

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 2023 Vol. 54 No. 5

特集「ゴム人工筋を駆動する圧力源の新展開」

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「ゴム人工筋を駆動する圧力源の新展開」

#### 【巻頭言】

「ゴム人工筋を駆動する圧力源の新展開」発行にあたって 藤田 壽憲 190

#### 【解説】

空気圧駆動McKibben型人工筋肉を用いたアシストスーツとその性能の評価 佐々木陽一 191

油圧駆動の超高出力ゴム人工筋 大野 信吾 195

McKibben型人工筋の水圧駆動化に関する検討 小林 亘 199

EHDポンプ駆動による人工筋 三井 和幸 202

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 加藤 友規 207

DMEの燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータ 奥井 学, 澤橋龍之介, 中村 太郎 211

水の電気分解/合成を利用したゴム人工筋アクチュエータ 難波江裕之, 鈴森 康一 215

#### 【会議報告】

The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology  
—ICMDT 2023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 219

#### 【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る—高専教員になるという働き方— 門脇 惇 221

#### 【企画行事】

2023年春季講演会併設セミナー「フルードパワーとハイブリッド」 落合 正巳 224

#### 【会告】

日本フルードパワーシステム学会 2023年度受賞候補者募集のお知らせ 214

会員移動 214

公益財団法人油空圧機器技術振興財団 2023年度研究助成募集のお知らせ 225

日本フルードパワーシステム学会 2023年度フェロー認定者推薦のお願い	225
理事会・委員会報告	226
共催・協賛行事のお知らせ	227
2023年度オータムセミナー「環境負荷の低減を進める空気圧システム」	228
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催 2023年秋季フルードパワーシステム講演会	228
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	229
次回予告	230

■表紙デザイン：浅賀美希 勝美印刷株

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 "Recent Developments in Pressure Sources to Drive Rubber Artificial Muscles"

#### [Preface]

On the Special Issue "Recent Developments in Pressure Sources to Drive Rubber Artificial Muscles"	Toshinori FUJITA	190
---	------------------	-----

#### [Review]

Development and Evaluation of Assist Suit Using the McKibben Pneumatic Artificial Muscle	Yoichi SASAKI	191
High-Power Hydraulic Artificial Muscle Made of Rubber	Shingo OHNO	195
A Study on Application of Water Hydraulics for McKibben Muscles	Wataru KOBAYASHI	199
Artificial Muscle Driven by EHD Pump	Kazuyuki MITSUI	202
Rubber Muscle Actuator Driven by Gas-Liquid Phase Change	Tomonori KATO	207
Artificial Muscle Actuator Driven by DME Combustion	Manabu OKUI, Ryunosuke SAWAHASHI, Taro NAKAMURA	211
Rubber Artificial Muscle Using Electrolysis/Synthesis of Water	Hiroyuki NABAE, Koichi SUZUMORI	215

#### [Conference Report]

Report on the 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology	Kenjiro TAKEMURA	219
---	------------------	-----

#### [Topics]

Senior talk to students— About the Work of NIT	Jun KADOWAKI	221
--	--------------	-----

#### [JFPS Activities]

Seminar in Spring Conference 2023-Fluid Power and Hybrids-	Masami OCHIAI	224
--	---------------	-----

#### [JFPS News]

214, 225, 226, 227, 228, 229, 230

## 「ゴム人工筋を駆動する圧力源の新展開」 発行にあたって

### 著者紹介



ふじ した とし のり  
藤 田 壽 憲

東京電機大学  
〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番  
E-mail : tfujita@mail.dendai.ac.jp

1992年東京工業大学助手を経て、2002年東京電機大学助教授、2004年同大学教授、現在に至る。流体計測・制御、主として空気圧システムの解析、制御の教育・研究に従事。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）。

ゴム人工筋は半世紀以上前から研究・開発されてきたアクチュエータのひとつである。その名前の通り人工的な筋肉を開発しようとして始まったものであるため、軽量・高出力で、しかもソフトである。この特徴は他のアクチュエータでは実現できないため、多くの研究者が魅了され、研究され続けている。もともとの圧力源は空気圧であったが、近年では油圧、水圧、機能性流体のほか、燃焼や水の電気分解など全く新しい方式も圧力源として登場している。このような背景から本特集号ではさまざまな圧力源で駆動されているゴム人工筋の研究を紹介することとした。

近年になって、従来よりも細くて長いゴム人工筋が市販されるようになった。細径化により、しなやかさに富み、人間との親和性も高い人工筋となっている。そこで空気圧を駆動源とするゴム人工筋の代表として、細径化されたゴム人工筋を取り上げ、これをアシストスーツにしたときの性能等についてコガネイ・佐々木氏に解説をお願いした。

何といても油圧の利点はその高出力にある。ゴム人工筋も油圧で駆動することにより、より比出力が高くなり、ゴム人工筋の適用分野が広がっていくことが期待できる。これを狙って油圧駆動用のゴム人工筋が開発されており、ブリヂストン・大野氏には開発した油圧駆動ゴム人工筋について紹介していただいた。

ゴム人工筋を使った在宅でのリハビリテーションを考えた場合、自宅には空気圧源があることは珍しい。逆に水道がない住宅はほぼなく、水道水圧がゴ

ム人工筋の動力源として有望である。このような観点から研究を行っている岡山理科大・小林先生には、ゴム人工筋の水圧駆動化について執筆をいただいた。

空気圧、油圧、油圧による駆動では弁や、これを接続するホースなどが必要である。さらに別途、コンプレッサなどの圧力源も必要となり、全体が大型化してしまう。このことはゴム人工筋の適用分野として期待されている移動ロボット、リハビリ機器、パワーアシスト装置では大きな問題となっている。この解決をモチベーションとして、ゴム人工筋の新たな駆動源を提唱している研究も活発であり、これを研究する諸氏にも解説記事を依頼した。

東京電機大・三井先生には高電圧を印加すると流れを生じるEHD現象を利用したポンプと、これによりゴム人工筋を駆動した結果を、また、福岡工大・加藤先生にはフッ化炭素の液相から気相に変化する気液相変化を利用することによりゴム人工筋を駆動した結果を紹介していただいた。

空気圧でゴム人工筋を駆動する際、大型化に加えて応答性の低さも問題のひとつである。中央大・奥井先生は、この応答性を、ガスの燃焼によりゴム人工筋を駆動することで高速応答を実現し、圧力源の問題と同時に解決することを提案している。また空気圧では効率の悪さも課題である。東京工業大学・難波江先生と鈴木先生は、純水を電気分解し酸素と水素を発生させ加圧し、燃料電池と同じように電気を取り出すことにより、水を合成し減圧するゴム人工筋の開発に成功している。電気分解に使用した電力を合成時に回生することができ、高効率なアクチュエータを実現することが期待できる。どちらもユニークで、おもしろいご研究であることから、無理を通してご執筆いただいた。

以上の記事を通してゴム人工筋の魅力や、その可能性を感じていただけたなら幸いである。末筆になるが、本特集号にご協力いただいた執筆者の皆様に、この紙面を借りて御礼申し上げる。本特集号は工苑・五嶋裕之委員と企画したものである。

(原稿受付：2023年7月24日)

## 解説

# 空気圧駆動McKibben型人工筋肉を用いた アシストスーツとその性能の評価

## 著者紹介



さ さ き よ う いち  
佐々木 陽 一

株式会社コガネイMIRAI事業部  
〒184-8533 東京都小金井市緑町3-11-28  
E-mail: sasaki-yi@koganei.co.jp

2021年北海道大学大学院農学研究所修士課程  
修了，同年入社，現在に至る。空圧制御，流体  
関連装置の開発に従事

## 1. はじめに

McKibben（マッキベン）型は，人工筋肉の代表的な機構であり，60年以上前から研究・開発されてきた技術である。圧縮性・非圧縮性を問わず，さまざまな流体が駆動源として用いられ，流体の圧力によってけん引力を発生するソフトアクチュエータの一種である。駆動源として，油圧を用いる手法<sup>1)</sup>や，水道水圧を用いる手法<sup>2)</sup>などを利用するMcKibben型人工筋肉も提案されているが，現時点において十分に社会実装されているとは言い難い。

近年，日本の少子高齢化に伴って，労働力人口の減少と高齢者介護の需要増加が加速している。介護現場では，移乗介助をはじめとする腰部の負担が大きい作業が多く，腰痛の発症などによる介護従事者の長期離脱や離職が懸念されている。このような社会課題を背景に，介助者が装着することで，腰部の負担を軽減することができるアシストスーツが数多く上市されている。そして，アシストスーツに組み込まれてアシスト力を発生する機械要素のひとつとして，McKibben型空気圧人工筋肉が注目されている。

本稿では，McKibben型人工筋肉の構造・原理と空気圧による駆動の利点について解説した上で，McKibben型空気圧人工筋肉の特長を活かしたアシストスーツの研究開発事例について紹介するとともに，その評価指標について言及する。

## 2. McKibben型人工筋肉の構造・原理

図1にMcKibben型人工筋肉の構造を示す。

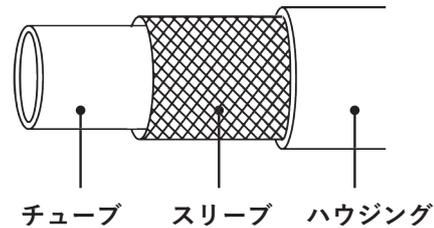


図1 McKibben型人工筋肉の構造

McKibben型人工筋肉の主要構成は，チューブ，スリーブ，そしてこれらの両端を固定するハウジングからなる。チューブには，弾性を有しているゴムなどの素材が使用される。その外側を覆っているスリーブは，繊維が格子状に編み込まれたものである。また，ハウジングのような，両端を固定する方法は複数存在し，接着剤を用いた手法<sup>3)4)</sup>や，針金を巻き付ける手法<sup>5)</sup>およびホースクランプを用いた手法<sup>6)</sup>などが挙げられる。

続いて，図2にけん引力発生原理を示す。

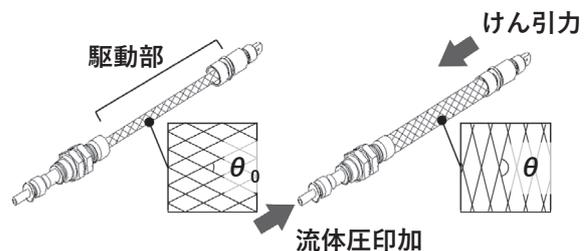


図2 けん引力発生原理

McKibben型人工筋肉の内部に圧力を印加すると駆動部のチューブは外径方向に膨らみ，繊維の交叉角度が $\theta_0$ から $\theta$ に変化する。外径方向に膨らむ際，繊維によってチューブは軸方向に収縮する。この収縮力を，ものを引っ張る力（けん引力）に変換する。

### 3. 空気圧人工筋肉の利点

水圧や油圧などの駆動源に比べ、空気圧が駆動源のMcKibben型人工筋肉の特長は、①軽量性 ②安全性の2つにあると考える。

- ① 軽量性について、使用流体が空気であるため、チューブ内部の体積分が軽い。
- ② 安全性について、人工筋肉の破損により外部に漏れるのは空気であり安全である。

### 4. 研究開発事例紹介

#### 4.1 空気圧人工筋肉を活かしたアシストスーツ

アシストスーツには、アシスト力を発生させるためにさまざまな機械要素を採用しているものがある。代表的な機械要素としてはモーター・空気圧人工筋肉・ゴム・樹脂ばねなどが挙げられる。各機械要素は一長一短を有しているが、軽量かつ大きな力を発生させることができる、空気圧人工筋肉を用いたアシストスーツが注目されている。たとえば、空気圧人工筋肉と外骨格からなる、腰にかかる負担軽減を目的とした装置<sup>7)</sup>や、織布化した細径空気圧人工筋肉から成る、良好な装着性と腰部における高い軽労化の両立を目的とした装置<sup>8)</sup>などが提案されている。いずれの提案において、他の流体ではなく、空気圧を駆動源として利用するには、以下3つの利点があると考えられる。

- ① 人工筋肉の内部に圧力を印加し、空気の入りを遮断した状態で、伸縮性を持つ。上述した状態の人工筋肉が伸びるためには、チューブ内部の体積が小さくなる必要がある。圧縮性を持つ空気は、ボイルの法則により圧力は上がるが体積は小さくなるので、伸縮性を持つ。
- ② 軽量なため、長時間の使用に適している。
- ③ 電気を使用しないため、漏電および感電などの二次災害の心配がなく安全である。

たとえば、伸縮性を生かすことで、最初に空気を入れるだけで使用可能なアシストスーツの駆動源になるうえ、その他の利点を生かせば、長時間装着でき、介護現場の入浴介助といったシーンにおいて、濡れても漏電せず、介護者と被介護者にとって安全なアシストスーツを開発することが可能になる。

#### 4.2 試作したアシストスーツの概要

われわれは、上記空気圧人工筋肉の応用例のひとつとして、腰部負担軽減を目的とした身体装着型アシストスーツの開発を行っている。図3にアシストスーツの構成を示す。このアシストスーツは空気圧人工筋肉を装着者のでん部から背中に沿って配置するため、外骨格を有さない。空気を印加することで、

収縮力を発生するため、腰部負担を軽減できると考える。動力源は、手動ポンプ（空気入れ）を携帯し、必要ときに簡便に供給できるようにする。圧力印加された空気圧人工筋肉は収縮する。供給した圧縮空気は空気圧人工筋肉の内部に貯められており、アシスト力発生の際に消費されない。装着者が前屈や中腰などの姿勢になった時、アシストスーツ内部の空気圧人工筋肉は伸びる。このとき、空気圧人工筋肉は収縮した状態に戻ろうとするため、その力がでん部を支えるアシスト力になる。備えられたボタンを押して圧縮空気を大気開放することで、任意にアシスト力を解除できる。電氣的な制御やセンサ類は使用しない。

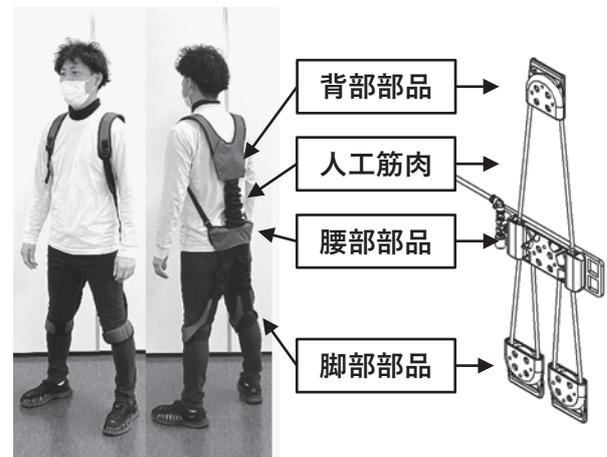


図3 アシストスーツの構成

#### 4.3 評価方法

試作したアシストスーツは、外骨格を介さずに空気圧人工筋肉を身体に沿うように取り付け、人間の関節を利用して補助する構造である。アシストスーツの性能を評価するにあたり、課題が2点あった。1点目は力学モデルを構築するのが困難であることと、2点目はアシストスーツの出力を実測するのが難しいことである。一方で、先行研究としてアシストスーツの性能評価で筋電位計測を用いる手法<sup>9)</sup>も存在する。われわれは、実際に人が着用した状態と未着用の状態の表面筋電位を計測し、後述する腰部負担軽減率として定義し、これをアシストスーツ性能の評価指標とした。

#### 4.4 被験者

男性17名（20代平均身長は171.5（+6.5，-5.5）cm，平均体重62.4（+9.6，-10.4）kg，平均BMIは21.2（+4.6，-1.7））を被験者として試験を実施した。

#### 4.5 試験方法と試験条件

筋電位を計測する対象動作・姿勢として、介護現

場での利用シーンを想定して、以下の2つを設定した。

① 重量物挙上動作

図4に重量物挙上動作の様子を示す。重量物挙上動作は、負荷重量10kgのコンテナを床面に置き、迎え動作から持ち上げ動作、下げ降ろし動作、復帰動作までの一連の動作を16秒で実施した。被験者の動作を揃えるために、メトロノームでカウントを取りながら試験を実施した。負荷重量は、先行研究の負荷重量、および厚生労働省の職場における腰痛予防対策指針<sup>10)</sup>を参考にして、被験者に対する過度の腰部負担とならないこと、将来的に女性の被験者においても同一重量で試験を実施できることを考慮して10kgに設定した。動作時間は、被験者がメトロノームのカウントに合わせて動作を実施できることを踏まえて、計16秒に設定した。

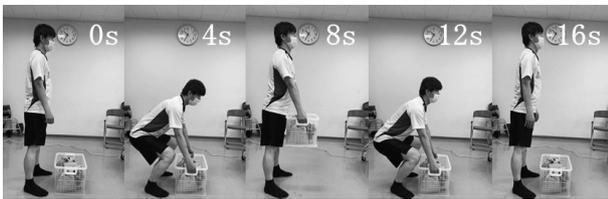


図4 重量物挙上動作

② 中腰姿勢の保持

図5に中腰姿勢の保持状態を示す。中腰姿勢の目線高さは、車椅子を利用されている被介助者の目線に合わせて介助者が食事介助やコミュニケーションなどを図るシーンを想定して、車椅子使用者の眼高はおよそ男性：115cm、女性：105cmである<sup>11)</sup>ことを参考に、110cmに設定した。

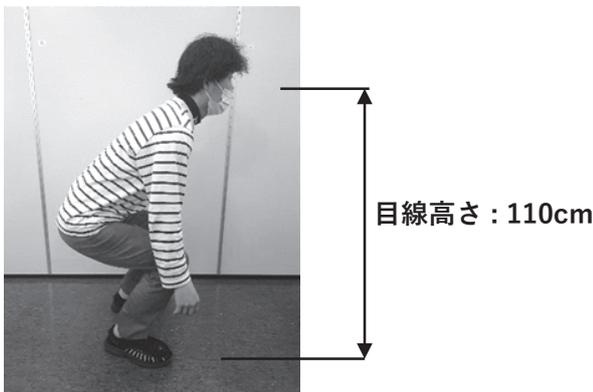


図5 中腰姿勢の保持動作

4.6 表面筋電位測定による腰部軽減率効果の検証

被験筋は腰部部分のアシストスーツの先行研究<sup>9)</sup>を参考にして、腰痛に関わる筋肉として、最長筋、腸筋、多裂筋とした。筋電位センサ (Delsys社製

Trignoワイヤレスシステム)を用い、センサ貼り付け位置はSENIAM sensor locations<sup>12)</sup>に基づいて特定し、重量物挙上動作および中腰姿勢の保持における表面筋電位 (ElectroMyoGraphy-EMG) を計測した。筋電位計測データは、20-450Hzのbandpass filter<sup>13)</sup>でノイズ除去を実施して、包絡線処理でスムージング<sup>14)</sup>したものを積分処理<sup>15)</sup>することでEMG積分値を算出する。筋電位の計測試験は、各動作・装具着用有無ごとに3回ずつ実施して、各々の試験条件ごとに平均値を算出した。筋電位計測により得られたEMG積分値を用いて、腰部負荷軽減率を評価した。腰部負荷軽減率は、図6に示す式より算出した。

$$\text{腰部負荷軽減率 [\%]} = \frac{\text{未装着時のEMG積分値} - \text{装着時のEMG積分値}}{\text{未装着時のEMG積分値}} \times 100$$

図6 腰部負荷軽減率算出式

①重量物挙上動作における腰部負荷軽減率の結果を図7に示す。本試験において、各筋肉の腰部負荷軽減率は、最長筋8.1%、腸筋9.7%、多裂筋2.5%であり、10kgの重量物を持ち上げる動作において、アシストスーツ着用によって腰部の負荷が軽減することを確認した。ただし、多裂筋においては被験者によるばらつきが多かった。

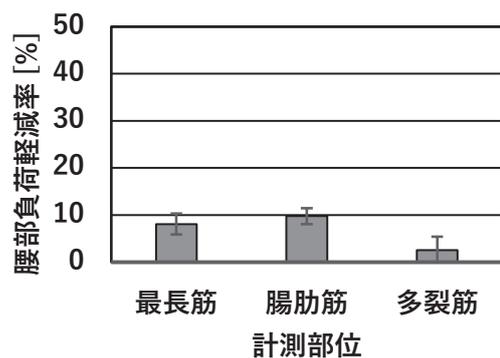


図7 重量物挙上動作における腰部負荷軽減率 (図中エラーバーは標準誤差を示す)

②中腰姿勢における腰部負荷軽減率の結果を図8に示す。本試験において、各筋肉の腰部負荷軽減率は、最長筋22.2%、腸筋30.3%、多裂筋20.9%であり、中腰姿勢の保持においても、アシストスーツ着用によって腰部の負荷が軽減することを確認した。両動作においてアシストスーツの着用により腰部

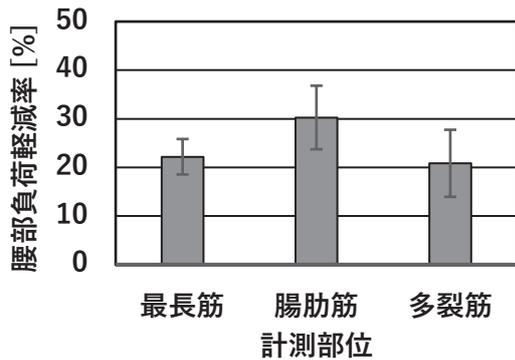


図8 中腰姿勢時における腰部負荷軽減率  
(図中エラーバーは標準誤差を示す)

負荷の軽減が認められ、中腰姿勢の保持の方がより大きな腰部負荷軽減率を示す結果となった。この結果から、対象とする動作によってアシスト力が異なることが分かった。

## 5. おわりに

本稿では、McKibben型人工筋肉の構造・原理の解説を行い、駆動源に空気圧を使用する利点を示した。さらに、アシストスーツの研究開発事例について紹介するとともに、アシストスーツの評価指標について述べた。現在上市されているアシストスーツは、そのアシスト力の評価指標がメーカーごとに異なる。そのため、購入者がアシストスーツを比較検討しにくい状況にある。アシストスーツを評価する際の動作は、アシストスーツが利用されるシーンに応じて、適宜設定する必要があるが、異なるアシストスーツを評価する場合、同じ評価指標で、同じ動作時における性能を評価することが望ましく、本稿の評価指標はその一例として提案できると考える。今後、アシストスーツが広く普及されるためには、その性能を評価する基準を標準化するなどの取り組みが求められると考える。

## 謝辞

筋電位計測試験の実施に当たり、多大なご助言・ご協力をいただいた東都大学幕張ヒューマンケア学部遠藤悠介講師、および被験者としてご協力いただいた同大学の学生の方々に謝意を表す。また、本研究はAMED（課題番号JP22he2002024）の支援を受けて実施したものである。

## 参考文献

- 1) 大野信吾：油圧駆動の高出力ゴム人工筋，計測と制御，第57巻，第11号，p. 799-801 (2018)
- 2) 小林亘，伊藤和寿：水道水圧駆動マッキベン型人工筋の変位制御，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 45，No. 6，p. 85-93 (2014)
- 3) <https://www.s-muscle.com/>
- 4) <https://www.mirai-projects.com/pneumuscle>
- 5) 田熊隆史：空気圧人工筋により駆動する柔軟な脚ロボット，日本ロボット学会誌，Vol. 37，No. 2，p. 144-149 (2019)
- 6) [https://ishikawa-lab.sakura.ne.jp/yoichi/muscle\\_recipe](https://ishikawa-lab.sakura.ne.jp/yoichi/muscle_recipe)
- 7) 小林宏：マッスルスーツ®，日本ロボット学会誌，38巻，2号，p. 143-146 (2020)
- 8) 大野晃寛，山本陽太，小黑めぐみ，難波江裕之，鈴森康一：細径空圧人工筋肉を用いたパワーアシストスーツの性能評価，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，2016巻 (2016)
- 9) Alemi, M.M. et al. : A passive exoskeleton reduces peak and mean EMG during symmetric and asymmetric lifting, Journal of Electromyography and Kinesiology, Vol. 47, p. 25-34 (2019)
- 10) <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/youtsuushishin.html>
- 11) 日本建築学会：建築設計資料集成一人間，丸善株式会社，p. 64 (2003)
- 12) <http://www.seniam.org/>
- 13) <https://jp.mathworks.com/help/signal/ref/bandpass.html>
- 14) <https://jp.mathworks.com/help/signal/ref/envelope.html>
- 15) <https://jp.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html>

(原稿受付：2023年6月16日)

# 油圧駆動の超高出力ゴム人工筋

## 著者紹介



おの しの ごと  
大野 信吾

株式会社ブリヂストン

〒187-8531 東京都小平市小川東町3-1-1

E-mail: shingo.oono@bridgestone.com

1995年東京工業大学制御工学専攻修士課程修了。同年株式会社ブリヂストン入社。2008年青山学院大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。日本フルードパワーシステム学会、応用物理学会の会員。博士（理学）。

## 1. はじめに

流体駆動のアクチュエータとしてはシリンダがもっともポピュラーであるが空気圧モータや油圧モータも広く使われている。近年は流体駆動アクチュエータとしてさまざまな構造の人工筋も提案されている<sup>1)-3)</sup>。シリコンなどの弾性材料で作られたベローズ状の構造に空気圧を印加することで、伸長や湾曲の変形をするアクチュエータは広く研究されている。しかしこれらの構造は印加した圧力による応力を弾性材料自身が受けることから、一般的に高い圧力を印加すると弾性材料が異常拡張して破壊につながりやすい。そのため圧力源として空気圧を用いて、印加圧力も低めに抑えている場合が多い。一方で流体圧を利用するアクチュエータが発生する力は一般的に印加圧力に比例するので、高い圧力を印加することができれば大きな力を得ることができる。McKibben型ゴム人工筋はゴムチューブの外側を伸長しない糸で作られたスリーブが覆っているためゴムチューブに高い圧力を印加してもゴムチューブが大きな応力を受けることが無く高い圧力に耐えることができる。そのため大きな力を出さずとも、高い信頼性を有しており実用に適したソフトアクチュエータであるといえる。これらの特徴からわれわれはMcKibben型ゴム人工筋の構造をベースに研究開発を行ってきた。

流体圧駆動アクチュエータの圧力源に圧縮性のある空気を用いる場合、安全面から1.0MPa以上の圧力で用いられることは少なく一般的には0.5MPa前

後で使用される場合が多い。一方で水や油といった液体を用いる場合1.0MPa以上の圧力を容易に用いることができる。液体を用いた高压駆動のゴム人工筋の過去の研究は横田らによる油圧駆動<sup>4)</sup>や鈴森らによる水圧駆動<sup>5)</sup>など数件しか例がなく、産業用に実用化されたものも見られていない。そこでわれわれは空圧だけでなく油圧駆動の超高出力なMcKibben型ゴム人工筋の開発を行ってきた<sup>6)</sup>。

本稿では油圧駆動の超高出力収縮型ゴム人工筋とMcKibben構造をベースにした油圧駆動の超高出力湾曲型ゴム人工筋<sup>7)</sup>について、その構造と特性を説明する。また油圧駆動の湾曲型ゴム人工筋を用いたロボットハンドについても紹介する。

## 2. McKibben型ゴム人工筋の構造と特徴

### 2.1 油圧駆動収縮型ゴム人工筋の構造

油圧駆動収縮型ゴム人工筋の構造を写真1に示す。空圧駆動のゴム人工筋と基本的な構造に変わりはなく圧力を印加することで径方向にチューブが膨らみスリーブがパンタグラフ変形することで軸方向に収縮する。空圧駆動とは異なり使用しているゴムチューブに、耐圧性、耐油性および繰り返しひずみに対する耐久性を満たすゴムを用いている。そのため空圧用に比べチューブの肉厚が厚くなっている。

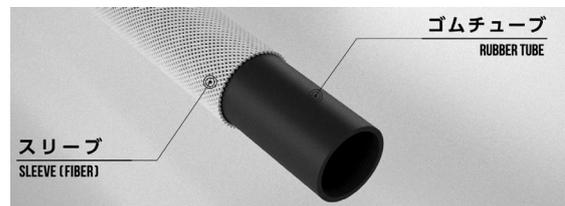


写真1 油圧駆動収縮型ゴム人工筋の構造

### 2.2 油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の構造

写真2に油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の構造を示す。収縮型ゴム人工筋のチューブとスリーブの間に板バネとなる金属板を挿入した構造となっている。収縮型ゴム人工筋と同様に流体を注入し加圧することでスリーブの編角が変化し軸方向に収縮しようとするが、周方向の一部に配置された板バネ部分は収縮す

ることができない。板バネのない部分は収縮することから板バネ部分を背中側にして全体が湾曲する。また流体の圧力を解放すると板バネの復元力とゴムチューブの弾性により元通りまっすぐな状態に戻ることができる。

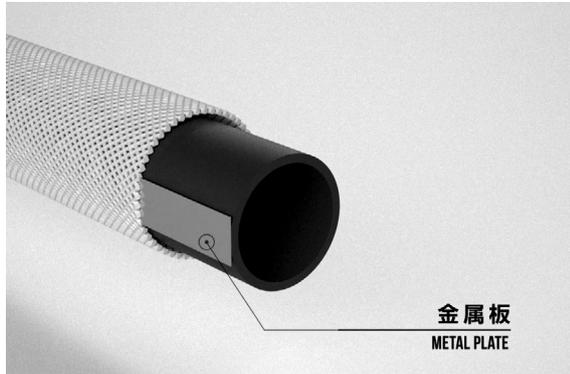


写真2 油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の構造

### 2.3 油圧駆動ゴム人工筋の特徴

収縮型、湾曲型ともに油圧駆動ゴム人工筋の主な特徴は以下のとおりである。

- ① シンプルな構造：収縮型はゴムチューブとスリーブと末端のみ、湾曲型の場合でも板バネが加わるだけのきわめてシンプルな構造である。
- ② 軽量高出力：主な構造物がゴムと繊維であり、湾曲型でも薄い板バネが加わるだけであるためきわめて軽く作ることができる。油圧駆動にすることでゴムチューブの肉厚が厚くなることによる重量増はあるが発生する力が大幅に大きくなることから空圧駆動に比べ人工筋の重量当たりの発生力はさらに大きくなる。
- ③ 構造の柔軟性：ゴムや繊維といった柔らかい部材から構成されており構造自体が柔らかい。
- ④ 衝撃に強い：ゴム人工筋に外力が加わった場合にゴム人工筋が変形して内容積を変化させることができることから、外力に対してバネ的な特性を示す。
- ⑤ ダイナミックレンジが広い：シール部材を必要としない構造からシール部のしゅう動抵抗が存在しないため、スティックスリップを生じることがなくきわめて小さな変位や力の制御が可能である。一方で油圧駆動による超高出力を発生することもできることからきわめて大きなダイナミックレンジを取ることができる。
- ⑥ 水中での使用が可能：ゴム人工筋は密閉構造でありシール構造を持たないことから水中で使用しても水中に油を流出することなく使用可能である。

ここに示した通り油圧駆動ゴム人工筋は非圧縮流体を用いているにも関わらずバネ的な要素を持ちソフトな動きが可能であるとともに、高い圧力を印加することで力強い動作も可能である。その他さまざまな特徴から実使用においても非常に優れたアクチュエータであると考えている。

## 3. 油圧駆動ゴム人工筋の特性

### 3.1 油圧駆動収縮型ゴム人工筋の特性

収縮型ゴム人工筋の収縮力については、式(1)のシュルツの式が有名である。

$$F = \frac{\pi D_0^2 P}{4} \frac{1}{\sin^2 \theta_0} \{3(1 - \varepsilon)^2 \cos^2 \theta_0 - 1\} \quad (1)$$

収縮力 $F$ は収縮率 $\varepsilon$ と印加圧力 $P$ の関数となる。ここで $D_0$ はチューブの初期外径、 $\theta_0$ はスリーブの初期編角であり、これらはゴム人工筋の設計パラメータである。式(1)より収縮力は印加圧力 $P$ に比例するので、油圧駆動にすることにより高圧を印加することができ空圧駆動のゴム人工筋に比べ大きな力を発生することができる。図1に初期外径20.0mm、初期編角30°の油圧駆動ゴム人工筋の印加圧力を一定にした時の収縮率と収縮力の関係を示す。

McKibben型ゴム人工筋特有のヒステリシス特性を示しているが、5.0MPa印加時の最大収縮力は8kN以上で最大収縮率はおおよそ25%であった。

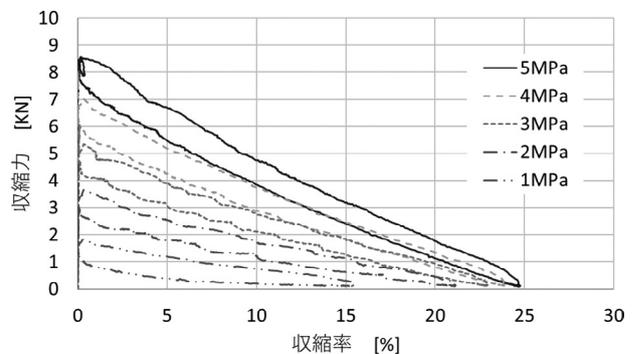


図1 油圧駆動収縮型ゴム人工筋の収縮率と収縮力の関係

図2に初期外径を11.0mm、16.3mm、20.0mm、初期編角30°の油圧駆動ゴム人工筋に5.0MPa印加した時の収縮率と収縮力の関係を示す。最大収縮率は23~25%程度とおおむね同じ値となり、収縮力は断面積に応じて大きくなっている。

図3は初期長に収縮型ゴム人工筋の長さを固定した時の印加圧力と収縮力の関係を示している。図2と同様に初期編角30°でチューブ外径の異なる3種類のゴム人工筋を用いて計測を行った。グラフには実験結果と共にシュルツの式による計算結果を示している。実験では6.0MPaまで印加したが、どの太

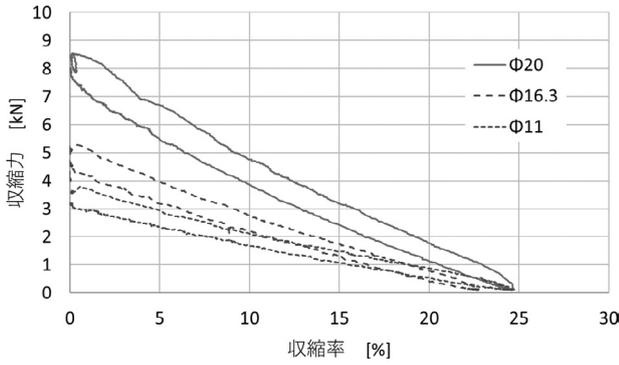


図2 油圧駆動収縮型ゴム人工筋の収縮率と収縮力の関係

さの人工筋も破壊することなく繰り返しの動作が可能であった。実験値と計算値は良く一致しているが実験のほうがやや収縮力が高くなっている。計算ではスリーブの厚さは無視してゴムチューブの外径を用いたが、実際のゴム人工筋のスリーブ厚さは有限であるためスリーブの厚さの分だけ実験の収縮率が高くなっている可能性が考えられる。

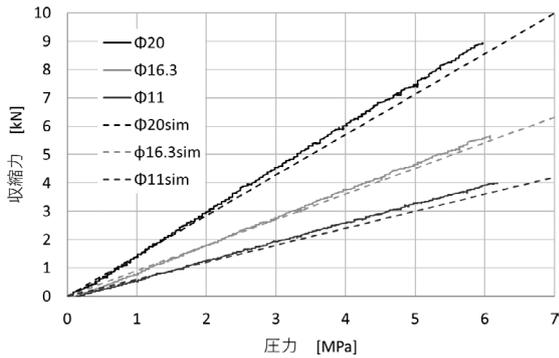


図3 油圧駆動収縮型ゴム人工筋の印加圧力と収縮力の関係

### 3.2 油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の特性

つぎに油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の印加圧力、湾曲角、湾曲力の関係を調べた。ここでは湾曲型ゴム人工筋の根本を固定し直線状態から加圧していき湾曲させていったときの先端部がゴム人工筋に垂直方向に曲がる力を湾曲力と定義する。実際の計測は写真3のようにゴム人工筋を固定し圧力印加により下方向に曲げていった時のはかりを押す力を計測し湾曲力とした。

実験に使用した油圧駆動湾曲型ゴム人工筋はチューブ外径11.0mm、16.3mm、20.0mm、初期編角30°、湾曲部長さ140mmのものである。小型の油圧ポンプを用いて加圧しながら印加圧力と湾曲力の計測を行った。結果を図4に示す。

収縮型ゴム人工筋の場合と同様にチューブ外径が大きくなるにつれ湾曲力も大きくなっている。印加圧力が0に近い領域では湾曲力が発生しない不感帯が



写真3 湾曲力計測方法

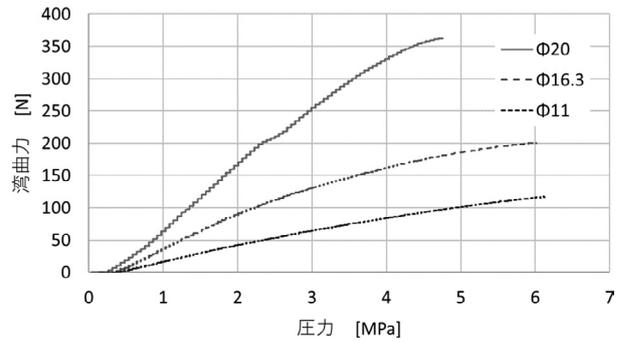


図4 油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の印加圧力と湾曲力の関係

見られる。装置のセッティング上、圧力を印加していないときのゴム人工筋の先端とはかりの表面は少しだけ距離があいていたために、低圧領域でわずかに変形を始めてはいたがはかりの表面に接触するまで力が計測されない部分が生じたためと考えられる。

つぎにチューブ外径11.0mm、スリーブの初期編角30°の空圧駆動湾曲型ゴム人工筋と油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の印加圧力に対する湾曲力の関係を比較した。図5は空圧駆動および油圧駆動の湾曲型ゴム人工筋の印加圧力に対する湾曲力の関係を示している。立ち上がり部分の傾きは空圧駆動と油圧駆動で大きな違いはなく、油圧駆動は印加圧力を大幅に上げることができるので湾曲力も大きく向上している。空圧駆動に比べ印加圧力が10倍になっているにもかかわらず湾曲力が10倍まで上がっていないのは湾曲力が大きくなっていくとともに板バネが外

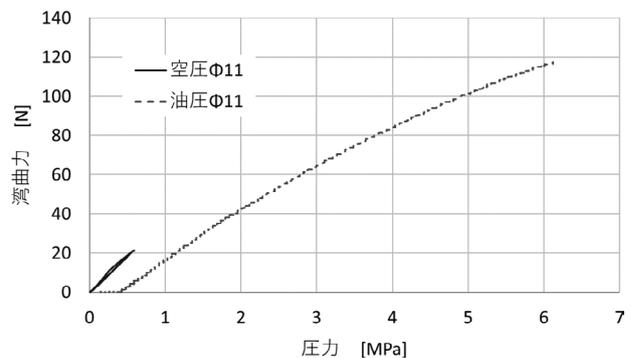


図5 空圧駆動および油圧駆動湾曲型ゴム人工筋の印加圧力と湾曲力の関係

側に逃げていくような変形を起し湾曲力が直線的に上がっていかないためと考えている。油圧駆動湾曲型ゴム人工筋については板バネの最適化が必要と考えている。

#### 4. 油圧駆動湾曲型ゴム人工筋を用いたロボットハンド

図4で示したチューブ外径20.0mmの油圧駆動湾曲型ゴム人工筋を3本用意し、平面上に120°間隔で均等に中心に向かって湾曲するように配置したロボットハンドを作製した。写真4は本ロボットハンドで12.9kgのバーベルを持ち上げている様子を示している。この時の印加圧力は約3.0MPaであった。写真5は同じハンドでゆで卵を潰さずに把持している

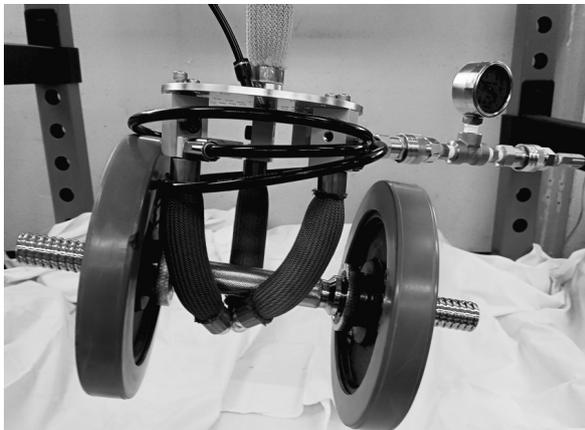


写真4 油圧駆動湾曲型ソフトロボットハンドで12.9kgのバーベルを把持している様子



写真5 油圧駆動湾曲型ソフトロボットハンドでゆで卵を潰さずに把持している様子

る様子を示している。この時の印加圧力は約0.5MPaであった。図5に示すように油圧駆動湾曲型ゴム人工筋は空圧駆動湾曲型ゴム人工筋の発生力の範囲を包含しつつさらに高い圧力領域まで連続的に湾曲力を制御できている。そのためきわめて小さな力を制御して柔らかい対象を把持することと高い圧力を印加して大きな力で重い対象を把持することの両立が可能であることを確認することができた。

#### 5. おわりに

本稿では油圧駆動による超高出力のゴム人工筋の特性と、きわめて小さな力から大きな力まで広いレンジで動作できる油圧駆動のソフトロボットハンドについて紹介した。McKibben構造のゴム人工筋は空圧駆動でも高い圧力を印加可能で大きな力を発生できるが油圧駆動を用いることでさらなる超高出力を得ることもできる。筆者らは真にソフトアクチュエータが実用化されていくためには柔らかさと力強さの両立が重要であると考えている。本稿で紹介したゴム人工筋や流体圧駆動のロボットハンドがその一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 鈴森康一：フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究（第1報，3自由度アクチュエータの静特性），日本機械学会論文集（C編），Vol. 55, No. 518, pp. 2547-2552（1989）
- 2) 佐々木大輔・則次俊郎・山本裕司・高岩昌弘：空気圧ゴム人工筋肉を用いたパワーアシストグローブの開発，日本ロボット学会誌，Vol. 24, No. 5, pp. 640-646（2006）
- 3) 大城竣・高嶋一登・則次俊郎・向井利春：“形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋肉の湾曲角度制御”，計測自動制御学会SI部門講演会SICE-SI2018予稿集，pp. 1790-1795（2018）
- 4) Yokota Shinichi, Komatsu Takehiro: "Flexible Hydraulic Actuator for Space Manipulators", *JSME International Journal. Series C Mechanical system machine elements and manufacturing*, Vol. 37-C, No. 1, pp. 179-184（1994）
- 5) Mayuko Mori, Koichi Suzumori, Masayuki Takahashi, Takashi Hosoya, "Very High Force Hydraulic McKibben Artificial Muscle with PBO Cord Sleeve", *Advanced Robotics (RSJ)*, Vol. 24, No. 1-2
- 6) 大野信吾：油圧駆動の高出力ゴム人工筋肉，計測と制御，Vol. 57, No. 11, pp. 799-802（2018）
- 7) 大野信吾・他：油圧駆動ハイパワー湾曲型ゴム人工筋肉の特性評価，第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2020）

（原稿受付：2023年6月20日）

# McKibben型人工筋の水圧駆動化に関する検討

## 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。同大学ポストドク研究員、2016年岡山理科大学助教を経て、同大学講師、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)。

## 1. はじめに

近年、ロボティクス分野において、アクチュエータにも軽量・柔軟であることが要求されており、ソフトアクチュエータについて積極的に研究が進められている。さらに、安全性に加えて高い人間・環境親和性が求められるものも少なくなく、このようなロボットに適用可能なアクチュエータとしてMcKibben型人工筋がよく知られている。また、内閣府の革新的研究開発推進プログラムであるImPACTのタフ・ロボティクス・チャレンジに代表される災害時におけるロボットの基盤技術としてのフルードパワー技術にも注目が集まっており<sup>1)</sup>、超高圧油圧アクチュエータを用いたレスキューロボットなどが提案されている。

このような背景のもと、著者らは100%オイルフリーという他の駆動源にはない唯一の特長を有する水圧駆動システムのMcKibben型人工筋への適用について検討し、非圧縮性流体である水道水を作動流体とする新しい水圧駆動McKibben型人工筋を提案してきた。

本稿では、水圧駆動McKibben型人工筋の特徴に加えて、モデル予測制御系に逐次最小二乗法による適応同定アルゴリズムを組み合わせた制御手法を適用した結果について紹介する。また、従来の空気圧駆動McKibben型人工筋との比較として、どちらの駆動源にも適用可能な実験装置を用いた静特性および動特性の検証結果と、システム同定法を適用した際のモデル化における比較などについて紹介する。

## 2. 水圧駆動McKibben型人工筋

まず、水圧駆動McKibben型人工筋について紹介する。提案型人工筋は従来の空気圧駆動型人工筋と比較して、1) 作動流体である水道水の非圧縮性に起因して応答性が高いこと、2) 0～100℃の範囲に制限されるものの温度変化による特性変動が小さいこと、3) 空気圧駆動のような圧縮性や温度変化への配慮が不要であること、といったメリットを有する一方、1) 作動流体に起因する重量増加および出力密度の低下、2) 圧縮性流体に起因する人工筋の本質的な柔らかさが損なわれる可能性がある、といったデメリットも挙げられる。また、これに加えて制御系設計の観点からは、図1に示すように強い非線形性を有しており、これらを考慮せずに高精度な制御系を設計することが困難であるといわれている。さらに、人工筋に接続する負荷の大きさにより収縮特性が大きく変わることからも、従来広く用いられてきたPID制御では大幅な制御性能の劣化を招いてしまっており、固定ゲインでの制御が困難であることも指摘されている。

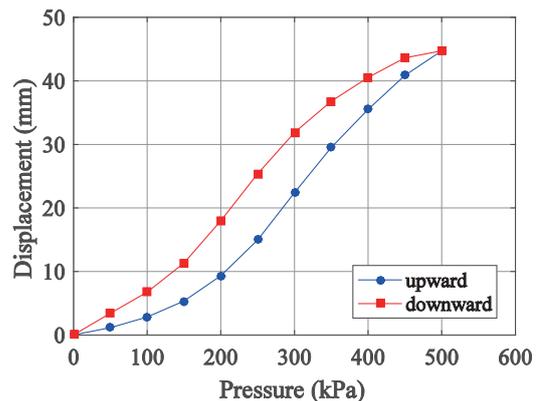


図1 水圧駆動型人工筋の変位—圧力特性

著者らは前述の水圧駆動型人工筋の課題に対し、モデルベースでのアプローチとして、図2に示すように、システム同定により得られたノミナルモデルを基にモデル予測制御系と逐次最小二乗法による適応同定アルゴリズムを組み合わせた新しい制御手法について検討している<sup>2)</sup>。図3および図4は提案手法による変位制御実験の結果および人工筋モデルの

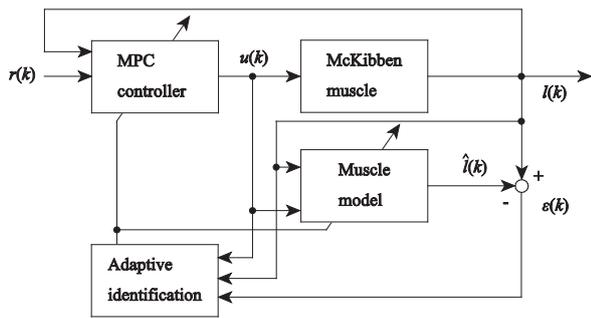


図2 提案制御手法の構成<sup>2)</sup>

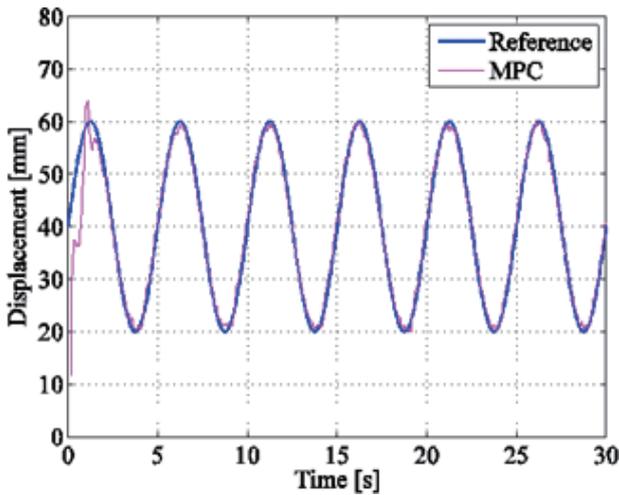


図3 変位制御実験結果 (負荷: 3.5N)

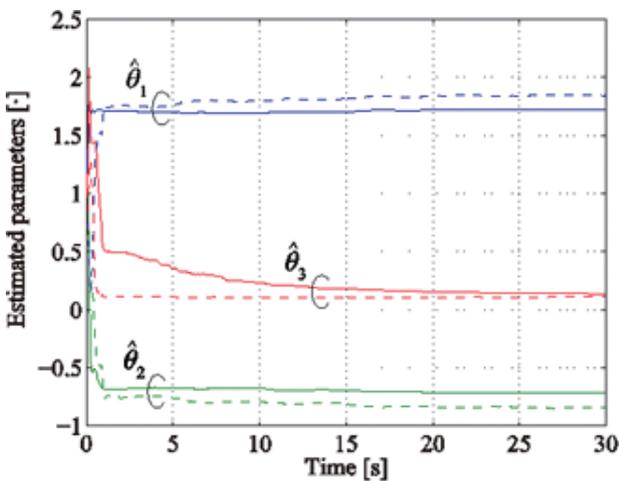


図4 推定パラメータの更新

パラメータ更新時の時間応答を示したものである。

### 3. 空気圧駆動型人工筋との比較

つぎに、試作した水圧駆動型人工筋の駆動源を空気圧に変更した場合における比較検証実験について紹介する。図5に示す実験装置は、試作型人工筋、2個の比例弁 (KFPV300-2-800, 株式会社コガネイ), 圧力センサ (PVL10KD, 株式会社共和電業), ロードセル (LUX-B-2KN-ID, 株式会社共和電業), 負荷調整用空気圧シリンダ (CG5LN32SR-200,

SMC株式会社) で構成されている。表1は2つの駆動源における特性の違いをまとめたものである。なお、実験装置は同様のものを使用しており、作動流体のみを水と圧縮空気に変更して実験を行っている。表1より、最大収縮率および最大収縮力はどちらもほぼ同程度となっており、静特性は大きく変わらないことが確認される一方、むだ時間や時定数といった動特性に関しては空気圧駆動型人工筋が優れていることが示されている。これは同じ比例弁を用いているため同径のオリフィスの場合、空気圧駆動時の供給流量が大幅に増加するためであると考えられる。

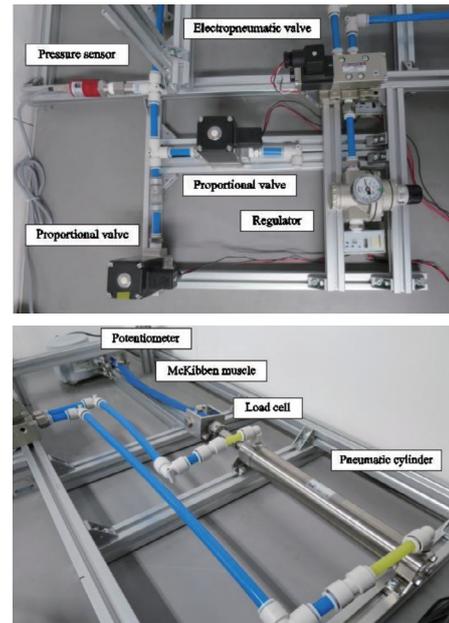


図5 実験装置の構成

表1 水圧駆動と空気圧駆動の比較

	Pneumatic drive	Tap-water drive
Max. contraction ratio (%)	23.7	25.3
Max. contraction force (N)	13.7	15.1
Time delay (s)	0.04	0.25
Time constant (s)	0.12	0.87

また、人工筋のモデル化における差異について検証するため、システム同定法<sup>3)</sup>を用いてそれぞれのモデルを導出した。McKibben型人工筋は強い非線形性を有しており、確立された数学モデルはいまだ提案されていない。ここでは、モデルベース制御に用いることを想定した比較的簡単なモデルを導出して比較することとしている。

システム同定では、図6に示すような入出力データのみを用いてモデル化を行う。このとき、入力にはM系列信号と呼ばれる擬似的な白色2値信号を用いるのが一般的である。式(1)はシステム同定により得

られた水圧駆動型人工筋の同定モデルである。

$$G_w(z) = \frac{0.0824}{z^2 - 1.7652z + 0.7819} \quad (1)$$

ただし、 $G_w(z)$  は離散時間伝達関数を表しており、 $z$ は $zx(k) = x(k+1)$  を満たすタイムシフトオペレータである。

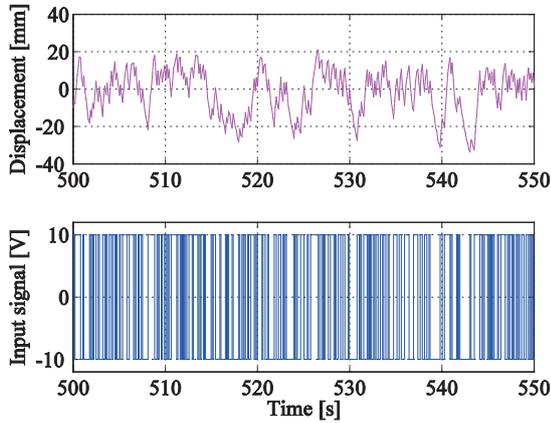


図6 実験データ (入力：弁への印加電圧, 出力：人工筋変位)

図7は実験データと式(1)で与えられる同定モデルを用いたシミュレーション結果を比較したものである。同定モデルは実験結果をおおむね再現できており、水圧駆動型人工筋は2次遅れ系で表される比較的簡易なモデルで表現できることがわかる。しかしながら、伸長と収縮の切替時では大きな誤差を生じる部分もあり、モデルベース制御のノミナルモデルとして使用する場合にも適用する制御系について十分に検討する必要がある。

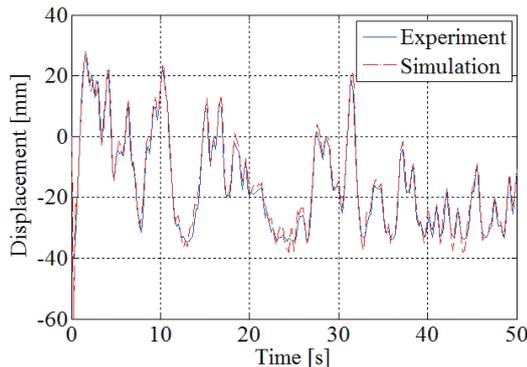


図7 実験結果とシミュレーション結果の比較 (水圧駆動)

つぎに、空気圧駆動型人工筋について同様の手法を用いて導出した同定モデルについて述べる。図6と同様に入力を弁への印加電圧、出力を人工筋変位として得られた実験データを用いて、システム同定法により以下の同定モデルを導出した。

$$G_a(z) = \frac{0.01909z^3 - 0.01086z^2 - 0.01118z + 0.004816}{z^4 - 3.227z^3 + 4.126z^2 - 2.503z + 0.6059} \quad (2)$$

ただし、 $G_a(z)$  は離散時間伝達関数である。図8は図7と同様に実験データと式(2)で与えられる空気圧駆動型人工筋の同定モデルを用いたシミュレーション結果を比較したものである。式(2)からわかるように、空気圧駆動型人工筋のモデル化において、水圧駆動型人工筋と同等の2次遅れ系では実現象を十分に再現することができず、4次遅れ系でのモデル化となっている。これは、作動流体である空気の圧縮性などの非線形性が水より強いことに起因していると考えられる。しかしながら、式(2)のような線形モデルでもモデルベース制御系のノミナルモデルとする場合においては十分に使用できると考えられる。

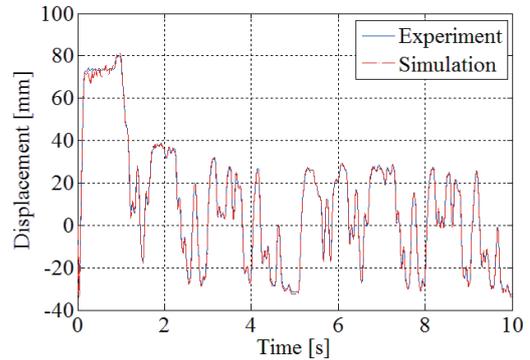


図8 実験結果とシミュレーション結果の比較 (空気圧駆動)

#### 4. おわりに

本稿では、従来空気圧により駆動されることが多いMcKibben型人工筋に対して、100%オイルフリーで人間・環境親和性の高い水圧駆動システムを適用した水圧駆動型人工筋について述べ、水圧/空気圧駆動が可能な実験装置を用いて比較した結果について紹介した。また、非線形性が強く制御が困難といわれるMcKibben型人工筋の制御手法として、適応型モデル予測制御系を適用した結果と、それぞれの駆動源を用いた際の同定モデルの導出について紹介した。水圧駆動型人工筋は他の駆動源にはない特長を有することから、これまで困難であった対象への適用が期待される。

#### 参考文献

- 1) 盛真唯子他：小型超高压油圧アクチュエータを用いたレスキューロボットの開発とその可能性検証試験，日本ロボット学会誌，Vol. 25, No. 5, p. 761-769 (2007)
- 2) W. Kobayashi, K. Ito, and S. Yamamoto, "Displacement Control of Water Hydraulic McKibben Muscles with Load Compensation", JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol. 8, No. 2, pp. 107-112, 2015
- 3) L. Ljung : System identification, Birkhäuser Boston, 1998

(原稿受付：2023年6月16日)

## 解説

## EHDポンプ駆動による人工筋

## 著者紹介



みつ い かず ゆき  
**三井和幸**

東京電機大学工学部先端機械工学科  
〒120-8551 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  
後期課程満期退学。同大学助手、助教授を経て、  
2002年同大学工学部教授。機能性流体関連、医  
療福祉機器開発の研究に従事。日本フルードパ  
ワーシステム学会理事、ライフサポート学会理  
事、生体医工学会、精密工学会などの会員。工  
学博士。

## 1. はじめに

ゴム人工筋、中でもMcKibben型人工筋は、軽量で出力密度が高く、柔軟性があり、人間の筋特性と同様の特性を持つことから、ソフトアクチュエータとして研究や応用が進められている。しかし、この人工筋の駆動には主に空気圧が用いられているため、人工筋自身が小型軽量であっても、駆動にはコンプレッサやポンプ、さらにはバルブなども必要となり、システム全体として大型化してしまう問題点がある。この問題点の解消のために、空気圧以外の圧力源を使用する方法が考案されており、本特集でも他の方々が多種多様な圧力源を用いた人工筋について述べていると思われる。これに対し著者らは、圧力源の小型化のみならず、熱の発生も少なく、コンプレッサのような音や振動が発生する圧力源ではない新たな圧力源として、機能性流体分野で注目されているEHD（電気流体力学）現象を応用し、電気で液体に流れを生じさせることで液圧を発生させるEHDポンプと名付けた圧力源を利用する人工筋の開発を行ってきた。本稿では、著者らが開発してきたEHDポンプとそれを圧力源とする人工筋について述べることにする。

## 2. EHD現象およびEHDポンプ

## 2.1 EHD現象

EHD（Electro-hydro-dynamics：電気流体力学）現象とは、シリコンオイル・機械油など、ある種

の電気絶縁性流体に電極を挿入し、その電極間に高電圧を印加すると、電極間で流体の流れが発生する現象である<sup>1)</sup>。

たとえば図1(a)のように、絶縁性液体中に、平板電極とそれに垂直に線電極を配置し高電圧（数kV～数10kV）を印加すると、図1(b)のように、外部からの機械的駆動力が作用していないにもかかわらず、線電極上を液体が上昇するEHD現象が発生する。この現象は、1956年に数元らにより発表され数元効果と呼ばれている<sup>2)</sup>。なお、印加する電圧は高電圧ではあるが、電流は数10 $\mu$ A～数100 $\mu$ A程度である。

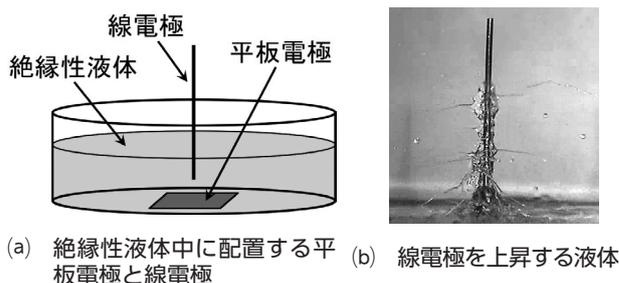


図1 EHD現象による液体の流れの一例

## 2.2 開発したEHDポンプ

## 2.2.1 考案したEHDポンプ用電極構成

EHD現象を利用したEHDポンプと名付けたポンプを開発するため、その基本となる電極構成を考案した。考案の過程を図2に示す。

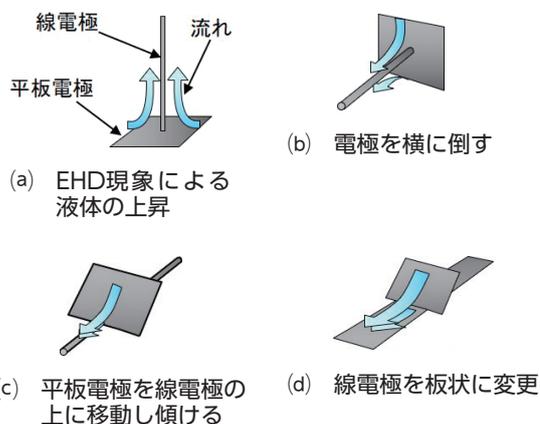


図2 EHDポンプ用電極構成の考案

まず図2(a)に示した数元効果を発生する平板電極と線電極の構成から、電極形状を(b)(c)と順に変更し、最終的に絶縁性液体中に(d)に示すような板状の電極と、その上に傾斜させた平板電極という構成を考案した。この電極構成を用い絶縁性液体に電圧を印加することで、液体内に不平等電界を発生させ液体に活発、かつ強い一方方向性の流れが発生できるのではないかと考えた<sup>3)</sup>。

### 2.2.2 考案した電極構成を用いたEHDポンプ

図3に示すように、図2(d)で示した電極構成をきょう体内に収納した著者らがEHDポンプと名付けた、電極のみの構成で、吸入した絶縁性液体の圧力を上昇させ吐出が可能新たなポンプを開発した。

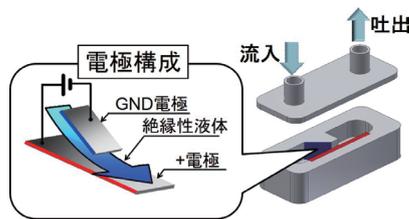


図3 EHDポンプの構造

このEHDポンプでは、図4に示すように、図2(d)の電極構成を直列多段に接続することで、吐出圧力を段数にほぼ比例して増幅することが可能である。

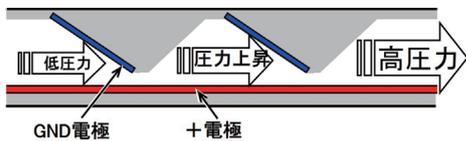


図4 吐出圧力を増幅させる電極の多段化

## 3. EHDポンプによるMcKibben型人工筋の駆動

開発したEHDポンプで人工筋の駆動が可能かを確認するため、McKibben型人工筋、小型EHDポンプを自作し搭載した人工筋アームを試作した。

### 3.1 自作したMcKibben型人工筋

自作したMcKibben型人工筋を図5に示す。この人工筋は、ポリウレタン製の風船を、室内配線などを束ねる目的等で使用される編み込みチューブ（長軸方向には伸びず、短軸方向のみ伸びる構造のチューブ）で覆い、両側をアクリルのジョイント部品で固定したものである。この人工筋の寸法は、収縮部分の長軸方向の長さを160mm、短軸方向の直径を20mmとした。この構造により、人工筋内に流体（液体）を流し込むとその圧力により短軸方向に膨

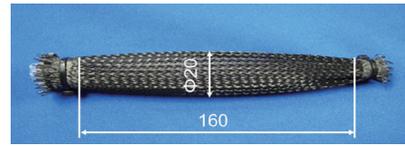


図5 自作したMcKibben型人工筋

らむことで、長軸方向に収縮することが可能となる。

### 3.2 McKibben型人工筋駆動用小型EHDポンプ

自作したMcKibben型人工筋を駆動するために、図6に示した小型EHDポンプを作製した。このEHDポンプの外形は縦22mm、横75mmとし、その中に図2(d)で示した電極構成を20段配置したものである。また、このEHDポンプは、9V乾電池の出力を市販の小型昇圧器により昇圧した高電圧を印加することで液体を吸引し、吐出することができる。

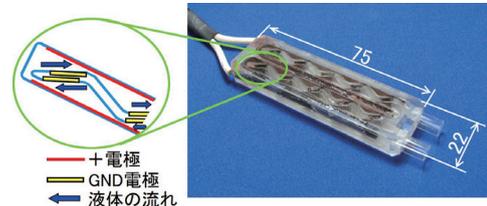


図6 McKibben型人工筋駆動用EHDポンプ

### 3.3 人工筋アーム

試作した人工筋アームは、図7に示すように自作したMcKibben型人工筋と、それを駆動する図6に示した小型EHDポンプ、および作動液体のリザーバなどを内蔵するもので、小型EHDポンプにより発生させた液圧によりMcKibben型人工筋を収縮させ、関節を駆動させる構造とした。なお、このアームは、上腕部130mm、前腕部110mmと、ヒトの腕の1/3程度の大きさとした。



図7 EHDポンプ駆動の人工筋アーム

### 3.4 動作試験結果

作製した小型EHDポンプは、印加電圧10kVで約60kPaの圧力を発生させることが可能で、このときの電流は約150 $\mu$ Aであった。この小型EHDポンプを用いて自作したMcKibben型人工筋を駆動した場

合のEHDポンプへの印加電圧とMcKibben型人工筋の収縮力の関係を図8に示す。

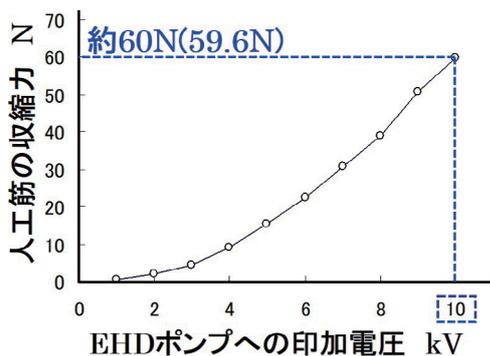


図8 EHDポンプへの印加電圧と人工筋の収縮力

このグラフを見て分かるように印加電圧の上昇に伴いその収縮力が増加し、印加電圧10kVで約60N(約6 kgf)の収縮力の発生が可能であった。また、印加電圧10kVにおけるステップ応答の時定数は約380msであった。このMcKibben型人工筋を用いてアームを実際に駆動させたところ、スムーズな動きが可能であり、アームに搭載した小型EHDポンプでのMcKibben型人工筋駆動においては音も振動も発生しなかった。さらに、このアームを連続稼働しても小型EHDポンプの発熱は見られなかった。このように、従来の空気圧によるMcKibben型人工筋駆動における問題点であったシステムとしての大型化や、音や振動さらには熱の発生という問題点の解消が実現できた。

#### 4. EHD人工筋の開発<sup>4)</sup>

3. で示したように、McKibben型人工筋の空気圧駆動における問題点は、駆動源をEHDポンプに変更することで解消することができた。しかし、McKibben型人工筋は、ゴム材(弾性材料)の膨張体と、それを覆う編み目状のスリーブによる構造であり、膨張体内に空気を圧送した場合スリーブの作用で膨張体は短軸方向に膨張し、人工筋全体が長軸方向に収縮する。この構造では、人工筋の弛緩時に内部の空気を排出するために膨張体の収縮力を利用することとなり、膨張体には弾性を有する材料を使用する必要がある。そのため、人工筋の収縮時には、人工筋として発揮する収縮力に必要な空気圧に、膨張体の弾性力に対抗するために必要な圧力を加えた過剰な圧力を膨張体内に注入する必要があるという問題を有している。さらには、編み目状のスリーブを使用していることから、膨張体の膨張・弛緩時の形状の変化にはスリーブの繊維角度などの幾何学的要素の影響が大きく、人工筋の収縮力と収縮率の

計算が容易ではなくなるのみならず、人工筋の動作に必要な圧力制御が複雑になってしまう問題も有している<sup>5)</sup>。そこで著者らは、2.2で示したEHDポンプを液体の圧送と吸引が可能な構造に改良することで、膨張体内の液体の吸引を可能にし、さらには人工筋の形状を変えることで収縮力および収縮率の算出が容易な人工筋の開発を行った。

#### 4.1 双方向EHDポンプ

2.2で示したEHDポンプでは、吸引した液体を一方方向に吐出するものであった。これに対し、図9に示すように、図3の傾斜させたGND電極を対称に配置することで、スイッチの切り替えで流れの方向を切り替えられると考えた。この電極構成を有するEHDポンプを双方向EHDポンプと呼ぶこととした。



図9 流れの方向の切り替えが可能な電極構成

図9で示した電極構成を内蔵し、実際に人工筋を駆動するために考案した双方向EHDポンプのイメージ図を図10に示す。

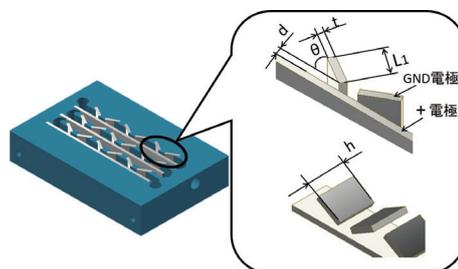


図10 人工筋駆動用双方向EHDポンプのイメージ図

この双方向EHDポンプは、図中の並行に配置した電極が+電極で、それに対し斜めに配置した電極がGND電極である。各電極の大きさは、 $L_1=5\text{mm}$ 、 $t=1\text{mm}$ 、 $h=7\text{mm}$ とし、GND電極と+電極との最短距離 $d=1\text{mm}$ 、GND電極の+電極に対する角度 $\theta$ を $30^\circ$ とした。また、すでに行った研究から、電極構成1段で10kV印加した場合の吐出圧が約3 kPaであったので、40kPaの吐出圧をめざし15段の多段電極構成とした。この考案に基づき実際に試作したEHDポンプを図11に示す。大きさは、 $60\text{mm} \times 40\text{mm} \times 28\text{mm}$ で、ポンプの吐出口は上方向(方向1)と下方向(方向2)に設けた構造とした。

この双方向EHDポンプに実際に電圧を印加し、吐出圧力を測定したところ、13kV印加時に目標圧力である40kPaを超える47.1kPa(方向1)と43.3kPa

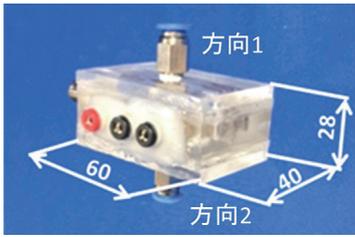


図11 実際に試作した人工筋駆動用双方向EHDポンプ

(方向2)の圧力を吐出することができた。

## 4.2 新たに考案したEHD人工筋

### 4.2.1 EHD人工筋の構造

従来のMcKibben型人工筋の構造的な問題点を解決するために、著者らは双方向EHDポンプによる駆動に適した新たな構造の人工筋を考案した。これをEHD人工筋と呼ぶこととした。考案したEHD人工筋は図12に示すように、膨張体をスリーブで覆うのではなく、Y方向に変位が可能な蛇腹型の構造体の上面と下面にボードを貼付け、その上下のボード間に紐を配置し、蛇腹型の構造体の中心に取りつけたリングに紐を通す構造である。構造体の上面にはEHDポンプが液体を注入・吸引する流入口を設けた。

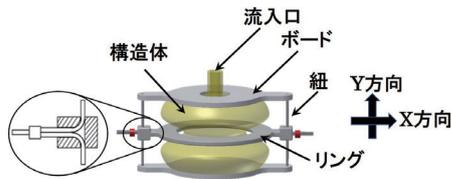


図12 考案したEHD人工筋の構造

このEHD人工筋は図13(a)に示すように、流入口に接続した双方向EHDポンプから液体を注入すると蛇腹型の構造体がY方向にふくらみ、ボードと紐の作用により、人工筋全体がX方向に収縮する。そして、図13(b)に示すように双方向EHDポンプにより液体を吸引すると構造体がY方向に萎み、人工筋がX方向にし緩する構造である。このEHD人工筋では、双方向EHDポンプが注入する液体により蛇腹型の構造体がY方向にふくらみ、構造体からボードにのみかかる圧力が紐を介してX方向の収縮力に変換される。この構造により、ボードと蛇腹型の構造体の接触面の面積から収縮力の計算を容易に行うことが可能となる。

また、構造体の変位方向に対して紐の引く角度が常に直角となるため、どの収縮率においても人工筋の収縮力は紐の角度の影響を受けなくなり、印加圧力に対して一定の収縮力を発揮する特性を持つと考えた。

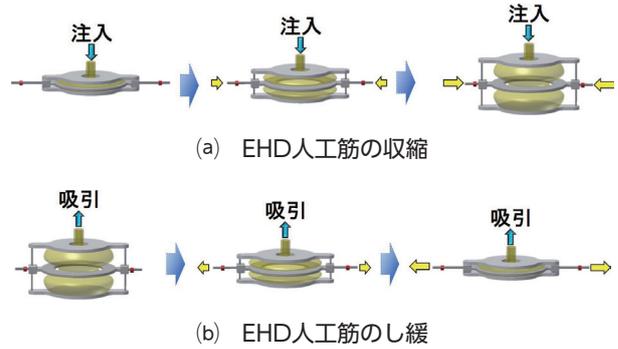


図13 EHD人工筋の収縮とし緩

### 4.2.2 実際に製作したEHD人工筋

従来のMcKibben型人工筋の収縮率がおよそ20～25%であるため、McKibben型人工筋の収縮率を超える30%を目標の収縮率となるような大きさのEHD人工筋を製作した。このEHD人工筋に内蔵される蛇腹型の構造体は図14に示すように、最大径を45mm、最小径を25mm、山の数を2とし、材質は柔軟性に優れた軟質ポリウレタンとした。



図14 EHD人工筋用蛇腹型の構造体

この蛇腹型の構造体を内蔵したEHD人工筋は図15に示すように、収縮時の長さを67mm、高さを35mm、し緩時の長さを95mm、高さを9mm、ボードと構造体の接触面の直径を36mmとし、人工筋全体の質量は11gである。ここで最大印加圧力は40kPaとした。

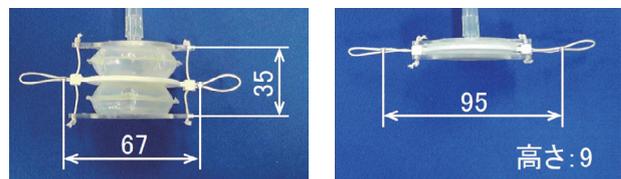


図15 製作したEHD人工筋

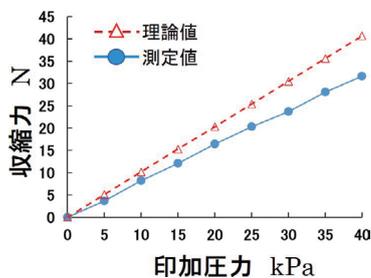
図15 製作したEHD人工筋

## 4.3 EHD人工筋の特性

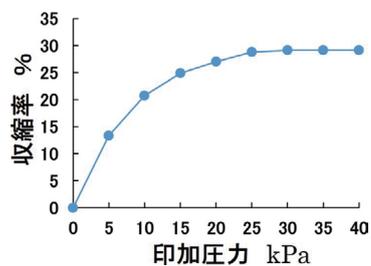
### 4.3.1 印加圧力に対する収縮力と収縮率

図16(a)にEHD人工筋への印加圧力と収縮力の関係を、図16(b)に印加圧力と収縮率の関係を示す。図16(a)グラフでは三角印が、ボードと構造体の接触面積と印加圧力から求めた理論値、丸印が測定値

である。このグラフから分かるように、印加圧力に対する収縮力は理論値と多少ずれているものの、傾向は同様の線形であり、最大印加圧力40kPaには最大収縮力31Nを発揮した。また、図16(b)のグラフを見て分かるように、収縮率は印加圧力の上昇に伴って上昇し、目標とした30%に匹敵する29%に達した。



(a) 印加圧力と収縮力の関係



(b) 印加圧力と収縮率の関係

図16 EHD人工筋の特性

#### 4.3.2 収縮率と収縮力の関係

図17に双方向EHDポンプからEHD人工筋への印加圧力をパラメータとした場合の収縮率と収縮力の関係を示す。このグラフでは、丸印が30kPa、三角印が25kPa、菱形印が20kPaの圧力を印加した結果である。どの印加圧力においても、収縮率の上昇に対して収縮力はほぼ変化せず一定となる傾向を示した。このことから、EHD人工筋は、McKibben型人工筋や生体の筋肉とは異なり、収縮率が変化しても収縮力が一定であるという従来にはない特性を有しており、位置や力を制御する場合、McKibben型人工筋よりも制御が容易となり、また、用途に合わせた設計が容易であると考えられる。

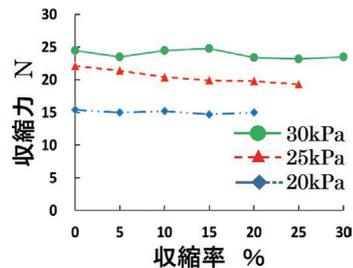


図17 収縮率と収縮力の関係

## 5. まとめ

本稿では、空気圧に代わる人工筋駆動の圧力源として、著者らが開発してきたEHDポンプを紹介するとともに、従来からのMcKibben型人工筋の駆動に実際にEHDポンプを使用することで、コンプレッサやバルブなどが不要で音や振動、さらには熱の発生もなく駆動できることを示した。そして、EHDポンプを液体の圧送と吸引が可能な構造に改良した双方向EHDポンプおよび、そのポンプによる駆動に適した構造で、収縮力および収縮率の算出が容易な著者らがEHD人工筋と名付けた新たな人工筋の構造とその特性を紹介した。今回紹介した人工筋駆動の圧力源であるEHDポンプは、圧力媒体が液体であるため、空気などの気体に比べ重量や慣性が大きいという問題点も残るが、システム全体としての小型化や、制御特性が良いなど多くの利点があり、人工筋に限らず多くの分野で使用できる新たな圧力源として期待できると考えている。

#### 参考文献

- 1) 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，p. 33-36 (2011)
- 2) 数元伊之助：液状誘電体が電極を上昇する現象，応用物理，25巻，第6号，p. 264-265 (1956)
- 3) 寺阪澄孝，工藤周，三井和幸：EHD現象を応用した回転型アクチュエータの開発—EHDモータの開発—，精密工学会誌，Vol. 74，No. 1，p. 87-91 (2008)
- 4) 武井裕輔，寺阪澄孝，下大川丈晴，三井和幸：EHDポンプを駆動源とした人工筋システムの開発，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 53，No. 2，p. 28-35 (2022)
- 5) 中村太郎：図解 人工筋肉—ソフトアクチュエータが拓く世界—，日刊工業新聞 (2011)

(原稿受付：2023年6月17日)

## 解説

## 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

## 著者紹介

かとうとも のり  
加藤友規福岡工業大学工学部知能機械工学科  
〒811-0295 福岡県福岡市東区和白東3-30-1  
E-mail: t-kato@fit.ac.jp

2007年東京工業大学大学院博士課程修了。都立高専助手～助教を経て、2010年福岡工業大学助教、2012年同大学准教授、現在に至る。空気圧制御に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会の会員。博士(工学)、技術士(機械部門)。

## 1. はじめに

本記事では、著者らが行っている、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と、それを用いたマニピュレータの制御に関する研究について、近年の成果をご紹介します。

本研究の目標は、空気圧ゴム人工筋に超小型のコンプレッサを内蔵し、その人工筋により駆動されるマニピュレータやパラレルリンク機構を開発することである。空気圧ゴム人工筋 (Pneumatic Artificial Rubber Muscles, 以下PARMあるいはPARMs) とは、図1(a)に示すような、空気圧駆動のアクチュエータである。内部の空気圧が上昇すると、PARMは径方向に膨張し、軸方向に収縮し、引張力を発生する。PARMsには繊維一体型やマッキベン型など、いくつかの種類があるが、PARMsは一般に、柔軟で軽量であり、同径のエアシリンダと比較して大きな引張力を発生することが可能である。さらに、PARMsには優れた防爆性や姿勢保持力が不要であるなどの優れた特徴がある。これらの長所のため、柔軟な接触動作が要求されるロボットやマニピュレータ、パワーアシストスーツなどへ適用することを目的とした研究が盛んである<sup>1)2)</sup>。

しかし、PARMsを駆動するためにはコンプレッサが必要であり、フィルタやサーボ弁なども必要となり、設置スペースも必要となる (図1(b))。

この問題に対し、PARMsをコンプレッサからの空気圧ではなく、液圧や液体から気体への相変化を

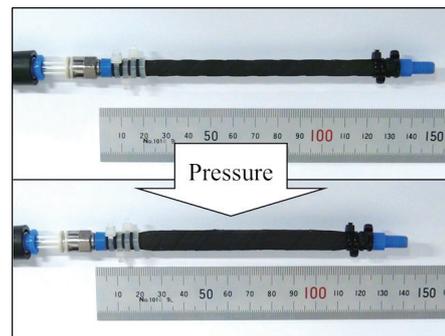
利用して駆動する研究が報告されている<sup>3)-5)</sup>。著者を含め近い研究者らが15年以上前、フッ化炭素の液体から気体に変化する気液相変化 (Gas-Liquid Phase Changes, 以下GLPCs) を用いて空気圧駆動のアクチュエータを駆動することを試みたが、応答の時定数は何十秒というオーダーであった<sup>6)-7)</sup>。

そこで近年、GLPCsによりアクチュエータ内に発生される内圧をフィードバック制御することにより応答速度を改善する研究を進めており、時定数で1秒以下から数秒という応答を実現している<sup>8)-10)</sup>。

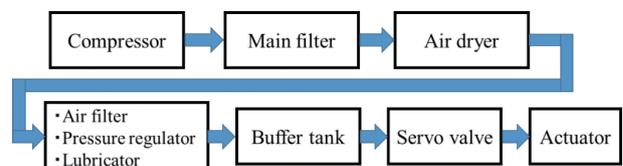
本記事では、まずGLPCsにより駆動されるPARMのフィードバック制御について、概要を紹介する。つぎに、そのGLPCs駆動のPARMを用いたマニピュレータの設計と製作について説明し、製作したマニピュレータの動作実験の結果について、紹介する。

## 2. 気液相変化により駆動されるアクチュエータ

気液相変化 (GLPCs) とは、気体から液体、液体から気体へと物質を相変化させる現象である。液体は、熱を与えると沸騰が始まり、気体に変化する。



(a) Pneumatic artificial rubber muscle (PARM)



(b) Peripheral devices

図1 PARMの収縮と駆動に必要な周辺機器

その際に、体積が膨張し圧力を発生させる。加熱を停止すると熱が奪われ凝縮し液体に戻る。その際に体積が収縮し、圧力が下降する。

GLPCsにより駆動されるアクチュエータの概要を図2に示す。気液相変化アクチュエータとは液相が気相へ変化する際、体積が膨張する現象を利用したアクチュエータである。装置に取り付けたコンスタンタン製のヒータに電力を与えることで、加熱された液体が膨張した後、沸騰し気体へ変化する。その際に体積が膨張し発生する圧力によってアクチュエータが駆動する。また、装置から熱を取り除くと、変化していた気体は液体に戻り体積は収縮する。気液相変化を用いたアクチュエータは、コンプレッサレスのためPARMの長所を生かしたまま、装置全体の小型化が可能となる。

本研究では作動流体にフルオロカーボン（3M, フロリナートPF-5052）を用いた。使用した作動流体と水との特性の比較を表1に示す。フッ化炭素は沸点が大気圧下において50 [°C] と低く、蒸発熱は104.65 [kJ/kg] と水の22分の1程度である。また、熱膨張率は、20 [°C] において0.00154 [°C<sup>-1</sup>] であり、水の約7倍である。

### 3. GLPCsによるPARMの駆動実験

#### 3.1 実験装置構成

図3に示す実験装置構成により、GLPCsによるPARMの駆動実験を行った。本実験で使用したPARMは、Festo社のMXAM-5-AAである。PARMの下には容積3.93 [cm<sup>3</sup>] の固定容器が取り付けられている。PARMとその固定容器には作動流体が充填されている。作動流体は、固定容器の下部に設置されたヒータ（これまでさまざまなヒータを使用しているが、ここではコンスタンタン線。Tokyo Wire Works, Ltd., diameter: 0.231 [mm], resistance per length: 16.02 [Ω/m], total resistance: 20.6 [Ω]) によって加熱される。

また、固定容器の上部には、圧力センサ（SMC Corporation, PSE510-R06）が設置されている。ヒータを駆動しPARMを収縮するための制御信号

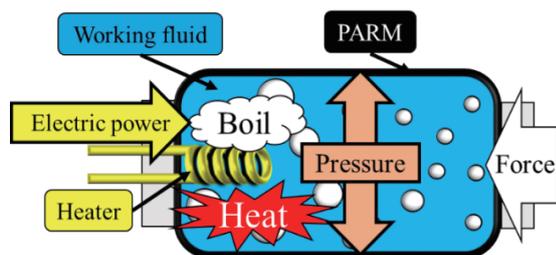


図2 GLPCsにより駆動されるアクチュエータ

表1 使用した作動流体と水との特性の比較

Working fluid (Chemical formula)	Boiling point (1 atm) [°C]	Heat of vaporization [kJ/kg]	Coefficient of thermal expansion [°C <sup>-1</sup> ]
Fluorocarbon (C <sub>5</sub> F <sub>11</sub> NO)	50	104.65	0.00154
Water (H <sub>2</sub> O)	100	2257	0.00021

(0-10 [V]) はDSP (digital signal processor, MIS, s-BOX) より出力される。その制御信号を電源に指令値として入力することにより、電源からコンスタンタン製のヒータに、0-35 [V] の電圧が印加される。このことにより、作動流体のフッ化炭素が加熱され、液体の体積の増加と、さらにはGLPCsが起こる。GLPCsにより発生した圧力は、圧力センサにより計測されてDSPに送られ、フィードバック制御が構成される（図4）。

#### 3.2 実験方法と実験結果

前述の通り、図3および図4に示した実験装置と制御系により、PARMをGLPCsにより駆動する実験を行った。実験において、フィードバックコントローラのPIゲインは、つぎの通り設定した。P (比例) ゲイン: 1,000V/Pa, I (積分) ゲイン: 3 V/(Pa·s)。圧力制御の目標値 $P_{ref}$ は最初、0.3 [MPa (gauge)] に設定した。そして制御開始後40 [s] で、0.35 [MPa] にステップ的に上昇させ、制御開始後80 [s] で再び0.3 [MPa] に戻した。発生した圧力 $P$ の信号はデータロガーにより記録した。

実験結果（圧力 $P$ ）を図5に示す。圧力の応答波形を一次遅れ要素のステップ応答波形であると近似すると、圧力0.3から0.35 [MPa] に上昇させた際の時定数は約0.51 [s] であり、0.35から0.3

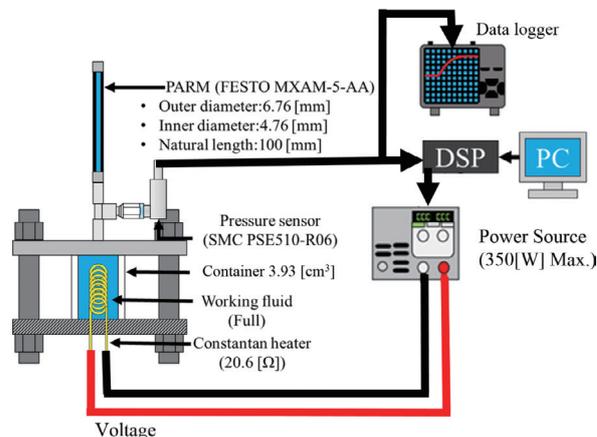


図3 実験装置の構成

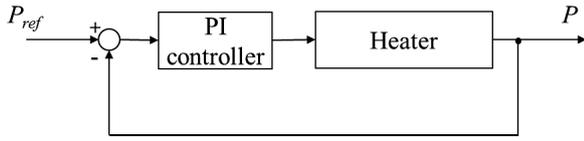


図4 圧力制御のブロック線図

[MPa] に下降させた際の時定数は約0.37 [s] であった。先行研究<sup>5)</sup>によると、PARMが発生する引っ張り力は、図6に示すように、圧力 $P$ だけでなく、収縮 $\varepsilon$ に依存する。たとえば、内圧が $P = 0.35$  [MPa] で収縮率が $\varepsilon = 0.04$ のとき、PARMが発生する引張力は $F = 20$  [N] となる。

#### 4. 気液相変化により駆動されるPARMを用いたマニピュレータ

##### 4.1 実験装置構成

本章では、GLPCsにより駆動されるPARMを用いたマニピュレータについて紹介する。製作されたマニピュレータを図7に示す。このマニピュレータの内部の構成要素の多くは、前章で図3に示したものとほぼ共通で、容積が $3.93$  [cm<sup>3</sup>] の固定容器、コンスタンタン製のヒータ、圧力センサ、作動流体、により構成されている。PARMの上部には、マニピュレータのグリッパ部分が新たに設計され取り付けられている。力の関係を計算すると、PARMの引張力が $18$  [N] のとき、グリッパの把持力は $2.55$  [N] となる。

##### 4.2 マニピュレータの動作実験

マニピュレータの把持力についての実験を行うための装置構成を図8に示す。3.2節と同様、PIゲインはそれぞれ、 $P$  (比例) ゲイン： $1,000$  [V/Pa]、 $I$  (積分) ゲイン： $3$  [V/(Pa·s)] と設定した。圧力制御の目標値は、最初は $P_{ref} = 0.3$  [MPa (gauge)] に設定し、制御開始後 $40$  [s] で、 $0.35$  MPaに上昇させ、制御開始後 $80$  sで再び $0.3$  [MPa] に戻した。グリッパの把持力は、ロードセル (Tokyo Sokki,

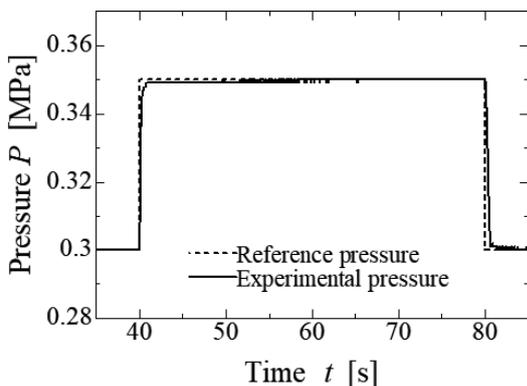


図5 実験結果 (圧力のステップ応答)

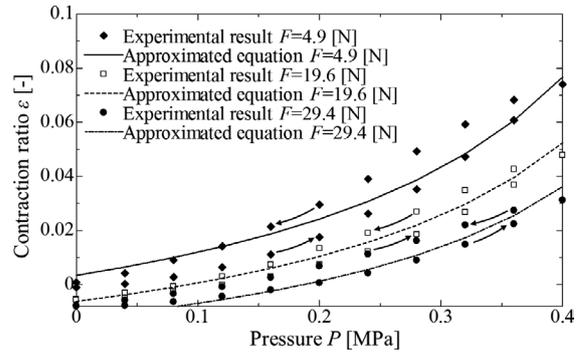


図6 PARMの静特性

TCLZ-20NA, Dynamic Strain Meter DA-18A) により測定した。圧力 $P$ 、把持力 $F$ とヒータへの電圧 $E$  はデータロガーで記録した。

実験結果を図9に示す。圧力 $P$ を $0.3$ から $0.35$  [MPa] に上昇させた際の時定数は約 $0.18$  [s] であり、 $0.35$ から $0.3$  [MPa] に下降させた際の時定数は約 $1.35$  [s] であった。 $40$  [s] から $80$  [s] の間、圧力 $P$ は約 $0.35$  [MPa] に保持されたが、その間のグリッパの把持力は、 $2.6 \sim 2.5$  [N] であった。なお、時間の経過とともに、把持力が若干、減少しているが、これはグリッパとロードセルに固定されているボルトとの間の滑りが原因である。なおここ数年は、このマニピュレータを駆動する人工筋を2本一組にして拮抗駆動することで応答性を改善する研究に取り組んでいる<sup>11)</sup>。

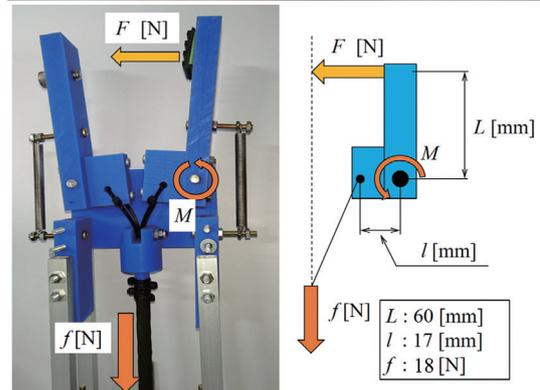
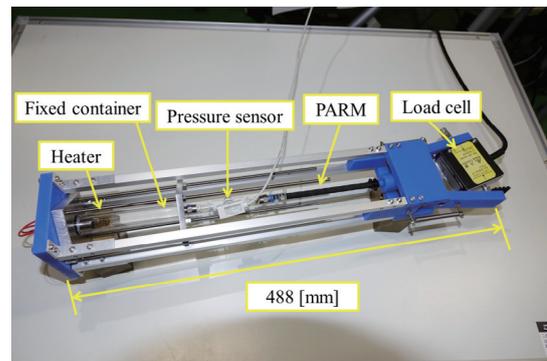


図7 GLPC駆動のPARMにより動作するマニピュレータ

## 5. おわりに

本記事では、著者らが行っている、気液相変化駆動の人工筋を用いたアクチュエータとマニピュレータに関する研究について紹介した。

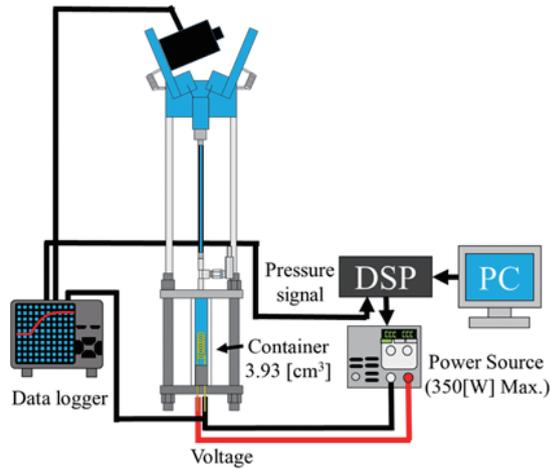


図8 マニピュレータの制御実験の装置構成

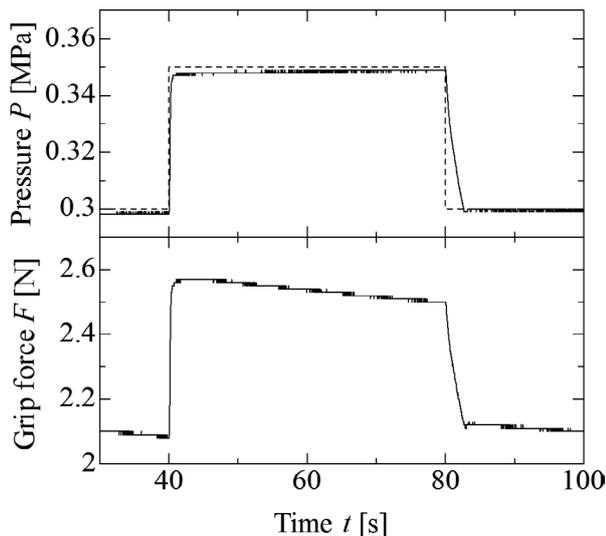


図9 マニピュレータによる把持実験の結果

### 参考文献

- 1) 則次俊郎, 空気圧アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 355-359 (1997)
- 2) KAWASHIMA, K., SASAKI, T., MIYATA, T.,

NAKAMURA, N., SEKIGUCHI, M., KAGAWA, T., Development of Robot Using Pneumatic Artificial Rubber Muscles to Operate Construction Machinery, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16, No. 1, pp. 8-15 (2004)

- 3) MATSUOKA, H., SUZUMORI, K., Gas/liquid phase change actuator for use in extreme temperature environments, *International Journal of Automation Technology* No. 8 Vol. 2, pp. 140-146 (2014)
- 4) MATSUOKA, H., SUZUMORI, K., KANDA T., Development of a gas/liquid phase change actuator for high temperatures, *ROBOMECH Journal* 3 : 1, pp. 1-7 (2016)
- 5) TSUJI, Y., DOHTA, S., AKAGI, T., FUJIWARA, Y., Analysis of Flexible Thin Actuator Using Gas-Liquid Phase-Change of Low Boiling Point Liquid, *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Technologies and Engineering Systems (ICITES2014)*, pp. 67-73 (2014)
- 6) 松田信一, 大野学, 泉俊之, 加藤重雄: 金属ベローズ型気液相変化アクチュエータ (内視鏡下外科手術用処置具への利用), *精密工学会誌*, Vol. 71, No. 6, pp. 723-728 (2005)
- 7) ONO, M., IZUMI, T., KATO, S., Proposal of a Gas-Liquid Phase-change Microactuator and its Applications, *Proceedings of the ASPE 2005 Annual Meeting*, Norfolk, pp. 138-141 (2005)
- 8) CHENG, M., KATO, T., HONDA, S., SAKURAGI, K., ONO, M., Pressure Control in a Miniature Rubber Muscle Driven by Gas-Liquid Phase-Change, *Proceedings of The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015)*, pp. 134-135 (2015)
- 9) KATO, T., SAKURAGI, K., CHENG, M., KAKIYAMA, R., MATSUNAGA, Y., ONO, M., Development of Miniaturized Rubber Muscle Actuator Driven by Gas-Liquid Phase Change, *Proceedings of Bath/ASME 2016 Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2016-1702* (2016)
- 10) KATO, T., HONDA, S., CHENG, M., SAKURAGI, K., ONO, M., Fabrication of a Miniature Rubber Muscle Actuator Driven by Gas-Liquid Phase Change, *JFPS International Journal of Fluid Power System*, Vol. 9, No. 1, pp. 11-17 (2016)
- 11) Kenya Higashijima, Tomonori Kato, Kazuki Sakuragi, Takahiro Sato and Manabu Ono : Development of Manipulator Using a Gas-Liquid Phase-Change Actuator, *JFPS International Journal of Fluid Power System*, Vol. 11, No. 3, pp. 70-74 (2019)

(原稿受付: 2023年5月31日)

## 解説

## DMEの燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータ

## 著者紹介



おく い まなぶ  
奥井 学

中央大学研究開発機構  
〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27  
E-mail: manabu.okui48@gmail.com

2014年東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻修了。日産自動車(株)などを経て2023年4月より研究開発機構機構准教授。空気圧アクチュエータ、機能性流体関連の研究に従事。博士(工学)。日本フルードパワーシステム学会平成29年度学術論文賞受賞。



さわ はし りゅうの すけ  
澤橋 龍之介

中央大学理工学研究科  
〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27  
E-mail: r\_sawahashi@bio.mech.chuo-u.ac.jp

2022年中央大学理工学部精密子機械工学専攻博士前期課程修了。VR空間における空気圧アクチュエータとMR流体を用いた可変粘弾性を有する気覚装置による人間の認知の研究に従事。修士(工学)。



なか むら た ろう  
中村 太郎

中央大学理工学部  
〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27  
E-mail: nakamura@mech.chuo-u.ac.jp

2003年信州大学大学院博士課程修了。博士(工学)。1999年秋田県立大学助手。2004年中央大学理工学部専任講師。2006年同大学准教授。2012年スイス連邦工科大学ローザンヌ校Visiting Professor。2013年より中央大学教授。2017年株式会社ソラリス設立。同社技術顧問。現在に至る。人工筋肉を用いたソフトロボットおよび生物型ロボットの開発と応用に従事。

## 1. はじめに

人工筋肉アクチュエータ<sup>1)2)</sup>は軽量、柔軟といった電気モータとは異なる特徴を持ち、ソフトロボットやウェアラブルシステムに応用されてきた。中でも空気圧人工筋肉は安定した動作や大きい発揮力を得やすく低コストであるといった特徴から、多くの応用研究が行われてきた<sup>3)4)</sup>。しかしながら、駆動に圧力源を要する、電気モータと比較して応答が遅いといった2つの大きな欠点があり、社会実装される例はあまり多くない。

圧力源の確保には多くの場合、モータ駆動のエアコンプレッサが用いられるが、システム全体の携帯

性を大きく損なう。コンプレッサの代替となる小型空気圧源により人工筋肉駆動システムを小型化・携帯化する研究も多く行われているが、電磁モータのバッテリー駆動と比較すると実用性が高いとは言えない。筆者らは圧縮気体生成手法の携帯性を流量密度[NL/g]で比較しているが、その結果からも空気圧システムの駆動にはある程度以上の体積・質量の圧力源が必要なことは明らかである<sup>5)</sup>。

応答の遅さは、空気圧の圧縮性やゴムの柔軟性に起因する。これは制御性を悪化させることがよく知られているが、応答の遅さは出力[W]の低下も招く。これは、応答の遅さにより人工筋肉アクチュエータの収縮速度が低下するためである。そのため、発揮力[N]が大きくともアクチュエータシステムとしては低出力となってしまう。出力の大きい瞬発的な動作を生成するために、ブレーキ要素を併用して弾性を蓄積し開放する研究も多く存在するが、弾性を蓄積するためのハードウェアに高い剛性が必要となることや、瞬発力の発生を阻害しないブレーキ方法が課題となっている<sup>6)7)</sup>。

本稿では、これらの2つの課題を解決するために着想した、ジメチルエーテル(DME)の燃焼により駆動する人工筋肉についてご紹介する。

## 2. DME燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータ

## 2.1 駆動原理

提案する、DME燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータ(以下、燃焼人工筋肉)の概要図を図1

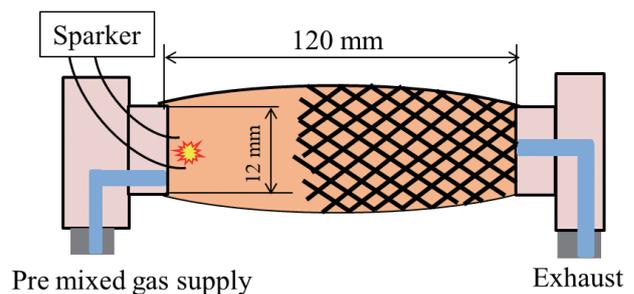


図1 燃焼型人工筋肉の基本構造

に示す。燃焼人工筋肉はMcKibben型人工筋肉の内部にスパーカを有する構造である。McKibben型人工筋肉とは、円筒状のゴムチューブを網状のスリーブで内包する構造の人工筋肉であり、ゴムチューブ内に空気圧を印加するとゴムチューブの膨張に伴い繊維の角度が変化し、軸方向に変位と力を得られる。このMcKibben型人工筋肉の内部に可燃性ガスであるDMEと空気の混合気体を充填し、スパーカで着火し、その際に生じる混合気体の燃焼による急激な圧力上昇を利用して人工筋肉を駆動する。なお、内部に圧力を印加することで、通常のマッキベン型人工筋肉として利用することも可能である。

燃焼に用いるDMEは含酸素燃料であり、炭素結合を有していないため黒煙が発生しない。また常温常圧では気体であるが、飽和蒸気圧が約0.6MPaと低圧であるため、液化して保存できる。軽量、安価なアルミ缶に封入して液体状態で常温携行が可能であり、一般的にはエアダスターとして流通している。図1に示すサイズの人工筋肉の駆動に必要なDMEはおよそ5mgであり、空気圧人工筋肉の携帯性を高められると同時に、燃焼による急激な圧力上昇による応答改善が期待できる。

## 2.2 基礎特性

開発した燃焼型人工筋肉の性能を確認するため基礎的な特性試験を実施した。その結果を図2～5に示す。

図2および図3は等尺性力応答試験の結果である。実験では、自然長で変位を拘束した燃焼人工筋肉に空気とDMEの混合気体を充填・着火し、着火時刻からの発揮力と内圧を測定した。なお、着火前の混合気体の充填圧力は0, 10, 20, 30kPaの4通りである。この混合気体の比率は事前実験で燃焼による圧力上昇が最も大きい比率（DMEモル比7%）である<sup>9)</sup>。結果から、いずれの印可圧力においてもDME燃焼駆動人工筋肉は高い力応答性を示した。着火指令から発揮力がピークとなるまでの時間はおよそ50msであり、従来のバルブを用いて圧縮空気を供給する駆動方法と比較して応答性が改善したといえる。また、本結果から用途に応じて印加圧や人工筋肉の形状（長さ、内径）を調節できることが示された。

図4および図5は変位応答実験の結果である。人工筋肉の一端を固定端に、もう一端は抵抗なく移動可能なスライドレールに取り付け、着火時刻からの圧力と変位を計測した。混合気体の印加圧力は0, 10, 20, 30, 40kPaと変化させた。結果より、すべての印可圧力においてDME燃焼駆動人工筋肉は高い変位応答性を示した。また、内圧が最大になる

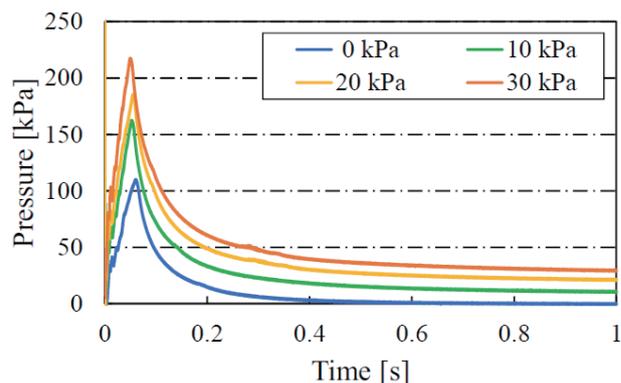


図2 等尺性試験での内圧応答<sup>9)</sup>

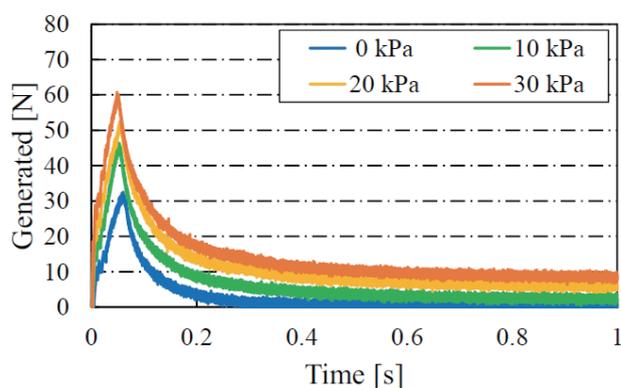


図3 等尺性収縮力の応答<sup>9)</sup>

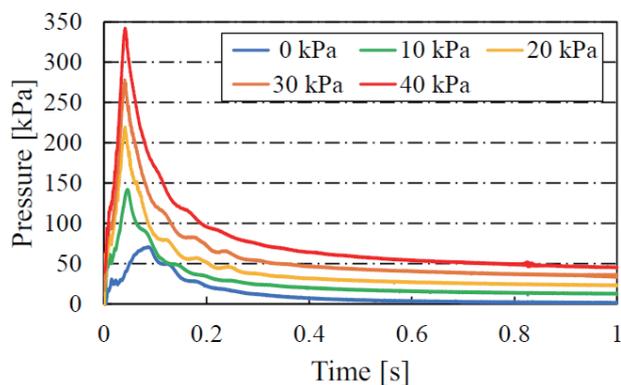


図4 変位応答試験での内圧応答<sup>9)</sup>

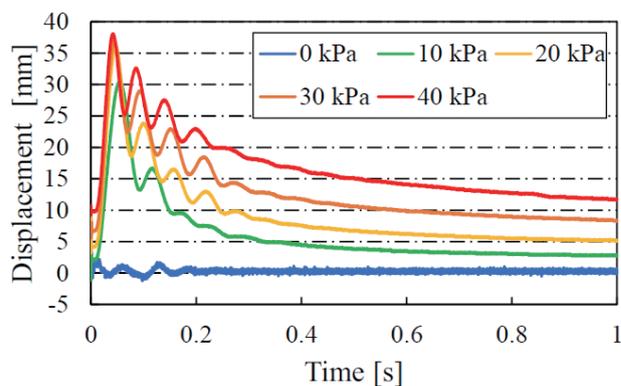


図5 変位応答<sup>9)</sup>

までの時間 (Peak time) は力応答と同様に50ms程度であり、高い圧力応答性を示した。以上より提案手法は空気圧駆動システムの応答性改善に有効だと考える。

### 3. 繰り返し駆動

燃焼型人工筋肉は一度駆動した後、反応後の気体を排気し、DMEと空気の混合気体を再充填する必要がある。原理実証段階では排気側ポートにバルブを設け、駆動ごとにバルブを開放し排気を行っていたが、そのような方法はバルブ数の増大やシステムの複雑化を招く。そこで、図6に示すような空気圧回路を用いて排気操作を行わずに繰り返し駆動する方法を提案している。提案手法では人工筋肉の給気側から排気口を塞がずに空気を流し続け、スパーカの着火タイミングのみで駆動を制御する。排気ポートが常時開放状態であるが、燃焼による圧力上昇が急激なため駆動への影響が大きいと想定している。

図7に繰り返し駆動時の内圧の応答を示す。流量を13.0L/minとし、スパーカの着火周波数を10Hzとしており、スパーカのみ操作している。結果より安定した着火が確認できると同時に、ピーク圧力も150kPaであり排気側ポートを開放していても十分に高い圧力が得られている。この駆動方法は、従来の流体駆動システムのジレンマであった、集積化とバルブ数の問題の解決も期待できる。流体アクチュエータは破壊耐性や柔軟性を向上するために集積化<sup>6)7)</sup>が行われることがあるが、それぞれのアクチュエータを個別に駆動する場合は必要なバルブの増加を引き起こしていた。本手法は、混合気体を任意の数の燃焼型人工筋肉に供給しながら、スパークプラグという電気的な信号で多数の流体アクチュエータの独立した駆動が可能である。

### おわりに

本稿では、DMEの燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータについて述べた。燃焼人工筋肉はわずかなDME消費で駆動でき、ラッチやブレーキを用いずに瞬発的な動作が可能であるため、流体駆動人工筋肉の課題であった携帯性と応答性の改善が期待できる。

最後に、本稿が当該分野の研究の一助となれば幸いである。

### 謝辞

本研究はJST, ACT-X, JPMJAX21K2の支援を受けたものである。

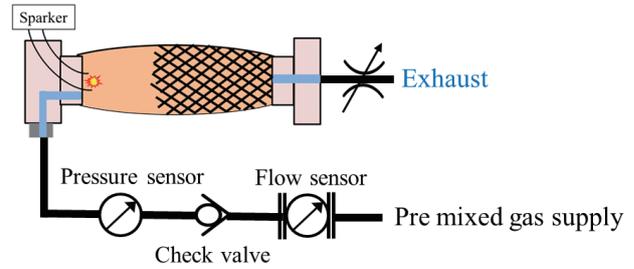


図6 繰り返し駆動のための空気圧回路構成

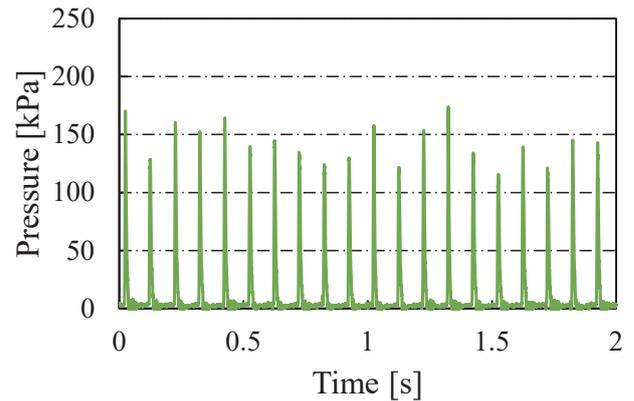


図7 10Hzでの繰り返し時の内圧<sup>10)</sup>

### 参考文献

- 1) Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori, "Design of thin McKibben muscle and multifilament structure", *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 261, 2017, Pages 66-74.
- 2) H. Tomori and T. Nakamura, "Theoretical Comparison of McKibben-Type Artificial Muscle and Novel Straight-Fiber-Type Artificial Muscle", *International Journal of Automation Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 544-550, 2011.
- 3) A. Ohno, H. Nabae and K. Suzumori, "Static Analysis of Powered Low-Back Orthosis driven by thin pneumatic artificial muscles considering body surface deformation", *In Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 39-44, 2015.
- 4) Y. Muramatsu, H. Umehara, and H. Kobayashi, "Improvement and Quantitative Performance Estimation of the Back Support Muscle Suit," *In Proc. of the 35th International Conference of the IEEE Engineering Medicine and Biology Society (EMBS)*, pp. 2844-2849, 2013.
- 5) M. Okui, Y. Nagura, S. Iikawa, Y. Yamada and T. Nakamura, "Evaluation of Air Compressing Methods for Development of a Portable Pneumatic Power Source", *Proc. of the 10th JFPS International Symposium on Fluid Power*, Fukuoka, Japan, 2B14, 2017.
- 6) T. Nagayama, H. Ishihara, H. Tomori and T. Nakamura, "Verification of throwing operation by a manipulator with variable viscoelastic joints with straight-fiber-type artificial muscles and magnetorheological brakes", *Advanced Robotics*, Vol. 30, Iss21, pp. 1365-1379, 2016.
- 7) Watari, Eyri & Tsukagoshi, Hideyuki & Kitagawa, Yasuhiro & Kitagawa, Ato. (2008). "MAGNETIC

- BRAKE CYLINDER TO ENHANCE TRAVERSE ABILITY AND ITS APPLICATION TO RESCUE ROBOTS”, Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power. 2008. 10.5739/isfp.2008.533.
- 8) R. Enjo, M. Okui, T. Nakamura: “Pneumatic Source Proposal for Improving Portability and Responsiveness of Artificial Muscle via Dimethyl Ether Phase Change and Combustion”, Proceedings of The 11th JFPS International symposium on Fluid Power, pp. 169-174, 2021.

- 9) 澤橋龍之介, 圓城竜斗, 奥井学, 中村太郎, “ジメチルエーテルの燃焼を利用した小型ソフトアクチュエータの開発—DME燃焼駆動人工筋肉の基礎特性—”, 2022年秋季フルードパワーシステム講演会, (2022. 11)
- 10) 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎, “ジメチルエーテルの燃焼を利用した小型ソフトアクチュエータの開発—DME燃焼駆動人工筋肉の連続駆動—”, 2023年春季フルードパワーシステム講演会, (2023. 5)

(原稿受付: 2023年7月23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。

## 日本フルードパワーシステム学会 2023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2023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 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)	804	8	105	123
差引き増減	±0	±0	+4	±0

正会員の内訳 名誉員17名・シニア員70名・ジュニア員71名・その他正会員646名

### <新入会員>

#### 正会員

奥村 和幸 (SMC株式会社)

藤井 秀峰 (SMC株式会社)

小黑 誠 (株式会社加藤製作所)

#### 学生会員

池田 賢 (芝浦工業大学)

生井 涼太 (芝浦工業大学)

稲川 尚樹 (芝浦工業大学)

佐々木優真 (室蘭工業大学)

## 解説

# 水の電気分解/合成を利用した ゴム人工筋アクチュエータ

## 著者紹介



なばえ ひろ ゆき  
**難波江 裕之**

東京工業大学工学院  
〒152-8550 目黒区大岡山2-12-1  
E-mail: nabae.h.aa@m.titech.ac.jp

2015年東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻博士後期課程修了, 博士(工学), 2013-2015年日本学術振興会特別研究員, 2015年より東京工業大学助教, 精密工学会, 日本機械学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, IEEE会員.



すず もり こう いち  
**鈴木 康一**

東京工業大学工学院  
〒152-8550 目黒区大岡山2-12-1  
E-mail: suzumori@mes.titech.ac.jp

1984年横浜国立大学大学院修士課程修了, 1984年-2001年株式会社東芝勤務, この間, 1990年, 横浜国立大学大学院博士課程修了, 1999-2001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, 2016年より株式会社s-muscle代表取締役兼務, 日本フルードパワーシステム学会会員, 日本機械学会, 日本ロボット学会フェロー, 工学博士.

## 1. はじめに

さまざまな人工筋肉が, 研究・開発されてきているが, 現在, 最も実用に近いものが空圧駆動のマッキベン型人工筋肉である. 筆者らは, 特に細径化(1.8 mm~4 mm)を行うことにより, 柔軟性を高めた細径マッキベン型人工筋肉<sup>1,2)</sup>を開発し, その基礎研究および応用に関して研究を進めてきた. 細径マッキベン型人工筋肉は, 量産にも成功しており製品化されている<sup>3)</sup>. 細径マッキベン型人工筋肉を使用する上での問題のひとつが圧力源を含む駆動システムである. これは空圧駆動のアクチュエータ共通の問題であるが, アクチュエータ自体が柔軟・軽量であったとしても, それを駆動するための圧力源やそれをコントロールするためのバルブ, そしてそれらをつなぐホースなどが接続されることでシステム全体としては大型化してしまう. この空圧アクチュエータの問題に対して筆者らは, 水の電気分解と合成を利用した駆動システムに関して研究を行ってきた<sup>4)</sup>. 本稿では, 水の電気分解・合成を用いたガス

圧制御と細径マッキベン型人工筋を組み合わせた電気駆動人工筋肉について紹介する.

## 2. 細径マッキベン型人工筋肉

マッキベン型人工筋肉は, ゴムチューブの外周に編組を編んだスリーブを施した構造となっており, ゴムチューブ内部に空圧が印加されることにより, 軸方向に収縮可能なアクチュエータである. ロボットやパワーサポートスーツのアクチュエータとして広く用いられている.

筆者らの用いる細径人工筋肉は, 基本構造や駆動原理は従来のもと同じであるが, 材料や製造手法の工夫により最小1.8 mmという非常に小さな外径を実現したものである(図1).



図1 細径マッキベン型人工筋肉. 図は4 mm径. 右図のようにロール状になっている状態から所望の長さを切り出し, 端末処理を施して使用する.

従来のマッキベン型人工筋肉は外径が数cmのものが多く, 曲げた状態での配置や駆動が困難であった. 従来のマッキベン型人工筋肉に比べ, 本人工筋では空圧を印加した状態でも十分に高い柔軟性を有しているため, 曲げた状態での配置や駆動が可能となっている. この特性を活かして, サポートスーツ<sup>5)</sup>や動く布である能動織布<sup>6,7)</sup>, 生体模倣ロボット<sup>8,9)</sup>などの応用研究を行ってきた.

## 3. 水の電気分解/合成を利用したガス圧制御

冒頭でも述べたが, 駆動システムの小型化・軽量化は, 空圧アクチュエータの共通の課題である. 筆者らはこの課題に対して, 水の電気分解および合成を用いたガス圧制御システムの研究を行っている. 図2に基本原理を示す. イオン交換膜を挟んで両側に

電極が配置されており、電極は水に接している。これは、固体高分子形燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell, 以下PEFC) と同様の構造であり、以降ではこの構造のことをPEFCと呼ぶ。この状態で、一定以上の電圧を印加すると、水が電気分解され、陰極と陽極にそれぞれ水素と酸素が発生する。これにより、圧力の発生が可能になる。また、両側の電極それぞれに水素と酸素が接した状態で、回路を短絡させると、水の合成が行われ水素と酸素が消費される。これにより、圧力を減少させることができる。また、この際、PEFCの作り出す電流をコンデンサ等にとめることによりエネルギー回生も行える。以上のプロセスを利用することにより電氣的にガス圧をコントロールすることが可能となる。これまでに本原理を用いることで、インフレータータイプの空圧アクチュエータ<sup>10)</sup>やテザーレスの空圧ロボット<sup>11)</sup>の駆動に成功している (図3)。図3左はインフレータータイプのアクチュエータであり、内部にPEFCが組み込まれている。電氣的に駆動制御が可能である。右図は胴体部にPEFCが組見込まれおり、上部には制御基板とバッテリーが搭載されている。

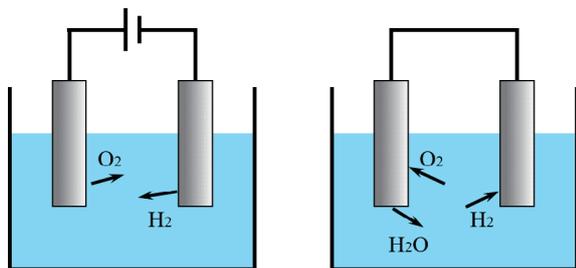


図2 水の電気分解と合成によるガス圧駆動の原理。電圧の印加により水が酸素と水素へと分解される (左図)。また、酸素と水素がそれぞれの電極に接している状態で両電極を短絡させると水素と酸素から水が合成される (右図)。以上の原理を用いることにより、ガス圧の電氣的な制御が可能となる。



図3 水の電気分解と合成応用例。左図はインフレータータイプのアクチュエータ内部にPEFCが組み込まれており、電氣的に駆動制御が可能である。右図は胴体部にPEFCが組見込まれおり、上部には制御基板とバッテリーが搭載されている。

#### 4. マッキベン型人工筋肉への適用とPEFCチューブの柔軟化

電気分解と合成によるガス圧制御システムを細径マッキベン型人工筋肉に搭載することで電気駆動の人工筋肉の実現が可能である。しかしながら、単純に通常のPEFCを円筒状にし、マッキベン型人工筋肉に搭載した場合、電極の剛性が高いため、柔軟性を損なってしまう。このことは、これまでの柔軟性を活かした応用が難しくなることを意味する。そのため行ったのが柔軟なPEFCチューブの開発である<sup>12)</sup>。柔軟な、PEFCチューブを実現するためにはイオン交換膜に柔軟な電極を施す必要がある。そこで注目したのが、IPMC (Ionic Polymer Metal Composite) アクチュエータの製作手法である。

IPMCアクチュエータはイオン交換膜の両面に電極を有するPEFCと同様の構造であるが、電極が柔軟であるため比較的低い電圧を印加することにより、イオンの移動による屈曲動作を行うことができる。IPMCアクチュエータでは無電解メッキを行うことにより、柔軟な電極をイオン交換膜の両面に施すことが可能である。同様の手段を用いて製作した柔軟なPEFCチューブと実現した柔軟な電気駆動のマッキベン型人工筋肉を図4に示す。この際にチューブ内側に適切に電極を施すために、チューブ内を還流させながらメッキを行う手法を開発した。開発した柔軟PEFCチューブと本チューブを用いた人工筋肉を図4に示す。開発した人工筋肉は170 mm以上の長さで径は4 mmとなっている。図に示すように曲げることが可能な柔軟性を有するとともに、電気での駆動が可能であり、10Vの印加電圧で約4.7%の収縮率を達成した。

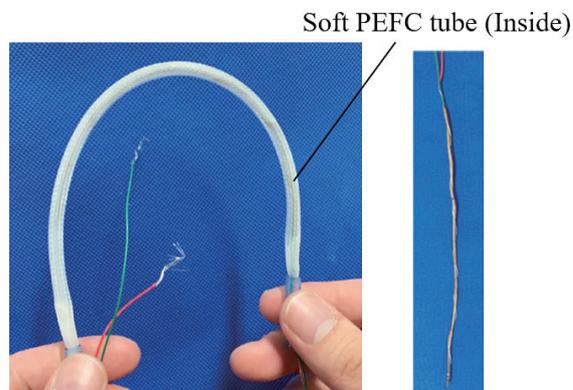


図4 柔軟なPEFCチューブと電気駆動細径マッキベン型人工筋肉

## 5. Au/Pt二層電極による耐久性の向上

前節での電気駆動細径マッキベン型人工筋肉は電気での駆動と屈曲可能な柔軟性を実現していたが、曲げ変形等に対する耐久性が低いという問題点があった。これは、触媒としての機能を期待して電極に白金を使用していたためだと考えられる。白金は、延性が低いため、屈曲された際に、チューブの変形に白金電極が対応できず破断し、導電性が不十分になるためである。そこで行ったのが、白金と金の二層電極構造の採用である<sup>13)</sup>。図5に二層電極構造の概念図を示す。前述の通り、電極が白金だけの場合、延性が低いため図5左に示すようにベースのイオン交換膜の変形に対して、破断が起こる。それに対して、金と白金の二層電極を用いた場合、白金はベースの変形に対して同様に破断するものの金は高い延性により破断せずに変形することが可能である。このため、白金は触媒としての役割を果たし、金により電極としての導電性が確保される。図6は、二層電極を施したPEFCチューブに対して繰り返しの屈曲動作を行い、外側と内側の電極の抵抗を測定した結果である。二層電極を用いることにより、繰り返しの屈曲動作に対しても十分に低い安定した抵抗値を示しており、導電性を確保できていることがわかる。

また、構造自体にも工夫を行った。PEFCチューブの外側を陽極、内側を陰極とすることで、それぞれ酸素と水素を発生させるようにしているが、水の合成を行うためには両者が混合しないようにする必要がある。そのため、従来はPEFCチューブの端点を単純に封止していた。しかしこの方法では、内部で発生した気体による人工筋肉の収縮変形への寄与が低くなってしまふ。そこでPEFCチューブの端点を袋状の柔軟なゴム材料によって封止することにより、気体の混合を防ぐことにした。袋状の部分が変形することにより、チューブ内部で発生する酸素の人工筋肉の駆動への寄与が高まり、性能向上を図ることができる。また、PEFCチューブ内部の圧力を低下させる効果もあるため、PEFCチューブの変形を抑制することができ、耐久性向上も期待できる。以上の改良により、本人工筋肉は無負荷状態において5Vの電圧印加により、およそ22%の収縮率を達成している。図7は二層電極を採用したPEFCチューブを用いた電気駆動マッキベン人工筋肉拮抗駆動システムである。回転ジョイントに本人工筋肉が接続されており、拮抗側はゴムを用いている。図7より見て取れるように、拮抗駆動系の動作に成功した。平均角速度と最大変位角は2.4 deg/sと83 degであった。

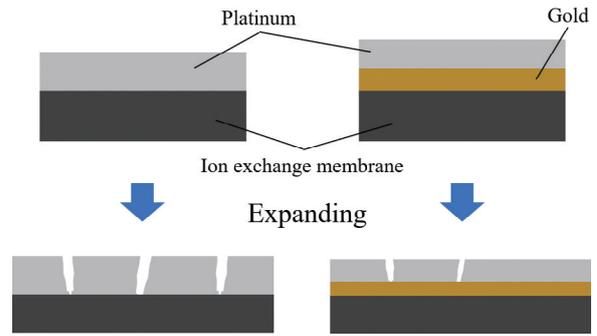


図5 Au/Pt二層電極による耐久性向上の機序。左図が白金電極一層の場合で右図が白金と金の二層電極の場合。

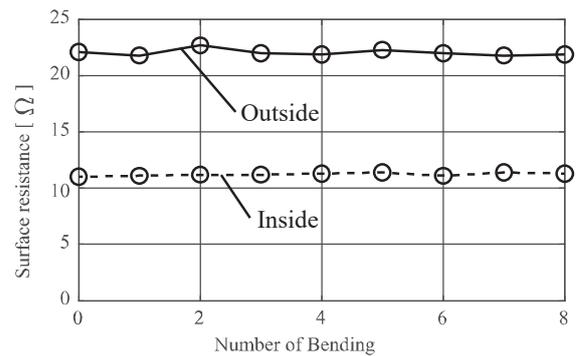


図6 繰り返し曲げによるPEFCチューブ電極の電気特性の変化

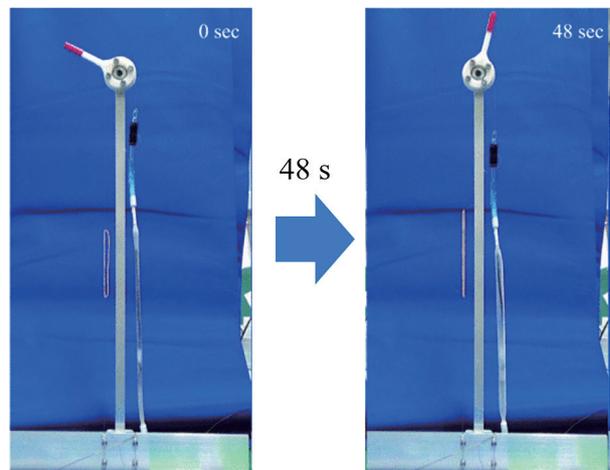


図7 拮抗駆動系への適用例

## 6. おわりに

本稿では、水の電気分解・合成および細径マッキベン人工筋肉を用いた電気駆動人工筋肉について紹介した。基礎的な原理やコンセプトに加えて、電極やPEFCチューブの構造の工夫による耐久性や動作性能の改善手法について解説を行った。紹介した電気駆動人工筋肉は基礎的な原理検証に成功しているが、動作速度や安定性に課題が残っており、今後改善に努めていきたい。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費、新学術領域研究「ソフトロボット学」JP 18H05470の助成により実施した。本稿で紹介した研究の遂行に携わった共同研究者の皆様並びに学生諸君に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Masayuki Takaoka, Koichi Suzumori, Shuichi Wakimoto, Kazuo Iijima, Takahiro Tokumiya. Fabrication of Thin McKibben Artificial Muscles with Various Design Parameters and Their Experimental Evaluations, The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2013), pp. 82, Mar. 2013.
- 2) Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori. Design of thin McKibben muscle and multifilament structure, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 261, Page 66-74, July 2017.
- 3) <http://www.s-muscle.com>
- 4) Koichi Suzumori, Akira Wada, Shuichi Wakimoto. New mobile pressure control system for pneumatic actuators, using reversible chemical reactions of water, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. A201, pp. 148-153, Oct. 2013.
- 5) Akihiro Ohno, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori. Static Analysis of Powered Low-Back Orthosis driven by thin pneumatic artificial muscles considering body surface deformation, 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2015), pp. 39-44, Dec. 2015
- 6) Tomoki Abe, Shoichiro Koizumi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori, Nao Sato, Michiko Adachi, Fumi Takamizawa. Fabrication of '18 Weave' Muscles and their Application to Soft Power Support Suit for Upper Limbs Using Thin McKibben Muscle, IEEE Robotics and Automation Letters (RAL), Apr. 2019.
- 7) Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori. Active Textile Braided in Three Strands with Thin McKibben Muscle, Soft Robotics, Vol. 6, No. 2, pp. 250-262, Apr. 2019.
- 8) Tatsuhiko Hiramitsu, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Gen Endo. Experimental Evaluation of Textile Mechanisms Made of Artificial Muscles, 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2019), the Proceedings of 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2019), Apr. 2019.
- 9) Shunichi Kurumaya, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Shuichi Wakimoto. Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles, Robomech Journal, Springer Open, 3, 18, Sept. 2016.
- 10) Atsuhiko Niikura, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Megu Gunji, Kent Mori, Ryuma Niiyama, Koichi Suzumori. Giraffe Neck Robot: First Step toward a Powerful and Flexible Robot Prototyping Based on Giraffe Anatomy, IEEE Robotics and Automation Letters (RAL), Vol. 7, Issue 2, pp. 3539-3546, Jan. 2022.
- 11) Akira Wada, Hiroyuki Nabae, Takaaki Kitamori, Koichi Suzumori. Energy regenerative hose-free pneumatic actuator, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 249, pp. 1-7, Oct. 2016.
- 12) Hiroyuki Nabae, Akio Kodaira, Tetsuya Horiuchi, Kinji Asaka, Gen Endo, Koichi Suzumori. Soft Polymer-Electrolyte-Fuel-Cell Tube Realizing Air-Hose-Free Thin McKibben Muscles, 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2019), Proceedings of 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 8281-8287, Nov. 2019.
- 13) Akio Kodaira, Hiroyuki Nabae, Tetsuya Horiuchi, Kinji Asaka, Gen Endo, Koichi Suzumori. Au/Pt Double-Layer Electrodes and Expanding Internal Chamber for Improving Air-Hose-Free Thin McKibben Muscles, 2021 4th IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2021), Apr. 2021.

(原稿受付：2023年6月15日)

## 会議報告

# The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology—ICMDT 2023におけるフルードパワー関連技術の研究動向

## 著者紹介



たけむら けんじろう  
竹村 研治郎

慶應義塾大学

〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1  
E-mail: takemura@mech.keio.ac.jp

2002年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。同大学助手、東京工業大学助手、助教を経て、2008年慶應義塾大学専任講師、2019年より同教授、現在に至る。機能性流体などの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

## 1. はじめに

2023年3月8～11日にThe 9<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology—ICMDT 2023が韓国チェジュ島で開催された。ICMDTは日本機械学会と韓国機械学会が隔年で共催する国際会議であり、日本側としては日本機械学会機素潤滑設計部門が主体となり開催している。機素、潤滑、設計のいずれもフルードパワー技術と密接な関係があるが、明示的な研究分野としては同部門に設置されたアクチュエータ技術企画委員会に関連して油圧、空気圧、水圧、機能性流体の各アクチュエータおよびその応用に関する研究発表が盛んである。主には日韓からの参加であるが、その他の国からの参加も見られた。

## 2. キーノートスピーチ

ICMDT 2023では日韓からそれぞれ2件、以下の4件のキーノートスピーチが行われた。

### *Origin of Innovation*

Prof. Min Yang Yang (The State University of New York at Korea, SUNY)

### *Development of Gaudi-inspired Screw for Miniature Differential Drive Mechanism*

Prof. Takashi Harada (Kindai University)

### *Study on Gear Noise Reduction for Automotive Field and*

### *High Performance Gears with JTEKT Only One Technology*

Dr. Hiroki Maki (JTEKT Corporation)

### *New Paradigm of Manufacturing for Electronics Technology of Printed Electronics*

Prof. Sung-Lim Ko (Konkuk University)

フルードパワー技術との直接の関連はないものの、要素技術に関する講演であり、フルードパワー機器やシステムにブレークスルーをもたらす可能性を秘めているかもしれない。

## 3. 一般講演

ICMDT 2023の一般講演はオーラル/ポスターの形式で行われた。フルードパワーシステムに関連するオーラル発表は主にActuator Systemsのセッションで行われた(図1)。Actuator Systemsのセッションは全部で10件の発表があり、このうち5件がフルードパワーに関連するものであった。

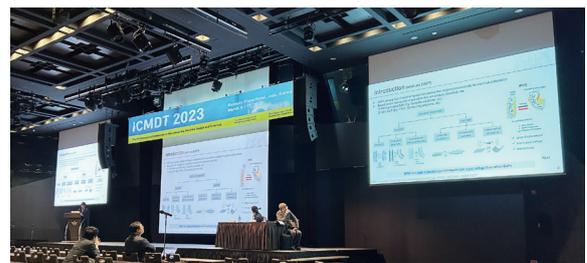


図1 メイン会場で行われたActuator Systemsのセッション

Chungnam National UniversityのJeong-Woo ParkらはElectro-Hydraulic Actuatorを用いた大型車両の後輪操舵に関するモデルベースデザイン<sup>1)</sup>を発表した。東工大のYujin Jangらは螺旋状の空気圧ゴムアクチュエータ<sup>2)</sup>を報告した。岡山大のWeihang Tianらは変位センシングを内蔵する光ファイバによるスリーブを利用したゴム人工筋の製作プロセス<sup>3)</sup>を提案した。近畿大のHayato Yaseらは空気圧ゴム人工筋を利用したウェアラブルの体幹筋のアシスト装置<sup>4)</sup>について発表した。高齢者への適用も見据えた空気

圧ゴム人工筋の応用例である。金沢大のYuuki Miyakeらはフレキシブルな材料を利用した屈曲可能なシリンダタイプの人工筋を提案しており、これをアームの屈曲に適用した結果<sup>5)</sup>を報告した。このほか、ポスター発表(図2)でも空気圧柔軟アクチュエータを利用した大腿骨運動エクササイズ装置<sup>6)</sup>や小型マッキベン型人工筋アクチュエータを用いた子供用装具のユーザテストの結果<sup>7)</sup>などがフルードパワー関連の研究成果として発表された。

ICMDT 2023でのアクチュエータ関連の発表を俯瞰(ふかん)すると、空気圧に限らずフレキシブルアクチュエータに関する研究が多く見られた。



図2 ポスター発表の様子

#### 4. おわりに

ICMDT2023はコロナで1年延期された末、キーノートスピーチ、一般講演(オーラル/ポスター)、バンケットなどすべてオンサイトで行われた。一部、都合で現地参加が叶わなかった発表に関しては事前収録されたビデオが会場で投影された。バンケット



図3 バンケットの様子

(図3)とクロージングセレモニーでは3Dプリンタやタブレットなど豪華商品が当たる抽選会が行われ大盛況であった。そのためかクロージングセレモニーの会場も満員であった。2年後の次回ICMDT 2025は日本で開催される。フルードパワーシステムと関連が深い機械要素、機能要素、潤滑、設計に関する研究発表は会員の皆様にとっても意義深い会議となることを願っている。

#### 参考文献

- 1) Park, J.-W., et. al. : Model based Design of RAS (Rear Axle Steering) System using EHA (Electro-Hydraulic Actuator), Proc. ICMDT 2023, P. 6 (2023)
- 2) Jang, Y., et. al. : Development of Spiral Pneumatic Rubber Actuator for Radial Transportation, Proc. ICMDT 2023, P. 7 (2023)
- 3) Tian, W., et. al. : Fabrication Process of Optical Fiber Type Smart Artificial Muscle, Proc. ICMDT 2023, P. 8 (2023)
- 4) Yase, H., et. al. : Actuators and Mechanisms Focusing on Slow and Fast Muscles for Trunk Rotation Assist Wearable Devices, Proc. ICMDT 2023, P. 9 (2023)
- 5) Miyake, Y., et. al. : Application of Air Cylinder Type Artificial Muscle for Swing Arm, Proc. ICMDT 2023, P. 13 (2023)
- 6) Ishii, D., et. al. : Design of a Hip Joint Motion Exercise device using Pneumatic Soft Actuators, Proc. ICMDT 2023, P. 80 (2023)
- 7) Yakami, R., et. al. : User Testing of a Pediatric Power Prosthetic Hand using miniature McKibben's Artificial Muscles, Proc. ICMDT 2023, P. 86 (2023)

(原稿受付：2023年6月13日)

## トピックス

# 学生さんへ、先輩が語る —高専教員になるという働き方—

## 著者紹介



かど わき じゅん  
門 脇 惇

香川高等専門学校  
〒761-8058 香川県高松市勅使町355  
E-mail : kadowaki-j@t.kagawa-nct.ac.jp

2022年香川大学大学院工学研究科知能機械システム工学専攻博士後期課程修了。同年香川高等専門学校助教。現在に至る。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員、博士（工学）。



図1 香川高専高松キャンパスの外観（改修前）

## 1. はじめに

### 1.1 自己紹介

筆者は栃木県で生まれ、高専卒業までの期間を過ごした。幼いころからロボットやモノづくりに興味を持ち、高専へ入学した。高専在学中はロボットコンテストに熱中し、作業服を私服とする日々を送った。成績的には不十分であったものの、ものづくりの知識を深めたい、ロボット開発を続けたいという漠然とした憧れを止めることが出来ず、四国にやってくるまで大学に滑り込んだ。大学院在学中に香川高専の非常勤教員の勤めさせていただいた縁もあり、修了後は香川高等専門学校の助教に着任した。現在は機械電子工学科に所属し、主に機械系科目を教えながら研究活動を行っている。

### 1.2 学校紹介

筆者が勤めている香川高等専門学校高松キャンパスを図1、2に示す。香川高等専門学校は、高松工業高等専門学校と詫間電波工業高等専門学校の統合によって発足した高等専門学校であり、2キャンパスを有する。高等専門学校は5年制であり、中学校卒業後から大学2年生までに相当する一貫教育を行う。筆者の所属する機械電子工学科でも、メカトロニクス分野の知識と技術を身に着けた実践的技術者の育成を目的として、機械工学と電気電子工学、情報技術などを中心に中学校卒業後の低学年から5年間学ぶカリキュラムが設定されている。

また、5年生では卒業研究が存在し、大学規模で



図2 筆者が担任するクラスの教室

はないものの、研究活動を経験することができる。

## 2. 学生時代について

### 2.1 研究内容

大学院では図3に示すような空気圧ゴム人工筋と呼ばれるアクチュエータを用いたソフトロボットの開発<sup>1)</sup>や、図4に示すMcKibben型空気圧ゴム人工筋の伸縮時に生じるヒステリシス特性のモデル化に関する研究<sup>2)3)</sup>を行った。前者は複数の空気圧ゴム人工筋を接続し、個別に動作させることによって、全体が柔軟でありながら移動能力を有し、狭あい部などを移動することが可能なロボットを開発するというものであった。

後者は、博士後期課程において行ったものであり、McKibben型空気圧ゴム人工筋と呼ばれる空気圧ゴム人工筋が伸縮するときの発生力とヒステリシス特

性について、人工筋の形状変形と変形時に生じる物理現象からモデルを導出する研究である。研究では、人工筋の端部が半球状に変形することに着目し、人工筋を構成するゴムチューブと繊維スリーブの接触面に生じるせん断変形と滑りがヒステリシスの原因であると考えたが、せん断変形から滑りへ移行する条件や収縮と伸長の動作が変化したときの接触面の状態を考慮することが出来ず、研究当初では想定していなかった進捗の遅れが生じた。問題解決のための議論や計算に多くの時間を要したことで指導教員であった教授には多大な迷惑をかけてしまったが、このときの経験は、土壇場でも諦めず、ポジティブに物事を考え続ける思考の培地となり、現在でも筆者の精神的支柱のひとつとなっている。

## 2.2 学生時代にしておいた方が良いこと

大学にある機材など、興味関心や研究活動に関わる物事は積極的に触れ、使用法を学んでおくことを強く勧める。在学中に考えることは少ないが、大学にある機材や集積された知識は非常に貴重なものであるとともに学生以外が触れることが難しいものでもある。特に社会に出た直後や、研究者として独立した直後は思い立っても機材がないため行動できないといったことも多い。また職場では、初めて操作する機械や学生時代とは仕様の異なる機械を用いて仕事を行うことがほとんどである。学生時代にさまざまな物事に触れて知識を蓄積することが、社会に出た後の働き方に影響すると考えられる。さらに、プレゼンテーションや会議において必要な資料や示す内容の根拠の準備、客観的に物事を評価できる思



図3 湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いた柔軟歩行ロボット

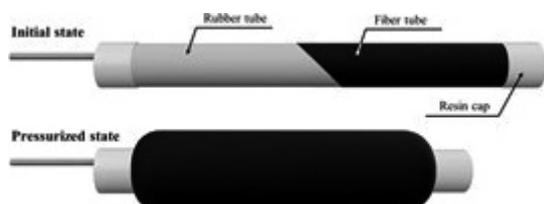


図4 McKibben型空気圧ゴム人工筋の構造

考といった音声にならない部分のコミュニケーション能力を高めることも重要であると考えられる。オンライン会議などは参加者が遠隔であることから、発言内容に関する事前事後のフォローを行うことは容易ではない。自分の意見を正確に理解してもらい、議論を活発化するためにも、研究ミーティングなどによるコミュニケーション能力の研さんを勧める。

## 3. 高専教員の仕事

### 3.1 仕事紹介

高専教員は、大学教員と比較して教育者の側面が非常に大きい。これは研究活動と授業を行いながら会議等の業務をこなす他に、部活動の顧問やクラス担任など高校教員的な部分を有するためであると考えられる。なお、筆者は高校生活を経験したことがないので、これは高校教員的な部分ではないという感想を持った方はご容赦いただきたい。

#### 3.1.1 研究活動

筆者は大学院時代に空気圧アクチュエータや人間支援ロボットについて研究を行っており、高専教員となった後も研究活動を継続している。しかしながら、後述する授業・部活動・クラス担任といった教育的業務に圧迫され、1日における研究活動時間は学生であった頃より大きく減少している。もし、これを読んでいる方の中に高専教員を志している方がいれば、短期間に集中して研究できる癖をつけておくことを強く勧める。

また、研究室には図5に示すように卒業研究を行う学生が配属される。研究ミーティングでの研究進捗の確認やアドバイスなどの研究指導も業務となる。

#### 3.1.2 授業

担当する科目の授業準備・実施と定期試験または課題による成績評価が主な業務となる。学科に所属する教員で、各学科の1年生から5年生までの専門科目を担当する。筆者の所属する機械電子工学科のように学科内で機械系教員、電気電子系教員といっ



図5 卒業研究風景

たように細分化されている場合もある。所属する教員の専門性にもよるが、実験実習を含む複数の科目を担当する。筆者は今年度、卒業研究指導を除いて5科目を担当している。自身が高専生であったころ以来に手を付ける内容もあり、授業準備などで新しい学びを得ることも多い。

### 3.1.3 部活動顧問

高専では低学年が高校生と同年代であり、全国高等学校総合体育大会や全国高等学校野球選手権大会への出場も可能である。高専というロボコンやプロコンといった印象を持たれる方も多いかと思われるが、運動部も盛んに活動が行われている。部活動は放課後と土日、長期休暇期間に行われるため、顧問も担当する部活動に合わせて勤務時間や休日業務の調整を行う必要がある。

### 3.1.4 クラス担任

高専教員と大学教員の差異として最も大きな内容がいわゆる「担任の先生」という立場にあると考えられる。これは各学科から選出され、1年間あるいは場合によっては3年間程度1つのクラスの担任業務を行うというものである。クラスに所属する学生の成績や出席状況などの情報を把握する他に、中学・高校におけるHRに相当する授業や保護者を交えた三者面談、学生指導などを行う。

また、体育祭などの行事ではクラス（学科）対抗種目において、走行能力や投てき能力が問われる。研究者の生物としての本領が試されている。

## 3.2 業務で大切にしていること

筆者が日々の業務で大切にしていることは、改善を止めないことである。人間は生物であり、同様の授業や指導を行ったとしても効果はそれぞれで異なる。しかしながら、各々が満足できるように説明を並べていくだけでは内容が冗長になり、学生の熱意を失うこととなってしまう。シンプルかつ全体に効果的な手法が必要である。一度組み上げた授業方法や研究指導に対して研さんを続けることは多くの時間を消費するが、補足説明などのアフターフォロー

が減ることで結果的にクオリティの向上だけではなく効率化にもつながると考えている。

## 3.3 Work・Life feat. Research

高専教員という職において、ワーク・ライフ・バランスを充実させるということは難しい。授業は曜日によって時間が異なり、放課後の部活動を監督する日は勤務時間も大きくずれる。土日に大会引率が発生すれば土日の休みがなくなるとともに、規則によって平日に休みを入れる必要が生じる場合もある。安定した勤務日と休日のローテーションを組むことがむずかしい。そうでなくとも、業務時間内で研究活動が完結することはない。このような状況下で考慮していることが、休める時間を積極的に作っていくことである。学校という環境では、仕事に受け身になった場合は際限ない量の業務と相対することになる。自身の裁量の範囲で休息のための時間を設け、メリハリをつけて働くことが業務、さらには研究活動をより有意義なものにすると考えている。

## 4. おわりに

ここまで読んでくれた学生の方には、ぜひとも多くのことを学び、その中に熱中できる物事を見つけしてほしい。何かに熱中できた経験は自信となり、人生を大いに盛り上げてくれることであろう。

### 参考文献

- 1) 門脇惇, 佐々木大輔: 湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いた柔軟歩行ロボットの開発, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2018) 講演論文集, p. 2789-2791 (2018)
- 2) 八瀬快人, 佐々木大輔, 門脇惇, 馬場優作: ゴムの物性を考慮したMcKibben型空気圧ゴム人工筋のモデル化, 日本機械学会論文集, 88巻 (905号), 全15頁 (2022)
- 3) 門脇惇, 佐々木大輔, 八瀬快人, 木村泰嘉: ゴムの物性を考慮したMcKibben型空気圧ゴム人工筋のヒステリシス特性のモデル化, 日本機械学会論文集, 88巻 (906号), 全17頁 (2022)

(原稿受付: 2023年6月18日)

## 企画行事

2023年春季講演会併設セミナー  
「フルードパワーとハイブリッド」

## 著者紹介



おち あい まさ み  
落 合 正 巳

協立機電工業(株)  
〒162-8575 東京都新宿区水道町3番9号  
E-mail : m.ochiai@kyoritsu-kiden.co.jp

元日立建機。1970年日立建機入社。油圧システム・油圧機器の研究・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

2023年春季講演会併設セミナー「フルードパワーとハイブリッド」が、2023年5月25日（木）に開催された。今回は、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45名、2団体と盛況であった（図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事業である。本年度は、編集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（54巻第2号（2023年3月号））において同テーマで特集を組み、執筆された方々の中から数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く機会としている。

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

小川恭右氏（川崎重工業(株)）には、「油圧ポンプ回転数制御システムへの単純適応制御の適用<sup>2)</sup>」と題して、ポンプを駆動するモータの回転数を必要な動力に応じて制御することで、油圧機器による制御を介さずに直接圧力、流量の制御が可能な制御システムについて講演いただいた。本講演では、調整負荷の軽減を目的として、安定性・応答性を両立しやす



図1 セミナー会場

い現代制御の単純適応制御に着目し、ロバスト性の向上やゲイン調整の自動化について解説いただいた。

肥後寛氏（九州工業大学）には、「ボンドグラフ法を用いた電空ハイブリッドアクチュエータのシステムモデル表現<sup>3)</sup>」と題して、電空ハイブリッドアクチュエータに搭載されるサーボモータの容量選定に有効であるシステムの動特性解析について講演していただいた。本講演では、ブロック線図で利用される伝達関数を意識することなくシステムの状態方程式を自動的に容易に導出できるボンドグラフ法を用いて電空ハイブリッドアクチュエータの数学モデルを作成し、サーボモータに作用する動力の動特性を解析、解析結果と実験結果の比較を解説していただいた。

加藤友規氏（福岡工業大学）には、「電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置<sup>4)</sup>」と題して、超精密加工を行う上で重要な基盤技術に超精密位置決め技術があり、現在推進している電空ハイブリッド超

精密鉛直位置決めステージの研究に関して、装置の概要と研究成果について講演していただいた。本講演では、鉛直ステージを駆動する電動リニアモータとステージを自重補償する空圧式バランスシリンダの併用で省力化や良好な制御性が得られていることを解説していただいた。

大村雄太氏（㈱コガネイ）には、「空圧・電動ファクトリー」<sup>5)</sup>と題して、現代工場における空圧機器と電動機器の共存と使用例について、ロボットを中心に講演していただいた。本講演では、空圧機器・電動機器のそれぞれの強み、ロボットハンドリング機器や自動走行搬送に使用する空圧機器と電動機器の比較などを解説していただいた。

### 3. おわりに

本稿では、2023年春季講演会併設セミナーの概要について報告した。数年来の対面式セミナー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、本セミナーで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) 村岡裕之：「フルードパワーとハイブリッド」発刊にあたって、フルードパワーシステム, Vol. 54, No. 2, p. 56 (2023)
- 2) 小川恭右：油圧ポンプ回転数制御システムへの単純適応制御の適用、フルードパワーシステム, Vol. 54, No. 2, p. 62-65 (2023)
- 3) 肥後寛：ボンドグラフ法を用いた電空ハイブリッドアクチュエータのシステムモデル表現、フルードパワーシステム, Vol. 54, No. 2, p. 66-70 (2023)
- 4) 加藤友規：電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置、フルードパワーシステム, Vol. 54, No. 2, p. 71-74 (2023)
- 5) 齊藤悠：空圧・電動ファクトリー、フルードパワーシステム, Vol. 54, No. 2, p. 75-78 (2023)

(原稿受付：2023年6月15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。

## 公益財団法人油空圧機器技術振興財団 2023年度研究助成募集のお知らせ

公益財団法人油空圧機器技術振興財団では、毎年、油圧・空気圧機器およびこれらに関連した研究に対して研究助成金を交付しており、今年度も、以下のとおり助成金を交付する研究者を募集いたします。

詳細は、学会ホームページ (<http://www.jfps.jp/>) の「公募情報」、または、油空圧機器技術振興財団ホームページの「研究実施者募集要綱」をご覧ください。 <http://zaidan.taiyo-ltd.co.jp/outline.html>

## 日本フルードパワーシステム学会 2023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

## 〈理事会・委員会日程〉

6月16日	基盤強化委員会
6月22日	企画委員会
7月25日	理事会
8月2日	編集委員会

## 〈理事会報告〉

## 2023年度第2回理事会

7月25日 15:00～17:00

機械振興会館6F 6-62, オンライン (参加者18名)

- (1) 国際シンポジウム広島2024開催準備状況
- (2) 2023年春季講演会開催報告
- (3) 2023年秋季講演会開催準備状況
- (4) 2023年春季講演会 最優秀講演賞選考
- (5) 2023年学会賞各賞の選考, フェロー候補者の推薦
- (6) 会員の推移
- (7) 学会創立50周年記念パーティー開催準備状況
- (8) 各委員会からの報告
- (9) その他

## 〈委員会報告〉

## 2023年度第1回基盤強化委員会

6月16日 16:00～17:00

Web開催 (参加者12名)

- (1) 2022年キャリア支援セミナー参加者へのアンケート結果報告
- (2) バーチャルミュージアムの更新改修状況報告
- (3) 会員の入会勧誘のお願いについて
- (4) 学会パンフレットの更新について
- (5) IFPEX2024について
- (6) その他

## 2023年度第1回企画委員会

6月22日 15:00～17:00

Web開催 (参加者23名)

- (1) 2023年春季講演会開催報告
- (2) 2023年春季講演会併設セミナー開催報告
- (3) 2023年春季講演会製品・技術紹介セッション開催報告
- (4) 2023年秋季講演会開催準備状況
- (5) 2023年オータムセミナー開催準備状況
- (6) 2023年ウィンターセミナー開催準備状況
- (7) 2024年春季講演会併設セミナー開催準備状況
- (8) 2024年春季講演会開催日程について
- (9) その他

## 2023年度第2回編集委員会

8月2日 15:00～16:30

Web開催 (参加者19名)

- (1) 会誌特集号の現状と企画
  - 1) Vol.54 No.4 「フルードパワーにおける品質向上技術の活用」
  - 2) Vol.54 No.E1 「緑陰特集」
  - 3) Vol.54 No.5 「ゴム人工筋を駆動する圧力源の新展開」
  - 4) Vol.54 No.6 「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」
  - 5) Vol.55 No.1 「フルードパワーを活用した超高压技術(仮)」
  - 6) Vol.55 No.2 「油圧関連テーマ(未定)」
- (2) その他
  - 1) 企画委員会からの提案
  - 2) 会議報告
  - 3) 今後の特集について

会  
告

## 共催・協賛行事のお知らせ

## 共催・協賛行事

**SICEセミナー「モデルベース制御設計～モデリングから制御系設計までを系統的に学ぶ～」2023**

主 催：公益社団法人 計測自動制御学会 制御部門

開 催 日：2023年9月28日(木)～9月29日(金)

会 場：オンライン開催

U R L：http://www.sice-ctrl.jp/jp/wiki/wiki.cgi/c/semi?page=design2023

**第66回自動制御連合講演会**

主 催：計測自動制御学会(幹事)、日本機械学会、システム制御情報学会、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：2023年10月7日(土)～10月8日(日)

会 場：東北大学川内キャンパス(宮城県仙台市青葉区川内41)

U R L：https://www.sice.jp/rengo66/

**連続講習会(全4回) 機械-電気の統合モデルによるモデルベース開発**

主 催：一般社団法人 日本機械学会 交通・物流部門

開催日程：2023年10月18日(水) 物理機能モデルの概要及び適用事例発表

2023年11月21日(火) 物理機能モデルの要素モデル(機械と電気の1次要素)

2023年12月26日(火) 物理機能モデルによるモデル(機械と電気の2次要素)

2024年1月23日(火) 物理機能モデルによるモデル化(機械と電気の共振構造と非線形化、機械と電気の統合モデル化実習)

会 場：日本機械学会事務局第1会議室(東京都新宿区新小川町4番1号 KDX飯田橋スクエア2階)

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/23-76/

**シンポジウム「動力伝達系の最新技術2023」**

主 催：公益社団法人 自動車技術会 動力伝達系部門委員会、CVT・ハイブリッド部門委員会

開 催 日：2023年11月17日(金)

会 場：東京工業大学すずかけ台キャンパス 大会館多目的ホール(神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

U R L：https://www.jsae.or.jp/assoc/event/gakkai/research/sympo/page07-23/

**EcoDesign2023 第13回環境調和型設計とインバースマニュファクチャリングに関する国際シンポジウム**

主 催：エコデザイン学会連合

開 催 日：2023年11月29日(水)～12月1日(金)

会 場：奈良県コンベンションセンター(奈良県奈良市三条大路1-691-1)

U R L：https://ecodenet.com/ed2023/

**2023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)**

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：2023年12月1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)

2023年12月7日(木) 2級認定試験(熱流体力学分野・振動分野)

2023年12月8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/

**キャビテーションに関するシンポジウム(第21回)**

主 催：日本学術会議 第三部

第21回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会

開 催 日：2023年12月7日(木)～12月8日(金)

会 場：大阪大学吹田キャンパス 銀杏会館(大阪府吹田市山田丘2-2)

U R L：https://cav21-mech.eng.osaka-u.ac.jp/

**第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023)**

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

開催日：2023年12月14日(木)～12月16日(土)

会場：朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター（新潟県新潟市中央区万代島6-1）

URL：https://sice-si.org/

新型コロナウイルスの影響で協賛行事の開催予定が変更になっている場合があります。  
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**詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp>) をご覧ください。

**2023年度オータムセミナー**  
**「環境負荷の低減を進める空気圧システム」**  
開催日時：2023年11月9日(木) 13:00～17:00

カーボンニュートラルの実現が国際社会における必須の課題となってきたことは周知の事実であり、空気圧業界においても例外ではありません。本セミナーでは、省エネ、省資源だけでなく、CO<sub>2</sub>排出抑制や環境汚染予防の視点などから環境負荷の低減を進める空気圧システムの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。

皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております。

**日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催**  
**2023年秋季フルードパワーシステム講演会**  
開催日：2023年11月30日(木)・12月1日(金)  
会場：岡山理科大学 50周年記念館（岡山県岡山市）

2023年秋季フルードパワーシステム講演会は2023年11月30日(木)・12月1日(金)に岡山理科大学50周年記念館（岡山県岡山市）で開催されます。本講演会では、一般講演に加えて、学内施設見学ツアーや技術懇談会などを企画する予定です。講演会では新型コロナウイルス対策を講じたうえで、通

常の対面での実施を予定しております。感染状況によっては変更になる場合もあります。詳細は学会ホームページに随時掲載いたしますので、ご確認くださいませよう願いたします。皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

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  
 (株)打江精機  
 (株)エイムテック  
 エコ技術研究所(台)  
 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)  
 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(台)  
 協和シール工業(株)  
 旭東ダイカスト(株)  
 (株)クボタ  
 KYB(株)  
 (株)工苑  
 甲南電機(株)  
 (株)古河製作所  
 (株)コガネイ  
 コスモ石油ルブリカンツ(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)  
 三和テッキ(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  
 ジャトコ(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  
 ダンフォス(株)  
 (株)都筑製作所  
 TMCシステム(株)  
 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)  
 ナブテスコ(株)  
 (株)南武  
 日新濾器工業(株)  
 日本アキュムレータ(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  
 (株)日立製作所  
 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)  
 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)  
 松巳鉄工(株)  
 三國機械工業(株)  
 三菱電線工業(株)  
 ヤマシファイルタ(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「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」—

【巻頭言】「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」発行に当たって	中野 政身
【解説】	
交流圧力源を用いたERマイクロアクチュエータシステム	吉田 和弘
電界共役流体（ECF）を用いたマイクロシリンジポンプの開発	金 俊完
電界共役流体の流動によるチップ上での液滴の生成とソーティング	竹村研治郎
EHDポンプを用いたロボット駆動機構の開発	三井 和幸
イオン液体静電噴霧による二酸化炭素分離吸収の高性能化	高奈 秀匡
車両用ドライMR流体ブレーキの開発と超小型EVへの実装	中野 政身
多層式MR流体ブレーキの装着型力覚提示装置への応用	澤橋龍之介, 奥井 学, 中村 太郎
MR流体を活用した吸盤	塚越 秀行
MCFを用いた磁場・電場同時印加による精密研磨の特性	西田 均
【会議報告】	
ROBOMECH2023におけるフルードパワー関連技術の研究動向	塚越 秀行
【トピックス】	
Youは日本をどう思う？第22回 日本生活10年目の韓国人，仕事と生活で思うこと	姜 玟佑
【研究室紹介】	
広島市立大学小嵯研究室	小嵯 貴弘
【企画行事】	
2023年春季フルードパワーシステム講演会開催報告	趙 菲菲

2023年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)	委 員 中 野 政 身 (㈱SmartTECH Lab.)
副委員長 山 田 宏 尚 (岐阜大学)	中 山 晃 (日立建機㈱)
委 員 飯 尾 昭一郎 (信州大学)	藤 田 壽 憲 (東京電機大学)
飯 田 武 郎 (コマツ)	丸 田 和 弘 (コマツ)
加 藤 友 規 (福岡工業大学)	水 上 和 哉 (CKD㈱)
北 村 剛 (油研工業㈱)	村 岡 裕 之 (㈱コガネイ)
窪 田 友 夫 (KYB㈱)	山 本 久 嗣 (富山高等専門学校)
五 嶋 裕 之 (㈱工苑)	吉 見 浩 司 (川崎重工業㈱)
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 (KYB㈱)
佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)	学会事務局 成 田 晋
妹 尾 満 (SMC㈱)	編集事務局 竹 内 留 美 (勝美印刷㈱)
谷 口 浩 成 (大阪工業大学)	(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 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―七 アクア白山ビル五階  
印刷所 勝美印刷株式会社