

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN

FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

フルードパワー システム

Sep.2015 Vol.46 No.5

日本フルードパワーシステム学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」

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「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」

【巻頭言】

「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」発行にあたって	山田 宏尚	202
----------------------------	-------	-----

【解説】

古代のフルードパワー — 続・ヘロンの謎 —	小山 紀	203
空気圧制御弁の推移	長岐 忠則	207
油圧ショベルの歴史を振り返り	布谷 貞夫	211
機能性流体の歴史レビューと展望	中野 政身	216
協会創成から学会揺籃期の思い出	中野 和夫	222

【会議報告】

ICMDT2015におけるフルードパワー技術研究動向	田中 豊	225
ROBOMECH 2015におけるフルードパワー技術研究動向	高岩 昌弘	227

【トピックス】

海外の産学連携（米国の事例）	平工 賢二	229
インドネシア駐在員日記	田中 大慶	232

【研究室紹介】

東北大学流体科学研究所 早瀬・白井・宮内研究室	早瀬 敏幸	235
-------------------------	-------	-----

【企画行事】

平成27年春季講演会併設セミナー開催報告「フルードパワーにおける故障予知技術」	内堀 晃彦	238
---	-------	-----

【会告】

平成27年度 オータムセミナーのお知らせ「アクアドライブシステムの産業利用の現状」	215
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催	
平成27年秋季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	215
平成27年度 日中若手研究者交流事業 徐兵教授（浙江大学）特別講演のお知らせ	
「建設機械のシングルポンプ—マルチアクチュエータにおけるモーションコントロールシステムに関する研究」	215
共催・協賛行事のお知らせ	241
お詫びと訂正	242
その他	240, 242, 243, 244

■表紙デザイン：山本 博勝 ㈱豊島

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Learn from the History of Fluid Power"

[Preface]

On the Special Issue "Learn from the History of Fluid Power"	Hironao YAMADA	202
--	----------------	-----

[Review]

The Ancient Fluid Power Technology—Series: The Mystery of the Heron—	Osamu OYAMA	203
History of Pneumatic Control Valve	Tadanori NAGAKI	207
Looking Back on the History of the Hydraulic Excavator	Sadao NUNOTANI	211
Historical Review and Prospect on Functional Fluids	Masami NAKANO	216
Memory of JFPS in its Infancy	Kazuo NAKANO	222

[Conference Report]

Research Trend of Fluid Power in ICMDT2015	Yutaka TANAKA	225
The Trend of Fluid Power Technology in ROBOMECH 2015	Masahiro TANAKA	227

[Topics]

Overseas Industry-university Cooperation (American case)	Kenji HIRAKU	229
A life in Balikpapan, Indonesia	Hiroyoshi TANAKA	232

[Laboratory Tour]

Hayase, Shirai, and Miyauchi Laboratory, Institute of Fluid Science, Tohoku University	Toshiyuki HAYASE	235
--	------------------	-----

[JFPS Activities]

Report on JFPS Spring Seminar "Failure Prediction Technology in Fluid Power"	Akihiko UCHIBORI	238
--	------------------	-----

[JFPS News]

215,240,241,242,243,244

巻頭言

「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」発行にあたって

著者紹介



やま だ ひろ なお
山 田 宏 尚

岐阜大学工学部
〒501-1193 岐阜市柳戸1-1
E-mail: yamada@gifu-u.ac.jp

1991年名古屋大学大学院 博士課程修了，名古屋大学工学部講師等を経て2007年より岐阜大学工学部 教授，油圧制御，人間支援工学などの研究に従事，日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，日本ロボット学会等の会員，工学博士。

皆さんは日本フルードパワーシステム学会のホームページをご覧になったことはあるだろうか。もし「最近，学会のホームページを見ていないな」と思われる会員の方がおられたら，ぜひご覧いただければと思う。特に，「フルードパワー・バーチャルミュージアム」¹⁾のサイトには，「フルードパワーの歴史」，「活躍するフルードパワー」，「未来を拓くフルードパワー」についての記事を読むことができる。この中で，「フルードパワーの歴史」の記事では，「フルードパワーとは」，「昔のフルードパワー」，「時代を画した機器」，「流体制御弁の発展」，「油圧シヨベルに見る油圧技術の進化」，「空気圧弁の発展」についての大変興味深い記事が並んでいる。このようなフルードパワーに関連したさまざまな記事を読んでみると，これらの技術にかかわってきた技術者たちの努力や，技術開発に関する歴史に興味がわいてくるのではないだろうか。

本特集では，フルードパワーの歴史について知的好奇心を満たし，読んでいて楽しい記事になることをめざして，フルードパワー，空気圧制御弁，油圧シヨベル，機能性流体，当学会設立などの歴史についての記事構成とした。工学的有用性だけでなく知的好奇心を満たすフルードパワーの歴史について，フルードパワーへの興味を持ってもらい，また基礎に立ち返ることで新しい発見が生まれるのではないかと思う。

まず，明治大学教授の小山紀氏には，古代ローマ時代にヘロンが残したフルードパワー技術にスポットライトを当て，古代のフルードパワー技術の謎解

きについての大変興味深い解説をいただいた。

元クロダ・妙徳の長岐忠則氏には，空気圧制御弁のうち，4・5ポート電磁弁の歴史的推移についての絞って解説いただいた。コマツの布谷貞夫氏には，油圧技術の重要なアプリケーションである油圧シヨベルの歴史について紹介いただいた。そして，東北大学教授の中野政身氏には，機能性流体の歴史について紹介いただいた。

最後に，東工大名誉教授の中野和夫氏にフルードパワーシステム学会の歴史について，学会設立の経緯はどのようなものだったか，設立に寄与した先生方，企業の方々などにまつわるエピソードについてご紹介いただいた。戦後からはじまる学会創成時の貴重な歴史的経緯を知ることができる。

本特集では紙面の都合によりフルードパワーに関するすべての分野をカバーできてはいない。フルードパワーの歴史に関しては他にも多くの文献^{2)～4)}があるので，興味を持たれた方はぜひこれらも参考にされたい。

「温故知新」とは広辞苑によれば「昔の物事を研究し吟味して，そこから新しい知識や見解を得ること」と説明されている。本特集号により，フルードパワーについての新しい発見や知見が得られれば幸いである。

最後に，ご多忙にもかかわらず，本特集号の各記事を執筆頂きました方々に厚く御礼申し上げます。大変残念なことに，空気圧制御弁の推移について解説頂きました長岐忠則氏が本特集号の出版を待たずに逝去されました。ご闘病のなかで貴重な原稿を執筆頂いたことを感謝申し上げるとともに，ご冥福を心からお祈り申し上げます。

参考文献

- 1) <http://www.jfps.jp/vir/>
- 2) フルードパワーの世界，日本フルードパワー工業会，(2009)
- 3) フルードパワーの進化と検証（油空圧技術増刊号），日本工業出版，Vol. 51，No. 11，(2012)
- 4) 日本フルードパワーシステム学会編集：油圧基幹技術—伝承と活用，日本工業出版，(2014)

(原稿受付：2015年6月30日)

解説

古代のフルードパワー — 続・ヘロンの謎 —

著者紹介



おやま 紀
小山 紀

明治大学理工学部
〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1
E-mail: oyama@isc.meiji.ac.jp

明治大学理工学部教授、流体制御の研究に従事、日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員、工学博士

1. はじめに

本会誌編集委員会から「フルードパワーの歴史」のテーマで執筆依頼をいただいた。「知的好奇心を満たすフルードパワーの歴史について」との指示もあわせて受けた。「歴史」を小山が技術史資料からだらだらとどると、ご指示の内容になりそうもなく自信がない。フルードパワー技術史はすでに多くの成書で取り上げられており、最近では機械学会誌3月号の特集記事「文化と歴史」に、フルードパワーに関しても独立記事ではないものの記述がある¹⁾。また、近年については学会ホームページ「バーチャルミュージアム」に掲載されている。そこでフルードパワーの古代史にピントを合わせ、資料が現存する最古のフルードパワー技術を取り上げることとする。この時代のフルードパワー技術者が置かれた環境と、彼らが信じた真理を述べてみたい。

流体は人が直接触れる特別な物質で、これを動力媒体として使うフルードパワーの歴史は、人が火を使い始めた時から始まっていたと考えて間違いない。鉄の精製跡が有史以前の地層から発見されるが、鉄溶解に必要な高温火力を得るには「ふいご」のような空気を圧縮送気する技術が必要だった筈だ。しかし有史以前では文字通り何も資料は残っていない。紀元前後になると、ヨーロッパ、特にギリシャやその周辺での古代技術に関する文献資料が見られるようになる。アジアでもこのような技術はあったと思うがなぜか一部しか取り上げられない。資料は現存しないのか、気になるが技術史紹介ではないので調

べていない。もしかしたら前者の記録がたまたま後世に残る幸運に恵まれたのかも知れない。

2. 文献に残る古代フルードパワー技術

もっとも古いフルードパワー技術者としてその名を資料に残しているのはギリシャ人あるいはアレクサンドリア人・クテシビオス（紀元前2世紀頃）である²⁾。消火用水ポンプや水オルガンを発明したと伝えられる。ほぼ同時代でもっとも多くの資料を残したのはヘロン（詳細不明。紀元前後といわれている）である。ヘロンが残した多くの書物や図面は、後世の編集者らの手により複製され現存する³⁾。またその日本語訳も読むことができる⁴⁾。本稿は後者を参考にさせていただいている。

ヘロンは三角形の面積を求める「ヘロンの公式」で数学者として有名であるが、旋盤や歯車の発明など機械技術者でもあり、中でも流体を扱ったものが多い。まさに古代のフルードパワー技術者である。ヘロンの図面の中に消火用水ポンプがある。クテシビオスの弟子とも伝えられているから、このポンプ図面はクテシビオス作かもしれない。シリンダポンプの逆止弁にはバタフライ弁が使われ、水の吹き出しノズルへの配管系には向きを自由に変えられるよう滑り軸受を利用したユニバーサルジョイントを用いるなど、今に繋がるフルードパワー技術の源流を思わせる。

彼の発明品としてもっとも有名なのは図1に示す風神の球である。台はボイラとなっており、下で火を焚くと蒸気がパイプで球に供給される。パイプは滑り軸受を介し球と結合されており、球の排気ノズルから蒸気が噴出して球が勢よく回転する。なにか仕事をさせていると最初の蒸気機関発明者と称せられるところだが、回転の様子を見せるディスプレイを目的としたものらしい。

図2は神殿の扉を火力により自動で開閉する装置の原理部を示している。左は空気を密閉した容器で、加熱されると空気が膨らんで、パイプで繋がった図中央の容器に入り下の水を押す。この容器にはサイホン管が取り付けられていて、押し出された水は右

のバケツ型容器（以後バケツ）に溜まる。その結果バケツは重くなり紐を引く。この紐は扉の回転軸と繋がっており、軸を回転させた結果扉が開く。火を取り除くと空気は元の容器に戻り、サイホンによりバケツの水は吸われて中の容器に移るため、バケツが軽くなり軸を元の方に回転させて扉は締まる。この仕掛けにおいて空気が熱により可逆的な膨張・収縮をする、すなわち後世になって「シャルルの法則」として知られるようになった現象を、ヘロンは理解していたことに驚く。

ヘロンの自動扉は人の便利をはかる実用目的ではなく自動で動くことで人の目を引き付ける、すなわちディスプレイを目的としている。風神の球もそうであるように、なぜ実用としてではなくディスプレイなのか。この時代技術者が置かれた状況を考える必要がある⁴⁾。当時でも織物などの製品生産や食料生産のため機械は必要とされた。しかしその製作や改良は作業員自身がおこなうのが常であり、機械を商品として提供することは一般的ではなかった。ヘロンの装置には神殿の自動扉や、ほかにも聖水の自動販売装置など、教会での使用を思わせるものが多い。商品としての機械が存在するとすれば、機械を神秘的な道具として利用し信者を獲得したい教会などが注文主であったのだろう。後世の技術者から「ヘロンは役立たない玩具ばかり発明した」と批判されるが、ヘロンは「玩具を発明したかった」のだと思う。

3. ヘロンの謎

以前、恩師、故・萩原辰弥先生が本誌に「古代の空圧技術—ヘロンの考察—」と題し寄稿された^{5),6)}。このなかで先生はヘロンが自身の発明品に謎を残していると指摘されている。先生の記事が掲載されたのは平成元年、および同2年とかなり以前なので、当該号はお手元に無いかも知れない。故・萩原先生のお許しを得ることができないまま一部を紹介する。この記事で先生は読者にも謎解きを勧められており、極めて好奇心を刺激する内容となっている。そこで私が考えた謎解きを記してみたい。なお、学会の過去記事は学会からコピー配信委託を受けた業者から入手可能（有料）なので、萩原先生の「ヘロンの謎」詳細は原著をご覧ください。

先生は同記事の中でヘロンが書き残した当時の原理、すなわち2,000年前の真理について触れられている。これらの中で本稿に必要な空気の性質に関する部分だけを引用し、文言を小山が勝手に改変しながら記述させていただく。

「（空気の挙動）空気は物質（粒子）である。した



図1 風神の球⁴⁾

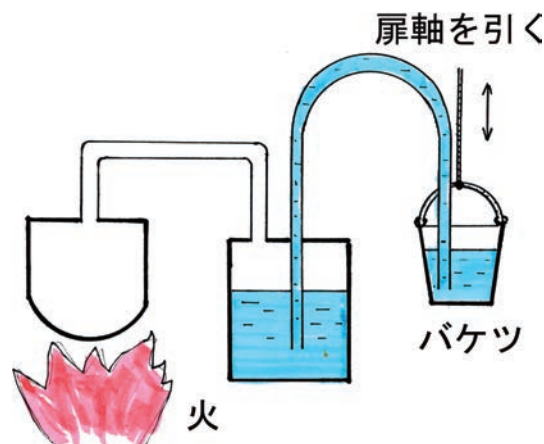


図2 自動扉の「しかけ」部分

がって空間に空気が入り込むと、その分だけほかの物質、たとえば水は逃げ出す。

（空気の圧縮性）空気の粒子には隙間があり、押されると粒子は隙間に入り込む。

（負圧の考え方）自然界には真空は存在せず、連続した真空は人為的にだけ存在できる。」

ヘロンの謎とはヘロンの書き残した図面通りに製作すると、その装置は正しく動作しないことである。しかし、一部を改良すると動作する。なぜなのか。

ヘロンはサイホンの原理が気に入っていたようで、発明品にはしばしばサイホンが利用されている。先生が出題された最初の謎はサイホン管に水を吸い上げて動作可能にする装置である（図3）。サイホン管は初期には空気が入っているため、これを抜く作業が必要となる。ヘロンの説明では、水を入れた容器（以後水引用容器）を管に接続しその底から水を抜くと、容器から流れ出た水がサイホン管内の空気を引くので、その体積分だけ（図では左容器からの）水が管に入る。また、サイホン管に水を満すた

めの条件として、水引用容器に入れる水の初期体積を管の体積よりも多くすればよい、とある。

萩原先生は体積だけでなく、水引用容器の水位(head)が条件を満たす必要があると指摘される。すなわち、サイホンを上がる水の高さは決して容器の水位より高くないことは、水の重さと圧力による力のつり合いを考慮すれば簡単にわかる。ヘロンの説明は先の空気の「負圧の考え方」を拡大解釈しており、空気の体積変化を考慮していない。

さらにヘロンは水がサイホン頂上まで上れば、あとは勝手にサイホン管右側に流れ落ち、そのままサイホンの空気抜きが完成すると説明している。先生はヘロンが説くこの条件を満たすには水引用容器の初期水位を

$$x_0 \geq (1 + \frac{a}{A})L \quad (1)$$

とすれば良いとされる。ここで、 A は左側の容器断面積、 a は水引用容器断面積で、 $A \gg a$ であれば $x_0 = L$ となる。

簡単のため水引用容器をサイホン管と同じ内径の円筒とし、これも簡単のため左の水位と同じ位置でサイホン管に結合したとすると図4になる。もし、先生のお答えを額面通り受け取って水引用容器に初期的に高さ L の水を入れて排水を開始したら、ちょうど容器の水の水位が $L/2$ になったときからはサイホン管の水は上がらなくなってしまう。一方、もし水が頂上まで上がったとしても、このときに右側の水がすべて流れ落ちてしまえば、サイホン管右側は大気圧になるため水は自重で元の容器に戻りヘロンが説くようにはならない。恐らく先生は、サイホンの水が頂上まで上がったとき引水用容器が負圧になっている必要があり、そのために(1)の水位を残すように説かれているのだと思う。しかし詳しい条件については書かれていない。初期水位はいくらにすればよいか。先生自身が読者に謎を提供されたものと考えて、小山がこの謎を解いてみることにした。

サイホン管の曲がった部分の長さ、容積は無視することにして、サイホン管の初期容積を V_0 、初期圧力を大気圧 P_a とする。先の条件より

$$V_0 = 2aL \quad (2)$$

である。水がサイホン頂上まで、すなわち L だけ上がったとき、この水重量を負圧により支えるには右側の水には L の水位が必要だ。すなわち水が L 上がったとき、右側の水の高さが L 残るよう初期水高さ x_0 を設定すればよい。左側水面が L 移動したときの右側水面移動距離は $x_0 - L$ （サイホン管内の空気が負圧により膨張するので L ではない）、このときのサイホン管容積 V は次式となる。

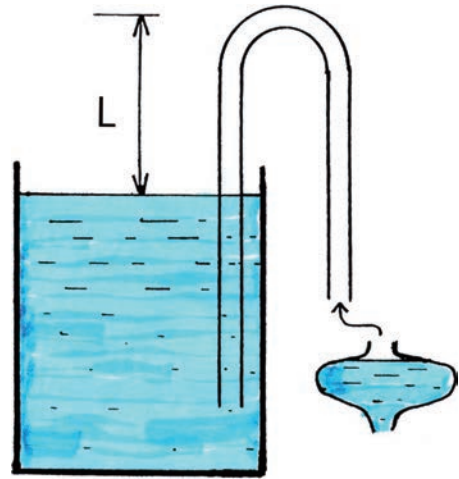


図3 サイホン管に水を吸い上げる方法（ヘロン）

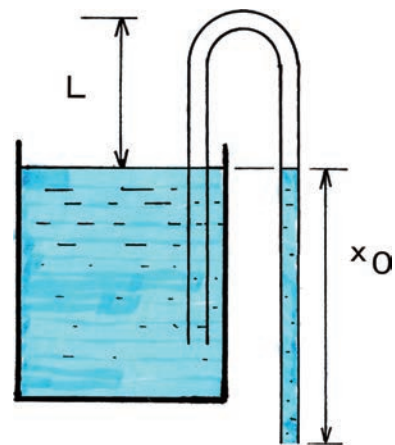


図4 サイホンに水を吸い上げ方法（小山改良）

$$V = a(L + x_0 - L) = ax_0 \quad (3)$$

(2)から(3)の容積変化を等温変化で仮定すれば

$$P_a V_0 = (P_a - \rho g L) V \quad (4)$$

が成り立つ。 ρ および g はそれぞれ水密度、重力加速度である。(2)、(3)および(4)式を連立させて初期水位の必要条件を解くと

$$x_0 \geq \frac{2P_a L}{P_a - \rho g L} \quad (5)$$

が求められる。

当然、ヘロンには空気の等温変化を定式化した知識は無かったろう。しかし要は水引用容器の高さを試行により求めればよいのだから、現場で調整したかも知れない。

萩原先生の記事ではさらにヘロンが図面で残したさまざまな仕掛けについて興味深い謎解きを進められており、先生らしい精緻さに感服しながら読み進めているうちに時間の経過を忘れる。この先をぜひお読みになることをお勧めする。

ところで、ヘロンの図面にはなぜこのような誤りが多いのか。ヘロンの原著を書き写してゆく際に誤

りが生じた可能性は否定できない。しかし、萩原先生はヘロンが意図して図面に欠陥を含めたと推察される。当時は新たに獲得した技術は本人に帰属し、決して他人と共有することはなかった時代である。特許など存在しないから、図面で公開したらその技術は本人の手を離れてしまう。本人でなければわからないノウハウを図面に含めておくのは当然であろう。すなわち、重要な部分の記述をわざと曖昧にしたのではないか。

4. おわりに

ヘロンは別の謎も残しているような気がする。路程計（距離計）、ねじ切旋盤、ウーム歯車、パイプオルガン、投石器などの機械や、ヘロンの公式をはじめとする幾何学や測量術などの数多くの著作がある。技術史を遡ればこれらはすべてヘロンの発明になる。これらがヘロンの業績とされるのには、本人も期待しなかった幸運が寄与したのではないか。

以後は資料に基づかない小山の勝手な私見である。ヘロンの生没年は不詳だが、アレクサンドリアの人と伝えられる。アレクサンドリアはその名からもわかるように有名なアレクサンドロス（アレキサンダ）大帝が古代エジプトの首都として設立し、大帝の死後、武臣・プトレマイオスがこの国を治めた。国力を見せつけるべく壮大な図書館を作り、プトレマイオス朝代々の王は資料の充実を図った。なかに

は外国から略奪した書籍もあったようだ。このような大量に集められた書籍の中にヘロンの著作があり、幾多の災害や戦乱を逃れ幸運にも現在に残ったのかも知れない。我々によく課せられる「業績は可能な限り資料（論文）にしておく」現代の処世術は、歴史的事実がその効果を証明しているのかも知れない。

2000年前の技術的思考に対してなんら稚拙な感じを受けない。ヘロンの謎の原因となる空気の圧縮性についても、当時の人はすでにその事実気付いている。現代の科学的思考の骨組みは、すでにこの時代には形成されていたように感じる。

参考文献

- 1) 機械学会編：特集「文化と機械」，日本機械学会誌 3 月号，118巻1156号（2015）
- 2) Neuburger, A : Die Technik des Alterms, Voigtlanders Verlag (1996)
- 3) Edited by Bennet Woodcraft : Inventions of the Ancients : the Pneumatic of Heron of Alexandria, Mechanica (1851)
- 4) 平田寛訳：古代人の発明 ヘロンの気体装置，創元社（1949）
- 5) 萩原辰弥：古代の空圧技術—ヘロンの考察一，油圧と空気圧，20巻 5 号，p. 71-77（1989）
- 6) 萩原辰弥：古代の空圧技術—ヘロンの考察（続）一，油圧と空気圧，21巻 5 号，p.58-63（1990）

（原稿受付：2015年 6 月29日）

解説

空気圧制御弁の推移

著者紹介

なが き ただ のり
長 岐 忠 則

〒289-2504 千葉県旭市ニ6132-3

1965年国立岩手大学工学部卒、黒田精工(株)入社空気圧機器開発に従事、2006年(株)妙徳入社執行役員、2009年退職。

1998年～2009年技能検定中央技能検定委員
著書 これだけ油圧空気圧 図解よくわかる油圧空気圧

1. はじめに

1.1 空気圧制御弁

空気圧制御弁は大きく分けて、圧力制御弁、流量制御弁、方向制御弁に分類される。

さらに、圧力制御弁は減圧弁、流量制御弁は速度制御弁、方向制御弁は電磁弁が代表される機器である。これらの中で制御機器の中でもっとも多く利用され、一番大きく変化を遂げたのが、電磁弁で主要機器の4・5ポート電磁弁である。本校では主に4・5ポート電磁弁の推移について述べることにする。

1.2 空気圧制御弁の日本での始まり

1880年米国で、鉄道車両のエアブレーキシステムが開発され、近代的な空気圧技術の曙となった。制御弁は、このシステムの主要機器として使用されている。

日本には、1919年（大正8年）国鉄がエアブレーキを導入し、日本の空気圧システムの、本格的利用が始まりました。この時代の空気圧機器は、すべて輸入品であり技術情報も少なく、国産化はまなまりませんでした。

そんな中で、航空機製作に欠かせないスポット溶接機に使用されていた、海外製空気圧機器の入手が困難になり、これらを開発することが軍事上重要になった。

1941年（昭和16年）、国産メーカーが開発に取り組み苦労の末、国産化に成功したのが、日本の空気圧制御弁の始まりと言える。

2. 創成期 1950年代～1960年代

1955年（昭和30年）代に入り、経済成長に伴い大量生産時代になり、自動車生産ラインに空気圧機器が多量に用いられ、自動化省力化の波に乗り空気圧機器

の利用が一段と進んだ時期となる。

そして国内の空気圧メーカーは、それぞれの得意分野を生かした、製品開発に取り組んだ時期である。

2.1 欧米品の国産化と技術水準の向上

この時期、自動車生産ラインで多用されていた電磁弁は、欧米の中大形のメタルシール直動形電磁弁（図1）であり、自動機械では丸形の円柱状の小形の直動形電磁弁などが主流であった。これらは、輸入品のため高価で納期もかかるので、空気圧ユーザから国産化の要望が強かった。

そこで、メタルシール電磁弁はスリーブ・スプール加工で、必要な精密加工技術を持った国内の精密加工技術メーカーが、丸形電磁弁については微細加工技術を持つ工具機械メーカーが、欧米製のものを参考に、自社開発または技術提携による開発を行い、国産化を始めた。したがって開発した製品は、基本的には欧米メーカー品の置き換えのためであるので、取り付けは同一、性能は同等以下であった。

さらに、この頃は圧縮空気の質が悪く、よく電磁弁が焼損する、メタルシールのスプールが固着するなどのトラブルが頻発した。



図1 初期の中形メタルシール電磁弁

3. 成長期 1960年代後半～1970年代

1965年（昭和40年）代に入ると、高度成長期で空気圧業界も急速に伸びた時期である。しかし、1970年前後のオイルショックにより一気に厳しい状況に追い込まれ、技術開発も一時的に停滞せざるを得なかった。

しかし、この時期は国内空気圧メーカーが、総合空気圧メーカーを目指し、一斉に取り組んだ時期でもあ

る。また、製造技術、素材技術が一段と向上したことを背景に、国内技術者は海外製品の性能と同等では満足できず、さらなる性能向上を目指して改良、開発に懸命に取り組んだ時期である。

また、空気圧機器の最適組み合わせを求めるサイジングマップが提唱され、電磁弁の小形化が進むきっかけとなり、現状のサイジングソフトの開発に続けている。

3.1 パイロット形電磁弁が主流に：低消費電力化

1960年後半になり、比較的空氣の質によるトラブルに強い、弾性体シールを用いたパイロット形電磁弁が開発され、次第に電磁弁の主流となった。

パイロット電磁弁は、小形のソレノイドで済むため、直動弁の20W程度から6W程度の低消費電力となった。また、丸形電磁弁の形状は、丸形形状から角形形状へと移り主流となっていた。

3.2 寿命1000万回時代へ：耐久性の向上

この時代の電磁弁の耐久性いわゆる寿命は、表1に示すように500万回が一般的でした。この時期、弾性体シールの材質の進歩、シール部の自己潤滑剤としてのグリースの性能向上、さらにシール形状に工夫をこらしたシールの開発が進み、長寿命化を実現した。電磁弁では1000万回が標準的になり、3000万回とうたうものも現れた。

3.3 注目すべき電磁弁の周辺技術

この時代に登場した注目すべき空気圧技術の項目をつぎに上げる。

1) プッシュイン継手の登場

1970年代始めに、欧州メーカーが開発したプッシュイン継手（図2）は、日本ではワンタッチ継手として空気圧配管作業を格段に容易にして、空気圧機器の普及発展に大きく寄与した。

そこで、継手のねじ込み工数を削減するため、サブベース、本体又はマニホールドにプッシュイン継手を圧入した電磁弁が登場した。

このプッシュイン継手は、その後の樹脂成形技術の向上により、現状の継手付き樹脂マニホールドの元となっている。

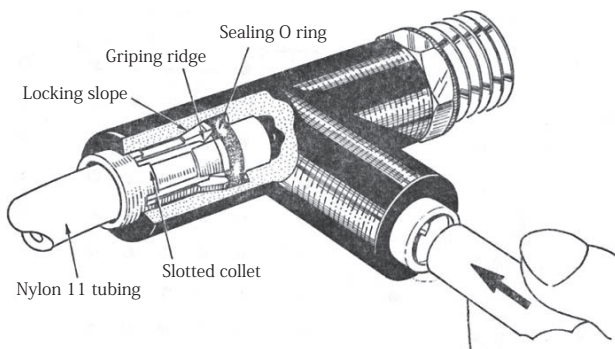


図2 初期のプッシュイン継手

2) 端子台、DINコネクタの登場

初期電磁弁の電気結線部は、リード線が主流であ

り電磁弁交換時などのメンテナンス性が悪かった。そこで、電気結線を電磁弁の手元で行えるメンテナンス性が良い、ターミナル（端子台）タイプ、DINコネクタタイプが利用されるようになった。

3) 使用材料、部品の性能向上

漏れのないアルミダイキャストの製造技術の進歩、樹脂材料および樹脂成形技術の向上、空気圧用のゴム材料の進歩および空気圧用のゴムシールの開発、ソレノイドの性能向上など、電磁弁関連の技術の進歩により、日本独自での電磁弁の小形化、高性能化に寄与した。

4) 流量表示は有効断面積表示へ

初期は流量特性といえ、入口および出口圧力と流量を描いた流量グラフを指していた。1964年にJIS C 9312 溶接機用電磁弁で、流量表示法の有効断面積が規格化された。

表1 1970年代のJISの特性表（抜粋）

呼び	有効断面積 以上mm ²		漏れ量以上 cm ³ /min		作動回数 万回	
	A	B	C	D	E	F
10	5	10	10	500	150	500
20	10	20	10	500	150	500
40	20	40	25	1,000	150	500
60	40	60	25	1,000	150	500
110	60	110	50	1,500	150	500

Cは弾性体シール、Dはメタルシール

この有効断面積は、わかりやすく実感に近いことから、空気圧用電磁弁のJISとして、1978年（昭和50年）にJIS B 8375：空気圧用4・5ポート電磁弁の流量特性として、有効断面積S（mm²）が採用制定され、電磁弁の流量特性として普及した。

表1に1970年代のJISに規定されている特性を示す。これによると、呼び10すなわちRc1/4相当の電磁弁で有効断面積は10mm²であった。現在の小形電磁弁では20mm²であるから、流量特性はおおよそ2倍に進歩している。

4. 成熟期 1980年代～1990年代

1980年代に入り、日本の空気圧技術は大きく飛躍発展した。電磁弁も小形化、軽量化、高品質・高信頼性およびデザインの美しさなどをテーマとした、製品開発が競って行われた。

4.1 10・15・18mm巾電磁弁の開発：小形化

1970年代後半、4・5ポート電磁弁で一番小形のものは、当時欧州メーカーの15mm巾で、有効断面積1mm²未満のものであった。これをターゲットに、日本の空気圧メーカーが開発したものが、15mm巾で有効断面積4mm²、消費電力2Wの電磁弁（図3）で、

低消費電力・小形大流量電磁弁の先駆けになったものです。

同時に18mm巾がシリーズ化され、さらに10mm巾が開発された。その後、海外メーカーも追随し、現在の10mm・15mm・18mm巾小形電磁弁系列の世界のスタンダードとなった。

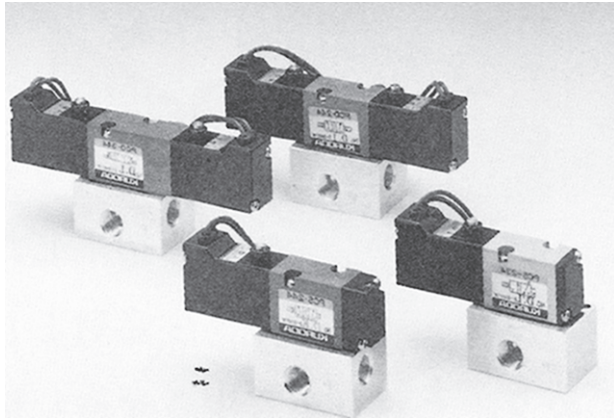


図3 初期の15mm巾小形電磁弁

4.2 アルミから樹脂へ：樹脂マニホールドの登場

1980年代後半になると、樹脂の成形技術、素材のさらなる向上によって、小形で複雑な構造のものが容易に製作できるようになり、マニホールドの材質がアルミダイカスト製から樹脂製が可能になった。

マニホールドを本体部、継手部、配線部などに分割し、マニホールドブロックに必要なブロックを組み込む形式が可能になった。さらに、マニホールドブロックをDINレールに固定する、DINレール取付けが考案され、増減連が容易に行えるようになった。

また、マニホールドブロックに電磁弁をねじ止める標準的搭載形に加え、配線部とマニホールドのプラグイン形、電磁弁本体を連結してマニホールド化するスタック形が開発され、省スペース化がさらに進んだ。

4.3 2W・表示ランプ付きの標準化：低消費電力化

1) 表示ランプ

発光ダイオード（LED）の登場で、小形の表示が可能になり、表示ランプ付きが標準仕様となった。

2) 消費電力2W時代へ

また、低消費電力化が進み、電磁弁の消費電力は2Wが一般的になった。これにより細いリード線が使用可能になったため、巾が10mm以下のワンタッチで着脱可能な、プラグインコネクタが開発され、小形電磁弁およびパイロット電磁弁のパイロット部に採用され主流となっていった。

3) 寿命5000万回時代へ

使用圧縮空気の質が良くなるとともに、使用シール性能、使用潤滑油の性能向上に伴い耐久性も向上した。電磁弁の寿命は、1000万回から5000万回へと長寿命化が進んだ。

4.4 プラグインマニホールド：省配線

制御部とマニホールドとの結線も、従来バルブ個々に制御部へ配線していたものを、マルチコネクタ、Dサブコネクタ、フラットケーブルコネクタなどによる、一括配線が採用されるようになり、PLCからの配線もワンタッチで接続が可能になった。

さらに、樹脂マニホールド間の電気接続にプラグイン方式が考案され、マニホールド内部に配線がまとめられすっきりしたデザインとなった（図4）。



図4 コネクタ接続マニホールド

4.5 ネットワーク対応マニホールド：シリアル伝送

空気圧システムは2000年代に入り、制御の複雑化、制御点数の増大に伴う大量の配線作業が必要になり、工数の増大、設置スペースの増大などの問題を生じた。

この問題を解消するシステムとして、マニホールドからPLCへの配線が2～6本で済む、FAネットワーク（シリアル伝送システム）が1980年代中頃に開発された。

このネットワークは、2000年代に入りオープンネットワークとして世界中に普及し、制御の重要な位置を占めるようになった。このため、Device Net, Profi-BUS, CC-Linkなどに代表される種々のオープンネットワークへ対応した電磁弁マニホールドユニットが開発された。

5. 安定期 2000年代～

2000年代に入り、空気圧産業は順調に伸びていき油圧と肩を並べるまでに成長を遂げた。

この時期、電磁弁に関する開発、技術面では目立ったものは出現していないが、生産技術の進歩により、コストダウン、より小形化、さらにユーザの細かな要求に応えた製品が次々と開発されている。

5.1 規格化の波：品質・環境・安全

日本の空気圧機器は国内だけでなく、海外への輸出の比率も大きくなりグローバル化が進み、電磁弁も主に欧州規格の取得がユーザより求められた。

1) ISO9000・CEマーキングの取得：品質と安全

最初に、品質システム規格のISO9000の取得が求められ、製造メーカーは一斉に取得に走った。これは空気圧メーカーに限らず産業全体に波及し、今では一

般的になっている。

つぎに、安全に関してはPL法の施行・普及に伴い、空気圧メーカのカatalog・取扱説明書などの、安全に関する表現・表記が大きく改善され、現在に至っている。さらに、欧州向けの機械装置に使用する空気圧機器に、欧州指令に適合することを示すCEマーキングの取得が求められ、製造メーカは対応に迫られた。

2) ISO14000の取得：環境対応

品質システムISO9000の取得が一段落した後は、環境システムISO14000の取得が求められ、急速に普及浸透した。

電磁弁に関しては、2003年に欧州のROHS指令が公布され施行されるのに伴い、ROHS指令対応として、使用している有害物質を廃止、削減しなければならなくなった。製造メーカは代替え材料の開発に取り組み、これをクリアしている。

5.2 省エネルギー化・小形化・長寿命化

1) 0.5W：低消費電力化

電磁弁の低消費電力化はさらに進み、2Wから1Wへ低減され、小形電磁弁では現在0.5Wが標準仕様になっている。

また、プランジャが吸着時に保持電流を低くする節電回路をつけた、0.1Wの低電力タイプも誕生している。

2) 6mm巾：小形・大流量化

世界のスタンダードとなった小形電磁弁の小形・大流量化がさらに進み、現状10mm巾で5mm²、15mm巾で12mm²、18mm巾で20mm²が標準仕様となっている。

小形化はさらに進み、外径2mmの配管チューブとプッシュイン継手が開発され、6, 7, 8mm巾の電磁弁も開発されている。

3) 1億回：長寿命化

耐久性の向上はさらに進み、各種要素、構造の改良により、弾性体シールで1億回、メタルシールでは2億回のものも現れている。

5.3 有効断面積から音速コンダクタンスへ

流量特性は、日本では長らく有効断面積で馴染んできた。しかし、グローバル化が進むにつれ国際標準ISOに準拠した表示が求められてきた。

流量特性について、2000年にISOに準拠したJIS B 8390：空気圧一圧縮性流体用機器—流量特性の試験方法が制定された。圧縮空気の流量特性は、音

速コンダクタンスC (dm³/(s・bar))と臨界圧力比bで表すことになった。このためカatalogなど有効断面積から音速コンダクタンスへの切り替えが図られ、比較的早く切り替えは完了した。

5.4 高速応答化

自動機械の高速化、高タクト化に伴い、空気圧機器にも高速応答が求められてきている。

電磁弁にも、高速応答が求められ、現状では4・5ポート小形電磁弁では10ms程度になってきている。2・3ポート弁では、0.4msを実現しているものが開発されている。

5.5 業界向け機器の開発

空気圧機器を多量に使用している業界で、特殊環境に対応する空気圧機器の開発が求められ、これらに応じて特定業界向けとしてラインアップして提供するようになった。

特定業界向けの電磁弁としての例は、半導体製造向けとして、外部へのパイロット弁の排気や呼吸穴を閉じて、主弁の排気ポートへ集合した、クリーンルーム仕様の電磁弁が代表的なものである。その他、ブラウン管製造向けとして、銅・銅合金およびフッ素系素材を含まない材料を使用した、銅イオン禁止電磁弁などが挙げられる。

6. おわりに

以上、制御機器の4・5ポート電磁弁の推移について述べた^{1)~4)}。筆者の独断による部分もあるかと思うがご容赦願いたい。

最後に、空気圧機器は各種産業にとって欠かせないものになり、ユーザからの要求もさらに厳しく、細かくなっていくと思われる。これらに応えるため空気圧技術者は、常に研究開発に取り組むことが望まれ、これらの課題をクリアしていき、空気圧技術がさらなる進歩をするものと期待している。

参考文献

- 1) 石川, 長岐: 機関誌フルードパワー 2006 Vol 20 No 2, pp 105/106
- 2) 石川, 長岐: 機関誌フルードパワー 2006 Vol 20 No 2, pp 108/111
- 3) 木下: 油空圧技術 2012. 10 pp. 44/47
- 4) 長岐: 油空圧技術 2005. 9 pp. 5/9

(原稿受付: 2015年6月5日)

解説

油圧ショベルの歴史を振り返り

著者紹介


ぬの たに さだ お
布 谷 貞 夫

(株)小松製作所 CTO室
〒107-8414 東京都港区赤坂2-3-6
E-mail: sadao_nunotani@komatsu.co.jp

1974年京都大学工学部精密学科卒。同年 小松製作所入社。油機開発センタに勤務。2010年フルードパワーシステム学会フェロー現在小松製作所CTO室 技監

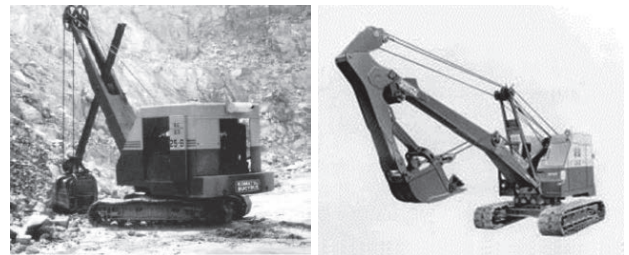


図2 機械式ショベルの構造

1. はじめに

油圧ショベルは今日油圧機器の主要な市場であり、油圧ショベルの歴史とともに、油圧技術も成長してきたと言える。その歴史を振り返り、油圧技術が果たした役割を図1に示すテーマに沿って紹介する。

1970	1980	1990	2000	2010
機械式ショベル	油圧式ショベル	後方小旋回ショベル	Hybrid式ショベル	新世代ICTショベル
	パワー・スピード向上	燃費効率向上	本格グローバル展開	
	操作性向上	トータル制御		
	操作力低減	ロードセンシングシステム		
	騒音低減	耐環境対応	排ガス1次 / 同2次 / 同3次 / 同4次	

図1 油圧ショベルと油圧技術の歩み

2. 油圧ショベルの出現と成長

2.1 機械式から油圧式へ

ショベルの歴史は、古くは1830年代の蒸気式ショベルの登場までさかのぼるが、1930年代からはディーゼルエンジンの登場により、市場に拡大していった。この機械式と言われるショベルは図2のように、ワイヤーロープを用いて、巻き上げウィンチとクラッチおよびブレーキを操作しリンクを動かす方式で、運転には大変な労力と熟練が必要であったそうである。

日本では1960年代から10社ほどの企業が参入し、2,000台規模の市場で競っていたが、多くは米国の

メーカーとの技術提携を行い開発、生産していた。

一方、油圧式ショベルは、同じ頃、欧州で誕生した後、徐々に機械式に取って代わり、主役の座を占めるようになっていった。油圧式はバルブを操作して流量=速度と、圧力=力を自在にコントロールできるため、操作性が良いこと、また、駆動源（ポンプ）とアクチュエータ（モータ、シリンダ）は配管で繋がり、配置の自由度が高いことなどが、機械式に比べよりショベルに適した方式であったと考えられる。また開発が進み、ポンプ他、機器の使用可能圧力が上がり高出力伝達が可能となったため、小型から大型の機種までの広範なパワーレンジ（10kW以下から1,000kW超まで）をほぼ同一のシステムでカバーするようになり、1970年代には機械式ショベルに取って代わるのみならず、ほかのブルドーザーや、ホイールローダーと言った先輩格の建機をも上回って市場で活躍するようになった。

ちなみに油圧の圧力レベルは、1970年代ギヤポンプ使用時14MPaで始まり、ピストンポンプに代



図3 1968年発表の初代油圧ショベル

わってから、25MPaから35MPaまで上がってきている。

図3に示すように油圧ショベルは長い腕機構と、旋回機能を有することで、ほかの建設機械と異なり、自走すること無く土砂を掘削・運搬出来る。このため作業効率が良く、また足下から頭上まで広範囲な領域で掘削、積み込みや、のり面生成など多彩な作業ができる汎用機として、その作業性能が大変評価された。

2.2 油圧ショベルの成長

さてその後の油圧ショベルの発展を、油圧技術の面から見ていくと、基本的な視点は作業性能の向上、もう一つは安全・環境適合である。またビジネスの観点から、グローバル展開・市場拡大も重要な視点である。

まず経済・社会の動きとの関係から、油圧ショベルの動勢を簡単に振り返る。

日本では高度成長からバブルを上り詰める過程で、土木、建設のラッシュがあり、1990年頃を頂点に、日本だけで世界の油圧ショベルの半分以上の台数が販売され、稼働する状況に至っていた。これに対応し、日本では数多くの企業が油圧ショベルの開発にしのぎを削り、その結果 技術、生産規模ともに世界におけるトップの座を確保するに至った。油圧ショベルの開発はこの間では主に、パワーとスピード競争と、車両の系列品揃えが主要な任務となっていた。その後、日本のバブルが終わり、建設機械のマーケットは、欧米と、新興国へ市場拡大を目指す、いわゆるグローバル化の本格競争時代に入る。これ以降、世界の中で求められる環境適合性能や、省エネ性能、安全性能、などより幅広い要求に対応が必要とされ、かつ世界中の現場での使われ方に対応するための品質確保が必要となった。

3. 油圧ショベルにおける油圧技術の歴史

3.1 パワー、スピード優先の時代

油圧ショベルが市場に出た1970年頃は、代表的な20tクラスの車両には60kW程のエンジンが搭載されていたが、モデルチェンジごとに作業量の増大を目指してパワーアップを重ね、その結果近年のモデルでは125kW程までに達している。エンジンのパワーをすべて受け止め、相応の力とスピード向上を達成するのは、油圧技術の仕事であり、これに対応するため大変な努力が試された。そもそも、1980年代までは建設機械用油圧機器そのものが黎明期でもあり、標準化や汎用化は後回しで、ひたすら試作部品を抱えて現場を走り回る時代であった。

エンジンのパワーアップだけでなく、可変ポンプ

の採用により同一エンジン馬力でもスピードと力が、合わせて（コーナー馬力）2倍以上となる向上が得られた。可変ポンプの制御は、吐出圧Pと流量Qの積すなわち吸収馬力がほぼ一定になるよう工夫されていて、エンストしないオートマチック車の如きである。

3.2 運転操作性の競争の時代

同じ条件で、より多くの作業量を達成するには、パワーだけでなく操作性の良さが重要である。操作性向上として第一には操作力の低減が図られた。機械式ショベルでは、レバー操作力が20kgfもあったと記録がある。一方油圧式では、当初はメインバルブのスプールをリンク機構を介して手で操作する方式が用いられ、操作力は3～5kgf前後のレベルとなり。この点も油圧式が機械式に大きく差を付けた要因になった。また更なる操作力の低減を目指し1985年前後から油圧リモートコントロールバルブが登場し、操作力は1～2kgfにまで低減されてきた。今後電気レバーが採用されるようになると、いっそう軽く指で操作するような方式も可能になるが、揺れる車体に搭乗しての操作であるため単純に軽ければ良いということにはならない。

操作性の第二は、ファインコントロール性の向上であろう。油圧ショベルは汎用性に富む性格からその使われ方は種々の作業に適用することを要求されてきた。そのひとつが、微速からフル速度まで、自在な速度コントロール性能である。油圧バルブにおいて優先回路や補償回路といった工夫や、ストローク／開口特性が職人技的に作り込まれた。ブリードオフという回路は、通過流量が負荷圧により変わり、速度の制御は不正確なものであるが圧力変動に対し静定性があり、揺れ動く車両での実作業では好まれ、この矛盾をどうバランスさせるかは、油圧技術者の腕の見せ所である。

三点目は同時複合操作性の向上である。軽負荷と重負荷のアクチュエーターを同時操作して、重負荷側の動きを止めないためには、たとえばタンデム回路で優先付けとか、複数のポンプ回路を切り替えるロジック制御や、さらに進み自動で圧力補正するロードセンシングシステム（図4の例）など、各社で工夫がなされている。

四点目に挙げるべきは、ショックの低減技術である。シリンダーをストロークエンドまで当てて使った場合には、車体に相当の衝撃が発生する。これをシリンダーに組み込んだ油圧クッション機構が解決した。高圧油を閉じ込める一種のダンパー室構造の応用である。

このほか、旋回や走行モーターに停止時のショッ

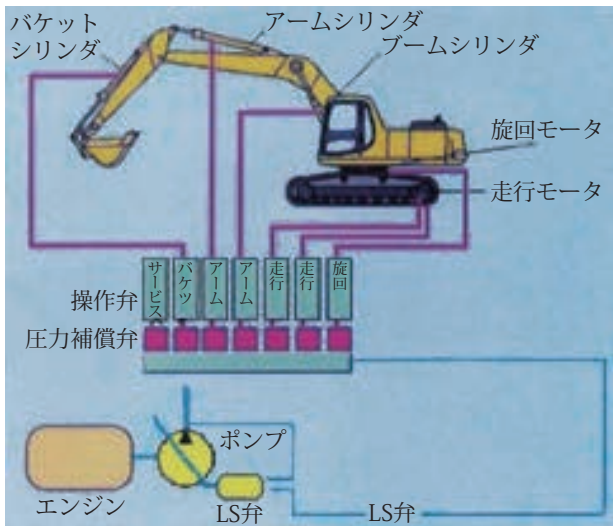


図4 ロードセンシングシステム概要

クを低減するショックレスバルブの開発が為された。

これらのショック低減技術は、油圧の特性を生かした、メカだけで解決した技術である点を記しておきたい。最新の電子制御、電気駆動技術を駆使したとしても決して容易にはできない油圧の優れた点である。

3.3 燃費効率の向上の時代

燃費効率の向上は、燃料費の低減とCO₂排出量削減の重要使命を持つ永続的テーマであり、市場における販売成績にも大きな影響をあたえる。

まず重要なのは油圧機器自体での効率向上で、ダイレクトに車両に効果を及ぼすため生産技術の改善と合わせ一貫して取り組まれてきた。つぎはシステムでのロス改善で、1980年代にはギヤポンプに代わり可変ポンプが採用され、ファインコントロール時の絞りロスやリリーフロス低減など大幅な燃費改善が得られた。

その後可変ポンプの制御に電子制御が追加され、作業モード選択や、オートデセル機能などが開発さ

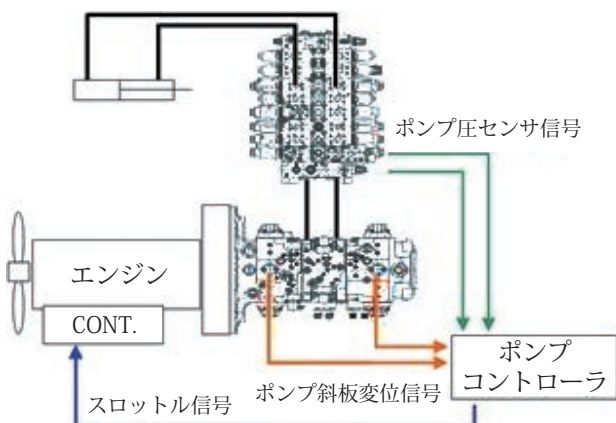


図5 トータル制御システム概要

れた。

さらにエンジン自体が、排ガス規制対応により電子制御が進むことにより、最良燃費ゾーンで稼働を可能にする図5のトータル制御技術に発展した。

最新の燃費改善技術は、図6のエネルギー回生システムである。ハイブリッドショベルと称され、従来は旋回の減速エネルギーが油圧リリーフ弁でリリーフの熱に変換され、放熱されていたのに対し、この制動エネルギーを回生し、駆動力として利用する。

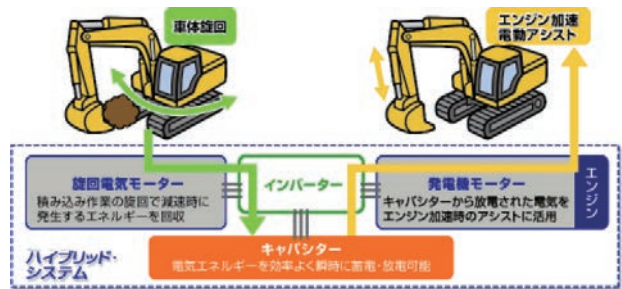


図6 ハイブリッドショベルのしくみ

現在各社から発表され、電気モーターとキャパシタを使用したシステムのほか、油圧アキュムレータを使用したシステムも発表されている。本稿で詳しい説明は省略するが、油圧ショベルに電動化の波が押し寄せつつある。ただ、多くの人の見解として、油圧シリンダーに取って代わる電気アクチュエーターは、当面は期待できず、「油圧式」ショベルはまだ健在と考えられる。

3.4 安全性能向上

安全性に関する技術開発は、過去から未来に永遠に継続する重要なテーマである。過去数多くの開発がなされているが、以下の開発事例を紹介しておく。

図7の後方小旋回ショベルは、都市での作業などでの安全性を向上させる目的で、1990年頃から、ミニショベルで開発された。やがて、この思想は小型から中型クラスまで展開されていった。この開発では、エンジンや油圧機器などが搭載の制約により、よりコンパクト化を求められ、設計に苦心したのみならず、同じクラスの標準車両と慣性バランスが異なるため、性能の作り込みにも一段と苦労があった。

そのほか、機器ベースでの開発としては、配管バースト時作業機落下防止弁が、シリンダーに直接マウントされ、走行・旋回モーターには、機械式ブレーキ（駐車ブレーキ機能）が内蔵されるようになった。

また、安全レバーロック装置がすべてに必要なとなるが、リモート操作パイロット弁のシステムになっていたので元圧を遮断するシンプルな方式で可能と



図7 後方小旋回ショベル

なった。

3.5 環境対応

1996年からディーゼルエンジン排ガス規制が始まり、ほぼ5年ごとに、目標の浄化レベルが厳しさを増すもので、これに対応して油圧ショベルのモデルチェンジが行われてきた。

ここではその詳細は省略するが、ステップを追って厳しくなる対策で、車両の原価が上昇せざるを得ず、これを相殺するために、燃料代やサービス費用などを含むライフサイクルコストを低減する技術が同時に開発され、顧客に訴求された。

そこでは、オイル交換などのインターバルを伸ばすコンポーネント中心の技術や、より進んで、ユーザーの現場での稼働状況をモニターするテレマティックス技術が開発され、グローバル市場における信頼性のレベルが向上していった。

そのほか環境対応に関して、グローバル展開にともない、生分解性作動油対応（油漏れで環境を汚染しない）や、クロム、鉛などの環境負荷材料の置き換えに関して、材料技術を動員した開発が行われた。

3.6 低騒音化の開発

油圧ショベルの騒音低減は、操作性、安全性と並び、車両の重要なセーリングポイントである。騒音源としては、エンジン音、冷却ファン音、それに油圧音（主にポンプの負荷時騒音）が代表である。

油圧技術では、ポンプの騒音低減は古くから取り組まれていて、弁板の高-低圧切り替わりポート部に絞り溝を設け、圧力脈動を低減する技術があり、さらには、ピストン毎の圧力の切り替わりタイミングをほんの少しずらし、ピーク周波数の山を低減する技術が開発された。

また他方、油圧駆動ファンシステムが開発され、ファンがエンジンと直結している場合に比べ、温度感応制御によりファン回転を下げる事が可能になり、稼働中のファン騒音は大幅に低減した。

車両全体では 遮音技術や、エンジンでの対応な

ど総動員され、その結果オペレータの耳元での騒音は、1980年の頃には、80dBAを超えていたが、最近では60dBA代半ばと、高級乗用車並みとなっている。

4, 新世代ショベルの登場

ICTを活用した情報化施工ショベルが登場し始めた。図8、図9に示すようにGPS技術や、ネットワーク技術により車両の外との通信技術が進んできて、セミオート作業などが見えてきた。一方、それらの技術を成立させるには、車両の内部の各要素の動きが、常時きちんと把握できていることが重要である。そのためには、油圧を始めとしたコンポーネント自体が、センサーを内蔵していることが必要となる。圧力センサーは従来から組み込まれ、パワーの制御に役立っているが、作業の制御をより高精度に行うためには、油圧ポンプの容量センサーやバルブの変位センサーなどによる、高速、高精度油圧制御システムが、重要な役割を果たすであろう。信頼性の高い実装技術が油圧技術に求められる。

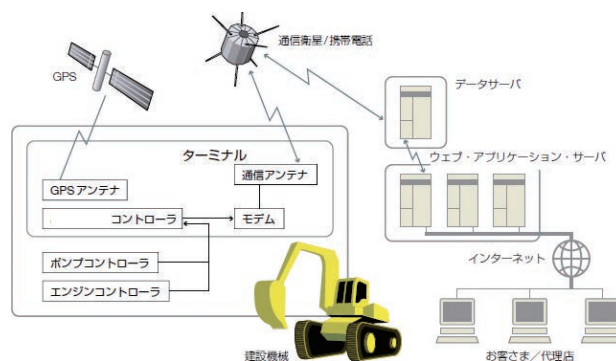


図8 ICTを活用した車両システム



図9 ICTショベル・セミオート作業

5. おわりに

「油圧の良さ」を充分わかっていない油圧技術者が、もしたとすれば、ぜひ歴史を振り返る事で理解していただきたい。まだまだ、油圧の革新で車両を成長させられる点が多いはずである。他方油圧の限界を突破する電子制御、ICT技術を駆使した油圧ショベルが登場してきている。油圧技術は、今後とも技術革新の主角として成長し続けられるのか？ そのためにはユーザーである車両の将来や、工事現

場の将来をイメージし、ニーズを先取りした技術開発に取り組んでいくべきと考える。

参考文献

- 1) 布谷貞夫：油圧基幹技術—伝承と活用— p. 5-13 日本工業出版 (2014)
- 2) 岡部信也：油圧ショベル大全，日本工業出版 (2007)
- 3) 坂根正弘：限りないダントツ経営への挑戦 日科技連 (2006)

(原稿受付：2015年6月9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

平成27年度 オータムセミナーのお知らせ 「アクアドライブシステムの産業利用の現状」 開催日：平成27年11月6日(金)

開催趣旨：

水道水を作動流体とするアクアドライブシステムに関心を持たれてきています。本セミナーでは一昨年のウインターセミナーを受け、具体的に利用されている産業分野を紹介するとともに課題について理解することで、さらなる応用を考える機会にしたいと思います。

開催日時：平成27年11月6日(金) 午後13時～17時

開催場所：機械振興会館本館：6階 6D-4
(東京都港区芝公園3-5-8)

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 平成27年秋季フルードパワーシステム講演会のお知らせ 開催日：平成27年11月26日(木)・27日(金)

開催趣旨：

平成27年秋季フルードパワーシステム講演会は鹿児島県鹿児島市ジェイドガーデンパレスで開催されます。本講演会では、一般講演に加えて、日中若手交流事業の一環として実施する招待講演(徐先生、浙江大学)・特別講演・オーガナイズドセッション・技術懇談会などを企画する予定です。本講演会に関する詳細なアナウンスは日本フルードパワーシステム学会のホームページ (<http://www.jfps.jp/index.html>) をご参照ください。特に企業様からの講演発表をお願いできればと思っております。皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

シオン・技術懇談会などを企画する予定です。本講演会に関する詳細なアナウンスは日本フルードパワーシステム学会のホームページ (<http://www.jfps.jp/index.html>) をご参照ください。特に企業様からの講演発表をお願いできればと思っております。皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

平成27年度 日中若手研究者交流事業 徐兵教授(浙江大学)特別講演のお知らせ 「建設機械のシングルポンプマルチアクチュエータにおけるモーションコントロールシステムに関する研究」 開催日：平成27年11月(秋季講演会にて)

開催趣旨：

2015年度日中若手研究者交流事業の一環として、中国から徐兵教授(浙江大学)を招聘し、研究者および開発者との研究交流を図るとともに、秋季講演会において特別講演会を開催いたします。建設機械を中心とした省エネルギー性および制御性の向上を目的とする制御系設計に関するご講演ですので、多

くの皆さまのご参加をお待ちしております。

詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。

お問合せ：国際交流委員・企画委員

伊藤和寿(芝浦工業大学 システム理工学部)

E-mail: kazu-ito@shibaura-it.ac.jp

解説

機能性流体の歴史レビューと展望

著者紹介

なかのまさみ
中野政身東北大学流体科学研究所
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
E-mail: m-nakano@fmail.ifs.tohoku.ac.jp1982年早稲田大学大学院博士後期課程修了。
同年山形大学助手、助教授を経て、1997年同教授。
2008年東北大学教授。機能性流体とその応用、
流体関連振動・騒音などの研究に従事。日本フルード
パワーシステム学会、日本機械学会（フェロー）などの
会員。工学博士。

1. はじめに

フルードパワーの産業応用の起源は、18世紀半ばから19世紀にかけて起った産業革命に遡るだろう。フルードパワーとして水力や蒸気を用いた動力機関を使った織機・紡績機の開発は、紡績業の生産性向上に大きく寄与している。1985年、ワットが蒸気機関のエネルギをピストン運動から円運動へ転換させることに成功し、この蒸気機関の改良によって、さまざまな機械に蒸気機関が応用されるようになった。このようなフルードパワーの起源に比して、機能性流体の歴史は、20世紀半ばからと浅い。

機能性流体（Functional Fluids）は、流体を人工的に調製してある機能を強調しかつ外部から加える物理量（電磁場、光、温度など）を制御することによってその物理化学的性質を機能的に変化できる流体を指しており、工学的に応用可能な機能性を発揮する流体の総称である。本学会においては、1990年代頃からこのような機能性流体に関わる講演会での研究発表や研究委員会での活動^{1)~5)}などが活発に行われてきているが、本学会において機能性流体がフルードパワーの作動媒体として認知されてきたのが、学会名を「日本油空圧学会」から「日本フルードパワーシステム学会」と名称を変更した2002年頃からである。油空圧分野だけでなく、機能性流体や水圧分野などさまざまなフルードパワーを対象にした学会活動の展開を期してのことである。

本解説では、フルードパワー技術に係る機能

性流体として、ER流体、MR流体、磁性流体、およびEHD流体・ECFを取り上げ、それらの起源を探りながらその歴史を顧み、その後の研究開発の動向を概観し、今後の展望を行うこととする。

2. ER 流体

2.1 ER流体の機能性と歴史的起源

外部電場の作用のもとで流体の内部構造が変化しそのレオロジー的性質が大きく変化する現象をER効果（Electro-Rheological Effect）といい、そのような機能を有する流体をER流体と呼ぶ。ER流体は、特にその粘性を数ミリ秒のオーダーで電氣的に可逆的かつ連続的に変化できるため、電気信号によって直接「力」、「圧力」、「流量」などの信号に変換し制御できる特筆すべき機能を有している。Winslow W.M.によって、1947年に初めてER流体を使ったブレーキやクラッチなどの各種応用機器に関する特許⁶⁾が申請され、1949年にはシリカ粒子を用いたER流体に関する最初の論文⁷⁾が発表されている（図1）。その後、これまでに、さまざまな種類のER流体が発見され、また新たに開発されてきている。これらのER流体は、その組成とER効果の違いから大きく分けて、粒子を分散した粒子分散系ER流体と粒子を含まない均一系ER流体に分類できる。

2.2 粒子分散系ER流体

粒子分散系ER流体は、シリコンオイルなどの絶縁性の分散媒中に電場下で電気分極しやすい物質からなる微粒子（一般に、直径1～10 μ m程度）を分散した懸濁液であり、電場下で電気分極した多数の粒子によるクラスター（架橋構造）の形成に起因

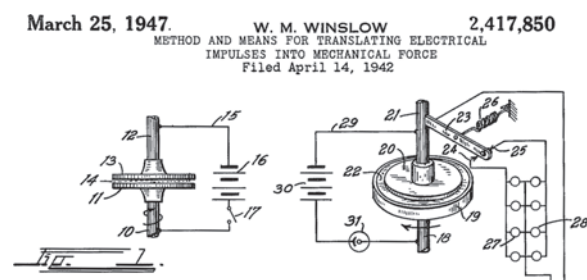


図1 ER流体デバイスの最初の特許図⁶⁾

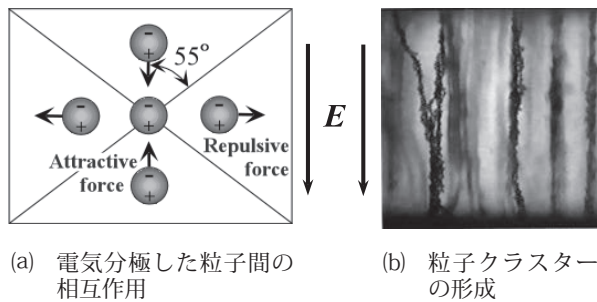


図2 電場下でのER流体の粒子クラスター形成

して見掛け上流体の粘性が増加したように振る舞う。すなわち、図2(a)に示すように、電界の方向に電気的に分極した一つの粒子に着目すると、双極子相互作用によって電界方向に対して $\pm 55^\circ$ 以内に位置するほかの粒子とはお互い静電引力で引き付け合うが、その範囲外にある他の粒子とは斥力が生じて反発する。そのため、無電場下で分散媒中に不規則に散在していた微粒子は、図2(b)のように電場を印加すると電界方向に粒子同士が鎖状につながり多数のクラスター構造や複数のクラスターが凝集した集合体(カラム)構造を形成して電極間を物理的に結合する。流動方向に対して直角に形成されるこれらのクラスターが流動抵抗となり、ER効果が発生する。電場印加によって形成された粒子クラスター構造を崩壊する力、すなわち降伏せん断応力 τ_y が現れ、その応力以下の応力では流動せず、応力が降伏せん断応力を越すと流動するビンガム流体に類似した挙動を呈する。

このようなER効果の発現機構から、粒子分散系ER流体の開発は主に分散粒子の創製に帰着する。これまで開発されてきたER流体粒子は、ER効果発現に水分が関与する粒子と水分をまったく含まない粒子とに分類でき、含水粒子としては、粒子表面に付着水として水分をもつ粒子、粒子内部に構造水として水分を含む粒子、およびイオン解離基を有する高分子電解質粒子などがあげられる。粒子の電気分極にはイオン解離基がほぼ均等に配列された電気二重層が関与し、粒子の含水量が多いほどER効果は大きくなるが、絶縁破壊に対する耐性が低下し不安定となる。また、非含水粒子としては、電子の移動が粒子の電気分極に関与する半導体粒子や導電体粒子、バルクとして誘電率の大きな強誘電体粒子などがあるが、一般に流れる電流値が大きくER効果が含水系ER流体に比して弱いが、水分が関与しないので高い安定性を示すことが特徴である。

2.3 均一系ER流体

均一系ER流体の代表として、低分子液晶や高分子液晶が見出されている。一般に、液晶の誘起せん

断応力は、粒子分散系ER流体とは異なり有意な降伏せん断応力は現れず、電場下でもせん断速度にほぼ比例して増加しニュートン流体に類似した特性を示す。その増加割合が電場強度 E によって変化するER特性を示す。液晶のER効果発現のメカニズムは、基本的には電場下での液晶の棒状分子の配向挙動に起因する。電場下で電界方向に棒状分子が配向する正の誘電異方性をもつp型のネマティックの低分子液晶では、数倍程度のER効果しか認められていないが、液晶ドメイン間に相互作用を持たせるために一つのフレキシブルな分子鎖に複数個の液晶性基を結合させた液晶性高分子溶液では10～30倍程度のER効果が確認されている⁸⁾。

2.4 ER流体の研究動向と展望

第1回のER流体に関する国際会議が1987年に米国で開催され、それ以後隔年で開催されてきている。1995年に英国で開催された第5回から会議名称にMR流体を含め、ER流体とMR流体に関する国際会議となっている。日本でも第6回会議を1997年に山形県米沢市で開催している⁹⁾。最近では、第14回会議がスペイン・グラナダで開催された¹⁰⁾。これら一連の国際会議から、ER流体に関する研究では、ER流体の応用に関する研究よりもER流体の開発や特性評価に関するものが多く、依然、流体開発や特性把握が活発で斬新な性能を示すER流体の出現の可能性を示唆している。その例として、ホンコン科学技術大学(HKUST)のPing Sheng教授らによって開発されたナノ粒子からなるGiant ER流体¹¹⁾が、基底粘度が非常に高い難点があるものの最大降伏応力が100kPa程度を示し、従来のER流体の20倍程度の巨大ER効果を発揮することが報告されており、その後もアジア圏を中心に活発な研究がなされてきている¹²⁾。また、ER効果発現に関与するクラスター形成に極性分子を作用させることで、数百kPaの降伏せん断応力を示すPM-ER流体(Polar Molecule dominated Electro-Rheological Fluids)も開発されている¹³⁾。

応用分野では、流体を媒体として動力を伝達するクラッチやブレーキ、流量や圧力を制御するバルブ、そして液体粘性を利用したダンパなどの流体が介在する機械要素への応用と同時に、振動制御、ロボット制御、アクチュエータ制御、マイクロマシン制御などの各種制御システムへの応用が展開されてきている。1990年代当初、ER流体が粘性を可変する機能をもっていることと市場規模の大きさから、自動車産業での応用が考えられ、液体封入式エンジンマウント、ショックアブソーバなどへ応用し車両の振動制御性能を高めようという研究が活発に行われていたが、当時のER流体の完成度の低さと使用条件

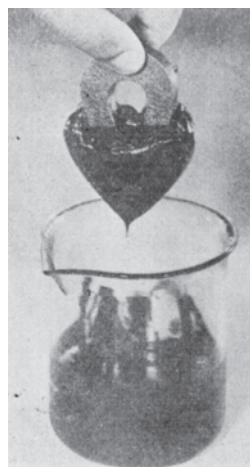
の過酷さから実用化レベルには至らなかった。その後、使用条件が過酷ではない一般産業への応用を目指して、除振テーブル、マイクロマシン、研磨加工、工作機械テーブル、トライボロジー、リハビリ訓練システムなど、多方面でのER流体の応用研究が活発に行われてきている。ER流体を作動流体とする液压システムの要素研究として、マイクロバルブ、マイクロアクチュエータ、マイクロポンプなど、マイクロフルードパワーシステム構築のための研究開発が試みられてきている。最近では、Giant ER流体を活用して圧電素子のねじれ振動を伝達して回転するモータ¹⁴⁾や液晶の均一系ER流体で駆動される柔軟構造を有するマイクロアクチュエータ¹⁵⁾が提案されている。また、原油輸送パイプラインの抵抗低減策として、電場を印加して原油粘度を低減する方法が提案されそのメカニズムが解明されていること¹⁶⁾は特記に値する。

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

3. MR 流体

3.1 MR流体の機能性と歴史的起源

MR流体 (Magneto-Rheological Suspension) は、シリコンオイルなどの油を分散媒としその中に 1 ~ 10 μ m の強磁性体粒子 (カルボニル鉄) を分散させた懸濁液であり、磁場の印加によってそのレオロジー特性を急速かつ可逆的に変化できる機能 (MR 効果) を示す流体である。分散した強磁性体粒子が磁場印加により磁氣的に分極し、粒子分散系ER流体と同様に粒子同士が結合してクラスター構造を形成することによりレオロジー特性が変化する。一方、このように外部磁場に反応する機能性流体として磁性流体が古くから知られているが、MR流体とのもっとも大きな違いは分散粒子径である。一般的な磁性流体の粒子径は 5 ~ 10nm 程度であるのに対してMR流体では 1 ~ 10 μ m 程度であるため、この粒子径のオーダーの違いからMR流体では磁性流体に比べ著しく大きなMR効果が得られる。また、両流体とも粒子同士の凝集や分散安定性の向上のため分散粒子表面に界面活性剤などを吸着させているが、磁性流体ではブラウン運動によって分散粒子が一様に分散するのに対して、MR流体では分散粒子の比重が大きいため粒子の沈降が問題となる。この対策と



(a) MR流体の磁場下での挙動



(b) MRクラッチによる人間の吊り上げ

図3 MR流体の磁場下での固体化とMRクラッチによる人間の吊り上げ¹⁷⁾

して、分散媒として動くと流動性が高くなるチキソトロピックな流体を用いたり、常に弱磁場を印加したりするなどして粒子沈降を抑制する提案がなされている。MR流体の誘起せん断応力は、粒子分散系ER流体のものに比して格段に大きく、約20から50倍の値を示すのが特徴的である。

MR流体は、1948年にRabinow J.によって最初に開発され、クラッチへの応用例が提示され、図3に示すように、MR流体の磁場下での挙動とMR流体クラッチを用いて人間を吊り上げる様子が示されている¹⁷⁾。

3.2 MR流体の応用の動向と展望

1990年代から応用研究が活発化し、前述したように、1995年開催の第5回国際会議から会議名称にER流体に加えてMR流体が含まれるようになってきている。当初は、MR流体ダンパの実際のモデルに関する研究¹⁸⁾や圧力流れモードでの定常流のMR特性や往復振動流の動的粘弾性に関する研究¹⁹⁾など、MR流体に関する基礎的特性に関する研究が行われていた。また、MR流体を研磨に応用する提案もなされており²⁰⁾、MR流体をガラスレンズの研磨加工に応用し製品化を行っており^{21), 22)}、これに関連する研究成果も発表されている²³⁾。現在では、MR流体は市販されており²⁴⁾、年間200tonオーダーのMR流体が生産・販売され、商業ベースでの市場展開が行われている。2014年にスペイン・グラナダで開催されたER流体とMR流体に関する第14回国際会議では、160件ほどの最新の研究成果が発表されているが、約半数がMR流体に関するもので、30%がER流体関係、残り20%がMRエラストマー・ほかと、MR流体に関する発表件数が格段に多くなっ

ている。MR流体が市販されるほど成熟していることからMR流体の開発よりもむしろ実用化を目指した応用分野の研究が活発に行われている。MR流体の応用機器としては、Dr. Carlson J.D.がレビューしているように²⁵⁾、各種のMRブレーキ、クラッチ、ダンパ、ショックアブソーバなどのモジュールが開発され、MRダンパやMRショックアブソーバは実際にトラックなどのシートダンパや乗用車²⁶⁾さらにはつり橋のワイヤ振動制御装置やビルなどの建築構造物の免震装置などに搭載され実用化に至っている。車両サスペンション用MRショックアブソーバは普及してきており、すでに13年ほどの実績を有する。最近では、MR流体が主に振動制御・衝撃吸収などに適していることから、高せん断域で急激にせん断応力が増大しその特性を磁場で可変な衝撃吸収に適したMR Shear-Thickening流体²⁷⁾、印加磁場で剛性や減衰特性の可変なMRエラストマーを用いた各種の振動制御デバイス²⁸⁾、不織布にMR流体を含浸させ粒子沈降を防止したMR流体コンポジットを活用した免震・制振用直動型ダンパ²⁹⁾などが開発されてきている。

MR流体の場合は、高出力で温度依存性が少ないことから今後かなり広範な分野での実用化の可能性が期待できるが、最大の欠点である粒子沈降が回避されかつ粒子の再分散性が保証できる応用に限定されるだろう。

4. 磁性流体

1965年にNASAのDr. Papell S.S.によって無重力空間における液体燃料の流れを磁石を用いて制御するために初めて磁性流体 (Magnetic Fluids, Ferrofluids) が開発された³⁰⁾。磁性流体は、粒子表面を界面活性材処理した10nm程度の強磁性微粒子を、水やケロシンなどの分散媒中に高濃度に分散したコロイド溶液である。非常に安定しており、重力や磁場勾配による凝集を起こすことはなく、その基本的物性は磁性と粘性によって特徴づけられる。磁場の作用により強磁性体なみの磁気分極を示し、磁気的性質はヒステリシスや残留磁化をもたない超常磁性の特性を示す。非一様磁場において磁気体積力が発生する性質をもち、また界面に作用する垂直磁場により界面の内外でマックスウェル応力による圧力差が生じる。分散濃度が低いと磁性流体はニュートン流体と同じ挙動を示すが、高濃度になると擬塑性流動を示し、若干ながら磁性流体の粘度の磁場依存性も認められるようになる。これまで、マグネタイトやマンガン亜鉛フェライトなどの粒子を分散した酸化物磁性流体、コバルトやニッケルなどの強磁

性金属や合金を用いた金属性磁性流体、磁化の温度依存性の大きい感温性磁性流体、磁性粒子表面に形成される電気二重層の作用で安定に粒子を分散させるイオン性磁性流体などが開発されてきている^{31), 32)}。

磁性流体の応用としては、HDD用の導電性防塵シールや動圧軸受、真空シール、そしてボイスコイルの熱伝導改善などに製品化され実用実績がある³³⁾。また、感温性磁性流体を活用した磁性流体熱交換ポンプや対流熱伝達の促進制御³⁴⁾、磁性流体マイクロマシン³⁵⁾、液滴を磁性流体で包み磁場による制御を行う磁性流体マイクロ流体デバイスへの応用展開³⁶⁾などの研究が鋭意進められてきている。今後の新たな磁性流体活用のブレークスルーと実用化が待たれるところである。

5. EHD流体・ECF

誘電性液体 (実質的には絶縁性液体) に高い電場を与えると、流体内部に電氣的な力が発生し誘電液体に対流や二次流れが発生する。このような現象を電気流体力学 (Electrohydrodynamic; EHD) 効果といい、このような現象を示す誘電液体を総称してEHD流体と呼ぶ。この流動メカニズムについてはまだ未解明な部分も多いが、直流電場では誘電泳動力より自由電荷に作用するクーロン力が支配的になり、このクーロン力により流体力学的不安定性が生じて流動 (イオンドラッグ流動) が生じる場合と、電気歪みが支配的で純伝導流動が生じる場合に大別できる。このような現象発見の起源はかなり前に遡り、1800年代頃から知られていた。近年、デカン二酸ジブチルなどに線状電極対を挿入して直流高電圧を印加すると電極間に顕著なジェット流が発生する現象が見出されるなど³⁷⁾、高出力の誘電液体が発見され、その特徴である小型化・マイクロ化を指向した応用研究が日本国内で活発に行われてきている¹⁾⁻⁵⁾。

横田らのグループは、これらの高出力の誘電液体をECF (Electro-Conjugate Fluids, 電界共役流体) と呼び、ECFを活用した各種のマイクロモーター、マイクロ人工筋、マイクロレートジャイロ、電子チップ冷却用ECFポンプなどを開発するとともに、それらのマイクロ化を鋭意進めてきており³⁸⁾、MEMS技術を援用した高集積の高性能なECFポンプを開発している³⁹⁾。また、三井らは、新たな異なる誘電液体で生じる流れ発生現象をEHD現象として捉え、回転型アクチュエータとしてローター側から流体が噴出するタイプのEHDモータ、多段構造のEHDポンプ、EHDポンプ駆動によるシリンダや人工筋アームなどを開発してきている⁴⁰⁾。今後とも、マイ

クロモーター、マイクロポンプ、マイクロアクチュエータなどマイクロマシン分野での実用化が期待される。

6. おわりに

21世紀の技術革新をもたらす原動力の一つとして、新物質や新材料、特に高機能材料があげられ、機能性流体も高付加価値製品の創出という観点からも産業および工業技術面において大きなブレークスルーをもたらすポテンシャルを有している。フルードパワーシステムの分野でも、各機能性流体固有の機能性を最大限に活用した独自の機能を発揮するコストパフォーマンスの高い先進機器・システムの実用化・製品化が期待される。本解説では、各機能性流体の歴史をレビューし、その動向を概観し今後の展望を行った。故きを温ねて新しきを創造する“温故創新”の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 中野政身編集：「機能性流体の油空圧機器への応用に関する研究委員会」研究成果報告書（1996年5月～1999年4月），日本フルードパワーシステム学会，p. 227（2002）
- 2) 中野政身編集：「機能性流体を用いたスマートフルードパワーシステムに関する研究委員会」研究成果報告書（2002年4月～2006年3月），日本フルードパワーシステム学会，p. 153（2006）
- 3) 中野政身編集：「機能性流体を活用した次世代型フルードパワーシステムに関する研究委員会」研究成果報告書（2006年4月～2009年3月），日本フルードパワーシステム学会，p. 159（2010）
- 4) 中野政身編集：「機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会」研究成果報告書（2009年4月～2012年3月），日本フルードパワーシステム学会，p. 168（2012）
- 5) 中野政身編集：「機能性流体との融合化によるフルードパワーシステムの新展開に関する研究委員会」研究成果報告書（2012年4月～2015年3月），日本フルードパワーシステム学会，発刊予定，（2015）
- 6) Winslow, W.M. : Method and Means for Translating Electrical Impulses into Mechanical Force, U.S. Patent 2417850, (1947)
- 7) Winslow, W.M. : Induced Fibration of Suspensions, Journal of Applied Physics, Vol. 20, No. 12, pp. 1137-1140 (1949)
- 8) 井上昭夫, 真庭俊嗣, 佐藤富雄, 谷口恵子 : 高分子液晶のER効果, 日本レオロジー学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 7-11 (1995)
- 9) Nakano, M., Koyama, K. eds. : Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and their Applications, World Scientific, p. 893 (1998)
- 10) 14th International Conference on ER Fluids and MR Suspensions (ERMR2014) : <http://www.ermr2014.com/>
- 11) Wen, W.G., et al. : The Giant Electrorheological Effects in Suspensions of Nanoparticles, Nature Materials, Vol. 2, No. 11, pp. 727-730 (2003)
- 12) Wang, B., et al. : Titanium Oxide Nanoparticle Modified with Chromium Ion and its Giant Electrorheological Activity, Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 3031-3038 (2007)
- 13) Shen, R., et al. : The Methods for Measuring Shear Stress of Polar Molecule Dominated Electrorheological Fluids, Journal of Applied Physics, Vol. 102, No. 024106, p. 2 (2007)
- 14) Qiu, W., et al. : Non-Contact Piezoelectric Rotary Motor Modulated by Giant Electrorheological Fluid, Sensors and Actuators, A : Physical, Vol. 217, No. 15, pp. 124-128 (2014)
- 15) Miyoshi, T, Yoshida, K., Eom, S.I., Yokota, S. : Proposal of a Multiple ER Microactuator System using an Alternating Pressure Source, Sensors and Actuators, A : Physical, Vol. 222, No. 1, pp. 167-175 (2015)
- 16) Tao, R., Du, E., Tang, H., Xu, X. : Neutron Scattering Studies of Crude Oil Viscosity Reduction with Electric Field, Fuel, Vol. 134, pp. 493-498 (2014)
- 17) Rabinow, J. : The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 1308-1315 (1948)
- 18) Spencer, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., Carlson, J.D. : Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers, J. of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 3, pp. 230-238 (1997)
- 19) Nakano, M., Yamamoto, H., Jolly, M.R. : Dynamic Viscoelasticity of a Magnetorheological Fluid in Oscillatory Slit Flow, Int. J. of Modern Physics B, Vol. 13, No. 14, 15&16, pp. 2068-2076 (1999)
- 20) Kordonski, W.I., Jacobs, S.D. : Magnetorheological Finishing, Int. J. of Modern Physics B, Vol. 10, No. 23 & 24, pp. 2837-2848 (1996)
- 21) QED Technologies : <http://www.qedmrf.com/>
- 22) 久米保 : MR流体研磨装置実用化事例, フルードパワーシステム, Vol. 42, No. 1, pp. 56-58 (2011)
- 23) Seok, J., et al. : A Study on the Fabrication of Curved Surfaces using Magnetorheological Fluid Finishing, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 14, pp. 2077-2090 (2007)
- 24) Lord Corporation : <http://www.lord.com/>
- 25) Carlson, J.D. : Smart magnetorheological fluids and devices, JFPS平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 3-7 (2004)
- 26) 松隈政彦 : 自動車用MR流体ダンパおよびエンジンマウントの実用化例, フルードパワーシステム, Vol. 42, No. 1, pp. 53-55 (2011)
- 27) Li, W.H., Nakano, M., et al. : Viscoelastic Properties of MR Shear Thickening Fluids, Bulletin of JSME, J. of Fluid Science and Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 1-8 (2014)
- 28) Li, Y.C., et al. : A State-of-the-Art Review on Magnetorheological Elastomer Devices, Smart Materials and Structures, Vol. 23, Paper No. 123001, pp. 1-24 (2014)
- 29) Nakano, M., Totsuka A., Inaba, T., Fukukita A. : Damping Properties of Seismic Linear Motion Damper with MR Fluid Composite Rotary Brake, Proc. of the 9th JFPS Int. Symp. on Fluid Power, pp. 550-555 (2014)
- 30) Papell, S.S. : Low Viscosity Magnetic Fluid obtained by the Colloidal Suspension of Magnetic Particles,

- U.S. Patent, No. 3215572 (1965)
- 31) 神山新一：磁性流体入門，産業図書，p. 135 (1989)
 - 32) 日本機械学会編：17・2 機能性流体，機械工学便覧（基礎編α4流体工学），丸善，pp. 185-189 (2006)
 - 33) 廣田泰文：磁性流体を用いたデバイスの実用化事例，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, pp. 59-61 (2011)
 - 34) 山口博司，他：低沸点流体混合磁性流体の駆動力特性に関する研究，日本機械学会論文集（B編），Vol. 70, No. 698, pp. 2591-2597 (2004)
 - 35) Sudo, S., et al. : A Magnetic Fluid Microdevice using Insect Wing, Journal of Physics-Condensed Matter, Vol. 20, No. 20, Paper No. 204142 (2008)
 - 36) Khalil, K.S., et al. : Ferrofluid-impregnated Surface for Active Manipulation of Droplets, Appl. Phys. Lett., Vol. 105, Paper No. 041604 (2014)
 - 37) Otsubo, Y., Edamura, K. : Dielectric Fluid Motor, Appl. Phys. Lett., Vol. 71, No. 3, pp. 318-320 (1997)
 - 38) 横田真一，竹村研治郎：ECF（電界共役流体）を応用したアクチュエータ・センサ，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, pp. 28-32 (2011)
 - 39) Kim, J.W., Yokota, S., Mikurino, K., Edamura, K. : ECF Micro Hydraulic Power Source by MEMS-fabricated Pentagonal Prism Electrode Arrays, World Automation Congress Proceedings, Paper No. 6936052, pp. 579-581 (2014)
 - 40) 三井和幸：EHD現象利用ポンプの開発とアクチュエータへの応用，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 1, pp. 33-36 (2011)

（原稿受付：2015年8月18日）

解説

協会創成から学会揺籃期の思い出

著者紹介

なかの かずお
中野和夫〒201-0003 東京都柏江市和泉本町1-25-28
E-mail: nakanokazu@jcom.home.ne.jp

1957年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同大学精密工学研究所助手、助教授、教授を経て、1992年同大学定年退官、1992より芝浦工業大学教授、2002同大学定年退職。現在に至る。日本フルードパワーシステム学会名誉員、工学博士。

1. はじめに

日本油空圧協会創成から日本フルードパワーシステム学会JFPSへと姿を変えた今日まで半世紀が経過した。この機会に本学会の歴史について書くよう依頼されたが、現役を退いて既に久しい筆者には荷が重い。そこで半世紀以上前から1990年頃までの間に筆者が学会と関わってきた身近な出来事を通して、学会変遷にまつわる風景を想い出しながらかきとどめることにした。学会の歴史の一側面を描くに過ぎないことをお許しいただきたい。

2. 協会発足前夜

1945年8月15日夜、東京上板橋で中学二年生であった筆者は家中の電灯という電灯を明々と灯して歓喜した。しかし喜びもつかの間、東京での生活は厳しい食糧難に見舞われた。真偽は定かではないが進駐軍の残飯を大鍋で煮込んだシチューを大井町駅前の闇市でたらふく食べたことが忘れられない。

皆がこのようなどん底に喘いでいた時の1947年、自動制御懇話会（2年後自動制御研究会と改称）が高橋安人東大教授等を中心に発足した。そして1950年朝鮮戦争勃発以降の米軍特需により我が国の産業は一気に活気づいた。その中で1956年6月油圧機器工業会が設立され、1957年京都大学を中心に日本自動制御協会が発足した。1958年に関西油圧懇話会が設立され、大阪府立工業奨励館関係研究室が支援。1959年東大生研大島康次郎教授のもとに精機学会 高速サーボ委員会が発足。1961年

自動制御研究会は(株)日本計測学会と合併し、(株)計測自動制御学会SICEへと発展。1965年SICEに流体制御素子懇談会発足。1968年東大生研の石原智男教授を主査として日本機械学会に油圧工学研究会が設置された。1969年12月日本空気圧工業会設立に至った。一方、当時日本各地の大学は東大・日大闘争（学生側の表現）に象徴される学園紛争に見舞われていた。そして1969年の東大入試はやむなく中止となった。学内で産学協同を標榜すればたちまち紛争学生による吊し上げにあう時代でもあった。

3. 日本油空圧協会設立へ

1853年の黒船来港ではないが、1960年代末頃、米国のNFPAより日本支部を設置したい旨の手紙が油圧機器工業会に届いた¹⁾。NFPAはNationalレベルのFluid Powerに関する団体Associationである。我が国にはNFPAに対応するような仕組みはなかった。そこで工業界、学界関係者ら協議の下に我が国独自で油圧・空気圧に関する産学にまたがる組織を設けることになった。

その準備には日本油圧工業会の筒井正専務理事、河野俊助技術委員長、東大生研の石原智男教授、東工大の辻茂教授、池辺洋教授等をはじめとして多くの諸先輩の尽力があった。設立準備委員会委員長石原智男教授によれば「本格的準備に入るまでの数年間は産学間の相互理解のための下準備に大変苦労した」そうである²⁾。

1970年3月に日本油空圧協会が任意団体として設立され、初代協会長に(株)機械振興協会長（当時）丹羽周夫氏を迎え、石原教授が副会長、池辺教授、辻教授がそれぞれ編集担当、研究・教育担当の常務理事となった。同協会の役員構成は総勢54名、その内学界関係者はわずか9名であった。協会事務局は丹羽会長等の計らいで機械振興協会ビルB1（タワー側）出口右横の一室に設けられ、学会への発展の礎を築くことができたのは幸いであった。事務局の態勢は中村修事務局長の下2名前後の事務担当職員でスタートした。

4. 協会誌発刊

池辺教授が会誌編集委員長となり、筆者が編集幹事を務めることになった。1970年6月に第1回の編集委員会を目黒区大岡山東工大精研会議室で開く運びとなった。会誌の意義・編集方針などを討議の上、会誌の名称選定に議題が移った。当時「…学会誌」といった堅い表現より「鉄と鋼」などと言った新風を感じる学協会誌の名称が好まれる傾向にあった。また米国では「Hydraulics & Pneumatics」という専門誌が発刊されていた。このような背景もあって会誌名称を協会名とも関連づけた「油圧と空気圧」に定めた。つぎに年間会誌発行回数を検討し、予算的にも事務局と編集委員会の不慣れな態勢からも月刊は無理と判断された。当分の間、季刊とすることにした。会誌記事については、論説、解説、教室など協会員に興味を持ってもらえる内容になるよう腐心した。さらにオリジナルな学術論文の掲載をもう一方の柱と考え、論文校閲の態勢も整えた。事務職員（女性）松田さんが編集を担当することになった。そして1970年10月に第1巻、第1号が発刊された。

5. 学術講演会開催

会員に研究成果発表の場を提供することは前述の会誌発行と並んで協会の重要事業の一つである。協会設立の翌年1971年5月第2期通常総会に合わせて協会最初の講演会を機械振興協会ビルで開催し、21編の論文が発表された。同年11月には大阪科学技術センターにおいて秋期油空圧技術講演会を開催した。以後油空圧学術講演会を毎年、春は総会開催に合わせ事務局のある東京で開催し、秋は関西地区会員の便を考え大阪地区で開催することになった。このような態勢が十数年続いた。その間全国各地の会員も増加し、大阪地区以外でも講演会を開いてはと言う要望も出てきた。1985年から秋期学術講演会開催地を大阪に限らず全国各地に順次変えることにした。その各地開催が実現できたのは開催地会員をはじめとした関係各位の献身的なご支援によるところ大であった。初回開催地に岡山が選ばれ、岡山衛生会館にて講演会を開催することができた。

6. 海外への羽ばたき

我が国の油圧技術は1955年前後の技術導入時代を経て自主技術開発段階へと進み、先進国に追いつくほどまでになった。

やがて1970年には国際標準化機構「油圧・空気圧システム」ISO/TC 131第1回総会がロンドンで

開催され、日本がSC1の幹事国に推挙された。総会に出席した辻茂教授は「ロンドンで開催された油空圧展コンファレンスにおいて講演できたこと」を思い深く語っている³⁾。1971年先進国から各1名が選ばれてのハノーバ油空圧招待講演会に日本から石原智男教授が招かれ、我が国が先進国の仲間入りが出来たことに感激したと同教授が述べている²⁾。1971年5月米国ピッツバーグで開かれた流体計測国際会議で東工大竹中俊夫教授が招待講演をされた。当時文部省在外研究員として米国Pennsylvania州立大学J.L. Shearer教授の所に滞在中であった筆者は竹中教授のお供をして会議に臨む機会を得た。ホテルで竹中教授と祝杯を挙げているところに当時横河電機(株)所属の山崎弘郎氏（後に東京大学教授）が参加され、杯を重ねることになった。山崎教授にとっても初めての海外発表経験であったとのことである。また1971年には上智大学の笠井浩爾助教授がドイツ・Aachen工科大学に、計量研の小宮勤一氏が英国Surrey大学にそれぞれ滞在し国際交流を深めておられた⁴⁾。このような一連の動きからも判るように、日本油空圧協会が発足した1970年を境に我が国の油圧・空気圧関連工業界、学界は世界へと羽ばたき始めた。そして奇しくも1971年は円為替レートが固定相場から変動相場へと変更されたニクソンショックの年でもあった。我が国の舵取りも未知の荒海に乗り出すような時代になった。

7. (社)日本油空圧学会設立へ

協会会員の活躍分野は油圧、空気圧、制御など広範囲に及んでいた。そこでそれら技術、工学情報を一つの冊子にまとめたハンドブックがあれば会員に大いに役立つと考えられた。1975年4月に池辺洋編集委員長による学会編纂の「油空圧便覧」がオーム社から出版された。編集幹事担当の筆者はその責を果たすべく1,000頁にわたる全編のゲラ刷りすべてに目を通したことが思い出される。油空圧全般を勉強するよい機会にもなった。

1977年に会員名簿が作成された。会員総数700名弱、その内学校関係会員構成比は約13%であった。さらなる協会発展に向けて会員、特に学校関係会員の増強に力が入れられた。

以上述べてきたように発足以来協会諸活動は順調に実績を積み重ね、その規模・態勢は強化され、事業内容も充実してきた。そこで協会を法人化して法人格としてのメリットやステータスを手に入れることが議論された。目指す法人の形態を「協会」のままにするか、「学会」へと変えて行くかについて先輩会員の間でいろいろ検討されたと聞いた。その結

果「学会」として法人化することになり、所管の文部省（当時）との折衝が開始された。当時事務局長であった服部克己氏の1981年文部省訪問報告メモには、法人化要件として i) 基本財産を一千万円以上保有していること、ii) 会員数が1,000名以上であることなど越えるべきハードルが記されていた。仄聞したところでは学校関係会員構成比は50%でなければならないと言った無理な話もあった。法人化への準備は着々と整えられ、申請の段階になった。(社)日本油空圧学会設立趣意書には、資産などは協会から寄付の形で学会に引き継がれること、基本財産として一千万円を確保できていること、個人会員数は1,100名余に達し、学校関係会員構成比は前年（1981）秋の15.4%から28%に改善されたことなどが記載されている。法人化を推進してこられた石原、辻、池辺各教授をはじめとした当時の関係者の苦勞が忍ばれる。

1982年5月に開かれた日本油空圧協会総会において同協会の解散と学会設立申請の議案が可決され、同年12月20日付けで文部大臣より設立許可が下り、社団法人日本油空圧学会が発足した。

8. 国際交流

学会法人化を記念して国際油空圧シンポジウムが実行委員長辻茂東工大名誉教授のもとに1983年9月29日30日中央大学理工学部で開催する運びとなった。初日は外国から招待されたアーヘン工科大学のW. Backé教授、アイントホーヘン工科大学のW.M.J. Schlösser教授ら4名の講演があった。翌日は市川常雄豊橋技科大教授、花房秀郎京大教授、石原智男東大教授の講演であった。その日は講演者も参加者もすべて日本人だけとなってしまい、日本語でのやりとりとなった国際化風景でもあった。

同時期に中山泰喜東海大教授らが流れの可視化に関する国際シンポジウム開催を計測自動制御学会に打診中であった。同学会長が本学会の理事池辺洋教授であったこともあって、シンポジウムがカバーする分野を流れの可視化にとどまらず流体の計測・制御を取り込んだ形に発展させることになった。1985年9月計測自動制御学会主催、本学会等共催で第1回の「流体の計測・制御と可視化に関する国際シンポジウムFLCOME」が国立教育会館で開催され、多くの国内研究者が国際の舞台で初めて発表する機会となった。

協会創立から20年近くが経過し、学会の基盤強化とさらなる発展のために1988年11月高橋浩爾上智大学教授を委員長とした学会創立20周年記念事業委員会が設立された。記念事業は「油空圧情報セ

ンターの設立」、「国際交流の活発化」、「記念出版」を3本の柱として計画された。その詳細は誌面の都合で割愛するが、国際交流事業についてのみ触れる。

1989年3月14日～16日本学会主催第1回の「フルードパワーに関する国際シンポジウムJHPS」が東京工大百年記念館で開催された。Call for paperから当日のシンポジウム運営まですべての業務を実行委員等がこなした手作りシンポジウムであった。海外15カ国からの参加があり、会場の雰囲気は熱気に包まれていた。そして新しい多くの友人を得たことは学会にとって大きな収穫であった。参加者の交流を深めるバンケットは目黒駅近くの雅叙園で開かれた。アトラクションとして実行委員等による弦楽演奏（パッヘルベルのカノン）が行われ、田中裕久委員（当時横浜国立大学教授）、大内英俊委員（当時山梨大学助教授）達が日頃研鑽の腕前を披露した風景が懐かしく思い出される。

9. あとがき

学会創立から45年を経過した今日までの前半20年を振り返ってきた。まだ薄暗い空が微かに明るくなり鋭い山の頂に光がきらりと当たり始めたような風景から、ぎらつく真昼の太陽の下で喘いだような日々、遙か水平線まで広がるサバンナに獲物を探し求めるような風景など、その時々思い出が姿を変えてよぎってきた。

学会の今日があるのは、会員諸氏の尽力はもとよりであるが、賛助会員会社からの財政支援、学界関係諸先輩からの指導などに依るところが大きく感謝する次第である。お世話になった方々の中には直接お礼を述べる事が叶わなくなった方も少なくない。孔子の川上の嘆「逝く者は斯くの如きか、昼夜を舍かず。」が想起される。東大入試が中止になった年に大学へ進学をした会員諸氏は65歳前後となり定年を迎えている。そして本稿執筆中の今春、本協会誌第1巻、第1号に論文が掲載された山口惇（元本学会長）が瑞宝中綬章を受章されたことは、学会の歩みの一つの現れとしご同慶の至りである。

参考文献

- 1) 早乙女郁雄：油空圧学会の創設の頃、油空圧の進歩100人の証言、(社)日本油空圧学会、p. 86-88、(1999)
- 2) 石原智男：油圧工学の発達小史、油空圧の進歩100人の証言、(社)日本油空圧学会、p. 86-88、(1999)
- 3) 辻茂：油空圧技術の発達小史、油空圧の進歩100人の証言、(社)日本油空圧学会、p. 86-88、(1999)
- 4) 中野和夫：私が歩んだ道と学会への提言、フルードパワーシステム、41巻、3号、p. 159-164、(2010)

(原稿受付：2015年5月29日)

会議報告

ICMDT2015におけるフルードパワー技術研究動向

著者紹介



た な か ゆたか
田 中 豊

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

1985年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了、その後、東工大精密工学研究所助手を経て、1991年法政大学講師、1992年同助教授、2002年同教授、現在に至る。工学博士(1991年東京工業大学)、ICMDT2015実行委員長

1. はじめに

日本機械学会機素潤滑設計部門の主催による第6回機素潤滑設計生産国際会議(The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology; ICMDT2015)は2015年4月22日～25日まで、沖縄県宜野湾市・沖縄コンベンションセンターで開催された。この会議は、2年に1度、日本と韓国を交互に開催地にして行われる国際会議で、機械要素、動力伝動、トライボロジー、設計、アクチュエータ・センサ、生産加工、MEMSなどの幅広いテーマからの講演発表があった。

会議は日本と韓国からの2つの招待講演、国内外からの4つの基調講演、参加7か国からの254件の技術講演(口頭発表が25セッションの129件、ポスター発表が2セッションの115件)、日韓親善若手交流セミナーなどで構成された。

2. 研究発表の動向

フルードパワーに関連した技術発表は、油圧・機能性流体・空気圧アクチュエータの3セッションやポスターセッション(図1)などに多く見られた。ここではいくつかの技術論文について紹介する。

K. Suzumoriは基調講演でNew Pneumatic Artificial Muscle Realizing Giacometti Robotics and Soft Roboticsと題して¹⁾、多線維構造の新しい空気圧人工筋アクチュエータを用いた冗長性を持つ次世代の柔軟ロボットの概念とアクチュエータ構造を提案した。

So-Nam YunらはMulti-physics Analysis of the

Electro-hydraulic Servo Valveと題して²⁾、市販ソフトウェアSimulationXを用いた電磁トルクモータの特性を含むノズルフラップ形電気油圧サーボ弁の動特性解析を行った。

J. NangoらはExperimental Analysis of Water Pump Driving Mechanism Using Orthogonal Double-slider Jointと題して³⁾、構造の異なる二つのスライダ・クランク機構により駆動される水圧ポンプの特性を実験的に比較検討した。

K. SanadaはDirect Drive Volume Control Actuator for Fuel Injection System of Marine Diesel Enginesと題して⁴⁾、船用ディーゼルエンジン用燃料噴射バルブ制御に、従来と異なるDDVC(直動容量制御)アクチュエータを用いたシステムのロバスト性をシミュレーションにより明らかにした。

Dao Thanh LiemらはMagneto-Rheological Damper Modeling and Application to Sensorless Force Damping Control Systemと題して⁵⁾セミアクティブ制振にMR流体ダンパのセルフチューニング型ファジー・ニューラル制御手法を適用した結果について報告した。

Dong Hanらは、A Novel 3D-Printed Finger Integrated with ECF Micropumpと題して⁶⁾、電界共役流体(ECF)マイクロポンプを用いた2つの屈曲関節をもつ全長83mmの指型アクチュエータの駆動原理を提案し、3Dプリンタを用いて試作したアクチュエータが空気圧を用いて40mm程度の屈曲動作することを確認した。またM. Shimizuらは、Proposal of DRIE-Fabricated Silicon Electrode Pairs



図1 会場内のポスターセッションの様子

for ECF Micro- pumpsと題して⁷⁾, アスペクト比の高い深掘反応性イオンエッチング法 (DRIE) を用いたマイクロECFポンプの製作方法を提案し, 試作した電極対を10個直列, 3個並列に組み合わせたECFポンプの圧力と流量の出力特性を明らかにした.

Y. OkamotoらはDisplacement and Gripping Detection by Piezoelectric Polymer Sensors for Soft Actuatorsと題して⁸⁾ ポリマー形フレキシブル変位センサを組み込んだベローズ型空気圧ソフトアクチュエータの動作特性とセンサ動作の妥当性を検証した.

D. Yamaguchiらは, Fabrication and Evaluation of Soft Film Actuator for Low Temperature Environmentと題して⁹⁾, 液体窒素中の極低温で動作する薄型フィルム空気圧ソフトアクチュエータの構造と製作法を提案し, 試作したアクチュエータの動作特性を明らかにした.

H. Taniguchiらは, A Prototype of Multifunctional Finger Joints Rehabilitation Device Using Pneumatic Soft Actuatorsと題して¹⁰⁾, 空気圧ソフトアクチュエータを用いた指関節のリハビリ装置の設計試作結果について報告した.

Mingzhao Chengらは, Pressure Control of a Miniature Rubber Muscle Driven by Gas-Liquid Phase-Changeと題して¹¹⁾, フッ化炭素の気液相変化による気体の圧力変化を駆動原理に用いた小形人工筋アクチュエータの動作にPI制御を適用し, そのステップ応答実験の結果について報告した.

D. Hirookaらは, Research on Controllability of the Particle Excitation Flow Control Valveと題して¹²⁾, オリフィスと粒子および励振用PZTアクチュエータから成る流量制御の動作原理を実現する小形空気圧流量制御弁を試作し, アクチュエータ励振周波数に対する流量特性の動特性を明らかにした.

A. WadaらはNew Gas Rubber Actuator Driven with Electrolysis/Synthesis of Waterと題して¹³⁾, 空気圧源や制御弁を必要としない水の電気分解により生成する水素と酸素により駆動されるダイアフラム形空気圧セルの動作原理と動作特性を実験的に明らかにし, このダイアフラムセルをフレキシブルマイクロアクチュエータに組み込んだ際の屈曲動作を確認した.

T. Hishikawaらは, Development of an Adsorption Suction Cup with Integrated Micro

Suction Cupsと題して¹⁴⁾, 吸盤の中に多数のマイクロ吸盤が集積配置された構造を持つ吸盤アクチュエータを試作し, さまざまな寸法のアクチュエータに対して吸引特性を実験的に検討した.

K. Takeiらは, A Pneumatically Assisted Dielectric Elastomer Actuator to Create Hydraulically-Coupled Surface Bulgingと題して¹⁵⁾, 触覚提示装置に用いることを想定した構造の駆動の補助に空気圧を用いたダイアフラム型誘電エラストマーアクチュエータ (DEA) を試作し, ダイアフラム表面の十分な変位の変化を確認した.

このほか, ポスターセッションにも10件以上のフルードパワー関連技術研究の発表が見られた.

3. おわりに

ICMDT2015における研究動向の一部について紹介した. 油圧, 空気圧, 機能性流体などのフルードパワーを用いた新しいアクチュエータや基盤技術の研究が数多く発表されていた. なお次回のICMDT2017は韓国で開催される予定である.

参考文献

- 1) K. Suzumori., Proc. 6th Int. Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology (誌名は以下すべて同じ), pp. 4-5, 2015.
- 2) So-Nam Yun, In-Seob Park, Young-Bog Ham, Y. Tanaka, pp. 116-117, 2015.
- 3) J. Nango, T. Koguchi, T. Yoshizawa, pp. 118-119.
- 4) K. Sanada, pp. 120-121, 2015.
- 5) Dao Thanh Liem, Dinh Quang Truong, Young Jin Yum, Kyoung Kwan Ahn, pp. 122-123, 2015.
- 6) Dong Han, Hongri Gu, Joon-wan Kim, S. Yokota, K. Edamura, pp. 124-125, 2015.
- 7) M. Shimizu, Joon-wan Kim, S. Yokota, K. Edamura, pp. 126-127, 2015.
- 8) Y. Okamoto, T. Kanda, S. Wakimoto, K. Suzumori, pp. 128-129, 2015.
- 9) D. Yamaguchi, T. Hanaki, Y. Ishino, M. Hara, M. Takasaki, T. Mizuno, pp. 130-131, 2015.
- 10) H. Taniguchi, Y. Naito, pp. 132-133.
- 11) M. Cheng, T. Kato, S. Honda, K. Sakuragi, M. Ono, pp. 134-135, 2015.
- 12) D. Hirooka, T. Yamaguchi, N. Furushiro, K. Suzumori, T. Kanda, pp. 136-137, 2015.
- 13) A. Wada, K. Suzumori, H. Kametani, T. Kitamori, S. Wakimoto, pp. 140-141.
- 14) T. Hishikawa, S. Wakimoto, K. Suzumori, T. Kanda, pp. 142-143, 2015.
- 15) K. Takei, M. Cho, A. Yamamoto, pp. 148-149, 2015.

(原稿受付: 2015年7月5日)

会議報告

ROBOMECH 2015におけるフルードパワー技術研究動向

著者紹介



たか いわ まさ ひろ
高 岩 昌 弘

徳島大学
〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2丁目1番地
E-mail: takaiwa@tokushima-u.ac.jp

1992年岡山大学大学院工学研究科修了。同年岡山大学機械工学科助手。2002年同システム工学科講師。2007年同准教授。2015年徳島大学教授。現在に至る。空気圧サーボを中心とした人間支援型ロボット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・日本機械学会・日本ロボット学会等の会員。博士（工学）。

1. 講演会の概要紹介

ロボティクス・メカトロニクス講演会2015（通称ROBOMECH 2015）が5月17日（日）～19日（火）まで、京都市勧業館（みやこめっせ）において開催された（図1）。本講演会は日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門主催によるもので、図2のように完全ポスター講演という特徴を有する。1988年の開催から数えて今年で第27回目となる。

ロボティクス・メカトロニクス関連の講演会としては、日本ロボット学会学術講演会、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となら

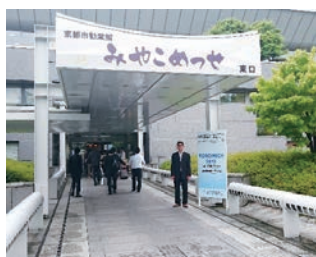


図1 会場にて

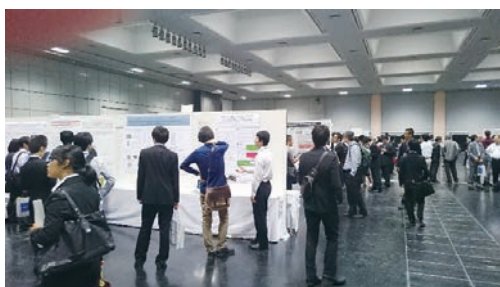


図2 ポスター講演の様子

び、国内におけるもっとも規模の大きい講演会の一つである。

講演会規模は年々拡大しており、今回は発表件数が1,325件、参加者総数は約2,000名を数えた。ちなみに、2011年に同大会を岡山市で開催した際は、参加者が1,650名であった。ここ数年の件数増加幅からも、ロボメカ分野に対する関心の高さが伺える。

会期は3日間で、初日の日曜日は例年通り、チュートリアルやワークショップが開催された。「RTミドルウェア講習会」や、「インターネットを利用したロボットサービス基盤としてのRSNP講習会」は例年開催されているので、興味があれば参加されたい。

2. フルードパワー関連の研究動向

以下に、フルードパワー関連の講演の中から、著者が勝手に抜粋したものを示す。

2.1 ソフトアクチュエータおよびポンプの開発



図3 ポリイミドフィルムを用いたアクチュエータ

花木ら¹⁾は、液体窒素温度のような極低温環境下でハンドリングなどを行うアクチュエータを目指し、図3に示すような、ポリイミドフィルムを用いて空気圧により屈曲する機構を提案した。アクチュエータの発生トルクや圧力に対する屈曲角度の推定式を導出している。

和田ら²⁾は、図4に示すように、水の電気分解により気体を発生させるポンプを提案し、これを用いた柔軟アクチュエータを構築している。電極構造の改良による応答性能の改善が報告されている。

2.2 パワーアシスト、リハビリ機器への応用

猪瀬ら³⁾は、図5に示すように人工筋肉とアシスト力増大機構を用いた、腰部の負担軽減を目的とするアシスト装置を開発した。疲労度および筋電位による筋力評価により支援効果を定量的に検証した。

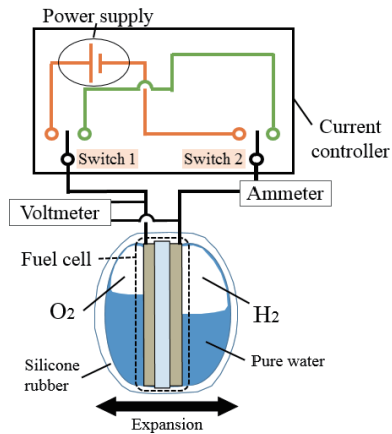


図4 水の電気分解を用いたポンプ

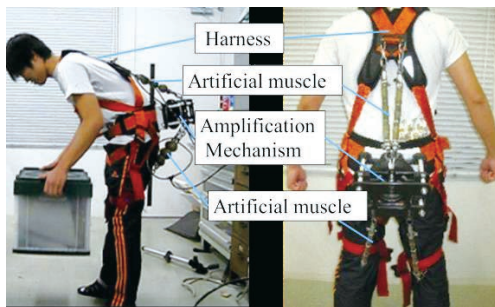


図5 腰部パワーアシスト機構

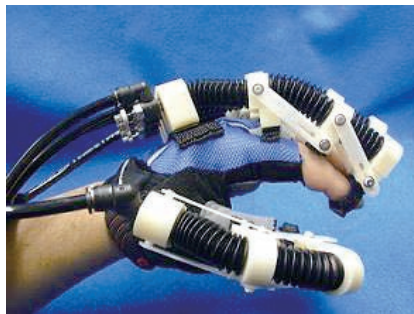


図6 指部リハビリ支援装置

高橋ら⁴⁾は、図6に示すように、水圧駆動タイプのベローズを指の背に装着した指の屈曲・伸展動作を訓練する装置を開発した。関節間にリンク機構を設けることでベローズ内の水が抜けた際は指が反り返るようになっており、稼動範囲を拡大する工夫がされている。

2.3 力覚提示装置への応用

小林ら⁵⁾は、図7に示すデルタ型ロボットを用いた力覚提示装置を開発した。関節駆動部を空気圧人工筋とMR流体クラッチにより駆動する手法を提案し、剛性提示性能について言及した。

松野ら⁶⁾は、図8に示すように、空気圧シリンダで直交3自由度を駆動する指先力覚提示装置を開発した。乳がん触診シミュレータへの応用を念頭に、しこりを模擬した形状モデルへの接触感覚を提示可能なことを示した。

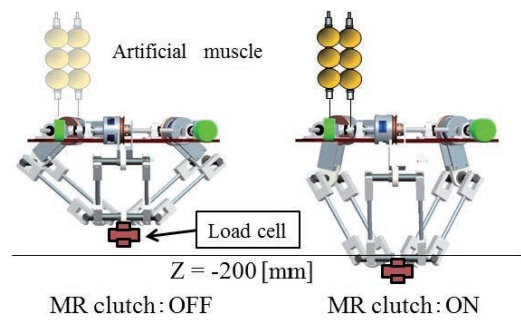


図7 デルタ機構を用いた力覚提示装置

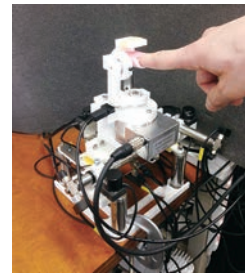


図8 指先力覚提示装置

3. おわりに

近年、3Dプリンターの活躍がめざましい。弾性特性を有する樹脂材料も扱うことができるため、流体アクチュエータの筐体そのものを作成できる。当然ながら流体の漏れに対する方策は講じなければならないが、アイデアをすぐに具現化できる魅力は大きい。たとえ漏れても環境を汚さない空気圧の場合はこのような試行錯誤的な開発段階で大きな威力を発揮するであろう。これからどのようなアクチュエータが世に出てくるのか、どのような使われ方をするのか興味はつきない。また、来年のRobomecは横浜市（パシフィコ横浜）において2016年6月8日（水）～11日（土）に開催予定であることを申し添えておく。

参考文献

出典はすべてロボティクス・メカトロニクス講演会'15 講演論文集である。筆頭著者、題目、講演番号のみを記す。

- 1) 花木ほか：ポリイミドフィルムを用いた液体窒素温度環境用ガス圧ソフトアクチュエータの試作と評価, 1A1-A05
- 2) 和田ほか：気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ第3報 電極面積比増加による応答性向上
- 3) 猪瀬ほか：空気圧人工筋肉を用いた内骨格型パワーアシストスーツの開発, 2A1-I10
- 4) 高橋ほか：手指の麻痺改善を目的とした小型リハビリテーション機器の研究, 1A1-E04
- 5) 小林ほか：空気圧人工筋肉とMRクラッチを用いた力覚提示装置の開発, 2A1-B03
- 6) 松野ほか：空気式多自由度アクチュエータを用いたがん触診シミュレータ, 2A2-K05

（原稿受付：2015年6月23日）

トピックス

海外の産学連携（米国の事例）

著者紹介



ひら く けん じ
平 工 賢 二

日立建機㈱
〒300-0013 茨城県土浦市神立町650番地
E-mail: k.hiraku.xy@hitachi-kenki.com

1991年岐阜大学大学院工学研究科修了。同年日立製作所機械研究所入社。2012年日立建機転属。現在に至る。油圧機器・システム関連の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会会員。

1. はじめに

米国ではフルードパワーシステム分野の活性化を目的にCCEFP（Center for Compact and Efficient Fluid Power）という産学連携プロジェクトを2006年に設立し、米国の7大学が中心となって26の革新的な研究テーマに取り組んでいる¹⁾。研究資金は米国NSF（National Science Foundation）と50以上の協賛企業から提供されており、企業は協賛金のランクに応じ、研究テーマの設定や方向性に対し発言権が与えられている。協賛金の上位ランクには米国の大手フルードパワー関連企業が名を連ねており、多くの大学、学生と結びついて影響力を与えている一方で、日本の協賛企業は数社に留まっている。CCEFPの取り組みにより、米国の油圧研究が存在感を増していることは、多くの方が感じていることと思われる。

筆者はこのうちの4大学に訪問する機会を得、また2012年から2014年までの3回の年次総会に参加したので、その概要を紹介する。

なお、NSFからの資金提供は2015年度で終了するため、2016年からはPascal Societyという名称に変更されるが、CCEFPと同様の取り組みを継続していく予定とのことである。

2. 大学での研究

2.1 パデュー大学

Monica Ivantysynova教授が所長を務めるパデュー大学のMaha油圧研究所は1700㎡の敷地を持

ち、40名ほどの研究者が在籍している²⁾。屋内の実験スペースのほかに屋外にローダやショベルを試験できるスペースもある。研究予算はCCEFPと企業からの個別共同研究による資金とで半々とのことであり、実験室には協賛企業のポンプが多数並べられていた。

研究テーマは、油圧ポンプの挙動解明の基礎研究と、DC（Displacement Controlled）Actuationと称されるポンプ直接制御方式の新規システム開発に大別される。

斜板ポンプの解析ではオリジナルのコードを用いて、油圧-構造-油膜-熱の高度な連成解析を行っており、解析の裏付けとなるバリデーションデータを計測するための多くの試験装置を保有している（図1）。また、ギヤポンプについてもAndrea Vacca教授が同様の研究を行っており、非対称ギヤを用いた可変容量ギヤポンプという意欲的なテーマに取り組んでいる。

DC Actuationでは燃費40%低減した油圧ショベルがCCEFPの看板テーマの一つとなっており、現在は燃費50%低減を目指し、アキュムレータを利用したエンジンのダウンサイジングに取り組んでいる。ご存知の方も多と思われるが、Monica教授は非常にパワフルな方で、DCでフルードパワーを革新できる、と機会ある毎に熱く語っておられる。



図1 試験装置の説明をするMonica教授（右）

2.2 ミネソタ大学

ミネソタ大学はCCEFPの本部となっており、CCEFPのDirectorを務めておられたKim Stelson教授を中心に広範囲の研究を行っている。訪問時は5名の教授陣に加え、産学連携担当のMichael Gust氏にもご同行頂き、また同大学勤務の日本人講師の同時通訳付きというご配慮までいただいた。代表的な研究テーマは、フリーピストンエンジン油圧ポンプ、油圧動力伝達を用いた新規システム開発、フライホイールアキュムレータなどである。

フリーピストンエンジン油圧ポンプの狙いは、効率の革新的向上であり、熱効率60%が見込めるとの報告があった。課題は精密な制御であり、バーチャルクラクシャフトと称するモデルベース制御の導入で、連続燃焼を達成したとのことである。残念ながら動いている様子を見ることはできなかった。

動力伝達機構の研究では油圧ハイブリッドカー（図2）や、油圧トランスフォーマ、HMT、風力発電などの研究を行っている。油圧ハイブリッドカーはHEVに対してバッテリーレスで低コストなどの強みがあるが、現時点では燃費でHEVに競合できるほどではないとのことだった。

フライホイールアキュムレータは回転エネルギーと液／空圧エネルギーの両方を蓄積するもので、計算上はカーボンハウジングにして18000min⁻¹で回せば通常のアキュムレータの3倍のエネルギー密度が得られるとのこと。実現は難しそうにも思えるが、アイデアを否定せず、可能性を追求する姿勢は見習うべきと感じた。

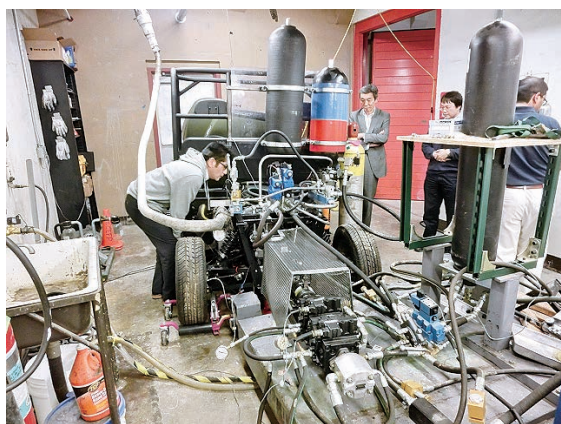


図2 油圧ハイブリッドカーの試験装置

2.3 ジョージア工業大学

ジョージア工業大学はWayne Book教授を中心にモーション制御を主体とした研究を行っており、日本のJun Ueda准教授も在席しておられる。代表的な研究テーマは、オペレータインターフェース、屋

内患者搬送機器、レスキューロボットなどである。

図3はオペレータインターフェースの研究のためのショベルシミュレータで、操作性向上や負担低減などの目的で、1レバー式のジョイスティックの評価を行っている。ショベルの前面には大型ディスプレイが配され、油圧機構モデルで計算されたフロントアクチュエータの3D画像をリアルタイムで表示する（旋回は実際に動く）。バケットを目標位置に動かすと、ブーム、アーム、旋回を自動計算して駆動するシステムとなっている。

屋内患者搬送機器は在宅看護での使用を想定したもので、患者にベルトを掛けて油圧シリンダで持ち上げることで、一人の介護者で搬送が可能となる。ジョイスティック状のインターフェースで介護者の操作力に応じて油圧がアシストされる方式で、試させてもらったところ操作性は良好であった。

これ以外にも、脈圧エネルギーを圧電素子で発電させて再利用する研究や、多孔質体のポーラス部の変形を利用したサイレンサーなどの先駆的な研究を行っていた。



図3 ショベルシミュレータとBook教授

2.4 イリノイ大学

イリノイ大学には2012年にCCEFPの年次総会参加した際、ラボツアーのイベントで学内を見学した。ここではCCEFPの看板テーマの一つである、足首リハビリ装置の研究を行っている（図4）。これは硬化症や麻痺などで歩行困難になった患者のリハビリをサポートするもので、センサで感知した歩行タイミングに合わせ空圧アクチュエータで足首動作をアシストする。足裏に空圧ポンプがあり、エラストマー製のアキュムレータで回生することで軽量化、長時間駆動のチャレンジを行っていた。

また、学内に大手建機メーカーのシミュレーションセンタがあり、ここには社員が常駐し、学生とチームを組み解析技術を開発している。学生を戦力化す

るための教育プログラムが組まれており、よい学生はそのまま就職することになる。

さらに、学内には企業との共同研究室がいくつもあり、建機メーカ、油圧機器メーカ、自動車メーカとフルードパワー関連企業が名を連ねる。



図4 足首のリハビリサポート装置

3. 年次総会

年次総会は毎年10月頃に開催されており、各テーマの1年間の成果報告（図5）、学生によるポスターセッション（図6）、ラボツアーなどが行われるほか、就職を希望する学生と企業との面談の場も設けられているのが大きな特徴である。参加者は150名前後で、大半が米国内の大学・企業からの参加、日本からは多い時で10名程度である。また、2年ごとにASME/BATHフルードパワーシンポジウムと併催され、この時は欧州からの参加者が増える。



図5 発表会場

ポスターセッションでは納得いくまで質問することができ、学生も気さくに答えてくれる。また、毎

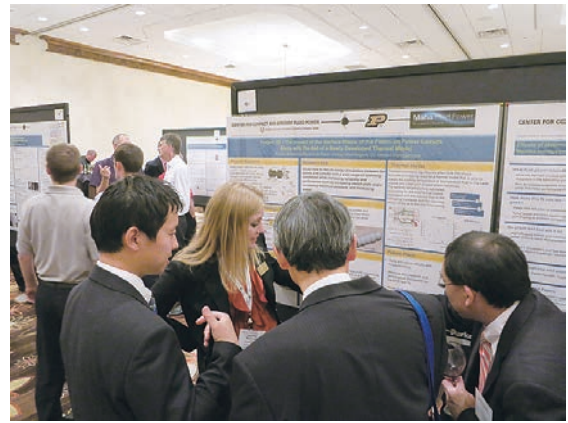


図6 学生によるポスターセッション



図7 懇親会イベント

年趣向を凝らした懇親会イベントが組んであり、学生や参加者とのコミュニケーションを深めることができる。2013年はフロリダにてサンセットクルーズが開催された（図7）。

4. おわりに

CCEFPは単なる研究活動に留まらず、優秀な学生を育て雇用することで産学が強固に結びつき、油圧技術を持続的に成長させようという強い意欲を感じた。学生は実際に優秀で、基礎から応用まで幅広く取り組んでいる。この取り組みにより米国の油圧技術はさらに強くなっていくものと感じた。日本においても、今後このようなサイクルが回っていくよう、本学会の活動に期待したい。

参考文献

- 1) CCEFP URL : <http://www.ccefp.org/>
- 2) Maha URL : <https://engineering.purdue.edu/Maha/>

（原稿受付：2015年6月12日）

トピックス

インドネシア駐在員日記

著者紹介



たな なか ひろ よし
田 中 大 慶

PT Hexindo Adiperkasa Tbk
Jl. Mulawarman No. 99 Balikpapan 76116, Indonesia
E-mail: tanaka@hexindo-tbk.co.id

1995年日立建機株式会社入社、主に鉱山用超大型ショベル・ダンプのサービス業務に従事、2011年よりインドネシア、東カリマンタン州、バリクパパンに出向

1. はじめに

首都ジャカルタのあるジャワ島の北に位置するカリマンタン島の東側半分は石炭・石油・天然ガス等の天然資源が豊富でそれらの生産が盛んに行われている。

現在駐在しているバリクパパン（図1）はジャカルタ・シンガポールよりも直行便が就航しておりカリマンタン島東部の玄関口になっている。外資を含めた資源企業が事務所を構える国際色豊かな町であり、また旧来の漁師町の色も残す地方都市でもある。そのバリクパパンに駐在して3年が経った。事務所勤務のほかに鉱山現場への出張も多く日々新たな発見がある。今回はインドネシア駐在員日記としてバリクパパンでの生活と現場出張時の体験談を紹介したいと思います。



図1 バリクパパン中心部全景

2. 気 候

赴任して間もない頃の年末の出来事。顧客との打合せで製品改善要求を出された。可能な部類の改善だったのでポジティブな回答をした所、案の定いつまでにかという質問が返ってきた。稼働環境の再確認と部品の手配、加えて現場での装着と調整で数ヶ月は掛かることは頭の中ですぐ計算できた、しかし部品の納期は即答できない。仕方がないので3ヶ月くらいは掛かるという意味で、来年の春先までには何とかすると回答した。顧客側のオーストラリア人技師が怪訝な顔をして春先とはいつのことだと質問してきた。もう1度丁寧に部品の納期を懸念している、時間が掛かることが予想されるが来年の春先までには何とかする、と回答すると表情がさらに険しくなってさらに質問してきた。わかった、それでいつまでにかできるんだ？

一瞬張り詰めた空気が会議室の中で流れたが、質問してきたオーストラリア人技師の険しい顔が急に和らぎ、私は南半球出身だから春先とはあと9ヶ月待てということだが北半球出身の貴方の言う春とは3月頃のことか、と補足してくれた。続いて同席していた顧客側のインドネシア人マネージャが一言。田中さん、インドネシアに春はありませんよ、この季節は乾季と雨季の2つだけです、というコメントで会議出席者一同大爆笑。幸運にも和やかな会議になりこの顧客とは今でも良好な関係を築けている。ちなみにバリクパパンは南緯1度に位置しています。

3. 現場出張

鉱山機械のサービス業務で訪れる現場はほとんどが僻地である。インドネシア赴任前に出張した現場も気温は+45℃から-40度まで、標高も海拔0mから標高4000mまで、まるで製品と一緒に人間も耐久試験されているみたいだが肉体的・精神的にも丈夫になり感謝しています。

従いインドネシア赴任が決まった時にもたいしたことは無いだろうと高を括っていた。しかしバリクパパン赴任後に新たな発見があった、まだ耐震試験は

未体験だった。カリマンタン島内の現場への移動は車を使うことが多い。たった250kmの移動が6時間も掛かる場合もある、理由は道路事情インフラ整備が整っていないため。特に東カリマンタン州の道路は整備も悪く山越えの道路は山なりに舗装しただけなので曲がりくねって勾配もきつい、舗装は随所が剥がれて穴だらけ、中には近隣住民が穴に岩を入れて補修している場所もあるが岩の部分が出っ張っているのかえってこれが首と腰に悪い。ドライバーも急減速や急ハンドルと大忙しだが乗っているこちらも油断していると窓ガラスや天井に頭をぶつけるくらいの悪路。無事仕事を終えてバリクパパンまで戻ってくると首から腰まで体の背面はガチガチ、耐震試験がここまで辛いものとは思わなかった。

陸路ではなく水路が唯一の交通手段という現場もある。川もしくは海を地元の人々はスピードボートという4人乗りの小型モーターボートで数時間移動して現場訪問というパターン、川の移動はマングローブの森の中を全速で進むのでちょっとした冒険気分を味わえる。しかし川を下り海に出て波が高いとスピードボートが波を乗り越えて着水するたびに腰が痛む。なぜか一人だけフルフェイスのバイク用ヘルメットかぶっているスピードボートの船長に減速してもらえるように頼むが、この地域は海賊が出るので早く帰らなければならないと聞いてくれない。カリマンタン島内の移動は想像以上に体力を消耗する。

しかし仕事を終えて戻ってくるとバリクパパンにもマッサージ屋が多数ありリーズナブルな値段で体をほぐしてもらえる。機械と一緒にしっかりメンテナンスしておけば長持ちするという言い訳を家族にはしながら現場出張後にはマッサージに行くのが日課となった。

4. 食 事

現場出張時の昼食は日本人駐在員の間では箱飯と呼んでいる現地版の弁当をいただくことになる(図2)。中身は白米を丸く固めて紙に包んだ物、川魚のフライ、野菜炒め、揚げ物のチップ、水というパターンが多い。運がよければプラスチックのウォークとスプーンがついてくるのでこれでいただく。無い場合は揚げ物のチップをスプーン代わりにしていただく。現地スタッフは右手の指先を器用に使い米とおかずを混ぜて丸めて食べていて感心する。私も何度か右手で食べてみたが指先だけではなく右手全体がべちゃべちゃになってしまう。

出張中は夕食も現地スタッフや顧客と食べる機会が多い。カリマンタンもイスラム色の強い地域であるため会食事にアルコールが出でこないことが多い。

アルコールが入らない分会食時間も短い、食事が終わったら即解散。

ただし華僑系の顧客との会食は中国式の会食スタイルとなり乾杯が入るので体調を整えてから参加するように心掛けている。

インドネシアの鉱山業界はオーストラリアより働きに来ている方々も多数いる。彼らと会食する機会も多いが当然のことながら豪州流のバーでピーナッツをつまみながらひたすらビールを飲み続けるというスタイルとなる。大抵の場合はビールで満腹になってしまい夕食までたどり着けないことが多い。



図2 現場での昼食

5. 現地での生活

バリクパパンには家族帯同赴任の前例が無かったが会社の計らいにより初めて家族帯同で赴任させていただけることとなった。

赴任時にこの地で暮らす日本人は2社8人だった。家族帯同での赴任は初めてなので当然のことながら日本人の相談相手はいない。子供達に通う学校も日本人学校はないため、豪州系インターナショナルスクールの幼児部に通学することとなった。住居は学校と同じ敷地内の外国人用コンパウンド(セキュリティ付き平屋の集合住宅)とした。

父親(駐在員)は昼間仕事で忙しくしている。したがって生活環境の変化の影響はそれほど気にならない。しかし家族にとって当地での駐在生活立ち上げは苦労の連続だった。

インドネシア駐在では一般的にメイドを雇い掃除、洗濯、食事の世話をしてもらう。家内にとって使用人を使うのは初めての経験で、文化や常識の違い、外国語でのコミュニケーションなど苦労も多く最初の1年で5人メイドが代わった。メイド変更の理由は、約束を守れない、金銭面で手癖が悪い、性格が合わないなどさまざま。また日本人は苦手だがイエ

ス／ノーをはっきり言わないと使用人を使うことはできないので家内にとってもよい経験になったと考えている。

現地の物価を理解しないとメイドに手渡す食材の買出し費用も実際にどの程度必要かわからない。そこで家内はメイドと一緒に早朝青空市場の買出しに同行してメイドが支払う金額とお釣りの金額を確認したり最初は苦労した。しかし努力は報われる物中では日本人は珍しいので顔を覚えてもらい家内一人で買い物に行ける果物屋なども増えて生活も徐々に安定していった。

長男（当時3歳）は日本の幼稚園に通っていなかったため、言葉の違いはあまり関係なく比較的ストレスなく幼稚園の通園生活に馴染むことができた。一方、長女（当時5歳）は日本の幼稚園に通園経験があったこともあり英語でのコミュニケーションは未経験のため最初は日本の幼稚園のほうが好きだと泣いていた。しかし子供は物事の吸収が早く、1ヵ月後には同じ居住区に住む豪州人やインドネシア人の子供たちと遊んでいた。会話を聞いていても子供達なりにちゃんとコミュニケーションが成り立っており感心した。ただし母国語以上に外国語が上達する

ことはないので、日本語のお勉強も帰宅後に家内が先生となり励んでいる。

当たり前だが海外での生活は日本での生活とは違う。日本では何のストレスもなく当たり前に行えることを海外でやろうとすると大ハッスルしなければならないこともある。今回は赴任地が発展途上国の地方都市であったという事情もあり、ほかの先進国や大都市圏での駐在より苦労も多かった。だが家族皆が良い経験をしており家族の結束も深まったと考えている。必要のない心配や苦労はする必要はないが、今回の駐在生活は将来よい経験だったと帰国後に家族みなで笑って話せるようになることを願っている。

6. 最 後 に

駐在員日記という事で経験談を記述させて頂きました。カリマンタン島に訪問される方々の一助になれば幸いです。

学会誌にそぐわない表現もあったかもしれませんがご容赦願います。

（原稿受付：2015年2月6日）

研究室紹介

東北大学流体科学研究所 早瀬・白井・宮内研究室

著者紹介

はやせとしゆき
早瀬敏幸東北大学流体科学研究所
〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1
E-mail: hayase@ifs.tohoku.ac.jp

1980年名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同大学助手、1990年東北大学流体科学研究所助教授を経て2000年同大学教授。現在に至る。数値流体力学、生体工学の研究に従事。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。工学博士。

1. はじめに

本研究室の正式名称は、東北大学流体科学研究所流動創成研究部門融合計算医工学研究分野である。細胞レベルから循環器系までの生体内流動現象の計測融合シミュレーションにより、疾病の機序の解明と次世代医療機器の創成に関する研究を行うことを目的としている。

本稿では、元々油圧制御系の非線形振動現象を主な研究テーマとしていた本研究室が、生体内の流動現象を対象とした研究室に至る経緯と研究室の現状、および現在の主な研究内容について、流体制御の研究が生体内の流動現象の研究にどのように生かされているかについても触れながら述べていきたい。

2. 研究室の概要

最初に、研究室の変遷について述べる。1990年に著者が助教授として東北大学流体科学研究所に着任した時は、元本学会会長の林 叡教授が流動場制御研究部門を担当されており、飯村或郎元秋田大学准教授が助手としておられ、油圧制御系の安定性が主な研究テーマだった。その後、1998年の研究所の改組に伴って、生体流動研究部門となった。国立大学の附置研究所では、社会の要請に応えるため、ほぼ10年毎に研究領域の見直しが行われる。当時の研究所の改組では、生体内の流れを新たに研究所の研究対象として加えることになった。当時、血圧測定時のコロトコフ音の発生機構に関連した血管と

血流の連成振動を研究されていた林 叡教授に白羽の矢が立って、生体流動研究部門を担当されることになり、研究室の研究テーマが生体流動関係に大きくシフトすることとなった。その後、2003年に計測と計算の融合手法による流体科学と異分野の融合研究を目的とした流体融合研究センターの設置に伴って、本研究室は、超実時間医療工学研究分野として、生体内流れの計測融合シミュレーションに関する研究を行うこととなった。2013年の研究所の改組では、融合計算医工学研究分野に改組されて、現在に至っている。

研究室の現状について述べる。平成27年度の研究室のメンバーは、職員が教授早瀬敏幸、准教授白井 敦、助教宮内 優、技術職員井上浩介、事務補佐員斎藤 加代の5名、学生が博士後期課程2名、博士前期課程9名、学部4年生2名の総勢18名である（図1）。大学院生の所属は、工学研究科6名、医工学研究科5名である。学生の居室は、生体工学関係の2研究室の学生22名が共同研究室に入っており、また教員の居室とも隣接しているので、学生間や、教員と学生の間の良好なコミュニケーションがとられている。また週1回の研究室ゼミと、2か月に1回の2研究室合同ゼミを実施している。

3. 研究内容

研究室の主な研究内容について述べる。

3.1 計測融合シミュレーション

流体計測手法と数値流体解析手法を融合し、幅広



図1 研究室のメンバー

い分野に適用可能な計測融合シミュレーション手法の研究を行っている。本手法は、制御理論のオブザーバーの数学モデルに数値流体解析モデルを用いたもので、流体計測結果を数値流体解析にフィードバックすることにより、実現現象の流れ場の正確かつ詳細な状態が得られる（図2）。本手法に関して、実現現象への収束や安定な解析スキームの研究など、汎用的な融合流体解析手法として確立するための研究を行っている。

計測融合シミュレーションは、計測結果と対応する計算結果との差に比例した仮想的な外力を数値流体解析モデルにフィードバックするもので、物理的意味が明確であり、従来の融合手法にない汎用性を有していることが特長である。本手法は、管内乱流、風洞実験、生体内血流解析など、幅広い分野に応用され、現在、自動車、電機などの産業分野へも応用が検討されている。

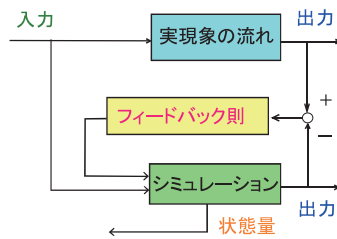


図2 計測融合シミュレーション

3.2 ハイブリッド風洞

計測融合シミュレーションを用いて、実現現象の流れ解析の基盤技術を確立するための研究を行っている。正方形管路内の乱流や風洞内の角柱後流のカルマン渦列など、流体力学の基本的な流れ場に対し、本手法による乱流速度場の再現や、本手法を風洞実験に応用したハイブリッド風洞による非定常圧力場の再現手法を確立するための研究を行っている（図3）。

本手法は、実現現象の流れの基本的な解析手法として、実流れの非定常圧力分布など、従来の計測手法や数値流体解析手法単独では得ることが困難であった流れの状態を取得できる。ハイブリッド風洞の研究では、風洞内の物体表面の圧力をフィードバックした計測融合シミュレーションを行って、物体後流のカルマン渦列に伴う非定常圧力分布を再現することができる。

3.3 超音波計測融合血流シミュレーション

計測融合シミュレーションの医療応用に関する研究では、小動物による循環器系の先端研究で不可欠な血流情報を取得する生体解析連成超音波計測システムの開発（図4）や臨床用2次元超音波計測融合血流解析システムの開発（図5）の研究を行ってい

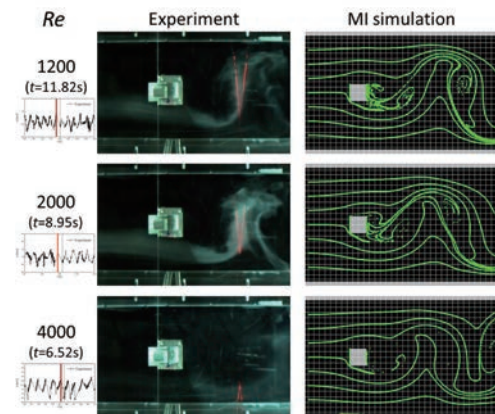
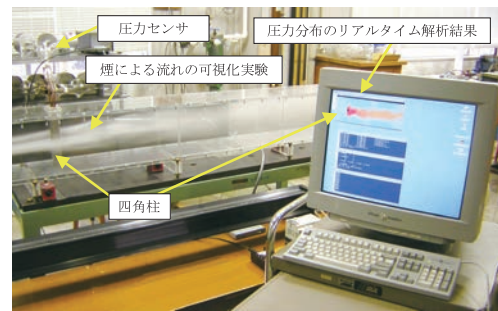


図3 ハイブリッド風洞

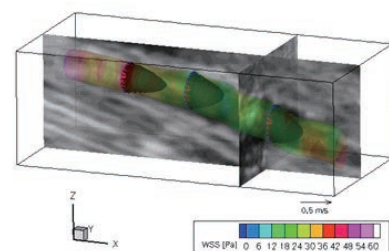
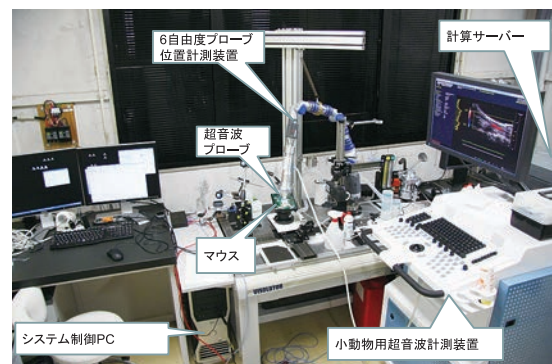


図4 生体解析連成超音波計測システム

る。また、微小循環に関する研究成果などに基づき、細胞レベルの計測融合血流解析の研究も行っている。

医療分野の血流解析において、本手法は、循環器系疾患の研究に不可欠な、血管内の正確な血流速度分布や血管壁せん断応力など、従来手法では取得困難な血行力学情報が得られる。生体解析連成超音波計測システムでは、マウスの頸動脈内の血流速度、壁せん断応力、血管変形（図4下）を、臨床用2次元超音波計測融合血流解析システムではヒト頸動脈



図5 臨床用2次元超音波計測融合血流解析システム

内の血流速度とせん断応力(図5下)をそれぞれ得た。

3.4 細胞流体工学

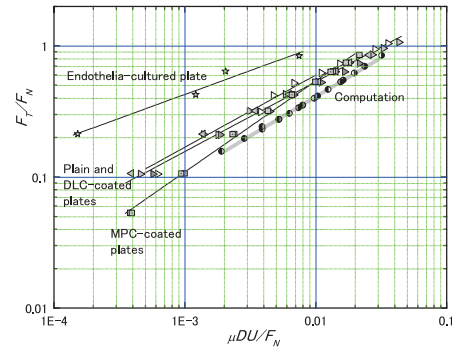
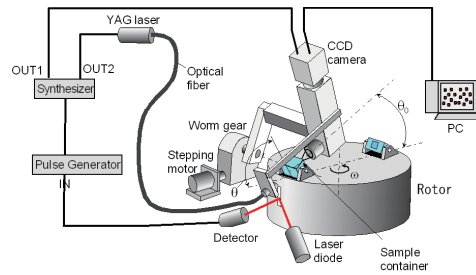
血液中の数マイクロメートルオーダーの赤血球や白血球は生体内の物質交換や免疫に重要な役割を果たしている。これらの血球細胞と血管表面を覆う内皮細胞との相互作用についての研究を行っている。著者らが開発した、傾斜遠心顕微鏡による、遠心力の影響で変形しつつ基板上を移動する赤血球の摩擦特性の計測や、血球周りの血漿流の3次元数値解析により、赤血球や白血球と内皮細胞との相互作用を明らかにするための研究を行っている(図6)。

3.5 その他

上記以外にも、集中定数モデルによる全身循環系のシミュレーションや血管内の圧力と速度の波動伝播解析、東洋医学における脈診のモデル化に関する研究などを行っている。これらの研究は、これまでの流体制御の研究での数学モデルが直接的に適用できる例である。

4. おわりに

本稿では、元々油圧制御系の非線形振動現象を主な研究テーマとしていた本研究室が、生体内の流動現象を対象とした研究室に至る経緯と研究室の現状、および細胞レベルから循環器系までの生体内流動現象の計測融合シミュレーションによる、疾病の機序の解明と次世代医療機器の創成に関する現在の主な研



Experiment: $\blacktriangleright$: $r=1$, Glass [8]
 $\triangleleft$: Glass, $\diamond$: DLC, $\square$: MPC, $r=1$, $\blacksquare$: MPC, $r=0$ [10]
 $\star$: Endothelial, $r=1$ [9]
 Computation: $\bullet$: $r=1$, $\circ$: $r=0.025$
 Symbols: F_N : white: 24 PN; light gray: 47 PN; gray: 95 PN

図6 傾斜遠心顕微鏡

究内容について述べた。本稿を纏めてみて、流体制御の研究が、現在の生体内の流動現象の研究のさまざまな部分で生かされていることに改めて気づいた。

東北大学の附置研究所群は、仙台駅に近い東北大学片平キャンパスで2年毎に片平まつりと呼ばれる一般公開を行っており、多くの小中学生が訪れる。実験室で実験装置を操作する男の子の真剣な表情が印象的である(図7)。



図7 片平まつりでの研究室公開

(原稿受付：2015年7月3日)

企画行事

平成27年春季講演会併設セミナー開催報告 「フルードパワーにおける故障予知技術」

著者紹介



うち ぼり あき ひこ
内 堀 晃 彦

宇部工業高等専門学校
〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-14-1
E-mail: uchibori@ube-k.ac.jp

1998年信州大学大学院工学系研究科博士課程単位取得退学、山口大学助手、宇部工業高等専門学校講師、同校准教授、沼津工業高等専門学校准教授を経て、現在、宇部工業高等専門学校准教授。ロボット工学、空気圧システムの開発に従事。日本フルードパワーシステム学会・電気学会の会員。博士（工学）。

1. はじめに

平成27年春季講演会併設セミナー「フルードパワーにおける故障予知技術」が平成27年5月27日（水）に機械振興会館において開催された。本稿では、本セミナーの趣旨および当日行われた各講演の概要について報告する。

2. 開催趣旨

近年、フルードパワーはすべての産業分野に適用されていると言っても過言ではないほど普及し、かつシステムが大規模化、複雑化している。その分ひとたびトラブルが発生すると、甚大な経済的損失や環境破壊、さらには深刻な人身事故に発展するリスクも高くなっているといえる。従来は経験則に基づく定期的な部品交換や分解調整などでの予防保全が主流だったが、最近ではセンシング技術およびコンピュータの急速な発達により、膨大な状態監視データを使った科学的根拠に基づく故障予知の手法が確立されつつある。これにより最適なメンテナンス時期を決定することができ、低リスク低コストでのシステム維持が可能となるため、故障予知技術は各産業分野から高い関心を寄せられている。このような背景から、フルードパワーにおける故障予知をテーマとした最新の研究、技術開発成果に関する講演をいただくこととした。

3. 講演の概要

3.1 予知保全技術など産業オートメーション技術のサービス体系化について

はじめに、公立大学法人首都大学東京 産業技術大学院大学の川田誠一先生より「予知保全技術など産業オートメーション技術のサービス体系化について」¹⁾と題する講演をいただいた（図1）。JEITAにおける産業オートメーションシステムのサービスビジネスに関する調査・検討活動での知見を基に、欧州における産業オートメーションサービスの体系から日本におけるサービス体系とその課題に関する解説が行われた。



図1 川田先生の講演

3.2 色診断による潤滑油状態監視センサ

つぎに、ナブテスコ株式会社の高橋勉氏より、「色診断による潤滑油状態監視センサ」²⁾と題する講演をいただいた（図2）。潤滑油の劣化原因（酸化や固形物の混入など）による色変化の違いを基にし



図2 高橋氏の講演

た故障予知アルゴリズムと、その実現のためのセンサと実際の試験例が紹介された。

3.3 電動流量制御システムを利用した空気圧機器の故障予知

株式会社コガネイの高松信夫氏には、「電動流量制御システムを利用した空気圧機器の故障予知」³⁾と題する講演をいただいた(図3)。シリンダーの劣化に伴うエア漏れによる動作時間(タクトタイム)の変化を基に、タクトタイムコントローラと電動流量制御弁(チェック弁付き可変絞弁)を用いて故障検知を行うシステムの紹介がなされた。



図3 高松氏の講演

3.4 ビッグデータを用いた異常時、正常時の比較による故障予知処理のアルゴリズム

株式会社日立製作所の鈴木英明氏には、「ビッグデータを用いた異常時、正常時の比較による故障予知処理のアルゴリズム」⁴⁾と題する講演をいただいた(図4)。実機から得られるビックデータを用いて機械学習を行うことで、故障予知の精度を上げるシステムの紹介がなされた。これは、正常な動作データを学習し、現在の状態と正常な状態とのノルムから異常を検知するものであるが、実機の稼働初期では学習に必要とされる正常なデータがそろっていないとは限らず、異常データは少数であるなどの学習時の苦勞にも触れられた。

3.5 油圧システムのリモートモニタリングによる保守方法

最後に、エムティエスジャパン株式会社の岩崎一



図4 鈴木氏の講演

実氏より、「油圧システムのリモートモニタリングによる保守方法」⁵⁾と題する講演をいただいた(図5)。油圧ユニットにセンサを取り付け、クラウド上で状態を解析し、PC、タブレット、スマートフォン上で確認するモニタリングシステムの紹介がなされた。このシステムは、多数の状態パラメータを監視しているため、不具合の発見や予見を早期に行うことができるものである。



図5 岩崎氏の講演

4. おわりに

本セミナーは、本学会の編集委員会と企画委員会の合同企画事業であり、学会誌(46巻第2号)の特集記事をテキストとして、その内容を深く理解する機会を設けるものである。当日は電機、空気圧、油圧、水圧の研究者から設計・開発、学生までの幅広い分野からの多数の参加が得られた。質疑応答も活発になされ、この分野に対する関心の高さが伺われた。

最後に、学会誌の特集記事をまとめられた吉田委員長、栗林委員をはじめとする編集委員の皆様と、セミナーの準備、運営にご協力いただいた企画委員ならびに学会事務局の皆様に、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 川田誠一：予知保全技術など産業オートメーション技術のサービス体系化について，フルードパワーシステム，Vol. 46，No. 2，p. 55-57 (2015)
- 2) 高橋勉：色診断による潤滑油状態監視センサ，フルードパワーシステム，Vol. 46，No. 2，p. 58-60 (2015)
- 3) 齊藤悠：電動流量制御システムを利用した空気圧機器の故障予知，フルードパワーシステム，Vol. 46，No. 2，p. 64-66 (2015)
- 4) 鈴木英明：予ビックデータを用いた異常時，正常時の比較による故障予知処理のアルゴリズム，フルードパワーシステム，Vol. 46，No. 2，p. 67-69 (2015)
- 5) 岩崎一実：油圧システムのリモートモニタリングによる保守方法，フルードパワーシステム，Vol. 46，No. 2，p. 74-76 (2015)

(原稿受付：2015年6月25日)

会 告

〈理事会・委員会日程〉

—	基盤強化委員会
8月20日	理事会
9月8日	企画委員会
9月10日	情報システム委員会
9月29日	委員長会議
10月2日	編集委員会

〈委員会報告〉

平成27年度第1回委員長会議

7月28日 15:00～17:00 機械振興会館

地下3階B3—9号室（出席者7名）

議題

- 1) 公益目的支出計画変更に伴う書面審議議事録について
- 2) 国際シンポジウム福岡の開催準備状況について
- 3) 子複製に係る権利委託契約書について
- 4) ベトナム使節団との会談について
- 5) IDC (International Design Contest) 開催支援について
- 6) 試用期間職員の専任職員への昇格について
- 7) 学会の財務基盤の強化の進捗状況について
- 8) その他

・講演会技術懇談会の会費について

報告事項

- 1) 各委員会からの報告
- 2) その他

平成27年度第1回企画委員会

7月2日 15:00～17:00 機械振興会館

地下3階B3—9号室（出席者30名）

- 1) 平成26年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - ・ウインターセミナー実施報告
 - ・その他
- 2) 平成27年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - ・平成27年春季講演会について
 - ・平成26年春季講演会優秀講演賞について
 - ・平成27年春季講演会併設セミナーについて
 - ・オースタムセミナーについて
 - ・平成27年秋季講演会について
 - ・公益事業について
 - ・その他
- 3) 平成28年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - ・平成28年春季講演会併設セミナーについて

- ・平成28年春季講演会について
- 4) その他審議・確認事項
 - ・会誌9月号の会告について
 - ・平成27年度秋季講演会の会告
 - ・平成27年度オースタムセミナー会告
 - ・その他 WGの構成について

平成27年度第1回基盤強化委員会

6月30日 15:00～17:00 機械振興会館

地下3階B3—9号室（出席者11名）

- 1) 会員サービス、会員数増加について
- 2) 外部への情報発信について
- 3) フルードパワー道場について
- 4) フルードパワー・バーチャルミュージアムについて
- 5) 研究委員会について
- 6) その他

平成27年度第2回編集委員会

8月5日 14:00～17:00 東京工業大学田町CIC

5階リエゾンコーナー501（出席者12名）

- 1) 学会誌発行報告
- 2) 学会誌編集計画
 - ・Vol.46 No.E 1（電子出版号）「緑陰特集」
 - ・Vol.46 No.5「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」
 - ・Vol.46 No.6「水素燃料自動車とフルードパワー技術」
 - ・Vol.47 No.1「農業に貢献するフルードパワー（案）」
 - ・Vol.47 No.2「アジアにおけるフルードパワー産業（アジアにおけるフルードパワーの最新情報（案）」
- 3) その他
 - ・会議報告
 - ・トピックスについて

平成27年度第1回情報システム委員会

7月3日 13:30～15:00 法政大学市ヶ谷キャンパス・新見附校舎9階・創造空間サロン1（出席者8名）

- 1) J-STAGEの問合せ結果について
- 2) 会議担当者について
- 3) HP更新作業状況報告（3月～6月）
- 4) 学会事務局の会員管理システムの更新について
- 5) 今年度の情報システム関連の作業について
- 6) 英語版ホームページについて
- 7) 英語版学会紹介パンフレットについて
- 8) 今後のHP更新作業（7月以降）
- 9) その他

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

国際トライボロジー会議 東京2015 (ITC TOKYO 2015)

開催日：2015年9月16日(水)～20日(日)

会場：東京理科大学 葛飾キャンパス (〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1)

問合せ：一般社団法人日本トライボロジー学会 事務局 (〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館407-2号室) TEL 03-3434-1926 FAX 03-3434-3556) ホームページ <http://itc2015.com>

産業応用部門2015年度大会

主催・企画：計測自動制御学会 産業応用部門

共催：(一社)日本フルードパワーシステム学会 計測自動制御学会 制御部門

期日：2015年10月27日(火)

会場：東京工業大学 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

第8回トライボロジー入門西日本講座

開催日：2015年11月5日(木)～6日(金)

会場：名城大学天白キャンパス内タワー 75 15階レセプションホール
(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

問合せ：一般社団法人日本トライボロジー学会 事務局 (〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館407-2号室) TEL 03-3434-1926 FAX 03-3434-3556)

申込み：ホームページ <http://www.tribology.jp> から可能です

第58回自動制御連合講演会 (神戸)

主催：システム制御情報学会 (幹事学会)、計測自動制御学会、日本機械学会、化学工学会、精密工学会、電気学会、日本航空宇宙学会

共催：神戸大学 工学研究科・システム情報学研究科

期日：2015年11月14日(土)、15日(日)

場所：神戸大学 六甲キャンパス 工学部教室棟 (神戸市灘区六甲台町1-1)

International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS 2015)
(2015年知的情報処理と生物医科学国際会議)

主催：琉球大学、沖縄科学技術大学院大学、沖縄高等工業専門学校

連絡先：2015年知的情報処理と生物医科学国際会議事務局 実行委員長 玉城 史朗
〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地 琉球大学工学部情報工学科
Tel：098-895-8720 FAX：098-895-8727 E-Mail：shiro@ie.u-ryukyu.ac.jp

EcoDesign 2015 第9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、産業技術総合研究所

会期：2015年12月2日～12月4日

開催場所：東京国際フォーラム (東京都千代田区丸の内3丁目5-1)

事務局：東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻梅田研究室EcoDesign2015事務局

No.15-121講習会 産業に役立つアクチュエータ研究開発の最前線

—最新アクチュエータ要素技術からアクチュエータシステムへの展開— (機素潤滑設計部門 企画)

主催：一般社団法人日本機械学会

開催日：2015年12月4日(金)

問合せ先：機素潤滑設計部門 担当職員 渡邊/電話 (03) 5360-3504

第16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

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

開催時期：平成27年12月14日(月)～16日(水)

事務局：〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学航空・機械研究実験棟3階310室
SI2015 実行委員長 新井 史人 E-mail：arai@mech.nagoya-u.ac.jp
SICE事務局：部門協議会担当 E-mail：bumon@sice.or.jp TEL：03-3814-4121

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正 会 員	海 外 会 員	学 生 会 員	賛 助 会 員
会 員 数 (8月10日現在)	943	16	125	133
差 引 増 減	+8	+1	-2	0

(注1) 正会員の内訳 名誉員12名・シニア員37名・ジュニア員152名

正会員

山田 剛史 (日立建機株式会社)	熊倉 啓 (SMC株式会社)
本間 太基 (SMC株式会社)	平川 鉄磨 (SMC株式会社)
今福 舜一 (SMC株式会社)	片山 泰伸 (SMC株式会社)
山崎 陽太 (SMC株式会社)	笹谷 俊貴 (SMC株式会社)
十時 一晃 (SMC株式会社)	齋藤 英明 (SMC株式会社)
佐野 圭祐 (SMC株式会社)	川原井圭一 (SMC株式会社)
村山 栄治 (ネオリウム・テクノロジー株式会社)	山長 雄亮 ((公財)鉄道総合技術研究所)
増沢 淳 (キャタピラージャパン株式会社)	

学生会員

磯村 鷹弥 (豊橋技術科学大学)	小橋 佑太 (豊橋技術科学大学)
高橋 悠瑚 (豊橋技術科学大学)	正村 孝太 (豊橋技術科学大学)
吉田 昂平 (豊橋技術科学大学)	横山 智洋 (豊橋技術科学大学)
伊藤 雄飛 (豊橋技術科学大学)	村中 契太 (芝浦工業大学)
稲垣 亮則 (芝浦工業大学)	黒澤 和磨 (芝浦工業大学)
塩田 晃弘 (芝浦工業大学)	鈴木 啓史 (芝浦工業大学)
松本 滉平 (芝浦工業大学)	丸井 裕太 (芝浦工業大学)
戸森 央貴 (中央大学)	内田 達也 (横浜国立大学)
梅津 創 (横浜国立大学)	篠崎 陽介 (横浜国立大学)
鈴木 裕二 (横浜国立大学)	

お詫びと訂正

本学会誌46巻、第4号(2015年7月)会告ページ「第34期通常総会終了」におきまして、以下のような記載ミスがありました。

【誤】 学生部門 東京工業大学 矢島 拓実 殿
「揺動型EHDアクチュエータを用いた多関節ロボットの開発に関する基礎的研究」

【正】 学生部門 東京電機大学 高橋 智久 殿
「揺動型EHDアクチュエータを用いた多関節ロボットの開発に関する基礎的研究」

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。

〈フルードパワーシステム学会〉

会 告

(一社)日本フルードパワーシステム学会 賛助会員一覧表

アイシン・エイ・ダブリュ(株)
 (株)明石合銅
 (株)曙ブレーキ中央技術研究所
 アズビル(株)湘南工場
 アズビルTACO(株)
 (株)アドヴィックス
 アネスト岩田株式会社
 イートン(株)
 (株)IHI
 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
 SMC(株)
 SMC(株)中国
 (株)荏原製作所
 (株)大阪ジャッキ製作所
 大瀧ジャッキ(株)
 (株)オプトン
 鹿島通商(株)
 KYB(株)
 KYBエンジニアリング・
 アンド・サービス(株)
 KYB-YS(株)
 (株)桂精機製作所
 神威産業(株)
 川崎重工業(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(株)
 旭東ダイカスト(株)
 協和シール工業(株)
 極東開発工業(株)
 (株)クボタ
 (株)クレアクト・インターナショナル
 クロダニューマティクス(株)
 (株)ケンチク舎
 (株)古河製作所
 (株)工苑
 甲南電機(株)
 (株)コガネイ
 コスモ石油ルブリカンツ(株)
 (株)小松製作所
 (株)小松製作所試験センタ

(株)小松製作所研究本部
 (株)小松製作所油機開発センタ
 (株)阪上製作所
 (株)鷺宮製作所
 佐藤金属株式会社
 三和テック(株)
 三輪精機(株)
 CKD(株)
 (株)島津製作所
 (株)ジェイテクト
 勝美印刷(株)
 JX日鉱日石エネルギー(株)
 ジヤトコ(株)
 新日鐵住金(株)交通産機品カンパニー
 住友建機(株)
 住友重機械工業(株)
 住友精密工業株式会社
 制御機材株式会社
 千住金属工業(株)
 第一電気(株)
 (株)TAIYO
 タイヨーインターナショナル(株)
 (株)タカコ
 (株)タダノ
 ダイキン・ザウアーダンプフォス(株)
 ダイキン工業(株)
 ダイワ(株)
 大生工業(株)
 調和工業(株)
 (株)都筑製作所
 TMCシステム(株)
 (株)TNK
 テラル(株)
 天竜丸澤(株)
 トーヨーエテック(株)
 東京メータ(株)
 TOHTO(株)
 東北特殊鋼(株)
 東明工業(株)
 DOOSAN CORPORATION
 同和発條(株)
 東京計器(株)
 東京計器パワーシステム(株)
 特許機器(株)
 特許庁
 豊興工業(株)

(株)豊田自動織機
 中西商事(株)
 中村工機(株)
 長津工業(株)
 長野計器(株)
 ナブテスコ(株)
 ニッタ(株)
 日新戸器工業(株)
 日本アキュムレータ(株)
 (株)日本アレフ
 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)
 日本電産トーソク(株)
 (一社)日本フルードパワー工業会
 日本ムーク(株)
 (株)野村商店
 (株)ハイダック
 日立建機(株)
 (株)日立建機ティエラ
 (株)日立建機カミーノ
 (株)日立製作所
 日立住友重機械建機クレーン(株)
 廣瀬バルブ工業(株)
 ピー・エス・シー(株)
 フジサンケイビジネスアイ
 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)
 マサモト(株)
 (株)増田製作所
 マックス(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)
 油研工業(株)
 理研精機(株)
 ワールドインシュアランス
 ブローカーズ(株)

編集室

次号予告

—特集「水素燃料自動車とフルードパワー技術」—

〔巻頭言〕「水素燃料自動車とフルードパワー技術」発行にあたって	五嶋 裕之
〔総論〕自動車における水素燃料、水素エネルギー利用に関する展望	山根 公高
〔解説〕水素ステーション関連技術	高橋 宣行
車載用燃料電池スタックの技術開発	荒木 拓人
水素高速充填に関する研究	尹 鍾皓
高圧縮水素ガス用減圧弁の開発	中村 善也
〔会議報告〕第14回スカンジナビアフルードパワー国際会議 (SICFP15) におけるフルードパワー研究開発動向	林 光昭
MOVIC2015におけるフルードパワー技術研究動向	眞田 一志
〔トピックス〕特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム……アクチュエータと流体回路	木原 和幸
フルードパワー分野の産学連携 (大学・企業) 成功事例	加藤 友規
〔研究室紹介〕横浜国立大学 眞田研究室	嘉藤 真英, 岸 和紀, 渡邊 拓巳
〔随想〕夢をかなえて	大島 茂
〔企画行事〕平成27年春季フルードパワーシステム講演会報告	赤木 徹也

平成27年度「フルードパワーシステム」編集委員

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

会告

複写される方へ

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

権利委託先: (一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

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

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

日本フルードパワーシステム学会論文集

第46巻, 第5号 (2015)

平成27年9月

目次

研究論文

1. 円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータの研究
近藤尚生, 竹内綾太, 若澤靖記 33

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.46, No.5

September 2015

Contents

Paper

1. A Study of a Cylindrical Two-Step Pole Type Electro-Magnetic Proportional Actuator

Hisao KONDO, Ryota TAKEUCHI, Yasunori WAKASAWA 33

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

研究論文

円筒形２段磁極式電磁比例アクチュエータの研究*

近藤 尚生**, 竹内 綾太***, 若澤 靖記**

A Study of a Cylindrical Two-Step Pole Type Electro-Magnetic Proportional Actuator

Hisao KONDO, Ryota TAKEUCHI, Yasunori WAKASAWA

In this study, a newly designed electro-magnetic proportional actuator composed of an armature and a stator with a cylindrical two-step pole to control oil hydraulic valves was constructed and examined. In the actuator, two traction forces generated by the magnetic flux flow in the radial air gap and the axial air gap between the armature and the stator are added and become thrust force on the actuator. Furthermore, these air gaps are arranged at two places in the magnetic circuit of the actuator so the total of the traction forces in their air gaps becomes a large thrust force on the actuator. The dimensions of this actuator are 60 mm diameter, by 83 mm length. As a result of measurements of the characteristics of this actuator, it became clear that its thrust force was constant within 2mm of the armature stroke, producing about 290N at an electronic power consumption of 15W. The thrust of this actuator is nearly 2.5 times larger than that of conventional proportional solenoids and linear motors of the same size and power consumption.

The principle of producing thrust force in the newly designed actuator is based on the above mentioned addition of the traction forces in the air gaps. Therefore, the actuators for producing the traction forces in the axial and radial air gaps separately were designed and made. Then, the two traction force curves were measured and a thrust force curve was made up by adding these traction force curves. This thrust force curve agrees well with the experimental curve of this actuator. As a result, a simple design method of this actuator can be shown in this study.

Key words : Fluid power, Electro-magnetic proportional valve, Valve actuator, Two-step pole, High force density

1. 緒 言

油圧アクチュエータの動作速度や力、トルクをコントローラからの電気信号に比例して制御できる電磁比例制御弁を駆動するアクチュエータとして、従来可動コイル式フォースモータ、トルクモータ、リニアモータや比例ソレノイドなどが用いられてきた^{1),2)}。これらのアクチュエータのうち比例ソレノイド以外は永久磁石を用いており、構造がやや複雑で高価である。また、比例ソレノイドは大きさの割に力が出ない。比例ソレノイド以外で簡便な段付磁極形状を持ち、ステータとアーマチャが対向する空気ギャップで軸方向と半径方向の二方向の磁束流れにより推力が発生する電磁比例アクチュエータの研究があるが^{3),4)}、従来の比例ソレノイドに比較して推力は大きくはなく、また動作ストロークが短かった。そこで、既報において圧力制御弁や流量制御弁、サーボ弁などを直動で操作するため

に、大きな推力を発生できる多段磁極式電磁比例アクチュエータを考案し、試作研究を行ってきた結果を報告している⁵⁾⁻⁹⁾。このアクチュエータは、推力が発生する軸方向に互いに対向する多数の突歯を持つステータとアーマチャの多数の突歯が磁極になり、それぞれの突歯が同時に吸引力を発生して引き合い、大きな推力を発生できる。このアクチュエータについて、実験と解析から特性を詳しく調べた結果、多段磁極式電磁比例アクチュエータの性能は高く、設計方法も明確になっているが、多数の磁極を対向させ三次元的に磁束を流す構造のため構造がやや複雑になり、また特性解析は三次元的に行う必要があり、製造および特性解析上やや難点があった。

そこで、著者の一人らは永久磁石を用いないで、基本構造は製作容易な軸対称の円筒形で、アクチュエータの磁気回路内に通常では１箇所である空気ギャップを２箇所に増やして磁極を２段にした円筒形２段磁極式電磁比例アクチュエータを新しく考案して試作し、その性能を調べた¹⁰⁾。このアクチュエータは、ステータとアーマチャが対向する２箇所の空気ギャップそれぞれで、しかも軸方向と半径方向の二方向の磁束流れにより発生する２つの吸引力の全ての合力が推力になるため、従来の比例ソレノイドやリニアモータよりも大きな推力を発生させられる可能性があるこ

*平成27年3月30日 原稿受付

**豊田工業高等専門学校機械工学科

(所在地：愛知県豊田市栄生町2-1)

(E-mail: hkondo@toyota-ct.ac.jp)

***豊田工業高等専門学校専攻科電子機械工学専攻

とがわかった。しかし、詳しい推力特性や設計法などが明らかではなかった。そのため、本研究では、従来の比例ソレノイドと比較して、同じ外形寸法と消費電力で推力がどの程度大きくなり、動作ストロークがどの程度得られるかを実験と解析の両面から明らかにした。さらに、アクチュエータ内の磁束流れや磁束量を調べ、空気隙間内の軸方向と半径方向の磁束流れによるそれぞれの吸引力曲線から、それらを合成して本アクチュエータの推力曲線が得られることを明らかにした。

2. アクチュエータの構造および電磁特性

Fig. 1に試作した円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータの構造図を示す。このアクチュエータは、全て円筒形状のステータ、アーマチャ、巻棒、コイル、ピンで構成されており、Fig. 1は軸方向の断面図である。

ステータはFig. 1のA部、B部でそれぞれ段付形状にしており、アーマチャ角部に対向する角部を持っている。コイルは巻棒に円筒状に巻かれ、巻棒とともにステータ内周部に納められる。アーマチャは巻棒内周面をガイドにして軸方向に自由に動ける。A部、B部の2箇所に対向するステータとアーマチャの角部の間の空気隙間は半径方向に0.05mmになるようにアクチュエータを製作した。また、Fig. 1に示すアクチュエータ各部のしゅう動部および半径方向の空気隙間に関係する部品の寸法公差および同軸度は全て0.01mm以下で製作した。ステータとアーマチャの材料は、入手の容易さからSS400を用いた。また、アクチュエータの外形寸法は直径60mmとした。

Fig. 1に示すアクチュエータは、コイルに電流を流すと磁束がコイルを取り囲むように流れ、AとBの角部ではそれぞれステータ・アーマチャ端面間の空気隙間と半径方向の空気隙間に磁束 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2} 、 ϕ_{r1} 、 ϕ_{r2} が流れる。端面方向の磁束 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2} によりそれぞれ端面吸引力 F_{a1} 、 F_{a2} が発生し、アーマチャ側面の半径方向の磁束 ϕ_{r1} 、 ϕ_{r2} により側面吸引力 F_{r1} 、 F_{r2} が発生する。これら4つの合力が本アクチュエータの推力 F となる。そのため、Fig. 1のアクチュエータについて、

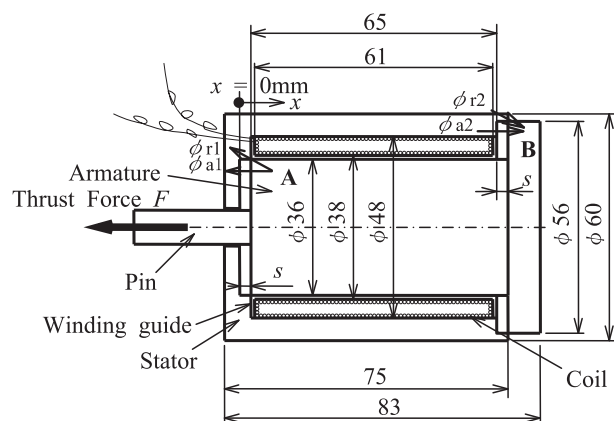


Fig. 1 Structure of the proportional actuator in this work

端面と側面方向の磁束流れの大きさに最も影響すると思われる s 寸法を1, 2, 3, 4mmに変えた4種類のものを試作した。Fig. 1において、アーマチャ端面がステータ端面に接触した位置をアーマチャ位置 $x=0$ として、アーマチャがそこから右へ移動する方向を正とした。

Fig. 2に比例ソレノイドの推力特性曲線を示す^{1),2)}。

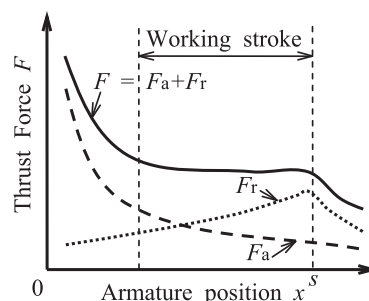


Fig. 2 Force characteristic curves of the proportional solenoid

ステータとアーマチャの対向する端面間の空気隙間を流れる磁束により発生する端面吸引力 F_a と、アーマチャ側面の半径方向の空気隙間に発生する側面吸引力 F_r の合力が推力 F になる^{1),2)}。そして、端面吸引力曲線と側面吸引力曲線の合力曲線が推力特性になり、アーマチャ位置 x が変化しても推力 F が一定になる範囲が比例ソレノイドの動作ストローク範囲になる。本研究の電磁比例アクチュエータも比例ソレノイドと同様に2つの吸引力曲線 F_a 、 F_r を足し合わせたものが推力 F の曲線になる。

本研究の電磁比例アクチュエータの特徴は、Fig. 1に示すように比例ソレノイドと比較して、コイルを扁平にしてステータおよびアーマチャの磁路断面積を大きくしていることである。また、ステータとアーマチャが対向する磁極部を磁気回路的に2段直列にして、アーマチャ変位に対する磁束量の変化を大きくして、大きな推力を発生させられるようにした。このアクチュエータは、コイル断面積が減りコイル巻数が減少するが、磁路断面積を大きくできることと磁極部を2段にすることにより、推力を大きく取り出せるようにした。また、本アクチュエータの構成部品は全て単純な円筒形状であり、製作が容易で安価にできる可能性が大きい。一方、コイルを扁平にしているため、コイル部を縦断する漏れ磁束が比較的大きくなり、推力に対する影響を検討する必要がある。

本研究では、実際にFig. 1に示すアクチュエータを試作して性能評価するとともに、有限要素法解析ソフト¹¹⁾を用いて磁場解析を行い、アクチュエータの推力特性や磁束流れを検討した。Fig. 1に示すアクチュエータは円筒軸対称構造であるため、円周方向の磁束流れは無く、磁場解析は軸方向断面のみの軸対称二次元流れで行うことができる。そのため、比較的容易に磁場解析が行える。

Fig. 3に、試作したアクチュエータのステータおよびアー

マチャと同じ材料のSS400材からリング試料を削り出し、 B - H 曲線を測定した結果を示す。磁場解析では、ステータとアーマチャの磁気特性として、Fig. 3に示すヒステリシス曲線の平均値（図中の丸印）を与えた。また、磁界の強さ H が $16,000 \text{ A/m}$ を超えた領域ではほぼ磁気飽和していると考え、図中の破線で示すように H の増加とともに真空透磁率 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ の勾配で磁束密度 B が増加するとしている。

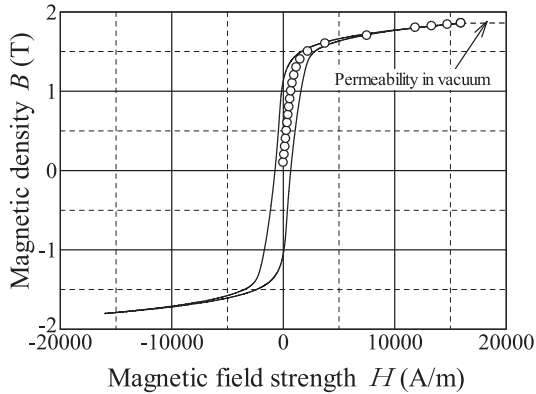


Fig. 3 B - H curve of SS400 in this analysis

Fig. 4およびFig. 5に、試作したアクチュエータ内の磁束線図と磁束密度分布図を解析により求めた結果の一例をそれぞれ示す。これらの図は、Fig. 1に示す断面の軸中心から上半分を示す。Fig. 4に示すように、A部とB部の対向する角形磁極部でそれぞれ磁束はステータとアーマチャの端面

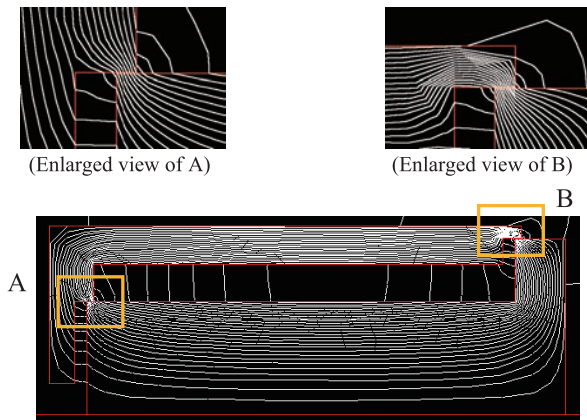


Fig. 4 Magnetic flux diagram
($s = 3.0 \text{ mm}$, $x = 2.0 \text{ mm}$, $NI = 1,106 \text{ AT}$)



Fig. 5 Contour graph of magnetic flux density (Unit [T])
($s = 3.0 \text{ mm}$, $x = 2.0 \text{ mm}$, $NI = 1,106 \text{ AT}$)

方向と半径方向に流れていることがわかる。また、Fig. 5に示すように、角形磁極部の角部で磁束密度が高くなっており、ステータとアーマチャが対向する端面間の空気隙間内も他の空気領域に比べ磁束密度が高くなっている。これらのことから、本研究で考案したアクチュエータは、2段磁極部でそれぞれ2方向に磁束が流れ、これらの磁束流れにより大きな推力を発生できると予測された。

3. 推力特性の実験および解析結果

Fig. 6(a)~(d)に、Fig. 1に示すアクチュエータの s 寸法を $1 \sim 4 \text{ mm}$ に変えたときのアーマチャ位置 x と推力 F の変化について実験値と解析値を比較した結果を示す。Fig. 1に示す本試作アクチュエータの場合、コイル巻棒寸法から計算すると、同程度の外形寸法の比例ソレノイドの消費電力 15 W の時のコイル起磁力 NI (N : コイル巻数, I : コイル電流) は $1,106 \text{ AT}$ (アンペア・ターン) である。この起磁力で推力特性を調べた。

Fig. 6(a), (b)に示すように、 s 寸法が比較的小さいと端面方向の空気隙間の磁束流れが支配的で端面吸引力 F_a が側面吸引力 F_r よりも大きく、2つの力を合成した推力 F はアーマチャ位置 x の変化に対して一定になる範囲が得られない。Fig. 6(c)に示す $s = 3 \text{ mm}$ の場合、端面方向と半径方向の空気隙間の磁束量がほぼ適切な状態であり、推力 F が一定になる x の範囲が得られる。さらに、Fig. 6(d)に示すように s 寸法が 4 mm と大きくなると、今度は半径方向の空気隙間の磁束流れが支配的で側面吸引力 F_r が端面吸引力 F_a よりもやや大きくなり、推力 F の曲線を見ると $x = 2 \text{ mm}$ 付近で落ち込みがある。Fig. 6(a)~(d)より、Fig. 1に示す構造・寸法のアクチュエータは、 s 寸法を 3 mm 程度にすれば推力 F が一定になる特性が得られ、 F が一定になる x の範囲は約 2 mm で、そのときの推力 F は 290 N 程度得られることがわかる。また、 s 寸

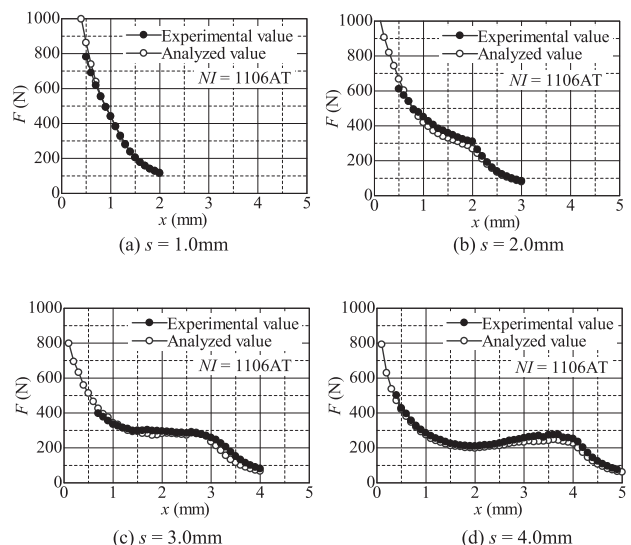


Fig. 6 Comparison of thrust force curves in the case of varying s

法を1～4mmに変化させても、推力 F の実験値と解析値は良好に一致しており、本研究で用いた有限要素法解析の有用性が確かめられた。

次に、Fig. 7に s 寸法が3mmのアクチュエータでアーマチャを $x=2$ mmの位置に固定して、起磁力 NI を変化させたときの推力 F の変化を調べた結果を示す。Fig. 7によれば、250～1800ATの間で起磁力 NI と推力 F は比例している。この比例特性は、Fig. 5に示したように、ステータとアーマチャが対向する2段磁極部の角部先端では磁束が集中して部分的に磁気飽和しており、起磁力 NI が大きくなるにつれて部分的な磁気飽和の範囲が角部先端から順次広がることにより得られている。この現象は、比例ソレノイドの非磁性リングに隣接する三角形の磁性体部分で磁束が集中して、起磁力が大きくなるにつれて三角形の先端から順次部分的に飽和する範囲が広がることにより比例特性が得られる¹⁾のと同様である。

また、消費電力15Wの $NI=1,106$ ATでは、推力 F は比例範囲に入っていることがわかる。このことから、さらに起磁力を大きくすればさらに大きな推力が得られることがわかる。

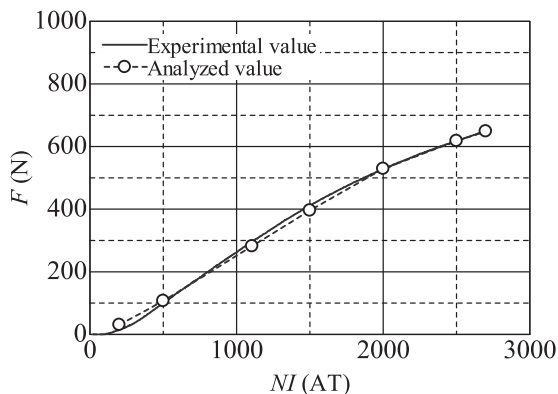


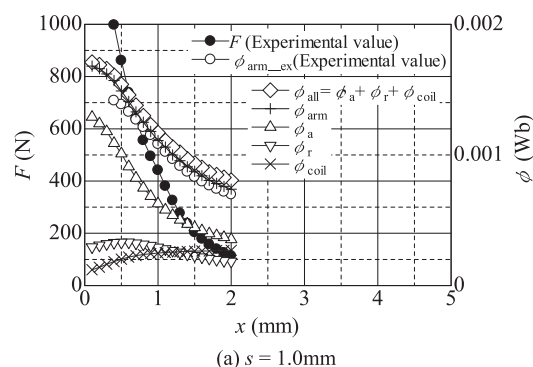
Fig. 7 Relationship between NI and F
($s = 3.0$ mm, $x = 2.0$ mm)

4. 磁束と推力の関係

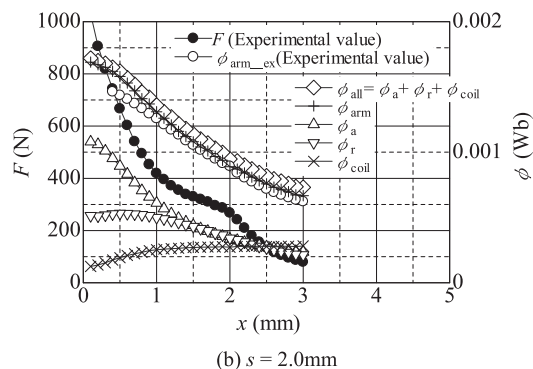
Fig. 8(a)～(d)に s 寸法を1～4mmに変えたときの、アーマチャ位置 x に対するアクチュエータ内の磁束の変化の関係を示す。アクチュエータ内の磁束は、ステータ・アーマチャ端面間の空気隙間に流れる磁束 ϕ_a 、半径方向の空気隙間に流れる磁束 ϕ_r 、コイルを縦断する漏れ磁束 ϕ_{coil} 、アーマチャ軸断面を通る磁束 ϕ_{arm} を有限要素法解析で求めた。また、アーマチャ軸断面を通る磁束はさぐりコイルで実測しており、その値を ϕ_{arm_ex} とした。また、Fig. 6に示した推力 F の実験値も共に示している。

Fig. 4の磁束線図より、アーマチャ軸断面を通る磁束 ϕ_{arm} は、上述の磁束 ϕ_a 、 ϕ_r 、 ϕ_{coil} の合計磁束 ϕ_{all} と等しくなるはずである。Fig. 8(a)に示す $s = 1$ mmの場合について見ると、

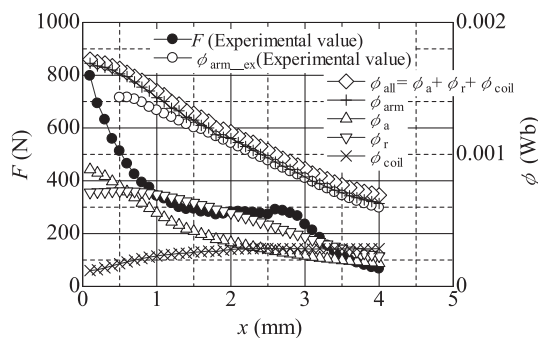
ϕ_{arm} と ϕ_{all} は一致しており、また、さぐりコイルで実験的に測定した ϕ_{arm_ex} ともほぼ一致していることが分かる。これにより、端面方向と半径方向の空気隙間およびコイルを縦



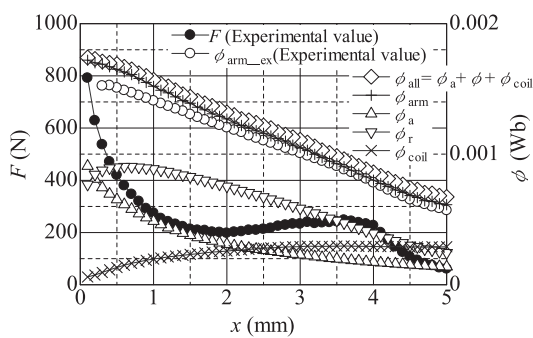
(a) $s = 1.0$ mm



(b) $s = 2.0$ mm



(c) $s = 3.0$ mm



(d) $s = 4.0$ mm

Fig. 8 Relationship between F and ϕ in the case of varying s

断する各磁束 ϕ_a , ϕ_r , ϕ_{coil} はほぼ妥当に解析されていると考えられる。

s 寸法が1mmと小さいFig. 8(a)の場合、端面方向の空気隙間の磁束 ϕ_a が総磁束 ϕ_{in} に対して占める割合が大きく、推力 F の曲線に対して端面吸引力 F_a が支配的になっていることが F の曲線形状からわかる。逆に s 寸法が4mmと大きいFig. 8(d)の場合、半径方向の空気隙間を流れる磁束 ϕ_r が ϕ_{in} に対して占める割合が大きく、推力 F に対して側面吸引力 F_r が支配的になっていることが F の曲線形状からわかる。Fig. 8(b)の $s = 2$ mmの場合は、アーマチャ位置 $x = 1 \sim 3$ mmの範囲で ϕ_a と ϕ_r がほぼ等しいが、推力 F の曲線形状から見ると、端面吸引力 F_a の方が側面吸引力 F_r よりもやや影響が大きいと考えられる。Fig. 8(c)の $s = 3$ mmの場合は、アーマチャ位置 $x = 1 \sim 3$ mmの範囲で ϕ_r の方が ϕ_a よりも30～60%程度大きい、2つの吸引力 F_a と F_r を足した推力 F の曲線はほぼ一定となっており、電磁比例アクチュエータとしての動作ストロークが得られ、本研究のアクチュエータの場合、 s 寸法は3mmが適切であることがわかる。また、Fig. 8(a)～(d)に示すように、コイルを縦断する漏れ磁束が総磁束に対して約10～40%ある。ただしFig. 8(c)の $s = 3$ mmのアクチュエータで電磁比例アクチュエータとしての動作ストローク範囲 $x = 1 \sim 3$ mm内ではこの割合は16～32%程度であるが、この漏れ磁束がアクチュエータの性能に対する影響は今後検討予定である。

5. 端面吸引力と側面吸引力が各々単独で発生するアクチュエータ

本研究のアクチュエータで、アーマチャ位置 x の変化に対して推力 F を一定の大きさにできるアクチュエータ寸法を設計するためには、第3章～4章で述べたようにいくつかの寸法のアクチュエータを試作・評価したり、いくつかの寸法のアクチュエータでそれぞれアーマチャの位置を変えるごとに解析モデルを作成して解析しなくてはならない。このように、良好な特性のアクチュエータを設計するには多くの費用や時間、手間がかかってしまう。本研究のアクチュエータの推力特性は、原理的に前述のように端面吸引力と側面吸引力を合成することにより求められることが明らかになった。そこで、これら2つの吸引力をそれぞれ単独で発生できるアクチュエータを製作し、これらのアクチュエータで得られた吸引力曲線を合成して推力特性曲線を求める試みを行った。この方法の妥当性が明らかになれば、アクチュエータの外形寸法などを変えた場合でも簡便に本研究のアクチュエータの設計が可能になる。

Fig. 9およびFig. 10に、端面吸引力と側面吸引力をそれぞれ単独で発生できるアクチュエータの構造図を示す。Fig. 9に示すアクチュエータは、Fig. 1のアクチュエータと比べるとステータA部とB部に段付が無く、またステータ対

向するアーマチャ2箇所の方角磁極部で半径方向の空気隙間が無く、Fig. 9に示すように端面方向のみにしか磁束が流れない。そのため、Fig. 9に示すアクチュエータは端面吸引力のみしか発生しない。一方、Fig. 10に示すアクチュエータは、アーマチャ端面に対向する2箇所のステータ端面には非磁性材料部品がはめ込んであり、ステータとアーマチャの対向する空気隙間は半径方向しか無い。そのため、ステータとアーマチャ間の磁束流れは半径方向しか存在しないため、Fig. 10に示すアクチュエータは側面吸引力しか発生しない。

Fig. 11とFig. 12に、Fig. 9とFig. 10に示したアクチュエータのそれぞれのアーマチャ位置 x に対する吸引力 F_a および F_r を示す。Fig. 11はいわゆるブランジャ形のソレノイドで、端面吸引力 F_a しか発生しないアクチュエータの吸引力特性を示している。また、Fig. 12はいわゆる漏えい形のソレノイド¹²⁾で、側面吸引力 F_r しか発生しないアクチュエータの吸引力特性を示していることがわかる。また、Fig. 11とFig. 12の各吸引力特性の実験値と解析値を比較すると共に良好に一致しており、Fig. 9およびFig. 10のアクチュエータの磁場解析も有用であることがわかる。

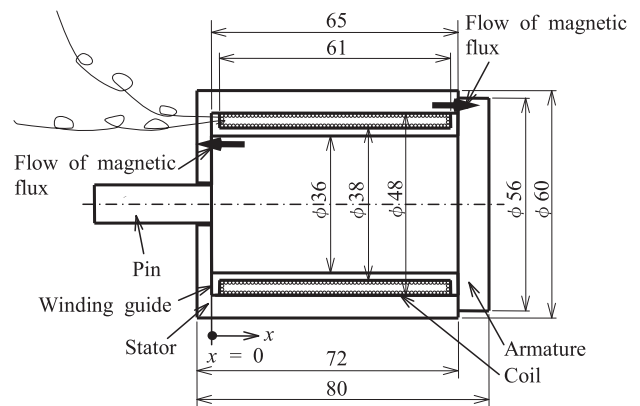


Fig. 9 Structure of the experimental actuator acting on the armature in the axial air gap

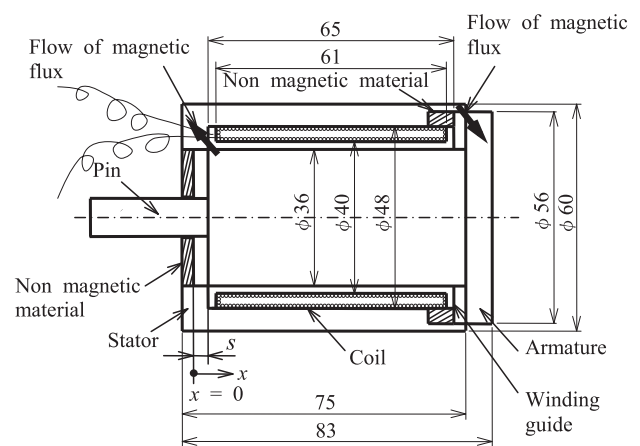
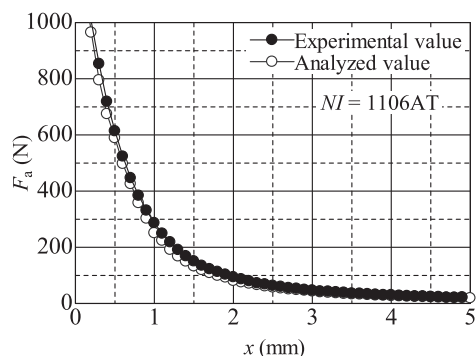
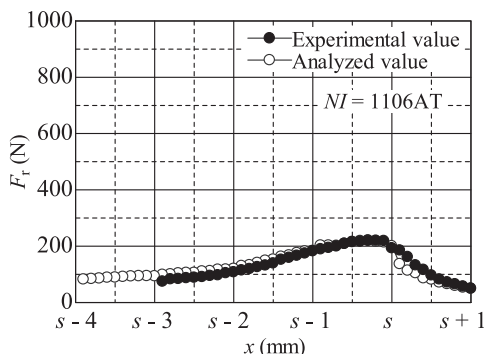


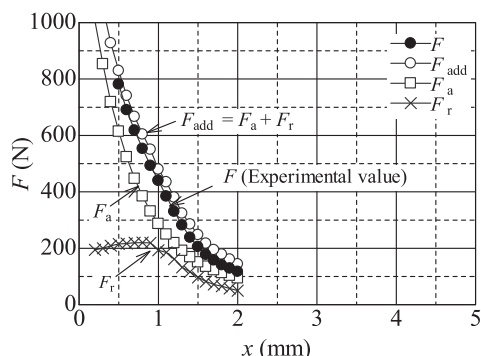
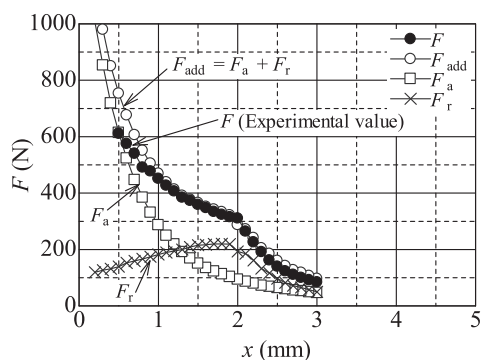
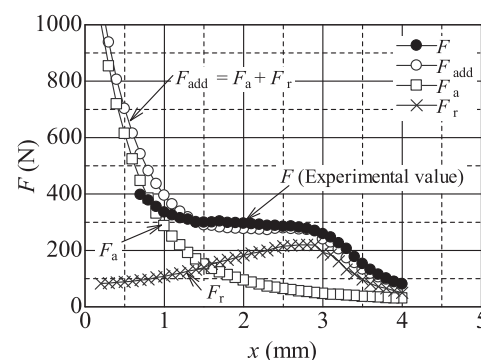
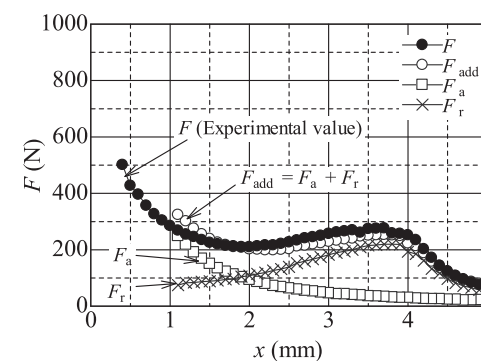
Fig. 10 Structure of the experimental actuator acting on the armature in the radial air gap

Fig. 11 Relationship between x and F_a Fig. 12 Relationship between x and F_r

6. 端面吸引力と側面吸引力の合成

Fig. 13(a)~(d)に第5章で述べた端面吸引力と側面吸引力が各々単独で発生するアクチュエータを使って測定した各々の吸引力曲線を合成して、Fig. 1に示した本研究のアクチュエータの推力曲線を求めて示した。

Fig. 13(a)は、 s 寸法が1 mmの場合について、Fig. 11およびFig. 12に示した端面吸引力 F_a と側面吸引力 F_r の両曲線を合成して推力曲線 F_{add} を求めた結果を示す。また、 F_{add} と $s = 1$ mmのアクチュエータの推力 F を測定した推力曲線との比較を示す。Fig. 13(a)によれば、両者の推力曲線は良く一致していることがわかる。 s 寸法が1 mmの場合と同様に s 寸法を2, 3, 4 mmにして推力曲線を求めた図をそれぞれFig. 13(b)~(d)に示す。Fig. 13(b)~(d)によれば、2つの吸引力 F_a と F_r を合成した推力曲線 F_{add} とFig. 1に示す各 s 寸法のアクチュエータの推力曲線 F を比較すると、アーマチャ位置 x が1 mm以下で両曲線の差が大きくなるが、 x が1 mm以上では両曲線は良く一致している。 x が1 mm以下では、Fig. 1に示した本研究で考案したアクチュエータにおいて、ステータとアーマチャの半径方向に対向する角形磁極どうしの重なり量が大きくなる。そのため、Fig. 8(b)~(d)に示したように磁極間の空気隙間に流れる磁束は、端面方向の流れに対して側面方向の流れが多くなる。その結果、Fig. 9に示した端面のみしか磁束が流れないアクチュエータで求めた端面吸引力 F_a に対して、 x が1 mm以下では本研究のアクチュエータの端面吸引力が小さくなり、Fig. 13(b)~(d)に示した

(a) $s = 1.0$ mm(b) $s = 2.0$ mm(c) $s = 3.0$ mm(d) $s = 4.0$ mmFig. 13 Relationship between forces F_a , F_r and F

ように実験値 F の方が F_a と F_r を足した F_{add} よりも小さくなったと考えられる。しかし、Fig. 13(b)~(d)に示すように、推力 F が一定になる動作ストローク範囲では推力曲線 F_{add} と F は良く一致している。以上のことから、端面吸引力と側面吸引力が単独で発生するアクチュエータの2つの吸引力曲線を合成して、本研究のアクチュエータの推力曲線を求めることにより、アーマチャ位置 x の変化に対して推力 F を一定にするための s 寸法を簡便に求めることができることがわかった。このことにより、本電磁比例アクチュエータを簡便に設計できることを明らかにできた。

7. 他の電磁比例アクチュエータとの特性比較

Fig. 14にアクチュエータに加える電力と推力の大きさの関係について、リニアモータおよび比例ソレノイドと本研究のアクチュエータで比較した結果を示す。また、Fig. 14に示したアクチュエータの諸元をTable 1に示す。

Fig. 14に示したアクチュエータは、Table 1に示すように外形寸法はほぼ同じである。Fig. 14のリニアモータは、A社のカタログ値の消費電力90Wでの推力をもとに計算で求めたものであり、比例ソレノイド(1)はB社のカタログ値を表し、比例ソレノイド(2)は実測値である⁵⁾。また、本研究

Table 1 Dimension of electro-magnetic proportional actuators shown in Fig. 14

Actuator	Size	Working stroke
Cylindrical two-step type ($s = 3\text{ mm}$)	60mm diameter × 83mm length	2 mm
Linear motor	60mm square × 87mm length	± 1 mm
Proportional solenoid (1)	60mm square × 123mm length	6 mm
Proportional solenoid (2)	60mm square × 117mm length	37mm

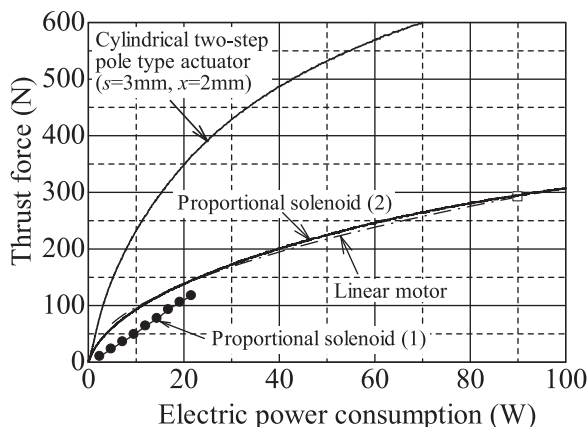


Fig. 14 Comparison of thrust force characteristics with electro-magnetic proportional actuators

の円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータは、 s 寸法が3mmの試作品の実測値から求めたものである。本研究の試作アクチュエータについて、室温23℃で消費電力15Wに相当する電流を連続でコイルに流し続けたところ温度上昇を続け、約136℃で温度は飽和した。一般的に用いられる絶縁軟銅線の許容温度は、エナメル線で105～155℃である¹³⁾。このことから、消費電力15Wで各アクチュエータの推力を比較すると、2段磁極式アクチュエータはリニアモータや比例ソレノイドに比較して25倍近い推力が得られる。さらにアクチュエータの放熱性を向上させて15Wよりも大きな電力をかけられれば、さらに大きな推力を得ることができる。また、Table 1より本アクチュエータは動作ストローク範囲が比例ソレノイドと比較すると短い、前述したように構成部品が全て単純な円筒形状で製作が容易であり、ストロークがやや短くても大きな推力が必要な用途に適している。なお、本研究のアクチュエータはアーマチャ直径を大きくすると、ステータと対向する端面の面積はほぼ直径の2乗に比例して大きくなる。一方、半径方向のステータとアーマチャ磁極間の重なり部分の対向面積は、アーマチャ直径と同じ比率でしか大きくならない。そのため、端面吸引力は側面吸引力よりも大きくなる割合が高く、推力が一定になる動作ストローク範囲を得るためにはFig. 13(a)~(d)の関係から s 寸法を大きくする必要がある。その結果、アーマチャ直径を大きくするとアクチュエータの推力が大きくなると共に動作ストロークも大きくなると考えられる。このことは比例ソレノイドでも同様で、比例ソレノイドの推力を大きくするためには外形寸法が大きくなり、動作ストロークもさらに大きくなる。逆に、動作ストロークを小さくすると小形化できるが、推力も小さくなってしまふと考えられる。

今後、本研究のアクチュエータがさらに大きな推力を発生できるように、コイルの銅部分とステータおよびアーマチャの鉄部分の比率や放熱性の検討を行う予定である。また、アクチュエータの外形寸法を変えた場合、推力や動作ストローク範囲が外形寸法に対してどのように変化するのか詳しく調べる予定である。

8. 結 言

油圧比例制御弁を駆動する電磁比例アクチュエータとして、円筒形2段磁極を持ち、ステータとアーマチャが対向する軸方向と半径方向の二方向の空気隙間に流れる磁束により発生する2つの吸引力の合力が推力になるアクチュエータを考案し、試作した。外形寸法が直径60mmで長さ83mmの試作アクチュエータについて推力特性を測定した結果、動作ストローク2mmの範囲で推力がほぼ一定になり、動作ストローク範囲内の推力は約290N得られた。本電磁比例アクチュエータは、外形寸法がほぼ同じリニアモータや比例ソレノイドと比較すると、室温時の消費電力15Wで25倍近

くの推力が得られることがわかった。

また、アクチュエータ内に流れる磁束を調べ、これらの磁束流れにより発生する端面吸引力と側面吸引力の合力が本アクチュエータの推力になることを明らかにした。そして、二つの吸引力をそれぞれ単独で発生できるアクチュエータを試作し、このアクチュエータで得られた2つの吸引力曲線を合成することにより、本研究のアクチュエータの推力曲線が求まり、本研究のアクチュエータを簡便に設計できる方法を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 田中裕久：油空圧機器のための電気—機械インターフェイス，油圧と空気圧，Vol. 22, No. 1, p. 49-56 (1991)
- 2) Backe, W. : Grundlagen und Entwicklungstendenzen in der Ventiltechnik, O+P, Vol. 34, No. 7, p. 496-505 (1990)
- 3) 田中裕久，増田健二：二段形電気油圧圧力比例弁に関する研究，日本機械学会論文集（C編），Vol. 55, No. 510, p. 503-507 (1989)
- 4) 久保忠正，田中裕久：比例ソレノイドの吸引特性に関する研究，昭和62年秋季油空圧講演会講演論文集，p. 89-92 (1987)
- 5) 近藤尚生，日比昭：多段磁極式電磁比例アクチュエータの試作研究，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 36, No. 4, p. 96-101 (2005)
- 6) 近藤尚生，日比昭：多段磁極式電磁比例アクチュエータの試作研究（第2報：アーマチャの磁路断面積と突歯断面形状の影響），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 38, No. 1, p. 7-12 (2007)
- 7) 近藤尚生，日比昭：多段磁極式電磁比例アクチュエータの試作研究（第3報，アーマチャの寸法諸元が性能に及ぼす影響），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 39, No. 6, p. 110-115 (2008)
- 8) Kondo, H., Hibi, A. : A Study of a Multi-step Pole Type Electro-magnetic Actuator for Controlling Proportional Hydraulic Valve, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol. 2, No. 2, p. 9-14 (2009)
- 9) Kondo, H., Kurata, Y. : A Study of a Multi-step Pole Type Electro-magnetic Actuator for Controlling Proportional Hydraulic Valve (Magnetic Flux Flow in the Actuator), Proceedings of 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, p. 415-422 (2014)
- 10) 近藤尚生，加藤新，山口健二：複数の角形磁極部を有する油圧比例弁用電磁比例アクチュエータの試作研究，日本機械学会東海支部第57期総会講演会講演論文集，No. 083-1, p. 77-78 (2008)
- 11) サイバネットシステム(株)：ANSYS磁場解析セミナーノート（2011）
- 12) 山口惇，田中裕久：油空圧工学，コロナ社，p. 87 (1986)
- 13) 中田高義，伊藤昭吉，河瀬順平：有限要素法による交直電磁石の設計と応用，森北出版，p. 11 (1991)

〒105-0011 東京都港区芝公園三丁目五-22 電話(03)3433-8441 FAX(03)3433-8442
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 東京0011013133690

印刷所 勝美印刷株式会社
東京都文京区白山1-13-7 アクア白山ビル五階