

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

May. 2024 Vol. 55 No. 3

特集「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」

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「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」

【巻頭言】

「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」発行にあたって 加藤 友規 98

【解説】

空気圧サーボを用いて回転数制御される切削工具の損耗推定 大坪 樹 99
超精密加工機における高速応答レギュレータの適用検討 福田 将彦 103
空気圧機器のIO-Link対応 三浦 克輝 107
空圧式アクティブ除振台の除振・制振技術 篠原雄一郎 112
エアパワーメータを活用した空気圧システムの省エネルギー診断 小林 敏也 117
圧力監視による空気圧機器の状態見える化 近藤 健元 121

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る一学生時代に得た経験を今に繋ぐ 下岡 綜 124

【研究室紹介】

東京電機大学 サイバネティック情報処理研究室 川瀬 利弘 128

【企画行事】

2023年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告 下岡 綜 132

【会告】

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催 2024年春季フルードパワーシステム講演会 127
2024年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」 127
2024年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー「触覚技術と応用技術」 127
共催・協賛行事のお知らせ 131

理事会・委員会報告	135
一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会賛助会員一覧表	136
会員移動	137
次回予告	138

■表紙デザイン：浅賀美希 勝美印刷株

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Fluid Power for Production Engineering in the DX Era"

[Preface]

On the Special Issue "Fluid Power for Production Engineering in the DX Era"	Tomonori KATO	98
---	---------------	----

[Review]

Estimation of Wear on Cutting Tools Controlled by Rotational Speed Using Pneumatic Servo	Tatsuki OTSUBO	99
Application Examination of a Precise and High Response Pressure Regulator for Ultra-Precision Machine Tool	Masahiko FUKUTA	103
IO-Link Compatible Devices for Pneumatic Equipment	Katsuki MIURA	107
Vibration Isolation and Suppression Technology of Pneumatic Active Isolation Table	Yuichiro SHINOHARA	112
Energy Saving Diagnosis of Pneumatic Systems Using Air Power Meters	Toshiya KOBAYASHI	117
Visualization of Pneumatic Equipment Status Through Pressure Monitoring	Takemoto KONDOH	121

[Topics]

Senior talk to students—Experiments in My Student Days Lead to the Present—	So SHIMOOKA	124
---	-------------	-----

[Laboratory Tour]

Cybernetic Information Processing Laboratory, Tokyo Denki University	Toshihiro KAWASE	128
--	------------------	-----

[JFPS Activities]

Report on the Autumn 2023 Fluid Power System Conference	So SHIMOOKA	132
---	-------------	-----

[JFPS News]

127,131,135,136,137,138

「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」 発行にあたって

著者紹介



かとうとものり
加藤友規

法政大学理工学部機械工学科
〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2
E-mail: t-kato@hosei.ac.jp

2007年東京工業大学大学院博士課程修了。都立高専助手～助教（2004～2010）、福岡工業大学助教～准教授（2010～2024）を経て、2024年法政大学教授となり現在に至る。空気圧の計測制御に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会などの会員。博士（工学）、技術士（機械部門）。

DX時代が本格的に到来し、フルードパワーシステムを取り巻く環境も大きく変化している。本学会の講演会や研究委員会においては、たとえば深層学習やIoTを従来のフルードパワー関連の機器に適用することによる、新しい予知保全技術やエネルギー評価技術などの研究開発事例が報告されている。

このような背景を踏まえ、本特集号は、「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」と題して、フルードパワー関連の機器を量産などの生産技術に用いる事例や、広い意味で生産技術に関与するフルードパワーの周辺技術の動向や可能性についてご紹介することを趣旨として企画された。

各記事の概要を以下にご紹介させていただく。

大坪樹氏（長崎大学）は、「空気圧サーボを用いて回転数制御される切削工具の損耗推定」と題して、大坪氏および矢澤氏・加藤らの研究グループが進めている、空気圧サーボによる回転数制御機能が付与されたエアタービンスピンドによるインプロセス工具損耗の推定方法について解説した。提案された工具摩耗推定方法は、圧縮空気により回転するスピンドルを工具主軸とする工作機械の工具摩耗推定方法として有用であり、特に工具そのものにセンサを設けることなく、工具損耗を加工中のインプロセスで推定することが可能であることが説明された。

福田将彦氏（芝浦機械株式会社）は、「超精密加工機における高速応答レギュレータの適用検討」と題して、超精密加工に要求される位置決め性能や鉛直方向位置決めにおける課題について述べられた後、鉛直位置決め装置のバランスシリンダの内圧制御に

川嶋氏・香川氏・加藤らが開発した高速応答精密圧力レギュレータを適用することにより、鉛直軸の高精度位置決めが可能となり、より付加価値の高い自由曲面光学素子の加工が可能なることを解説した。

三浦克輝氏（SMC株式会社）は、「空気圧機器のIO-Link対応」と題して、この約20年の空気圧機器へのネットワーク通信の導入やIoT化実現のための技術開発の経過とともに、空気圧機器のIO-Link対応に関する取り組みを紹介した。IO-LINKの特徴、IO-Link対応の空気圧機器の紹介と活用例、そして今後の課題や展望について解説した。

篠原雄一郎氏（特許機器株式会社）は、「空圧式アクティブ除振台の除振・制振技術」と題して、生産装置を含む精密機器の除振・制振に欠かせないアクティブ除振台について、除震装置の役割と要求性能、アクティブ除振装置、除震装置の機能性能と要求される制御技術、制御技術の事例、について解説した。

小林敏也氏（東京メータ株式会社）は、「エアパワーメータを活用した空気圧システムの省エネルギー診断」と題して、空気圧を利用する機械・装置の消費エネルギーを測定するための機器であるエアパワーメータを紹介し、IoT、ICTを活用した省エネルギー診断について述べた。さらに将来的な展望として、マルチメータとしてのエアパワーメータの特徴を生かし稼働状況や環境条件などのデータAIで分析することで、消費エネルギーの予測や設備の故障や不良の早期発見などに活用可能であることを述べた。

近藤健元氏（CKD株式会社）は、「圧力監視による空気圧機器の状態の見える化」と題して、圧力監視ユニットによる空気圧機器の状態見える化を取り上げ、従来の空気圧機器の保全の課題を取り上げた上で、DXが進むフルードパワーの保全方法としての可能性について解説した。

なお、本特集は本学会編集委員会にて、著者が主査を担当し、副査を水上和哉氏（CKD株式会社）が担当して企画された。各記事の執筆者の皆様をはじめ、特集の企画にご協力いただいた関係各位に、深く感謝申し上げたい。

（原稿受付：2024年2月16日）

解説

空気圧サーボを用いて回転数制御される
切削工具の損耗推定

著者紹介



おお 坪 樹

長崎大学大学院
〒852-8136 長崎県長崎市文教町1-14
E-mail: t-otsubo@nagasaki-u.ac.jp

2015年長崎大学大学院工学研究科博士後期課程修了。サレジオ高等専門学校助教を経て、2017年長崎大学大学院工学研究科助教。精密加工、精密計測、光応用計測の研究に従事。精密工学会、日本機械学会、砥粒加工学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

切削加工において、切削工具に生じる摩耗やチッピング（微小な欠け）は、加工精度を著しく劣化させるため、工具の損耗を把握し、適切に工具交換を行うことが重要である。従来の工具管理は、加工距離が累積するに従い工具の切れ刃が摩耗することから切削距離で管理されている。あらかじめ工具の寿命に達する加工距離を設定しておき、工具ごとに加工距離を累積管理する。工具の累積加工距離が予め設定した寿命距離を超えた時に工具交換を行う。しかし従来の方法では、工具摩耗の急激な摩耗やチッピングを検知することができない。そのためオペレータが、工作物の状態を観察し、経験に基づいて工具の摩耗状態を推測し、工具交換を行っているのが現状である。ものづくり現場では、人手不足、技術継承の問題を抱えおり、工具損耗をインプロセスで検知・推定する技術開発が求められている。これまでに工具摩耗損耗検知機能センサ付き切削工具等¹⁾が提案されているが、消耗品である工具そのものにセンサ機能を設けるため、コスト的課題がある。本解説ではこれまでに開発した回転数制御機能付きエアタービンスピンドル²⁻³⁾によるインプロセス工具損耗の推定方法⁴⁻⁵⁾について述べる。

2. 回転数制御システム

2.1 HPQR

本研究では、エアタービンスピンドルの回転数の

安定化と高速制御の実現を目的とし、これまで開発を進めてきた気体用超精密高速応答圧力レギュレータ（以下、HPQR）⁶⁾を用いて圧縮空気を制御した。HPQRの制御系内に回転数フィードバックと外乱推定オブザーバを組み込むことで、タービン駆動側供給圧力を制御した。HPQRの写真を図1に示す。HPQRは、圧力センサと圧力微分計（P.D. Sensor）を用いて、スプール型サーボ弁（S.P.弁）を制御することで供給空気圧を高速かつ精密に制御する減圧機構である。HPQRの圧力制御系は、圧力制御をメインループ、圧力微分値をマイナーフィードバックとした2つの制御系から構成した微分先行型の制御系である。これにより、HPQRの供給側や下流側の外乱（流量や圧力変動）が生じて、その影響を打ち消す制御構成となっている。

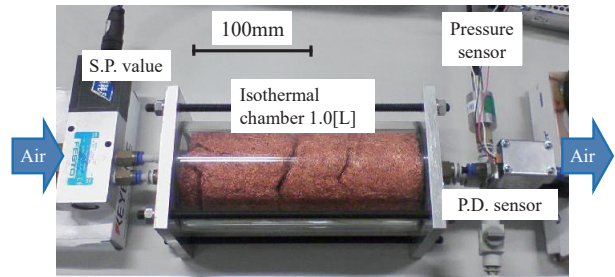


図1 気体用超精密高速応答圧力レギュレータ（HPQR）

2.2 回転数制御システム

回転数制御システムの概要を図2に示す。NCフライス盤の主軸に本研究用に製作した回転数計測システムを内蔵した静圧空気軸受のエアタービンスピンドルを取り付けた。回転数計測は、タービンから増設した軸の回転をハウジングに取り組んだPhoto ICで行えるようにしている。タービン側流路には回転数制御を行うためにHPQRを挿入し、DSPを用いて制御した。エアタービンスピンドルの回転数を測定し、フィードバックすることで、回転数を制御する制御系を構成した。

2.3 回転数制御システムを用いた切削加工

切削加工における回転数制御システムの有効性を評価した。回転工具として直径2mm、2枚刃の超硬

スクエアエンドミルを使用し、被削材には合金工具鋼 (SKD61) を使用した。実験条件を表 1 に示す。エアタービンスピンドルの目標回転数 $40,000\text{min}^{-1}$ と設定し、回転数制御の有無における切削加工中の回転数を測定した。図 3 に半径方向切り込み量 0.4mm 、軸方向切り込み量 0.5mm 、送り速度 750mm/min における加工距離と回転数の関係を示す。回転数制御なしの場合、加工が始まると急激に回転数が減少し、加

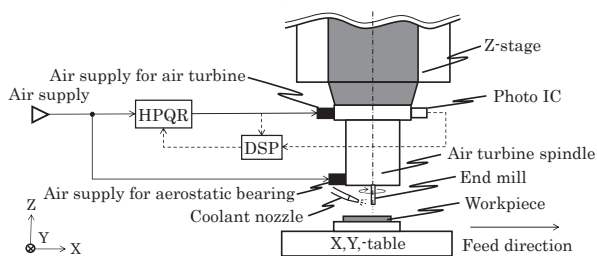


図2 回転数制御システム

表 1 切削加工実験条件

Work material	SKD61
Work size (L×W×H) [mm]	150×30×10
Machine tool	V33 (Makino milling machine)
Lubricated condition	Dry
Type of milling	Down cut
Spindle speed N [min^{-1}]	40,000
Axial depth of cut a_a [mm]	0.5
Radial depth of cut a_r [mm]	0.2, 0.3, 0.4
Feed rate f [mm/min]	750, 1400, 2800, 4000
Tool	Square end mill (Carbide)
Tool diameter [mm]	2
Number of flutes	2

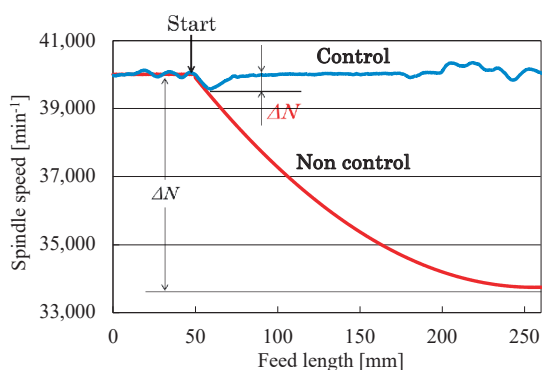


図3 加工中の回転数測定結果

工が終了するまでに回転数が約6,000回転程減少した。一方、回転数制御を加えた場合は、加工開始直後にわずかに回転数が減少するものの、制御によるエアタービンへの供給空気圧の上昇によって回転数は回復し、その後は回転数を一定に保つことができた。この他の条件においても同様の傾向が見られ、回転数制御を行なった場合、加工中の回転数減少を約2%以下に抑制することを確認し、本システムが切削加工中の回転数制御に有効であることを示した。

3. 工具摩耗および折損検知

3.1 工具損耗推定の概要

エアタービンスピンドルは、圧縮空気により回転するスピンドルを工具主軸とし、スピンドルに供給する圧縮空気の供給圧力を調整することによりスピンドルの回転数を制御する。切削加工において、工具逃げ面摩耗量が大きくなると切削抵抗が増加する。開発した回転数制御システムは、スピンドルの回転数を保持するためにスピンドルに供給する圧縮空気の供給圧力を上昇させる。つまり、工具逃げ面摩耗量とスピンドルに供給する圧縮空気の供給圧力との間には相関が存在する。この相関から工具の逃げ面摩耗量を推定する。

回転工具として直径 2mm 、2枚刃の超硬ボールエンドミルを使用し、被削材にSKD61を使用した。図4に示す被削材の端面 (300mm の辺) をX方向にダウンカット加工し、順次内側へと向かいながら断続的に加工を繰り返した。なお、図中の矢印は工具の軌道を示している。工具寿命の直接的判定方法として工具の逃げ面摩耗量 $V_{B\max}$ を測定した。測定にはワイヤレスのデジタル顕微鏡を使用し、機上で測定することで工具の取り付け・取り外しの工程を省略し、取り付け時の突き出し量の変動を最小限に抑えるようにした。また無負荷回転速度の圧力平均値と加工開始から終了時までの圧力平均値の差を圧力上昇量 ΔP とし、工具摩耗との相関を調査した。圧力上昇量で評価する理由として、同一の回転速度で

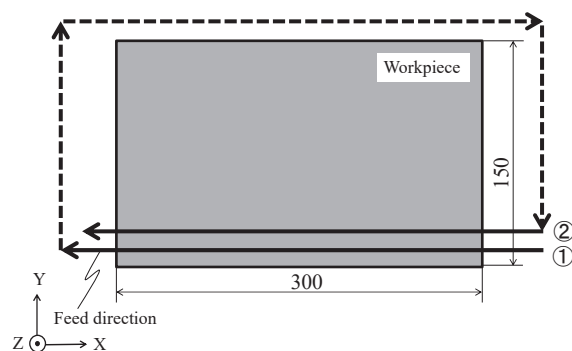


図4 被削材と加工パス

も気温や湿度などの影響により必要な供給圧が変わり、実験的に差が発生する。この差をなくすために圧力上昇量を相対的に評価することで異なる実験結果を比較することができる。

図5に圧力上昇量と逃げ面摩耗量との関係を示す。チップングがない場合では、工具の逃げ面摩耗が進行すると供給圧力が上昇する傾向が見られ、相関係数を算出すると0.98と高い数値を示した。一方、チップングがある場合では途中から工具の逃げ面摩耗が進行しても供給圧が上昇せず、相関係数も0.69と低い値を示した。このことから、供給圧力の上昇量と工具の逃げ面摩耗量の相関が低くなった場合、チップングなど工具の異常摩耗であると推定できる。

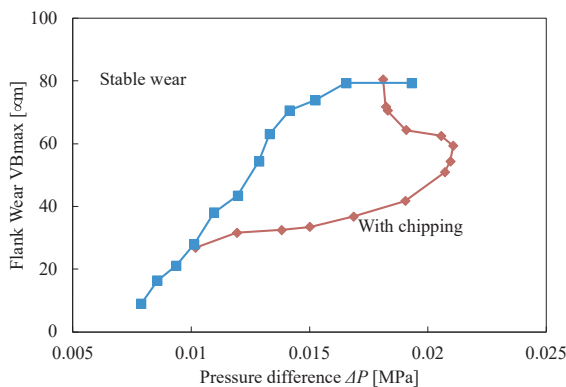
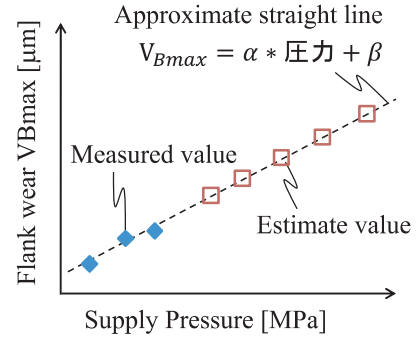


図5 供給圧力の変動量と逃げ面摩耗量の関係

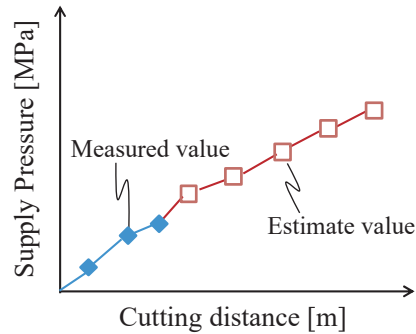
3.2 工具摩耗の推定方法

具体的な工具摩耗の推定方法について説明する。図6は逃げ面摩耗量の推定について説明する図であり、(a)は圧縮空気の供給圧力と逃げ面摩耗量を示し、(b)は加工距離と供給圧力を示している。図中の◆は、加工の初期に近い段階で、所定の加工距離を3点決め、そこでの供給圧力と逃げ面摩耗量を測定した結果を示している。逃げ面摩耗量の推定手順は以下の通りである。

- ①図6(a)において、測定値から直線近似式を導くことで、より加工が進んだ場合にスピンドルの所定の回転速度を保持するために必要な圧縮空気の供給圧力と工具の逃げ面摩耗量との対応を示す第1の関係式を求める。
- ②図6(b)では、同じく測定値から直線近似式を導くことで、所定の加工距離における圧縮空気の供給圧力の測定値に基づいて加工距離と圧縮空気の供給圧力の対応を示す第2の関係式を求める。
- ③第2の関係式に外挿して、次の加工距離における供給圧力予測値を推定する。
- ④供給圧力予測値と、第1の関係式から、より加工が進んだ場合の逃げ面摩耗量を推定する。



(a) 供給圧力と逃げ面摩耗量



(b) 加工距離と供給圧力

図6 工具摩耗推定方法

推定した逃げ面摩耗量が寿命判定基準以下ならば加工を続行し、判定基準を超える場合には加工終了の判断を行う。なお、圧縮空気の供給圧力は自動的に入手することが可能であるため、加工が推定した加工距離に達した場合は、そこでの供給圧力の測定値を用いて第2の関係式を更新して、つぎの加工距離の推定精度を上げることが可能である。

3.3 工具チップングの検知

図7は、異常摩耗の推定について説明する図であり、チップングが発生したときの加工距離と供給圧力との関係を示している。図中の(□)は供給圧力予測値であり、図中(●)は供給圧力の測定値である。楕円の破線で囲ってある表記は、加工距離での供給圧力予測値を推定する3点の測定値が順次推移していることを示している。具体的には、加工初期に測定した供給圧力3点から関係式を求め、4点目の供給圧力を推定する。つぎに5点目の供給圧力の推定する場合には、2点目から実際に測定された4点目の供給圧力を用いて関係式を更新し、供給圧力推定する。

同図の切削距離240m地点において、供給圧力予測値と測定値が乖離しており、測定値の方が予測値より低くなっている。切削距離240m地点における工具を観察した結果、工具先端部であるチゼル部付近にチップングを確認した(図8)。チップングの発生により、切削抵抗が減少したために、回転数制御システムが供給圧力を下げたことを示している。

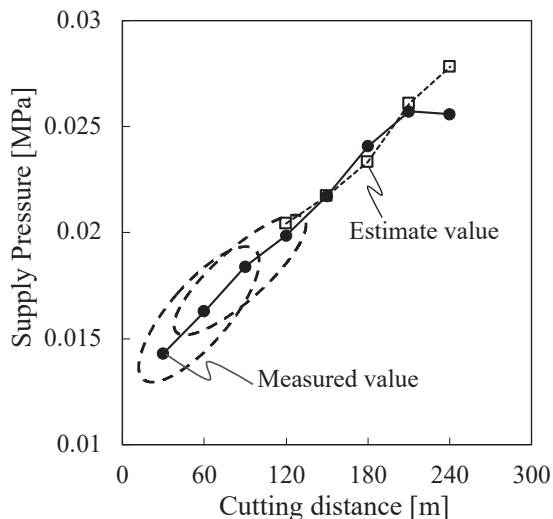


図7 工具摩耗推定とチップング検知の例



図8 チゼル部におけるチップングの発生(加工距離240m)

何らかの異常摩耗が発生したと推定することができる。供給圧力予測値と測定値の乖離の程度の判定基準を設定しておくことで、自動で異常摩耗を検知することができる。

4. おわりに

本研究の工具摩耗推定方法は、圧縮空気により回転するスピンドルを工具主軸とする工作機械の工具摩耗推定方法として有用であり、特に工具そのものにセンサを設けることなく、工具損耗を加工中のインプロセスで推定することが可能な工具摩耗推定方

法である。ものづくり産業において、人手不足と技術継承の問題が深刻化しており、特に高度な技術が求められる製造プロセスでは、経験豊富な従業員の減少や若手の技術習得の遅れが課題となっている。開発した工具損耗の推定・検知技術は、人手不足を補いつつ、生産の効率化を図ることができる。また、工具摩耗のインプロセス計測により、加工途中の工具摩耗の数値化が可能となるため、工具損耗の判定のノウハウをデジタル化、保存・共有することで新人や後継者の教育・育成を支援につながる。今後も、ものづくりのDX化が進むことになると考えられるが、本研究がその一助となることを期待している。

参考文献

- 1) 村田光昭, 黒河周平, 大西修, 土肥俊郎: 工具・被削材間接触電気抵抗変化による正面フライス工具摩耗のインプロセス検出, 日本機械学会論文集 (C編) 79巻 803号 (2013-7)
- 2) T.Kato, G.Higashijima, T.Yazawa, T.Otsubo, Y.Noizaki, K.Tanaka: Rotation Control of Air Turbine Spindle using High Precision Quick Response Pneumatic Pressure Regulator, JFPS International Journal of Fluid Power System Vol. 7, No. 1 pp. 9-15 (2012)
- 3) T.Kato, G.Higashijima, T.Yazawa, T.Otsubo and K.Tanaka: Proposal of disturbance-compensating and energy-saving control method of air turbine spindle and evaluation of its energy consumption, Precision Engineering, Vol. 43, pp. 439-447 (2016)
- 4) Y.Okamoto, T.Yazawa, T.Kato, K.Nishida, S.Moriyama, Y.Maeda, and T.Otsubo: Study on tool wear in-process estimation for ball end mill using rotation control air turbine spindle, Key Engineering Materials, Vol. 749, pp. 94-100 (2017)
- 5) 加藤友規, 西田一矢, 數裕太, 廣瀬太志, 矢澤孝哲, 岡本優介, 長田尚子, 工具損耗推定方法, 特許番号: 第6905224号, 2017-06-29
- 6) 川島健嗣, 加藤友規, 山崎俊平, 香川利春: 気体用の超精密高速応答圧力レギュレータの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 38, No. 2, p. 17-522 (2007)

(原稿受付: 2024年2月13日)

解説

超精密加工機における高速応答レギュレータの適用検討

著者紹介



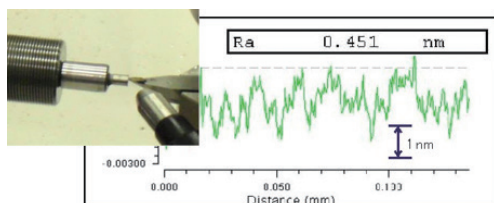
ふく た ま さ ひ こ
福田 将彦

芝浦機械株式会社
〒412-0038 静岡県御殿場市駒門1-120
E-mail: fukuta.masahiko@shibaura-m.com

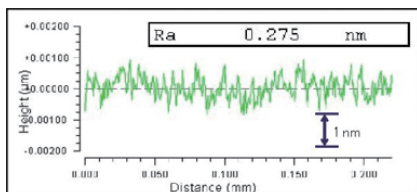
1998年広島大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、東芝機械(株)入社。超精密加工機の製造および開発に従事。博士(工学)。

1. はじめに

モバイルデバイスの普及にともない超精密加工に関連する技術が発展し高品質な光学製品の生産を可能としてきた。その中で加工を担う装置として、さまざまな要素技術が提案され性能とコストパフォーマンスの両面において優れた超精密工作機械が登場している。代表的な事例であるレンズ金型加工では、ナノメートルオーダーの位置決め性能を活かした加工プロセスが採用されている¹⁾。ただし、直交する水平2軸で構成される旋盤系の加工方法や段取りで対応可能な回転対称形状に限定されたアプリケーションに着目した事例が多く、鉛直軸を加えた3軸または複数の回転軸を含む5軸加工を必要とする自由曲面



(a) 1 nm位置決め分解能



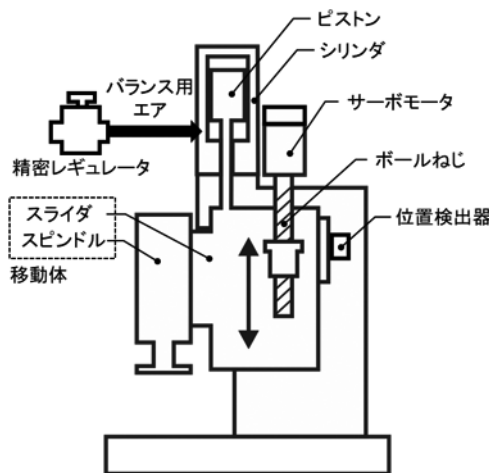
(b) 0.1 nm位置決め分解能

図1 位置決め分解能による加工面粗さの比較

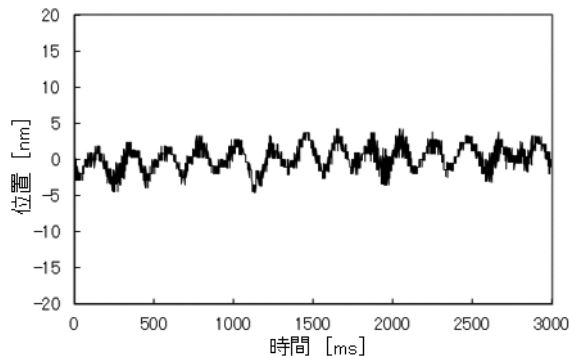
形状など付加価値の高い加工には課題が残っている。

2. 超精密加工に要求される位置決め性能

モバイルカメラ用レンズは、高解像度と低背化を図るため複雑な曲面をもつ複数の非球面レンズから構成されている。これら曲面形状は数式により厳密に定義されており、成形技術や組立技術の向上とともに金型加工でも加工誤差をできるだけ小さくすることが要求される。図1は加工機の位置決め分解能による金型加工面の比較を示している。同図(a)に示す1 nmの位置決め分解能を持った加工機による金型加工表面にはナノメートルオーダーの凹凸が認められ、レンズにおいて望ましくないゴーストや虹目の要因になる可能性が指摘されている。したがって、



(a) 超精密加工機における鉛直軸構成



(b) 鉛直軸の位置決め精度

図2 圧力制御特性による位置決め精度への影響

ハイエンド光学ユニットに用いる金型加工では同図(b)に示すような高品位加工を可能とする0.1nmの位置決め分解能をもつ加工機が必要とされている²⁾。

3. 鉛直方向位置決めにおける課題

超精密加工機の鉛直軸では水平軸と同じくリニアモータ駆動を採用しているが、スライダやスピンドルなどの移動体質量による制御特性の低下やリニアモータからの発熱を低減させることを目的とし、空圧式バランスシリンダを併用した構造を採用している。さらに移動体質量を高精度にキャンセルするため、シリンダとピストンは非接触構造となっており、シリンダとピストンの間に形成されるシリンダ室に所定圧力に制御されたエアが供給される。ただし、移動にともないシリンダ室の拡大縮小が生じ圧力が変化する。そこで、シリンダ室の圧力は常に移動体質量が適切にキャンセルするように制御されていないと、これら圧力制御に用いるレギュレータには高精度な圧力制御と良好な流量特性が求められる。

3.1 圧力の安定性

高精度な圧力制御手法としてダイヤフラム型精密レギュレータが知られている。内蔵された調整ばねとのバランスにより吸排気がなされるため、単純な機構にも関わらず安定した圧力制御が期待できる。バランスシリンダでは、エア消費流量が少なく、加工状況により1次側や2次側に圧力変動が生じる可能性があり、供給圧変動に関わらず安定かつ高感度な制御特性が求められる。図2は軸動作によりシリンダ室の圧力に微小変化が生じたときの鉛直軸の位置決め特性を示している。この事例では、ボールねじ駆動を採用した構成だったため、圧力変動による位置決め誤差を移動体背面に設置した位置検出器により検知できたにも関わらず、十分な位置フィードバック制御ができず10nm程度の位置誤差を生じた。リニアモータ駆動の場合、高い制御特性が期待できるため上記誤差の低減を期待できるが、制御系への外乱となり不安定要素となる。したがって、ナノメートルオーダーの位置決めを達成するためには少なくとも0.01MPa以下の高感度な圧力制御が必要となる。

3.2 高速応答性

鉛直軸を含む直交3軸を用いた光学曲面創成では水平軸と同様の動作特性が鉛直軸にも必要となり、加工条件の最適化や加工効率の向上の観点から大きな速度変化が生じる場合がある。図3では高速移動時におけるシリンダ室の圧力変化とリニアモータへの電流値の一例を示しているが、高速移動にともな

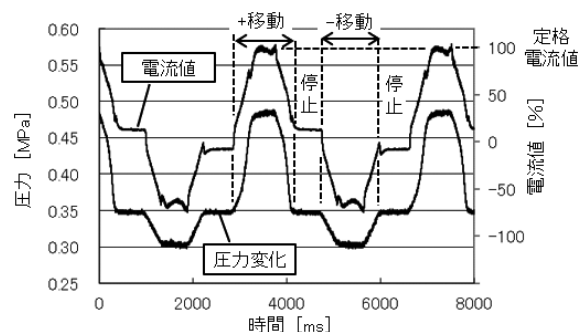


図3 高速移動時の軸電流値とシリンダ内圧力（従来精密レギュレータ）

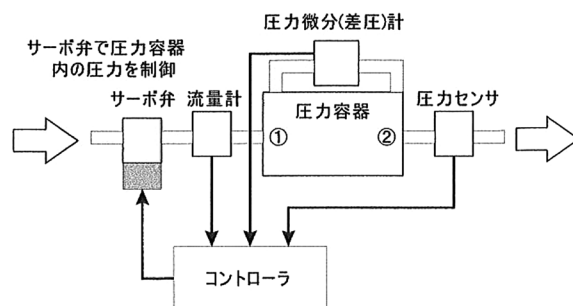


図4 高速応答精密レギュレータの概要

うシリンダ室の急激な拡大縮小に対し精密レギュレータの吸排気が間に合わず、移動体のイナーシャ以上に推力が必要となり、結果として定格電流値を超えるトルクがリニアモータに生じた。この場合、指令速度に到達できないため、正常な位置決め制御が困難となり不安定になった制御系の発振による異音や振動の原因となる。

4. 高速応答精密圧力レギュレータの適用

前章で述べたように高速で鉛直軸が移動しながら高精度に位置決めを行う加工には、従来の精密レギュレータではシリンダ室の吸排気が追従できず適正な圧力制御が困難な場合がある。そこで、高速応答精密レギュレータを用いた場合の加工機の動作特性について検証を行った。

4.1 試験装置の概要

本章で用いた高速応答精密レギュレータ(HPR100, 東京メータ㈱)は、スプール型サーボバルブを採用しており、図4に示すように流量と圧力から一定圧力が得られるようにサーボ弁を用いた圧力制御を行っている³⁾。その結果、1kPa単位の圧力設定と0.3sの応答特性を有している。そこで、直交3軸(X, Y, Z)とワーク軸(C)から構成される同時4軸制御超精密加工機(ULG-100D (H3), 芝浦機械㈱)を用い、鉛直軸のバランスシリンダの圧力調整に適用した。本加工機は、全軸リニアモータ駆動を採用し、1nm位置決め分解能を達成している⁴⁾。加工検証で

は、鉛直軸動作を必要とするフレネル形状を含む自由曲面形状加工を行った。この加工では最大2,000mm/minの鉛直方向の軸移動を含む同時4軸動作(X-Y-Z-C)を必要とする。

4.2 圧力の安定性

圧力制御の安定性評価として、0.01mmと0.05mmの往復軸動作におけるシリンダ室の圧力変動について評価を行った。従来の精密レギュレータでは図2で示したように微小な圧力変動に対し十分な制御性能が得られず10nm程度の位置決め誤差を生じていたが、本装置では微小移動にともなうシリンダ室の拡大縮小が生じているにも関わらず、適切な制御により圧力変動が認められなかった。そこでより顕著な検証を行うため0.05mmの軸動作を行った。その結果、図5に示すように圧力変動が認められるものの0.001MPa以下に制御できており、かつ短時間に収束、位置決め性能への影響を最小限に抑えていることがわかった。

4.3 高速応答性

図3で示した従来の精密レギュレータを用いた事例では、高速移動時において吸排気が間に合わずシリンダ室の圧力変動が最大0.18MPaとなり、移動体質量に対し余分な推力を必要とする状況となった。本装置を用いて同じ軸動作を行った時の状況を図6に示す。シリンダ室の圧力変動は0.05MPa以下に抑えられ、リニアモータへの電流値変動も約半分に小さくなったことがわかる。つまり、定格に対し余裕のある電流にも関わらず適切に移動体質量をキャンセルしていることを示しており、良好な位置決め特性が期待できる。また実際の加工では、工具刃先が常にワークと接しながら急激な速度変化が移動軸に生じる場合も考えられる。そこで図7では図6で示した挙動のうち、2,000mm/minから停止させたときの軸動作の拡大表示を示している。高速移動から停止を行った直後には若干の圧力変動が認められるが、停止後0.3～0.5s程度で収束し、位置決め誤差への影響を最小限に制御できていることがわかった。

図8は、加工においてさまざまに軸速度が変化することを想定し、軸速度に対するシリンダ室の圧力変化について従来の精密レギュレータと本装置との比較を行った結果を示している。その結果、800mm/min以下の領域において従来の精密レギュレータは比較的圧力変動を低く抑えており良好な圧力制御が行われていることを示しているが、それ以上では顕著な圧力増加が認められた。つまりシリンダ室の圧力変動に対し精密レギュレータの圧力制御が適切に追従していないと考えられる。一方、本装置では低速時に従来の精密レギュレータよりも高い圧力変動を示して

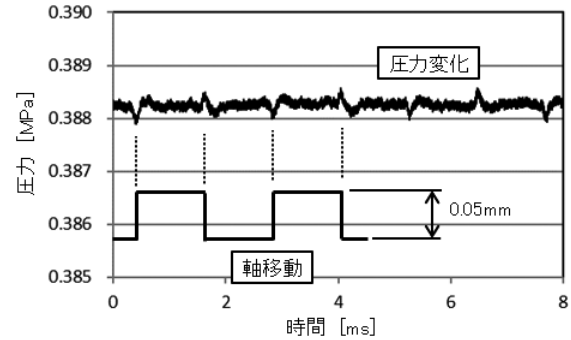


図5 微小動作時のシリンダ内圧力変化

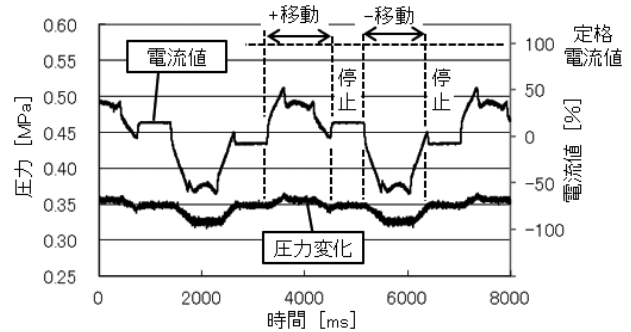


図6 高速移動時の軸電流値とシリンダ内圧力（高速応答精密レギュレータ）

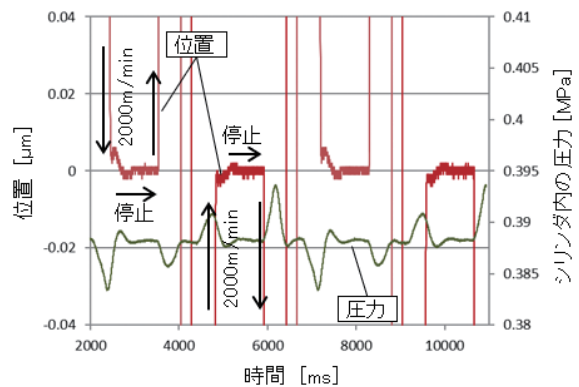


図7 高速移動時におけるシリンダ室の圧力変化

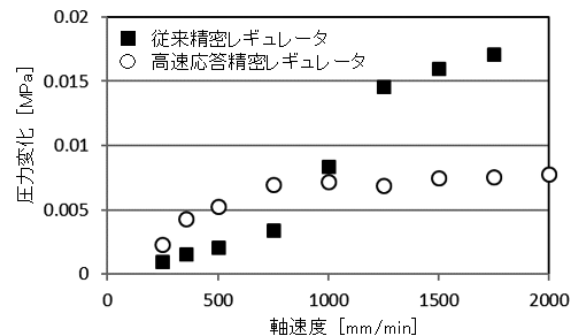


図8 軸速度に対するシリンダ内圧力変化の比較

いるものの、1,000～2,000mm/minにおいて0.01MPa以下の圧力変動に抑えており良好な制御特性を示していることがわかった。

4.4 加工結果

図9は加工におけるシリンダ室の圧力変動とリニアモータへの電流値を示している。その結果、スライダ移動による定常的な電流値変動が認められるが、シリンダ室の圧力変動は0.05MPa程度に抑えられていることがわかった。また本形状では一部微細形状が含まれるため、途中急な速度変化が生じている。

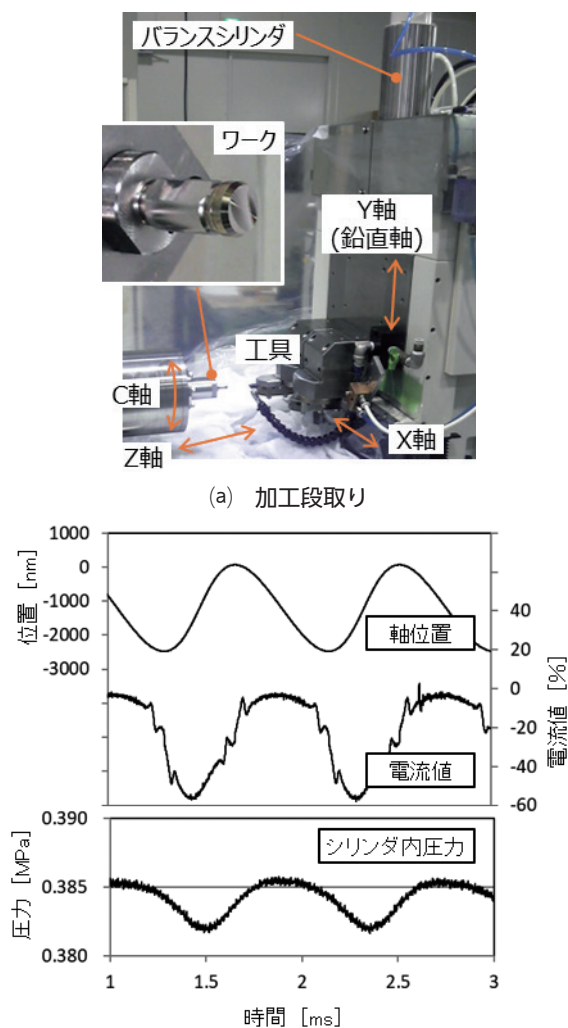


図9 加工における挙動

このような場合、従来の精密レギュレータは吸排気が追従できず圧力変動が大きくなり、リニアモータへの電流値が一時的に過大になる傾向があるが、本装置では局所的な電流値変動が確認できるものの、シリンダ室の圧力において顕著な変動が認められず良好な圧力制御ができていたことがわかる。本加工では上記微細形状部を加工するため、数 μm 程度の先端形状をもつ単結晶ダイヤモンド工具を用いており、位置決め特性の低下は工具折損を生じやすい。このような加工条件に対し、図9(a)中の加工面写真で示しているように工具折損やビバリなどを生じることなく良好な加工面が得ることができた。

5. おわりに

高速応答精密レギュレータを用いることにより、鉛直軸の高精度位置決めが可能となり、より付加価値の高い自由曲面光学素子の加工が可能になることがわかった。カメラだけではなくAR/VRをはじめとする高機能モバイルデバイスも着目されつつあり、このような要素技術も必要になってくると考えられる。そのため、停電時などの運用上の課題などを含め実用性が向上し、常用的に適用できるようになることを期待したい。

参考文献

- 1) 田中克敏, 福田将彦, 覚張勝治: 超精密加工機械の高精度化の研究, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology 51(8), 482-487, 2007-08
- 2) 片平雄, 福田将彦: 周波数分布特性からみる超精密加工面の定量的評価方法に関する検討, 精密工学会学術講演会講演論文集 2015A(0), 233-234, 2015
- 3) 川嶋健嗣, 加藤友規, 山崎俊平, 香川利春: 気体用の超精密高速応答圧力レギュレータの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集 38(2), 29-34, 2007
- 4) <https://www.shibaura-machine.co.jp/>

(原稿受付: 2024年2月13日)

解説

空気圧機器のIO-Link対応

著者紹介

み うら かつ き
三 浦 克 輝SMC株式会社
〒300-2493 茨城県つくばみらい市絹の台4-2-2
E-mail: miura.katsuki@smcjp.co.jp2001年埼玉大学工学部電気電子システム工学科卒業。現在
SMC株式会社開発第5部に所属、各種フィールドバスや産業用
イーサネット対応機器のソフトウェア開発に従事。

1. はじめに

私は2001年に入社して以来、バルブマニホールドを中心にフィールドバス対応機器の開発に携わってきた。バルブマニホールドは空気圧機器の中では一番早い段階から、シリアル通信の導入が始まった。私が配属されたときには既に、DeviceNet、PROFIBUS、CC-Linkなどのオープン規格のフィールドバスに対応したバルブマニホールドが開発され、シリーズの拡充が行われていた。これらはRS485やCAN（Controller Area Network）をベースとしたフィールドバスで、PLC同士やPCが接続されるイーサネットをベースとするコントローラーネットワークとは物理的な階層の違いがあった。

2010年以降は産業用イーサネットのシェアが伸び、コントローラーネットワークとフィールドネットワークが統合されるようになった。これに伴い現在もさまざまな産業用イーサネットに対応するバルブマニホールドの開発を行っている。

さらに近年では、より上位となる工場管理レベルのネットワークを含めて安全にインターネットに接続できるOPC UAが普及し始め、空気圧機器も対応が求められている。

これに対して各種センサが接続されるセンサネットワークの階層は、小型で低コストの製品が求められ、フィールドバスや産業用イーサネットへの対応が困難だったため、長らく4-20mAなどのアナログ信号や単純なON/OFF信号で接続することが主流だった。IO-Link通信は、センサネットワークのシリアル通信化を容易にするとともに、プロセスデー

タのデジタル化だけでなく、さまざまな情報を末端機器から得ることも可能にした。このことにより、末端機器までを含めたIIoT化が実現しつつある（図1）。

本解説では空気圧機器のIO-Link対応に関する取り組みを紹介する。

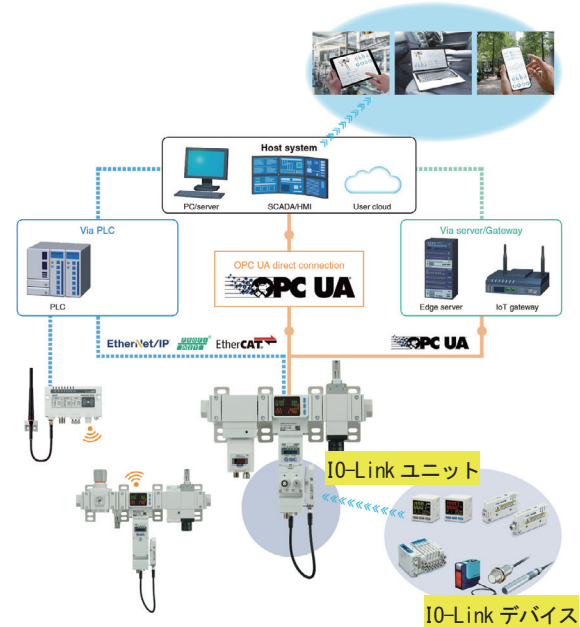


図1 空気圧機器とIIoTイメージ（エアマネジメントシステム）

2. 用語

本解説では下記の用語を使用する（表1）。

表1 用語定義

用語	定義
IO-Link ユニット	IO-Link通信と上位通信とのゲートウェイとして働き複数のIO-Linkマスターポートを有する機器
IO-Link デバイス	IO-Linkユニットの各ポートと1対1で通信接続するセンサやアクチュエータ

3. IO-Linkの特徴

3.1 IO-Linkとは

IO-Linkはポイント・ツー・ポイントによる双方向デジタル通信により、フィールドバスおよび産業用イーサネットシステムに対して、センサやアクチュエータを接続することを目的として設計された産業用インタフェース規格 (IEC 61131-9) である。センサやアクチュエータの動作状況および識別情報を制御装置 (PLC) と通信する事により、従来手作業で管理していた工場内の個々のセンサやアクチュエータの状態や情報を管理者へ提供することにより、工場のシステム管理の自動化を可能とするシステム構築を実現する技術である¹⁾ (図2)。

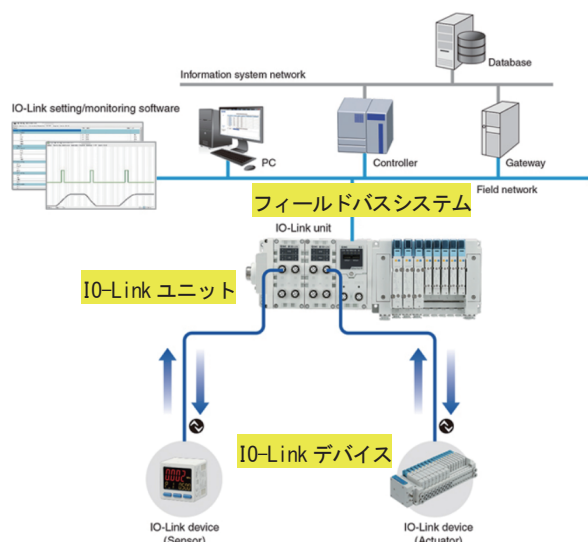


図2 IO-Linkデバイスの接続例

3.2 接 続

IO-LinkユニットとIO-Linkデバイスとの接続方式は、3線式（センサ用電源+信号）アナログセンサやデジタルセンサと同様の物理層（非シールドケーブル使用可能、最長20m）である。

IO-Linkデバイスへの電源供給は、電源1系統のポートClassAと、電源2系統のポートClassBがある (図3)。センサなどの入力機器は主にポートClassA、バルブマニホールドなどの出力機器は主にポートClassBで設計している。

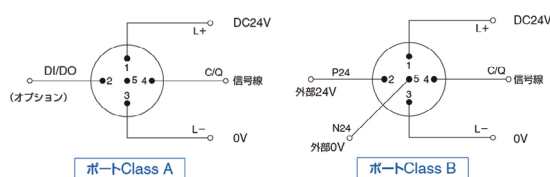


図3 IO-LinkのポートClass

シンプルなハードウェア構成（CPU+トランシーバ）と軽量の通信プロトコルにより、小型機器でも通信機能を搭載することが可能である。通信速度は、下表の3種類（表2）があり、IO-Linkユニットが自動で速度を認識できる。

表2 IO-Link通信速度

通信速度分類	通信速度	最短通信周期
COM1	4.8kbit/s	18.0ms
COM2	38.4kbit/s	2.3ms
COM3	230.4kbit/s	0.4ms

3.3 データの見える化

IO-Link通信にはプロセスデータ通信の他に、非周期データ通信、イベント通信がある (表3)。非周期データ通信やイベント通信の活用により、従来のアナログセンサでは扱えなかったデータを上位側に通知することができ、IO-Link通信を通して末端機器の情報が遠隔から見えるようになる。

表3 IO-Link通信種別と扱うデータ

通信種別	内容
プロセスデータ通信	IN/OUT：最大32byte/32byte 圧力/流量/距離/温度などの測定入力データやアクチュエータ用出力データなど
非周期データ通信	最大238byte 機器情報、パラメータなど ファームウェア更新用データなど、さらに大きなデータを扱う仕組みも用意されている。
イベント通信	同時に最大6個までのイベント情報を通知できる 診断データなど

プロセスデータ通信は、一定周期でIO-LinkユニットとIO-Linkデバイスが双方向にデータ交換する通信である。従来のアナログセンサにおける4-20mAの信号に相当するデジタルデータやON/OFFデータなどを扱う。シリアル通信化することで、複数のデータをまとめて、1本のケーブルで通信することが可能である。

非周期データ通信は、必要な時だけIO-Linkユニットが主導する形で、双方向にデータ交換する通信である。従来のアナログセンサなどでは扱えなかった、機器情報 (表4) や、パラメータなどのデータを扱うことができる。

表4 非周期データ通信で扱う主な機器情報

情報種別	内容
ベンダ情報	ベンダの識別コード、名称など
製品識別情報	機器の固有コード、名称など
製造情報	シリアル番号など
バージョン情報	ハードウェアバージョン、ソフトウェアバージョンなど
タグ情報	ユーザーが自由に設定できる文字列

イベント通信は、必要な時だけIO-Linkデバイスが主導する形で、上位側にデータを通知するための通信である。IO-Linkデバイスで異常などが発生した場合、すぐに異常を上位側に伝えることができる。

なお、非周期データ通信やイベント通信は、データを分割して送受信する方式のため、そのデータサイズに関わらず、プロセスデータ通信の周期を圧迫することなく、安定した通信が実現できる。

3.4 設定の容易性

シリアル通信化されていないアナログセンサでは、閾（しきい）値などのパラメータを、ボタンスイッチやLCD画面などで設定/確認する必要があったが、IO-Linkデバイスでは非周期データ通信を経由して上位側から設定/確認することができる。そのため、複数の機器に同じような設定をすることや、設置した後に機器のパラメータを変更することなどが容易である。

IO-Linkデバイスが持つパラメータはIODD（IO-Link Device Description）と呼ばれる設定ファイルに記述されている。PCなどにIODDをインポートすることで、パラメータの属性（Index, Subindex）を知らなくても、GUIからパラメータ名で直感的な設定/確認ができる（図4）。

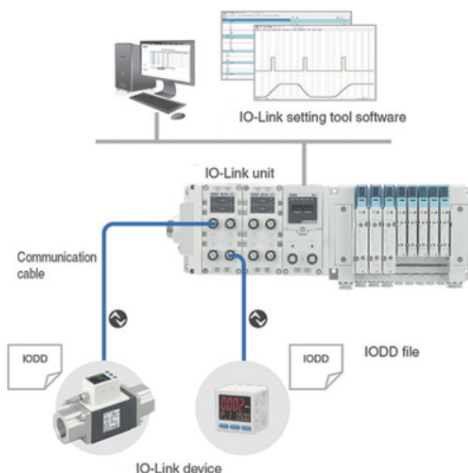


図4 IO-Linkによる設定の容易性

3.5 メンテナンスの容易性

IO-LinkにはDataStorageという機能があり、IO-LinkデバイスのパラメータをIO-Linkユニット側にバックアップすることができる。IO-Linkデバイスをメンテナンス交換する際に、センサの閾値など装置特有に設定していたパラメータを、あらかじめバックアップしたデータから自動で引き継ぐことができる（図5）。これにより、交換前の機器にどのようなパラメータを設定していたか確認する作業や、そのデータを新しい機器に設定する作業を省略することが可能である。

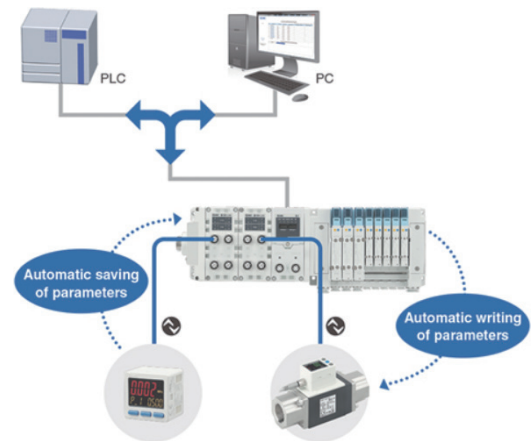


図5 IO-LinkによるパラメータBackupとRestore

3.6 IO-Linkプロファイル

IO-Linkには、いくつかのIO-Linkデバイスプロファイルが定義されている（表5）。アナログセンサでは4-20mAなどのアナログ値を上位側で圧力/流量値などに変換する際に、機器特有のスケーリング処理を行う必要があった。IO-Linkプロファイルには、値のスケーリングに必要なデータをプロセスデータに混在させるなど、データの形式が定義されており、これに従うことでユーザーは統一した方式でデータのスケーリングが可能になる。その他にも、センサの閾値を決めるパラメータの形式や、ファームウェア更新などの機能も定義されている。

表5 IO-Linkプロファイル

プロファイル	内容
Common device profile	device identification and diagnostics (I&D)
	firmware updates (Binary Large Objects (BLOB))
Smart sensor profile	Fixed Switching Sensors – FSS
	Adjustable Switching Sensors – AdSS
	Digital Measuring Sensors – DMS

ムウェア更新手順などが定義されており、IO-Linkデバイス間の差異なく使用することができる。

4. IO-Link対応機器の紹介

すでにバルブ、各種センサ、減圧弁など多くの空気圧機器がIO-Link通信に対応している。

4.1 バルブマニホールド/電空レギュレータ

IO-Linkに限らず各種フィールドバスや、産業用イーサネットに対応した製品がある。予防保全への取り組みとして、出力の回数をカウントし、上位側に通知する機能を搭載しているものがある（図6）。

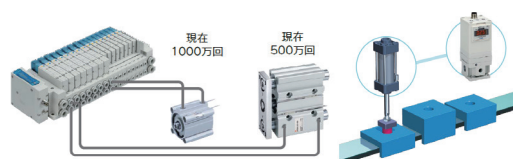


図6 バルブマニホールド/電空レギュレータ

4.2 圧力/流量/位置センサ

ON/OFF信号と圧力/流量/位置情報、温度などのデータを同時に監視できる。センサのアナログ値や温度などの状態に基づき、閾値を柔軟に設定でき、これに応じたON/OFF信号などを出力できる（図7）。

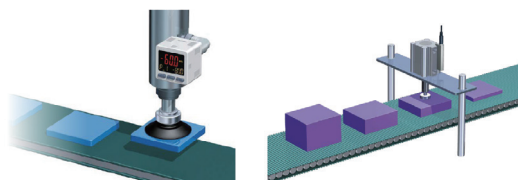


図7 各種センサ

4.3 エアマネジメントシステム (IO-Linkユニット)

生産停止/設備待機時の低圧化によりエア消費を削減できる。各種IO-Linkデバイスを接続できるほか、OPC UAにより遠隔からセキュアに制御できる（図8）。

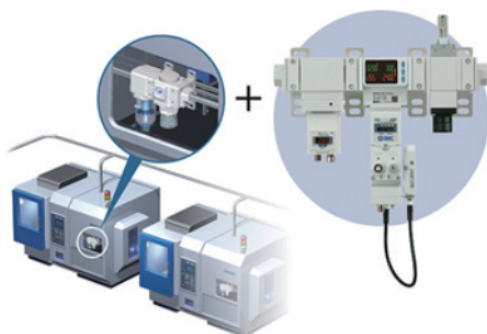


図8 エアマネジメントシステム

4.4 無線システム (IO-Linkユニット)

上位側（ベース）と、センサやアクチュエータを接続する下位側（リモート／IO-Linkユニット）の間を無線化できる。

IO-Link通信で扱うデータを無線通信化でき、可動部における断線リスクの低減や配線コストの削減、遮蔽空間との通信が可能になる（図9）。



図9 無線システム

5. 課題

5.1 認証試験

IO-Linkは上述のプロファイルを含む通信プロトコル、設定ファイル（IODDファイル）、物理層のテスト仕様が定められており、それぞれのテストツールが存在する。しかし、現状は統一した機関による認証試験がなく、相互接続性の確認はベンダ主体で行う必要がある。

当社では、開発したIO-Linkデバイスにおいて、相互接続性に関する問題を防止するため、開発段階で複数のIO-Linkユニットとの接続性を確認するほか、ドイツで毎年開催されているIO-Link plugfestに積極的に参加している。IO-Link plugfestは、さまざまなIO-LinkユニットやIO-Linkデバイスのベンダが一堂に会し、それぞれのデバイスを互いに接続して、問題点やその改善方法を協議することができる場である。

5.2 予防保全、予知保全

ユーザーがDXによって実現したいことのひとつとして予防保全や予知保全が挙げられる。予防保全へのアプローチとして、アクチュエータの動作回数をカウントするなどの取り組みを行っている。ユーザーにとってより有用なデータを末端の空気圧機器でも収集できる取り組みを行っていききたい。

5.3 ネットワーク間の垣根

IO-Linkを通じて末端のデバイスと上位側をシリアル通信で接続する仕組みはできたが、IO-Link通信は小さい通信フレーム（数byte～数十byte）に特化しており、上位側の産業用イーサネットとは非周期データやイベントデータの扱いにかい離がある。

IO-Link over SPE (Single Pair Ethernet) 仕様など、より大きなデータをより速くより遠くに通信するための仕様拡張が進められており、今後はよりシームレスに通信できるようになることが期待される。

6. おわりに

当初はユーザーからの要求でIO-Link通信に対応した空気圧機器製品の開発と拡充を行ってきた。その結果、これまでは4-20mAのアナログ信号やON/OFF信号で接続していたような製品がシリアル通信化され、プロセスデータに留まらず、機器情報の収集、パラメータ管理、異常の詳細把握、ファームウェアの更新などさまざまなことが上位のPLCやPC、さらにはインターネットによる遠隔制御まで可能になる経路が開けた。このようにIIoTを実感できるようになりつつあるが、DX（デジタルトラン

スフォーメーション）実現のためには、ようやくスタートラインに立った段階だと考えている。

ユーザーにとって真に有用なデータとは何か？ 新たに収集すべきデータは？ 適正な周期や分解能は？ 末端で処理すべきデータは？ サイバーセキュリティへの対応は？ などまだまだ検討すべきことが残されている。

ユーザーが望むFAにおけるDXに向けて、空気圧機器メーカーとして、これからどのように貢献できるかを引き続き考えていきたい。

参考文献

- 1) <https://ja.wikipedia.org/wiki/IO-Link>

(原稿受付：2024年2月6日)

解説

空圧式アクティブ除振台の除振・制振技術

著者紹介



しの はら ゆういちろう
篠 原 雄一郎

特許機器株式会社
〒660-0833 兵庫県尼崎市南初島町10-133
E-mail: shinohara@tokkyokiki.co.jp

2004年 特許機器株式会社入社、現在、研究開発センター 研究開発3課に所属、除振装置の制御とその研究開発に従事、日本機械学会の会員。

1. はじめに

精密機器の多くは設置環境の改善を目的として、空気ばねで支持されている。精密機器としてたとえば露光装置には、激しくかつ繊細に位置決めするステージが組み込まれている。このステージ搭載物への露光精度を確保するため、除振装置が備えられる¹⁾。除振装置の主な役割は、外乱振動の除外であり、近年ではアクティブ除振装置が多く採用されている。これらアクティブ除振装置が実用機として発表された1989年以降、多くの実績が積み重ねられ、関連技術の成熟度²⁾⁻⁴⁾はかなり高くなってきた。

そこで本稿では、空圧式アクティブ除振台において、主要な除振および制振技術の制御事例⁵⁾⁻⁷⁾を紹介する。

2. 除振装置の役割と要求性能

除振装置の使用目的は、精密機器に作用する各種外乱振動を除外することである。これらの外乱振動は、(1)機器を支えるばね系を介して設置面から伝達する振動、(2)ばね系の上部に直接作用する振動によるものが主である。これら作用の違いを明確にするため(1)を地動外乱、(2)を直動外乱と呼び区別する。

除振台に搭載する機器として、たとえば図1のようなものが挙げられる。上図は電子顕微鏡の例であり、振動がそのまま像の揺れに直結するため、地動外乱の除振が必要である。下図は露光装置の例であり、装置内に移動するステージを内蔵しており、ステージ移動に起因する直動外乱の抑制(制振)が必要である。さらに偏重により発生する傾きに対して、

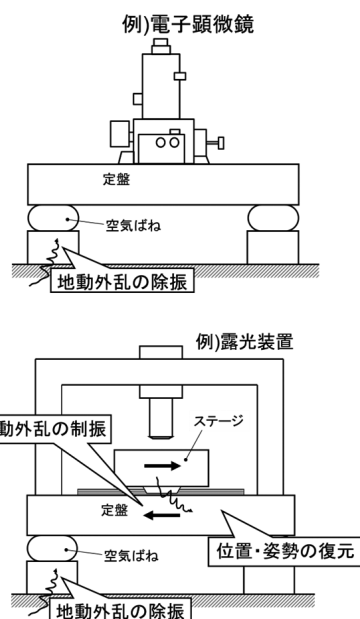


図1 アクティブ除振装置の役割

位置・姿勢の復元も必要となる。

このように除振装置の要求性能としては、(1)地動外乱の絶縁性能「除振」、(2)直動外乱の収束性能「制振」、(3)位置姿勢の復元性能の3つが求められる。

3. アクティブ除振の概要と装置

3.1 空気ばねとアクティブ除振

アクティブ除振装置は、空気圧制御での利用を基本としてサーボ弁、タンクなどの空気圧アクチュエータとセンサ類、制御装置などで構成される。空気ばねを用いて除振する場合、搭載機器の荷重を支持するばね要素だけでなく、アクチュエータも兼用することができる。空気圧アクチュエータは大質量の支持と微細な力出力を一つの空気ばねで実現可能である。たとえば構成要素であるサーボ弁は、自身の固有振動数が高く周波数特性が広いだけでなく、圧力制御の直線性も優れる。これらの特性から、アクティブ除振・制振を実用化する上で、これら要素の利用はメリットが大きい。

アクティブ除振系の構成を説明する。図2は鉛直方向の1自由度モデルである。システムは、質量 M 、

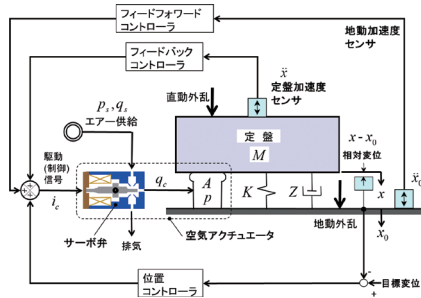


図2 空圧式アクティブ除振系の構成

減衰Z、ばねKの要素とその振動を計測するセンサ、その信号を制御信号に変換するコントローラ、制御信号を空気圧に変換するサーボ弁、その空気圧に基づいて制御力に変換して対象を制御する空気圧アクチュエータで構成されている。この構成のもと、スカイフック系（図3）と呼ぶ絶対座標系の信号を操作して、アクチュエータで支持した装置をアクティブ制御する。この制御により、振動絶縁性能や制振性能をかなり自由に操作することが可能となる（図4）。

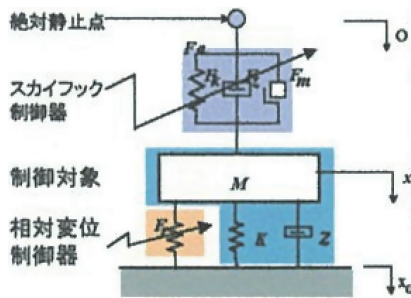


図3 スカイフック系モデル

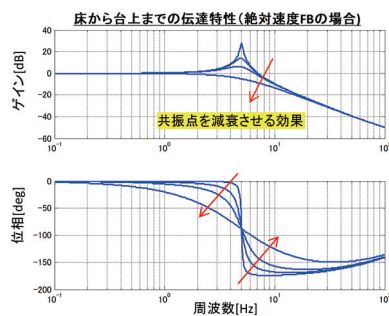


図4 スカイフック系の伝達特性

3.2 アクティブ除振装置

3.2.1 制御方法

除振装置内蔵の加速度センサおよび変位センサにより、除振装置の位置と姿勢を一定に維持しつつ除振制御を行う。さらに、座標制御方式を導入している。これは各除振ユニットのセンサ測定値を除振装置上の定盤の並進と回転の自由度に変換し、その自

由度ごとに制御を行う方式である（図5）。

この手法により、並進と回転の制御を個別に行うことが可能となる。その効果の一つとして図6で示すように転倒方向を硬くすることにより搭載物が高重心であっても姿勢を一定に保ちながら、鉛直・水平方向を柔らかくすることにより除振性能を向上させる制御が可能である。

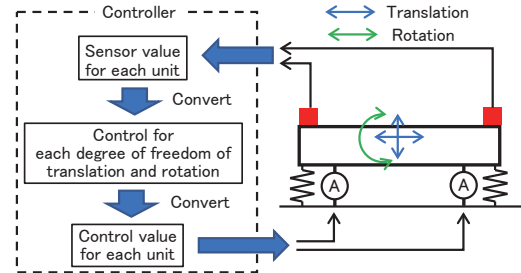


図5 アクティブ除振装置の制御方式

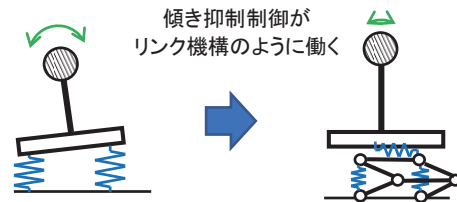


図6 傾き抑制制御のイメージ

3.2.2 実用化した製品

図2の構成を6自由度で実現した製品を紹介する。図7はアクティブ除振装置に使用される空気圧アクチュエータユニットの例である。このユニットは、鉛直・水平方向の2方向に動作可能な空気圧アクチュエータとアクチュエータの作動方向の振動検出と位置検出が可能なセンサ、そして設置点（床）の振動を検出可能なセンサを内蔵しており、さらに信号の前段処理を含めて一体に構成されている。通常のアクティブ除振装置は、このアクチュエータユニットを4体配置することで実現されている。

図8は制御を実装する高機能コントローラであり、波形モニターや自動制御調整の機能を有する。



図7 除振ユニット例



図8 コントローラ例

4. 除振装置の基本性能と要求される制御技術

4.1 除振装置の基本性能

つぎに、このユニットを用いたアクティブ除振台の基本性能を3点示す。1点目は振動絶縁性能である(図9)。図より、アクティブ状態では1Hz以下から良好な絶縁性能(除振領域の拡大)を得ている。2点目は直動外乱時の制振性能である(図10)。図よりステージ加振時の外乱を瞬時に感知し、素早く安定している。3点目は復元性能である(図11)。図より、変位制御により正確な位置復元性能を得ている。

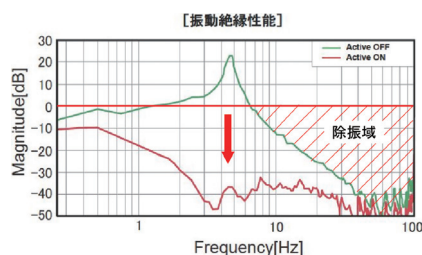


図9 除振性能

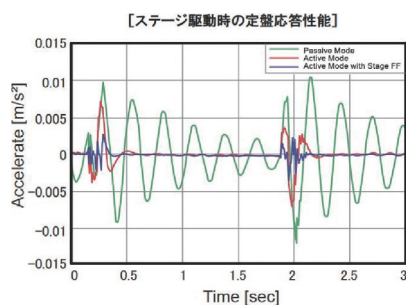


図10 制振性能

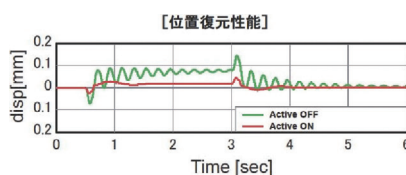


図11 復元性能

4.2 要求される制御技術

アクティブ除振装置が広く採用されるようになってから、さまざまな要求が生じ、その都度技術開発が進んできた。対応技術としては、(1)大型・大荷重

への対応、(2)ステージ高速化への対応、(3)設置床に振動を伝えない技術、(4)遮断性能向上のための技術などが挙げられる。そこで次章では制御技術事例を紹介する。具体的には、「1 Hz以下の除振」、「2 段式システムによる除振」、「ステージフィードフォワード制御による制振」である。ただし(1)大型・大荷重への対応と(3)設置床に振動を伝えない技術については文献⁵⁾に譲り、ここでは割愛する。

5. 制御技術事例

5.1 1 Hz以下の除振技術⁷⁾

1 Hz以下の除振は一般的に難しいとされている。ここでは、前述図5と図6の制御技術を用いて、高重心の搭載物でも、この難しさを克服できることを実験例で示す。

図12では、空圧式除振装置に高重心の構造体を搭載した場合であり、図13は除振特性を示す。高重心の影響により、パッシブ時の固有モードが1 Hzに存在し、その周波数近傍の振動を増幅しているが、アクティブ制御を用いることで水平・鉛直方向ともに0.4Hzから除振できていることが確認できる。

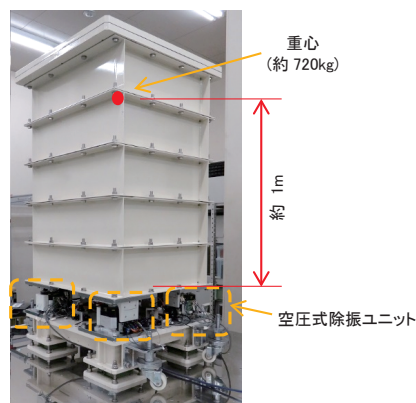


図12 1 Hz以下の除振実験系

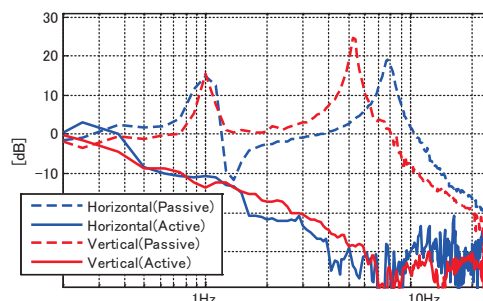


図13 1 Hz以下の除振特性

5.2 2段式除振システムによる除振技術

遮断性能を向上させるため、たとえば空圧式パッシブ除振装置の下に空圧式アクティブ除振装置を追加して配置することが考えられる。これを2段式除

振システムと呼ぶ。このシステムを使うことで、除振性能がさらに向上する可能性がある。

まず空圧式パッシブ除振装置の下に、固有振動数の近い空圧式アクティブ除振装置を設置した場合でも、アクティブ制御により広帯域で高い除振性能が得られることを1次元シミュレーションにより示す。

5.2.1 シミュレーションによる検証⁷⁾

2段階式除振システムのシミュレーションモデルを図14に示す。M1は搭載装置内蔵の除振ユニットで支持される負荷を表し、M2は搭載装置のフレームおよび下側除振装置で支持される設置用定盤を表す。

図2で示すように空圧式除振装置は複数の種類のセンサにより制御されているが、問題を単純化するために、ここではばね上の加速度信号からアクチュエータへのフィードバック制御に限定して考察する。シミュレーション条件として、質量比 ($MR=M2/M1$) は1.0, 上側除振台の固有値を1.8Hz, 下側除振装置の固有値を2.0Hzとする。

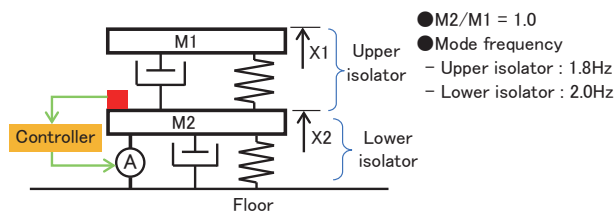


図14 2段階式空圧除振システムのモデル

シミュレーション結果を図15に示す。図の上段は床から上側除振装置までの振動伝達特性を、下段は床から下側除振装置までの振動伝達特性を表している。図からは、加速度制御を行わないパッシブ状態で二つの除振装置の近接する2つの固有モードの連成により1～4Hzの除振性能が劣化していることがわかる。アクティブ制御ではまったく影響のないレベルまで改善されており、結果として広帯域で高い除振性能を達成されていることが確認できる。

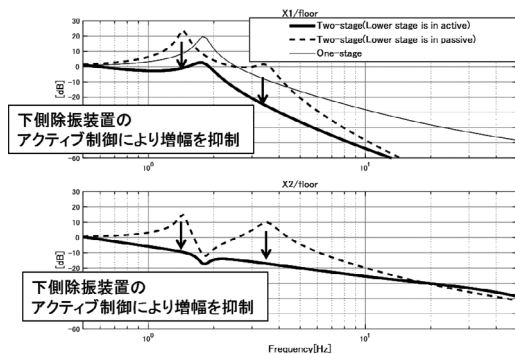


図15 2段階式空圧除振システムの除振特性（シミュレーション）

5.2.2 実験による検証⁵⁾

ここでは、2段階式除振システムとして、アクティブ除振装置を直列に使用することを考える（2段階アクティブと呼ぶ）。図16はその構成である。アクティブ除振装置Aを床上に設置し、その上部にアクティブ除振装置Bを搭載する。この際、アクティブ除振装置Bは、装置本体に内蔵されたものであっても問題ない。このシステムは、床振動が非常に大きい場合、1台のアクティブ除振装置では振動を十分に低減できない状況に適用される。

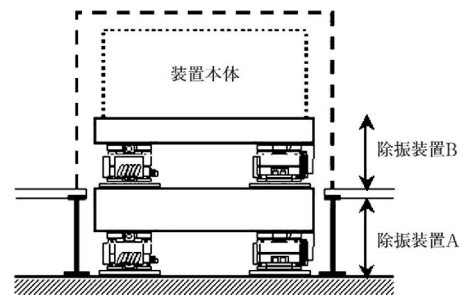


図16 2段階アクティブの構成

図17は実験結果である。図において、除振装置Bのみをアクティブ制御状態にした場合と、除振装置AおよびBを共にアクティブ制御にした場合を比較した。両方の装置をアクティブ制御にした場合は、その除振性能が10～20dB程度向上していることが確認できる。

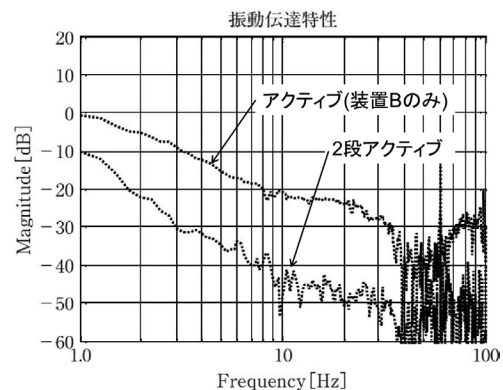


図17 2段階アクティブの除振特性

5.3 ステージフィードフォワード制御による制振技術⁵⁾⁻⁶⁾

ステージ高速化への対応技術を紹介する。近年、ステージが大型化・高速化されたことにより、ステージからの加振力が除振装置を大きく振動させるようになってきた。この問題に対処する手法として、ステージの挙動信号からフィードフォワード制御を行う方法がある（ステージフィードフォワード：ス

テージFFと略す)。ステージFF制御のブロック線図を図18に示す。この図から、ステージの加速度と変位を信号として取り込み、加振力変換マトリックスにより位置情報が逐次更新される制御ループが追加されることがわかる。

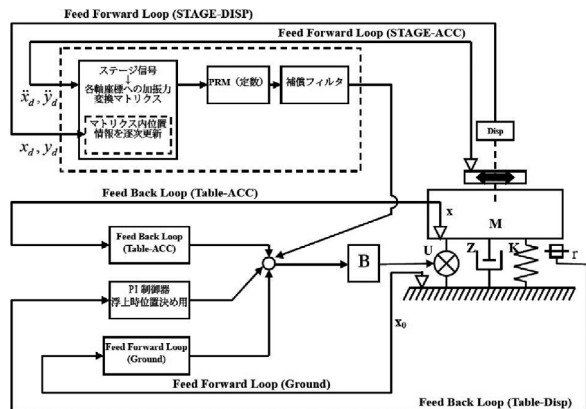


図18 ステージFFの制御ブロック線図

図19はステージFF制御による定盤加速度応答を示す。この図はステージ加減速時の振動抑制を表している。図の太実線より、ステージFF制御により加速度ピーク値が1/4程度に低減し、瞬間的な外乱を抑える効果が確認できる。

また、重いステージの場合、ステージ移動に伴う荷重の変化によって定盤が低周波で振動し傾くことがある。図20は定盤傾斜の時刻歴応答である。ステージFF制御OFFにした場合、傾斜で大きく揺らいでいるが、ステージFF制御ONにすることで応答が1/10程度に抑制されることが確認できる。

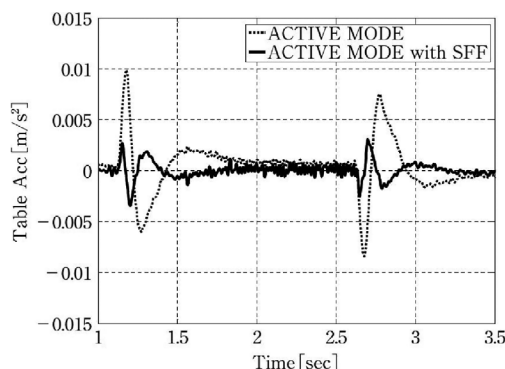


図19 加速度の制振性能

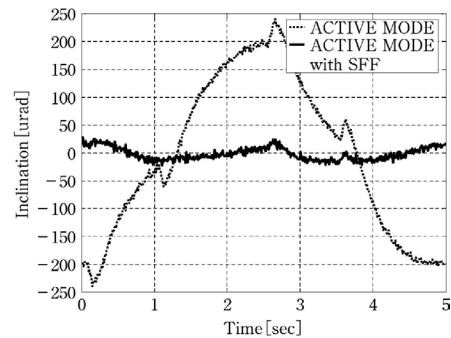


図20 傾斜の制振性能

6. おわりに

本稿では、精密機器の除振・制振に欠かせないアクティブ除振台について、除振・制振技術の解説と既存の制御技術の事例を紹介した。約10年前に本誌に投稿した解説記事⁸⁾では、「空気圧制御の可能性を極限まで追求しなければならないだろう」と締めくくり、その中で開発中の高速応答の空気圧アクチュエータの成果も紹介した。今回は、紙面の都合上、新たな研究開発の内容は割愛したが、今後機会があれば紹介させていただく予定である。

最後に、除振を取り巻く環境はステージの大型化・高速化を例に出すまでもなく、厳しい要求が課せられる。その中で、対応技術が着実に進歩することに期待したい。

参考文献

- 1) 福永徹：半導体露光装置における振動外乱と対策，超精密位置決め専門委員会定例会講演前刷集，No. 2022-1, p. 35-44
- 2) 日本振動技術協会：防振・除振編（その3 アクティブ除振技術）総論，振動技術総覧2005, p. 194-197 (2005)
- 3) 安田正志，大坂隆英，池田雅夫：フィードフォワード制御を併用したアクティブ除振装置の研究，日本機械学会論文集，Vol. 58, No. 552, C, p. 2381-2387 (1992)
- 4) 安田正志，池田雅夫：ダブルアクティブ制御による除振装置の性能向上，日本機械学会論文集，Vol. 59, No.562, C, p.1694-1701 (1993)
- 5) 野口保行：アクティブ除振・制振による精密機器の微振動制御，精密工学会誌，Vol. 73, No. 4, p. 410-413 (2007)
- 6) 野口保行，安田正志，顧榮榮：搭載機器外乱のフィードフォワード制御による空気圧アクティブ除振台の性能向上，第47回自動制御連合講演会，No. 125 (2004)
- 7) https://www.tokkyokiki.co.jp/common/pdf/product/nanotechnology/paper_2020-501196_jp.pdf
- 8) 篠原雄一郎，野口保行：ハイブリッド技術による空気ばね式除振台の微振動制御，フルードパワーシステム，Vol. 42, No. 2, p. 95-100 (2011)

(原稿受付：2024年1月29日)

解説

エアパワーメータを活用した
空気圧システムの省エネルギー診断

著者紹介

こばやし としや
小林 敏也東京メータ株式会社
〒211-8577 神奈川県川崎市中原区今井南町10-41
E-mail: t_kobayashi@tokyometer.co.jp

1984年 神奈川大学工学部卒業。1984年東京メータ株式会社入社。同社技術部にて、空気圧機器に関する開発に従事。2006年よりエアパワーメータの開発に携わる。

1. はじめに

DX時代の産業用機械・装置のエネルギー消費の効率化を推進するための技術の一例として、空気圧を利用する機械・装置の消費エネルギーを測定するための機器であるエアパワーメータとIoT、ICTを活用した省エネルギー診断について述べる。

2. エアパワーメータ

2.1 開発の背景

温室効果ガスの排出量の削減および省エネルギー化の要求が高まっている中で、製造業の工場・事業所で使用される空気圧機器についても当然に、省エネルギー化が求められている。しかし、空気圧システムでは、エネルギーが空気圧に変換された後のエネルギー使用量を把握することが困難であった。圧縮空気を作る際には一般に圧縮機（コンプレッサ）が使用されるため、空気圧機器のエネルギー消費量を議論・評価する際には圧縮機の電力使用量を測定することが多いが、より有効に省エネルギー化を実現するためには、個別の空気圧機器のエネルギー消費量を評価する必要がある。

このような背景から、1999年頃より、東京工業大学の香川利春名誉教授・蔡茂林教授（現：北京航空航天大学）・藤田壽憲教授（現：東京電機大学）・川嶋健嗣教授（現：東京大学）らは、空気圧システムのエネルギー評価に、エクセルギの概念を取り入れ、「エアパワー」による評価方法を提案した^{1)~4)}。

また工作機械が消費するエネルギーの測定方法に

関するJIS規格（JIS B 0955-2：2021）が制定された。この規格は、主に特定の条件下で工作機械に供給されるエネルギーの測定方法について、圧縮空気を含めすべて電力（kWh又はWh）に換算して求めるよう規定している。これにより、所定の部品の製造に必要な工作機械のエネルギー量の算定が可能となる。

2.2 有効エネルギーとエアパワー

有効エネルギーとエアパワーについては、香川先生・蔡先生の著書⁵⁾に詳しく説明されているので、詳しくはそちらをご参照いただきたい。同書によると、圧縮空気の有効エネルギーとは、大気温度や圧力の状態を基準にとり、それらに対して相対的なエネルギーを定義したもので、圧縮空気から取り出して有効仕事に変換できるエネルギーを表す。有効エネルギーを時間微分することで、管路内を流れている圧縮空気がつまエアパワー $\dot{E}_i$ [W] は以下の式で求められる。

$$\dot{E}_i = \frac{d\dot{E}}{dt} = PQ \ln \frac{P}{P_a} \quad (1)$$

ただし、 P ：ラインの絶対圧 [Pa(abs)]、 P_a ：大気圧 [Pa(abs)]、 Q ：体積流量 [m³/s] である。

なお、正確には温度変化による影響を考慮する必要があるが、一般に空気圧機器は室温に近い環境下で使用されるため、厳密な測定を行う場合を除き、エネルギー管理の観点ではさほど影響はないと考えられる⁶⁾。この圧縮空気エネルギー評価のことを、電気回路の場合と比較して、エネルギーのアナロジーとして解説している文献がある⁷⁾。

2.3 エアパワーメータの開発

前述の通り、管路内を流れる圧縮空気の瞬時のエアパワーは、ライン圧と体積流量を計測すれば、算出可能である。

エアパワーを測定するための機器として開発されたのがエアパワーメータ（APM）である（写真1）。APMの構成は、流量計（ラミナー式、あるいはオリフィス式、差圧を計測する微差圧計内蔵）、圧力計、温度計である。APMはもともと流量計をベースに開発されており、ラミナー式は、流量計として

数十Hz程度の応答性能を有する。APMは、エアパワー [W]、圧力 [Pa]、流量 [L/min (ANR)]、温度 [°C]、積算エアパワー [kWh]、積算流量 [m³]、CO₂排出量 [kg-CO₂]、コスト表示が可能であり1台7役のマルチメータである⁸⁾。計測する流量レンジやエアパワーレンジによって、APMにはいくつかのタイプがある。

APMは、流量計と同じように、管路内に接続して使用する。たとえば、管路内のライン圧が $P=0.5\text{MPa (abs)}$ 、体積流量が $Q=0.01\text{m}^3/\text{s}$ 、温度を通常の大気温度とすると、圧縮空気のエアパワーは約8kWとなる。



写真1 エアパワーメータ

3. APMによるエネルギー消費量の評価

3.1 工場の空気圧エネルギー消費の見える化

近年は電力消費はさまざまなメーカー、機器により計測、管理が行われている。クラウド上にデータを吸い上げ、WEB上でどこからでもエネルギー消費を管理することが可能になっている。

APMを工場内の配管内の要所に設置することで、電動機器と空圧機器を同時に利用した場合などに、工場全体のエネルギーとして管理することが可能となる(図1)。

たとえば、APMを圧縮機の出口付近に設置し、圧縮機の消費電力と比較することで、圧縮機の運転状態における効率を評価できる。また、各ラインに設置することで管路からの漏れや圧力損失を計測可能である。前述の例のように、個々の空気圧機器の効率や消費エネルギーを計測することも当然可能である。

APMの信号を、IoT・ICT技術を用いて管理することで、事業所内(さらには複数の事業所)のエネルギー使用状況を常時監視できるようになり、稼働の最適化や省エネルギー化を検討することが可能となり、また漏れや異常使用などに対して早期に対応することが可能となると考えられる。

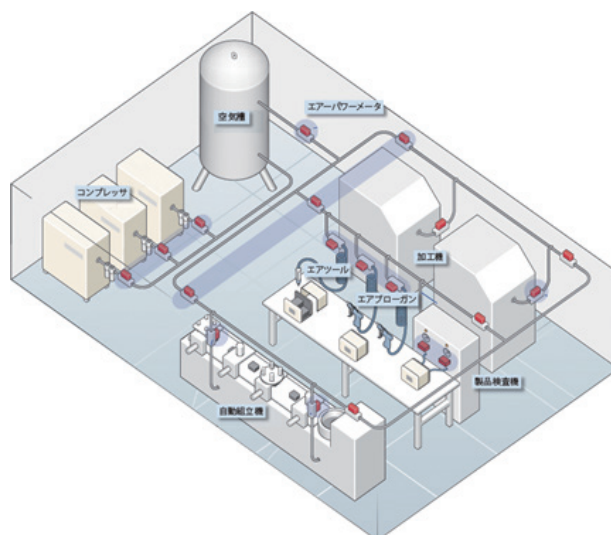


図1 工場内のエアパワー管理(イメージ)

3.2 IoT, ICTを活用したエアパワー管理

エアパワーが適正に使用されているかを管理するためにはコンプレッサや工作機械の稼働状態と合わせて検証するため電力消費とエアパワーを同時に測定することが重要である。クラウドサービスを利用したエネルギー管理システムを利用し、各測定値をクラウド上にアップロードし、PCや、Pad、スマートフォンのWebブラウザから時間と場所を選ばず数値および、グラフの閲覧が可能である(図2)。必要に応じてデータをPC等にダウンロードし、表計算ソフト等を利用し、詳細なエネルギー消費データの検証も可能である。

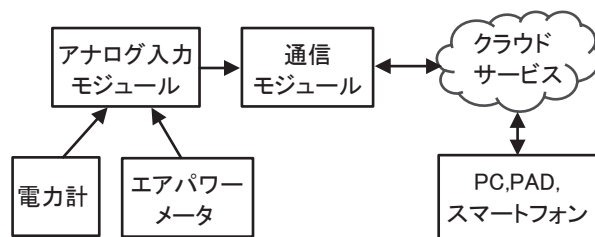


図2 クラウドサービスを利用したエネルギー管理

例としてコンプレッサの電力消費とエアパワーを同時系列で比較し、コンプレッサが効率的に稼働しているか評価した(図3)。

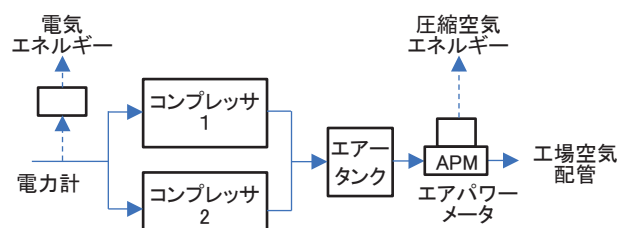


図3 コンプレッサの消費エネルギー

クラウド上に蓄積したデータから24時間分のデータを表計算ソフトでエアパワーとコンプレッサ電力をグラフ上に重ねた例を示す(図4)。この例では15kWのインバータコンプレッサを並列運転しているためコンプレッサは低速回転で運転していた。そのため効率が40%程度に低下している。一般にコンプレッサは定格回転数より低い回転数では効率が悪くなり、無駄なエネルギー消費が増加する。

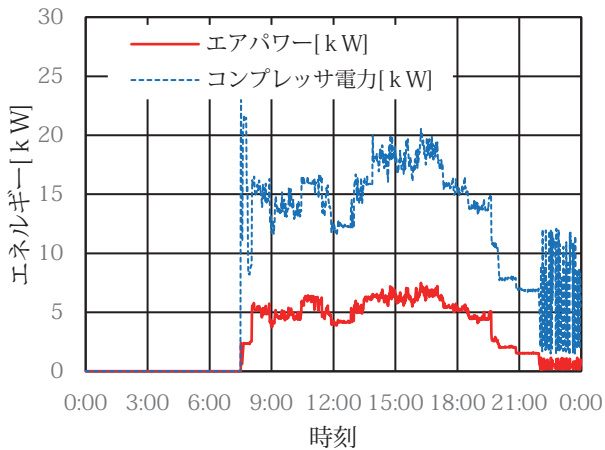


図4 コンプレッサ電力、エアパワーの測定例

1日の工場内の工作機械全体が消費する空気圧エネルギーが小さい時間と、大きい時間があり、少ない時にはコンプレッサ1台で賄うことが可能で、消費が大きいときには2台必要であることがわかる。

APMにエアパワー閾(しきい)値を設定し閾値を超えて1台では不足する場合に2台目を運転する様になると効率が改善する可能性がある。

またこの例では時刻7:30にコンプレッサの運転を開始しているが、空圧配管、タンクの圧力が夜間のエアリークにより低下していたため起動時の電力消費が多くなっている。さらに工作機械が停止している21:30以降にエアリークによる圧力低下のためコンプレッサが起動停止を繰り返していた。工作機械の未稼働時に空圧配管のバルブを閉じることで、電力消費を削減できる。

3.3 工作機械の消費するエネルギーの測定

前述した工作機械が消費するエネルギーの測定方法については、圧縮空気を含む場合の評価対象システム(図5)では電気エネルギーは電力計、圧縮空気はエアパワーメータにより消費するエネルギーが測定できる。

実際の圧縮空気による電力消費量は、使用するコンプレッサの効率により測定したエアパワーよりも大きくなるため、コンプレッサの消費電力と同時にコンプレッサの出口の圧縮空気のエアパワーを測定

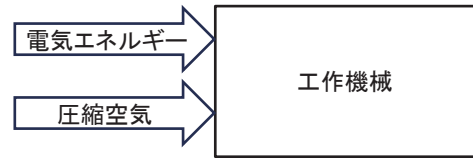


図5 圧縮空気を含む場合の評価対象システム

し、運転状態におけるコンプレッサの効率を求めることにより、エアパワー[kW]からコンプレッサ効率を考慮した電力[kW]に換算する必要がある。

4. エアパワーメータを使用した省エネ診断

4.1 APMによる現状把握

工場内の圧縮空気の使用状況を把握する。APMにより空気圧エネルギーを電気エネルギーと同様にエネルギー消費量として見える化することにより、圧縮空気に対する省エネ対策の重要性の再認識と、省エネ化の効果をAPMにより定量的に評価することができる。APMによる使用量、圧力の測定の他、使用機器、使用場所などの調査と空気圧配管、圧縮空気設備の点検を行い、劣化や不具合がないかを確認する。

4.2 省エネ化の目標設定

現状把握による空気圧エネルギー消費をもとに、省エネ化の目標を設定する。目標は、APMにより測定したエアリークや使用状況、設備の状態をから実現可能な目標を設定する。具体的には使用量の削減、不必要な使用量を無くす、使用効率を向上することでエネルギーコストの削減や環境負荷の低減を目標とする。

4.3 省エネ対策の立案

対策例：エアリーク等を無くし圧縮空気の使用量を削減する。空圧配管は圧縮空気設備の効率を上げる。使用圧力を適正化しコンプレッサの設定圧力を下げる。使用機器の見直し、無駄な空気の放出を防止する対策をとる。圧縮空気設備の定期点検とメンテナンスを行う。

4.4 省エネ対策の実行

工場の圧縮空気の省エネ化は、設備投資や工数を要する場合がある。しかし、省エネ効果は大きく、投資回収も期待でき、CO₂排出量の削減にもつながる。したがって対策を実施する際には、効果と費用を十分に検討する必要がある。

実行例1：APMによりエアリークが確認されたラインの漏れ箇所の特定制と漏れ防止対策。一般的な工場の空気配管は複数のラインに分岐しているため、複数のエアパワーメータを取り付けることにより検出されたラインにエアリーク箇所を限定できる。

エア漏れが発生しやすい箇所は、配管や接手のネジ込み部、空気用ホースの劣化による亀裂箇所、ワンタッチ式エアチューブフィッティング直後で無理にチューブが曲げられている箇所、フィルター、レギュレータ等の空圧機器の劣化によるパッキンひび割れ箇所、ブローガンの締め切り不良などである。

エア漏れ箇所は泡式のリークテスター、超音波リークテスタ、超音波カメラが用いられる。超音波カメラではリーク箇所をカメラの画層に重ねて表示し、リーク箇所を発見することが可能である。

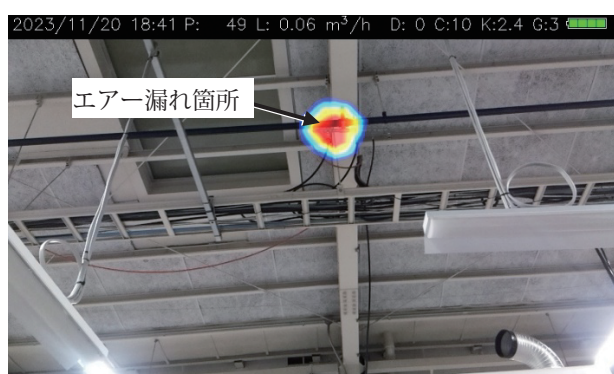


写真2 超音波カメラ画像

実施例2：エアブローノズル、エアブロー方法の最適化によるエアブローによる加工製品の洗浄液の除去工程でのエアパワー消費量の低減。加工製品の形状に合わせより効率の良い省エネノズルに交換し、さらに連続ブローから間欠ブロー化することでエアパワー消費量を半減することができる。またパルス状の吹き付けによるブローの効果も向上する可能性がある。

実施例3：圧力損失によるエネルギー消費量の削減。APMでは流量計と異なり、空気圧搬送経路での圧力損失によるエネルギー消費量を測定することが可能。機器や配管の前後の空気圧エネルギーの差から、機器や配管の効率を求め、効率の悪い箇所に対して対策を行う。細いエアホースやエアチューブによる引き回しを減らし、口径が大きいエア配管にする。空気配管をループ配管にする。接続カプラーを圧力損失の少ない省エネカプラーを使用する。空気圧エネルギー消費量のピークを抑えるため適所に空気タンクを設ける。

4.5 評価・改善

対策を実施した後は、省エネ効果を評価する必要がある。APMにより省エネ効果を評価することで圧縮空気の使用方法による効果とコンプレッサ運転

方法による効果を切り分けて評価できる。省エネによるコストの削減効果も確認し、効果が十分でない場合や、新たな課題が見つかった場合は、対策を改善する。

5. おわりに

本稿ではDX時代の産業用機械・装置のエネルギー消費の効率化を推進するための技術の一例として、空気圧を利用する機械・装置の消費エネルギーを測定するための機器であるエアパワーメータとIoT、ICTを活用した省エネルギー診断について述べた。

将来的にはマルチメータとしてのエアパワーメータの特徴を生かし稼働状況や環境条件などのデータをAIで分析することで、消費エネルギーの予測、設備の故障や不良の早期発見にも役立てたいと考える。

参考文献

- 1) 香川利春：シリンダの省エネルギー—圧縮空気エネルギーの定義，油空圧技術，Vol. 38, No. 6, p. 1-4 (1999)
- 2) 蔡茂林，藤田壽憲，香川利春：空気圧エネルギーの評価法に関する一考察，平成12年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集，p. 91-93 (2000)
- 3) 蔡茂林，藤田壽憲，香川利春：エアエクセルギによる空気圧エネルギー評価，平成13年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集，P. 85-87 (2001)
- 4) Maolin Cai, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa: Power Assessment of Flowing Compressed Air, Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 128, p. 402-405 (2006)
- 5) 香川利春，蔡茂林：圧縮性流体の計測と制御—空気圧解析入門—，日本工業出版，p. 91-101 (2010)
- 6) 山本円朗：フルードパワーの挑戦エアパワーメーター 圧縮空気エネルギーを「見える化」する新概念の計測器—，フルードパワー（日本フルードパワー工業会），Vol. 23, No. 4, p. 21-23 (2009)
- 7) フルードパワーの世界，日本フルードパワー工業会，p.46-47 (2009)
- 8) 小林敏也：圧縮空気エネルギー測定装置，油空圧技術（日本工業出版），Vol. 52, No. 11, p. 82-87 (2013)
- 9) 加藤友規，東嶋元気，矢澤孝哲，大坪樹，野崎悠輔，田中克敏：気体用超精密高速応答圧力レギュレータを用いたエアタービンスピンドルの回転数制御，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 45, No. 1, p. 8-14 (2014)
- 10) Tomonori Kato, Genki Higashijima, Takanori Yazawa, Tatsuki Otsubo, Katsutoshi Tanaka: Proposal of Disturbance-Compensating and Energy-Saving Control Method of Air Turbine Spindle and Evaluation of Its Energy Consumption, Precision Engineering, Vol. 43, p. 439-447 (2016)
- 11) JIS B 0955-2: 2021 (ISO 14955-2: 2018) 工作機械—環境評価—第2部：工作機械及びその構成要素に供給されるエネルギーの測定方法

（原稿受付：2024年1月31日）

解説

圧力監視による空気圧機器の状態見える化

著者紹介

こん どう たけもと
近 藤 健 元CKD株式会社
〒485-8551 愛知県小牧市応時2-250
E-mail: t-kondoh@ckd.co.jp2001年 信州大学工学部電気電子工学科卒業。
同年CKD株式会社入社、主に、空気圧駆動機器、
通信制御機器の研究開発に従事、現在に至る。

1. はじめに

近年のDXを支えるデジタル技術の進歩によって、人の能力はセンサによる情報収集に代替され、ビッグデータの分析から知見を獲得する時代となった。産業用機械や設備では、これらデジタル技術の活用による信頼性の向上、自動化・測定などの操業技術の進歩、そして故障時期を予測し適正な時期に修復を行う状態基準保全¹⁾の導入など、保全活動の最適化が進んでいる。

本稿では、圧力監視ユニットによる空気圧機器の状態見える化を取り上げ、DXが進むフルードパワーの保全方法としての可能性について解説する。

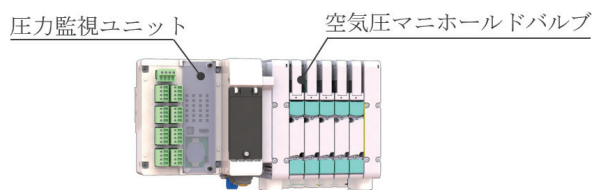


図1 圧力監視ユニットと空気圧マニホールドバルブ

2. 空気圧機器の保全の課題

2.1 機器の監視方法

空気圧シリンダ（以下、シリンダ）や空気圧バルブ（以下、バルブ）などの空気圧駆動機器（以下、機器）は、過酷な環境に強く、過負荷があっても電気システムのような焼損が発生しないなどの優れた特長を持つ。しかし、多少の劣化や異常が発生しても、すぐに停止までには至らないことや、機器の制

御がフィードバック回路を持たないオープンループで用いられる場合が多いため、使用中に動作状態の変化に気づけないといった特性もある。そのため、気が付いたときには寿命限界まで達してしまい突発的な故障が起こる場合がある。

2.2 機器監視の課題

設備全体や機器の監視方法として一般的に実施されるのが、一つの作業の工程開始から完了までの1サイクルに対して実際にかかる時間（以下、サイクルタイム）を測定する方法である。このサイクルタイムは設備の生産性向上のために重要な指標である。しかし、一方で機器の異常検知の目安とする場合には、つぎのような課題がある。

2.3 故障個所が特定できない

サイクルタイムには、バルブへの通電から弁が開くまでの時間（以下、バルブ応答時間）やシリンダが作動してから停止するまでの時間（以下、シリンダ動作時間）の両方を含む。よって、機器のサイクルタイムを測定しても、個別の動作時間の変動量が分からないため異常発生箇所を特定できない。

2.4 異常が発見できない

シリンダは排気流量を調整して速度制御を行うメータアウトで用いられる場合が大半であるが、この場合はサイクルタイムの確認による機器の劣化や異常の発見が困難である。その理由はメータアウトの動作特性としてバルブの弁切り替わり時点からシリンダの停止時点までのシステム全体としてのストローク時間がパッキン摩擦力や負荷変動に依存しないためである²⁾。よって、たとえば、ピストンパッキンの潤滑不良による飛び出し現象³⁾が発生しても、サイクルタイム自体は変動せず異常を検知できない可能性がある。

3. 圧力監視による機器状態の見える化

3.1 圧力監視の構成

図2は圧力監視ユニット（以下、本ユニット）を用いた機器の監視例である。主な構成要素は、本ユニットと圧力センサ、バルブ、シリンダ、流量調整弁である。シリンダは複動シリンダであり、流量調

整弁はメータアウトによって速度制御を行う。圧力センサはシリンダのピストンロッドの出ている側（以下、ヘッド側）とシリンダのピストンロッドの出ていない側（以下、キャップ側）の給排気ポートとそれぞれの流量調整弁との間に設置する。本ユニットには、圧力センサによって圧力値を電圧値に変換した信号（以下、圧力信号）を入力する。また、本ユニットはバルブと一体接続しており、バルブのソレノイドコイルへの通電信号（以下、バルブ信号）が本ユニットに入力されている。

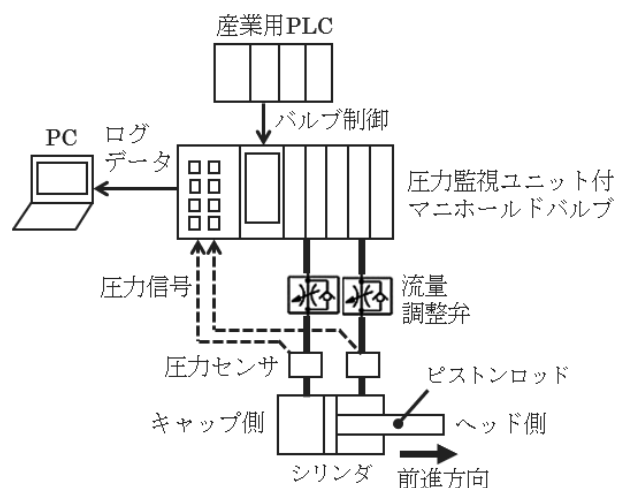


図2 圧力監視の構成

3.2 バルブとシリンダの圧力特性

本ユニットに入力する圧力信号について説明する。図3はシリンダのピストンロッド前進時の圧力特性である。図中の時間 t_1 は、バルブのコイルに電気信号を入力した時点（以下、バルブ通電）である。 t_2 時点でバルブの弁の切り替え（以下、バルブ切替）がされると、キャップ側の圧力が上昇し、ヘッド側の圧力は下降する。そして、 t_3 時点でシリンダのピストンロッドが前進を開始すると、キャップ側の給気とヘッド側の排気が平衡し、それぞれが元圧より低い一定圧力を保持する。そして、 t_4 時点でシリンダのピストンロッドが停止（以下、シリンダ停止）すると、キャップ側の圧力が元圧まで上昇し、ヘッド側の圧力は排気され大気圧まで下降する。

3.3 圧力変化からの機器動作の検出

本ユニットが、圧力信号の変化から機器の動作を検出する方法を説明する。まず本ユニットは、キャップ側の圧力信号とヘッド側の圧力信号の加算をした後、加算値の単位時間あたりの変動（以下、微分）を計算する。図4は圧力信号と加算値の波形である。加算値はバルブ通電（ t_1 ）では元圧と同じ値であるが、バルブ切替（ t_2 ）で上昇を開始し、シリンダ停止（ t_4 ）で下降する。このように、加算値

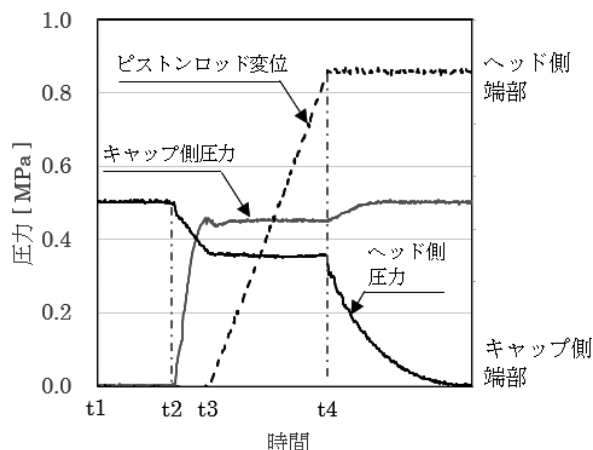


図3 バルブとシリンダの圧力特性

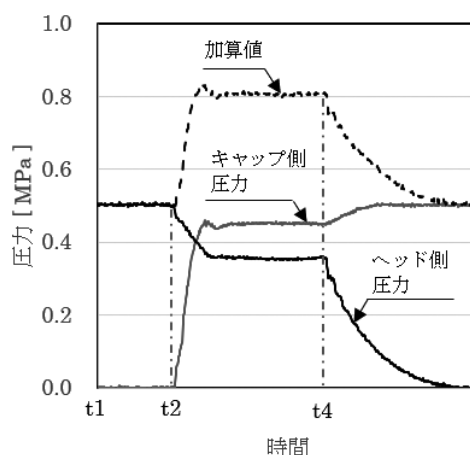


図4 圧力と加算値

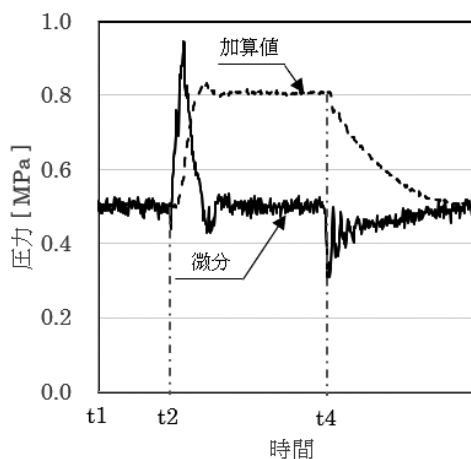


図5 加算値と微分

の上昇と下降はバルブ切替とシリンダ停止とそれぞれ同一時点で変化する。

図5は加算値と微分の波形である。微分は加算値の単位時間あたりの変動なので、加算値の増減に伴う波形の上昇および下降の傾きに依って変化する。よって、本ユニットは微分の正方向への変化を検出した場合はバルブ切替（ t_2 ）と判断し、微分の負方

向への変化を検知した場合はシリンダ停止（t4）と判断することができる。

本ユニットは、バルブ通電からバルブ切替までの時間と、バルブ切替からシリンダ停止までの時間を検出する。よって、バルブ応答時間とシリンダ動作時間を個別に確認できるため、動作異常の発生時に異常個所の特定ができる。

3.4 シリンダ動作状態の判定

本ユニットは、シリンダのピストンロッドの推力（以下、シリンダ推力）を式(1)によって計算する。シリンダ推力は、バルブ切替からシリンダ停止するまで間の最大値と平均値を検出する。

$$F_T = \left(\frac{\pi}{4} D^2 \times P_1 \right) - \left(\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \times P_2 \right) \quad (1)$$

F_T ：シリンダ推力 [N]

D ：ピストン径 [mm]

d ：ピストンロッド径 [mm]

P_1 ：キャップ側の配管圧力 [MPa]

P_2 ：ヘッド側の配管圧力 [MPa]

本ユニットは、正常時のシリンダ推力と現在のシリンダ推力を比較し、その変動量から、シリンダの動作状態の変化を判定する。式(2)に、シリンダ推力、パッキン摩擦力、シリンダが出す力（以下、負荷力）の関係を示す。

$$F_T + \Delta F_T = (F_L + \mu) + (\Delta F_L + \Delta \mu) \quad (2)$$

F_T ：シリンダ推力 [N]

ΔF_T ：シリンダ推力の変動 [N]

F_L ：負荷力 [N]

ΔF_L ：負荷力の変動 [N]

μ ：パッキン摩擦力 [N]

$\Delta \mu$ ：パッキン摩擦力の変動 [N]

4. 機器の状態変化の監視例

図6は、当社内の生産設備に使用しているシリンダの正常時と異常時の動作比較である。この事例の場合、シリンダ動作は30ms遅くなっているが、推

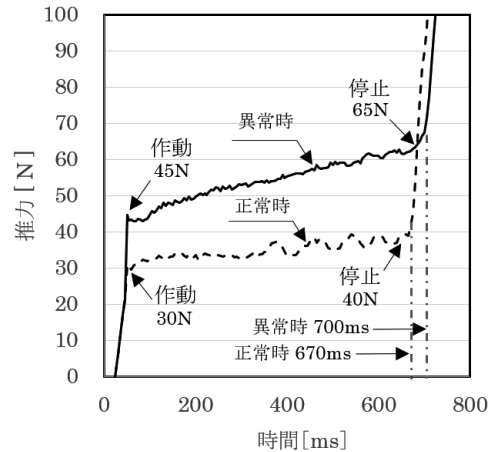


図6 正常時と異常時のシリンダ推力

力の差は最大で25N発生している。このように、通常目視では気づかないレベルの動作遅れであっても、推力の検出によれば機器状態の変化をより正確に把握することができる。

5. おわりに

今回紹介した圧力監視ユニットは、これまで人の感覚に頼っていた機器の動作状態確認を機械に置き換えることをめざし開発した。DXによりデジタル化が進む製造現場では、今以上にさまざまな情報を収集し見える化できる機器が求められる。今後もこのようなデジタル技術の進歩に対応する新たな価値を持った製品開発を続けたい。

参考文献

- 1) 吉川達志：一番最初に読む設備保全の本，日刊工業新聞社，p. 32-33（2013）
- 2) 香川利治，蔡茂林，藤田壽憲，竹内正顕，川嶋健嗣，田中豊，小山紀：空気圧システム入門，日本フルードパワーシステム学会，p. 41-47（2003）
- 3) 小笠原邦夫：ひとりで全部できる空気圧設備の保全，日刊工業新聞社，p. 110（2016）

（原稿受付：2024年2月5日）

トピックス

学生さんへ，先輩が語る —学生時代に得た経験を今に繋ぐ—

著者紹介



しもおか そうぞう
下岡 綜

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域
〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1
E-mail: shimooka@okayama-u.ac.jp

2020年岡山理科大学大学院工学研究科博士課程（後期）システム科学専攻修了。同年国立松江工業高等専門学校助教を経て，2021年岡山大学学術研究院自然科学学域助教，2023年より環境生命自然科学学域助教，現在に至る。日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，日本ロボット学会などの会員，博士（工学）。

1. はじめに

1.1 自己紹介

私は岡山県岡山市の出身で，ありがたいことに現在も出身地で研究・教育活動を続けている。ここで簡単に自己紹介する。幼少期はロボットやものづくりにそれほど興味があるわけではなく，テレビゲームに登場する人工知能に興味を示していた。大学進学も人工知能に関連する研究に取り組んでいる岡山理科大学工学部知能機械工学科へと進学した。ものづくり教育に熱心な学科であったことと，制御工学が理解しやすいこともあり，次第にロボットや機械にも興味を持ち始めた。研究室はソフトアクチュエータ，制御弁など要素技術を研究開発するメカトロニクス研究室（当時，堂田・赤木研）へ進み，私の将来を大きく変える分岐点となった（詳細は後述を参照）。研究では空気圧制御弁の評価¹⁾，ソフトアクチュエータや変位センサの開発²⁾に取り組み，現在でも続けている。最近ではこれらの応用として，リハビリテーション機器の研究・開発を医療従事者の方々と行っている。

本稿は，学生時代に経験したこと（少し社会人経験も含む）を仕事・将来にどう繋げているかを紹介する。主観的な内容が多いが，少しでも将来の参考になれば幸いである。

1.2 研究室紹介

本題に入る前に現在の研究について少し話す。私の所属する研究室インタフェースシステム学は，人

間とロボット（コンピュータも含む）の共存をめざし，ロボットシステムならびにヒューマンインターフェースに関する研究教育を行っている。そのため，VR/MR技術を応用した介護や医療支援システム³⁾，病変に針を刺して治療検査するCTガイド下針穿刺ロボットの開発やヘビ型ロボットの研究⁴⁾，そして私が取り組むソフトアクチュエータやリハビリテーション機器⁵⁾の開発など幅広い研究を行っている（図1）。教員3名，学生35名，研究員2名と多く在籍しており，賑やかに研究活動を行っている（図2）。

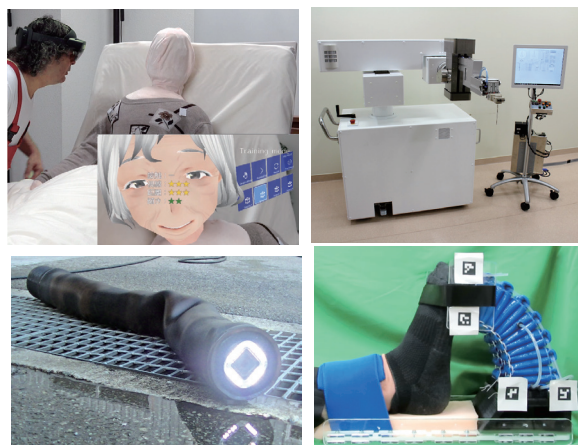


図1 介護スキル向上のためのARシステム（左上）³⁾ CT透視ガイド下針穿刺ロボット（右上），ヘビ型ロボット（左下）⁴⁾，足関節用リハビリテーション機器（右下）⁵⁾



図2 ゼミ合宿での集合写真（岡山県新見市）

2. 学生時代で経験して得たもの

博士も含めて学生時代は、岡山理科大学工学部知能機械工学科に通い、物理や制御工学などの座学、ロボコン要素を取り入れた実習を仲間とともに取り組んでいたことを今でも覚えている。特に力を入れていたのは「よさこい」のサークルに所属していて、春から秋にかけて練習や祭りに参加していた。チーム内だけでなく、別チームとの交流もあり、さまざまな業種の人とも関係を深めることができた。職種・考え方も異なるため、衝突することもしばしばあった。そのため、折り合いを付けることやコミュニケーションを円滑にするなどに苦悩し、互いの立場を尊重し、円滑にする能力が身に付いたように思う。

4年生ではメカトロニクス研究室に所属し、ON/OFF弁を複数用いて流量を調整することができる疑似サーボ弁の性能評価に取り組んでいた¹⁾。なんとなく理解し始めた8月頃には、指導教員（堂田周治郎先生）から「12月に国際学会があるから出てみないか？」っと急に連絡が来た。英語はおろか日本語ですら自分の研究発表をしたことがなかったため、私は「何かあったら助けてくれますか？」と特に考え無しに返答した。「それは助けたら」と即答され、私も国際学会に参加することを決意した。その後は、原稿の執筆やスライドの作成、発表練習など初めての事ばかりで投げ出したいくなったが、何とか乗り切ることができた。そして台湾で開催されたICITES2013 (International Conference on Intelligent Technologies and Engineering Systems 2013) に参加した (図3)。



図3 ホテル前での記念撮影 (台湾 高雄)

聞き取るのも難しい状態ではあったが、何とか理解しようと頑張って電子辞書を広げていたことを覚えている。自身の発表は練習したこともあり、質疑応答も含め無事に終えることができた。視聴する中

で、自分も教授の見様見真似で英語での質問をするなどの挑戦もしてみた。さまざまな研究に触れたことで、自分の中で研究というのが面白く思い始めた。国際学会発表の誘いが無ければ、この研究室ではなかったら、今自分は研究者になってなかっただろうと思うし、興味関心が広がらなかっただろうと考える。私はそれほど自信があるわけでも能力が高いわけでもなかったが、何事にも物怖じせずチャレンジすることで自分の行動力が変わり、研究者をめざすのもいいと思うようになった。このような貴重な経験をさせてくれた指導教員に感謝申し上げる。

修士ではゴム人工筋の収縮量を計測するため、人工筋内部に超音波センサを挿入したセンサ内蔵型のゴム人工筋の研究を行った。ユニークな計測方法ではあったが、空気圧が加わることで音波が発生しにくい状態があり、計測誤差が生じていた。そのため、思うような結果を出すことができなかったがそれでも学会発表にはできるだけ参加し発表してきた。

修士終了後に企業へ就職し、業務に取り組んでいた。しかし、研究のことが頭から離れず、業務に集中できないことが度々あった。この時「若い時にしか冒険はできない」と唐突に思い付き、1年と経たずして退職し、博士課程への進学を決めた。この選択は悩みに悩んだが、人生としてのチャレンジと考え、思い切って飛び込んだ。

博士では、よく指導教員（赤木徹也教授）と激しい議論を交わしていたことをよく覚えている。私の性格は尖っていて、あまり人間関係が良好とは言えなかった。それでも熱心に指導（説得）していただき、少しは穏やかな性格になったと思う。それから、個々の学生（後輩）の性格や長所を考えながら接するようになった。研究としては、2.5倍程度伸長するソフトアクチュエータを用いて、肩関節のリハビリテーションデバイスの研究・開発を進めてきた。可動範囲が大きく、柔軟な特性を維持しつつ関節を動かすほどの力も有しているのが特徴である (図4)⁶⁾。

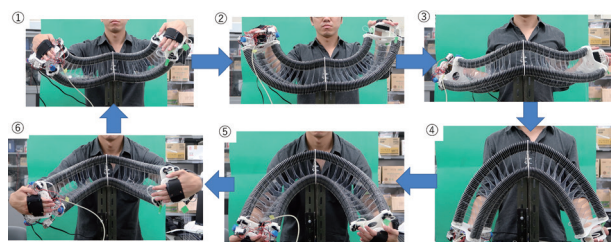


図4 肩関節用リハビリテーションデバイス⁶⁾

話は変わり、とある先生から「博士の学生も研究者の一人である」とアドバイスをいただいたことが

ある。これがきっかけなのか、自分の研究とは別に医療従事者の方と交渉し、医工連携に繋げ、共同研究をするようになった。指導教員には事後報告になってしまったが、「自分で考え、異分野の方と交渉し、その先へ繋げることができる能力がある」と指導教員に褒めていただいた。これまでの経験・身に着けてきたコミュニケーションや臆する事なくチャレンジする精神の積み重ねがあってこそその結果ではないかと考える。現場のニーズにどのように対応していくか苦戦していたが、共同研究者とも相談しながら試作を進めている、これも貴重な経験となった。

3. 教員になっての活動と経験

博士課程を修了し、アカデミックの研究者として、島根県の松江工業高等専門学校に就職した。教員として初年度であったため、何をしたらいいのか分からないこともあったが、研究室の学生とも相談しながら研究を進めていった。リハビリテーション機器の開発を続け、評価や意見をもらえる理学療法士の方と共同研究がしたいと考えていた。島根大学が企画するイベントに参加し、ニーズや評価などをもらえる方がいないか探してもらい、マッチングすることができた。この時、私は図々しく色んな方に声をかけ、断れることも度々あった。その中でも熱心に評価してもらえる理学療法士の方々と出会うことができ、評価だけでなく現場の状況についても伺うことができた。リハビリテーションの現場ではさまざまなニーズや課題があり、今現在でも伺い、勉強途中である。

今の所属である岡山大学でも岡山大学病院の臨床医や現場の理学療法士・作業療法士の方々とともにリハビリテーション機器の研究・開発に取り組んでいる。ただ機器を開発するだけでは、機械的な動きや支援になってしまう。そこで、理学療法など人が行う手技を機器に取り入れることで、効果的にリハビリテーションを行うことや、手技の定量的な解明を行うことを目的として研究を進めている。こういった異分野の方との連携は考え方や専門知識も異なるので、進捗内容の説明や議論も難しいと感じる。理解してもらえるように工夫することや共同研究者の専門性を十分に発揮してもらうための環境作りが大切であると学んだ。担当の学生さんにも意識してもらい、進捗報告をしてもらっている(図5)。

共同研究を進める上で、研究者自身で全てを管理することや方針を決めることは難しいため、学内のコーディネータの方に全体のマネジメントをしてもらい、知財(特許関連)を管理する方にも入って



図5 リハビリテーション機器の進捗報告

もらっている。一人では限界はあるし、得意不得意もある。自分の不得意を改善するのではなく、複数人で自分たちの強みを活かすチーム作りをするように心掛けるようになった。異分野の方々と繋がり、協力して取り組んでいくのは研究者の醍醐味であり、私個人非常にやりがいのある業務である。

4. ま と め

これまで経験してきたことについて研究活動を含め紹介してきた。大学や研究内だけでなく、多種多様な人々と交流し、親交を深める難しさから多くのことを学んできた。関係が悪化することや、数多くの失敗もしてきた。その経験から、自分の強みを発見し、今の仕事に活かしている。難しいと感じてしまうことにも果敢にチャレンジすることで、成功や失敗に関わらず、自分の知らない良さに気づくこともできる。この執筆で自分の強みのルーツを再び思い出すことができ、懐かしく感じることができた。これを読んでくれた皆様に、これから出会うチャンスを大切にしたい。諦めて後悔するのではなく、失敗してもいいから何かを得て感じて欲しい。出会う人にも何かを与えられる側になるではなく与える研究者やエンジニアになって欲しい。将来の参考になれば何よりである。

参考文献

- 1) S. Shimooka, S. Dohta, T. Akagi, Y. Moriwake and F. Zhao : Estimation of Pressure Control Performance in Low-Cost Quasi-Servo Valve Using Embedded Controller, Lecture Notes in Electrical Engineering 293, Vol. 1, 359-366 (2014)
- 2) S. SHIMOOKA, S. DOHTA, T. AKAGI, W. KOBAYASHI and M. YONEDA : Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible Extension Type Soft Actuator with Built-in Small-Sized Quasi Servo Valve and Displacement Sensor, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol. 11, No. 2, pp. 18-25 (2018)
- 3) A. Nakazawa, M. Iwamoto, R. Kurazume, M. Nunoi, M. Kobayashi, M. Honda : Augmented reality-based

affective training for improving care communication skill and empathy, PLOS ONE, Vol. 18, No. 7, e0288175a (2023)

- 4) 五福明夫, 亀川哲志, 下岡綜：インタフェースシステム学研究室, ロボット, No. 260, pp. 59-60 (2021)
- 5) S. Shimooka, R. Suzuki, T. Uehara, T. Hirayama and A. Gofuku, Development of ankle joint rehabilitation device for bedridden patient using fan-shaped pneumatic soft actuator driven by low pressure, Journal of Robotics and Mechatronics Vol. 35 No. 3,

pp. 565-576 (2023)

- 6) S. Shimooka, T. Akagi, S. Dohta, T. Shinohara, Y. Hane and M. Aliff, Development of Reinforced Extension Type Flexible Pneumatic Actuator with Circumferential Restraints and Its Application for Rehabilitation Device, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 8116-8127 (2020)

(原稿受付：2024年2月5日)

会 告

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催 2024年春季フルードパワーシステム講演会 開催日：2024年6月20日（木）・21日（金）

2024年春季フルードパワーシステム講演会は2024年6月20日（木）・6月21日（金）に機械振興会館（東京都港区）で開催いたします。本講演会では、一般講演に加えて、製品技術紹介セッション、日中若手交流事業の一環として実施する国

際特別講演や技術懇談会（参加費無料）を企画しています。

詳細は学会ホームページに随時掲載いたしますので、ご確認くださいませますようお願いいたします。

皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

2024年春季フルードパワーシステム講演会併設企画 「製品・技術紹介セッション」 開催日：2024年6月21日（金）

春季フルードパワーシステム講演会の中で、企業関係の方々に製品・技術の紹介をしていただく「製品・技術紹介セッション」を企画しました。本企画は、製品に係る技術や課題等を学会主要行事の一つである講演会で発表していただき、会員間で問題意識を共有し会員相互の研究・技術の促進を図ろうとする

ものです。また、本セッションの講演は「最優秀講演賞」社会人部門の審査対象です。なお、最大6件の講演枠を準備しています。この枠が埋まってしまった場合、ご容赦いただけますようお願い申し上げます。企業関係の会員皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております。

2024年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー 「触覚技術と応用技術」 開催日：2024年6月20日（木）

2024年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナーを2024年6月20日（木）に機械振興会館（東京都港区）で開催いたします。

本セミナーでは、人が感じる触覚のデータ化および触覚技術の紹介とフルードパワーへの活用事例などを紹介します。

詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。

なお、日本フルードパワーシステム学会誌55巻2号（2024年3月号）が当日の講演資料となりますので、各自ご持参いただけますようお願いいたします。

皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

研究室紹介

東京電機大学 サイバネティック情報処理研究室

著者紹介



かわ せ とし ひろ
川 瀬 利 弘

東京電機大学工学部情報通信工学科
〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番
E-mail : tkawase@mail.dendai.ac.jp

2012年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。2022年より東京電機大学工学部情報通信工学科准教授。生体信号によるロボット制御、空気圧による情報処理などの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、計測自動制御学会、日本生体医工学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

東京電機大学は、1907年創立の電機学校を前身とする歴史ある理工系の大学である。建学の精神「実学尊重」を実践した教育をしているとともに、教育・研究理念を「技術は人なり」としており、優れた技術を持つには良い人格が重要であるとする学風が根付いている。長年にわたり東京の神田にキャンパスを構えていたが、2012年に北千住へ移転し（図1）、現在は、東京千住および埼玉鳩山の2つのキャンパスにて、約1万人の大学生および修士・博士課程の大学院生が学んでいる。理工系の一分野として医用生体工学（ME）の研究・教育も盛んであり、社会人などを対象とするME講座を1977年以来



図1 東京電機大学 東京千住キャンパス

50年近く続けているほか、2024年4月には埼玉鳩山キャンパスに理工学部電子情報・生体医工学系が新設される。

筆者が所属する工学部情報通信工学科は、電機大にある4つの情報系学科の一つである。東京千住キャンパスにあり、1949年の新制大学発足時に電気通信工学科として設けられた、大学でもっとも古くからある学科の一つである。以後、改称や改組を経て、現在では情報系および通信系の技術を扱う、ソフトウェアとハードウェアの両方を重視した教育を行う学科となっている。通常の教育のほか、工学部第二部として、昼間働く学生などを対象に夜間にも教育を行っている。

筆者は生体信号処理や神経科学を背景としたりハビリテーション工学の研究に携わってきており、2022年4月に東京電機大学に着任した。フルードパワーシステムとの出会いは、2017年に東京医科歯科大学の川嶋健嗣教授（現所属：東京大学）および東京工業大学の只野耕太郎准教授の研究室に、文部科学省認定の共同研究拠点（生体医歯工学共同研究拠点）に関わる兼任の助教として着任したときとなる。空気圧を用いた手術支援ロボットやアシストスーツの研究と関わる中で、空気圧を用いた新しい情報処理方式の着想に至った。本稿では、このテーマに関する研究の説明を中心に、筆者の研究室の紹介をする。なお、ここで紹介する研究内容は、東京医科歯科大学および東京大学の学生・研究者と行ったものを多く含む。

2. 研究室の概要

サイバネティック情報処理研究室は筆者が電機大に着任したときにスタートした研究室である。教員は筆者1名であり、2023年度に、第1期生となる学部4年生12名の卒業研究を指導した（2024年度のメンバーは学部4年生約10名、修士1年生1名の予定）。現在の主な研究テーマは、生体信号（脳波・筋電）を使った運動支援技術の研究、触覚提示デバイスを使った身体錯覚の研究、空気圧を使って制御するアシストスーツの研究、手術支援ロボット



図2 旭祭での研究室展示の様子（2023年11月，開場前に撮影）

のインタフェースの研究である。オープンキャンパスや、大学祭である旭祭にて、積極的に研究内容に関するデモンストレーション展示を行なっている（図2）。

サイバネティック情報処理研究室という研究室名は、当研究室で進めていきたいテーマを包括できるよう、筆者が着任時に考えたものである。人間を支援する機械が筆者の研究テーマであるが、その際、支援される（あるいは機械を用いて支援する）人間、および支援を行う機械それ自体の、システムとしての特性を把握して生かすことを心がけている。このような見方は、20世紀中頃にノーバート・ウィナーにより提唱された、生体や機械の活動を制御や通信の観点から統一的に扱う学問である「サイバネティクス」に端を発するところが多い。そこで、人間と機械の双方に対しサイバネティクス的な情報処理の観点から研究を行うということで、この研究室名を冠することとした。

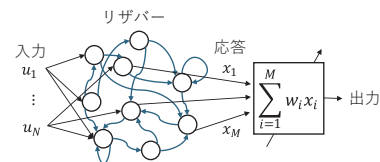
3. 研究内容の紹介

本稿では空気圧に関連するテーマのうち、筆者らが提案した空気圧による情報処理方式である空気圧リザーバーコンピューティングの研究について紹介する。

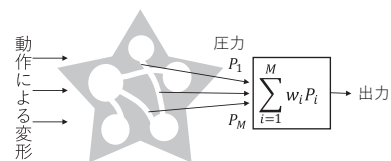
3.1 空気圧リザーバーコンピューティングの概要

人間や機械が行う情報処理というと、脳やコンピュータが行うものと思われがちであるが、それだけではないとする見方がある。たとえば、人間が行うような二足歩行は一見すると高度な計算が必要だが、脚の形をしたリンク機構を斜面に置くだけでも、歩行と同じ動きを発生できる（受動歩行）。このように、身体の力学的特性が計算のような役割を果たすことは形態学的計算と呼ばれ、身体を生かした知能を持つロボットの原理の一つとして研究されている。身体による計算をうまくロボットの制御などに活用できれば、コンピュータによる計算を省略でき、機械の省電力化や軽量化、耐環境性の向上が期待できる。

この研究領域で注目を集めているのが物理リザーバーコンピューティングである。これは機械学習の分野で提案されていたリザーバーコンピューティングというニューラルネットワークの手法から着想されたものである。リザーバーコンピューティングでは、入力をリザーバーと呼ばれるニューロン同士がランダムに結合したものに送り、その多様な反応を線形和で統合して出力する（図3(a)）（フルードパワー技術で貯蔵容器を意味するreservoirと同単語であるが、本稿ではリザーバーは上記の意味で用いる）。通常の機械学習手法と同様にデータによる学習が可能であるが、普通のニューラルネットと異なり、主たる計算を行うリザーバーでは学習を行わない（学習は出力の線形和の係数調整で行う）。ニューラルネットの特徴である学習をしないということは、リザーバーはニューラルネットでなくてもよく、さらに言えばコンピュータの中にあるプログラムである必要すらない。そこで、リザーバーの部分は何らかの物理系（光回路、柔軟物体など）に置き換えてしまうというのが、物理リザーバーコンピューティングの考え方である。この方式を用い、ロボットの分野ではたとえば、4足ロボットの歩行のためのアクチュエータ制御信号を、柔軟な背骨に埋め込んだセンサの反応から計算することなどが行われてきた¹⁾。



(a) リザーバーコンピューティング



(b) 空気圧リザーバーコンピューティング

図3 空気圧リザーバーコンピューティングの考え方

筆者らが提案したのは、ここで言うリザーバーのための物理系として空気圧管路系を用いることである²⁾³⁾。この提案では、空気を使うロボットの内部に、空気圧管路のネットワークを埋め込み、ロボットの動作に伴い管路内に圧力などの変化が生じるようにする。そしてこの変化をセンサで検出し、センサ値の線形和を計算してロボットの姿勢推定や制御に用いる（図3(b)）。

空気を使う計算というアイデアは、フルイディクスとしてコンピュータの普及以前に盛んに研究され

ていたが、近年はソフトロボットとの関連で改めて研究されている。しかし、これらの研究の多くは、論理演算を中心としたある固定された計算を行うことが主眼であった。空気圧管路系を使った物理リザーバーコンピューティング（空気圧リザーバーコンピューティングと称する）は、データから学習した計算を行う手法であり、軽量・低コストである空気のリザーバーを生かしつつ新しい応用が可能であると思われる。

3.2 空気圧リザーバーコンピューティングによる空気圧ゴム人工筋アシストスーツの状態推定と制御

筆者らが空気圧リザーバーコンピューティングを実際の機械に適用した例として、空気圧ゴム人工筋アシストスーツがある。空気圧リザーバーコンピューティングを提案した当時、東京医科歯科大学では、空気圧ゴム人工筋を用いた歩行アシスト装置の研究がされていた⁴⁾。このアシストスーツの特徴として、空気圧ゴム人工筋をアクチュエータとしてだけではなく、センサとしても使っているということがある。アシストスーツに取り付けられた人工筋に繋がるチューブの根本に圧力センサを付け、その圧力変化を検出することで歩行動作タイミングの検知を行い、スーツ側から電気的なセンサを除くことで水中での使用を可能としていた。しかし、より細かい制御をするためには、タイミングだけでなく関節角度のような連続的な状態の推定が必要である。そこで、アシストスーツに張り巡らせた小型の人工筋を単一の管路ネットワークに接続し、これをリザーバーとして使用することで、関節角度や関節角速度を推定した（図4）。これを用いて、実際に歩行アシストの制御を行なうことに成功した⁵⁾。

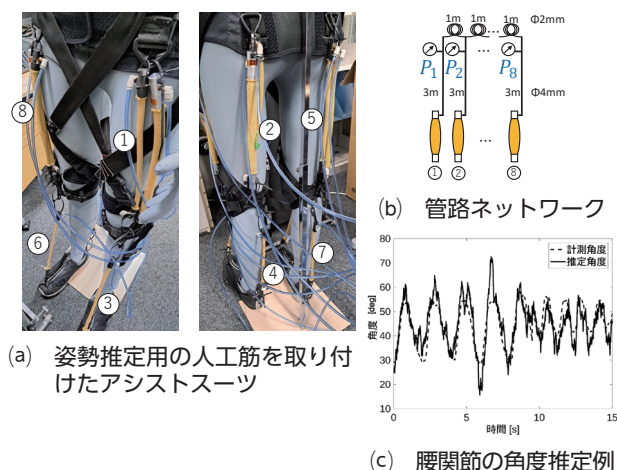


図4 空気圧リザーバーコンピューティングによる状態推定

3.3 空気圧リザーバーコンピューティングによる周期的波形の生成

ここまで紹介した人工筋アシストスーツの方式は、

装着者の動作に反応してアシスト力を発揮するものだが、歩行用アシスト装置には、装置自体が周期的な運動を生成するものもある。このような周期的な動作を、空気圧リザーバーコンピューティングを用いて生成するシステムを提案し、シミュレーションにより検証した。物理リザーバーコンピューティングの利用法の一つに、得られた計算結果を物理系への入力にフィードバックすることで、学習した周期波形を生成するというものがある。この方式をもとに、管路内の圧力の線形和を管路入口への圧力入力としてフィードバックし、線形和の重みの調節により指定した周期的な値を出力するシステムを提案した（図5(a)）。これをシミュレーションし、よく知られた周期波形であるvan der pol方程式の解軌道を出力させることに成功した（図5(b)）。さらに、外乱により圧力が変化したときにも学習された軌道に出力が戻ることを確認した⁶⁾。

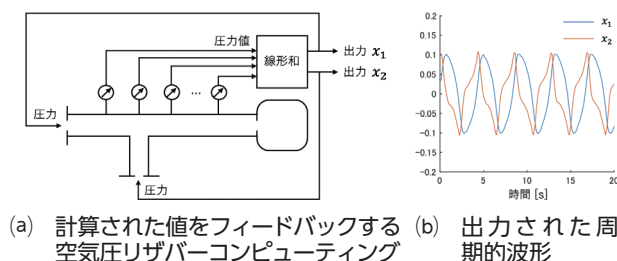


図5 空気圧リザーバーコンピューティングによる周期的な値の生成

4. おわりに

本稿で紹介した空気圧による計算は、形態学的計算やニューラルネットのような、人間の生体が行う情報処理の原理と空気圧技術を結びつけたものと言える。本稿で紹介したもの以外にも、そのような技術を電機大の学生とともに研究中である。空気圧による計算の研究は、工作機械などを使わなくても研究を進められるので、情報系の学生とも相性が良いように思う。今後も、フルードパワーシステムの技術を活かして人間を支援するシステムを進化させていきたい。

最後に、ともに研究を進めていただいている学生や研究者・企業の方々に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 中嶋浩平：やわらかい身体ダイナミクスに計算をアウトソースする，人工知能，Vol.33，No. 5，pp. 570-576 (2018)
- 2) 川瀬利弘，宮崎哲郎，菅野貴皓，只野耕太郎，川嶋健嗣：空気圧管路系を用いた物理リザーバーコンピューティングの提案，フルードパワーシステム講演会講演論文

- 集, pp. 180-182 (2019)
- 3) Kawase, T., Miyazaki, T., Kanno, T., Tadano, K., Nakajima, Y., Kawashima, K.: Pneumatic Reservoir Computing for Sensing Soft Body: Computational Ability of Air in Tube and Its Application to Posture Estimation of Soft Exoskeleton, Sensors and Materials, Vol.33, No. 8 pp. 2803-2803 (2021)
- 4) 川嶋健嗣：東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 バイオメカニクス分野 川嶋研究室, フルードパワーシステム, Vol. 48, No. 6, pp. 43-45 (2017)
- 5) Hayashi, H., Kawase, T., Miyazaki, T., Sogabe, M.,

- Nakajima, Y., Kawashima, K.: Online Assistance Control of a Pneumatic Gait Assistive Suit Using Physical Reservoir Computing Exploiting Air Dynamics, Proceedings of IEEE ICRA, pp. 3245-3251 (2022)
- 6) Shinkawa, H., Kawase, T., Miyazaki, T., Kanno, T., Sogabe, M., Kawashima, K.: Limit Cycle Generation with Pneumatically Driven Physical Reservoir Computing, Proceedings of IEEE ICRA, pp. 537-543 (2023)

(原稿受付：2024年3月9日)

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

ロボティクス・メカトロニクス講演会2024 (ROBOMECH 2024 in Utsunomiya)

主 催：一般社団法人日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門
開 催 日：2024年5月29日(水)～6月1日(土)
会 場：ライトキューブ宇都宮 (栃木県宇都宮市宮みらい1-20)
U R L：https://robomech.org/2024/

第42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：2024年9月3日(火)～9月6日(金)
会 場：大阪工業大学梅田キャンパス (大阪府大阪市北区茶屋町1-45)
U R L：https://ac.rsj-web.org/2024/

日本混相流学会 混相流シンポジウム2024

主 催：日本混相流学会
開 催 日：2024年9月4日(水)～9月6日(金)
会 場：富山大学五福キャンパス (富山県富山市五福3190)
U R L：http://www.jsmf.gr.jp/mfsymp2024/

IFPEX2024 第27回油圧・空気圧・水圧国際見本市

主 催：一般社団法人 日本フルードパワー工業会, 産経新聞社
開 催 日：2024年9月18日(水)～9月20日(金)
会 場：東京ビッグサイト 東2, 3ホール (東京都江東区有明3-11-1)
U R L：https://www.ifpex.jp/2024/

Grinding Technology Japan 2025/SiC, GaN加工技術展

企 画：日本工業出版株式会社, 株式会社産経新聞社
開 催 日：2025年3月5日(水)～3月7日(金)
会 場：幕張メッセ (千葉県千葉市美浜区中瀬2-1)
U R L：https://gtj-expo.jp/2025/jp/

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。

企画行事

2023年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告

著者紹介



しも おか そう
下 岡 綜

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域
〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1
E-mail : shimooka@okayama-u.ac.jp

2020年岡山理科大学大学院工学研究科博士課程（後期）システム科学専攻修了。同年国立松江工業高等専門学校助教を経て、2021年岡山大学学術研究院自然科学学域助教。2023年より環境生命自然科学学域助教。現在に至る。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

2023年11月30日（木）と12月1日（金）の2日間、「2023年秋季フルードパワーシステム講演会」が岡山県岡山市にある岡山理科大学50周年記念館にて対面形式で開催された（図1）。



図1 岡山理科大学50周年記念館

講演会では空気圧、水圧・機能性流体と油圧の3セッションで行われた。また、11月30日の午後には、岡山理科大学の恐竜学博物館の見学が開かれ、恐竜学博物館館長の石垣忍様による特別講演も行われた。皆様のご協力により、参加者111名（内団体

は3団体）となり、盛況のうちに終了することができた。以下、本講演会の詳細を報告する。

2. 開催概要

本講演会の開催場所である岡山理科大学は7学部21学科1コースの規模の大きい私立大学である。

会場は創立50周年を記念して建てられた50周年記念館で開催された。また会場の1階は一部展示物があり、誰でも見学が可能である。また、2階は休憩スペースとして講演参加者に提供されていた。



図2 第1室（空気圧関連）



図3 第2室（水圧・機能性流体、油圧関連）

新型コロナウイルスも5類に引き下げられ、コロナ禍前の状態に戻り、議論・歓談が盛んにできるようになった。参加者には岡山の名物である吉備団子

が配布され岡山の魅力を知っていただく企画が成された。

秋季講演会は2室に分かれて、講演が行われた。第1室(図2)は空気圧に関する講演、第2室(図3)は水圧・機能性流体、油圧に関する講演があった。どちらの会場も活発な質疑応答や議論が行われ、今後の研究に活かせる助言や、意見交換など言語を問わず行われた。賛助会員企業様向けの団体視聴用のライブ配信を行い、従来通り、質疑応答は対面形式のみとした。また質疑応答の時に質問者の声がオンライン側で聞き取りにくい状態があったため、ミキサーを導入して改善が行われた。

昼休憩時に大学内にある恐竜学博物館の見学や展示物の説明を受けられる企画も行われた(図4)。恐竜学博物館館長の石垣忍様、学芸員の市川美和様に案内や説明をしていただいた。学会参加者も興味を持って質問をしていた場面や、説明を受けていた場面も見られた。著者も説明を受けながら恐竜を発掘するまでの忍耐とやりがいを知ることができた。会場から少し離れていることもあり、現地の学生に博物館までの案内をしていただいた。心よりお礼申し上げる。



図4 恐竜学博物館内の様子

3. 一般講演および特別講演

秋季講演会では特別講演1件、一般公演47件で開催され、件数も例年と同様であった。分野別の内訳は以下の通りである。

表1 分野別講演件数

分野	件数
空気圧	27
水圧・機能性流体	8
油圧	12
合計	47

本講演会でも空気圧関連の講演発表が半数以上で

あり、最終セッションでは両室ともに空気圧関連のセッションであった。詳細なプログラムは学会ホームページを参照いただきたい。

特別講演は岡山理科大学恐竜学博物館の館長石垣忍様による「面白い恐竜学をめざして：発掘とコラボの現場から」という題目で講演いただいた(図5)。これまでご自身が発掘されてきた恐竜の話や、発掘の流れや苦労、現在までの道のりについて講演された。馴染みの少ない分野だけに参加者は終始真剣に視聴されていたように見える。またモンゴルの発掘に関する衣食住や、工学との共同研究に関する話題など、非常に貴重かつ心踊る話題であったと著者は感じた。



図5 特別講演(第1室)

4. 最優秀講演賞表彰式および技術懇談会

コロナ禍前のように最優秀講演賞表彰式と技術懇談会が開催された。場所は岡山理科大学A1号館11階ラウンジであり、岡山を一望できるほどの景観である。まず、2023年春季フルードパワーシステム講演会(東京)の最優秀講演賞の授与が行われた(図6)。



図6 2023年春季講演会の最優秀講演賞の授与



図7 岡山理科大学の平野博之学長の挨拶

技術懇談会では、岡山理科大学の平野博之学長から挨拶いただき、岡山理科大学の紹介や魅力を教授いただいた（図7）。参加者も90名ほどで、食事を楽しみながら近況報告や談笑が行われ、コロナ禍前の活気が戻ってきたように見えた（図8）。

5. おわりに

2023年秋季フルードパワーシステム講演会はコロナ禍前と同様の口頭発表や情報交換、雑談ができるようになった。今後もこの環境でできるよう著者も努める所存である。本講演会は公益社団法人おか



図8 技術懇談会の様子

やま観光コンベンション協会様よりご助成いただいた。最後に、本学術講演会にご参加いただいた皆様、発表いただいた講演者の皆様、講演会の企画および運営にご尽力いただいた企画委員の皆様、学会事務局の皆様にご心よりお礼申し上げます。また、現地会場の手配から当日の準備・運営にご尽力いただいた岡山理科大学の教職員の皆様に、この場をお借りして心より謝意を表す。

（原稿受付：2024年2月5日）

会 告

〈理事会・委員会日程〉

3月11日	基盤強化委員
3月13日	庶務委員会
3月25日	理事会
3月26日	編集委員会
3月27日	企画委員会

〈理事会報告〉

2023年度第6回理事会

3月25日 14:00～16:00

機械振興会館6-65, ハイブリッド開催（参加者20名）

- (1) 国際シンポジウム広島2024開催準備状況
- (2) 2023年春季講演会開催準備状況
- (3) 2024年度予算案
- (4) 2024・2025年度学会役員
- (5) 2024・2025年度評議員名簿案
- (6) 2024年度評議員会資料
- (7) 会員の推移
- (8) 規程類の改訂
- (9) 各委員会からの報告
- (10) その他

〈委員会報告〉

2023年度第4回基盤強化委員会

3月11日 16:00～17:00

Web開催 (参加者13名)

- (1) 2023年度キャリア支援セミナー企画
- (2) 学会パンフレットの更新

- (3) 研究者リストの更新
- (4) 基盤研究委員会運営内規の改訂
- (5) その他

2023年度第6回編集委員会

3月26日 15:00～16:00

機械振興会館B3-3, ハイブリッド開催（参加者24名）

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.55 No.3「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー」
 - 2) Vol.55 No.4「フルードパワーシステムにおけるMDB活用」
 - 3) Vol.55 No.E 1「緑陰特集」
 - 4) Vol.55 No.5「電動フルードパワー技術」
 - 5) Vol.55 No.6「機械工学を学ぶ皆さんへーフルードパワーのすすめー」
 - 6) Vol.56 No.1「IFPE2024」
 - 7) Vol.56 No.2「JFPS国際シンポジウム広島2024」
- (2) その他
 - 1) 会議報告
 - 2) 今後の特集について

2023年度第5回企画委員会

3月27日 15:00～17:00

機械振興会館B3-6, ハイブリッド開催（参加者23名）

- (1) 2023年度ウィンターセミナー開催報告
- (2) 2024年春季講演会・技術紹介セッション開催準備状況
- (3) 2024年春季講演会併設セミナー開催準備状況
- (4) 2024年度オータムセミナー
- (5) 2024年度ウィンターセミナー
- (6) 研究委員会延長申請
- (7) その他

会 告

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

賛助会員一覧表

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

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

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

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 (4月10日現在)	768	8	84	122
差引き増減	－39	±0	－37	－2

正会員の内訳 名誉員17名・シニア員67名・ジュニア員68名・その他正会員616名

〈新入会員〉

正会員

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 中西 優真 (オムロン株式会社) | 佐々木優真 (北海道総合通信局) |
| 角宮 大輝 (特許庁) | 田中 尚志 (CKD株式会社) |
| 近藤 健元 (CKD株式会社) | 石川 晶浩 (CKD株式会社) |
| 坂本 和之 (株式会社コガネイ) | 阿部 哲平 (アネスト岩田株式会社) |
| 木田 圭祐 (株式会社トクピ製作所) | 加藤 輝雄 (株式会社都筑製作所) |
| 林田 浩孝 (協和機工株式会社) | 頼経 昌史 (株式会社ジェイテクト) |

学生会員

- 山本 祥太 (芝浦工業大学)

編集室

次号予告

—特集「フルードパワーシステムにおけるMBD活用」—

【巻頭言】「フルードパワーシステムにおけるMBD活用」発行にあたって

吉見 浩司

【解説】

モデルベース開発と想定設計手法の連携による手戻りゼロの実現に向けて
FEMモデルの機械学習モデルへの縮退化と1DCAEの実装に関する取り組み
フルードパワーシステム開発におけるバーチャルプロトタイプMBDの適用
油圧分野におけるモデルベース開発の事例紹介

工藤 啓治
萬谷 浩章
竹下 仁士
眞田 一志

モデルベース開発 (MBD) プラットフォームによる油圧制御システム開発
小型軸流ファンの低風量動作で発生する逆流に回転数が与える影響

脇谷 伸
福江 高志

「SURIWASE2.0」によるモビリティ社会の最先端開発コミュニティ実現を目指して
回路設計シミュレーションソフトの活用

村岡 正, 足立 智彦
山本 和恵

【ニュース】日中若手研究者交流事業 (2023年度中国派遣)

酒井 悟

【会議報告】FLUCOME2023におけるフルードパワー関連技術の研究動向

香川 利春

計測自動制御学会第24回流体計測制御シンポジウムに観るフルードパワー研究動向

藤田 壽憲

【トピックス】学生さんへ、先輩が語る一メーカーの研究所に携わる社会人の日常について

北村 佳彬

【企画行事】2023年度ウインターセミナー開催報告「医療福祉技術を支えるフルードパワー」

高岩 昌弘

2023年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)

委員 中 野 政 身 (㈱SmartTECH Lab.)

副委員長 山 田 宏 尚 (岐阜大学)

中 山 晃 (日立建機㈱)

委員 飯 尾 昭一郎 (信州大学)

藤 田 壽 憲 (東京電機大学)

飯 田 武 郎 (コマツ)

丸 田 和 弘 (コマツ)

加 藤 友 規 (福岡工業大学)

水 上 和 哉 (CKD㈱)

北 村 剛 (油研工業㈱)

村 岡 裕 之 (㈱コガネイ)

窪 田 友 夫 (カヤバ㈱)

山 本 久 嗣 (富山高等専門学校)

五 嶋 裕 之 (㈱工苑)

吉 見 浩 司 (川崎重工業㈱)

齋 藤 直 樹 (秋田県立大学)

吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)

佐々木 大 輔 (香川大学)

担当理事 伊 藤 隆 (カヤバ㈱)

佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)

学会事務局 成 田 晋

妹 尾 満 (SMC㈱)

編集事務局 竹 内 留 美 (勝美印刷㈱)

谷 口 浩 成 (大阪工業大学)

(あいうえお 順)

会 告

複写される方へ

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

権利委託先: (一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

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

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

〒105-0011 東京都港区芝公園三丁目五-21 機械振興会館別館101 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 東京00110-31233690

東京都文京区白山1-23-7 アクア白山ビル五階
印刷所 勝美印刷株式会社