

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN

FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

フルードパワー  
システム

Mar.2017 Vol.48 No.2

日本フルードパワーシステム学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「フルードパワーに役立つ  
センシング技術」

日本フルードパワーシステム学会誌

# フルードパワーシステム

## 目次

### 特集「フルードパワーに役立つセンシング技術」

#### 【巻頭言】

「フルードパワーに役立つセンシング技術」の発行にあたって 塚越 秀行 60

#### 【解説】

磁気式アブソリュートエンコーダの技術紹介 佐藤 衛 61

磁歪式リアセンサの技術紹介 中川晋一郎 64

柔軟空気圧シリンダ用変位センサの開発 赤木 徹也 67

電磁超音波共鳴法による高温配管の減肉モニタリング  
内一 哲哉, 高木 敏行, 浦山 良一 71

ICT建機用ストロークセンサ付シリンダの紹介 影山 雅人 75

磁場印加型レオメータの開発とMR流体の磁気レオロジー計測 中野 政身 78

材質認識システムを備えた人工指 小山 紀 82

#### 【会議報告】

2016年度日本機械学会年次大会におけるフルードパワー研究の動向 田中 豊 86

Bath/ASME Fluid Power and Motion Control 2016 参加記 一柳 隆義 88

第34回日本ロボット学会学術講演会におけるフルードパワー技術研究動向 佐々木大輔 90

#### 【教室】

入門講座「エネルギー工学」第四回：水力発電と再生可能エネルギーなど 江間 敏 92

#### 【トピックス】

クラウドロボティクスプラットフォームを開発する大学発ベンチャー企業 岡本 悠 96

フルードパワー設計者のためのグローバススタンダード 第2回

機械安全—パフォーマンスレベルPLと平均危険側故障時間MTTFd— 高野 一治 100

**【研究室紹介】**

室蘭工業大学 機械システム設計学研究室

(フルードパワーに関する学生との研究活動)

風間 俊治 103

**【企画行事】**

平成29年度企画行事紹介

藤田 壽憲, 桜井 康雄 106

平成28年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告

田中 豊 108

**【会告】**

書籍案内 オーム社刊「油圧・空気圧回路～書き方&設計の基礎教本」

85

平成29年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー

「フルードパワーに役立つセンシング技術」

111

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催

平成29年春季フルードパワーシステム講演会

111

平成29年春季フルードパワーシステム講演会併設企画

「製品・技術セッション」

111

共催・協賛行事のお知らせ

112

その他

110, 113, 114

■表紙デザイン：山本 博勝 株豊島

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

# FLUID POWER SYSTEM

## Contents

### Special Issue "Sensing Technology Useful for Fluid Power"

#### [Preface]

|  |                     |    |
|--|---------------------|----|
| On the Special Issue "Sensing Technology Useful for Fluid Power" | Hideyuki TSUKAGOSHI | 60 |
|--|---------------------|----|

#### [Review]

|   |  |    |
|---|--|----|
| Technical Introduction of the Magnetic Absolute Encoder   | Mamoru SATO  | 61 |
| Technical Introduction of Magnetostrictive linear Sensor  | Shinichiro NAKAGAWA                                  | 64 |
| Development of Displacement Sensor for Flexible Pneumatic Cylinder  | Tetsuya AKAGI  | 67 |
| Monitoring of Pipe Wall Thinning at High Temperature Environment by Electromagnetic Acoustic Resonance Method | Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki TAKAGI, Ryouichi URAYAMA | 71 |
| Introduction of the cylinder with stroke sensor for ICT-based construction equipment                          | Masato KAGEYAMA                                      | 75 |
| Development of Magnetic Field-Applicable Rheometer and Magneto-Rheology Measurement of MR Fluids              | Masami NAKANO  | 78 |
| Artificial Finger Having Material Recognition System  | Osamu OYAMA  | 82 |

#### [Conference Report]

|  |                      |    |
|--|----------------------|----|
| Research Trend of Fluid Power in JSME Annual Conference 2016 | Yutaka TANAKA        | 86 |
| Report of the Bath/ASME Fluid Power and Motion Control 2016  | Takayoshi ICHIYANAGI | 88 |
| Research Trend about Fluid Power Technology in RSJ2016       | Daisuke SASAKI       | 90 |

#### [Lecture]

|   |             |    |
|---|-------------|----|
| An Introductory Course of Energy Engineering : 4. Hydraulic Power Generation and Renewable Energy | Satoshi EMA | 92 |
|---|-------------|----|

#### [Topics]

|   |                 |     |
|---|-----------------|-----|
| University Spin-off Developing a Cloud Robotics Platform                      | Yu OKAMOTO      | 96  |
| Machine Safety—Performance Level PL and Mean Time to Dangerous Failure MTTFd— | Kazuharu TAKANO | 100 |

#### [Laboratory Tour]

|  |                  |     |
|--|------------------|-----|
| Mechanical Systems Design Laboratory, Muroran Institute of Technology (Research Activities with Students on Fluid Power) | Toshiharu KAZAMA | 103 |
|--|------------------|-----|

#### [JFPS Activities]

|   |                                 |     |
|---|---------------------------------|-----|
| Introduction of Event of JFPS in 2017             | Toshinori FUJITA, Yasuo SAKURAI | 106 |
| Report for the JFPS Annual Autumn Conference 2016 | Yutaka TANAKA                   | 108 |

#### [JFPS News]

|  |                             |
|--|-----------------------------|
|  | 85, 110, 111, 112, 113, 114 |
|--|-----------------------------|

## 特集「フルードパワーに役立つセンシング技術」の発行にあたって

### 著者紹介



つか 越 秀 行

東京工業大学大学院

〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-S5-19  
E-mail: htsuka@cm.ctrl.titech.ac.jp

1998年東京工業大学大学院工学研究科博士課程修了。同大学助手を経て、2004年同大学工学部助教授、准教授、現在に至る。レスキューロボット、流体アクチュエータの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

フルードパワーシステムの高性能化・高機能化を図るうえで、圧力・流量・温度などの従来までの計測技術に加え、近年さまざまな物理量のセンシング技術が必要とされている。また、フルードパワー機器の用途の多様化に伴い、その動作を監視する役割を担うセンサ自体も、従来までの高精度・高応答な特性に加えて、要求される性能の基準が多岐に渡ってきている。

たとえば、土木・建設現場では、油圧建機と情報技術との融合によるスマート化が急速に進みつつある。無人化施工もその一例であり、無線機を用いて建機を遠隔操縦するシステムは、危険な環境でもオペレータが安全を確保しつつ施工を行えることを可能とした。その実現には、建機の位置や姿勢を計測する技術、地面の形状を3次元的に測量する技術、シリンダの変位やバケットに作用する負荷を推定する技術、作動油の劣化状況や機器の故障を把握・予知する技術などが欠かせない。また、これらを計測するセンサ自体には、温度・湿度・粉塵などの点で劣悪な使用条件に耐える環境耐性、堅牢性が求められる。

一方、医療・介護現場のように人間生活に密着した身近な環境でも、フルードパワーは新たな進化を遂げている。リハビリや介助において動作をアシストするために、人体に装着する柔軟な空気圧アクチュエータが盛んに研究されている。人体に直接力を及ぼす用途では、安全性や親和性を担保するために構造的柔軟性が有効なため、柔軟構造物の変位や

力を計測できるセンサが求められる。また、電源喪失や断線などの非常事態でも人体に危害を及ぼすことのないセンシング技術も不可欠であろう。

さらに、機能性流体も近年実用化が加速しつつある。ダンパ・ブレーキ・クラッチなどさまざまな製品に機能性流体が使用されていることは、以前本会誌で紹介された通りである。とりわけ、外部磁場でレオロジー特性が変わるMR流体にはさまざまな魅力が秘められており、磁場環境下でその特性変化を計測できる技術はこの分野のさらなる発展につながるものと期待される。

そこで本特集号では、「フルードパワーに役立つセンシング技術」と題し、油圧・空気圧・機能性流体の各分野において活用され始めた、もしくはこれから活用される可能性の高い、センシング技術の最新情報を紹介する。

佐藤衛氏（株式会社緑測器）には磁気式アブソリュートエンコーダとその魅力についてご紹介いただく。中川晋一郎氏（サンテスト株式会社）には、磁歪式リニアセンサとその油圧シリンダへの活用例について紹介していただく。赤木徹也氏（岡山理科大学）には、柔軟空気圧シリンダのための変位センサをご紹介していただく。内一哲哉氏ら（東北大学）には、電磁超音波共鳴法による高温配管の減肉モニタリングをご紹介いただく。影山雅人氏（コマツ）には、自動施工を行うICT建機に適用するためのストロークセンサ付きシリンダをご紹介していただく。中野政身氏（東北大学）には、磁場印加型レオメータの開発とMR流体の磁気レオロジー計測についてご紹介いただく。小山紀氏（明治大学）には、フルードパワーを用いたセンシング技術の新たな可能性として材質認識システムを備えた人工指をご紹介いただく。

末筆ながら、ご多忙のなかご寄稿いただいた執筆者のみなさまに厚く御礼申し上げます。本特集号が、フルードパワーに役立つセンシング技術に関する最新情報の提供に資すれば、望外の喜びである。

（原稿受付：2017年2月2日）

## 解説

## 磁気式アブソリュートエンコーダの技術紹介

## 著者紹介



さとう まもる  
佐藤 衛

株式会社緑測器技術部開発課長  
〒205-0023 東京都羽村市神明台3-2-8  
E-mail: msato@midori.co.jp

1995年 東京工業高等専門学校電気工学科卒業、  
同年株式会社緑測器入社、磁気を利用した回転型、直線型、傾斜型の無接触式ポテンショメータの企画・設計・開発等に従事、現在に至る。

## 1. はじめに

我が国における工作機器製品は、国内外から高評価を受けており市場競争力も高い。しかし、近年は新興国の台頭もあり、競争力の維持・強化には製品加工や精密計測に必要な位置決め技術への要求が益々高度化している。

油空圧装置においても、高精度化、高効率化、自動化に向け、ポンプ・コンプレッサ、シリンダ・モータの駆動系、および制御弁などの挙動を精度良く検出する要望が増加している。

現状の高精度位置計測センサは光学方式が主流であるが、高分解能化が進む反面、環境耐性および低コスト化との両立が困難という課題がある。また、他方式を含め、検出信号の内挿誤差の影響により分解能に見合う精度を実現できないという課題もある。位置決め技術の高度化の実現に向けた要求事項は多岐に渡るが、製造業者間で共通の課題は、高精度化、安全性および信頼性、低コスト化である。

高精度化の実現には、高分解能化は重要な課題であるが、環境条件およびセンサ構成部品の経時的変化に伴って劣化する真値からの偏差である「正確さ」を長期間に渡って高い水準に維持できる真に高精度な位置決め技術が望まれている。

また、近年では安全性および信頼性に対するニーズが急速に高まっている。工作機械やロボット等では作業の高度化や複雑化・長時間化が進んでおり、センサの電源喪失やその他外乱による位置データの喪失は生産性の低下の原因となる。特に、医療や福祉のサービスロボットでは介護者や被介護者の人命

を脅かす恐れがあり、電源投入時・復帰時には原点復帰運転が不要で位置計測が可能な真にアブソリュートなセンサが望まれている。

また、設備・機器の稼働環境によっては、湿気、熱、埃、振動、衝撃、外部磁界、電磁波、等、さまざまな外的要因があり、堅牢性、環境耐性の要求も強い。

これらのニーズに対して、高分解能、堅牢性等、個別要求に対応するセンサは市場供給されているが、高価であるという課題もある。

高精度、堅牢性、環境耐性、安全性に低コストを加えた総合的性能を有する位置決めセンサが望まれている。

## 2. 磁気式アブソリュートエンコーダの技術紹介

前述の背景およびニーズを踏まえ、磁気式、位相変調方式を採用したアブソリュートエンコーダの開発により、高分解能化および高精度化に向けた取組みを行なった。

## 2.1 磁気式エンコーダの高精度化

従来のエンコーダでは、検出信号の内挿誤差の影響により、分解能12bitに対し、精度が8～9bitに低下する課題がある。本開発では、1回転1波長型アブソリュートエンコーダにおいて、分解能12～13bitに対して精度11bit以上を目指した。

## (1) 磁気センサ素子の選定

精度向上のためには、以下の特性が望まれる。

- ・高い動作磁界で使用できること
- ・信号歪み（高調波成分）が小さいこと
- ・出力振幅が大きいこと
- ・温度ドリフトが小さいこと
- ・ヒステリシスが小さいこと

磁気センサ素子としては、ホール素子、磁気抵抗素子（AMR、TMR、GMR含む）などが多くのメーカーで製品化されており、それらの比較評価により最適な素子の選定を実施した。

図1は、選定した磁気センサ素子の印加磁界に対する出力振幅である。印加磁界が20mT以上の領域

では出力振幅がほぼ100%で安定しており、S/N比の高い信号を安定して得られることがわかる。印加磁界を大きくすることは、磁界環境下での磁気式エンコーダへの影響を受けにくくする効果がある。

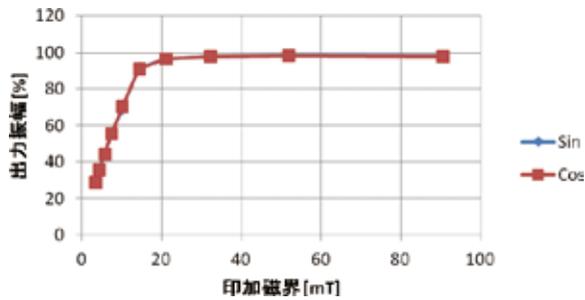


図1 磁気センサ素子の印加磁界—振幅

図2は、選定した磁気センサ素子への印加磁界に対して、センサ信号に重畳する高調波成分を示す。印加磁界を20～60mTに設定することで、2～5次の高調波が1%以下となることが確認できる。

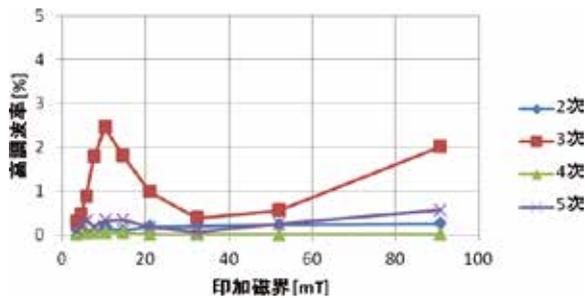


図2 磁気センサの印加磁界—高調波率

その他、中点電圧のバラツキ、温度ドリフト、Sin/Cos位相差などの検証を行い、磁気センサ素子の選定を実施した。

(2) センサ信号に含まれる誤差の最小化

上記の素子であっても、Sin/Cosのセンサ信号には、位相変調信号リップル、DC偏倚、位相ズレ等の誤差が重畳し、エンコーダの精度劣化の要因となる。

この誤差を最小化するために、当該エンコーダでは、高精度の角度基準器を基準とし、エンコーダのアブソリュートアドレスとの誤差を逐次演算により補正する方式を適用した。

最大13bitの分解能を有する1回転1波長型の磁気式アブソリュートエンコーダの試作を行い、精度検証を実施した結果を以下に示す。

図3は、補正前の精度の一例を示す。誤差は最大で±5379[秒]、精度7.9bit相当となる。

図4は、同一のサンプルに補正を適用した結果である。誤差は±396[秒]、精度11.7bit相当まで改

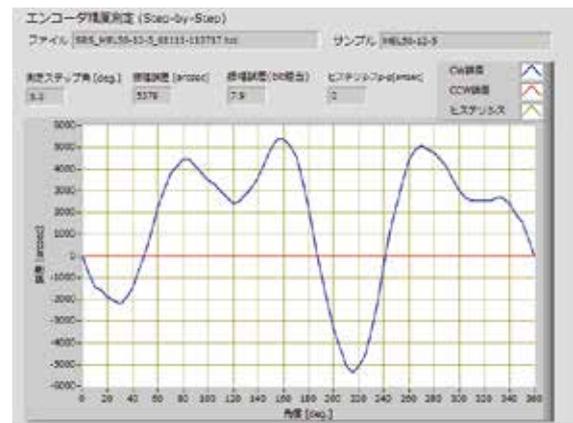


図3 補正未実施のセンサの精度

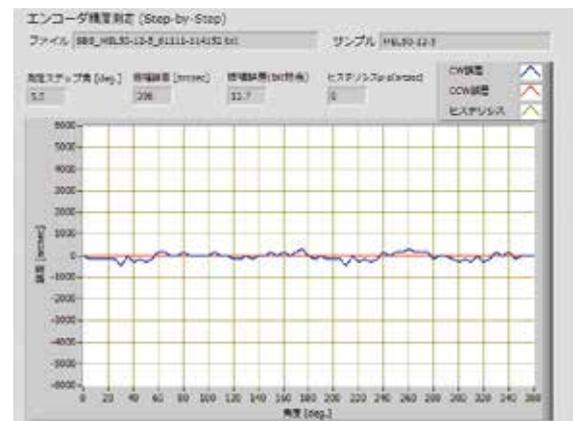


図4 補正後のセンサの精度

善されている。

更に、サンプル数を増やして安定性を確認した結果においても、全数で精度11bit以上が得られることが実証された。

(3) 1回転1波長出力型エンコーダの製品化検討

上記の高精度化の取組みを元に、最大13bitの分解能を有する1回転1波長型磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に取り組み中である。

製品仕様としては、分解能13bit、精度は11bitであり、実質精度の高さを特徴とする。また、磁気式の特徴である環境耐性の強さを活かし、使用温度範囲は-20℃～+80℃、密閉性は保護等級IP67を可能とする。

デジタル処理部分は、FPGAの採用により、角度データの更新周期が12kHz以上の高速動作にも対応可能である。

この製品は、同等の分解能を有する既存のセンサにおける精度改善の要求に対しては、有効なソリューションの提供となると考えている。

1回転1波長型磁気式アブソリュートエンコーダの試作品の外観写真を図5に示す。

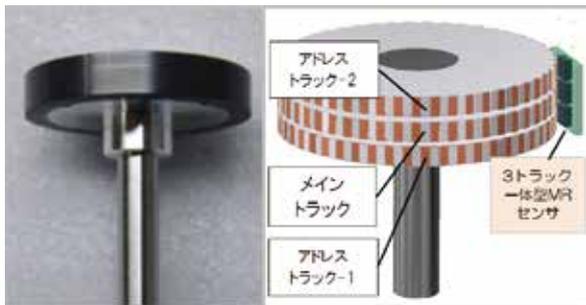


図5 磁気式エンコーダの試作品

## 2.2 複数トラックによる高分解能化

1回転1波長型と平行して、高分解能化のために、1回転360°にわたって多極磁気目盛を備えた複数の着磁トラックを有するアブソリュートエンコーダの開発にも取り組んでいる。

本研究では、磁気ドラム外径 $\phi 32.6\text{mm}$ 、メイントラック、アドレストラック-1およびアドレストラック-2の3トラックの構成である。各トラック間では目盛のピッチは少しずつ異なるが、メイントラックは波長 $400\mu\text{m}$ 、256波長/回転を有している。図6に、磁気ドラムの概要を示す。

図6 磁気ドラム  $\phi 32.6\text{mm}$ 

### (1) 回転スケール着磁装置の製作

当該エンコーダの開発においては、異なる波長が混在する多極磁気目盛を正確に着磁することが求められるが、この達成に向け回転スケール着磁装置の製作を実施した。高分解能基準エンコーダを内蔵し、波長 $100\mu\text{m}$ 、4096波長/回転の着磁が可能、また、着磁精度（着磁ピッチ、信号歪）の評価が可能である。更に、高精度着磁の要件として、磁気ドラムの偏心調整支援機能を備えている。

### (2) 高精度磁気ドラムの製作

着磁条件の最適化を行い、 $\phi 32.6\text{mm}$ 、波長 $400\mu\text{m}$ 、256波長/回転の磁気ドラムの製作を実施した。

この結果、現時点では、単ピッチ精度0.1%、累積ピッチ精度0.5%、振幅変動5%以下の高精度が得られることが確認された。図7に磁気ドラムの単

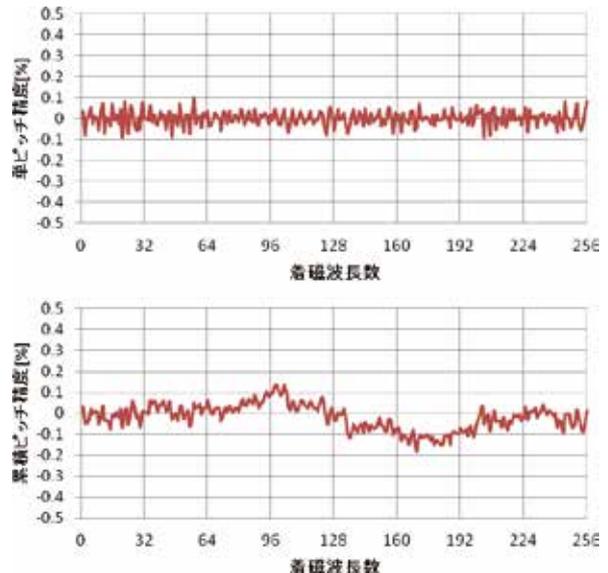


図7 磁気ドラムの単ピッチ、累積ピッチ精度

ピッチ精度、累積ピッチ精度を示す。

今後は、この磁気ドラムを使用して、分解能17bit～20bitのアブソリュートエンコーダの開発を行う予定である。

今回、高精度磁気ドラムの製作が可能となったが、この成果は自社エンコーダへの適用のみならず、高精度磁気目盛を必要とするユーザーへのソリューションの提案になると考えている。

## 3. 今後の課題

今回紹介した技術によって、高精度、高分解能の磁気式エンコーダが実現できる見込みが立ったと考えている。

しかしながら、電磁界環境下での使用、市場のIoTへの要望の高まりに対応した通信インターフェース設計、また、更なる高精度化、高速化などの課題はあり、ユーザーのニーズに合ったセンサを低コストで提供することにより、油空圧機器のシステムとしての付加価値の創出に寄与するものとする。

## 4. むすび

本稿では、高分解能で高精度の磁気式エンコーダの開発について述べた。油空圧機器による制御の高精度化、高効率化などの要望に対してはその動作を検出するポジションセンサの高精度化が必須であるため、今後も高精度で信頼性の高いポジションセンサの開発を行ない、油空圧機器の発展に協力したい。

(原稿受付：2016年12月5日)

## 解説

## 磁歪式リニアセンサの技術紹介

## 著者紹介



なか がわ しんいちろう  
中川 晋一郎

サントレスト株式会社  
〒554-0024 大阪市此花区島屋4-2-51  
E-mail: nakagawa@santest.co.jp

1978年生。2002年京都大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年サントレスト株式会社技術部入社。2016年 サントレスト株式会社技術部長。現在に至る。産業用センサおよび油空圧制御製品の研究開発およびユーザーへのサポートに従事。システム制御情報学会会員。

## 1. はじめに

筆者はこれまで産業用センサおよび油空圧フィードバック制御の研究および開発に携わり、製品の提供、ユーザーへのサポート、改良を通じ、より精度および信頼性の高い製品の普及を図ってきた。本稿では、装置の自動化に伴いその必要性が増すと考えられるセンサ群から、特に油空圧機器と親和性が高い磁歪式リニアセンサについてその技術紹介を行いたい。

## 2. 磁歪現象とは

## 2.1 概要

磁歪（じわい）現象とは、磁性材料に加わる磁界の強さに応じてその形状が変化する現象である。いわゆる磁性材料には多かれ少なかれ磁歪現象が発生するが、特に大きく磁歪現象が発生する材料のことを磁歪材という<sup>1)</sup>。標準的に用いられるものは鉄（Fe）ニッケル（Ni）系合金であるが<sup>2)</sup>、材料の熱処理/真直加工処理などによってもその効果の大きさ、温度に対する減衰、ヒステリシス、長期安定性などのパラメータが左右される。

## 2.2 リニアセンサへの応用

磁歪現象を応用した産業用のリニアセンサの原理を図1で説明する。

磁歪材料で作られたワイヤ（磁歪線）の近傍に永久磁石を設置する（通常、シリンダのピストンロッドのような可動部に設置する）。永久磁石の磁界は磁歪線に対して軸方向の歪みを発生させている。こ

の様相に矢印Aのようにパルス状の電流を与えると、電流は磁歪線に円周方向の磁界を発生させる。電流による磁界が永久磁石に到達すると、瞬間的に重ね合わせによる捻り応力を磁歪線に発生させ（Wiedemann効果<sup>3)</sup>）、その機械的振動は磁歪線表面を伝搬する。

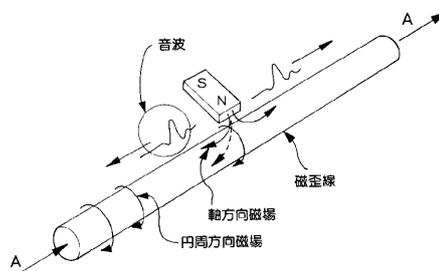


図1 磁歪式リニアセンサ動作原理

磁歪線を伝わる機械的振動（捻り弾性波）はいわゆる横波であるため、その伝搬速度は磁歪線の密度 $\rho$ および磁歪線の剛性率 $G$ で決まり、秒速約2,750メートルである。磁歪式リニアセンサでは、この機械振動をコイルまたは圧電デバイスを利用して電気変換し、電流のパルス発生から機械振動が帰ってくるまでの時間を正確に計測することで、現在の永久磁石の位置を得るものである（図2）。

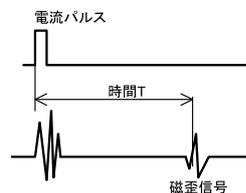


図2 磁歪式リニアセンサ動作波形模式図

## 3. 産業用リニアセンサとしての性質

## 3.1 構成

製品としての磁歪式リニアセンサは、この検出原理を活用して、特に油空圧機器との組み合わせにおいて使用しやすいようデザインされている（写真1）。

磁歪センサの心臓部となる磁歪線は、耐圧ロッド内に振動衝撃吸収機構および絶縁保護チューブとと



写真1 磁歪式リニアセンサとアンプ

もに収められており、外界の振動/衝撃/電界等の影響を受けないように工夫されている。

また、電流パルス発生および波形整形の電子回路はセンサヘッド部に内蔵されており、アナログ出力、SSI出力、フィールドバス通信出力、PLCビルトインモジュールなどの産業界で標準的に利用されている種々のインターフェースを通じてユーザ機器へ接続される。

図3はセンサを油圧シリンダに内蔵した例である。油圧シリンダに内蔵することで、装置の小型化が図れるとともに、検出マグネット部および磁歪線への外来電磁波からの遮蔽となり、非常に都合が良い。

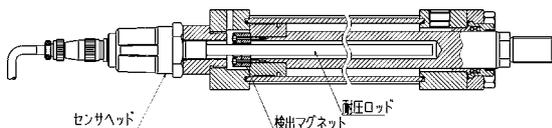


図3 磁歪式センサ内蔵油圧シリンダ

つぎに磁歪式リニアセンサ製品の特長を述べる。

### 3.2 代表的性能

- ・最小分解能：1  $\mu\text{m}$
- ・測定長：最大7,500mm（より長いオプションも可）
- ・使用温度範囲：-20~65 $^{\circ}\text{C}$
- ・保護等級：IP67（オプションで水没仕様も可）
- ・非線形性：0.025% FS以下
- ・繰り返し精度：0.001% FS以下
- ・温度特性：20ppmFS/ $^{\circ}\text{C}$
- ・サンプリング周期：1msec（ストロークに依存）

### 3.3 使用方法、使用環境など

- ・非接触位置検出

測定原理からわかるように、磁歪線と永久磁石間には機械的な接触摩擦は皆無であり、長期にわたり安定した性能を発揮できる。また、可動部に取り付ける永久磁石には電源や信号線などを何ら配線する必要がなく、設置が容易である点も特徴的である。

- ・アブソリュート検出

アブソリュート検出とは、電源投入直後に測定

基準（機械端面など）からの距離を出力できる特徴をいう。これに比べて、光学式スケールに代表される検出方法では、電源投入時点の位置を基準とした距離だけが得られ（インクリメンタル検出）、機械端面からの距離を得ようとすれば別に原点センサを設置し、電源投入時に毎回原点出し操作を必要とする。産業機械への組み込み用途においてアブソリュート検出センサが使いやすいのはいままでの間もない。すでに述べたように、磁歪式リニアセンサの位置測定は電流パルスの発生から振動波形が帰ってくるまでの時間を測定する方法であるから、原理的にアブソリュート検出である。

- ・完全に密閉された構造

検出部と可動部が非接触であることから、デリケートな内部電子回路を外界から完全に分離遮蔽することができる。とりわけ重環境下での取扱いに有利である。

## 4. 適用事例

磁歪式リニアセンサの高い信頼性および耐久性からさまざまな用途のシリンダ位置検出に適用されており、タイヤ加硫機、シールドマシン、風車、鉄道、製鉄設備、ロボットなど適用範囲は非常に広い。

また、磁気遮蔽板を設置することによって、強磁界環境となるリニアモーターカーの軌道切替えシリンダの位置決めセンサとしても使用実績を得た。

写真2 シールドマシン<sup>4)</sup> (左) 海中浚渫ロボット<sup>5)</sup> (右)

## 5. 利用上の注意

磁歪式リニアセンサにも他のセンサと同様に弱点はあるが、物理的影響を正しく理解してお使いいただくことで未然にトラブルを避けることができる。これまでの事例の中から特に注意を促したい点について二点挙げる。

### 5.1 電気ノイズ対策

近年ではインバータモーターやACサーボモーターを装置に利用する事例が珍しくなくなり、日進月歩でその大容量化、高速応答化が進んでいる。

これら大容量モーターとセンサ筐体がフレームを通じて電氣的に導通している場合では、適切にマシンアースを取っていただくよう強くお願いしたい。国

内での試運転では問題なかったにもかかわらず、海外工場に移設した途端にノイズによるトラブルが発生する事例も聞かれているため、移設工事や改造工事の際にも注意が必要である。

また、センサケーブルの配線にも注意が必要である。センサの内部回路および信号線の電圧レベルは高々数ボルトである。これら信号線はツイストペアシールド線を使い、モータ動力線とは近接しないように配線する必要がある。

やむを得ず近接させざるを得ない場合にはケーブルを鋼管内に通すなど電気的分離を図っていただきたい。さらに、モータ本体だけではなく制御盤内のモータドライバも強力なノイズ発生源であるから、バラ配線を行わずセンサアンプ直前までシールド線を利用して配線する必要がある。

### 5.2 検出マグネットの取り付け

磁歪式リニアセンサはその取り付け方法にほとんど制約は無いが、センサヘッドから見て検出マグネットの手前20mmの範囲内には強磁性材料が存在してはならない点だけは注意が必要である(図4)。検出マグネットが磁歪線へ与える静磁界に歪みを生じさせて正常な磁歪現象の発生を妨げるからである。これは検出マグネット取り付け金具およびセンサロッド支持金具にも当てはまるため、注意が必要である。

なお、取り付け金具を非磁性材料(オーステナイト系ステンレス鋼, アルミニウム)で製作した場合にはこのような制約はない。

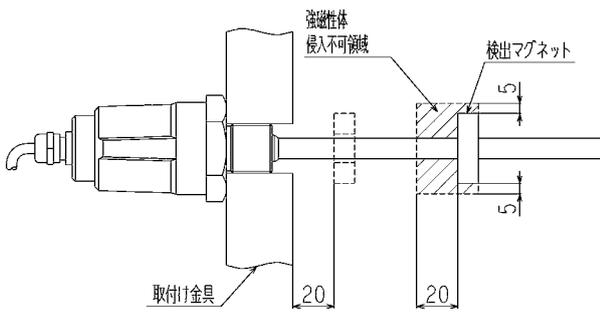


図4 強磁性材料侵入不可領域

## 6. さらなる可能性の追求

### 6.1 線形性補正

磁歪式リニアセンサはその耐環境性の高さに加えて良好な非線形性を有しているものの、長ストロークセンサとなるとその誤差が無視できない。そこで非線形性を可能な限り小さくするべく取り組んだ事例を紹介する。

磁歪式リニアセンサの繰り返し精度特性が非線形

性の10倍以上であることに着目し、センサ内部のマイクロプロセッサに補正值のルックアップテーブルを仕込むことで非線形性の補正を試みた。結果を図5に示す。横軸はセンサ検出距離で縦軸は完全直線からのズレ量[mm]である。点線は補正前、実線は補正後の結果を示している。7,400mmの検出距離で補正前は最大ズレが0.1mmであったのに対し、補正後には0.03mmまで縮小することに成功している。

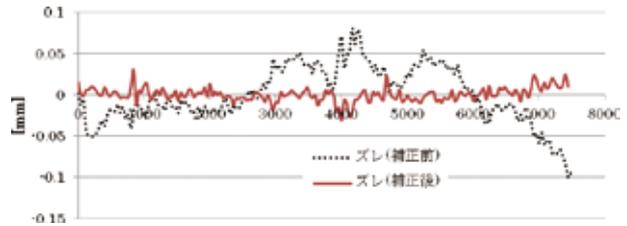


図5 線形性補正による直線性の改善結果

### 6.2 小型化

つぎに、機器への組み込みを目的とした小型化の取り組みを紹介する。写真3はできる限り信号検出部分を小型化した試作品である。磁歪振動から電気振動への変換(信号ピックアップ)に圧電デバイスを利用し、大幅な小型化を実現している。

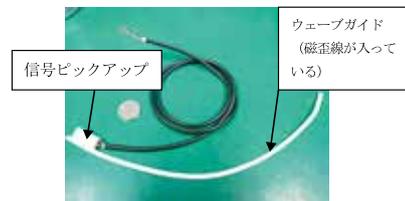


写真3 組み込み用途試作品

## 6. むすび

磁歪式リニアセンサは発明されてから40年を超えてもなおその魅力を失わない稀有な産業用センサである。産業用センサとしての数々の改良課題に日夜取り組み続けてきた世界中の技術者達の功績をたたえ、むすびとさせていただきたい。

#### 参考文献

- 1) 菊池喜充：磁歪振動と超音波，コロナ社，p. 178-181 (1952)
- 2) 牧野昇：磁性材料とその応用，オーム社，p. 246-251 (1952)
- 3) 安積健次郎：磁わい計測とその応用，オーム社，p. 3-4 (1962)
- 4) <http://www.mhi.co.jp/>
- 5) <http://www.s-jwa.or.jp/>

(原稿受付：2016年11月30日)

## 解説

## 柔軟空気圧シリンダ用変位センサの開発

## 著者紹介



あかぎてつや  
赤木徹也

岡山理科大学工学部知能機械工学科  
〒700-0005 岡山市北区理大町1-1  
E-mail: akagi@are.ous.ac.jp

1998年岡山理科大学大学院工学研究科博士課程修了。津山工業高等専門学校助手を経て、2005年岡山理科大学工学部講師、2010年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞、2013年同大学教授、現在に至る。ウェアラブル空気圧制御機器の開発に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

## 1. はじめに

高齢化社会を迎え、リハビリテーション機器やパワーアシスト装置の開発が盛んに行われている<sup>1-3)</sup>。著者らも、これまでに人体に装着可能な柔軟な空気圧シリンダ<sup>4)</sup>を開発し、この柔軟空気圧シリンダを用いた上肢リハビリテーション機器を開発してきた<sup>5)</sup>。この機器は、2つの柔軟空気圧シリンダをリング状に曲げ、直角に交差させた球面アクチュエータを使った機器である。この機器を両手で保持しながら動作させることで、簡易なポータブル上肢リハビリテーション機器として利用できる。しかし、この機器を制御する際、柔軟なシリンダの動きに合わせて長ストロークが計測できる変位センサを必要とする。本解説では、この柔軟空気圧シリンダの変位センサとして開発した柔軟リニアエンコーダ<sup>6)</sup>とワイヤ式リニアポテンショメータ<sup>7)</sup>の2種類のセンサを紹介する。また、機器への搭載を考慮し、安価なマイクロコンピュータ（以後マイコンと呼ぶ）を用いた制御システムを試作し、シリンダの位置決め制御実験を行った結果についても紹介する。

## 2. ロッドレス柔軟空気圧シリンダ

図1にロッドレス型柔軟空気圧シリンダ<sup>2)</sup>の構造を示す。シリンダは、柔軟チューブ（株式会社SMC TUS 1208）と、鋼球（φ9mm）、チューブ外側より真鍮製ローラ（φ4mm）により締付けられたアクリル製ステージから構成される。またローラの両側は鋼球

（φ3mm）で支えられ、ステージにはチューブを保持する役割の鋼球（φ3mm）が4個設けられている。動作原理は、片側の圧力室を加圧すると内部の鋼球（φ9mm）が押し、それに伴いローラが押しステージが動くというものである。

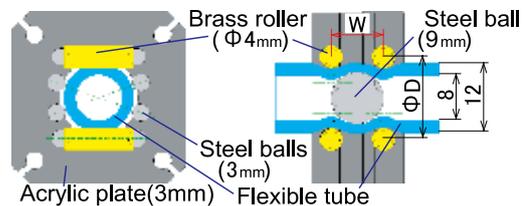
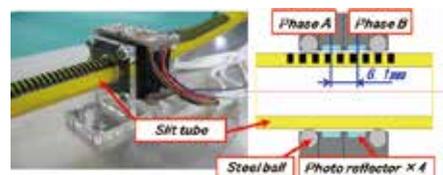


図1 ロッドレス型柔軟空気圧シリンダ

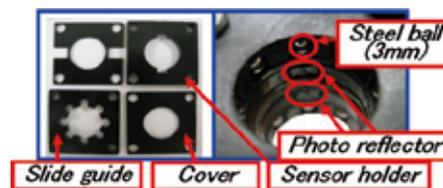
## 3. 柔軟リニアエンコーダ

## 3.1 構造と動作原理

このシリンダの変位センサとして開発した柔軟リニアエンコーダを図2に示す。図2(a)、(b)は試作エンコーダの全体図とチューブ上をスライドするセンサユニットの内部構造と構成部品を示す。柔軟リニアエンコーダはスリット（深さ1mm、幅1mm、ピッチ2mm）の入った柔軟チューブとセンサユニットから構成される。また、センサユニット内面は図2(a)に示すようにスリットに対して並列で6.1mmの中心間



a) 柔軟リニアエンコーダの構造図



b) センサユニットの構造

図2 柔軟リニアエンコーダ

表1 Up/Downカウンタのアルゴリズム

| Pattern | Phase |   | Step1       | Step2      | Step3    | Motor turn times |
|---------|-------|---|-------------|------------|----------|------------------|
|         | A     | B | Binary data | Replaced   | Up-count | Down count       |
| I       | H     | L | 2           | Replaced 3 | -3       | Replaced+1 -1    |
| II      | H     | H | 3           | Replaced 2 | +1       | -1               |
| III     | L     | H | 1           | 1          | +1       | -1               |
| IV      | L     | L | 0           | 0          | +1       | +3Replaced-1     |

距離を有する2個のフォトフレクタ(株GENIXTEK TPR-105F)が配置されA相・B相の検出面と対向面に2個のフォトフレクタを配置している。対向面のフォトフレクタは、チューブの曲げなどにより生じるチューブ表面までの距離変化を計測し、A相・B相のしきい値を補正するためのものである。計測システムではマイコン(株)Renesas H8/3664)内のA/D変換器で4つのフォトフレクタからの電圧を取り込み、検出面とは逆の面にあるフォトフレクタからの出力をしきい値として、比較を行った後、A相・B相に相当する値に変換し、表1に示すアルゴリズムを使ったUp/Downカウンタにより変位の計測を行う。

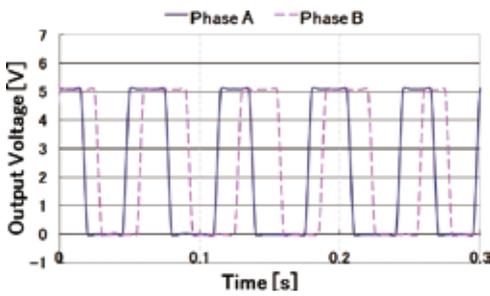


図3 試作エンコーダのA相・B相の出力結果

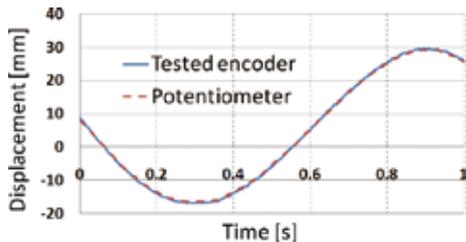


図4 試作リニアエンコーダによる変位の計測結果

図3に柔軟チューブを30mm/sの速度で一定方向に移動させた場合のA相・B相の出力結果を示す。図から通常のリニアエンコーダと同様にA相・B相の90度位相のずれたパルス出力が得られていることがわかる。つぎに、チューブを動かした際の実際の変位(ポテンションメータで計測)と試作エンコーダによる検出変位の比較を図4に示す。チューブの移動速度は30mm/sである。センサ出力(実線)が実際の変位であるポテンションメータ出力(破線)によく一致しており柔軟リニアエンコーダの有効性が確認できる。

### 3.2 センサー一体型柔軟空気圧シリンダ

試作リニアエンコーダは柔軟空気圧シリンダと並列に配置することでスライドステージ部の変位計測ができるが、ストロークが大きくなればなるほど、湾曲やたわみのより誤差を生じる。そこで柔軟リニアエンコーダを一体化した柔軟空気圧シリンダを開発した。その構成を図5に示す。構造は、スリットチューブをシリンダとして使い、前述のセンサユニットをスライドステージに直列に接続したものである。また、印可圧力によるチューブの圧壊を防ぐため、スリットの溝の深さを1mmから0.5mmに変更した。

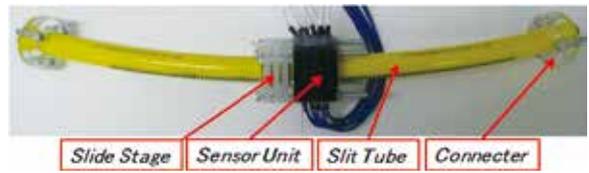


図5 リニアエンコーダ型柔軟空気圧シリンダ

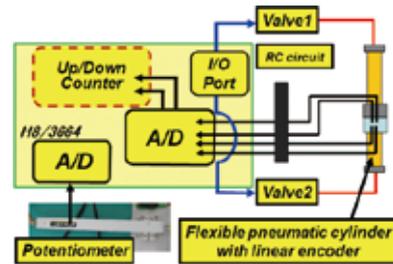


図6 チューブの屈曲を利用した低コストサーボ弁

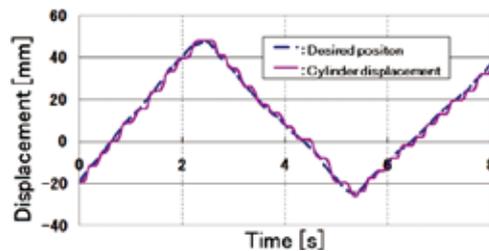


図7 位置決め制御結果

図6にセンサー一体型柔軟空気圧シリンダの位置決め制御システムの構成を示す。制御の流れは以下の通りである。リニアエンコーダのA相・B相のセンサ出力をA/D変換器を介してマイコン内に取りこみ、前述のプログラムで形成したUp/Downカウンタによりカウント値に変換する。また、目標値設定用のポテンションメータからの出力をA/D変換器を介してマイコン内に取り込む。この偏差の正負によりオンオフ制御則に従って弁を駆動し、位置決め制御を行う。このセンサを使った柔軟空気圧シリンダの位置決め制御結果を図7に示す。図中の実線はシリンダ変位、破線は目標変位である。シリンダの摩擦とオ

ンオフ制御のため、シリンダ変位は多少階段状に変化しているが、試作センサの変位フィードバックにより位置決め制御が実現していることがわかる。なお、摩擦を考慮した制御則によりこの制御性能を改良することが可能である。

## 4. ワイヤ式リニアポテンショメータ

### 4.1 構造と動作原理

前述のシリンダは、柔軟チューブにスリットを加工する必要があるが、長いチューブの製作が難しい。また、より安価なセンサが開発できれば、安価な柔軟空気圧シリンダとともに使い捨てにも耐え得る価格のホームリハビリ機器の開発が可能である。そこで、より安価で長変位の計測が可能なセンサとして図8に示すワイヤ式リニアポテンショメータを試作した。センサは、10回転分を計測できるヘリカルポテンショメータ（㈱Bourns 3590S-A26-104L）と、板バネによるワイヤ巻取り機構、ステンレス製ワイヤ（直径0.4mm）、図9に示すチューブ端コネクタから構成される。チューブ端コネクタは、一般的なチューブコネクタと亚克力板、小さな穴が開いたゴム球（外径4.6mm）から構成されており、チューブコネクタのネジによってゴム球に加わる圧縮力を調節することで、ワイヤがスライドしても気密性を保つことができる。図10に、シリンダヘッドの構造を示す。外径9mmの鋼球には内径2mmの穴が開いており、気密性を保持するため、2つのゴム球（外径4.6mm）で両側から挟んでいる。これらはM2のネジで固定され、ナスカンを通してリニアポテンショメータのワイヤと接続されている。ナスカンを使用することで、シリンダ内部で鋼球が回転しても、ワイヤがよじれるなどの影響はない。またワイヤは、T字コネクタとチューブ端コネクタを通り、シリンダ外部のポテンショメータに繋がっている。このワ

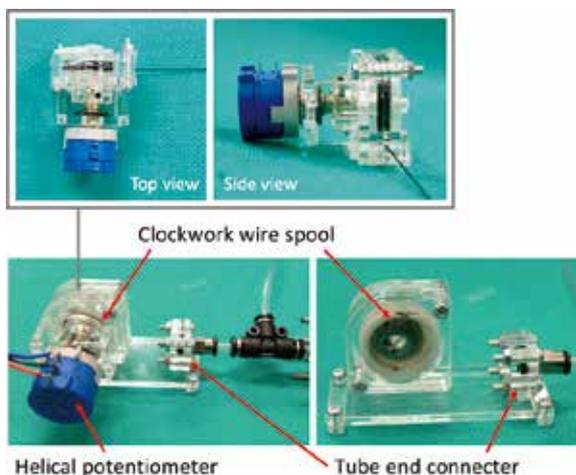


図8 ワイヤ式リニアポテンショメータ

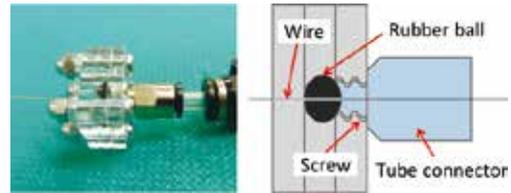


図9 チューブ端コネクタ

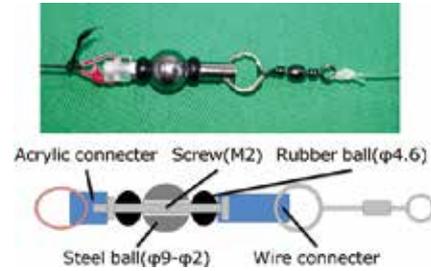


図10 シリンダヘッドの構造

イヤ式リニアポテンショメータの最大計測長さは約0.7mであり、10bitのA/D変換器使用時で検出分解能は0.74mmと十分な分解能を有する。また、ワイヤを除くセンサの材料コストは約900円と非常に安価である。

### 4.2 制御システムと制御結果

上述のセンサを内蔵した柔軟空気圧シリンダを図11に、その位置決め制御システムの構成を図12に示す。システムは、2つのON/OFF弁（㈱Koganei G010E）と、試作センサを搭載した柔軟空気圧シリンダ、シリンダ逆側に設置されたワイヤ巻取り機構から構成される。制御の流れは以下の通りである。まずマイコン（㈱Renesas SH7125）に内蔵されたA/D変換器を介して、試作センサからの出力電圧を取込む。つぎに、事前に設定された目標値との偏差を求め、その正負によって弁を操作し、ステージ変位を制御する。また、変位データはシリアル変換モジュール（㈱FTDI FT234X）を介し、PCで記録する。ここで、シリアルデータの送信を含めた制御のサンプリング周期は1msである。

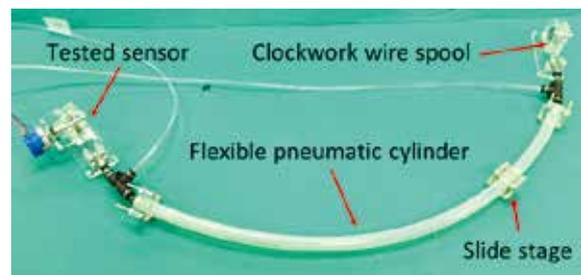


図11 リニア変位センサ内蔵型柔軟空気圧シリンダ

図13に、ワイヤ式リニアポテンショメータを用いたオンオフ制御によるシリンダの多点位置決め制

御結果を示す。図中の破線は目標値、実線は試作センサによる変位を示す。図13より、オンオフ制御による振動は見られるが、目標値に追従できており、試作センサの有効性が確認できる。また、図14に示すように、大きく湾曲した状態でも同様に制御できることを確認した。

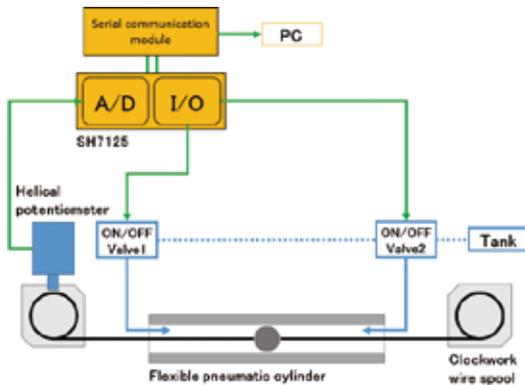


図12 柔軟空気圧シリンダを用いた位置決め制御システム

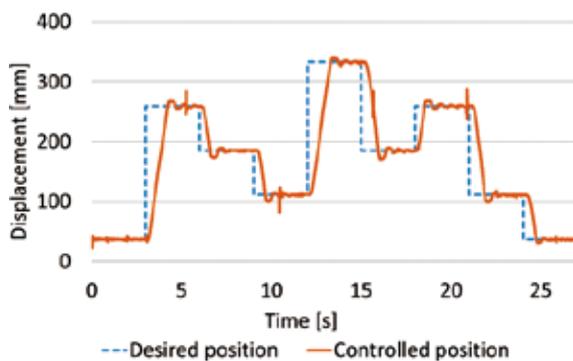


図13 シリンダ変位の応答

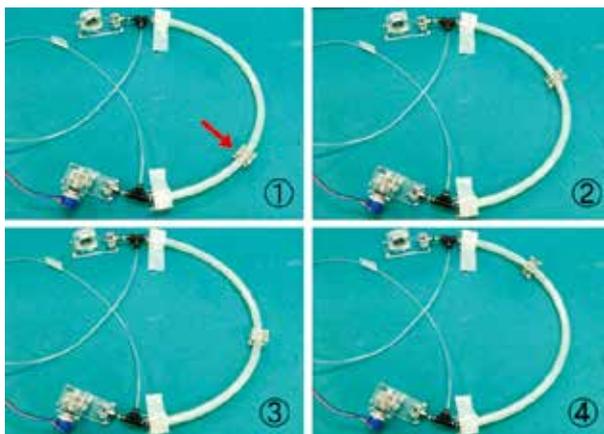


図14 柔軟空気圧シリンダの位置決め制御風景

## 5. おわりに

柔軟空気圧シリンダ用の変位センサとして、スリットを施した柔軟チューブとフォトリフレクタを用いた柔軟リニアエンコーダを構成し、シリンダと一体化したアクチュエータを提案・試作し、また位

置決め制御を行った。その結果、制御中に湾曲やねじりを加えても軸方向の位置決め制御ができることを確認した。また、長変位の計測用に、ヘリカルポテンシオメータとワイヤ巻取り機構を用いた軽量・安価なワイヤ式リニアポテンシオメータを提案・試作し、柔軟空気圧シリンダと組み合わせた変位計測システムを構築した。また、このシステムを用いたシリンダの位置決め制御を実現し、その有用性を確認した。

本解説では、柔軟空気圧シリンダの柔軟性を損なうことなく変位計測ができる2つのセンサの開発について述べた。これらのセンサは既製品に比べて分解能などでは劣るものの、ソフトアクチュエータが必要とする分解能を満たすものであり、さらに安価なものに注目して開発を行った。元来安価な空気圧ソフトアクチュエータや、マイコンなどを使って、使い捨てに耐え得るリハビリテーション機器が開発できれば、今後、家庭でできるリハビリテーションの幅が広がるものと、著者らは期待する。

なお、紹介したセンサやマイコンなど小型・安価で読者諸兄に有益な物品と思われるので、本稿ではメーカーと型式を編集委員会の許可のもとに明示した。

## 参考文献

- 1) Ishii, M., Yamamoto, K., Hyodo, K. : Stand-Alone Wearable Power Assist Suit-Development and Availability-, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 17, No. 5, p. 575-583 (2005)
- 2) Kobayashi, H., Shibata, T. and Ishida, Y. : Realization of all 7 motions for the upper limb by a muscle suit, Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 16, p. 504-512 (2004)
- 3) Noritsugu, T., Takaiwa, M. and Sasaki, D. : Development of Power Assist Wear Using Pneumatic Rubber Artificial Muscles, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 21, No. 5, p. 607-613 (2009)
- 4) 赤木徹也, 堂田周治郎 : ロッドレス型柔軟空気圧シリンダの開発とその応用, 日本機械学会論文集C編, Vol. 73, No. 731, p. 2108-2114 (2007)
- 5) Matsui, Y., Akagi, T. and Dohta, S. : Development and Control of Flexible Spherical Actuator for Portable Rehabilitation Device, International Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, p. 49-54 (2015)
- 6) Akagi, T., Dohta, S., Matsushita, H. and Fukuhara, A. : Development of Flexible Pneumatic Cylinder with Built-in Flexible Linear Encoder and Flexible Bending Sensor, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 6, No. 4, p. 359-372 (2012)
- 7) Matsui, Y., Akagi, T. and Dohta, S. : Development of Low-Cost Wire Type Linear Potentiometer for Flexible Spherical Actuator, Proceedings of AIM2016, p. 1017-1021 (2016)

(原稿受付：2016年10月27日)

## 解説

## 電磁超音波共鳴法による高温配管の減肉モニタリング

## 著者紹介

うちもとてつや  
内一哲哉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: uchimoto@ifs.tohoku.ac.jp

1998年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同大学助手、東北大学講師、助教授を経て、准教授、現在に至る。電磁非破壊評価、劣化診断などの研究に従事。博士（工学）。

たかぎとしゆき  
高木敏行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: takagi@ifs.tohoku.ac.jp

1982年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。日立製作所、東京大学助教授、東北大学助教授を経て、1997年同教授、現在に至る。電磁非破壊評価、オンラインモニタリング、知的材料などの研究に従事。工学博士。

うらやまりょういち  
浦山良一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: urayama@wert.ifs.tohoku.ac.jp

1981年東北学院大学工学部応用物理学科卒業。2007年東北大学流体科学研究所の産学官連携研究員、現在に至る。電磁非破壊評価、オンラインモニタリング、劣化診断の研究に従事。「電磁超音波共鳴法による配管減肉のオンラインモニタリング」で2013年日本保全学会論文賞受賞。日本保全学会などの会員。

## 1. はじめに

現在の火力・原子力発電所の減肉管理規格では、プラントが停止している際に配管検査を行うことが前提である。これまでの運転経験により推定される減肉速度を踏まえて、停止中に検査により確認すれば十分であるとの考えによる。しかし、プラントの運転期間の増加に伴う減肉の進行により、配管肉厚測定の数が増加する傾向にあり、新しい減肉管理方法を構築する必要がある。日本機械学会「配管減肉管理高度化に向けた最新技術知見適用化のための調査研究分科会」においては、長期的な取組みとして、以下の研究が提案されている<sup>1)</sup>。

- 1) 運転状態において検査が可能な検査技術の確立と、予測技術の高精度化

- 2) 偏流部位全体や更に広範囲の減肉状況を把握するスクリーニングを目的とした配管検査手法

特に、1)の減肉モニタリング技術については、モニタリングを実施する箇所の減肉傾向を把握しその箇所の安全性を向上させる効果の他に、配管減肉評価法の検証や減肉箇所の代表測定点の妥当性の検証、減肉のメカニズム解明に応用可能であり、減肉管理の高度化につながるものと考えられる。

超音波試験法を高温物体のオンラインモニタリングに適用する場合、高温探触子の使用やバッファローッド法などの接触法が考えられる<sup>2)</sup>。接触法では、探触子自体はもとより、接触媒質も高温に耐える必要がある。これまでに、ニオブ酸リチウム単結晶の圧電素子を用いた高温超音波探触子をろう付けにより取り付けて配管減肉のオンラインモニタリングを行った事例が報告されている<sup>3)</sup>。加圧水型原子力発電所における高温配管への適用や、運転温度が500℃以上に達する高速増殖炉への適用を目指した開発がなされた。

一方で、レーザー超音波法、空気超音波法、電磁超音波法などの非接触法の適用が考えられる<sup>2)</sup>。電磁超音波探触子 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) は、電磁現象により超音波を送受信する方法であり、接触媒質が不要であり高温環境において安定して信号を取得することが期待できる<sup>4)</sup>。一方で電気機械変換効率が低いため、SN比が低いという欠点を有する。この欠点を補う方法として、共鳴法の適用が考えられる。

本稿では、共鳴法を用いたEMATによる減肉のオンラインモニタリングについて、その概要と、配管減肉のオンラインモニタリングへの適用例について紹介する。

2. EMATプローブの概要と高温プローブの開発<sup>5)</sup>

代表的なEMATプローブの構造を図1に示す。プローブは、rfコイル、検出コイル、永久磁石から構

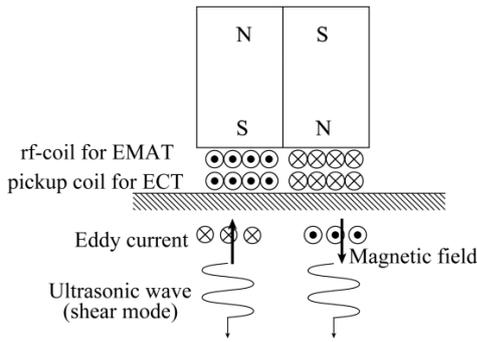


図1 EMATプローブの構造

表1 高温用EMATプローブ構成部材

| 使用部品   | 仕様           |
|--------|--------------|
| 磁石     | サマリウムコバルト磁石  |
| コイル銅線  | ポリエステルイミド被覆線 |
| コイル基材  | ガラス繊維シート     |
| 接着材    | エポキシ系樹脂接着剤   |
| 配線ケーブル | FTTP電線       |
| 配線接続   | 圧着端子接続       |

成される。rfコイルにパルス励磁電流を流し、試験体表面に渦電流を誘導させる。磁石によるバイアス磁場と渦電流との相互作用により、試験体表面に水平方向のローレンツ力が発生し、試験体内を横波が伝搬する。超音波の受信は、上記の逆過程により行われる。測定対象が磁性材料である場合、ローレンツ力に磁歪力による寄与も加わる。著者らは、原子力発電設備の配管減肉の定点監視に適用することを目標とし、配管温度300℃に耐える複合プローブの構成部材を検討し、試作を行った。試作にあたり、プローブを構成する材料として、1) 永久磁石材料、2) コイル巻線、3) コイル基板と接着剤、4) 配線ケーブル、のそれぞれについて検討を行った。300℃の環境に耐える材料を選定した結果、表1に示す材料を用いてプローブを作製し、電気炉を使用した高温環境下での模擬減肉評価試験を実施した。

室温用プローブにおいて使用したNd系永久磁石と比較して、SmCo系永久磁石は大きなノイズを検出した。これは、磁石内に発生した超音波が伝搬して現れたノイズと考えられる。Nd系永久磁石は、防錆のために表面にアルミ等の金属メッキが施されており、渦電流がメッキに集中することにより磁石内の超音波発生を低減していると考えられる。そこで、SmCo系永久磁石とコイルとの間に、厚さ0.1mmのアルミニウム箔を挿入した。さらに、磁石表面にランダムスリットを入れ、磁石内に発生した超音波

を乱反射させることにより、300℃においても明瞭なパルスエコー波形を取得した。

### 3. 配管減肉のオンラインモニタリングへの適用<sup>6)</sup>

#### 3.1 共鳴法と信号処理法の概要

配管減肉のモニタリングを行うためには、数 $\mu\text{m}$ /日以下の非常に低い減肉速度に対して肉厚変化を評価する必要がある。そこで共鳴法を適用し、肉厚測定を実施した。送信波は、時間間隔100 $\mu\text{s}$ のバースト波であり、中心周波数を1.5MHzから3.5MHzまで10kHzの刻み幅で掃引した。得られた受信信号に対して同期検波を行い、スペクトルを求めた。配管の肉厚と音速により決まる基本共鳴周波数の間隔で、スペクトルにピークが現れる。ピーク間隔を求めることにより、肉厚或いは音速を評価することが可能である。

平板などの単純な形状の試験片であれば容易にピーク間隔を評価できるが、配管減肉評価では、複雑な減肉形状により明瞭なピークを確認することが難しいことがある。ピーク間隔を安定して求めるために、著者らはN周期加算法(SNC法)を提案している<sup>7)</sup>。基本波形に対して周波数軸を1/nだけ縮小することにより、n次の共鳴周波数 $f_n$ を基本周波数 $f_1$ に重ね合わせることが可能である。従って、共鳴スペクトル強度 $x(f)$ に対して、

$$f_1 = \arg \max_f \left\{ \sum_n x(nf) \right\}$$

で表される処理を行うことにより得られるSNCスペクトルに対して、基本周波数の場所に高次のピークを重ね合わせた波形を得ることができる。この基本周波数 $f_1$ を評価することにより、板厚 $d$ を、音速 $v$ を用いて $d = v/f_1$ と評価することが可能である。本

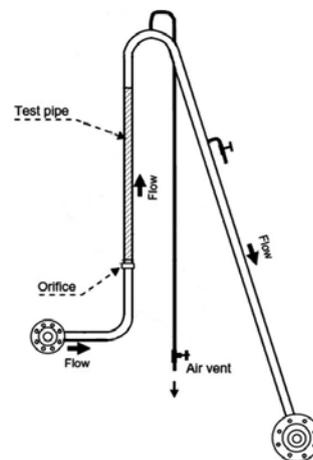


図2 模擬減肉試験装置における配管試験部の概略図



図3 配管試験部に取り付けたEMATプローブ

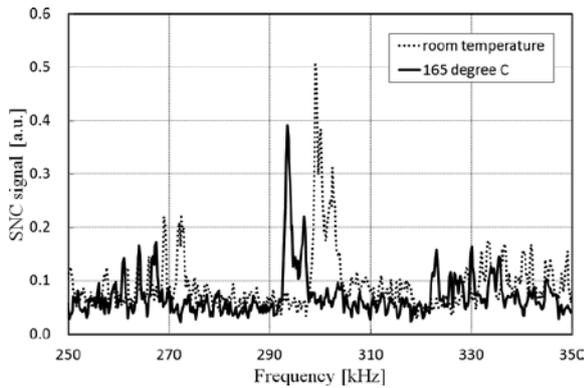


図4 SNCスペクトルの雰囲気温度による変化

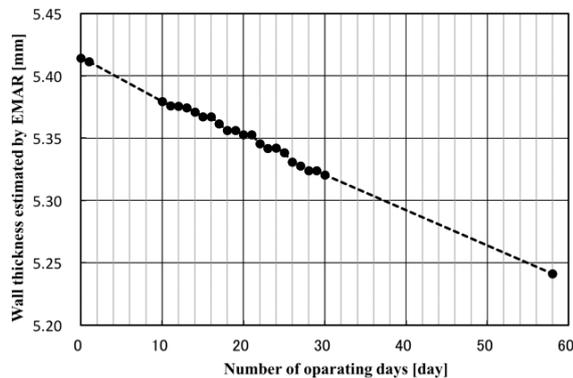


図5 2相流減肉試験の際の肉厚測定結果

手法を適用することにより、停止中の原子力発電所の配管の肉厚を測定した結果、従来の超音波厚さ計と同等の精度を示すことが確認できている。

### 3.2 試験方法の概要

大規模減肉試験装置の試験部にプローブを設置して、配管減肉のオンラインモニタリングを実施した。図2に減肉試験装置の試験部の概略図を示す。試験配管は炭素鋼配管STPT370, 50A Sch80であり、内径49.5mm, 外径60.5mm, 公称肉厚5.5mmである。オリフィス下流の試験部配管にとりつけた高温用EMATプローブの写真を図3に示す。二相流による減肉試験(第1回試験)と、単相流で溶存酸素量を変化させた試験(第2回試験)の2回の試験において、配管減肉オンラインモニタリングを行った。流体温度は流れ加速型腐食が起きやすい165℃に設定

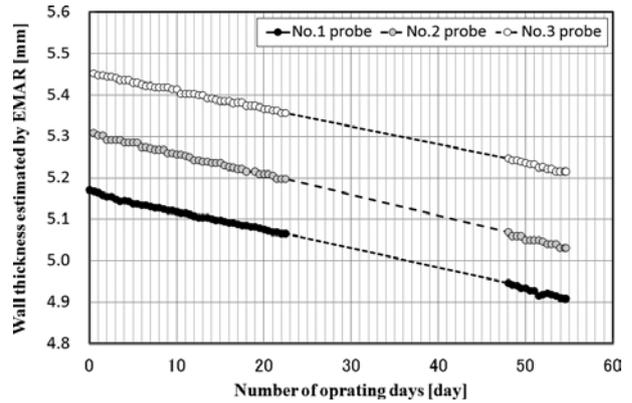


図6 単相流減肉試験の際の肉厚測定結果

された。測定機器はプローブから離れた制御室に設置したため、長さ約32mのケーブルによる信号の減衰とノイズの影響を避けるために、プリアンプをプローブの近くに設置した。

### 3.3 オンラインモニタリング試験の結果

装置起動前の室温におけるSNCスペクトルと、起動後の定格運転時のSNCスペクトルを図4にあわせて示し、両者を比較する。流体温度が室温から165℃に上昇し、配管材料の音速が変化することに伴って、基本周波数が移動することがわかる。165℃の定格運転時の音速を求めるために、起動前に対比試験片を用いて得た音速に基づいて初期肉厚を評価する。起動後に定格温度に至った直後に肉厚評価値に基づいて計算した音速3180m/sを、モニタリング期間中の音速として用いた。

図5に第1回試験における高温環境下での配管肉厚のモニタリング結果を示す。測定は1日1回の頻度で行い、配管肉厚を評価した。単調に評価肉厚が減少しており、測定が安定であることを示唆している。EMARによる初期測定肉厚は5.42mm, 最終肉厚は5.24mmで、減肉量は0.18mmの評価であった。試験終了後の破壊試験による肉厚測定値は5.18mmであり、EMARの最終測定肉厚との差は0.06mmであり、十分な精度で測定が行われていることを示している。

第2回の試験では、配管の同じ軸方向位置において、周方向に3個のプローブを設置して測定を行った。図6に肉厚の測定結果を示す。いずれのプローブにおいても、同様に肉厚は単調減少している。この試験においてもEMARを用いたモニタリングにより数 $\mu\text{m}$ 単位での肉厚変化を評価できると考えられる。

## 4. おわりに

本稿では、電磁超音波共鳴法を用いた配管減肉のオンラインモニタリングについて紹介した。配管の局所的な肉厚しか評価できないという制限はあるものの、数 $\mu\text{m}$ 単位での肉厚変化を安定して評価するこ

とが可能である。従って、シミュレーションなどに基づく配管減肉評価法の検証などに活用することができる。減肉のオンラインモニタリングとシミュレーションの予測を併用することにより、配管減肉管理の高度化が期待される。

#### 謝辞

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会の研究拠点形成事業（A.先端拠点形成型）「省エネルギーのための知的層材料・層構造国際研究拠点」により実施された。

#### 参考文献

- 1) 稲田文夫ほか, 配管減肉管理高度化に向けた最新技術知見 (P-SCCII-3分科会報告), 日本機械学会第17回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp.351-354 (2012)
- 2) 井原郁夫, 高温物体の超音波センシングとその展望, 非破壊検査, Vol. 64, No. 2, pp. 48-55 (2015)
- 3) 荒川敬弘, 杉野巨, 荒邦章, 平林勝, 高温用超音波探触子の開発と適用例非破壊検査, Vol. 63, No. 2, pp. 621-628 (2014)
- 4) Hirao M. and Ogi, H., Electromagnetic Acoustic Transducers, Springer Japan (2003) .
- 5) 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行: 電磁超音波-渦電流複合プローブの高温環境モニタリングへの適用に関する検討, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 76, pp. 587-593 (2010)
- 6) 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, 兼本茂, 電磁超音波共鳴法による配管減肉オンラインモニタリング, 保全学, Vol. 11, pp. 83-89 (2013)
- 7) Urayama, R., Uchimoto, T., Takagi, T., Kanemoto, S.: Quantitative Evaluation of Pipe Wall Thinning by Electromagnetic Acoustic Resonance, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol. 2, No. 25-33, pp. 25-33 (2010)

(原稿受付: 2016年12月28日)

## 解説

## ICT建機用ストロークセンサ付シリンダの紹介

## 著者紹介



かげ やま まさと  
影 山 雅 人

コマツ油機開発センター  
〒323-8558 栃木県小山市横倉新田400  
E-mail : masato\_kageyama@komatsu.co.jp

1986年横浜国立大学工学部情報工学科卒業、  
同年コマツ入社、日本フルードパワーシステム  
学会会員

## 1. はじめに

3D-施工CADデータを基に、自動施工を行うICT建機の普及が進んでいる。

従来の施工では、施工図に従い測量によって丁張りと呼ばれる目印を設け、その目印を基に施工を進めるのが基本であった。たとえば掘削作業では、掘削により地形が変わるため、掘削が進む都度丁張りを繰り返す必要があり、手間のかかる作業となる。

ICT建機には、全地球衛星ナビゲーションシステム（GNSS）が搭載され、3D-施工CADデータを基に、作業機が、自動制御により操作される。

従来施工で必要となっていた測量や丁張りが不要となり、施工効率を格段に上げることができる<sup>1)2)</sup>。

このようなICT建機には、作業機の位置を、高精度、高応答で計測するためのセンサが必要となる。従来、作業機の位置を計測するためには、重力に対する傾きを計測する傾斜角センサが、広く用いられ



図1 ICT 油圧ショベル

ていた。傾斜角センサは、重力に対する振り子の傾きを計測するのが一般的であり、整定するまで時間が掛かるため、計測精度や応答性に劣り作業機の自動制御には不十分であった。

当社が、2013年に導入したICTブルドーザ、2014年に導入したICT油圧ショベルには、ストロークセンサ付シリンダが搭載されている。

このシリンダは、自動制御に十分な応答性、精度をもたせるための、独自の技術に基づくものであり、ICTブルドーザ、ICT油圧ショベルに必須のコンポーネントとなっている。ここでは、このシリンダについて紹介する。



図2 ICTブルドーザ



図3 ストロークセンサ付シリンダ

## 2. ストロークセンサ付シリンダの構造

シリンダの機械的な信頼性の確保のため、センサの開発においては、既存シリンダの主要な構造を変更しないことを基本的な開発方針とした。そのため

の検出方法として、(1)シリンダロッドの相対移動量をローラで検出し、(2)リセットセンサにて、シリンダ本体に対するロッドの絶対位置を検出するシステムを採用した。

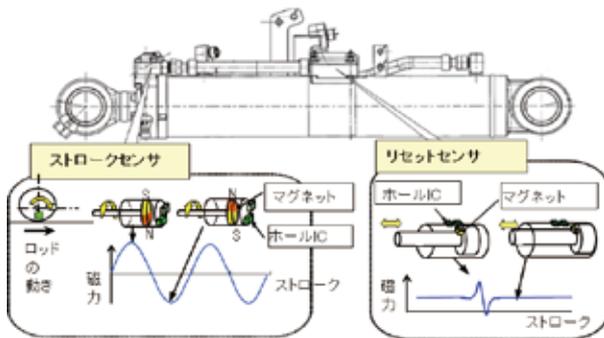


図4 ストロークセンサ付シリンダ概要

### 3. ストロークセンサ

シリンダロッドの移動をローラで検出することで、簡易な構造で高精度な検出が期待できる。この方法は、シリンダストロークを計測する場合など、従来から用いられている方法であるが、より高精度で計測するためには、ローラの慣性や、摺動抵抗を小さくすることが必要となる。そのため、シリンダに最適化した小型でかつ高精度なセンサを新たに開発した。

回転角度を計測するセンサ部は、ローラに磁石を装着し、磁石による磁気をホールICにより検出する方式とした。非接触であるために摺動抵抗が少なく、また、ローラには磁石のみが取り付けられているために、慣性の増加も最小限に抑えることができる。

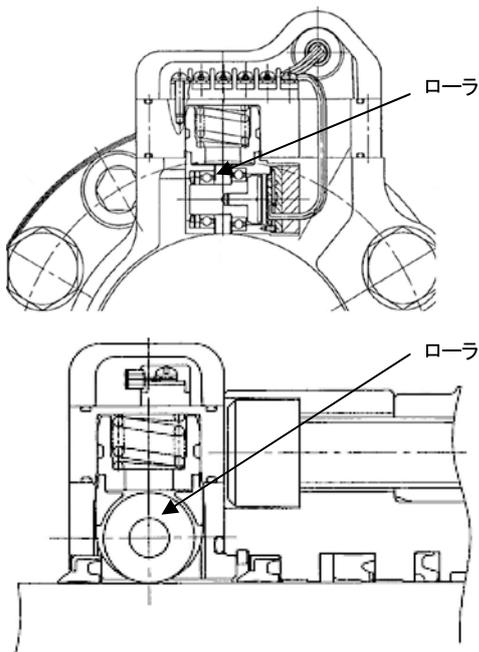


図5 ストロークセンサ

### 4. リセットセンサ

ストロークセンサは、シリンダロッドの移動をローラで検出するため、ローラのすべりにより計測ストロークにずれが生じることがある。このずれ量を計測するため、リセットセンサを設ける。

リセットセンサは、ピストン部に設けた磁石の磁気を、チューブの外側の磁力検出素子により検出する。既存シリンダの主要な構造を変更せず、シリンダチューブの外側から、ピストンの位置を検出することができる。ピストンがリセットセンサを通過する都度、ストロークセンサのすべり量を補正する。

チューブの材質は鋼、つまり、磁性体であり、チューブ内部の磁界を外にわずかししか通さない。リセットセンサは、磁力検出素子の配置と磁性体による磁路の構造によって、僅かな磁力を効率よく検出できるよう工夫している。

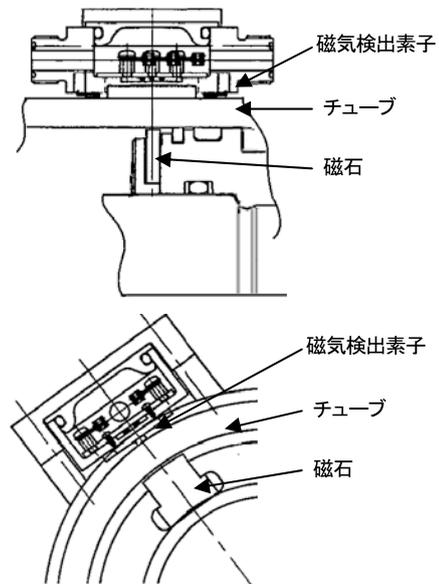


図6 リセットセンサ

また、チューブは、導電体であり、磁界の変化により渦電流を生じる。検出される磁力は、チューブ内の渦電流の影響も受ける。ピストン部に設けた磁石の移動により、磁界が変化し、チューブ中に、渦電流が発生する。渦電流の大きさは、シリンダの移動速度に応じて大きくなるため、リセットセンサの検出位置は、シリンダの移動速度による影響を受ける。

図7に、渦電流を考慮した磁気シミュレーションによるチューブ内の磁力分布を示す。移動速度により、チューブ内の磁力分布が変化していることがわかる。

渦電流の影響は、シリンダ速度に依存するため、ローラ式のストロークセンサにてシリンダ速度を計

測し、リセットセンサで計測したピストンの位置を補正することとした<sup>3)4)</sup>。これらにより、リセットセンサによる高精度な計測を実現している。

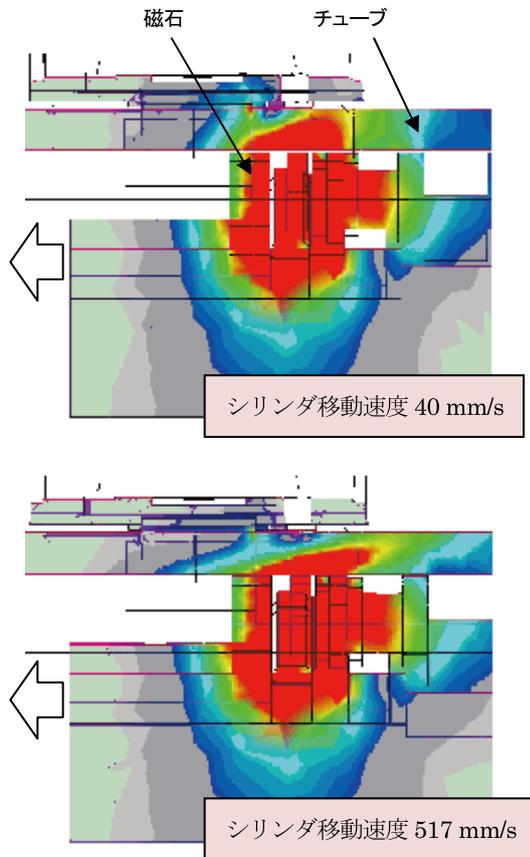


図7 チューブ内の磁力分布

## 5. まとめ

ICT建機をはじめとして、建機の電子化は今後ますます進んでいくことが想定され、建機の油圧機器

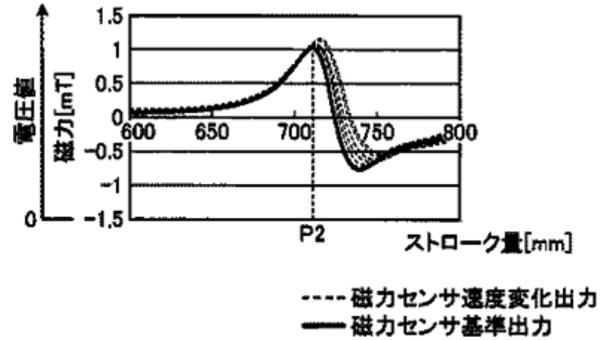


図8 ストローク検出磁力特性

も電子化に対応した検出、制御機構が求められる。

建機の油圧機器は、厳しい作動環境下で大出力を発揮することに加え、高精度な計測精度、制御精度が要求されていくこととなる。これらを実現するために、油圧機器用のセンサ類、電子制御機器の開発を進める必要がある。その例の一つが、このストロークセンサ付きシリンダと考える。

今後とも、より高い性能・精度のキーコンポーネントを開発し続け、建機の電子化に貢献したいと考える。

### 参考文献

- 1) 林和彦, 嶋田健二郎: D61EXi/PXi-23の開発 作業機自動制御ブルドーザ, コマツ技報2013VOL. 59 NO. 166
- 2) 島野佑基, 上義樹, 下風研一郎: PC210LCi-10/PC200i-10の開発 マシンコントロール油圧ショベルコマツ技報2014VOL. 60 NO. 167
- 3) 影山雅人, 堀秀司, 石崎直樹, 永橋伸之: シリンダの位置計測装置 特開2006-226909 (P2006-226909A)
- 4) 影山雅人, 横山佑喜: シリンダ位置計測装置及びシリンダ位置計測方法 特開2014-74662 (P2014-74662A)

(原稿受付: 2016年12月5日)

## 解説

# 磁場印加型レオメータの開発と MR流体の磁気レオロジー計測

## 著者紹介



なか の まさ み  
中野 政身

東北大学流体科学研究所  
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1  
E-mail: m-nakano@fmail.ifs.tohoku.ac.jp

1982年早稲田大学大学院博士後期課程修了。同年山形大学助手、助教授を経て、1997年同教授、2008年東北大学教授。機能性流体とその応用、流体関連振動・騒音、振動制御などの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会（理事）、日本機械学会（フェロー）などの会員。工学博士

## 1. はじめに

MR (MagnetoRheological) 流体<sup>1)</sup>は、外部磁場の印加の下でレオロジー特性が変化する機能性流体である。その印加磁場に対する粘性（厳密には降伏せん断応力）の変化が非常に大きくかつ数msの応答性と可逆性をもつことから、ブレーキ、クラッチ、ダンパなどの機械要素だけでなく、振動制御、アクチュエータ制御、ロボット制御などの多様な制御システムへの応用展開も試みられている<sup>2)</sup>。MR流体そのものの研究開発や上述の応用に際して、MR流体の基本的な磁場下での磁気レオロジー特性や流動特性を把握することは必要不可欠である。著者らは、1.0T程度までの比較的高い磁場下でのMR流体の基本的な磁気レオロジー特性を高精度で測定することができる、磁場印加型の回転平行円盤型レオメータを開発している<sup>3)</sup>。FEMによる磁場解析を援用して、測定部の平行2円盤間に充填されたMR流体に垂直に一樣な磁場が印加されるような磁気閉回路をもつ磁場印加装置を設計・開発し、製品化している。本磁場印加装置からなる測定部を高精度レオメータに装着することによって、回転平行円盤間のMR流体の磁気レオロジー特性を測定可能としている。本解説では、その磁場印加型回転平行円盤レオメータの設計の詳細と磁気的特性、それを用いて計測した1.0T程度までの比較的高い磁場印加時のMR流体の磁気レオロジー特性の測定結果などについて紹介する。

## 2. 開発した磁場印加型レオメータ

### 2.1 磁場印加装置

高精度レオメータ<sup>4)</sup>に装着することを前提に、磁場解析を援用して、MR流体が充填される測定部である2枚の回転平行円盤間に効果的に磁場を印加できる磁場印加装置を設計している。設計仕様を、電磁石のコイルの発熱を抑えるためその消費電力の最大値を14Wとし、コイルへの印加電流  $I=0.5A$  時に直径  $\phi 20mm$  の平行円盤間のMR流体に最大1.0Tの磁束密度が印加されるように設定した。そのために、電磁石で発生した磁界が漏れ損失が少なく平行円盤からなる測定部に垂直に均一に印加されるような磁気閉回路をもつ磁場印加装置としている。図1には、設計した磁場印加装置の断面図とその磁場解析結果及び測定部を示す。磁場印加装置は、コイルとそれを取り囲むケース（磁性体）からなる電磁石部（図中の下部）とその発生した磁界を効果的に測定部に導くための電磁石上部に取り付けるふた部、そして直径  $\phi 20mm$  の回転円盤と固定円盤が平行に配置された測定部で構成される。電磁石で発生した磁界は、図中の磁気閉回路に矢印で示すように、コイルケース部の中芯、底面、外側面を經由して、上部のふた部に導かれ、ふたの中心部から測定部に効果的に印加される。磁場解析結果 ( $I=0.5A$ ) は、測定部の

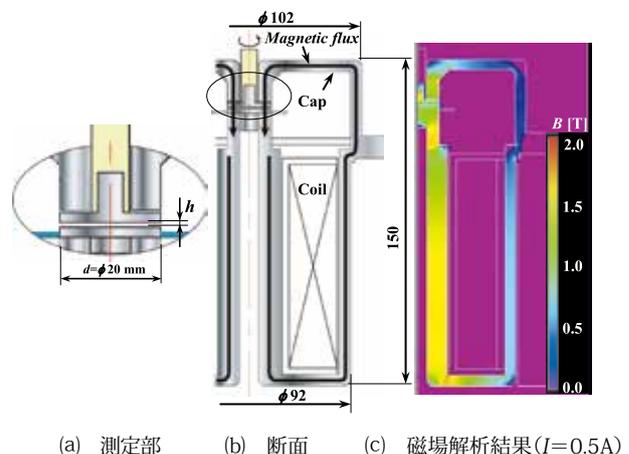


図1 開発した磁場印加装置と測定部

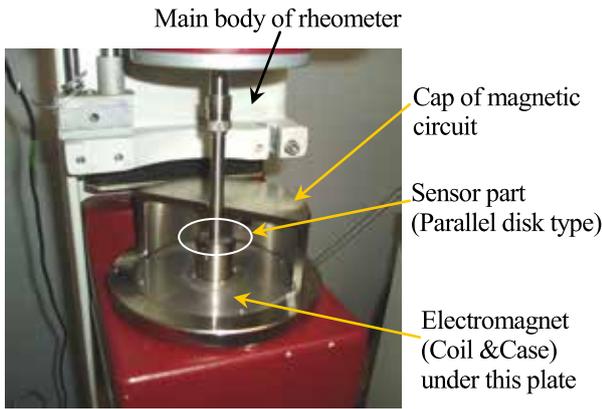


図2 開発した磁場印加型平行2円盤レオメータの外観

平行円盤間にMR流体を充填した場合のもので、磁気回路中に特に過大な磁束密度を発生する部分もなく、効果的に測定部に約1.0 Tの磁束密度の磁界が印加されている。図2には、その開発した磁場印加装置及び平行2円盤からなる測定部を高精度レオメータに装着した外観を示す。図からわかるように、磁界を効果的に測定部に導くための上部のふた部は2つに分割でき、計測の際に測定部に供試流体を充填してから設置できるようにしてある。

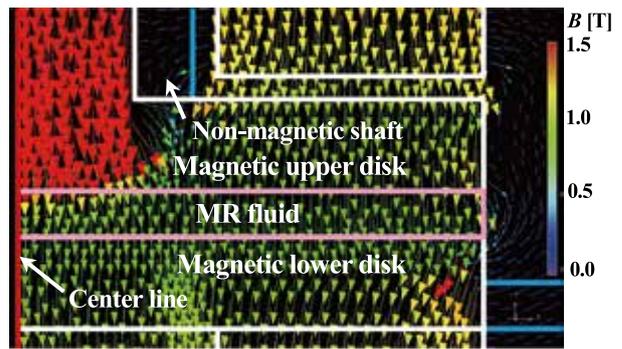
2.2 回転平行2円盤からなる測定部

図3には、平行2円盤からなる測定部の磁場解析結果を示す。平行2円盤は磁性体からなり、上部回転円盤とその軸との連結部を一部磁性体とすることにより、軸の周囲に配置された上部のふたの中心部から測定部に磁界を効果的に導入し、平行2円盤間のMR流体に垂直に均様な磁界が印加されるようにしてある。2円盤間の空間にMR流体を充填するようにしてあり、下部円盤の下方には非磁性体の中空円盤からなる流体漏れの受け皿を設けてある。図3(a)の磁場解析結果に示すように、2円盤間のMR流体全体に約1.0 Tの磁束密度のほぼ均様な磁場が垂直に印加されているのが確認できる。また、図3(b)の円盤間のMR流体に印加された磁束密度の半径方向の分布からもわかるように、コイルへの印加電流  $I$  を変化させても円盤間（半径位置  $r = 0 \sim 10\text{mm}$ ）ではほぼ均様な磁場分布となっている。

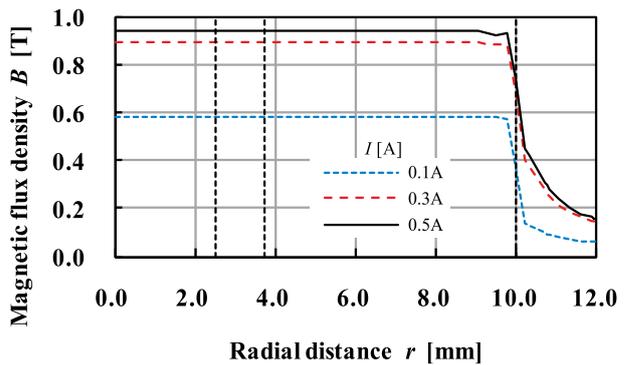
2.3 測定部の磁気的特性

測定部の平行2円盤間に印加される磁束密度の半径方向分布は、間隙間が空気層の場合にはホール素子を用いた Gauss 計で計測できるので、その計測結果と磁場解析結果とを比較して図4に示す。計測結果は磁場解析結果とそのレベルが若干異なるが、円盤間では半径方向にほぼ均様な磁場が印加されていることが確認できる。

平行円盤間内のMR流体に印加される磁束密度は、



(a) MR流体が充填された平行2円盤からなる測定部周辺の磁束密度分布の解析結果



(b) 平行2円盤間のMR流体に印加される磁束密度  $B$  の半径方向分布の電磁コイル電流  $I$  による変化（間隙：MR流体）

図3 平行2円盤からなる測定部の磁場分布解析結果（ $h = 1.0\text{mm}$ ）

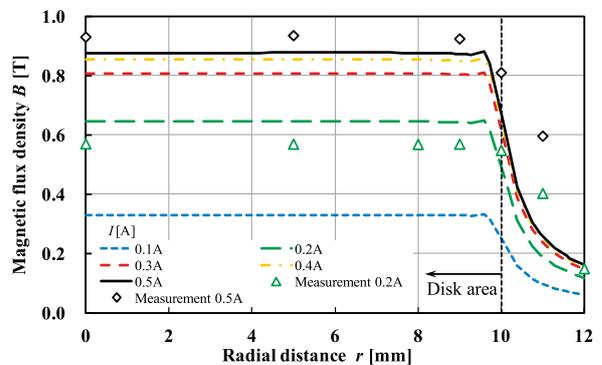


図4 平行2円盤間の磁束密度  $B$  の半径方向分布の磁場解析結果と測定値の比較（ $h = 1.2\text{mm}$ ，間隙：空気層）

測定部のMR流体受け皿（下部円盤）の下部の円筒状支持部にサーチコイルを装着して、この支持部を通過する磁束を磁束計によって計測して、事前に計測してある支持部を通過する磁束と間隙間の磁束密度との関係から間接的に求めている。図5には、円盤間間隙  $h = 1.2\text{mm}$  で間隙間を空気層とした場合と市販MR流体（MRF-132DG）を充填した場合について、計測した間隙間の磁束密度  $B$  の電磁コイル電流  $I$  に対する変化を示す。間隙間が空気層の場合には当然ながらMR流体の場合より  $B$  が小さくなる

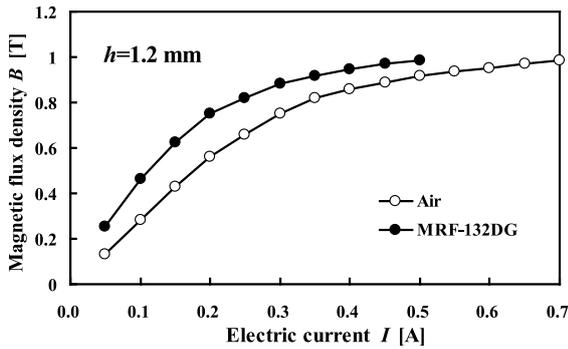


図5 平行2円盤間に印加される磁束密度 $B$ の電磁コイルへの印加電流 $I$ による変化（円盤間が空気層とMR流体の場合の比較）

が、いずれの場合も、磁束密度 $B$ は印加電流 $I$ が大きくなるにつれて増大し、 $I=0.4\text{A}$ 程度から徐々に磁氣的に飽和する傾向がある。間隙間にMR流体を充填した状態では、設計どおりに $I=0.5\text{A}$ でほぼ $1.0\text{T}$ の磁束密度が印加されていることが確認できる。

### 3. 市販MR流体の磁気レオロジー特性の計測

#### 3.1 定常的な磁気レオロジー特性

MR流体の磁気レオロジー特性の計測に際しては、円盤外周面で液体面が同一になるように、円盤間の容積と同量のMR流体を計測して2円盤間にMR流体を充填している。また、せん断応力 $\tau$ は、測定部の円盤全面に印加磁場によって変化する一定のせん断応力が働くとして次式によって求めた。

$$\tau = \frac{12}{\pi d^3} \cdot T \quad (1)$$

ここで、 $d$ : 円盤直径、 $T$ : 計測トルクである。

平行2円盤間に市販のMR流体（MRF-132DG）を充填しせん断速度 $\dot{\gamma}=100\text{s}^{-1}$ 一定で回転せん断を加えている状態で、ステップ状に磁場を印加した際のせん断応力の時間的な変化を図6に示す。いずれの印加磁場でも、計測したせん断応力はステップ状に上昇し時間的に大きな変動はなくほぼ一定の値を維持しており、安定したせん断応力が計測可能なことがわかる。また、図7には、種々の一定磁場下におけるMR流体のせん断速度に対するせん断応力の変化特性（流動曲線）を示す。比較的高い磁場で低いせん断速度域を除いて、すべての印加磁束密度においてせん断応力はせん断速度の変化に対してほぼ一定の値を示しており、印加磁束密度が大きくなるにつれてせん断速度 $\dot{\gamma}=0\text{s}^{-1}$ での降伏せん断応力（流動曲線と縦軸との交点でのせん断応力値）が増大する。MR流体特有の特徴を示していることがわかる。図8には、せん断速度 $\dot{\gamma}=100\text{s}^{-1}$ 一定で印加磁束密度 $B$ を $1.0\text{T}$ 程度まで変化した際のMR流体のせん断

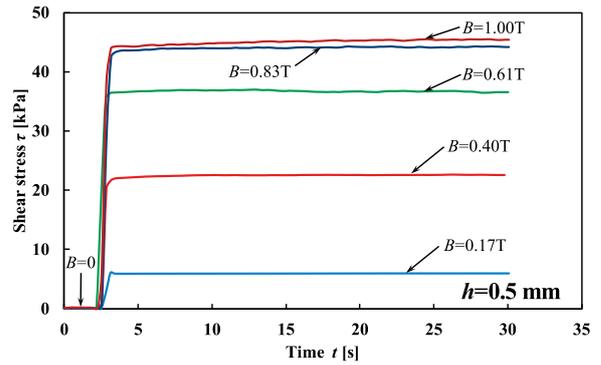


図6 円盤間のMR流体にステップ状に磁場を印加した際のせん断応力 $\tau$ の時間的な変化（せん断速度 $\dot{\gamma}=100\text{s}^{-1}$ ）

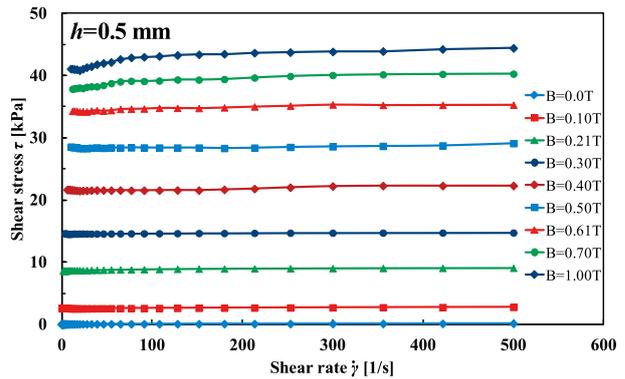


図7 一定磁場印加下におけるMR流体のせん断応力 $\tau$ のせん断速度 $\dot{\gamma}$ に対する変化（磁束密度 $B$ 変化）

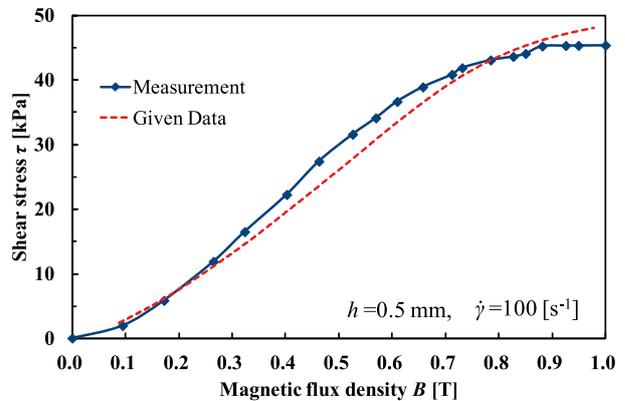


図8 印加磁束密度 $B$ に対するMR流体のせん断応力 $\tau$ の変化

応力の変化を示す。せん断応力は、印加磁束密度 $B$ の増大に伴いほぼ比例して大きくなるが、 $B=0.8\text{T}$ 程度から飽和する傾向がみられ、 $B=1.0\text{T}$ で $\tau=45\text{kPa}$ 程度に達している。MRF-132DGのMR流体に対して販売元から公表されている $B-\tau$ 曲線（図中の破線）の変化とほぼ一致している。

#### 3.2 MR効果の動的粘弾性特性

使用している高精度レオメータの本体には、測定部の上側円盤に往復振動を与えて動的な粘弾性特性を計測できる機能が備わっている。その機能を使って、市販MR流体の動的粘弾性特性を計測した。その一例として、図9には、印加磁束密度 $B=0.2\text{T}$ 、

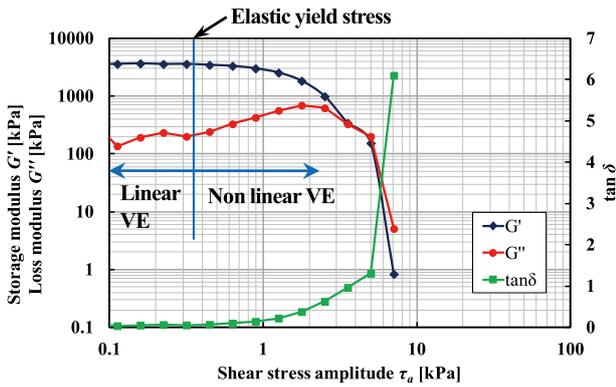


図9 MR流体のせん断応力振幅に対する動的粘弾性特性の変化 ( $h=1.0\text{mm}$ ,  $B=0.2\text{T}$ ,  $f=1\text{Hz}$ )

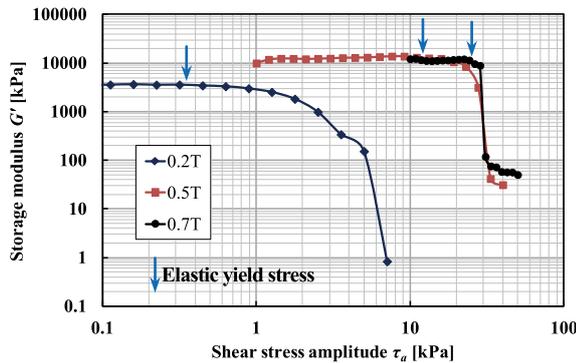


図10 MR流体のせん断応力振幅に対する貯蔵弾性率 $G'$ の変化の印加磁束密度による違い ( $h=1.0\text{mm}$ ,  $f=1\text{Hz}$ )

振動周波数 $f=1.0\text{Hz}$ の際のMR流体の貯蔵弾性率 $G'$ 、損失弾性率 $G''$ 及び損失正接 $\tan\delta$ のせん断応力振幅 $\tau_a$ に対する変化を示す。せん断応力振幅 $\tau_a$ の増大に伴い、 $G'$ が徐々に低下し $G''$ が徐々に増加しそして $\tan\delta$ が上昇し始める $\tau_a=0.35\text{kPa}$ を弾性降伏せん断応力として定義でき、その左側 ( $\tau_a<0.35\text{kPa}$ ) では弾性的特性が支配的な線形粘弾性特性を呈する。 $\tau_a>0.35\text{kPa}$ の範囲では、 $\tau_a$ が大きくなるにつれて粘性的特性が顕著になり、 $\tau_a=5\text{kPa}$ 程度付近で $G'$ 及び $G''$ が急激に低下して完全な降伏現象が加わり、それ以上の $\tau_a$ では降伏現象が明確に現れる非線形粘弾性特性が支配的になる。 $\tau_a<0.35\text{kPa}$ の線形粘弾性域では、貯蔵弾性率 $G'$ がほぼ一定値を示すことが特徴的である。また、図10に示すように、印加磁束密度 $B$ が大きくなるほど弾性降伏せん断応力は増大するが、その値は図7に示す定常的な磁気レオロジー特性から判断できる降伏せん断応力値（流動曲線と縦軸との交点）よりかなり低い値を示す。むしろこの降伏せん断応力値は、 $G'$ 及び $G''$ が急激に低下して完全な降伏現象が加わる際のせん断応力振幅値に近い値を示している。例えば、 $B=0.5\text{T}$ では、図10では $G'$ 及び $G''$ が急激に低下するせん断応力振

幅値は約 $20\text{kPa}$ と計測されており、図7では降伏せん断応力値は約 $28\text{kPa}$ 程度と読み取れる。

以上のように、開発した磁場印加装置をもつ回転平行2円盤レオメータは、MR流体のように磁場に応答してレオロジー特性が変化する機能性流体の定常的及び動的な磁気レオロジー特性を精度よく計測できることが確認できた。

## 4. おわりに

$B=1.0\text{T}$ 程度の比較的高い磁場を回転平行2円盤からなる測定部に効果的に印加可能な磁場印加装置を磁場解析を援用して設計・製作し、ほぼ設計どおり、電磁石への印加電流 $I=0.5\text{A}$ で約 $1.0\text{T}$ の磁束密度を円盤間のMR流体に印加できることを確認した。また、開発した測定部と磁場印加装置を高精度レオメータに装着して、MR流体の誘起せん断応力を測定し、高磁場下までの基本的な定常的及び動的な磁気レオロジー特性を測定可能なことを確認できた。開発した磁場印加型レオメータは市販の高精度レオメータ<sup>4)</sup>のオプション品 (MR-101N) として製品化され販売されており、新規MR流体の創製研究等で実際に活用されている<sup>5)-8)</sup>。

## 参考文献

- 1) Nakano, M., Yamamoto, H., Jolly, M.R.: Dynamic Viscoelasticity of A Magnetorheological Fluid in Oscillatory Slit Flow, Int. J. of Modern Physics B, Vol. 13, No. 14, 15&16, p. 2068-2076 (1999)
- 2) 中野政身：MR流体アクチュエータ，未来型アクチュエータ材料・デバイス—その基礎技術と研究展望—，シーエムシー，p. 257-268 (2006)
- 3) 中野政身，戸塚厚，矢崎利昭：MR流体測定用磁場印加型平行円盤レオメータに関する研究開発，JFPS平成22年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集，p. 118-120 (2010)
- 4) [http://eko.co.jp/materials/mat\\_products/cat01/0343/0359](http://eko.co.jp/materials/mat_products/cat01/0343/0359)
- 5) Noma, j., et al.: Magnetorheology of colloidal dispersion containing Fe nanoparticles synthesized by the arcplasma method, J. of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 322, p. 1868-1871 (2010)
- 6) 中野政身，他5名：高粘度MR流体のMR効果と分散安定性，日本レオロジー学会第61回レオロジー討論会講演要旨集，講演No.3C01，p. 360-361 (2013)
- 7) 中野政身，他4名：ナノ・マイクロ粒子混合系MR流体のMR効果向上と粒子カラム挙動，JSME2015年度年次大会講演会CD-ROM講演論文集，Paper No.S0520304，p. 1-5 (2015)
- 8) 中野政身，他4名：ドライMR流体の流動性向上とMR効果，JFPS平成28年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集，p. 27-29 (2016)

(原稿受付：2017年1月25日)

## 解説

## 材質認識システムを備えた人工指

## 著者紹介



おやま おさむ  
小山 紀

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

1978年より明治大学工学部（現・理工学部）  
助手を経て2000年同大学理工学部教授，現在に  
至る。日本フルードパワーシステム学会員

## 1. 緒言

本稿は空気圧システムの新たな分野のセンシングへの応用を試みるもので，本誌の特集趣旨には適合しない気がする。しかし，著者はこのようなセンシングに空気圧が適していると確信しており，批判を恐れずに執筆させていただく。空気圧操作は何よりも柔軟なハンドリングを可能とする特徴がある，著者らはそれを実証するため空気圧駆動ロボット指を使い，台の上にある重ねた複数の紙の一枚だけを分離し把持することが可能であることを示した<sup>1)</sup>。

一方，ヒトの指が物に触れたときの触覚は，硬さ，弾力性，表面粗さ，粘弾性，温度変化，湿度などであるが，触覚の起因となる物理的な要素の特定が難しく，ヒトと同等な性能を持つ材質識別センサは登場していない。特定の感覚に着目したものとして，弾性・粘性変化を用いるもの<sup>2)</sup>や，熱伝導率を用いるもの<sup>3)</sup>，表面粗さを用いるもの<sup>4)</sup>などがある。また，触覚センサ自体の開発に関しては，歪ゲージを用いるもの<sup>5)</sup>や有機トランジスタを用いるもの<sup>6)</sup>，光を用いるもの<sup>7)</sup>などが報告されている。

## 2. 空気圧材質認識人工指

指に存在する受容器は解剖学的に明らかになっており，メルケル細胞やルフィニ終末など個々の受容器の働きもわかっている。著者らは被験者により材質認識に関する官能試験を実施し，種々の材質に対しての触覚アンケートを意味微分法（SD法）により数値化した。多変数データ解析手法により因子分析すると，圧覚，表面感触および温感に関する因子

がほぼ100%の寄与率を持っていた。圧覚因子は指が受ける力，表面感触因子は接触すべりによる振動，そして温感因子は接触後の指先温度変化と仮定し，それぞれ「硬さ」，「表面状態」そして「温度」パラメータと定義する。指受容器の代替としてこれらのパラメータが計測できるよう，歪ゲージと熱電対を内蔵させた図1に示す人工指を作成した。振動は歪ゲージの信号を数値微分して求める。指の中心には骨となるアルミパイプがあり，骨周囲には発熱体がおかれている。センサは外殻を覆う手術用ゴム手袋内側に置かれ，信号線はアルミパイプを経由して指外部に引き出される。指全体はヒト指の硬さに近いプリンゲル樹脂でできている。

人工指は図2に示すように4本の空気圧シリンダを使って試料を上から押さえたままなぞり動作をする。図中②および③はそれぞれ指を水平，垂直方向に動かし，④と⑤は指先が識別対象試料に接触する角度を調整するものである。角度調整部分は図3のように腱駆動リンク機構になっている。

ヒト指の受容器個々の働きはわかっているが，これらの相互作用は明確ではない。各パラメータ信号から正しく材質が識別できるようニューラルネットワーク（NN）を用い，教示によりNNを学習させる。したがって試料材質ごとの「硬さ」「表面状態」「温度」パラメータ数値がNN入力となる。このときセンサのアナログ信号を直接NN入力として使うこともできる<sup>8)</sup>が，データ量を抑制するためヒト受容器の膜電位発火現象を組み込む。図4に示すように神経細胞である受容器への刺激により細胞内に電荷が発生し，膜電位蓄積がある閾値を超えたとき，瞬間

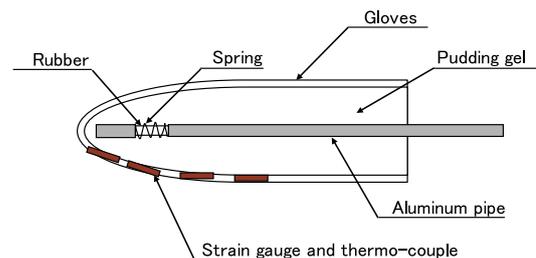


図1 人工指の構造

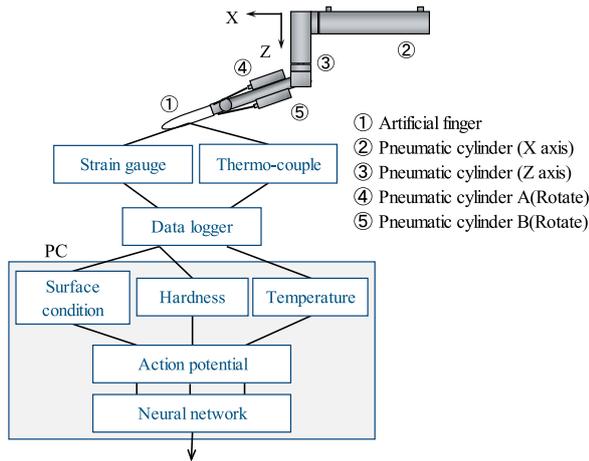


図2 人工指による材質認識システム

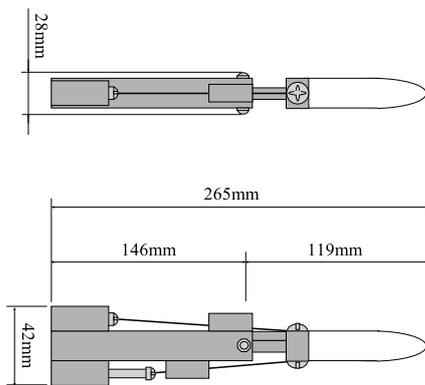


図3 指先屈曲駆動機構

的に大きな発火電位が生じ脳へと伝達される。脳での処理は発火頻度が利用されている<sup>9)</sup>。この伝達方法は刺激を受けてから脳が認知するまでに遅れが生じる欠点があるが、ある時刻における個々の受容器からの情報は、発火しているか否かの2値情報であるため、アナログ的な強度変化を持つ時系列信号に比較し信号情報密度が小さく処理負担が軽くなる利点がある。

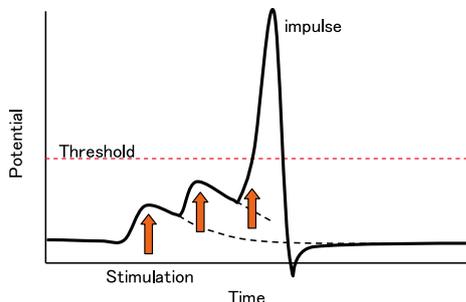


図4 受容器発火のモデル

神経細胞の膜電位変化にはHodgkin-Huxleyモデル<sup>10)</sup>がよく使われるが、 $\text{Na}^+$ チャンネルや $\text{K}^+$ チャンネルの開閉を含んでおり複雑である。より簡易的なモデルとして図5の電気的等価回路を用いた。これは先のモデルから各イオンチャンネルを除いたも

のである。ここで膜電位を $V$ 、無刺激時の膜初期電位 $E_L$ 、抵抗値を $g_L$ 、膜が持つ等価コンデンサ容量を $C$ とする。刺激により細胞に流れ込む電荷（電流）を $I$ とし、 $I_L$ にはセンサからの信号電流をそのまま与える。 $V$ を適当な閾値を設けて、ある時刻に1あるいは0の電位に変換して発火現象とする。なお受容器と等価モデルでは電荷発生原理が異なるため、 $g_L$ や $C$ の値は生体を参考とせず試行により適当な値を使った。

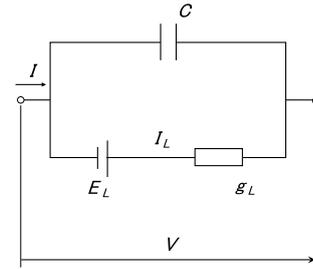


図5 受容器の膜電位モデル

### 3. 指動作の実験手順

各パラメータを測定するための指動作は、「押さえつける」と「なぞる」である。実験手順は以下のようになる。

(1)人工指を初期位置に置く。(2)空気圧シリンダに一定空気圧を与え、被験試料を押さえつける動作を5秒間行う。このときの指の押さえつけ力は20Nである。(3)指は押さえつけたまま空気圧シリンダにより図2の右方向になぞる動作をする。なぞる速度はヒトの動きより少し速い300mm/sとしている。

認識する試料として日常生活で触れることが多い材料を選び、その中で質感の特性に幅を持たせた表1に示す20種を使用した。図6に人工指で試料を押さえつけ、なぞったときの膜電位波形（連続波形）と発火波形（棒状波形）の代表例を示している。左上が「表面状態」、右が「硬さ」そして下が「温度」パラメータを表す。波形はどの試料でも同様になるが、膜電位の振幅が異なり、したがって発火の頻度や様子が違う。

膜電位発火状況をNNの入力として与えるとき、時系列2次元データとして使うこともできるが、NNへの教示データを減らして学習の収束速度を上げるためスカラー代表値を使う。すなわち、それぞれのパラメータにおける発火総数、あるいは発火周期をNNの入力として使う。

NNの概要を図7に示す。それぞれ各パラメータの代表値が与えられる3つの入力と70素子中間層、そして20種の試料スコア（その試料が真なら1、

偽なら零，実際はその中間) を出力とする20出力構造をしている．すなわちNNは3つのパラメータを受け取ると試料名を直接出力することができる．学習方法はバックプロパゲーションを使用する．学習時の教示信号は入力パラメータに対応する試料(20種)の出力スコア(正しい試料では値を1，他は零)である．NNに学習をおこなわせるとき，毎回指の動作をさせると時間がかかるので，各試料についてあらかじめ20回の指動作をさせておき，得られた各パラメータ代表値のそれぞれ平均値を使っている．学習誤差率が0.01より小さくなることを学習収束条件としたが，収束するのに要した時間は10秒と短時間であった．

表1 認識に用いた試料

|     |      |         |         |
|-----|------|---------|---------|
| タイル | レンガ  | ポリスチレン  | アルミニウム  |
| 銅   | ボール紙 | アクリル(滑) | アクリル(粗) |
| 手袋皮 | オイル皮 | ゴム(硬質)  | ゴム(軟質)  |
| 麻布  | 杉材   | 檜材      | コルク材    |
| 綿   | 人工芝  | スポンジ    | カーペット   |

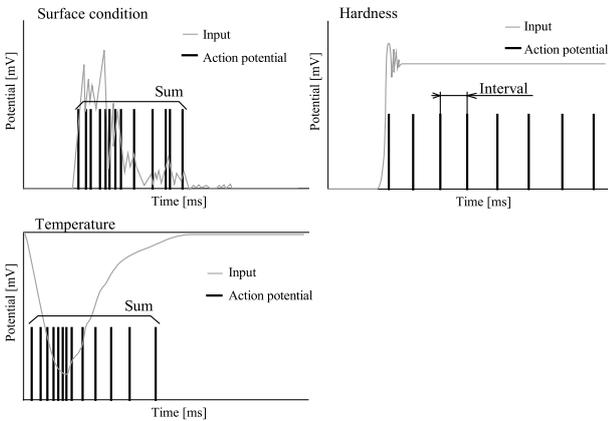


図6 人工指の膜電位波形と発火

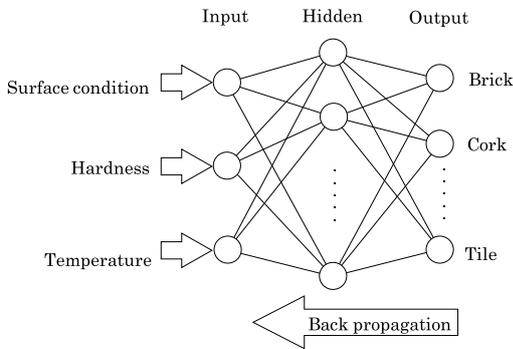


図7 人工指のニューラルネットワーク

学習が完了した認識システムにおいて，試料に対して人工指を動作させてどの程度の正答率があるか

を調べる．ばらつきを考慮して10回の指動作における出力の平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ より信頼区間を算出し，NN入力パラメータ代表値として信頼区間の限界値 $\mu-\sigma$ と $\mu+\sigma$ を与える．パラメータは3つであるので1つの試料について総組み合わせは8通りとなる．この8通りのばらつきにおける限界値をあたえたとき，何回正しい試料名を当てられたかをパーセンテージで示したものを正答率とする．その結果，レンガでは100%であり特徴のある試料は同程度の正答率を得た．逆に似通った特徴を持つ試料では正答率がやや下がる．もっとも悪かったのは杉と檜木で，それぞれ50%，25%であった．似通った材質に対しヒトでも間違った判定をすることがあるから妥当ともいえるが，複数回試行を行えば正答率は上がる．

#### 4. 結 言

空気圧アクチュエータを材質認識システムに用いたときのメリットは，現状では他の形式アクチュエータとの比較がないので明言できない．しかし本稿で示したような簡便な機構でも，実用的なレベルの材質認識ができることで有用さが示されていると思う．指の押しつけやなぞり動作において空気圧が柔軟に作用している．電動アクチュエータでは生じるかもしれない，駆動ギアや電極ブラシなどの接触面変化から受ける駆動力変動を心配する必要がない．今回用いた膜電位発火モデルは，原理的にはアナログ信号による周波数変調の一種といえる．しかし，NNの入力要素として用いたとき，アナログデータを直接用いた場合<sup>8)</sup>に比較し飛躍的に学習速度が向上した．回路中の $g_L$ ， $C$ および閾値の設定が有効なフィルタ機能を与えたためと考えている．なお，紙面の都合詳細な内容については文献を参照されたい<sup>11)</sup>．

#### 参考文献

- 1) O. OYAMA : PAPER HANDLING ROBOT USING PNEUMATIC ACTUATORS, Proceedings of the Third JHPS International Symposium on Fluid Power 96, 109/114 (1996)
- 2) 元尾，新井，福田：構造の弾性・粘性変化を利用した圧電振動型触覚センサ，日本ロボット学会誌，24-3，408/415 (2006)
- 3) 井野，泉，高橋，伊福：物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質触覚ディスプレイ方式の提案—感覚フィードバック型ハンドのための基礎的研究，計測自動制御学会論文集，30-3，345/351 (1994)
- 4) 田中，佐野，藤本，田中，長南：人間の触覚と調和する触覚センサおよびデバイスの開発，電子情報通信学会技術研究報告，HIP，ヒューマン情報処理，107-332，97/102 (2007)
- 5) 木村，内山，前野：把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発(十字状ひずみゲージ配列を有する

球面状センサによる任意方向把持力制御), 日本機械学会論文集, C編, 70-689, 83/88 (2004)

6) 染谷: 有機トランジスタを利用したフレキシブル触覚センサとその応用, トライボロジスト, 51-10, 725/730 (2006)

7) 大岡, 小林, 高田, 三矢: 半球形光学式三輪触覚センサの開発, 日本機械学会論文集, C編, 74-742, 1477/1484 (2008)

8) 吉満, 小山: 空気圧ロボットのための触覚感性を持った人工指の研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 39-4, 74/80 (2008)

9) 大地: 生理学テキスト, 23/44, 文光堂 (2007)

10) A.L. Hodgkin, A.F. Huxley: A quantitative description of membrane currents and its application to conduction and excitation in nerve, Journal of Physiology, 117-4, 500/544 (1952)

11) 萩原, 大下, 吉満, 小山: 空気圧シリンダを用いた人工指による材質認識システムの研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 41-4, 67/73 (2010)

(原稿受付: 2017年1月10日)

会 告

書籍案内 オーム社刊  
「油圧・空気圧回路～書き方&設計の基礎教本」

この度、一般社団法人 日本フルードパワー工業会では、当会の編集による油圧・空気圧回路に関する実務書をオーム社より発行しましたのでご紹介します。

内容は、右図表紙の副題に示されている通り、回路の書き方と設計の教本といえるものです。フルードパワーシステムを構成するための、図記号、関連企画、機器の構造・機能などの知識、基本回路から実際の装置に適用された応用回路まで、幅広く網羅されています。設計に際して座右に置ける書であり、同時に、これから油圧・空気圧を学ぼうとする方々から中堅技術者、さらに既にご使用いただいているユーザの皆様方まで活用できる基礎教本でもあります。

著者は、会員企業の第一線ベテラン技術者である、東京計器(株)渋谷文昭氏とCKD(株)増尾秀三氏です。冒頭には、著者による「各編の校正&学習ポイント」というガイドもあり、読みすすめやすい工夫が盛り込まれています。特に、

- ① 全編を通してわかりやすい図表がふんだんに使われている
- ② 回路や図記号のていねいな解説がされている
- ③ 側注部にキーワードが解説されている

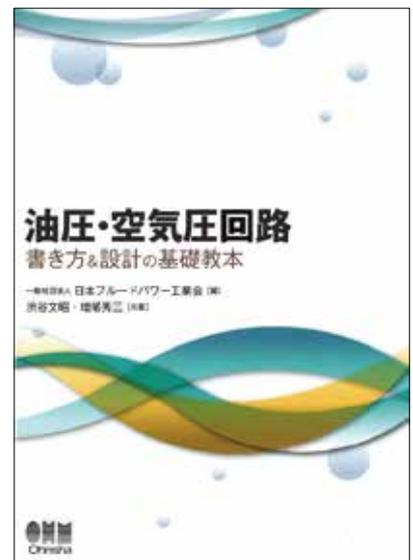
などの特長があり、大変見やすく、読みやすく感じられる紙面構成になっています。是非、お二人の力作を手にとってみてください。

購入に際しては、当会で注文書を兼ねたチラシを用意して一括注文するなどの便を図りますので、ご希望の方は下記にお問い合わせをお願いします。

記

購入方法: JFPA会員企業、同「フルードパワー」協賛会員の皆様、JFPS会員の皆様には、購入の際の便を図ります。ご希望の方は、下記までお問い合わせをお願いします。

問合せ先: 一般社団法人 日本フルードパワー工業会 編集事務局担当 大橋 彰  
〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-3 機械振興会館311号  
TEL: (03) 3433-5392 FAX: (03) 3434-3354 E-mail: ak.ohashi@jfpa.biz



## 会議報告

2016年度日本機械学会年次大会における  
フルードパワー研究の動向

## 著者紹介



たなか ゆたか  
田中 豊

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

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

## 1. はじめに

2016年度日本機械学会年次大会は2016年9月11日（日）～14日（水）まで九州大学伊都キャンパスで開催された。大会のテーマは「新たな価値の創造を担う機械工学」で，会期中，1,360件の学術講演発表と特別講演や市民フォーラム，特別企画など多くの行事が行われた。今回の通常講演から，大会会場のみで知ることができる最新の生の研究成果の発表と議論を想定し，前刷り1頁の原稿でも投稿が可能となり，企業からの発表も数多くみられた。

総合プログラムや講演前刷りDVDよりフルードパワーに関連した18件の講演が確認された。本稿ではこれらの講演発表の概要を紹介する。

## 2. 研究発表の動向

先端技術フォーラム「人と関わるアクチュエータ・その展開」の中でつぎの2件の発表があった。鈴森は，外径2～5mmと従来より細いマッキベン型人工筋を開発・実用化し，高い出力密度と軽くてしなやかな特徴を活かした図1に示すパワーアシスト



図1 細径人工筋を用いたパワーアシストスーツ<sup>1)</sup>

スーツや筋骨格ロボットを紹介している<sup>1)</sup>。また佐々木は，膝・腰関節用パワーアシストウェアと小形空気圧供給システムについて紹介している<sup>2)</sup>。

油圧・空気圧システムの安全制御の観点から次の2件の講演発表が確認された。中村らは，空気圧駆動システムにおける，安全（確認）の原理に基づいたインタロックシステムとリスクベースの安全と実行ベースの安全の連携による安全制御について検討している<sup>3)</sup>。また古杉らは，油圧駆動システムにおいて故障により圧力変動を発生させる各種コンポーネントの危険側故障の発生プロセスを故障モード解析し，その結果を踏まえて油圧駆動システムの安全確認型インタロックシステムを検討している<sup>4)</sup>。

武田らは，空気圧浮上による非接触搬送装置の動特性を検討することを目的に，図2に示す実験装置を用いて空気圧供給口の形状や配置が系の安定性におよぼす影響と励振メカニズムを検討している<sup>5)</sup>。

松岡らは，分散溶液に菜種エステルを用いて，粒子の分離が起きにくく，分散安定性に優れたMR流体による小形ダンパを試作し，その抵抗力特性を実験的に検討している<sup>6)</sup>。

後藤らは，水素貯蔵合金にパラジウム粉末を用いたシリンダ型アクチュエータに水素を導入・排気した際の変形挙動について報告している<sup>7)</sup>。

向井は，大型風力発電用に図3に示す機構により電磁弁を用いずに可変容量機構を有するラジアルピストンポンプを考案し，ピストンを押し込むカムの位相差を調整することで容量制御を実現している<sup>8)</sup>。

目黒らは，軽量で患部を直接包みこめる空気圧ソ

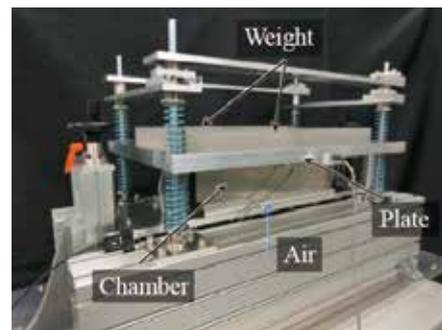


図2 空気圧浮上搬送装置の特性評価システム<sup>5)</sup>

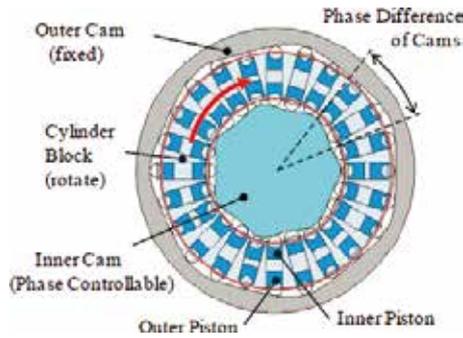


図3 可変容量ラジアルピストンポンプ<sup>8)</sup>

フトアクチュエータを駆動源とした手指関節のリハビリ装置を開発し、そのリハビリ方法と関節可動域に関する評価実験結果について報告している<sup>9)</sup>。

谷瀬らは、ミミズの蠕動運動を模倣したダクト内を清掃・移動可能なロボットを試作し、水平管および垂直管に対する走行実験の結果について報告している<sup>10)</sup>。また長山らは、図4に示す軸方向繊維強化型人工筋肉とMRブレーキを併用し、着地を考慮した二脚跳躍ロボットを試作して跳躍動作の基本となる屈伸動作について検討している<sup>11)</sup>。

OS次世代アクチュエータではフルードパワーに関連した7件の発表があった。坂間らは、市販の油圧式ピストンモータを種類別にトルクや出力密度、トルク慣性比で分類し、その特性の比較調査結果を報告している<sup>12)</sup>。また風間は、動力伝達要素としての流体の配管や電力配線に注目し、その特性や違いを伝達要素の動力密度の観点から論じている<sup>13)</sup>。

真田らは、DDVC方式の燃料噴射装置を大形船舶用ディーゼルエンジンポンプに適用したシステムに対して、船体の運動モデルによるシミュレーションで速度制御の妥当性を検討している<sup>14)</sup>。鈴木は、ロボットアームの関節部に使用することを想定して開発したシングルベーン型水圧揺動モータをロータリー型水圧サーボ弁で駆動した角度制御の試作実験結果を報告している<sup>15)</sup>。川村らは、高速電磁弁のPWM制御によりメータアウト回路で空気圧シリンダの速度制御方式を行い、その有用性を確認している<sup>16)</sup>。

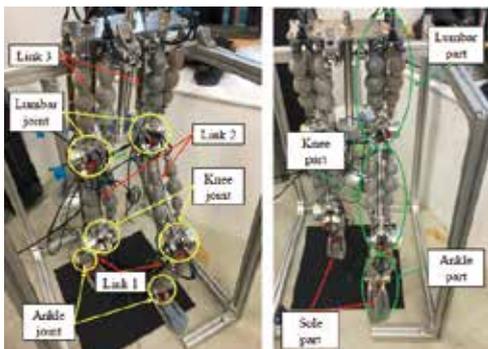


図4 二脚跳躍ロボット<sup>11)</sup>

三好らは、高い出力密度を持つ交流圧力源を備えた均一系ERFを作動流体とする多自由度屈曲マイクロアクチュエータシステムの試作とその動作結果について報告している<sup>17)</sup>。また村越らは、磁場解析結果を基にダンパのオリフィス部の流路形状を磁場印加状況に合わせて設計したMR流体ダンパの試作と評価試験の結果について報告している<sup>18)</sup>。

### 3. おわりに

九州大学で行われた2016年度日本機械学会年次大会におけるフルードパワー研究の動向について油圧・水圧・空気圧・機能性流体に関する18件の講演発表を紹介した。2017年度の年次大会は埼玉大学で2017年9月3日～6日まで開催される予定である。

#### 参考文献

- 1) 鈴森, 細径人工筋の実用化, 日本機械学会2016年度年次大会講演論文集, No.16-1 (誌名は以下すべて同じ), F113002, 2016.
- 2) 佐々木, 空気圧ソフトアクチュエータを使ったパワーアシストウェアとその周辺技術, F113003, 2016.
- 3) 中村他, 空気圧駆動システムの圧力制御における安全制御に関する論理的研究, G1700202, 2016.
- 4) 古杉他, 油圧駆動システムのインタロックの検討, G1700202, 2016.
- 5) 武田他, 空気圧で浮上する平板の動的安定性, J0910201, 2016.
- 6) 松岡他, 菜種エステルを用いたMR流体ダンパ, J1010405, 2016.
- 7) 後藤他, 水素貯蔵合金を用いた水素駆動アクチュエータ, J1110204, 2016.
- 8) 向井, 容量可変ラジアルピストンポンプの基礎検討 (電磁弁を用いないラジアルピストンポンプの可変容量機構), S1120203, 2016.
- 9) 目黒他, 空気圧ソフトアクチュエータを用いたハンドリハビリ装置の検討, S1170504, 2016.
- 10) 谷瀬他, ダクト清掃用蠕動運動型ロボットの走行性能の向上, S1510105, 2016.
- 11) 長山他, 空気圧ゴム人工筋肉と磁気粘性流体ブレーキを用いた二脚跳躍ロボットの開発, S1510201, 2016.
- 12) 坂間, 田中, 油圧式ピストンモータの性能比較に関する調査研究, J1110101, 2016.
- 13) 風間, 油圧・空気圧・電動駆動システムにおける動力伝達要素のパワー密度に関する一考察, J1110102, 2016.
- 14) 真田, 宮寄, DDVC燃料噴射装置を用いた船舶の速度制御, J1110103, 2016.
- 15) 鈴木, 水圧用ロータリー型サーボ弁による水圧揺動モータの角度制御, J1110104, 2016.
- 16) 川村他, 高速電磁弁を用いた空気圧シリンダの速度制御に関する研究, J1110105, 2016.
- 17) 三好他, MEMS技術を応用したマイクロ交流圧力源搭載形2自由度ERアクチュエータシステムに関する研究, J1110106, 2016.
- 18) 村越他, 非直線型オリフィスを持つMR流体ダンパの開発, J1110107, 2016.

(原稿受付：2017年1月9日)

## 会議報告

Bath/ASME Fluid Power and Motion Control 2016  
参加記

## 著者紹介

いち やなぎ たか よし  
一 柳 隆 義防衛大学校機械システム工学科  
〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20  
E-mail: ichiyana@nda.ac.jp2001年神奈川県立大学大学院博士後期課程修了。  
同年防衛大学校機械システム工学科助手。2014  
年同大学校准教授。現在に至る。流体伝播振動、  
流体計測の研究に従事。日本フルードパワーシ  
ステム学会、日本機械学会、計測自動制御学会  
などの会員。博士（工学）。

## 1. はじめに

Bath/ASME Fluid Power and Motion Control 2016が2016年9月7日から7日までイギリスのバース大学にて開催された。バース大学とアメリカ機械学会（American Society of Mechanical Engineers）の共催で、隔年ごとに会場を移して開催されるようになってから今回で5回目のバース大学開催となる。ただし、1988年にBath International Fluid Power Workshopの名前で年次開催の国際会議としてスタートし、1998年に会議の名称をBath Workshop on Power Transmission and Motion Controlに変更して2007年まで続けられた時代を含めると今回が25回目の開催であり、長い歴史を重ねた国際会議となっている。以前の会議名に「Workshop」と記されているように、本会議では平行でセッションを実施せずに、参加者全員が同じ部屋に集まって情報交換をしやすい環境で研究発表が行われるのが特徴である。主催者からの発表によると、本年度は16の国から参加者が集まり、計50件の研究発表が行われた。なお、日本からも大学および油圧機器関連メーカーの研究者など計12名の参加があった。

## 2. 会議に参加して

前述したとおり、本会議では一会場のみを使用し、3日間で計11のテクニカルセッションに分けられて講演（図1）が行われた。以下に、セッション名と発表件数を示す。

・Pumps and Motors：油圧5件

- ・Hydraulic Component and System Efficiency：油圧5件
- ・Noise and Vibration：油圧5件
- ・Motion Control：油圧5件
- ・Hydraulic Component and System Modelling：油圧4件、空圧1件
- ・Digital Hydraulics：油圧5件
- ・Robotics and Prosthetics：油圧1件、空圧1件
- ・Sealing and Tribology：油圧2件、水圧1件
- ・CFD Modelling of Hydraulic Components：油圧5件
- ・Pneumatics：空圧5件
- ・Energy Generation and Recovery：油圧4件

各セッションにおける講演題目や著者について興味のある方はFPMC2016のホームページを参照されたい。

テクニカルセッションの他にも、2日目の午後にはバース大学のエッジ教授（Prof. K.A. Edge）の名誉博士号の授与式とミネソタ大学のステルソン教授（Prof. K. Stelson）のKoskiメダル記念講演が行われた。ご存知のように、エッジ教授は80年代から長年にわたってオーガナイザーとして本会議に携わってきており、近年はバース大学のDeputy Vice Chancellor（副学長に相当）としてもご活躍されてきた方である。今年（2016年）は折しもバース大学の設立50周年記念に重なることから、その記念行事の一環としてエッジ教授に所縁のある本会議に



図1 セッションの様子

て授与式が執り行われたとのことである(図2)。なお、授与式にはエッジ教授と共にバース大学のフルードパワー研究を率いてこられたバロウズ教授(Prof. C.R. Burrows)も奥様と共に出席されており元氣な姿を拝見できた。



図2 Edge教授の名誉博士号授与式

本会議はアメリカとイギリスの共催イベントであり、毎年ASMEのKoskiメダル(The Robert E. Koski Medal)とIMEchEのBramahメダル(The Joseph Bramah Medal)の授与式も行われている。2007年に設立されて10回目に当たる2016年のKoskiメダルはステルソン教授が受賞され、「Is there a future for fluid power?」という題目で記念講演を行い活発な議論がなされた(図3)。



図3 Stelson教授によるKoskiメダル記念講演

Bramahメダルはイギリスで1968年に設立された40年以上の歴史を有する賞であり、本年はエジンバラ大学(およびアルテミス・インテリジェント・パワー社)のランペン教授(Prof. W. Rampen)が受賞した(図4)。ランペン教授の功績は先進的なデ

ジタル制御による油圧技術(Digital Displacement Technology)の開発であり、日本の福島沖洋上風力発電の実験で使用されている風車のトランスミッション(ポンプ・モータ)も適用例の一つである。



図4 Rampen教授のBramahメダル授与

### 3. おわりに

バース市街は世界遺産に登録されているように、街並みが美しく観光地としても人気のある街である。また、今年のバンケット会場となったバース近郊のキャスルケーム(コッツウォルズ地方)も典型的なイギリスの田舎町を堪能できる街で、会場の洋館も14世紀に建てられた歴史の感じられる素晴らしい会場であった(図5)。今年は、3日間とも晴天に恵まれ会議中はオンオフ共に充実した時間を過ごすことができた。次回のバース開催は隔年開催ということで2018年を予定している。



図5 バンケット会場(Monor House at Castle Combe)

(原稿受付: 2017年1月12日)

## 会議報告

## 第34回日本ロボット学会学術講演会における フルードパワー技術研究動向

## 著者紹介



さ さ き だい すけ  
佐々木 大 輔

香川大学工学部  
〒761-0396 香川県高松市林町2217-20  
E-mail : daisuke@eng.kagawa-u.ac.jp

2003年岡山大学大学院博士後期課程中退、同大学助手、助教を経て、2015年香川大学工学部講師、2016年同准教授。現在に至る。空気圧ソフトウェアを使ったウェアラブルロボットの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、IEEE、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。博士（工学）。



図2 懇親会の様子

### 1. はじめに

第34回日本ロボット学会学術講演会が2016年9月7日（水）から9日（金）まで山形大学小白川キャンパス（山形市小白川町1丁目4番12号）にて開催された。

本講演会は、ロボット関連の講演会としては国内有数の規模であり3日間の会期で、参加者数は1108名であった。9月8日（木）には、山形テルサ（山形市双葉町1丁目2番3号）にて特別講演が開かれ東北大学大学院工学研究科 教授 吉田和哉先生による「宇宙ロボティクス：理論から実践へ」と題した講演があった（図1）。その後開催された懇親会では、ホテルメトロポリタン山形（山形市香澄町1丁目1番1号）の会場が約480名の参加者で満員となる大変な盛況ぶりであった（図2）。機器・カタログ・書籍展示では36社の出展があり、参加者



図1 特別講演の様子

### 2. フルードパワー技術に関連する発表の紹介

#### 2.1 圧電振動子駆動微粒子励振型制御弁<sup>1)</sup>

ロボットのような多自由度機構の駆動に用いる小型の制御弁として開発した圧電振動子駆動による微粒子励振型制御弁（図3）について報告されている。

従来研究において水や油を作動流体とした場合の流量制御が可能であることが確認されており、本発表では制御弁を2つ用い、三方弁の機能を果たす構成で水圧アクチュエータを駆動することを試みた内容についての報告があった。

使用した制御弁は、圧電振動子と一体となったオリフィス板により微粒子を励振し複数孔の開閉を実現している。制御弁は直径10mm、高さ9.0mm、質量4.6gである。

作動流体（水道水）の供給圧、圧電振動子への印加電圧の値を変化させた時のアクチュエータ駆動特

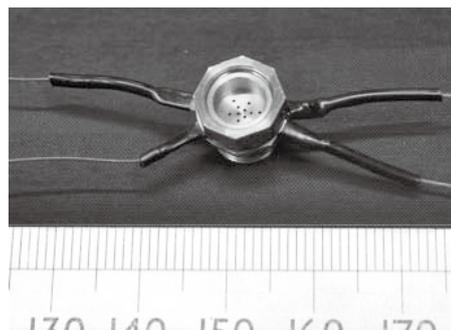


図3 圧電振動子駆動微粒子励振型制御弁の外観

性の評価を行っている。アクチュエータは、ワイヤを引っ張る構造のシリンダ状アクチュエータが使用されている。供給圧が100-400kPa（ゲージ圧）の範囲で水の流量制御が可能であることは、過去の研究で確認されており、アクチュエータを使用した場合においても印加電圧によるアクチュエータの速度制御は可能であると報告されている。一体となった三方弁の製作が今後の予定と報告されており、流体アクチュエータ駆動システムの小型化が期待できる。

## 2.2 ジャミング転移による可変剛性機能を有する細径人工筋集積柔軟マニピュレータ<sup>2)</sup>

細径McKibben型人工筋を集積したマニピュレータの開発が、この研究の目的とされている。このマニピュレータは、柔軟性による形状適応性に優れる反面、物体の把持などには限界があるため、剛性を可変にする手法として近年注目を浴びるジャミング転移現象による可変剛性機能をマニピュレータに付加した内容に関して報告された。

製作した柔軟マニピュレータは、図4のように柔軟なコアの軸方向と斜め方向に複数の細径人工筋を配置することで湾曲・収縮・ねじり動作（図5）が可能で構造である。軸方向には3本の人工筋を集積した束を3束配置し、斜め方向には右巻き、左巻きにそ

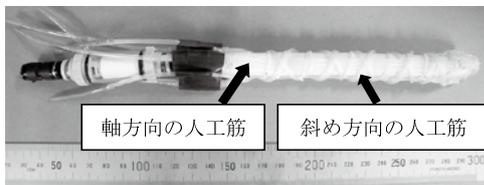
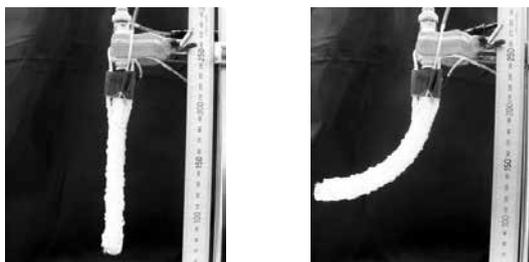
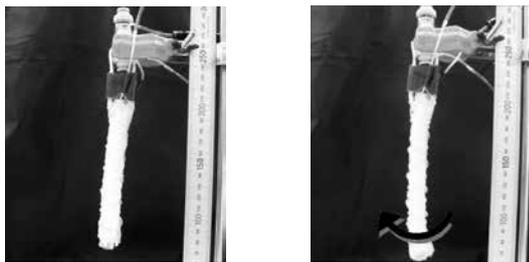


図4 マニピュレータ外観



(a) 初期状態

(b) 湾曲



(c) 収縮

(d) ねじり

図5 マニピュレータの駆動の様子

れぞれ人工筋を1本ずつ配置されている。コアは中空のシリンダ形状の長さ165mm、外径12.8mm、膜厚0.4mmのシリコンゴムであり、内部に90 $\mu$ mのガラスビーズが封入されている。可変剛性機能を付加した柔軟マニピュレータのコアに負圧を印加し粉体群の密度を高めジャミング転移が発生させることで、湾曲動作において剛性が変化することが確認されている。

## 2.3 空気圧ゴム人工筋を利用したウェアラブル建設作業支援装置<sup>3)</sup>

建設作業員の職人の動作支援を目的とした空気圧ゴム人工筋を搭載した内骨格型のウェアラブル動作支援装置について報告されている。建設作業を模した動作から得られたデータに基づき、McKibben型の空気圧ゴム人工筋、制御弁、圧力センサ、人工筋や機器類を固定するためのサポータから構成される動作支援装置を製作している。開発した装置を実際に装着し、直立状態と前屈維持という動作を繰り返した時の筋電位から、脊柱起立筋への支援効果が発揮されることが確認されている。

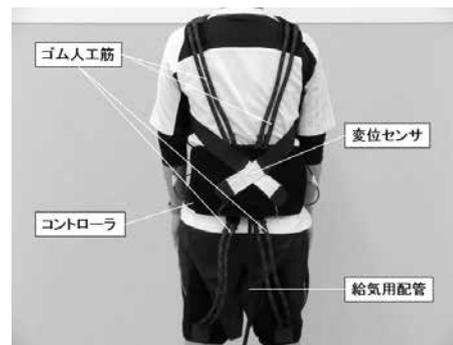


図6 建設作業支援装置の外観

## 3. おわりに

本講では、第34回日本ロボット学会学術講演会の概要およびフルードパワー関連技術に関して紹介した。第35回日本ロボット学会学術講演会は、2017年9月11日（月）～14日（木）に、東洋大学（白山キャンパス）にて開催予定であることを申し添えておく。

### 参考文献

- 以下全て第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集に収録。
- 1) 神田 他：圧電振動子駆動微粒子励振型制御弁による水圧アクチュエータの駆動, RSJ2016AC1X1-03
  - 2) 山根 他：ジャミング転移による可変剛性機能を有する細径人工筋集積柔軟マニピュレータの試作, RSJ2016AC2G1-08
  - 3) 大野 他：空気圧ゴム人工筋を利用したウェアラブル建設作業支援装置の開発, RSJ2016AC2D2-04

(原稿受付：2016年12月14日)

教室

# 入門講座「エネルギー工学」

## 第四回：水力発電と再生可能エネルギーなど

著者紹介



**江間 敏** さとし  
 沼津工業高等専門学校  
 〒410-8501 静岡県沼津市大岡3600  
 E-mail : ema@numazu-ct.ac.jp

1977年東京工業大学大学院修士課程修了。国鉄（現JR）勤務、鉄道技術研究所を経て、1986年沼津高専勤務、2015年同高専退職（名誉教授）、現在嘱託教授。電力工学、浮上式鉄道の研究に従事、電気学会上級会員。

### 1. はじめに

自然の河川流量を利用する水力発電の歴史は古く、昭和20年代では日本の発電の主力となり、発電設備の大半を占めていた。しかし、30年代から40年代にかけて急増する電力需要をまかなうため、水力より建設費が安く、出力規模の大きいものを短期間で建設できる火力発電所が次々に設けられ、発電の主力は火力へと移ってきた。その後は原子力発電も加わりベストミックスの時代となった。比率は小さくなったものの（約1割）、水力発電は短時間で起動、停止できることから一日のピークをまかなう重要な役割を担っている。また、最近では再生可能エネルギーとして小規模水力も普及が求められている。後半の再生可能エネルギーについては、紙面の制限もあり関係する固定価格買取制度、太陽光、風力の普及状況について触れ、最後に原子力発電と火力の相違点にも言及した。

### 2. 水力発電

#### 2.1 水力発電の原理と概要

水力発電による電力は、高い所にある水のもっている位置エネルギーを水車で機械エネルギーに変え、これで発電機を運転して得られる。

質量  $m$  [kg] の物体が、高さ  $H$  [m] がある場合の位置エネルギー  $W$  は、重力加速度を  $g$  [m/s<sup>2</sup>] とすれば  $W = mgH$  [J] で表される。このエネルギーを時間で微分したものが仕事となる。ここで、 $dm/dt$  は質量の変化であり、水の場合、単位時間に落ちる水の量（流量）であり、これを  $Q$  とする。水 1 m<sup>3</sup> の重さを

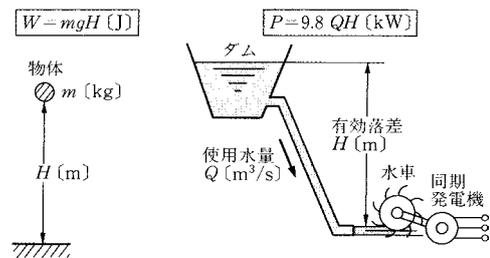


図1 物体の位置エネルギーと理論水力

1,000kgとし、 $g = 9.8$  [m/s<sup>2</sup>] とすると

$$P = 9.8QH \text{ [kW]} \dots\dots\dots (1) \text{ となる。}$$

この  $P$  は理論水力と呼ばれ（図1）、この水力によって発電機から出る電力  $P_g$  は水車の効率  $\eta_t$ 、発電機の効率  $\eta_g$  を乗じた値となる。水力発電設備の概要を水路式を例に図2に示す。（1）式から明らかのように、水力を有効に使用するには、どのようにして大きな落差  $[H]$  と流量  $[Q]$  とを得るかである。落差の取り方（取水方法）による発電方式には三つがある。①水路式（図2）②ダム式（図4参照）③ダム水路式流量の使い方（発電所の運用）による方式には4方式がある。

①流込み式②調整池式③貯水池式（図3）④揚水式（図3）④の揚水式発電は電気はエネルギーの貯蔵はできないが、深夜の余剰電力を利用した貯蔵施設とも考えられる。

ダムの代表的な種類は以下である。

①重力ダム（図4）②アーチダム（図4）③（ロック）フィルダム④アースダム である。

#### 2.2 水力学（連続の原理とベルヌーイの定理）

水の流れの基本定理二つを簡単に述べる。第一は途中で水の出入りがなければ、任意の断面における流量はどこでも相等しく一定である（連続の原理）。

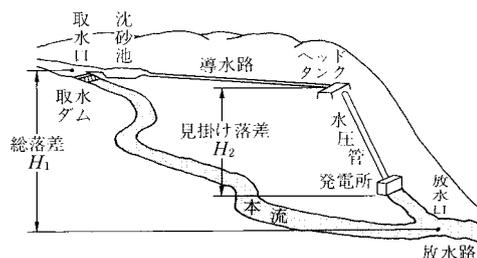


図2 水力発電設備の概要（水路式発電所）

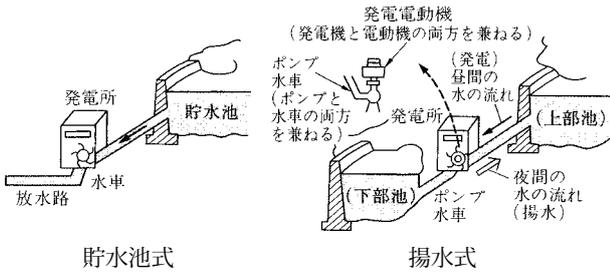


図3 流量の使い方による方式（貯水池式，揚水式）

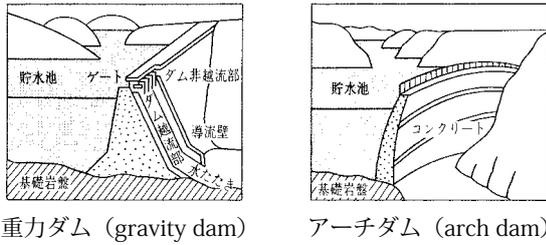


図4 ダムの種類（重力ダムとアーチダム）

断面積をA，平均流速をVとすれば $Q=AV$ である。  
 つぎに流体の単位体積当りの重量 $w$  [kg/m<sup>3</sup>]，単位面積に作用する圧力を $P$  [Pa]とすると，  
**【位置エネルギー】 + 【圧力エネルギー】 + 【運動エネルギー】**  
 の総和は等しいことから，次式が得られる。

$$h + \frac{P}{wg} + \frac{v^2}{2g} = H \quad [\text{m}] \quad \dots\dots\dots(2)$$

この式を，ベルヌーイの定理（図5）という。水力発電では落差をもってそれぞれのエネルギーを示すことができる便利な表示法である。ベルヌーイの定理から証明できる現象は数多くあり興味深い。霧吹き の作用，飛行機の揚力，テニス，野球などのボールの運動である。

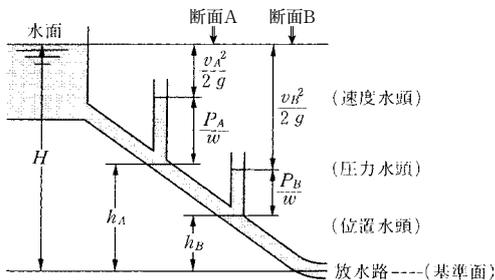


図5 ベルヌーイの定理

**2.3 水撃作用とサージタンク**

圧力水路を通して取水しているときは，水車の使用流量が急激に減少すると，水圧管内を流下中の流水の運動エネルギーは圧力エネルギーに変わり，非常に高い圧力となって水圧管内や圧力水路内を伝搬する（図6）．この現象を**水撃作用**（water hammering）

という．この圧力は水圧管を破裂の危険にさらすので，水圧管内の圧力変動をタンク内の水位の上下振動によって吸収し，圧力変動の影響が他に波及しないようにする．このタンクは圧力水路と水圧管の接続点や水圧管の傾斜の変わる点に設けられ，サージタンクあるいは調圧水槽という．

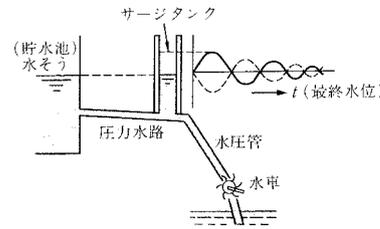


図6 水撃作用とサージタンクおよび外観

**2.4 水車の特性（比速度）**

回転数に関するいろいろな水車の特性の違いを比較するものに比速度（specific speed）がある．任意の水車について，そのランナと，羽根の形その他をそのまま相似に縮小したランナを仮定し，それを単位落差（たとえば1 m）のもとで相似な状態で運転させて単位出力（たとえば1 kW）を発生させるために必要な1分間の回転数 $n_s$ で比較する方法が用いられる（図7）．この $n_s$ が比速度であり，ある水車の比速度 $n_s$  [m-kW] は次式のように計算される．

$$n_s = n \cdot P^{1/2} \cdot H^{-5/4} \quad [\text{m-kW}]$$

$$\text{または, } n = n_s \cdot P^{-1/2} \cdot H^{5/4} \quad [\text{rpm}] \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに， $n$ は水車の定格回転数 [rpm]， $P$ は有効落差 $H$  [m]におけるノズルまたはランナ1個当たりの水車出力 [kW]である．

各水車の比速度は，ペルトン水車で12～23，フランシス水車で50～350の範囲にある．

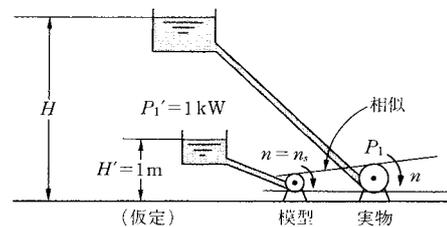


図7 比速度の概念

**2.5 调速機と水車**

ある発電所において，負荷が増減しても水車に流入させる水の量を加減しなければ，つまり発電機からの電氣的出力と水車に流入させる水の量を加減しなければ，発電機からの電氣的出力と水車より発電機に入る機械的入力 の平衡が破れ，負荷が増加した場合には，発電機の回転速度は低下する．これに伴って，系統の周波数は低下する（西日本60Hz，東日本50Hz）．そ

ここで負荷の増減にかかわらず周波数を一定に保持するためには、その増減に応じて水車への水量を加減し、その出力を発電機出力に合わせて発電機の回転速度を一定に保たなければならない。この操作を调速といひ、これを行う装置を调速機 (governor) という。调速機の種類としては機械式と電気式に大別され、当初は機械式调速機が使用されていたが、現在ではほとんどが電気式に置き換わっている。ここでは説明の便宜上から、機械式调速機を取り上げる (図8)。配圧弁以降の構造は、機械式も電気式も同様である。負荷の増減によって、スピーダの遠心重りから始まる全体の動作原理については省くが、確認いただければと思う。

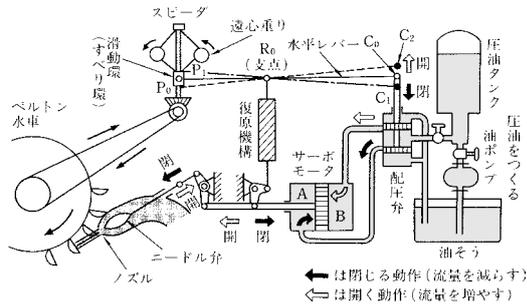


図8 機械式调速機

水車には種々の形式があり、それらをいかに選ぶかがその発電所の出力、効率、建設費などを決定する鍵となる。3mの水の落差から使用できる低落差用の水車がカプラン水車。50～500mの中落差に適した水車をフランス水車 (図9)。高落差に適した水車がペルトン水車 (図8参照) である。水車は水の羽根車に対する作用によって、火力発電の蒸気タービンと同様に、衝動水車と反動水車とに分けられる。前者は水の衝撃力によって、回転し、後者は流入する水の衝撃力と羽根にかかる圧力を利用して回転する。ペルトン水車は衝動水車であり、フランス、カプラン水車は反動水車である。

### 3. 再生可能エネルギーと固定価格買取制度

#### 3.1 再生可能エネルギー

人類の歴史は火の熱と光を使うことから始まり、

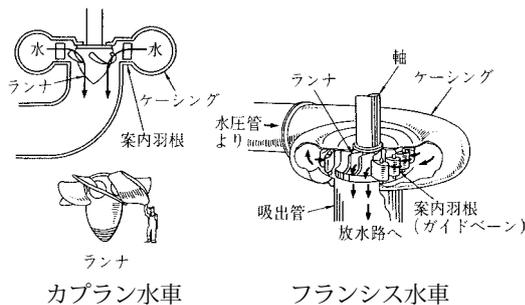


図9 各種水車 (カプランとフランス水車)

家畜の力や自然の力を経て、石炭・石油の時代、さらには原子力エネルギーを利用するまでに至った。しかしながら現在主要な役割を果たしているエネルギー資源には限りがあるといわれている (第一回 2.2節)。また化石燃料は地球温暖化効果ガスを排出するためにこれを抑制しなければ地球環境を壊滅的に悪化させる問題がある (第三回 4章)。この問題に対処して持続可能な社会を構築する一つ的手段として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが地球規模で普及しつつある。

2015年末の全世界における風力発電の総容量は4億kWを超え、ついに原子力発電の総容量 (3億8225万kW) を追いついた。同年末にパリで開催された国連のCOP21では、世界中の国が一致して地球温暖化対策に取り組む歴史的なパリ協定が採択され、翌年発効され、今後ますます再生可能エネルギーは普及することが予想される。また国内においても2012年普及を後押しすべく、電力会社に自然エネルギーの買い取りを義務づける「固定価格買取制度」もスタートした。

#### 3.2 固定価格買取制度と再生可能エネルギー普及状況

我が国では再生可能エネルギー (新エネルギー) の普及策として電気事業者に対して一定量以上の新エネルギー等を利用して得られる電気の利用を義務付ける「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法 (RPS法)」が2002年に施行された。しかし、義務付けられた利用量が少ないことや新エネルギー発電の売電価格が低いために普及は進まず2010年の国の新エネルギー導入目標は達成できなかった。

このためRPS法は廃止されて、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法 (FIT法)」が2012年7月に施行された。これは再生可能エネルギーで発電した電気を電力会社が一定期間かつ固定価格で買い取ることを国が約束するもので、買取価格 (売電価格) は調達価格と呼ばれておりRPS法に比べて格段に高い価格に設定された。この価格は毎年度普及状況に応じて見直されており、普及の著しい太陽光発電 (非住宅用10kW以上) の2015年度の買取価格は27円/kWh (前年度32円/kWh) である。電力会社が買い取りに要する費用は賦課金として家庭などの電気の利用者が電気の使用量に応じて負担しており、2015年度の賦課金は1.58円/kWh (前年度0.75円/kWh) で、普及が進むにつれてだんだん高くなる傾向にある。この制度で定義されている再生可能エネルギーは、太陽光・風力・小水力・地熱 (第二回)・バイオマス発電

(第二回)であり、太陽光や風力エネルギーは無尽蔵であるものの、それらの発電電力は天候に左右されるために需要量に応じて制御できず不安定であり、発電設備の利用率はたとえば風力発電については原子力発電に比べて約30%と低いことが課題である。2014年末までの日本の太陽光発電の導入量の推移を図10に示すが、最近では指数関数的に増加しており2014年末の累積導入量は2333万kW(火力・原子力発電の約23基分)である。これは2012年に施行されたFIT法の効果によるため、今後ますます増加する傾向にあることが予想される。

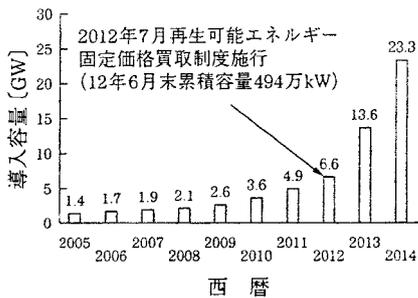


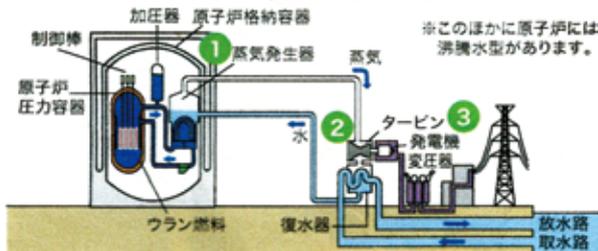
図10 日本の太陽光発電導入の推移

太陽光と風力発電について、原理等の詳しい説明は紙面の制限もあり、割愛させていただく。

#### 4. 火力発電と原子力発電の違い

火力発電と原子力発電(図11)を比較した場合、両発電とも蒸気タービン内で膨張、仕事をさせたのち復水に戻し再び熱を加え蒸気にするというサイクルである。その点では両発電とも違いはない。異なる点は、火力発電のボイラーが化石燃料を使用することに対し、原子力発電では原子炉にてウランの核分裂によって得られるエネルギーを利用する発電方式である。しかしながら、原子力発電ではウランの燃料集合体の許容温度によって制限されるため、蒸気温度を火力発電の場合のように高くはできない

##### ● 原子力発電のしくみ(加圧水型の例)

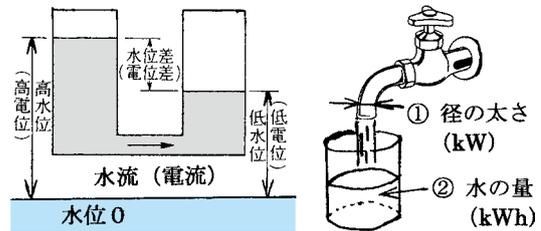


- ① ウランを原子炉の中で核分裂させ、発生する原子力の熱で水を熱して、蒸気を作ります。
- ② この蒸気力でタービンの羽根を回します。
- ③ 発電機が回転して電気を作ります。

図11 原子力発電のしくみ(加圧水型の場合)

(260~290℃)。このため、飽和または飽和に近い蒸気しか得られず、蒸気条件が悪い。したがって、同一出力の火力発電所に比べてタービン、復水器など著しく大きくなり、熱効率も低くなる。

#### コラム 水の流れと電気電子工学(図12)



[1] 電位(電圧)と電流 [2] kWとkWh

図12 水の流れと電気電子工学

連続の原理より流量(水量)はどこでも相等しく一定である。電気も電流の連続性から電流(電荷の流れ)は1本の導体の中では、どの箇所でも同じ大きさとなる。そこで目に見えない電流を日常接する水流で考えるとわかりやすい。[1]より水位の差(電位差)により水流(電流)が生じる。また水の流れを作るのにポンプ(電源)がある。[2]よりkWは仕事率であり、発電所の能力でもある。水道管に例えると蛇口の太さや数ということになる。kWhは仕事(J)であり電気の消費量を表し、蛇口から流れた水の量ということになる。ただ、水と違って電気は貯められないため、日々の電力需要に見合った電力供給をする必要がある。特に日中のピーク電力に対応しているのが水力発電(揚水式)である(図13)。

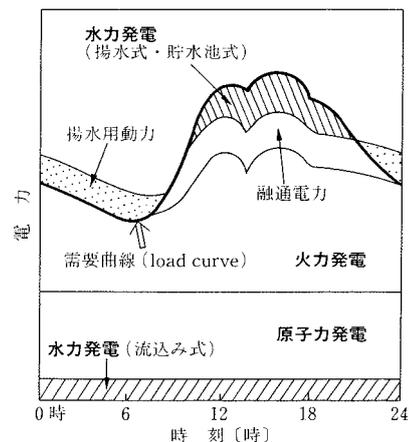


図13 需要曲線(日負荷曲線)と供給電力

##### 参考文献

- 1) 江間敏, 甲斐隆章: 電力工学(改訂版), コロナ社, 4章・5章(2017年) 図1~図10及び図13は上記文献

(原稿受付: 2016年10月24日)

## トピックス

## クラウドロボティクスプラットフォームを開発する 大学発ベンチャー企業

### 著者紹介



おかもと ゆう  
**岡本 悠**

Rapyuta Robotics(株)  
〒104-0033 東京都中央区新川1-29-13  
E-mail: you.okamoto@rapyuta-robotics.com

2012年東京工業大学大学院修士課程修了。同年株式会社安川電機入社。モーション制御の研究開発などに従事。2015年Rapyuta Robotics株式会社入社。修士(工学)。

### 1. はじめに

本稿は著者の在籍していた東京工業大学 香川・川嶋研究室(現東京工業大学 只野研究室, 東京医科歯科大学川嶋研究室)の先輩にあたる, 福岡工業大学の加藤友規先生のご紹介で執筆の機会をいただいたものであり, はじめに, 関係者各位に感謝申し上げます。

著者は2014年7月にスイスのチューリッヒ工科大学のスピノフとして設立したRapyuta Robotics(株)に日本人1人目の正社員として2015年4月から勤務している。Rapyuta RoboticsはEUの研究プロジェクト「RoboEarth」<sup>1)</sup>および社名と同様のプロジェクト「Rapyuta」<sup>2)</sup>の成果を事業化するために, Gajan Mohanarajah, Arudchelvan Krishnamoorthy, Dominique Hunzikerによって設立された, クラウドロボティクスの事業化を目指すベンチャー企業である。

本誌には, ベンチャー起業を紹介する記事もこれまでに多くあるが, 海外の大学発ベンチャー起業に関するものは少ないと思う。自身の経験を紹介し, 起業を検討している方や, ベンチャー企業への就職を検討している方の参考になれば幸いである。

### 2. クラウドロボティクスプラットフォーム

著者らの目指しているのは, クラウドロボティクスのプラットフォームを提供し, ロボット開発のエコシステムを作ることである。クラウドロボティクスとは, 計算量が多い部分や大量のデータ保存が必

要な部分をクラウド上で処理し, 障害物回避などのリアルタイム性が必要な計算をロボット本体のコンピュータで行い, クラウドにつながった複数のロボットが協調しながらタスクをおこなうというロボットシステムの考え方である。これにより, ロボット本体はより安価かつ軽量にしつつ, システム全体としては計算量が多いアプリケーションを実現できる。前述の「Rapyuta」プロジェクトで経験したクラウドロボティクスによる, クラウドを介したロボットの協調制御およびドローンなどの小型ロボットの運動制御, その両方の技術を有していることに, 著者らの技術的な強みがある。

ロボットシステムを構成するには, ハードウェア・ソフトウェアの両方が必要であり, 必要なソフトウェアもロボット制御・ネットワークなど多岐に渡る事が多い。それらすべてを一から開発するのは非常にコストがかかる。一方で実環境で動くロボットシステムは用途に応じて構成が多岐に渡る。それら一つ一つのシステムを一から構築をしてはロボット導入による効果がコストに見合わず, ビジネスとしては成立しづらい。そこで, ロボットシステム構築を容易にするツールを提供することによって, ロボットビジネスを普及させていくことが必要であると考えられる。そのようなソフトウェアのフレームワークとしてROS<sup>3)</sup>がある。ROSはロボットの研究開発ではデファクトスタンダードとして広まっており, 世界中で様々な機能を持ったパッケージが作成されている。それらをクラウド経由でも容易に使えるように拡張し, クラウドロボティクスのソフトウェア基盤となるPaaS (Platform as a Service) を提供することで, プラットフォーム上で手軽にロボット向けアプリケーションを開発できるようにする。それによってクラウドを利用した多様なロボットシステムが社会に展開されていくことが著者らの目指しているところである(図1)。ロボットその物ではなく, プラットフォームの提供を目指しているところが, 他のロボット系のベンチャー企業との大きな違いである。

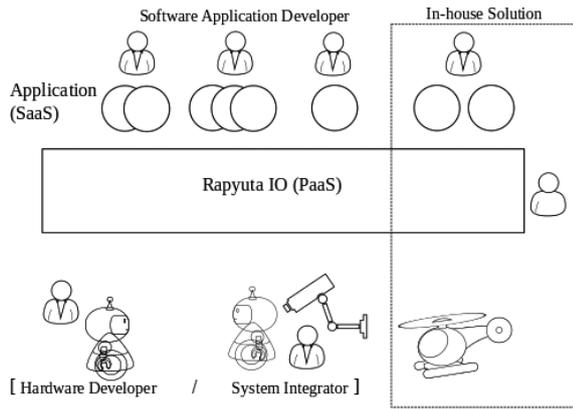


図1 クラウドロボティクスプラットフォーム概念図。クラウドのPaaS部分を中心に、ソフトウェアアプリケーション開発者、ハードウェア開発者などが、協力することで、ロボットアプリケーションの開発を容易にする。

### 3. 市場展開

目標とするビジネスモデルがあったとしても、それがどの程度の市場があるか、また、それを直接実現できるかの検討が必要である。プラットフォームを展開していくことによって、社会にロボットを普及していくことが著者らの目指しているところである。しかし、実際にロボットの市場といった場合に求められているのはロボットシステムその物であり、プラットフォームが直接的なニーズとなっているわけではない。また、何の実績もないプラットフォームをいきなり商品開発に使用しようとはなかなか思われなれないと考える。そこで、具体的なアプリケーションの事例が必要となる。そこで著者らはビジネス展開を2ステップに分けてすすめることで市場を切り開こうとしている。ビジネスの初期ステップではハードウェアまでを含めたロボットシステムを作成し、サービスとして提供する。現在インフラ点検や屋内警備システム向けのロボットシステムを開発している(図2)。この一つ目のサービスによって、

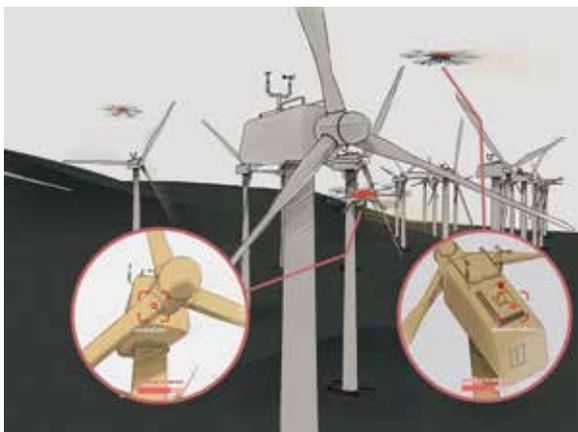


図2 インフラ点検用ロボットシステムのイメージ

クラウドロボティクスおよびプラットフォームの優位性を示すことを目指す。そして後のステップでは、その初期ステップの結果を示すことで、本来の目標であるプラットフォームの普及・展開をしていく。

大学発のベンチャー企業においては、自身が持つ技術的な強みをどうビジネスにつなげていくかが重要である。また、最終的な目標に対して、どのように道筋を描いていくか、技術だけでなくビジネスの展開においても重要となる。

## 4. 法規制

ベンチャー企業に限った話ではないが、新規の産業分野に進出する際には、関連法規に気をつける必要がある。既存の法律が新規技術を想定していないケースがあり、単に技術を開発しただけでは事業化ができないことがある。ここでは、ロボットやドローンに関する法律である、航空法および電波法について述べる。

### 4.1 航空法

ドローンなどのいわゆる無人航空機を飛ばす場合には航空法に定められたルールにしたがう必要がある。国土交通省のホームページにわかりやすい説明がある(図3)<sup>4)</sup>。これは、ドローンの首相官邸への墜落などを受けて、2015年12月に改正された。これにより人口密集地や空港周辺などでは無人航空機を飛行させる際には、事前の申請が必要となった。これは、サービスの提供はもちろん、商品開発や実験などの際に留意する必要がある。実験施設を持つような大きな事務所を保有していない場合には実験を行う場所を探す必要がある。

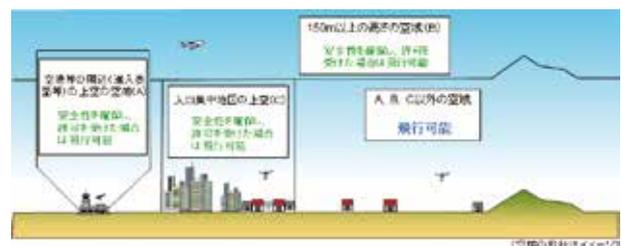


図3 無人航空機の飛行の許可が必要となる空域<sup>4)</sup>

### 4.2 電波法

ドローンなどの自律移動するロボットであれば、何かしらの無線機器を搭載することになるが、この無線機器の選定に関しては、電波法に留意する必要がある。もっとも容易に使用できるのはWiFiやbluetoothに代表される2.4GHzの機器を使うことである。機器の種類も多く、国内認証を取得した機器の入手も容易である。ただし、2.4GHzは非常に多くの機器が使用しているため、他の電波から干渉を

受けることを容認しなければならない。特に、ドローンやロボットの場合は制御信号を無線で受信することがあり、電波干渉はシステムに重大な影響を与える可能性がある。また、空撮などで映像を無線で地上の機器に送るケースがあるが、電波干渉は映像の品質に悪影響を与える。

そこで、他の周波数帯の電波を使用することが検討される。代表的なものとして、920MHz、映像伝送などに使用される5.7GHz、携帯電話に使用される4G/LTEなどの電波があげられる。無人航空機に関して注意が必要なのは特に、5.7GHzと4G/LTEである。

4G/LTEなどの携帯電話用の無線に関しては、現在実証実験がすすめられている<sup>5)</sup>。直近で使いたいのであれば、所定の手続きをしなければならない。逆に商品開発・サービス展開をすぐにしないのであれば、実証実験が終了し、法律が改正されるのを待つという手も考えられる。

5.7GHzについては2016年8月に一部法改正が行われ、ロボット用に電波が割り当てられた<sup>6)</sup>。ただし使用には、各種申請が必要となる。5.7GHzは外国では使用できるケースが多く、海外製のドローンでは一般的に使用されている電波であるため、海外製の部品を買うときには周波数が日本で使用できるものか、認可されているものかを確認しなければならない。

この様に、新規の技術に関しては関係法規に注意が必要である。特に近く改正する予定のものなどの動向については注視をしておきたい。法律改正が遅れたために、実験予定、サービス開始予定の変更が発生したり、規制緩和されるのを待てば苦勞なく使える機器を規制緩和前に無理に使うために無駄な労力を使うなどの弊害が考えられる。また、最悪のケースとしては、規制が厳しくなり、サービスそのものを提供できなくなる可能性すらありえる。新規の技術に関しては法律が対応していないのは仕方ないことであり、その変更に必要な手間や時間も含めた予定を立てる必要がある。

実験に関しては、全国各地にある特区を利用することが有効である。ただし、特区によって緩和される規制が異なるので注意が必要である。

## 5. 海外展開するベンチャー

### 5.1 海外オフィスとの連携

ベンチャー企業であり少人数ではあるが、著者らはスイスのチューリッヒ、インドのバンガロール、そして東京の3拠点を構えている。海外拠点と連携する際に留意する点としては、法規の違いや物品の

輸出入がある。前述した無線機器のように海外では使用可能な機器が日本では使用不可能なケースがある。グローバルに事業展開をしている製品であれば、各国ごとに現地対応した製品を製造しているので、それらの機器を別に購入する必要がある。そうでない場合、別の機器を選定し直さなければならない。

物品の輸出入に関しては、海外では1週間で入手可能な製品が日本では2ヶ月を要するなどの納期の違いなどにも注意をする必要がある。また、開発途中の機体などを輸出入する際には、外国為替及び外国貿易法にしたがい、該非判定を行う必要がある。専門の部署をもたない小さい会社ではそういった作業を技術者自身でやらなければならないケースも多い。そういった慣れない作業にかかる時間や費用も考慮すべきである。

### 5.2 海外オフィスとの連携

人材獲得はベンチャー企業にとっては特に重要な課題である。少人数のチームでは個人の仕事の種類や責任の範囲は自ずと広がる。ここでは、海外のベンチャー故の採用のプロセスの特徴について弊社の例を主に述べる。

社内では基本英語で会話が行われる。特にSkypeなどのビデオ会議においては直接あって話すのに比べると高い英語力が必要となる事も多く、日本人には一つのハードルとなる。

採用活動において、インターンシップの扱いは日本と海外で大きく違う。海外の企業の場合インターンシップは3ヶ月—1年と日本企業のインターンシップに比べて長い期間おこなわれる。また、基本的にはその期間は正社員と同じ様にフルタイムで仕事を行う。そのため、ベンチャーのような少人数のチームであれば、インターンシップの学生は貴重な労働力となると同時に、長い時間ともに仕事をするため、採用活動の一環としても、面接だけでは分からない、仕事に対する態度などを知ることが出来、非常に有意義である。残念ながら、日本の学生の場合そのような長い期間大学を離れることは少ないため、弊社においても圧倒的に海外の大学のインターンシップ生が多いのが現状であり、日本の大学の学生の応募は少ない(あるいは、応募があっても条件的に辞退される)。語学力だけでなく、その後の就職活動や研究にも活かすことのできる経験を得られると思うので、日本の学生にも是非ベンチャー企業でのインターンシップに挑戦をしてもらいたい。

エンジニアの採用においては、執筆した論文などの出版物だけでなく、ポートフォリオ(作成したプログラム、回路図など)も大きな判断材料となる。実際に作ったものの説得力は書類上の経歴に比べて

大きな威力を持つ。具体的には、オープンソースプロジェクトへの貢献などがある。オープンソースであるため、ソースコードを見てプログラミング能力やそのソフトウェアに対するドキュメントの作成能力を見ることができる上に、そのソフトウェアがどれだけ世の中で使われているかが分かるため、評価が行いやすい。その他、1時間や1週間と時間を設けて、実際にプログラミングなどの作業をしてもらう面接形態もとっている。企業などの部門によっては、高い技術力をもつエンジニアや研究者であっても社外に出せる成果をあまりもっていないケースがあり、面接において自身のアピールがうまくできていないように見えるケースがある。多様なキャリアを積んでいきたいと考えるのであれば、自分の実力がわかりやすい成果物を持っていることが重要となる。

## 6. おわりに

海外大学発ベンチャー企業における経験を述べさせていただいた。会社の文化は会社それぞれである。起業や就職の際に一つの例として、参考になれば幸いである。

ベンチャー企業で働くことは、困難な部分もあるが、製品開発工程の多くの部分や意思決定の多くの部分に関わることができるなど、自身が成長できる機会も大きい。また、海外ベンチャーであれば、さ

まざまな人種の人々との人脈を築くこともできる。

ロボティクス分野は必要性が認識され、長く研究開発が進められてきたが、ビジネスとして成功している例は、工場で稼働している産業用ロボットを除けば、非常に少ない挑戦的な分野である。挑戦的な分野であるからこそ、ベンチャー企業で取り組むべき価値があると思う。

### 参考文献

- 1) Markus Waibel, Michael Beetz, Javier Civera, Raffaello d'Andrea, Jos Elfring, Dorian Galvez-Lopez, Kai Häussermann, Rob Janssen, J.M.M. Montiel, Alexander Perzylo, Bjoern Schiessle, Moritz Tenorth, Oliver Zweigle and M.J.G. René Van de Molengraft. RoboEarth-A World Wide Web for Robots. In Robotics & Automation Magazine, IEEE, vol 18, no 2, pp 69-82, June 2011.
- 2) Hunziker, D., Mohanarajah, G., Waibel, M., and D'Andrea, R. Rapyuta : The RoboEarth Cloud Engine. In Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013
- 3) <http://www.ros.org/>
- 4) [http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)「5」
- 5) <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/uav/>
- 6) <http://www.soumu.go.jp/soutsu/kanto/press/27/0520k1.html>

(原稿受付：2016年10月17日)

トピックス

# フルードパワー設計者のためのグローバルスタンダード 第2回 機械安全ーパフォーマンスレベル PLと 平均危険側故障時間 MTTFdー

著者紹介



たかの かず はる  
**高野 一治**  
油研工業株式会社 戦略製品開発プロジェクトチーム  
〒252-1113 神奈川県綾瀬市上土棚中4-4-34  
E-mail : ka.takano@yuken.co.jp

1994年油研工業株式会社に入社、第二製造部、品質保証部、研究開発部を経て、2015年戦略製品開発プロジェクトチームに配属、現在に至る。主に、油圧バルブの開発に従事。

## 1. はじめに

第1回では機械安全に対する基本事項として、国際安全規格の構成と、すべての機械に適用される基本規格であるISO12100 機械類の安全性-設計のための一般原則-について解説した。

第2回は広範囲の機械に適用されるグループ安全規格の一つであるISO13849機械類の安全性-制御システムの安全関連部-をとりあげ、安全性の能力を示すパフォーマンスレベルPLと製品寿命を示す平均危険側故障時間MTTFdについて解説する。

## 2. ISO13849による安全関連部の評価

### 2.1 ISO13849-1について

機械を設計する場合、その機械を操作する人が安全に作業できるよう、設計段階でリスクを見積り、リスクが残っている場合はできる限り削減する必要がある。ISO13849-1はリスク低減の指針となる規格である。ここで述べる機械とは工作機械、プレス機械、および産業ロボットなどコンポーネントで構成されたシステム機械である。これら機械の安全機能は、インタロックなどの保護装置、制御ユニット、バルブやリレーなどの動力制御要素により構成されている。これらは機械制御システムの安全関連部 (SRP/OS) と呼ばれる。

### 2.2 リスク低減の評価手順

機械設計においては、想定されるリスクが適切に低減されているか評価する必要がある。その評価は安全関連部の能力を示すパフォーマンスレベルPLで行う。

具体的な評価フローを次に示す (図1)。

- ① 要求パフォーマンスレベルPLrの決定
- ② 安全機能の設計、安全関連部を特定
- ③ パフォーマンスレベルPLの見積り
- ④ パフォーマンスレベルの検証

$$PL \geq PLr$$

- ⑤ 全要求事項に適合するかの確認
- このフローを反復し、リスクを低減する。

### 2.3 要求パフォーマンスレベルPLr

安全関連部に要求されるパフォーマンスレベルPLrは、危険が発生したときの傷害の程度、危険の発生頻度、および危険回避の可否から、図2のリスクグラフに基づいてa~eの5つのレベルに分けられ

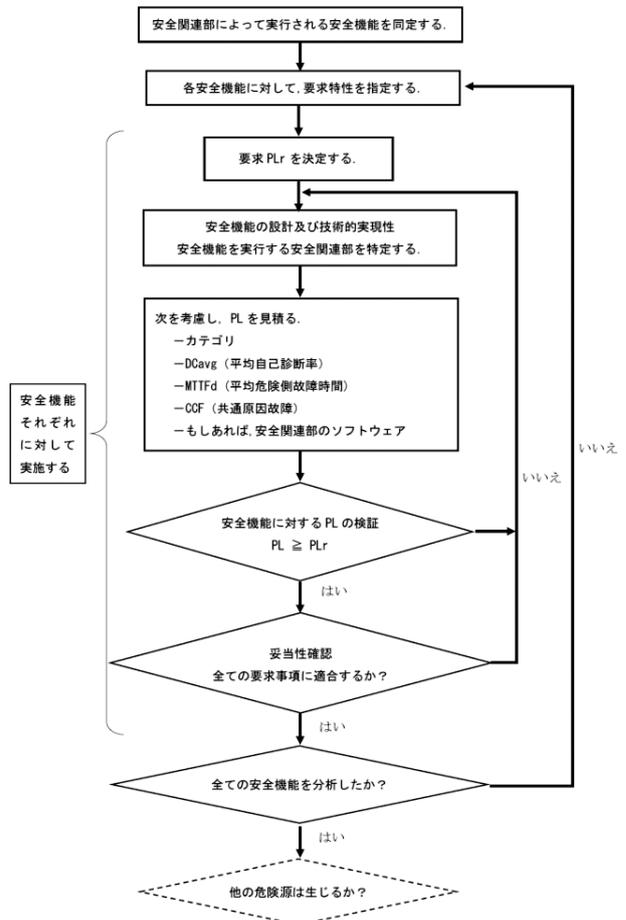


図1 安全関連部の設計のための反復プロセス

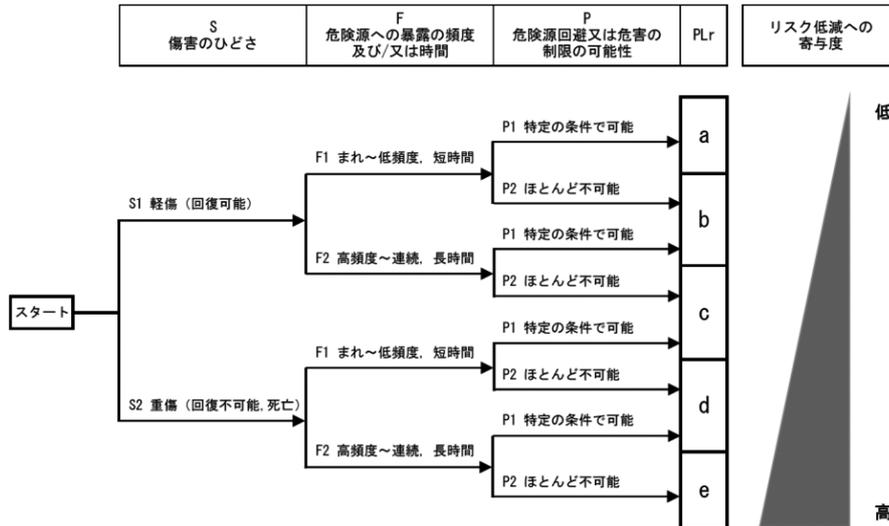


図2 PLr決定のためのリスクグラフ

表1 PLを評価するための単純化手順

| カテゴリ  | B    | 1      | 2     | 2 | 3 | 3 | 4    |
|-------|------|--------|-------|---|---|---|------|
| DCavg | なし   | なし     | 低     | 中 | 低 | 中 | 高    |
| MTTFd | 低    | a 該当なし | a     | b | b | c | 該当なし |
|       | 中    | b 該当なし | b     | c | c | d | 該当なし |
|       | 高    | 該当なし   | c     | c | d | d | e    |
| CCF   | 関連なし |        | 65点以上 |   |   |   |      |

る。PLrがaの場合はリスク低減の寄与度が低く、eの場合は寄与度が高くなる。

2.4 パフォーマンスレベルPLとその検証

設計された安全関連部が要求パフォーマンスレベル以上の安全性能を達成しているかどうか検証する必要がある。安全関連部のパフォーマンスレベルは以下の4つの要素から表1の手順により決定される。

- カテゴリ…安全関連部の構造に対する分類。“B, 1, 2, 3, 4”の5つのカテゴリがある。
- DCavg (平均自己診断率)…安全関連部のすべての危険側故障に対する検出可能な危険側故障の割合。“なし, 低, 中, 高”の4とおりに分類。
- MTTFd (平均危険側故障時間)…安全関連部が危険側故障を生じるまでの平均的な時間。“低, 中, 高”の3とおりに分類。
- CCF (共通原因故障)…ある共通の原因により生じる異なったアイテムの故障。カテゴリ2, 3, 4の場合, 規格に基づいた評価で65点以上が必要。

表1から見積もられたパフォーマンスレベルPLは, 要求パフォーマンスレベルPLr以上であることが必要である。たとえば, 設計した機械装置で想定される傷害が重症であるが, その危険にさらされる時間が短時間で, かつ特定の条件では危険を回避で

きる場合, 要求パフォーマンスレベルPLrはcとなる(図3)。この機械装置の安全関連部のパフォーマンスレベルPLはc, d, eが必要となる(表2)。

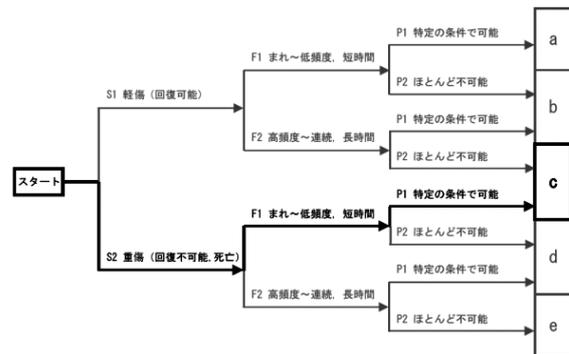


図3 PLr決定の例

表2 PL評価の例

| カテゴリ  | B    | 1      | 2     | 2 | 3 | 3 | 4    |
|-------|------|--------|-------|---|---|---|------|
| DCavg | なし   | なし     | 低     | 中 | 低 | 中 | 高    |
| MTTFd | 低    | a 該当なし | a     | b | b | c | 該当なし |
|       | 中    | b 該当なし | b     | c | c | d | 該当なし |
|       | 高    | 該当なし   | c     | c | d | d | e    |
| CCF   | 関連なし |        | 65点以上 |   |   |   |      |

## 2.5 平均危険側故障時間 MTTFd

MTTFdは機械の安全機能が喪失されるまでの平均時間である。通常、機械には複数の安全関連部が備わっている。その機械のMTTFdは個々の安全関連部のMTTFdの逆数の総和で求められる。MTTFdは年数によって低、中、高の3通りに分けられる(表3)。

表3 MTTFd

|       |   |                    |
|-------|---|--------------------|
| MTTFd | 低 | 3年 ≤ MTTFd < 10年   |
|       | 中 | 10年 ≤ MTTFd < 30年  |
|       | 高 | 30年 ≤ MTTFd < 100年 |

機械装置のMTTFdを決定するためには、コンポーネントのMTTFdを把握する必要がある。ISO13849-1では、機械装置の設計者はつぎの要領でコンポーネントのMTTFdを見積もることとしている。

- a) コンポーネントメーカーのデータ
- b) ISO13849-1附属書C, Dの方法
- c) a) b) でMTTFd値を決められない場合、MTTFd値を10年とする。

## 3. コンポーネントのMTTFd

安全関連部に使用されるコンポーネントは油圧バルブ、空圧バルブ、リレー、位置スイッチなどさまざまである。ここでは、ISO13849-1附属書Cから油空圧に関連するMTTFdの評価方法を紹介する。

### 3.1 グッド・エンジニアリング・プラクティスメソッド

ISO13849-2の基本安全原則、十分吟味された安全原則、またはコンポーネント設計のための関連規格に従って製造されている場合は、ISO13849-1の表C. 1 からMTTFd又は $B_{10d}$  (コンポーネントの10%が危険側故障を生じるまでの平均サイクル数)の値を見積もることができる。

基本安全原則とは、適切な材料の使用、適切な製造方法、圧力や速度の制限など安全に関する基本的

な決まりを示したものである。十分吟味された安全原則とは、ばね設計において疲労を考慮するとか、切替弁のフェイルセーフなど個々の用途の安全に対する決まりを示したものである。

### 3.2 ISO13849-2液圧式コンポーネント設計のための基本安全原則

十分吟味された安全原則に従って製造され、かつ使用者に適切な用途、運転条件を指示している場合、MTTFdは150年と見積もることができる。

### 3.3 $B_{10d}$ によるMTTFdの計算

試験により $B_{10d}$ を確定し、下記の式(1)からMTTFdを計算する。

$$MTTFd = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}} \dots\dots\dots (1)$$

- $B_{10d}$ : コンポーネントの10%が危険側故障を生じるまでの平均サイクル数
- $n_{op}$ : 年間の平均運転回数

コンポーネントの故障は一般的にワイブル分布に基づいていると考えられる。試験結果からワイブル確率紙や最尤推定法によりワイブル分布の形状パラメータと尺度パラメータを見積り、 $B_{10d}$ を確定する。

## 4. おわりに

今回はグループ安全規格のISO13849-1から、主にパフォーマンスレベルPLと平均危険側故障時間MTTFdについて解説した。機械装置の安全性に関する考え方は、確定論的アプローチからIEC61508の機能安全規格の概念、すなわち確率論的なアプローチを取り入れた定量的な評価に変化してきた。コンポーネント設計もこの評価と深く関わっていることを理解していただければ幸いである。

### 参考文献

- 1) 財団法人規格協会: JIS ハンドブック 機械安全 (2014)
- 2) 越川清重, 植草源三, 村田忠: 実務に役立つ信頼性技術, 日刊工業新聞社, p. 90-102 (1982)

(原稿受付: 2016年11月29日)

## 研究室紹介

室蘭工業大学 機械システム設計学研究室  
(フルードパワーに関する学生との研究活動)

## 著者紹介

かざ ま とし はる  
風 間 俊 治室蘭工業大学大学院  
〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1  
E-mail: kazama@mmm.muroran-it.ac.jp

1988年横浜国立大学大学院修了。2005年室蘭工業大学教授、現在に至る。主に、トライボロジー、キャビテーション、設計工学などの教育研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本トライボロジー学会、日本機械学会等の会員。博士（工学）。

## 1. はじめに

国立大学法人 室蘭工業大学は、北海道内の高等教育機関のひとつである。昭和24年に北海道初の工科系4年制大学として発足した。ただし、母体をさかのぼると、実に約130年の歴史と伝統を有する。幾多の改組再編を経て、現在は、4学科14コースの学士課程、3専攻14コースの博士前期課程、1専攻3コースの博士後期課程で構成されている。機械工学に関する教育研究は、機械航空創造系学科に置かれる機械システム工学コースならびに生産システム工学系専攻に置かれる機械工学コースとロボティクスコースで主に行われている。なお、道内では、北海道大学、北見工業大学、北海道科学大学、室蘭工業大学ならびに旭川、釧路、函館、苫小牧の各工業高等専門学校等に機械系教育課程を有する。

キャンパスは、国内外屈指の鉄鋼業関連企業を抱える、自然が豊かな「ものづくりのマチ」を掲げる、室蘭市（北海道中央南部の胆振（いぶり）地域）にある。支笏洞爺国立公園や登別温泉に隣接し、北国でありながら気候が温暖であり、道内各地と比較しても、夏は涼しく、冬は温かく雪は少ない。北海道の玄関口である新千歳空港から特急列車や高速バスを利用して1時間強、札幌から特急列車で1時間半程度の距離にあり、交通の便はよい。なお、室蘭の由来は、アイヌ語の「モ・ルエラニ」（小さな・下り路）であり、本学もまた、小さな高台に置かれている。

研究室内の活動やフルードパワーに関する研究テーマについては、すでに解説記事<sup>1,2)</sup>やホームページ<sup>3)</sup>等で表しているため、本稿では、代表著者より概要を述べるに留め、現役の学生諸君や卒業生の方々に寄せて頂いたコメントを載せることにより、学生の視点による研究室の様子や研究への取り組みを紹介して、編集委員会からの依頼に応えたい。なお、研究指導は、主に教員2名（風間俊治教授、成田幸仁准教授）で担当しているが、紙面等の都合上、フルードパワー関連の一部に限定されることを付記する。

## 2. 研究グループの活動について

研究室内の年間スケジュールは、例年、概ねつぎの通りである。4月の研究室配属の後、オリエンテーションや歓迎会を経て研究室の活動が始まる。7～8月に研究室内の前期中間発表会を行い、お盆期間を挟んで研究室は夏休みとなる。9月に前期分の卒業研究の審査発表会の準備と実施、12月に研究室内の後期中間発表会の後、年末年始の大学一斉休業に合わせて研究室も冬休みに入る。年が明けると、修士1年生の中間発表会（平成28年度は12月）、2月に修士論文および卒業論文の審査発表会、3月に日本機械学会学生会の卒研発表会などがあり、卒業式を迎えて1年間の行事が終わる。その間、研究室内の各種パーティ、学科内の学生主体のソフトボール大会やフットサル大会などがあり、学生達は、研究と並行してキャンパスライフを大いに楽しみ、充実した日々を過ごしている。

フルードパワーに関するテーマを選んだ学生達は、ポンプ・アクチュエータとキャビテーションの両チームに分かれて、ほぼ連日、研究に勤しんでいる。

前者のチームでは、機器の安全性や効率ならびに環境の負荷の低減の向上を狙った、トライボロジー特性の把握や最適設計法の確立を念頭に、ピストン、ベーン、歯車の各油圧ポンプならびに油空圧シリンダのしゅう動部温度やポンプ・アクチュエータ諸性能の計測を実験的に推進している。

後者のチームでは、液圧機器の信頼性や寿命なら

びに各種作動油や水道水の適用性の改善を見据えた、物理現象の解明や課題克服法の提案を目指して、噴流衝突式試験装置によるキャビテーション壊食実験やキャビテーション噴流の可視化に取り組んでいる。

### 3. 所属学生や留学生からのメッセージ

主に平成28年度の在学生数名による、研究テーマの紹介や研究室の印象を以下に載せる。

現在（平成28年度）私は、三年次に就職活動を始めた際、学んでいる機械工学は、非常に幅広い分野の企業から必要とされていることを知りました。その中でも私は土木の分野で機械工学の専攻が活かせる仕事に就きたいと思うようになり、機械工学の中でも土木に直結するフルードパワー（油圧）システムについて研究している風間先生の研究室を選びました。現在「斜板式アキシャルピストンポンプの振動計測」と題して油圧ポンプの高効率化につなげていくための研究をしています。

私のテーマに限らず、油圧システムに関する実験は地味なものが多く、1回の実験で数時間掛かるものばかりで根気が要りますが、油圧システムは建設・医療・交通など幅広い分野で活用されているためやりがいを感じることができます。

風間先生は、結果よりもその過程を大切にされる先生で、例えば実験での1つの手順についても、なぜそれを行うのか丁寧に説明して下さり、その場だけの知識にならないようなお話をしてくださいます。ここで学んだことは今後、社会に出ても役に立つと感じています。

（吉田 笑 君，学部4年）

私が行っている研究は、噴流キャビテーション試験法による高剛性油の性能評価です。建設機械などの油圧システムに使われる石油系作動油には圧縮性があり、応答の遅れなどが起こります。そこで、圧縮性が非常に低い高剛性油が開発されています。しかし、壊食に関する特性が分からないために壊食実験を行い、壊食が少ない高剛性油を見出すことが目的です。

（星 政輝 君，学部4年）

本研究室では風間教授、成田准教授の下、伝達装置や油圧関係の研究に取り組んでいます。私は現在、風間教授の下、油圧シリンダという機器の性能特性実験研究を行っております。私は建設機

械メーカーに就職予定で、関連する技術の研究に取り組みたいと思い、本研究に日々チャレンジしています。研究室全体としては、基本的に学生は実験やシミュレーション等に励んでいます。実験装置の製図、設計を行う事も多々あり、本研究室の特徴かと思えます。

（小田原 寿弥 君，学部4年）

The teacher works very hard and the students are working hard. Every week there will be a meeting, we will report their experience. In this lab., I learned a lot of knowledge. We will raise questions and teacher will help students solve the problem on the second day. The students help each other, and some people help me to learn Japanese, and some people help me to learn professional knowledge. It is my honor to be in this group. Thank you very much.

（Ren Yanlin 君，中国短期研究生）

I am Thiranan Tiwaratreewit as an exchange student. I was a member of SEKKEI laboratory at Muroran Institute of Technology in 2013. I was proud and very happy to attend in this laboratory. Prof. Kazama Toshiharu; Sensei is very kind for me. Big thanks for good take care and warm welcome to me.

The learning outcomes during I have been studied at Muroran IT as an exchange student program for my short term (around three months and a half month) as follow; (1) My research study, I was doing my research continuously from Thailand in the field of logistics engineering and supply chain management about the performance evaluation of green supply chain management for Thai Electronics Industry. From my exploration research, I gained a lot of suggestions related electronics industry from my supervisor (Prof. Kazama Toshiharu; sensei) and I would follow his advice into research paper. Now it was almost complete success that I was very satisfied. (2) Cultural environment, I ...

（Thiranan Tiwaratreewit さん，タイ短期研究生）

#### 4. 卒業生からのメッセージ

本研究室を卒業して、フルードパワー分野で技術者として活躍している若手OBから頂いた、当時の思い出やエピソードを紹介する。

私は、2006年4月～2009年3月まで室蘭工業大学機械システム工学科の機械システム設計学研究室（風間研究室）に在籍し、風間先生にご指導いただきました。現在は、建機メーカーにて油圧システムおよびコンポーネント内部の流れ現象に関する研究に従事しております。

液圧システムを用いた力強く多様な動きが可能な機械に興味があり、トライボロジーをテーマに油圧ポンプや軸受など様々な油圧コンポーネントを対象に研究を行っている風間研究室の所属を希望しました。

在籍当時の研究テーマは、油中のキャビテーションエロージョンに関する内容でした。研究室のテーマを紹介された時に、自分が今まで聞いたことも想像したことも無かった現象によって破壊が起こるといふ事実に強い新鮮さを感じ、このテーマを選択したことを覚えています。研究室では、もともと研究が好きだったことに加え、筆者がやりたいと提案したことに対し、風間先生が的確な助言や実験環境の用意を行って頂けたことで、連日実験室に籠りきりになって楽しく研究をしていました。

風間先生は、研究そして教育に対して非常に真剣に誠実に取り組まれている先生です。授業でのわかりやすさや楽しさを損なわない工夫はもちろんのこと、研究においても先生から一方的に研究指示をするのではなく、実験環境の準備や学生への助言に努め、学生自身がその研究の大切なことに気が付けるように努力しておられました。

この風間先生の静かでありながらも非常に熱いご指導を頂き、研究室では多くのことを学ばせて頂きました。特に筆者は、就職後もフルードパワー分野での研究を行っているため、今になっても「あの時の風間先生の言葉はこういうことだったのか」とご指導頂いたことが役立ったと実感することが多く、大変感謝しております。

（熊谷賢人氏，2009年修士卒）

空気圧機器メーカーに勤務しており、現製品の技術担当をしております。担当の機器は、アクチュエータであり、メインはエアシリンダです。日々、製品に触れながら経験を積んでおります。

学部生時代から風間先生の授業を受講する機会があり、先生の講義の仕方が好きで研究室を選びました。研究室に所属して、流体潤滑に関する研究テーマを持ちました。具体的には、ジャーナル軸受の潤滑に関する研究です。実験主体の研究であった為、知識の乏しい学部生時代でも多くの現象に直面することができ、貴重な経験が出来たと感じております。ジャーナル軸受自体は、潤滑の基礎であるため多くの参考図書が存在し、不明点が発生するたびに図書館へ通ったことを思い出します。

大学院生時代になり、研究に対する理解が深まるとともに、参考文献では補い切れない現象に直面する機会が増し、悩む機会も増えました。日々、風間先生の部屋のドアをノックしたことを思い出します。その際は、先生が非常に真摯にご対応頂いたことを思い出します。

研究室の思い出で印象に残っていることは、研究ゼミや研究報告会です。研究ゼミでは、各学生が自身の研究に関する報告・連絡・相談が行われます。自身以外の研究内容や進め方を共有できる良い機会であった為、知識がより深まりました。また、私以外の学生も苦勞していることがわかりました。研究報告会は緊張した雰囲気で行われ、時に厳しい意見が飛びます。

非常にメリハリのある研究室に所属したことで、社会人になった今も当時の経験が役立っていると感じ、感謝しております。

（齋藤 圭佑 氏，2013年修士卒）

#### 5. む す び

本研究室の雰囲気を感じ取っていたければ幸いです。本学会、卒業生、学生の皆様に心より感謝申し上げます。

主な解説記事他

- 1) 風間：油空圧技術，Vol. 55, No.7 (2016)，57/60.
- 2) 風間，成田：設計工学，Vol. 46, No. 11 (2011)，646.
- 3) <http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~kazama/>

（原稿受付：2016年11月16日）

## 企画行事

## 平成29年度企画行事紹介

## 著者紹介



ふじ た とし のり  
藤 田 壽 憲

東京電機大学工学部  
〒120-8551 足立区千住旭町5  
E-mail: tfujita@cck.dendai.ac.jp

1992年東京工業大学助手を経て、2002年東京電機大学助教授、2004年同大学教授、現在に至る。流体計測・制御、主として空気圧システムの解析、制御の教育・研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、計測自動制御学会などの会員、博士（工学）。



さくら い やす お  
桜 井 康 雄

足利工業大学工学部  
〒326-8558 足利市大前町268-1  
E-mail: ysakurai@ashitech.ac.jp

昭和61年上智大学大学院理工学研究科博士前期課程機械工学専攻修了。富士重工業(株)、上智大学助手等を経て平成12年足利工業大学講師、平成13年同大学助教授、平成19年同大准教授、平成21年同大教授、現在に至る。博士（工学）。

## 1. はじめに

企画委員会は、委員長 藤田壽憲（東京電機大、学会理事）、副委員長 成田晋（KYB(株)）、幹事 桜井康雄（足利工大、学会理事）を含め、学校側委員19名、企業側委員17名および学会事務局で構成されている。本委員会は、講演会およびセミナー等の学会の集会事業の企画立案および実施を担当する。

本稿では、平成28年度の事業についてまとめるとともに、未確定な部分もあるが、平成29年度実施予定の企画行事の内容を紹介する。

## 2. 平成28年度行事まとめ

平成28年の春季フルードパワーシステム講演会は、主査を金委員（東京工大）、副査を内堀委員（宇部高専）、メンバーを大内委員（山梨大）、製品・技術紹介セッションの主査を曾谷委員（川崎重工業(株)）としたワーキンググループ（以後、WG）で平成28年5月26日（木）、27日（金）に機械振興会館において実施された。1件の特別講演、1件の国際特別講演、41件の講演（技術紹介セッション7件を含む）が行われた。参加者は126名であった。なお、この内12名は後述する春季講演会併設セミ

ナーと併せての登録であった。

春季講演会併設セミナーは、学会の企画事業を担当する企画委員会と学会誌の作成を担当する編集委員会との合同企画である。平成28年度の本セミナーは企画委員会が主導して実施した。企画委員会でテーマ案および原稿執筆者候補を選出し、編集委員会に諮り学会誌を制作していただく。この学会誌をテキストとして同じテーマのセミナーを実施する。平成28年度の本セミナーは春季講演会の前日である25日（水）に機械振興会館を会場として開催した。テーマは「フルードパワーシステムを変えるIoT、ICTの最新技術」、参加者数は25名であった。本セミナーは主査を成田副委員長（KYB(株)）、メンバーを加藤（猛）委員（(株)コガネイ）、高後委員（日本電産トソク(株)）、曾谷委員（川崎重工業(株)）、和田委員（CKD(株)）としたWGで実施した。

第4回日中国際共同ワークショップが春季フルードパワーシステム講演会の前日である5月25日（水）に機械振興会館を会場として開催された。主査は伊藤委員（芝浦工大、国際交流担当理事）、メンバーを落合委員（協立機電工業(株)）としたWGにより実施された。参加者は約40名（中国からの参加者9名含む）、日本、中国から5件ずつの講演が行われた。

フルードパワー技術に関する啓蒙活動の一つとして、また、学会協賛の公益事業として、本年度も足利ユネスコ学校（開催期間：8月1日（月）～5日（金）、会場：足利工業大学総合研究センター、足利学校等）への協賛を実施した。本学会とフルードパワー技術の紹介は、8月3日（水）のモノ作り実習の前に映像を中心に約15分間行った（参加者：小学校3年生～6年生の生徒約70名、小学校教諭10名）。

企画委員会が実施のサポートをしている特別教育講座「油圧システムのモデリングの基礎をつかむ—ブロック線図とパワーフロー—」が9月6日（火）に機械振興会館で14名の参加者を得て実施された。

平成28年秋季フルードパワーシステム講演会は、主査を田中豊委員（法政大学）、副査を只野委員（東京工大）としたWGで10月19日（水）、20日（木）に青森市文化観光交流会館ねぶたの家ワ・ラッセ（青森市）を会場として行われた。1件の特別講演、43件の講演が行われた。参加者は90名であった。さらに、本学会主催の講演会初の試みとし

て、21日（金）にテクニカルツアー（青函トンネル記念館，体験坑道等見学）が実施された。17名の参加者を得て好評裏に終了した。

平成28年度のオートムセミナーは主査を和田委員（CKD株），副査を張委員（SMC株）としたWGで11月25日（金）に名古屋市のトヨタ産業技術記念館を会場として実施された。テーマは「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」とし，種々の製品や部品を製造する生産技術分野で利用されているフルードパワー技術の活用事例に関する4件の講演が行われた。受付開始を9時30分とし，午前中はトヨタ産業技術記念館内を見学できるように配慮した。13時から講演形式のセミナーを実施した。参加者は24名であった。

平成28年度のウインターセミナーは平成29年2月17日（金）に開催予定である。主査を高後委員（日本電産トソク株），メンバーを田中豊委員（法政大），兵藤委員（東京計器株），宮原委員（（公財）鉄道総合技術研究所）としたWGで実施の準備を進めている。テーマは「自動車の動力伝達機能を支える油圧技術」とし，講演は4件，会場は機械振興会館を予定している。

### 3. 平成29年度行事予定

#### 3.1 春季フルードパワーシステム講演会

平成29年の春季講演会は，主査を只野委員（東京工大）としたWGで具体案を検討している。5月25日（木），26日（金）に機械振興会館において開催することが確定している。特別講演は鈴木康一教授による「フルードパワーが拓く次世代ロボティクス」を予定している。オーガナイズドセッションは2テーマ企画している。26日（金）の午後は製品・技術紹介セッション（主査：落合委員，協立機電工業株）を行った後，本学会の総会を予定している。

#### 3.2 春季講演会併設セミナー

平成29年度の本セミナーは，編集委員会が主導で特集号を作成し，セミナーの実施のみを企画委員会が担当する。企画委員会ではセミナー実施にあたり主査を内堀委員（宇部高専）とし準備を進めている。春季講演会の前日である24日（水）に機械振興会館を会場とし実施する予定である。テキストとなる学会誌平成29年3月号（Vol. 48 No. 2）の特集号のテーマは「フルードパワーに役立つセンシング技術」である。テキストを学会誌とすることで，この学会誌に特集された解説記事の内容を深く理解

する機会を設けている。

#### 3.3 秋季フルードパワーシステム講演会

平成29年は本学会主催の国際シンポジウム（開催地：福岡，開催日：10月24日（火）～27日（金））が開催される年であるため秋季講演会は実施しないことに決まっている。平成30年の秋季講演会に期待していただきたい。

#### 3.4 オートムセミナー

平成29年度のオートムセミナーは主査を名倉委員（コマツ）とし準備を進めている。開催時期は11月中下旬を予定している。学会誌7月号の会告から本セミナーの案内を開始する予定である。

#### 3.5 ウインターセミナー

平成29年度のウインターセミナーは平成30年2月中旬から3月中旬の間に実施を予定している。主査を赤木委員（岡山理大），副査を小林委員（岡山理大）として準備を進めている。学会誌11月号の会告から本セミナーの案内を開始する予定である。

#### 3.6 学会協賛公益事業

本学会ならびにフルードパワー技術を多くの方々に知ってもらうことを目的として，足利市には限定されるものの，足利ユネスコ協会主催の足利ユネスコ学校への協賛（10万円の資金援助）を行っている。平成29年度の本事業に対する協賛の継続は平成29年3月の理事会に諮る予定である。

#### 3.7 特別教育講座

本学会に設置されているOHC-Sim特別研究委員会が主催する特別教育講座の運営を企画委員会はサポートしている。平成29年度も油圧システムにおけるモデリングに関する内容の講座を実施する予定である。実施時期は8月の第4週目後半を予定している。本講座の案内は学会誌7月号で行う予定である。

### 4. おわりに

本稿では平成28年度に実施した企画事業のまとめと，平成29年度に予定している企画事業について述べた。本稿を執筆した時期が平成28年12月上旬であったため，不確定な部分が多々あることはご容赦願いたい。企画委員会は今後も会員の方々に満足いただける企画事業を実施するよう努力していきたいと考えている。会員の方々には学会ホームページで新しい情報をご確認いただくようお願いし本稿の結びとする。

（原稿受付：2016年12月3日）

## 企画行事

## 平成28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



た なか ゆたか  
田 中 豊

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

1985年東京工業大学大学院総合理工学研究所修士課程修了，その後，東工大精密工学研究所助手を経て，1991年法政大学講師，1992年同助教授，2002年同教授，現在に至る。工学博士（1991年東京工業大学）。平成28年度秋季講演会の企画主査

平成28年度の秋季フルードパワーシステム講演会は2016年10月19日(木)～21日(金)まで，青森市文化観光交流施設「ねぶたの家ワ・ラッセ」で開催された。

写真1に示す会場のねぶたの家ワ・ラッセは2011年1月に青森駅前に開館した新しい観光施設で，館内には有名なねぶた祭の歴史や魅力を紹介したり，祭りで最優秀賞を受賞した大型ねぶたの実物を展示したり，ねぶた祭の囃子を実体験したりできるミュージアムホールと，講演会などが行える3つの学習室とイベントホールを備えている。

講演会は1件の特別講演と油圧・空気圧・水圧・機能性流体に関連する43件の技術講演が，4つのオーガナイズドセッションを含む10のセッションで行われ，2日間にわたり参加登録者総勢90名に



写真1 ねぶたの家ワ・ラッセの外観



写真2 技術講演セッションの様子

よる活発な議論が展開された。写真2に技術講演セッションの様子を示す。

全体の講演数は，企画されたオーガナイズドセッションとして「油圧制御技術と制御技術に貢献する油圧要素機器」に7件，「ソフト・ロボティクス」に9件の講演があった。またその他の一般技術講演として，油圧・水圧関連に10件，空気圧関連に12件，機能性流体関連に5件の発表がそれぞれあった。

二日目（10月20日）の午前中には，ねぶた囃子と踊りの体験会，午後には，青森ねぶた祭保存会の對馬忠雄氏をお招きして，青森ねぶた祭の歴史と発展と題した特別講演会が行われた。青森ねぶた祭は，毎年8月2日～7日に開催される東北三大祭の一つで，歴史的な物語を題材にした「ねぶた」と呼ばれる大型の灯籠が「はねと」と呼ばれる踊り手とともに夜の街を運行するそうで，平成28年は合計22台のねぶたが登場したとのことである。会場での展示や実演から伝わる壮大な祭りの臨場感と特別講演の興味ある内容に，一度は是非，本物の祭を体験したいと思った参加者も多かったのではないだろうか。

二日目の夕方からは，会場を青森国際ホテルの萬葉の間に移し，表彰式と技術懇談会が開催された。この表彰式は，その年の春季講演会の最優秀講演賞受賞者の方々を表彰するもので，今回は社会人部門から株式会社タカコの辻井喜勝殿，学生部門からは東京電機大学の武井裕輔殿と芝浦工業大学の八木澤



写真3 春季講演会の最優秀講演賞の表彰者

遼殿の3名の方々が表彰された。写真3に小山紀会長を囲んだ3名の受賞者の方々を示す。

続いて行われた技術懇談会では、地元の味覚と日本酒を囲み、参加者同士の交流が活発に行われた。また会の途中では、写真4に示す津軽三味線と地元民謡のアトラクションも行われ、技術懇談会は大いに盛り上がった。

三日目（10月21日）にはテクニカルツアーが企画され17名の参加者があった。ツアーは青函トンネル記念館と立坑見学、竜飛崎の見学等で構成された。体験立坑見学では、日本一短い私鉄「竜飛斜坑線」に乗って、海面下140mトンネル工事を模擬体験することができるようになっている。斜度14度の斜坑線は地の底へ吸い込まれるように10分ほど海面下の体験坑道駅に到着し、作業坑内には実際にトンネル工事に使用された油圧作業機械等と共に難工事の様子が再現展示されていた。写真5に展示の様子を示す。立坑見学は1時間ほどの短い時間であったが、昭和の偉大な土木工事の現場を体験できて、参加者一同、非常に感慨深いものがあったようである。またツアーの帰り道すがら、運よく新幹線の通過時間帯に遭遇し、青函トンネルの青森側口の見学コーナーで写真6に示すトンネル侵入の様子を見学した。3月に新函館まで新幹線が開通してから青函トンネルを通過するようになったが、スピードを落として走るので見学には向いているようである。

講演や技術懇談会、テクニカルツアーなど盛りだくさんの内容の秋季講演会であったが、多くの参加者に東北の秋を満喫していただけたようである。最後に、本講演会の開催にご協力いただいた企画委員会の皆様に感謝申し上げます。またご支援を賜った公



写真4 津軽三味線のアトラクション



写真5 青函トンネル立坑内



写真6 青函トンネル青森側出入口の新幹線

益社団法人青森観光コンベンション協会と青森市役所交流推進課の関係者の皆様にもこの場を借りて御礼申し上げます。

（原稿受付：2017年1月1日）

## 会 告

## 〈理事会・委員会日程〉

|       |           |
|-------|-----------|
| 2月23日 | 委員長会議     |
| 3月24日 | 理事会       |
| 3月28日 | 企画委員会     |
| 3月31日 | 編集委員会     |
| 4月10日 | 情報システム委員会 |
| 4月24日 | 基盤強化委員会   |

## 〈理事会報告〉

1月17日 15:00～17:00 機械振興会館  
地下3階B3-3号室 (出席者18名)

- 1) 国際シンポジウム福岡について
- 2) 平成28年度学会賞について
- 3) 平成29年度フェロー認定について
- 4) 賛助会員への連絡方法について
- 5) 会員サービスについて
- 6) 学会財務基盤の強化の進捗状況について
- 7) その他

## 〈委員会報告〉

## 平成28年度第4回委員長会議

12月20日 15:00～17:00 機械振興会館  
B3-8号室 (出席者7名)

- 1) 国際シンポジウム準備状況について
- 2) 平成28年秋季FPS講演会準備状況について
- 3) フェロー推薦状況について
- 4) 50周年の進め方について
- 5) 学会財務基盤の強化の進捗状況について
- 6) 評議員会の議題について
- 7) その他

## 平成28年度第4回編集委員会

2月3日 14:00～17:00 KKR沼津はまゆう  
会議室 (出席者15名)

- 1) 会誌特集号の現状と企画
  - ・ Vol. 48 No. 2 「フルードパワーに役立つセンシング技術」
  - ・ Vol. 48 No. 3 「モデルベース開発とその活用事例」
  - ・ Vol. 48 No. 4 「フルードパワーにおけるトライボロジーの展開」
  - ・ Vol. 48 E1 (電子出版号) 「緑陰特集」
  - ・ Vol. 48 No. 5 「福祉・介護分野におけるフルードパワーの最新技術 (仮)」

- ・ Vol. 48 No. 6 「災害現場で活用されるフルードパワー機械と周辺技術 (仮)」
  - ・ Vol. 49 No. 1 「IFPEX2017」
- 2) その他
    - ・ 会議報告
    - ・ トピックスについて
    - ・ 今後の特集
    - ・ 事務局からの連絡

## 平成28年度第4回企画委員会

1月27日 15:00～17:00 機械振興会館  
5階5S-1号室 (出席者15名)

- 1) 平成28年度実施事業について
  - ・ ウィンターセミナー
  - ・ その他
- 2) 平成29年度実施事業について
  - ・ 平成29年春季講演会併設セミナー
  - ・ 平成29年春季講演会
  - ・ オータムセミナー
  - ・ その他
- 3) その他
  - ① 研究委員会の設置
  - ② 講演会・セミナー等のキャンセル事の扱いについて
  - ③ 予告会告・会告について
    - ・ 平成29年春季講演会併設セミナー (3月号)
    - ・ 平成29年春季講演会 (3月号)
    - ・ 平成29年秋季講演会「製品・技術紹介セッション」(3月号)
  - ※ 会誌1月号 (48-2号, 1/4頁版原稿提出  
締切12月5日予定)
- ④ その他

## 平成28年度第3回基盤強化委員会

2月14日 15:00～17:00 機械振興会館  
地下3階 B3-9号室 (出席者名10名)

- 1) 会員サービスについて
- 2) 外部への情報発信について
- 3) FP道場11について
- 4) バーチャルミュージアムについて
- 5) 研究委員会について
- 6) その他

## 平成28年度第3回情報システム委員会

1月13日 15:00～17:00 機械振興会館  
事務局 (出席者12名)

- 1) 会議報告の担当者について
- 2) HP更新について
- 3) その他

## 会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp/>) をご覧ください

平成29年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー  
「フルードパワーに役立つセンシング技術」  
開催日：平成29年5月24日(水)

## 開催趣旨：

平成29年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナーを、平成29年5月24日(水)午後に機械振興会館(東京都港区)で開催いたします。

フルードパワーの高性能化・高機能化を図るうえで、さまざまな物理量のセンシング技術が必要とされ始めており、計測すべき情報の種類や役割も多様化し、それに伴うセンシング技術も近年飛躍的に進化しています。本併設セミナーではフルード

パワーに活用され始めた、もしくはこれから活用される可能性の高い、センシング技術の最新情報を紹介していただきます。

詳細は学会ホームページにて、ご確認をお願いいたします。

なお、日本フルードパワーシステム学会誌48巻2号(2017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。

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催  
平成29年春季フルードパワーシステム講演会  
開催日：平成29年5月25日(木)・26日(金)

## 開催趣旨：

平成29年春季フルードパワーシステム講演会は平成29年5月25日(木)・26日(金)に機械振興会館(東京都港区)で開催されます。本講演会では、一般講演に加えて、東京工業大学の鈴森康一教授による特別講演「フルードパワーが拓く次世代ロボティクス(仮)」やオーガナイズドセッション「機能性

流体テクノロジーとその次世代FPSへの革新的展開」,「フルードパワーの制御システム」を企画しております。その他、製品技術紹介セッションや技術懇談会などを予定しております。詳細は学会ホームページに随時掲載いたしますので、ご確認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。

平成29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：平成29年5月26日(金)

## 開催趣旨：

本講演会では、企業関係の方々に製品・技術の紹介をいただくオーガナイズドセッション(「製品・技術紹介セッション」)を企画しました。本企画は、企業関係の方々に、現在、企業がお持ちの製品・技術あるいは検討課題などを、学会主要行事の1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・技術の交流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、平成15年より表彰事業の1つとして設立された「最優秀講演賞」社会人部門の審査対象となります。企業関係の会員みなさまの参加を心よりお待ちしております。

## 会 告

## 共催・協賛行事のお知らせ

## 協賛行事

|   |
|---|
| <p><b>TECHNO-FRONTIER 20117 (専門技術展および技術シンポジウム)</b><br/>           会 期：2017年4月19日(水)～21日(金)<br/>               〈展示会〉10：00～17：00<br/>               〈技術シンポジウム〉10：00～17：00<br/>           会 場：幕張メッセ(国際展示場) 展示ホール4-8：展示会 国際会議場：技術シンポジウム<br/>           主 援：一般社団法人日本能率協会</p>   |
| <p><b>一般社団法人日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2017</b><br/> <b>ROBOMECH 2017 in Fukushima 再生と飛躍を導くロボティクス・メカトロニクス</b><br/>           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<br/>           会 期：2017年5月10(水)～13日(土)<br/>               10日(水)：ワークショップ, チュートリアル, 部門登録者総会<br/>               11日(木)：ポスターセッション, 企業展示, 特別講演, 表彰式, 懇親会(ホテルハマツ)<br/>               12日(金)：ポスターセッション, 企業展示<br/>               13日(土)：公開講座, ワークショップ, チュートリアル, テクニカルツアー<br/>           大会Webページ：<a href="http://jsme.or.jp/rmd/robomech2017/">http://jsme.or.jp/rmd/robomech2017/</a></p> |
| <p><b>トライボロジー会議2017 春 東京</b><br/>           開 催 日：2017年5月15日(月)～17日(水)<br/>           会 場：国立オリンピック記念青少年総合センター<br/>               (〒151-0052 東京都渋谷区代々木神園町3-1 センター棟)<br/>           申込み・問合せ：一般社団法人日本トライボロジー学会 事務局<br/>               (〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館 407-2号室)<br/>           TEL：03-3434-1926 FAX：03-3434-3556<br/>           E-mail：jast@tribology.jp<br/>           ホームページ <a href="http://www.tribology.jp">http://www.tribology.jp</a> から申込みいただけます。</p>   |
| <p><b>一般社団法人日本機械学会関西支部 第349回講習会</b><br/> <b>「構造・強度設計における数値シミュレーションの基礎と応用」</b><br/>           日 時：2017年5月29日(月)10：00～16：30<br/>               30日(火) 9：30～16：30<br/>           会 場：大阪科学技術センター8階中ホール [大阪市西区靱本町1-8-4 / 06-6443-5324 / 地下鉄四つ橋線「本町」駅下車, 28号出口北へ400m]<br/>           関西支部ホームページ：<a href="http://www.kansai.jsme.or.jp/">http://www.kansai.jsme.or.jp/</a><br/>           申 込 先：一般社団法人日本機械学会関西支部 〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 TEL：06-6443-2073 FAX：06-6443-6049 E-mail：info@kansai.jsme.or.jp</p>                             |
| <p><b>「EU Green Gateway to Japan」プロジェクト</b><br/>           日 程：2017年7月1日～2019年12月<br/>           場 所：東京<br/>           主 催：欧州連合(EU)<br/>           運営事務局：(一社)日本能率協会産業シンクセンター</p>  |
| <p><b>第45回可視化情報シンポジウム</b><br/>           開 催 日：平成29年7月18日(火)～19日(水)<br/>           開催場所：工学院大学 新宿キャンパス 東京都新宿区西新宿1-24-2<br/>           ホームページ：<a href="http://www.visualization.jp/symp2017/">http://www.visualization.jp/symp2017/</a></p>   |

## 日本混相流学会主催・学会設立30周年記念

## 日本混相流学会混相流シンポジウム2017講演発表募集

主 催：日本混相流学会

共 催：電気通信大学

開 催 日：2017年8月18日(金)～20日(日)または19日(土)～21日(月)  
(決まり次第ホームページでアナウンスします)

会 場：電気通信大学（東京都調布市）

ホームページ：http://www.jsmf.gr.jp/mfsymp2017/

## NO.17-13 Dynamics and Design Conference 2017 第15回「運動と振動の制御」シンポジウム

総合テーマ：『今、次世代を支えるダイナミクスを考える』

U R L：http://www.jsme.or.jp/conference/dmccconf17

企 画：一般社団法人機械学会 機械力学・計測制御部門

開 催 日：2017年8月29日(火)～9月1日(金)

同時開催：Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics &amp; Control

会 場：愛知大学 豊橋キャンパス（愛知県豊橋市畑町1-1）

## 第35回日本ロボット学会学術講演会

主 催：一般社団法人 日本ロボット学会学術講演会

会 期：2017年9月11日(月)、12日(火)、13日(水)、14日(木)  
(9月11日はオープンフォーラムのみ、12日から一般講演)

場 所：東洋大学 白山キャンパス（〒112-8606 東京都文京区白山 5-28-20）

H P：http://rsj2017.rsj-web.org/

## 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<br>(2月10日現在) | 970   | 16   | 137  | 133  |
| 差 引 き 増 減          | +2    | +1   | +1   | -1   |

正会員の内訳 名誉員14名・シニア員42名・ジュニア員191名・その他正会員723名

## 正会員

森原 稔雄（シーメンス株式会社）

曹 鉉子（Hankil Hightechpia）

三橋 知明（ ）

大関 浩（千葉工業大学）

富松 幸亮（日本ルーブリゾール株式会社）

## 学生会員

李 文思（立命館大学）

編集室

次号予告

—特集「モデルベース開発とその活用事例」—

|                                       |             |
|---------------------------------------|-------------|
| 〔巻頭言〕「モデルベース開発とその活用事例」発刊にあたって         | 内堀 晃彦       |
| 〔総論〕フルードパワーシステムとモデルベース開発              | 眞田 一志       |
| 〔解説〕自動車業界でのモデルベース適用事例                 | 秋葉 博幸       |
| 油圧システムのモデリング                          | 林 光昭        |
| 1 DCAEの考え方に基づくモデルベース開発                | 大富 浩一       |
| 大学のフルードパワー研究・教育におけるデジタルコントロールの活用      | 佐藤 恭一       |
| 1 DCAEによるフルードパワーシステム設計に関する研究委員会       | 桜井 康雄       |
| コンパインのエンジン振動、騒音低減へのCAEモデルの適用          | 辻内 伸好、明井 政博 |
| HILS技術を用いた仮想走行試験手法の基礎研究               | 渡辺 信行       |
| 〔会議報告〕山梨講演会2016におけるフルードパワー技術研究        | 吉田 和弘       |
| 計測自動制御学会・流体計測制御シンポジウムにおける研究動向         | 舩木 達也       |
| ICMT2016会議報告                          | 巖 祥仁        |
| 〔トピックス〕建設機械における日・米・欧の排出ガス規制対応技術の変遷と今後 | 田村 好美       |
| 細径人工筋肉の研究と実用化                         | 鈴木 康一       |
| 特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム・特許文献を見る4        | 木原 和幸       |
| ドイツ駐在員日記                              | 塩見 幸治       |
| 〔研究室紹介〕                               | 三井 和幸       |
| 〔企画行事〕平成28年度オースタムセミナー開催報告             |             |
| 「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」      | 和田 重伸       |

平成28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)      | 委員 中 野 政 身 (東北大学)     |
| 副委員長 村 松 久 巳 (沼津工業高等専門学校) | 中 山 晃 (日立建機株)         |
| 委員 伊 藤 雅 則 (東京海洋大学)       | 成 田 晋 (KYB株)          |
| 上 野 朝 嗣 (CKD株)            | 藤 田 壽 憲 (東京電機大学)      |
| 内 堀 晃 彦 (宇部工業高等専門学校)      | 丸 田 和 弘 (株コマツ)        |
| 加 藤 猛 美 (株コガネイ)           | 柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)    |
| 加 藤 友 規 (福岡工業大学)          | 山 田 真の介 (株TAIYO)      |
| 北 村 剛 (油研工業株)             | 山 田 宏 尚 (岐阜大学)        |
| 木 原 和 幸 (財工業所有権協力センター)    | 吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)     |
| 栗 林 直 樹 (川崎重工業)           | 担当理事 伊 藤 和 巳 (KYB株)   |
| 五 嶋 裕 之 (機械振興協会)          | 編集事務局 藤 谷 秀 次 (学会事務局) |
| 佐 藤 恭 一 (横浜国立大学)          | 竹 内 留 美 (勝美印刷株)       |
| 妹 尾 満 (SMC株)              |                       |

(あいうえお 順)

会 告

複写される方へ

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

権利委託先：(一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

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

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

# 日本フルードパワーシステム学会論文集

第48巻, 第2号 (2017)

平成29年2月

## 目次

### 研究論文

1. 差圧センサ動特性試験のための圧力発生器の試作  
阪本大介, 尹 鍾皓, 香川利春 9

TRANSACTIONS OF  
THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.48, No.2

March 2017

Contents

Paper

1. A trial manufacture of a differential pressure wave generator for the dynamic calibration of pressure sensors

Daisuke SAKAMOTO, Chongho YOUN, Toshiharu KAGAWA 9

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

## 研究論文

## 差圧センサ動特性試験のための圧力発生器の試作\*

阪本 大介\*\*, 尹 鍾皓\*\*\*, 香川 利春\*\*\*\*

## A trial manufacture of a differential pressure wave generator for the dynamic calibration of pressure sensors

Daisuke SAKAMOTO, Chongho YOUN, Toshiharu KAGAWA

This paper reports a newly developed pneumatic pressure wave generator. The developed pressure wave generator responds to the requirement of the dynamic calibration of pressure sensors that must detect small differential pressures. A closed chamber of about 200 milliliters capacity is filled with air and stuffed with a thin metal wire bundle. A small piston is inserted into the chamber. When the piston moves, the pressure in the chamber changes correspondingly. The stuffed wire bundle has a large heat capacity which absorbs generated heat by air compression of air. Consequently, the air temperature in the chamber is kept almost constant; hence the pressure amplitude becomes almost independent from the change of frequency of the piston motion. Experiments are performed with various volume of stuffed wire, whose range is from zero to ten percent of the box space, and with various frequencies of piston motion. This paper gives a theoretical base of the characteristic of the wave generator, which is verified by experiments. Obtained experimental results satisfied the requirement of the constancy of the pressure amplitude and negligible phase lag for intended range of frequency, i.e., one to fifty Hz. The experimental results also proved that the selected parameters can respond to the design purpose of the pressure wave generator.

**Key words** : Pressure wave generator, Dynamic calibration, Pressure sensor, Isothermal chamber

## 1. 緒 言

この研究では、空気圧を用いた微小振幅の圧力正弦波発生装置を開発した結果を報告する。この装置は、微差圧計の動特性の検定を目的として開発したものである。

一般に、圧力計の静特性測定は、規格も整備されているし、測定ないし検定のための標準機も確立されている<sup>1)-3)</sup>。一方、動特性の測定、検定方法は標準化されていないが、多くの研究<sup>4)-7)</sup>がなされており、また、変動する圧力の検出に用いる圧力センサでは、構成要素の固有振動数を十分高くしておけば、ある程度の周波数までは、静特性と同じ特性が期待できるから、メーカーなども固有振動数の記載で済ませている。研究されている動特性試験の方法は数百ヘルツから数千ヘルツと、比較的高い周波数に関するものがほとんどである。一般的な単一圧力を測定する場合は、これで良いのであるが、微圧ないし微差圧センサでは問題

が生じる。それは、微差圧ないし微圧を検出するためには、ダイアフラムなどの剛性を大きくできず、したがって固有振動数が低くなるからである。圧力計が変動する微小な差圧を正しく検出しているか否か、を知るためには、まず信頼できる基準圧力信号を発生させる必要がある。本研究で開発する正弦波発生装置は、約10Paの微小振幅の基準圧力信号を発生させるものである。この装置では、Fig. 1に示すように、容器に空気を閉じ込め、その容器に小さなピストンをはめて、ピストンの往復運動により、制御された圧力変動を生じさせる。この場合には、ピストンの往復運動は容器内空気の体積変化を生じさせるから、ボイル・シャルルの法則にしたがう圧力と温度の変化が生じる。温度は容器との熱交換を通じて周波数の影響を受ける。もし温度を一定に保てれば、体積変化に応じる圧力変化の予測が正確に行える。川嶋、船木らは容器内に金属線を詰めることで、容器内の空気をほぼ等温に維持できることを示した<sup>8)-10)</sup>。そこで、本研究においても、容器内に熱容量が大きく、伝熱面積の多い物質（金属ウール、Fig. 2 参照）を充填して、容器内空気の温度変化を十分小さくして、周波数に依存しない圧力変化を発生させようとする。川嶋らは線径50 $\mu$ mの銅線を300kg/m<sup>3</sup>充填することで、容器内空気の流入流出に伴う温度変化を抑制することができることを確認している<sup>9)</sup>。また、王らは銅線の充填率により等温性能

\*平成26年7月31日 原稿受付

\*\*東京工業大学メカノマイクロ工学

(所在地 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

(E-mail : sakamoto.daa@m.titech.ac.jp)

\*\*\*東京工業大学精密工学研究所

\*\*\*\*東京工業大学総合理工学研究科

が変化することを確認している<sup>11)</sup>。しかしながら、本試験装置は密閉容器内の気体の体積を変化させるものであり、それらとは条件が異なる。そのため、本試験装置において、充填する材料、充填量などにより、入力であるピストン変位に対する、圧力の振幅や位相がどのようになるかを明らかにしなければならない。ここで試作した例では、パラメータを選定することにより50Hzまでの実験範囲において、振幅が一定で、位相ずれが許容できる程度とすることができたので、その結果を報告する。

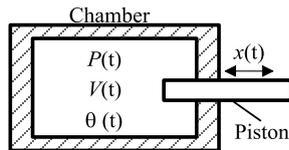


Fig. 1 Schematic of pressure generator



Fig. 2 Metal wool

## 2. 主な記号

|                                      |                     |
|--------------------------------------|---------------------|
| $a$ : 充填材ワイヤの半径                      | [m]                 |
| $a_B$ : 容器円筒半径                       | [m]                 |
| $A$ : ピストン断面積                        | [m <sup>2</sup> ]   |
| $c_p$ : 気体の定積比熱                      | [J/kg /K]           |
| $c_R$ : 充填材の比熱                       | [J/kg /K]           |
| $c_V$ : 気体の定積比熱                      | [J/kg /K]           |
| $D$ : ワイヤ径                           | [mm]                |
| $f$ : 周波数                            | [Hz]                |
| $G$ : 伝達関数                           | [-]                 |
| $H$ : 単位体積あたりに生じる熱量                  | [W/m <sup>3</sup> ] |
| $k$ : 線材の熱伝導率                        | [W/m/K]             |
| $l$ : ピストンの変位振幅 (strokeの1/2)         | [m]                 |
| $L_B$ : 容器円筒の長さ                      | [m]                 |
| $M$ : 容器内気体質量                        | [kg]                |
| $M_R$ : 充填材質量 ( $M_R = V_R \rho_R$ ) | [kg]                |
| $P$ : 容器内圧力                          | [Pa]                |
| $R$ : ガス定数                           | [J/kg /K]           |
| $s$ : ラプラス演算子                        | [s <sup>-1</sup> ]  |
| $S_R$ : 充填線材総表面積                     | [m <sup>2</sup> ]   |
| $S_W$ : 空容器内面表面積                     | [m <sup>2</sup> ]   |
| $S_f$ : 充填材と容器壁との真実接触面積              | [m <sup>2</sup> ]   |
| $t$ : 時間                             | [s]                 |
| $\theta$ : 容器内気体の平均温度                | [K]                 |
| $\theta_0$ : 環境の温度 (定数)              | [K]                 |
| $\theta_R$ : 充填材の温度                  | [K]                 |
| $u$ : 気体の単位質量あたり内部エネルギー              | [J/kg]              |
| $U$ : 容器内気体の内部エネルギー                  | [J]                 |
| $V$ : 容器内で気体が占有する空間の体積               | [m <sup>3</sup> ]   |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| $V_E$ : 空容器の容積  | [m <sup>3</sup> ]       |
| $V_R$ : 充填材体積   | [m <sup>3</sup> ]       |
| $V_0$ : ピストンが中央位置のときの気体占有体積                                   | [m <sup>3</sup> ]       |
| $x$ : ピストン変位  | [m]                     |
| $z$ : 充填材の体積割合= $V_R/V_E$                                     | [-]                     |
| $\alpha_f$ : 充填材と容器壁の間の熱伝達率                                   | [J/s/K/m <sup>2</sup> ] |
| $\alpha_R$ : 充填材と気体の間の熱伝達率                                    | [J/s/K/m <sup>2</sup> ] |
| $\alpha_W$ : 容器と気体の間の熱伝達率                                     | [J/s/K/m <sup>2</sup> ] |
| $\varepsilon$ : 無次元パラメータ= $\tau_A(\kappa-1)Al/V_0$ (式(18)で定義) |                         |
| $\kappa$ : 比熱比  | [-]                     |
| $\mu$ : 式(14)で定義する単位温度あたり熱流束の比                                | [-]                     |
| $\mu_R$ : 式(15)で定義する単位温度あたり熱流束の比                              | [-]                     |
| $\rho$ : 気体密度   | [kg/m <sup>3</sup> ]    |
| $\rho_R$ : 充填材の密度   | [kg/m <sup>3</sup> ]    |
| $\tau_A$ : 式(12)で定義する特性時間 $c_p M / (S_W \alpha_W)$            | [s]                     |
| $\tau_R$ : 式(13)で定義する特性時間 $c_R M_R / (S_R \alpha_R)$          | [s]                     |
| $\omega$ : 角周波数   | [rad/s]                 |

## 3. 理 論

Fig. 1は考察する装置の中に充填材がない場合を示している。この空洞に細線の充填材を入れる。装置はさらに大きな鉄板に固定してあり、実験中は一定温度を保っているのみなせる。すなわち、空洞の壁面は室温を保っているのみなせる。

ピストンが往復運動をするとき、空洞内の空気に対する仕事の授受があり、これに応じて気体による熱の発生吸収が生じ、容器壁面との間の熱交換が生じる。充填材があるときには、熱交換はこれとの間にも生じる。この様子はFig. 3のように示すことができる。

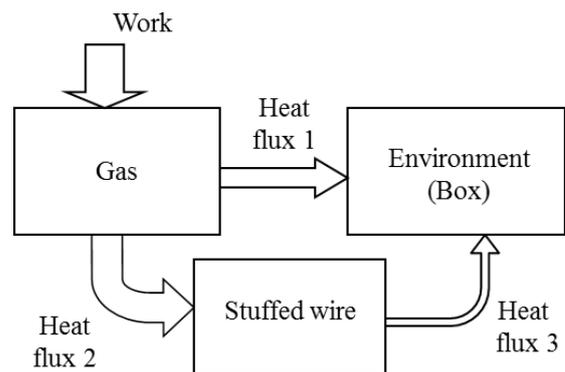


Fig. 3 Model of heat exchange

図において、熱の流れには正負があり、図の矢印方向を正方向とする。たとえば気体温度が周囲温度より低いときには、Heat flux 1は負の値となる。充填材が無い場合には、Heat flux 2とHeat flux 3は0である。充填材を入れると、Heat flux 2, Heat flux 3が0ではなくなるが、充填材に蓄熱性があるから、Heat flux 2とHeat flux 3は、一般に異なる。

る値となる。

Fig. 1の容器には、内部に気体と充填材が入っているが、充填材は運動せず、容器内に留まり続ける。気体は容器と充填材の間の空間を占有しているが、これも容器内に留まっており全体としての流動はない。この空間の大きさは、容器や充填材の熱膨張により変化する可能性があるが、それは微小であるから、ここでは無視する。この空間にピストンの出入りがある。この出入りが、容器内空間体積を変化させるので、容器内圧力に変動が生じる。ピストンの出入りにより生じる空気の流動は極めて小さいため、以下ではこれを無視して解析を行う。その振幅や位相と、ピストン運動との関係を理論的に求める。理論を簡単化するために、若干の仮定を設ける。

[1] 容器内の圧力は至るところ同じ値である。

[2] 流体は理想気体である。この仮定により

$$u = c_V \theta, \quad c_p = u + P/\rho, \quad c_p/c_V = \kappa, \quad P = \rho R \theta \quad (1)$$

[3] 容器内の気体は漏れず、したがって気体質量  $M$  は一定である。

さて、容器内にある気体の内部エネルギー  $U$  は、式(1)と温度、質量などから決定する。

$$U = c_V M \theta = c_V P V / R \quad (2)$$

この  $V$  は容器全体の容積  $V_E$  から、充填材とピストンが占める空間容積を差し引いた量である。容器内には充填材を入れるので、残りの空間に気体がある。それゆえ、ピストンの出入りによって、気体の体積が変化する。これらの体積の関係は次のようになっている。

$$V_E = V_R + V_0 \quad (3)$$

$$V = V_0 - A l \sin \omega t \quad (4)$$

$$z = V_R / V_E \quad (5)$$

以下では、まずFig. 3に示した熱の流れをエネルギー保存則により表す。

気体に関するエネルギーの保存則は次の通りである。気体にはピストンによる仕事に加えられ、熱の流出、Heat flux 1とHeat flux 2が生じる。これは次のように表される。

$$\frac{dU}{dt} = -P \frac{dV}{dt} - S_w \alpha_w (\theta - \theta_0) - S_R \alpha_R (\theta - \theta_R) \quad (6)$$

$U$  を消去して、次式を得る。

$$c_V M \frac{dT}{dt} = -P \frac{dV}{dt} - S_w \alpha_w (\theta - \theta_0) - S_R \alpha_R (\theta - \theta_R) \quad (7)$$

充填材に関するエネルギー保存則は次の通りである。

$$c_R M_R \frac{dT_R}{dt} = S_R \alpha_R (T - T_R) - S_i \alpha_i (T_R - T_0) \quad (8)$$

ピストン変位を入力として、式(7)、(8)を連立して解き、状態方程式を用いて、出力  $P$  を知ることがができる。ピストン運動によるチャンバの体積変化は微小であるから、それにより引き起こされる温度及び圧力の変化も微小である。それゆえ、変動する微小量を解析すれば基本的な情報が得られる。まず次のように置く。

$$\begin{aligned} V &= V_0 + \delta V, & \delta V &= -Ax, & |\delta V| &\ll V_0 \\ \theta &= \theta_0 + \delta \theta, & |\delta \theta| &\ll \theta_0 \\ \theta_R &= \theta_0 + \delta \theta_R, & |\delta \theta_R| &\ll \theta_0 \\ P &= P_0 + \delta P, & |\delta P| &\ll P_0 \end{aligned} \quad (9)$$

次に、式(7)を変形して次式を得る。

$$\tau_A \frac{d(\delta \theta)}{dt} + (1 + \mu) \delta \theta = \theta_0 \varepsilon \frac{d(x/l)}{dt} + \mu \delta T \theta_R \quad (10)$$

式(8)を変形して次式を得る。

$$\tau_R \frac{d(\delta \theta_R)}{dt} + (1 + \mu_R) \delta \theta_R = \delta \theta \quad (11)$$

ただし

$$\tau_A = c_V M / (S_w \alpha_w) \quad (12)$$

$$\tau_R = c_R M_R / (S_R \alpha_R) \quad (13)$$

$$\mu = S_R \alpha_R / (S_w \alpha_w) \quad (14)$$

$$\mu_R = S_i \alpha_i / (S_R \alpha_R) \quad (15)$$

$$\varepsilon = \tau_A (\kappa - 1) A l / V_0 \quad (16)$$

ここで、変数のラプラス変換を用いて関係式を表す

$$L(\delta \theta) = \hat{\theta}, \quad L(\delta \theta_R) = \hat{\theta}_R, \quad L(\delta P) = \hat{P}, \quad L(x/l) = \hat{X} \quad (17)$$

とおくと、式(10)、(11)は次のようになる。

$$(\tau_A s + 1 + \mu) \hat{\theta} = \theta_0 \tau_A (\kappa - 1) s (A l / V_0) \hat{X} + \mu \hat{\theta}_R \quad (18)$$

$$(\tau_R s + 1 + \mu_R) \hat{\theta}_R = \hat{\theta} \quad (19)$$

これらの2式から  $\hat{\theta}_R$  を消去すると

$$\frac{\hat{\theta}}{\theta_0} = \frac{\tau_A (\kappa - 1) s (\tau_R s + 1 + \mu_R)}{(\tau_A s + 1 + \mu) (\tau_R s + 1 + \mu_R) - \mu} \left( \frac{A l}{V_0} \hat{X} \right) \quad (20)$$

となる。ここで

$$\frac{\hat{P}}{P_0} = \frac{\hat{\theta}}{\theta_0} + \frac{A l \hat{X}}{V_0} \quad (21)$$

を使えば

$$\frac{\hat{P}}{P_0} = G(s) \left( \frac{A l}{V_0} \hat{X} \right) \quad (22)$$

$$G(s) = 1 + \frac{\tau_A (\kappa - 1) s (\tau_R s + 1 + \mu_R)}{(\tau_A s + 1 + \mu) (\tau_R s + 1 + \mu_R) - \mu} \quad (23)$$

を得る。この  $G(s)$  で  $s \rightarrow 0$  とすると、

$$\frac{\hat{P}}{P_0} \rightarrow \frac{A l \hat{X}}{V_0} \quad (\text{等温変化}) \quad (24)$$

$s \rightarrow \infty$  とすると、

$$\frac{\hat{P}}{P_0} \rightarrow \kappa \frac{A l \hat{X}}{V_0} \quad (\text{断熱変化}) \quad (25)$$

である。周波数特性では  $s = j\omega$  として、数点の  $\omega$  で  $\tau_A$  を実験的に求め、 $\alpha_w$  を求める。 $S_i$  は容器内面積の1%くらいが上限であるから、近似的な取り扱いでは無視できるであろう。また、周波数があまり高くない範囲では式(23)における  $s$  の二乗の項を無視した近似ができる。以上のもとでは式(23)は

$$G(s) \approx G_{\text{approx}}(s) = \frac{[\kappa \tau_A + (1 + \mu) \tau_R] s + 1}{[\tau_A + (1 + \mu) \tau_R] s + 1} \quad (26)$$

となる。この近似関数を見ると、

$$\tau_A \ll (1 + \mu) \tau_R \quad (27)$$

とすれば、 $G_{\text{approx}}$  は  $s$  の値によらず

$$G(s) \approx 1 \tag{28}$$

である。条件 $\Delta$ をもとのパラメータに戻すと

$$\frac{c_R M_R}{S_R \alpha_R} + \frac{c_R M_R}{S_w \alpha_w} \gg \frac{c_f M}{S_w \alpha_w} \tag{29}$$

である。これは極めて簡明な事実を主張する関係式である。すなわち、充填材の熱容量 $c_R M_R$ が気体の熱容量に比べて十分大きいときには、 $G(s)$ は1、すなわち気体の温度変化は無視できるようになるから、等温変化の場合の圧力変化が見られるようになる。

### 4. 実験方法

#### 4.1 実験装置

##### (1) 非定常微圧発生装置

製作した非定常微圧発生器をFig. 4に示す。本装置は電動機、ピストン駆動部及びピストン、チャンバから構成される。ピストンの駆動方式はスライダ・クランク機構を用い、ピストンの駆動速度は電動機の回転速度により制御する。電動機軸とクランクはカップリングにより結合されており、クランクは電動機と同期して回転する。クランクは軸中心のずれ $L_c$ が1mmとなる二つの軸から構成されており、片側の軸を電動機軸に、もう一方の軸をコネクティングロッドに接続する。コネクティングロッドには二つのベアリングを中心距離 $L_s$ が100mmになるように取り付けられており、ベアリングを通じてクランクとピストンを接続している。モータの回転速度を一定に制御することで、ピストン変位を振幅役1mm正弦波状に変化させることができる。チャンバの材質はSUS304である。装置組み立て時のチャンバ形状は内径50mm、長さ100mmの円筒型であり、容積は約200 $\text{cm}^3$ である。チャンバは70mm角ブロックを円筒状にくり抜いて製作しており、容器の厚みは最も薄い部分で10mmである。

圧力計は、JTEKT Co. 製、拡散型シリコンダイヤフラム半導体トランジューサ、PD104-10kである。この圧力計のダイヤフラムの1次共振周波数は6kHzである。使用に先立ち精度1Paの差圧センサで校正した。

本装置において容器内気体は平均位置周りで振動し、一般的な流動はない。容器内の気体速度は最大で最高周波数のときのピストン断面で生じ、速度50mm/sである。これは

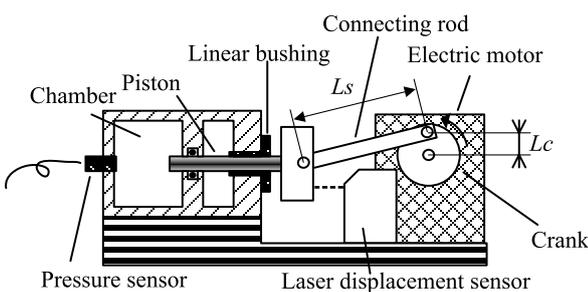


Fig. 4 Experimental setup

チャンバ内の振動では空間平均で0.25mm/sであるため、容器内における流動は無視できる程度であると考えられる。

##### (2) 銅線の充填率及び充填後のシリンダ容積

充填材には被覆銅線を用いる。充填材の線径と平均密度をTable 1に示す。また、充填率と体積をTable 2に示す。

wire 1は船木が用いた線径、wire 2はJIS3202規格中の最も細いものである。

Table 1 Covered polyurethane copper wire

|   | Wire 1 | Wire 2 |
|---|--------|--------|
| Diameter of copper wire (D) [ $\mu\text{m}$ ]       | 20     | 50     |
| Thickness of coating polyurethane [ $\mu\text{m}$ ] | 0.37   | 1.07   |
| Density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]                  | 8.39   | 8.32   |

Table 2 Air volume in the chamber with wire

| Volume ratio | Volume of wire 1 [ $\text{cm}^3$ ] | Volume of wire 2 [ $\text{cm}^3$ ] |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0%           | 0                                  | 0                                  |
| 1.07%        | 2.13                               | 2.15                               |
| 2.14%        | 4.26                               | 4.3                                |
| 4.28%        | 8.52                               | 8.6                                |
| 6.4%         | 12.8                               | 12.9                               |
| 8.6%         | 17                                 | 17.2                               |
| 10.7%        | 21.3                               | 21.5                               |

#### 4.2 実験結果

それぞれの充填率において、周波数：1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50Hzでピストンを動かし、シリンダ内の圧力及びピストンの変位を計測した。サンプリング時間は1~10Hzで1ms, 15~50Hzで0.1msとした。Fig. 5に測定結果の一例として、wire 1をシリンダ容積の1%充填し、ピストンを50Hzで往復運動させた場合の圧力応答を示す。図より、圧力はピストンの駆動周波数で変動しており、概ね正弦波で変化していることがわかる。図には微小な高調波が重なっているが、これは静止中も見られるので、計測系で生じているノイズである。これ以外は正確な正弦波となっていることを周波数解析で確かめてある。

圧力センサで測定した圧力 $P_{exp}$ 及びピストン変位から推

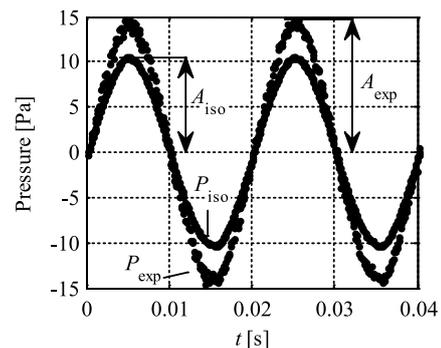


Fig. 5 Pressure wave by 1% stuffing of wire 2

定される等温変化時の圧力波形 $P_{iso}$ を周波数解析し、振幅を求めた。wire 1, wire 2の実験においてそれぞれの充填率において横軸に周波数、縦軸に圧力振幅の比を取り、Fig. 6, Fig. 7に示す。図より、 $P_{exp}$ と $P_{iso}$ の振幅比は周波数の増加に伴い大きくなり、充填率の増加に伴い小さくなることわかる。つまり、周波数が大きくなるほど、銅線と空気の熱の交換が熱の発生消滅に間にあわなくなり、空気温度の変化幅が増すが、充填率を大きくすると、伝熱面積が増えて熱交換が増加し、空気の温度変化が抑制される。また、銅線の線径が細いほうが、温度変化を抑制する能力が高いことがわかる。wire 1を4%, wire 2を8%以上充填することにより、50Hzまでの周波数において圧力振幅の変化を3%以内に抑えることが可能であった。

### 5. 考察

#### 5.1 伝熱量の比較

wire 1とwire 2に関して、理論式(22)及び(23)を実験結果に適用して、単位時間、単位温度あたりの伝熱量 $Q$ を算出し、Fig. 8とFig. 9にそれぞれ示す。実験結果は熱流束が充填率と周波数により変化することを示している。また、これから熱伝達率を算出すると50Hzにおいては、その値が100を超えており、通常の平面でみられる熱伝達率よりずっと大きい。これを説明するために、次の熱伝導モデルを考えた。

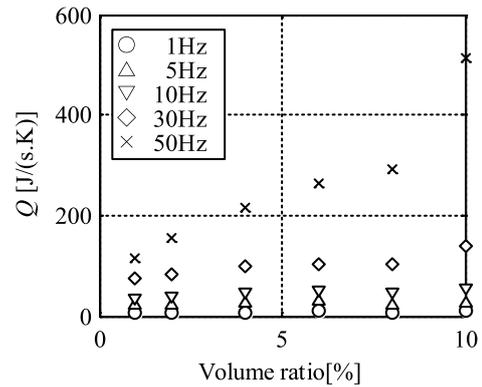


Fig. 8 Amount of heat transferred with wire 1

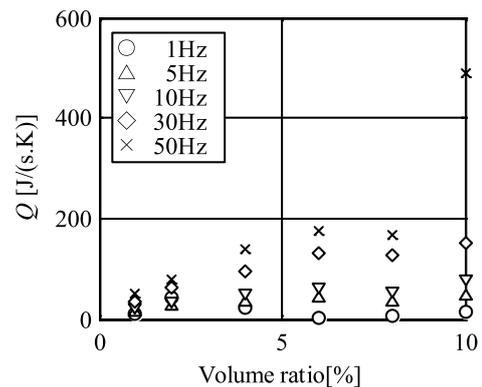


Fig. 9 Amount of heat transferred with wire 2

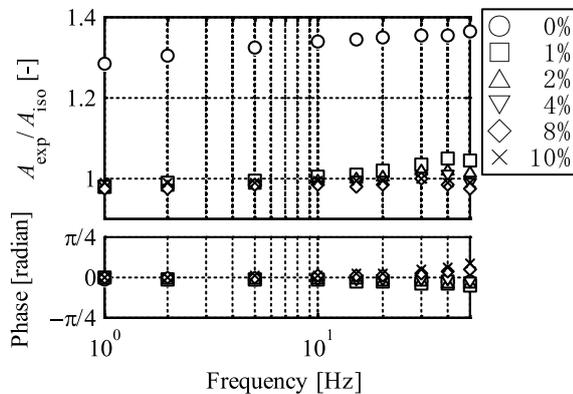


Fig. 6 Pressure amplitude ratio ( $P_{exp}/P_{iso}$ ) with wire 1

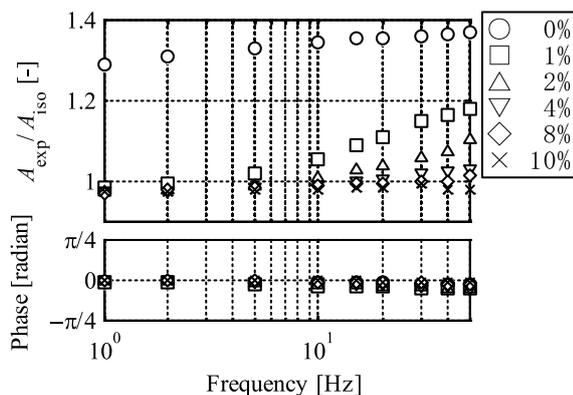


Fig. 7 Pressure amplitude ratio ( $P_{exp}/P_{iso}$ ) with wire 2

#### 5.2 熱伝導モデル

ワイヤとその間の空間を、Fig. 10のように模式化して考える。まず左の図は容器の断面にワイヤが平行で等間隔な線群に整列されていると模式化したものである。正六角は稠密かつ一様に分布する仮定の区画である。実際は不規則になるが、ここでは平均的な状態を考える。六角形では計算が非常に複雑になるから、Fig. 10に示すように、一本の六角柱には一本の円柱を対応させて近似する。

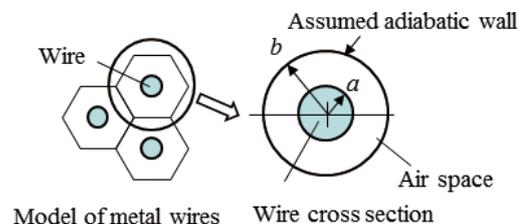


Fig. 10 Wire bundle model

図に示した外径 $b$ の空気円筒の内側は、他のワイヤから影響を受けない。よって、円周は断熱壁であると考えてよい。空気が発生した熱は、すべて内側のワイヤ表面に吸収されるとする。この円筒部では空気の流通がないので、ほぼ静止しているとみなせる。ゆえに通常の流れのある場合の熱伝達係数を考える場合とは状況が異なる。ここでは熱伝導を考えなければならない。半径 $b$ の円周上における温

度を $\theta_b$ 、ワイヤ表面の温度を $\theta_a$ とする。ワイヤと空気との熱伝達率を $\alpha_R$ とすると、単位長さあたりの熱流束についての定義は

$$q = \alpha_R (2\pi a) (\theta_a - \theta_b) \quad (30)$$

であるから、 $\alpha_R$ は $q$ と $(\theta_b - \theta_a)$ を知らば求めることができる。それは次のように計算される。まず外半径 $b$ 、内半径 $a$ の円環部における熱伝導方程式は

$$k \left( \frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} \right) + H = 0 \quad (31)$$

である。ただし、 $H$ は単位体積から湧き出す熱流束で、仕事熱に変換された結果である。式(31)に関する境界条件は、

$$\left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=b} = 0 \quad \theta|_{r=b} = 0 \quad (32)$$

である。これらの境界条件を満足する(31)の解は、

$$\theta = \frac{H(b^2 - r^2)}{4k} + \frac{Hb^2}{2k} \log \frac{r}{b} \quad (33)$$

である。一本の円環部から出るHeat fluxの総量は

$$q = H\pi(b^2 - a^2) \quad (34)$$

(30)に(33)、(34)を代入して

$$\alpha_R = \frac{2k}{a \left[ 1 + \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \log \frac{b}{a} \right]} \quad (35)$$

を得る。 $b$ は次のように考えて決定する。

容器においてワイヤが占拠した体積は容器全容積 $\pi b^2 L$ と $z$ の積であるから、 $z\pi b^2 = \pi a^2 \rightarrow b = a/\sqrt{z}$ である。これを(35)に代入して $b$ を消去すれば

$$\alpha_R = \frac{2k}{a \left[ 1 + \frac{2/z}{1/z - 1} \log \frac{1}{z} \right]} = \frac{2k}{a \left[ 1 + \frac{1}{1 - z} \log \frac{1}{z} \right]} \quad (36)$$

となる。単位時間、単位温度差あたりの伝熱量は

$$Q = \alpha_R S_R = \frac{4V_0 k}{a^2} \frac{z}{1 + \frac{1}{1 - z} \log \frac{1}{z}} \quad (37)$$

である。この関数は $z \rightarrow 0$ では0、 $2V_0 k/a^2$ に漸近する。ただし、それは数式上であって、そのように極端な値は、もちろん現実的でない。 $z$ は強く押し込んでも、最大で0.1くらいであるし、 $z=0.01$ 以下となると、ワイヤがまばらになって、Fig. 10のような一様な広がりモデルは使えなくなる。ワイヤの線径 $D$ が20, 50 $\mu\text{m}$ 、 $z=0.01 \sim 0.1$ の間の式(37)の値を、Fig. 11に示す。 $z=0.1$ 、 $a=25\mu\text{m}$ のときの値で見ると、 $\alpha_R S_R \approx 933[\text{W/K}]$ 、 $z=0.1$ 、 $a=10\mu\text{m}$ では $\alpha_R S_R \approx 5800[\text{W/K}]$ である。この理論では、式(31)で非定常項を無視したので、周波数の影響が出ない。それゆえ実験値との直接比較は適当ではないが、熱伝達率が、通常の平面で観測する値の数倍以上の大きさとなることは説明できているといえる。

この理論値を、実験値と比較すると、実験値の方が一桁小さい。これには一つははっきりした原因が考えられる。

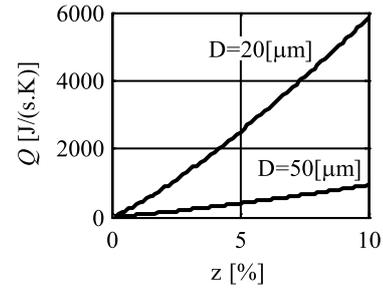


Fig. 11 Amount of heat transferred

Fig. 10のモデルではワイヤが均等に分布しているという理想化した仮定をしていて、それは現実的ではない。一部のワイヤが接触して、その結果、同等な $a$ 、 $b$ は理想的な場合よりも大きくなる。この接触が平均して2本程度とすれば、 $b$ 、 $a$ はともに $\sqrt{2}$ 倍程度となり、式(37)で与える $Q$ の値は0.5倍程度に下がる。銅線の接触する割合は、充填率が大きく、線径が小さいほど大きくなる筈である。理論値と実験値の差も同様に大きくなることから、より厳密に伝熱現象を解析するためには、充填率や線径が銅線の分布に与える影響を明らかにする必要があると考えられる。

## 6. 結 言

線径の異なる2種類の銅線を用いて、容器内の銅線の充填率を0～10%まで変化させ、微小容積変化時の容器内圧力を計測した。

- 1 1～50Hzの周波数において振幅約10Paの正弦波状の圧力変動を発生することのできる圧力発生器を開発した。
- 2 チャンバに充填する銅線の線径及び充填率により、発生する圧力波の振幅に対する周波数の影響が変化することを明らかにした。その結果、線径20 $\mu\text{m}$ の銅線を4%以上、線径50 $\mu\text{m}$ の銅線を8%以上充填することで、周波数による圧力振幅の影響3%以下に抑制できることを確認した。
- 3 大気圧下において本装置を用いて発生した圧力は、ピストン変位から推定が可能であり、計測したピストン変位を基準値として、圧力センサの微圧変動における動特性試験が可能であることがわかった。

## 謝 辞

理論の構築に当たり、神奈川大学名誉教授 浦田暎三氏の指導を受けた。また、研究費においては東京瓦斯株式会社からの支援を受けた。

## 参考文献

- 1) JIS-B-7547：デジタル圧力計の特性試験方法及び校正方法 (2008)
- 2) JIS-B-7505-1：アネロイド型圧力計 (2007)
- 3) JIS-B-7610：重錘形圧力天びん (2012)

- 4) Bean, E. V. : Dynamic Pressure Metrogy, Metrologia, Vol. 30, p. 737-741 (1994)
- 5) Fujiyoshi, T. : Experimental Manufacture of Hydraulic Pressure Pulsator for Measuring Frequency Characteristics of Pressure Transducers, Journal of Japanese society for Non-Destructive Inspection (1994)
- 6) James A. C., George E. B. : Frequency characteristics of some pressure transducer systems, American Heart Journal, Vol. 77, No. 6, p. 792-797 (1969)
- 7) Kobata, T., Ooiwa, A. : Method of evaluating frequency characteristics of pressure transducers using newly developed dynamic pressure generator, Sensors and Actuators, Vol. 79, p. 97-101 (2000)
- 8) Kawashima, K., Kagawa, T. : Unsteady Flow Generator for Gases Using an Isothermal Chamber, Measurement, Vol. 33, p. 333-340 (2003)
- 9) 川嶋 健嗣, 石井 幸男, 船木 達也, 香川 利春 : 準等温化圧力容器を用いた空気圧機器の流量特性計測に関する研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 34, No. 2, p. 34-39 (2003)
- 10) Funaki, T. et al. : Generator of variable gas flows using anisothermal chamber, Meas. Sci. Technol., Vol. 18, p. 835 (2007)
- 11) 王 涛, 蔡茂林, 川嶋健嗣, 香川利春 : 準等温化圧力容器を用いた空気圧機器の流量特性計測に関する研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 37, No. 2, p. 15-23 (2006)

〒105  
|  
0011

東京都港区芝公園三丁目五―三―三 電話 (〇三) 三四三三―八四四一  
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 東京〇〇二〇―三―三三六九〇  
FAX (〇三) 三四三三―八四四一

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