきている。これらのER流体は、その組成とER効果の違いから大きく分けて、粒子を分散した粒子分散系ER流体と粒子を含まない均一系ER流体に分類できる。

粒子分散系ER流体は、シリコンオイル等の絶縁性の分散媒中に電場下で電気分極し易い物質からなる微粒子（一般に、直径1～10 μ m程度）を分散した懸濁液であり、電場下で電気分極した多数の粒子によるクラスター（架橋構造）の形成に起因して見掛け上流体の粘性が増加したように振る舞う。電場印加によって形成された粒子クラスター構造を崩壊する力、すなわち降伏せん断応力が現れ、その応力以下の応力では流動せず、応力が降伏せん断応力

を越すと流動するビンガム流体に類似した挙動を呈する。

均一系ER流体の代表として、低分子液晶や高分子液晶が見出されている。一般に、液晶の誘起せん断応力は、有意な降伏せん断応力は現れず、電場下でもせん断速度にほぼ比例して増加しニュートン流体に類似した特性を示す。その増加割合が電場強度 E によって変化するER特性を示す。

ER流体の応用分野では、流体を媒体として動力を伝達するクラッチやブレーキ、流量や圧力を制御するバルブ、そして液体粘性を利用したダンパなどの流体が介在する機械要素への応用と同時に、振動制御、ロボット制御、アクチュエータ制御、マイクロマシン制御などの各種制御システムへの応用が展開されてきている。1990年代当初、ER流体が粘性を可変する機能をもっていることと市場規模の大きさから、自動車産業での応用が考えられ、液体封入式エンジンマウント、ショックアブソーバなどへ応用し車両の振動制御性能を高めようという研究が活発に行われていたが、当時のER流体の完成度の低さと使用条件の過酷さから実用化レベルには至らなかった。その後、使用条件が過酷ではない一般産業への応用を目指して、除振テーブル、マイクロマシン、研磨加工、工作機械テーブル、トライボロジー、リハビリ訓練システムなど、多方面でのER流体の応用研究が活発に行われてきている。ER流体を作動流体とする液压システムの要素研究として、マイクロバルブ、マイクロアクチュエータ、マイクロポンプなど、マイクロフルードパワーシステム構築のための研究開発が試みられてきている。

2.2 ER流体の実用化の動向

ここ二十数年に及ぶ流体の研究開発の結果、実用に供するER流体が開発され国内外で販売されている。国内では、E社⁹⁾が粒子分散系と高分子液晶均一系のER流体を販売しており、C社¹⁰⁾がイギリスS社¹¹⁾の粒子分散系ER流体を代理店販売している。海外では、ドイツF社¹²⁾が粒子分散系ER流体を開発・販売し、ホンコンのSM社¹³⁾が従来の粒子分散

系ER流体の20倍程度の50～100kPa程度の降伏せん断応力（図1）を発揮するナノ粒子を分散したGiant-ER流体¹⁴⁾を開発・販売している。

ER流体を活用した機器の実用化事例としては、まず、電動モータとERクラッチからなるERアクチュエータを活用した力覚提示装置を応用した安全性が高くかつコンパクトな3次元上肢リハビリ訓練システムやERブレーキを活用した各種の上肢リハビリ支援システムが実用化レベルで開発されていることが挙げられる¹⁵⁾。その臨床応用結果から訓練意欲の維持・増進に効果があることとリハビリの有効性が



図2 ERアクチュエータを活用した上肢リハビリ支援システム⁹⁾



図3 シリンダー・ピストン型ERダンパの腕の筋力トレーニングシステムへの活用¹²⁾



図4 ER流体バルブで駆動される点字ピンからなる3行点字表示システム（2048 dots/129文字，3行，サイズ：450×130×60mm）¹¹⁾

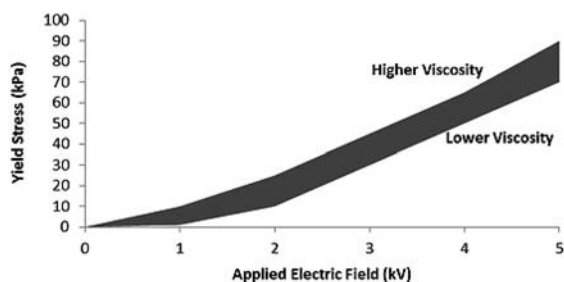


図1 Giant-ER流体の誘起降伏せん断応力vs.印加電場強度¹³⁾

示されており、ERアクチュエータを用いた6自由度の上部リハビリ支援システム(図2)が製品化され販売されている⁹⁾。

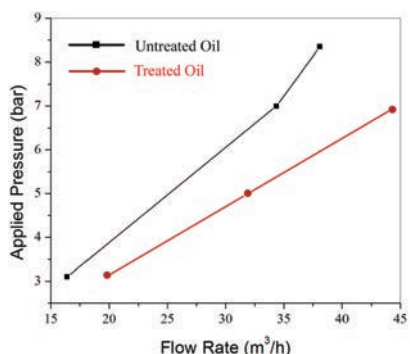
ドイツF社¹²⁾では、自社開発のER流体を用いてシリンダー・ピストン型のERダンパーを開発し、腕の筋力トレーニングシステムに応用(図3)として実用化している。

また、イギリスのS社¹¹⁾では、ER流体のマイクロフルードパワーシステムへの実用化例として、全く可動部のない電極対だけからなるERバルブで駆動される点字ピンで構成されたコンパクトな点字表示システム(図4)を製品化し販売している。

ER流体は一般に電場を印加することによって粘度が増大する方向の機能性を有するが、原油輸送パイプラインの抵抗低減策として、電場を流れ方向に印加して原油中のパラフィンやアスファルトの粒子クラスターを形成することによって乱流を抑制して層流化し逆にパイプラインの抵抗を低減する方法が



(a) 原油輸送パイプラインのポンプ下流に設置された電場印加装置



(b) 流量とポンプ圧力との関係：Untreated Oilの場合、 $Re > 2,300$ でパイプ流れが乱流化し流量に対するポンプ圧の勾配が大きくなるが、一方、電場を印加したTreated Oilでは、 $Re=6,348$ に達しても流れの層流化によって流量とポンプ圧力は比例関係を保っている。

図5 原油輸送パイプラインの電場印加装置による抵抗低減の実例¹⁶⁾

提案され、実用化レベルでの試験(図5)が実施されていること¹⁶⁾はER効果の新規な活用法という意味で特記に値する。

今後、電極だけで制御でき高速応答性が確保できるER流体の特徴を最大限に活用した機器の軽量化・小型化を指向した機器の実用化が望まれ、各種の小型化ERデバイスの構築とそれらの温度変化の少ない環境で使用される一般産業機器や医療・福祉・介護機器等への応用が期待できる。

3. MR 流体

3.1 MR流体の研究開発の動向

MR流体は、シリコンオイル等の油を分散媒としその中に1～10 μ mの強磁性体粒子(一般には、カルボニル鉄)を分散させた懸濁液であり、磁場の印加によってそのレオロジー特性を急速かつ可逆的に変化できる機能(MR効果)を示す流体である。分散した強磁性体粒子が磁場印加により磁氣的に分極し、粒子分散系ER流体と同様に粒子同士が結合してクラスター構造を形成することによりレオロジー特性が変化する。MR流体の誘起せん断応力は、粒子分散系ER流体のものに比して格段に大きく、約20から50倍の値を示すのが特徴的である。

MR流体は、1948年にRabinow J.によって最初に開発され¹⁷⁾、クラッチへの応用が提示されているが、1990年代からMR流体の応用研究が活発化している。現在では、MR流体は市販されており¹⁸⁾、商業ベースでの市場展開が行われている。現在年間200tonオーダーのMR流体が生産・販売されている。このように、MR流体が市販されるほど成熟していることから、MR流体の開発よりもむしろ実用化を目指した応用分野の研究開発が活発に行われてきている。

MR流体の応用に関する研究開発では、各種のMRブレーキ、クラッチ、ダンパ、ショックアブソーバなどのモジュールが開発されてきている。MRダンパやMRショックアブソーバは実際にトラック・農業用トラクターなどのシートダンパや乗用車・軍用トラックさらにはつり橋のワイヤ振動制御装置やビルなどの建築構造物の免震装置などに搭載され実用化に至っている^{19), 20)}。他には、新規でコンパクトなMRバルブを用いた可変減衰力MRベローズダンパ、永久磁石を用いて変位と速度に依存して減衰特性が変化するパッシブ式MRダンパ、不織布にMR流体を含浸させMR流体中の粒子沈降を防止したMR流体コンポジットを活用した回転型MR流体ブレーキをボールネジを活用して直動に変換した建築構造物用の直動型MRダンパなどが開発

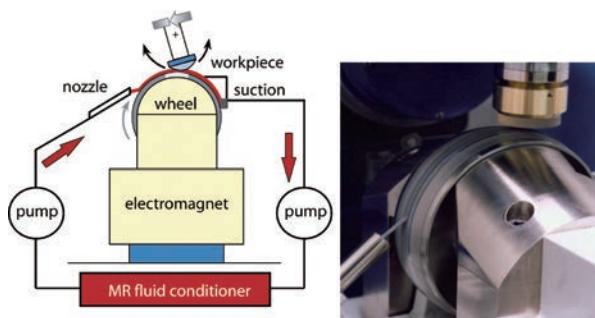
され、良好な制振特性を実現している²¹⁾。また、同様なMR流体コンポジット中に線材を直接通してブレーキ力を発生させるMRブレーキをコイル巻線張力制御装置に適用することによって張力変動を劇的に抑制している²²⁾。他のMRブレーキの応用例としては、誘導電動モータの機械的摩擦を利用した電磁ブレーキの代わりにMR流体ブレーキを開発して適用した例¹⁹⁾などがあげられる。

3.2 MR流体の実用化の動向

MR流体の実用化・製品化の最たるものは、MR流体ショックアブソーバの開発(図6)とその車両用セミアクティブサスペンション制御への応用である²³⁾。2002年にMR流体ショックアブソーバを高級乗用車やスポーツ車へ搭載してからすでに14年ほどの実績を有しており、現在でもSUVや欧州高級ス



図6 MR流体ショックアブソーバの例(2002年米国D社開発・事業化→2009年中国B社へ事業部売却)



(a) MR流体による研磨の概要



(b) 製品化された5軸制御MR流体研磨装置

図7 MR流体を活用した研磨装置²⁵⁾

ポーツ車などへ採用され使用が拡大してきている。国内メーカーも自動車用のMR流体ダンパを開発しており実用化が待たれるところである²⁴⁾。また、MR流体エンジンマウントも開発・製品化され、2009年には独スポーツ車に搭載されている²³⁾。これらのMR流体デバイスの車両への搭載と実績は、車両などの苛酷な環境下でもMR流体が信頼性をもって使用できることを実証するものである。

MR流体を活用したサブナノオーダー研磨加工に関する研究開発及びMR流体研磨機の製品化^{25), 26)}は注目すべきものがある。これに関連する研究成果も発表されている²⁷⁾。図7に示すように、回転ホイールの左側のノズルから研磨剤を混合したMR流体が供給され、回転ホイール外周面上を流れて右側のスクレーパーで回収される。回転ホイール上端には電磁石によって磁場が印加されており、そのホイール上端部の磁場下のMR流体にガラスレンズなどの被研磨面を押し付けることによって研磨が行われる。局所的なスポットで研磨が可能なることから、被研磨面形状を事前に測定してそのデータを活用して被研磨面の研磨量を推定しNC制御によりスポット的に被研磨面の研磨を行っている。

MR流体の健康福祉分野への応用として、米国O社²⁸⁾が多盤式MR流体ブレーキを活用した大腿義足のMR流体膝継手(図8)を開発し、製品化している。コンピュータ制御され、Yielding機能が効果的に発揮され平地や階段の滑らかな歩行を可能としている。また、国内でも、小型の高性能な多盤式MR流体ブレーキを開発して膝継手に活用した随意電子制御大腿義足を研究開発している^{29), 30)}。義足使用者の随意によって膝をLock並びにYieldingすることが可能で、平地、階段歩行だけでなく、違和感なく椅子に座る動作なども可能としている。ピストン・シリンダー式のMR流体ダンパを負荷を与えるブレーキとして用いた上肢・下肢の筋力トレーニングを1台で実現できる筋力トレーニング装置も開発



図8 大腿義足のMR流体膝継手²⁸⁾

(a) 無線操縦機のスロットル操作³³⁾(b) 抵抗可変下肢装具³⁴⁾

図9 ナノ粒子分散MR流体を用いたブレーキの実用化応用機器

され、製品化されている³¹⁾。

アークプラズマ法で創製された100nmの鉄粒子を分散したナノ粒子分散MR流体³²⁾は粒子沈降にくく再分散し易いうえに、滑らかな感覚を表現できるのが特徴である。このMR流体を用いたブレーキを活用して、模型ヘリや飛行機の無線操縦のスロットルフィーリングをMR流体ブレーキに流す電流によって自在に変化できる無線操縦機（図9(a)）を開発し、製品化している³³⁾。また、このMR流体ブレーキを下肢装具（図9(b)）にも適用し、製品化している³⁴⁾。各種センサからの情報から判断した歩行周期の段階に応じてMR流体ブレーキによって最適な抵抗を下肢装具に発生させ、脳卒中でまひ症状をもつ人の動きを補助する機能をもつ。

MR流体の家電製品への実用化の例として、MR流体セミアクティブダンパを用いたドラム式洗濯機が製品化されている³⁵⁾。脱水時のドラム回転数に応じて、MR流体ダンパへの通電をON/OFF制御することによって、ドラム振動の低減を図っている。

今後、MR流体は高出力で温度依存性が少なく取扱が容易なことから、かなり広範な分野での実用化の可能性が期待できる。

4. 磁性流体

4.1 磁性流体の研究開発の動向

磁性流体は、粒子表面を界面活性材処理した10nm程度の強磁性微粒子を、水やケロシンなどの分散媒中に高濃度に分散したコロイド溶液である。ブラウン運動によって分散粒子が一樣に分散するため粒子沈降が起こらず非常に安定しており、重力や磁場勾配による凝集を起こすことはなく、その基本的物性は磁性と粘性によって特徴づけられる。磁場の作用により強磁性体なみの磁気分極を示し、磁気的性質はヒステリシスや残留磁化をもたない超常磁性の特性を示す。非一様磁場において磁気体積力が発生する性質をもつ。分散濃度が低いと磁性流体は

ニュートン流体と同じ挙動を示すが、高濃度になると擬塑性流動を示し、若干ながら磁性流体の粘度の磁場依存性も認められるようになる。これまで、マグネタイトやマンガン亜鉛フェライトなどの粒子を分散した酸化物磁性流体、コバルトやニッケルなどの強磁性金属や合金を用いた金属性磁性流体、磁化の温度依存性の大きい感温性磁性流体、磁性粒子表面に形成される電気二重層の作用で安定に粒子を分散させるイオン性磁性流体などが開発されてきている^{36), 37)}。

磁性流体の応用に関する研究開発としては、感温性磁性流体を活用した磁性流体熱交換ポンプ³⁸⁾や対流熱伝達の促進制御³⁹⁾、磁性流体マイクロマシン⁴⁰⁾、ロータリー型血液ポンプの軸シールへの応用⁴¹⁾、磁性流体スパイク先端を電極としてコロナ放電を発生するプラズマ生成法⁴²⁾などの基礎的な研究開発が鋭意進められてきている。

4.2 磁性流体の実用化の動向

磁性流体の応用機器の実用化・製品化の典型的な例は磁性流体シールであり、軸との間に磁性材料で磁気回路を形成し、軸と磁性材料との間に磁性流体を保持して、磁性流体によってシールを行う。そのため、シール抵抗が著しく低いのが特徴である。実際には、磁性流体シールはHDD用の導電性防塵シールや動圧軸受などに応用され製品化されている⁴³⁾。また、同様の磁性流体シールを多段に配置した真空シールは、防塵機能だけでなく大気と真空の圧力差をシールできるため、広く真空製造分野に有効活用されている⁴³⁾。

従来のスピーカーに不可欠なダンパーをなくし磁性流体でボイスコイルを支えるダンパーレスの構造を採用した磁性流体スピーカー（図10）が開発され、製品化されている。このことにより、少ない電力で中高音域でのひずみが少なく、非常にクリアで歯切れのいい音を再生できるコンパクトなスピーカーを実現している⁴⁴⁾。

磁性流体による磁気体積力を印加磁場によって調

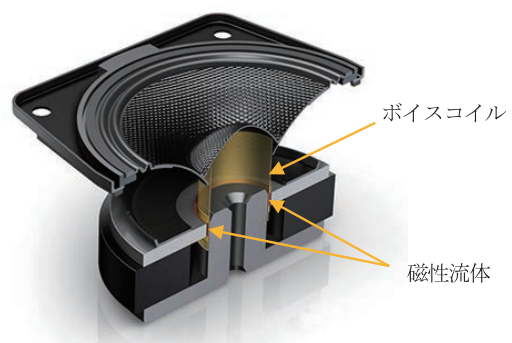
図10 ダンパーレスの磁性流体スピーカー⁴⁴⁾



図11 磁性流体を活用した比重差選別機⁴⁵⁾

整して、密度の異なる複数の物質群から特定の密度の物質を分離する比重差選別が実用化されている(図11)⁴⁵⁾。選別対象は、鉱石からの金属選別だけでなく、プラスチックなどの高精度リサイクルの分野でも広く使用されている。

以上のように、磁性流体のもつ機能性を活用した実用化展開がなされてきているが、今後さらに新たな磁性流体活用のブレークスルーと実用化が待たれるところである。

5. EHD流体・ECF

誘電性液体(実質的には絶縁性液体)に高い電場を与えると、流体内部に電気的な力が発生し誘電液体に対流や二次流れが発生する。このような現象を電気流体力学(Electro-Hydro-Dynamic:EHD)効果といい、このような現象を示す誘電液体を総称してEHD流体と呼ぶ。この流動メカニズムについてはまだ未解明な部分も多いが、直流電場では誘電泳動力より自由電荷に作用するクーロン力が支配的になり、このクーロン力により流体力学的不安定性が生じて流動(イオンドラッグ流動)が生じる場合と、電気歪みが支配的で純伝導流動が生じる場合に大別できる。このような現象発見の起源はかなり前に遡り、1800年代頃から知られていた。近年、高出力の誘電液体が発見され、その特徴である小型化・マイクロ化を指向した応用研究が日本国内で活発に行われてきている^{1), 2), 7)}。

横田らのグループは、これらの高出力の誘電液体をECF(Electro-Conjugate Fluids, 電界共役流体)と呼び、ECFを活用した各種のマイクロモーター、マイクロ人工筋、マイクロレートジャイロ、電子チップ冷却用ECFポンプなどを開発するとともに、それらのマイクロ化を鋭意進めてきており⁴⁶⁾、MEMS技術を援用した高集積の高性能なECFポンプも開発している⁴⁷⁾。また、三井らは、新たな異なる誘電液体で生じる流れ発生現象をEHD現象として捉え、回転型アクチュエータとしてローター側から流

体が噴出するタイプのEHDモーター、多段構造のEHDポンプ、EHDポンプ駆動によるシリンダや人工筋アームなどを開発してきている⁴⁸⁾。今後とも、マイクロモーター、マイクロポンプ、マイクロアクチュエータなどMEMS分野での実用化、製品化が期待される。

6. おわりに

フルードパワー分野に活用できるポテンシャルを有する機能性流体を取り上げ、各機能性流体固有の機能性を活用した機器の実用化、製品化の動向を紹介した。種々の分野で実用化展開がなされてきている。今後、既存の機能性流体の欠点を克服したり、斬新な機能性を示したりする流体の創製が期待されると同時に、応用の観点からは、各機能性流体固有の機能性を最大限に活用した独自の機能を発揮するコストパフォーマンスの高い様々な応用分野での先進機器の実用化・製品化が期待される。

参考文献

- 1) 中野政身編集:「機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会」研究成果報告書(2009年4月~2012年3月), 日本フルードパワーシステム学会, p. 168 (2012)
- 2) 中野政身編集:「機能性流体との融合化によるフルードパワーシステムの新展開に関する研究委員会」研究成果報告書(2012年4月~2015年3月), 日本フルードパワーシステム学会, 発刊予定, (2016)
- 3) Nakano, M., Koyama, K. eds.: Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and their Applications, World Scientific, p. 893 (1998)
- 4) 日本機械学会編: 機能性流体・知能流体, コロナ社, p. 179, (2000)
- 5) 15th Int. Conf. on ER Fluids and MR Suspensions (ERMR2016): <http://ermr2016.org/>
- 6) 中野政身: 機能性流体の研究動向と将来展望, 日本機械学会論文集(B編) Vol. 75, No. 753, p. 893-900 (2009)
- 7) 特集号「機能性流体テクノロジーの最前線」, フルードパワーシステム, Vol. 42, No. 1, (2011)
- 8) 中野政身: 機能性流体の歴史レビューと展望, フルードパワーシステム, Vol. 46, No. 5, p. 216-221 (2015)
- 9) <http://www.ertec.jp/>
- 10) <http://www.creact.co.jp/measure/mr-er/smarttech-er/smarttech/>
- 11) <http://www.smarttec.co.uk/erf2.htm>
- 12) <http://www.fludicon.com/>
- 13) <http://www.smartmaterialslab.com/>
- 14) Wen, W.G., et al.: The Giant Electrorheological Effects in Suspensions of Nanoparticles, Nature Materials, Vol. 2, No. 11, p. 727-730 (2003)
- 15) 古荘純次, 森川隆浩: ER流体・MR流体を用いたリハビリ支援, VRシステム, フルードパワーシステム, Vol. 42, No. 1, p. 12-15 (2011)
- 16) Tao, R., Gu, G.Q.: Suppressing turbulence and enhancing liquid suspension flow in pipelines with electrorheology, Phys. Rev. E, Vol. 91, Article No. 012304, p. 1-7 (2015)

- 17) Rabinow, J. : The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transactions, Vol. 67, p. 1308-1315 (1948)
- 18) Lord Corporation : <http://www.lord.com/>
http://www.creact.co.jp/measure/mr-er/lord_mr/lord_mr/
- 19) 中野政身：MR流体アクチュエータ，未来型アクチュエータ材料・デバイス，シーエムシー，p. 257-268 (2006)
- 20) 木本彰：MRデバイス実用化事例，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, p. 50-52 (2011)
- 21) 中野政身：振動制御系への電磁レオロジー流体の応用，日本ロボット学会誌，Vol. 31, No. 5, p. 452-456 (2013)
- 22) 中野政身，他：MR流体コンポジットブレーキの開発とそのコイル巻線用線材張力制御装置への応用，日本機械学会論文集（B編），Vol. 75, No. 753, p. 993-999 (2009)
- 23) 松隈政彦：自動車用MRダンパおよびエンジンマウントの実用化例，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, p. 53-55 (2011)
- 24) 斎藤啓司：自動車用MRダンパの開発，KYB技報，No. 42, p. 16-21 (2011)
- 25) QED Technologies : <https://qedmrf.com/en/>
- 26) 久米保：MR流体研磨装置実用化事例，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, p. 56-58 (2011)
- 27) Seok, J., et al. : A Study on the Fabrication of Curved Surfaces using Magnetorheological Fluid Finishing, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 14, p. 2077-2090 (2007)
- 28) OSSUR : <http://www.ossur.jp/>
<http://www.ossur.com/americas>
- 29) 引地雄一，中野政身，鈴木貴詞：MR-SPCOM (MR fluid brake-Stance Phase Controlled by Optional Motion) 大腿義足膝継手の開発と歩行・動作解析，日本義肢装具学会誌，Vol. 31, No. 1, p. 45-51 (2015)
- 30) 引地雄一，中野政身：小型MR流体ブレーキ膝継手を用いた随意制御大腿義足の開発，フルードパワーシステム，Vol. 44, No. 6, p. 344-346 (2013)
- 31) <http://www.takei-si.co.jp/productinfo/detail/255.html>
- 32) Noma, j., et al. : Magnetorheology of colloidal dispersion containing Fe nanoparticles synthesized by the arcplasma method, J. of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 322, p. 1868-1871 (2010)
- 33) <https://www.jrpropo.co.jp/jpn/topics/sMRF/>
- 34) <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00391701>
- 35) 井澤浩一：MRFアクティブサスペンションの洗濯機への応用，日本ロボット学会誌，Vol. 31, No. 5, p. 488-489 (2013)
- 36) 神山新一：磁性流体入門，産業図書，p. 135 (1989)
- 37) 日本機械学会編：17・2 機能性流体，機械工学便覧（基礎編 α 4流体工学），丸善，pp. 185-189 (2006)
- 38) 山口博司，他：低沸点流体混合磁性流体の駆動力特性に関する研究，日本機械学会論文集（B編），Vol. 70, No. 698, pp. 2591-2597 (2004)
- 39) Saravanan, S. Yamaguchi, H. : Onset of Centrifugal Convection in a Magnetic-Fluid- Saturated Porous Medium, Physics of Fluids, Vol. 17, No. 8, Article No. 084105 (2005)
- 40) Sudo, S., et al. : A Magnetic Fluid Microdevice using Insect Wing, Journal of Physics-Condensed Matter, Vol. 20, No. 20, Paper No. 204142 (2008)
- 41) Mitamura, Y., et al. : Application of a Magnetic Fluid Seal to Rotary Blood Pumps, Journal of Physics-Condensed Matter, Vol. 20, No. 20, Article No. 204145 (2008)
- 42) Uehara, S., Itoga, T., Nishiyama, H. : Discharge and flow characteristics using magnetic fluid spikes for air pollution control, J. Phys. D : Appl. Phys., Vol. 48, Article No. 282001 (2015)
- 43) 廣田泰文：磁性流体を用いたデバイスの実用化事例，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, pp. 59-61 (2011)
- 44) <https://msc.sony.jp/member/enjoy/products/feature/20130731/>
- 45) <http://liquisort.com/>
- 46) 横田眞一，竹村研治郎：ECF（電界共役流体）を応用したアクチュエータ・センサ，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, pp. 28-32 (2011)
- 47) Kim, J.W., Yokota, S., Mikurino, K., Edamura, K. : ECF Micro Hydraulic Power Source by MEMS-fabricated Pentagonal Prism Electrode Arrays, World Automation Congress Proceedings, Paper No. 6936052, pp. 579-581 (2014)
- 48) 三井和幸：EHD現象利用ポンプの開発とアクチュエータへの応用，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, pp. 33-36 (2011)

(原稿受付：2016年10月25日)

解説

自動車用MR流体ダンパの研究

著者紹介



さいとう けいじ
齋藤 啓司

KYB(株)基盤技術研究所 要素技術研究室
〒252-0328 神奈川県相模原市南区麻溝台1-12-1
E-mail : saitou-kei@kyb.co.jp

1991年日本大学理工学部卒業、同年、カヤバ工業(株)(現KYB(株))に入社、各種ダンパの研究開発に従事、日本フルードパワーシステム学会会員。

1. はじめに

MR流体ダンパは、機能性流体の一種であるMR流体(磁気粘性流体: Magneto-rheological Fluid)を作動流体としたダンパである。MR流体は、外部から加えられた磁界に反応して、その流動特性が変化する流体である。つまり磁界のない状態ではニュートン流体として扱うことができるが、磁界を受けることによりMR流体は瞬間的に半固体化し、ビンガム流体のような降伏応力をもつ性質に変化する。このように磁界の強さを変化させることにより降伏応力の大きさを調整できることから、減衰力を可変制御する自動車用のセミアクティブダンパへの適用が可能となる。

コンベンショナルな自動車用ダンパ(コンベダンパ)は、ピストン部に減衰力を発生させるための精密なバルブ機構を有しており、また減衰力調整式ダンパでは、バルブ機構を外部から電氣的に制御するように工夫されている。一方、MR流体ダンパの場合には、このようなバルブ機構が不要であり、代わりに流動特性を変化させるための磁界を発生させるコイルが設けられている。このようにバルブレス構造であるため、信頼性や高応答性に優れていることから、Beijing West Industries Co.,LTD (BWI) では2002年に米国にて初めて量産化に成功し¹⁾、その後、欧州の自動車メーカーにも採用され、スポーツ車およびSUV車を中心に採用車種が拡大している状況にある。

本報では、自動車用に研究を進めているMR流体

ダンパの概要について報告する。

2. MR流体ダンパの構造と特徴

2.1 MR流体²⁾

MR流体は、化学合成油をベースに直径1~10 μ mの球状の強磁性粒子を分散させたコロイド溶液であり、磁場の印加によってそのレオロジー特性を数ミリ秒のオーダーで可逆的に変化できる機能を示す流体である。図1に示すように、MR流体は無磁場時には強磁性粒子が不規則に分散した状態にあり、通常の作動油と同様なニュートン流体に近い流動特性を示すが、磁場印加時には磁気分極した強磁性粒子同士がクラスタと呼ばれる鎖状構造を形成し、この強磁性粒子クラスタが抵抗体となって、せん断応力を発生させる。

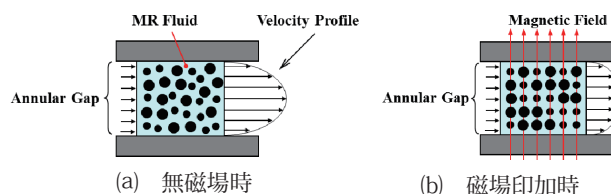


図1 MR流体の流れ

2.2 MR流体ダンパの構造

図2にMR流体ダンパの構造を、図3にダンパ減衰力を発生させるピストン制御部の可変原理図をそれぞれ示す。MR流体ダンパは、単筒式ガス入りショックアブソーバの構造をベースとしている。ピストン制御部は、円環状の隙間が流路となり、その流路に対して直交して磁場が形成するようにコイルを配置している。このコイルに電流を印加することで流路を通過するMR流体中の強磁性粒子がクラスタを形成し、それが流れの抵抗となって圧力差(減衰力)を生じさせる。

2.3 MR流体ダンパの特徴

①バルブレス単純構造²⁾

MR流体ダンパはバルブ等の可動部がない単純構造であるために、

- ・応答速度が速い

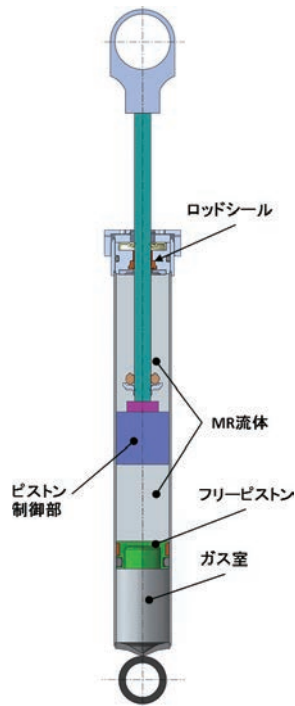


図2 ダンパ構造図

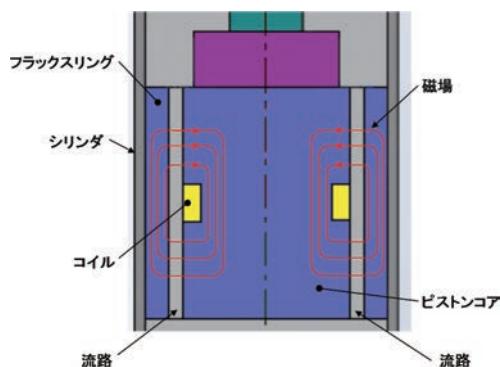


図3 ピストン制御部原理図

- ・部品点数が少なく組立性に優れる
- ・性能のバラツキが小さい
- ・バルブ起因の異音の発生がない

という利点がある。

②低速・高減衰¹⁾

減衰力特性は、ピストン速度が遅い領域から高減衰力を発生させることができる。そのため車体の動き始めのピストン速度の遅い領域から車体挙動を制御することが可能である。

3. MR流体ダンパの基本特性

MR流体ダンパの評価は、各種の性能評価および耐久性評価を行っており、以下に代表的な性能評価結果を示す。

3.1 減衰力-速度特性

図4に印加電流値を変えた場合の減衰力-速度特性を示す。図は、印加電流ゼロの場合のSoft特性、

最大電流印加時のHard特性、および最大電流の半分の電流を印加した時のMid特性を示す。図中の縦軸の減衰力は式(1)で求められる無次元量であり、圧側はダンパが縮むときに発生する減衰力、伸側はダンパが伸びる時に発生する減衰力を示す。

減衰力=各速度における減衰力

$$\div 0.3\text{m/s時の圧側減衰力} \quad (1)$$

図よりHard特性は、ピストン速度0.3m/s時でSoft特性と比べて約5.5倍の減衰力が発生している。なお、車両の乗り心地を向上させるためにSoft特性を低下させる場合には、流路を広くする必要があるが、その場合には制御部の磁束密度の低下が大きく影響するため、制御可能範囲（Hard減衰力-Soft減衰力）は減少する。

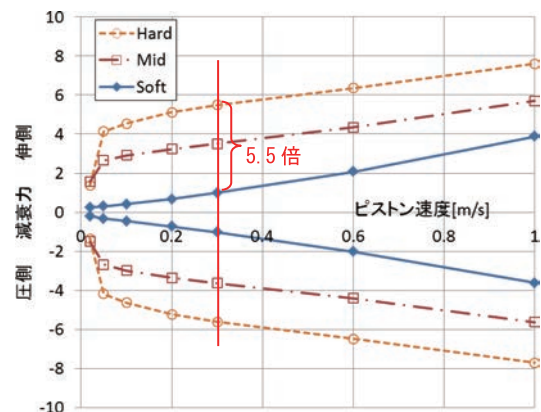


図4 減衰力-速度特性

3.2 フリクション特性

図5にフリクション特性の一例として、ダンパ変位と減衰力のリサージュ波形を示す。図は、横力付加時にコンベダンパと比較したものである。図より、MR流体ダンパの減衰力は、コンベダンパに比べ大幅に高くなっている。コンベダンパは一般的にしゅう動部であるピストン外周に樹脂性のピストンバンドを設けているが、MR流体ダンパでは、シリンダー-フラックスリング間は金属同士のしゅう動状態となり、さらに流体中には強磁性粒子が分散されてい

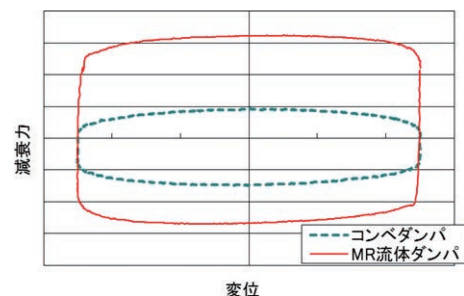


図5 フリクション波形

るため、フリクション値が高くなる傾向にある。

実車評価においては、一般的にフリクションが高いと乗り心地が悪化する傾向にあることから、MR流体ダンパに対しては、乗り心地を向上させるためにフリクション低減が求められている。

3.3 減衰力-温度特性

図6に減衰力-温度特性結果を示す。図はピストン速度0.1m/s, Soft時およびHard時の各温度における減衰力変化率を示したものである。減衰力変化率は以下の式で算出している。

$$\text{減衰力変化率} = ((\text{各温度時の減衰力} - 20^\circ\text{C時の減衰力}) / 20^\circ\text{C時の減衰力}) \times 100 \quad (2)$$

図よりSoft特性は、低温側では非常に高くなっており、高温側は若干低くなっている。MR流体ダンパは、バルブレス構造で流路は円環状隙間のため（リリーフ機能がない構造）、温度変化に対する減衰力変化は流体の粘度変化に比例するため、粘度変化が大きい低温側でより減衰力変化が大きくなる。一方、Hard特性の減衰力変化率はSoft特性と比較して小さくなっている。

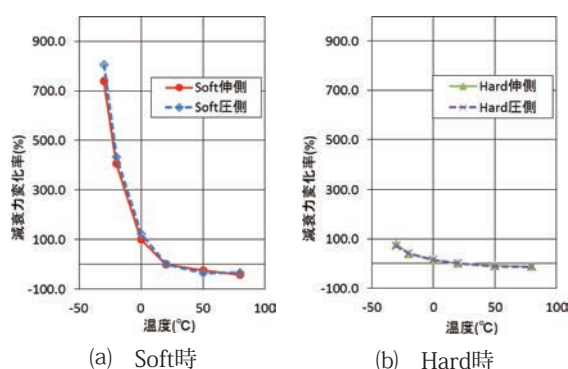


図6 減衰力-温度特性

3.4 減衰力切替応答性

減衰力切替応答性試験は、LORD社製の電流ドライバを用いて、図7に示すような回路で行った。図8にピストン速度0.1m/s時の減衰力切替りの63%応答時間結果を示す。減衰力の切替えは回路の都合上、Soft相当⇔Mid相当である。図より減衰力の立上り側（Soft→Mid）と立下り側（Mid→Soft）での

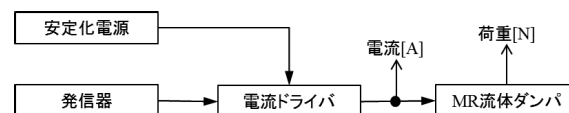


図7 応答性計測回路

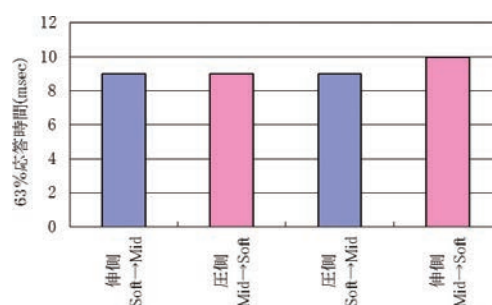


図8 減衰力切替応答時間

差は小さく、いずれの条件の場合も応答時間は10msec以下である。

4. MR流体ダンパの耐久性

耐久性評価は、しゅう動部の耐久性、耐焼付き性、およびシール部の油漏れを評価する加速試験を実施し、社内評価基準を満たす結果が得られている。

5. おわりに

本報では、これまでに行ってきたMR流体ダンパ研究の概要について、MR流体ダンパの特徴的な特性を中心に紹介した。

今後、MR流体ダンパの特徴を最大限活かすことができる車種への展開により、採用車種が増えることを期待する。

参考文献

- 1) 松隅政彦：自動車用MR流体ダンパおよびエンジンマウントの実用化例，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol. 42, No. 1, p. 53-55 (2011)
- 2) 斎藤啓司：自動車用MRダンパの開発，KYB技報，No. 42, p. 16-21 (2011)

(原稿受付：2016年8月8日)

解説

超小型EV向けMR流体ブレーキの開発

著者紹介



なか の まさ み
中野 政身

東北大学流体科学研究所
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
E-mail: m-nakano@fmail.ifs.tohoku.ac.jp

1982年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年山形大学助手、助教授を経て、1997年同教授、2008年東北大学教授。機能性流体とその応用、流体関連振動・騒音などの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会（理事）、日本機械学会（フェロー）などの会員。工学博士



ふる かわ ひとし
古川 仁

（株）曙ブレーキ中央技術研究所
〒348-8511 埼玉県羽生市東5-4-71
E-mail: h-furukawa@akebono-brake.com

1983年曙ブレーキ工業（株）入社。以来、研究開発に従事し機構部分を担当。担当した開発アイテムは自動車を始めフォークリフトから新幹線や風力発電機用等のブレーキ。



みち つじ よし はる
道辻 善治

（株）曙ブレーキ中央技術研究所
〒348-8511 埼玉県羽生市東5-4-7
E-mail: y-michitsuji@akebono-brake.com

2014年曙ブレーキ工業（株）入社。以来、研究開発に従事しMR流体関連他に新技術を担当。メカトロ技術を中心にブレーキへの適用を研究開発する。

1. はじめに

2020年代に普及するとされている自動運転車や自動車の全電動化への対応と摩耗粉やブレーキ音の発生しない環境に配慮した車両用ブレーキとして、機械的摩擦に頼らないMR（Magneto-Rheological）流体を用いた新発想の「MR流体ブレーキ」を開発している¹⁾。MR流体は、油中に数ミクロンの強磁性体粒子を分散させた懸濁液で、磁場印加により分散粒子が磁気的に分極して鎖状の粒子クラスターを形成することによって液体から半固体に相変化する機能性流体である^{2), 3)}。開発したMR流体ブレーキをスマートモビリティの一つとして期待されている超小型EV⁴⁾の四輪に搭載し、走行試験を実施して、十分なブレーキ性能とブレーキフィーリング制御の

適用など高い制御性があることを実証している。この試験車両の実証から、従来の摩擦ブレーキの弱点である摩耗粉やノイズ・バイブレーションはもちろんメンテナンス性等の改善、高い制御性、車両の全電動化への寄与等で、MR流体ブレーキはユーザーへ新しい価値を提供できるものとして期待できる。

本解説では、開発したMR流体ブレーキの概要とそれを四輪に搭載した超小型EVのユニークなブレーキシステムについて紹介する。

2. 開発したMR流体ブレーキ

2.1 MR流体ブレーキの構造と作動原理

従来の油圧・摩擦式のディスクブレーキ（図1）は、油圧によりブレーキキャリパーがブレーキパッドをディスクロータに挟みつけることによって摩擦ブレーキ力を発生する。そのため、摩耗粉やブレーキ音・振動の発生、ブレーキパッドやディスクの摩耗によるメンテナンスの必要性、油圧式駆動による応答性や制御性の限界など、諸課題を包含している。

一方、MR流体に磁場を印加することによってブレーキ力を発生させる原理をブレーキに応用することによって、従来ブレーキを種々の面で凌駕するポテンシャルを有している。今回開発したMR流体ブレーキ（図2）は、車両側に固定された円盤（2枚）とハブベアリングと一緒に回転する円盤（3枚）が交互に配置された多層円盤間にMR流体を充填した構造をとっている。多層円盤外周に配置され

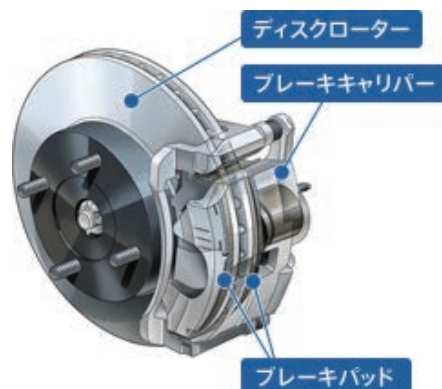
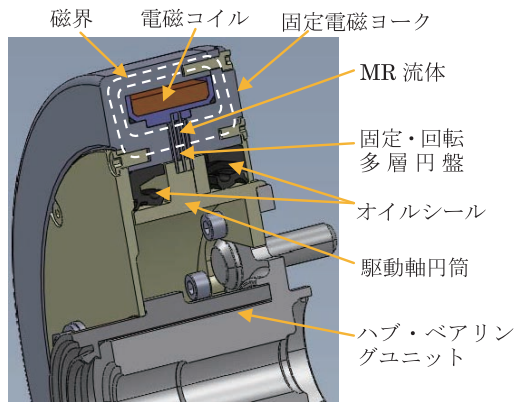
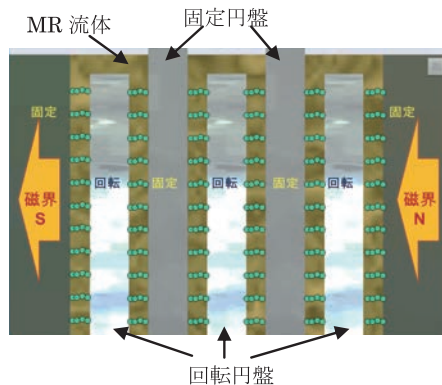


図1 従来の油圧・摩擦式ディスクブレーキ



(a) 開発した多層円盤型MR流体ブレーキ



(b) 固定・回転円盤間の鎖状粒子クラスターの形成

図2 MR流体ブレーキの構造と作動原理

た円環状電磁コイルに電流を流すと固定電磁ヨークに磁界が発生して多層円盤間のMR流体に磁界が印加され、回転円盤にMR流体のせん断力が働きブレーキとして作動する。図2(b)の作動原理に示すように、多層円盤に垂直に磁界が印加されるため、MR流体中の分散粒子は磁気分極し互いに引き付け合い円盤に垂直な磁界方向に鎖状のクラスターを形成する。回転円盤は回転し続けているため、固定円盤と回転円盤とに固着した鎖状粒子クラスターがせん断変形を受け円盤間のほぼ中心部で崩壊してはつながら現象を繰り返すことで、回転円盤に抵抗力が発生してブレーキ機能が働く。このような作動原理のため、摩耗しないため摩耗粉が発生せず、環境負荷軽減に貢献する。また、MR流体が磁場に数msのオーダーで反応することから、磁場印加装置を適切に設計することによって俊敏かつ安定したブレーキ制御が可能となる。

開発したMR流体ブレーキの外観を図3に示す。本MR流体ブレーキを搭載する超小型EV⁴⁾のオリジナルの12 in.のホイール内のスペースに装着できるように、MR流体ブレーキのサイズは外径φ244mm、幅約54mmとしている。従来の油圧駆動式ディスクブレーキのように軸方向に動く駆動メカが不用な

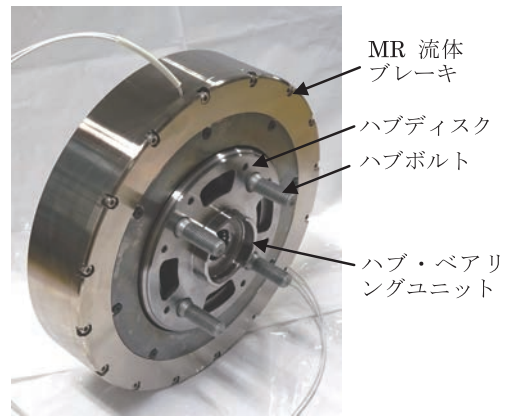
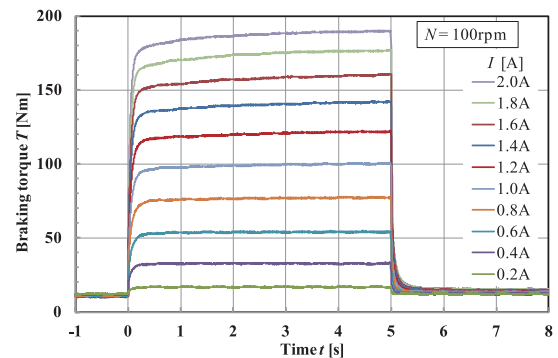


図3 開発したMR流体ブレーキの外観

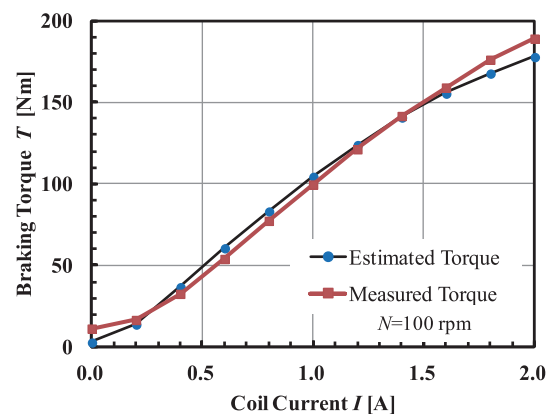
め、比較的シンプルな外観となっている。

2.2 MR流体ブレーキの基本特性

設計は電磁場解析を援用して行い、MR流体ブレーキのブレーキトルクを予測して設計している。超小型EVの一輪あたりの必要ブレーキトルクは160Nmであるので、電磁コイルに2Aの電流を流した際に目標トルク160Nm以上が得られるように電磁コイルも含めてMR流体ブレーキを設計した。図4には、サーボモータとトルク変換器からなるMR流体ブレーキの基本的な制動トルク特性計測装置を用いて測定した回転数 $N=100\text{rpm}$ 時のMR流体



(a) ステップ応答特性



(b) 印加電流に対する定常的制動トルク特性

図4 MR流体ブレーキの基本特性

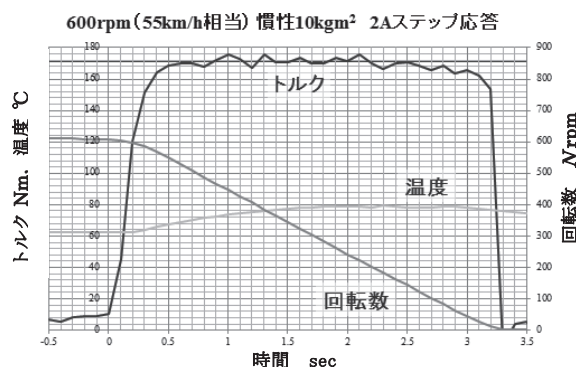


図5 ダイナモ試験による2A印加時の制動トルク等の時間変化

ブレーキの基本特性を示す。電磁コイルへの印加電流 I の目標値（電流フィードバック制御付き電流アンプ（電流立ち上がり時間5ms程度）への電圧入力）を矩形波状（0Aと目標 I A間の5秒間の立ち上がり、立下り波形）に与えて、それに対する制動トルクの時間応答を測定した（図4(a)）。印加電流 I が大きくなるに伴い制動トルクも増大し、その立ち上がりの時定数は30～40msで、立下り時には17～20msと比較的速い応答を呈する。また、計測した定常的な制動トルクは（図4(b)）、印加電流 I にほぼ比例して増大し、 $I=2.0$ A時に約180Nmの制動トルクが得られ、設計時の予測値の変化にほぼ一致している。

図5には、負荷として回転慣性を利用したダイナモ試験機を用いてMR流体ブレーキを回転数600rpm（超小型EVの最高速度55km/h相当）まで加速してから電流2A相当の電圧を印加してブレーキをかけた際の制動トルクとMR流体温度の時間変化を示す。ダイナモ試験においても、ほぼ170Nm程度の制動トルクが得られており、電流2Aで超小型EVの保安基準を満足するトルクが発生できていることを確認できた。この試験では、MR流体ブレーキの電磁コイルへの電流アンプとして、図4の場合とは異なり電流フィードバック無しの電流アンプを用いていたため、制動トルクは時定数約0.3s程度の応答速度で立ち上がっており、図4の場合に比べてかなり遅い応答を示している。それでも、従来の油圧式ブレーキよりは速い応答を示している。また、ブレーキをかけることによって、ブレーキ内のMR流体の温度も制動時間3.3秒間程度で60℃から80℃程度まで20℃程度上昇しているが、特に問題は発生していない。

3. 超小型EVによる四輪MR流体ブレーキ実車試験

3.1 四輪MR流体ブレーキシステム

開発したMR流体ブレーキを超小型EV⁴⁾の四輪の

12inホイール内に装着している（図6）。MR流体ブレーキを活用したユニークなブレーキシステムとして、運転者が要求するブレーキ力（ブレーキペダルのストローク）を電気信号に変換して各車輪の電動MR流体ブレーキへ供給してブレーキを掛ける四輪BBW（Brake by Wire）ブレーキシステムを構築している。このシステムでは、図7に示すように、電子制御装置（ECU）を用いてMR流体ブレーキへの入力電圧を直接コントロールしているため、あらかじめ設定したブレーキの効力の三つのパターンからユーザーが自分の好みのブレーキフィーリングを選択できる機能を設けている。



図6 MR流体ブレーキを装着した超小型EV(左)とその車輪(右)

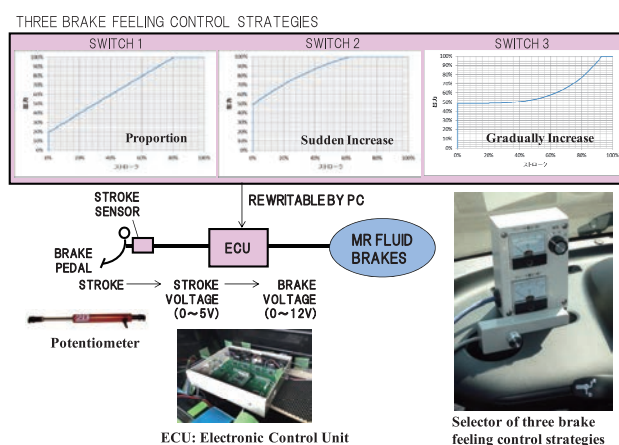


図7 三つのブレーキフィーリングパターンが選択できる四輪MR流体ブレーキシステム

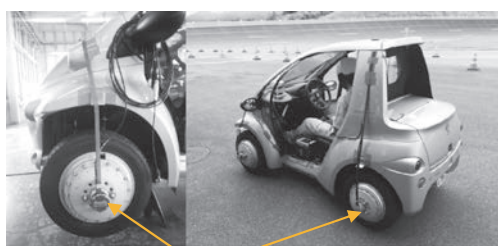
3.2 実車走行試験結果

MR流体ブレーキを搭載した超小型EVの実車走行試験を実施した結果、MR流体ブレーキはブレーキ力が安定しており、応答性についても従来の摩擦ブレーキに比して違和感なく操作が可能であった。図8には、MR流体ブレーキを装着した超小型EVが勾配30%の坂道で一時停止している様子を示す。MR流体ブレーキはこのような急勾配の坂道でも停止できるほど十分な制動トルクを発生している。

実車でMR流体ブレーキの走行時のブレーキトルクは、図9(a)に示すようにホイールの回転トルク

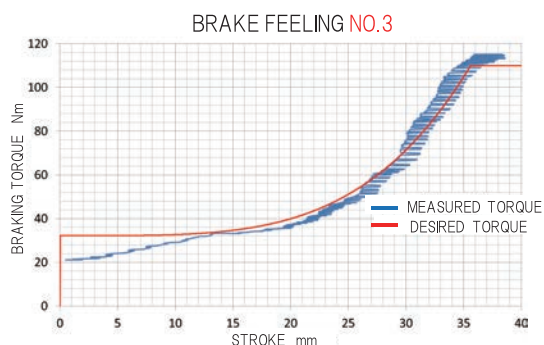


図8 MR流体ブレーキを装着した超小型EVが勾配30%坂道で一時停止している様子



ホイール・トルクメータ

(a) ホイール・トルクメータによる実車の制動トルク計測



(b) ブレーキペダル・ストロークと制動トルク（設定値，実測値）との関係（欧州ラグジュアリー車のフィーリング）

図9 ブレーキフィーリング制御結果の一例

をホイールの歪で計測するホイール・トルクメータを用いて計測した。ブレーキフィーリング制御の結果として、ペダル・ストローク～ブレーキトルク測

定結果の一例を図9(b)に示す。これは欧州ラグジュアリー車のブレーキフィーリングを模擬した場合で、ペダル・ストロークが大きくなるにつれてブレーキトルクが徐々に増加しストローク終盤で急激に増大するように設定してある。ブレーキトルクの実測値が設定値に良好に追従しており、MR流体ブレーキは高い制御性を有していることがわかる。

4. ま と め

超小型EV向けのMR流体ブレーキを設計・開発し、その制動トルクの基本特性試験、ダイナモ試験、実車走行試験を通じて、本開発のMR流体ブレーキは超小型EVが必要とする十分な制動トルクを発揮し、かつ安定したブレーキ性能とブレーキフィーリング制御の適用など高い制御性を有することを実証できた。今後、MR流体ブレーキのもつ環境適合性（摩擦粉ゼロ、ノイズ&振動ゼロ、摩擦ゼロによるメンテナンスフリー）を顕在化した実用化はもちろんですが、その安定かつ高い制御性を活かした自動化への対応（四輪独立制御による自動運転、自動ブレーキへの対応）や軽量化（インホイールモータとの共存、高強度軽量複合材料の活用）などが期待される。また、車両以外にも適用可能と考えられるアイテムへの課題や特徴等を検討して、MR流体の活用の裾野を広げていきたい。

参考文献

- 1) http://www.akebono-brake.com/static/news/2016/08/10/n20160810_01.html
- 2) Rabinow, J. : The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transactions, Vol.67, pp.1308-1315 (1948)
- 3) Nakano, M., Yamamoto, H., Jolly, M.R. : Dynamic Viscoelasticity of a Magnetorheological Fluid in Oscillatory Slit Flow, Int. J. of Modern Physics B, Vol.13, No.14,15&16, pp.2068-2076 (1999)
- 4) <http://coms.toyotabody.jp/>

（原稿受付：2016年8月30日）

解説

建築物の免震・制振用MR流体ダンパの開発

著者紹介



そで やま ひろし
袖 山 博

三和テッキ株式会社
〒329-1192 栃木県宇都宮市中岡本町2703
E-mail: sodeyama@tekki.co.jp

1993年東京都立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、三和テッキ株式会社に入社。振動制御、耐震装置の研究・開発に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、日本建築学会の会員。博士（工学）。



図1 制振改修工事の例

1. はじめに

4月に熊本県熊本地方を中心に発生した一連の激しい地震（最大震度7が2回、6強が2回、6弱が3回発生）において、建築物にも大きな被害が発生したことは記憶に新しいところである。日本は世界でも有数の地震国であり、首都直下地震や南海トラフ巨大地震等、甚大な被害が想定される地震から人命や財産を保護するために、免震建築や制振建築（図1）が大きな注目を集めている。

地震時の建築物の応答（変形や加速度等）を低減させるために、図2に示すような建築工法が、近年の建築物の新築時さらには既存の建築物の耐震改修工事に取り入れられている。建築物の地震応答を成長させずに速やかに抑えるためには、建物の揺れのエネルギーを吸収する制振装置（いわゆるダンパ）が非常に有効であり、制振工法ではもちろんのこと、免震工法においてもダンパは減衰材として大きな役割を果たしている。

現在ではさまざまな原理や機構を応用して、多種多様なダンパが考案されている。その中でも粘性流体の流動抵抗を利用するオイルダンパは、弁機構等を適切に設計することにより、対象の建築物に合わせてエネルギー吸収特性を精度よく実現できることから、建築市場においても広く普及している。MR流体ダンパもオイルダンパの一種であるが、エネルギー吸収特性を外部から簡単に制御できることから、より高性能な振動制御を実現できるダンパである。本

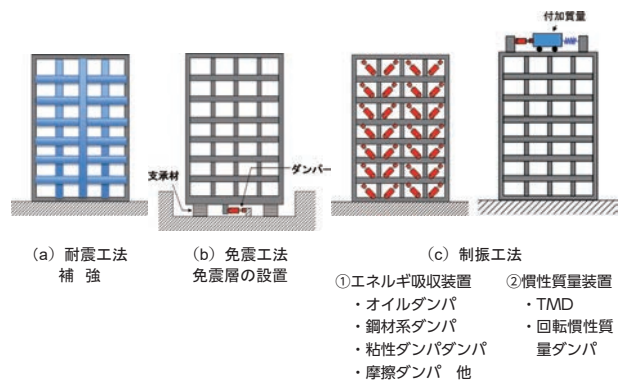


図2 建築物の地震応答低減手法

報は、建築用のMR流体ダンパについて、基本的な情報を含めて、近年の研究開発動向の一端を紹介するものである。

2. MR流体ダンパ

MR流体は分散媒である合成油等の中に、分散質として強磁性微粒子の鉄粉を均一に分散させた特殊な流体である。磁場が作用すると均一に分散している鉄粉同士が磁場の方向に配列するため、その結びつきを妨げる向きへの流れや動きに対して大きな抵抗を及ぼすことがMR流体の大きな特徴である。この基本特性を生かしてダンパに応用したものがMR流体ダンパである。

図3に建築用として研究開発された大型のMR流体ダンパの構造を示す¹⁾。シリンダとピストンロッドで構成された極めて単純な構造である。地震時には、建築物の揺れに応じてピストンロッドが移動し、

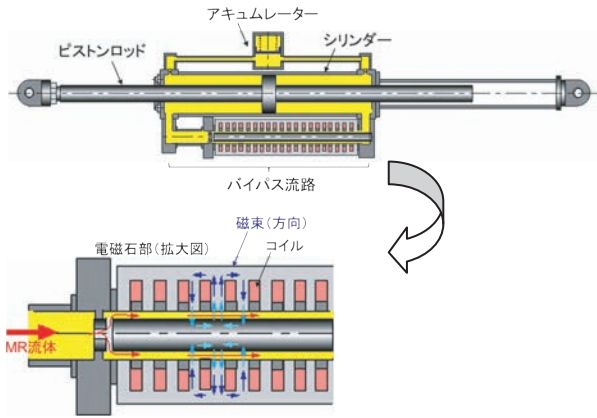


図3 MR流体ダンパの構造

シリンダーの中に充填されているMR流体をバイパス流路へと押し出す。バイパス流路には電磁石（コイル）が設置されており、MR流体に適切な磁場を作用させることにより所望の抵抗力が得られる。MR流体に加える磁場の強さは、コイルに印加する電流を増減させることにより調整することができる。図4に制振用MR流体ダンパの設置状況を示す²⁾。

図5は、制振用MR流体ダンパに正弦波状の繰返し変位を与えた場合の入力速度（最大値）と発生荷重（最大抵抗力）との関係を示したものである。同じ入力速度であっても印加電流を増加することにより、発生荷重が増大していることが確認できる。また、このように非線形性の強い力学特性であっても、MR流体の特性をBinghamモデル等で定式化することにより簡便に解析的に特性を予測することも可能である（図5中の実線：解析結果³⁾）。

図6は、免震建築用に開発した大型MR流体ダンパの力学的特性を示したものである。上段の二つの図は、比較的低速度・小振幅の場合の変位・荷重関係図（左側）と速度・荷重関係図（右側）であり、下段の図は同じ加振振動数で入力変位を増加させた場合の同様の特性を示すものである。

地震時の建築物の応答低減を目的として適用される建築用MR流体ダンパの場合、地震がない場合にはその間にダンパが作動しないことから、MR流体の鉄微粒子の分離、沈降による力学特性の経年変化が課題となっていた。このためMR流体の改良等が検討されてきたが、現在では分散媒にグリースを用いることで鉄微粒子の分散安定性を改善する研究も進められ、貴重な成果が報告されている⁴⁾。

3. MR慣性ダンパ

図2に示したように振動を低減させる制振工法には、エネルギー吸収装置を用いる方法とは別に、質量の慣性力を利用する方法もある。従来から動吸振器



図4 制振用MR流体ダンパ（設置例）

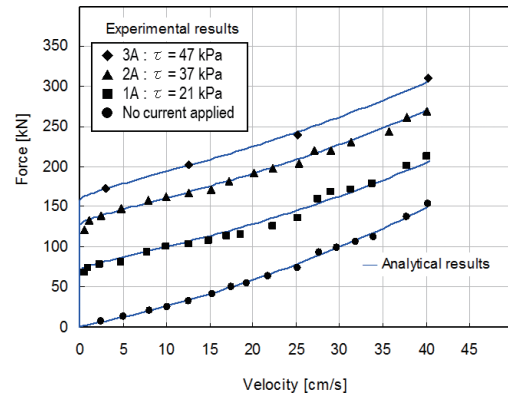
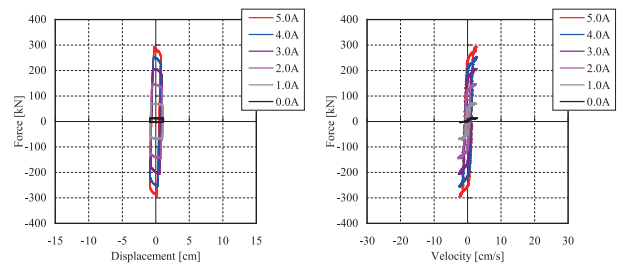
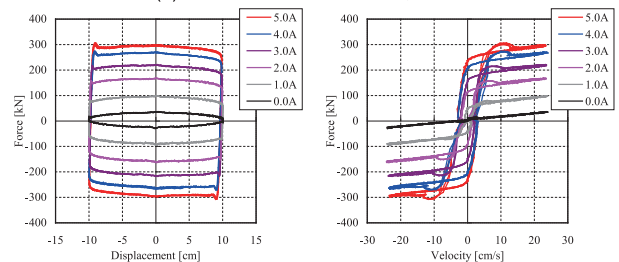


図5 制振用MR流体ダンパの荷重・速度関係図



(1) 正弦波加振試験 0.35Hz, +/-1cm



(2) 正弦波加振試験 0.35Hz, +/-10cm

図6 免震用MRダンパの力学特性

(TMD: Tuned Mass Damper) としてDen Hartogの定点理論による最適設計法も含めて、広く知られた技術である。

一方、この10年程の間で、TMDと同様に質量の慣性力を振動低減に利用した新たな制振装置（回転慣性質量ダンパ）が積極的に研究されている。著者らは、この回転慣性質量ダンパにさらにMR流体による可変減衰機構を付加したダンパ（以後、「MR

慣性ダンパ」と呼ぶ)を開発している⁵⁾。

回転慣性質量ダンパは、一般的にボールねじ・ナット、フライホイールで構成されており、直線運動の振動がボールねじにより回転運動に変換され、ボールねじの端部に接続されたフライホイールに伝達される仕組みである。直線方向の等価質量は、回転体の慣性モーメントに比例しボールねじのリードの二乗に反比例する。従って、比較的小さく軽いフライホイールでも、ボールねじによる一種の質量増幅機構の効果により、数十トン～数百トン級の極めて大きな等価質量を実現し、建築物の応答を制御するような制振効果を発揮するのである。

MR慣性ダンパの構造を図7に示す。ケース内側に磁場発生機構(電磁石)を内蔵し、フライホイールとの隙間にMR流体が充填されていることが特徴である。フライホイールが回転する際に、慣性力に加えてMR流体(磁気粘性流体)のせん断流れによる減衰力が得られる。地震時の建築物の揺れに応じてMR流体の特性を制御し、最適な抵抗力を建築物に与えることができる。

図8および図9にMR慣性ダンパの性能試験(正弦波変位入力での加振試験)の状況とその時の試験結果を示す。図9(a)の変位・荷重関係図は、MR流体へ作用させる磁場の強さを零にした場合である。この結果では、主にフライホイールの等価質量に起因する慣性力が主体となり、入力加速度に比例した

右下がりの変位・荷重関係が確認できる。一方で、図9(b)は一定の磁場をMR流体に作用させた場合の結果であり、右下がりの特性に加えて、変位・荷重曲線にヒステリシス部分(面積の増大)、すなわちエネルギー吸収効果が明確に確認できる。

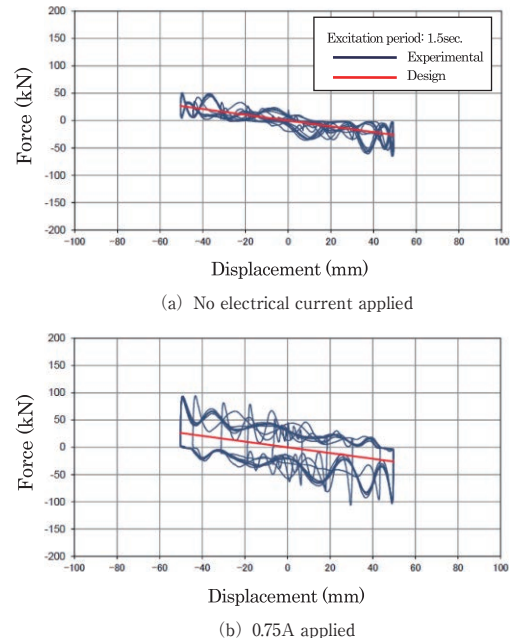


図9 MR慣性ダンパの変位・荷重関係図(正弦波加振)

4. おわりに

建築物の地震対策用に開発された二つのMR流体ダンパについて、その構造や性能を簡単に紹介した。MR流体の課題を解決するためにMRグリース等も研究開発されており、今後もより高性能な建築物の応答制御を実現するためにダンパのさらなる改良が進められていくと考える。

参考文献

- 1) 袖山博, 砂子田勝昭, 藤谷秀雄, 樋渡健, 塩崎洋一, 外村卓也, 高知能建築構造システムの開発に関する日米共同構造実験研究(その81), 日本建築学会大会学術講演梗概集(2003-9)
- 2) 袖山博, 砂子田勝昭, セミアクティブ制振構造用300kN級MRダンパ, 日本機械学会D&D Conference(2001-8)
- 3) 袖山博, 鈴木浩平, 岩田範生, 砂子田勝昭, バイパス式MRダンパの設計法に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 70巻691号(2004-3)
- 4) 白石俊彦, 三井田悠磨, 杉山慎也, 森下信: 磁気粘性グリースの基本特性と可制御型ダンパへの適用, 日本機械学会論文集(C編), 77巻778号(2011-6)
- 5) Sodeyama, H., Tomizawa, T., and Fujitani, H.: A study on Controllable Aseismic Device with Inertia Mass and MR Fluid, 2013 ASME PVP Conference(2013-8)

(原稿受付: 2016年8月26日)

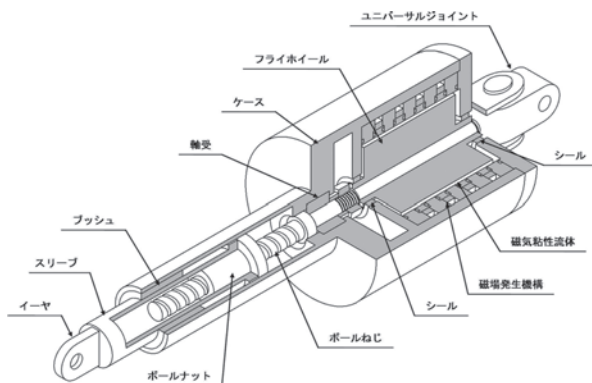


図7 MR慣性ダンパの構造



図8 MR慣性ダンパの加振試験状況

解説

ナノMR流体の特長とハプティクスへの応用

著者紹介



の ま じゅん いち
野 間 淳 一

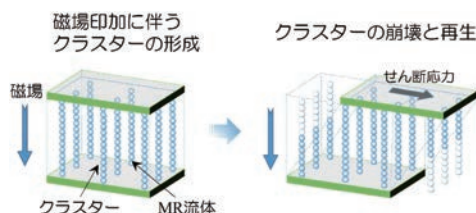
株式会社栗本鐵工所
〒559-0021 大阪市住之江区柴谷2-8-45
E-mail: j_noma@kurimoto.co.jp

1993年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、株式会社栗本鐵工所入社。新規事業を目指した研究開発に従事。日本フルードパワーシステム学会、粉体工学会、溶接工学会の会員、博士（工学）

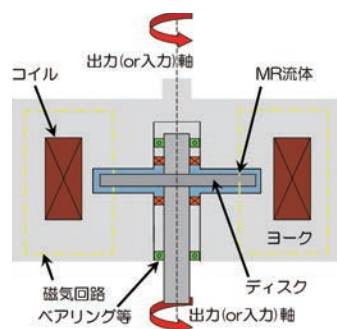
1. はじめに

磁気粘性流体（Magnetorheological fluid, 以下、MR流体）は1940年代にJ. Rabinowによって発明された機能性流体の一つであり¹⁾、外部から印加される磁場に応じて、急速、かつ、連続的、可逆的に粘性が変化する。また、その応答速度は数ミリ秒とされている。MR流体は強磁性粒子をオイル等の溶媒に分散させたものであり、強磁性粒子が外部磁場に応じて配列しクラスターを形成することによって見かけ上の粘性が変化する²⁾。たとえば、図1(a)に示すようにMR流体を2枚の平板の間に充填し、磁場を印加して流体をせん断すれば、クラスターは崩壊と再生を繰り返し、安定なせん断抵抗を示す。この原理を用いて磁場（コイル電流）によって制御が可能なブレーキやクラッチを製作することができる（図1(b)参照）。なお、これらのデバイスではパッシブなトルクが発現される。

従来のMR流体では、強磁性粒子としてカルボニル鉄粉といわれる直径数ミクロンの鉄粒子が用いられている。ミクロンサイズであるがゆえに、時間が経てば鉄粒子は沈降し、時に粒子沈降層は強固なケーキ層を形成して容易に再分散させることができないことがある³⁾。この課題解決の一案として、著者らは、直径が100nm程度の鉄ナノ粒子を用いた鉄ナノ粒子分散MR流体（以下、ナノMR流体）を提案してきた⁴⁾。従来のMR流体と比較して発現するせん断応力はやや小さいが、従来のMR流体と比較して優れた特長も有している。本報では、ナノMR



(a) せん断流れモード



(b) せん断流れモードを利用した回転型MRデバイス

図1 回転型MRデバイスの構造（一例）

流体の特長とその特長を活かしたハプティクス分野への応用について解説する。

2. ナノMR流体の特長

MR流体は、鉄粒子を溶媒であるオイルに分散させた懸濁液（サスペンションともいう）である。一般に、懸濁液における粒子の沈降速度は、粒子と溶媒の比重差、粒子径の2乗に比例する（ストークスの法則）。鉄粒子と溶媒との比重差が大きいため、ミクロンサイズの鉄粒子を用いる従来のMR流体の多くは沈降防止剤を添加したり、チクソ性の高い溶媒を用いることによって粒子の沈降を妨げている。添加材や溶媒の種類によって分散安定性は向上するが、これらの添加剤は耐久性などにも影響を及ぼすことが予想される。

ナノMR流体は、直径100nm程度の鉄ナノ粒子をオイル等の溶媒に分散させたものであり、粒子が沈降しにくい。また、分散性向上のために鉄ナノ粒子の表面を修飾しているが、そのほかの添加物は加えていないため耐久性にも優れている。図2に従来の

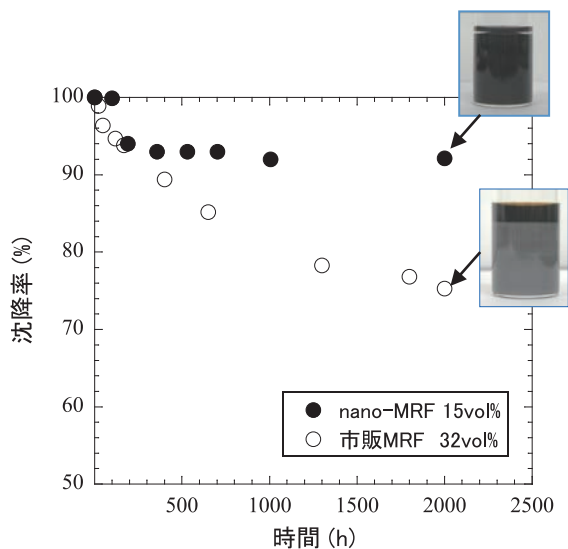


図2 沈降試験の結果

市販MR流体とナノMR流体の沈降試験の結果を示す。ナノMR流体に含まれる鉄粒子は市販MR流体の半分程度であるが、沈降率は90%以上で飽和している。

また、ナノMR流体は長期安定性に優れているだけでなく、ブレーキやクラッチ等へ応用した場合に低速におけるトルクの安定性に優れている。このトルク安定性は、MR流体に磁場を印加した際に形成されるクラスターの挙動に起因すると考えられる。

図3に、磁場を印加して流体をせん断した時のクラスター（粒子の配列）の観察結果を示す。図(a)に示すように、ナノMR流体は流体層のほぼ中央付近を境界として安定してクラスターの崩壊と再生が繰り返された。それに対して、従来の流体ではクラスターが崩壊する位置が安定しておらず、流体全体が回転ディスクに伴って流動するなど、不安定な挙動を示した。これらの結果から、クラスター崩壊と再生の安定性がトルク安定性に影響を及ぼすと考えられた。

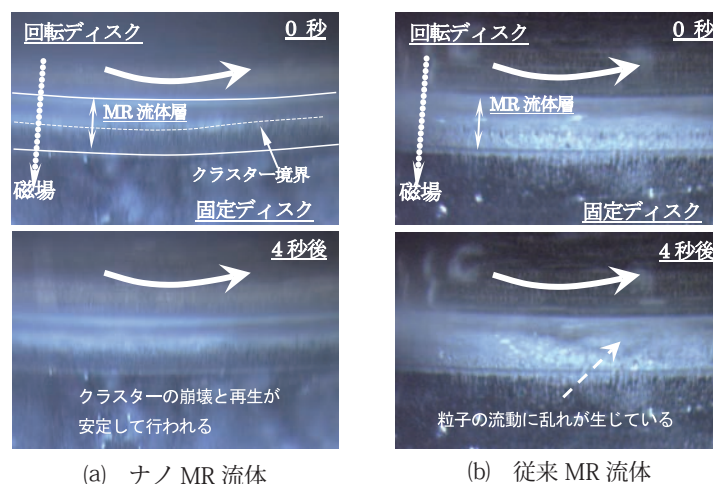


図3 MR流体中のクラスターの観察

ナノMR流体は人が動かすような低速回転速度であってもトルクを安定に伝えることができ、かつ、流体の粘弾性を変化させることによって生じる感触は、機械的な振動や力と異なる。これらの特長を活かして、ナノMR流体によってハプティクス分野に新しい感触を与えたいと考えている。

3. ナノMR流体のハプティクスへの応用

ハプティクスとは「利用者に力、振動、動きなどを与えることで皮膚感覚フィードバックを得る技術」と定義されている。MR流体は振動のような触覚だけでなく、力覚を提示することができる（以下、力触覚）。また、人に力触覚を与える装置として重要視されるのは、その安全性である。MR流体はパッシブなトルクを発現する。そのため、動力源として使用することは難しいが、人が働きかけた力に対する抵抗力を制御するため、非常に安全性が高いといえる。

ナノMR流体にどのような磁場を印加すれば、どのような感触が生まれるのか、それを明らかにしていくことによって、安全、小型でありながらリアルな力触覚を提示できるハプティクスデバイスが実現できると考えている。まだ感触評価は始まったばかりであるが、以下にナノMR流体の感触評価の一例を紹介する。

3.1 ナノMR流体の感触評価方法

本稿では、ハサミで物を把持した時の力触覚評価について紹介する。本評価では、自作の手触り評価装置を用いて、人に作用する力学的な刺激と物を把持する人の動作の両方を同時に測定し、人が物を把持するプロセスの全体像を定量的に評価している⁵⁾。図4に本研究で用いた感触評価装置を示す。MRデバイスをオリジナルの手触り評価装置に固定し、ハサミを回転させたときに人へ作用する力を測定して

いる。同時に、高速度カメラによって人の指とリングの動きを撮影して、その画像から各々の変位および加速度を求める。

3.2 ナノMR流体の粘性変化がもたらす感触

図5は、上記図4のMRデバイスに単純な正弦波交流電流を40Hzで印加した状態で、被験者が回転リングを回転させた時にリングの支点に加わる接線力とその方向 θ を測定した結果である。被験者がリングを回転させてハサミを開閉するときには、ハサミの支点に0.5～1.0Nの接線力が加わった。測定された0.5～1.0Nの小刻みなトルクの変動はMRデバイスのトルク変化（すなわち、ナノMR流体の粘性変化）に伴う変動である。

図6に、これらの過程における接線力の経時変化を0.1秒のスケールで拡大したものを示す。MRデバイスに40Hzの電圧を加えた時のみ、接線力は約0.025秒を1周期とする正弦運動を繰り返した。このトルク変化から、リングをつまんでいる指には「ぶるぶる感」が認知された。

つぎに、MRデバイスに10～400Hzの正弦波交流電流を加えてみた。交流電流を400Hzとした場合に「きゅきゅっと感」が、70～150Hzの中程度の周波数では「じーじー感」「びりびり感」が、10～40Hzの低周波の電圧を加えたときは「かくかく感」「ぶるぶる感」が確認された。

単純な正弦波の磁場を印加しても、周波数によって感じられる感触が変化する。さらに、コイルへの磁場を多様に変化させることによって、さまざまな触感を提示することが可能と考えられた。

4. おわりに

今回はナノMR流体の特長と、ハプティクス分野への応用を確認するための感触評価について紹介した。ナノMR流体の感触評価は始まったばかりであるが、さまざまな感触を発現できる可能性がある。将来的にはマスター・スレーブロボットや建設機械の遠隔操作やバーチャル等、幅広い分野で実用化されればと考えている。

なお、本解説で掲載したクラスターの観察は東北大学中野政身教授の成果である。また、感触の評価はNEDO委託事業次世代ロボット中核技術開発において、山形大学野々村美宗准教授によって実施された成果である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) M.R. Jolly, J.W. Bender, J.D. Carlson, J. intel. Mater. Sys. Struc., 10, 5-13 (1999)

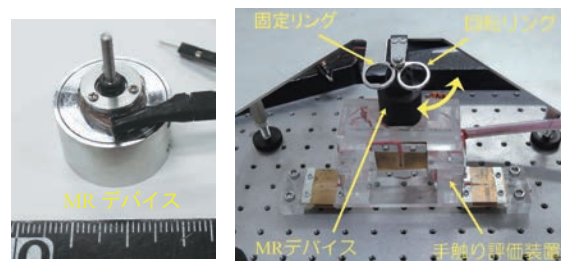


図4 評価に用いたMRデバイスと感触評価装置

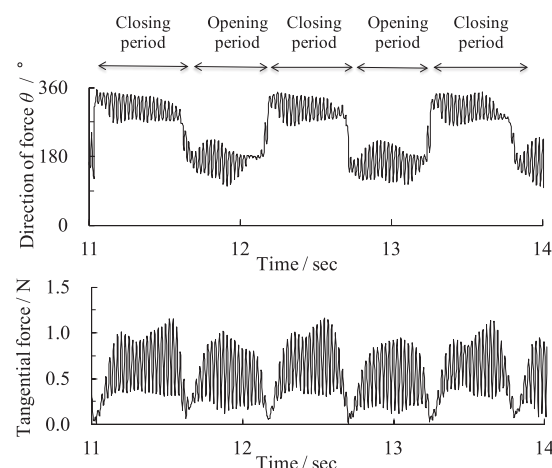


図5 40Hzの正弦波交流電圧を加えた時の接線力と方向の経時変化

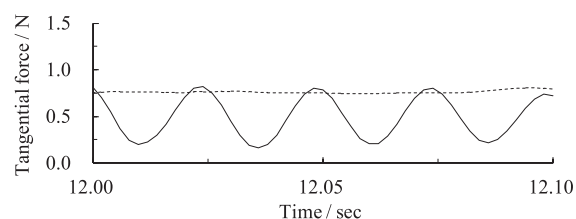


図6 40Hzの正弦波交流電圧を加えた時と加えていない時の接線力の経時変化（直線：電圧印加時、破線：電圧切断時）

- 2) Masami NAKANO : Magneto-Rheological Suspension and Its Engineering Application, J. HTSJ, 43, 179, 26-31 (2004)
- 3) B.J. Park, et al. : Core-shell typed polymer coated-carbonyl iron suspensions and their magnetorheology, 11th Int. Conf. on Electrorheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions [ERMR 2009], 012078, 2009
- 4) J. Noma, H. Abe, T. Kikuchi, J. Furusho, M. Naito : Magnetorheology of colloidal dispersion containing Fe nanoparticles synthesized by the arc-plasma method, J. Mag. Magn. Mater., 322 (2010) pp. 1868-1871
- 5) Y. Nonomura, R. Saito, A. Takahashi : Friction at fingertip surface during water contact process, Bull. Chem. Soc. Jpn., 88 (2015), pp. 949-954.

(原稿受付：2016年8月8日)

解説

MR流体ブレーキを用いた
筋力トレーニングロボットの開発

著者紹介

たか とう しず お
高 頭 静 夫竹井機器工業株式会社
〒956-0113 新潟県新潟市秋葉区矢代田619番地

1979年新潟大学工学部精密工学科卒業。竹井機器工業株式会社取締役。

いし い ひろし
石 井 博株式会社日立製作所
〒108-8250 東京都港区港南2-18-1

1981年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。株式会社日立製作所社会イノベーション事業本部部長。日本機械学会などの会員。工学博士。

しら いし とし ひこ
白 石 俊 彦横浜国立大学大学院環境情報研究院
〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7

2003年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同年横浜国立大学助手。講師を経て、2010年准教授。専門は機械力学、バイオメカニクス、インテリジェントシステム。「MR流体の効果発現機構の解明とその制御装置への応用に関する研究」で2006年日本機械学会奨励賞受賞。日本機械学会などの会員。博士（工学）

たか すぎ しんいちろう
高 杉 紳一郎佐賀整肢学園こども発達医療センター
〒849-0906 佐賀県佐賀市金立町金立2215-27

1989年九州大学医学部大学院博士課程修了。九州大学整形外科講師。医局長。病院診療准教授を経て、2015年佐賀整肢学園こども発達医療センター副院長。2016年九州大学産学連携センター客員教授。専門は高齢者リハビリテーション、スポーツ医学、リハビリテーション医学会専門医。医学博士。

いわ たに とおる
岩 谷 徹東京工芸大学芸術学部ゲーム学科
〒164-8678 東京都中野区本町2-9-5

1977年株式会社ナムコ入社。1980年ビデオゲーム「パックマン」製作。2005年ギネス記録認定。2007年東京工芸大学ゲーム学科教授。専門はゲーム学、ゲーム企画の研究。日本デジタルゲーム学会などの会員。

1. 緒 言

平成18年度に施行された改正介護保険法により、高齢者に対して筋力向上トレーニングなどのサービスが提供されている。

安全かつ効果的に筋力トレーニングを行うために

は、負荷量、伸展・屈曲のストローク回数やストローク量などを、各人の身体機能に応じて適切に設定する必要がある。しかし、介護予防拠点ではこのような専門的な知識を有する運動療法士や運動指導員等が不足しており、マシンを用いたトレーニングが必ずしも普及しない一因となっている。また、板錘の重力を利用したマシンでは伸展時と屈曲時とで負荷の方向を変えることができないため、エキセントリック筋収縮を含み、遅発性筋痛を誘発しやすかった¹⁾。さらに、高齢者に多い「つまずき」による転倒予防に効果的なトレーニングマシンは見当たらないのが現状である。

このような背景のもと、加齢などにより体力や身体機能が低下した高齢者の筋力向上トレーニングを支援するロボットの開発に着手した。運動者の身体機能や運動状態に応じた負荷の自動調整機能を有するとともに、筋疲労が少なく安全で効果的な、特に「つまずき」による転倒予防に効果的な筋力トレーニングを実現することを目的として、MR流体ブレーキを負荷源とするトレーニングロボットの実用化開発を行なった。

2. トレーニングロボットの開発

2.1 筋力トレーニング方法

本開発においてリハビリテーションの専門医より、「つまずき」による転倒予防に効果的な筋力トレーニングとして、図1に示すような脚のフル・コンセントリック運動の提案があった。本運動のポイントは下肢の伸展時と屈曲時とで負荷の方向を変えることである。伸展時は運動者に向かう方向に負荷がかかり、運動者は大腿四頭筋、大臀筋、下腿三頭筋などを使って負荷に対抗して脚を押すレッグプレス運動を行う。この時、筋肉は縮まりながら力を発揮するコンセントリックな状態である。本トレーニングは立ち上がるなどの動作改善に効果がある。一方、屈曲時は運動者から遠ざかる方向に負荷がかかり、運動者は腸腰筋、ハムストリング、前脛骨筋などを使って負荷に対抗して脚を引上げるリフトオフ運動を行う。この時も、筋肉は縮まりながら力を発揮す

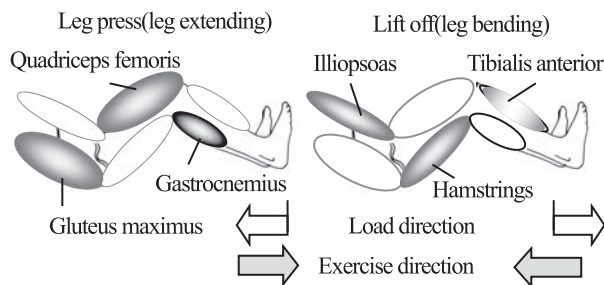


図1 Full concentric exercise

るコンセントリックな状態である。本トレーニングはつま先を上げたり、腿を上げるための筋力向上が図れ、つまずき予防に効果がある。

レッグプレス運動とリフトオフ運動を繰り返し行うのが、下肢のフル・コンセントリック運動である。上肢についても腕で引くローイング運動と腕で押すチェストプレス運動を組合せたフル・コンセントリック運動が可能である。既存の板錘式マシンでは、伸展時と屈曲時とで負荷の方向を変えることができないため、屈曲時もレッグプレス運動となり、縮んだ筋肉が元の長さに戻りながら力を発揮するエキセントリック筋収縮となる。エキセントリック筋収縮では筋線維に損傷が生じやすく、これが筋疲労や遅発性筋痛につながる。フル・コンセントリック運動では、エキセントリック筋収縮がないため、筋疲労が少なく、遅発性筋痛が起きにくい高齢者に優しい筋力トレーニングを実現することが可能となる。

2.2 筋力トレーニング方法の検証

フル・コンセントリック運動の効果を検証するために、図2に示すようなプロトタイプロボットを用いて、要介護認定者19名を対象として、約3ヶ月間、フル・コンセントリック運動をベースとした実証試験を実施した。本実証試験は既存の板錘式マシンとプロトタイプロボットを比較対照する形式（ロボット群10名、対照群9名）で実施した。

ロボット群については、プロトタイプロボットを用いて、上肢および下肢に対するフル・コンセント

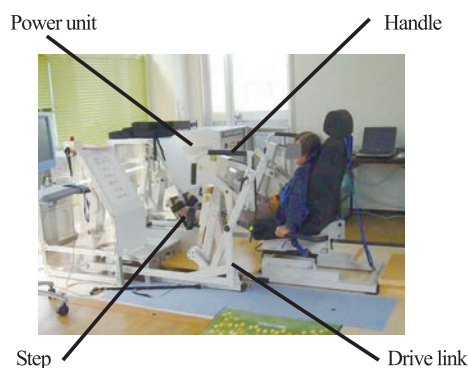


図2 Prototype robot

リック運動を実施した。運動負荷は上肢、下肢とも、速度に比例した負荷と等張負荷を組み合わせた。レッグプレス運動およびリフトオフ運動において被験者に与える目標負荷は、レッグプレス運動では被験者の体重の40%、リフトオフ運動では10%とした。ローイング運動およびチェストプレス運動の目標負荷はどちらも体重の20%とした。対照群については、既存の板錘式マシンを用いて、レッグプレス運動、レッグエクステンション運動、ヒップアダクション運動、ローイング運動を実施した。レッグプレス運動において被験者にかかる目標等張負荷は、被験者の体重の40%に設定した。ローイング運動、レッグエクステンション運動、ヒップアダクション運動における目標負荷はどちらも20%に設定した。

トレーニングはいずれの群も週2回を原則とし、3ヵ月間で計24回実施した。身体機能に対する効果を評価するため、トレーニング開始前と終了後に膝関節伸展筋力、膝関節屈曲筋力、足関節背屈筋力、股関節屈曲筋力、肘関節伸展筋力、肘関節屈曲筋力、5m最大歩行速度、3mTUG、長座体前屈、握力、開眼片脚起立時間、ファンクショナルリーチを測定した。

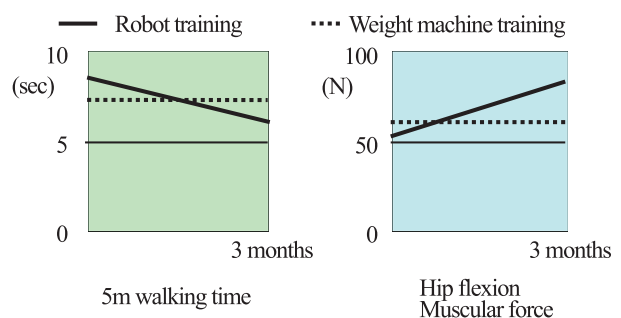


図3 Functional improvement

図3に実証試験結果の代表例として、5m歩行能力および股関節屈曲筋力の運動前後の改善状況を示す。5m最大歩行速度については、5mを歩行するのに要する所要時間であり、短い方が歩行速度の速いことを示している。ロボット群のみ-29.0%となり、統計学的に有意な短縮 ($p < 0.05$) を示した。被験者10名中9名 (90.0%) に歩行速度の向上が見られた。一方、対照群では-5.3%となり、有意な短縮が認められなかった。股関節の屈曲筋力はロボット群では+56.0%、対照群では+7.5%となり、両群ともに統計学的に有意な向上 (ロボット群: $p < 0.01$, 対照群: $p < 0.05$) を示した。また、ロボット群では被験者10名全員 (100%) に、対照群では9名中7名 (77.8%) にそれぞれ筋力向上が見られた。ロボット群では、リフトオフ動作にお

いて腸腰筋の強力な「もも上げ」作用を必要とするため、十分な筋力向上が認められたものと考えられる。対照群でも大腿四頭筋のうち二関節筋である大腿直筋は股関節屈曲の作用をもつため、一定の筋力向上は認められるが、効果はロボット群の方が大きいことがわかる。一方、ロボット群では足関節背屈筋力も+20.6%向上する($p<0.01$)という測定結果が得られており、前脛骨筋による「つま先上げ」と腸腰筋による「もも上げ」の動作改善によって、「つまずき」によって生じる転倒骨折の予防効果が期待される。

要介護認定者19名を対象とした実証試験により、以下のことを確認した。

- 1) ロボット群、対照群ともに複数の身体機能に向上が認められ、要介護度やADL（日常生活動作）機能が悪化することはなかった。
- 2) ロボット群では、リフトオフ運動で強化される股関節屈曲、膝関節屈曲、足関節背屈の各筋力に著しい向上があり、歩行速度などが被験者平均で25%以上改善した。また、被験者の80%以上（目標：80%以上）に歩行速度などの改善が見られるなど、対照群より多数の身体機能に向上効果があった。
- 3) ロボット群のトレーニング時間は対照群のトレーニング時間の75%以下（目標：80%以下）であった。

以上のことから、フル・コンセントリック運動の効果を検証できた。

なお、本検証に使用したプロトタイプロボットは、負荷源としてサーボモーターを用いたが、実用化にあたり、最大定格負荷、負荷方向の切替の応答性、装置の大きさ、コストなどに課題があった。そのため、新たな負荷源を開発することが不可欠であった。

2.3 構造・機構

表1に本ロボットの主要仕様を示す。本仕様に基づき、図4に示すような、上肢・下肢の筋力トレーニングを1台で実現するオールインワンタイプの筋力トレーニングロボットを開発した。

世界初のフル・コンセントリック運動を実現するためには、伸展時と屈曲時とで負荷の方向を瞬時に



図4 Outward appearance

変えるだけでなく、伸展時と屈曲時の脚力の差異に応じて、負荷の大きさを変える必要がある。そのため、本ロボットでは負荷の発生源としてMR流体ブレーキを採用した。MR流体ブレーキが発生する負荷を運動者へ伝達するチェーン・スプロケット駆動機構、運動者に負荷を印加する脚載台（下肢運動の場合）や握りバー（上肢運動の場合）から構成されている。図5に構造図を示す。

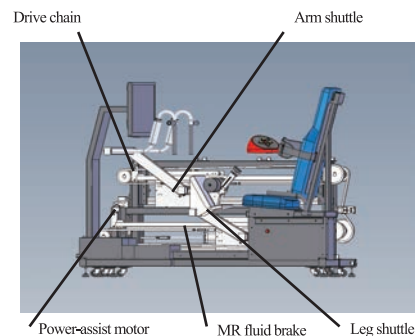


図5 Structure

MR流体ブレーキは、図6に示すように、MR流体を封入したシリンダー、MR流体に磁場を与えるコイル、MR流体が発生する力を伝達するピストンから構成されている。MR流体に外部から磁場を加えると磁場の強度に応じて流体中で分散している磁性粒子がクラスタを形成し、マクロ特性として降伏応力が変化する。このクラスタを外部せん断により破壊する際の抵抗を負荷として利用するものである。

図7にコイル電流に対する負荷特性を示す。

負荷は電流にほぼ比例するとともに、1.5Aの電流で定格負荷3.5kNを発生することがわかる。一方、MR流体ブレーキにはパッキンの摺動部抵抗やピストン隙間部の粘性抵抗として50N程度の最小負荷が

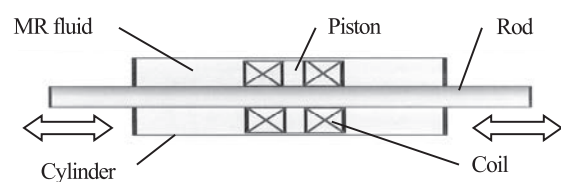


図6 MR fluid brake

表1 Specification

Load	20N ~ 2,000N
Stroke	400mm (Leg exercise) 600mm (Arm exercise)
Power	AC100V (50/60Hz)
Size	1,800W, 900D, 1,250Hmm
Weight	2,500N

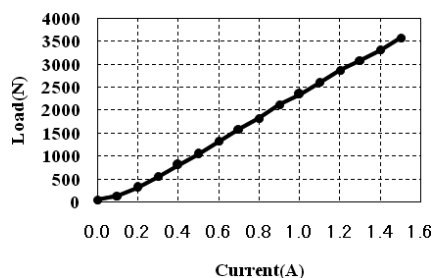


図7 Load characteristics

ある。本負荷を打ち消すために、駆動機構にアシストモーターを付加した。

負荷の制御は、あらかじめ取得したMR流体ブレーキ特性を基に、負荷量をフィードフォワード制御およびフィードバック制御で加え、速度と負荷量の変化値を判断してアシストモーターを作動させている。

図8に運動者の負荷および電流変化の経時波形を示す。伸展から屈曲への切替時に、運動者のペダルあるいはハンドルにかかる力の大きさと方向を検知し、電流によりMR流体ブレーキの負荷量を制御している。この時、負荷の大きさが0.05秒程度の遅れで瞬時に行われていることがわかる。²⁾

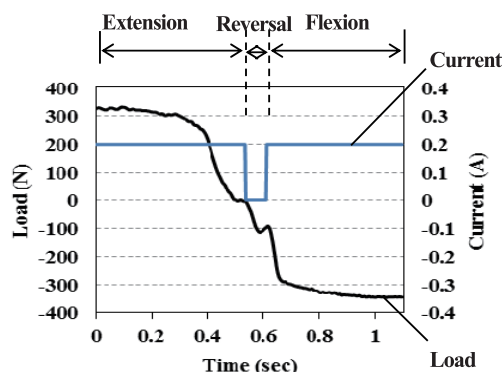


図8 Load characteristics (Time progress)

以上のことから、本ロボットは運動者の上肢、下肢の動きを検出し、負荷の方向や大きさを制御することによってフル・コンセントリック運動を実現できるとともに、各人の運動機能に応じて負荷を自動的に調整できることがわかった。

本ロボットによって、「つまずき」による転倒予防に効果的な筋力トレーニングを行えるとともに、従来は運動療法士や運動指導員等が行っていた負荷の判断をある程度肩代わりすることが可能となった。

3. トレーニングロボットの実用化

本開発成果をもとに、2011年に製品化した。本製品は筋力測定モード、上肢の筋力トレーニングモード、下肢の筋力トレーニングモード、有酸素ト

レーニングモード、上肢下肢が連動するボート漕ぎ様式のゲームモードの5種類の機能を有する。

ゲームモードでは、ボート漕ぎ運動の速さや左右ハンドルへの力のかけ方の差異がディスプレイ上のボートの速度や進行方向と連動し、ボートからの景色が変化する体感型ゲームとなっており、ゲームを楽しみながら筋力、心肺持久力、運動調整力などの総合的な身体機能向上が図れる。「楽しさ」の要素をトレーニング機器に搭載することは、運動を継続的に実施させるためのモチベーション向上に貢献するとともに、製品の付加価値を高めることにも繋がっている³⁾⁻⁵⁾。

4. 結 言

加齢などにより体力や身体機能が低下した高齢者の筋力向上トレーニングを支援するため、フル・コンセントリック運動と称する筋力トレーニング方法を検証するとともに、本運動を実現するためにMR流体ブレーキを用いた筋力向上トレーニングロボットを開発した。要介護認定者19名を対象とした実証試験によりフル・コンセントリック運動の効果を検証した。また、運動者の上肢、下肢の動きを検出し、負荷の方向や大きさを制御することによってフル・コンセントリック運動を実現できるとともに、各人の運動機能に応じて負荷を自動的に調整することができることを確認した。

本開発成果をもとに、2011年に製品化した。本製品は上肢2種類、下肢2種類の筋力トレーニングが1台ででき、筋疲労が少なく、「つまずき」による転倒予防に効果的なフル・コンセントリック運動が実現できるとともに、運動者の身体機能に応じて負荷の自動調整を行うことができる。また、高齢者の介護予防だけでなく、一般健常者やアスリートまで幅広く市場への活用が期待できる。

参考文献

- 1) 介護予防 包括的高齢者運動トレーニングCGT. 大淵修一, 佐竹恵治著, pp 10-15, 健康と良い友だち社, 2004
- 2) 白石俊彦: MR流体の効果発現機構の解明とその制御装置への応用に関する研究, 日本機械学会誌, 110, 1062 (2007) 356
- 3) 石井博, 家坂邦直, 橋爪誠, 高杉紳一郎: 筋力トレーニングロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 26, 8 (2008) 872-873
- 4) 高杉紳一郎, 河野一郎, 上島隆秀ほか: 介護予防のための新しいトレーニングマシンの開発と効果検証, 第23回日本運動器科学会, 156 (2011) 156
- 5) 高杉紳一郎: 医工連携によるロボット技術を活かした転倒予防, J. of Clinical Rehabilitation, 24, 11 (2015) 1101-1107

(原稿受付: 2016年7月29日)

ER流体とその応用開発の現状

著者紹介



井上 昭夫

株式会社ERテック
〒562-0046 大阪府箕面市桜ヶ丘2-1-31
E-mail: ertecjp@ybb.ne.jp

1979年旭化成工業（現旭化成）株式会社入社、ポリアクリロニトリルの繊維、フィルム、多孔膜の研究開発後、ER流体とその応用技術の開発に従事。専門は機能性高分子、1997年工学博士号取得（名古屋大学）。2003年株式会社ERテックを設立。

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。前者は主にイオンの分極を、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、すでに報告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わかると撤退した。現在ER流体を販売する企業は独逸²⁾や英国³⁾でわずかにあるものの、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。

- 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、図2）
- 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）。
- 繰り返し電圧を上げ下げしても、せん断応力（トルク）にヒステリシスがほとんどない。
- 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。
- 高電圧の印加を要するが、電流は極めてわずか

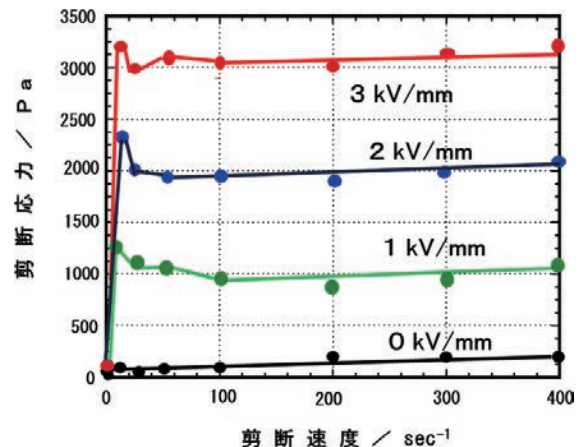


図1 ER流体のせん断応力特性

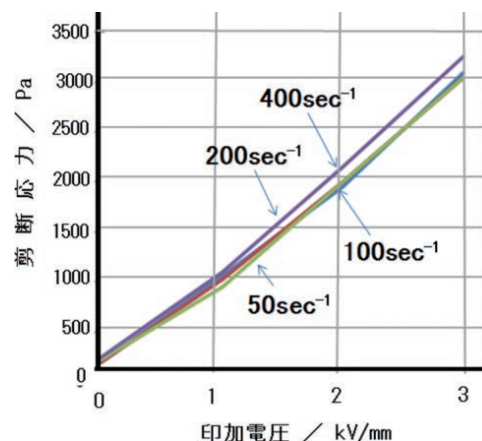


図2 ER流体のせん断速度

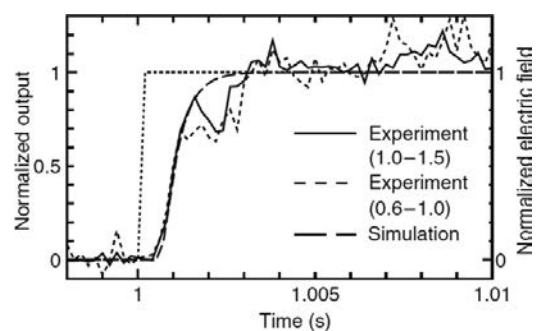


図3 ER流体の応答速度（立ち上がり）⁴⁾

である（電極面積 1 cm^2 あたり数 μA 以下）。

- 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（ $10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ）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流体の使われ方を図4に示す。

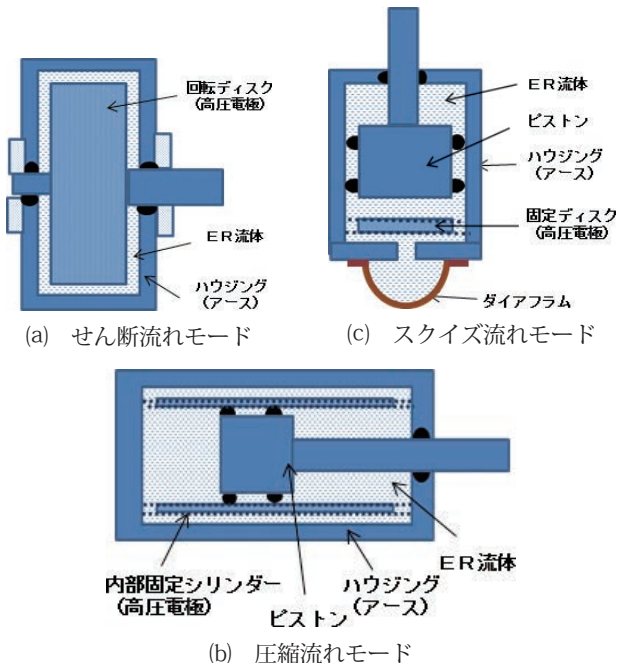


図4 流れモードとER流体の使われ方の例

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m秒以下）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

ヒステリシスがほとんどないため、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。

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



写真1 樹脂製ER流体クラッチ

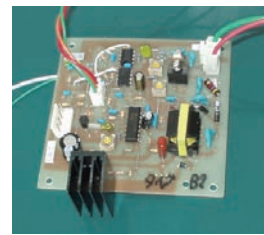


写真2 高圧電源

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℃以下や50℃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。最近で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。

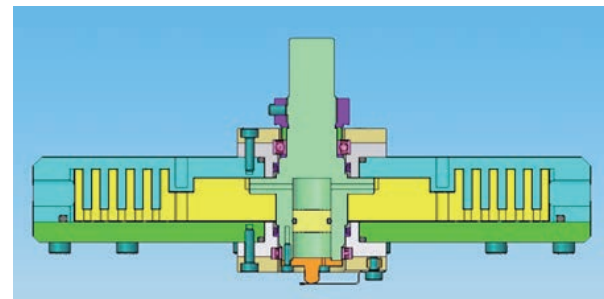


図5 多重シリンダ型ER流体ブレーキの断面図

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

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。

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

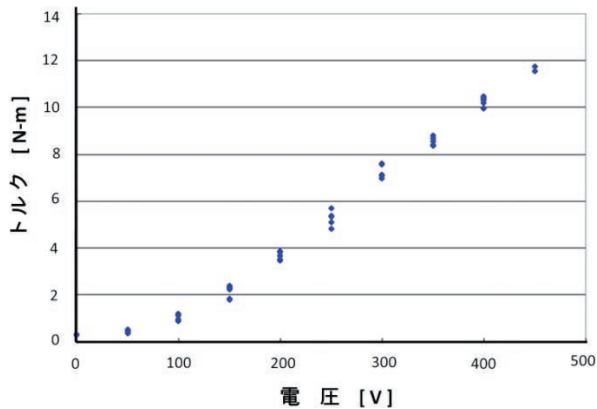


図6 ER流体ブレーキのトルク性能

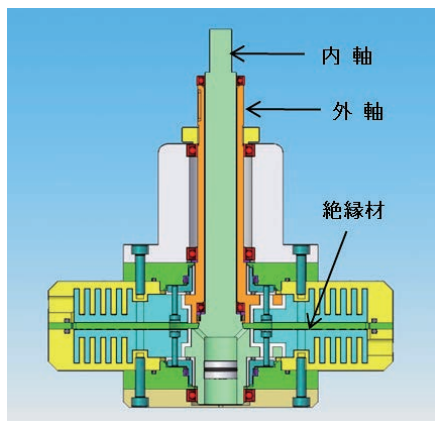


図7 同芯2軸型ER流体ブレーキ

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流体クラッチはもっとも望ましい⁵⁾。

- 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

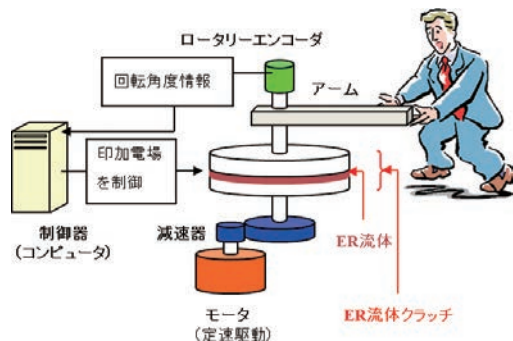


図8 クラッチを介在させたモータ駆動システム

リシスがほとんど無い長所は、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。

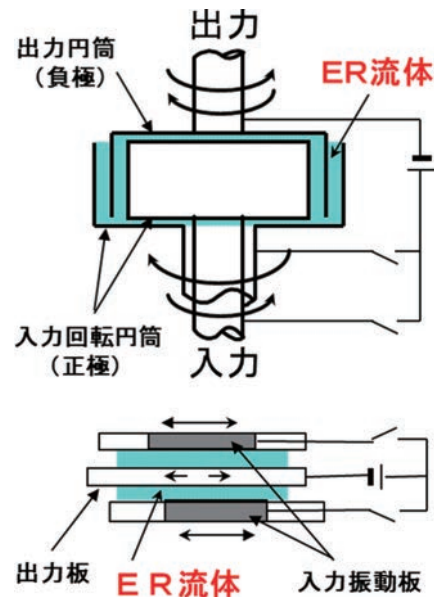


図9 ER流体を用いた力覚呈示の原理

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／デコボコなどさまざま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で共同開発された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3)。



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最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⁾。

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、さらにモータと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ほか、運動機能の解析評価にも利用される。

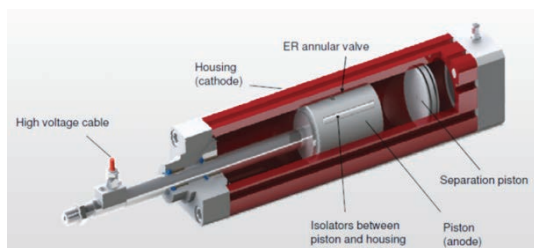


図10 ピストン型ER流体ダンパー



写真4 ERダンパーを用いたトレーニング装置



写真5 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6)。



写真6 ER流体ダンパーの乗用車および産業機械への応用

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。

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.fluidicon.com> (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 O10-4 (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)

(原稿受付：2016年7月27日)

解説

リハビリテーション長下肢装具用電子制御EAM 膝ブレーキの開発

著者紹介



あん ざい ひで のぶ
安 秀 伸

藤倉化成株式会社
〒340-0203 埼玉県久喜市桜田5-13-1
E-mail: h-anzai@fkkasei.co.jp

1978年八戸工業大学 工学部 機械工学科修了。
1994年 藤倉化成株式会社に入社、現在に至る。
新素材開発及びその応用の研究・開発に従事。
日本フルードパワーシステム学会、日本機械学
会、電気学会、生体医工学会などの会員。



やま もと すみ こ
山 本 澄 子

国際医療福祉大学大学院
〒158-0083 東京都港区南青山1-3-3
E-mail: sumiko-y@iuhw.ac.jp

1976年慶応義塾大学大学院工学研究科修士課
程修了。東北大学助教授を経て、2003年国際医
療福祉大学大学院教授、現在にいたる。高齢者、
障がい者の動作分析、下肢装具の開発の研究に
従事。日本義肢装具学会、バイオメカニズム学
会などの会員。工学博士。



みつ い かず ゆき
三 井 和 幸

東京電機大学
〒120-8511 東京都足立区千住旭町5番
E-mail: mitsui@cck.dendai.ac.jp

1988年東京電機大学大学院理工学研究科博士
課程満期退学。同大学工学部助手を経て2002年
同大学工学部教授、現在に至る。生体計測、機
能性流体関連の研究に従事。日本フルードパ
ワーシステム学会、精密工学会などの会員。ラ
イフサポート学会理事。工学博士。



やす い ただし
安 井 匡

川村義肢株式会社
〒574-0064 大阪府大東市御領1-12-1
E-mail: yasui@kawamura-gishi.co.jp

1997年大阪府立工業高等専門学校機械工学科
卒。同年川村義肢株式会社に入社、現在に至る。
装具や補助機器の開発に従事。義肢装具学会会
員。

の総患者数は、厚生労働省の「平成26年患者調査の概況」²⁾より、117万9千人であり、寝たきりの第一要因となっている。患者数の増加にともない、厚生労働省の方針により早期リハビリテーション、早期歩行練習が推進されている。早期の歩行練習では、膝が不安定な状態での歩行練習となり、膝関節と足関節の動きを機械的な継手によって補助する長下肢装具（Knee-Ankle-Foot-Orthosis：KAFO）が必要となる。従来のKAFO（図1）は、安定性を得るため



図1 従来の長下肢装具（KAFO）

に体重がかかった時に膝が曲がらないように固定されている。そのため、足を振り出す際に腰を持ち上げて足全体を引き上げ旋回するように歩行する「ぶんまわし」などの代償動作が必要となる。このような動きは、効率的な歩行練習を阻害してしまう。海外では脊髄損傷者などを対象として、膝継手の電子制御により振り出す際に膝が曲がるStance Control Orthosisが開発されている。しかし、大きさ、重量、電力消費、誤動作、反応時間などの問題から実用に十分供する物は開発されていない。そこで上記のような片麻痺者の早期リハビリテーションにおける歩行練習で使用することを目的とした電子制御EAM

1. はじめに

日本の高齢人口は、2025年には65歳以上が30%、75歳以上は18%に達する見通しが厚生労働省から出されている¹⁾。人口の高齢化にともないさまざまな疾患を有する人口の増加が見込まれ、特に脳血管障害の患者数の増加が懸念されている。脳血管障害

膝ブレーキ（図2）付KAFO（以下E-KAFO）の開発に着手した。

本研究は、産学の共同研究であり、機能性材料を用いたブレーキのKAFOへの適用研究・開発・実用化を目指すものである。E-KAFOの膝継手には省電力で瞬時に膝を固定・解除することが可能な電氣的吸引材料（Electro Attractive Material：EAM）を使用することとした。



図2 開発した電子制御EAM膝ブレーキ

2. EAM&G (Electro Attractive Material & Electro Adhesive Gel) の開発

1993年にF社は粒子分散型電気粘性流体（Electro Rheological Fluid：ERF）を発表した³⁾。開発は、温度特性、せん断力向上、分散安定性を主の課題として取り組んだ。温度特性は、 $-30^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ までほぼフラットなせん断力を発生できるようになった。せん断力も、磁気粘性流体（Magneto Rheological Fluid：MRF）と比較すると小さいが1kPaを発生できた。しかし、分散安定性のクリアは簡単ではなかった。ERFに分散している粒子は、粒子径により微妙に比重が違い、分散媒と比重を合わせることができなかった。また、分散剤やチキソトロピー付与剤を用いると電圧印加時のせん断力を十分に発揮させることが難しかった。

そこで考え出したのが、ゲル化である。電圧を印加した状態のERFをゲル骨格の中に閉じ込めるという方法である。これにより、分散安定性の問題が解決した。さらに液体シールが不要になるという副産

物が得られた。この副産物は、後に機構の簡素化に大いに役に立った。

3. 電子制御EAM膝ブレーキの開発

3.1 開発目標

当面の開発目標は、早期歩行練習に使用するKAFO用の膝ブレーキである。適用対象者を明確にし、機能を絞り込み、開発期間の短縮を目指した。求めた特性は、「軽量」、「コンパクト」、「省電力」、「安定動作」そして「操作性」である。KAFOを使っている歩行練習は、理学療法士（Physical Therapist：PT）が後方から患者の身体を保持しながら介助する。従来のKAFOでは足を振り出す際に患者の足を持ち上げて振り出すため、この時期にPTの手元のスイッチで膝継手の固定・解除を行うこととした。必要ブレーキトルクは、成人男性の体重を支えることができる膝トルク40Nmを目標とした。

3.2 電子制御EAM膝ブレーキの開発

3.2.1 EAMブレーキ開発

電子制御EAM膝ブレーキに許容される膝回りの空間寸法から、電子制御EAM膝ブレーキに内蔵されるEAMブレーキの外径を80mmとした。外径が決まることにより、中に入れることができるEAM電極の最大有効外径は66mmとなった。EAMの発生するせん断応力は、約10kPaであるため、1枚のEAM電極が発生できるトルクは、およそ0.7Nmとなり、10枚のEAM電極を重ねても7Nmにしかない。目標の40Nmには程遠いため、外部からの入力を増速してEAM電極に入れることにした。増速機構は、遊星歯車機構を用いた。採用の理由は、入力軸と出力軸を同一軸上にとることができ、EAM電極とも軸を合わせることができるとためである。採用した増速比は、1：6で、電圧を印加しない空転時のトルクを小さくすることも考慮した。これにより、EAMブレーキのトルクはEAM電極10枚で40Nm（DC700V印加）を確保することができた（図3）。因みにDC700Vは、低電圧に分類される。

EAMブレーキトルクの電圧依存性

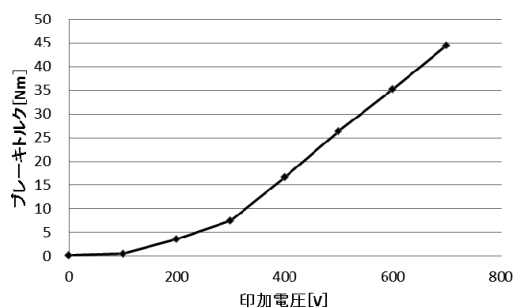


図3 EAMブレーキトルクの電圧依存性

3.2.2 電子制御EAM膝ブレーキの構成

電子制御EAM膝ブレーキには、EAMブレーキ以外にブレーキを駆動する電源装置、バッテリー、コントロール装置、バッテリー充電装置、ロータリーエンコーダ、本体前面にある操作スイッチ、PTが持つ手元スイッチなどが必要とされる（図4）。

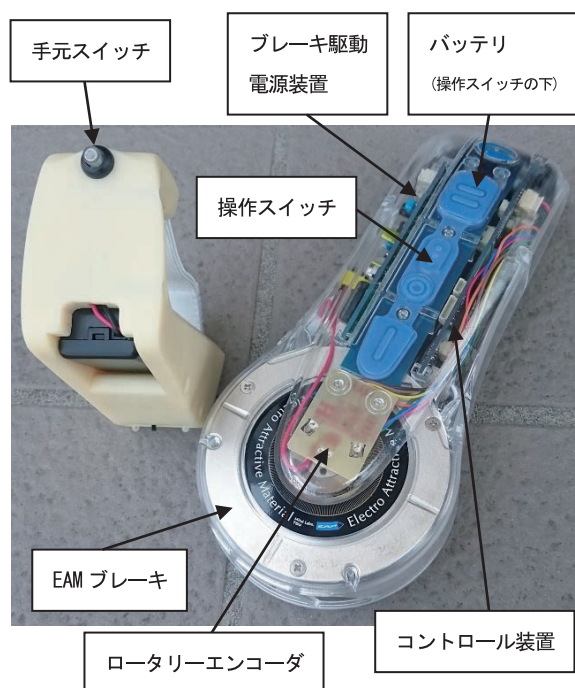


図4 電子制御EAM膝ブレーキの構成

内蔵するバッテリーは、Li-ion電池を採用し、ほぼ一日の稼働時間を賄える容量（約2,500mAh）を備えた。コントロール装置は将来の機能増強に備え、高性能CPUを搭載した基板も開発した。ロータリーエンコーダは、椅子へ座るときにダンピングを効かせて、静かに座る機能の追加を将来予定しているため搭載している。また、歩行練習時の膝曲げ角度も将来取り込めるようにしている。

操作性に関して、操作スイッチはバックライトで光るようにし、押すことができるボタンを示すようにしている。また、動作状況を赤（固定）と緑（解除）のLEDを用いて表示し、歩行練習時にビデオ撮影して練習効果を確認するときにも役立つようにしている。ボタン操作の確実性を高めるため、バイブレーション素子を搭載し、振動によりボタンを押したときの操作感も高めている。

以上の機能要素を筐体に納めたその重量は、598gとなった。開発当初は、遊星歯車周りの部品には機械構造用鋼材を使用していたが、ナイロン66とアルミに材質を変更し、約300gの軽量化を行った。材質変更による強度低下が心配されるが、

破壊試験を行い48Nmのブレーキトルクがかかっても耐えることを確認した。

完成した電子制御EAM膝ブレーキは、幅90mm、長さ200mm、高さ35mm（取付用ピンは除く）となった（図5）。



図5 KAFOに取り付けた電子制御EAM膝ブレーキ

4. おわりに

E-KAFO向けのEAMブレーキ開発を行い、プロトタイプモデルへ落とし込み、現在臨床試験を行っている。臨床試験は、複数施設を計画している。臨床試験後、上市する計画である。開発初期では、許される寸法の制限により必要とされるトルクの発生が危ぶまれた。また、電圧をEAM電極に印加する経路でのノイズの発生など難題を乗り越えて作り上げることができた。

特に開発中のE-KAFOを動作テストしていただいた中伊豆リハビリテーションセンターの田中惣治先生ほかPTの先生方には、重要なお意見をいただいたことに感謝する。

今後、市販モデルへの機能の落とし込みを行い、世の中に役に立ち、使ってもらえる製品にしていきたい。また、歩行練習用のみならず、パーソナルユースの製品へも応用展開を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/hukushi_kaigo/kaigo_koureisha/chiiki-houkatsu/dl/link1-1.pdf
- 2) <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/14/dl/kanja.pdf>
- 3) 枝村一弥：ER流体の開発、油圧と空気圧/日本油空圧学会、25巻7号、p803-807 (1994)

（原稿受付：2016年8月19日）

解説

釣用リールにおける磁性流体シールの応用

著者紹介



お 小 はら たけ しげ
原 武 恵

グローブライド株式会社
〒203-8511 東京都東久留米市前沢3-14-16
E-mail: ohara@globeride.co.jp

1993年中央大学精密機械工学科卒業。同年グローブライド株式会社入社。釣用リールの材料、表面処理開発や部品加工技術に従事し、現在フィッシング生産本部リール製造部リール開発課に在籍。日本トライボロジー学会などの会員。

1. はじめに

磁性流体シールの実用例としてはハードディスクドライブ（HDD）や半導体製造装置での真空シールなどで実用化され¹⁾、以前から釣用リールでも防水シールとして応用できないかと着目していた。その特長は釣用リールの回転軸で求められる要求品質（防水性能）に近いものであるが、防水用途という観点での使用実績や応用事例がなく液体シールに展開することには問題があるとされていた²⁾。そのような状況の中、過酷な環境で使用する釣用リールでは、耐食性を大幅に改善させた高耐食ボールベアリングの採用、ゴムシールなどを多用した防水構造等が展開されてきた。本稿では釣用リールで従来の延長線上ではなく、画期的な方法で防水性能を高め実用化されている磁性流体シールの応用例について紹介する。

2. 釣用リールへの磁性流体シールの検討

2.1 リールにおける課題

釣用リールの初期性能を著しく阻害する要因として一番に挙げられるのが、リール本体内部に海水が浸入することによるパーツの腐食や乾燥して発生する塩の結晶である。このような腐食や塩の結晶は回転部や摺動部に入り込むと異音、振動、食い付きの原因となる。そこで、従来は水の浸入経路にパッキンを設けることで海水の浸入を食い止めていた。しかし近年、釣用リール開発の流れでは、より摩擦抵抗が少なく滑らかな回転性能と、それを維持させる

という耐久性が求められている。

まず、本開発では多くの回転軸を有するリール構成部位の中でも特に回転フィーリングに敏感で、且つ浸水や異物侵入による影響を受けやすいスピニングリールのメインシャフト部（図1）への磁性流体シールを検討した。

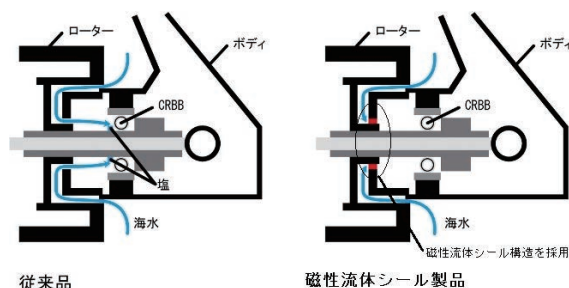


図1 磁性流体によるシール部

2.2 磁性流体シールの構想

前述の通り、磁性流体シールによる防水技術に関してはほとんど情報や知見は得られなかったため、既に他分野で実績のあった磁性流体シールの構成を参考に独自でシールユニットを試作した。このユニットによる塩水を使った耐水圧の実験結果を図2に示す。これは溶媒、飽和磁化の異なる磁性流体A、B、Cを用意し、それぞれシール部のギャップを0.15mm、0.30mm、0.50mmの条件で比較したものである。図2のように塩水であってもガスでのシール実験³⁾にみられるようなギャップの大きさによりシール耐圧が大きく変わる現象がみられた。このような結果より対象が海水であっても従来の磁性流体

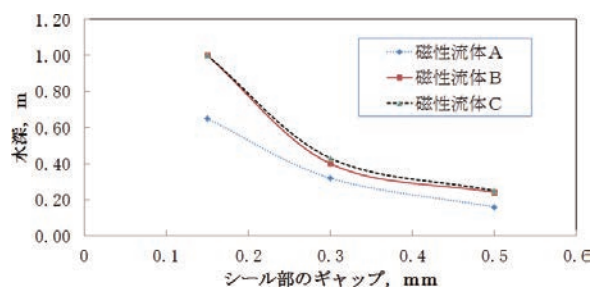


図2 塩水を使った磁性流体シールの耐水圧

シールの設計手法や構造を基本に考えることができた。

以後さまざまな実験を繰り返し、磁性流体選定、磁石や極板により磁気回路を調整し、最終的にはリールを構成する周辺部品と組み合わせ可能なリール専用ユニットが完成した、実機においては高速回転や衝撃などの物理的な評価から環境試験、また、海水、砂、グリス付着などの外的な懸念事項等について幅広く評価を行い当社製品における磁性流体シール機構は商標登録するに至った⁴⁾。

3. 釣用リールでの応用と展開

図3にはスピニングリールに於いて磁性流体シールが採用されている箇所を解りやすく示した。各部位共に今迄は防水性能と回転性能を両立させることが難しかったが、磁性流体シールの採用により市場のニーズを満たせる性能を達成することができた。これらは使用される部位の特徴ごとに異なる構成となっている。

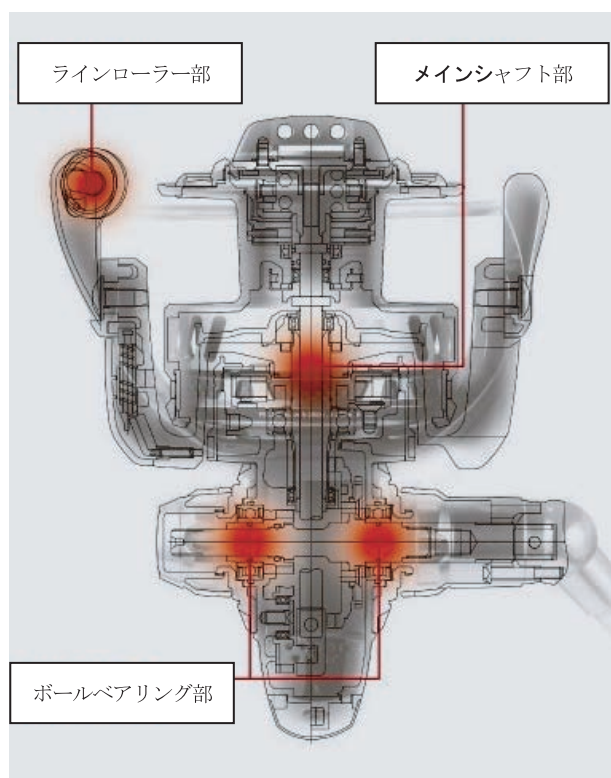


図3 釣用リールでの磁性流体シール採用箇所

3.1 メインシャフト部

最初に磁性流体シールが採用された部位である。図4にはメインシャフト部の磁性流体シール構造を示した。この部位については製品の要求品質に合わせ、汎用タイプ、高防水タイプなどの使い分けがある。基本的に磁性流体シールの構成は図4（上段の図）のように、HDD等で実績のある極板2枚のサ

ンドイッチ形状になっているが、機種によっては磁場の影響が作動に支障を与える場合があり、上下極板の厚さを変えるなど漏洩磁束を軽減する工夫がなされているものもある。汎用的機構としてもっとも展開が進んでいる。

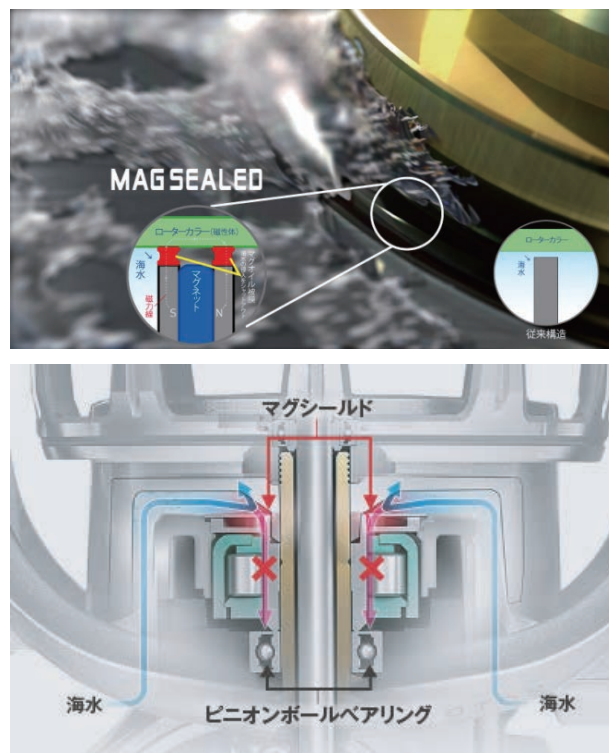


図4 メインシャフト部の磁性流体シール構造

3.2 ラインローラー部

ラインローラーという限られた小スペース内に最小限の部品で構成された磁性流体シールである。図5にはラインローラー部の磁性流体シール構造を示した。極板は設けずに構成部品であるボールベアリング外輪を利用し磁界を形成している。ラインローラーは前述のメインシャフト部より遥かに高速回転するため30,000rpmでも耐えうる仕様とした。また、この部位は支持部本体も回転するため、磁性流

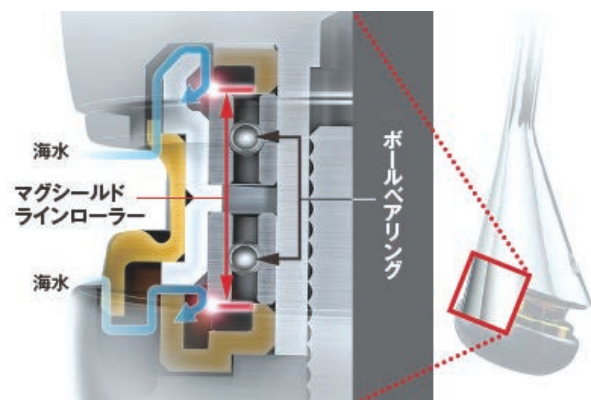


図5 ラインローラー部の磁性流体シール構造

体シールに対し公転する方向に遠心力が掛かる。そのため、磁性流体が遠心力で飛散しにくい設計となっている。

3.3 ボールベアリング部

回転性能の要であるボールベアリング自身を単体で完全防水するため、ボールベアリングの表裏両面、内外輪、すべての隙間を密封したものである。図6および図7にはボールベアリングの磁性流体シール構造を示した。一般的なゴムシール型ボールベアリングと比較し海水や埃の侵入を大幅に防ぐことができるため、初期の回転性能を長く保てるメリットがある。また、釣用リールにおいてはほかの磁性流体シールに比べ複雑な設計を用いる必要がないため容易に使いやすく、現在、多くの部位、製品へ展開されつつある。しかしながら、一般的なボールベアリングと比べると少量生産であるために、シールド部品の追加以上にコスト高となっている。今後、釣用リールでの更なる展開や他業界からの需要などによって生産数量が増えれば大幅にコストを抑えられる可能性があり、将来的には汎用機種へも搭載されることが期待される。



図6 磁性流体シール型ボールベアリング

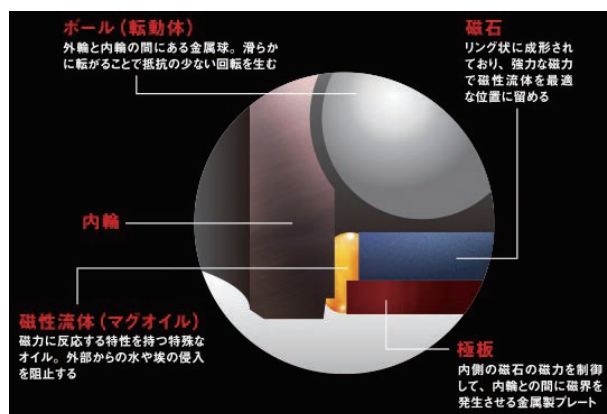


図7 ボールベアリングの磁性流体シール構造

4. おわりに

本技術を搭載した製品は2010年の発売以来、徐々に製品展開され現在においては当社スピニングリールの半分近くの製品へ採用されています。磁性流体シール技術はいまだ防水用途としては認知されていないものの、釣用リールにおいては防水、防塵技術として非常に有効であり進化の途上にあります。今後ますます性能向上を進めていくためにも材料、構造の見直しを図って行きたいと考えています。これまでの当社における評価や実績からも磁性流体シールに関してはさまざまな可能性があるものと感じています。ぜひとも本事例がきっかけとなり新たな磁性流体シール技術革新の一助にでもなれば幸いです。

参考文献

- 1) 廣田泰文：磁性流体を用いたデバイスの実用化事例，フルードパワーシステム，Vol. 42，No. 1，p. 59-61（2011）
- 2) 神山新一：磁性流体入門，産業図書株式会社，p. 97-100（1989）
- 3) 武富荒・近角聡信：磁性流体-基礎と応用一，日刊工業新聞社，p. 22-55（1988）
- 4) <http://www.daiwaweb.com/jp/>

（原稿受付：2016年8月1日）

ニュース

第4回フルードパワーに関する日中国際共同ワークショップ (The 4th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power) 開催報告

著者紹介

いとう かず ひさ
伊藤 和 寿芝浦工業大学
〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307
E-mail: kazu-ito@shibaura-it.ac.jp

1995年上智大学大学院博士前期課程修了。株式会社小松製作所、上智大学助手・講師、鳥取大学准教授を経て2011年芝浦工業大学教授。現在に至る。日本フルードパワーシステム学会、日本生物環境工学会、計測自動制御学会、電気学会等の会員。博士（工学）。

1. はじめに

フルードパワーシステム研究における日中間での関係が深いことについては、本学会誌でも何度か紹介する機会を頂戴している。その中でも特に大きな意味を持つものは、JFPSと中国機械工程学会内にある流体伝動および制御分会との間で2010年から始められた国際共同ワークショップ（以下、JWS）事業である。若手研究者人材交流事業と並び、両国のフルードパワー技術の発展と情報交換の場としてJWSは大変良い機会であり、また開催国のフルードパワーシステム研究者および業界の若手への国際交流・啓発を促進する上でも大きな意義がある。

このJWSは、開催国の国内学会の開催に同期させて行うことが原則となっており、そのために一般セッションへの参加においては言葉の壁が存在する。しかし、日本語と中国語はほぼ同じ漢字を共有できるため、各セッションの発表を聴講しても意外に理解が可能という文化的背景が活用できることも特徴の一つである。発表論文は開催国の査読を経て双方5編とする計10編であり、油空水圧および機能性流体を対象とする解析、設計および制御を含む広い分野を網羅している。これまでの開催実績およびテーマとしては以下の通りである（開催場所の後ろの丸カッコ内は実行委員長）。

第一回（2010年）「Energy Saving and New Application on Fluid Power」、甘肅省蘭州市（冀宏教授、蘭州理工大学）

第二回（2012年）「Sustainable Future on Fluid Power」、機械振興会館（田中豊教授、法政大学）

第三回（2014年）「Green, Digital and Intelligence」、山西省太原市（権龍教授、太原理工大学）

第四回目となる今回は開催地を再び東京に移し、「Innovative Key Technology in Fluid Power」をテーマとして、本年度の春季講演会の前日にあたる5月25日午後に機械振興会館にて開催された。以下では今回のJWSについて報告する。

2. 講演論文

今回のJWSでは3セッションを編成した。この節では発表された論文について簡単にレビューする。なお、発表された論文のうち基準を満たすものはJFPS International Journal of Fluid Power Systemへの推薦対象となる。



写真1 JWS冒頭で挨拶される築地前会長

〔第一セッション〕 Energy-Saving and Hydraulic Pump Design, Chair: Prof. K.Ito (Shibaura Institute of Technology)

1. Y. Shang *et al.* (Beihang University), “Active Load Sensing Electro-Hydrostatic Actuator for More Electrical Aircraft: Concept and Design” では、航空機の機体制御用電気油圧システムをロードセンシング方式で制御する際に大きな問題となる応

答・効率低下および弁部での発熱を、大幅に改善する設計法とその効果についてシミュレーション検討した結果をまとめている。

2. P.N. Pham *et al.* (Shibaura Institute of Technology), “Energy Saving for Water Hydraulic Pushing Cylinder in Meat Slicer” では、アクアドライブシステムを食肉スライサシステムに応用した場合の省エネルギー効果について、従来のサーボ弁を使用したシステムと比較して大きく改善できる手法をシミュレーション検討を基に提案している。

3. H. Cui *et al.* (Taiyuan University of Technology), “The Research on Characteristics of Flow Field and Shear Torque of Oil Film for Hydroviscous Drive” では、大型油圧採鉱機械等で利用される流体粘性駆動装置における流体クラッチのシミュレーションモデルの構築が行われた。流量、圧力分布、油膜厚、せん断トルク等について、実験結果と合わせた精度検討が報告されている。

4. T. Kazama (Muroran Institute of Technology), “Numerical Simulation of A Slipper with Retainer for Axial Piston Pumps and Motors under Swashplate Vibration” では、油圧アキシアルピストンポンプモータにおける斜板振動下における、リテーナを含むスリッパの精密な動特性解析モデルが提案され、スリッパのジャンプおよび漏れに対するリテーナの抑制効果が広い動作点領域で確認されたことがまとめられている。

〔第二セッション〕 Hydraulics and Control, Chair : Prof. B. Xu (Zhejiang University)

1. J. Tao *et al.* (Shanghai Jiao-tong University), “Modelling and Simulation of Unidirectional Proportional Pump-Controlled Asymmetric Cylinder Position Control System with Model Predictive Control Algorithm” では、油圧駆動片ロッドシリンダシステムに対し、ゼロオーバーシュートを拘束条件として与えた場合におけるモデル予測

制御系の性能についてシミュレーション検討し、サンプリングタイム、予測区間長および制御区間長の影響についても合わせて検討している。

2. K. Sanada (Yokohama National University), “Speed Control of Marine Diesel Engine by DDVC Fuel Injection System” では、船舶用ディーゼルエンジンの速度制御用油圧DDVCシステムのモデル化と制御系設計提案について、良好な結果が得られることをシミュレーション検討により報告している。

3. B. Yu *et al.* (Yanshan University), “The Co-simulation Research of Single Leg Hydraulic Control System on Legged Robot” では、油圧駆動四脚ロボットにおける脚についての設計およびモデル化と、ADAMS, MATLAB/Simulinkによる協調シミュレーション結果を報告している。

〔第三セッション〕 Pneumatics and Functional Fluids, Chair : Prof. K. Takemura (Keio University)

1. J-W. Kim *et al.* (Tokyo Institute of Technology), “MEMS-Fabricated Needle & Ring Electrode Pair (NRE) and its Application to the Braille Cell” では、強いECFジェットを得るための三つの電極形状を提案・評価し、それを用いたマイクロポンプを点字板制御に応用した際の実験結果を報告している。これらはMEMS技術の応用により製作されている。

2. X. Li *et al.* (Zhejiang University), “Development and Analysis of Air Flotation Element with Additional Air-Intake Capacity” では、旋回流の併用により引き込み効果を有する新しい空気圧浮上システムを提案し、試作装置により設計パラメータがどのように性能に影響を与えるかについて定量的に評価を行った結果を報告している。

3. T. Akagi *et al.* (Okayama University of Science), “Low-cost Portable Rehabilitation Devices Using Flexible Pneumatic Cylinders with Built-in Pneumatic Driving System Controlled by Embedded Controller” では、組込みシステムを用いて安価に実現できる空気圧駆動柔軟シリンダを提案し、それらを手首のリハビリテーションシステムに応用した二種類の試作機（球面型および手首装着型）とその応答性能について検討を行っている。

3. 日中交流

JWS終了後は、来日研究者、講演者および実行委員会関係者らによる技術懇親会が開催された。訪日団の代表は北京航空航天大学の焦宗夏教授が務められ、同大学からは蔡茂林教授、尚耀星副教授が参加した。中国側国際交流委員長の徐兵教授の所属され



写真2 ワークショップ参加者ら（左端は黎教授，手前は国際交流担当の蕭氏）



写真3 ワークショップ終了後の参加者による記念写真

る浙江大学からは黎鑫教授，燕山大学からは俞滨講師，上海交通大学からは陶建峰副教授，太原理工大学からは廉自生教授，崔红伟講師，の計9名が参加された。このうち実に7名が45歳以下の研究者であり，さらにこのうち3名は来日が初めてという状況であった。今後の日中交流への意義は大きいと期待される一方，来年以降日本から参加する場合も必ず若手研究者が同行するようにし，研究および人的な交流の幅を広げることが必要であると思われる。



写真4 左から，焦教授，眞田副会長，小山会長

写真5 初来日の研究者ら
(左から，崔講師，廉教授，伊藤，俞講師)

写真6 左から，Dr. Pham，尚副教授



写真7 (左) 陶副教授，藤谷事務局長，(右) 蔡教授

4. ジョイントワークショップを終えて

約40名の出席者を迎え，一先ずの成功を収めた今回のJWSであったが，同日隣の講演室では春季講演会併設セミナーが開催されており，ある程度予想されたとは言え，実行担当者としては参加者への配慮が反省材料であった。今後JWSは韓国のフルードパワーシステム学会も加えた三カ国開催の方向で検討が進められており，実行担当者の負担を抑えながらいかに集客力を上げるかが大きな課題となる。

一方，今回のJWSで研究発表を行った芝浦工業大学ポスドク研究員Dr. Pham (写真6) がその橋渡しとなり，本年4月にはベトナムの国立の研究機関との人材および技術交流に関するMOUも締結された。新たなグローバル化の芽をどのように育ててゆくかが大きな課題であるが，同時に学会の学会員，賛助会員ならびに大学関係者，延いては日本のフルードパワー産業界にどのようなメリットがあるかについても明確にしてゆく必要がある。

最後に，第四回のJWS開催にあたり，論文投稿者の先生方，国際交流担当委員各位，田中前国際交流委員長，眞田前企画委員長，竹村委員，学会事務局をはじめとする多くの皆さまにアドバイスならびにご協力を頂きました。本紙面をお借りして深く御礼申し上げます。ありがとうございました。

(原稿受付：2016年7月10日)

会議報告

インドフルードパワー技術セミナーに参加して

著者紹介



さなだ かずし
眞 田 一 志

横浜国立大学大学院
〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
E-mail: sanada-kazushi-sn@ynu.ac.jp

昭和61年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程制御工学専攻修了。昭和61年4月東京工業大学助手。平成10年横浜国立大学工学部生産工学科助教授。平成13年横浜国立大学大学院助教授。平成16年横浜国立大学大学院教授。現在に至る。

1. はじめに

Fluid Power Society of India主催のFluid Power Technical Seminar 2016（油空圧技術セミナー2016）が、平成28年6月17日（金）から6月18日（土）の2日間にわたり、インドのバンガロールにあるインド理科大学院（Indian Institute of Science）Satish Dhawan Auditoriumにて開催された。日本からは、著者を含む3名が参加した（写真1）。

当学会では、国際交流の一環として、インド工科大学のSingaperumal名誉教授（当時、教授）を招待したことがあり、今回は、同名誉教授が香川前会長に同セミナーを紹介され、藤谷事務局長と著者も同行することとなった。同名誉教授は、インドフルードパワー学会の副会長を務めておられる。著者は、Singaperumal先生が訪日された際、当学会の国際交流担当を務めており、成田空港まで先生をお迎えし、滞在中の数日、各所をご案内したことがある。今回はそれ以来の再会であり、著者にとっても感慨深い訪印であった。

インドフルードパワー学会（Fluid Power Society of India, FPSI）は、創立1973年の歴史ある学会であり、産業界と学会が連携することで、インドの油空圧技術を発展させ、油空圧業界の発展を支援し、学生に知識と技術と提供し、研究を推進することにより、インドの発展に貢献することを目的とした非営利団体である。会長のSeshanath氏は、あるインド企業のCEOをなされている。会員は、産業界や大

学を含めておよそ1,500名で、インド全国にわたっている。本部はバンガロール（Bangalore）にあり、Chennai, Hyderabad, Mumbai及びPuneに支部が置かれている。学生会もあり、企業訪問、優秀プロジェクト表彰、技術セミナーにおける学生セッションなどの活動を行っている。また、FPSIは、技術講演会、セミナー、カンファレンスを開催し、“Fluid Power”を年4巻発行している。FPSIは、ハノーバーメッセ2015において、FPSIパビリオンを組織し、インドの油空圧機器の展示を運営した。同学会のパンフレットの表紙には、防衛、航空宇宙、製鉄、建設機械、農業機械、空気圧、IoTのイメージ写真が掲載されており、インドにおける油空圧の主要な分野を伺うことができる。



写真1 FPTS2016 日本からの参加者

2. 技術セミナーの概要

油空圧技術セミナーは、開会式、基調講演1件、Focused Session（オーガナイズドセッション）、学生セッションから構成されていた。

基調講演の講師はスウェーデンのJan Nilsson氏（スウェーデンのある企業の海外担当役員）で、“Research and product development in Industry-Academia greenhouse”のタイトルで、スウェーデン油圧工業会（The Association of Fluid Systems）の紹介やスウェーデン政府による大形予算の研究助成（日本のSIPに相当するプロジェクト）について紹介した。後ほど、スウェーデンの大学に共通の知人がいることがわかり、世界（世間）は狭くなったことを実感した。

Focused Sessionとして、Aerospace & Defence（6

件), Mobile Hydraulics (5件), Pneumatics (5件), Energy Saving Technology (5件), Hydraulic Cylinders (6件), Hydraulic Oil (5件), 及び学生プロジェクトセッション (6件) から構成されていた。参加者数は合計214名であった。

本セミナーでは、投稿原稿の査読は行われなかった。使用言語は英語が指定され、発表も英語で行われた。英語は、インドの公用語のひとつである（ヒンディー語と英語が公用語と定められている）。英語で行われるので、国際会議と勘違いするが、あくまでインドの国内向けの技術セミナーである。セミナーは、大学内の講演会ホールで開催された（写真2）。ウェルカムやバンケットは無かった。



写真2 講演会場の様子

Focused Session (FSと略す) のAerospace & Defenceは、航空宇宙分野の油圧技術に関するセッションである。たとえば、講演論文¹⁾は、戦闘機のフライトコントロールアクチュエータに関する論文で、図1は直動弁を利用した冗長アクチュエータシステムを紹介した図である。

Mobile Hydraulics FSでは、戦場で損傷した車両の回収を行う特殊なクレーン車の油圧回路に関する論文²⁾や、電気駆動大形ダンプトラックの油圧回路に関する論文³⁾などが発表された。その他、各セッションの講演では、油圧・空気圧技術の発表だけでなく、最新製品についても合わせて紹介されており、全体としてみれば、あたかも企業・製品紹介と技術

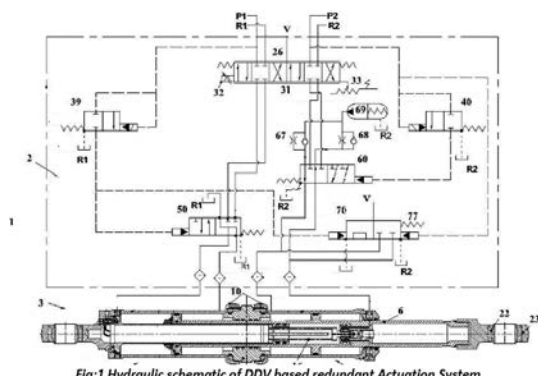


図1 直動弁を用いた冗長アクチュエータ¹⁾

紹介を合体させたようであった。

著者は、今回、Energy Saving Technology FSに配された。同セッションでは、ハイドロスタティックトランスミッションやサーボ駆動油圧回路（いわゆる回転数制御、こちらではサーボと呼ぶそうである）に関する基礎および製品紹介の講演が行われた。

著者は、油圧における省エネルギー技術の研究開発動向を紹介するレビュー論文⁴⁾を発表して、ハイブリッド技術や風力発電、燃料噴射装置の油圧技術に関する研究動向を紹介した。また、JFPSとJFPAについて簡単に紹介した。受付に、当学会のパンフレットと2017年開催予定のJFPS国際シンポジウムの案内をおいていただき、加えて著者の講演発表でも紹介した。2014年に松江で開催された当学会の国際シンポジウムでは、キーノート講演にインド工科大学の先生をお呼びしたことも紹介した。

3. おわりに

バンガロールは、インドのハイテク産業の中心地と言われ、日本からもいくつかの企業が進出している。標高およそ1,000mの高地に在り、街中には緑があふれている。著者が訪問した6月は、最高気温は30度に届かず、湿度も低く、快適であった。バンガロールは、「インドの軽井沢」と呼ばれているそうである。

インドでは、今、“Make-in-India”を掲げて、インド産業の発展を目指している。本セミナーでも、国産技術として発表されると、会場から歓声と大きな拍手があがったことが、とても印象的であった。今後とも、今回のような国際交流が継続されることが期待される。

参考文献

- 1) K S Nagesh and Ravi Jai Prakash, Proceedings of the Technical Seminar, Fluid Power Technical Seminar 2016, Fluid Power Society of India, p. 26/43, 2016
- 2) Lingaraj V V, et. al., Design and Development of Hydraulic System for Mobile Recovery Vehicle, Proceedings of the Technical Seminar, Fluid Power Technical Seminar 2016, Fluid Power Society of India, p. 61/75, 2016
- 3) Renukaraj Y M, et. al., Advances in large electric-drive dump truck Hydraulic System, Proceedings of the Technical Seminar, Fluid Power Technical Seminar 2016, Fluid Power Society of India, p. 88/93, 2016
- 4) K. Sanada, Challenges for energy-saving of oil-hydraulic technology, Proceedings of the Technical Seminar, Fluid Power Technical Seminar 2016, Fluid Power Society of India, p. 135/141, 2016

（原稿受付：2016年6月25日）

会議報告

ROBOMECH2016における フルードパワー技術研究の動向

著者紹介



た な か ゆたか
田 中 豊

法政大学デザイン工学部
〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33
E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp

1985年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了，その後，東工大精密工学研究所助手を経て，1991年法政大学講師，1992年同助教授，2002年同教授，現在に至る。法政大学情報メディア教育研究センター所長を兼務，工学博士（1991年東京工業大学）。

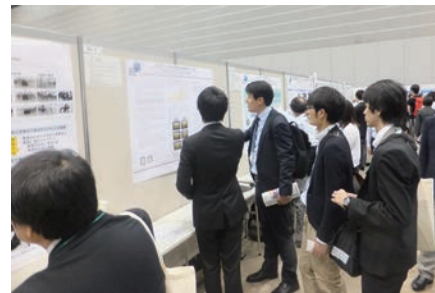


写真1 ポスターセッションの様子

表1 セッション数および代表的なセッション名

分野名	セッション数	代表的なセッション名
ロボメカにおける基盤制御技術	12	フルードパワー・ロボティクス
人間協調・共存システム	11	ウェアラブルロボティクス
人間および生物規範	10	感覚・運動・計測
移動ロボット	10	脚移動ロボット
屋外環境でのロボメカ技術	9	飛行ロボット・メカトロニクス
医療・福祉システム	9	医療ロボティクス・メカトロニクス
ロボメカ技術の応用システム	8	建設&インフラ用ロボット・メカトロニクス
ナノ・マイクロシステム	7	マイクロロボット，マイクロマシン
センシング	6	触覚と力覚
機構と制御	5	パラレルロボット・メカニズム
ロボットシステムのための環境	4	ネットワークロボティクス
ストラテジックセッション	3	ImPACTタフ・ロボティクス・チャレンジ
ロボメカを使った教育	2	ロボカップ・ロボットコンテスト
JSME部門関係セッション	1	カーロボティクスとITS

表2 分野別の論文件数

分野	件数	割合 [%]
油圧	11	13.4
空気圧	52	63.4
水圧	4	4.9
機能性流体	6	7.3
マイクロ流体	9	11.0
合計	82	100.0

1. はじめに

ロボティクス・メカトロニクス講演会2016 in Yokohama (ROBOMECH2016 in Yokohama) は日本機械学会のロボティクス・メカトロニクス部門の主催により，2016年6月8日(水)から6月11日(土)まで，パシフィコ横浜の展示ホールAを講演メイン会場にして開催された。本講演会はずべての発表がポスターセッションで行われる国内最大規模の講演会で，26回目となる今回のテーマは「未来社会を創造するロボティクス・メカトロニクス」で，1,265件のポスター講演（講演論文）のほか，産学連携企画「連携からのロボットの实用化促進」など社会との結びつきを意識したさまざまな行事が企画され，約900名の参加者があったとのことである。写真1にポスターセッションの様子を示す。

2. 研究発表の動向

表1に分野別のセッション数と代表的なセッションテーマを示す。フルードパワー・ロボティクスのセッションをはじめ，全体で97セッションが企画された。手元の抄録集および講演論文が収録されたDVDを基にした著者の分析によれば，全体の講演の中で油圧・空気圧などのフルードパワーに関連する発表として82件が確認された。表2にフルードパワー分野別の発表件数を示す。空気圧に関連した発表が52件と全体の6割以上を占めている。

表3は油圧と水圧関連を合わせた液圧分野の15件の論文について，検索によりタイトルとキーワードに使われている単語の論文数を整理した結果である。後に示す空気圧のような際立った特定の単語は見られないがControlという単語が比較的多くみら

表3 液圧分野のキーワードと論文件数

キーワード	件数	割合 [%]
Hydraulic	9	60.0
Control	5	33.3
Valve	3	20.0
System	3	20.0
Water	2	13.3
Flow	2	13.3
Pressure	2	13.3
Volume	2	13.3
Disaster	2	13.3
Bellows	2	13.3
Teleoperation	2	13.3
Excavator	2	13.3
Tough	2	13.3

表4 空気圧分野のキーワードと論文件数

キーワード	件数	割合 [%]
Pneumatic	32	65.3
Artificial muscle	18	36.7
Control	11	22.4
Soft	9	18.4
McKibben	8	16.3
Assist, Assistive	8	16.3
Hand	6	12.2
Valve	5	10.2
Manipulator, Manipulation	5	10.2
Jump	5	10.2
Surgical	4	8.2
Wearable	4	8.2
Gripper	3	6.1
Rescue	2	4.1

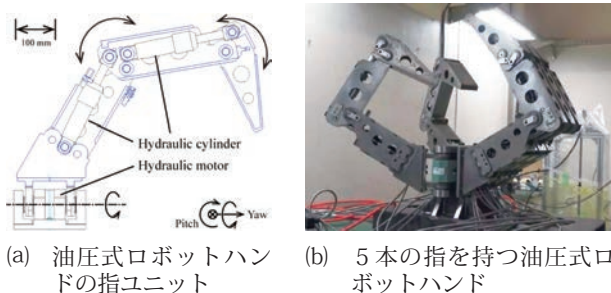


図1 油圧式高出力多指ロボットハンド

れ、制御に関連する論文が多いことがわかる。またストラジックセッションとして企画されたImPACTタフ・ロボティクス・チャレンジのセッションの中に油圧ロボット関連の論文が6件確認された^{1)~6)}。油圧の高出力を活かした取り組みと言える。たとえば日下部らは、新たに開発した高出力油圧シリンダと油圧ベーンモータを用いて、図1(a)に示す構造の油圧式多関節の指5本で構成された図1(b)に示す大出力多指ロボットハンドの開発結果を報告している⁵⁾。

表4は空気圧関連の論文52件について、表3と同様な方法により整理した結果である。Artificial muscleやMcKibbenなど空気圧人工筋に関連する単語を持つ論文が多くみられる。またAssistやAssistiveなど動作支援に関する論文が多いのも特徴的である。さらにSoftやJump, Wearableなど空気圧の瞬発性や圧縮性、軽量性や親和性をロボットやメカトロシステムへ利用した論文も多い。またControlの単語を用いた論文も油圧・水圧関連の分野と同様に多い。

中川らは、空気圧人工筋で駆動される図2に示す小形四脚ロボットを開発し、時速9.5kmの高速トロット歩容を実現したことを報告している⁷⁾。また澤村らは3つの空気圧人工筋を図3のように配置して順番に駆動することにより回転運動を生成する機

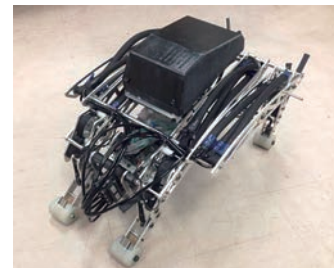


図2 空気圧駆動による高速小形四脚ロボット

構を提案している⁸⁾。白井らは空気圧を用いたソフトアクチュエータを試作し、人間装着用コルセットに適用してその性能を評価している⁹⁾。

空気圧を用いた装着システムの場合、空気圧源の取り扱いが重要である。奥井らは炭酸水素ナトリウムとクエン酸の化学反応による携帯型空気圧源を提案し、基本特性実験により有効性を確認している¹⁰⁾。また高橋らは空気圧人工筋を用いた装着型筋力補助装置の空気圧源として空圧ポンプを用いた簡易システムの開発結果を報告している¹¹⁾。

宮川は図4に示す空気圧アクチュエータを用いた手指の伸展支援装置の開発結果について報告している¹²⁾。また森田らは図5(a)に示す細径多繊維構造マッキベン人工筋を図5(b)に示す筋骨格ヒューマン

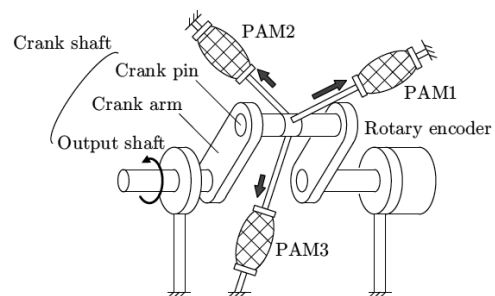


図3 空気圧人工筋を用いた無限回転アクチュエータの構成

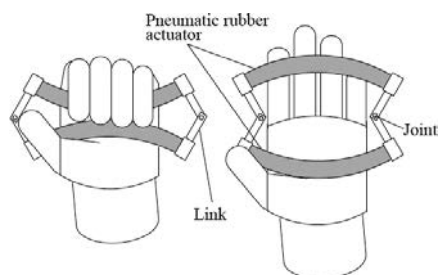


図4 空気圧アクチュエータを用いた手指の伸展支援装置



(a) 細径多繊維構造空気圧人工筋



(b) 筋骨格ヒューマノイドロボット

図5 細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボット

イドロボットに適用し、その歩行動作実験の結果について報告している¹³⁾。この筋骨格ヒューマノイドロボットはポスター講演会場に展示されていた。

機能性流体関連の論文では6件のすべてがMR流体を用いた事例である。いずれの論文もER流体の可変粘性特性を利用しているが、その適用対象はAR用装着型力覚提示装置のブレーキに用いた事例¹⁴⁾、脳外科用手術シミュレータ用力覚提示装置に用いた事例¹⁵⁾、歩行補助杖の支持補助機構に用いた事例¹⁶⁾、跳躍ロボットのブレーキ機構に用いた事例¹⁷⁾、空気圧人工筋の可変粘弾性機構に用いた事例¹⁸⁾、空気圧ピストンシリンダの粘弾性機構に用いた事例¹⁹⁾などさまざまである。

マイクロ流体関連の論文では、9件のうち7件が医療用あるいは薬剤用への応用を念頭においたマイクロ流路やマイクロバルブに関する事例^{20)~26)}で、残りの2件はマイクロハンドのような把持機構への応用事例^{27), 28)}であった。

3. おわりに

本講演会ではフルードパワーの特長を活かした多くのロボットやメカトロニクスシステムへの応用事例を見ることができた。特に最近、欧米で研究が盛んな空気圧や機能性流体を活用した「ソフト・ロボティクス」に関する多くの研究成果が見られ、日本は確実にこの分野を牽引するポテンシャルを持っていることを実感した。

来年のROBOMECH2017は2017年5月10日～

13日まで福島ビッグパレットふくしまで開催される予定である。

参考文献

- 1) 松本他, 6軸油圧マニピュレータのモデリングと制御, No.16-2ロボティクス・メカトロニクス講演会2016講演論文集(誌名は以下すべて同じ), 1A1-09b7.
- 2) 岡田他, 多自由度油圧駆動ロボットのシリンダ圧に基づく手先負荷力推定, 1A2-09b4.
- 3) 大藤他, 微粒子励振型流量制御弁による油流量制御, 1P1-09a1.
- 4) 坂間他, 油圧ロボットのための油中気泡の分離除去装置とその効果, 1P1-09b2.
- 5) 日下部他, 小型高出力油圧アクチュエータの開発と多指タフロボットハンドへの応用, 1P1-09b6.
- 6) 浮田他, 作動流体の粘性による微粒子励振制御弁の駆動特性への影響, 1P1-09b7.
- 7) 中川他, 空気圧人工筋駆動小型四脚ロボットの高速走行, 1A2-07b2.
- 8) 澤村他, 空気圧人工筋を用いた無限回転アクチュエータの開発, 2A2-04b4.
- 9) 臼井他, 常時着用によって生じる筋衰退の予防を目的とした空気圧コルセットの提案, 1P1-01b6.
- 10) 奥井他, 炭酸水素ナトリウムとクエン酸の化学反応を用いた携帯型空圧源の提案, 2A1-03b6.
- 11) 高橋他, 外部からの空気供給を必要としない腰補助用マッスルスーツの開発, 1P1-14a5.
- 12) 宮川, 湾曲型空圧アクチュエータを用いた手指伸展支援装置の開発, 2A2-02a7.
- 13) 森田他, 細径マッキベン人工筋を用いた筋骨格ロボットの歩行動作実現, 2P2-12a3.
- 14) 鈴木 他, MRブレーキと人工筋肉を用いた装着型1自由度力覚提示装置の開発とAR空間への適用, 1A1-20a3.
- 15) 辻田他, MR流体を用いた脳外科手術シミュレータ用遭遇型力覚提示装置の開発, 1A1-20b6.
- 16) 秋山他, MR流体を用いた高齢者用歩行補助杖の改良とバランス制御, 1P1-01b3.
- 17) 長山他, 空気圧人工筋肉とMRブレーキを用いた跳躍ロボットによる着地を考慮した垂直跳躍実験, 2A2-12a6.
- 18) 奥井他, 空気圧人工筋肉と磁気粘性流体を用いた可変粘弾性特性とクラッチを有する外骨格アシストスーツの開発, 2A2-13b1.
- 19) 亀崎他, 磁気粘性流体ダンパのためのトロイダル型ピストンヘッドの開発, 2P1-13b2.
- 20) Di Chang, et. al., On-Chip Force Sensor for Mechanical Properties Measurement of *Synechocystis* sp. PCC 6803, 2A2-18b7.
- 21) 神永他, がん細胞特異的結合ペプチドスクリーニングのためのマイクロ流体デバイス, 2A2-18b6.
- 22) 信國他, 微小流体デバイスと半導体イオンセンサによる高精度pH測定法の開発, 2A2-18b5.
- 23) 下垣外他, 次世代医療に向けた弁付ハイブリッドフラクタルステントの研究, 2A2-18b4.
- 24) 谷口他, シリコンチューブの壁面振動を利用した高粘度流体用連続流式攪拌装置の基礎的検討, 2A2-18b3.
- 25) 石田他, 受動バルブを用いたスラグ液滴の自動格納マイクロ流体デバイス, 2A2-18b2.
- 26) 石田他, 多量のシアノバクテリアの一括分裂抑制マイクロ流体デバイス, 2A2-18b1.
- 27) 嵯峨他, ECFマイクロ液圧源を内蔵した偏心チューブ形マイクロハンドに関する研究, 2P1-04b1.
- 28) 西村他, マイクログリッパ内蔵流体指による把持評価, 2P1-03b7.

(原稿受付: 2016年8月16日)

教 室

入門講座「エネルギー工学」

第二回：火力発電と再生可能エネルギー

著 者 紹 介



え ま さとし
江 間 敏

沼津工業高等専門学校
〒410-8501 静岡県沼津市大岡3600
E-mail: ema@numazu-ct.ac.jp

1977年東京工業大学大学院修士課程修了。国鉄（現JR）勤務、鉄道技術研究所を経て、1986年沼津高専勤務、2015年同高専退職（名誉教授）、現在嘱託教授。電力工学、浮上式鉄道の研究に従事、電気学会上級会員。

1. はじめに

燃料の熱エネルギーを利用して発電する方式を火力発電といい、そのうちガソリン機関等の内燃機関を用いるのが内燃火力発電であり、蒸気タービンを用いるのが火力発電である。これは外燃機関でもある。一般に火力発電といえば火力発電をさす。この講座では火力発電に関する基本的事柄について述べる。後半は再生可能エネルギーの中でも火力発電に関係する地熱発電、廃棄物発電（ごみ発電）について、さらに余熱（排熱）を利用したコージェネレーションについても説明する。

2. 火力発電

2.1 火力発電のしくみと熱サイクル

図1に火力発電所の構成例を示す。図には出ていないが、高煙突の手前には排煙装置（ NO_x , SO_x ），電気集じん装置等の設備がある。火力発電所では、燃料の燃焼によって生じる熱エネルギーを機械エネルギーに変換し、これで発電機を回転するが、この

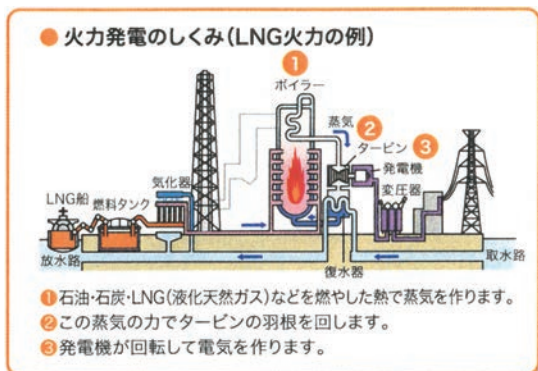


図1 火力発電のしくみ (LNGの場合)

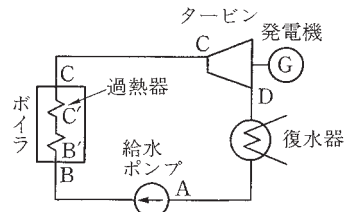


図2 エネルギー変換のブロック図

エネルギーの変換には水蒸気が媒体として用いられる。図2は、このエネルギー変換のブロック図で、ボイラで熱エネルギーを与えられて発生した蒸気は、ボイラ内の過熱器で過熱されて内部エネルギーを増し、高圧高温になってタービンに送られ、タービン中で膨張して羽根車を回し、機械的な仕事をする。その結果、低圧低温になった蒸気は、復水器に送られ、凝縮して水となる。この復水は、給水ポンプで、再びボイラに圧入されて蒸発し、この過程を繰り返す（熱サイクル）。

2.2 ランキンサイクル

ランキンサイクルは、蒸気サイクル中最も重要なサイクルで、1854年にランキン（英）によって考案されたものである。図3は、このサイクルのT（絶対温度）-S（エントロピー）線図である。図2のエネルギー変換図と対応している。

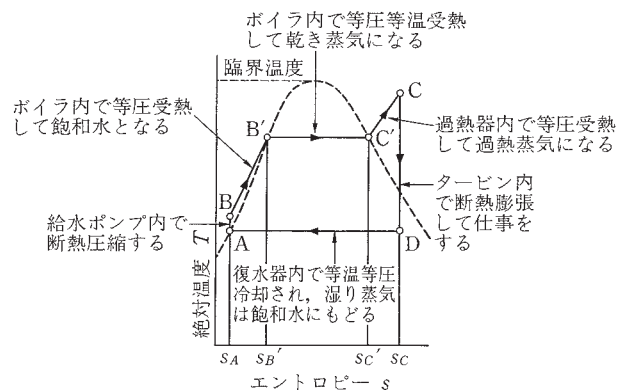


図3 ランキンサイクル (T-S線図)

2.3 火力発電の熱効率とその重要性

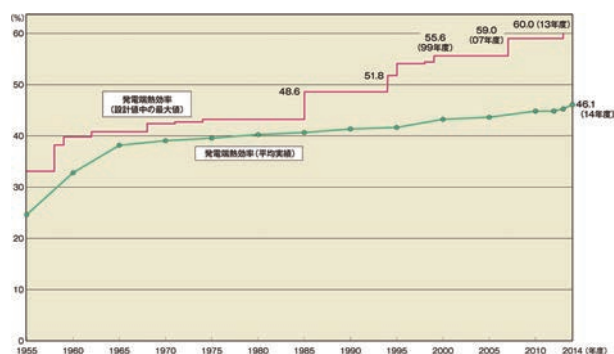
熱サイクルにおいて、水および蒸気に与えられた熱エネルギーのうち、どれだけ蒸気タービンの羽根車に与えられる機械エネルギーに変えられるかの割

合は、熱のサイクル効率（熱効率）と呼ばれる。これは、発電経済上きわめて重要な問題であるが、蒸気が吸収したエネルギーのうち、かなりの部分が復水器で失われるため、サイクル効率は大きな値になり得ない。復水器の冷却水が持ち去る熱損失で、ほぼ全熱損失の50%近くを占める。さらに総合熱効率はボイラ効率を η_B 、熱のサイクル効率を η_C 、タービン効率を η_T 、発電機効率を η_G とすると、発電所の総合熱効率 η_P は、次式のようになる。

$$\eta_P = \eta_B \eta_C \eta_T \eta_G \dots\dots\dots (1)$$

最新の大容量発電所では40%を越える値にもなり、旧式の発電所では20%台程度に止まり、発電経済上から、発電所熱効率の高い設備の建設および運用には大きな努力が払われている（図4）。

熱効率で言えば、蒸気機関が約10～20%、ガソリン機関約20～30%、太陽光（ソーラー）が10%台であるので、火力40%は比較的高いほうであり、日本の電力の6割、東日本大震災以降は9割を担う火力の役割は大きい。平成4年頃の中部電力のデータによると、管内の全火力発電所の熱効率が1%アップすれば53万世帯、名古屋市の全世帯の60%に1年間送る電力量が賄えるとのこと。熱効率向上策には蒸気圧を上げた（超々臨界圧）ボイラー開発、長翼タービン採用等いろいろとあるが、中でもコンバインドサイクル発電は重要である。



(注) 低位発熱量は総合エネルギー統計の解説（2010年度改定版）の換算係数を用いて、高位発熱量より推定

図4 火力発電設備の熱効率の推移

2.4 コンバインドサイクル発電（CC発電）

コンバインドサイクル（複合サイクル）発電は、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた発電方式である（図5）。圧縮した空気の中で燃料を燃やして、燃焼ガス（1,300℃級）を発生させ、その膨張力を利用して発電機を回すガスタービン発電と、その排ガス（500℃程度）の余熱を回収して蒸気タービンを回す火力発電を組み合わせ、最新鋭の従来型火力の40%台を上回る高い熱効率を得ることができる。CC発電をさらに発展させ、燃焼ガス温度を高めることで50%を越える熱効率を目指した改良型が研究、開発されている

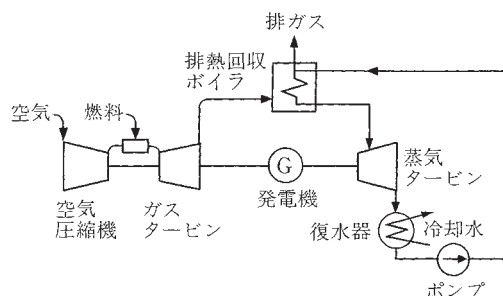


図5 コンバインドサイクル発電

3. 火力発電と再生可能エネルギー

平成24年に再生可能エネルギー固定価格買取制度が施行された。この法律によると再生可能エネルギーは太陽光、風力、小水力、地熱、バイオマス発電である。3章では火力発電と関係する地熱、様々なバイオマスエネルギーの内、関係する廃棄物発電について述べる。

3.1 地熱発電

地殻内部のマグマで熱せられた蒸気で、発電機に直結したタービンをまわして発電する。自然エネルギーを利用した発電方式の中でも、地熱発電はアメリカ、イタリア、ニュージーランドをはじめ世界各国で活発に行われている。現在、日本では九州地方（八丁原他）を中心に10ヶ所ほどの地熱発電所が稼働しているが、適した土地の多くが国立、国定公園の近隣に存在するため、開発にも限りがある。日本は世界第五位で、544MWの設備容量をもつ。

地熱発電は、井戸から取り出す蒸気を利用する天然蒸気利用発電所と、熱水を利用する熱水利用発電所との2種類に大別することができる。いずれの方式も普通の火力発電と原理は同じであるが、熱効率の点では相当に劣る。その主因は、利用する蒸気の圧力および温度がきわめて低いことである。また、蒸気中にはきわめて多くのガスおよび不純物を含むため、不純物によって機器類を腐食する恐れがあり、また不凝縮性のガスの排除に多くの動力を消費する不利がある。図6は熱水分離蒸気利用復水式で、熱水を分離して地下に戻す方式である。

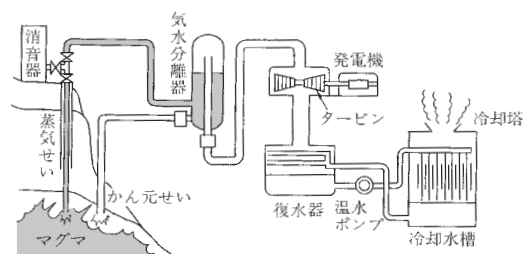


図6 天然蒸気利用発電所（熱水分離式）の構成例

3.2 ごみ発電（廃棄物発電）

近年、さらに高カロリー化しつつある一般廃棄物および可燃性産業廃棄物などを燃料とした燃焼炉に

よって、安定的に高温高压蒸気を発生させる廃棄物発電システム（ごみ発電）の開発が進められている。廃棄物を燃やす際の高温の熱は、通常は空気中に無駄に放出されるが、廃棄物発電ではこの熱を有効利用して発電する。ゴミ固形燃料（RDF）の普及を目指す動きもある。これはゴミの焼却時に発生する毒性のあるダイオキシン低減対策の一つとして注目されている。また最近ではゴミ発電の効率を高めるために、ガスタービンと組み合わせた（スーパーゴミ発電）もある。環境省によると、全国の自治体のごみ焼却施設での発電能力規模は2009年度末時点で、167万3000kWと原発2基分に匹敵するが、不燃ごみが混じると燃えにくくなり、発電効率が落ちること等により実際の発電量はその半分程度である。

4. 火力発電とコージェネレーション (熱併給発電)

火力発電所では、一般的に発電過程でできた余熱は捨てているため、前述の通り電力として利用されるエネルギーは40%ぐらいである。これに対して、この余熱エネルギーも暖房や給湯などに当てて、エネルギー利用率を高めるのがコージェネレーション（熱併給発電）システムである。「Co」とは「共に」、「Generation」とは「発生する」という意味で、一つの燃料から電気と熱という二つの異なったエネルギーを同時に発生させ、利用する。コージェネとも略称される。具体的には、エンジン、ガスタービンなど用いて発電して電気エネルギーを得ると同時に、発生する排熱を回収して熱エネルギーとして、冷暖房や給湯などに利用する。平成15年に誕生した東京六本木ヒルズでは、11棟のビルが林立するが、自家発電と排熱を利用した冷暖房システムを取り入れている。

コラム 日本の周波数と交流発電機の構造

新潟県糸魚川市から静岡県富士川を結ぶ付近を境に東日本は50Hz、西日本は60Hzと周波数が異なり、日本の電力供給網は事実上分断されている。このため平成23年3月の東日本大震災時には、電力不足の首都圏に、西日本の電力は、ほんの少ししか送ることができなかった。一つの国に二つの周波数が併存するのは珍しい。周波数の違いは、明治時代に東京電力の前身である東京電灯がドイツ製の50Hzの発電機を、大阪電灯は米国製の60Hzの発電機をそれぞれ導入したのが発端である。終戦後、周波数統一の議論が起きたが、戦後復興に向けた電力供給が急務で、具体化しなかった。現在、東西間で電力を融通するための、パワーエレクトロニクス技術を用

いた周波数変換所が3か所程あるが、十分な電力融通はできない。さて鍵を握る周波数はどのように決まるのだろうか？

磁石N、Sを、軸のまわりに一定速度で回転させると、フレミングの右手の法則より、導体のコイルに一定周波数の交流電圧が誘導される。これが交流発電機の原理である（図7）。これには電機子が回転する形の回転電機子形と界磁が回転する回転界磁形の2種類があるが、絶縁、容量等から回転界磁形が一般的である。界磁の磁極数を2P（N極S極一对で2極）、回転子の回転速度を n [1/S] とすると、交流電圧の周波数 f [Hz] は

$$f = P \times n \text{ [Hz]} \text{ となる。} \dots\dots\dots (2)$$

蒸気タービンと直結している火力・原子力発電のタービン発電機は、50Hz地区の場合、毎分3,000か1,500回転である。一方水力発電の水車は300回転ぐらいである。磁極数変えること、定格回転数の変更が容易にできればよいが、あの巨大な発電機となると容易ではなく、今日に至っている。外部から技術が導入されて立ち上がるときに、規格化、標準化がいかに重要であることを示すよい例でもある。

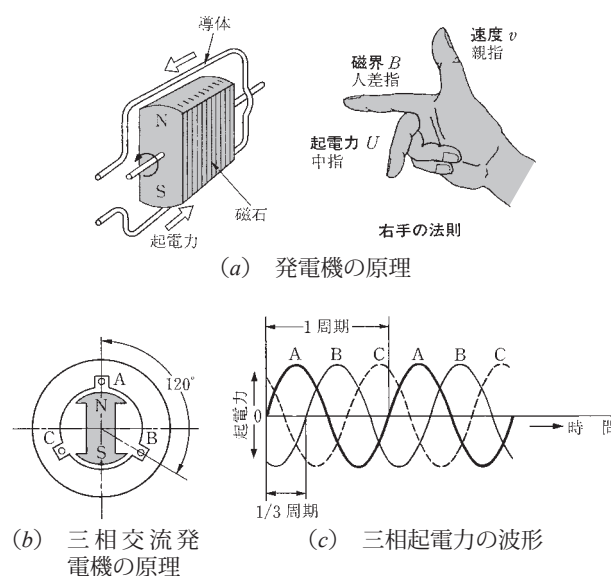


図7 交流発電機の原理（三相交流同期発電機）

参考文献

- 1) 江間敏, 甲斐隆章: 電力工学, コロナ社, 2章・5章 (2003年) 図2～図7 (除く図4) は上記文献
- 2) 日本原子力文化財団: 原子力・エネルギー図面集2016 図4 は上記文献

(原稿受付: 2016年7月26日)

トピックス

補助人工心臓開発と大学発ベンチャー

著者紹介



しん し ただ ひこ
進 士 忠 彦

東京工業大学科学技術創成研究院
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259
E-mail: shinshi.t.ab@m.titech.ac.jp

1992年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。日立製作所、東京工業大学精密工学研究所助手、助教授／准教授を経て、2010年同大学精密工学研究所教授、現在に至る。電磁力応用デバイスの研究に従事。精密工学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。



図1 試作した体内植え込みを目指す磁気浮上補助人工心臓



図2 体内植え込みと体外設置補助人工心臓

1. はじめに

筆者は、2011年8月、東京工業大学と東京医科歯科大学が共同開発した体外設置磁気浮上補助人工心臓を臨床応用するため、3人の発起人の一人として、補助人工心臓の研究開発会社「メドテックハート株式会社」を起業した。政府や大学が勧める研究成果の実用化や大学発ベンチャーの起業施策の後押しもあるが、原理検証機止まり、論文止まりの大学での研究開発を、更に先に進めてみたいとの単純だが強い思いがあったことが、起業に参加した大きな理由である。

本文執筆中の現在、ベンチャーはいまだ目標である臨床試験には到達していないが、開発を加速するため、他企業からの投資を受け、欧州に設けたオフィスを起点に、発起人の高谷節雄社長（元 東京医科歯科大学 生体材料工学研究所・教授）が、引き続き臨床試験の前段階であるISO13485の取得を目指し活動している¹⁾²⁾。筆者は、大学の兼業規則等の理由により会社の経営から現在は退いたが、これまでの起業に至った経緯ならびに現況について簡単に述べる。

2. 磁気浮上補助人工心臓

2.1 研究背景

心臓移植の分野では、絶対的なドナー不足から、体内植え込み補助人工心臓への期待が高く、筆者らが研究を本格的に始めた2003年頃、小型化が可能

で、耐久性の高い、連続流補助人工心臓の開発がすでに複数の大学、公的研究機関、ベンチャー企業等により進められていた。筆者らも、前述の高谷教授（当時）との共同研究において、遠心ポンプ型補助人工心臓に使用可能な小形の磁気軸受モータおよび血液ポンプの試作を進め、2006年頃には、溶血（赤血球の破壊）は既存の使い捨て遠心血液ポンプと比べ約半分、容積は当時テルモの開発していた磁気浮上遠心補助人工心臓の3分2となる原理検証機（後に3分1まで小型化）³⁾を、図1のように完成していた。

しかしながら、すでに、多くの体内植え込み用の連続流補助人工心臓が、臨床試験に導入されている状況や、実用化の難易度を鑑み、研究の軸足を比較的研究開発が手薄な、高性能・高耐久な体外設置補助人工心臓に切り替えた。図2に、参考までに体内植え込みと体外設置の補助人工心臓の違いを示す。体内植え込みは、数年を越える耐久性と生活の質（QOL）の点で、体外設置は緊急時の装着しやすさや中短期でみたコストの点で優れている。また、人工肺と組み合わせ使用することが出来ることも体外設置型の利点である。

当時、スイス企業が開発した磁気浮上式の一機種

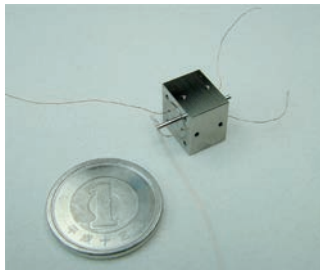


図3 マイクロ磁気軸受の研究

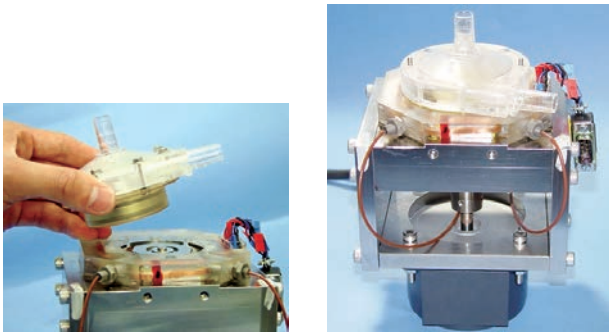


図4 使い捨て体外設置磁気浮上補助人工心臓

を除き、体外設置の使い捨て連続流補助人工心臓のほとんどは、ピボット軸受や玉軸受などの接触式軸受を用いてインペラを支えており、耐久性が1日以下と短く、血液ダメージも小さくなかった。しかし、それでは体内植え込み補助人工心臓につなぐBridge-to-Bridgeや、最適治療の決断につなげるために時間を稼ぐBridge-to-Decisionの治療には不十分である。そこで、1ヶ月間以上インペラとその軸受を含んだポンプヘッド部を交換することなく使用でき、今まで以上に血液ダメージの少ない体外設置補助人工心臓が強く必要とされていた。

2.2 シーズ技術

筆者らは、人工心臓の研究開始当初、人工心臓どころか医療にまったく関係のない、産業用精密機械用の軸受を研究対象としており、ナノメートルオーダーの回転精度や、数ミリメートルオーダーの小型化が可能な磁気軸受の実現を目指していた。但し、技術を精密機械関連の企業に売り込んでも、なかなか応用先が見えないところがあった。

当時、上司の下河辺明教授（元東京工業大学 理事・副学長）から、東京医科歯科大学では補助人工心臓の耐久性や循環時の血液ダメージ低減を目指すため、非接触軸受である磁気軸受のニーズがあるとの話を頂き、医科歯科大との共同研究がスタートした。そのころの筆者は、人工心臓の主流が拍動型から連続流型に移行していることや、ポンプ性能として、どのような流量・圧力が必要とされているかさえも知らなかった。



図5 東京医科歯科大学での補助人工心臓を用いた子牛による補助循環試験の様子

その一方で、幸運なことに、当時全く別の目的で研究開発していた図3のようなマイクロ磁気軸受技術が連続流補助人工心臓に驚くほど有効に活用できることが分かった。また、朝間淳一君（現 静岡大学・准教授）、土方 亘君（現東京工業大学・准教授）、パイ チナン君（現サンパウロ大・助教）などをはじめとした優秀な学生が、精力的に研究室で人工心臓の研究を担当してくれたおかげで、磁気軸受を用いた補助人工心臓として、ポンプサイズ、流体性能、消費電力、溶血性能とも優れたもの（一例、体外設置磁気浮上補助人工心臓例 図4）を、研究開始5年以内に実現することができた。

3. 起業のきっかけとその後

3.1 独創的シーズ展開事業（大学発ベンチャー創出推進）

研究開始から数年が過ぎ、優秀な学生たちの活躍により人工臓器の学術誌に論文を何編か発表することはできた。しかしながら、発表内容は提案した磁気軸受の新規性を軸とし、ポンプの基本性能とin vitroの動物血による溶血試験までで、人工心臓の最大の難関である血栓（血液の凝固）評価には手つかずであった。このため、我々の開発する補助人工心臓の研究の方向が、血栓の問題解消に、有効なのか、動物試験により確認する必要性に迫られていた。

当時、共同研究先の東京医科歯科大学では、人工心臓の評価に必要な大型動物実験用の手術室と集中治療室を有していた。しかしながら、この動物試験は大型動物（子牛）一頭に対して最大数か月に渡る昼夜連続の管理を同時並行で2～3頭に実施し、累計数十頭に上るものである。それぞれに通常の患者と同様な手術、術後管理が不可欠で、実施することは容易ではなかった。国内外の企業への共同研究提案や、公的な競争的研究資金への応募などの活動により、2008年度の半ばより、ようやく高谷教授を研究代表者として、科学技術振興機構から大学発ベンチャー創出推進事業の枠組みで研究資金を頂き、

図5に示すように動物実験を開始することができた。

開発中の磁気浮上補助人工心臓を用いた循環補助や人工肺と組み合わせた人工心肺試験にあたっては、東京医科歯科大学の研究者、医師を中心とし、東工大の大学院生も常時複数名、手術、術後管理に参加した。また、医科歯科大側の担当者の要望を聞きながら、動物試験における補助人工心臓の耐久性や信頼性を向上する作業を行った。

動物実験当初は、初歩的な電源喪失事故に始まり、環境ノイズ等による磁気浮上の不安定化、動物の運動に伴うポンプの破損、部品の加工・組立誤差などに起因する溶血・血栓、樹脂と金属界面の剥離によるポンプの錆などが発生した。手術直前に執刀医が待機し、麻酔医が実験動物に麻酔をかけているにもかかわらず、補助人工心臓が動作せず、装置試作担当の東工大の学生が青くなったことも一度ではなかったと思う。

原因が明確な問題以外にも、補助人工心臓を動物に装着後、連続運転中には、機械、電気、ソフト、材料、手術、術後管理、動物個体の違いなどが複雑に関わることで様々な問題が発生し、何ヶ月も解決の糸口が見えない事態にも、何度も直面した。しかし、チーム全体が2～3年と経験を積むことで、徐々に問題が解消され、最終的には、60日間連続のポンプヘッド交換なしの補助循環⁴⁾と、3週間のポンプヘッドおよび人工肺を交換しない心肺補助⁵⁾を実現した。

3.2 起業後

2011年高谷教授の大学定年退職の直前に、共同経営者としてベンチャーを起業することとなった。十分な開発スペースがない状態からのスタートだった。会社役員の手弁当や、開発品の将来性に興味を頂きたいいくつかの企業のご支援を得ることで、開発を続けることができ、2013年の中頃より、NEDOイノベーション実用化ベンチャー支援助成事業の支援を2年間に渡り頂くことにより、開発用オフィスを正式に構え、製品開発を本格的に始動した。

具体的には、使い捨てインペラやポンプハウジングの開発と、磁気浮上制御器を含んだコンソールの開発である。言うは易しであるが、インペラやハウジングを高精度に製作し、かつ適正なコストを実現することや、コンソールを医療従事者にも使いやすく且つコンパクト化することは、最も開発で苦戦している部分である。図6に現在の開発機の写真を示す。

また、東京工業大学、東京医科歯科大学、および

科学技術振興機構の支援により、関連する技術の特許化も進めた。現在は、欧州での臨床に向け、品質マネジメントシステムの構築と認証取得に向けて活動している。

4. ま と め

フルードパワーと起業とのお話を頂き、筆者が関わった補助人工心臓の研究開発を目指す大学ベンチャーの途中経過を、簡単に述べさせて頂いた。装置の故障が生命に直結し、臨床应用のため膨大な試験と資金が必要である医療機器の開発は、日本の並み居る巨大企業すら尻込みする開発テーマである。日銭を稼ぐ手段すらない大学発ベンチャーが、そのような製品に挑戦することは、無謀と言われても不思議ではない。実際、技術の問題だけではなく、材料・部品入手の障害、お金、人材の問題など、大学の教員ではなかなかできない経験をした。補助人工心臓開発はまだまだ道半ばで、臨床まで越えなくてはならない山は多いが、無謀な挑戦が無謀で終わらず、どんな形であれ大きく花開いてくれることを信じて止まない。



図6 臨床用体外設置磁気浮上補助人工心臓

参考文献

- 1) <http://medtechheart.com/>
- 2) <http://www.japantimes.co.jp/news/2016/03/22/business/corporate-business/sony-backed-m3-targeting-investments-health-care-startups/#.V8QPdl9OKUk>
- 3) 進士忠彦：磁気浮上式補助人工心臓の小型化技術，日本機械学会誌，Vol. 112, No. 1088, pp. 572-575 (2009)
- 4) Eiki NAGAOKA, et al. : MedTech Mag-Lev, Single-use, Extracorporeal Magnetically Levitated Centrifugal Blood Pump for Mid-term Circulatory Support, ASAIO Journal, Vol. 59, 3, p. 246-252 (2013)
- 5) Tatsuki Fujiwara, et al. : New Generation Extracorporeal Membrane Oxygenation With MedTech Mag-Lev, a Single-Use, Magnetically Levitated, Centrifugal Blood Pump, Artificial Organs, Vol. 37, No. 5, pp. 447-456 (2013)

(原稿受付：2016年8月30日)

研究室紹介

東京工業大学 工学院 鈴森・遠藤研究室

著者紹介



すず もり こう いち
鈴 森 康 一

東京工業大学工学院

〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 11-60

1990年 横浜国立大学大学院博士課程修了。
1984年-2001年 株式会社東芝、1999年-2001年
財団法人マイクロマシンセンター、2001年-2014
年 岡山大学教授、2014年より東京工業大学教授。
アクチュエータ、ロボットの研究に従事。日本
フルードパワーシステム学会、日本ロボット学
会等の会員、工学博士。

1. はじめに

東京工業大学は本年2016年4月に、開学以来最大とも言われる大きな組織および教育システムの改革を実施した。2030年までに世界トップ10の研究大学入りを目指した改革ということだが、その目玉の一つは、学部と大学院を統一した「学院」なる組織を創設し学士課程、修士課程、博士後期課程のシームレスな教育体系を導入した点である。これに伴い、そもそも「大学院」という組織が無くなったので、私たちの研究室はそれまでの「大学院理工学研究科機械宇宙システム専攻」から単に「工学院」の所属となり、教育に関して機械系機械コースを担当することになった。正直に言うと、新しいシステムに戸惑いを感じることも多い毎日だが、今日の大学を取り巻く社会情勢を考えると新しい可能性に富んだ体制なのかもしれない。

このようなフラットな組織になり、正式には従来の「研究分野」という組織は無くなってしまった。ただそれでは日々の生活が成り立たないので、通常「鈴森・遠藤研究室」あるいは「ロボティクス研究分野」という呼び名で通っている。要するにロボットを専門分野とする研究室である¹⁾。

研究室には、筆者（鈴森）と、遠藤玄准教授、難波江裕之助教の3名の教員が所属し、協力して研究室の運営、研究、教育にあたっている。私は2014年4月に着任、遠藤先生と難波江先生は2015年4月に着任した非常に新しい研究室である。もっとも

遠藤先生は本研究室の前身である広瀬茂男先生の研究室に長くいた経歴があるのだが。

現在は、鈴森が油空圧アクチュエータとそのロボット応用を、遠藤先生が移動ロボットや原子力プラント点検ロボットなどのフィールドロボットを、難波江先生が各種新アクチュエータとその応用の研究を主に進めている。工学院的ホームページに掲げている研究室のキャッチフレーズは、「ロボットを創る・アクチュエータを創る」である（図2）。既成のアクチュエータやセンサなどの機能部品を使うだけではなく、機能部品自身から創りだそう、革新的な機能部品が革新的なロボットを生み出す、というのが筆者のロボティクス研究に対する姿勢である²⁾。このような観点から見ると、どちらかという「要素」寄りの教員と、どちらかという「システム」寄りの教員が一つの研究室にいることは相互に刺激しあえ、とても良い環境であると感じている。

学生は、2016年10月現在、博士後期課程7名、修士課程2年3名、修士課程1年3名、学部4年生4名、交換留学生1名である。新カリキュラムの学



図1 研究室のメンバー（の一部）



図2 東京工業大学 工学院のHPにおける本研究室のバーナー

生が研究室に配属される3年後には、学部とか大学院とかいう組織に属さない学生が入ってくことになるので、その時はいったい何て呼ぶのだろう？戸惑いと新しさへのちょっとしたワクワク感が混ざった毎日を過ごしている。

そのほか、5名の研究員、4名の技術員、1名の事務員が研究室の運営、研究を支えてくれている。研究員と技術員は主に産学連携研究や学外との共同プロジェクトの研究業務に従事している。

2. 研究紹介

このように、本研究室では各種機能デバイス開発からロボットシステム構築、フィールド応用まで幅広く研究を進めているが、本稿では、そのうち主に筆者が担当しているフルードパワーに関連した研究を取り上げて紹介する。

2.1 細径人工筋の応用

岡山県倉敷市は各種繊維産業が集積した繊維の町である。筆者が岡山大学に在職中に地元の製紐会社と協力して外径が数mmの細径のマッキベン型人工筋の量産化に成功した。マッキベン型人工筋はゴムチューブ外周に繊維を編み込んだ構造を持ち、空気を加えることで25%程度収縮する空圧アクチュエータである。柔軟、軽量、大きな発生力といった特徴を持つ。1960年頃の米国の発明で、これまで数cmの太さの人工筋がパワースーツやロボットに利用されている。

筆者らはこれを細径、量産化した。そうするとこれを編んだり束ねたりすることで、しなやかで形状適応性に優れた各種駆動メカニズムが実現できる。筆者らはこれを細径、量産化した³⁾。以下、細径人工筋により実現が期待される3種の新しいロボットを紹介する。



図3 細径人工筋（外径1.8mmのもの）

2.1.1 身体サポートウェア

細径人工筋を布状、あるいはセータ状に編むことにより、柔らかい「サポートウェア」ができる。外骨格型のパワースーツほどには大きな力のサポートは行えないが、身体にフィットし着心地の良いソフ



図4 身体サポートウェア（左：腰と上肢のパワーサポートスーツ、右上：前腕の動作サポート、右下：前腕圧迫具）

トエグゾスケルトン型パワースーツや身体をサポート装具の実現を目指して研究を進めている。

2.1.2 筋骨格ロボット

「ロボットダンス」に象徴されるように、現在のロボットの動きはギクシャクして実際の人間の動きとはずいぶん異なる。原因の一つは駆動機構の違いにある。ロボットと人間の身体は、自由度、冗長度、使われる対偶の種類の数でずいぶん異なる。たとえば、普通のロボットの脚は1脚あたり3～7個程度のモータで駆動されるが、実際の人間の1脚は約50個の独立した筋肉で駆動される。人間と同じような筋骨格駆動機構を構成すれば、人間と同じような運動特性を持ったロボット機構が実現できるのではないか。こう考えて進めている研究である。従来のモータでは1脚に50個もモータを集積することは困難だったが、細径人工筋を使えば人間の筋骨格機構とほぼ同じメカニズムが作れる。担当する学生が解剖学書を読み込み、また整形外科医にも実際にしてもらい、試作した筋骨格ロボットを図5に示す。

実際動かすと、人間っぽい、なんとも艶めかしい動きをする。Youtubeでは投稿直後2週間で約30万の再生回数に達し、よい評価が得られている⁴⁾。

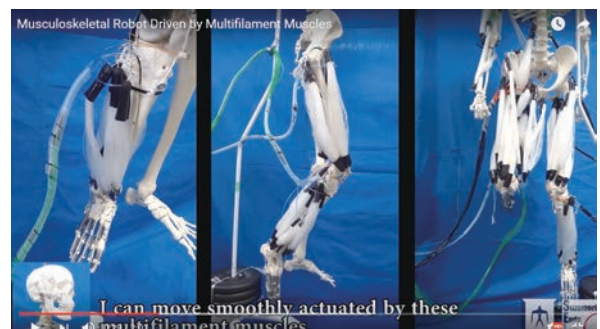


図5 筋骨格ロボット

2.1.3 ジャコメッティロボット

従来のロボットはひたすら高機能/高性能化を目指した。その結果、優れた機能のロボットが出来上がったが、大きな重量になり現場投入の際に安全面や搬入の面において大きな課題が生まれることもしばしばあった。

スイスの彫刻家ジャコメッティの作品のような、贅肉をそぎ取った本質機能のみのロボット設計はそうした問題を解決する一つの考え方ではないか。そう思い、ジャコメッティロボットと命名し、簡単、超軽量、長尺を特徴とするロボットの研究を進めている。

図6に試作例を2つ示す。位置決め精度や速度や可搬能力には劣るが、極めて軽量で、これなら落下しても、階段から転げ落ちても被害はほとんどでないだろう。軽量で力の大きい細径人工筋だからこそできるロボットである。

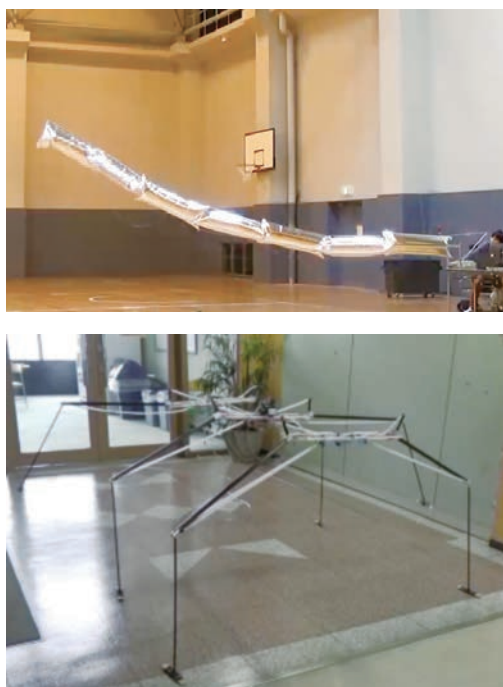


図6 ジャコメッティロボットの例（上：7mの片持ち型ロボット（7関節）、下：6脚歩行ロボット）

2.2 気液化学反応を利用した空圧アクチュエータ

空圧アクチュエータの最大の弱点は、コンプレッサと送気チューブの存在である。筆者は空圧アクチュエータ内部に高分子燃料電池を組み込み、電流によって水合成/水分解反応を制御し、発生する気体で空圧アクチュエータを動かす研究をしている。紙面の制約で詳述できないが、ぜひ研究室で公開しているビデオを見ていただきたい⁴⁾。

2.3 タフロボット用油圧コンポーネント

IMPACTプログラムの一つ「タフ・ロボティクス・

チャレンジ」（2014-2019年、田所論PM）の中で筆者は、従来のロボットに比べて発生力が格段に大きく、外界からの衝撃や振動に強い「タフなロボット」の実現を目指し、油圧コンポーネントの研究開発を進めている。重機械や建設機械用に開発された既存の油圧コンポーネントは必ずしもロボット用には向いていない。ロボットは、1) 大きな動作軸数を持ち、2) アクチュエータ自体が可動部に搭載され、3) ときには繊細な力制御作業も要求され、4) ポンプを内蔵した自立型であることが要求される。このため、小型高压化、多自由度対応、軽量化、高エネルギー効率、をポイントに、アクチュエータおよびその関連技術の研究を進めている。

複数の企業や、東工大以外の大学とも協力した産学連携体制をとっている。また、開発した油圧コンポーネントは、同プロジェクト内で開発されている建設ロボット（大阪大学吉灘研と建機メーカー）や、脚ロボット（早稲田大学高西・橋本研）に適用する。いくつか研究開発例を示そう。

図7は、油空圧メーカーと協力して開発した軽量低摺動シリンダで、内径30mm、低摺動を特徴とする。マグネシウム合金や低摺動パッキン等、新しい試みを採用している。図のシリンダは21MPa仕様であるが、プロジェクトでは35MPaを標準に開発している。



図7 軽量・低摺動シリンダ（油空圧メーカーと共同開発）

図8は、タイヤメーカーと共同で開発中の油圧マッキベン型人工筋である。力学的特性に優れた耐油ゴムを新たに開発し、最大収縮率30%、最大収縮力約500kgf（5MPa加圧時、人工筋外径15mm）である。無摺動、コンプライアンス、軽量、耐衝撃/振動といった、従来の油圧アクチュエータとは異なる

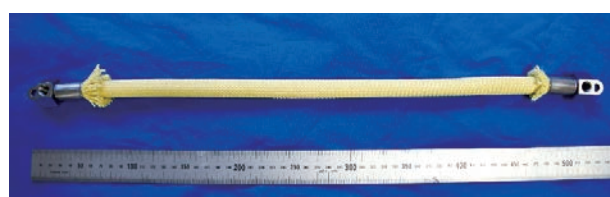


図8 油圧マッキベン型人工筋（タイヤメーカーと共同開発）

る大きな特徴を持つ。

図9は開発したシリンダ10本とベーンモータ2台で構成される5指ハンドである。合計12自由度、駆動圧35MPaで、指先先端では1指あたり最大700kgfの力が出せる。一方、コンプライアンス制御を行うと、手で押すと簡単にバックドライブする繊細な動作も可能である。大阪大学吉灘研と建機メーカーが開発している建設ロボットに搭載する多機能バケット（ハンド）の実現を目指した研究である。

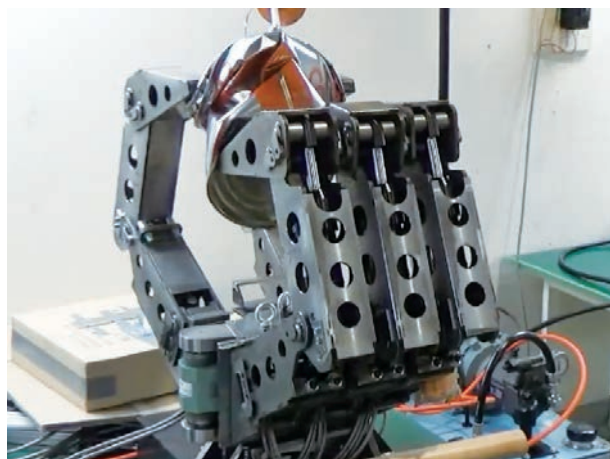


図9 12自由度5指パワーハンド

3. おわりに

筆者はこれまで、ロボット用に限らず、また油空

圧アクチュエータに限らず、さまざまな新アクチュエータの研究に取り組んできた。3年半前に現在の新しい職場環境で活動する転機をいただき、新しい研究仲間にも恵まれ、ロボット用の新しい油空圧アクチュエータに注力していこうと考えた。

昨今ややもすると、目新しい技術や欧米でホットになっている研究トピックに振り回されすぎる傾向はないだろうか？油空圧技術は、たとえば最近のAIに比べると“派手さ”や“社会へのインパクトの大きさ”には少々かけるかもしれない。しかし、このような基盤技術にこそ、新しい実用的なロボティクス展開を引き起こす可能性があると考えている。

冒頭に述べたように、本研究室ではフルードパワー以外にも、さまざまなロボットやアクチュエータの研究開発を進めている。研究成果はぜひ社会で広く活用していただきたいと願っている。ご興味があればコンタクトしていただきたい。

参考文献

- 1) 鈴森・遠藤研究室ホームページ：<http://www-robot.mes.titech.ac.jp/home.html>
- 2) 鈴森, 次世代アクチュエータが切り拓く新しいロボティクス, 日本ロボット学会誌 Vol.33 No.9, (2015年12月).
- 3) <http://www.s-muscle.com/>
- 4) 鈴森・遠藤研動画サイト：<https://www.youtube.com/channel/UCOz02yvsxufQPelvWmlANAA>

(原稿受付：2016年9月26日)

企画行事

平成28年春季フルードパワーシステム講演会報告

著者紹介



きむ じゅうん わん
金 俊 完

東京工業大学大学院
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-J3-12
E-mail : kim.j.aa@m.titech.ac.jp

2005年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士後期課程修了。2005年から東京工業大学精密工学研究所助手（助教）、2013年から同大学准教授、現在に至る。機能性流体、MEMS、マイクロマシン、超精密機械加工、メカトロニクスなどの研究に従事、博士（工学）。

1. はじめに

平成28年5月26日（木）から27日（金）の2日間、機械振興会館（〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8）において、平成28年春季フルードパワーシステム講演会が日本フルードパワーシステム学会主催・日本機械学会共催で開かれた。本講演会では、2種類のオーガナイズドセッション（OS）、2種類の一般セッション、製品技術紹介セッション、特別講演、国際特別講演が企画され、計43件の講演発表がなされた。

- OS「フルードパワーの流体现象」：7件
- OS「機能性流体テクノロジーの次世代FPSへの展開」：11件
- 一般セッション「油圧・水圧」：7件
- 一般セッション「空気圧」：9件
- 製品技術紹介セッション：7件
- 国際特別講演：1件
- 特別講演：1件

また、会期前日の5月25日（水）の午後には、（1）平成28年春季講演会併設セミナー「フルードパワーシステムを変えるIoT、ICTの最新技術」と（2）第4回フルードパワーに関する日中国際共同ワークショップが同会場にて開催された。

本記事では、5月26日（木）、27日（金）の2日間の講演会について、概要を報告する。

2. 各セッションの概要

2.1 OS：フルードパワーの流体现象

本OSでは、香川利春先生（東京工業大学、教授）、尹鍾皓先生（東京工業大学、助教）がオーガナイ

ザになり、「フルードパワーシステムでは、圧力変化に伴いさまざまな非線形な流体现象が発生する。さまざまな流体现象の調査・研究やその結果を用いたより進化したフルードパワーシステム技術について情報交換を行う。フルードパワーの流体现象に関する講演を基礎から応用に至るまで広く募集する。」という趣旨の研究が募集された。これに賛同する7件の発表と活発な質疑・応答が行われた（写真1）。



写真1 講演発表の様子（OS：フルードパワーの流体现象）

2.2 OS：機能性流体テクノロジーの次世代FPSへの展開

本OSのオーガナイザは、中野政身先生（東北大学、教授）と吉田和弘先生（東京工業大学、教授）、竹村研治郎先生（慶應義塾大学、准教授）であり、本OSの概要は、「ER流体、液晶、EHD・ECF、MR流体、磁性流体、および機能性ソフトマテリアルなどの機能性流体の創製・特性評価から革新的な次世代フルードパワーシステム技術への展開に関する研究発表を募集します。機能性流体が拓く次世代FPSに関する情報交換の場としますので、奮ってのご発表および参加をお願いします。」であった。本OSでは、本講演会のセッションの中、最大発表件数である11件の発表が計3室に分かれ行われた。（写真2）。このような積極的な参加は、「機能性流体テクノロジーの次世代FPSへの展開に関する研究委員会」のサポートの成果であると思う。

2.3 一般セッション「油圧・水圧」

本セッションでは、油圧関連で5件、水圧関連で2件の研究発表があった（写真3）。

2.4 一般セッション「空気圧」

本セッションでは、9件の研究発表があった（写真4）。平成27年度と同セッションでの発表件数



写真2 講演発表の様子
(OS: 機能性流体テクノロジーの次世代FPSへの展開)



写真3 講演発表の様子 (油圧・水圧)



写真4 講演発表の様子 (空気圧)

(13件)に比べると件数は減少しているが、これは空気圧関連のOS「フルードパワーの流体現象」に分散されたからであると判断できる。

2.5 製品技術紹介セッション

本セッションは、企業からの技術発表を積極的に行なう目的で、平成10年春季講演会から続いている企画である。本年度は7件の発表があった。

3. 国際特別講演と特別講演

5月26日(木)午前11時から11時50分まで、焦宗夏先生(北京航空航天大学 教授)を講師として、「The Linear Driven Electro-Hydrostatic Actuators (直線駆動型電気静圧アクチュエータ)」のタイトルで国際特別講演が行われた(写真5)。

また、5月27日(金)午前10時50分からの1時間で、東亜建設工業株式会社的那須野陽平主任を講

師としてお招きし、「洋上風力発電事業における安全なアクセス手段の確立に向けて～6軸減揺栈橋(E-motion)の開発～」の話題で特別講演が行われた(写真6)。会場に空席がないほどの盛況であった。



写真5 国際特別講演 (北京航空航天大学 焦宗夏 教授)



写真6 特別講演 (東亜建設工業株式会社 那須野 陽平 主任)

4. おわりに

本年度は、会期前日に「第4回フルードパワーに関する日中国際共同ワークショップ」が同会場にて開催されたため、技術懇談会でも多数の中国からの研究者と有意義な情報交換ができたと思う(写真7)。



写真7 技術懇談会の様子

なお、筆者は本学会企画委員会として、本講演会の主査を担当させていただいた。本講演会にご協力いただきました皆様に深く感謝申し上げます。

(原稿受付: 2016年10月14日)

会 告

〈理事会・委員会日程〉

11月1日	委員長会議
11月22日	理事会
12月 1日	編集委員会
12月 2日	企画委員会
12月 6日	基盤強化委員会
1月13日	情報システム委員会

〈理事会報告〉

- 10月4日 15:00～17:00 機械振興会館
地下3階B3—3号室（出席者15名）
- 1) 国際シンポジウム福岡について
 - 2) 日中若手交流事業について
 - 3) 平成28年秋季講演会について
 - 4) 平成29年度フェロー認定者推薦について
 - 5) 学会創立50周年記念事業準備委員会設置について
 - 6) 論文集電子化の流れについて
 - 7) 学会財務基盤の強化の進捗状況について
 - 8) 会員の推移と入退会者について
 - 9) 補助職員採用について
 - 10) 賛助会員会費値上げに伴う規定変更、HP更新について

〈委員会報告〉

平成28年度第2回委員長会議

- 9月2日 15:00～17:00
機械振興会館6—63号室（出席者8名）
- 1) 新会長挨拶
 - 2) 理事会開催要領について
 - 3) 平成28年度各委員会の名簿作成について
 - 4) 学会財務基盤の強化の進捗状況について
 - 5) その他

平成28年度第2回企画委員会

- 9月20日 15:00～17:00
機械振興会館地下3階B3—3号室（出席者15名）
- 1) 平成28年度実施事業について
 - ・平成28年秋季講演会
 - ・オータムセミナー
 - ・ウインターセミナー
 - 2) 平成29年度実施事業について
 - ・平成29年春季講演会併設セミナー
 - ・平成29年春季講演会

- ・オータムセミナー
- ・ウインターセミナー

3) その他

- ①予告会告・会告について
 - ・平成28年度オータムセミナー（会誌11月号掲載）
 - ・平成28年度ウインターセミナー（会誌11月号掲載）
- ②WGの構成と担当について
- ③その他

平成28年度第2回情報システム委員会

- 9月28日 16:00～18:00 法政大学 新見附校舎
創造空間サロン1（出席者6名）
- 1) 会議報告の担当者の編集委員会への周知について
 - 2) 今後の会議報告の担当について
 - 3) HP更新作業について
 - 4) メイリングリストの配信管理について
 - 5) その他

平成28年度第3回編集委員会

- 10月5日 14:00～17:00 東京工業大学田町CIC
5階リエゾンコーナー 501（出席者11名）
- 1) 会誌特集号の現状と企画
 - ・Vol.47 No.6「機能性流体を活用したフルードパワー技術の実用化最前線」
 - ・Vol.48 No.1「柔軟構造のフルードパワー・アクチュエータ」
 - ・Vol.48 No.2「フルードパワーに役立つセンシング技術（仮）」
 - ・Vol.48 No.3「モデルベース開発（仮）」
 - ・Vol.48 No.4「トライボロジーの基礎（仮）」
 - ・Vol.48 E 1（電子出版号）「緑陰特集」
 - 2) その他
 - ・会議報告
 - ・トピックスについて
 - ・今後の特集号の分担について
 - ・記事一覧

平成28年度第2回基盤強化委員会

- 10月6日 14:00～15:30
機械振興会館地下3階B3—9号室（出席者10名）
- 1) 会員サービス、会員数増加
 - 2) 外部への情報発信
 - 3) フルードパワー道場
 - 4) フルードパワー・バーチャルミュージアム
 - 5) 研究員会について
 - 6) その他

Professor Dr.-Ing Wolfgang Backéご逝去のお知らせ (25. July 1929 Kidifu/Tanzania-21. July 2016 Aachen)



W. Backé先生
(提供：H. Murrenhoff教授)

ご略歴

- 1955 アーヘン工科大学機械工学科卒業，同大学工作機械研究所研究員
- 1959 Dr.-Ingenieur 学位取得，同大学Oberingenieur 就任
- 1962 Habilitation取得（教授相当）
- 1962 カールスルーエ工科大学工作機械研究所副所長，その後企業へ
- 1968 アーヘン工科大学流体駆動及び制御研究所（IHP）を創設し所長・教授就任
- 1994 同大学 名誉教授
- 1988 連邦功労十字勲章
- 1997 ドイツ連邦共和国・第1級連邦功労十字勲章

生涯を通じて約150編の学術論文と8冊の学術書を記す。IHP教授の間，124名の博士を育成，国際的にも中国の路甬祥教授，韓国の李教一教授などをはじめ日本人も含む多数の研究者を育てた。学術と工業の両方に貢献し，教授を取り巻く一群はその活躍からFluid power gangとも呼ばれた。子供は3男1女，趣味はゴルフとサイクリング。

バケ教授を偲んで

私は，かねがね希望していたドイツへの留学を目指して，フンボルト協会（ドイツ政府直轄事業）の給費生に応募しました。受け入れ希望先はアーヘン工科大学のバケ教授でした。1970年の夏，念願の採用通知が届きました。1971年2月末に羽田空港からルフトハンザ機でデュッセルドルフ空港を経て，アーヘンに行き，先ずバケ教授に挨拶しました。アロルゼンという小さな町で2ヶ月間のドイツ語研修を受けた後に，アーヘン工科大学に落ち着き，ここで1年あまり生活することになりました。

バケ教授は油空圧研究所の所長であると同時に油空圧講座の教授でした。教授は日本人である私に大変興味を持ち，折に触れて色々と話しかけてきました。又とても親切で，私の家族が夏休みの間ドイツに来るということが決まると，補助ベッドを貸してくれました。研究所は町中の「11本の煙突通り」という通りにありました。この頃はまだあちこちに戦争の焼け跡がありましたが，翌年，研究室はアーヘン西駅のそばに引っ越しました。1972年の4月中旬に教授と奥様は，郊外のレストランで送別会を開いて下さいました。

4月24日に私はアーヘンを去ることになりました。アーヘンには約一年滞在しましたが，その間，教授は終始私の面倒を見て下さいました。その後も教授と私の関係は続きました。1975年には日本政府の招待で来日され，私は教授を大阪まで案内しました。また教授は中国に招待される機会が多く，1981年には北京でお目にかかり旧交を温めました。

近年はお会いする機会がなくなり、時々 e メールを交わすのみでした。

教授はその後も日本の油空圧関係研究者を多く受け入れて下さいました。今回の訃報に接し、心からご冥福を祈る次第です。

高橋 浩爾

追悼の辞

バケイ先生が亡くなられた。私がアーヘンの油空圧研究所に留学したのは、1975-76年の11ヶ月。当時竹中研の助手であった私が外国出張となり、研究室で博士課程の2年目を迎えていた総領の北川さん（後に東工大教授）が、私の代役を勤めた。自分の研究も進めながら、修士や学部卒論の面倒を見るだけでなく、学生実験の指導もやってくれた。当時往復した手紙に細々と、研究や採点方法の問い合わせなどが書いてある。大分苦勞をかけたが、私はその間に今思えば、生涯で最も幸せな日々を送っていた。バケイ先生は、私の住居から始まる留学生活万般の世話をして下さいました。もちろん先生は家主と交渉などしないが、同室のHelduser氏とLee氏に私の面倒を見るように指示されていた。この二人は後にDresden大学、Seoul大学の教授になった人たちであるが、帰国後もずっと付き合いが続いた。研究所でのテーマは一つだけなので、1週間おきに旅行に出て、欧州各地の大学を見てまわることができた。今でこそ国際学会が頻繁に開かれ、研究交流は盛んであるが、当時は通信も交通も今とは比較にならぬ不自由さであったから、私がどこそこの大学の先生を訪問したという、研究所の助手たちから、ときにはバケイ先生からも、そこでどんな研究をしていたかを聞かれた。バケイ先生が来日されたときに、私の家に泊まって頂いたこともあった。思い出はつきないので、ご冥福を祈りつつ筆を止める。

浦田 暎三

バック先生を偲んで

バック先生（Prof. W. Backé）の訃報に接し、巨星、墮つとの感が深い。バック先生は、1970年から1994年まで、ドイツアーヘン工科大学流体駆動制御研究所（IHP）の所長を勤められていたが、私はその間の1981年10月から10か月間、文部省長期在外研究員としてIHPに留学する幸運に恵まれた。そこで警咳に触れて以来、バック先生を心の師として深く敬愛している。

40歳を過ぎたばかりの駆け出しの頃の私は、IHPでの滞在経験から、人生観の覚醒をはじめとする計り知れない財産を得た。その一つとして、IHPで出遭った多くの研究者との交流・人脈が帰国後に花開いて、本学会をはじめとする私の学会活動へと展開した事実がある。これら貴重な財産を賜った象徴として、バック先生を師と仰ぐ所以がここにある。

先生が残された数々の偉業・業績の中で、第一のそれは、教授退官後の同研究所（IFASと改称）として後任のムレノフ教授（Prof. H. Murrenhoff）へと盤石な体制で引き継がれたことであろう。1992年、退官直前のバック先生を日本にお招きしたことがあり、その折に退官後の件を直接お聞きする機会があった。ムレノフ教授とは、IHP滞在中から親交があったので、その後任引き継ぎの報は私にとってまさにホットニュースであった。バック先生としてもその喜びを抑えがたい様子が窺われ、数次にわたる大学内外での審査がいかに厳格であったかを彷彿とさせるものがあった。

先生の御冥福を心からお祈り申し上げます。

武藤 高義

バック先生の思い出

バック先生に初めてお目にかかったのは、1978年9月に先生が日本学術振興会の招聘研究者として奥様と一緒に来日されたときであった。上智大学高橋教授が招聘責任者であったため、ご夫妻の3週間にわたる日本滞在中のスケジュール調整、宿舎の手配等のお手伝いをさせていただいた。関西方面への旅行の終盤、大阪と富山の見学に同行し、宇奈月温泉に1泊し、日本の温泉を楽しんでいただいた。これが契機となり、1980年6月から1年間、フンボルト財団の奨学金をいただき、アーヘン工科大学に滞在し、先生からカートリッジ弁内の流れの可視化というテーマをいただき、研究させていただいた。当時は、研究所内での意思疎通はドイツ語で行う必要があり、同室の助手にいろいろと教えてもらい、また新たに実験装置を作成するために工場の技術員の方々にいろいろとお願いするのに苦勞したが、何とかかしか写真を撮り、簡単に整理して報告した。アーヘンについて、1ヶ月ほどたった時期に、研究室の1日がかりのエクスカージョンに参加した。大型バス2台で出かけ、国境のベルギー側の川で2人乗りのカヌーによる川くだりを行ったが、ドイツ語の

十分にできない私のためにバック先生と一緒に乗ってくださり、2時間ほどの川くだりを楽しんだのが懐かしい思い出である。

帰国した後も、たびたびヨーロッパのフルードパワー国際会議（アーヘン、バース、リンシェーピン、タンペレ、ドレスデン）に出席したが、どの会議でもバック先生が出席しておられ、研究発表に対して、適切な質問をされ、フルードパワー分野の後輩の育成にあたっておられた。2012年にドレスデンで最後にお目にかかった際の穏やかな口調での質問を思い出し、見習わなくてはと思っている。

先生の笑顔を思い出しつつ、ご冥福を祈って。

池尾 茂

追 悼

バック先生ご逝去の報に接し深甚なる哀悼の意を表します。

個人的に初めてバック先生にお会いしたのはAlexander von Humboldt財団（当時西独）の奨励研究資金援助を受け、1982年8月から4か月間のフライブルクゲーティンスティチュート語学研修中（フライブルク）の7月の暑い日であった。8月から1年間の研究指導を受け入れて頂いたお礼と研究打ち合わせのためご挨拶に伺ったときである。先生はIHP（現在のIFK）の所長として、油空圧工学を中心として機械工学全般にわたり既に世界的な活躍をされていた。このような著名な先生にどうぞ挨拶したものかと思いつつIHPに伺い、秘書を介してすぐに先生にお会いすることができた。挨拶時には家族との快適な西独滞在に向けた重要な示唆を頂いた。その後先生自ら同行され、これから1年間の筆者の居室と同居する大学院学生2名の紹介、そして研究所主要施設の説明をして頂いた。著名で多忙な先生にこのように温かく迎えて頂いたことがとても印象に残っており、以来30年間にわたりご指導を頂いたが、常にこの温かいお気持ちで接して頂いたと感じている。世界レベルで活躍され、温かなお気持ちを常に示された先生にお会いし、ご指導を頂いたことは筆者にとってこの上ない宝物となっている。

バック先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

黙祷

中田 毅

バケイ先生の思い出

1988年8月から1年間アーヘン工大のIHP（油空圧研究所）の外国人研究者として滞在してお世話になった。渡独は2カ月前にマンハイムのゲーティンスティチュートで2カ月のドイツ語の勉強を行った。ブーフミュラーさんという大家さんの家に間借りして生活を行った。マンハイムは綺麗な都市で路面電車を利用して語学学校に通学した。2カ月後、片言のドイツ語を頼りにバケイ先生のアーヘン工大に引っ越した。家族を呼び、古い屋敷の部屋を借りた。屋根裏部屋には同じアーヘン工大の電気工学科のイラン人の学生が住んでいた。大変に懇意になり、一緒に旅行をした。アーヘン工大では空気圧サーボシステムに関する実験的研究を行った。バケイ先生は時々食事会に招いて下さり、大変に親しくして頂いた。かれこれ28年になるが、アーヘン工大バケイ研究所で行った空気圧サーボシステムの温度変化の計測がその後の研究の基礎として役立った。バケイ先生のご冥福を祈ります。

香川 利春

会 告

平成28年度 オータムセミナー
「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」
 開催日時：平成28年11月25日（金）9：30～17：00

開催趣旨：

今年度のオートムセミナーは、名古屋市のトヨタ産業技術記念館で開催いたします。

今回のセミナーは、私たちの身の回りにあるさまざまな製品や部品を作るときに使われるフルードパワーに着目し、最先端のものづくりに貢献している事例を第一線で活躍されている方々に具体例を交えてご講演いただきます。

セミナーに参加される方々にトヨタ産業技術記念館の繊維機

械と自動車生産に関する素晴らしい展示もゆっくりと見て頂きたく、午前に館内の自由見学時間を設け、午後から講演形式のセミナーを行います。

詳しい情報を学会ホームページに掲載しております。参加申込も同ページからお願いいたします。

[http://www.jfps.jp/Event/topix_16autumn.html]

皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

論文集の掲載形態の変更について

論文集委員会では、昨今のインターネットの普及による学術誌の電子出版の状況を踏まえ、論文集の出版のあり方について検討を進めて参りました。日本機械学会を始めとし、多くの学会において論文集を電子出版のみで刊行するようになってきております。これを受けて本学会においても、2018年より会誌への印刷による出版は終了し、J-Stagelによる電子出版のみに一本化するとの結論に至りました。2017年はその移行措置期間として会誌出版後一月以内にJ-Stagelにも公開することにな

ります。投稿規定等についても順次見直しておりますので、改めてご報告させていただきます。

以上、会員皆さまのご理解を賜りたく、何とぞよろしくお願い申し上げます。

会 長 小山 紀
 論文集委員長 川上 幸男

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正 会 員	海 外 会 員	学 生 会 員	賛 助 会 員
会 員 数 (10月10日現在)	963	15	144	134
差 引 増 減	+2	-1	+9	±0

正会員の内訳 名誉員14名・シニア員40名・ジュニア員186名・その他正会員723名

正会員

安齊 秀伸（藤倉化成株式会社）
渡辺 和宏（株式会社ジェイテクト）

中根 好章（株式会社ジェイテクト）
彭 敬輝（法政大学）

学生会員

加藤 直熙（岡山理科大学）
江口 裕哉（岡山理科大学）
原田 翔太（岡山理科大学）
飯島 佳樹（慶應義塾大学）
松原 竜也（東京工業大学）

黒星雄一郎（慶應義塾大学）
玉木 博章（岡山理科大学）
藤田 理知（東京医科歯科大学）
松本 貴夢（大阪大学）
ZEBING MAO（東京工業大学）

共催・協賛行事のお知らせ

共催行事

キャビテーションに関するシンポジウム（第18回）

主 催：日本学術会議 第三部（予定）

第18回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会

（委員長：理化学研究所理事，東京大学名誉教授・松本洋一郎）

開 催 日：2016年12月8日（木）～9日（金）

会 場：九州大学医学部百年講堂（〒812-8582 福岡市東区馬出3丁目1番1号）

連 絡 先：九州大学大学院工学研究院 安東 潤 教授

TEL：092-802-3449（直通） FAX：092-802-3368

e-mail：cav18@nams.kyushu-u.ac.jp

協賛行事

N0.16-14 講習会

産業に役立つアクチュエータ研究開発の最前線

—最新アクチュエータ要素技術からアクチュエータシステムへの展開—

開 催 日：2016年11月25日（金）

会 場：名古屋大学 ベンチャービジネスラバトリー ベンチャーホール

[名古屋市千種区不老町／電話（052）789-5447 地下鉄名城線名古屋大学駅3番口より徒歩3分]

<http://www.nagoya-u.ac.jp>

問合せ先：機素潤滑設計部門 担当職員 金子／電話（03）5360-3504／E-mail kaneko@jsme.or.jp

SICEセミナー「モデルベース制御系設計 ～モデリングから制御系設計までを系統的に学ぶ～」2016

主催・企画：計測自動制御学会 制御部門

詳細URL：<http://www.sice-ctrl.jp/jp/wiki/wiki.cgi/c/semi?page=design2016>

期 日：2016年12月5日（月），6日（火）

会 場：電気通信大学附属図書館（東3号館）マルチメディアホール（301号室）

東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

http://www.lib.uec.ac.jp/modules/outsider/index.php?content_id=3

エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム（EcoDePS）2016

開 催 日：2016年12月7日（水）

開催場所：東京理科大学森戸記念館（東京都新宿区神楽坂1-3）

主 催：エコデザイン学会連合

後 援：エコプロダクツ大賞推進協議会（予定）

幹事団体：特定非営利法人エコデザイン推進機構

組織委員長：細田 奈麻絵 物質・材料研究機構グループリーダー／東京大学教授

実行委員長：木下 裕介 産業技術総合研究所研究員

事 務 局：エコデザイン推進機構／エコデザイン学会連合事務局（イートレイ株）

21016年度 計算力学技術者（CAE技術者）資格認定事業

（固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者）

実 施 日：認定試験2016年12月10日（土）

申 込：2016年8月1日（月）～ 8月17日（水）17時

申込方法・申請書類等の詳細は、<http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm> 参照

第17回SICEシステムインテグレーション部門講演会

開 催 日：平成28年12月15日（木）～17日（土）

会 場：札幌コンベンションセンター（札幌市白石区東札幌6条1丁目1-1 ※地下鉄東西線東札幌駅から徒歩10分）

主 催：公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門

HP：<http://www.si-sice.org/si2016>

事務局所在地：〒060-0814 札幌市北区北14条西9 北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻

本件連絡担当者：SI2016実行委員長 田中 孝之 E-mail：ttanaka@ssi.ist.hokudai.ac.jp TEL：011-706-6756SICE事務局：部門担当 E-mail：bumon@sice.or.jp TEL：03-3814-4121

「EU Green Gateway to Japan」プロジェクト

日 程：2017年7月1日～2019年12月

場 所：東京

主 催：欧州連合（EU）

運営事務局：（一社）日本能率協会 産業シンクセンター

会 告

書籍案内 オーム社刊
「油圧・空気圧回路～書き方&設計の基礎教本」

この度、一般社団法人 日本フルードパワー工業会では、当会の編集による油圧・空気圧回路に関する実務書をオーム社より発行しましたのでご紹介します。

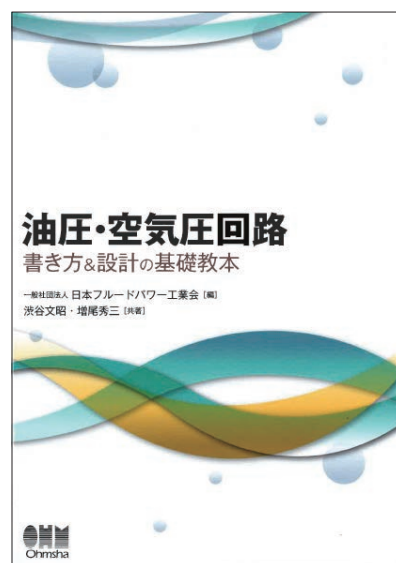
内容は、右図表紙の副題に示されている通り、回路の書き方と設計の教本といえるものです。フルードパワーシステムを構成するための、図記号、関連企画、機器の構造・機能などの知識、基本回路から実際の装置に適用された応用回路まで、幅広く網羅されています。設計に際して座右に置ける書であり、同時に、これから油圧・空気圧を学ぼうとする方々から中堅技術者、さらに既にご使用いただいているユーザの皆様方まで活用できる基礎教本でもあります。

著者は、会員企業の第一線ベテラン技術者である、東京計器(株)渋谷文昭氏とCKD(株)増尾秀三氏です。冒頭には、著者による「各編の校正&学習ポイント」というガイドもあり、読みすすめやすい工夫が盛り込まれています。特に、

- ① 全編を通してわかりやすい図表がふんだんに使われている
- ② 回路や図記号のていねいな解説がされている
- ③ 側注部にキーワードが解説されている

などの特長があり、大変見やすく、読みやすく感じられる紙面構成になっています。是非、お二人の力作を手にとってみてください。

購入に際しては、当会で注文書を兼ねたチラシを用意して一括注文するなどの便を図りますので、ご希望の方は下記にお問い合わせ願います。



記

購入方法：JFPA会員企業、同「フルードパワー」協賛会員の皆様、JFPS会員の皆様には、購入の際の便を図ります。ご希望の方は、下記までお問い合わせ願います。

問合せ先：一般社団法人 日本フルードパワー工業会 編集事務局担当 大橋 彰

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-3 機械振興会館311号

TEL：(03) 3433-5392 FAX：(03) 3434-3354 E-mail：ak.ohashi@jfpa.biz

会 告

資料一覧表

価格は、(一社)日本フルードパワーシステム学会事務局までお問い合わせください。

資 料 名	発行年月
平成元年春季油空圧講演会講演論文集	元年 5月
平成元年秋季油空圧講演会講演論文集	元年11月
平成2年秋季油空圧講演会講演論文集	2 年11月
平成3年秋季油空圧講演会講演論文集	3 年11月
平成4年春季油空圧講演会講演論文集	4 年 5月
平成4年秋季油空圧講演会講演論文集	4 年10月
平成5年春季油空圧講演会講演論文集	5 年 5月
平成5年秋季油空圧講演会講演論文集	5 年11月
平成6年秋季油空圧講演会講演論文集	6 年10月
平成7年秋季油空圧講演会講演論文集	7 年11月
平成8年春季油空圧講演会講演論文集	8 年 5月
平成8年秋季油空圧講演会講演論文集	8 年10月
平成9年春季油空圧講演会講演論文集	9 年 5月
平成9 年秋季油空圧講演会講演論文集	9 年 5月
平成10年春季油空圧講演会講演論文集	10年 5月
平成10年秋季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	10年11月
平成11年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	11年 5月
平成12年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	11年 5月
平成12年秋季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	12年10月
平成13年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	13年 5月
平成13年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	13年11月
平成14年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	14年 5月
平成15年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	15年 5月
平成16年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	16年 5月
平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	16年11月
平成17年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	17年 5月
平成18年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	18年 5月
平成18年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	18年11月
平成19年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	19年 5月
平成19年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	19年11月
平成20年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	20年 5月
平成21年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	21年 6月
平成21年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	21年11月
平成22年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	22年 5月
平成22年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	22年12月
平成23年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	23年 5月
平成24年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	24年 5月
平成24年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	24年11月

平成25年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	25年 5月
平成25年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	25年11月
平成26年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	26年 5月
平成27年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	27年 5月
平成27年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	27年11月
平成28年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	28年 5月
平成28年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	28年10月
平成11年IFPEXフルイドパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	11年10月
平成14年IFPEXフルイドパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	14年 6月
平成17年IFPEXフルイドパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	17年 8月
平成20年IFPEXフルイドパワーシステム ワークショップ講演会講演論文集	17年 4月
平成23年IFPEXフルイドパワーシステム ワークショップ国際見本市論文集	23年 7月
平成26年第24回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集	26年 9月
フォーラム'91「賢い電子油圧制御をいかに実現するか」	3年 7月
フォーラム'92「ここまできた電子油空圧制御システム」	4年 7月
フォーラム'94「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題 その1」	6年 7月
フォーラム'95「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題 その2」	7年 7月
フォーラム'96「油空圧技術を支えるトライボロジー」	8年 7月
フォーラム'97「21世紀を見つめた新技術開発」	9年 7月
フォーラム'98「オフロードビーグル用走行装置の動向」	10年 7月
フォーラム'99「技術開発におけるトラブル事例」	11年 7月
フォーラム2000「油空圧機器の省エネルギー化はこれだ！」	12年 7月
フォーラム2001「自動車における最新油空圧技術の動向」	13年 7月
フォーラム2002「電動かフルードか」	14年 8月
フォーラム2003「電動かフルードかⅡ」	15年 5月
フォーラム2003「最近の緩衝・制振・免振技術」	16年 5月
オータムセミナー「油空圧のセンシング技術」	元年10月
オータムセミナー「メカトロニクス関連センサ」	2年10月
オータムセミナー「油空圧を支える解析技術」	4年10月
オータムセミナー「油圧機器・システムにおける振動をいかに克服するか」	5年10月
オータムセミナー「油空圧制御と高速インターフェース技術の融合」	6年11月
オータムセミナー「油空圧におけるシミュレーション技術の現状と課題」	7年10月
オータムセミナー「最新制御理論の超活用法(油空圧システムとロバスト制御の融合)」	8年 9月
オータムセミナー 2000「環境適合技術の動向」	12年 9月
オータムセミナー 2001「フルイドパワーシステムに用いられる制御技術の動向」	13年 9月
オータムセミナー 2003「フルードパワーと環境・リサイクル」	15年10月
オータムセミナー 2004「食品機械におけるフルードパワーの利用と課題」	16年10月
オータムセミナー 2005「レスキューにおけるフルードパワーシステム」	17年10月
オータムセミナー 2006「生活に密着したフルードパワー」	18年10月
オータムセミナー 2007「鉄道におけるフルードパワー技術」 資料は『油空圧技術』Vol.49 No.4	
オータムセミナー 2008「フルードパワーシステムと環境・省エネルギー」	20年10月
オータムセミナー 2009「フルードパワーシステムのためのlinux開催環境」	21年10月
オータムセミナー 2010「BOPビジネスの可能性～CSRとビジネスの両立～」	22年11月
オータムセミナー 2011「パワートレインにおけるフルードパワー技術」	23年11月
オータムセミナー 2012「フルードパワー技術を生かす油圧作動油の最新動向」	24年11月
オータムセミナー 2013「鉄道車両とフルードパワー技術」	25年10月
オータムセミナー 2014「医療・福祉・介護分野でのフルードパワーを利用したロボティクス」	26年11月

オータムセミナー 2015「アクアドライブシステムの産業利用の現状」	27年11月
ウインターセミナー「油空圧システムの低騒音化のために」	2年 2月
ウインターセミナー「知っておきたい新しいアクチュエータ」	3年 2月
ウインターセミナー「200X年における電子油空圧はどうあるべきか Part2」	4年 2月
ウインターセミナー「新素材の油空圧への応用」	5年 2月
ウインターセミナー「空気圧の新たな可能性を求めて」	6年 2月
ウインターセミナー「人と環境に優しい油空圧—油空圧機器・システムの低騒音化技術—」	7年 2月
ウインターセミナー「油圧システムの高圧化に関する現状と将来」	8年 2月
ウインターセミナー「フルイドパワーにおける流体の役割」	9年 2月
ウインターセミナー「ER流体の可能性とその油空圧技術への応用」	10年 1月
ウインターセミナー「ユーザは語る・自動化機器における駆動方式の現状と将来像」	11年 1月
ウインターセミナー「水圧システムの現状と応用事例・展望」	12年 1月
ウインターセミナー「省エネ、環境のためのセンシング」	13年 1月
ウインターセミナー「油空圧機器・システムにおける省エネルギー化の方法」	14年 1月
ウインターセミナー「油空圧機器に係わる加工技術～共存する油空圧機器と加工技術～」	15年 1月
ウインターセミナー「メンテナンスエンジニアリング—ランニングコストを安く—」	16年 1月
ウインターセミナー「医療・福祉におけるフルードパワーシステムの応用動向」	17年 1月
ウインターセミナー「機械システムの安全性」	18年 2月
ウインターセミナー「家庭の中のフルードパワー」	19年 2月
ウインターセミナー「航空機とロケットへの応用」	20年 2月
ウインターセミナー「海と船のフルードパワー」資料は『学会誌』Vol.39 No.5	21年 2月
ウインターセミナー「フルードパワー機器・システムの小型化」資料は『学会誌』Vol.39 No.5	22年 2月
ウインターセミナー「福祉・医療環境における空気圧応用の現状と問題」	23年 2月
ウインターセミナー「圧縮空気エネルギーの有効利用技術」	24年 2月
ウインターセミナー「アクアドライブシステム（新水駆動圧技術）の現状と将来」	25年 2月
ウインターセミナー「大型機械と油圧技術」	26年 2月
ウインターセミナー「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」	27年 2月
ウインターセミナー「フルードパワー技術を支える要素技術」	28年 3月
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	元年 8月
教育講座「現代制御理論講座」（大学上級コース）	元年10月
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	2年 8月
教育講座「トライボロジー講座」（大学上級コース）	3年 8月
教育講座「油空圧における鋳造技術講座」	5年10月
教育講座「空気圧システム入門」	10年 9月
教育講座「空気圧システム入門」	11年 6月
教育講座「空気圧システム入門」	13年 6月
教育講座「トライボロジー講座」	14年 9月
教育講座「空気圧システム入門」	15年 5月
教育講座「空気圧システムの基礎」	15年 5月
第1回油空圧国際シンポジウム論文集	2年 1月
第2回油空圧国際シンポジウム論文集	5年 9月
第3回油空圧国際シンポジウム論文集	8年11月
第4回油空圧国際シンポジウム論文集	11年11月
第5回油空圧国際シンポジウム論文集	14年11月
第6回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（CD-ROM）	17年11月
第7回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子、CD-ROM）	20年 9月
第8回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子、CD-ROM）	23年10月

第9回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	26年10月
学会創立20周年記念出版「油空圧の進歩100人の証言」	2年 5月
学会創立30周年記念出版「アドバンスドフルードパワー技術の基礎と応用」	15年 4月
分冊販売 油圧駆動の世界—油圧ならこうする—	
空気圧システム入門	
水圧駆動テキストブック	
日本フルードパワーシステム学会創立40周年出版	23年 4月
分冊販売 油圧システムのモデリングと解析手法	
Webシミュレーション解説	
アクアドライブ技術の進展	

フルードパワーシステム 総目次 (第47巻)

	号	通し頁		号	通し頁
【挨拶】					
年頭のご挨拶 … 築地 徹浩	1	4	油圧作動油と気泡 … { 坂間 清子 田中 豊	4	174
年頭にあって … { 小山 紀 肥田 一雄	1	5	状態基準保全 (CBM) を実現するオイル分析 … 山中 克浩	4	178
会長就任にあたって … 小山 紀	4	152			
特集「農業に貢献するフルードパワー」			特集「フルードパワーを活用した大規模研究開発」		
「農業に貢献するフルードパワー」… 柳田 秀記	1	6	「フルードパワーを活用した大規模研究開発」発行にあたって… 佐藤 恭一	5	206
発行に当たって … 中川 修一	1	7	地球温暖化対策：海洋エネ発電 (波力、潮力) の研究開発… 丸山 康樹	5	207
農業機械における油圧技術 … 加藤 猛美	1	12	フルードパワーによる実大三次元震動破壊実験… 梶原 浩一	5	211
空気ジェットを利用した米粒などの選別機 … 土澤 聡明	1	15	深海水槽および高圧タンクによる海洋開発分野の研究開発… { 藤原 智 中島 康晴 岡本 章裕	5	215
ロボットハンドによる農作物の収穫支援… 伏見 卓也	1	18	フルードパワーを活用した鉄道車両試験装置および車両用機器開発… 宮原 宏平	5	219
マッスルスーツによる農作業支援の検討… 小林 宏	1	22	超高压下の物質合成技術… 谷口 尚	5	222
温室内環境の均質化に使用される循環扇… 畔柳 武司	1	22	圧縮空気を利用した地震探査… 伊藤 誠	5	226
			大規模波動地盤総合水路 (大津波水路) による沿岸防災研究… 鈴木高二郎	5	229
特集「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」			特集「機能性流体を活用したフルードパワー技術の実用化最前線」		
「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」発行にあたって… 成田 晋	2	50	「機能性流体を活用したフルードパワー技術の実用化最前線」発行… 中野 政身	6	264
Internet of Things 時代における変化とその対策… 森 大輔	2	51	機能性流体の研究開発と実用化の動向… 中野 政身	6	265
フルードパワーの情報センシング技術… 眞田 一志	2	54	自動車用MR流体ダンパの研究… 斎藤 啓司	6	272
マイコンと周辺機器の情報通信基盤技術… 赤木 徹也	2	57	超小型EV向けMR流体ブレーキの開発… { 中野 政身 古川 仁 道辻 善治	6	275
遠隔操作に関わる一般論とバイラテラル・マルチラテラル遠隔制御について… 三好 孝典	2	61	建築物の免震・制振用MR流体ダンパの開発… 袖山 博	6	279
エアパワーメータを活用した空気圧システムの省エネルギー化… { 加藤 友規 山本 円朗 小林 敏也	2	65	ナノMR流体の特長とハプティクスへの応用… 野間 淳一	6	282
クラウド時代のメンテナンス・サービス… 細矢 征史	2	68	MR流体ブレーキを用いた筋力トレーニングロボットの開発… { 高頭 静夫 石井 博 白石 俊彦 高杉紳一郎 岩谷 徹	6	285
衛星通信を利用した建設機械のグローバル遠隔監視システム… 関口 和浩	2	71	ER流体とその応用開発の現状… 井上 昭夫	6	289
荒掘削から仕上げ整地まで自動アシスト制御するICT油圧ショベル… 大岩 憲史	2	74	リハビリテーション長下肢装具用電子制御EAM膝ブレーキの開発… { 安齊 秀伸 山本 澄子 三井 和幸 安井 匡	6	293
			釣用リールにおける磁性流体シールの応用… 小原 武恵	6	296
特集「海洋開発・港湾建設に活用されるフルードパワー」			【解説】		
「海洋開発・港湾建設に活用されるフルードパワー」発行にあたって… 五嶋 裕之	3	104	乗用管理機搭載式ブームスプレーヤーのブーム垂直変位低減装置の開発… 水上 智道	3	124
港湾における水中建設作業機械の現状と展望… 平林 丈嗣	3	105	【ニュース】		
空気を地盤に注入する新しい液化化対策工法 —Air-des工法—… 山根 信幸	3	111	The KSFC 2015 Autumn Conference on Drive and Control 参加記… 伊藤 和寿	1	25
シールドマシンと油圧システム… 酒井 義雄	3	114	日中若手研究者交流事業報告… 伊藤 和寿	4	182
循環泥水駆動によるコア採取装置… 眞本 悠一	3	117	第4回フルードパワーに関する日中国際共同ワークショップ (The 4 th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power) 開催報告… 伊藤 和寿	6	299
海洋掘削における噴出防止装置について… 宮崎 英剛	3	121	【会議報告】		
特集「フルードパワーを支える油圧作動油の劣化と対策」			日本機械学会2015年度年次大会におけるフルードパワー技術研究動向… 桜井 康雄	1	29
「フルードパワーを支える油圧作動油の劣化と対策」発行にあたって… 丸田 和弘	4	154			
作動油の劣化とその対策について… 風間 俊治	4	155			
作動油の劣化と対応… 田崎 博之	4	160			
固形ダストによる油圧回路の不具合とその対処法… 石塚 信	4	164			
エレメントレス・フィルターによる油中コンタミの除去技術… 福田 寛人	4	168			
水分による油の劣化とフィルトレーション… 森永由一郎	4	171			

FPM2015におけるフルードパワー技術研究動向	…小林 亘	1	31
山梨講演会におけるフルードパワー技術研究	…吉田 和弘	2	78
ASME/Bath2015に参加して	…真田 一志	2	80
計測自動制御学会・流体計測制御シンポジウムにおける研究動向	…中尾 光博	3	127
第13回FULCOME2015カ ター ル に参加して	…香川 利春	3	129
ICMT2015におけるフルードパワー技術研究動向	…嚴 祥仁	3	131
IFK2016におけるフルードパワー技術の動向	…伊藤 隆	5	232
第16回JSME機素潤滑設計部門講演会におけるフルードパワー技術研究	…金 俊完	5	234
インドフルードパワー技術セミナーに参加して	…真田 一志	6	302
ROBOMECH2016におけるフルードパワー技術研究の動向	…田中 豊	6	304

【教室（連載）】

入門講座「エネルギー工学」第一回：日本のエネルギーと発電方式	…江間 敏	5	236
入門講座「エネルギー工学」第二回：火力発電と再生可能エネルギー	…江間 敏	6	307

【トピックス】

中国（上海）駐在日記	…阪本 晴康	1	33
米国ボストン滞在記	…吉田 和弘	1	36
駐在員日誌 無錫奮闘記	…真野 茂	3	133
台湾（台北）駐在日記	…川口 敦史	5	244

空気圧サーボ制御を用いた手術支援ロボットを開発する大学発ベンチャー企業	…川嶋 健嗣	4	184
産学協同という幻想	…山田 剛志	5	239
補助人工心臓開発と大学発ベンチャー	…進士 忠彦	6	310
特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム……特許文献を見る1	…木原 和幸	2	82
特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム……特許文献を見る2	…木原 和幸	4	187

【研究室紹介】

法政大学高機能メカトロデザイン研究室の紹介	…田中 豊 坂間 清子	1	39
芝浦工業大学 川上研究室	…川村 隼人	2	85
足利工業大学 桜井研究室の紹介	…岡本 拓也	3	137
沼津工業高等専門学校 村松・前田研究室	…村松 久巳 前田 篤志	4	191
岐阜大学工学部 機械工学科 山田宏尚研究室	…山田 宏尚	5	247
東京工業大学 工学院 鈴森・遠藤研究室	…鈴森 康一	6	313

【企画行事】

平成28年度企画行事紹介	…真田 一志 桜井 康雄	2	91
平成27年度オートムセミナー開催報告「アクアドライブシステムの産業利用の現状」	…川島 正人	2	93
平成27年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告	…中尾 光博	3	140
平成27年度ウィンターセミナー開催報告	…兵藤 訓一	4	194
平成28年春季講演会併設セミナー開催報告「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」	…成田 晋	5	250
平成28年春季フルードパワーシステム講演会報告	…金 俊完	6	317

【展望】

60周年を迎えての抱負・学会への期待	…藤原 達也	2	88
--------------------	--------	---	----

【会告】

共催・協賛行事のお知らせ		1	
平成27年度 ウィンターセミナーのお知らせ「フルードパワー技術を支える要素技術」		1	28
平成28年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」のお知らせ		1	28
第10回JFPS国際シンポジウムのお知らせ		1	44
その他		1	42,43,45,46
平成28年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」のお知らせ		2	97
平成28年度 第四回日中国際共同ワークショップのお知らせThe 4th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power—Innovative Key Technology on Fluid Power—		2	97
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会共催 平成28年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ		2	97
平成28年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」のお知らせ		2	98
共催・協賛行事のお知らせ		2	98
フルードパワー道場11「トライボロジーの基礎知識（2）」開催のお知らせ		2	99
その他		2	96,99,100
平成28年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」のお知らせ		3	143
平成28年度 第四回日中国際共同ワークショップのお知らせThe 4th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power—Innovative Key Technology on Fluid Power—		3	143
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会共催 平成28年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ		3	143
共催・協賛行事のお知らせ		3	146
永年会員のお知らせ		3	146
その他		3	142,146,147,148
第35期 通常総会終了		4	197
平成28年度 特別教育講座のお知らせ「油圧システムのモデリングの基礎をつかむ—ブロック線図とパワーフロー—		4	198
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会共催 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会のお知らせ		4	198
平成28年度 オートムセミナー「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」のお知らせ		4	198
共催・協賛行事のお知らせ		4	199
その他		4	196,201,202
日本フルードパワーシステム学会 平成28年度受賞候補者募集		5	255

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会（JFPS）フェロー認定者推薦のお願い	5	256	Professor Dr.-Ing Wolfgang Backé ご逝去のお知らせ	6	320
お詫びと訂正	5	256	平成28年度 オータムセミナー 「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」	6	323
共催・協賛行事のお知らせ	5	258	開催のお知らせ		
平成28年度 オータムセミナー 「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」	5	259	論文集の掲載形態の変更について	6	323
開催のお知らせ			共催・協賛行事のお知らせ	6	325
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会共催 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会（青森）のお知らせ	5	259	書籍案内 オーム社刊「油圧・空気圧回路～書き方&設計の基礎教本」	6	326
その他	5	253,254,257,260	資料一覧	6	327
			フルードパワーシステム第47巻総目次	6	331
			その他	6	319,324,334

編集室

次号予告

—特集「柔軟構造のフルードパワーアクチュエータ」—

〔挨拶〕 年頭の挨拶 年頭にあって	眞田 一志	小山 紀 肥田 一雄 塚越 秀行 則次 俊郎
〔巻頭言〕「柔軟構造のフルードパワーアクチュエータ」発刊にあたって		
〔総論〕 柔軟構造のフルードパワーアクチュエータの展望		
〔解説〕 圧力駆動バルーンアクチュエータを利用したマイクロフィンガーによる培養細胞組織の把持・解放操作		小西 聡
液圧アクチュエータを用いた内視鏡用径可変フード	松永 忠雄	芳賀 洋一
フレキシブルERバルブを用いたマイクログリッパ		吉田 和弘
気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ	鈴木 康一	和田 晃
螺旋状巻き付き空気圧駆動ソフトアクチュエータ		西岡 靖貴
タコの吸盤を参考にした空気圧駆動による投擲型柔軟吸着体：Anchor Ball		塚越 秀行
〔会議報告〕 ERMR2016におけるフルードパワー技術の研究動向		竹村研治郎
〔教室〕 入門講座「エネルギー工学」第三回：続・火力発電と環境対策・地球温暖化		江間 敏
〔トピックス〕 特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム・・・特許文献を見る3		木原 和幸
レンズ風車とそのクラスタ化による新しい風車システム—マルチレンズ風車の開発—		大屋 裕二
フルードパワー設計者のためのグローバルスタンダード 第1回「ISO12100」機械類の安全性		
—設計者のための一般原則— リスクアセスメント及びリスク低減		北村 剛
インド駐在員日記		松崎 顕介
〔研究室紹介〕 東北大学中野研究室		中野 政身

平成28年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 塚越 秀行 (東京工業大学)	委員 中野 政身 (東北大学)
副委員長 村松 久巳 (沼津工業高等専門学校)	中山 晃 (日立建機(株))
委員 伊藤 雅則 (東京海洋大学)	成田 晋 (KYB(株))
上野 朝嗣 (CKD(株))	藤田 壽憲 (東京電機大学)
内堀 晃彦 (宇部工業高等専門学校)	丸田 和弘 (株コマツ)
加藤 猛美 (株コガネイ)	柳田 秀記 (豊橋技術科学大学)
加藤 友規 (福岡工業大学)	山田 真の介 (株TAIYO)
北村 剛 (油研工業(株))	山田 宏尚 (岐阜大学)
木原 和幸 (財工業所有権協力センター)	吉満 俊拓 (神奈川工科大学)
栗林 直樹 (川崎重工業)	担当理事 伊藤 和巳 (KYB(株))
五嶋 裕之 (機械振興協会)	編集事務局 藤谷 秀次 (学会事務局)
佐藤 恭一 (横浜国立大学)	竹内 留美 (勝美印刷(株))
妹尾 満 (SMC(株))	

(あいうえお 順)

会告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写してください。ただし(公社)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。したがって、社外頒布用の複写は許諾が必要です。

権利委託先：(一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL：03-3475-5618 FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接本会へご連絡ください。

日本フルードパワーシステム学会論文集

第47巻, 第6号 (2016)

平成28年11月

目 次

研究論文

1. 微粒子励振型流量制御弁による油圧制御
浮田貴宏, 鈴森康一, 難波江裕之, 神田岳文, 大藤翔輝 39

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.47, No.6

November 2016

Contents

Paper

1. Hydraulic control by flow control valve using particle excitation

Takahiro UKIDA, Koichi SUZUMORI, Hiroyuki NABAE,

Takefumi KANDA, Shoki OFUJI 39

Published by
The Japan Fluid Power System Society
c/o Kikaishinko Building
3-5-22 Shiba-koen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011, Japan

研究論文

微粒子励振型流量制御弁による油圧制御*

浮田 貴宏**, 鈴木 康一**, 難波江 裕之**
神田 岳文***, 大藤 翔輝***

Hydraulic control by flow control valve using particle excitation

Takahiro UKIDA, Koichi SUZUMORI, Hiroyuki NABAE,
Takefumi KANDA, Shoki OFUJI

In this paper, we report on hydraulic characteristics of the particle excitation control valve, which was originally developed for a flow rate control of pneumatic actuators. The orifices are opened and closed with particles excited by the vibration of the orifice plate and the fluid force. This results in more simple and compact structure, and higher flow rate-to-weight ratio than conventional pneumatic valves. Because the traditional hydraulic valves are bulky and heavy, the purpose of this study is the development of a small and lightweight hydraulic valve by applying the working principle of this particle excitation valve to hydraulics. We have focused on two characteristics affected by changing the working fluid from air to oil. One is the vibration of the orifice plate, and the other is the movement of the particles. As a result, it is found that the inertia of the working fluid reduces the vibration velocity of the orifice plate to 24%, and the viscosity of the working fluid raises the operating voltage of the valve to 167% by the influence on the movement of the particles. In addition, when silicone oils are used as working fluid, whose kinematic viscosity values are 1mm²/s, 2mm²/s, and 3mm²/s, maximum volumetric flow rate of the prototype valve are 891ml/min, 887ml/min, and 838ml/min, respectively. These experimental results indicate the potential of the proposed valve for hydraulics.

Key words : Proportional Control Valve, Hydraulics, Flow Control, Piezoelectric Element, Micro-Mechanism

1. 緒 言

BigDogに代表される油圧アクチュエータで構成されたロボットには、電磁アクチュエータで構成されたロボットと比較して、外部環境からの衝撃に強く、大きな力を発生できるタフなロボットが出来る可能性がある^{1)~3)}。これらの利点を有した油圧アクチュエータで構成されたロボットに電磁アクチュエータで構成されたロボットと同様の多自由度の動作を行わせる場合、多数の油圧サーボ弁をロボットに搭載することが必要となる。

航空機などに使用されている小型の油圧サーボ弁は、その大きさと重量の点でロボットに適している。しかし、小型の油圧サーボ弁は高額であるため、多自由度を持つ油圧ロボットの開発における問題点となる。そこで、油圧ロボットに搭載可能な大きさと単純な構造を持つ安価な小型

の油圧サーボ弁の開発を本研究の目標としている。

著者の一部は以前に空気圧用の流量制御弁を開発している^{4)~7)}。この流量制御弁は圧電素子によって流路内の微粒子を励振し、これらによるオリフィスの開閉を利用して流量制御を行う。これにより単純かつ小型な構造となり、一般的な空気圧用の流量制御弁と比較して、高い質量流量比を実現している。この流量制御弁の動作原理を利用して、新たな油圧サーボ弁を開発することにより、より安価かつ小型・軽量の油圧サーボ弁の開発が期待される。しかし、空気圧制御弁として蓄積してきた従来の設計手法をそのまま油の制御に適用しても制御弁は動作しない。これは、作動流体の慣性力や微粒子に作用する粘性抵抗の増加などの作動流体の物性の変化が、制御弁の動きを阻害したことが原因である。

本論文では作動流体の密度や粘性が影響を与える要素として、オリフィス板の振動速度および微粒子が作動流体から受ける抗力に着目し、数値解析および実験により影響を明らかにする。また、試作した流量制御弁について、複数の動粘度のシリコンオイルを作動流体とした動作実験を行い、流量制御弁の動作条件およびその特性を明らかにする。

*平成28年4月30日 原稿受付

**東京工業大学

(所在地：東京都目黒区大岡山2-12-1)

(E-mail: ukidatab@mtitech.ac.jp)

***岡山大学大学院自然科学研究科

(所在地：岡山県岡山市北区津島中3-1-1)

2. 主な記号

- F_D : 作動流体から微粒子が受ける抗力
 F_I : 微粒子の慣性力
 F_P : 圧力による微粒子のオリフィスへの押付力
 P : 供給圧力 (ゲージ圧)
 μ : 作動流体の絶対粘度
 ν : 作動流体の動粘度
 ρ : 作動流体の密度

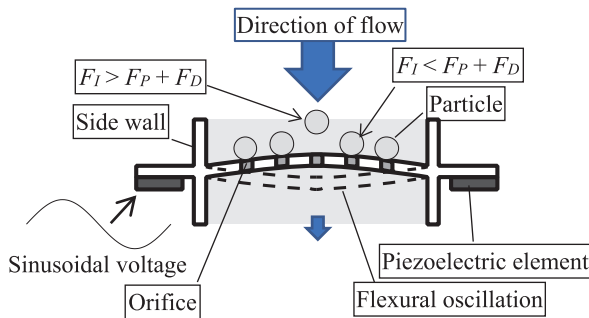


Fig. 1 Working principle of the valve using particle excitation.

Table 1 Silicone oils used in this study⁸⁾.

No.	ν [mm ² /s]	μ [$\times 10^{-6}$ Pa·s]	ρ [kg/m ³]	Speed of sound [m/s]
#1	1	818	818	901.3
#2	2	1,700	850	—
#3	3	2,610	869	—
#4	4	3,540	884	—
#5	5	4,480	897	—
#6	10	9,350	935	966.5
#7	30	28,700	955	—

3. 微粒子励振型流量制御弁の構造

Fig. 1に微粒子励振型流量制御弁の動作原理を示す⁴⁾。この流量制御弁は複数のオリフィスが配置されたオリフィス板、微粒子、圧電素子で構成される。この流量制御弁は非動作時、作動流体の圧力が微粒子をオリフィスに押し付け、流体の流れを止める。この微粒子がオリフィスから離れることで流体は流れ、オリフィスから離れる微粒子の数の制御により、流量を変化させることができる。圧電素子によってオリフィス板が共振すると、微粒子はその慣性力によってオリフィス板から飛び跳ね、それによってオリフィスが開口する。微粒子がオリフィス板から離れるためには、微粒子の慣性力が、流体圧による押し付け力や作動流体の粘性や慣性による抗力を超える必要がある。一般的なISO VG32の作動油と空気を比較した場合、油の絶対粘度は空気の約1,500倍、密度は約700倍である。油圧制御を実現するには、これらが制御弁の動きに与える影響を明らかにす

る必要がある。そこで、本論文ではTable 1に示す動粘度の異なる7種のシリコンオイルを用いて、その影響を検証する。なおTable 1に示す#2から#5は、#1および#6のシリコンオイルの混合比により、生成される。

今回実験に用いた流量制御弁の主な仕様とオリフィス板の形状をそれぞれFig. 2とTable 2に示す。流量制御弁の寸法は外径10mm、高さ9mm、質量25gである。構造部の材質および駆動に用いる圧電素子には、それぞれSUS-304および厚さ0.2mmのリング状のチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) を使用する。この圧電素子を複数積層し、オリフィス板にナットで固定した。オリフィスの配置及びオリフィス径については、これまで空気圧制御の弁で実績のある設計を利用した⁵⁾⁻⁷⁾。

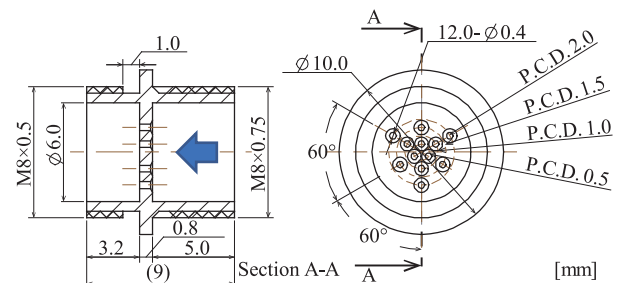


Fig. 2 Schematics of the orifice plate. The arrow in left figure indicates the direction of flow.

Table 2 Specifications of the flow control valve.

Item	Value
Diameter [mm]	10.0
Height [mm]	9.0
Weight [g]	25
Number of orifices	12
Orifice diameter [mm]	0.4
Number of particles	12
Particle diameter [mm]	0.8

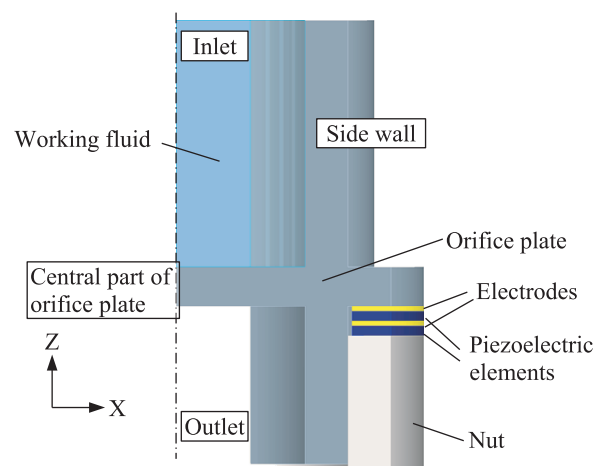


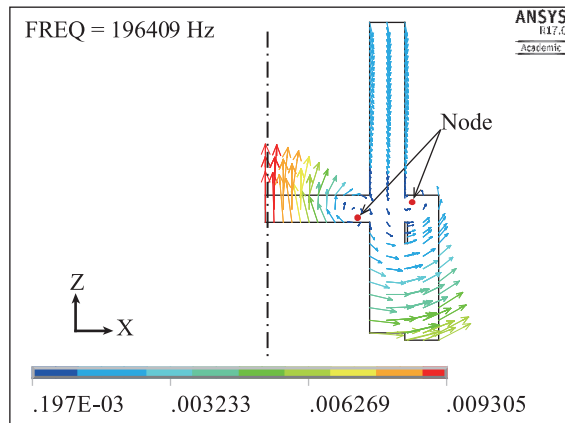
Fig. 3 Quarter model of the valve for FEM analysis.

4. オリフィス板の振動特性

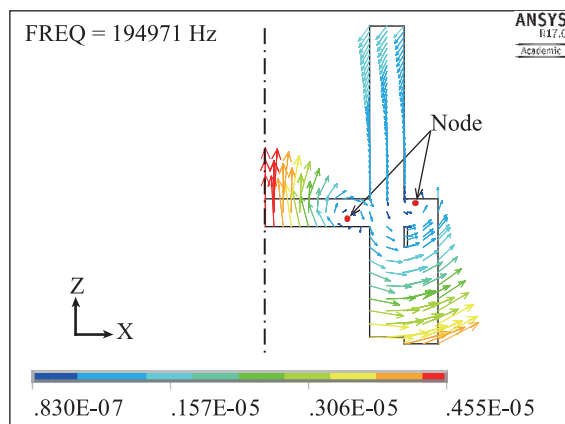
ここでは作動流体を空気から油に変更することを中心に、各種動作条件のオリフィス板振動特性への影響を述べる。

4.1 有限要素法によるモーダル解析

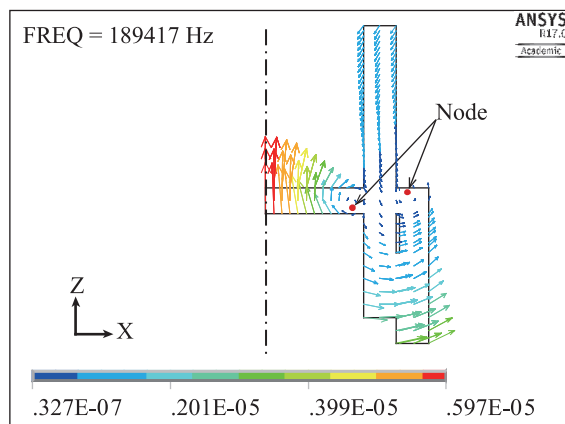
本流量制御弁はたわみ方向に共振させたオリフィス板により、微粒子に慣性力を発生させ、微粒子をオリフィスから離れさせることで動作する。そのため、作動流体を油に



(a) Working fluid : Air, Number of PZT : 2



(b) Working fluid : #1, Number of PZT : 2



(c) Working fluid : #1, Number of PZT : 4

Fig. 4 Analytical results of vibrational mode, for three typical conditions.

するとその密度および粘性の影響で、空気圧の場合よりも大きな振動エネルギーが必要となる。また、より大きな振動エネルギーを得るためには圧電素子の積層数を増加させることになるが、このことは、一般に制御弁の共振周波数の低下を招く。そこで振動モードとその共振周波数への作動流体の慣性および圧電素子の枚数が与える影響をモーダル解析により明らかにした。解析には有限要素法解析ソフトANSYSを使用した。この解析では、共振周波数への影響が最も大きいと考えられる流体の慣性力に着目し、印加圧力および作動流体の粘性は考慮しない。解析に用いた1/4モデルをFig. 3に示す。作動流体は音響流体要素としてモデル化し、全体のメッシュを20節点の6面体により分割した。境界条件はX-Z平面およびY-Z平面を対称とした。圧電素子を2枚積層したモデルは、節点数が21,517、圧電素子を4枚積層したモデルは、節点数が22,032となる。音響流体要素として材料特性には空気と#1のシリコンオイルの音速と密度の値をそれぞれ与えた。

オリフィス板の中央がたわみ方向に大きく振動するモードの解析結果について、X-Z平面上にある節点の変位ベクトルをFig. 4に示す。2点の節を中心に回転する振動モードとなり、その共振周波数は作動流体を空気から油に変更することにより1.4 kHz低下し (Fig. 4(a)と(b)の比較)、圧電素子の積層数を2枚から4枚に変更することにより5.6 kHz低下した (Fig. 4(b)と(c)の比較)。この結果から、作動流体の変更および圧電素子の枚数変更による共振周波数の変化は3%以下であり、振動モードおよび共振周波数への影響は、少ないことが確認できた。

4.2 実験による振動特性の解析

次にオリフィス板を複数の条件で振動させ、それぞれの条件が振動特性に与える影響を実験により明らかにした。実験条件をTable 3に示す。振動の様子を確認するため、レーザードップラー振動計 (Polytech社製OFV-3001) および周波数特性分析器 (NF社製FRA-5095) を用い、オリフィス板中央 (Fig. 2右図の中央) の振動速度を測定した。一定の圧力を印加した状態で実験を行うためにオリフィスをもたない制御弁を試作し、これをアルミニウム製のブロックに固定した。なお、拘束状態の変化を低減するため、アルミニウム製のブロックと固定具の間に緩衝材を配置し

Table 3 Experimental conditions.

Item	Value
Working fluid	Air, Silicone oil
Impressed pressure [MPa]	0.1, 0.3, 0.5
Driving voltage [V_{pp}]	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Kinematic viscosity of silicone oil [mm^2/s]	1, 10, 30
Number of piezoelectric elements	2, 4
Fluid temperature	Ambient temperature ($18 \pm 2^\circ\text{C}$)

た. 下記 i) から v) に沿って, それぞれの条件の振動特性への影響を述べる.

i) 作動流体の粘性と密度の影響

作動流体として空気および#1のシリコンオイルを用いた周波数応答の測定結果をそれぞれFig. 5(a)に示す. 測定条件は印加電圧10V_{p-p}, 印加圧力0.5MPa, 圧電素子の積層数2枚とした. 測定する周波数域はモダル解析の結果より共振点があると推測される100kHzから200kHzとした. 作動流体として空気を用いた結果では, 特に大きな共振点が137.1kHz, 179.8kHz, 190.8kHzの3箇所にて測定された. 上記のモダル解析で示したとおり, 作動流体の変更による共振点のずれは1%以下であるので, シリコンオイルを用いた場合の共振点130.2kHz, 177.3kHz, 190.5kHzにおける振動モードは, 空気をを用いた場合の共振点137.1kHz, 179.8kHz, 190.8kHzに対応することがわかる. そこでシリコンオイルを用いた場合について, 対応する振動モードにおける最大振動速度を空気の場合と比較すると, 130.2kHzおよび190.5kHzの共振点では振動速度が90%以上低下した. もっとも減衰が小さかった177.3kHz付近の共振点について比較した結果をTable 4に示す. 作動流体を空気からシリコンオイルに変更することにより, 振動速度とQ値はそれぞれ76%と72%低下した. また共振周波数は2.5kHz低下した.

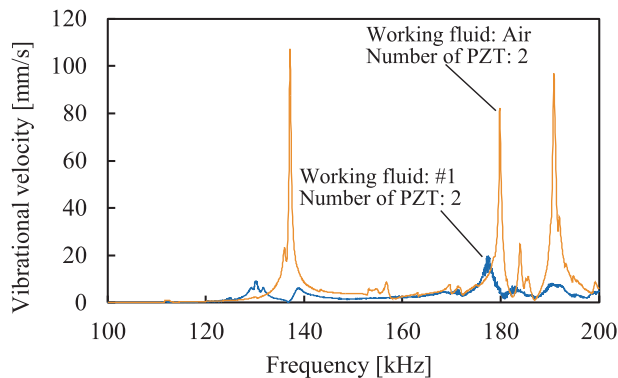
ii) 圧電素子の枚数の影響

i) で示したシリコンオイルを用いた条件から, 圧電素子の積層数を4枚に変更し, その影響をみた. 周波数応答の測定結果をFig. 5(b)に示す. 特に大きな共振点が130.3kHz, 175.1kHz, 189.7kHzの3箇所にて確認された. モダル解析の結果より, 圧電素子の積層数による共振周波数への影響は3%以下であるので, 最も振動速度が大きかった175.1kHzの共振点は, 圧電素子2枚の共振点177.3kHzと同じ振動モードと考えられる. そこで両者を比較した結果をTable 4に示す. 圧電素子の積層数を2枚から4枚に変更することにより, 振動速度は217%上昇したが, Q値は25%低下した. また共振周波数は2.2kHz低下した.

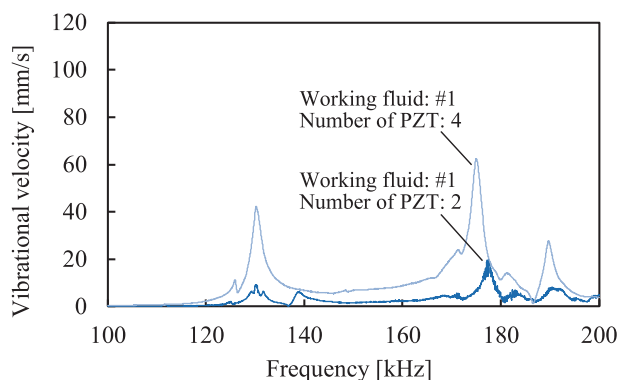
以降の測定ではTable 4で示した共振周波数周辺について述べる.

Table 4 Measurement results of resonant frequency, vibrational velocity, and quality factor in each setup.

Setups			
Working fluid	Air	Silicone oil: # 1 in Table 1	
Number of piezoelectric elements	2	2	4
Results			
Resonant frequency [kHz]	1798	1773	175.1
Vibrational velocity [mm/s]	822	197	624
Quality factor	244	69	52



(a) Influence of the working fluid.



(b) Influence of the number of PZT.

Fig. 5 Vibrational velocity at the central part of the orifice plate vs. driving frequency.

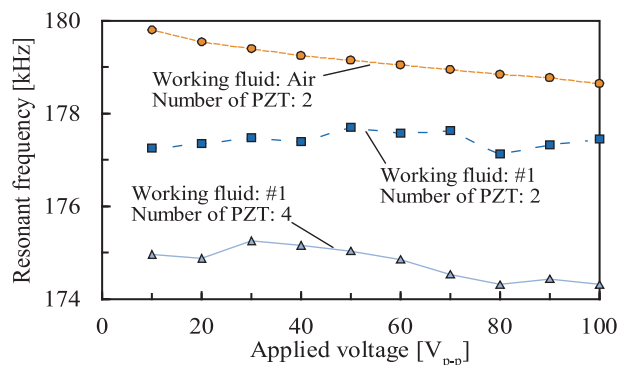


Fig. 6 Relationship between resonant frequency and applied voltage.

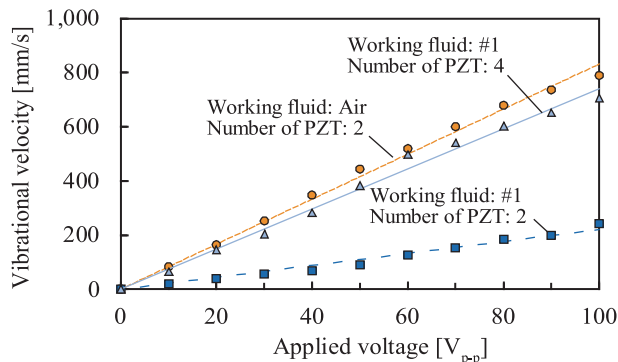


Fig. 7 Relationship between vibrational velocity at the central part of orifice plate and the applied voltage.

iii) 印加電圧の影響

Table 4に示す3つの条件について、印加電圧と共振周波数およびその振動速度の関係をFig. 6およびFig. 7に示す。作動流体として空気を用いた場合、印加電圧の増加により共振周波数は低下し、印加電圧10V_{pp}と100V_{pp}の場合を比較すると12kHz低下した。また、作動流体としてシリコンオイルを用いた場合、圧電素子の枚数に関わらず印加電圧の増加に対して共振周波数は上下し、その差は最大0.9kHzであった。印加電圧と振動速度の関係は全ての条件について線形であった。

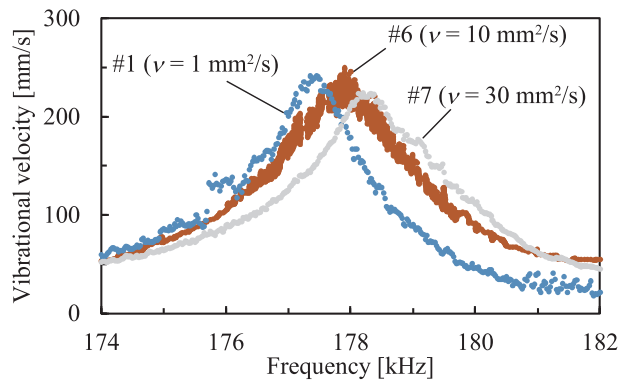


Fig. 8 Relationship between vibrational velocity, kinematic viscosity and driving frequency around resonant frequency.

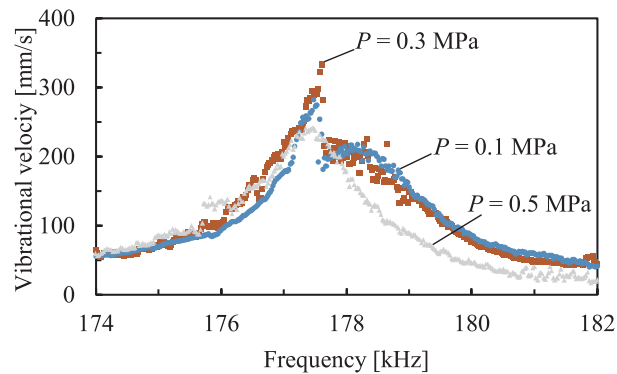


Fig. 9 Relationship between vibrational velocity, impressed pressure and driving frequency around resonant frequency.

iv) 動粘度の影響

#1, #6, #7のシリコンオイルを用いて作動流体の動粘度の影響を調べた。周波数応答の測定結果をFig. 8に示す。印加電圧100V_{pp}、印加圧力0.5MPa、圧電素子の積層数2枚とした。測定の結果、動粘度の増加により共振周波数は上昇し、動粘度を1mm²/sから30mm²/sに増加させると共振周波数は0.7kHz上昇した。一方で振動速度とQ値は、動粘度が10mm²/sおよび30mm²/sのとき、それぞれ最大値と最小値を取った。最大値と最小値の差は、振動速度では10%、Q値では15%であった。

v) 印加圧力の影響

作動流体の圧力を変化させた周波数応答の測定結果をFig. 9に示す。測定の条件は、作動流体として#1のシリコンオイルを用い、印加電圧100V_{pp}、圧電素子の積層数2枚とした。測定の結果、共振周波数の変化は100Hz以下とな

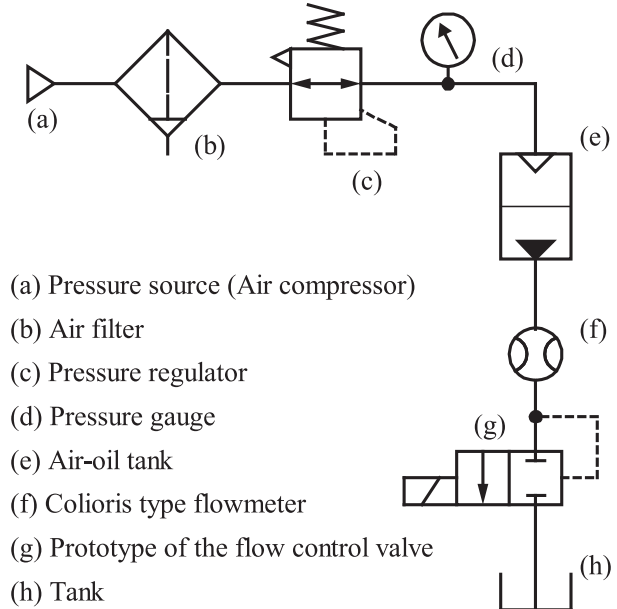


Fig. 10 Schematics of experimental setup.

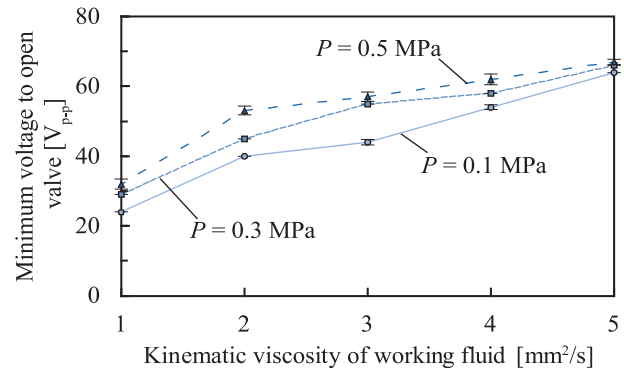


Fig. 11 Relationship between minimum voltage to open valve, impressed pressure and kinematic viscosity of the working fluid. Error bars show standard deviation.

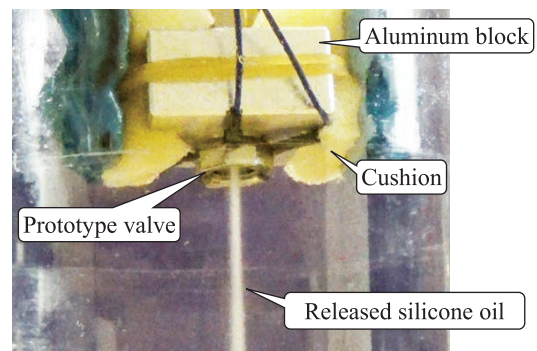


Fig. 12 Driving state of the prototype valve.

り、印加圧力と振動速度の関係に一貫性はなかった。振動速度は印加圧力が0.3MPaと0.5MPaのとき、それぞれ最大値と最小値を取り、その差は19%であった。

5. 実験による微粒子の挙動解析

微粒子はオリフィス板から飛び跳ねる際、流体による押し付け力や作動流体の粘性や慣性による抗力を受ける。ここでは流量制御弁のオリフィスが開口する印加電圧、作動流体の動粘度、印加圧力の関係を測定し、作動流体の粘性と圧力の増加による微粒子が受ける力の影響を明らかにする。

実験に使用した油圧回路をFig. 10に示す。流量制御弁は引き続きアルミニウム製ブロックに固定する。なお、圧電素子を2枚積層した流量制御弁は、全ての条件において動作しなかった。そのため、以降の実験では圧電素子を4枚積層した制御弁を用いた。また、シリコンオイルの温度はシリコンオイルの動粘度が規定された25℃とした。駆動周波数は170kHzから190kHzの範囲にて調整した結果、最もよく動作する180kHzを使用した。この周波数は42節で示した共振周波数より5kHz高い数値であるが、オリフィスの有無による影響が要因と考えられる。

作動流体として#1から#5のシリコンオイルを用い、オリフィスが開口した印加電圧をFig. 11に示す。印加圧力は0.1MPa、0.3MPa、0.5MPaとした。縦軸の最低動作電圧は開口に必要な最も低い動作電圧を示し、流量が5 ml/minを超えた場合、制御弁が安定して開口したと判定した。実験の結果、動粘度および印加圧力の増加とともに最低動作電圧は増加し、最低動作電圧の最小値と最大値はそれぞれ24V_{p-p}、67V_{p-p}であった。動作の様子をFig. 12に示す。

印加圧力が0.1MPaのとき、動粘度を1 ml/sから5 ml/sに増加させると、オリフィスの開口に必要な最低動作電圧は167%増加した。

42節に示した通り、印加電圧とオリフィス板の振動速度は線形であること、また、作動流体の圧力と粘性がオリフィス板の振動速度へ与える影響は小さいことがわかっていく。したがって、Fig. 11に見られるような、作動油の圧力および動粘度の増加に伴う最低動作電圧の増加は、オリフィス板の振動速度低下によるものではなく、作動油から微粒子が受ける力（すなわち油圧が微粒子をオリフィスに押し付ける力、および作動油の慣性と粘性による抗力）により、微粒子の運動が妨げられることが原因と言える。

6. 流量特性の評価実験

印加電圧に対する本制御弁の流量特性を測定した。実験は5章と同じ実験システムで行った。また、作動流体として温度25℃の#1から#3のシリコンオイルを用い、印加圧力0.1MPaから0.5MPaの範囲について行った。実験結果をFig. 13に示す。

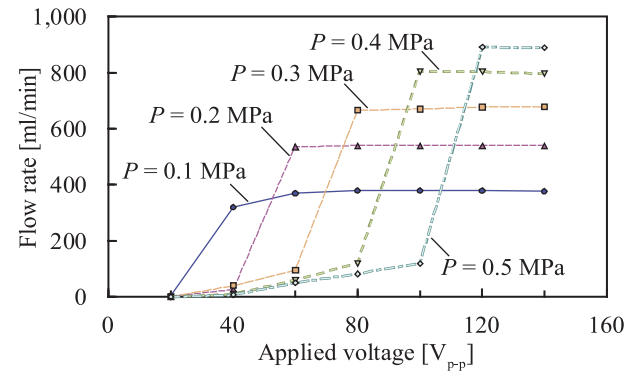
印加圧力および印加電圧の増加により流量は上昇し、印

加圧力が0.5MPa、印加電圧が140V_{p-p}のとき、それぞれの流体に対する最大流量891ml/min（#1, $v = 1$ ml/s）、887ml/min（#2, $v = 2$ ml/s）、838ml/min（#3, $v = 3$ ml/s）を示した。

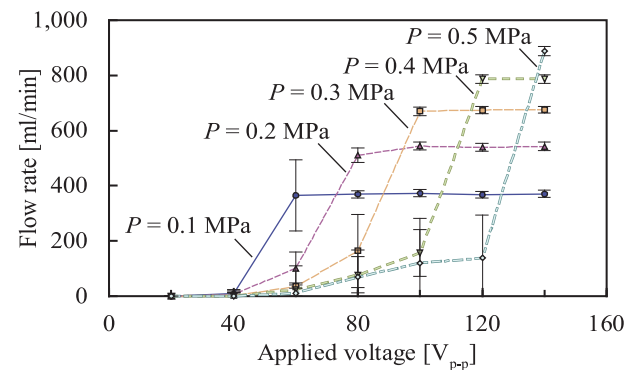
次に動粘度、印加圧力、最大流量の関係をFig. 14に示す。各印加圧力について動粘度を1 ml/sから2 ml/s、2 ml/sから3 ml/sに増加させた場合、最大流量はそれぞれ最大1.4%、6.1%低下した。

Fig. 13に示すように、印加電圧上昇に伴う流量の変化は以下の3段階が見られることがわかった。

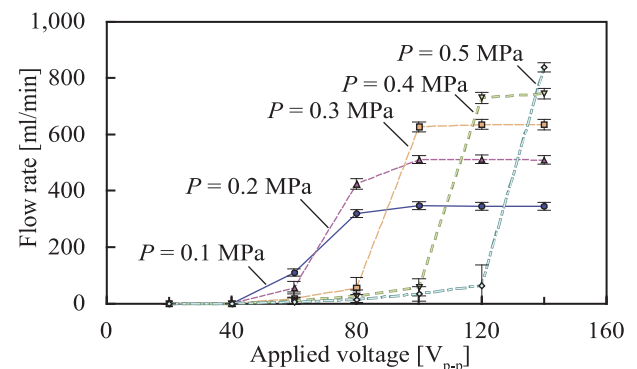
第1段階は、比較的印加電圧が低い場合で、電圧変化に



(a) Silicone oil of #1 ($v = 1$ ml/s)



(b) Silicone oil of #2 ($v = 2$ ml/s)



(c) Silicone oil of #3 ($v = 3$ ml/s)

Fig. 13 Relationship between volumetric flow rate, impressed pressure, and applied voltage. Error bars show standard deviation. Upper, middle, and lower figures show the results of different silicone oils (#1, #2, and #3 in Table 1, respectively).

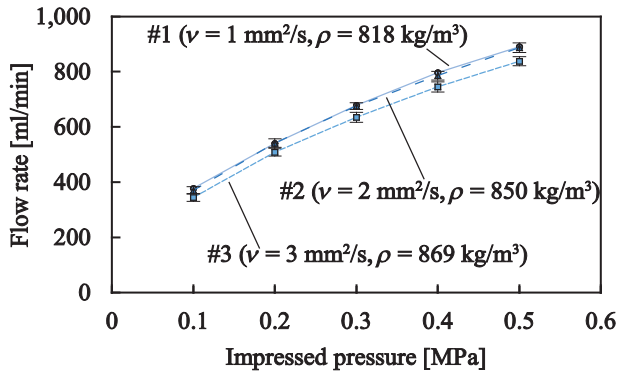


Fig. 14 Relationship between volumetric flow rate of the valve, kinematic viscosity, and impressed pressure, when applied voltage was $140V_{p-p}$. Error bars show standard deviation.

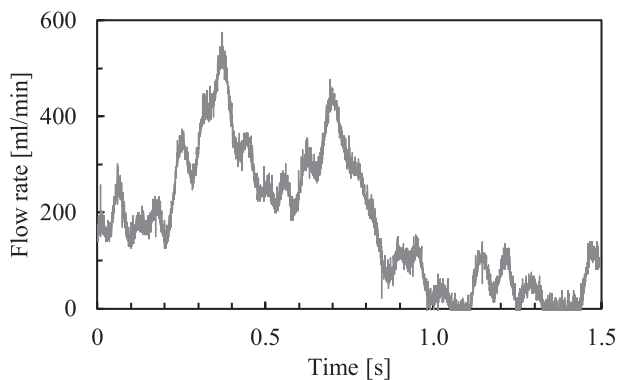


Fig. 15 Transition of flow rate, when the value of kinematic viscosity, impressed pressure, and applied voltage were $2 \text{ mm}^2/\text{s}$, 0.3MPa , and $80V_{p-p}$ respectively.

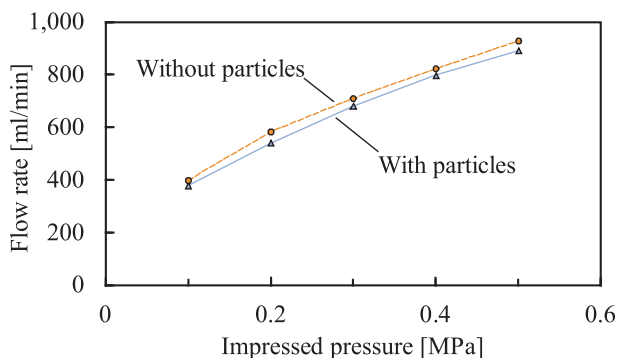


Fig. 16 Comparison between the flow rates with particles and without particles.

対して流量変化の割合が小さい段階である。特に印加圧力が高く、作動油粘度が高い場合に顕著に表れる。この段階では、微粒子はオリフィス近辺で連続して開閉を繰り返す状態と考えられる。オリフィス板の振動速度が小さい場合、微粒子は飛び跳ねた直後に作動流体から受ける力によってオリフィスに押し戻され、微粒子がオリフィス近辺から離れないため、流量が小さい。ただし、時間による流量の変動が小さく安定しているのが特徴である。

第2段階は、印加電圧上昇に伴い、低流量から大流量まで急激に遷移する間の段階である。この領域では流量が不安定で、印加圧力に対して流量を安定して連続的に制御するのは難しい。一例として、印加圧力 0.3MPa 、印加電圧 $80V_{p-p}$ 、作動流体として#2のシリコンオイルを用いたときの流量の時間変化をFig. 15に示す。平均流量は 164ml/min であるが、約1秒間の間に瞬間流量は最大 575ml/min 、最小 0ml/min と大きく変化する。その原因は、制御弁内における圧力変動により、微粒子の押し付け力が変化するためと考えられる。印加電圧をあげていくと、まずオリフィス板中央の微粒子が飛び跳ねるが、これに伴って制御弁内の流体が流出して弁内の圧力が低下する。制御弁内の圧力低下はその他の微粒子のオリフィスへの押し付け力を低下させ、微粒子はオリフィスから飛び跳ね瞬間流量が上昇する。一方、流量増加は微粒子をオリフィスに押し付ける作用を増大させる。このようなメカニズムで、この段階では流量の時間変動が大きく、動作が不安定であると考えている。

第3段階は、印加電圧上昇に対して流量が飽和する段階である。Fig. 16は、微粒子を入れない場合の流量特性と、微粒子を入れた状態での最大流量を比較した実験結果である。作動流体として#1のシリコンオイルを用いている。両者の差は小さく、最大流量となる第3段階では、十分強い微粒子励振により、微粒子がオリフィスから十分離れていることがわかる。

これら3つの段階が切り替わる電圧は、作動油の動粘度および印加圧力の増加に伴い上昇する。4.2節で示した通り、動粘度および印加圧力は、オリフィス板の振動速度に対して影響が小さいので、この現象は微粒子に作用する作動流体から受ける力によるものと考えられる。

7. 結 言

小型軽量で安価な油圧制御弁の実現を目指し、空気圧制御用に考案、開発された微粒子励振型流量制御弁の原理を油圧制御に適用するための基礎検討を構造数値解析と実験により行った。

今回の研究では、制御弁の構造や寸法は既報の空圧流量制御弁（外径 10mm 、長さ 9mm 、オリフィス数12、リング状圧電素子）を想定した、また作動流体としては、粘度調整のしやすさからシリコンオイル（動粘度 $1 \sim 30\text{mm}^2/\text{s}$ ）を想定して検討を進めた。このように限定的な検討ではあるが、以下の知見を得た。

まず、オリフィス板の振動特性に関して、

- 1) 作動油の使用に伴い、オリフィス板の振動速度は低下する。この主要因は、作動油の粘性によるものではなく、その質量によるものである。

作動油中の微粒子の挙動に関して、

- 2) 作動油の動粘度上昇により、オリフィス開口に必要な

印加電圧は上昇する。これは、オリフィス板の振動速度の低下によるものではなく、微粒子が作動油から受ける抗力によるものである。

以上より開発した制御弁に関して、

- 3) 試作した超小型油圧制御弁により、供給圧力が0.5MPaのとき、動粘度が1 mm²/sのシリコンオイルでは流量891ml/min、動粘度が3 mm²/sのものでは流量838ml/minをそれぞれ達成した。
- 4) 印加電圧上昇に伴う流量の変化は、1) 低流量段階、2) 急激遷移段階、3) 飽和段階の3段階が見られることがわかった。

今回の検討では、制御圧、作動油粘度は、まだ限定的ではあるが、それぞれの要因が明らかになり、微粒子励振型流量制御弁の原理を用いた超小型油圧制御弁実現の可能性を実証できたと考えている。

今後は、マッキベン型人工筋を想定した低圧油圧アクチュエータへの本制御弁の搭載研究を進めるとともに、高圧力、高粘度対応の油圧制御弁開発および表面張力等のその他の液体の物性が本制御弁に与える影響についても、研究を進める。

謝 辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参 考 文 献

- 1) Raibert, M, et al. : Bigdog, the Rough-Terrain Quadruped Robot, Proceedings of the 17th World Congress. Vol. 17, No. 1, (2008)
- 2) Semini, C, et al. : Design of HyQ-a Hydraulically and Electrically Actuated Quadruped Robot, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, vol. 225, No. 6, p. 831-849 (2011)
- 3) Jiaqi, Z, et al. : Trot gait design and CPG method for a quadruped robot, Journal of Bionic Engineering, vol. 11, No. 1, p. 18-25 (2014)
- 4) Hirooka, D, et al. : Flow control valve for pneumatic actuators using particle excitation by PZT vibrator, Sensors and Actuators A : Physical, vol. 155, No. 2, p. 285-289 (2009)
- 5) Hirooka, D, et al. : Design and evaluation of orifice arrangement for particle-excitation flow control valve, Sensors and Actuators A : Physical, vol. 171, No. 2, p. 283-291 (2011)
- 6) 廣岡大祐, 鈴森康一, 神田岳文 : 微粒子励振型空気流量制御弁の非線形補償による流量制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 43, No. 5, p. 117-121 (2012)
- 7) 廣岡大祐, 山口智実, 古城直道他 : 微粒子励振型流量制御弁を用いた空気圧シリンダの速度制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 46, No. 2, p. 7-13 (2015)
- 8) 信越化学工業株式会社 : シリコンオイル (KF-96) 性能試験結果

日本フルードパワーシステム学会論文集 総目次（第47巻）

【研究論文】

号 通し頁

気液相変化により駆動されるゴム 人工筋アクチュエータの製作 ...	加藤 友規 本多 駿太 程 明昭 櫻木 一樹 大野 学	1	1	油圧アームのオンライン物理パラ メータ同定 ...	松本 優司 酒井 悟	5	31
樹脂部品を用いた高圧対応ギヤボ ンプ ...	伊藤 貴廣 小泉 俊裕 御簾納雅記	2	7	微粒子励振型流量制御弁による油 圧制御 ...	浮田 貴宏 鈴森 康一 難波江裕之 神田 岳文 大藤 翔輝	6	39
DDVC方式燃料噴射装置による舶 用ディーゼルエンジンの噴射量制御 ...	眞田 一志	3	15				
統合動作解析によるガス遮断器用 油圧操作器の設計手法 ...	瀬戸 信治 橋本 裕明 海老澤大輔 小野寺 充	4	23				

〒105
|
0011 東京都港区芝公園三丁目五―三二 電話(〇三)三四三三―八四四一 FAX(〇三)三四三三―八四四二
編集兼発行人 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇―一〇―三一―三三六九〇

東京都文京区白山一―一三―七 アクア白山ビル五階
印刷所 勝美印刷株式会社