

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

システム

July.2020 Vol.51 No.4

特集「フルードパワーのクリーン化技術最前線」



日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目次

【挨拶】

| | | |
|-----------|--------------------|-----|
| 会長就任にあたって | 真田 一志 | 152 |
| 副会長のご挨拶 | 早川 恭弘, 田中 豊, 嶋村 英彦 | 153 |

特集「フルードパワーのクリーン化技術最前線」

【巻頭言】

| | | |
|-----------------------------|-------|-----|
| 「フルードパワーのクリーン化技術最前線」発行にあたって | 中野 政身 | 155 |
|-----------------------------|-------|-----|

【解説】

| | | |
|--------------------------|----------------------------|-----|
| ミニマルファブによる半導体, MEMS製造の革新 | 前川 仁, クンプアン ソマワシ, 原 史朗 | 156 |
| 半導体デバイス・液晶パネル製造用レジストポンプ | 矢島 丈夫 | 162 |
| 磁性流体を用いた真空装置の技術紹介と展望 | 鷺坂 圭亮, 浅井 笙平, 折原 大輔, 廣田 泰文 | 165 |
| 真空装置に必要な漏れ試験技術 | 平山 道人 | 169 |
| プラズマ流による殺菌・ウイルス不活化 | 佐藤 岳彦 | 172 |
| 抗菌・除菌フィルタの要素・評価技術 | 大石 崇 | 177 |

【トピックス】

| | | |
|-------------------------------------|--------------|-----|
| 学生さんへ, 先輩が語るー電子工学から油圧システムへー | 森田 晃平 | 181 |
| Youは日本をどう思う? 第15回: 日本の医療について勉強しています | ンダイゼイエ サミュエル | 185 |

【研究室紹介】

| | | |
|---------------------------|------|-----|
| 信州大学酒井研究室: 油圧アームのモデルベース制御 | 酒井 悟 | 187 |
|---------------------------|------|-----|

【会告】

| | |
|--|-----|
| 理事会・委員会報告 | 191 |
| 日本フルードパワーシステム学会ホームページ改訂のお知らせ | 192 |
| 2019年度 学会賞表彰 | 193 |
| 訂正のお知らせ | 193 |
| 学会創立50周年特別会費（賛助金）の受付結果 | 194 |
| 2020年度（第39期）通常総会終了 | 195 |
| 日本フルードパワーシステム学会論文集51巻（2020年）1号 発行のお知らせ | 195 |
| 共催・協賛行事のお知らせ | 196 |
| 会員移動 | 197 |
| 次回予告 | 198 |

■表紙デザイン：浅賀 美希 勝美印刷株

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

[Greeting Message]

| | | |
|------------------------------|--|-----|
| Greetings from the President | Kazushi SANADA | 152 |
| Message from Vice Presidents | Yasuhiro HAYAKAWA, Yutaka TANAKA, Hidehiko SHIMAMURA | 153 |

Special Issue “The Cutting Edge of Clean Technologies in Fluid Power”

[Preface]

| | | |
|--|---------------|-----|
| On the Special Issue “The Cutting Edge of Clean Technologies in Fluid Power” | Masami NAKANO | 155 |
|--|---------------|-----|

[Review]

| | | |
|--|---|-----|
| Minimal Fab - Semiconductor and MEMS Fabrication that “Everyone Can Innovate” | Hitoshi MAEKAWA, Khumpuang SOMMAWAN, Shiro HARA | 156 |
| Resist Pump for Semiconductor Device and Liquid Crystal Panel Manufacturing | Takeo YAJIMA | 162 |
| Technical Introduction and Provision on Vacuum Equipments using Ferrofluid | Keisuke SAGISAKA, Syohei ASAI, Daisuke ORIHARA, Yasutake HIROTA | 165 |
| Leak Test Technology Required for Vacuum Equipments | Michito HIRAYAMA | 169 |
| Bacteria Sterilization and Virus Inactivation by Plasma Flow | Takehiko SATO | 172 |
| Key Underlying Technologies and Evaluation Techniques for Anti-bacterial/Bacteria Removing Filters | Takashi OHISHI | 177 |

[Topics]

| | | |
|---|--------------------|-----|
| Senior talks to students — Applying Electronics to Hydraulic Systems — | Kohey MORITA | 181 |
| What do you think of Japan? 15th : I’m Studying About Japanese Medicine | Ndayizeye Samyuerl | 185 |

[Laboratory Tour]

| | | |
|---|--------------|-----|
| Satoru Sakai Laboratory: Model Based Control for Hydraulic Arms | Satoru SAKAI | 187 |
|---|--------------|-----|

[JFPS News]

191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198

挨拶

会長就任にあたって

著者紹介



さなだ かず し
真田 一志

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

1986年3月東京工業大学大学院理工学研究科
修士課程制御工学専攻修了。1986年4月東京工
業大学助手、1998年横浜国立大学工学部生産工
学科助教授、2001年横浜国立大学大学院助教授、
2004年横浜国立大学大学院教授、現在に至る。

先の総会にて2020～2021年度会長に指名されました真田一志です。はからずも、会長に再度指名されたことはまったく想定外のことでありました。これからの2年間、理事、監事の皆様とともに学会運営を担当させていただきます。なにとぞよろしくお願い申し上げます。

新型コロナウイルス感染拡大による非常事態宣言が発出されたことに伴い、本学会では、学会主催の各種イベントと委員会活動の中止あるいは延期をいたしました。

2020年春季講演会については、5月28日（木）、29日（金）における機械振興会館での開催を中止いたしました。春季講演会にあわせて開催する予定であった、学会創立50周年記念式典・祝賀会も延期いたしました。原稿執筆時点で、時期などは未定です。理事会・総会・表彰式などについては延期し、学会事務局もテレワークで対応いたしました。さらに、第11回JFPSフルードパワー国際シンポジウムは1年延期し、2021年10月の開催予定となりました。

非常事態宣言が発出されている間は、不要不急の外出は自粛され、Webによる遠隔での授業や会議が広く行われるようになりました。非常事態宣言が解除されたあとも、ウイズコロナ、アフターコロナの新しい生活様式として、Webを利用した会議・授業は継続されています。当学会の各種委員会も

Web会議にて開催され、徐々にではありますが学会活動が活性化されつつあります。

2020年度（第39期）通常総会は、会場での出席は極少数とするためにWeb会議を導入し、議案説明の役員などはWebで出席することとし、会場（学会事務局）での出席は議長（会長）、副会長、事務局などの少数とするようにいたしました。延期された学会行事については、社会状況を注視しつつ適切な時期に再開するよう慎重に検討してまいります。

今期から副会長を3名体制としました。新型コロナウイルス感染拡大にともなう厳しい状況に適切かつ迅速に対応しなければなりません。これまでご説明申し上げましたように、さまざまなイベントが中止あるいは延期を余儀なくされております。会員の皆様の安全・安心を第一に考え、苦渋の判断を行いました。これらの活動の再開にあたって、あるいは今後予想されている第2波に適切に対応するためには、従前にも増して学会運営を担っていただく副会長・理事会の体制を強化する必要があると判断いたしました。3名の副会長をはじめ理事・監事の皆様のご協力と会員の皆様のご支援をいただき、この難しい状況を乗り越えるべく、誠心誠意、務めてまいります。

この状況のもとで普及したWeb会議は、その有効性が認識されました。当学会としても、さまざまな場面でWeb会議を利用した学会活動を模索しつつ、フルードパワーシステム学会の活動を広めていく努力が必要であると考えております。

最後になりましたが、これからの2年間、会員の皆様のご指導とご協力をいただきながら、当学会の運営に微力ながら努力する所存です。会員の皆様のご理解とご協力を賜りますよう、なにとぞよろしくお願い申し上げます。

（原稿受付：2020年6月12日）

挨拶

副会長のご挨拶

著者紹介



はや かわ やす ひろ
早川 恭弘
奈良工業高等専門学校電子制御工学科
〒639-1080 奈良県大和郡山市矢田町22
E-mail : hayakawa@ctrl.nara-k.ac.jp

独立行政法人 国立高等専門学校機構 奈良工業高等専門学校電子制御工学科教授、福祉・介護ロボットの研究に従事、社会福祉法人 天寿会理事、博士（工学）



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3月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4月法政大学講師、1992年同助教授、2002年同教授、現在に至る、工学博士



しま むら ひで ひこ
嶋村 英彦
川崎重工業株式会社
精密機械・ロボットカンパニー
〒651-2239 神戸市西区榎谷町松本234
E-mail : shimamura_h@khi.co.jp

川崎重工業株式会社 常務執行役員、精密機械・ロボットカンパニープレジデント

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会の2020年度総会が開催され、学会長として前期に引き続き眞田一志先生が選出されました。また副会長には、前期から田中豊と嶋村英彦の続投に加え、早川恭弘が新たに任命されました。私ども3名は副会長として、トロイカ体制で眞田会長を補佐しつつ、学会の運営に尽力してまいりたいと考えております。副会長のご挨拶として所信を述べさせていただきます。

当学会の2020年は、新型コロナウイルスの感染拡大やそれにとまなう緊急事態宣言の発出など未曾有の危機の中での船出となりました。世界中で多くの罹患者が出ており、ワクチンや特效薬がない状態が続いています。

このような状況により、国際交流の活性化とフルードパワー研究者間の情報交換を目指し当学会の柱の事業の一つとして進めてきた2020年10月開催

予定の第11回JFPSフルードパワー国際シンポジウム・函館は、1年延期による開催を余儀なくされ、来年同時期の2021年10月開催に変更となりました。また、今年の6月に韓国で開催予定だった日中韓共同ワークショップも1年延期となり、さらに、7月に中国・上海で実施される予定だった日中若手交流事業も中止となりました。以上の状況から、日本とアジアや欧米フルードパワーコミュニティとの交流に大きな支障が出ております。もちろんこうした国際学会や交流事業の中止や延期は日本だけではありません。世界中でフルードパワーコミュニティの交流に大きな支障が出ております。世界中がネット環境で結ばれている現在、遠隔地からのリモートによる会議の開催や参加は技術的には可能です。しかし世界各地に足を運び、また多くの研究者や技術者が日本を訪れ、フェースtoフェースで情報交換する意義は大きいと思われまます。一刻も早く、これまでどおりの交流が行える世界が来ることを願っております。

産学連携の事業に関しては、フルードパワー関連企業の皆様の企業活動にも大きな制約が出ておられることから、連携事業にも影響をおよぼしております。しかし、こうした危機的状況だからこそ、日本フルードパワー工業会などと共同し、共同研究事業が拡大していくように支援を行っていく所存であります。

当学会は2020年3月13日に創立50周年を迎えました。この記念すべき年を学会のさらなる発展の契機としたいと考え、会員・賛助会員の皆様にご支援をお願いし、そして多くの方々からご賛同をいただきました。しかしながら、予定していた50周年記念行事については規模を大幅に縮小して行うこととなり、皆様にお会いして直接御礼を申し上げる事ができず申し訳ありません。多くのご支援に、この場をお借りして、厚く御礼申し上げます。皆様からのご支援は学会の基盤の強化に役立てさせていただきたいと考えております。学会のホームページは5月に大幅なりニューアルが行われ、記念出版事業も予定通り進んでおります。次の10年、20年に向け、

当学会が国内をはじめ海外におけるフルードパワー関連大学、研究所および業界とさまざまな形で協力し合うことが重要と考えております。

当学会では、講演会やセミナー等さまざまな企画を通じて会員・賛助会員の方々の研究活動の支援を行っております。こうした活動も現在中止や延期が続いておりますが、今後リモートでのセミナーを企画するなど、別の形でご満足をいただけるよう努力してまいります。特にきめ細かいフルードパワーに関連する研究分野の探索や、その探索結果をもとにしたデータや情報の発信は、学会の大きな使命であ

ることに変わりありません。現状におけるピンチを契機と考え、こうした情報発信に積極的に取り組める情報基盤の整備をより一層進めてまいります。

新たに学から就任した1名と産学学の3名体制で役割を分担し、このコロナ危機の中で学会として何ができるかを熟慮断行し、皆様のお役に立てるよう尽力してまいります。ご理解ならびにご支援のほど、なにとぞよろしくお願い申し上げます。

(原稿受付：2020年6月15日)

「フルードパワーのクリーン化技術最前線」発行にあたって

著者紹介

なかのまさみ
中野政身

東北大学未来科学技術共同研究センター
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
東北大学産学連携先端材料研究開発センター内
E-mail: masami.nakano.b2@tohoku.ac.jp

1982年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。1981年早稲田大学助手、1982年山形大学助手、助教授を経て、1997年同教授、2008年東北大学教授流体科学研究所、2018年同教授未来科学技術共同研究センター。機能性流体、流体関連振動・騒音、振動制御などに関わるスマート流体制御システム工学に従事。日本フルードパワーシステム学会理事。

クリーン化の重要性は製造業全般に及び、製品歩留まりの向上、製品品質の向上、効率的なメンテナンス・予防保全といったメリットをもたらし、クリーン化技術はモノづくりを支える基盤技術である。特に、半導体・液晶パネルなどの製造分野においては、その製造装置およびプロセス技術の微細化と複雑化の進展によって、集積回路や液晶パネルなどの高集積化・高性能化が達成されてきている。これらの製造技術を根底から支えているのがクリーン化技術である。その代表がクリーンルームによる空気中の粒子サイズと個数を基準とした清浄度クラス管理であるが、その清浄度管理も一層厳しくなり化学物質成分などの汚染物質（コンタミ）の低減も重要な課題となっている。これらの製造プロセスで常に用いられる超純水、各種ガス、薬液などについてのクリーン化技術も平行して行われており、それらの開発は製造、供給、ストックにも配慮し、ユースポイントで十分な清浄度が確保できるように展開されている。

折しも、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）が猛威を振るっているところであるが、医療機器製造・医療現場および食品製造分野においても、ゴミ・チリだけでなくこのようなウイルス、細菌などの病原微生物の滅菌・殺菌・除菌・抗菌技術等のクリーン化技術が必要不可欠となっている。

本特集号では、以上のような半導体・液晶パネル製造、医療機器・食品製造分野等におけるフルードパワー機器に関わる各種クリーン化要素・システム

技術を取り上げ、その最新情報の提供に資する。

前川仁氏、他（産業技術総合研究所）には、多品種少量ニーズに柔軟に対応可能な省資源・省エネルギー型の半導体、MEMS生産システムである”ミニマルファブ”について、その構想から開発状況、そしてその装置に使用されるフルードパワー機器も含めて小型化・クリーン化技術に関して解説いただいた。

矢島丈夫氏（㈱コガネイ）には、半導体・液晶パネル製造プロセスの微細加工のためのフォトリソグラフィ法に用いられるレジストを供給する可撓性を持つチューブフレームの収縮・拡張を利用したクリーン化レジストポンプに関して紹介いただいた。

鷺坂圭亮氏、他（㈱フェローテック）には、半導体製造プロセスの真空環境で使用される磁性流体の種類とそれらを用いた真空装置用軸シールに関して、磁性流体組成および軸シール構造の基本技術を紹介いただき、実用環境におけるクリーン化技術の課題や今後の方向性について解説いただいた。

半導体製造プロセスなどで使用される真空装置のクリーン化技術の一つとして気密性の確保が重要となる。平山道人氏（㈱アルバック）には、そのための漏れ試験に用いられるヘリウムリークディテクタの原理および試験例について解説いただいた。

佐藤岳彦氏（東北大学）には、医療機器・医療現場で問題となる病原微生物として、ウイルス、細菌、真菌、原虫、プリオンについて詳述していただき、それらの不活化の原理と方法とともに、特に、低温プラズマ流による殺菌・ウイルス不活化法に関して紹介いただいた。

大石崇氏（CKD㈱）には、食品生産プロセスでの包装・充填・圧送・洗浄・乾燥・攪拌工程などで用いられる圧縮空気への異物混入防止および細菌対策として開発した抗菌・除菌フィルタに関して、その特長や要素技術および評価技術について紹介いただいた。

末筆ながら、ご多忙な中を貴重な解説記事をご寄稿いただいた執筆者の皆様へ厚く御礼を申し上げる。また、本特集号がフルードパワーのクリーン化技術の最新情報の提供に資することができれば幸いである。

（原稿受付：2020年6月3日）

解説

ミニマルファブによる半導体，MEMS製造の革新

著者紹介



まえ かわ ひとし
前川 仁
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
一般社団法人 ミニマルファブ推進機構
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1
E-mail : maekawa.hitoshi@aist.go.jp

1988年、東京工業大学 制御工学専攻修士課程修了、機械技術研究所入所。2001年、産業技術総合研究所に改組、現在に至る。ミニマルファブの搬送・制御系の開発に従事。日本機械学会などの会員。博士（工学）、技術士（機械部門）、1級機械加工技能士（数値制御フライス盤）。



クン プアン ソ マ ワン
Khumpuang Somwan
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
デバイス技術研究部門
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1
E-mail : sommawan.khumpuang@aist.go.jp

2002年、英ブリストル大学 機械工学科大学院修士課程修了。2006年、立命館大学 マイクロ機械システム工学科博士課程修了。2007年より独ブライブルク大学勤務を経て、2011年より産業技術総合研究所 デバイス技術研究部門ミニマルシステムグループ主任研究員。



はら し ろう
原 史朗
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
デバイス技術研究部門
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1
E-mail : shiro-hara@aist.go.jp

1990年工学博士。早稲田大学理工学部助手等を経て、1993年、電子技術総合研究所入所。2006年ミニマルファブ構想を提唱、現在、産業技術総合研究所 デバイス技術研究部門・首席研究員兼ミニマルシステムグループ長、ファブシステム研究会代表。

な機能向上と低価格化を達成した。その一方で大口径ウェーハを処理するためには、製造装置およびそれらを配置するクリーンルームもまた大規模化しなければならない。このため半導体製造に要する設備投資と運転コストはウェーハの大口径化とともに増大し、現行の300mmウェーハを扱う半導体工場の設備投資は5,000億円以上に達している。そして国内外の電機メーカーの多くがこの巨額投資を支えきれず、半導体製造事業の分離再編に転じ、寡占化が進んでいる。

この寡占化により、大きな問題が生じている。大量に消費されるデバイスならば、大口径ウェーハから多数のデバイスを製造するほど量産効果により製造コストが減少するが、これは非常に高い稼働率、つまり工場生産が受注で満杯であることを前提としている。ところがアナログIC、パワーデバイス、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサ、特定用途向けICなど、品種は多い一方で1品種ごとのロットは少ない多品種少量ニーズに対して大量生産システムを適用すると、大量生産工場で少量ニーズのオーダーを多数受けて、多品種少量生産をきめ細かく管理しなければならない。実際にはそれが難しいため、顧客に本来の必要数以上のオーダーを要求して製品を過剰に生産し、その過剰購入分は利用されないという大きな無駄が生じている。このため、従来の大量生産システムでは多品種少量デバイスの製造が割高になり、さらには少量ニーズに対するビジネスは切捨てざるを得ない、という制約が生じてしまった。

1. はじめに

エレクトロニクス産業の根幹をなす半導体製造は、現在大きな転機を迎えている。従来の半導体製造では、一度に大量のデバイスを製造して単価を下げることを追求して、製造単位となるウェーハ（シリコンなどの超高純度結晶基板）の大口径化と製造設備の規模拡大を続けてきた。このような大量生産を指向したものづくりは、CPUやメモリのような比較的少品種のデバイスの大量ニーズに対してはきわめて有効であり、たとえばPCや携帯電話などの飛躍的

2. ミニマルファブ構想

ここで従来の大量生産システム（以後、メガファブと呼ぶ）とはまったく異なるものづくりとして新たに提唱するのが、ミニマルファブと名付けた多品種少量ニーズに柔軟に対応可能な省資源・省エネルギー型の半導体、MEMS生産システムである¹⁾。図1に比較するようにメガファブが大口径ウェーハ、大型装置、大規模クリーンルーム、巨額投資に基づくのとは対照的に、ミニマルファブではハーフィンチ

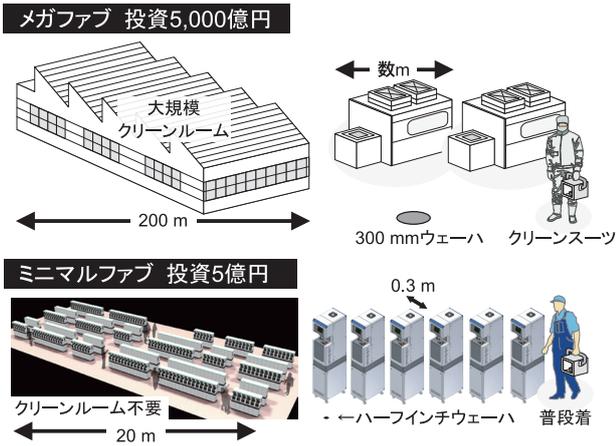


図1 ミニマルファブ構想

ウェーハ、小型の製造装置、クリーンルームを用いずにウェーハ周りだけを局所クリーン化する環境制御、少額投資により生産システムを構築する。その投資額はメガファブの1/1,000にあたる約5億円を最終目標としている。以下では、ミニマルファブの特徴的なコンセプトを列挙する。

2.1 多品種少量生産「のみ」が目的で、大量生産を目指さない

ミニマルファブは多品種少量生産を指向した新しい生産システムであるが、従来のメガファブに対し、それらを置き換えるものではない。前述したように、少量の需要しかないデバイスをメガファブで大量生産すると大きな無駄が生じるが、それと同様に大量消費されるデバイスを敢えて少量生産に特化したミニマルファブで小ロットずつ生産することは、合理的ではない。したがってミニマルファブとメガファブは排他的に競合する存在ではなく、多様なニーズの数量規模に応じて両者がそれぞれ優位となる領域をカバーしあう相補的な関係にある。

2.2 標準化した小型の製造装置

ハーフィンチウェーハを処理対象とするミニマル装置は、メガファブ用の製造装置に比べて大幅な小型化が可能であり、図2に示すように全てのミニマル装置は人との親和性が高いサイズ(W294×D450×H1440mm)および外観に統一している。ここでLSI製造を想定すると約400台の装置が必要になるが、ミニマルファブではわずか20m四方のスペースにそれらを配置することができる。

2.3 ハーフインチウェーハを製造単位とする

ミニマルファブでは、直径12.5mmのハーフィンチウェーハ(図3右下)を製造単位とする。この小さな製造単位により、多品種少量生産や研究開発に必要な最小限の資源・エネルギー消費で柔軟に対応することができる。ここでハーフィンチウェーハの面積

はメガファブでの製造単位である300mmウェーハの約1/1,000であり、単純比較するとミニマルファブの生産性はメガファブの1/1,000に減少する。しかしながら現実の市場には、この能力でも十分に応えることができるニーズは多数存在する。

2.4 クリーンルームが不要

半導体の製造中にウェーハが微粒子やガスにより汚染されると、製品の機能品質や歩留まりが著しく損なわれてしまう。これを防ぐために、メガファブでは大規模クリーンルーム内に製造装置群を配置し、その大空間全体の清浄度を管理する。これには巨額の設備投資と運用コストを要するだけでなく、作業者は自身が汚染源とならないようにクリーンスーツに着替えてエアシャワーを浴びて入室しなければならないなど、煩雑な手間を強いられる。これらのむだが生じるのは、汚染が大敵であるウェーハ、ウェーハ処理部以外については汚染が問題にならない製造装置、さらに汚染源そのものである人間を無



図2 ミニマル装置 (W294×D450×H1440mm)

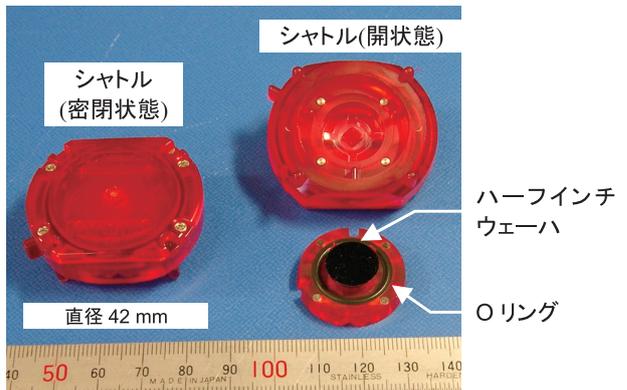


図3 ハーフインチウェーハとシャトル

理に同一空間に混在させたためである。

これに対してミニマルファブでは図4に示すように、ウェーハが存在する空間と人間が存在する空間を完全に分離し、徹底的にクリーン化した必要最小限の局所クリーン空間内でウェーハを処理する。その一方、局所クリーン空間以外については特殊な環境制御は行わず、作業者は一般的な空調・服装のまま製造に従事する。この局所クリーン化技術により、ミニマルファブではクリーンルームが不要にもかかわらず、汚染から遮断されたウェーハ処理と作業者の快適な環境を両立することができる。ただし、各ミニマル装置内部の局所クリーン空間どうしを隔てる空間は、一般的な環境である。そこでミニマル装置間でウェーハを搬送する際には、図3のシャトルと呼ぶ密閉容器にウェーハを格納して汚染から遮断する。

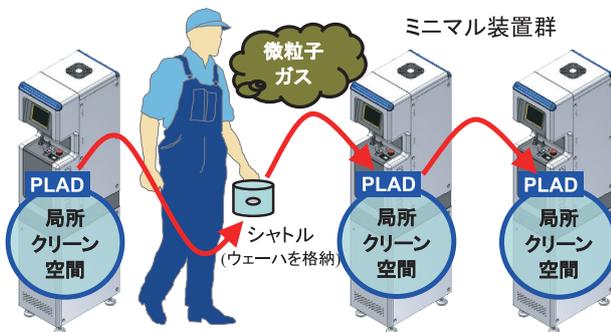


図4 局所クリーン化

2.5 ウェーハを1枚ずつ搬送

従来のメガファブでは、ウェーハを25枚入りの搬送容器に格納して工場内を搬送する。ところが製造装置の多くは1枚のウェーハしか処理できないため、それ以外の処理前後のウェーハは搬送容器の中でむだに待たされてしまう。さらに数100台の製造装置についてそれぞれ複数の搬送容器が待機すると、工場全体では処理待ち中の多数のウェーハが滞留する。その結果デバイスが完成するまでには、正味のウェーハ処理時間の合計をはるかに上回る長時間を要している。

これに対してミニマルファブでは、ハーフインチウェーハを1枚ずつシャトルに格納して搬送する。このため、あるミニマル装置で処理を終えたウェーハはむだに待たされることなく直ちに次の装置に移動し、結果として短時間での製造が可能となる。

2.6 ウェーハ搬送機構の標準化

ミニマル装置は、シャトルからハーフインチウェーハを取出して装置内部の局所クリーン空間内で処理した後、再びシャトルに格納する動作を繰り返す。

返す。このシャトル開閉とウェーハ搬送を汚染侵入を遮断しつつ実行するために、すべてのミニマル装置はPLAD: Particle Lock Air-tight Docking (微粒子・ガスを遮断するドッキング機構、図5)と呼ぶ共通の搬送機構を備える。PLADに密閉状態のシャトルを装着すると、しゅう動や発塵を伴わない動作によりシャトルを開き、さらに搬送アームが昇降・伸縮してウェーハをシャトルからミニマル装置内部に搬送する。

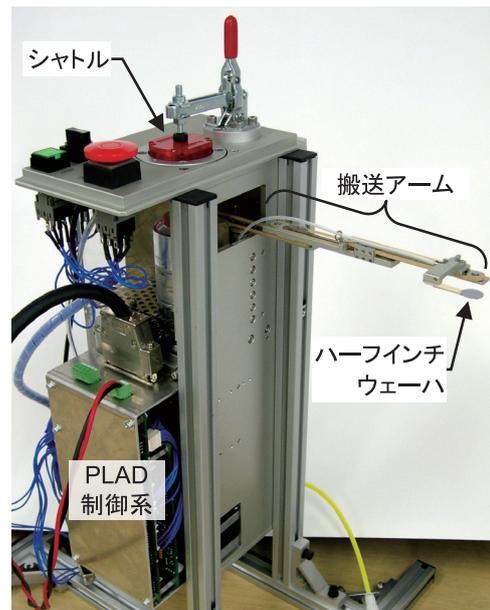


図5 ウェーハ搬送機構PLAD

またPLADの動作制御はミニマル装置から逐一指令するのではなく、PLAD自体が備える制御系が実行する。具体的には、ミニマル装置側のコントローラからPLADに対してウェーハ搬送を要求する信号を送出すると、以降はPLAD制御系が各アクチュエータの詳細な動作を制御して、装置内の定められた受渡し位置までウェーハを搬送する。これは、搬送機構を全ミニマル装置で共通に使用可能な標準パッケージとして準備したことを意味する。このため、ミニマル装置メーカーは各装置ごとに個別の搬送機構やその制御ソフトウェアを独自に開発する必要がなくなり、肝心のウェーハ処理部の開発に集中することができる。そして共通機器として供給されるPLADを結合することにより、ミニマル装置にはウェーハ搬送機能が容易かつ確実に実装される。この標準化した共通機器により重複した無用の設計製作を省く考え方は、PLADだけでなく装置筐体やコントローラなど、ミニマル装置の全体に及んでいる。

2.7 自動化、操作の共通化を徹底

メガファブで使用する製造装置では、それらの操

作方法がそれぞれ異なるため、各装置に専属の作業者を配置する。ここで作業者の人数はウェーハの大小に関係しないので、ミニマルファブをメガファブと同様に運用すると、生産能力をメガファブの1/1,000にスケールダウンして投資額を1/1,000に削減したにもかかわらず作業者の人数は変わらず、生産能力あたりの人件費が1,000倍に増えるというデメリットが生じる。また前述したLSI工場の例では、20m四方のミニマルファブに約400名の作業者がひしめく非現実的な状況を招いてしまう。

そこでミニマルファブをその規模に見合う少人数で運用するために、ミニマル装置の自動化および操作方法の共通化を徹底する仕組みを開発した。たとえばミニマル装置でウェーハ処理を開始するための操作はPLADにシャトルを装着し、それに続いてボタンを押す2動作のみであり、それ以降のウェーハの搬送や処理は自動的に進行する。この基本製造操作の他にも、処理条件の設定や装置メンテナンスのための操作も必要であるが、これらについてもタッチパネル画面のデザインや画面遷移の階層構造などを統一している。このため、作業者は1台のミニマル装置の操作を習得すれば、他のミニマル装置も同様に操作できるようになる。すると各装置に専属の作業者はもはや不要になり、ミニマルファブの少人数での運用が可能になる。またメガファブと異なり、ミニマル装置を操作するのは単純作業者とは限らず、エンジニアや研究者が自ら多種類のミニマル装置を操作することもできる。このため研究開発においては、研究者自身が簡単なトレーニングを受けてミニマル装置群を自在に操作し、研究者のアイデアを試作に直結するスピーディな研究環境を実現している。

2.8 外部ユーティリティ接続を限定

ミニマル装置に接続する外部ユーティリティはAC100V電源、圧縮空気、窒素ガス、除害済み排気の4つに限定している。このため、ミニマル装置を短時間の作業で容易に設置することが可能になっている。すると製造対象やプロセス技術の変更に伴って工程を組み換える場合には、メガファブのように装置レイアウトを固定したままウェーハの動線を入り組んだ経路に変更するのではなく、ミニマル装置を工程順に並べ換えることにより、動線を理想的な一直線に近い形状に保つことができる。これを実現するために、窒素以外のガスや純水・薬液などの供給源をすべてミニマル装置に内蔵し、それらの消費量を極限まで削減している。

2.9 ミニマル規格の策定

ミニマルファブ構想は国立研究開発法人 産業技術総合研究所が提唱し、一般社団法人 ミニマルファブ

推進機構およびその傘下のユーザーと開発集団であるファブシステム研究会とともに研究開発および産業化を進めている。ファブシステム研究会は約150の企業、大学、公的機関からなり、これら多数のメンバーが効率良く協力するために、ウェーハの寸法形状、装置サイズ、ミニマル装置とPLADのインタフェース、ユーザーインタフェース、外部ユーティリティ接続等をミニマル規格として策定、遵守している。

3. 開発状況

現在、半導体やMEMSデバイス製造における各工程、すなわち洗浄、塗布、露光、現像、エッチング、成膜、平坦化、不純物注入、接合、めっき、切断、研磨、樹脂封入、検査などを処理する約80種類のミニマル装置を開発済みであり、それらの多くは既に販売されている。またミニマル装置により配線、抵抗、キャパシタ、ダイオード、トランジスタなどの基本素子（図6）およびカンチレバー、ダイヤフラムなどの高アスペクト比の3次元構造をウェーハ上に作成するプロセス技術、さらにウェーハを樹脂に封入して外部電極を形成し、プリント基板に実装可能な形態にパッケージングする技術も開発している。これらのミニマル装置群およびプロセス技術を用いてCMOSデジタルIC、OPアンプ、MEMSセンサなどを試作しており、現時点では最小幅1 μ mの回路パターンを安定して作成可能である。

またこれまでの10年間、ファブシステム研究会は半導体製造に関する国内最大の展示会であるSEMICON Japanへの出展を続けている。会場の東京ビッグサイトはクリーンルームには程遠い大量の微粒子が浮遊する環境であり、さらに来訪者は通常

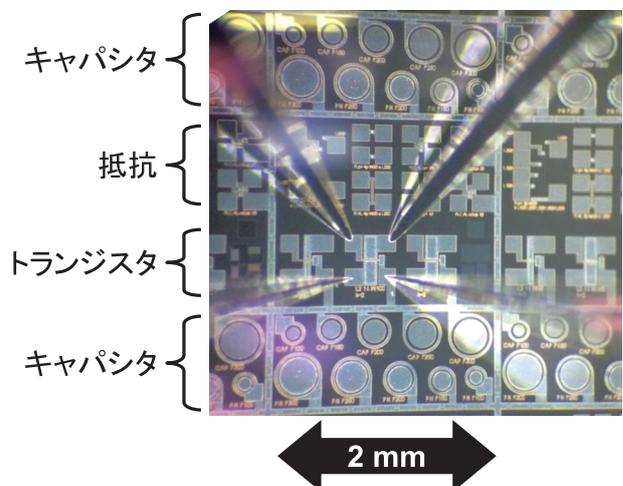


図6 ミニマルファブによりハーフィンチウェーハ上に作成した素子

の服装で土足のままミニマル装置の直近を取り囲む。それにもかかわらず、ミニマル装置は局所クリーン化技術により汚染侵入を遮断しつつ各工程を処理し、短時間でのトランジスタ製造を会場で達成している。さらに小型かつ外部ユーティリティ接続を最小限にしたミニマル装置の特長により、約60台のミニマル装置が会場に到着してから数時間後に稼働を開始し、また展示終了から1時間以内に撤収を完了するという、立ち上げに半年から1年を要するメガファブに比べてきわめて高い機動力を発揮している。

4. ミニマル装置における流体駆動および流体制御機器

ミニマル装置には厳しい寸法制限が課せられるため、そこで使用する流体制御機器を極限まで小型化しなければならない。また、ミニマル装置における流体駆動および流体制御については、ミニマルファブに特有の問題や要求が存在する。

まず、ミニマル装置には約700kPaの圧縮空気を供給し、それが400kPa程度まで低下しても装置が正常に動作するよう定めている。すなわちミニマル装置であっても、圧縮空気の供給圧力は一般機器と変わらない。これが一因となって、開発初期のミニマル装置では冬の朝などの低温時にエア駆動部の動作が固着ぎみになり、スムーズな動作を始めるまで人手で動きを補助しなければならないトラブルが頻発した。供給圧力を変えないままミニマル装置のサイズに合わせて小径シリンダを選択すると、ピストンの受圧面積および発生推力は減少する。ここで低温により駆動部の粘性抵抗が増大したため、本来の負荷と粘性抵抗の総和に対して発生推力が不足したという当然の現象がトラブルの原因である。もしも開発中にこのトラブルが発生していれば、簡単に原因を特定して解決できたはずである。ところがメガファブの温度管理されたクリーンルーム内で稼働する大型装置では、ピストンの発生推力は粘性抵抗に対して十分大きい。この前提に慣れた装置メーカーが大型装置と同じ感覚で小型かつ広い温度範囲で稼働しなければならないミニマル装置を設計したため、単純なトラブルを実際に発生するまで見逃してしまったのである。このトラブルののち、ミニマルファブではエア駆動よりもモーター駆動を推奨することとなった。

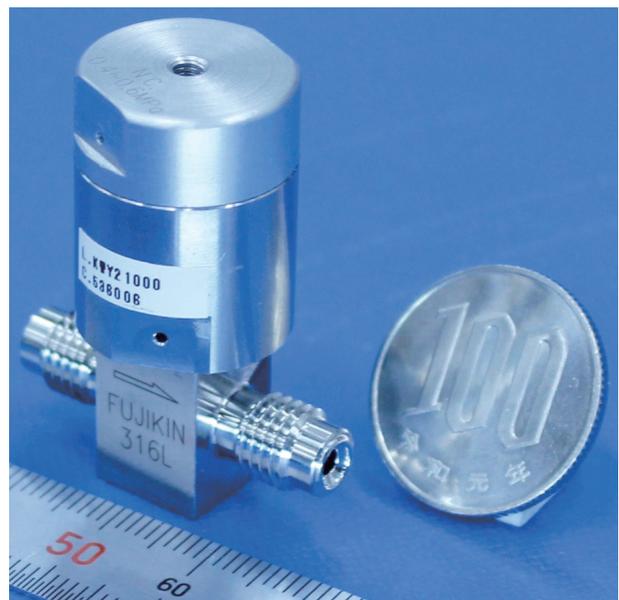
つぎにミニマルファブではウェーハ面積を1/1,000にスケールダウンしているため、その処理のためのガスやパーズ用窒素などの消費量も1/1,000に削減しなければならない。するとCVD (Chemical Vapor Deposition 組成, 温度, 圧力, 流

量を制御したガス流にウェーハをさらし、表面にガス分子を堆積する薄膜成長処理) 装置などでは、メガファブ用大型装置の数10 l/minに及ぶガス流量よりもはるかに小さい100ml/min～数ml/minの領域でガス流量を制御することが求められる。

さらに従来の開閉弁の多くは、幅20mmのボディの上に構成している。これは手動操作ハンドルの操作力に十分耐えるフットプリントでボディを固定しなければならないためである。これに対して前述したようにミニマル装置は自動化を徹底するため、基本的に開閉弁はエアオペレート弁である。したがってハンドル操作力による制約を受けずに、小型化を追求することが可能である。

以上述べたミニマルファブに特有の要求を半導体系主要バルブメーカーに提示して、ミニマル装置用の流体制御機器の開発を依頼した。各社はこれを目標が明確な新たな開発案件として歓迎し、以下で述べるユニークな機器が開発された。

図7は、小型エアオペレート開閉弁 ($\phi 19 \times H40.7\text{mm}$, ボディ部 $\square 10\text{mm}$, 重量48g, Cv値0.04) である。金属ダイヤフラムと樹脂シートが隙間を隔てて対向し、パイロット圧力に応じてダイヤフラムがシートに密着・分離することにより、ガス流路を開閉する。図8には、別タイプの開閉弁 ($W10 \times D32 \times H92\text{mm}$, 円柱部 $\phi 10\text{mm}$, 重量38g, Cv値0.1) を示す。小フットプリント形状により、多数の弁を密集して配置することが可能である。前述したように小径のエアオペレート弁では、受圧面積が減少して開閉動作のための十分な推力を発生することが困



$\phi 19 \times H40.7\text{mm}$, ボディ部 $\square 10\text{mm}$, 重量48g, Cv値0.04

図7 開閉弁1



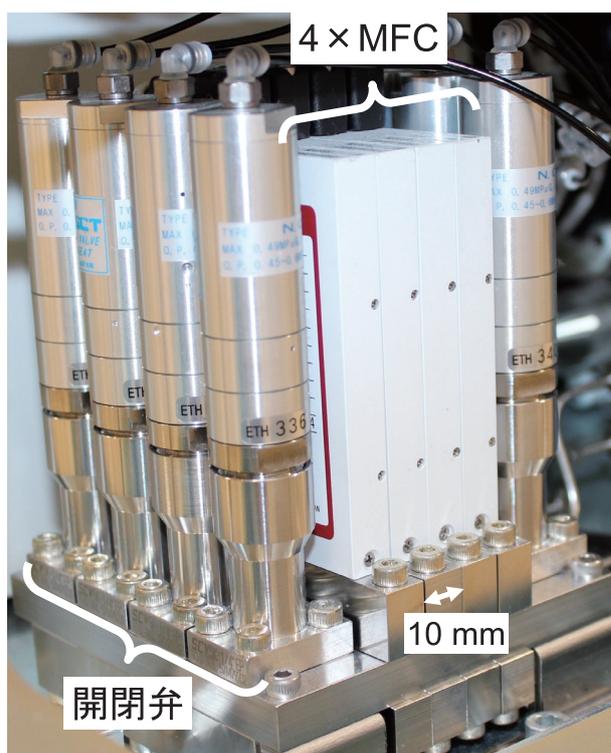
W10×D32×H92mm, 円柱部φ10mm, 重量38g, Cv値 0.1

図8 開閉弁 2

難になる。これに対しては複数のシリンダユニットを縦列配置することにより、小径化を達成しつつ十分な推力を発生している。これらの開閉弁は、ミニマル装置各部のガス流路や真空排気系などに使用している。

半導体やMEMSの製造には、ウェーハ表面でガスを反応させて成膜、エッチング、不純物拡散などを行う工程が多数含まれる。これらの工程では、適切な成膜・エッチング速度や拡散深さを実現するために、ガスとウェーハの反応速度を制御しなければならない。一方、ガス密度はその温度圧力に依存して変動する。したがってこのような反応速度の制御においては時間あたりに流れるガス分子の総数、すなわち体積流量ではなく質量流量を制御する必要がある。マスフローコントローラ（MFC: Mass Flow Controller）はそのためのガス制御機器であり、幅20mmの従来製品に対してW10×D83×H100mmのサイズに流量センサ、バルブ、フィードバック制御系を一体化した小型MFCを開発した。また図9のように、4基のMFCおよび各MFCの上流・下流側それぞれで流路を閉鎖する8基の開閉弁をマニフォールド上に集積したモジュールも開発している。マニフォールド内部にはMFC、開閉弁およびポートを接続する4系統の複雑な流路を一体構成している。この流路も一体化した小型MFCモジュールにより、数十基のバルブからなるガス制御系をミニマル装置に内蔵することができた。なお、一部のモジュールの開閉弁には前述した図8の弁を使用しており、ファブシステム研究会の中で同業他社が協業する好例になっている。

現状のミニマル装置では、ブロアー、真空ポンプ、液送ポンプ、ポンペ、フィルタ、フランジ継手など、ミニマル装置には最適なサイズとは言えないものの、やむを得ず従来製品を使用している部分がある。今後の課題として、これら多岐にわたる要素機器についてミニマルファブに合わせた小型化、省エネルギー



単体MFCサイズW10×D83×H100mm

図9 MFC 4連モジュール

化、低騒音化、低価格化を推進してゆく。

5. おわりに

以上、多品種少量ニーズに柔軟に対応可能なミニマルファブについて概説した。ミニマル装置群およびプロセス技術は、研究開発用途にはすでに十分な実用レベルに達しており、企業や公的機関ユーザーが小回りのきく試作ツールとして実用化している。現在は次段階として回路パターンの微細化、各ミニマル装置の完成度の向上、装置間でのシャトルの自動搬送など、デバイスメーカーの製造事業に使用可能な生産向け実用ファクトリーシステムを構築するための開発を開始している。なおファブシステム研究会では、「ミニマルファブのために開発した機器や技術は、それ以外の事業にも積極的に展開する」という方針を定めている。ここで紹介した流体制御機器が、半導体産業以外にも貢献することを期待する。

参考文献

- 1) 原史朗ら：特集 ミニマルファブによる製造技術の革新、クリーンテクノロジー、Vol. 23, No. 12, p. 1-59 (2013)。

(原稿受付：2020年5月21日)

解説

半導体デバイス・液晶パネル製造用レジストポンプ

著者紹介



や じ ま た け お
矢 島 丈 夫

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

1983年 音響機器メーカーに入社、ファインセラミックスセンサの開発に従事、1989年 株式会社コガネイに入社、半導体製造装置の開発、半導体・液晶パネル用バルブ・ポンプの開発及びその他の分野の機器開発に従事。フェロー。

1. はじめに

半導体デバイス製造工程や液晶パネル製造工程では多種の薬液を使用し、それらの送液には各工程に合わせたポンプが使用されている。中でも製品の品質を特に左右するポンプにレジストポンプがある。ご存知のように半導体デバイスの加工は微細化を繰り返す。ディスプレイは精細化している。これらの微細な加工はフォトリソグラフィ技術を用いている。ウエハーやガラス基板に感光性を持つレジスト膜を作り、回路パターンが描かれた原版を通した光で、パターンを縮小して転写する技術である。レジストは液状でポンプによって送液し、基板に塗布した後に硬化させて膜を形成する。本稿では筆者らが開発した、フルードパワーを利用したクリーンなレジストポンプについて紹介したい。

2. 必須性能

ポンプに求められる重要な性能の一つが薬液を汚さないことである。フォトリソグラフィ技術で転写される回路パターンは微細であり、異物が微粒子であっても、レジストと共に塗布されるとパターンに欠陥が生じてしまう。またレジストに他の成分が溶け込むとウエハーを汚染し不良につながる。これらから接液部の材質としては主に耐薬品性に優れたフッ素樹脂を用い、ポンプの動作で発塵がない構造とすることが重要である。たとえばプランジャーポンプはプランジャーとシールがしゅう動し発塵するために使えない。その他のベーンポンプやギヤポン

プなども同様にしゅう動部が存在し用いることはできない。

3. チューブフラムポンプ

3.1 従来のポンプ

弊社ではレジストポンプとして、フッ素樹脂の一つであるPTFE製のベローズを用いた電動ベローズポンプを開発している。8インチウエハーが主流の時代はこのポンプが数多く使用された。しかしながら微細化の進み方は激しく、歩留まり向上を考えたときベローズポンプの問題点が浮き彫りとなった。

- ①ベローズは山谷の連続した形状で、谷の部分にあるレジストは流れに乗り難く滞留する。長時間滞留したレジストは変質してゲル状となり、流出し欠陥の原因となる。
- ②ベローズは切削加工で製作される。切削表面からの素材の発塵がある。

3.2 チューブフラム

ベローズに代わる接液部材としてチューブフラムを用いたポンプを開発した。チューブフラムとは可とう性を持つチューブを外側から押し収縮させて内容積を小さくし、つぎに外側に拡張することで内容積を大きくできるチューブであり、この容積変化をポンプに利用する。チューブはフッ素樹脂のひとつであるPFAの押出成形法で作るため、チューブ内面は非常に平滑である。またポンプ前後の配管も同じPFA製チューブであるから、あたかもチューブの一部が変形して液を押し出すような直線的な流路を可能にする。このような滞留しにくい流路形状はレジストに対して理想的である。

3.3 同軸チューブフラムポンプ

図1が開発したポンプの接液部周辺の概略図である。チューブフラムの外側にそれと同軸状に、有効径が違う一体加工した2つのベローズを配置する。チューブフラムはベローズの両端に溶接される。チューブフラムとベローズの間には非圧縮性流体の媒体を入れてある。このように媒体を含めて3つの部品だけで構成されたシールがない密封構造である。運転はベローズの中間にあるアームをアクチュエー

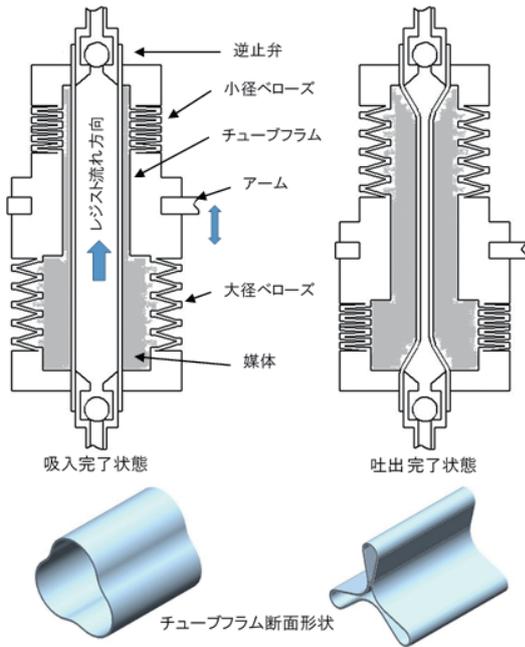


図1 同軸チューブフラムポンプ外略図

々に接続し、チューブの軸方向に往復動する。

- 吸入完了状態：大径ベローズが伸び、小径ベローズが縮む。この時チューブフラムは拡張状態である。
- 吐出完了状態：大径ベローズが縮み、小径ベローズが伸びる。この時チューブフラムは収縮状態である。

大径ベローズと小径ベローズの長さの変化でベローズ内側の容積が変化し、媒体を介してチューブが拡張収縮することになる。これによりチューブ内側の容積が変化してレジストを吸入・吐出する。

オイルなどの媒体を利用したポンプでは、その液が漏れると駆動側と従動側の関係が損なわれ、また媒体領域に空気が入り込むと吐出精度を維持できない。これはひとたび起きれば自然には復元しない。したがって各部品間のシールが重要である。このポンプでは駆動側と従動側をチューブなどで接続するのではなく、一体化しOリングなどのシールは使用していない。したがって漏れのリスクは非常に小さく、高い信頼性を実現している。

4. 液晶パネル製造用ポンプ

4.1 塗布方式の変更

同軸チューブフラムポンプは半導体デバイス用として開発したが、大型化して液晶パネルのレジストにも使用されている。液晶パネルは第4世代まではスピン塗布方式であったが、基板サイズが1m角を超える第5世代以降はスリット塗布方式となった(図2)。

スピン塗布は基板の中央にレジストを吐出し、高速で回転させることで遠心力を利用して薄膜を形成する。安定した膜厚が得られる反面、吐出したレジストの殆どが飛び散る無駄が多い方法である。基板の大型化で無駄にするレジストも増大し問題視されるようになり、これに代わる方式としてスリット塗布が提案された。

スリット塗布は画面の幅のスリットを備えるノズルからレジストを吐出して、液の流れと同期してノズル(またはガラス基板)を移動させて塗る方法である。

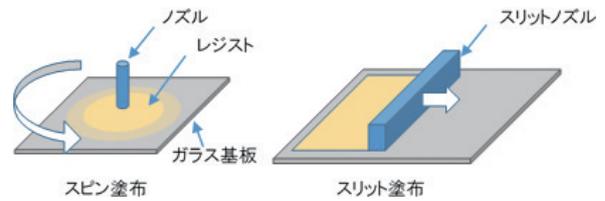


図2 塗布方式

スピン塗布での送液方法はタンク加圧による圧送方式やベローズポンプなどが使用されていた。スピン塗布の場合、精度が要求される膜厚はスピン条件によりコントロールされるため、ノズルから吐出されるレジスト量や流量は比較的ラフで良い利点があった。これに対しスリット塗布では、ポンプで送るレジストの流量変動が膜厚のばらつきに直結するために流量の高い安定性が必要である。またカラーフィルタに用いるレジストは数色あり、1台のポンプでレジストを入れ替える際の高い洗浄性が求められる。同軸チューブフラムポンプはその構造の特長から、これらの要求を満たすものとして採用されている。

4.2 さらなる基板大型化による問題

液晶パネルは大きなガラス基板で数台分の液晶画面を一括して製作し最後に分割する。テレビ画面のサイズは年々大きくなり、第8世代では2m角を超える基板となった。レジストの量は増大し、基板が大きくなっても処理時間を維持するために流量も増加した。同時にスリットノズルの移動も高速となり、ポンプの流量の立ち上がり特性が塗り始めの膜の形状に大きく影響を与えるようになった。具体的にはポンプの流量特性に急峻な立ち上がりが求められるようになった。

一般的な用途で用いられる金属製のプランジャーポンプと比較して、接液部にフッ素樹脂を用いるポンプはその素材の柔らかさから、圧力の影響を受けやすい。たとえばベローズポンプの場合、吐出時の圧力でフッ素樹脂製のベローズが変形し、設定に対

し吐出量が減少する。立ち上がり特性もポンプ室内の圧力が定常圧にいたるまではベローズが変形し流量が安定しない。同軸チューブフラムポンプも圧力を受けるのはふたつのフッ素樹脂製ベローズであり同様である。

4.3 密封プランジャー型チューブフラムポンプ

クリーンであるチューブフラムの長所を維持しつつ、前項の問題を解決するために開発したのが図3に示すポンプである。チューブフラムの駆動はプランジャーとし、シールを挟んで後ろの空間はベローズで覆い、ここにも媒体を満たしてある。媒体は非圧縮性であるため、ベローズの伸縮によるペローズ内の容積の変化が問題となるが、ベローズの有効径とプランジャー径を一致させる構造として、プランジャーの動きによらずこの領域の容積を不変とした。

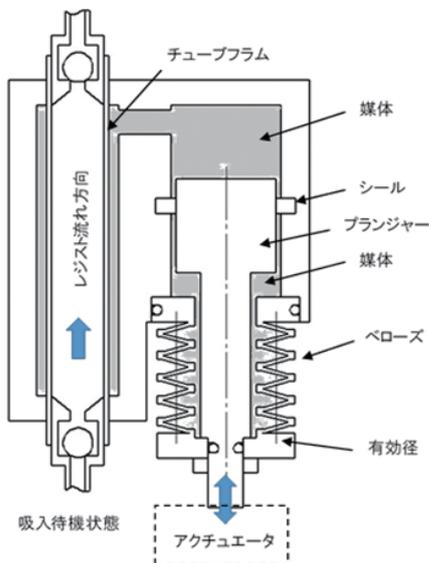


図3 密封プランジャー型チューブフラムポンプ

一般的なプランジャーポンプは薬液をシールが外界と分離する。薬液との相性が悪い場合は摩耗し早期にシール性が低下する。またプランジャーの往復動に伴う液の微小な流出や外気の流入の可能性がある。これに対し、開発したポンプはシールに触れる液（媒体）が薬液（レジストなど）ではないため、潤滑性の良い液を媒体に選定でき、シールの寿命に関して理想的である。またシールの背後は媒体で満たされているから外気の流入はなくポンプ性能を落すことがない。さらにその領域は固定シールで密閉されているために、外界に媒体が流出して周辺を汚染することや、プランジャーとシールのしゅう動部が露出していないから、しゅう動により発生したパーティクルの周囲への飛散がなくクリーンルームを汚染することがない。

図4は同じサイズの2種のポンプにおける流量の立ち上がり比較である。流量の変動を2次側の固定絞りにより圧力の変動で捉えている。密封プランジャー型チューブフラムポンプは流量の急峻な立ち上がりが得られていることがわかる。

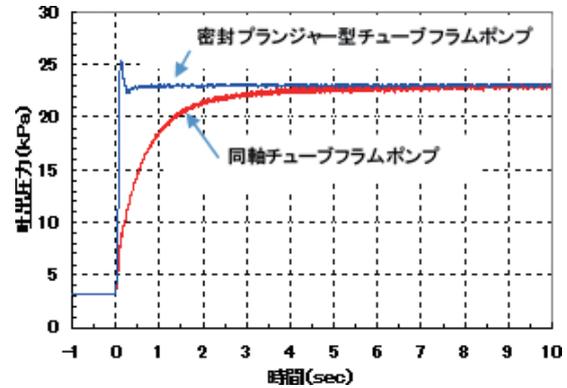


図4 流量の立ち上がり比較

図5はこのポンプの外観写真である。本構造のポンプは第8世代以降の大型基板のレジストや、粘度の高いポリイミド、有機ELパネルの薬液の塗布に使用されている。

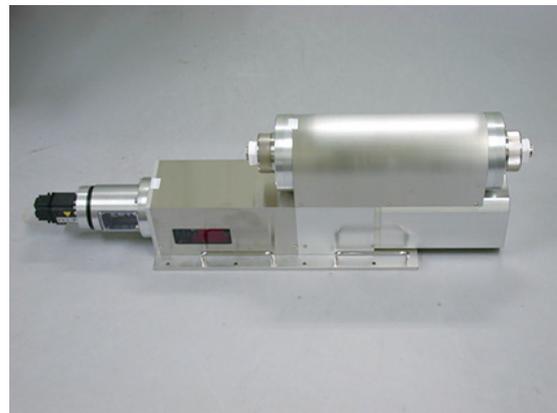


図5 密封プランジャー型チューブフラムポンプ

5. おわりに

半導体デバイスの進化は今後も続き、フラットパネルディスプレイの方式も液晶から有機ELへ、さらに他の方式に移行していくと思われる。ポンプにはさらに高いクリーン度が求められるに違いない。本稿で紹介したポンプのアクチュエータは主にモータを使用した電動アクチュエータであるが、クリーンなポンプを実現するうえでフルードパワーが必要であり、それは今後も変わらないと考える。

(原稿受付：2020年4月15日)

解説

磁性流体を用いた真空装置の技術紹介と展望

著者紹介



さぎ さか けい すけ
鷲坂 圭 亮

株式会社フェローテック
〒103-0027 東京都中央区日本橋2-3-4
E-mail : sagisaka@ferrotec.co.jp

2007年東邦大学大学院理学研究科卒業。成膜装置開発を経て、パキュウムテクノロジー部製品技術課課長、現在に至る。真空シールの設計開発に従事。



あさ い しょう へい
浅井 笙 平

株式会社フェローテック
〒103-0027 東京都中央区日本橋2-3-4
E-mail : asai-s@ferrotec.co.jp

2016年東海大学工学部卒業。磁性流体事業を経て、マグネティックマテリアル部に所属、現在に至る。磁性流体の技術開発に従事。日本化学会などの会員。



おり はら だい すけ
折原 大 輔

株式会社フェローテック
〒103-0027 東京都中央区日本橋2-3-4
E-mail : orihara@ferrotec.co.jp

2000年玉川大学工学部卒業。真空シールの設計開発、営業技術を経て、執行役員 パキュウムテクノロジー部部長、現在に至る。



ひろ た やす たけ
廣田 泰 文

株式会社フェローテック
〒103-0027 東京都中央区日本橋2-3-4
E-mail : hirota@ferrotec.co.jp

1994年北海道大学工学部卒業。磁性流体を中心に電子デバイス事業を経て、マグネティックマテリアル部部長、現在に至る。粉体粉末冶金学会などの会員。

1. はじめに

微細な磁性粒子を任意の溶媒中に安定に分散させた“磁性流体”は、1960年代にNASA（米国航空宇宙局）のプロジェクトとして、無重力下の宇宙空間で効率よく液体燃料を燃焼系に移送するため、磁力に反応する液体材料を目標として開発されたものである^{1,2)}。磁性流体は、重力や磁場に作用を受けても固液分離なく、図1のように、磁力に反応して形状

を自在に変化できる液体として機能する。

このユニークな材料は、本稿で紹介する半導体やFPD製造装置などに使用される真空装置（真空シール）をはじめ、ハードディスクやクリーンロボットの関節などに用いられる防塵シール、また放熱やダンピング性能の向上を目的に、最新のスピーカやモバイル製品用の触感アクチュエータなど、各種電子デバイスにも積極的に採用が進んでいる³⁻⁵⁾。

本稿では、真空環境で使用される磁性流体とそれらを用いた真空装置に着目し、素材および装置構造それぞれの基本技術の紹介、実用環境における技術課題、今後の方向性について解説する。



図1 磁場に反応する磁性流体

2. 真空装置に用いる磁性流体

2.1 磁性流体の組成

磁性流体は、主に磁性ナノ粒子、分散剤、および分散媒から構成される。磁性ナノ粒子には直径が約10nmの酸化鉄が一般的に用いられ、用途に応じて水、溶剤、各種オイルなどの分散媒が選択される。

分散媒中の磁性ナノ粒子は、周囲の熱エネルギーによるブラウン運動で動き回るが、分散媒の中で長期間にわたって安定に分散するためには、磁性ナノ粒子表面に最適な分散剤によって確実に被覆する必要がある。図2に、Rosensweigらによって検討された、2個の磁性ナノ粒子表面間の距離 h （粒子径との比）に対するポテンシャルエネルギー総和の関係を示す^{6,7)}。Rは粒子の中心間距離、 r は粒子半径、 δ は分散剤の厚み、 E_A はファンデルワールス引力、 E_R は粒子表面の立体障壁による反発エネルギー、 E_T

は以上のエネルギー総和を示す。なお磁氣的吸引エネルギー V_M も考慮する必要あるが、十分に小さいため除外している。

ここでポテンシャルエネルギーの総和が正にある場合は粒子間の反発力が勝り、負の場合には吸引力が増すことを示しているが、分子の長さが大きい分散剤で粒子を被覆することで、ポテンシャルエネルギー総和 E_T は正となることを示している。すなわち、分散剤を用いて一定以上の粒子間距離を常に保つことによって、半永久的に磁性流体中の磁性ナノ粒子は安定に分散できることがわかる。

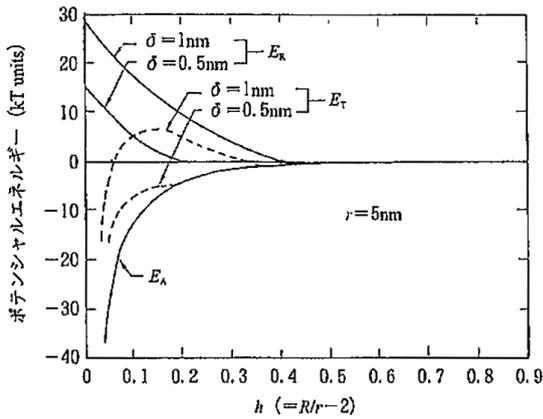


図2 直径10nm粒子の分散安定性に及ぼす分散剤被覆厚さの影響

また用途によっては、一般的な構成成分のみからなる磁性流体では十分な要求仕様を満たすことができない場合がある。他の液体製品などと同様に、潤滑性や耐酸化安定性をはじめ、濡れ性や絶縁・導電性など、さまざまな特殊プロセスを適用したり各種添加剤を配合することで、製品としてバランスの良い性能を有するように緻密に設計していく必要がある。

2.2 磁性流体の特性

無機の磁性材料と有機の流体材料のハイブリッドである磁性流体は、それぞれの特性をあわせもつユニークな機能性材料である。磁性材料としての性質は、含有する磁性ナノ粒子に由来するが、そのきわめて小さいサイズにより“超常磁性”と呼ばれる磁気特性を示すことが知られている。

これは、粒子が10nmレベルになると強磁性体の磁区より小さく、粒子の磁気モーメントのベクトル量は、熱ブラウン運動と印加磁界のエネルギー平衡のみで決まるため、残留磁化状態を生じないことになる。すなわち、外部磁界がない場合には磁性流体の磁化はゼロであり、磁性流体は外部からの磁界が作用することで初めて磁化されると言える。よって容器に入った状態の磁性流体は、磁場が作用しない

限り、他の材料と同様にごく普通の液体材料としてふるまう。

液体材料としての性質、典型的には粘弾性、蒸発性、表面張力などの諸々の物理特性は、おおむね分散媒が持つ諸特性を伝承する。たとえば、分子量が大きく粘性が比較的高いオイルを用いた場合、磁性流体の粘性は高くなるが、蒸発性は低く抑えられる。また酸化安定性や他物質との反応性などの化学特性も同様に、分散媒の特性に大きく影響を受ける。

たとえばエステル油は、一般的な炭化水素油と比較して、粘性は低いが耐熱性能に優れる有用な材料であるが、一方で化学反応性は高い特徴をもつ。このオイルを磁性流体に適用する場合、低粘度・長寿命を求めるのに有効であるが、潤滑剤・接着剤などの有機材料や活性の高いガスなどとの接触によって、短期間での品質劣化が進む場合があるため、十分な注意が必要になる。

2.3 真空装置に求められる磁性流体

用途ごとに求められる諸特性をバランスよく満たす磁性流体を設計するには、独自ノウハウと経験を中心に、多くの関連パラメータを考慮する必要があり、都度最適なものを用意される。真空装置向けには、当然のことながらシール性能を確実にする必要があり、強い磁場勾配に配置されても、磁性粒子の偏析が起きにくいことが必要とされる。

前節で紹介した超常磁性の特性をかながみれば、常にシール性能を維持するためには、磁場がある位置に存在し続けなければならない。単位体積の磁性流体が磁場から受ける力は、磁性流体の磁化と磁場勾配に依存するため、磁気回路の設計と同様に、飽和磁化を高め設定することも大事になる。一方、磁性流体の飽和磁化を上げると、液体としての粘性は高くなる傾向になる。一般的に、駆動トルクに関連する粘性は低く抑えることが求められるため、どこに重心をおいた設計とするかがポイントとなる。

さらに、主に真空側から蒸発成分が放出されにくい組成の磁性流体が求められる。たとえば、同じ分子構造の材料でも、蒸発を抑えるためには分子サイズ(分子量)が大きいものを選択する必要があるが、液体としての粘性は高くなってしまふ。そのため、極端な性能・特性が求められる場合、分散媒の種類そのものを変えて対応するケースも多い。表1に、

表1 主な真空シール用磁性流体

| 種類 | エステル系 | 炭化水素系 | フッ素系1 | フッ素系2 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 主な特徴 | 高耐熱、低粘度 | 標準的、安定 | 高耐熱、不活性 | 超低蒸発 |
| 分散媒 | エステル油 | PAO | PFPE | PFPE |
| 飽和磁化/mT | 45 | 45 | 45 | 35 |
| 粘度/mPa・sec @27°C | 450 | 450 | 1,500 | 22,000 |
| 密度/kg・m ⁻³ @室温 | 1,200-1,400 | 1,200-1,400 | 2,000-2,200 | 2,100-2,300 |

当社の真空シールで一般的に使用されている磁性流体の種類と特徴を示す。

標準的な用途であれば、バランスの良い炭化水素系磁性流体が扱いやすいことが知られている。同じ炭化水素系オイルでも多くの種類・グレードが存在するが、たとえば、実用上の寿命対応がクリティカルになってしまう場合は、フッ素系やエステル系の機種に積極的に切り替える検討が必要になる。

また表1で、複数のフッ素系磁性流体が紹介されているが、フッ素系オイルは耐熱性、耐薬品性に優れ、蒸発特性も低いことから、極度にコンタミネーションを嫌う半導体製造装置やFPD製造装置用のシールなどに用いられる。特にppmオーダーでの蒸発を嫌う用途においては、分子量の大きい分散媒が用いられるが、当然のごとくこれを用いた磁性流体の粘度は高くなり、駆動トルクに影響を及ぼす。また真空チャンバーの潤滑にフッ素系グリースが使用されることも多く、同系統の材料を用いることでチャンバー内の残存ガスの管理を容易にすることもできる。

また表1に、フッ素系磁性流体の主な特徴として、“超低蒸発”と記した。蒸発特性を議論する場合に、飽和蒸気圧の数値が用いられることが一般的に多い。この指標は各社から大まかな見解はだされているものの⁸⁾、測定方法はまったく規格化されておらず、条件設定次第で大きく数字が変わってしまうため、取り扱いには十分に注意しなければならない。厳密には、同じ取扱者が同じ設定条件のもと、複数の磁性流体を比較評価する場合にのみ有効と考えるべきである。

3. 磁性流体を用いた真空装置

3.1 磁性流体シールの原理

磁性流体シールは、磁性流体を磁力により軸周りに保持し隔壁を作る、非接触の回転軸シールである。基本構造を図3に示す。永久磁石、磁性体の磁極と

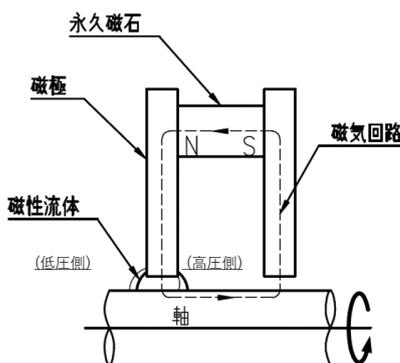


図3 磁性流体シールの基本構造

軸により磁気回路を構成することで、強い磁場領域が磁極と軸の間（シールギャップ）に現れる。磁性流体隔壁は、シールギャップに注入された磁性流体を磁力によって保持することで形成される。

図3に示すように、磁性流体で隔てられた気体に圧力差が生じた場合、その差圧によって隔壁となる磁性流体は移動し（細線）、その差圧と元の位置（太線）に戻ろうとする磁気力が釣り合うことにより差圧に耐えることができる⁹⁾。

磁性流体シールのシールギャップ部の磁場プロファイルを図4に示す。同図下図は、軸近傍で回転軸に平行な直線Lに沿って位置座標を決めた場合の磁場強度Hのプロットを示している。

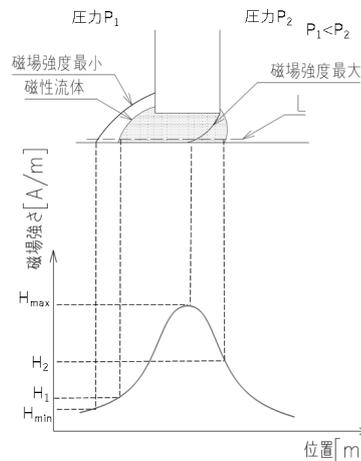


図4 磁性流体の変位と磁場プロファイル

磁性流体シール1段当たりの耐圧ΔPは、磁性流体の磁化値Mを飽和磁化値M_Sと近似できるとすれば、(1)式で表される。

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (H_2 - H_1) \times M_S \quad (1)$$

ここで添字1は低圧側とする。耐圧限界においては、同図上図の太線のように低圧側に移動して釣り合うことになり、その耐圧ΔP_{max}は(2)式で理論上求めることができる⁹⁻¹⁰⁾。

$$\Delta P_{max} = (H_{max} - H_{min}) \times M_S \quad (2)$$

同式から、磁性流体の飽和磁化値と磁場強度を極端に大きくすれば高耐圧のシールを得ることができそうであるが、実際には磁性流体を用いる上での制約もあるため¹⁰⁾、大きな差圧に耐える必要がある場合、後述する真空シールや加圧シールのように単段シールではなく多段シール構造として、必要耐圧を得ることとなる。その際のシール原理は単段シールと同じであり、各段の差圧の合計が全体の差圧となる。

3.2 真空シールについて

真空シールとして磁性流体シールを使用する際には、上記のとおり多段構造として大気圧に耐えうる

シールにする必要があるのはもちろんであるが、そのためには軸と磁極のすき間（シールギャップ）を小さくすることや、磁石の強化など磁気回路を真空シールとして最適化する必要がある。市販製品としては、ベアリングを組み込んだシールユニットとして提供されるケースが大部分であるが、シールギャップを確実に維持するためであることが大きな理由である。

磁性流体シールの特徴を、その他接触式シールと比較したものを表2に示す。他の機構のシールと比較して、磁性流体シールは高精度で高トルクを伝達でき、高気密、低発塵、長寿命であることがわかる。半導体やFPD製造装置において、ナノ粒子が分散したオイルが真空槽内に入ることに抵抗があるユーザーはいるかもしれないが、それ以上に、その他の接触式シールでは達成できない超低発塵という大きなメリットが、さまざまな製造プロセス向けに広く認知されている。

表2 磁性流体シールと各接触式シールの比較

| | 磁性流体シール | オイルシール (ウィルソンシール) | ○リングシール | ベローズ式シール | 磁気結合式シール |
|---------------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 真空領域 | 超高真空 ◎ | 高真空 ○ | 高真空 ○ | 超高真空 ◎ | 超高真空 ◎ |
| 回転速度 | 高速回転 ◎ | 低速回転 ○ | 低速回転 ○ | 低速回転 ○ | 低速回転 ○ |
| 許容伝達トルク ※1 | 大 ◎ | 大 ◎ | 大 ◎ | 小 ○ | 小 ○ |
| 発塵 | 極小 ◎ | 多 △ | 多 △ | 少 ○ | 少 ○ |
| 寿命 | 長 ◎ | 短 ○ | 短 ○ | 短 ○ | 短 ○ |

※1：許容伝達トルクは回転軸（シャフト）の強度に依存されます。

3.3 真空シールを用いた用途の今後の展望

クリーン環境を必要とする分野において、特に半導体製造装置では、今後さらなるクリーン環境の要求が予想される。上記のとおり、他の接触式シールとの比較では秀でたものであるが、留意しなくてはならない点もある¹¹⁾。磁性流体シールは超低発塵ではあるものの、当然ながら真空環境下でいくつかの放出ガスモードがあり、主に以下が知られている。

- ①磁性流体成分の放出
- ②磁性流体吸蔵水分の放出
- ③大気成分の透過

磁性流体成分の放出は、当初より懸念されていることであるが、低蒸発の磁性流体を使用するなど対策されている。今後は②や③などを低減することで、よりシビアになるプロセス条件に対応していく必要があるだろう。

また、活性ガスに対するさらなる長寿命化を達成することにより、装置のメンテナンスサイクルを長

期化することもさらなるクリーン化につながるだろう。メンテナンスにより、どうしても人の手が加わるため、作業由来の金属汚染（NaやCaなど）が発生しやすい。長寿命化はそのような観点からもクリーン化につながるはずである。

4. おわりに

約半世紀前に発明された機能性ハイブリッドナノ材料ともいえる磁性流体は、現在でも最新技術の製品に積極的に採用されているが、開発直後から比較的早い時期に採用された真空シール装置も、いまだ幅広い分野で使用されている。

本稿では、磁性流体という材料、またそれを用いた真空シールという装置の両面で、基本技術の紹介から課題まで取り上げた。特に半導体製造装置に代表されるクリーン環境が必須の領域において、さらに厳しい条件に対応する必要がでてくる。そのレベルに対応していくには、磁性流体のさらなる進化が求められるし、それを最も適切に使用するメカ設計技術のコンビネーションが重要となってくる。

当社においては、長年の事業実績からのノウハウと経験を継承して活用していくものの、幅広い技術分野を横断的に理解した上で、先進的な製品開発を進めていくことを大事にしたい。

参考文献

- 1) Papell, S.: Low Viscosity Magnetic Fluid Obtained by the Colloidal Suspension of Magnetic Particles, US Patent No. 3,215,572 (1965)
- 2) https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2015/cg_2.html
- 3) Hirota, Y., Tsuda, S.: Nanoparticle for Practical Use, J. Soc. Powder Technol., Japan, 42, 492-502 (2005)
- 4) Hirota, Y.: The Latest Technical Trend at in-Market Ferrofluid Applications, Japan-Taiwan International Conference on Magnetic Fluids 2018, Invited Talks Abstract (2018)
- 5) Rosensweig, R., Hirota, Y., Tsuda, S. and Raj, K.: J. Phys. Condens. Matter, 20 (2008) 204147
- 6) Rosensweig, R.: Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press (1985)
- 7) 津田史郎：微粒子工学大系 第Ⅱ巻 応用技術，フジテクノシステム，p. 257-260 (2002)
- 8) Black, T., Tsuda, S. and Raj, K.: Characterization of an ultra-low vapor pressure ferrofluid : JMMM, 252 (2002) 39-42
- 9) 神山新一：磁性流体入門，産業図書，p. 58-64, 97-100 (1989)
- 10) 廣岡正剛：最新シーリングテクノロジー 第4編 第3節 第3項，テクノシステム (2010)
- 11) 廣岡正剛：潤滑経済，539，p. 10-13 (2010)

(原稿受付：2020年4月30日)

解説

真空装置に必要な漏れ試験技術

著者紹介



ひら やま みち と
平 山 道 人
株式会社アルバック 規格品事業部 計測機器部
〒253-8643 神奈川県茅ヶ崎市萩園2500
E-mail : michito_hirayama@ulvac.com

2005年日本大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年、株式会社アルバックに入社。主にヘリウムリークディテクタの開発担当として真空計測機器の開発に従事。現在に至る。真空主任技術者・非破壊試験技術者

1. はじめに

半導体などの電子デバイスの製造工程の多くには、真空環境下のプロセスを伴う真空装置が使用されている。その真空装置は、気密性を保つため、製作時やメンテナンス時に定期的な漏れ試験が必要とされている。真空装置に用いられる漏れ試験には、極微小な漏れの検出が必要なことから、ヘリウムガスを使用する試験が広く採用されている。本稿では、その漏れ試験機である、ヘリウムリークディテクタ (helium leak detector, HLD) の原理および試験例について解説する。

2. ヘリウムリークディテクタとは

HLDはヘリウムガスをトレーサーガスとして、HLD内に流入するヘリウムの流量を測定する機器である。トレーサーガスとして、ヘリウムガスが用いられる理由を列挙する。

- ・空気中の体積分率が5 ppmと少ないこと。
- ・分子直径が最も小さいこと。
- ・不活性ガスであること。
- ・質量数による識別が容易である。

国内製のHLDは、50年以上前から開発が進められ、基本的な磁場偏向型質量分析の原理を変えることなく、現在においても、もっとも微小な漏れを検出する機器とされている。

同じ分析原理であるが、搭載ポンプの数や大きさによって、HLDは、20kg程度の小型の物から100kgを超える大型の物も市販されている (図1)。また、漏れ試験の対象となる試験体が複数の場所にあるこ

とを想定し可搬性を持たせたHLDや、試験体が多い時の利便性を考慮し、表示機が本体と独立したHLDもある。



図1 ヘリウムリークディテクタ

HLDによる試験と、その他の試験の測定範囲を表す (図2)。HLDは試験体の内側から外側の漏れ試験 (試験体加圧) と試験体の外側から内側の漏れ試験 (試験体減圧) の両方が使用できる事も特徴である。

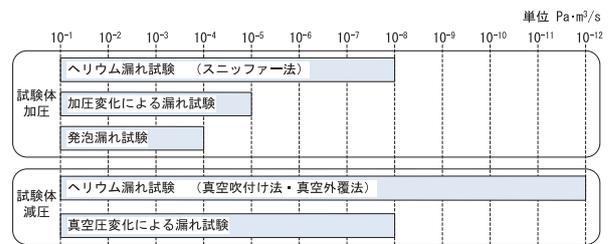


図2 漏れ試験の種類とその測定範囲

図2に記載したHLDの検出下限相当である 10^{-12} Pa·m³/sの漏れは、 3.1×10^{-4} atm·cc/yearに単位換算される。この漏れ量は大気圧下で3.1ccの気体が1万年の年月をかけて流れるという極微小な流量であり、HLDがいかに微小な漏れ試験を扱うかを理解いただきたい。

3. 構成と原理

3.1 排気系統

図3は一般的なHLD内部排気系統とその構成機器である。HLD自体もその測定方式から一つの真空装置であり、構成品としても真空機器が多く用いられている。

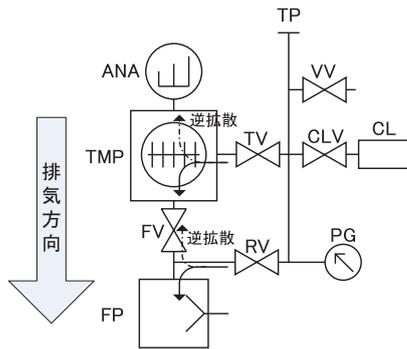


図3 ヘリウムリークディテクタ排気系統図

TP：テストポート（試験体やスニッファープローブを接続するポート）、TMP：ターボモレキュラーポンプ（分析管を排気する高真空ポンプ）、FP：フォアポンプ（試験体内とTMPを大気圧下から真空排気するポンプ）、ANA：分析管（ヘリウムのイオン電流測定）、PG：ピラニ真空計（圧力測定）、CL：校正リーク（トレーサブルの取れた漏れの発生）、TV：テストバルブ、FV：フォアバルブ、RV：粗引バルブ、CLV：校正リークバルブ、VV：ベントバルブ

3.2 カウンターフロー

図3で構成される一般的なHLDの測定開始からの内部動作フローを紹介する。

- (1)HLDの起動完了の後、試験体をTPに接続、HLDで測定開始を実行する。
- (2)VVとFVが閉じ、RVが開き試験体内を減圧する。
- (3)試験体内圧力が規定圧力以下になるとFVが開き比較的大きな漏れ（ $10^{-8} \sim 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度）の測定状態となる。
- (4)さらに減圧が進み規定圧力以下になるとRVが閉まりTVが開き微小な漏れ（ $10^{-12} \sim 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度）の測定状態となる。

測定の工程である(3)(4)の工程では、TMPとFPの作用により、RVもしくはTVから導入されるガスのうち大部分は実線矢印方向に流れるが、一部のガスは逆拡散して点線矢印方向に流れANAに到達する。TMPはその原理上軽い分子に対しての圧縮比は低く、逆拡散量が多くなるため、軽いガスであるヘリウムは、他のガスに比べ点線矢印方向に流れやすく、ANAに到達しやすいという特徴がある。

このようなTMPの逆拡散現象を利用する測定方式は、「カウンターフロー」と呼ばれ、昨今のHLDに多く採用されている。HLDの機種によりTVを複数設けるなど、ガスの導入口に工夫が見られる。

3.3 分析管

分析管は磁場偏向型の質量分析計となっている（図4）。ヘリウムガスはこの分析管内でヘリウムイオン電流として検知される。分析管内は、ガスイオン飛行軌道確保のため、分子流領域の圧力状態（分子同士の衝突よりも分子と壁の衝突が支配的な状態）が必要である。そのため、分析管内はTMPに

よる真空排気により、圧力は 10^{-2} Pa 以下の高真空に保たれている。

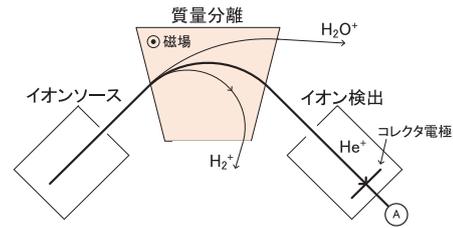


図4 分析管

3.3.1 イオンソース

ガスをイオン化し、ガスイオンを放出する場所である。イオンソース内の赤熱させたフィラメントから放出された熱電子の衝突を受けたガス分子は、電子が弾かれ正の電荷を持つガスイオンとなる（イオン化）。

ガス分子 → ガスイオン + 電子



ガスイオンは、イオンソース内の電場によってエネルギー（加速電圧 V_{acc} ）を得て、イオンソースから質量分離部へ放出される。その他、イオンソースには、熱電子の飛行誘導、ガスイオンビーム収束等を目的とした電極が複数設けられている。

3.3.2 質量分離

ガスイオンを質量分離する場所である。質量分離部には飛行軌道と垂直方向の磁場が設けられている。イオンソースで加速電圧のエネルギーを得たガスイオンは、質量分離部に設けられた磁場 B によってローレンツ力を受け、質量電荷比 M/z （質量数 M とイオン価数 z の比）によって決まる半径 r の円軌道で飛行する（式1）。質量数の小さい水素イオン（ $M/z = 2$ ）などは軌道半径が小さく、質量数の大きい水イオン（ $M/z = 18$ ）などは軌道半径が大きくなり、ヘリウムイオン（ $M/z = 4$ ）のみがイオン検出部に到達する。

$$r \propto \frac{\sqrt{V_{acc} \cdot M/z}}{B}$$

式1 ガスイオン軌道半径と質量電荷比の関係

3.3.3 イオン検出

ヘリウムイオンを電流として検出するための電極（コレクタ電極）が設けられている。スリットなどを設け、ヘリウム以外のガスイオンは遮られる。検出されるヘリウムイオン電流は、微小な電流であることから、検出部に増倍器を設ける機器もある。

3.4 校正リーク

校正リークとは、トレーサブルの取れた漏れを発生させる機器である。HLDは漏れ量の測定のため、校正リーク吸引時と非吸引時のヘリウムイオン電流を測定し、ヘリウムイオン電流と漏れ量の関係を与える工程（校正作業）を事前に行う必要がある。

校正リークは2種類の漏れの発生方式がある。チャンネル型校正リークは内部の細管から漏れを発生させ、メンブレン型校正リークはガラスや樹脂の透過現象により漏れを発生させる(図5)。一般的に、メンブレン型校正リークの方が、チャンネル型校正リークより小さい漏れ量が扱われる。



図5 校正リーク(左:チャンネル型, 右:メンブレン型)

3.5 制御

初期のHLDは、ヘリウムイオン飛行軌道の調整や、校正リークを用いた校正作業を作業員自身で行う必要があり、取り扱いに熟練が必要な機器であった。しかし、1990年代には、HLD内動作の自動化が進み、近年のHLDは誰でも簡単に漏れ試験ができる機器となっている。さらには、製品の量産設備などに用いられる漏れ試験の自動システムにおいては、上位システムからHLDを制御することで、作業員が直接HLDの操作をすることなく試験を進める事も可能となっている。

4. 試験例

4.1 真空容器

真空装置で扱われる真空容器に対しては、試験体の外側から内側への漏れ試験が行われる。試験体内部をHLDで真空に排気、試験体外側にヘリウムガスを吹き付けながら走査する真空吹付け法(JIS Z 2331 附属書1)の試験が一般的である(図6)。



図6 真空容器の試験

試験体の溶接部やシール部に欠陥があり漏れが生じていると、試験体外側に吹き付けたヘリウムガスは、試験体内側に流れ込み、真空空間で拡散され、HLDに到達し検出される。

ヘリウムガス吹付けからHLDに検出されるまでの応答時間は、漏れ流路の形状、試験体の形状や内容積、HLDの排気速度等に依存し、注意が必要である。応答時間を試験体の内容積 V をHLDの排気速度 S で

除した、真空排気の時定数 V/S を目安と考える簡易的な方法もあるが、試験体に校正リークを接続しての確認を推奨する。

また、試験体の減圧時間短縮のため、HLDと並列で真空ポンプを設ける試験方法がある。この方法は、試験体に漏れ込んだヘリウムガスのすべてがHLDに流れ込まないため、実際の漏れ量は、HLDの測定漏れ量よりも大きい事に注意が必要である。

4.2 加圧容器

HLDでは、専用のプローブを接続する事で、スニッファー法(JIS Z 2331 附属書3)による試験体の内側から外側への漏れ試験を行うこともできる。スニッファー法では、漏れ量単位以外に、ヘリウム濃度単位ppmによる試験も可能となる。

図7は、配管継手部に対してHLDを用いたスニッファー法の試験を行っている様子である。配管内にヘリウムガスを加圧させ、試験箇所である継手部にスニッファープローブを近づけ、ガスを吸引しヘリウムガスの漏れ出しの有無を確認する。



図7 スニッファー法による配管試験例

スニッファー法は加圧される試験体に用いられ、真空装置においても、加圧状態で使用されるガス配管、冷却水配管などに採用される機会が多い。漏れ量の測定下限は、 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (大気圧下換算 $3.1 \text{atm} \cdot \text{cc}/\text{year}$)と微小な漏れ試験が可能となる。ただし、測定雰囲気中に多くのヘリウムガスが存在すると漏れ有無の見極めが難しく、注意が必要である。

5. おわりに

昨今、HLDによる漏れ試験は、微小漏れの検出、漏れ量の定量、試験時間短縮、乾燥工程不要などの理由で、真空装置に限らず、自動車部品、空調冷凍機部品、食品・医療品の梱包関連品、さらには原子力関連に及ぶまでその使用範囲は広がっている。

本稿を通じて、漏れ試験に関わる方々の理解や運用の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本非破壊検査協会：漏れ試験 I, II
- 2) ULVAC TECHNICAL JOURNAL No.79 p.14-18 (2015)

(原稿受付：2020年4月6日)

解説

プラズマ流による殺菌・ウイルス不活化法

著者紹介



さとう たけひこ
佐藤 岳彦

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: takehiko.sato.d7@tohoku.ac.jp

1995年東北大学大学院工学研究科博士課程修了。松下電工(株)、東北大学助手、講師、助教授、准教授を経て、2011年同大学流体科学研究所教授、現在に至る。プラズマ医療・殺菌、気液プラズマ流の研究に従事。日本機械学会、静電気学会などの会員。博士(工学)。

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) のパンデミックは、世界中に社会秩序の混乱と経済的損失を招き猛威を振るっている。感染症と人類との戦いは古代より続けられており、ペスト、天然痘、はしか、インフルエンザなどでは多くの人の命が失われ、国の衰退や社会秩序の変革をもたらしてきた。この壮絶な歴史は、「感染症の世界史 (石弘之、角川ソフィア文庫)」に詳述されている。100年前に発生したスペイン風邪では、日本においても1918年と1919年の2回に渡り感染が起り、多大な被害が発生した。今回のパンデミックもしばらくは気が抜けない状況が続く可能性が高い。

ウイルスは、核酸とそれを取り囲むタンパク質からなるカプシド、カプシドを包み込む脂質やタンパク質を主成分とするエンベロープから構成される。核酸がRNAかDNAか、エンベロープがあるかないかにより大きく4種類に分けることができる。エンベロープには糖タンパク質が組み込まれており、標的とする細胞の受容体と結合することで細胞内への侵入を容易にしている。また、RNA型は比較的変異しやすい性質を持つため、抗体ができて回避されやすい。インフルエンザウイルスやコロナウイルスは、エンベロープを有する一本鎖RNAウイルスのため感染力が高い。ウイルスが細胞に結合すると、ウイルスゲノムやカプシドは、細胞膜と融合し細胞質に直接放出されるか、エンベロープのまま取り込まれ小

胞による酸性化で細胞質内に放出される。RNA型の多くは、ウイルスRNAがmRNA (メッセンジャーRNA) として機能し、細胞質内で複製やタンパク質合成が行われる。十分にゲノムとタンパク質が産生されると細胞内でウイルスが再構築される。ウイルスは種類により宿主細胞における感染形態が異なり、急性 (溶解)、持続、潜伏、形質転換などのタイプがあり、急性の場合、宿主細胞は死滅する¹⁾。

さて、新型コロナウイルスであるが、エンベロープ型であり、エンベロープが破壊されると細胞には感染できないため、脂質を変性させるアルコール消毒が有効となる。また、接触感染や飛沫感染することが知られており、エアロゾルで3時間、段ボールで24時間、プラスチックでは72時間、感染力が維持されることが報告されていることから²⁾、マスクや手洗いが感染予防の基本となる。

2. 病原微生物

病原微生物には、ウイルス、細菌、真菌、原虫などがあり、ここでは、感染性タンパク質であるプリオンも病原体として紹介する。その大きさは、ウイルスが20 ~ 300 nm、細菌が0.3 ~ 10 μm、真菌が数μm、原虫が1 ~ 20 μmと幅広い。さらに、外部環境の変化に高い抵抗性を示す芽胞菌やバイオフィーム、孢子、シストなどの形態を取ることがある³⁾。

ウイルス：前節で紹介しなかったノンエンベロープウイルスには、消化管から侵入するウイルスとして、ノロウイルス、ロタウイルス、アデノウイルス、A型肝炎ウイルスなどがあり、胃酸、胆汁酸、膵臓からの消化酵素でも分解されない強固な構造を有し、不活化が難しい⁴⁾。ウイルス全般について、病原性を発現する機構は、(1)感染細胞が破壊されることによる組織や器官の損傷、(2)ウイルスに対する免疫機能の発現により感染細胞が攻撃を受けて破壊、(3)感染細胞の免疫が抑制され二次的な病態の発現の3つが知られている。

細菌：原核細胞であり、形状から球菌、桿菌、らせん菌の3種に分けられる。また、細胞壁の構造の違

いから、グラム陽性菌とグラム陰性菌に分類できる。グラム陽性菌の細胞壁は、厚さ50～80 nmでペプチドグリカンを中心成分とし、タイコ酸が含まれる。ペプチドグリカンと細胞膜は、細胞壁内あるいは細菌表面に局在する細胞壁結合タンパク質や、細胞膜と共有結合するリポタンパク質により結合している。グラム陰性菌の細胞壁は、薄いペプチドグリカン膜と外膜からなる。外膜はリン脂質の二重層、リポ多糖、リポタンパク質、タンパク質で構成されている^{4,5,6)}。リポ多糖は、エンドトキシンとして知られ外膜に組み込まれている。その生物学的活性は、リポDが担っており、致死毒性や発熱反応、白血球減少作用など病原性を発現する要因となっている⁷⁾。細胞壁のペプチドグリカンは細胞の内部浸透圧による膨張を抑え、細胞の形状を維持する役割を担う。細胞壁が損傷を受けると細胞が膨張し、最終的には破裂し溶菌に至る。

芽胞は栄養条件の悪化などにより休眠耐久型細胞に変化した状態である。Bacillus属やClostridium属の菌が形成し、物理化学的作用に対して高い抵抗性を持つため、病院などにおける滅菌検査、指標菌として用いられている。芽胞の構造は、外側から、エクソスポリウム、芽胞殻(外層と内層)、芽胞外膜、皮層、芽胞壁、芽胞内膜、芯部となる。芽胞殻は、主にシステインなどのタンパク質からなり、芽胞全体のタンパク質の50-80%を占める。芽胞殻は、大きな分子の透過に対する障壁となっているだけでなく、酸化剤に対する防壁の役割を担う。皮層はペプチドグリカンから成るが殻内の脱水の維持を担い、芽胞壁は発芽と成長を担う。芽胞内膜は脂質親和性のある物質から構成され不透過性を有し、芯部はDNA, RNA, リボソーム、酵素が収められ強い脱水環境にある⁸⁾。

バイオフィームは、多糖とタンパク質を主成分とする細胞外高分子物質に包まれた凝集体で、物質表面に強固に付着するだけでなく、高密度に内包されている菌体同士も結びつけ構造を維持する機能を有すため、抗菌薬の作用や宿主の防御機構の攻撃に対して高い抵抗性を持つ^{6,9)}。

病原性の発現は、毒性を示す代謝産物を産生することで、正常な細胞や組織を破壊したり炎症反応や免疫低下を起こすことになる⁴⁾。

真菌：真核細胞であるが、細胞膜と細胞壁を備えているのが特徴である。細胞膜はリン脂質とグリセリドに加え、エルゴステロールなどが含まれ、細胞壁は主にキチン、グルカン、糖タンパク質から構成される⁴⁾。形態は、酵母、糸状菌、胞子をとる。カンジダ症や白癬などの真菌症の原因となることが知ら

れている⁴⁾。

原虫：単細胞の真核細胞であり、基本的な構造は一般的な動物細胞と同じで、細胞膜に核や細胞質が含まれる。人体への寄生原虫は鞭毛虫類、根状仮足類、孢子虫類、キネトフォラグミノフォラに分類され、トキソプラズマ症、マラリア、アメーバ症、トリパノソーマ症などの原虫感染症を引き起こす。形態を変化させシストやオーシストになると厳しい環境においても抵抗性を持ち、スポロゾイトは1年間生存できる^{4,10)}。

プリオン：神経細胞膜に付着する膜糖タンパク質であり、正常型と異常型がある。プリオン病を発現するのは異常型で、プロテアーゼ抵抗性を持ち、脳内に蓄積し神経細胞に障害を与える。正常型は、異常型と結合することで異常型プリオンタンパク質に変換し、異常型が増幅すると考えられている^{4,11)}。

3. 病原微生物の不活化原理

微生物を不活化する手法は、低温・高温、乾燥、酸素、浸透圧、紫外線・放射線、高電圧パルス電界、放電、超音波、ろ過、化学薬品(消毒薬)などがあり、いずれもタンパク質や細胞器を不活化し機能を失わせる手法である⁴⁾。微生物の種類を一般的な抵抗性の強い順に並べると、強い順に、①プリオン⇒②芽胞菌⇒③原虫のオーシスト⇒④抗酸菌⇒⑤小型のノンエンベロープウイルス⇒⑥原虫のシスト⇒⑦真菌の胞子⇒⑧グラム陰性菌⇒⑨栄養形の真菌⇒⑩大型のノンエンベロープウイルス⇒⑪グラム陽性菌⇒⑫エンベロープウイルスであることが報告されている¹¹⁾。医療用滅菌法である高圧蒸気滅菌、酸化エチレンガス滅菌、過酸化水素低温ガスプラズマ滅菌、放射線滅菌では、芽胞菌の滅菌が可能であるがプリオンの不活化は困難である。プラズマを利用した殺菌法は、近年食品や農業への応用も進められている¹²⁾。ここでは、放電を利用している紫外線やオゾン、低温プラズマ、高電圧パルス電界の不活化原理について解説する。

紫外線：260 nm近傍の波長が細胞のDNAに吸収され、チミン二量体を生成しDNAの複製を阻害する。微生物の種類に関わらず不活化できる上、薬品や加熱などの作用がなく、耐性菌の発生や、殺菌効果の残存もなく、簡便に利用できるなどの特徴を持つ。しかしながら、照射部位にしか効果を与えず、物体の陰など不活化できない部位が生じる問題点もある¹³⁾。

オゾン：細胞壁が酸化され損傷し細胞の内部浸透圧による細胞質膜の膨張を抑えられなくなり、最終的に破裂し細胞質が流出し死滅すると考えられている。グラム陰性菌では細胞壁に含まれているリポタンパ

ク質が酸化を受けやすい¹³⁾。他にも酵素の不活化、リボソームや細胞小器官の損傷、DNAの損傷があると考えられている。オゾンは放電や電解により比較的簡便に生成できる上、自然分解するため利用しやすい。溶存オゾンはグラム陰性菌に対しては菌種に関わりなく低曝露量でも効果的に殺滅できるが、芽胞菌、酵母、糸状菌に対しては菌種に依存し、耐熱性芽胞菌には効きにくい。また、温度やpHにより分解速度が異なり¹³⁾、殺菌効果に影響を与える。気中におけるオゾンガスの殺菌効果は水中と比較すると低い。殺菌効果を高めるためには、温度や相対湿度を適切な条件にすること、また分解を促進する窒素酸化物などの生成が必要である。

低温プラズマ：減圧プラズマの場合は、減圧容器内で生成した酸素ラジカルにより細胞壁を酸化し損傷することでオゾンと同様に溶菌を起させる。また、酸素原子などが、細胞壁を透過し細胞器官やタンパク質などを酸化し不活化させる。医療器具の殺菌装置としての開発が進められている。大気圧下では、リモートプラズマ、プラズマジェット、誘電体バリア放電、マイクロ波などの方法が提案されている¹⁴⁾。発生させる化学種や照射面積、温度など、発生方法を殺菌対象に応じて適切に選ぶ必要がある。

プラズマを発生し酸素に電子付着させるとスーパーオキシドアニオン ($O_2^- \cdot$) が生成される。 $O_2^- \cdot$ はヒドロペルオキシドラジカル ($HO_2 \cdot$) と水溶液中で平衡状態となる ($O_2^- \cdot + H_2O \rightleftharpoons HO_2 \cdot + OH^-$)。この pK_{HO_2} は4.8であり、pHを調整することで細胞内に浸透しやすい $HO_2 \cdot$ の濃度を上げ、細菌の殺滅効率を大幅に向上できる。また、生成される一酸化窒素 ($NO \cdot$) との反応により、水中には反応性の高いパーオキシナイトライト ($ONOO^-$) やニトロニウムイオン (NO_2^+) が生成され細胞膜の過酸化やタンパク質の酸化などを引き起こす。な

お、 $HO_2 \cdot$ の生成は、亜硝酸 (HNO_2) と過酸化水素 (H_2O_2) の反応から得られるペルオキシナイトライト ($HOONO$) から生成される過硝酸 ($HOONO_2$) の分解でも得られることが報告されている。他にも、 $NO \cdot$ とオゾン (O_3) の反応で生成される二酸化窒素 ($NO_2 \cdot$) や、酸素 (O_2) や O_3 から生成される反応性の高い一重項酸素 (1O_2) も殺菌に寄与すると考えられる^{3,15,16)}。

高電圧パルス電界：細胞膜はリン脂質からなる二重構造で、膜タンパク質を介して細胞内のイオン濃度は一定に保たれ、細胞質は外部に対して常に負に帯電している。細胞膜に高電界が印加されると、膜に電気的な力がはたらき、膜に孔が形成される。孔が小さいと修復されるが、大きくなると修復不可能になり、細胞質が流出し死滅する。パルス電界は一般に対象物内部にも作用し、広範な領域を処理できる¹²⁾。

4. 低温プラズマ流による殺菌・ウイルス不活化

ここでは、当研究室で今まで行ってきた細菌やウイルスの不活化実験の結果を紹介する。

4.1 ウイルス不活化実験

図1にプラズマ流によるウイルス不活化実験装置を示す。コンタクトレンズ容器の蓋の裏側に厚さ0.2 mmのアルミナ板の両側に電極を設置し、印加電圧を±1.4 kV_{pp}、40 kHzで印加し、容器側の電極にプラズマを発生させた。ウイルス混合培地を容器に入れ、プラズマを規定の条件で照射し、プラズマ処理ウイルス液を段階的に10倍希釈し、細胞を培養しているプレートに希釈液を滴下し、インキュベータで168時間培養した。その後、ウイルス感染に伴う細胞変性効果 (CPE) を観察することでウイルス力価を定量化するTCID₅₀法で評価した。ここでは、エンベロープの有無とDNA/RNAの組み合わせから4種類のウイルス：インフルエンザ (エンベロープ有, RNA)、ヘルペス (エンベロープ有, DNA)、アデノ (エンベロープ無し, DNA)、エンテロ (エンベロープ無し, RNA)、を抽出した。照射時間は30分と60分、容器内の液量は2000, 300, 50 μLとした。ウイルス実験は、東北大学大学院医学系研究科微生物学分野の押谷仁教授の指導の下で行った。

表1にウイルス不活化結果の一覧を示す。インフルエンザウイルスは液量2000 μLで60分、ヘルペスウイルスは液量300 μLで30分、アデノウイルスは液量300 μLで60分照射することで不活化できることが明らかになった。一方、エンテロウイルスは、液量50 μLで30

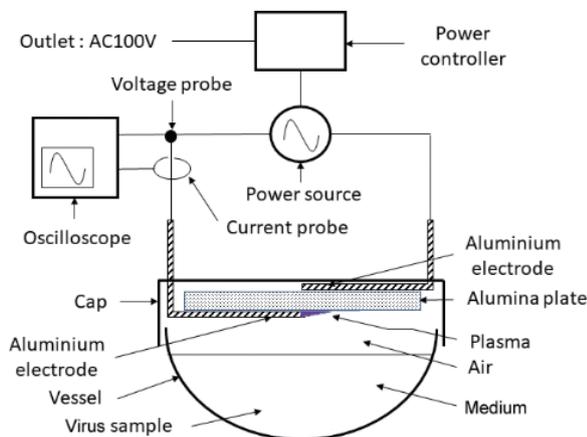


図1 ウイルス不活化実験装置^{17,19)}

表1 プラズマ処理によるウイルス不活化実験結果¹⁷⁾

| | | Control | Plasma-treated (Discharge time [min], Liquid volume [μ L]) | | | | |
|---|-----------------------------|---------|---|-------------|------------|------------|-----------|
| | | | 30, 2000 | 60, 2000 | 30, 300 | 60, 300 | 30, 50 |
| Virus titer (\log_{10} (TCID ₅₀)) | Influenza (RNA, Env +) | 7.25 | 7.00 | <1.50 | <1.50 | | |
| | Herpes (DNA, Env +) | 4.75 | 4.50 | 4.50 | <1.50 | | |
| | Adeno (DNA, Env -) | 6.00 | 5.75 | 5.00 | 4.50 | <2.50 | <1.50 |
| | Enterovirus (RNA, Env -) | 4.75 | | 4.25 | 4.00 | 4.25 | 4.50 |

分照射しても不活化されなかった。これより、液中のエンベロープウイルスはプラズマ処理によりノンエンベロープより不活化しやすいことが示されたが、実用性に向けた検証や再現性の確認などが必要であり、今後検討していきたい¹⁷⁾。

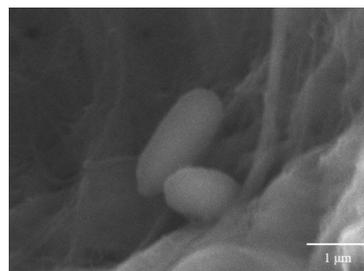
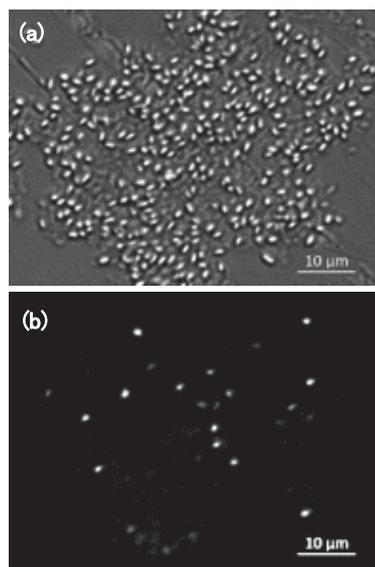
4.2 芽胞菌殺菌実験

図1に示す実験装置において、効率を向上させるために電極形状を直線状から円形に変えて、 ± 1.6 kV, 40 kHzの放電条件で、芽胞菌の殺菌効果を検証した。芽胞菌は、高圧蒸気滅菌法の指標菌として用いられる*Geobacillus stearothermophilus* (ATCC 7953)の芽胞が塗布された生物学的インジケータ（3M Health Care, Attest 1291）（以下BI）を使用した。このBIは5桁低減を保証していることからここでは滅菌と見なす。滅菌判定には滅菌判定器（3M Health Care, 290オートリーダー）を用いた。芽胞菌の酵素活性の蛍光反応を読み取ることで行う。BI内の芽胞が塗布された紙を滅菌容器内に入れて、気中滅菌ではそのまま、水中滅菌では純水2 mLを入れて放電した。放電終了後に芽胞が塗布された紙をBIに戻した。この工程は無菌状態を保つため、クリーンベンチ内で行った。滅菌処理後のBIを、滅菌試験器を用いて、指標菌が滅菌されているかどうか確認した。また、12回試行を行い、すべてのBIが滅菌された時点を滅菌完了とした。

表2に滅菌性能試験の結果を示す。表中の+は滅

表2 プラズマ処理による芽胞菌滅菌結果¹⁸⁾

| | Discharge time [min] | Result [+ : NOT sterilized, - : Sterilized] |
|----------|----------------------|---|
| In air | 1 | + + + + + + + + + + - - |
| | 2 | + + + + + + + - - - - - |
| | 3 | - - - - - - - - - - - - |
| | 4 | - - - - - - - - - - - - |
| In water | 3 | + + + + + + + + + + + + |
| | 5 | + + + + + - - - - - - - |
| | 8 | - - - - - - - - - - - - |
| | 10 | - - - - - - - - - - - - |
| | 20 | - - - - - - - - - - - - |

図2 水中の芽胞菌を微量窒素(0.2 ppm)を含む酸素ガスプラズマで25分処理したSEM画像¹⁹⁾図3 プラズマ処理後の芽胞菌の(a)明視野観察と(b)蛍光観察の様子（実験条件は図2と同じ）²⁰⁾

菌失敗，-は滅菌成功を表す。表より滅菌は、気中では3分、水中では8分で完了した。水中での滅菌の場合、気中で生成された活性化学種が芽胞菌に輸送されるのに時間が必要であることと、短寿命活性種が失活し安定した化学種に変化してしまったためと考えられる。なお、化学種の輸送は、イオン風により気流が生成され気中に循環流れが形成され、それに伴い水の流れが誘起され輸送される^{18,19)}。

つぎに、同じ実験装置を利用し、微量窒素ガス(0.2 ppm)を含んだ酸素ガスにより滅菌を行った場合の、芽胞菌のSEM写真を図2に示す。芽胞菌は殺滅されているものの形状に変化は見られない。図3は(a)光学顕微鏡による芽胞菌の明視野観察の様子であり、(b)は蛍光観察した結果である。蛍光染色は、DNAにインターカレートするヨウ化プロピジウム溶液(PI: Propidium iodide)を用いた。蛍光発光が認められることから、一部の芽胞菌に微細孔が形成されていることが示された。これより、芽胞菌の殺滅機構は、化学種の拡散による酸化だけでなく、穿孔による化学種の浸透の可能性が示された²⁰⁾。

5. おわりに

著者が、プラズマ殺菌に取り組み始めたのは、2003年である。きっかけはSARSであり、将来のパンデミックへの感染予防に貢献するべく研究開発を進めてきたが、今回のCOVID-19には残念ながら間に合わなかった。プラズマは、低温・低コスト・安全な上、プラズマが誘起する流れにより効果的に殺菌が可能などの優位性があり、コンタクトレンズのプラズマ滅菌・洗浄装置の実用化も進めているが、製品にするためのハードルは高く、研究成果を社会に出すための難しさを痛感しているところである。しかし、パンデミックが将来また発生したときに向けて対応ができるように研究を進めていきたい。最後に、本解説に掲載した成果に関わられた皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) 下遠野邦忠, 瀬谷司 (監訳): 生命科学のためのウイルス学, 南江堂, p. 2-43 (2015).
- 2) van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., Munster, V. J.: Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1, *The New England Journal of Medicine*, Vol. 382, No. 16, p. 1564-1567 (2020)
- 3) 大久保雅章 (監修): プラズマ産業応用技術—表面処理から環境, 医療, バイオ, 農業用途まで— (第4章, 1. プラズマ殺菌, 佐藤岳彦 (著)), p. 244-254 (2017)
- 4) 平松啓一 (監修), 中込治, 神谷茂 (編集), 標準微生物学, 医学書院 (2013).
- 5) 上原剛: 細菌の形態形成における細胞壁造形機構, *生化学*, Vol. 85, p. 349-353 (2013)
- 6) 白土明子: 黄色ブドウ球菌の細胞壁成分による自然免疫の誘導と制御, *生化学*, Vol. 84, p. 737-752 (2012)
- 7) 真下順一: リピドAの化学構造とShwartzman活性, *昭和大学薬学雑誌*, Vol. 1, p. 127-139 (2010)
- 8) A. Driks: *Bacillus subtilis Spore Coat*, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, Vol. 63, p. 1-20 (1999)
- 9) 稲葉知大, 清川達則, 尾花望, 豊福雅典, 八幡穰, 野村暢彦: 集団微生物学のすすめ, *化学と生物*, Vol. 52, No. 9, p. 594-601 (2014)
- 10) J. P. Dubey, D. S. Lindsay, C. A. Speer: Structures of *Toxoplasma gondii* Tachyzoites, Bradyzoites, and Sporozoites and Biology and Development of Tissue Cyst, *Clin. Microbiol. Rev.*, Vol. 11, No. 2, p. 268-299 (1998)
- 11) A. Sakudo, H. Shintani (Eds.), *Sterilization and Disinfection by Plasma: Sterilization Mechanisms, Biological and Medical Applications*, Nova Science Publishers, New York (2014)
- 12) 大嶋孝之: 食品分野における非加熱殺菌技術 (第4講 高電圧パルス電界・放電を用いた非加熱殺菌技術), *NTS*, p. 63-80 (2013)
- 13) 高野光男, 横山理雄 (監修), *新殺菌工学実用ハンドブック*, サイエンスフォーラム (1991).
- 14) 佐藤岳彦: 大気圧プラズマ流の研究動向, *機械の研究*, Vol. 66, p. 455-464 (2014)
- 15) 佐藤岳彦: 大気圧プラズマ流による細菌の殺滅, *静電気学会*, Vol. 37, No. 3, p. 127-131 (2013)
- 16) S. Ikawa, A. Tani, Y. Nakashima, K. Kitano: Physicochemical properties of bactericidal plasma-treated water, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 49, 425401 (2016)
- 17) 岡崎和貴: 大気圧低温プラズマ流による滅菌用コンタクトレンズケースの開発, *東北大学修士論文* (2016)
- 18) 佐藤岳彦, 神山秀人, 中嶋智樹, 長沢敏勝, 藤村茂, 中谷達行: コンタクトレンズ用プラズマ殺菌装置の開発, *静電気学会誌*, Vol. 42, No. 1, p. 27-33 (2018)
- 19) K. Muramatsu, T. Sato, T. Nakajima, T. Nagasawa, T. Nakatani, S. Fujimura: Sterilization in liquids by air plasma under intermittent discharge, *Mech. Eng. J.*, Vol. 7, No. 1, p. 1-9 (2020)
- 20) 及川港基: 酸素プラズマの芽胞菌不活化作用と微量窒素酸化物の影響, *東北大学修士論文* (2018)

(原稿受付: 2020年5月18日)

抗菌・除菌フィルタの要素・評価技術

著者紹介



おお いし たかし
大石 崇
CKD株式会社
〒485-8551 愛知県小牧市応時二丁目250番地
E-mail: takashi-ohishi@ckd.co.jp

2008年日本大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年CKD株式会社に入社、現在に至る。FRL機器の設計に従事。日本フルードパワーシステム学会。

1. はじめに

「食の安全と安心」に関心が高まる中、食品機械・装置に対して安全かつ衛生的な対応がより強く求められる。食品生産では包装・充填・圧送・洗浄・乾燥・攪拌工程で圧縮空気が用いられる。たとえば、食品を包装する際の包装材の開封、食品充填時の容器のブロー、食品材料の攪拌などである。2020年6月HACCP義務化にともない、食品製造や食品機械の用途において圧縮空気の異物混入防止および細菌対策の要求が高まっている。当社では細菌の増殖を抑制する「抗菌」と、菌の数を減らし清浄度を高める「除菌」技術に注目している。そこで、長年培ってきた工作機械などを対象とする工業用フィルタのろ過技術と抗菌・除菌材料の要素技術を融合し、食品業界の要求に対応するための「抗菌・除菌フィルタ」を開発した。本稿ではこの抗菌・除菌フィルタの特長や要素技術および評価技術について紹介する。

2. 細菌について

細菌はその形により球菌、桿菌およびらせん菌に大きく分けられている¹⁾(図1)。球菌の大きさは直径0.5～1μm(1mm=1,000μm)であり、その配列や集合状態から単球菌、双球菌、連鎖球菌などと呼ばれる。桿菌は棒状の細菌で、普通は幅0.5～1μm×長さ2～4μmであるが、中には比較的短い形の短桿菌や幅に比較して長さの大きい長桿菌もある。一般に細菌の大きさは0.3μm以上と言われている。

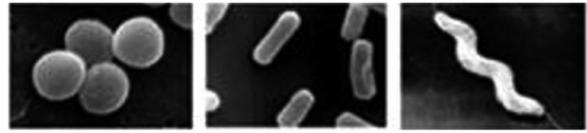


図1 細菌の分類

3. 抗菌・除菌とは

抗菌は日本工業規格JIS Z 2801で、「製品の表面における細菌の増殖を抑制する状態」と定義されている²⁾。

また、洗剤・石けん公正取引協議会が定義する除菌とは、「物理的、化学的または生物学的作用などにより、対象物から増殖可能な細菌の数(生菌数)を有効数減少させること」と定義されている²⁾。いずれも清浄度を高めることであり、細菌がなくなることではないこと、ろ過度以下のウイルスなどは除去できないことに注意が必要である。

4. 抗菌・除菌フィルタに求められる性能と要素技術

抗菌除菌フィルタに要求される性能と指定事項を以下の表1に示す。

表1 要求される性能と指示事項

| 必要な性能 | 要求値 | 要素技術 | 評価試験 |
|--------------------------|-------------|------------------------|--|
| エレメントろ材の抗菌性能 | 抗菌活性値2.0以上 | 抗菌剤を添加したフィルタろ材の開発と評価技術 | JIS L 1902「繊維製品の抗菌性試験方法及び抗菌効果」 |
| ろ過性能 | 99.99%以上 | フィルタエレメントの設計と製造技術 | JIS B 8392-4「個体粒子含有量の試験方法」 |
| 細菌補足性能 | LRV8以上 | フィルタエレメントの製造技術と評価技術 | JIS K 3835「精密ろ過膜エレメント及びモジュールの細菌補足性能試験方法」 |
| 食品衛生法に適合した合成樹脂材料とゴム材料の採用 | 食品衛生法に適合 | 流体通路部樹脂材料とゴム材料の選定と評価 | 食品、添加物等の規格基準として昭和34年厚生省告示第370号の材質試験と溶出試験 |
| 食品機械用潤滑剤の採用 | NSF H1 グリース | 使用グリースの選定 | アメリカ国立科学財団NSFが認証するH1グリース |

5. 当社の抗菌・除菌フィルタ技術

当社の抗菌・除菌フィルタは3タイプの抗菌・除菌フィルタで構成している。各フィルタの特徴を紹介する(図2)。



図2 抗菌・除菌フィルタ

5.1 抗菌5μmプレフィルタ

抗菌5μmプレフィルタはルーバーディフレクタのサイクロン効果により水分および個体粒子を分離する当社独自の構造を取っている。最適形状を求めするために解析ソフトを使用し、物質に働く遠心力で異物を除去できる流路を見極めた。その結果、異物の多くはエアの流れで除去でき、フィルタの長寿命化を実現している(図3)。

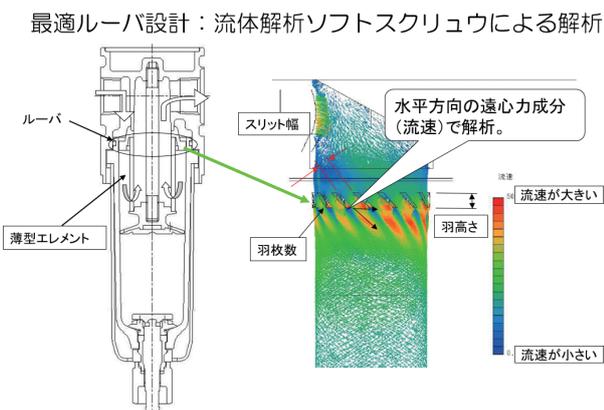


図3 抗菌5μmプレフィルタ

ルーバーディフレクタの効果だけでは分離できない細菌においては、抗菌5μmプレフィルタエレメントにより、異物除去と合わせ抗菌効果による増殖を抑制することで2次側への細菌流出を減らし、2次側フィルタの寿命を延ばしている。このフィルタエレメント(図4)のろ材には銀系無機抗菌剤とスギ花粉・ダニなど吸収除去する2つの機能をハイブ

リッドしたオリジナル繊維を採用している。銀系無機抗菌剤は従来の一般的な銀系粒子に対してナノサイズの微粒子を採用し、一般的な抗菌剤に対して1000倍の表面積を実現し、抗菌効果を高めている。



図4 抗菌5μmプレフィルタエレメント

5.1.1 抗菌剤について

抗菌剤は無機系、有機系に大別される。無機系抗菌剤は銀を用いたものが多く、安全性が高い。ほかに銅、亜鉛、酸化チタンを用いたものもある。当社が採用した無機系抗菌剤は細菌・カビ・酵母の広範囲で効果を発揮し、有機溶媒などによる溶出はなく長期にわたり抗菌性を発現する。また、耐熱性に優れ、プラスチックに練りこむことが可能である。有機系抗菌剤は即効性があるが水、熱などにより蒸発・分解を生じやすく、効果が低下する。

当社では銀イオンを使用している。上記の微粒子を使いフィルタ繊維に均一に添着させることで、抗菌効果の均一性を持たせることができた。溶出した銀イオンが細菌の内部に侵入し、細菌が栄養を取り入れる酵素の働きを停止させ死滅させると考えられている(図5)。



図5 酵素障害説

5.1.2 抗菌能力

JIS L 1902「繊維製品の抗菌性試験方法および抗菌効果」10定量試験 10.1菌液吸収法³⁾により、黄色ブドウ球菌と肺炎桿菌で抗菌力試験を行った結果、抗菌活性値4以上の優れた抗菌性能を有している⁴⁾。

この試験は標準布の増殖値Fと加工布の増殖値Gを測定し、つぎの計算式で求める。抗菌活性値=F-G
F: 標準布の24時間培養後の生菌数平均の常用対数から接種直後の生菌数平均の常用対数を引いた値、

G：加工布の24時間培養後の生菌数平均の常用対数から接種直後の生菌数平均の受容体数を引いた値。試験結果を図6に、培養後の生菌数測定平板を図7に示す。

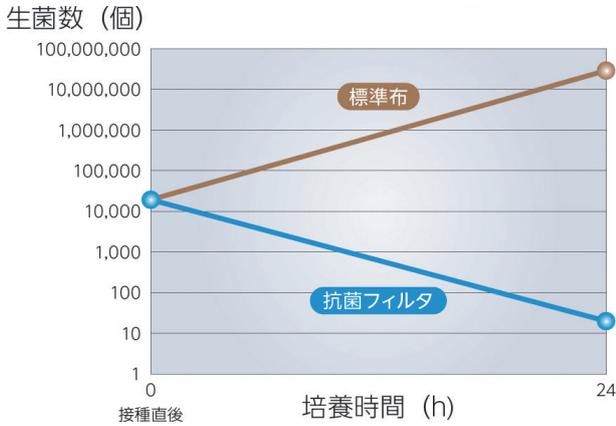


図6 抗菌力試験結果

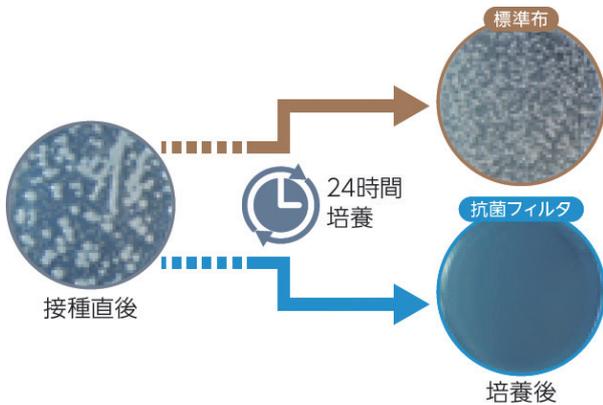


図7 培養後の生菌数測定平板

5.2 抗菌高性能フィルタ

抗菌5 μm プレフィルタに対し、さらにろ過度を高くすることを目的に、ろ材には有機系の抗菌剤に比べ安全性、持続性、耐熱性等に優れた銀系無機抗菌剤による抗菌加工を行ったグラスファイバー入りPET不織布(図8)を採用した。さえぎり・慣性・拡散・重力沈降・静電気の5つの捕集機構が総合的に作用して補足するコアレスニングフィルタである。抗菌高性能フィルタエレメント(図9)はプラス

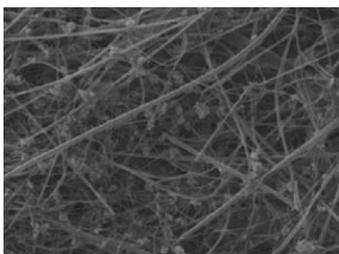


図8 抗菌不織布

チック製網状部材とろ材とが一緒に渦巻き状に巻回された当社特許構造および製造方法で製造されている(図10)。これにより、生産効率の問題を改善できた。



図9 抗菌高性能フィルタエレメント

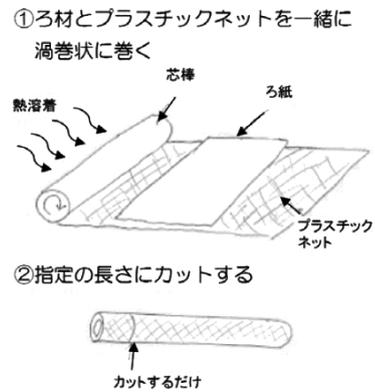


図10 エレメント構造

5.2.1 ろ過性能

JIS B 8392-4「個体粒子含有量の試験方法」⁵⁾に準拠して当社でろ過性能試験を実施し、当社独自構造のエレメントにて、0.1 μm ろ過効率99.99%以上(実力値)、細菌サイズの0.3 μm 以上については100%(実力値)の優れたろ過性能を実現した。

5.3 除菌フィルタ

除菌フィルタエレメント(図11)は、ストロー状の繊維の壁面に特殊な超微細孔がある中空糸膜(図12)で精密ろ過を行う。



図11 除菌フィルタエレメント

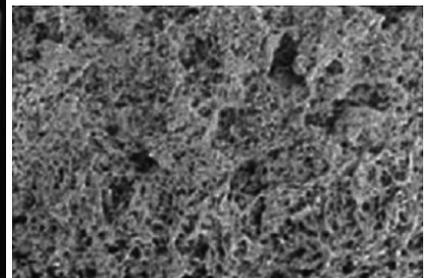


図12 中空糸膜

5.3.1 ろ過性能

JIS B 8392-4「個体粒子含有量の試験方法」⁵⁾に準拠して当社でろ過性能試験を実施し、0.01 μ mろ過効率99.99%の優れたろ過性能を実現した。

5.3.2 除菌性能

JIS K 3835「精密ろ過膜エレメントおよびモジュールの細菌補足性能試験方法」⁶⁾に準拠した除菌性能試験を行った結果、LRV8以上の優れた細菌補足性能を有している⁷⁾。

この試験の供試菌はBrevundimons diminuta ATCC19146 (図13)、菌数 8.5×10^8 の細菌をIN側から流し込み除菌フィルタのOUT側へろ液中漏出菌数 (図14) を測定し、つぎの計算式で求める。
LRV値 = \log_{10} 原水中の総菌数 / ろ液中漏出菌数 (0のとき1代入) = $(\log_{10} 8.5 \times 10^8) / 1 \geq 8.93$

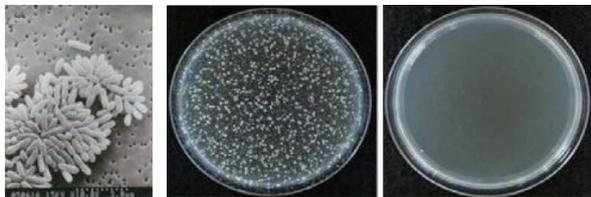


図13 供試菌 図14 チャレンジ菌数 (左) と漏出菌数 (右)

6. 菌・カビの測定技術

JIS B 8392-7圧縮空気—第7部：微生物汚染物質含有量の試験方法で測定する方法である⁸⁾。この試験は圧縮空気中に存在する個体粒子からコロニーを形成できる微生物 (たとえば細菌やカビ) を区別する試験方法である。サンプリング培養および微生物

粒子数量の決定手段である。エアースンプラーで微生物を補足する原理は、空気源から供給された圧縮空気は湿った寒天培地の表面に向かって狭いスリットあるいはホールを通して加速される。このとき空気分子は偏向させられるが微生物は完成によって寒天培地の表面に衝突する。適切に培養された微生物はコロニーに増殖し、ひとつの微生物がひとつのコロニーを発生させるという仮説のもとで計数される。

7. 終わりに

今後抗菌・除菌技術はさまざまな業界での需要が見込まれると考えている。特に食品業界ではHACCPの制度化にともない圧縮空気の管理が重要視されている。また医薬品・化粧品製造での異物や細菌混入防止など要求仕様を調査し、抗菌・除菌フィルタのシリーズ展開を図り、安全面での貢献を狙う。

参考文献

- 1) 細菌の分類 Kusuri-jouhou.com微生物学
- 2) JIS Z 2801 抗菌加工製品—抗菌性試験方法・抗菌効果
- 3) JIS L 1902 繊維製品の抗菌性試験方法及び抗菌効果
- 4) 抗菌力試験結果 一般財団法人日本食品分析センター第15037764001-0101号
- 5) JIS B 8392-4 圧縮空気—第4部：個体粒子含有量の試験方法
- 6) JIS K 3835 精密ろ過膜エレメント及びモジュールの細菌補足性能試験方法
- 7) 細菌補足性試験結果 日本微生物クリニック株式会社試験成績書発行番号 CJ2014.10-1
- 8) JIS B 8392-7 圧縮空気—第7部：微生物汚染物質含有量の試験方法

(原稿受付：2020年4月6日)

トピックス

学生さんへ、先輩が語る —電子工学から油圧システムへ—

著者紹介



もり た こう へい
森 田 晃 平

株式会社工苑

〒213-0032 神奈川県川崎市高津区久地 4-26-41

E-mail : morita@koenn.co.jp

開発部主任，2005年電気通信大学 電気通信学部
電子工学科卒業，株式会社工苑入社，現在に至る。
電気・電子・油圧制御システムの開発・設計・製作に従事。

1. はじめに

1.1 自己紹介

私は神奈川県で生まれ、大学卒業までを過ごした。電子工作に興味があったことから、工学系の単科大学の電子工学科に進学した。したがって大学では油圧や空気圧の専門科目の授業もなく、縁あって現在の勤務先に入社するまで、フルードパワーに関しては全くの素人であった。本誌の学生読者の多くは、フルードパワーに関係した学習や研究を行っていると思われる。私の学生時代と比べて現代のフルードパワーシステムは、電気・電子工学と密接に関係しており、今や切り離せない関係といえる。筆者の入社からこれまでの体験が、これから社会で活躍される学生さんの参考になるよう筆を進める。

1.2 企業の紹介

私の所属する工苑は、各種の電気油圧サーボ弁、電磁比例弁の駆動に不可欠な、アンプやコントローラの開発・設計・製造を40年以上行っているいわゆる中小企業である。自社ブランド製品の他、大手油圧機器メーカーからの受託によるOEM（相手先ブランド製造）製品も数多く手がけており、各種油圧制御システムを黒子として支える役割を担っている。近年は油圧アンプの製造販売を足掛かりとして、油圧サーボシステムを含むデジタル制御システム全体の開発も行うようになった。

2. 会社での業務紹介

2.1 入社して最初の担当業務

当時、電子工学科卒業生の多くは、家電や電子機器のメーカーに就職した。大学の先輩であった社長（当時）に誘われて、油圧システムもおもしろそうだと入社してはみたものの、当初は何もわからず勉強の日々であった。最初に担当したのは、油圧サーボ弁や電磁比例弁アンプの回路設計であった（写真1）。駆動アンプを必要とする電磁弁、電磁比例弁、サーボ弁等は、構造の違いやメーカー別に仕様が異なり、典型的な多品種・少量生産品であると感じた。先輩社員の助言を受けながら回路設計を行い、試作品を完成させ試験を行う。試験結果をフードバックし、問題があれば回路や試作品の修正を行う。無事完成したら、製作手順書や取扱い説明書を作成する。

大手企業の開発・設計部署であれば、上記作業を細かく分割し、チームとして作業を行うことが通常だと思われる。当社のような中小企業では、担当者が設計から製品の完成まで担当する必要があった。今振り返れば新人にはかなり高いハードルであるが、数多くの経験を踏むことで、設計者として成長できたと考えている。

モータやインバータ用のドライブアンプに比べ油空圧弁用アンプの電子・マイコン化は遅れていたが、近年急速に普及が進んでいる。マイコン化によりパラメータなどのデジタル設定が可能となる大きなメリットがある。アナログ式の電子回路アンプを手動トリマポテンショで調整する作業に比べ、設定の再現性が向上し複数台への設定がコピーで済むので省力化が可能である¹⁾。モニタ機能も強化されているので、トラブル発生時の要因究明にも非常に役に立つと期待される（写真2）。このように、電子・マイコン技術を取り込むことでさらなる発展が期待される。設計者としては、日々進化する組み込みマイコン技術の知識習得が重要となる。

2.2 アンプ開発から油圧システム開発へ

すでに紹介したように、当社は油空圧制御弁のアンプの専門メーカーである。しかし近年、大学や試験



写真1 油圧サーボアンプの導入例（10軸制御）



写真2 開発中のマイコン内蔵サーボアンプ

機関など長年油圧システムを利用しているユーザから、「試験機が故障したが、メーカーで修理できないと断られた」、「アンプだけではなくメカ部も修理できないか?」といった相談が寄せられるようになった。社内ではアンプ屋がメカ部も担当するのは無謀との意見も強かった。幸いにも協力企業や大学諸先生のご支援もあり、試験装置や実験装置の修理、改造や改修だけでなく機械設計を含むシステム開発も可能になった。写真3にVR用の六自由度モーションベースの開発事例を示す。

2.3 産学連携

新技術の研究開発や新事業の創出を図ることを目的とし、大学、研究機関、民間企業が連携した産学連携が活発である。当社でも、法政大学、大手建設企業、造船企業、研究機関が連携した新技術開発を担当する機会に恵まれたので概要を紹介したい²⁾。

洋上風力発電やメタンハイドレートなどの海洋資源開発では、作業船による大規模工事が不可欠である。洋上施設との移動には一般的に交通船が用いられる。天候不良時は交通船が大きく動揺するため、海中転落や挟まれ事故のリスクが高まり、非常に危険な命がけの作業となる。船舶から洋上構造物への安全な乗降手段の提供は、安全な洋上建設施工を実施するため解決すべき緊急課題のひとつと考えられ



写真3 VR用六自由度モーションベース開発事例



写真4 油圧動揺吸収装置の海上実証実験

た。船舶の波浪時における動揺を低減し、乗り心地、作業性や安全性を向上することは古くからさまざまな研究が行われていた。

そこでこれまでとは発想を転換し、制振を必要な機器のみに限定、その動きを常に水平に保つことで動揺の影響をキャンセルすることを試みた。開発した六自由度パラレルメカニズムと呼ばれる油圧動揺吸収装置の制御効果を確認する目的で、山口県門司港付近の海上で実海域試験を実施した。海上試験は、総トン数496トンのタグボートの後部甲板上に動揺吸収装置を固定し、主船体とパラレルメカニズムのプラットフォームに船舶用高精度モーションセンサをそれぞれ設置した。主船体とプラットフォームの変位、横揺れ角および縦揺れ角をそれぞれ同時計測し、主船体の動揺に対してパラレルメカニズム動揺吸収装置を動作させることで、プラットフォームの動揺がどの程度吸収されるか実験を行った。実験の状況を写真4に示す。実験の結果、主船体の動揺に対してプラットフォームの動揺は上下動、横揺れ角、縦揺れ角とも66%から84%程度大幅に減じられ、

油圧式動揺吸収装置の制御効果が確認された。

2.4 地域社会との連携

弊社の立地する川崎北工業地区は、古くは川崎発の品種である梨の「長十郎」を中心とした果樹栽培の盛んな地域であった。近隣に町工場が点在するのどかな風景が、近年は果樹園の廃業による宅地開発により、東京、横浜のベッドタウンとなっている。古くからあった農業用水路は再整備され、例年3月下旬から4月上旬に宿河原堤桜並木（写真5）が満



写真5 宿河原堤桜並木



写真6 オープンファクトリのスナップ



写真7 J1サッカーチームのマスコット来場



写真8 川崎市営等々力競技場メインスタンド

開となる時期は、お花見散策路として市内外の多くの人に親しまれている。地域に転居され新たに住民となった方々にとって、近隣の町工場は迷惑施設となる可能性があるため、地域住民と積極的にコミュニケーションを図ることが重要となっている。当社の所属する地区工業会も川崎市と連携し、例年「オープンファクトリ」を開催している。各工場をこの日一日だけ開放し、普段見ることのできない工場でものづくり体験をしながら、皆の町でいろいろなものが作られていることを知ってもらう企画を行っている。消防署や警察署、地元のプロサッカーチームとも連携し、ゲームコーナーや体験コーナー、ローカルTVの取材など、盛りだくさんな内容になっている。

写真6, 7に、弊社内で昨年実施したオープンファクトリ体験コーナーの様子を示す。

2.5 社内イベントなど

福利厚生の一環として、地元川崎市のJ1プロサッカーチームの法人サポーターとなっており、シーズン予約席が確保されている。希望者は同僚や家族などとビールを飲みながらゆったりとしたメインスタンド（写真8）で観戦できるため、サッカー好きの社員には大変好評である。また社員旅行が年1回企画される。最近では、社員旅行が敬遠される企業も多いそうだが、当社では、ホテル（食事含む）、移動手段などの確保は会社で行い、現地での行動は各自で自由に考えることになっている。若手社員に敬遠される「仕事の延長みたいな旅行」とならないように配慮しており、ほとんどの社員が積極的に参加している。

3. おわりに

以上のように、入社以来私はフルードパワー技術に関係した多種多様な業務にかかわってきた。大企

業では特に技術系の場合専門分野に特化したキャリアパスを進み、スペシャリストを目指すことが多い。しかし、中小企業では人材が豊富なわけではないので、一人で多様な役割をこなさなければならない。地域や行政との連携なども大変ではあるが、見方を変えると刺激や変化が多く、貴重な体験や経験が数多く得られるのではと思う。本稿を読まれた学生さんが、一人でも多くフルードパワー技術開発に魅力を感じ、この分野で活躍されることを願う。

参考文献

- 1) 岩崎章：油圧サーボ・比例弁駆動ドライバの技術，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol. 49, No. 6, p. 11-13 (2018)
- 2) 「動揺吸収型可動式棧橋」の開発に着手，東亜建設工業株，プレスリリース，2014
<http://www.toa-const.co.jp/company/release/2014/140219.html>

(原稿受付：2020年5月15日)

What do you think of Japan? (Youは日本をどう思う?)

第15回 日本の医療について勉強しています

ルワンダ共和国



著者紹介

ンダイゼイエ サミュエル
Ndayizeye Samyuerl
東海大学工学部医用生体工学科
〒259-1206 神奈川県手塚市真田 4-10-28
E-mail : ndayizeye.sam@gmail.com

1. はじめに

自己紹介：

私はルワンダ出身です。趣味はサッカーと読書です。私はルワンダで高校を卒業した後、日本への留学のために奨学金を受けることができました。

来日の理由：

私は映画やアニメで見た日本の文化に非常に興味がありました。文化、言語についてもっと学び、ルワンダ人と日本人のネットワークを作りたいと思っていました。私の母国の医療技術はまだ発展途上であるため、日本の優れた医療技術について知りたいと思いました。

現在の所属機関とその研究／仕事内容：

私は現在、東海大学の工学部医用生体工学科の学生であり、医療問題やとりわけ診断に使用される各種の医療機器および装置の設計、医療機器の技術サポートの提供方法を学び、文化交流イベントに出席したり、さまざまなスピーチやプレゼンテーションを行ったりしています。あまり知られていませんが、ルワンダについて日本の人々に伝えるテレビ番組に参加したこともあります (写真1, 2)。



写真1 大学の様子



写真2 文化交流イベント

2. 日本の印象

2.1 来日直後の第一印象

来日直後の日本の第一印象は：

私の最初の印象では、日本は私が訪れたすべての国の中でもっとも清潔であるということでした。通りはきれいで、日本人は外国人が言葉の壁に悩まされているときは、いつでも互いに尊重し、喜んで助けてくれます。日本人は私の国での主な挨拶である握手をしないことに驚きました。

2.2 研究室に関して

日本人の考え方や働き方で驚いたこと：

日本人は時間を尊重することに非常に優れていることに驚きました。日本人はいつも時間通りで、約束の時間に数分遅れてもいけません。私が日本に到着してから1ヶ月後、JR列車は正時の25秒前に駅を出発しましたが、彼らはその25秒間を顧客に深く謝罪しました。これはとても驚くべきことであり、私はそのことを忘れることができません。

日本に滞在中に自分がもっとも変わった点は？：

日本での2年間の滞在中に私の人生は変わりました。今、私は地球市民になり、異なる文化、考え、生き方を持つ人々とのコミュニケーション方法が本当に改善されたと感じています。さらに、日本への留学は、ネットワーキングスキルとチームワークを向上させる良い方法でした。信じられないほどのアイデアを持つ日本人の若者と一緒に働くこと、そして海外にいなくてもグローバルな考え方をしていると感じました。日本人の若者との交流はアフリカについての彼らの質問に答え、さらに日本文化を学ぶ良い機会でした（写真3）。



写真3 日本の若者との集まり

2.3 生活に関して

日本の生活で気になったことは？

日本に住んでいる間に気になった最大のことは、文化の違いでした。食べ物はまったく異なり、生き方や社交もまったく異なります。しかし、私は現在ゆっくりと慣れてきています。日本に来たとき、健

康上の問題のために豚肉を食べることができませんでした。さらに、私はこの国に住んでいる数少ないアフリカ人の一人であり、最初は少し大変でしたが、その後、日本人に影響を与え、彼らと意識を共有するのに最適な機会であることに気がきました。彼らは私の母国についてだけでなく、私の母国の歴史について知りたいと思っていることがわかりました。

日本についての印象は？：

日本ではあらゆることがよく組織されていて、すべてが計画通りに整然と行われていることに感銘を受けました。物事は決められた特定の方法で行われることが期待されています。

最も興味ある日本の文化：

私は家族や友達と食事することが好きなので、日本の食事文化に興味を持っている。仕事後、友達と飲食店に行き一緒に話し合いながら食事を楽しむことである。このときには新しい人と出会ったり、友達とのつながりを深めたりする機会になる。また、友人の誕生日のパーティーに参加し、一緒に食事しながら、話し合った。好きな人と楽しい会話をして時間を過ごすのは大切であると思っている。

3. 抱負と日本の方々へのメッセージ

今後はどんな予定？ 出身国に戻るのいつ？：

現時点では、私はいつ帰国するか決めていませんが、日本の人々から学ぶべきことはまだまだたくさんあると思いますし、彼らと共有することもたくさんあると思います。卒業後は日本の病院や医療関連企業で一定期間は日本人と仕事の経験を積みたいものだと思っています。

日本人へのメッセージ：

多くの日本人は寛容であると思いますが、日本人の中には、外国の文化や、外国人と日本人の密接な関係を許容する信念をまだ受け入れていない人もいます。日本人にとっても、他の文化を学び、さらに受け入れる方が良いと思います。こうした人々は、日本人と外国人の間に強い絆を築くために意識を変えるべきと考えます。

（原稿受付：2020年2月17日）

研究室紹介

信州大学酒井研究室：油圧アームのモデルベース制御

著者紹介



さか い さとる
酒 井 悟

信州大学
〒380-0928 長野県長野市若里4-17-1
E-mail: satorus@shinshu-u.ac.jp

1998年京都大学工学部卒業，2003年同大学農学研究科博士後期課程修了，同大学情報学研究科JSPS特別研究員（PD），Twente大学客員研究員，千葉大学助教を経て，2010年信州大学工学部准教授，現在に至る。油圧システム制御の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会正会員。

1. はじめに

油圧システムの制御は

- モデルフリー制御（宮大工が経験に基づいて作業するように制御すること）
- モデルベース制御（建築士が力学に基づいて作業するように制御すること）

に大別される¹⁾。ヒトによるモデルフリー制御だけではなく人工知能によるモデルフリー制御の視点が増えつつあるものの，仮に良さそうなモデルフリー制御が見つかったとしても最終的に正当化されるためにはモデルベース制御の視点が必要である。油圧システムは力学と制御の双方（ハードとソフトの連立方程式）に支配される特殊なシステムである以上，設計・プログラミングの瑕疵による事故を，合理的に未然に想定したり事後に調査したりするため，モデルベース制御の視点が不可欠である。

2. 研究テーマ

モデルフリー制御の視点から電動アクチュエータに対する油圧アクチュエータのいくつかの優位性はBoston DynamicsのBigDogやAtlasなどの成果によっても示されているものの，その成果が農機・建機などへの応用に至っているわけではなく，接続可能な

- 段階1 モデリング・同定
- 段階2 制御器設計・解析
- 段階3 シミュレーション



図1 実験の風景（上：水平並進も鉛直回転も可能な可変機構を有する油圧アーム実験，下：学内外実験）

段階4 制御器実装・実験（図1）

の4段階から主として構成される油圧アームのモデルベース制御は未完成である。

そこで本研究室では油圧アームのモデルベース制御を開発している²⁻⁶⁾。モデルベース制御の鍵となる設計モデル（の一部）を乱暴に整理すると，

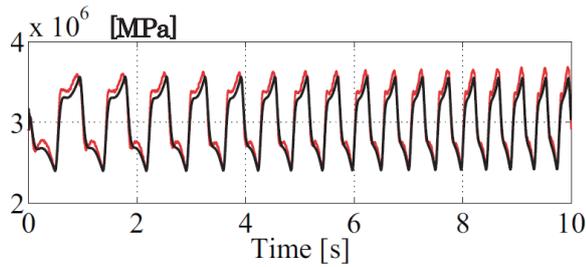


図2 非線形公称モデルの精度⁵⁾
(黒：圧力モデル値 vs. グレー：圧力実験値)

精度の順序は

伝達関数 [非線形性を無視, 線形近似系]

≡ 特異摂動モデル [圧力動特性を無視, 準静的系]

< 非線形公称モデル (図2)

< 数値計算モデル

< 第1原理モデル

となるものの、(赤池情報量基準とは異なるが) モデルの複雑さ・制御しやすさの順序が同時に考慮される必要がある。これまでに豊かな構造的特徴を有することが解明されてきた非線形公称モデルに注目して、高速・高精度と高効率だけではなく“高安全を達成するモデルベース制御”が研究テーマである。電動アームに対して油圧アームは状態変数を多く有するため、特に段階1では同定後の低次元化に加えて、同定前の基底生成の自由度⁶⁾も活用されるべきと考えている。

3. 研究室の雰囲気・特徴

正直に学生目線の雰囲気を無記名で学生から集計して掲載しようと試みたものの、新型ウィルスの混乱で最後まで実行できなくなった。「実力がつく研究室」との良い声だけで悪い声が集計できなかったが「良くも悪くも自分でやらないといけない研究室」と認識している。実態としてのルールは、

*平日は9時台着席 (コアタイム無し)

*土日は原則OFF (平日に休んだら土曜は自主的に作業してもよいが、日曜は締切直前を除きOFF)

*夏季・春季など長期休暇ごとに最低2週間OFF (上限は無く、自主的に3週間OFFなども可)

となっている。飲み会 (図3) とは別の研究室旅行のような集団イベントはなく、筆者が学生時代に徒歩・自転車で移動・野宿していたためかどうか、学生も近い雰囲気になっていることがある。おそらく土地柄もあってバイクの交通事故が (軽いとは言え) やや多く正直なところ心配な面もある。

専門目線の特徴はつぎの2点かと思われる。

★油圧のための制御の基礎

★農機・建機への応用



図3 学生企画の誕生日会 (欧米の当人企画には移行できなかった)

3.1 油圧のための制御の基礎

油圧アームのモデルベース制御は、制御対象を油圧アームに限定しつつ構造的特徴を抽出して、既存の制御理論の直接応用では不可能な制御性能・機能を達成する「油圧のための制御」とも換言できる。つまり既存の制御理論 (古典制御・現代制御など) の直接応用について、一定の理解が基礎となる。ここでは力学と制御の双方に支配される油圧システムに対する暴走時の怖さ (線形近似・特異摂動の怖さを含む) の理解が含まれている。

学部では古典制御 (伝達関数・ブロック線図・ボード線図・ナイキスト線図など)・現代制御 (線形近似・状態方程式の解・状態フィードバック・状態オブザーバなど) の講義と演習と実験が開講されているが、上記の一定の理解に至るとは限らない。

4月から7月にかけては2個の目的:

目的1 既存の制御理論を体験理解する

目的2 卒論直前の負担を軽減する

のため、新入生は技術報告書の執筆とプレゼンテーションに取り組んでいる。4人から5人の4年生が毎年来ており、全員が大学院にそのまま進学することが少なくない。現在は4年生5名、研究生1名、修士課程9名、博士課程1名 (予定) の構成となっている。110WのDCサーボモータが新入生全員の共通の制御対象であり、①PID制御法、②ループ整形法、③LQ制御法、④状態オブザーバ法などから1テーマを選択して、上述した段階1から段階4までが接続可能であることを体験理解しつつ、全員の前でプレゼンテーションをする。仮に④を選択した新入生は、他の新入生のプレゼンテーションから①②③についても間接的に勉強したり比較したりして、理解を深めることができる。必要な知識はC言語・Linux・Matlab・Excel/PowerPoint・TeXの操作で

あって、卒論直前までには身に付くため、負担がピークカットされる。プレゼンテーションは発表30分・質疑1時間（図表・数式など形式面、機械摩擦・圧力損失と線形近似・特異摂動など力学・制御に関する内容面）の構成となっている。スライドを簡潔にするため英語表記としており、難度の順序が日本語<日常英語<技術英語というのは誤解であって、日本語<技術英語<日常英語であると伝えている。全員は最低1点を質問する。これらは就職活動（アマダ・オークマ・クボタ・日立製作所・本田技研・三菱重工など）を終えたOB・OGの声・過去の他研究室の手法を踏まえているものである。

8月から10月にかけては、2個の目的：

目的3 先輩の卒論・修論を引継ぐ

目的4 ハードウェアを故障診断する

のため、先輩の卒論・修論の再現実験に取り組む。同一条件（同一のモデリング・設計・シミュレーション・実装）のもと同一結果が得られればハードウェアは健全なので制御対象ではなく制御器のV&Vに専念することができる。その後、再現実験を少し更新すれば卒論、卒論のやり残しを深めれば、油圧のための制御としての良い修論テーマが（理想的には学生によって）自然に発見されることが増えている。輪読会（制御・油空圧の本）には全員参加する。



図5 無人農機（上：無人管理機，下：無人トラクタ）筆者撮影

3.2 農機・建機への応用

4年生・大学院生は油圧と農機・建機に関する多くの情報⁷⁾に触れて、油圧システムに対するモチベーションを向上させている。その一部は他の学生にも有用（有害にはならない）と仮定して、概要を以下に報告させていただく。

筆者は2019年に世界最大の農機メーカーであるJohnDeereの生産工場（ドイツ）やAgritechnica（農機の展示会）をアメリカ・イラン・スペイン・台湾・チェコ・中国・ドイツ・ブラジル・日本の国際チーム一員として、2020年に国内最大・世界3位の農機メーカーであるクボタの展示会を研究室（院生数名）として招待いただいた。結論を先に述べれば「現時点で顕在化している電動化の後の時代では、油圧のための制御が（場合によっては現時点よりも）重要である」ということである。学生によっては正反対の予想、電動化の後の時代では、油圧のための制御は重要では無いと予想することも少なくない。

そもそもの油圧と農機・建機の歴史的関係は図4のJohnDeere博物館でも確認できる。左のトラクタ（約70馬力，1987-1994）の操舵トルクの伝達は油圧式、右のトラクタ（約70馬力，1973-1979）の操舵トルクの伝達は機械式（リンク機構）である。



図4 JohnDeere博物館（上：外観，下：油圧式と機械式の併設）筆者撮影

Agritechnicaは自動車・航空機・医療機器など全分野の中で世界4位の規模の展示会である。経済大臣と農業大臣が15分演説（ドイツ語が分からない筆者は同時通訳イヤホンを使用）後に技術賞（国際チーム引率者が審査委員長，CIGR Next Leaders Event）を授与する。今回の金メダルは電動化トラクタであって受賞者のほぼ全員（10名未満）は感極まっており，他の技術者の発表からも技術賞の歴史的重み・審査の公平性が感じられた。注目展示はJohnDeereの図5の無人管理機（プロトタイプだが実圃場での動画あり）であり，電動モータで駆動される油圧ポンプを介して油圧シリンダ・油圧モータが前輪・後輪の操舵トルクと推進トルクを制御するため，現在の有人管理機よりも油圧アクチュエータの個数は増加する。クボタの図5の無人トラクタ（プロトタイプ）も同様であって，可変機構の前輪・後輪のための油圧シリンダは各輪1個，全四輪4個であるため，現在の有人トラクタよりも油圧アクチュエータの個数はやはり増加する。またプロトタイプではなく市販の建設バックホウ・トラクタのエンジン（約20kW）をバッテリーに換装した電動化実機展示では，油圧アクチュエータの個数だけではなく仕様にも変化はない（バッテリーによる車体重量化は許容できる）とのことであった。一方，Agritechnicaでの他社の無人管理機の電動化実機展示では，油圧システムを完全に除去したものの，電動アクチュエータによる操舵トルクを制御できない（大型バッテリーによる車体重量化が許容できない）とのことであった。今後もバッテリー性能は向上していくと予想

される中での，図5の2機のプロトタイプの共通メッセージは重いと考えられる。

4. おわりに

なるべく読者に有用（有害にはならない）となるような内容を心掛けたものの，過不足があると思われる。お許しいただけると幸いである。

参考文献

- 1) 木村英紀：制御工学の考え方，ブルーバックス（2002）
- 2) 前島祐三，酒井悟，中西稔，大須賀公一：油圧アームの基底パラメータ同定法とモデル検証，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 43，No. 1，pp. 16-21（2012）
- 3) 松本優司，酒井悟：油圧アームのオンライン物理パラメータ同定，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 47，No. 5，pp. 31-37（2016）
- 4) 那花優将，永井一輝，酒井悟：油圧アームの非定常流量要素の最適行列同定とオンライン推定への応用，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 50，No. 2，pp. 31-37（2016）
- 5) Satoru Sakai, Stefano Stramigioli : Visualization of Hydraulic Cylinder Dynamics by a Structure Preserving Nondimensionalization, IEEE/ASME TMECH, Vol. 23, No. 5, pp. 2196-2206 (2018)
- 6) Satoru Sakai, Masayuki Ando, Shunsuke Kobashi : Visual Feedback without Geometric Features against Occlusion : A Walsh basis, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 27, No. 2, pp. 864-871 (2019)
- 7) 酒井悟：ロボット制御学ハンドブック（編集：松野，大須賀，松原，野田，稲見），第25章編集，近代科学社（2017）

（原稿受付：2020年4月13日）

会 告

〈理事会・委員会日程〉

| | |
|-------|-------|
| 書面審議 | 理事会 |
| 6月23日 | 企画委員会 |
| 書面審議 | 編集委員会 |

〈理事会報告〉

2019年度第7回理事会

書面審議（参加者23名）

- 1) 2019年度事業報告書および決算書類の承認
- 2) 通常総会（第39期）の招集

〈委員会報告〉

2020年度第1回企画委員会

6月23日 15:00～17:00

機械振興会館, Web開催（参加者35名）

- 1) 2020年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - (1) 2020年春季フルードパワーシステム講演会
 - (2) 2020年度オータムセミナー
 - (3) 2020年秋季フルードパワーシステム講演会

- (4) 2020年度ウィンターセミナー
- 2) 2021年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - (1) 2021年春季フルードパワーシステム講演会・総会日程
- 3) その他審議・確認事項
 - (1) その他

2019年度第6回編集委員会

書面審議（参加者22名）

- 1) 会誌特集号の現状と企画
 - ・ Vol.51 No.4 「フルードパワーのクリーン化技術最前線」
 - ・ Vol.51 E.1 「緑陰特集」
 - ・ Vol.51 No.5 「フルードパワーの最新解析技術動向」
 - ・ Vol.51 No.6 「トータルシステムの効率向上（仮）」
 - ・ Vol.52 No.1 「自然災害に関わる流体现象とフルードパワーによる防災技術（仮）」
 - ・ Vol.52 No.2 「再生可能エネルギーに関するフルードパワー（仮）」
- 2) その他
 - ・ 執筆者へのPDFデータ寄贈について
 - ・ 掲載希望の広告について
 - ・ 会議報告
 - ・ 新トピックスについて
 - ・ 今後の特集について

会 告

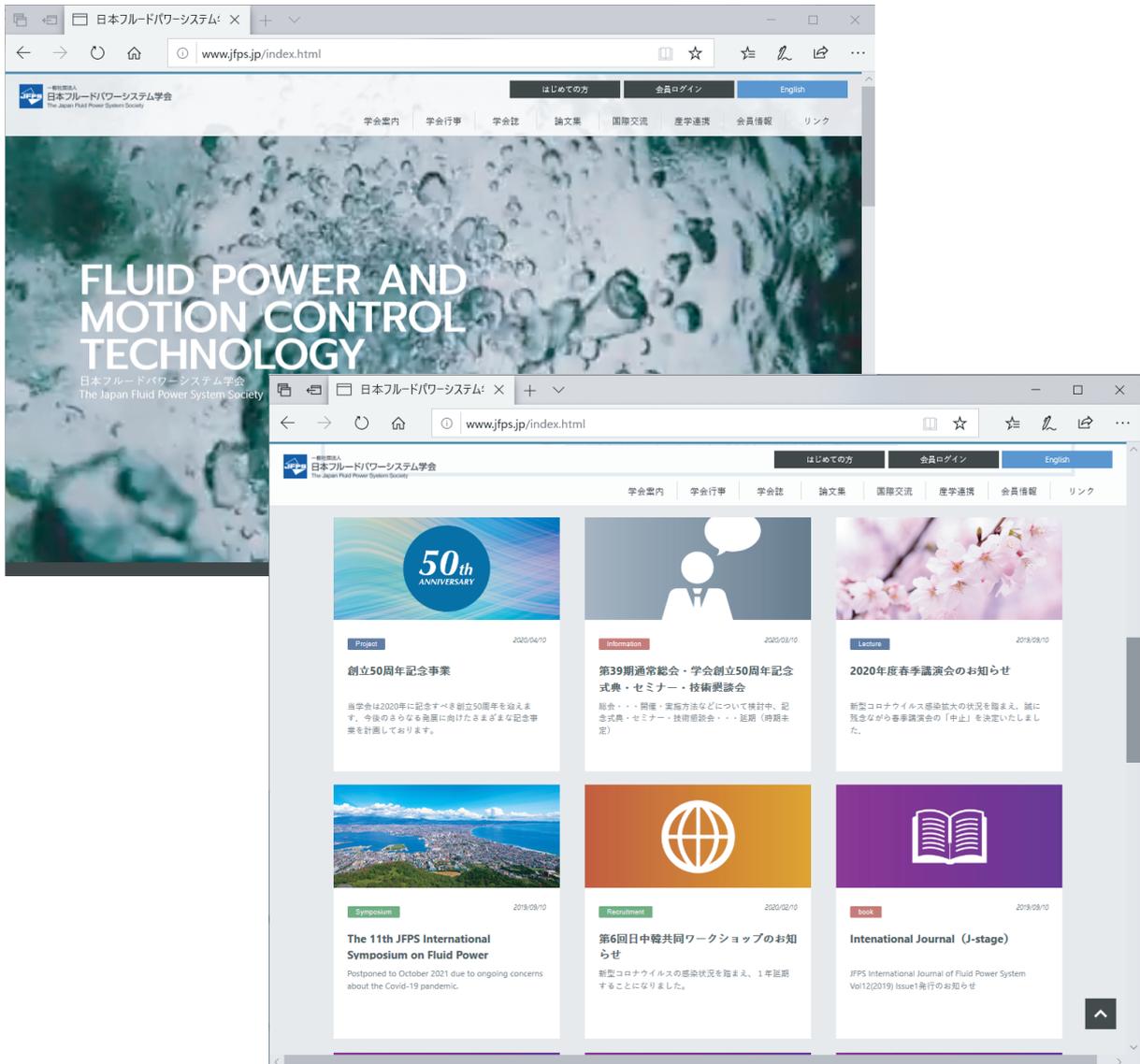
日本フルードパワーシステム学会ホームページ改訂のお知らせ

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会では、学会創立50周年記念事業の一環として、学会ホームページの改訂について検討してまいりましたが、このたび、リニューアル版を公開いたしましたのでお知らせいたします。

今回の改訂では、デザインの一新、英語ページの充実、スマートフォン対応などを図っております。ぜひ、新しいホームページをご覧ください、ご活用ください。

ホームページURL : <http://www.jfps.jp/index.html>

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会
学会創立50周年記念事業実行委員会



会 告

2019年度 学会賞表彰

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会2019年度の学会賞の受賞者が決まりました。

名誉員推挙

・美作大学 則次 俊郎 殿

フェロー称号授与

・日立建機株式会社 釣賀 靖貴 殿
 ・川崎重工業株式会社 曾谷 康史 殿
 ・東京計器株式会社 兵藤 訓一 殿
 ・川崎重工業株式会社 栗林 直樹 殿
 ・株式会社工苑 五嶋 裕之 殿

学会賞表彰

学術論文賞

「油圧機械式無段変速機的设计手法に関する研究」

・ヤンマー株式会社 大内田剛史 殿
 ・横浜国立大学 佐藤 恭一 殿

技術開発賞

該当なし

技術功労賞

・株式会社小松製作所 吉田 伸実 殿

学術貢献賞

・豊橋技術科学大学 柳田 秀記 殿

SMC高田賞

「天然ゴムの伸張結晶化を用いた軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉の長寿命化」

・中央大学 小島 明寛 殿
 「ポンプ供給圧低減による水圧モータシステムの高効率化」
 ・芝浦工業大学 八木澤 遼 殿

公益財団法人 油空圧機器技術振興財団顕彰

「空気圧駆動機構を用いた人工指による材質認識システムに関する研究」

・神奈川工科大学 吉満 俊拓 殿
 ・富士ゼロックス株式会社 大下 功祐 殿
 萩原 千尋 殿
 ・明治大学 小山 紀 殿

最優秀講演賞

2019年11月に開催された秋季フルードパワーシステム講演会において、特に優秀な講演発表をされた受賞者

・社会人部門 公益財団法人鉄道総合技術研究所 石栗航太郎 殿

「機械的フィードバック特性を有する鉄道車両用空気圧シリンダのシミュレーションモデル構築」

・学生部門 東京電機大学 武井 裕輔 殿
 「EHDポンプを駆動源とした多方向収縮型人工筋の開発に関する基礎的研究」

・学生部門 東京工業大学 今井 勇樹 殿
 「肺抹消への到達を目指した自走式カテーテル
 第4報：気管支内の方向操舵手法の検討」

訂正のお知らせ

本学会誌51巻、第3号(2020年5月)会議報告「ASME/BATH 2019 SYMPOSIUM ON FLUID POWER AND MOTION CONTROL (FPMC2019)に参加して」におきまして、著者紹介のメールアドレスの一部が誤って記載されておりましたので、下記のように訂正させていただきます。

【誤】 E-mail : masuda4631@ihi.com

【正】 E-mail : masuda4361@ihi-g.com

(フルードパワーシステム編集委員会)

会 告

学会創立50周年特別会費（賛助金）の受付結果

学会創立50周年記念事業・行事に協賛し、特別会費（賛助金）のご協力をいただいた賛助会員および正会員各位は、つぎのとおりです。関係者一同、心から感謝申し上げます。

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会

会長（学会創立50周年記念実行委員会 委員長） 眞田 一志

理事（学会創立50周年記念実行委員会 幹事） 吉満 俊拓

【賛助会員】 50音順（敬称略）

| | | |
|----------------|--------------------|-----------------------|
| (株)IHI | イナバゴム(株) | (株)インターナショナル・サーボ・データー |
| SMC(株) | SMC中国(株) | (株)NF1 |
| オカダイナストリ(株) | 川崎重工業(株) | 川重商事(株) |
| (株)神崎高級工機製作所 | KYB(株) | KYBエンジニアリングアンドサービス(株) |
| (株)古河製作所 | (株)小松製作所 | (株)阪上製作所 |
| (株)ジェイテクト | CKD(株) | 勝美印刷(株) |
| 住友重機械工業(株) | ダイキン・ザウアーダンフォース(株) | 大生工業(株) |
| (株)TAIYO | タイヨーインタナショナル(株) | (株)タカコ |
| (株)タダノ | (株)都筑製作所 | 東京計器(株) |
| 東京計器パワーシステム(株) | TOHTO(株) | 東レエンジニアリング(株) |
| 豊興工業(株) | 中西商事(株) | ナブテスコ(株) |
| 日本アキュムレータ(株) | 日本機材(株) | 日本クエーカー・ケミカル(株) |
| 日本工業出版(株) | 日本精器(株) | (一社)日本フルードパワー工業会 |
| 日本ムーブ(株) | 日立建機(株) | (株)日立建機ティエラ |
| (株)不二越 | フジサンケイ ビジネスアイ | (株)増田製作所 |
| マックス(株) | 三菱電線工業(株) | ヤマシンフィルタ(株) |
| 油研工業(株) | (株)ユータック | リバーフィールド(株) |

【正会員】 50音順（敬称略）

| | | | | | |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 饗庭 健一 | 青柳 幸雄 | 天野 勝 | 荒井 一則 | 池尾 茂 | 石井 進 |
| 石崎 義公 | 石浜 和義 | 市丸 寛展 | 一柳 隆義 | 伊藤 一寿 | 伊藤 和寿 |
| 伊藤 和巳 | 稲富祥一郎 | 井上 淳 | 今泉 竹司 | 呉 春男 | 上嶋 優矢 |
| 浦井 隆宏 | 大内 英俊 | 大信田文司 | 大科 守雄 | 大橋 彰 | 大見 康生 |
| 小笠原文男 | 小木曾太郎 | 小澤 忠彦 | 落合 貴志 | 落合 正巳 | 小山 紀 |
| 香川 利春 | 柿山 稜 | 風間 俊治 | 加藤 友規 | 神倉 一 | 川上 幸男 |
| 川嶋 健嗣 | 川島 正人 | 神田 国夫 | 北川 能 | 北畠 多門 | 木原 和幸 |
| 玄 相昊 | 小嶋 英一 | 小曾戸 博 | 小藪栄太郎 | 斉藤 賢治 | 齋藤 剛 |
| 齋藤 直樹 | 酒井 悟 | 桜井 康雄 | 佐々木政彰 | 佐藤 三禄 | 佐藤 潤 |
| 佐藤 毅彦 | 佐藤 允彦 | 佐藤 恭一 | 眞田 一志 | 嶋村 英彦 | 清水 秋雄 |
| 蕭 欣志 | 上達 政夫 | 杉本 文一 | 鈴木 勝正 | 鈴木 勝也 | 鈴木 圭子 |
| 鈴木 健児 | 鈴木 隆司 | 須原 正明 | 曾谷 康史 | 袖山 博 | 高岩 昌弘 |
| 高崎 邦彦 | 高田 進 | 高田 芳行 | 高橋 建郎 | 高橋 浩爾 | 竹村研治郎 |
| 田中 和博 | 田中 裕久 | 田中 豊 | 田中 義人 | 千葉 誠 | 塚越 秀行 |
| 築地 徹浩 | 筒井 大和 | 釣賀 靖貴 | 寺澤 孝男 | 富山 俊作 | 中井 政光 |
| 長汐 康裕 | 永瀬 徳美 | 仲宗根隆志 | 永田 精一 | 中田 毅 | 中野 和夫 |
| 中野 政身 | 中山 晃 | 成田 晋 | 西田 均 | 西股 健一 | 野武 久雄 |
| 延本 泰一 | 則次 俊郎 | 土師野 正 | 橋本 強二 | 波多野 徹 | 羽生田信良 |
| 早川 恭弘 | 林 光昭 | 張本 護平 | 肥田 一雄 | 兵藤 訓一 | 広田 善晴 |
| 藤田 壽憲 | 藤谷 秀次 | 前畑 一英 | 増田 精鋭 | 松園 和久 | 松永 拓也 |
| 丸田 和弘 | 丸山 勝徳 | 三浦 孝夫 | 峯岸 敬一 | 宮川 新平 | 宮崎 哲郎 |
| 武藤 高義 | 村松 久巳 | 村山 勝彦 | 諸橋 博 | 柳田 秀記 | 山口 惇 |
| 山田 宏尚 | 横田 眞一 | 吉田 和弘 | 吉田 清久 | 吉田 進 | 吉田 伸実 |
| 吉灘 裕 | 吉松 英昭 | 吉満 俊拓 | レア・ルコント | | |

会 告

2020年度（第39期）通常総会終了

1. 日 時 2020年6月30日（火）
15時00分～15時40分
2. 場 所 東京都港区芝公園3丁目5番地22号 機械振
興会館別館102 学会事務局およびオンライン
による開催

3. 議事の経過および結果

15:00開会、事務局よりオンライン出席上の注意事項説明のち、出席者数、オンラインによる出席者数、HPによる書面審議承認者数および委任状の数を報告し、ついで眞田一志会長が定款第15条「総会の議長は、会長がこれにあたる」にもとづき議長となり、議事録署名人として、CKD株式会社 和田重伸殿、株式会社小松製作所 名倉忍殿を指名したのち議事に入る。

(報告事項)

- 報告1 2019年度事業報告（2019年度事業報告書）の件
報告2 2020年度事業計画（2020年度事業計画書）の件
報告3 2020年度収支予算（2020年度収支予算書）の件

報告1～3に対し、庶務委員会 田中委員長、会計委員会 村松委員長から説明および報告があった。

(議案)

第1号議案 2019年度決算（貸借対照表、正味財産増減計算書、財産目録（財務諸表に対する注記、附属明細書を含む）、監査報告の件

第1号議案に対し、庶務委員会 田中委員長から説明および報告があり、賛成多数で可決承認された。

第2号議案 役員交代（2020、2021年度理事及び監事候補）の件

第2号議案に対し、眞田会長から説明および報告があり、賛成多数で可決承認された。

2020年度（第39期）通常総会は、新型コロナウイルス感染症防止のためオンラインにて開催され、学会賞表彰式、および受賞記念講演、技術懇談会などの行事を行うことができなかったが、多数のオンライン出席者を得て成功裡に終えることができた。

日本フルードパワーシステム学会論文集
51巻（2020）1号 発行のお知らせ
（公開日：2020/6/1）

【研究論文】

- (1) プリーツ式収縮型極軽量空気圧ソフトアクチュエータの設計
橋本 将宏, 西岡 靖貴, 安田 寿彦, 山野 光裕
- (2) ウェアラブルロボット用空気圧供給システムに用いる容積可変タンクのモデル化
門脇 惇, 佐々木 大輔, 萱原 多久実
- (URL) https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jfps/51/1/_contents/-char/ja

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

| |
|--|
| <p>混相流シンポジウム2020 主 催：日本混相流学会 開 催 日：2020年8月21日(金)～8月23日(日) 会 場：オンライン開催 U R L：http://www.jsmf.gr.jp/index.shtml</p> |
| <p>Dynamics and Design Conference 2020 企 画：一般社団法人 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 開 催 日：2020年9月1日(火)～9月4日(金) 会 場：オンライン開催 U R L：http://www.jsme.or.jp/cinference/dmconf20/</p> |
| <p>第48回 可視化情報シンポジウム 主 催：一般社団法人 可視化情報学会 開 催 日：2020年9月24日(木)～9月26日(土) 会 場：かごしま県民交流センター（鹿児島県鹿児島市山下町14-50） U R L：https://www.vsj.jp/symp2020/</p> |
| <p>第38回 日本ロボット学会学術講演会 主 催：一般社団法人 日本ロボット学会 開 催 日：2020年10月9日(金)～10月11日(日) 会 場：オンライン開催 U R L：http://ac.rs-jweb.org/2020/</p> |
| <p>第63回 自動制御連合講演会 主 催：公益社団法人 計測自動制御学会，化学工学会，システム制御情報学会，精密工学会，電気学会，日本機械学会，日本航空宇宙学会 開 催 日：2020年11月18日(水)～11月20日(金) 会 場：黒部・宇奈月温泉 やまのは（富山県黒部市宇奈月温泉352-7） 黒部市宇奈月国際会館 セレネ（富山県黒部市宇奈月温泉6-3） U R L：https://www.sice.jp/rengo63/</p> |
| <p>第15回「運動と振動の制御」国際会議（MoViC2020） 主 催：一般社団法人 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 開 催 日：2020年12月8日(火)～12月11日(金) 会 場：朱鷺メッセ（新潟県新潟市中央区万代島6-1） U R L：https://www.jsme.or.jp/conference/movic2020/</p> |
| <p>第3回 安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議（COMPSAFE2020） 主 催：COMPSAFE2020実行委員会 開 催 日：2020年12月8日(火)～12月11日(金) 会 場：オンライン開催 U R L：https://compsafe2020.org/</p> |
| <p>第21回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（SI2020） 主 催：公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 開 催 日：2020年12月16日(水)～12月18日(金) 会 場：オンライン開催 U R L：https://www.sice-si.org/conf/si2020/</p> |

Grinding Technology Japan 2020

企 画：日本工業出版株式会社
 開 催 日：2021年3月2日(火)～3月4日(木)
 会 場：幕張メッセ（千葉県千葉市美浜区中瀬2-1）
 U R L：https://10times.com/grinding-technology-japan

新型コロナウイルスの影響で協賛行事の開催予定が変更になっている場合があります。
 各行事の最新情報は、主催者のホームページまたは各行事のURLからご確認ください。

会 告**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 (6月10日現在) | 884 | 12 | 92 | 129 |
| 差引き増減 | +7 | ±0 | +2 | ±0 |

正会員の内訳 名誉員15名・シニア員46名・ジュニア員114名・その他正会員709名

〈新入会員〉

正会員

| | |
|-------------------|-----------------|
| 宮坂 篤 (油研工業株式会社) | 稲田 諒 (日立建機株式会社) |
| 竹之内翔太 (SMC株式会社) | 福島 誠人 (SMC株式会社) |
| 長ヶ部光太 (SMC株式会社) | 須谷 瑞樹 (SMC株式会社) |
| 東山 和司 (SMC株式会社) | 小江 敦大 (SMC株式会社) |
| 安永 将也 (SMC株式会社) | 楠瀬 系知 (SMC株式会社) |
| 下岡 綜 (松江工業高等専門学校) | |

学生会員

| | |
|---------------|----------------|
| 加藤 輝雄 (信州大学) | 鶴原 理司 (芝浦工業大学) |
| 森山 開 (芝浦工業大学) | |

編集室

次号予告

— 特集「フルードパワーの最新解析技術動向」—

【巻頭言】「フルードパワーの最新解析技術動向」の発行にあたって

加藤友規

【解説】

斜軸式油圧モータの潤滑解析

田中真二

油圧機器のキャビテーションの流れ解析

沖田浩平

流体機械へのモデルベース開発手法の適用とケーススタディ

工藤啓治

モデルベース開発のためのパラメトリックCAE活用法

満嶋弘二, 永溝喜也

ベーンポンプの流れ解析

長島 碧

CFDによる調節弁でのエロージョン発生の予測

尹 鍾皓, 齊藤健二

【ニュース】機能性流体教科書

中野政身

【トピックス】

学生さんへ先輩が語る—フルードパワーの研究に携わる学生の皆さんに向けて—

坂間清子

英国ノッティンガム駐在員日記

加藤友規

【研究室紹介】大分大学工学部 菊池研究室

原 久乃, 菊池武士

2020年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 塚 越 秀 行 (東京工業大学)
 副委員長 村 松 久 巳 (沼津工業高等専門学校)
 委 員 飯 尾 昭一郎 (信州大学)
 飯 田 武 郎 (株)小松製作所
 伊 藤 雅 則 (東京海洋大学)
 梅 村 哲 郎 (KYB株)
 加 藤 友 規 (福岡工業大学)
 北 村 剛 (油研工業株)
 栗 林 直 樹 (川崎重工業株)
 五 嶋 裕 之 (株)工苑
 齋 藤 直 樹 (秋田県立大学)
 佐々木 大 輔 (香川大学)
 佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)
 妹 尾 満 (SMC株)

委 員 中 野 政 身 (東北大学)
 中 山 晃 (日立建機株)
 藤 田 壽 憲 (東京電機大学)
 丸 田 和 弘 (株)小松製作所
 宮 津 寿 宏 (CKD株)
 矢 島 丈 夫 (株)コガネイ
 柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)
 山 田 真の介 (株)TAIYO
 山 田 宏 尚 (岐阜大学)
 吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)
 担当理事 伊 藤 和 巳 (KYBエンジニアリングアンドサービス株)
 学会事務局 成 田 晋
 編集事務局 竹 内 留 美 (勝美印刷株)
 (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。

個人会員各位

2020年7月15日

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

2020年度会費納入のお願い

拝啓 時下益々ご清祥のこととお慶び申し上げます。

さて、2020年度（2020年4月1日～至2021年3月31日）の会費を、下記の通りご納入賜わりたくお願い申し上げます。なお、すでにご納入くださいました場合は、何卒ご容赦ください。

敬 具

記

2020年度
 正会員会費 8,000円
 (40歳未満で入会された方は、入会から5年間にかぎり4,000円となります.)
 学生会員会費 2,000円

お 願 い

- ・2019年度以前の会費を未納の方は、新年度分（2020年度）とあわせてお振り込みくださいますようお願い申し上げます。
- ・会員名を必ずご記入ください。
- ・便利な自動振り込みは手数料が不要です。ご希望によりお申し込み書をお送りいたしますので、FAXまたはE-mailにてご一報いただきたく、よろしくお願い申し上げます。

以上

| 払 込 取 扱 票 | | | | | | | | | | | | 払込票兼受領証 | | | | | | | | | | |
|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|
| 00 | 東京 | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 | | | | | |
| 口座番号 (右詰めに記入ください) | | | | | | | | | | | | 右詰めに記入ください | | | | | | | | | | |
| 金額 | | | | | | | | | | | | 金額 | | | | | | | | | | |
| 千 百 十 万 千 百 十 円 | | | | | | | | | | | | 千 百 十 万 千 百 十 円 | | | | | | | | | | |
| 0 0 1 1 0 3 1 3 3 6 9 0 | | | | | | | | | | | | * 1 3 3 6 9 0 | | | | | | | | | | |
| 加入者名 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 | | | | | | | | | | | | 加入者名 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 | | | | | | | | | | |
| 料 金 | | | | | | | | | | | | 料 金 | | | | | | | | | | |
| 通 信 欄 該当するものに○をつけ、お振込の内容をご記入ください。 1. () 年度 () 会費 企業名・[] 会 員 名 2. () の代金 | | | | | | | | | | | | * 払込人住所氏名 | | | | | | | | | | |
| 払込人住所氏名 (郵便番号) | | | | | | | | | | | | (消費税込) 受付局日附印 | | | | | | | | | | |
| (電話番号 - -) | | | | | | | | | | | | 料 金 | | | | | | | | | | |
| 裏面の注意事項をお読みください。(郵政事業庁)(私製承認東第23957号) | | | | | | | | | | | | 円 | | | | | | | | | | |
| 受付局日附印 | | | | | | | | | | | | 特 殊 取 扱 | | | | | | | | | | |

各票の※印欄は、払込において記載してください。

切り取らないで郵便局にお出しください。記載事項を訂正した場合は、その箇所に訂正印を押してください。

お振り込み先金融機関一覧

1. 郵便振替貯金 00110-3-133690

* 下の振替用紙をご利用いただけます。

(なお、この振替用紙は会費納入・資料購入・セミナー等受講料など総てにご利用いただけます。)

2. 三井住友銀行 日比谷支店 (普) 7611417

(注) * 口座名はいずれも「シャ) ニホンフルードパワーシステムガッカイ」です。

* 誠に恐れ入りますが、振り込み手数料はご負担くださいますようお願い申し上げます。

* 上記2をご利用の方で、会社名・大学名にてご送金の方は、個人名・内容・振込金融機関名を、FAXまたはE-mailで学会宛にご連絡くださいますよう、お願い申し上げます。

FAX : 03-3433-8442

E-mail : info@jfps.jp

この受領証は、郵便局で機械処理をした場合は郵便振替の払込みの証拠となるものですから大切に保存してください。

ご注意

この払込書は、機械で処理しますので、口座番号及び金額を記入する際は、枠内に丁寧に記入してください。

また、下部の欄(表面及び裏面)を汚したり、本票を折り曲げたりしないでください。

(日本郵政公社)

〒105
0011

東京都港区芝公園三丁目五―二―二 機械振興会館別館一〇二 電話(〇三)三四三三―八四四一 FAX(〇三)三四三三―八四四二
編集兼発行人 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇―一〇―三一―二三三六九〇

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