

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

May.2017 Vol.48 No.3

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「モデルベース開発と
その活用事例」

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「モデルベース開発とその活用事例」

【巻頭言】

「モデルベース開発とその活用事例」の発刊にあたって	塚越 秀行	118
---------------------------	-------	-----

【総論】

フルードパワーシステムとモデルベース開発	眞田 一志	119
----------------------	-------	-----

【解説】

自動車業界でのモデルベースデザイン適用事例	秋葉 博幸	124
油圧システムのモデリング	林 光昭	130
1DCAEの考え方に基づくモデルベース開発	大富 浩一	134
大学のフルードパワー研究・教育におけるデジタルコントローラの活用	佐藤 恭一	139
1DCAEによるフルードパワーシステム設計に関する研究委員会	桜井 康雄	142
コンバインのエンジン振動、騒音低減へのCAEモデルの適用	辻内 伸好, 明井 政博	145
HILS技術を用いた仮想走行試験手法の基礎研究	渡辺 信行	150

【会議報告】

山梨講演会2016におけるフルードパワー技術研究	吉田 和弘	153
ICMT2016会議報告	巖 祥仁	155

【トピックス】

建設機械における日・米・欧の排出ガス規制対応技術の変遷と今後	田村 好美	157
細径人工筋肉の研究と実用化	鈴森 康一	162
特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…特許文献を見る4	木原 和幸	166

【研究室紹介】

東北大学流体科学研究所 中野・田研究室 中野 政身 170

【企画行事】

平成28年度オータムセミナー開催報告
「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」 和田 重伸 174

【会告】

平成29年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー
「フルードパワーに役立つセンシング技術」 169
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催
平成29年春季フルードパワーシステム講演会 169
共催・協賛行事のお知らせ 178
その他 177, 180, 181, 182

■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 "Model Based Development and Its Examples of Utilization"

[Preface]

On the Special Issue "Model Based Development and Its Examples of Utilization"	Hideyuki TSUKAGOSHI	118
--	---------------------	-----

[Survey]

Fluid Power System and Model Base Development	Kazushi SANADA	119
---	----------------	-----

[Review]

Model-based Design in the Automotive Industry	Hiroyuki AKIBA	124
Modeling for Hydraulic Systems	Mitsuaki HAYASHI	130
Model Based Development by 1DCAE Concept	Koichi OHTOMI	134
Practical Use of Digital Controller in Academic Research and Education	Yasukazu SATO	139
Research Committee on Design of Fluid Power System by 1DCAE	Yasuo SAKURAI	142
Application of CAE Model to Combine Engine Vibration and Noise Reduction	Nobutaka TSUJIIUCHI, Masahiro AKEI	145
Fundamental Study of Virtual Running Test Environment for Railway Vehicle using HILS Technique	Nobuyuki WATANABE	150

[Conference Report]

Researches of Fluid Power Technologies in Yamanashi District Conference 2016	Kazuhiro YOSHIDA	153
Report on ICMT2016	EOM SangIn	155

[Topics]

History and Future Trend of Emission Reduction Technologies on Construction Machinery for Japan/USA/EU Emission Regulation	Yoshimi TAMURA	157
Development and Commercialization of Thin Artificial Muscles	Koichi SUZUMORI	162
Investigation of the Patent Documents/ Japan Platform for Patent Information —Patent Literature reference 4	Kazuyuki KIHARA	166

[Laboratory Tour]

Nakano & Tian Laboratory, Institute of Fluid Science, Tohoku University	Masami NAKANO	170
---	---------------	-----

[JFPS Activities]

Autumn Seminar 2016	Shigenobu WADA	174
---------------------	----------------	-----

[JFPS News]

169, 177, 178, 180, 181, 182

巻頭言

特集「モデルベース開発とその活用事例」の
発行にあたって

著者紹介



つか 越 秀 行

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

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

数ある製造業のなかでとりわけ熾烈な国際競争を繰り広げてきた自動車産業において、大きな変革をもたらす製品開発手法として「モデルベース開発(MBD)」が注目を浴びている。

MBDは実機試作を極力行わず、実験からの統計データや物理現象などを記述する数式などの「モデル」をもとに、バーチャルな試作により製品開発を行う手法である。設計・試作・実験・改良を繰り返す従来型の非効率的な開発プロセスとは異なり、MBDでは試作前の段階で無数のアイデアを机上で簡便に比較検討できる。このため、設計の最適解をスピーディーに見つけ出すことが可能な夢の開発プロセスといわれている。

従来の自動車の設計は、車両全体・エンジン・トランスミッション、さらにそれらを構成するコンポーネントというように、上流から下流へ階層的に分化されながら進められ、その試作評価は逆順に遡って行われてきた。各試作の過程で検証や改良は行われるものの、車両全体の検証が行われるのは試作の最終段階である。それゆえ、もしこの最終段階で問題が発覚すると、初めから設計・試作の工程がやり直されるというプロセスをたどり、1つの開発プロジェクトに5年から6年もの期間とそれに応じた人員やコストが費やされてきた。

これに対して、MBDでは設計段階からバーチャルな試作を行い、あらゆる選択肢のなかから本当に品質のよい設計パラメータを採用しながら開発を進められるため、短期間に効率よく開発を行うことが

可能となる。そして今、このような開発手法が、自動車産業以外の様々な分野に適用されつつある。

そこで本特集号では、「モデルベース開発とその活用事例」と題し、MBDの適用事例に関する最新情報を紹介する。MBDをフルードパワーシステムや様々な機械システムに巧みに適用されている研究者・技術者にその斬新な発想をご紹介いただいたうえで、MBDの新たな可能性を探求することが本特集号の目的である。

真田一志氏（横浜国大）には、総論としてモデルベース開発の概念を概説していただいたうえで、フルードパワーシステムにおけるその適用事例をご紹介していただく。秋葉博幸氏（MathWroksJapan）には、自動車業界で適用されてきたモデルベース開発の適用事例をご紹介いただく。林光昭氏（株式会社IHI）には、油圧シミュレーションのモデルを構築するうえで必要となる油圧の基礎的事項をまとめて解説していただく。大富浩一氏（東大）には、製品開発の上流段階で全体適正設計を可能とする1DCAEの考え方を解説いただくとともに、宇宙機器開発への適用事例をご紹介していただく。佐藤恭一氏（横浜国大）には、大学の教育・研究で実践されてきたデジタル・コントローラを活用したモデルベース開発をご紹介していただく。桜井康雄氏（足利工業大）には、平成28年4月に設置された「1DCAEによるフルードパワーシステム設計に関する研究委員会」の設立趣旨とその活動内容をご紹介していただく。辻内伸好氏（同志社大）と明井政博氏（ヤンマー株式会社）には、農業機械の乗心地性能向上のためのシステム設計に適用されたモデルベース開発を解説していただく。そして、渡辺信行氏（鉄道総研）には、HILS技術を用いた鉄道車両の仮想走行試験手法をご紹介していただく。

末筆ながら、ご多忙のなかご寄稿いただいた執筆者のみなさまに厚く御礼申し上げる。本特集号が、モデルベース開発とその活用事例に関する最新情報の提供に資すれば、望外の喜びである。

（原稿受付：2017年4月20日）

総論

フルードパワーシステムとモデルベース開発

著者紹介



さなだ かずし
真田 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: sanada-kazushi-sn@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。博士（工学）。

1. はじめに

「モデルベース開発」は、制御システムの効率的な開発手法として知られており、図1に示すVプロセスでその開発段階が説明されている。機械を電子制御するとき、機械と制御プログラムが統合されて、はじめて機能が発揮される。通常、機械と制御プログラムは別々に開発され、後工程で組み合わせて機能が確認（検証）されることになる。Vプロセスでは、開発初期の仕様設計の段階からモデルを用いた解析技術を導入し、ECUへの実装と検証から適合へと、一連の開発段階を経ることが推奨されている。その各段階で、プラントのモデル（シミュレーションモデル）を利用して、開発技術の確認と検証を段階的に進めることで、別々に開発されている機械と制御プログラムの統合を円滑に行うことを目的としている。

Vプロセスの左側の開発プロセスは、仕様設計から開始される。これから開発する機械に求められる要求事項を精査し、仕様として整理する。次に、仕様に基づいてコンポーネントとシステムの設計が進められる。左側の最下段では、要求仕様にもとづいて設計された制御プログラムをECUに実装する。そこで利用されるツールは、ブロック線図をもとにしたシミュレーションソフトウェアであり、コントローラのブロック線図をソフトウェアのウィンドウ画面で作成し、メニューのダウンロード機能を起動すれば、マウスのクリックひとつで制御プログラムがターゲットのECUにダウンロードされ、即座に実

行可能な状況まで到達することができる。このまま、制御プログラムのテストを行う場合もあるが、制御プログラムの効率向上を目指して、制御ブロック線図の改良や、ダウンロードされる制御プログラムのソースコードに改良を加える場合もある。

Vプロセスの右側は、そのECU実装からスタートして、実物を対象とした検証と適合のプロセスへと続いている。「実装検証」は、ECUに制御プログラムが正しく実装されているかを検証する。その後の「適合」が重要なプロセスとして位置づけられており、制御パラメータの合わせ込みが行われる。特に、機械の非線形性を補償するためマップを利用する場合、マップの各要素の調整を行う必要があり、膨大な工数が見込まれるプロセスである。

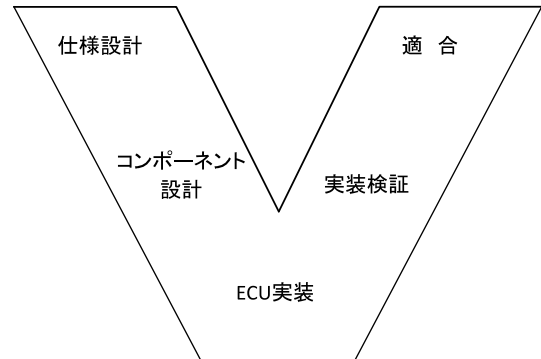


図1 モデルベース開発のVプロセス

Vプロセスで表わされるモデルベース開発では、機械の実物がまだ存在しない初期の仕様設計の段階から、機械の動作を模擬するシミュレーションモデルを開発して、各設計プロセスを進めていくことが特徴である。設計の段階が進むにつれて、機械の動作を模擬するシミュレーションモデルも複雑に、そして実物の機械の挙動をより高度に再現できるモデルへと進化する。

モデルベース開発は、自動車開発で広く利用されてきた。さらに、最近では、建設機械や産業用機械でもモデルベース開発が利用されるようになり、急速に利用範囲が広がっている。モデルベース開発では、モデリング技術と制御技術は必須の技術である。

特に、対象となる機械をより深く理解することは、より良いモデルを開発するためには欠くことのできない必須の要件である。制御対象、制御工学とモデリングの相互の関係を三角形で表わした図を、図2に示す。モデリングにより、システムの静特性と動特性を明らかにし、最適化を行うことができる。例えば、作業機械の一種のフォアワダの車両全体モデルを、油圧回路とマルチボディダイナミックスを考慮して作成し、コ・シミュレーションを実施した研究¹⁾が報告されている。また、機械構造物、油圧システムと制御を統合した連成シミュレーションを行い、制御システムを最適化する研究²⁾や、高速シミュレーションを活用することでシミュレーションだけでなくテストにも利用した研究³⁾や、システムの内部における流れの詳細をCFDにより解析する研究⁴⁾が報告されている。フルードパワーシステムの制御には、線形制御や非線形制御がある。本稿では、フルードパワーシステムのモデリングと制御に関する研究論文をレビューする。

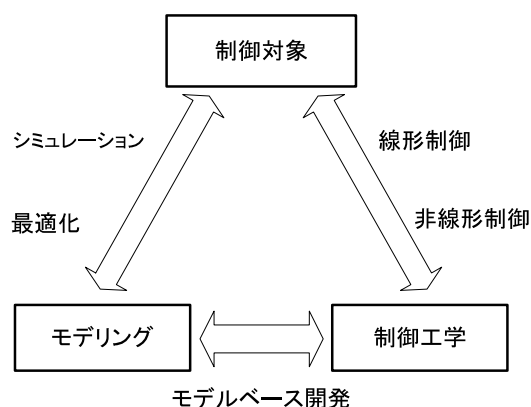


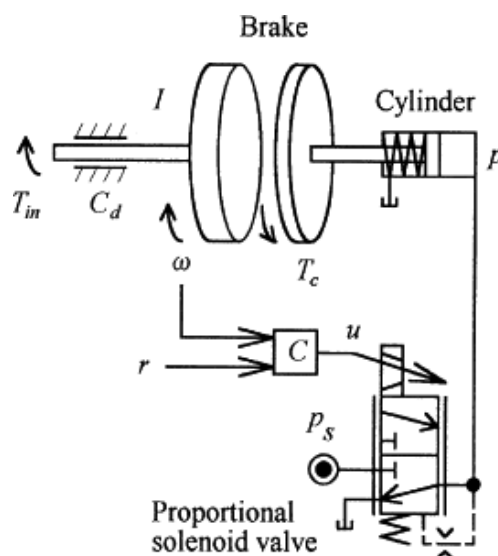
図2 モデリングと制御工学の三角形

2. フルードパワーシステムの制御

2.1 自動変速機

自動変速機のブレーキやクラッチの操作に、油圧バルブや油圧アクチュエータが利用されている。ブレーキやクラッチの摩擦係数は、滑り速度、温度やその他の要因により、ばらつきを示す。シリンダに油圧を供給する比例減圧弁の動特性は、動作圧に依存する。クラッチ油圧をシーケンスによりパターンとして与える場合、変速時間に大きなばらつきが生じる。そこで、ロバスト制御理論を適用して、各種の不確かな要因をノミナルモデルのモデル誤差として定量的に評価し、 μ シンセシスによって変速制御系を構成する方法が提案されている⁵⁾。制御対象である自動変速機を含む駆動系を実時間でシミュレーションし、設計したコントローラの検証を行った。

本研究を契機として、自動変速機の非線形制御の国際共同研究^{6)~8)}が実施された。

図3 自動変速機のロバスト変速制御⁵⁾

2.2 水圧駆動樹脂封止プレス

水圧駆動樹脂封止プレスは、直径12インチのウェハ上に薄い樹脂皮膜をプレスで成形する半導体製造装置のひとつである。ウェハと同じ直径のラムシリンダでプレスすれば、パスカルの原理によって一様な荷重分布を得ることができ、皮膜の成形にとって大きなメリットとなる。樹脂封止プレスはクリーンルームで使用されることから、清浄度を重視して、油圧作動油の代わりに水道水を作動流体として使用する水圧駆動が採用された。金型の荷重制御においては、はじめは流動性の高い樹脂が、プレスすることで固化し、弾性係数が時間とともに大きくなる。荷重制御にとっては、負荷のばね定数が時間とともに変化することに相当し、弾性係数の変動を考慮したロバスト制御が導入され、水圧駆動樹脂封止プレス（図4）が開発された⁹⁾。

図4 水圧駆動樹脂封止プレス⁹⁾

3. フルードパワーシステムのモデリング

3.1 コモンレール燃料噴射装置

コモンレール燃料噴射装置は、図5に示すように、パイプ状のコモンレール容器に燃料ポンプによって高圧に加圧された燃料を蓄積し、電子制御された噴射弁から燃料を噴射する装置である。一つの気筒の噴射弁から燃料が噴射されると、その噴射弁の元圧が減少し、圧力低下波がコモンレールを介して次に噴射する燃料噴射弁の元圧を変動させる。その結果、燃料噴射率の制御精度を劣化させることになり、マップを利用した各種の補償のための制御手法が開発されてきた。そのマップは、開発段階で多くの工数を費やして作成しなければならず、エンジン制御の高度化にともなってマップ作成の負担が課題となっている。マップの代わりに、シミュレーションモデルを利用することができれば、多様な条件下で、要求された燃料噴射の制御精度を補償する制御プログラムを比較的少ない工数で実現できると期待された。シミュレーションモデルで課題となるのはコモンレールを伝播する圧力波の伝播を再現する数学モデルであり、管路動特性の最適化有限要素モデルが適用された¹⁰⁾。

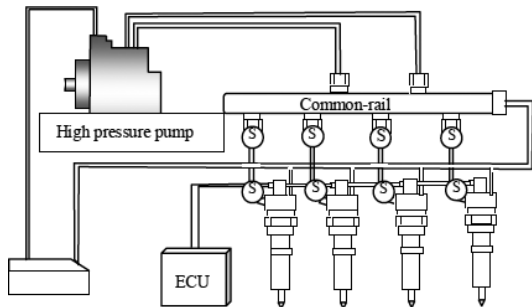


図5 コモンレール燃料噴射装置¹⁰⁾

3.2 船舶用燃料噴射装置

大形タンカーは巨大なエンジンを搭載しており、燃料噴射装置も大形になる。エンジン出力軸の回転運動をカムとリンク機構を介してプランジャーポンプを押下し、燃料を加圧して燃料噴射弁を開き、燃料を噴射する。これは、機械式の燃料噴射装置である。最近、船舶の排ガス規制が厳格化されたため、燃料噴射の電子制御化が進められている。そのひとつの方法がコモンレール燃料噴射装置であるが、高圧の燃料を蓄積するコモンレール自体が大形化し、また圧力伝播の影響を補償する必要があるなどの技術的課題がある。そこで、著者らは、図6に示すDDVC方式燃料噴射装置¹¹⁾を考案し、実験およびシミュレーションによる研究を行った。DDVC方式燃

料噴射装置は、固定容量形油圧ポンプをACサーボモータで駆動し、油圧シリンダを駆動する。燃料ポンプを油圧シリンダで押下するタイミングと押下量を、ACサーボモータへの印可電圧で制御することができる。燃料噴射量は、その実験結果を図7に示すように、ACサーボモータ印可電圧のパラメータによって制御可能であり、DDVC方式燃料噴射装置が電子制御に適した装置であることがわかる。DDVC燃料噴射装置を適用したエンジンの出力軸の回転数制御と、船舶の航行速度制御への適用可能性をシミュレーションにより示している。

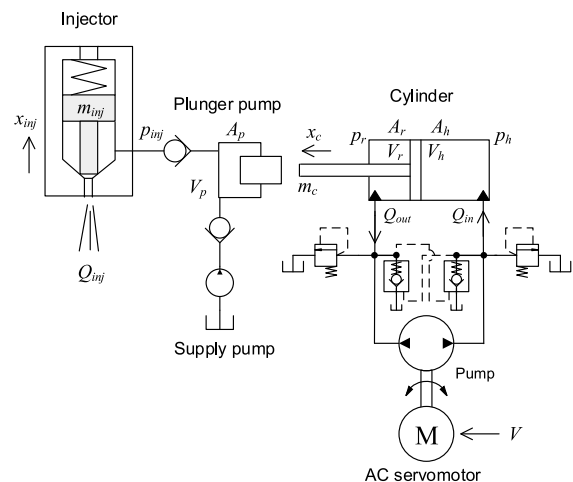


図6 DDVC燃料噴射装置¹¹⁾

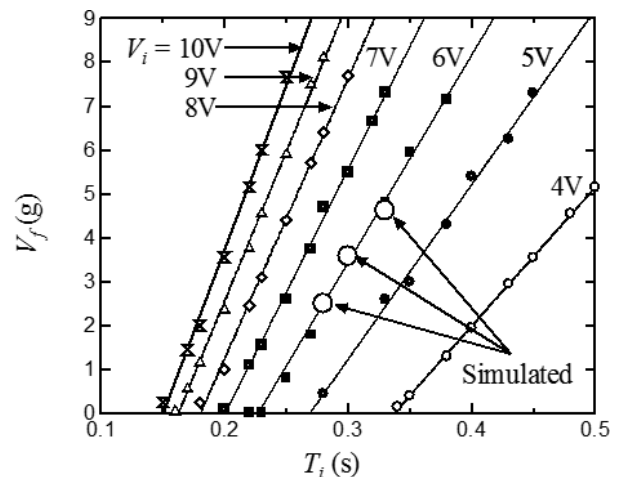


図7 燃料噴射量制御の実験結果¹¹⁾

3.3 シリンダクッション

モデリング技術は、フルードパワーシステムの最適設計に適用することができる。建設機械のシリンダクッションの最適化¹²⁾にモデリング技術が適用された。油圧ショベルのアームシリンダには、ストロークエンドでピストンを減速するクッション機構が組み込まれている。クッションにはさまざまな機構があるが、ここでは、図8に示すプランジャー

クッションが取り上げられた。ピストンに取り付けられたプランジャーが、シリンダカバーに穿たれた穴に挿入されることで、油路が絞られ、クッション圧力が生じ、ピストンが減速される仕組みである。その際、プランジャーと穴の隙間がクッション圧に影響するため、プランジャー直径の設計が、クッションの効果にとって重要な要因となる。アームシリンダとプランジャークッションを考慮したシミュレーションモデルを構築して、減速時のピストン速度の目標波形とモデルのピストン速度の誤差面積を評価量として最小化するように、プランジャー直径を最適化する手法¹²⁾が提案されている。プランジャーは、図8に示すように、軸方向に10分割され、各区間の直径が定義されている。目標速度との誤差が最小になるように、プランジャー直径の分布を自動的に調整し、プランジャーの最適化を実施した。

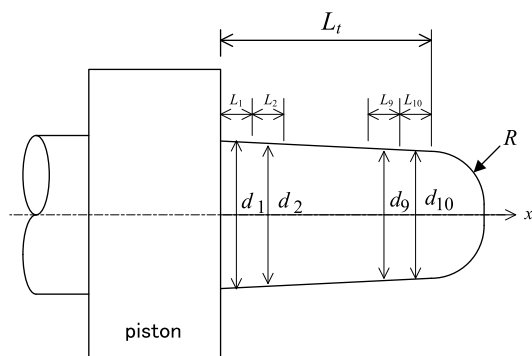


図8 クッションプランジャーの最適化¹²⁾

3.4 ポンプインペラー

要素機器の内部流れを3次元解析することで、より詳細な情報を得ることができる。一例として、ポンプインペラーの流れ解析¹³⁾を紹介する。油圧ポンプの吸い込み圧を加圧する方法のひとつに、インペラーがある。吸込み口にインペラーを取り付け、ポンプの回転でインペラーを回すことで、吸い込み圧を加圧する機構である。インペラー周囲の流れを調整して渦損失によるエネルギー消費を避けるため、CFD解析を行った。CFDの解析モデルを、図9に示す。流れ解析により流線を求めれば、渦の有無を可視化することができる。流線を見ながら流路形状を調整して渦の発生を抑えることで、消費動力を削減することができる。

4. おわりに

モデルベース開発で重要な役割を果たすモデリング技術と制御技術は、洗練されたシミュレーションソフトウェア、制御系開発ソフトとコンピュータの発展により、急速に進歩している。本稿では、モデ

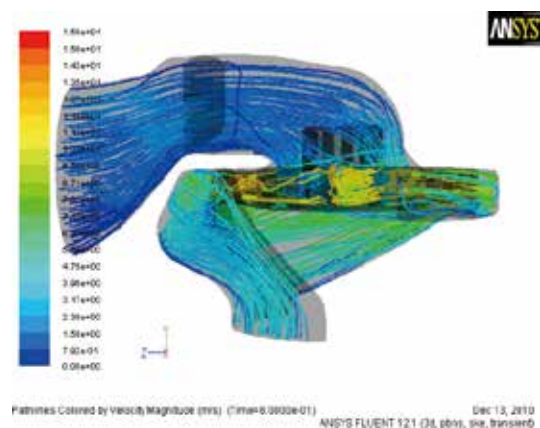


図9 油圧ポンプのインペラー周囲のCFD解析¹³⁾

リング技術、制御技術とフルードパワーシステムの関係について、研究事例を交えながら述べてきた。本稿が、モデルベース開発についての紹介となれば、著者の望外の喜びである。

参考文献

- 1) Braun, R., Ericson, L., Krus, P. : Full vehicle simulation of forwarder with semi-active suspension using co-simulation, Proceedings of the ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2015-9588 (2015)
- 2) Schulze, T., Weber, J., Großmann, K., Penter, L., Schenke, C. : Hydraulic die cushions in deep drawing press-analysis and optimization using coupled simulation, Proceedings of the ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2015-9623 (2015)
- 3) Pettersson, K., Larsson, L. V., Larsson, K. V., Krus, P. : Simulation aided design and testing of hydromechanical transmissions, Proceedings of the 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, 2C2-1 (2014)
- 4) Takahashi, M., Nomura, R., Aoki, M., Okahashi, T. : Unsteady CFD simulation of pure-tone noise generated by a hydraulic relief valve, Proceedings of the 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, 3A2-1 (2014)
- 5) Sanada, K. and Kitagawa, A. : A study of two-degree-of-freedom control of rotating speed in an automatic transmission, considering modeling errors of a hydraulic system, Control Engineering Practice, Volume 6, Issue 9, pp. 1125-1132 (1998)
- 6) Gao, B., Chen, H., Sanada, K., Hu, Y. : Design of clutch slip controller for automatic transmission using backstepping, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume 16, Issue 3, p. 498-508 (2011)
- 7) Gao, B., Chen, H., Tian, L., Sanada, K. : A nonlinear clutch pressure observer for automatic transmission : considering drive-shaft compliance, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.134, No.1, 011018 (8 pages) (2012)
- 8) Gao, B., Chen, H., Ma, Y., Sanada, K. : Design of nonlinear shaft torque observer for trucks with Automated Manual Transmission, Mechatronics, 21,

- pp. 1034–1042 (2011)
- 9) Sanada, K. : A method of designing a robust force controller of a water-hydraulic servo system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 216, No. 2, pp. 135–141 (2002)
 - 10) Akiyama, H., Yuasa, H., Kato, A., Saiki, T., Sanada, K., Kado, N. : Precise fuel control of diesel common-rail system by using OFEM, SAE Technical Paper, 2010–01–0876 (2010)
 - 11) Sanada, K., Miyazaki, T. : Application of DDVC Fuel Injection System to Ship Speed Control, Proceedings of Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2016–1760 (2016)
 - 12) Sanada, K., Huang, R. : A study of a simulation model of a cylinder cushion for construction machinery, Transactions of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 40, No.2, pp. 22–29 (2009)
 - 13) Sanada, K., Yamaguchi, N. : CFD analysis of inlet flow around an impeller of an oil-hydraulic pump, Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power Okinawa, pp. 188–195 (2011)
- (原稿受付：2017年1月28日)

解説

自動車業界でのモデルベースデザイン適用事例

著者紹介

あきばひろゆき
秋葉博幸MathWorks Japan
〒107-0052 東京都港区赤坂4-15-1
赤坂ガーデンシティ 7F
E-mail: Hiroyuki.Akiba@mathworks.com

1995年に日本電気株式会社（NEC）に入社し通信インフラのシステム構築・ソフトウェア開発を担当、その後2000年より株式会社本田技術研究所にて四輪車・二輪車のパワートレイン制御システム開発に従事、2015年にMathWorks入社、現在に至る。

1. はじめに

現在の乗用車にどれほどの制御システムが搭載されているかご存知だろうか？

小型車でも50個、高級車になると200個を超えとも言われている。代表的なものは以下の通りである。

パワートレイン制御：

エンジン・トランスミッション・走行用モーター／発電機・バッテリーなど

シャーシ制御：

ESC（Electric Stability Control：車両挙動安定化制御システム）やABS（Anti-lock Brake System：車輪ロック抑止制御システム）、EPS（Electric Power Steering：電気式パワーステアリング）など

ボディエレクトロニクス：

ワイパーやパワーウィンドウ、エアコン、電動スライドドア／バックドア、メーターなど

安全・便利：

エアバッグ、自動パーキングシステム、クルーズコントロール（定車速制御システム）、ADAS（Advanced Driver Assistance System：先進運転支援システム）など

上記のものはあくまで代表的なものであり更に多くのものが存在している。車の至る所に制御システムが存在していることをおわかりいただけたと思う。本章では、自動車業界での制御システム開発におけ

るモデルベースデザインの適用事例を紹介する。

2. 背景と課題

車両にはすでに多くの制御システムが搭載されており、今後自動運転を実現するに当たっては更に多くの制御システムが搭載される事が見込まれる。

また、それぞれの制御システムにおいては、システムの性能を向上させるため、新たにセンサやアクチュエータを追加する、あるいは制御アルゴリズムを改良するなど、より制御が複雑化し開発するソフトウェアが増大する傾向にある。

更には、グローバルに展開する車両が多く開発されるようになることで、販売地域ごとに異なる多くの仕様を設定しなければならなくなっている。これにはシステムを構成する制御仕様の組み合わせを変更する、あるいは設定パラメータを変更することが必要となる。多くの組合せを用意し、それぞれの組合せに対して動作が正しく行われることを検証しなければならないため、非常に多くの開発工数が必要となっている。

品質や安全性の担保もまた当然ながら必須であり、特に安全性については機能安全規格ISO26262が制定され、これに準拠する事が求められている。

また、同時により一層の開発期間の短縮やコストの低減も求められている。

以上の内容をまとめると、制御システムの開発には課題が山積していることがわかる。

- ・制御システムの増加
- ・制御アルゴリズムの複雑化
- ・ソフトウェア開発規模の増大
- ・コスト削減・開発期間の短縮
- ・安全性の担保—機能安全規格への対応

これらの中には相反する要求も存在している。これらの課題に対応するために導入・適用が進んでいるのがモデルベースデザインの技術である。

3. モデルベースデザインの適用

3.1 モデルベースデザインとは

「構想・設計・試作・検証といった開発プロセスを

モデル&シミュレーションに基づき実施する設計・開発手法」をモデルベースデザインと呼んでいる。

自動車メーカーでのパワートレイン制御システム開発での適用に端を発し、現在では非常に多くの制御システムの開発において適用されている。また、これらのシステムを納入、あるいはECU (Electric Control Unit) を納入するサプライヤにおいても、自動車メーカーからの要請に基づき適用が進んでいる状況である。また、ISO26262への対応もモデルベースデザインの適用を推進する原動力となっている。

3.2 ワークフロー

一般的な制御システムの開発のワークフローと各フェーズにおいて適用されるモデルベースデザインの要素技術を以下に示す。

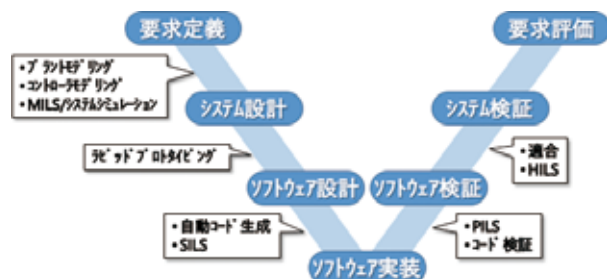


図1 モデルベースデザインワークフローと要素技術

ワークフローについては各社で異なる場合が多いことから、以降の章では図1で定義された各フェーズで適用される要素技術について具体的な説明をしたい。

3.3 要求定義

制御対象を分析して、制御システムが持つべき機能や動作の内容を要求として定義する。ここでの要求定義に基づき下流工程の設計や検証方法が決まることから、非常に重要な作業と言える。

制御システムの動作を表現するための手法として、OMG (Object Management Group) が定義している

- ・UML Unified Modeling Language
- ・SysML Systems Modeling Language

といったモデリング手法が用いられることが多い。

3.4 モデリング

制御システムの設計を行うにあたっては、要求定義に基づいて適切な動作を行うコントローラの設計が必要だが、その動作が正しいかどうかを確認するためにモデルとシミュレーションが必要となる。

シミュレーションを行うには、制御を行うコントローラのモデルと制御対象であるプラントのモデルが必要となる。両方のモデルがあってはじめてシミュレーションが行えるのである。

ただし、アルゴリズム単体の確からしさだけを確

認したいのであれば、コントローラモデル単体でシミュレーションし確認を行う事も可能である。この場合は、制御システム全体としてのモデル・シミュレーションを使用した検証はできないのは言うまでもなく、モデルベースデザイン適用のメリットは非常に限定的である。

3.4.1 コントローラモデリング

モデルベースデザインを適用しコントローラをモデル化することにより「動く仕様書」を作成することが可能となる。モデルを作成するに際しては「ブロック線図」や「状態遷移図」を用いて、必要なアルゴリズムを実装する。

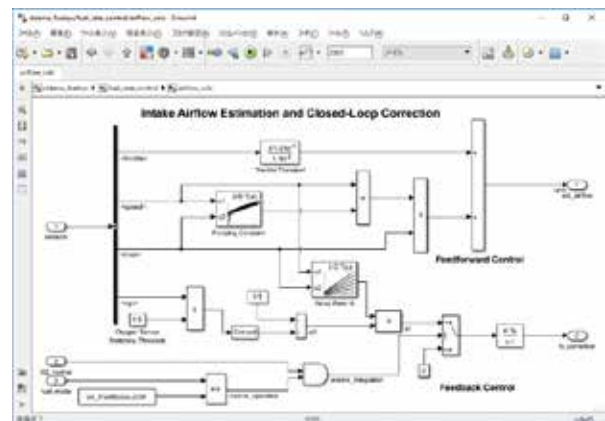


図2 ブロック線図の一例

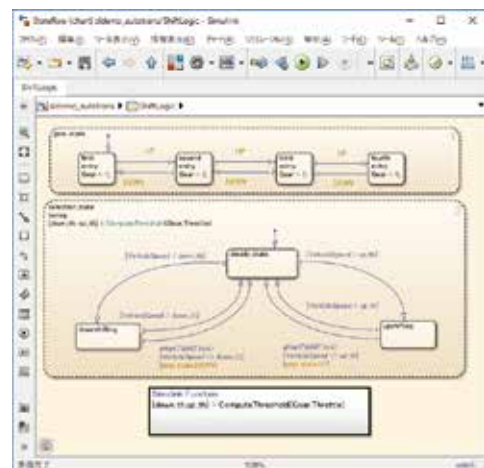


図3 状態遷移図の一例

これらモデリングの作業は「Simulink®」「Stateflow®」を用いて行われていることが多い。

アルゴリズムはPID制御にはじまり、現代制御やモデル予測制御など幅広い制御技術が適用されている。

昨今はより高度な技術を用いた高性能なコントローラが求められる場合が多く、モデルベースデザイン適用の重要性・必要性が更に高まっている。

作成したコントローラモデルは、次項で説明する

プラントモデルと組み合わせてシミュレーションし適切な動作が行われているかを確認する。

また、検証技術を用いて不具合のないコントローラとなっているかについても確認を行う。

3.4.2 プラントモデリング

先に述べた通り、モデルベースデザインを適用するにあたり、コントローラモデルと共に重要であるのが制御対象をモデル化した「プラントモデル」である。

プラントモデルを作成するに当たっては、以下の3つの手法が用いられる。

- ・ホワイトボックスモデリング
- ・ブラックボックスモデリング
- ・グレーボックスモデリング

以下に各手法の概略を述べる。

ホワイトボックスモデリング

物理原理・法則に基づいて数式化することでモデリングする手法。運動方程式や回路方程式、エネルギー保存則などを用いて数式化する。

ブラックボックスモデリング

モデル化対象の入力と出力のみに着目し、統計的な手法でモデリングする手法。システム同定とも呼ばれる。

グレーボックスモデリング

ホワイトボックスモデリングとブラックボックスモデリングを組み合わせたモデリング手法。部分的に物理原理・法則を用い、統計的手法で補完する。現実的な手法であり、多く用いられている。

プラントモデルの作成に当たっては実際の制御対象とプラントモデルとの同一性を問われる場合が多い。厳密に一致させるためには非常に詳細なモデルとなるため、一般的にシミュレーション時間を要する。制御システム開発において必要なプラントモデルの詳細度やシミュレーション時間を考慮したモデリングが重要である。

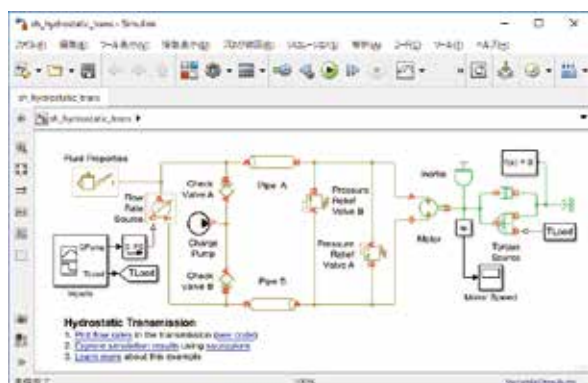


図4 プラントモデリングツールの一例

流体系のプラントモデルを構成する場合、流体系だけでなく機械的要素、電氣的要素、熱などの多くのドメインが関係するため、それぞれをモデルとして表現し統合して、制御系を構成するシステム全体でシミュレーションできることが必要であり、重要である。

3.5 システムシミュレーション

プラントモデルとコントローラモデルが準備できるとそれらを結合してシステム全体のシミュレーションが可能となる。このような状況でぜひ活用して貰いたいのが「システムシミュレーション」である。

自動車メーカーは、ワークフロー上のより上流の設計に注力しようとしており、システムの性能を定義・評価するプロセスであるシステムシミュレーションも注力ポイントの一つである。

定義された要求にマッチする制御システムとするため、システムシミュレーションを活用し、制御アルゴリズム見直しやパラメータ変更をしながら繰り返しシミュレーションを行うことで機能や性能の絞り込みや作り込みが行われており、これがシステムを開発する上で非常に重要となっている。定量的な要求（たとえば燃費10%改善）があれば、評価関数を用いて最適化シミュレーションを行うことで最適値を求めることができ、どの部分に着目して設計すべきかを把握する事も可能となる。これは、コントローラだけでなく、プラント、場合によってはセンサやアクチュエータの特性なども含めて最適解を求めることも行われる。

たとえば、ホイールローダでの目標性能達成可否をシミュレーションで見積もる場合を考える。

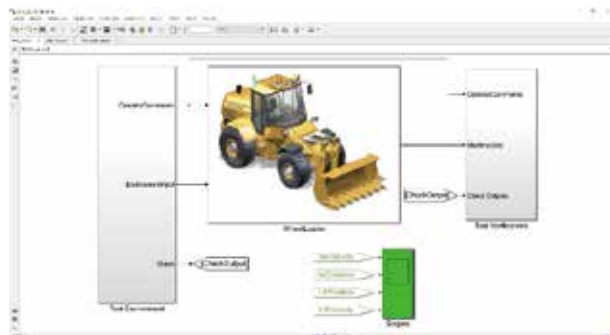


図5 システムシミュレーション用モデル

まずは、コントローラとプラントを組み合わせたシステム全体のシミュレーション用モデルを準備する。

「Simcape™」, 「Simcape Fluids™」といったプラントモデリングツールを利用すると図6のように、流体系だけでなく機械・電気・熱など複数のドメインにまたがった可読性の高いモデリングが可能とな

り、Simulinkとの連携によりシームレスに制御設計・シミュレーションを簡便に実施することが可能となる。

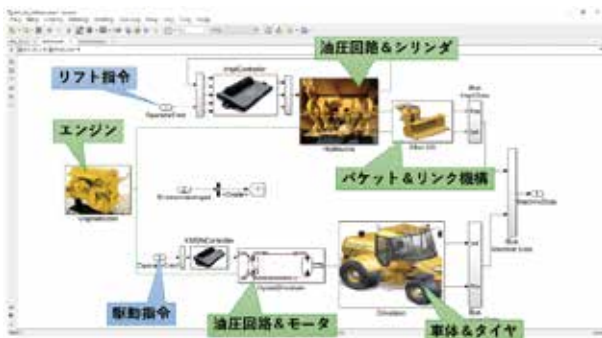


図6 ホイールローダーモデル

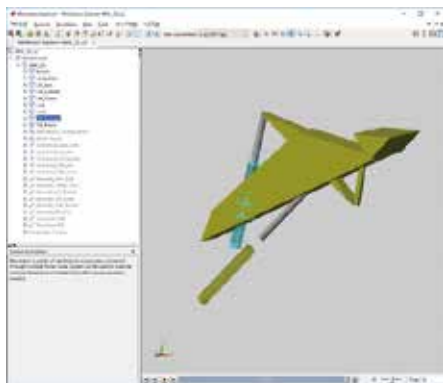


図7 バケット部の作動シミュレーション

複数のドメインを組み合わせたシステム全体でシミュレーションを行い、最終的な挙動を確認して、要求に見合ったシステムであるかどうかを確認する。結果として

- ✓ 実機・試作機作成前の仕様検討
- ✓ 新規開発制御ロジックのコンセプト検討
- ✓ メカ・エレ・制御並行開発で全体最適化

が可能となるのである。

システムシミュレーションを行うことで、より良いシステムをより短期間で設計することが可能となるのである。モデルベースデザインの利点の一つである。

3.6 ラピッドプロトタイピング

設計したコントローラモデルを机上で確認した後、すぐに実際の制御対象と組み合わせてテストを行いたくなるものである。

この作業がラピッドプロトタイピングである。

モデルからの自動コード生成の技術により、コントローラモデルからC言語のコードを生成し、コンパイルして実行ファイルを生成した後、ラピッドプロトタイピング用の専用ハードウェアを用いて実際

の制御対象と制御システムを構成し、テストを行うものである。ラピッドプロトタイピングを行うフェーズでECUのハードウェアが準備されていればそれを使うが、一般的にはこのフェーズでは用意が間に合わない場合が多いため、市販のラピッドプロトタイピング用のハードウェアを用いる場合が多い。

3.7 自動コード生成

ここで述べるコード生成の対象は製品化するに際して使用するコントローラ用ハードウェアであるECUに実装する組み込み用のC言語のコードである。ROMやRAMの使用量、実行効率に配慮したコードをツールにより自動的に生成させる。

自動車業界では、AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture) というECU内のソフトウェアアーキテクチャ規格の適用が最近増えている。生成したコードをAUTOSARプラットフォームのECUに実装するものである。理由は開発の効率化やECUサプライヤを広く選択出来ることなどが挙げられる。モデルベースデザインとは異なる技術であるが、モデルベースデザインと共に効率的な開発を主眼に適用されるケースが多く見られる。

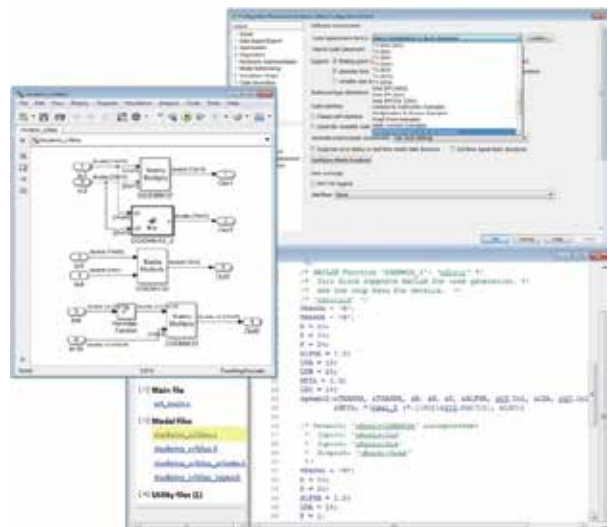


図8 自動コード生成の一例

3.8 シミュレーション手法

シミュレーションを実行するコントローラモデルとプラントモデル、およびそれを実行する環境により、以下の4つのシミュレーション手法がある。

- MILS : Model In-the-Loop Simulation
- SILS : Software In-the-Loop Simulation
- PILS : Processor In-the-Loop Simulation
- HILS : Hardware In-the-Loop Simulation

3.8.1 MILS

PC上で行うシミュレーションである。

コントローラとプラントのいずれもモデルを用い

たシミュレーションの手法である。

3.8.2 SILS

PC上で行うシミュレーションである。

MILSに対して、プラントは同一のモデルを使用するが、コントローラはモデルから自動生成したECU組み込み用のC言語のコードを用いたシミュレーションの手法である。MILSでのシミュレーション結果と比較し、同等の動作であることを中心に確認を行う。

3.8.3 PILS

PCとCPUを用いたシミュレーションである。ECUに実装する前にCPU単体でコントローラを動作させ、確認するシミュレーション手法である。

SILSに対して、プラントは同一のモデルを使用するが、コントローラはSILSで用いたC言語のコードを使用するCPUに応じたコンパイラでコンパイルし実行可能なバイナリファイルを準備する。これをターゲットのCPUに書き込み、PCと接続してPC上でプラントモデルを動作させ、CPU側でコントローラを動作させて処理ステップを同期させながらシミュレーションを行う。

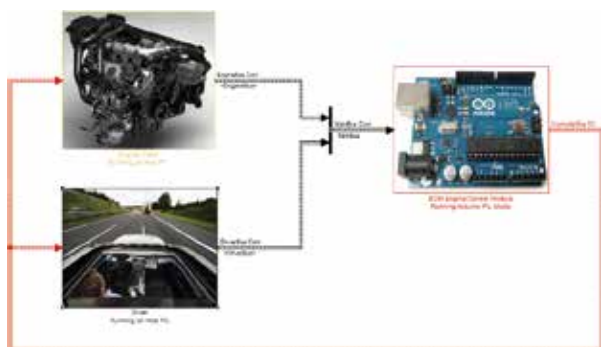


図9 PILSの一例

3.8.4 HILS

ECUとプラントモデルを実行するための専用ハードウェア（HILシミュレータと以後記述する）を用いたシミュレーション手法である。

実際の制御対象を用いたテストを行う前のシミュレーションとなる。コントローラには実際のECUを用いるが、ECUには実際の制御対象を制御するように理解させる必要がある。このため、ECUにPILSで用いた実行可能なバイナリファイルを書き込み、一方、制御対象についてはECUに接続可能で、センサ・アクチュエータの信号の入出力が可能なハードウェアであるHILシミュレータを用いて模擬する。

こうすることで、ECUはあたかも実際の制御対象を制御しているように動作させることが可能となる。

HILシミュレータのセットアップ、ハードウェアやソフトウェア、プラントモデルの維持管理には多くの工数を要することから、専門の部門を置いている自動車メーカーも多い。

3.9 検証

バイワイヤ技術の発展・適用が進み、車両における「走る・曲がる・止まる」の基本要素が全て電子制御を基本とするものとなりつつあり、安全な制御システムであることの重要性がより高まっている。

ここで重要となるのが「検証」である。

シミュレーション可能であるため、モデル上で多くの検証が可能となり品質向上や自動化などにより開発工数・コストの低減に貢献できる。

この章で述べる検証とは、プラントモデルは用いず、コントローラモデルを対象とした検証手法である。

3.9.1 モデル検証

制御システムの設計者は、システムのあるべき挙動を理解していることからテストシナリオ・テストケースを作成でき、これをコントローラモデルに注入して動作の検証を行っている。

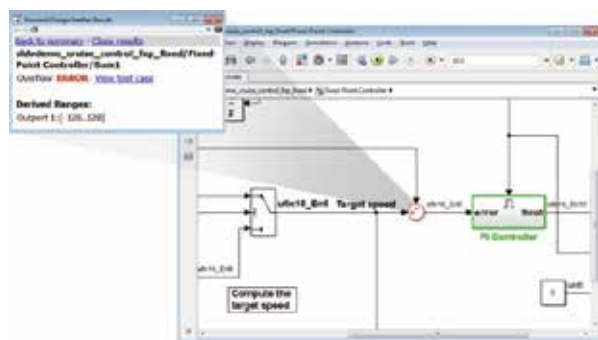


図10 モデル検証の一例

また、モデルの隠れた設計エラーを特定したり、整数オーバーフロー、デッド ロジック、配列アクセス違反、ゼロ除算および要求仕様違反を引き起こす要因を特定したりすることで更に品質を高める取り組みをしている。更に形式的手法により設計エラーを特定したり、テストケースを自動的に生成したり、要求仕様に対する設計の検証などを実施している。

C言語でのコーディングルールに相当するモデリング標準に対する準拠チェックを実施している例も多い。北米のMAAB（MathWorks Automotive Advisory Board）やJMAAB（Japan MBD Automotive Advisory Board）で規定されたモデリングガイドラインを適用、あるいは各社でこれをカスタマイズしたモデリング標準を規定し、これに準拠しているかどうかをツールで確認を行い、同様に品質の向上に

役立っている。

日本の自動車業界は世界的に見ても特にこの分野に注力し、牽引している状況である。

3.9.2 コード検証

更なる品質の向上のため、コントローラモデルと自動コード生成されたC言語のコードとの一致性を検証されるケースが特にECUサプライヤを中心に行われる場合がある。

また、C言語のコードに対して静的解析ツールを用いて、実行時エラーの有無を確認している。

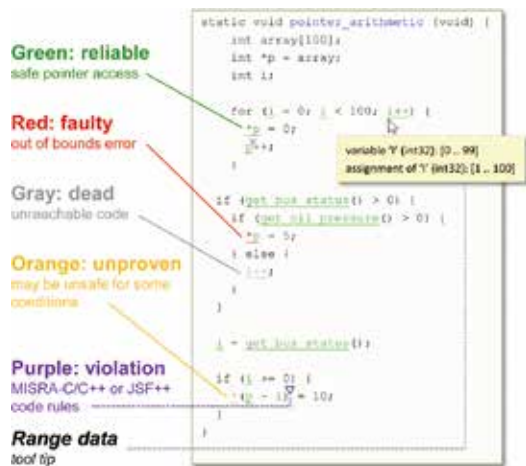


図11 コード検証の一例

3.10 適 合

コントローラモデルには多くの場合、適合パラメータが含まれている。PID制御のゲインなどがこれに相当する。適切なプラントモデルが用意されている場合には、実際の制御対象とのテストを行う前にこれらの適合パラメータを用意する事が可能である。

システムシミュレーションの中で既に適合パラメータの最適値が求められている事もある。

当然実際の制御対象とのテストにおいての調整は必要になるが、初期値としてパラメータを用意しておくだけでもテスト工数は大幅に低減される。

また、昨今のコントローラは適合パラメータが非常に多く、また多次元のマップを持つ場合もあり、工数や設定の難度の観点で課題となっている。シミュレーションを用いた適合パラメータの決定はこういった課題に対する一つの対応策として用いられている。

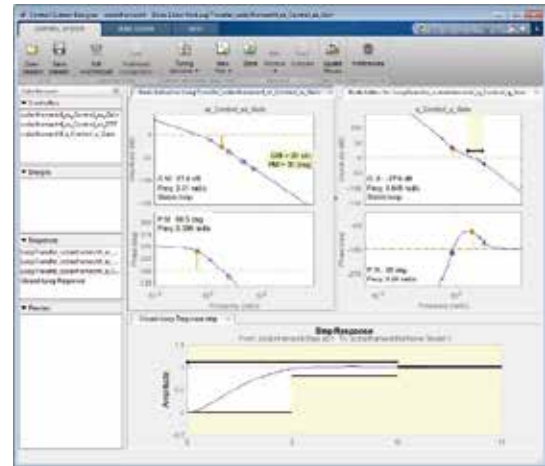


図12 適合パラメータ検討の一例

4. 事 例

ここまでの内容で自動車業界での制御システムの開発におけるモデルベースデザインの適用の実際を理解していただけたと思う。

自動車業界での適用事例を個別に説明する事が今回は紙面の都合できないため、以下のリンク先を参照されたい。日本だけでなく、世界の自動車業界における幅広い領域の多くの事例を垣間見ることができる。

https://jp.mathworks.com/company/user_stories.html

上記リンク先にある事例は実際に使われている中のあくまでほんの一部である。自動車業界では非常に多くの領域で用いられており標準的な制御開発手法となっていることをぜひご理解いただきたいと思います。

5. おわりに

今回は具体的な作業内容を中心に自動車業界におけるモデルベースデザイン適用事例をご紹介させていただきました。

モデルベースデザインを用いた開発が将来の製品開発～更に複雑化する機能開発、品質向上、安全性向上など～に向け一層貢献できること、自動車業界だけでなくより多くの業界・技術者の方々に使用していただけることを切に願うばかりである。

(原稿受付：2017年2月15日)

解説

油圧システムのモデリング

著者紹介



はやし 林 みつ 光 あき 昭

株式会社IHI
〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1
E-mail: mitsuaki_hayashio@ihi.co.jp

1989年明治大学大学院修士課程修了。同年石川島播磨重工業株式会社（現・株式会社IHI）入社。現在に至る。油圧装置／システムに関する研究開発に従事。日本フルードパワーシステム学会会員

1. はじめに

PCが普及して机上で数値計算が行われるようになった当初、シミュレーションには、そのモデルを導出して1階連立常微分方程式に書き下す事から始まり、積分演算やプリポスト処理のプログラムまで、すべて自前で賄う必要があった。GUIによるPC操作が当たり前になった今日、その環境をベースとした様々な工学分野におけるシミュレーションソフトが提供されるようになり、油圧に関しても、より複雑で大規模なシミュレーションが取り扱えるようになった¹⁾。シミュレーションソフトの恩恵は、本来の目的であるモデル作りやモデルベースでの検討を実現するにあたり、それに必要な手間や労力を激減できたことにある。その結果として、以前では考えられなかった複雑で大規模なシミュレーションを行えるようになったが、根幹となるモデル自体の内容は、自前で苦労していた時代と変わらない。そこで必要とされた知識は無用になったわけではなく、シミュレーションソフトを使う上での素地として、有用かつ必要な知識になったと言える。本稿では、油圧システムの「モデルベース開発」にあたり、目的にあった適切なモデルを用意する上で、必要と思われる基本的な事柄について紹介する。

2. 基本要素

2.1 作動流体特性²⁾³⁾

2.1.1 圧縮性

一般的に非圧縮性流体に分類される作動油も、動

的な挙動を扱う油圧シミュレーションにおいては、その影響を無視することはできない。圧縮性に関する作動流体特性としては、体積弾性係数の値で扱われることが一般的であり、作動流体容積が圧縮/膨張する際の圧力変化量が示される。

$$dP = -K \times \frac{dV}{V} \quad (1)$$

〔 K : 体積弾性係数, dP : 圧力変化
 dV : 体積変化, V : 初期体積 〕

体積弾性係数は、実際には圧力および温度によって変化するが⁴⁾、一般産業用の油圧装置が対象の場合、定数値として差し支えなく、油圧系作動油であれば1,700MPaの値が知られている。

2.1.2 密度

作動流体の密度は、基準状態（大気圧）での値として与えられるが、体積弾性係数の定義からは、圧力状態に応じて変化する値となる。

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow \frac{d\rho}{dP} = \rho / K \quad (2)$$

（ m : 流体質量, ρ : 密度, V : 流体体積）

作動圧力領域が、低圧～高圧まで幅広い範囲で変化する状況を想定すれば、圧縮性と密度は式(2)のように互いに関連する値となり、それぞれ独立した特性値にはならない。体積弾性係数の値を定義したとすれば、密度は基準値からの圧力変化により、体積弾性係数で決定される事となる。一方で、圧力に応じた密度変化を定義すれば、体積弾性係数は、その密度変化で決定される値となる。

2.1.3 粘度

作動流体粘度がISO粘度グレード（VG）で示される場合、この値は油温40℃における動粘度（cSt）の値であり、作動温度条件が異なる場合には、その温度条件に応じた動粘度を設定する必要がある。一般的にはVG値に加えて、異なる温度条件（40℃、100℃）での動粘度が示されるので、この値から、ASTM粘度温度図表⁵⁾等を用いる事により、作動温度条件における動粘度を知ることができる。

2.1.4 熱物性値

本稿解説では触れないが、油圧システム内での作

動油発熱や放熱等の現象を考慮する熱油圧解析にあたっては、比熱や熱膨張係数等を始めとする、作動流体の各種熱物性値の定義が必要となる。熱油圧解析においては、圧力損失要素や冷却器等での熱収支に応じた作動流体の温度変化に加えて、作動流体の圧縮／膨張に伴う温度変化が考慮される。

2.2 圧力損失

各種制御弁による絞りや、配管抵抗に代表されるモデル化要素であり、前者は流れが乱される事による作動流体の運動エネルギー散逸による損失であるので、流速の二乗に比例した圧力損失となる。後者は作動流体の流れに伴う摩擦による損失であるので、流速に比例した圧力損失となる。したがって、その損失要因に応じて、作用する圧力差またはその平方根に比例して、発生する流量が決定されるモデルで現される。

$$q = Q_R \cdot \Delta p \text{ または } q = Q_R \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (3)$$

(q ：発生流量, Δp ：圧力差, Q_R ：流量係数)

ここで流量係数の値は、配管抵抗であれば、その形状（径、長さ）と作動流体粘度による値であり、制御弁等であれば、その仕様（流路面積、圧力損失量、圧力流量特性など）に基づいた値となる。

2.3 容積（圧力状態）

油圧回路内での圧力状態は、作動流体経路に存在する容積に出入りする流体流量の収支と、その圧縮性（体積弾性係数）により決定される。図1での容積の場合、容積内の圧力応答は、以下の微分方程式に基づいたモデルとなる。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K}{V} \cdot (q_{in} - q_{out}) \quad (4)$$

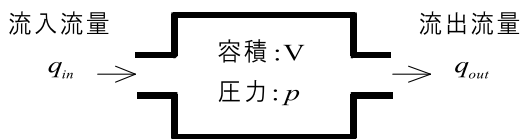


図1 容積（圧力状態）モデル

2.4 流体運動

プランジャ、ピストン、弁体（スプール、ポペット）など、油圧装置内部の可動部では、その動作に応じた作動流体の流動が発生し、可動部には作動流体の流動に応じた流体力が作用する。

図2のプランジャ動作を例とすれば、シリンダ室内にはプランジャ動作に応じた流量が流入することとなり、シリンダ室内の圧力は、プランジャ動作とシリンダ出入口での流出入流量の収支により変化して、プランジャには容積内圧力による力が作用する事となる。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K}{V(x)} \cdot \left(A \cdot \frac{dx}{dt} - q_{out} \right) \quad (5)$$

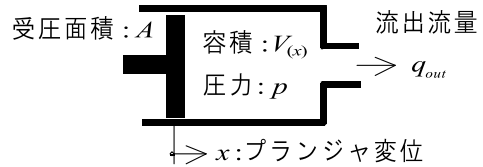


図2 プランジャ動作

図3で示すポペット弁を例とすれば、ポペット弁での発生流量は、絞り部流路を圧力損失要素としてモデル化されるが、その弁体に作用する軸力には、絞り部流路での差圧に加えて、絞り部を通過する作動流体による流体力が作用する⁶⁾⁷⁾。

$$f_k = A_P \cdot \Delta p - \rho \cdot q \cdot u \cdot \cos \theta \quad (6)$$

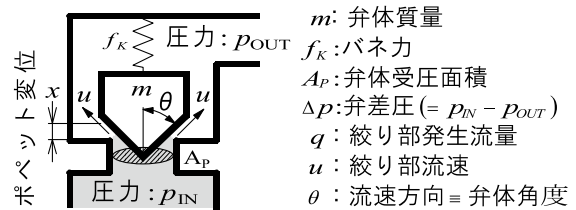


図3 ポペット弁

また、ポペット開閉による弁体動作が発生すれば、その圧力流量特性に基づく流量に加えて、絞り部流路を境として、その上流側と下流側に、弁体移動容積分の作動流体の流動が発生する事になる。

$$\text{下流側への流入流量: } q_D = q + A_P \cdot \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

$$\text{上流側での流出流量: } q_U = q - A_P \cdot \frac{dx}{dt}$$

3. 油圧機器／要素のモデル化

ポンプ／制御弁／アクチュエータ等、油圧装置の構成要素は多種多様ではあるが、その作動原理は前章で示した基本要素に還元されると考えられ、それら基本要素の組合せによりモデル化される。ここでは、前章で示した基本要素モデルをベースとした、油圧機器／要素のモデル化方法を取り上げる。

3.1 制御弁

圧力損失要素において、その流量特性を操作することにより、各種制御弁がモデルできる。切換弁であれば、各ポート流路の圧力流量特性に基づく流量係数が、バルブ切換操作に連動して変化するモデルであり、逆止弁や圧力制御弁であれば、制御ポート流路の流量係数が、作動圧力状態に連動して変化するモデルとなる。ここで、制御弁自体の動特性の考慮が必要な場合には、この流量係数の変化に、制御

弁動特性を現すモデルが追加される。

3.1.1 逆止弁

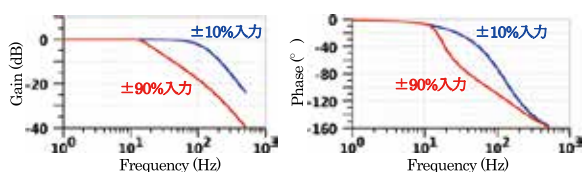
前章図3のポペット弁による逆止弁の動特性を考慮する場合、式(6)で示される作用力より、逆止弁の開閉動作が発生すると考えて、軸方向の弁体慣性の運動方程式により、逆止弁の動特性をモデル化することができる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -f_k + A_p \cdot \Delta p - \rho \cdot q \cdot u \cdot \cos\theta \quad (8)$$

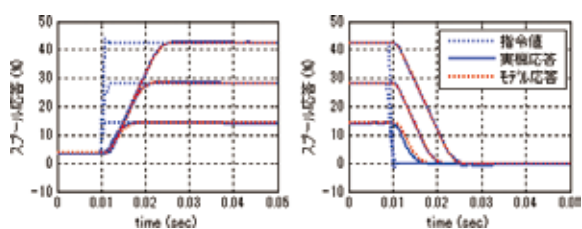
ここで、式(8)における Δp は、絞り部流路における差圧であるが、弁体動作に伴い、その Δp の応答は、式(7)による流量の影響を受ける。すなわち、弁体速度に比例して、下流側への流入流量は増加/上流側での流出流量は減少して、その流量変化により、下流側圧力は上昇/上流側圧力は低下するので、弁体動作への減衰力として作用する事になる。

3.1.2 サーボ弁

サーボ弁の動特性を示す特性として、応答周波数で示される場合があるが、各種作動条件に対応したモデルとしては、その周波数応答を考慮するだけでは不十分である場合がある。一般的に、サーボ弁応答周波数として示される値は、ある一定の指令値振幅での周波数応答を計測した結果の値であり、その応答は図4(a)のように、指令値振幅の大きさによって変化する⁸⁾。ステップ応答によるサーボ弁応答は、一般的に図4(b)に示されるような特性となり、出力の変化率が制限されるような挙動を示す。これは、サーボ弁スプール駆動機構（ノズルフラッパー、ソレノイドなど）の駆動能力に起因した挙動と考えられるが、その影響の結果として、周波数応答特性の振幅依存性が発生すると考えられる。



(a) 周波数応答



(b) ステップ応答

図4 サーボ弁応答特性

このような応答特性のモデル化には、前節ポペット弁の例と同様に、サーボ弁内部機構の詳細モデル

を構築する事も考えられるが、仕様等によりその特性が予め与えられるのであれば、図5に示すような簡易モデルで代替するのが現実的である。この例では、サーボ弁応答を2次遅れとして、駆動力の制約や摩擦に相当する非線形特性を付加することにより、振幅依存の応答やヒステリシス、スレッシュホールド等の特性をモデル化している。

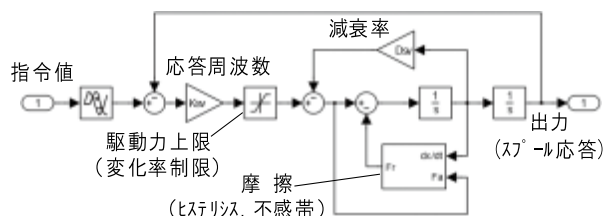


図5 サーボ弁動特性モデル

3.2 油圧シリンダ

油圧シリンダは、そのストロークに応じて内部容積が変化するモデルとして、前章図(2)のプランジャと同様なモデル式(5)が適用できるが、複動型シリンダでは、キャップ側/ヘッド側の各室の容積モデルにより、以下のようにモデル化する事ができる。

$$F_C = A_C \cdot p_C - A_H \cdot p_H$$

$$\frac{dp_H}{dt} = \frac{K}{A_H(L-x)} \left(q_H + A_H \frac{dx}{dt} \right) \quad (8)$$

$$\frac{dp_C}{dt} = \frac{K}{A_C \cdot x} \left(q_C - A_C \frac{dx}{dt} \right)$$

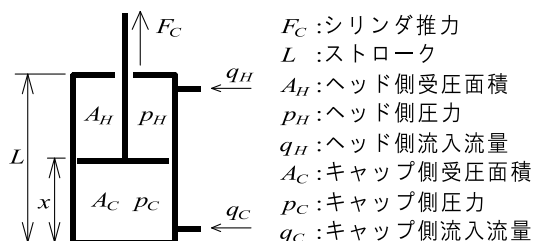


図6 複動型シリンダ

4. 油圧回路／システムのモデル化

前章までのような構成要素モデルを組み合わせれば、油圧装置／システムのシミュレーションモデルとなる。各構成要素モデルは、それぞれ個別のモデルとして機能するが、モデルでの入出力として定義された状態量の受渡により、油圧装置／システムとしてのモデルが実現される。図7を例とすれば、油圧シリンダと圧力損失の要素モデルから、式(9)のようなモデルで現すことができる。

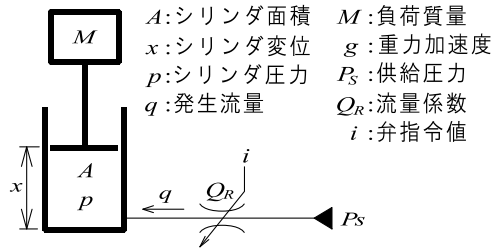


図7 油圧回路／システム

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{1}{M}(A \cdot p - M \cdot g) \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{K}{A \cdot x} \left(q - A \frac{dx}{dt} \right)\end{aligned}\quad (9)$$

$$q = Q_R \cdot i \cdot \sqrt{P_S - p}$$

また、制御系設計で必要となる伝達関数等のモデル導出が必要な場合には、作動点を $[x, p, i] = [X_0, P_0, I_0]$ として、以下のような線形近似を行えば良い。

$$\begin{aligned}q_{(p,i)} &\approx q_{(P_0, I_0)} + \left. \frac{\partial q}{\partial i} \right|_{(P_0, I_0)} \cdot \Delta i + \left. \frac{\partial q}{\partial p} \right|_{(P_0, I_0)} \cdot \Delta p \\ \left. \frac{\partial q}{\partial i} \right|_{(P_0, I_0)} &= Q_R \cdot \sqrt{P_S - P_0} \\ \left. \frac{\partial q}{\partial p} \right|_{(P_0, I_0)} &= -\frac{Q_R \cdot I_0}{2\sqrt{P_S - P_0}}\end{aligned}\quad (10)$$

ここでは説明のために単純化した油圧回路を例としたが、より現実的で複雑な油圧回路構成においても、そのモデル化要素が増えるだけで、基本要素の組合せで構成される事には変わりなく、同様の考え方

で対応することができる。

5. おわりに

これまでに油圧シミュレーションに携わってきた経験から、シミュレーションモデルを構築する上での着目点、見落としがちな要素などを意識して、油圧シミュレーションにおけるモデル作りに関する基本的な事項を紹介させていただいた。内容的には、その前提条件や仮定が曖昧な部分や、理論的な厳密性に欠ける点があると思うが、筆者の認識不足と紙面制約の都合もあり、詳細は参考文献を参照していただきたい。

参考文献

- 1) 桜井康雄：油圧機器・回路設計に用いられるCAE,フルードパワーシステム, Vol. 43, No. 1, p. 23-25 (2012)
- 2) 新井澄夫：新版 油圧作動油, 日刊工業新聞社 (1970)
- 3) Hodges : Hydraulic Fluids, Butterworth-Heinemann (1996)
- 4) (一社) 日本フルードパワー工業会編：実用油圧ポケットブック, p. 252 (2012)
- 5) ASTM 規格D341, Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Liquid Petroleum Products
- 6) 竹中利夫, 浦田暎三：油力学, 養賢堂, p. 47-50 (1970)
- 7) 小波倭文朗, 西海孝夫：油圧制御システム, 東京電機大学出版局, p. 117-119 (1999)
- 8) (社) 日本油空圧学会編：新版・油空圧便覧, オーム社, p332-333 (1989)

(原稿受付：2016年2月6日)

解説

1DCAEの考え方に基づくモデルベース開発

著者紹介



おお とも こう いち
大 富 浩 一

東京大学大学院
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
E-mail: koichi.ohotomi@delight.t.u-tokyo.ac.jp

1979年、東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了 工学博士 1979年から2014年まで大手総合電機メーカーの本社研究所に勤務この間、原子力、宇宙機器から家電機器等の製品開発に従事 これらを通して、設計に関する広範な研究開発を実施 専門は機械力学、設計工学、現在は1DCAEの普及啓蒙活動に注力。

1. はじめに

1DCAEに基づくモデルベース開発について紹介する。モデルベース開発は元々、航空宇宙機器のように試作が困難で、実験による検証も容易でない製品に対して、できるだけ精度の良いモデルを構築して、設計段階で性能／課題を予測可能とすることにより、製品のリスク、コスト、開発期間を最小化する考え方と理解している。また、一般にはシステムズエンジニアリングの一手法とも捉えられている。システムズエンジニアリングもモデルベース開発も元来、欧米的なトップダウン開発を前提として手法であり、ボトムアップ、擦り合わせを基本とした日本のものづくりには馴染まない。恐らく適用しても欧米に近づくことはあっても、追いつき追い越すとも難しいと考える。そこで、システムズエンジニアリング、モデルベース開発の考え方も踏襲しつつ、より日本のものづくりに合った形で同様の効果を実現する考え方が1DCAEである。ここでは、1DCAEの考え方を紹介するとともに、事例として宇宙機器開発を紹介する。実は、1DCAEの提案時期と宇宙機器開発の時期は逆転しているが、元来、1DCAEという考え方は潜在的に存在したものである。

2. 1DCAEによる全体適正設計^{1), 2)}

1DCAEの定義は、『1DCAEとは上流段階から適用可能な設計支援の考え方、手法、ツールで、1Dは特に一次元であることを意味しているわけではなく、

物事の本質を的確に捉え、見通しの良い形式でシミュルに表現することを意味する。1DCAEにより、設計の上流から下流までCAEで評価可能となる。ここで言うCAEはいわゆるシミュレーションだけでなく、本来のComputer-Aided Engineering を意味する。1DCAEでは、製品設計を行うに当たって（形を作る前に）機能ベースで対象とする製品（システム）全体を表現し、評価解析可能とすることにより、製品開発上流段階での全体適正設計を可能とする。全体適正設計を受けて（この結果を入力として）個別設計を実施、個別設計の結果を全体適正設計に戻しシステム検証を行う。』としている。

1DCAEでは、図1に示すように製品設計を行うに当たって（形を作る前に）機能ベースで対象とする製品（システム）全体を表現し、評価解析可能とすることにより、製品開発上流段階での全体適正設計を可能とする。全体適正設計を受けて（この結果を入力として）個別設計を実施、個別設計の結果を全体適正設計に戻しシステム検証を行う。

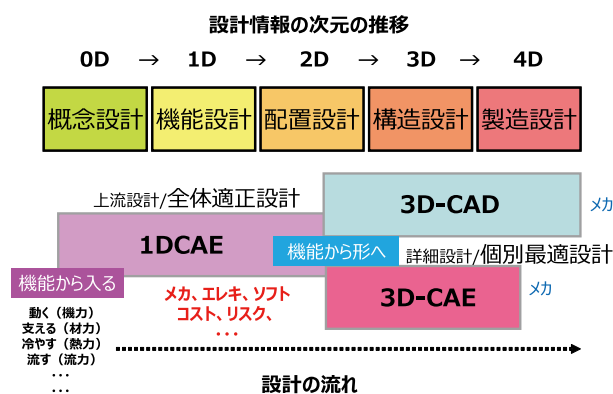


図1 1DCAEの位置づけ

1DCAEでは製品開発目標を設定、これに則って概念設計、機能設計を行う。製品の機能を考えることにより、設計仕様を仮決定し、3D-CAE部分に受け渡す。3D-CAEでは1DCAEから受取った仕様に基づいて配置設計、構造設計、製造設計を行う。3D-CAEはいわゆる構造を考える部分であり、従来のCAD/CAEが威力を発揮する。3D-CAEの結果は

1DCAEに戻され、システムとしての機能検証を行う。この1DCAEと3D-CAEの関係を図2に示す。

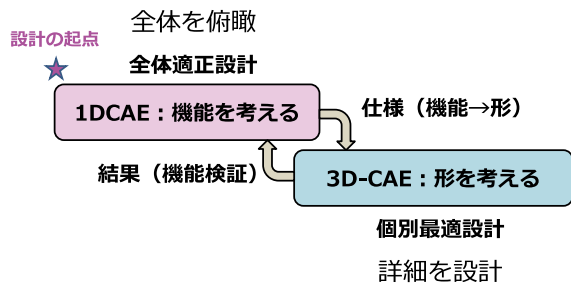


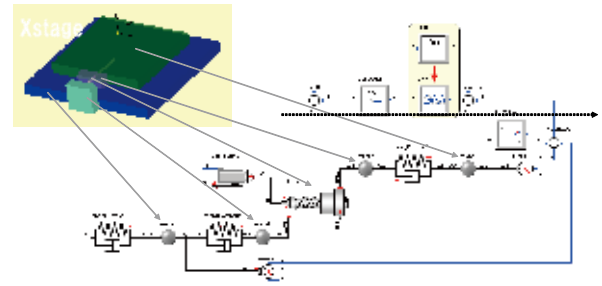
図2 1DCAEと3D-CAEの関係

広義の1DCAEとはこの1DCAEを起点とした3D-CAEも含む設計の枠組みである。1DCAEは対象とする製品の価値、機能、現象をハード、ソフトに関わらずもれなく記述し、パラメータサーベイを可能とする環境を構築する。目的に応じて、製品を使用する消費者、社会、経済、流通といった非物理現象も含む場合がある。また、1DCAEと3D-CAEの関係は車（自転車）の両輪と考えることもできる。1DCAEにより目標設定を正しく行うための方向付けを行い、3D-CAEにより目標に向かって加速することにより、全体として高い目標を設定でき、かつ、最短でゴールすることを可能とする。

1DCAEが目指すところをそのまま具体化するツールはまだ存在しない。しかしながら、物理モデルシミュレーションは1DCAEの考え方を具現化してくれる一つのツールとして有力である。一例として、物理モデルシミュレーションを用いた1DCAEによる稼働ステージの設計イメージを図3に示す。稼働ステージは稼働テーブル、これを駆動するモータ、機構、モータを駆動する制御（ソフト）からなっている。これを1DCAEの一つの姿である物理モデルシミュレーションで表現すると図のようになる。この段階ではメカ部分の形状は気にしなくてよく、質量、バネ定数といった離散情報だけが必要である。この1DCAEで最適な質量、バネ定数を決定し、これを実現するように左上の3D-CAD/CAEを用いて形にしていく。ここで決定された詳細情報から最終的な質量、バネ定数を1DCAEに戻し、稼働ステージとしての機能を検証する。

1DCAEは特殊な考え方ではない。昔から、技術者は対象としている製品をモデル化したいと考え、自分の能力の範囲で時間をかけてモデル化、パラメータサーベイをしていた。しかしながら、最近は製品開発のサイクルが短くなり、このようなことは間に合わなくなった。また、（狭義の）CAEの普及で開発効率は上がったものの、技術者の思考がワ

3D：構造は分かるが機能は見えない



1D：構造は分からないが機能は見える

図3 1Dと3Dの比較

ンパターン化し、価値ある製品の創出にブレーキがかかってしまった。1DCAEはこのような現状の課題に対して、一つの解を示してくれる可能性のある考え方、手法、ツールである。物理的なことを理解していれば1DCAEを用いて短時間で対象製品をモデル化することが可能である。ここで目指す1DCAEは上記の機能も有しながらより広範囲により柔軟に設計を支援する概念である。

3. 1DCAEの考え方にに基づくモデルベース開発

1DCAEの考え方にに基づくモデルベース開発の事例として宇宙機器を紹介する。宇宙機器は単品生産品で、事前の検証／試作が困難な場合が多い。したがって、通常の設計手法に加えて、固有の設計手法が必要となる。特に、宇宙機器の場合には打ち上げ後のトラブル対応が重要である。当然、最善の努力を払ってトラブルが発生しないよう設計をするわけであるが、不幸にしてトラブルが発生する可能性はまったくゼロではない。そのような場合に、対応できるような仕組み、構造を考慮する設計法が必要となる。また、宇宙機器開発の場合には、実物での検証が困難な場合が多く、シミュレーションが強力な設計ツールとなる。しかしながら、シミュレーションは予測された事象についてのみ解を提示するわけであるから、いかにして発生するであろう事象を予測するかがポイントである。また、宇宙機器に限らないが、国際協調、異分野との協調、顧客／下請け連携といったいわゆる協調設計も重要である。国際協調の場合、日本人には言語の壁という大きな弊害が存在する。これを最小化する意味でも設計手法の意義は大きい。

上記の視点から、図4に示す宇宙機器に1DCAEの考え方にに基づくモデルベース開発を適用した。この機器は国際宇宙ステーションへの搭載を目的に、JAXA/NASAで共同開発したものである。NASAの

運用計画の見直し等により、残念ながら、最終段階で中止となったが、宇宙機器開発として有益な知見が得られた。

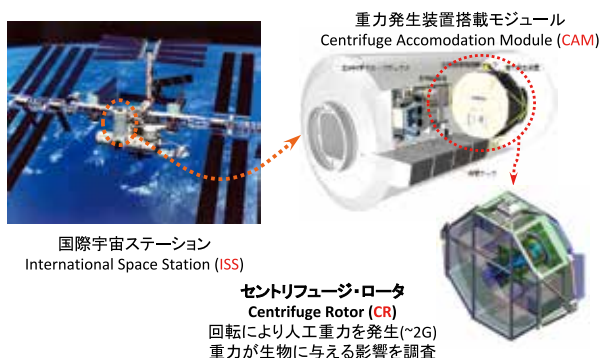


図4 対象とする宇宙機器

この機器は、宇宙環境下、重力の大きさをパラメータとした生物実験を行うことを目的としたもので、将来、月、火星での人類の長期滞在を見据えた計画である。人工重力は、生物飼育箱を回転させることによって実現する。最大回転数42rpmで、最大重力2gを発生する。人工重力を発生させる本体をCR (Centrifuge Rotor)、CRを格納するモジュールをCAM (Centrifuge Accommodation Module) と呼ぶ。CAMは国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の一部を構成する。このうち、人工重力発生装置 (以下、CRと略す) が対象となる機器である。

CRは直径約2.5m、質量1,200kgの回転体で、内部に生物飼育箱、回転駆動装置、その他の種々の機器を搭載する。回転体として、生物飼育箱の初期の不釣り合いに加えて、生物飼育箱内部の動植物の成長に伴う漸次的質量の変化、動物の動きに伴う質量重心の変化による不釣り合いが発生する。この様な不釣り合いが存在すると、CRが振動し、生物飼育箱の動植物に悪影響を及ぼすばかりでなく、CRの振動がISSに伝わり、ISS内の他の試験装置に影響を与える。そこで、これに対する対策が必要となる。

CRでは基本的に、外部への振動を最小化するために振動絶縁機構 (VIM: Vibration Isolation Mechanism) という非常に柔軟な機構で支持されている。図5に示すように、VIMは並進3軸、倒れ2軸の独立したばねで支持され、さらに共振点通過時の変位を最小化するために、減衰機構を付加している。減衰機構はVoice Coil Motorを用いたアクティブ減衰機構と、磁気ダンパによるパッシブ減衰機構から成る。

また、回転体の不釣り合いの除去に対しては、自動バランスシステム (ABS: Auto-Balancing System) が回転体内部に搭載されている。ABSの動作原理は



図5 振動制御のための二つの機構

以下のとおりである。不釣り合いによる回転体の振動は、柔構造のVIMの振動変位 (並進2軸、回転2軸: 並進の回転軸方向は不釣り合いによって励起されない) として検知される。振動変位を並進成分、倒れ成分に分離、これに相当する不釣り合い補正量 (並進の場合は力、倒れの場合はモーメント) を算出する。一方、回転体内部には、図5に示すように、静バランサ、動バランサの2種類 (それぞれ2軸) の不釣り合い修正機構があり、それぞれ、VIM振動変位から算出された不釣り合い補正量 (力、モーメント) に相当する修正不釣り合いを発生するように機械的に駆動される。静バランサは修正不釣り合い力を発生するように並進2軸方向に、動バランサは修正不釣り合いモーメントを発生するように回転2軸方向に、それぞれ動くように機構的に構成されている。上記の振動変位計測/不釣り合い量算出/修正不釣り合い量算出/静バランサ・動バランサ駆動 といった一連の作業は、フィードバック制御系によって実現される。

CRの設計は1DCAEの考え方にに基づき、以下に示すプロセスで実施された。

- A 概念設計: 全体をどのような機構にするか、回転体の駆動方法は、回転体をどのように柔支持するか、等のCRのアウトラインを決定。
- B 機能設計: 回転体を柔支持するとして、どの程度のばね定数/減衰定数にしたら良いか、この場合、顧客の振動スペックを満足するか、等の基本性能を満足していることを確認。
- C 配置設計: 機構を構成するスペースは限られている。この限られたスペースの中に、機能を満足する機械システムを構築。
- D 構造設計: 機械システムは種々の外乱に対して、十分な構造強度を有している必要がある。材料の選定、構造の決定、運用期間を考慮した構造強度設計の実施。

E 製造設計：構造設計で決定した構造を製造する手順の決定。

上記の開発のプロセスをイメージ的に示したのが、図6である³⁾。このうち、開発初期段階での全体機能最適化とシステム構成がほぼ決まった段階での統合シミュレーションについて以下説明する。

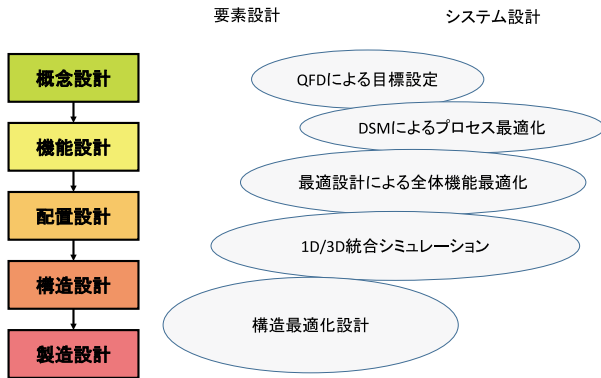


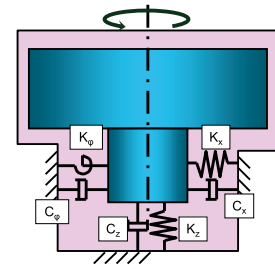
図6 開発のプロセス

全体機能最適化

CRの心臓部である支持系の機能を左右するばね定数／減衰定数をパラメータ最適化によって決定した。機能設計段階では、モデルは詳細である必要はないので、図7に示すように、回転部を剛体、支持部を並進2自由度（水平2自由度は同一定数のため、1自由度と換算）、倒れ1自由度（実際は2自由度だが、同一定数のため、1自由度と換算）の計3自由度でモデル化する。最適化計算は変位（できるだけ小さくしたい）を目的関数とし、加速度（顧客のスペックを満足）を制約条件とし、6個の設計パラメータ（3自由度×ばね定数／減衰定数）に関して実施する。対象とする解析モデルは3自由度の質点系モデルで表現される。最適化の手法は色々あるが、ここでは市販の最適化ツールを用いた。この一連の計算により、ばね定数／減衰定数が決定される。

最適設計で最も重要なことは、目的関数、制約条件をどのようにして決めるかということであるが、同様に、設計パラメータの上下限の設定も重要である。なぜなら、設計パラメータは自由に選べるわけではなく、この場合には、具体的な構造をイメージし、ばね定数は最低どの程度まで可能か、減衰定数は最大どの程度まで可能かを判断する必要がある。そして多くの場合、最適化された設計パラメータは、この上下限のいずれかに張り付く。

最適設計の最大の効果は、このようにして得られた設計値そのものにあるのではなく、最適設計の手順を踏むことにより、設計者がそれまで曖昧にしていた設計決定プロセスを明らかにし、論理的手順に従って設計解を自ら導出するところにある。



ばね定数(K)
減衰定数(C)

 軸方向
水平方向
倒れ方向

設計パラメータ数:6

図7 全体機能最適化のためのモデル

1D／3D統合シミュレーション⁴⁾

宇宙機器は重力の影響のため、地上でその性能を検証することは困難である。そこで、シミュレーションが性能検証の有効な手段となる。CRの場合には、機構、構造、制御、流体、電磁、騒音、衝突といった物理現象が絡むため、いわゆる、統合シミュレーションが必要となる。図8にCR統合シミュレーションの概略モデルを示す。CRのシミュレーションの難しさは、上記の物理現象のモデリングのみならず、CRがISSと連成していること、地球の周りを回っていることもモデリングする必要がある点である。つぎに、疑問となるのは、大変な思いをして統合シミュレーションを実施したが、本当にそこで得られる結果は正しいのかということである。そこで、重力の影響を可能な限り排除した地上試験を実施した。この地上試験装置の統合シミュレーションモデルを作成、シミュレーションを実施した。このシミュレーション結果と、地上試験の結果を比較することにより、統合シミュレーションモデルの妥当性を確認した。このようにして、妥当性の確認された地上試験装置用統合シミュレーションモデルを、宇宙用統合シミュレーションモデルに拡張した。こ

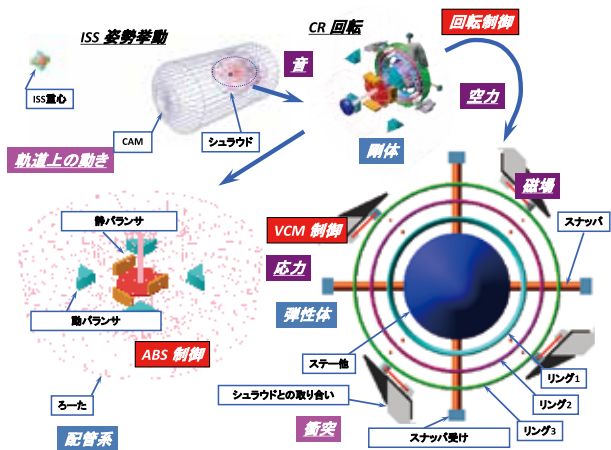


図8 1D／3D統合シミュレーション

の手順は、その妥当性を数学的に証明するものでないが、このようにして得られた統合シミュレーションモデルは設計に有効であった。

4. おわりに

1DCAEの考え方を紹介するとともに、事例として宇宙機器開発を紹介した。最初に述べたように、宇宙機器の開発時期は1DCAEの提案時期より前であるが、ここで紹介したように“1DCAEの考え方に基づくモデルベース開発”を先取りした形になっている。これはモデルベース開発、システムズエンジニアリングが特別なものでなく、日本のものづくりにおいてはごく自然に行われていることを意味する。これはこれで重要なのだが、この考え方、手法を普及させていくには皆が共有、理解できる考え方が必要と考える。これが“1DCAE”である。1DCAEの考え方の普及とともに、これを具体化するツールも発展している。宇宙機器開発時点では機構解析を基本に統合シミュレーションを実施したが、

現時点では物理モデルシミュレーションツール（いわゆる1D-CAE）を適用することにより、効率的かつ精度よく実行することが可能になっている。今後、考え方、ツール、適用事例の三位一体で1DCAEの普及啓蒙活動を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 大富浩一, 羽藤武宏, “1DCAEによるものづくりの革新”, 東芝レビュー Vol. 67 No. 7 (2012)
- 2) 日本機械学会: 1DCAE概念に基づくものづくり設計教育, 日本機械学会講習会, 13-75 (2013)
- 3) Ohtomi, K., Collaborative Design in New Product Development, 24th International Symposium on Space Technology and Science, (2004)
- 4) Ohtomi, K., Kanzawa, T., Roy Hampton, and Kawamoto, O. “Centrifuge Rotor Integrated Analysis”. SPIE Defense & Security Symposium, Modeling, Simulation and Calibration of Space-based systems, 5420-01. (2004)

(原稿受付: 2017年2月7日)

解説

大学のフルードパワー研究・教育における デジタルコントローラの活用

著者紹介



さとう やすかず
佐藤 恭一

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 : sato-yasukazu-zm@ynu.ac.jp

1992年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同大学講師、准教授を経て、2012年同大大学院工学研究科教授、現在に至る。油圧動力の伝達、制御、メカトロニクス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）。

1. はじめに

産業界では、モデルベース開発（MBD：Model Based Development）の導入が話題となっている。一般に、ある製品の開発には、システム設計、コンポーネント設計、要素（部品）設計といった上流レベルから下流レベルへの各設計工程、制御コードの生成と実装、下流レベルから上流レベルへの種々の検査、検証が行われ、多くの技術者が関わっており、よく知られるV字モデル（図1）のプロセスが進められている。従来の開発工程は、各設計工程を進めていき、制御コード生成、実装を経て、各種検証を行い、不具合があれば該当する設計工程にフィードバックされる。各設計、検証のレベル間の要求仕様の伝達は、レベル間の特有の仕様書や図面であり、制御コードの生成も人がコードを書くという作業を含んでいる。レベルが移るたびに人の手が入り工数の増加、効率の悪化の要因となり、人的ミスの原因を生んでいると言われている。一方、MBDは、仕様書に代わって全レベルに共通するモデルを用い、シミュレーションによる性能評価、検証も併用する。各レベル間では、従来の仕様書が表現する文面での要求や、図面が表現する精度だけでなく、共通モデルが表現する性能、静特性、動特性、制御方法も的確に伝達していくことができる（図2）。

開発対象により、MBDの導入が有効な場合と、効果が得にくい場合があると言われている。また、ものづくりの観点でも、量産品を生み出す企業での研究開発と大学での教育研究では事情の異なりがあ

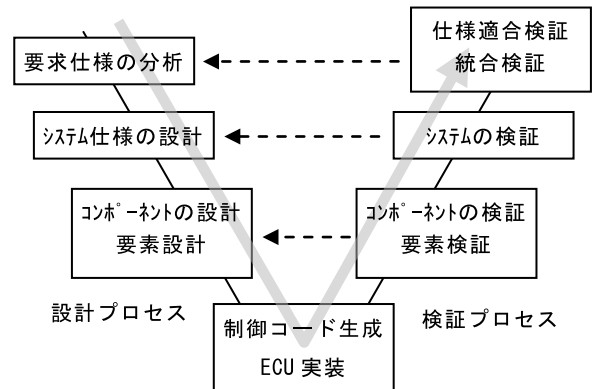


図1 V字モデルの開発、検証工程

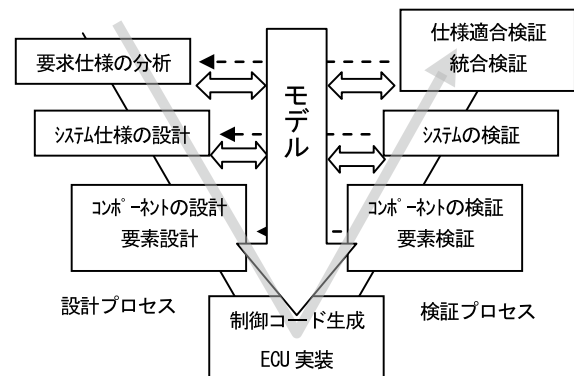


図2 モデルベース開発

るであろう。本報では、大学の立場で、筆者の研究室で教育研究におけるMBD活用事例を紹介する。

2. 大学におけるモデルベース開発

2.1 研究室の学生のバックグラウンド

筆者の研究室は機械工学系の学科に属しており、4年次に卒業論文の指導で研究室に配属されてくる学生は、機械工学の基礎を学んできている。コンピューティング関連の授業でプログラミングの基本は学んでおり、微分方程式、行列式、代数方程式などをプログラムで解く数値解析の経験はある。また、制御の授業で、信号の伝達、変換を、ブロック線図、伝達関数で表現することも経験している。しかしながら、自身で制御対象を駆動するためのプログラムコードを書き、DSP（Digital Signal Processor）な

どの制御デバイスに実装し、実際にハードウェアを構成するということはほとんど経験していない。そのため、研究室に配属されてから、初めてハードウェアの制御方法を実体験する。実機を操作するまでに、独学で制御プログラムを作成し、デバッグすることに多大な時間を要し、その分、実験や解析の時間が圧迫されている。

当研究室では、学生一名に一研究テーマを担当してもらっているので、前述の図1に示すV字モデルの設計、検証工程によれば、全工程を一人で担当していることになる。その中で制御プログラムの完成に長時間を要すると、卒業までの研究期間は決まっているので研究全体の内容が薄くなる。

また、数年にわたる研究テーマの場合は、学部学生は4年生の卒業研究の1年間、大学院生は修士課程の2年間で研究室を巣立っていくので、研究の継続性も重要な観点となるが、実情は図3のようであり、担当学生間の十分な引き継ぎができないことが多い。

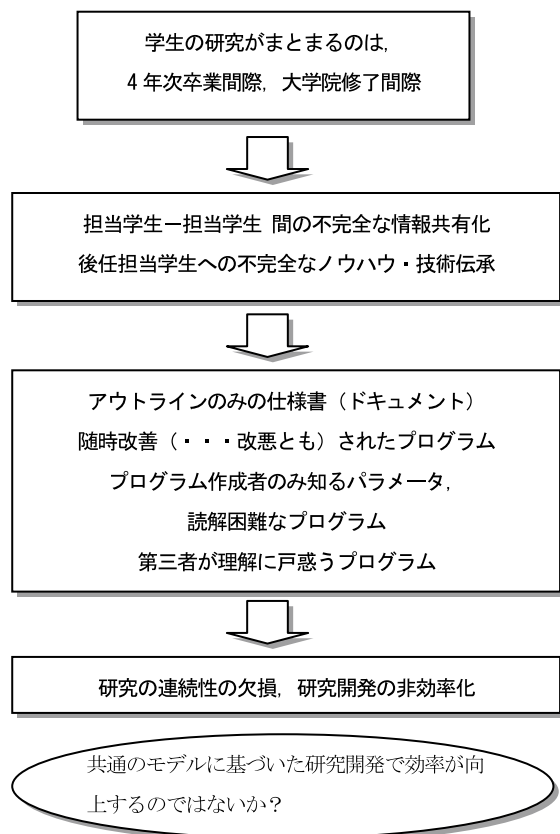


図3 研究の継続と学生間のノウハウ・技術の伝承

2.2 デジタルコントローラの活用

デジタルコントローラは、中枢のMPU（Micro-processing unit）、DSP、FPGA（Field-Programmable Gate Array）などの演算ユニットと、ADC（Analog-Digital Converter）やDAC（Digital-Analog Converter）などのインターフェースで構成される。多様な種類、

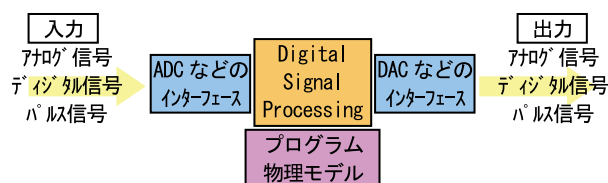


図4 デジタルコントローラの概要



図5 既製品・市販品を利用したアクチュエータシステムの構成

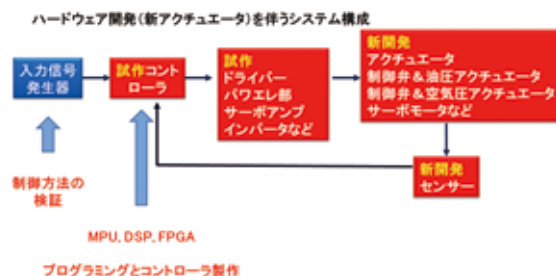


図6 ハードウェア開発を伴うアクチュエータシステムの構成

性能のデジタルコントローラが市販されている。デジタルコントローラを動かすプログラムは、設計者が記述言語でプログラムコードを書き、それから演算ユニット上で動くバイナリコードを生成するものがほとんどだが、市販のシミュレーションソフトのブロック線図で表現したモデルをから、バイナリコードを自動的に生成できるものもある。このブロック線図のモデルが扱えることが、プログラムコードを手入力で作成していくのが苦手な機械工学系学生にとって、比較的容易に短期間でプログラムを創り上げることができ、都合がよい。

2.3 アクチュエータ開発を例に¹⁾

筆者の研究室の研究テーマの一つにアクチュエータの開発がある。制御理論、駆動方法の検証などは、市販のアクチュエータ、コントローラでシステムを構成し、その分、制御指令の生成に注力することができる（図5）。

一方、新原理、新構造のアクチュエータを対象とする研究の場合は、ハードウェアの市販品がなく、すべて試作によるところが多い（図6）。このような研究過程では、制御法の構築から対象アクチュエータの試作、関連するセンサー、ドライバ、コントローラの作製を学生が一人で担当する。併せて、学

生がシステム全体を表現するモデルを作成し、ハードウェアの試作前に、シミュレーションでこのシステムの作動を検証する。アクチュエータの動特性を把握でき、アクチュエータの構造、ドライバ、コントローラの仕様を改善できる。

さらに、システム全体のモデルの一部を既存のハードウェアに置き換え、残りのモデルをデジタルコントローラ内に構築すれば、HILS (Hardware In the Loop Simulation) が活用できる。ハードウェアとデジタルコントローラ間のインターフェースの仕様（電圧、電流、カウンタ信号など）が明確になっているので、すべて一人の学生で担当する研究テーマであっても、ハードウェアの準備、接続などは他の学生の協力を得ることができる。

3. モータ駆動システム、油圧ポンプ駆動システムの研究開発例

3.1 システム全体のモデル作成

スイッチトリラクタンスモータ (SRM, Switched Reluctance Motor) の駆動システムの開発例を紹介する。SRMは永久磁石を用いない交流同期モータである。作動原理の紹介から制御法の提案、産業機械駆動への応用など、多くの文献があるが、研究に適当な市販品がないため、当研究室では、モータ本体、ドライバ、コントローラなどシステム全体のハードウェアを自作した。その過程で、学生Aは、SRM本体および駆動システムの全体モデルを作成し、シミュレーションにより作動を検証し、各種パラメータのモータの動特性への影響の研究をまとめた。

3.2 システム全体のハードウェアの構成

学生Bは、学生Aの研究の成果を用いてモータ本体を設計して試作した。また、ドライバ等のパワーエレクトロニクス部分を、モデルに基づいて実際の電気回路で構成した。従来、モータ駆動用コントローラには、学生が書いたプログラムコードを実装したデジタルコントローラを用いていたが、デバッグに時間を要し、また、他の学生にとってはそのプログラムコードは理解に難儀するものであった。

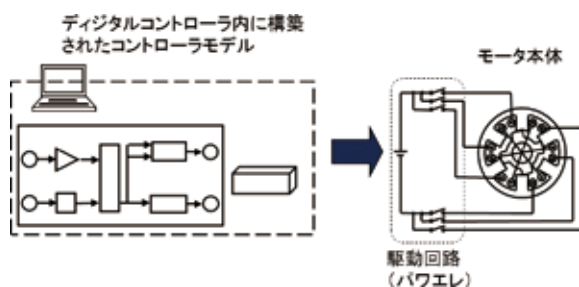


図7 ブロック線図表現のモデルを用いたモータ駆動用デジタルコントローラ

今回、シミュレーションで作動が検証された全体モデルからコントローラのモデルのみを抜き出し、そのブロック線図で表現されたモデルを直接デジタルコントローラに実装することにより、図7に示すように容易にモータ駆動用コントローラを創り上げることができ、SRMの駆動システム全体のハードウェアを構成することができた。

3.3 モデルベース開発と研究拡張

学生Cは回転駆動のみであったSRM駆動システムの全体モデルを改良し、回転と直動の二自由度運動を実現する回転直動二自由度SRMを開発した²⁾。回転直動二自由度SRMの全体モデルをシミュレーションで作動検証することにより、コントローラの作製も、SRM駆動用のデジタルコントローラ内に構築されたモデルを二自由度SRMのコントローラモデルに修正するだけで対応できた。

学生Dは、SRMの駆動に正逆両方向回転と回生・発電の機能を付加し、図8に示す閉回路用油圧ポンプの回転数制御に適用した³⁾。これもコントローラは、デジタルコントローラ内に構築されたモデルの修正で対応できた。

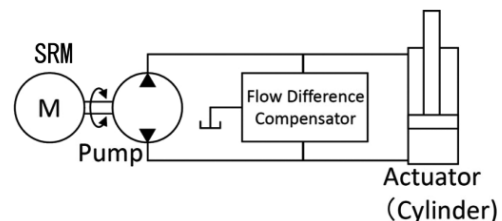


図8 SRM駆動閉回路用油圧ポンプの流量制御

4. おわりに

大学の教育、研究におけるモデルを実装できるデジタルコントローラの活用事例を紹介した。デジタルコントローラの利用は教育、研究に便利であるが、学生がモデル作成のもとにある物理原理や信号処理を理解し、ブラックボックスとならないように指導することが肝要と考える。

参考文献

- 1) 佐藤, フルードパワー道場 8 「フルードパワーに生かせる電子回路技術(2)」第3回テキスト, 日本フルードパワーシステム学会, (2013)
- 2) Y. Sato, et al., Sensorless Torque and Thrust Estimation of a Rotational/Linear Two Degrees-of Freedom Switched Reluctance Motor, IEEE Transactions on Magnetics Vol. 52, No. 7, Paper No. 8204504 (2016)
- 3) 佐藤, 角谷, 鄭, 油圧ポンプ駆動用SRモータのサーボ機能付加による油圧閉回路流量制御, 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会論文集, p. 25-27 (2016)

(原稿受付: 2017年3月27日)

解説

1DCAEによるフルードパワーシステム設計に関する研究委員会

著者紹介



さくら い やす お
桜井 康雄

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

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

1. はじめに

1DCAEによるフルードパワーシステム設計に関する研究委員会は、委員長 田中和博先生(九州工業大学)、幹事 桜井康雄(足利工業大学)を含め、大学側委員7名、企業側委員11名で構成されている。なお、本委員会は、平成28年4月から活動を始めた研究委員会である。

ここでは、本研究委員会の設立の経緯、設立趣旨およびその活動内容について紹介する。

2. 研究委員会の設立の経緯

本研究委員会は平成25年4月から平成28年3月まで実施した油空圧のシミュレーション委員会を発展させた委員会である。油空圧のシミュレーション委員会の委員長は中田毅先生(東京電機大学)、幹事は田中和博先生(九州工業大学)であった。

油空圧のシミュレーション委員会では、CAEツールとして近年大きく進展してきたCFDソフトウェアをはじめとして要素機器ならびにシステムの動特性把握に対して有効と考えられるさまざまなシミュレーション・ソフトウェアやシミュレーション技術およびその応用例の話題提供を受けることにより、今後のCAEツールおよびその利用方法の発展の方向性を探ることを目的としていた。

最初の年度は、ソフトウェアやシミュレーション技術の現状の把握を目的として、CAEツールおよびCFDソフトウェアのベンダーを中心に話題提供をお願いした。この年度に紹介されたソフトウェアにつ

表1 紹介されたソフトウェア

演題	話題提供企業	紹介されたソフト
熱・流れ・磁場解析とシステムへの応用	アンシス・ジャパン(株)	FLUENT CFX
熱流体解析プログラムCONVERGE™の紹介	(株)IDAJ	CONVERGE™
CADデータを用いた流体解析ソフトXFlowの紹介	(株)電通国際情報サービスエンプラインズソリューション	XFlow
STAR-CCM+とAMESim, MATLAB等、1Dベースツールとの連成事例紹介および油圧、空気圧事例紹介	(株)CD-adapco	STAR-CCM+ AMESim MATLAB

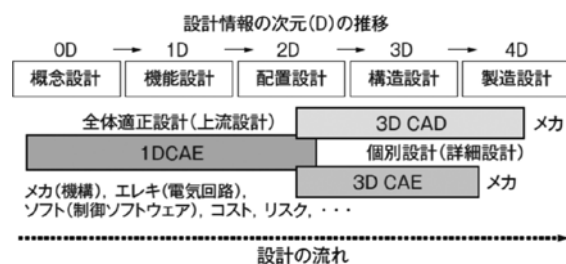


図1 1DCAEに基づいた設計の流れ¹⁾

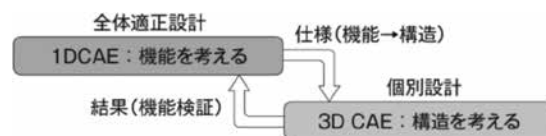


図2 1DCAEと3DCAEの関係¹⁾

いて表1にまとめた。次年度は、システシミュレーションの応用の現状について理解を深めるため、大学側委員による油空圧システムのシミュレーション解析技術に関する話題提供を中心に委員会を実施した。1年間の研究委員会の延長を行い、これらの年度で得られた本研究委員会の成果を活用して今後の

発展の方向性と必要技術の検討を行った。最後の年度の第3回目の委員会における話題提供は、CAEツールおよびCFDソフトウェアを系統的に利用した設計開発の発展の方向を探るため、「1DCAEの考え方に基づくモデルベース開発」と題した大富浩一先生（東京大学）による話題提供であった。大富先生が説明したもののづくりの流れは図1に示した通りである¹⁾。また、1DCAEと3DCAEの関係を図2に示す¹⁾。1DCAEは概念設計を行うODからスタートする。その後の1DではODで明確にされた仕様を満足するための全体適正設計（上流設計）が行われる。全体適正設計により明確にされたシステムを構成する要素の性能を満足するよう個別設計（詳細設計）が3DCADと3DCAEを用いて行われる。3DCAEの結果は1DCAEに戻され、システムとしての機能の確認が行われる。この「1DCAEを取り入れたシステム設計」が種々の業種で取り入れられつつあるとのことであった。

この話題提供の内容を受けて、フルードパワーシステムの設計開発にこのような手法を取り入れることの可能性を探索することが必要であるということに認識するに至った。これが本研究委員会設置の動機のひとつである。

さらに、本研究委員会委員長田中和博先生（九州工業大学）による「CFDを用いることにより流体システム全体の設計は、高精度化、高速化、効率化したのであろうか？」、「CFDの真価が問われる時代である」という指摘²⁾にも本研究委員会設置の動機がある。

CFDの利用範囲の拡大は急速に進んでおり、現在では、研究、開発、設計・生産現場の様々な面で利用されるようになってきているとのことである。理論・実験・CFDの3本柱で活動できるようになり、分野によっては、CFDが実験に取って代わる発想も出現した。モデルの不完全性や解析精度不足のために検証ツールとしての実験は必要との認識が一般的ではあるものの、実験の測定精度にも限界があるため、CFDは実験解析に追いつこうとしている状況であると考えられるとのことである。しかしながら、CFDを利用することにより、流体システム全体の設計が合理化されたとは言いがたいのが現状であるとのことである。CFDは実験の補完的役割を果たしているに過ぎないとのことである。また、地球シミュレータを活用したプロジェクトが何件か立ち上がったが、その成果により技術のブレークスルーが起きたということはまだ聞かれないとのことである。CFDを設計プロセスに上手く利用するために、既存の設計プロセスに対しCFDを当てはめるという考え

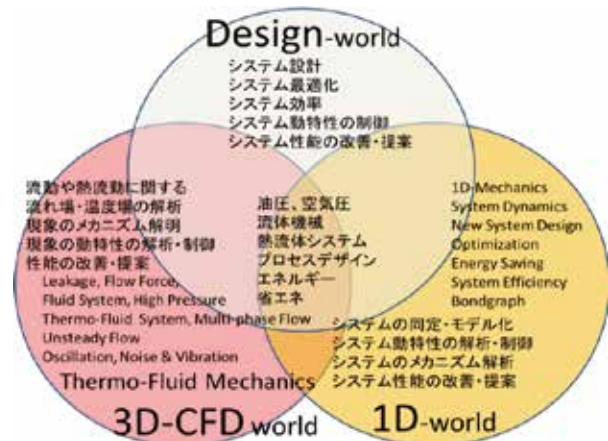


図3 CFD, 1D-CAE, 設計の関係²⁾

では無く、設計プロセスそのものを大きく変革できるか、製品のイノベーションに結び付く設計プロセスを提案できるか、CFD側からのアプローチも必要とのことである。よって、このような問題点を解決するために1DCAEを捉えたらどうであろうかということが提案されている。さらに、フルードパワーシステムの設計に際しては、システム制御あるいはシステムダイナミクスについて考慮する必要がある。これらのシミュレートする際にモデルベースデザインソフトAmesim³⁾、Simulation-X⁴⁾などが力を発揮する。これらの領域とCFDの領域を整理すると図3のようになるとのことである。

この図より、フルードパワーの設計開発においても1DCAEの概念を適用し、1DCAEと3DCAEを上手く利用した設計の流れについて検討する必要性を強く認識するに至った。

そこで、田中和博先生に本研究委員会の委員長をお願い、本委員会の設置を学会に提案した。

3. 研究委員会の設立主旨と活動内容

前述した通り、1DCAEとは物事の本質を的確にとらえ見通しの良い形式でシステムを表現し全体の適正設計を行った後、3DCAEによりシステム構成要素個々の詳細設計を行い、その結果を全体適正設計に戻し再度システムの評価を行う設計手法である。この設計手法は種々の業種で取り入れられつつあることから、フルードパワーシステムの分野でもこの設計手法に関する技術および情報を一元的に取り纏める必要があるとの観点から本研委員会を設置した。本研究員会では曖昧なものを具体化するODおよび1DCAEに着目し、この設計手法をフルードパワーシステムに適用できるか検討することを目標としている。そこで、まず、1DCAEの中の1D（機能設計）を行うために必要なマルチドメインソフトウェアの

運用事例、運用上のノウハウおよび運用上の問題点を明らかにしたいと考えている。次いで、他の業界で1DCAEが利用されている現状を把握することを考えている。これらの情報に基づき1DCAEによるフルードパワーシステム設計に有益な情報をまとめることが目標である。

本研究委員会は、前述した通り平成28年4月から開始した委員会である。そのため、委員会は3回開催されただけである。第1回目の委員会は平成28年6月、第2回目は平成28年8月、第3回目は平成28年11月に開催し、第4回目の委員会は平成29年3月の開催を予定している。

第1回目の委員会では、田中和博委員長により、本研究委員会の設立趣旨と目標についての説明および「CFDと1DCAE」と題した話題提供が行われた。この話題提供では、1DCAEに基づいた開発設計および教育が日本の技術および大学の競争力が低下に歯止めをかけの一助となるのではないかという見解が示された。すなわち、別の視点から1DCAEの必要性および有効性が示された。次いで、CFDの立ち位置、および、CFDによる技術のブレークスルーは起きてはいないとのことが示された。そこで、ハードとソフトが発展して社会における今後の設計とモノづくりを考えた場合、本質を見抜いた設計手法すなわちトータルエンジニアリングの実現、すなわち、1DCAEが必要であることが示された。最後に1DとCFDを組み合わせた具体的事例として、複雑な内部流路を有する油圧マニフォールドブロックにおいて、CFDで1Dに必要なパラメータを推定し、その結果に基づき1Dシミュレーションを実行した結果が示された。

第2回目の委員会ではトヨタ自動車㈱平野豊氏より、「応用：Modelicaと1DCAE～オブジェクト指向異種物理系モデリング言語Modelicaによるモデルベース開発～」と題した話題提供が行われた。まず、自動車開発のプロセスを通して1DCAEの流れの説明が行われた。顧客要求仕様に基づき車両の特性をEXCEL等で検討する0D-Simから始め、システム挙動の検討をModelica⁵⁾、Amesim等を用いて1D-Simにより検討した後、FEMあるいはCFDによる3D-Simで機構・形状設計を行うことの紹介が行われた。次いで、1D-Simで用いられるモデルベース開発の狙い、モデルベース開発で重要となるパラメータの決定方法の実情およびモデルベースシステ

ム開発での留意事項について説明が行われた。最後に、モデルベース開発を実現するためのオブジェクト指向異種物理系統合モデリング言語であるModelicaの有効性と利用の現状、Modelicaに準拠した種々のモデリングツール（Amesim、Dymola⁶⁾、Simulation-X、Maple-sim⁷⁾）の特徴についての説明とともにECT、電子制御ブレーキの油圧系、将来の電動化モビリティのシミュレーションの事例についての解説が行われた。

第3回委員会では、シーメンス㈱緒方洋介氏より「Amesimを用いた油圧システムのシミュレーション」と題した講演が行われた。Amesimの特徴の簡単な紹介の後、油圧ダンパと車両モデルとの連成事例、すなわち、メカ部には3次元機構解析ソフトを使いAmesimと連成させたシミュレーションを行った結果が示された。次に、油空圧システムと様々な機構との連成事例についての解説が行われた。例えばチェック弁周りの流れをCFDで計算し流体力を求めAmesimに送り、そこで弁の位置を計算しCFDに送るというシミュレーションである。

4. おわりに

本稿では平成28年4月に設置された「1DCAEによるフルードパワーシステム設計に関する研究委員会」の設立の経緯、設立趣旨およびその活動内容について紹介した。

1DCAEに基づいた設計手法の実現はフルードパワーの世界で可能なのか？効果があるのか？等々本研究委員会を通して意見交換し考えていきたい。本研究委員会は始まって1年が経過した程度である。1DCAEについて少しでも興味のある会員の本研究委員会への参加を期待したい。

参考文献

- 1) 大富浩一：1DCAEの考え方に基づくものづくり，機械設計，Vol. 59，No. 9，p.12-13（2015）
- 2) 田中和博：CFDと流体システム，日本機械学会2015年度年次大会DVD論文集，K05200（2015）
- 3) https://www.plm.automation.siemens.com/ja_jp/products/lms/imagine-lab/amesim/
- 4) <http://www.newtonworks.co.jp/product/simulationx/>
- 5) <https://www.modelica.org/>
- 6) <https://www.3ds.com/ja/products-services/catia/products/dymola/>
- 7) <http://www.cybernet.co.jp/maple/product/maplesim/>

（原稿受付：2017年2月4日）

解説

コンバインのエンジン振動、騒音低減へのCAEモデルの適用

著者紹介



つじ のぶ ひろ
辻内 伸好

同志社大学理工学部機械システム工学科
〒610-0321 京都府京田辺市1-3
E-mail: ntsujiuc@mail.doshisha.ac.jp

1982年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了、三菱電機㈱を経て同志社大学理工学部機械システム工学科教授、現在に至る。振動工学、制御工学、バイオメカニクスの研究に従事。日本機械学会、自動車技術会、日本騒音制御工学会、IEEE、SAE、SEMなどの会員。博士（工学）。



あけ い まさ ひろ
明井 政博

ヤンマー株式会社エンジン事業部小形エンジン統括部
〒526-0111 滋賀県長浜市川道町1009-2
E-mail: masahiro_akei@yanmar.com

2003年大阪府立大学工学部卒業後、ヤンマー株式会社入社。2015年同志社大学大学院理工学研究科博士課程修了。ヤンマー株式会社にて産業用ディーゼルエンジンの開発に従事。日本機械学会、自動車技術会、日本騒音制御工学会、農業食料工学会、SAEなどの会員。博士（工学）。

1. はじめに

最近、自動車を代表として製品の設計・開発において「モデルベース開発（MBD）」という考え方が重要な地位を占めるようになってきている。MBDはよく「V字モデル」で説明されることが多く、初期の概念設計でいかに有効利用可能であるかが重要となる。一方、MBDの定義や利用目的は適用分野や対象によってさまざまである。

車両の振動騒音乗り心地の性能向上に関する設計（NVH設計）についても、従来から、製品設計の開発部門と生産部門の間では、図面による情報伝達を基に、3DCADモデルを用いることで、形状情報の効率的な共有がおこなわれてきた。最近では、これを発展させ、解析モデルを共有することで、フロントローディングと呼ばれる、開発早期に振動騒音の遠因となる外乱をモデルで予測し、それを最小化する生産品質の作り込みに反映されるようになってきている。

そこで、本論文では、特に農業機械のNVH設計

に焦点を当て、「モデル化技術の構築」「実用モデルの開発」を基盤とする「システム開発」について述べる¹⁾²⁾。

2. 農業機械の振動騒音

農業機械のオペレータの耳位置での騒音レベルは、年々低下傾向にあるもののオペレータの聴力保護の観点から現在の騒音レベルが十分であるとは言い難い。また、農業機械のオペレータに影響を与える振動には、座席の振動などの全身振動とステアリングの振動のような手腕振動がある。

農業機械の振動・騒音に関しては、エンジンからの音響・振動入力の影響が大きい。エンジンからの入力に対して対策をおこなうのが効果的である。しかしながら、エンジンの性能とエンジンの低騒音、低振動化を両立するには限界がある。そこで、エンジンの開発と車体の開発の連携が重要であり、その両者を受け渡す「システム開発」技術の確立が必要である。対象の普通型コンバインを図1に示し、解析モデルと実験解析を併用した振動騒音解析のフローを図2に示す。

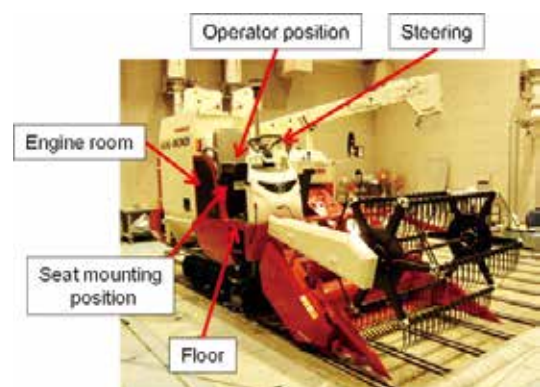


図1 普通型コンバイン

3. 騒音に関する解析モデル

3.1 逆音響解析による音源同定

エンジンからの放射音の低減化には数値シミュレーションを用いた騒音予測が有効であるため、精

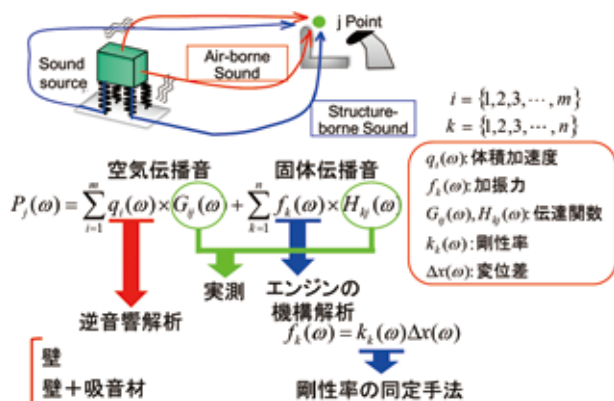


図2 解析モデルと実験解析を併用した振動騒音解析のフロー

度の良い音源モデルが必要となる。音源モデルを構築する手法の一つとして、逆音響解析が提案されている。逆音響解析は、音源の周囲に配置された観測点の音圧の実測値から音源の表面振動速度を算出する手法であり、音源モデルを構築する有効な手法³⁾である。逆音響解析により構築された音源モデルと境界要素法（BEM）を用いて、騒音予測⁴⁾がおこなわれる。

音源となる構造物があるとき、構造物表面における振動速度と観測点の音圧の関係は、次式で表現することができる。

$$\{p\} = [H]\{v\} \quad (1)$$

ここで、 $\{p\}$ は、観測点における音圧ベクトル、 $\{v\}$ は、構造物の表面における振動速度ベクトル、 $[H]$ は、構造物の表面振動と観測点の音圧の音響伝達関数である。逆音響解析は、 $\{p\}$ を既知、 $\{v\}$ を未知として、式(1)を解く逆問題である。伝達関数行列 $[H]$ は、正則であることが少ないため、振動速度を同定する際は、擬似逆行列を用いる。式(1)に左から伝達関数行列 $[H]$ の擬似逆行列 $[H]^+$ を掛けると音圧ベクトル $\{v\}$ は、次式で表現することができる。

$$\{v\} = [H]^+\{p\} \quad (2)$$

擬似逆行列の算出には特異値分解を用いる。音圧計測結果 $\{p\}$ に誤差がある場合、小さな特異値の影響で、音源同定結果の誤差が大きくなるため、これを無視した近似行列を用いて、誤差が大きくなることを防ぐ。情報量と同定誤差はトレードオフの関係にあるため、適切な許容値を選定する必要がある。そこで、許容値の選定には、L-curve手法⁴⁾を用いる。

境界要素法によりエンジン表面とエンジンの周囲との音響伝達関数 $[H]$ を求める。音響伝達関数 $[H]$ と実測で得られたエンジンの周囲音圧 $\{p\}$ を用いて、式(2)を解き、エンジン表面の振動速度 $\{v\}$ を同定する。図3に音源同定に用いた境界要素モデル

ルを示す。

3.2 騒音伝達経路解析と寄与度解析

音源モデルの構築と騒音伝達経路解析のフローを図4に示す。逆音響解析の入力となるエンジンの周囲の音圧をエンジンベンチにて計測する。計測で得られた音圧と境界要素法で計算された音響伝達関数を用いて逆音響解析をおこなう。逆音響解析で同定された表面振動速度を周波数領域で微分し加速度に変換する。得られた加速度と分割したエンジンの放射面の面積の積から体積加速度を算出する。次に騒音の放射面であるエンジン表面からオペレータの耳位置までの伝達関数を計測する。最後に同定された各部の体積加速度と伝達関数を用いて、オペレータの耳位置の騒音に対する伝達経路解析をおこなう。

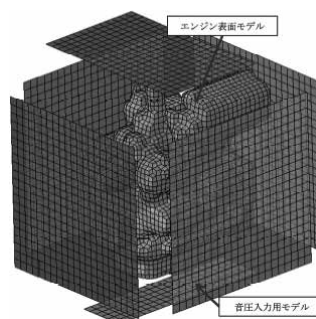


図3 音源同定に用いた境界要素モデル

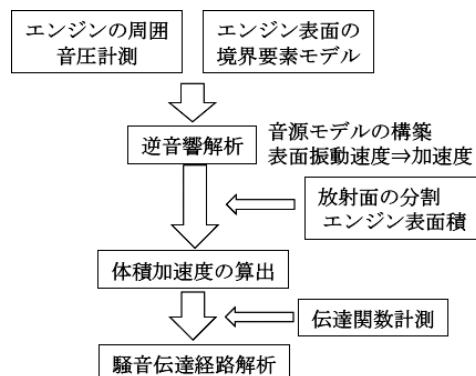


図4 音源モデルの構築と騒音伝達経路解析のフロー

伝達経路解析は、評価点の応答に対して、寄与の大きな経路を特定する手法である。評価点における応答は、各経路からの寄与の総和に等しいと考える。エンジンからの放射音に着目し、オペレータ位置の騒音を応答 $P(\omega)$ 、エンジン表面の入力点 i における体積加速度入力を $q_i(\omega)$ とすると、次式で表すことができる。

$$P(\omega) = \sum_{i=1}^n q_i(\omega) H_i(\omega) \quad (3)$$

ここで、 i は経路番号、 n は総経路数、 $H_i(\omega)$ は入力点 i から評価点までの伝達関数である。伝達経路

解析では、入力 $q_i(\omega)$ と伝達関数 $H_i(\omega)$ から各経路の寄与を算出することで寄与の高い経路を特定することができる。

ここでは、エンジンの放射面の騒音伝達経路解析の結果を示す。エンジンの放射面は合計208の面に分割したが、騒音の改善部位が判断しやすいように各部品の寄与を算出した。図5に騒音伝達経路解析の結果を示す。

図5は全14部品の寄与を1/3オクターブバンドで表したものである。図5中には、騒音レベルの実測値と騒音伝達経路解析で合成された騒音レベルを併せて示した。

実測値および伝達経路解析で合成された騒音レベルの両者で800Hz帯域の騒音レベルが最も大きいことがわかる。800Hz帯域の各部品の寄与に着目すると、排気サイレンサと遮熱カバー、フライホイール、吸気マニホールドと燃料フィルタからの放射音の寄与が高いことがわかる。他の周波数帯域においてもこれらの部位の寄与が大きいと優先対策する部位であるといえる。

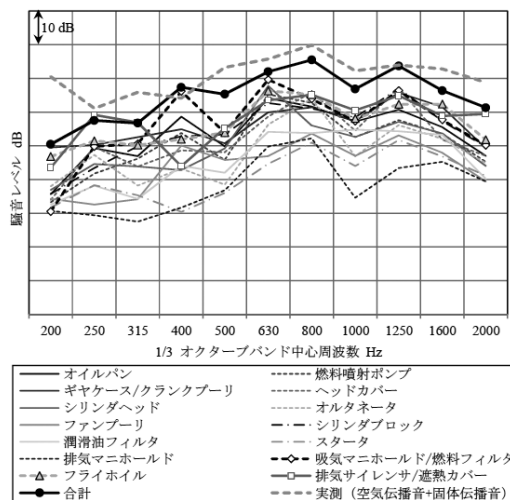


図5 騒音伝達経路解析の結果

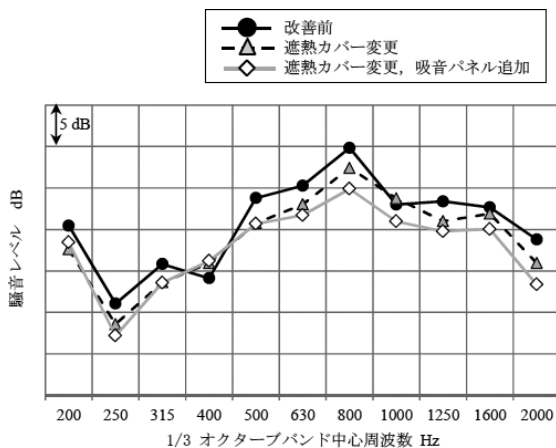


図6 騒音改善の結果

3.3 騒音の改善

騒音改善の結果を図6に示す。黒の●のプロット点が改善前を示し、三角のプロットが遮熱カバーを変えた時の騒音レベルの結果である。ひし形のプロットが遮熱カバーと吸音パネルを追加した時のオペレータ耳位置の騒音結果である。改善前後で、5 dB程度騒音レベルを下げる事ができた。

これらの結果より、音源モデルと伝達関数を用いて、寄与の高い部位を特定し、効率良く騒音改善をおこなうことができるといえる。

4. 振動に関する解析モデル

近年のCAEの発展により、機構解析を用いてエンジンの動的挙動を解析することが可能となってきた⁵⁾⁶⁾。これにより、エンジンから機械への振動伝達力に関しても数値解析で求めることができる。ここでは、エンジンの機構解析で求めた振動伝達力と実験により得られた伝達関数を用いたハイブリッド振動伝達経路解析手法について述べる。

4.1 機構解析モデルによる振動入力 の同定

まず、エンジンからコンバインのメインフレームへの振動伝達力を計算する機構解析モデルに関して述べる。図7に機構解析モデルの概要を示す。エンジンの各要素や要素間を結合するジョイントは、そ

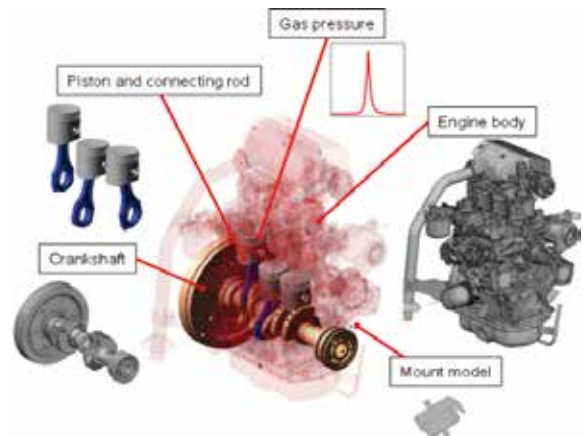


図7 ディーゼルエンジンの機構解析モデルの概要

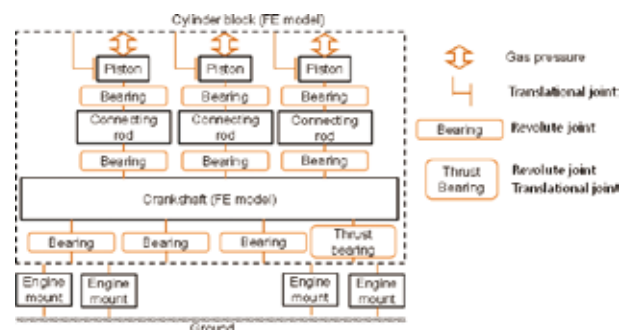


図8 機構解析モデルの要素とジョイントの定義

それぞれの要素を3D上に配置し、図8のように各要素間をジョイントで結合している。

クランク軸、エンジン本体は、自由度を減らした弾性体モデルとしてモデル化する。ピストン、コンロッドは3DCADモデルから得られた質量特性、重心位置を考慮する。筒内圧は、実験によって計測されたデータを使用する。エンジンマウントは周波数依存特性と振幅依存特性を考慮するため、3並列の一般化Maxwellモデルに非線形バネを追加し、拡張モデルを構築した。各要素のバネ定数や減衰係数は、エンジンマウントの単体試験結果を元に算出した。このようにエンジンマウントの周波数依存特性と振幅依存特性を考慮したモデルを用いた。

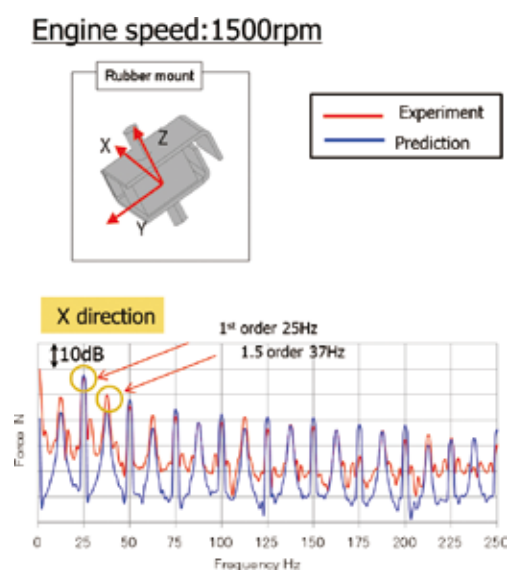


図9 エンジンマウントからの振動伝達力

図9にx方向の振動伝達力の予測結果と実測結果を示す。横軸が周波数、縦軸が伝達力、赤線が実測値、青線が予測値を示している。エンジン回転数の0.5次置きに伝達力のピークが発生する。3気筒エンジンの主起振力である、1次成分25Hz、1.5次成分の37Hzが大きいことがわかり、実測値と予測値は良く一致する。

4.2 オペレータ位置での振動予測

機構解析により求めた振動伝達力と実測した伝達関数を用いてオペレータ位置での振動レベルの予測をおこなった。図10に振動レベルの実測値と予測値を比較した結果を示す。ステアリング部の振動レベルには、手腕系の感覚補正⁷⁾を用いている。また、シート取付け部とフロア部の振動レベルには、全身振動の感覚補正⁸⁾を用いている。実測値と予測値の差は、概ね3dB以内であり、よく一致している。これらの結果より、エンジンの機構解析と実測した伝達関数を用いて、オペレータ位置の振動レベルの予

測が可能であるといえる。

5. ま と め

本稿では農業機械のNVH設計について、解析モデルと実験解析を併用した振動伝達経路解析を援用し、農業用コンバインの低振動、低騒音システム設計に適用した応用例について概説した。エンジンの高機能化技術と振動騒音特性の高度化の両立は重要な課題として今後も取り扱われる。

今後、ここで開発された技術やシステムモデルが制御系も含んだ本来の意味での「モデルベース開発」に適用されることを期待する。

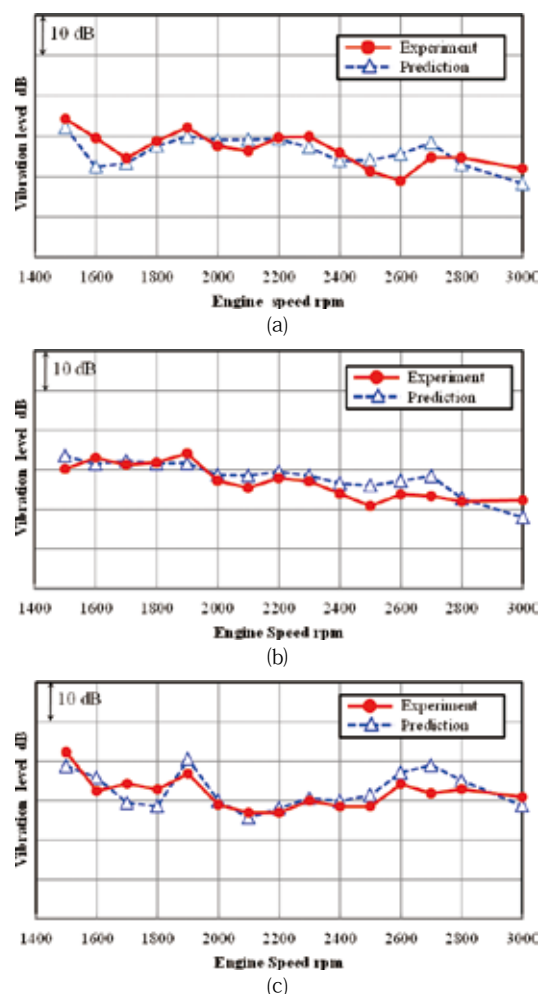


図10 オペレータ位置の振動レベルの予測結果

参考文献

- 1) 明井政博, 辻内伸好, 伊藤彰人, 山内貴之, 逆音響解析を用いた音源モデルの構築と騒音伝達経路解析, 農業食料工学会誌, Vol. 77, No. 3, pp. 186-196 (2015)
- 2) M. Akei, T. Koizumi, N. Tsujiuchi, T. Yamauchi, Prediction of vibration at operator position and transfer path analysis using engine multi body dynamics model,

-
- | | |
|--|---|
| <p>SAE Technical Paper 2014-01-2316 (2014)</p> <p>3) F. Martinus, D.W. Herrin, A.F. Seybert : Practical considerations in reconstructing the surface vibration using inverse numerical acoustics, SAE technical paper 2003-01-1456 (2003)</p> <p>4) D.W. Herrin, J. Liu, F. Martinus, D.J. Kato, S. heah : Prediction of sound pressure in the far field using the inverse boundary element method, Noise control eng. j., vol. 58, no. 1, pp. 75-82 (2010)</p> <p>5) T. Ortjohann, M. Rebbert, F. Maassen, M. Robers, 3D-Durability Analysis of Crankshafts via Coupled</p> | <p>Dynamic Simulation including Modal Reduction, SAE Technical Paper 2006-01-0823 (2006)</p> <p>6) K. Marudachalam, N. Choudhari, P. Chandramouli, V. Krishna Balla, Analytical Prediction and Measurement of Engine Mount Forces SAE Technical Paper 2007-32-0105 (2007)</p> <p>7) ISO Standards 5349-1 : 2001</p> <p>8) ISO Standards 2631-1 : 1997</p> <p style="text-align: right;">(原稿受付：2017年2月13日)</p> |
|--|---|

解説

HILS技術を用いた仮想走行試験手法の基礎研究

著者紹介

わた なべ のぶ ゆき
渡辺 信行公益財団法人鉄道総合技術研究所
〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38
E-mail: watanabe.nobuyuki.53@rtri.or.jp

1996年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年公益財団法人鉄道総合技術研究所に入所。2016年車両構造技術研究部走り装置研究室長。現在に至る。仮想走行試験環境の構築の研究に従事。日本機械学会などの会員。

1. はじめに

鉄道車両、あるいはその構成要素の開発においては、性能を検証する手段として営業線で実際に車両を走行させる、「現車走行試験」が多用されている。しかし、営業線での現車走行試験は営業列車や保線作業の間合いに実施せざるを得ないことから、集中的に試験を行うことは困難である上、営業列車に支障しないように試験条件が制約されることが多い。近年、このような制約を緩和できる試験専用線が日本にも建設されたが¹⁾、新幹線のような高速鉄道を含めたあらゆる車両の検証を1施設だけで実施することは不可能である。

一方、モデルベース開発における検証手法の1つとしてHILS技術がある。HILSでは検証対象となる実物とシミュレーションを試験機を通じてリアルタイムに結合することによって仮想的な環境下での実機評価を可能とする。当研究所ではこのHILS技術を導入することによって、所内のベンチ試験機で仮想的な現車試験を実現する「仮想走行試験環境」を構築するための研究を進めている。本稿ではその概要を述べる。

2. 仮想走行試験環境の試験機の構成

2.1 全体構成

図1に構築中の仮想走行試験環境の全体構成を示す。各試験装置とシミュレータは光ファイバーを用いたリアルタイムネットワークで結合されているが、すべての試験装置を同時に使用することを想定して

いない。大きく分けて、要素部品試験環境、編成試験環境、ラピッドプロトタイプ台車に分類することができ、目的に応じて機器を選択し、試験する。

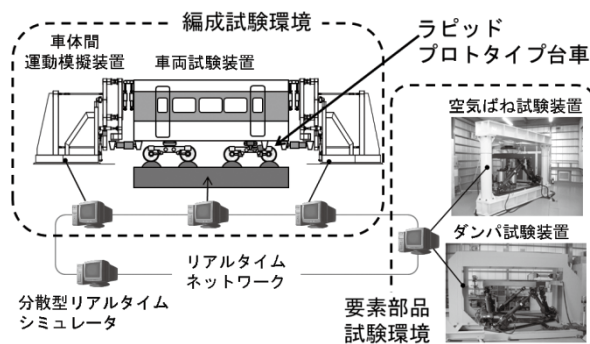


図1 試験機の全体構成

2.2 ダンパ・空気ばね試験装置と要素部品試験環境

オイルダンパや空気ばねは鉄道車両を構成する要素部品として幅広く使用され、これらの特性はダンパであればピストン伸縮方向、空気ばねであれば上下・左右（前後）方向の主たる作用軸の特性として規定されている。しかし、これらの部品が取り付けられた車体、台車は3次元の動きをするため、ダンパや空気ばねを3次元に動かすことによって、より実態に近い性能評価が可能になると考えられる。

そこで、ダンパ試験装置（図2）や空気ばね試験装置では、供試体の加振機構としてスチュワートプラットフォーム型のモーションベースを採用することによって、シミュレータが計算した3次元の動きで供試体を加振できる構成となっている。

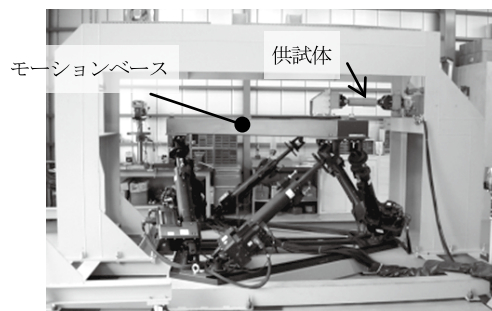


図2 ダンパ試験装置

2.3 車体間運動模擬装置と編成試験環境

新幹線のような高速で走行する車両では隣接車両の影響を受けた挙動を示すことがあるが、1車両の特性を評価する車両試験装置ではこのような編成に起因する運動を再現することができない。そこで供試車両に隣接して、隣の車両の動きを模擬する車体間運動模擬装置を設置し、装置と供試車両の間を実編成で用いる車体間ダンパで結合させ、シミュレータにより車体間運動模擬装置と車両試験装置を同時に動かすことによって編成車両状態を実現する。

車体間運動模擬装置（図3）は、パラレルリンクで支持された2重のフレーム構造となっている。中間フレームは3本のアクチュエータによって上下・左右・ロール運動が可能となる。隣の車体の妻面を模擬する前フレームと中間フレームとの間の2本のアクチュエータによってヨー運動を実現し、合わせて4自由度の動きが可能となっている。

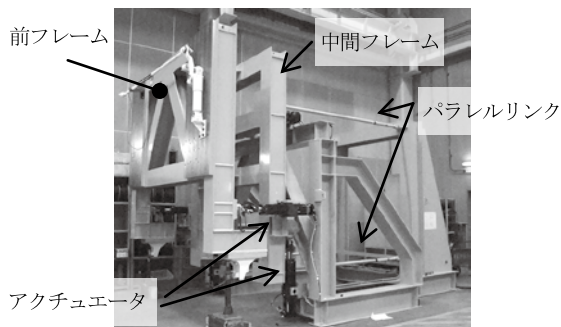


図3 車体間運動模擬装置

2.4 ラピッドプロトタイプ台車

ラピッドプロトタイプ台車（図4）は、既開発の要素部品試験環境や編成試験環境と異なり、現在開発中の台車のばね・ダンパ特性を車両試験装置で評価するための試験用台車である。台車には9本のアクチュエータが装備されており、ソフトウェア制御によってアクチュエータの長さと推力の関係を実現したいばね・ダンパの特性にする。このような手法は厳密にはHILSの定義と異なるがソフトウェアとハードウェアの2つの環境がリアルタイムで結合されているという意味ではHILSと同等と考えられる。

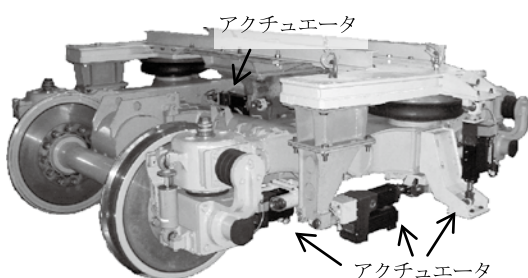


図4 ラピッドプロトタイプ台車

3. HILS試験を実現するための要素技術の開発

3.1 特性同定手法

通常ダンパや空気ばねは車両に複数装備されるが、前述のダンパ試験装置や空気ばね試験装置では試験できる供試体の数は1個に限定される。運動の対称性を考慮することによって1個の供試体の挙動を複数の供試体の挙動とみなしたHILS試験を実施することも可能であるが²⁾、一般的には試験装置で加振されないダンパや空気ばねの部分を数値シミュレーション部分に実装しなければHILS試験を実現できない。

そこで、供試体の持つ非線形性を考慮したシミュレーションモデルの生成手法を検討した³⁾。ここでは、HILS試験で使用できる高精度なモデルを効率よく得ることを主眼に、ダイナミクスモデルを併用した階層型ニューラルネットワークを採用した。図5に1例として新幹線用ダンパの同定結果を示すが、開発した手法で良好に特性を同定できることを確認した。

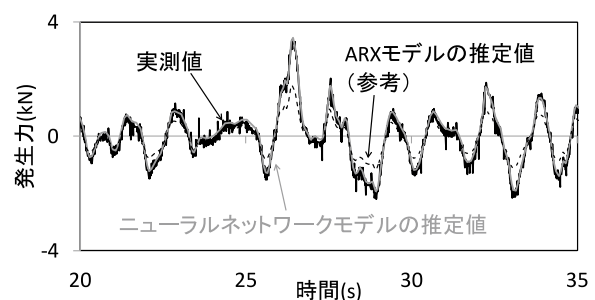


図5 新幹線用ダンパの主軸方向の特性同定結果

3.2 軌条輪加振手法

走行中の車両の車輪とレールとの間にはクリープ力がはたらいっている。車両試験装置で走行試験を実施する際には、軌道検測車で取得した営業線での軌道不整をもとに軌条輪を動かし、軌道不整を模擬する。しかし、

- ・まくら木方向のレール（軌条輪）の絶対速度
- ・車両進行方向のレール（軌条輪）の曲率

の違いにより、営業線と車両試験装置の走行試験ではクリープ力が異なることが知られている⁴⁾。編成試験環境では、このクリープ力の差異に起因する車両の応答差が発生しない加振方法が必要となるが、軌条輪の加振方法の工夫だけでは輪軸の動きを等価にすることはできない。

そこで、営業線で走行した条件と台車枠左右加速度とヨーイング角加速度を等しくする軌条輪加振手法を開発した⁵⁾。概略を図6に示すが、軌道不整

(u_r) を入力とし、レール上の走行した際の車両の台車枠の応答 (y_r) を出力とする伝達関数を G_r 、軌条輪加振 (u_x) を入力とし、車両試験装置上で走行した際の応答 (y_x) を出力とする伝達関数を G_x としたとき、 y_r と y_x を等しくする条件から、 u_r と u_x の関係は式 (1) で表される。

$$G_r u_r = G_x u_x \quad \therefore u_x = G_x^{-1} G_r u_r \quad (1)$$

したがって、あらかじめ車両試験装置上で特性同定し、伝達関数を推定すれば、台車枠より上部（空気ばね等の車体支持装置や車体）の応答を営業線走行条件と同等にすることが可能となる（図7）。

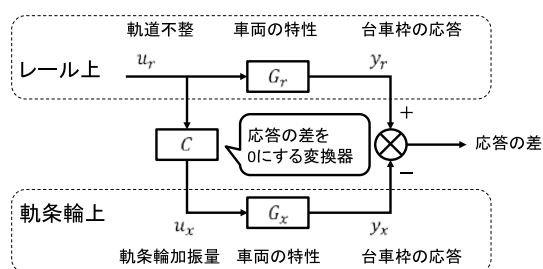


図6 開発手法の概要

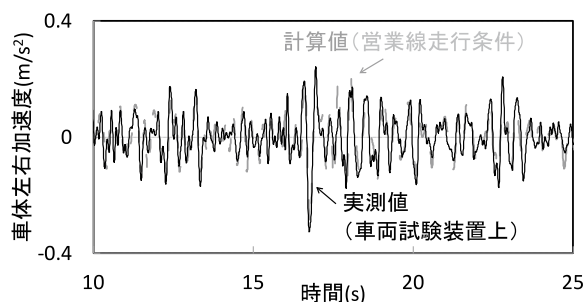


図7 営業線走行条件計算値と車両試験装置上実測値の比較

3.3 高精度なアクチュエータ制御手法

試験機の加振機構として、アクチュエータがよく用いられている。単なる加振機として使用する場合には、ゲイン特性が仕様を満足すれば十分であることが多い。しかし、実物とシミュレーションが試験機を通じてリアルタイムに結合するHILS試験では、実機と計算機との間にループ構造が存在することから、位相特性やむだ時間も実験精度に影響を及ぼし、最悪の場合には発振等危険な状態になることもある。

ラピッドプロトタイプ台車の場合、複数のアクチュエータが同一の部材（台車枠や輪軸）に取り付けられていて、それぞれが台車部品の特性に応じて動作している。当初は模擬特性の変更の容易さを優先してコントローラをアクチュエータ毎に独立させていた。その結果、アクチュエータ単体では良好に動作したが、台車として使用すると干渉と思われる高周波の振動が観測された⁶⁾。

そこで、数値モデル出力と実機出力を同期させる

コントローラの導出手法の1つであるDynamically Substructured Systems (DSS) 手法をベースにアクチュエータの制御性能向上に取り組んでいる^{7) 8)}。開発したコントローラを適用した台車について車両試験装置で走行試験を行った際のヨーダンパの特性を模擬するアクチュエータの応答を図8に示すが、精度よく動作できることが確認できる。今後は他のアクチュエータの制御にも適用を検討する。

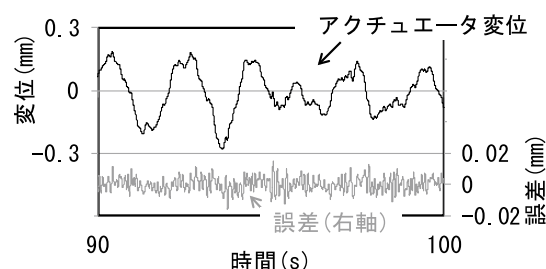


図8 ユーダンパ特性を模擬するアクチュエータの制御精度

4. おわりに

本稿では、当研究所で取り組んでいる「仮想走行試験環境」で用いている試験機の構成と、HILS試験を実現するために開発した手法について述べた。今後も研究開発を進め、試験インフラとして活用いただけるような実験環境にしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 中村大樹：MIHARA試験センターの運用開始，日本鉄道施設協会誌，Vol. 53，No. 1，p. 4-6（2015）
- 2) 山口輝也：実ヨーダンパを用いたHardware-In-the-Loopシミュレーションによる鉄道車両の蛇行動安定性試験（試験環境の構築と定性的な検証），日本機械学会論文集C編，Vol. 79，No. 806，p. 3420-3431（2013）
- 3) 小金井玲子，渡辺信行，朝比奈峰之，佐々木君章：ニューラルネットワークを用いた鉄道車両用ダンパの特性同定，鉄道総研報告，Vol. 23，No. 4，p. 11-16（2009）
- 4) 宮本昌幸：車両試験台建設への道筋，RRR，Vol. 72，No. 11，p. 24-27（2015）
- 5) 山口輝也，下村隆行，佐々木君章：車両試験台における実軌道走行模擬のための加振方法，鉄道総研報告，Vol. 27，No. 5，p. 11-16（2013）
- 6) 渡辺信行，佐々木君章，森下隼人：ラピッドプロトタイプ台車の基礎試験，鉄道総研報告，Vol. 26，No. 3，p. 5-10（2012）
- 7) 渡辺信行，D.P. Stoten：ラピッドプロトタイプ台車のアクチュエータ制御性能向上のためのDSS手法の適用，鉄道総研報告，Vol. 29，No. 9，p. 5-10（2015）
- 8) T. Yamaguchi，D.P. Stoten：Synthesised H^∞/μ Control Design for Dynamically Substructured Systems，Proceeding of The 13th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC 2016)，DOI：10.1088/1742-6596/744/1/012205（2016）

（原稿受付：2017年1月23日）

会議報告

山梨講演会2016におけるフルードパワー技術研究

著者紹介



よし だ かず ひろ
吉 田 和 弘

東京工業大学 科学技術創成研究院
未来産業技術研究所
〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259-R2-42
E-mail: yoshida@pi.titech.ac.jp

1989年東京工業大学大学院博士課程修了，同大学助手，助教授（准教授）を経て2015年4月教授，2008年10月～2009年3月米国UCSB客員研究員，2015年7月～9月米国MIT客員研究員，流体マイクロマシン，機能性流体の研究に従事，JFPS，JSME，IEEEなどの会員，工学博士。

1. ま え が き

2016年10月22日（土）に，山梨大学工学部（甲府市武田4-3-11）において，日本機械学会関東支部および精密工学会の共催で，山梨講演会2016が開催された．本講演会では，OS（オーガナイズドセッション）「アクチュエータシステム」10件，OS「流れの可視化と制御」5件，OS「応用熱工学」15件，OS「切削・研削・研磨加工」5件，OS「フランジガスケット締結体の力学と密封性能評価」12件，OS「バイオメカニクス」5件，流体工学3件，材料力学・計測13件，表面の科学7件，振動工学3件，加工5件，ロボット・制御・機械要素5件の研究発表と特別講演1件，合計89件の講演が行われた．

山梨講演会には長年にわたりOS「流体パワーによる駆動と制御」が設けられていたが，今回からこれを発展させた「アクチュエータシステム」が設けられた．オーガナイズは，田中豊教授（法政大学），石井孝明教授（山梨大学），および著者の3名であ

る．講演件数は10件で5件ずつの2セッション構成となった．図1に本セッションに出席者の集合写真を示す．研究発表の内容は，全10件のうち8件がフルードパワーを応用したアクチュエータに関するもので，その内訳は，油圧2件，水圧1件，空気圧3件，機能性流体2件であった．以下ではそれぞれの研究発表の概要について紹介する．

2. 研究発表の概要

2.1 油圧および水圧関連の研究発表

油圧関連ではアクチュエータおよび周辺機器，水圧関連ではポンプの研究発表があった．

坂間らは，油中気泡が油圧アクチュエータの特性に及ぼす影響について実験的に検討している¹⁾．圧力容器に封入した油をサーボシリンダで加圧する実験装置を構築し，エアコンプレッサと気泡除去装置を利用して含有する気泡の量を変化させた作動油の等価体積弾性係数を測定している．この測定結果に基づき油圧アクチュエータの容積効率について検討し，油中気泡が多いとき，低い圧力において容積効率が低下することを定量的に示している．

桜井らは，漏れによる油圧圧力容器の圧力低下を低減する素子を開発している²⁾．圧力容器の作動油を閉じ込めると圧力を維持できることは油圧システムの長所の一つであるが，漏れにより圧力は低下する．その低減を図るため，シリコンゴムの弾性変形により作動油を供給する低コストの圧力低下抑制素子を提案，試作し，シリコンゴムの硬度および圧力を変えて圧力低下特性を実験的に検討し，提案する素子の妥当性を明らかにしている．



図1 山梨講演会2016オーガナイズドセッション「アクチュエータシステム」の出席者

吉田らは、水の流体慣性を応用した圧電マイクロポンプの高出力化についてシミュレーションにより検討している³⁾。流体慣性ポンプは、吐出側にチェック弁の代わりに管路要素を設けたダイヤフラムポンプで、流体慣性により吸入時でも吐出を継続することで高流量が得られる。このポンプに対し、バイアス圧力印加で圧力振幅を増大させる高出力化を提案し、従来の数学モデルを改良して用いたシミュレーションによりその妥当性を明らかにしている。

2.2 空気圧関連の研究発表

空気圧関連では、システム2件および周辺機器の研究発表があった。

平原らは、工場作業者に装着してパワーアシストを行う荷重支持アームにおいて、2本のアームの協調駆動による剛性制御について検討している⁴⁾。本装置は、空気圧シリンダで駆動されるアーム2本で中腰姿勢の作業者を支持し、身体負荷の軽減を図る。アームごとに剛性特性のモデルを含む2自由度制御系を構築して位置制御を行い、協調駆動を行う。剛性制御実験を行った結果、荷重を目標の支持力と剛性特性で支持できることを確認している。

直井および藤田は、空気圧ベローズを用いた3自由度微動ステージの軌道制御のフィードフォワード制御による特性改善について検討している⁵⁾。本装置は、空気圧ベローズと弾性ヒンジ案内から成るユニット3個でステージを支持する構造である。従来の位置、速度、加速度のフィードバック制御系にフィードフォワード制御器を加えた制御系を構築し、操作量が滑らかになる目標軌道を与えた結果、追従性が向上することを実験的に確認している。

丸井らは、空気圧システムのドレンを除去するサイクロン形ドレンセパレータの特性改善のため案内羽形状について検討している⁶⁾。本装置は、空気とドレンの混合流体の旋回流を案内羽を用いて発生させ、遠心力を利用して密度差によりドレンを分離するものである。内部の圧力損失を低減し、広い流量域で使用できるようにするため、トンボの羽の形状を参考にした案内羽形状による特性について、実験およびシミュレーションにより明らかにしている。

2.3 機能性流体関連の研究発表

機能性流体関連では、基礎特性およびポンプの研究発表があった。

稲垣らは、MRF（磁気粘性流体）の電気抵抗変化を応用したリレーを提案し、MRFのクラスタの導通特性について実験的に検討している⁷⁾。MRFは、電気絶縁性のベース液に磁性体粒子を分散させたもので、本デバイスでは磁界により磁性体粒子の集合状態を変え電気抵抗を変化させる。固定抵抗と直列

接続したMRFの電圧降下を、電磁石にステップ電圧および方形波電圧を印加して測定し、提案するデバイスの妥当性および課題を明らかにしている。

清水らは、不均一電界印加で生じるECF（電界共役流体）の流れを応用したマイクロポンプの高出力化を図るため、DRIE（深掘り反応性イオンエッチング）を用いて高アスペクト比の三角柱ースリット形電極（TPSE）を製作している⁸⁾。DRIEを用いたTPSEの製作プロセスを提案、開発してTPSEを試作し、試作電極側面の形状を測定して設計値からのずれの大きさを評価するとともに、その発生原因について考察を加えている。

3. あとがき

本稿では、山梨講演会2016で発表されたフルードパワー技術研究の発表について概観した。講演会終了後にはOS「アクチュエータシステム」の出席者による懇親会が開催され、研究情報の交換を行うとともに、親交を深めることができた。2017年も山梨講演会においてOS「アクチュエータシステム」が設けられ、フルードパワー技術関連の最新の研究成果が発表されると思われる。多数の方々のご参加、ご発表に期待したい。

参考文献

- 1) 坂間清子, 五嶋裕之, 田中豊: 油中気泡が油圧アクチュエータの特性におよぼす影響, 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 153-154 (2016)
- 2) 桜井康雄, 兵藤訓一, 饗庭健一: 漏れによる容器内圧力低下抑制素子の開発, 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 155-156 (2016)
- 3) 吉田和弘, 宝来亮汰, 嚴祥仁, 永田貴之, 浅井勝彦: 流体慣性を応用した圧電マイクロポンプの高出力化 (シミュレーションによる検討), 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 157-158 (2016)
- 4) 平原雄一, 飯島拓也, 宮寄哲郎, 眞田一志: 作業者に装着する荷重支持アームの協調制御による目標支持力剛性の実現, 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 143-144 (2016)
- 5) 直井誠, 藤田壽憲: 空気圧ベローズを用いた3自由度微動ステージの軌道制御 —フィードフォワード制御による改善—, 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 145-146 (2016)
- 6) 丸井裕太, 村山栄治, 川上幸男, 土岐真人: サイクロン型ドレンセパレータの案内羽形状の検討, 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 147-148 (2016)
- 7) 稲垣亮則, 村山栄治, 川上幸男: MR流体のクラスタによる導通特性の実験的検討, 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 159-160 (2016)
- 8) 清水美咲, 西岡國生, 松谷晃宏, 吉田和弘, 金俊完: DRIEによる高アスペクト比三角柱ースリット形電極 (TPSE) の製作に関する研究, 山梨講演会講演論文集 (CD-ROM), p. 161-162 (2016)

(原稿受付: 2017年2月5日)

会議報告

ICMT2016会議報告

著者紹介

 おむ さん いん
 嚴 祥 仁

 精密工学研究所
 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-R2-42
 E-mail : sieom@pi.titech.ac.jp

2009年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。同年東北大学助教、2010年東京工業大学助教、流体マイクロマシン、機能性流体の研究に従事。JFPS、JSMEなどの会員、博士（工学）。

1. はじめに

メカトロニクス分野を中心とした幅広い分野の研究発表が行われる国際会議ICMT（International Conference on Mechatronics Technology）は、今回2016年10月28日から10月31日まで中国のDalian University of Technologyにおいて開催（図1）された。カンファレンスでは中国Dalian University of TechnologyのDongming Guo教授と日本東京工業大学の岩附信行教授が共同で議長を務め、基調講演7件（図2）と口頭講演121件の合計128件の講演が行われた（表1）。また10月28日の夜にWelcome Reception、10月29日にBanquetが開催され（図3）、会議参加者の親睦を深めるよい機会になった。10月30日はCollaborative Innovation center of Major Machine Manufacturing in LiaoningにおいてTechnical Visitが行われた（図4）。本カンファレンスはメカトロニクス分野を中心としているので、フルードパワー技術関係の発表が少なかったため、講演会全般について紹介する。


 図1 開催地のDalian University of Technology
Bochuan Libraryの全景


図2 基調講演の様子

表1 全体プログラム

10 / 28	Registration/Welcome Reception			
10 / 29	Opening Session			
	Keynote Speech			
	Advanced Mechatronics Devices (1) (2)	Mechatronics Control (1) (2)	Precision Manufacturing Technology and Control (1) (2)	MEMS/NEMS & 3D Printing (1) (2)
	Banquet			
10 / 30	Keynote Speech			
	Precision Manufacturing Technology and Control (3) (4)	Precision Measurement Technology (1) (2)	Sensors and Actuators & Mechatronics Control (1) (2)	Bioengineering/ biomedical Mechatronics
				Renewable Energy and Energy Saving Technologies/ Production Systems
10 / 31	Technical Visit			



図3 バンケットの様子



図4 Technical Visitが行われたCollaborative Innovation Center of Major Machine Manufacturing in Liaoningの内部

2. 講演会について

2.1 基調講演

講演会では7件の基調講演が行われ、メカトロニクス分野を中心とした各分野の最先端技術について紹介があった。行われた基調講演の講師と演題を下記に紹介する。

- (1) Professor K.P. Rajurkar, USA
Review of Micro Electrical Discharge Machining and Micro Ultra Sonic Machining Processes and their Applications
- (2) Professor Tadahiko SHINSHI, Japan
Mechatronics Technology for Artificial Hearts
- (3) Dr. Charles Wang, USA
A new technique for angular and linear measurement in 5-axis machines
- (4) Professor Yuri Chugui, Russia
Optoelectronic Precision Measuring Systems and Laser Technologies for Science and Industry

- (5) Professor Tianhong Cui, USA
Graphene Biosensors for Medical Diagnostics
- (6) Professor Robert Dorey, UK
Additive manufacture printing of active micro devices
- (7) Professor Zhongde Shan, China
Hybrid Forming Manufacturing Technology of Metal Complex Parts

2.2 テクニカルセッション

表1に示すようにテクニカルセッションはメカトロニクス分野を中心として構成され、本カンファレンスの特徴を表している。その中で、数件のフルードパワー関連の発表があり、たとえば、MR流体関連として、Jinghui PengらはVibration suppression of armature assembly in a hydraulic servo-valve torque motor using magnetic fluidと題して発表を行った¹⁾。また、Xuan Ba DangらはAn Predictive Optimal Control Approach for an Electro-hydraulic Systemと題して、Electro-hydraulic Systemの制御方法に関して発表を行った²⁾。K. YoshidaらはA Study on a High Pressure Piezoelectric Micropump Using Fluid Inertia for Fluid Power Sourcesと題して、新しいマイクロポンプを開発について発表した³⁾。ECF流体に関連してはD. HanらがDynamic Characteristics of Hybrid 3D printed Mini Finger Embedding ECF (Electro-conjugate Fluid) Micropumpと題して、3Dプリンターで製作したECF駆動アクチュエータについて紹介した⁴⁾。このように、メカトロニクス分野においてもフルードパワー関係の研究が行われている。

3. おわりに

本稿ではメカトロニクス分野を中心とする国際会議ICMT2016について紹介した。

参考文献

- 1) J. Peng, S. Li, Y. Tanaka : Vibration suppression of armature assembly in a hydraulic servo-valve torque motor using magnetic fluid, Proceedings of ICMT2016, 1 (2016)
- 2) X.B. Dang, K.K. Ahn : An Predictive Optimal Control Approach for an Electro-hydraulic System, Proceedings of ICMT2016, 63 (2016)
- 3) K. Yoshida, R. Horai, S.I. Eom, T. Nagata, K. Asai : A Study on a High Pressure Piezoelectric Micropump Using Fluid Inertia for Fluid Power Sources, Proceedings of ICMT2016, 82 (2016)
- 4) D. Han, S. Yokota, K. Edamura, J.-W. Kim : Dynamic Characteristics of Hybrid 3Dprinted Mini Finger Embedding ECF (Electro-conjugate Fluid) Micropump, Proceedings of ICMT2016, 89 (2016)

(原稿受付：2017年3月6日)

トピックス

建設機械における日・米・欧の 排出ガス規制対応技術の変遷と今後

著者紹介

たむらよしみ
田村好美

〒107-8414 東京都港区赤坂2-3-6
株式会社小松製作所開発本部エンジン開発センタ企画室

1. はじめに

2014年度から新たな段階の排出ガス規制が日米欧で施行開始され約2年が経過しようとしている中、着々と規制適合車が市場導入されてきている。一方で、先行している自動車においては市場での排出ガス規制のあり方の新たな課題が出て来て、その対応策についても検討がなされている。建設機械用ディーゼル機関の今までの歩みから得られた事と、今後の展開、なすべき課題などについて以下に記し、何かの参考になればとの思いでまとめた。そもそも建設機械用ディーゼルエンジンには、信頼性・耐久性が求められ、小型から大型まで幅広いレンジで高出力が求められ、高い熱効率も求められる。排気ガスについては1996年に米国で規制が開始され、欧州、日本が追従してきた。現在ではその他の国々でも環境への配慮が進み、排気ガス規制が実施されるようになり、グローバルな商品という位置づけの建設機械であることから、さらなる進化と前出の課題をクリアすることで、市場で評価される。

2. 排出ガス規制とその内容

(1) 日米欧の排出ガス規制

排出ガス規制は先行する自動車の規制を追う形で施行されて来ているが、使われ方の違い、稼働環境の違いから、その内容は異なり以下については建設機械における排出ガス規制対応を主題で書いている旨を先にお断りしておきたい。

米国連邦環境保護局(EPA: Environmental Protection Agency)は乗用車、オンロードトラックの排出ガス規制に続き建設機械、産業機械等に対してはノンロードディーゼルエンジン規制として1996年から規制を開始し、欧州連合(EU)も追従。

日本においては、同時期に当時の建設省(現国土交通省)が「排ガス対策型建設機械指定制度」として直轄工事に対する使用制限として同様な基準値を導入して規制への先鞭をつけた。国内の建設機械・産業機械・農業機械等のオフロード用機械については特定特殊自動車として排出ガス規制が2006年に法制化され、日米欧で同様な排出ガス規制が実施されるようになった。図1に示すように1996年から5年毎に強化されてきた排出ガス規制は、2006年からの規制(米国ではTier3欧州ではStageⅢA日本では平成18年規制)が開始され、2011年からの規制(米国ではTier4interim、欧州ではStageⅢB、日本では平成23年規制)が導入された。欧米は使用されるエンジン単体の規制範囲に対して、日本は車両も含めた規制で、異なる点が特徴として挙げられる。

2011年からの規制ではパティキュレート(以下PM)が2006年規制の1/10にまで低減され、その3年後の2014年からの規制では窒素酸化物(以下NOx)が2006年規制の1/10まで低減されることになり、建設機械用エンジンから大幅低減が図られることとなった。出力レンジの小さい規制カテゴリーにおいては、規制値が異なることから、酸化触媒のみでの仕様も実用化している。

欧州においては、さらに規制強化の方針が打ち出され、より厳しいPM排出量低減と粒子数を制限するPN(Particle Number)規制導入を2019年より実施する方針が打ち出されている。本件はPM低減技術およびPN計測技術、方法、設備導入も新たな課題、技術が必要になる。

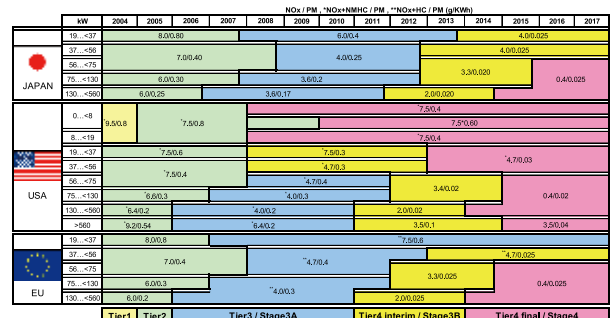


図1 日米欧の2014年までのオフロード排出ガス規制

(2) 建設機械用エンジンの排出ガスの測定法

建設機械用ディーゼル機関の排出ガス測定モードは使われ方の違いから自動車用とは異なったモードが設定され、従来からISO8178のC1モードと呼ばれる定常8モードでの測定モード(図2)が採用されていた。2011年からの新規制では、多用途での使われ方を排気ガス試験方法に反映させる狙いから、ノンロードトランジェントサイクル(図3)と呼ばれる過渡状態での測定モードが追加され、双方のモードでの測定結果がそれぞれ規制値を満足させる必要がある。1,200秒間で、ホイールローダー、スキッドステアローダー、農業機械、油圧ショベル等々を考慮した負荷、回転数で運転する試験モードで、日米欧の基準調和も図られている。定常試験として、図2のC1モードに対して、各ポイントでの頻度値が若干異なり自動運転ができるRMC(Ramped Modal Cycle)の試験法も追加され、いずれに試験モードで行うかエンジンメーカーの選択の幅が広げられた。

2011年規制からの対応技術として、エンジン本体の改良ではNOxあるいはPM低減を図るには厳しい規制であるため、多くのメーカーが後処理装置の採用をしており、後処理装置に使われている触媒への影響が出ない低イオウ燃料が必要で、自動車用と同様に、燃料規格が変更されている。

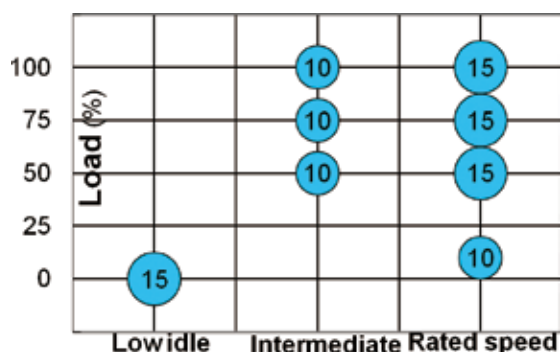


図2 ISO8178 C1モード
(丸印内に書かれている数字が頻度値を表す)

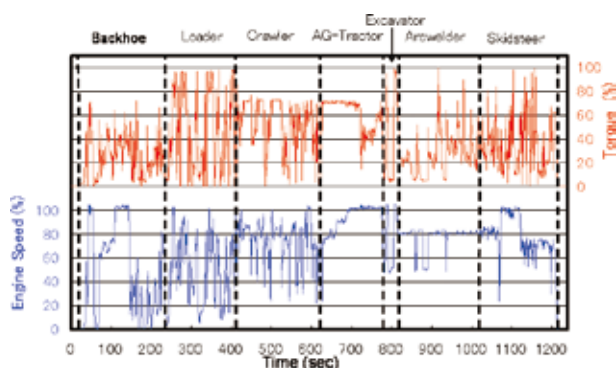


図3 ノンロードトランジェントサイクル (NRTC)

3. 排出ガス規制対応技術の変遷 (以下弊社 の事例が主)

(1) 排出ガス規制対応技術 (～ 2010)

建設機械の排出ガス低減対応技術は規制の段階的に大きく変化してきている。また、先行してきた自動車用の技術やコンポーネントをそのまま建設機械には使えないものが多々あり、状況に応じて最適化が図られてきた。以下の技術事例は、出力が130kW～560kWクラスの機関について規制対応技術の一例を述べる。2001年(2001年～)までの規制対応はエンジンのみの燃焼改善を柱として達成出来た。2006規制からはNOxとPMの低減を両立させるために、高圧噴射と排出ガス再循環システム(以下EGRシステム)などの導入が多く、多くの機関で織り込まれた。車両も含んだトータル制御をするべく電子制御化が一気に進んだ。

NOxとPMの低減とエンジン性能の両立を図るために、パイロット噴射やポスト噴射が可能なマルチ噴射機能がある、高圧燃料噴射装置のコモンレール噴射システムが使われるようになったのもこの時期。

(2) 排出ガス規制対応技術 (2011 ～)

第4次規制に入ると、エンジンのみの改善で出来た第3次規制対応に対して、大きく分けて二通りの方策が実用化されてきた。

第一は、EGRシステムの排出ガス循環量(EGR量)を増やしてNOxを半減すると共にPM低減のためにパティキュレートフィルタと呼ばれる後処理装置を新たに導入するという組み合わせである(図4, 9, 10)。

また、コモンレール燃料噴射システムは高噴射圧化への開発が進められ、2011年規制対応エンジンでは200Mpaレベルにまで噴射圧が高められてPM低減を図った。

第二は、PMに低減に対してあくまで燃焼改善により規制値レベルまで低減し、NOxについては後処



図4 排出ガス規制対応技術の変遷 (コマツの事例)

理装置を導入して規制値まで低減するという方策である(図4)。PMを規制値レベルまで燃焼改善にて改善するために電子制御による高圧噴射システムを活用すると共に燃焼のマッチングをNO_x-PMトレードオフ上で低PMとなるようにマッチングさせることで達成している。NO_xの後処理装置としてはすでにトラック等で実用化されている還元剤として尿素水を用いたSCR(Selective Catalytic Reduction)と呼ばれる脱硝触媒を使ったシステムが主に採用されている。

第一の方策では「PMを溜める」「PMを燃やす」という基本的な機能が必要で、PMの量を検知し適当な時期に自然にまたは強制的に適宜に燃焼させることが必要になる。

第二の方策では、NO_x低減のための後処理装置のための、還元剤となる尿素関連装置が必要となり、低温環境下時でも機能維持できる技術が必須となる。また、排気ガス温度が還元大きく影響するので、温度マネジメント技術も必要になった。

4. 主な排出ガス規制対応技術の紹介

(1) 排出ガス再循環システム(EGRシステム)

排出ガスの一部を冷却し、不活性ガスとして吸気と共にシリンダー内に導き、燃焼時の熱容量を増大させることによって燃焼温度を下げることでNO_xを低減することができるシステムである(図5)。建設機械用としては2006年第三次規制から導入されて来ているものもあり、本システムの特徴は燃料消費の悪化を抑えつつNO_xの低減が可能となることに狙いがある。EGR量を増やす意図から、後述の可変ターボチャージャの採用、EGRクーラーの大容量化などが図られている。

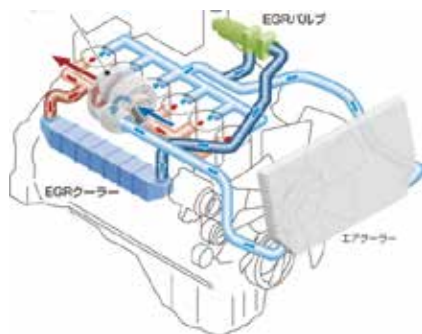


図5 エアハンドリング

(2) 可変ターボチャージャ(一例)

一般的なこれまでのターボチャージャは排気ガスによりタービン翼を回し、同軸上にあるブースト翼で給気を押し込むものだが、可変式はタービンのマッチング特性を変化させて、排出ガス特性とエン

ジン性能の両者を改善することが狙いである(図6)。

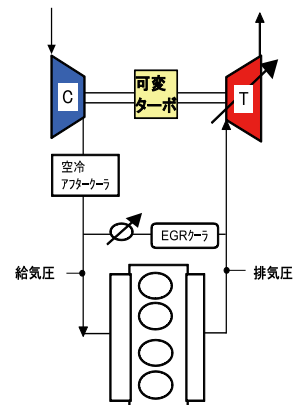


図6 エアハンドリングシステム

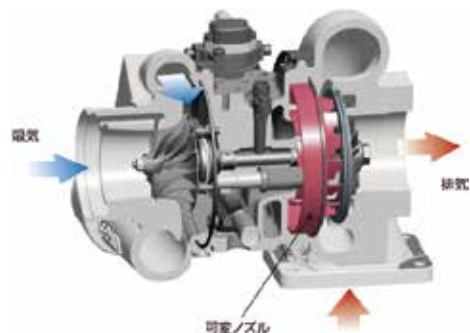


図7 可変ターボチャージャ

可変式により、EGR制御の精度と自由度を上げることができるだけでなく、建設機械にとって重要な過渡特性に対しても改善することができる。建設機械にとっては負荷変動に対するエンジンの応答性は重要な特性であり、排出ガス規制の開始に伴いPMの低減やNO_x低減に重要なEGRの制御特性との絡みからその改善は難しいものとなっていたので本機能の導入は非常に効果的である。一方で高度や気温など特殊な環境下やエンジン回転および負荷の急激な変動を伴う使われ方から、耐久性を確保することが非常に難しく、可変ターボチャージャについてはこれまで建設機械では積極的に導入されてこなかった経緯があった。図7はベーンをスライドさせてタービンの通路面積を可変化するタイプの例を示している。

(3) 電子制御式高圧燃料噴射システム

燃料噴射システムとしては、コモンレールタイプの採用が中大型への普及に続いて小型にまで普及してきている。従来と比較すると、2001年第二次規制では噴射圧が120Mpa程度であったものが2006年第三次規制では160Mpaへ、そして2011年からの第四次規制では200Mpaまで高圧噴射が可能

となり、噴射率の増加や噴射の分割化（マルチ噴射）が図られて、噴射率および噴射時期の可変制御の自由度が大幅に増している（図8）。

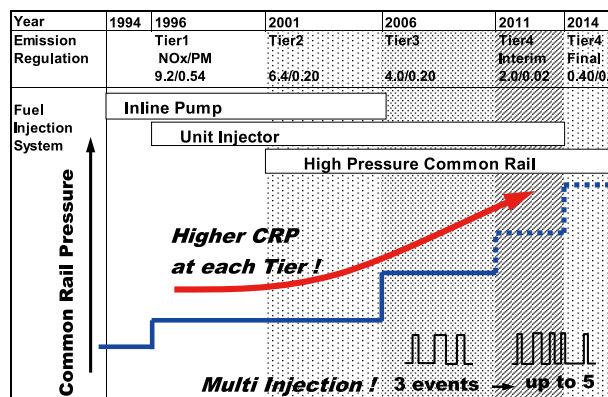


図8 コモンレール燃料噴射システム

このような噴射系の機能向上は単に排出ガスの低減に寄与するだけでなくエンジンの低温時を含めた始動性、環境（温度、高度）への対応、後処理装置への排ガス温度のマネージメント、酸化剤または還元剤としてのHC供給装置の役割など従来噴射系とは大幅に異なった役割を担っている。

(4) 排出ガス後処理装置

2011年規制から後処理装置前のエンジン出口のPMレベルをどれほどに抑えられるかにより、後処理装置はPM捕捉率を決め、PMをフィルタでため込む量が決まる。さらに溜まったPMを燃焼させて除去する仕組みをシステムとして組み込んでいる。ここで装置の大きさが決まり、各社でそれぞれ設定され特徴付けられる。燃焼方策としてはバーナーを使ってフィルタ内温度をPMが燃焼させる方法や酸化触媒を用いて供給燃料を酸化させて昇温しPMを燃焼させる方法などが採用されている（図9）。

図10は酸化触媒を使って温度制御を行うシステムを示す。酸化剤としての燃料は装置上流側で噴射されフィルタ内の酸化触媒出口温度が目標温度となるように制御されPMを燃焼させる。また通常は排出ガス中のNOは酸化触媒により酸化されNO₂となっており、比較的低温での、PM燃焼（酸化）に寄与（自然再生と呼ばれる）し、フィルタ内のPM堆積低減効果にも寄与している。

2014年規制からはNOxの大幅低減が課せられ、前出の2-(2)で記載した尿素を用いたSCR（Selective Catalytic Reduction）が主に実用化されている（図11）。

SCRは尿素水を排気ガスの熱によりアンモニアに変換させ、それを還元剤としてNOxを浄化する。

他にも、NOx吸蔵触媒システムなどもあり、NOx

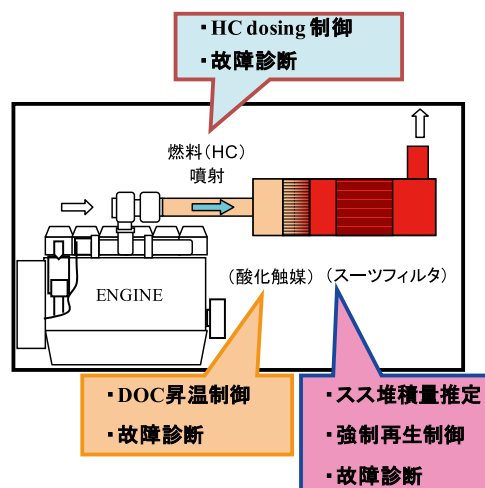


図9 PM低減のための後処理装置

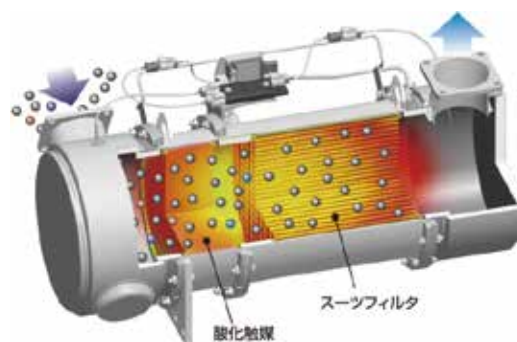


図10 パティキュレートフィルタ

を硝酸塩の形で触媒中に吸蔵し、還元雰囲気中でNOxを浄化する方式などもある。周期で還元雰囲気にする運転制御が必要で、この時のスモーク、燃費、還元時のトルク変動などが課題と言われている。また、燃料、オイル中の硫黄分による被毒で、吸蔵性能の低下も課題はあるようだ。



図11 NOx低減のための後処理装置

(5) 電子制御

燃料噴射装置の可変性と電子制御化が進み、燃料噴射量、噴射時期、噴射圧の電子制御が可能となり、EGRシステムはEGRバルブの制御と可変ターボチャージャの電子制御化により精度よくEGR量を制

御できるようになった。またPM低減のための後処理装置についても同様に温度・圧力等の情報を採取して、それに基づくシミュレーションを行ってシステムの制御を行っている。電子制御の導入は単に各システムの制御性の向上だけでなく、エンジントータル制御こそが最大のメリットである。排出ガスの低減を含めて環境変化や使われ方に応じたエンジンの最適制御が可能となっている。更にエンジンばかりでなく車両とのトータル制御を図ることで車両としての機能・性能の向上は勿論のこと電子制御の高機能化をすることで、排気ガス性状維持のためのメンテナンスや故障診断に対しても大きな威力を発揮することになり、車載ネットワーク経由で車両の稼働情報を収集しデータ送信機能なども補ってきている。今後建設機械の自動化（ICT建設機械）、AI機能化、等には必須のアイテムとなるであろう。

5. 日欧米以外の国々での排気ガス規制対応と今後の規制動向予測と展望

日米欧の排出ガス規制については、日米は2014年規制以降の計画は公表されていないが、欧州はさらなる規制強化の考えが示されていて、2019年以降に、さらに厳しいPM排出量低減、一定の大きさのPM粒子数規制するPN規制を実施する方針が示されている。PMのさらなる低減技術開発や、粒子数を抑える技術開発、測定方法、計測技術、などの新たに必要になる。また、排出ガスの測定条件についても、自動車が進められている、より現実の使われ方近い運転での評価、リアルワールドでの計測、評価も、従来の試験ベンチでの評価に加えて、使用実態の中での排出ガス計測、評価も課題として認識しておくべきではと考える。

市場導入されている建設機械用NOx低減装置においては、市場導入なされてから時間的な実績が十分とは言えず、市場実績の蓄積から得られる課題も出て来る可能性への対応も不可欠で、新たな技術への

チャレンジも必要になるかもしれない。

一方、日米欧以外の国々でも環境への配慮は注目されていて、欧米を追従する形で規制強化が図られつつある。ただし、日米欧での最新のエンジンが搭載された機械を導入しようとしても、その国々の経済事情もあってイオウ分の少ない適合仕様燃料が手に入らないという事情があり、燃料中のイオウ分は触媒を使った装置への悪影響もあることから、これらの地域へは排気ガス規制の一世代前の機械の導入も必要になる。

また、2015年12月に気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）で採択され、翌年11月に発行した国際条約においてのCO₂削減への貢献も必要になって来るものと推測する。

6. おわりに

ディーゼル機関はまだまだ建設機械においては不可欠な動力源であるが、一方で大気環境負荷への対応も重要なことは充分認識している。先行している日米欧以外の国々でも経済成長は目を見張るものがあるが、同時に環境への配慮は不可欠で積極的に対応している国々が増加している。これらへも充分に配慮、対応していく必要があることは、業界、メーカーとして当然の使命である。各国政府、規制当局を始め、機械を使うお客様、建設機械を供給するメーカー、それをサポートするサービス代理店までが一体で、国際的大気環境改善に取り組み、経済発展と連動させて進めていくことを切望する。

参考文献

中央環境審議会 第六次、九次、十一、十二次答申、山海堂発行「ディーゼルエンジンテクノロジー」2006/4月号掲載「コマツECOT3エンジンの最先端テクノロジー」、社団法人日本建設機械化協会発行「建設の施工企画」2011/1、日本工業株出版「建設機械」2012/1、2013/8

（原稿受付：2017年2月6日）

トピックス

細径人工筋肉の研究と実用化

著者紹介



すず もり こう いち
鈴 森 康 一

東京工業大学工学院
〒152-8550 目黒区大岡山 2-12-1
E-mail: suzumori@mes.titech.ac.jp

1984年横浜国立大学大学院修士課程修了。1984年-2001年株式会社東芝勤務。この間、1990年、横浜国立大学大学院博士課程修了。1999-2001年財団法人マイクロマシンセンター。2001年-2014年岡山大学教授。2014年より東京工業大学教授。2016年より株式会社s-muscle代表取締役兼務。日本フルードパワーシステム学会会員、日本機械学会、日本ロボット学会フェロー、工学博士。

1. はじめに

筆者らはマッキベン型人工筋肉の細径化（1.8mm～4.5mm）とその量産化に成功し、2016年4月に東京工業大学と岡山大学の両大学発ベンチャーとして、株式会社s-muscle（エスマスル）を立ち上げた¹⁾。その経緯と、起業後1年経って今考えていることを述べさせていただく。

2. 細径人工筋肉

マッキベン型人工筋肉は、ゴムチューブの外周に編組を編んだ簡単な構造を持ち、ゴムチューブ内部に空気圧をかけると軸方向に縮む。1960年頃に米国で発明され、その後いくつかのメカで生産販売、またロボットやパワーサポートスーツとして利用されてきた。

筆者らの細径人工筋肉は、原理と構造は従来のものとまったく同じであるが、主に材料や製造法を工



図1 細径人工筋肉の一例（左：端末加工品、上から外径4.5mm、2.5mm、1.8mm、右：ロール巻での出荷例）

夫することにより、最小1.8mmの外径を持つしなやかなものになった（図1）。従来のものは外径数cmのものが多い。

図2は製造現場の様子である。



図2 細径人工筋肉の生産の様子

3. 開発のきっかけ

筆者は古くから種々の空圧ラバーアクチュエータを開発してきた。そのなかで、従来の外径数cm程度のマッキベン型人工筋肉を試作したり、使ったりしてきた経験があり、その特性はよく知っていた。

平成23年頃、海外の電機メカから、細く力の大きいアクチュエータの相談を受けた。形状記憶合金やワイヤ駆動などいくつかの方法が頭に浮かんだがどれも要求を満たせない。そこで思いついたのはマッキベン型人工筋肉を細く作れば要求性能を満たすはずだということであった。

細く作るのは、まずは細径で弾性特性の良いゴムチューブの押出し技術と、細く正確な製紐技術（「せいちゅう」と呼ぶ。組みひもを作る技術）が必要となる。いろいろなつてを頼って、試作に協力してくれるメカを探した。

その結果、古くからお世話になっているゴムチューブメカと、倉敷市の株式会社池田製紐所（その後一緒に起業することになる）に協力していただけることになった。このご協力がなければ、そ

もそもこの研究は始めていなかったかも知れない。

「製紐産業」は伝統がある一方で、なにか新しい技術を導入したいというご意向もあって、非常に熱心に対応していただいた。材料についても編み方についてもディスカッションを重ねた。たとえば、人工筋肉の特性を決めるうえで重要なのは繊維の編み角であるが、我々はそれを中心軸に対する角度で表現するが、製紐業界では組紐の長さあたりの繊維の重量で指定する。このような意識合わせから始まった。

その後、無事人工筋肉は出来上がり、学会で賞をいただいたりもした²⁾。一方で、ロボットやパワーサポートスーツ等さまざまな応用研究も始めた。

4. 起業に至るまで

学会発表やマスコミ報道を通じて、介護用具、ロボット、アパレル等の多くのメーカーや、大学などの研究者から、売ってほしいという問い合わせをたくさんいただくようになった。はじめのうちは、自分たちの研究用に作っているだけなので外に出す余裕がないとお断りしていたのだが、その後も熱心に言うてくださる方が多かったので、起業することを考え始めた。平成26年頃からである。ちょうど時期を同じくして、筆者が岡山大学から東京工業大学に異動することにもなり、企業体制を本格的に検討し始めた。

こうして、筆者と、一緒に開発を進めてきた岡山大学の脇元修一准教授、倉敷市の株式会社池田製紐所、それに、端末加工や空気圧制御装置を担当してもらう株式会社コガネイの4者で協力して起業した。また、大学の研究成果を活用するベンチャー企業として、東京工業大学と岡山大学から大学発ベンチャー企業として正式に認めていただいた。

会社自体はファブレスの形態をとっている。主に筆者と脇元准教授らが人工筋肉の設計を担当し、生産や販売業務は、上記の2社に委託した形式をとっている。また、大学とs-muscleと人工筋肉のユーザーの間で共同研究契約を結び、人工筋肉の応用研究開発を進めている。共同で知財を持つとともに、人工筋肉を、介護器具、服飾、ロボット等のユーザーメーカーに買っていただく、というのが基本的なビジネススタイルである。

平成28年8月よりサンプル出荷をはじめ、潜在的なユーザーメーカーや研究者に試用してもらっている。平成29年4月からは、技術的改良を加えた正式バージョンの人工筋肉の販売を開始する計画である。

5. 耐久性・品質管理

昔からあるマッキベン型人工筋肉を単に小さく

作っただけでしょう?と思われる方もいるかもしれない。

とんでもない。細径化にともない、通常のマッキベン型人工筋肉では問題とならなかったさまざまな技術課題を解決する必要があった。特に、品質管理と耐久性向上に関する問題は、細径化に伴い顕著になる。

人工筋肉が正常に動かなかったり、壊れたり、空気漏れを起こすのにはいくつかのパターンがある。代表的なものを図3に紹介しよう。

図3(A)は、我々が「ヘビ玉」と呼んでいる異常動作現象である。写真に写る2本の人工筋肉はともに同じ空気圧をかけて縮んでいる状態であるが、上側の人工筋肉は正常に様に径方向に膨らんでいるのに対し、下側の人工筋肉は膨らんでいる箇所とあまり膨らんでいない箇所がある。通常のサイズのマッキベン型人工筋肉ではこのような現象は経験したことがなかった。この現象がさらにひどくなると、図3(B)のように編組内でゴムチューブが蛇行しだし、場合によっては空気が抜けなくなる。ちょうどヘビが卵を飲み込んだように見えるので、「ヘビ玉」と呼んでいる。これは製造時に適切な処理を行わないとしばしば現れる現象であるが、この現象の解明と対策にはずいぶん悩まされた。

図3(C)は長時間繰り返し動作したときに生じることがある代表的な破壊モードである。表面に傷がついているがこれは編組を構成する繊維がゴムチューブ表面に食い込んでつけている傷である。これが進むと、ちょうど糸で羊かんを切るように亀裂が進展し、ゴムチューブに穴をあけ空気漏れを起こす。一般に大きなマッキベン型人工筋に比べて細径人工筋肉は編組の打ち数が少ないので、編組の繊維とゴムチューブ表面の接触部分の面圧が高くなり、この問題は特に顕著になる。

図3(D)は伸縮動作を繰り返すうちに、編組を構成する繊維に粗密ができる不具合である。これは特に端末処理付近で起こりやすく、その場合編組の粗の部分からゴムチューブが飛び出し、図3(E)のようになる。こうなると短時間のうちに飛び出した部分が破裂する。あるいは図3(F)のように完全に飛び出してしまう。

これらの現象の発生メカニズムを解析しながら、材料や製造法を工夫することで、品質向上、耐久性向上を進めてきた。

6. 用途開拓

細径人工筋肉単体の性能向上もさることながら、用途開拓も重要な事業として、ユーザー企業や大学と

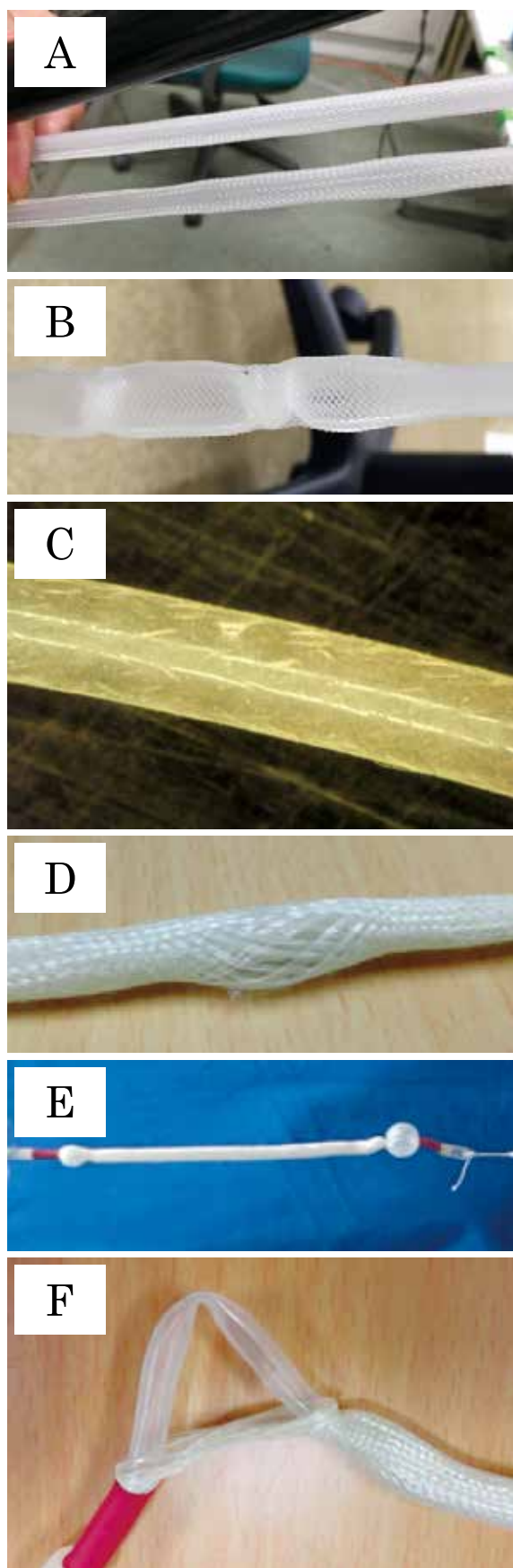


図3 異常動作、破壊の代表例（A, B：へビ玉現象, C：繊維によるゴムチューブ表面の傷, D, E, F：編組の繊維の片寄り）細径人工筋肉

協力して進めている。

いま力を入れているのは、介護用具やパワーアシストスーツと、ロボットへの応用である。東工大で進めている研究は、本誌の昨年末の号で紹介させて頂いたのでみていただきたい³⁾。そのほかの2例を紹介する。

図4は20m長さのアームである⁴⁾。ヘリウムを充填した樹脂袋の一部を溶着して曲がりやすい部分を20か所作り、これを関節として40本の細径人工筋肉で拮抗駆動する。先端には小型カメラが搭載され、構造物等の検査が行える。全体で1.2kgである。周囲にぶつかっても、万一落下しても安全である。通常のモータでは重すぎてこのようなロボットは実現できない。まさにこの細径人工筋肉だからこそできる新しいロボットである。

図5は、現在東工大と共同で進めているサポートスーツへの応用例である⁵⁾。外骨格型のロボットスーツに比べると大きな力のサポートは行えないが、軽く、柔らかく、着心地のよいサポートスーツの実現を目指して開発を進めている。



図4 細径委人工筋肉でしか実現できない超軽量20m長ロボットアーム



図5 パワーアシスト応用

7. いま思うこと

細径人工筋肉の研究に着手して以来、多くの方の支援を得て、ベンチャー設立ならびに1年の経営に至った。この場を借りて深くお礼申し上げる。

ベンチャーを起業して以来、さまざまな投資や出資のご提案をいただいた。ただ、この数年は技術の確立を中心にしっかりと事業を進め、企業としての実力をつけていただきたいと考えている。

細径人工筋肉はしなやかで、柔らかく、軽く、力が強く、色々な使い道があると思う。ぜひ大勢の方に検討していただきたい。

なお、本稿で紹介した人工筋肉の応用に関する研究の一部は、科研基盤(A) (26249028)、科研挑戦的萌芽 (15K13907)、ならびに、戦略的イノベーション創造プログラム (革新的設計生産技術) の一部として東京工業大学で実施されたものである。

参考文献

- 1) <http://www.s-muscle.com>
- 2) Masayuki Takaoka, Koichi Suzumori, Shuichi Wakimoto, Kazuo Iijima, Takahiro Tokumiyu. Fabrication of Thin McKibben Artificial Muscles with Various Design Parameters and Their Experimental Evaluations, The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2013), p. 82 (2013)
- 3) 鈴森康一, 研究室紹介 東京工業大学 鈴森・遠藤研究室, フルードパワーシステム, Vol. 47, No. 6, p. 313-316 (2016)
- 4) Masashi Takeichi, Koichi Suzumori, Gen Endo, Hiroyuki Nabae, Development of Giacometti Arm with Balloon Body, IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), (2017 accepted).
- 5) Akihiro Ohno, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori. Static Analysis of Powered Low-Back Orthosis driven by thin pneumatic artificial muscles considering body surface deformation, 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2015), p. 39-44 (2015)

(原稿受付：2017年1月25日)

トピックス

特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム …特許文献を見る4

著者紹介



きはら かず ゆき
木原 和幸

工業所有権協力センター
〒135-0042 東京都江東区木場1-2-15
E-mail: k-kihara@sctv.jp

1974年神戸大学工学部計測工学科卒。東京計器入社、パワーコントロール研究室長、油空圧技術部長等を経て、現在に至る。比例弁、サーボ弁、ピストンポンプ等の油圧機器とそれらを制御するコントロールシステム等の開発に従事。日本フルードパワーシステム学会会員。

1. はじめに

前稿までに国際特許分類（IPC）および日本における特許の分類の大まかな概要を紹介し、具体的な事例として、低騒音、高圧化、耐コンタミ性に関する特許文献をキーワードから検索する方法を示した。また、アクチュエータと流体回路に関連して、わかりにくい点も示した。さらに、前稿までは特許文献を見るという形で、実際の特許文献にどのようなFI、Fタームが付与されてるかを示した。前稿では一般的な作動流体ではなく、特殊流体、具体的には電気粘性流体などを用いたアクチュエータの例を紹介したが、本稿では、一般的な作動流体を用いたアクチュエータおよび特別な用途に用いられるアクチュエータにどのようなFI、Fタームが付与されているかを紹介する。

2. 特許文献1

最初に紹介する特許文献は、特開2009-29655 リニアアクチュエータであり、要介護者、介護者の支援、リハビリテーション等の場で活躍する機械、ロボットに可撓性要素より構成されるリニアアクチュエータで対応するものである。技術分野、課題、請求項1、代表図、解決手段を示す。

【技術分野】偏平チューブを用いたリニアアクチュエータに関する。

【課題】従来の可撓性ホースを用いたリニアアクチュエータは、大型化及び摩擦力の損失が増大化を

招いていた。

【特許請求の範囲】

【請求項1】非加圧状態に偏平断面形状となり、加圧状態に円形断面形状となる可撓性の偏平チューブ1と、前記偏平チューブの座屈部1aを形成かつ保持し、該座屈部により発生する推進力により前記偏平チューブに沿って移動可能なスライダ2とを具備するリニアアクチュエータ。

図1に代表図（構成図）を示す。

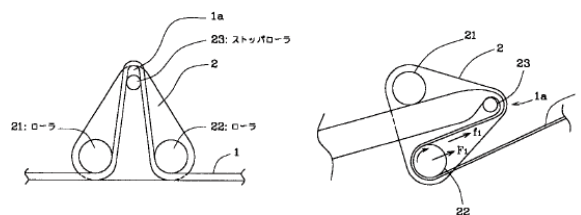


図1 代表図

【解決手段】非加圧状態に偏平断面形状となり、加圧状態に円形断面形状となる可撓性の偏平チューブと、この偏平チューブの座屈部を形成かつ保持し、座屈部により発生する推進力により偏平チューブに沿って移動可能なスライダとを具備するものである。これにより、座屈部により発生する推進力をスライダの運動に変換する。

特許情報プラットフォーム¹⁾から本特許文献の経過情報の出願情報を参照すると、付与されているFIは下記である。

①F15B15/00@Z

②F15B15/10@H

①、②ともにテーマコード3H081のアクチュエータである。表1に3H081のFIの抜粋を示す。

表1 テーマコード3H081のFI抜粋

F15B15/00	部材をある位置から他の位置へ移すための流体作動装置
F15B15/00@A	複数の流体圧アクチュエータを連結
F15B15/00@Z	その他のもの

F15B15/08	・モータユニットの構造に特徴
F15B15/10	・・ダイヤフラム形のモータ
F15B15/10@A	ダイヤフラムが1つ
F15B15/10@B	ダイヤフラムが2つ以上
F15B15/10@C	作動流体の給排口に特徴
F15B15/10@D	ロッドの貫通部に特徴
F15B15/10@E	ロッドのダイヤフラムへの取付構造に特徴
F15B15/10@F	ダイヤフラムのケースへの取付構造に特徴
F15B15/10@G	ベローズを用いたもの
F15B15/10@H	ゴム袋を用いたもの
F15B15/10@Z	その他のもの

すなわち、①を上位から簡略して表現すると、流体作動装置で、その他のものである。②は流体作動装置で、構造に特徴があり、ダイヤフラム形で、ゴム袋を用いたアクチュエータとなる。

付与されているFタームを表2に示す。

表2 付与されている3H081のFターム

型式	AA18	弾性収縮筒（ゴム袋）
駆動手段	BB03	空気（圧縮性流体）
	BB13	手動
目的または効果	CC23	小形化，軽量化，簡素化等
	CC24	耐久性向上（長寿命化）
各部材の形状又は構造	DD07	ゴム
	DD14	出力部材が可撓性のあるもの
各部材間の構造	EE08	受圧部材との一体化

なお、本文献のFI，Fタームはほぼ適切であると考えられる。FIとして、上位のレベルのF15B15/00@Z，その他が付与されていることは、下位のレベルのF15B15/10@Hゴム袋を用いたもののみの分類では、十分ではないとの判断と考えられる。

3. 特許文献2

もう一つの特許文献は特開2013-139832シリンダ装置およびそれを用いた投擲装置である。

技術分野，課題，請求項1，代表図を示す。解決手段は請求項と同等のため省略する。

【技術分野】シリンダ装置に関する。

【課題】物体に大きな力を持続的に与え，また物体に与える力を制御可能なシリンダ装置を提供する。

【特許請求の範囲】

【請求項1】その底部に第1開口および第2開口が設けられたシリンダチューブと，前記シリンダ

チューブ内に，その軸方向に往復摺動可能に設けられたピストンと，気体を収容するタンクと，前記タンク内に気体を注入する経路に設けられた第1バルブと，前記第2開口を介して前記シリンダチューブの内部空間に気体を注入する経路に設けられた第2バルブと，前記シリンダチューブの底面に設けられ，前記ピストンを前記シリンダチューブの底面側に引きつける磁石と，を備え，前記ピストンが前記磁石によって前記シリンダチューブの底面に引きつけられた状態において，前記シリンダチューブ内の前記ピストンの受圧面と前記シリンダチューブの内壁が形成する空間は，前記第1開口を介して前記タンクと連通する第1空間と，前記第2開口を介して前記第2バルブと連通する第2空間とに区画されていることを特徴とするシリンダ装置。

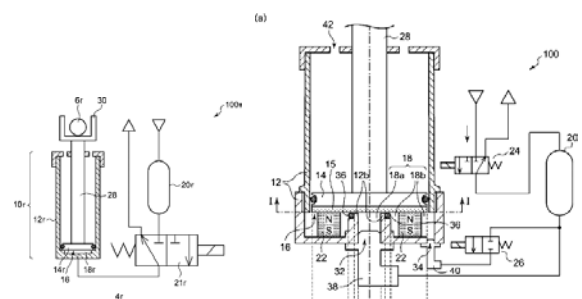


図2 代表図

付与されているFIは下記である。

- ①F15B11/06@B
- ②F15B15/14,360
- ③F15B15/14,380@C
- ④F15B15/22@J

②～④のFIは特許文献1と同じテーマコードである。近傍のFIを表3，Fタームを表4に示す。

表3 近傍のFI

F15B15/14	・・直線シリンダ形
F15B15/14,360	ヘッドカバーそれ自体に特徴
F15B15/14,380	作動流体通路に特徴
F15B15/14,380@A	シリンダ又はタイロッド内に流路を形成
F15B15/14,380@B	ロッド内に流路を形成〔Aが優先〕
F15B15/14,380@C	給排ポートそれ自体又は給排ポートのとり付け位置〔A，Bが優先〕
F15B15/14,380@D	配管部
F15B15/14,380@Z	その他のもの
F15B15/22	行程の加速または減速を目的とするもの

F15B15/22@A	速度制御をするもの
F15B15/22@B	ハイドロチエツカー形
F15B15/22@C	減速手段
F15B15/22@D	行程端における緩衝を目的
F15B15/22@J	加速手段, [例. 急速排気弁を設けたもの]

表4 Fターム

型式	AA03	ピストンを有するもの
駆動手段	BB03	空気(圧縮性流体)
目的または効果	CC26	動作の迅速化, 応答性の向上等
	CC29	その他
各部材の形状又は構造	DD24	ロッドカバー, ヘッドカバー等
制御(調整)	FF13	速度または力の制御
	FF27	電磁弁
用途	HH10	その他

①はテーマコード3H089流体回路(1)である。

表5に3H089のFI抜粋, 表6に付与されているFタームを示す。

表5 テーマコード3H089のFI抜粋

F15B11/00	追従動作をしないサーボモータ系
F15B11/06	・圧縮性の媒質, 例. 空気, 蒸気, を用いるための特有な要素をもつもの
F15B11/06@A	作動流体として圧縮空気のみを用いる回路
F15B11/06@B	・力, 圧力又は速度を制御する回路

表6 付与されている3H089のFターム

型式	AA02	供給圧制御
目的または効果	BB30	その他
アクチュエータ	CC01	シリンダ形
主回路要素(1)	DA04	アキュムレータ
	DA05	圧縮機
主回路要素(2)	DB43	切換弁
駆動手段	GG03	空気(ガス含)
用途	JJ20	その他

本文献のFI, Fタームはほぼ適切と考えられるが, Fタームにおいて, CC29その他とHH10その他が付与されているのは, アクチュエータが投擲装置であることによる。すなわち, シリンダ, 流体回路を用い

た投擲に関する文献が少ないことが推定される。

4. おわりに

本稿で紹介した特許文献は2つとも特許査定となっている。すなわち, 同等の特許文献はないことになる。なお, 参考文献は特許文献情報プラットフォームの最初の画面で特許実用新案を選択し, 6. 審査書類情報照会を選択, 特許出願番号あるいは公開特許公報番号などを入力することにより, 確認できる。あるいは最初の画面で特許実用新案を選択し, 1. 特許・実用新案番号照会を選択し, 特許出願番号あるいは公開特許公報番号などを入力し, 特許文献を表示し, 上段に表示されている審査書類情報照会を選択することにより確認できる。検索報告書, 拒絶理由書などに, 先行技術文献がある。ただし, 本稿における特許文献2は検索報告書がなく, 拒絶理由も記載不備のレベルのため, 先行技術文献は提示されていない。

実際の特許文献からFI, Fタームを見るは本稿までとし, 次稿からは標準的な機器を改良すれば, どのようなFI, Fタームが付与されるはずかを検討し, 紹介する。

本稿をより良く理解するために, 参考文献^{2)~12)}に示す特許文献を調べるを参照されたい。

参考文献

- 1) 特許情報プラットフォーム <http://www.j-platpat.inpit.go.jp/web/all/top/BTmTopPage>
- 2) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 1…特許の基本, フルードパワーシステム, Vol. 44, No. 4, p. 241-243 (2013)
- 3) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 2…特許の基本, フルードパワーシステム, Vol. 44, No. 6, p. 362-364 (2013)
- 4) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 3…日本の分類・テーマコード1, フルードパワーシステム, Vol. 45, No. 2, p. 81-83 (2014)
- 5) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 4…日本の分類・テーマコード2, フルードパワーシステム, Vol. 45, No. 4, p. 184-186 (2014)
- 6) 木原和幸: 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, フルードパワーシステム, Vol. 45, No. 6, p. 285-287 (2014)
- 7) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 6…類似文献の検索2, フルードパワーシステム, Vol. 46, No. 2, p. 90-92 (2015)
- 8) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…特許電子図書館のサービス終了, フルードパワーシステム, Vol. 46, No. 4, p. 179-181 (2015)
- 9) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…アクチュエータと流体回路, フルードパワーシステム, Vol. 46, No. 6, p. 270-272 (2015)
- 10) 木原和幸: 特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…特許文献を見る1, フルードパワーシステム, Vol.

- 47, No. 2, p. 82-84 (2016)
- 11) 木原和幸：特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…特許文献を見る2，フルードパワーシステム，Vol. 47, No. 4, p. 187-190 (2016)
- 12) 木原和幸：特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…

ム…特許文献を見る3，フルードパワーシステム，Vol. 48, No. 1, p. 47-49 (2017)

(原稿受付：2017年2月16日)

会 告

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

平成29年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー 「フルードパワーに役立つセンシング技術」 開催日時：平成29年5月24日(水) 13:15~16:45

開催趣旨：

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

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

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

詳細は学会ホームページにて、ご確認をお願いいたします。

なお、日本フルードパワーシステム学会誌48巻2号（2017年3月号）が当日の講演資料となりますので、各自ご持参いただきますようお願いいたします。

皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

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

開催趣旨：

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

クノロジーとその次世代FPSへの革新的展開」，「フルードパワーの制御システム」を企画しております。その他、製品技術紹介セッションや技術懇談会などを予定しております。詳細は学会ホームページをご確認いただきますようお願いいたします。皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

研究室紹介

東北大学流体科学研究所 中野・田研究室

著者紹介



中野 政 身

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

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

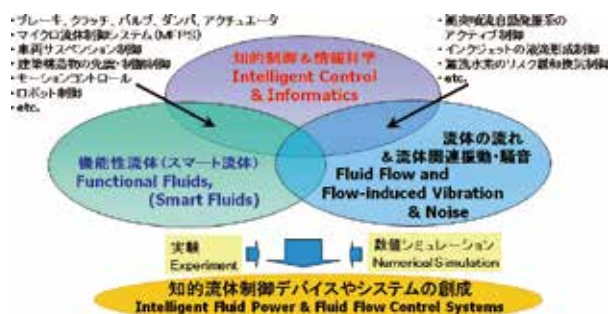


図1 次世代型知能流体制御デバイス・システムの創成

1. はじめに

「流体科学の基礎研究と、それを基盤とした先端学術領域との融合、ならびに重点科学技術分野への応用において世界最高水準の研究を推進して、新しい学理を構築、社会が直面する諸問題を解決するとともに、世界で活躍する若手研究者・技術者を育成する。」これが著者が所属している東北大学流体科学研究所¹⁾のミッションである。併せて、国立大学附置研究所には、共同利用・共同研究の拠点化が要請されており、本研究所は流体科学分野の共同利用・共同研究拠点として、平成22年度より「流体科学研究拠点」、そして平成28年度より「流体科学国際研究教育拠点」として文部科学省に認定されている。より多様性のある世界の知を結集し、本研究所に集う研究者が互いに刺激を受けて研究の深化と創造を行う環境を醸成する必要があることから、世界の研究者が集う流体科学分野の国際共同研究拠点化を強力に推進することを標榜している。

流体科学研究所は、流動創成研究部門、複雑流動研究部門、ナノ流動研究部門、および未到エネルギーセンターからなる3研究部門・1研究センターで構成されており、それぞれ6～8の研究分野からなるが、中野・田研究室は7研究分野からなる流動創成研究部門に所属しており、知能流体制御システム研究分野²⁾を担っている。知能流体制御システム研究分野では、図1に示すように、「電磁レオロジー流体」などの高度な機能性を発揮する“スマー

ト流体・ソフトマテリアル”，“流れの制御”，そして“知的制御・情報科学”に関する基礎科学的研究を基軸として、これらを三位一体として融合・活用した対環境性、省エネルギー、信頼性、安心・安全などの面で優れた「次世代型知能流体制御デバイスやシステム」の創成を目指して研究開発を推進している。このことにより、車両、生産、エネルギー、建築、福祉・介護などの分野において、特にQOL向上に貢献することを目的としている。

2. 研究室の概要

研究室には、筆者(中野)³⁾と田瞳菲(Tian Tongfei)助教の2名の教員が所属しており、研究・教育、そして社会貢献等の運営および活動を行っている。筆者は、2008年4月に着任し、田助教はオーストラリア・ウーロンゴン大学でPh.D.を取得して2015年10月に着任している。田助教は、「Shear-Thickening流体およびMRエラストマーの創製とそれらの応用に関する研究」が専門で、着任してから活発に研究展開をしてきており、数多くの貴重な研究成果をあげてきている。他に、フランスINSA Lyonからの客員教授Jean-Yves Cavaille、客員准教授Gael Sebald、客員研究員Gildas Diguëtの3名(図2)が滞在して、「電磁場反応性スマートソフト材料の開発とそれらのアクチュエータ及びエネルギー分野への応用」に関する国際共同研究をそれぞれの専門性を活かしながら遂行している。これらの3名は、2016年4月から東北大学内に材料科学および工学分野の研究連携を強化することを目的に



図2 ElyTMaxメンバーと研究室スタッフとの会食



図3 忘年会後のボウリング大会にて

設立された、フランス国立科学研究センター (CNRS)、リヨン大学 (Université de Lyon) と連携した国際共同研究ユニットELyTMaxに所属しており、筆者もそのメンバーとして活動している。

本研究所が「流体科学国際研究教育拠点」として強力に推し進めている共同利用・共同研究拠点化のための公募共同研究も、2016年度には海外4件、国内6件が採択され、下記の国内外の共同研究員との相互連携のもとに本研究所の共通施設・設備及び研究室研究設備等を活かした幅広い異分野融合の研究展開をしている。

海外共同研究員：Prof. Miklos Zrinyi (Semmelweis University, Hungary), Prof. Rongjia Tao (Temple University, USA), Prof. Weihua Li (Wollongong University, Australia), A. Prof. Gael Sebald (INSA Lyon, France)

国内共同研究員：京都工芸繊維大学 田中克史教授、愛媛大学 松浦一雄准教授、山形大学 ランジェム准教授、同志社大学 平田勝哉教授、東京工業大学 塚越秀行准教授、名古屋工業大学 井門康司教授

さらに、科学研究費補助金プロジェクトの共同研究や数社との民間共同研究なども積極的かつ活発に実施しており、基盤的な研究による学理構築と産学連携による実用化展開に繋がる応用研究を共に推進してきている。

以上のような、国内外の大学・研究機関及び企業の研究者との共同研究等を通じて、国際性豊かで社会性に富みかつ異分野融合の研究環境の下で、幅広い見識をもった創造性豊かな人材育成はもちろんであるが、研究室の各種イベント等(図3)の企画・運営などを通じて人間味溢れる人材の養成にも心掛けた研究室運営を行なっている。

3. 研究紹介

本研究室の研究テーマは、大きく「流体関連振動・騒音及び流れの制御」と「機能性流体・ソフト材料の創製とその応用」とに分類できるが、後者はさらに「電界制御流体・材料関係」と「磁場制御流体・ソフト材料関係」に分けられる。これらの分類に沿って現在取組んでいるフルードパワー関連研究の一端を紹介する。

3.1 流体関連振動・騒音及び流れの制御

筆者の学生時代の研究テーマが“バルブから発生する振動・騒音の解明と低減化”であったことから、バルブで発生する振動や騒音トラブルに関する企業からの相談や共同研究の依頼が多い。図4は、車両用燃料ポンプで使用される逆止弁で発生する弁プラグの自励振動を移動境界法CFDと弁プラグ運動の連成解析手法によって再現したもので、振動抑制に対して弁形状などの一連の設計要件を明らかにしている。これらの成果に対して、自動車技術会賞「論文賞」を受賞している。これらの手法は他の分野で使用されている各種の制御バルブ等についても適用でき、現在は、空調用機器で用いられる冷媒制御弁で発生する自励振動に関して三次元解析モデルによるシミュレーションによってその低減化対策について検討している。

円形空気噴流が同軸同径の穴の開いた平板に衝突して発生する噴流の自励発振現象をホールトン現象と呼び、ダクト内サイレンサ、マフラー、バルブなどさまざまな工学的分野において発生し騒音問題となっている。ブローダウン型風洞による実験と

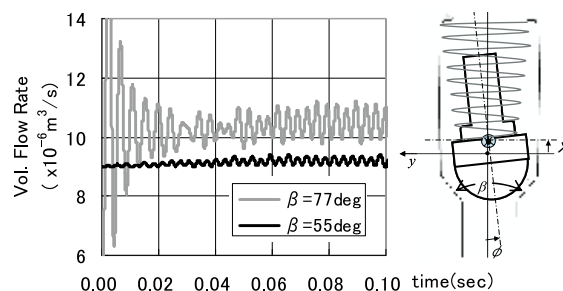
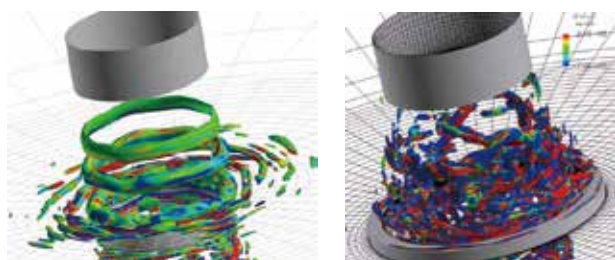


図4 流体・構造連成解析による逆止弁の弁プラグ自励振動に伴う流量変動の再現(弁座角 β が大→自励振動が発生し易い)



(a) 突起がない場合

(b) 突起がある場合

図5 下流平板へのリング状突起設置によるホールトーン自励発振現象の低減効果のDNSシミュレーションによる再現（組織的なリング渦構造(a)が微細な渦に無秩序化されている(b)）

DNSによる数値シミュレーションによってその発振機構を明確にするとともに、下流の穴の開いた平板にリング状の突起を設けることによるホールトーン自励発振現象の低減効果を見出し、その効果を流体力学および音響学的な側面から詳細に明らかにしている（図5）。これらの成果に対して、当研究室の助教だった愛媛大学松浦一雄准教授が日本流体力学会竜門賞を受賞している。現在は、空気噴流出口に設けたプラズマアクチュエータを用いた噴流励起によるホールトーン現象のアクティブ制御に取り組んでいる。

3.2 電界制御流体・材料関連研究

電界制御流体として、電場印加により粘性の変化するER（Electro-Rheological）流体とその応用に関する研究を展開してきており、マイクロ粒子分散系ER流体を用いたダンパ、マイクロERバルブやER流体液圧駆動点字表示システム（図6）などを開発してきている。最近では、ER流体を作動流体とするMicro Fluid Power Systems（MFPS）の構築を目的に、そのアクチュエータを駆動するより微細な流路でも使用可能なER流体として、400nmのTiO₂のナノ粒子ER流体をその分散媒に変性シリコンオイルを用い粒子の体積分率を適切に調整して創製することにより、低い基底粘度でER効果もより高く時間的にも安定したER効果の得られるナノ粒子ER流体を開発している。

電界応答ポリマー EAP（Electro-Active-Polymer）材料として、誘電液体中のDC電場下で回転運動をするEAP材料の創製を行ない、そのマイクロモータへの応用に関する研究を展開している。マイクロファブリケーションにより適したエポキシ系EAP（SU8レジスト）をロータとするマイクロモータを創製して、そのモータとしての特性を把握しその可能性について検討している。図7には、その一例として、円柱状と歯車形状のディスクロータの誘電液体中での無負荷回転速度を測定した結果を示す。その特性のロータサイズや形状及び印加電場への依存

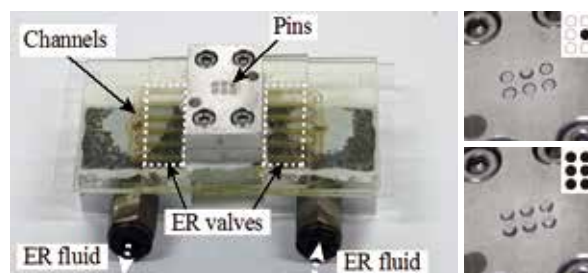


図6 開発したER流体液圧駆動点字表示システム

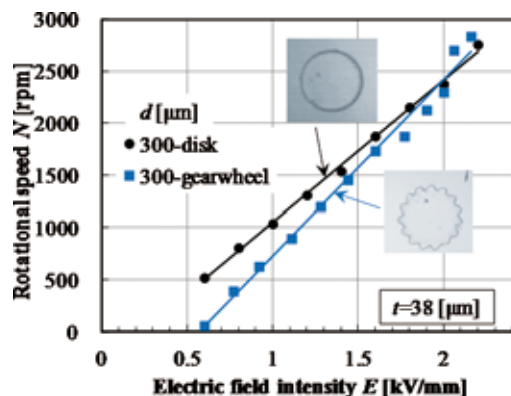


図7 エポキシ系EAPロータ（円柱状、歯車形状）の無負荷回転速度特性

性などについて検討している。また、すでに開発している成形が容易なEAPコンポジット材料を用いた電極・ロータ一体型の小型マイクロモータに関する研究開発も展開している。

3.3 電場制御流体・ソフト材料関連研究

電場制御流体・ソフト材料としては、磁場印加により粘弾性が変化するMR（Magneto-Rheological）流体やMRエラストマーの創製とその応用に関する研究を展開してきている。これまで、新規なMR流体コンポジットブレーキを活用したコイル巻線用テンション制御装置（JSME東北支部「技術研究賞」受賞）、モータ用のMR流体電磁ブレーキ（JSME東北支部「技術研究賞」受賞）、変位に依存する減衰特性を有するパッシブ式MR流体ダンパ（油空圧機器技術振興財団論文顕彰）、変位と速度に応じて減衰特性の変化するパッシブ式MRダンパ（日本機械学会賞（論文）受賞（大学院博士後期課程修了村上氏との共同受賞））、MR流体クラッチを用いたアクティブ負荷機を活用した下肢リハビリ用筋力評価・訓練システム、MR流体ブレーキ膝継手を用いた随意電子制御大腿義足（図8）（日本義肢装具学会「土屋和夫論文賞」受賞（大学院博士後期課程修了引地氏との共同受賞））、免震・制振用のMR流体コンポジットブレーキを用いた直動型の減衰力可変ダンパ（図9）などを研究開発してきている。

最近では、MR効果の向上を目的に、ナノ・マイクロ粒子混合系MR流体（特許出願）を創製し、ナ

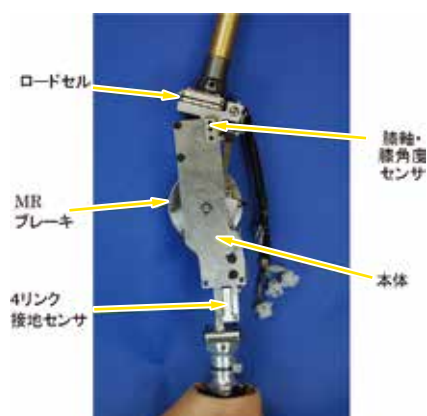


図8 MR流体ブレーキ膝継手を用いた随意電子制御大腿義足



図9 MR流体コンポジットブレーキを用いた直動型減衰力可変ダンパの振動台免震試験時の設置状況

ノ (100nm程度) 粒子をある割合で混合することによりマイクロ粒子だけを分散したMR流体の約2倍のせん断応力を誘起することを見出しており、その効果をせん断流れモードでの粒子クラスター構造形成・崩壊の可視化との関連によって検討している。また、従来のオイル等を分散媒とした鉄粒子分散系MR流体に代わって、分散媒を空気としたマイクロサイズの鉄粒子からなるドライMR流体を創製し、その流動性向上およびそのMR効果や粒子構造形成等について検討することによって、動力伝達・制動系などに用いられるMRクラッチやMRブレーキにおける発熱等のかかなり過酷な条件下でも使用可能性を有する新規なMR流体 (特許出願) を研究開発している。機能性ソフト材料として、磁場の印加によって特に剛性可変機能を有するMRエラストマーの創製並びにその応用研究も展開している。図10に示すのは、Wollongong Univ. のProf. Weihua Li との共同研究で開発した、永久磁石と電磁石そして磁気回路からなる積層MRエラストマーアイソレータで、電磁石電流の増加に対して剛性が顕著に低下する機能を有する。本積層MRエラストマーアイソレータ4台の上に物体を搭載した1DOF免震システムを構築し、スカイフック制御を施すことによって、効果的な免震制御が可能なることを明らかにしている。

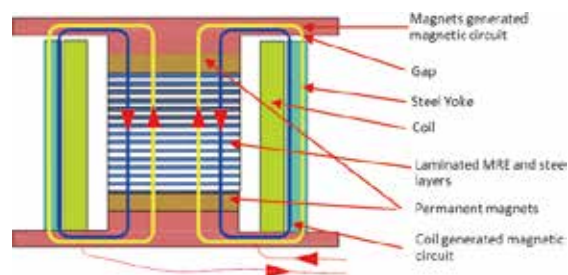


図10 永久磁石と電磁石そして磁気回路からなる積層MRエラストマーアイソレータ

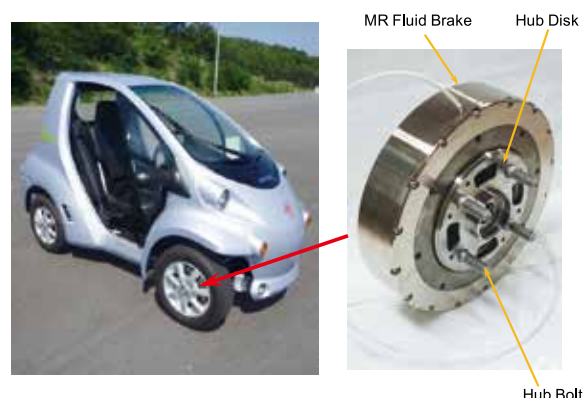


図11 開発した車両MR流体ブレーキと超小型EVへの搭載

今後、より剛性可変の大きいMRエラストマーを開発するとともに、より多様な分野への応用展開を期している。

MR流体クラッチ・ブレーキの動力伝達・制動系への応用の手始めとして、国内ブレーキメーカーとの共同で小型EV向けのMR流体ブレーキを設計・開発し、そのブレーキ特性を把握するとともに、実車 (超小型EV) の4輪に搭載し走行試験を実施して、十分なブレーキ性能とブレーキフィーリング制御の適用など高い制御性があることを実証している (図11)。今後、スマートモビリティなどへの実用展開が期待される。

4. おわりに

以上、筆者が所属する東北大学流体科学研究所が強力に推し進めている「流体科学国際研究教育拠点化」の一助として、国内外の研究者が集い互いに刺激を受けて研究の深化と創造を行う環境を提供している中野・田研究室の運営の一端を紹介した。

参考文献

- 1) <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/index.html>
- 2) http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/crfrd_ifcsl.html
- 3) <http://db.tohoku.ac.jp/whois/detail/ca2d5231efc320c9e2a2d21eaded3ba9.html>

(原稿受付：2017年4月13日)

企画行事

平成28年度オートムセミナー開催報告 「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」

著者紹介



わだ しげ のぶ
和田 重伸

CKD株式会社
〒485-8551 愛知県小牧市応時2-250
E-mail: s-wada@ckd.co.jp

1981年電気通信大学大学院修了。同年日本電気株式会社入社。精密加工技術研究や研究試作品開発等に従事。2008年CKD株式会社入社。ロボット技術の開発等に従事。現在に至る。日本フルードパワーシステム学会会員。

1. はじめに

平成28年度オートムセミナー「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」が平成28年11月25日（金）に開催された。本稿では本セミナーの趣旨および当日行われた各講演の概要について報告するとともに、セミナー併設で行われた見学の様子も紹介する。



図1 トヨタ産業技術記念館

2. 開催趣旨

今回は、いつもセミナーを開催する東京の機械振興会館を離れ、愛知県名古屋市で開催された。愛知県を含む中部地区は国内でも有数の製造業集積地域で、特に自動車や工作機械メーカーの本社や生産拠点多くある上、次世代産業として航空機産業やロボット産業も育ちつつあることから、今後も更なる発展が期待されている。

今回のセミナーのテーマである生産技術の分野で

もフルードパワーは多岐にわたり使われている。第一線で活躍されている講師の方にフルードパワー活用の事例を具体例を交えて講演をいただいた。

会場は名古屋駅からも近い「トヨタ産業技術記念館」、ここは元織機工場の赤れんがの建物の中に日本の近代化・工業化を支えてきた繊維機械と自動車製造に関する圧倒的な質と量の収蔵品が展示されている（図1）。

企画構成にあたっては、開催場所の特長を生かすため、午前に館内展示の自由見学時間を設け午後から講演形式のセミナーを行うこととし、講演選定では内容が会場の展示と関連したり、中部・北陸地域の講師にお願いする等の配慮を行った。

3. セミナーの概要

3.1 講演と参加者

セミナーは4件の講演で構成され、登録：24名、講師と講師アシスタント：5名および事務局：1名、計30名の参加であった。全国11都道県（講師含）からの参加を得ることができた。

3.2 開 会

講演形式のセミナーはホールBにおいて13時に開始された。企画委員会委員長で東京電機大学の藤田壽憲先生から参加に対する御礼とセミナーの趣旨説明がなされた後、講演が開始された。

3.3 自動車製造ラインで活躍する空圧機器

はじめに、SMC株式会社の岡田明彦氏より講演をいただいた（図2）。

自動車製造工程では、固定、位置決め、移動を要する工程が多くあり、多くの空圧アクチュエータやこれを制御するバルブ類が用いられている。メーカー標準品の他、用途に合わせたユニット品、特殊開発品も使用されており、また世界の自動車会社に目を向けると、メーカーの考え方、その国の設備の考え方、設備製作の技術レベルにより、同じ工程でも使用機器が異なっている。これらの機器の特長をデータを示しつつ判りやすく説明された。

3.4 ウォータージェット加工とその応用

つぎに、株式会社スギノマシンの原島謙一氏より



図2 岡田氏の講演

講演をいただいた（図3）。

ウォータージェット加工は水または研磨材粒子を混入した水を200～600MPaに加圧し、微細なノズルから噴射して対象物を加工するもので、他の切断法では加工困難だったり、きれいに切ることが難しい場面で使われている。（富山名物の鱒の寿司の切断にも利用されているとのこと）加圧機構、高圧化の有効性、研磨材の効果、CFRPの加工に適していること等をデータと動画で示された。

さらに、この技術の応用としてナノオーダーの微粒子を粉碎生成する技術も紹介され、機能性流体の研究をしている方にとって、興味深い話であった。



図3 原島氏の講演

3.5 炭素繊維束の開繊加工技術と複合材料への応用

福井県工業技術センターの川邊和正氏より講演をいただいた（図4）。

直径5～7 μ mと非常に細い炭素繊維が数千～数万本集束した束を、弛ませた状態で空気流を当てることでこれまでの方法よりも薄く、繊維も傷付けないで広げる技術及び装置を開発されており、データと動画で紹介された。また薄い状態に広げられた炭素繊維を用いてプリプレグを作りCFRPにすると、通

常のCFRPで問題となる層間剥離が発生せず品質が安定することを示された。

更に、地域の中小企業と手を組んで航空機産業の大企業との橋渡しを行っていることが紹介された。



図4 川邊氏の講演

3.6 樹脂成型開発機へのフルードパワー採用事例

最後に、株式会社高橋精機工業所の高橋茂壽氏より講演をいただいた（図5）。



図5 高橋氏の講演

自動車部品は軽量化や装飾性が求められ、樹脂化やユニット化が進められているため、独自に開発した設備で要求を満たす製品を実現している。金型にガラス等を挟みモールド部などを一体成型するエンキャップ成形等の射出成型では、位置決め、加圧保持、充填補助等で空圧や油圧が用いられている。また、エアインテーク部品等を熱可塑性樹脂筒の型内で空気加圧して一体成型するブロー成形では、独自の横型NC成形で異材質一体やフィラー入り樹脂成型にも対応していることを説明された。講演には実際の部品を持ち込んで頂いたため、参加者は手にすることでその効果を実感することができた。

3.7 閉 会

講演終了後、エントランスロビーの環状織機の前にて集合写真を撮影した。この環状織機は経済産業省の近代化産業遺産に認定されている（図6）。



図6 参加者で集合写真

参加者からのアンケートでは、「実務的な話が聞けて良かった」「あまり知らない分野でのフルードパワー応用事例を知ることができた」等の意見が多かった。

また、東京以外でセミナーを開催すること、見学と座学のセミナーをセットにして開催することに関しては肯定的な意見がほとんどであった。

4. 館内の展示見学

最後に、セミナー開催前に設定したトヨタ産業技術記念館内展示の自由見学の様子について報告する。展示は「繊維機械館」と「自動車館」に分かれており、ガイドツアーや説明も充実しているため、非常にわかりやすい展示となっている。

「繊維機械館」では、大正・昭和初期の紡織工場の雰囲気を残す空間に昔の道具／機械から現代の織



図7 繊維機械館内景

機までが系統立てて配置され、実演が可能な動態状態で展示されている（図7、図8）。



図8 空気流で横糸を送る高速織機

「自動車館」では、広大な空間で自動車づくりをさまざまな視点から紹介していたが、今回多くの参加者の興味を引いたのが自動車製造ラインの再現と、かつて実際の現場で使われていた生産設備の作動デモであった（図9）。



図9 自動車館内の鍛造装置

5. 謝 辞

最後に、本セミナーで貴重な講演をいただきました講師の皆様、当日会場でご討論やご意見をいただいた参加者の皆様、会場や備品に関する対応とさまざまなご配慮をいただきましたトヨタ産業技術記念館の皆様、セミナー企画と当日の運営にご協力をいただいた本学会企画委員会委員や事務局の皆様に深く感謝申し上げます。

（原稿受付：2016年12月14日）

会 告

〈理事会・委員会日程〉

4月18日	情報システム委員会
5月26日	理事会
6月29日	企画委員会
6月 6日	編集委員会
4月25日	基盤強化委員会

〈理事会報告〉

3月24日 14:00～16:00

機械振興会館6階6—65号室（出席者17名）

- 1) 国際シンポジウム福岡の準備状況について
- 2) 平成29年春季講演会の準備状況について
- 3) 平成28年度学会賞について
- 4) 平成29年度予算案について
- 5) 平成29年度の研究委員会について
- 6) 50周年記念事業準備について
- 7) 会員の推移について
- 8) その他

〈委員会報告〉

平成28年度第5回編集委員会

3月31日 14:00～17:00 東京工業大学田町CIC
5階リエゾンコーナー 501（出席者12名）

- 1) 会誌特集号の現状と企画
 - ・ Vol. 48 No. 3「モデルベース開発とその活用事例」
 - ・ Vol. 48 No. 4「フルードパワーにおけるトライボロジーの展開」
 - ・ Vol. 48 E1（電子出版号）「緑陰特集」

・ Vol. 48 No. 5「人に優しいフルードパワーの最新技術（仮）」

・ Vol. 48 No. 6「災害現場で活用されるフルードパワー技術（仮）」

・ Vol. 49 No. 1「IFPEX2017」

・ Vol. 49 No. 2の特集案検討

2) その他

・ トピックスについて

・ 新トピックスについて

・ 今後の特集について

平成28年度第5回企画委員会

3月28日 15:00～17:00 機械振興会館

地下3階B 3—9号室（出席者19名）

1) 平成28年度実施事業について

・ ウィンターセミナー

・ その他

2) 平成29年度実施事業について

・ 平成29年春季講演会併設セミナー

・ 平成29年春季講演会

・ 「製品紹介セッション」

・ オータムセミナー

・ ウィンターセミナー

・ その他

3) その他審議・確認事項

①講演会・セミナー等のキャンセル事の扱いについて

②講演会・セミナー等・年度表記と表紙について

③予告会告・会告について

・ 平成29年春季講演会併設セミナー（3月号）

・ 平成29年春季講演会（3月号）

・ 平成29年秋季講演会「製品・技術紹介セッション」（3月号）

・ その他

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

トライボロジー会議2017 春 東京

開 催 日：2017年5月15日(月)～17日(水)

会 場：国立オリンピック記念青少年総合センター

(〒151-0052 東京都渋谷区代々木神園町3-1 センター棟)

申込み・問合せ：一般社団法人日本トライボロジー学会 事務局

(〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館407-2号室)

TEL：03-3434-1926 FAX：03-3434-3556

E-mail：jast@tribology.jp

ホームページ <http://www.tribology.jp> から申込みいただけます。

一般社団法人日本機械学会関西支部 第349回講習会

「構造・強度設計における数値シミュレーションの基礎と応用」

日 時：2017年5月29日(月) 10:00～16:30

30日(火) 9:30～16:30

会 場：大阪科学技術センター8階中ホール [大阪市西区靱本町1-8-4 / 06-6443-5324 / 地下鉄四つ橋線「本町」駅下車, 28号出口北へ400m]

関西支部ホームページ：<http://www.kansai.jsme.or.jp/>申 込 先：一般社団法人日本機械学会関西支部 〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内
TEL：06-6443-2073 FAX：06-6443-6049 E-mail：info@kansai.jsme.or.jp

「EU Green Gateway to Japan」プロジェクト

日 程：2017年7月1日～2019年12月

場 所：東京

主 催：欧州連合 (EU)

運営事務局：(一社)日本能率協会 産業シンクセンター

第45回可視化情報シンポジウム

開 催 日：平成29年7月18日(火)～19日(水)

開催場所：工学院大学 新宿キャンパス 東京都新宿区西新宿1-24-2

ホームページ：<http://www.visualization.jp/symp2017/>

一般社団法人日本機械学会 関西支部 第350回講習会

「事例に学ぶ流体関連振動 (トラブル事例相談会付き)」

開 催 日：2017年7月27日(木), 28日(金) 9:10～17:00

会 場：大阪科学技術センター4階401号室 (大阪市西区靱本町1-8-4 / 06-6443-5324 (代) / 地下鉄四つ橋線「本町」駅下車, 北へ400m)

定 員：100名

申込締切：2017年7月20日(木) (締切後でも定員に余裕があれば受け付けますので、問合せ下さい。)

申込方法：関西支部ホームページ (<http://www.kansai.jsme.or.jp/>) より申込できます。

日本混相流学会主催・学会設立30周年記念

日本混相流学会混相流シンポジウム2017講演発表募集

主 催：日本混相流学会

共 催：電気通信大学

開 催 日：2017年8月18日(金)～20日(日) または19日(土)～21日(月)

(決まり次第ホームページでアナウンスします)

会 場：電気通信大学 (東京都調布市)

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

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

総合テーマ：『今、次世代を支えるダイナミクスを考える』

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

企 画：一般社団法人機械学会 機械力学・計測制御部門

開 催 日：2017年8月29日(火)～9月1日(金)

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

会 場：愛知大学 豊橋キャンパス（愛知県豊橋市畑町1-1）

第35回日本ロボット学会学術講演会

主 催：一般社団法人 日本ロボット学会学術講演会

会 期：2017年9月11日(月), 12日(火), 13日(水), 14日(木)

(9月11日はオープンフォーラムのみ, 12日から一般講演)

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

H P : <http://rsj2017.rsj-web.org/>**NO. 17-4 第30回計算力学講演会 The 30th Computational Mechanics Conference (計算力学部門 企画)**

開 催 日：2017年9月16日(土)～18日(月・祝)

会 場：近畿大学東大阪キャンパス（東大阪市小若江3-4-1）

最寄りの駅からのアクセス

(<http://www.kindai.ac.jp/about-kindai/campus-guide/higashi-osaka.html>)

近鉄大阪線・長瀬駅からの経路（徒歩15分）

近鉄奈良線・八戸ノ里駅からの経路（徒歩約20分、バス約6分）

スケジュール等の詳細は講演会ホームページでご確認下さい。

<http://www.jsme.or.jp/cmd/conference/cmdconf17/index.html>

会 告

会 員 移 動

会員の種類	正 会 員	海 外 会 員	学 生 会 員	賛 助 会 員
会 員 数 (4月10日現在)	949	16	117	129
差 引 き 増 減	-21	± 0	-20	± 0

正会員の内訳 名誉員14名・シニア員40名・ジュニア員194名・その他正会員700名

賛助会員

松巳鉄工株式会社

正会員

横山 貴裕 (—)

丸居 英夫 (川崎重工業株式会社)

足立 直樹 (川崎重工業株式会社)

赤瀬 広至 (ナブテスコ株式会社)

本多 駿太 (三菱電機メカトロニクスエンジニアリング株式会社)

久保利賀剛 (株式会社ジェイテクト)

正岡 孝一 (川崎重工業株式会社)

安田 好伸 (川崎重工業株式会社)

稲山 公憲 (CKD株式会社)

程 明昭 (KYB株式会社)

学生会員

藤本 裕敬 (豊橋技術科学大学)

品川 裕次 (豊橋技術科学大学)

清水自由理 (早稲田大学)

高橋 悟 (信州大学)

秋吉 俊祐 (上智大学)

見上 慧 (東京工業大学)

下岡 綜 (岡山理科大学)

綾田 直人 (豊橋技術科学大学)

判澤 拓実 (豊橋技術科学大学)

塩井 優 (信州大学)

田中友季子 (信州大学)

久保 宏平 (明治大学)

中條 龍一 (東京電機大学)

会 告

(一社)日本フルードパワーシステム学会 賛助会員一覧表

アイシン・エイ・ダブリュ(株)
 (株)明石合銅
 (株)曙ブレーキ中央技術研究所
 アズビル(株)湘南工場
 アズビルTACO(株)
 (株)アドヴィックス
 アネスト岩田(株)
 イートン(株)
 (株)IHI
 出光興産(株)
 イナバゴム(株)
 イハラサイエンス(株)
 (株)インターナショナル・
 サーボ・データー
 (株)打江精機
 SMC(株)
 SMC(株)中国
 (株)荏原製作所
 (株)大阪ジャッキ製作所
 大瀧ジャッキ(株)
 鹿島通商(株)
 KYB(株)
 KYBエンジニアリング・アンド・
 サービス(株)
 KYB-YS(株)
 (株)桂精機製作所
 神威産業(株)
 川崎重工業(株)
 川重商事(株)
 (株)神崎高級工機製作所
 キャタピラー・ジャパン(株)
 旭東ダイカスト(株)
 協和シール工業(株)
 極東開発工業(株)
 (株)クボタ
 (株)クレアクト・インターナショナル
 クロダニューマティクス(株)
 (株)ケンチク舎成増
 (株)古河製作所
 (株)工苑
 甲南電機(株)
 (株)コガネイ
 コスモ石油ルブリカンツ(株)
 (株)小松製作所
 (株)小松製作所試験センタ

(株)小松製作所研究本部
 (株)小松製作所油機開発センタ
 (株)阪上製作所
 (株)鷺宮製作所
 佐藤金属(株)
 三和テッキ(株)
 三輪精機(株)
 CKD(株)
 (株)島津製作所
 (株)ジェイテクト奈良
 (株)ジェイテクト刈谷
 勝美印刷(株)
 JXエネルギー(株)
 ジャトコ(株)
 新日鐵住金(株)交通産機品カンパニー
 住友建機(株)
 住友重機械工業(株)
 住友精密工業(株)
 制御機材(株)
 千住金属工業(株)
 第一電気(株)
 (株)TAIYO
 タイヨーインターナショナル(株)
 (株)タカコ
 (株)タダノ
 ダイキン・ザウアーダンフォース(株)
 ダイキン工業(株)
 ダイワ(株)
 大生工業(株)
 調和工業(株)
 (株)都筑製作所
 TMCシステム(株)
 (株)TNK
 天竜丸澤(株)
 東京メータ(株)
 TOHTO(株)
 東北特殊鋼(株)
 東明工業(株)
 同和発條(株)
 東京計器(株)
 東京計器パワーシステム(株)
 特許機器(株)
 特許庁
 豊興工業(株)
 (株)豊田自動織機

中西商事(株)
 中村工機(株)
 長津工業(株)
 長野計器(株)
 ナブテスコ(株)
 ニッタ(株)
 日新濾器工業(株)
 日本アキュムレータ(株)
 日本機材(株)
 日本クエーカー・ケミカル(株)
 日本工業出版(株)
 日本精器(株)
 日本電産トーソク(株)
 (一社)日本フルードパワー工業会
 日本ムーク(株)
 (株)野村商店
 (株)ハイダック
 日立建機(株)
 (株)日立建機ティエラ
 (株)日立建機カミーノ
 (株)日立製作所
 日立住友重機械建機クレーン(株)
 廣瀬バルブ工業(株)
 フジサンケイビジネスアイ
 フェスト(株)
 (株)フクダ
 (株)不二越
 二見屋工業(株)
 ボッシュ・レックスロス(株)
 昌富工業(株)
 マサモト(株)
 (株)増田製作所
 マックス(株)
 松巳鉄工(株)
 三菱電線工業(株)
 ヤマシンフィルタ(株)
 ヤマハモーター・ハイドロリック
 システム(株)
 油研工業(株)
 理研精機(株)
 リバーフィールド(株)
 (株)レンタルのニッケン
 ワールドインシュアランス
 ブローカーズ(株)

編集室

次号予告

—特集「フルードパワー分野におけるトライボロジーの展開」—

〔巻頭言〕「フルードパワー分野におけるトライボロジーの展開」発刊にあたって

〔総論〕流体潤滑理論

〔解説〕弾性流体潤滑理論 (EHL理論)

油圧作動油の耐摩耗性、およびその評価試験方法について

転がり軸受の高速化技術

工作機械摺動面のグリース潤滑

ワイブル分布の原理と機械材料およびトライボロジーへの応用

カーボンオニオンによる潤滑特性の改善

低摩擦発現のための表面テクスチャリング

表面微細構造により誘起されるマイクロ・ナノ気体潤滑機構

MR流体用回転軸シールの開発

〔ニュース〕日中若手研究者交流報告 (FPTC2016, Hangzhou, China)

〔会議報告〕FPIRC2016におけるフルードパワー技術研究動向

〔トピックス〕モータの高効率規制

〔研究室紹介〕東京電機大学工学部 先端機械工学科 三井研究室

〔企画行事〕ウインターセミナー (H29.2.17)

山田真の介

糸魚川文広

八木 和行

永坂 光洋

藤井 健次

大関 浩

清水 茂夫

平田 敦

足立 幸志

米村 茂

鷲野誠一郎

小林 亘

野口 恵伸

深澤 雄三

三井 和幸

高後 哲也

平成28年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 塚 越 秀 行 (東京工業大学)
 副委員長 村 松 久 巳 (沼津工業高等専門学校)
 委員 伊 藤 雅 則 (東京海洋大学)
 上 野 朝 嗣 (CKD(株))
 内 堀 晃 彦 (宇部工業高等専門学校)
 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))

委員 中 野 政 身 (東北大学)
 中 山 晃 (日立建機(株))
 成 田 晋 (KYB(株))
 藤 田 壽 憲 (東京電機大学)
 丸 田 和 弘 (株コマツ)
 柳 田 秀 記 (豊橋技術科学大学)
 山 田 真の介 (株TAIYO)
 山 田 宏 尚 (岐阜大学)
 吉 満 俊 拓 (神奈川工科大学)
 担当理事 伊 藤 和 巳 (KYB(株))

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48巻, 第3号 (2017)

平成29年5月

目次

研究論文

1. 炭酸水素ナトリウムとクエン酸の化学反応を用いた小型増圧ポンプ
を有する携帯型空気圧源の提案
奥井 学, 名倉裕貴, 飯川伸吾, 山田泰之, 中村太郎 17

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.48, No.3

May 2017

Contents

Paper

1. Proposal of Portable Pneumatic Power Source Using Chemical Reaction of Sodium Bicarbonate and Citric Acid with Small Sized Pressure Booster

Manabu OKUI, Yuki NAGURA, Shingo IIKAWA, Yasuyuki YAMADA,

Taro NAKAMURA 17

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

炭酸水素ナトリウムとクエン酸の化学反応を用いた
小型増圧ポンプを有する携帯型空気圧源の提案*奥井 学**, 名倉 裕貴**, 飯川 伸吾**
山田 泰之**, 中村 太郎**Proposal of Portable Pneumatic Power Source Using Chemical Reaction of
Sodium Bicarbonate and Citric Acid with Small Sized Pressure BoosterManabu OKUI, Yuki NAGURA, Shingo IIKAWA,
Yasuyuki YAMADA, Taro NAKAMURA

This paper is concerned with portable pneumatic power source using chemical reaction of sodium bicarbonate and citric acid. Carbon dioxide generated in the chemical reaction is used as the compressed air. Both sodium bicarbonate and citric acid are inexpensive, nontoxic, and readily available. This paper is organized as follows. Firstly, the characteristics of the chemical reaction is surveyed and the appropriate pneumatic power source system is discussed. Secondly, a pressure booster that can achieve a stable air generation system without external power is described. Thirdly, the experiment using the prototype system is conducted to confirm the effectiveness of the proposed method.

Key words : Pneumatic power source, Chemical reaction, Pump

1. 緒 言

空気圧駆動システムは様々な分野で用いられている。近年では特に、柔軟な動作が可能かつ、軽量で高出力という特性に着目した研究が多くなされている^{1),2)}。これらの装置の駆動には主にエンジンや大型モータ駆動のコンプレッサにより生成される圧縮空気が利用されるが、これらの大型／高重量の空気圧源は装置のモバイル化の障壁となっている。携帯型空気圧源によりシステムのモバイル化が可能となれば、空気圧システムの用途が大きく広がると考える。

そのため、これまでに多くの携帯空気圧源が開発されている。その一つが小型のコンプレッサをバッテリーで駆動する方法である³⁾。本方式はバッテリーを電源としモータの駆動により圧縮空気を生成する。しかし、電気エネルギーから圧縮空気を生成するためエネルギー効率に課題があり、また高圧印加時に圧縮空気の吐出流量が小さいという点も問題である。一方、ガスの燃焼⁴⁾や燃料電池の放電／充電⁵⁾を利用した空気圧アクチュエータの駆動方法も開発されているが、安定的に十分な圧力の圧縮空気を生成することは実現していない。また、空気圧源の代わりにタンクに圧縮空気をためる手法も考えられるが、数MPaの高

圧貯蔵では容器の耐圧性向上のためタンクが重くなり、低圧貯蔵では十分な圧縮空気量を確保するためにはタンクが大型化してしまう。これらを顧みて、北川らはドライアイスの3重点を利用した空気圧源を開発している⁶⁾。本方式は0.42MPaの気体を安定的に放出できることが確認されているが、ドライアイスを使用していることから常温下で圧縮空気のエネルギーを貯蔵することができないなどの課題が存在する。

本研究ではこれらの課題を解決するために、炭酸水素ナトリウムとクエン酸の化学反応により発生する二酸化炭素を利用する方法に着目した。炭酸水素ナトリウムと酸の反応の空気圧源としての利用はこれまでも検討されており、動力を用いずに0.7MPa以上の高圧が発生可能という特性が確認されている^{7),8)}。しかし、いずれも発生最大圧力の測定などにとどまり実際の空気圧システムを駆動するといった検討は行われていない。そこで本報では、本化学反応の空気圧源としての特性についてより詳細に調査し、化学反応を利用した空気圧源の構成について検討する。また外部動力を用いずに反応を安定的に制御する小型増圧ポンプについて述べ、最後に試作した空気圧源による空気圧人工筋肉の駆動実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

2. 空気圧源の構成

2.1 化学反応の基本理

式(1)に示すように、炭酸水素ナトリウムとクエン酸、水を混合することで二酸化炭素が発生することは広く知られ

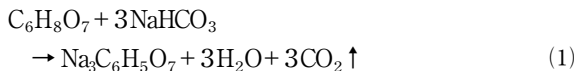
*平成28年10月20日 原稿受付

**中央大学

(所在地：東京都文京区春日1-13-27)

(E-mail: nakamura@mech.chuo-u.ac.jp)

ている。これらの物質は一般的に清掃用に利用されており、安価で保存が容易、かつ簡易に入手および廃棄が可能である。また本反応により生成される二酸化炭素、水、クエン酸三ナトリウム（化学式： $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ）の混合物は無毒であり、一般的な下水に廃棄することが可能であるだけでなく、飲料用水としても利用可能である。



2.2 発生圧力と発生気体量

提案する化学反応を利用した空気圧源は、身に着けながら移動が可能であり、できるだけ使用者に負担を与えないことが望ましい。すなわち軽量かつ小型であることが求められる。また、空気圧システムの駆動に十分な圧力を発生可能かどうかという点も重要である。そのため、発生可能な最大圧力と混合物質量あたりの発生積算流量を実験により調査した。

実験装置をFig. 1に示す。装置は500mLのボトルおよび測定用空圧回路から成る。ボトルの内部には炭酸水素ナトリウムとクエン酸が水と分離された状態で格納されている。ボトルAは内部に外部磁力により可動する機構を持ち、密封状態を保ったまま混合を行うことが可能である。実験では、初めに2方弁を閉じた状態で磁力操作により混合を行う。次に、混合を促すためボトルを振る。圧力に変化が無くなるまでボトルを振り、その後2方弁を開放し流量を測定する。流量計はSMC製PFMB7201-02-A-M、圧力計はPISCO製SEU11-6UAを使用した。実験は25℃の屋内で行い、標準状態気体体積の算出は大気圧を0.1013MPaとみなし計算した。実験は3回行い、その平均値を測定値とした。

実験に使用した物質の分量をTable 1に、測定結果をTable 2に示す。結果より、本手法は空気圧システムの駆動に十分な圧力が発生可能なことが確認できた。また、発生気体の積算流量は654NLであり、これは1 molの気体の体積を22.4NLとした場合の理論値である672NLとほぼ一致している。これは長さ180mmの軸方向繊維強化型人工筋肉⁷⁾を0.3MPaの印加圧力で約14回駆動可能な気体量であり、携帯空気圧源として使用に耐えうるだけの流量を発生可能であると考えられる。

Table 1 Experimental condition

Sodium bicarbonate	25.2g (0.3mol)
Citric acid	192g (0.1mol)
Water	300mL

Table 2 Experimental result

Measured integrated flow	654NL
Measured pressure	1.1MPa

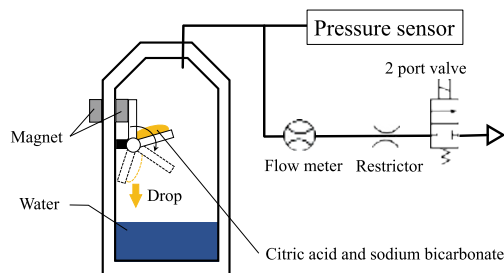


Fig. 1 Gas generating experimental setup

2.3 水の分量と反応速度の関係

水を溶媒とした化学反応において、水の分量が反応速度に影響することが広く知られている。安定した圧力と流量を供給可能な空気圧源開発のため、気体の発生スピードと水の分量の影響について実験により調べた。

実験装置はFig. 1と同様のものを使用した。実験では、バルブは常に開放状態にして置き、密閉容器内にクエン酸96g、炭酸水素ナトリウム126gの混合粉末と水を分離して封入し、外部から磁力操作により混合した。混合開始から180秒間の積算流量を測定した。水量は10mLから100mLまで5 mLごとに変化させ測定した。

測定結果のうち、代表的なものをFig. 2に示す。本結果から、水の分量が25mLの時に最も反応速度が速いことが分かった。また、水量が25mL以上の場合は反応速度は濃度が高いほど早く、水量が25mL以下では濃度が高いほど反応速度が低下することが分かった。そのため、本化学反応を空気圧源として使用する場合には、クエン酸と炭酸水素ナトリウムの濃度を上記実験条件での水の分量が25mLの濃度、すなわち水1 Lあたりそれぞれの物質を2 mol、6 mol混合することが望ましいことが確認できた。

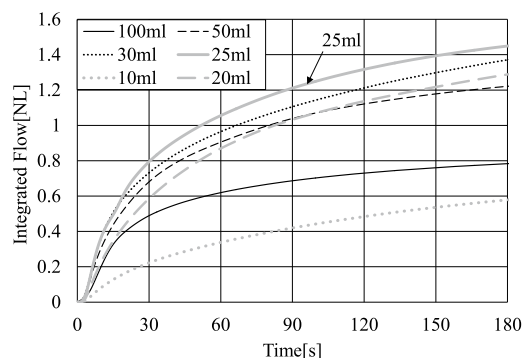


Fig. 2 Integrated flow rate of the chemical reaction

2.4 反応を継続させる手法

本化学反応は1 MPa以上の圧縮空気が発生することが可能であるため、必要な空気量分の物質をあらかじめ混合しておく場合には空気圧源内部の圧力が1 MPa以上になる可能性がある。容器内圧が1 MPa以上となる場合、タンクに

高い耐圧性が必要となるためタンクの高重量化を招く。そのため、発生圧力を適度に保つために、クエン酸と炭酸水素ナトリウムを必要に応じて混合することが必要だと考える。加えて、水の分量は反応速度に影響を与えるため、それぞれの物質を23で述べた混合比で反応させることが望ましい。

クエン酸と炭酸水素ナトリウムを継続的に混合する手法として、Fig. 3(a)に示す2物質を混合した粉体をスクリー搬送機などで水に投入する粉体投入方式が考えられる。このような構成においては、水に投入する粉体量を制御することで容器内を任意の圧力に調整可能であるが、装置全体を高圧のタンク内に密封する必要がある、構造が複雑化する。同様の理由から、どちらか一方の物質の水溶液に、もう一方の物質を粉体状態で投入する方式も課題が存在すると言える。

システムを簡素化するために、Fig. 3(b)のような液体注入方式が考えられる。本方式は空気圧発生タンクにあらかじめ粉体または液体を封入しておき、水溶液や水を注入する方式である。この方式の場合、圧力の高い容器内に液体を送り込むためのポンプなどの増圧装置が必要であるが、システム全体を容器内に入れる必要がなくシステムの簡素化が期待できる。また、反応物質の注入量もバルブの開け閉めなどにより容易に制御が可能である。

他にも反応を継続させる手法は考えられるが、本研究ではFig. 3(b)の構成を前提に考察を進める。この構成は、水と炭酸水素ナトリウムがあらかじめ封入された容器に、クエン酸を注入する方式である。クエン酸濃度は、ポンプの駆動量を最小限にするために飽和水溶液となる38mol/Lとする。また水・クエン酸・炭酸水素ナトリウムを23で求めた最適な分量比とするために、圧力発生容器には127mol/Lの炭酸水素ナトリウム水溶液を、クエン酸と炭酸水素ナトリウムのモル比が1:3となる分量だけ封入しておく。実際には炭酸水素ナトリウムの溶解度は1.1mol/Lのため、ほとんどの炭酸水素ナトリウムは解け切らずに個体として残る。本構成により、常にクエン酸と炭酸水素ナトリウムの飽和水溶液が混合され安定的な反応が可能となる。加えて混合が進むにつれ、クエン酸・炭酸水素ナトリウム・水の分量比が23で求めた最適な比に近づいていき、最終的には23の比とすることが可能である。

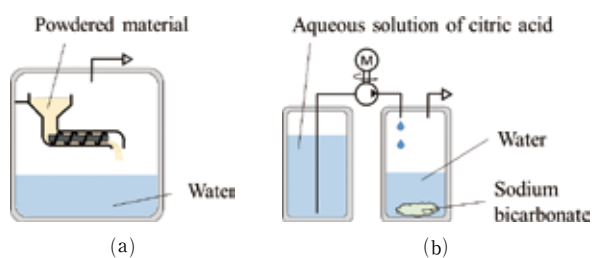


Fig. 3 Comparison of structure

3. 増圧装置

前章で提案した方式を採用する場合、クエン酸飽和水溶液を送る増圧装置が必要となる。本章では、新たなエネルギー源を必要とせずにラバークチュエータの排気で駆動する増圧装置について述べる。

3.1 構造

空気圧ラバークチュエータは、ある印可圧力以下では動作しない特性を持つ。例としてFig. 5に軸方向繊維強化型人工筋肉の収縮特性⁷⁾を示す。人工筋肉は約0.125MPaまでは収縮しないことがわかる。本研究ではこのラバークチュエータが収縮し始める圧力を基底圧力と呼び、この基底圧力を利用した増圧装置を提案する。

増圧装置の動作原理図をFig. 4に示す。本装置は軸方向繊維強化ゴムチューブと単動空気圧シリンダ、ターミナルおよびチェック弁から成る。軸方向繊維強化ゴムチューブはFig. 6に示す構造となっており、空気圧を印加した際に軸方向が炭素繊維で拘束されているため、径方向にのみ膨張し長手方向には収縮する。シリンダ内に流体が入った状態で軸方向繊維強化ゴムチューブに圧力を印加することでシリンダが押しされ、軸方向繊維強化ゴムチューブに印加した圧力よりも高い圧力を吐出する。

本増圧装置を利用した空気圧源のシステム全体図をFig. 7に示す。システムはラバークチュエータ、2方弁、3方弁、レギュレータ、リリースバルブ、増圧装置、クエン酸水溶液の入ったボトルA、重層と水の入ったボトルBから成る。まず、Fig. 7に示すように3方弁は開き、2方弁は開放状態としておき、ボトルBからの圧力によりラバークチュエータを駆動する。次に3方弁と2方弁を同時に切り替え、アクチュエータの排気圧力により増圧装置を駆動しボトルAのクエン酸水溶液がボトルBに注入される。これらの2つの状態を繰り返すことでラバークチュエータの駆動と増圧装置によるクエン酸の注入が交互に行われる。

3.2 特性

本節では、増圧装置の特性を物理モデルから考察する。装置の各パラメータをTable 3に示す。各パラメータは

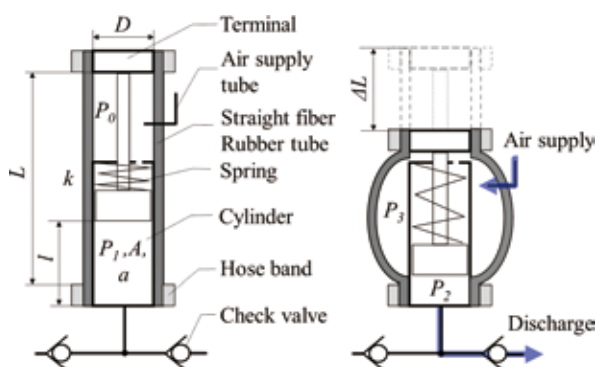


Fig. 4 Schematic of the pressure booster

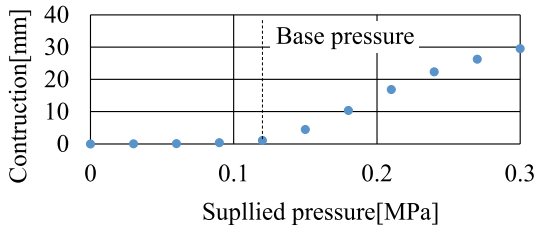


Fig. 5 Applied pressure and shrinkage of rubber actuator

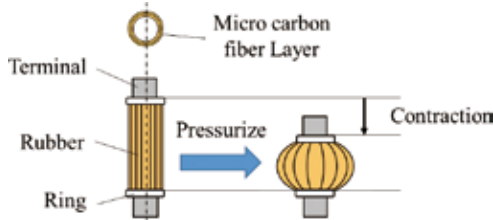


Fig. 6 Principle of straight fiber artificial muscle

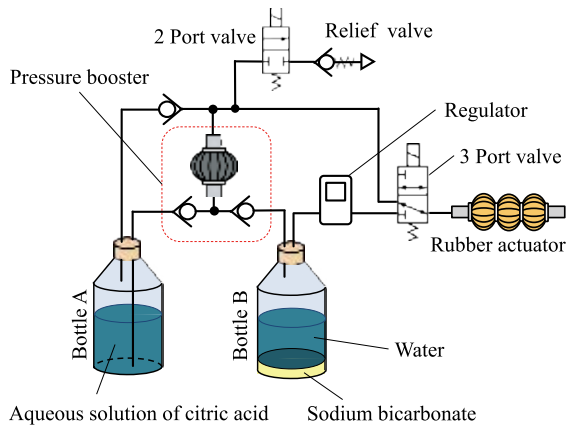


Fig. 7 Continuous air generation system

Fig. 4と対応している。なお本モデルでは、ばねは押しばねを前提としたが、本増圧装置の駆動原理上ばねを有していないシリンダや引きばねを有するシリンダについても同様の動作が可能である。

軸方向繊維チューブのシリンダを押す力を F_m 、シリンダ内のバネ力を F_k とする。すると、力のつり合いより式(2)が成り立つ。

$$F_m + F_k + P_3(A - a) = P_2 A \quad (2)$$

F_k は次の式(3)により定義される。

$$F_k = k(l - \Delta L) \quad (3)$$

また、人工筋肉の収縮による力 F_m は、軸方向繊維強化型人工筋肉の力学的平行モデル⁹⁾により式(4)のように表せる。 G_1, G_2, G_3 は人工筋の仕様と収縮量から定まる定数である。

$$F_m(\Delta L, P_3) = \{P_3 G_3(\Delta L) - G_1(\Delta L)\} / G_2(\Delta L) \quad (4)$$

式(2)-(4)より、吐出圧力は式(5)のように表せる。

$$P_2 = \{P_3 G_3(\Delta L) - G_1(\Delta L)\} G_2(\Delta L)^{-1} A^{-1} + k A^{-1} (l - \Delta L) + P_3 A^{-1} (A - a) \quad (5)$$

式(5)を用いて、本ポンプの吐出流量と吐出圧力の関係を図示したものがFig. 8である。グラフの描画には、Table 4, 5に示すパラメータを用いた。Fig. 8より、ポンプへの供給

圧力に対して吐出圧力が大きく、高い増圧率を有していることがわかる。また、本ポンプは吐出圧力が高まるほど吐出流量が下がることがわかった。

Table 3 Parameters of pressure booster

D	Diameter of tube [mm]
L	Length of tube [mm]
ΔL	Shrinkage of tube [mm]
l	Maximum shrinkage of tube [mm]
A	Piston area of cylinder [mm ²]
a	Cross sectional area of cylinder rod [mm ²]
P_0	Atmospheric pressure [MPa]
P_1	Pressure of inflow [MPa]
P_2	Pressure of outflow [MPa]
P_3	Pressure of pressure booster [MPa]
k	Spring constant [N/mm]

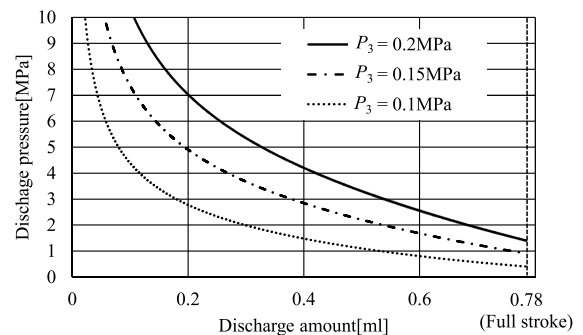


Fig. 8 Discharging amount and pressure

3.3 プロトタイプ

制作したプロトタイプの外観をFig. 9に、仕様をTable 4に示す。シリンダはSMC製単動シリンダCJPB10-10を用いた。軸方向繊維強化チューブはNRゴムとマイクロカーボン繊維で構成され、内径10mm、外形13mm、長さ45mmである。

3.4 特性実験

試作した増圧装置の、最大流量吐出時における吐出圧力を測定し、理論値との比較を行う。実験環境をFig. 10に示す。ポンプへの流入液体の圧力を一定とし、増圧ポンプを繰り返し駆動させ、ポンプの吐出流量が最大でなくなった時点での容器内圧力を圧力計で測定した。なお、ポンプ

Table 4 Specification of the pressure booster

Size	210mm×20mm×30mm
Weight	122g
Discharge amount of cylinder	0.78mL
Spring constant of cylinder	0.49N/mm

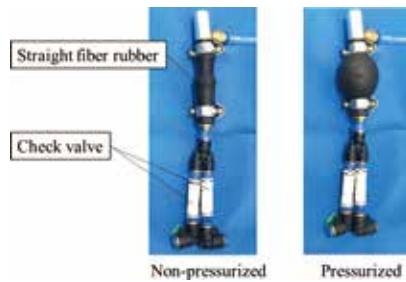


Fig. 9 Image of pressure booster

が最大吐出流量を吐出しているかどうかは、シリンダロッドとシリンダが衝突する音によって判断した。流入液体の圧力は0.1MPaから0.2MPaまで0.025MPaずつ変化させた。増圧ポンプの駆動にはラバーアクチュエータの排気は使用せず、別途用意した空気圧源から0.1, 0.15, 0.2MPaの3通りの圧力を加えて実験を行った。実験結果をFig. 11に示す。図中の理論値は、式(5)を用いて最大吐出量での吐出圧力を算出したものである。測定値は理論値をやや下回っているものの、32で導出したモデルが本増圧装置の特性を表していることが確認できた。また、理論値との差については、増圧装置に用いたウレタンチューブの弾性変形が主な要因であると考えられる。

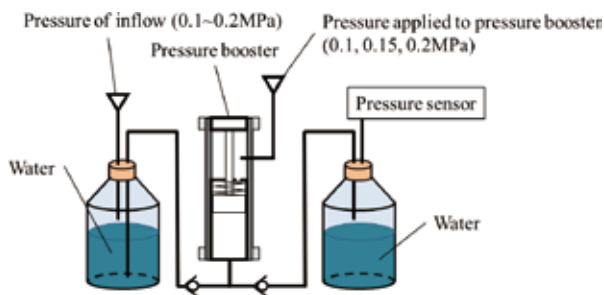


Fig. 10 Experimental set up

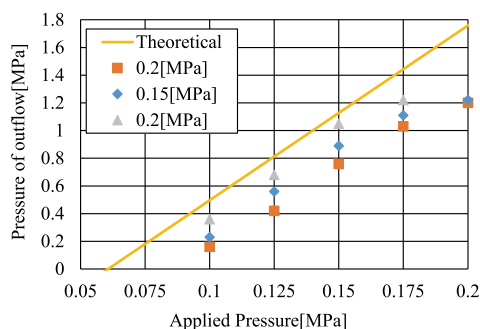


Fig. 11 Characteristics of pressure booster

4. 人工筋肉駆動実験

4.1 実験条件

提案システムの有効性を確かめるため、人工筋肉駆動実験を行った。実験装置をFig. 12に示す。なお、システム構成はFig. 7と同様である。実験装置の設定および使用した

物質の分量をTable 5に示す。実験では、3方弁と2方弁を周期10s, デューティ比50%のパルス信号で同時に駆動した。本操作により人工筋肉と増圧装置が交互に駆動され、増圧装置が駆動されるごとにクエン酸飽和水溶液がボトルBに注入される。また、実験開始直後から人工筋肉の駆動及びクエン酸水溶液の注入が開始するように、ボトルAを0.15MPa, ボトルBを0.35MPaにあらかじめ加圧した。なお、本実験で使用したクエン酸および炭酸水素ナトリウムの分量は、6.72NLの二酸化炭素を発生可能な物質質量であり、これは本実験で使用する人工筋肉を44回駆動することが可能である。

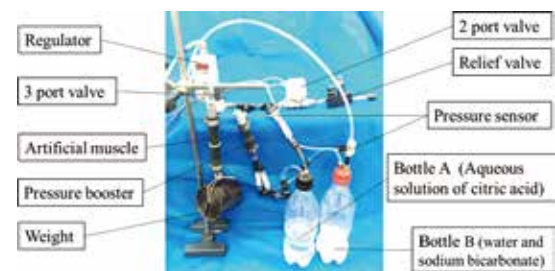


Fig. 12 Experimental setup

Table 5 Experimental conditions

Amount of citric acid in bottle A	192g
Water in bottle A	26mL
Sodium bicarbonate	25.2g
Water in bottle B	24mL
Volume of bottle A	0.5L
Volume of bottle B	0.5L
Volume of artificial muscle (pressurized)	0.15L
Mass of weight	1.7kg
Driving pressure of artificial muscle	0.225MPa

4.2 結果と考察

実験の様子をFig. 13に示す。人工筋肉と増圧装置が交互に加圧されている様子が確認できる。なお、人工筋肉は1サイクル毎に重りを15mm持ち上げることを確認した。Fig. 14はボトルB内の圧力について、本実験の結果と、増圧システムを用いずにボトルBにあらかじめ充填された圧力のみにより人工筋肉を駆動させた場合との比較である。比較結果からわかるように、増圧システムを用いない場合の人工筋肉駆動回数が6回であるのに対し、提案システムは23回の駆動が可能であり、提案手法により人工筋肉を0.225MPaの印加圧力で17回駆動させるだけの圧縮空気が生成されたことが確認できた。本実験において気体発生に使用したクエン酸、水、炭酸水素ナトリウムの総質量は94.4gであるため、人工筋肉を一回駆動させるために、約5.6gの

反応物質が必要といえる。これは、15kgの反応物質を使用したとすると約268回の駆動が可能であり、たとえば30sに一回人工筋肉を駆動させる作業を想定した際に、134min使用可能となり十分使用に耐える時間と考える。

Fig. 15はボトルA内圧力および増圧装置駆動圧力である。ボトルA内の圧力が人工筋肉駆動圧力を下回ると同時に、増圧装置への供給圧力も低下し、ボトルA内圧力の上昇が鈍化することが確認できる。これは、ボトルA内に注入されるクエン酸飽和水溶液の量が増圧装置の駆動圧力の低下に伴い減少するからである。

本実験で人工筋肉を駆動できた回数は23回であり、41で算出した44回に対し少ない回数であった。要因はクエン酸と炭酸水素ナトリウムが完全に反応していないことと考える。これは、実験終了後にボトルを振った際にボトルA内圧力が再び人工筋肉駆動圧力以上に上昇したことから確認できた。

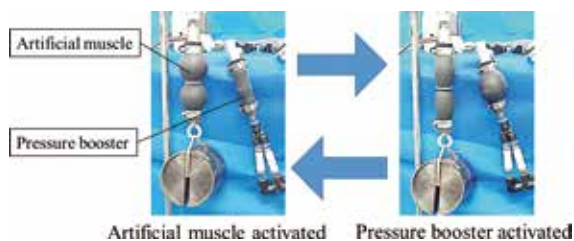


Fig. 13 Image of experiment

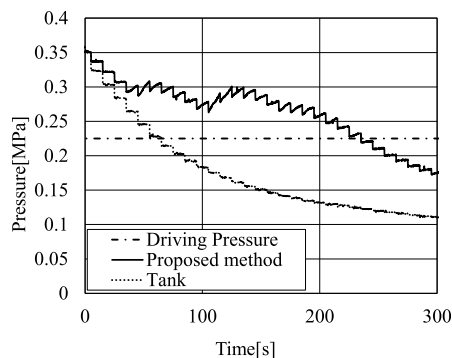


Fig. 14 Pressure in bottle A

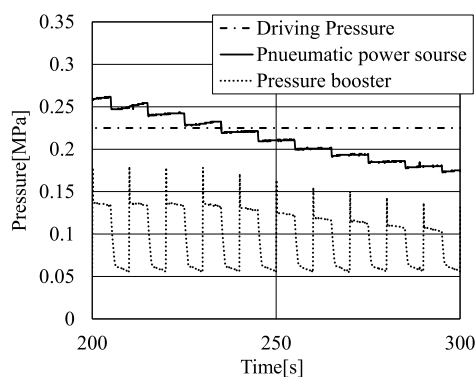


Fig. 15 Pressure to pressure booster and in bottle B

5. 結 言

化学反応を利用した圧縮空気生成手法と、増圧装置により化学反応を継続させるシステムを提案した。また試作機による実験を行い、提案システムの動作を確認した。

今回行った実験は、小型のアクチュエータで評価を行っており、実際のシステムの消費空気量よりも小さい。今後は増圧ポンプを大型化する、振動を加えて化学反応を促進するなどの手法により流量増加が期待できる。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の支援により実施された。

参 考 文 献

- 1) C. T. Loh, H. Tsukagoshi, "Pneumatic Big-hand Gripper with Slip-in Tip Aimed for the Transfer Support of the Human Body", IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), 475-481 (2014)
- 2) D. Sasaki, T. Noritsugu and M. Takaiwa, "Development of Active Support Splint driven by Pneumatic Soft Actuator (ASSIST)", IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, 520-525 (2005)
- 3) 則次俊郎, 韓建海, 高岩昌弘, "電磁石型リニア駆動小型コンプレッサの開発", 日本フルードパワーシステム学会論文集, vol. 33, No. 4, p. 83-90 (2002)
- 4) R. F. Shepherd, A. A. Stokes, J. Freake, J. Barber, P. W. Snyder, A. D. Mazzeo, L. Cademartiri, S. A. Morin and G. M. Whitesides, "Using Explosions to Power a Soft Robot", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2964-2968 (2013)
- 5) K. Suzumori, A. Wada and S. Wakimoto, "A new mobile pressure control system for pneumatic actuators using reversible chemical reactions of water," IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 122-127 (2013)
- 6) 北川能, 呉海帆, 塚越秀行, 朴聖煥, "三重点における相変化を利用した携帯型空気圧源の開発", 日本フルードパワーシステム学会論文集, vol. 36, No. 6, p. 16-22, (2003)
- 7) 多田隈建二郎, 多田隈理一郎, 緒方裕彦, 越智康平, 東森充, 金子真, "爆発的混合反応を活用した高圧気体発生機構", 第29回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1P1-5 (2011)
- 8) 山本孝之, 鈴木康一, 山田嘉昭, 脇元修一, 武藤明徳, "化学反応による空圧アクチュエータ用携帯ガス圧源の開発", 日本機械学会第22回バイオエンジニアリング学会講演論文集, 111 (2010)
- 9) T. Nakamura, D. Tanaka, H. Maeda, "Joint stiffness and

position control of artificial muscle manipulator using
instantaneous loads using a mechanical equilibrium

model,” Advanced Robotics, vol. 25, pp. 387-406 (2011)

〒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
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―三三六九〇 FAX (〇三) 三四三三―八四四二

印刷所 東京都文京区白山一―一三―七 アクア白山ビル五階
勝美印刷株式会社