

日本フルードパワーシステム学会誌

# フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

# システム

Sep. 2024 Vol. 55 No. 5

特集「電動フルードパワー技術」



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「電動フルードパワー技術」

#### 【巻頭言】

「電動フルードパワー技術」発刊にあたって 中山 晃 202

#### 【解説】

空気圧駆動と電動駆動を併用した手術支援ロボット 只野耕太郎 203

融合型ハイブリッドリニアアクチュエータ 仲田 佳弘, 野田 智之 207

MR流体を用いたロータリーアクチュエータ 亀崎 允啓 212

電動油圧アクチュエータ 宮城 光 217

ロボット向け電油アクチュエータの開発 依田 聡 220

バッテリー駆動式ミニショベルの開発 高橋 究 224

#### 【会議報告】

IFK2024におけるフルードパワー関連技術の研究動向 小林 亘 227

#### 【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る一失敗を恐れずチャレンジを— 小島 一輝 230

#### 【企画行事】

2024年春季講演会併設セミナー「触覚技術と応用技術」 兵藤 訓一 233

#### 【会告】

2024年度オースタムセミナー「水圧技術の課題と現状」 229

会員移動 229

理事会・委員会報告 235

日本フルードパワーシステム学会 2024年度フェロー認定者推薦のお願い 236

日中若手研究者交流事業 招聘者募集のお知らせ	236
日本フルードパワーシステム学会 2024年度受賞候補者募集のお知らせ	236
英文論文誌の特集号（第12回フルードパワー国際シンポジウム広島2024）のお知らせ	237
お詫びと訂正	237
共催・協賛行事のお知らせ	238
一般社団法人 フルードパワーシステム学会賛助会員一覧表	239
次回予告	240

■表紙デザイン：浅賀 美希 勝美印刷㈱

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 “Electrified Fluid Power Technology”

**[Preface]**

On the Special Issue “Electrified Fluid Power Technology”	Akira NAKAYAMA	202
---	----------------	-----

**[Review]**

A Surgical Robot that Combines Pneumatic and Electric Drive	Kotaro TADANO	203
Fusion Hybrid Linear Actuator	Yoshihiro NAKATA, Tomoyuki NODA	207
Rotary Actuator using MR Fluids	Mitsuhiro KAMEZAKI	212
Electro-Hydraulic Actuator	Mitsuru MIYAGI	217
Development of Electro-hydraulic Actuators for Robots	Satoshi YORITA	220
Development of Battery-Powered Mini Excavator	Kiwamu TAKAHASHI	224

**[Conference Report]**

Research Trend on Fluid Power System in IFK2024	Wataru KOBAYASHI	227
---	------------------	-----

**[Topics]**

Senior talk to students —Take on Challenges without Fear of Failure—	Kazuki KOJIMA	230
--	---------------	-----

**[JFPS Activities]**

Seminar in Spring Conference 2024- Haptic Technology and Applied Technology	Norikazu HYODO	233
---	----------------	-----

**[JFPS News]**

	229, 235, 236, 237, 238, 239, 240
--	-----------------------------------

## 「電動フルードパワー技術」発刊にあたって

## 著者紹介



なか やま あきら  
中山 晃

日立建機株式会社  
〒300-0013 茨城県土浦市神立町650  
E-mail : a.nakayama.xo@hitachi-kenki.com

1991年日立建機株式会社入社，研究・開発本部  
先行開発センタ，油圧機器，油圧システムの研  
究開発に従事，日本フルードパワーシステム学  
会会員

地球温暖化抑制のため機械製品の省エネ化要求が高まっており，その対応技術の一つとして電動化があげられる。低騒音化，クリーン化など環境への影響も軽減でき，小型化，高応答化なども可能なため，フルードパワーを電動に置き換える機械も見受けられる一方，電動技術を取り込むことでフルードパワー技術の高度化，高機能化を図った事例も増えてきている。そこで，今回は「電動フルードパワー技術」特集として，電動技術とフルードパワー技術をうまく組み合わせた技術事例を紹介する。

只野耕太郎氏（リバーフィールド株式会社）には，空気圧と電動を併用した手術支援ロボットについて解説いただいた。ロボット手術では，ロボット操作における力覚フィードバックによって，過剰な力の抑制による生体組織の挫滅防止を図っている。力覚フィードバックには，空気圧シリンダの圧力情報を利用してロボット手先の反力とすることで，繊細な動きを可能としている。

仲田佳弘氏（電気通信大学）と野田智之氏（株式会社国際電気通信基礎研究所）には，「融合型ハイブリッドリニアアクチュエータ」について紹介していただいた。空気圧シリンダとリニアモータのハイブリッド化により，柔軟性と高応答化を図った。空気圧シリンダの非線形性や摩擦力は電磁力制御で補償することで高い制御性能を示している。

亀崎允啓氏（東京大学）には，「MR流体を用いたロータリーアクチュエータ」について解説いた

いた。MR流体はブレーキやクラッチとしての適用例はあるが，ロータリーアクチュエータとして高い出力特性と逆可動性を示しており，ロボットハンド等への応用が期待できる。

宮城光氏（カヤバ株式会社）には，「電動油圧アクチュエータ」について解説いただいた。電動モータ，油圧ポンプ，バルブ，シリンダ，タンクから構成される油圧システムを一つのパッケージに集約し，小型・軽量化したものである。電動油圧シリンダなので，ボールねじ式のような電動シリンダよりも耐衝撃性に優れている。

依田聡氏（川崎重工業株式会社）には，「ロボット向け電油アクチュエータ」について解説いただいた。これは前述と同じ油圧アクチュエータであるが，ロボット向けに高速と高推力の両立を図っている。電動ポンプを可変容量ポンプで構成し，低負荷時は大流量，高負荷時は小容量に制御される。これにより電動モータの大型化を回避し，小型軽量化を実現している。

高橋究氏（株式会社日立建機ティエラ）には，動力源をエンジンからバッテリー駆動化したミニショベルの開発について解説いただいた。車体への搭載上の制約から大容量バッテリーの採用が難しく，連続運転時間の減少が課題であったが，商用電源からバッテリー充電しながらも運転可能とすることで，長時間連続運転を可能とした。

以上，本特集で取り上げた電動フルードパワー技術は，いわゆるハイブリッド技術である。電動とフルードパワーは，各々の利点と欠点を互いに補完することが多く，相性が良い組み合わせといえる。今後も電動技術はフルードパワー技術の進化に寄与すると期待している。

最後に，ご多忙の中，寄稿いただきました執筆者の皆様には厚く御礼申し上げます。

（原稿受付：2024年8月9日）

解説

# 空気圧駆動と電動駆動を併用した手術支援ロボット

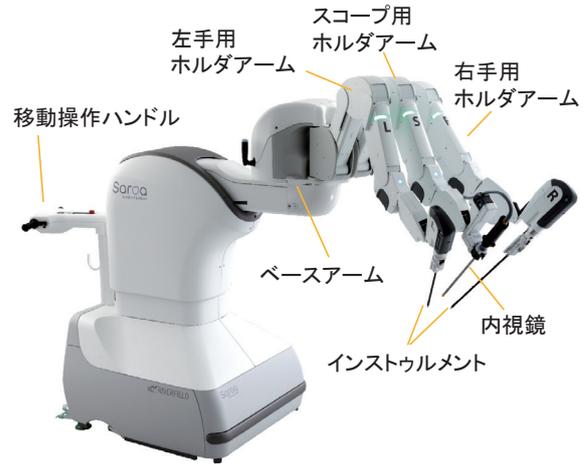
## 著者紹介



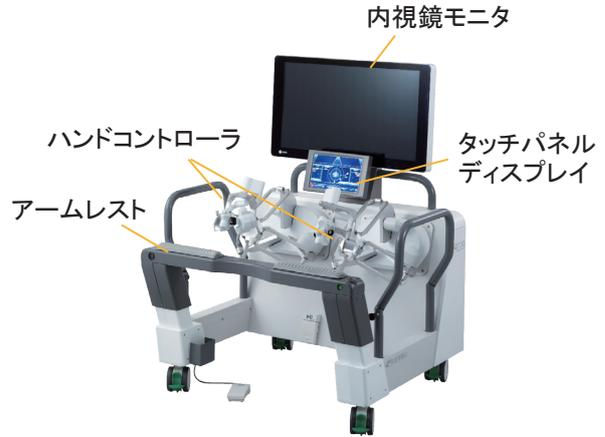
ただのこうたろう  
**只野 耕太郎**

リバーフィールド株式会社  
〒107-0052 東京都港区赤坂8-1-22  
NMF青山一丁目ビル4F  
E-mail: k-tadano.rfc@riverfieldinc.com

2007年9月東京工業大学大学院総合理工学研究科メカノマイクロ工学専攻博士後期課程修了。翌年4月東京工業大学助教。2013年6月准教授。2014年リバーフィールド株式会社取締役。2020年4月より代表取締役社長。日本機械学会、日本ロボット学会、日本フルードパワーシステム学会などの会員。博士（工学）。



(a) ペイシェントカート



(b) サージョンコンソール

図1 製品化した手術支援ロボット

## 1. はじめに

手術支援ロボットが臨床で使用され始めてから20年以上が経ち、国内外でその普及は拡大の一途をたどっている<sup>1)</sup>。従来のロボット手術では内視鏡からの視覚情報にのみに基づき手技を行っているが、より直感的で安全な作業のために、手術中に生じる反力の力覚提示が望まれている。力覚フィードバックにより、過剰な力の抑制による生体組織の挫滅防止や、ラーニングカーブの短縮などが期待されている。

一方、力覚フィードバックを実現するには、手技中の反力を検出する必要がある。反力を計測するためには力を受ける部位近傍に力センサを実装することが一般的であるが、手術支援ロボットの手先は、洗浄、滅菌、エネルギーデバイスとの併用など実運用の考慮が必要であり、その観点から力センサの取り付けは望ましくない。

著者らは、患者体内に進入するロボット手先の関節にバックドライバビリティの高い空気圧駆動を採用することで、力センサなしに空気の圧力値から外力を検出できる手術支援ロボットシステムの開発を行ってきた<sup>2)3)</sup>。2014年に本システムの実用化を目指して大学発スタートアップを設立し、長きに渡る製品化に向けた活動を経て、2023年に高度管理医療機器とし薬事承認を得た。製品化したロボットシステムは、その関節の駆動に電動駆動も併用しており、本稿では、主要な各構成部をその駆動方式に焦点を当てて紹介する。

## 2. 製品化した手術支援ロボット

### 2.1 全体概要

製品化した手術支援ロボットの全体外観を図1に示す。本システムは、手術台の脇に配置され患者体内で手技を行うペイシェントカート（図1(a)）とこれを離れた位置から操作するためのサージョンコンソール（図1(b)）から構成される。ペイシェントカートにはホルダアームと呼ぶ3本のロボットアームが備え付けられており、そのうち中央のアームに

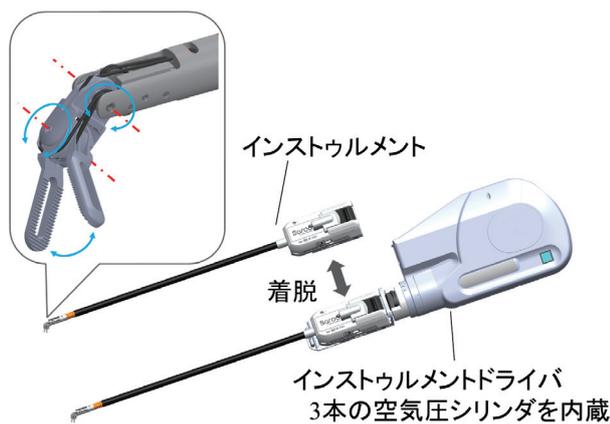


図2 インストゥルメントとインストゥルメントドライバ

は内視鏡が取り付けられ術者の目の役割を担う。左右のアームにはロボットのエンドエフェクタに相当するインストゥルメントが装着され、術者の両手として患者の腹腔内に進入する。これらを、術者がサージョンコンソールのハンドコントローラを介して操作し、手術手技を行う。

## 2.2 インストゥルメント

インストゥルメントは、図2に示すように、その先端に把持動作と屈曲を含む3自由度を有している。これらの関節はすべて空気圧駆動としており、その動力は根元側の駆動子から入力され、ワイヤを介して伝達される。また、ロボットアーム本体側のインストゥルメントドライバと着脱可能な構造となっており、インストゥルメント側にはアクチュエータやセンサなどの要素は一切含まない。これにより、機能や先端形状の異なる別のインストゥルメントへ術中に素早く交換できるだけでなく、術前の丸洗い洗浄およびオートクレーブ滅菌が可能となる。

インストゥルメントドライバには3本の空気圧シリンダや位置センサ等が内蔵されており、装着されたインストゥルメントの駆動子を位置制御する。インストゥルメント先端が受ける反力は、図3のように空気圧シリンダの高いバックドライバビリティを利用して圧力情報から推定する。

このように、空気圧シリンダのバックドライバビリティを利用してインストゥルメント先端の外力を推定するにはインストゥルメント自体のバックドライバビリティも十分に高い必要がある。すなわちワイヤ動力伝達における摩擦や曲げによる抵抗を極力小さくすることが重要であるが、一方で、動力伝達の剛性を高めるためにワイヤの初期張力を高くする必要もある。さらには絶縁性や気腹ガスに対するシール性の維持も求められる中で、これらを同時に実現することは容易ではないが、小型ベアリングの実装やワイヤの取り回し経路の工夫などによって両

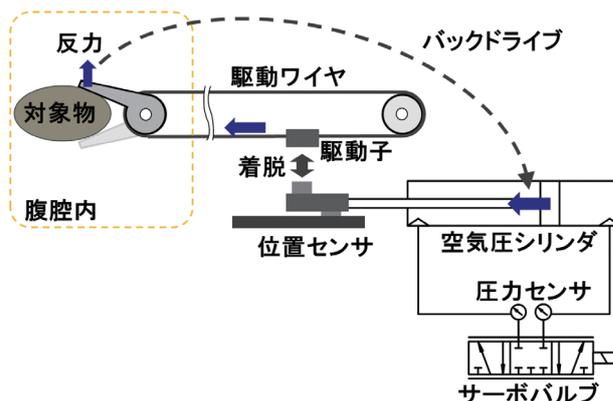


図3 空気圧シリンダのバックドライバビリティを用いた外力検出

立を図っている。

また、一部を除く各インストゥルメントは、後端部に設けられた電極を介して外部の高周波電流発生装置と接続することができ、モノポーラやバイポーラといったいわゆる電気メスとしての機能も有している。バックドライバビリティを利用した外力検出では電氣的な力覚センサが不要であるため、高周波電流による干渉ノイズの影響を受ける心配がない。

インストゥルメントドライバは、インストゥルメント先端の並進に伴って大きく移動するが、慣性力の低減や周辺との衝突干渉をできるだけ避けるためにも軽量かつコンパクトであることが重要である。アクチュエータとして空気圧シリンダを採用することで、その軽量さに加え減速機構も不要となり、軽量コンパクトさと高いバックドライバビリティを両立することができる。空気圧シリンダを制御するためのサーボバルブは、インストゥルメントドライバ内ではなく、ホルダアームが搭載されるベースアーム内に配置している。

## 2.3 ホルダアーム

上記インストゥルメントを体外で位置決めするホルダアームは、インストゥルメントに腹壁上の挿入ポートを通過させながら、その先端位置をサージョンコンソールからの指令値に一致するように制御する必要がある。この実現方法には、機構的にリモートセンターと呼ばれる不動点を作り出し、それが挿入ポートの位置と一致するようにアームのベース位置を固定する方法と、ロボットアームに挿入ポートの位置を記憶させ、常にそこを通るように手首に相当する関節を連動させる方法がある<sup>4)</sup>。製品化した手術支援ロボットのホルダアームにおいては、最終的に後者を採用し、図4に示すような計6自由度の構造とした。これにより、挿入ポートの位置を簡易的なティーチングによりアームに記憶させるだけでよく、挿入ポートとホルダアームの位置合わせを不要とし

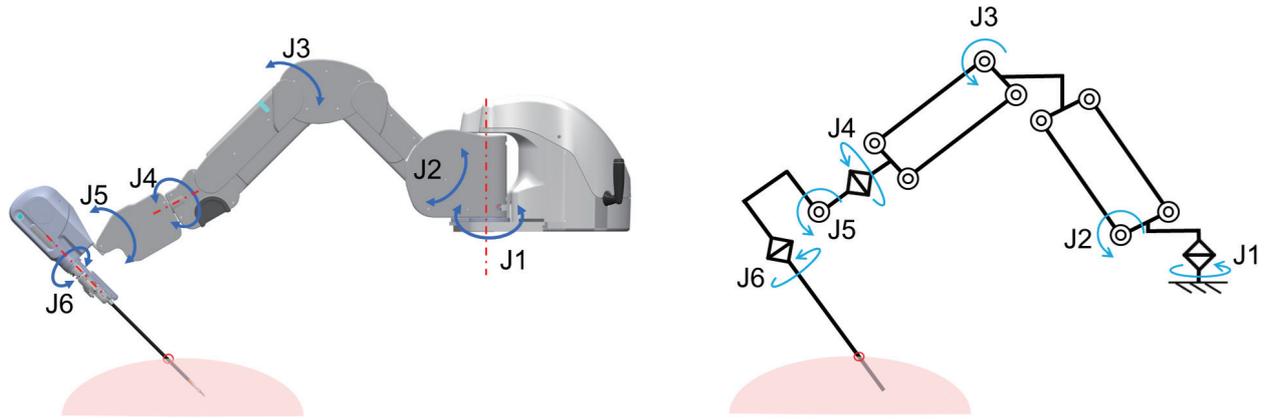


図4 ホルダアームの構造

ている。

本ホルダアームにおいて、開発当初は全ての関節に空気圧アクチュエータを用いて試作を行ったが、最終的に図4中J1, J2, J3, J6の関節の駆動に電動モータを採用した。

前述の通り、空気圧シリンダの内蔵されているインストゥルメントドライバは、軽量さを意識した設計を行っているものの、J6回転のための駆動機構も含んでいる。また、インストゥルメントドライバの直前には手首関節に相当するJ4, J5の関節部も存在し、この周辺に一定の重量が集中することは避けられない。この重心は、ホルダアームの手先部近傍に位置し、J1, J2, J3から大きく離れるため、これら関節への重力負荷、慣性負荷は大きなものとなる。

したがって、J1, J2, J3関節には、インストゥルメントの関節に比べ非常に大きなトルクが要求され、空気圧アクチュエータを利用する場合は大きな受圧面積が必要となる。この場合、空気圧アクチュエータ内の容積が増大し、必要な流量への要求も大きくなってしまふ。さらに、緊急時の確実な停止のためにブレーキの実装が必要であるが、アクチュエータのトルクが大きいことで、これを止めるブレーキも大型のものが必要となる。これらを回避するには減速比の高い減速機の利用が有効であるが、減速比を高くする場合、高速かつ無限回転が得意な電動モータが有利となる。

インストゥルメント全体をロール回転させるJ6については、重力や慣性負荷は比較的小さいが、360度を大きく超える広い可動範囲が必要であり、ベーンタイプの空気圧揺動アクチュエータでは、シングルベーンでも一般に270度程度までしか回転できず、増速機構が必要となってしまふ。この場合、揺動アクチュエータもトルク容量の大きなものを選定が必要となり、増速機構と合わせて大型化し、空

気圧駆動の利点が失われてしまふ。

以上の理由から、上記J1, J2, J3, J6の関節においては電動駆動を採用することとし、全体として大型化することを防いだ。

一方で、減速機の摩擦により関節のバックドライバビリティは低下することとなる。ロボットのセッティング等においては、手で直接ホルダアームを持って動かす必要があるが、バックドライバビリティの低下に伴い、このマニュアル操作はしにくいものとなる。そのため、インストゥルメントドライバの根元に力覚センサを実装し、小さな力でマニュアル操作できるようアシスト制御を行っている。

一方、ホルダアームの手首に相当する関節J4, J5には空気圧駆動を採用しており、気腹圧の変化などにより挿入ポートの位置に変動があったとしても、位置ずれによる腹壁への負荷荷重を柔らかく吸収することができる。これにより、例えば肋骨の間に挿入ポートが設置される胸腔内の手術においては、術後の肋骨の痛みが発生しにくくなることが期待されている。

## 2.4 サージョンコンソール

術者が操作を行うコンソール(図1(b))は、主に力覚提示可能なハンドコントローラと内視鏡モニタ、その直下に配置されたタッチパネルディスプレイから構成される。内視鏡モニタとして術者正面にフラットパネルディスプレイを設置するオープンコンソール形態としており、ヘッドアップでの操作が可能である。操作中に発生している力の情報は、力覚としてだけでなく図5のようにタッチパネルディスプレイに視覚的にも表示され、数値も確認することができる。これにより、術中操作の力加減を定量的に行うことも可能となる。

ハプティックインターフェースであるハンドコントローラは並進3自由度、回転3自由度、把持1自由度の計7自由度を有しており、それぞれDCモ-



図5 タッチパネルディスプレイ上の力覚情報表示

タによる駆動とし、力センサを利用しないインピーダンス型の制御としている。手術手技の入力装置として高い操作性を提供するためには、ハンドコントローラにも高いバックドライバビリティが求められる。特に、並進に寄与する各駆動軸の摩擦抵抗は、複合して術者手先への抵抗力として現れ、その方向はアームの姿勢に依存して手先の進行方向とは異なるものとなるため、わずかであっても繊細な手技においては操作の直進性を妨げるものとなる。インストゥルメントドライバと異なり、ハンドコントローラにおいては、重量の制約が少なく利用できる空間にも余裕があるため、各軸ともにワイヤを用いた低減速比の減速機構を用いて、必要なトルクを確保しながらしゅう動抵抗を極力排除している。現バージョンにおいては、並進動作のための機構としてパラレルリンク機構を採用しているが、現在は、有効可動域を拡大しながら、このしゅう動抵抗をさらに低減した新しい設計のハンドコントローラを開発中である。

### 3. おわりに

本稿では、空気圧駆動と電動を適材適所に併用した手術支援ロボットを紹介した。開発した手術支援



図6 臨床使用の様子

ロボットは、2023年日本国内において、胸部外科（心臓外科を除く）、一般消化器外科、泌尿器科、婦人科の4診療科において薬事承認取得した。その後、複数の協力病院施設において、図6に示すような臨床使用を開始し、これまでに各診療科合わせて計70症例以上実施している。いずれも手術は無事完遂している。既に商業ベースでの導入も始まっており、今後は導入先の拡大および臨床実績の積み上げを行いながら、新機能の実装などアップデートを継続的に実施していく。

#### 参考文献

- 1) Surgical Robots Market by Product & Service (Instruments & Accessories, Systems, Service), Application (Urological Surgery, Gynecological Surgery, Orthopedic Surgery), End User (Hospitals, Ambulatory Surgery Centers)- Global Forecasts to 2025, Markets and Markets, 2020.
- 2) 只野耕太郎, 川嶋健嗣. 空気圧サーボを用いた多自由度鉗子システムのバイラテラル制御, 日本コンピュータ外科学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 25-31, 2005.
- 3) Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Kazuyuki Kojima, Naofumi Tanaka. Development of a pneumatic surgical manipulator IBIS IV, Journal of Robotics and Mechatronics, No. 2, pp. 179-187, 2010.
- 4) Koki Aizawa, Daisuke Haraguchi, Kotaro Tadano. Load Reduction Control on Tool-Insertion Port for Laparoscopic Surgical Robot Using Semi-Active Joints, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 32, No. 5, pp. 1000-1009, Oct. 2020.

(原稿受付：2024年7月12日)

## 融合型ハイブリッドリニアアクチュエータ

## 著者紹介



なか た よし ひろ  
**仲田 佳弘**

電気通信大学大学院  
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1  
E-mail : ynakata@uec.ac.jp

2013年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同大学助教を経て、2021年電気通信大学大学院情報理工研究科准教授。アクチュエータ、人と関わるロボットの研究に従事。日本ロボット学会IEEE、日本ロボット学会などの会員。博士（工学）。



の だ と も ゆ き  
**野田 智之**

株式会社国際電気通信基礎技術研究所  
〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2-2-2  
E-mail : t\_noda@atr.jp

2009年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2010年ATR脳情報通信総合研究所で研究員、主任研究員を経て、2021年主幹研究員。2023年電気通信大学連携准教授を兼任。ニューロリハビリテーションの研究に従事。IEEE、日本ロボット学会などの会員。

## 1. はじめに

空気圧シリンダや電気モータは、ロボット用アクチュエータとして、産業用から医療用、さらに家庭用まで幅広く使用されている。アクチュエータの性能は、ロボットの動作の正確さや応答性に直結し、作業内容に大きく影響する。近年、協働ロボットの登場で、位置や関節角度の制御性だけでなく、その安全性も求められるようになった。現状は、接触時に停止することが基本的な安全規格の要求である。しかし、筆者らは、さらに次世代の協働ロボットでは、人や環境と接触しつつ、大きな力を安全に発生する技術が必要になると考えている。精度と高速な応答が求められる一方、外力に対する系の柔軟性も必要となるだろう。

この観点で、次世代のロボット用アクチュエータの満たすべき要件は、外力に対する柔軟性（バックドライバビリティ）、高い出力／重量比、および精密かつ高速な応答であると考えられる（図1）。しかし、単一の駆動方法でこれらをすべて満たすことは難しい。空気圧アクチュエータは、軽量高出力で



図1 ロボット用アクチュエータが持つべき特性

外力に対して柔軟性を持つ。過負荷状態や突然の障害時にも比較的安全に動作し、衝撃が加わった時にも安全性が高いことは大きな利点である。しかし、応答速度や制御精度に課題がある。一方、電磁アクチュエータは、高い応答速度と制御精度を誇る。直接ドライブモータや低減速比の減速機を組み合わせたアクチュエータによって、バックドライバビリティの高い関節を持つ四脚ロボット<sup>1)</sup>や人型ロボット<sup>2)</sup>が開発され、高い運動性能を示している。しかし、依然として電磁アクチュエータは出力の観点や定常負荷を駆動する場合に発熱の問題があるなど用途が制限されることが多い。

このように、単一の駆動原理に基づくアクチュエータでは性能に限界があるため、二つ以上の異なるアクチュエータを相補的に用いるハイブリッド駆動方式が提案されている<sup>3)~6)</sup>。このようなアクチュエータは、周波数帯域が異なるアクチュエータの出力を組み合わせるDistributed Macro-Mini (DM<sup>2</sup>) Actuation<sup>7)8)</sup>が知られている。従来、これらのハイブリッド駆動方式を実現する際には、二つのアクチュエータの出力をギアやベルトなど追加の機械要素を用いて合成していた。しかし、このような設計は、システムの大規模化や構造の複雑さを招く。

著者らは、二つのアクチュエータの構造を融合させることで小型化する「融合型ハイブリッドリニアアクチュエータ (Fusion Hybrid Linear Actuator : FHLA)」のコンセプトを提案<sup>9)</sup>した。FHLAは、二つのアクチュエータの可動子とその可動域を融合させた「ハイブリッドアクチュエータ」である点で、これまでの「ハイブリッド駆動方式」の研究とは異なる。

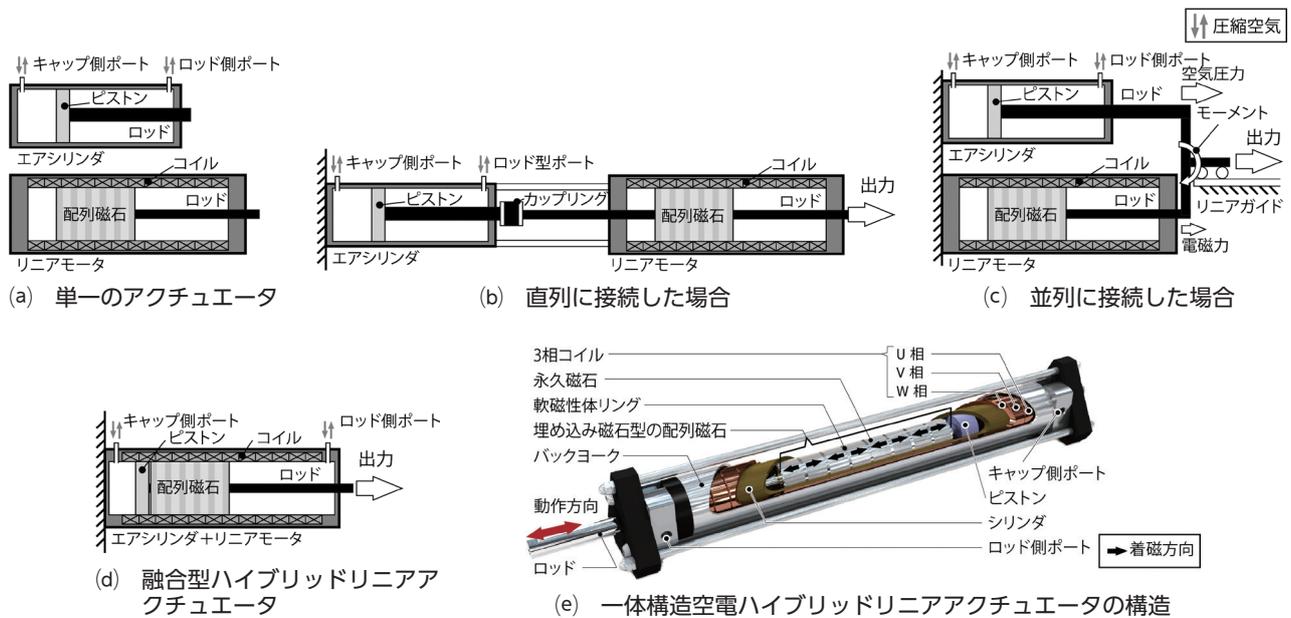


図2 ハイブリッド駆動のアクチュエータの構造比較とiPEHLAの基本構造

本解説では、筆者らが提案するFHLAとコンセプト、そしてその利点について解説する。さらに、FHLAの出力特性として、動きの外乱に対する力制御性を示し、本特性を生かした応用、および将来的な技術展望について説明する。これにより、FHLAが持つ潜在的な利点とその実用化に向けた方向性を示したい。

## 2. 融合型ハイブリッドリニアアクチュエータ

ここでは、FHLAの設計コンセプト<sup>9)</sup>について解説する。FHLAの一つの実現例として、空気圧シリンダとリニアモータを融合した一体構造空電ハイブリッドリニアアクチュエータ(Integrated Pneumatic-Electromagnetic Hybrid Linear Actuator : iPEHLA)<sup>9)10)</sup>を例に構造とその利点を説明する。

### 2.1 ハイブリッド駆動の利点と課題

1980年代後半から、ハイブリッド駆動方式の事例が多数提案されている<sup>3)-8)</sup>。これらは基本的に、二つのアクチュエータの可動部が伝達要素で接続される。出力は大きい周波数応答が低いアクチュエータと、出力は小さい周波数応答が高いアクチュエータを組み合わせることで、高出力と高周波数応答を実現している。

しかし、異なる位置に二つのアクチュエータを配置し、可動部をケーブル、ギアやベルトなどの伝達要素で接続する設計では、追加の支持機構が必要となり、構造が大型化しやすい。また、人に触れることを目的としたロボットに適用する場合、安全性を確保するため、これらの機械要素はカバーで覆う必

要がある。これによりシステムが複雑化し、サイズも大きくなる点で課題があった。

### 2.2 融合型の設計コンセプトと基本構造

融合型のハイブリッドリニアアクチュエータの設計コンセプトは、二つのアクチュエータをはじめから融合し、上記の課題を解決する。

図2に、具体例として、二つのアクチュエータを空気圧シリンダとリニアモータとした場合の従来の設計と融合型の設計コンセプトの比較を示す。図2(a)は、空気圧シリンダとリニアモータを示している。図2(b)と(c)は、それぞれ二つのアクチュエータを直列に接続した場合と並列に接続した場合を示しており、従来の設計コンセプトに基づくものである。Higoら<sup>5)</sup>は、図2(b)に示す直列接続の設計を提案している。ただし、リニアモータの代わりに回転モータ駆動のボールねじ機構を用いている。この設計では、二つのアクチュエータの可動部を接続するための部品が別途必要となり、その分の動作空間も必要である。可動部の動作空間が共有されていないため、構造が大型化する。Rouzbehら<sup>6)</sup>は、図2(c)に示す並列接続の設計を提案しているが、空気圧シリンダとリニアモータの出力差が接続部分に大きなモーメントを発生させることが問題となる。そのため、出力軸の並進動作を安定化するために強固なりニアガイドが必要となる。

融合型のコンセプトに基づく設計を図2(d)に示す。出力軸を支えるためのガイドや、アクチュエータ同士を接続するための接続部品を必要としない。これにより、アクチュエータの体積が削減される。伝達機構が不要で部品数が減少するため、構造の耐久性

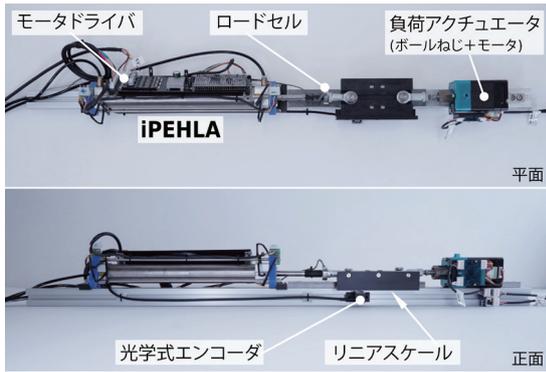


図3 iPEHLAの写真、右側は外乱印加装置

が向上することが期待される。また、単一のアクチュエータとして取り扱えるため、既存のアクチュエータの置き換えも容易である。なお、図2(d)に示す空気圧シリンダとリニアモータからなるアクチュエータは、FHLAの一つの実現例iPEHLAとして実機を開発している(図2(e), 図3)。

### 2.3 iPEHLAの設計と構造最適化

つぎに筆者らがこの基本設計をどのように具現化し、設計パラメータを最適化したか解説する。

iPEHLAのリニアモータ部には、3相2極のスロットレス管状リニア永久磁石同期モータ (Slotless tubular linear permanent magnet synchronous motor) を採用している。管状リニアモータには、スロットあり(図4(a))とスロットレス(図4(b))の設計がある。スロットレスの設計は、iPEHLAに以下の3つの利点をもたらす。

- 1) スロットを構成する軟磁性体板がコイル間に無いため、シンプルな巻き線構造となり製造が容易
- 2) コギング力が発生せず、力を一定に保ち易い
- 3) エアシリンダの肉厚や内径変化による電磁力への影響が少ない

iPEHLAのエアシリンダはリニアモータ部のエアギャップに配置することになる。シリンダが薄いと内部の空気圧を高くできないため、ある程度の厚みが必要であるが、スロットありの設計の場合、ギャップが広がると推力が低下するため問題がある。

空気圧力を大きくするには、シリンダのボア径を大きくする必要がある。Bianchiら<sup>11)</sup>の研究で、リニアモータのエアギャップの外径を最適化した場合、スロットレスの方がスロットありよりも最適解が大きくなることが示されている。以上の観点で、スロットレスの設計を採用した。

iPEHLAのリニアモータ部は、可動部に埋め込み磁石型(軟磁性体の間に永久磁石を挟む)構造を採用している。これにより、コイルを通過する磁束を強められる。筆者である仲田は、過去に同様の構造

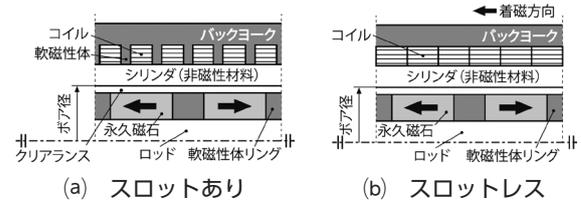


図4 管状リニアモータの構造の違い(シリンダ内蔵)

を持つリニアモータを提案<sup>12)</sup>しており、iPEHLAではこの構造を採用した。軟磁性体と永久磁石の幅、コイルの外周を覆うバックヨーク(可動部との間で磁気回路を構成する。周囲に磁束が漏れるのを防ぐシールドの役割も持つ)の厚みの3要素を有限要素法による電磁界シミュレーションにより最適化した。これにより、iPEHLAはリニアモータとしても高い推力定数(8.67N/A, 実測値で8.02N/A)を実現している。試作機は、リニアモータとしては、比較的低電圧(24V)で駆動できる。

## 3. 出力特性：外乱に対する応答

iPEHLAの出力特性、特に外乱に対する応答性について解説する。文献<sup>9)</sup>では、出力軸にさまざまな周波数の位置の外乱を印加した際に、一定の力を維持することができるか、つまり「ならい制御」のベンチマークを提案した。iPEHLAの試作機(図3)を用いた実験により、ハイブリッド駆動は、空気圧力のみを用いる場合と比較して、応答性が高いことを示した。以下でその概略を説明する。

### 3.1 空電ハイブリッド駆動の制御モデル

空電ハイブリッド駆動において、二つのアクチュエータの出力を、どのセンサの情報に基づき、どのように組み合わせて用いるかは重要な問題である。その一例として、iPEHLAにおいて、光学式エンコーダで計測した可動部位置の情報から、モデルベースのフィードフォワード制御によって、可動部先端の力を一定に維持する実装例を解説する。

iPEHLAのハイブリッド駆動の摩擦補償モードでは、まず、目標力の発生に必要な空気圧の指令値を圧力制御バルブに与えることで力を発生させる。ピストンはグリスで潤滑されているが、摩擦が発生するため、力を一定に保つには補償が必要である。

筆者らは、Canudas de Witら<sup>13)</sup>の提案するStribeck効果を考慮した摩擦力のモデルを、空気室内の圧力変化を考慮するように拡張したモデルを提案<sup>9)</sup>している。これは、iPEHLAのピストンが図5に示すように両側に広がるフィンを持っており、空気室内の圧力増加で、フィンがシリンダに押し付けられ、摩擦が増加すると考えられるためである。

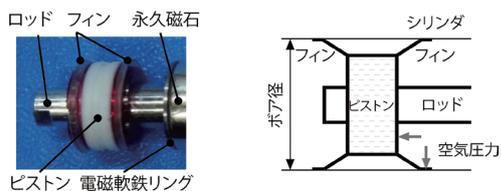


図5 iPEHLAのピストン形状

### 3.2 iPEHLAの特性評価

以下に、iPEHLAの特性の要点をまとめる。

**力制御性能：**空気圧力によって必要な力を発生させ、電磁力によってアクチュエータ内で生じる動摩擦を補償するハイブリッド駆動では、iPEHLAの力を空気圧力だけの制御で一定に維持する場合と比較して、目標力に対する誤差を半減させることができた。この結果から、iPEHLAのハイブリッド駆動が、外乱に対して一定の力を維持する能力に優れることを確認できた。なお、実験では、目標力を0, 20, 40, 60Nと設定した。電磁力のみでは大きな力を発生させることは難しく、ハイブリッド駆動により、広範囲の力目標に対する高い力制御性能を示している。

**バックドライバビリティ：**空気圧シリンダもリニアモータも共にバックドライバビリティが高いアクチュエータであり、これらを融合させたiPEHLAもまた、高いバックドライバビリティを有する。たとえば、0Nを目標力とした際の外乱に対する応答は、バックドライバビリティが低いアクチュエータでは制御応答性が重要となるが、iPEHLAは制御なしでも外力に柔軟に応答できる。

## 4. FHLAの今後の課題と展望

現在、電磁力は、摩擦補償に用いているが、空気圧力と電磁力の組み合わせの配分はシステムやタスクの内容によって変更するのが良いと考えられる。FHLAの応用研究では、この問題にも取り組んでいる。また、FHLAの性能向上には、電磁力の改善や、空気圧力の遅延・非線形性への対応も重要である。

FHLAの応用として、ロボットリハビリテーションへの適用を検討している<sup>14)15)</sup>。図6は開発中の肩関節挙上運動のための外骨格型ロボットの試作機であり、抗重力下の挙上動作のリハビリテーションで、自力で腕を動かすことができない中重度の患者のアシストを行えるように設計している。このアシストには、FHLAの広い範囲での力の制御性が活用できる。

この研究では、リハビリテーション中に患者の能動的な動作を妨げない特性である動的透明性 (Dynamic Transparency)<sup>16)</sup>に着目している。これは、ロボットの物理特性が患者に影響を与えず、あたかもロボットが「透明」であるかのようにふるま



図6 開発中の肩関節挙上運動用外骨格型ロボットの試作機

うことを指す。従来の研究では、患者とロボット間の相互作用力を0にする透明性の実現が目標とされてきた<sup>16)17)</sup>。しかし、これでは、前述のような腕を自力で動かさない患者をアシストすることができない。そこで、我々は、アシスト中の透明性として、「力の動的透明性」という概念を提案している<sup>15)</sup>。ロボットの物理特性が患者に影響を与えないが、必要なアシスト力だけは発生させるのである。力の制御性とバックドライバビリティが高いFHLAの特性を十分に活かすことができる。この概念が、ユーザの自発的な動作を促進し、効果的なリハビリテーションの実現に重要であると考え、医師や療法士の協力のもと、実証を進める予定である。

## 5. おわりに

融合型ハイブリッドリニアアクチュエータのコンセプトと構造の利点について解説した。空気圧力と電磁力を追加の伝達要素無しに組み合わせる「融合型ハイブリッド」のコンセプトにより、高い推力密度と応答性、さらにバックドライバビリティを備える小型のアクチュエータを実現できる。ロボットと人や環境との接触タスクを想定し、外乱に対する応答を評価するベンチマーク試験の結果から、ハイブリッド駆動により高出力と高応答性を両立する優れた性能を発揮できることを示した。最後に、技術の課題とFHLAをロボットリハビリテーション分野に応用した研究と展望について紹介した。

### 謝辞

本解説の研究は、JSPS 科研費JP21H04911の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Fan, Y., Pei, Z., Wang, C., Li, M., Tang, Z., Liu, Q. : A review of quadruped robots : Structure, control, and autonomous motion Vol. 6, No. 6, p. 2300783 (2024)
- 2) Ficht, G., Behnke, S. : Bipedal humanoid hardware design : A technology review Current Robotics Reports, Vol. 2, p. 201-210 (2021)
- 3) Petrosky, L. J. : Hybrid electro-pneumatic robot joint actuator, U.S. Patent Application US4782258A (1988)
- 4) Takemura, F., Pandian, S. R., Nagase, Y., Mizutani, H., Hayakawa, Y., Kawamura, S. : Control of a hybrid pneumatic/electric motor. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), p. 209-214 (2000)
- 5) Higo, H., Sakurai, Y., Nakada, T., Tanaka, K., Nagayama, K. : Dynamic characteristic and power consumption on an electro-pneumatic hybrid positioning system, In Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, Vol.2005, No. 6, p. 363-368 (2005).
- 6) Rouzbeh, B., Bone, G. M. : Position control and force allocation algorithms for hybrid pneumatic-electric linear actuators. In Proceedings of the 7th International Conference of Control Systems, and Robotics, No. 137, p. 1-7 (2020)
- 7) Zinn, M., Roth, B., Khatib, O., Salisbury, J. K. : A new actuation approach for human friendly robot design, The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 4-5, p. 379-398 (2004)
- 8) Sardellitti, I., Park, J., Shin, D., Khatib, O. : Air muscle controller design in the distributed macro-mini (DM<sup>2</sup>) actuation approach, In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 1822-1827 (2007)
- 9) Nakata, Y., Noda, T. : Fusion hybrid linear actuator : Concept and disturbance resistance evaluation, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 28, No. 4, p. 2167-2177 (2023)
- 10) Nakata, Y., Noda, T., Morimoto J., Ishiguro H. : Development of a pneumatic-electromagnetic hybrid linear actuator with an integrated structure, In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 6238-6243 (2015)
- 11) Bianchi, N., Bolognani, S., Tonel, F. : Design criteria of a tubular linear IPM motor, In Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, (Cat. No. 01EX485), pp. 1-7 (2001)
- 12) 仲田佳弘, 平田勝弘, 石黒浩 : 人工筋肉リニア電磁アクチュエータの開発, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-08-63, p. 67-72 (2008)
- 13) Canudas de Wit, C., Olsson, H., Astrom, K. J., Lischinsky, P. : A new model for control of systems with friction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, p. 419-425 (1995)
- 14) Shimoyama, T., Noda, T., Teramae, T., and Nakata, Y. : Achieving mechanical transparency using fusion hybrid linear actuator for shoulder flexion and extension in exoskeleton robot, In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, TuCT14-AX.3 (2024)
- 15) 下山拓真, 野田智之, 寺前達也, 仲田佳弘 : アシスト時の動的透明性を実現する外骨格ロボットに向けた能動関節の研究開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-101 (2024)
- 16) Zimmermann, Y., Küçüktabak, E. B., Farshidian, F., Riener, R., Hutter, M. : Towards dynamic transparency : Robust interaction force tracking using multi-sensory control on an arm exoskeleton. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 7417-7424 (2020)
- 17) Just, F., Özen, Ö., Bösch, P., Bobrovsky, H., Klamroth-Marganska, V., Riener, R., Rauter, G. : Exoskeleton transparency : feed-forward compensation vs. disturbance observer, at-Automatisierungstechnik, Vol. 66, No. 12, p. 1014-1026 (2018)

(原稿受付 : 2024年 6月 17日)

解説

# MR流体を用いたロータリーアクチュエータ

## 著者紹介



かめ ざき みつ ひろ  
**亀 崎 允 啓**

東京大学  
 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

2010年早稲田大学大学院創造理工学研究科博士後期課程修了。同大学助手、講師、准教授を経て、2023年東京大学大学院工学系研究科特任教授。機能性流体を用いたアクチュエータ・センサ等の研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会などの会員。博士（工学）。

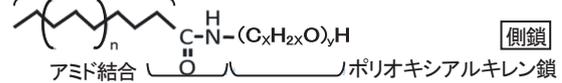
## 1. はじめに

機能性材料（金属，セラミックス，流体，エラストマ，ゲルなど）とは，磁場，電場，光，熱などの外部刺激に応じて物理的・化学的等の特性が変化する材料のことで，機械システムの設計にパラダイムシフトを起こし，いままで実現が難しかった機能を発現させることのできる大きな潜在性を有している<sup>1)</sup>。このように，ものづくりにおいて，機構と材料はきわめて密接な関係にある。本稿では，機能性材料とロボット機構の融合を加速・拡大することを目的に，磁気機能性流体の一つである「磁気粘性流体（Magnetorheological Fluid：MR流体）」を用いたロータリーアクチュエータについて解説する。MR流体は，直径1-10 $\mu$ mの強磁性微粒子（鉄等）を潤滑油（シリコンオイル等）に分散させた流体で，外部磁場強度に応じて，流動状態から大きな降伏応力を有するゲル状態に高速・連続的・可逆的に変化する機能性流体である。MR流体を作動流体とすることで，逆可動性と高出力性をアクチュエータに具備することが本研究最大の狙いである。各種ロータリーアクチュエータについて解説した後，今後の材料・機構融合研究の展望についてまとめる。

## 2. 分離安定性の高いMR流体

アクチュエータの解説に入る前に，従来のMR流体の課題と新たに開発したMR流体について述べる。MR流体は新規機械要素として期待の大きな材料であるが，材料構成が低粘度低比重の潤滑油中に高比

アルキレン鎖=潤滑油 [主鎖] (a) 分散媒体の基本構造



(b) アミド基の磁性体に対する選択吸着モデル

(a) 潤滑性分散媒体：ポリオキシシレン脂肪酸アミド誘導体



(b) 開発品と従来品の沈降分離状態の比較（180日後）

図1 分離安定性の高いMR流体

重大粒子径の磁性体を混合させた様態であるため，磁性粒子の沈降分離という本質的課題が存在する<sup>2)</sup>。これにより，機構の精緻な制御が困難となり，機構の損傷を引き起こす場合もあるため，ほかの特性値が優れていても実用に耐えられない。そこで，長期貯蔵でも沈降しない高い安定性を持つMR流体を開発した。このMR流体は，大きな応力を発揮できる直径数-50 $\mu$ mの大きな磁性粒子を主成分として分散しつつ，磁性粒子の沈降を抑制するための側鎖を持つポリオキシシレン脂肪酸アミド誘導体を分散媒体に適用（図1(a)）するとともに，直径20-300nmのナノ粒子を分散媒体に添加することで，半年間の静置状態でも沈降せず（図1(b)），外部からの磁場に対して高い応力を発揮することに成功した。詳細は，文献<sup>3)</sup>を参照いただきたい。

## 3. 逆可動性と高出力性を有するアクチュエータ

本章では，ロボットシステムに組み込んだロータリーアクチュエータを例に，駆動原理とその開発・評価結果を紹介する。ここでは，逆可動性に特化したBackdrivable MRF-Seal (BMS) アクチュエータと高出力性に特化したBackdrivable MRF-Valve (BMV) アクチュエータ，さらにMR流体クラッチとMR流体

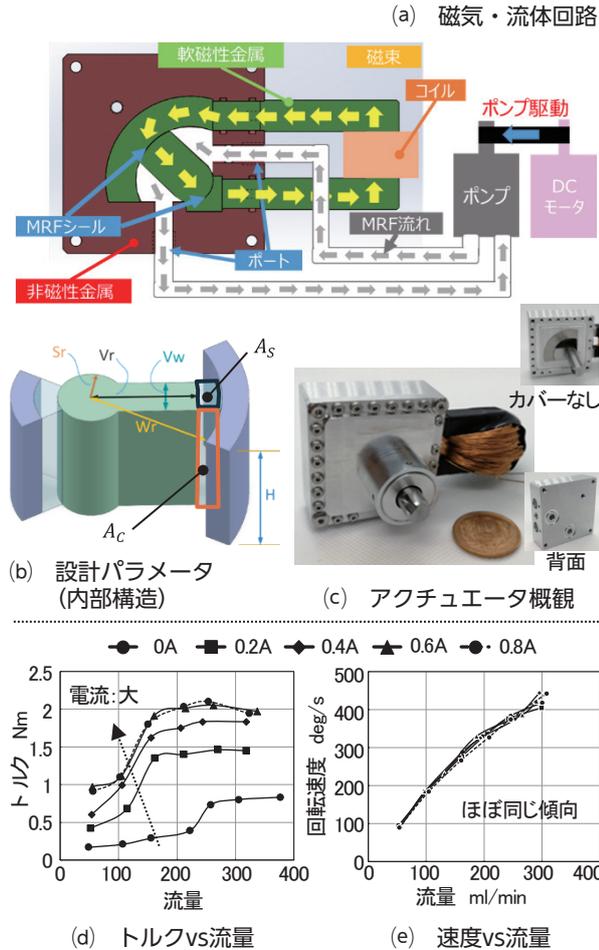


図2 BMSアクチュエータ

方向変換器を用いた動力伝達機構について解説する。

### 3.1 MR流体シール型 (BMS) アクチュエータ

(1) 駆動原理：通常の油圧ベーンモータでは、作動流体は一方の流出入口からアクチュエータ内部へと送られる。流入側チャンバー内圧力が上昇し、流出側チャンバーとの圧力差が生じることで出力軸が回転する仕組みである。BMSアクチュエータは、作動流体であるMR流体がMR流体シール部を通してチャンバー間を相互に移動できる。図2(a)に示すように、ハウジング、MR流体シール部、ベーン・出力軸部を通る磁気回路が構成され、電磁石コイルへの印加電流に応じてMR流体シール部に与える磁場強さを調整することで、シール耐圧や漏れ量を調整できる。無磁場状態では逆可動性モードに、磁場有状態ではMR流体の降伏応力に応じた高出力モードとなる。

(2) 仕様および機構設計：人の手と同程度のロボットハンドを実現することを目標とし、体格を45×80×20mm、目標トルクを2.85Nmと設定した。流入出ポートや外部へのMR流体漏れと磁束漏れを最小限に抑えられるように、軟磁性金属である電磁ステンレス鋼と非磁性金属であるアルミニウムを配置する。

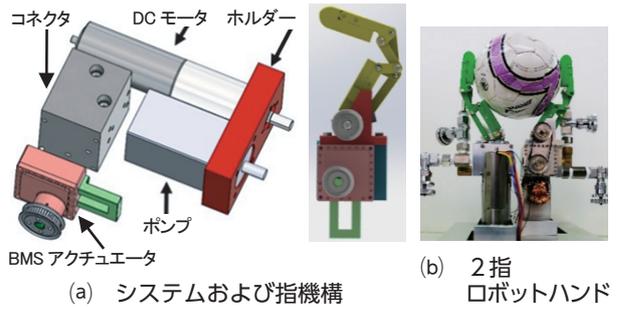


図3 BMSアクチュエータを用いたロボットハンド

詳細設計では図2(b)に示すパラメータを決定する必要がある。目標体格から、 $H=10\text{mm}$ 、 $W_r=12.2\text{mm}$ 、 $S_r=5\text{mm}$ 、逆可動性を考慮してMR流体シールの幅を0.1mmとするため、 $V_r=12.1\text{mm}$ 、目標トルク2.85Nmを実現するため、 $V_w=9.8\text{mm}$ とそれぞれ設定した。以上から、理論最大耐圧は3.5MPa、最大トルクは3.0-f (摩擦力) Nmと算出される。図2(c)に開発したBMSアクチュエータの外観を示す。

(3) BMSアクチュエータの基本性能：小型ポンプ (TFH-040, Takako) を用いた静的トルク試験結果を図2(d)に示す。MR流体シールによって耐圧が上昇しトルク増加が確認された。無負荷時の速度試験結果を図2(e)に示す。回転速度はポンプ流量に依存し、磁場強さに影響されないことが確認された。これは、当該速度において異なる逆可動性を実現できることを示している。逆可動性試験の結果、無磁場状態 (0 A) での最大静止摩擦力は0.0075Nm、最大耐圧 (0.6A) 時は0.0093Nmであった。以上より、開発したBMSアクチュエータは、きわめて小さな静止摩擦力を有し、高い逆可動性 (安全性) を実現することが確認された<sup>4)</sup>。

(4) ロボットハンドへの応用：BMSアクチュエータにより根元の関節を直接駆動させ、指を連動リンク機構により回転させる2指のロボットハンドを開発した。小型ポンプおよびDCモータはハンドの甲に収納できる構造となっている (図3(a))。本原理試作では最大約5kgの把持力が得られた。本設計は逆可動性を重視したが、連通流路やMR流体配合の調整により、体格を維持したまま最大把持力を人の握力程度 (約40kg) まで増加させることが可能と考えている。ロボットハンドを用いた物体把持 (図3(b)) や環境への接触動作を含む実験から設計要件に挙げた高い出力性・逆可動性の実現されていることを確認した<sup>5)</sup>。

### 3.2 MR流体バルブ型 (BMV) アクチュエータ

(1) 駆動原理：BMVアクチュエータは、トルク性能の確保を優先して設計を行った。基本的な構造はBMSアクチュエータと同じであるが、ベーン内部に

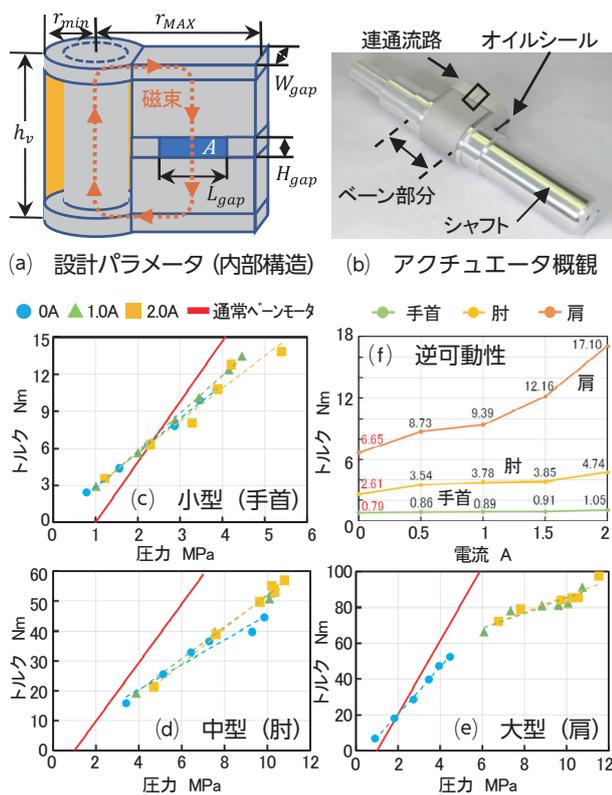
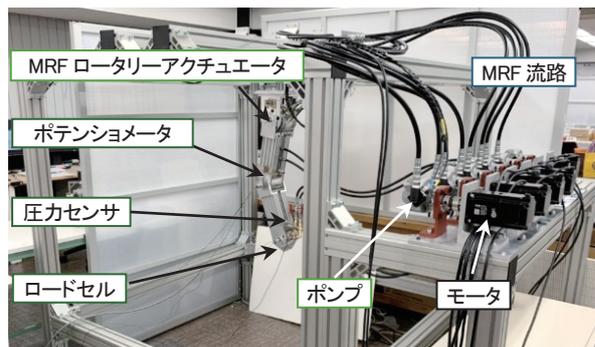


図4 BMVアクチュエータ

連通路路が設けられており、その連通路路は、磁場の作用によりMR流体バルブとして機能し、より大きな降伏応力を生じさせられる点で異なる (図4(a)). (2) 仕様および機構設計：人の腕と同程度のロボットアームを実現することを目標とし、可搬重量を10kg、アームの肩ピッチ軸から手先までの長さを670mm、停止状態のアクチュエータがアーム自重によって始動する最小外力を逆可動性として設定した。ロボットアームは4自由度で、肩部2関節 (大型)、肘部1関節 (中型)、手首部1関節 (小型) である。詳細設計では、図4(a)に示すパラメータを決定する必要がある。トルクと圧力の関係からMR流体バルブの圧力限界を決定した。手首関節では要求逆可動トルクが特に小さいため、シールを使用しない。 $W_{gap}$  はとり得る最大のもの、磁束ロス低減のため、 $L_{gap}$  を長く設定した。このようにして、各アクチュエータの要求最大トルク・最小逆可動性を実現するパラメータ群を導出した。図4(b)に開発したBMVアクチュエータのシャフト部を示す。

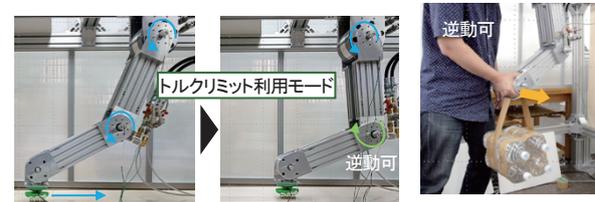
(3) 性能評価：図4(c)-(e)に、ギヤポンプ (MA3, Eaton) を用いて取得した回転トルクと圧力の関係を示す。3種類のアクチュエータそれぞれにおいて、目標トルクを発揮できることを確認した。通常のベーンモータより出力曲線は緩やかだが、逆可動性を獲得したことにより1MPa以下でもアクチュエータが動作可能となった。図4(f)にポンプ停止状態で



(a) ロボットアームシステムの外観



(b) ピン挿入作業



(c) ならい動作 FB制御なしでならい動作実現 (d) 重量物運搬

図5 BMVアクチュエータを用いたロボットアーム

計測した静的逆可動性試験の結果を示す。3種類のアクチュエータそれぞれにおいて、無磁場状態での逆可動性が目標値以下であること、磁場強度に応じて逆可動性を調整できること、肩では2倍以上変化することを確認した<sup>6)</sup>。

(4) ロボットアームへの応用：BMVアクチュエータを搭載したロボットアームを図5(a)に示す。ギヤポンプ、サーボモータ、角度センサ、油圧センサ、ロードセルで構成されている。ここでは、産業用ロボットアームの代表的デモを3種類実施した。ピン挿入作業では、人の直接操作による逆動可能な外力追従モードで位置合わせをした後、形状順応駆動モードにより特別な制御なしにピン挿入が成功した (図5(b)). ならい作業では、設定負荷トルク以下で駆動するトルクリミット利用モードにより特別な制御なしにならい動作が実現している (図5(c)). 最後に、重量物運搬では、重量物 (8 kg) を持ち上げた状態で、逆可動できることを確認した (図5(d)). 以上より、BMVアクチュエータが有する高出力性と逆可動性を4自由度ロボットアームにおいても発現でき、種々の作業に有効に活用できることが確認できた<sup>7)</sup>。

### 3.3 動力伝達機構

次世代のロボットにおいては、アクチュエータだ

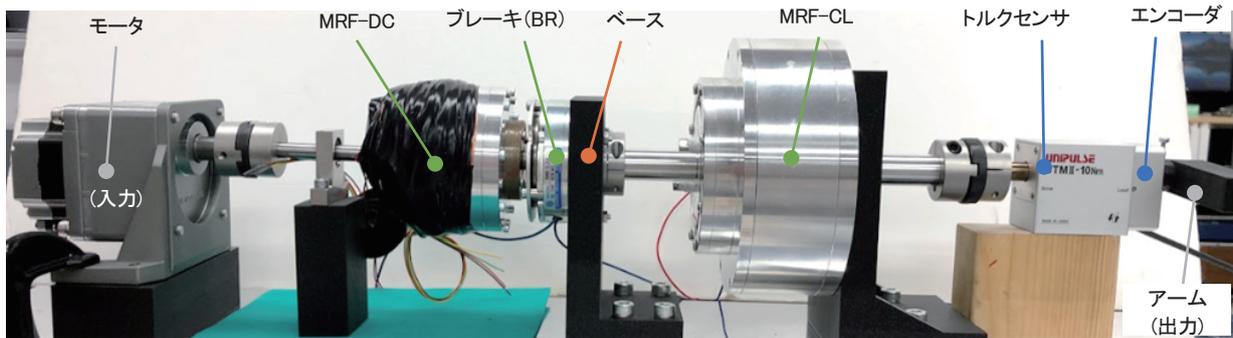


図6 ギア・クラッチ・ブレーキを組み合わせたMR流体動力伝達システム

けでなく、動力の結合・離脱や方向変換等の「動力伝達機構」にも高応答性・逆可動性が求められている。結合・離脱は、クラッチで実現できるが、摩擦クラッチでは方向変換や十分な逆可動性を実現できない。また、かみ合い時の騒音や衝撃振動も課題である。一方、方向変換は、傘歯車を組み合わせたギアボックスによって実現できるが、逆可動性は十分でない。そこで、図6に示すような、MR流体方向変換器 (MRF-DC) とMR流体クラッチ (MRF-CL) およびブレーキ (BR) を組み合わせた逆可動性と高応答性を有する動力伝達機構の試作機を構築した。詳細は文献<sup>8)</sup>を参照されたい。

(1) MR流体クラッチの設計：寸法は、直径158mm、幅90mmである。多くのクラッチディスクを用いることで、クラッチのトルクを低下させることなく、小型化できることから、3つのディスクを有するMRF-CLを設計した。製造性と保守性を向上させるために、ローターの周りに4つの独立コイルを円形に設定した。著者らの以前の研究を参考に、駆動ディスクと従動ディスク間の距離を0.5mmに設定した。

(2) MR流体方向変換器の設計：寸法は、直径90mm、長さ160mmである。方向転換には4つの傘歯車を使用した。この機構は入力方向を逆にするのみであるため、出力方向を切替可能な新機構を設計した。ボックスと歯車の間にMR流体を充填し、磁気回路がシャフトを通過するようにコイルを設置した。MR流体が液体状態の場合、MR流体は潤滑油のように機能し、出力軸が逆転する。MR流体が高粘度状態の場合、傘歯車間のギャップにあるMR流体が傘歯車にかみ合う。傘歯車をロックできるため、入力シャフトはボックスを回転させることができ、出力軸は正転する。

(3) 複数の動作モード：MRF-CLの結合は、動力伝達に不可欠である。MRF-DCが接続されている場合、駆動軸によってボックスが同方向に回転するため、正方向回転が得られる。逆回転の場合は、ブレーキをかけてベースにボックスを固定することで、傘歯

車が正常にかみ合うため、逆方向回転が得られる。MRF-DCとBRの両方がオフの場合、駆動軸は傘歯車伝達とボックス回転の両方を介して出力軸を回転させようとする。ただし、これらの伝達力は互いに逆方向であるため伝達されない。つまり、MRF-CLがオンの場合でも出力軸はフリー状態になる。MRF-DCとBRの両方がオンの場合、駆動軸からの力はブレーキによって完全にブロックされるため、この状態は禁止状態である。

(4) 性能評価：出力トルクは、MRF-CLによって支配的に制御できるため、MRF-CLの磁気回路における印加電流を変化させて実施した。励磁電流が大きくなると、出力トルクが大きくなり、3Aで0.15Nmとなった。つぎに、システム全体の反応速度を計測するために、2Aの電流の下、モータ速度を2rpmとして実験を行った。出力方向を変えたタイミングから磁場をかけて最大出力トルクに達するまでの時間を計測した結果、平均反応時間は0.3秒であった。上述のBMVアクチュエータは1.23秒であった。最後に、異なる電流下で、エンドエフェクタを駆動するための最小の力を測定することにより、システム全体の逆可動性能を評価した。モータの速度は2rpmに設定し、アームの端点 (長さ0.13m) を作用点として回転させた際の最小トルクを算出した結果、最小トルクの最大値は1.135Nmとなることがわかった。この値は、十分に小さな値であり人との接触等に対して安全といえる。

#### 4. おわりに

環境にしなやかに対応する次世代のロボットの構築は、1980年代頃に確立された機械・電気系融合分野のみでは、十分に対処できない。この課題解決には、材料面での味付け (ここでは、MR流体) を重要設計要件として設計初期段階から扱うこと、つまり、材料・機構側面の利点・欠点を技術・実用面から捉え直し、それぞれを有機的に結合させる新たなものづくりの形の創造と整備が不可欠である。本稿

では紹介できなかったが、磁気粘弾性エラストマを用いたサクシオンカップ<sup>9)</sup>やジャミンググリッパ<sup>10)</sup>の開発も進めているので参照されたい。フルードパワーを使ったアクチュエータシステムを競争力のある新産業基盤技術に育てるため、今後は、「材料×機構×制御 (AI)」の新融合領域の整備と非連続的な進化・深化を鋭意進めていく。

#### 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー産業技術開発機構 (NEDO) 先導研究プログラム、日本ペイントホールディングス、ならびに、早稲田大学理工学術院総合研究所・次世代ロボット研究機構の支援を受けて行われました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 亀崎允啓, 坂本裕之: 次世代産業用ソフトロボットの実現に向けた革新的MR材料×駆動機構の融合研究開発, 日本ロボット学会学会誌, 39(2), 109-114 (2021)
- 2) J.D. Carlson: What makes a good MR fluid?, J. Intelligent Material Systems and Structure, 13(7-8), 431-435 (2002)
- 3) P. Zhang, M. Kamezaki, et. al.: Development of anti-sedimentation magnetorheological fluids and its implementation to MRF Damper, Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intelli. Mechatron, 400-405 (2019)
- 4) 大槻健史朗, 亀崎允啓, 張裴之, 何卓頤, 菅野重樹: 磁気粘性流体を用いた低摺動ベーン形ロータリアクチュエータの開発, 第37回日本ロボット学会学術講演会論文集, 1C2-04 (2019)
- 5) S. Shembekar, et. al.: Preliminary development of a powerful and backdrivable robot gripper using magnetorheological fluids, Proc. Int. Symp. Autom. Rob. in Construction, 1458-1463 (2020)
- 6) P. Zhang, M. Kamezaki, et. al.: Development and evaluation of a backdrivable vane-type rotary actuator using magnetorheological fluids, IEEE/ASME Trans. Mechatron., 27(6), 4863-4873 (2022)
- 7) 角田龍一郎, 亀崎允啓, 張裴之, 菅野重樹: MRFロボットアームのための力学的・幾何的順応性を高める基本制御システムの試作, JSMEロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-E10 (2021)
- 8) Z. He, M. Kamezaki, et. al.: A prototype power transmission system with backdrivability and responsiveness using magnetorheological fluid direction converter and clutch, Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics, 3702-3707 (2020)
- 9) P. Zhang, M. Kamezaki, et. al.: EPM-MRE: Electropermanent magnet-magnetorheological elastomer for soft actuation system and its application to robotic grasping, IEEE Rob. Autom. Lett., 6(4), 8181-8188 (2021)
- 10) Ho Enomoto, et. al.: Delicate jamming grasp: detecting deformation of fragile objects using permanent magnet elastomer membrane, IEEE Rob. Autom. Lett., 9(2), 979-986 (2023)

(原稿受付: 2024年6月7日)

# 電動油圧アクチュエータ

## 著者紹介



みやぎ みつる  
**宮城 光**

カヤバ株式会社  
〒252-0328 神奈川県相模原市南区麻溝台1-12-1  
E-mail: miyagi-mit@kyb.co.jp

2012年KYB株式会社（現：カヤバ株式会社）  
入社。アクチュエータの評価・研究に従事。

## 1. はじめに

近年、地球温暖化やそれに伴う異常気象などの環境問題が取り沙汰されている。日本を含む124か国と1地域（2021年1月20日時点）が2050年までのカーボンニュートラル実現を表明し、温室効果ガス排出量の削減に取り組んでいる<sup>1)2)</sup>。これを受けて、社会全体の省エネルギー化への要求は高まり、油圧業界においては、環境に配慮した電動化製品への置き換えが進みつつある。しかしながら、現状の油圧による高出力を維持したまま電動化を実現するには、さまざまな課題がある。

当社では、電動技術と油圧技術の長所を併せ持つ電動油圧アクチュエータ（通称：EHA, Electro-Hydraulic Actuator）について、長年にわたり製造・販売を行ってきた実績がある。本稿では、その当社製品を例に、その概要と特徴について紹介する<sup>3)4)</sup>。

## 2. 構造と原理

電動油圧アクチュエータの構造と原理を紹介する前に一般的な油圧システムについて説明する。

油圧システムは主に下記5つの要素から構成される（図1）。

- (1)アクチュエータ : 油圧を仕事に変換する
- (2)油圧バルブ : 圧力や速度、方向の決定
- (3)油圧ポンプ : 圧油を供給する
- (4)油圧アクセサリ : 補助的役割を行う
- (5)油圧タンク : 油を貯蔵する

アクチュエータ

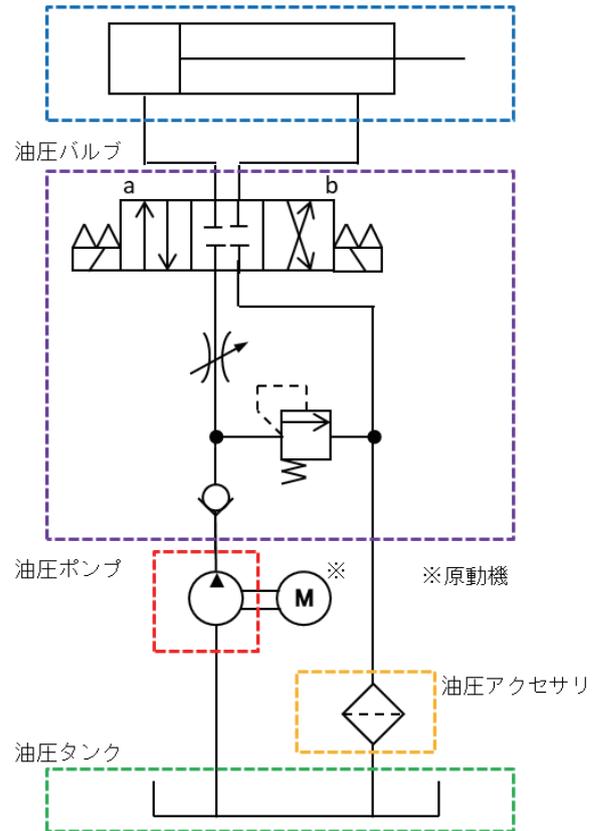


図1 油圧システム図（一般例）

一般的な油圧システムは、一つの原動機で集中して機械的エネルギーを作り出し、油圧ポンプを介して流体エネルギーに変換し、これを制御しシリンダなどのアクチュエータに供給して仕事を行わせる。原動機一つに対して、アクチュエータが複数ということがよく見られる。

一方で、電動油圧アクチュエータはアクチュエータ一つに対して、通常は電動モータおよびポンプが一つずつ取付けられるため、それぞれが独立したモジュール品である。

電動油圧アクチュエータの中でも、当社製品である電動油圧シリンダについて、構造と原理を説明する。構造図を図2に示す。油圧回路図を図3に示す。

電動油圧シリンダは前述のように油圧システムを一つのパッケージに集約したものであり、モータ、

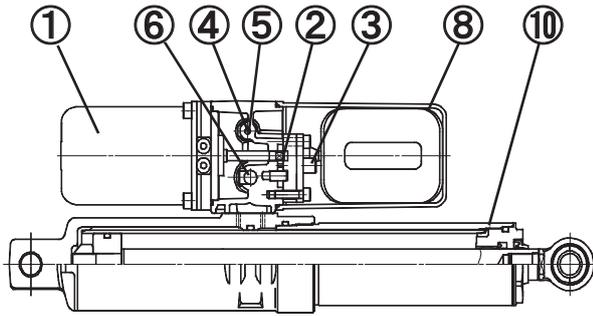


図2 構造図

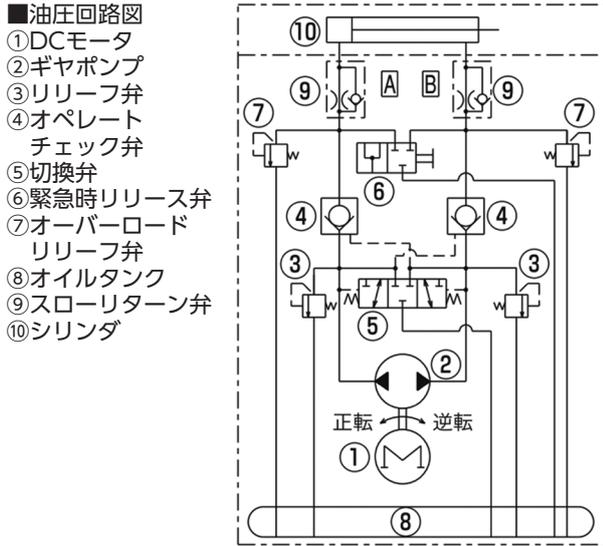


図3 油圧回路図

ポンプ、バルブ、シリンダ、タンクで構成される。油圧回路は閉回路で構成されており、外部の油圧システムと接続する必要がないため、注油や配管接続、エア抜きといった油圧施工を必要としない。電源を接続するだけで、DCモータの正転・逆転により油圧シリンダの伸縮動作を行うことができる。

以下に、電動油圧シリンダの作動説明を記す(図3)。

(1) シリンダの作動

①DCモータの駆動により②ギヤポンプを正回転させることで、⑤切換弁が図中右側へ移動し⑧オイルタンクより作動油を吸い上げる。ギヤポンプから出た圧油は④オペレートチェック弁を通過し⑩シリンダ伸び室へ送り込まれ、シリンダが伸び動作を行う。縮み室の油はシリンダの作動に伴い、再びギヤポンプに送り込まれる。過負荷時やストロークエンドに達すると③リリーフ弁が作動し、油をオイルタンクに戻すことで、圧力の上昇を抑制して製品を保護する。

縮み作動ではギヤポンプが逆回転になる点や切換弁の位置が異なる点はあるが、動作原理については伸び動作と同様である。

(2) 負荷保持

①DCモータ停止時、⑩シリンダは④オペレートチェック弁によって負荷保持される。シリンダに過大な外力が作用する場合や、温度変化によりシリンダ内部圧力が上昇した場合⑦オーバーロードリリーフ弁が作動し、油をタンクへ戻すことで圧力の上昇を抑制する。

(3) 緊急時手動操作

電源の停電や①DCモータのリード線断線等の非常時に⑩シリンダを伸縮させる場合には⑥緊急時リリース弁を操作することで対応が可能である。シリンダの伸び室・縮み室及び⑧オイルタンクが連通し、シリンダ伸縮を手動で行うことができる。

### 3. メリットとデメリット

電動油圧シリンダのメリットを以下に記載する。

(1) 省エネルギー化

非作動時はエネルギーを消費しない電動油圧にすることで、稼働中は常にエネルギーを消費する大掛かりな油圧システムと切り離すことができるため、待機中に生じるポンプの稼働などを削減できる。また、閉回路によるポンプ制御であるため配管や制御弁による損失が少なく、一般的な油圧システムよりも高効率である。

(2) 耐環境性

油圧システムにおいては、各機器を接続する配管作業とエア抜き作業が必要だが、電動油圧シリンダでは製造段階で作業済みのため不要である。さらに油圧システムでは配管継ぎ手やフランジ、油圧ホースからの外部油漏れ発生リスクがあるが、電動油圧シリンダでは製品中に内蔵するため、そのリスクは低い。

(3) メンテナンス性向上

電源一つで接続することができるため、油圧配管スペースの制限を受けることがなく、配置する自由度が高い。また、簡易にシリンダの着脱が可能となるため、着脱に伴う油の流出がなくなるなど、母機取り付けのための時間と労力を削減することができる。

(4) 小型・軽量

油圧システムを一つに集約しているという観点で、小型かつ軽量である。そのため、母機の先端などにシリンダを設置した場合であっても重量負荷が小さく、母機自体の軽量化・省エネに貢献できる。

(5) 耐衝撃性

ボールねじ式のような電動シリンダと比較すると、電動油圧シリンダは負荷が直接モータに伝わらないことから、耐衝撃性に優れる。

#### (6) 制御拡張性

電動モータの駆動に多機能のコントローラを用いて、各種センサーと組み合わせることにより、リアルタイムのデータ収集や精度の高い制御などが可能となる。

上記のようなメリットがある一方で、下記のようなデメリットも挙げられる。

#### (1) 低出力

一般的な油圧システムの油圧モータと比較すると、小型軽量の電動油圧シリンダの電動モータは出力が小さいため、電動油圧シリンダとしても低推力・低速度となる。

#### (2) 温度上昇

閉回路かつ小型軽量でタンク容量が小さい構造上、油温が上昇しやすい。また、モータの発熱影響を受けやすいという点からも油温が上昇しやすく、連続運転に向かない。

## 4. 活用範囲

電動油圧シリンダは、自動車産業や建設機械、産業ロボットや農業機械など、さまざまな分野で広く使用されている。その中でも、当社製品が主に利用されている農業機械について、その使われ方を一部紹介する。

#### (1) 代かき機

代かきとは、稲作において水田の土壌をかき混ぜたり、均したりする作業である。この作業により、水田の土壌を柔らかくし、空気を含ませることで土壌改善ができるほか、稲の根が根付きやすく、ムラなく育つという効果がある。

代かき機は、トラクタ後部に連結する作業機であり、複数の爪で土壌をかき混ぜる機能を持つ。効率的に代かきを行うため、トラクタ以上の幅を持つが、トラクタの道路走行を考慮し、折り畳み機構を有しており、この折り畳み機構の開閉動作に電動油圧シリンダが採用されている。

#### (2) あぜ塗機

あぜ塗りとは、稲作において、水田の畔（あぜ）を造成・修繕し、水田に貯めた水が外へ漏れ出ないようにすることである。あぜ塗機は、トラクタ後部

に連結する作業機であり、あぜを作るためのディスクとローラで構成される。あぜ面の土に対して、ディスクとローラを押し付けながら回転させることで、あぜ道を成形する。その機構の格納や張り出しに電動油圧シリンダが採用されている。

#### (3) 草刈り機（モア）

広い場所で草を刈る際に、トラクタ後部に装着して草刈りを行う機械を草刈り機（モア）と呼ぶ。草刈り部の角度調整や張り出し（オフセット）に電動油圧シリンダが採用されている。

今回取り上げた活用事例については、いずれも屋外での使用用途となるため、電動油圧シリンダの防塵・防水性を確保する必要がある。また、母機の振動に耐えられるように、耐振性に考慮した設計となっている。

## 5. おわりに

本稿では当社製品を事例に電動油圧アクチュエータの概要と特徴について紹介した。

今後、環境への配慮の高まりから省エネルギー化がより一層求められ、電動油圧の普及・成長が促進されると予想する。

油圧から電動油圧に置き換わることでIoT化の流れがさらに加速すると考える。これにより、ネットワークを介したデータ収集や遠隔監視が可能となることから作業時の稼働効率の向上や状態異常の早期発見など、さまざまな省エネルギー化や高効率化への期待がされる。

当社においても、社会に求められる環境にやさしい製品の開発を継続していく。

#### 参考文献

- 1) [https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/about/](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/)
- 2) [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon\\_neutral\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html)
- 3) 田中 大介：製品紹介・ミニモーションパッケージ 5 型, KYB 技報, 第 61 号, p. 50-54 (2020)
- 4) 田中 大介：農業機械用油圧機器, 油空圧技術 p. 14-19 (2022)

(原稿受付：2024年6月7日)

## 解説

## ロボット向け電油アクチュエータの開発

## 著者紹介



より た さとし  
依 田 聡

川崎重工業株式会社精密機械・ロボットカンパニー  
精密機械ディビジョン  
技術総括部  
〒651-2239 兵庫県神戸市西区榎谷町松本234  
E-mail: yorita\_satoshi@global.kawasaki.com

2017年川崎重工業株式会社に入社。ロボット向け油圧アクチュエータおよび建設機械向け油圧モータの開発・設計に従事。

## 1. はじめに

高速高精度な動きを必要とするロボット分野では電動モータ駆動が活用されることが多い。しかし近年、ヒューマノイドロボットなど過酷な環境下での力強い動きを必要とするロボットに対して、耐環境性と耐衝撃性に優れた油圧駆動を適用する動きがある<sup>1)</sup>。

その流れを受け、当社が2014年度から2021年度にかけて取組んだ、ヒューマノイドロボットを油圧駆動化するプロジェクトの開発品<sup>2)</sup>についてご紹介する。

## 2. ヒューマノイドロボット概要

油圧駆動化の対象であるヒューマノイドロボット<sup>3)</sup>は、人と同等の寸法を目指し、全長1.75m、重量84kgにて開発を進めた。また、脚部、腕部を含む合計32自由度は従来すべて電動アクチュエータ駆動としていた。これを油圧駆動化するに当たり、人の寸法からかい離しないよう、各部の小型軽量化を追求する必要がある。さらに、搭載時に他部位と干渉することを避けるため、人の形状から逸脱する突起物等をなくすことが求められる。また起き上がり時には低速だが高推力で動作することが必要となる一方で、歩行時には低推力だが高速で動作することが必要となる。以上より開発するアクチュエータには、小型軽量、高速と高推力の両立、耐衝撃性、および高い信頼性が要求される。

## 3. アクチュエータ概要

## 3.1 開発コンセプト

アクチュエータの中でも、特に高速と高推力の両立が必要とされる脚部（図1）へ適用することを目的として本アクチュエータの開発を行うこととした。

作業中の不意の衝撃などにより、電動アクチュエータは減速機構にダメージを受けるリスクがある。その一方で、耐衝撃性のある油圧アクチュエータでは、油の圧縮性や高応答な圧力リリーフ機構によってダメージを回避する効果をヒューマノイドロボットに付加することができる。

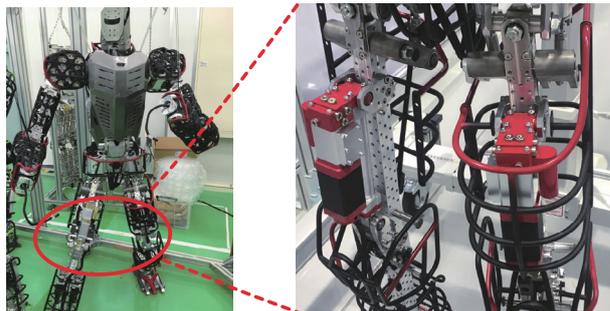
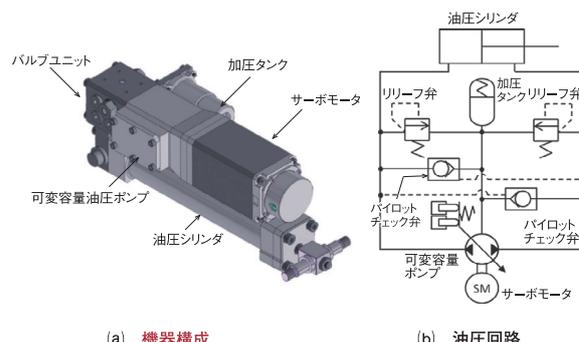


図1 脚部への適用イメージ

## 3.2 機器構成、仕様

機器構成と油圧回路を図2に、仕様を表1に示す。サーボモータ、油圧ポンプ、バルブユニットおよび油圧シリンダを一体構造とし、油圧機器間において配管を持たないコンパクトな構造とした。サーボ



(a) 機器構成

(b) 油圧回路

図2 電油アクチュエータの構成

表1 電油アクチュエータの仕様

最大推力 [N]	6,800
最大速度 [mm /s]	224
ヘッド径 [mm]	24
ロッド径 [mm]	12
ストローク [mm]	150

モータの回転に応じてシリンダへ油を送出するクローズドループ構成である。

本アクチュエータは、他の電動アクチュエータと同様にロボットコントローラを用いて駆動することが可能である。脚部の関節角度を別途エンコーダで検出し、所望の角度を実現するシリンダ位置となるようサーボモータの制御を行う。

## 4. 開発内容

小型軽量化、高速低推力と低速高推力の両立、および高信頼性を達成するため次の開発を行った。

### 4.1 小型軽量化

#### 4.1.1 小型バルブユニットの開発

バルブユニット最小化のため、要求機能の実現に最低限必要なバルブ数とし、専用バルブ、および油通路を含めたマニホールドを新規開発した。図3に示すバルブユニットを構成する各バルブには、以下の機能が要求される。

##### ①リリーフ弁

アクチュエータが受けた過大な外力を油圧で即時にかつ正確に逃がすため、高い応答性と優れたオーバーライド特性が必要となる。

##### ②パイロットチェック弁

アクチュエータ後退時、シリンダヘッド側とシリンダロッド側の両油室の体積差に起因する負圧が生じないように、低い圧力で開弁する必要がある。

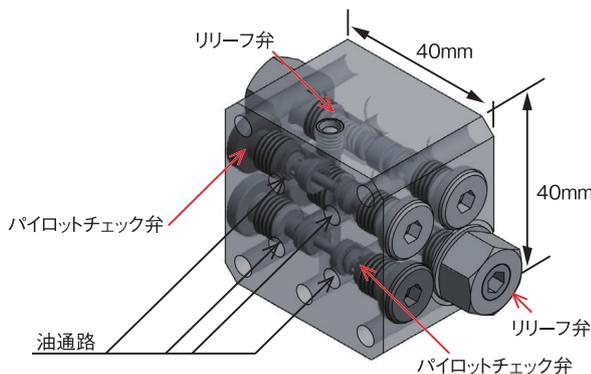


図3 バルブユニット

##### ③チェック弁

アクチュエータ前進時、タンクから油を応答性良く吸入するため、圧力損失を最小限とする必要がある。

バルブユニットを小型軽量化するため、上記機能と性能を満足する小型カートリッジ型バルブを開発し、マニホールド内の油通路本数を最少化し、かつ油通路周囲の肉厚が必要最小となるようバルブを配置することで、マニホールド外形はサーボモータ外形である40mm以下の寸法を実現した。また、油通路は圧力損失が最小となるように形状と交差角度を設定した。

#### 4.1.2 バルブユニット、ヘッドカバー、タンクの一体化

一般的な油圧アクチュエータは、バルブ・シリンダ・ポンプ・タンク等の各ブロックを連結して構成される。これらのブロックを一体化することで、各ブロックの接合面に設けていたシールを省略することや、油通路配置の自由度を高めることができ、さらなる小型化を見込める。

そこで、図4のようにバルブブロック、シリンダのヘッドカバー、ポンプのバルブカバー、タンク接続ブロックの4部品を一体化した。その際には、以下2点を考慮した。

##### ①各要素間の油通路の最適化

バルブ油室間を直線的につなぎ、シリンダおよびタンクに至る油通路の曲がりや径変化を最小限にした。

##### ②タンク容積の見直し

従来は一般産業機械の基準に従い過大なタンク容積を設定していたが、ロボットへの適用を考慮し、タンク容積の要求仕様をシリンダ両油室の体積差補償に必要な容積の1.1倍に改めた。これにより、タンク容積を従来の1/4以下に低減した。

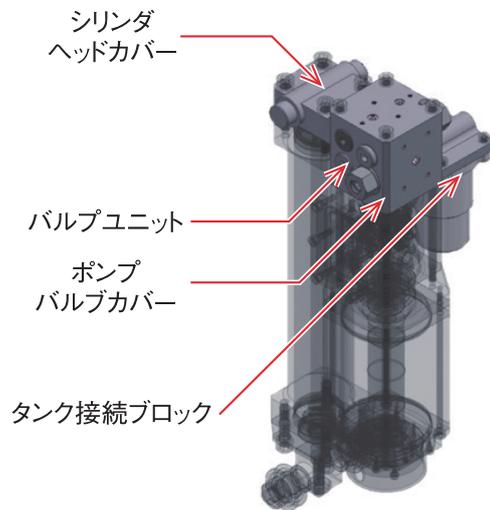


図4 各部品の一体化

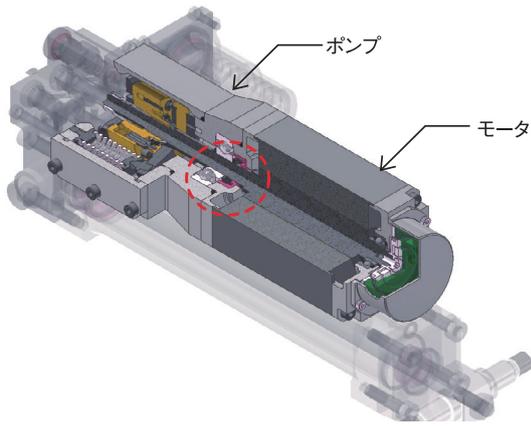


図5 軸の一体化

これらの取組みにより、アクチュエータ取付部-ポンプ取付部間の寸法を大幅に低減することができた。

#### 4.1.3 油圧ポンプとサーボモータの一体化

油圧ポンプとそれを駆動するサーボモータは同一軸上にレイアウトしており、当初は軸同士をスプラインによって結合していたが、結合部の強度が不足するという問題があった。

これを解決するため、ポンプとモータの駆動軸を一体化した構造を設計した。一体化に向け、ポンプとモータを接続するフランジ形状や、オイルシール、軸受などの最適化を図った。改良後のポンプ・モータを図5に示す。

ポンプとモータそれぞれに使用する軸受について、駆動軸一体化と共に、中間に位置する軸受を共通化することで部品点数削減と更なる小型化を実現した。

### 4.2 高速低推力と低速高推力の両立

#### (可変容量型小型斜板ポンプの開発)

ヒューマノイドロボットに求められる高推力と高速を両立するため、油圧ポンプは可変容量型であることが必要である。建設機械向および産業機械向で培った斜板式ピストンポンプの技術を基に、押しつけ容積0.75cm<sup>3</sup>および1.5cm<sup>3</sup>の可変容量型斜板式ピストンポンプの開発を行った。

ポンプ吐出流量は、アクチュエータへの位置指令

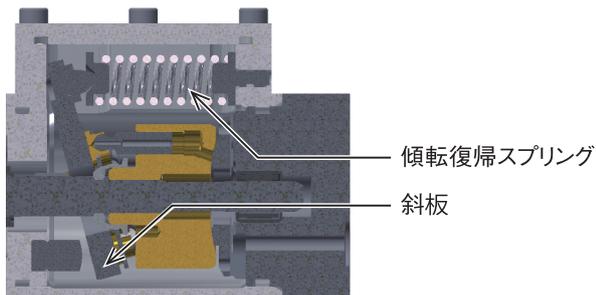


図6 可変容量型斜板式ピストンポンプ

に応じて制御されるサーボモータの回転によって供給するが、アクチュエータの負荷圧力に応じてポンプ容量を最適に制御することで、サーボモータをストールさせることなく、アクチュエータに高压の作動油を供給できる。

またピストンに生じる油圧力と斜板角を保持するスプリング荷重を最適にバランスさせることで、負荷圧力に応じて無段階にポンプ容量を制御する機構を採用しており、サーボモータからの出力を無駄なく油圧エネルギーに変換できるだけでなく、斜板駆動機構を簡略化し、電磁切換弁を省略できたことで小型軽量化にも貢献している(図6)。

図7に、従来方式(電磁切換弁による容量2段階切換方式)と本アクチュエータで採用した容量無段階制御方式の比較図を示す。従来方式では、サーボモータをストールさせずに連続使用する場合には、圧力が上昇した際に容量を大→小に切り換える必要があり、斜線部に示す領域の動力が利用できていなかった。本アクチュエータ用ポンプでは、圧力の上昇に対して、容量を無段階に制御することで、サーボモータの動力をロスなく油圧エネルギーに変換できることが可能となり、より小さい動力で全圧力域にわたって、高速/高推力を実現することができている。

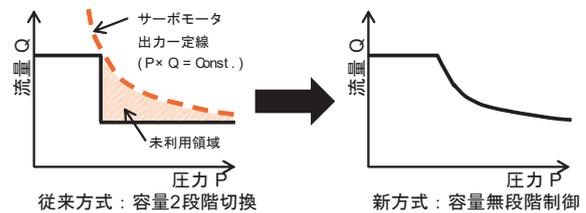


図7 流量制御方式の最適化

### 4.3 高信頼性化

#### 4.3.1 油圧シリンダの振動抑制制御

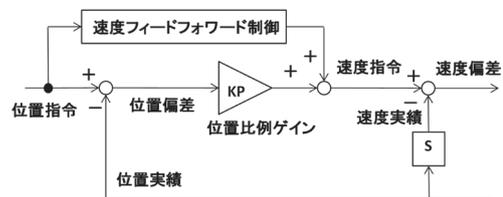


図8 位置制御ブロック図

本アクチュエータのサーボ制御システムにおける、位置制御周辺のブロック図を図8に示す。エンコーダを用いて位置実績をフィードバックし、位置指令との偏差を基にモータへ速度指令を与えるよう制御する。位置比例ゲインは、高負荷、高速時における追従性を損なわないよう調整しているため、逆に低

負荷、低速時にとっては大きい値となり、持続振動やハンチングが発生してしまう。これはサーボモータが動作してから、油が吐出されて油圧シリンダが動作するまでに遅れがあることに起因している。

この対策として、低負荷、低速時であることをモータ電流、モータ速度から判断し、位置比例ゲインおよび速度フィードフォワード制御におけるゲインを適切な値に変化させる機能開発を行った。低負荷、低速時における、本制御適用前後の油圧シリンダ速度波形比較を図9に示す。持続振動を大幅に低減できていることがわかる。

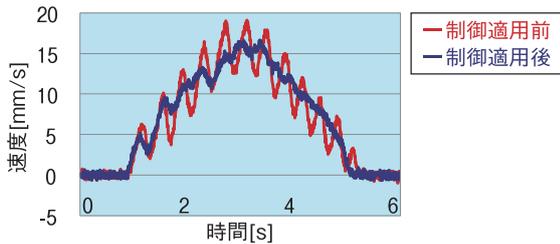


図9 振動抑制制御の効果

#### 4.3.2 シリンダ軸受、シール配置見直し

ロッド部は、黄銅製ブッシュ、シール部品、ダスト侵入防止用パッキンを組合せた構造としていたが、外部からロッドの軸方向に衝撃荷重が作用した場合に作動油が漏れるリスクがあった。また、黄銅製ブッシュの摩擦抵抗が大きいという課題があった。そこで、耐圧性能を高めた専用ロッドシールを採用し、ブッシュ材質を樹脂に変更することで上記のリスクおよび課題の解決を図った(表2)。

また、ピストン部は、ピストン支持とシールの両方を二つのピストンシールが担う構造としていた。しかし、動作条件によっては二つのシール間に作動油が侵入して圧こもりが生じ、シール性能が低下するリスクが生じる。これを解消するため、樹脂製の

表2 シリンダ軸受、シールの見直し

	ロッド部	ピストン部
見直し前		
見直し後		

軸受とピストンシール一つを並べて配置する構造とした。

この対策により、リリース弁によるセット圧を超える圧力が加わってもシリンダが問題なく動作することを確認している。

### 5. おわりに

本稿では、ヒューマノイドロボット駆動用の油圧アクチュエータをご紹介した。油圧技術と電動技術を融合することで、油圧機器を活用できる場は大きく広がると考えている。今後も油圧機器の新たな適用先の探求を続けていく。

#### 参考文献

- 1) 田中豊：油圧駆動ロボットに役立つ油圧要素技術，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol. 50，No. 2，Mar. 2019
- 2) 川崎重工技報，Vol. 181，No. 5，Nov. 2019
- 3) 垣内，掃部，下村，柚木崎，野沢，岡田，稲葉：転倒起立動作を可能とする耐荷重接点を備えた等身大人間型ロボットプラットフォームRHP2の開発，日本ロボット学会誌，Vol. 36

(原稿受付：2024年6月12日)

## 解説

## バッテリー駆動式ミニショベルの開発

## 著者紹介



たか はし きわむ  
高橋 究

株式会社 日立建機ティエラ  
〒528-0061 滋賀県甲賀市水口町笹が丘1-2  
E-mail : k.takahashi.xv@hitachi-kenki.com

1997年東北大学大学院機械電子工学研究科博士前期課程修了。同年日立建機(株)に入社、2000年から(株)日立建機ティエラに在籍し、主にコンパクト油圧ショベルの油圧システム開発に従事。現在はバッテリー駆動式電動油圧ショベルの開発に従事。

## 1. はじめに

ノルウェーやオランダなど一部の欧州の国や地域では、建設現場の脱炭素化のため、補助金などの電動化建機の導入を促す政策により、電動建機の需要が他国に先行して拡大してきた。また、その他の欧州主要都市でもローエミッション、ゼロ・エミッションゾーンの導入などにより、バッテリー駆動式建設機械の導入が進みつつある。

日本国内でも、2023年10月にGX建設機械の認定制度に関する規定が導入され、今後一部の工事で電動化建機の導入が進むと期待されている。

## 2. 油圧ショベル電動化に関する当社の取り組み

日立建機は古くから商用電源で駆動される油圧ショベルを世の中に出してきた。1962年には電動の機械式ショベル、1971年には電動の油圧式ショベルを発売し、1990年代以降、建屋内の産業廃棄物処理作業で使用される有線式電動ショベルを販売し、これまで多くのお客さまにご愛用いただいている。

2011年には、キャパシタに蓄えられたエネルギーでエンジンや旋回装置の動力を電動モータでアシストする20tクラスのハイブリッド式油圧ショベルを発売した。

一方、約20年前からリチウムイオンバッテリーを搭載した建設機械の開発にも取り組んできた。夜間工事の騒音低減などを狙った5tクラスのバッテリー駆動式ミニショベルを2006年に<sup>1)2)</sup>、電力の

ピークシフトを狙った7tクラスのバッテリー駆動式油圧ショベルを2007年に<sup>2)</sup>、3.5tクラスのバッテリー駆動式ミニショベルを2010年にそれぞれ発売した<sup>3)</sup>。この内、5tおよび3.5tクラスのバッテリー駆動式ミニショベルには、バッテリー切れに対するお客さまの不安を軽減するため、商用電源で充電しながら稼働ができる機能を搭載した。しかしながら、これらの機種はごく限られた台数をお客さまへ納入したに留まっていた。

## 3. 新たなバッテリー駆動式ミニショベルの開発

## 3.1 従来モデルの課題

前述のバッテリー駆動式ショベルの普及が進まなかった主な理由としては、①高い車体価格、②長い納期、③短いバッテリー稼働時間と大きな後端旋回半径、などが挙げられる。この内、①と②については、インバータ・電動モータ・充電器など主要電動コンポーネントが専用開発品だったことがその要因だったと考えている。一方、③については、例えば前述の3.5tクラスのモデルでは約4時間のバッテリー稼働が可能だが、現場によっては丸一日の稼働ができない。逆に、その長さのバッテリー稼働を実現するために、後端半径がエンジン機に対して大きくなり、都市土木を担うミニショベルに本来求められる、狭所作業性が失われてしまっていた。

現在はバッテリーのエネルギー密度が向上しているが、それでも丸一日の稼働を可能とするバッテリーを小さな後端半径のショベル本体に収めるのは非現実的であることに変わりない。

## 3.2 新たなバッテリー駆動式ミニショベルの検討

新たなバッテリー駆動式ミニショベル開発に際して、①汎用部品を採用する、②エンジン機と同じ外観と後端旋回半径を保つ、③商用電源を供給しながら稼働できる機能を備え、長いバッテリー稼働時間を追求しない、などに留意した。この内、①については、可能な限り自動車または商用車用の部品をそのまま、または一部流用した。②と③については、稼働する現場に商用電源が供給可能な設備があり、

かつ走行頻度が少ない，例えば屋内で産業廃棄物処理作業を行う現場などで使用されることを想定した。通常は給電ケーブルを接続した状態で稼働し，作業エリアを移動する際には給電ケーブルを取り外して稼働できれば良いとして，車体仕様の検討および部品の選定を行った。

### 3.3 5tクラス バッテリー駆動式ミニショベル

短いバッテリー稼働時間と，商用電源から給電しながら稼働ができるバッテリー駆動式後方超小旋回型ミニショベルを基本コンセプトとし，当時ゼロ・エミッションへのニーズが特に高まっていた欧州市場向けとして開発をスタートした。また日立建機グループの中・長期的な電動化製品のラインナップを検討し，5tクラスのモデルを開発対象として選定した。

車体のレイアウトにおいては，作動温度が比較的低いバッテリー・車載充電器・インバータ・電動モータなどの電動コンポーネントと，作動温度が比較的高い作動油タンク・油圧ポンプ・コントロールバルブなど油圧機器を旋回体の別の区画に格納し，油圧機器から電動コンポーネントへの熱影響を最小限にした。

さらに，エンジンレスによる低騒音・低振動をオペレータが実感できるように，ゲートロックレバーを上げると電動モータを停止するとともに，ラジエータとオイルクーラの電動ファンの回転数をそれぞれ別個に制御し，水温や油温が低いときに電動ファンの回転数を抑えた。

一方，市場でのニーズ調査の際にお客さまから多く寄せられた，エンジン機と同じ操作性とパワーを維持してほしい，というご意見に配慮し，実績のあるエンジン機の油圧システムをそのまま継承することとした。

基本コンセプトの検証を行うため，①ISO電気安全規格に準拠，②同クラスのエンジン機と同じ作業量，③遠隔監視システム，④エンジンレスによる低騒音・低振動を実感できるオペレータ快適性，などの特徴を備えた試作機を製作し，日本国内のお客さまにご使用いただき，ご意見を伺った。

その結果，スピードや力はエンジン機と同等で良いという評価を頂いた一方，いくつか改善点のご指摘をいただいた。そこで，それらのご意見を参考に，以下の改善を施した。

- (a) ショベルが作動可能な状態であることを外部に示すため，作動表示灯を追加
- (b) 電動モータが回転中に疑似的なエンジン音を発生する作動音響装置を追加
- (c) ケーブルの接続状況を確認しやすくするため，後方視界補助用カメラとモニターを追加

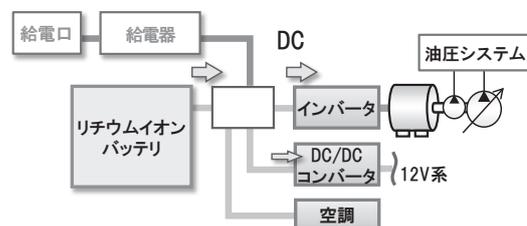
- (d) 給電ケーブルのコネクタを，過大な引っ張り力が作用すると切り離されるタイプに変更
- (e) ヒーターに加え，エアコン用電動コンプレッサとコンデンサを追加

以上の改善を反映した試作機の外観を図1に示す。本機の最大の特徴は，商用電源から給電しながら稼働ができることである。作動モードとしては，図2

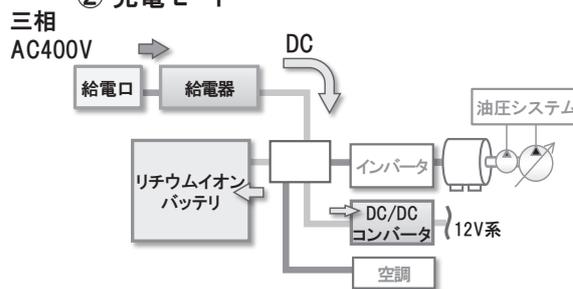


図1 開発したバッテリー駆動式ミニショベル外観

#### ① バッテリーモード



#### ② 充電モード



#### ③ 商用電源アシストモード

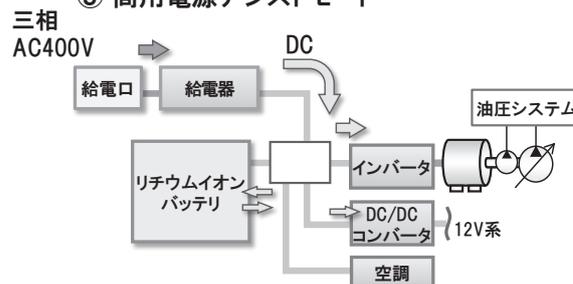


図2 3種類の作動モード

に示すように3種類を備えている。どの作動モードが選択されているかは、オペレータが運転席のモニターで確認できるようにした。

### 3.4 建設現場のゼロ・エミッション実現に向けて

現在実用化されているリチウムイオンバッテリーのエネルギー密度では、ショベルが丸一日の稼働に必要なエネルギー量とショベルに搭載可能なバッテリー容量の関係から、1日に1回の充電でショベルに期待される広範な用途に対応することは困難である。また、建設現場では電気自動車用の充電設備へのアクセスも困難だったり、同じ建設現場で稼働する複数の電動建機が短い時間で充電しようとする、瞬間的に膨大な電力が必要となり、系統電源に過剰な負荷をかけ、停電の原因となったりするといった課題がある。

このため、電動建機を建設現場で運用するためには、建設現場で運用可能な可搬式充電設備を併せて導入することが必要不可欠である。欧州では電動化が進んでいる国や地域を中心に、すでに可搬式充電設備が活用されている。今後は日本国内の電力事情に合わせた可搬式充電設備の整備が必要である。さらに、お客様の現場それぞれの事情に応じ、それら充電環境や効率的な運用などのソリューションをセットで提案する必要があると考えている。

日立建機グループは、複数のパートナーと協力し、日立建機のバッテリー駆動式油圧ショベルと、可搬式充電設備、その他の電動機材などを設置し、電動建機とその他資器材と一緒に稼働する現場を再現し、効率良くそれら資器材を活用するソリューションの研究を行うための拠点として、電動建機のゼロ・エミッション研究施設（図3）を2024年5月27日に千葉県市川市に開設した。



図3 電動建機のゼロ・エミッション研究施設

## 4. 今後の展望と課題

本機は、電動化ニーズが特に高い欧州専用モデルとして開発が進められた。しかし、近年日本国内においても、GX建設機械認定制度の導入などを受け、引き合いが増加しつつある。価格の高さや充電インフラなどの課題があるものの、今後日本国内においても、電動建機が活躍する建設現場が増えてくると期待している。

一方で、最近では欧州においても、補助金の支給要件や内容が見直しされるなど、これまで旺盛だった電動建機の需要についても一時期の勢いが一段落しつつあると聞く。また、中国メーカーが低価格な電動建機などで存在感を示しつつある。

そのような状況の中、今後は電動建機の周辺機器やサービスをわかりやすくソリューションとしてお客さまに提案するとともに、より少ない電力でいかに効率よく作業ができるか、つまり電費の改善がより重要になってくる予想される。今回紹介した5tクラスバッテリー駆動式ミニショベルではエンジン機と同じ油圧システムを採用したが、今後は電動であることのメリット（高精度な回転数制御が可能、など）を活かした油圧システムの採用についても検討していく必要があると考えている。

## 5. おわりに

日立建機グループにおけるこれまでの電動化への取組みと、5tクラスバッテリー駆動式ミニショベルの開発の背景とコンセプト、特長についてご紹介した。

これからも、電動建機の開発に携わる身として、お客さまの困りごとに寄り添い、新たな価値を創造する技術・製品開発に取り組み、グローバルな低炭素社会の実現、および社会・環境・お客さまの課題解決に貢献していく所存である。

### 参考文献

- 1) 木村敏広：2WAYエコショベルの開発（バッテリー型油圧ショベル）、建設施工と建設機械シンポジウム論文集、(社)日本建設機械化協会、p. 133-136 (2007)
- 2) 大平修司：2種類のバッテリー駆動ショベルの開発と今後の展開、建設の施工企画、No. 695、p. 54-59 (2008)
- 3) 湯上誠之：バッテリー駆動式油圧ショベルの開発、建設施工と建設機械シンポジウム論文集、(社)日本建設機械化協会、p. 129-132 (2011)

(原稿受付：2024年5月24日)

## 会議報告

IFK2024における  
フルードパワー関連技術の研究動向

## 著者紹介



こばやし わたる  
小林 亘

岡山理科大学情報理工学部  
〒700-0005 岡山市北区理大町1-1  
E-mail : w-kobayashi@ous.ac.jp

2015年芝浦工業大学大学院理工学研究科博士課程機能制御システム専攻修了。同ポストドク研究員を経て、2016年岡山理科大学助教、2018年同講師、2024年同准教授、現在に至る。日本フルードパワーシステム学会、計測自動制御学会などの会員。博士（工学）。



写真2 発表会場の様子 (Opening ceremony)

れる広い会場であった。

## 1. はじめに

2024年3月19日～21日にThe 14th International Fluid Power Conference (IFK2024) がドレスデン(ドイツ)のTU Dresden Hörsaalzentrumで開催された(写真1)。この会議は、1974年にAFK (Aachener Fluidtechnisches Kolloquium) として初めて開催され、その後1998年からはアーヘン工科大学とドレスデン工科大学の共同開催となっており、交互に開催されている。今回はドレスデン工科大学での開催の年であった。なお、この会議は欧州ではもっとも伝統あるフルードパワーに関する会議の一つであり、筆者は今回初めて参加した。本稿では会議の様子や欧州におけるフルードパワーの研究動向について報告させていただく。なお、今回のテーマは「Sustainable Productivity」となっており、これらのキーワードに関連した発表が多くみられた。写真2はオープニングの様子であり、2枚のスクリーンが左右に投影さ



写真1 会場 (Hörsaalzentrum)

## 2. 研究論文発表の動向

会議では、1日目に3部屋12セッションで口頭発表42件、2日目に2部屋6セッションで口頭発表22件、3日目に2部屋6セッションで口頭発表20件が実施され、合計84件の論文発表が行われた。セッション毎の発表件数を表1にまとめる。分野の構成としては、圧倒的に油圧関連が占めている。空気圧に関するものが2セッション、水圧に関するものが1セッションとなっており、Hydrogen (水素)に関するものも1セッション設けられていた。特に、Mobile applicationsやIndependent metering in mobile applications, System layouts in mobile machinesでは、ハイブリッドもしくは電動建機の自動化に関する研究<sup>1)</sup>、DigitalizationやDigital constructionでは、深層学習や画像認識の適用に関する研究<sup>2)</sup>など、建設機械を対象としたさまざまな研究が発表されていた。また、EfficiencyやSustainable pneumaticsなどの本会議のテーマにもなっているSustainabilityとProductivityに関する研究も興味深いものであった<sup>3)</sup>。発表者の内訳は、ドイツ64%、その他欧州19%、アジア12%、アメリカ5%となっており、日本からは1件の発表のみであった。なお、発表論文はピアレビュー有りのものと無しのものに分けられており、全体の49%となる41件がピアレビュー有りの論文であった。一方で、会場内にはエキシビジョンブースも別会場として設けられており、3部屋と1階フロア部を合わせ

表1 講演論文の分野別件数

Session topics	Session number	Paper number
Efficiency	1	4
Fundamentals	1	3
Water hydraulics	1	4
Valves	1	4
Tribology	1	4
Materials	1	3
Mobile applications	1	4
Pumps	1	4
New and special applications	2	6
Independent metering in mobile applications	1	3
Sustainable pneumatics	1	3
Industrial control strategy	1	3
Pneumatics	1	4
Control	1	4
System design and architecture	2	7
Simulation	1	4
System layouts in mobile machines	1	4
Digitalization	1	4
Digital construction	1	3
Actuators and sensors	2	6
Hydrogen	1	3
Total	24	84

て18社の展示が行われていた。各企業ブースには担当者がおり、実際の製品を見ながら詳しい話を聞くことができるようになっていた。

### 3. 基調講演の動向

2日目には2件の基調講演が実施された。1件目はドレスデン工科大学のJürgen Weber教授による「Intelligent mobile machines contribute to productivity and sustainability of construction sites」と題した講演であり(写真3)、2件目はボッシュ・レックスロス社のSteffen Haack氏、フェスト社のAnsgar Kriwet氏、ドイツ機械工業連盟のHartmut Rauen氏による「Data management in fluid power technology」と題した講演であった。

3日目にも1件の基調講演が企画されており、Boris Nikolai Konrad氏による「KI」と題したAIに関連する講演では、冒頭にMemory expertと紹介されたKonrad氏が、カードの絵柄と数字を全て短時間で暗記し、壇上で1枚ずつ開きながら当てるといったパフォーマンスも披露し会場を沸かせていた(写真4)。



写真3 J. Weber教授による基調講演の様子



写真4 B.N. Konrad氏による基調講演の様子



写真5 Farewell addressの様子

会議の最後には、会場を市内中心部のAlbertinumに移してFarewell addressが盛大に行われた(写真5)。

### 4. おわりに

本稿では、IFK2024の概要について報告した。会議中は実験室を開放しての建設機械のデモンストラーションやラボツアーなども実施されており、盛況裏に終えられた。一方で、日本からの参加者は確認できただけでも著者を含めて4名しかおらず、日本との交流が積極的に行われているとはいえない状況であった。学会関係者の一人としてこのような交流を積極的に行いたいと考えているが、多くの方が国外の研究者および技術者との関係をより深めていただけたら幸いである。なお、次回のこの会議は2026年の3月にアーヘンで開催予定となっている。

参考文献

- 1) B. sender, A. Opgenoorth, K. Schmitz : Automated system synthesis for electrified mobile machinery, 14th IFK Conference Proceedings, pp. 348-359, 2024
- 2) L. Michiels, M. Westermann, B. Kazenwadel, C. Geiger, M. Geimer : A comparison of state-of-the-art network architectures for instance-segmentation in forest environment, 14th IFK Conference Proceedings, pp. 937-948, 2024
- 3) J. Sprink, K. Schmitz : Product carbon footprint of hydraulic and pneumatic components – challenges in accounting and comparability, 14th IFK Conference Proceedings, pp. 496-504, 2024

(原稿受付：2024年6月8日)

会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp>) をご覧ください。

2024年度オータムセミナー  
**「水圧技術の課題と現状」**  
 開催日時：11月28日(木) 13:00 ~ 17:00

地球環境負荷低減への取り組みが国際社会で進む中、対環境性や鉱物油の利用削減という観点で、水圧技術の普及が期待されています。本セミナーでは、水圧技術に関する課題を整理し、近年の研究や取り組みについて取り上げます。

本セミナーはオンラインでの開催を予定しております（※会場での開催はございません）。詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。皆様のご参加を心よりお待ちしております。

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 (8月10日現在)	770	8	105	122
差引き増減	-1	±0	±0	±0

正会員の内訳 名誉員18名・シニア員68名・ジュニア員83名・その他正会員601名

〈新入会員〉

正会員

栗田 和則 (ダイキン油機エンジニアリング株式会社)

逸見 祐介 (三ツ星ベルト株式会社)

学生会員

服部 光希 (東京大学)

## トピックス

## 学生さんへ，先輩が語る —失敗を恐れずチャレンジを—

## 著者紹介



こ じま かず き  
小 島 一 輝

株式会社ジェイテクト  
〒448-0032 愛知県刈谷市朝日町1-1  
E-mail : kojimakazuki9981@gmail.com

2021年近畿大学大学院総合理工学研究科メカニクス系工学専攻博士前期課程修了。同年株式会社ジェイテクトに入社。配属から2023年まで歯車開発部に所属し歯面修整を施した歯車の開発業務に従事。2023年から現在に至るまでトヨタ自動車に出向し工具設計のデジタル化業務に従事。

### 1. はじめに

#### 1.1 自己紹介

私は小さな頃から好奇心旺盛であった。小学生で家のパソコンを触って、便利ツールなどを勝手にインストールしていたが、両親は気付いていなかったと思う。両親は機械音痴なので、電化製品の設定や故障した時によく頼られていた。祖父のパソコンの動作が重いので見てほしいと言われ、解決した時に500円を貰って大喜びしたことを覚えているが、今思えば安過ぎる報酬に感じる。

大学は機械工学科を専攻した，工場見学で目の前で製品が加工され，組み立てられるところを見て，ものづくりに携わりたいと思ったからである。大学に入っても，工場見学にたくさん行ったが，効率良く大量生産している様子を見るのはとても気持ち良かった。

大学院でトライボロジーを学び，とても興味深く感じた。そこでこの経験が活かすことができるベアリングや，パワーステアリング（歯車含む）で大きなシェアを持つ弊社に入社した（図1）。入社後は歯車事業部で歯車の開発業務に携わっている。



図1 電動パワーステアリングの一例

#### 1.2 会社紹介

弊社は2006年1月に光洋精工株式会社と豊田工業株式会社が合併し発足した。自動車部品，ベアリング，工作機械，ギヤなどのさまざまな事業を展開しているグローバル企業である（図2）。そのどれもが世界のものづくりを支えており，ものづくりの現場に貢献してきている。



図2 ベアリングの一例

#### 1.3 職場紹介

私が所属する歯車事業部の開発拠点は，愛知県高浜市にある田戸岬工場にあるテクニカルセンターである（図3）。田戸岬工場では，ドライブシャフトや電子制御カップリング，電磁クラッチの生産を主にに行なっている。電子制御カップリングは4輪駆動の車に搭載される部品で，通常時FF走行だが，路面状況に応じて4輪駆動にする働きを持つ。

テクニカルセンターでは，ドライブシャフト，プロペラシャフト，電子制御カップリング，トルク感応式差動制限デフの設計・開発を行っている。



図3 田戸岬工場 テクニカルセンター

## 2. 学生生活を振り返って

大学では、教授がしっかりしていて、実績もある研究室を志望した。自分がマイペースな性格なので、多少厳しい先生の方がいいと思ったからである。その研究室がトライボロジーの研究室であった。研究内容は、無潤滑・水潤滑で駆動させた歯車の摩擦摩耗特性についてであった。基礎研究であるため、他の研究に比べて地味ではあるが、歯車を組み付けて運転を行うことや、試験後の歯車を測定して、摩耗していく様子を実際に確認できるのは楽しかった。研究で苦勞したことは、計算などで証明できないことが多いことだった。たとえば測定で予想外の摩耗が発生した時に発生原因の追究ため、文献調査や素材系の教授に質問して、根拠を元素測定機などで調査することなど模索する作業が特に苦勞した。その中で試験の組付け誤差は特に気にしなければならないことだと学んだ。試験経験の浅いころ、私は組付け作業を厳密に行えていなかった。組付け、取り外しがたくさんある試験で、測定機の予約の時間が迫っているため、焦りが出ていたからである。ただし、厳密に取り付けていない歯車では片当たりと呼ばれる偏摩耗を生じてしまっていた。幸い予備の歯車があったので、大事にならなかったが、組付けを厳密に行わなかったことを反省した。そこからは組付け部に印をつけて組付け誤差を減らすよう作業を行い、無事に試験を完了できた。

大学では、たくさんのことにチャレンジして、失敗してほしい。その失敗は社会人になったときに、避けることができる。社会人になってもたくさん失敗するだろうが、気を落とすことはない。前を向いて同じ失敗を繰り返さないようにして成長してほしい。

## 3. 仕事紹介と心構え

### 3.1 業務紹介

私が所属するグループでは、自動車やロボット用の歯車の開発を行っている。歯車の歯面に修整を加えることで従来の歯車より高効率な歯車を開発し、搭載製品の滑らかな駆動を目指している。スカイピング加工と呼ばれる、現在の歯車小型化の流れに必須な加工法を、弊社工作機械でできることに他社との優位性がある(図4)。

スカイピング加工とは、工具と工作物を相対的に傾けて、同期回転させることにより発生する相対速度を用いて歯車加工を行う工法である。この工法の原理は、1960年代にヨーロッパで提案されていたが、当時は加工機の剛性や制御の問題で実用化には

至っていなかった。近年の工具、制御、機械などの技術進化によって実用化できるようになり、内歯車や、小さな歯車の加工で注目されている<sup>1)</sup>。

私はこの加工法を含むさまざまな加工法で作成した歯車を比較する役割を担っている。比較方法は減速機に各加工法で作成した歯車を組み込んで運転を行い、運転データや、運転後の歯車の歯面性状の確認を行うものである。大学院時代にやっていたことと、スケールは大きくなったが同じであった。試験機が大きくなり、安全教育が行われているので、安全の意識をしっかりと持つようになった。大学院時代の試験は回転物なのに何もカバーもなく危険すぎる状態で運転しており、巻き込み事故がなくて運が良かったと今は思う。

試験後の歯車の測定だが、歯車測定機という機械を使用する。歯車測定者は歯車の基礎知識がないと設定が出来ないので使い始めはとても苦勞した。大事な数値を間違えてしまうと、数万円する測定子がぶつかって破損するのである。そのため大学院時代は委託の会社の方に測定もお願いしていた。学生の時に歯車測定もチャレンジしていれば、社会人になってから測定子を壊すことはなかったかもしれない。

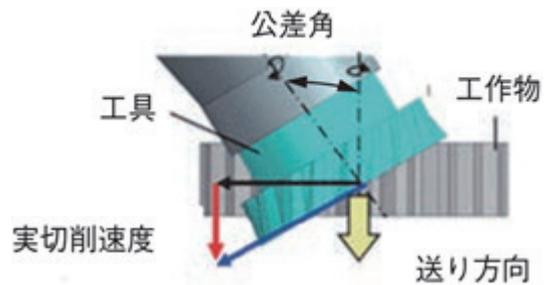


図4 スカイピング加工法

### 3.2 業務を進める際に心がけていること

私が業務を進める際に心がけていることは、三つある。一つは「業務の優先順位設定」である。各業務の期限をメンバーと確認し、業務の優先順位を設定していく。また業務内でも実行する順番を決めておくことで、作業中は作業に集中して臨むことができ、作業の抜けもなくすことができた。試験が思い通りにいかないことはたくさんあるが、作業忘れて試験が失敗してやり直しというのはもったいないことである。もし、仕方なく業務が遅れても設定した優先順位に従って、残業するのか次の日にまわすのか決めることができるので日程計画を引き直す必要もない。

二つ目は「ボールをなるべく早く次の人に渡す」である。グループでの開発で自分の作業待ちになっ

ている状態は、開発期間が長くなる原因となるので、できるだけ早く終わらせて次の人に渡せるようにしている。次の人が期間に余裕をもって業務を行えることにもつながる。自分一人で完結できるものについては後回しの方が全体最適だと考える。

最後は「遠慮せずにわからないことは聞く」である。業務でわからないことはたくさん出てくると予想される。自分で考えてから聞くことは理にかなった意見だが、5分考えてわからないことは聞いた方がいい。私は自分で考えた方が良い派だったが、半日以上考えてわからず上司に相談したら自分では思いつかない答えだったことを何度も経験した。上司の方針によっては、答えを教えてはくれない方もいるが、考え方やヒントぐらいは教えてくれると思う。「聞くは一時の恥、聞かぬは一生の恥」ということわざもあるように、聞かないでその場を乗り切れても一生わからないままなので、一度聞いて知識として取り入れてほしい。

大事なことは二度同じことを聞かないようにすることである。聞いたことはメモをして、自分のものにし、専門分野に自信を持った技術者になってほしい。

#### 4. 終わりに

私も社会人としてまだまだ未熟であり、このように学生時代や業務の心がけを語るのには恥ずかしいところではあるが、この経験が未来へはばたく皆さんの参考になればとてもうれしいことである。地元で就職したいと就職先を狭めず、世界とは言わずとも日本国内には視野を広げてほしい。私は地元を離れて人生観が変わったし、住む場所が変わったので休日には、今まで行ったことのない場所への旅行もすぐ行けるようになった。テーマパークもいいが、日本の美しい自然や、お寺なども廃れてしまう前に行ってもいい思い出になると思う(図5, 6, 7)。

最後に、人生は仕事がメインではないので立派な社会人なら、仕事も遊びも本気で取り組んで、人生を楽しんでほしい。



図5 鳴沢洞穴



図6 合掌村



図7 法多山

#### 参考文献

- 1) 張琳, 夏田一樹: スカイビングセンタを用いた複合加工技術の開発—シンクロスリーブ工程集約への取り組み—, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1016, p. 73-78 (2018)

(原稿受付: 2024年6月7日)

## 企画行事

2024年春季講演会併設セミナー  
「触覚技術と応用技術」

## 著者紹介

ひょう どう のり かず  
兵 藤 訓 一東京計器株式会社  
〒327-0816 栃木県佐野市栄町1-1  
E-mail : n-hyoudou@tokyo-keiki.co.jp

1993年 株式会社トキメック（現 東京計器株式会社）入社、油圧機器・システムの開発・設計に従事、日本フルードパワーシステム学会の会員

## 1. はじめに

2024年春季講演会併設セミナー「触覚技術と応用技術」は、2024年6月20日（木）に開催された。

今回も、対面形式（個人）とオンライン配信（団体）の併用で開催された。参加者は、個人48名、3団体と盛況であった（写真1）。

本セミナーは学会誌の制作を担当する編集委員会と講演会やセミナーの企画を担当する企画委員会との合同企画行事である。本年度は企画委員会が主導で特集号の企画とセミナーの実施を担当した。

本セミナーは先に学会誌（55巻第2号（2024年3月号））において同テーマの特集を組み、執筆された方々の中から5名の講師をお招きして講演を行っていただいた。学会誌をテキストとして講演していただくことで、解説記事を深く理解していただ



写真1 セミナー会場

く機会としている。

本特集号とセミナー企画趣旨については、学会誌<sup>1)</sup>を参照されたし。本稿では当日行われた各講演の概要について報告する。

## 2. セミナーの概要

篠田裕之氏（東京大学）には、「空中超音波による触覚フィードバック」<sup>2)</sup>と題して、空中超音波による非接触での触覚提示技術をご講演いただいた（写真2）。本講演では、空中超音波触覚提示技術のポイントとして触感を強める方法や、圧覚の提示方法、冷覚の提示方法などについて解説いただいた。

吉満俊拓氏（神奈川工科大学）には、「空気圧腱駆動機構を用いた人工指による材質認識システム」<sup>3)</sup>と題して、空気圧ロボットを対象とした人工指のリアルタイムに識別できる材料認識システムをご講演いただいた（写真3）。本講演では、ヒトの触覚感性機能の評価方法に対するニューラルネットワークを用いた材質認識について解説いただいた。

菊池武士氏（大分大学）には、「繊細ハプティックデバイスの実現を目指したMR流体デバイスとその評価方法の開発」<sup>4)</sup>と題して、MR流体デバイスとその評価方法をご講演いただいた（写真4）。本講演では、MR流体の磁気レオロジー特性やトルク特性の評価方法について各種の方法を解説いただいた。

江沢迪和氏（株式会社大林組）には、「建設重機



写真2 篠田氏のご講演



写真3 吉満氏のご講演



写真5 江沢氏のご講演



写真4 菊池氏のご講演



写真6 中村氏のご講演

の臨場感のある遠隔操作の実現を目指して<sup>5)</sup>と題して、建設重機の遠隔操作に対する「リアルハプティクス技術」事例をご講演いただいた(写真5)。本講演では、力覚を伝送する技術を使用することで、柔らかいものと硬いものを判断してつかむ事例紹介として、建設重機を用いた実際の実験の様子を、動画を基に解説いただいた。

中村太郎氏(中央大学)には、「VR/AR空間におけるフルードパワーを用いたウェアラブルな全身型力覚提示システム<sup>6)</sup>」と題して、フルードパワーを用いたウェアラブルな全身型力覚提示システムをご紹介いただいた(写真6)。本講演では、ゲームの世界に没入しているような感覚を目指してご研究なされている、「双腕装着型力覚提示装置」「下肢装着型外骨格」「靴装置」などを動画を交えて解説いただいた。

### 3. おわりに

本稿では、2024年春季講演会併設セミナーの概要について報告した。普段関わりの少ない触覚に関するテーマであったことから多くの参加者が得られ、質疑応答も活発に行われた。

最後に、本セミナーにおいて貴重な講演をいただ

いた講師の皆様にご礼申し上げますとともに、本セミナーの実施にご協力いただいた編集委員、企画委員および学会事務局の皆様へ深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 兵藤訓一:「触覚技術と応用技術」発刊にあたって, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 55, No. 2, p. 54 (2024)
- 2) 篠田裕之:「空中超音波による触覚フィードバック」, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 55, No. 2, p. 55-58 (2024)
- 3) 吉満俊拓:「空気圧腱駆動機構を用いた人工指による材質認識システム」, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 55, No. 2, p. 59-63 (2024)
- 4) 菊池武士:「繊細ハプティックデバイスの実現を目指したMR流体デバイスとその評価法の開発」, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 55, No. 2, p. 64-67 (2024)
- 5) 江沢迪和:「建設重機の臨場感のある遠隔操作の実現を目指して」, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 55, No. 2, p. 72-75 (2024)
- 6) 澤橋龍之介, 中村太郎:「VR/AR空間におけるフルードパワーを用いたウェアラブルな全身型力覚提示システム」, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 55, No. 2, p. 76-80 (2024)

(原稿受付: 2024年6月25日)

会 告

〈理事会・委員会日程〉

7月12日	基盤強化委員会
7月25日	企画委員会
8月7日	情報システム委員会
8月7日	編集委員会

〈委員会報告〉

2024年度第1回基盤強化委員会

7月12日 16:00~17:00

機械振興会館 B3-3 ハイブリッド開催 (参加者15名)

- (1) 委員紹介
- (2) 産学連携 フルードパワー研究者リストの更新
- (3) IFPEX2024カレッジ研究発表コーナーについて
- (4) 2024年度キャリア支援セミナーについて
- (5) 出版のご紹介
- (6) その他

2024年度第1回企画委員会

7月25日 15:00~17:00

オンライン開催 (参加者18名)

- (1) 新委員紹介
- (2) 2024年春季フルードパワーシステム講演会開催報告
  - 1) 講演会, 併設セミナー, 技術懇談会
  - 2) 最優秀講演賞について
  - 3) その他
- (3) 2024年度オータムセミナーについて
- (4) 2024年度ウィンターセミナーについて
- (5) 講演論文集のフォーマットについて
- (6) その他

2024年度第1回情報システム委員会

8月7日 13:00~14:00

オンライン開催 (参加者12名)

- (1) 2024年度委員の確認
- (2) 学会HPの更新状況確認
- (3) 学会HPのアクセス状況
- (4) 会議報告
  - ・担当および執筆者の選定
- (5) HP内容の更新検討
- (6) その他

2024年度第2回編集委員会

8月7日 14:00~17:00

オンライン開催 (参加者18名)

- (1) 会誌特集号の現状と企画
  - 1) Vol.55 No.E1 「緑陰特集」
  - 2) Vol.55 No.5 「電動フルードパワー技術」
  - 3) Vol.55 No.6 「機械工学を学ぶ皆さんへ ―フルードパワーのすすめ―」
  - 4) Vol.56 No.1 「IFPE2024」
  - 5) Vol.56 No.2 「JFPS国際シンポジウム広島2024」
  - 6) Vol.56 No.3 企画・編集合同企画
- (2) その他
  - 1) 会議報告
  - 2) 一般投稿について
  - 3) 今後の特集について

## 会 告

## 日本フルードパワーシステム学会 2024年度フェロー認定者推薦のお願い

日本フルードパワーシステム学会フェローは、フルードパワー技術の進展に貢献した正会員、本学会の諸活動に貢献した正会員に贈られる名誉ある称号です。認定された本人には本学会より認定証を交付します。

本年も当学会の「フェローに関する規程」にもとづき、日本フルードパワーシステム学会フェロー認定者の推薦をお願いいたします。

推薦の方法など詳しくは学会ホームページをご覧ください。

## 会 告

## 日中若手研究者交流事業 招聘者募集のお知らせ

日本フルードパワーシステム学会では、国際交流事業の一環として毎年中国のフルードパワー学会との間で交互に一名の研究者を派遣しています。この派遣では、中国の多くの研究者・技術者らとの情報交換、相互交流を行えるほか、中国機械工程学会流体伝動及び制御分会の主催する学会での招待講演も予定されます。具体的には今回は、燕山大学で開催される国内学会 Fluid Power Transmission and Control (10月27-30

日)への招聘となります。

招聘を希望される方は、10月31日(木)までに以下宛にメールにてお申し出ください。なお、複数名の申し出がありました場合には、委員長の判断での決定とさせていただきます。どうぞ奮ってご応募いただきますよう、よろしくお願い申し上げます。

国際交流委員長 伊藤和寿 (芝浦工業大学)

kazu-ito@shibaura-it.ac.jp

## 会 告

## 日本フルードパワーシステム学会 2024年度受賞候補者募集のお知らせ

当学会は、我が国の油圧・空気圧・水圧工学の振興と発展の奨励を目的として毎年優れた研究・技術を表彰しております。本年も当学会の「表彰規程」にもとづき、日本フルードパワーシステム学会2024年度受賞候補者を募集いたします。

つきましては、独創的な研究、画期的な新技術、累積効果抜群な研究者、技術者などについて、適格な受賞候補者をご推薦ください。

募集要項など詳しくは学会ホームページをご覧ください。

## 会 告

英文論文誌の特集号（第12回フルードパワー国際シンポジウム  
広島2024）のお知らせ

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会では、この度、英文論文誌「JFPS International Journal of Fluid Power System」(Volume 18, 2025年予定) に「第12回フルードパワー国際シンポジウム 広島2024」の特集号を企画しております。詳細は、英文論文誌のホームページ ([https://www.jfps.jp/eng/e02\\_01.html](https://www.jfps.jp/eng/e02_01.html)) に掲載予定で

す。当該シンポジウムで発表される皆様、どうぞ奮ってご投稿ください。

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会  
論文集委員会

## お詫びと訂正

本学会誌55巻、第1号（2024年1月）表紙および背表紙におきまして、以下のような記載ミスがありました。

【誤】特集「フルードパワーシステムを活用した超高压技術」

【正】特集「フルードパワーを活用した超高压技術」

関係各位に大変ご迷惑をおかけしたことを深くお詫び申し上げます、ここに訂正させていただきます。

〈勝美印刷株式会社〉

## 会 告

## 共催・協賛行事のお知らせ

## 共催・協賛行事

<p><b>IFPEX2024 第27回油圧・空気圧・水圧国際見本市</b>            主 催：一般社団法人 日本フルードパワー工業会, 産経新聞社            開 催 日：2024年9月18日(水)～9月20日(金)            会 場：東京ビッグサイト 東2, 3ホール (東京都江東区有明3-11-1)            U R L：https://www.ifpex.jp/2024/</p>
<p><b>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～」2024</b>            主 催：公益財団法人 計測自動制御学会 制御部門            開 催 日：2024年9月26日(木)～9月27日(金)            会 場：オンライン開催            U R L：https://www.sice-ctrl.jp/jp/wiki/wiki.cgi/c/semi?page=design2024</p>
<p><b>計測自動制御学会 産業応用部門2024年度大会</b>            主 催：公益財団法人 計測自動制御学会 産業応用部門            開 催 日：2024年11月20日(木)            会 場：法政大学小金井キャンパス (富山県富山市五福3190)            U R L：https://www.sice.or.jp/ia-div/2024_taikai.html</p>
<p><b>第67回自動制御連合講演会</b>            主 催：システム制御情報学会 (幹事), 日本機械学会, 計測自動制御学会, 化学工学会, 精密工学会, 電気学会, 日本航空宇宙学会            開 催 日：2024年11月23日(土)～11月24日(日)            会 場：姫路商工会議所 (兵庫県姫路市下寺町43)            U R L：https://rengo67.iscie.or.jp/</p>
<p><b>2024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・熱流体力学分野・振動分野)</b>            主 催：一般社団法人 日本機械学会 計算力学技術者資格認定事業委員会            試験日程：2024年11月29日(金) 1級認定試験 (固体力学分野・熱流体力学分野・振動分野)                      2024年12月5日(木) 2級認定試験 (熱流体力学分野・振動分野)                      2023年12月6日(金) 2級認定試験 (固体力学分野)            会 場：下記HPを確認ください            U R L：https://www.jsme.or.jp/cee/</p>
<p><b>Grinding Technology Japan 2025 / SiC, GaN加工技術展</b>            企 画：日本工業出版株式会社, 株式会社産経新聞社            開 催 日：2025年3月5日(水)～3月7日(金)            会 場：幕張メッセ (千葉県千葉市美浜区中瀬2-1)            U R L：https://gtj-expo.jp/2025/jp/</p>
<p><b>第4回安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議 (COMPSAFE2025)</b>            主 催：日本計算工学会, 日本計算力学連合            開 催 日：2025年7月1日(火)～7月4日(金)            会 場：神戸国際会議場 (神戸市中央区港島中町6-9-1)            U R L：https://www.compsafe2025.org</p>

各行事の最新情報は、主催者のホームページまたは各行事のURLからご確認ください。

## 会 告

# 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 賛助会員一覧表

(株)IH  
 (株)アイシン  
 (株)明石合銅  
 アズビル(株)藤沢テクノセンター  
 アズビルTACO(株)  
 (株)アドヴィックス  
 アネスト岩田(株)  
 出光興産(株)  
 イナバゴム(株)  
 イハラサイエンス(株)  
 (株)インターナショナル・サーボ・データー  
 (株)打江精機  
 (株)エイムテック  
 エコ技術研究所(公)  
 SMC(株)  
 SMC中国有限公司  
 (株)NF1  
 ENEOS(株) 潤滑油カンパニー  
 (株)荏原製作所  
 (株)大阪ジャッキ製作所  
 大瀧ジャッキ(株)  
 オカダイナダストリ(株)  
 鹿島通商(株)  
 (株)桂精機製作所  
 神威産業(株)  
 カヤバ(株)  
 川崎重工業(株)精密機械・  
 ロボットカンパニー  
 川崎油工(株)  
 川重商事(株)  
 (株)神崎高級工機製作所  
 キャタピラー・ジャパン(公)  
 協和シール工業(株)  
 旭東ダイカスト(株)  
 (株)クボタ  
 (株)工苑  
 甲南電機(株)  
 (株)古河製作所  
 (株)コガネイ  
 コスモ石油リブリカンツ(株)  
 (株)小松製作所開発本部

(株)小松製作所試験センタ  
 (株)小松製作所油機開発センタ  
 (株)阪上製作所  
 (株)鷲宮製作所  
 佐藤金属(株)  
 産経新聞 東京本社  
 三輪精機(株)  
 三和テック(株)  
 (株)ジェイテクト  
 (株)ジェイテクトフルードパワーシステム  
 CKD(株)  
 (株)島津製作所  
 ジヤトコ(株)  
 勝美印刷(株)  
 新電元メカトロニクス(株)  
 住友建機(株)  
 住友重機械建機クレーン(株)  
 住友重機械工業(株)  
 制御機材(株)  
 第一電気(株)  
 ダイキン工業(株)  
 ダイキン・ザウアーダンフォォス(株)  
 大生工業(株)  
 (株)TAIYO  
 タイヨーインタナショナル(株)  
 ダイワ(株)  
 (株)タカコ  
 (株)タダノ  
 ダンフォォス(株)  
 (株)都筑製作所  
 東京計器(株)  
 東京計器パワーシステム(株)  
 東京メータ(株)  
 東北特殊鋼(株)  
 東明工業(株)  
 東レエンジニアリング(株)  
 特許機器(株)  
 特許庁  
 TOHTO(株)  
 (株)豊田自動織機  
 長津工業(株)

中西商事(株)  
 長野計器(株)  
 中村工機(株)(株)  
 NACOL(株)  
 ナブテスコ(株)  
 (株)南武  
 日新濾器工業(株)  
 日本機材(株)  
 日本クエーカー・ケミカル(株)  
 日本工業出版(株)  
 日本精器(株)  
 日本製鉄(株)交通産機品カンパニー  
 (一社)日本フルードパワー工業会  
 日本ムーグ(株)  
 (株)野村商店  
 (株)ハイダック  
 ピー・エス・シー(株)  
 日立建機(株)  
 (株)日立建機ティエラ  
 廣瀬バルブ工業(株)  
 フェスト(株)  
 (株)フクダ  
 (株)不二越  
 二見屋工業(株)  
 (株)ブリヂストン  
 ボッシュ・レックスロス(株)  
 昌富工業(株)  
 (株)増田製作所  
 マックス(株)  
 松巴鉄工(株)  
 三國機械工業(株)  
 三菱電線工業(株)  
 ヤマシンプイルタ(株)  
 ヤマハモーターハイドロリックシステム(株)  
 (株)山本金属製作所  
 油研工業(株)  
 (株)ユーテック  
 横河計測(株)  
 理研精機(株)  
 リバーフィールド(株)  
 (株)レンタルのニッケン

## 編集室

## 次号予告

—特集「機械工学を学ぶ皆さんへ —フルードパワーのすゝめ—」—

【巻頭言】「機械工学を学ぶ皆さんへ —フルードパワーのすゝめ—」発行にあたって	佐々木大輔
【解説】	
超大型機械を動かすためのフルードパワー	浅野広太郎
省エネルギー化に向けた要素技術	三枝 直人
水素に関する取り組みと関連製品の紹介	山下 洋司
超高圧処理装置の全固体電池への応用	伊藤 洋行
医療に貢献するフルードパワー	小林 正樹, 門脇 信傑
支援モード切替機能を有すパッシブ型動作支援装置の開発と活用事例	小川 和徳
【会議報告】	
第23回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会におけるフルードパワー関連技術の研究動向	竹村研治郎
Robomech2024におけるフルードパワー関連技術の研究動向	高岩 昌弘
【トピックス】学生さんへ、先輩が語る	八瀬 快人
【研究室紹介】富山高等専門学校 機械システム工学科 山本研究室	山本 久嗣
【企画行事】2024年春季フルードパワーシステム講演会	桜井 康雄

## 2024年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 村 松 久 巳 (沼津工業高等専門学校)	委 員 中 山 晃 (日立建機株)
副委員長 藤 田 壽 憲 (東京電機大学)	丸 田 和 弘 (株都築製作所)
委 員 飯 尾 昭一郎 (信州大学)	水 上 和 哉 (CKD株)
遠 藤 勝 久 (SMC株)	溝 口 周 秀 (コマツ)
加 藤 友 規 (法政大学)	村 岡 裕 之 (株コガネイ)
北 村 剛 (油研工業株)	山 田 宏 尚 (岐阜大学)
窪 田 友 夫 (カヤバ株)	山 本 久 嗣 (富山高等専門学校)
五 嶋 裕 之 (株工苑)	吉 見 浩 司 (川崎重工業株)
齋 藤 直 樹 (秋田県立大学)	吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)
佐々木 大 輔 (香川大学)	担当理事 伊 藤 隆 (カヤバ株)
佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)	学会事務局 成 田 晋
谷 口 浩 成 (大阪工業大学)	編集事務局 竹 内 留 美 (勝美印刷株)
中 野 政 身 (株SmartTECH Lab.)	(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。

〒105  
0011

東京都港区芝公園三丁目五番二機械振興会館別館一〇二一 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―二三三六九〇

東京都文京区白山一―二―三―七 アクア白山ビル五階  
印刷所 勝美印刷株式会社