

## 解 説

## 学術貢献賞を受賞して（マイクロ液圧をめざして）\*

横田 眞一\*\*

\* 平成 27 年 6 月 2 日原稿受付

\*\* 東京工業大学名誉教授，〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

## 1. はじめに

このたび学術貢献賞を頂戴できたのは著者にとって大変光栄なことと感謝している。東京工業大学に入学して以後、修士課程に進んだのは 42 年前になる。機械制御に興味があることもあって、池邊洋研究室に世話になることになった。池邊研において高機能油圧サーボの修論テーマをもらい、ビッカースの可変容量モータと東京精密測器のサーボ弁を用いて試作した<sup>1)</sup>ところ、いままで見たことのない力強い動きに感動して、以来油圧制御の虜となった。油圧の最大の特長はそのパワー密度の高いことである。その後経緯はあったものの、油圧を含む液圧にこだわり、マイクロ液圧<sup>10)</sup>を提唱して、それを実現すべく 20 年が経過した。この 40 有余年にわたり液圧の研究に携わって今日に至っている。

## 2. これまでの主な研究

## 2. 1 管内非定常流れ

現名誉教授である中野和夫研究室の助手として、LDV による管内流速測定と差分法によるシミュレーションを駆使して、液圧管路の動特性および管路内非定常流量計測の研究<sup>3)</sup>（平成元年、日本油空圧学会より論文賞を受賞）を進めた。この管路内非定常流量計測手法は、管中心流速から動特性を逆算して流量を推定するものである。これらをもとに「円筒形絞りの周波数特性の研究」にまとめて<sup>2)</sup>、1982 年に東京工業大学より工学博士の学位を得ている。

## 2. 2 油圧サーボシステムと 6 軸マニピュレータ

その後、積層 PZT 素子を用いた高速電気油圧サーボ弁の開発<sup>4)</sup>、および古河電工と共同で外乱オブザーバを応用した、活線作業用 6 軸油圧マニピュレータのロバスト制御<sup>5)</sup>の研究を進めた。これに関連した論文<sup>6)</sup>に対して平成 11 年に日本油空圧学会より論文賞を頂戴している。

## 2. 3 CPS (Constant Pressure Systems)を用いた車用エネルギー回生システム

1995 年より日本油空圧学会（現：日本フルードパワーシステム学会）と日本油空圧工業会（現、日本フルードパワー工業会）の共同研究として、「CPS を用いた車用エネルギー回生のフィージビリティスタディ」と題して、CPS 油圧回生駆動によるハイブリッド車の可能性を探る共同研究が、日本機械工業連合会の援助のもとで、FFC モータの開発者である島津の喜多氏を委員長に、また著者が幹事となって、試作実験<sup>8)9)</sup>を含めて 6 年にわたり実施された。当時上智大池尾茂教授、東京工科大一柳健教授と共同で、実車による実験を通して、フライホイールと FFC (Fluid Force Couple)ポンプの組み合わせの油圧による自動車パワーの回生の十分な可能性は示せたが、ポンプでの騒音が課題として残った。

## 2. 4 機能性流体の液圧への応用

教授に昇任した時期に、当時吉田和弘准教授（現教授）とともに液体駆動によるマイクロマシン<sup>7)</sup>に軸足を替えつつあるときに、知人を通して機能性流体のひとつである ERF を枝村氏から紹介され、1994 年に千葉大の大坪教授の三名で ERF (Electro-rheological Fluid)の共同研究を始めた。その後、粒子分散系 ERF の新たな媒質を探る過程で、1995 年 ECF (Electro-Conjugate Fluid)と呼ぶ機能性流体が見いだされ、後に日本、USA、EU で特許が成立した。特許申請に際して、今後の応用についての検討を行い、ジャイロを含め実現した応用の大部分はこの時点で予定した。

## 2. 5 機能性流体を応用したマイクロアクチュエータ

また、学術領域研究を進めるために、「次世代アクチュエータ技術の予測調査研究」を東大樋口俊郎教授、当時岡山大学（現東工大）鈴森康一教授らとともに実施して、平成14年度科学研究費補助金、基盤研究(C1)研究成果報告書2002にその結果をまとめて、それを足がかりに、樋口教授を中心に2005年～2010年の間、学術領域研究プロジェクト「ブレークスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」を進めた。著者は広報委員として、テーマ選定、HP充実および展示会参加提案などその活動の活性化に貢献した。個別の研究としては、「機能性流体を応用したマイクロアクチュエータ」というテーマで、5年にわたり研究を進めた。共同研究なども展開され、これらの研究成果は、数多くの論文誌や、著書「アクチュエータ工学」；養賢堂(2004)、「Micro Actuators, Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs」；Springer (2010)、「実用新アクチュエータ」；NTS (2011) に報告されている。

## 2. 6 液体駆動によるマイクロマシンの実現

一立方 cm 程度のマイクロ液圧システムを可能とするためには、ポンプを含む高機能なアクチュエータを欠くことができないが、市場で手に入るものはほとんどない。そこで ERF, MRF(Magneto-rheological Fluid), ECF<sup>10)</sup>などの機能性流体を応用したマイクロアクチュエータ創成を目指した研究を進めてきた。なかでもマイクロセンサとして、ECF レートジャイロ<sup>13)</sup>について、多摩川精機と共同で開発した。2次元マイクロジャイロの論文<sup>14)</sup>について、2013年に日本機械学会より論文賞を受賞している。

## 3. マイクロ液圧の実現を目指して

液圧の限界の探求への興味もあり、ECFを用いて、一立方 cm 程度のマイクロ液圧システムを実現することを目指してきた。そのため、とくに ECF について、マイクロモータ、マイクロポンプの高性能化を指向して研究開発を試みている。機能性流体の一種である ECF（電気共役流体）ジェットが発生する圧力を用いると、マイクロ液圧源（マイクロポンプ）を実現できる。ECF は誘電液体の一種であり、物性値（導電度、粘度）の一定の領域にあるものと定義して特許（一例：特許番号 3157804, H13 など）が成立している。ECF に浸した例えば針のような形状の、電界が不均一となる電極対間に高電圧をかけると電極よりジェットが発生する。現在は、金俊完准教授が加わったことで MEMS 技術を用いた ECF ジェット発生電極対の微小化、高精度化に取り組み<sup>15)</sup>、マイクロ液圧システムの高パワー密度化を精力的に行ってきた。一立方 cm 程度の高集積された高圧 ECF マイクロポンプが実現できると、マイクロ液圧システムの実現が可能となる。この ECF ジェットの発生メカニズムは十分に解明されていないが、検討が進みつつある。現状では、ジェット発生の主因は、Onsager 効果と電荷注入の二つと考えている。Onsager 効果によりジェットが生じることは実験とシミュレーションを用いて、金らにより一部確かめられている。電荷注入については、電極の金属材料の Debye 温度がそのジェットの強さに影響していることが、竹村らにより確かめられている。

### 3. 1 ECF ジェット発生器とポンプ内蔵アクチュエータ

ECF ジェット発生のための電極対の形状は、ジェット発生に大きな影響を与えるので、平面電極、針ーリング電極対、三角柱ースリット電極対などを提案して検討してきた。このうち、三角柱スリット電極対 (TPS)<sup>15)</sup>は、MEMS 技術を用いたマイクロ電極であり、この形状は、2次元のプリント基板上のエッチング（シードレイヤ）を電鍍により2.5次元にして針ーリング電極対の3次元効果を確保したものである。この電極対の特長は、まず、再現性に優れ、集積性も良い。直列にすることで高圧が得られ、並列で流量を増加できることである。

### 3. 2 MEMS 技術を用いた ECF マイクロポンプ機能

MEMS 技術を用いた三角柱スリット電極対 (TPS) は、高さ 500 $\mu\text{m}$ 、幅 1mm、スリット電極幅 200 $\mu\text{m}$  を基本寸法としている。この電極対の表面は金めっきを施しているが、電極対の MEMS による詳しい製作方法については文献<sup>15)</sup>を参照されたい。直列に並べると電極対数に比例した圧力が得られることを確認している。なかなかきれいに電鍍することが難しかったが、ノウハウを蓄積することにより、どうにかきれいな電極を得られるようになった。図1に試作した電極対の SEM 写真の一例を示す。流量に関しては、流路隔壁が無い場合多少減少するが占有面積は小さくでき、隔壁がある場合に並列した数に比例した流量が得られる。体積あたりのパワー密度は 270mW/cm<sup>3</sup> (3kV 印加時) となり、針ーリング電極対のそれを大きく越えている。さらに、平面上に広げた電極対アレイ基板を高さ方向に積むことにより、容易に3次元に電極対アレイを展開できる。

### 3. 3 マイクロポンプの高圧力化の試みと今後の可能性

微小化特性の知見をもとに高集積マイクロポンプを設計して製作した<sup>16)</sup>。図2にその電極対アレイと SEM 写真を示

す。その寸法はカバーを除いて縦10mm横10mm厚さ1mmであり、基本的な電極ギャップは100 $\mu$ mで、その狭い空間に、極性を工夫した119対もの電極対を直列に集積している。形状についても微小化特性実験の知見をもとにして変更を加えている。この体積0.2cm<sup>3</sup>のポンプで、ECFとしてFF909EHA2を用いて、印加電圧1.5kVで、0.43MPaの圧力が発生できた。このポンプを用いると、図3に示す偏心フィンガを0.3MPaの圧力で180度曲げるまで駆動できる。これらのことから、小さなサイコロ程度の1cm<sup>3</sup>以下の体積のポンプで圧力1MPaは十分発生できると考えている。さらにすきまをマイクロ化してさらに積層化できれば同程度の圧力に対して必要な印加電圧はさらに低く、1kV以下にすることが容易に可能である。先に述べた微小化実験とアレイ状マイクロ電極整列に対するシミュレーション結果を総合すると、図4に示すマイクロ三角柱アレイが実現できると仮定した場合、体積あたりのパワー密度を現在の13倍の3.8MW/m<sup>3</sup>にすることが可能となる。現状での問題は、加工方法にあり、MEMS技術でも現状の方式ではある程度の困難を伴うと思われるが、このようなデバイスが実現されることを夢見ている。

#### 4. おわりに

電気油圧サーボシステムに魅せられて40年、マイクロ液圧の実現を夢見て、20年その実現に向けて検討してきた。図5は最近、体積が1.5cm<sup>3</sup>以下のマイクロポンプの、現状での体積当たりのパワー密度を著者がまとめたものである<sup>17)</sup>。著者らのECFポンプが世界中のほかのポンプに比べて一桁以上高い値を示しているが、まだまだマイクロ液圧に十分なものではない。パワー密度は1MW/m<sup>3</sup> (1W/cm<sup>3</sup>)は必要と考えている。現時点で機能性流体ECFが発生するジェットを用いて、体積1cm<sup>3</sup>以下で0.4MPaの圧力を発生できるマイクロポンプが実現できることを確認した。ここまで来られるとは当初考えていなかったが、ECFの微小化特性を信じてきた成果である。マイクロ液圧システムの実現が近いと感じている。また、マイクロ液圧研究に興味をもっていただき、IMechEから2012年にBramah Medalが授与された。Bramah氏は、イギリス人で18世紀の油圧プレスなどの発明家であり、この受賞はアジアでは、はじめてである。著者としては、マイクロ液圧の分野が今後さらに発展して、実用化されていくことを期待している。この場をお借りして、これまでに著者と共に研究に協力いただいた学生諸氏と、恩師中野和夫名誉教授をはじめとする共同研究者としての教職員各位の研究に対する熱意と努力に敬意と謝意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 池邊洋, 横田: 負荷適応形サーボ系, 油圧と空気圧, Vol.9, No.1, p.52-58 (1978)
- 2) 横田, 中野: 円筒形絞りの圧力流量周波数特性, 油圧と空気圧, Vol.13, No.3, p.67-73 (1982)
- 3) 中野, 横田: 円筒形絞りの動特性を利用した瞬時流量計, 油圧と空気圧, Vol.17, No.4, p.311-317 (1986) [日本油空圧学会論文賞]
- 4) 横田, 平本, 上西: 積層P Z T素子を用いた高速電気油圧デジタル弁, 油圧と空気圧, Vol.20, No.7, p.604-610 (1989)
- 5) 山本, 横田, 田村: 配電作業用電気油圧マニピュレータの高精度制御 第3報 6軸マニピュレータの高精度軌跡制御, 油圧と空気圧, Vol.26, No.7, p.896-902 (1995)
- 6) 横田, 篠原, 安, 山本: 3軸電気油圧マニピュレータのコンプライアンス制御, 日本油空圧学会論文集, Vol.29, No.1, p.23-29 (1998) [日本油空圧学会論文賞]
- 7) 吉田, 篠原, 横田: 流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究 第2報 単一の圧力供給チューブを用いた小形管内走行マシンの試作, 油圧と空気圧, Vol.25, No.7, p.857-863 (1994)
- 8) 中澤, 横田, 喜多: 車両駆動用定圧力源システムに関する研究 第1報 フライホイールポンプ/モータによる省燃費効果に関するシミュレーション, 油圧と空気圧, Vol.27, No.7, p.920-925 (1996)
- 9) 横田, 近藤, 西島, 喜多: 定圧力源システムを用いたフライホイールハイブリッドカー-台上試験装置の試作および市街地走行模擬実験, 機論, 68巻671号C, p.2127-2132 (2002)
- 10) 阿部, 横田, 竹村, 枝村: ECFジェットによる発生圧力を応用したチューブ形ECFマイクロアクチュエータ, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.37, No.5, p.55-60 (2006)
- 11) K. Takemura, F. Yajima, K. Edamura, and S. Yokota: Integration of Micro Artificial Muscle cells using Electro-conjugate Fluid, the *Journal of Sensors and Actuators A*, Vol.144, Issue2, p.348-353 (2008)
- 12) 横田眞一, 基調講演「マイクロ液圧」, 平成22年度秋季フルードパワーシステム講演会, p.3-6 (2010)

- 13) 横田, 今村, 鈴木, 竹村, 枝村, 熊谷: 電界共役流体を用いたマイクロ液体レートジャイロの研究, 機論, 75 巻 750 号 C, p.496-502 (2009)
- 14) 尾川, 横田, 枝村, 竹村: 電界共役流体を用いた 2 軸液体マイクロレートジャイロの開発, 機論, 77-773C, p.204-211 (2011) [日本機械学会論文賞]
- 15) J-W Kim, T. Suzuki, S. Yokota, and K. Edamura: Tube-type micropump by using electro-conjugated fluid (ECF), the *Journal of Sensors & Actuators A. Physical*, Vol.174, p.155-161 (2012)
- 16) 古木, 金, 横田, 枝村, MEMS 技術を用いた集積化による ECF マイクロポンプの高圧化, 機学山梨講演会 2014 論文集, 153 (2014)
- 17) Shinichi Yokota, A Review on micropumps from the viewpoint of volumetric power density, the *Journal of Mechanical Engineering Reviews*, Vol.1, No.2, p.1-11 (2014)

### 著者紹介



よこた しんいち

横田 眞一 君

1949 年 8 月 22 日生まれ.

1975 年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了, 同年, 同大学助手, 助教授を経て, 1995 年東京工業大学精密工学研究所教授, 2006~2008 年同研究所所長, 2013~2015 年東京工業大学経営協議会委員, 2015 年同大学名誉教授, 現在に至る. 工学博士. 油圧サーボシステム, 機能性流体を応用したマイクロアクチュエータ・センサ・システムの創成研究に従事. 日本機械学会フェロー, 日本フルードパワーシステム学会フェロー(2010-2012 会長)などの 会員. A Regional Editor of Elsevier B. V. Journal, Sensors and Actuators A: Physical, An Editorial Board member of Journal of Systems and Control Engineering, IMechE, 日本機械学会論文賞 2012 受賞, IMechE, Bramah Medal 2011 受賞, IMechE, Donald Julius Groen Prize 2006 など受賞.  
E-mail:syokota.pi@gmail.com

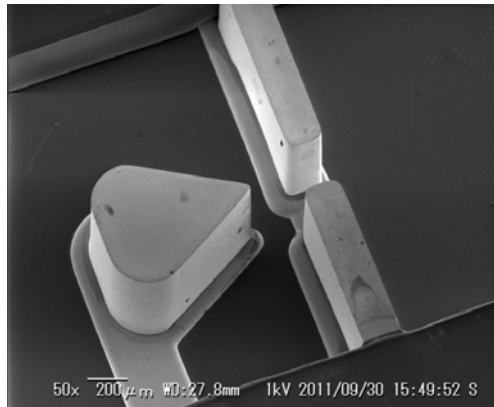


図1 試作した ECF マイクロポンプ用電極対

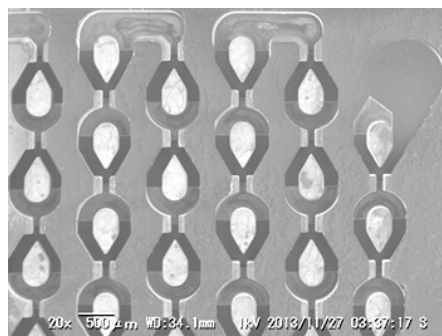
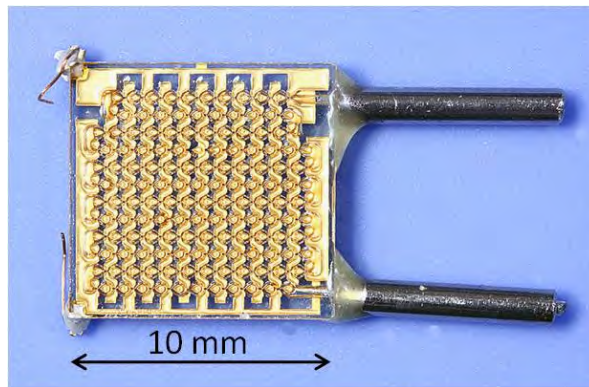


図2 試作した高圧化 ECF マイクロポンプ



図3 偏心フィンガのECFポンプ駆動

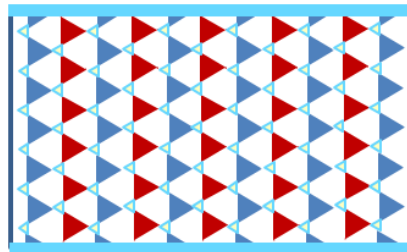


図4 微小化した100 $\mu\text{m}$ スリットアレイ状三角柱マイクロ電極対

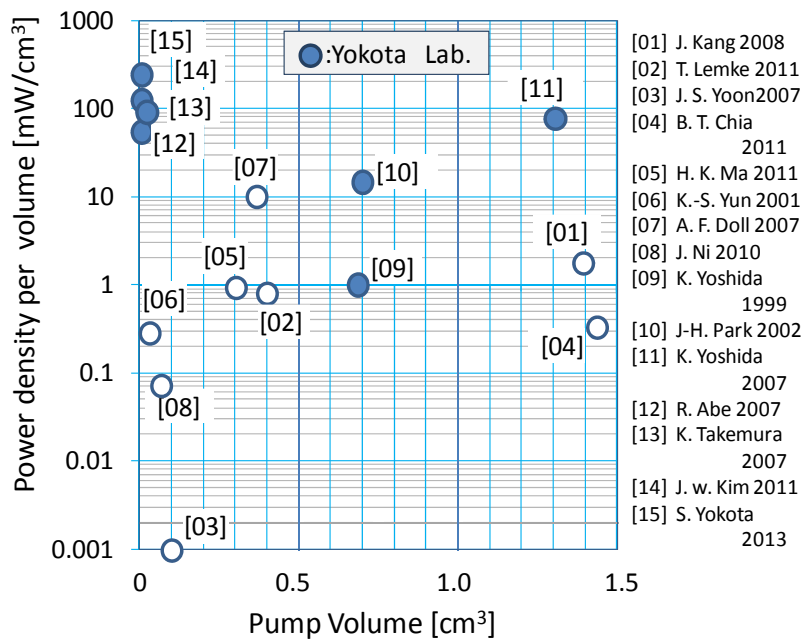


図5 マイクロポンプの体積当たりのパワー密度比較