

卓越した大学院拠点形成支援

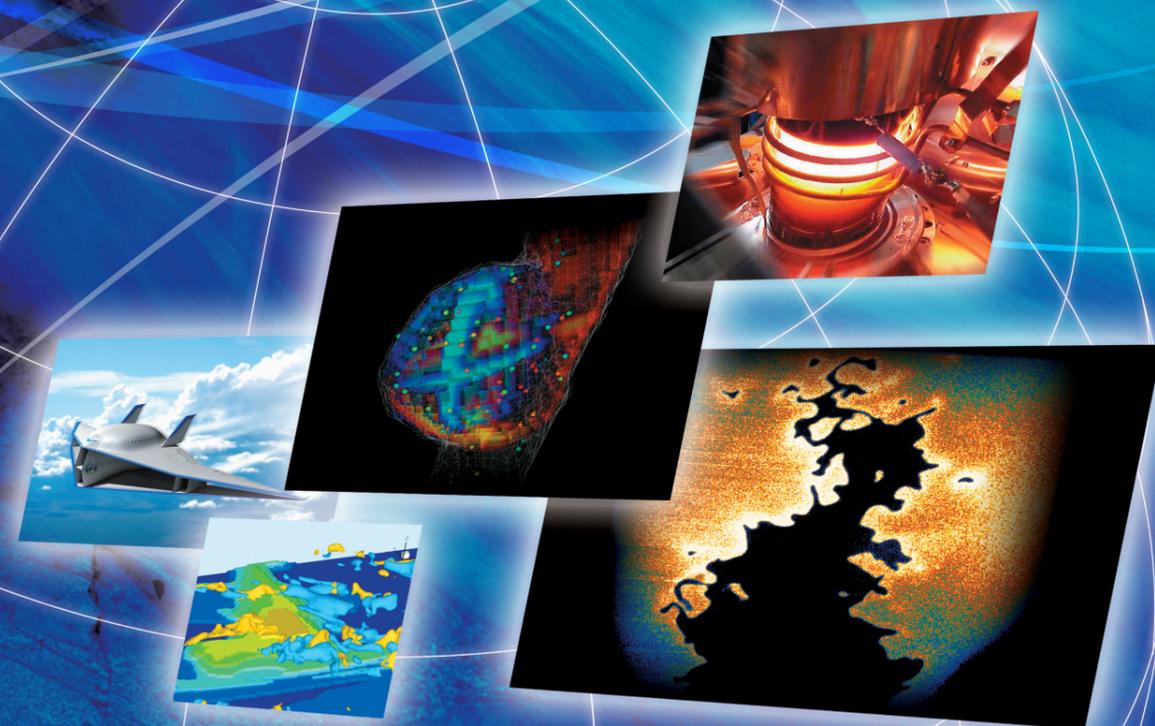
流動ダイナミクス  
知の融合教育研究世界拠点

# 平成27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27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 27 年度も平成 26 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 27 年 10 月に開催した 12th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015)では、19 か国 711 名もの研究者および学生が参加し、白熱した議論のもと成功裏に終了しました。特に、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 11 回目を迎え、学生の参加人数も 374 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 28 年 3 月 7 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 27 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 .....	6
3. 研究支援リサーチ・アシスタントの取り組みと実績.....	7



## 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(機械システムデザイン工学専攻、ナノメカニクス専攻、航空宇宙工学専攻、バイオロボティクス専攻)、情報科学研究科(システム情報科学専攻)、環境科学研究科(環境科学専攻)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	工学研究科機械システムデザイン工学専攻・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

大平 勝秀	流体科学研究所・教授
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	工学研究科附属先端材料強度科学研究センター・教授
佐藤 一永	工学研究科附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 Eleventh International Students / Young Birds Seminar on Multi-scale Flow Dynamics

平成27年10月27日～29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27年10月27日から29日にかけて行われたTwelfth International Conference on Flow Dynamics (第12回流動ダイナミクスに関する国際会議：19か国711名参加、うち学生374名)の学生セッションとして開催された。今回は、博士課程の古川琢磨氏、加藤昂大氏、白戸高志氏の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、69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. Joe Yoshikawa (Tohoku University, Japan)

Mr. Yuta Takakuwa (Nagaoka University of Technology, Japan)

Mr. Gulliaume Lacaille (Tohoku University, Japan)

## 2.1 RA 研究発表会

設置目的：全員参加の研究交流会とする。

- 1) 日 時 平成27年12月21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会



## 2.2 特別講演会

- 1) 日 時 平成28年1月25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 Professor Qun CHEN  
(Tsinghua University, China)  
題 目 “The Synergy of Heat and  
Electricity in Transmission for Integrating  
Renewable Energy Resources into Grid”
- 2) 日 時 平成28年2月29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 Professor Gary ROSENGARTEN  
(RMIT University, Australia)  
題 目 “When small is better: Using  
nanotechnology to control transport  
processes from solar thermal collectors to  
nanoparticle separation”



## 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
相馬 達哉	工学研究科化学工学専攻	D2	青木 秀之
湯口 雄大	工学研究科航空宇宙工学専攻	D2	吉田 和哉
山田 脩裕	工学研究科ナノメカニクス専攻	D1	足立 幸志

## 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
湯口 雄大	D2	30th International Symposium on Space Technology and Science	Kobe, Japan	2015.7.4～ 2015.7.10
Cervantes Salguero Keitel Abraham	D2	21st International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA21)	Cambridge, USA	2015.8.17～ 2015.8.21
相馬 達哉	D2	The 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems	Tainan, Taiwan	2015.8.23～ 2015.8.27
吉村 光生	D1	EUROGEN 2015	Glasgow, UK	2015.9.14～ 2015.9.16
李 康一	D3	7th Asian Thermal Spray Conference (ATSC)	Xi'an, China	2015.9.23～ 2015.9.25
比嘉 翔弥	D2	13th European Conference of the ISTVS	Roma, Italy	2015.10.21～ 2015.10.23
廣田 真人	D1	American Physical Society 68th Annual DFD Meeting	Boston, USA	2015.11.22～ 2015.11.24
小澤 裕二	D3	International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15)	Yokohama, Japan	2015.11.30～ 2015.12.4

## 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
神田 雄貴 工学研究科機械システムデザイン工学専攻	D1	Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse フランス	固気界面でのメタンハイドレート解離現象における濃度場の可視化計測	2016.1.13~ 2016.2.27	圓山 重直 (流体研)
佐々木 幸太 工学研究科量子エネルギー工学専攻	D2	Fraunhofer-Institute for Nondestructive Testing IZFP ドイツ	テラヘルツスペクトロメーターによる複合材料非破壊検査技術の高度化	2016.1.18~ 2016.2.26	橋爪 秀利 (工学部)

### 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 比嘉 翔弥

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D2

研究課題

未知環境での車輪状態のオンライン推定に基づいた移動ロボットの環境適応型走行制御

#### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本研究では、月面などの未知の軟弱不整地環境において、車輪状態のオンライン推定に基づいた移動ロボットの環境適応型走行制御の実現を目指している。一般に、軟弱不整地を走行する車輪型移動ロボットの走行には車輪の滑りが伴う。これは車輪の回転により、走行地盤が変形することに起因する。本年度は、走行制御について取り組む前の準備として、車輪と走行地盤の相互作用について詳細に明らかにすることとし、車輪下部の三次元応力分布の詳細な計測とグラウサ付き車輪の応力分布の可視化について取り組んだ。

車輪下部の三次元応力分布の詳細な計測では、車輪幅方向の10箇所において、接触面に作用する垂直応力分布と、これまで計測が困難とされてきた車輪円周方向のせん断応力分布と車輪幅方向のせん断応力分布の計測を実現した。車輪表面の三次元応力分布の計測にあたり、本研究では、これまで使用してきた計測装置をせん断応力の計測も行えるように改良した。計測装置は、6軸力覚センサと車輪表面に露出される5種類の接触部品から構成され、車輪表面の特定の位置における三次元応力分布の計測を可能にする。また、車輪内部に本計測装置を組み込み、軟弱地盤上で走行させることにより、車輪回転角毎の三次元応力分布計測を行った。また、接触部品を交換して同様の計測を行うことにより、10箇所の三次元応力分布を計測した。10箇所の三次元応力分布をそれぞれ重ね合わせることで、接触領域全体の三次元応力分布を取得した。計測結果より、車輪の滑り率の増加に伴って、その発生領域が前進すること、および車輪円周方向のせん断応力分布が垂直応力分布の割合よりも大きくなることを確認した。また、2方向のせん断応力を合成することにより、車輪下部のせん断応力分布の発生方向を明らかにした。図1より、車輪の滑り率の増加に伴い、車輪の両側面部におけるせん断力の方向が変化することが明らかになった。

グラウサ付き車輪の応力分布の可視化については、車輪表面の三カ所に作用する力とグラウサに作用する力の計測をそれぞれ個別に行い、それぞれの車輪の回転角度毎に重ね合わせることで実現した。グラウサ付き車輪とは、車輪表面にグラウサと呼ばれる板状の突起が等間隔で配置された車輪のことであり、グラウサの作用により、車輪の走行性能が向上することが知られている。グラウサは、排土抵抗の関係式を用いたモデル化や解析が行われてきたが、グラウサ車輪の力関係について実験的な検証は行われてこなかった。本研究により、けん引負荷の増加時には、車輪表面部に発生するせん断成分よりもグラウサに作用するせん断成分の方が、より支配的になることが分かった(図2)。

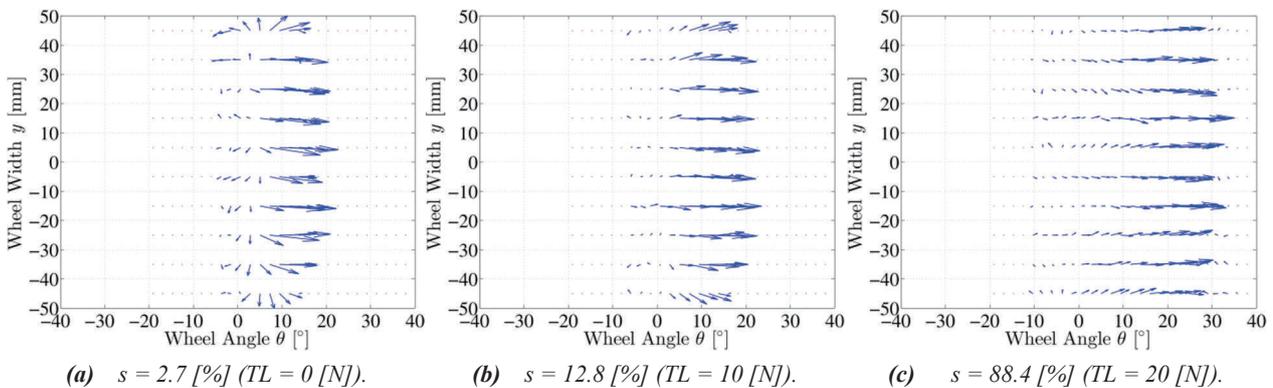
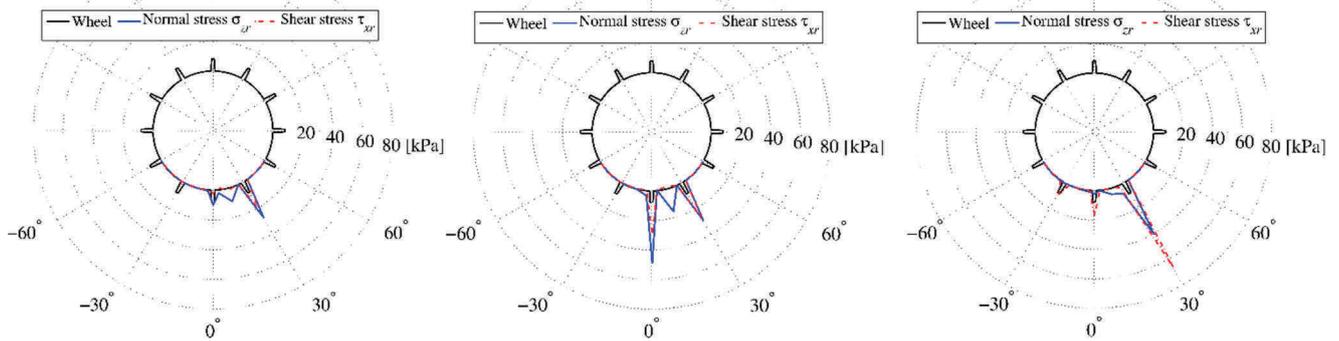


Fig. 1. Generating directions of the shear stress on the rear wheel surface of the testbed (査読論文3より).



(a) Traction load = 0 kg,  $s = -8\%$

(b) Traction load = 2 kg,  $s = 9\%$

(c) Traction load = 4 kg,  $s = 71\%$

Fig. 2. Stress distribution for a wheel with grousers (査読論文1より).

## 平成27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）

- ・国際会議派遣プログラム採択

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 軟弱地盤における車輪の三次元応力分布計測
2. 軟弱地盤を走行するグラウサ付き車輪の応力分布計測

### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Shoya Higa, Kazumasa Sawada, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida, "Visualization of the Stress Distributions of a Wheel with Grousers Traveling on Loose Soil", 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, May, (Accepted)
2. 中田圭, 比嘉翔弥, 永岡健司, 吉田和哉, 「軟弱斜面におけるスキッドステア型マイクロローバの走行特性」, 第21回ロボティクスシンポジウム予稿集, (2016-03) (採択済み, 発表予定)
3. Shoya Higa, Kazumasa Sawada, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, "Three-dimensional stress distribution on a rigid wheel surface for a lightweight vehicle", 13th European Conference of the ISTVS, pp. 383-391, Rome, Italy, (2015-10)

### 【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. Shoya Higa, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, "Measurement and Modeling for Two-dimensional Normal Stress Distribution of Wheel on Loose Soil", Journal of Terramechanics, Elsevier, vol. 62, pp. 63-73, 2015

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Shoya Higa, Kenji Nagaoka, and Kazuya Yoshida, "Mobility performance and stress distribution generated beneath a wheel on loose soil for a wheeled rover", The 25st Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, 2015.
2. 比嘉翔弥, 永岡健司, 永谷圭司, 吉田和哉, 「軟弱土壌を走行する車輪型移動ロボットのための車輪下部せん断応力分布の二次元的な計測手法」, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2015, 1P2-V06 (2015-05)
3. 中田圭, 永岡健司, Nathan Britton, 比嘉翔弥, Costa Paula, Iure Barros, 吉田和哉, 「グラウサ高さを考慮したスキッドステア型探査ローバのエネルギー消費に基づく走行特性解析」, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2015, 1P2-U02 (2015-05)

### 【受賞・特許等】

受賞日：2015年10月23日

受賞名：Best Paper Silver Award

組織名：International Society for Terrain-Vehicle Systems



氏名 井川 祥平

所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D1

研究課題

金属内における水素拡散現象の量子・分子・統計論的解析

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、BCC構造の鉄内における水素拡散現象が量子効果によって受ける影響を評価するためのプログラム作成を行った。水素が金属内を拡散する際に影響を与える量子効果として原子位置の不確定性によるポテンシャル障壁の温度変化と量子トンネル効果が考えられる。この中で本年度はポテンシャル障壁の温度変化を評価するためのプログラム作成を行った。ここで、先行研究[1]の結果を図1に示す。この図は、BCC金属内における最も安定なサイトであるTサイト間を水素が拡散するときのポテンシャル障壁を示している。この図よりポテンシャル障壁は温度によって大きく変化していることがわかる。そのため、本研究ではまずこの先行研究の結果を再現するようにプログラムの作成を行った。計算条件として、図2のような金属原子が128個の中に水素原子を1個配置した系を対象とした。ポテンシャルモデルとしては、金属構造をよく再現できるEmbedded atom methodポテンシャルを用いた。

最初に古典的なポテンシャル障壁を求めるためにNudged elastic band(NEB)法[2]の計算プログラムの作成を行った。NEB法は拡散経路の始点と終点を決め、その間にいくつかのイメージを配置しそのイメージに対して相互作用を計算する。この最終的なイメージの位置が水素の拡散経路にあたるMinimum energy pathを求めるものであり、これにより古典の場合のポテンシャル障壁の大きさを求めることができる。次に、求めた古典的なポテンシャル障壁を用いて経路積分セントロイド(CMD)法[3]による計算を行うためのプログラム作成を行った。CMD法は図3に示すようなビーズとその中心位置であるセントロイドからなるモデルに対して分子動力学計算を行うものである。各ビーズはバネで繋がれており、このビーズの広がり原子位置の不確定性を表す。これらのプログラムをより様々な温度条件で計算を行い、今後はポテンシャル障壁が量子効果によりどのような影響を受けるかを評価する。

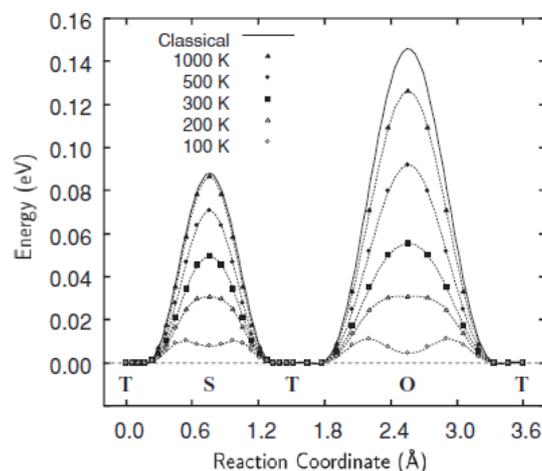


図1 量子効果によるポテンシャル障壁の温度依存性[1]

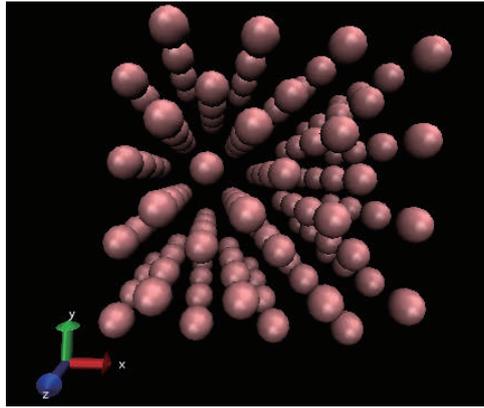


図2 本研究で対象とした計算系

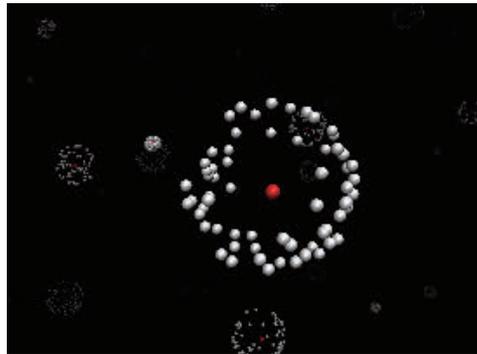


図3 CMD法における水素モデル。(赤がセントロイド, 白がビーズ)

- [1] H. Kimizuka, H. Mori. and S. Ogata, Physical Review B, 83, 094110, 2011.
- [2] G. Henkelman and H. Jonsson, J. Chem. Phys., 113,22,2000.
- [3] J. Cao and G. A. Voth, J. Chem. Phys., 99, 10070, 1993.

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

量子効果によるポテンシャル障壁の温度依存性の解析

金属内の水素拡散に影響を及ぼす量子効果の一つとしては原子位置の不確定性が考えられる。そのため本研究では、Nudged elastic band法を用いてMinimum energy path(MEP)を求めた。このMEPを用いて経路積分セントロイド法による計算を行うことで量子効果によるポテンシャル障壁の温度依存性を評価している。

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 井川祥平, 永島浩樹, 坪井伸幸, 徳増崇, 津田伸一  
二原子分子流体の臨界点近傍における静的・動的ゆらぎ構造の分子動力的解析  
日本機械学会2015年度年次大会, 札幌市

### 【研究費の獲得】

日本学術振興会特別研究員DC2採用



氏名 伊藤 潔洋

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

単粒子衝突試験システムによるコールドスプレー粒子付着挙動の機構解析

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度(平成27年6月～9月)は、コールドスプレー粒子付着メカニズムを明らかにするために自ら開発した単粒子衝突試験システム(SPITS)を用いて、直径1mmの純Alおよび純Cu粒子が様々な金属基材上に衝突する際の反発速度の測定を行った。Fig. 1に単粒子衝突試験システムの概略図を示す。本装置は、直径1mm前後の単粒子をヘリウムガスによって加速し高速で基材に衝突させる装置である。既知の寸法・形状を有する単粒子を衝突させることで、粒子の付着挙動に及ぼす粒子速度や運動エネルギーを正確に評価することができる。さらに、高速度カメラにより反発した粒子を撮影することで反発速度の測定も可能となる。

Table 1にこれまでの実験によって得られている各基材上における粒子の臨界速度を示す。臨界速度とは、粒子が基材上に付着できる最低限の速度を意味する。Table 1のように、臨界速度は基材によって大きく異なることが明らかになっている。反発エネルギーはこの臨界速度の顕著な違いを生む要因の一つと考えられることからその測定を試みた。

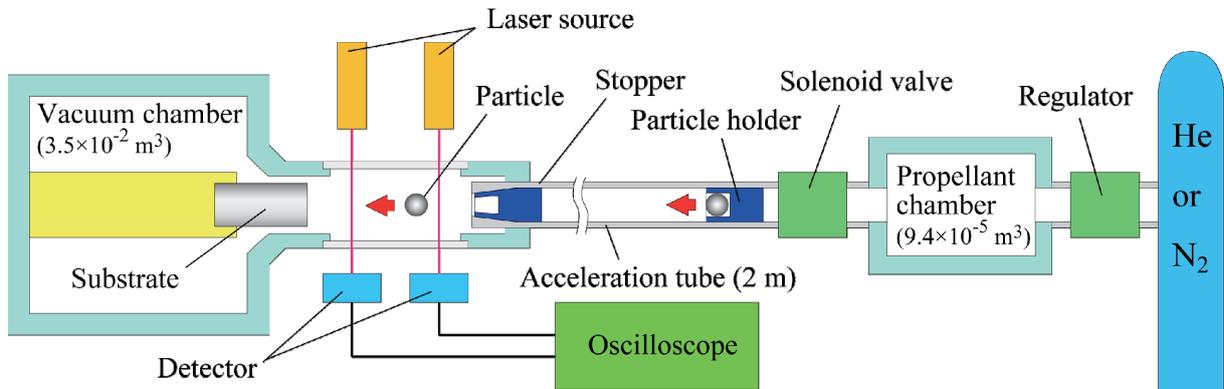


Fig. 1 Schematic illustration of single particle impact testing system (SPITS)

Table 1 Critical velocity of Al and Cu particles deposited on each substrate material

	Substrate material				
	Al	Cu	Ni	Ti	S15C
Al particle	353 m/s	301 m/s	296 m/s	500 m/s	432 m/s
Cu particle	No deposition	216 m/s	260 m/s	294 m/s	282 m/s

SPITSを用いAlおよびCu粒子を各基材上へ衝突させた場合の各衝突速度における反発速度をプロットしたグラフをFig. 2に示す。Table 1に示した臨界速度からも分かるように、通常粒子はある速度を超えると付着してしまうためその時の反発速度は測定することはできない。たとえ臨界速度以下であったとしても粒子/基材間の相互作用の影響は無視できない。そこで、可能な限り理想的な反発速度を測定するため、基材表面にフッ素系のコーティングを施しそこに粒子を衝突させた。その結果、臨界速度以上でも粒子が付着することなく反発させることに成功した。またFig. 3に示す有限要素法を用いた反発速度

の数値解析結果と実験結果が良く一致していることが確認されたため、実験結果は理想に近い反発速度を示しているものと考えられる。

Fig. 2 (a)において、CuやNi基材上におけるAl粒子の臨界速度である300 m/s付近に着目すると、Al基材上の反発速度のみ高い値を示しているものの、それ以外の基材については反発速度に顕著な差が無いことが確認された。従って、CuやNi基材に比べTiやS15C基材で高い臨界速度を示したのは反発速度が要因ではないことを明らかにした。

またFig. 2 (b)において、Ni基材上におけるCu粒子の臨界速度である260 m/s付近に着目すると、Cu基材上の反発速度のみ低い値を示しているものの、それ以外の基材については反発速度に顕著な差が無いことが確認された。従って、Ni、TiおよびS15C基材における臨界速度の顕著な違いは反発速度が要因ではないことを明らかにした。

今後反発速度以外の要因(結合エネルギー、粒子・基材の塑性変形量、自然酸化膜の除去し易さ)についても臨界速度に及ぼす影響を明らかにしていくことがコールドスプレー粒子の付着メカニズム解明につながるものと期待できる。

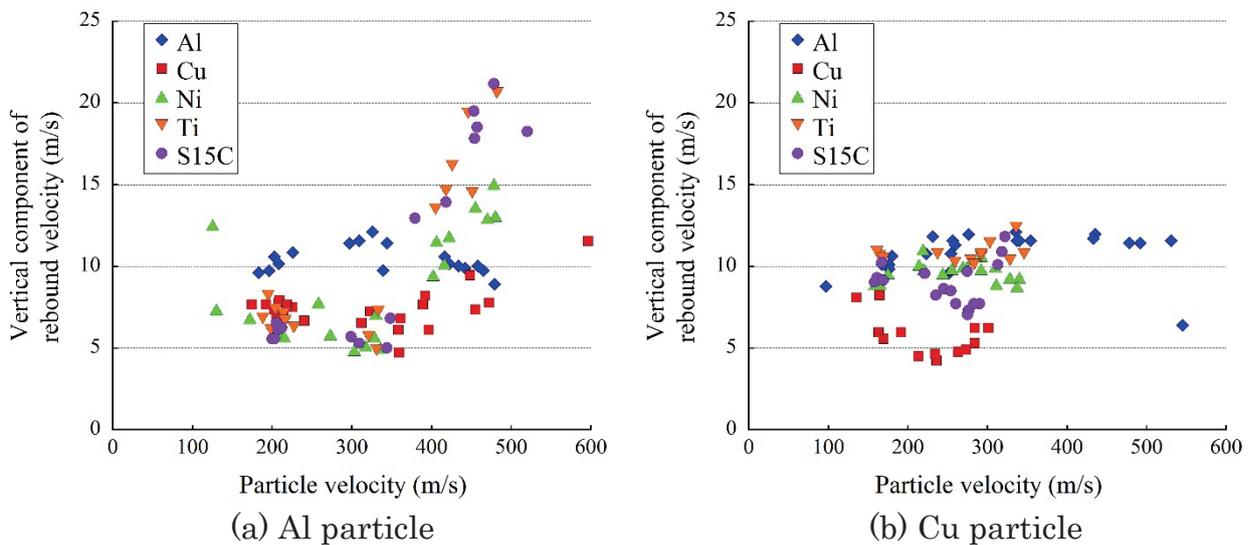


Fig. 2 Rebound velocities of each particle measured by a high speed camera.

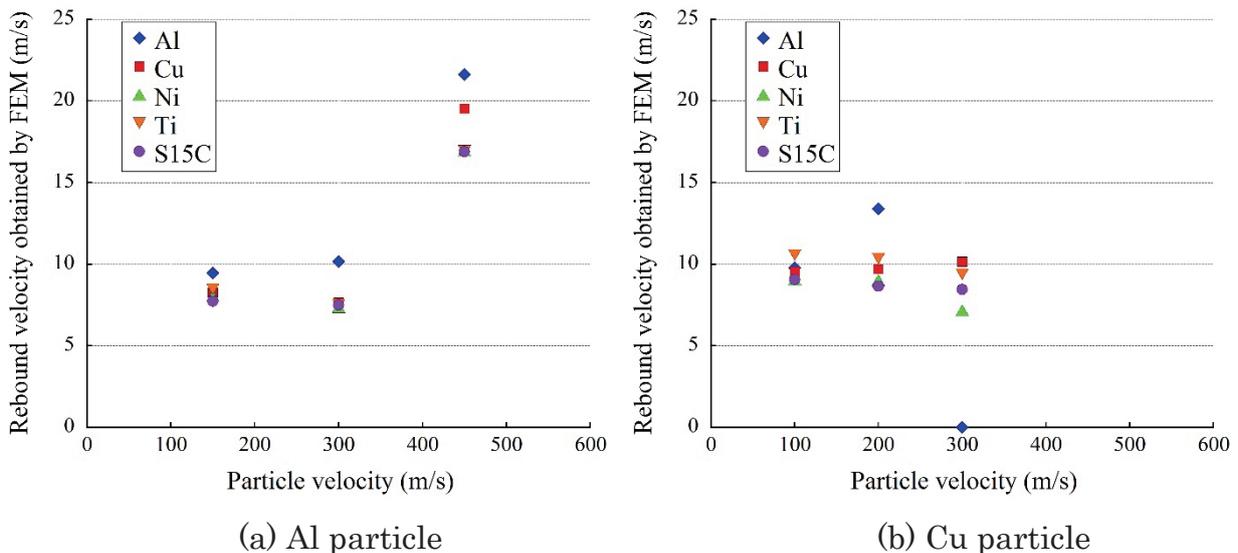


Fig. 3 Rebound velocities of each particle calculated by a finite element method.

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 単粒子衝突試験システムによるコールドスプレー粒子付着挙動の機構解析  
単粒子衝突試験システムを用いて純Alおよび純Cu粒子の様々な金属基材上への付着挙動を詳細に分析することで付着メカニズムの解明を試みている。これまでに反発エネルギーは付着に影響を及ぼす一因子にすぎないことを明らかにしている。

氏名 伊藤 真澄



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

粒子法によるTIG溶接の溶融池形成シミュレーション

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

粒子法による溶接計算手法開発のための取り組みの一環として、計算手法の妥当性確認のために、種々の計算を行った。

図1は、水滴に扁平楕円体形状を初期条件として与えた場合の形状時間変化を示す。上下に潰れた円盤状の滴は、表面張力の効果により球形に丸まる方向に変形していく( $t=0\sim 120\text{ms}$ )。その後、惰性により上下に伸び、ひょうたん状(460ms)や、2球体をつないだような特徴的な形状(560ms)が現れる。この計算は過去に行われた微小重力下実験と比較できるように条件を合わせており、計算結果の形状と各時刻は実験とよく一致した。

図2は振動する壁面上に置かれた水滴の内部で流動の起きる様子を捉えたものである。(a)は比較のための振動のない場合の計算であり、この場合は濃色のマーカーが殆ど移動していないことがわかる。一方の、壁面が周期 $T$ で上下に振動する条件では、液滴の左側に置かれたマーカーが右側へ移動している。壁面振動により流動が現れる様子が捉えられた。

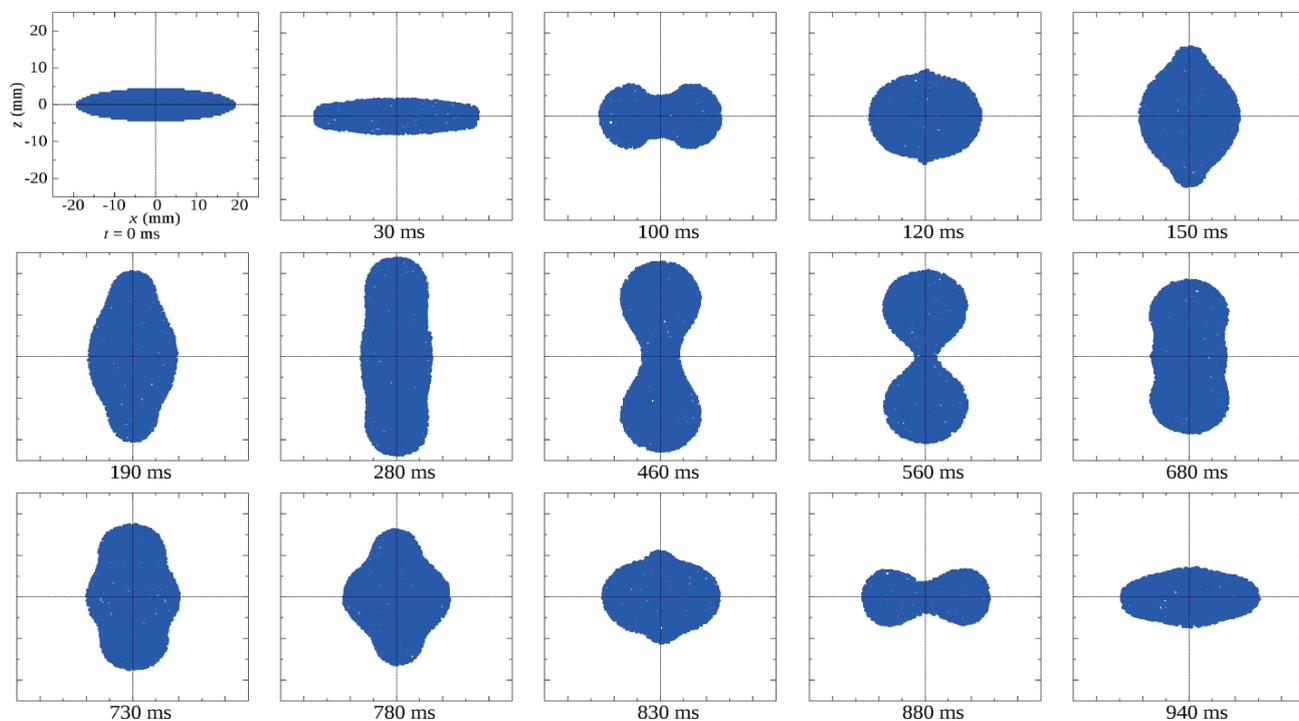


図1 扁平楕円体の初期形状を与えられた液滴の時間変化。

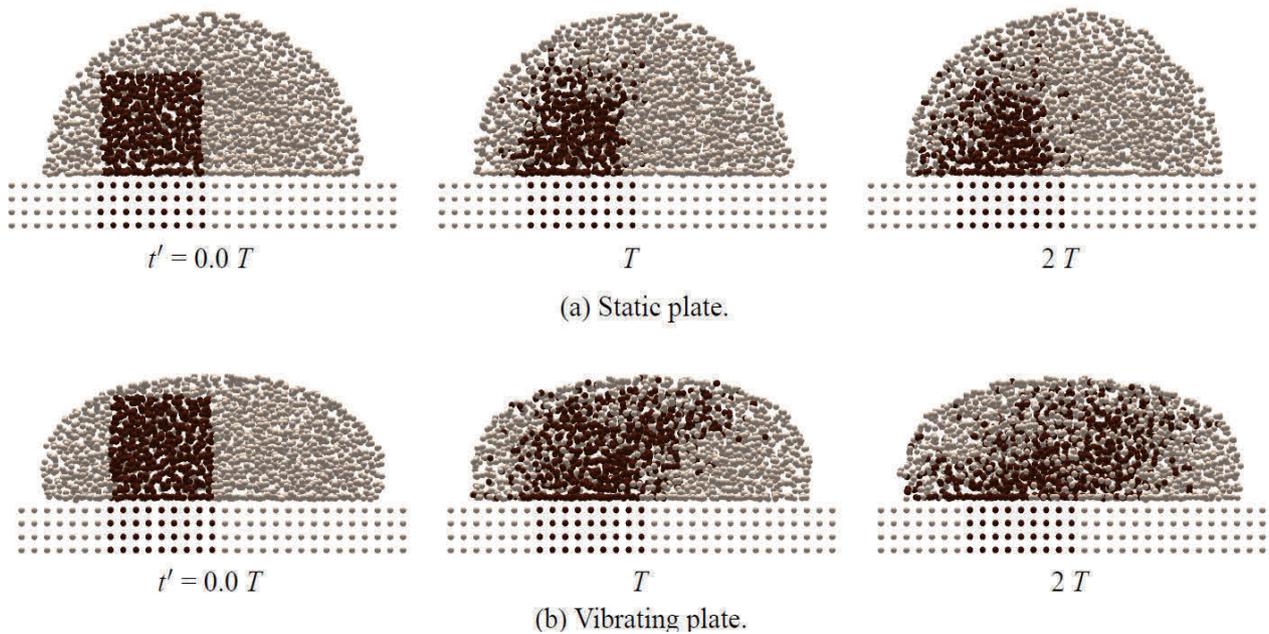


図2 振動する固体面に置かれた水滴の内部流動.

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Masumi Ito, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi, and Masaya Shigeta  
Numerical Simulation of Joining Process in a TIG Welding System Using Incompressible SPH Method  
Japan Welding Society Journal, Vol.33, No.2 (2015), pp.34s–38s.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Masumi Ito, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi  
Incompressible SPH Simulation of Droplet Deformation  
Twelfth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, (October 27-29, 2015), pp.802-803(USB).
2. 伊藤真澄, 西尾悠, 伊澤精一郎, 福西祐  
固体面上に置かれた液滴の表面変形及び内部流動に関するSPHシミュレーション  
日本機械学会2015年度年次大会・講演論文集, (2015-9), CD-ROM.

氏名 加藤 昂大



所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D2

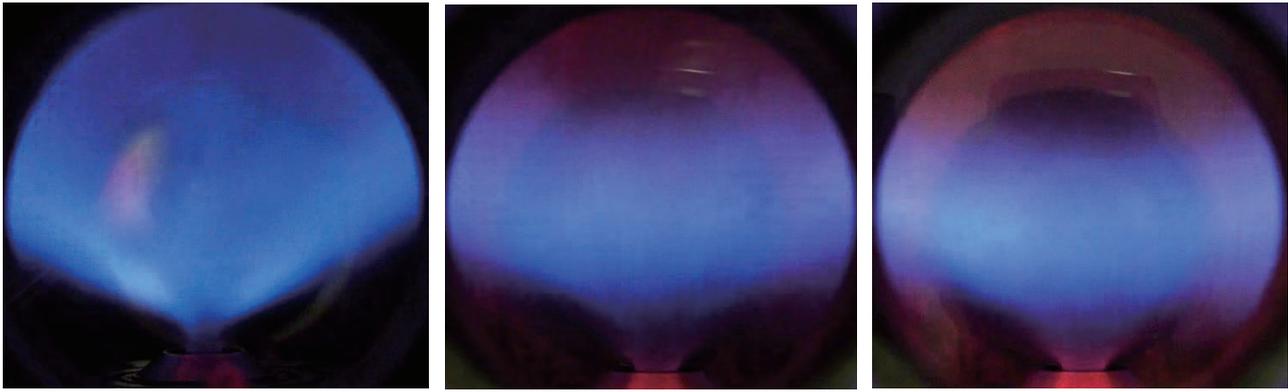
研究課題

同軸気流噴射弁の噴霧形成過程および噴霧燃焼過程に及ぼす雰囲気圧力と液体物性値の影響に関する研究

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

希薄燃焼は、燃料消費量が少なく二酸化炭素や窒素酸化物などの燃焼排出物の排出量が少ないといった利点を持ち注目されているが、燃料希薄状態であるため安定した火炎を形成することが難しい。特に、航空用ガスタービンエンジンでは噴霧燃焼が用いられ、液体燃料の微粒化、蒸発、酸化剤との混合、燃焼といった4つの過程が同時に生じるため、ガス燃焼と比較して火炎が吹き飛び易い。また、航空用ガスタービンエンジンの運用環境は、燃焼室圧力が1.0 MPa～4.0 MPaの間で変化する。幅広い圧力範囲で希薄燃焼のような不安定な火炎を維持するためには、噴霧燃焼特性に対する雰囲気圧力の影響を調べるとともに、噴霧形成過程にまで立ち入って燃焼メカニズムを明らかにする必要がある。そこで、本年度は高圧環境下でのエタノール噴霧燃焼試験を行い、火炎吹き飛び限界を調べた。加えて、非燃焼場において火炎吹き飛びが生じる条件下でのエタノール噴霧の噴霧粒径を調べ、吹き飛びが生じる要因について噴霧特性の観点から考察した。

試験を行った燃焼室圧力 $P_c$ は0.1, 0.3, 0.4 MPaである。液体燃料には、エタノールを用いた。これは、エタノールが蒸発しやすく、空気予熱を必要としないため容易に燃焼できることから使用した。図1(a), (b), (c)に空気流速 $U_A$ は28.1 m/s、当量比は0.8程度における噴霧火炎画像を示す。なお、大気圧下でのみ当量比1.2であるが、これはこの空気流速条件下では、希薄領域で安定した火炎を形成することができないためである。一方で高圧環境下では、エタノール噴霧火炎は当量比が0.8程度の希薄燃焼域においても安定した火炎を形成することができ、大気圧の場合と比較して火炎の長さが短くなる。また、圧力が高くなるにつれて火炎の発光強度が強くなっていることが分かる。図2にエタノール噴霧火炎の吹き飛びと空気流速の関係を示す。エタノール噴霧火炎の吹き飛び限界曲線は、空気流速が高くなるにつれて当量比が1よりも低い希薄燃焼領域まで広がる。 $P_c = 0.3$  MPaでは、大気圧下と同様に空気流速が高くなるにしたがって吹き飛び限界曲線が希薄燃焼側へと広がり、当量比が0.7程度の領域でも保炎することが可能になった。高圧環境下では、空気流が持つ運動量が圧力に比例して大きくなるため微粒化が促進される。また、空気流の質量流量が増加するため、供給する液体燃料の質量流量が増加し、大気圧下と比較して単位体積当たりの発熱量が高い。そのため、液滴が蒸発しやすく当量比が0.7程度の領域まで保炎範囲が広がっていると考えられる。噴霧火炎における火炎吹き飛びは、反応を持続するために必要なエネルギーが空気流もしくは液滴の蒸発によって奪われ、十分に供給されないために生じると考えられる。そのため、噴霧液滴の粒径および空間数密度は火炎吹き飛びと密接な関係にあると言える。そこで、非燃焼場においてエタノール噴霧に対して、高速度観察およびPDPAを行い、噴霧の形態を把握するとともにエタノールの液滴粒径および軸方向流速の計測を行った。図3(a), (b)に $P_c = 0.1, 0.3$  MPa、 $U_A = 40$  m/s における火炎吹き飛び時の燃料流量条件における高速度撮影画像を示す。燃料流量はそれぞれ当量比0.9および0.65に相当する流量である。各画像の右上にはPDPA計測から算出したSMD(ザウター平均粒径)を示す。大気圧下では、噴射弁先端部から噴霧液滴が放出された後に液滴が周方向へと分散し、液滴空間数密度が高い領域が見られなくなる。一方で $P_c = 0.3$  MPaでは、噴射弁直後から肉眼で確認することのできない程度の粒径まで微粒化された液滴が、下流側へと噴霧濃度が濃い領域として広がっている。このことから、高圧下では、噴霧粒径が小さいことも保炎範囲を広げる要因として考えられるが、噴霧液滴の空間数密度が高いことから局所的に当量比が1に近い領域が形成され、火炎を安定させるとともに保炎範囲を広げているのではないかと推測される。



(a)  $P_C = 0.1 \text{ MPa}$ ,  $U_A = 28.1 \text{ m/s}$   
 $\Phi = 1.2$

(b)  $P_C = 0.3 \text{ MPa}$ ,  $U_A = 28.1 \text{ m/s}$   
 $\Phi = 0.88$

(c)  $P_C = 0.3 \text{ MPa}$ ,  $U_A = 28.1 \text{ m/s}$   
 $\Phi = 0.81$

1. 噴霧火炎画像

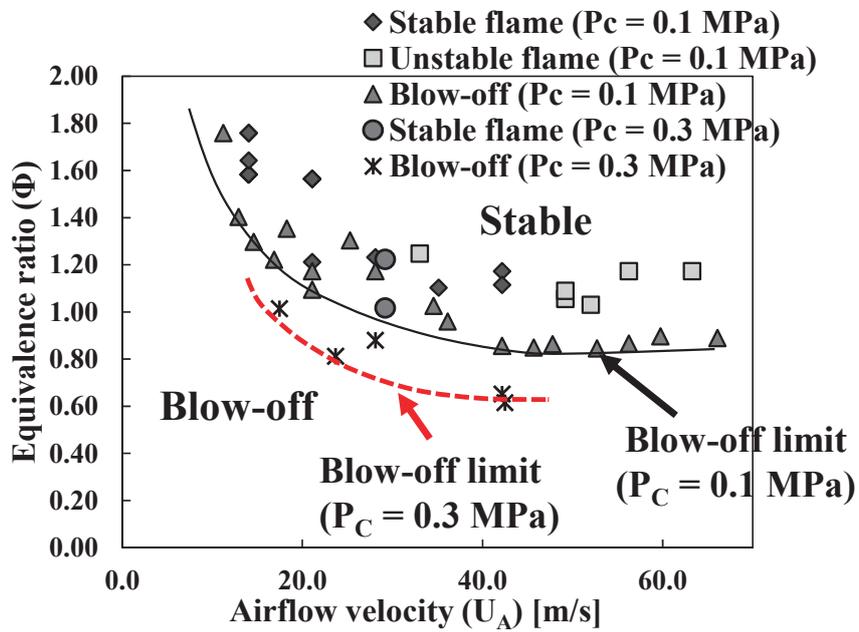
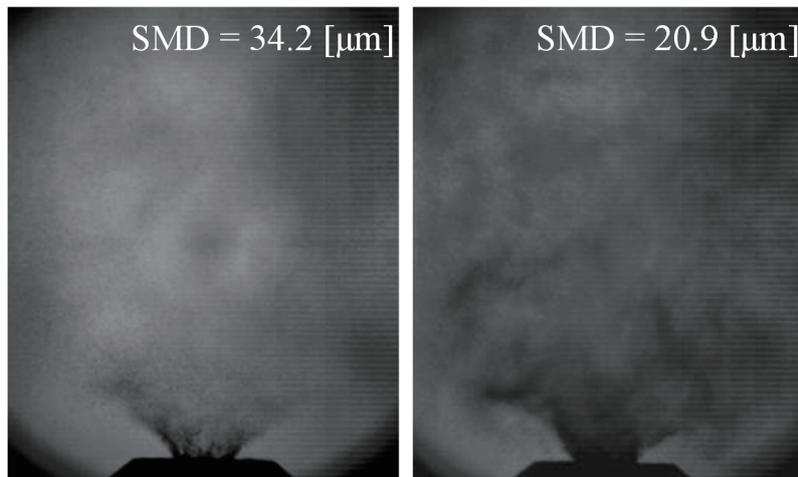


図2. 火炎吹き飛びと空気流速の関係



(a)  $P_C = 0.1 \text{ MPa}$ ,  $U_A = 40 \text{ m/s}$   
 $\Phi = 0.9$

(b)  $P_C = 0.3 \text{ MPa}$ ,  $U_A = 40 \text{ m/s}$   
 $\Phi = 0.65$

図3. 高速度撮影画像(エタノール噴霧)

## 平成27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：Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD)

主催団体：ICFD実行委員会

開 催 国：日本

開催期間：2015.10.27～10.29

役 割：OS16：The 11th International Students / Young Birds Seminar on Multi-scale Flow Dynamics セッションオーガナイザー

## 平成27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噴霧火炎吹き飛び特性に関する研究  
噴霧燃焼は、燃焼過程において噴霧特性の影響を強く受ける。航空用ガスタービンのような幅広い燃焼室圧力を運用環境として持つ燃焼機器において希薄燃焼を実現するためには、圧力に対する燃焼特性の変化を調べ、燃焼メカニズムを明らかにする必要がある。そのため、同軸気流噴射を用いて実験的に燃焼特性および噴霧特性の計測を行っている。
2. 交差流が液膜微粒化過程に及ぼす影響  
同軸気流噴射弁の噴霧形成メカニズムは旋回流を含むため未知な点が多く、基礎的な液膜微粒化過程と比べて大きく異なる。液膜への旋回空気流の効果は、周方向へのせん断効果、周方向への遠心力である。そこで、周方向へのせん断効果を模擬するため、交差流二次元模擬噴射弁を製作し、液膜微粒化過程への交差流の影響を調べている。
3. 高圧噴霧燃焼試験装置の設計  
同軸気流噴射弁では燃料微粒化に高速空気流を用いるため、高圧環境下では大量の高温燃焼ガスが排出される。安全な試験を行うためには、想定する試験に対して設計圧力、温度、排ガス流量を設定し、排ガス流量制御、冷却制御を含めて燃焼器の製作を行う必要がある。そこで、新たに燃焼室圧力が0.7MPaまで安全に試験が可能な高圧噴霧燃焼試験装置を設計し、製作を行った。

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Kodai Kato, Soichiro Suzuki, Taku Kudo, Soichiro Kato, Masahiro Uchida, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi  
Effects of cross-flow on liquid sheet break-up and droplet diameters for two-dimensional air-blast atomizer in high pressure environment  
Twelfth International Conference on Flow Dynamics, OS2-27, Sendai, October, 2015.
2. Kodai Kato, Taku Kudo, Soichiro Kato, Masahiro Uchida, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi  
Effects of Droplet Diameter on the Blow-off Limit of Ethanol Swirl Spray Flame at Elevated Pressure  
Proceedings of 53rd Symposium (Japanese) on Combustion, pp. 42-43.



氏名 加藤 茂樹

所属 医工学研究科医工学専攻・D3

研究課題

リンパネットワークを介した超音波とナノ・マイクロバブルによる薬剤送達法の開発

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、リンパ管経由で抗がん剤と微小気泡をリンパ節に送達し、外部から超音波を照射してリンパ節内の腫瘍細胞に抗がん剤の導入を試みた。従来の動物実験マウスではリンパ節の大きさが最大 1 mm 程度と小さく、リンパ節に注射してリンパ管に薬剤を投与することが困難であった。しかし、本研究では、成長するとリンパ節が恒常的にヒトのリンパ節と同等まで腫脹するリンパ節腫脹マウス MXH10/Mo-*lpr/lpr* の開発に成功した。このマウスのリンパ節は最大 10 mm 程度まで腫脹するためリンパ節への注射が容易であり、腸骨下リンパ節に注射した溶液は側腹部のリンパ管を經由して内側腋窩リンパ節 (以下、腋窩リンパ節) へ送達することが可能となった (図1)。はじめに、腋窩リンパ節に腫瘍細胞である KM-Luc/GFP 細胞を移植し、リンパ経路の上流側である腸骨下リンパ節に薬剤を注射してリンパ管を介して直接腋窩リンパ節に抗がん剤 (ドキシソルビン) の送達を行った。また、微小気泡として音響性リポソームをドキシソルビンと同時に注射して腋窩リンパ節に投与し、外部から超音波を照射することで腋窩リンパ節内にキャビテーションを誘導した。このとき、キャビテーションによる衝撃圧などの力学的作用によって、リンパ節内のリンパ洞からドキシソルビンを漏出させ、リンパ節内腫瘍組織深部にまで効果的に透過させた。ドキシソルビンの分布は、腋窩リンパ節の凍結切片を免疫染色することで可視化した。抗がん剤としてドキシソルビンを使用したことで、ドキシソルビンの蛍光 (赤) を顕微鏡で検出した。ドキシソルビンの腫瘍腋窩リンパ節内での分布は、超音波とナノ・マイクロバブルを併用したことで他の群より、有意にドキシソルビンの蛍光シグナル強度が増大した (図2)。

また、治療介入の影響による腫瘍腋窩リンパ節の病理組織学的変化を観察するため、パラフィンスライドを免疫染色して顕微鏡で観察し、血管密度を定量化した。その結果、PBS を単独で投与したコントロール群に対して有意に血管密度が減少していることが明らかになった。腫瘍血管密度と腫瘍の増殖率の間には相関があることが指摘されており、リンパ行性に抗がん剤と微小気泡を投与して超音波を照射すると腫瘍の増殖を抑制可能なことが明らかとなった (図3)。

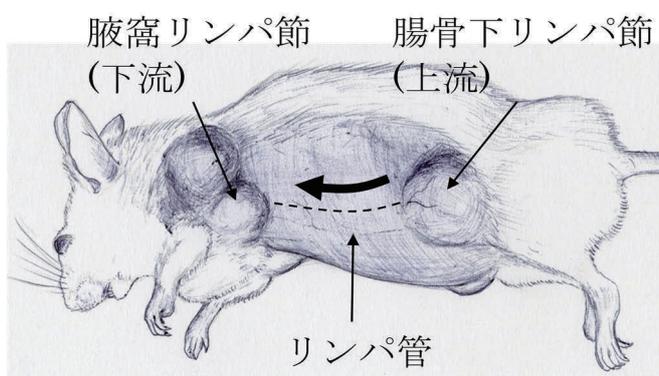


図1. MXH10/Mo-*lpr/lpr* の概略図

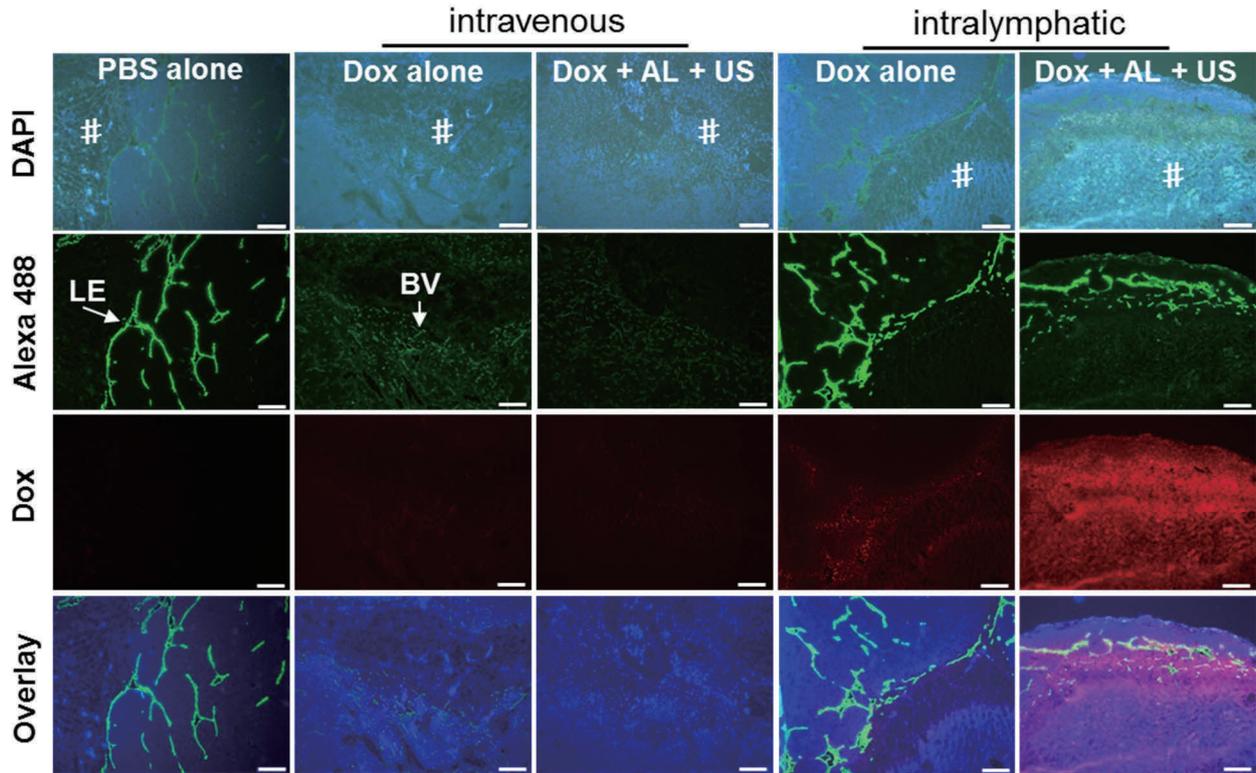


図2 腫瘍腋窩リンパ節の凍結蛍光免疫染色画像

DAPI は細胞核、Alexa 488 はリンパ管内皮 (LE) および血管内皮 (BV)、Dox はドキソルビシンの蛍光を示す。#: 腫瘍領域、scale bar は 200 μm を示す。Dox: ドキソルビシン、AL: 微小気泡、US: 超音波

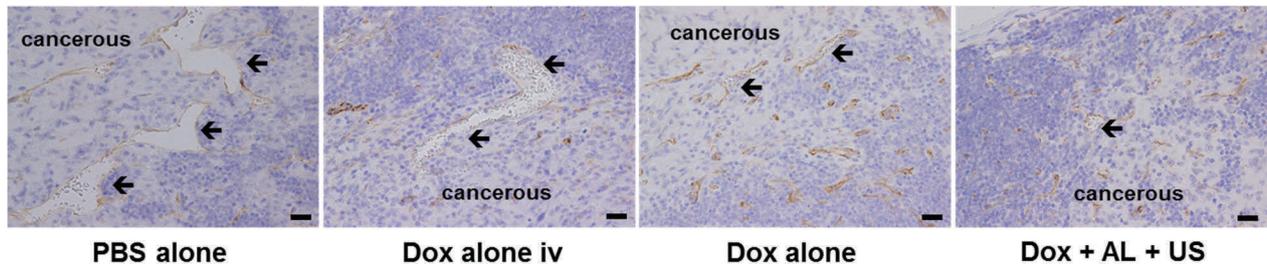


図3 腫瘍腋窩リンパ節のパラフィン免疫染色画像

矢印は血管腔を示す。Dox+AL+US において血管密度が減少した。

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 超音波と微小気泡による抗がん剤の腫瘍細胞への導入効率評価  
超音波と微小気泡によってもたらされる力学的作用がリンパ管内皮細胞および腫瘍細胞の細胞膜透過性を一過的に亢進させ抗腫瘍効果が增大するかどうか評価する。評価指標は、リンパ節の凍結切片を免疫染色することで、リンパ洞外への漏出を顕微鏡下の画像を取得し、ImageJ を用いて定量化する。
2. リンパ管を介した薬剤投与かつ超音波と微小気泡による抗がん剤の腫瘍細胞への導入効率評価 (*In vivo*)  
抗がん剤と微小気泡を同時に腸骨下リンパ節から注射し、リンパ管を介して腫瘍細胞を生着させた

腋窩リンパ節へ抗がん剤を投与する。抗がん剤あるいは微小気泡が腋窩リンパ節に到達したら外部から腋窩リンパ節内の腫瘍細胞へ導入を行う。治療効果の判定は、腋窩リンパ節を摘出してパラフィン切片とし、免疫染色を行った後、顕微鏡下で病理組織像を ImageJ で解析する。

#### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. **Kato S**, Mori S, Kodama T. “A novel treatment for lymph node metastasis using a lymphatic drug delivery system with nano microbubbles and ultrasound”  
*Journal of Cancer*. 6(12):1282-1294. 2015

#### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. **加藤茂樹**, 森士朗, 阪本真弥, 小玉哲也. リンパ行性薬剤投与とソノポレーションによる腫瘍リンパ節治療法開発. 第 31 回日本 DDS 学会学術集会, プログラム予稿集 48 頁, 2015 年 7 月 2 日-3 日 (京王プラザホテル, 東京都新宿区). [口頭発表]
2. **加藤茂樹**, 森士朗, 阪本真弥, 小玉哲也. ソノポレーション法によるリンパ球への遺伝子導入. 第 31 回日本 DDS 学会学術集会, プログラム予稿集 63 頁, 2015 年 7 月 2 日-3 日 (京王プラザホテル, 東京都新宿区). [ポスター]

#### 【受賞・特許等】

1. **Cover image** 採択  
**Kato S**, Mori S, Kodama T. “A novel treatment for lymph node metastasis using a lymphatic drug delivery system with nano microbubbles and ultrasound”  
*Journal of Cancer*. 6(12):1282-1294. 2015



氏名 川越 吉晃

所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D1

研究課題

ナノスケール多孔質体内における気体の流動特性に関する分子論的解析

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、多孔質体内流速モデルのマルチスケールにわたる適用への検討を行った。まず、本研究で取り扱うようなナノスケールの多孔質体においてはその構造が非常に複雑であるため、流れの代表長さを決定することが難しく、流動予測における1つの問題であった。また、ナノスケール流れは非平衡性が強く、従来の連続体として扱うことも不適切である。そこで昨年度、分子気体力学の観点から、流れの代表長さを推定し、Knudsen拡散による流速モデルを構築した。Fig. 1にこのモデルから見積もられた平均流速と数値シミュレーションによって得られた平均流速の比較を示す。ここで数値シミュレーションにはBoltzmann方程式の確率論的解法であるDSMC法[1]を用いた。また、比較のために従来の連続体力学に基づく経験式[2、3、4]も示す。図中の実線は縦軸と横軸の値が1:1の関係を表しており、この実線に近いほどモデルが良い予測を与えていると言える。また、図中の右上ほど流れのスケールが大きく、左下ほど流れのスケールが小さい。流れのスケールが小さいほど、従来の経験式とDSMC計算の差は大きくなっているのに対し、提案したモデルは流れのスケールが小さい領域ではDSMC計算とよく一致している。しかし、流れのスケールが大きくなると提案したモデルはDSMC計算との差が大きくなる。これは昨年提案したモデルが連続流の効果を無視しているためと考え、今回連続流の効果を考慮した流速モデルを提案した。Fig. 2に昨年度提案したKnudsen拡散のみの流速モデルおよび今回の連続流を考慮した流速モデルから見積もられた平均流速とDSMC計算から得られた平均流速の比較を示す。Knudsen拡散のみを考慮したモデルとDSMC計算との差が大きくなっていた領域でも、連続流を考慮したモデルはDSMC計算と良く一致しており、マルチスケールにわたって多孔質体内の気体輸送を良く再現することができた。これにより、様々なスケールを有する多孔質デバイス内の気体輸送特性を包括的に予測することが可能になると考えられる。

- [1] Bird, G.A., Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Clarendon, Oxford, (1994).
- [2] Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., Transport Phenomena 2nd ed., Wiley, (2002).
- [3] Jacob, B., Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier, (1972).
- [4] Dullien, F.A.L., Porous Media Fluid Transport and Pore Structure, Academic press, (1979).

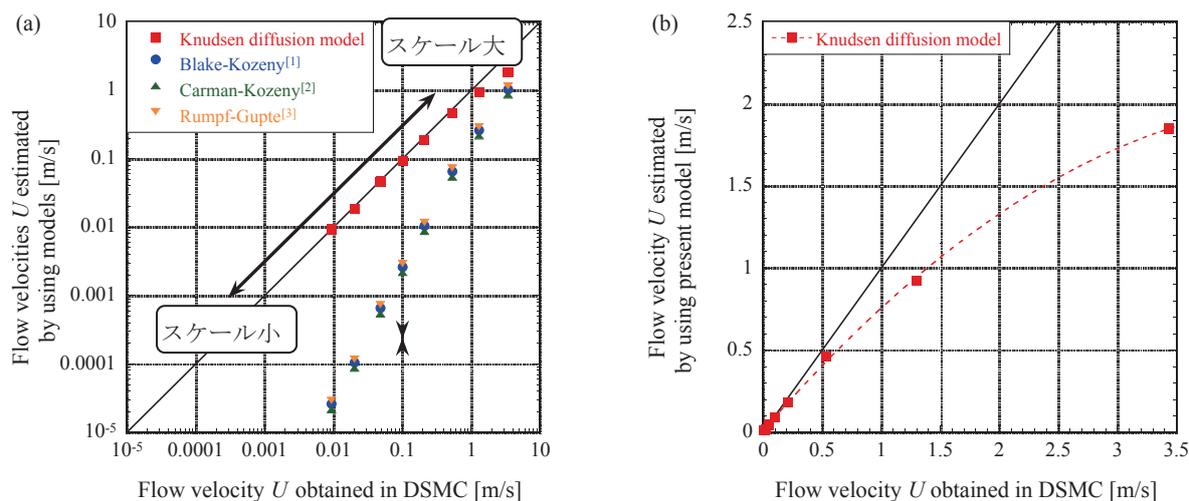


Fig. 1 Flow velocities estimated by using the Knudsen diffusion model and the conventional models based on continuum hypothesis versus flow velocity obtained in the DSMC simulations: (a) on double-logarithmic axes; (b) on linier axes. ( $\varepsilon=0.49$ ,  $\bar{p}=0.95$  atm,  $\nabla p=-0.3691$  Pa/nm)

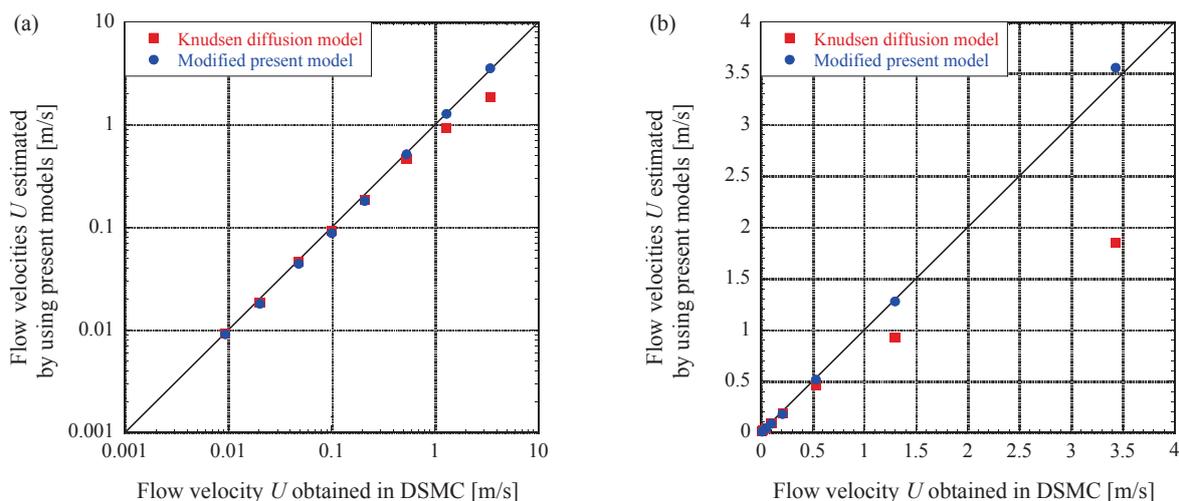


Fig. 2 Flow velocities estimated by using the present models versus flow velocity obtained in the DSMC simulations: (a) on double-logarithmic axes; (b) on linier axes. ( $\varepsilon=0.49$ ,  $\bar{p}=0.95$  atm,  $\nabla p=-0.3691$  Pa/nm)

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

・ ナノスケール多孔質体内流速モデルのマルチスケールへの拡張  
 昨年提案したナノスケール多孔質体内の輸送特性を予測するモデルに連続流による効果を組み込み、マルチスケールにわたって適用できるモデルへの拡張を行った。

**【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】**

1. 川越吉晃, 米村茂, 徳増崇  
多孔質体内ナノスケール気体流れの流動特性に関する研究  
日本機械学会2015年度年次大会講演論文集, 札幌市, J0540202 (2015. 9. 13-16)
2. 川越吉晃, 米村茂, 徳増崇  
多孔質体内ナノスケール気体流れの輸送特性に関する研究  
日本流体力学会年会2015講演論文集, 東京都目黒区, 044 (2015. 9. 26-28)
3. Yoshiaki Kawagoe, Shigeru Yonemura, Takashi Tokumasu  
Modeling of Pressure-driven Gas Flow in Nanoscale Porous Media  
Twelfth International Conference on Flow Dynamics Proceedings, Sendai, 834-835 (2015. 10. 27-29)

**【研究費の獲得】**

平成28年度日本学術振興会特別研究員(DC2)採用内定



氏名 小林 友哉

所属 工学研究科機械システムデザイン工学専攻・D1

研究課題

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条件におけるメタン予混合火炎の燃焼特性

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、超希薄条件におけるメタン火炎の詳細化学反応機構評価を行い、希釈ガスが混合気の反応性に与える化学的影響及びそのメカニズムを明らかにした。手法として、本研究で新たに開発した縦型の温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた(図1)。温度分布制御型マイクロフローリアクタとは、消炎直径以下の内径を有する石英管を外部熱源により加熱し、混合気を管内へ流入・自着火させることで酸化過程を観察する装置である。縦型の温度分布制御型マイクロフローリアクタは、石英管を管軸に沿って同軸拡散バーナで加熱することにより、従来手法より温度勾配をなだらかにし、反応温度の分解能を向上させた。これを用い、 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$ 及び $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 予混合気の希釈率、燃料濃度を変化させ、燃料超希薄条件における詳細化学反応機構の評価を行った。その結果、最新の詳細化学反応機構であるAramco Mechanismや広く用いられているGRI Mechanism 3.0より、San Diego Mechanismを用いて得られる数値計算結果が実験結果と最も良く一致することが明らかとなった(図2)。また、火炎の定在位置から希釈ガスの量が多い場合及び燃料濃度が高い場合は混合気の反応性が低下することがわかった。さらに、実験及び数値計算の結果、Xe希釈火炎のほうが $\text{N}_2$ 希釈火炎の場合と比較して、反応性が高いことがわかった。混合気の種類が反応性に与える化学的影響を調べるために、San Diego Mechanismを用いて詳細に検討を行った。火炎位置に対する各素反応の感度を解析した結果、OHに関連した反応が大部分を占めることが明らかとなった(図3)。Xe希釈火炎及び $\text{N}_2$ 希釈火炎についてOH生成反応速度の違いを解析した結果、(R1)  $\text{H} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{O}$ がもっともOH生成に寄与することがわかり、希釈ガス種による反応速度の違いがこの反応で顕著に現れた(図4)。反応経路解析を行ったところ、R1は三体反応である(R10)  $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{M}$ の反応と競合関係にあることがわかり、この反応が促進された場合、R1が抑制されることが示された。三体としての衝突効率率はXeより $\text{N}_2$ の方が高いため、このメカニズムによって $\text{N}_2$ 希釈混合気の場合は反応性が低下することが明らかとなった。

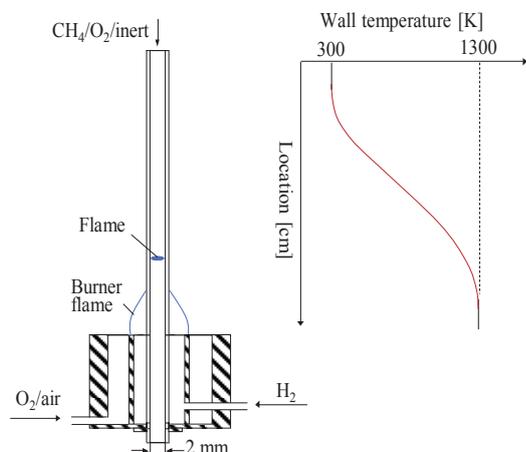


図1 縦型温度分布制御型マイクロフローリアクタの概略図

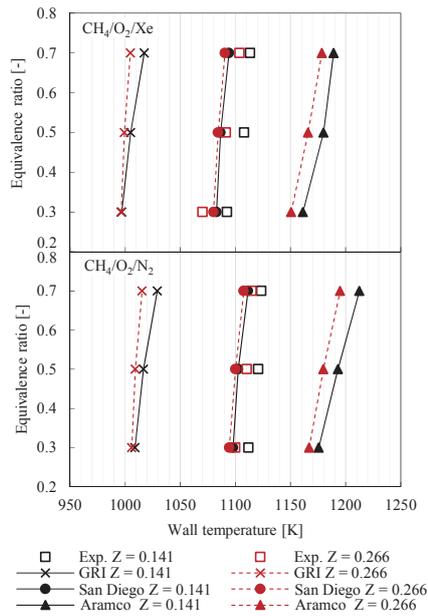


図2 数値計算および実験で得られた火炎位置の比較(V = 1.0 cm/s)

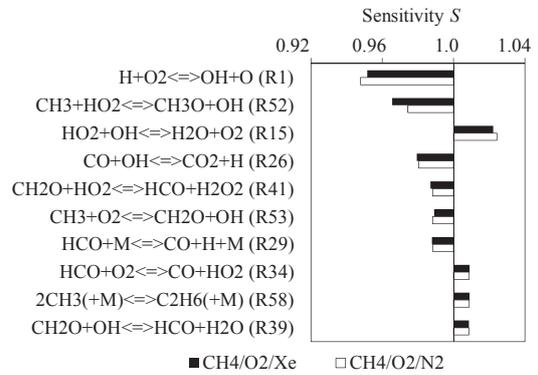


図3 火炎位置に対する感度解析結果 (V = 1.0 cm/s)

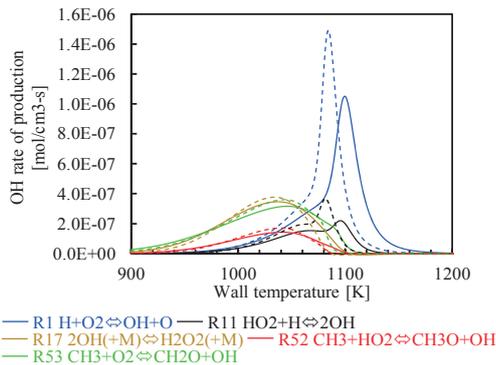


図4 OH生成速度の比較. 点線がXe希釈火炎, 実線がN<sub>2</sub>火炎

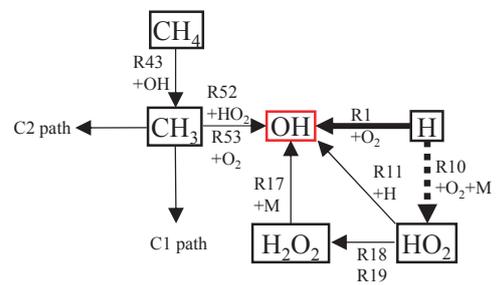


図5 OH生成に寄与度の大きい反応経路の概略図(V = 1.0 cm/s)

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 縦型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条件における詳細化学反応機構の性能評価・希釈ガスが混合気中の反応性に与える影響

従来の温度分布制御型マイクロフローリアクタより高精度の実験装置を構築し、これに基づいて実験及び定常数値計算を行った。

2. 高圧環境下において低温酸化反応が着火核成長過程に与える影響

ノッキング機構の解明に向け、ガソリン燃料の主成分であるノルマルヘプタンを燃料とし、温度分布制御型マイクロフローリアクタ内で観察される着火・伝播・消炎を繰り返すモード(FREI)を対象に非定常数値計算を行っている。

### 3. 拡散熱的不安定性が火炎の燃焼限界に与える影響

火炎の安定限界及び燃焼限界に関する知見は燃焼器開発に必要不可欠である。特に、物質拡散と熱拡散の不一致によって生じる不安定性が燃焼限界に与える影響については不明な部分が多い。これを解明するために独自の数値計算コードを開発している。

#### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. R. Fursenko, S. Minaev, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, T. Kobayashi, K. Takase, M. Katsuta, M. Kikuchi, K. Maruta  
Near-lean limit combustion regimes of low-Lewis-number stretched premixed flames, *Combustion and Flame*, Vol. 162, No. 5, pp.1712-1718 (2015).
2. T. Kobayashi, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Maruta,  
Ultra-lean combustion characteristics of premixed methane flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the Combustion Institute* (査読中)
3. T. Okuno, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Takase, M. Katsuta, M. Kikuchi, K. Maruta,  
Study on the combustion limit, near-lean limit extinction boundary, and flame regimes of low-Lewis-number CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> counterflow flames under microgravity, *Combustion and Flame* (査読中)

#### 【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

○平成27年(1月～12月)

1. T. Kobayashi, K. Takase, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, M. Katsuta, M. Kikuchi, K. Maruta,  
6th International Symposium on Physical Sciences in Space, 18Com-10, pp. 58.

#### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Twelfth International Conference on Flow Dynamics
2. 第53回燃焼シンポジウム

氏名 李 康一



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

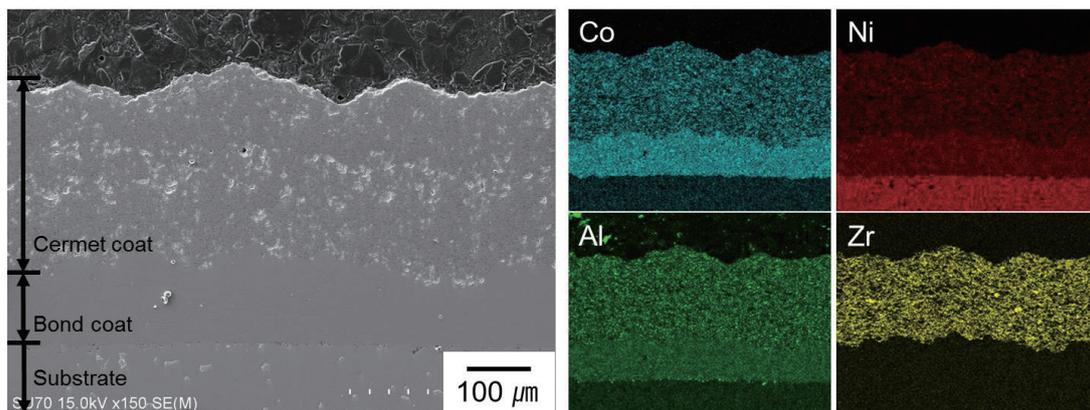
コールドスプレー法を用いた傾斜機能遮熱コーティングの新構想

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

In general, the fabrication of thermal barrier coatings (TBCs) of gas turbine blades, involves the application of a MCrAlY bond coat to a Ni-based superalloy substrate. A top coat of yttria-stabilized zirconia (YSZ) follows. However, failure of these conventional TBC systems has been reported to mainly result from the thermal expansion mismatch between the ceramic and metal coating layers of the systems. To overcome this mismatch, functionally graded materials (FGMs) have been introduced into TBCs; these are referred to as FGM TBCs. FGM TBCs were first proposed in order to obtain a material capable of withstanding the severe thermomechanical loading that occurs in structures and fusion reactors in spacecraft systems, ceramic engines, gas turbines, and diesel engines.

In this study, the cold-spray technique was applied to the fabrication of FGM-TBCs. Several advantages exist in manufacturing FGM-TBC using cold-spraying. The production cost is very low and deposition efficiency is very high, compared to thermal spray. However, the cold-spraying system has a severe problem with regard to deposition of ceramic materials.

To overcome this problem, cermet powder was applied to the fabrication of FGM-TBC. Here, a cermet powder is used to produce a FGM-TBC with a constant rate in each layer. Cermet powder is a composite material composed of ceramic and metallic materials. CoNiCrAlY/YSZ cermet powders with different compositions were prepared to deposit on CoNiCrAlY bond coated substrate.

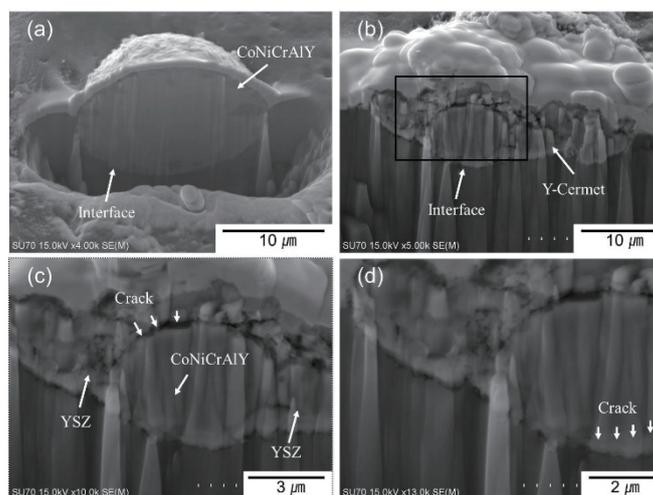


**Fig. 1.** Cross-sectional SEM image of the microstructure of the as-sprayed 25Y-cermet coatings and corresponding EDX mapping.

A cross-sectional SEM image and the EDX elemental mapping results of the 25Y-cermet coatings on a bond coat deposited by cold-spraying are shown in Fig. 1.

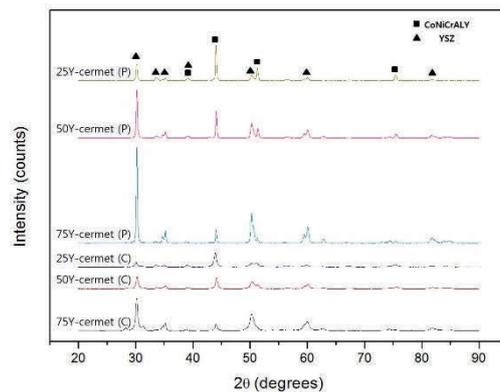
The EDX images depict two clearly distinguishable phases present in the coatings. A coating of

Y-cermet powder with well-distributed YSZ powders was successfully deposited by cold-spraying. The coatings show a homogeneous microstructure because the feedstock powders were mechanically blended, causing their agglomeration to form the spray particles. In addition, cracks and voids are nearly invisible both at the bonding layer between the coating and the substrate and within the coating layer itself. This confirms that the low-particle-velocity deposition of Y-cermet powder had a significant preventative effect against the rebound energy of the CoNiCrAlY powder, ensuring the even distribution of the YSZ powders.



**Fig. 2.** Cross-sectional micrographs of (a) CoNiCrAlY particle, (b) Y-cermet particle at 5000 $\times$ , (c) Y-cermet particle at 10000 $\times$ , and (d) Y-cermet particle at 13000 $\times$ .

The particles were cut by focused ion beam (FIB) to observe the interface of the bonded area and investigate the deposition mechanism. Figure 2 shows the cross-sections of particles bonded on the Al substrate. To prepare the specimens by FIB, a 1–2  $\mu\text{m}$  W layer was deposited onto the particles. Then, the particle was cut by FIB using a 520 kV ion beam. To polish the cross-section, its area was treated for 5 min using a 150 kV ion beam. Figure 2(a) shows the cross-section of a sprayed CoNiCrAlY particle. As observed in the image, CoNiCrAlY is bonded with the induced transformation of the Al substrate, as a result of the very high hardness of the superalloy particle. The particle also experiences transformation; however, the particle is not destroyed. Meanwhile, in case of Y-cermet powder in Fig. 2(b-d), the particle is confirmed to be destroyed on collision with the substrate. This indicates that the Y-cermet cannot withstand the impact energy as a result of its low hardness. With ceramic materials, their deposition is commonly known to be very difficult because of their lack of ductility. Some materials coated by cold-spraying are also only capable of deposition in very specific circumstances. With the Y-cermet powder, although the particles are destroyed by their high collision energy, cold-spraying can successfully deposit ceramic materials with metallic materials. As shown in Figure 2(b), the Y-cermet particle is deposited over a wide area; cracks inside of the particle are observed. In the EDX results, cracks were found between the nano-YSZ and CoNiCrAlY in the Y-cermet. After collision, the particle is crushed by its high impact energy. Additionally, in Figure 2(d), nano-YSZ is confirmed to exist between the CoNiCrAlY particle and the Al substrate. After the collision, the CoNiCrAlY particle compresses the YSZ particle using the collision energy; consequently, this is expected to produce a denser coating.



**Fig. 3.** XRD profiles of the Y-cermet powders (P) and the cold-sprayed Y-cermet coatings (C).

X-ray diffraction (XRD) analysis was used to determine the materials and phases present in both the mechanical powder blends and the fabricated coatings. Fig. 3 shows the XRD spectra of the representative feedstock powders and coatings. Only peaks corresponding to phases of YSZ and CoNiCrAlY exist in the patterns of the as-sprayed coatings, identical to those of the feedstock powders. This suggests that no phase transformation occurs in the cold-spraying of Y-cermet under our experimental conditions. Moreover, no metal oxidation is observed at the cold-sprayed deposited surface, as a result of its low deposition temperature and the inert gas atmosphere (N<sub>2</sub>) of the process. XRD also provides the relative amounts of materials present in a given mixture. The primary peaks of YSZ and CoNiCrAlY are at the 2θ angles of approximately 30° and 44°, respectively.

In the present study, the mechanically agglomerated and sintered cermet powders of YSZ/CoNiCrAlY and its cold-sprayed coatings were investigated.

The Y-cermet powder containing well-distributed YSZ powders was successfully deposited by the cold-spray process. The results showed a homogeneous microstructure because the feedstock powders were mechanically blended and agglomerated to form the spray particles. Moreover, no metal oxidation was found at the cold-sprayed deposited surface, as a result of the reaction's low temperature and inert gas atmosphere (N<sub>2</sub>). Consequently, the cold-spray system is a suitable method to manufacture FGM-TBCs using Y-cermet powders, especially considering its low cost and simplicity. However, some remaining problems, such as the formation of pores and generation of cracks by high pressure, must be solved before this process is implemented commercially.

## References

- [1] A. Manap, A. Nakano and K. Ogawa: J. Therm. Spray Technol. **21** (2012) 586-596.
- [2] D. Seo, K. Ogawa, Y. Nakao, H. Miura and T. Shoji:

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

コールドスプレー法を用いた傾斜機能遮熱コーティングの新構想をすることにより、ガスタービンの効率を向上させる発展させる大きな役割をするものと判断される。

**【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】**

1. K.I. Lee, K. Sato, K. Ogawa, “Mechanical Properties and Deposition Mechanism of Cold-sprayed CoNiCrAlY/YSZ Cermet”, Materials transactions, Accepted in Jan. 2016, in press (2016)

**【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】**

1. K.I. Lee, K. Sato, K. Ogawa, “Characteristics of cold-sprayed CoNiCrAlY/YSZ cermet powder and functionally graded materials coating”, 7<sup>th</sup> Asian Thermal Spray Conference, Xi’an, China (Sep. 2015)
2. K.I. Lee, K. Sato, K. Ogawa, “Microstructure and Mechanical Properties of Cold-sprayed Y-Cermet powder”, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, Toyohashi, Japan (Oct. 2015)



氏名 LI Yujie

所属 工学研究科バイオロボティクス専攻・D3

研究課題

狭窄を併発する脳動脈瘤内流れに基づいた治療法の開発

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

A silicone phantom of the patient-specific aneurysm was manufactured. To decrease the geometrical difference between the silicone phantom and the 3D model in CFD, the silicone phantom was scanned by a Micro-CT scanner, and reconstructed to a 3D model. Working fluid used in MRI has similar property to human blood. Corresponding boundary conditions and fluid properties were set in CFD, to ensure that flow conditions are the same in each method. Further results of 2D velocity vector profile and 3D streamline have been studied and compared.

From the comparison between MRI and CFD, the shape of the edge of the geometry shows some discrepancies, as well as the flow pattern around the wall, as shown in Fig.1 and Fig.2.

In summary, the low resolution and low velocity-to-noise ratio at the edge of the model in MRI measurement may affect the detection of geometry shape as well as the flow movement in the model, which need to be improved in future study.

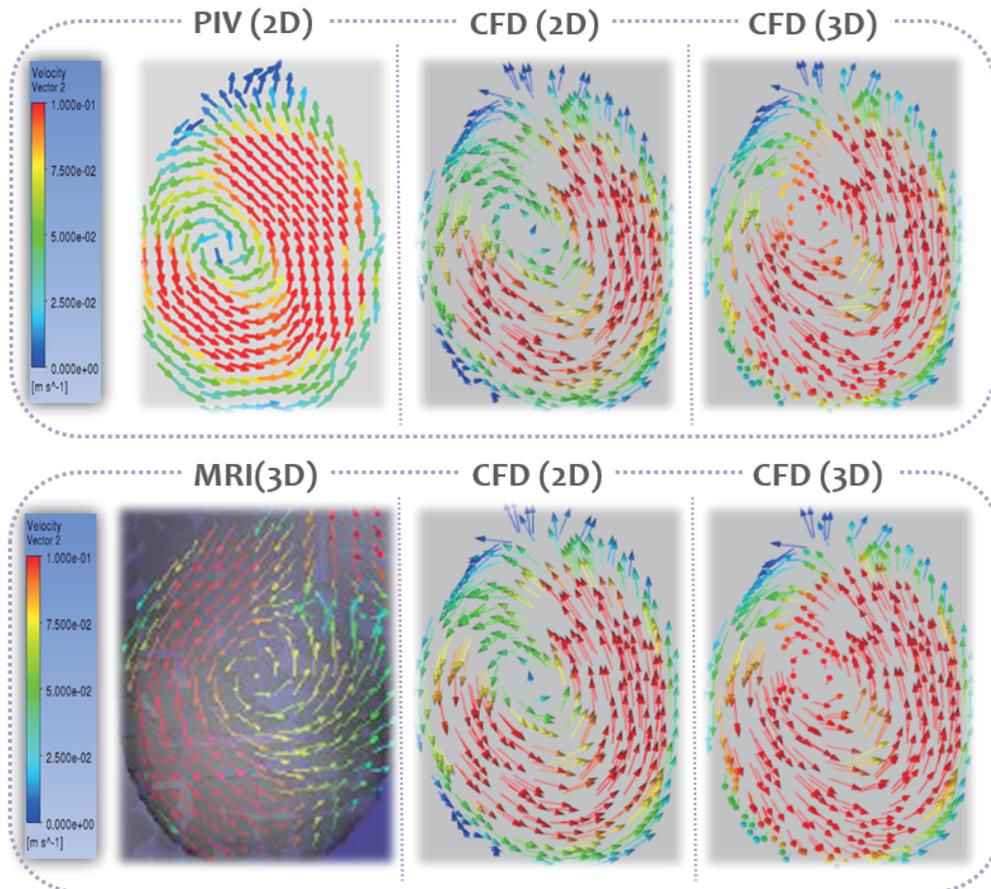


Fig. 1 Velocity vector on the target plane

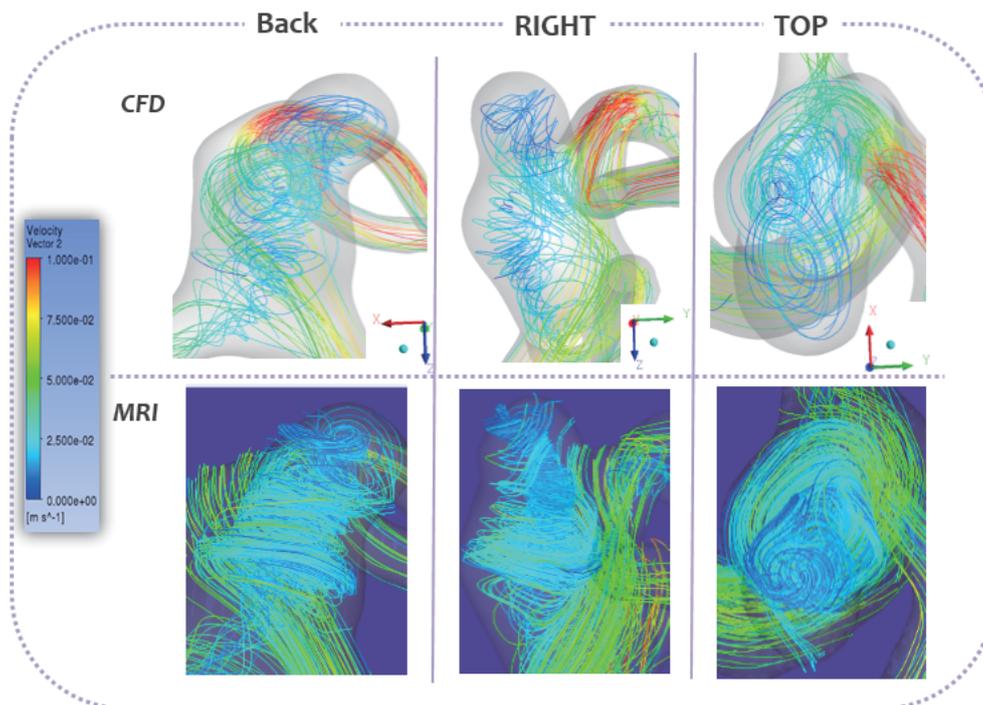


Fig.2 Comparison of Streamline between CFD and MRI results

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. Study the setting of boundary condition, and compare the difference among PIV, CFD and MRI.
2. Study the error factor, like the differences in velocity caused by the position of target plane and the calibration.
3. Study and compare the 2D velocity distribution on the center of the target plane, as well as the streamline.

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Yujie Li, Yuuya Yoneyama, Haruo Isoda, Takafumi Kosugi, Takashi Kosugi, Makoto Ohta, Comparison between CFD and MRI with 2D velocity vector field and 3D streamline in the cerebral aneurysm, *Interdisciplinary Cerebrovascular Symposium & Intracranial Stent Meeting*, Gold Coast, Australia, 13-14 November 2015.
2. Yujie Li, Makoto Ohta, Comparison of the velocity vector field under different boundary conditions in a complex geometry with different experimental methods and numerical simulation, *China-Japan Joint Workshop on Flow Dynamics and Transport Phenomena*, Tsinghua University, Beijing, China, 2015

氏名 松尾 翔平



所属 工学研究科化学工学専攻・D1

研究課題

数値シミュレーションを用いた高炉用コークスにおける強度支配因子の  
解明

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は高炉内におけるコークスの破壊挙動を予測するために、実際のコークスを想定した破壊解析手法の検討を行った。

炉内の通気通液性を確保するために、高炉用コークスには高い強度が求められている。コークス強度に対して支配的な因子は、コークスの微視構造である。既往の研究において、X線CTによる撮像結果を基にFEMによるコークスの三次元応力解析[1]が行われており、コークスの三次元的な微視構造がコークスの剛性や応力分布に影響を及ぼしていることが明らかにされている。一方で、我々の研究グループでは離散的解析法にもとづく破壊解析を実施することにより、負荷下におけるコークス内の応力分布に加えて、破壊の挙動についても検討している。しかしながらこれまで、三次元の実際のコークスに対しての破壊解析は行われていない。そこでX線CTによって取得したコークスの三次元微視構造をもとに解析対象を作成し、破壊解析を行った。

まず、マイクロX線CT(ScanXmate D160TS110, コムスキャンテクノ)を用いて $\phi 20 \times 10$  mmの円柱に成型した室炉コークスを撮像した。解析対象として $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ のX線CT領域を用いた。X線CT画像を輝度に基づいて気孔および基質に分別した。さらに、規則的ではなく自然な形状の亀裂進展を表現するために、直方体である基質のボクセルに対してMarching Tetras法[2]を用い、四面体の要素に分割した。次に、現実的な時間での破壊解析を実施するために、要素の辺の縮約およびメッシュの品質を向上させる幾何学的な操作[3]を行い、メッシュ数を削減した。破壊解析法は、解析対象を剛体とそれらをつなぐばねと考える離散的な解析手法のRigid-Bodies Spring Model(RBSM)[4]により実施した。境界条件は引張とし、材料物性は実際のコークスの値を参考にした。Table 1に材料物性を示す。なお、開発したプログラムの力学的な精度を検証するために、片持ちはりの解析を実施し、力学解析の精度の高い有限要素法(Finite Element Method, FEM)と比較したところ、FEMと同様の変形挙動が示されたため、本手法が妥当性であることを確認している。

数値解析の結果、コークスの構造が崩壊に至るまでの破壊解析を行うことができた (Fig. 2)。また、負荷にともないコークスの破壊が進行したために、荷重ひずみ線図は非線形性を示した (Fig. 3)。本手法を用いることにより、実際のコークスにおける形状を考慮した破壊解析が実施可能であることが示唆された。

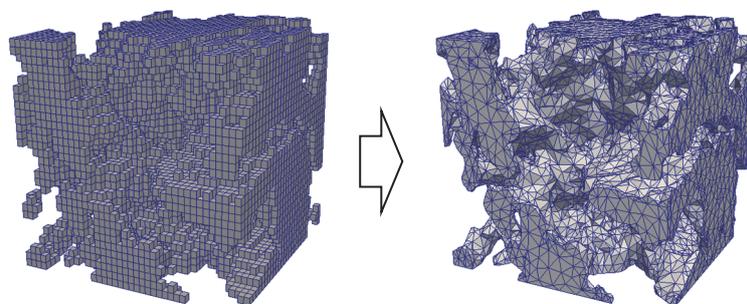


Fig. 1 X線CT像を基にした非構造メッシュの作成

Table 1 材料物性

弾性係数	[GPa]	25
ポアソン比	[-]	0.2
引張強度	[MPa]	7
最大亀裂幅	[mm]	0.02
せん断強度	[MPa]	17.3
内部摩擦角	[°]	32
圧縮強度	[MPa]	150

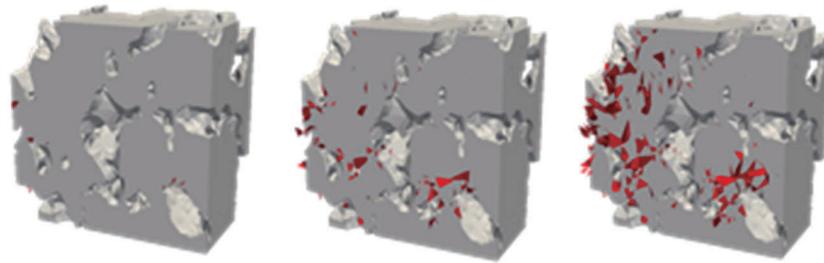


Fig.2 負荷の進行にともない進展する破壊の様子 (赤色：破断部位)

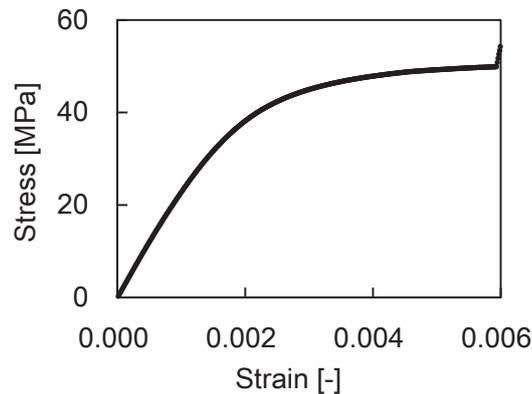


Fig.3 応力ひずみ線図

- [1] Hiraki, K., Yamazaki, Y., Kanai, T., Uchida, A., Saito, Y., Matsushita, Y., Aoki, H., Miura, T., Nomura, S., and Hayashizaki, H. (2012). Numerical Analysis of 3-D Microstructure of Coke Using Micro X-ray CT, ISIJ International, 52 (11), 1966-1972.
- [2] Labelle, F., and Shewchuk, J. R. (2007). Isosurface stuffing: fast tetrahedral meshes with good dihedral angles. ACM Transactions on Graphics, 26 (3), 57.
- [3] Cutler, B., Dorsey, J., and McMillan, L. (2004). Simplification and improvement of tetrahedral models for simulation. Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing, 93-102.
- [4] Toi, Y., and Kiyosue, T. (1995). Damage mechanics models for brittle microcracking solids based on three-dimensional mesoscopic simulations. Engineering Fracture Mechanics, 50 (1), 11-27.

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 実コークスの破壊解析に関する研究  
ぜい性材料の破壊挙動を再現可能な解析手法であるRBSM(剛体ばねモデル)を用いて、コークスのマイクロX線CTの撮像データから得られるコークス組織の情報を基に、コークス破壊現象を精度よく予測可能な解析手法の開発を行った。

### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Shohei Matsuo, Daisuke Igawa, Yuki Hara, Yukinori Miyamoto, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Noriyuki Okuyama, Takuya Yoshida,  
Fracture Analysis of Coke Considering with Three-dimensional Microstructure,  
International Conference on Coal Science & Technology (ICCS&T2015), Paper no. 3127378,  
Melbourne, Australia, September 27-October 01 (2015).
2. Daisuke Igawa, Shohei Matsuo, Yukinori Miyamoto, Yuki Hara, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Seiji Nomura, Kazuya Uebo, Hideyuki Hayashizaki,  
Three-dimensional Morphological Analysis of Coke Pore Structure Based on the Maximal Ball Method,  
International Conference on Coal Science & Technology (ICCS&T2015), Paper no. 3127321,  
Melbourne, Australia, September 27-October 01 (2015)
3. Yukinori Miyamoto, Daisuke Igawa, Shohei Matsuo, Yuki Hara, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Seiji Nomura, Kazuya Uebo, Hideyuki Hayashizaki  
Modeling of initial swelling phenomenon of softening coal based on solid mechanics,  
International Conference on Coal Science & Technology (ICCS&T2015), Paper no. 31273320,  
Melbourne, Australia, September 27-October 01 (2015)

### 【受賞・特許等】

受賞日：2016年3月23日

受賞名：日本鉄鋼協会 俵論文賞

組織名：日本鉄鋼協会

氏名 NGUYEN HOANG HUNG



所属 Department of Nanomechanics · D2

研究課題

C-axis tilted AlN film for vibration energy harvester

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

In recent years much attention has been paid on an AlN thin film as an alternative piezoelectric material to Lead Zirconate Titanate (PZT) in vibrational energy harvesters due to more concern to the environment and human health that asks society to restrict the use of lead in industry. Accordingly researchers have searched for lead-free piezoelectric materials for vibrational energy harvesters (VEHs) [1-3], among lead-free piezoelectric materials developed so far, an AlN (wurtzite structure) film has been considered as one of the most promising materials for vibration energy harvesters because of its high figure of merit (FOM) of output power density [4, 5]. Furthermore AlN, a semiconductor process compatible materials, can be easily integrated into silicon devices [4, 6].

In general people use [0001]-oriented AlN films which have c-axis oriented normal to the substrate surface because electromechanical coupling coefficient ( $k_{31}$ ) is large along this crystal orientation [10] and output power of the VEHs can be increased. However,  $k_{31}$  of the [0001]-oriented AlN is still smaller than that of PZT films [4, 6-9]. Thus it is important to further increase  $k_{31}$  of the AlN thin films, and tilting c-axis of the [0001]-oriented can be one effective approach [11, 12]

In this year (2015/01 to 2015/12), I investigated oblique sputtering conditions to deposit tilted c-axis, stoichiometric AlN thin film on Si (100) substrates. By changing conditions and using N<sub>2</sub> plasma, I have optimized the deposition process to get high crystallinity thin film of AlN. Obtained thin film showed high density and smoothness. The thin film consisted of c-axis (002) oriented. I have also clarified by changing substrate temperature and using oblique deposition method, I successfully grown AlN films with the c-axis tilt angle of more than 15°. In addition we prepare AlN films with different c-axis tilt angle for the future investigation of  $k_{31}$  of the c-axis tilted AlN films and fabrication of high output power VEHs.

For more details, Figure 1 shows a schematic of the sputtering set up for incident angle deposition of the AlN films. A substrate holder and an Al target were arranged so as to set incident angle of deposition flux to be 45° from substrate normal. During film growth Ar and N<sub>2</sub> are used as reactive gases. N<sub>2</sub> was introduced into the chamber through the ion gun to make nitrogen plasma to facilitate AlN formation. N<sub>2</sub>/Ar gas flow rate of 3 was fixed to obtain AlN stoichiometry according to the previous investigation.

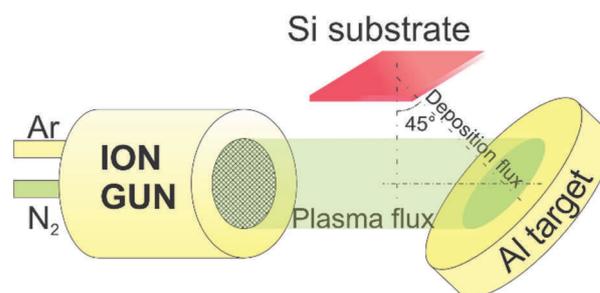


Figure 1. Schematic of deposition

XRD measurements verified that we have succeeded in growing c-axis tilted AlN thin films. Figure 2a shows a 2D-XRD diffraction image of the AlN film grown at 650°C. Except a diffraction peak from Si, only peaks from (0002) and (0004) plane of AlN were observed almost symmetrically along the chi axis, indicating that film has [0001] orientation. With decreasing growth temperature, the (0002) peak gradually moves down along the chi axis. This clearly indicates that the c-axis tilted from the substrate normal. Tilt-angles were determined as Chi angle of the (0002) peak centre (figure 3), and found to be 6° for 560°C (Figure 2b) and 22° for 420°C (Figure 2c). For the films grown at lower than 300°C (figure 2d and 2e) the tilt angle could not be determined due to poor crystallinity, though the c-axis likely tilt more from the substrate normal at lower growth temperature.

To understand the mechanism determining the tilt-angle of the c-axis, we conducted FE-SEM. A

cross-sectional FE-SEM image of the film grown at 420°C (tilt-angle: 22°) shows a columnar structure with tilt-angle of 43° (Figure 3b), which is close to the incident angle of the deposition flux. In contrast, the columnar structure for 650°C (tilt-angle: ~ 0°) does not tilt (Figure 3a). These facts indicate that tilting of the c-axis can be obtained by growing crystal along the tilted direction using the incident angle deposition if growth temperature is low enough to suppress atomic migration.

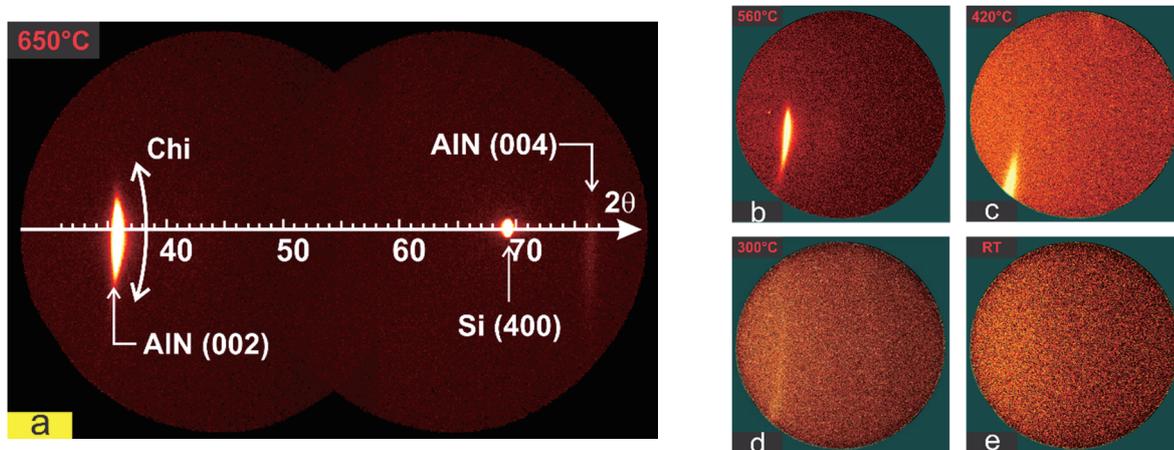


Figure 2. 2D-XRD patterns of AlN films deposited at various temperature.

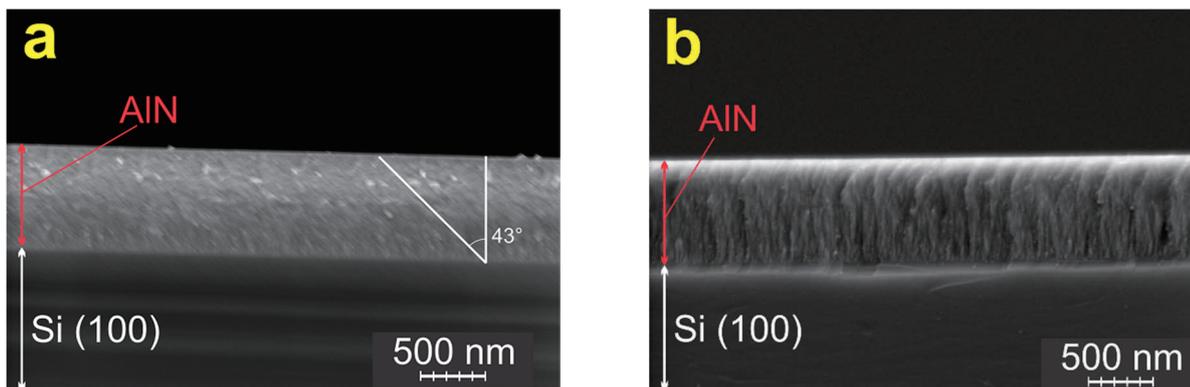


Figure 3. Cross-sectional FE-SEM images of AlN thin film deposited at (a) 420°C and (b) 650°C

Finally we point out that incident angle deposition can be an appropriate growth method to suppress electrical short between top and bottom electrodes that is often a problem reported for AlN films in micro devices. Because the tilted columnar structures are stacked, films do not allow cracks and pin-holes to go straight through the film. This unique geometry will prevent connection between top and bottom electrodes, which are usually fabricated using physical vapor deposition methods with line-of-sight deposition.

- [1] Le VM, Hara M, Kuwano H. 2013. *J. J. Appl. Phys.* **52** 07HD8
- [2] *Piezoelectric MEMS*, ed Bassiri-Gharb N, Springer, chapter 20: Materials and Devices, pp. 413
- [3] Hara M. and Kuwano H. 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 07GC11
- [4] Matloub R., et. al.. 2013, *Appl. Phys. Lett.* **102** (15) 152903
- [5] Sakurai T, Yamada O, Miyamoto Y. 2006. *Mat. Sc. Eng.: A* **415** 40
- [6] Nathan J, Lynette K, Alan M. 2013. *Smart Mater. Struc.* **22** 115033
- [7] Tasnádi F, Alling B, Höglund C, Wingqvist G, Birch J, et al. 2010. *Phys. Rev. Lett.* **104** 137601
- [8] Akira N, Mari A, Tsuyoshi Y, Satoru M, Masanori U, et al. 2015. *J. J. Appl. Phys.* **54** 07HD1
- [9] Zhang J, Cao Z, and Kuwano H 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 09ND18.

- [10] Trolier-McKinstry S, Muralt P. 2004. *J. Electr.* **12** 7
- [11] Wang Q, Cao Z. and Kuwano H. 2012 *Proc. PowerMEMS2012* 327
- [12] Wang Q, Oguchi H, Hara M, Kuwano H. *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2014 IEEE 27th International Conference*, 636

**平成27年度の研究業績**  
**【研究内容】**

1. Maintenance and recovery of dual guns ion beam sputtering

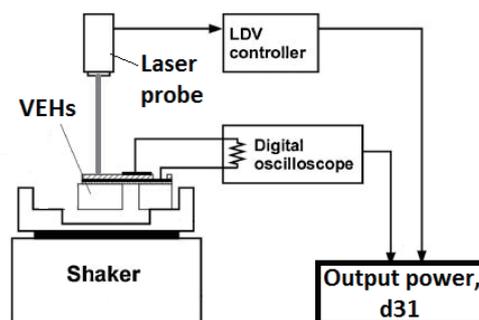
First, the dual guns chamber was modified to suitable for AlN sputter in an incident angle. Amount of oxygen in the chamber was confirmed by Mass spectroscopy using Q-Mass.

2. Conduct experiment and optimize the deposition process

AlN deposition processes were performed for the first time using the chamber. These processes were optimized through many times of deposition by changing the condition as: Back pressure, deposition pressure, gases flowrate ratio, deposition temperature, N<sub>2</sub> with and without ion

3. 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)...especially, a vibration measurement system has been setting up to evaluated output power of the vibration energy harvester as shown in the figure 4.



**Figure 4. Experimental setup for evaluating the output power of an energy harvester.**

**【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】**

1. H. H. Nguyen, M. Hara, H. Oguchi, H. Kuwano  
 C-axis tilted AlN films for vibration energy harvesters  
 Journal of Physics: Conference Series 660 (2015) 012076  
 doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012076

**【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】**

1. Conference: The 15th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (POWERMEMS2015)  
 Sponsor: Northeastern University and Massachusetts Institute of Technology (MIT)  
 Country: United State  
 Date: 2015.12.01 ~ 2015.12.04  
 Role: Author  
 Title of contribution: C-axis tilted AlN films for vibration energy harvesters
2. Conference: 日本機械学会第7回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集  
 Country: Japan  
 Date: 2015.10.28 ~ 2015.10.30  
 Role: Author  
 Title of contribution: 革新的AlN系圧電薄膜の開発研究

氏名 小澤 裕二



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

高温環境中におけるNi基超合金のき裂型損傷に関する研究

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、Ni基超合金である625合金の鍛造材において、750℃の水蒸気・乾燥ガス(大気組成)環境中で繰返し負荷下き裂進展試験を行い、負荷周波数依存性評価により、き裂進展挙動に及ぼす疲労・環境の効果の発現条件の整理、水蒸気環境の影響のメカニズムを調査した。

本研究の繰返し負荷き裂進展試験結果である、応力拡大係数幅  $\Delta K \approx 10 \sim 13 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  の領域での単位時間当たりのき裂進展速度と負荷周波数の関係をFig.1に示す。Fig.1における破線は、勾配45度の直線であり、環境の影響を受けない、純粋な疲労き裂進展挙動を示した基準線である。このグラフより、負荷周波数域が  $f=0.1 \sim 0.01 \text{ Hz}$  では、水蒸気・乾燥ガスの両環境下において、勾配45度の直線に則ることから、環境の影響の小さい疲労き裂進展であることが予想された(Fig.1 i)。水蒸気環境中では、 $f < 0.04 \text{ Hz}$  の周波数域において、環境の影響により加速された疲労き裂進展を確認した(Fig.1 ii)。さらに、周波数が小さくなるにつれその加速の程度は大きくなる傾向を示し、 $f \approx 2 \times 10^{-4} \text{ Hz}$  では、純粋な疲労き裂進展速度より約10倍もの加速を示した。一方、乾燥ガス中では、 $f \approx 2 \times 10^{-4} \text{ Hz}$  の条件のみ、上記と同様の加速を示したが、加速の程度は、水蒸気環境中での加速の程度より小さい結果となった(Fig.1 iii)。以上の結果より、ある特定の負荷周波数下において、水蒸気、乾燥ガス環境中共に、環境により加速された疲労き裂進展挙動を示すが、水蒸気中の方がより広範囲の負荷周波数域で発現し、またその加速の程度も大きいことが判明した。Fig.2に、水蒸気環境中での試験後試験片のき裂側面のSEM観察結果の一例、および同位置のEBSD解析結果であるIPFマップを示す。両環境共に、負荷周波数の低下に伴い、き裂面上酸化物およびき裂先端酸化物がより厚く成長すると共に、き裂経路は直線的な経路から屈曲的な経路へと変化することを確認した。屈曲した経路は、全体のき裂経路に占める粒界割れ経路の割合に起因していることが分かった。また、水蒸気中では、乾燥ガス中と比較して、わずかながらき裂面上酸化物およびき裂先端酸化物が厚く、また粒界割れ経路の割合も大きいことが分かった。乾燥ガス中より水蒸気中の方が酸化速度が大きいことに起因していると考えられる。微視組織観察結果とき裂進展速度を比較し、き裂進展速度は、粒界割れ経路率の上昇に伴い増加する傾向があり、すなわち粒界割れがき裂進展速度を加速させる要因であることが判明した。また、元素分析結果等を考慮し、625合金鍛造材においては、粒界に析出したNb、Mo炭化物の優先酸化が、粒界での強度の低下、およびそれに伴う速いき裂進展速度を示す一つの要因であると示唆された。

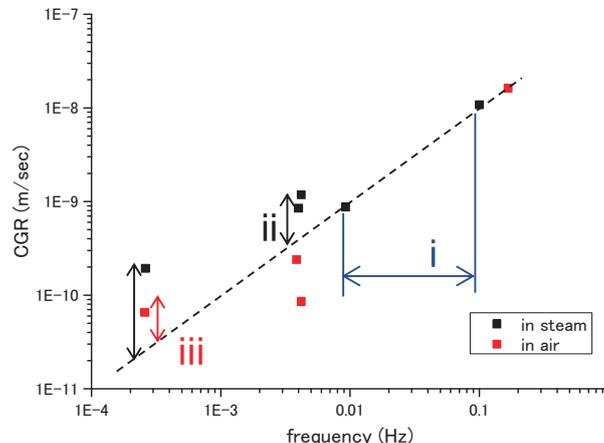


Fig.1 き裂進展速度と負荷周波数の関係

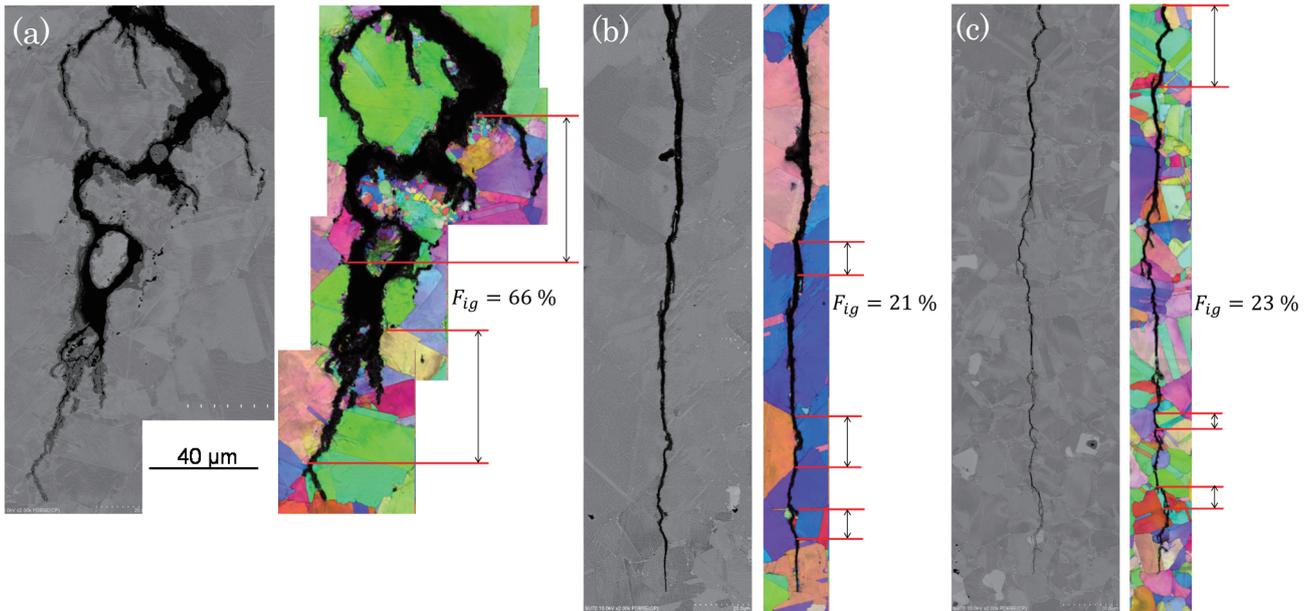


Fig.2 水蒸気環境中試験後き裂側面観察結果

(a)  $f=0.000261$  Hz (b)  $f=0.01$  Hz (c)  $f=0.1$  Hz

## 平成27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20回動力エネルギー技術シンポジウム

主催団体：日本機械学会 動力エネルギーシステム部門

開催国：日 本

開催期間：2015.6.18 ～ 2015.6.19

役 割：補助業務

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

#### 1. 高温環境中におけるNi基超合金のき裂型損傷に関する研究

現在、実用化研究の段階にある次世代型超々臨界圧発電(A-USC)における蒸気タービン等の高温部材において、クリープ強度の観点からNi基超合金の適用が考えられている。しかしそれらは高温の酸素富化環境下では応力誘起酸化(SAGBO)割れ等の劣化・損傷の発生が報告されており、使用環境である高温水蒸気環境でも同様の損傷が懸念されている。そこで、A-USC候補材であるNi基超合金(625合金、617合金)のSAGBO割れ等の損傷発生メカニズムやき裂進展特性を把握し、将来顕在化する可能性のある課題の事前解決により、A-USCの運用に寄与することを目的とし、研究を行っている。

### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

#### 1. Yuji OZAWA, Masashi SAITO and Yoichi TAKEDA

Dependence of crack growth rate on cyclic loading period of alloy 625 in high temperature steam and dry gas environments

Proceedings of the International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15) November 30-December 4, 2015, Yokohama, Japan, ICOPE-15-1088, (2015)



氏名 齋藤 庸賀

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

硬質微細粒子を電着させた高機能タップの開発

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、開発した硬質粒子電着タップの特性である切りくず巻きつき抑制効果の性能に着目し、切りくずが工具に巻きつきやすいとされる一般圧延用炭素鋼鋼材SS400に対する加工実験を行った。巻きつき抑制効果を定量的に評価するために、全加工数に対する切りくずの巻きつき回数を表した切りくずの巻きつき率という指標を用いた。その結果、開発された硬質粒子電着タップは、切りくずの巻きつきが発生しやすい高速切削条件(50m/min)において、従来のタップ工具に比べて、切りくずの巻きつき率が70%抑制できることを明らかにした。(図1)加えて、切りくずの巻きつき率とカール直径の関係を調査したところ、カール直径の増加に伴い切りくずの巻きつき率が増加することが明らかになった。また、切りくずの巻きつきの発生に大きく影響を与えている切りくずのカール直径が工具表面のどのような要因によって引き起こされるのか調査するために、工具・切りくず間で発生する力学的パラメータを以下の式を解くことにより求めた。

$$F_{stic} + F_{slid} = F_C \quad (1)$$

$$l_{stic} + l_{slid} = l_C \quad (2)$$

$$\frac{F_{stic}}{l_{stic}} = \tau_s \quad (3)$$

$$p(x) = P_0 \left(1 - \frac{x}{l_C}\right)^\xi \quad (4)$$

$$\mu_{slid} = \frac{F_{slid}}{F_{n,slid}} \quad (5)$$

$$\phi = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{\frac{t_1}{t_2} \cos \alpha_e}{1 - \frac{t_1}{t_2} \sin \alpha_e} \right) \quad (6)$$

計算の結果、切りくずのカール直径と最も相関のあるパラメータを調べたところ、図2に示すように切りくずのカール直径はせん断角 $\phi$ の増加に伴い低下する傾向があることが分かった。さらに、図3に示すように、そのせん断角 $\phi$ は工具すくい面上におけるすべり部における摩擦係数 $\mu_{slid}$ にもっとも影響を受け、摩擦係数の増加に伴い増加することが分かった。このことから、切りくずの巻きつきを抑制するためには、工具すくい面の摩擦係数を増加させることが有効であるということが分かった。

切りくずの巻きつき発生メカニズムを考察するために、切りくず形状の生成について加工シミュレーションソフト(Advantedge)を用いた解析も試みた。図3に、タップ工具刃先の加工モデルにおける被削材料による壁面部の有無の影響を表したシミュレーション結果を示す。同図に示すように、被削材料の壁

面部が存在しない場合、切りくずは進行方向に対して左側に流れていくのに対して、壁面部が存在する場合は、切りくずが壁面部によって拘束され流出方向がすくい面に沿って加工面上方へと流れていることが分かる。このことから、切りくずは切れ刃のみでなく被削材料の壁面部による拘束によって切りくず形状が決定することが分かった。

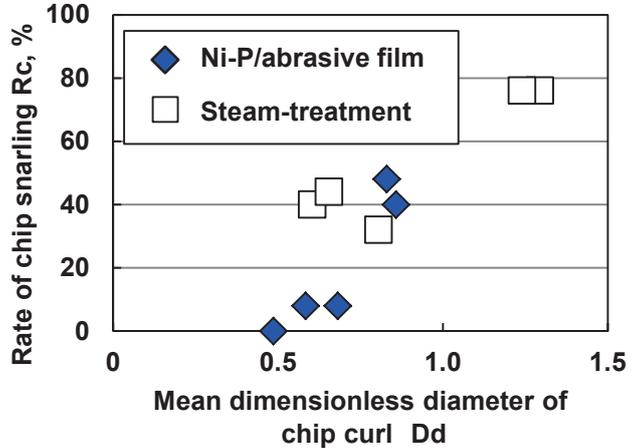


図1 切りくずの巻きつき率とカール直径の関係

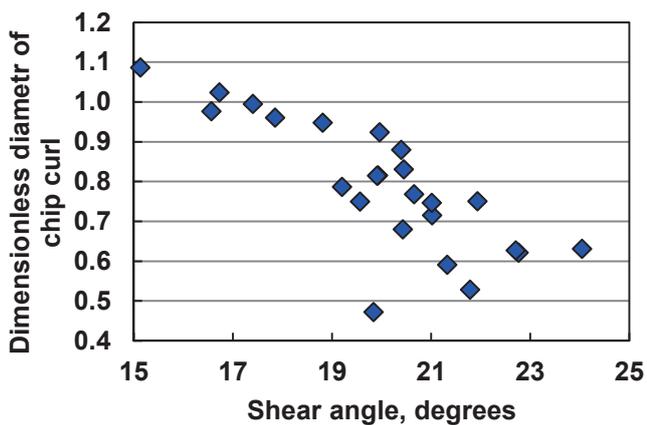


図2 切りくずのカール直径とせん断角の関係

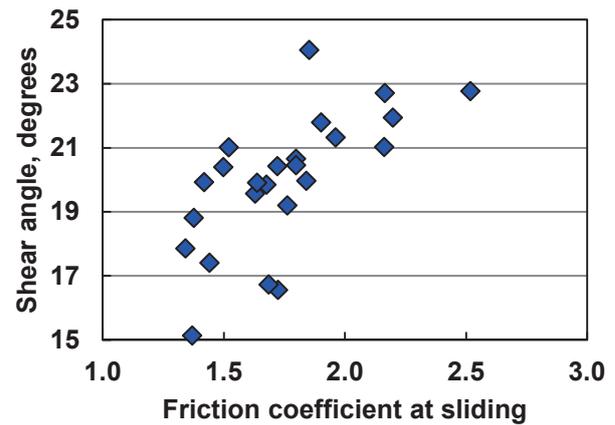
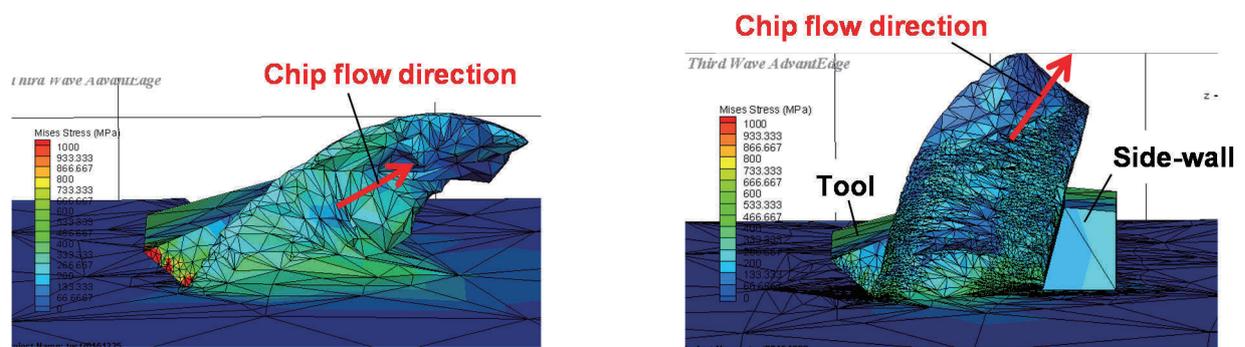


図3 せん断角と摩擦係数の関係



(a) 壁部なし (b) 壁部あり

図4 切りくずのカール直径とせん断角の関係

## 平成27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）

名 称：平成27年度博士交流セミナー  
主催団体：博士交流セミナー実行委員会  
開 催 国：日 本  
開催期間：2015.12.3  
役 割：オーガナイザー

## 平成27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, Yuki Kadota, Takeshi Ymaguchi, Kei Shibata, Takeshi Kubo, Wataru Watanabe, Satoru Oyama, Kazuo Hokkirigawa  
Study on Prevention Mechanism of Chip Snarling for Tapping Tool Covered with Nickel-Phosphorus/Abrasive Particles Composite Film  
Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(2015), pp. 242-243
2. 齋藤庸賀, 滝口翔樹, 山口健, 柴田圭, 久保武史, 渡部亘, 小山悟, 堀切川一男  
切りくずの巻きつき抑制効果を有する硬質粒子電着タップの開発  
トライボロジー会議 2015春 姫路 予稿集, PB6
3. Yasuyoshi Saito, Yuki Kadota, Shoki Takiguchi, Kei Shibata, Takeshi Kubo, Wataru Watanabe, Satoru Oyama and Kazuo Hokkirigawa  
Mechanism of Prevention of Chip Snarling on Tapping Tool Covered with Nickel-Phosphorus/Abrasive Particles Composite Film  
International Tribology Conference 2015, Tokyo, 19pF-09

### 【受賞・特許等】

受賞日：2015年 5月28日  
受賞名：優秀ポスター賞  
組織名：トライボロジー学会

受賞日：September 16-20, 2015  
受賞名：ITC Tokyo 2015 Young Researcher Paper Award  
組織名：International Tribology Conference 2015

受賞日：2016年3月11日  
受賞名：日本機械学会東北支部技術研究賞  
組織名：日本機械学会東北支部

### 【研究費の獲得】

名称：科学技術振興機構復興促進プログラム（マッチング促進 タイプ I）  
期間：2015年4月-2016年3月



氏名 相馬 達哉

所属 工学研究科化学工学専攻・D2

研究課題

二相流解析による超高速回転微粒化機構の解明および高効率噴霧システムの開発

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

高速回転ベルカップは噴霧器の一種であり、自動車塗装において広く利用されているものの、20-60%程度の塗料がターゲットに付着せず飛散する。噴霧により形成される液滴の粒径分布が塗着効率に影響を及ぼすことから、塗着効率向上のためには粒径の制御技術の確立が求められる。ベルカップのような回転体を用いた遠心微粒化においては、条件によって膜状分裂、繊維状分裂、滴状分裂のいずれかの分裂パターンが現れる。自動車塗装においては、比較的均一な液滴が得られる繊維状分裂となる条件において噴霧塗装を行う。そのため、回転体から射出される液糸の分裂挙動を把握することが重要である。

回転の影響を除いた液糸の分裂挙動を把握するため、単孔ノズルによる水中へのニトロベンゼンの噴霧を解析し、微粒化の挙動を検討した。二相流解析手法として volume of fluid法を用いた。図1に各噴出流速における Sauter平均粒径を示す。噴出流速の増大とともに、粒径は減少した後に増大した。また、噴出流速0.1 m/sの場合、図2からもわかるように、ノズルから射出されたニトロベンゼンは表面張力によりノズル先端に留まり、懸垂液滴を形成した。時間の経過とともに懸垂液滴は大きくなり、自重が表面張力を越えた場合に分裂した。噴出流速0.4 m/sの場合、表面が滑らかな液糸が形成された。液糸はRayleigh不安定性によって分裂した。これらの挙動は宝沢らの実験[1]とよく合致している。また、噴出流速0.4 m/sの場合、液糸・液滴の移動速度が進行とともに減少していることがわかる。これは、周囲流体の密度が大きく、気液の場合と比較して大きな抗力を受けるためである。そのため、数十個に1個程度ではあるが前方の液滴に追いつき合一する液滴が現れた。比較的大きな液滴の後方に位置する液滴は抗力を受けにくいいため、前方の液滴と衝突および合一しやすい傾向が得られた。

前述のRayleigh不安定性による分裂に代表されるように、微粒化においては表面張力が重要な因子となる。volume of fluid法は複数の液滴の合一や分裂を考慮しやすい一方で、界面の曲率の算出が難しく、表面張力の推算に誤差をともなうことが知られている。この原因の一つは曲率推算に用いるVOF関数が不連続関数であるためであり、連続関数であるLevel set関数を用いることで高精度化を期待できる。ここで、Level set関数は界面からの距離を絶対値とし、界面の

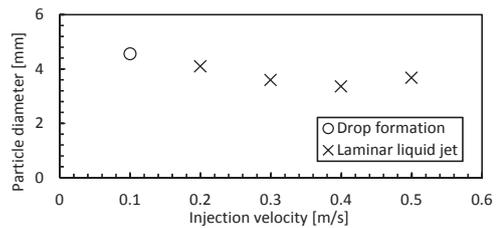


図1. 噴出流速による粒径の変化

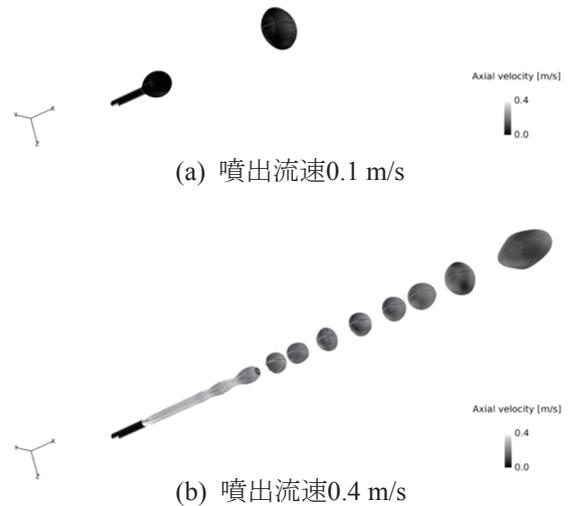


図2. 噴出流速による分裂パターンの違い

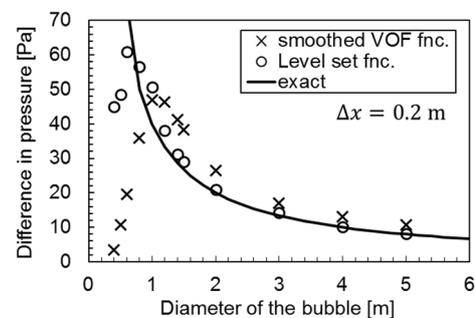


図3. 界面の曲率評価手法による精度の違い

内外で逆の符号を持つ符号付き距離関数である。しかしながら、適切なLevel set関数を構築することは必ずしも容易ではない。これは①volume of fluid法では明確な界面の位置が定義されないこと、②着目する計算格子の周囲から最も近い界面を探索すると計算負荷が大きくなることが原因である。本解析においては、PLICによって界面位置を特定し、Level set関数の移流方程式を解くことによってLevel set関数を計算した。妥当性の検証のため、水中に静置された気泡の解析を行い、気泡内外の圧力差の計算値を理論解であるLaplace圧と比較した。図3に界面の曲率の算出にVOF関数を使用した場合とLevel set関数を使用した場合の圧力差を示す。Level set関数を用いた場合、VOF関数を用いた場合と比較して理論解を良好に再現することができた。今後、Level set関数を用いた微粒化の解析を行うことで、より厳密な検討を行うことが期待される。

[1] Hozawa, M., et al., The size of drops formed from single nozzles in liquid-liquid systems, Kagaku Kogaku, 33, 893 (1969).

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 単孔ノズルによる液体微粒化の直接シミュレーション  
液系の分裂挙動を把握するため、単孔ノズルから射出される液噴流の解析を行っている。
2. 表面張力の高精度な推算を目的とした気液界面の形状評価手法の検討  
volume of fluid法を用いた二相流解析における表面張力の予測値の精度を向上させるため、Level set関数を用いた界面形状の評価手法を導入し、性能を評価している。

### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Tatsuya Soma, Tomoyuki Katayama, Junichi Tanimoto, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Daichi Nakai, Genki Kitamura, Masanari Miura, Takukatsu Asakawa, Masatoshi Daikoku, Toshiki Haneda, Yohsuke Hatayama, Minori Shirota, Takao Inamura  
Liquid Film Flow on a High Speed Rotary Bell-Cup Atomizer  
International Journal of Multiphase Flow, 70, 96-103 (2015)
2. Tatsuya Soma, Shun Amemiya, Tomoyuki Katayama, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Ryota Sakabe, Takao Inamura, Masatoshi Daikoku, Junichi Fukuno  
Spray Characterization of Bell-Cup Atomizer Comparing with Powder Spray Gun  
the 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Taiwan, August 23-27 (2015)
3. 松下洋介, 吉田恵子, 赤尾津翔大, 谷本惇一, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 青木秀之, 三浦隆利  
酸化反応を伴うチャー粒子表面への酸化剤の物質移動速度の推算とO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>系への適用  
日本エネルギー学会誌, 94(5), 428-435 (2015) [総説・査読無し]

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 稲村隆夫, 大黒正敏, 福野純一  
単孔ノズルによる液体微粒化の直接シミュレーション  
化学工学会第81年会, 大阪, 3月13-15日 (2016)
2. Tatsuya Soma, Shun Amemiya, Tomoyuki Katayama, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Ryota Sakabe, Takao Inamura, Masatoshi Daikoku, Junichi Fukuno  
Spray Characterization of Bell-Cup Atomizer Comparing with Powder Spray Gun  
the 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Taiwan, August 23-27 (2015)
3. Masatoshi Daikoku, Takukatsu Asakawa, Shinji Tamakuma, Koji Sato, Ryota Sakabe, Takao Inamura, Shun Amemiya, Tatsuya Soma, Tomoyuki Katayama, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Junichi Fukuno  
The effect of Shaping Air on Breakup of Liquid Column by Bell-Cup Atomizer  
the 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Taiwan, August

- 23-27 (2015)
4. Ryota Sakabe, Takao Inamura, Masatoshi Daikoku, Tatsuya Soma, Tomoyuki Katayama, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Junichi Fukuno  
Behavior of Single Droplet in Stagnation Air Flow near Wall,  
the 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Taiwan, August 23-27 (2015)
  5. 赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之, 谷本惇一, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 村尾明紀  
微粉炭を対象とした揮発分放出と不均一反応の半並発反応モデルの開発  
日本学術振興会製鉄第54委員会第187回委員会, 東京, 12月3-4日 (2015)
  6. 赤尾津翔大, 谷本惇一, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 村尾明紀  
揮発分放出過程が微粉炭粒子表面への酸化剤の物質移動に及ぼす影響の数値解析的検討 -雰囲気温度の影響-  
第52回日本伝熱シンポジウム, 福岡, 6月3-5日 (2015)
  7. 玉熊真士, 大黒正敏, 佐藤考司, 坂部良太, 稲村隆夫, 雨宮駿, 片山知雪, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之  
局所的高速気流による液柱の分裂に関する研究  
日本設計工学会平成27年度春季研究発表講演会, 5月30-31日 (2015)
  8. 赤尾津翔大, 谷本惇一, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 村尾明紀  
揮発分放出と酸化反応を伴う単一微粉炭粒子周りの物質移動解析  
第15回日本伝熱学会東北支部学生発表会, 仙台, 5月9日 (2015)
  9. Shota Akaotsu, Junichi Tanimoto, Tatsuya Soma, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Akinori Murao  
Numerical Investigation of Effect of Devolatilization Process on Mass Transfer of Oxidant to a Pulverized Coal Particle -Effect of Coal Type and Particle Diameter-  
International Conference on Coal Science & Technology (ICCS&T2015), Paper no. 3127372, Melbourne, Australia, September 27-October 01 (2015)
  10. Junichi Tanimoto, Shota Akaotsu, Tatsuya Soma, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Akinori Murao  
Effect of wide range of heating rates during pyrolysis on reactivities of pulverized coal chars  
International Conference on Coal Science & Technology (ICCS&T2015), Paper no. 3127340, Melbourne, Australia, September 27-October 01 (2015)

#### 【受賞・特許等】

受賞日：2016年3月16日

受賞名：粒子・流体プロセス部会 フロンティア賞

組織名：化学工学会 粒子・流体プロセス部会

受賞者：Tatsuya Soma, Tomoyuki Katayama, Junichi Tanimoto, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Daichi Nakai, Genki Kitamura, Masanari Miura, Takukatsu Asakawa, Masatoshi Daikoku, Toshiki Haneda, Yohsuke Hatayama, Minoru Shirota, Takao Inamura

受賞日：2015年12月3日

受賞名：研究発表奨励賞

組織名：日本学術振興会製鉄第54委員会

受賞者：赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之, 谷本惇一, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 村尾明紀

氏名 武田 翔



所属 工学研究科機械システムデザイン工学専攻・D1

研究課題

動的プロセスによる強ひずみ粉体成形技術における固体-固体接合界面ダイナミクスの解明

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、動的な粉末の固化成形技術である常温圧縮せん断法による固体材料の接合・成形メカニズムを検討した。これまで明らかにされてこなかった金属材料と非金属材料の接合メカニズムを分析するために、まず、前年度より検討を続けてきた銅と二硫化モリブデンの低摩擦複合材料の成形を行い、材料組織を評価した。図1に銅と二硫化モリブデンの接合界面のTEM像を示す。図1において、白の破線で囲まれた領域が二硫化モリブデンである。図1から、銅と二硫化モリブデンが直接接触、接合していることがわかる。今回行った常温圧縮せん断法による複合材料の成形には大気曝露された銅粉末を原料として用い、更に常温・大気雰囲気中で成形を行っている。従って、原料粉末表面には酸化膜が存在するが、この酸化膜は常温圧縮せん断法による成形プロセスの過程で除去され、銅の新生面と二硫化モリブデンが直接接合していると考えられる。この複合材料に関する後述する3つの研究成果発表を行った。

また、これまでに試みられてこなかった、金属以上の硬度を有するセラミックスや、全く異なる構造を有する硫化物や高分子材料等、非金属材料の成形に関する知見により、常温圧縮せん断法による固体材料の接合・成形メカニズムをより詳細に明らかにすることができると思われる。そこで本年度は、常温圧縮せん断法を用いてセラミックス粉末と二硫化モリブデンの固化成形を試みた。金属材料を成形した条件と同条件で加工を行ったところ、これらの粉末はピンセット等のハンドリングに耐え得る強度を有した薄板に成形された(図2)。しかし、その結合は常温圧縮せん断法により成形した金属材料とは違い、化学結合ではなく、機械的に粉末同士が噛み合っているだけであった。セラミックスや二硫化モリブデンはひずみを加えても変形せずに破壊されるため、先行研究で金属材料に対して検討されたモデルでは接合メカニズムを十分に説明できないと考えられる。以上の結果から、破壊を考慮した新たなモデルの必要性が示唆された。

現在は銅とグラファイトの複合材料成形に関して調査を進めている。グラファイトは二硫化モリブデンと同様に層状構造を有した固体潤滑剤のひとつであるが、私はこの複合材料が銅と二硫化モリブデンの組み合わせとは異なる材料組織や物性を示すことを明らかにした。これらの複合材料の接合状態の差異を調べることで常温圧縮せん断法による異種材料接合メカニズムをより詳細に解明できると考えている。更に、銅/グラファイト/二硫化モリブデンの複合材料は大気雰囲気中で0.16と二硫化モリブデン単体より優れた摩擦特性を示すため、低摩擦の摺動部材として適用可能ではないかと思われる。

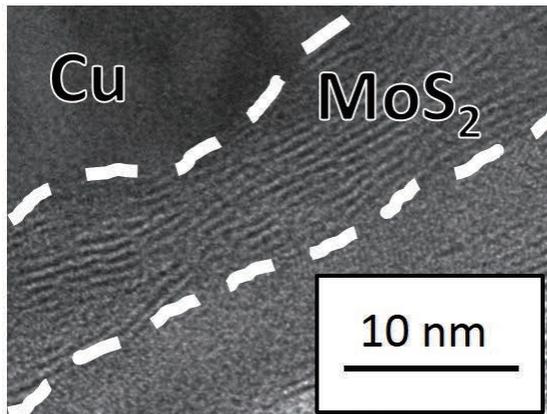


図1 銅-二硫化モリブデン接合界面のTEM像

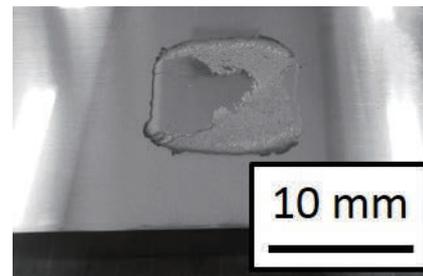


図2 二硫化モリブデン単体の板材

### 平成27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）

<国際総合技術展>

名 称：nano tech 2016 第15回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議

主催団体：nano tech実行委員会

開 催 国：日本

開催期間：2016.1.27~29

役 割：展示説明員

### 平成27年度の研究業績

#### 【研究内容】

1. 常温圧縮せん断法による固体材料の接合メカニズムの検討  
種々の材料の固化成形を、常温圧縮せん断法を用いて試みている。先行研究で試みられてこなかった金属材料と非金属材料の組み合わせの複合化を行い、材料の物性評価や接合界面の組織の分析を行っている。前述したミクロな接合メカニズムだけでなく、付与するひずみ量を段階的に変化させた材料の組織観察を行うことで、マクロな成形メカニズムの解明も試みている。
2. 低摩擦の摺動部材開発  
銅にグラファイトや二硫化モリブデンを複合化することで、摺動部材への適用を目指した低摩擦の材料の成形、および物性の評価を行っている。

#### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. S. Takeda, H. Miki, T. Miyazaki, H. Takeishi, T. Takagi, Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics, October 27-29, 2015, Sendai, Miyagi, Japan, 752-753.
2. 武田翔, 三木寛之, 宮崎孝道, 高木 敏行, 自己潤滑性複合材料の常温圧縮せん断法による固化成形とその摩擦特性, 日本機械学会2015年度年次大会, 2015年9月14日, 北海道, J0440404.
3. S. Takeda, H. Miki, T. Miyazaki, T. Takagi, Proceedings of the 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, June 21-22, 2015, NUAA, Nanjing, China.

氏名 堤 駿



所属 工学研究科化学工学専攻・D1

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27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。効果的な抽出前処理法により高いHC抽出率が得られることから、HC抽出率を向上させるメカニズムの検討が必要である。そこで本研究では、*B. braunii*の細胞およびコロニーをマイルドに破碎し、HC抽出するとともに破碎前後の試料の形状解析およびコロニー周囲の高分子の形態を評価することで、コロニーの破碎および高分子の剥離がHC抽出率に及ぼす影響を検討した。

試料には濃度0.82 g/Lの*B. braunii* BOT-22株を用いた。ビーズミル(LMZ015, Ashizawa Finetech製)およびJPSS(JP-SS, 日本スピンドル製)を用いて試料を破碎した。各装置の実験条件をTable 1に示す。破碎前後の

Bead mill		Jet-Paster		
Peripheral speed	Bead diameter	Bead filling ratio	Rotation speed	Treatment time
[m/s]	[mm]	[v/v%]	[rpm]	[min]
11, 14	0.5	85	2400, 4800	3

細胞に対して粉体画像解析装置(PITA-3, セイシン企業製)を用いて画像解析し、細胞の円相当径および円形度から破碎前後の形状変化を評価した。また、墨汁染色法を行い、破碎前後のコロニー周囲の高分子を観察した。試料に*n*-ヘキサンを混合して液液抽出し、GC-FID (GC-FID 2014, 島津製作所製)を用いて定量した。HC抽出率は、培養液をろ過・乾燥した試料からHCを抽出した場合の抽出率を100%とし、その相対値として評価した。

破碎した藻類の形状評価を行った結果をFig. 1に示す。ここで、*B. braunii*の細胞の円相当径 $d$ はおよそ10  $\mu\text{m}$ であることから、観測された粒子に対し、 $d \leq 8 \mu\text{m}$ の粒子を破碎によって生じた細胞断片、 $8 < d \leq 11 \mu\text{m}$ の粒子を細胞単体、 $d > 11 \mu\text{m}$ の粒子をコロニーと分類した。ビーズミルを用いた場合(Fig. 1 (a))、破碎前後の粒子の形状は未処理の試料より細胞単体が減少し、細胞断片およびコロニーは増加した。JPSSの場合(Fig 1 (b))、回転数によらず細胞断片・単体が減少し、コロニーは増加した。破碎前後のコロニー周囲の高分子を墨汁染色法によって観察した結果をFig. 2に示す。未処理の試料ではコロニー周囲に隙間なく高分子が存在している。ビーズミルで破碎すると、一部の高分子が破碎され、破碎された部分から墨汁がコロニー内部に浸透した。JPSSにおいて回転数2400 rpmで試料を破碎した場合にはコロニー周囲に高分子が存在し、高分子に損傷がなかった一方で、4800 rpmで破碎した場合にはコロニー周囲に高分子がなく、ほぼ全ての高分子が破碎された。破碎前後の試料からHCを抽出した結果をFig. 3に示す。未処理の試料ではHCがほとんど抽出できない一方、それぞれの破碎装置で試料を破碎すると抽出率が大きく増加した。特にJPSSを用いて4800 rpmで破碎した場合に、乾燥した試料から抽出した場合とほぼ同等の抽出率となった。ここで、ビーズミルにおいて周速14 m/sで処理した場合とJPSSにおいて回転数4800 rpmで処理した場合を比較すると、形状評価した際には両者ともほぼ同様の傾向であるにもかかわらず、HC抽出率に大きな差を示した。コロニー周囲の高分子に着目すると、ビーズミルを用いた場合には完全に破壊されていないものの、JPSSの場合完全に破壊されていることがわかる。この高分子は水

分を貯蔵するため<sup>1)</sup>、ヘキササンがコロニー内部に入り込むことを阻害すると考えられる。したがって、HC抽出率が増加したのは、コロニー周囲の高分子を除去したことが原因であると考えられる。以上の結果から、コロニー周囲の高分子が*B. braunii*からのHC抽出に大きな影響を及ぼすことが示唆された。

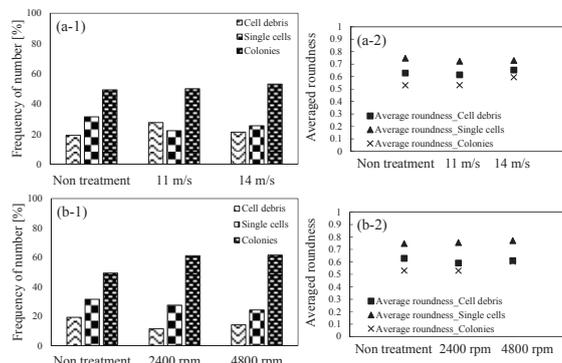


Fig. 1 The morphology of the samples before and after treatment (a) Bead mill, (b) JPSS, (1) Diameter, (2) Roundness

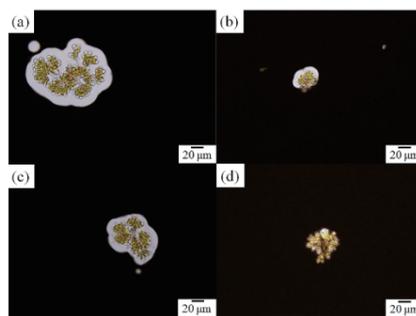


Fig. 2 The images of the samples (a) Non treatment, (b) bead mill treatment at 14-m/s of peripheral speed, (c) JPSS treatment at 2400-rpm of rotation speed, (d) at 4800-rpm of rotation speed

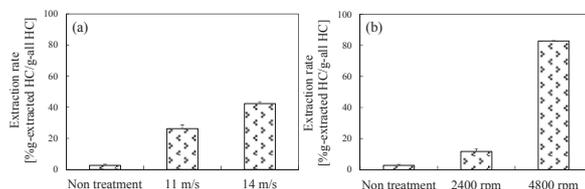


Fig. 3 The extraction rates of the samples (a) Bead mill treatment, (b) JPSS treatment

【引用文献】 1) Demura, M.; Ioki, M.; Kawachi, M.; Nakajima, N.; Watanabe, M. M.; *J Appl Phycol*, **26**, 49-53 (2014)

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 機械的破碎方法による藻類からの炭化水素抽出メカニズムの検討  
バイオ燃料の原料として有用な藻類は、燃料原料の炭化水素を抽出する前に適切な前処理を施すことで飛躍的に抽出率が増加することが知られている。このことから、機械的に藻類を破碎することによる藻類の破碎の度合いや藻類の表面構造を実験的に分析することで、抽出率に大きな影響を及ぼす因子を調査している。
2. 濃縮した藻類培養液を処理することによる実用的な機械的破碎前処理方法の検討  
微細藻類は一般的に非常に希薄な環境下で培養するため、機械的に藻類を破碎する前処理方法を利用した実用的なプロセスの構築には、濃縮した藻類を用いた実験が不可欠である。より実用的な実験を行うため、膜分離により濃縮した培養液を処理している。

3. 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ている。

**【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】**

1. 微細藻類を精密ろ過する際の膜間差圧が膜のファウリング現象に及ぼす影響, 横溝まどな, 堤駿, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 化学工学会第81年会, 大阪 (2016) [ポスター・査読なし]
2. 機械的破碎法による *Botryococcus braunii* の濃縮培養液からの炭化水素抽出実験  
○堤駿, 横溝まどな, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之第6回藻類バイオマスプロセス開発研究発表会, つくば, 2月4日(2016) [口頭・査読なし]
3. 機械的細胞破碎法による *Botryococcus braunii* からの炭化水素抽出メカニズムの検討, 堤駿, 横溝まどな, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 第11回バイオマス科学会議, 新潟, 1月20-21日 (2016) [ポスター・査読なし]
4. 微細藻類の濃縮を目的とした膜分離操作時の透過流束に関する検討-精製水を対象とした検討-, 横溝まどな, 堤駿, 倍賞弘平, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 第6回藻類バイオマスプロセス開発研究発表会, 仙台, 7月31日(2015) [口頭・査読なし]
5. ジェットペースタによる *B. braunii* のコロニー破碎に関する処理時間の影響, 堤駿, 横溝まどな, 倍賞弘平, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 第6回藻類バイオマスプロセス開発研究発表会, 仙台, 7月31日(2015) [口頭・査読なし]
6. Evaluation of Cell Disruption Influences on Particle Size and Shapes and Hydrocarbon Extraction yield of *Botryococcus braunii* (Race B) with High Pressure Homogenizer and Circulate Particle Disruption Machine, Shun Tsutsumi, Madona Yokomizo, Kohei Baisho, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, and Hideyuki Aoki, 5th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, San Diego, USA, June 7-10 (2015) [ポスター・査読なし]

氏名 薛 高鹏



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

極低温立体計測(磁気共鳴力顕微鏡)のための静電駆動型XYZマイクロステージの開発

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

In this year, this research focuses on an assembled comb-drive XYZ-microstage with large displacements and low hysteresis for the scanner of magnetic resonance force microscopy (MRFM) at cryogenic environment. For measurements, a sample of 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical (DPPH) is glued onto the assembled XYZ-microstage. As the setup components of the MRFM measurement, the scanning XYZ-microstage with DPPH sample, a sensitive cantilever with a small magnetic particle, a fiber-optic interferometer to detect the vibration of the cantilever and a radio frequency (RF) coil are installed into the vacuum chamber of MRFM. Finally, the vibration of the cantilever caused by magnetic force due to electron spin-resonance spectroscopy (ESR) can be detected through adjusting the magnetic field intensity of RF coil.

The concept of MRFM, as a promising magnetic resonance imaging combined with atomic force microscopy (AFM) technology, was firstly proposed by Sidles in 1991. This technique utilizes a small magnetic tip and an ultra-sensitive cantilever to detect the densities of spins or radicals. Within several decades, MRFM has been applied to various fields including physics, chemistry, biology and material science as an effective characterization method. Microscanners for cryogenic measurements using MRFM require large stroke at low temperature with small affections to thermal variation. In terms of magnetic force measurements for MRFM, electrostatic comb-drive actuation would be the most applicable method due to its high flexibility for system integration and relatively large actuation displacement at low temperatures.

The components of the comb-drive XYZ-microstage consisting of a comb-drive XY-microstage, two comb-drive Z-microstages and silicon base substrate are fabricated, respectively. Then, they are assembled together to construct the XYZ-microstage using microassembly technology, as shown in Fig. 1. The samples of two DPPH particles are attached to a glass needle tip using electrostatic force and transferred to the small tip outstretched from the center plate of the XYZ-microstage by adjusting a manipulator under a view of microscope, as the inset in Fig. 1. The actuated displacement and applied voltage with triangular wave are plotted as a function of time, as shown in Fig. 2. The XYZ-microstage is capable of producing  $\sim 50 \mu\text{m}$  displacement into Z-direction at the actuation voltage of 82 V. To evaluate the hysteresis of the assembled comb-drive XYZ-microstage, the displacements in forward and backward sweep are plotted. From comparison, it is demonstrated that the assembled comb-drive XYZ-microstage exhibits low hysteresis of  $\sim 0.245 \mu\text{m}$ .

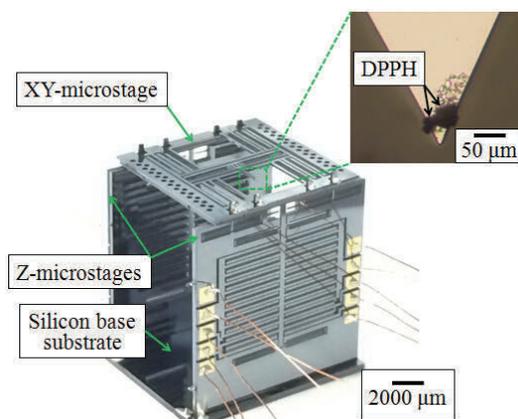


Fig. 1. Assembled XYZ-microstage with DPPH sample.

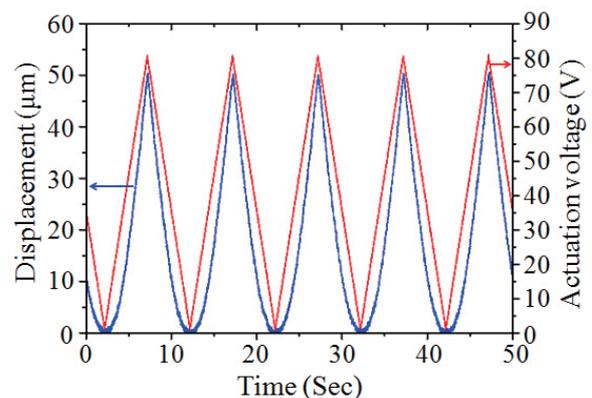


Fig. 2. Relationship of displacement and actuation displacement with time.

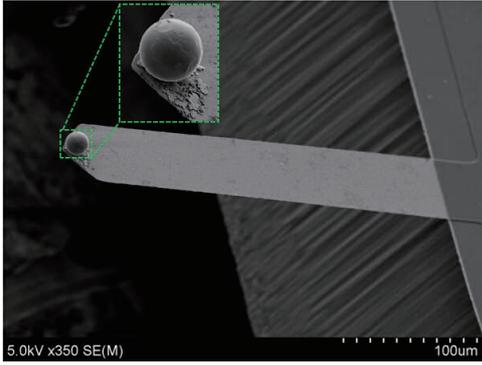


Fig. 3. Cantilever sensor with a magnetic particle.

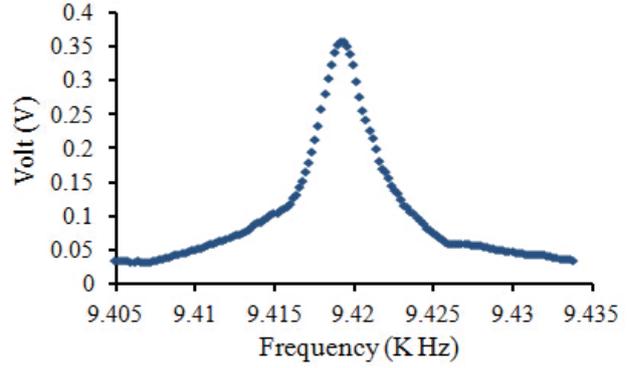


Fig. 4. Resonant frequency of the cantilever sensor with the magnetic particle.

As the cantilever sensor in MRFM in Fig. 3, a small magnetic particle is put on the cantilever tip using a manipulator. The magnetic particle is magnetized by applying a magnetic field of 12.3 kOe. The resonant frequency of the cantilever with the magnetic particle is measured by the a fiber-optic interferometer in a vacuum degree of  $8.6E-4$  Pa at room temperature. As shown in Fig. 4, the resonant frequency is found to be 9.419 kHz and the Q factor is 3489.

In order to realize the MRFM measurement, the characterized XYZ-microstage with the glued sample DPPH, the cantilever sensor with the magenetic particle, the fiber-optic interferometer and a RF coil are introduced into the vacuum chamber of MRFM, as shown in Fig. 5. The distance between the magnetic particle of cantilever and the sample DPPH on the tip of XYZ-microstage is set to  $\sim 15$   $\mu\text{m}$ , to make sure that the sample is near the resonant slice. The optical fiber is placed behind the cantilever with a  $\sim 100$   $\mu\text{m}$  gap to measure the vibration of the sensor with a high sensitivity.

In order to evaluate the setup of MRFM measurement, 1D scan experiment is done with the applied RF signal to the coil. The modulated magnetization  $M_z$  of the sample DPPH in the resonant slice through the magnetic resonance causes an oscillating magnetic force  $F_z = -M_z \cdot \partial H_z / \partial z$  to the cantilever, where the  $\partial H_z / \partial z$  is the magnetic field gradient at the resonant slice. The resonant slice represents a paraboloidal shell region, in which the magnetic field generated by the magnet particle matches the magnetic resonance condition.

To determine the suitable position of the DPPH sample in the resonant slice, RF frequency dependence on the magnetic force to the sensor are measured at two sensor positions with actuation voltages of 20 and 60 V. The ESR magnetic resonance signals can be observed with a range of the applied radio frequency from 1025 to 1075 MHz, as shown in Fig. 6. The positions of the DPPH sample corresponding to the actuation voltages of 20 and 60 V applied to the microstage are  $\sim 3$  and  $\sim 29$   $\mu\text{m}$  displacements in Z direction, respectively. From the measurement results, the magnetic resonance signals are strong at the position of  $\sim 3$   $\mu\text{m}$  displacement, but the DPPH sample will be out of the resonant slice when the actuated displacements are larger than  $\sim 29$   $\mu\text{m}$ . Those results shows that the developed XYZ microstage can be applicable to MRFM.

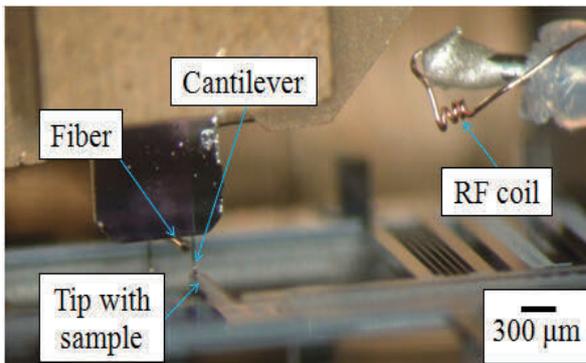


Fig. 5. Setup of MRFM in the vacuum chamber.

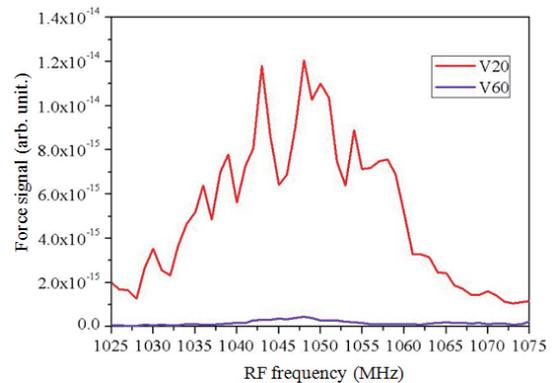


Fig. 6. ESR force signals versus RF frequency of at two positions of the sample.

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. A comb-drive XYZ-microstage with an improved design for large displacements is fabricated for the scanner of MRFM at cryogenic environment, based on the microassembly technology. The XYZ-microstage is capable of producing  $\sim 50$   $\mu\text{m}$  displacement into Z-direction and low hysteresis of  $\sim 0.245$   $\mu\text{m}$ . The samples of two DPPH particles are attached to the small tip outstretched from the center plate of the XYZ-microstage.
2. A small magnetic particle is put on the cantilever sensor using a manipulator, and the resonant frequency of the cantilever sensor is found to be 9.419 kHz and the Q factor is 3489.
3. The characterized XYZ-microstage with the glued sample DPPH, the cantilever sensor with the magnetic particle, the fiber-optic interferometer and a RF coil are introduced into the vacuum chamber of MRFM.
4. The ESR magnetic resonance signals are obtained from the fiber-optic interferometer due to the vibration of the cantilever, when the DPPH sample moves into the resonant slice region of the magnetic particle. The generated magnetic field distribution of the magnet particle is estimated, when the DPPH sample is scanned by actuating the XYZ-microstage in Z-direction.

### 【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 (submitted).
2. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Chip-Level Microassembly of XYZ-Microstage with Large Displacements”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol. 135, No. 6, pp.236-237.
3. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Comb-drive XYZ-Microstage Based on Assembling Technology for Low Temperature Measurement Systems”, Proceedings of International Conference ICEP-IAAC2015, pp. 83-88, Apr. 2015.

### 【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 large displacements for the 3D scanning stage of magnetic resonance force microscopy”, 第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 新潟県新潟市, 2015年10月.
2. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Assembled comb-drive XYZ-microstage with large displacements for the 3D scanning stage of low temperature measurement systems”, The 6th Japan China Korea Joint Conference on MEMS/NEMS 2015, Xian, China, Sep. 2015.
3. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Comb-drive XYZ-Microstage Based on Assembling Technology for Low Temperature Measurement Systems”, International Conference on ICEP-IAAC 2015, Kyoto, JAPAN, Apr. 2015.



氏名 山田 脩裕

所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D1

研究課題

トライボ化学反応の制御による大気中無潤滑超低摩擦システムの開発

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、窒化炭素 (CN<sub>x</sub>) 膜の摩擦特性に及ぼす酸素分子と水分子の影響の解明、低摩擦発現メカニズムの提案、及び超低摩擦発現のための必要条件の提案を行った。

まず、窒化ケイ素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) を相手材としたボール-オン-ディスク摩擦試験により、窒素ガス中の酸素濃度及び相対湿度の減少及び増加に伴い摩擦係数が増加することを明らかにした(Fig. 1, 2)。これは、CN<sub>x</sub>膜の低摩擦発現のためにある一定量の酸素及び水分が必要であり、それぞれ低摩擦発現のための役割を有していることを示唆している。続いて、酸素濃度70 ppm、1100 ppmの窒素ガス環境で、それぞれ0.1程度の摩擦係数、0.05以下の低摩擦係数を示した際のSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>ボール摩耗痕をラマン分光分析した(Fig. 3)。その結果、酸素濃度1100 ppmの窒素ガス環境の場合、摩耗痕上では初期のCN<sub>x</sub>膜から構造の変化した炭素の存在が観察されるものの、酸素濃度70 ppmの窒素ガス環境の場合、炭素の構造変化が観察されないことを明らかにした。これは、ある一定量の酸素が存在する環境では炭素の構造変化が促進され、酸素がCN<sub>x</sub>膜の低せん断構造への変化に寄与していることを示唆している。さらに、重水 (<sup>2</sup>H<sub>2</sub>O) を用いて相対湿度5 %RHほどに加湿した窒素ガス環境における摩擦試験を行い、ボール及びディスク摩耗痕をTOF-SIMS分析した(Fig. 4)。その結果、低摩擦発現時のCN<sub>x</sub>膜摩耗痕上から重水由来の水素及び水酸基の存在が確認され、窒素ガス中の水分子がCN<sub>x</sub>と摩擦化学反応を起こしていることを明らかにした。水素基及び水酸基がCN<sub>x</sub>最表面の炭素原子未結合手を終端し低凝着性の界面が形成されたことで低摩擦が発現した[1]と考えられる。

また、CN<sub>x</sub>膜付炭化ケイ素ボールとCN<sub>x</sub>膜付炭化ケイ素ディスクの組み合わせを用い、CN<sub>x</sub>の摩擦特性に及ぼす酸素と水分の影響を検討した。窒素ガス中の相対湿度及び酸素濃度の増加に伴い、CN<sub>x</sub>膜の

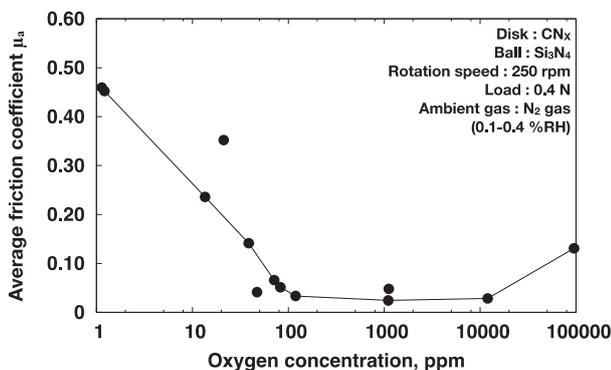


Fig. 1 Effect of oxygen concentration on friction of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/CN<sub>x</sub> in N<sub>2</sub> gas with relative humidity of 0.1-0.4 %RH

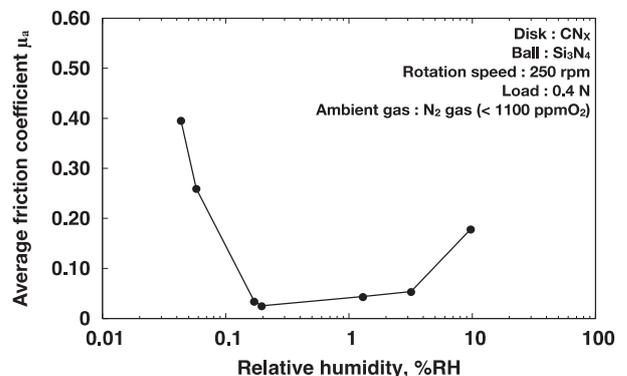


Fig. 2 Effect of relative humidity on friction of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/CN<sub>x</sub> in N<sub>2</sub> gas

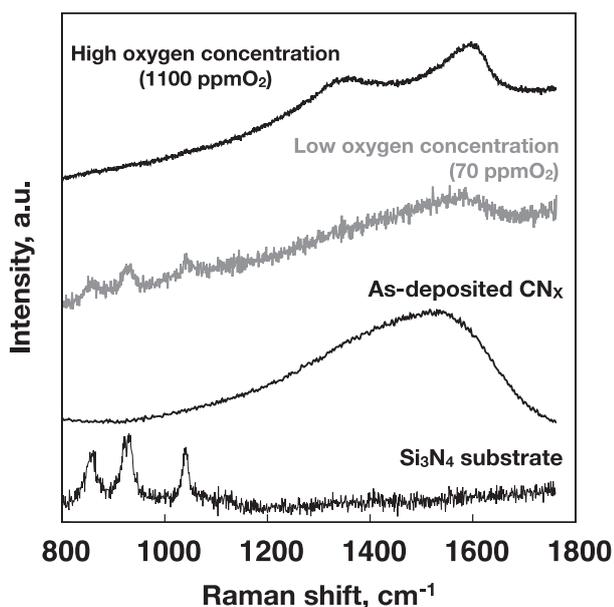


Fig. 3 Raman shift of wear scar on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> balls after sliding against CN<sub>x</sub>-coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> disk in N<sub>2</sub> gas

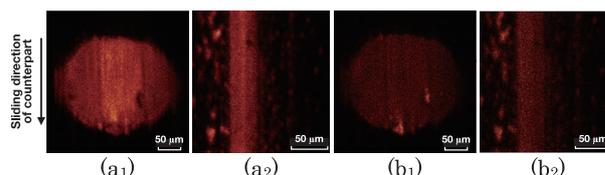


Fig. 4 (a) <sup>2</sup>H; (b) O<sup>2</sup>H TOF-SIMS images of wear scar of CN<sub>x</sub>-coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball ((a<sub>1</sub>), (b<sub>1</sub>)) and wear track of CN<sub>x</sub>-coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> disk ((a<sub>2</sub>), (b<sub>2</sub>))

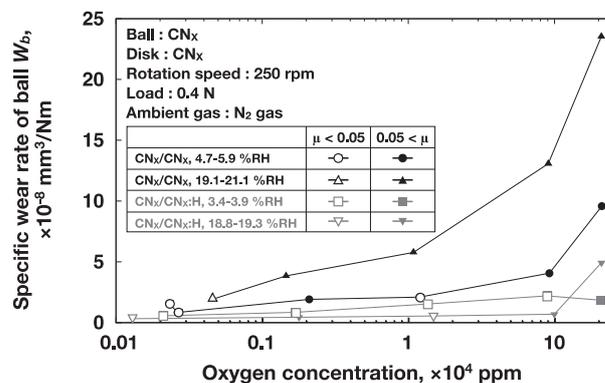


Fig. 5 Effect of the oxygen concentration on the specific wear rate of CN<sub>x</sub> coatings on ball slid against CN<sub>x</sub>-coated or CN<sub>x</sub>:H-coated disk in N<sub>2</sub>

えられる。また、CN<sub>x</sub>膜がおおよそ  $3.0 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  以下の比摩耗量を示すとき、0.05以下の低摩擦係数を発現することを明らかにした。さらに、膜内部に水素を含有するCN<sub>x</sub> (CN<sub>x</sub>:H) 膜をディスク試験片に施すことで、CN<sub>x</sub>膜付ボールの摩耗が減少することを明らかにした(Fig. 5)。これは、膜内部に水素を含有することで相手材への炭素の移着が相対的に増加し[3]、ボール試験片表面における炭素ベースの層の自己形成が維持され、結果として摩耗及び摩擦が減少したものと考えられる。

- [1] 久保百司, J. Comput. Chem. Jpn., 12, 1 (2013) A3-A13.
- [2] P. Wang, M. Hirose, Y. Suzuki, K. Adachi, Surface and Coatings Technology, 221, (2013) 163-172.
- [3] 王楊, 鶴田武, 村林宏紀, 小林康彦, 白珊丹, 樋口祐次, 尾澤信樹, 足立幸志, 久保百司, トライボロジー会議 2015 春 姫路予稿集, (2015) 350-351.

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 窒化炭素膜の低摩擦発現に及ぼす酸素と水分の影響の解明  
窒素ガス環境における0.05以下の超低摩擦係数発現時のCN<sub>x</sub>膜表面を、Raman分光分析、TOF-SIMS分析、及びXPS分析し、雰囲気ガスとCN<sub>x</sub>膜の摩擦化学反応を解明し、その摩擦への影響を検討している。
2. 窒化炭素膜の摩耗特性に及ぼす酸素と水分の影響の解明  
水分量及び酸素量を制御した窒素ガス環境における摩耗試験を行い、CN<sub>x</sub>膜の摩耗に及ぼす酸素と水分の影響を明らかにしている。また、四重極型質量分析計を導入し、摩擦試験中の化学反応生成物をその場検出可能な装置を開発・評価し、摩耗機構の解明を行っている。

3. 窒化炭素膜による超低摩擦発現のためのナノ界面形成機構の解明  
窒素ガス環境における超低摩擦発現時のCN<sub>x</sub>膜摩耗痕をTOF-SIMS分析し、摩擦面における深さ方向の結合状態を解明している。得られた知見をもとに、超低摩擦発現のためのナノ界面形成機構を提案している。

#### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Naohiro Yamada, Tomomi Watari, Takanori Takeno, Koshi Adachi, Role of water and oxygen molecules on lubricity of carbon nitride coatings in nitrogen gas environment, Tribology Online, (accepted).

#### 【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. Tribology Online

#### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Naohiro Yamada, Tomomi Watari, Takanori Takeno, Koshi Adachi, Lubricity of carbon nitride coatings by tribochemical reactions with oxygen and water molecules in nitrogen gas environment, 20th International Conference on Wear of Materials, Toronto, Canada, (2015.4.12-16) P2.51.
2. 山田脩裕, 渡友美, 竹野貴法, 足立幸志, 窒化炭素膜の摩擦特性に及ぼす酸素と水分子の影響, トライボロジー会議 2015春 姫路 講演論文集, 姫路市, pp.270-271 (2015.5.27-29).
3. 渡友美, 山田脩裕, 竹野貴法, 足立幸志, 窒化炭素膜を用いた摩擦システムにおける大気中低摩擦発現のための必要条件, トライボロジー会議 2015春 姫路 講演論文集, 姫路市, pp.272-273 (2015.5.27-29).
4. 渡友美, 山田脩裕, 竹野貴法, 足立幸志, 窒化炭素膜を用いた大気中低摩擦システムに関する研究, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 仙台市, pp.517-518 (2015.9.4-6).
5. Naohiro Yamada, Tomomi Watari, Takanori Takeno, Koshi Adachi, Effect of Oxygen and Water Molecules on Super-low Friction of Carbon Nitride Coatings, International Tribology Conference, TOKYO 2015, pp.145-146 (2015.9.17).

#### 【研究費の獲得】

名称：日本学術振興会特別研究員奨励費

機関：2016年度, 2017年度

氏名 吉川 穰



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

乱流の初生過程に関する研究

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

私は博士研究において、平板境界層の乱流遷移における乱流の初生に至るメカニズムを明らかにすることを目的としている。過去の研究で、主流乱れが大きい場合には、層流境界層中に流れ方向に伸びた高速及び低速の領域が平板スパン方向に交互に並ぶストリーク構造が発達し、低速部の下流で孤立した乱流領域が発生することが分かっている。[1]本研究では、平板境界層中に置いたブロック列の下流にストリーク構造を形成し、短時間の噴流による刺激を与え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った。その際、噴流の強さには一様流速の18%と20%の2種類を採用し、流れ場の違いを観察した。

図1に渦構造の体積の時間変化を示す。渦構造は速度勾配テンソルの第二不変量である $Q$ 値をもとに定義し、あるしきい値で渦を描画した場合の時々刻々の体積を算出した。いずれの場合も渦構造の体積は時間の経過とともに増加・減少する。しかし、一様流速の18%の強さで噴流を噴射した場合にはその後も単調減少するのに対し、20%の場合には $t=200$ を境に再度渦構造の体積は増加に転じており、成長することが分かる。そこで $t=200$ において20%の場合の流れ場を観察すると、図2の右側に示すような渦構造が存在しており、その中には緑色の丸枠で囲った壁面垂直方向及びスパン方向に傾いた斜めの縦渦が存在していた。この渦構造は同時刻の18%の場合の流れ場では観察されず、さらにその後の時刻においても成長を続け、流れの複雑化に深く関わっていることが分かった。

次にこの斜めの縦渦がどのようにして生成されたのかを調べるため、20%の場合の流れ場の時間を戻して観察したところ、 $t=170$ においては図2の左側に示すような赤丸で囲った横渦であることが分かった。この横渦を含む流れ方向に垂直な断面における速度ベクトル場と渦度場を図3に示す。図3の左側では流れ方向渦度で着色しており、図2の黒丸で囲った縦渦を同様に黒丸で示している。これらの縦渦の内側には青色の矢印で示したような下向きの速度が現れており、それにより境界層内に存在するスパン方向の渦度はその位置に集中する。図3の右側ではスパン方向渦度で着色しており、左側の図で矢印の先に相当する部分でスパン方向の強い領域が存在していることが分かる。この領域は図2の赤丸で囲った横渦に対応しており、以上より縦渦が作る下向きの速度によって境界層内のスパン方向渦度が集中し、横渦が形成されることが分かった。この横渦はその後縦渦によって斜め上向きに巻き取られるように伸長され、最終的に斜めの縦渦を形成する。

最後に18%の場合において、渦構造の体積が単調に減少した理由について考察するため、 $t=170$ と $t=190$ における流れ場を図4に示す。18%の場合においても $t=170$ では横渦と周囲の縦渦が同様の構造を形成しているものの、 $t=190$ では横渦が消失してしまっていることが分かる。つまり、18%の場合には斜めの縦渦が形成される前に横渦が消えてしまったため、その後の流れ場の複雑化を引き起こすことができなかったものと考えられる。

[1] Matsubara M. and Alfredsson P. H., “Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 430 (2001), pp. 149-168.

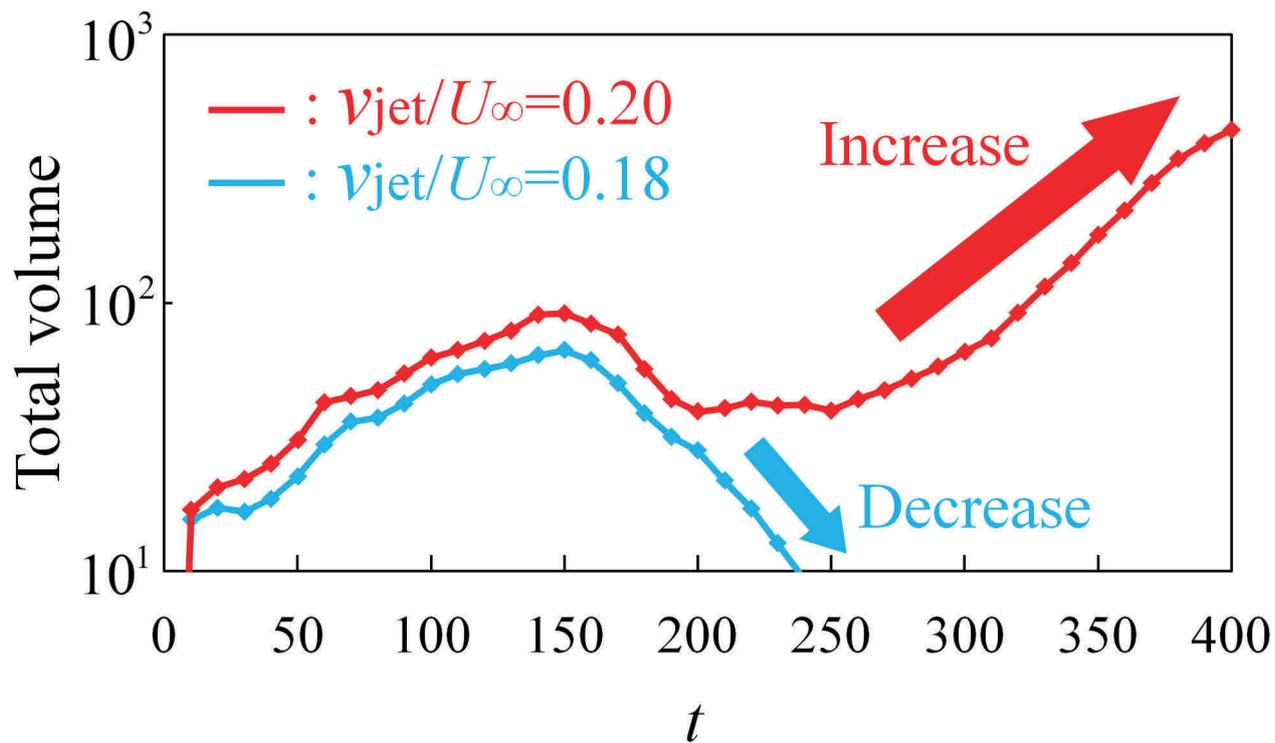


図1 渦構造の体積の時間変化

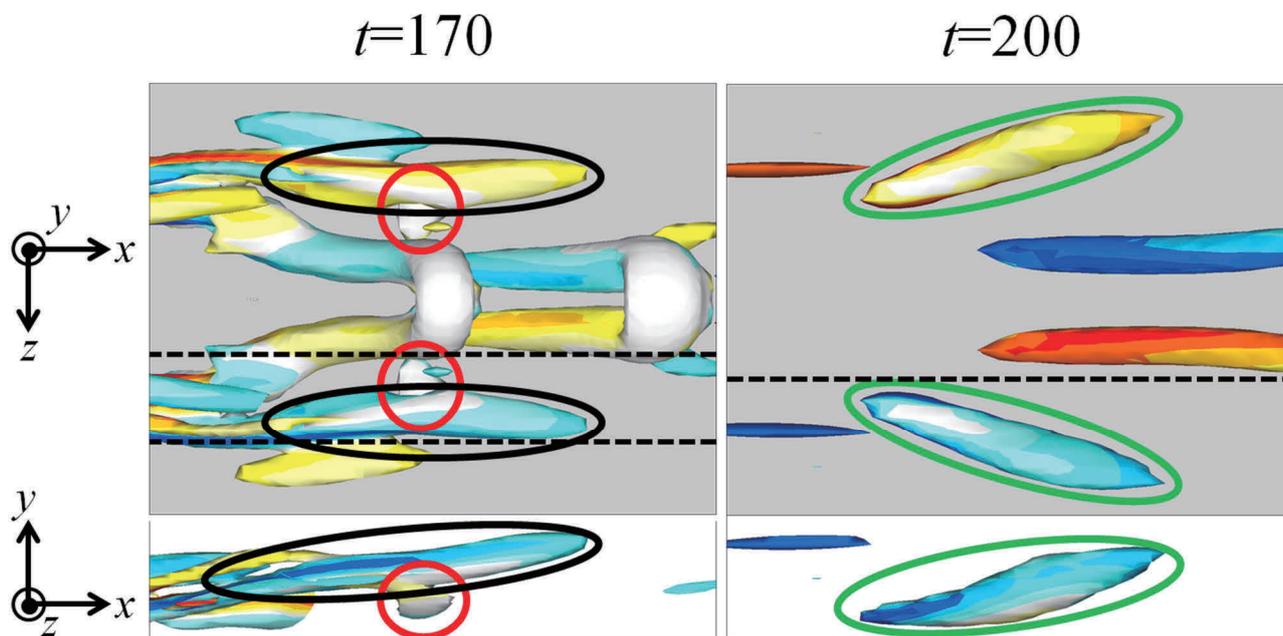


図2 成長する渦構造とその起源(一様流速度の20%で噴流を噴射した場合)

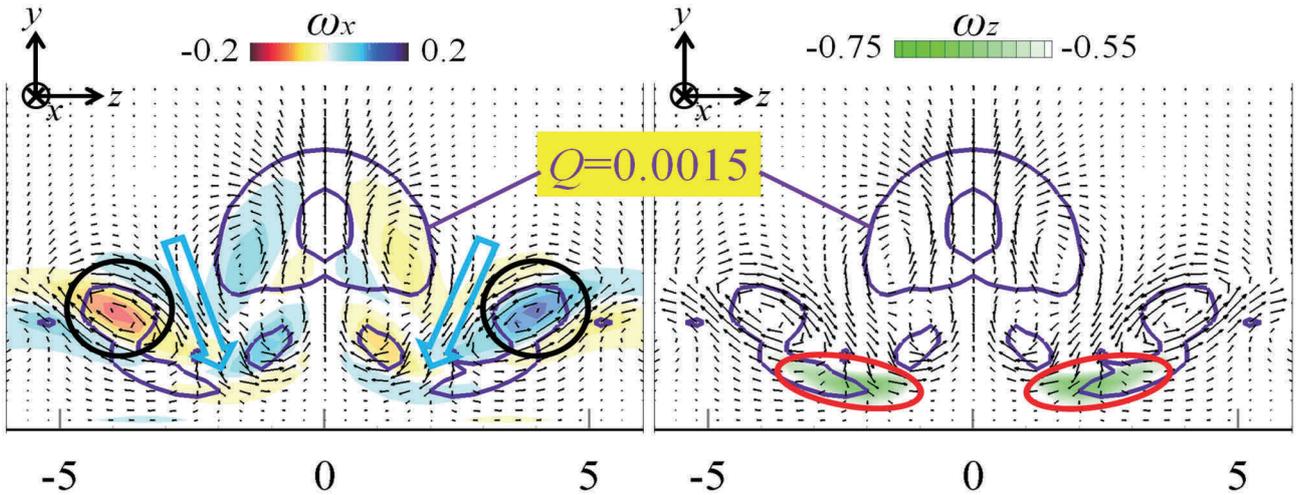


図3  $t=170$ における速度ベクトル場と渦度場(一様流速の20%で噴流を噴射した場合)

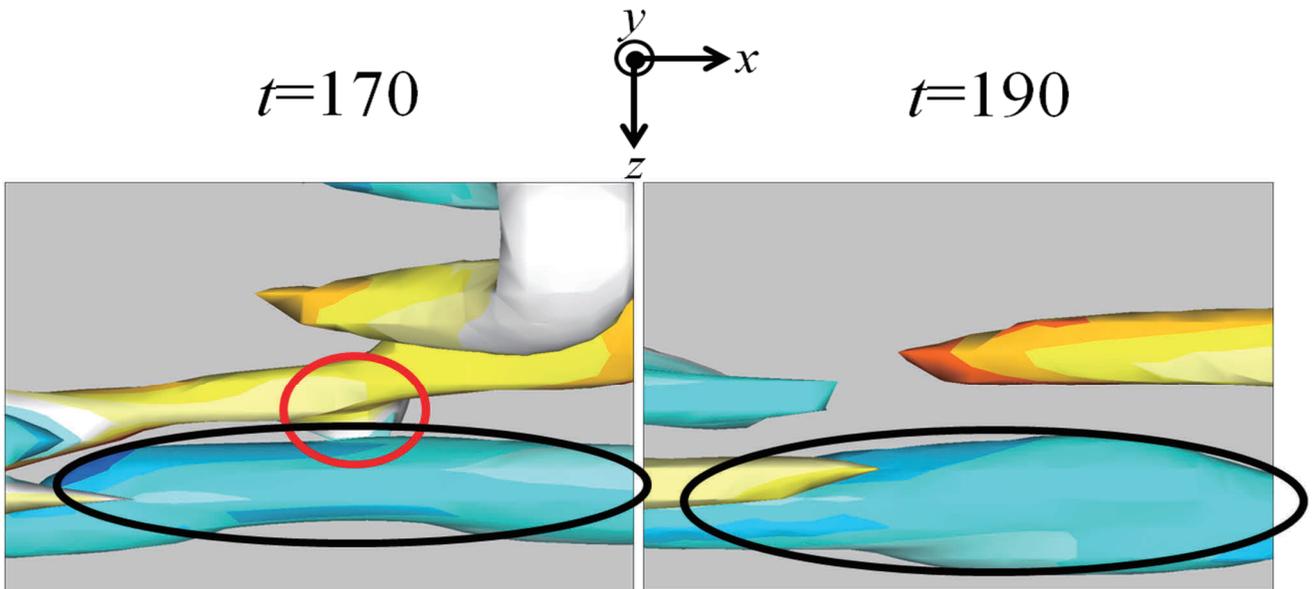


図4 横渦の時間変化(一様流速の18%で噴流を噴射した場合)

**平成27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)**

- ・ 機械学会の研究分科会にて研究を紹介
- ・ 流体若手夏の学校2015への参加

**平成27年度の研究業績**

**【研究内容】**

- ・ 低速ストリークに対して噴射する噴流の強さを変えた場合に、渦構造の体積が減少せずに増加に転じる鍵となる渦構造の特定とその生成メカニズムの解明
- ・ 壁面垂直方向及びスパン方向に対して斜め向きの縦渦が形成された場合、後にその斜めの縦渦の周りで構造が複雑化する様子が観察された。斜めの縦渦は、別な縦渦が作る下向き速度によって壁面付近

に集中した渦度を元に横渦が形成され、その横渦が縦渦によって斜め上向きに伸長されることで形成されることが分かった。

・より下流で、斜めの縦渦の周りに現れる渦構造の発生メカニズム

斜めの縦渦の周りに新たな渦構造が発生・成長することで流れ場は急激に複雑になり、乱流化する。この新たな渦構造は流れ方向渦度成分を持っており、初期には渦度のtiltingによってその成分が生成されていた。これは渦線に対して、等速度線が傾いているために起こっていたことが分かった。

#### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

##### 1. 国際学会

Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi,  
Vortical Structures Contributing to the Onset of Turbulence,  
Twelfth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, (October 27-29, 2015),  
p.806-807, USB Memory.

##### 2. 国内学会

吉川 穰, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐,  
乱流の初生に関わる渦構造に関する数値計算による研究,  
日本流体力学会年会2015講演論文集, (2015-9), 061, USBメモリ.

#### 【受賞・特許等】

・ICFD2015 Best Award受賞

氏名 吉村 光生



所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D1

研究課題

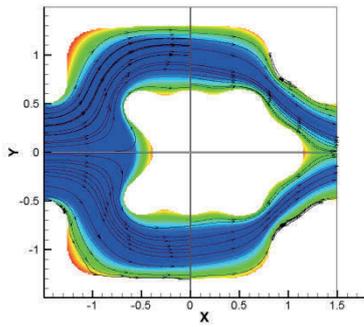
流体問題におけるトポロジー最適化の大域的解探索手法の開発と実問題への応用

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

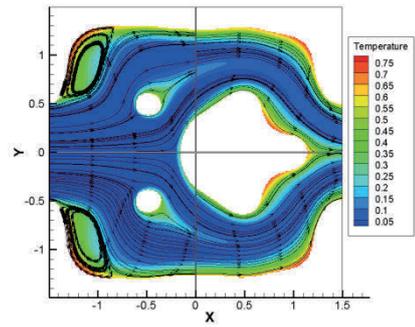
本年度は、遺伝的アルゴリズムを流体問題のトポロジー最適化に適用する上でベンチマーク問題として流路の設計を対象として提案手法の妥当性の検証を行った。提案手法は昨年度までにレイノルズ数(以下  $Re$  数)が 5 の低  $Re$  数の問題に着目していたが、本年度は  $Re$  数が 50 のケース、また、流路の流入口と流出口の数を変えた形状についても提案手法を適用した。

構造最適化はその形状定義の方法によって寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化に分けられる。これらの最適化手法において、最も形状表現自由度が高く革新的な構造の創出及び大幅な性能改善が期待されるトポロジー最適化が近年注目を集めている。本研究では、流体問題のトポロジー最適化について大域的最適解の探索が可能な遺伝的アルゴリズムの適用と応用を目的としている。トポロジー最適化の形状定義は固定された設計領域において材料の有無を特性関数によって判別する材料の分布問題を解くことに等しい。しかし、設計領域全体における計算格子と同数の設計変数を置くことは遺伝的アルゴリズムの適用を考えた際に非現実的な計算コストを要求する。したがって、本研究では設計領域において離散化された数点のコントロールポイントに設計変数を置き、領域全体に亘ってラプラス方程式を解くことでコントロールポイント間の特性関数の値を補間している。本研究では、流路の性能を測る指標として圧力損失の最小化と壁面との熱伝達による伝熱の最大化を目的関数とする単目的または多目的最適化問題を扱う。これらの目的関数は数値流体力学ソルバーによって評価されるが、遺伝的アルゴリズムの集団ベースの多点同時探索を実現するために、多数回の目的関数評価、すなわち膨大な計算コストが求められる。本研究では、この問題に対処するため Kriging モデルによって各目的関数を代数式の形で近似し、この代数式を遺伝的アルゴリズムの評価に用いることで計算コストの低減を図る。図 1 はレイノルズ数 50、ヌセルト数 10 の流入口・流出口一つずつの流路の熱伝達最大化を目的関数とする単目的最適化問題の最適化結果である。 $Re$  数の上昇により流体の剥離が発生することから、流路内部に置かれる固体の島の形状は剥離を起こさないように流れ方向に凸型になる必要があるといえる。また、最適化の過程で、最終的に探索された大域的最適解の他に、それとほぼ同等の目的関数値を持ちながら流路のトポロジーが大きく異なる固体が発見された。これは、設定する問題が多峰性の強い問題であり、その解探索には提案手法のような集団ベースの多点同時探索手法を採用する必要性を示唆している。

提案手法は、トポロジー最適化を遺伝的アルゴリズムで扱えるように設計領域に離散化されたコントロールポイントを配置して設計変数の数を減らしている。しかし、トポロジー最適化の設計自由度の高さと遺伝的アルゴリズムが局所探索を不得手とすることにより、解探索の過程で、問題の性能向上に寄与しない突起部などの無駄な要素を除去できない問題がある。そこで、本研究は 2 次元流路についてラプラス方程式の解で表現される流体と固体を分ける特性関数の分布に対し、領域全体でヘルムホルツ方程式を解くことで、現在の形状表現の自由度を下げることなく、より多様な形状を表現でき、かつ無駄な部分を除去できる手法を提案した。図 2 は同じ設計変数の組に対してラプラス方程式を解いて得られる特性関数の分布によって表現される流路(左)及び、ヘルムホルツ方程式によるフィルタリングを通じた特性関数によって表現される流路(右)を表している。そして、この手法をベンチマーク問題に適用し、以前の提案手法の結果と比較を行った。その結果、新手法は以前の手法と同等の最適解を探索することができ、かつ無駄な部分の少ない形状を探索することができた。また、新手法を流路の圧力損失最小化を第 2 の目的関数とした多目的最適化にも適用した。提案した新手法は流線型の島を作ることができ、今回のベンチマーク問題では大きな性能向上は見られなかったが、高レイノルズ数の問題を扱うとき、圧力損失の改善が期待できる結果を示した。(図 3)

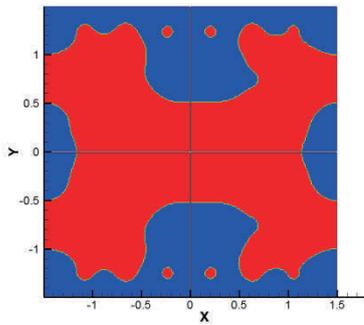


大域的最適解と近い目的関数値を持ちながらトポロジーが異なる解

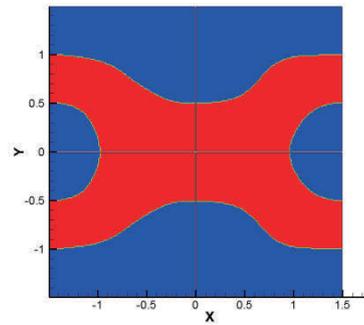


大域的最適解

図 1 ベンチマーク問題の最適化結果の温度分布と流線

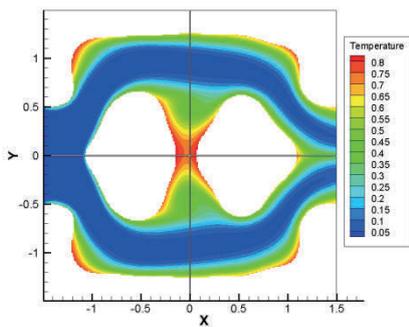


フィルタリング前

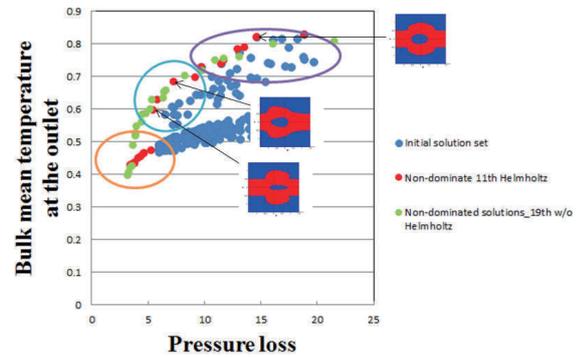


フィルタリング後

図 2 ヘルムホルツ方程式によるフィルタリング



単目的ベンチマーク問題の最適解



多目的最適化の解空間

図 3 ヘルムホルツ方程式によるフィルタリングを適用後の最適化結果

## 平成27年度の研究業績

### 【研究内容】

1. 遺伝的アルゴリズムの流体問題トポロジー最適化への適用  
遺伝的アルゴリズムを流体問題のトポロジー最適化に適用する。本年度は複数の新たなベンチマーク問題を検討した。
2. トポロジー最適化における製造可能性を考慮した形状表現手法の検討  
遺伝的アルゴリズムを適用したトポロジー最適化では、トポロジー最適化の設計自由度の高さと遺伝的アルゴリズムの特性によって、対象の性能向上に寄与しない無駄な要素が出現することがある。本研究ではそれに対処するフィルタリング手法を提案し、従来の自由度を下げることなく、製造可能性を考慮した解探索を実現した。

### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Mitsuo Yoshimura, Takashi Misaka, Koji Shimoyama, Shigeru Obayashi, “Topology Optimization of Flow Channels with Heat Transfer Using a Genetic Algorithm Assisted by the Kriging Model”, *EUROGEN 2015: Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Social Problems*, Glasgow, UK, 14-16 September 2015.

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 吉村 光生, 三坂 孝志, 下山 幸治, 大林 茂, 「遺伝的アルゴリズムによる熱伝達を考慮した流路のトポロジー最適化」, 第20回計算工学講演会, 茨城, 8-10 June 2015.
2. Mitsuo Yoshimura, Takashi Misaka, Koji Shimoyama, Shigeru Obayashi, “Topology Optimization of Flow Channels with Heat Transfer Using a Genetic Algorithm”, *Proceedings of the 1st NUAU-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology*, Nanjing China, 21-22 June 2015.
3. Mitsuo Yoshimura, “Multiphysics Topology Optimization Using a Genetic Algorithm”, Beijing China, 24-25 June 2015.
4. 吉村 光生, 「遺伝的アルゴリズムによる熱流体連成問題のトポロジー最適化」, 航空宇宙流体科学サマースクール 2015, 神奈川, 2-4 August, 2015.
5. Mitsuo Yoshimura, “Multiphysics topology optimization using a surrogate-based genetic algorithm”, *Next Generation Transport Aircraft Workshop 2016*, Hawaii, USA, 22-25 February 2016. (発表予定)

### 【受賞・特許等】

受賞日 : 2015年3月25日  
受賞名 : 日本機械学会三浦賞  
組織名 : 日本機械学会

### 【研究費の獲得】

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27年度 博士課程後期学生国際会議派遣  
期間 : 2015年9月

氏名 湯口 雄大



所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D2

研究課題

ロッククライマー型小天体探査ロボットの力学と運動制御

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

本研究では、小惑星や彗星などの小天体の表面を探査する新たなロボットとして、小天体表面を掴みながら移動するロッククライマー型探査ロボットの開発を目指している。本年度は、小天体表面を継続して移動するための運動制御法について検討し、シミュレーションおよび実験を実施してその妥当性を検証した。

小天体表面の環境は、不整地かつ重力が極めて小さいという特徴を有している。そのため、たとえ支持腕のグripperが小天体表面を掴んでいても、遊腕の動作によって支持腕のグripperにかかる反力がある程度を超えてしまうと、グripperが表面から離れてしまい、継続して移動することができなくなる。よって、目的のロボットを開発するためには、遊腕の動作による支持腕のグripperへの反動を排除する運動制御法を確立することが必要である。そこで、本研究では、ロボットが冗長自由度を有する際に存在する反動零空間を利用した無反動軌道を生成することにより、支持腕のグripperに対して反動を与えない歩容制御を実現した。具体的には、まず支持腕のグripperの慣性を実際よりも仮想的に大きく設定することで、グripperによる支持腕の固定状態を表現した。次に、グripperに対するロボット全体の運動量・角運動量が遊腕の動作によって変化しない条件を元に、無反動軌道を実現するための拘束条件式を導出した。この拘束条件を遊腕の手先位置制御と組み合わせることにより、支持腕のグripperに対して反動を与えずに遊腕を動作させることが可能となる。そして、この制御則を遊腕と支持腕が入れ替わる毎に切り替えることによって、連続した無反動移動を実現する。この制御則の妥当性を確かめるため、初めに二次元での移動シミュレーションを実施した。なお、無反動とする軸は、小天体表面からの浮遊を防ぐために、小天体表面に対して垂直方向（図1におけるx軸）とした。その結果、図1の支持腕のグripperにかかる力のグラフに示される通り、小天体表面に垂直な方向に対してほとんど反力を発生させることなく、連続して移動することができた。この時の移動の様子の一部を図2に示す。これより、提案するロボットが不整地上を連続して移動可能なことを明らかにした。

次に、実機を開発して実験によりこの制御則の有効性を検証した。図3に開発した空気浮上テストベッドを示す。このテストベッドは、片腕2自由度の双腕型ロボットである。また、空気タンクを備えており、圧縮した空気をロボット底面に取り付けたエアベアリングから噴出することにより、二次元微小重力環境での挙動を模擬することができる。本実験では、ロボットの歩容を検証することを目的として、移動は一步のみとした。また、片腕の手先を平板に固定することにより、支持腕のグripperによる把持状態を模擬した。そして、図4に移動実験によって支持腕の手先に作用した反力のグラフを示す。このグラフから、無反動制御を導入することで、小天体表面に対して垂直な方向（x軸）に作用する反力が大きく抑えられることが分かり、無反動制御の有効性を実験的にも明らかにすることができた。

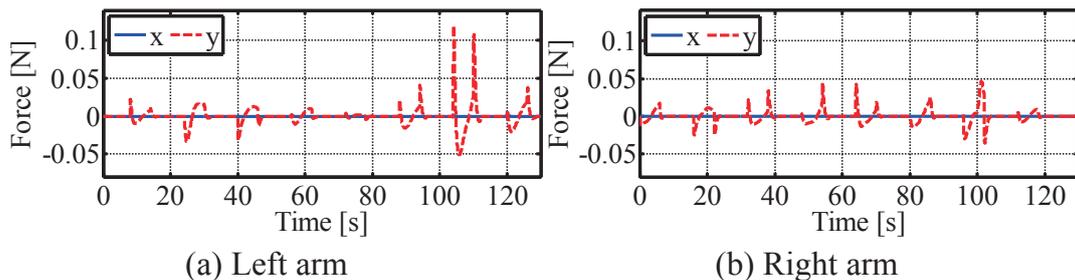


図1 小天体表面移動シミュレーションにおけるロボットの支持腕のグripperにかかる反力

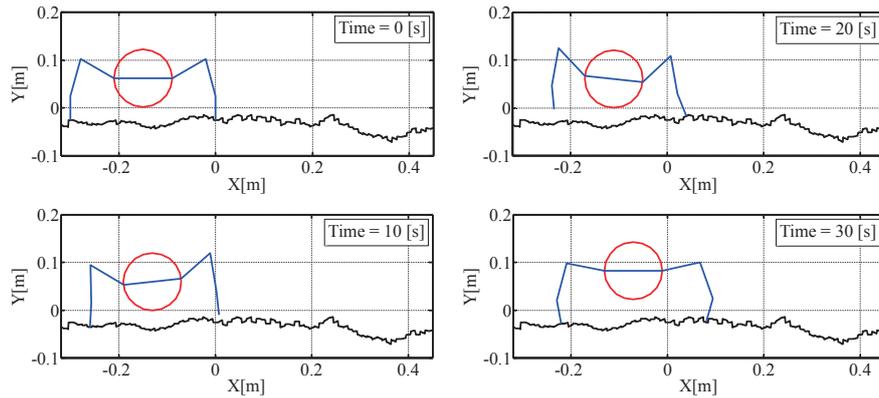


図2 小天体表面移動シミュレーションにおけるロボットの移動の様子

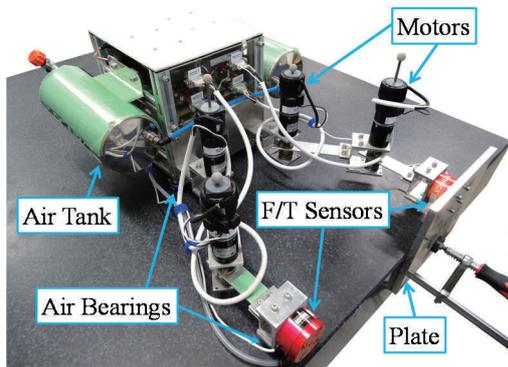
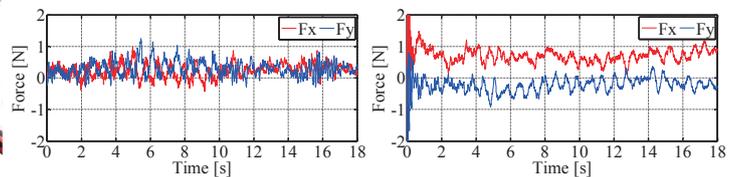


図3 空気浮上テストベッド



(a) With reactionless control

(b) Without reactionless control

図4 移動実験における支持腕の手先にかかる反力

## 平成27年度の研究業績

### 【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Yudai Yuguchi, Kenji Nagaoka and Kazuya Yoshida, "Verification of Gait Control Based on Reaction Null-Space for Ground-Gripping Robot in Microgravity," in Proc. 2016 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, May, 2016. (Accepted)
2. Yudai Yuguchi, Warley F. R. Ribeiro, Kenji Nagaoka and Kazuya Yoshida, "Analysis on Motion Control Based on Reaction Null Space for Ground Grip Robot on an Asteroid," in Proc. 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe, Japan, July, 2015.
3. Yudai Yuguchi, Warley F. R. Ribeiro, Kenji Nagaoka and Kazuya Yoshida, "Experimental Evaluation of Gripping Characteristics Based on Frictional Theory for Ground Grip Locomotive Robot on Asteroid," in Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Seattle, WA, USA, May, 2015.

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Yudai Yuguchi, Kenji Nagaoka and Kazuya Yoshida, "Mobility Analysis of Ground-Gripping Robot like a Rock Climber for Minor Body Exploration," The 25th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, A-2, Kanagawa, July, 2015.

### 【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27年度優秀研究奨励プログラム  
 期間：平成27年度

### 【研究費の獲得】

名称：日本学術振興会特別研究員（DC2）奨励費  
 期間：平成28年度～平成29年度

氏名 張 明子



所属 工学研究科 バイオロボティクス専攻・D3

研究課題

Manufacture-oriented optimization methods for flow diverter stents in treating intracranial aneurysms

### 平成27年度における本卓越拠点に対する取り組み

Flow diverting stent (FDS) becomes increasingly favorable in treating giant and wide-neck brain aneurysms. Flow diversion efficiency is thought to be of great importance in predicting the prognosis of FDS treatment. To visualize the flow pattern through the aneurysmal orifice under different FDS implantation potentially helps engineers with the upgraded design of FDS device.

In this study, a deployed FDS device was mimicked by eight helices including 4 clockwise and 4 counter-clockwise clinging to the wall of the parent artery of an idealized aneurysm model. (Fig. 1) Different objective functions-aneurysmal average velocity (AAV) and aneurysmal maximum velocity (AMV)-were applied in obtaining better designs of FDS device. A pre-constructed combination( Anzai u. a., 2014 ) of lattice Boltzmann method (LBM) and simulated annealing (SA) procedure was used to automatically identify an optimal device shape. Visualization of flow patterns through the aneurysmal orifice was performed by using an open source post-processing software Paraview.

This method was applied to two idealized aneurysm geometries: the Straight(S) Model and the Curve(C) Model. We compared the flow reduction  $R_f$  by measuring the AMV before and after the design optimization with respect to the non-stented case. The  $R_f$  of FD in S model experienced an improvement from 83.63% to 92.77%, while the  $R_f$  for C model increased from 92.75% to 95.49%, both having reached the pre-defined convergent states. By visualizing the post-optimization streamlines and velocity vectors, we found the disruption of the bundle of inflow may closely relate to a high efficient FD design. The optimized device geometries significantly differed when different objective function (AMV/AAV) was selected.

Facing the manufacturing possibility, this study provided a design optimization method for the most commonly applied helix-like FD devices, in which the optimization parameters were carefully decided to maintain its original helix-like structure.

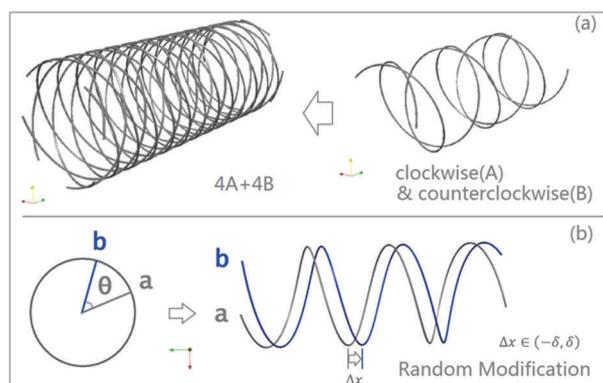


Fig. 1 Construction of FD wires and schematic of Random Modification strategy.

## 平成27年度の研究業績

### 【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Bastien Chopard, Makoto Ohta , Manufacture-Oriented Design Optimization for a Flow Diverter Stent Using Lattice Boltzmann Method and Simulated Annealing, the 11th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11), June 7-12, 2015, Sydney, Australia

### 【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Makoto Ohta, Introduction of Optimization of Design using Combination of Lattice Boltzmann Method as CFD and Simulated Annealing for Reduction of Flow Speed, the 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, June 21-22, 2015, NUAA, Nanjing, China
2. Hitomi Anzai, Yuuki Yoshida, Mingzi Zhang, Makoto Ohta, Searching for valuable hemodynamic parameters for applying to optimization study, the 9th European Solid Mechanics Conference, July 6-10, 2015, Madrid, Spain
3. Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Bastien Chopard, Makoto Ohta, Towards the Patient-specific Design of Intracranial Stents for Advanced Flow Diversion Efficacy, Proceedings of 2nd Biomedical Symposium and 1st Biomedical Engineering Symposium, Nov. 16, 2015, Sydney, Australia
4. Makoto Ito, Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Makoto Ohta, Optimization of Flow Diverter design, Beijing-Tohoku Biomechanics Symposium, November 25, 2015, Beijing University of Technology, Beijing, China

### 【受賞・特許等】

1. Best Student Presentation Award (Intracranial Stent Meeting 2015 (Gold Coast, Australia)) , Visualization of Flow Patterns through the Aneurysmal Orifice after Flow Diverter Optimizations with Different Objective Functions

