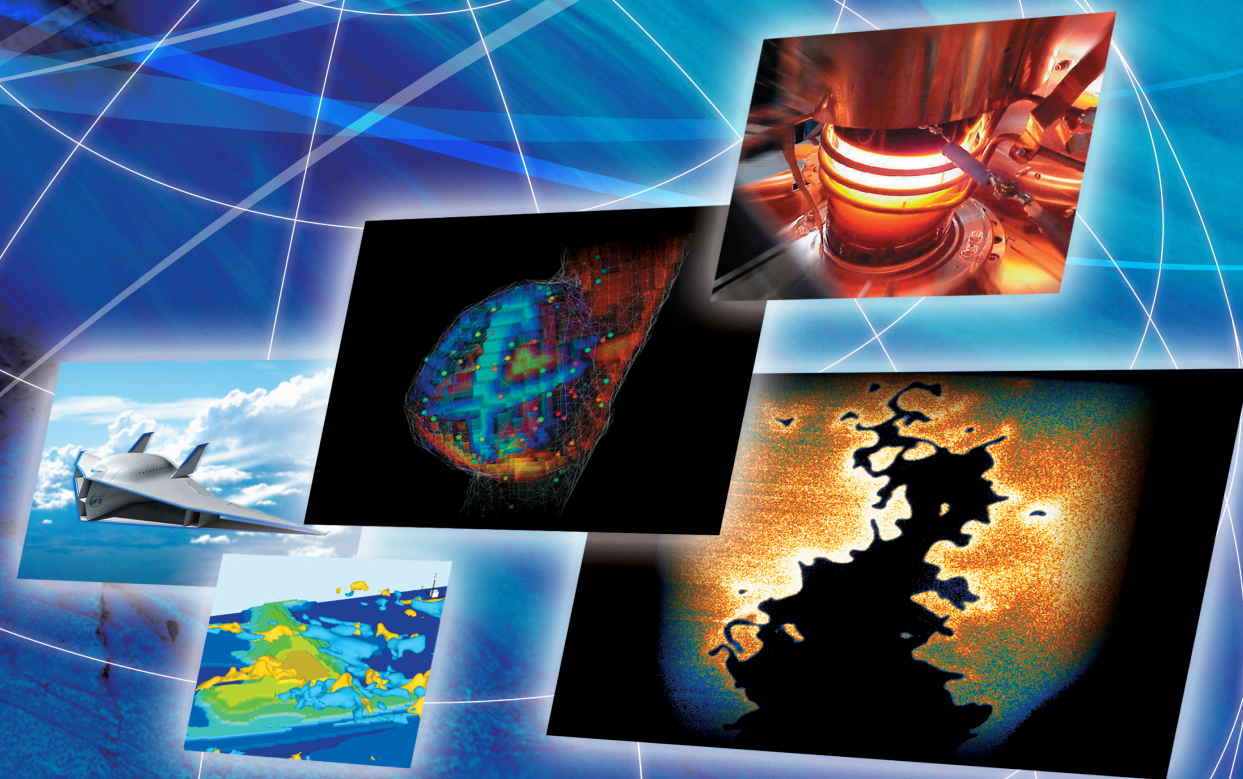


卓越した大学院拠点形成支援

流動ダイナミクス
知の融合教育研究世界拠点

平成29年度 研究活動報告書



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 29 年度も平成 28 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、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 29 年 11 月に開催した 14th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017)では、29 か国 685 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 13 回目を迎え、学生の参加人数も 312 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。

また、21 世紀 COE プログラム、グローバル COE プログラム及び卓越した大学院拠点形成の拠点リーダーとして長年ご指導頂きました圓山重直教授が、昨年 4 月に八戸工業高等専門学校校長として転出されることになりましたが、引き続き卓越した大学院拠点形成が里見総長の強力なご支援のもと、人材育成を目的とした拠点活動が継続できましたことは、大変有意義な成果と思っております。

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 30 年 3 月 2 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 大林 茂

平成 29 年度卓越した大学院 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	4
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

大林 茂

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

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・教授

太田 信

流体科学研究所・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・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・教授

渡邊 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・特任教授

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

学際科学フロンティア研究所・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

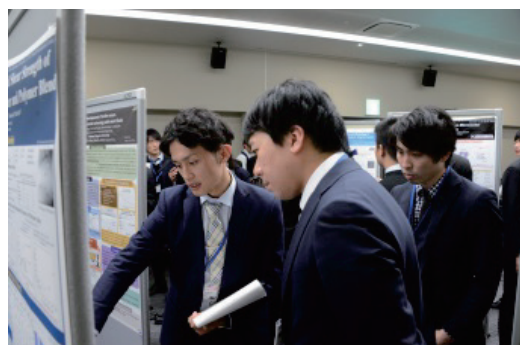
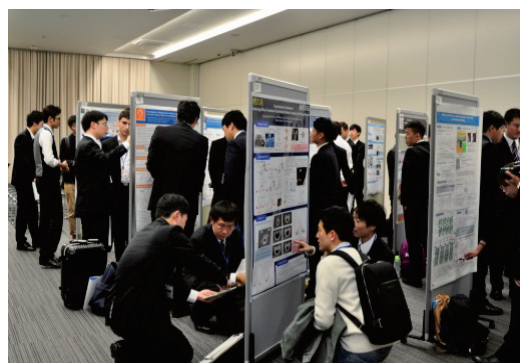
学生が企画・運営する国際会議を開催し、英語での発表討議能力を養成しながら研究組織運営とリーダーシップの訓練を行う。

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

平成29年11月1日～3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29年11月1日から3日にかけて行われたFourteenth International Conference on Flow Dynamics (第14回流動ダイナミクスに関する国際会議：29か国685名参加、うち学生312名)の学生セッションとして開催された。今回は、博士課程の大塚啓介氏、神田雄貴氏、山口達也氏の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、73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. Yuki Murakami (Tohoku University, Japan)

Mr. Kosuke Kudo (Hirosaki University, Japan)

Mr. Kenji Ishikawa (Waseda University, Japan)

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30年2月8日 10:00-12:00

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：Zihao Wang

題目：「クロム酸化物に着目した水素加速酸化現象の学理的解明」

発表者：吉田 尚生

題目：「全固体リチウムイオン電池開発のための”見える化”手法の開発と設計指針の提案」

<国際会議派遣プログラム採択者による発表>

発表者： 安保 巧

題目：“Visualization of Surface on a Prolate Spheroid Model Suspended by Magnetic Suspension and Balance System”

発表者：Le Dinh Anh

題目：“A Simplified Thermodynamics Model for Homogeneous Model for modeling Cavitating Flow”



2.3 特別講演会

1) 日 時 平成 29 年 12 月 13 日

場 所 東北大学流体科学研究所
2号館5階 大講義室

講師：Professor Bruce Hinds
(University of Washington, USA)

題目：“Dramatic nano-fluidic properties of carbon nanotubes as a platform for active membrane systems”

2) 講師：Assistant Professor Peter Pauzauskie
(University of Washington, USA)

題目：“Engineering optoelectronic point defects in nanoscale ceramic materials”



2.4 優秀研究奨励プログラム採択者

自らの研究内容を効果的に表現するスキルの向上を目的とし、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
Zihao Wang	工学研究科ファインメカニクス専攻	D2	竹田 陽一
吉田 尚生	工学研究科機械機能創成専攻	D2	橋田 俊之

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
熊田 圭悟	D2	15th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-XV)	Hollywood, Florida, USA	2017.7.23 ~ 2017.7.28
李 根燮	D3	The 16th European Turbulence Conference	Stockholm, Sweden	2017.8.21 ~ 2017.8.24
安保 巧	D2	American Physical Society Division of Fluid Dynamics 70th Annual Meeting in Denver 2017	Denver, Colorado, USA	2017.11.19 ~ 2017.11.21
Chang Chia-Hsing	D1	10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-10)	Taoyuan, Taiwan	2017.12.15 ~ 2017.12.17
Le Dinh Anh	D1	17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC17)	Maui island, Hawaii, USA	2017.12.16 ~ 2017.12.21
永田 貴之	D1	AIAA Science and Technology Forum and Exposition (The 2018 SciTech Forum)	Kissimmee, Florida, USA	2018.1.8 ~ 2018.1.12

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
渡邊 和浩 医工学研究科 医工学専攻	D1	ZHAW Life Sciences und Facility Management	脳動脈瘤治療のための深層学習の応用に向けた画像処理手法の開発	2017.8.21 ~ 2017.9.30	太田 信 (流体研)
小澤 雄太 工学研究科航 空宇宙工学専 攻	D1	Ecole Centrale de Lyon, Center for Acoustics	無響室風洞を用いた超音速噴流の音響計測	2018.1.8 ~ 2018.3.2	野々村 拓 (工学研究科)

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 張 家興



所属 工学研究科 機械機能創成専攻・D1

研究課題

プラズマ生成電荷の輸送制御による細胞応答機構

平成29年度における本卓越拠点に対する取り組み

Effect of Pulsed Current on Cell Activity

Plasma medicine is using low-temperature plasma to medical research, and the delivery of medically active species or ionic species at the molecular level is current topics in this research field [1]. Although, most of researches focus on chemical reactions produced by plasma, the influence of electrical transmission processes into cell growth is not developed completely [2]. In this experiment, we constructed the system that could not only use the same voltage and current as plasma generator, but also minimize chemical species generated by plasma, avoiding electrically induced reaction by-products or pH changes in the cell culture chamber [3].

The stimulation system design included two parts: the cell culture chamber and the salt bridge setup. The cell culture chamber was composed by cover glass slide, $10 \times 20 \times 10$ mm (W $\times$ L $\times$ H). For cell stimulation test, we put the culture-insert inside the chamber and cultured for 24 hours to create a $500 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$ gap between two well to observe cell migration and generated uniform pulsed current flow through cells. We seeded 2×10^5 cells/well and incubated with the pulsed current stimulation at 5 % CO_2 and 37 °C for 6 hours, used HT-1080 cell (JCRB, human sarcoma cell line). On the other hand, the salt bridge setup was for pulsed current transfers via the Ag/AgCl chloride electrodes and agarose bridges; internal agarose bridges were constructed by filling 8 mm glass tubing filled with 2 % agarose to connect between the chamber and the reservoirs filled with phosphate buffered saline (PBS). This configuration allowed us to physically isolate cells from pH variations and metal elution from the electrodes as shown in fig. 1.

In our experiment, we tested two different conditions for stimulus. In 100 Hz case, we measured the maximum voltage was 839 V, and maximum current was 268 mA, as showed in fig. 2(a) & (b). Especially, the rising time for current was less than 10 ns and the current width was 180 ns. On the other hand, in 1000 Hz case, the maximum voltage was 569 V, and maximum current was 209 mA, with the same rising time and the width as previous condition, as shown in fig. 3(a) & (b). During the treatment, pH value and temperature were constant based on 3 times tests for all condition including the control sample without stimulation.

The cell activity was evaluated with migration ability, we observed before and after the treatment as shown in fig. 5(a) - (f). Obviously, the stimulated cells appeared different morphology. Moreover, cells which were stimulated extended more longer and overlapped to each other and reached to center easier. In addition, at 24 h after the treatment, the number of cell was decreased by the pulsed current stimulation as shown in fig. 6.

Indeed, the nanosecond pulsed current affected cell activity. Due to the decrease of cell number, the cell was tardy in growth by the stimulation. Moreover, the cells with 100 Hz simulation showed almost no proliferation at 24 hours after the treatment, compared to that with 1000 Hz stimulation. This result may be due to the higher current and voltage in 100 Hz case. For the future work, we will focus on cell morphology and viability, using differential interference contrast microscopy to investigate cell surface and dyes for cell staining to check dead or alive.

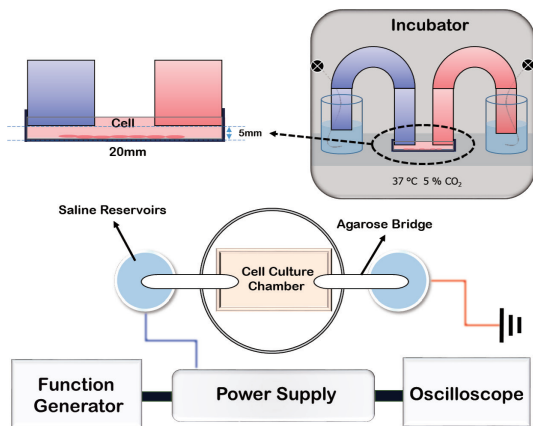
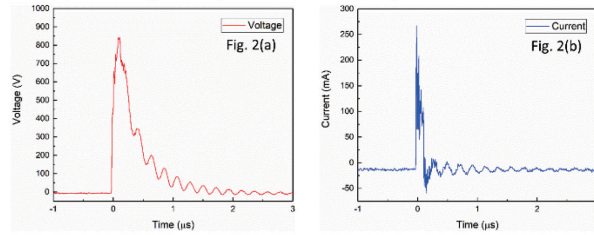


Fig. 1. Schematic of the setup

◦ 100 Hz (Max. Voltage: 839 V, Max. Current: 268 mA, Current Pulse Width: 180 ns)



◦ 1000 Hz (Max. Voltage: 569 V, Max. Current: 209 mA, Current Pulse Width: 180 ns)

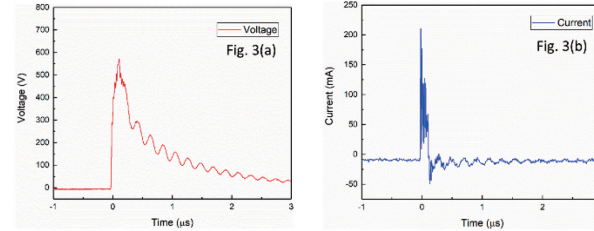
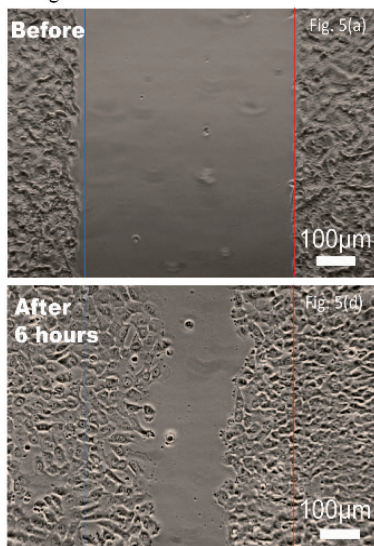
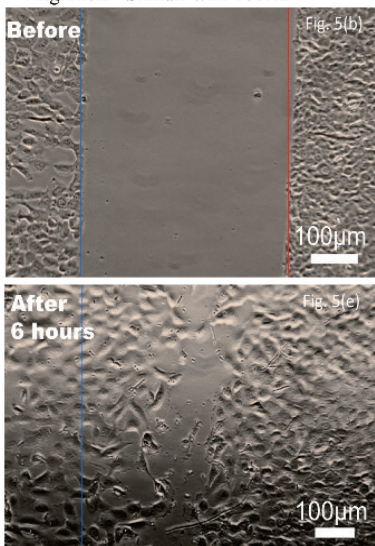


Fig. 2. & 3. Voltage and Current

◦ Migration - Control



◦ Migration - Stimuli with 100Hz



◦ Migration - Stimuli with 1000Hz

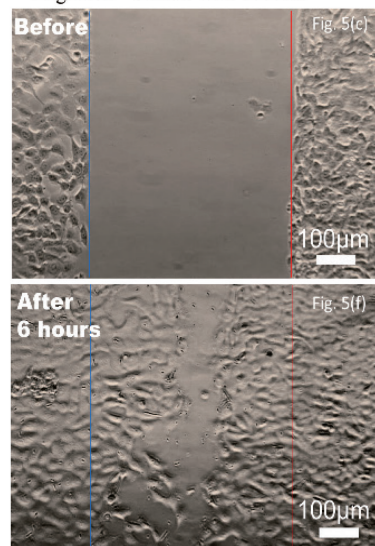


Fig. 5. Cell migration before and after treatment

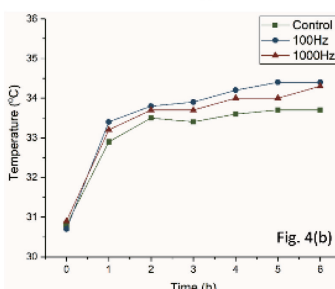
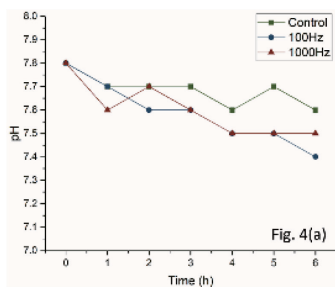


Fig. 4. pH & Temperature

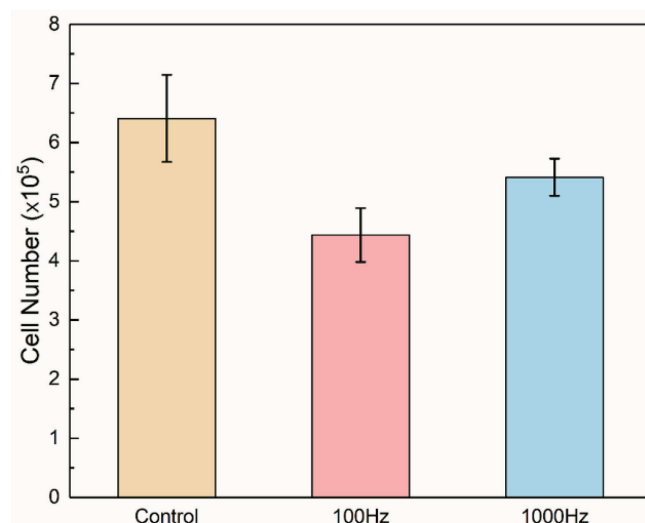


Fig. 6. Bar chart of cell numbers at 24 h after the treatment

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. To construct the stimulation system that we could analyze the impacts by direct pulsed currents
2. To optimize the suitable parameters (nanosecond pulse) to match with plasma sources
3. To observe cell activity after pulsed current stimulations

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. “Plasma Medicine: Applications of Low-Temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology”, M Laroussi, et al, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (2012)
2. “Plasma–liquid interactions: a review and roadmap”, P.-J. Bruggeman, et al, Plasma Sources Sci. Technol. 25 (2016)
3. “Application of direct current electric fields to cells and tissues in vitro and modulation of wound electric field in vivo”, B. Song, et al, Nature Protocols vol.2 no.6 (2007)

【受賞・特許等】

10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-10)」における講演により、「Best Poster Paper Award」を受賞（2017年12月17日）



氏名 DELAGE REMI

所属 工学研究科機械機能創成専攻・D2

研究課題

Spatiotemporal Observation of Thermoacoustic Chaotic Oscillations

平成29年度における本卓越拠点に対する取り組み

Experimentally, it has been reported that thermoacoustic systems can exhibit various nonlinear phenomena such as quasiperiodic [1,2] and chaotic [3] oscillations. Our study focused on the observation of chaotic pressure oscillations in a straight and loop thermoacoustic system for a better understanding of the slow and fast dynamics with respect to both spatial and temporal dimensions.

Figure 1 presents the two thermoacoustic systems used for our study. The oscillations were sustained by a stack heated on one side and cooled on the other at a temperature T_H and T_C respectively. It was found that both systems follow a quasiperiodic route to chaos:

The straight thermoacoustic system started to oscillate at a temperature ratio of $T_H/T_C = 1.94$ with a frequency $f_3 = 250.2$ Hz, corresponding to the third longitudinal acoustic mode of the system. With the appearance of the fundamental acoustic mode oscillations of a frequency $f_1 = 84.2$ Hz incommensurate with f_3 , the system showed quasiperiodic oscillations at $T_H/T_C = 2.19$. After this quasiperiodic transition, the system fell into a locking state between f_1 and f_3 at $T_H/T_C = 2.29$, then again showed quasiperiodic oscillations with f_1 and $f_2 = 166.9$ Hz the frequency of the second acoustic mode at $T_H/T_C = 2.48$. At $T_H/T_C = 2.58$, the system finally exhibited chaotic oscillations.

In the case of the loop system, the oscillations started at $T_H/T_C = 1.83$ with a frequency $f_3 = 245.5$ Hz. A short quasiperiodic transition occurred with $f_1 = 83.2$ Hz and f_3 in the range from $T_H/T_C = 2.40$ to 2.48 , then chaotic oscillations appeared with $T_H/T_C > 2.48$.

Time series of the final chaotic states showing aperiodic beating in both systems, recorded at the nearest position to the pipe end and 2.57 m away from the hot heat exchanger respectively, are presented Fig. 2 a) and b) for $T_H/T_C = 2.73$ and 2.74 .

In the straight thermoacoustic system, we observed successive reflections of the pressure waves occurring at both ends of the system, while in the loop thermoacoustic system, the pressure waves appeared to be mostly propagating in one direction from cold to hot in the stack with less intense reflections due to the curvature of the system.

The spatio-temporal chaotic oscillations were created through a mode competition among the unstable oscillations in both the straight tube and the looped tube, translated into the chaotic amplitude fluctuations of the travelling pressure waves.

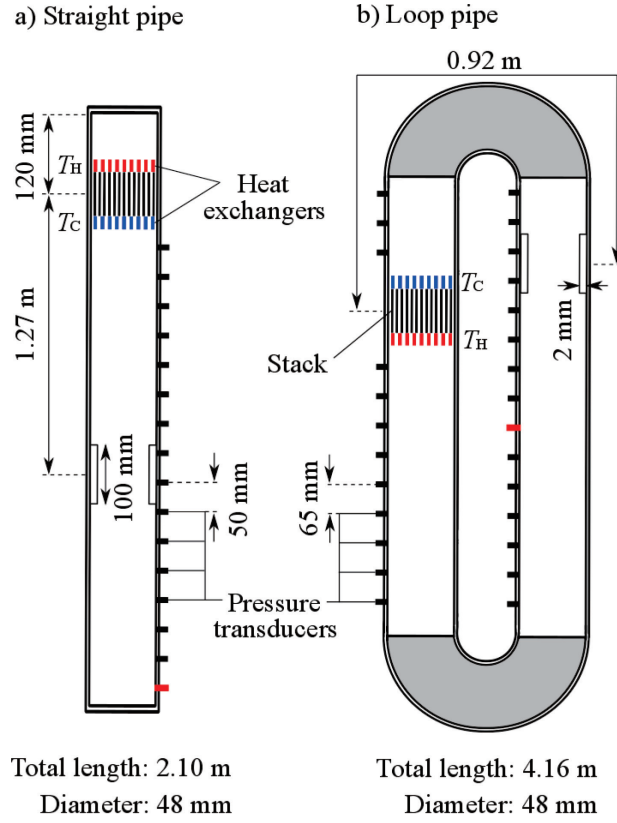


Fig. 1 Schematic illustration of a) the straight and b) the loop thermoacoustic systems. The transducers in red color correspond to the measuring position for the time series in Fig. 2.

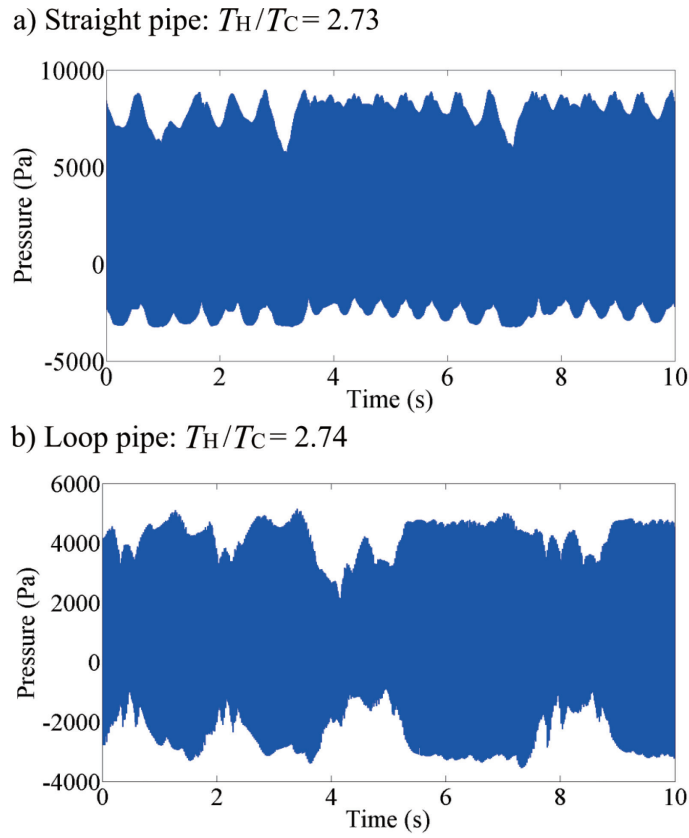


Fig. 2 Time series of the chaotic behaviors in a) the straight and b) the loop thermoacoustic systems.

- [1] A. Atchley, F.M. Kuo, J. Acoust. Soc. Am., 95, 3 (1994), 1401.
- [2] T. Biwa, F. Shima, T. Yazaki, J. Phys. Soc. Jpn, 82 (2013), 043401.
- [3] T. Yazaki, Phys. Rev. E, 48, 3 (1993), 1806.

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. Search for the best configuration to observe chaotic oscillations in the straight and loop thermoacoustic systems. Calculation of the correlation dimension to check if the oscillations are indeed chaotic. Preparation and calibration of the pressure transducers for the measurement.
2. Measurements, data processing and analysis of the results

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Remi Delage, Yusuke Takayama, Hiroaki Hyodo, Tetsushi Biwa.
Thermoacoustic chaotic oscillations control by delayed self-feedback
4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions Control 21-24 August 2017, Nihon University, Tokyo. .
2. Remi Delage, 高山 祐介, 佐藤 萌子, 兵頭 弘晃, 琵琶 哲志
熱音響カオス振動の時空間計測
日本流体力学会 年会2017、東京理科大学、2017年8月30日～9月1日
3. Delage Remi, Takayama Yusuke, Sato Moeko, Hyodo Hiroaki, Biwa Tetsushi.
Spatiotemporal Observation of Thermoacoustic Chaotic Oscillations
14th International Conference on Flow Dynamics, November 1-3 2017, Sendai
4. 高山 祐介, Remi Delage, 佐藤 萌子, 兵頭 弘晃, 琵琶 哲志
周期外力による熱音響カオス振動の位相同期
日本音響学会2017年秋季研究発表会、愛媛大学、平成29年9月25日～27日、愛媛

【研究費の獲得】

名称：特別研究員奨励費
期間：2018年-2020年



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・D3

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29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 primary reference fuels (PRF) was investigated by weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile (MFR). The MFR consists of a quartz tube with a small inner diameter, which is heated by an external heat source [1]. This leads to a stationary temperature profile along its axis. For low flow velocities, a spatial separation of chemical reaction zones occurs. This is called a weak flame, which separates into up to three sub-flames, which are from low to high temperature: cool flame, blue flame and hot flame. This weak flame represents the ignition stage and can therefore be used to study fuel reactivity 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.

Our previous research showed opposing trends of reactivity for experiments and simulations by the KUCRS [3] mechanism (see Fig. 1). Here, experimental results showed hot flames at lower wall temperatures for lower equivalence ratios, which indicates higher reactivity. One-dimensional simulations using CHEMKIN-PRO [4] and KUCRS, however, showed the hot flames shifting to higher wall temperatures for lower equivalence ratios.

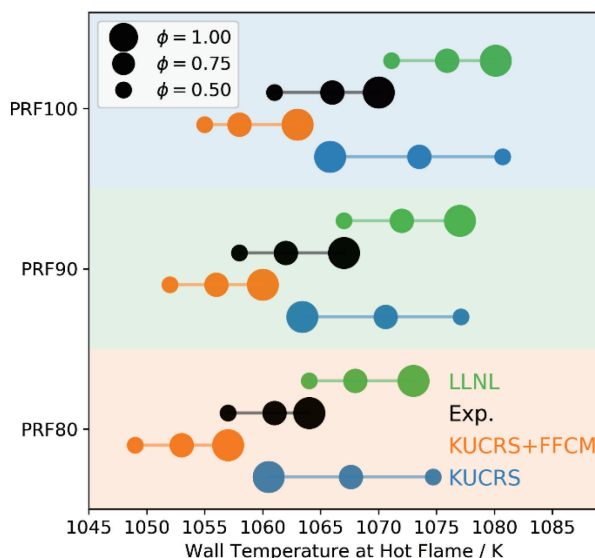


Fig. 1: Wall temperatures at hot flame location for three PRFs at equivalence ratios 1.0, 0.75 and 0.5: experiments and simulations.

To investigate the reasons for the opposing trends, KUCRS' results were compared to those of the LLNL mechanism [5] and a sensitivity analysis was conducted to identify the chemical reaction with the highest influence on the hot flame location. Here it was found, that reactions of hydrogen and oxygen species have the highest effect. By substituting seven of these reactions by those of the very recent FFCM mechanism [6], the reactivity trend could be inversed and showed very good agreement

with the experimental results (See Fig.1, KUCRS+FFCM). The applicability of this modified mechanism was tested for other investigation methods, such as ignition delay times in shock tubes. The agreement with previous results was very good and showed the broad applicability of the mechanism.

The next step of this research was to investigate the influence of high pressure conditions on the reactivity of lean PRF/air mixtures experimentally and numerically. In experiments up to 5 atm, hot flames shifted to lower wall temperatures for higher pressures (see Fig. 2). Leaner mixtures showed higher reactivity for all pressure conditions. Computationally, the best agreement was again achieved by the modified KUCRL+FFCM mechanism.

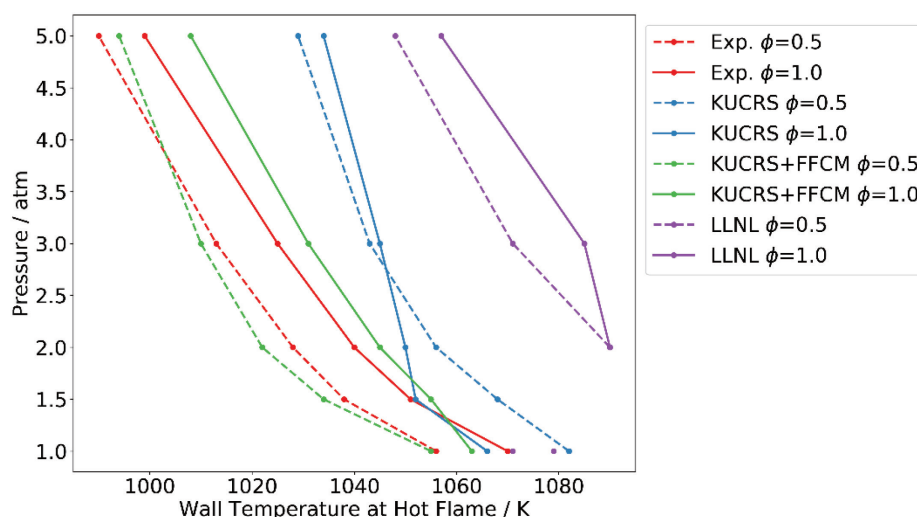


Fig. 2: Wall temperatures at hot flame location for PRF100 at equivalence ratio 1.0 and 0.5 for pressure between 1 atm and 5 atm: experiments and simulations.

The higher reactivity of the hot flame was caused by enhanced reactions that involve HO_2 radicals, which promoted chemical chain branching. Furthermore, cool flames and hot flames shifted to lower wall temperatures as well, in this case promoted by enhanced reactions of fuel radicals.

These results show the wide applicability of the MFR for the investigation of fuel reactivity. It was first used to improve an existing reaction mechanism. In a next step, the extension to higher pressures verified the applicability of the modified mechanism to conditions that are close to actual automotive engine conditions.

- [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] A. Miyoshi, J. Phys. Chem. A, **115** (15), 3301-3325 (2011).
- [4] CHEMKIN-PRO 17.2, Reaction Design: San Diego, 2016.
- [5] H. Curran, P. Gaffuri, W. Pitz, C. Westbrook, Combust. Flame, **129** (3), 253-280 (2002).
- [6] G. Smith, Y. Tao, H. Wang, FFCM-1, <http://nanoenergy.stanford.edu/ffcm1>.

【査読論文（査読付き国際会議論文を含む）】

1. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
Evaluation of the reactivity of ultra-lean PRF/air mixtures by weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile
International Journal of Engine Research, submitted (2018).

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. Modified existing reaction mechanism
By analyzing and comparing experimental and computational results, we were able to modify an existing chemical reaction mechanism. This modified reaction mechanism yielded excellent results for our conditions and performed very well for other investigation conditions. As this reaction mechanism is the base for more complex fuels, it is expected that the modification will enhance future investigation considerably.
2. Obtained experimental and numerical results at elevated pressures
Experiments and simulations were conducted at elevated pressures, which are closer to actual engine conditions. Here, experimental trends showed good agreement with numerical results by the modified mechanism. This will help to conduct research at practical conditions, and promote our knowledge about reactivity of ultra-lean mixtures at engine conditions.

【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
The reactivity of ultra-lean gasoline surrogate/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile (Poster)
SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム, Tokyo, July 2017.
2. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
Equivalence Ratio Dependence of Reactivity of Low and High Temperature Reactions for Ultra-Lean Gasoline Surrogate/Air Weak Flames in Micro Flow Reactor with Controlled Temperature Profile (Poster)
The Ninth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine System, Okayama, July 2017.
3. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
On the Equivalence Ratio Dependence of the Reactivity of Ultra-Lean Gasoline Surrogate/Air Weak Flames in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile (Oral)
Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, November 2017.
4. P. Grajetzki, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta
On the equivalence ratio dependence of the reactivity of ultra-lean PRF/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile (Oral)
第55回燃焼シンポジウム, Okayama, November 2017.

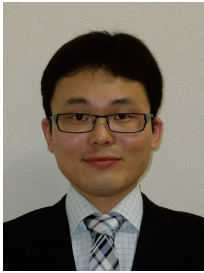
【受賞・特許等】

受賞日：2017年3月29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 熊田 圭悟



所属 工学研究科機械機能創成専攻・D2

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29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）の電解質を貫通する欠陥を染色し、光学顕微鏡で観察する簡易な手法を開発した。

SOFCの機械的信頼性・耐久性を向上させるためには、機械的損傷発生原因の一つである燃料極の再酸化を防ぐ必要がある。燃料極材料として一般的に用いられているニッケル・ジルコニアサーメットが再酸化されると、体積が膨張しセルの破損を引き起す原因となる[1,2]。SOFCの起動・停止や緊急停止時に、安全を確保するため燃料供給を停止し、残った燃料ガスを窒素などの不活性ガスや水蒸気を用いてパージする操作が行われる[3]。このような状況下において、電解質を貫通する欠陥があると燃料極が酸化する可能性が高くなるという解析結果が報告されている[4]。一方、電解質欠陥を評価する方法として、気体の漏洩を調べる方法が一般的であるが、欠陥の位置や大きさ、個数を判別することは難しい。

そこで本研究では、電解質を貫通する欠陥を染色し光学顕微鏡で観察する簡易な手法を染色法として開発した。ハーフセルの状態で、赤色の油性染料で色付けしたエタノール IP を燃料極側に垂らし、電解質側を真空引きすることで電解質欠陥を染色した（図 1）。エタノール IP が気化した後に、電解質側の表面を光学顕微鏡で観察することで、10 μm 以上の電解質を貫通する欠陥を検出することができた。電解質の焼結時間を長くすると（3 $\rightarrow$ 8h）、電解質欠陥密度が減少（28 $\rightarrow$ 0 個/ cm^2 ）することが分かった。

さらに緊急停止を想定し、発電試験に燃料供給を遮断することで電解質欠陥から空気を漏洩させ燃料極を意図的に酸化させる実験を行った。その際に生じる機械的損傷をアコースティック・エミッション（AE）法により検出した。燃料遮断から損傷が開始するまでの電圧変化と検出した AE 信号を図 2, 3 に示す。図 2 は、電解質欠陥の多いセル（電解質焼結時間 3h）の結果であり、燃料遮断から AE 信号を検出するまで 4.5h の猶予があった。対して、電解質結果の少ないセル（電解質焼結時間 8h）では、AE 信号の検出までに 15.7h かっており、電解質欠陥密度が下がったことで酸化耐性が向上していることを確認することができた。

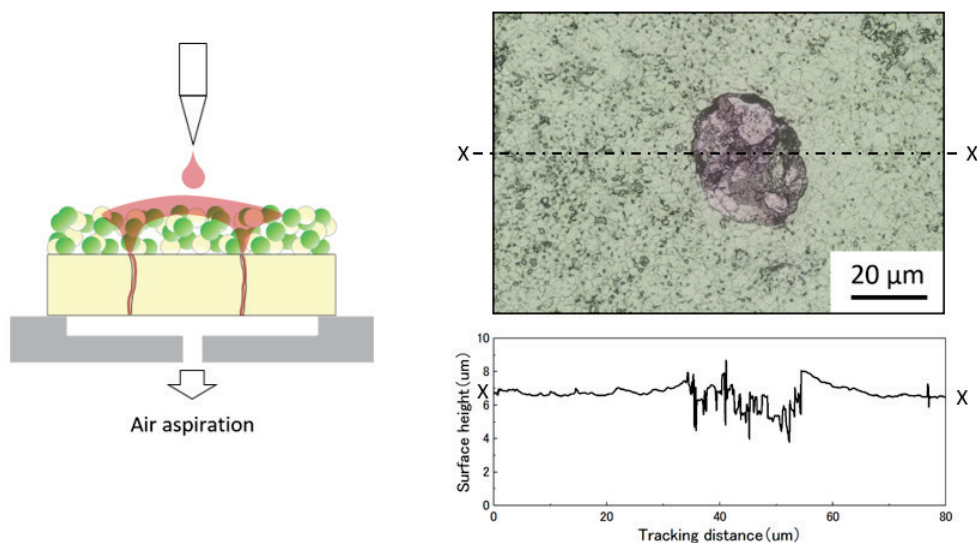


図1 電解質を貫通する欠陥の染色方法と検出した欠陥とその表面形状

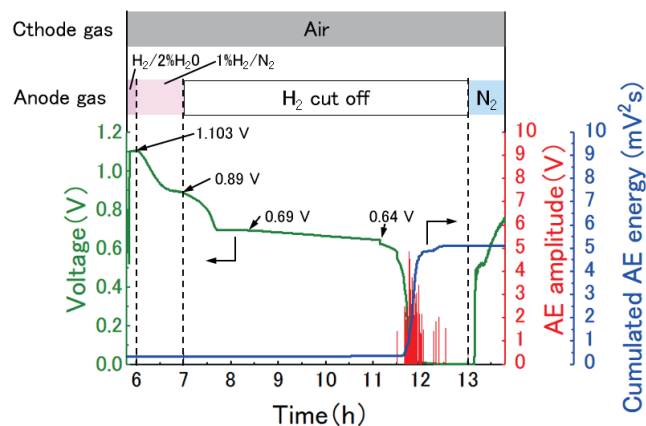


図2 電解質欠陥の多いセル（電解質焼結条件 1350℃ 3h）の燃料遮断時の電圧変化と検出したAE信号

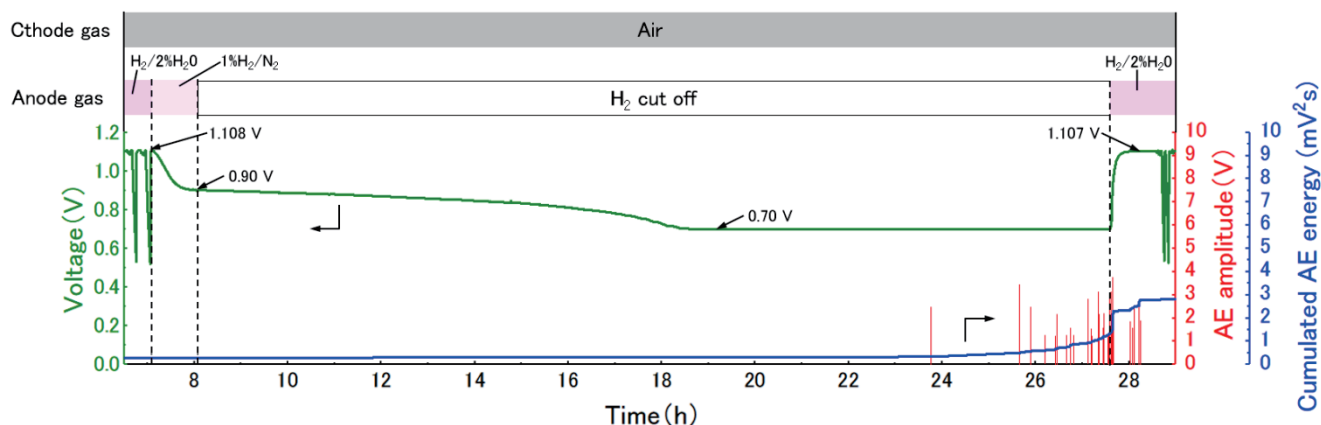


図3 電解質欠陥の少ないセル（電解質焼結条件 1350℃ 8h）の燃料遮断時の電圧変化と検出したAE信号

- [1] D. Sarantaridis, R.A. Rudkin, and A. Atkinson, J. Power Sources, **180** (2008), pp. 704-710
- [2] J. Laurencin , G. Delette , B. Morel , F. Lefebvre-Joud , and M. Dupeux , J. Power Sources, **192** (2009), pp. 344-352
- [3] A. Wood, M. Pastula, D. Waldbillig, and D. G. Ivey, J. Electrochem. Soc., **153** (10) (2006), A1929-A1934
- [4] 中村和郎, 染川貴亮, 伊東卓也, 藤田顕二郎, 堀内賢治, 松崎良雄, 機械学会年次大会講演論文集, 2009.1 (0), 219-220, 2009.

平成 29 年度の研究業績

【研究内容】

1. SOFC作動環境下において発生する機械的損傷の検出と対策
電気化学的手法とアコースティック・エミッション (AE) 法を併用し、燃料遮断や降温過程で発生する機械的損傷を検出し、その対策案を検討している。
2. SOFCハーフセルの反取りにおける燃料極基板のクリープ変形と電解質薄膜の残留応力変化に関する研究
反取り条件（荷重・温度・時間）によって、ハーフセルの反り量および電解質薄膜の残留応力がどのように変化するかを燃料極基板のクリープ変形を考慮しつつ実験と解析の両面から調査している。
3. SOFCの電解質/電極間の界面破壊特性の評価
電極および反応防止層の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、界面破壊特性の評価を行っている。
4. テラヘルツ波を用いたSOFC単セルの非破壊検査技術の開発
SOFC単セルに発生した界面はく離および酸化領域をテラヘルツ波によって検出することができるか検証を行っている。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. **Kumada, K.**, Sato, K., and Hashida, T., “Evaluation of Mechanical Damages in SOFCs during Start/Stop Operation by Using Acoustic Emission Technique,” *ECS Transactions*, 78 (1), (2017), pp. 2355-2363. 【査読付き国際会議論文集】

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. **Kumada, K.**, Sato, K., and Hashida, T., “Evaluation of Mechanical Damages in SOFCs during Start/Stop Operation by Using Acoustic Emission Technique,” *15th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-XV)*, Hollywood, Florida, USA, July 23-28, 2017. 【ポスター発表・査読なし】
2. **熊田圭悟**, 佐藤一永, 橋田俊之, “酸化還元サイクル環境中における固体酸化物燃料電池の機械的劣化評価に関する研究”, 日本機械学会2017年度年次大会, 埼玉大学, 埼玉, 2017.9.3-6. 【口頭発表・査読なし】
3. **熊田圭悟**, 佐藤一永, 橋田俊之, “レドックスサイクル環境下における固体酸化物燃料電池の劣化評価に関する研究”, 日本機械学会 東北支部 第53期秋季講演会, 八戸工業大学, 八戸, 2017.9.30. 【口頭発表・査読なし】
4. 薮田佳絵, **熊田圭悟**, 碓智文, 福井健一, 沼尾正行, 佐藤一永, 橋田 俊之, “テラヘルツ分光と機械学習を併用した固体酸化物燃料電池の損傷可視化”, 応用物理学会第2回フォトニクス研究会, 沖縄県青年会館, 沖縄, 2017.12.1-2. 【ポスター発表・査読なし】



氏名 LE DINH ANH

所属 Department of Mechanical Systems Engineering ・ D2

研究課題

Simplified Modeling of Cavitating Flow with Thermodynamic Effects for Homogeneous Model

平成29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 thermodynamic effects on cavitation. Cavitation is the formation of vapor phase inner the liquid phase when the local pressure decreases to around its saturated vapor pressure at local thermodynamic stage. Cavitation is the major concern in the design of hydraulic devices such as propeller, rocket engine etc. due to the performance degradation, vibrations, flow unsteadiness and erosion. The thermodynamic effects appear in cryogenic fluid, water at high temperature and thermal sensitive liquid. In those liquids, when cavitation occurs, latent heat of evaporation is deprived, local temperature decreases, saturated vapor pressure decreases and then cavitation is suppressed. Hence, the energy transport need to be included for simulating those fluids. In numerical simulation, the homogeneous model is widely used for modeling cavitating flow with the advantages: simple, low computational cost. Up to date, several efforts have been done to include the thermodynamic effects on numerical simulation of cavitation. That can be classified into two categories. The first category is the modification of energy transport equation [1, 2]. This method was applied to 2D quarter hydrofoil with cryogenic liquid, however, the method to include the latent heat effect is not consistent and then, the inconsistency of temperature distribution compared with the experimental data was reproduced. The second category is simple method, in that the modification of saturated vapor pressure without solving the additional energy equation [3, 4]. However, the temperature distribution cannot reproduce. Hence, in this research, I had simplified the energy equation that clarify the characteristics of thermodynamic effects on numerical simulation of cavitating flow. The present method belongs to the first category. In that, the energy transport equation is modified in term of transport equation for the mixture temperature. The experiment of cavitation in liquid nitrogen on 2D quarter hydrofoil by Hord is chosen for validating the new thermodynamic model. As the results, the present simplify thermodynamic effects model shows the improvement in estimation of temperature and pressure compare to the other models.

Mixture total energy equation

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial (\rho e + p) u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial q_i}{\partial x_j}$$



Mixture enthalpy Equation

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_j}{\partial x_j} = \frac{Dp}{Dt} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \beta_i}{\partial x_j}$$

Latent heat: **implicitly** appear



Simplified Model (No viscous term)

$$C_p \left(\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho u T}{\partial x} + \frac{\partial \rho v T}{\partial y} \right) = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial \beta_i}{\partial x_j} - L \dot{m}$$

Latent heat: **implicitly** appear

Here

$$q_i = k T_i + u_i \tau_{ij}, \quad L = (C_{pg} - C_{pl})T + h_{0g} - h_{0l}, \quad \beta_i = k \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

$$h = Y h_g + (1 - Y) h_l, \quad h_g = C_{pg} T + h_{0g}, \quad h_l = C_{pl} T + h_{0l}$$

Reference models

Hosangadi et. al.^[8] model:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \beta_i}{\partial x_j} + h_{lh}$$

Utturka et. al.^[9] model:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \beta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho Y L}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i Y L}{\partial x_i}$$

Latent heat: **explicitly** appear

Main
Difference

H : Enthalpy

h_g : Reference specific enthalpy

C_p : Specific heat capacity

L : Latent heat of Evaporation/Condensation

k : Thermal conductivity

Fig. 1 Comparison of current model and previous models

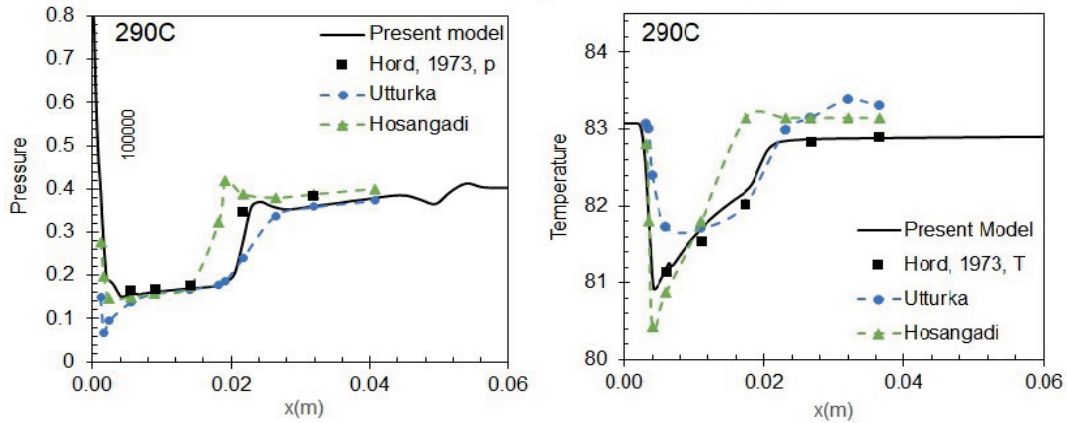


Fig. 2 Comparison of pressure and temperature distribution between present model and referent simulation results by Hosangadi et. al., Utturka et. al. and Hord experiment data in case 290C

[1] Hosangadi A, Ahuja V. J Fluids Eng-Trans ASME, 2005, 127(2): 267–281.

[2] Utturkar Y, Wu J Y, Wang G Y, et al. Prog Aerosp Sci, 2005, 41(7): 558–608.

[3] Y. Iga, N. Ochiai, Y. Yoshida, T. Ikohagi, Proc. of 7th Int. Symposium on Cavitation CAV2009, paper No.78.

[4] S. Tsuda, N. Tani, N. Yamanishi. J. Fluids Eng. Vol. 134 (2012), pp. 051301-1-9.

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. Derive the equation that accounting the thermodynamic effects on cavitation behavior.
Starting from total energy equation for mixture, the equation for mixture temperature is derived by modifying and simplifying the total energy equation.
2. Present model differ from previous model by other researcher is that the latent heat of evaporation and condensation must implicit appear in enthalpy equation.
The result by present model shows good agreement comparing to experimental data than the results by previous model by other researcher. This confirms that the present model is more accurate.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Le Dinh Anh, Yuka Iga
“Simplified Modeling of Cavitating Flow with Thermodynamic Effects for Homogeneous Model”.
The 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics
of Rotating Machinery ISROMAC 2017 Hawaii, Maui, December 16-21, 2017.

氏名 澤木 悠太



所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D3

研究課題

高次精度スペクトラルボリューム法のハイブリッド非構造格子への拡張と定常空力予測および非定常空力弾性フラッタ予測への適用に関する研究

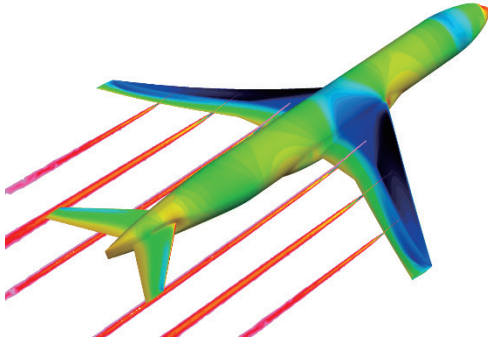
平成29年度における本卓越拠点に対する取り組み

慣性力・弾性力・空気力が連成して生じるフラッタ現象は時間の経過に対して振動の振幅が指数関数的に増加する自励振動現象で、機体の破壊に至る可能性があるため大変危険であり、航空機開発において考慮すべき最も重要な現象のひとつである。風洞試験や飛行試験においても模型や機体が破壊される可能性があることから、数値シミュレーションによる解析は極めて重要である。特に遷音速条件ではフラッタが発生する速度が低下する遷音速ディップと呼ばれる傾向が観測されることがわかっており、この原因は翼上面に生じる衝撃波にあるとされている。衝撃波をとらえるためには流体の非線形性を考慮した方程式を解く必要がある。また、フラッタはエンジンナセルや翼端デバイスによってその性質が変わることから、それらを含む複雑な機体形状に対して解析を行う必要がある。本研究では複雑形状周りに格子生成が容易な非構造格子を用いて非線形流体の支配方程式であるEuler方程式やRANS方程式を解く。従来の非構造有限体積法は歪な格子に対して精度が低下する課題があったが、セルに内部自由度を導入することで、非構造格子に対しても高次精度を達成するDG法[1]、SV法[2]、FR法[3]などが提案されてきた。本研究では、その中でも空間2次精度の範疇では計算コストが比較的低いSpectral Volume (SV)法を採用し、歪な格子に対しても空間2次精度を維持できる非構造格子法の実用化を目指した。フラッタ境界における遷音速ディップを数値解析で予測するときの課題は、計算ケース数が膨大になってしまうことである。機体設計の過程において内部構造の質量分布、燃料搭載量など、様々な機体状態を考える必要があることに加えて、主流マッハ数と動圧をスイープしなければならない。ある主流マッハ数に対してたくさんの動圧で非定常計算を行うことにより振動が発散し始める境界を求める必要がある。そこで本研究では遷音速ディップを高速に予測する手法を提案し、検討した。

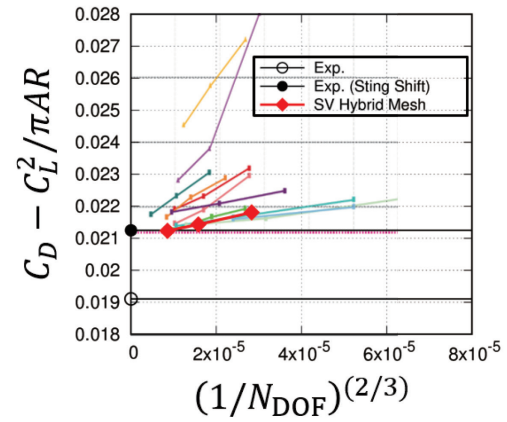
まず、SV法の実用化を行った。これまでに研究されてきたSV法[4]は3次元では計算格子として四面体しか扱うことができなかったため、本研究でプリズムや六面体に拡張し、柔軟性を向上させた。拡張したSV法をSV+法と呼ぶことにする。図1にSV+法を用いてNASA-CRM (NASA Common Research Model)の空力解析を行った結果を示す。図1(a)は巡航迎角における翼表面圧力係数分布と後流の渦粘性分布である。図1(b)は巡航迎角における抗力係数の格子収束性結果であり、赤線がSV+法による結果で、他のプロットはAPC-I (First Aerodynamics Prediction Challenge)[5]という日本で開催されたCFDワークショップに参加された他の研究者が従来の非構造有限体積法ソルバーで計算した結果を表している。四面体とプリズムを含むハイブリッド非構造格子を用いてもSV+法では図1(b)の抗力係数の格子収束性に示されているように、従来の非構造有限体積法よりも優れた格子収束性を与えるため、同じ総自由度の解析では従来法よりも定量的に優れた解析が可能となる。

次に、遷音速ディップの高速予測法を提案した。非定常計算で得られた揚力係数 C_L の時間履歴から振動の減衰比 ζ を求めて、それを主流マッハ数 M_∞ と無次元動圧 FSI の2次元設計変数に対して補間を行い、 $\zeta = 0$ のラインをフラッタ境界として予測した。補間方法としてはRadial basis function (RBF)の重ね合わせを用い、関数にはWendland C2関数[6]を採用した。図2にRBFの補間によるフラッタ境界の予測を示す。一様等間隔な初期サンプル16点に加えて、図2(a)に示されているように主流マッハ数 M_∞ と一般化空気力 f の関係を調べることで遷音速ディップ付近に該当する M_∞ を推定し、さらに4点を追加して補間により求めたフラッタ境界を図2(b)に示す。追加点を選定することにより遷音速ディップ付近はTarget boundaryに近い分布となった。また、初期サンプル点分布や補間方法の依存性についても検討し、初期サンプル点分布はLatin hypercube法でも同様な補間結果となり、補間方法はKriging法でも同様な補間

結果となったことから、遷音速ディップ付近に選定した追加点を置くことが最終的な結果に対して重要であり、初期サンプル点分布や補間方法にはあまり依存しないと考えられる。

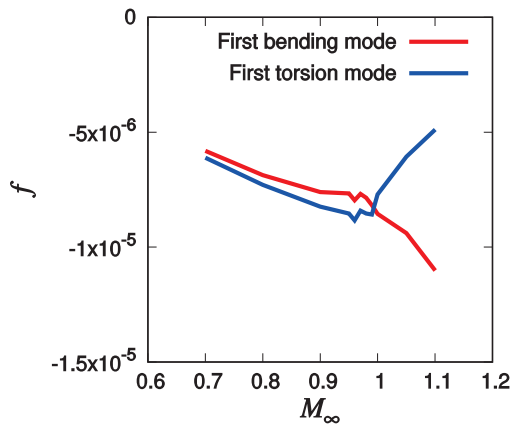


(a) 機体表面の圧力係数分布。後流は渦粘性。

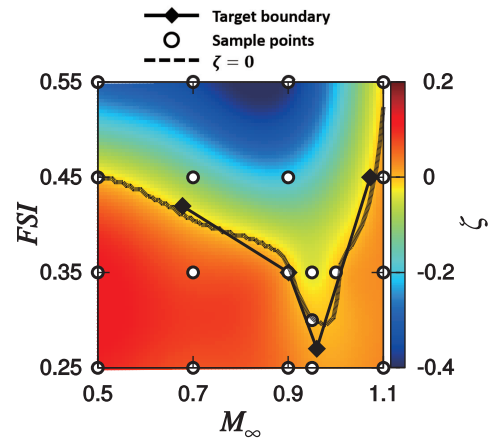


(b) 抗力係数の格子収束性。赤線が本研究の計算。他のプロットはAPC-I[5]に参加した従来の非構造有限体積ソルバーによる結果。

図1 開発したSV⁺法によるNASA-CRMの空力解析結果。



(a) 主流マッハ数 M_∞ を変化させたときの1次曲げと1次ねじりの方程式に対する一般化空気力 f 。



(b) 一様等間隔なサンプル16点に、 $FSI = 0.35$ における $M_\infty = 0.95, 1.00$ の2点と $M_\infty = 0.95$ における $FSI = 0.25, 0.30$ の2点を追加してRBFにより減衰比 ζ を補間して求めた応答曲面。

図2 Radial basis function (RBF)を用いた補間によるフラッタ境界の高速予測。

参考文献

- [1] B. Cockburn, “Discontinuous Galerkin Methods,” *School of Mathematics*, pp. 1–25, 2003.
- [2] Z. J. Wang, “Spectral (finite) volume method for conservation laws on unstructured grids: Basic formulation,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 178, No. 1, pp. 210–251, 2002.
- [3] H. T. Huynh, “A flux reconstruction approach to high-order schemes including discontinuous Galerkin methods,” AIAA paper 2007-4079, 2007.
- [4] Y. Liu, M. Vinokur, and Z. J. Wang, “Spectral (finite) volume method for conservation laws on unstructured grids V: Extension to three-dimensional systems,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 212, No. 2, pp. 454–472, 2006.
- [5] ワークショップ実行委員会, “Summary of First Aerodynamics Prediction Challenge (APC-I),” JAXA-SP-15-005, pp. 217–275, 2015.
- [6] H. Wendland, “Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial basis functions of minimal degree,” *Advances in Computational Mathematics*, Vol. 4, pp. 389–396, 1995.

平成29年度の研究業績

【研究内容】

- 1. SV法をハイブリッド非構造格子に拡張し、SV+法を開発した。開発したSV+法をNASA-CRMの空力解析に適用し計算により得られた空力係数が実験値と良く一致することを示した。また、従来の非構造有限体積法ソルバーによる格子収束性結果と比較し、SV+法は従来法よりも定量的に優れた解析が可能であることを示した。
- 2. RBFを用いた補間によるフラッタ境界の高速な予測法を提案した。主流マッハ数と一般化空気力の関係を調べることで追加するサンプル点を選定し、少ない計算ケース数で遷音速ディップの予測を可能にした。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

- 1. 澤木悠太, 河合宗司, 澤田恵介, “スペクトラルボリューム法の六面体格子への拡張と NASA-CRM 周りの流れ場解析への適用,” 航空宇宙技術, 10.2322/astj.JSASS-D-17-00034, 2017.
- 2. 澤木悠太, 久谷雄一, 澤田恵介, “ハイブリッド非構造格子に対するスペクトラルボリューム法の格子収束性に関する研究,” 航空宇宙技術. (2017 年に投稿. 査読中.)
- 3. 澤木悠太, 久谷雄一, 澤田恵介, “動径基底関数を用いた遷音速フラッタ境界の高速予測法の研究,” 航空宇宙技術. (2017 年に投稿. 査読中.)

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

- 1. 長谷部航平, 澤木悠太, 澤田恵介, “非構造格子法を用いた NASA-CRM の空力解析,” Third Aerodynamics Prediction Challenge (APC-III), 2017.
- 2. 長谷部航平, 澤木悠太, 久谷雄一, 澤田恵介, “非構造格子法を用いた NASA-CRM の空力解析,” 第 55 回飛行機シンポジウム, JSASS-2017-5172, 2017.

氏名 堤 駿



所属 工学研究科化学工学専攻・D3

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29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。

微細藻類から効率的に炭化水素や脂質を抽出するには、抽出前に細胞を破砕することが有効である。細胞の機械的強度を理解することで、細胞に過大な外力を与え、投入するエネルギーが過剰となることを防ぐことができる。そこで本章ではナノインデンテーション法を用いて細胞の機械的強度を測定した。Fig. 1に実験の概要を示す。アクリル基板に固定させた細胞を培養液中で垂直に加圧させ、細胞が破裂するまでの荷重と変位を測定した。細胞が破砕する場合、Fig. 2に示す特徴的な点がみられる。これは細胞が破裂する際、圧子は細胞からの力を受けないためである。この点における荷重を細胞の強度とし、約30個の細胞の強度を測定すると、Table 1に示す強度および公称応力が得られた。これらの値は既往の研究⁴⁾で測定された藻類の強度よりも15–33倍程度高い。一方で、強度と変位から、細胞1 gを破砕するために必要なエネルギーを算出すると、既往の研究で報告された値よりも低い同程度の値であった。これは*B. braunii*が既往の研究で用いられている藻類(*Chlorella vulgaris*および*Saccharomyces cerevisiae*)よりも大きな粒径を有し、藻類1 gを構成する細胞数が少ないためである。実用的には、細胞1 gあたりの強度のほうが重要であるため、*B. braunii*は*C. vulgaris*および*S. cerevisiae*よりも小さなエネルギーで破砕可能であることが示唆された。

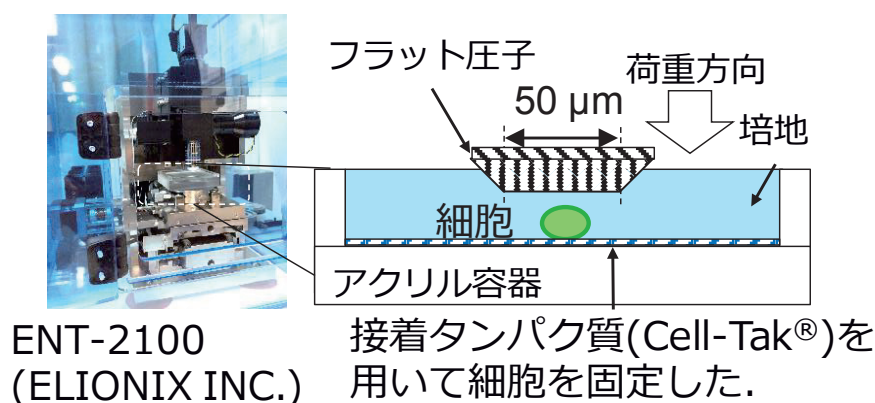


Fig. 1 Experimental procedure

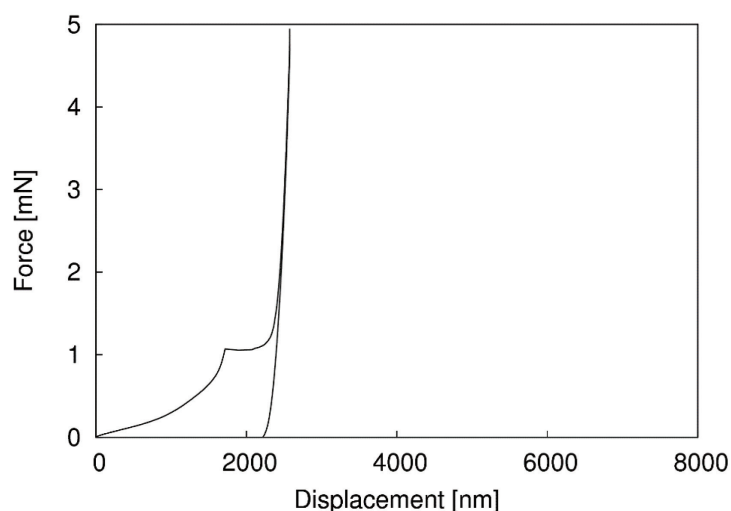


Fig. 2 Typical force-displacement curve.

Table 1 Single-cell compression data.

d_C	[mm]	8.93
F_B	[mN]	3574
P_B	[MPa]	57.6
W_{spec}	[J/g]	3.25
All values represent mean value.		

【引用文献】1) Largeau, C.; Casadevall, E.; Berkaloﬀ, C.; Dhamelincourt, 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) Overbeck, A.; Gunther, S.; Kampen, I.; Kwade, A. et al., *Chem. Eng. Technol.*, **40**, 1158-1164 (2017)

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. 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碎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た。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Effect of mechanical pretreatment on hydrocarbon extraction from concentrated wet hydrocarbon-rich microalga, *Botryococcus braunii*, **Shun Tsutsumi**, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, and Hideyuki Aoki, *Energy & Fuels*, 2018 *in press*
2. Investigation of colony disruption for hydrocarbon extraction from *Botryococcus braunii*, **Shun Tsutsumi**, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, and Hideyuki Aoki, *Fuel Processing Technology*, 2018, **172**, 36–48
3. Mechanical cell disruption of microalgae for investigating the effects of degree of disruption on hydrocarbon extraction, **Shun Tsutsumi**, Madona Yokomizo, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, and Hideyuki Aoki, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2017, **12**(3), 454-467

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Mechanical Strength of Individual Algal Cell of *Botryococcus braunii* using Nanoindentation Method, OShun Tsutsumi, Yuka Fukuda, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, and Hideyuki Aoki, 7th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, 2017 年 6 月 18-21 日, Miami, USA [ポスター・査読なし]

【研究費の獲得】

2017年度 学生のための国際会議発表支援, 日本エネルギー学会
(国際学会支援費 ¥200,000-)



氏名 WANG ZIHAO

所属 School of Engineering, Department of Finemechanics,
D2

研究課題

Synergistic effect of corrosion and fretting process under high
temperature high pressure water environment

平成29年度における本卓越拠点に対する取り組み

For the advantages of the high power generating efficacy and low greenhouse gas emission properties, nuclear power plant (NPP) have been widely built up all over the world. However, with the increment of the running time, lots of environmental degradations occurred on the NPP components. The most vulnerable structural component is the SG tube in the pressurized water reactor (PWR) [1-3]. In the past few decades, researchers mainly focused on the stress corrosion crack (SCC) of PWR-SG for its apparent damage phenomenon, few attentions were paid on the fretting issues. Recently, the fretting damage gradually appears and grows into one of the major problems of the SG tube with the increment of service time. In this case, to study the fretting damage of SG-tube is very important and urgent for people to understand the safety issues of the NPP.

In my work, a self-designed test rig, which guarantees a stable fretting amplitude and normal force, was used to conduct the fretting corrosion test in the autoclave with a high frequency tensile testing machine. A water chemistry controlling system was also introduced into this test. It can control the dissolved oxygen (DO) and dissolved hydrogen (DH) to simulate the PWR secondary water chemistry. The synergy of the fretting and corrosion process of the SG tube in HTHP environment was investigated in detail.

Fig. 1 shows the schematic of the fretting test system. The test rig was set in an autoclave at 288°C with a water pressure of 8.5 MPa [4]. A ball-on-plate (304 SS ball and Inconel 690 plate) fretting system was used to simulate the SG tube and its supportor. While the machine was running, the 304 ball could load a steady normal force on the Inconel 690 plate. Meanwhile, a relative movement occurred at the contact point between the ball and the plate.

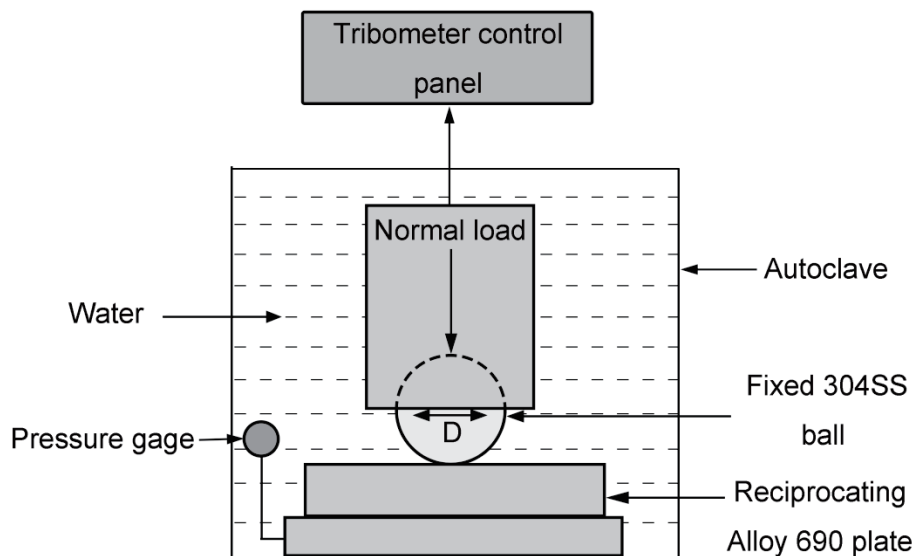


Fig. 1. Schematic diagram of fretting corrosion test rig in 288 °C water with a pressure of 8.5 MPa [4].

As shown in Fig. 2, three different damage types can be observed at three temperatures, which are named as (1) central wear damage, (2) crack damage and (3) pitting-like damage. Fig. 2a shows their typical characteristics. It should be noted that each damage type is selected from one temperature as an example. Detailed analysis will be given in the following paragraph. Fig. 2b shows the distribution of each damage type. The central wear damage zone locates at the center area of the worn scar, which is shown as the interior of the red circle. The crack damage zone occurs near the scar edge, which is shown as the area between the two blue circles. The pitting-like damage zone locates also at the edge of the worn scar, which partially overlaps with the crack damage zone. The area between the black and red circle stands for the pitting-like damage zone.

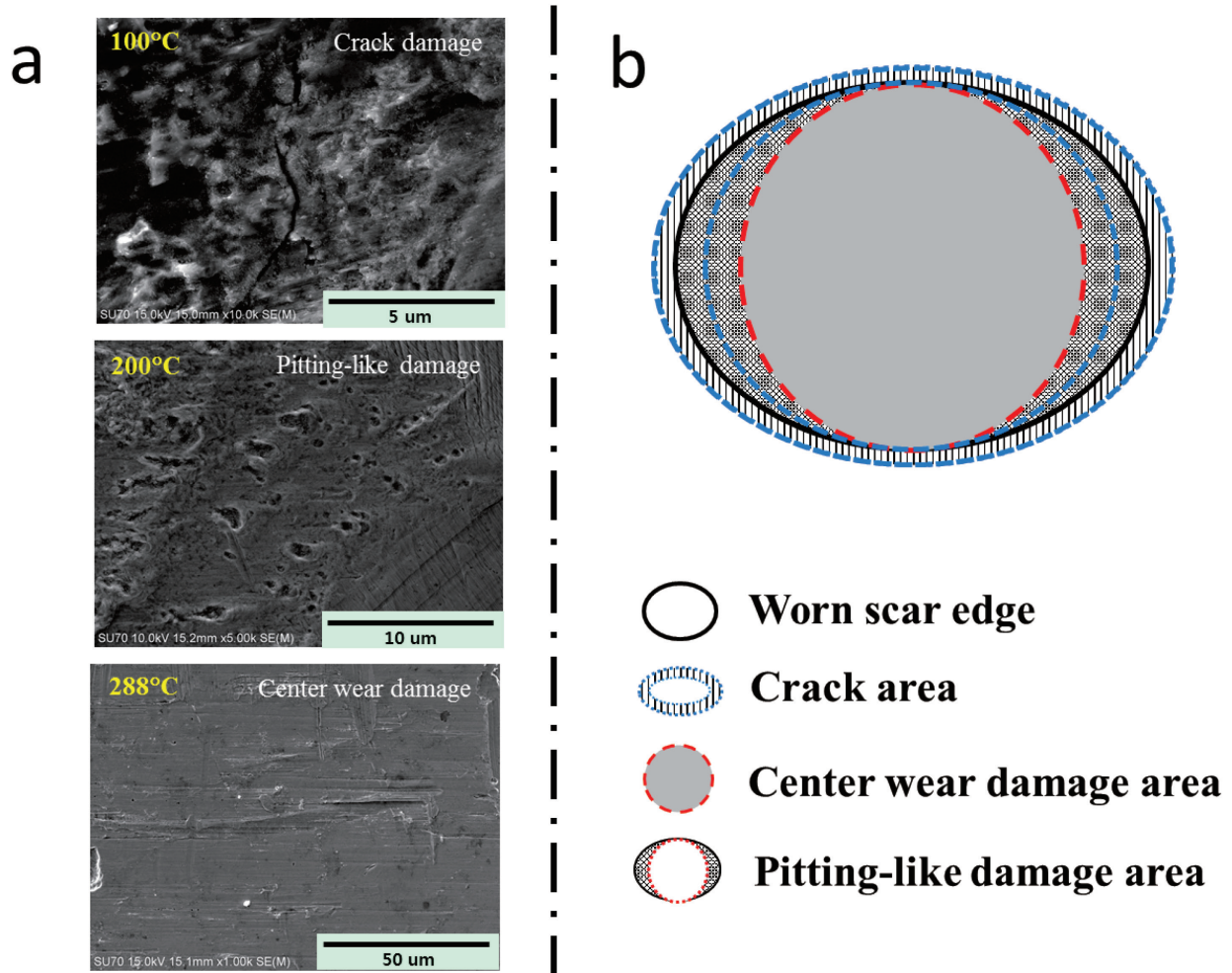


Fig. 2. (a) The typical damage morphologies at different temperatures and (b) their particular locations.

Fig. 3 shows the pitting-like damage morphologies under different magnifications at 100°C, 200°C and 288°C, respectively. Figs. 3a and 3b clearly show the pitting-like damage locates at the edge of the worn scar. Fig. 3c shows the magnified morphologies and the composition results both in and out the pit. At 100°C, the pitting-like damage is comprised of intensive pits cluster and no obvious corrosion product can be observed. When the temperature increases to 200°C and 288°C, pits size increases (more than 2 μm) and corrosion products generate inside the pit. This proves that the pit size increases with the increment of temperature. According to the composition results, the oxygen content of both interior and surrounding area of the pit are very low (interior/surrounding is 0.76/1.05%, respectively) at 100°C. However, at 200°C and 288°C, the oxygen contents of the pit interior become much higher than the surrounding area (inside/surrounding is 9.29/0.63% at 200°C

and 7.83/0.94% at 288°C, respectively). Fig. 3d shows the further magnified morphologies, from which some fine particles can be observed clearly inside the pits at 200°C and 288°C, while no such particles can be found at 100°C.

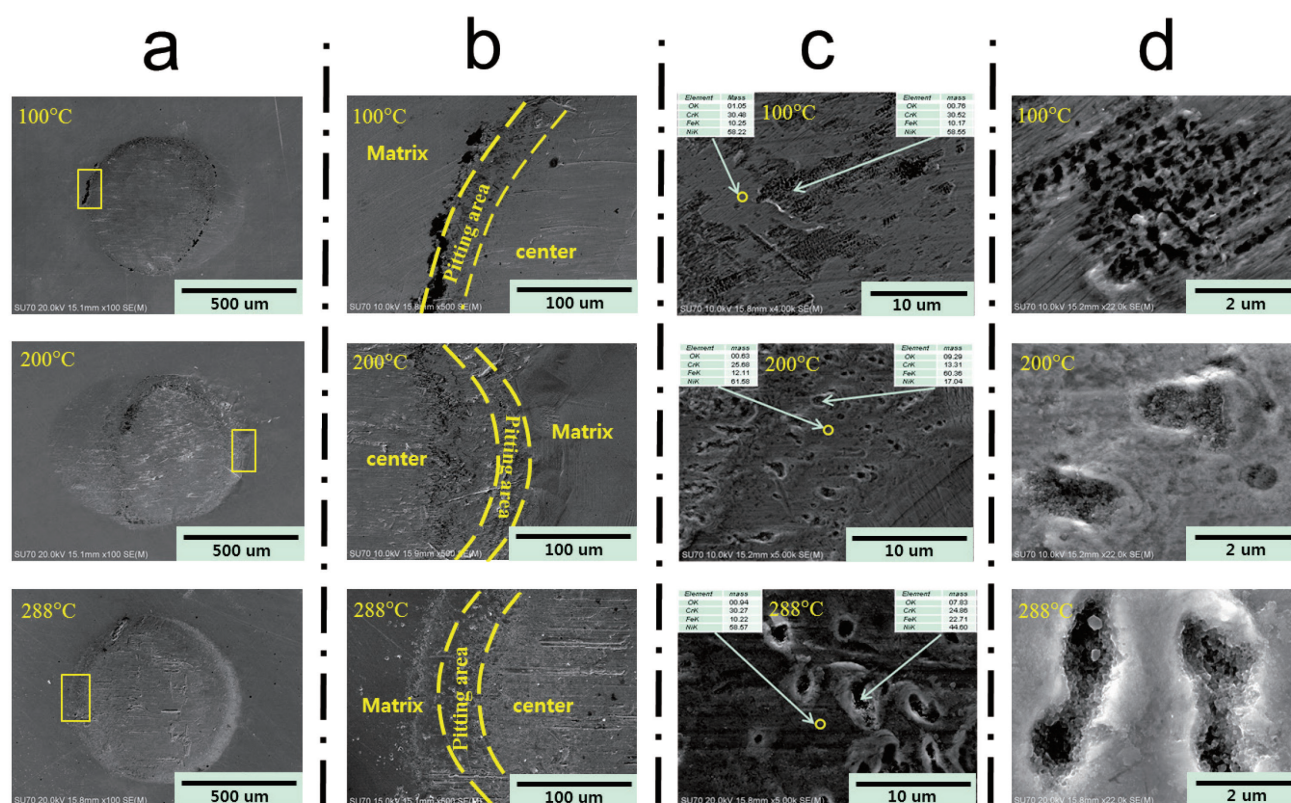


Fig. 3. SEM morphologies of pitting-like damage under different magnifications. The EDS results are inserted.

Reference

- [1] M.H. Attia, Fretting fatigue and wear damage of structural components in nuclear power stations - Fitness for service and life management perspective, Tribol Int, 39 (2006) 1294-1304.
- [2] D.G. Kim, Y.Z. Lee, Experimental investigation on sliding and fretting wear of steam generator tube materials, Wear, 250 (2001) 673-680.
- [3] J.Y. Yun, G.S. Shin, D.I. Kim, H.S. Lee, W.S. Kang, S.J. Kim, Effect of carbide size and spacing on the fretting wear behavior of Inconel 690 SG tube mated with SUS 409, Wear, 338 (2015) 252-257.
- [4] L. Xin, B.B. Yang, Z.H. Wang, J. Li, Y.H. Lu, T. Shoji, Effect of normal force on fretting wear behavior and mechanism of Alloy 690TT in high temperature water, Wear, 368 (2016) 210-218.

平成29年度の研究業績

【研究内容】

The synergistic effect of high temperature corrosion and fretting process has been studied. It is found that three kinds of damage types could generate under high temperature high pressure environment. Furthermore, with the increment of the temperature, the fretting damage became even more serious. It is due to the acceleration of the corrosion process.

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. **Z. H. Wang**, J. Xu, J. Lia, Y.H. Lu, Y.Otsuka, Y.Mutoh, T.Shoji, Y. Takeda.
“Fretting wear damage of Inconel 690 in the high temperature high pressure water environment”, Journal of Nuclear Materials, (Jan. 2018) (Major revision).
2. **Zihao Wang**, Jian Xu, Yoichi Takeda, Tetsuo Shoji.
“A novel electrochemical method for detection and quantification of laves phase in 12Cr martensitic stainless steel”, Corrosion science, (Sep. 2017) (Under review).
3. **Zihao Wang**, Tetsuo Shoji, Yoichi Takeda, Hideki Yuya, Jian Xu.
“Microstructure and pitting behavior of the dissimilar metal weld of 309L cladding and low alloy steel A533B”, Corrosion science, (Sep. 2017) (Under review).
4. Li, J., Yang, B. B., Lu, Y. H., Xin, L., **Wang, Z. H.**, & Shoji, T.
“The effects of electrochemical polarization condition and applied potential on tribocorrosion behaviors of Inconel 690 alloys in water environment”, Materials & Design, Volume 119, (2017), Pages 93-103.
5. Jian Xu, **Zihao Wang** & Tetsuo Shoji.
“Effects of hydrogen on corrosion of pure Ni in high temperature water”, Corrosion Science, Volume 122, (2017), Pages 123-129.
6. Li, J., Yang, B. B., Lu, Y. H., Xin, L., **Wang, Z. H.**, & Shoji, T.
“The effect of normal force on fretting corrosion behavior of Inconel 690 in 3.5% sodium chloride”, Materials Characterization. Volume 116, (2017), Pages 147-154.
7. Li, J., Yang, B. B., Lu, Y. H., Xin, L., **Wang, Z. H.**, & Shoji, T.
“The degradation mechanism of Inconel 690TT induced by fretting wear in air”, Tribology International, Volume 116, (2017), Pages 147-154.
8. Xin, L., Lu, Y. H., Otsuka, Y., Mutoh, Y., **Wang, Z. H.**, & Shoji, T.
“The role of frequency on fretting corrosion of Alloy 690TT against 304 stainless steel in high temperature high pressure water”, Materials Characterization. Volume 134, (2017), Pages 260-273.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Wang Zihao, Yoichi Takeda, Xu Jian, Tetsuo Shoji.
“A Novel Electrochemical Method for Detection and Quantification of Laves Phase in 12Cr steel”, (2017) USTB-TU国際ジョイントラボワークショップ.

【受賞・特許等】

1. Tohoku University President Fellowship 2017
2. 卓越した大学院「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」平成29年度優秀研究奨励プログラム



氏名 山口 達也

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D2

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29年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、昨年度に設計製作した水素/空気燃焼ガストーチイグナイタ(図1)を用いて、本研究で適用した噴射ガス全温推定手法の妥当性について、実験及び数値計算の両面から検証した。また、単孔噴射器を有するキャビティー保炎器の保炎に与える気流境界層厚さの影響を三次元数値計算によって調査した。

噴射ガス全温の推定手法の検証では、まず初めに、噴射ガスの組成および温度に依存するパラメータである平均分子量および比熱比に着目した。本研究では、これらの値が、代表圧力環境下(1.0 MPa)の化学平衡状態における値にほぼ一致するものと仮定した。そこで、この仮定の妥当性の検証のため、噴射ガスの酸素消費率を多成分ガス分析計によって評価した。その結果、噴射孔直径が燃焼室の内径に対して十分に小さく、仕切管形状が適切に選択されていれば、燃焼ガス中の酸素濃度は十分に小さく、化学平衡仮定によって平均分子量を決定することは妥当であることが示された。また、平均分子量および比熱比に与える熱損失の影響を評価したところ、噴射ガス温度が平衡断熱火炎温度の80%以上であれば、平均分子量の熱損失に起因する誤差は最大で0.77%となることが示された。比熱比については、噴射ガス全温の推定に重要となる臨界流れ係数の二乗値の熱損失に起因する誤差は最大で0.74%となることが示された。次に、本研究で導入したIshibashiとTakamotoによる流出係数算出方法^[1]の噴射ガス全温推定における妥当性に着目した。噴射孔壁面からの熱損失を考慮した三次元数値計算の結果、IshibashiとTakamotoによる流出係数算出方法では、噴射ガス全温が過小評価されることが示された。これは彼らの流出係数算出方法では、壁面断熱が仮定されており、温度境界層の存在による壁面近傍における質量流速の増加が考慮されていないためである。また、噴射ガスの熱損失が顕著な条件では流出係数が1.0を超えることが示され、実施した数値計算の中で最も熱損失が大きな条件では、噴射ガス全温が14.6%も過小評価されることが示された(図2)。したがって、より精度の高い噴射ガス温度の推定には、熱損失の低減あるいは熱損失が流出係数に与える影響の定量化が必要である。

単孔噴射器を有するキャビティー保炎器の保炎に与える気流境界層厚さの影響の調査では、気流境界層厚さを比較的容易に変更可能な三次元数値計算を実施することとした。その結果、実機のスクラムジェット燃焼器のように、エンジン入口(空気取り込み口)から壁面に沿って、境界層が厚く発達する条件では、気流と噴流の干渉によって保炎器の上流に生じる剥離領域が大きくなり、その剥離領域から気流が保炎器内部に多量に流入することによって、保炎器内部が、気流全温が十分でない条件では冷却されることで、化学反応の特性時間が長くなるため、保炎が困難となることが示された(図3)。したがって、単孔噴射器を有するキャビティー保炎器では、噴流と気流の干渉を弱めて、大規模な境界層剥離の発生を抑える必要がある。

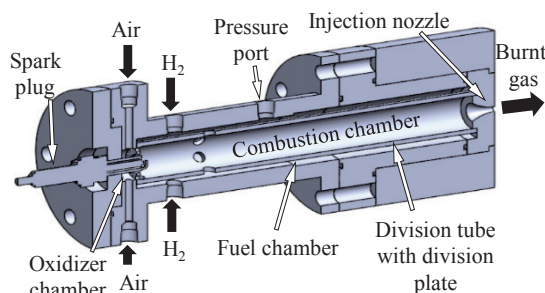


図1 水素/空気燃焼ガストーチイグナイタの内部構造

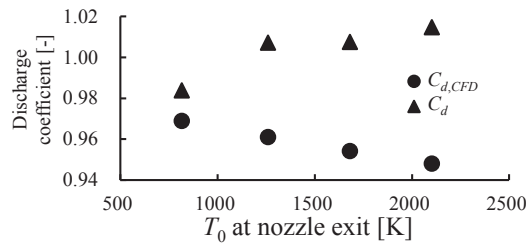


図2 推定された流出係数と実際の流出係数に与える噴射ガス温度の影響

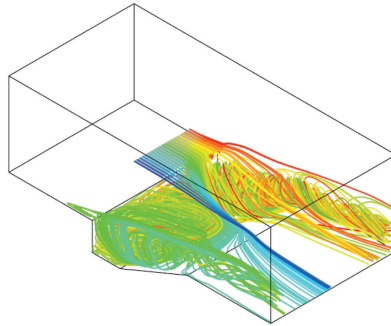


図3 三次元数値計算によって確認された剥離領域からの気流を示す三次元流線

[1] M. Ishibashi and M. Takamoto, *Flow Meas. Instrum.* 11 (2000) 305-313.

平成29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：Fourteenth 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：2017.11.1~3
 役 割：学生セッションオーガナイザー

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. 水素/空気燃焼ガストーチイグナイタの噴射全温評価手法の検証
 本研究で開発した水素/空気燃焼ガストーチイグナイタに流出係数を考慮した噴射ガス全温評価手法を適用し、その妥当性を実験及び数値計算から評価した。
2. 単孔噴射器を有するキャビティー保炎器の保炎に与える気流境界層厚さの影響
 本研究はこれまでに、単孔噴射器を有するキャビティー保炎器の燃焼形態が試験形式（セミフリージェット方式あるいは直結方式）によって異なる実験事実を確認していた。その原因として、気流境界層厚さに着目し、三次元数値計算によってその影響を調査した。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 山口達也，市川太郎，日沢知寛，工藤琢，早川晃弘，小林秀昭，底面に単孔噴射器を有するキャビティー保炎器の保炎に与える境界層厚さの影響，A313，富山，2017年



氏名 吉田 尚生

所属 工学研究科機械機能創成専攻・D2

研究課題

全固体リチウムイオン電池開発のための”見える化”手法の開発
と設計指針の提案

平成29年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、充放電可能な全固体リチウムイオン電池の作製方法の確立を行った。全固体リチウムイオン電池は正極、電解質、負極が積層した3層構造で形成される。電解質材料にはイオン伝導性の高い $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (以降LLZと呼称する)を用いた[1-2]。本研究ではLLZの粉末の合成と焼結体の作製を行った。 Li_2CO_3 , La_2O_3 , ZrO_2 , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ を7:3:2:0.3のモル比で計量し遊星ボールを用いて湿式混合を行い、るつぼの中で 800°C で10時間、 900°C で10時間焼結すること粉末の合成を行った。得られたLLZ粉末のXRDのピークは報告されているLLZのピークに非常によく一致した(図1)。得られた粉末は $\phi 10$ のダイスを用いて10kNで圧縮成型した後、100MPで静水圧プレスを行った後、 1150°C で36時間焼結することでLLZ焼結体を作製した。焼結過程では 1000°C 以上で焼結することでLiの蒸発が起こるため、周りを母粉末で覆うことでLiの蒸発を抑制した。得られた焼結体のXRDのピークは粉末同様、報告されているLLZのピークに非常によく一致した(図1) [3]。作製した焼結体の表面を1200番のエメリー紙を用いて研磨した後、正極の形成を行った。正極材料には LiCoO_2 とPoly Vinylidene Di Fluorideを9:1の重量比で混合し、N-methylpyrrolidoneで湿潤させることでスラリーの作製を行った。作製したスラリーをドクターブレードを用いて電解質上に塗布し、乾燥炉で乾燥することで膜の形成を行い、 700°C で2時間焼結することで電極・電解質間の接合を行った。その後作製した焼結体にLi金属負極の圧着を行うことで全固体電池を組み立てた。Li金属負極は非常に反応性が高く、大気中の水分と容易に反応してしまうため、Li金属負極の圧着はアルゴンガスで満ちたグローブボックス内で行った。作製した全固体電池は $1\mu\text{A}$ で定電流試験を行うことで電池性能の評価を行った(図2)。充放電試験の結果から作製した全固体電池は充放電可能であることが確認され、目的としていた全固体電池の作製を達成した。作製した全固体電池は充放電サイクルが進むごとに容量の劣化が進行していることが確認された(図3)。この劣化のメカニズムを解明するために、充放電前後のサンプルに対し樹脂埋めを行い、研磨を行うことで断面観察を行った(図4)。断面観察の結果から充放電の前後で電極・電解質界面ではなく離が発生していることが確認された。本研究で作製した全固体電池で起きた容量の劣化はこのはく離によるものであると考えられる。これらの結果から全固体リチウムイオン電池で起きる劣化は機械的損傷が関与していることが明らかとなった。

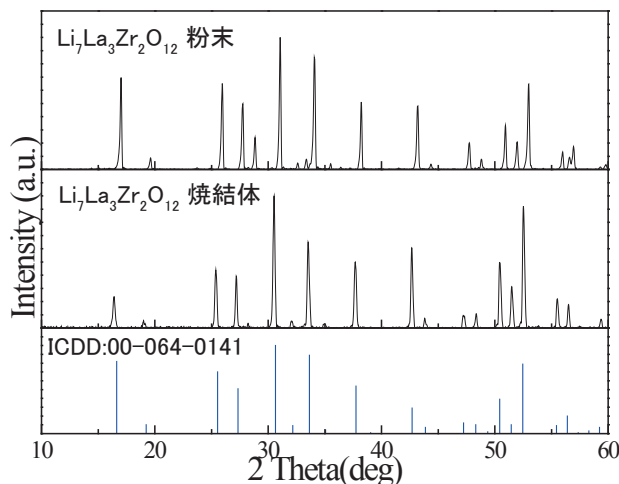


図1 LLZの結晶構造

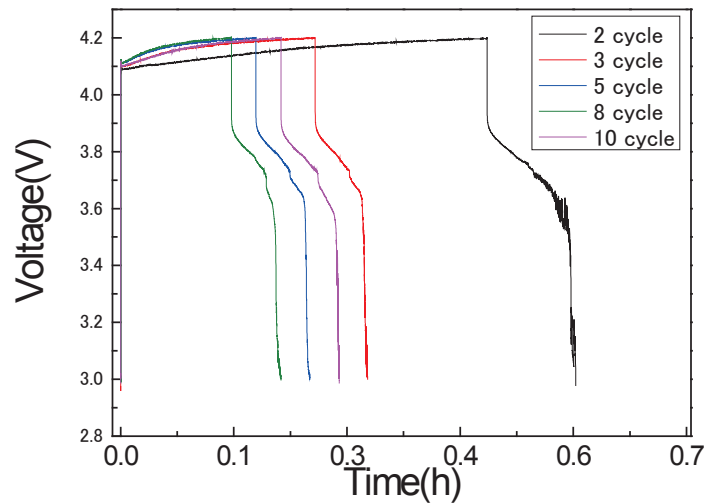


図2 全固体リチウムイオン電池の定電流充放電試験

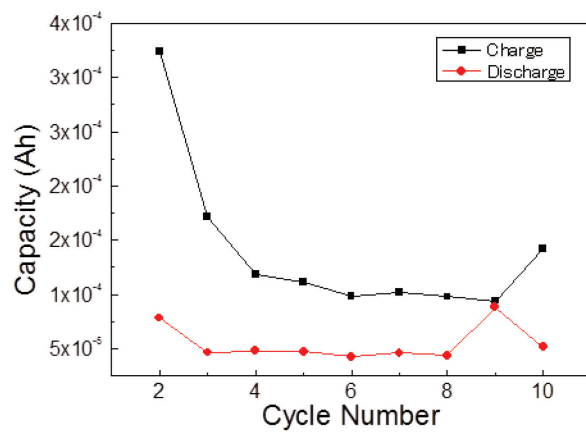


図3 全固体リチウムイオン電池のサイクル特性

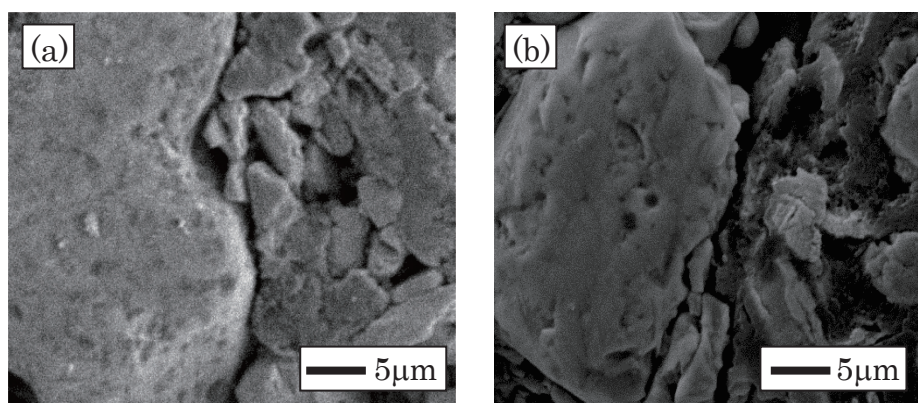


図4 充放電サイクル前後の断面観察結果(a)充放電前 (b)10サイクル後

- [1] J. Wakasugi, H. Munakata and K. Kanamura, *Electrochemistry*, **85**, 77 (2017).
- [2] M. Kotobuki, H. Munakata, K. Kanamura, Y. Sato and T. Yoshida, *J. Electrochem. Soc.*, **157**, 1076 (2010).
- [3] C.A. Geiger, E. Alekseev, B. Lazic, M. Fisch, T. Armbruster, R. Langner, M. Fechtelkord, N. Kim, T. Pettke and W. Grove, *Inorg. Chem.*, **50**, 1089 (2011).

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. 全固体リチウムイオン電池電解質材料の合成
全固体リチウムイオン電池作製のため高イオン導伝性材料の合成と合成条件の最適化を行っている
2. 全固体リチウムイオン電池の作製
全固体電池電解質の焼結体の作製条件や正極・負極の積層条件の最適化を行い、実際に充放電可能な全固体リチウムイオン電池の開発を行っている。
3. 全固体リチウムイオン電池の充放電挙動と劣化メカニズムの分析
全固体リチウムイオン電池の充放電試験を行い、その電池特性の評価を行うとともに、容量劣化のメカニズムの分析を行うことで、全固体電池の容量劣化には機械的な損傷が関与することを明らかにしている。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 吉田尚生, 佐藤一永, 橋田俊之, リチウムイオン電池用電極材料の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2017年度年次大会, 2017/9, 口頭, 埼玉.
2. 吉田尚生, 佐藤一永, 橋田俊之, リチウムイオン電池の機械的損傷と電気化学的劣化に関する研究, 日本機械学会東北支部 第53期総会・秋季講演会, 2017/9, 口頭, 八戸.
3. 大内康弘, 奥山航平, 吉田尚生, 佐藤一永, 橋田俊之, 全固体リチウムイオン電池の創成を目的とした固体電解質の作製と評価に関する研究, 東北学生会 第48回学生員卒業研究発表会.
4. 奥山航平, 吉田尚生, 佐藤一永, 橋田俊之, 全固体リチウムイオン二次電池の創成に向けた低温合成法によるコバルト酸リチウム正極の成膜とその電気化学的評価, 日本機械学会東北支部 第53期総会・講演会

【受賞・特許等】

名称：卓越した大学院「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」平成29年度優秀研究奨励プログラム

期間：2017年度



氏名 吉村 光生

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D3

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29年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、マイクロ流路の一種であるマイクロ混合器の設計についてトポロジー最適化によって混合を促進させる構造の検討と、現実の工学的運用においてしばしばみられる不確実性を考慮したロバストトポロジー最適化の適用を行った。マイクロ混合器はその代表寸法や代表流速により、流路内の流れが層流に支配されることが知られている [1]。したがって、混合を短時間かつ短距離で完了させるために流路内流れに摂動を与える必要がある。

本研究では、流路底面に溝を取り付けることで、混合を促進させることを狙う。まず、流路の外側に溝を付けたケースについてトポロジー最適化を実施したところ、斜めの溝が支配的な役割を果たし、一方の流体を他方の流体側へ輸送する傾向が見られた [2]。今年度はさらに、流路の内側に溝を取り付けたケースにおいてトポロジー最適化を実施した。最適化の結果、流路内側の溝については流れに垂直な短い溝が二流体の間に速度差を生じさせ、結果として流体界面の引き伸ばし及び折り曲げを可能にすることで、混合性能の大幅な向上を実現できることを確認した (図1)。さらに、遺伝的アルゴリズムによる大域的な探索は大域的最適解の他、複数の局所解を発見することができ、応答曲面法を解探索に援用することで、計算時間を勾配法による探索によるもの [3] と遜色ないレベルにまで削減した。

次に、上記のマイクロ混合器の設計について、製造時及び運用時において発生しうる不確実性を仮定したロバストトポロジー最適化を実施した。製造時の不確実性は溝の寸法 (幅及び高さ) に、運用時の不確実性は流路流入口における二流体の割合に与えられるものとした。これらの二つの不確実性について、どちらか片方のみを課した場合と、両方が同時にただし独立な確率密度分布に基づいて発生した場合の計 3 ケースについて最適化を行った。最適化における目的関数は、ある設計点周りでばらつきを仮定したときの混合性能指標 (流出口における濃度の標準偏差) の平均値と標準偏差から構成される多目的最適化問題である。それぞれのケースにおいて得られた知見は以下のものである。

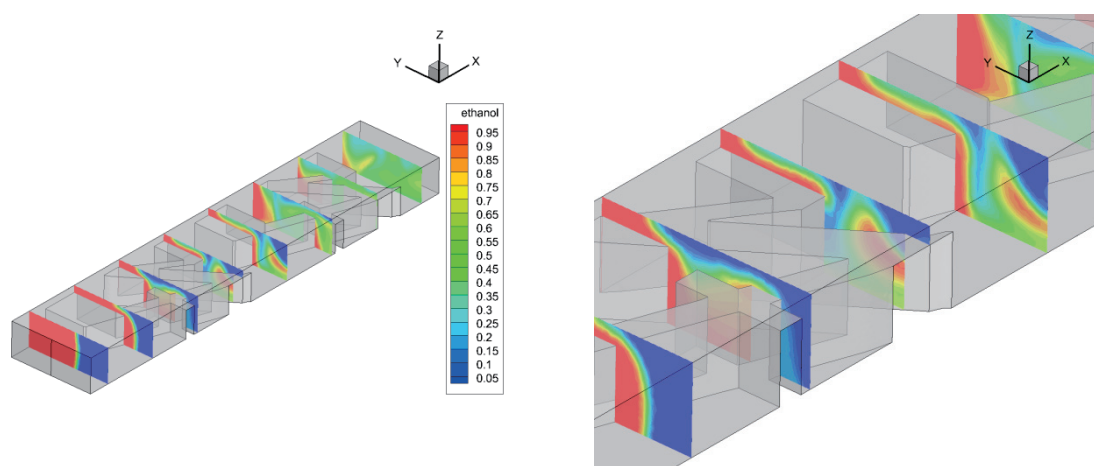
(1) 製造における不確実性のみを考慮したケース: 本ケースでは性能 (平均値) 及びロバスト性 (標準偏差) と流路の寸法の間に明瞭なトレードオフが見られた。すなわち、性能が良い解では溝が高く、また幅が太い傾向にある一方で、それらの解は寸法の変動による混合性能のばらつきが大きくロバスト性が低い形状でもある。したがって、一切の不確実性を無視した決定論最適化において解明された混合を促進させる流体現象は寸法不確実性の影響を受けやすいことが分かる。

(2) 運用時における流体割合の不均一性のみを考慮したケース: 本ケースで得られた解はロバスト性が高い構造と性能が優れた構造で異なるトポロジーを持つことが確認された。ロバスト性が高い形状では、流入口における界面の変動の影響を受けにくくするために、設計領域の大部分が溝に占められた左右対称に近い構造をとる。一方で、性能が高い形状では、決定論的最適化でみられた混合を促進させる重要な溝である「短い横溝」による界面の引き伸ばしが弱くなるものの、斜めの長い溝が界面を中央へと押す役割を果たすことから比較的高い混合性能が担保していることが解明された。

(3) 製造時および運用時の不確実性を同時に考慮したケース: 本ケースでは性能とロバスト性のトレードオフはケース(1)と(2)において得られた知見を考慮することで説明される。まず、性能が高い形状では依然として、界面の引き伸ばしと折り曲げによって混合が促進される。しかし、これらの現象は寸法の変動に敏感であるためにロバスト性は低い。そのため、ロバスト性を高めるために、性能をある程度犠牲にしつつも、界面の引き伸ばしと折り曲げが発生する頻度を下げる、または溝構造を左右対称にしつつ斜めの長い溝によって流入口界面の変動による影響を抑えることが有効であると確認された (図2)。

以上の、トポロジー最適化による設計は従来のマイクロ混合器の設計知見 [4] を踏襲しながらも、抜本的な性能向上を実現するものであり、現実の設計においても有用なものである。

- [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] Yoshimura, M., Shimoyama, K., Misaka, T., Obayashi, Shigeru., Topology and Sizing Optimization of Micromixers Using Graph-theoretical Representation and Genetic Algorithm, *ASME IDETC2017*, Cleveland, OH, USA, August 2017.
- [3] Deng, Y., Liu, Z., Zhang, P., Liu, Y., Gao, Q., and Wu, Y., “A flexible layout design method for passive micromixers,” *Biomed. Microdevices*, **14**(5), pp. 929–945, (2012).
- [4] Ottino, J. M., and Wiggins, S. , “Introduction: mixing in microfluidics,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, **362**(1818), pp. 923–935, (2004).



(a) Phase contour

(b) Zoom of 3rd to 5th cross sections of Fig 1(a)

図 1: 流路内側の溝による流れ場の様子

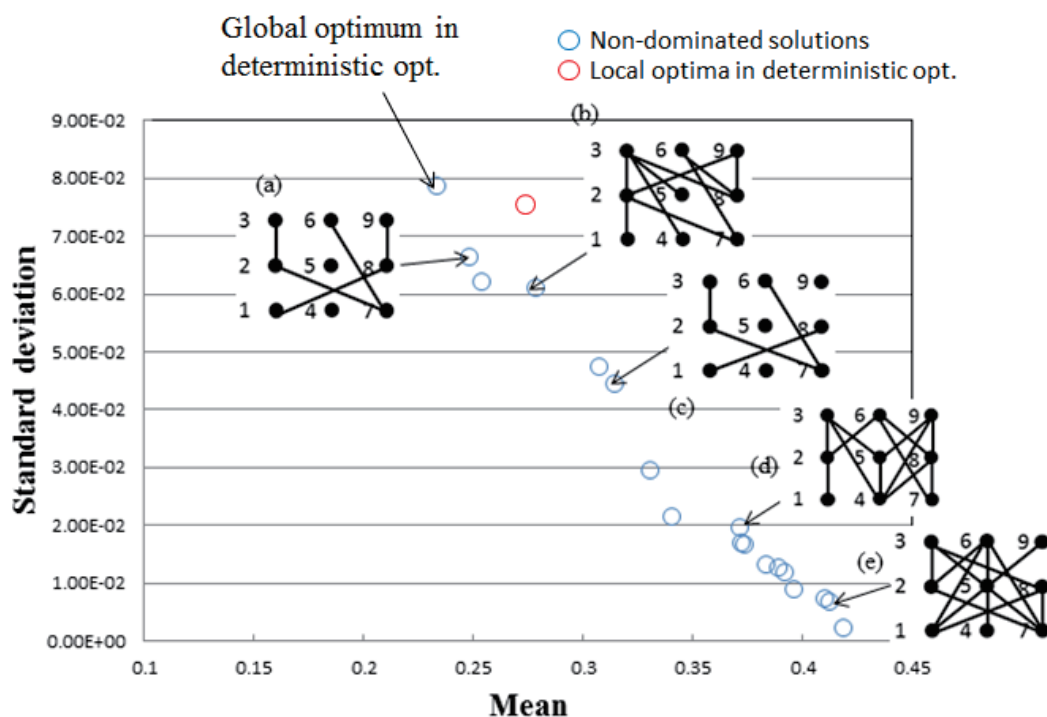


図2: 製造時と運用時における不確実性を考慮したケースの非劣解集合

平成29年度の研究業績

【研究内容】

1. 溝付きマイクロ混合器の流れ場の解明
マイクロ混合器底面に取り付けられた溝の向きと寸法による流れ場の変化、及び混合の促進メカニズムの解明を行った。
2. 遺伝的アルゴリズムによるマイクロ混合器のロバストトポロジー最適化
現実の工学問題でしばしばみられる不確実性を考慮し、溝寸法の変動、または流入口界面の不均一性による混合性能の影響について、遺伝的アルゴリズムを用いることで、性能とロバスト性の間の相関を包括的に示した。

【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 and Sizing Optimization of Micromixers Using Graph-theoretical Representation and Genetic Algorithm”, *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC2017*, Cleveland, OH, USA, August 2017.

【国際会議・国内学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 吉村光生, 下山幸治, 三坂孝志, 大林茂, 「遺伝的アルゴリズムによる溝付きマイクロ混合器のトポロジー最適化」, 日本機械学会2017年度年次大会, 埼玉, 2017年9月



氏名 Wang Haoran

所 属 Graduate school of Biomedical Engineering -
Biomedical Engineering・D1

研究課題

Research on hemodynamic analysis of different bypass
surgical methods of coronary artery aneurysm(CAA)
treatment

平成29年度における本卓越拠点に対する取り組み

Background: Coronary artery aneurysm is a rare condition with a reported incidence of 0.14–4.9% in patients undergoing coronary angiography and 0.3–5.3% in patients after percutaneous transluminal coronary angioplasty (PTCA). Currently, there are limited clinical data to prove what kind of operation is a better pattern to treat these patients, and the hemodynamic effects of these aneurysms and bypass grafts after surgery are still unknown. Optimum surgical therapy for this entity is difficult to standardize. We present here some models as a comparison with the aim of establishing a better surgical therapy for this rare entity.

Methods: A patient-specific 3-dimensional model of the aortic arch and coronary arteries was reconstructed. Different diameter aneurysms were applied to the left anterior descending artery (LAD). The saphenous vein graft (SVG) and left internal mammary artery (LIMA) were used to bypass the aneurysm with or without ligation of the CAAs, respectively. 3D models were built to study the hemodynamics of the operation. A numerical study was performed by coupling the 3D artery model with 0-dimensional lumped parameter model of the cardiovascular system.

Results: The graft flow, native coronary flow, wall shear stress (WSS), oscillatory shear index (OSI) and relative residence time (RRT) were calculated and illustrated. The values of mass flow are shown in Table 1 and the WSS distribution are shown in Figure 1. Inverse flow, high wall shear stress and high oscillatory shear index appeared on the left internal mammary artery graft. Low wall shear stress and low oscillatory shear index appeared on the saphenous vein graft. RRT increases after surgery.

Conclusion: High oscillatory shear index and inverse flow might be the major hemodynamic characteristic in left internal mammary artery graft. The inverse graft flow and high oscillatory shear index can cause the bypass graft blocking. Low OSI and non-inverse flow only appear in the result of LIMA with the ligation of CAA. As meanwhile, the saphenous vein graft can provide good results.

Table 1 Massflow of LIMA and SVG

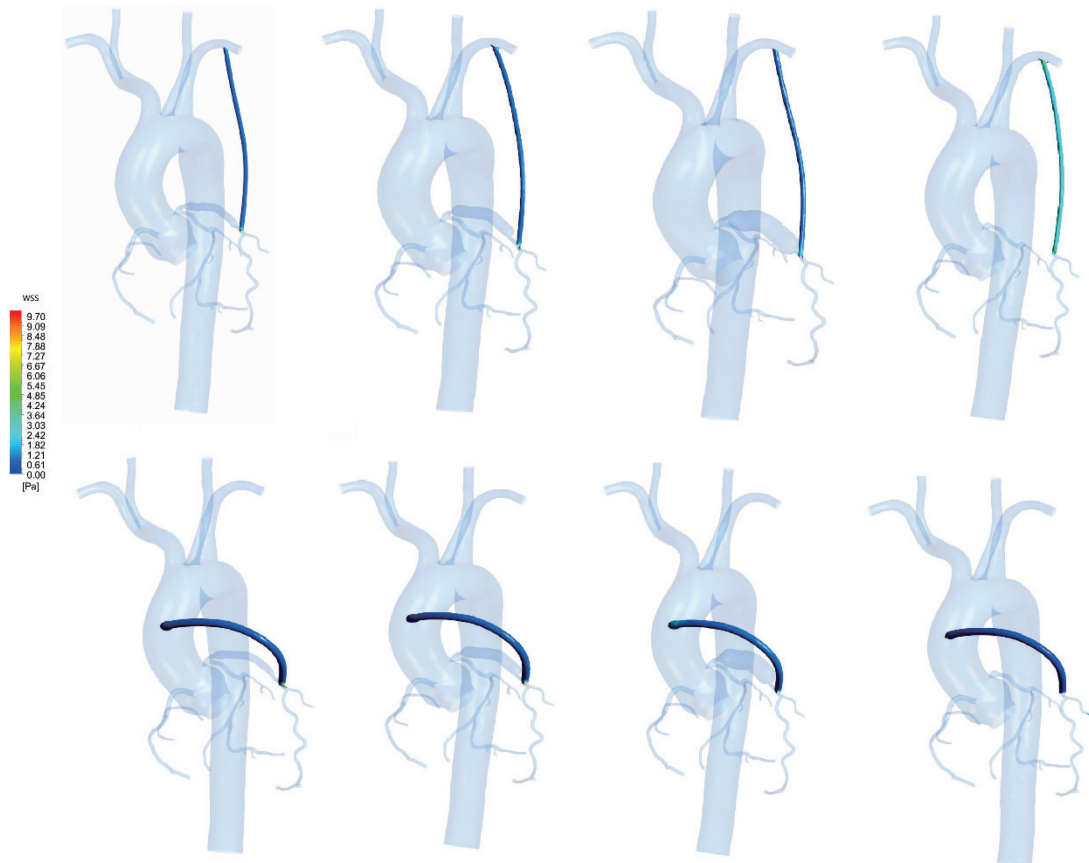
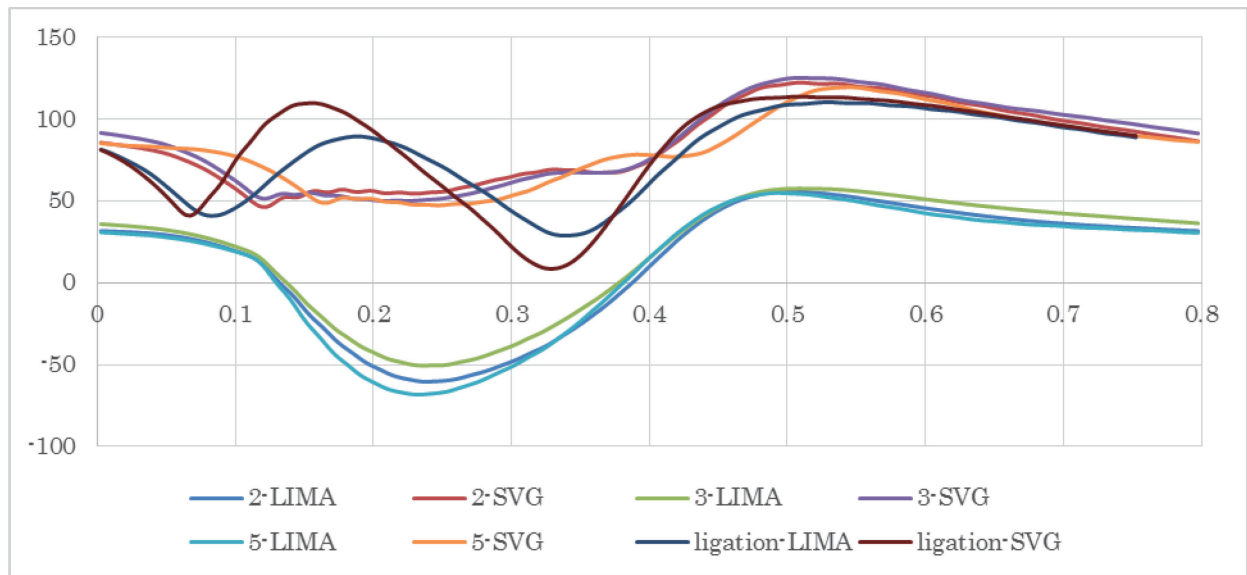


Figure 1 WSS distribution of bypass graft

平成29年度の研究業績

【研究内容】

Research on hemodynamic analysis of different bypass surgical methods of coronary artery aneurysm(CAA) treatment



氏名 Gaoyang Li

所属 Graduate school of Biomedical Engineering-
Biomedical Engineering・D1

研究課題

Research on Arterial Stiffness in Type 2 Diabetic Subjects
Based on Pulse Waveform Characteristics

平成29年度における本卓越拠点に対する取り組み

Vascular endothelial dysfunction in type 2 diabetic patients can affect the physiological structure of large and medium-sized arteries and microvascular, resulting in decreased vascular elasticity and abnormal structure and function of organs and tissues which may even lead to arteriosclerosis. One of the key points for the treatment of diabetes is early detection of arteriosclerosis and resort suitable and remedial measure to prevent the process [1]. Early detection of arterial stiffness is of great significance for clinical diabetic patients.

Previous studies show that pulse wave velocity (PWV) can reflect the arterial stiffness and can be used as one of parameters for early detection of arteriosclerosis in type 2 diabetic patients; The brachial-ankle pulse wave velocity (baPWV) which can be used as the risk factor for diabetic complications is directly related to the incidence of type 2 diabetes ; High baPWV value can serve as an independent predictor of diabetic mortality and cardiovascular morbidity (ref.4); For type 2 diabetic patients, the parameters such as CAVI calculated by PWV can also be used as indexes of arteriosclerosis ; However, due to the technical limitation, there are some inevitable errors for the PWV measurement, which causes poor reproducibility [2]. Most studies choose only the pulse wave velocity as the research object, ignoring the pulse waveform.

The noninvasive detection technology of hemodynamics, represented by pulse wave detection and analysis, has been widely used as an important method of noninvasive detection of cardiovascular function because of its convenient and fast measurement with high reliability. Pulse waveform characteristics such as shape, amplitude, period, etc. are closely related to the functional status of blood vessels as shown in Fig.1. Pulse waves propagate in the arterial vessels and are constantly reflected at the downstream branches of all levels, making the pulse wave not only affected by the heart but also affected by all levels of arteries and branches in a variety of physiological and pathological factors such as vascular resistance, arterial stiffness [3]. Therefore, different physiological and pathological changes make different waveform characteristics. However, for patients with type 2 diabetes, there is no research on the correlation between its pulse waveform and arterial stiffness. Therefore, a comprehensive investigation into their pulse waveform characteristics is necessary. In this research, the pulse waveform data of type 2 diabetic patients and healthy subjects was collected respectively and the characteristic parameters for statistical analysis were extracted. The correlation between the baPWV used as the arterial stiffness index and pulse waveform parameters was analyzed to obtain the correlation between waveform parameters and arterial stiffness. The purpose of this research was to demonstrate that pulse waveform characteristics could be used as indexes of arterial stiffness in type 2 diabetic patients

Table1 The independent sample T-test result of pulse waveform parameters

Characteristics		Control Subjects Healthy Subjects	Subjects with Diabetes	P
T		914.1±118.0	915.5±199.1	0.98
T1	Left Arm	22.8±4.1	23.4±4.0	0.67
	Right Arm	24.0±3.7	24.4±3.7	0.75
	Left Ankle	26.5±3.2	26.2±3.8	0.79
	Right Ankle	26.6±3.2	26.2±3.8	0.75
T2	Left Arm	38.6±3.3	38.8±5.5	0.92
	Right Arm	38.7±3.3	39.4±5.3	1262
	Left Ankle	52.7±5.0	52.9±7.5	0.92
	Right Ankle	52.8±5.1	53.2±7.6	0.83
T3		83.2±14.2	72.4±10.4	<0.05
Area	Left Arm	6210.2±900.9	7506.2±858.5	<0.05
	Right Arm	6098.8±1217	7453.1±1931.6	<0.05
	Left Ankle	6717.9±1596.3	8375.2±1291.1	<0.05
	Right Ankle	6566.0±1571.1	8180.5±1268.9	<0.05
Area1	Left Arm	3631.2±774.2	4343.0±961.1	<0.05
	Right Arm	3524.0±945.1	4362.4±1395.6	<0.05
	Left Ankle	5460.7±1404.5	6370.2±1160.1	<0.05
	Right Ankle	5159.2±1298.7	6202.4±1323.7	<0.05
Area2	Left Arm	2421.9±279.9	2933.8±605.2	<0.05
	Right Arm	2574.7±496.5	3090.8±911.7	<0.05
	Left Ankle	1257.2±333.1	2005.0±601.9	<0.05
	Right Ankle	1406.8±451.1	1978.1±562.2	<0.05
baPWV(m/s)		14.9±1.1	16.0±1.9	<0.05

Table2 Correlation between pulse waveform parameters and baPWV

Characteristics	baPWV	
	r	P
A	Left Arm	.381*
	Right Arm	.369*
	Left Ankle	.458**
	Right Ankle	.434**
A1	Left Arm	.373*
	Right Arm	.342*
	Left Ankle	.410*
	Right Ankle	.396*
A2	Left Arm	.432**
	Right Arm	.275
	Left Ankle	.340*
	Right Ankle	.269
T3		-.458**

P values were calculated using the Person correlation test.

- [1] Ryden L, Standl E, Bartnik M, et al. Guidelines on diabetes, pre-diabetes, and cardiovascular diseases: executive summary. Eur Heart J 2007;28:88-136
- [2] Grossmann K, Rolka H, Reinhardt H and Reissmann H C 1987 A new bedside procedure for computerized analysis of pulse curves in the diagnosis of peripheral arterial disease VASA 16 324-9
- [3] Karamanoglu M, O'Rourke MF, Avolio AP and Kelly RP. An analysis of the relationship between central aortic and peripheral upper limb pressure waves in man. Eur Heart J. 1993;14:160-7

平成29年度の研究業績

【研究内容】

Research on Arterial Stiffness in Type 2 Diabetic Subjects Based on Pulse Waveform Characteristics
To get the pulse waveform and the correlation with the arterial stiffness change