

卓越した大学院拠点形成支援

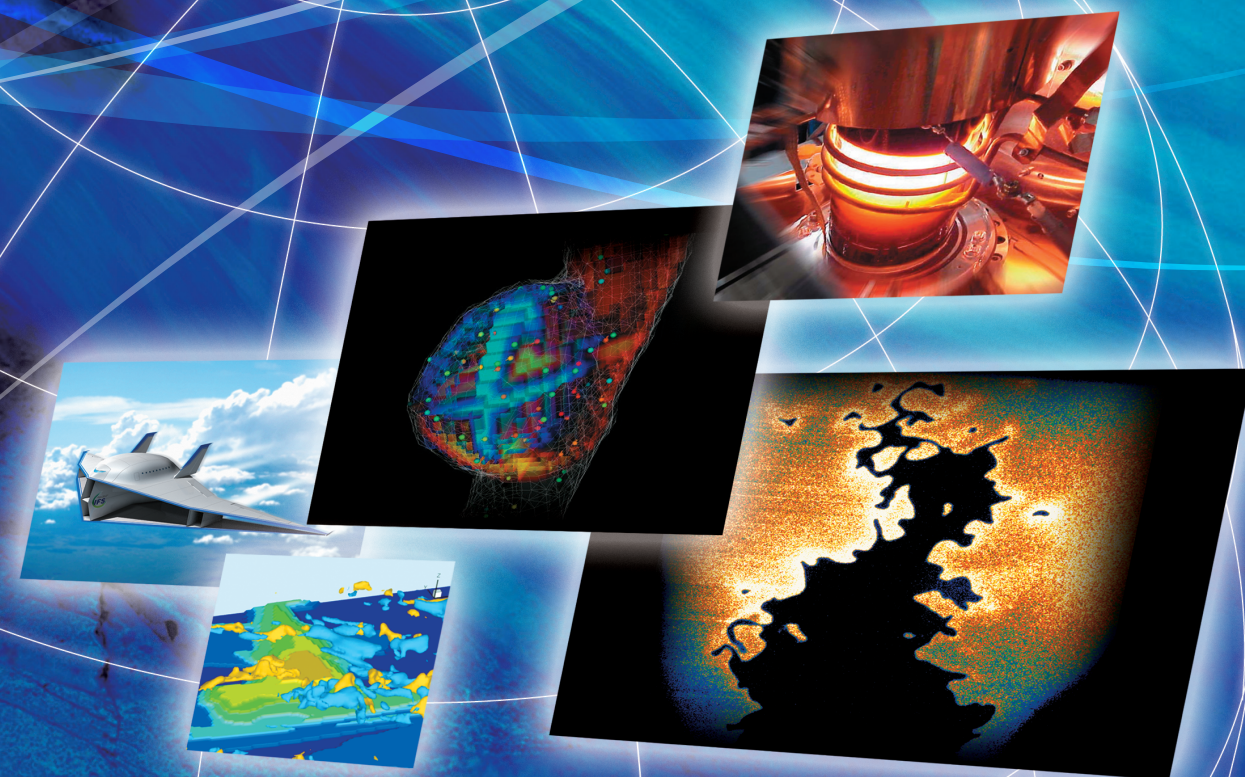
流動ダイナミクス
知の融合教育研究世界拠点

平成28年度 研究活動報告書

流動ダイナミクス 知の融合教育研究世界拠点

平成28年度 研究活動報告書

東北大学 流体科学研究所



はしがき

本拠点は、平成 25 年度に卓越した大学院拠点形成支援「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」として東北大学流体科学研究所を拠点に工学研究科、情報科学研究科、医工学研究科等と連携・協力し活動を開始し、平成 28 年度も平成 27 年度に引き続き、里見 進総長および学生支援部の人材育成事業へのご理解とご協力により活動を継続しております。

この拠点は、平成 21 世紀 COE プログラム「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」(平成 15~19 年度)、グローバル COE プログラム「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」(平成 20~24 年度)の成果・基盤等を引き継ぐもので、10 年以上にわたり博士課程後期学生を対象に、世界で活躍する若手研究者・技術者を育成することを使命とし、人材育成に貢献してきました。

平成 28 年 10 月に開催した 13th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2016)では、22 か国 584 名もの研究者および学生が参加し、流動ダイナミクス分野では、「世界最大級」の国際学会として仙台で開催することが定着し、「流動ダイナミクスに関する成果は、毎年仙台で発表しよう」が、合言葉になり仙台の国際化に貢献しています。

中でも、学生がオーガナイザーを務め自主的に企画運営をする特徴を持った学生セッション (International Students / Young Birds Seminar on Multi-scale Flow) は、今回で 12 回目を迎え、学生の参加人数も 288 名と年々参加人数が増え活発な討論が行われ、日本人の学生たちのプレゼンテーション能力が益々上達してきたことを実感しております。

これは、21 世紀 COE 及び GCOE での各種プログラム活動を通じて、国際的・先導的人材育成するため、英語での発表討議能力を養成しながら学生が主体的に能力を発揮できるよう指導してきた成果の現れであると思っております。

本拠点では ICFD を通しての人材育成だけでなく、研究支援リサーチ・アシスタントの研究発表会や海外の著名な研究者を招聘しての特別講演会、インターンシップ派遣及び国際会議派遣などを通じて、国際的な博士課程人材を育成する事業を実施してきました。

卓越した大学院拠点形成が総長の強力なご支援のもと、来年度も人材育成を目的とした拠点活動が継続できますことは、大変有意義なことと思っております。つきましては、これまでの成果を踏まえて、流体科学研究所を拠点として関係専攻と連携し引き続きこれまで築いた国際ネットワーク等を進化させ真の国際拠点として確立する所存です。

今後ともご支援・ご指導を賜りますようお願い申し上げます。



平成 29 年 3 月 3 日

東北大学流体科学研究所 卓越した大学院拠点形成支援
「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」

実施責任者 圓山 重直

平成 28 年度卓越大学院 研究活動報告書

1. 卓越した大学院拠点形成支援	
「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」の概要.....	1
1.1 実施担当者・研究協力者	2
2. 主な教育活動.....	3
2.1 学生企画 / 運営国際会議・シンポジウム	3
2.2 RA 研究発表会.....	4
2.3 特別講演会	4
2.4 優秀研究奨励プログラム採択者.....	5
2.5 国際会議派遣	5
2.6 インターンシップ派遣	5
3. 研究支援リサーチ・アシスタントの取り組みと実績	6

1. 拠点の概要

本拠点の中心となる学術領域である「流動ダイナミクス」は、エネルギー、地球環境、ライフサイエンスなど、人類が直面する諸問題に密接に関連する総合学術領域である。本拠点は、21世紀COE「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」およびGCOE「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」の10年間の拠点形成支援プログラムにより「流動ダイナミクス教育研究の世界拠点」として確固たる地位を確立しつつある。本拠点では、拠点形成の各種事業の強力な推進によって、流動ダイナミクスの世界拠点形成の確立を目指しており、本拠点の中核となる流体科学研究所は、共同利用・共同研究拠点として流体科学の基礎および応用研究において世界最高水準の研究環境で研究を推進するとともに、世界で活躍する若手研究者・技術者を育成することを使命としており、その方向性は流体科学研究所の将来計画とも合致している。

本拠点は、世界最先端研究を通じ構築してきたマルチステージ国際ネットワーク(オーストラリア・ニューサウスウェールズ大学/ロシア・モスクワ国立大学/韓国・韓国科学技術院/米国・シラキュース大学/フランス・国立応用科学院リヨン校/スウェーデン・王立工科大学)を活用して、各種プログラム等により優秀な博士課程人材を集め、国際的な人材育成を実施してきた。つまり、国際ジョイントラボ等の研究活動を通じて、国際的な異文化融合などの知の融合を目指し、国際水準を凌駕する学問的能力と強靱な精神力を身につけて、学術分野のみならず広く国際社会に貢献する中核的人材として、独創的な成果を持続的に生み出してゆく将来の流動ダイナミクスの世界コミュニティでリーダーシップを発揮できる人材を育成している。

教育体制は、流体科学研究所の教員が兼務教員として所属する工学研究科（機械機能創成専攻、ファインメカニクス専攻、航空宇宙工学専攻、ロボティクス専攻）、情報科学研究科（システム情報科学専攻）、環境科学研究科（先進社会環境学専攻）の教育と密接に連携するとともに、工学研究科（化学工学専攻、量子エネルギー工学専攻）、情報科学研究科（情報基礎科学専攻）及び医工学研究科（医工学専攻）とも協力し、共同で博士課程教育を行っている。その中で、上記マルチステージ国際ネットワークを活用した博士課程学生の国際教育各種事業を強力に推進し、国際共同研究、国際インターンシップ、国際会議の企画運営など学際教育・融合研究等を通じて国際的な博士課程人材を育成している。

1.1 実施担当者

実施責任者

圓山 重直

流体科学研究所・教授

西山 秀哉

流体科学研究所・教授

高木 敏行

流体科学研究所・教授

小林 秀昭

流体科学研究所・教授

寒川 誠二

流体科学研究所・教授

大林 茂

流体科学研究所・教授

伊藤 高敏

流体科学研究所・教授

小原 拓

流体科学研究所・教授

丸田 薫

流体科学研究所・教授

石本 淳

流体科学研究所・教授

徳増 崇

流体科学研究所・准教授

太田 信

流体科学研究所・准教授

福西 祐

工学研究科機械機能創成専攻・教授

浅井 圭介

工学研究科航空宇宙工学専攻・教授

澤田 恵介

工学研究科航空宇宙工学専攻・教授

青木 秀之

工学研究科化学工学専攻・教授

橋爪 秀利

工学研究科量子エネルギー工学専攻・教授

山本 悟

情報科学研究科情報基礎科学専攻・教授

小玉 哲也

医工学研究科医工学専攻・教授

雨澤 浩史

多元物質科学研究所・教授

研究協力者

中野 政身

流体科学研究所・教授

佐藤 岳彦

流体科学研究所・教授

米村 茂

流体科学研究所・准教授

白井 敦

流体科学研究所・准教授

内一 哲哉

流体科学研究所・准教授

小宮 敦樹

流体科学研究所・准教授

伊賀 由佳

流体科学研究所・准教授

清水 浩之

流体科学研究所・助教

渡辺 豊

工学研究科量子エネルギー工学専攻・教授

北島 純男

工学研究科量子エネルギー工学専攻・准教授

江原 真司

工学研究科量子エネルギー工学専攻・准教授

遊佐 訓孝

工学研究科量子エネルギー工学専攻・准教授

三浦 英生

工学研究科付属先端材料強度科学研究センター・教授

佐藤 一永

工学研究科付属先端材料強度科学研究センター・准教授

畠山 望

未来科学技術共同研究センター・准教授

三木 寛之

学際科学国際高等研究センター・准教授

2. 主な教育活動

2.1 学生企画 / 運営国際会議・シンポジウム

学生が企画・運営する国際会議を開催し、英語での発表討議能力を養成しながら研究組織運営とリーダーシップの訓練を行う。

The Twelfth International Students / Young Birds Seminar on Multi-scale Flow Dynamics

平成28年10月10日～12日 仙台国際センター

学生がオーガナイザーを務め自主的に企画運営するという特徴を持つ本セッションは、平成28年10月10日から12日にかけて行われた **Thirteenth International Conference on Flow Dynamics** (第13回流動ダイナミクスに関する国際会議：22か国584名参加、うち学生288名)の学生セッションとして開催された。今回は、博士課程の赤上研太氏、奥野友哉氏、ロッケンバッハ怜氏の3名がオーガナイザーとしてプログラム作成や講演論文の集計作業等を行った。

教員および参加者による投票で、62件の発表から選ばれた以下3名の学生に **Best Presentation Award** が授与された。



【Best Presentation Award】

Mr. Kyohei Hanazaki (Nagaoka University of Technology)

Mr. Keisuke Otsuka (Tohoku University)

Mr. Ziyue Xu (Tohoku University)

2.2 RA 研究発表会

設置目的：全員参加の研究交流会とする。

日 時 平成29年1月26日

場 所 東北大学流体科学研究所COE棟3階セミナー室

<優秀研究奨励プログラム採択者による研究発表>

発表者：大塚 啓介

題目：「流体・構造・制御の異分野融合による可変翼モデリング法の確立」

<優秀研究奨励プログラム採択者による研究発表>

発表者：堤 駿

題目：「微細藻類からの高効率油脂回収法の確立を目指した藻類の定式化の提案」

<国際インターンシッププログラム派遣報告>

発表者：朱 敏杰

派遣期間：平成28年9月1日～10月31日

派遣先：Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystem, Chinese Academy of Sciences



2.3 特別講演会

- 1) 日 時 平成28年10月11日
場 所 仙台国際センター
講 師 Professor Wu-Shung Fu
(National Chiao Tung University, China)
題 目 “Simulation of Gaseous Discharge from a High Pressure Vessel by an Opening”

- 2) 日 時 平成29年3月6日
場 所 東北大学 流体科学研究所COE棟3階セミナー室
講 師 Associate Professor Chenwang Lei
(The University of Sydney, Australia)
題 目 “Resonance and transition of thermal boundary layers”



- 3) 日 時 平成29年3月23日
場 所 東北大学 流体科学研究所COE棟3階セミナー室
講 師 Associate Professor Bong Jae Lee
(KAIST, Korea)
題 目 “Measurement of Near-Field Thermal Radiation for Applications in Thermophotovoltaic System”

2.4 優秀研究奨励プログラム採択者

優秀な学生を人材育成していく教育プログラムで、自らの研究内容を効果的に表現する方法を学んでいくことを目的とする。

氏 名	所 属	学年	指導教員
大塚 啓介	工学研究科航空宇宙工学専攻	D1	榎原 幹十朗
堤 駿	工学研究科化学工学専攻	D2	青木 秀之

2.5 国際会議派遣

博士課程後期学生が自らの研究成果を海外等で開催される国際会議において発表し、海外の多くの研究者と意見を交換し、学ぶ機会を与えることを目的とする。

派遣者名	学年	学会名	学会開催地	開催期間
奥野 友哉	D2	36th International Symposium on Combustion	Seoul, Korea	2016.7.31 ~ 2016.8.5
許 書涵	D3	The 17th International Stirling Engine Conference	Newcastle, UK	2016.8.24 ~ 2016.8.26
Sun Hongjun	D1	7th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications	Xi'an, China	2016.9.18 ~ 2016.9.20
吉川 穰	D3	27th International Symposium on Transport Phenomena	Honolulu, USA	2016.9.20 ~ 2016.9.23
松本 貴則	D1	21st International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation	Lisbon, Portugal	2016.9.25 ~ 2016.9.28
磯野 達志	D2	AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2017	Grapevine, USA	2017.1.9 ~ 2017.1.13

2.6 インターンシップ派遣

海外研究機関にて現地の研究プロジェクトに直接参画する博士課程後期学生に対し、その経費を支援する。国際的な視野を持ち、将来国際プロジェクトマネージャーとして活躍できる人材を育成することを目的とする。

学生氏名	学年	派遣先	研究課題	期間	指導教員
朱 敏杰 工学研究科機械機能創成専攻	D1	Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystem, Chinese Academy of Sciences	二硫化モリブデン膜を用いた Piezotronic と Piezophototronic デバイスの開発	2016.9.1 ~ 2016.10.31	小野 崇人

3. 研究支援リサーチ・アシスタントの取り組みと実績

氏名 Grajetzki, Philipp



所属 工学研究科機械システムデザイン工学専攻・D2

研究課題

A new approach to determine the reactivity of fuels using a vertical type micro flow reactor with a controlled temperature profile

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

In this research the reactivity of gasoline and its surrogates in a micro flow reactor with a controlled temperature profile (MFR) is investigated. The MFR consists of a small quartz tube which is heated by an external heat source [1]. For low flow velocities a spatial separation of reaction zones (cool flame, blue flame and hot flame), called weak flame, can be observed which enables us to study the occurring reactions in high detail [2]. Based on the flame position and characteristics inside the tube, the reactivity of the fuels under various conditions can be examined.

This year, after having set up my experimental apparatus in the previous year, this research focused on extending the scope to more complex fuels on the one hand and to support experimental findings by numerical simulations on the other hand. In the experiments the number of fuel components was increased from 2 to 3, 5 and 10 as well as actual gasoline (a highly complex mixture). These mixtures were chosen in accordance with fuels from the Strategic Innovation Promotion program (SIP) which this research is part of. All fuels were divided into two groups of research octane number 90 and 100, respectively. Here it was found that compositions that show the same reactivity obtained by conventional methods, such as shock tubes and rapid compression machines, show different reactivity in the MFR. Here a higher number of components generally leads to higher reactivity. Furthermore, reactivities change with varying the equivalence ratio Φ , see Fig. 1. Under engine conditions lower Φ leads to lesser reactivity whereas in the MFR experiments it was found that

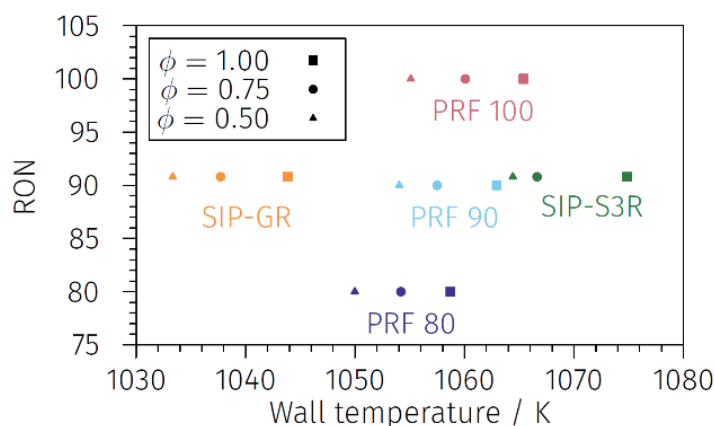


Fig. 1: Experimental hot flame positions for five fuels of octane numbers 80, 90 and 100 for three equivalence ratios Φ .

lower Φ lead to a higher reactivity for all mixtures.

For numerical simulations a one-dimensional model of the MFR [1] was used with the software CHEMKIN-PRO [3]. As reaction mechanisms the well-established Livermore PRF mechanism as well as newly developed mechanisms for the SIP fuels were employed. For all mechanisms a reduction of the equivalence ratio lead to lower reactivities which is opposite to the experimental findings, see Fig. 2. As all of these mechanisms were developed with the goal of matching engine

data, it appears that they are not capable of reproducing the conditions observed in the MFR. In order to get a better understanding of the underlying reasons that cause these discrepancies, work on determining the fundamental chemical and physical causes was begun recently.

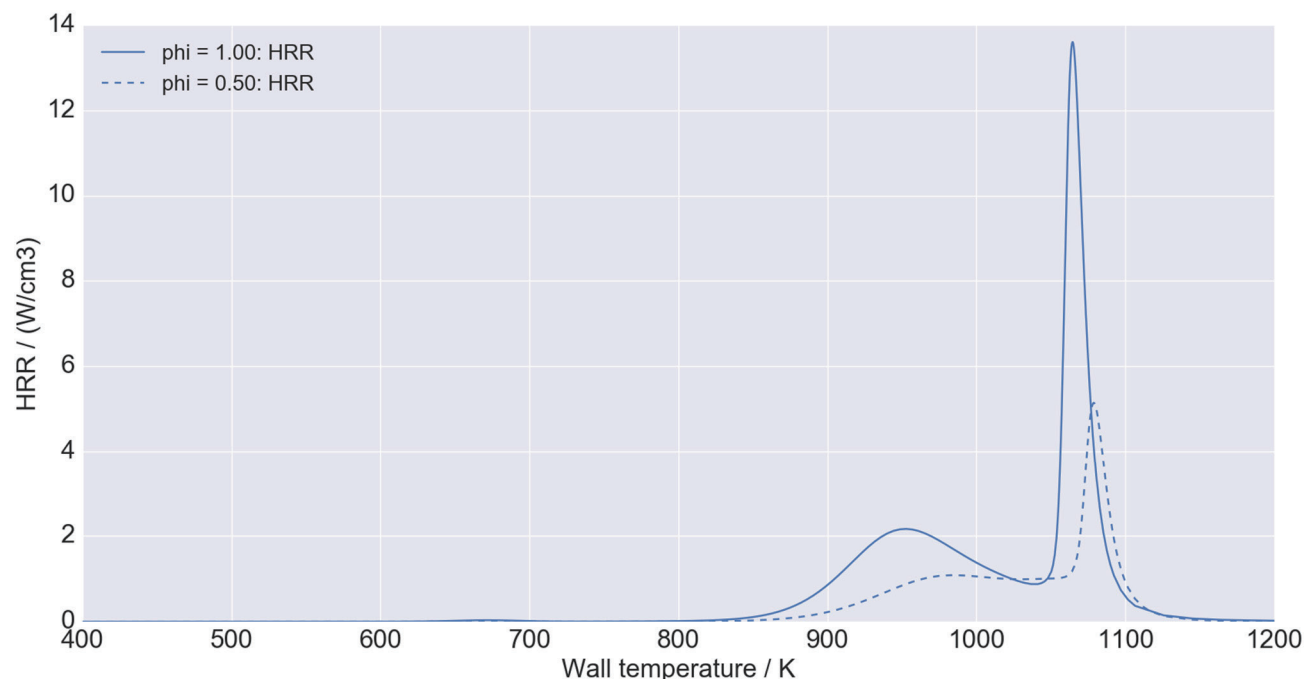


Fig. 2: Numerical heat release rate for *iso*-octane at equivalence ratios 0.5 and 1.0 as obtained by KUCRS PRF mech (SIP mech).

These results will be an important part in getting a profound understanding of the reactivity of complex fuels especially in low equivalence ratio conditions. For this, the results are being compiled and will be incorporated into a journal paper by the end of March 2017.

- [1] K. Maruta, T. Kataoka, N.I. Kim, S. Minaev, R. Fursenko, Proc. Combust. Inst., **30** (2), 2429-2436 (2005).
- [2] H. Oshibe, H. Nakamura, T. Tezuka, K. Maruta, Combust. Flame, **157** (8), 1572-1580 (2010).
- [3] CHEMKIN-PRO 17.2, Reaction Design: San Diego, 2016

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. Obtained experimental data of gasoline surrogate weak flames
To increase the size and accuracy of our database for fuel reactivity, experiments were conducted using SIP gasoline surrogates. In these experiments it was found that lower octane numbers lead to higher reactivity which is in accordance to conventional results. Higher reactivity was also found for lower equivalence ratios which is opposite to previous results and indicates further possibilities for better understanding of ignition and combustion.
2. Obtained numerical results for surrogate weak flames
One-dimensional numerical results were obtained for various reaction mechanisms under experimental conditions. Here a good agreement was found for stoichiometric cases. However, ultra-lean cases showed opposing trends for lower equivalence ratios. From this it was concluded that the existing understanding of ultra-lean combustion is still incomplete.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
Weak flame in a micro flow reactor with controlled temperature profile for the investigation of ignition characteristics in lean PRF/TRF/air mixtures (Poster)
SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム, Tokyo, June 2016
2. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
Ignition characteristics of ultra-lean PRF/TRF/air weak flames in a vertical-type micro flow reactor with a controlled temperature profile (Poster)
The 36th International Symposium on Combustion, Seoul, Korea, August 2016
3. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
RON of Gasoline Surrogates and their Weak Flame Characteristics in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile under Ultra-Lean Conditions (Oral)
Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, October 2016
4. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
Influence of RON on the reactivity of ultra-lean gasoline surrogates/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile (Oral)
第54回燃焼シンポジウム, Sendai, November 2016

【受賞・特許等】

受賞日：2016年3月28日

受賞名：東北大学外国人留学生総長特別奨学生奨学金

組織名：東北大学



氏名 加藤 昂大

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D3

研究課題

高圧環境下における同軸気流噴射弁の噴霧燃焼特性に関する研究

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

航空用ガスタービン燃焼器では、有害物質である窒素酸化物質(NO_x)や二酸化炭素(CO_2)の排出量が少なく燃料消費量を低減することが可能な燃料希薄燃焼の研究が盛んに行われており、代表的な低 NO_x 燃焼方式である Rich Quench Lean(RQL)方式の燃焼器が実際の燃焼器で使用されている。RQL方式では、火炎付近に燃料過濃部を形成することで安定した保炎範囲を有する一方で、燃料可能部の存在に起因する有害な燃焼排出物(NO_x 、すす)を低減することが出来ず、有害物質の排出量低減に限界が存在する。有害物質の排出量の低減を極限まで目指すためには、火炎付近から燃料希薄状態で燃焼を行う必要がある。燃料希薄燃焼では、燃料流量が少ないため燃料液滴の空間分布が不均一になり、燃焼振動や火炎吹き飛びなどの不安定な火炎を形成し易い特徴を有する。航空用ガスタービン燃焼器では、燃焼器内圧力や燃焼器入口空気温度が飛行条件によって幅広く変化することから、雰囲気圧力に対する保炎範囲の変化や希薄側での火炎吹き飛びメカニズムの解明は、航空用ガスタービン燃焼器において安定した燃料希薄燃焼を実現するための有用な知見になるであろう。

平成27年度では、高圧環境下におけるエタノール噴霧火炎の保炎範囲の計測を行い、保炎範囲は圧力が高くなるにつれて空気流速が低い領域から燃料希薄側で燃焼することを明らかにし、高圧環境下では蒸発潜熱の低下や噴霧粒径が小さくなることによって燃料希薄側でも安定した火炎が形成されることを示した。また、高圧下での保炎範囲は、エタノールガスの希薄側可燃限界値(当量比 $\phi = 0.41$)近くまで広がっており、ガス燃料を使用した場合の燃焼状態へと変化していることが分かった。しかしながら、火炎吹き飛びが生じる要因やそのメカニズムは明らかではない。

今年度は、高圧環境下の噴霧燃焼場において噴霧粒径を計測するために Phase Doppler Particle Anemometry(PDPA)を行うことが可能な高圧燃焼器を製作し、試験装置の構築および雰囲気圧力 0.3 MPaまでの高圧環境下の噴霧燃焼場に対して噴霧粒径の計測を実施した。なお、PDPAは、同軸気流噴射弁中心部を原点として軸方向(z軸)を5 mm、15 mm、25 mm、半径方向(r軸)に0 mmから30 mmの範囲で計測を行った。図1.1に高圧噴霧燃焼試験装置の外観図および内部の模式図を示す。高圧噴霧燃焼試験装置は、空気予熱用電気ヒーター、高圧容器、冷却塔接続配管、冷却塔で構成される。高圧容器および冷却塔接続配管、冷却塔は設計圧力 0.7 MPa、設計温度 200 °Cで設計しており、ケロシンを燃料とした場合に最大負荷条件下(雰囲気圧力 $P_c = 0.7\text{ MPa}$ 、噴射弁空気流速 $U_A = 70\text{ m/s}$ 、予熱空気温度200°C、総括当量比 $\phi_{\text{overall}} = 1.0$)で20分間試験を行うことが可能である。燃焼ガス冷却には、燃焼ガスへ直接水噴霧を行い、蒸発潜熱を利用して冷却する仕組みである。燃焼ガス冷却後のガス温度は、圧力調整弁前において200 °Cから300 °Cまで冷却される。高圧容器観測部は8か所の観測窓(観測窓直径62 mm)を有し、8か所の内2か所はレーザー入射観測窓に対して35度の角度の位置に設置されており、PDPA計測に最適化された仕様になっている。また、高圧容器内部には、同軸気流噴射弁上に一辺80 mmの矩形ガラスライナーが設置されており、前年度使用した小型高圧容器と異なる構造になっており、ライナーがある場合とライナーがない場合の違いが生じると考えられる。

図1.2に $P_c = 0.1\text{ MPa}$ および0.3 MPaにおけるエタノール噴霧火炎の保炎範囲を示す。また、前年度に計測したライナー無しの場合における保炎範囲も併せて示す。ライナー付き同軸気流噴射弁の保炎範囲は、空気流速が高くなるにつれて希薄側へと広がっており、ライナーがない場合と同様の傾向を示している。しかし、ライナーがない場合と比較して十分に微粒化が行われていない空気流速が低い領域から燃料希薄側まで保炎範囲が広がっており、空気流速 $U_A = 30\text{ m/s}$ 以上においてはエタノールガスの希薄側可燃限界である $\phi_{\text{overall}} = 0.41$ に近い吹き飛び当量比 $\phi_{\text{overall}} = 0.43$ になる。ライナー付きの場合は、噴霧コーン外側にも再循環領域が形成され、旋回流内側からだけでなく外側の領域からも噴霧液滴に加熱が行われるため、蒸発し易く可燃限界付近まで広がっていると考えられる。

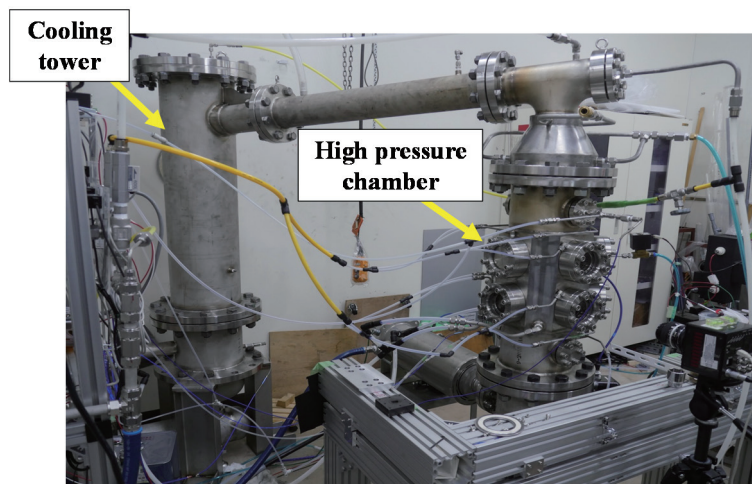


図1.1 高压噴霧燃焼試験装置外観図

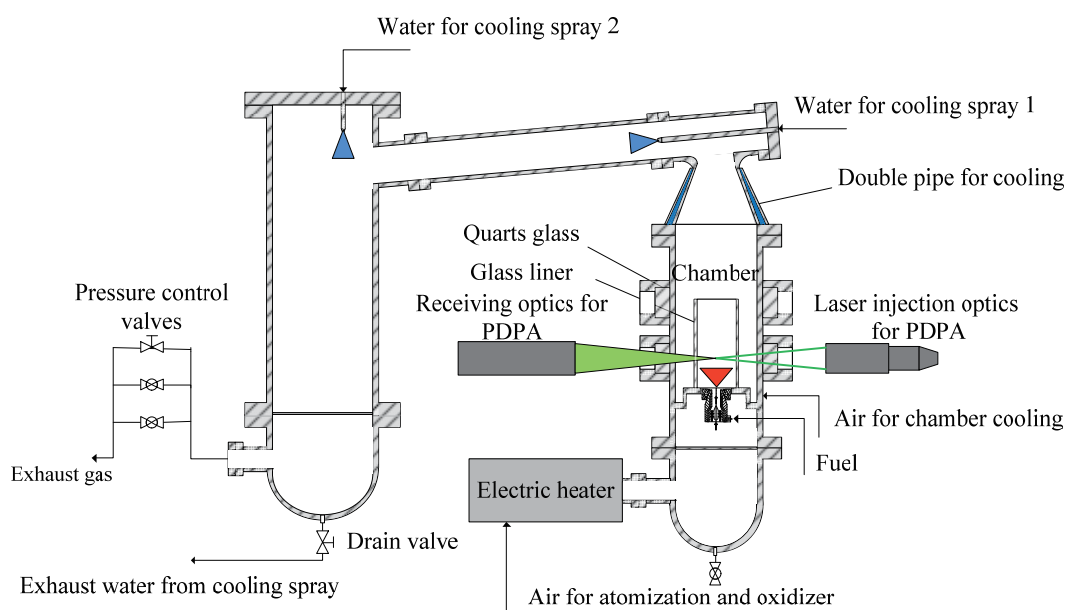


図1.2 高压噴霧燃焼試験装置断面図

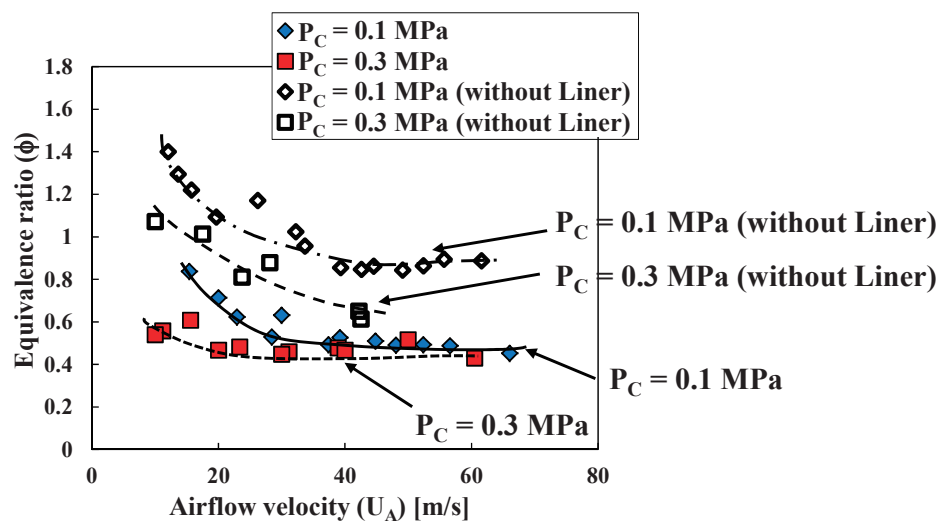


図1.3 エタノール噴霧火炎の保炎範囲

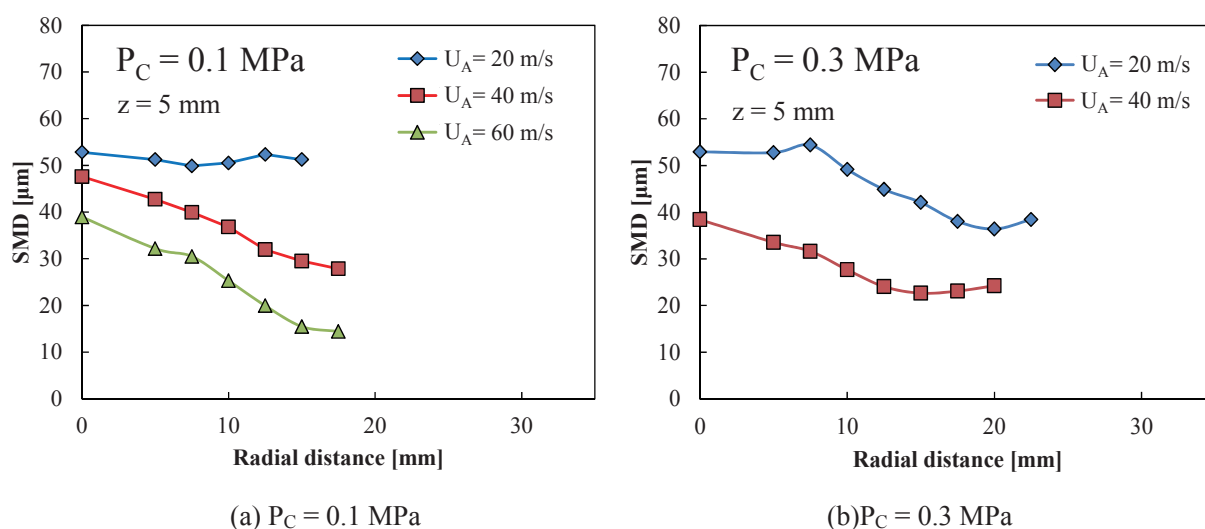


図1.4 $z = 5 \text{ mm}$ におけるSMD半径方向分布

図1.4 (a)、(b)に $P_C = 0.1 \text{ MPa}$ 、 0.3 MPa における吹き飛び限界付近でのSauter Mean Diameter (SMD)の半径方向分布を示す。なお、軸方向位置は $z = 5 \text{ mm}$ である。空気流速が高くなるにつれてSMDが明確に減少しており、蒸発時間が短縮されることで流速が高くなるにつれて保炎範囲が広がっていると言える。また、圧力が高くなった $P_C = 0.3 \text{ MPa}$ では、 $P_C = 0.1 \text{ MPa}$ と比較して同じ空気流速においてもSMDがさらに小さくなっており、高圧下において保炎範囲が広がる要因も粒径に起因するものだと考えられる。噴霧燃焼では、液体燃料が直接燃焼するのではなくガス化した燃料が燃焼することから、実際に燃焼している燃料は投入燃料に対して少なく、実際の当量比は低い[1]。また、層流燃焼速度は噴霧粒径が大きくなるにつれて高い当量比で最大になり、噴霧粒径が小さくなるにつれてガス燃料と同様に当量比1付近で最大となる[1、2]。すなわち、噴霧粒径の減少は投入燃料の内で即座にガス化する燃料を増加させることに繋がり、燃焼速度を増加させるため火炎範囲が広がっていると考えられる。しかし、保炎範囲はSMDの減少に対して非線形的に変化しており、エタノールの希薄側可燃限界付近に達すると噴霧粒径の変化に対して一定になる。空気流速の増大は、噴霧粒径の減少に繋がる一方で燃焼速度に対して酸化剤供給流速が高くなり、火炎が消炎するため保炎範囲が狭くなると推測される。これは、旋回流火炎の特性と似ていることから、流速の増加による再循環流の強化や発熱量の増大などに起因して、蒸発、混合した予混合気への熱量の供給や活性化学種の供給による燃焼速度の増大によるものではないかと考えられる。

[1] A. Neophytou and E. Mastroskos, Combust. Flame 156 (2009) 1627-1640.

[2] H. Kobayashi, N. Ono, Y. Okuyama, and T. Niioka, Proc. Combust. Inst. 25 (1994) 1693-1699.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 高圧環境下における同軸気流噴射弁の燃焼特性
航空用ガスタービン燃焼器のような実機燃焼器が使用される高圧環境下における同軸気流噴射弁の噴霧燃焼特性を明らかにすべく、火炎の高速度観察やレーザー計測法(PDPA)を用いて噴霧粒径の計測を実験的に行い、火炎吹き飛びメカニズムを調べている。
2. 高圧噴霧燃焼器の設計および構築
実際のガスタービン燃焼器が運用されるような高温高圧環境下を再現することが可能な試験装置は、国外においても少ない。そこで、高温高圧環境を再現することができ、レーザー計測に最適化された高圧噴霧試験装置、冷却系の設計およびその構築を行った。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Kodai Kato, Taku Kudo, Masahiro Uchida, Soichiro Kato, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi
Blow-off limit of ethanol spray flame in swirl flow using a pre-filming air-blast atomizer at elevated pressure
36TH International Symposium on Combustion, Poster presentation, W1P051, 2016.

氏名 熊田 圭悟



所属 工学研究科機械機能創成専攻・D1

研究課題

固体酸化物燃料電池の機械的信頼性・耐久性向上のための研究

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、固体酸化物燃料電池（Solid Oxide Fuel Cell：SOFC）に発生する機械的損傷をアコースティック・エミッション（AE）法と電気化学的測定手法を併用して評価し、3種類の特徴的なAE信号を抽出することに成功した。

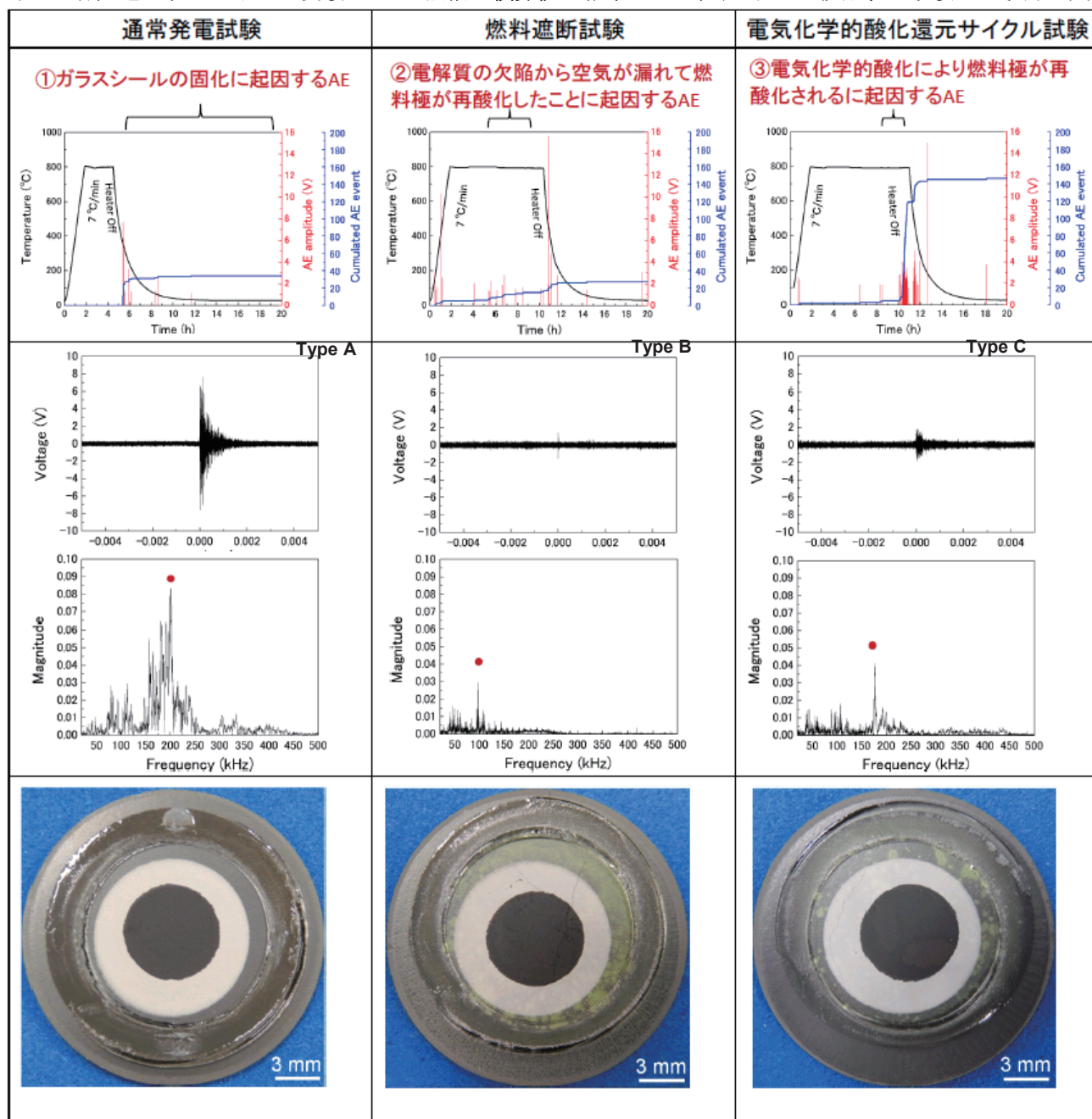
SOFCの機械的信頼性・耐久性を向上させる上で、機械的損傷の発生を防ぐことは大きな研究課題である。電解質に欠陥があり、そこから空気が漏れ燃料極が再酸化される場合や、燃料不足環境下で発電することで電気化学的に燃料極が再酸化される場合[1,2]において機械的損傷が発生することがある。また、ガスシールにガラスシールを用いた場合、降温過程においてガラスシールが固化し、セルが拘束され熱収縮変形が抑えられ、さらに温度が下がったところで機械的損傷が発生する場合がある[3]。高温発電環境下において発生した機械的損傷は、降温過程を経て、さらに損傷が進展すると考えられるが、これに関する十分な研究はなされていない。

本研究では、後観察や電気化学的測定手法に加えてAE法を併用することで、作動環境下で発生するSOFCの機械的損傷をより詳細に評価し、そこからSOFCの機械的信頼性・耐久性を向上させるための知見を得ることを目的としている。本年度は、通常発電試験（起動停止サイクルを含む）と燃料遮断試験および酸化還元サイクル試験を実施し、それぞれを比較・検証（表1）することで、①ガラスシールの固化に起因するAE信号（Aタイプ）、②電解質の欠陥から空気が漏れ燃料極が再酸化したことに起因するAE信号（Bタイプ）、③電気化学的酸化により燃料極が再酸化したことに起因するAE信号（Cタイプ）の3種類を分類した。

通常発電試験では、2回の起動停止サイクルで発電性能が劣化せず、セルにも光学顕微鏡で確認できる損傷はなかった。このため、検出したAE信号はガラスシールの固化に起因するものであると判断しAタイプとした。燃料遮断試験では、燃料供給停止後にセルの開回路電圧が0Vまで低下した。これは、電解質の欠陥から空気が漏れ燃料極が再酸化したためであり、酸化状態を維持するためN₂パージして取り出したセルには、電解質と燃料極の界面近傍で斑に酸化していることが確認できた。この燃料遮断中に検出したAE信号をBタイプとした。さらに燃料遮断中に発電することで電気化学的に酸化させた試験では、開回路電圧が0Vに近づいた段階で検出されるAE信号数が急激に増え、単に燃料を遮断した試験結果とは異なる傾向を示した。この急増したAE信号を電気化学的酸化に起因するAE信号としてCタイプとした。AE波形をFFT解析すると、Aタイプには200kHz、Bタイプは100kHz、Cタイプには175kHz付近にピークがあることが分かった。また、高温発電環境下でセルが再酸化し損傷した場合、降温過程におけるAE検出開始までの発電温度からの温度差が減少しており、セルが耐えられる熱応力の値が小さくなったと推測される。

今後は、分類したAE波形と機械的損傷の関連付けおよび自己組織化マップ（Self-Organizing Map：SOM）[4]を用いて類似AE波の発生過程から損傷過程の時系列分析を行い、SOFCに発生する機械的損傷の進展挙動について詳細に調査する。

表1 各発電試験における温度履歴とAE振幅・積算値の結果および代表的なAE波形、試験後の試験片写真



- [1] D. Sarantaridis, R.A. Rudkin, A. Atkinson, J. Power Sources, **180** (2008), pp. 704-710
 [2] J. Laurencin, G. Delette, B. Morel, F. Lefebvre-Joud, M. Dupeux, J. Power Sources, **192** (2009), pp. 344-352
 [3] A. Atkinson, B. Sun, Materials Science and Technology, **23** (10), (2007), pp. 1135-1143
 [4] K. Fukui, K. Sato, T. Hashida, J. Mizusaki, and M. Numao, ECS Transactions, **57** (1), (2013) pp. 571-580

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 起動停止サイクル試験において発生する固体酸化燃料電池の機械的損傷の評価
 固体酸化燃料電池の起動停止に伴って発生する機械的損傷を、AE法および電気化学的測定手法を併用して評価している。熱サイクルだけでなく酸化還元サイクルの影響も考慮した実験を行っている。

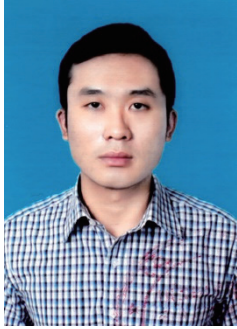
2. 固体酸化物燃料電池の電解質/電極間の界面はく離強度評価手法の開発
電極材料を電解質材料で挟み込んだ四点曲げ試験片を作製し、界面はく離強度を評価できるか検討している。室温だけでなく高温での実験も行っている。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. **Keigo Kumada**, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida
Investigation of Mechanical Damage of SOFC caused by Electrochemical Oxidation Using In-Situ Acoustic Emission and Electrochemical Technique
Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology (August 22nd, Sendai, Japan), (2016), pp. 970-973

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読あり）】

1. **Keigo Kumada**, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida
Investigation of Mechanical Damage of SOFC caused by Electrochemical Oxidation Using In-Situ Acoustic Emission and Electrochemical Technique
IEEE Nano 2016 16th International Conference On Nanotechnology, 2016/8/22, Sendai, Japan.
Oral Presentation



氏名 LE DINH ANH

所属 Graduate School of Engineering · D1

研究課題

Experimental and Numerical Study of Transition of Cavitation Pattern in a Sudden Converging Nozzle

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

In this fiscal year, I conducted research about the modeling of cavitation aspect, which is influence by the flow condition such as the Reynolds number. In this study, the effect of Reynolds number on the cavitation is investigated by the sudden converging-diverging nozzle experiment apparatus in Advanced Fluid Machinery Systems Laboratory as in Fig. 1. Then the numerical simulation is conducted base on the experiment data to investigate the influence of single-phase turbulence model especially for Reynolds number effect on the aspect of cavity surface by comparing with our visualization results. Fig. 2 shows the comparison of cavity aspect in the nozzle at different Reynolds number. For low Re, The quasi steady and almost smooth cavity surface can be seen in both short and long cavity length. In contrast, the unsteady cavity with disturbed surface in case of long cavity length and the cloud cavity in case of short cavity length are recorded in case of high Re flow. From the results of several combinations of Reynolds number and cavitation number, the transition from smooth to shear bubbles cavity and to disturbed cavity surface are visualized in both short and long cavity condition, respectively, in spite of same cavity length. Four kinds of single-phase turbulence model which are Reynolds-averaged Navier-Stocks (RANS) model, such as two-equation closures: (Re-Normalization Group (RNG) $k-\epsilon$ model, Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ model and RANS-LES hybrid closures such as: (Scale Adaptive Simulation (SAS), Delay Detached Eddy Simulation (DDES-SST)) are compared by using commercial software FLUENT 14.0 [1]. Additionally, the combination of cavitation model such as: Schnerr-Sauer model [2] and Singhal model [3] and turbulent model are investigated. Through numerical analysis and comparing to experimental data, the transition of cavitation patterns cannot reproduce by the combination of Schnerr-Sauer model and single-phase turbulence model, which corresponds to smooth cavity surface for all case, not even at high Re condition. In contrast, the Singhal's model reproduces the transition of cavity aspect in a certain combination with turbulent model. The disturbed cavity surface is reproduced by using Singhal's model with SST $k-\omega$ model when Reynolds number increases in case of long cavity condition. It is found that by accounting the local turbulent kinetic energy by SST $k-\omega$ model, the weighting term in Singhal phase change model affects to increase the mass transfer on the cavity surface while avoiding the increase of cavity volume, that is considered as a cause of the reproduction of the transition of cavity surface, which cannot be reproduced by Schnerr-Sauer model. Additionally, the SST $k-\omega$ model is comparatively effective and requires low cost compare to other turbulent model in point of cavity length and cavity volume.

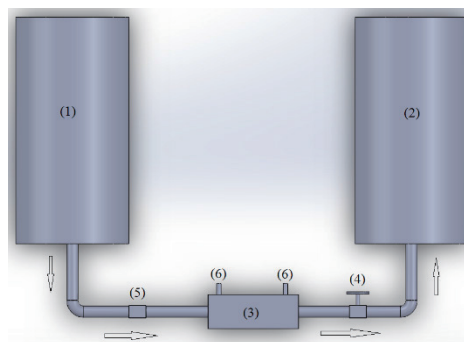


Fig. 1 Experiment apparatus

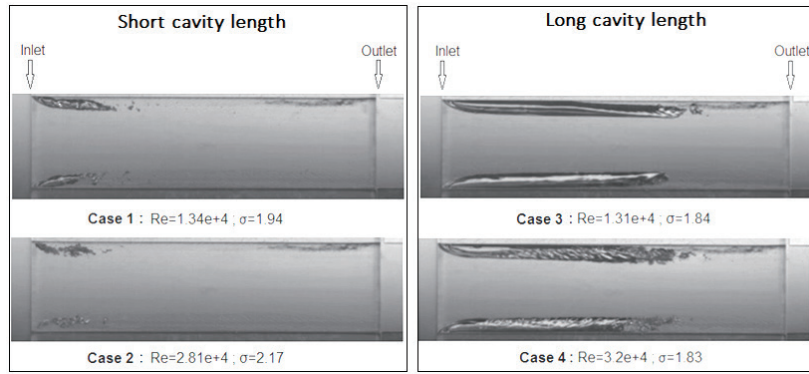


Fig. 2 Comparison of cavitation aspect at different Reynolds number

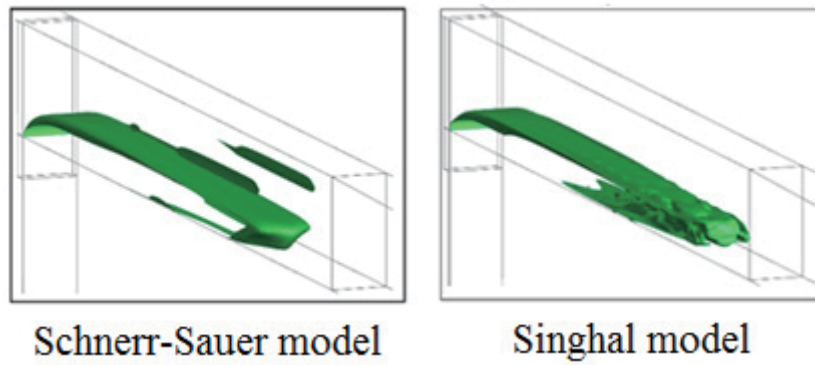


Fig. 3 Comparison of void fraction by Schnerr-Sauer model and Singhal model with SST k- ω model

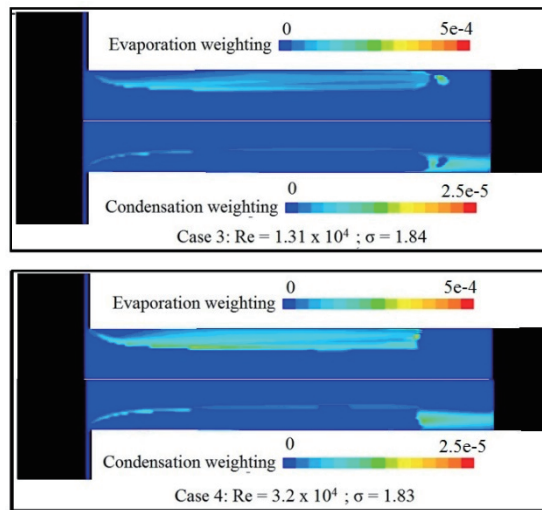


Fig. 4 Comparison of weighting term in case of long cavity by SST k- ω model and Singhal cavitation model

- [1] Fluent 12.0 Theory Guide.
- [2] G. H. Schnerr and J. Sauer. In Fourth International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA, 2001.
- [3] Ashok K. Singhal, Mahesh M. Athavale, Huiying Li, Yu Jiang. Journal of Fluid Engineering, September 2002, Vol. 124, Page 617-624

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. Investigate the influent of flow condition on the aspect of cavity
By using the sudden converging-diverging nozzle experimental apparatus, the aspect of cavity was experimented under the variety of flow condition (different Reynolds, number)
2. Investigate the influence of single-phase turbulence model especially for Reynolds number effect on the aspect of cavity surface.
The influence of various existing single phase turbulence model on the modeling of cavitation aspect was conducted. The results suggest that the SST $k-\omega$ show good agreement and effective in the modeling of cavitation.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Vu Van Truong, Le Dinh Anh, Truong Viet Anh
“Numerical Simulation of Solidification in an Annulus with the Presence of Density Difference”.
The Fourth International Forum on Heat Transfer (IFHT2016), 2nd – 4th November 2016.
2. Le Dinh Anh, Yuka Iga
“Influence of Cavitation Model on Cavity Surface Transition in a Nozzle”.
The 13th International Conference on Flow Dynamics, October 2016.



氏名 李 根燮 (イ ゲンソップ)

所属 工学研究科 機械機能創成専攻・D2

研究課題

回転円板上に形成られる3次元境界層流れの遷移過程に関する研究

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

回転円板上の流れの遷移過程について数値計算を用い研究を行った。回転円板上の流れは飛行機の後退翼上の流れと等しいため、研究をするにあたって便利のために後退翼上の流れの代用流れとして回転円板上の流れが研究されてきた。また、流れの遷移に関する研究はエネルギーの観点から非常に重要である。その理由としては、流れが層流から乱流で遷移したとき、乱流での摩擦抵抗は層流の時と比べて10倍になっていることが知られており、流れを制御することでエネルギー効率を上げられる。数値計算は三次元ナビエストークス方程式を有限差分法を用いて行った。表1は計算条件を表している。 Re は半径長さを意味する。2つの計算ケースがあり、各ケースは攪乱の導入位置が異なることがわかる。また、計算コストを下げるため、周方向の領域が $2\pi/32$ になり、ケーキのような計算場になっている。そして、上流と下流にはダンピング領域が設置されており、下流の境界からの望ましくない速度変動を抑制している。図2は速度変動強さを表している。 Γ は回転円板の何回転したかを意味する。また、カラーバーは速度変動強さを示している。各ケースに攪乱が投入された後、その攪乱が乱流遷移している。下流に乱れた領域が乱流になったことを示している。しかし、各ケースの遷移点が違うことがわかる。図2(a)は $Re=650$ 付近で、図2(b)は $Re=700$ 付近で遷移が始めている。その理由を調べるために、図3に周方向速度を $z=1.3$ の面に描画している。上流には何も見えないが、中流では線のパターンが見えており、これは縦渦である。また、下流には不規則的になっており、これは乱流を示している。大きな違いとして、縦渦の本数が違うことがわかり、この結果層流から乱流への遷移点が違うことが分かった。この結果は後退翼上の流れの実験結果[1]とよく一致している。また、同じ計算場から縦渦の本数が違う理由としては全体不安定によって一番成長できる本数が選ばれたからである[2]。

まとめると、回転円板上の流れにおいて、遷移が起こるとき生成される縦渦の本数によって遷移点が異なることが分かった。また、縦渦の本数が多いほど遷移点が遅れることが分かった。

表1 計算条件

	$Re_{jet}=600$ case	$Re_{jet}=650$ case
Re of jet area	598~602(ST)	648~652(WK)
r	450~853	
θ	$2\pi/32$	
z	0~54.2	
N_r	403	
N_θ	143	
N_z	61	

Δr	1.0
$\Delta \theta$	$2\pi/(32N_\theta)$
Δz	0.05 ($a=1.075$)
Re_{ns}	750~810(DB)
Re_{damp}	450~470 (UB) 810~853 (DB)

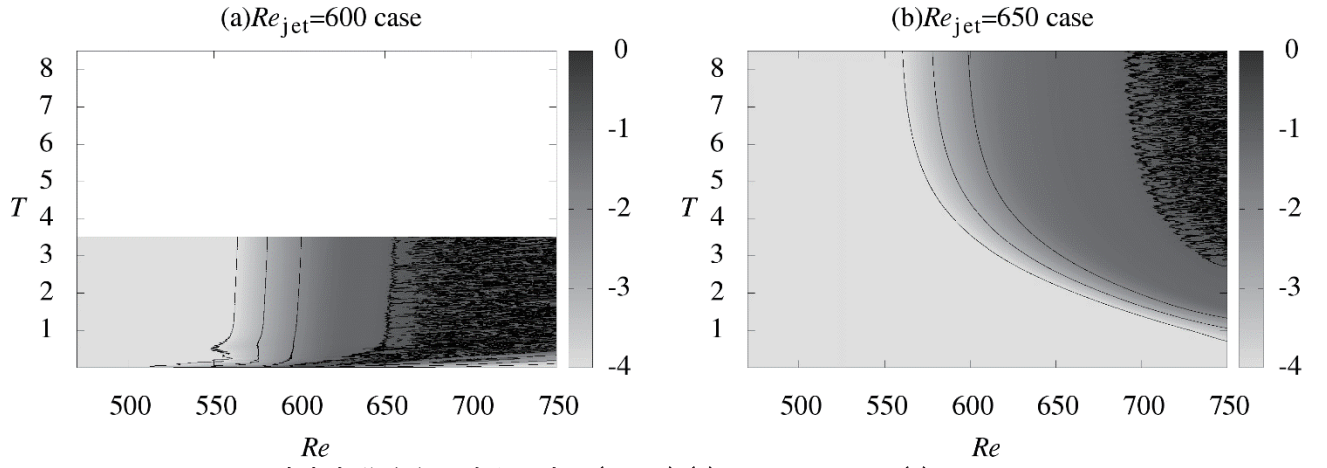


図1 速度変動強さの時空間変化($z=1.3$) (a) $Re_{jet}=600$ case (b) $Re_{jet}=650$ case

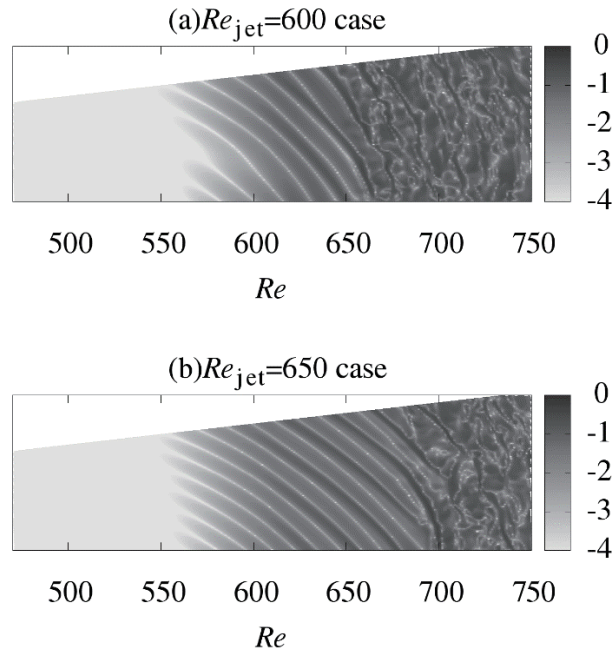


図2 $z=1.3$ の面における周方向速度 (a) $Re_{jet}=600$ case (b) $Re_{jet}=650$ case

[1] W. S. Saric, R. B. Carrillo, JR. and M. S. Reibert, *Meccanic*, 33 (1998) 469-487.

[2] R. J. Lingwood, *J. Fluid Mech.*, 299 (1995) 17-33.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 回転円板上の流れに現れる縦渦の本数と遷移点との関係
回転円板上の流れを数値解析し遷移と縦渦の本数の関係を調べる。縦渦の本数は全体不安定によって各半径に対して主に成長する数が異なる。縦渦の本数が高いほど遷移点が遅れることが分かった。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Keunseob Lee, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi
Numerical Study of Global Instability of a Rotating Disk
The 27th International Symposium on Transport Phenomena, Honolulu, USA, (2016.9.20-23)

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Keunseob Lee, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi
Relation between Spiral Vortices and 3-D Boundary Layer Transition of Rotating Disk Flow
The Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, (2016.10.10-12)

氏名 NGUYEN HOANG HUNG



所属 Department of Nanomechanics • D3

研究課題

Combinatorial approach to MgHf co-doped AlN ((Mg,Hf)_xAl_{1-x}N) thin films

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

Recently due to the restriction of lead in industry, lead-free materials have received considerable interest from many scientists for applications such as vibrational energy harvesters (VEHs) ¹⁻⁴. Among the lead-free piezoelectric materials that have been studied, *c*-axis oriented AlN film is a good candidate for the piezoelectric thin film for VEHs because of its high breakdown voltage⁴ and high output power density ¹. However compared with the traditional lead zirconate titanate (PZT), piezoelectric coefficient of the AlN ($d_{31} \sim 5.5$ pC/N for AlN and ~ 100 pC/N for PZT ⁵) is very low ^{1, 4-10}. Therefore, one of the important topics is to improve AlN piezoelectricity. The most effective approach developed so far is modifying crystal structure of AlN using substitution of Al³⁺ site by other elements.

Among the systems studied so far, MgHf co-doped AlN ((Mg,Hf)_xAl_{1-x}N) showed the highest increase rate of d_{31} per dopant concentration (at.%). For example, Y. Iwazaki et al. reported MgHf doping and d_{31} of AlN showed increase rate of 11.5% ⁹. This rate is the largest so far. However, in the previous study of (Mg,Hf)_xAl_{1-x}N, dopant concentration was limiter only to 13% although the piezoelectric coefficient tends to increase more at higher concentration of dopants. Moreover, the important crystal characteristics including lattice constant, crystal orientation et al were not reported, though these parameters can be dominant on the d_{31} .

In this year (2016/01 to 2016/12), I investigated combinatorial approach to deposit highly doped (Mg,Hf)_xAl_{1-x}N thin film. . The combinatorial approach is a high-throughput material investigation method preparing films with various composition on a single substrate. Moreover, the method enables us to precisely tune the concentration of dopants.). The results revealed that I successfully covered the widest ever composition range of $0 < x < 0.24$ for this material. In addition, these studies found that I succeeded in realizing largest ever *c*-axis expansion of 2.7% at $x = 0.24$, which will lead to the highest enhancement in the piezoelectric coefficient. The results of this study opened the way for high-throughput development of the dielectric materials.

For more details, Figure 1 shows a schematic of the sputtering set up for combinatorial (Mg,Hf)_xAl_{1-x}N thin film. AlN targets and Mg-Hf targets (Mg target with pieces of Hf on top) were sputtered simultaneously to grow films on Si (100) substrates. Number of Hf piece was adjusted in order to get Mg: Hf $\sim 1: 1$. A substrate holder and the targets were arranging to obtain composition gradient. Plasma gases used for sputtering were Ar and N₂. The latter was used to compensate the nitrogen deficiency in thin films. Thin films were deposited at 600°C to get high crystallinity ⁴.

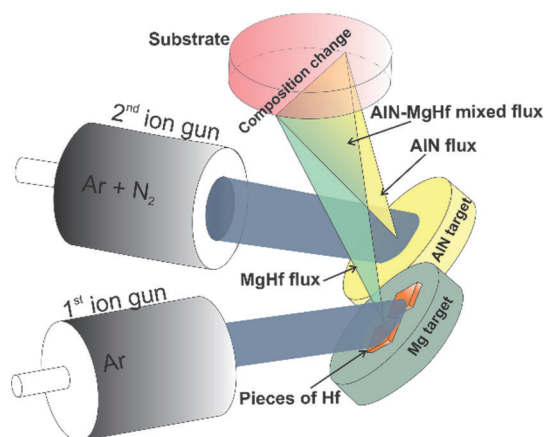


Figure 1. Schematic of combinatorial deposition using AlN target and Mg target with pieces of Hf on top

Figure 2 shows a typical picture of the film surface prepared by the combinatorial approach. Lateral color change indicates change in the thickness ratio of AlN to MgHf, which corresponds to dopant concentration. For the 2 cm × 4 cm sample, typical composition difference is 5.0 at.%. Focused X-ray beam with spot diameter of 1 mm allowed for measurement of more than 14 points along the composition gradient.

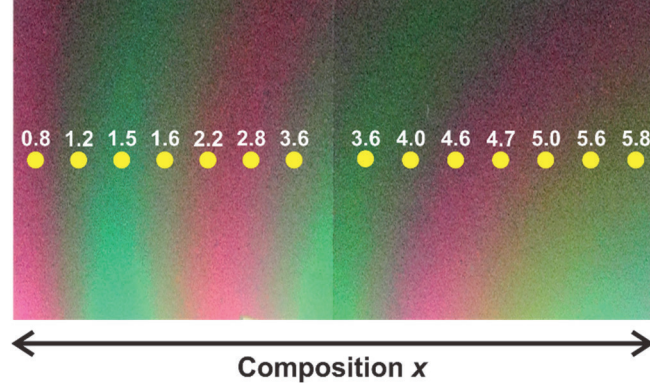


Figure 2. An example of combinatorial film. Yellow circles and numbers indicated the measured point and corresponding dopants concentration, respectively.

XRD and EDS measurements confirmed that I succeeded in making solid solution of $(\text{Mg,Hf})_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ at the highest concentration of dopant ever. Figure 3 showed XRD pattern of the $(\text{Mg,Hf})_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ film ($0 < x < 0.24$). Only a peak from (0002) and (0004) plane of AlN were observed. Because we did not observe neither Mg nor Hf peaks, the pattern indicated that (MgHf) dissolved in the AlN lattice.

The solid solution was also indicated by the continuous peak shift from the (0002) peak of the pure AlN film^{9, 10}. As shown in the XRD patterns, the continuous peak shift in the 2θ position of the AlN(0002) peak indicated that c -axis lattice constant of the AlN was gradually expanded with increasing the dopant concentration. The c value was determined from the following formula:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{1}{c^2}$$

where, h , k and l are Miller indices, a and c are lattice constants, d is inter-planar distance for (hkl) plan (here is (002)).

In summary, I successfully deposited $(\text{Mg,Hf})_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ films with composition gradient covering the widest range of composition ($0 < x < 0.24$) so far reported. For these films the c -lattice of AlN was expanded almost linearly with the composition, and we obtained c -axis expansion of 2.2% at $x = 0.24$, which is the largest value for this system. I believe future study will find the largest piezoelectric coefficient for $(\text{Mg,Hf})_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ among the AlN-based materials due to the largest c -axis expansion, prove the importance of this material for the vibrational energy harvesters.

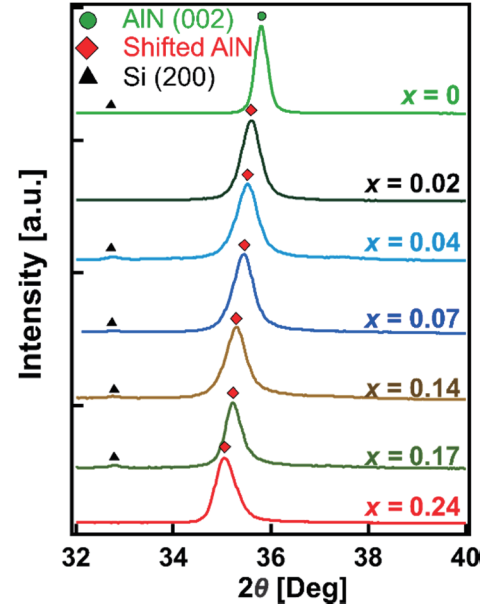


Figure 3. XRD patterns of $(\text{Mg,Hf})_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ films deposited at 600°C

- [1] L. V. Minh, M. Hara, T. Yokoyama, T. Nishihara, M. Ueda, and H. Kuwano, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 62 (11), 2005-2008 (2015).
- [2] Z. Vashaei, T. Aikawa, M. Ohtsuka, H. Kobatake, H. Fukuyama, S. Ikeda, and K. Takada, J. Crys. Growth, 311 (3), 459-462 (2009).
- [3] M. Akiyama, T. Kamohara, K. Kano, A. Teshigahara, Y. Takeuchi, and N. Kawahara, Adv. Mater. 21, 593 (2009).
- [4] H. H. Nguyen, H. Oguchi, and H. Kuwano, J. Phys.: Conference Series 557 (1), 012047 (2014).
- [5] S. Trolier-McKinstry, P. Muralt, Journal of Electroceramics 12(1-2) 7-17 (2004).
- [6] F. Tasnádi, B. Alling, C. Höglund, G. Wingqvist, J. Birch, L. Hultman, Abrikosov, Phys. R. Lett., 104 (13), 137601 (2010).
- [7] H. Liu, F. Zeng, G. Tang, F. Pan, Applied Surface Science, 270 (0), 225-230 (2013).
- [8] R. Matloub, M. Hadad, A. Mazzalai, N. Chidambaram, G. Moulard, C. S. Sandu, T. Metzger, P. Muralt, Applied Physics Letters 102 (15), 152903 (2013).
- [9] I. Yoshiki, Y. Tsuyoshi, N. Tokihiro, U. Masanori Appl. Phys. Exp. 8:061501 (2015).
- [10] T. Yokoyama et al. Proc. Ultr. Symp. (IUS) IEEE International 1382-5 (2013)

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. Conduct experiment and optimize the deposition process

The combinatorial $(\text{MgHf})_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ thin film deposition processes were performed using co-sputtering chamber (figure 1). These processes were optimized through many times of deposition by changing the condition as: Back pressure, deposition pressure, gases flow rate ratio, deposition temperature, N_2 with and without ion. The results gave the optimal sputtering deposition conditions.

2. Characterization of thin films properties

The deposited films were evaluated to decide the best deposition conditions. Typically, the thin films were characterized by the following equipment, EDX spectroscopy (FE-SEM, Hitachi SU-70), X-ray diffraction (XRD, Bruker D8) and atomic force microscopy (AFM, Nikon TE2000-U). A piezoelectric response microscope was set up to quickly evaluate the piezoelectric coefficient of combinatorial thin film.

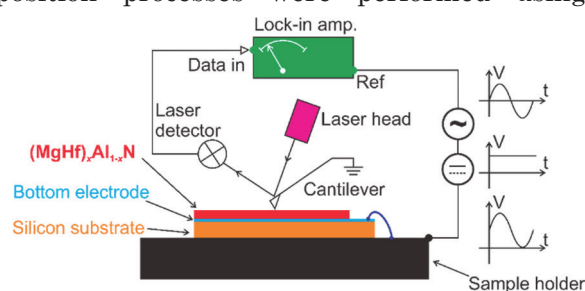


Figure 4. Experimental setup for evaluating the piezoelectric coefficient.

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. H. H. Nguyen, H. Oguchi, H. Kuwano, Combinatorial approach to MgHf co-doped AlN thin films for Vibrational Energy Harvesters. Journal of Physics: Conference Series 2016, 773 (2016) 12075, doi: 10.1088/1742-6596/773/1/012075

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

Conference: The 16th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (POWERMEMS2016)

Sponsor: Université Paris-Est and Grenoble Alpes Université, FRANCE

Country and date: France / 2016.12.05 ~ 2016.12.09

Role: Author

Title of contribution: C-axis tilted AlN films for vibration energy harvesters



氏名 奥野 友哉

所属 工学研究科機械システムデザイン工学専攻・D2

研究課題

微小重力場における伸長予混合火炎の燃焼限界，球状火炎の形成，および燃焼形態の分布にレイス数が及ぼす影響に関する研究

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、熱拡散モデルを用いた半理論計算を行う計算コードを開発し、微小重力場における対向流火炎実験と数値計算結果を比較することで、レイス数が伸長火炎の燃焼限界、球状火炎の形成、および燃焼形態の分布図に与える影響について調べた。

高効率な燃焼器の開発には燃焼限界に関する正確かつ包括的な知見が必要不可欠である。これまでの研究では、伝播火炎の燃焼限界を調べるために対向流火炎法が広く用いられてきた。低伸張率条件の場合、本質的な燃焼限界は微小重力下でのみ得られるため、過去には落下塔(JAMIC)を用いた対向流火炎実験が行われている[1]。これと並行して、通常の平面伝播火炎の燃焼限界以下でも、レイス数効果により微小重力場で存在可能なFlame ballに関する研究が行われてきた[2]。しかしながら、これまで平面伝播火炎およびFlame ballは別々に調べられてきたため、両者の関係性は明らかになっておらず、両者を統一した燃焼限界は議論されてこなかった。近年我々の研究グループは、実験および数値計算を用いて微小重力場中における $Le = 0.5$ 、伸張率 3.0 s^{-1} 付近の条件での対向流火炎について調べ、対向流火炎が球状火炎へ遷移することを示した [3, 4]。さらに伸張率が低い場合、球状火炎がFlame ballへと漸近すると考えられ、伝播火炎とFlame ballをつなぐ新たな火炎領域が得られると考えられる。しかしながら、これまでの研究では、レイス数が球状火炎の形成に与える影響について調べられていない。したがって本研究では、メタン混合気の希釈剤としてKrまたはXeを用いることでレイス数を変化させた実験を行い(Kr: $Le = 0.75$, Xe: $Le = 0.5$)、レイス数が球状火炎の形成に与える影響について調べた。同時に、熱拡散モデルを用いた3次元非定常計算を行い、実験結果との比較を行った。

図1に当量比 $\phi = 0.48$ において、微小重力実験で得られた火炎画像を示す。図1(a)および(b)に示したとおり、レイス数にかかわらず伸張率が比較的高い条件(3.2 s^{-1})では平面の火炎が得られた。しかし、伸張率が低い場合、図1(c)および(d)に示すように、 $Le = 0.75$ では平面の火炎が得られる一方、 $Le = 0.5$ ではセル状火炎が得られた。これは、拡散・熱的不安性によるものだと考えられる。さらに伸張率を低下させた場合、 $Le = 0.75$ のときは 1.9 s^{-1} 近傍で消炎するが、 $Le = 0.5$ のときは図1(e)に示すようにそれぞれのセルが独立し、反応物が反応帯後方へと流入するSporadic flameが得られた。また、平面火炎が形成されたときに当量比を減少させた場合、平面火炎のエッジが未燃混合気に対して進展する火炎と、平面火炎のエッジが後退する火炎が得られた。

図2に拡散熱的モデルを用いて得た3次元非定常計算結果を示す。このとき、格子点数は4246万点、反応機構には1段総括反応を用いた。また、温度は断熱火炎温度、燃料濃度は入り口における燃料濃度で無次元化した。図2(a)、(b)より、伸張率が 1.0 s^{-1} の条件ではレイス数に関わらず、平面の火炎が得られた。伸張率を低下させた場合、 $Le = 0.75$ のときは $a = 0.8 \text{ s}^{-1}$ 近傍で火炎が平面のまま消炎したが、 $Le = 0.5$ のときは図2(c)に示すようにSporadic flameが得られ、実験結果と定性的に一致した。

図3(a)、(b)に実験で得られた消炎点、図3(c)、(d)に実験で得られた火炎形態の分布図、図3(e)、(f)に3次元非定常の半理論計算で得られた火炎形態の分布図を示す。図3(a)と(b)を比較すると、 $Le = 0.75$ の場合は1次元対向流火炎の計算結果と実験結果はよく一致するが、 $Le = 0.5$ の場合は両者の間に一致が見られず、特に低伸張率条件では、数値計算結果と実験結果の間に定性的な差異が見られた。ここで、図3(b)、(c)に着目すると、 $Le = 0.75$ の場合は燃焼限界近傍において平面火炎のみが見られる一方、 $Le = 0.5$ の場合は $a = 0.8 \text{ s}^{-1}$ の近傍でSporadic flameが表れている。これは3次元非定常計算結果と定性的に一致した。これらより、 $Le = 0.5$ では拡散熱的效果により低伸張率条件ではSporadic flameが形成され、1次元モデルと比較して燃焼限界が拡大することが実験および数値計算で示された。一方、 $Le = 0.75$ の場合はこのような現象が実験および数値計算で確認されず、一次元モデルで燃焼限界を記述可能なことが示された。

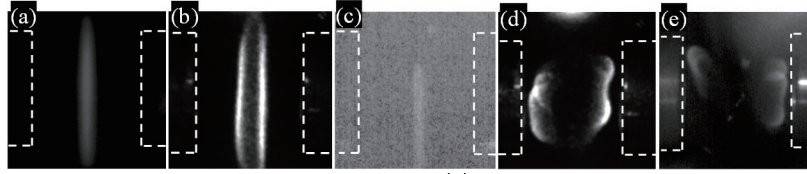


図1 $\phi = 0.48$ において微小重力実験で得られた火炎画像 (a) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Kr}$, $a = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $Le = 0.75$ (b) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$, $a = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $Le = 0.5$ (c) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Kr}$, $a = 2.1 \text{ s}^{-1}$, $Le = 0.75$ (d) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$, $a = 2.2 \text{ s}^{-1}$, $Le = 0.5$ (e) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$, $a = 0.82 \text{ s}^{-1}$, $Le = 0.5$

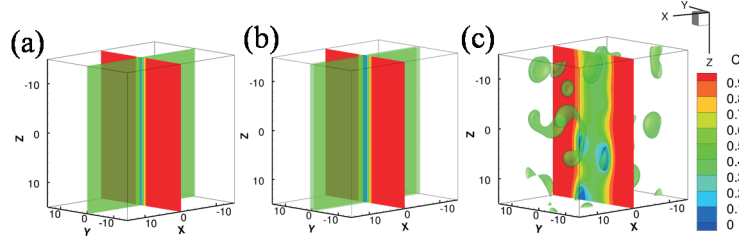


図2 3次元非定常半理論計算で得られた $\phi = 0.48$ における $T = 0.85$ の等値面および燃料濃度の濃度分布図. (a) $Le = 0.75$, $a = 1.0 \text{ s}^{-1}$ (b) $Le = 0.5$, $a = 1.0 \text{ s}^{-1}$ (c) $Le = 0.5$, $a = 0.18 \text{ s}^{-1}$

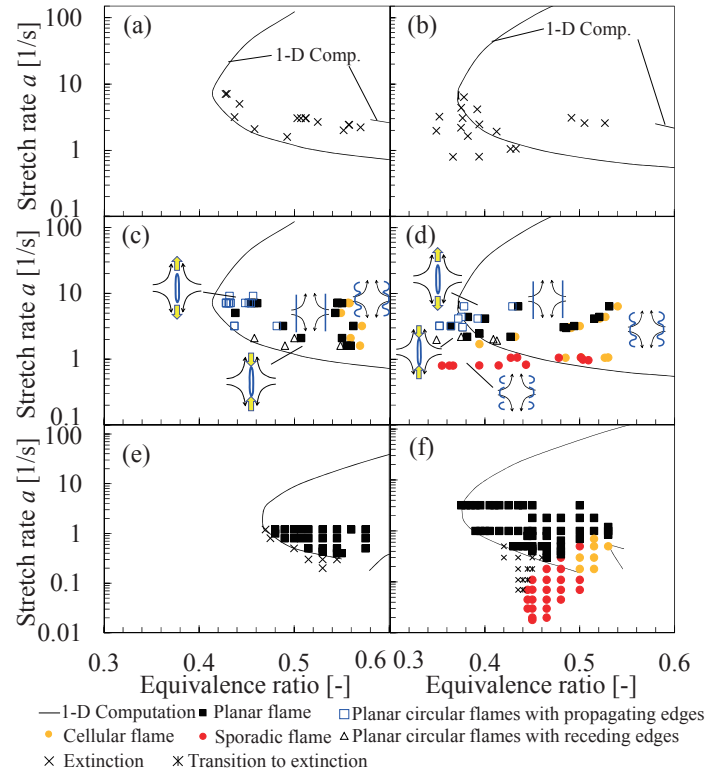


図3 実験で得られた対向流火炎の消炎点 (a) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Kr}$, $Le = 0.75$ (b) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$, $Le = 0.5$ および実験で得られた火炎形態の分布図 (c) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Kr}$, $Le = 0.75$ (d) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$, $Le = 0.5$, 3次元非定常半理論計算で得られた火炎形態の分布図 (e) $Le = 0.75$ (f) $Le = 0.5$

- [1] K. Maruta, M. Yoshida, Y. Ju, T. Niioka, Proc. Combust. Inst., 26, (1998) 1283-1289.
- [2] P.D. Ronney et al., AIAA Journal, 36 (1998) 1361-1368.
- [3] K. Takase et al., Combust. Flame, 160 (2013) 1235-1241.
- [4] R. Fursenko et al., Combust. Flame, 162, (2015) 1712-1718.

平成28年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

<国際会議>

名 称：The Thirteenth International Conference on Flow Dynamics

主催団体：東北大学流体科学研究所

開 催 国：日 本

開催期間：2016.10.10~12

役 割：学生セッションオーガナイザー

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 拡散熱的不安定性が火炎の燃焼限界に与える影響

熱拡散モデルを用いた計算コードを開発し、レイス数が伸長火炎の燃焼限界、球状火炎の形成、および燃焼形態の分布図に与える影響について調べた。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Tomoya Okuno, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Koichi Takase, Masato Katsuta, Masao Kikuchi, Kaoru Maruta
Study on the combustion limit, near-limit extinction boundary, and flame regimes of low-Lewis-number $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ counterflow flames under microgravity
Combustion and Flame 172 (2016) 13-19.
2. Tomoya Okuno, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta
Ultra-lean combustion characteristics of premixed methane flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile
Proceedings of the Combustion Institute (2016) *In Press*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.137>.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 小林友哉(旧姓)、中村寿、手塚卓也、丸田薫
温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた超希薄メタン予混合火炎に及ぼす希釈ガスの影響に関する研究
第53回日本伝熱シンポジウム、大阪市(2016.5.24-26)
2. Tomoya Okuno, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta
Ultra-lean combustion characteristics of premixed methane flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile
36th International Symposium on Combustion, Seoul, South Korea (2016.8.1-5)
3. Tomoya Okuno, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Masao Kikuchi, Kaoru Maruta
The effect of Lewis number on the formation of ball-like flames in counterflow fields under microgravity at low stretch rates
The Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai (2016.10.10-12)
4. Tomoya Okuno, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Koichi Takase, Roman Fursenko, Sergey Minaev, Masato Katsuta, Masao Kikuchi, Kaoru Maruta
Transitions from counterflow flames to ball-like flames and “flame balls” in fuel-lean low-Lewis-number premixed flames under microgravity
11th Asian Microgravity Symposium, Sapporo (2016.10.25-29)
5. 奥野友哉、中村寿、手塚卓也、長谷川進、菊池政雄、丸田薫
微小重力場を用いた対向流場中における球状火炎の形成にレイス数が与える影響
第54回燃焼シンポジウム、仙台市 (2016.11.23-25)

【受賞・特許等】

受賞日：2016年10月27日

受賞名：Excellent Poster Award

組織名：11th Asian Microgravity Symposium-2016

【研究費の獲得】

名称：日本学術振興会特別研究員DC2

期間：2017年度-2018年度



氏名 大塚 啓介

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D1

研究課題

流体・構造・制御の異分野融合による可変翼モデリング法の確立

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

折り畳み展開式可変翼の流体構造連成効果を考慮したモデリング法を新規提案した。提案モデルは弾性変形と剛体移動の混在した翼の挙動を時間解析できる。さらに、提案モデルは容易に線形化できるように定式化されており、フラッタ周波数解析や制御系設計への応用もできる。本年度は、提案モデルを用いた可変翼の挙動時間解析とフラッタ周波数解析を行った。

今回、時間解析の対象にしたのはMITの提唱する可変翼である(図1)。可変翼は6個のボディが展開用のバネでジョイントされている。図2は時間解析で得られた弾性軸の振動時間履歴である。提案モデルは部材の弾性変形とジョイント周りの剛体回転が混在した非線形挙動を解析できている。また、本解析結果とMITで行われた実験結果を翼端変位(図3)に関して比較したところ、振動周期・振動振幅ともに良好な一致を得られた(表1)。

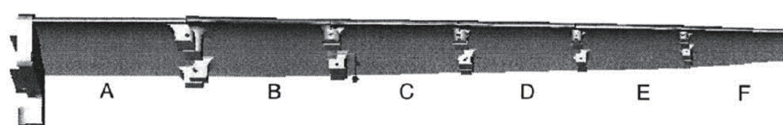


図1 MIT: 6ボディ可変翼[1]

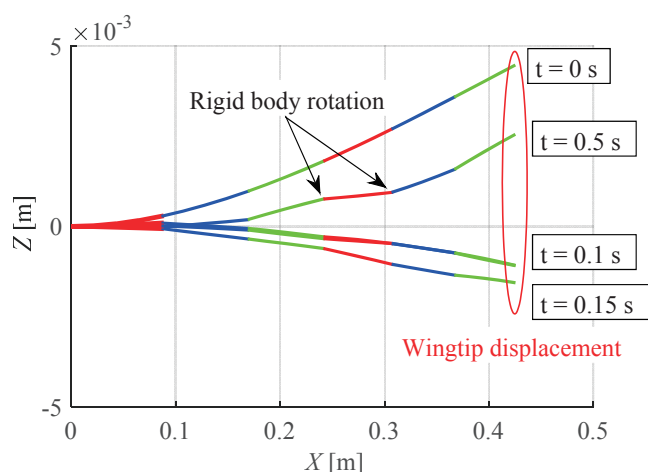
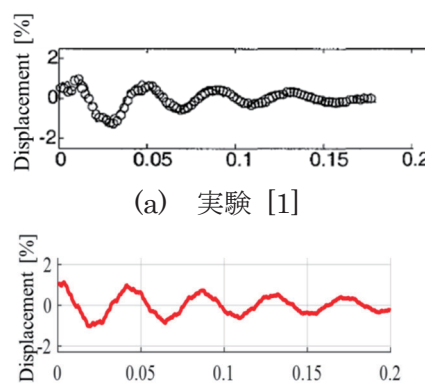


図2 弾性軸の振動時間履歴 [2]



(b) 解析 [2]

図3 翼端変位の時間履歴 (流速36.2 m/s)

表1 時間解析と実験の比較 [2]

	Simulation	Experiment	Error [%]
Amplitude [%]	0.47	0.42	12
Period [s]	0.045	0.046	2.1

- [1] Radcliffe, T. O., and Cesnik, C. E. S., “Aeroelastic Response of Multi-Segmented Hinged Wings,” *Proceedings of the 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Vol. 21, No. 2, 2001, pp. 286-295.
- [2] Otsuka, K., Miyazawa, H., and Makihara, K., “Deployment Simulation of Morphing Wing,” *13th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai-Miyagi, Japan, October 10-12, 2016.

一方で、フラッタ周波数解析の対象としたのは、Duke大学で用いられた2個のボディからなる可変翼である（図4）。提案モデルを用いた周波数解析結果とDuke大学で行われた実験結果を示す（図5）。この図から、解析と実験が良好な一致を示すことが分かる。また、図5の横軸は折り畳み角度を示す。折り畳み展開式可変翼は折り畳み角度に応じて、フラッタ特性が変化する特異な性質が実験で報告されている[3]。提案モデルはこのフラッタ特性の変化を捉える事ができている。

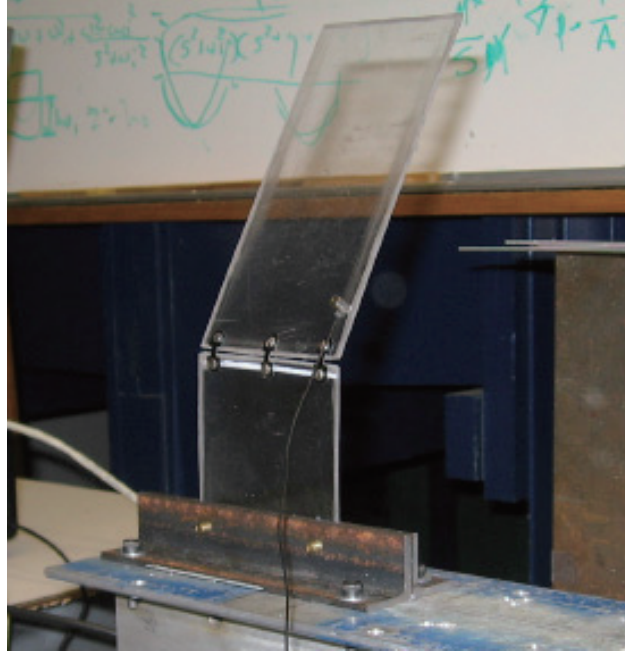


図4 Duke大学: 3ボディ可変翼 [3]

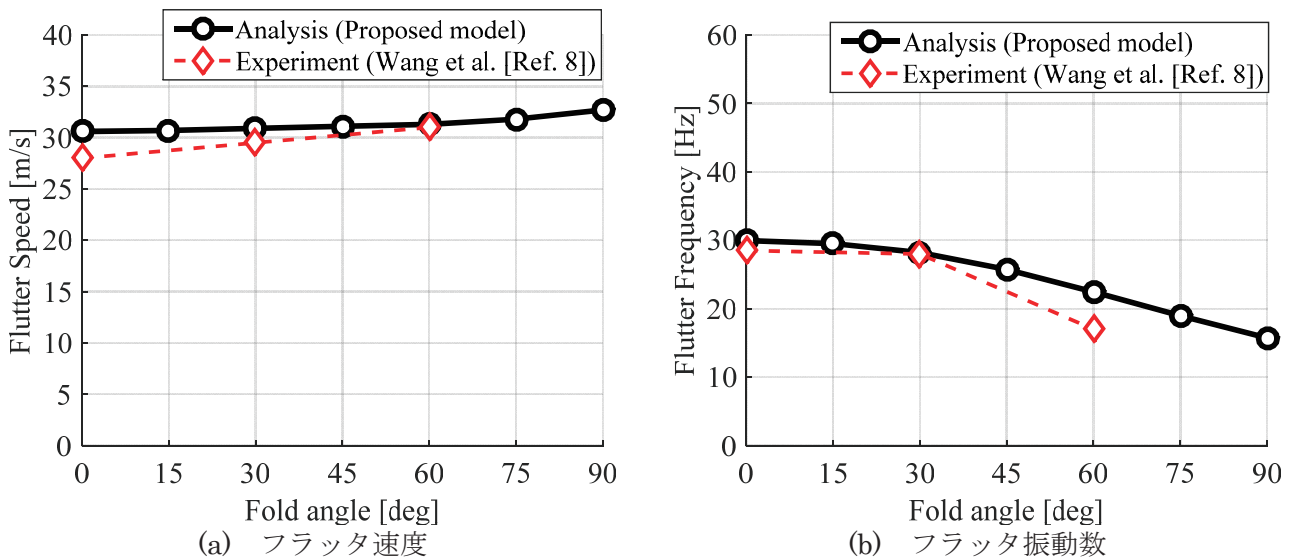


図5 フラッタ周波数解析と実験の比較 [4]

- [3] Wang, I., Gibbs, S. C., and Dowell, E. H., "Aeroelastic Model of Multisegmented Folding Wings: Theory and Experiment," *Journal of Aircraft*, Vol. 49, No. 3, 2012, pp. 911-921.
- [4] Otsuka, K., and Makihara, K., "Frequency-Domain Flutter Analysis of Folding Wing Based on Flexible Multibody Dynamics," *The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, Toyama, Japan, October 25-27, 2016.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 折り畳み展開式可変翼の数値モデルの提案
折り畳み展開式可変翼とロボットアームの挙動の類似性から、新たな可変翼モデリング法創出の着想を得た。ロボット工学の分野で用いられるモデリング手法「マルチボディダイナミクス」を流体構造連成分野と融合させることで、可変翼のモデリング法を新規提案した。
2. 可変翼挙動の非線形時間解析
ジョイントを有する可変翼の挙動は、ボディの剛体運動と弾性変形の混在した非線形挙動になる。提案モデルはこの非線形挙動を表現することができ、かつ実験とも良好な一致を得た。
3. 可変翼フラッタの線形周波数解析
提案モデルは、容易に線形化できるよう工夫が凝らされており、様々な折り畳み状態でのフラッタ特性を線形周波数解析できる。解析で得られたフラッタ特性は実験と良く一致した。

【査読論文（査読付き国際会議論文を含む）】

1. Otsuka, K., and Makihara, K., “Aeroelastic Deployable Wing Simulation Considering Rotation Hinge Joint based on Flexible Multibody Dynamics,” *Journal of Sound Vibration*, Vol. 369, No. 12, 2016, pp. 147-167. 【査読あり】
2. Otsuka, K., and Makihara, K., “Parametric Studies for the Aeroelastic Analysis of Multibody Wings,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 14, No. ists30, 2016, pp. Pc_33-Pc_42. 【査読あり】
3. Otsuka, K., and Makihara, K., “Frequency-Domain Flutter Analysis of Folding Wing Based on Flexible Multibody Dynamics,” *The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, Toyama, Japan, October 25-27, 2016. 【査読付き国際会議論文集】
4. Otsuka, K., Wang, Y., and Makihara, K., “Deployable Wing Model Considering Structural Flexibility and Aerodynamic Unsteadiness for Deployment System Design,” *Journal of Sound Vibration*. 【参考・2017年2月投稿予定】

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Otsuka, K., and Makihara, K., “Flutter Analysis of Deployable Wing Using Flexible Multibody Dynamics,” *First International Symposium on Flutter and its Application*, Tokyo, Japan, May 15-17, 2016. 【口頭発表・査読なし】
2. Otsuka, K., Miyazawa, H., and Makihara, K., “Deployment Simulation of Morphing Wing,” *13th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai-Miyagi, Japan, October 10-12, 2016. 【ポスター発表・査読なし】

【受賞・特許等】

受賞日：2016年3月11日

受賞名：独創研究学生賞

組織名：日本機械学会

受賞日：2016年10月10-12日

受賞名：Best Presentation Award, The Twelfth International Students/Young Birds Seminar on Multi-Scale Flow Dynamics

組織名：Institute of Fluid Science, Tohoku University

【研究費の獲得】

名称：「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」平成28年度優秀研究奨励プログラム【採択】

期間：2016年度

名称：平成29年度日本学術振興会特別研究員【採択】

期間：2017年度～2018年度



氏名 齋藤 庸賀

所属 機械システムデザイン工学専攻・D3

研究課題

硬質粒子被膜を有する高機能タップ工具の開発

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

これまでの研究成果より、切りくずの巻きつきを抑制するためには、切りくずのカール直径を減少させることが有効であることを明らかにした。そこで本年度は、開発した硬質粒子電着タップの切りくずのカール直径を減少させるメカニズムを解明するために、加工中の工具すくい面におけるsliding zoneの摩擦係数と二次塑性領域の厚さの推定を行った。図1に、sticking-sliding摩擦モデル[1]に基づく、工具すくい面上の応力場を示す。同図に示されるように、刃先先端部付近(sticking zone)では被削材料は高い垂直応力にさらされることで降伏状態に達しており、そのせん断応力は降伏せん断応力に等しい。その後続く、高い垂直応力にさらされながらすべりが生じる領域(sliding zone)では、クーロンの摩擦法則に従いせん断応力が発生する。このような、応力場にさらされた際の工具すくい面のsliding zoneにおける摩擦係数 μ_{slid} は以下の式より求めることができる。

$$F_{stick} + F_{slid} = F_{nth} \quad (1)$$

$$F_{stick} = k_{chip} \times A_{stick} \quad (2)$$

$$F_{n_slid} = F_{n_nth} \times \frac{\int_{L_{stick}}^{L_c} \left(1 - \frac{z}{L_c}\right)^x w(z) dz}{\int_0^{L_c} \left(1 - \frac{z}{L_c}\right)^x w(z) dz} \quad (3)$$

$$\mu_{slid} = \frac{F_{slid}}{F_{n_slid}} \quad (4)$$

また、図2に切りくずをカールさせる要因として知られる切りくず内部の二次塑性領域のモデル[2]を示す。同図に示されるように、二次塑性域の代表厚さ δ は以下の式から求めることができる。

$$\delta = L_{stick} \times \sin(\phi - \alpha_e) \quad (5)$$

図3、図4に切りくずのカール直径とsliding zoneの摩擦係数の関係、切りくずのカール直径と二次塑性域の関係を示す。同図に示すように切りくずのカール直径は摩擦係数の増加、二次塑性域の増加に伴い、減少する傾向を示した。さらに、図5に二次塑性域の厚さとsliding zoneの摩擦係数の関係を示す。同図に示されるように、二次塑性域の厚さはsliding zoneの摩擦係数の増加に伴い、増加する傾向を示す。これらの結果より、切りくずのカール直径を減少させ、切りくずの巻きつき率 R_c を5%以下にすることができる条件は、sliding zoneの摩擦係数1.7以上、二次塑性域厚さ23 μ m以上であることが明らかになった。本研究で開発した硬質粒子電着タップは工具すくい面において高い摩擦係数を示し、厚い二次塑性域を形成することにより切りくずのカール直径を減少させ、巻きつきを抑制することができたと考えられる。

[1] Shaw, C. M., Int. J. Mech. Sci., **22**(1980) 673-686.

[2] Özel, T. and Zeren, E., J. Manuf. and Eng., **128**(2005) 119-129.

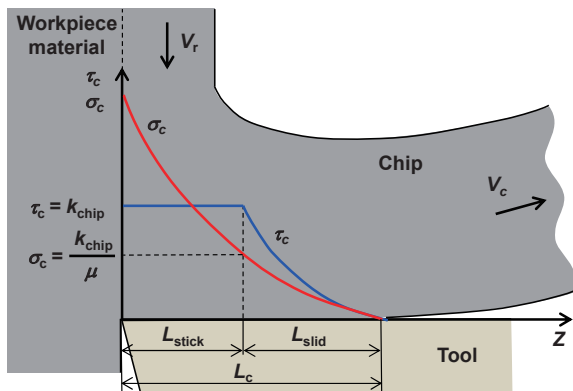


図1 sticking-sliding 摩擦モデル

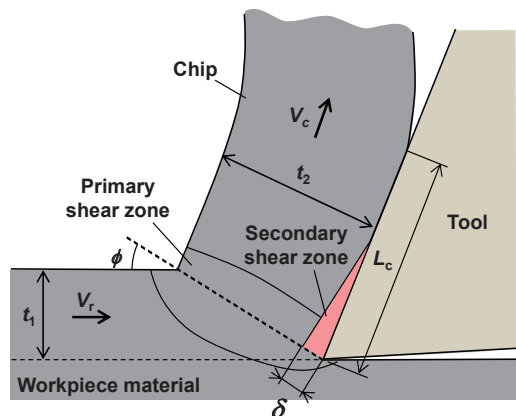


図2 二次塑性域モデル

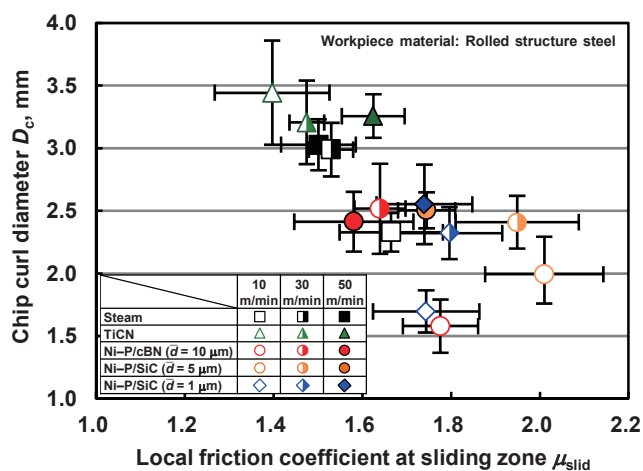


図3 切りくずのカール直径とsliding zoneの摩擦係数の関係

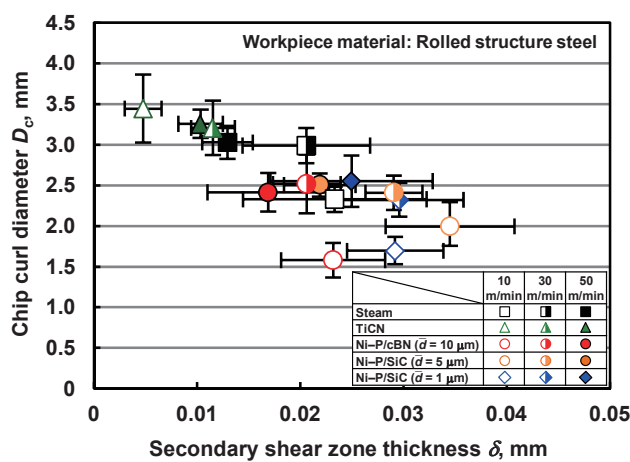


図4 切りくずのカール直径と二次塑性域厚さの関係

	Ni-P/cBN film (\$d=10 \mu m\$)	Ni-P/cBN film (\$d=5 \mu m\$)	Ni-P/SiC film (\$d=1 \mu m\$)	Steam treatment	TiCN coating
10 m/min	○	○	◇	□	△
30 m/min	●	●	◇	■	△
50 m/min	●	●	◇	■	△

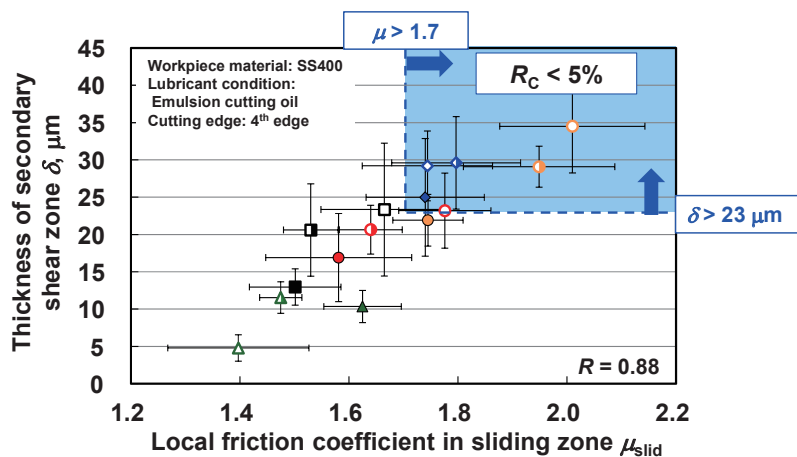


図5 二次塑性域厚さとsliding zoneの摩擦係数の関係

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

○平成28年（1月～12月）

1. Yasuyoshi Saito, Takeshi Yamaguchi, Kei Shibata, Yuki Kadota, Takeshi Kubo, Wataru Watanabe and Kazuo Hokkirigawa, Development of A New Tapping Tool Covered with Nickel/Abrasive Particles Composite Film for Preventing Chip Snarling and Tool Service Life Extension, Tribology Online, 11, 2 (2016) 81-87.
2. Yasuyoshi Saito, Shoki Takiguchi, Takeshi Yamaguchi, Kei Shibata, Takeshi Kubo, Wataru Watanabe and Kazuo Hokkirigawa, Effect of friction at chip-tool interface on chip geometry and chip snarling in tapping process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 107 (2016) 60-65.

平成28年度の研究業績

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Yasuyoshi Saito, Takeshi Yamaguchi, Kei Shibata, Takeshi Kubo, Wataru Watanabe, Kazuo Hokkirigawa Development of a new tapping tool covered with nickel/abrasive particles composite film for preventing chip snarling and tool service life extension, Tribology Conference 2016 Spring in Tokyo, (2016).
2. 齋藤庸賀, 板垣遼, 山口健, 柴田圭, 久保武史, 渡部亘, 小山悟, 堀切川一男
タッピング工具への切りくず巻きつきに及ぼす工具-切りくず間の摩擦係数の影響
トライボロジー会議 2016 秋新潟予稿集, 新潟市, (2016.10.12-14)

氏名 佐々木 裕章



所属 工学研究科機械システムデザイン工学専攻・D3

研究課題

流体・材料連成数値解析による高速液滴衝突および材料の評価手法に関する研究

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

高速液滴衝突により材料が受ける影響について数値的に解析した。単一液滴が材料に高速衝突する数値解析から、主に液滴衝突速度と液滴径の変化が材料に与える影響を評価した。Fig. 1には液滴径を $d = 100 \mu\text{m}$ で一定とし、液滴衝突速度を $V = 100 \sim 400 \text{ m/s}$ と変化させた場合の流体側最大圧力 p_{max} 、液滴衝突中心の最大圧力 $(p_{\text{ic}})_{\text{max}}$ 、材料側最大相当応力 $(\sigma_{\text{eq}})_{\text{max}}$ と液滴衝突速度 V の関係をそれぞれ表した結果を示す。液滴衝突速度に対しては p_{max} 、 $(p_{\text{ic}})_{\text{max}}$ 、 $(\sigma_{\text{eq}})_{\text{max}}$ とも線形的に増加した。さらに、衝突中心である $(p_{\text{ic}})_{\text{max}}$ と V の関係を水撃圧の式である $p_{\text{wh}} = \rho c V$ を用いて表すと、衝突中心での最大圧力は $(p_{\text{ic}})_{\text{max}} = 1.04 \rho c V$ 、コンタクトエッジにおける局所高圧は $1.45 \rho c V$ となった。これらを既存の数値解析による研究結果と比較すると液滴衝突の圧力分布は衝突中心で水撃圧 $\rho c V$ の0.7~1.4倍、コンタクトエッジ付近で1.0~2.8倍という報告がされている^[1]ことから、本解析結果もこの範囲内にあり妥当性があると考えられる。衝突により材料側に発生する $(\sigma_{\text{eq}})_{\text{max}}$ も水撃圧に対して $0.99 \rho c V$ となりこれらはすべて水撃圧の定数倍により表される。次に、Fig. 2に液滴衝突速度を $V = 200 \text{ m/s}$ 一定とし、液滴径を $d = 50 \sim 1000 \mu\text{m}$ と変化させた場合の p_{max} 、 $(p_{\text{ic}})_{\text{max}}$ 、 $(\sigma_{\text{eq}})_{\text{max}}$ と液滴径 d の関係を示す。Fig. 2に示す通り、液滴衝突速度が一定の場合は、それぞれの値は液滴径に関係なくほぼ一定値を取ったことから、液滴衝突による最大圧力、最大相当応力は水撃現象が支配的要因であることが示された。よって、マイクロサイズの液滴においても高速衝突することにより、高い衝撃圧を発生させることが出来ることを本数値解析は示唆している。

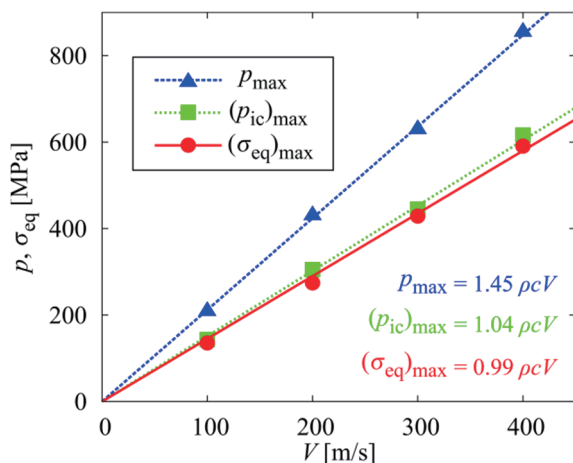


Fig. 1 p_{max} , $(p_{\text{ic}})_{\text{max}}$, $(\sigma_{\text{eq}})_{\text{max}}$ と V の関係^[6]

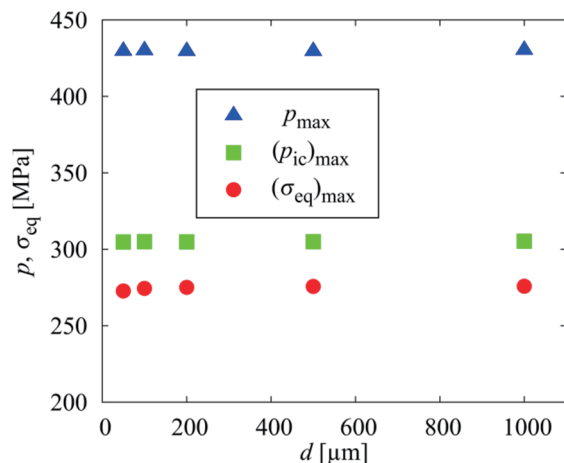


Fig. 2 p_{max} , $(p_{\text{ic}})_{\text{max}}$, $(\sigma_{\text{eq}})_{\text{max}}$ と d の関係^[6]

本研究では、材料側の評価について最大相当応力値を用いた評価のほかに、液滴衝突により材料内に発生する最大相当応力の領域を用いた評価を行った。液滴衝突により材料に発生する最大相当応力分布に対し、ある閾値を越える領域を「衝突影響体積」とする。Fig. 3にいくつかの閾値に対しての衝突影響体積（黒線で囲まれた領域）の変化を示す。この体積から、材料に対する液滴衝突速度の影響を評価する。ここで、材料側の閾値としては、液滴衝撃エロージョン試験にて得られる炭素鋼の限界流速 80 m/s ^[2]を液滴衝突速度として、本解析から求めた最大相当応力値 111 MPa を衝突影響体積の閾値として用いる。Fig. 4に衝突影響体積 v_{IE} と液滴衝突速度 V の関係について示す。衝突影響体積 v_{IE} は液滴衝突速度 V の約4.8乗に比例して増加している。この関係はFig. 1に示した最大相当応力値の結果とは異なり、液滴衝突速度は材料に対して線形ではなく、指数乗にて影響することを示唆している。この数値解析結果は、実

験により得られている既存の減肉予測式^{[3][4]}が示すように、液滴衝突速度が減肉速度に対して線形ではなく、べき乗則で影響することを定性的に再現しているといえる。また、Heymannは4.8乗^[3]、Sanchezは4.0乗^[4]、服部は6.0~7.1乗^[2]、藤沢は7.0乗^[5]にて液滴衝突速度が減肉速度に影響するという実験結果を示している。以上から、本解析で得られた衝突影響体積と液滴衝突速度の関係により得られたべき指数4.8は、実験が示す液滴衝突速度のべき指数の範囲内にあることから、本衝突影響体積 v_{IE} を用いた評価は液滴衝撃エロージョンにおける減肉特性を表す一つの指標になると考えられる。

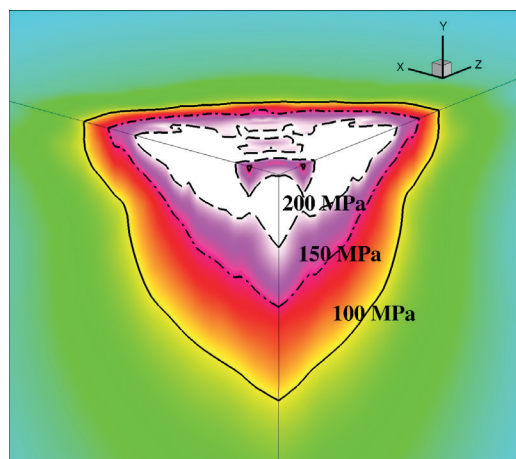


Fig. 3 衝突影響体積^[6]

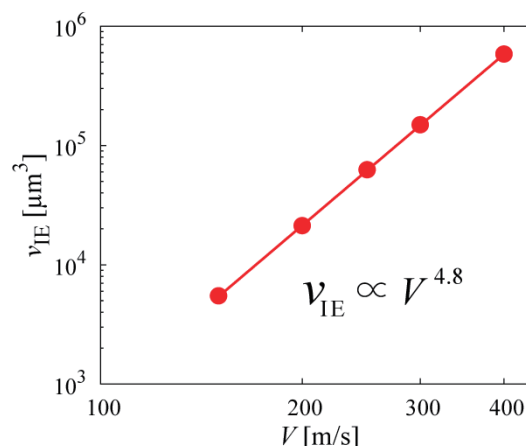


Fig. 4 衝突影響体積 v_{IE} と V の関係^[6]

- [1] Hwang, J. B. G. and Hammitt, F. G., ASME, J. Fluids Eng., 99, 396-404 (1977).
- [2] Hattori, S. and Takinami, M., Wear, Vol. 269, pp. 310-316 (2010).
- [3] Heymann, F. J., ASTM STP 474, 212-248 (1970).
- [4] Sanchez-Caldera, L. E., Ph. D. Thesis., Dep. Mech. Eng. Massachusetts Institute of Technology (1984).
- [5] Fujisawa, N., Ymagata, T., Hayashi, K. and Takano, T., Nucl. Eng. Des., Vol. 250, pp. 101-107 (2012).
- [6] 佐々木裕章, 落合直哉, 伊賀由佳, 「流体・材料連成数値解析による高速液滴衝突現象の数値的研究」, 混相流, Vol. 30, No. 1(2016), pp. 65-74.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 単一液滴が材料に高速衝突する現象の数値解析結果より、主に液滴衝突速度と液滴径の変化により材料が受ける影響を評価した。
2. 材料表面の液膜の存在により、高速液滴衝突により材料が受ける影響を数値解析にて評価した。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 佐々木裕章, 伊賀由佳,
「高速液滴衝突時に発生するキャビテーション気泡崩壊の流体・材料連成数値解析」
"Numerical analysis of cavitation bubble collapse during high-speed liquid droplet impingement by fluid/material coupled method"
流体力学学会年会2016, 2016.9, 名古屋 (2016.9.26-28), No. 226.
2. 佐々木裕章, 伊賀由佳,
「高速液滴衝突における材料表面液膜の影響に関する流体・材料連成数値解析」
ターボ機械協会 第76回北見講演会, 北見 (2016. 9. 30), No. B8.

【受賞・特許等】

受賞日：2016年9月30日
 受賞名：ターボ機械協会 第76回北見講演会 若手優秀講演賞
 組織名：ターボ機械協会



氏名 澤木 悠太

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D2

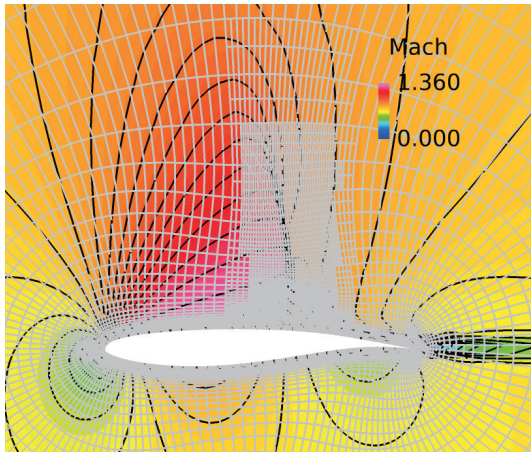
研究課題

流体構造双方の非線形性を考慮した航空機主翼フラッタ現象の
数値的研究

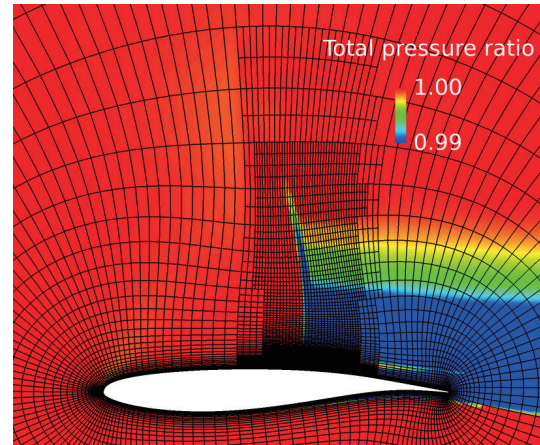
平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

空力弾性現象のひとつであるフラッタ現象は構造破壊に至る可能性のある危険な現象である。航空機は、フライト中にフラッタが発生しないように設計される。民間航空機の巡航速度は遷音速であるから、翼面上に衝撃波が生じる。フラッタの発生により構造が振動すると、衝撃波位置も移動する。衝撃波位置の移動は翼構造に加わる空力荷重の分布変化となるため、フラッタを高精度に予測するためには衝撃波位置を正しくとらえる必要がある。そのためにまず、衝撃波位置に対する解適合格子細分化を高次精度非構造格子法であるSV法に適用した。これにより衝撃波を細かく解像することに成功し、衝撃波位置の予測精度向上を比較的少ない計算セルで可能にした(図1(a))。また、SV法を用いることにより異なる大きさのセル界面の物理量補間を高次に行うことができるようになり、ハンギングノード部の総圧損失を従来の有限体積法より抑えることができた(図1(b))。しかし、格子細分化を施す翼表面が曲面の場合、新たに追加される格子点を線形補間で求めると、元の形状との誤差が大きくなる問題が発生した。そこで次に、元の曲面形状を保持するために、周囲の格子点から高次に補間を行う手法[1]を実装した。これにより元の形状を厳密に再現した場合と高次補間により近似的に曲面を再現した場合の流れ場が同等となることを示した。

複合材の採用や主翼の高アスペクト比化による航空機の燃費向上が実現されるようになってきたが、このような主翼はたわみ量が大きくなる。従来フラッタ解析の構造解析部分で広く用いられてきたモード法はモードの重ね合わせによって線形の運動方程式を解く方法のため、微小変形に対しては十分であるが、たわみ量が大きい場合の信頼性はあまり検証されていない。衝撃波をとらえるための流体の非線形性に加え、構造の幾何学的非線形性を考慮することが今後必要になると考えられる。そこでまず、非線形FEMコードを構築し流体解析コードとカップリングしてアスペクト比8.67の高アスペクト比主翼に対してフラッタ解析を行った。FEMを陰解法で解く場合は(構造メッシュの全節点数) × (x, y, z の3方向)のサイズの行列を解く必要がある。非定常計算で毎ステップ行列反転を行うと膨大な計算コストがかかるため本研究では陽解法を用いて行列反転を避けることで、CFDとFEMのカップリングを実現させた(図2)。流体解析では陰解法、構造解析では陽解法を用いることで、弱連成となってしまうが、モード法を用いて陽解法と陰解法による結果を比較し、その差が小さいことから今回のケースでは陽解法を用いても連成の精度は劣化しないことを確認している。また、モード数を10~20程度十分にとったモード法と線形FEMによる結果の差が小さいことから、微小変形の範疇では選択するモード数を誤らない限り、計算コストの面でモード法が有効であることがわかった(図3)。翼端後縁の最大変位が翼スパン長の4%程度を超えると構造の幾何学的非線形性が生じ、線形FEMと非線形FEMによる結果に差異が生じ始めた(図4)。CFDとFEMのカップリングの実現性については、モード法に比べれば計算時間が長い、陽解法を用いることで現実的な時間で計算できるようになった。また、今後は流体解析部分に加えて、構造解析部分も計算の並列化を行うことでさらに高速化を狙える。変形する翼に対して流体解析を行うためには、格子変形手法を導入する必要がある、幾何学的非線形が現れるような大変形翼の周りの流体解析用空間格子を高速かつロバストに変形させることが重要となる。そこで次に、翼近傍付近では翼に対する格子の直交性を維持する剛体回転、外側ではRadial basis function[2]を用いた補間、を組み合わせたハイブリッドな格子変形手法を構築した。こちらは現在2次元で成功しており、今後3次元に拡張する予定である。



(a) 格子とマッハ数コンター

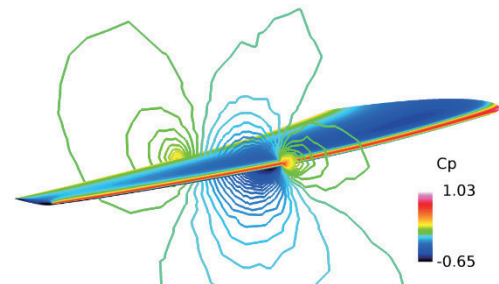


(b) ハンギングノード部の総圧損失

図1 解適合格子細分化により得られた流れ場

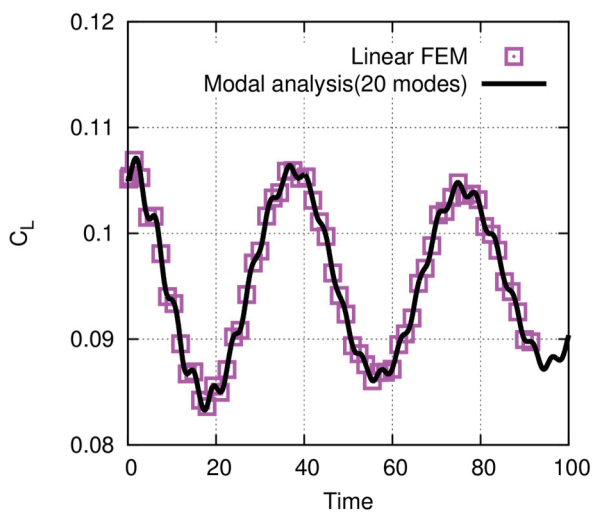


(a) 構造解析により得られた変形

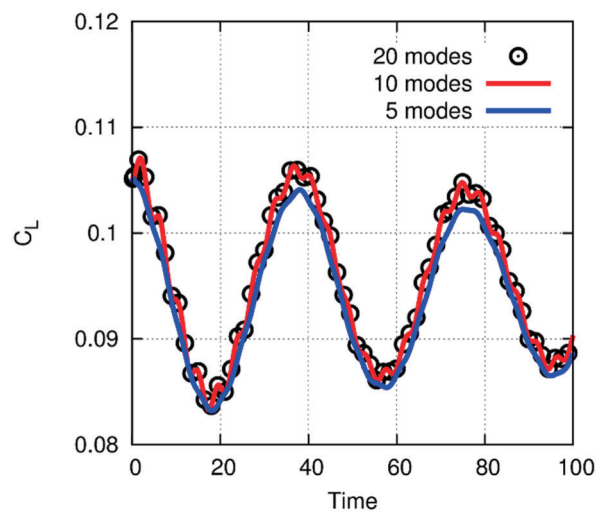


(b) 流体解析により得られた圧力係数分布

図2 非線形FEMによるフラッタ解析 (マッハ数0.7, 迎角1.0 [deg])

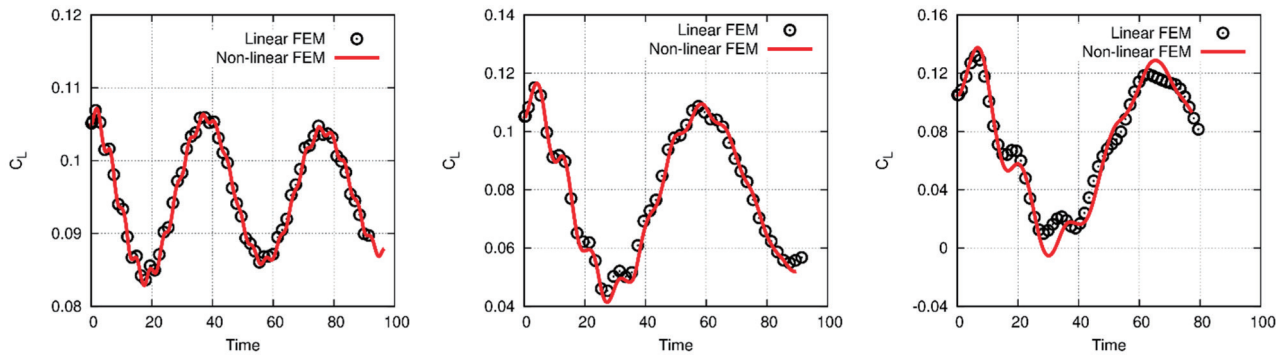


(a) 線形FEMとモード法 (20モード)の比較



(b) モード数の比較

図3 揚力係数の時間履歴によるモード法で用いるモード数の検討



(a) 翼端後縁の最大変位が
スパン長の1.4%のとき (b) 翼端後縁の最大変位が
スパン長の4.0%のとき (c) 翼端後縁の最大変位が
スパン長の5.6%のとき
図4 揚力係数の時間履歴による線形FEMと非線形FEMの比較

- [1] X. Jiao and D. Wang, *Eng Comput.*, 28(4), 2012.
[2] M. Cordero-Gracia et al., *Aerosp Sci Technol.*, 23(1), 2012.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 遷音速フラッタ現象で重要な衝撃波を解像するために、衝撃波位置に対する解適合格子細分化を高次精度非構造格子法であるSV法に適用し、衝撃波を細かく解像することに成功した。SV法を用いることによりハンギングノード部の総圧損失が従来の有限体積法より少ないことを示した。
2. 格子細分化を施す翼表面が曲面の場合でも元の曲面形状を保持するために、周囲の格子点から高次に補間を行う手法を実装し、元の形状に対する流れ場と同等の流れ場を得ることに成功した。
3. 流体の非線形性に加え、構造の非線形性を考慮するために、非線形FEMコードを構築し流体解析コードとカップリングして高アスペクト比主翼に対してフラッタ解析を行った。高い動圧では変形が大きくなり、構造の幾何学的非線形性が生じた。
4. 大変形翼の周りの流体解析用の空間格子を高速かつロバストに変形させるために、翼近傍付近では翼に対する格子の直交性を維持する剛体回転、外側ではRadial basis functionを用いた補間を行うハイブリッドな手法を構築した。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Y. Sawaki, S. Tateoka, and K. Sawada, “Wing Flutter Computation Using Spectral Volume Method for Unstructured Hybrid Mesh,” First International Symposium on Flutter and its Application, ISFA-1R21, Tokyo, Japan, May 2016.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 澤木悠太, 澤田恵介, “高次精度格子生成に関する研究,” 第48回流体力学講演会/第34回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 1A09, 金沢歌劇座, 2016年7月.
2. 澤木悠太, 浅田啓幸, 澤田恵介, “DG法・SV法による解析,” Second Aerodynamics Prediction Challenge (APC-II), 金沢歌劇座, 2016年7月.
3. 澤木悠太, 浅田啓幸, 澤田恵介, “APC-IIのデータ整理で見た航空CFDと風洞試験の課題,” 第54回飛行機シンポジウム, 2H11, 富山国際会議場・ANAクラウンプラザホテル富山, 2016年10月.

【受賞・特許等】

受賞日：2016年4月

受賞名：Best student award at Next Generation Transport Aircraft Workshop 2016

組織名：Next generation Transport Aircraft Workshop 2016

氏名 堤 駿



所属 工学研究科化学工学専攻・D2

研究課題

微細藻類*Botryococcus braunii*からの炭化水素抽出に有効な機械的前処理方法の検討

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

炭化水素(HC)を生産する緑藻*Botryococcus braunii*は次世代のバイオ燃料の原料として注目されている。*B. braunii*は産生したHCの90%以上を細胞外部に分泌し、コロニー内部に貯蔵するものの、前処理なしではコロニー内部のHCを抽出できない^{1,2,3)}ため、効果的な抽出前処理法が必要である。既往の研究では、抽出前処理として熱や機械的な外力を藻類に加えてコロニー表面の多糖類を除去することによってHC抽出率が向上したこと^{4,5)}が報告されており、多糖類の剥離度合いが炭化水素の抽出率に影響を及ぼすことが定性的に示されてきた。しかしながら、コロニー表面からの多糖類の剥離度合いを定量的に評価した例は皆無である。本研究では、多糖類が培養液中で電位を持つことに着目し、ゼータ電位を用いて加熱処理または機械的処理後の藻類表面の多糖類の剥離度合いを評価した。

試料には濃度0.48 g/Lの*B. braunii* BOT-22株を用いた。加熱処理として、Furuhashi et al.の条件(90 °C, 20 min)を用いた⁵⁾。機械的処理として、JET PASTER®(JP-SS、日本スピンドル製)を用いて、回転数を2400 rpmまたは4800 rpmで3 min処理した。また、墨汁染色法を行い、破碎前後のコロニー周囲の多糖類を観察した。

藻類のゼータ電位の測定には、Zetasizer Nano ZSP (Malvern Instruments, UK)を用いた。*B. braunii*のコロニーのゼータ電位を測定するため、培養液を遠心分離し、その上澄みのみを採取し、試料とした。また、対照実験として、細胞壁の主要な構成物質であるセルロースを培地に分散させた場合のゼータ電位を測定した。

藻類周囲の多糖類を観察するため、加熱処理または機械的処理前後の藻類試料に対し、墨汁染色法により観察した結果をFig. 1に示す。未処理の試料 (Fig. 1 (NT))およびJET PASTERにおいて回転数2400 rpmで処理した試料 (Fig. 1 (JP-1))では、コロニーの周囲に隙間なく多糖類が存在していることがわかる。一方、4800 rpmで処理した試料(Fig. 1 (JP-2))では、藻類周囲の多糖類が完全に剥離した。加熱処理の場合、*B. braunii*周囲に多糖類がみられなかった。

Fig. 2に未処理の試料と機械的処理または熱処理した試料のゼータ電位をセルロースビーズの結果とともに示す。未処理の試料ではゼータ電位はおよそ-25 mVであった。機械的処理または加熱処理を行うと、*B. braunii*のゼータ電位は上昇し、セルロースビーズの値に近づいた。(JP-2)および(TT)ではコロニー表面からほとんどの多糖類が剥離されていたことから(Fig. 1 (JP-2) と (TT))、*B. braunii*のゼータ電位が処理前後において変化したのは、外力や加熱によって藻類表面から多糖類が除去されたことにより、細胞壁を構成する主成分であるセルロースが露出したためであると考えられる。これらの結果はFig. 2に示した顕微鏡観察結果と同様の傾向を示しており、*B. braunii*の周囲に存在する多糖類の有無をゼータ電位によって評価可能であることを示した。

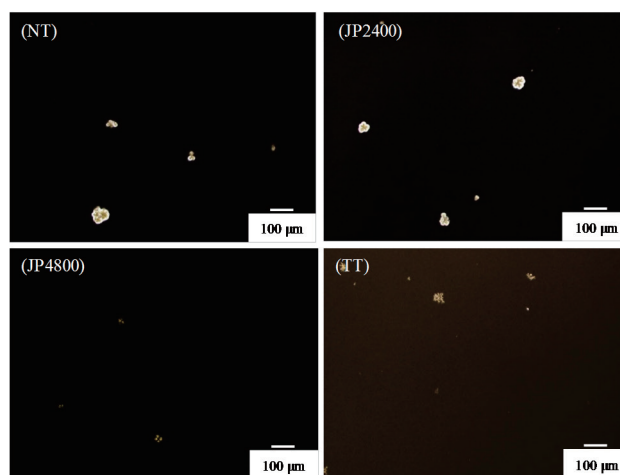


Fig. 1 The images of the samples. (NT) Untreated sample; (JP2400) Mechanical treatment with JET PASTER at 2400 rpm; (JP4800) Mechanical treatment at 4800 rpm; (TT) Thermal treatment.

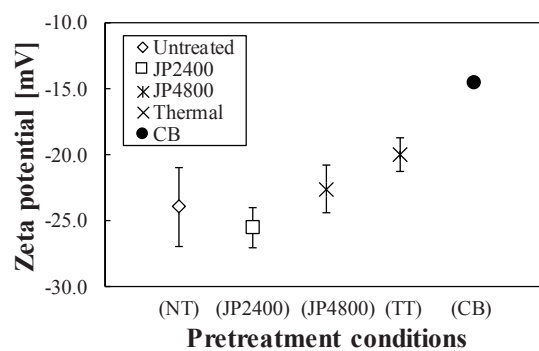


Fig. 2 The zeta potential of each sample. (NT) Untreated sample; (JP-1) JET PASTER treatment at 2400 rpm; (JP-2) JET PASTER treatment at 4800 rpm; (TT) Thermal treatment; (CB) Cellulose beads. Error bars represent standard deviations.

【引用文献】 1) Largeau, C.; Casadevall, E.; Berkaloff, C.; Dhamelinourt, P.: *Phytochemistry*, **19**, 1043-1051 (1980), 2) Kita, K.; Okada, S.; Sekino, H.; Imou, K.; Yokoyama, S.; Amano, T.: *Appl Energy*, **87**, 2420-2423 (2010), 3) Lee, J. Y.; Yoo, C.; Jun, S. Y.; Ahn, C. Y.; Oh, H. M.: *Bioresour technol*, **101**, S75-77 (2010), 4) Tsutsumi, S.; Yokomizo, M.; Saito, Y.; Matsushita, Y. and Aoki, H.: P-47, 11th Conference on Biomass Science (2016), 5) Furuhashi, K.; Noguchi, T.; Okada, S.; Hasegawa, F.; Kaizu, Y.; Imou, K.: *Algal Research*, **16**, 160-166 (2016)

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 藻類のゼータ電位測定

バイオ燃料の原料として有用な *Botryococcus braunii* は、コロニー周囲の多糖類をコロニーの表面から剥離させることで飛躍的に抽出率が増加することが知られている。この多糖類は液中で電離することから、ゼータ電位を用いて藻類の表面構造の定量的な評価を目指している。

2. 藻類の機械的強度の測定

機械的に最適な大きさの外力を藻類に加えることで、低い消費エネルギーで多くの藻類を破砕することを目的とし、藻類細胞の機械的強度を測定する実験を行っている。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. ゼータ電位を用いた緑藻*Botryococcus braunii*の表面構造評価, ○堤駿, 福田悠華, 横溝まどな, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 第12回バイオマス科学会議, 東京, 1月18-19日(2017) [ポスター・査読なし]
2. 膜分離によって濃縮した緑藻 *Botryococcus braunii* の細胞破碎処理がHC抽出率に及ぼす影響, 堤駿, 横溝まどな, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 第25回日本エネルギー学会大会, 東京, 8月9-10日(2016) [口頭・査読なし]
3. Investigation of mechanical hydrocarbon extraction from condensed suspension of *Botryococcus braunii*, Shun Tsutsumi, Madona Yokomizo, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, 6th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, San Diego, USA June 20-21 (2016) [ポスター・査読なし]

【研究費の獲得】

名称: 「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」平成28年度優秀研究奨励プログラム【採択】
期間: 2016年度



氏名 WANG ZIHAO

所属 School of Engineering, Department of Mechanical and
Aerospace Engineering, Finemechanics course, D1

研究課題

The fretting behavior of Inconel 690 and 304 SS

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

The objective of my research is to investigate the effect of passive film properties on fretting behavior. This year I start my research from October to February. The fretting performance will change a lot due to the passive film, which generates on the surface of the contact point under the corrosive medium [1]. The effect of passive film properties on fretting behavior was studied. The experimental equipment is a fretting tester with an electrochemical cell, which can apply stable potentials on the fretting pair and record the current density during the fretting procedure (Fig. 1). Fig. 2a shows the destruction and recovery of the passive film, which is induced by the fretting process, in one cycle (this is a supposed model). A stable potential applied on the fretting pair, which can guarantee a stable passive film recovery after it destroyed by the fretting process. Current density will be used to characterize the destruction of the passive film. Fig. 2b is the expected tendency of current density. If the recording current density can perfectly match the tendency as Fig. 2b describes, then, by using the current density as a connection point, the quantitative relation between the passive film status and the fretting phenomenon can be established, which can reveal the root cause of how passive film affects the fretting process. By combining the electrochemical and fretting data together, it indicates what actually happens to the fretting damage process at the very moment when passive film destroys and recovers.

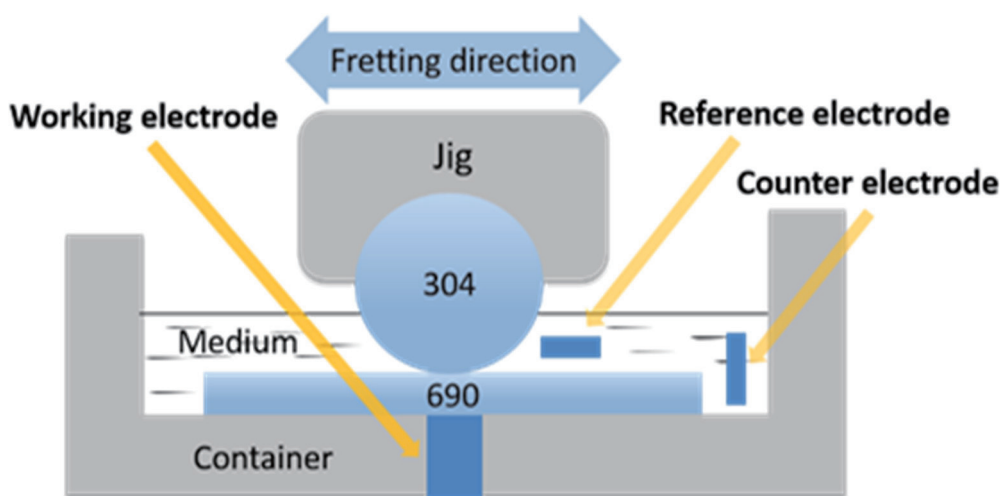


Fig. 1 the schematic map of the fretting tester

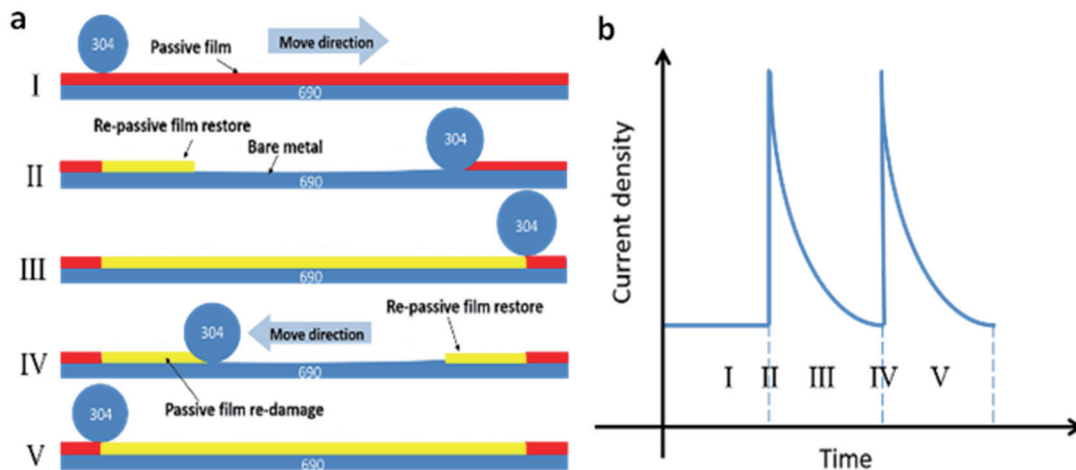


Fig. 2 (a) The passive film damage model on Inconel 690 and (b) the schematic map of current transient curve for one fretting cycle [2].

[1] P.D. Ren, G.X. Chen, M.H. Zhu, Z.R. Zhou, Influence of oil and water media on fretting behaviour of AISI 52100 steel rubbing against AISI 1045 steel, T Nonferr Metal Soc, 14 (2004) 364-369.

[2] Z.H. Wang, Y.H. Lu, J. Li, T. Shoji, Effect of pH value on the fretting wear behavior of Inconel 690 alloy, Tribol Int, 95 (2016) 162-169.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

To investigate the effects of passive film on the fretting wear behavior of Inconel 690 and 304 SS. The equipment has been designed and pilot run. Sample preparation was finished.

【査読論文（査読付き国際会議論文を含む）】

1. **Z. H. Wang**, Y. H. Lu, J. Li and T. Shoji
“Effect of pH value on the fretting wear behavior of Inconel 690 alloy” [J]. Tribology International, Volume 95, March 2016, Pages 162–169, (SCI)
2. **Zihao Wang**, Yonghao Lu, Haoyang Zhang and Tetsuo Shoji
“Effect of cold rolling on the fretting wear behavior and mechanism in Inconel 600 alloy” [J]. Tribology Transactions, 2016, 59(5): 923-931.(SCI)
3. Xin L, Yang B B, **Wang Z H**, et al.
“Effect of normal force on fretting wear behavior and mechanism of Alloy 690TT in high temperature water” [J]. Wear, 2016, 368: 210-218.
4. Long Xin, **Zihao Wang**, Jie Li, Yonghao Lu, Tetsuo Shoji
“Microstructural characterization of subsurface caused by fretting wear of Inconel 690TT alloy” [J]. Materials Characterization, Volume 115, May 2016, Pages 32–38.
5. Xin L, Yang B B, **Wang Z H**, et al.
“Microstructural evolution of subsurface on Inconel 690TT alloy subjected to fretting wear at elevated temperature” [J]. Materials & Design, 2016, 104: 152-161.
6. L. Xin, **Z.H. Wang**, J. Li, Y.H. Lu, T. Shoji,
“Fretting wear behavior and mechanism of Inconel 690 alloy related to displacement amplitude” [J]. Tribology Transactions, in press.



氏名 Kaiping Wen

所属 School of Engineering, Aerospace Engineering, D1

研究課題

Optimization of Synthetic Jet for Bluff Body Drag Reduction Based on Multi-Fidelity Kriging Model

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

Passive flow control techniques used for drag reduction of ground vehicle, such as shape streamlining, vortex generator and porous surface, are simple and reliable, nevertheless, car body design is an integral processes of aerodynamics, sense of beauty, space and style design. Active flow control techniques have the advantage without influence on style design[1]. Synthetic jet is one way to affect the wake flow structure, which has large influence on the drag of bluff body vehicle. The obstacles for the applying in real production are the balance between energy consumption, reliability, and control strategy. The objective of this research is to improve the control strategy by optimizing the velocity, frequency and jet angle of periodic synthetic jet, as shown in Fig. 1.

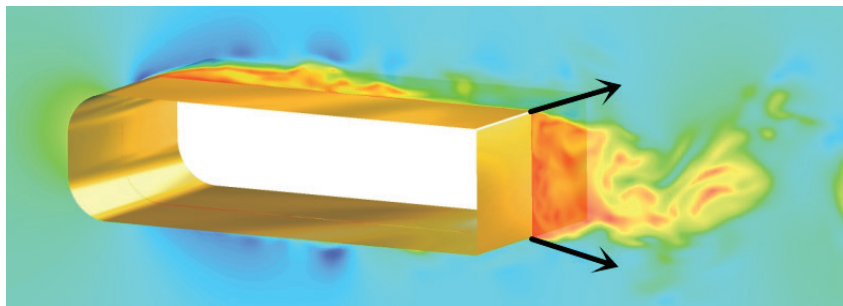


Fig. 1 Two synthetic jets on the rear face of the bluff body vehicle model

The numerical calculation method used is Detached Eddy Simulation(DES). The Reynolds-averaged Navier-Stokes is incapable of accurately predicting the drag of bluff body under the actuation of synthetic jet, as the red triangles show in Fig.2 (The Strouhal number of synthetic jet vs. Drag reduction). The DES result is comparable with Large-eddy Simulation result [2] and qualitatively similar with experiment result (The bluff body is simplified compared with experiment model) [3]. However, it is also time consuming to perform optimization using DES as the transient calculation and many numbers of initial samples for Kriging model construction. Therefore the multi-fidelity Kriging model, also called Co-kriging model, is introduced. The low-fidelity with coarse mesh and large time step is used to qualitatively predict the tendency, and the high-fidelity with better mesh or experiment is used to quantitatively predict the drag of bluff body. The Fig. 3 shows the advantage of multi-fidelity Kriging model, that use four points from experiment result [3] as high fidelity data and combine 10 points from DES with coarse mesh as low fidelity data. The purple line

in Fig. 3 is predicted by the co-Kriging model, and performs more accurate and time saving than the ordinary Kriging model from 4 high fidelity data. The future work is the optimization with whole parameters of synthetic jet by the multi-fidelity Kriging model.

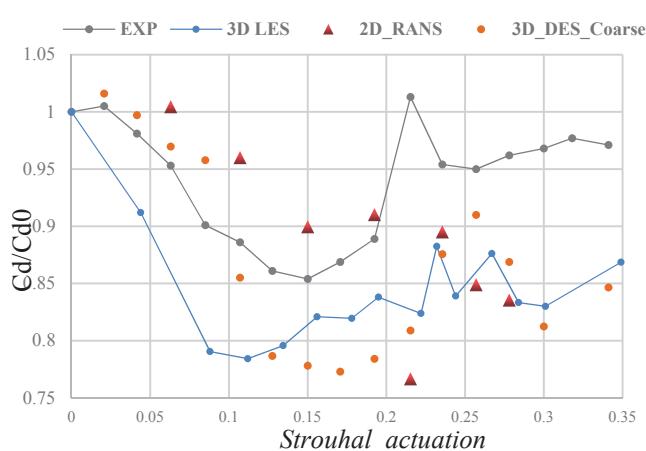


Fig. 2 Simulation method comparison

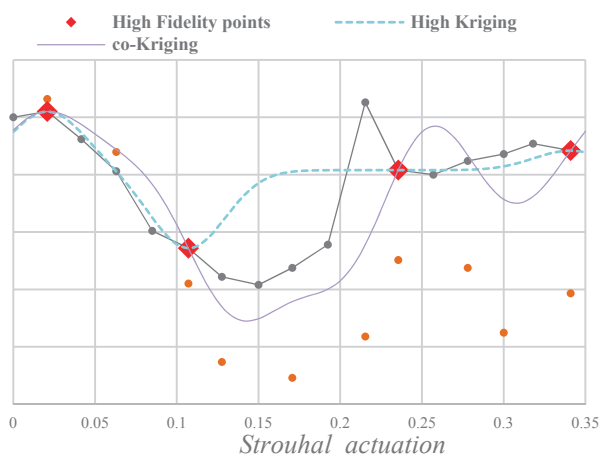


Fig. 3 Multi-fidelity Kriging and ordinary Kriging model

Reference

- [1] M. Koike et al. Mitsubishi Motors Technical Review, 16(2004)
- [2] Derwin J., M.C.Thompson et al. Numerical analysis of bluff body wakes under periodic open-loop control. J. Fluid Mech. 739, 94-123 (2013)
- [3] Mark Pastoor, Lars Henning et al. Feedback shear layer control for bluff body drag reduction. J. Fluid Mech. 608, 161-196 (2008)

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. Analysis of techniques for drag reduction of ground vehicle.

Reviews and summarizes the history of the techniques that used to reduce the aerodynamic drag of ground vehicle, and look forward to the future of those techniques. The advantages and disadvantages of passive and active drag control methods are analyzed and turn up the point of research that balance the energy consumption, reliability, and control strategy of active control.

2. Verification of numerical methods, RANS, DES and LES.

Three numerical methods are compared to test the capacity of simulating the wake flow of bluff body under the actuation of periodic synthetic jet. The DES is decided to be the numerical method in optimization as its goodness in the trade-off between accuracy and efficiency.

3. Verification of Multi-fidelity Kriging model for optimization.

The one design variable optimization is performed using Multi-fidelity Kriging model to verify the feasibility and efficiency.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Kaiping Wen

The techniques used to reduce the aerodynamic drag of ground vehicle
航空宇宙流体科学サマースクール、大津市（2016.9.8-10）



氏名 薛 高鵬

所属 工学研究科機械システムデザイン工学専攻・D3

研究課題

小型磁気共鳴力顕微鏡システム

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

The concept of magnetic resonance force microscopy (MRFM), as a promising magnetic resonance imaging combined with atomic force microscopy (AFM) technology, utilizes a small magnetic tip and an ultra-sensitive cantilever to detect the densities of spins or radicals. Normally, high vacuum environment for the resonant detection should be maintained in MRFM measurement, to decrease the air damping and increase the sensitivity of the cantilever sensor. The test objects of the sensitive cantilever are strongly constrained, because the test objects like cells should be kept in the standard atmospheric pressure environment. Therefore, vacuum packaging of the sensitive cantilever with an independent vacuum micro-chamber is a promising method to separate the vacuum environment between the cantilever sensor and test objects. Here, the research content in this year is focused on developing a vacuum packaged cantilever magnetic sensor, to construct the measurement setup of MRFM and also to realize the MRFM measurement at standard atmospheric environment.

Recently, based on extremely high signal to noise ratio, an ultra-sensitive cantilever with a small magnet has been utilized to detect the densities of spins or radicals through a non-invasive method in a nanometer scale [1, 2]. However, a high vacuum environment for the resonant detection should be maintained, to decrease the air damping and increase the sensitivity of the cantilever sensor. The test objects of the sensitive cantilever sensor are strongly constrained in magnetic resonance force microscopy (MRFM), because the test objects like cells should be kept in standard atmospheric pressure environment.

Vacuum packaging of the sensitive cantilever with an independent vacuum micro-chamber is a promising method to separate the vacuum environment between the cantilever sensor and test objects. Figure 1 shows the schematic of the proposed vacuum packaged cantilever sensor. The Si cantilever with a micro-magnet is anodically bonded to the glass substrate with a cavity. The getter material is placed into another cavity to adsorb the residue gas. To avoid the cantilever structure to be affected by the generated electrostatic force during final anodic-bonding process, thin Cr-Ti film is deposited onto the cantilever anchor and bonding area of glass substrate. Finally, the cantilever is hermetically packaged by anodic-bonding. Figure 2 (a) shows the optical image of the fabricated sample and Figure 2 (b) shows the cantilever structure after magnet mounting.

Based on the measured pressure dependence of the Q factor before packaging, the packaged vacuum is estimated to be in the range of $7.8 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^3$ Pa. To detect magnetic field intensity, a PZT plate is mounted on the vacuum packaged cantilever for vibration detection using laser doppler

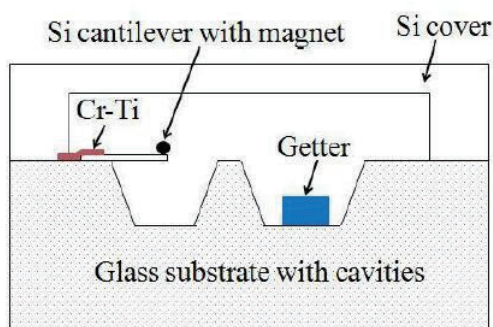


Figure 1: Schematic diagram of the vacuum packaged Si cantilever with a mounted magnet based on anodic bonding.

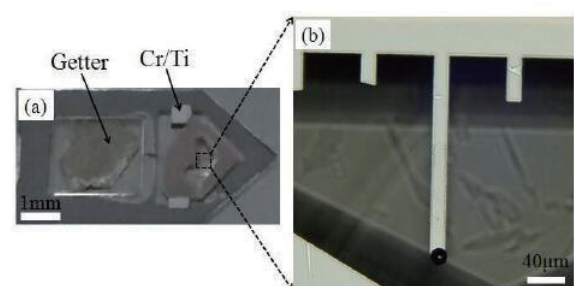


Figure 2: Optical image of the overall view of the fabricated vacuum packaged cantilever magnetic sensor (a), and magnified top view of the cantilever after the magnet mounting process (b).

vibrometer, as shown in Figure 3. Figure 4 shows the resonant frequency variation plotted as a function of the magnetic field gradient with a magnetic field resolution of $\sim 4 \times 10^{-6}$ T. The MRFM measurement setup is established at atmospheric environment with the vacuum packaged cantilever sensor, $\sim 1 \times 1$ mm² DPPH radical, a RF coil for spin resonance and a coil with SmCo magnet for magnetic field modulation, as shown in Figure 5. The vibration of the cantilever is measured by laser doppler vibrometer with a lock-in amplifier. Figure 6 shows that the ESR magnetic resonance signals are observed with the applied RF field from 500 to 1000 MHz. The measured amplitude at the peak is 7.6 nm and the corresponding force is calculated to be 9.2×10^{-12} N. The spin density at the peak is estimated to be $\sim 1.5 \times 10^{15}$ spins/cm³. It is demonstrated that this vacuum packaging technology is an effective method to improve the sensitivity of the cantilever sensor and gives more possible applications of the cantilever sensors at various ambient condition.

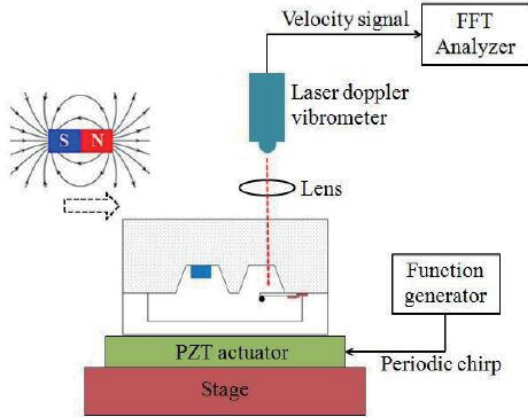


Figure 3: Magnetic field gradient measurement setup.

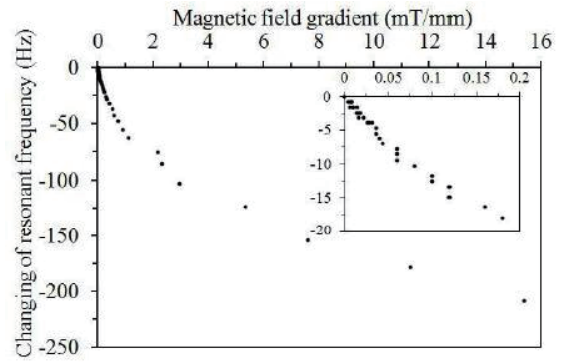


Figure 4: Relationship of the magnetic field gradient versus the resonant frequency.

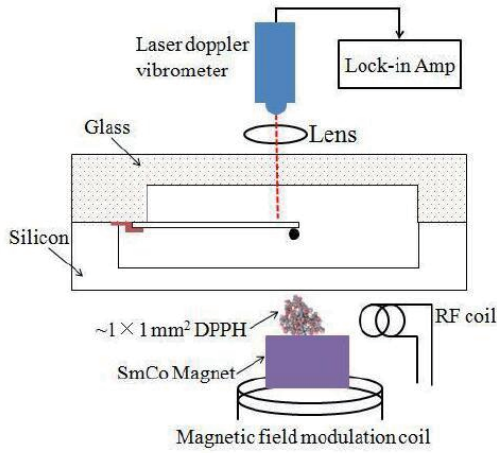


Figure 5: MRFM measurement setup with the vacuum packaged cantilever sensor at atmospheric environment.

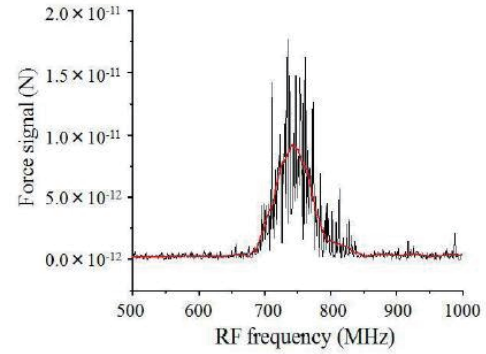


Figure 6: ESR force signals in the DPPH sample versus scanning radio frequency of the coil at atmospheric environment.

- [1] C. L. Degen, M. Poggio, H. J. Mamin, C. T. Rettner, and D. Rugar, "Nanoscale magnetic resonance imaging", *PNAS*, vol. 106, no. 5, pp. 1313-1317, Feb. 2009.
- [2] Y. Seo, M. Toda, and T. Ono: "Si nanowire probe with Nd-Fe-B magnet for attonewton-scale force detection", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 25, no. 4, pp. 045015, Mar. 2015.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. To separate the vacuum environment between the cantilever sensor and test objects, a cantilever magnetic sensor is vacuum-packaged successfully based on anodic bonding.
2. The magnetic field gradient and radical density are detected by the vacuum packaged cantilever magnetic sensor at the atmospheric condition based on magnetic force sensing.

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Comb-Drive XYZ-Microstage with Large Displacements Based on Chip-Level Microassembly”, *Journal of Micro electro mechanical Systems*, Vol. 25, No. 6, pp. 989-998, Dec. 2016.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Assembled Comb-drive XYZ-microstage with DPPH Sample for the 3D Scanning of Magnetic Resonance Force Microscope”, *The 16th International Conference on Nanotechnology*, pp.980-981, Sendai, JAPAN, Aug. 2016.
2. Gaopeng Xue, Masaya Toda, Nurasyikin Mohd, Zhonglie An, Nguyen Van Toan, and Takahito Ono, “Magnetic field sensor based on vacuum packaged cantilever with a mounted magnet”, *The 33th Sensor Symposium on Sensor・Micromachine and Application System*, Hirado Nagasaki, Oct. 2016.



氏名 山口 達也

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D1

研究課題

超音速流における予燃焼ガス単孔噴射型キャビティー保炎器の
燃焼特性

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、従来は困難であった予燃焼ガスの噴射エンタルピーの推定を目指した新型予燃焼トーチの設計・製作を実施した。まず、図1のような外観および内部構造を有する新型予燃焼トーチを考案・製作した。予燃焼トーチは内部の総当量比を変化させることで噴射エンタルピーをある程度制御できることが望ましいため、非常に燃料リッチな環境においても予燃焼ガスを生成できる必要がある。そこで、新型予燃焼トーチの内部は円筒形状を基本として側面から燃料ガスが供給され、底面から空気が供給されるような構造とし、燃料雰囲気中に空気の逆拡散火炎を形成するような内部構造とした。この構造は図2に示すように側面に設けた仕切り管の穴の配置や数を変更することで試行錯誤的に予燃焼状態を改善できるため、噴射ガスのエンタルピーの改善が見込まれる。現在は、いずれの仕切り管を用いた場合においても予燃焼トーチ内部の総当量比が5.9程度となる非常に燃料過濃な作動条件においても予燃焼トーチ内部での着火・保炎が達成されたことから新型予燃焼トーチはトーチ内部の総当量比を広く変化させて運用することが可能であると考えられる。しかしながら、仕切り管に配置した穴の数や位置によって熱電対によって計測される参照温度が大きく変化するため、仕切り管の選択に注意が必要であることが示唆された。すなわち、不適切な仕切り管を選択してしまうと、燃焼効率が著しく低下することによって、後述する平均分子量に関する仮定を逸脱してしまい、実際の平均分子量が推定される平均分子量よりも低下し、噴射温度を過大評価してしまう恐れがある。場合によって予燃焼ガスの運用条件によって仕切り管の変更も検討しなければならないと考えられる。この点については推定温度の妥当性に影響を与えうるため、今後より詳細な検討を実施する。

噴射エンタルピーの評価法の発案には宇宙航空研究開発機構で提案されているロケットトーチ[1,2,3]の考え方を基礎として、臨界流れの質量流量の式と等エントロピー関係式から以下の噴射ガス静温度 T_s の算出式を導出した。

$$T_s = \frac{1}{R_0} M_w \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \left(\frac{p_0 A^*}{\dot{m}} \right)^2$$

ここで、上式の右辺に現れる平均分子量 M_w や比熱比 γ はそれ自身が厳密には静温度 T_s に依存する量であるため、上式を静温度 T_s について陽的に解くことは難しい。本研究では、これを回避するために比熱比一定($\gamma = 1.31$)の仮定および断熱火炎温度における組成を仮定することとし、それらの仮定が算出される静温度 T_s に与える誤差について評価したところ、比熱比を $\gamma = 1.31$ と仮定した時に水素/空気系の比熱比の最大値($\gamma = 1.4$)と最小値($\gamma = 1.24$)に与える誤差が温度推定値に与える誤差率が最小となり、その値が0.8%程度となることを明らかにした。また、断熱火炎温度における平衡組成の仮定が平衡温度800 Kにおける平衡組成に対して与える誤差が温度推定値に与える誤差率は量論当量比付近で最大値となるがその値は最大でも0.3%程度となることがCHEMKIN-PROを用いた平衡計算によって明らかとなった。以上より、組成平衡の仮定が十分に満足されることで本研究の温度推定手法は良い精度で噴射温度を推定できることが期待される。

また、同時に上式から算出される予燃焼ガスの全温度を超音速燃焼試験中に逐次確認できるようにするため、Microchip社製のマイクロコントローラPIC18F4553を用いて新たに開発した多チャンネル(最大12CH)電圧計測デバイス(図3)にUSB通信機能を実装することによって、PCでの逐次計算による推定温度等のモニタリングおよび計測が安価に行えるようにした。

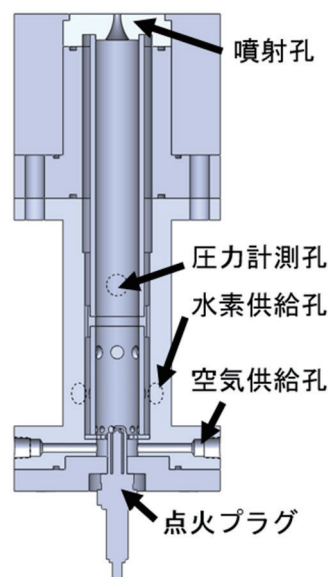
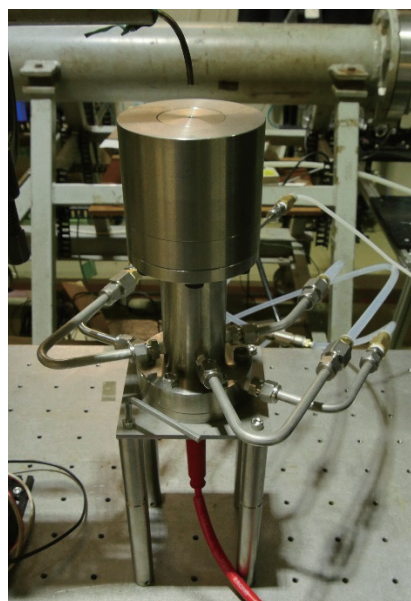


図1 本年度に設計・製作した新型予燃焼トーチとその内部構造

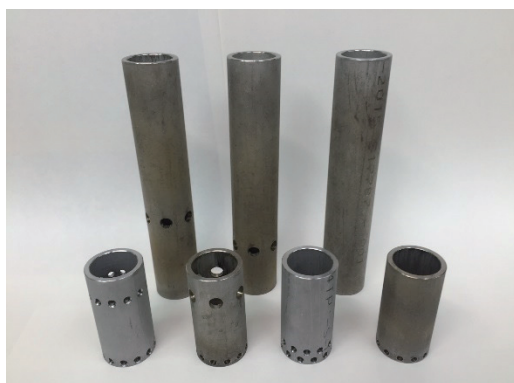


図2 トーチ内部に設置される側面仕切り管

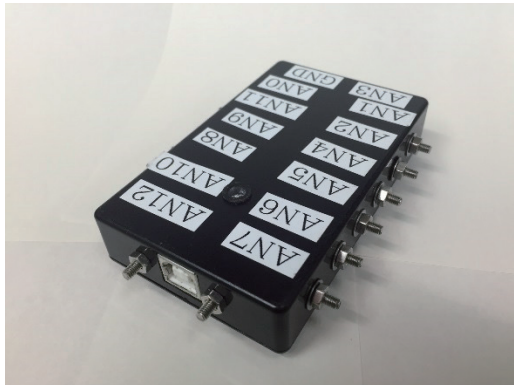


図3 多チャンネル電圧計測デバイス

- [1] 「超音速流におけるマイクロトーチによる着火促進実験」，小林完，富岡定毅，工藤賢司，村上淳郎，三谷徹，第36回燃焼シンポジウム， B343，1998年
- [2] 「超音速流における燃料過濃マイクロバーナによる着火促進」，小林完，工藤賢司，村上淳郎，三谷徹， 第38回燃焼シンポジウム， C344，2000年
- [3] 「M4飛行条件におけるスクラムジェットエンジンの燃焼器-インレット干渉抑制」，小林完，荻田丈史，富岡定毅，谷香一郎，櫻中登，三谷徹，日本航空宇宙学会論文集，Vol.54, No.628, pp.196-203,2006

平成28年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

<シンポジウム>

名 称：第54回燃焼シンポジウム
主催団体：一般社団法人 日本燃焼学会
開 催 国：日 本
開催期間：2016.11.23~25
役 割：スタッフ

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 新型予燃焼トーチの設計製作
本研究で従来使用してきた予燃焼トーチの問題点の一つである予燃焼ガスのエンタルピー損失を低減し、強制着火性能に優れた予燃焼ガスの生成を目指した新型予燃焼トーチの設計および製作を実施した。
2. 予燃焼ガス噴射温度推定法の提案
本研究で従来使用してきた予燃焼トーチのもう一つの問題点である予燃焼ガスの温度評価を改善するため、臨海ノズルの質量流量の関係式を利用した温度推定法を考案した。その妥当性について検証は今後実施してゆく。
3. 予燃焼ガス噴射条件の逐次監視・記録システムの開発
従来は超音速燃焼試験後に実施していた予燃焼ガスの噴射条件の算出を超音速燃焼試験中に逐次確認できるようにするため、PICマイコンを用いた多チャンネル電圧計測および計算システムを新たに開発した。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Tatsuya Yamaguchi, Taro Ichikawa, Ko Murata, Taku Kudo, Akihiro Hayakawa and Hideaki Kobayashi, Supersonic Combustion Using Pre-Combustion Gas Injection from a Bottom Single Hole into a Cavity Flameholder, 36th International Symposium on Combustion, Work in Progress Poster, 1P067, July, 2016



氏名 吉田 尚生

所属 工学研究科機械機能創成専攻・D1

研究課題

全固体二次電池のIn-Situ測定手法の開発と動的電気化学・力学的劣化モデルの構築

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、リチウムイオン電池のAE測定を用いたIn-situでの機械的損傷の評価システムの開発を行うことで、充放電に伴う電極部の体積変化に伴う損傷のメカニズムを明確にした。次世代の負極として注目されているSi負極は充電時にLiイオンがSi負極へ合金化しながら拡散し大きく膨張、放電時にはLiが脱離することで体積が大きく収縮することが知られている[1]。その際の大きな体積膨張によって電極部の損傷が発生する[2]。この損傷挙動をAE法を用いて、充放電を行いながらその場で観察する手法の開発を行った。図1にSi負極のCC-CV試験下でのAE信号の発生エネルギーを示す。リチウムイオン電池では初期サイクルにSEI(Solid Electrolyte Interphase)の形成[3]などの特殊な反応が進行することが知られている。そこで初期サイクルと2サイクル目以降をそれぞれ分析したところ、初期サイクルでは充電(膨張)時に大きくAEが発生したのに対し、2サイクル目以降になると放電(収縮)時に大きくAEが発生することが示された。それらのAEの発生源を明確にするためにFFT解析を行った(図2, 図3)。得られたAE信号はFFT解析の結果からガスの発生(Type A)と電極の損傷(Type B)の大きく2つに分けられることが分かった[4,5]。充電過程では1サイクル目にガスの発生とSi負極の損傷が起こった。2サイクル目以降になると、充電過程ではAEがほとんど発生しなくなった。このことから充電過程で発生するAEは電極の膨張時の剥離に由来する信号であると考えられ、1サイクル目で剥離が十分に進行することから、2サイクル目以降では充電過程でAEが発生しなかったと考えられる。それに対し放電過程では、サイクル数にかかわらずSi負極の損傷が起こった。通常、収縮時には膨張時に発生した電極-基板間の応力は緩和する方向に進むと考えられるため、収縮時に発生した損傷は電極基板界面の剥離ではなく、電極内部での損傷によるものと考えられる。図4にSi負極の発生エネルギーとエネルギー密度を示す。Si負極で発生したAEエネルギーとそのエネルギー密度との間には相関関係があることが示された。このことから今回開発した手法は電池の劣化を評価するのに有用な手法である。

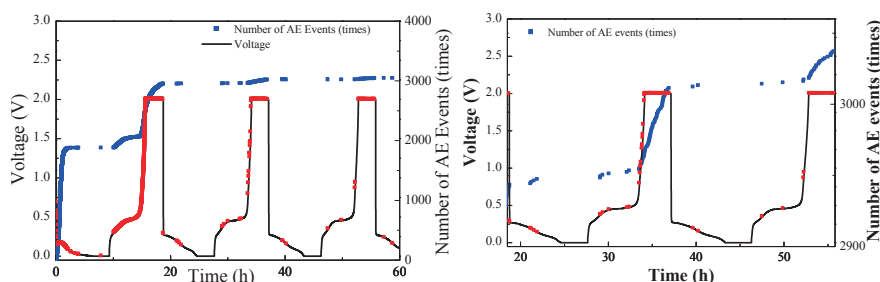


図1 Si負極のCC-CV試験下でのAE信号の発生エネルギー (a)初期サイクル以降 (b)2サイクル以降

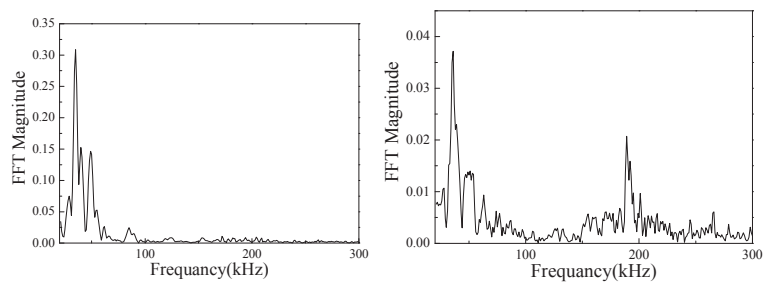


図2 FFT解析により得られた周波数分布(a)ガスの発生 (b)電極の損傷

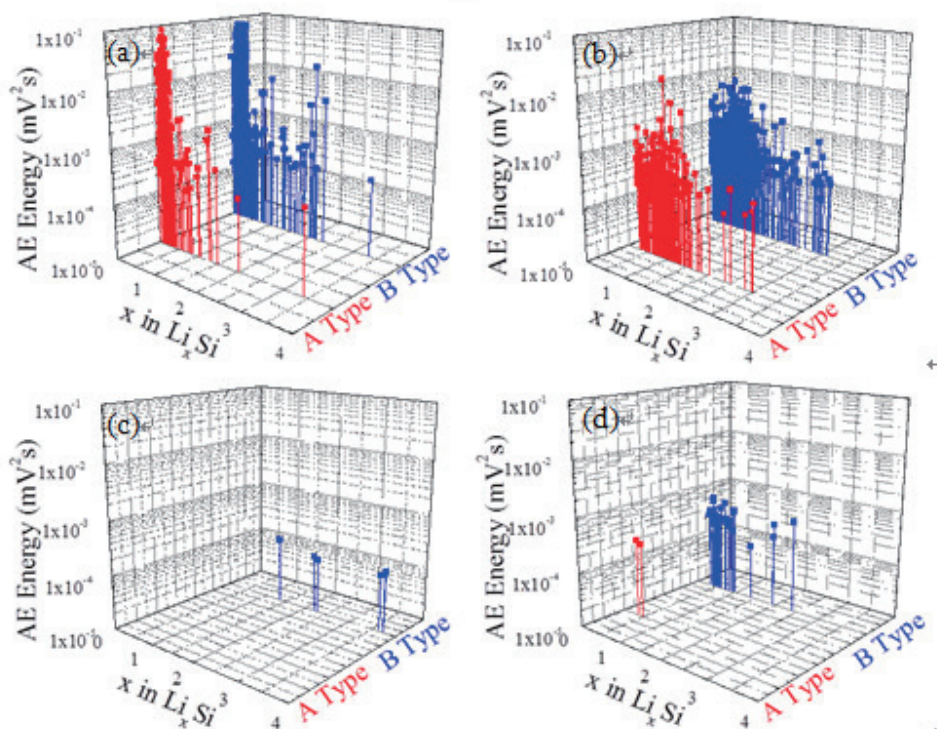


図3 周波数解析結果 (a)初期サイクル充電過程 (b) 初期サイクル放電過程
(c)2サイクル目充電過程 (b) 2サイクル目放電過程

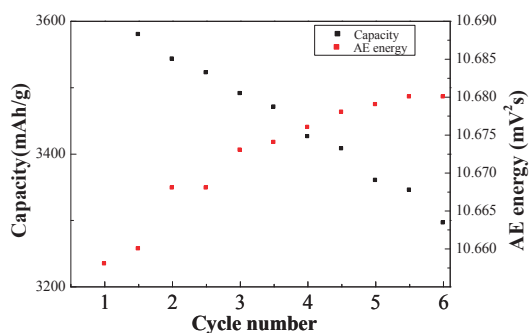


図4 Si負極の発生エネルギーとエネルギー密度

- [1] B.A. Boukamp, G.C. Lesh and R.A. Huggins, J.Electrochemical Society, Vol.128, (1981) 725.
- [2] J.P. Maranchi, A.F. Hepp, A.G. Evans, N.T. Nuhfer and P.N. Kumta, J.Electrochemical Society, Vol.153, (2006) A1246..
- [3] Y.M. Lee, J.Y. Lee, H.T.Shim, J.K. Lee and J.K. Park, J. The Electrochemical Society, Vol.154, (2007) 515.
- [4] J.W. Wang, Y. He, F.Fan, X.H. Liu, S. Xia, Y. Liu, C.T. Harris, H. Li, J.Y. Huang, S.X. Mao and T. Zhu, Nano Letters, Vol.13, (2013) 709.

[5] P.D. Wentzell and A.P. Wada, Anal.Chem, Vol.61, (1989) 2638.

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 二次電池のIn-Situ測定手法の開発
リチウムイオン電池の電池内部の損傷挙動の解析を行うため、AE法やレーザー顕微鏡観察を用いて、その場で電池を評価する手法の開発を行い。得られたデータを解析するためのプログラムの開発を行っている。
2. リチウムイオン電池の電極・電解質材料の最適条件の模索
リチウムイオン電池の電極・電解質材料を共焼結により作製し、その特性を電気化学的・機械的特性を評価することで、最適条件の模索を行っている。
3. 二次電池電極材料の作製手法の確立
リチウムイオン電池の電極・電解質材料をPLD(Pulsed Laser Deposition)法、焼結法、塗布法、コールドスプレー法などを用いてリチウムイオン電池の電極の最適な作製方法の確立を行った。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. **Naoki Yoshida**, Tadashi Sakamoto, Naoaki Kuwata, Junichi Kawamura, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida, Electrochemical Degradation Caused by Mechanical Damage in Silicon Negative Electrodes, *ECS Transactions*, Vol.75, No. 20 (2017), pp31-37.
2. **Naoki Yoshida**, Tadashi Sakamoto, Naoaki Kuwata, Junichi Kawamura, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida, In situ evaluation of mechanical and electrochemical degradation in silicon negative electrode for lithium-ion secondary batteries, *Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology*(August 22nd, Sendai, Japan), (2016), pp. 974-977
3. Kohei Okuyama, **Naoki Yoshida**, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida, Preparation and Electrochemical Evaluation of LiCoO₂ Film Prepared with Cold Spraying for Development of Lithium-Ion Battery, *ECS Transactions*, Vol.75, No. 20 (2017), pp191-199.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. **Naoki Yoshida**, Tadashi Sakamoto, Naoaki Kuwata, Junichi Kawamura, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida, In situ evaluation of mechanical and electrochemical degradation in silicon negative electrode for lithium-ion secondary batteries, *IEEE Nano 2016 16th International Conference On Nanotechnology*, 2016/8/22, Sendai, Japan. Oral Presentation
2. **Naoki Yoshida**, Tadashi Sakamoto, Naoaki Kuwata, Junichi Kawamura, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida, Electrochemical Degradation Caused by Mechanical Damage in Silicon Negative Electrodes, *Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science(PRIME 2016)*, 2016/10/2, Honolulu, Hawaii. Oral Presentation
3. 吉田尚生, 坂本正, 桑田直明, 河村純一, 佐藤一永, 橋田俊之, リチウムイオン二次電池用負極材料における機械的損傷と電気化学的特性変化に関する研究, *日本機械学会2016年度年次大会*. 2016/9/11, 口頭, 九州大学伊都キャンパス, 福岡.
4. Kohei Okuyama, **Naoki Yoshida**, Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida, Preparation and Electrochemical Evaluation of LiCoO₂ Film Prepared with Cold Spraying for Development of Lithium-Ion Battery, *Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science(PRIME 2016)*, 2016/10/2, Honolulu, Hawaii. Oral Presentation.



氏名 吉川 穰

所属 工学研究科 機械機能創成工学専攻・D3

研究課題

平板境界層における乱流の初生に関する研究

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

私は境界層の乱流遷移における乱流開始のメカニズム解明を目的として、境界層内に現れる渦構造に着目して研究を行っている。これまでも、平板境界層に対して攪乱を与えて乱流遷移を引き起こし、その過程を調査する研究は数多く行われてきたが、乱流の初生の引き金となる渦構造の特定には至っていない。私は本年度、平板上の層流境界層に対して壁面から短時間噴流を噴射することで境界層の乱流化を促す数値シミュレーションを行い、噴射速度のわずかな違いによって乱流へと遷移する流れ場と層流状態へと戻る流れ場を再現して両者を比べることで、乱流化の鍵となる渦構造を探った。その際の噴射速度は一様流速の18%と20%とした。

図1は各時刻において流れ場に存在する渦構造の体積を示す。本研究では速度勾配テンソルの第二不変量である Q 値を用いて、 $Q=0.0015$ の等値面内部を渦領域と定義した。噴流の噴射開始時刻を $t=0$ とし、 $t=15$ まで噴流を噴射した。噴流噴射後いずれの場合においても渦の体積は増加した後、減少に転じる。その後、18%の場合にはそのまま流れ場から渦が消失し層流状態へと戻るのに対し、20%の場合には体積が再び増加に転じて増え続け、流れ場は乱流状態となる。

20%の場合に渦の体積が再び増加に転じる前後の $t=160$ 及び $t=240$ における渦構造($Q=0.0015$)の上面図をそれぞれ図2、図3に示す。 Q の等値面は x 方向(流れ方向)渦度で色づけされている。 $t=160$ においては z 方向(スパン方向)の中心にヘアピン渦が複数存在する。このように噴流の短時間噴射後に下流でヘアピン渦列が現れる現象は過去の水槽実験^[1]においても観察されている。ここでヘアピン渦の上流やスパン方向外側に流れ方向に伸びた縦渦が存在するという点において、2つの流れ場にはほとんど違いがない。しかし $t=240$ においては、20%の場合いくつかの渦構造が生き残っているのに対して、18%の場合にはそのほとんどが消失している。さて図2の黄破線内部に着目すると、20%の場合には最も上流に存在するヘアピン渦とその隣接する縦渦との間の距離が近いのに対して、18%の場合ではその距離が離れていることが分かる。本計算で得られた流れ場では、これらの渦が接続し壁面垂直方向に高さの差を持つ渦を新たに形成できた20%の場合にはその構造が生き残るのに対して、18%の場合には接続できずに残った構造が減衰しながら流下するのみで乱流遷移を引き起こさないことが分かった。ここで生き残った渦構造はスパン方向中心に位置していたヘアピン渦とその両脇に存在していた縦渦の接続により、スパン方向に広がった縦渦対となる。その縦渦対の間で新たに橋渡しをする横渦が生じた結果、 $t=240$ においては $t=160$ の時に存在するヘアピン渦に比べて脚と脚の間隔の広いヘアピン渦(橙丸内部)が形成される。このヘアピン渦は流下とともに成長を続け、やがてその周囲に新たな渦構造が生成されることで流れ場は最終的に乱流状態となる。その成長はヘアピン渦の脚と脚の間隔が広いために粘性拡散が抑えられ、さらに壁面垂直方向に高さの差が大きいために境界層の持つ平均速度勾配によって伸長されやすい形状であったことが原因であると考えられる。本計算で得られた2つの流れ場の比較から、今回設定した条件において乱流遷移が起こるか否かを決定する要因は脚と脚の間隔の広いヘアピン渦が形成されるかどうかにかかっており、その違いは最初に形成された脚と脚の間隔の狭いヘアピン渦とその両脇に存在する縦渦の接続に左右されることが分かった。

以上の研究内容は、その一部を国際会議ISTP27のポスター発表において議論を行っており、現在論文投稿のための準備中である。

^[1] D. R. Sabatino and T. Rossmann, “Tomographic PIV measurements of a regenerating hairpin vortex”, *Experiments in Fluids*, 57:6 (2016), 13 pages.

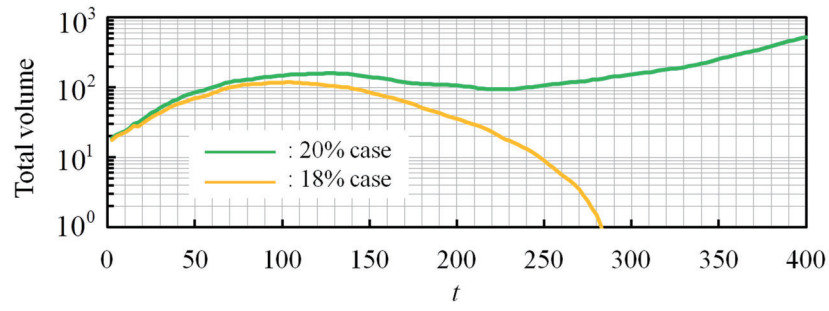


図1 流れ場に存在する渦構造の体積の時間変化

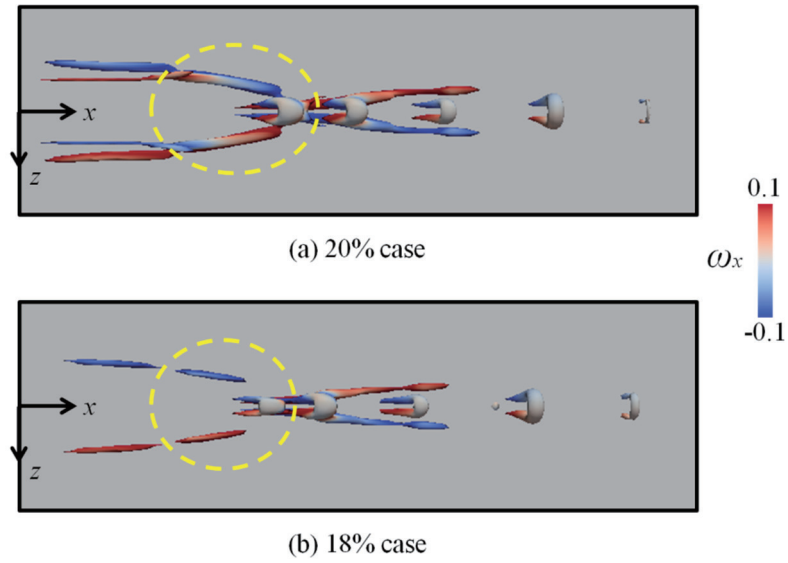


図2 時刻 $t = 160$ における渦構造

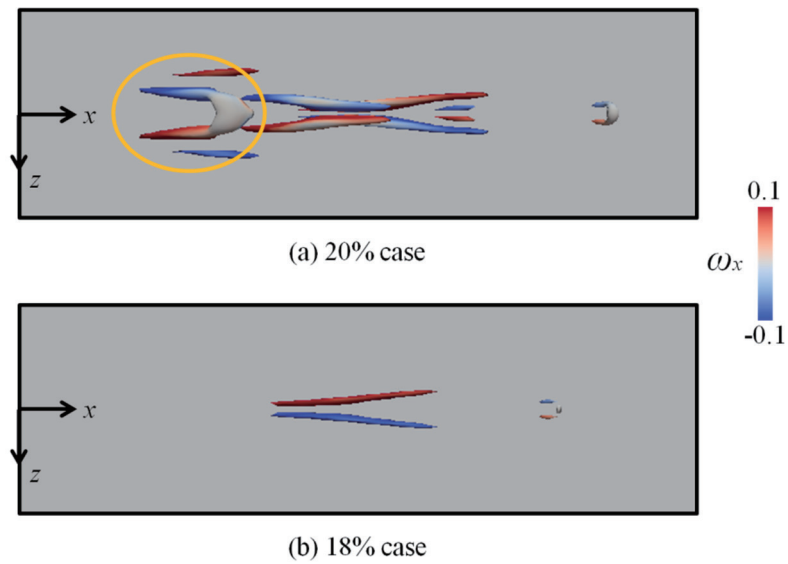


図3 時刻 $t = 240$ における渦構造

平成28年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

- ・熱海研究会にて研究を紹介

平成28年度の研究業績

【研究内容】

・平板境界層に対する短時間噴流噴射による乱流遷移の鍵となる渦構造の特定
境界層に噴射する噴流の速度を変えて乱流化する場合としない場合の流れ場を比較した。最初に現れるヘアピン渦は脚と脚の間隔が狭く、上流に新たなヘアピン渦を次々と生成するものの減衰の一途をたどるだけであったが、途中で生成された脚と脚の間隔の広いヘアピン渦は下流に行くにつれて長い間成長し、乱流遷移を引き起こす。これは粘性減衰が弱く境界層のせん断によって大きく伸長されることが原因であると考えられる。

・平板上でのランダムな吹き出し・吸い込みによる乱流遷移において乱流開始前に現れる渦構造
平板上に開けた無限に長いスリットを用いる場合と、スパン方向に周期的にスリットの有無が切り替わる場合の2つの条件で、スリットから境界層中にランダムノイズを導入した。その結果スリットに端がある周期的な場合には、より小さな乱れを入れた場合においても下流で乱流遷移が起こり、その際にはスリット端の直下流に生じる傾いた縦渦が遷移の発端となることが分かった。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. 国際学会発表

Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi,
NUMERICAL SIMULATION OF THE BOUNDARY LAYER TRANSITION CAUSED BY A
SHORT DURATION JET,
The 27th International Symposium on Transport Phenomena, Honolulu, USA, (September 20-23,
2016), ISTP27-190, 4 pages, USB Memory.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 国際学会発表

Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi,
Boundary Layer Transition Triggered by Local Random Blowing-and-Suction at a Slit,
Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, (October 10-12, 2016),
p.652-653, USB Memory.

氏名 吉村 光生



所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D2

研究課題

マイクロチャネルのロバスト設計に向けた大域的トポロジー最適化手法の開発

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、流体問題へのトポロジー最適化の新たな応用例としてマイクロ流路内の混合問題に取り組んだ。マイクロ混合器は、少量の試薬によって安価かつ短時間で混合を模擬できることから、化学実験、製薬、生命科学など幅広い分野への応用が期待される。しかし、マイクロ流路内の流れは代表長さが 1 mm 以下、流速が 1 cm/s となるような低レイノルズ数流れであるため、層流が支配的となる。したがって、混合は分子拡散に依存し、流路長は必然的に長くなる。このような場合、流れに摂動を与えることで短距離かつ短時間で効率的な混合を実現する手法が提案されている。摂動を与える方法としては、超音波や泡によって振動を与える active mixing と、流路の構造を変えることで流れに対流を生み出す passive mixing がある [1]。前者は流路外部に装置を装着する必要があるため、それらの管理や保守の観点からマイクロ流路にとって実用的とは言えない。一方、後者は外部装置を必要とせず、流路の構造の変化も近年の製造技術の向上により実用的になってきたため、注目されている。本研究では、この passive mixing に注目し、マイクロ流路の底面に複数の溝を加工することで、混合を促進する手法を提案する。

図1 において緑色で示された領域を設計領域として、混合性能を最大化する溝の分布をトポロジー最適化と遺伝的アルゴリズムによって探索する。設計領域における溝は図2 のようにグラフ理論に基づいて表現される。作動流体は水 (図1: 青) とエタノール (図1: 赤) とし、レイノルズ数を 1, ペクレ数を 1.2×10^3 としている。各形状は数値流体力学によって評価されるが、数値計算のための格子は物体表面を覆う三角形データの集合である STL データを必要とする。トポロジー最適化を実施する上で、溝の形状は幅や高さのみならず、本数や連続性など位相も含めて変化するため、通常の点列集合による形状表現では正確な形状が再現されない可能性がある。そこで、本研究では Delaunay 三角分割法 [2] を改良し、正確な STL データを高速かつロバストに再現する。形状表現にグラフ理論を採用することでトポロジーの変化を含む高い表現自由度を比較的少数の変数で表現することが可能となったが、グラフが表現できる複雑性のすべてを考慮して数値解析と最適化を行うことは計算コストの観点から現実的ではない。そこで本研究はまず、事前のパラメトリック・スタディによって明らかに混合の効率化に貢献しない溝を解探索から除外する。そして、溝の本数が多すぎる場合は、却って混合効率の悪化と製造可能性の低下をもたらすことから、各個体において許容される溝の最大本数を規定する。後者の制約は試行錯誤的に決められるものであり、また、制約によっては解探索が阻害される恐れがあることから、本研究では溝の最大本数の最適値に関する考察も行った。

最適化結果の一例を図3 に示す。マイクロ混合器における混合効率の指標は複数の局所解 (違う構造でありながら性能がほぼ同じ解) を持つことが知られており、本研究では大域的最適解 (関数空間全体における最小値) の他に複数の局所解を発見することができた。そして、それぞれの解から以下の特徴を持つ溝が混合に重要な役割を持つことが分かった。まず、主流方向を斜めに横断する溝が一方の流体を他方へ輸送する。そして、それらに付随する細い斜めの溝が補助的に界面の輸送、または他方の流体への合流を促進する。これらの特徴は、従来の設計・解析手法では報告されていないものであり、大域的解探索をトポロジー最適化に適用した本研究によって解明されたものである。これらの知見により、旧来経験的に設計されてきたマイクロ混合器の枠組みを超えた、より高性能な流路の設計が可能になると考えられる。本研究では、計算コストの節約および提案手法の検証のために、混合の初期段階に注目した設計を行った。今後は、設計領域の周期性 [3] に注目し、混合の完了に近い段階までのトポロジー最適化を実施する予定である。

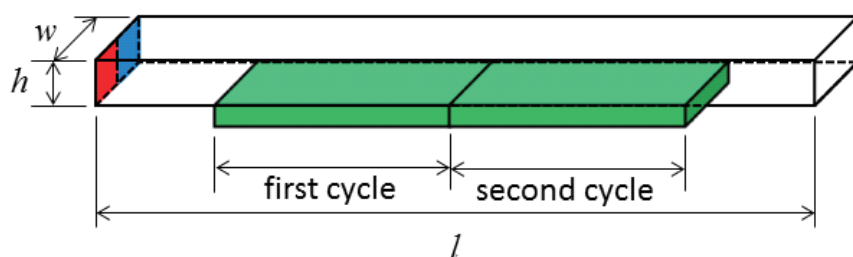


図1. マイクロ混合器と設計領域

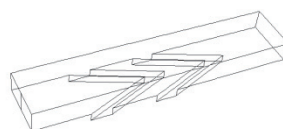
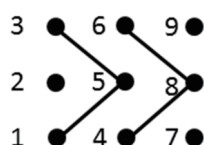
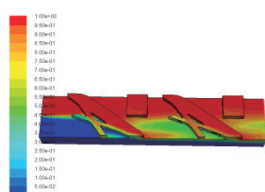
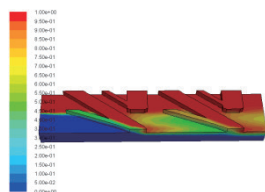


図2. (左) グラフによる形状表現, (右) グラフと同じ形の溝を添付した流路



(a) 大域的最適解



(b) 局所最適解

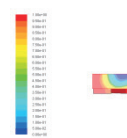


図3. 最適化結果. (左) マイクロ流路底面の相分布, (右) 流路出口の相分布

- [1] V. Hessel., H. Löwe., and F. Schönfeld., “Micromixers - A review on passive and active mixing principles,” *Chem. Eng. Sci.*, **60**(8–9 SPEC. ISS.), pp. 2479–2501, (2005).
- [2] L. P. Chew., “Constrained Delaunay Triangulation,” *Algorithmica*, **4**(1–4), pp. 97–108, (1989).
- [3] Y. Deng., Z. Liu., P. Zhang., Y. Liu., Q. Gao., and Y. Wu., “A flexible layout design method for passive micromixers,” *Biomed. Microdevices*, **14**(5), pp. 929–945, (2012).

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. 非凸形状に対して既存の点のみを用いた Delaunay 三角分割手法の提案
一般的に非凸形状に対しても凸形状を生成してしまう Delaunay 三角分割に対して、新たな点を導入することなく正しい形状を復元する手法を開発した。
2. 遺伝的アルゴリズムによるマイクロ混合器のトポロジー最適化
グラフ理論によって形状を表現し、混合促進のための適切な溝の本数、形状を遺伝的アルゴリズムによって探索した。また、異なる幅の溝が混在する流路において各溝が混合に果たす役割を解明した。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. ○ Mitsuo Yoshimura, Koji Shimoyama, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, “Topology optimization of fluid problems using genetic algorithm assisted by the Kriging model”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 109, Issue. 4, pp. 514-534, 2017.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読あり）】

1. ○ Mitsuo Yoshimura, Koji Shimoyama, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, “Topology Optimization Using a Genetic Algorithm with a Novel Level Set Representation Approach”, *ECCOMAS Congress2016: 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Crete, Greece, June 2016.



氏名 朱 敏杰

所属 工学研究科機械機能創成専攻・D1

研究課題

MEMS Piezoresistive Sensors Based on CVD Grown
Molybdenum Disulfide Films

平成28年度における本卓越拠点に対する取り組み

Introduction

The piezoresistive effect is a change in the electrical resistivity of a semiconductor or conductor when mechanical strain is applied, which causes a change in electrical resistance. The piezoresistive effect in those materials has been widely used in the MEMS smart sensor field, including strain gauges, cantilever force sensors, accelerometers and pressure sensors [1]. Recently, advances in computing and artificial intelligence have resulted in increasingly the demand of flexible or wearable devices, robotic, biomedical devices with multi-functionality and enhanced performance. However, in order to obtain these applications, novel technologies for sensing electronics becomes more and more important.

Conventional silicon can be made flexible by thinning down the Si wafer below 25 μm , while the brittle of Si limits the lifetime and reliability of devices. Other materials like organic polymers give high sensitivity with respect to external strain. There are still some drawbacks such as high hysteresis, nonlinearity and poor repeatability. Therefore, a more suitable material for future flexible electronics is required. As an alternative, MoS₂ has large mechanical flexibility, outstanding optical transmittance, high gauge factor and semiconductor properties, which is an ideal choice [2][3].

The most important step for piezoresistive molybdenum disulfide, monolithic integration in silicon based MEMS, has not yet been reported. In addition, only few papers reported piezoresistive flexible sensor for practical applications. The purpose of this research is to fabricate MEMS piezoresistive pressure sensor based on CVD grown large-scale monolayer molybdenum disulfide.

2. Experimental details

To get single- or few- layer MoS₂ from the molecules or atoms, the most common method is chemical vapor deposition (CVD). For large-area few layers MoS₂ growth, sulfurization of pre-deposited Mo-based precursors and direct reaction of simultaneously sulfur gaseous and molybdenum dioxide precursor were introduced. [4]

2.1 Sulfurization of pre-deposited Mo-based precursors

As a two-step process, the first step involves the synthesis of Mo thin films on silicon substrates coated with a 280 nm thick SiO₂ layer by thermal oxidation. Prior to sputtering, the substrates were

cleaned with acetone, ethanol and rinsed in deionized (DI) water, followed by piranha solution ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=2:1$). After rinsing by DI water again, the substrates were dried and baked for 5 min at 145 °C. The substrate was agitated by exposure to a suspension consisting of isopropyl alcohol (IPA) solution and 100 nm diameter diamond powders in an ultrasonic bath. After loading the substrate, a sputter chamber was evacuated by employing a rotary pump and a turbomolecular pump combination to achieve the vacuum at 3×10^{-4} Pa. The Mo thin films were deposited by RF sputtering at room temperature under Ar gas atmosphere. The deposition time was 5 s to obtain a Mo films with thickness of about 1 nm measured by Ellipometer. The RF power was set at 60 W.

Fig. 1 shows a schematic diagram of the MoS₂ synthesis procedure. The sputtered Mo films were placed in a low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD) system equipped with a 36 mm diameter quartz tube furnace which was pumped down to a pressure less than 1.9 Pa. Sulfur (200 mg, 99%) was placed in a ceramic boat upstream of the quartz tube and fixed at 135 °C using a heating tape. Ar gas was used as carrier gas with flow rate of 250 sccm. The pressure of the CVD chamber was kept at 329 Pa. The quartz tube was heated to 750 °C at the center in 30 min. After 180 min, the furnace was cooled down naturally to room temperature.

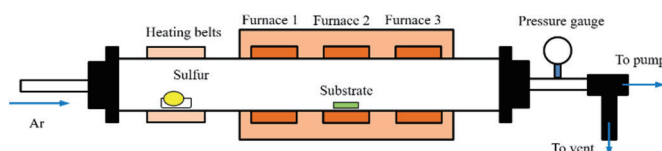


Figure 1. Schematic illustration of the sulfurization system.

2.2 CVD growth of MoS₂

Prior to the CVD process, the substrate was cleaned as the same illustrated in section 2.1. Fig. 2 illustrates the CVD setup for MoS₂ growth. Sulfur (200 mg, 99%) was placed in a ceramic boat upstream of the quartz tube and MoO₃ powders (450mg) were placed in furnace 1, with a SiO₂/Si substrate putted in furnace 3.

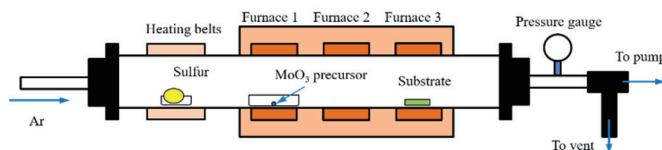


Figure 2. Schematic illustration of the MoS₂ CVD system

The main steps of the MoS₂ growing method is shown in Fig. 3. Fig. 4 illustrates the temperature curves for sulfur precursor and SiO₂/Si substrate for the whole experimental procedure. The quartz tube was first pumped down until the chamber pressure to 1.9 Pa to remove the oxygen, followed by constant Ar gas flow of 280~300 sccm at room temperature. Sulfur was heated at first. While the temperature reaches to 95 °C, open the heat switch of furnace. The growth temperature was set to 690~700 °C for 15 min to produce MoS₂ spices which precipitated onto the SiO₂/Si substrate to form MoS₂ thin film. After synthesis, the furnace and sulfur heating belts were shut down and were cooling down naturally to room temperature. Finally, the substrate was unloaded at room

temperature.

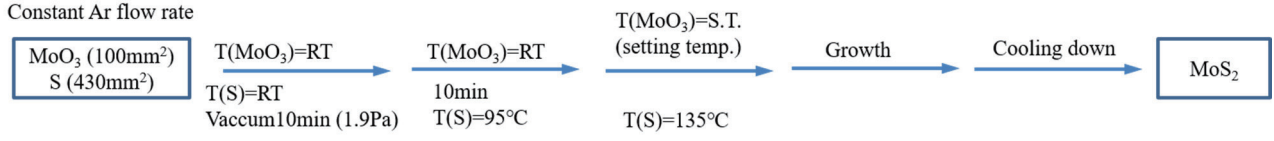


Figure 3. Main steps of the MoS₂ growing method.

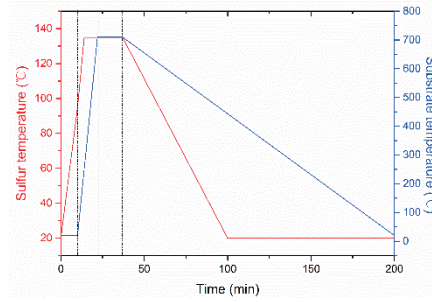


Figure 4. Temperature programming process of MoO₃ and S precursors.

3. Results and discussion

3.1 Mo sulfurization

Figure 5 (left) shows optical images of MoS₂ films using our two-step Mo sputtering sulfurization growth method. It can be seen that the film is uniform and continuous across a large area without grain boundary. Two characteristic Raman vibration modes can also be seen in the spectra in Figure 5 (right), the E_{12g} mode representing the in-plane vibration of molybdenum and sulfur atoms and the A_{1g} mode related to the out-of-plane vibration of sulfur atoms. The frequency difference between these two modes depends on the number of layers of MoS₂. The fitting results show that these two modes are located at 385.89 and 405.84 cm⁻¹, respectively, giving a frequency difference Δ of 20.05 cm⁻¹. Raman frequency difference is well known as an appropriate quantity to assign the number of MoS₂ layers. It indicates that the thin film is two layers. However, the full width at half-maximum (FWHM) of the Raman peak is so large that represents the low structural quality in Mo-sulfurization MoS₂ thin film.

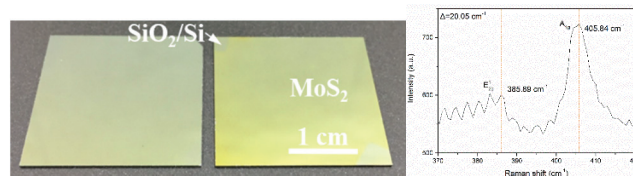


Figure 5. Optical images and Raman spectrum of MoS₂ films by sulfurization

3.2 CVD grown MoS₂ thin film

Fig. 6 (left) shows the SEM images of CVD grown MoS₂ thin film. We can see that only monolayer MoS₂ was grown; bilayer or multilayer MoS₂ was rarely seen. The brighter area indicates the SiO₂ substrate. The surface of SiO₂ substrate was covered by MoS₂ domains. The morphology size of MoS₂ is mainly ~500 nm.

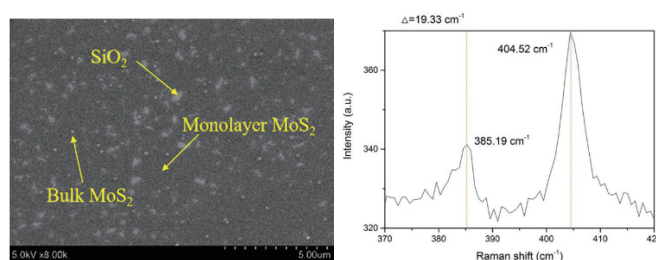


Figure 6. SEM images and Raman spectrum of CVD MoS2 films

To be sure that the domains imaged by SEM were indeed monolayer MoS₂, we characterized by Raman spectroscopy. Raman spectrum of CVD grown MoS₂ films are given in Fig. 6(right). The two Raman a peak frequency difference of 19.33 cm^{-1} shows the existence of monolayer MoS₂. The electrical properties of this MoS₂ film was evaluated after making Au/Ti electrode by EB evaporator. The resist of the grown MoS₂ was measured about $9.3 \times 10^4 \Omega$.

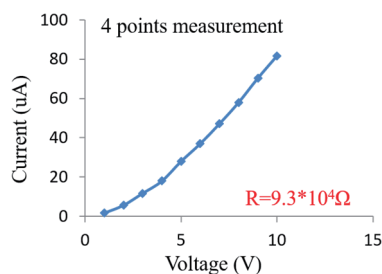


Figure 7. Electrical properties of grown MoS2

Conclusions

In this work, a large-area few-layer MoS₂ film on SiO₂/Si substrates using a combination of RF magnetron sputtering was successful. Monolayer MoS₂ film can be grown by CVD method in whole surface and it was confirmed by Raman. However, the repeatability is need to be improved. The resistive of grown MoS₂ was measured with about $9.3 \times 10^4 \Omega$. It can be used for fabricating piezoresistive sensors.

References

1. Barlian, A. Alvin, et al. "Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems." *Proceedings of the IEEE* 97.3 (2009): 513-552.
2. Wu, Wenzhuo, et al. "Piezoelectricity of single-atomic-layer MoS₂ for energy conversion and piezotronics." *Nature* 514.7523 (2014): 470-474.
3. Bertolazzi, Simone, Jacopo Brivio, and Andras Kis. "Stretching and breaking of ultrathin MoS₂." *ACS nano* 5.12 (2011): 9703-9709.
4. Choudhary, Nitin, et al. "Growth of large-scale and thickness-modulated MoS₂ nanosheets." *ACS applied materials & interfaces* 6.23 (2014): 21215-21222.

平成28年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

<国際インターンシップ派遣>

名 称：The Thirteenth International Conference on Flow Dynamics

主催団体：東北大学流体科学研究所& Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

開 催 国：日本と中国

開催期間：2016.09.01~2016.10.31

役 割：派遣学生

平成28年度の研究業績

【研究内容】

1. Polyacrylamide Hydrogel based Triboelectric Nanogenerator (TENG)
A polyacrylamide hydrogel containing lithium chloride was synthesized successfully. We used this polyacrylamide hydrogel to fabricate a triboelectric nanogenerator. In addition, the fabricated nanogenerator were evaluated and can be used as a tactile sensor.
2. CVD Grown Molybdenum Disulfide Films
A large-area few-layer MoS₂ film on SiO₂/Si substrates using a combination of RF magnetron sputtering was successful. Monolayer MoS₂ film can be grown by CVD method in whole surface and it was confirmed by Raman. We will fabricate a MEMS piezoresistive sensor in the future.

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Jinhua Li, Minjie Zhu, Zhuqing Wang, Takahito Ono.
Engineering micro-supercapacitors of graphene nanowalls/Ni heterostructure based on microfabrication technology.
Applied Physics Letters 109.15 (2016): 153901.
2. Minjie Zhu, Masaya Toda, and Takahito Ono.
Scanning probe with nitrogen vacancy centers in diamond particle for magnetic resonance imaging.
Nanotechnology (IEEE-NANO), 2016 IEEE 16th International Conference on. IEEE, 2016.
3. Minjie Zhu, Masaya Toda, and Takahito Ono.
Fabrication of Assembled Scanning Probe with Nitrogen Vacancy Centers in Diamond Particle.
IEEE Transactions on Nanotechnology (2016).

