

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN

FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

フルードパワー システム

Sep.2014 Vol.45 No.5

日本フルードパワーシステム学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「フルードパワーにおける最新の計測技術」

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「フルードパワーにおける最新の計測技術」

【巻頭言】

「フルードパワーにおける最新の計測技術」発行にあたって	柳田 秀記	206
-----------------------------	-------	-----

【解説】

AEセンサを用いた液体流量計測法	中田 毅, 鄭 以勤, 桜井 康雄	207
カルマンフィルタを用いた管内非定常流量計測	眞田 一志	211
マイクロPIV (Particle Image Velocimetry)	西野 耕一	214
感圧塗料による圧力計測技術の機械工学への応用	森 英男	217
超音波法による潤滑診断の可能性	竹内 彰敏	220
音源分離技術	戸上 真人	224

【ニュース】

International Journal of Fluid Power 電子ジャーナルの紹介	眞田 一志	228
---	-------	-----

【会議報告】

IFK2014 (ドイツ・アーヘン) 参加記	加藤 友規	229
JSME機素潤滑設計部門講演会におけるフルードパワー技術研究	金 俊完	231

【教室】

入門講座「トライボロジー」 第2回：表面について	風間 俊治	233
--------------------------	-------	-----

【トピックス】

中国駐在員日記	住野 亘	236
---------	------	-----

【研究室紹介】

奈良高専電子制御工学科早川研究室	早川 恭弘	239
------------------	-------	-----

【企画行事】

平成26年春季講演会併設セミナー開催報告

「フルードパワーに貢献する材料，加工，表面処理技術」 武田 稔 242

【コーヒースタンド】

手押し井戸ポンプ ファミリー編 大橋 彰 245

【会告】

第9回JFPS 国際シンポジウム開催のお知らせ 210

日本フルードパワーシステム学会 平成26年度受賞候補者募集 247

平成26年度オータムセミナーのお知らせ 248

共催・協賛行事のお知らせ 249

その他 246, 250, 251, 252

■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 "Recent Developments in Measuring Technology for Fluid Power"

[Preface]

On the Special Issue "Recent Developments in Measuring Technology for Fluid Power"	Hideki YANADA	206
--	---------------	-----

[Review]

A Liquid Flow Rate Measurement Method Using an AE Sensor	Takeshi NAKADA, Yi Quin Zheng, Yasuo SAKURAI	207
Measurement of Unsteady Flow Rate in a Pipe using Kalman Filter	Kazushi SANADA	211
Micro PIV (Particle Image Velocimetry)	Koichi NISHINO	214
Application of Pressure Measurement Technique by Pressure Sensitive Paint to Mechanical Engineering	Hideo MORI	217
Potential of Lubrication Diagnosis Using Ultrasonic Technique	Akitoshi TAKEUCHI	220
Sound Source Separation	Masahito TOGAMI	224

[News]

Introduction of an Electronic Journal "International Journal of Fluid Power"	Kazushi SANADA	228
--	----------------	-----

[Conference Report]

Report on IFK2014 in Aachen, Germany	Tomonori KATO	229
Researches Concerning Fluid Power Technology at the 14th MD&T Division Meeting in JSME	Joon-wan KIM	231

[Lecture]

An Introductory Course of Tribology: 2. On Surface	Toshiharu KAZAMA	233
--	------------------	-----

[Topics]

China Diary of Expatriates	Wataru SUMINO	236
----------------------------	---------------	-----

[Laboratory Tour]

Hayakawa Laboratory at Department of Control Engineering in National Institute of Technology, Nara College	Yasuhiro HAYAKAWA	239
--	-------------------	-----

[JFPS Activities]

Report of JFPS Spring Seminar 2014 "Material, Machining and Surface Coating Technology for Fluid Power"	Minoru TAKEDA	242
---	---------------	-----

[Coffee Break]

Akira OHASHI	245
--------------	-----

[JFPS News]

210, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252
--

巻頭言

「フルードパワーにおける最新の計測技術」発行にあたって

著者紹介



やな だ ひで き
柳 田 秀 記

豊橋技術科学大学
〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1
E-mail: yanada@me.tut.ac.jp

1982年豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学教務職員、1992年同助教授、2012年同教授。現在に至る。電気力を利用した絶縁性液体の浄化と流動、摩擦のモデリング等の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。工学博士。

加圧した流体の持つ動力を機械的動力として取り出すフルードパワーシステムでは、作動流体の圧力、管路を流れる流量、温度、アクチュエータの位置・速度（角速度）・力（トルク）、音圧レベルなどの各種物理量のいくつかを計測することは必須となる。フルードパワーシステムの制御や運転状態モニタリングのためにシステムに組み込んで使用する計測器もあれば、研究開発段階でのみ利用される計測器もある。

かつて筆者が所属していた研究室では油圧の研究を中心に行っており、ひずみゲージを用いたトルクメータ・圧力センサ・ロードセル、精密ブルドン管圧力計、サーミスタ温度計、電磁オシログラフをよく利用していた。流量計測では計量タンク・台秤・タイマによる重量法がもっぱら用いられていた。技術の発展により、今日では目にする機会がなくなった計測器や記録器もあるが、ひずみゲージを用いたセンサのように、相変わらず利用しているものもある。

基本原理や本質的な構造の変わらない計測器が多くある一方で、新たな計測方法や製作技術が提案・実現され、より高精度な、あるいはより簡便な計測が可能になったり、また、これまで計測できなかった物理量が計測できるようになったりと、計測技術の進展はフルードパワー機器・システムをはじめ、各種の機器やシステムの高性能化・高機能化に大いに貢献してきた。本特集号では、フルードパワーおよびその周辺技術分野で最近開発された計測技術に

ついて紹介することとした。

以下に本特集号の概要を紹介する。

最初は、中田毅氏らが開発された「AEセンサを用いた液体流量計測法」である。液体が流れる管路からは特定の周波数域のAE信号が検出され、その振幅が流量の増加とともに大きくなることに着目された新しい流量計測法をご紹介いただいた。

眞田一志氏には、同氏らが開発された「カルマンフィルタを用いた管内非定常流量計測」についてご紹介いただいた。カルマンフィルタ理論と管路動特性モデルと統合し、管路の3点の圧力計測から非定常流量の計測を可能とする新しい方法である。

西野耕一氏には、「マイクロPIV」について解説をしていただいた。近年はマイクロフルードパワーの研究も盛んに行われており、この計測法が活用されるものと思われる。

森英男氏には、歴史の浅い「感圧塗料による圧力計測技術の機械工学への応用」について解説をしていただいた。計測原理の理解は筆者には容易ではないが、ターボ機械の翼表面の圧力計測などにはすでに適用例があり、興味深い。

竹内彰敏氏には、「超音波法による潤滑診断の可能性」について、玉軸受を対象としてご紹介いただいた。軸受各部からの超音波の反射率やその変化に着目することで潤滑診断が可能になるという、興味深い研究成果が示されている。

戸上真人氏には、複数の音が混ざったマイクロホン入力信号から、所望の音のみを分離・抽出する「音源分離技術」についてご紹介いただいた。音声抽出が主な対象であるが、今後は機械の異常検出などへの展開が期待される。

末筆ながら、ご多忙の中執筆を快くお引き受けいただき、貴重な解説記事をご執筆いただいた著者の皆様に厚く御礼申し上げます。本特集号により、最新の計測技術に関する情報が読者の皆様に提供できれば幸いである。

（原稿受付：2014年6月20日）

解説

AEセンサを用いた液体流量計測法

著者紹介

なか だ たけし
中 田 毅

東京電機大学
〒270-1382 千葉県印西市武西学園台2-1200
E-mail: t-nakada@mail.dendai.ac.jp

1974年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。同大学助手、工業技術院機械技術研究所を経て、1993年東京電機大学工学部教授、情報環境学部教授、現在同大学情報環境学部研究員、油圧制御の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会等の会員、工学博士。

てい い きん
鄭 以 勤

東京電機大学情報環境学部
〒270-1382 千葉県印西市武西学園台2-1200
E-mail: tei@mail.dendai.ac.jp

1982年中国皖南医学院医学部卒業。1999年東京電機大学超伝導応用研究所を経て、情報環境学部技術職員。現在に至る。生体磁気、流量計測、三次元計測の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会などの会員、博士（工学）。

さくら い やす お
桜 井 康 雄

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

1986年上智大学大学院博士前期課程修了。富士重工業(株)、上智大学助手等を経て2000年足利工業大学講師、2001年同大助教授、2007年同大准教授、2009年同大教授。油空圧システムの動特性解析、ECFの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会等の会員、博士（工学）。

1. はじめに

給排水システム、冷却システム、石油パイプラインシステムなど液体輸送システムや液圧システムをはじめとして、多くの産業分野で液体パイプラインが広く利用されている。これらのシステムの保守、安全性、高効率操業などの観点からパイプラインを流れる流量を計測することは圧力計測や温度計測とともにきわめて重要である。パイプラインの液体流量計測法¹⁾はパイプ内断面を単位時間に通過する液体の量を直接計測する方式と、流速の計測法などを応用して流量を求める間接計測方式に大別される。直接計測方式としては、オーバル式、ルーツ式などの容積式流量計やタービン流量計などが、また間接

計測方式としては電磁流量計、超音波流量計やうず流量計などが広く実用に供されている。筆者らは、パイプラインの外壁に設置したAE（アコースティック・エミッション：音響の放出）センサを用いてパイプ中を流れる液体（水道水）の定常流量計測法を開発²⁾したので、詳細については参考文献2)に譲り、本稿では液体流量計測にAEセンサを応用したきっかけおよび開発した液体流量計測法の概要と課題について解説する。わずかでも皆様のご参考になれば幸いである。

2. AEセンサを用いた液体流量計測法開発の経緯

筆者らの一人は、30年程前通商産業省（現、経済産業省）工業技術院大型プロジェクト「海底石油パイプラインの設備診断」の研究開発に従事し、その一環として、パイプラインの破損時に発生するAEをパイプラインの外壁に設置したAEセンサで検出することにより液体漏えいをオンラインで検知するという液体漏えい検知技術の開発に取り組んだ。当時のパイプラインのオンライン漏えい検知では圧力センサと流量計の利用が一般的であり、たとえばパイプラインにある一定間隔で圧力センサを設置して、その各部の圧力センサの出力変化からオンラインで液体漏えいの発生の検知を行うという手法が知られていた。しかし、海底パイプラインの長さは数kmに及ぶこともあり、信頼性の高い漏えい検知と漏えい位置の評定を行うためには多くの圧力センサや流量計が必要になり、設置費用や保守管理上の課題が発生すると推察された。「海底石油パイプラインの設備診断」の研究では圧力センサではなく、前述のようにAEセンサを利用し、パイプの破損部における漏えい流体が発生する流体音響ノイズ（一種のAE）に着目した漏えい検知手法の開発を対象として、主に流体音響ノイズの特性の解明³⁾を行った。この研究を進めていく中で、信頼性の高い漏えい検知、漏えい位置の評定、使用するセンサ数の削減という課題をいかに解決していくかということの重要性を痛感した。それと同時に、もし一つのAEセン

サにAE計測によるパイプの破損（割れ）の検出と破損部における漏えい流体の発生するAEの検出というAEセンサ本来のAE検出機能の上に、AEセンサによる流量計測という新たな機能を付与することができれば、前述の課題を克服できるのではないかという思いが常に頭に浮かんでいた。また、このように一つのセンサに本来の検出量とは別の検出量も計測できるという、いわばセンサの複合機能化はこれからの情報化社会の実現に向けて発展の期待されるセンシング技術の高度化にも貢献するものと思われる。当時は種々の事情でセンサの複合機能化は実現できなかったが、この間の研究でAEセンサの複合機能化の実現の可能性が認められたことを背景にして、東京電機大学工学部から情報環境学部への所属変更を機にセンサの複合機能化研究を進めることにし、第一段階としてAEセンサによる流量計測法の開発を行ったので、以下ではその概要について述べる。

3. AEセンサの液体流量計測法への応用

3.1 AEセンサを用いた液体流量計測法概念

図1は、内径および外形が13.3mmおよび17.5mmのパイプ中を流れる液体（水道水）が発生するAEの計測波形の一例であり、流量の増加にともなってAEの振幅が大きくなる傾向を示した。したがって、流量とそれに対するAEを計測し、その関係に再現性が認められれば、以下のような信号処理プロセスによって流量を求められるものと考えられる。

- ① パイプを流れる液体によって発生したAE信号の特徴を抽出する。実際には、バンドパスフィルタを構築する。
- ② 特徴抽出されたAE信号のRMS（Root Mean Square）値 V_{RMS} を求める。RMS回路の構成。
- ③ 種々の流量に対するRMS値を実験的に求め、流量 Q と V_{RMS} の関係を表す実験式を求める。

$$V_{RMS} = F(Q) \quad (1)$$

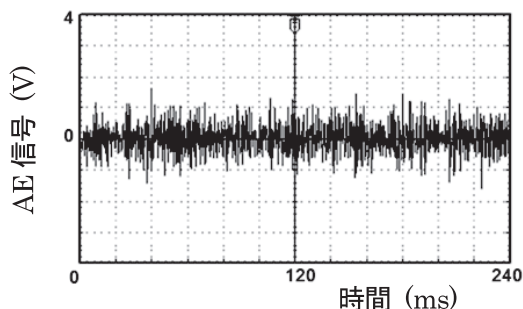


図1 パイプ中を流れる液体の発生するAE波形の一例

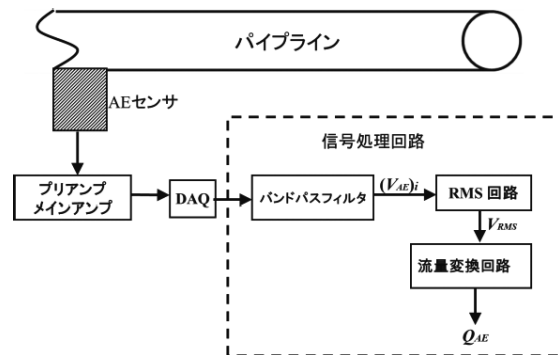


図2 信号処理回路

- ④ 式(1)から、逆関数を求める。その際、校正用うず流量計で測定した流量を真の流量 Q とAEセンサで測定した流量を区別するため、 Q を Q_{AE} と置き換えた。

$$Q_{AE} = F^{-1}(V_{RMS}) \quad (2)$$

したがって、以上の①～④の信号処理プロセスを図2に示すようにPC上で構成し、ある未知の流量 Q に対して計測されたAE信号の V_{RMS} を式(2)に代入すれば、AEセンサを用いてそのときの流量 Q_{AE} が求まる。なお、図2で示した信号処理回路中の流量変換回路が式(2)に相当する。

3.2 AEセンサ

AEセンサ⁴⁾は材料の割れや変形などに伴って発生する弾性波を検出するセンサであり、おもに機械システム・プラントなどの設備診断や加工プロセスのオンラインモニタリングで利用されている。たとえば、材料の割れなどの異常を検出する場合には、ある閾値レベルを設定し、AEセンサの出力信号がこの閾値レベルを超える回数から材料の異常の有無を判定する方法がしばしばとられる。一般に、AEセンサの周波数特性は平坦ではないので、AEセンサの共振周波数を材料の割れなどで発生するAE信号の周波数に近づけて使用し高感度を確保することにより、この異常判定の精度を高める手法がとられている。しかし、本研究ではパイプを流れる液体が発生するAE信号の波形解析によって流量を計測するため、計測に用いたAEセンサは共振をできるだけ抑えた広帯域AEセンサを使用し、AEセンサの仕様書によればその周波数特性は100k～1 MHz（±10dB）である。

4. 流量計測結果と今後の課題

4.1 実験装置と流量計測結果

3.1で述べた考え方に基づいて試作した実験装置の概要を図3に示す。実験に際してはパイプを流れ

る液体として水道水を使用した。実験装置の主要部は水圧源、スチールパイプ（パイプ内径：13.3mm）、実際のパイプ流量を計測する校正用うず流量計、金属製取り付け金具を介してパイプ外壁に固定されたAEセンサおよび図2で示した信号処理プロセスを主体とする信号処理システムで構成されている。図3中のポンプ回転数を制御する誘導電動機の回転速度が1,000rpmで、パイプを流れる流量 Q が0 l/minの場合のAE信号のフーリエ解析結果によれば、その振幅は全周波数帯域においてほとんど0Vであった。一方、誘導電動機の回転速度を調整して流量 Q を種々変化させたときのAE信号のフーリエ解析結果によれば、1,000Hz～1,800Hzの周波数域で急激に振幅が増大し、流体が流れることによって発生するAE信号はこの周波数域に有意な特徴が存在することが明らかになった。また、流量 Q の増加にともない周波数帯域はほとんど変化しないこともわかった。これらの結果から、信号処理プロセス①で示したように、AE信号の特徴を抽出するバンドパスフィルタの周波数帯域を1,200Hz～1,400Hzに設定した。また、図2中のDAQはデータ集録ボード（一種のA/D変換器）であり、使用したPCの処理速度なども勘案してそのサンプリング周期を 5×10^{-5} sに設定した。信号処理プロセス②では、一定流量 Q に対して取得した1,000個のAE信号データから V_{RMS} を求めた。4～11 l/minの範囲における種々の流量 Q に対する V_{RMS} の値を実験的に求めた結果、 V_{RMS} は流量 Q の2次式で良く近似されることがわかり、信号処理プロセス③および④で示した式(1)および式(2)は近似的にそれぞれ式(3)、式(4)のように求められた。なお、4 l/min以下では V_{RMS} の値が急激に小さくなり、式(3)を満たさない流量領域になっている。

$$V_{RMS} = 0.074Q^2 - 0.40Q + 0.69 \quad (3)$$

$$Q_{AE} = \sqrt{13.5V_{RMS} - 2.10} + 2.68 \quad (4)$$

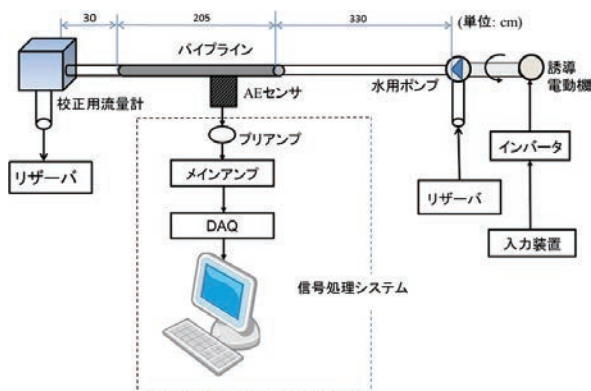
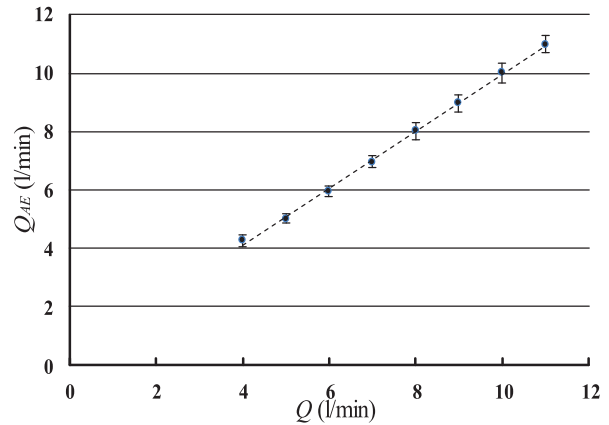
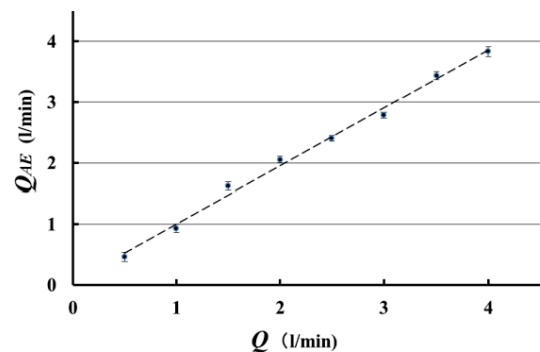


図3 実験装置の概要

図4 Q と Q_{AE} の関係図5 小流量域における Q と Q_{AE} の関係

以上のように信号処理回路を設定し、 Q と Q_{AE} の関係について、一定の流量に対し10回の繰り返し流量計測実験を行った。その結果を図4に示すが、 Q と Q_{AE} は流量が4～11 l/minの範囲にわたって、繰り返し精度が7%以内で良い一致が見られた。4 l/min以下では、前述のように V_{RMS} の値が急激に減少し、式(3)を満たさない流量領域のため流量計測はできなかった。

つぎに、提案した流量計測手法で流量を計測できる限界と考えられる4 l/min以下の小流量の場合について検討した。これまでの実験で使用したパイプの場合、実験範囲内では流れが乱流、4 l/min以下の小流量の場合には層流になっていると考えられ、乱流の場合の流体音響は、層流のときのそれに比べて急激に大きくなることが推測される。そこで、流量が4 l/min以下において乱流になるように、パイプ内径をこれまでの実験で使用した13.3mmから6.2mmに変更して、これまでと同様な方法で Q と Q_{AE} の関係を実験的に求め、その結果を図5に示すが、図4とほぼ同様な結果が得られた。

4.2 今後の課題

ここで述べたことは、AEセンサを用いてパイプラインを流れる液体の流量計測手法の考え方と計測可能性を確認するための実験結果のみである。この

流量計測法の実用性については、液体の流れによって発生する流体音響に関する理論的な検討、適用可能な液体の種類、パイプの内径の影響、温度依存性、乱流と層流を含めて計測可能範囲を拡大する総合的な計測手法、計測システム外で発生する音響的なバックグラウンドノイズの影響、非定常流量計測の可能性などに関し、系統的な実験を積み重ねる必要がある。現段階では一定な流量計測にとどまっているが、パイプ中を流れる流体音響の特徴を表す周波数は1 kHz以上であるので、原理的には非定常流量の計測も可能であると考えられ、予備的な実験では3 Hz程度まで計測可能であるという見通しが得られている。この計測可能な周波数の限界は、使用するA/D変換器とPCの性能に大きく依存しているようである。この流量計測手法を用いれば、パイプ外壁にAEセンサを取り付けるのみで、簡易かつ非接触な流量計測が可能であり、高圧の液体流量計測も期待できる有効な流量計測手法の一つといえよう。

5. ま と め

AEセンサを応用した新しい流量計測手法の概要

について解説した。AEセンサを応用した流量計測手法は、単に流量計測に留まらず、一つのAEセンサにここで解説した流量計測機能と同時に、AEセンサ本来の用途である材料の割れ検出機能を共有させることにより、パイプラインの新しい漏えい検知手法への発展も期待できる。

参考文献

- 1) 技術資料 流体計測法, 日本機械学会, p. 165-222 (1994)
- 2) 中田毅, 鄭以勤, 桜井康雄: AEセンサを用いた液体流量計測法, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 44, No. 3, p. 49-54 (2013)
- 3) 中田毅, 光岡豊一: アコースティックエミッションセンサによる流体音響ノイズの測定, 日本機械学会論文集B編, Vol. 51, No. 470, p. 3155-3164 (1985)
- 4) 技術資料 AEセンサ (アコースティック・エミッションの基礎と測定法), 株式会社エヌエフ回路設計ブロック, p. 1-35 (2002)

(原稿受付: 2014年6月8日)

会 告

第9回JFPS国際シンポジウム開催のお知らせ

開催趣旨:

日本フルードパワーシステム学会では、本年(2014年)10月28～31日に島根県松江市で第9回JFPS国際シンポジウムを開催します。

シンポジウムでは、油圧・空気圧・水圧や機能性流体を含むフルードパワー全般に亘る最新の情報を提供します。また、シンポジウムのメインテーマは、“Energy Saving and LCA Design in Smart Fluid Power System”としました。

シンポジウムの目的は、世界中の研究者やエンジニアのためにフルードパワーの現状と未来技術に対する意見交換する場所を提供することです。皆様の積極的な参加をお待ちしています。

また、フルードパワーシステムおよびコンポーネントの最先端技術を紹介する展示会は、産業アプリケーションとそのエンジニアリングの背景に重点をおきます。企業の皆様の参加をお待ちしています。

松江市は、再建された壮大な城をシンボルとする島根県の県庁所在地で、日本の神々の逸話に関連する古い日本がいたるところに見られます。シンポジウムの開催場所は、このような松江市にふさわしい“くにびきメッセ”で開催されます。

皆様と松江でお会いできるのを楽しみにしています。

詳細は、<http://www.jfps.jp/net/9thjfps/>を参照ください。

解説

カルマンフィルタを用いた管内非定常流量計測

著者紹介



さな だ かず し
眞 田 一 志

横浜国立大学大学院
〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
E-mail: ksanada@ynu.ac.jp

昭和61年3月東京工業大学大学院理工学研究科
修士課程制御工学専攻修了。昭和61年4月東京工
業大学助手。平成10年横浜国立大学工学部生産
工学科助教授。平成13年横浜国立大学大学院助
教授。平成16年横浜国立大学大学院教授。現在
に至る。

1. はじめに

人が生きるために水は欠かせないものであり、人類の歴史上、特に農耕・かんがい技術の進歩に伴い、水の流れを計る技術も発展してきた。古代エジプトのメンフィスの遺跡からは、紀元前2500年前の約400メートルの銅製水道管が発掘されている。ローマ時代の水道路はそのアーチの美しさでもよく知られているが、紀元前3世紀半ば以降、アッピア水道など4本の上水道が建設され、ローマ市民の生活環境の向上に大きく貢献した。当時、ローマ水道の流量は水路の面積で決まると考えられていたが、1世紀頃の発明家でありアレキサンドリアで活躍したヘロンは、流れの流速も関係していることを指摘し、今日知られている流量＝面積×流速の原理を発見した。一説には、ヘロンの計測により、ローマ人の一人あたりの一日の送水量が1000リットルにも達したと言われている¹⁾。大量の水が古代ローマの人々の豊かな生活を支えていた。

今日では、家庭用や工業用にさまざまな流量計が使用されている。流量を計測するには、主に二つの方法がある。一つは容積で計る容積式流量計であり、ほかの一つは障害物の前後の圧力差で計る差圧式流量計である。容積式流量計は、流れを枡にため、枡の容積と時間から流量を求める計測法であり、計測時間を長くすることで容易に精度を上げることができる。一方、差圧式流量計の代表例はオリフィス流量計で、中央に円形の穴をあけた薄板を管路に挿入

し、その円形の穴で流れを絞ることで生じる圧力降下を計測して、流量を求める方法である。時間をかけることなく、差圧を読み取って計算すれば、短時間で流量を求めることができる。オリフィスについては、JIS Z 8762-2 円形管路の絞り機構による流量測定方法-第2部オリフィス板に定められている。

そのほかに、電磁流量計、超音波流量計、渦流量計、コリオリ流量計、面積式流量計、熱線流量計、タービン流量計などがある²⁾。

本稿で紹介する方法は、管路を流れる非圧縮性流体の流量を測定する新しい方法である。管路の流れの数学モデルに圧力信号を入力することで非定常流量を推定する方法で、カルマンフィルタの原理にもとづいている^{3)~6)}。3個の圧力センサとコンピュータを必要とするが、管路内に障害物を設置することなく、非定常流量の測定が可能であり、管路に沿った流量と圧力の分布を推定することもできる。

2. カルマンフィルタによる非定常流量計測の原理

本計測法では、カルマンフィルタを基本原理として利用している。カルマンフィルタは、(1)対象システムの動特性、(2)対象システムの入力信号と出力信号、(3)雑音の統計的性質、(4)初期値に関する先験情報から、システムの状態の最小2乗推定値を逐次的に与えるオンライン処理アルゴリズムである⁷⁾。本手法のシステム構成を図1に示す。管路の3点の圧力信号を計測して、カルマンフィルタにより流量を

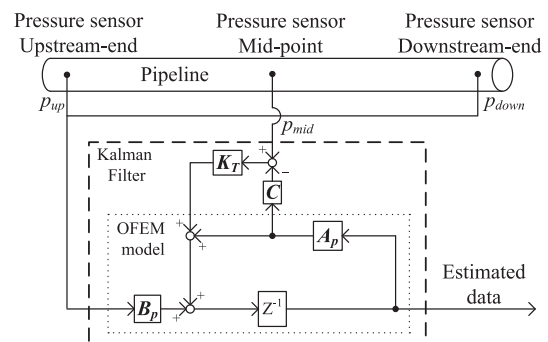


図1 カルマンフィルタの構成

計測する。

2.1 対象システムの動特性

円形の管路を流れる非圧縮性流体（密度 ρ ）の運動方程式（式(1)）と連続の式（式(2)）を基礎式とする。波動伝播速度 c に比べて、流速 $v=q/A$ （ q ：流量、 A ：面積）が無視できるほど小さい領域では、対流項を省略して考えることができる。 p_f は管路の圧力損失を表している。

運動方程式

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{A}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - p_f(q) \quad (1)$$

連続の式

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{A} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (2)$$

これらの式が基礎式であるが、流量 q と圧力 p は時間 t と管路の位置座標 x の関数であり、基礎式は偏微分方程式になっている。

カルマンフィルタは、システム方程式の線形性を前提とする。そこで本手法では、対象システムの動特性モデルとして、最適化有限要素モデル⁸⁾を利用した。詳細は参考文献に譲ることとして、最適化有限要素モデルは現代制御理論の状態方程式で表すことができ、線形性を有している。計測区間の両端における圧力が入力であり、管路の軸に沿った格子点における流量と圧力が状態変数である。

2.2 対象システムの入力信号と出力信号

入力信号に計測区間の両端の圧力を採用する。図1に示す p_{up} と p_{down} が入力信号である。出力信号は、管路の中央の点における圧力、すなわち図1における p_{mid} である。最適化有限要素モデルの状態変数から、中央点の圧力を算出することができる。中央点における実測値と最適化有限要素モデルから算出される中央点の圧力推定値との偏差を計算し、ゲインを乗じてモデルにフィードバックする。カルマンフィルタ理論によれば、中央点の圧力のモデル出力が実測値に収束したとき、ほかの格子点における圧力と流量の推定値も実際の値に収束し、その結果、非定常流量を測定することができる。

2.3 雑音の統計的性質

カルマンフィルタでは、ノイズはガウス白色雑音であると仮定する。本手法の場合、使用する圧力センサのノイズをガウス白色雑音であると仮定し、その共分散をカルマンフィルタの計算に用いる。センサノイズの大きさを考慮したうえで、非定常流量の計測が可能である。

2.4 初期値に関する先験情報

対象システムである管路内の圧力と流量の初期値に応じて、最適化有限要素モデルの状態変数ベクト

ル（格子点における圧力と流量）の初期値を設定する。初期状態として定常流れを仮定すれば、流量の初期値と管路の圧力損失から、管路に沿った格子点における圧力を計算することができる。格子点の流量はすべて定常流量に等しく設定すればよい。この初期値の設定では、若干の誤差は許容される。中央点の圧力について、モデル推定値と実測値の偏差がモデルにフィードバックされることで、モデルの状態変数が実際の値に収束する。そのため、初期誤差の影響は短時間で減衰することが知られている。

3. 非定常流量の計測例

油圧管路における非定常流量の計測結果を紹介する^{3)~6)}。実験装置の概要を図2に、外観を図3に示す。油圧ポンプ(1)から吐き出された油圧作動油は、計測区間を流れてタンクに戻る。3個の圧力センサ(5)~(7)の信号をカルマンフィルタの計算に用いる。

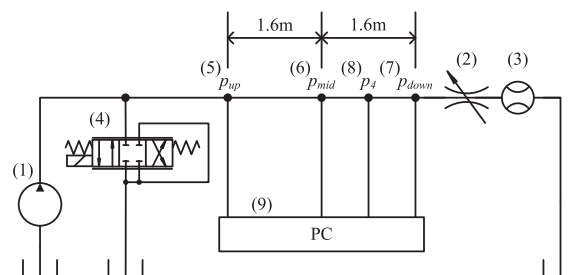


図2 実験装置

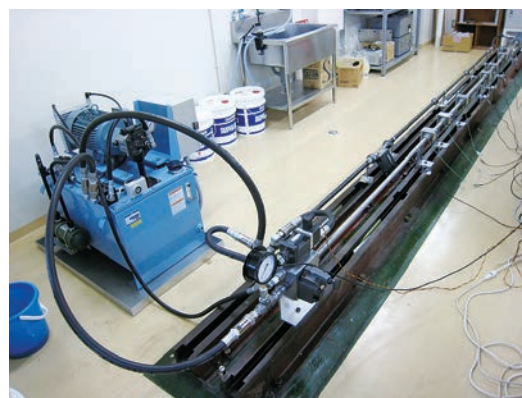


図3 実験装置の外観

表1 実験の諸元

Wave speed	1310m/s
Length of pipe	3.2m
Number of elements	5
Diameter of pipe	20mm
Kinematic viscosity	50cSt
Density	850kg/m ³
Sampling time	0.1ms

圧力センサ(8)はモニタ用であり、ここでは省略する。負荷圧力は絞り弁(2)で調整する。コリオリ式流量計(3)は定常流量の確認用に用いた。サーボ弁(4)はブリードオフに使用し、正弦波駆動して脈動流量を発生させた。実験装置の諸元を表1に示す。

サーボ弁(4)を100Hzで正弦波駆動し、非定常流量を計測した結果を図4に示す。実線がカルマンフィルタの推定結果で、破線は特性曲線法の計算結果であり、両者はよく一致している。一点鎖線はコリオリ流量計(3)の出力であるが、本来定常流量計測用であるため、この周波数帯域における測定には適していない。

カルマンフィルタによって推定した非定常流量をFFT解析した結果を図5の最上段のプロットに示す。

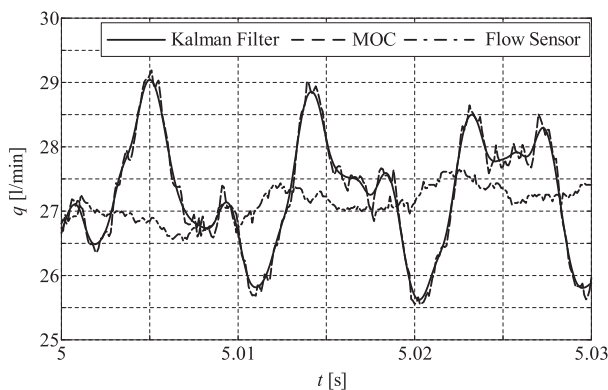


図4 中間点における非定常流量のカルマンフィルタによる測定結果

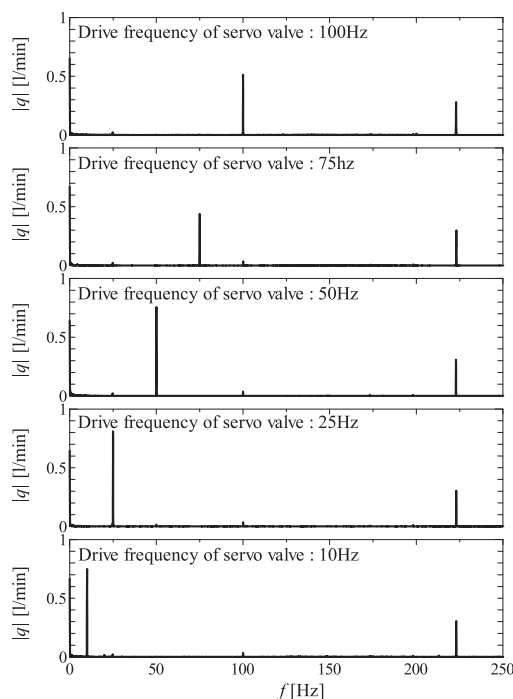


図5 脈動流量の測定結果

サーボ弁の駆動周波数である100Hzにピークが現れている。また、225Hzのピークは、油圧ポンプの吐き出し流量のポンピング周波数に対応している。サーボ弁の駆動周波数を、75Hz、50Hz、25Hz、10Hzとした場合のFFT解析結果も同図に示している。油圧ポンプのポンピング周波数は同じ225Hzにピークが現れているのに対して、サーボ弁の駆動周波数においてピークが現れている。

4. おわりに

本稿のはじめに述べたように、流量計測は古代より発明され、発展してきた技術であり、現在でも新しい計測器が研究開発されている。本稿で紹介した計測法は、カルマンフィルタ理論と管路動特性モデルを統合した点に特徴がある。そのためには管路動特性の線形な状態方程式が必要であるが、最適化有限要素モデルはまさにそのようなモデルとして活用されている。油圧分野において非定常流量を計測することができれば、これまで解明困難とされてきたことも、明らかにできるようになる。たとえば、従来はシミュレーションでしかわからなかった過渡的な現象も、非定常流量を実際に計測することで、実験結果として提示することができるようになる。多くの研究者が、非定常流量の計測法に着目されることを期待する。

参考文献

- 1) 小川 胖：流体計測の歴史（1. 古代オリエント）、計測技術、2003年11月号、日本工業出版、p. 88-91 (2003)
- 2) 眞島正市、磯部孝：計測法通論、東京大学出版会（1979）
- 3) 小澤明、眞田一志：管路動特性の最適化有限要素モデルを用いたカルマンフィルタに関する研究、日本フルードパワーシステム学会論文集、Vol. 42, No. 5, p. 89-94 (2011)
- 4) OZAWA, A., SANADA, K.: An Indirect Measurement Method of Transient Pressure and Flow Rate in a Pipe, Proceedings of the 8th International Symposium on Fluid Power, Okinawa 2011, Oct. 25-28, 2011, p. 104-109 (2011)
- 5) Sanada, K.: Using a Kalman Filter to Estimate Unsteady Flow, International Journal of Automation Technology, Vol. 6, No. 4, p. 440-444 (2012)
- 6) 小澤明、眞田一志：カルマンフィルタを用いた管内非定常流量・圧力の推定、日本フルードパワーシステム学会論文集、Vol. 44, No. 1, p. 8-15 (2013)
- 7) 片山 徹：応用カルマンフィルタ、朝倉書店、p. 5 (1989)
- 8) Sanada, K., Richards, C.W., Longmore D.K., and Johnston, D.N.: A finite element model of hydraulic pipelines using an optimized interlacing grid system, Proc Instn Mech Engrs, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 207, p. 213-222 (1993)

(原稿受付：2014年5月28日)

解説

マイクロPIV (Particle Image Velocimetry)

著者紹介

にし の こう いち
西 野 耕 一横浜国立大学大学院
〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
E-mail: nish@ynu.ac.jp

1990年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。横浜国立大学講師、助教授を経て、2004年同大学大学院工学研究院教授、現在に至る。流体計測技術の開発、表面張力流の研究に従事。日本機械学会、可視化情報学会などの会員。工学博士。

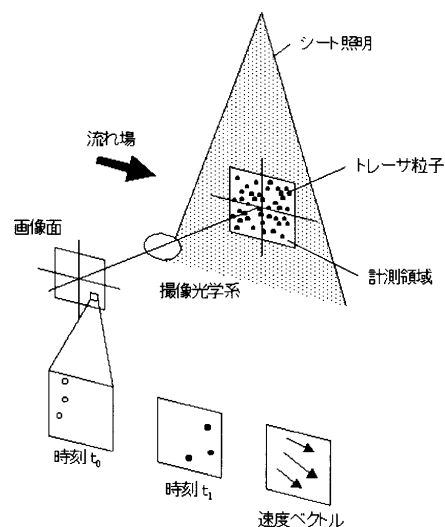
1. はじめに

本稿では、マイクロ流れの流速分布計測手法として広く使われているマイクロPIV (Particle Image Velocimetry) について解説する。PIVは流れに懸濁させたトレーサ粒子（たとえば、気流中のオイルミストや煙、液流中の微小固体粒子や蛍光粒子）の動きを撮影し、移動距離を定量化することによって流速分布を得るもので、近年の流速分布計測の標準的手法として普及が進んでいる。

マイクロ流れは、界面近傍の流れ、マイクロデバイス内部の流れ、多孔質体・積層体内部の流れ、生物や生命工学における流れなどに見られる。マイクロ流れは代表寸法が小さく、センサを挿入することが許されないため、可視化撮影に基づくPIVが威力を発揮する計測対象である。PIVと顕微鏡撮影を組み合わせた手法がマイクロPIVであり、すでにいくつかの解説記事や学会誌特集号が存在する^{1)~5)}。本稿ではマイクロPIVの測定原理、これまでの研究開発、最近の話題について紹介する。

2. 測定原理とこれまでの研究開発

PIVは粒子像数密度が高いHigh image density PIVとそれが低いLow image density PIVに部類され⁶⁾、前者を狭義のPIV、後者をPTV (Particle Tracking Velocimetry) と呼ぶ。どちらも、図1⁷⁾に示した通り、流れに懸濁させたトレーサ粒子を撮影し、所定の時間間隔 Δt [s] での移動距離 $\Delta \vec{x}$ [pixel]

図1 PIVの原理⁷⁾

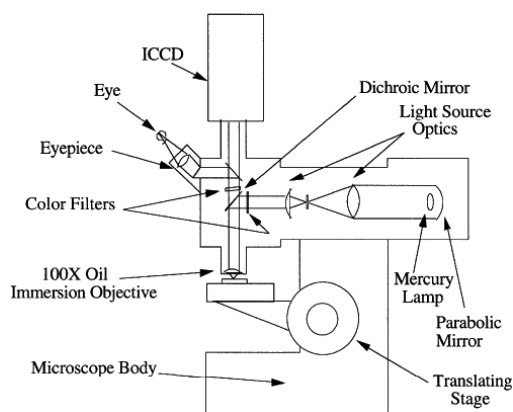
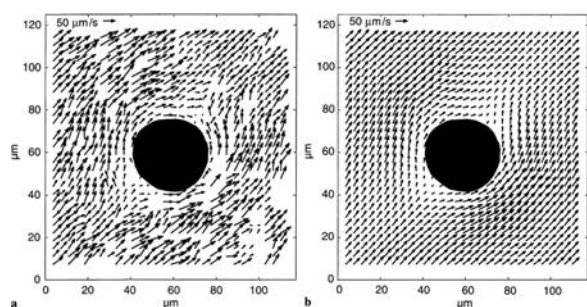
を求め、次式でトレーサ粒子速度を計算し、それを局所の流体速度 $\vec{v}$ [m/s] と見なすものである。

$$\vec{v} = a \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 a [m/pixel] はスケーリングファクタである。図1の標準PIVでは、レーザシート光で流れ場を照射し、その2次元断面内の流速を計測する。レーザシート光の厚みは1mm程度であり、十分に薄い2次元断面と見なせる。

マイクロPIVの測定原理は至って単純で、顕微鏡撮影によって微小な流れ場を拡大撮影することに基づく。そのような測定結果を初めて報告した論文⁸⁾はGoogle Scholarでの被引用回数が1000を超えており、多くの研究者の興味を引いていることがわかる。図2はその論文で報告されたマイクロPIVシステムである。同軸落射蛍光顕微鏡（油浸100倍対物レンズ装着）にICCDカメラを装着し、粒径300nmの蛍光粒子（励起波長469nm、蛍光波長509nm）を懸濁させている。水銀ランプとカラーフィルタで蛍光粒子を照明する。これを用いて120 μ m $\times$ 120 μ mの視野幅で30 μ mの物体回りの流れを測定した結果が示されている（図3）。

市販されているマイクロPIVシステムでは、照明

図2 マイクロPIVシステム⁸⁾図3 マイクロPIVの測定結果⁸⁾
左：瞬間速度ベクトル，右：8枚の瞬間速度ベクトルの平均

源としてダブルパルスNd:YAGレーザーが使われる。その波長は $\lambda=532\text{nm}$ で、パルスレーザーの発光時間間隔 Δt を任意に設定することができる。図4にパルスレーザーと長作動距離対物レンズ(20倍, $NA=0.42$, 作動距離20mm)で撮影されたキャピラリー管(内径 $100\mu\text{m}$)内の蛍光粒子(粒子径 $2\mu\text{m}$, 蛍光波長域はオレンジ)の画像を示す。

顕微鏡撮影における落射照明は、視野奥行き方向のすべての領域を照明するため(Volume IlluminationあるいはFlood Illuminationと呼ばれる)、撮影されたトレーサ粒子が奥行き方向のどの位置にあるのか特定できないという問題が生じる。Meinhartらは、トレーサ粒子の実質的な被写界深度 Δ_z が次式で与えられることを示した⁹⁾。

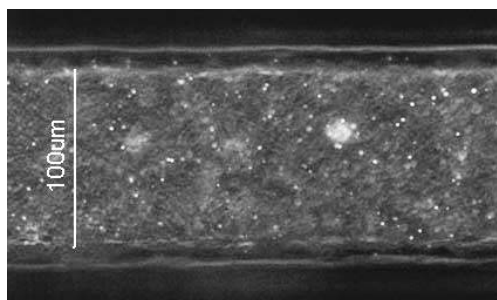


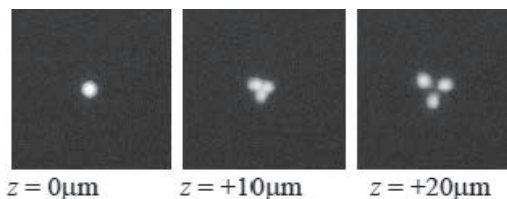
図4 マイクロPIVで撮影された蛍光粒子画像

$$\Delta_z = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16d_p}{\tan\theta} + d_p \quad (2)$$

ここで、 n は対物レンズと測定対象との間の媒質の屈折率、 θ は粒子が対物レンズに張る円錐の頂角の $1/2$ 、 d_p はトレーサ粒子径である。この結果は、被写界深度が撮像系の回折の影響(右辺第1項)、幾何光学的な影響(第2項)、粒子径そのもの(第3項)で与えられることを意味する。たとえば、 $n=1.0$, $\lambda=532\text{nm}$, $NA=0.275$, $d_p=2\mu\text{m}$ では(図4を得た長作動距離対物レンズに概ね相当)、 $\Delta_z=38.8\mu\text{m}$ となる。一方、 $n=1.5$, $\lambda=532\text{nm}$, $NA=1.4$, $d_p=0.2\mu\text{m}$ では(図2の油浸没対物レンズに概ね相当)、 $\Delta_z=1.8\mu\text{m}$ となる¹⁾。

視野奥行き方向位置を限定するため、被写界深度の浅い撮影光学系を採用することが考えられる。その一つとして、共焦点顕微鏡を用いた測定が報告されている¹⁰⁾。2000fpsの高速度カメラを用いたシステムで、被写界深度が $1.88\mu\text{m}$ に抑え込まれている(視野幅は $228\mu\text{m} \times 171\mu\text{m}$)。マイクロ流路内の液滴の動的挙動の測定結果が示されている。

被写界深度の影響を排除するため、トレーサ粒子の視野奥行き方向位置を直接測定する方法が提案されている。その一つに、Defocusing法と呼ばれる方法¹¹⁾がある。これは、三角形に配置された三つのピンホールを有する絞りを撮像光学系に設置することにより、トレーサ粒子像が三つの白点として撮影され、白点間距離(=三角形の大きさ)が被写界深度方向の位置に依存する特性を利用するものである。製作された対物レンズ用の絞りと撮影された粒子像を図5に示す(参考文献¹²⁾のFig.6と9)。ここで、図中の z は焦点面からの距離(正号は対物レンズ方向)を表す。

図5 Defocusing法¹¹⁾
上：絞りと対物レンズ，下：撮影された粒子像

トレーサ粒子が小さくなるとブラウン運動の影響が顕在化する。上述の計測⁸⁾では、その影響が大きくならぬよう粒径300nmの蛍光粒子を選んだとある。ブラウン運動による粒子の拡散距離 $\sqrt{x^2}$ は次式で与えられる¹³⁾。

$$\sqrt{x^2} = \sqrt{\frac{2kT}{3\pi\mu d_p} \Delta t} \quad (3)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T は流体温度、 μ は流体の粘性係数である。ブラウン運動が速度測定に与える影響は $\sqrt{x^2}/\Delta t \propto \Delta t^{-1/2}$ となるため、パルスレーザの発光時間間隔が短くなるにつれて影響が増大する。その影響を低減するため、狭義のPIVとPTVを組み合わせたアルゴリズムが提案されている¹⁴⁾(この論文は2003年度の日本機械学会論文賞を受賞した)。

3. 最近の話題

マイクロ流れでは、固体壁面近傍のナノオーダーの流体層の挙動への関心が高まる¹⁵⁾。そのような流体挙動を明らかにするために、高い空間分解能を有するナノPIVの開発が進められている。ここでも上述の被写界深度の改善が鍵を握る。先駆的研究として、全反射界面に生じるエバネッセント光を利用した固体壁近傍の数100nm領域のPIV計測が報告されている¹⁶⁾。全反射照明蛍光顕微鏡の技術を用いたPIVと言える。この路線の研究は精力的に進められており、近年では25nmの空間分解能で10kHzのサンプリングができることが報告されている¹⁷⁾。

最近のもう一つの動きはフルボリューム計測(3次元計測)である。通常スケールの流れ場の3次元計測はすでに多くの研究報告があり、ハンドブックなどにもまとめられている⁷⁾。近年はCT(Computed Tomography)の原理を利用したTomoPIVの開発が進められている¹⁸⁾。この手法をマイクロPIVに適用する研究が進められている¹⁹⁾。

4. おわりに

本稿では、マイクロ流れの流速分布計測手法の主役と言えるマイクロPIVについて、測定原理、これまでの研究開発の様子、最近の話題を紹介した。振り返ってみると、顕微鏡撮影技術をいかに適用するか? 改善するか? という方向で研究開発が進んできたと言える。今後は、電子顕微鏡のように、より空間分解能の高い線源の利用が進むのではないかと筆者は考えている。

参考文献

1) 西野耕一: マイクロ流れの速度場計測, ながれ, Vol. 20,

- p. 83-91 (2001)
- 2) 可視化情報学会: (特集) マイクロビジュアライゼーション, 可視化情報, Vol. 23, No. 90 (2003)
- 3) Wereley, S. T., Meinhart, C. D.: Recent Advances in Micro-Particle Image Velocimetry, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, p. 557-576 (2010)
- 4) 可視化情報学会: (特集) マイクロ・ナノフロー, 可視化情報, Vol. 33, No. 129 (2013)
- 5) 株式会社東レリサーチセンター調査研究部: マイクロ流路 (3.1 濃度及び流速の計測技術), p.176-213 (2014)
- 6) Adrian, R. J.: Particle-imaging Technique for Experimental Fluid Mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, p.261-304 (1991)
- 7) 可視化情報学会編: PIVハンドブック, 森北出版 (2002).
- 8) Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J., Adrian, R. J.: A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics, Experiments in Fluids, Vol. 25, No. 4, p. 316-319 (1998)
- 9) Meinhart, C. D., Wereley, S. T., Gray, M. H. B.: Volume Illumination for Two-dimensional Particle Image Velocimetry, Measurement Science and Technology, Vol. 11, p. 809-814 (2000)
- 10) Kinoshita, H., Kaneda, S., Fujii, T., Oshima, M.: Three-dimensional Measurement and Visualization of Internal Flow of a Moving Droplet Using Confocal Micro-PIV, Lab on a Chip, Vol. 7, p. 338-346 (2007)
- 11) Yoon, S. Y., Kim, K. C.: 3D Particle Position and 3D Velocity Field Measurement in a Microvolume via the Defocusing Concept, Measurement Science and Technology, Vol. 17, No. 11, p. 2897-2905 (2006)
- 12) Kim, K. C., Yoon, S. Y.: 3D Micro-PIV Technique for Quantitative Visualization of Low Speed Flow in Microfluidics, Proc. of 5th Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, 27-29th September, PSFVIP-5-105 (2005).
- 13) 流れの可視化学会編: 新版 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, p. 158-164 (1986)
- 14) 稲葉靖二郎, 佐藤洋平, 菱田公一, 前田昌信: サブミクロン蛍光粒子を用いた微小空間における流れ場計測(トレーサ粒子のブラウン運動を考慮した局所空間平均PTVの提案), 日本機械学会論文集 (B編), 68巻, 675号, p. 3033-3040 (2002)
- 15) Kihm, D. D.: Near-field Characterization of Micro/Nano-scaled Fluid Flows, Springer (2011)
- 16) Zettner, C. M., Yoda, M.: Particle Velocity Field Measurements in a Near-wall Flow Using Evanescent Wave Illumination, Experiments in Fluids, Vol.34, p. 115-121 (2003)
- 17) Guasto, J. S., Breuer, K. S.: High-speed Quantum Dot Tracking and Velocimetry Using Evanescent Wave Illumination, Experiments in Fluids, Vol.47, p. 1059-1066 (2009)
- 18) Scarano, F.: (Topical Review) Tomographic PIV: Principles and Practice, Measurement Science and Technology, Vol. 24, 012001 (2013)
- 19) Kim, H., Westerweel, J., Elsinga, G. E.: Comparison of Tomo-PIV and 3D-PTV for Microfluidic Flows, Measurement Science and Technology, Vol. 24, 024007 (2013)

(原稿受付: 2014年7月11日)

解説

感圧塗料による圧力計測技術の機械工学への応用

著者紹介



もり ひで お
森 英 男

九州大学大学院
〒819-0395 福岡市西区元岡744番地
E-mail: hide-m@mech.kyushu-u.ac.jp

2000年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。ドイツ航空宇宙センター客員研究員、名古屋大学助手、講師を経て、2008年九州大学大学院工学研究院准教授、現在に至る。専門は光学的流体計測技術、日本機械学会、可視化情報学会などの会員、博士（工学）。

1. はじめに

実験流体工学（EFD）分野の解析における圧力計測手法として、感圧塗料（Pressure Sensitive Paint: PSP）¹⁾が近年注目を集めている。PSPによる圧力計測手法は、固体表面上の圧力分布を画像として取得可能なことや、従来のプローブを用いた手法に比べて低侵襲であること、回転体などプローブの設置が困難な対象物への適用が容易などの利点を有する。PSPは、1990年前後に米国と旧ソビエト連邦でそれぞれ独立して開発され^{1)~4)}、その後欧州や日本を含めた世界各国でPSPの技術革新が進められた結果、圧力感度や時間応答性の向上など、PSPの技術は20年あまりの間に大きな発展を遂げた^{5),6)}。しかしながら、機械工学分野のEFD解析における比較的低速な空気流中の圧力計測や、ターボ機械動翼など回転体表面上の圧力計測への応用が期待されているものの、実際のEFD解析への適用例はいまだ限られてい

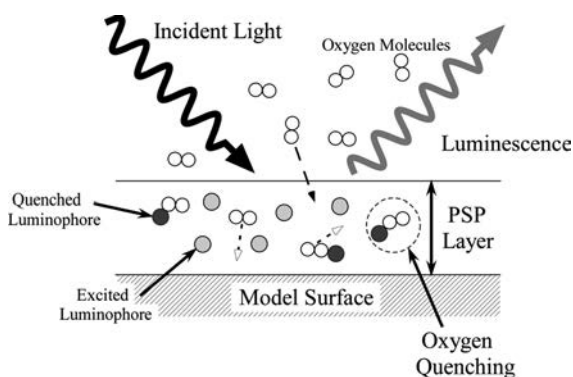


図1 感圧塗料（PSP）の原理

る。その主な原因は、PSPの適用において、従来の流体計測手法とは大きく異なるPSP特有のノウハウが必要であることが挙げられる。本記事では、PSPの基本原理および必要な装置の構成など、計測手法の概略を示すとともに、PSPを適用したEFD解析における近年の動向について述べる。

2. PSPの基本原理

2.1 基本原理と圧力感度

PSPは、有機系色素分子が発する燐光や蛍光が酸素分子により消光される現象を応用したセンサー技術であり、塗料として固体表面に適用することで、表面圧力を測定する手法として利用することができる^{1),2)}。PSPの原理を示す模式図を図1に示す。

PSPは、酸素消光性を有する発光色素分子と、色素分子を固体表面に付着させるためのバインダーにより構成される。色素として、PtTFPPなどのポルフィリン金属錯体や、ルテニウム錯体、ピレンなどの有機系色素が一般的に用いられる。バインダーには、poly（TMSP）などの酸素透過性ポリマーや多孔質表面などが用いられる。前者のポリマーバインダーを使用する場合、色素とポリマーをともに有機溶媒に溶解させ、エアブラシや浸漬などの方法で固体表面に塗布する。有機溶媒が蒸発すると、固体表面上に色素分子を担持したポリマーの薄膜が形成される。また後者の多孔質表面として、TLC用シリカゲル板や陽極酸化皮膜などが用いられ、色素の溶液を塗布することで、色素分子を表面に直接吸着させる。

このようにして固体表面上に適用されたPSPに短波長（青～近紫外）の光を照射すると、電子エネルギーの低い基底状態にある色素分子が光エネルギーを吸収し、励起状態となる。励起状態の色素分子は不安定であり、エネルギーを失いやすいが、一部の色素分子は蛍光または燐光としてエネルギーを放出し、基底状態に戻る。このとき、励起状態の色素分子に酸素分子が作用すると、色素分子のエネルギーが失われ、無発光のまま基底状態に戻るため、発光強度が低下する（酸素消光）。PSPの薄膜中に浸透する酸素分子の濃度は、薄膜表面の酸素分圧に比例するため、酸素消光作用は酸素分圧に依存する。さ

らに大気中における酸素のモル比は一定であり、空気の圧力は酸素分圧に比例するため、結果的にPSPの発光強度は表面の圧力に依存する。

圧力 P とPSPの発光強度 I の関係は、次式のStern-Volmer式により与えられる¹⁾。

$$\frac{I_{ref}}{I} = A_0 + A_1 \frac{P}{P_{ref}} \quad (1)$$

ここで、 I_{ref} は既知の圧力 P_{ref} （参照圧力）における発光強度である。 A_0 および A_1 をStern-Volmer係数と呼び、較正試験により求められる。なお実際のPSPの適用では、式(1)に二次の非線形項 $A_2(P/P_{ref})^2$ を補正項として加えた経験式が一般的に用いられる。

式(1)では、圧力および発光強度の比をとることで、PSPの励起光の照射強度分布を式中に含まない形となっているが、そのために、既知の圧力条件 P_{ref} における発光強度 I_{ref} の分布画像（以下、参照画像）を必要とする。通常、風洞や回転体の停止時における発光強度分布を参照画像として用いるのが一般的であるが、風洞の運転時と停止時で測定対象物に変形や変位が生じる場合や、回転体を対象とする場合に回転時と停止時の画像間でピクセル位置のずれが生じると、PSPによる計測結果に誤差をもたらす要因となる。位置ずれ自体の補正はアフィン変換などの幾何学的変換により可能であるが、この場合、対象物の変形や変位に伴う照射光強度分布の変化がもたらす計測誤差の補正はできない。

一方、PSPは発光強度だけでなく発光寿命も圧力に対する依存性を有するため、発光寿命を利用した圧力計測手法も提案されている¹⁾。発光寿命は照射光強度に依存しないため、本手法では参照画像の取得が不要となり、前述の参照画像の位置ずれに起因した誤差の問題を解決できる。なお、PSPの発光寿命はns～μsオーダーと非常に短いため、本手法の適用には高速なシャッターを有するハイスピードカメラなどの器材が必要となる。

2.2 温度依存性

PSPの発光強度（および発光寿命）は、酸素圧力だけでなくPSP塗膜の温度にも依存する。これは、励起状態の色素が無放射でエネルギーを失う（失活）作用およびポリマー中の酸素分子の拡散がともに温度依存性を有するためであり、PSPによる圧力計測に大きな誤差をもたらす可能性がある。一方で、この温度依存性を温度計測に利用する手法は感温塗料（Temperature Sensitive Paint: TSP）と呼ばれる。Hyakutakeら⁷⁾は、PSPとTSPの塗膜を重ね合わせることで、圧力と温度の同時計測を実現する手法を提案している。Moonら⁸⁾は、PSPとTSPの重ね塗り手法を適用し、TSPで取得した温度分布を用いてPSPの温度補正を行うことで、低速流れ場における圧力計測精度の向上を実現している。

3. 装置の構成

PSPによる計測に必要な装置類は、励起用光源と光検出器およびパーソナルコンピュータやオシロスコープなどの記録装置により構成される。実験装置の模式図を図2に示す。

励起用光源の要件は、PSPの発光分子を励起できる波長の光を発することが必須である。発光分子の多くは青色から近紫外の短波長領域に光吸収スペクトルを有するため、長波長の成分を多く含む白熱電球は不向きである。光源としてはキセノンアークランプや水銀ランプ、レーザーなどが使用され、近年では青色～近紫外のLED光源も多く利用される。また、測定対象となる表面を均一に照射するためには、大口径の光源が望ましい。Iijimaら⁹⁾は、測定対象表面上に無機EL膜を展開し、PSPの励起に利用する手法により、励起光の強度分布の均一化を実現している。なお、発光寿命ベースの手法を適用する場合は、フラッシュランプやパルスレーザーなどパルス発振が可能な光源を用いる必要がある。

光検出器としてはビデオカメラが一般的に用いられる。撮影対象物の光強度と記録画像の輝度値の線形性や、輝度値の階調度の高さが要求されるため、科学計測用ビデオカメラの利用が望ましい²⁾。撮影の際は、短波長の励起光の散乱を遮断し、長波長のPSP発光を透過する光学フィルターを用いる。一方、光学窓の小さい風洞内部へ適用する場合など、光学的アクセスが限られ、励起光の導入やカメラによる発光画像の撮影が困難な場合は、光ファイバーを介した励起光の導入法や、細いレーザービームを測定対象面へ照射する方法を用い、フォトダイオードや光電子増倍管によりPSPの発光強度を取得することもできる。この場合はPSPの利点の一つである画像計測が不可能となるが、PSPの励起光源としてレーザービームを用い、ビームスポットを計測対象面上でスキャンさせる方法により、擬似的な画像計測が

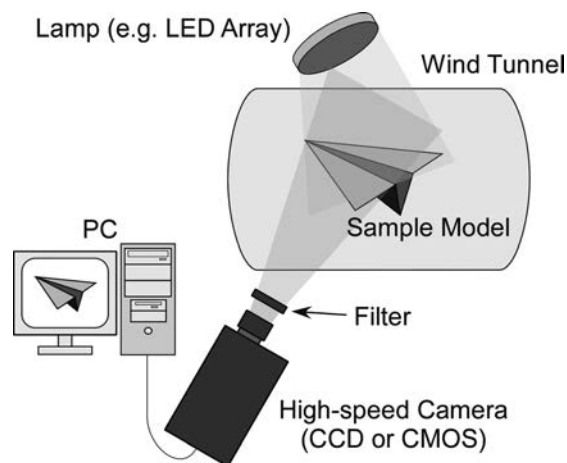


図2 実験装置の模式図

可能となる¹⁾。

取得したPSPの発光強度画像をPCに取り込み、式(1)を適用して圧力分布を算出する。その際、あらかじめ較正試験により発光強度と圧力値との関係を取得し、その結果からStern-Volmer係数 A_n を求める必要がある。較正試験の実施方法として、PSPを塗布した試料を圧力や温度の制御が可能な密閉容器中に設置し、各圧力および温度条件における発光強度を測定する方法(a priori較正法)または試験模型表面に複数の圧力孔を設け、風洞試験時に取得した圧力孔近傍の発光強度値を較正に利用する方法(in situ較正法)が用いられる。後者のin situ較正法は、風洞試験と較正試験を同時に行うことが可能なため、装置の配置の違いに起因する系統誤差を低減することが可能な利点があるが、測定対象表面に不均一な温度分布が生じている場合や、回転体など圧力センサーの設置が困難な対象物の場合は、a priori較正法が適している。

4. 流体機械を対象としたEFD解析への応用

PSP技術の開発から20年あまりが経過し、当初は圧力感度の限界などの制限により航空宇宙分野における高速流れ場の定常解析へ適用例が限られていたPSPは、近年では低速流れ場や非定常流れ場など、適用範囲を広げつつある^{5),6)}。その一方で、現時点においても、機械工学分野におけるPSPのEFD解析への適用例は限られており、特に回転翼面上など流体機械を対象としたPSPの適用例は非常に少ないのが現状である。

ターボ機械のEFD解析におけるPSPの適用例として、Suryanarayananら¹⁰⁾は、タービン翼列の膜冷却効果を検証するため、回転タービン翼を対象としてPSPを適用している。冷却ガスに窒素を利用した際の翼面上の酸素分圧を測定することで、膜冷却効果を実験的に検証している。また木村ら¹¹⁾は、ガスタービン翼列のフラッター特性を解析するため、陽極酸化アルミニウム被膜ベースのPSPを用いて、強制振動を加えた直線翼列の翼表面における非定常圧力計測を行い、圧力変動の位相を高い精度で取得することに成功している。大村ら¹²⁾は、超音速タービン翼の直線翼列の側板上における圧力計測へ重ね塗りPSP/TSPを適用し、圧力分布の定量計測および衝撃波構造の可視化解析を行っている。

以上の研究例はごく一部であり、著者の浅学および紙面の都合のため、PSPの適用例のすべてを紹介できなかった非礼をここにお詫びする。

5. 結 言

PSPの技術は現在も発展を続けており、国内の

PSP技術に携わる多くの研究者によるフォーラムが毎年開催され、活発な議論が行われている¹³⁾。また昨年はPSPおよびTSPに関する講習会が開催され¹⁴⁾、著者も講師を務めたが、受講された方々のPSP技術に対する強い関心を伺うことができた。今後、機械工学分野のEFD解析において、PSPが一層広く活用されることを期待している。

参考文献

- 1) Liu, T., Sullivan, J.P.: Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer (2005)
- 2) 浅井圭介：感圧塗料による圧力分布の計測技術，可視化情報学会誌，Vol. 18, No. 69, p. 97-104 (1998)
- 3) Kavandi, J., Callis, J., Gouterman, M., Khalil, G., Wright, D., Green, E., Burns, D., McLachlan, B.: Luminescent Barometry in Wind Tunnels, Rev. Sci. Instrum., Vol. 61, No. 11, p. 3340-3347 (1990)
- 4) Ardasheva, M.M., Nevskii, L.B., Pervushin G.E.: Measurement of Pressure Distribution by Means of Indicator Coatings, J. Appl. Mech. Tech. Phys., Vol. 26, No. 4, p. 469-474 (1985)
- 5) 江上泰広，松田佑：特集 感圧塗料計測，可視化情報学会誌，Vol.34, No.132, p.2-34 (2014)
- 6) Gregory, J.W., Sakaue, H., Liu, T., Sullivan, J.P.: Fast Pressure-sensitive Paint for Flow and Acoustic Diagnostics, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 46, p. 303-330 (2014)
- 7) Hyakutake, T., Taguchi, H., Kato, J., Nishide, H., Watanabe M.: Luminescent Multi-layered Polymer Coating for the Simultaneous Detection of Oxygen Pressure and Temperature, Macromol. Chem. Phys., Vol. 210, p. 1230-1234 (2009)
- 8) Moon, K., Mori, H., Ambe, Y., Kawabata H.: Development of Dual-layer PSP/TSP System for Pressure and Temperature Measurements in Low-speed Flow Field, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, AJK2011-11020 (2011)
- 9) Iijima, Y., Sakaue, H.: Development of Electroluminescence Based Pressure-sensitive Paint System, Rev. Sci. Instrum. Vol. 82, 015107 (2011)
- 10) Suryanarayanan, A., Ozturk, B., Schobeiri, M.T., Han, J.C.: Film-cooling Effectiveness on a Rotating Turbine Platform Using Pressure Sensitive Paint Technique, J. Turbomachinery, Vol. 132, 041001 (2010)
- 11) 木村泰徳，渡辺紀徳，姫野武洋，井上智博，鶴沢聖治：感圧塗料による振動翼表面非定常圧力計測の試み，第40回日本ガスタービン学会定期講演会，A-6 (2012)
- 12) 大村尚登，川幡宏亮，前田恭平，森英男，中野晋，小野英樹，築瀬祐太：超音速流れ場における重ね塗りPSP/TSPを用いた圧力分布の可視化，可視化情報，Vol. 33, Suppl. 1, p. 505-508 (2013)
- 13) 第9回学際領域における分子イメージングフォーラム，http://www.aero.jaxa.jp/publication/event/event131029_rep.html (2013)
- 14) 染矢聡，田中康恵：第15回可視化フロンティア「LIF・PSP・TSP講習会2013」開催報告，可視化情報学会誌，Vol. 34, No. 132, p. 35-36 (2014)

(原稿受付：2014年6月10日)

解説

超音波法による潤滑診断の可能性

著者紹介



たけ うち あき とし
竹 内 彰 敏

高知工科大学
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185番地
E-mail : takeuchi.akitoshi@kochi-tech.ac.jp

1986年日本大学大学院工学研究科博士後期課程満期退学，同大学助手，専任講師を経て，1997年高知工科大学助教授，教授，現在に至る。日本トライボロジー学会，日本設計工学会，日本非破壊検査協会，日本設備管理学会，日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

軸受に異常が発生すると，機械設備の停止など，種々の不都合が生じることは周知の通りである。機械装置に組み込まれる転がり軸受では，実際のはめ合い，組み付けの良否や経年変化などにより，設計時の想定を上回る複雑な力が作用している可能性が高い。このため，実動運転にある軸受の潤滑状態の診断には，作用している荷重の大きさや方向のその場観測が重要となるが，厚いハウジングに組み込まれた軸受に作用する力を，たとえば歪ゲージなどにより正しく把握することは難しい。

またたとえば，固体接触が介入する混合潤滑や固形粒子の噛み込みを伴う潤滑油汚染下では，転送面起点型のフレーキングが問題となるため¹⁾，損傷（や摩耗）の進展や摩耗粉の噛み込みなどの軸受劣化の情報をその場で定量的に把握できる，簡便な測定法が必要になる。

さらに，近年の省エネルギー・省資源化に応じて，潤滑剤の攪拌抵抗の低減を目的とした，微量な潤滑剤での運転が試みられているが²⁾，特に，高速回転機械などでは，供給油量の不足により致命的な損傷に陥る危険性を抱えており，潤滑油の供給状態の定量監視技術の確立が望まれている。

ここでは，ハウジングと軸受外輪との境界面からの音波の反射率，ならびに，外輪と玉との境界面での反射率の変化に着目した，軸受荷重の推定³⁾や表面損傷の定量測定⁴⁾，潤滑油供給不足の評価⁵⁾，な

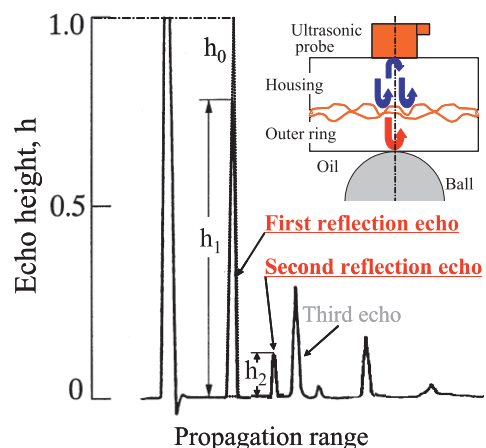


図1 測定原理と反射エコー高さ

どの潤滑診断法の可能性について述べる。

2. 測定原理

図1に示すように，超音波探触子から入射された音波の一部は，ハウジングと軸受外輪の音響的性質の違い，はめあい面の固体接触面積や接触点（したがって空隙）の分布状態などに応じて透過し，残りは反射する。そして，探触子音軸上に玉がある場合には，図中の模式図のように，探傷器画面上で受信音圧に比例した第1反射エコー（高さ h_1 ）が観測される⁵⁾。このエコー高さの低下量（ $h_0 - h_1$ ）は，固体接触面積，したがって境界面の面圧に比例するため，たとえば，玉が探触子直下にある時のエコー高さの値から，玉荷重や軸受荷重の推定が可能になると考えられる。ここで h_0 は，両隣の玉の中間に超音波の音軸がある場合のエコー高さである。

一方，外輪に透過した波も外輪転走面の状態（玉の有無や油の供給状態）に応じてその一部が反射して探触子に戻り，第2反射エコー（高さ h_2 ）を形成する。ここでは，それぞれの反射エコー高さ h_1 と h_2 を，上述のエコー高さ h_0 で標準化して定めたエコー高さ比， $H_{T1} = 1 - h_1/h_0$ ， $H_{T2} = 1 - h_2/h_0$ による，軸受荷重や損傷，潤滑油供給不足の評価の可能性について述べる。

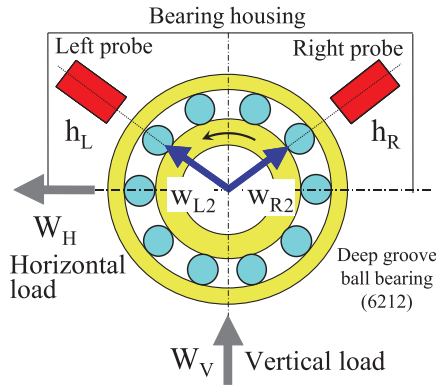


図2 実験装置概略

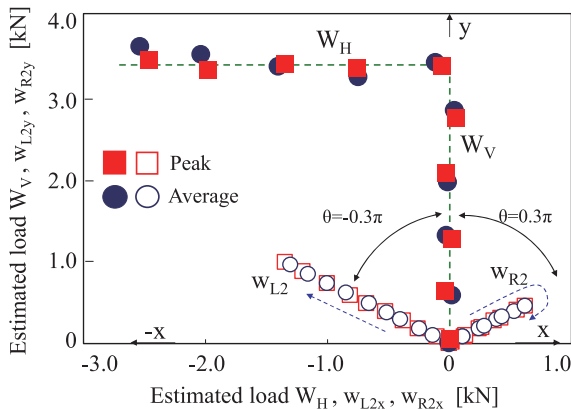


図3 探触子位置での軸受荷重と玉荷重の成分推定

3. 軸受荷重測定の可能性

前述したように、実際に運転されている軸受に作用する荷重は、設計時に想定していた値と異なる場合があるため、潤滑状態の把握や寿命予測のためには、定量的な軸受荷重のその場観測が必要となる。

図2中に示した斜角探触子(2MHz)を用い、極低速回転(0.5rpm)で求めた、第1反射エコー高さ H_{T1} と、垂直荷重 W_V あるいは水平荷重 W_H の関係(したがって校正曲線)を基に、10rpmで回転する玉軸受に負荷された荷重を推定した結果を図3に示す。なお、図中の[Peak]は、たとえば図4に示す H_{T1} の変動波形のピーク(探触子音軸上に玉が存在)での推定結果、[Average]は H_{T1} の平均高さで推定した結果である。また、 W_{L2} と W_{R2} は左右探触子直下の玉支持荷重の推定結果である。

実験では、垂直荷重を $W_V = 0 \sim 3.4$ kNまで負荷した後、水平荷重を $W_H = 0 \sim 2.72$ kNまで重畳させたが、求められた W_V や W_H の結果には、荷重や荷重ステップにある程度のバラツキが認められるものの、その軌跡は荷重の負荷過程をほぼトレースできている。

4. 転がり軸受の損傷評価の可能性

たとえば、超音波の照射領域において、内輪に発

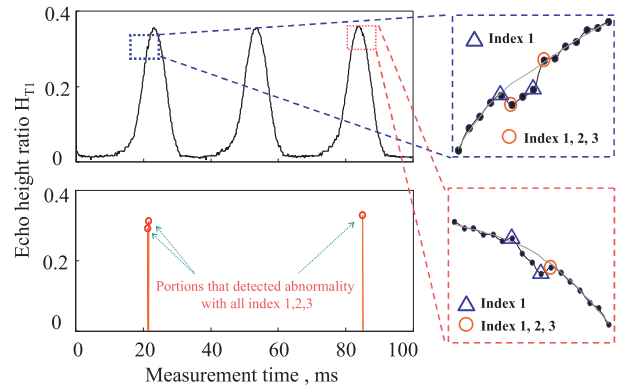


図4 異常箇所の検出例

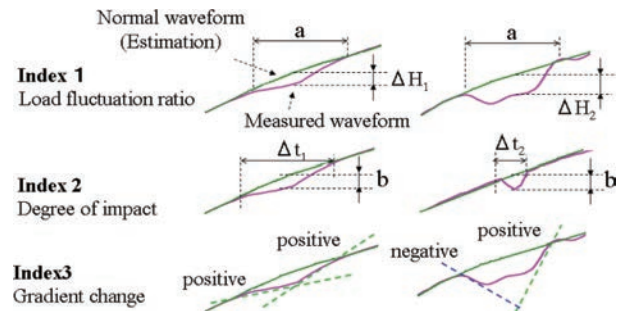


図5 異常の評価指標

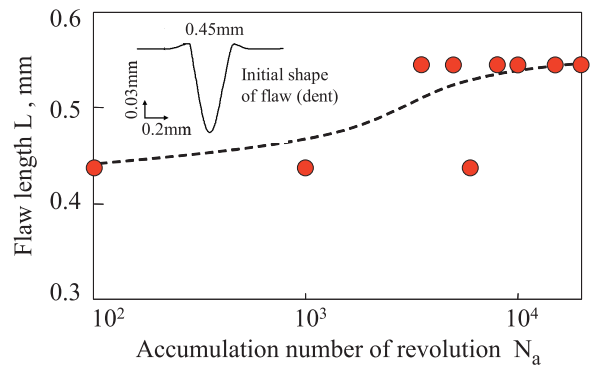


図6 初期長さ0.45mmのビッカース圧痕の成長

生した圧痕やフレーキング部と玉が接触すると、玉の支持荷重が減少し、その結果、外輪とハウジングの接触圧力(したがって固体接触面積)が局所的に低下する。軸受の転送面と玉の間に摩耗粉が噛みこんだ場合には玉支持荷重が増加するため、接触圧力は逆に増加する。

図4は、玉の移動に伴う第1反射波のエコー高さ H_{T1} の変動の観測例である。 H_{T1} は探触子音軸上に玉が位置するときに最も高く、両隣の玉の中間に音軸がある付近では低く現れる。損傷の診断では、上記の接触圧力に依存して増減する、この H_{T1} の挙動を観測しており、図中の□印で囲んだ領域のような、わずかな H_{T1} の変化に着目する。

異常箇所(損傷や摩耗粉の噛み込)の特定では図

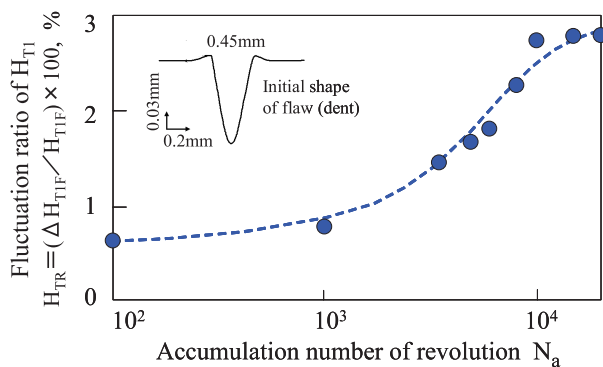


図7 玉支持荷重の減少割合の経時変化

5に示す3つの指標を用いた。指標1は玉の支持荷重の変動 (ΔH_{T1})、指標2は損傷部への玉の落ち込みに伴う衝撃の程度 ($\Delta H_{T1} / \Delta t$)、指標3は H_{T1} の局所勾配の変化 ($+\leftrightarrow-$) であり、診断ではそのいずれもが閾値を超えた場合に異常と判断した。たとえば図4の波形では、同図右側に拡大して示したように、2箇所そのような異常部（初期円周方向長さ0.45mmのピッカース圧痕）が観測されている。

最小2乗法により推定した健全な軸受でのエコー高さ比 H_{T1} と、実測された H_{T1} の差をとると、損傷幅 L や玉の支持荷重の低下に伴う H_{T1} の減少量を推定できる。図6の損傷幅 L は、測定系の最小分解能のために階段状に現れてはいるが、累積回転数の増加に伴い明らかに広がっている。また、図7に示した玉の支持荷重の減少割合 H_{TR} においても累積回転

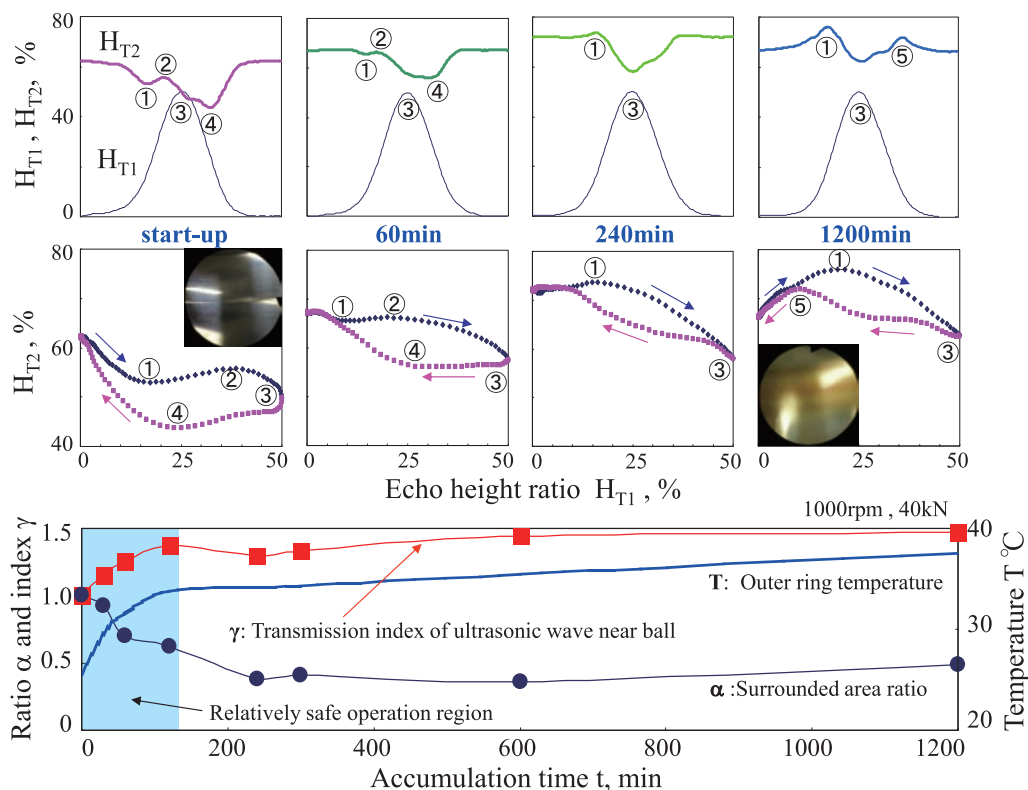
数の影響は明瞭であり、 $N_a=5,000$ 回転を超えた付近から急激に増加しており、軸受の劣化傾向が把握できている。

5. 潤滑油の供給不足と潤滑状態評価の可能性

軸受への多量な潤滑油の供給は、攪拌抵抗の増大による駆動トルクの上昇を招くことから、特に高速で運転される転がり軸受では、必要最小油量での運転が望まれている。しかし、潤滑面間に供給される潤滑油が不足すると、転走面と玉との固体接触が介入する混合潤滑状態に陥り、潤滑面の劣化や表面起点型のフレーキング発生の可能性が急速に増すばかりでなく、焼付きに至る危険性も高まる。このため、転がり軸受面間への潤滑油の供給状態をその場で観測できる簡便な診断法が望まれる。

超音波法による油供給状態の評価は、軸受外輪と玉との境界面からの第2反射エコーの観測を基に行う。図8に、運転直前に軸受の転走面へ低粘度の鉱物油ベース合成潤滑剤を0.5ccだけ噴霧し、その後の注油を行わなかった実験（1,000rpm）での結果を示す。

たとえば、超音波音軸に転動体が近づく際に現れる玉入口側でのエコー高さ比 H_{T2} の局所上昇（図8上段の②）の維持時間や、玉出口側での H_{T2} が最小となる点と音軸との時間差（図8の④と③の差）に着目する。運転開始時に観測された②の局所上昇

図8 H_{T1} と H_{T2} の閉曲線面積や外輪と玉境界からの音波の伝播具合の経時変化

(入り口部での潤滑油の存在)や、④と③の時間差(入り口側と出口側の油膜形成状態の違い)は、240分経過時には観測されていないことから、転走面での潤滑油の枯渇が示唆される。

しかし、そのような維持時間や時間差を、その場で正確に観測することは難しいため、つぎに、ハウジングと軸受外輪の境界面からの第1反射エコー高さ H_{T1} と、外輪と玉との境界面からの第2反射エコー高さ H_{T2} の関係から求まる閉曲線の形や(図8中段)その面積、ならびに潤滑膜や玉への音波の透過のしやすさ、を評価指数とした簡便な潤滑診断法の可能性(同図下段)を検討する。

中段に示した H_{T1} と H_{T2} の閉曲線の形は時間の経過と共に変化するため、潤滑状態の変遷を視覚的に捉える観測法として都合がよい。たとえば運転初期に、玉が音軸に近づく玉入口側(①周辺)で観測された H_{T2} の減少は、時間が経過して潤滑油が枯渇するに連れ消滅する。

下段には、閉曲線の面積の時間変化を、実験初期での面積との比 α で示してある。約240minまでの α は時間と共に減少し、0.4程度まで低下した後にほぼ一定の値を維持することから、潤滑油は240minまでにほぼ枯渇したと推定される。

第2反射波のエコー高さ H_{T2} から試算した潤滑膜や玉への音波の伝播のしやすさの時間変化を、実験初期との比 γ で示した結果では、 α とは逆に、運転開始から120minまでの間に増加し、その後はほとんど変化しない。この γ の増加には、ワニスに似たガム状物質の生成や油焼けの発生も影響していると推定される。そして図8の場合、少なくとも100min以降での運転の危険性は高いと判断される。

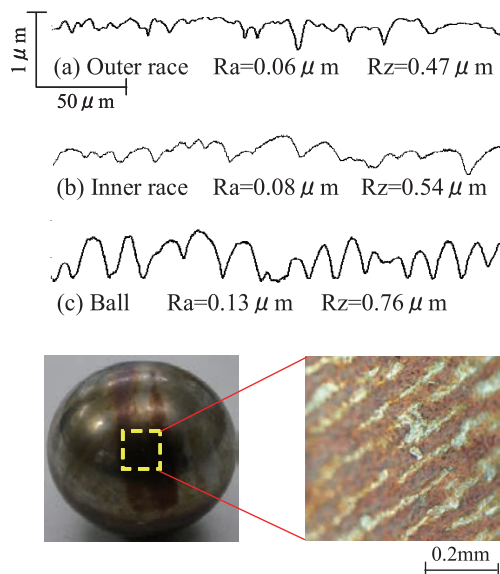


図9 実験後の潤滑面の表面性状

軸受の振動が大きく、実験を中止した(1,260min)後に分解・観測した転がり摩擦面の写真を図9に示す。実験前に $Ra \approx 0.03 \mu m$ であった軸受(外輪、内輪、玉)の表面粗さは、その2倍程度に荒れ、それら転走面には目視で油焼けが確認できた。

6. まとめ

超音波法での、玉軸受の支持荷重測定、内輪損傷の長さ推定や軸受の劣化過程の評価、そして潤滑油の供給不足の観測の可能性につき述べてきた。

(1)ハウジングと外輪の界面からの第1反射エコー高さ比から推定された軸受の支持荷重やその方向は、実際に負荷されたそれらとほぼ一致する。

(2)第1反射エコー高さ H_{T1} の変動量(ΔH_{T1})、衝撃の程度($\Delta H_{T1}/\Delta t$)、局所勾配の変化($+\leftrightarrow-$)から異常箇所の検出が可能になり、正常時の H_{T1} との比較を基に、損傷の進展、玉支持荷重の低下割合、そして軸受劣化過程の定量評価が可能になる。

(3)玉入口側(潤滑油流入側)での、外輪と玉との界面からの第2反射エコー高さ H_{T2} のピークの消滅や、出口側での H_{T2} の最小位置と音軸位置との時間差の減少、さらには、 H_{T1} と H_{T2} の閉曲線の形や面積の減少、そして、外輪と玉の接触部での音波の伝播指標により、潤滑油供給状態の良否を定量的に評価できる見込みがある。

このように、超音波法による潤滑診断の可能性は明らかになったものの、実現場での適用実績が無く、ノイズや振動、温度補償等の問題も残されており、実用的な技術への昇華はこれからの課題である。最後に、このような技術紹介の機会を与えていただいたことに、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Y.P. Chiu, J.Y. Liu : An Analytical Study of the Stress Concentration around a Furrow Shaped Surface Defect in Rolling Contact, Transactions of the ASME Journal of Tribology, Vol. 92, p. 258-263 (1970)
- 2) 小杉太, 野島進: 新ジェット (MQCJ) 潤滑対応単列円筒ころ軸受, NTN Technical Review No. 76, p. 94-98 (2008)
- 3) 竹内彰敏: 斜角超音波探触子法による深溝玉軸受の支持荷重測定の試み, 機論C編, Vol. 78, No. 791, p. 2592-2603 (2012)
- 4) A. Takeuchi : Observation of Lubrication Conditions Using an Ultrasonic Technique, Lubrication Science, Vol. 21, p. 397-413 (2009)
- 5) 竹内彰敏: 転がり軸受面での潤滑油の供給不足と枯渇過程の超音波観測, 機論C編, Vol. 78, No. 795 (2012), p. 3776-3786 (2012)

(原稿受付: 2014年6月1日)

解説

音源分離技術

著者紹介

とがみ まさひと
戸上 真人

(株)日立製作所・中央研究所
〒185-8601 東京都分寺市東恋ヶ窪 1-280
E-mail: masahito.togami.fe@hitachi.com

2002年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。2003年10月(株)日立製作所中央研究所入社。2012年10月より同社主任研究員、現在に至る。音響処理、信号処理技術の研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、日本音響学会、人工知能学会などの会員。博士(工学)。

1. はじめに

遠隔会議システム、遠隔作業支援システム、騒音環境での音声認識システム、音響情報からの異常検出システムなど、音を扱うさまざまなシステムで、複数の音が混ざった音の中から特定の音のみを抽出したいというニーズが広く存在する。このニーズに応えるべく、複数の音が混ざった信号を音源毎に分離する音源分離技術が盛んに検討されてきている。本稿では、この音源分離技術について、音声処理の観点で長年検討されてきた技術を中心に解説する。

音源分離技術は、単一マイクロホンを用いた技術と複数のマイクロホンを用いた方法の二つに分けることができる。前者は、主に、時間軸上において、各音源の統計的な性質が異なることを利用して音源を分離する技術である。一般に、音声成分のように所望の音源が時間毎に音量が大きく変化する非定常な音であると仮定できる場合は多い。また、所望の音以外の音は、熱雑音や環境騒音のように音量が一定の定常的な音とみなすことができる場合が多い。単一マイクロホンを用いた技術として、このような定常性と非定常性の違いに基づき分離する手法が広く検討されている¹⁾。熱雑音や環境騒音のように定常的な雑音成分は、単一マイクロホンを用いた手法で十分に分離・消去することができる。一方で、複数の人の音声混ざった音の中から、特定の人の音声のみを分離したい場合などは、所望の音とそれ以外の雑音とが、時間軸上で類似の統計的性質を示す

ことになり、単一マイクロホンを用いた手法では、分離困難と言える。

これに対して、近年複数のマイクロホンを用いることで、単一マイクロホンを用いた手法では活用が困難な音の到来方向の情報を手掛かりに音源を分離する手法が広く検討されてきている^{2~4)}。これら複数のマイクロホンを用いた音源分離技術では、各音源が存在する空間的な場所が異なるということ、及び複数のマイクロホン間の時間差、位相差、強度差が音源の空間的な場所の関数になることを利用して、マイクロホン入力信号から各音源の信号を逆推定する技術である。複数のマイクロホンを用いた手法は、各音源の空間的な場所が異なっていれば、所望音と雑音とが両方とも非定常な音であっても分離することが可能である。また、従来は各音源の方向を事前に与える手法が主流であったが、近年、事前の情報を必要としないブラインド音源分離技術が主流となりつつあり、より簡便に音源を分離することが可能となりつつある。

本稿では、複数のマイクロホンを用いてマイクロホン入力信号を各音源に分離する音源分離技術について解説すると共に、今後の展望について述べる。

2. 複数のマイクロホンを用いた音源分離技術

2.1 概要

音源分離技術とは、複数の音が混ざったマイクロホン入力信号から所望の音を抽出するためのデジタル信号処理技術である。音源分離は、対象を音に限定しているが、信号分離技術の一つのカテゴリとして、無線のアレイアンテナで広く活用される遅延和アレイ法²⁾、最小分散ビームフォーマ法³⁾など、分野横断の共通技術をベースに検討が進んできた。音源分離技術で扱う問題は、次式で定義されるマイク入力信号 y_i (t は時間インデックス) から各音源の信号 s_i を推定する問題と位置付けることができる。

$$y_i = A s_i \quad (1)$$

ここで、 $y_i = [y_{i1} \dots y_{iM}]$ であり、 M はマイクロホン数とする。 $s_i = [s_{i1} \dots s_{iN}]$ であり、 N は音源数と

する。\$s_{i,t}\$はi番目の音源の原信号を意味する。したがって、\$s_i\$が推定できれば、所望信号に相当する音源の信号を容易に抽出することができる。Aは、空間的な音の伝搬経路に相当する変数とする。ここで、\$y_t\$と\$s_t\$は時間変化する信号であるが、音源の位置が変化しなければAは時間不変の変数となる。一般に音源分離技術は、Aについての事前情報の有無に基づき、非ブラインド信号分離技術とブラインド信号分離技術との二つのカテゴリに分けることができる。非ブラインド音源分離技術とは、分離に際して、AまたはAの一部を既知の変数と思い分離する手法である。Aが未知と仮定するブラインド音源分離法では、Aを求める必要がある。しかし、\$y_t = As_t\$を満たすAおよび\$s_t\$は無限に存在するため、いわゆる不良設定問題となり解を一意に定めることができない。そこで、ブラインド音源分離技術では、\$s_t\$に関する先験的知識（音源間の独立性など）を確率モデルとして表現することで、確率的な観点で妥当な解を求める手法が検討されてきている。

2.2 非ブラインド音源分離技術

非ブラインドの音源分離技術としては、遅延和アレイ²⁾、最小分散ビームフォーマ³⁾が一般的に広く使われている。ここで、式(1)を所望信号と雑音信号の和として以下のように再定義する。

$$y_t = s_{1,t} \mathbf{a}_1 + \mathbf{n}_t \quad (2)$$

ここでは1つ目の音源を所望信号と定義していることになる。\$\mathbf{a}_i\$は、行列Aのi列目の列ベクトルであり、i番目の音源の空間的な場所に依存した変数であり、ステアリングベクトルと呼ぶ。

\$\mathbf{n}_t\$は、1つ目の音源以外の音源の和として、\$\sum_{i=2}^N s_{i,t} \mathbf{a}_i\$

のように定義する。遅延和アレイ法、最小分散ビームフォーマ共に、\$\mathbf{a}_1\$が既知であると仮定し、所望信号の音源信号\$s_1\$を推定する。遅延和アレイ法では、次式で推定信号\$\hat{s}_{DS,t}\$を得る。

$$\hat{s}_{DS,t} = \frac{\mathbf{a}_1^H \mathbf{y}_t}{\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_1} \quad (3)$$

ここで、Hは、行列またはベクトルのエルミート転置を取る演算子とする。遅延和アレイ法はいわゆる同相加算法であり、すべてのマイクロホン信号中の所望信号の位相を合わせた後加算することで、所望音を強調することができる。一方で所望音以外の雑音については、各マイクロホン信号中の位相がばらつくため、加算処理により強調されない。したがって、加算後のS/Nは加算前のS/Nと比較して向上することが期待できる。以下にS/N向上の仕組みを示す。ここで、式(3)は、

$$\hat{s}_{DS,t} = s_{1,t} + \sum_{i=2}^N s_{i,t} \frac{\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_i}{\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_1} \quad (4)$$

と変形することができる。第二項において、\$\frac{\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_i}{\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_1}\$は1以下の値を取ることになる。仮に各音源のステアリングベクトルが直交しているとする、第二項は0となり、遅延和アレイで推定した推定信号\$\hat{s}_{DS,t}\$は、\$s_1\$に一致する。したがって、加算処理により、S/Nが向上することになる。しかし、一般には、各音源のステアリングベクトルは直交しないため、遅延和アレイでは完全に第二項を消すことができない。遅延和アレイにおいて第二項の影響を十分に小さくするためには、用いるマイクロホンの数を増やし、大規模化することが必要となってしまう。

そこで、各音源のステアリングベクトルが直交しない場合であっても、可能な限り少ないマイクロホン素子数で第二項を完全に消去するための方法として、減算型の手法が検討されてきた。加算型の遅延和アレイ法では、所望信号を強調するような処理を施すのに対して、減算型の手法では、各マイクロホンの信号に対する重みを調整することで、各マイクロホンの信号を加算した後に、雑音信号が消えるように制御する。最小分散ビームフォーマ³⁾は、減算型の手法の代表的な手法であり、所望信号の推定信号\$\hat{s}_{MVBf,t}\$は、次式で求められる。

$$\hat{s}_{MVBf,t} = \mathbf{w}_{MVBf}^H \mathbf{y}_t \quad (5)$$

ここで、\$\mathbf{w}_{MVBf}\$は、各マイクロホンに対する重みに相当する係数であり、所望信号を推定するための空間フィルタと見ることができる。\$\mathbf{w}_{MVBf}\$は、フィルタリング後の信号の平均パワーを最小化するように、次式で最適化される。

$$\mathbf{w}_{MVBf} = \argmin \mathbf{E} [\mathbf{w}^H \mathbf{y}_t \mathbf{y}_t^H \mathbf{w}] \text{ s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{a}_1 = 1 \quad (6)$$

ここで、Eは期待値計算の演算子とする。上記より、

$$\mathbf{w}_{MVBf} = \frac{\mathbf{a}_1^H \mathbf{R}^{-1}}{\mathbf{a}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_1} \quad (7)$$

となる。ここで、観測信号のエルゴード性を仮定し、

\$\mathbf{R} = \mathbf{E} [\mathbf{y}_t \mathbf{y}_t^H] \approx \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L \mathbf{y}_t \mathbf{y}_t^H\$ とする。Lはフィルタ設計に用いる観測信号のデータ長とする。

最小分散ビームフォーマは、マイクロホン素子数よりも音源数が少ない場合に、理論的にすべての雑音成分を完全に消去することが可能となる。したがって、音源数が少ない場合、遅延和アレイと比較して遥かに高精度に所望音を抽出することができる。一方、音源が空間的に密に存在し、マイクロホン数よりも音源数が遥かに多い場合には、最小分散ビーム

ムフォーマと遅延和アレイの差は小さくなる。

2.3 ブラインド音源分離技術

最小分散ビームフォーマにおいて、所望音のステアリングベクトルは、マイクロホン素子間の間隔が完全に既知であり、残響が存在しないことを前提に、所望音の到来方向のみから決める方法が一般的に取られる。しかし、一般には素子間隔には誤差が含まれたり、残響が存在するため、所望音の到来方向のみから決めたステアリングベクトルと現実のステアリングベクトルの間には大きなずれが生じる。このずれにより、音源分離の際に、不要音だけでなく、所望音も誤って分離・除去してしまうといった問題が生じる。

このような非ブラインド音源分離技術の欠点を補うために開発された技術がブラインド音源分離技術である。ブラインド音源分離技術では、ステアリングベクトルを与えることなく、マイクロホン入力信号のみから、分離を行う手法である。音源分離では、 $\mathbf{A}$ および $\mathbf{s}_t$ に関する先験的知識を確率モデルとして表現することで、確率的な観点で妥当な解を求めるような構成を取る。ブラインド音源分離技術の代表例は、1990年代より盛んに研究がなされている独立成分分析³⁾である。独立成分分析を用いた音源分離では、音源ごとに次式で分離する。

$$\hat{\mathbf{s}}_{\text{ICA}, t} = \mathbf{W}_{\text{ICA}}^H \mathbf{y}_t \quad (8)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{s}}_{\text{ICA}, t} = [\hat{s}_{\text{ICA}, 1, t} \dots \hat{s}_{\text{ICA}, N, t}]^T$ とし、 $\mathbf{T}$ は行列また

はベクトルの転置演算子とする。 $\mathbf{W}_{\text{ICA}}$ は、 N 行 M 列の行列であり、入力信号を各音源信号に分離する分離フィルタである。この分離フィルタ $\mathbf{W}_{\text{ICA}}$ を観測信号から算出することが独立成分分析の主要な課題となる。理想的には、 $\mathbf{A}^{-1}$ となることが望まれるが、一般に独立成分分析では、分離フィルタに定数倍の不定性と、分離した後の音源の順序の不定性（パーミュテーション問題）が存在する。これら不定性については後段処理で十分対処可能であるため、不定性を気にすることなく分離フィルタを学習する。学習の際には、

- 1) 各音源の原信号が相互に独立であること
- 2) 各音源の原信号がスーパーガウシアン分布に従うこと

を仮定し、分離フィルタを学習するといった方法が一般的に取られる³⁾。独立成分分析は、マイクロホン信号のみから音源が分離できる簡便さから2000年代前半に盛んに検討が進んだ。しかし、壁や床で音が反射することによって生じる残響成分など音源の原信号と相関が高い成分を抑圧することが困難で

あるなど、実用上の問題が生じた。これにより、残響成分の統計モデルなどを統合した手法など、さまざまな確率モデルを統合した手法に置き換わりつつある。

3. 独立成分分析以後のブラインド音源分離技術

独立成分分析以後、ブラインド音源分離技術の実現可能性が一気に高まった。近年では、独立性にこだわらず、さまざまな確率モデルを導入して音源を分離する手法が広く検討されている。各時間ごとに $\mathbf{s}_t$ の中で、0より大きい値を有する成分は極少数であるという先験的知識（スパース性）を利用したスパース音源分離法⁴⁾は、音声や音楽のように周波数領域で、スパースな性質を有する信号の分離に広く活用が進んできている。また、従来の音源分離技術では直接音の存在のみ仮定するが、実際には、壁や床、ないしは天井で音が反射することによって生じる残響成分がマイクロホン入力信号に混入する。この残響成分は所望音以外の音源と同様に不要な成分であり消去が必要である。しかし、残響成分はほかの音源と異なり、所望信号と高い相関を示すため、独立性を利用した手法では分離困難となる。近年、観測信号に、時間方向に無相関化するようなフィルタを重ねることにより、時間無相関の残響が抑圧された音声信号を得るような、残響除去法が検討されてきている⁵⁾。また、従来の適応ビームフォーマ、独立成分分析等では、伝達関数が時間不変であることを仮定することが一般的であった。しかし、実際には、人の顔が動くなどの影響で、伝達関数が時間変化することが多い。このような伝達関数の時間変化に対してロバストに動作する音源分離技術が求められている。これに対してDuongらは、直接音のステアリングベクトルの時変性を考慮した新しい音源分離の枠組みを提案している⁶⁾。この枠組みでは、直接音のステアリングベクトルの時変性と共に、音源信号の時変性も考慮しており、音源信号の振幅がダイナミックに変化するような音源を効率よく分離することができる。著者らは、Duongらの方法をベースに、残響除去機能⁷⁾、遠隔会議などで使われる音響エコーキャンセラ⁸⁾、背景雑音除去機能、音源分離機能を確率的な観点で最適統合した音源分離法を提案している。今後、さらに音源分離技術は、さまざまな確率モデル、機能を統合する方向で進化していくと考えている。

4. 音源分離技術の応用

これまで、音源分離技術は、遠隔会議システムの

雑音除去技術⁹⁾、携帯電話向けの雑音抑圧技術¹⁰⁾、人間共生型ロボットの音声認識機能のプリプロセッサ¹¹⁾など、主に音声を抽出する道具として応用されてきた。ブラインド音源分離技術の登場により、事前情報を与えることなく、所望音以外の音源、背景雑音、残響成分など、さまざまな不要音を分離することができるようになりつつある。今後は、さまざまな駆動音が混ざった中から、特定の駆動音を抽出し、異常検出するなど、非音声の抽出技術としても広く活用されていくことが期待されている。

5. ま と め

本稿では、複数の音が混ざったマイクロホン入力信号から、所望の音のみを分離・抽出する音源分離技術について解説した。音源分離技術は、伝達関数が未知のブラインド音源分離技術と、一部既知の非ブラインド音源分離技術に分けることができる。ブラインド音源分離技術は、事前の知識を必要とせずに、背景雑音、残響、音響エコー成分などさまざまな不要音を分離・除去することができる技術であり、確率的な観点で各種分離技術を統合する方向に進化を続けている。今後は、音響情報からの異常検出法など、非音声の抽出技術としても広く活用されていくことが期待される。

参考文献

- 1) P.C. Loizou: Speech Enhancement: Theory And Practice, Signal Processing and Communications, Crc Pr Llc, 2007/6.
- 2) D.H. Johnson and D.E. Dudgeon: Array signal processing concepts and Techniques, PTR Prentice Hall, New Jersey, USA, (1993)
- 3) 浅野太, 音のアレイ信号処理, コロナ社, (2011)
- 4) Ö. Yilmaz and S. Rickard: Blind separation of speech mixtures via time frequency masking, *IEEE Trans. SP*, Vol. 52, No. 7, pp. 1830-1847, (2004)
- 5) K. Kinoshita, M. Delcroix, T. Nakatani, and M. Miyoshi: Suppression of Late Reverberation Effect on Speech Signal Using Long-term Multiple-step Linear Prediction, *IEEE Trans. ASLP*, Vol. 17, No. 4, p. 534-545, (2009)
- 6) N.Q.K. Duong, E. Vincent, and R. Gribonval: Underdetermined reverberant audio source separation using a fullrank spatial covariance model, *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, Vol. 18, No. 7, p. 1830-1840, (2010)
- 7) M. Togami, Y. Kawaguchi, R. Takeda, Y. Obuchi, and N. Nukaga: Optimized Speech Dereverberation From Probabilistic Perspective for Time Varying Acoustic Transfer Function, *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Process.*, Vol. 21, No. 7, p. 1369-1380, (2013)
- 8) M. Togami and Y. Kawaguchi: Speech enhancement combined with dereverberation and acoustic echo reduction for time varying systems, *Proc. Statistical Signal Processing Workshop*, 2012, p. 357-360 (2012)
- 9) 戸上真人, 他: 垂直配置マイクロホンアレーを利用した卓上突発音除去機能を備える遠隔会議システム, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J93-D No. 10, p. 2069-2084 (2010)
- 10) 戸上真人, 他: 音源分離技術を利用した撮影範囲の音声抽出技術, *電子情報通信学会誌*, Vol.96, No. 11, p. 848-855, (2013)
- 11) M. Togami, Y. Obuchi, and A. Amano: Automatic Speech Recognition of Human-Symbiotic Robot EMIEW, in "Human-Robot Interaction, p. 395-404, I-tech Education and Publishing, (2007)

(原稿受付：2014年6月9日)

ニュース

International Journal of Fluid Power

電子ジャーナルの紹介

著者紹介



さな だ かず し
真田 一 志

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

昭和61年3月東京工業大学大学院理工学研究
科修士課程制御工学専攻修了。昭和61年4月東
京工業大学助手。平成10年横浜国立大学工学部
生産工学科助教授。平成13年横浜国立大学大
学院助教授。平成16年横浜国立大学大学院教授。
現在に至る。

1. はじめに

2014年4月、International Journal of Fluid PowerのWebサイト¹⁾が開設され、同年6月に電子投稿システムの運用が開始された。ここでは、同誌について紹介する。

2. 電子ジャーナルの概要

International Journal of Fluid Power は、フルードパワー分野の国際的な団体であるFluid Power Net International (FPNI)²⁾が2000年から発行している英文学術雑誌であり、年3号を発行している。投稿論文は、少なくとも2名の専門家による査読を経て掲載される。同誌では、フルードパワーに関する主として下記の分野の学術論文を取り上げている。

- ・解析、モデリングと制御
- ・モニタリングと故障診断
- ・人工知能応用
- ・機器とシステムの設計
- ・ソフトウェアとハードのインターフェース
- ・計算機援用工学

同誌には、これらの学術論文だけでなく、各大学におけるPhD学位授与者に関する情報や、関係書籍の発行のお知らせ、各国のフルードパワーセンターの活動、国際会議の開催案内も掲載されており、フルードパワーに関する各国各地域における教育研究の情報を得ることができる。JFPSの国際シンポジ

ウムの開催案内も毎回掲載されている。

同誌の編集委員長は、米国Purdue UniversityのMonika Ivantysynova教授であり、Technical Editorが1名、Associate Editorが10名、および24名のInternational Editorial Boardにより運営されている。

同誌は、これまで冊子として発行されてきた。2014年4月に、同誌のWebサイトが開設され、電子ジャーナルとして衣替えされた。それまで冊子に掲載されたすべての論文は電子化され、Webサイトから閲覧することができる。ちなみに、同誌で最も閲覧されている論文は、体積弾性係数に関するレビュー論文³⁾である。

2014年6月には、電子投稿システムの運用が開始された。専用のサイト⁴⁾が開設されており、論文のフォーマットなどの著者向けの情報ページと、査読者向けのページなどが利用できる。

3. おわりに

JFPSとFPNIの国際会議に関する交流として著者が知るのは、2005年につくばで開催された国際シンポジウムでFPNIがCo-Sponsor となってからである。それ以前からも、両団体の関係者はそれぞれが開催した国際会議に相互に参加して交流を深めており、その良好な関係は現在まで長く続いている。今回の同誌の電子ジャーナル発行により、フルードパワーの学術論文の国際的な認知度が高まり、ひいては両団体の交流がますます強化されることを願っている。

参考文献

- 1) <http://www.tandfonline.com/toc/tjfp20/current#>
- 2) <http://www.fpni.net/>
- 3) Hossein Gholizadeha, Richard Burtona, and Greg Schoenau: Fluid Bulk Modulus: A Literature Survey, International Journal of Fluid Power, Vol. 12, Issue 3, p. 5-15, (2011)
- 4) <http://www.edmgr.com/tjfp/>

(原稿受付：2014年7月20日)

会議報告

IFK2014（ドイツ・アーヘン）参加記

著者紹介



かとうとも のり
加藤友規

福岡工業大学工学部知能機械工学科
〒811-0295 福岡県福岡市東区和白東3-30-1
E-mail: t-kato@fit.ac.jp

2007年東京工業大学大学院博士課程修了。都立高専助手～助教を経て、2010年福岡工業大学助教、2012年同大学准教授、現在に至る。空気圧制御に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）、技術士（機械部門）。

1. はじめに

2014年3月24日から26日、ドイツのアーヘンにて、国際会議「9th International Fluid Power Conference (IFK2014)」が開催された。筆者はこの会議に参加させていただいたので、ここに参加記としてご報告させていただく。

2. 国際会議の概要

2.1 IFKについて

International Fluid Power Conference (IFK) は、その名の通りフルードパワー技術に関する国際会議であり、ドイツのアーヘンで1998年3月に第1回目が開催されて以来、2年おきにアーヘン（アーヘン工科大学、以下RWTH）とドレスデン（ドレスデン工科大学）で交互に開催されている。

2.2 会場と会議の概要

見学会以外の会議と企業展示は、アーヘンの市街地にあるEurogress Aachenにて行われた（写真1）。

会議は3月24日のSymposiumから開始され、12のセッションにおいて計50件の講演があった。また、同日夜にはオープニングイベントが開催され、企業展示（写真2）とScientific poster sessionのコーナーもオープンした。翌25日と26日はColloquiumが行われ、オープニング（写真3）と3件のPlenary Lecturesに引き続き、22のセッションにおいて81件の講演が行われた。なおIFKでは、初日のSymposiumは大学関係者の発表が多い（大

学84%：企業16%）のに対し、Colloquiumは企業関係者の発表が多い（大学40%：企業60%）のが毎



写真1 会場のEurogress Aachen

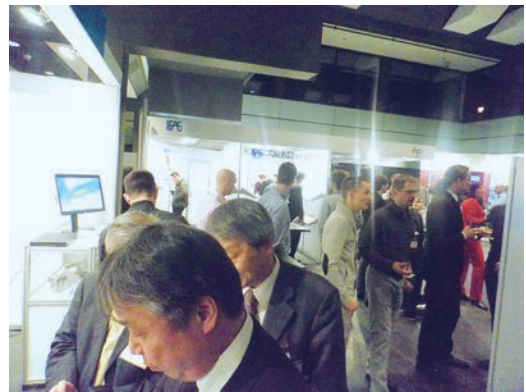


写真2 企業展示



写真3 講演会・会場内（3月25日 Colloquium）



写真4 Banquet (3月25日 Aachen town hall)



写真5 Kim A. Stelson先生のご講演



写真6 Huayoung Yang先生のご講演



写真7 H. Murrenhoff先生によるClosing remarks

回の特徴である。また、前回のIFK2012ではいくつかドイツ語によるご講演があり、その際には英語への同時通訳が行われていたが、筆者が見た限り、今回はすべて英語による発表であった。

また25日の夜はAachen town Hallにて、Banquetが開催された(写真4)。料理は大変おいしく、またアーヘン工科大学の学生達による出し物が深夜まで続き、とても楽しい懇親会であった。

2.3 クロージングと大学見学会

26日の夕方には、クロージングが行われた。その際、Closing Lecturesとして、ミネソタ大学のKim A. Stelson先生(写真5)と浙江大学のHuayoung Yang先生(写真6)によるご講演が行われた。

その後、Closing Remarksとして、主催者のアーヘン工科大学のH. Murrenhoff先生がご講演され、参加者数や参加者の出身国・属性などの統計についてご報告された(写真7)。そのご報告によると、今回のIFK2014の参加登録者のうち、大学関係者は約3割で、約6割は企業関係者とのことであった。また、参加者のうち約8割はヨーロッパ在住で、ヨーロッパ以外は約2割、日本人はその2割のうちの19%(つまり全体の約4%)ということであった。(ちなみに、日本人の参加者数は筆者がお会いした限りではあるが、20名弱程度であったと思う。)Murrenhoff先生のご講演の最後には、次回のIFKは2016年3月にドレスデンで開催されることがアナウンスされ、ドレスデン工科大学のWaber先生がご紹介された。

Closing終了後はバスにて、アーヘン工科大学のIFASに移動し、Laboratory Partyが開催された。

3. おわりに

個人的な話で恐縮であるが、筆者は8年前のIFK2006(アーヘン)と前回のIFK2012(ドレスデン)に出席したので、今回は3度目のIFKであり、8年ぶりのアーヘンであった。今回は学会の前後に、東工大や福岡工業大学と交流のある、スイス連邦工科大学とコンスタンツ応用科学大学にも立ち寄らせていただくことができ、大変勉強になる出張であった。

最後に、25日と26日の夜の懇親会・大学見学会の席では、ドイツ・イタリア・台湾など、多数の外国の方々より「今度は秋に松江で会いましょう。」と言われたことが、とても誇らしく嬉しかったことを書き添えさせていただき、私のIFK2014参加記の結びとさせていただきます。

(原稿受付: 2014年6月23日)

会議報告

JSME機素潤滑設計部門講演会における フルードパワー技術研究

著者紹介



きむ じゅん わん
金 俊 完

東京工業大学大学院
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-J3-12
E-mail: woodjoon@pi.titech.ac.jp

2005年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士後期課程修了。2005年から東京工業大学精密工学研究所助手（助教）、2013年から同大学准教授、現在に至る。機能性流体、MEMS、マイクロマシン、超精密機械加工、メカトロニクスなどの研究に従事。博士（工学）。

1. はじめに

JSME機素潤滑設計部門講演会（以下、MD&T講演会）は、日本機械学会機素潤滑設計部門の主催で隔年に開催される研究交流集会であり、西暦奇数年には大韓機械学会生産設計部門と共同で国際会議（以下、ICMDT）を開催している。今年のMD&T講演会は、西暦偶数年であり日本機械学会のみの主催で、学術ばかりでなく技術の視点からも情報交換を活発に行えることを目的に、機械設計、機械要素、アクチュエータシステム、トライボロジーなどの分野における新たなアイデア、研究成果、今後の方向性を議論・討論した。今回でICMDTを含め第14回を迎えるMD&T講演会は、2014年4月21日から22日まで信州松代ロイヤルホテルで開かれた。第14回MD&T講演会の会議要約によると、本講演会は幅広い分野から80件以上の一般講演、1件の特別講演、4件の基調講演、技術情報交流会などで構成された。本報告では、これらの研究発表の中、フルードパワーシステムに関連する発表を1)油圧・水圧、2)空気圧、3)機能性流体の応用の大枠に分類し、代表的な研究成果について紹介する。

2. フルードパワー技術に関する発表

2.1 油圧・水圧とフルードパワー技術

第14回MD&T講演会では、油圧・水圧分野の発表として、(1)圧電素子を用いた交流圧力源システムの研究、(2)作動流体の相変化を用いたアクチュエータシステムが発表された。

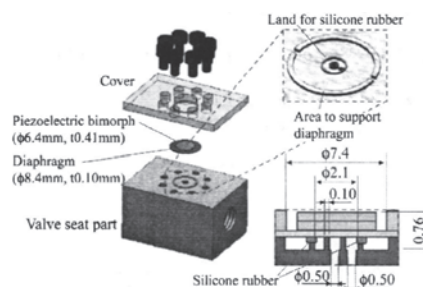


図1 薄型圧電バルブ¹⁾

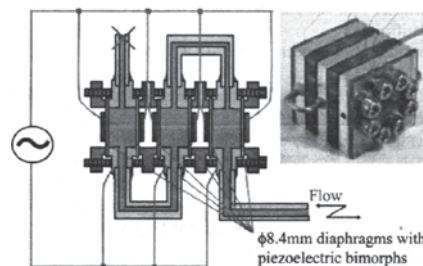


図2 圧電素子を用いた交流圧力源¹⁾

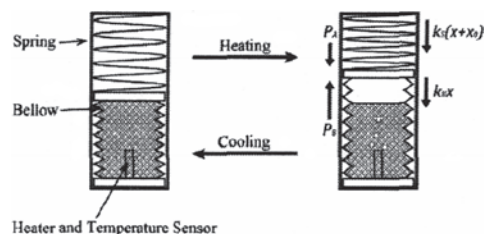


図3 気液相変化を用いたモーション²⁾

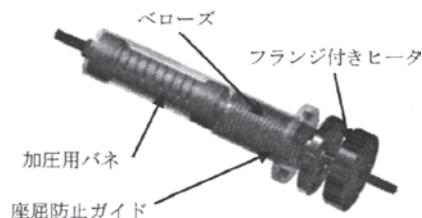


図4 気液相変化型アクチュエータ²⁾

吉田らは、一つの交流圧力源で複数のアクチュエータを制御できる高速かつコンパクトなシステムを実現することを目的として、高応答に適している圧電素子を用いたアクティブバルブと交流圧力源を検討している¹⁾。この多自由度アクチュエータシステムの主要要素である圧電バルブ（図1）、圧電交

流圧力源（図2）を開発することで、これらを統合したシステムの有効性を示している¹⁾。

松岡らは、高温環境下で使用可能なアクチュエータの実現を目的として、気体・液体相変化を用いた圧力源（図3）を検討している²⁾。300℃の高温雰囲気下で駆動可能にするために、287℃の融点を持つトリエチレングリコールを作動流体に、筐体をベローズとするシステム（図4）を開発して、この有効性を示している²⁾。

2.2 空気圧

MD&T講演会で発表された空気圧応用研究として空気圧型リハビリ装置を紹介する。

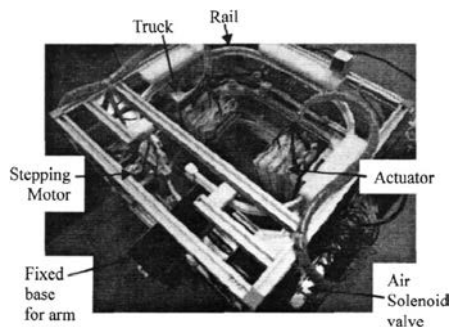


図5 手指関節用リハビリ装置³⁾

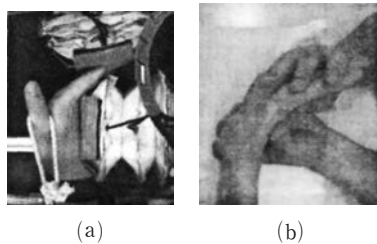


図6 リハビリ装置と作業療法士の伸展動作³⁾

谷口らは、関節可動域訓練のみならず、作業療法士が行なうリハビリの再現が可能な装置の実現を目的として、空気圧を用いた手指関節用リハビリ装置（図5）を開発している³⁾。この研究では、柔軟性に優れている空気圧ソフトアクチュエータを用いることで、安全で筋ストレッチングができることを実験（図6）により確認している³⁾。

2.3 機能性流体

第14回MD&T講演会では、ECF関連で1件、ERF関連で1件の研究発表があった。

三好らは、高いパワー密度を有し、多自由度を持つ管内作業マイクロマシンを実現することを目的とし、機能性流体であるERFと交流圧力源を融合したシステムをMEMS技術により開発している⁴⁾。全長1mmのフィンガは非常に複雑な三次元構造体であるものの、新たに提案する高度なMEMSプロセスにより製作に成功している⁴⁾。

また、GUらは、高出力パワー密度のECFマイクロポンプを実現するために、三角柱-スリット形電極対のさらなる微小化の効果を調べることができる新たな電極対を提案している⁵⁾。MEMS技術によるこのECFポンプの性能を実験的に調べることで、高パワー密度への有効性を明らかにしている⁵⁾。

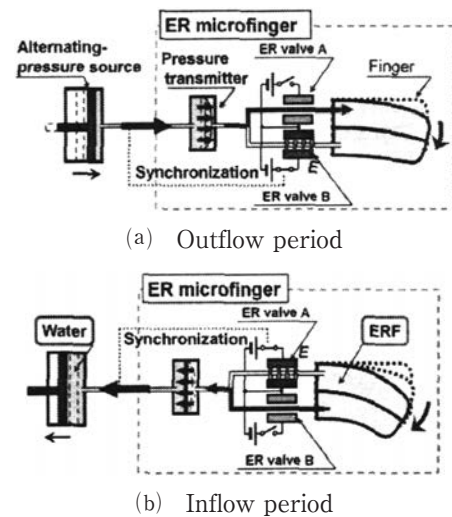


図7 交流圧力源によるERフィンガ⁴⁾

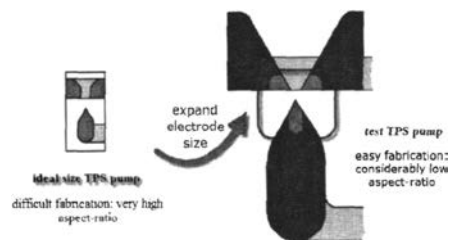


図8 三角柱-テーパースリット電極対⁵⁾

3. おわりに

MD&T講演会は機械設計・要素関連の会議であり、フルードパワーを用いた研究発表は少ない。今後、フルードパワーシステムに関する研究が増え、この分野での発展を期待する。

参考文献

- 1) 吉田和弘, 山本悟史, 嚴祥仁, 横田眞一: 第14回機素潤滑設計部門講演会, p. 135-136 (2014)
- 2) 松岡大樹, 鈴森康一, 山田嘉昭: 第14回機素潤滑設計部門講演会, p. 131-132 (2014)
- 3) 谷口浩成, 王前力人, 國米良太: 第14回機素潤滑設計部門講演会, p. 39-42 (2014)
- 4) 三好智也, 吉田和弘, 金俊完, 嚴祥仁, 横田眞一: 第14回機素潤滑設計部門講演会, p. 35-36 (2014)
- 5) GU Hongri, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥: 第14回機素潤滑設計部門講演会, p. 137-138 (2014)

(原稿受付: 2014年8月13日)

入門講座「トライボロジー」

第2回：表面について

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. 「表面」について

1.1 表面とは

「表面」(surface)とは、固体と液体、固体と気体、あるいは液体と気体の境界面をいう。日常的には、それらの中で固体が気体と接する面を指す場合が多いであろう。一見、何の変哲もなく見える表面を、物理学者Wolfgang Pauliは“God made solids, but surfaces were made by the Devil. (神が固体を作り、悪魔が表面を作った)”と言いついた。実のところ、表面は複雑怪奇である。今回は、その表面に焦点を当てる。

1.2 固体表面の構造

図1に固体表層部近くの断面構造を、金属（鋼）を例として、模式的に示す。図中、(i)～(v)が固体、(vi)が気体（空気）である。このように各層が幾重にも重なり合う。

ここで、(i)の金属素地と(vi)の外界との間に挟まる層を順に見てみよう。(ii)は金属を加工した際に形成される加工変質層（厚さは $10^0 \mu\text{m}$ 程度）である。特徴として、機械加工による高熱や高温、高圧力や高せん断力に曝されることが多いことから、硬くて脆くなりがちである。

除去加工時には、金属の内部組織が新生面として表れる。ただし、新生面は表面エネルギーや化学的活性が高く、瞬時に周囲の流体分子を引き付けて反応する。具体的には、空気中の水分による(iii)の酸化膜、つまり錆の層（ 10^1nm 程度）や切削油や潤滑

油による(iv)の吸着分子膜、つまり油の膜（ 10^0nm 程度）が形作られる。そして、(v)の汚れの層、つまり外界からのさまざまな付着物（ 10^1nm 程度）に覆われる¹⁾。

1.3 固体表面の形状

つぎに、固体表面の幾何学的な特性（形状）に視点を移す。物体をいかに丁寧に加工しても、完全な（幾何学的）平面にはならず、その表面には、いわば面の肌や風合いなどの、微細で複雑な凹凸が必然的に形成される。図2にイメージを載せる。狭領域の表面のこの幾何学的性質を「表面性状」と呼ぶ。

最近では、計測技術の発展に伴い、表面の形状を3次元で直接的に取り扱うことも多くなってきた。しかしながら、現状では図3のように輪郭曲線を測定して評価する方法が一般的といえる。しかし、たとえ2次元（断面）としても、粗さ突起部の形状やその高さ分布はさまざまであり、表面性状を厳密に表現するためには多くのパラメータを要する。ここでは、代表的なパラメータとして、算術平均粗さ Ra 、二乗平均平方根粗さ Rq 、最大高さ Ry を取り上げる。

Ra は粗さ曲線とその平均値の直線で囲まれる面積を底辺で除した平均高さに、 Rq は粗さ曲線で作

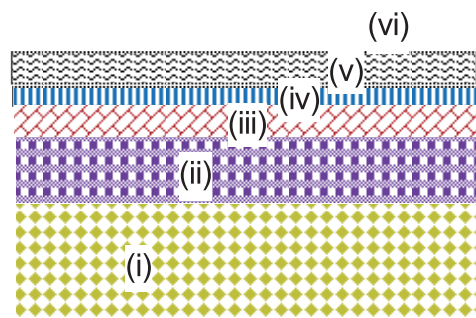


図1 金属表層部の構造説明図



図2 表面の3次元イメージ図

られる回転体の体積を軸長さで除した平均半径に当たり、面の全体的な凹凸を評価できる。 Ry は粗さ曲線の最大値 $R_{\max}$ と最小値 $R_{\min}$ の差であり、局所的な山や谷、つまりバリやキズなどを見積もることができる。それぞれの定義式は次式で与えられる($f(x)$ は位置 x における(仮想的な)平均面から(凹凸を有する)表面までの距離、 L は測定長さ)。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (1)$$

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L f(x)^2 dx} \quad (2)$$

$$Ry = R_{\max} - R_{\min} \quad (3)$$

表面は、特に加工法により、きわめて強い方向性のある場合(異方性)から、ほとんど方向性のない場合(等方性)まで多様である。たとえば、金属部品を旋盤で切削加工した後などには、筋状の加工痕がよく見られる。このように一方向のみに凹凸のある表面形状を「1次元粗さ」と称される。また、そうした表面がその筋目の方向に滑る場合とその直交方向に滑る場合では、しゅう動特性が大きく異なる。前者を「平行粗さ」、後者を「直交粗さ」という。

相対的に凹凸の波長の長いものを「うねり」、短いものを「粗さ」、そのしきい値を「カットオフ値」 λ_c と呼ぶ。なお、表面の凹凸を図示する場合には、図3のように、横倍率に対して縦倍率を $10^1 \sim 10^2$ 倍程度に拡大して表示することが多い。しかし、実際の粗さ突起の傾斜角度は非常に小さく、高々、数度である。念のため付記する。

2. 「接触」について

2.1 固体同士の表面接触

固体表面が互いに接触する場合、面全体ではなく、図4のように両表面のごく一部、主に凸部が接触することになる。図中の $A_0 (=a \times b)$ を「見掛けの接触面積」、局所的な接触面積の総和 $A_t (= \sum \Delta A_{ri})$ を「真実接触面積」と呼ぶ。真実接触面積率 A_t/A_0 は一概に定まらないが、多くの場合、きわめて小さく、1%にも満たない。

接触部では、粗さの突起部が弾性的あるいは塑性的に変形して荷重を支える。その判断には

$$\psi = \frac{E'}{2H} \sqrt{\frac{\sigma'}{\beta'}} \quad (4)$$

で定義されるパラメータ(塑性指数)が用いられる。 $\psi < 0.6$ で弾性的、 $\psi > 1$ で塑性的な接触となる。ここに、 β' は粗さ突起の曲率半径。また、 E' は等価弾性係数、 σ' は合成粗さであり、材料のPoisson比を ν とし、相対する物体を添え字1, 2で表して

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (6)$$

通常の金属加工面同士の接触においては、しばしば、 $\psi > 1$ となる。その場合、突起部の接触圧は金属の塑性流動圧力 p_m にほぼ等しくなると考えることができる。さらに、 p_m は材料の押し込み硬さに等しいと置いて、一般にVickers硬さ H で代表できる。したがって、接触する突起総数を n として、荷重 W との力の釣り合いより次式が導き出される。

$$\begin{aligned} W &= \Delta A_{r1} p_1 + \Delta A_{r2} p_2 + \cdots + \Delta A_{rn} p_n \\ &= \sum_i \Delta A_{ri} p_i = A_r p_m = A_r H \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 集中接触

いま、ふたつの球を接触させることを考える。数学的には、その接触部は「点」であるが、実際には、物体の弾性変形が生じることから、一定の面積を有する「円」になる。Hertzは、荷重 W に対する接触円の半径 a の関係を以下の式で示した。

$$a^3 = \frac{3WR'}{2E'} \quad (8)$$

ここに、 R' は等価半径であり、両物体をそれぞれ

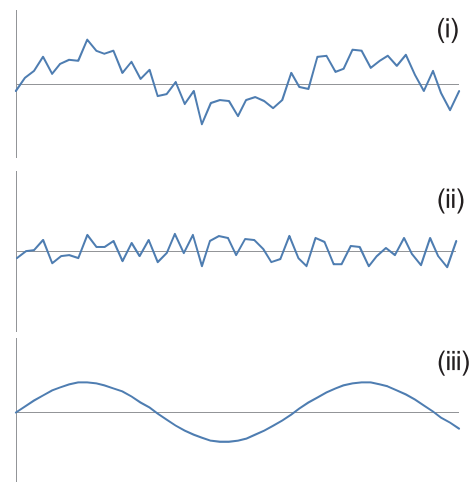


図3 輪郭曲線のイメージ ((i)測定断面, (ii)粗さ, (iii)うねり)

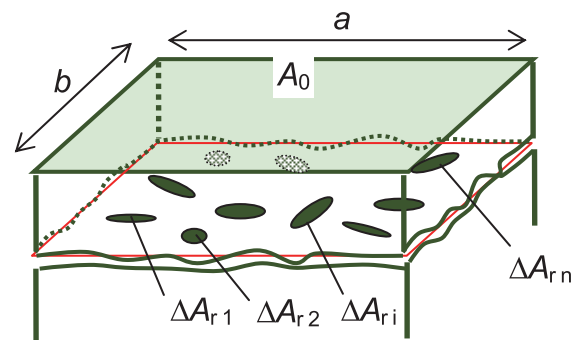


図4 固体接触のイメージ図

1, 2 (どちらが球, 平板あるいは凹, 凸面でも構わない) で表して, 次式で定義される.

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (9)$$

つまり, パラメータ E や R' は, 材料の弾性や接触面の曲率を片側に等値させたことを意味し (前出の σ' も同様), 剛体の平面 ($R=\infty$) と弾性体の球 ($R>0$) との接触問題に置き換えたことになる. なお, 凸面 ($R^+>0$) と凹面 ($R^-<0$) の組合せでも成り立つ (ただし, $R^+<|R^-|$). 接触面の平均圧力 p_{mean} , 最大圧力 p_{max} , 圧力分布 p および接触円中心での変形量 δ は, それぞれ以下の式で与えられる.

$$p_{\text{mean}} = \frac{W}{\pi a^2} = \frac{2}{3\pi} \left(\frac{3WE'^2}{2R'^2} \right)^{1/3} \quad (10)$$

$$p_{\text{max}} = \frac{3}{2} p_{\text{mean}} \quad (11)$$

$$p = p_{\text{max}} \sqrt{1 - (r/a)^2} \quad (12)$$

$$\delta = a^2/R' \quad (13)$$

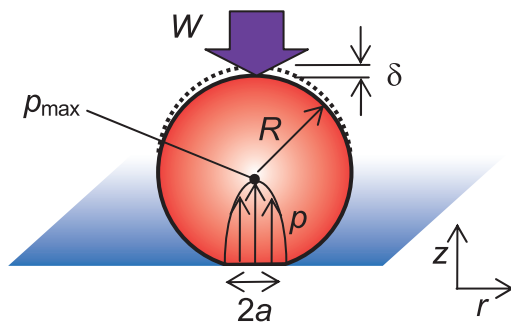


図5 ヘルツ接触

3. クイズ

今回も, 気負わずに取り組んでいただきたい.

3.1 入門レベル【真実接触面積】

大きさ (高さ140 mm, 幅70 mm, 厚さ9 mm) や重さ (150 gf) の等しい2台のスマートフォンが (背面を合わせて) 重ねて置かれている. 真実接触面積は, どの程度であろうか?

3.2 基礎レベル【ヘルツ接触】

定盤の上に小さな鋼球を置いても, 接触は点とはならず, 円となる. 定盤が鋳鉄製で鋼球が直径

20 mmの場合 (粗さは考えない), その面積はどのくらいになるか?

3.3 応用レベル【粗さ曲線】

正弦波状の粗さの場合, 算術平均粗さ R_a と二乗平均平方根粗さ R_q との関係を求めてみよう.

附録

略解 1

粗さ突起部で塑性接触しているとすれば (おおむね, $\psi>1$ となる), 塑性流動圧力を1.5 GPaとして

$$\frac{A_r}{A_0} = \frac{W/p_m}{BH} = \frac{0.15 \times 9.81 / (1.5 \times 10^9)}{0.07 \times 0.14} = 1 \times 10^{-7} \quad (14)$$

略解 2

$$\begin{aligned} W &= \rho \frac{4}{3} \pi R^3 g = 7850 \times \frac{4\pi}{3} \times 0.01^3 \times 9.81 \\ &= 0.322 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{E'} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1-0.3^2}{206 \times 10^9} + \frac{1-0.27^2}{98 \times 10^9} \right) \\ &= \frac{1}{144 \times 10^9} \text{ [Pa}^{-1}\text{]} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{0.01} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{0.01} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (17)$$

$$a = \left(\frac{3 \times 0.322 \times 0.01}{2 \times 144 \times 10^9} \right)^{1/3} = 32.2 \times 10^{-6} \text{ [m]} \quad (18)$$

$$\therefore A = \pi a^2 = \pi (32.2 \times 10^{-6})^2 = 3.26 \times 10^{-9} \text{ [m}^2\text{]} \quad (19)$$

略解 3

粗さ曲線の片振幅を A , 波長を L とすれば

$$\frac{R_q}{R_a} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left[A \sin \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \right]^2 dx}}{\frac{1}{L} \int_0^L \left| A \sin \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \right| dx} = \frac{A/\sqrt{2}}{2A/\pi} = 1.11 \quad (20)$$

参考文献

1) 橋本巨: 基礎から学ぶトライボロジー, 森北出版 (2006)

(原稿受付: 2014年5月6日)

トピックス

中国駐在員日記

著者紹介



すみの 野 わたる
住 野 亘

コマツ

〒323-8558 栃木県小山市横倉新田400
E-mail : wataru_sumino@komatsu.co.jp

2008年東京工業大学大学院総理工学研究科
卒 同年株式会社小松製作所入社、開発本部油
機開発センタ所属。
2012年小松山推工程機械有限公司へ赴任。
2013年開発本部油機開発センタへ帰任、現在に
至る。

1. はじめに

私は2012年4月より1年間、現地法人の工場がある、中国山東省の済寧市に赴任していた。それまで海外に行くといったら、アメリカやヨーロッパの国々に旅行で行ったことがある程度で、中国には行ったことも、行こうと思ったこともなかった。

中国語はもちろん話すことはできず、中国という国についての知識もほとんどない状態の着任であった。そのため、戸惑いを感じたりすることも多々あったが、多くの楽しく貴重な経験もすることができた。今回機会をいただいたので、中国での生活の一部をご紹介します。

2. 赴任地について

私が赴任したのは、山東省の済寧市という場所にある現地法人の工場である。済寧市は山東省の省都である済南市より車で5時間程度のところにある、



写真1 済寧市中心部の街並み

人口約800万人の内陸の地方都市である。会社の工場は市のほぼ中心部にあり、そこから約2km程度はなれた場所にある日本人駐在者用の会社の寮に私は住むこととなった。寮の目の前には2012年初頭より営業を開始した、日本の大手スーパーがあり、ここで食材や日用品を購入することができた。日本企業の製品も数多く取り扱われていたため、生活物資の調達に困ることはなかった（写真1）。

街の中心部では至る所で工事が行われており、特に建設中のマンションの多さには驚いたものである。少し街外れまで歩くと、古びたアパートや露店が雑然と立ち並んでおり、まさに今、都市化が進められているのだと感じさせられた。

道路には、ドイツやイギリスのメーカーの高級車が走っているかと思えば、自動三輪車やバイクにリアカーをつけたような乗り物も数多く走っている。中国では、急速な発展に伴う富裕層と、貧困層との格差の広がり以前より問題となっているが、街の風景からもその現実を窺い知ることができた。

3. 中国での食事

日本で食べる中華料理は、美味しいものが多いため、現地でも同じような料理が食べられるのだろうと楽観的に考えていた。しかしながら着任早々、そうではないことを思い知らされた。私がいた地域の現地料理（山東料理）は日本で食べたことのある中華料理とはまったく異なっていた。油で茹でたキャベツや、よくわからない味付けの出汁で煮込まれた煮魚、香草（パクチー）をたっぷり入れたラーメン



写真2 中国での食事

など、なかなか箸が進まない料理ばかりで、正直最後まで現地料理には慣れることができなかった（写真2）。

特にパクチーが苦手で、ラーメンに入れられていた時は、箸ですべて取り除いてから食べていた。このパクチーについては、日本人駐在員の中でも好き嫌いが分かれており、パクチーがないと物足りない、パクチーだけでも食べられるというくらい好きな人もいれば、私と同じようにまったく駄目という人もいた。

一方で、たまに行く上海で食べた中華料理は美味しい物が多く、特に現地の人を紹介してくれたお店で食べた小籠包は絶品であった。

4. お酒の席での風景

中国といえば、白酒（アルコール度数38%以上）や紹興酒といった強いお酒が有名である。これらのお酒は（特に白酒）、中国人との酒の席には必ず登場する。しかし、私の周りだけでも知れないが、中国の若い方々は、このような強いお酒は飲まない人が多かった。年配の方は、もちろん良く飲まれる方が多いのであるが、中国といえば老若男女白酒を飲むと勝手に思い込んでいた私にとっては、意外であった。

自分では飲まないのに、周りの人にはお酒を勧める。特に日本人は、飲み会の際には格好の飲ませる対象であり、何人もの人が白酒を注ぎにやって来る。

日本人には白酒を飲ませ、自分はビール、場合によっては、炭酸飲料をグラスに入れて、「これは白酒です。乾杯しましょう！」というのもあった。炭酸がシュワシュワ出ており、バレバレである。こちらもお酒を飲んで、陽気になっているので片言の中国語で「これは炭酸飲料だろ。白酒を飲もうよ。」といって相手にも白酒を飲ませるというやり取りをしたものだった。

お酒の席で陽気になる（写真3）のは日本も中国も同じで、みんなニコニコしており、言葉は通じな



写真3 宴会ではしゃぐ筆者

くても雰囲気打ち解けあうことができた。少々お酒を勧めて飲ませるが、フラフラになってしまった人を心配して、ちゃんと介抱してくれる人はいた。また、こちらもフラフラになる前に水を飲んで休憩するなどの対応策もとっていたので、飲み会はたくさんあったものの、大事に至ることはなかった。

5. ある初夏の一日

6月のある休日、自転車を買ったのでサイクリングに行こうという話になった。現地の方が、ちょうどいい距離に大きな公園があるので、案内してくれるという。そこで私と、同じ時期に赴任していたもう1人の駐在者との3人でサイクリングに出かけた。

天気は良く、中国では珍しく青空が出ている絶好のサイクリング日和で、街中から公園まで、片道15kmほどのサイクリングを楽しんだ。（写真4）

道路は基本的に舗装されているのだが、工事中的の場所が多々ある上、雨があまり降らないために乾燥しており、大変ホコリっぽい。寮に帰って来る頃には体中砂だらけになってしまった。さっそくシャワーを浴びて汚れを落とそうとすると、水が出ない。管理人のところに行ってみると、ボイラーに水を供給する配管のパッキンが破損してしまったので修理中だという。庭に出てみると、辺り一面水浸しになっている中、修理人が苦戦していた。「今日はもう夕方なので、今日中には直せないかもしれませんが」など弱気なことを言う。何としてでもシャワーを浴びたい私達は、修理人の傍に立ち、「絶対に今日直してくれ、直るまで帰らせない。」とプレッシャーをかけ続けた。

おかげで何とか夕暮れ時には修理が終わり、シャワーを浴びることができた。

6. 通訳の方とのやり取り

赴任して3ヶ月ほどすると、簡単な内容であれば片言の言葉で話したり、筆談したりで何とか現地のスタッフの方とコミュニケーションできるようになってきた。しかし、難しい内容の話はやはり通訳



写真4 サイクリングを楽しむ筆者ら

にお願いすることになる。会社の通訳の方々は優秀で、内容的に伝えるのが難しいかなと思うようなことでも、うまく伝えてくれた。

月に1回程度、この通訳の方々と飲み会を開いていたのであるが、そのたびに彼等が日本語・日本文化を良く知っていることに驚かされた。特に、日本に留学経験がないのに日本語を上手に話す人は一体どうやって勉強したのだろうと不思議に思っ聞いてみると、日本のドラマや、漫画を通してだという。

飲み会では、ドラマのシーンなどが話題となり、あのドラマは見たことがあるか、などいろいろ聞かれるのだが、私はドラマをあまり見ない方なので、そのドラマもこのドラマも見たことがないのだと言うと、呆れ顔で「あり得ない。住野さん、人生損していますよ。」と言われてしまった。

7. 中国高速鉄道

中国では、2007年から高速鉄道が各地で営業を始め、私が中国に着任した際には、最寄の曲阜駅（といっても駅まで車で50分かかるが）から上海や北京への路線も開通していた。中国高速鉄道は、2011年に脱線事故を起こし、その後車両を地面に埋めて処理したことで日本でも話題になっていた。初めて乗車する際には幾許かの不安はあったが、曲阜～上海間を約3時間30分で結んでおり、運賃も340元（約5,500円）と手ごろで利便性が高いため、出張の際には高速鉄道を良く利用していた。運行している車両は日本やドイツ、フランスからの技術供与を受けてライセンス生産されたもので、上海虹橋駅では日本の新幹線や、ドイツのICE（写真5）、イタリアの高速鉄道にそっくりな車両が並んで停車しているのを見ることができた。座席は特等・1等・2等とあるのだが、私がよく利用していた2等車両は大声で電話している人がいたり、パソコンで映画を見ている人（イヤホンなしで）がいたり、お弁当を広げて食べる人がいたり大変賑やかであった。

路線のほとんどの区間が直線で、営業最高速度の300km/hで走行する。車窓から外の風景を眺めてい



写真5 中国高速鉄道（ICEタイプ）

ると、広大な農作地が延々と続いており、自分が広い大陸にいるのだということを感じさせられた。

8. 中国での仕事

中国での主な仕事は現地の油圧機器の品質情報を集めて、対応を現地スタッフにアドバイスしたり、日本に状況を報告したりすることであった。ユーザの元に赴いて現地調査したり、自分で車両を操縦して状況を調べたりなど、自分の五感で建設機械の使い方を実感する機会を多く持つことができた。

また、2012年11月に上海で開かれた建設機械の見本市に調査隊の一員として参加した。この見本市には、中国メーカーが鉱山用の超大型ダンプトラック（写真6）や超大型油圧ショベル（写真7）を展示しており、虎視眈々と利益率の高い鉱山事業への参入を狙っていることが窺えた。



写真6 中国メーカーの鉱山用超大型ダンプ



写真7 中国メーカーの鉱山用超大型ショベル

9. おわりに

中国に赴任した1年間は日本にいた時とは仕事の内容も変わり、さらに異国の地であったため、戸惑うことが多かった。しかしながら現地のスタッフをはじめ、たくさんの方々に協力いただいたおかげで、任期を全うすることができた。日本と中国は、国家レベルでは仲良く付き合っているとは言えない状況であるが、駐在中に知り合うことができた多くの方は親切で、仲良くなることができた。また折を見て会いに行きたいと思っている。

最後に、このような貴重な体験の機会を与えてくれた上司や関係の方々に感謝の気持ちを伝えたい。

（原稿受付：2014年6月5日）

研究室紹介

奈良高専電子制御工学科早川研究室

著者紹介



はや かわ やす ひろ
早川 恭弘

奈良工業高等専門学校
〒639-1080 奈良県大和郡山市矢田町22
E-mail : hayakawa@ctrl.nara-k.ac.jp

2006年奈良工業高等専門学校電子制御工学科教授。現在に至る。空気圧を用いた福祉介護機器開発の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会、IEEEなどの会員。博士（工学）。

1. はじめに

奈良工業高等専門学校は、昭和39年4月に（入学定員機械工学科2学級80名、電気工学科1学級40名）、奈良県大和郡山市内に設置された。そして、昭和44年4月に化学工学科（1学級40名）、昭和61年4月に情報工学科（1学級40名）が増設された。さらに、平成2年4月に機械工学科（2学級80名）が機械工学科（1学級40名）、電子制御工学科（1学級40名）に改組された。また、平成4年4月に、本校に専攻科（入学定員機械制御工学専攻8名、電子情報工学専攻8名、化学工学専攻4名）が発足した。専攻科は、高等専門学校本科の課程を修了した学生または社会人が入学資格を有し、学位授与機構が認定する2年制教育機関である。

私の研究室は、電子制御工学科および機械制御工学専攻に所属している。研究テーマは、空気圧を用いた福祉介護機器の開発、福祉介護機器に適した新しい空気圧要素の開発を行っている。また、最近では電動モータによる介護機器の開発を行っており、福祉介護機器開発に最適なアクチュエータについて議論している。

現在の研究室学生スタッフは、電子制御工学科（以下、本科）5年生4名および機械制御工学専攻1年生3名、2年生3名から構成されている。特に、専攻科学生6名は、本科5年生から研究を行っていることから、最長3年間、それぞれのテーマに関して研究を行っている。研究室に配属されている専攻科学生を図1に示す。

本稿では、研究室における主な研究テーマおよび

その概要について紹介する。

2. 研究

2.1 研究体制

私の研究室では、専攻科学生一人一人に研究テーマを割り当て、基本的に各専攻科学生の下に本科5年生を配属させている。そして、各専攻科学生は、配属されている本科学生に対し、研究指導（研究報告のやり方、研究の方向性など）を可能な限り行うよう指示している。専攻科学生は、大学の3、4回生に相当するが低学年の学生を指導することにより、逆に自らの研究に対する取り組みを再考する機会になると考えている。

また、研究室全体のゼミを基本的に毎週1回実施し、各学生の研究進捗状況を確認している。これにより、専攻科学生が本科学生へ指導している内容を確認し、研究方針の修正を行っている。



図1 専攻科学生

2.2 研究テーマ

現在行っている研究テーマは、大きく3つに分かれている。

- 1) 高機能靴に関する研究
- 2) 高機能マットに関する研究
- 3) 介護移乗機に関する研究

ここで、1) および2) は、空気圧を駆動源とするアクチュエータを使用し、3) は電動アクチュエータを使用している。

以下に、各テーマに関する研究概要を説明する。

1) 高機能靴に関する研究

1-1) 概要

本研究では、リハビリ時における安定した歩行を実現するために、スポンジコア・ソフトラバーアクチュエータ（以下 SCSRA）を用いた歩行バランス提示用高機能靴、高機能靴を用いた歩行計測システムおよび靴の有用性を定量的に評価する足部評価装置の開発・改良を行っている。

1-2) 歩行バランス提示システム

本研究で構成するシステムは、被験者の足部のバランスを調べる高機能靴、足部のバランス状態を表示する端末装置、靴と表示装置を同期する通信装置である。図2に歩行訓練システムの構成概要を示す。

現在、このようなシステムで構成するときに懸念されているのが、システムの大型化である。そこで、小型、軽量、安価なシステムを構成することを課題とし、本研究では、その課題を解決するシステムを開発している。

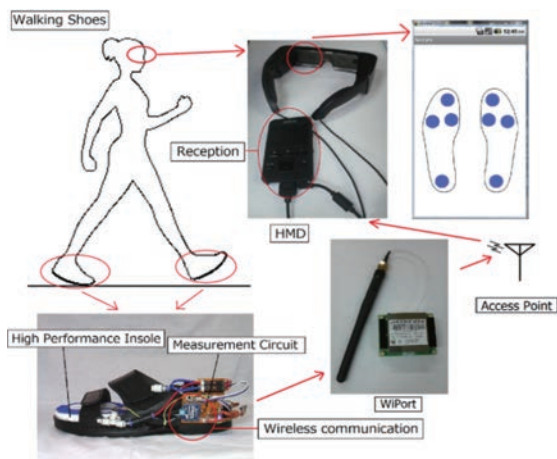


図2 歩行訓練システム構成

1-3) 足部評価装置

高機能靴の動作実験を行う装置として評価装置の開発を行っている。製作した歩行評価装置の外観を図3に示す。評価装置は、(a)：踏込再現用のエアシリンダ、(b)：スイング再現用アクチュエータ、(c)：六軸力覚センサ、(d)：ヨー角再現用アクチュエータ、(e)：ロール角再現用アクチュエータ、(f)：ピッチ角再現用アクチュエータ、(g)：足部、(h)：角度センサから構成されている。

2) 高機能マットに関する研究

2-1) 概要

大規模地震の発生により、被災者は避難所での生活を送る可能性が増している。特に、震災直後は、電気・ガス・水道などのライフラインが使用できなくなる。よって、高齢者は高機能な介護用電動ベッドを使うことができないために、睡眠環境は非常に

劣悪なものとなっていると考えられる。そこで、本研究では、無電源化において鬱血や褥瘡防止可能なマットシステムの開発を行っている。

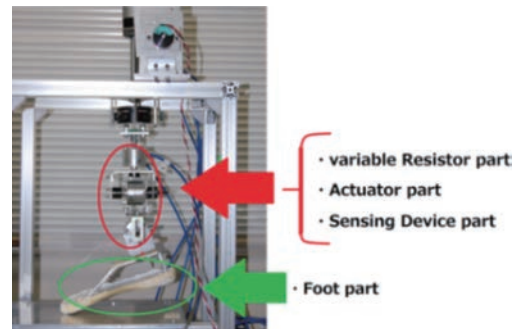


図3 歩行評価装置

2-2) 布アクチュエータ

本研究において開発している布アクチュエータは、図4に示すスポンジに熱接着の高気密フィルムを用いて布をコーティングした構造である。また、布生地には吸汗性と速乾性に優れたジャージ素材を使用している。その結果、チューブによりアクチュエータ内圧を加減圧することが可能となる。これにより、大きな形状変化を伴わずに剛性のみを変化させることができる。このアクチュエータを用いる利点としては、安全性の高さが挙げられる。具体的には、アクチュエータ無加圧状態においても、スポンジ自体の形状保持能力が保たれることや、空気の過度注入によって起こる破裂事故のおそれもないことが挙げられる。

2-3) 空気圧マットシステム

また、本研究で開発している空気圧マットシステムの概略図を図5に示す。

このマットシステムによるマット内の空気の排気は、布アクチュエータを用いたタンクと電磁バルブによって行われる。タンクはスポンジの復元力により、マット内の空気を排気することを目的として用

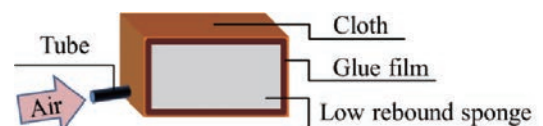


図4 布アクチュエータ構造

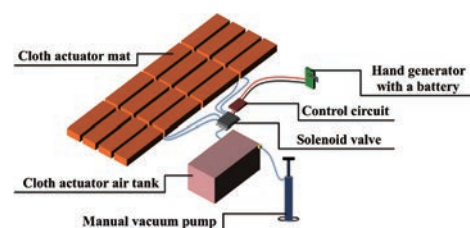


図5 マットシステム

いる。また、電磁バルブは制御回路によりマット内の空気の排気、保持、大気解放を行う。そして、電磁バルブと制御回路は蓄電池付きの手回し発電機を用いることによって動作する。これにより、無電力下においても電力を生み出すことが可能である。また、このマットシステムは電動の減圧ポンプを使用せず、手動式減圧ポンプを使用していることから騒音にも配慮したシステムとなっている。この手動式ポンプを動作させることにより、タンク内を負圧にすることが可能となる。そして、アクチュエータを圧縮させることにより、アクチュエータ内部のスポンジの復元力を得ている。

2-4) アクティブセンシングマットシステム

鬱血、褥瘡およびベッドからの転落を防止し、外出時においてもタブレット等の小型端末装置を操作することにより、遠隔な被介護者の状態のモニタリングや過荷重時の通知およびマット制御が可能なシステムの開発を行っている。

開発しているマットシステムおよびマット要素を図6および図7に示す。マット内圧制御による剛性変化と、二層構造による底付きを防止することが可能となっている。

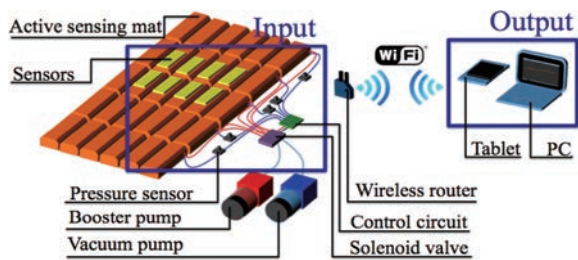


図6 アクティブセンシングマットシステム

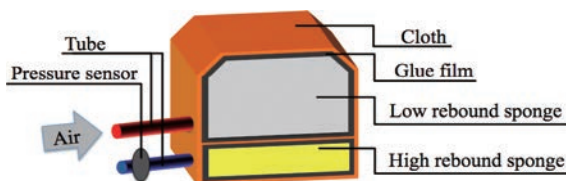


図7 マット要素

3) 介護移乗機に関する研究

3-1) 概要

介護現場における負担の問題で多く挙げられるのは、移乗の問題である。この負担を軽減する機器として移乗機が開発されている。しかし、既存の移乗機は移乗中、移乗者に精神的・肉体的負担をかけてしまうといった問題が報告されている。そこで、本研究では、移乗者に負担をかけない移乗方法を有する介護移乗機の開発を行っている。

3-2) 移乗機

本研究で開発した移乗機および移乗動作の流れを図8および図9に示す。本移乗機は、人間のおんぶをモデルとした移乗形態であり、移乗者胸部を移乗機にもたれさせることで、移乗者臀部を持ち上げる方法である。この移乗方法により、移乗者の自重を胸部および臀部に分散することができる。図8に示すように、移乗者の胸部と接触する人体把持部は、3自由度で位置・角度を変更することが可能である。また、平行2輪の駆動輪を有しており、前進、後退、左右旋回による移動が可能となっている。そのため、移乗機に被介護者が移乗した状態で、任意の場所まで移動できる。



図8 開発した移乗機

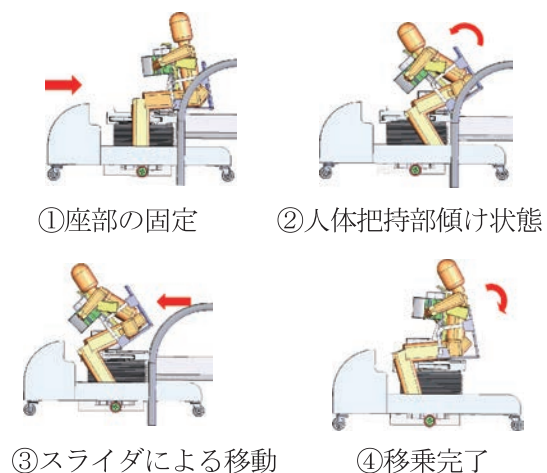


図9 移乗動作

3. おわりに

研究室における体制と研究テーマについて説明させていただいた。高専は、本科5年生（大学の2回生相当）と専攻科学生（大学3、4回生相当）が研究を行っており、大学学部よりも研究を行う期間が長い（3年間）ことがわかりいただけたと思う。

（原稿受付：2014年6月3日）

企画行事

平成26年春季講演会併設セミナー開催報告 「フルードパワーに貢献する材料，加工，表面処理技術」

著者紹介



たけだ みのる
武 田 稔

(株)ジェイテクト
〒104-0061 東京都中央区銀座7-11-15
E-mail: minoru_takeda@jtek.co.jp

1991年光洋精工(株)入社，2006年(株)ジェイテクトに社名変更，研究開発本部 研究企画部に所属，日本フルードパワーシステム学会会員，精密工学会会員，日本機械学会会員，日本トライボロジー学会会員。

1. はじめに

平成26年5月28日（水）午後，平成26年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーに貢献する材料，加工，表面処理技術」が機械振興会館本館地下3階研修1室を会場に開催された。

このセミナーは講演会やセミナーの企画運営を行う企画委員会と，学会誌の編集を行う編集委員会の11回目の合同企画事業として企画し実施されたものであり，連携した特集記事は平成26年3月に発行された本学会誌第45巻2号に「フルードパワーに貢献する材料，加工，表面処理技術」として掲載された。油空圧機器に限らず製品の高性能化を支え，過酷な要求を克服するために必要不可欠であるモノづくり基盤を担う「材料，加工，表面処理技術」について最新技術や研究成果について解説したもので，それぞれの技術の専門家による計5件の記事で構成されている¹⁾。

今回のセミナーは，上記特集を執筆してくださった著者である5名の方に講師をお引き受けいただき，同特集記事をテキストとして各技術に関して，より理解を深めるべく開催された。

以下，本セミナーの様子について報告する。

2. セミナーの概要

2.1 参加者

参加登録者：28名に講師および講演サポートの9名を加えた37名の参加でセミナーが開催された

(写真1)。

参加登録者の内訳は，大学等教員：2名，学生：3名，民間企業：23名であった。



写真1 セミナー会場の様子

2.2 開 会

セミナーは13時に開会となり，冒頭に企画委員長の大内英俊先生（山梨大学）から開会のご挨拶をいただいた（写真2）。ご挨拶の中で，学会誌の特集記事に連携して本日のセミナーが開催されたことが説明され，学会誌への執筆に加えて本日のセミナー講演をお引き受けいただいた講師や参加して下さった方々への謝辞に加え，参加者の意見が学会誌や学会行事を良くしていく糧であるので終了後のアンケートに意見を記載してもらいたいと述べられた。



写真2 開会の挨拶（大内企画委員長）

2.3 講 演

セミナーは計5件の講演で構成された。以下，講

演の内容について簡単に説明する。講演内容の詳細に関しては学会誌の特集記事¹⁾をご覧ください。

① 日本電気株式会社 曾山 誠 氏

「電子機器用の難燃ポリ乳酸複合材の開発」

環境調和性の観点から再生可能な植物を原料とする難燃性バイオプラスチックについて最高の植物成分率（石油削減率）と、高度な難燃性や実用特性を満足するポリ乳酸複合材を開発し、新たな特徴として耐光性、耐薬品性、耐傷付き性や抗菌性を有している内容の説明があった。本特徴を生かしてさまざまな電子機器への用途拡大を目指すことが示された（写真3）。

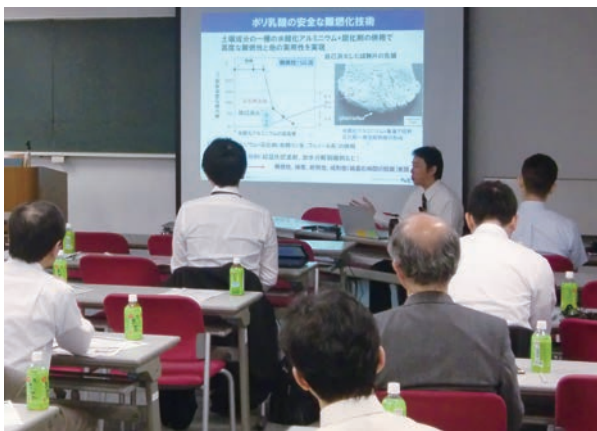


写真3 木内氏の講演

② 株式会社ジェイテクト 安藤寛之 氏

「DLC-Si被覆電磁クラッチを用いた次世代電子制御AWDカップリングの開発」

自動車の駆動部品である電子制御カップリングの電磁クラッチしゅう動面へDLC-Siをコーティングすることで耐摩耗性が向上し、表面テクスチャーの最適化を図ることで、製品性能を飛躍的に高められたことが説明された。本技術がドライブラインの小



写真4 安藤氏の講演

型・軽量化やさらなる地球環境保護に貢献することが示された（写真4）。

③ 東北特殊鋼株式会社 山田裕樹 氏

「水圧システムに貢献する電磁材料」

水圧駆動システムや固体高分子形燃料電池などの水環境下で、高い耐食性を有する電磁弁に使用される電磁ステンレス鋼と加工性についての説明があった。今後、燃料電池の拡大に伴い、ステンレス鋼への水素脆化が重要になることが示された（写真5）。



写真5 山田氏の講演

④ 日本電産トーソク株式会社 窪田朝徳 氏

「電磁軟鉄バリレス加工の構築」

油圧制御用比例電磁弁に用いられる純鉄系材料は、切削加工時の切屑処理性が悪く、高速加工し難いという課題があった。反転仕上げ切削法を用いることで、バリの抑制が可能になるとの説明があった。今後は荒加工、仕上げ加工の工具材料や加工条件の選定が必要であることが示された（写真6）。



写真6 窪田氏の講演

⑤ 川崎重工業株式会社 西田信治 氏

「油圧ポンプ・モータに貢献する摺動部品材料と表面処理技術」

建設機械や産業車両・機械に広く使用されている

斜板形油圧ポンプ・モータのしゅう動部品材料と表面処理の適用技術について説明があった。しゅう動部品の性能向上は、高出力・高密度化へ大きく寄与することから、材料、表面処理技術の重要性が今後、ますます高まることが示された（写真7）。



写真7 西田氏の講演

2.4 閉 会

編集委員長の吉田和弘先生（東京工業大学）より閉会のご挨拶をいただいた（写真8）。ご挨拶の中で本日のセミナー講演をお引き受けいただいた講師や参加して下さった方々への謝辞が述べられた。

その後、講師と聴講された参加者で集合写真撮影（写真9）を行って閉会となった。



写真8 閉会の挨拶（吉田編集委員長）

2.5 アンケート

次回以降のセミナーをより一層充実したものとす



写真9 講師と参加者の集合写真

るために、セミナー終了後に参加者へのアンケート記入をお願いした。

アンケートの詳細については割愛するが、満足度が高く、学会誌特集と連携して実施したことに対して肯定的なご意見を多くいただいた。編集委員会や企画委員会での、今後の企画策定に参考とさせていただく。

3. おわりに

講演時間と質疑応答時間を合わせて、1件当たり40分と比較的余裕をもったスケジュールで進行することができ、講師の皆様には学会誌記事よりも踏み込んだ話をしていただくことができた。質疑応答でも有意義な議論が行なわれ、わかりやすく充実したセミナーになったと思う。これもひとえに、関係各位のご協力の賜物であり、特に大変お忙しい中、講演をお引き受け下さった講師の皆様、参加者の皆様には、この場を借りて深く感謝を申し上げる。

本セミナーは、学会誌第45巻第2号の特集記事と連携して開催を行った。同特集記事をまとめられた吉田委員長をはじめとする編集委員の皆様、重ねて深く御礼を申し上げる。

また、本セミナーの運営にあたっては事前準備から当日の運営までご協力、ご助言をいただいた企画委員ならびに学会事務局の皆様、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 特集「フルードパワーに貢献する材料、加工、表面処理技術」、日本フルードパワーシステム学会誌, Vol. 45, No. 2, p. 54-73 (2014)

（原稿受付：2014年6月17日）

コーヒーブレイク

手押し井戸ポンプ ファミリー編

大 橋 彰

((一社) 日本フルードパワー工業会)

吸上げと押上げと圧上げ

前号¹⁾のルーツ編で紹介した吸上げポンプには、押上げポンプと言う仲間がいることを後に知った。宇田川_物理学では「圧上唧筒」と称し両方説明しているが、ここでは理科機器の構造操作事典²⁾より図1、図2および作動説明文を引用する。

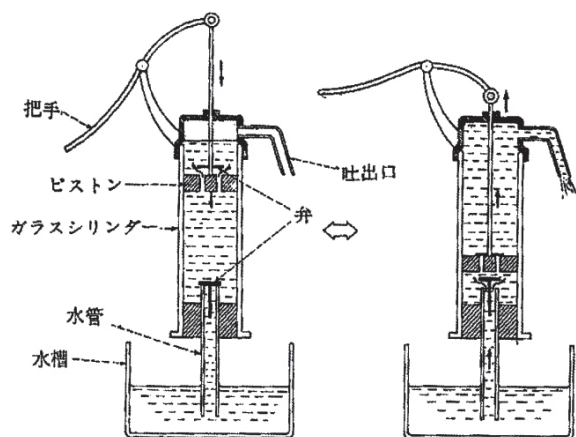


図1 吸上げポンプ

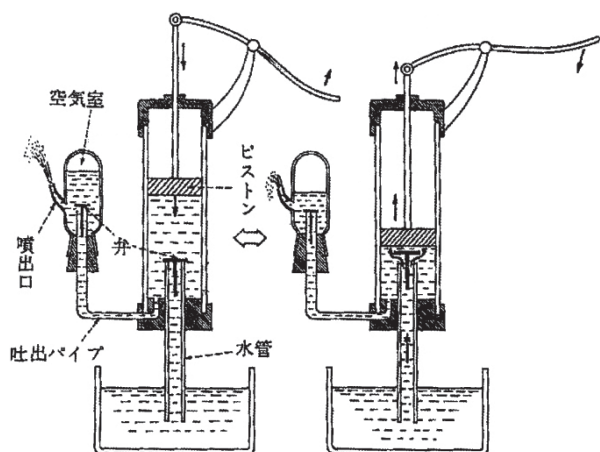


図2 押上げポンプ

図1の吸上げポンプで、把手（レバー）を上・下させ弁を通して吸い上げられた水は、ピストン側の弁により徐々にピストン上部に溜まり、レバーを押したとき上部の吐出口から溢れ出る。図2の押

上げポンプにはピストン部に弁がなく、レバーを持ち上げピストンを押し下げると溜まった水が吐出パイプから空気室に送られ、噴出口から吐出される。

両図の相違点、空気室は、「水が空気室へ入ってくると、噴出孔より水が噴出するが、余分な水はさらに中の空気を圧縮する。この圧縮された空気は、ピストンが上にあがる過程、すなわち水が空気室に入っていない間でも、空気室内の水を押し、噴出を継続する」との説明がある。まさに圧力機器であり、明治の世に「圧上」とは上手い訳語を付けたものだ。

ポンプの名称について+α

図3は、小学校向け工作教材である³⁾。このプラスチック製ポンプキットは、「すいあげ・おしあげポンプ・空気室を利用したポンプ」の3種が組立てられるとの説明がある。地下水が吸い上げられる現象は3種とも同じで、ピストンを引き抜く動作による負の圧力と大気圧との差によって生じる。このキットの説明にある三つの名称は、本当は水がどの部屋にあるときの作動を指すのかによって異なるはずだが、井戸ポンプの名として最も適していると思う。



← 組立状態, ↓ 各部品



図3 ポンプキット

参考文献

- 1) 大橋彰：手押し井戸ポンプ ルーツ編，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 4, p.195 (2014)
- 2) 理科機器構造操作図解大事典，全国教育図書株式会社（日本教文株式会社），(1958)
- 3) 株式会社大和科学教材研究所，楽しみながら作れるダイワ科学工作シリーズNo. 1ポンプ，<http://www.daiwa-e.com/>

会 告

〈理事会・委員会日程〉

9月4日	委員長会議
9月9日	基盤強化委員会
9月22日	理事会
9月24日	情報システム委員会
10月3日	編集委員会

〈第2回理事会〉

7月30日 15:00～17:00 機械振興会館地下3階
B3—9号室（出席者17名）

- 1) 国際シンポジウム次期委員長の選任について
- 2) フェロー認定者推薦につて
- 3) フェリカの使用状況について
- 4) 平成26年度春季講演会最優秀講演賞受賞者の推薦について
- 5) IFPEXカレッジコーナの資料配布について
- 6) 電子著作物の複製等に関する権利委託について
- 7) 会員の推移と入退会者について
- 8) 理事会名簿作成について
- 9) 学会の財務基盤の強化の進捗状況について
- 10) その他

〈委員会報告〉

第1回委員長会議開催要領

7月24日 13:30～15:00 機械振興会館6階
6—60号室（出席者10名）

- 1) 平成26年度フェロー認定者推薦状況について
- 2) 平成26年度春季講演会最優秀講演賞受賞者の推薦について
- 3) 電子著作物の複写等に関する権利委託について
- 4) 学会の財務基盤の強化の進捗状況について
- 5) その他

第2回編集委員会

8月4日 14:00～17:00 東京工業大学田町キャンパス
キャンパスイノベーションセンター 8F—806会議室
（出席者14名）

- 1) 学会誌発行報告
- 2) 学会誌編集計画
 - ・ Vol.45 No.4 「これがフルードパワーの魅力だ！」
 - ・ Vol.45 E.1 小特集「日本フルードパワーシステム学会活動の紹介」
 - ・ Vol.45 No.5 「フルードパワーにおける最新の計測技術」
 - ・ Vol.45 No.6 「アディティブ・マニファクチャリング（積層造形／3Dプリンタ）」
 - ・ Vol.46 No.1 「IFPEX2014特集号」
 - ・ Vol.46 No.2 「フルードパワーにおける故障予知技術（案）」
 - ・ Vol.46 No.3 「国際シンポジウム2014（仮）」
- 3) その他
 - ・ 会議報告
 - ・ トピックスについて
 - ・ 原稿確認について
 - ・ 今後の特集案について
 - ・ 各委員の担当について

会 告

日本フルードパワーシステム学会

平成26年度受賞候補者募集

当学会は、我が国の油圧・空気圧・水圧工学の振興と発展の奨励を目的として毎年優れた研究・技術を表彰しております。本年も当学会の「表彰規程」に基づき、日本フルードパワーシステム学会平成26年度受賞候補者を募集いたします。

つきましては、独創的な研究、画期的な新技術、累積効果抜群な研究者、技術者などについて、下記募集要項をご覧ください。適格な受賞候補者をご推薦ください。

募集要項

1. **受賞候補者の資格** 受賞候補者の資格は本学会の正会員および法人である賛助会員に属する者とする。ただし、共同研究者、共同開発者のある場合はその者の資格については、その限りでない。
2. **募集方法** 公募によるものとし、当学会の賛助会員、正会員、あるいはフルードパワー工業団体、フルードパワー関係学協会の推薦、または本人の申請によるほか、本学会内の委員会の推薦による。
3. **応募対象**
 - (1) **学術論文賞** 過去数年以内に発行された日本フルードパワーシステム学会誌、論文集、あるいは本学会主催の国際シンポジウムのプロシーディングスに掲載された研究論文の著者（連名も可）。
 - (2) **学術貢献賞** 多年フルードパワー工学・技術に携わり、その間数多くの論文を発表して、当該工学・技術分野に多大の貢献をし、その累積効果が抜群であって、しかも学会に対する貢献大なる研究者。
 - (3) **技術開発賞** 過去数年以内に完成を遂げた油圧・空気圧・水圧・その他の流体圧に関する新技術の開発者とする。ただし、当該製品は市場で6ヶ月以上使用実績があることが望ましく、選考の際は特許（もしくは新案）の申請も参考とする。応募者が連名の場合は、筆頭者を含めて5名以内とする。
 - (4) **技術功労賞** 多年フルードパワー技術に携わり、この間数々の技術改良を行うなどして当該技術の向上に貢献しその累積効果が抜群の技術者（長年にわたる技術的な功績を重視し、候補者の年齢は原則として50歳以上とし、現在の事業所における役職についてはこだわらないが、

業績があまり世に知られていない技術者を積極的に推薦する）。

4. **提出書類** 推薦者または申請者は必ず当学会所定の「推薦書・申請書」用紙を使用し、1件につき4通提出するものとする（推薦書・申請書用紙は学会事務局info@jfps.jp Tel：03-3433-8441までご請求ください。各賞《下記のSMC賞も含む》ごとの用紙をお送りします）。
5. **提出締切日** 平成26年12月5日までに着信のこと。
6. **提出先および問合せ先** 〒105-0011 東京都港区芝公園3丁目5番22号 機械振興会館 別館102
一般社団法人日本フルードパワーシステム学会事務局
TEL：03-3433-8441 E-mail：info@jfps.jp
7. **表 彰** 表彰は選考された受賞者に対して賞状と副賞を贈与する。共同研究および共同開発の場合は賞状を共同研究者および共同開発者にも贈る。表彰は原則として学術論文賞2件以内・学術貢献賞1件・技術開発賞2件以内および技術功労賞若干件とする。
8. **表彰の時期** 表彰は平成27年5月開催の第34期通常総会でおこなう。

「SMC高田賞」

SMC株式会社殿のご寄付を基金として、標記のごとく「SMC高田賞」が設けられており、新進気鋭の方々の多数応募をお待ちしています。

1. **応募資格** 学会の正会員、学生会員および法人である賛助会員に所属する者のうち、原則として年令満40才未満の研究者・技術者とする。ただし、大学院生の場合は年令に制限を設けない。また一度受賞した者は、重ねて受賞することができない。
2. **応募対象となるもの** 過去数年以内に発行された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学会論文集」または講演論文集に掲載された研究論文の著者とする。
3. **表 彰** 表彰は、選考された受賞者に対して、賞状と副賞の贈与をもって行う。副賞は論文1篇に対し10万円とする。表彰は原則として2件以内とする。

会 告

平成26年度オータムセミナーのお知らせ

「医療・福祉・介護分野でのフルードパワーを利用したロボティクス」

開催趣旨：

昨今、医療・福祉・介護分野でフルードパワーの利用に関する文献や技術紹介が散見される機会が増えたように感じます。そこで今回、現状を把握し、将来に向けてフルードパワー適用の方向性を模索するきっかけと致したく当セミナーを企画しました。

国の施策にも示されているように、ロボティクスによる産業発展は必須です。この機会を利用して、フルードパワー関連の方のみならず、医療・福祉・介護などの分野に携わっている方々にも、是非ご参加いただきたく存じます。

講演内容：

空気圧サーボを用いた外科手術支援システムの開発（東京医科歯科大学）／ヒトに優しいロボットを支えるフルードアクチュエータ（信州大学）／空電ハイブリッド駆動によるバランスアシストロボット（立命館大学）

開催日時：

2014年11月14日（金）13：30～17：00

会 場：

機械振興会館 本館 地下3階 B3-2
〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8

お詫びと訂正

本学会誌45巻、第4号（2014年7月）平成26年度会費納入のお願いページ裏面のお振込み先金融機関一覧におきまして、以下のような記載ミスがありました。

【誤】2. あさひ銀行 神谷町支店（普）1390969

（注）＊口座名はいずれも「社団法人 日本油空圧学会」です。

【正】2. 三井住友銀行 日比谷支店（普）7611417

（注）＊口座名はいずれも「社団法人 日本フルードパワーシステム学会」です。

関係各位に大変ご迷惑をおかけしたことを深くお詫び申し上げ、ここに訂正させていただきます。

〈勝美印刷株式会社〉

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

2014年度計算力学技術者（CAE技術者）資格認定事業（個体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者）

URL：http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm

主 催：一般社団法人機械学会

試験日程：上級アナリスト 2014年9月23日(火)、1・2級12月20日(土)

第10回固体潤滑シンポジウム

企画・運営：日本トライボロジー学会 固体潤滑研究会（第二種研究会）

日 時：2014年10月21日(火)、22日(水)

場 所：東京理科大学 森戸記念館（東京都新宿区神楽坂）

第7回トライボロジー入門西日本講座 ートライボロジーの基本知識と考え方ー

開 催：2014年10月23日(木)～24日(金)

会 場：同志社大学 至誠刊S1教室（〒602-8580 京都市上京区今井出川烏丸東入今井出川キャンパス内）

申込・問合せ先：一般社団法人日本トライボロジー学会事務局

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8機械振興会館407-1号室 TEL03-3434-1926

FAX03-3434-3556 申込みはhttp://www.tribology.pから

トライボロジー会議2014 秋 盛岡

主 催：一般社団法人日本トライボロジー学会

開 催：2014年11月5日(水)～8日(土)

会 場：アイーナいわて県民情報交流センター（〒020-0045 岩手県盛岡市盛岡駅西通1-7-1）

第57回自動制御連合講演会

URL：http://.sice.or.jp/~rengo57/

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

期 日：2014年11月10日(月)、11日(火)、12日(水)

会 場：伊香保温ホテル天坊（群馬県渋川市伊香保町396-20）

No.14-129 講習会 とことんわかる自動車のモデリングと制御2014～アクティブ操舵制御の最先端～

企 画：交通・物流部門

期 日：2014年11月10日(月)

会 場：日本機械学会（東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5F）

2014年度 計測自動制御学会 産業応用部門大会

主 催：(公社)計測自動制御学会 産業応用部門

期 日：平成26年11月12日(水)

会 場：東京工業大学 大岡山キャンパス 蔵前会館（〒105-0011 東京都目黒区大岡山2-12-1）

キャビテーションに関するシンポジウム

主 催：日本学会会議 第三部（予定）

期 日：平成26年11月20日(木)、21日(金)

会 場：東京大学生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1）

No.14-105講習会「産業に役立つアクチュエータ研究開発の最前線」

主 催：一般社団法人日本機械学会（機素潤滑設計部門企画）

開 催：2014年12月4日(木)

会 場：名古屋大学ベンチャービジネスラバトリーベンチャーホール【名古屋市千種区不老町／電話(052) 789-5447／地下鉄名城線名古屋大学駅3番口より徒歩3分／http://www.vbl.nagoya-u.ac.jp】

第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会

主 催：公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門

開 催：平成26年12月14日(日)～17日(水)

連 絡 先：〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 中央大学理工学部精密機械工学科

SI2014 実行委員長 大隅 久 E-mail: osumi@mech.chuo-u.ac.jp

SICE 事務局：部門協議会担当 E-mail: bumon@sice.or.jp TEL: 03-3814-4121

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正 会 員	海 外 会 員	学 生 会 員	賛 助 会 員
会 員 数 (8月10日現在)	943	15	127	134
差引き増減	+ 1	- 1	- 4	0

(注1) 正会員の内訳 名誉員13名・シニア員39名・ジュニア員157名

正会員

Soon-Yong Yang (University of Ulsan)

上田 貴博 (SMC株)

菊地 諒 (SMC株)

宮 優太 (SMC株)

松原 佑樹 (SMC株)

酒井 直行 (株JTEKT)

菊池 重孝 (SMC株)

新村 崇 (SMC株)

野尻 豊 (SMC株)

土棚 善貴 (岡谷精立工業株)

学生会員

中野飛路人 (芝浦工業大学)

飯島 拓也 (横浜国立大学)

遠藤 浩彰 (豊橋技術科学大学)

荒木 悠志 (豊橋技術科学大学)

眞鍋 諭 (豊橋技術科学大学)

柏木 優太 (芝浦工業大学)

大塚 亮輔 (芝浦工業大学)

小柳 友美 (芝浦工業大学)

高田 大空 (芝浦工業大学)

山下 和秀 (芝浦工業大学)

野村 康介 (東京電機大学)

匂坂 友紀 (東京電機大学)

大野 豪也 (慶應義塾大学)

青木善那理 (山梨大学)

長野 翔 (山梨大学)

片山 堯之 (横浜国立大学)

星野 友輔 (横浜国立大学)

大高 佑人 (横浜国立大学)

平岡 隆輝 (横浜国立大学)

松浦 慎仁 (豊橋技術科学大学)

西郷 瑞輝 (豊橋技術科学大学)

森長 亮 (上智大学)

川邊大志郎 (芝浦工業大学)

横田 周斗 (芝浦工業大学)

川村 隼人 (芝浦工業大学)

村越 晴信 (芝浦工業大学)

加藤 和英 (東京電機大学)

畠山 径 (東京電機大学)

佐藤 洋輔 (東京電機大学)

Ahmad Qusyairi ZUBER (山梨大学)

江端 秀穂 (山梨大学)

宮澤 仁 (横浜国立大学)

星野 卓磨 (横浜国立大学)

村上 慶太 (横浜国立大学)

会 告

平成26・27年度一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会委員会名簿

(敬称略)

委員会名	委 員 (◎委員長 ○副委員長 *幹事)
企画委員会	◎眞田一志 (横浜国立大学), ○成田 晋 (KYB株), *桜井康雄 (足利工業大学), 赤木徹也 (岡山理科大学), 浅野哲史 (株本田技術研究所), 荒井一則 (フジサンケイ ビジネスアイ), 伊藤和寿 (芝浦工業大学), 内堀晃彦 (宇部工業高等専門学校), 落合正巳 (協立機電工業株), 風戸昭人 ((公財) 鉄道総合技術研究所), 加藤猛美 (株コガネイ), 加藤友規 (福岡工業大学), 川島正人 (東北特殊鋼株), 金 俊完 (東京工業大学), 高後哲也 (日本電産トーソク株), 曾谷康史 (川崎重工業株), 高岩昌弘 (岡山大学), 武田 稔 (株ジェイテクト), 竹村研治郎 (慶應義塾大学), 田中 豊 (法政大学), 中尾光博 (鹿児島大学), 名倉 忍 (コマツ), 林 光昭 (株IHI), 早瀬敏幸 (東北大学), 兵藤訓一 (東京計器株), 山下良介 (SMC株), 和田重伸 (CKD株)
編集委員会	◎吉田和弘 (東京工業大学), ○塚越秀行 (東京工業大学), 伊藤雅則 (東京海洋大学), 内堀晃彦 (宇部工業高等専門学校), 小倉 弘 (日立建機株), 加藤猛美 (株コガネイ), 加藤友規 (福岡工業大学), 北村 剛 (油研工業株), 木原和幸 ((一財) 工業所有権協力センター), 栗林直樹 (川崎重工業株), 五嶋裕之 ((一財) 機械振興協会), 佐藤恭一 (横浜国立大学), 妹尾 満 (SMC株), 多田昌弘 (CKD株), 中野政身 (東北大学), 成田 晋 (KYB株), 藤田壽憲 (東京電機大学), 丸田和弘 (株コマツ), 村松久巳 (沼津工業高等専門学校), 柳田秀記 (豊橋技術科学大学), 山田真の介 (株TAIYO), 吉満俊拓 (神奈川工科大学), 伊藤和巳 (KYB株), 山田宏尚 (岐阜大学)
基盤強化委員会	◎川嶋健嗣 (東京医科歯科大学), *吉満俊拓 (神奈川工科大学), 井口謙彦 (CKD株), 伊藤和巳 (KYB株), 大科守雄 (日立建機株), 大場孝一 (油研工業株), 小山 紀 (明治大学), 川上幸男 (芝浦工業大学), 佐藤恭一 (横浜国立大学), 佐藤毅彦 (東京計器株), 眞田一志 (横浜国立大学), 西海孝夫 (防衛大学校), 西股健一 (SMC株), 布谷貞夫 (コマツ), 東川智信 (株TAIYO), 肥田一雄 (川崎重工業株), 弘光 進 ((一社) 日本フルードパワー工業会), 藤田壽憲 (東京電機大学), 宮 能治 (KYB株), 安木秀巳 (油研工業株), 吉田伸実 (株コマツ)
論文集委員会	◎川上幸男 (芝浦工業大学), ○柳田秀記 (豊橋技術科学大学), 築地徹浩 (上智大学), 伊藤和寿 (芝浦工業大学), 風間俊治 (室蘭工業大学), 川嶋健嗣 (東京医科歯科大学), 桜井康雄 (足利工業大学), 竹村研治郎 (慶應義塾大学), 中村太郎 (中央大学), 西海孝夫 (防衛大学校), 村松久巳 (沼津工業高等専門学校)
情報システム委員会	◎田中 豊 (法政大学), *巖 祥仁 (東京工業大学), 一柳隆義 (防衛大学校), 川上幸男 (芝浦工業大学), 竹村研治郎 (慶應義塾大学), 野口恵伸 (KYB株), 久保田浩
庶務委員会	◎小山 紀 (明治大学), 大科守雄 (日立建機株), 川嶋健嗣 (東京医科歯科大学), 築地徹浩 (上智大学), 峯岸敬一 (SMC株)
会計委員会	◎西海孝夫 (防衛大学校), 酒井直行 (株ジェイテクト), 佐藤恭一 (横浜国立大学), 肥田一雄 (川崎重工業株), 吉田伸実 (株コマツ)
表彰委員会	◎早川恭弘 (奈良工業高等専門学校)
出版委員会	◎佐藤恭一 (横浜国立大学)
国際交流担当	◎伊藤和寿 (芝浦工業大学)

編集室

次号予告

—特集「アディティブ・マニファクチャリング」—

〔巻頭言〕「アディティブ・マニファクチャリング」発行にあたって

〔総論〕積層造形技術

〔解説〕ファブラボの活動とその広がり

3Dプリンティングを活用した実習系授業の取り組み

加工プロセスとしての3Dプリンタの可能性

RP成型機によるシェル鋳型の超短納期製作について

原理/特性

〔会議報告〕ROBOMECH2014におけるフルードパワー技術研究動向

ACTUATOR14におけるフルードパワー技術研究

Lappeenranta University of Technology (フィンランド) において

〔教室〕入門講座「トライボロジー」第3回：摩耗について

〔トピックス〕特許文献を調べる・特許電子図書館の活用5…類似文献の検索1

英国駐在記

〔研究室紹介〕九州工業大学 田中・瀧脇・清水研究室

〔企画行事〕平成26年春季フルードパワーシステム講演会報告

〔トピックス〕手押し井戸ポンプ しゅくみ編

吉満 俊拓

徳永 剛

門田 和雄

松本 大樹

福岡新五郎

高橋 啓二

吉満 俊拓

早川 恭弘

吉田 和弘

一柳 隆義

風間 俊治

木原 和幸

山田 宏昭

嶋田 愛子

加藤 友規

大橋 彰

平成26年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 吉田 和弘 (東京工業大学)

副委員長 塚越 秀行 (東京工業大学)

委員 伊藤 雅則 (東京海洋大学)

内堀 晃彦 (宇部工業高等専門学校)

小倉 弘 (日立建機株)

加藤 猛美 (株コガネイ)

加藤 友規 (福岡工業大学)

北村 剛 (油研工業株)

木原 和幸 (財工業所有権協力センター)

栗林 直樹 (川崎重工業)

五嶋 裕之 (機械振興協会)

佐藤 恭一 (横浜国立大学)

妹尾 満 (SMC株)

多田 昌弘 (CKD株)

委員 中野 政身 (東北大学)

成田 晋 (KYB株)

藤田 壽憲 (東京電機大学)

丸田 和弘 (株コマツ)

村松 久巳 (沼津工業高等専門学校)

柳田 秀記 (豊橋技術科学大学)

山田 真の介 (株TAIYO)

吉満 俊拓 (神奈川工科大学)

担当理事 伊藤 和巳 (KYB株)

山田 宏尚 (岐阜大学)

編集事務局 藤谷 秀次 (学会事務局)

竹内 留美 (勝美印刷株)

(あいうえお 順)

会告

複写される方へ

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

権利委託先：(一社) 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

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

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

日本フルードパワーシステム学会論文集

第45巻, 第5号 (2014)

平成26年9月

目次

研究論文

1. 圧力変化法による容器の漏れ検査について
(基礎的特性の研究)
土屋 順裕, ウーレイレイ, 尹 鍾皓, 香川 利春 73
2. 気泡除去装置の設計と評価に関する研究
(第2報 スパイラル係数を用いた放気口径と流出口径の選定)
坂間 清子, 鈴木 隆司, 田中 豊 79

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.45, No.5

September 2014

Contents

Paper

1. On the Leak Testing of Vessels by Compressed Air Charging
(Study of Basic Characteristics)
Nobuhiro TSUCHIYA, Lai Lai OO, Chongho YOUN, Toshiharu KAGAWA 73
2. A Study on Design and Estimation of Bubble Eliminator
(2nd Report: Selection of Diameter of Vent Port and Outlet Port Using
Spiral Number)
Sayako SAKAMA, Ryushi SUZUKI, Yutaka TANAKA 79

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

圧力変化法による容器の漏れ検査について*

(基礎的特性の研究)

土 屋 順 裕**, ウーレイレイ***, 尹 鍾 皓***, 香 川 利 春***

On the Leak Testing of Vessels by Compressed Air Charging

(Study of Basic Characteristics)

Nobuhiro TSUCHIYA, Lai Lai OO, Chongho YOUN, Toshiharu KAGAWA

This paper studies influence of the magnitude of charging-pressure-step and the pressure measuring time to the error of leak detection by the pressure charging method. In this method, compressed air is charged into a vessel whose leak should be examined. A leak changes the pressure in the vessel after the charging. However, the heat transfer around the vessel also changes the pressure. When the charging pressure is low, the temperature rise due to the compression is low; hence the thermal effect is small by low charge pressures. The experimental results in this study indicate that tests with higher pressures induce greater difficulty in leak detection. They also show that a longer duration of the pressure measurement decreases the error of the leak detect.

Key words : Leak, Pressure measurement, Compressed air, Temperature, Measurement duration

1. 緒 言

漏れ検査はさまざまな産業分野で欠かせない技術となっており、工業製品を対象とする場合には部品製造工程、完成品検査などで広く行われている。漏れ検査の対象品の例としてガス機器及び配管、水道配管類、電気器具類、自動車部品などがすぐに思い浮かぶが、実は食品、薬品、化粧品などの小型容器類はすべて漏れ検査の対象品である。こうして見ると、漏れ検査と無縁の工業製品を見つけるのが難しいくらいである。一般に、漏れ検査では、検査対象固有の検査基準値を設定し、検査もこれに従って実施する。漏れ検査に関する工業規格は、ASTM¹⁾が最も早くから整備されているが、現在ではJIS^{2)~4)}にも基礎的な規格がある。ISOではASTMとほぼ同じ内容⁵⁾が、検討中となっている。JISの漏れ試験方法³⁾(この場合の試験は、検査と技術的には同等である)は、目的や対象により、多様なものがあり、液没法、発泡法、圧力変化法加圧法、流量測定法、超音波法などが規定されている。これらの方法にはそれぞれ得失があり、検出可能な漏れのレベルにも違いがある。

JIS Z 2332²⁾の圧力変化法加圧法では、空気圧を封入した

後の圧力低下の判定時間を24時間又はその整数倍の時間で行うことが望ましいとしている。しかし、生産ラインにおける漏れ検査では、このように長い時間を取ることは非常に困難である。そこで、本論文では検査を5minないし10min程度で完了することを目標とする基礎研究を行う。

漏れ検査は対象品の大きさによって、難易度が異なる。非常に小さなものや、逆に大きなものは、検査が困難になる。たとえば最近では住宅用の低環境負荷給湯機器システムに100L(リットル)以上の大容量容器が用いられるが、これなどは寸法が大きくて、短時間での漏れ検査が難しい例である。

本研究では対象容器の内容量は約150Lとし、空気加圧法による漏れ検査を行うときの、容器内圧力と容器内部空気の温度及び、外壁面温度などの変化する様子を調べ、充填空気圧力の高さや、漏れ判定に費やす時間が、漏れ検出誤差に与える影響を調べる。

2. 主 な 記 号

$E(Q)$	: Q の推定誤差	[—]
G	: 質量漏れ流量	[kg/s]
G^*	: 仮定の質量漏れ流量	[kg/s]
P	: 圧力	[Pa]
P_A	: 加圧ステップ圧力	[Pa(G)]
Q	: 体積漏れ流量	[m ³ /s]
Q_A	: 見かけの体積漏れ流量	[m ³ /s]
Q^*	: 仮定の体積漏れ流量	[m ³ /s]
m	: 空気質量	[kg]

*平成25年11月12日 原稿受付

**株式会社ガスター

(所在地 神奈川県大和市深見台3-4)

(E-mail: tsuchiyn@gastar.co.jp)

***東京工業大学精密工学研究所

(所在地 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

R	: 空気のス定数	[J/K/kg]
ρ_0	: 標準状態における空気密度	[kg/m ³]
t	: 時間 (時刻)	[s]
T	: 時間 (インターバル)	[s]
V	: 容器内容積	[m ³]
θ	: 温度	[K]
θ_0	: = 273.15; 絶対温度への換算定数	[K]
θ_a	: 室温	[°C]
θ_c	: 容器内中心温度	[°C]
θ_w	: 容器外壁温度	[°C]

3. 見かけの漏れ流量の補正

容器内に圧縮空気を充填して行う漏れ検査の基本的な考え方は次のとおりである。

- (1) 容器に、弁を介して圧縮空気を充填する。
 - (2) 所定圧力になったら、弁を閉鎖する。
 - (3) その容器からの空気の漏れを何らかの方法で検出する。
- 一般的な加圧式漏れ検査は上記のとおりであるが、ここで考察する漏れ検査方法は、検査対象容器内の圧力変化を測定するもので、単圧式と呼ぶことがある。

本研究では、加圧による内部温度変化の影響が、長い時間にわたって残りやすい大形の容器を対象として、短時間で漏れ検出を行おうとする場合の、加圧力と漏れ検出精度との関係を考察する。漏れがあれば圧力は低下するが、漏れがなくても、冷却により圧力は低下する。小さな容器では、短時間で容器内至るところで室温に達するから、温度の影響は小さく、通常は無視できる。それに対して大形の容器では、内部の温度分布、容器外側の熱的条件などが漏れ判定に影響を与える。

そこで、漏れの無い容器における温度変化より生じる圧力変化を、温度変化が無いときの、漏れによる圧力変化に換算することを考える。そのように換算した流量を、本論文では仮想の漏れ流量と呼ぶことにする。このように、あたかも漏れが生じたかのように見える仮想の漏れ流量を算出することによって、短時間の漏れ検査における真の漏れを推定する。

まず空気の状態方程式は

$$PV = mR\theta \quad (1)$$

であるが、この両辺を微分してから、両辺を $R\theta$ で割ると、

$$\frac{V}{R\theta} \frac{dP}{dt} = \frac{dm}{dt} + \frac{m}{\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

である。質量保存則により、漏れの質量流量 G は

$$G = - \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

である。ここで、式(2)を

$$- \frac{V}{R\theta} \frac{dP}{dt} = G + G^* \quad (4)$$

と表すとき、 G^* が前述の仮想の漏れの質量流量であり、

$$G^* = - \frac{m}{\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

と表される。式(3)-(5)を標準状態 (ANR; 293.15K, 100kPa (Abs)) における体積流量に換算すると

$$\text{見かけの漏れ流量: } Q_A = - \frac{V}{\rho_0 R \theta} \frac{dP}{dt} \quad (6)$$

$$\text{真の漏れ流量: } Q = \frac{G}{\rho_0} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{dm}{dt} \quad (7)$$

$$\text{仮想の漏れ流量: } Q^* = \frac{G^*}{\rho_0} = - \frac{m}{\rho_0 \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

である。式(4)、(6)-(8)から、標準状態換算の見かけの漏れ流量、真の漏れ流量、仮想の漏れ流量の関係は

$$Q_A = Q + Q^* \quad (9)$$

である。

容器内へ圧縮空気を充填するとき、注入に要する仕事によって容器内温度が上昇し⁶⁾、その後放置すれば、周囲と熱交換を行い、室温に戻る。この温度変化の影響が Q^* により表される。それゆえ、加圧法で真の漏れ流量を知るには、 Q^* を推定する必要がある。この推定を行うために、漏れの無い容器を用いて、圧力と温度の測定を行う。漏れの無い容器では、式(9)において、 $Q = 0$ であるから

$$Q_0^* = - \frac{V}{\rho_0 R \theta} \frac{dP}{dt} \bigg|_{Q=0} \quad (10)$$

と表す。式(10)で求めた Q_0^* と、漏れがあるときの式(9)に現れた Q^* とは、(6)~(8)に代入する m や θ が測定時間内であまり変わらなければ、近似的に等しいと見なせる。よって、式(10)を式(9)に代入して、真の漏れ流量を

$$Q \approx Q_A - Q_0^* \quad (11)$$

によって推定する。以上が本研究で扱う空気加圧式漏れ検査における補正の方法である。あらかじめ漏れが無いことがわかっている容器について、 Q_0^* を測定しておけば、同製品における Q_A から Q を推定できる。本論文ではこの方法を検討する。式(8)を用いて Q^* を得る方法もあるが、それは別の研究課題となるので、本論文では扱わない。

4. 実験

容器に空気を加圧充填し、圧力及び温度の大きな過渡的変動がおさまった後に、あらかじめ定めた時間内の容器内圧力、容器内温度、容器外壁温度の変化を調べる。この実験には、あらかじめ漏れが無いことを確認してある容器を用いる。始めに漏れ無しの実験を行う。その後で、Fig. 1に示す実験装置の弁 V_3 を開いて、人工的に漏れがある状態とした場合の実験を行う。

4.1 実験装置及び実験方法

実験に用いた容器は、容量0.147m³、板厚1.0mmのステンレス製である。容器の概略寸法は高さ1.564m、直径0.355mの円筒形で、両端は丸みをつけてある。この容器の最大許容内圧は500kPa(G)である。容器は横置きに設置し、室温変

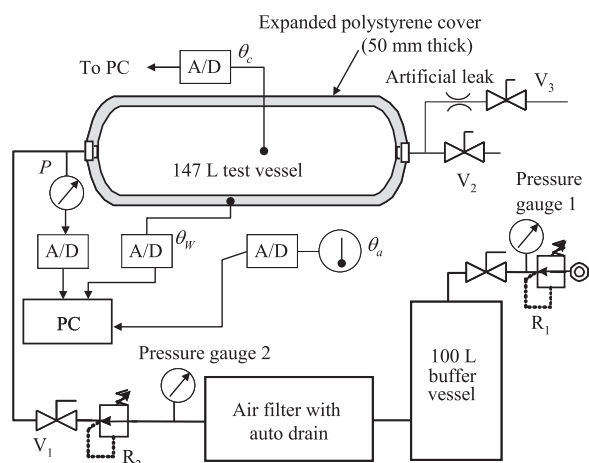


Fig. 1 Experimental rig

化等の外乱を減らすために、容器全体を厚さ約50mmの発泡スチロールで覆った。この容器には、内容物を注入する口と、放出用の口が設けてあるので、これらに空気圧配管を接続した。注入側は、まず空気圧源を一次レギュレータ R_1 の上流に接続し、下流には供給圧力安定化のためのバッファ容器、空気清浄・乾燥システム、二次レギュレータ R_2 をこの順番に接続して、圧縮空気を容器入り口に接続した。

各実験ごとに、 R_2 の下流に設けた空気供給弁 V_1 により容器内への圧縮空気の充填を行い、容器出口に設けた放出弁 V_2 により容器内の圧縮空気の放出を行う。漏れなしの実験では、弁 V_3 は閉じておく。加圧力は約25~500kPa(G)の間の複数の値とする。

容器に圧力センサを装着して容器内の圧力 P を計測し、AD変換を行ってパソコンに自動保存をしている。圧力センサは、計測レンジ0～1MPa、非直線性 $\pm 0.5\%$ F.S.のキーエンス社製圧力センサ（AP-13S）を用いた。また容器内部の中央、容器外壁面、及び室温を測定するための熱電対が取り付けられている。温度計は、T型熱電対；クラス2（JIS C1602-1995、アンプは㈱システム技研M5TS55-R/K）である。

実験を行った手順は次のとおりである.

- ① 一次レギュレータ R_1 及び二次レギュレータ R_2 を調整して、充填する圧力を定める。
- ② 容器への空気供給弁 V_1 を閉じ、放出弁 V_2 を開放して容器内部を大気圧としてから、 V_2 を閉じる。
- ③ 圧力センサ、温度計のデータの記録を開始する。この時刻を $t=0\text{ s}$ とする。
- ④ 初期の容器内圧力を60秒間（ $=T_1$ ）計測する。終端の時刻は $t=t_1=60\text{ s}$ である。
- ⑤ V_1 を開き60秒間（ $=T_2$ ）加圧空気を充填する。終端の時刻は $t=t_2=120\text{ s}$ である。
- ⑥ V_1 を閉じた後、圧力及び温度の大きな過渡的変動がおさまるまで60秒間以上（ $=T_3$ ）待つ。終端の時刻は $t=$

$t_3 > 180\text{s}$ である.

- ⑦ t_3 以後 T_4 秒間漏れ判定のための圧力測定を続ける。終端の時刻は $t=t_4=t_3+T_4$ である。
- ⑧ 加圧状態を $t=t_5$ まで維持してから放出弁 V_2 を開き、容器内圧力を大気圧に戻す。

充填圧力ステップ毎に①～⑧の作業を行った。圧力及び温度記録ステップは最小0.25sとびである。

T_1 から T_4 までの合計 t_4 が漏れ検査にかかる時間，すなわち検査時間である． t_4 をどの程度に取ればよいかを，実験的に調べる．

4.2 実験結果とその整理

漏れがない場合の容器内圧力変化の測定例を、Fig. 2に示す。容器内圧力は、加圧空気供給弁 V_1 を開くと同時に上昇を始め、弁 V_1 を閉じた時点から降下を始めている。各時刻の圧力は大きなノイズを含んでいるが、全体的には時間経過に伴い、緩やかに減少している。

容器への空気充填終了後、圧力と温度の測定値から漏れ流量を求める手順をFig. 3を用いて説明する。圧力及び温度の大きな過渡的変動がおさまった後の、 t_3 から t_4 までのインターバル (T_4) における観測記録を用いる。仮定の漏れを求める計算では、漏れ判定時刻を

$$t_m = (t_3 + t_4)/2 \quad (12)$$

とする。計算に用いる時間幅は、 $T_4 = 120\text{s}$ とした。時刻 t_m における圧力の微分係数を求めるために、 $t_3 = (t_m - 60)\text{s}$ から $t_4 = (t_m + 60)\text{s}$ までの120秒間の圧力の測定値を2次曲線で近似する。

$$P = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (13)$$

係数 (a_0, a_1, a_2) は実験データに最小二乗法を適用して求め、 t_m における圧力の微分値を次のように求める。

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=t_m} \approx a_1 + 2a_2 t_m \quad (14)$$

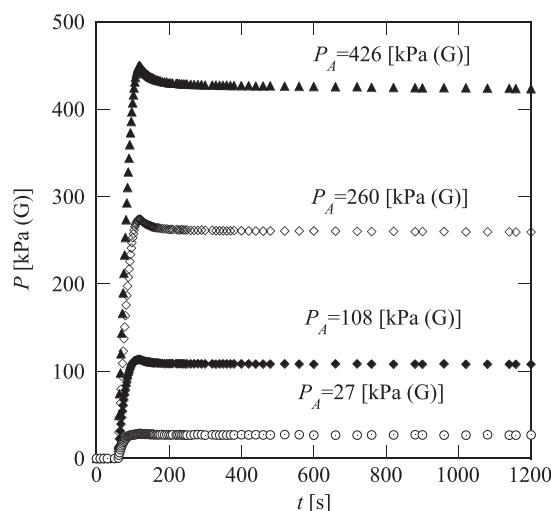


Fig. 2 Pressure variations

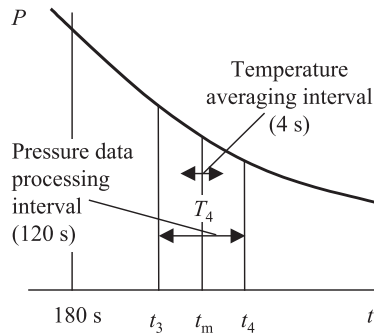


Fig. 3 Data processing interval

式(14)で求めた値を、漏れがある場合は式(6)に、漏れが無い場合には式(10)に代入する。式(6)、(10)の計算に必要な温度 θ についても、ノイズを除く必要がある。そのために判定時刻 t_m の前後 $\pm 2s$ の間の θ_c の平均を、 t_m における θ_c の値とした。 θ_w についても同様である。容器内の空気平均温度は正確にはわからないので、タンク中心温度とタンク壁面温度を用いて、次のように推定した。

$$\theta = [\theta_w + (\theta_c - \theta_w)(1/3)] + \theta_0 \quad (15)$$

ここで使った係数(1/3)は、(1)壁面温度は至るところで同じである、(2)温度は注入直後ではタンク内で一定、(3)その後は壁面により冷却されるが対流は無視できる、(4)その結果、温度は半径方向にも長さ方向にも放物線的に分布し、(5)壁面では壁面温度に等しいこと、を仮定して求めた値である(長さ方向の放物線分布の仮定から係数2/3、半径方向の放物線分布の仮定から係数1/2となり、これらの積で1/3となる)。

漏れ無しの実験の圧力、温度データから式(10)によって求めた Q_0^* と加圧ステップ P_A の関係を、Fig. 4に示す。

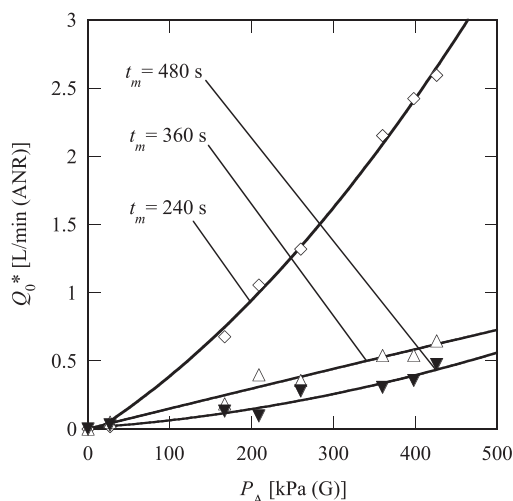


Fig. 4 Virtual leak by a no-leak vessel

この仮定の漏れ流量と同程度の大きさの漏れ流量を発生させる細管式の漏れ発生器 (Fig. 1中のArtificial leak) を製作した。製作した漏れ発生器の圧力流量特性をFig. 5に示す。

す。この流量は容積式流量計 (シナガワ湿式ガスメータ: 型式: WS-1型) で測定した。

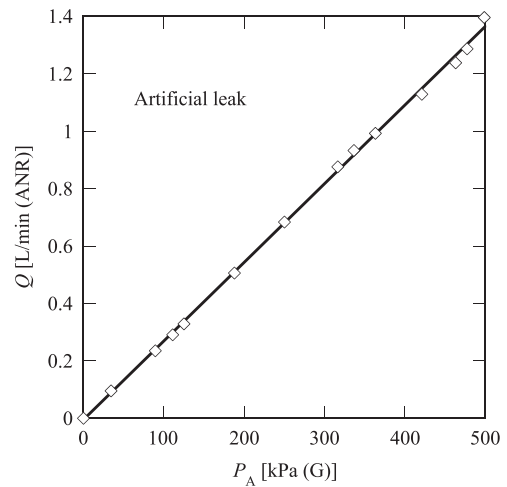


Fig. 5 Characteristic of artificial leak (20°C)

漏れがあるときの実験は、Fig. 1の弁 V_3 を開いて行う、実験の手順、データ処理は、漏れが無い場合と同じとした。実験結果の見掛けの漏れ流量 Q_A を式(6)により求めて、Fig. 6に示す。式(6)に代入する数値は、式(14)、(15)を用いて、実験値から算出した。

次に温度変化の経過について述べる。以下の記述の中の数値は漏れなしの実験での値であるが、Fig. 5に示した漏れを加えた場合であっても、ほぼ同じ値となった。

充填開始と同時に温度上昇も始まるが、その温度上昇と同時に容器壁面への熱の伝達も生じる。それゆえ容器内空気の温度上昇は、理想的な断熱圧縮の場合の温度上昇よりも低い。漏れ無しの場合の、加圧開始後の容器中心温度及び容器壁面温度の測定結果をFig. 7, 8に示す。温度測定はすべての加圧実験について行ったが、図が込み入ったものとなるので、これらの図には、その一部を代表データとし

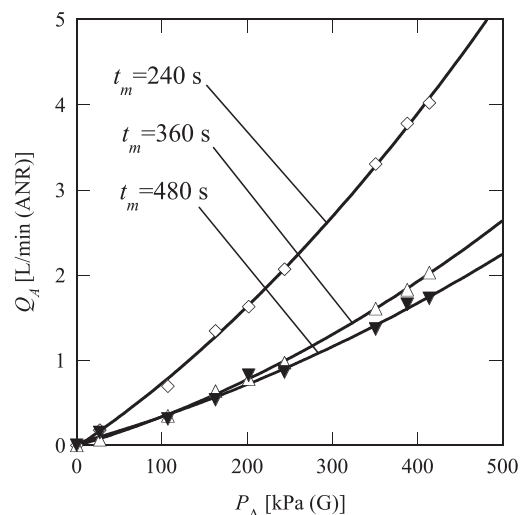


Fig. 6 Apparent leak

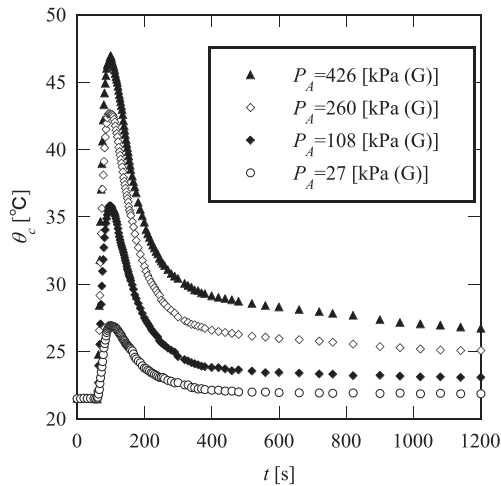


Fig. 7 Temperature at the center of vessel

て示してある。

Fig. 7に示す内部気体の温度は充填後に急激な上昇を示し、その後減衰する。Fig. 8に示す容器壁面温度は、気体温度のように激しい変化をしない。これらの図を比べると、式(15)による、右辺 θ の変化の大部分が、 θ_c によるものであることがわかる。

充填圧力が小さいときには、圧力の変化が小さいだけでなく、容器内部の空気温度変化も小さくなる⁶⁾。容器の外壁面の温度変化はさらに小さい。充填圧力ステップが高くなると、容器内部の温度変化が大きくなるが、圧力ステップの大きさと温度変化幅は比例していない。Fig. 7の容器内部の温度上昇幅の最高値は、圧力ステップ27kPaでは5 K程度であるが、圧力ステップが426kPaと約16倍になっても、温度上昇幅の最高値は約26Kと、5倍程度にとどまる。

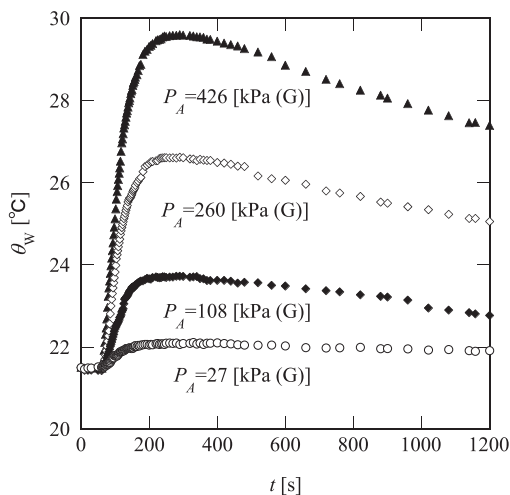


Fig. 8 Vessel wall temperature

容器圧力充填により、気体は発熱するが、その熱は熱容量の大きな容器壁に伝達されるので、気体の温度は断熱圧

縮から想像するほどは上がらない。一方、容器の熱容量は大きいから、容器壁面温度の上昇は、気体のように高くない。容器壁温度が上昇すると、その熱は外気に放出されるが、外気と容器壁の温度差はさほど大きくないから、放熱率は小さい。したがって、内部気体の発熱量の大部分は一時的に容器に蓄えられていて、それが時間の経過に伴って徐々に外部に放出される。

5. 考 察

式(11)を参照して、漏れの推定値の誤差は

$$E(Q) = Q_A - (Q + Q_0^*) \quad (16)$$

である。この式の右辺を次のように求めた。 Q_A はFig. 6により P_A の二次関数で近似する。 Q はFig. 5に示した細管の圧力流量特性を表す直線の式で近似する。 Q_0^* はFig. 4に示した漏れ無しの実験における曲線を P_A の二次関数で近似する。このようにして、 $E(Q)$ が P_A により変化する様子を算出した結果をFig. 9に示す。これらの3本の曲線のパラメータは、漏れ判定時間 t_m である。 t_m を大きくすれば、推定の誤りは減少する。 P_A が0ならば、理論上はすべての流量が0となるのであるが、ここに示したグラフは0ではない。これは計算に用いた曲線の式を実験値から最小二乗法で求めたからである。この推定誤差の値は、 Q_0^* と比べると $t_m = 360$ s、480sではやや小さい程度であるが、 $t_m = 240$ sでは Q_0^* の約10%程度である。全体としては、測定時間の延長により推定誤差が減る。また、加圧力 P_A が小さいときにも推定誤差は小さくなるが、こちらは圧力が低ければ漏れ流量が小さいという当然の結果である。温度変化はFig. 8に示されているように、時間の延長により少なくなるから、充填から長時間後の圧力変化の原因は漏れのみによるものに近づく。したがって、判定時間を長く取れば、漏れの推定誤差は小さくなる筈で、Fig. 9はその傾向を示している。この図で $P_A < 320$ kPa(G)では $t_m = 360$ sでの誤差が、 $t_m = 480$ sの場合よりも小さくなる区間があるが、これは実験誤差と考えている。

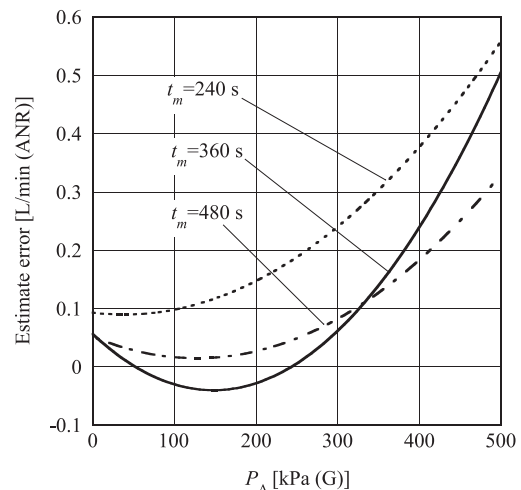


Fig. 9 Estimate error of leak

容器の漏れ量は、流量値がいくら以下として上限を指定するのが一般的で、通常は、容器が大きくても、許容される漏れ量が増すことはあまりない。そのため、大容量の容器では漏れ検査が困難になる。これを説明しよう。容器内の空気の質量保存則及び状態方程式から

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \theta}{\theta} \quad (17)$$

である。温度は300Kのまわりでの変動で、 $\Delta \theta$ が約1Kとすると、これは質量が0.3% 流出したのと同じ圧力変化をもたらす。容量150Lの容器で内圧500kPa(Abs)では、これと同じ圧力変化をもたらす質量流出は $12 \times 0.15 \times 5 \times 0.003 \text{ kg} = 0.0027 \text{ kg}$ であるが、それは標準状態では $5 \times 150 \times 0.003 \text{ L} = 225 \text{ L}$ の体積にあたる。これが5分間で流出するならば、平均流量は0.45L/min(ANR)となり、Fig. 9に現れている誤差と同じオーダーになる。今回の実験は、加圧法での漏れ検出における推定誤差の要因に、温度の推定誤差があることを示唆するといえる。本論文の手法は、このレベルの誤差が許される場合に適用できるであろう。

許容漏れ流量を一定に指定すると、一定時間内に許容できる質量減 Δm も一定である。容器容量と m は比例し、これが増加すると $\Delta m/m$ は小さくなる。簡単のために、温度変化を0にできたとすると、容量増加により、式(17)左辺の $\Delta P/P$ は小さくなるから、 ΔP の検出精度の向上が要求される。この観点からは低圧ほど不利である。

これを数値的に見るために、検出しなければならない漏れのオーダーを1 mL/min(ANR)と仮定する。初期圧力500kPa(Abs)、温度は300Kで一定、1 mL/min(ANR)の漏れが5 min続いた場合の質量減少は、約 $6 \times 10^{-6} \text{ kg}$ である。容量150L、500kPa(Abs)の容器内空気の初期質量は約0.9 kgであるから、この質量流出の相対値は、 $\Delta m/m = 6.7 \times 10^{-6}$ である。式(17)で、これに対応する圧力の変化量は、 $5 \times 10^5 \text{ Pa} \times 6.7 \times 10^{-6} = 3.4 \text{ Pa}$ である。この圧力変化の検出は困難であるから、このレベルの漏れ、容器容量、計測時間に対して、本論文の手法を適用するのは困難である。圧力検出が成功しても、温度の相対変化の影響を、かなり小さく($\Delta \theta < 0.003 \text{ K}$)抑えておかなければならず、これも極めて困難である。

判定時間が長いほど、漏れの検出は精度を増す。圧力計の不正確さは、推定漏れ流量の不正確さと一次の関係にある。 P_d が小さいときには、 $E(Q)$ も小さくなるが、この傾向の原因の一つが温度変化である。内圧が低いときに漏れなくても、高圧では漏れを生じることがある。たとえば容

器に微小なクラックがある場合には、高圧に至ってクラックが開口して漏れを生じることもある。それゆえ、単純に低圧による検査が良いとはいえないが、高圧での漏れ検査は温度変化による誤差増加を招きがちであることは、一つの注意事項である。

6. 結 言

容量150L程度の容器の漏れ検査を空気加圧によって行うときの、充填圧力の大きさ及び検査時間長さが検査結果に与える影響を調べた。大形容器の短時間の単圧式測定においては、加圧により生じる温度変化の影響が大きいことを確認した。充填圧力を変えた実験により、低圧(約27kPa(G))の場合は熱の影響が少なく、漏れ流量推定の誤差は検査時間5 minで100mL/min(ANR)以下である。高圧(約400kPa(G)程度)では検査時間を5 minとすれば、漏れ流量推定の誤差は約400mL/min(ANR)程度となるが、検査時間を7 minとすれば、誤差は200mL/min(ANR)に減少する。このように、単圧の加圧式では、注入圧力を増大すると、また、検査時間を短くすると、漏れ流量推定の誤差が増大する。ここで例示した値は、一般の漏れ検出の要求水準よりかなり大きい。単圧式の限界や性質を知ることができたので、得られた知見は漏れ推定の誤差を低下させるために役立てることができる。

謝 辞

研究の取りまとめと検討について、神奈川大学名誉教授、浦田映三先生の指導を受けた。

参 考 文 献

- 1) ASTM E432-91 Standard Guide for Selection of a Leak Testing Method, p. 1-3 (2004).
- 2) JIS Z 2332 圧力変化による漏れ試験方法, p. 1-9 (2012).
- 3) JIS Z 2330 非破壊試験－漏れ試験方法の種類及びその選択, p. 1-18 (2012).
- 4) 田村芳一, 漏れ試験方法の規格の現状, J. Vac. Soc. Jpn. (真空), Vol. 50, No. 8, p. 517-249 (2007)
- 5) ISO, TC 135/SC 6 - Leak detection methods, http://www.iso.org/iso/home/standards_development/list_of_iso_technical_committees/iso_technical_committee.htm?commid=52430, downloaded 06/11/2013.
- 6) 谷下市松, 工業熱力学基礎編, 修正第53版, 裳華房, p. 65-68 (2008).

研究論文

気泡除去装置の設計と評価に関する研究*

(第2報 スパイラル係数を用いた放気口径と流出口径の選定)

坂間 清子**, 鈴木 隆司***, 田中 豊****

A Study on Design and Estimation of Bubble Eliminator (2nd Report: Selection of Diameter of Vent Port and Outlet Port Using Spiral Number)

Sayako SAKAMA, Ryushi SUZUKI, Yutaka TANAKA

Air bubbles in hydraulic oil lower the efficiency of hydraulic systems and contribute to instrument malfunctions. To mitigate these problems, it is possible to use an active “bubble eliminator” that uses swirl flow to remove air bubbles. This study aims to optimize the shape parameters of the device. For this purpose, its performance needs to be evaluated precisely. To evaluate the performance of the bubble eliminator, we should consider a correlation between the effect of swirl flow and axial flow because these flows affect the bubble behavior in the device greatly. In this paper, we perform the experimental flow visualization and numerical simulation with different values of the diameter of the outlet and vent port. Additionally, this paper presents a new performance index named “spiral number” and evaluates the performance of the bubble eliminator using this index. This index considers the correlation between the effect of the swirl flow and axial flow. We analyze the experimental and numerical results using this index, and show that the index is useful for evaluating the performance of the bubble eliminator. We conclude that the diameter of the outlet port and vent port can be selected using this index.

Key words : Bubble, Bubble eliminator, CFD, Experimental Flow Visualization, Swirl Flow

1. 緒 言

流体を用いた機器には、旋回流を利用した機器が多く存在する。また、これらの機器は大きく分けて2種類に分類される。一つは、流体中に粒子を細かく分散させる目的で利用され、マイクロバブルの発生装置がその一例として知られる¹⁾。旋回流が利用されるもう一つの目的は、複数種類の流体や物質の分離のためである。加工液中の砥粒²⁾、空気圧機器内の水分³⁾などの異なる物質の分離除去が主な用途として知られるが、圧縮空気を暖気と冷気に分離するボルテックスチューブ⁴⁾のように、同一の物質を性質の違いで分離する用途もある。本研究では、油圧システムの動特性⁵⁾や作動油の劣化⁶⁾に影響をおよぼす作動油中の気泡を分離除去する目的で旋回流を利用する。

著者らは、作動油中の気泡を分離除去する気泡除去装置⁷⁾を開発し、この装置が油中気泡の分離除去に適していることを実験的に確認している⁸⁾。しかし、気泡除去装置の形状は様々な条件で使用されてきた中で培われた経験に基づいて設計されており、装置の形状パラメータの設計指針が確立されているわけではない。したがって、装置の形状パラメータを最適化することで、装置の気泡除去性能はさらに向上することが予想される。従来の研究では、装置の性能を向上させるために数値解析により装置の形状パラメータが装置の性能におよぼす影響を分析し、装置の形状パラメータを変更することで気泡の除去性能が向上することを明らかにしている⁹⁾。しかし、従来の研究では特定の条件下で装置の形状パラメータの変更と性能の比較を行っており、汎用的に用いることのできる装置の形状パラメータの設計指針は確立されていない。汎用的に使用できる装置の設計指針を確立するには、様々な条件下で使用できる装置の性能評価指標を確立し、装置の形状パラメータを最適化することが必要となる。

第1報¹⁰⁾では、油の損失量を評価する作動油流出率と、気泡の除去量を評価する気泡除去率の二つの評価指標を用いて放気口径の選定法を提案した。しかし、前報では、放気口径のみに注目しており、他のパラメータとの関係を考

*平成26年2月22日 原稿受付

**法政大学大学院デザイン工学研究科システムデザイン専攻
(E-mail : sayako.sakama.9k@stu.hosei.ac.jp)

***株式会社オーパスシステム

(所在地 東京都目黒区中目黒3-18-1)

****法政大学デザイン工学部システムデザイン学科

(所在地 東京都千代田区富士見2-17-1)

(E-mail : y_tanaka@hosei.ac.jp)

慮していない。また、気泡を効率よく除去するには、中心軸方向の流れだけでなく、気泡の挙動に大きく影響をおよぼす旋回方向の流れの影響を考慮する必要があるが、前報では旋回方向の流れが装置の性能におよぼす影響には言及していない。本報では、流出口径と放気口径の両者の関係を明らかにして簡易な方法で流出口径と放気口径を選定することを目的とし、旋回方向と中心軸方向の流れの關係に注目して気泡除去装置の流れの可視化実験と数値解析の結果を分析・評価する。

2. 主な記号

D_2 : 流出口径
 D_3 : 放気口径
 E_b : 気泡除去率
 Q : 体積流量
 U : 流速
 S : スパイラル係数
 添字
 B : 気泡
 i : 流入口
 v : 放気口
 o : 流出口
 s : 旋回方向
 z : 中心軸方向

3. 気泡除去装置の原理と実験・解析条件

Fig. 1に気泡除去装置の構造と原理を示す。気泡除去装置は、流入口、流入管路部、テーパ管路部、流出口、放気口により構成される。流入口は流入管路部に接線方向から油が流入するように取り付けられており、流入口から油を流入させることで旋回流を発生させる。油中に混入した気泡は、旋回流により装置の中心軸上に集合し、流出口側に背圧をかけることで集合した気泡を放気口から押し出し、油タンクへ戻す。

放気口から径の大きな気泡が流出すれば、タンク内での気泡の消泡性が向上する。したがって、気泡除去装置内で気泡を十分に集合させて大きな気泡を作ること、そして可能な限り多くの気泡を放気口から流出させることが気泡除

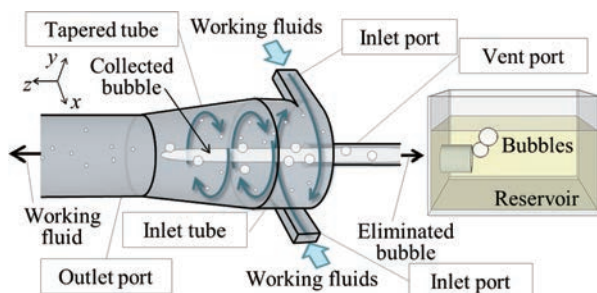


Fig. 1 Design and principle of bubble eliminator

去装置に求められる性能である。

本研究では、気泡除去装置の流れの可視化実験と数値解析を実施し、装置の性能を評価している。本報では、可視化実験、数値解析共に油温は全て40℃とし、そのときの作動油動粘度は31.3mm/s、流入流量は20L/min、そのうち混入させる気泡量は0.2L/minとした。Fig. 2とTable 1に装置の形状パラメータを示す。No. 1は、流入流量20L/minの条件で経験的に除去性能が高いと評価されていた形状である。本報では、No. 1の基準形状から流出口径 D_2 と放気口径 D_3 を変更して実験と数値解析を実施している。

4. 可視化実験

本研究では、全て透明アクリルで作成した気泡除去装置を用いて装置内部の流れの可視化実験を実施している¹⁰⁾。気泡除去装置の性能を評価するために、本報では、この可視化用気泡除去装置内部の流れを、高速度カメラを用いて6,000fpsで撮影し、気泡の挙動を分析する。本実験装置には、ポンプの吸い込み側に作動油に一定量の空気を混入させるためにコンプレッサが設けられている。コンプレッサから空気圧用の精密な絞り弁を介して空気を混入させ、流量計のモニタを確認しながら空気量を調整する。また、気泡除去装置の各ポートには体積流量計とコリオリ式質量流量センサが取り付けられており、これらのセンサデータから各ポートを通過する流体の見かけの密度を算出することができ、各ポートを通過する気泡量がわかる。本報では、装置の性能を定量的に評価するために、これらの値を用いて気泡除去率を算出する。気泡除去率 E_b は以下の(1)式で計算される。

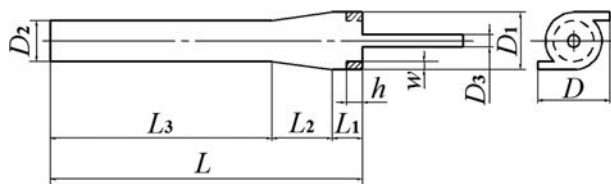


Fig. 2 Geometry of bubble eliminator

Table 1 Condition of experiments

No.	D [mm]	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	L [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	L_3 [mm]	w [mm]	h [mm]
1	36	28	20	6	265	15	30	220	3	6
2	36	28	20	8	265	15	30	220	3	6
3	36	28	20	10	265	15	30	220	3	6
4	36	28	15	6	265	15	30	220	3	6
5	36	28	15	8	265	15	30	220	3	6
6	36	28	15	10	265	15	30	220	3	6
7	36	28	10	6	265	15	30	220	3	6
8	36	28	10	8	265	15	30	220	3	6
9	36	28	10	10	265	15	30	220	3	6

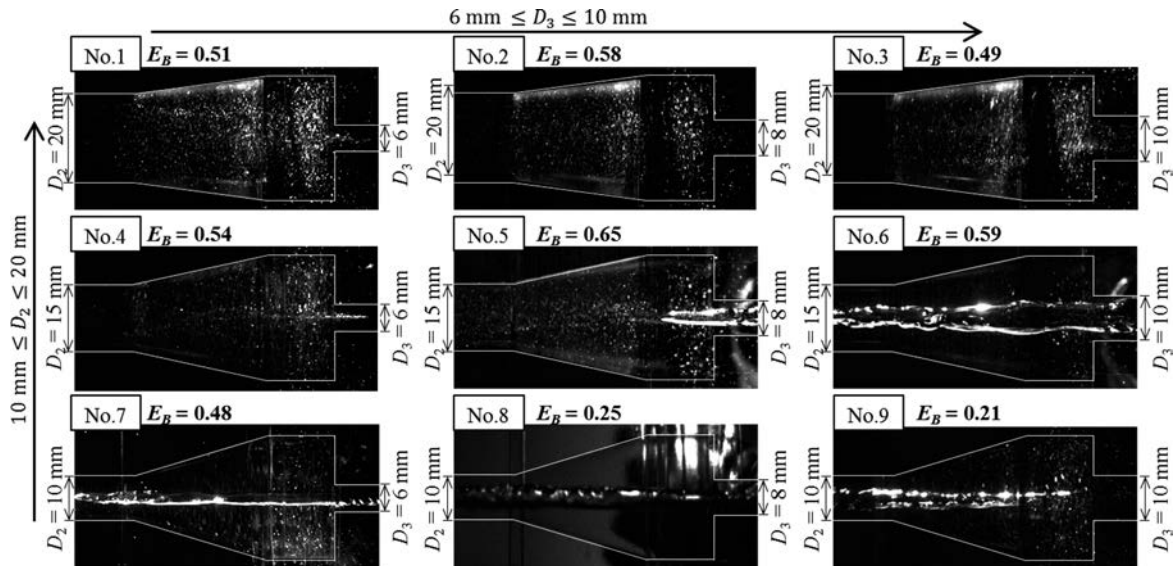


Fig. 3 Results of experimental flow visualization

$$E_B = \frac{Q_{Bv}}{Q_{Bo} + Q_{Bv}} \quad (1)$$

ここで、 Q_{Bv} は放気口から流出する気泡の体積流量、 Q_{Bo} は流出口から流出する気泡の体積流量である。気泡除去率を計算するときは、これらの値を大気圧下の体積流量の値に換算している。

本節では、放気口径と流出口径の違いが装置内の気泡の挙動におよぼす影響を分析する。Fig. 3に流出口径 D_2 と放気口径 D_3 を変更して実施した可視化実験の結果を示す。なお、装置内の気泡の挙動を明確にするために気泡除去装置の内壁面を白線で描画している。また、気泡除去率 E_B は図中に示している。 D_3 が大きいとき、あるいは D_2 が小さいときに気泡は集合しやすく、特にNo.5 ($D_2=15\text{mm}$, $D_3=8\text{mm}$)とNo.6 ($D_2=15\text{mm}$, $D_3=10\text{mm}$)のとき、またNo.7～9 ($D_2=10\text{mm}$)のときは、流入管路部、あるいはテーパ管路部内で気柱が形成されるほど気泡が集合する。しかし、 D_3 が大きくなり、 D_2 が小さいほど、集合した気泡が左方向の流出口に移動することがわかる。また、気泡除去率 E_B を比較すると、No.1～3 ($D_2=20\text{mm}$)の条件では、 D_3 がどの条件であっても0.5～0.6程度の値を示し、 $D_3=8\text{mm}$ の条件で最も高い値を示した。No.4～6 ($D_2=15\text{mm}$)の条件では、No.1～3 ($D_2=20\text{mm}$)の条件よりも E_B は全体に高く、この条件でも $D_3=8\text{mm}$ のときに最も E_B は高い。しかし、No.7～9 ($D_2=10\text{mm}$)の条件では、 $D_3=8, 10\text{mm}$ のときに E_B が低下することが確認された。可視化実験で撮影された動画からもNo.8 ($D_2=10\text{mm}$, $D_3=8\text{mm}$)、No.9 ($D_2=10\text{mm}$, $D_3=10\text{mm}$)の条件では集合した気泡が流出口方向に流れる傾向にあることが確認されており、 E_B が低下したのは、集合した気泡が流出口から流出してしまったためだと考えられる。すべての条件の中で最も気泡除去率 E_B が高いのはNo.5 ($D_2=15\text{mm}$, $D_3=8\text{mm}$)の条件であり、本報で実施した実験の中ではこの条

件が最も気泡の除去効率が高いと評価できる。前節で述べたように、気泡を効率よく除去するには、気泡を十分に集合させること、可能な限り多くの気泡を放気口から流出させることが必要であり、 $D_2=15\text{mm}$, $D_3=8\text{mm}$ の条件では、その両方の条件を満たしていることがわかる。

可視化実験で撮影された動画から、気泡を十分に集合させるには、 D_2 を小さく、あるいは D_3 を大きく設定する必要があることを確認した。しかし、 D_2 を小さく、さらに D_3 を大きくすると、気泡除去率 E_B が低下する。したがって、 D_2 と D_3 には最適な関係があり、 D_2 と D_3 を最適化するには、それぞれのパラメータを個々に最適化するのではなく、双方の関係を考慮して最適化する必要がある。

5. 数値解析

5.1 解析の概要

可視化実験で、気泡除去装置内部の気泡の挙動を確認したが、流出口径 D_2 と放気口径 D_3 の違いが装置内部の流れに与える影響を詳細に分析することはできていない。本研究では、気泡除去装置内の流れを詳細に分析するために、流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+を用いて数値解析を実施している。前報¹⁰⁾では、油と空気の気液二相流解析を実施するために、混相流モデルにオイラー混相流モデル、乱流モデルにk-ε乱流モデルを利用していた。しかし、k-ε乱流モデルは旋回流の流れの予測に適していないことが明らかになっている¹¹⁾。本報では、数値解析の精度を向上させるために旋回流の流れの再現に適したレイノルズ応力方程式モデルを用いて数値解析を実施する。なお、本解析で使用するソフトウェアは、オイラー混相流モデルとレイノルズ応力方程式モデルを同時に利用することができないため、本報では油のみの単相流モデルとして解析を実施した。装置の形状パラメータ、油の温度、動粘度、流入流量

の条件は全て可視化実験の条件と同じとしている。また、流出口と放気口の境界条件は流量分配出口とし、実験で計測された流量の値から流出比を設定している。座標系は、装置の中心軸上に z 軸をとり、放気口の入口部を原点としている。また、流出口方向に正、放気口方向に負の値をとる。

5.2 中心軸上の流速変化

Fig. 4は、気泡除去装置の中心軸上の中心軸方向の流速 U_z の変化を表しており、流出口方向を正、放気口方向を負としている。 D_2 が同一のNo.1～3, No.4～6, No.7～9の各条件で U_z の変化を比較すると、 D_3 が小さいほど放気口へ向かう流速が全体に速いことがわかる。また、 D_3 が同一のNo.1, 4, 7, No.2, 5, 8, No.3, 6, 9のそれぞれの条件では、 D_2 が大きいほど放気口へ向かう流速が全体に速いことがわかる。以上のことから、 D_3 が小さく、あるいは D_2 が大きくなると、装置の中心軸上では放気口へ向かう流速が速くなることがわかる。一方、 D_3 が大きく、 D_2 が小さい条件では、流出口へ向かう流速が速くなることがわかる。特にNo.8, 9の条件では、放気口内でも U_z は正の値を示している。可視化実験で、これらの条件では集合した気泡が全て流出口方向に流出することが確認されており、放気口の入口付近から流出口まで U_z が正の値を示す条件では、気泡は放気口からではなく流出口から流出してしまうことがわかる。

5.3 スパイラル係数を用いた比較

以上のことから、装置の中心軸上の中心軸方向の流速変化を比較することで気泡の流出する方向をある程度予測することができる。しかしながら、気泡除去装置の内部では、中心軸方向の流れだけでなく、旋回方向の流れも気泡の挙動に大きく影響をおよぼす。したがって、中心軸方向と旋回方向の両方の流れを考慮することでさらに詳細に気泡の挙動を分析できると推察される。

そこで、旋回方向と中心軸方向の流速の比で表されたスパイラル係数という指標を導入し、中心軸方向の流れだけでなく旋回方向の流れが気泡の挙動におよぼす影響を考慮して気泡の集合の様子を分析する。スパイラル係数 S は、以下の式(2)で定義する。

$$S = \frac{U_z}{U_s} \quad (2)$$

ここで、 U_z は装置の中心軸方向の流速、 U_s は装置の旋回方向の流速を表している。本報では、装置の x - z 断面のスパイラル係数の分布を比較することで、装置内部の流れを分析する。旋回方向の流速 U_s は、接線方向の流速を意味し、装置断面のスパイラル係数を算出する際は、断面に垂直な流速となる。

Fig. 5に装置断面のスパイラル係数 S の分布を示す。白く塗りつぶされている範囲($S \geq 1$)と黒く塗りつぶされている範囲($S \leq -1$)は、それぞれ流出口に向かう流速と

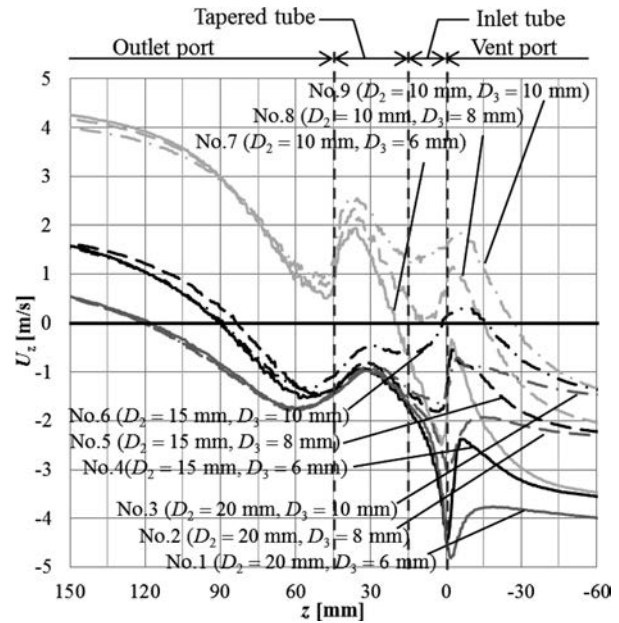


Fig. 4 Velocity component U_z on the z -axis in various diameters of the outlet port and vent port

放気口に向かう流速が旋回流速に対して速いことを表している。また、その他の範囲($-1 < S < 1$)は、旋回方向の流速が軸方向流速に対して速いことを表しており、 $S=0$ に近づくほど、相対的に中心軸方向の流速が遅くなり、旋回方向の流速が速くなる。 D_2 が同一のNo.1～3, No.4～6, No.7～9の各条件でスパイラル係数の分布を比較すると、 D_3 が大きくなるほど放気口内の軸方向流速に対して旋回流速が速くなることがわかる。 D_3 が同一のNo.1, 4, 7, No.2, 5, 8, No.3, 6, 9の各条件では、 D_2 が小さくなると、放気口内では軸方向流速に対して旋回流速が速くなるが、流出口内では軸方向流速に対して旋回流速が遅くなることがわかる。また、No.1～3 ($D_2=20$ mm)の条件のように、流出口内で軸方向流速に対して旋回流速が速い条件では、中心軸上で放気口に向かう流速が相対的に速く、No.7～9 ($D_2=10$ mm)の条件のように、放気口内で軸方向流速に対して旋回流速が速い条件では、中心軸上では流出口に向かう流速が相対的に速いことがわかる。可視化実験の結果と比較すると、気泡が合体しない条件では、流出口内で旋回流が維持されやすく、放気口内では中心軸方向の流れに遷移しやすい。また、テーパ管路部や流入管路部内で気泡が合体する条件では、放気口内で旋回流が維持されやすく、流出口内では中心軸方向の流れに遷移しやすい。

以上のことから、流出口と放気口内の旋回方向の流れと中心軸方向の流れを分析することで、気泡の集合の様子を評価できることが明らかになった。次節では、これらの関係を定量的に評価し、 D_2 と D_3 を選定する方法を検討する。

6. 流出口径と放気口径の選定

流出口と放気口内の旋回方向と中心軸方向の流れの影響

を考慮して D_2 と D_3 を選定するために、装置内部の油を剛体と仮定して放気口と流出口の管路内のスパイラル係数を計算した。スパイラル係数は式(2)で定義され、このときの放気口内のスパイラル係数 S_v と流出口内のスパイラル係数 S_o は、それぞれ以下の式(3)と式(4)で表される。

$$S_v = \frac{U_{zv}}{U_{sv}} \quad (3)$$

$$S_o = \frac{U_{zo}}{U_{so}} \quad (4)$$

ここで、 U_{zv} と U_{zo} は放気口と流出口の軸方向平均流速、 U_{sv} と U_{so} は装置内部の油を剛体と仮定したときの放気口と流出口内壁面上の周速度であり、流入口からの流入流速 U_{si} で剛体が回転するとすれば、 U_{sv} と U_{so} はそれぞれ以下の式

(5)、式(6)で表される。

$$U_{sv} = \frac{D_3}{D_1} U_{si} \quad (5)$$

$$U_{so} = \frac{D_2}{D_1} U_{si} \quad (6)$$

(3)～(6)式より、 S_v/S_o は以下の式(7)で表される。

$$\frac{S_v}{S_o} = \frac{D_2^3}{D_3^3} \cdot \frac{Q_v}{Q_o} \quad (7)$$

ここで、 Q_v は放気口から流出する流体の体積流量、 Q_o は放気口から流出する流体の体積流量である。スパイラル係数の比は、流出口と放気口の径の比と各ポートから流出する流体の体積流量の比の積で求められる。

Table 2に D_2 と D_3 を変更したときの流出口と放気口内のスパイラル係数 S_o と S_v 、また放気口と流出口のスパイラル係数の比 S_v/S_o を示す。Fig. 3の可視化実験の結果から考察すると、 S_o が大きく、 S_v が小さいほど、気泡は合体しやすい。しかし、これらの条件では、集合した気泡が流出口方向に移動しやすい。この二つのスパイラル係数を合わせて評価するために S_v/S_o で比較する。可視化実験において、気泡除去率 E_b が大幅に減少したNo. 8 ($D_2=10\text{mm}$, $D_3=8\text{mm}$)、No. 9 ($D_2=10\text{mm}$, $D_3=10\text{mm}$)の条件では、 S_v/S_o は0.59, 0.37と低い値を示した。一方、気柱の形成が確認されなかったNo. 1～3 ($D_2=20\text{mm}$)の条件、No. 4 ($D_2=15\text{mm}$, $D_3=6\text{mm}$)の条件では、 S_v/S_o は2.66以上の値を示した。Fig. 6にスパイラル係数の比 S_v/S_o と気泡除去率 E_b の関係を示す。なお、ここでは本報で実施した実験の結果だけでなく、 D_3 をさらに小さくした条件、流出口と放気口からの流出比を変更した条件の結果も示す。流出口と放気口からの流出比を変更したのは、式(7)からわかるように、流出口と放気口からの流体の流出比も S_v/S_o に影響を与えと考えられるためである。●は本報で実施したNo. 1～9の結果、△はその他の条件で実施した実験結果である。No. 1～9の条件だけでなく、それ以外の条件においても、 $S_v/S_o < 0.59$ の条件では E_b が大幅に低下すること、 $S_v/S_o > 2.66$ の条件では流入管路部とテーパ管路部内で気泡が合体しづらいたことが確認された。したがって、流入管路部とテーパ管路部内で気泡を合体させ、気泡を放気口から効率よく除去させる条件は $0.59 < S_v/S_o < 2.66$ の範囲に存在することがわかる。気泡を作動油から効率よく分離除去するには、気泡除去装置内で気泡を合体させて大きな気泡をつくること、また、集合させた気泡を可能な限り多く放気口から流出させる必要がある。すなわち、気泡除去装置の性能を向上させるには、 $0.59 < S_v/S_o < 2.66$ の範囲内の値を示すように D_2 と D_3 を選定することが望ましいと言える。

7. 結 言

本報では、気泡除去装置の流れの可視化実験を実施し、気泡の集合の様子と流量センサの値から算出される気泡除

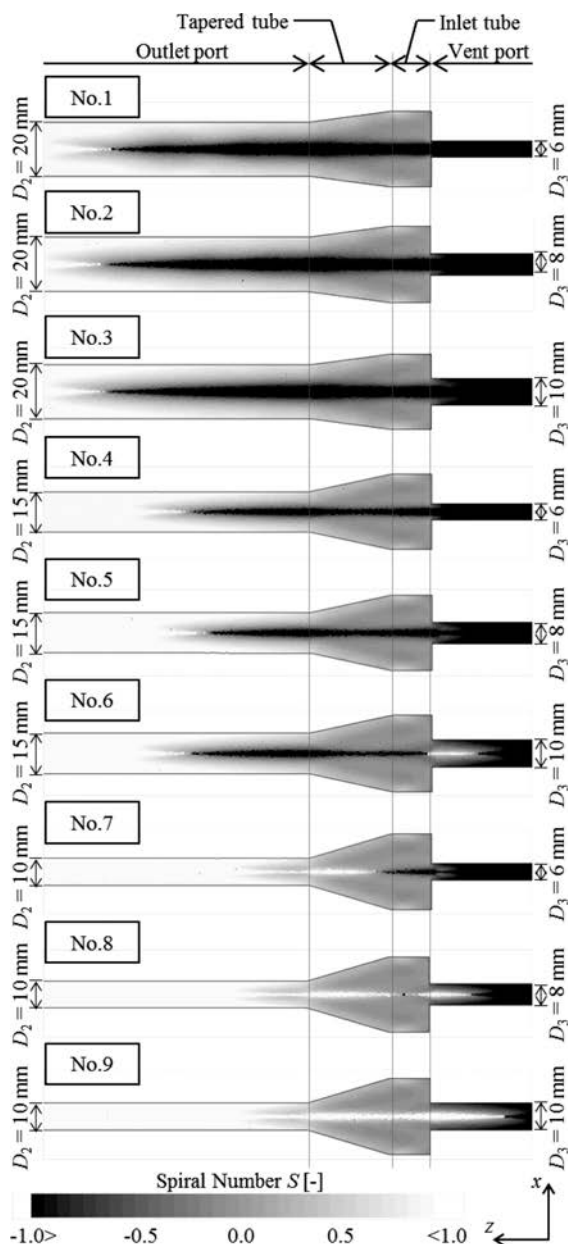


Fig. 5 Spiral number on cross-section view along the x-axis and z-axis

Table 2 Spiral number ratios in various diameters of the outlet and vent port

No.	D_2 [mm]	D_3 [mm]	S_o	S_v	S_v/S_o	E_B
1	20	6	0.12	1.43	11.71	0.51
2		8	0.12	0.62	5.13	0.58
3		10	0.12	0.32	2.66	0.49
4	15	6	0.30	1.27	4.24	0.54
5		8	0.29	0.61	2.11	0.65
6		10	0.29	0.32	1.12	0.59
7	10	6	1.01	1.25	1.24	0.48
8		8	0.98	0.59	0.59	0.25
9		10	0.94	0.35	0.37	0.21

去率を用いて装置の性能を実験的に評価した。また、流れの数値解析を実施し、旋回方向と中心軸方向の流れの関係を考慮したスパイラル係数という指標を用いて装置内部の流れの様子を分析した。これらの結果から、旋回方向と中心軸方向の流速の比を考慮することで気泡の集合の様子を予測できることを明らかにした。さらに、装置内部の油を剛体と仮定して流出口と放気口のそれぞれのスパイラル係数を算出し、この二つのスパイラル係数の比を用いることで、最適な流出口径と放気口径を選定することが可能になった。

本研究は、JSPS科研費25・9669と平成22～24年度戦略的基盤技術高度化支援事業「油圧動力伝達システムに使用する油中気泡除去技術」の一部として実施されたことを付記して、実験にご協力いただいた株式会社ティーエヌケーの田中信之氏、三科一男氏、タマティーエルオー株式会社の三宅隆氏をはじめ関係者に謝意を表す。なお、本研究の数値解析は法政大学情報メディア教育研究センターのソフトウェアを用いて実施された。

参 考 文 献

- 岡島健太, 鈴木遼, 川口清司, 渡辺大輔: 旋回流式マイクロバブル発生器における気泡微細化, 日本機械学会北信越支部第47期総会・講演会講演論文集, Vol. 47, No. 23, p. 23-24 (1999)
- 佐藤秀明, 青良治, 安味貞正: 精密ろ過膜による加工液のろ過: 第4報, 旋回流を用いた研削加工液のクロスフロー精密ろ過, 日本機械学会論文集, C編, Vol. 65, No. 637, p. 3845-3852 (1999)
- 杉崎一郎: 遠心分離による圧縮空気ラインの省エネルギー—スーパーサイクロンセパレータを用いた省エネルギーコスト削減の提言—, 油空圧技術, Vol. 50, No. 10, p. 37-41 (2011)

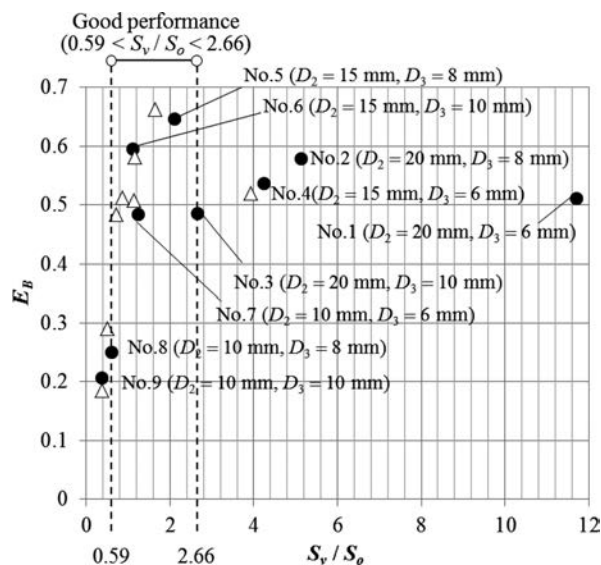


Fig. 6 Correlation of spiral number and rates of bubble removal

- 高浜平七郎, 横沢肇: ボルテックスチューブによるエネルギー分離とその研究動向, 日本機械学会誌, Vol. 84, No. 752, p. 651-656 (1981)
- Sakama, S., Goto, H., Suzuki, R., Tanaka, Y.: Change of Oil Properties with Bubble Elimination in Hydraulic Systems, Proc. 22nd International Conference on Hydraulics and Pneumatics, Prague, Czech Republic, p. 33-40 (2013)
- Backe, W., Lipphardt, P.: Influence of Dispersed Air on the Pressure Medium, Proc. IMechE, Vol. 97, No. 76, p. 77-84, (1976)
- 鈴木隆司, 横田真一: 旋回流利用による気泡除去 (第二報 テーパ形による性能向上), 油圧と空気圧, Vol. 25, No. 4, p. 543-548 (1994)
- Tanaka, Y., Sakama, S., Suzuki, R.: Bubble Elimination from Working Oil for Environmentally Friendly Hydraulic System Design, International Journal of Automation Technology, Vol. 6, No. 4, p. 488-493 (2012)
- Suzuki, R., Tanaka, Y., Goto, H.: Bubble Elimination from Hydraulic Fluids for Reduction of Environmental Burdens, Proc. of the twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'11, Vol. 2, p. 341-353 (2011)
- 坂間清子, 鈴木隆司, 田中豊: 気泡除去装置の設計と評価に関する研究 (第1報 放気口径の選定), 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol. 44, No. 2, p. 43-48 (2013)
- 平井秀一郎, 高城敏美, 松本全陽: 管内旋回流における層流化現象の予測, 日本機械学会論文集, B編, Vol. 52, No. 476, p. 1608-1616 (1986)

〒105
|
0011 東京都港区芝公園三丁目五―三二 電話(〇三)三四三三―八四四一 FAX(〇三)三四三三―八四四二
編集兼発行人 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇―一〇―三一―三三六九〇

東京都文京区小石川一―三―七
印刷所 勝美印刷株式会社