

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

システム

July 2022 Vol. 53 No. 4

特集「フルードパワーと音」

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

【挨拶】

会長就任にあたって	早川 恭弘	146
副会長のご挨拶	嶋村 英彦, 川上 幸男	147

特集「フルードパワーと音」

【巻頭言】

「フルードパワーと音」発刊にあたって	妹尾 満	148
--------------------	------	-----

【解説】

流れにともなう騒音の発生メカニズムや特性	丸田 芳幸	149
ブラズマアクチュエータによる空力音制御	横山 博史	154
ファン騒音の音質評価指標と改善について	中野 武史, 御法川 学	158
水圧駆動システムにおけるキャビテーション現象の評価と対策	飯尾昭一郎	164
タイの伝統楽器クルイの自動吹奏ロボットによる音色表現	加藤 友規	167
管楽器の空力音響解析	吉永 司, 横山 博史	170

【会議報告】

日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会（MDT2021）におけるフルードパワー技術研究	吉田 和弘	175
---	-------	-----

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る—フルードパワーシステムに携わる学生さんへ向けて—	八木澤 遼	177
Youは日本をどう思う？第20回：マレーシアから日本に留学して	セリン オンフイツ	180
ドイツ駐在日記	塩見 幸治	183

【会告】

会員移動	163
2022年度（第41期）通常総会終了	174
理事会・委員会報告	187

2022・2023年度 委員会委員長	187
2021年度 学会賞表彰	188
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催 2022年秋季フルードパワーシステム講演会	188
共催・協賛行事のお知らせ	189
次回予告	190

■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

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

[Greeting Message]

Greetings from the President	Yasuhiro HAYAKAWA	146
Message from Vice Presidents	Hidehiko SHIMAMURA, Yukio KAWAKAMI	147

Special Issue "Fluid Power Related to Sound"

[Preface]

On the Special Issue "Fluid Power Related to Sound"	Mitsuru SENOO	148
---	---------------	-----

[Review]

Generation Mechanism and Characteristics of Flow Induced Noise	Yoshiyuki MARUTA	149
Control of Aerodynamic Sound by a Plasma Actuator	Hiroshi YOKOYAMA	154
Study on Sound Quality Metrics and Improvement of Fan Noise	Takefumi NAKANO, Gaku MINORIKAWA	158
Understanding the Cavitation Phenomenon in Water Hydraulic System and its Countermeasures	Shouichiro IIO	164
Sound Expression of a Robot which Plays the Traditional Thai Duct Flute, Khloi	Tomonori KATO	167
Aeroacoustic Simulations of Wind Instruments	Tsukasa YOSHINAGA, Hiroshi YOKOYAMA	170

[Conference Report]

Researches on Fluid Power Technologies in the 20th Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME	Kazuhiro YOSHIDA	175
--	------------------	-----

[Topics]

Seniors talk to students - Message for Students who Study Fluid Power System -	Ryo YAGISAWA	177
What do you think of Japan? 20th : Studying Abroad Japan from Malaysia	Serene Ong Hui Sze	180
Report from Germany Stay A Life in Germany Germany Resident Diary	Koji SHIOMI	183

[JFPS News]

163, 174, 187, 188, 189, 190

挨拶

会長就任にあたって

著者紹介



はや かわ やす ひろ
早 川 恭 弘

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

1984年立命館大学理工学研究科博士前期課程
機械工学専攻修了, 2022年独立行政法人 国立高
等専門学校機構 奈良工業高等専門学校電子制御
工学科嘱託教授, 福祉・介護ロボットの研究に
従事, 社会福祉法人天寿会理事, 博士 (工学)。

2期4年務められた真田会長の後任として、先の学会総会において2022、2023年度会長に指名されました早川恭弘です。学会創立時から諸先輩方が築き上げてこられた当学会は2020年に学会創立50周年を迎えました。2020年に開催予定だった学会創立50周年記念式典は、新型コロナウイルス感染拡大により延期され、2021年6月25日(金)に機械振興会館からオンラインで開催されました。また、創立50周年記念誌および機能性流体入門テキストも出版され、学会誌に50周年記念企画の特集号が掲載されました。学会創立50周年記念パーティーに関しては、社会情勢をかんがみ開催したいと思えます。その際は、ぜひご参加たまわりますようお願い申し上げます。

学会創立50周年は、ひとつの大きな節目であり、つぎの100周年に向けて、学会のさらなる基盤強化を図っていききたいと思います。当学会は、日本油空圧協会、(株)日本油空圧学会、(株)日本フルードパワーシステム学会と名称を変更してきました。現在では、空気圧、油圧を初めとして、水圧や機能性流体などを含めた幅広い分野を網羅しており、今後ますます、それらの応用事例が期待されています。会員の皆様から期待される学会であり続けることが必要であることから、社会情勢に合わせて、当学会の運営方法および事業内容も変化させていかなければならないと考えます。

2020年からの新型コロナウイルス感染拡大により、社会活動が大きく変わりました。学会においても講演会、セミナーなどが延期されたり、オンライ

ン開催されたりしています。また、学会運営のための各種会議もオンライン形式となっています。2021年10月に開催された第11回JFPSフルードパワー国際シンポジウム函館においても、講演はオンデマンド、Closing & Awards Ceremonyなどがオンラインで実施されました。また、2022年春季講演会、総会もオンラインで実施されました。このような状況下においても、会員の皆様にとって有益な学会であるために、ウィズコロナ、アフターコロナにおける新しい取組みをさらに検討していきたいと考えています。事業内容に関しては、遠隔地からも多くの会員が参加できるオンライン開催および会員相互のつながりを深める対面形式開催など、それぞれのメリットを最大限に活かした事業の検討を行うことにより、当学会の基盤強化を図っていききたいと思います。会員の皆様のご支援を心よりお願い申し上げます。

また、学会ホームページは、会員の皆様に対して重要な情報発信源であることから、さらに有用な情報提供ができるよう当学会の情報基盤整備を継続してまいります。

国際交流に関しては、これまで、国際シンポジウムおよび日中韓共同ワークショップにより、各国の研究者と交流を深めています。さらに、日本におけるフルードパワーに関する情報を継続して世界に発信するためには、JFPS International Journal of Fluid Power Systemの充実が求められます。会員の皆様の積極的な投稿をよろしくお願いいたします。

産学連携に関しては、日本フルードパワー工業会との連携強化をさらに図り、積極的に活動を進めたいと思います。

最後になりましたが、フルードパワー技術の発展をめざし、会員の皆様および事務局の方々のご支援を頂戴しながら、当学会運営に微力ながら最大限努力していく所存であります。会員の皆様のご理解とご支援ご協力をたまわりますようお願い申し上げます。

(原稿受付：2022年5月30日)

挨拶

副会長のご挨拶

著者紹介



しまむら ひで ひこ
嶋村 英彦

川崎重工業株式会社
精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター
〒651-2239 神戸市西区榎谷町松本234
E-mail: shimamura_h@khi.co.jp

川崎重工業株式会社 専務執行役員、精密機械・ロボットカンパニープレジデント。



かわ かみ ゆき お
川上 幸男

芝浦工業大学システム理工学部
さいたま市見沼区深作307
E-mail: kawakami@shibaura-it.ac.jp

1991年早稲田大学大学院工学研究科博士課程単位取得満期退学。1992年芝浦工業大学助手、講師、助教授を経て、2004年同大学システム工学部教授。空気圧システム制御の研究に従事。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）。

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会の2022年度総会が5月27日にオンライン形式で開催され、眞田一志会長が任期満了となり、奈良工業高等専門学校・早川恭弘先生が新たに会長に選出されました。また副会長には、川崎重工業㈱・嶋村英彦の続投に加え、芝浦工業大学・川上幸男が新たに任命されました。私ども2名は副会長として、早川新会長を補佐しつつ、学会の運営に尽力して参りたいと考えております。副会長のご挨拶として所信を述べさせていただきます。

2020年初頭からの新型コロナウイルスの感染拡大の影響を大きく受け、学会活動においては臨機応変な対応が必要となったこの2年間でした。講演会、セミナー等の通常のイベント行事は対面形式での実施が難しく、基本的にはオンライン開催での実施となりましたが、企画委員会の尽力により各行事とも趣向を凝らしたものとなり、オンライン形式でも活発な質疑、討論、研究者間交流の場を設けることができました。オンライン形式での実施は距離的、時間的なハードルを下げ、気軽に参加できるといった新しい価値観を創出できたように感じています。一方で、フェースtoフェースだからこそ得られる交流も少なからず存在し、オンライン形式だけでは十分

でないことは誰もが認識していることかと思えます。コロナ禍が落ち着いてきており、今後は対面形式での実施を基本としますが、オンライン形式だから提供できるサービスにも着目し、両方のバランスをうまく取るように企画を進めて行きます。

JFPSフルードパワー国際シンポジウムは本学会の重要な国際交流事業になりますが、当初2020年10月開催予定の第11回・函館大会は、1年延期して2021年10月に開催することができました。従来のように参加者が現地に集まり対面形式での開催は難しいことから、講演発表は事前にビデオ登録し、大会期間中に函館からオンデマンドで配信し、質疑はオンラインで対応するといった新しい試みを行いました。通常の国際交流が実施できない中、国を超えてフルードパワー研究者間の情報交換を活性化するという大きな目的を達成することができました。次回・第12回については広島を開催地として2024年10月開催をめざして計画を進めています。感染状況が落ち着き、基本的には参加者が現地に集い、対面形式で情報交換を行える場を提供したいと考えています。また、時間的、距離的な制約が小さくできるといったオンライン形式の利点を踏まえ、函館大会で得られた知見を一部効果的に取り入れることも考えています。また、第6回の日中韓共同ワークショップも1年延期して2021年7月にオンライン形式で国立釜慶大学にて開催することができました。次回第7回については日本開催となり、2023年に対面形式での開催をめざして準備を進めております。日中若手交流事業についても2020年から中断しておりますが、2022年にはぜひとも再開し、中国現地に若手研究者を派遣したいと考えています。

産学連携の事業に関してもアフターコロナを見据えて、日本フルードパワー工業会等と共同し、共同研究事業が一層拡大できるように支援を進めていきます。

早川新会長のもと、皆様のお役に立てるよう尽力してまいりますので、ご理解ならびにご支援のほど、なにとぞよろしくお願い申し上げます。

(原稿受付：2022年6月1日)

巻頭言

「フルードパワーと音」発刊にあたって

著者紹介

せのお みつる
妹 尾 満

SMC株式会社
〒300-2493 茨城県つくばみらい市絹の台4-2-2

1996年愛媛大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。
同年SMC株式会社に入社。空気圧システムの省エネルギーに関
する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会会員。

音は、私たちの身の回りにあり、雑音、騒音、コミュニケーションの手段の声、音楽などで気づかずに何らかの音を常に聞いている。このように私たちの身の回りには音は、体系化され、学問として扱われている。音に関する学問は、音楽学、音響学、物理学、工学、心理学などに多岐にわたり発生、現象、伝達、感じ方などが研究されてきた。

また、音は、人の健康や生活に悪影響を与えると騒音として扱われ、規制の対象になる。工場や事業所では、労働環境や生活環境の改善のため、騒音が規制されている。日本では、工場や事業所から発生する騒音に対して、騒音規制法により規制されている。作業場では、安全衛生法で作業環境の騒音の測定と対策が義務づけられている。

フルードパワーの分野でも、エア機器からの排気騒音とポンプや圧縮機から発生する騒音が問題となり、労働環境保全のため、低騒音化などの対策や低騒音製品の開発が行われてきた。

この不愉快な騒音とは反対に、パイプオルガンなどフルードパワーを利用し、人に心地よい音を奏でる楽器がある。人の呼気を利用した管楽器も大局から見ると、人の肺を空気圧源とみなすことができ、フルードパワーを利用した楽器のひとつと考えられる。

本特集では、「フルードパワーと音」と題して、フルードパワーにおける音の発生メカニズム、音の制御および評価と楽器の制御および解析について紹介する。

中央大学の丸田芳幸氏には、流体音のメカニズムとして流体音の特徴と発生源としての音源の構成、噴流騒音やキャビティトーンのような流体音の種類

および流体音の静粛化を行うための流体変動因子の解明や静粛化や低騒音化のヒントについて解説いただいた。

豊橋技術科学大学の横山博史氏には、誘電体バリヤ放電により気流を発生させるプラズマアクチュエータによる空力音の制御の一例として、キャビティ音の制御を紹介していただいた。間欠制御による効果が及ぼす影響について実験結果と解析結果により評価した内容について解説いただいた。

法政大学の中野武史氏、御法川学氏には、ファン騒音の音質評価指標としてファン騒音が耳障りと感じる主要因のトーン成分を評価する新たな評価指標を提案し、官能試験を実施することにより、提案した評価指標の有効性について解説いただいた。

信州大学の飯尾昭一郎氏には、水圧用スプール弁を想定した矩形オリフィスからのキャビテーション噴流の可視化と圧力-流量特性と騒音特性の関係について解説いただいた。

福岡工業大学の加藤友規氏には、タイの伝統的な縦笛クルイの自動吹奏ロボットの開発前に、リコーダ自動吹奏ロボットで人間の奏者と同じような音色が再現できることを確認した。その後、クルイ自動吹奏ロボットで、流量や運指圧の制御により人間の演奏のような音色を再現できた例について解説いただいた。

豊橋技術科学大学の吉永司氏および横山博史氏には、管楽器のリコーダの流れや音場を計算により音スペクトルや共鳴管内の圧力変動を予測した結果とシングルリード楽器のサクソネットのリード振動波や音スペクトルの予測した結果について解説いただいた。

最後に、本特集を企画するにあたり、ご助言いただいた編集委員会の委員の方々、ご多忙の中、突然に依頼にも関わらず、ご快諾いただき、ご寄稿いただきました執筆者の方々に深く感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。

(原稿受付：2022年6月1日)

解説

流れにともなう騒音の発生メカニズムや特性

著者紹介



まる た よし ゆき
丸 田 芳 幸

中央大学理工学部
〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27
E-mail: yoshiyuki_maruta@camal.mech.chuo-u.ac.jp

1979年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。2010年まで在原製作所で流体機械システムの静粛化技術の研究開発に従事。2014年中央大学理工学部共同研究員。現在に至る。日本機械学会永年会員、日本騒音制御工学会、ターボ機械協会の会員。博士(工学)。

1. はじめに

空気や液体などの流体が運動すると圧力変動の波が誘起されて、音波として放射され伝搬する。流体の運動にともなって発生する音を、流体音と称している。物理学的に見ると、流体の非定常運動（流れ）にともなう現象であり、定性的な理論説明がほぼ完了しており、数値解析による予測やシミュレーションも可能になっている。流体音は自然界で通常的に発生しており、また航空機や高速鉄道および自動車などからも発生し、空調設備や家電機器などからも発生する。液空圧装置を含む機械装置や各種の設備機器から発生して放射される流体音を、流体騒音と称している¹⁾。

2. 流体音のメカニズム

2.1 発生機構と特徴

音波（圧力変動波）を誘起する流体の非定常な運動（せん断流や渦流）には、さまざまなパターンが存在する。流体が運動すると流体中の圧力が変化するので、変動する運動（非定常流れ）があると圧力が変動し、伝搬する音波が誘起される。非定常流れの変動量、変動率、変動する領域の分布などによって発生する音波の強さや周波数、音色が定まる。流体音の原因になる非定常流動現象は、いくつかのパターンに区別されているが、それらの大部分が流体力学的に解明されている。また、それらに共通する流体音の定性的な特徴はつぎのようになる。

- (1) 音の周波数が代表寸法に反比例して、代表流速に比例する。
- (2) 通常条件で、流体音の強さは代表流速の6乗に比例する。
- (3) 共鳴や共振現象が絡むと、周波数の変化が不連続的になり、異常に大きな騒音に成長する。
- (4) 音源としての非定常流れの流動パターンに応じて、卓越音と広帯域周波数音とに区分される。
- (5) 流体的自励振動現象が原因になると、卓越音成分が支配的になる。
- (6) 周波数特性はストロハル数（＝「代表周波数」×「代表寸法」／「代表流速」）の影響を受けやすく、発生音強さや支配的音源機構はレイノルズ数（＝「代表流速」×「代表寸法」／「動粘性係数」）との関係が強い。

2.2 音源：流体力学的な要因

(1) せん断流が流体音の主因／渦音理論²⁾

せん断流にともなう流体変動から流体音が発生する、と概説できる。この変動する流体力学的物理量は、変化して移流する渦によって誘起される物理量であるので、渦の運動が主因になる音源である（渦音理論）として、次項のように解説される。流体運動の基礎式をベクトル演算で表し、それを用いて流体音の波動方程式を導出すると、右辺の音源項が、渦度ベクトルと速度ベクトルの外積のダイバージェンス（発散）として表すことができる。ここで渦度は、「流体中のある部分が、近くにある渦に引き込まれようとして受ける力（流体が進行方向から渦の中心へ曲げられる応力）」を意味する。数値流体解析によって流体音を推定する場合には、渦音理論を用いることが一般的になっている。

上記の理論は理学的に正しいが、工学的には難解である。音源メカニズムの理解のために、つぎのように解説される。

(2) 渦度の変動と発生音

渦が静止していて変化しなければ音源にはならず、渦が運動または変化することで、渦の周囲に圧力変動が誘起される。そのメカニズムを定性的に説明すると、図1に示すようになる。静止している渦を横

切る2本の直線を想定し、その線上での渦度の強さの分布を求めると図示のようになる。渦中心近くでは渦度が強く、中心から離れるほど渦度は弱くなる。線上の各点の渦度の強弱は、その点での静圧（負の圧力）の大小に相当するので、渦中心に近いほど負圧が強く、中心から離れるほど負圧が弱い分布になる。

もし、直線A上の静止点Mに圧力センサを固定し、渦が直線Aと平行に左から右へと移動してきて通り過ぎたとすると、図の下部に示した圧力分布において横軸が時間軸に置き換わったことになるので、この点Mでは1回の圧力変動を検知することになる。直線B上の静止点Nで圧力を検知すると、渦中心からの距離が長いのでM点の計測より振幅が小さい圧力変動が検知される。複数個の渦が連続して左から右へ移動するならば、複数回の圧力変動を検知する。渦の移動速度や渦の間隔によって、検知される圧力変動の周期や周波数が決定される。各静止点で検知される圧力変動には遠距離場へ伝搬する成分と伝搬しない成分が含まれており、伝搬する成分を積分したものが音波に相当する。

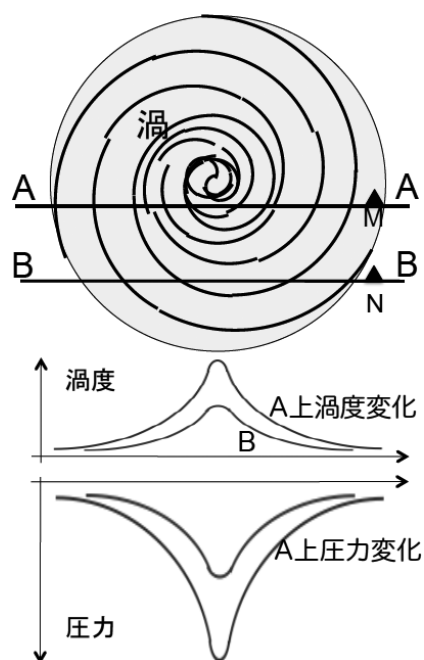


図1 渦の移動（渦度変化）が圧力変動を誘起

渦の強さを表す循環は、渦の周囲の閉曲線に沿って渦度を積分した結果であるので、強い渦が通過するほど、静止点で検知する渦度の変化が大きく、検知される圧力変動の振幅が大きくなる。よって、強い渦が運動する（移動する）と強い音源になり得る。一方、渦が移動しなくても、変形（成長、衰弱、延びる、縮む、曲折など）すると、周囲の渦度も変動するので、圧力変動が誘起される（図2）。

渦の発生、運動、変形や、せん断流の発生や乱流

の発生は、流体力学的な現象であり、それらの性質や運動特性は、ほとんどが実験的に解明されている。また、能力が向上した計算機を利用する最新の数値流体解析によっても予測できる現象であるので、発生する流体音の特性もほとんどが予測可能になっている³⁾。

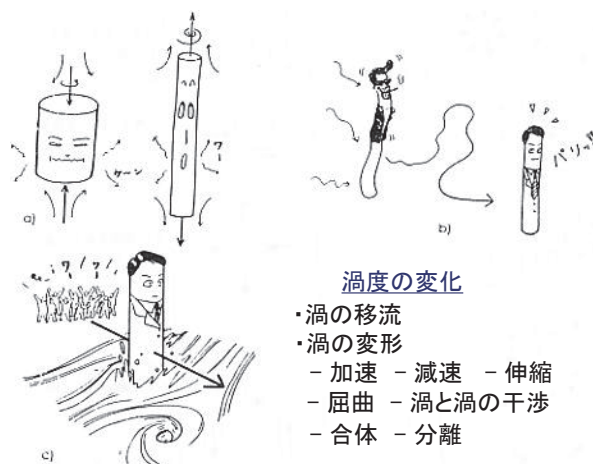


図2 渦度の変化を伴う渦の運動

(3) LighthillとCurleの解析近似⁴⁾

音波の波動方程式を、流体力学の基礎式（連続の式、粘性流体の運動量保存式（Navier-Stokes方程式）、断熱変化の式）から線形近似によって導出するが、線形近似において高次の微小項（流体力学的な要素を備えている）を省略しないで式の変形を行うと、流体音に関する波動方程式を導出できる。波動方程式として整理する過程で、省略しなかった微小項を右辺に集めて、音源項とみなしている。音源項としての流体力学的要素から、遠距離場の音圧（圧力変動の伝搬成分）に関与する要素を解析的に抽出すると、つぎのような3種類の近似音源項の和として整理できる。「単極子音源」、「双極子音源」、「四重極子音源」であり、それらの支配的な変動要素は以下である。

- ・「単極子音源」：流体中のある領域からの流体の湧き出しと吸い込みの変動（体積変動）によって誘起される音源である。振動する固体面からの放射音波や流体中の密度変動（泡や風船の破裂など）も、この単極子音源に含まれる。
- ・「双極子音源」：流体中に存在する固体の表面（境界面）に分布する圧力変動を時間に関して偏微分した要素を、固体表面全体にわたって面積分した結果が、この音源としてみなされる。普通にわれわれの生活空間で発生している流体音、流体騒音の音源のほとんどが、この双極子音源である。せん断流が固体物体に衝突したり、きわめて近くに接近すると、物体表面に圧力変動を誘起して双極子音源が発生する。
- ・「四重極子音源」：ある領域内のレイノルズ応力を

主体とするLighthillの応力テンソルを時間に関して2階偏微分した因子を、その領域全体で体積分した結果が、この音源である。噴流から発生する音や流体内の乱れ自身が、四重極子音源に該当する。

上記の3種類の音源の関係を図示すると、図3のようになる。次元解析によって、単極子音源では発生音の音響パワーが代表流速の4乗に比例し、双極子音源では代表流速の6乗に比例し、四重極子音源では音響パワーが代表流速の8乗に比例して大きくなることがわかっている。これらの3種類の音源項を構成する流体力学的な変動因子（速度変動の法線成分、固体表面の圧力変動、レイノルズ応力、せん断応力など）は実測しやすい物理量であり、実機や模型実験での測定値から発生する流体音を推定する場合には、理解しやすい音源メカニズムである。

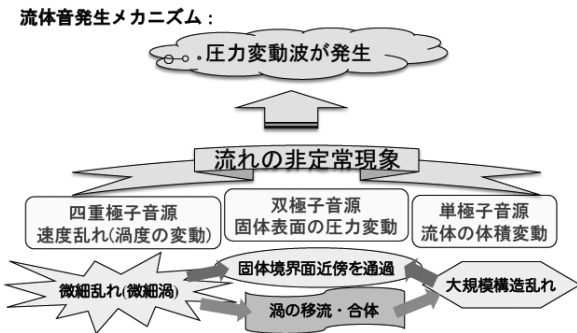


図3 流体騒音の発生源は3種類の音源が構成

3. 代表的な流体音

3.1 広帯域騒音

(1) 噴流騒音 (Jet Noise)

高速の流体（噴流）がノズルから吹き出す時に発生する音であり、噴流の外周部で成長するせん断流領域とノズル口径の4倍程度下流側に存在する混合流領域が支配的な音源になる。これら2つの領域における激しい渦度変化が原因であり、多数の四重極子音源が集まる音源である（図4）。発生する音の強さは、吹き出し流速の8乗に比例して吹き出し口直径の3乗に比例する。周波数特性は広帯域分布を示すが、ストロハル数（「周波数」×「口径」／「吹き出し流速」）が0.4～0.5付近になだらかな最大値成分を有している。ただし、一般的な吹き出し口（空調ダクトの開口部など）では吹き出し口先端部の内周面に流れの境界層が発生しているため、それとともに先端部から渦放出が行われ、吹き出し口先端に激しい圧力変動が発生し、双極子音源が誘起される⁵⁾。渦放出にともなう流体音の特性は、音響強さが流速の6乗に比例し、周波数特性では、ストロハル数が0.8付近になだらかな極大値成分を

有する（図5）。一方、液空圧装置で用いる容積型流体機械における流体騒音の主因は過度的な噴流現象であり、上述のメカニズムや特性とは少し異なっている。

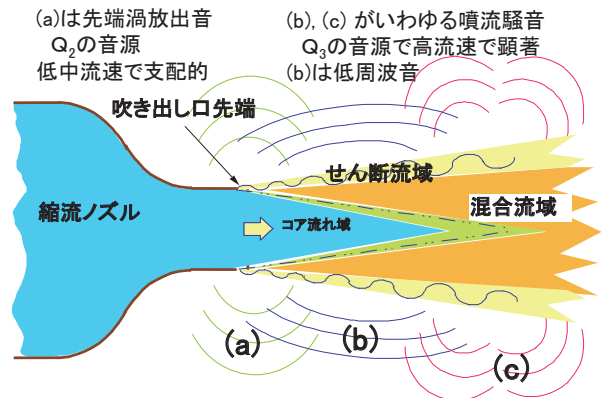


図4 ノズル吹き出し流発生音の音源構成

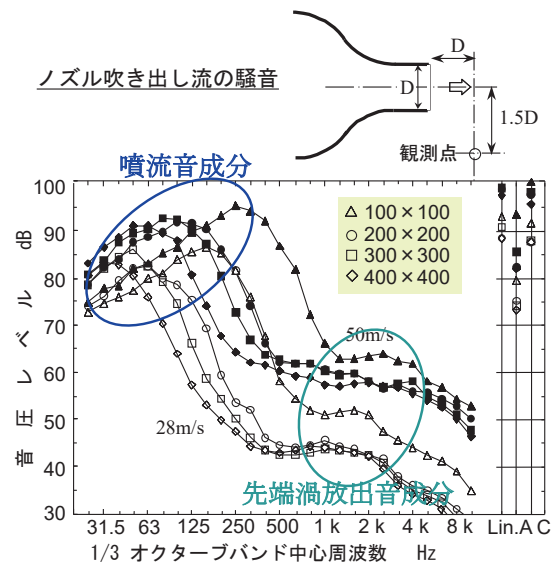


図5 噴流騒音スペクトルの観測例（口径4種類、流速2条件）

(2) 境界層騒音／流体擦過音

流体中の固体物体の表面には境界層流れが存在し、その内部では上流から下流に向かって渦度が増大している。流体の粘性力に起因する表面摩擦の効果であり、表面に逆流部が生じると、それよりも下流側では乱流境界層になる。乱流境界層内では渦度の変動が主流内よりも激しく、境界層底部の物体表面に圧力変動が誘起されて、そこを双極子音源とする流体音が発生する。発生する音の強さは主流速度の6乗に比例する。ただし、境界層内の渦度変動の周波数特性が十分に解明されていないので、発生する音についても特徴的な周波数成分の有無が不明である。

(3) はく離流れ騒音／風切り音

流体中の固体物体の表面に発生する流動現象としてははく離流れがあり、流体騒音の音源として説明されることが多い現象である。境界層の底部で生じた

逆流域が大きく広がるとはく離流れになるが、平板表面だけではなく、角がある物体、固体物体の折れ曲がりのある表面、曲面のある表面などで発生する。はく離流れ領域内の渦度の変動により物体表面に圧力変動が誘起されて、双極子音源が発生する。ストロハル数（代表寸法がはく離流れ領域の厚さ）が約0.3付近に最大値を持つ広帯域分布の周波数特性を有する。はく離流れ域が閉じる再付着するはく離流れと再付着しないはく離流れがあり、後者から発生する流体騒音を風切り音とも呼んでいる。

3.2 卓越周波数の音

(1) エオルス音 (Iolus tone)

流体音の分野では有名な音であり、流体中に置かれた柱状体から発生する音である。柱状体の後流にカルマン渦が発生することは自明であるが、渦が柱状体の側面から交互に放出される時に、その渦度の変化によって柱状体表面に圧力変動が誘起され、双極子音源にもとづく流体音が放射される。柱状体を振動しないように強固に固定しても音が発生することが実証されており、流体音の代表例として理解されるようになっている⁶⁾。カルマン渦のストロハル数（代表寸法が直径）と同じく約0.2に卓越する周波数成分を持つ音であり、流速の6乗に比例する音響強さを有している。放射音の指向性は、主流に直交する側方に強く音を放射する8の字特性を備えている。

(2) エッジトーン (Edge tone)

スリット状の開孔部から吹き出す膜噴流を、くさび状物体 (Edge) に吹きつける場合に発生する卓越音である。膜噴流の不安定性に起因して噴流がかすかに曲がってくさびの側面に触れると、接触部で圧力変動の波が誘起されて上流に伝搬してフィードバックし、膜噴流を反対側に曲げるきっかけを作る。逆側に曲がった噴流はくさびの反対側の側面に接触して、上流にフィードバックする圧力変動波を誘起する。この繰り返しのフィードバック現象が膜噴流を自励振動状態に導き、単極子音源と見なせる流体音を放射する。

(3) キャビティトーン (Cavity tone)

くぼみや溝など空洞部の開口部を流体が横切る状況で発生する、卓越周波数成分を有する自励音である。図6に示すように、開口部を横切る流体はせん断流であり、このせん断流が空洞の上流側縁部から周期的に放出される渦を移流する。空洞の下流側縁部に流されて近づいた渦は、圧縮されて変形し、下流側縁部に双極子音源としての圧力変動を誘起し、圧力変動波（音波）を放射する。この音波の一部が上流へ伝搬（フィードバック）して、上流側縁部の渦の放出に刺激を与える。渦の放出、移流、音波の誘起、

フィードバックを繰り返すことで、この1サイクルから定まる周波数の卓越音が放射される。空洞の深さが空洞開口部の長さの1/2よりも深いと、気柱共鳴（または液柱共鳴）が発生し、共鳴音が放射される。

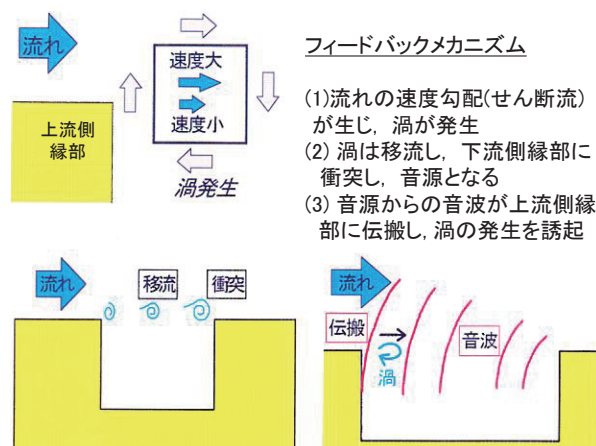


図6 キャビティトーンのメカニズム概略

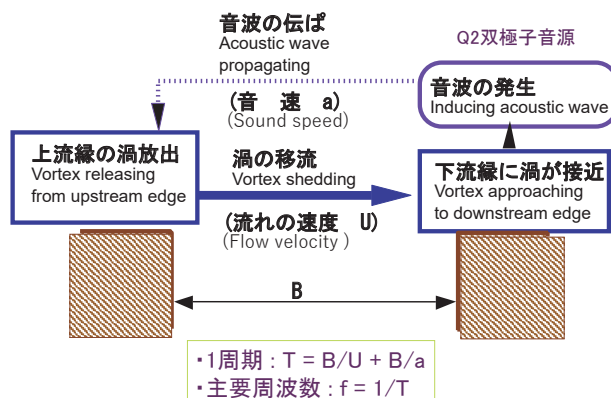


図7 流体自励振動音のフィードバック周期

(4) 流体自励振動音／自励音

流体中に複数の固体物体が存在する場合に、上流側の物体から放出された渦列（せん断流）が下流側の物体に衝突または接近すると、そこに発生した双極子音源から音波が放射され、音波が上流側へフィードバックして上流側物体の渦放出部分を刺激する。フィードバックした音波（流体力学的には擾乱と呼ぶ）による刺激で、渦放出の周期が制御され、特定の周波数の卓越成分音が周囲へ放射される。流体の自励振動にともなって発生する音であり、エッジトーンやキャビティトーンの説明で示したメカニズムの一般的な現象である（図7）。しかし、放出された渦は下流へ移流する間に拡散減衰するので、図8に示すように下流側物体までの間隔が長い（上流側物体の太さの約5倍以上）とフィードバックによる自励音は発生しない⁷⁾。フィードバックだけによる自励音の強さは代表流速の6乗に比例するが、共鳴系がともなうと代表流速の約4乗に比例する。

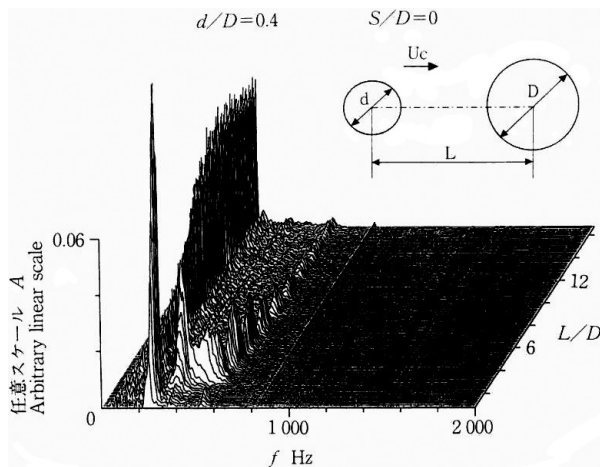


図8 流体自動振動音の発生は物体間距離に依存

(5) 干渉音

流体中固体物体の下流側にはせん断流や渦流れを含む流速が遅くなった後流 (wake) があり、下流側の物体が後流域を横切る場合に発生する音である。変化する流速分布の領域を物体が横断することで物体表面に圧力変動 (物体全体には揚力変動) が誘起され、双極子音源から騒音が放射される。等間隔で列をなす物体が通過すると、この間隔の移動時間を周期とする圧力変動が繰り返して誘起されるので、卓越成分音が発生する。上流にある物体からの後流域ではなくても、流速分布が変化する領域を固体物体が横切ると、干渉音が発生する。この干渉音は、ターボポンプおよび送風機や圧縮機などの非容積型流体機械から発生する騒音の代表的な原因である。

4. 流体騒音の静粛化

4.1 流体変動因子 (音源構造) の解明

未解明な流体騒音を静粛化する場合、対象騒音の音響的特性と流動特性を定性的に計測解析して、前章に記述したいくつかの流体音発生メカニズムのいずれに近いかを見極める。その結果にもとづいて、音源構造であろうと推測できる流動変動因子の定量的な特性解明を行い、その変動量の低減方法を試行錯誤的に検討する。この過程では、音源の原因になりうる流動の変動因子と観測音との同時測定から相関関係が解明できないと、発生メカニズムの解明と対策方法の立案にはいたらない。計測する流動変動因子の代表的なものは、圧力変動と流速変動である⁷⁾。

4.2 静粛化・低騒音化のヒント

対象にする流体音の発生メカニズムが具体的に解明 (予測) できると、流動現象を制御する手法によって流体音を静粛化・低騒音化することが可能になる。筆者の経験にもとづくと、流体騒音の静粛化のヒントをつぎのようにまとめられる。

「流体音の強さ」=「圧力変動発生強さ」×「流れの相関スケール」×「流れと音の場の伝達関数」というように、近似的に要因分析ができ、各要因を制御するための着目点が以下のように列挙される。

(1) 圧力変動発生強さの低減

- ・乱流領域の縮小、・渦の発生抑制、・渦度変動の低減、・せん断流域の緩鈍化、・高速流領域の縮小、・自励振動現象抑制、・フィードバック機構の除去、・境界層流れの制御、・流動状態の把握、・固体物体への流体加振力の抑制など。

(2) 流れの相関スケールの制御

- ・非定常流れのコヒーレンス抑制、・偏流の利用、・乱れの一様性 (二次元性) の低減、・微小乱れを利用、・渦の分断、・縦渦の利用、・渦放出部分の把握

(3) 流れと音の場の伝達関数の制御

- ・流れの状態の把握、・対象流体音の特性把握、・流れと音響場特性の関係把握、・共鳴機構の低減、・共振機構の低減、・吸音性材料の利用、・放射指向性の利用

5. 結び／流れと音のハーモニー

液空圧装置においても、配管系から発生する騒音は上述の流体現象に起因することが多い。われわれの通常の活動空間で発生している流体騒音は、大部分が双極子音源の現象から放射されている。しかし、固体物体表面に圧力変動を誘起する主因は、流体中の渦度変動である。音響現象は流体力学的現象の一部であるので、音波によって渦度変動を制御することが、今後、実現可能になると推察する。流れと音がハーモニーして、さらなる静粛化を進展する理論と技術の出現を期待する。

参考文献

- 1) 丸田芳幸：流体運動から発生する騒音，騒音制御，44巻，1号，p. 9-14 (2020)。
- 2) 吉川 茂，和田 仁：音源の流体音響学，コロナ社，(2007)。
- 3) 加藤千幸：CFDに基づくターボ機械の騒音予測，ターボ機械，40巻，1号，p. 27-35，(2012)。
- 4) M.E. Goldstein著，今市憲作，辻本良信 訳：流体音響学，共立出版，(1991)。
- 5) 丸田芳幸，御法川 学：低騒音風洞計測部暗騒音の研究 (第1報 計測部暗騒音の音源分析)，日本機械学会論文集，61巻 (B編)，590号，p. 3741-3748，(1995)。
- 6) 山田彰二，藤田 肇，丸田芳幸，榎 浩幸，白石純一：二次元モデルから発生する空力騒音の実験的研究 (第2報 円柱の傾斜角度と角柱の迎え角の発生音への影響)，日本機械学会論文集，63巻 (B編)，610号，p. 41-46，(1997)。
- 7) 望月 修，丸田芳幸：流体音工学入門，朝倉書店，(1996)。

(原稿受付：2022年3月18日)

解説

プラズマアクチュエータによる空力音制御

著者紹介



よこ やま ひろ し
横山 博史

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

2010年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。豊橋技術科学大学助教を経て、2017年同大学准教授。空力音、流体制御、数値流体力学の研究に従事。2019年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞、日本機械学会などの会員、博士（工学）。

1. はじめに

空気の流れからは渦の運動などにより空力音と呼ばれる音が発生する¹⁾。空力音は速度のおおむね5-8乗に比例して大きくなることが知られており²⁾、輸送機関の高速化においては発生音の増大が問題となる。

高速鉄道の車間部や飛行機の手荷物格納部などでは、図1に示すキャビティと呼ばれる溝部まわりの流れから生じる音（キャビティ音）が問題になる場合がある。こうした音は、流体から発生した音が再び流体に影響を及ぼすフィードバックループが形成されることで特に強く発生し³⁾、そうした音はフィードバック音と呼ばれる。キャビティ流れ以外にも、流れが音を受容する点と音の発生する点両方が存在するさまざまな流れ場で、フィードバック音は発生する^{4), 5)}。フィードバック音は単一の周波数で強いパワーをもつピーク音となり、人にとって不快であるため、特に低減手法の確立が求められてきた。

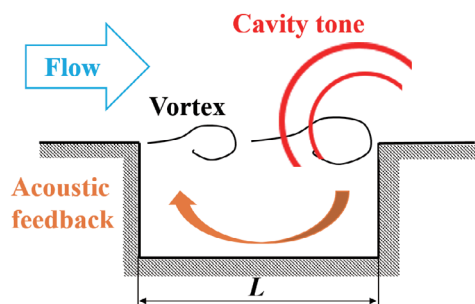


図1 キャビティ流れからの音の発生

近年図2に示すプラズマアクチュエータ⁶⁾（以下PA）と呼ばれる流体制御デバイスを用いた方法が注目されている。特に、薄い誘電体に隔てられた電極対に高周波交流高電圧を印加することで生じる誘電体バリア放電（DBD）により気流を発生させるDBD-PAの研究が活発になされている^{7, 8)}。PAは構造が単純で機械的可動部を持たないことから対象物への設置が容易であり、時間応答性が高いなどの利点がある。PAは翼などの物体周りの流れに対して、はく離を抑制し空力性能を向上させる目的で、多くの研究が行われている⁷⁾。また、円柱表面にPAを設置し、カルマン渦の渦放出に起因する発生音を低減した研究例もある⁸⁾。

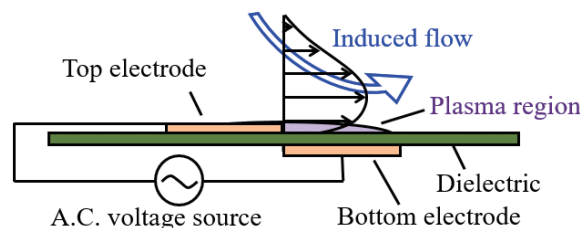


図2 プラズマアクチュエータの模式図

著者は、強いピーク性をもつフィードバック音を対象とし、プラズマアクチュエータによる制御に関する研究を行ってきた⁹⁻¹²⁾。たとえば、自動車グリルなどのような平板列周りの流れからは、音響共鳴をともし強い音が発生する場合があるが、平板前縁部近傍に設置されたPAにより、こうした共鳴音を制御できることを示した⁹⁾。さらに、自動車ボンネットなどに見られる折れ部を有する曲面端部から発生するフィードバック音を対象とした研究では、PA制御により最大30dB発生音が低減した¹⁰⁾。これらの研究では、PAは連続的に駆動されたが、翼周りの流れの制御ではPAを適切な周波数で間欠的に駆動することで高い制御効果が得られた研究例もある¹³⁾。そこで、基本的なフィードバック音の1つであるキャビティ音を対象として、PAを間欠駆動する制御を行い、制御効果を評価した¹¹⁾。本稿ではこの結果を紹介する。

2. 研究手法

2.1 対象とする流れ

図3に解析対象とするキャビティ流れおよびPA形状を示す。座標系は原点をキャビティ前縁とし、流れ方向を x 方向、キャビティ底面の鉛直方向を y 方向、スパン方向を z 方向とした。実験において強いキャビティ音が観測された条件を参考に、キャビティ長さ L は20mm、深さ D は10mmとした。主流速度 U_0 は30m/s（マッハ数0.087）とし、流入境界層の運動量厚さは $\theta=0.145$ mmとした。

PA形状および印加電圧条件はPAを連続駆動した際に効果的な発生音の低減効果が得られた条件¹²⁾を参考にし、図3に示すように、上部・下部電極対をスパン方向に間隔4mmにて配置し、印加電圧の大きさは5.4kV、駆動周波数は4.2kHzとした。PA駆動は一定周期で間欠的に行われ、間欠周波数は $f_i=10\text{--}750$ Hzの範囲で変化させて、制御効果を比較した。間欠周期中のPAをオンとする時間割合である間欠比は0.5とした結果をここでは示す。

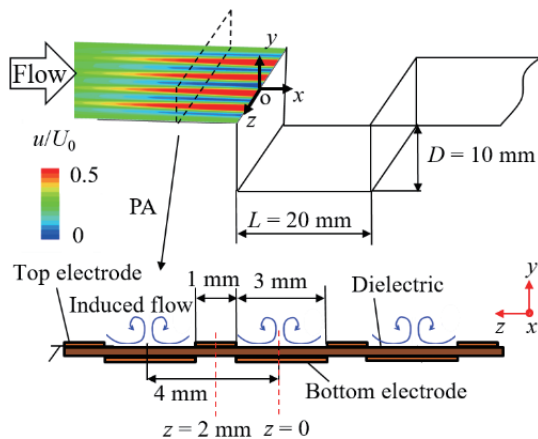


図3 キャビティ形状およびプラズマアクチュエータによる制御（図中の等高線は流れ方向速度の分布）

2.2 実験手法

実験には図4に示す吸い込み式風洞装置を用いた。PAは流れへの影響を最小限に抑えるため、キャビティ上流の壁面に埋め込むように設置した¹⁴⁾。発生音の測定は $x=135$ mm、 $y=430$ mmに設置したマイクロフォンにより、PA非制御時の条件とあわせて行った。測定のサンプリング周波数は40kHz、計測時間は30sとした。

2.3 解析手法

流れと音の連成現象を再現するために3次元圧縮性Navier-Stokes方程式、連続の式およびエネルギー方程式を支配方程式とし、PAによる運動量付加の影響を表す項を加えた。空間差分には6次精度コンパクトスキーム¹⁵⁾（境界では4次精度）、時間積分は

3次精度ルンゲ・クッタ法を用いて数値解析を行った。PAのモデル化にはSuzenら¹⁶⁾の手法を用いた。モデル化の詳細については文献12)を参照されたい。

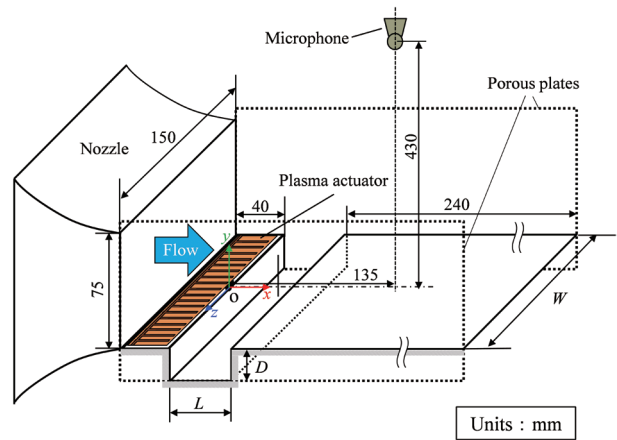


図4 風洞実験

3. 結果

3.1 制御による音圧スペクトルの変化

図5に制御時および非制御時での実験と解析で得られた音圧スペクトルを示す。ここでは効果的であった間欠周波数200Hzでの制御結果を示している。横軸は周波数を主流速度とキャビティ長さで無次元化したストローハル数 St であり、周波数解像度は $\Delta St=0.05$ としている。

図5より非制御時には $St=1.6$ において強い音が発生していることがわかる（この周波数を以降では基本周波数と呼ぶ）。一方で制御時にはこの音が低減されていることがわかる。特に実験結果においては、 $St=2.8$ 付近では、制御時の音が大きくなっているが、この周波数はPAの駆動周波数に相当し、PA近

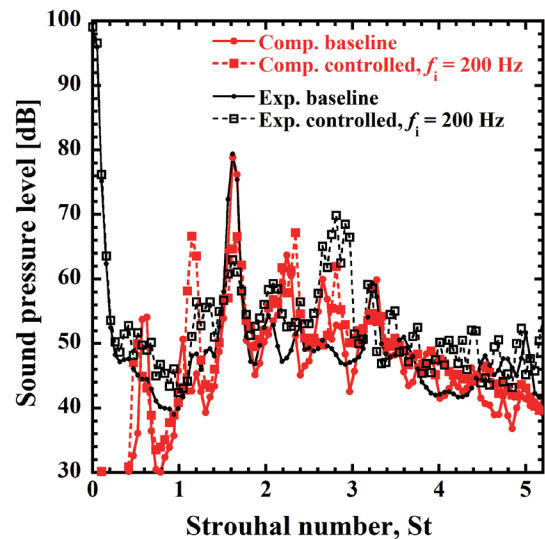


図5 制御時および非制御時の音圧スペクトル

傍での流れの変動による発生音の影響が考えられる。また、 $St < 0.5$ の低周波領域では風洞の暗騒音の影響により、実験値が大きくなる。一方で、制御時・非制御時での基本周波数の発生音の大きさは実験と解析で良く一致しており、PAによる制御効果を本解析により適切に予測できていると考えられる。

3.2 間欠周波数が制御効果に及ぼす影響

制御効果を評価するため、基本周波数における制御時の音圧レベルから非制御時の値を引いた ΔSPL を算出した。図6には制御の間欠周波数 f_i が ΔSPL に及ぼす影響を示す。実験・計算どちらの結果においても $f_i = 200\text{Hz}$ において最大の低減効果が得られ、本計算では約16dB発生音が低減された。これらより、適切な間欠周波数で制御を行うことで、効果的な発生音の低減効果が得られることが示された。

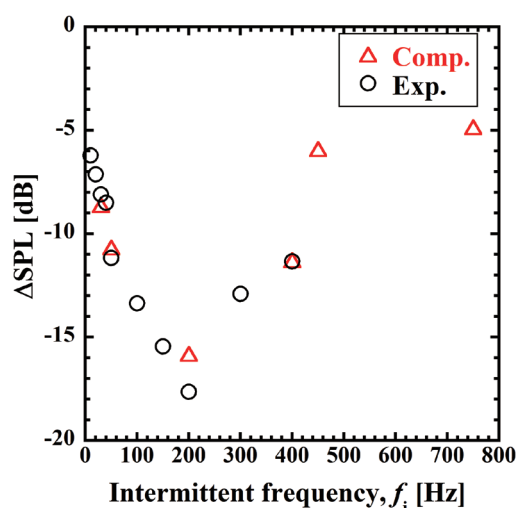


図6 間欠周波数によるキャビティ音制御効果の変化

3.3 発生音の低減機構

3.3.1 非制御時の流れ場・音場

非制御時のキャビティ流れにおける渦構造と変動圧力（各点の圧力から時間平均成分を引いた値）分布を図7に示す。渦構造としては速度勾配テンソルの第二不変量 q の等値面（図中の灰色部）により微細な渦構造を抽出し、低圧領域（図中の黒色部）によりキャビティ音の原因となる大規模渦構造を抽出している。図7より、低圧領域を持つキャビティ音の原因となる二次元的な大規模渦構造がキャビティ内に現れることがわかる。大規模渦構造がキャビティ後端部に衝突することで、膨張波が発生する（図7(b)）。また、半周期異なる時刻では圧縮波が形成される（図7(a)）。こうした周期的な音波の発生により、強い音圧変動が遠方に伝わり、図5のスペクトルに示した基本周波数での強い音として観測される。

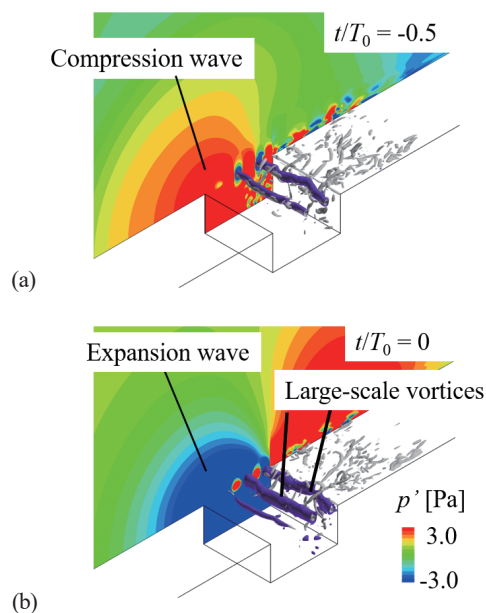


図7 非制御時の流れ場および音場の解析結果（ $t = 0$ は渦がキャビティ後端にぶつかる瞬間、 T_0 は基本周波数の周期）。(a) $t/T_0 = -0.5$ 。(b) $t/T_0 = 0$ 。

3.3.2 流れ場・音場への制御効果

図8は、間欠周波数 $f_i = 50, 200, 750\text{Hz}$ により制御した流れ場について、PAがオフからオンに切り替わる瞬間の渦構造および変動圧力の等高線を示す。図8(b)より、効果的な間欠周波数 $f_i = 200\text{Hz}$ では、三次元的な渦構造の生成が活発な流れ場となっており、スパン方向に二次元的な大規模渦構造の生成は抑制された状態であることがわかる。これは、図3に示すように、PAによる誘起流によって、スパン方向に速度分布をもった流れがキャビティへ流入するためである。

図8(a)より効果的な間欠周波数より低い間欠周波数 $f_i = 50\text{Hz}$ では、非制御時と同様の二次元的な大規模渦構造が発生していることがわかる。この間欠周波数での制御時では、PAがオンとなる時間においてはこうした大規模渦構造が抑制されるものの、PAがオフとなっている時間が十分長く、大規模渦構造が再形成したと考えられる。この結果、渦構造に起因する強い音響放射が生じ、発生音の低減効果は小さくなったと考えられる。また、図8(c)に示すように高い間欠周波数 $f_i = 750\text{Hz}$ でも、大規模渦構造が生成されていることがわかる。これは、高い間欠周波数で制御を行った場合、流入境界層の非一様性が低くなるためであることがわかっている。以上より、キャビティ流れにおいて二次元的な大規模渦構造が徐々に抑制されるよう間欠周波数を設定することが、効果的な制御において重要であることがわかった。

効果的な間欠周波数は、キャビティ流れの条件に依存することがわかっている。また、制御としてはPAの消費電力についても考慮する必要がある。こ

これらの詳細については、文献11)を参照されたい。

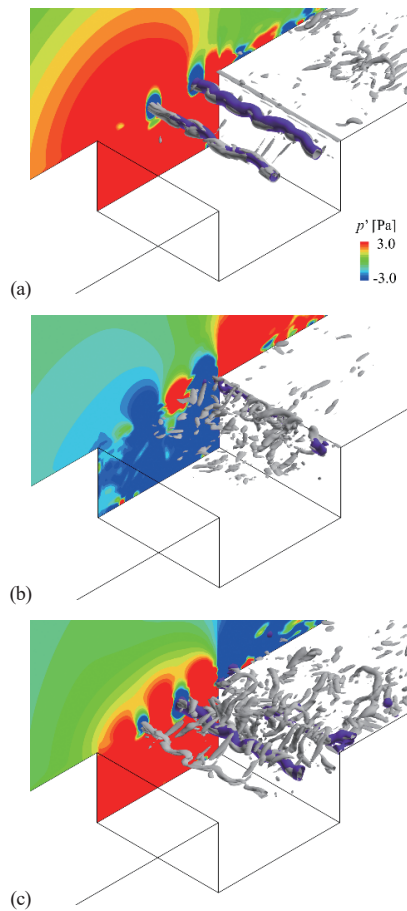


図8 制御時の流れ場および音場の解析結果. (a) $f_1=50\text{Hz}$. (b) $f_1=200\text{Hz}$. (c) $f_1=750\text{Hz}$.

4. おわりに

本稿ではプラズマアクチュエータによる空力音の制御の一例として、キャビティ音の制御を紹介した。特に間欠制御の間欠周波数が制御効果に及ぼす影響について、実験結果および解析結果より議論した。プラズマアクチュエータは、自身から発生する音の問題もあるが、設置場所や電極形状が比較的自由に決められる利点もあるため、さまざまな流れ場の制御の基礎研究に適用可能と期待される。また、現在のPAの誘起流はおおむね数m/sと比較的低速ではあるものの、適切な設置場所、電極形状および駆動条件で制御を行うことで、数十m/sの比較的高い主流速度の流れ場や発生音に対し、高い制御効果を得ることが可能であることが示された。プラズマアクチュエータに関しては、現在活発に研究が進められており、今後の発展が期待される。

謝辞

本研究はJSPS科研費17K06153の助成を受けて

行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 望月修, 丸田芳幸: 流体音工学入門, 朝倉書店 (1996)
- 2) 梶昭次郎: 流体から発生する音, 騒音制御, Vol. 14, No. 5, p. 219-220 (1990)
- 3) 横山博史, 加藤千幸: 乱流境界層内のキャビティ音発生におけるフィードバック機構 (第1報, 流体力学的振動), 日本機械学会論文集B編, Vol. 75, No. 760, p. 2369-2378 (2009)
- 4) 横山博史, 北宮克哉, 飯田明由: 一様流中におかれた平板列からの音響共鳴を伴う空力音の発生, 日本機械学会論文集B編, Vol. 79, No. 804, p. 1419-1433 (2013)
- 5) 横山博史, 篠原大志, 中島崇宏, 宮澤真史, 飯田明由: 層流境界層中におかれた折れ部を上流に有する曲面端部から生じるフィードバック音の直接計算, 日本機械学会論文集B編, Vol. 81, No. 826, 15-00148 (2015)
- 6) Post, M.L., Corke T.C.: Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators, *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 11, p. 2177-2184 (2004)
- 7) Jukes, T., Segawa, T., Walker, S., Furutani, H., Iki, N., Takekawa, S.: Active Separation Control over a NACA0024 by DBD plasma Actuator and FBG Sensor, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 7, p. 39-52 (2012)
- 8) Thomas, O., Kozlov, A., Corke, T.C.: Plasma Actuator for Cylinder Flow Control and Noise Reduction, *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 8, p. 1921-1931 (2008)
- 9) 楠本誠, 横山博史, Angland, D., 飯田明由: プラズマアクチュエータによる平板列から発生する空力騒音の制御, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 847, p. 16-00364 (2017)
- 10) 宮本孟宜, 横山博史, 飯田明由: 折れ部を有する曲面の端部から発生するフィードバック音のプラズマアクチュエータを用いた制御, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 861, 18-00121 (2018)
- 11) Yokoyama, H., Otsuka, K., Otake, K., Nishikawara, M., Yanada, H.: Control of Cavity Flow with Acoustic Radiation by an Intermittently Driven Plasma Actuator, *Physics of Fluids*, Vol. 32, No. 10, 106104 (2020)
- 12) Yokoyama, H., Tanimoto, I., Iida, A.: Experimental tests and aeroacoustic simulations of the control of cavity tone by plasma actuators, *Applied Sciences*, Vol. 7, 790 (2017)
- 13) Aono, H., Kawai, S., Nonomura, T., Sato, M., Fujii, K., Okada, K.: Plasma-actuator burst-mode frequency effects on leading-edge flow-separation control at Reynolds number 2.6×10^5 , *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 11, p. 3789-3806 (2017)
- 14) Inasawa, A., Ninomiya, C., Asai, M.: Suppression of tonal trailing-edge noise from an airfoil using a plasma actuator, *AIAA Journal*, Vol. 51, No. 7, p. 1695-1702 (2013)
- 15) Lele, S.K.: Compact finite difference schemes with spectral-like resolution, *Journal of Computational Physics*, Vol. 103, No. 1, p. 16-42 (1992)
- 16) Suzen, Y.B., Huang, P.G., Jacob, J.D., Ashpis, D.E.: Numerical Simulation of Plasma Based Flow Control Applications, *Proceedings of 35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2005-4633 (2005)

(原稿受付: 2022年3月9日)

解説

ファン騒音の音質評価指標と改善について

著者紹介

なか の たけ ふみ
中野武史キャテック株式会社
〒110-0016 東京都台東区台東4-24-7
E-mail: takefumi_nakano@catec.co.jp

2004年法政大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年キャテック株式会社入社。音響振動計測ソフトウェア開発業務に従事。2017年法政大学大学院理工学研究科博士後期課程入学。現在に至る。修士（工学）。

みのりかわ がく
御法川 学法政大学
〒184-0002 東京都小金井市梶野町3-7-2
E-mail: minori@hosei.ac.jp

1992年法政大学大学院修了後、株式会社荏原総合研究所勤務を経て、1999年より法政大学、教授（現職）。これまで一貫して流体騒音、ファン性能向上、静音化、スモールファン測定規格の研究に従事。2008年より航空分野の研究を開始。環境計量士（騒音・振動）。

1. はじめに

現代生活において、パソコンやプロジェクタなどの情報機器は必需である。これらの機器には、一般的に安価で効率的な冷却用ファンが搭載されている。ファンの静音化が進み、A特性音圧レベル自体は小さく抑えられているが、静粛な住環境においては、その音でさえ耳障りに感じられる場合がある。また、近年、空撮用や農業用のドローンにもファンが用いられ、さらには、ドローン技術を応用した『空飛ぶクルマ』も近い将来身近なものとなり、人や物を運ぶために必要な揚力・推力を確保しつつ、静音化を図ることは難題であり、トレードオフの関係にあるともいえる。これらの課題に対し、ファン騒音の特徴的な音質であるトーン性に着目し、音質評価指標の確立に向けた現在までの取り組みについて概説する。

2. ファン騒音とトーン性

ファン騒音が耳障りとなる主要因は、騒音に含まれるトーン成分であり、ファンやモーターの回転などにより生じる回転騒音は羽根車の通過にともなう

周期的な圧力変動によって生じ、軸流ファンでは動翼枚数 z と回転数 n の積（翼通過周波数）およびその倍数において卓越する成分を有し、オーバーオールA特性音圧レベルへの寄与度が高いため、非常に耳障りな音となる¹⁾。なお、ファン騒音においては、オーバーオールA特性音圧レベルが同一であっても、トーン性の高い騒音はより耳障りであることが知られている。トーン成分が聴覚に与える影響については、ECMA-74²⁾などでは、Tone-to-Noise Ratio（以下、TNR）およびProminence Ratio（以下、PR）という評価指標（単位：dB）が定義されている。

3. トーン性評価指標

3.1 既存規格のトーン性評価指標

ECMA-74において、TNR (ΔL_T) は、ひとつの臨界帯域内のトーン成分のパワー (W_t) とそれ以外のパワー (W_n) に対する比を常用対数であらわし、10倍したものと定義されている（図1）²⁾。また、離散周波数音の周波数が1 kHz以上でTNRが8 dB以上のとき、そのトーン成分を“Prominent discrete tone（顕著な離散周波数音）”と判定する。ここで、複数のトーン成分が同一または隣接する臨界帯域に存在する場合、TNRが極端な数値を示す場合があることに注意が必要である。

同様に、PR (ΔL_p) は、トーン成分を含む臨界帯域に含まれるパワー (W_M) とその両隣の臨界帯域に含まれるパワー (W_L および W_U) の平均との比を常用対数であらわし、10倍したものと定義されている（図2）。また、離散周波数音の周波数が1 kHz以上でPR値が9 dB以上のとき、そのトーン成分を顕著な離散周波数音と判定する。PRはTNRにおいて臨界帯域幅の中に別の顕著なピークがあった場合、ピーク近傍のレベルが臨界帯域幅より大きい場合あるいは小さい場合に過小あるいは過大評価してしまうことに対応する手法である²⁾。

$$\Delta L_T = 10 \log_{10} \left(\frac{W_t}{W_n} \right)$$

ΔL_T : TNR according to ECMA-74 (dB)

W_t : power of tone (Pa²)

W_n : power of other components in critical bands (Pa^2)

$$\Delta L_P = 10 \log_{10} \left[\frac{W_M}{(W_L + W_U)/2} \right]$$

ΔL_P : PR according to ECMA-74 (dB)

W_M : power of middle critical band (Pa^2)

W_L : power of lower critical band (Pa^2)

W_U : power of upper critical band (Pa^2)

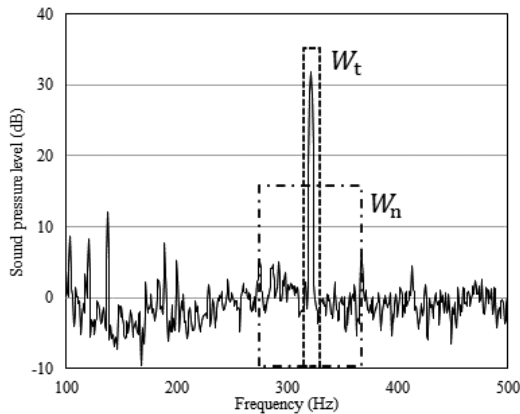


図1 TNR値の算出概略

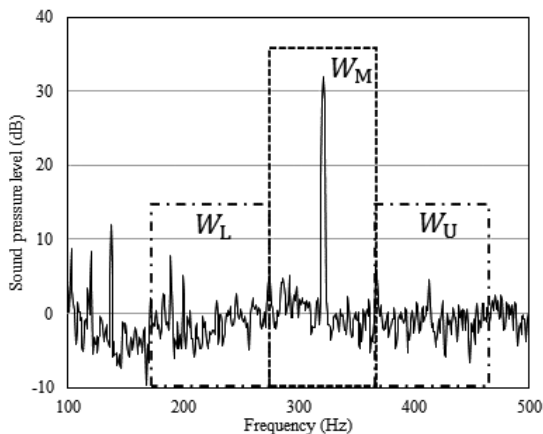


図2 PR値の算出概略

3.2 提案するトーン性評価指標

単一ピークを対象とする評価指標であるTNRおよびPRは、品質管理上、顕著な離散周波数音と見なされないトーン成分については評価対象とせず、また、複数のトーン成分が混在する騒音を総合的に評価する指標ではない。

そこで、著者らはこの指標のdB（デシベル）和をとるTotal Tone-to-Noise Ratio（以下、T-TNR）およびTotal Prominence Ratio（以下、T-PR）を提案し、騒音全体のトーン性評価指標としての確立を進めている。

騒音中の複数のトーン成分について、TNRおよびPRの算出方法により個々のトーン成分のレベル（ ΔL_{Ti} および ΔL_{Pi} ）を求め、それらの総和を新たな

評価指標 $\langle L_T \rangle$ および $\langle L_P \rangle$ とし、次式のように定義する（図3、4）。また、T-TNRおよびT-PRの耳障り感に対するしきい値レベルをそれぞれ $\langle L_T \rangle_0$ および $\langle L_P \rangle_0$ と呼ぶ。

$$\langle L_T \rangle = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\Delta L_{Ti}/10} \right)$$

$$\langle L_P \rangle = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\Delta L_{Pi}/10} \right)$$

$\langle L_T \rangle$: T-TNR (dB)

ΔL_{Ti} : TNR for i -th tonal component (dB)

$\langle L_P \rangle$: T-PR (dB)

ΔL_{Pi} : PR for i -th tonal component (dB)

n : number of tonal components of the noise spectrum of interest

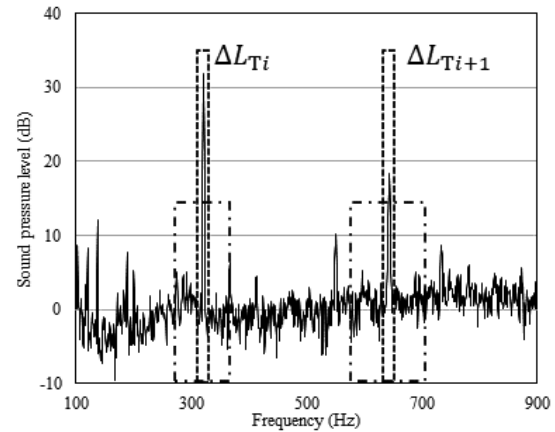


図3 T-TNR値の算出概略

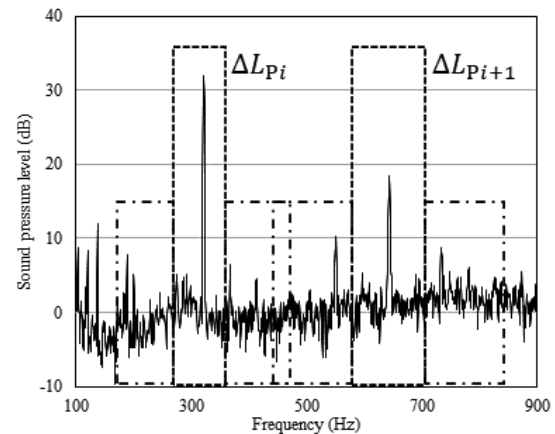


図4 T-PR値の算出概略

4. 現在までの取り組み

4.1 合成音を用いた官能試験の実施^{③)}

トーン成分と広帯域成分のバランスを変化させた合成音、つまりホワイトノイズとサイン波の合成音を試験音として用いた。試験音について、詳述する。

試験音パターン1：等レベルのトーン成分を周波

数軸上に等間隔（600, 1,200, 1,800, 2,400, 3,000Hz）に設定し、すべてのトーン成分を1から5倍に変化させた。

試験音パターン2：Bark尺度で2以上離れるようにトーン成分（720, 1,440, 2,880, 5,760Hz）を設定し、すべてのピーク成分が等しい音を基準とし、1次のピーク成分を2から5倍に変化させた。

試験音パターン3：試験音パターン1と同様にトーン成分を変化させ、トーン成分が高くなるのにもともないラウドネスを低下させるように全体の音量を調整した。

表1 試験音パターン①

試験音パターン	試験音パターン調整方法
1	トーン成分とノイズ成分の割合を調整し、全ての試験音のラウドネスが等しくなるように調整。
2	各トーン成分のレベルを調整し、全ての試験音のラウドネスが等しくなるように調整。
3	トーン成分の上昇にともない、ラウドネスが減少するようにトーン成分とノイズ成分の割合を調整。

試験音パターンごとの試験音間の感覚的な相対距離を得るために、一対比較法による官能試験を実施した。試験においては、「耳障りー耳障りでない」の形容詞を評価軸に用いた。一組の音からランダムに選んだ二つの音を順番に聞かせ、最初の音（基準音）に対する二番目の音（比較音）の評価を5段階で評価させた。また、提示順序の影響を調べるために、すべての組み合わせを提示した。一対比較法によって得られた主観的な順位と音質評価指標の相関分析を行った。

耳障り感とT-TNRおよびT-PRは非常に高い相関があることがわかった。これより、トーン成分を有するファン騒音を評価する場合、これらの評価指標を用いることは有効であると知見を得られた。しかしながら、耳障り感の軸は、試験音パターンごとの相対的なものと考えられ、しきい値レベルを決定するという課題が残された。

4.2 合成音を用いた官能試験の実施②⁴⁾

先行研究にて残された課題である『耳障りに関するしきい値レベルの決定』について、検討を行った。

単一周波数のトーン性すなわちTNRおよびPRのしきい値レベルおよびT-TNRおよびT-PRのしきい値レベルを求めるため、「調整法」による官能試験を

実施した。

試験音のトーン成分は、先行研究の試験音パターン2（表1）で使用した周波数（720, 1,440, 2,880, 5,760Hz）とし、広帯域成分はホワイトノイズとした。

まず、各周波数単体の音を再生し、周波数ごとの許容範囲を推定した。つぎに、その結果をもとに合成音を作成・再生し、被験者にゲインの調整をさせることで顕著なトーン性（耳障り感）のしきい値レベルを評価させた。なお、トーン成分として設定した周波数の合成音を調整する場合はすべての周波数のゲインの変化値は同期させた。また、系列誤差をなくするため、上昇系列と下降系列になるよう提示音の初期ゲインを調整した。

TNRおよびPRの単一のトーン成分と広帯域成分の合成音に対するしきい値レベルを表2と表3に示す。これらの結果から、2kHz以下の離散周波数音については、規格基準レベルより高く（反応が鈍く）、2kHz以上の離散周波数音については、規格基準レベルより低く（反応が高く）なっていることが確認された。一方で、個々のしきい値レベルの許容範囲は、低周波域では広く、高周波域では狭いことも確認された。

つぎに、複数のトーン成分と広帯域成分の合成音

表2 各周波数におけるTNRのしきい値レベル

周波数 (Hz)	TNR (dB)	標準偏差 (dB)
720	21.5	6.9
1,440	11.5	4.7
2,880	5.0	3.2
5,760	0.5	2.7

表3 各周波数におけるPRのしきい値レベル

周波数 (Hz)	PR (dB)	標準偏差 (dB)
720	21.6	6.8
1,440	11.8	4.5
2,880	6.2	2.1
5,760	3.4	1.7

表4 耳障り感に対するしきい値レベル

	閾値レベル (dB)	標準偏差 (dB)
$\langle L_T \rangle_0$	17.8	6.3
$\langle L_P \rangle_0$	18.2	6.0

に対する耳障り感に対するしきい値レベル $\langle L_T \rangle_0$ および $\langle L_P \rangle_0$ を表 4 に示す。得られたしきい値レベルに対し、標準偏差が大きい結果となった。つまり、得られた値をそのまま実際のファン騒音のしきい値レベルとして適用できない可能性が高いと考えられた。そこで、実際のファン騒音を収録し、それをベースにしきい値レベルを検討する課題が残された。

4.3 ファン騒音を用いた官能試験の実施⁵⁾

実際のファン騒音を用いた官能試験の刺激音を作成するため、形状、仕様の異なる 7 種類のファン（小型軸流ファン）音源を準備した。それらの内訳は、羽根直径 80mm、定格回転数 $2,000 \text{ min}^{-1}$ および 7 枚羽根を備えたファンが 4 種類、羽根直径の異なるファン（羽根直径 120mm の Fan E）が 1 種類、定格回転数の異なるファン（定格回転数 $2,800 \text{ min}^{-1}$ の Fan F と Fan G）が 2 種類である。供試ファン緒元を表 5 に示す。

$\langle L_T \rangle$ と $\langle L_P \rangle$ に加え、代表的な評価指標を表 6 に示す。表 6 で扱う評価指標は、T-TNR ($\langle L_T \rangle$)、T-PR ($\langle L_P \rangle$)、ラウドネス (Loudness, N)、シャープネス (Sharpness, S) およびオーバーオールレベ

表 5 供試ファン緒元

ファン名称	羽根直径 (mm)	回転数 (min^{-1})	羽根枚数 (枚)
Fan A	80	2,000	7
Fan B	80	2,000	7
Fan C	80	2,000	7
Fan D	80	2,000	7
Fan E	120	2,000	7
Fan F	80	2,800	7
Fan G	80	2,800	7

表 6 供試ファン特性

ファン名称	$\langle L_T \rangle$ (dB)	$\langle L_P \rangle$ (dB)	N (sone)	S (acum)	OA (dB)
Fan A	5.4	9.5	1.2	1.5	30.9
Fan B	9.6	11.6	0.7	1.2	27.0
Fan C	3.1	9.6	0.3	1.5	22.5
Fan D	4.3	8.7	0.9	1.4	29.0
Fan E	12.0	13.9	2.9	1.4	38.8
Fan F	19.4	16.5	2.1	1.4	36.0
Fan G	6.5	12.8	1.3	1.4	31.0
標準偏差	5.7	2.8	0.9	0.1	5.4
変動係数	0.66	0.23	0.65	0.08	0.18

ル (Overall Level, OA) である。ここで、T-TNR と T-PR の算出においては、回転騒音に起因する 7 次までのトーン成分、すなわち Fan A から Fan E は約 1,633Hz まで、Fan F と Fan G は約 2,286Hz までの 7 つのトーン成分のみを考慮した。

ファン音源から、まず回転騒音に起因する 7 次までの各トーン成分のレベルを減衰させ、さらに純音の聴覚しきい値を考慮し調整した音源を官能試験の基準音源とした。官能試験では、この基準音源に 7 次までのトーン成分を加算し、被験者にはひとつのボリュームコントローラを操作させることで、7 次までのトーン成分のレベルを一斉に調整させることとした。なお、ボリュームコントローラによる各トーン成分のレベルの変化率は、定格回転数駆動時の各トーン成分のレベルの割合を基準とした。ここで、「Fan A」の基準音源を被験者が調整した音源を「Sound A」とし、その他のファンの基準音源および調整後の音源も同様のルールに従って扱うこととした。

官能試験方法は、先行研究と同様に「調整法」を採用した。まず、被験者は基準音源のみを聴き、そのレベルを調整してから、耳障りに感じる基準音源のしきい値レベルを決定する。つぎに、被験者は 7 次までのトーン成分を基準音源に加えた音を聴き、ボリュームコントローラを用いてそれらのレベルを調整し、耳障りに感じる音のしきい値レベルを決定する。この試験を 7 つの基準音源すべてに対して実施する。なお、被験者に提示される基準音源の順序はランダムであり、系統的誤差の影響を考慮して、昇順と降順の両方を実施した。

試験音ごとのしきい値レベルと評価指標ごとの標準偏差および変動係数を表 7 に示し、各評価指標間の相関係数を表 8 に示す。また、すべての被験者の官能試験結果から得られた各評価指標のしきい値レ

表 7 各試験音のしきい値レベル

試験音	$\langle L_T \rangle_0$ (dB)	$\langle L_P \rangle_0$ (dB)	N_0 (sone)	S_0 (acum)	OA ₀ (dB)
Sound A	11.8	12.7	1.9	1.2	36.0
Sound B	16.1	19.2	1.9	0.9	36.9
Sound C	15.5	14.5	2.0	1.1	35.5
Sound D	9.7	11.7	1.3	1.2	32.0
Sound E	17.9	20.8	1.7	1.1	34.8
Sound F	16.3	22.4	1.6	1.1	34.6
Sound G	12.9	14.3	1.9	1.2	35.8
標準偏差	2.9	4.2	0.2	0.1	1.5
変動係数	0.20	0.25	0.14	0.09	0.04

表8 各評価指標間の相関係数

	$\langle L_T \rangle_0$	$\langle L_P \rangle_0$	N_0	S_0	OA_0
$\langle L_T \rangle_0$	—	0.88	0.24	-0.59	0.47
$\langle L_P \rangle_0$	0.88	—	-0.14	-0.52	0.26
N_0	0.24	-0.14	—	-0.04	0.79
S_0	-0.59	-0.52	-0.04	—	-0.47
OA_0	0.47	0.26	0.79	-0.47	—

表9 各評価指標のしきい値レベル

	$\langle L_T \rangle_0$ (dB)	$\langle L_P \rangle_0$ (dB)	N_0 (sone)	S_0 (acum)	OA_0 (dB)
TL	14.3	16.0	1.7	1.1	35.3

ベルを表9に示す。なお、しきい値レベルが正規分布に従う結果ではなかったため、しきい値レベルは中央値を代表値として採用した。ここで、以下の表では、ラウドネス、シャープネスおよびオーバーオールレベルのしきい値レベルを N_0 、 S_0 および OA_0 と表記する。

さて、表6に示す供試ファン特性において、変動係数が小さな評価指標は、音質の差異が検出しがたいことを意味するが、表7に示す試験音ごとのしきい値レベルの変動係数が小さいということは、被験者間のばらつきが小さく評価指標として有効であることを示す。両者を踏まえると、評価指標の変動係数が大きく、被験者のしきい値レベルの変動係数が小さいものをトーン性に関するしきい値レベルの評価指標として採用すべきと考える。

たとえば、シャープネスやオーバーオールレベルの場合は被験者のしきい値レベルのばらつきは小さいものの、評価指標の変動係数が小さく、音の差異を定量化しにくいと、トーン性に関する評価指標として採用することはむずかしいと考える。これに対して、ラウドネスやT-TNRの場合、それらの変動係数から被験者のしきい値レベルのばらつきはファン音源のばらつきより小さく抑えられ、ファン音源の変動係数が大きいことから音の差異を検出できると考えられる。つまり、ラウドネスおよびT-TNRは耳障り感の評価指標として有効であると考えられる。一方、T-PRについては、被験者のしきい値レベルの変動係数と評価指標の変動係数にほぼ差異がない。しかし、両者のばらつきには重複している範囲が存在していることから、しきい値レベルを適切に設定することができれば、有効な耳障り感の評価指標になり得ると考えられる。ここで、『4.1合成音を用い

た官能試験の実施①³⁾』の結果において、ラウドネスの値が同じ音源であってもT-TNRおよびT-PRの違いにより、耳障り感に差異が生じることが確認されており、提案する評価指標のしきい値レベル $\langle L_T \rangle_0$ および $\langle L_P \rangle_0$ は、ラウドネスのしきい値レベルに対して優位性があると考えられる。

表8から、 $\langle L_T \rangle_0$ または $\langle L_P \rangle_0$ とシャープネスには負の相関が確認された。一方、 $\langle L_T \rangle_0$ または $\langle L_P \rangle_0$ とラウドネスにはほぼ相関がなく、 $\langle L_T \rangle_0$ とオーバーオールレベルについては正の相関があり、 $\langle L_P \rangle_0$ とオーバーオールレベルについては低い相関が認められた。また、ラウドネスとシャープネスについては、ほぼ相関がない結果であった。つまり、耳障り感の評価指標として $\langle L_T \rangle_0$ と $\langle L_P \rangle_0$ を採用した場合、ファンの騒音に含まれるトーン成分のレベル（オーバーオールレベル）および周波数構成（シャープネス）の差異によりしきい値レベルが変動する可能性が残されているが、音の大きさ（ラウドネス）の差異がしきい値レベルに影響を与える可能性は低いと考えられる。このように音の大きさに差異がない場合でも耳障り感を評価でき、また音の大きさの影響を受けがたいという点において、 $\langle L_T \rangle_0$ と $\langle L_P \rangle_0$ は有効であると考えられた。

5. 今後の課題と取り組み

5.1 ECMA TC26の状況⁶⁾

ご存じの方もおられると思うが、ECMA TC26とは、ECMA-74を管理（改訂）する技術委員会である。ここでは、この技術委員会の最近の動向について概説する。

2021年6月にECMA-74第18版が発行された。この改訂では、コンピュータ機器の動作条件の改訂、ラックマウント型ユニットとラックエンクロージャ型システムのオペレータ位置の音圧レベルの新設、ECMA-418を指す付属書Hの新設が行われた。

このECMA-418は、2020年12月に第1版が発行され、part 1とpart 2からなり、心理音響の観点から音質を評価するのにフォーカスした規格である。part 1は、tone-to-noise ratioおよびprominence ratioを用いて騒音に顕著な離散周波数が含まれているか否かの判定方法が記載されており、これは従来のECMA-74 Annex Dが独立した形となっている。一方、part 2は、聴覚モデルと聴覚モデルに依存する心理音響メトリクスについて記載されており、情報機器や通信機器からの発生音に含まれる音色や粗さを表すために特定ラウドネスを用いる心理音響モデルである。part 2のメトリクスの算出方法について、ご興味のある方は参考文献を参照されたし。なお、ECMA-418

の改訂版は、2022年6月に正式版に切り替わる予定である。

5.2 今後の取り組み

調整法により設定したしきい値レベル $\langle L_T \rangle_0$ と $\langle L_P \rangle_0$ は、ファン騒音の耳障り感に対する評価を行うことが可能であり、耳障り感の主要な指標であるラウドネスと同等の評価結果になりうると考えられる。さらに、ラウドネスが同じ場合でも耳障り感には差異は生じ、しきい値レベル $\langle L_T \rangle_0$ と $\langle L_P \rangle_0$ を適切に設定することで、耳障りな音を顕在化できる可能性を有すると考える。

今後、ファン単体の評価だけでなく、ファンが組込まれた製品に対応できる汎用的なしきい値レベル設定方法や数値同定が必要であり、特に冒頭でも紹介したドローンや空飛ぶクルマに代表されるような、これまでにない新たな製品に対しても積極的に取り組む必要があるとも考えている。

参考文献

1) 鈴木・西村・雉本・御法川, 機械音響工学, (1993), 127, コロナ社.
2) Standard ECMA-74 12th Edition/December 2012 “Measurement of Airborne Noise emitted by Information Technology and Telecommunications Equipment”, (2012), Annex D.
3) 中野武史, 御法川学: 小型ファンから発生する騒音のトーン性評価指標に関する研究, 騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, p. 47-50, (2017)
4) Takefumi Nakano, Gaku Minorikawa: STUDY ON EVALUATION METHOD OF THE TONAL NOISE COMPONENTS FOR SMALL FAN, ICSV25, (2018).
5) 中野武史, 御法川学: スモールファンのトーン性評価手法に関する研究, ターボ機械, 第48巻, 第3号, p. 166-175, (2020)
6) ECMA TC26ホームページ
<https://www.ecma-international.org/technical-committees/tc26/>

(原稿受付: 2022年4月4日)

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 (6月10日現在)	826	8	93	127
差引き増減	+1	±0	+1	±0

正会員の内訳 名誉員17名・シニア員68名・ジュニア員78名・その他正会員663名

〈新入会員〉

正会員

久保 成弘 (株式会社伊東商会)
松本 瞬平 (SMC株式会社)
淡路 彩乃 (株式会社SUBARU)

齊藤 悠 (株式会社コガネイ)
水上 和彦 (SMC株式会社)
坂本 裕之 (日本ペイントコーポレートソリューションズ株式会社)

学生会員

太田樹里愛 (福岡工業大学)
三橋 雄貴 (福岡工業大学)
原田 元気 (福岡工業大学)

峯口 諒 (福岡工業大学)
高野 倫之 (福岡工業大学)

解説

水圧駆動システムにおける キャビテーション現象の評価と対策

著者紹介



いい お しょういちろう
飯尾 昭一郎

信州大学工学部機械システム工学科
〒380-8553 長野市若里 4-17-1
E-mail: shouio@shinshu-u.ac.jp

2004年宮崎大学大学院博士課程修了，同年信州大学工学部助手，2011年同大学准教授。小水力発電，水圧システムの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会，ターボ機械協会，日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

作動流体に水道水を用いる水圧駆動システム（Aqua Drive System: ADS）は，作動流体の漏れによる汚染がなく，クリーンな環境を構築しやすい。一方で，水は作動油と比較して潤滑性に乏しく，また，飽和蒸気圧が高いためにキャビテーションによる振動騒音や壊食が発生する点に留意が必要である。

ADSの性能を左右する重要な要素のひとつにサーボ弁がある。キャビテーションによる振動騒音，圧力－流量特性，壊食等は作動流体の種類のみならず弁の絞り部形状等の影響も受ける。筆者らは実機スプール弁の絞り部形状を模したモデルを対象として，キャビテーションの発生形態と振動騒音特性，圧力－流量特性との関係性を評価し¹⁾，本誌でも概要を述べさせていただいている²⁾。これらの従来研究では，制御開口部の幅の違いに着目し，キャビテーションの発生形態，騒音，圧力－流量特性を示しており，制御開口部の面積が開口幅に比例する条件での比較であった。そこで，制御開口部面積を一定とし，縦横比のみが異なる矩形オリフィスを用いて評価し，開口部の縦横比がキャビテーションの発生形態等に与える影響を調べた。本稿ではその概要を述べる。

2. 試験回路と測定部の概要

図1に試験回路を示す。水圧ポンプユニットから出た作動水は圧力脈動抑制用アキュムレータ，コリオリ式質量流量計を通り，矩形オリフィスを有する

試験部で噴流を形成し，その後，下流のタンク，チラーの熱交換器を通過してポンプユニットのタンクへと戻る。水温は22.3～22.5℃，溶存酸素濃度は6.45～7.06ppmである。矩形オリフィスの上流圧 P_1 と下流圧 P_2 はそれぞれ上流と下流のリリーフ弁で調節する。キャビテーション現象はハロゲンランプあるいはレーザシート光を照明として高速度カメラで観察した。フレームレートは30kfpsである。

図2に測定部の概略を示す。透明アクリル製で内部空間に発生するキャビテーション現象を直接可視化できる。下部の金属板の中央にオリフィスを固定している。水は測定部下部から流入し，噴出口から鉛直上方へ噴出する。図3に使用したオリフィスの写真と断面図を示す。一つは $\phi 1.46\text{mm}$ の円形噴出口であり，それ以外は図のとおり4条件の縦横比（ AR ）とした。いずれも開口部面積は 1.69mm^2 であり，実機サーボ弁の開口部面積と同等である。

3. キャビテーションの可視化

図4にオリフィスから噴出するキャビテーション

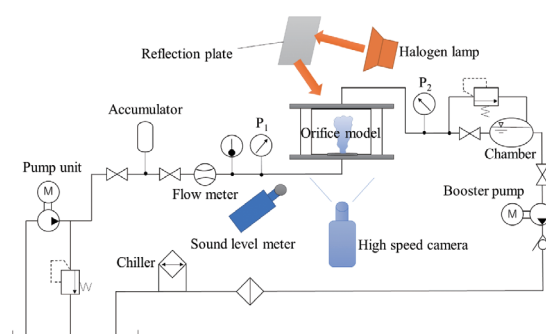


図1 試験回路

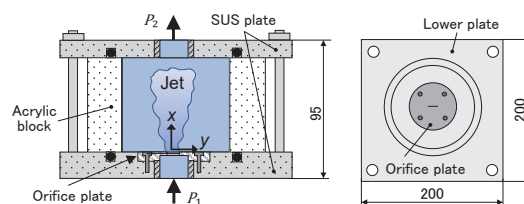


図2 測定部概要

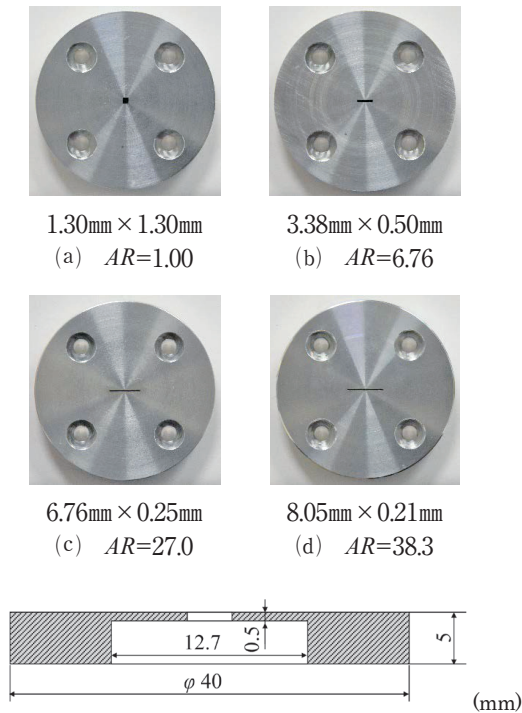


図3 オリフィスの画像と断面形状

を側方から撮影した瞬間画像を示す。画像の横方向が噴出口長辺方向である。画像中の目盛りは流れ方向距離を噴出口等価直径で除した無次元距離である。いずれのオリフィスにおいても噴出口から上方にキャビテーション噴流が伸びており、キャビテーションの発生領域は、噴出直後は明瞭であるが、下流になると断続的となり徐々に淡くなっている。目視ではあるが、キャビテーション噴流の長さは縦横比が大きくなるほど短いことが認められる。

図5にキャビテーション噴流をレーザシート光で輪切りにして、上方から撮影した画像を示す。約0.07秒間(2000枚)の画像を平均化したものである。図中の白線の長さは3.0mmである。(a)に示す $\phi 1.46\text{mm}$ の円形噴流に着目する。画像中の明部はキャビテーションの気泡によりレーザ光が散乱している部分である。 $x/D_e \approx 0.00$ の位置ではキャビテーションの発生領域が円形であることがわかる。この領域の直径は噴出口直径と同程度である。また、その内部は暗くなっておりキャビテーションの発生は認められない。このように、噴流のせん断層でキャビテーションが発生していることが確認された。明部の輝度は下流になるほど低くなるが、 $x/D_e \leq 4.11$ の位置までは円形である様子がわかる。これより下流ではキャビテーション領域は不明瞭となり、消失する。つぎに、 $AR=1.00$ の正方形噴流を見ると、 $x/D_e \approx 0.00$ の位置ではいびつな菱形のキャビテーション領域が確認できる。図中の破線が噴出口を示しており、キャビテーションの発生領域の形はそれ

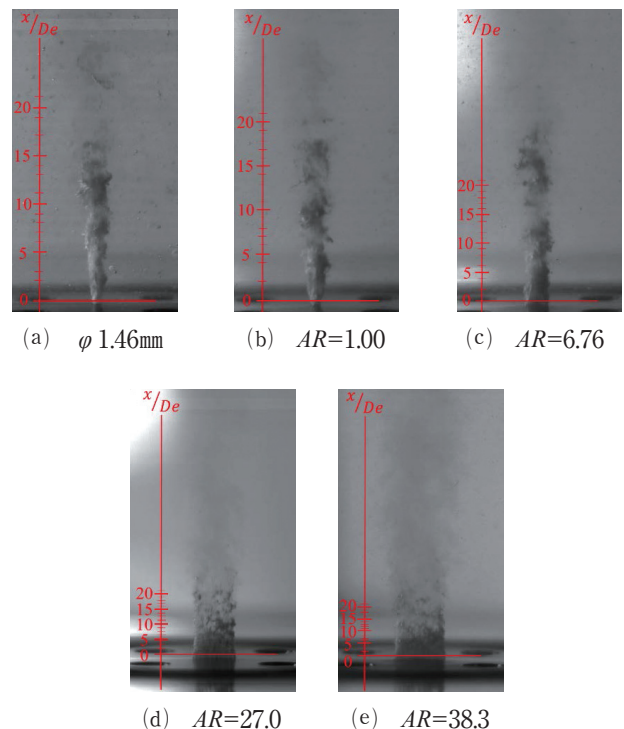
から45°回転していることがわかる。下流になると菱形から円形になっている。

$AR=6.76$ の場合には、噴出口付近ではキャビテーションの発生領域の形状が長方形の角部が凹んだ状態である。下流になるほど噴出口長辺方向に短く、短辺方向に長くなる様子がわかる。単相の縦横比が小さな矩形噴流では、せん断層に発生した渦の長軸と短軸が入れ替わる軸スイッチングが発生することが知られている。これは、渦の自己誘起速度の違いが原因とされている。今回観察されたキャビテーションは噴流のせん断層に発生しており、直接的にはせん断層内に生成する渦の局所的な圧力低下がキャビテーションの発生原因だと予想している。キャビテーション発生領域も軸スイッチング現象に類似した形状変化が認められており、その詳細な理解は今後の課題である。

4. 圧力-流量特性

図6にオリフィス噴出口の縦横比を変化させた場合のキャビテーション数 σ に対する流量係数 C の変化を示す。キャビテーション数 σ 、流量係数 C はそれぞれ以下の式(1)、(2)で定義した。ここで P_v は水の飽和蒸気圧、 ρ は水の密度、 V は流量 Q を噴出口断面積 A で除した断面平均流速である。

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

図4 側方から観察したキャビテーション噴流⁴⁾
($P_1=3.0\text{MPaG}$, $P_2=0.0\text{MPaG}$)

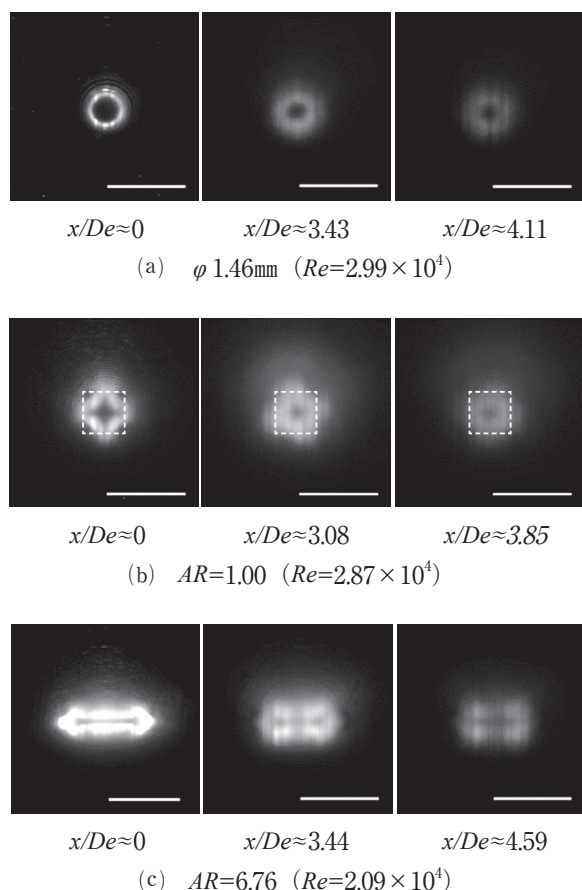


図5 キャビテーション噴流断面の時間平均画像³⁾
($P_1=3.0\text{MPa(G)}$, $P_2=0.0\text{MPa(G)}$)

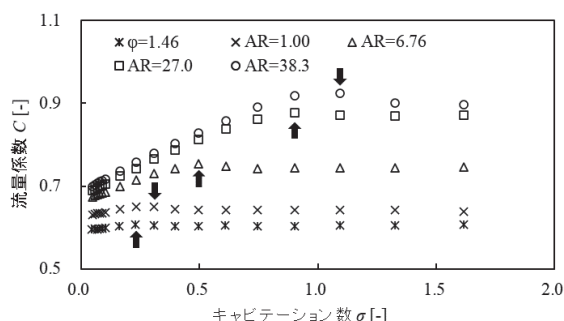


図6 キャビテーション数と流量係数との関係
(図中の矢印はキャビテーションの発生が認められた点)

$$C = \frac{Q}{AV} = \frac{Q}{A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}} \quad (2)$$

この結果から、流量係数はキャビテーション数に依存することなく $\phi 1.46\text{mm}$, $AR=1.00$, 6.76 , 27.0 , 38.3 の順に大きくなるのがわかる。また、図中の矢印で示したプロットは、キャビテーション数を減少方向に変化した場合にキャビテーションの発生が目視で観察された点である。この点よりも左側の条件ではキャビテーションが常に発生している。このキャビテーションが発生し始めるキャビテーシ

ョン数は、噴出口の縦横比が小さい条件ほど低くなっている。

5. 騒音特性

図7に縦横比が $AR=1.00$, 6.76 の場合におけるキャビテーション数に対する騒音レベルを示す。キャビテーション数を減少させていくと緩やかに騒音が増大し、 $\sigma \leq 0.4$ で騒音が急激に増大している。 $AR=6.76$ の方が若干騒音レベルは高いが縦横比による騒音レベルの変化の傾向に明確な違いは認められない。現在、縦横比が大きな条件での知見獲得を進めている。

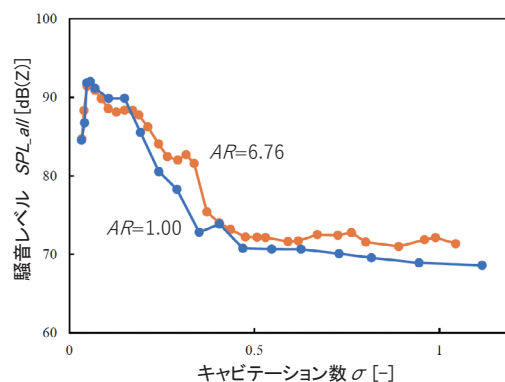


図7 キャビテーション数と騒音との関係

6. おわりに

水圧用スプール弁を想定した矩形オリフィスからのキャビテーション噴流について、その基本的な特性を紹介させていただいた。キャビテーション抑制および流量特性の観点からは縦横比が大きい噴出口の方が望ましいことが示されている。一方、騒音について現状では縦横比による明確な差は認められていない。今後詳細な検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) H. Okabe, Y. Tanaka, A. Watanabe, F. Yoshida, S. Iio, Y. Haneda: Cavitation in a Spool Valve for Water Hydraulics, Proc. 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 229 (2018) .
- 2) 飯尾昭一郎: 水圧用流量制御弁におけるキャビテーション現象, フルードパワーシステム, 50(3), pp. 122-124 (2019) .
- 3) H. Takei, K. Terakawa, S. Iio, K. Takamura, T. Uchiyama, F. Yoshida: Flow Characteristics of a Cavitating Jet through a Small Rectangular Orifice with Different Aspect Ratio, Proc. 11th JFPS International Symposium on fluid power Hakodate 2020.

(原稿受付: 2022年5月31日)

解説

タイの伝統楽器クルイの自動吹奏ロボットによる音色表現

著者紹介



かとうとも のり
加藤友規

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

2007年東京工業大学大学院博士課程修了。都立高専助手～助教を経て、2010年福岡工業大学助教、2012年同大学准教授。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）。

1. はじめに

エンターテインメントを目的としたロボット開発の一環として、著者らは2009年ごろより、層流型高速応答流量計（QFS）を用いたリコーダー吹奏ロボットに関する研究を進めてきた。

一方、著者が勤務する福岡工業大学（FIT）は、タイのキングモンクット工科大学ラカバン校（KMITL）と協定を結んでおり、KMITLのキャンパス内にはFITが設置したFBK日本語センターがある。著者の研究室でもKMITLの学部卒業者を大学院生として受け入れるなどの交流実績がある。

ところで、タイにはクルイ（Khlu）と呼ばれる伝統的な縦笛があり、日本におけるリコーダー同様、タイでは学校教材としても広く使用されている。著者らは、2014年度より、KMITLのミュージックサイエンス&エンジニアリング学部（IMSE）との共同研究として、クルイの自動吹奏ロボットや音色の解析に関する研究を実施している。本記事では、近年の同研究の概要についてご紹介する。

2. クルイの自動吹奏ロボット

2.1 リコーダー自動吹奏ロボット（先行研究）

前述のとおり著者らは、リコーダー（ソプラノ・アルト）を自動吹奏するロボットに関する研究を進めてきた。ロボットシステムを図1に、制御信号の流れを含めた構成を図2にそれぞれ示す。

このロボットの研究に関してはまず、非定常流量

発生装置により層流型高速応答流量計（QFS、東京メータ製QFS-0.3-50-30）の動特性を検証し、リコーダーの呼気の計測・制御に使用可能な十分な動特性を有していることを確認した。つぎに、QFSを用いて、リコーダーの各音階における最適な呼気流量を測定した。その後、人間の奏者がリコーダーでビブラートを表現した場合の音と流量を測定し、その測定値を流量目標値とし、リコーダー吹奏ロボットでビブラートを再現する実験を行った。実験の結果、人間の奏者の呼気とリコーダー吹奏ロボットの呼気は相関が極めて高く、音色を忠実に再現できていることを確認した¹⁾。

また、ビブラートなどの特殊な音色を含んだ楽曲をロボットで吹奏する際、ロボットの吹奏に人間のような味わいを持たせることを目的として、人間のビブラート独特のばらつきを考慮し、そのモデル化を行うことでロボットによるビブラート吹奏に不規則な変化を持たせる流量制御目標値の生成方法を提案した²⁻⁶⁾。

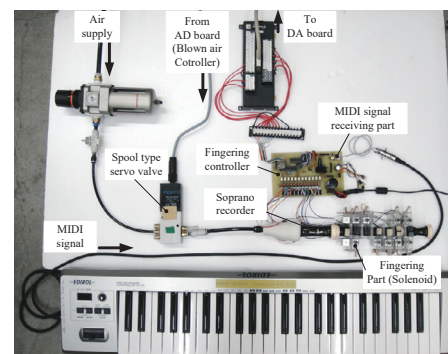


図1 リコーダー自動吹奏ロボット

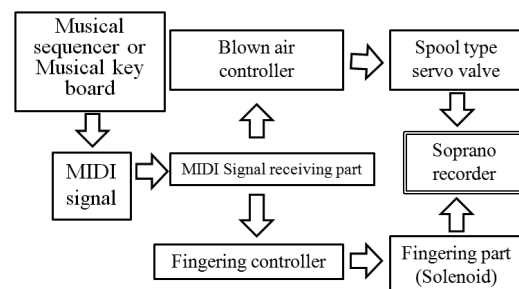


図2 リコーダー自動吹奏ロボットの構成

2.2 クルイについて

タイのクルイ（図3）には数百年の歴史があり、いくつかの種類（大別して3種類）がある。材質は、木材・竹・プラスチックなどがあるが、現地の音楽関係者によると、上級者向けの材質は木材または竹で、学校では一般にプラスチック製を使用することである。親指を含め8つのトーンホールがあり、日本のリコーダーと一見、良く似ている。

しかし、クルイが日本のリコーダーと大きく異なるのは、その音律である。日本のリコーダーは12平均律を使用しているが、タイの伝統的な音律は7平均律である（タイ音律、とも呼ばれるようである）。

著者がタイの楽器店で購入したクルイは、B $\flat$ であった。これは、全部のトーンホールをふさいだ際の一番低い音がB $\flat$ 4（=A4 $\sharp$ 、466.16Hz）であるという意味であり、そこを基準に運指により、倍ずつ音の周波数が変化することを意味する。12平均律と7平均律の違い（各音の周波数）を図4に示す。

2.3 クルイの呼気流量の調整

クルイを吹奏する場合、各音階によって最適な呼気流量値が存在する。もし呼気流量値が最適値より上下に変化すると、音程も同様に变化する。

上述の通り、クルイは7平均律であるが、著者が知る曲の楽譜は、12平均律である。12平均律でクルイを自動吹奏するロボットを製作するため、各運指における音階が12平均律に従うよう、図5に

示す実験装置構成により、呼気の流量を調整することとした。

実験において、運指はテープによりふさぎ、供給される流量は可変絞りにより最適値になるように調整した。音程はチューナー（Korg社製GA-1）により測定され、その際の流量値はQFSにより測定した。

調整結果を図6に示す。この結果を用いることで、クルイ吹奏ロボットは12平均律での演奏が可能となる。

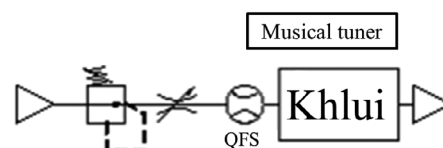


図5 QFSを用いた流量とクルイの音程の調整

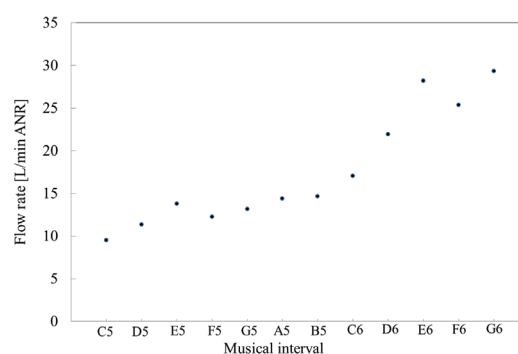


図6 流量とクルイの音程の関係（校正結果）

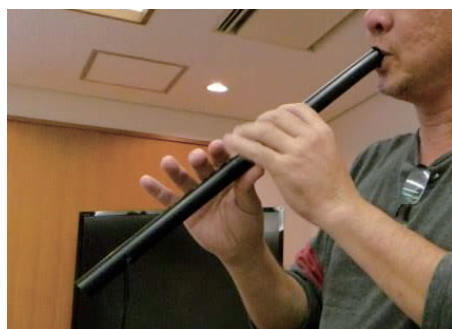


図3 クルイ

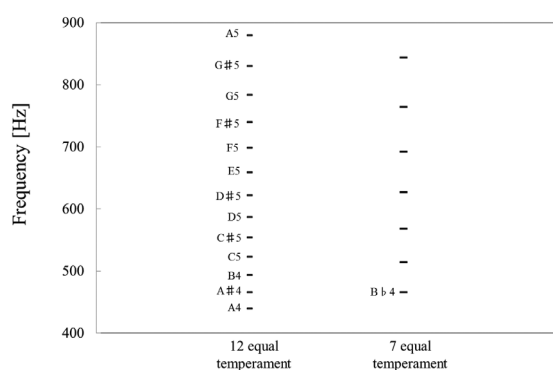


図4 12平均律と7平均律

2.4 クルイ吹奏ロボットの製作

前述のリコーダー吹奏ロボットを改造して、クルイ吹奏ロボットを製作した（図7）。運指機構や信号の流れなどは図1・図2とほぼ同様であるが、出先での演奏会を想定し、MIDIキーボードの代わりに、小型のオーディオインターフェース（Roland QUAD-CAPTURE, UA-55）を使用した。呼気流量の制御は2.3節の方法を使用しつつ、ロボットの運指の条件下で、微調整を行った。また、呼気の非定常流量制御と運指圧力の制御を用いることで、ビブラートやトレモロといった特殊な音色の表現もある程度可能である⁷⁻⁹⁾。一例として、ラ（A5）付近でトレモロ（音程は一定で音量が周期的に変化する）を表現した際の音の測定結果を図8に示す。

なおこのクルイ吹奏ロボットは、2015年7月にバンコク国際貿易展示場（BITEC）で開催されたKMITL創立55周年記念Engineering Expo2015に際して、KMITL側から招待演奏を依頼された。著者は、当時加藤研究室に在籍した、音楽系サークル出身者を含む4名の学生らとバンド「FIT-KRJ」を結成し、バンコクに出向いて演奏を披露した（図9）。

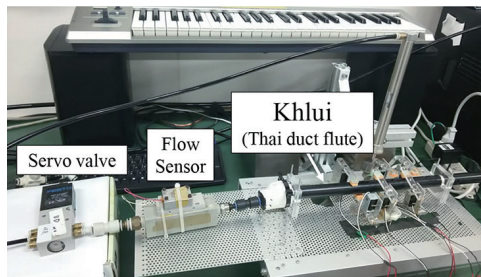


図7 クルイ吹奏ロボット

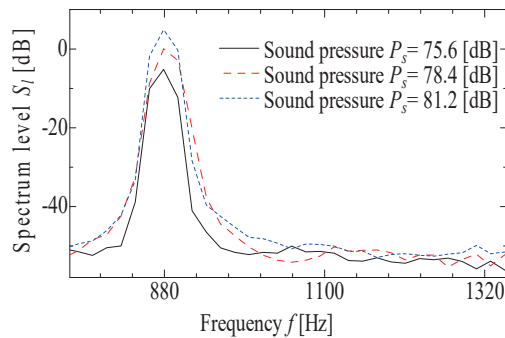


図8 クルイ吹奏ロボットによるトレモロ表現



図9 バンコクBITECでの招待演奏

3. おわりに

本記事では、著者らが取り組んできたタイの伝統的な縦笛であるクルイを自動吹奏するロボットの開発と音色表現に関する研究について、概要を紹介した。

なお著者らは近年は、クルイの材質による音の違いの解析や¹⁰⁾¹¹⁾、サクソなどのリード楽器を吹奏する際の呼気補助装置に関する研究¹²⁾¹³⁾を、KMITLと連携して進めている。

参考文献

- 1) Tomonori KATO, Yoshiyuki KAWAMURA, Tatsuya FUNAKI, Kenji KAWASHIMA, Toshiharu KAGAWA : Control of Blown Air For a Soprano-Recorder-Playing Robot Using Unsteady Flow Rate Measurements and Control Techniques, Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Power, pp. 626-632 (2011)

- 2) 加藤友規, 益田大海, 河村良行, 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春 : 層流型高速応答流量計を用いたソプラノリコーダー吹奏ロボットの呼気制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 第43巻第6号, pp. 143-148 (2012)
- 3) 平川鉄磨, 加藤友規, 益田大海, 武藤大樹 : リコーダー吹奏ロボットの呼気制御—ばらつきを考慮したビブラートのモデル化—, 平成24年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 23-24 (2012)
- 4) Hiromi Masuda, Tomonori Kato, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa : Development of a Recorder-playing Robot Using Unsteady Flow Rate Control Technique, Proceedings of International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, WeA08-01 (CD-ROM) (2012)
- 5) 藤澤雄一郎, 平川鉄磨, 加藤友規 : リコーダー吹奏ロボットの呼気制御—振幅のばらつきを考慮したビブラートのモデル化—, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会講演論文集, pp. 219-220 (2013)
- 6) Kazuki Sakuragi, Mingzhao Cheng, Tomonori Kato : Recorder-playing robot that uses versatile vibrato to mimic a human player, Proceedings of The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 002584-002588 (2015)
- 7) 加藤友規, 木宮正貴, 櫻木一樹, 西田一矢, 程明昭 : クルイ (タイの伝統的な縦笛) を自動吹奏するロボットの開発, 平成27年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 92-94 (2015)
- 8) 加藤友規, 櫻木一樹, 木宮正貴 : クルイを演奏するロボットの呼気制御に関する研究, 福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報, Vol. 33, pp. 43-44 (2016)
- 9) Tomonori Kato, Kohei Shimazaki, Kenya Higashijima, Ryoji Tokunaga, Phonlasit Thinnakorn Na Ayuthaya, Pitak Thumwarin : Refinement of a Thai Flute-playing Robot in Thai Style, Conference Proceedings, The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technologies, : PID390 (2018)
- 10) Nachanant Chitanont, Padcharawan Padthong, Bhumrape Sinpru, Nutwarot Sriseang, Pitak Thumwarin, Tomonori Kato : Acoustical Analysis of the Thai Duct Flute, Khlui, Conference Proceedings, The 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, 9165322 (2020)
- 11) Tantep Sinjanakhom, Sorawat Chivapreecha, Nachanant Chitanont, Tomonori Kato : Deep Neural Networks for Sound Synthesis of Thai Duct Flute, Khlui, Conference Proceedings, The 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ID91 (2021)
- 12) Tomonori Kato, Kohei Shimazaki, Songmoung Nundrakwang, Pavarit Chuprasert, Thumwarin Pitak : Proposal of the Concept of a Breathing Assist System for Saxophone Players with Breathing Problems, Conference Proceedings, The 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, p. 136 (2019)
- 13) Tomonori Kato, Tadataka Ashikari, Chikara Matoba, Asashi Mawatari, Pitak Thumwarin : Journal of Drive and Control, Vol. 18, No. 4, pp. 72-76 (2021)

(原稿受付：2022年3月11日)

解説

管楽器の空力音響解析

著者紹介



よし なが つかさ
吉 永 司

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

2018年大阪大学大学院基礎工学系研究科博士後期課程修了。同大学特任助教を経て、2019年豊橋技術科学大学助教に就任。流体力学、空力音、音声生成の研究に従事。日本機械学会、日本音響学会などの会員。博士（工学）。



よこ やま ひろ し
横 山 博 史

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

2010年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。豊橋技術科学大学助教を経て、2017年同大学准教授。空力音、流体制御、数値流体力学の研究に従事。2019年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

本稿では楽器からの発音に関して著者らが行ってきた研究¹⁾²⁾を紹介する。楽器における物理は、文献³⁾などにあるように音響学や振動学の分野を中心に研究されてきた。実際の管楽器内部では、流体力学的現象、音響学的現象さらにシングルリード楽器などでは物体振動が連成した複雑な現象が生じ、その結果として音が発生する。近年では、実験的に流れや音場を計測する試みとともに¹⁾、計算機の発達にともない、数値流体力学にもとづいた楽器周りの流れ場や音場の解析が活発になされている⁴⁾⁵⁾。

著者らは、流れと音が連成した現象を予測するために、圧縮性Navier-Stokes方程式にもとづく解析を実施し、管楽器まわりの流れ場や音場を明らかにする試みを行ってきた¹⁾²⁾。本稿では、特に基本的な楽器からの発音現象に主眼をおいて、これらの結果の一部を示す。詳細については各引用文献を参照されたい。第2節にてリコーダに関する研究、第3節にてシングルリードに関する研究をそれぞれ紹介する。

2. リコーダ

2.1 解析手法

図1にリコーダ周りの流れや音場を予測した際の計算体系を示す。ここでは、リコーダの歌口部から第3音孔までを含むようなリコーダモデルを対象に研究を行った。リコーダでは、吹き入れた気流がウィンドウェイと呼ばれる流路を通り、ウィンドウェイ出口からジェットが形成される。ここでは、ウィンドウェイ出口での断面平均速度を10.4m/sとした条件の結果を示す。

支配方程式として、圧縮性Navier-Stokes方程式を連続の式およびエネルギー保存式とともに解く。流れ場および音場を精度よく分析するため、空間微分は6次精度のコンパクトスキーム⁶⁾を用い、時間積分は3次精度のルンゲ・クッタ法を用いて評価した。楽器の複雑な形状まわりの流体・音響場を直交格子上で再現するためにVolume penalization 法⁷⁾を用いた。

一般に楽器内部で発生する渦構造の空間スケールに比べ、音波のスケールは非常に大きい。このようなスケールの異なる現象をどちらも精度よく予測するた

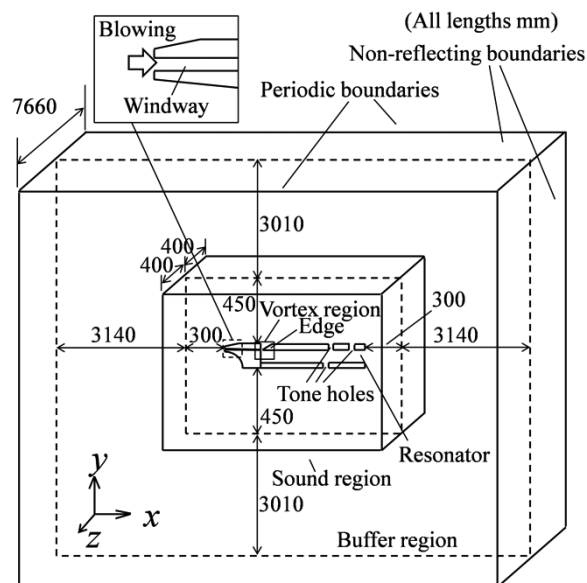


図1 計算体系およびリコーダモデル

め、図1に示すように、計算領域を3つの格子間隔の異なる領域Vortex region, Sound region, Buffer regionにわけた。空気の流れや流れからの音の発生をとらえるVortex regionではもっとも細かい格子間隔とした。Sound regionでは、音波の伝ばのみをとらえるためやや粗い格子とするが、音波の波長スケールの大きさとする。さらに、計算領域の遠方境界では音の反射を最小限に抑える無反射境界条件を用い、その近傍ではBuffer regionと呼ばれる音を減衰させる領域を設定する。なお、音の反射を防ぐため、格子間隔は徐々に変化させ、領域間での格子間隔の変化は滑らかである。

2.2 音圧スペクトル

図2には3つの音孔がすべて開いた条件での音圧スペクトル（楽器から90mm離れた点）を示す。音圧スペクトルは、時系列の圧力変動データを周波数分析することで得られる。ここで横軸は基本周波数 f_p で無次元化され、この条件では750Hz程度である。図2に示すように、解析により予測された発生音の音圧スペクトルは実験結果とおおむね一致する。ただし、一部の高調波周波数の音の大きさは実験に比べて、過大もしくは過小評価しており、課題も残されている。

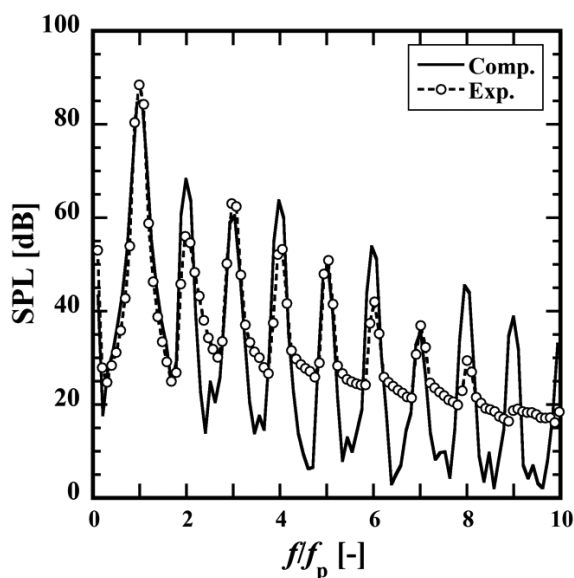


図2 音圧スペクトル（全ての音孔を開いた条件）

2.3 共鳴管内の変動圧力

図3に各音孔条件での共鳴管内の変動圧力分布を示す。ここでは、共鳴管内部がもっとも低圧になる時刻（ $t=0$ ）の音場を示している。音孔が全て閉じた条件（図3(c)）では、共鳴管内部全体で低圧となっており、定在波の形成が確認された。図中の白の線は共鳴管内部の定在波の大まかな経路を示す。音孔を開いた場合では、開いた音孔付近から変動圧

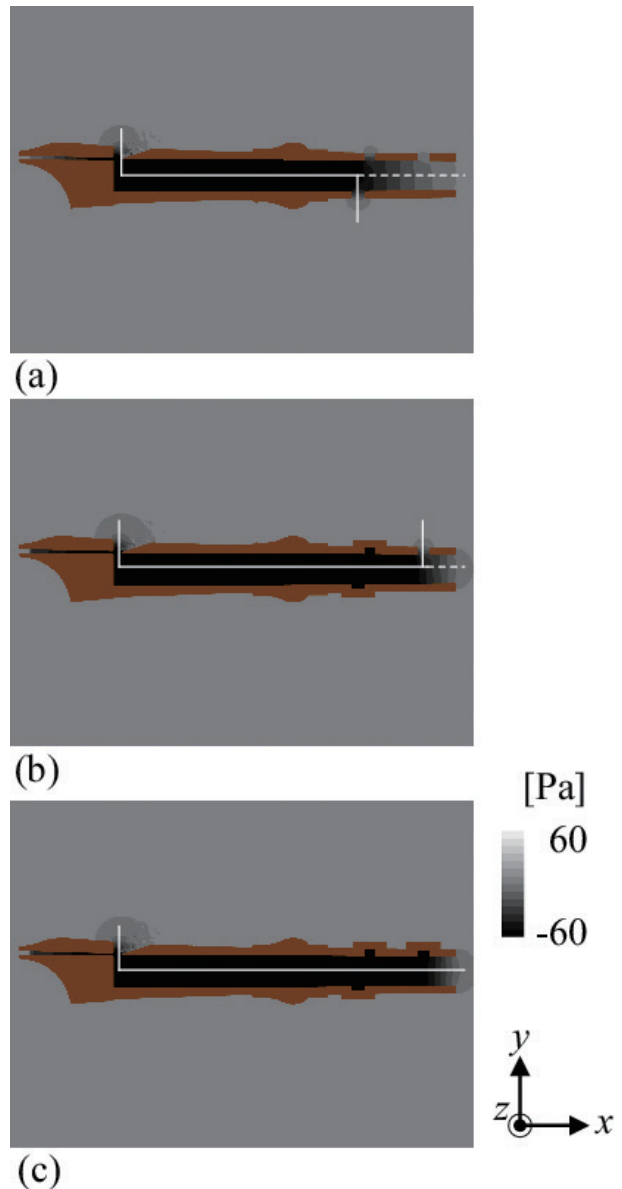


図3 共鳴管内の変動圧力（共鳴管内部が最も低圧になる時刻 $t=0$ ）。(a) 3音孔全て開いた条件。(b) 2音孔を閉じた条件。(c) 3音孔を全て閉じた条件。

力が弱まり、定在波の長さが短くなる。その結果、基本周波数も高くなる。

2.4 ジェットの揺動

図4にすべての音孔が開いた条件での x 方向（ウィンドウェイ出口からの吹き出し方向）速度の分布を示す。ウィンドウェイからジェットが生じ、ジェットはエッジに対し上下に揺動していることがわかる。この揺動の周波数は発生音の基本周波数である。ジェットの揺動によって共鳴管内部の気体において圧縮および膨張が生じ、音響共鳴が発生する。この結果、楽器から音が発生し、周囲に伝ばする。

ここでは、リコーダからの発音の基本的な現象について紹介したが、本解析手法を用い、ウィンドウェイ出口形状とジェットの揺動の関係も調べられ

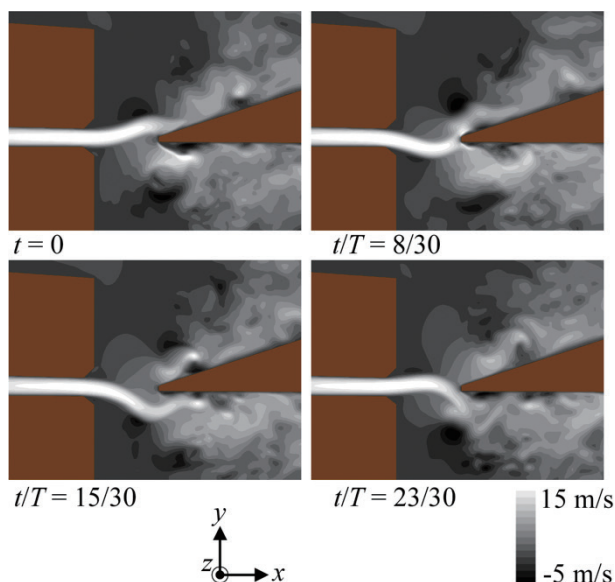


図4 ジェットの揺動（3音孔全て開いた条件）

ている⁸⁾⁹⁾。また、フルードからの発音現象を予測した研究もある¹⁰⁾。

3. シングルリード楽器

3.1 解析手法

前節のリコーダやフルードに代表されるエアリード楽器では楽器自身は振動せず、楽器に吐き出された気流が振動することにより音を発生している。それに対し、シングルリード楽器と分類される楽器は、一枚の薄板（リード）が楽器に取り付けられ、リードを気流により振動させながら音を発生させる。代表的なシングルリード楽器としては、クラリネットやサキソフォンが知られているが、本研究ではサクソネットと呼ばれるクラリネットの歌口とリコーダと同様の音孔を有する単純な円管（共鳴管）を持つ楽器を対象とした。

図5にサクソネットと人工吹鳴器の概要を示す。リコーダの解析では歌口の入口部に一樣流を設定することで音の発生を再現できたが、シングルリード楽器では圧力の高まった口腔内でのリードの振動を再現する必要がある。そこで、人工吹鳴器と呼ばれる圧力チャンバを歌口に設定することにより、音の発生を再現する。サクソネットは全長307mmであり、本解析では全音孔を閉じているため、C4（約262 Hz）の音が発生する。

前節のリコーダの解析手法と同様に、気流と音については圧縮性Navier-Stokes方程式を用い予測し、リードの振動を一次元はりの運動方程式¹¹⁾を用い予測し、これらを連成して解くことにより、音の発生を予測する。リードへの流体力を気流中の圧力により算出して与えると同時に、リードの振動変位と

表面速度をVolume penalization法における壁面境界に与えて解析を行う。

解析の条件としては、図5と同じ寸法で作製した人工吹鳴器による実験¹²⁾と比較するため、実験と同じ条件になるように圧力チャンバの入口に流量11L/minを流入し、チャンバ内の圧力を8 kPaに保ってリードの自励振動を発生させた。

3.2 リード振動波形

図6にリード先端の振動波形を示す。マウスピースの歌口が閉じた状態を0 mmとし、実験におけるレーザ変位計の計測結果と比較している。実験におけるリード振動の基本周波数は $f_p = 265 \text{ Hz}$ だったのに対し、解析では $f_p = 251 \text{ Hz}$ となり、横軸の時刻は各周期で無次元化している。実験では $t/T = 0.6$ で変位が急激に増加し、変位が0.49 mmで最大となったのに対し、解析では $t/T = 0.6$ から実験に比べて緩やかに増加し、変位が0.59 mmで最大となった。実験の波形と比べてやや異なる傾向が見られるものの、リード振動の2次元性やスパン方向の形状変化を考慮していない一次元はりの方程式でも、高い精度でリード振動波形を予測できた。

3.3 音圧スペクトル

図7に楽器から100 mm離れた点での音圧スペクトルを示す。横軸は基本周波数 f_p で無次元化している。シングルリード楽器の音の特徴としては、偶数次倍音に比べて奇数次倍音が大きくなる傾向にあり³⁾、解析により予測された発生音の音圧スペクトルは実

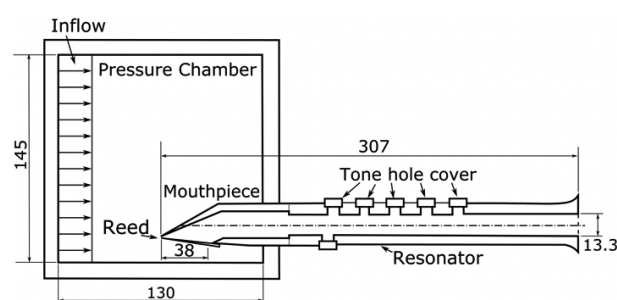


図5 シングルリード楽器と人工吹鳴器（単位：mm）

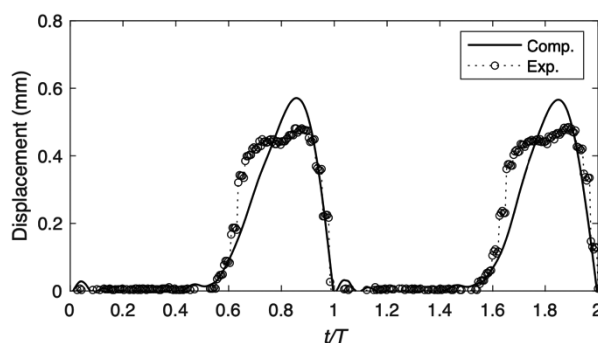


図6 リード先端の振動波形（0 mmが閉口時を表す）

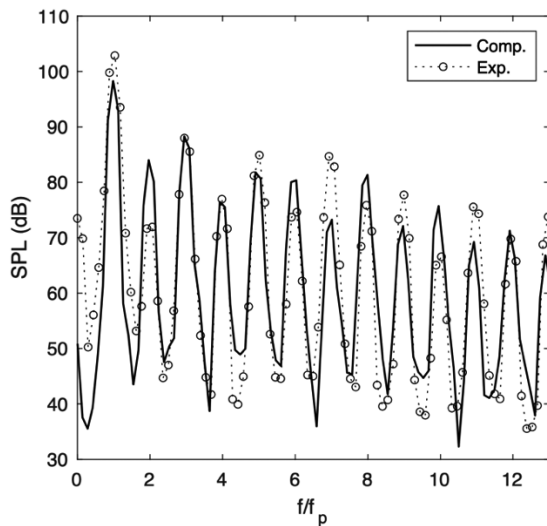


図7 シングルリード楽器の音圧スペクトル

験結果と概ね一致する。ただし、2次倍音や6次倍音など、偶数次倍音がやや大きく見積もられており、この原因としては、実験で見られたリード変位の開口時の急峻な変化が十分にとらえられていないことが考えられる。

3.4 管内圧力の伝ば

図8にサクソネット管内の1/4周期ごとの変動圧力分布を示す。時刻 $t/T=0$ ではリードにより歌口が閉口されているが慣性により気流は管内から共鳴管出口へ流れ、歌口付近は圧力が低下する($t/T=1/4$)。しかし、その圧力の低下にともない管内の気流が逆流して、リード付近の圧力は高まり($t/T=3/4$)、リードが開口する。そしてリードの開口

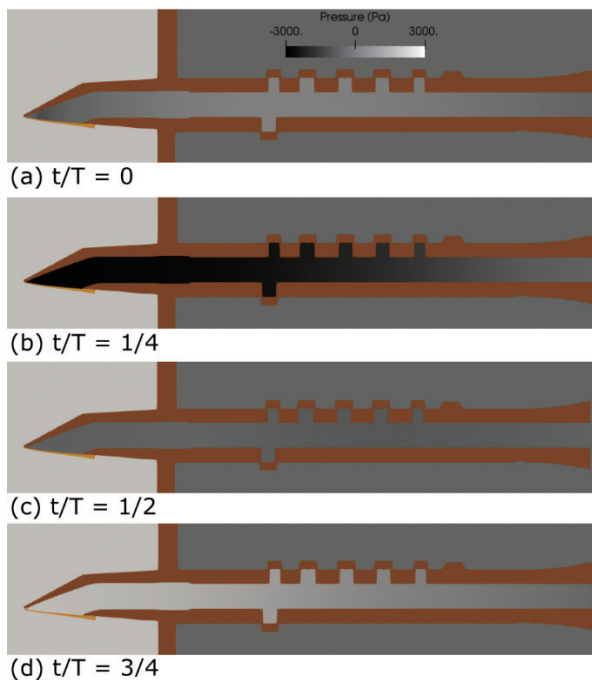


図8 楽器管内の変動圧力分布

によりマウスピース内の圧力が低下し、リードが閉口し始める。この楽器管内の圧力増減の周期は管の長さにより決まり、気流と音の伝ば、リード振動を連成して解析できていることがわかる。

4. おわりに

本稿では、圧縮性Navier-Stokes方程式にもとづく管楽器の空力音響解析について、著者らが行ってきたリコーダおよびシングルリード楽器の事例を紹介した。著者らの解析手法の特徴として、高精度の差分法とVolume penalization法を用いている点があり、複雑なメッシュ生成に頼らずに実際の楽器形状を精度良く解析できるとともに、リードとマウスピースとの壁面境界の接触にも対応できることが利点としてあげられる。一方、リコーダの高周波数音やリードの細かい振動波形など、まだ実験結果をとらえられていない部分もあり、どのように精度を向上させるかは今後の課題である。また、同じ解析手法が人工声帯¹³⁾の開発などにも応用されており、本手法が流体機械の振動解析などにも広く応用されることが期待できる。結びに、本研究の遂行にあたり、ご協力やご指摘をいただいたヤマハ株式会社の庄司哲郎氏、三木晃氏、鬼束博文氏、有元慶太氏に謝意を示す。

参考文献

- 1) Yokoyama, H., Miki, A., Onitsuka, H., Iida, A.: Direct numerical simulation of fluid-acoustic interactions in a recorder with tone holes, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 138, No. 2, p. 858-873 (2015)
- 2) Yoshinaga, T., Yokoyama, H., Tetsuro, S., Miki, A., Iida, A.: Global numerical simulation of fluid-structure-acoustic interaction in a single-reed instrument, *The Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 149, No. 3, p. 1623-1632 (2021)
- 3) Fletcher, N.H., Rossing, T.D.: *The physics of musical instruments*, Springer New York (2010)
- 4) Miyamoto, M., Ito, Y., Iwasaki, T., Akamura, T., Takahashi, K., Takami, T., Kobayashi, T., Nishida, A., Aoyagi, M.: Numerical study on acoustic oscillations of 2D and 3D flue organ pipe like instruments with compressible LES, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 99, No. 1, p. 154-171 (2013)
- 5) Giordano, N.: Simulation studies of a recorder in three dimensions, *The Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 135, No. 2, p. 906-916 (2014)
- 6) Lele, S.K.: Compact finite difference schemes with spectral-like resolution, *Journal of Computational Physics*, Vol. 103, No. 1, p. 16-42 (1992)
- 7) Liu, Q., Vasilyev, O.V.: A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 2, p. 946-966 (2007)

- 8) Yokoyama, H., Hamasuna, R., Miki, A., Onitsuka, H., Iida, A. : Direct aeroacoustic simulation related with mode change in a recorder, Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, p. 1315-1324 (2016)
- 9) Onogi, K., Yokoyama, H., Iida, A. : Analysis of jet oscillations with acoustic radiation in the recorder by direct aeroacoustic simulations, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.146, No. 2, p. 1427-1437 (2019)
- 10) Onogi, K., Yokoyama, H., Iida, A. : Investigation of jet behavior and acoustic radiation of the flute by direct aeroacoustic simulation, Proceedings of International Congress on Sound and Vibration, No. 333, p. 1-8 (2021)
- 11) Avanzini, F., Van Walstijn, M. : Modelling the mechanical response of the reed-mouthpiece-lip system of a clarinet. Part I. A one-dimensional distributed model, Acta Acust. United Acust. Vol. 90, No. 3, p. 537-547 (2004)
- 12) Yokoyama, H., Kobayashi, M., Iida, A. : Analysis of flow and acoustic radiation in reed instruments by compressible flow simulation, Acoust. Sci. Technol. Vol. 41, No. 5, p. 739-750 (2020)
- 13) Yoshinaga, T., Arai, T., Inaam, R., Yokoyama, H., Iida, A. : A fully coupled fluid-structure-acoustic interaction simulation on reed-type artificial vocal fold. Appl. Acoust. Vol. 184, No. 108339, p. 1-7 (2021)

(原稿受付：2022年3月9日)

会 告

2022年度（第41期）通常総会終了

1. 日 時 2022年5月27日(金)
15時00分～16時00分
2. 場 所 東京都港区芝公園3丁目5番地22号 機械振興
会館6階 6D-4会議室およびオンラインによる開催

3. 議事の経過および結果

15:00 開会、事務局よりオンライン出席上の注意事項説明ののち、出席者数、オンラインによる出席者数、HPIによる書面審議承認者数および委任状の数を報告し、その総数が定款の定めを上回り、本総会および本総会の審議結果は成立することが報告された。ついで眞田一志会長が定款第15条「総会の議長は、会長がこれにあたる」にもとづき議長となり、議事録署名人として、株式会社小松製作所 名倉忍殿、東京計器株式会社 兵藤訓一殿を指名したのち議事に入った。

(報告事項)

- 報告1 2021年度事業報告（2021年度事業報告書）の件
 報告2 2022年度事業計画（2022年度事業計画書）の件
 報告3 2022年度収支予算（2022年度収支予算書）の件
 報告1～3に対し、庶務委員会 田中委員長、会計委員会 村松委員長から説明および報告があった。

(議案)

- 第1号議案 2021年度決算（貸借対照表、正味財産増減計算書、財産目録（財務諸表に対する注記、附属明細書を含む）、監査報告の件
 第1号議案に対し、会計委員会 村松委員長から説明および報告があり、賛成多数で可決承認された。
 第2号議案 役員交代（2022、2023年度理事及び監事候補）の件
 第2号議案に対し、眞田会長から説明および報告があり、賛成多数で可決承認された。

以上で総会を終了し、10分間の休憩の後、2022、2023年度会長の早川新会長による就任のあいさつが行われ、その後、日本フルードパワーシステム学会賞などの受賞者の氏名が読み上げられ、後日、受賞者に表彰状、盾などが贈られることが伝えられた。

2022年度（第41期）通常総会は、昨年と同様に新型コロナウイルス感染防止のためオンラインにて開催され、学会賞表彰式、および受賞記念講演、技術懇談会などの行事を行うことができなかったが、多数のオンライン出席者をえて成功裡に終えることができた。

会議報告

日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会
(MDT2021) 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.jp1989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。機能
性流体，パワーマイクロロボットの研究に従事。
JFPS, JSME, IEEEなどの会員，工学博士。

1. ま え が き

機素潤滑設計部門講演会は，日本機械学会が有する22部門のうちのひとつである機素潤滑設計部門が毎年1回開催している学術講演会である。機素潤滑設計部門は，機械工学の中で，機械要素，トライボロジー，機械設計，またはアクチュエータシステムを専門とする研究者，技術者を中心に構成されている。本講演会は以前は毎年4月に開催されていたが，2021年は，新型コロナウイルス感染症の影響で，12月6，7日にZoomを用いたオンライン形式で開催された。本講演会では，ベルト・チェーン・トラクションドライブ，ねじ・機構，歯車(1)，(2)，軸受(1)，(2)，トライボロジー(1)，(2)，表面改質・硬質薄膜・固体潤滑剤(1)，(2)，アシスト・ウェアラブル，機構・運動，次世代アクチュエータ，アクチュエータの応用機構(1)，(2)というセッションが設定され，合計76件の研究発表が行われた。

フルードパワー技術関連の研究発表はアクチュエータ関連のセッションで行われた。その内訳は，機械要素（アクチュエータ，バルブ）4件，システム4件の合計8件であった。そのうち，空気圧関連が6件で，油圧・水圧2件であった。本稿では，各発表の概要について紹介する。

2. フルードパワー技術関連の発表の概要

2.1 機械要素関連

門脇らは，パワーアシストロボットなどに応用できるMcKibben型空気圧ゴム人工筋について，可動部

が短い場合にもその構造とゴムの特性から発生力を推定することができる数学モデルを構築している¹⁾。まず，ゴムチューブを繊維が編み込まれたスリーブで覆ったMcKibben型空気圧ゴム人工筋の構造を説明し，繊維の仮想パンタグラフ構造を可動部が短いものにも適用可能とした拡張パンタグラフ構造を用いた数学モデルを提案，構築している。つぎに，可動部の長さが45～200 mmの4種類のゴム人工筋について印加圧力および収縮率に対する発生力を測定し，提案モデルの推定値との比較を行い，提案モデルの妥当性を確認している。

長崎らは，高温・低温環境や放射線環境のような極限環境下で駆動するため，プリントドエレクトロニクス技術を用いたポリイミド（PI）フィルム製ソフトアクチュエータを開発している²⁾。本アクチュエータは，2枚のPIフィルムの周囲を溶着し空気圧室を構成したもので，まず，PIフィルムの周囲を任意のパターンで溶着するため，熱可塑性PIフィルムの上に導電性接着剤で所望のパターンを描き，通電加熱しながらもう1枚のPIフィルムを押し付ける溶着手法を開発している。つぎに，はく離試験を行い，溶着強度を実験的に明らかにしている。最後に，空気圧による耐圧試験を行い，本手法で空気圧ソフトアクチュエータを実現できる可能性を示している。

イらは，製紐技術を用い平紐状に細径McKibben型人工筋肉を集積した平紐型集積人工筋肉への光ファイバセンサの複合化について検討している³⁾。光ファイバセンサは，光ファイバの曲げに応じて伝ばする光量の損失が変化することを検知するもので，これを細径人工筋肉とともに組み込み複合化することで収縮率を測定する。まず，平紐型集積人工筋肉の静特性を実験的に明らかにしている。次に，光ファイバを組み込むピッチを変えた人工筋肉を試作し，印加圧力に対する収縮率を測定し，光ファイバセンサの複合化により若干低下することを示している。最後に，印加圧力に対する光ファイバセンサの出力電圧を測定し，本人工筋肉の可能性を示している。

田中らは，流量制御のために正重合，圧力制御のために負重合というように重合を変化できるスプール型油圧制御弁を提案し，その特性をシミュレー

ションにより検討している⁴⁾。まず、円柱状のランドの側面を中心軸に対して傾けるとともに、ノッチを設けたスプールを、直動運動と回転運動が可能な2自由度アクチュエータで駆動する油圧制御弁を提案し、弁開度特性の解析によりその妥当性を確認している。つぎに、慣性負荷制御系についてシミュレーション解析を行い、提案する制御弁の有効性を示している。最後に、慣性負荷制御時および外部負荷変動時のシミュレーション解析を行い、キャビテーションの抑制効果があることを示している。

2.2 システム関連

八瀬らは、高齢者の歩行能力低下に対するリハビリテーションのため、体幹回旋支援を行う空気圧ソフトアクチュエータ駆動型ウェアラブル装置を提案、開発している⁵⁾。まず、2個の空気圧ベローズにより正転逆転のねじり動作を行うユニットを12個連結するとともに、その中心部に配置したMcKibben型空気圧ゴム人工筋により剛性を変化させる構造で、体幹背面全体の姿勢矯正と運動支援を行う装置を提案している。つぎに、提案装置を試作し、空気圧ベローズの発生力を測定している。また、提案装置の発生トルクを測定し、理論値に比べ約半分と低いものの、体幹回旋筋の支援を実現できる値が得られることを確認している。

谷口らは、物品などの搬送システムのため、ダクトホースを用いた、高いストロークを有し、小型、軽量な空気圧リフターを提案、開発している⁶⁾。まず、2枚の正方形平板間に4本のダクトホースを用いた円筒型空気圧ソフトアクチュエータを配置するとともに、パンタグラフ型リンク機構でそれらの平行を維持するユニットを7個積層した空気圧リフターを提案している。つぎに、提案する空気圧リフターのユニットを試作し、無負荷伸長時の動作について実験的に解明し、水平傾斜角度の変化を測定している。また、テーブルにおもりを負荷として加えた動作を行い、耐荷重を明らかにしている。これらにより提案する空気圧リフターの特性を明らかにしている。

吉田らは、インフラ構造物や設備の狭あい空間のメンテナンスに用いる空気圧駆動ソフトロボットのため、伸縮機構の提案、開発を行っている⁷⁾。まず、フレキシブルダクトホース3本を結束バンドで束ねた構造で、各ホースを加圧、減圧することで、伸長および屈曲動作を行う伸縮機構、および障害物を回避するための操作法を提案している。つぎに、ポリエステルファイバ入り強化シートとPVC両面コートにより構成されている、直径50 mm、自由長830 mm、最大長3050 mmのフレキシブルダクトホースを3本用いて伸縮機構を試作し、各ホースの

圧力を10, 30, 50 kPaと変化させたときの屈曲時の形状の時間変化を実験的に明らかにしている。

木田らは、産業用プラントの細管内などで狭所作業を行うパワーマイクロロボットのため、流体慣性マイクロポンプを応用した管内走行マイクロロボットの提案、設計を行っている⁸⁾。まず、圧電往復ポンプの吐出側にチェックバルブの代わりに細い管路を設け流体慣性により高パワーが得られるポンプのオンオフ動作で液圧アクチュエータを伸縮させ、摩擦に方向性がある脚により前進動作を行う構造で、アクチュエータをタンクとしても用い短縮化を図った管内走行ロボットを提案している。つぎに、流体慣性ポンプの短縮化設計をシミュレーション解析にもとづき行っている。最後に、管内走行ロボットの走行特性を理論解析し、主要寸法の設計を行っている。

3. あとがき

日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021)で発表されたフルードパワー技術関連の発表について概観した。本講演会は毎年定期的に行われている。2022年は、より深い情報交換を行うことができる対面形式となるように願っている。

参考文献

- 1) 門脇惇, 佐々木大輔, 八瀬快人, 原田魁星: 初期形状を考慮した短駆動長McKibben型空気圧ゴム人工筋の特性推定, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2101, (2021)
- 2) 長崎あかり, 山口大介, 脇元修一, 神田岳文: プリントッドエレクトロニクス技術に応用したポリイミドフィルム製ソフトアクチュエータの開発, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2103, (2021)
- 3) イウク, 田偉航, 脇元修一, 神田岳文, 山口大介: 平紐型集積人工筋肉への光ファイバセンサ複合に関する検討, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2102, (2021)
- 4) 田中靖人, 下岡隆雅, 佐藤恭一: 直動・回転2自由度アクチュエータで制御される非対称可変重合スプール型油圧制御弁の開発, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2105, (2021)
- 5) 八瀬快人, 佐々木大輔, 門脇惇, 木村泰嘉, 日下隆太郎: 体幹回旋支援を目的としたソフトアクチュエータ駆動型ウェアラブル装置の開発, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2109, (2021)
- 6) 谷口浩成, 長谷川和哉: ダクトホースを用いたハイスโตรーク空気圧リフターの開発, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2110, (2021)
- 7) 吉田元輝, 丹羽隼平, 谷口浩成: 狹隘空間を移動する空気圧式ソフトロボットののための伸縮機構の開発, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2111, (2021)
- 8) 木田航平, 吉田和弘, 金俊完: 流体慣性マイクロポンプを応用した管内走行マイクロロボットの提案と設計, 機学第20回機素潤滑設計部門講演会(MDT2021) 予稿集, 2112, (2021)

(原稿受付: 2022年4月4日)

トピックス

学生さんへ、先輩が語る ―フルードパワーシステムに携わる学生さんへ向けて―

著者紹介



やぎさわ りょう
八木澤 遼

日立建機株式会社
〒300-0013 茨城県土浦市神立町650番地
E-mail : r.yagisawa.wr@hitachi-kenki.com

2018年芝浦工業大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年日立建機株式会社入社。油圧システムの研究開発に従事。日本フルードパワーシステム学会の会員。

1. はじめに

1.1 自己紹介

私が学生の頃、本トピックスを読みながら、学生と社会人との違いや、学生時代に力を入れるべきことについて学んだ。同様に、私の経験が学生の皆さんの参考になるかはわからないが、私の失敗／成功体験を紹介させていただき、皆さんのこれからの活動の一助となれば幸いである。

私は青森で生まれ育ち、高校卒業までを過ごした。運よく青森で名のある高校に進学できた私は、慢心から、何事も楽な方を選択する高校時代を過ごした。受験期には、苦手な英語がネックとなり、進学できる大学が限られたが、そのような状況下でも苦手科目を克服しようとはせず、当時、英語受験の必要がなかった芝浦工業大学の学科に進学した。楽な方を選択することによって将来の選択肢が狭まることに危機感を覚えた私は、大学に入学してからは自らを厳しい環境に置くことをモットーとした。これによる経験が、今の業務に大いに役立っていると考えている。現在は建設機械のメーカーである日立建機にて、油圧システムの研究開発に従事している。

1.2 企業紹介

日立建機は、建設機械やマイニング機械の製造・販売・レンタル・アフターサービスを行う企業であり、ショベルを製品化してから2020年で70周年を迎えた。世界中に拠点を持ち、世界各国の社会インフラを支えている。純国産技術による日本初の油圧ショベルを開発して以来、独自の研究開発と高度な

生産技術により、信頼性の高い製品を生み出し続けてきた。現在はSDGsへの取組みのひとつとしてバッテリー式ショベル（写真1）の開発や¹⁾、協調安全と高度な自律運転の両立を可能とするシステムプラットフォーム（写真2）の開発など²⁾、さまざまな最先端技術の開発を進めている。

私が現在働いている土浦工場（写真3）は、「Made by Hitachi」活動の中心を担う日立建機のマザー工場である。土浦工場は常磐線神立駅から徒歩10分の距離にあり、例年11月頃に日立建機フェスティバル（写真4）が開催される³⁾。ご興味のある方はぜひ足を運んでいただきたい。



写真1 バッテリー式ショベル



写真2 自律型建設機械向けシステムプラットフォームを適用した車体



写真3 土浦工場



写真4 日立建機フェスティバル

2. 学生時代を振り返って

2.1 フルードパワーとの出会い

大学の授業で制御工学の面白さを知った私は、制御工学の授業を担当されていた伊藤和寿先生の研究室配属を希望し、配属された。伊藤先生からいくつかの研究テーマを提示していただいたが、自らを厳しい環境に置くことをモットーとしていた私は、提示された中で一番研究を進めるのが難しそうなテーマを選択した。そのテーマとは油圧システムの省エネルギー化であり、これが私のフルードパワーとの

出会いであった。このテーマはベトナム人ポスドクと連携して進める必要があったため、英語でのディスカッションが必須であった。高校時代から苦手な英語であったが、研究を進めるため、必死に英語論文を読み漁り、油圧関係で良く使われる英語のフレーズをノートに書き込んだ。ベトナム人ポスドクは私のたどたどしい英語も真摯に聞いてくださったため、英語でディスカッションすることが段々と楽しくなっていくとともに、油圧システムの魅力に引き込まれるようになっていった。

大学院に進学してからは水圧システムの省エネルギー化の研究に着手した。水圧システムは理論的な考え方は油圧システムと同様であるが、内部漏れや材料選定の難しさから、可変容量ポンプなどの省エネルギー化のために利用される機器が研究段階にある。そのため、水圧システムの変更による省エネルギー化の意義が大きく、こちらも非常に面白い研究であった。本研究においてもベトナム人ポスドクと共同で進め、英語でのディスカッションに苦闘しながらも、最大限の成果が得られるよう尽力した。夜遅くまで実験ベンチ立上げやシミュレーションを行ったことを今でも鮮明に覚えている。

自らを厳しい環境に置いたことによる成果として、日本フルードパワーシステム学会の講演会にて最優秀講演賞をいただいたことや⁴⁾、大学院時代の研究論文がSMC高田賞を賜ったことは非常に光栄であり⁵⁾、自信にもつながっている。

世の中の液圧アクチュエータを有するさまざまな機械は当たり前のように動いているが、その液圧システムを変更することによって大幅な省エネルギー化を達成できる可能性があり、私はそこに液圧システム研究の魅力を感じている。また、液圧システムを変更することによる制御性能の悪化を、バルブやポンプなどの制御を工夫することによって改善を図る必要があるため、コンポーネント単体の知識や制御の知識が必要なおもしろさのひとつである。現在も油圧システムの研究開発に従事しているため、引き続きより良い油圧システムの発明に努めていきたい。

2.2 国際PBLへの参加

英語でのディスカッションの難しさとおもしろさを知った私は、協定校のラクイラ大学（イタリア、写真5）で開催された3週間程度の国際PBL（Project Based Learning）に参加した。ここでは、「ユニバーサルな農業機械の開発」という議題で、イタリア人と連携し、CAD設計やシミュレーションなどを行った（写真6, 7）。PBLの前半は議論が発散することが多々あった。しかし、作業を進めるにつれ、日本

人の長所はスケジュール管理能力だと客観的に知ることができ、一方で、イタリア人の長所は休みをしっかりと取ることで効率的に作業を進めることだと知った。PBLの後半はこれら日本人とイタリア人の長所をそれぞれ生かすことによって、何とか成果をまとめ上げることができた。この経験は現在の業務にも生きており、イタリア人を見習って、行き詰った時には適宜休憩や有休を取るようにし、ONとOFFの切り替えをしっかりと行うようにしている。

現在はコロナ禍につき、上記のような機会がなかなか得られないと思うが、チャンスがあればぜひ挑戦していただきたい。何かしら今後に役立つ発見があるはずである。



写真5 ラクイラ大学



写真6 ディスカッションの様子



写真7 送別会

2.3 会社選び

大学で液圧システムの研究の楽しさを知った私は、油圧システムの研究ができる企業に絞り、就活を行った。中でも、油圧ショベルは複数の油圧アクチュエータを備えているため、油圧システムも複雑であることを知り興味が湧いた。また、油圧ショベルは人が乗る機械であるため、操作性を保证するための制御がとても重要であることにも魅力を感じた。上記の理由から油圧ショベルのメーカーを希望し、縁あって日立建機に入社することとなった。

現在の業務には満足しているが、就活時代の後悔としては、もっと幅広い業種の会社見学に参加すればよかったと感じている。当時は大学での研究を進めるため、就活に時間を割くのがもったいないと思い、業種を絞って就活を行ったが、社会人になってからは他業種の会社見学の機会は減多にない。もっと就活時に見聞を広げておけばよかったと思う。

3. 会社での仕事とやりがい

3.1 仕事のやりがい

建設機械の研究開発のためには、流体力学、機械力学、材料力学、熱力学、制御工学、電気工学など、さまざまな学問の知識を必要とするため、会社に入ってから日々勉強である。その分、シミュレーションや実験でうまくいくと達成感が得られる。

また、自分で油圧ショベルを動かしては操作感や燃費を評価し、取得したデータを分析して、問題点の抽出および改善を行っている。日々多彩な業務を経験することができている。

3.2 仕事で大切にしていること

仕事で大切にしていることがおもにふたつある。ひとつは「段取り八分」である。これは、事前にきちんとした段取りさえしておけば、仕事の8割方は完了しているという格言であり、つねに心掛けるようにしている。たとえば、すぐに使える実験機があったとしても、まずは実験項目と実験方法を整理し、結果をある程度見積もったうえで実験した方が格段に効率が良いと考えている。もちろん、実験がうまくいかないことも多々あるが、段取りをしっかりとっておけば原因追及にかかる時間が大幅に短縮される。

もうひとつは、「履歴を残すこと」である。上司や他部署を説得しなければならない場面が多くあるのだが、その際には根拠を示す必要がある。よって、自分がどのような考えでその結論にいたったかを詳細に記録しておく必要がある。さもなくば、根拠を得るために再検討しなければならなくなってしまう。

3.3 リフレッシュのしかた

前述の国際PBLを通して、OFFの時間を有意義に過ごす大切さを学んだ。休日を充実させるため、私は日立建機土浦サッカー部に入部した。日立建機土浦サッカー部は、1部～3部リーグで構成される茨城県社会人リーグに属しており、年間の試合を通して他チームと切磋琢磨している（写真8）。2部リーグと3部リーグを行き来している状況だが、2部リーグで中位程度になれるよう尽力していきたい。しかし、現在はコロナのため、リーグ戦への参加を辞退している状況である。コロナが明けるのを願うばかりである。

コロナ禍で体力が落ちるのを防ぐため、ここ数年は自転車で汗を流している（写真9）。茨城にはつくば霞ヶ浦りんりんロードがあり、霞ヶ浦を周るコースや、筑波山ヒルクライムコース、旧筑波鉄道廃線敷を活用したコースなど、初心者から上級者まで、さまざまなコースが用意されている。自転車はソーシャルディスタンスを保ちながら楽しめるため、

おすすめである。

また、2021年の年末には子どもが生まれたため、1か月間有休を取得した。長い期間仕事から離れたが、子どもと日中を過ごし、リフレッシュすることができた。



写真8 リーグ戦の様子



写真9 愛車と霞ヶ浦

4. まとめ

本トピックスでは、私の高校時代の失敗を踏まえたうえで大学での過ごし方や、現在の働き方について紹介させていただいた。本トピックスの執筆を通して、過去の経験が現在に強く影響していることに気づくことができた。学生の皆さんも、これからにつなげられる経験を積めるよう過ごしていただけたら何よりである。私自身は、自らを厳しい環境に置くことと、ONとOFFの切り替えをしっかりと行うことは今後も続けていきたい。

参考文献

- 1) <https://www.hitachicm.com/global/jp/sustainability/sdgs/case-study/#a02>
- 2) <https://www.hitachicm.com/global/jp/news-list-jp/20-08-19j/>
- 3) <https://www.hitachicm.com/global/jp/news-list-jp/topics21-09-01j/>
- 4) 八木澤遼, 伊藤和寿, Pha N. Pham: サクションブースト式エネルギー回生による油圧ショベルの高効率化, p.74-76, 春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (2016)
- 5) 八木澤遼, 伊藤和寿, PHAM Ngoc Pha, 池尾茂: ポンプ供給圧低減による水圧モータシステムの高効率化, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.49, No.3, p.72-79 (2018)

(原稿受付: 2022年4月21日)

What do you think of Japan? (Youは日本をどう思う?)

第20回 マレーシアから日本に留学して



著者紹介



せりん おんふいつ
セリン オンフイツ

信州大学工学部機械システム工学科卒業
〒380-8553 長野市若里4-17-1
E-mail: sereneong17@gmail.com

2017年呉工業高等専門学校に編入し、2020年に卒業。2020年に信州大学工学部機械システム工学科に編入し、2021年に同学科流体制御研究室（飯尾研究室）にて卒業研究をおこない2022年3月に卒業。

1. はじめに

自己紹介：

マレーシアの自然に恵まれているクチン市の出身。
日本語学校で2年間日本語を学び、2017年来日、



写真1 高専の友達と一緒に実家に帰って旅したとき（中央が筆者）



写真2 呉工業高等専門学校の運動会での集合写真

呉工業高等専門学校に編入した。卒業後、信州大学工学部機械システム工学科3年次生に編入した。

楽器を弾くことが好きで、コロナ禍の前に吹奏楽部に入部した。週末や休みにはよく旅行をしたり、新しい料理に挑戦したりしている。

来日の理由：

母国のマレーシアでは日系企業が多く、日本は技術力に優れている印象を持っていた。質の高いサービスが受けられるおもてなしのイメージも強かった。

日系企業に勤めた父親の影響で、日本文化に興味を持ったことから、実際に触れて、学びたいとの考えにいたり、日本を留学先に選んだ。

所属機関とその研究：

信州大学工学部機械システム工学科の飯尾研究室に所属し、水中で駆動する衝動水車の研究開発に携わった（写真3）。

上水道では、浄水場と配水池の間の余剰圧力を減圧弁で減じている地点があり、圧力エネルギーが廃棄されている。そのため、減圧弁を水車に替えることで減圧と発電を実現する水車である。一般的には衝動水車は気相中で駆動されるが、衛生上の理由から水中で運転する衝動水車が考案された。水中駆時の攪拌損失や円板摩擦の低減、ノズルやランナ形状の最適化に取り組んだ。この研究テーマに携わり、SDGsへの取組につながることはもちろん、日本に

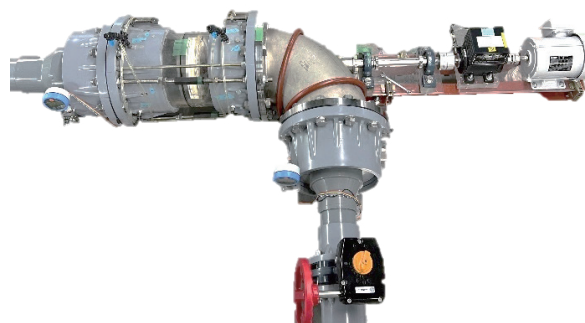


写真3 水中駆動衝動水車の実験装置

においてエネルギーの自給率向上、非常用電源などのニーズが高いことを実感し、そこに貢献すべく研究活動を行った。

2. 日本の印象

2.1 来日直後の第一印象

来日して初めて乗った新幹線がとても静粛で、速度が速かったのが強く印象に残っている。この新幹線の快適さに驚くとともに、日本の技術力の高さを感じた。

生活面では、コンビニやスーパーがどこにでもあり、電車へのアクセスも良いため、非常に便利だと感じた。また、歩道や公園が多く、毎日体を動かす機会があり、健康的に過ごせる印象を持った。その他に、日本人にとって当たり前の牛乳パックや納豆の蓋が消費者にとって便利になるようにいろいろと工夫されていることに驚いた。

2.2 研究室・大学

日本人の考え方や働き方で驚いたこと：

早いもの勝ちの環境で育てられた私の観点から、なんでも公平に実施されている日本に驚いた。研究室への所属直後から1か月間の基礎研究が課され、その後で先生と個人面談で希望テーマや理由を述べてから、各自のテーマに配属された。公平に自分のやりたいテーマを選べるチャンスが与えられ、なんとすてきなシステムだと思った。そのほかに、ものごとを集団で決めるときは、数学的に公平なじゃんけんで決めることが多かったのも驚いた。

また、日本人の余裕をもって行動する習慣にも驚いた。例えば、就職活動は卒業する前の2年間弱の期間から始まること、学会に向けて数週間前に最終の発表練習が行われたことに関して、事前のプランニングが非常に重視されていると感じた。

日本に滞在中に自分が最も変わった点：

編入してきた留学生として、たくさんの専門用語がある専門科目の授業に参加すること、周りのクラスメイトと会話することが最初のチャレンジだった。

自ら周りのクラスメイトに知らないことを聞いたり話したりするのが大事だと気づいたことで、ものごと積極的に挑戦する精神が生み出された。

また、報告・連絡・相談という習慣が身についた。研究室では定期的に研究の進捗状況について先輩や先生に対して報告・連絡・相談する機会を持った。自分のアイデア、実験データをまとめてから相談し、前に進むという過程を日々の研究生活で繰り返した。社会人になったときには「ハウレンソウ」の大切さを忘れず周りの方々とコミュニケーションを取っていきたいと考えている。

2.3 生活に関して

日本の生活で気になったこと：

日本では周囲に合わせる集団主義が重視されており、常に平和を保つような行動が求められていると感じた。留学生の私は空気が読めないときが多く、のりが悪いと言われまいように、周囲に合わせてしまうことが多かった。日本語では「大丈夫」や「いいよ」のような曖昧な言葉があり、よく相手の意図を勘違いしてしまった。

来日したばかりのときに、海外の文化に慣れていない人が多いと感じ、最初は少し戸惑った。自ら機会を設けてたくさん国際交流のイベントを行った。その結果、私も日本のいろいろな文化について学ぶことができたため、お互いに理解し合うことが大切だと気付いた。

他に気になった点として、毎回スーパーやコンビニに行くと、プラスチック袋で包まれている商品が多く並んでおり、違和感を感じた。衛生的であることは間違いなが、COP26でさらに注力されてい



写真4 研究室の仲間と一緒に山に登りに行ったとき

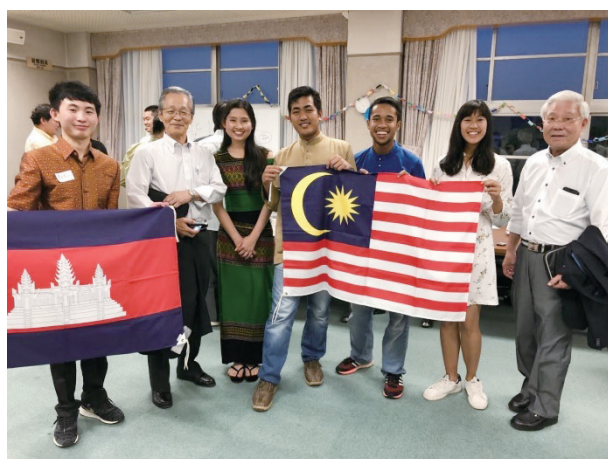


写真5 高専の国際交流パーティーの様子



写真6 呉映画サークルでマレーシアの文化を紹介する講座の後に一緒にサラワク・ラクサを作った様子（右が筆者）

る環境問題に対して改善していく必要があると感じる。金銭だけで解決できない問題だと思うが、まずは自分の行動できる範囲でマイバッグを持参すること等を意識していきたいと考えた。

日本の生活でよかったこと：

日本は安全で住みやすい場所が多いと思う。女性としてひとりで町を出歩いても、あまり不安を感じないため、ひとり旅が好きな方にとっても適している国だと思う。また、留学しているうちに勉強だけではなく、文化も含めて学んでいくのが大事だと思う。実際には、自分の周りにはいろいろな経験をしている方がいらっしやり、積極的に会話することで日本人の優しさを感じた。家族が遠くに住んでいる私に対して、周りの方々の優しさはモチベーション向上につながり、寂しい気持ちを抑えることができた。

私は旅行をするのが好きで、日本に留学しているうちに多くの有名な観光地に行った。どこに行っても設備が整っていて、魅力的だった。さらに、地産地消に力を入れている国として、各都道府県を訪問する際に特産物や名物を提供する店が多くあり、自分好みのお土産を買うことができた。そして、現地の方々が自分の住んでいる都道府県を応援していることが伝わった。呉に住んでいたとき、知り合いの

99%は広島カープの大ファンであり、試合に勝つと必ずその様子がクラスで話題になり、皆で盛り上がった。

3. 日本の方々へのメッセージ

「どのように英語を勉強したの？」がこれまでの留学経験で一番多かった質問だと思う。個人的なアドバイスとしては、まずアウトプットしてみる（話す、書く）ことをお勧めする。文法や語彙を覚えることも必要だが、その場合には行動につながるのが最後になるため、間違いを恐れずにアウトプットすることが大事だと思う。

その他、相手に対して気になった点があれば、気遣いを含めて直接相手に意見を伝えることで平和を保つことができると私は思う。文化や言語の違いでよく相手の言いたいことを勘違いしてしまうため、再度確認する習慣が身についた。当たり前と思われるかもしれないが、外国人との会話に限らずお互いに密接にコミュニケーションを取っていきましょう！

（原稿受付：2022年5月21日）



写真7 信州大学の「Mix Culture」というイベントの様子

トピックス

ドイツ駐在日記

著者紹介



しお み こう じ
塩 見 幸 治

SMC株式会社
〒300-2493 茨城県つくばみらい市絹の台4-2-2
E-mail : shiomi.koji@smcjp.co.jp

1997年 筑波大学大学院工学研究科 修士取得
後退学、同年 SMC株式会社に入社、弁理士。

1. はじめに

私は幼稚園から会社まで茨城県内で過ごしてきた田舎者である。そんな私が初めて県外で生活するチャンスをいただいた。それがイギリス駐在であった。そのイギリス駐在を経て、さらに、欧州産業の中心といわれるドイツへ駐在するチャンスをいただいた。

ドイツに来るまで田舎者の私は、日本製品が世界中を圧巻していると信じ切っていた。

しかしながら、最近のVDMA（ドイツ機械工業連盟）の発表で、2019年の機械の輸出国シェア第1

位はなんとドイツで、日本は、中国とアメリカに続き第4位であることを知った。

さらに、ドイツの人口が、日本と比較して2/3と少ないにも関わらず、倍近くの輸出額を誇ることを知り大変驚いた。そして、最近では「インダストリー 4.0」なる第4次産業革命を提唱している。

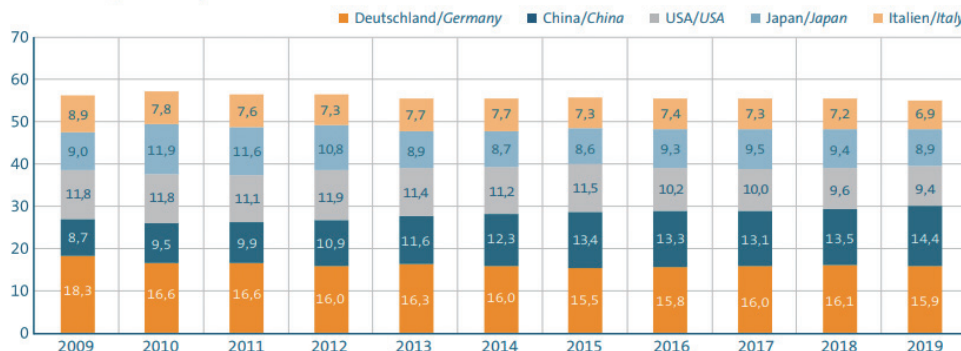
夕方にはさっさと帰宅し、有給も平気で3週間以上連続して取得するドイツ人のどこにそんなパワーがあるのか大変不思議である。ドイツの観光名所やおいしい食べ物の話はガイドブックに任せ、この8年半のドイツ駐在で私が見てきたそんな産業大国ドイツを、大変失礼ではあるが、独断と偏見で分析してみたいと思う。

2. ルールが大切なドイツ人

4年半駐在したイギリスは、「Hi, how are you?」と知らない人にでも気軽にあいさつをし、常に譲り合いの精神を持つジェントルマンの国であった。たとえば、相手の車が車線変更をして前に入ろうとするとき、必ずパッシングをして前に入れてくれる。常に相手のことを考えて行動をするのがイギリス人の印象であった。

Anteile ausgewählter Länder an der Maschinenausfuhr der wichtigsten Lieferländer Shares in world trade of mech. engineering of the most important exporting countries

Anteile* in Prozent/Shares* in percent



*) Ab 2011 sind die Handelsanteile der ausgewählten Länder niedriger, weil der Kreis der ausgewerteten Lieferländer erweitert wurde./
In 2011 trade shares have been decreased due to the integration of further countries.

Quelle/Source: Nationale statistische Ämter, VDMA/National statistical offices, VDMA

図1 世界の機械の輸出国シェア¹⁾

ドイツに赴任し自動車の運転にちょうど慣れてきたころ、1台の車が合流車線から私の前に入ろうとした。私は、イギリス時代を思い出しスピードを緩め「前へどうぞ」とパッシングをした。すると、突然その車は元の合流車線に戻ってしまい、そして、私の後ろで合流したのである。その時、私の目の前で起きた光景は、まったく私には理解できなかったが、その後、ドイツではパッシングは、「進路妨害するな!」という意味らしいことがわかった。「前にどうぞ」と親切心でパッシングをした私の意に反して、進路妨害でルール違反をしていると警告されたその車は道を譲ってくれたのであろう。

この速度制限がない高速道路「アウトバーン」は、大変有名である。このアウトバーンがさらにドイツでのルールの大切さを理解するうえで大変良い例としてあげられる。日本人にとって「速度無制限」というと無秩序な感じがするが、ドイツではまったくそうではない。むしろ、予想以上に大変秩序のある高速道路といえよう。ここでは追い越しを完了した自動車は常に走行車線に戻るというルールが徹底されている。その結果、高速道路上に毎時80kmで走行車線を走る低速トラックと、毎時200km以上で追い越し車線の一番外側を走るスポーツカーが、まったく問題なく混在している。速度差120km以上もある高速道路は日本ではまったく考えられないだろう。

一方で明確なルールがなく良識に判断を任される場所でのドイツ人は、秩序を重んずる日本人からすると考えられない行動をする。たとえば、電車の乗り降りやスーパーマーケットでのレジ待ちの列は目も当てられたものではない。

日本の電車の乗り降りでは、必ず降りる人のために乗降扉の前を大きく開け、全員降りてから乗り込む。一方、ドイツでは、乗降扉の前に乗り込む人だけができる。そこには、人ひとりがようやくひとり通れるほどの隙間があり、人をかき分けて電車を降りなければならない。そして、人が降りる前に電車になだれ込んでいく。日本人には考えられない光景であらう。

また、ドイツの中小規模のスーパーマーケットでは、店員が品出しとレジの両方をこなし、レジ待ちの列の長さに合わせて使用するレジの台数を調整する。もしも、レジ待ちの列が長くなってくると、すでに数人のドイツ人が次に開きそうなレジの前で待ち始める。そのレジが開かないと、店員にレジを開けろと主張し始める。そして、そのレジが開くと、他のレジで長い列を作っていた人たちが我先になだれ込んでいく。このドイツでのスーパーのレジ待

ちでの現象も、列で待つことに慣れている日本人にとって初めはどうしても理解できない出来事のひとつであらう。ちなみに、イギリスで隣のレジが開いたとすれば、「あなたが先に並んでいたのでお先にどうぞ」と譲り合い、並んでいた順番そのままですら別列ができあがる。日本から見るとヨーロッパはひとつと思われがちだが全くそうではない。

いまだにどうしてドイツ人がルールを重んずる人種となったのかはわからないが、このように彼らにとってルールは大変重要な役割をしているようだ。ドイツ産業界でも同じようにルールが重要な役割を果たしていることを、このドイツ駐在を通して垣間見ることができた。そして、そのルールを明文化するために、規格化と標準化が盛んにおこなわれている。ここからなぜドイツ産業界で規格化や標準化が重要なのか考えてみたいと思う。

3. ドイツの教育システム

まず、ドイツの教育システムを知らずに、ドイツ産業界での規格や標準化の重要性を理解することは難しいと思われるので、ここで多少触れておきたいと思う。ドイツでは、大学も含めて職業訓練のシステムが発展成熟している。机の上の勉強だけでなく、その専門に関わる職業訓練も重要な位置を占めており、それぞれが専門家となるべくそれぞれの教育を受ける。そして、どの専門分野に進んでも、その分野についてすでに会社経験がある専門家となって学校を卒業していく。たとえば、ドイツでおもしろいのは、大学で人事についての専攻が可能であり、会社の人事部に就職する。また、パン屋の場合、パン職人となるためにパンの職業訓練学校を2年半から3年半の間受けて筆記と実技試験を合格しなければならない。さらに、マイスターとなるためにはパン職人になった後の経験だけでなく、専門学校でさらに勉強を積み重ねて国家試験に合格しなければならない。マイスターになって、はじめて自分のパン屋を開くことができる。このようにある特定分野の専門家として経験と勉強を積み重ねていく。

ところで、ドイツの職業訓練は日本のインターンの制度とは異なり、本当の専門家を育てるための教育システムである。日本のインターンは求人件数が多くないだけでなく、その多くは短期無給で実務ではなく仮想プロジェクトの作業で、また、就職プロセスの一部であることも多いようだ。一方で、ドイツでは、学校に通いながら会社に入り職業訓練を受ける機会が全員にある。学校での専攻分野と関わりのある実務を中長期にわたって会社で覚えていく。会社は少額ではあるが給与を職業訓練生に支払う。

そして、職業訓練の後には、専門別の全国共通試験を受ける。このように学校卒業時には会社経験を兼ね備えた一定レベル以上の特定分野の専門家として就職していくのである。

また、大学在籍中にのみインターンを経験ができる日本と異なり、ドイツでは学校に在籍中のみならず入学前や卒業後にもキャリアを考えながら職業訓練を自由に受けることが可能である。このようなドイツの教育システムをドイツ人の同僚は皆、口をそろえて世界一と自負している。

4. ドイツ人と仕事

このような教育システムを持つドイツでは同級生が一斉に高校や大学を卒業することはなく、また、社会人となる時期もそれぞれ異なる。それに対して、企業は実務経験と専門知識のある即戦力を求めて通年採用を行い、必要な時に必要な人を採用する。もちろん日本のような新卒採用者の入社式もない。

ドイツの教育制度はその道の専門家を教育機関と企業が一体となって生み出すしくみであり、そして学校を卒業して社会人になるとときには、企業活動の中における自分の専門分野がすでに決まっている。そして個人が会社と雇用契約を結ぶときには、その個人の専門範囲をかんがみ業務範囲が明文化されている。

そのドイツ人は、契約外つまり専門外の業務を率先して行うことは多くはない。彼らは、自分が専門とする業務範ちゅうを仕上げた後、隣の別の分野の専門家に業務を引き継いで完了する。契約外の業務を押し付けた場合、訴訟になることもあると聞いている。

たとえば、聞いた話では、機械エンジニアのために材料を選定する専門のエンジニアがいるらしい。新卒で就職後にさまざまな業務を任せられ期待される日本の会社からこれらを見ると、理解が難しいであろう。逆に、ドイツ人からみると職業訓練で専門教育を受けていない日本人が、毎年4月1日に一斉に入社し、その後、多様な業務をつぎつぎとこなしていくことに理解するのに時間がかかるようである。

また、別の側面からみると、ドイツでは社員自身の自主性と意思を尊重する風土があるといえよう。任された専門分野については、他から言われなくとも自ら掘り下げて勉強をする。

また、そこで自らの業務に関係する自己負担費用が発生すると、その費用を控除することが可能である。たとえば、個人で支払った業務に関連する書籍、そして、個人で申し込んだセミナーや学校等の費用は控除対象となる。このようにドイツでは教育シス

テムだけでなく、社会に出てからも先ほどのマイスター制度も含めて、国全体をあけて個々の専門性を深めさせてさらに飛躍できるしくみを作り上げているようにみえる。さらに、その自身で深く掘り下げた専門分野に関するその専門家の発言は、上下関係に関係なく尊重されることも理解できる。

5. 規格が好きなドイツ人

ドイツ人の規格好きは周知の事実と思う。規格品以外の製品をドイツ人に売り込むのはなかなか簡単ではない。良く考えるとあたり前だが、規格はその道の専門家が集まって作られることを、このドイツで協会の技術分科会に参加してわかった。市場では競合する敵同士の会社が、会社から選りすぐった専門家を技術分科会に送り出し、まったく損得の垣根なくかんかんがくがくと将来の新しい規格について議論をしているのには大変驚いた。こうやって「State of the art」と呼ばれる「その専門家による、その時に考え得る最高の考え方」を反映した規格が制定され、その規格に沿って各社が製品開発や適合試験を実施して世の中に製品を送り出す。

つまり規格はドイツ人にとって一種のバイブルのようなものである。

そして、ドイツ生産設備は規格適合品が多く採用され、さらに、その生産設備自体も規格に適合しているのである。たとえば、身近な規格としてDINレール、IP保護構造等級、丸型Mコネクタ、ISOバルブにISOシリンダ、さらに、ATEX防爆規格や安全規格などがあげられる。おもしろいところでは、小型デジタル圧力センサのメニュー画面まで規格化されていることをドイツに来て知った。

6. ドイツの標準化

そして、規格化に加え、ドイツ人は標準化も好きである。装置を設計製作する会社には多くの場合、使用機器の標準化を専門に担当する部署がある。もちろん標準化の中でもさらに各分野の専門家がいる。そこで、製品の採用テストを行い、装置に使用可能な標準製品リストを作成する。ところで、できあがったそのリストは単なる製品のリストではなく、その会社が装置にどの技術を採用しているのかを明確に示す文書としても大変重要な役割を果たしている。われわれ部品メーカーは、その技術動向を見極めて製品開発し、このリストにその自社開発製品を載せることがひとつの大きな仕事である。

そして、装置設計担当者がそのリストから実際に使用する機器を選ぶ。ただし、この標準製品リストにはほとんどの場合で規格品から選定されているの

が現状である。これは、標準化部門が、彼らのバイブルにあたる規格に適合した製品を選定しておけば、同じ規格信者の設計担当や現場担当など他部署から文句を言われないからであろう。一方で、規格に沿わない製品をドイツ人に紹介し、さらに、そのメリットを伝えて採用につなげることは並大抵の努力では成し得ないことはご理解いただけるだろうか。その製品が規格品と同等以上で使用に問題がない事を確認する必要がある、標準化担当だけではなく現場から設計まで巻き込んで確認が実施される。

7. ドイツの生産設備

物を製造するという意味では、ドイツ製も日本製も生産設備としてはもちろん同じ機能を有している。その中でドイツの生産設備で要求される独特かつ重要な機能が「自己診断」であり、われわれ部品メーカーにも要求されている。実は、私が赴任する前の2000年前後から、その「自己診断」の要求がドイツからあったが、今振り返るとその当時はその本質を良く理解できていなかったと思う。

ドイツでは「100%の製品は存在せず、必ず壊れる」さらに、「人は必ずミスをする」という考えにもとづき、装置立上げや生産で故障や問題が発生したときに、いかに早くその部分を見つけて対処できるかに重点を置いている。

先に述べたとおり、ドイツの会社は皆、個々人が専門分野を持って業務を遂行しており、専門家の集団といえよう。生産設備でも同様に、それぞれの細分化された分野の専門家がスペシャリストとして生産設備の一部を担当している。したがって、ドイツでは問題の発生個所によって担当する専門家が異なる。

このため、どの専門家を呼ぶべきか迅速かつ確に判断する必要がある。そこで装置内の状態を表示できる自己診断情報が重要な役割を果たす。

日本では納入した製品が一台でも故障した場合、その原因追究と改良を行い、その後、二度と同じ原因で故障が起きないように対策を行う。問題の対処という観点では、日本とドイツの思想はまったく異なると言える。

現在の装置は、エンタープライズ系のネットワークから装置内までEthernetベースの通信でつなげることが可能となった。また、さらにその先の末端のセンサやアクチュエータにもドイツ発の通信技術で

あるIO-Linkでつなげることが可能となった。つまり世界中のどこにいても装置内の状態や情報を見ることができ、さらに、遠隔地から装置内末端まで設定等の変更をする技術的な準備は整ったと言えよう。セキュリティなど課題はまだ多いが、今後はこれら技術をどのように活用していくかに焦点があてられていく。

最近では、末端の機器から定期的に圧力や温度等の情報を集め、その大量のデータを解析して装置自体の状態確認やさらに省エネに役立てようという動きもある。人の健康診断と同じで、目に見えた自覚症状がなくとも診断結果に応じて保守保全を行い、装置を健康な状態に保って生産を続ける考え方である。

今後のハードウェアやソフトウェア技術の進歩向上により、今では考えられもしない技術や手法で製造装置が進化し、ドイツが提唱する「インダストリー 4.0」の姿も少しずつ見えてくるのが大変楽しみだ。

8. おわりに

ドイツ駐在を通して、ドイツ独特の社会の仕組みからドイツらしい成熟した社会ができあがっていることを垣間見ることができた。また、その独特の考え方や風習からドイツ特有の哲学にもとづく装置ができあがっていることを理解することができたと思う。競合の垣根なくドイツ人全員で英知を結集して規格化を行い、その規格を使用して各企業で標準化を行う。そして、それにもとづいたドイツ製造装置が世界を圧巻しているのであろう。

考えて見ると日本も同じように日本人固有の独特な考え方や文化があり、そこから他の国では生み出せない素晴らしい製品を世の中につぎつぎと出している。日本人の考え方も他国からは理解しにくいところもあるだろう。そのような中で、相手の考え方を尊重し理解していくことで本当に相手が必要なことが見えてくることをドイツ駐在で学ぶことができた。そして、今後はこれまでの駐在経験を生かし、国際的に通用する製品開発に携わり、社会に貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) Mechanical engineering –figures and charts 2021, VDMA

(原稿受付：2022年3月11日)

会 告

〈理事会・委員会日程〉

4月～5月	企画委員会
5月27日	理事会
5月31日	編集委員会

〈理事会報告〉

2022年度第1回理事会

5月27日 13:00～14:00

Web開催（参加者26名）

- (1) 総会の準備状況
- (2) 評議員会開催状況
- (3) 2021年度理事会みなし決議
- (4) 国際シンポジウム広島2024開催準備状況
- (5) 2022年秋季講演会開催準備状況
- (6) EBSCO hostへの論文集情報の提供について
- (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〉

2021年度第6回企画委員会

4月23日～5月20日

書面審議（参加者33名）

- (1) 春季フルードパワーシステム講演会プログラム案
- (2) 春季講演会運営マニュアルについて
- (3) 製品技術セッションについて
- (4) 春季講演会併設セミナーについて
- (5) その他

2022年度第1回編集委員会

5月31日 13:00～11:30

Web開催（参加者21名）

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.53 No.4「フルードパワーと音」
 - 2) Vol.53 No.E1「緑陰特集」
 - 3) Vol.53 No.5「フルードパワーとカーボンニュートラル」
 - 4) Vol.53 No.6「社会を支える分離技術」
 - 5) Vol.54 No.1「フルードパワーとソフトロボティクス」
 - 6) Vol.54 No.2「フルードパワーとハイブリッド（案）」
- (2) その他
 - 1) EBSCO hostへの会誌記事情報の収録について
 - 2) 今後の特集について

2022・2023年度 委員会委員長

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 2022・2023年度の委員会委員長が通常総会後に開催された理事会にて選任されました。

会長	早川 恭弘	奈良工業高等専門学校 電子制御工学科 特任教授
副会長（庶務委員会）	川上 幸男	芝浦工業大学 システム理工学部 教授
副会長	嶋村 英彦	川崎重工業株式会社 専務執行役員 精密機械・ロボットカンパニー プレジデント
基盤強化委員会	田中 豊	法政大学 デザイン工学部システムデザイン学科 教授
編集委員会	柳田 秀記	豊橋技術科学大学 機械工学系 教授
企画委員会	桜井 康雄	足利大学 工学部創生工学科機械分野機械工学コース 教授
国際交流委員会	加藤 友規	福岡工業大学 工学部機能機械工学科 准教授
論文集委員会	風間 俊治	室蘭工業大学 もの創造系領域 教授
情報システム委員会	竹村研治郎	慶應義塾大学 理工学部機械工学科 教授
表彰委員会	高岩 昌弘	徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 教授
出版委員会	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 教授
会計委員会	塚越 秀行	東京工業大学 工学院システム制御系/システム制御コース 教授

会 告

2021年度 学会賞表彰

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会2021年度の学会賞の受賞者が決まりました。

受賞者は、2022年5月27日にオンライン開催された第41期通常総会終了後に氏名が読み上げられ、後日、受賞者に表彰状、盾などが贈られました。

名誉員推挙

・東北大学 中野 政身 殿

フェロー称号授与

・株式会社小松製作所 名倉 忍 殿

学会賞表彰

学術論文賞

「Transmitted Power of Piping and Wiring in Hydraulic, Pneumatic, and Electric Drive Systems
(Considerations for Loss in Pipes and Wires)」

・室蘭工業大学 風間 俊治 殿

技術開発賞

「電動流量制御弁とタクトタイムコントローラを用いた空気圧シリンダ制御およびモニタリングシステム」

・株式会社コガネイ 齊藤 悠 殿

・株式会社コガネイ 高橋 義広 殿

技術功労賞

・SMC株式会社 西股 健一 殿

学術貢献賞

・法政大学 田中 豊 殿

SMC高田賞

「Development of Small-sized Servo Valve using Gate Mechanism and Diaphragm」

・岡山理科大学 小林 卓巳 殿

公益財団法人 油空圧機器技術振興財団顕彰

「Improving the overall efficiency of an electro-hydraulic drive system by using efficiency maps」

・横浜国立大学 Ha Tham Phan 殿

・横浜国立大学 佐藤 恭一 殿

最優秀講演賞

2021年6月に開催された2021年春季フルードパワーシステム講演会において、特に優秀な講演発表をされた受賞者

・社会人部門 株式会社IHI 増田 精鋭 殿

「ボペット弁型圧力制御弁のヒステリシスの再現」

・学生部門 立命館大学 甲斐 友朗 殿

「新油圧回路H2SB+による単関節アームの位置軌道追従」

・学生部門 信州大学 宇佐美太一 殿

「非線形油圧アームの力制御のロバスト性について」

会 告

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

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催
2022年秋季フルードパワーシステム講演会
開催日：2022年11月10日(木)・11日(金)
会場：海峡メッセ下関（山口県下関市）

2022年秋季フルードパワーシステム講演会を海峡メッセ下関で開催します。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、講演会では新型コロナウイルス対策を講じたうえで、通常の対面型

での実施を予定しています。感染状況によってはオンラインに変更する場合があります。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。

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

後援・協賛行事

第380回講習会「事例に学ぶ流体関連振動」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 関西支部

開 催 日：2022年7月26日(火)～7月27日(水)

会 場：オンライン開催

U R L：https://jsmekansai.org/Seminar/kou380.html

第50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：2022年8月8日(月)～8月10日(水)

会 場：工学院大学 新宿キャンパス（東京都新宿区西新宿1-24-2） U R L：https://www.vsj.jp/symp2022/

2022年度 計算力学技術者（CAE技術者）資格認定事業

（固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者）

主 催：一般社団法人 日本機械学会 計算力学技術者資格認定事業委員会

試験日程：2022年8月初旬 上級アナリスト認定試験一次試験（書類審査）

2022年9月17日(土) 上級アナリスト認定試験二次試験（固体力学分野）

2022年9月25日(日) 上級アナリスト認定試験二次試験（熱流体力学分野・振動分野）

2022年12月2日(金) 1級認定試験（固体力学分野・熱流体力学分野・振動分野）

2022年12月8日(木) 2級認定試験（熱流体力学分野・振動分野）

2022年12月9日(金) 2級認定試験（固体力学分野）

会 場：下記HPを確認ください

U R L：https://www.jsme.or.jp/cee/

Dynamics and Design Conference 2022

企 画：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：2022年9月5日(月)～9月8日(木)

会 場：秋田県立大学 本荘キャンパス（秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口84-4）

U R L：https://www.jsme.or.jp/conference/dmccconf22/

第40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：2022年9月5日(月)～9月9日(金)

会 場：東京大学 本郷キャンパス（東京都文京区本郷7-3-1） U R L：https://ac.rsjs-web.org/2022/

日本機械学会 第35回計算力学講演会（CMD2022）

主 催：一般社団法人 日本機械学会 計算力学部門 開 催 日：2022年11月16日(水)～11月18日(金)

会 場：オンライン開催 U R L：https://confit.atlas.jp/guide/event/cmd2022/top

日本機械学会 第21回機素潤滑設計部門講演会（MDT2022）

主 催：一般社団法人 日本機械学会 機素潤滑設計部門 開 催 日：2022年12月5日(月)～12月6日(火)

会 場：オンライン開催 U R L：https://www.jsme.or.jp/conference/mdtconf22/

Grinding Technology Japan 2023

企 画：日本工業出版株式会社、株式会社産経新聞社 開 催 日：2023年3月8日(水)～3月10日(金)

会 場：幕張メッセ（千葉県千葉市美浜区中瀬2-1） U R L：https://gtj-expo.jp/2023/jp/

新型コロナウイ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。

編集室

次号予告

—特集「フルードパワーとカーボンニュートラル」—

【巻頭言】「フルードパワーとカーボンニュートラル」発行にあたって

岩田 将男

【解説】

油圧ショベル向け油圧蓄圧式ハイブリッドシステム

土方 聖二

油状態センサを用いた油圧機器向け状態監視システム

亀田 幸則

低炭素化社会実現に向けた油圧要素機器の開発

三枝 直人

Sustainable Management of CO₂—CO₂削減の取り組み—

妹尾 満

カーボンニュートラル実現に向け空圧機器が貢献できること（仮）

猪飼 暢崇

フルードパワーのカーボンニュートラルへの挑戦

風間 俊治

【トピックス】

学生さんへ、先輩が語る—他分野から空気圧機器メーカーに勤めて—

江川 千晶

笑顔で活躍—お仕事フルードパワー便—理系進学を選択して—

相良 桃子

【企画行事】2022年春季講演会併設セミナー「進化を続ける空気圧機器」

張本 護平

2022年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記（豊橋技術科学大学）

委員 佐 藤 恭 一（横浜国立大学）

副委員長 山 田 宏 尚（岐阜大学）

妹 尾 満（SMC株）

委員 飯 尾 昭一郎（信州大学）

谷 口 浩 成（大阪工業大学）

飯 田 武 郎（コマツ）

中 野 政 身（東北大学）

岩 田 将 男（CKD株）

中 山 晃（日立建機株）

加 藤 友 規（福岡工業大学）

藤 田 壽 憲（東京電機大学）

北 村 剛（油研工業株）

丸 田 和 弘（コマツ）

窪 田 友 夫（KYB株）

村 岡 裕 之（株コガネイ）

栗 林 直 樹（川崎重工株）

吉 満 俊 拓（神奈川工科大学）

五 嶋 裕 之（株工苑）

担当理事 伊 藤 隆（KYB株）

齋 藤 直 樹（秋田県立大学）

学会事務局 成 田 晋

佐々木 大 輔（香川大学）

編集事務局 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ないので、直接本会へご連絡ください。

個人会員各位

2022年7月15日

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

2022年度会費納入のお願い

拝啓 時下益々ご清祥のこととお慶び申し上げます。

さて、2022年度（2022年4月1日～至2023年3月31日）の会費を、下記の通りご納入賜わりたくお願い申し上げます。なお、すでにご納入くださいました場合は、なにとぞご容赦ください。

敬 具

記

2022年度
正 会 員 会 費 8,000円
(40歳未満で入会された方は、入会から
5年間にかけ4,000円となります。)
学生会員会費 2,000円
シニア員・名誉員会費 4,000円

お 願 い

- ・2021年度以前の会費を未納の方は、新年度分（2022年度）とあわせてお振り込みくださいますようお願い申し上げます。
- ・会員名を必ずご記入ください。
- ・便利な自動振り込みは手数料が不要です。ご希望によりお申し込み書をお送りいたしますので、FAXまたはE-mailにてご一報いただきたく、よろしくお願い申し上げます。

以上

払 込 取 扱 票															払込票兼受領証																		
00		東京		口座番号 (右詰めにご記入ください)											金 額		千 百 十 万 千 百 十 円		千 百 十 万 千 百 十 円														
00		1103		133690		133690		金額		※		※		※		※		※															
加入者名		一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会													料 金		特 殊 取 扱		加入者名		一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会												
通 信 欄		該当するものに○をつけ、お振込の内容をご記入ください。 1. () 年度 () 会費 企 業 名・[] 会 員 名・[] 2. () の代金													払込人住所氏名		※ (郵便番号)		受 付 局 日 附 印		料 金		※ (消費税込み)		受 付 局 日 附 印								
裏面の注意事項をお読みください。(郵政事業庁)(私製承認第23957号)																																	

お振り込み先金融機関一覧

1. 郵便振替貯金 00110-3-133690

*下の振替用紙をご利用いただけます。

(なお、この振替用紙は会費納入・資料購入・セミナー等受講料など総てにご利用いただけます。)

2. 三井住友銀行 日比谷支店 (普) 7611417

(注) *口座名はいずれも「シャ) ニホンフルードパワーシステムガッカイ」です。

*誠に恐れ入りますが、振り込み手数料はご負担くださいますようお願い申しあげます。

*上記2をご利用の方で、会社名・大学名にてご送金の方は、個人名・内容・振込金融機関名を、FAXまたはE-mailで学会宛にご連絡くださいますよう、お願い申しあげます。

FAX : 03-3433-8442

E-mail : info@jfps.jp

この受領証は、郵便局で機械処理をした場合は郵便振替の払込みの証拠となるものですから大切に保存してください。

ご注意

この払込書は、機械で処理しますので、口座番号及び金額を記入する際は、枠内に丁寧に記入してください。

また、下部の欄(表面及び裏面)を汚したり、本票を折り曲げたりしないでください。

(日本郵政公社)

〒105
0011

東京都港区芝公園三丁目五十二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―一〇―三一―二三六九〇

東京都文京区白山一―二三―七 アクア白山ビル五階
印刷所 勝美印刷株式会社