昭和47年10月19日第4種学術刊行物許可　2020年9月15日発行（奇数月）　ISSN 1346−7719　フルードパワーシステム

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

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Sep. 2020　Vol. 51　No. 5

特集「フルードパワーの最新解析技術動向」

JFPS　一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会　http://www.jfps.jp

ISSN 1346-7719
第51巻　第５号　2020年９月

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目　　次

特集「フルードパワーの最新解析技術動向」

【巻頭言】

「フルードパワーの最新解析技術動向」発行にあたって　加藤　友規　202

【解説】

斜軸式油圧モータの挙動計測と混合潤滑解析　田中　真二　203
油圧機器のキャビテーション流れ解析　沖田　浩平　206
流体機械へのモデルベース開発手法の適用とケーススタディ　工藤　啓治　212
モデルベース開発のためのパラメトリックCAE活用法　満嶋　弘二，永溝　喜也　216
ベーンポンプの流れ解析　長島　碧　220
CFDによる調節弁でのエロージョン発生の予測　尹　鍾晧，斉藤　健二　224

【トピックス】

学生さんへ，先輩が語る―フルードパワーの研究に携わる学生の皆さんに向けて―　坂間　清子　227
英国ノッティンガム駐在員日記　加藤　友規　230

【研究室紹介】

大分大学理工学部　菊池研究室　原　久乃，菊池　武士　233

【会告】

理事会・委員会報告　236
学会創立50周年特別会費（賛助金）の受付結果　237
2020年度オータムセミナー「自動車におけるフルードパワー技術」　238
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会　共催　2020年秋季フルードパワーシステム講演会　238
日本フルードパワーシステム学会2020年度受賞候補者募集のお知らせ　238

訃報　Cliff Burrows教授　239
会員移動　239
共催・協賛行事のお知らせ　240
一般社団法人　日本フルードパワーシステム学会　賛助会員一覧表　241
次回予告　242

■表紙デザイン：浅賀　美希　勝美印刷㈱

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

FLUID POWER SYSTEM

ISSN 1346-7719
Vol. 51, No. 5 September 2020

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "The Latest Trends in Fluid Power Analysis Technology"

【Preface】

On the Special Issue "The Latest Trends in Fluid Power Analysis Technology" — Tomonori KATO — 202

【Review】

Measurement of Behavior and Mixed Lubrication Analysis of Bent Axis Hydraulic Motor — Shinji TANAKA — 203
Numerical Study of Cavitating Flows in Hydraulic Equipment — Kohei OKITA — 206
Application of Model-Based Development Methodology for Fluid Machinery and Case Studies — Keiji KUDO — 212
Parametric CAE Utilization for Model-Based Development — Kouji MITSUSHIMA, Yoshiya NAGAMIZO — 216
Flow Analysis of Vane Pump — Midori NAGASHIMA — 220
Prediction of Erosion Occurrence in Control Valves with Computational Fluid Dynamics — Chongho YOUN, Kenji SAITO — 224

【Topics】

Senior talks to students — Message to students studying fluid power — — Sayako SAKAMA — 227
A Life in Nottingham, UK — Tomonori KATO — 230

【Laboratory Tour】

Kikuchi Lab., Faculty of Science and Technology, Oita Univ — Hisano HARA, Takehito KIKUCHI — 233

【JFPS News】

236, 237, 238, 239, 240, 241, 242

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

巻頭言

「フルードパワーの最新解析技術動向」発行にあたって

著者紹介

加藤友規（かとう とものり）

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

2007年東京工業大学大学院博士課程修了．都立高専助手～助教を経て，2010年福岡工業大学助教，2012年同大学准教授．空気圧制御に関する研究に従事．日本フルードパワーシステム学会の会員（現在，理事・国際交流委員長を担当）．博士（工学），技術士（機械部門）．

近年のテクノロジーの進歩により，課題解決の手段としてのモデルベース開発（MBD）やデジタルフォーメーションが注目を集めている．その中では，さまざまなビジネスや仕事の仕方，文化の変革が求められている．

本特集号は，そのような背景を踏まえ，フルードパワーシステムに使用される装置・要素の解析技術などを取り上げ，フロントローディング化の手段としての解析・ミュレーション技術の動向を紹介したいという趣旨で企画された．

各記事の概要を以下にご紹介させていただく．

田中真二氏（東京工業大学／コマツ革新技術共創研究所）には，斜軸式油圧モータのシリンダブロック，バルブプレート間の挙動について，渦電流式変位センサを用いた挙動計測と混合潤滑解析とがある条件下でほぼ一致することをご解説いただいた．

沖田浩平氏（日本大学）には，油圧リリーフ弁や油圧バルブの騒音，耐久性に影響を与える重要な現象であるキャビテーションについて，オープンソースの数値解析環境であるOpenFORMを利用した解析，およびご解説いただいた．

工藤啓治氏（ダッソー・システムズ株式会社）は，「流体機械へのモデルベース開発手法の適用とケーススタディ」と題して，設計手戻りを限りなくゼロにすることを目標とする，想定設計コンセプトを提示された．過去設計モデルや手順を標準化し，パラメトリックな標準モデルをベースにした仮想経験データベースとその分析で構成されるModel Based Parametric Design手法を適用することで，想定設計と最適設計が実現できることを示された．

満嶋弘二氏と永溝喜也氏（KYB株式会社）は，「モデルベース開発のためのパラメトリックCAE活用法」と題して，機械設計におけるモデルベース開発を効率良く進めるための方法論のひとつとして，パラメータ設計を用いたパラメトリックCAE活用法について，具体的な事例を交えて紹介された．

長島碧氏（KYB株式会社）は，「ベーンポンプの流れ解析」と題して，車載用ベーンポンプを例に，極限性能を実現するために，集中定数モデルによる従来解析技術の課題を補うことができるCFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）解析技術を活用する事例が紹介された．

尹鍾晧氏と斉藤健二氏（アズビル株式会社）は，「CFDによる調節弁でのエロージョン発生の予測」と題して，CFDを用いた非定常キャビテーション解析を行い，エロージョン指標を用いて解析結果を可視化する手法をご紹介された．また，エロージョン指標の有効性について検討を行い，プラグに起こる壊食とキャビテーションの発生形態との関連性についてCFD解析により推測した例をご紹介された．

なお，本特集は本学会編集委員会にて，著者が主査を担当し，副査を飯田武郎氏（株式会社小松製作所）が担当して企画された．各記事の執筆者の皆様をはじめ，特集の企画にご協力いただいた関係各位に，深く感謝申し上げる次第である．

（原稿受付：2020年７月９日）

解説

斜軸式油圧モータの挙動計測と混合潤滑解析

著者紹介

田中真二（たなか しんじ）

東京工業大学
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259
E-mail : tanaka.s.aj@m.titech.ac.jp

1999年東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了．同大学助手，助教を経て，2015年同大学特任准教授．油圧機器のトライボロジーに関する研究に従事．日本トライボロジー学会，日本機械学会などの会員．博士（工学）．

1．はじめに

建機の作業性向上を実現するために，Hydro-Static Transmissionに使用されている斜軸式油圧モータの高速化が求められているが，高速化により油圧モータしゅう動部の潤滑状態が厳しくなることが懸念されている．これまで油圧モータやポンプの潤滑に関する研究は斜板式がほとんどで，斜軸式は非常に少ない．本報では著者がこれまでに取り組んだ斜軸式油圧モータの挙動計測と混合潤滑解析について紹介する．

2．シリンダブロックとバルブプレートの挙動計測

図1に斜軸式油圧モータの概略を示す．ホイールローダーが土砂をすくい込み動作をするときのように，建機が高速走行状態から急制動すると，高速回転する油圧モータから油の吐出量が急減し，吐出ポート側のシリンダボア内圧が急上昇する．これにより，シリンダブロックはバルブプレートに強く押し付けられて，シリンダブロック／バルブプレート間の潤滑状態が厳しくなると考えられるが，急制動時におけるこれらの部品挙動はまだ確認されていなかった．

これまでに斜軸式の油圧ポンプ・モータについて部品挙動を計測した例としては，斜軸式ピストンポンプにおいて一定速度で回転するシリンダブロックの挙動を計測したものがある[1]．しかし，図1のようなシリンダブロックとバルブプレートが回転軸で拘束されていない斜軸式油圧モータについて部品挙動を計測した例はない．そこで，渦電流式変位センサを用いて，急制動時における斜軸式油圧モータのシリンダブロックおよびバルブプレートの挙動計測を行った[2]．

急制動時にシリンダブロックがバルブプレートに押し付けられると，シリンダブロックはバルブプレートの球面軸受上を，また，バルブプレートはエンドキャップ溝内をそれぞれ移動すると考えられる．そこで，これらの挙動が計測できるように，バルブプレートおよびバルブプレートに取り付けたブラケットに渦電流式変位センサを設置した．図2に変位センサの設置位置を示す．また，シリンダブロック円筒面の溝が通過した際の回転パルスを変位センサで検出して，シリンダブロックの回転角度を計測した．

図3に油圧モータの回転速度5,250rpm，ブレーキング時最大作動油圧50MPaのときに計測された

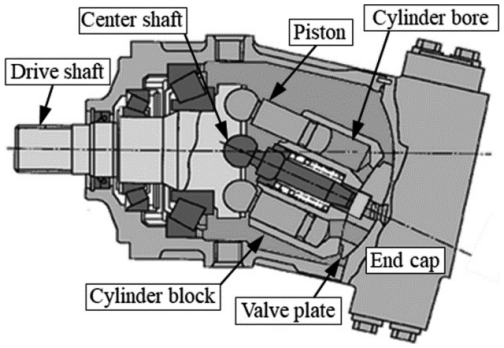


図1　斜軸式油圧モータ

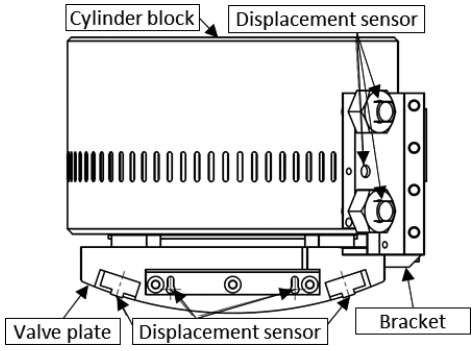


図2　変位センサの取付位置

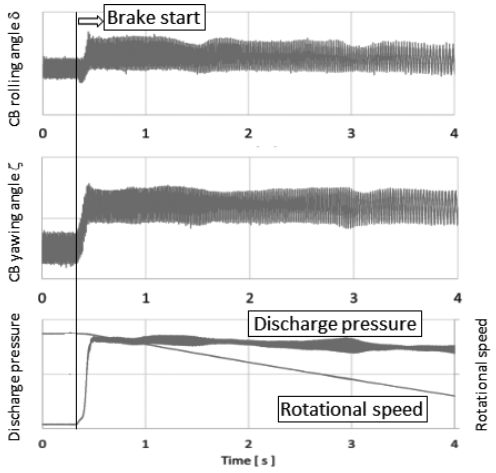


図３　急制動時におけるシリンダブロックの挙動

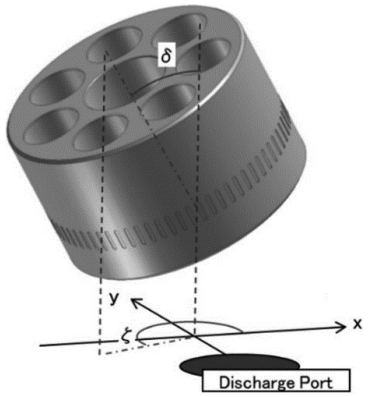


図４　シリンダブロックの姿勢

シリンダブロックの挙動，図４にシリンダブロックの姿勢をそれぞれ示す．急制動の直後に吐出ポートの油圧が50MPaに達して油圧モータが減速を始めた．このとき，シリンダブロックの方位角 ζ は吐出ポート側に30°程度変化した．これは吐出ポート側にあるシリンダボア内圧が上昇したために，シリンダブロックが吐出ポート側に傾いたためと考えられる．また，天頂角δは1.5倍程度大きくなり，急制動によりバルブプレートに対するシリンダブロックの傾きは大きくなった．バルブプレートは急制動の直後に吸入ポート側へ傾かずに平行移動した．これらの挙動計測結果から各部品の自由度を決定して運動方程式を立て，斜軸式油圧モータの機構解析を行った．算出されたシリンダブロック／バルブプレート間の荷重とすべり速度を用いて，後述する混合潤滑解析を行った．

３．シリンダブロック/バルブプレート間の混合潤滑解析

前述のように油圧モータが急制動すると，シリンダブロック／バルブプレート間には大きな荷重が作用し，同時にシリンダブロックの回転速度は低下する．このため，シリンダブロック／バルブプレート間のしゅう動部は混合潤滑状態にあると考えられる．これまでに斜軸式油圧モータについて混合潤滑解析が行われた例はなく，斜軸式ピストンポンプの球面バルブプレートについて混合潤滑解析を行った例[3,4]があるのみである．そこで，前述の挙動計測にもとづいた機構解析と連成した，斜軸式油圧モータのシリンダブロック／バルブプレート間の混合潤滑解析を行った[5,6]．

図５に解析モデルを示す．本解析では，バルブプレートの球面中心を原点とした球面座標系を設定した．シリンダブロック／バルブプレート間の油膜厚さは式(1)に示すように，バルブプレート中心軸に対するシリンダブロック中心軸の傾きδ，シリンダブロック重心位置，バルブプレート球面部の中心O_{SV}とシリンダブロック球面部の中心O_{SR}の距離eから幾何的に求めた．

$$h=C_s+e\sin\theta\sin\theta'\cos(\varphi-\varphi')+e\cos\theta\cos\theta'+\delta \quad (1)$$

ここで，C_sはバルブプレートとシリンダブロック球面部の球面半径差である．θ'，δ' はO_{SV}を中心とした座標系から見たO_{SR}の天頂角と方位角である．

油膜の圧力方程式には表面粗さを考慮したPatir-Chengの修正レイノルズ方程式を用いた[7,8]．

$$\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\Phi h^3\sin\theta\frac{\partial p_f}{\eta\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\Phi h^3\frac{\partial p_f}{\eta\partial\varphi}\right)=6R_s^2\omega\left(\frac{\partial h_T}{\partial\theta}-\sigma\frac{\partial\Phi_s}{\partial\varphi}\right)+12R_s^2\frac{\partial h_T}{\partial t} \quad (2)$$

固体接触による弾性変形は半無限体とした．油膜厚さと固体接触圧力の関係はGreenwoodとTrippの理論[9]に従い，PatirとChengの式[10]から得た．

$$p_c=\begin{cases}4.4086\times10^{-5}k_cE\left(4-\dfrac{h}{\sigma}\right) & (h<4\sigma)\\ 0 & (h\geq4\sigma)\end{cases} \quad (3)$$

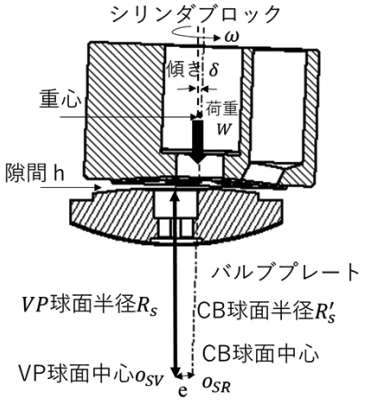


図５　解析モデル

油は非圧縮性であるとした．また，粘度と圧力の関係はBarusの式に従った．

解析の流れとしては，機構解析から得られたシリンダブロック／バルブプレート間の荷重から弾性変形の影響係数を計算して，シリンダブロックの重心位置の初期値および挙動計測で計測された傾きから油膜厚さhを求めた．また，マルチレベル法[11]を用いて，修正レイノルズ方程式から流体圧力p_fを求め，PatirとChengの式から固体接触圧力p_cを求めた．

解析条件は吸入圧力７MPa，吐出圧力２MPa，傾転角５°で，シリンダブロックは5,300rpmで定速回転しているとした．解析結果の一例として，図６～８にシリンダブロック／バルブプレート間の油膜厚さ，流体圧力，固体接触圧力をそれぞれ示す．方位角180°で油膜厚さが最小になり，図３の挙動計測結果（急制動前の定速回転時で175°程度）とほぼ一致した．図８より，シリンダブロック／バルブプレート間は混合潤滑状態にあること，シリンダブロックがバルブプレートに対して傾いているため，球面軸受面の外周に向かって固体接触圧力が高くなることがわかった．

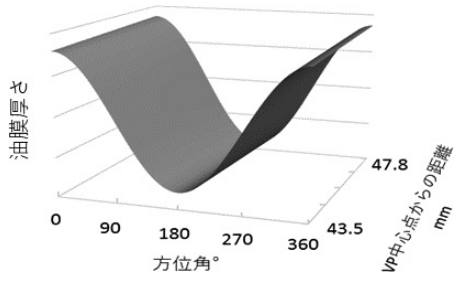


図６　シリンダブロック／バルブプレート間の油膜厚さ

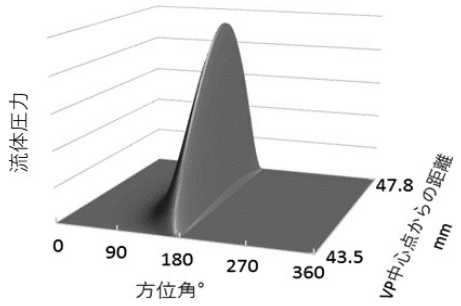


図７　シリンダブロック／バルブプレート間の流体圧力

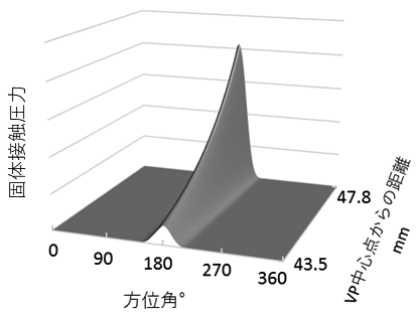


図８　シリンダブロック／バルブプレート間の固体接触圧力

4．おわりに

フルードパワーの最新解析技術動向として，著者がこれまでに行った斜軸式油圧モータの挙動計測と混合潤滑解析について紹介した．斜軸式油圧モータのしゅう動部の潤滑特性にはさまざまな部品の挙動が関係するため，潤滑問題の解明は難しい．また，実際の部品挙動や潤滑状態もまだ不明な点が多い．今後も実機の計測と並行して，潤滑解析を進める必要があると考える．

参考文献

1）田中嘉津彦，京極啓史，中原綱光：球面弁板を有する斜軸式ピストンポンプのロータ挙動の測定，日本機械学会論文集（B編），Vol. 60，No. 569，p. 201-207（1994）
2）田中久美，田中真二，菊池雅男，山本浩：斜軸式油圧モータにおけるシリンダブロック及びバルブプレートの挙動計測，トライボロジー会議2018秋（伊勢）予稿集，B23（2018）
3）田中嘉津彦，京極啓史，桃園聡，中原綱光：ロッド駆動方式斜軸式ピストンポンプにおける球面弁板の混合潤滑解析（第１報，数学モデル），日本機械学会論文集（B編），Vol. 65，No. 634，p. 2038-2046（1999）
4）田中嘉津彦，京極啓史，桃園聡，中原綱光：ロッド駆動方式斜軸式ピストンポンプにおける球面弁板の混合潤滑解析（第２報，数学モデル），日本機械学会論文集（B編），Vol. 65，No. 634，p. 2047-2055（1999）
5）梅田光，田中真二，菊池雅男，山本浩：斜軸式油圧モータにおけるシリンダブロック/バルブプレート間の潤滑特性，トライボロジー会議2017秋（高松）予稿集，C35（2017）
6）梅田光，矢内柊平，田中真二，菊池雅男，山本浩：斜軸式油圧モータにおけるシリンダブロック／バルブプレート間の混合潤滑解析，トライボロジー会議2018秋（伊勢）予稿集，B24（2018）
7）N. Patir and H.S. Cheng：An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication, Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol. 100, No. 1, p. 12-17（1978）
8）N. Patir and H.S. Cheng：Application of Average Flow Model to Lubrication Between Rough Sliding Surfaces, Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol. 101, No. 2, p. 220-229（1979）
9）J.A. Greenwood and J.H. Tripp：The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 185, No. 48, p. 625-633（1970）
10）N. Patir and H.S. Cheng：Effect of Surface Roughness Orientation on the Central Film Thickness in E.H.D. Contacts, Proceedings of the 5th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, p. 15-21（1978）
11）C.H. Venner and A.A. Lubrecht：Multilevel Methods in Ludrication, Elsevier（2000）

（原稿受付：2020年７月２日）

解説

油圧機器のキャビテーション流れ解析

著者紹介

沖田浩平（おきた こうへい）

日本大学生産工学部機械工学科
〒275-8575　千葉県習志野市泉町１－２－１
E-mail : okita.kohei@nihon-u.ac.jp

2002年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了．東京大学研究員，理化学研究所上級研究員を経て，2011年日本大学生産工学部准教授，現在に至る．キャビテーション，医用超音波，数値流体力学の研究に従事．日本機械学会，日本流体力学会などの会員．博士（工学）．

1. 緒　　言

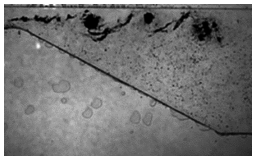
建設機械などの油圧機器でキャビテーションの発生にともなう騒音や壊食が問題となっており，キャビテーションが機器に与える影響について，設計段階での数値シミュレーションによる検討が求められている．本稿では，キャビテーション流れについて簡単に述べた後，数値解析開発環境であるOpenFOAM[1]より提供されている流体ソルバーの一部について紹介し，独自のカスタマイズを施したOpenFOAMソルバーによる解析事例として，油圧リリーフ弁[2)3)]や油圧バルブ[4)]のキャビテーション流れに対する数値シミュレーションの結果を示す．そして，キャビテーション流れに対する数値シミュレーションの現状と課題について述べる．

2. キャビテーション流れ解析における留意点

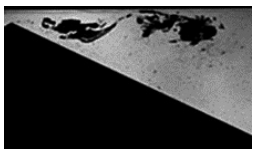
図１に二次元縮小拡大流路における水と油のキャビテーション流れのシャドーグラフを示す．のど部先端から生じた渦にキャビテーションが発生している様子が見られる．ここで，キャビテーション流れに関連する無次元数として，レイノルズ数Reとキャビテーション数σを流体の動粘度ν，蒸気圧力p_v，密度ρを用いて次のように定義する[5)]．

$$\mathrm{Re} \equiv \frac{v_{th}\delta_{th}}{\nu}\ ,\quad \sigma \equiv \frac{p_d - p_v}{\frac{1}{2}\rho v_{th}^2}$$

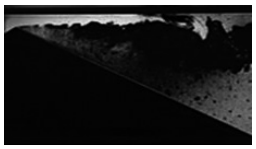
ただし，v_{th}とδ_{th}はスロート部の平均流速と長さ，p_dは下流圧力である．油の動粘度（ISO VG46相当）が水に比べて非常に高いため，図１の流れではレイノルズ数が50倍程度異なる．図１(a)および(b)より，どちらの流れにおいても紙面方向を軸とする二次元的な渦の低圧部に生成したキャビテーションの塊とこれらをつなぐような流れ方向に細長く伸びた渦にキャビテーションが見られるものの，図１(a)と(b)を比較すると，レイノルズ数によってキャビテーションの最小構造のスケールが異なる．一方，レイノルズ数が等しい油の流れでキャビテーション数が異なる場合の図１(b)と(c)を比較すると，キャビテーション数の低下によって，キャビテーションの発生量が大幅に増加している．



(a)　水（Re＝83,667，σ＝0.50）



(b)　油（Re＝1,570，σ＝0.25）



(c)　油（Re＝1,570，σ＝0.20）

図１　二次元縮小拡大流路に生じる水と油のキャビテーション（スロート部隙間δ_{th}と奥行幅wの比は，水の装置でw＝5δ_{th}/4，油の装置ではw＝3δ_{th}/2であり，油の装置では下部が光を通さないため影となっている）

キャビテーションの発生が流れ場の渦の低圧部や下流圧力の圧力値に依存するため，キャビテーション流れ解析においては，流れの最小構造や流れ場の圧力値が適切に再現される必要がある．とくに，油のキャビテーション流れでは油の動粘度の温度依存性が大きいため，実験での油温の計測が必要不可欠

であり，解析と実験の対応を検討する際は，動粘度の変化によってレイノルズ数が変化することはもちろんのこと，流路内の損失が変化するために，下流圧力を通してキャビテーション数にも影響することに注意する必要がある．

3. 解析手法

3.1 OpenFOAMのキャビテーション流れ解析

OpenFOAMはオープンソースの数値解析開発環境であり，さまざまな流れに対する流体解析ソルバーが提供されている．また，複雑形状の流路内流れに対して非構造格子が利用でき，スーパーコンピュータを利用した大規模並列計算も可能である．キャビテーション流れに対するソルバーとしては，CavitatingFoamとInterPhaseChangeFoamがある．CavitatingFoamでは，液相と気相が均質に混ざった混合体の密度ρ_mが圧力pに関する状態方程式としてモデル化されており，蒸気圧力付近で液相密度と気相密度の間で混合体の密度値が変化する．一方，InterPhaseChangeFoamでは，混合体の密度が気液間の相変化によって変化するとしてモデル化されており，局所圧力が飽和蒸気圧力より低くなると蒸発し，逆に高くなると凝縮するというような相変化がモデル化されている．OpenFOAMに限らず，キャビテーション流れのモデル化に関するより詳しい説明については文献[6]をご参照いただきたい．

3.2 InterPhaseChangeFoamのカスタマイズ

これまでに，InterPhaseChangeFoamのソースコードを利用して，著者が提案したキャビテーションモデル[7]を導入したOpenFOAMソルバーを開発している．主な変更は二つあり，一点は，液相，気相ともに非圧縮性を仮定したInterPhaseChangeFoamにおいて，液相に圧縮性を考慮している．これによって，キャビテーション騒音のような音の伝播を取り扱うことが可能になる．また，音波の流出境界条件での非物理的な反射を防ぐため，waveTransmissive境界条件を利用できるようにしている．

もう一点は，InterPhaseChangeFoamにおいて相変化モデルとして選択可能なMerkle，Kunz，Schnerr-Sauerモデルに替えて独自の相変化モデルを導入している．図1のようなキャビテーション流れにおいて，気液界面をとらえるグリッドスケールで数値シミュレーションするには計算コストが膨大となる．そこで，気液界面のスケールよりも大きなグリッドスケールでキャビテーション流れを再現するために，さまざまな相変化モデルが提案されている．著者らは，流れの渦運動にともなって膨張・収縮するキャビテーション気泡クラウドを対象とするマクロな相変化モデルを提案し，物体周りのキャビテーション流れにおいて，非定常な流れの再現性だけでなく，平均量についても定量的に妥当な結果が得られることを示している[7]．

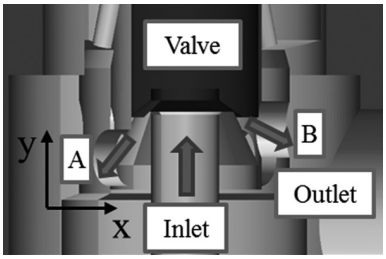


図2　油圧リリーフ弁の形状モデル

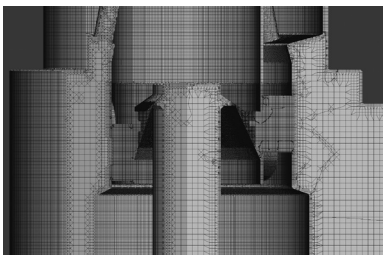


図3　snappyHexMeshで生成された境界適合の非構造格子

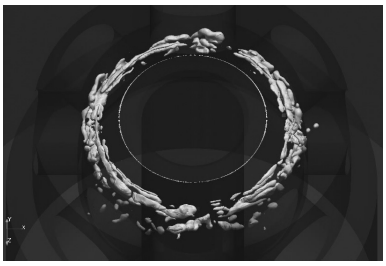
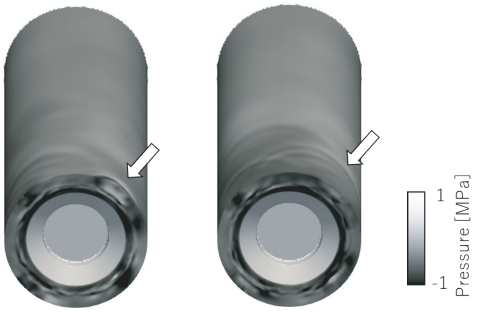


図4　リリーフ弁に生じるキャビテーション（σ=0.15，気相体積率0.1の等値面を可視化）

4. 油圧リリーフ弁に生じるキャビテーション騒音

油圧リリーフ弁において，キャビテーションの発生にともなう騒音をオペレーターが異音に感じると報告されている．ここでは，異音発生メカニズムの解明を目的に，図2に示すような形状の油圧リリーフ弁におけるキャビテーション流れの解析を実施した．図2より，流入部からの流れは，固定されたバルブの隙間から噴出し，それぞれ4つの孔Aと孔Bを通った後に流出部へと向かう．計算格子は，OpenFOAMで提供されているメッシュ生成ツールのsnappyHexMeshを用いて，図3に示すような境界適合の非構造格子を適用した．バルブ隙間部から孔Aおよび孔Bにかけて十分に細分化し，複雑形状の流路全体を約1,700万格子点で解像した．隙間部の平均流速と隙間長さで定義したレイノルズ数はRe＝538であ



(a)　t＝1.400ms　(b)　t＝1.405ms

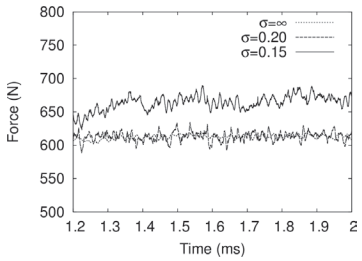
図5　バルブ表面の瞬時の圧力分布（σ＝0.15）

り，境界条件は流入境界で流速一定，流出境界で圧力一定，壁面でノンスリップ条件とした．キャビテーションが発生しない条件で十分発達させた流れを初期値に，キャビテーション数を下げてキャビテーションの流れ解析を行った．

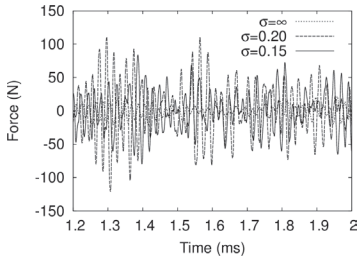
キャビテーション数σ＝0.15における瞬時のキャビテーションの様子を図4に，バルブ表面の瞬時の圧力分布を図5に示す．図4より，隙間から噴出した流れによって生成された横渦にキャビテーションが発生し，同心円状に分布していることがわかる．このキャビテーションの時間発展の様子によると，キャビテーションは不規則に崩壊し，崩壊にともなって生じる衝撃圧（図5(a)）が局所的にバルブに作用するだけでなく，流路内を圧力波が伝播して機器全体に広がっていく（図5(b)）．また，圧力波がバルブ側面を通過する際に，バルブの軸に垂直な横方向の力も作用する．

各キャビテーション数において，バルブに作用する圧力による軸方向（Y方向）および横方向（X方向）の力の時間履歴と周波数スペクトルをそれぞれ図6および図7に示す．図6(a)より，キャビテーションが発生しないσ＝∞とキャビテーションが発生し始めるσ＝2.0の場合，軸方向には平均して約610Nの力が作用しており，キャビテーションにともなって力の変動が大きくなっていることがわかる．また，図4のようなキャビテーション状態であるσ＝1.5の場合，軸方向の力が平均664Nとキャビテーションが発生しない場合に比べて10％程度増加している．図7(a)より，軸方向に作用する力の周波数スペクトルは，σ＝1.5において20kHz以下の可聴音域の振幅が増大していることや，40kHzと60kHz付近にピークが認められる．

一方，図6(b)より，横方向の力については，力の振幅がσ＝∞で最大22Nであるのに対して，σ＝2.0では最大120N，σ＝1.5では最大84Nとキャビテーションの発生により4～5倍の変動力が作用してい

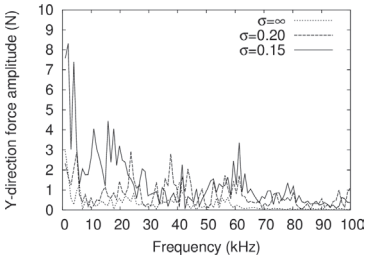


(a)　軸方向（Y方向）

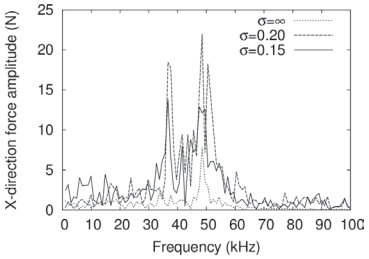


(b)　横方向（X方向）

図6　各キャビテーション数においてバルブに作用する圧力による力の各方向成分の時間履歴

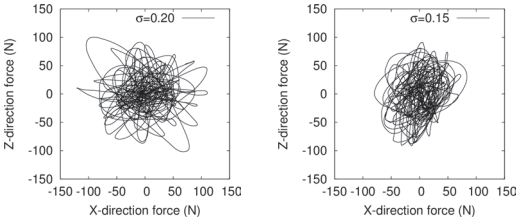


(a)　軸方向（Y方向）



(b)　横方向（X方向）

図7　各キャビテーション数においてバルブに作用する圧力による力の各方向成分の周波数スペクトル



(a)　σ＝0.20　(b)　σ＝0.15

図8　各キャビテーション数においてバルブの軸に垂直な方向の力の時間軌跡

る．また，図7(b)より，横方向の力の周波数スペクトルを見れば，$\sigma=\infty$で50kHzにピークがあるのに対して，$\sigma=2.0$や$\sigma=1.5$では，50kHz付近に加えて，37kHz付近にもピークが表れている．キャビテーションの発生により振幅が増大しているが，$\sigma=2.0$と$\sigma=1.5$では，キャビテーションの発生量が多い$\sigma=1.5$の振幅が小さいことがわかる．

バルブの軸に垂直な方向に作用する圧力による力の時間軌跡として，X方向とZ方向の力を時系列に繋いだグラフを図8に示す．中心（0，0）から線上のある点へのベクトルは，ある時刻においてバルブの軸に垂直に作用する力の向きと大きさを持っている．キャビテーション数によらず非常に細長い円を描いており，瞬間的に特定の方向に力が作用しているが，その方向に指向性はなく，さまざまな向きに作用していることがわかる．

キャビテーションの発生によって局所的な損失が増大して上流圧が高くなると，流量が減少するか，もしくは大きくなった軸方向力によって，実際にはバルブの開口が拡がる．いずれの場合も開口部の流速が低下するためにキャビテーションの発生が抑えられる．その結果，局所損失が減少して上流圧が低くなるため，流量が増大するか，もしくはバルブの開口が狭くなる．このようなキャビテーションによる上流圧の変動は，リリーフ弁に振動を生じる一因になる．また，バルブに作用する軸垂直方向の力については可聴音域より高い周波数帯の変動であるが，キャビテーションによって変動の振幅が大きくなるため，20kHz以下の可聴音域の機械的な振動を加振する要因になることも考えられる．よって，バルブの振動との関連を調べるためには，キャビテーション流れとバルブの流体構造連成解析が必要であり，今後の課題である．

5. 油圧バルブのキャビテーションエロージョン

油圧バルブの概略図を図9に示す．複数の孔を有する円筒形のスプールが高圧側に移動すると，一部の孔から油がスプール内に流入し，キャビテーションが発生する．このキャビテーション気泡が，ブロックに面したスプール孔内で崩壊して生じたブロック表面の壊食が観察されている．このようなキャビテーションエロージョンが生じるメカニズムの解明を目的に流れ解析を行った．

数値シミュレーションには，snappyHexMeshを用いて生成した図10に示すような境界適合の非構造格子を用いた．総格子点数は約363万点である．高圧側に上下2か所のスプール孔が部分的に開口し

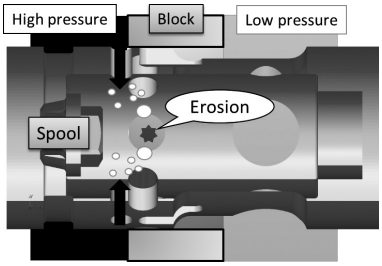


図9　油圧バルブの概略図

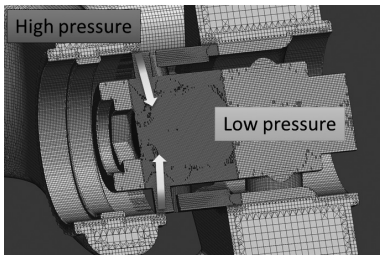


図10　スプール内の境界適合非構造格子の様子

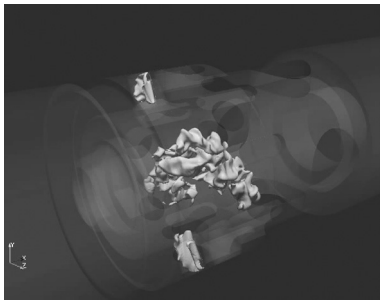


図11　スプール内の瞬時のキャビテーションの様子（$\sigma=0.10$, 気相体積率0.1の等値面を可視化）

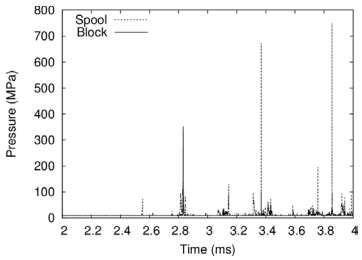
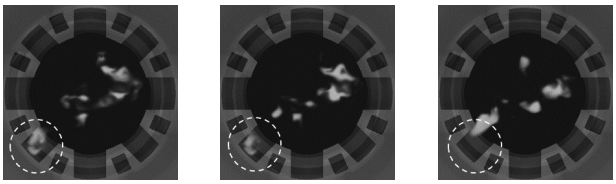


図12　スプールおよびブロック表面上の最大圧力の時間履歴（$\sigma=0.10$）



(a)　t＝2.81ms　(b)　t＝2.83ms　(c)　t＝2.85ms

図13　スプール孔断面上のキャビテーションの時間変化（$\sigma=0.10$，気相体積率をグレースケールコンターで可視化）

た状態である．境界条件は，高圧側の流入境界で流速一定，低圧側につながる３つの流出境界で圧力一定とした．また，キャビテーション数は上流圧と下流圧を用いて定義した．

図11はスプール内の瞬時のキャビテーションの様子を示している．高圧側に部分的に開口した上下２か所のスプール孔の中でキャビテーションが発生しており，孔からスプール内に噴出した高速ジェットによる渦の低圧部にもキャビテーションが発生している．スプール内のキャビテーションは，生成と崩壊を繰り返す様子が時間発展の可視化結果から観察されている．

スプールおよびブロック表面上の最大圧力の時間履歴を図12に示す．両表面上においてキャビテーションの崩壊にともなうスパイク上の圧力上昇が複数見られる．ここで，ブロック表面上の最大圧力に着目すると，t＝2.83msで342MPaの圧力が生じており，図13より，この時間前後のスプール孔断面上のキャビテーションの様子を見れば，破線で囲まれたスプール孔内に存在するキャビテーションが急激に収縮し消滅していることがわかる．また，圧力分布からこの孔内で圧力が急激に上昇することを確認している．したがって，このようなスプール孔内でのキャビテーションの崩壊が，ブロック表面の壊食を引き起こしていることが数値シミュレーションによって示された．

6. 結　　言

OpenFOAMを利用したキャビテーション流れ解析について，油圧リリーフ弁におけるキャビテーション騒音と油圧バルブにおけるキャビテーションエロージョンへの解析事例を示した．油圧機器に生じるキャビテーションの実験では，高圧に耐えられる可視化実験装置を構築する必要があるのはもちろんのこと，キャビテーションが高速な現象であることや，気液界面の存在によって，詳細な流れの観察に困難さがある．一方で，数値シミュレーションは詳細な流れの情報が得られるものの，十分な実験データがないキャビテーション流れに対してシミュレーション結果の妥当性を判断する難しさがある．したがって，キャビテーション流れに対しては，数値シミュレーションと実験の両方をうまく活用して，現象の解明につなげていくのが得策であり，効率的だと考える．

実際，先に示した解析事例では，対応する可視化実験によってシミュレーションの定性的な妥当性を検討している．たとえば，油圧バルブ内のキャビテーション流れでは，スプール孔内でキャビテーションが崩壊するというシミュレーションで再現された様相を可視化実験においても観察している．一方で，キャビテーションエロージョンにおいては，材料表面に加わる圧力の値が重要となるが，数値シミュレーションで得られるキャビテーションの崩壊圧は，格子解像度の影響が大きく，格子幅が小さくなるにつれて，高くなることが報告されている．よって，現状のキャビテーション流れ解析においては，数値シミュレーションを適切に行うことができれば，キャビテーションエロージョンのメカニズムに対しては，定性的なキャビテーション流れの再現によって解明できるが，エロージョンが生じるかどうかといった定量的な評価はまだ難しいというのが著者の感覚である．ただし，定性的な結果であっても，活用次第で十分設計に役立てることは可能であると考えられる．

キャビテーションは，グリッドスケールよりも小さい微小気泡核から初生・膨張し，グリッドスケールよりも大きくなった後，渦との干渉で分裂したり，圧力回復にともなって収縮する際に界面不安定により分裂したりして，グリッドスケールよりも小さくなる．よって，このような気液界面のスケールとグリッドスケールの関係を適切に考慮したキャビテーションモデルの開発が定量的な精度の向上に求められており，ハイブリッドモデルと称するキャビテーションモデルが提案されてきているが，まだ現状では発展途上にある．

一方，キャビテーションの流れ解析については，OpenFOAMのほかにも，商用アプリケーションを用いて解析できるようになり，多数の解析事例が報告されてきている．しかし，キャビテーションモデルや乱流モデルの組み合わせによって結果が異なったり，キャビテーションモデルに含まれる経験パラメータによっても結果が異なったりする場合がある．このため，設計においてキャビテーション流れ解析を利用にするには，若干の経験が求められるように思われる．

以上より，今後もさまざまなキャビテーション流れに対するシミュレーションと実験に取り組み，新しいモデル開発や解析技術の向上に貢献していきたい．

最後に，東京大学名誉教授の加藤洋治先生，東京大学の高木周先生，コマツの名倉忍様，片岡豊美様，宮本祐介様，古川輝幸様には，共同研究者として本研究の遂行に際して多大なご協力を賜りました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1）OpenFOAM，http://openfoam.org/もしくはhttp://www.

openfoam.com/.
2）沖田浩平，宮本祐介，片岡豊美，高木周，加藤洋治：油圧リリーフ弁の異音発生メカニズムに関する研究，キャビテーションに関するシンポジウム（第17回）講演論文集（2014）
3）Okita, K., Miyamoto, Y., Kataoka, T., Takagi, S., Kato, H.：Mechanism of Noise Generation by Cavitation in Hydraulic Relief Valve, J. Physics：Conference Series 656 (2015)
4）Okita, K., Miyamoto, Y., Furukawa, T., Nagura, S., Takagi, S., Kato, H.：Influence of Collapse of Cavitation Bubble Cloud on Erosion of Solid Surface in Hydraulic Machinery, Proc. 10th Symp. Cavitation (CAV2018), p. 542-545 (2018)
5）加藤洋治：新板キャビテーション，森北出版（2017）
6）沖田浩平：キャビテーション流れのモデリングとシミュレーション，ターボ機械，Vol. 45，No. 9，p. 15-23 (2017)
7）沖田浩平，梶島岳夫：翼まわりの非定常キャビテーション流れの数値シミュレーション，日本機械学会論文集（B編），Vol. 68，No. 667，p. 637-644（2002）

（原稿受付：2020年6月16日）

解説

流体機械へのモデルベース開発手法の適用とケーススタディ

著者紹介

工藤啓治（くどう けいじ）
ダッソー・システムズ株式会社
〒141-6020 東京都品川区大崎2－1－1
E-mail : Keiji.KUDO@3ds.com

1984年 北海道大学 理学部物理学科 物性理論専攻卒．シミュレーション全般に関する，開発，マーケティング，HPC活用，最適設計・ロバスト設計適用，業務改革ビジネスコンサルに従事．日本機械学会，日本計算工学会会員．

1. はじめに

設計開発プロセスにおいて期間やコストが増える要因のほとんどに設計の手戻りが起因している．手戻りが発生する原因には，設計が複雑になってきたことで，経験や実績による設計では対応できない複雑な性能間のトレードオフや，データ共有やコミュニケーションに関する不備，経験の少ないエンジニアの増加などさまざまな要因が考えられるものの，結果として事前の想定が甘いか，予測が不十分であったことによる基本設計の品質に帰着する．一方，基本設計時には未定・未知の設計情報がたくさん含まれているので，それらをある程度想定し，性能や制約がどのような振る舞いをするかを把握しておくことがきわめて重要である．本稿では，後工程での手戻りを事前に回避する方法論を想定設計と名付け，それを実現する手段として，ここで定義するModel Based Parametric Designフレームワークを用いる．

2. 想定設計とその期待成果

製造業の設計開発プロセス工程においては，さまざまな不具合が生じている．たとえば，

・検討漏れにより，試作段階で何度も手戻り
・後工程での不具合解決のため，基本設計見直し
・目標性能が高すぎて，むだな試行錯誤
・トレードオフ性を解決できず，重量付加
・市場の要望に対応できずに競争力のない製品に

このような設計課題は，基本設計の品質が悪いことが原因となって後工程で生じており，開発工程と時間にもコストにも大幅な影響を及ぼす．設計品質が悪くなる理由を言い換えると，“状況把握と変更に対応できなかった想定の失敗”ということができる．特に，裏付けの薄い経験にもとづく設計プロセスにおいては，このような不具合が頻繁に生じることは，しばしば報告されている．こうした不具合を生じさせないための素性のよい基本設計のあり方とは，上記と対比させる形で書くと下記の状態になっていることである．

・抜け漏れのない要求検証を行う
・後工程での変動要因を想定しておく
・目標性能の割り付け案を幅広く検討しておく
・複合性能のトレードオフ性を事前検討しておく
・要求変更の可能性を想定しておく

これらを実現するためのあるべき姿を，【さまざまな設計情報の変動可能性を想定しておき，そのための多様な設計案の組み合わせをシミュレーションで事前検討しておくことで，実現可能な設計案を常に選択できる状態】と定義し，「想定設計」と名付ける．

特に複合性能のトレードオフ性について流体機械一般で考えれば，製品性能や制約条件は，流体的な側面では流速，流量，流体圧，流体音騒音，容量などで表現され，構造的な側面では，応力，変形量，耐久性，振動などを評価する必要があるだろう．これらの指標は，仕様や形状を変えるだけですべてに影響し，相反する関係にあるために，それらの複雑な関係性を定量的に把握する手法が必要となる．

3. モデルベース開発の位置づけ

設計開発プロセス全体におけるモデルベース開発（MBD）の位置づけを明確にしておく．MBDの定義は広くさまざまではあるが，ここでは図1に示すように，MBDが適用される領域は，実物試作を実施する前のバーチャルな設計プロセスすべてと考える．

本稿では，標準モデルを駆使してパラメトリックに多数の設計案の組み合わせ検討を行うModel Based Parametric Design というしくみをMBDの根幹ととらえて説明する．Model Based Parametric

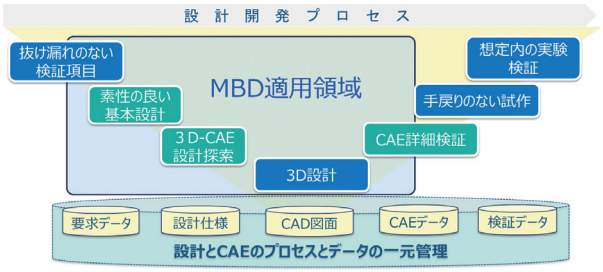


図１　設計開発プロセスにおけるMBD

Design は図２に示すように，４つのステップからなるフレームワークであり，想定設計を実現するために，１）設計者が合理的に判断するに十分な情報と２）正しい判断をするためのデータ分析を提供する．

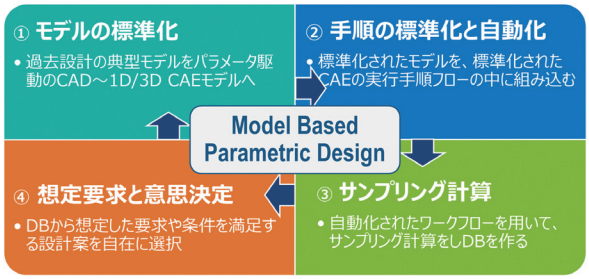


図２　Model Based Parametric Designのしくみ

① モデルの標準化

過去設計の典型モデルを，パラメータ駆動のための初期モデルとして定義することが出発点となる．過去設計のDBから類似性のパターンを調べ，共通しているデータ群をグループ化し，パターンの変化を可変設計パラメータとして数値化することで，パラメータ駆動可能な標準モデルを，CADあるいは，1D/3D CAEモデルの形で定義することができる．

モデルの標準化は言い換えれば，過去設計のノウハウを形式知化し，分析し，未来設計に再利用できる形にした設計情報といえるので，モデル標準化の試み自体が高度な設計行為であることをあらためて強調しておきたい．

② 手順の標準化

設計性能解析の手順をワークフロー化し，可変パラメータの組み合わせを自動的に設定し，計算を自動的に実行可能な形にする．問題を解く手順を，ワークフローという標準化された形式知に表現された結果，再利用のある高度な設計情報となっている．

③ サンプリング計算

設計変数，制約条件，要求性能に想定可能な上下限値を与えて，実験計画法などを用いたサンプリング計算 を実施する．このデータ群は仮想経験DBと言い換えることもできる．計算回数には特に推奨された回数はないものの，設計変数と制約条件や要求数の総数次元を勘案しながら，数百回から数万回程度のサンプリング数を実施することで，可能な限りの組み合わせ数の新たな設計案を生成する．

④ 想定要求と意思決定

設計方針に沿った要求性能と制約条件を想定して，限界仕様・バランス性の高い仕様・特化仕様を自在に選択しながら，仮想経験DBから設計案を絞り込む思考と判断の段階である．さまざまな状況を想定しながらデータ分析をするこの手順こそが，想定設計の本質であり，従来の設計プロセスには見られなかった考え方である．この想定設計が正しく実現できれば，後工程での手戻りを合理的に減らすことが可能な，素性のよい基本設計案を提供できることになる．

4. ケース・スタディ

4.1　設計計算シートを用いた設計空間分析による想定設計

新たな製品を設計するに際し，表計算ソフトに埋め込んだ簡易計算式や経験則を使った基本設計がよく行われている．ここでは，油圧機器で行われた例を示す．ある設計要件内の容量を持ちながら，なるべく全長の短い機器を設計するにあたり，設計パラメータ数30種，制約条件10種以上にも及ぶ複雑かつ広大な設計空間を解く問題である．従来，さまざまな種類の表計算ソフト内の計算シートを手作業で使い分けながら熟練設計者が当たりを付けたパラメータの組み合わせを検討し，数日掛けて基本設計を行っていたが，ほかの優れた設計案がある可能性を探索する手段がないことと，パラメータの選択や条件が属人的であること，時間がかかることが課題であった．

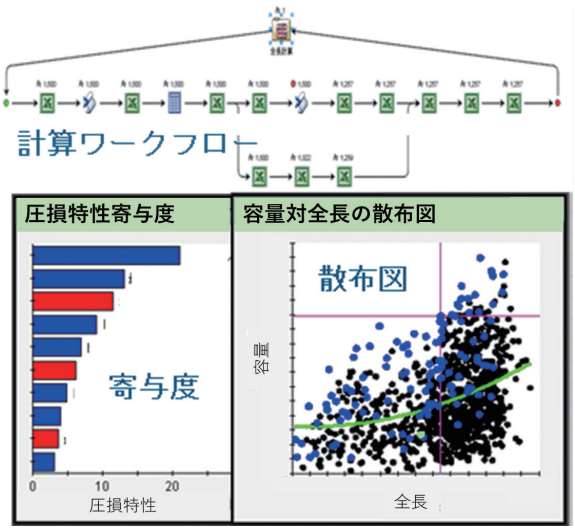


図３　設計計算の自動化と分析

Model Based Parametric Designによるしくみを応用することによって，一連の表計算ソフト計算シートをワークフローとしてつなぎ合わせ，実験計画法を駆使して広い設計空間を効率よく絞り込まれた組み合わせで探索し，数千回の計算を数時間で行うことができるようになった．これにより，人に依存しない標準的手順で，自動的に抜け漏れなく設計探索ができることとなることに加え，図３に示すような寄与度分析や散布図分析を駆使した新たな設計知見が確立されることになる．さらに，下流工程での設計品質の向上も見込まれる．

4.2　高精度Computational Aero Acoustics（CAA）によるバーチャル最適化設計

従来，流体解析による最適設計を企業で行うには計算リソースの面から難しいとされてきたが，昨今のハードウエアの継続的な性能向上と合理的な価格により，かなりの大規模な計算が実施できるようになってきた．手法面においても，直接計算の回数をなるべく削減しながら，再現に優れた代理モデルを活用することで，計算回数を気にすることなく多目的最適解探索を大量に実施できる方法も確立されている．ここでは，計算精度の面から近年トレンドになっている格子ボルツマン法による非定常熱流体解析ソフトウエア[1)]を用いたHVAC騒音低減のための形状最適化設計事例について説明する[2)]．

⑴　最適化設計の対象

設計対象は，ドイツ製高級車のHVACダクトで，ブロワを除いたダクトおよび６種（左・右，中央，上部）のレジスタが吐出部として配置されている．そのうち，事前調査により，中央ダクト，上部レジスタ～ダクト，左右ダクトの３部位の寄与度が大きいことが判明しているので，この３部位の設計変更を実施した．

⑵　形状最適化手法

- 目的関数：騒音と空調性能を両立させるために下記の２種を設定している．
  １）音響性能：800［Hz］～ 2,000［Hz］の周波数域で算出されるOASPL（Over All SPL）の低減
  ２）流体性能：Inlet部に圧力拘束条件を課した際の流量をBaseline形状と同値
- 設計変数：各部位の形状変更範囲を次の２点で制限を設け，柔軟な形状変更を実施するためにCADを介さずモーフィング技術を用いた．
  １）物理的に搭載可能スペース
  ２）形状内渦度および表面圧力変動値を算出しそれぞれが大きい各部位で４領域

⑶　最適設計結果

最初に，300 ～ 400コアの並列計算機で，すべての最適化計算（Baseline ～ Final形状の計算）までで，約40計算を行った．そのサンプル計算結果から，代理モデルを作成し，そのうえで10,000回の多目的設計探索を行った．複数の最適解集合から，性能を保証しながら，騒音が低減されたSPL結果を図４に示す．

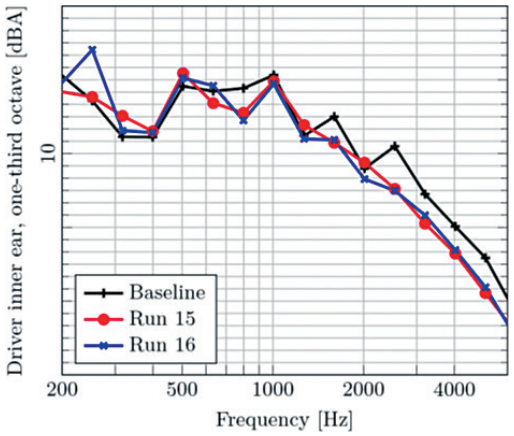


図４　Sound Pressure Level for Baseline

本図からもわかるように，低減対象である800［Hz］以上の周波数域で大幅な低減が見られることがわかる．また，最終的な形状に渦度成分表示を加えた結果を図５に示す．

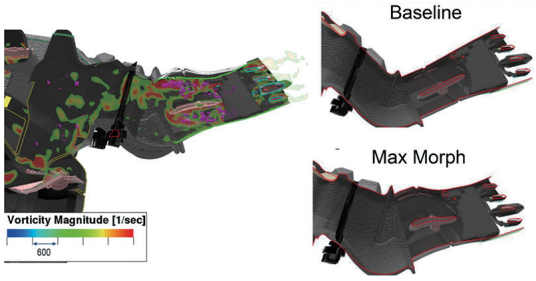


図５　Left: Optimized geometry and Vorticity distribution, Right: Baseline and Max. range

本手法により，実験によるトライ＆エラーでは検討困難であった新たな設計案を導出可能となり，かつ実測では得られない物理現象の詳細や騒音発生メカニズムも解明できるようになった．

5.　想定設計と最適設計の相違点

コンセプトとケース・スタディで紹介してきた想定設計と最適設計と何が違うのかを整理してみたい．まずは，適用されるフェーズが最適設計の場合には，構想設計から基本設計，詳細設計にいたる設計プロセスの中枢域で幅広く適用されるのに対し，想定設

計の場合には，商品企画から構想設計にいたる設計開発の初期段階においてその効果を発揮するという点において，大きく異にする．図６に示すように，想定設計では（後工程での手戻りを削減するための）適切な性能バランスを実現する設計解を絞り込むことが求められる．それら設計可能解の中で（トレードオフも含みながら）性能最大化を図るのが最適設計という位置づけになる．

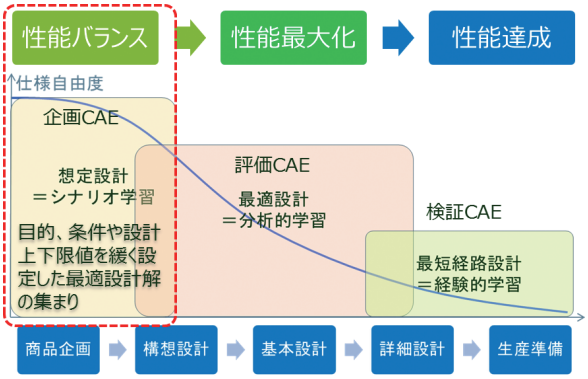


図６　想定設計と最適設計の適用フェーズ

実際にデータを目の前にしたときには，想定設計的な見方と最適設計的な見方を行き来しながら，素性の良いデータを探索するということになる．技術は同じであるが，方法論とデータの見方が異なるので，意識して使い分けることが肝要である．

6. 設計開発のあるべき像に向けて

設計の約８割は既存設計の流用やルーチンワークであるといわれる．残りの２割が新規設計であるが，そのうちの大半は従来設計にもとづく新たな設計パラメータの組み合わせにもとづき，新しい発想にもとづくのはさらに一部であるから，ざっくりと図７に占めるような構図になる．

商品の魅力を出し，競合と優位に戦うには発想設計が重要ではあるものの，リソースには限りがあるので，リソースの大半を占める改良設計を迅速に正しく実施しないことには，革新設計や発想設計に取り組む余地はなくなってしまう．今回紹介したModel Based Parametric Designのしくみは，まさに改良設計と革新設計を迅速に正しく取り組む方策であり，想定設計の考え方はしくみを正しく使い込むための概念と言ってよい．このような考え方にもとづく設計プロセスは，従来，CAEのFront loading

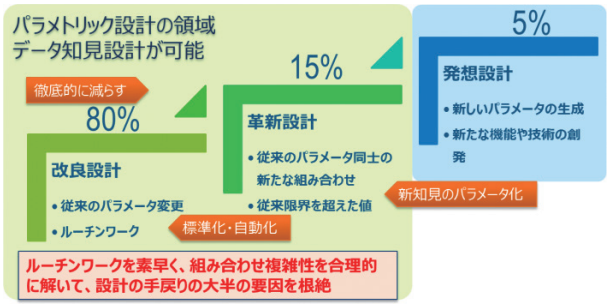


図７　改良設計・革新設計・発想設計

あるいは Up-front CAEと呼ばれてきたコンセプトの実現でもあり，また，世界の先端企業では，名称は個別ながら長期的戦略的な取り組みとして想定設計が実現されている．

7. ま と め

設計手戻りを限りなくゼロにすることを目標とする，想定設計コンセプトとケーススタディを提示した．過去設計モデルや手順を標準化し，パラメトリックな標準モデルをベースにした仮想経験DBとその分析で構成されるModel Based Parametric Design手法を適用することで，想定設計と最適設計が実現できることを示した．本稿で紹介した手法がより幅広く適用され，手戻り削減に大きく貢献することを願ってやまない．

8. 謝　　辞

本論文のケース・スタディ執筆にあたり，筆者の同僚である甲斐寿氏から協力をいただいたので，感謝申し上げる．

参考文献

1）https://blogs.3ds.com/simulia/tag/powerflow/
2）Charles M. Luzzato, Jan Biermann and Raphaël Fouque: The Aero-Acoustic Design and Optimization of a Ground Transportation HVAC System using Lattice Boltzmann Methods, NAFEMS World Congress 2019, At Quebec
3）工藤啓治，シミュレーションを基盤とした設計フロント・ローディング手法の体系化とその実現，スマートプロセス学会誌2018年５月号
4）工藤啓治，量産・実効・個別品質を検証するIoT時代の統計的シミュレーション・フレームワークについて，計算工学講演会論文集　Vol. 25（2020年６月）

（原稿受付：2020年６月８日）

解説

モデルベース開発のためのパラメトリックCAE活用法

著者紹介

満嶋弘二（みつしま こうじ）
KYB株式会社
〒509-0206 岐阜県可児市土田60
E-mail : mitsushima-kou@kyb.co.jp

1987年神奈川大学工学部機械工学科卒．カヤバ工業株式会社（現KYB）入社，CAE解析業務，社内展開業務を経て，現在はDX推進業務に従事．日本フルードパワーシステム学会，品質工学会などの会員．

永溝喜也（ながみぞ よしや）
KYB株式会社
〒252-0328 神奈川県相模原市南区麻溝台1－12－1
E-mail : nagamizo-yos@kyb.co.jp

2012年佐賀大学大学院工学系研究科修士課程修了．KYB㈱入社．現在はCAE解析業務に従事．

1. はじめに

モデルベース開発（MBD）は，組み込み系システムの開発において，モデルをベースにシミュレーション機能を活用することで，開発期間の短縮とソフトウェアの品質を向上させる開発手法である．最近では，適用対象を機械設計（強度，振動，運動…）にも拡げ，CAEを活用した机上開発という意味で使われることも多い[1)]．本解説では，後者の意味でMBDを捉え，机上開発を効率良く進める方法論を紹介する．

製品開発の上流段階で問題を早期に潰しこむフロントローディング手法としてのCAE活用の歴史は古い．文献２）によれば，設計とは，「目標品質の商品を作り出すための新着想を得て新要素を作りこれを組み合わせて統合する」ことで完結させずに，「設計の根拠を理論化し多数の代替案と効率良い評価手法を用意し，活気と人間味あふれるDRで最適案を選択すること」と定義されている．「設計根拠の理論化」の部分に関して，CAEソフトウェア技術の飛躍的な進歩により，使い勝手の良い物理モデリングツールが登場し，広く使われるようになった．「多数の代替案と効率の良い評価手法の用意」の部分では，優れたアイデアを早く選択するために評価の自動化と合理化が必要とされる．評価の自動化はアイデアを考える時間と回数を増やし，評価の合理化は設計者が失敗に事前に気づく心のゆとりを育む[3)]．開発の上流段階でこれを実践することで，機械設計におけるMBDを効率良く進めることができる．以降では，その方法論のひとつとして，パラメータ設計を用いたパラメトリックCAE活用法について，具体的な事例を交えて紹介する．

2. パラメータ設計

2.1 機能性評価について

初めに「設計根拠の理論化」という観点で，技術の働きについて考える．この働きは機能と言い換えることができ，たとえば油圧ポンプの機能は，外部から駆動力を入力し，高圧，高流量の油を吐出することである．機械製品の場合，一般に機能はエネルギー変換として表される．油圧ポンプは，駆動エネルギー（回転数×トルク）を油の流体エネルギー（吐出圧力×流量）に変換する装置である．

製品が出荷されたのち，市場ではさまざまな条件下で使用される．出荷時には何の問題もなかった製品が，ユーザの使い方，温度や湿度などの環境，時間的な劣化などのさまざまな条件にさらされ，故障や不具合が引き起こされる．品質とは，市場のさまざまな条件下における，製品の機能の安定性と定義できる．

製品の品質を見極める信頼性試験には，通常多くの時間が必要である．これを短時間で行える手法として，機能性評価がある．機能性評価では，対象製品の機能を考え，これを市場でのさまざまな使われ方を想定して意地悪条件のもとで計測し，その安定性を評価する．この時，安定性を評価する指標として，SN比が用いられる．SN比とは，もともと情報工学で用いられる信号（Signal）と雑音（Noise）の比のことであり，Signal/Noiseで定義される．信号とは，複数の意地悪条件を負荷した際の平均値，雑音は標準偏差（ばらつき）を表す．これに常用対数

を用いて，

SN比＝20log(平均値/標準偏差)　[db]

と表される．真数部は変動係数の逆数である．

機能性評価の例として，２種類の油圧ポンプAとBに対して，意地悪条件を低温，高温の２水準に設定し，効率試験を行った結果について，表１に示す．両ポンプの平均性能は同一であるが，SN比の大きいポンプAの方が，安定性に優れている．

表１　SN比の計算例

ポンプ	意地悪条件		平均	標準偏差	SN比 [db]
	低温	高温			
A	0.88	0.92	0.90	0.028	30.1
B	0.85	0.95	0.90	0.071	22.1

2.2　パラメータ設計とその手順

つぎに「多数の代替案と効率の良い評価手法」について考える．パラメータ設計とは，複数の設計パラメータの組み合わせを変更して機能性評価を実施し，安定性の優れた設計条件を求める手法である．表１の例では，２種類のポンプに対して，２水準の意地悪条件を設定したため，計４回の実験が必要となる．これに対して製品開発時には，検討すべき多くの設計パラメータが存在する．また，意地悪条件も，市場での使われ方を考慮して，なるべく多く取り上げることが推奨される．それらすべての組み合わせで実験をする場合，実験数が膨大となる．そこで，実験計画法の考え方を応用し，実験数を大幅に削減する手法として，パラメータ設計が産み出された．パラメータ設計では，直交表を使って実験回数を削減する．例として，L18直交表を図１に示す．

この直交表では，最大８種類の設計パラメータを，２水準１因子，３水準７因子で割り付け，18回の実験で分析できる．L18直交表のほかにも，取り上げたい設計パラメータの数に応じて，L36，L54等さまざまな直交表を利用できる．

	列番号	設計パラメータ (1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
実験番号	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	2	2	2	2	2	2
	3	1	1	3	3	3	3	3	3
	4	1	2	1	1	2	2	3	3
	5	1	2	2	2	3	3	1	1
	6	1	2	3	3	1	1	2	2
	7	1	3	1	2	1	3	2	3
	8	1	3	2	3	2	1	3	1
	9	1	3	3	1	3	2	1	2
	10	2	1	1	3	3	2	2	1
	11	2	1	2	1	1	3	3	2
	12	2	1	3	2	2	1	1	3
	13	2	2	1	2	3	1	3	2
	14	2	2	2	3	1	2	1	3
	15	2	2	3	1	2	3	2	1
	16	2	3	1	3	2	3	1	2
	17	2	3	2	1	3	1	2	3
	18	2	3	3	2	1	2	3	1

図１　L18（$2^1 \times 3^7$）直交表

設計パラメータを直交表に割り付け，意地悪条件のもとで実験を行い，表１の例と同様に，直交表の各実験番号におけるSN比を計算する．この結果を統計的に処理し，設計パラメータごとの要因効果を計算し，図２のようにグラフ化する．平均値についても同様の処理をし，図３のようにグラフ化する．これら２つの図から，より安定性が高く（SN比大），狙いの平均値を満たす設計パラメータの組み合わせを選択する（最適化）．

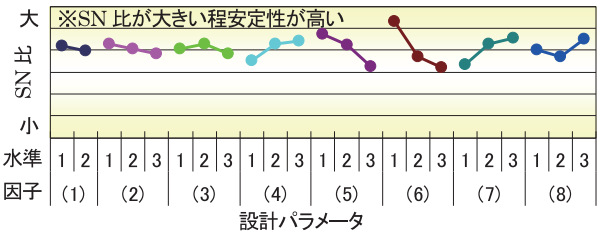


図２　SN比の要因効果図

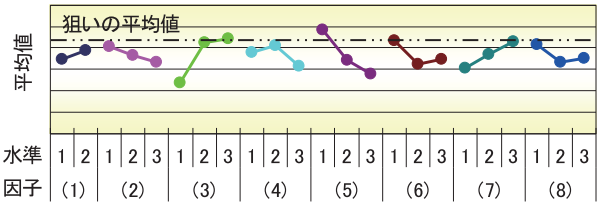


図３　平均値の要因効果図

ここで，要因効果図から選択された最適値は，直交表による一部の組み合わせの実験結果から，数式的に推定されたものであることに注意されたい．そのため，実際の組み合わせを用いて再実験を行い，推定精度の確認を行う．これを確認実験と呼ぶ．推定結果と確認結果に差がなければ，正しい実験が行えたと判断する．逆に両者に差が生じた場合，機能の安定性を評価するプロセスに問題があると判断する．推定精度を悪化させる原因の多くは，設定した設計パラメータ間に，出力値に対する交互作用が存在する場合である．交互作用が含まれると，特定の組み合わせに出力の大小が影響され，調整が難しくなる．パラメータ設計では，設計パラメータには設計思想を反映し，良い設計とは出力値に対して個々の設計パラメータが独立して作用すべきと考える．

表２に，パラメータ設計の適用手順を示す．統計処理の計算方法など，より詳しい説明に関しては，参考文献４）を参照されたい．

表２　パラメータ設計の８ステップ

１）テーマ選択・目的とプロジェクト範囲の明確化
２）機能の定義と計測モデル作成
３）意地悪条件の戦略を決める
４）設計パラメータを設定し，直交表に割り付ける
５）実機実験またはCAE計算し，データを収集する
６）SN比を使って，データ解析する
７）最適化，推定，確認実験をする
８）アクションプランを立てる（文書化する）

3. 適 用 事 例

建設機械の油圧システムに用いられる電磁比例減圧弁には，比例ソレノイドが用いられている．市場ニーズである安価で性能の良い製品を開発するため，設計工数低減と開発手戻り防止が必要とされていた．そこで，比例ソレノイドの吸引力特性の安定化設計に，パラメータ設計とパラメトリックCAEを活用した事例を紹介する．

１）テーマ選択・目的とプロジェクト範囲の明確化

比例ソレノイドに求められる特性として，

・ストローク－吸引力特性が平坦であること

・電流－吸引力特性が比例関係にあること

・これら特性が市場で安定して発揮されること

が挙げられる．これらを同時に満足させる設計条件を求める．

２）機能の定義と計測モデル作成

３）意地悪条件の戦略を決める

比例ソレノイドの機能を，電流に比例した吸引力を発生する装置と定義した（図４）．

実験には図５に示すCAEモデルにて計算を行う．このモデルは，形状寸法（44種類）をパラメトリックに変更した計算が可能であり[5]，技術的な検討の結果，21種類を設計パラメータとして採用した．意地悪条件の設定において，CAEモデルでは，市場での使われ方として製品の劣化や摩耗などを考慮することが難しく，設計パラメータの公差に倍率をかけて設定した[6]．安定化の概念を図６に示す．

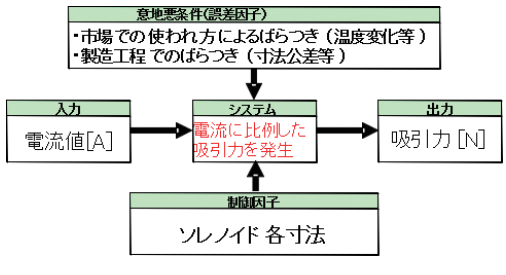


図４　システムチャート

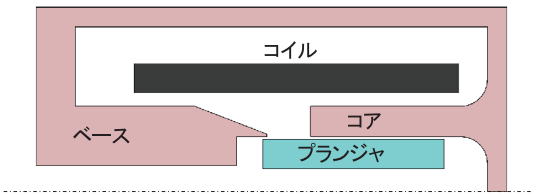


図５　CAE磁場解析モデル

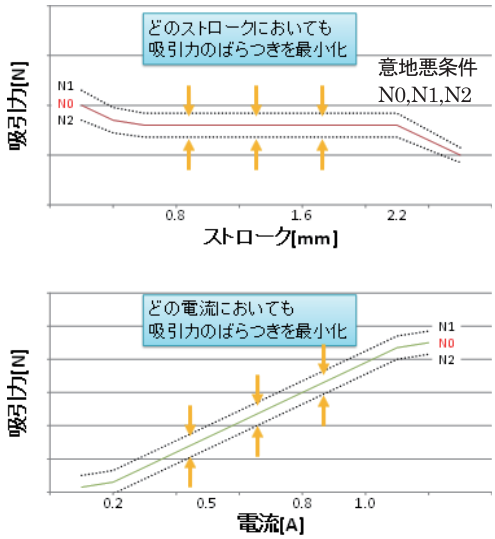


図６　安定化させるべき特性

４）設計パラメータを設定し，直交表に割り付ける

５）実機実験またはCAE計算し，データを収集する

設計パラメータが21種類であることから，最大26因子を割付可能な，L54直交表を用いた．意地悪条件21種類も同様にL54直交表に割り付けた．計算では，設計パラメータの直交表と意地悪条件の直交表のすべての組み合わせで実施する必要があり，総計算数として，54×54＝2,916ケースを計算した．

６）SN比を使って，データ解析する

７）最適化，推定，確認実験をする

計算結果を統計処理し，SN比，吸引力の大きさ，吸引力のストロークに対する安定性の３項目に対して，要因効果図を作成する（図７）．横軸の設計パラメータの各水準値を，

①吸引力のばらつきが小（SN比が大）

②吸引力の大きさが大

③吸引力のストローク安定性が良

となるように選択し，最適化を実施する．最適条件のSN比の推定値は，49.9[db]であった．比較のために設定した基準条件（初期の設計条件を設定することが多い）の推定値は44.7[db]であり，両者の差は5.2[db]である．SN比は対数で定義され，その差は真数の比を表している．5.2[db]とは，ばらつきを表す変動係数で約40％減に相当する．次に最適条件と基準条件に対して，実際の組み合わせを用い

て確認実験（計算）を実施した．結果を表３に示す．

表３　確認実験の結果

SN比［db］		
条件	推定値	確認結果
最適条件	49.9	48.4
基準条件	44.7	45.0
差	5.2	3.4

SN比の推定値と確認結果はおおむね一致している．確認結果の最適条件と基準条件の差は3.4［db］であり，性能ばらつきで約30［%］の低減に相当する．各印加電流におけるばらつき低減効果を図８に示す．推定値と確認結果で生じた差に関しては，設計パラメータの取り方に改善の余地があることを示唆しており，今後の課題とする．

８）アクションプランを立てる（文書化する）

・市場を想定した意地悪条件のもとで，性能ばらつきを約30［%］低減する形状を考案できた．

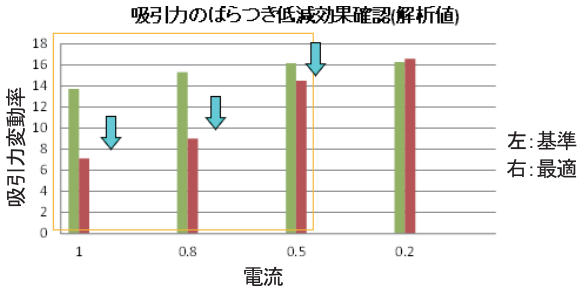


図８　印加電流別のばらつき低減効果

・固有ノウハウのため紹介できないが，要因効果図の技術的な分析から，性能ばらつきを低減するための磁路設計方法を確立できた．

4. ま と め

パラメータ設計を用いたパラメトリックCAE活用が，MBDの効率化に有効な点として，

・製品の機能に着目して安定化することで，問題が発生する前の開発上流段階で検討を行える．

・多数の設計パラメータを変化させて，抜け漏れのない検討が実施できる．

・手法が手順化されており，共通の方法で結果を確認できるなど，開発プロセスに組み込みやすい．

これに加えて，本手法は，技術の本質を追求し，技術者の想像力を引き出す方法論のひとつとして，モノづくり企業の次世代を担う若手，中堅の技術者の育成にも活用できると考えている．

参考文献

1）藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発，マツダ技報No. 31 p. 44-47（2013）

2）岸本行雄：設計の方法 創造的設計へのアプローチ，日科技連（1988）

3）馬場富男：解析主導型設計のCAE推進，KYB技報 第39号（2009）

4）田口伸：技術情報を想像するためのデータ解析法 タグチメソッド入門，日本規格協会（2016）

5）満嶋弘二：CAEと品質工学，KYB技報 第41号（2010）

6）沢田龍作：複雑系のロバスト設計―品質工学とMBD―，品質工学会誌 Vol. 27 No. 6（2019）

（原稿受付：2020年６月９日）

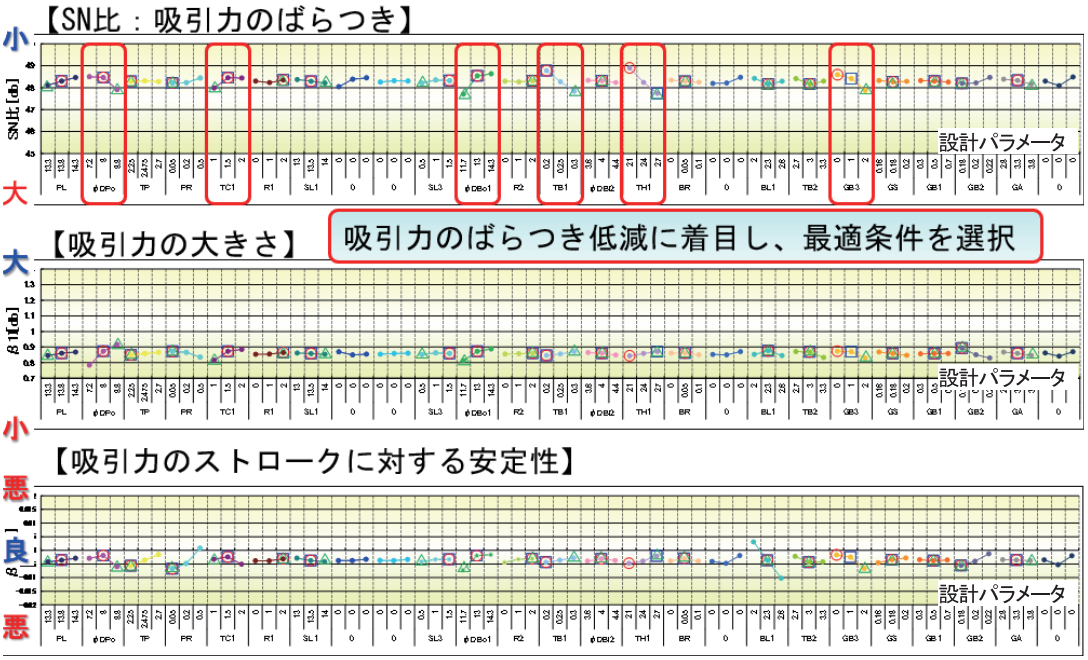


図７　要因効果図

解説

ベーンポンプの流れ解析

著者紹介

長島　碧（ながしま　みどり）
KYB株式会社
〒252-0328 神奈川県相模原市南区麻溝台1－12－1

2011年神奈川大学工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了．2011年KYB株式会社入社．油圧制御，流体関連の研究に従事．

1．はじめに

自動車のパワーステアリング（PS）システムやCVT（無段変速機）システムに用いられるベーンポンプ（図1[1)]）は，各システムの油圧源となる重要な要素機器である．自動車業界では，低燃費かつ静粛性の高い車両の開発が必須となっており，ベーンポンプにおいても効率や静粛性などを極限まで高めることが求められている．このような極限性能を実現するためには，試作・実機評価を繰返してきた従来の設計技術だけでは対応が難しく，解析技術を用いた理論的な検討にもとづく設計・評価技術が重要な位置づけとなってきている．

現在弊社では，ベーンポンプの極限性能の実現のために，従来から用いている集中定数モデルによる解析技術に加え，CFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）解析技術も活用した設計を実施してきている．本報ではこれらの解析技術について紹介する．

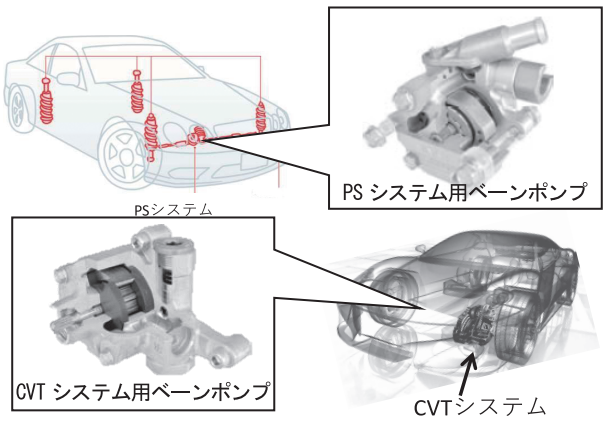


図1　車載ベーンポンプ

2．ベーンポンプ（構造，動作原理）

本報で対象とするベーンポンプは図2のような平衡型のベーンポンプである．ベーンとロータ，シャフトで構成されたロータASSYは2つのバルブプレート間に配置されている．

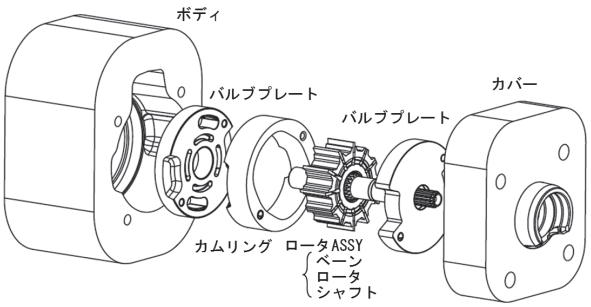


図2　ベーンポンプ構造

ベーンポンプが作動油を吸込み，吐出するサイクルを図3に示す．平衡型ベーンポンプは2つのベーンとロータ，カムリングで形成されるボリューム（ポンプ室）が①吸込み，②遷移区間（吸込み～吐出），③吐出，④遷移区間（吐出～吸込み）を繰り返し通過することで作動油の供給を行っている．また，このときのポンプ室内の圧力は図4のように変化し，吐出圧力は図5のように変動する．このポンプ室内圧力と吐出圧力の変動が振動・騒音に影響を及ぼすため，静粛性の高いベーンポンプを設計するには，これらを予測して設計することが重要である．

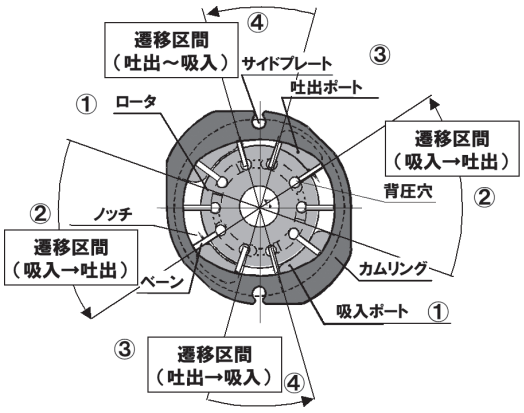


図3　ベーンポンプ吸込み～吐出行程

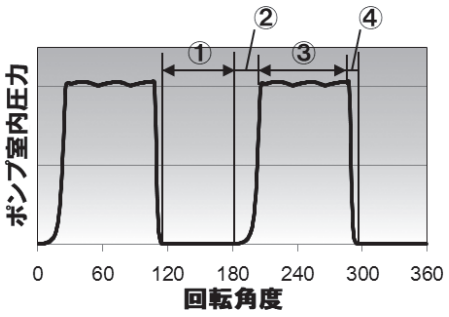


図４　ポンプ室内圧力変動

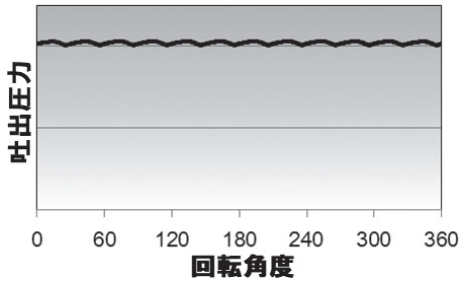


図５　ポンプ吐出圧力変動

また，ベーンポンプの高速回転時においては，キャビテーションに加え，CVTシステム内の作動油撹拌による気体混入により，図６のように吐出流量が低下し，容積効率が悪化してしまう．このため，容積効率を改善するためには，これらを予測して設計をすることが重要である．

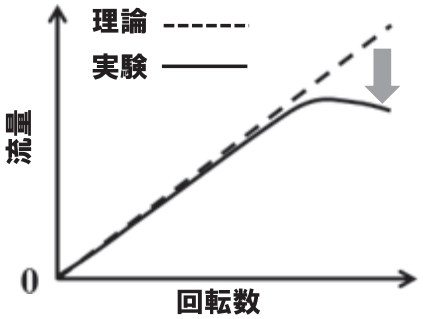


図６　回転数－流量特性

3．従来解析技術（集中定数モデル）

まず，集中定数モデルによる解析技術（以下，従来解析技術）について述べる．図７は実験によるポンプ室内圧力の測定結果，図８は弊社で開発した従来解析技術による同部圧力の解析結果である．両図中のRは，測定回転数に対して理論吐出流量Q_{ref}から５％低下した実吐出流量Q_D（$Q_D=(1-0.05)\cdot Q_{ref}$）のときの回転数$R_{ref}$にて無次元化した量である．$R$＝1.0以下では，吸込み行程，予圧縮行程（遷移区間），吐出行程間の圧力の変化傾向が実験と解析で類似していることが確認できる．しかし，高速回転となるR=1.2では，低速回転時と比較して昇圧が遅れる傾向は実験と解析とで一致するが，吐出行程に入っても圧力が上昇しないという実験結果を解析では再現できていない．この現象は，ポンプの高速回転時において，吸込み圧力の低下が生じ，それにともなってポンプ室内にキャビテーションが発生することにより起きていると推定できるが，従来解析技術ではキャビテーションモデルを考慮していないため，実験よりも早く昇圧していると考えられる．

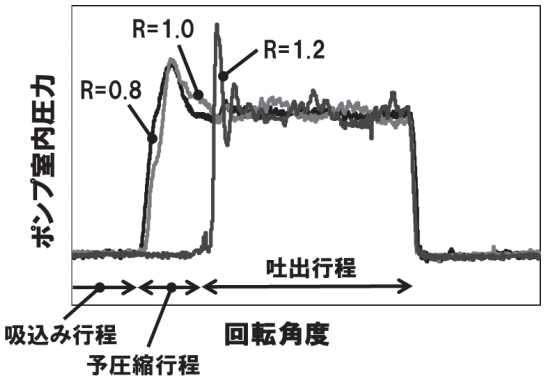


図７　ポンプ室内圧力（実験）

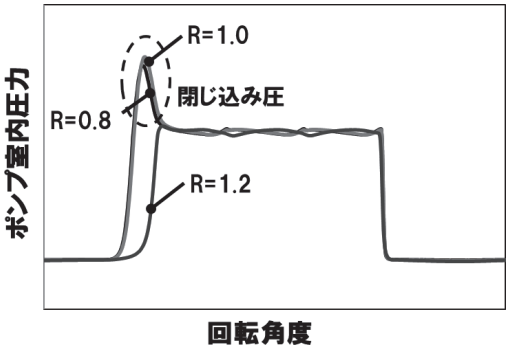


図８　ポンプ室内圧力（解析）

また，閉じ込み圧（図中丸印部）のピーク値に関しても，R=1.2では，実験結果と比較して明らかな差異が認められる．これは，従来解析技術ではポンプ室内の定常的な圧力変化の予測は可能であるものの，前述のように過渡的なキャビテーションの発生やポンプ室内部の気体挙動の影響を考慮できていないことが原因と考えられる．このように，従来解析技術には，高速回転時の予測精度や気体挙動のモデル化に課題がある．

4．CFD解析技術

一方，近年のCFD解析では，キャビテーションの生成・消滅を考慮したキャビテーションモデル[2, 3]や，気体と流体の挙動を考慮した気液二層流モデルが実装されているほか，部品の回転運動についても考慮可能となっており，キャビテーション性能の予測精度も向上している．本章では，市販CFD解析ソフトSimerics MP＋®（Simerics社）を使用し，ベー

ンポンプに対してキャビテーションを考慮した解析を行った結果について述べる．

ここでは，吸込み部の形状（図９の切欠き部）を変更した３つのカムリングを用いて，吸込み油路の形状が性能へ及ぼす影響を実験と解析で確認した結果について紹介する．具体的なカムリングの形状は図10に示すものであり，切欠きなしのType A，切欠き深さHのType B，２HのType Cの３パターンとなる．実験と解析の条件に関しては，作動油中の気体の影響を見るために，強制的に気体（空気）を混入した場合としていない場合の２条件とした．また，解析には，従来解析技術で考慮することが困難な気体の挙動を予測するために，キャビテーションモデル（Shinghalモデル）を用い，さらにはポンプ室の回転運動も考慮した非定常解析とした．次節より，解析モデルの妥当性を確認するために行った回転数－流量特性やポンプ室内圧力の比較結果について述べる．

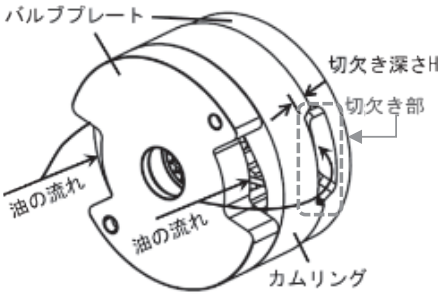


図９　カムリング切欠き位置

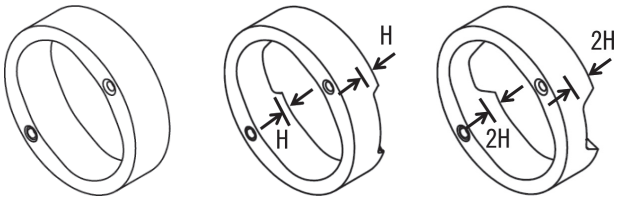


図10　カムリング形状

4.1　回転数－流量特性

最初に，キャビテーションモデルの予測精度を確認するために，回転数－流量特性について解析を行った結果について述べる．図11は作動油中の気体の混入がない場合における実験と解析の比較結果である．図中の縦軸Qは，測定流量に対してR＝1.0における理論流量Q_{ref}にて無次元化したものである．また，破線は理論流量を示す線である．図11中に白抜き丸で示しているのは，キャビテーションモデルを考慮しない場合のCFD結果であるが，高速回転域の流量低下を精度良く予測できていないことが確認できる．一方，塗りつぶしの丸で示したキャビテーションモデルを考慮した解析結果では，Type A ～ Cの切欠き形状の違いによらず，R＝1.0以上で顕著な流量低下も良好に再現できている．これは，キャビテーションモデルの考慮により，高速回転時に発生するキャビテーションが原因の吸込み不良を精度良く解析できたことによるものと考えられる．この傾向が作動油中に気体混入がある場合でも再現できるかを確認するために解析と実験との比較を行った（図12）．図より，作動油中に気体混入がある場合においても，気体混入がない場合と同様に実験結果とCFD解析結果がほぼ一致していることが確認でき，今回のCFD解析では回転数－流量特性を精度良く予測することが可能であるがわかった．

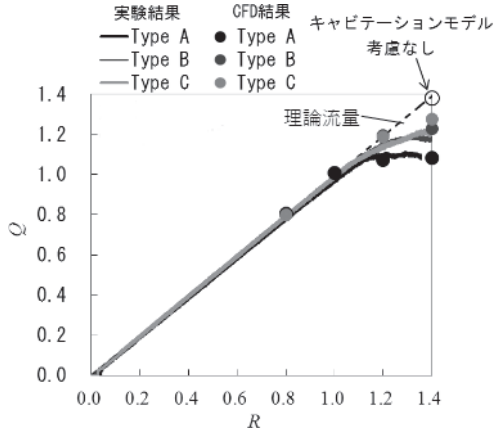


図11　回転数－流量特性（気体混入なし）

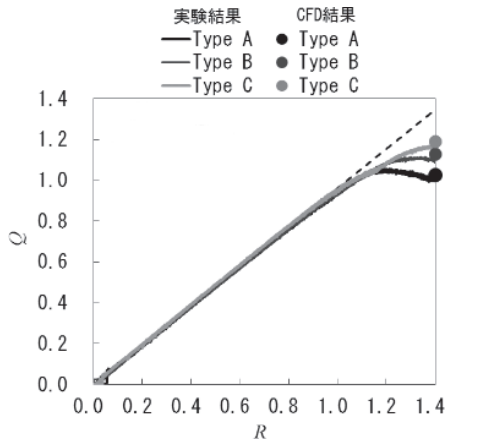


図12　回転数－流量特性（気体混入あり）

4.2　ポンプ室内圧力

つぎに，ポンプ室内圧力の実験結果とCFD解析結果の比較として，Type Cのカムリングを用いた際の結果を図13に示す．

まず，ポンプ室内圧力の昇圧タイミングを比較すると，低速回転時のR＝0.8では，実験と解析は良好に一致している．一方，高速回転時のR＝1.4の結果においては，実験と解析の結果に若干のずれが確認できるが，前述の従来解析技術の結果よりも大幅に解析精度が向上している．これは，過渡的なキャビテーショ

ンの発生や，ポンプ室内部の気体挙動の影響をCFD解析により予測できたことによるものと考えられる．

図13の閉じ込み圧を比較すると低速回転時のR＝0.8，高速回転時のR＝1.4ともに解析結果の方が実験結果よりも大きくなっており，さらには，前述の従来解析技術析の結果よりも解析精度が悪化していることが確認できる．この理由としては，従来の解析技術で考慮していたベーン先端やロータ側面の隙間からの漏れを今回のCFD解析のモデルでは考慮していないため，漏れによるポンプ室内の圧力低下が生じずに悪化したと考えられる．一方，高速回転時のR＝1.4の閉じ込み圧では，従来の解析技術で確認できなかったピーク圧が再現できており，予測精度が向上していると言える．この理由は，前述の昇圧タイミングの理由と同様である．

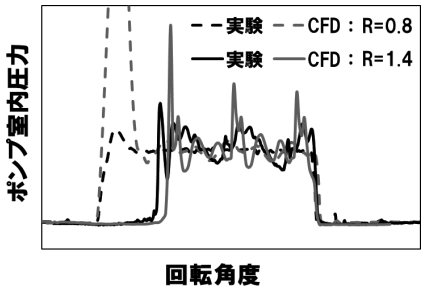


図13　ポンプ室内圧力（Type C，気体混入なし）

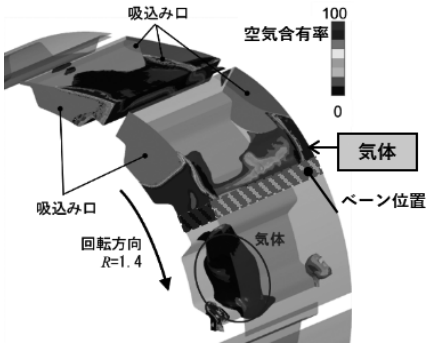
4.3　ポンプ室内の気体含有率

最後に，ポンプ室内気体含有率のCFD解析結果例として，図14にR＝1.4時のカムリングType BとType Cの結果を示す．図のコンターは，飽和蒸気圧を等値面として表示している．図より，高速回転時は，ベーンの移動速度が速くなるため，Type B，Cともに吸込み口部の圧力が低下し，気体（キャビテーション）が発生している様子がわかる．また，流路（切欠き）が狭いType Bでは，吸込み不足によりポンプ室内への油の充填が不十分になり，ベーンの後方により多くの気体が存在していることがわかる．一方，Type Bより流路が広いType Cでは，ポンプ室内に油が充填されやすいことからベーン後方の気体量がType Bより減少していることがわかる．

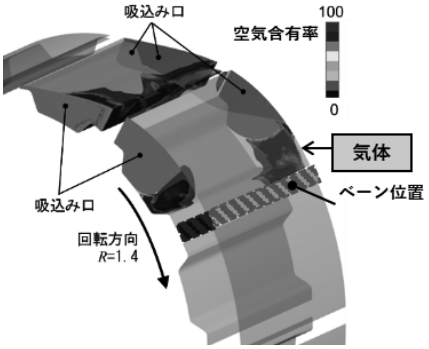
このように，CFD解析技術は，流量特性やポンプ室内圧力の予測に加え，ポンプ内部の気体の状態把握までが可能な技術であり，油路の詳細設計のための理論的検討が行える．しかし，従来解析技術と比べ計算時間がかかるため，双方をうまく使い分けることが重要となる．

5. ま と め

本報では，車載用ベーンポンプを例に，集中定数モデルによる従来解析技術の課題を補うことができるCFD解析技術について述べてきた．



(a)　Type B



(b)　Type C

図14　ポンプ室内気体含有率

従来解析技術では，モデルの特性上，設計値の検討を行う際のパラメータスタディを短時間で実施できるという特徴はあるが，キャビテーションなどによる作動油中の気体の挙動を考慮することが難しい．それに対して，気体の挙動を予測可能なCFD解析技術では，キャビテーションが発生する高速回転時の性能についても精度良く予測可能であることが分かり，油路を含めた部品形状の詳細設計への適用に対する可能性も示すことができた．弊社では，これらの解析技術を併用することで，ポンプ性能の高精度予測や理論的な設計検討を可能とし，冒頭に述べた極限性能の実現を目指している．

参考文献

1）KYB株式会社会社案内カタログ（2019年10月）
2）Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H., Jiang, Y., Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model, J. Fluids Eng., Vol. 124, Issue 3, pp. 617-624, 2002）
3）Zwart1, P., Gerber, A., Belamri, T., A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics, ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow, No. 152, 2004

（原稿受付：2020年 6 月 9 日）

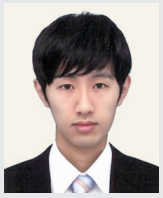
解説

CFDによる調節弁でのエロージョン発生の予測

著者紹介

尹　鍾皓（ゆん　ぞんほ）
アズビル株式会社バルブ商品開発部
〒251-8522 神奈川県藤沢市川名１－12－２
E-mail : c.youn.9i@azbil.com

2005年東京工業大学大学院精密機械システム専攻博士課程修了．同年ボッシュ㈱入社．2007年東京工業大学精密工学研究所助教．2017アズビル株式会社入社．調節弁関連の流体解析と計測の研究に従事．日本フルードパワーシステム学会．博士（工学）．



斉藤健二（さいとうけんじ）
アズビル株式会社バルブ商品開発部
〒253-0113 神奈川県高座郡寒川町大曲４－１－１
E-mail : k.saito.ht@azbil.com

2014年東京電機大学大学院工学研究科博士前期課程修了．同年アズビル株式会社入社．調節弁関連の技術開発・設計に従事．

1. はじめに

調節弁はプラグを上下に動かし流路の隙間を制御することで，流量を調節したり流体を止めたりする機能を持った流体機械である．調節弁はプロセス制御における操作端としてさまざまなプラントや工場の配管系に使用されている．化学市場向けの高圧アングル弁やLNG基地向け大口径調節弁といった多種多様な環境下ではプロセス流体の条件も幅広く，特に液体の場合には局所的な流速の増加や渦によりキャビテーションが発生するケースも多い．

このキャビテーションの崩壊が壁面近傍で起こった場合，崩壊時に発生する衝撃力が壁面に印加され，これが長期間継続することでやがて壊食（エロージョン）が発生する．キャビテーション壊食により弁本体や内弁の損傷が起こると，プラントの停止といった深刻な問題を引き起こすこともある．このような背景から，近年ではキャビテーションによる壊食を机上で予測する方法として，CFD（Computational Fluid Dynamics）よる数値解析から算出したエロージョン指標が提案されており，プロペラなどの翼形状を対象に壊食箇所の予測について検討が行われている．

本解説ではCFDを用いた非定常キャビテーション解析を行い，エロージョン指標を用いて解析結果を可視化した．また，エロージョン指標の有効性について検討を行い，プラグに起こる壊食とキャビテーションの発生形態との関連性についてCFD解析により推測した．

2. CFDを用いたキャビテーション解析

2.1 CFDモデルおよび解析条件

解析対象であるコンタード形アングル弁のモデルを図１に示す．形状および寸法は先に紹介した高圧アングル弁と同様で，流れ方向はflow-to-openである[1)]．

CFD解析条件について表１に示す．CFDのソルバーは汎用流体解析コードのAdvance/Frontflow/Redを用いた．キャビテーションモデルには均質流モデルを使用した．解析対象とするモデルの弁開度は定格リフトの100%および90%の２種類とした．壁面の速度境界条件はSpalding則を与えモデル化した．計算の刻み時間はクーラン数をおおむね10程度に収まるように設定した．また，計算資源はスーパーコンピュータ「京」を用いて計算を行った．

2.2 解析結果

2.1節にて示した計算条件で，まずはキャビテーションを考慮したCFD解析の妥当性について検証した．解析の条件はキャビテーション数σ=1.13，リ

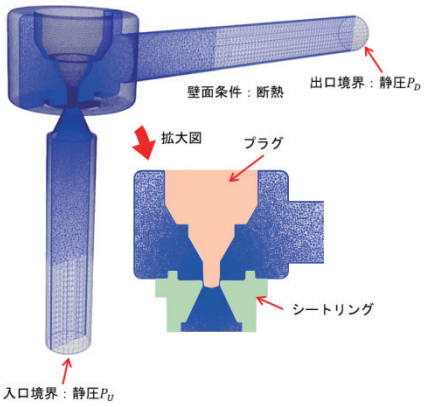


図１　解析対象断面（アングル弁）

表１　CFD解析　計算条件

流体	水（25℃，圧縮性）	
メッシュ セル数	開度：100%	6,723,867
	開度：90%	7,899,316
差分スキーム	運動量	２次精度風上
	エネルギー	１次精度風上
刻み時間ΔT	2e-06 ～ 1e-05	

フト100%，上流圧（P_U）1,100kPa（abs），下流圧（P_D）128.7kPa（abs）にした．ここで，キャビテーション数σは式(1)で定義される．

$$\sigma = \frac{P_U - P_V^*}{P_U - P_D} \tag{1}$$

CFD解析結果と実験結果の流量係数C_vを比較すると誤差は約２%でよく一致していることを確認した．

図２はCFD結果のボイド率α=0.05のコンター図と実験による気泡発生時の瞬間写真を示したものである．この図から，気泡の発生様相についてもCFD解析モデルは妥当であると考えられる．

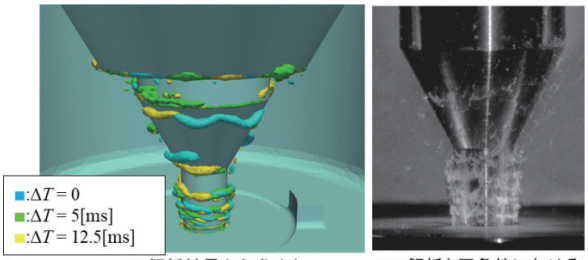


図２　ボイド率α=0.05のCFD結果と実験結果との比較

3. キャビテーション壊食の数値解析

3.1　エロージョン指標

エロージョン指標は，物体表面における気泡や圧力の変動が壊食強さを規定するパラメータであると仮定し，関数化したものである．今回使用したエロージョン指標は蓮池ら[2]によって提案された次式を用いた．

$$\text{指標１}：\frac{1}{T_C}\int_0^{T_C} \alpha \cdot max\left[\frac{\partial P}{\partial t}, 0\right] dt \tag{2}$$

$$\text{指標２}：\frac{1}{T_C}\int_0^{T_C} \alpha \cdot max[P - P_V^*, 0]\, dt \tag{3}$$

$$\text{指標３}：\frac{1}{T_C}\int_0^{T_C} max\left[-\frac{\partial \alpha}{\partial t}, 0\right] dt \tag{4}$$

$$\text{指標４}：\int_0^{T_C} max[P - P_V^*, 0] \cdot max\left[-\frac{\partial \alpha}{\partial t}, 0\right] dt \tag{5}$$

ここでT_Cはキャビテーションの発生周期である．

3.2節ではこの式(2)～(5)の指標を用いてCFD解析結果を可視化し，評価を行う．

3.2　実験による壊食結果との比較

3.1節で示した各エロージョン指標の妥当性について検討するため，実験結果との比較を行った．CFD解析条件および実験条件について表２に示す．条件はケース１，ケース２の２種類で，それぞれ下流圧が異なる．

図３，図４には式(2)～(5)のエロージョン指標によって得られた解析結果のコンター図，および実験においてプラグで発生した壊食結果を示す．実験結果の壊食をみると，壊食はプラグシート面，円錐面，円錐面端部で発生しているがケース１とケース２ではその壊食の様相が異なっている．ここで，ケース１の各コンター図をみると指標３ではプラグ先端で高い値を示しており，これは実験による壊食結果と定性的に一致していない．指標１，指標２，および指標４については実験結果と近い様相を示している．

次に，ケース２では実験結果の写真から，シート面のほかにプラグ円錐面でも広く壊食が発生していることがわかる．ケース２でも指標３は実験結果と一致しないが，指標１，指標２，および指標４については実験結果と大きな差は見られない．

以上から，エロージョン指標１，２，および４は，壊食のリスクがある箇所の特定に有効であると考えられる．

表２　壊食実験条件

実験条件	ケース1	ケース2
キャビテーション数σ	1.058	1.041
リフト [%]	90	
上流圧P_U [MPa（abs）]	20	20
下流圧P_D [MPa（abs）]	1	0.8

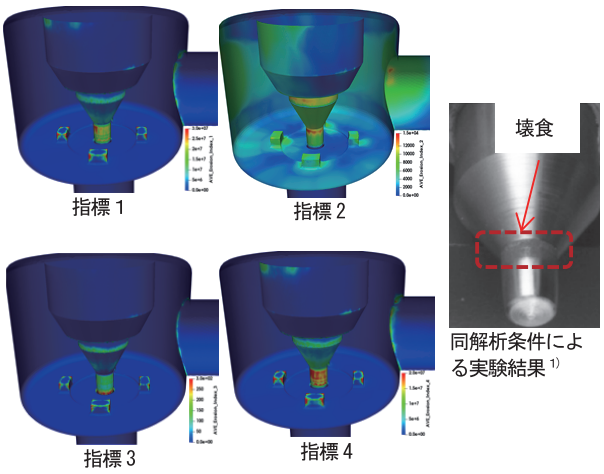


図３　エロージョン指標およびプラグ壊食（ケース１）

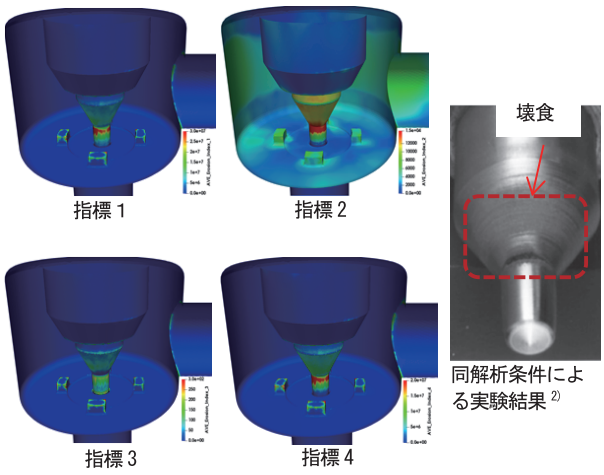


図４　エロージョン指標およびプラグ壊食（ケース２）

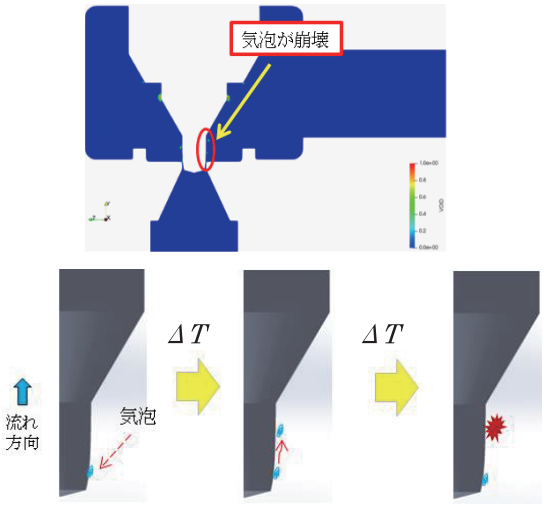
3.3　キャビテーション流れによる壊食

ここでは，3.2節のケース１とケース２においてキャビテーション壊食の様相が異なる理由について，非定常キャビテーション流れのCFD解析結果から考察する．ケース１，２ともに十分に時間発展した流れ場を形成した後，そこからさらに時間ΔTを進んだときのキャビテーション流れの変化を可視化し，ボイド率のコンター図を図５に示す．

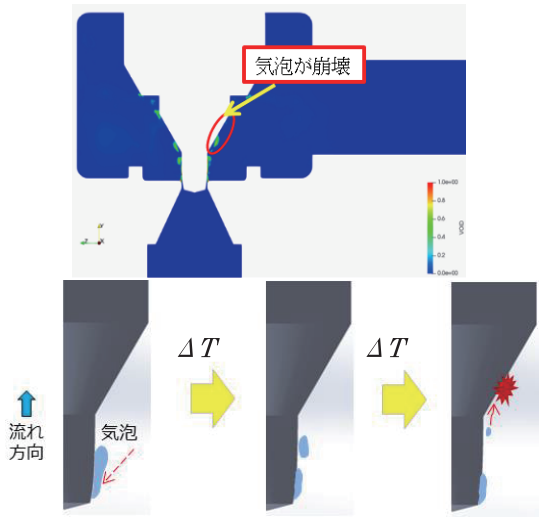
気泡はケース１，ケース２両者ともプラグ最縮流部付近で発生し，発生した気泡が流れに沿ってプラグ前方からシート面へ向かって流れていく様子がわかる．この気泡はプラグおよびシートリングで剥離して発生した渦に起因するキャビテーションだと考えられる．

ケース１では，気泡はプラグの円錐面まで到達する前にシート面付近で崩壊する様子が読みとれる．この気泡崩壊が継続して発生することによって主にシート面付近でのみ壊食が発生していると推測される．

ケース２では，プラグ特性部が気泡により層状に覆われている様子がわかる．これは発達したシートキャビテーションによるものだと考えられる．翼形状による研究ではシートキャビテーションは時間とともに発達した後に気泡群の一部が分離し，雲状の塊となって後流へ流れていくことが知られている（クラウドキャビテーション）．ケース２の結果，シートキャビテーションからクラウドキャビテーションへ移行し，円錐面に衝突して崩壊する様子がわかる．また，キャビテーション壊食の原因はクラウドキャビテーションによる影響が大きいことから，ケース２ではプラグ表面から分離した気泡群がプラグ円錐面に衝突，崩壊することで壊食にいたったと推測される．



(a)　ケース１



(b)　ケース２

図５　各ケースにおけるキャビテーションの様相

4. おわりに

本解説では，アングル形調節弁を対象にキャビテーションを考慮したCFD解析を行い，調節弁に発生するキャビテーション壊食の予測に有効なエロージョン指標を検討した．その結果，エロージョン指標１，２，４は壊食のリスクがある箇所の特定に有効であることがわかった．

参考文献

1）湯沢聡：高圧水流の減圧・制御にともなう調節弁のキャビテーションと壊食に関する研究，早稲田大学博士論文（2003）

2）N.Hasuike, S.Yamasaki et al., Numerical Study on Cavitation Erosion Risk of Marine Propellers Operating in Wake Flow, Journal of the JIME, Vol. 46, No.3, p. 79-87 (2011)

（原稿受付：2020年６月12日）

トピックス

学生さんへ，先輩が語る ―フルードパワーの研究に携わる学生の皆さんに向けて―

著者紹介

坂間清子（さかま さやこ）

産業技術総合研究所 情報・人間工学領域
インダストリアルCPS研究センター
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1－1－1中央第2
E-mail：s-sakama@aist.go.jp

2015年法政大学大学院デザイン工学研究科博士後期課程修了，同大学ポスドク，青山学院大学助教などを経て，2020年産業技術総合研究所研究員．油圧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）．

1. はじめに

1.1 自己紹介

私は，学生のころからフルードパワーの研究に携わり，大学院修了後もこれまで大学・研究機関でフルードパワーの研究に従事してきた．学生の皆さんにとって参考になることがあるかはわからないが，本稿では，これまでの私の研究や仕事の内容，取り組み方について紹介していく．

図1は私のこれまでの経歴である．私は，2015年に博士の学位を取得後，1年間ポスドク，非常勤講師を務め，その後3年間，青山学院大学で助教として働いていた．この間の大きなライフイベントは子供を出産したことである．育児と仕事を両立することが難しい職場環境というわけではなかったが，これを機にあらためてキャリア設計をしてみようと考え，2019年からは国立研究開発法人産業技術総合研究所（略称：産総研）[1] に産総研イノベーションスクール[2] という制度で産総研特別研究員（ポスドク）として入所し，2020年からはテニュアトラック型任期付研究員として産総研で働いている．

1.2 研究所・職場紹介

産総研は，「技術を社会へ」をスローガンに，日本の産業や社会に役立つ技術の創出とその実用化，事業化につなげる「橋渡し」機能を担う公的研究機関である．産総研には，「エネルギー・環境」，「生命工学」，「情報・人間工学」，「材料・化学」，「エレクトロニクス・製造」，「地質調査」，「計量標準」の

図1　これまでの経歴

7つの研究領域があり，産業技術に関わるあらゆる分野で活躍する研究者が集まっている．研究者は，研究所内はもちろん，国や民間企業，ほかの研究機関と連携しながら，社会的・経済的価値につながる技術開発を目指して研究に取り組んでいる．

私は，情報・人間工学領域のインダストリアルCPS研究センター[3] に所属している．本センターは，「人と協調する人工知能（AI），ロボット，センサなどを融合した技術の研究開発を推進し，製造業を中

心とした労働生産性向上，技能の継承・高度化に寄与すること」を研究目標としており，私は油圧のアクチュエータやロボットに関する研究を中心に行っている．

産総研は，東京とつくばの２か所に本部を置き，そのほかに全国９か所に研究拠点を持つ．私の所属する部署は本部であるつくばにあり，基本的にはこのつくばセンターで研究を行う（コロナウイルス感染拡大防止のため，本稿執筆中は在宅勤務が続いている）．産総研では毎年各研究センターで一般公開が開催されるだけでなく，つくばセンターには，サイエンス・スクエア（写真１）と地質標本館（写真２），臨海副都心センターには「ライフ・テクノロジー・スタジオ」という一般の方にもご覧いただける展示施設がある．ご興味のある方はぜひ足を運んでいただきたい．

2. 大学での研究・仕事内容

2.1　学生～ポスドクの研究

学部から大学院修了までの間，さらにその後のポスドクとしての１年間，私は法政大学の田中豊先生の研究室で油圧動力伝達システムの気泡除去に関する研究を行っていた．図２は，旋回流を利用して油中の気泡を分離・除去する気泡除去装置の流れの可視化実験と解析の結果の一例である．このころの研究では，このような流体の流れの可視化実験や数値解析を中心に行っており，現在取り組んでいるアクチュエータやロボットの研究は行っていなかった．

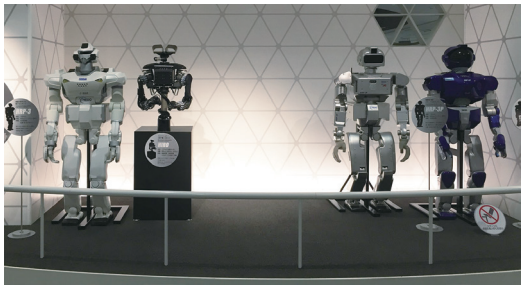


写真１　サイエンス・スクエア展示例
ヒューマノイドロボット[4)]

写真２　地質標本館展示例
富士・箱根火山[5)]

2.2　助教時代の教育・研究

青山学院大学では，機械制御が専門の研究室に助教として所属し，研究室の学生の卒論・修論の指導，また，授業は，学生実験や演習科目を中心に担当していた．

授業では，教授や准教授の先生方の補佐や，少人数のグループで実施する演習や実験などを担当しており，難しい内容ではなかったが，これまでの研究で専門としてきた内容とは大きく異なる内容の授業が多く，特に１年目は勉強や授業の準備にかなりの時間を費やしていた．

研究室では，油圧システムの油中気泡の除去に関する研究だけでなく，これまでの研究を少し発展させて，油中の気泡の圧縮性をあえて積極的に活用した油圧アクチュエータの開発（図２）や，油中の気泡量の測定・制御に関するテーマで，学生を指導しながら研究を行っていた．研究室の上司の先生のご配慮で自由に研究を進めることができ，また，研究熱心な学生が研究に取り組んでくれたことで，新しいテーマであったにも関わらず，短い期間で興味深い結果が数多く得られ，充実した３年間であった．

3. 産総研イノベーションスクール[2)]

産総研には，社会で活躍する博士人材などの育成および若手研究者のキャリア開発支援を目的とした「産総研イノベーションスクール」という人材育成

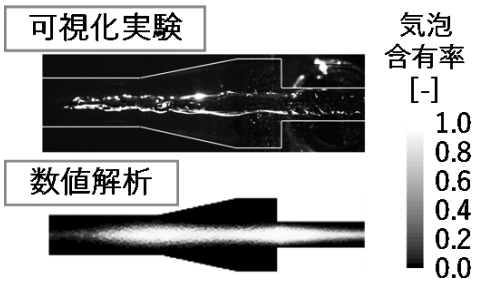


図２　気泡除去装置の流れの可視化実験・数値解析の結果例

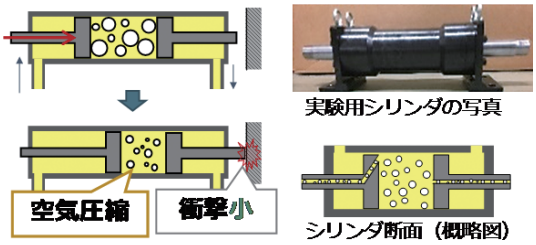


図３　気泡の混入した作動油を動力伝達媒体とする油圧シリンダ

制度がある．このイノベーションスクールには，博士号取得者を対象とした４月から１年間の「イノベーション人材育成コース」，大学院生を対象とした10月から半年間の「研究基礎力育成コース」の２つのコースがあり，私は「イノベーション人材育成コース」のスクール生として在籍していた．ここでは私が受講していた「イノベーション人材育成コース」について紹介していく．

イノベーション人材育成コースの受講生は，産総研特別研究員（ポスドク）として産総研の希望する研究ユニットに所属し，研究に取り組みながら，イノベーションスクールの講義や演習を受講する．イノベーションスクールでは，ビジネスマナー，博士人材のための就職活動に対する取り組み方，効果的なプレゼンテーションの方法，博士人材に求められる研究や仕事に対する姿勢，新たなイノベーション創出のためのプロジェクトの立ち上げ方など，社会で活躍する博士人材に必要な力を身につけるためのあらゆる講義・演習が用意されている（写真３～５）．なお，スクール生の専門分野は，バイオや地質，材料，情報，エネルギーなど多岐に渡る．講義・演習はグループで取り組む内容も多く，大学や学会では出会うことのない研究分野の研究者同士がディスカッションを行いながら協力して課題に取り組む．バックグラウンドの異なる研究者同士のディスカッションは，新たな発見が多く，刺激を受けることばかりであった．これは多様な研究分野の研究者が集まる産総研だからこそ実現できるカリキュラムである．

講義・演習のほかに，イノベーションスクールの重要なカリキュラムのひとつとして企業研修がある．研修期間は２～６カ月で，研修を通して企業での働き方を実践的に学ぶ．私は油圧機器を製造するメーカに研修をお願いし，３カ月間受け入れていただいた．私はこれまで企業での就業経験がなく，まったくと言っていいほど戦力にならなかったが，研修先の社員の皆様は，最後まで非常に丁寧に指導をしてくださった．研修を通して学んだことは新鮮なことばかりで，研究や仕事に対する視野が大きく広がる３カ月であった．

写真３　講義の様子

写真４　演習の様子①

写真５　演習の様子②

4. 就職活動に向けて

学生のころの研究の紹介でもお話したが，私は学生のころ，油圧の“油中の気泡除去”というニッチな研究を行っており，知識や経験が乏しいことに劣等感を抱いていた．しかし，大学院を修了して５年の間，３度の就職活動を通して，自分のできないことではなく，自分にしかないことを見直すことで新たなチャンスを作り出すことができ，結果的に自分の知識や経験の幅を広げていくことにつながることがわかった．企業，大学，研究所に関わらず，組織には多様性が求められる．学生の皆さんには，自分の知識，経験だけでなく性格や趣味なども含めて，ほかの人と何が違うかをよく考え，その特徴を利用することで組織や社会の直面している課題解決にどのように貢献できるかを一度考えてみてほしい．

ひとつ，本稿を読んでくださっている学生の皆さんに共通していえる他人との違いは「フルートパワーの研究に携わっていること」である．フルードパワーはあらゆる産業分野で利用されているにも関わらず，それを専門とする研究者は多いとは言えない．研究の内容に関わらず，皆さんのその知識と経験は，社会的に価値のあるものだということを誇りにもって就職活動に臨んでほしい．

5. おわりに

私は大学院を修了してからの５年間でさまざまな経験を積むことができたが，学生のころと比べて，柔軟に物事を考えることができなくなったように感じる．新型コロナウイルスの流行が大きな課題となっている昨今ではあるが，そのことだけにとらわれず，これから社会に出る学生の皆さんには，柔軟な発想をもって社会で活躍されることを期待している．

参考文献

1）https://www.aist.go.jp/
2）https://unit.aist.go.jp/inn-s/index.html
3）https://unit.aist.go.jp/icps/index.html
4）https://www.aist.go.jp/sst/ja/
5）https://www.gsj.jp/Muse/

（原稿受付：2020年６月10日）

トピックス

英国ノッティンガム駐在員日記

著者紹介

加藤友規（かとう ともり）

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

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

1. はじめに

著者は2018年４月～2019年３月の約１年間，英国のノッティンガム大学で海外研修を実施した．本記事では，その際の様子を少し紹介させていただく．なお，本記事は主観的な感想文に近く，名称や数字など，正確性に欠く点があるかもしれないことについては，あらかじめご容赦いただきたい．

2. ノッティンガム大学について

ノッティンガム大学があるノッティンガム市は，ロンドンから北に約180㎞に位置している（写真１）．人口は市内だけで約29万人，周辺（ノッティンガムシャー）を合わせると約100万人が暮らす，イングランドのイーストミッドランズ（というリージョン）の中の主要な都市である．市内には，ロビンフットで有名なノッティンガム城やウラトンパーク（写真２），郊外にはシャーウッドの森など，観光名所がいくつかはある．古くから繊維産業（レース）と炭鉱で栄え，1800年代前半にはラッダイト運動（産業革命による機械普及に反発した労働者による機械破壊運動）の舞台となった町である．

ノッティンガム大学は，英国のラッセルグループ（英国の研究型公立24大学）に属する，1881年設立の国立の大規模研究型大学である．医学・工学・理学・農学など，31のスクール（学部に相当）を有し，ノッティンガム市内のキャンパスの学生数は約33,000人である．中国（寧波）とマレーシアにもキャンパスがあり，３か国のキャンパスを合計すると学生数は約43,000人である．ノッティンガム市内のメインのキャンパスはパークキャンパスと呼ばれ，緑が多く，キャンパス内には川が流れ，とても美しいのが特徴である（写真３）．

著者は工学部の機械系学科で流体力学がご専門の

写真１　ノッティンガムの位置

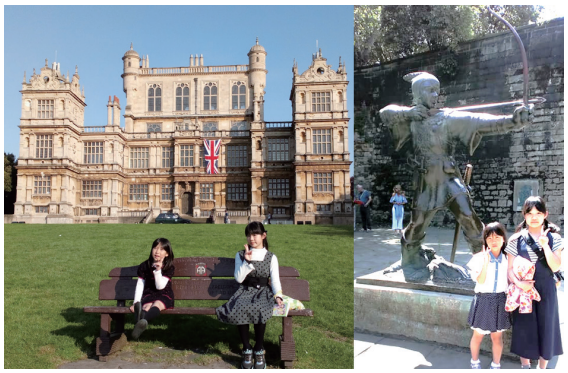


写真２　ノッティンガム市内（ウラトンパーク，ロビンフット像）

写真３　ノッティンガム大学（Trent Building）

Kwing-So Choi教授の研究室に滞在させていただいた．実はChoi教授は日本育ちで，著者の恩師である香川利春先生（東京工業大学名誉教授）ともお知り合いとのことでのご縁であった．写真４は研究室のメンバーとの夕食会の際の一幕である．研究室のメンバーの出身地・国籍は，実にさまざまであった．

また，著者はChoi教授からご紹介いただき，メカトロニクスや機械加工学など，学部・修士課程のいくつかの授業を見学させていただいた（写真５）．

授業の内容自体は，日本の大学と基本的に変わらないが，大きな違いとしては，どの授業においても，学生に教科書を購入させず，プリント配布やPDFで対応していることであった．このことは，後述する娘達の現地の小学校・中学校でも同様であった．

3. FPMC（BATH/ASME）2018への参加

2018年９月12日から14日に英国バース大学において，Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control（FPMC 2018）が開催され，著者も参加した[1]（写真６）．眞田一志先生（横浜国立大学）をはじめ，日本からお越しの本学会関係者とお会いすることができたのは，特にうれしいことであった．

4. SMC UK Pneumatics・ETCへの訪問と見学

英国ミルトンキーンズにある，SMC株式会社の英国拠点である，SMC Pneumatics（U.K.）Ltd. とSMC European Technical Centreを訪問・見学させていただく機会が二度あった．一度目は６月に一人で訪問し，二度目は11月に福岡工業大学から海外研修で英国に来た他教員１名と大学院４名とともに訪問させていただいた（写真７）．お忙しい中，ご丁寧にご対応いただいた同社の皆様に対して，ここに記して感謝申し上げたい．

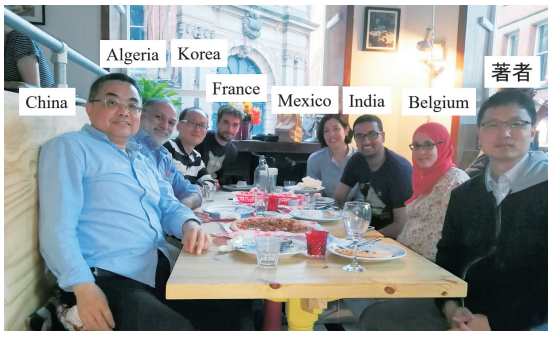


写真４　研究室のメンバーとの夕食会

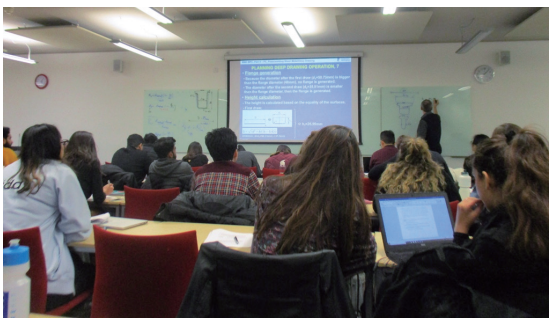


写真５　ノッティンガム大学での授業見学

写真６　FPMC（BATH/ASME）2018（バース大学）

写真７　SMC UK Pneumatics（ミルトンキーンズ）

5. 子供達の現地校と日本人補習校

私のこの英国研修には，妻と当時小６と小３の娘の計３名の家族が同行した．娘達は，平日は現地校に通うこととなった．

小６の長女は，英国ではYear７～８（中学１～２年生）の学齢ということで，Alderman White Schoolという中学校に通った（写真８）．やはり中学校ということで，勉強の面でも人間関係の面でも，相当な苦労があったようである．良くも悪くも，外国人であることや言葉の面に対して，特に配慮はなかった．

一方，小３の次女は，Year３～４（小学３～４年生）の学齢ということで，Lanes Primary Schoolという小学校に通った．こちらは，マレーシアで日本人の子供に英語を教えていたご経験があるという男性の担任の先生にも恵まれ，運動会やお遊戯会など，かなり楽しく過ごしたようである（写真９）．お友達もたくさんできた．３月の最終登校の日には全校集会が開催されて日本に帰国することが紹介され，寄

写真８　長女の現地中学校（Alderman White School）

写真９　次女の現地小学校（The Lanes Primary School）

せ書きや記念品をいただき，お別れは相当辛かったようである．

ノッティンガムの約20㎞西に，ダービーという町がある．Toyota Motor Manufacturing UKとその関連の（多くは日系）企業，Rolls-Royceなどがあり，日本人が多い．そのため，ダービー日本人補習校という学校があり，小１～高３まで，計100名ほどの児童・生徒が在籍していた．毎週土曜日に，娘達は同校に登校した．（写真10）．なお，補習校というのは日本語学校ではなく，あくまで将来的な帰国（日本の教育への復帰）のための補間を前提としている．そのため，週１回の午前午後のみの授業で，日本の小中学校の算数（数学）と国語の半分の量を教えるカリキュラムである（ただし，日本の教科書は全教科分が支給される）．

同校は，児童・生徒・教員・保護者の仲がとても良く，本当に家族ぐるみで，皆様と良いお付き合いをさせていただき，現在も交流が続いている．

また海外子女・国際児には，人それぞれ，お悩みや苦悩がとても多いことを知った．特に現地駐在が長くなると，子供は次第に英語の方が得意になり，日本語の習得が難しいというお話や，帰国後の受験をどうしよう，というお悩みを，しばしばお聞きした．

写真10　ダービー日本人補習校

6. おわりに

最後に，著者が帰国後の2019年４月に勤務校で実施した報告会で，「これから海外研修に出られる教職員向け」として述べさせていただいた事柄をご紹介させていただき，本記事の結びとする．

- 海外研修で何をするのかは，本当に事前に良く計画した方がよい．
- 家族同伴か単身赴任かは，よく考えた方がよい．
- 子供の現地校は，すんなり入れるとは限らない．数か月待たされることもあるらしい．
- 学齢期のお子さんが同伴する場合，日本人補習校が近くにあるかどうかは非常に重要．地域によっては全日制の日本人学校という選択もある．
- 住居をどう確保するかは，大きな問題．大学の宿舎を１年間借りられたらベストかと思う．
- 英国では民間賃貸を巡るトラブルは多いらしい．
- 著者は最初の１カ月だけ大学の宿舎を借り，４月後半から民間の賃貸物件を借りたが，権利意識の強い中東系移民の大家との間での深刻なトラブル（たとえば何度注意しても予告なしで頻繁に訪問してくる，庭や収納を使わせろと要求してくる，などの英国における明らかな法律違反行為）に見舞われ，９月に英国弁護士を通じて契約を解除し，次の物件に引っ越した．ただし，残り半年の期間で家族向け物件を貸してくれる大家は少なく，その意味でも大変苦労した．
- 何をするにも，心労や苦労は大変多かった．
- 海外研修にはお金がかかる．貯金は非常に重要．

参考文献

1）加藤友規：FPMC（BATH/ASME）2018におけるフルードパワー関連技術の研究動向，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol.50，No.1, p.40-42（2019）

（原稿受付：2020年５月29日）

研究室紹介

大分大学理工学部　菊池研究室

著　者　紹　介

原（はら）　久乃（ひさの）

大分大学理工学部
〒870-1192 大分県大分市旦野原700

2019年大分大学入学．理工学部創生工学科福祉メカトロニクスコース所属．視線計測センサと鏡面反射を利用した視線計測法や，心拍の解析による心理状態の分析の研究に従事．

菊池（きくち）　武士（たけひと）

大分大学理工学部
〒870-1192 大分県大分市旦野原700
E-mail : t-kikuchi@oita-u.ac.jp

2003年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了．同年大阪府立産業技術総合研究所．大阪大学大学院工学研究科助手，山形大学大学院理工学研究科准教授を経て大分大学理工学部教授．機能性流体を用いたメカトロ機器に関する研究開発や福祉工学，リハビリテーションロボティクスへの応用研究に従事．日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会，IEEE等の会員．博士（工学）．

1. はじめに

大分大学は教育学部，経済学部，理工学部，福祉健康科学部，医学部，およびそれぞれの大学院研究科からなり，挾間キャンパス（由布市，医学部・附属病院），王子キャンパス（大分市，教育学部付属学校），旦野原キャンパス（大分市，その他の学部，図１）の３つのキャンパスで構成されています．理工学部は2017年度より，機械，電気電子，福祉メカトロニクス，建築学，数理科学，知能情報システム，自然科学，応用化学の８つのコースに改組しました．

菊池研究室は理工学部創生工学科福祉メカトロニクスコースに所属しています．当コースは，高度福祉社会に貢献するメカトロニクス・ロボット技術の習得のために，機械・電気・制御・情報工学に関する教育と研究を行っています．特に当研究室では，包括的ライフサポートを目指し，機能性流体や柔軟関節，各種センサを用いた医療・福祉・生活・教育支援技術についての研究・開発を行っています（図２）．

図１　大分大学　旦野原キャンパス

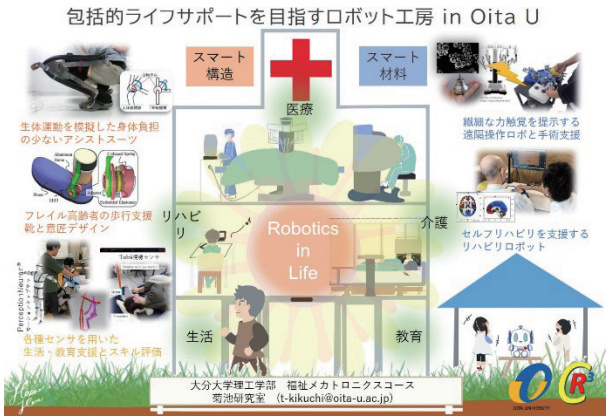


図２　主な研究テーマ

2. 研究室について（原）

私は，三次元CADや3Dプリンタの使い方を教えていただくために伺ったのがきっかけで，菊池研究室に所属することになりました．現在，心拍の解析で快不快の情動を調べる研究や視線計測センサと鏡面反射を用いた視線計測を研究しています．

菊池先生は研究室のメンバーのことを家族のように思い，寄り添ってくださります．私の研究テーマも，得意な部分や興味を考慮して決めていただきました．そして，多角的なアドバイスをしてくださります．また研究室の先輩方も，わからないことを教えてくださったり，気さくに話しかけてくださったりと優しいです．私が昨年，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門主催 九州地区競技会ロ

ボメカ・デザインコンペ2019に参加した際にも，模型を作るのを手伝ってくださり，とても頼りになりました．私にとって菊池研究室は，さまざまな経験を通して自分が成長できる居心地が良い場所です．

図３　研究室のメンバー

3. 研究テーマの紹介（菊池）

3.1　スマート材料ロボティクス

電場（Electric field）や磁場（Magnetic field）の変化によって硬さや流れやすさが 変化する流体を機能性流体（Functional fluid）と言います． 当研究室ではMR流体（Magnetorheological fluid），ER流体（Electrorheological fluid），磁性エラストマー（Magnetic field sensitive elastomer）を用いたメカトロニクスデバイス（図４）の設計と開発を行っています[1,3]．さらに，開発したデバイスを医療・福祉・そのほかの工業分野に 応用するための研究も実施しています．

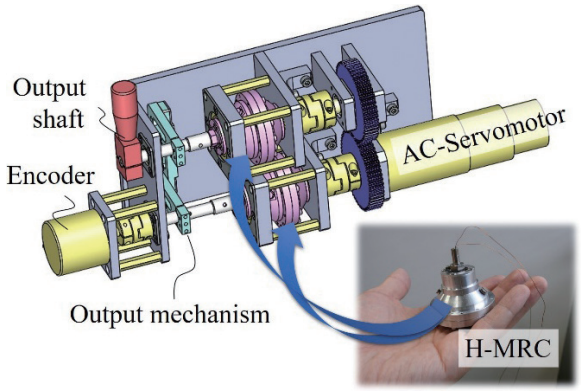


図４　触覚提示向けMR流体アクチュエータ[4]

遠隔操作型手術支援ロボットは今後ますます普及するものと考えられていますが，術者への力フィードバックは十分に行われていないのが現状です．そこで我々は，MR流体を用いて，繊細な力制御が可能なアクチュエータを開発し，これを遠隔操作型手術支援ロボットのマスタ装置（図５）に応用することを目指しています[4]．

図５　遠隔操作系のためのハプティクスデバイス[4]

われわれが現在開発している卓上型上肢リハビリテーションロボットD-SEMUL（図６）は，ER流体ブレーキを用いた抵抗力提示型ハプティックインタフェースであり，モータの暴走を心配する必要がないために本質的に安全な装置です．D-SEMULでは，ソフト，ハードの両面から，ユーザに使いやすいユーザインタフェースの開発を進めています[5]．

図６　上肢リハビリテーションロボットD-SEMUL[5]

3.2　スマート構造ロボティクス

当研究室では，柔軟性，非線形性，調整可能性を有する構造をスマート構造と定義し，このスマート構造を生体支援に応用するための研究・開発を行っています．

われわれは弾性体内蔵型柔軟関節（以下，EEFJ）を考案し，歩行中の足首の運動補助に用いることを検討しました[6]．EEFJは，湾曲した板ばねとそれに内包されるゴム状部品の相互作用によって非線形性を有する力学特性を持たせることができます．これにより，歩行中の底屈―背屈方向の足首回りの補助モーメントに方向による異方性を持たせることができ，関節部品の調整可能性を拡張することが可能です．また，内包するゴム状部品は3Dプリンタなどを使って異なる弾性率を手軽に再現できます．我々は，このEEFJを脳卒中片麻痺者が使用する短下肢装具（AFO）に応用することを検討しました．この

EEFJ型AFOは，従来の弾性体を利用したAFOのような調整容易性を有しながら，ばねやオイルダンパで底背屈に力学的異方特性を付加した単関節型AFOと同様の力学特性を得ることができました．

人間の力を増幅させるパワーアシストシステムの研究が盛んにおこなわれていますが，このような人と機械が直接的に接するシステムにおいては使用者に対する安全確保が最重要課題です．これまでのパワーアシスト装置は多くがヒンジ関節を用いているために，人間の複雑な関節運動に細かく適合することが困難です．この中心の不一致は時に装着者に違和感を与えるだけでなく，人体に余計な負担を与える可能性もあります．われわれは，生体膝関節を模擬した関節と空気圧人工筋を組み合わせて，深屈曲可能な新しいパワーアシスト装具[7]を開発しました（図７）．現在，トーションばねを用いたパッシブなアシスト装具の開発も行っています．

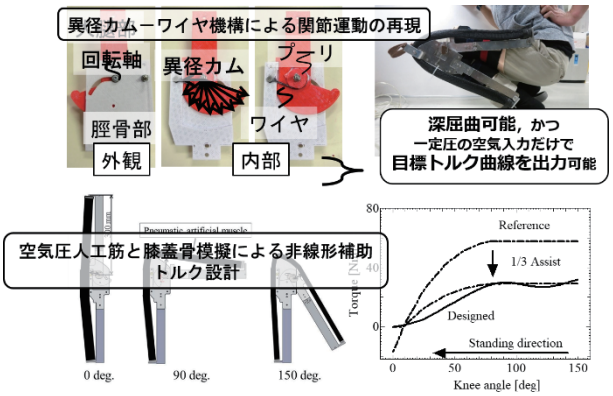


図７　生体膝関節を模擬したパワーアシスト装具

3.3　生体計測センサを用いた生活・教育支援とスキル評価

上記のロボット工学研究のほかに，各種センサを用いた生活・教育支援とスキル評価に関する研究も行っています．

照射した赤外光が角膜（黒目）に反射してできる反射点をプルキンエ像といい，このプルキンエ像と黒目の中心との相対関係で視線の方向を推定する方法を角膜反射法と言います．安価な視線計測センサは，この角膜反射法を用いています．われわれは，小児性麻痺などによって体位の自由が利かない重症心身障がい児のために側臥位でも使用できる視線計測系の開発を行っています．別府発達医療センターにおいて予備的実験を行ったところ，ベッドサイドのスペースが狭くベッドの横に視線計測に必要な600㎜以上のスペースを確保することが困難な場合が多いことがわかりました．そこでわれわれは，鏡面反射を用いて光路を屈折させ，ベッドサイドとは別の場所にあるモニタ（もしくは壁に投影した映像）を側臥位の被験者に観察させ，同時にEye trackerに視線計測させる方法（図８）を提案し[8]，研究しています．

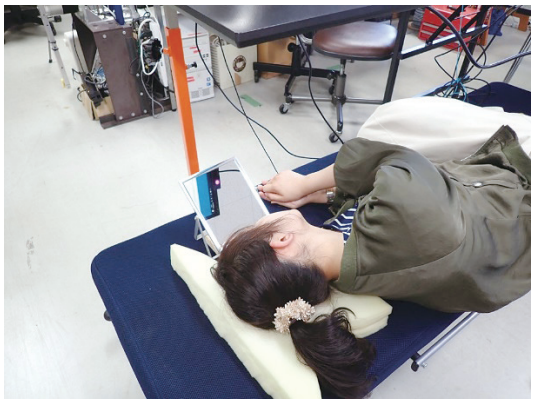


図８　鏡面反射を用いた視線計測の実験風景

4. おわりに

これからも菊池研究室は，枠にとらわれないさまざまな視点から研究の発想を見つけ出し，それを実現させるため挑戦していきます．

参考文献

1）菊池武士，（解説）MR流体のロボティクス・メカトロニクスへの応用方法，日本ロボット学会誌，Vol. 31, No.5, pp. 23-26, 2013.
2）ER・MR流体を応用したパッシブ力制御デバイスと生体支援，バイオメカニズム学会誌，Vol 41, No. 2, pp. 63-66（2017.5）
3）Takehito Kikuchi, Yusuke Kobayashi, Mika Kawai, Tetsu Mitsumata, Elastic properties of magnetorheological elastomers in a heterogeneous uniaxial magnetic field, International Journal of Molecular Sciences, Vol. 19, 3045, 2018.
4）菊池武士，遠隔操作型手術支援ロボットのための繊細な力触覚提示を行うMR流体デバイス，Medical Science Digest, Vol. 46, No.5, pp. 272-274, 2020.
5）菊池武士，ハプティックインタフェースのリハビリテーション医学への応用とその効果，機械の研究，第71巻第９号，pp. 673-678, 2019.
6）阿部功，菊池武士，甲斐亮平，谷田惣亮，弾性体内蔵型柔軟関節を持つ足関節サポータの開発，日本機械学会論文集（C編），Vol. 82, No. 844, p. 16-00231, 2016.
7）Takehito Kikuchi, Kohei Sakai, Isao Abe, Bioinspired Knee Joint for a Power-Assist Suit, Journal of Robotics, Volume 2016, doi：10.1155/2016/3613715, 2016.
8）菊池武士，原久乃，竹中万葉，安価な視線計測センサと鏡面反射を利用した視線計測法の提案，LIFE2019講演予稿集，pp. 426-429, 2019.

（原稿受付：2020年５月６日）

会　告

〈理事会・委員会日程〉

8月18日	理事会
8月11日	情報システム委員会
8月24日	企画委員会
書面審議	編集委員会

〈理事会報告〉

2020年度第２回理事会

8月18日　15：00～17：00

Web開催　（参加者18名）

1）国際シンポジウム函館2020の開催準備状況

2）学会創立50周年記念事業の準備状況

3）2020年秋季フルードパワーシステム講演会開催準備状況

4）2020年度学会賞各賞の選考

5）2020年度修正予算案

6）論文投稿規程の改訂

7）会員の推移

8）各委員会からの報告

9）その他

〈委員会報告〉

2020年度第１回情報システム委員会

8月11日　13：00～15：00

Web開催　（参加者8名）

1）学会HPの更新状況

2）事務局のテレワーク環境整備について

3）会議報告

4）その他

2020年度第２回企画委員会

8月24日　15：00～17：00

Web開催　（参加者25名）

1）2020年度実施の事業に関する報告・審議事項

⑴　2020年度オータムセミナー

⑵　2020年秋季フルードパワーシステム講演会

⑶　2020年度ウィンターセミナー

2）2021年度実施の事業に関する報告・審議事項

⑴　2021年春季フルードパワーシステム講演会・総会日程

3）その他審議・確認事項

⑴　その他

2020年度第１回編集委員会

書面審議　（参加者18名）

1）会誌特集号の現状と企画

⑴　Vol.51 No.5「フルードパワーの最新解析技術動向」

⑵　Vol.51 No.6「トータルシステムの効率向上（仮）」

⑶　Vol.52 No.1「自然災害に関わる流体現象とフルードパワーによる防災技術（仮）」

⑷　Vol.52 No.2「再生可能エネルギーに関するフルードパワー（仮）」

2）その他

⑴　執筆者のPDFデータ商用利用について

⑵　今後の特集について

⑶　トピックスについて

会　告

学会創立50周年特別会費（賛助金）の受付結果

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

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会
会長（学会創立50周年記念実行委員会　委員長）　眞田　一志
理事（学会創立50周年記念実行委員会　幹事）　吉満　俊拓

［賛助会員］　50音順（敬称略）

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

［正会員］　50音順（敬称略）

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

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

2020年度オータムセミナー
「自動車におけるフルードパワー技術」
開催日時：2020年11月20日(金)　13：00 ～ 17：00

自動車分野においてフルードパワーは重要な基盤技術であり，各種研究や製品開発が進められています．本セミナーでは，自動車分野におけるフルードパワー技術に関する最新の研究開発事例を紹介することで，関連技術者の今後の展望の一助としたいと思います.

今回は会場である機械振興会館（東京都港区）に加え，オンライン併用にて開催予定です．詳細は学会ホームページに随時掲載いたします．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
2020年秋季フルードパワーシステム講演会
開催日：2020年12月8日(火)・9日(水)

2020年秋季フルードパワーシステム講演会は2020年12月8日（火）・9日（水）に岡山理科大学（岡山市）で開催されます．本講演会では，一般講演に加えて，特別講演とオーガナイズドセッションを企画しています．なお，新型コロナウイルスの影響を考慮して，今回は，通常の参加型とオンライン型の併用，もしくはオンライン型のみでの実施を予定しています．詳細につきましては、学会ホームページでご確認くださいますようお願い申し上げます．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
2020年度受賞候補者募集のお知らせ

当学会は，我が国の油圧・空気圧・水圧工学の振興と発展の奨励を目的として毎年優れた研究・技術を表彰しております．本年も当学会の「表彰規程」にもとづき，日本フルードパワーシステム学会2020年度受賞候補者を募集いたします.

つきましては，独創的な研究，画期的な新技術，累積効果抜群な研究者，技術者などについて，適格な受賞候補者をご推薦ください.

募集要項など詳しくは学会ホームページをご覧ください.

会　告

訃報　Cliff Burrows教授

バース大学Cliff Burrows教授が，2020年４月20日にご逝去されました．

Cliff Burrows教授は，バース大学に1987年に教授として，またFluid Power Center（現在のthe Centre for Power Transmission & Motion Control）の所長として着任され，世界のフルードパワー研究の指導的役割を果たしてこられました．1988年から，バース大学のフルードパワーに関する国際会議を開始され，その活動は現在のthe annual Bath/ASME Symposium on Fluid Power & Motion Controlに継続されております．

当学会で主催するフルードパワー国際シンポジウムにも，ご家族を同伴されてご参加され，日本の多くのフルードパワー研究者とも親交を深められました．

Cliff Burrows教授の訃報に接し，ここに謹んでお悔やみ申し上げます．

2020年８月３日
会長　眞田一志

バース大学　Cliff Burrows教授の訃報について：
https://www.bath.ac.uk/announcements/the-university-is-deeply-saddened-to-announce-the-death-of-professor-cliff-burrows/　（2020年８月２日閲覧）

会　員　移　動

会員の種類	正会員	海外会員	学生会員	賛助会員
会員数 （８月10日現在）	879	12	95	128
差引き増減	−5	±0	+3	−1

正会員の内訳　名誉員15名・シニア員48名・ジュニア員113名・その他正会員703名

〈新入会員〉

正会員

杉崎　寛和（コマツ）

学生会員

王　　蒔遠（明治大学）
富田健太郎（横浜国立大学）
下岡　隆雅（横浜国立大学）
田原　芳基（横浜国立大学）
田附　優輝（横浜国立大学）
新井　慶彦（横浜国立大学）
田中　靖人（横浜国立大学）

会　告

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

第48回 可視化情報シンポジウム
主　　催：一般社団法人　可視化情報学会
開 催 日：2020年9月24日(木)～9月26日(土)
会　　場：かごしま県民交流センター（鹿児島県鹿児島市山下町14-50）
U R L：https://www.vsj.jp/symp2020/

SICEセミナー「モデルベースト制御系設計～モデリングから制御系設計までを系統的に学ぶ～」2020
主　　催：公益社団法人　計測自動制御学会 制御部門
開 催 日：2020年9月29日(火)，9月30日(水)
会　　場：オンライン開催
U R L：http://www.sice-ctrl.jp/jp/wiki/wiki.cgi/c/semi?page=design2020

第38回 日本ロボット学会学術講演会
主　　催：一般社団法人　日本ロボット学会
開 催 日：2020年10月9日(金) ～ 10月11日(日)
会　　場：オンライン開催
U R L：http://ac.rsj-web.org/2020/

第63回 自動制御連合講演会
主　　催：公益社団法人　計測自動制御学会，化学工学会，システム制御情報学会，精密工学会，電気学会，日本機械学会，日本航空宇宙学会
開 催 日：2020年11月18日(水)～ 11月20日(金)
会　　場：黒部・宇奈月温泉　やまのは（富山県黒部市宇奈月温泉352-7）
黒部市宇奈月国際会館　セレネ（富山県黒部市宇奈月温泉6-3）
U R L：https://www.sice.jp/rengo63/

第15回「運動と振動の制御」国際会議（MoViC2020）
主　　催：一般社団法人　日本機械学会　機械力学・計測制御部門
開 催 日：2020年12月8日(火) ～ 12月11日(金)
会　　場：朱鷺メッセ（新潟県新潟市中央区万代島6-1）
U R L：https://www.jsme.or.jp/conference/movic2020/

第３回 安心・安全・環境に関する計算理工学国際会議（COMPSAFE2020）
主　　催：COMPSAFE2020実行委員会
開 催 日：2020年12月8日(火)～ 12月11日(金)
会　　場：オンライン開催
U R L：https://compsafe2020.org/

第21回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（SI2020）
主　　催：公益社団法人　計測自動制御学会 システムインテグレーション部門
開 催 日：2020年12月16日(水)～ 12月18日(金)
会　　場：オンライン開催
U R L：https://www.sice-si.org/conf/si2020/

Grinding Technology Japan 2020
企　　画：日本工業出版株式会社
開 催 日：2021年3月2日(火)～3月4日(木)
会　　場：幕張メッセ（千葉県千葉市美浜区中瀬2-1）
U R L：https://10times.com/grinding-technology-japan

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

会　告

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 賛助会員一覧表

㈱IHI
アイシン・エィ・ダブリュ㈱
㈱明石合銅
アズビル㈱藤沢テクノセンター
アズビルTACO㈱
㈱アドヴィックス
アネスト岩田㈱
イートン㈱
出光興産㈱
イナバゴム㈱
イハラサイエンス㈱
㈱インターナショナル・
　サーボ・データー
㈱打江精機
SMC㈱
SMC㈱中国
㈱NF1
ENEOS㈱潤滑油カンパニー
㈱荏原製作所
㈱大阪ジャッキ製作所
大瀧ジャッキ㈱
オカダインダストリ㈱
鹿島通商㈱
㈱桂精機製作所
神威産業㈱
川崎重工業㈱精密機械・
　ロボットカンパニー
川崎油工㈱
川重商事㈱
㈱神崎高級工機製作所
キャタピラージャパン㈾
協和シール工業㈱
旭東ダイカスト㈱
㈱クボタ
KYB㈱
KYBエンジニアリング
　アンドサービス㈱
KYB-YS㈱
㈱工苑
甲南電機㈱
㈱古河製作所
㈱コガネイ
コスモ石油ルブリカンツ㈱
㈱小松製作所
㈱小松製作所試験センタ
㈱小松製作所開発本部
㈱小松製作所油機開発センタ
㈱阪上製作所
㈱鷺宮製作所
佐藤金属㈱
三輪精機㈱
三和テッキ㈱
㈱ジェイテクト奈良
㈱ジェイテクト刈谷
CKD㈱
㈱島津製作所
勝美印刷㈱
ジヤトコ㈱
住友建機㈱
住友重機械建機クレーン㈱
住友重機械工業㈱
制御機材㈱
千住金属工業㈱
第一電気㈱
ダイキン工業㈱
ダイキン･ザウアーダンフォス㈱
大生工業㈱
㈱TAIYO
タイヨーインタナショナル㈱
ダイワ㈱
㈱タカコ
㈱タダノ
調和工業㈱
㈱都筑製作所
TMCシステム㈱
東京計器㈱
東京計器パワーシステム㈱
東京メータ㈱
東北特殊鋼㈱
東明工業㈱
東レエンジニアリング㈱
同和発條㈱
特許機器㈱
特許庁
TOHTO㈱
豊興工業㈱
㈱豊田自動織機
長津工業㈱
中西商事㈱
長野計器㈱
中村工機㈱㈱
㈱NaNaデザインワークス
ナブテスコ㈱
㈱南武
日新濾器工業㈱
日本アキュムレータ㈱
日本機材㈱
日本クエーカー・ケミカル㈱
日本工業出版㈱
日本精器㈱
日本製鉄㈱交通産機品事業部
日本電産トーソク㈱
（一社）日本フルードパワー工業会
日本ムーグ㈱
㈱野村商店
㈱ハイダック
日立建機㈱
㈱日立建機ティエラ
㈱日立製作所
廣瀬バルブ工業㈱
フエスト㈱
㈱フクダ
㈱不二越
フジサンケイビジネスアイ
二見屋工業㈱
ボッシュ・レックスロス㈱
昌富工業㈱
マサモト㈱
㈱増田製作所
マックス㈱
松巳鉄工㈱
三國機械工業㈱
三菱電線工業㈱
ヤマシンフイルタ㈱
ヤマハモーターハイドロリック
　システム㈱
㈱山本金属製作所
油研工業㈱
㈱ユーテック
理研精機㈱
リバーフィールド㈱
㈱レンタルのニッケン

編 集 室

次号予告

— 特集「トータルシステムの効率向上」—

【巻頭言】「トータルシステムの効率向上」の発行にあたって　佐藤　恭一
【解　説】
ロードセンシングシステム　高　圭介
３ポンプ油圧システム　小高　克明
電空ハイブリッド超精密鉛直位置決めステージの制御　加藤　友規
転がり軸受の低トルク化技術　外尾　道太
自動車用トランスミッションにおける効率向上システム　柴山　尚士
空気圧システムのエネルギー消費の評価　蔡　茂林，香川　利春
鉄道車両用真空式トイレの省エネルギー　藤野　謙司
【ニュース】50周年記念冊子　佐藤　恭一
【トピックス】
学生さんへ先輩が語る—大勢の人と関わりながら働くということ—　勝又　玲子
【研究室紹介】立命館大学　平井研究室　平井　慎一

2020年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長　柳田秀記（豊橋技術科学大学）
副委員長　山田宏尚（岐阜大学）
委員　飯尾昭一郎（信州大学）
飯田武郎（㈱小松製作所）
伊藤雅則（東京海洋大学）
梅村哲郎（KYB㈱）
加藤友規（福岡工業大学）
北村剛（油研工業㈱）
栗林直樹（川崎重工業㈱）
五嶋裕之（㈱工苑）
齋藤直樹（秋田県立大学）
佐々木大輔（香川大学）
佐藤恭一（横浜国立大学）
委員　妹尾満（SMC㈱）
中野政身（東北大学）
中山晃（日立建機㈱）
藤田壽憲（東京電機大学）
丸田和弘（㈱小松製作所）
宮津寿宏（CKD㈱）
矢島丈夫（㈱コガネイ）
山田真の介（㈱TAIYO）
吉満俊拓（神奈川工科大学）
担当理事　伊藤和巳（KYBエンジニアアリングアンドサービス㈱）
学会事務局　成田晋
編集事務局　竹内留美（勝美印刷㈱）
（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．

フルードパワーシステム Vol.51 No.5

昭和47年10月19日第４種学術刊行物認可
2020年９月15日発行　　（奇数月）

〒105―0011
東京都港区芝公園三丁目五―二二　機械振興会館別館一〇二　電話（〇三）三四三三―八四四一　ＦＡＸ（〇三）三四三三―八四四二
編集兼発行人　一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会　振替口座　東京〇〇一一〇―三―一三三六九〇
印刷所　勝美印刷株式会社　東京都文京区白山一―一三―七　アクア白山ビル五階

本紙広告取扱　株式会社 産業企画　東京都港区新橋6-22-2 佐藤ビル　〒105-0004
TEL. 03-3437-0057　FAX. 03-3437-9868　www.sanki.asia　E-mail　sanki@sanki.asia