



氏名 阿部 敬太

所属 工学研究科化学工学専攻・D3

研究課題

高精度単結晶成長プロセスシミュレーションによる革新的単結晶成長技術の構築

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、著者らがこれまで開発した屈折率の異なる多相領域のふく射伝熱を扱える拡張ふく射要素法[1]を酸化物単結晶成長用CZ炉の総合熱解析法[2]へ導入し、結晶表面でのふく射の鏡面反射の影響を考慮できる精緻な総合熱解析法を構築するとともに、結晶表面が鏡面の場合の炉内温度分布に関する詳細な情報を得た。解析では、図1のLiNbO₃単結晶(直径22.8 mm)成長用高周波加熱CZ炉全体を対象とし、以下を仮定した。1：擬定常状態、2：融液内伝熱は熱伝導支配、3：結晶はふく射に対して半透過性であり非散乱体、結晶以外は不透明体、4：結晶表面は鏡面、その他の面は拡散面、5：ガス相は非ふく射性媒体、6：物性値の温度・波長依存性はない、7：固液界面形状は融点の等温線。ふく射要素法と総合熱解析法の統合は図2に示すように総合熱解析とふく射要素法で各々の計算結果を交換し合い、以下の手順で行った。(1)：炉内温度分布に基づき、ふく射要素法により各ふく射体積要素の発熱量および面要素の熱流束をそれぞれ求める。(2)：(1)の結果に基づき、総合熱解析により、炉内温度分布および固液界面形状を求める。(3)：固液界面形状が収束するまで(1)、(2)を繰り返す。なお総合熱解析の数値解析手法には有限要素法を用いた。

図3に炉内温度分布に及ぼす結晶表面のふく射特性の影響を示す。なお、拡散面のふく射伝熱解析には従来のモデル[1]であるP1法を用いた。本解析、P1法による炉内温度分布は結晶の肩部を除きほぼ一致した。また、結晶表面を鏡面とした場合は肩部で半径方向の温度勾配が増大した。これは結晶中心軸近傍から射出されるふく射の光線の多くは結晶肩部表面への入射角が小さいためガス側へ透過するが、結晶周囲近傍から射出するふく射の光線は入射角が大きく、その多くが全反射するため、結晶外部への熱損失が減少することによる。以上により結晶成長炉内の温度分布に及ぼす結晶表面のふく射特性(鏡面反射面、拡散反射面)の影響を明らかにした。

[1] Keita Abe, Ken-ichi Sugioka, Masaki Kubo, Takao Tsukada, and Shigenao Maruyama, Numer. Heat Transf. A, (2013), 63, 1-13.

[2] M. Kobayashi, T. Hagino, T. Tsukada, M. Hozawa, J. Cryst. Growth, (2002) 235, 258-270.

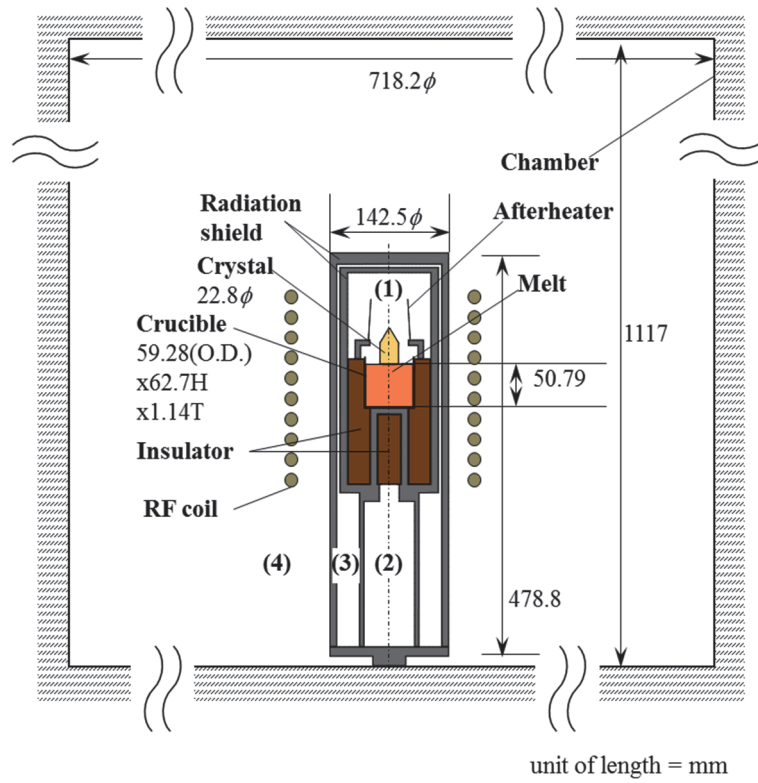


図1: LiNbO₃ 単結晶成長用高周波加熱CZ 炉

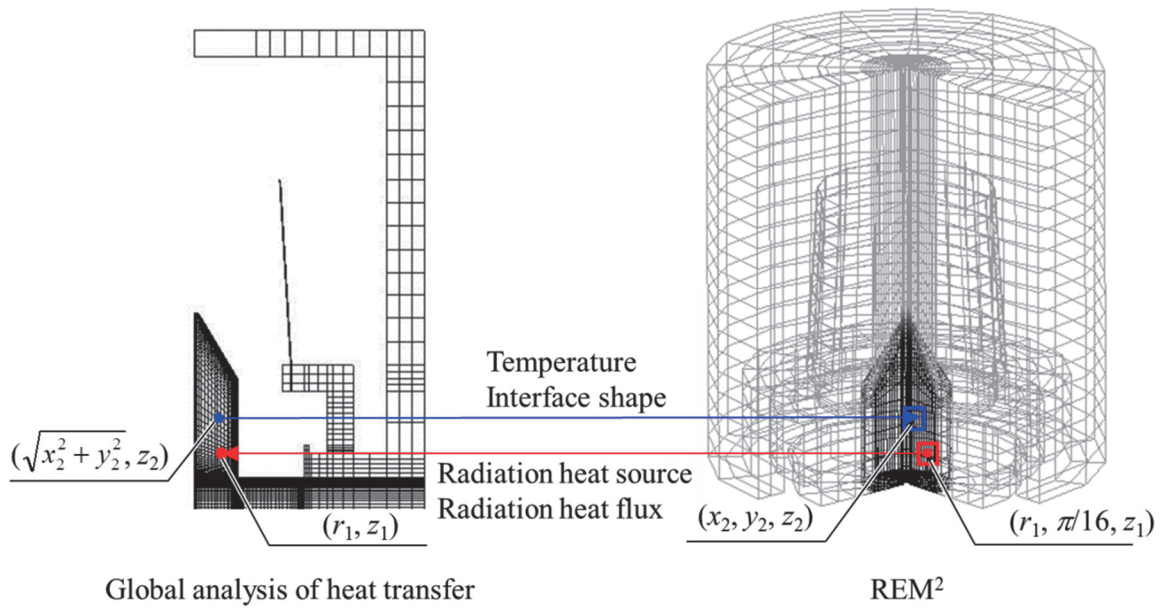


図2: 総合熱解析とふく射要素法で交換する値

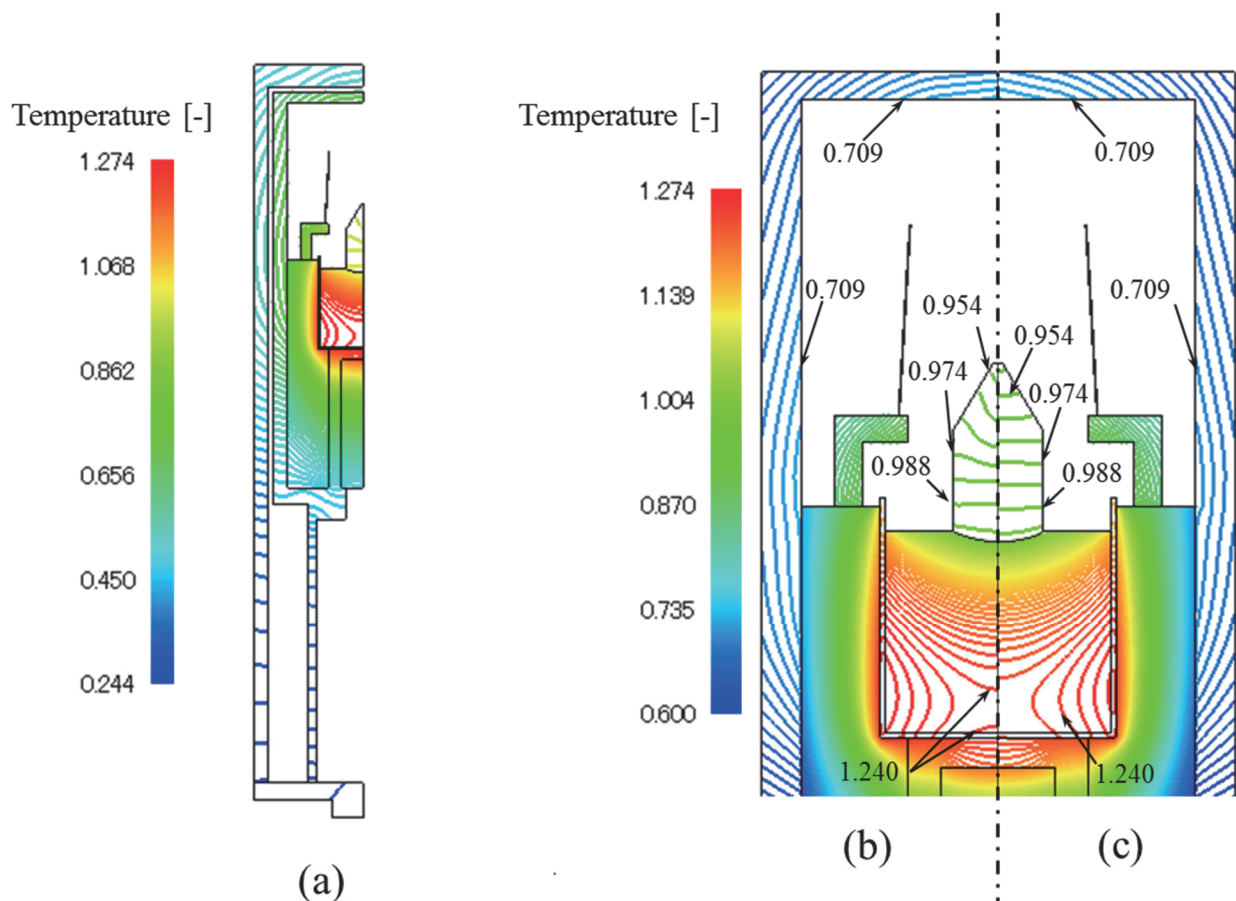


図3:炉内温度分布に及ぼす結晶表面のふく射特性の影響。(a) 炉内全体(鏡面), (b)結晶周り(鏡面), (c) 結晶周り(拡散面)。なお温度は融点で無次元化されている。

平成26年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

<国際会議>

名 称：The 11th International Conference on Flow Dynamics

主催団体：東北大学流体科学研究所

開 催 国：日 本

開催期間：2014.10.8 ～ 2014.10.10

役 割：Floor Leader

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 酸化物単結晶成長用CZ炉の数値シミュレーションに関する研究は平成26年度における本卓越拠点に対する取り組みで述べた通りである。
2. 同時にSiGe結晶成長用TLZ炉の数値シミュレーションに関する研究も行い、炉内熱環境と結晶内の組成分布の関係を明らかにした。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. K. Abe, S. Sumioka, K.-I. Sugioka, M. Kubo, T. Tsukada, K. Kinoshita, Y. Arai and Y. Inatomi, Numerical simulations of SiGe crystal growth by the traveling liquidus-zone method in a microgravity environment, J. Cryst. Growth, (2014), 402, 71-77

2. Keita Abe, Yuta Nagato, Ken-ichi Sugioka, Masaki Kubo, Takao Tsukada, and Shigenao Maruyama, Development of Global Model of Heat Transfer in Czochralski Furnace Taking Specular Reflection at Crystal Surface Into Account, Numerical Heat Transfer, part A: Applications, (in press),

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Keita Abe, Sara Sumioka, Ken-ichi Sugioka, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Kyoichi Kinoshita, Yasutomo Arai and Yuko Inatomi, 『10th Asian Microgravity Symposium』, 「Numerical study on transport phenomena in SiGe crystal growth process by traveling liquidus-zone method under microgravity」, P22, ポスター形式, 2014年10月(韓国, ソウル).
2. 阿部敬太, 住岡沙羅, 杉岡健一, 久保正樹, 塚田隆夫, 木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 『第51回日本伝熱シンポジウム』, 「微小重力下でのTLZ法によるSiGe結晶成長プロセスの数値解析並びに結晶内組成均一化条件の提案」, ESP306, ポスター形式, 2014年5月(浜松市)
3. 住岡沙羅, 阿部敬太, 杉岡健一, 久保正樹, 塚田隆夫, 木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 『化学工学会第46回秋季大会』, 「微小重力環境下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶成長条件の数値解析的検討」, O115, 口頭形式, 2014年9月(福岡市)
4. 木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 塚田隆夫, 宮田浩旭, 田中涼太, 阿部敬太, 住岡沙羅, 『第44回結晶成長国内会議』, 「TLZ法による微小重力下SiGe結晶成長実験」, 08aB05, 口頭形式, 2014年11月(東京)
5. 住岡沙羅, 阿部敬太, 杉岡健一, 久保正樹, 塚田隆夫, 木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 『第44回結晶成長国内会議』, 「微小重力下でTLZ法により成長したSiGe結晶の軸方向・径方向組成分布の数値シミュレーション」, 08aB03, 口頭形式, 2014年11月(東京)
6. 荒井康智, 木下恭一, 稲富裕光, 塚田隆夫, 阿部敬太, 住岡沙羅, 『第44回結晶成長国内会議』, 「微小重力下でTLZ法により成長したSiGe結晶の詳細な軸方向・径方向組成分布計測」, 08aB04, 口頭形式, 2014年11月(東京)
7. 住岡沙羅, 阿部敬太, 杉岡健一, 久保正樹, 塚田隆夫, 木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 『JASMAG-28』, 「微小重力環境下でTLZ法により成長したSiGe結晶内組成分布の数値解析」, 26H02, 口頭形式, 2014年11月(姫路市)
8. 木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 塚田隆夫, 宮田浩旭, 田中涼太, 阿部敬太, 住岡沙羅, 『JASMAG-28』, 「微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成の研究(その2)」, 26H03, 口頭形式, 2014年11月(姫路市)
9. 木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 塚田隆夫, 宮田浩旭, 田中涼太, 阿部敬太, 住岡沙羅, 『第29回宇宙環境利用シンポジウム』, 「微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成」, 15, 口頭形式, 2015年1月(相模原市)
10. 荒井康智, 木下恭一, 稲富裕光, 塚田隆夫, 阿部敬太, 住岡沙羅, 久保正樹, 『第62回応用物理学会春季学術講演会』, 「宇宙環境を利用した均一組成 宇宙環境を利用した均一組成SiGe結晶育成実験」, 12a-D13-2, 口頭形式, 2015年3月発表予定(平塚市)

【受賞・特許等】

年月日：2014年10月30日

受賞名：Best Student Award

組織名：The Organizing Committee of the 10th Asian Microgravity Symposium – 2014



氏名 阿部 浩司

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D3

研究課題

トルエン蛍光及びその消光の温度依存特性に関する研究

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、吸い込み式超音速ノズルを利用した、トルエンの蛍光強度の温度依存性、及び酸素、アセトンガスなどの消光剤による消光の大きさを評価する試験のデータの解析を行った。図1に示すように、対称形状のノズルの中心線に沿ってレーザーを照射して、超音速流中に含まれるトルエンを蛍光発光させ、カメラで撮影する。そのトルエン蛍光の輝度値の下流方向への変化と、ノズル形状から理論的に求めた各点の温度と密度を対応付けることで、蛍光の種々の温度特性を算出する。

この計測では、カメラのビニング設定、ノズル中心軸からのレーザーのずれ、レンズの収差による像のゆがみの影響により、画像上のあるy座標上で横方向にLIF輝度値のプロファイルを取得するだけでは、正しい結果が得られない恐れがある。それらの影響を補正して本来の輝度値プロファイルを求めるために、中心軸に垂直な断面における蛍光輝度値の分布と良く一致する双曲線正割関数 $Y=\text{sech}\{(X-m)/b\}$ (図2)を利用して、テンプレートフィッティングを行った。

まず、この関数の2つのパラメーター(m,b)を細かく変化させて、蛍光分布の中心のy方向へのずれ、及び分布の広がりの変化を再現する。すべてのm,bの組み合わせから得られるテンプレートに対して、異なるパターンでビニングを掛け、2×2, 4×4, 8×8のテンプレートプロファイルを生成した。解析するデータの各x座標点におけるy方向の輝度値分布と作成した多数のテンプレートの一致度を、相関係数を計算することで求め、最も一致度が高いものをそのx位置における最適テンプレートとした。さらに、最小二乗法により、最適テンプレートを上下方向に拡大、縮小して輝度値プロファイルとフィッティングさせることで、輝度値を求めた。

上に述べた解析で得られた輝度値から導いた酸素によるトルエン蛍光消光の消光係数(Stern-Volmer係数： k_{sv})の温度依存性のグラフを図3に示す。実線は、常温以上で定義されたモデル式を低温側に拡張したもので、四角のプロットは、従来の、単純にx方向に輝度値をトレースする解析法で得られた結果である。図から分かるように、新たな解析法で得られた k_{sv} は、従来のものに比べ低温側で低くなること がわかる。今後はこの解析の妥当性を検討するとともに、蛍光の他の温度依存特性の算出にも利用する予定である。

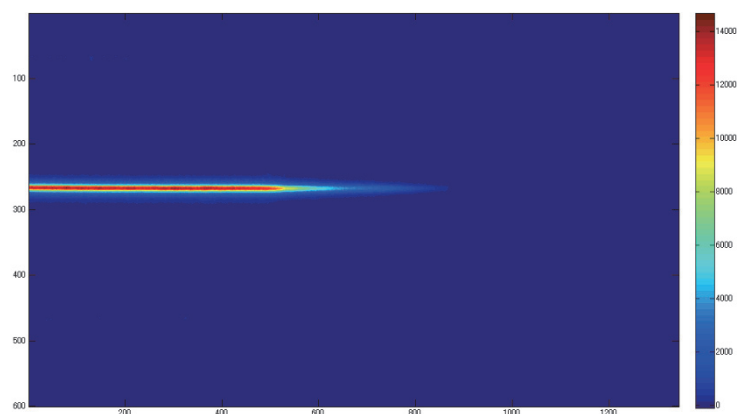


図1 トルエン蛍光画像

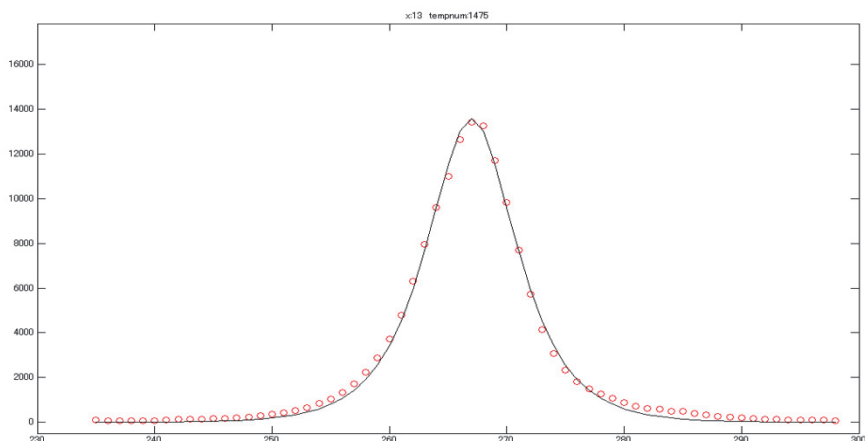


図2 輝度値のy方向分布と双曲線正割関数の比較

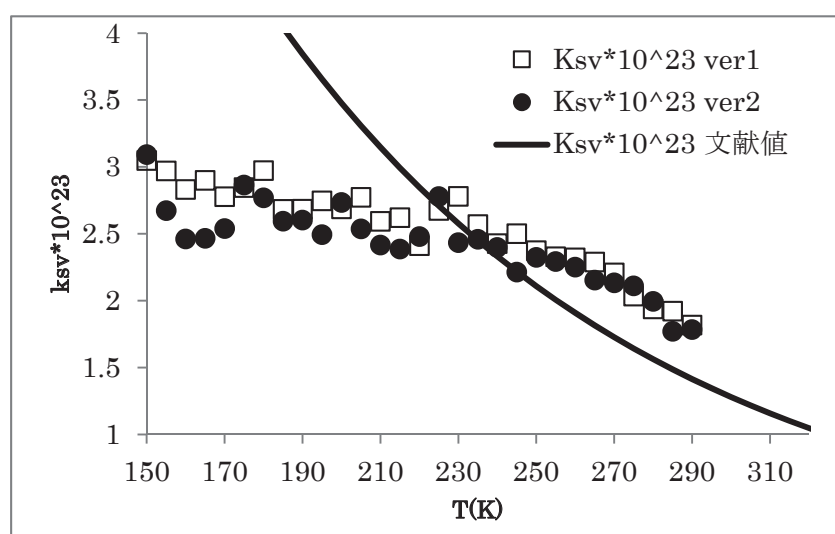


図3 酸素によるトルエン蛍光消光のstern-volmer定数の温度依存性

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. トルエン蛍光及びその消光の温度依存特性に関する研究
岡山大学に半年間滞在し、低温域におけるトルエン蛍光の温度依存、及びその酸素、アセトンなどの消光剤による消光が温度変化によって受ける影響を、超音速ノズルを用いた手法で調べた。これにより、これまで報告のなかった低温域の広い温度範囲（150 K～常温付近）でトルエン蛍光の種々の温度依存性を取得できた。
2. テンプレートフィッティングを用いたトルエン蛍光信号強度の解析
上述の試験で得た蛍光信号データの詳細な解析を行うにあたり、まずはノズル中心軸に垂直な断面での蛍光輝度値分布と双曲線正割関数が良く一致することを見出した。この関数を利用し、撮影条件の違い等により受ける影響を緩和することを試みた。
3. 常温でのアセトン、トルエンの蛍光の相互作用に関する研究
セルを用いて、常温、常圧におけるトルエン蛍光がアセトンの添加によって受ける影響を、消光と蛍光の吸収にわけて測定することを試みた。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 阿部浩司, 佐藤直也, 河内俊憲, 柳瀬眞一郎, 浅井圭介
超音速吸い込み風洞を用いた低温域におけるトルエン分子の蛍光特性の取得
第14回日本流体力学会中四国・九州支部講演会（口頭）



氏名 包 忠青 (Bao Zhongqing)

所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D3

研究課題

表面弾性波を用いた高感度ひずみセンサとセンサネットワーク応用の研究

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

25年度中には、構造ヘルスマニタリング用発振器型表面弾性波ひずみセンサを用いたワイヤレスセンサノードのモジュールを作製したが、大規模なセンサネットワークへの展開を想定した場合、センサノードのワンチップ化が望ましく、センサ素子(SAW共振子を用いたひずみセンサ)と CMOS 回路の集積化が開発のキーとなる。本年度(26年度)は、構造ヘルスマニタリングシステムに用いるワイヤレスセンサノードの集積化を目指して、シリコン(Si)基板ベースの窒化アルミニウム(AlN) 圧電薄膜を用いた表面弾性波(Surface Acoustic Wave: SAW)ひずみセンサの開発に取り込んだ。

i) AlN圧電薄膜を用いたSAWひずみセンサの作製

図1は、本研究で提案したAlN圧電薄膜を用いたSAW共振子の構造図である。本素子はシリコン基板上に堆積された、SiO₂ 膜と、Pt/Ti 膜、AlN圧電薄膜とからなり、圧電薄膜の上にはレイリーSAW を励振するため、Au/Cr のすだれ状電極(Interdigital Transducer : IDT)が形成されている。ここで、Pt 膜は格子定数の整合性を改善するシード層として機能する。SiO₂層は、音響絶縁膜として機能するとともに温度補償膜としても期待される。

図2は、作製したSAWひずみセンサの断面の走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)写真である。AlN圧電薄膜の成膜技術として、反応性ACマグネトロンスパッタによる成膜技術の検討を行った。図3は、成膜を行ったAlN薄膜の X 線回折パターンである。本図より、c 軸を示すAlN (0002)のピークが確認される。また、AlN(0002)ピークに対するロックングカーブした結果、半値幅(Full Width at Half Maximum :FWHM)が1.659°であることをわかり、高いc 軸配向性を確認された。

ii) AlN圧電薄膜を用いたSAWひずみセンサの評価

本ひずみセンサは、ひずみをSAW素子の共振周波数の変化として計測するため、まず、作製したSAWひずみセンサの周波数特性を評価した。図4は、AlN 圧電薄膜を用いたSAWひずみセンサの周波数応答である。本結果より、基板表面を伝搬するSAWの共振特性(ピークA)を確認される。ここで、ピークBは基板全体を伝搬する板波によるスプリアスである。

次に、センサのAlN膜厚の依存性を調べた。図5は、AlN圧電薄膜の厚みを1μmから5 μmまで変化させた時の位相速度と実効的電気機械結合係数の変化を評価した結果である。AlN膜厚を増大させることによって、実効的電気機械結合係数が増大し、位相速度が減少することがわかる。これより、図4で示した表面波動はAlN膜だけではなく、Si基板にも振幅がおよんでいることが推測される。

続いて、作製したSAWひずみセンサを日本工業規格に基づく引張試験(JIS Z2241)に適用し、ひずみセンシング機能することを検証した。図6は、印加ひずみに対する共振周波数のシフト量を示したものである。本結果より、センサの測定値と理論値とほぼ一致し、10⁻⁶オーダーのひずみの計測に成功し、センサノードの集積化に用いるひずみセンサ素子として有用であることを示した。

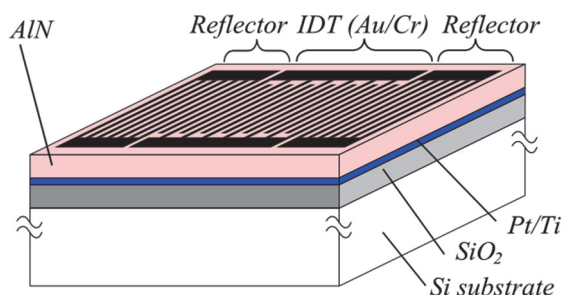


図1 AlN膜を用いたSAWひずみセンサの構造図

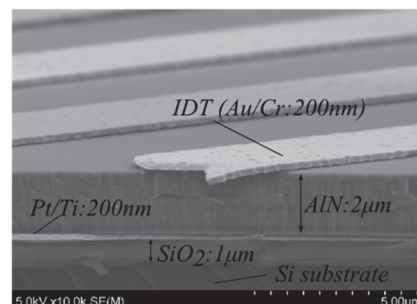


図2 AlN膜を用いたSAWひずみセンサのSEM画像

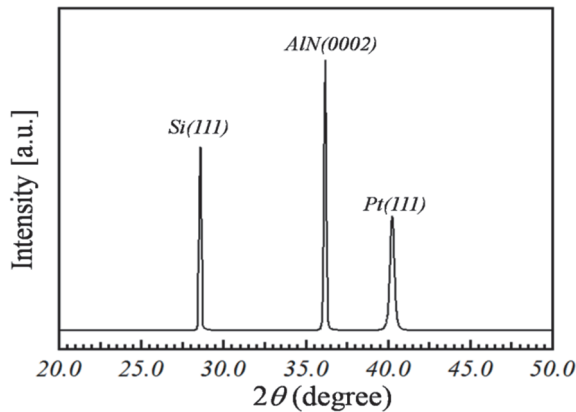


図3 AlN膜のX線回折パターン

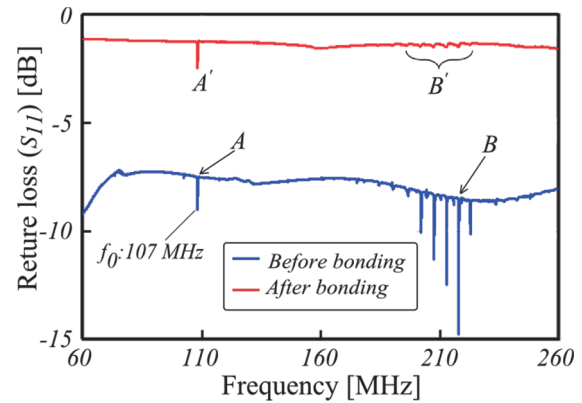


図4 AlN膜を用いたSAWひずみセンサの周波数応答

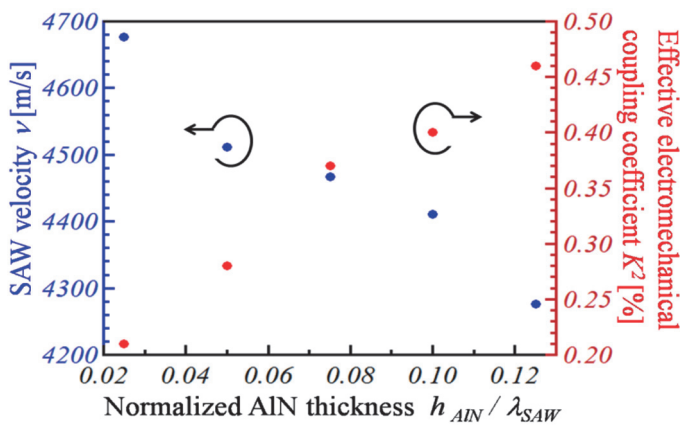


図5 AlN膜を用いたSAW共振子の位相速度および実効的電気機械結合係数 k^2 のAlN膜厚との関係

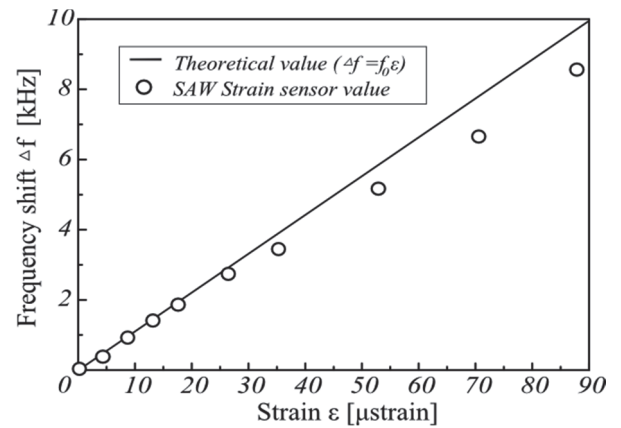


図6 ひずみと共振周波数の変化との関係

平成26年度の研究業績

【研究内容】

- AlN圧電薄膜を用いた表面弾性波ひずみセンサの開発
- AlN圧電薄膜を用いた表面弾性波ひずみセンサの作製
 - AlN圧電薄膜を用いた表面弾性波ひずみセンサの評価

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

- 今野 智一, 包 忠青, 原 基揚, 桑野 博喜:
“窒化アルミニウム圧電薄膜を用いた表面弾性波ひずみセンサの開発”
日本機械学会 2014 年度年次大会, (2014.9).
- 包 忠青, 原 基揚, 桑野 博喜:
“300 MHz 帯表面弾性波共振器を利用した発振器型ひずみセンサ”
第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集,
電気学会センサ・マイクロマシン部門 [編] 31, pp.1-4, 松江市, (2014.10).

氏名 ボロトフ セルゲイ (Bolotov Sergey)



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

ナノ・マイクロ複合構造体の超音波援用成形に関する研究

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

1. 研究概要

本研究では、ガラス表面上へ数十nm～数μmの微細構造を創成する手法として、ガラス前駆体を用いた転写手法を提案している。微細構造を表面に施すことにより、反射防止、再帰反射、光拡散などの機能を付与することが可能であり、本手法は大面積に対して高精度な微細構造を製造できる点で優れており、その開発が期待されている。

本手法では微細構造を有する型にガラス前駆体を塗布し、熱処理などによりガラス転化させて固化させる、その後、再度ガラス前駆体を塗布し、ガラス基板と接着させて、完全に固化させたのち離型する。現在問題となっているのは、接着させた時反応が完了せず、離型時に構造が損傷および膜ごと剥離することである。離型時の損傷は3種類考えられる、一つは膜と基板の間の破壊、二つ目は膜内部の破壊、三つ目は、構造によって接着力が上昇し、構造部分だけの破壊である。膜内のガラス転化度合の分布が破壊形態に影響していると考えられ、その関係を求めることが出来れば、本手法の確立への前進することが出来る。本報では熱処理の条件を変えたときの接着強度をスクラッチ試験により求めた。

2. 熱処理が破壊形態に与える影響

図1に80℃、250℃で熱処理したサンプルを図に記載の条件でスクラッチ試験した後のスクラッチ痕のレーザー顕微鏡画像である。250℃ではあるスクラッチ荷重を超えたところから部分的に膜が剥離しているのに対し、80℃で熱処理したものは荷重が増加するにつれ徐々に削られていっているのがわかる。基板が連続的に露出し始めたときの荷重をもとめ、次式で剥離強度Qを求め、熱処理時間とQの関係を80℃、250℃について図2に示す。

$$\frac{L_{crit}\mu^*\sqrt{t_{film}}}{\sqrt[3]{L_{crit}R}} = Q \left[\frac{\sqrt{m}}{\sqrt[3]{J}} \right]$$

L_{crit} : 剥離荷重, μ^* : スクラッチ試験機で得られる摩擦係数, t_{film} : 膜厚, R : スタイラス半径, W : 界面接着エネルギー, E : 等価縦弾性係数

250℃で5時間以上熱処理した膜は剥離せず、基板の破壊が生じ、シリカ転化が完了したことを示す。また、80℃で熱処理時間が10時間未満のものでは膜は削られたが基板が露出せず、測定できなかった。図2より、250℃で熱処理時間が5時間以下の場合、80℃で熱処理した場合と接着強度が大きく変わらないのに対し、5時間を超えたあたりで急激に接着強度が向上していることが確認できる。この結果より250℃では反応が表面から進行し、反応が完了した硬い層と未完了の柔らかい層があると考えられ、基板と膜の界面まで反応が進むまで十分な接着強度を得られないと推論できる。

本報の結論として、スクラッチ試験を用いて接着強度を評価することが出来、スクラッチ痕の形態よりの膜の強度を評価出来ると考えられる。また、試験結果より膜と基板間のシリカ転化度合が最も影響していると考えられる。

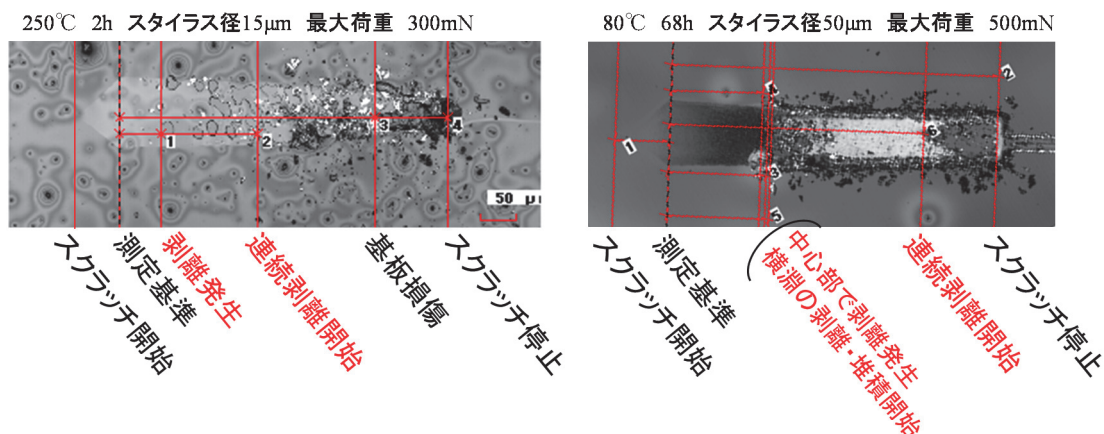


図1 80℃, 250℃で熱処理後のスクラッチ痕のレーザー顕微鏡画像と剥離位置

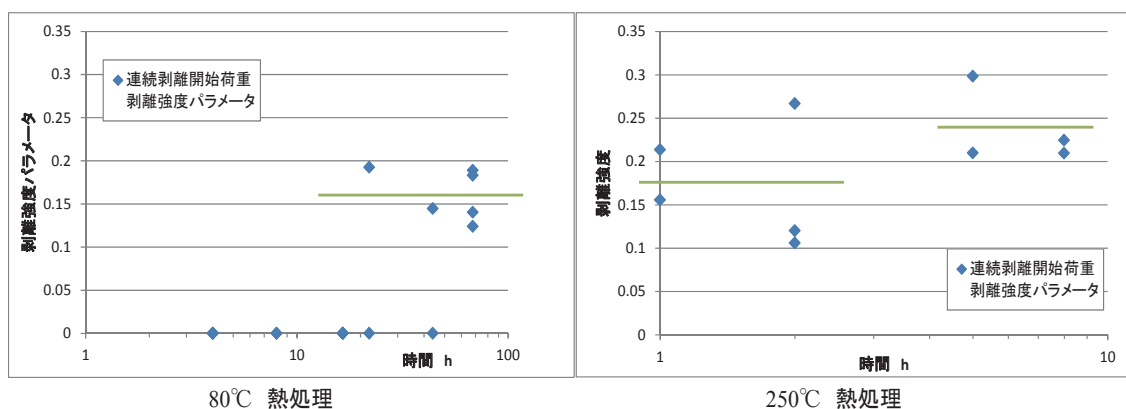


図2 80℃, 250℃での熱処理時間と剥離強度パラメータの関係

平成26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. Sergey Bolotov, Masaharu Hashidume, Keita Shimada, Masayoshi Mizutani, Tsunemoto Kuriyagawa: LargeScale Periodic Structure Fabrication by Scratching Silica-Glass-Precursor Coating, The 38th International MATADOR Conference, 2015 March 28-31.(発表予定)



氏名 ブリトン・ナタン (Nathan John Britton)

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D1

研究課題

Lunar Micro-rover Navigation and Teleoperation

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

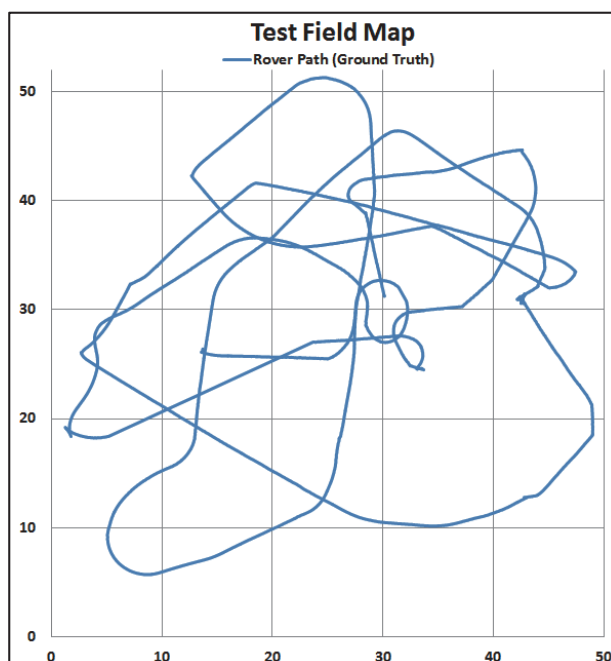


Figure 1: Lunar Micro Rover, Moonraker, beginning the field test after successful deployment from the envelope (left), and a map of its trajectory around the test site (right); the envelope is at coordinates (30,30).

A high fidelity field test of a four-wheeled lunar micro-rover, code-named Moonraker, was conducted by the Space Robotics Lab at a lunar analog site in Hamamatsu Japan (Figure 1), in cooperation with Google Lunar XPRIZE Team Hakuto. In preparation for a lunar mission, where slippage in loose soil is a key risk, a prediction method of the slip ratio based on the slope angle, using only the Moonraker's on-board telemetry, is highly desirable. A ground truth of Moonraker's location was measured and compared with the motor telemetry to obtain a profile of slippage during the entire four hour 500m mission. A linear relationship between the slope angle and slip ratio was determined which can be used to predict the slip ratio when ground truth data is not available.

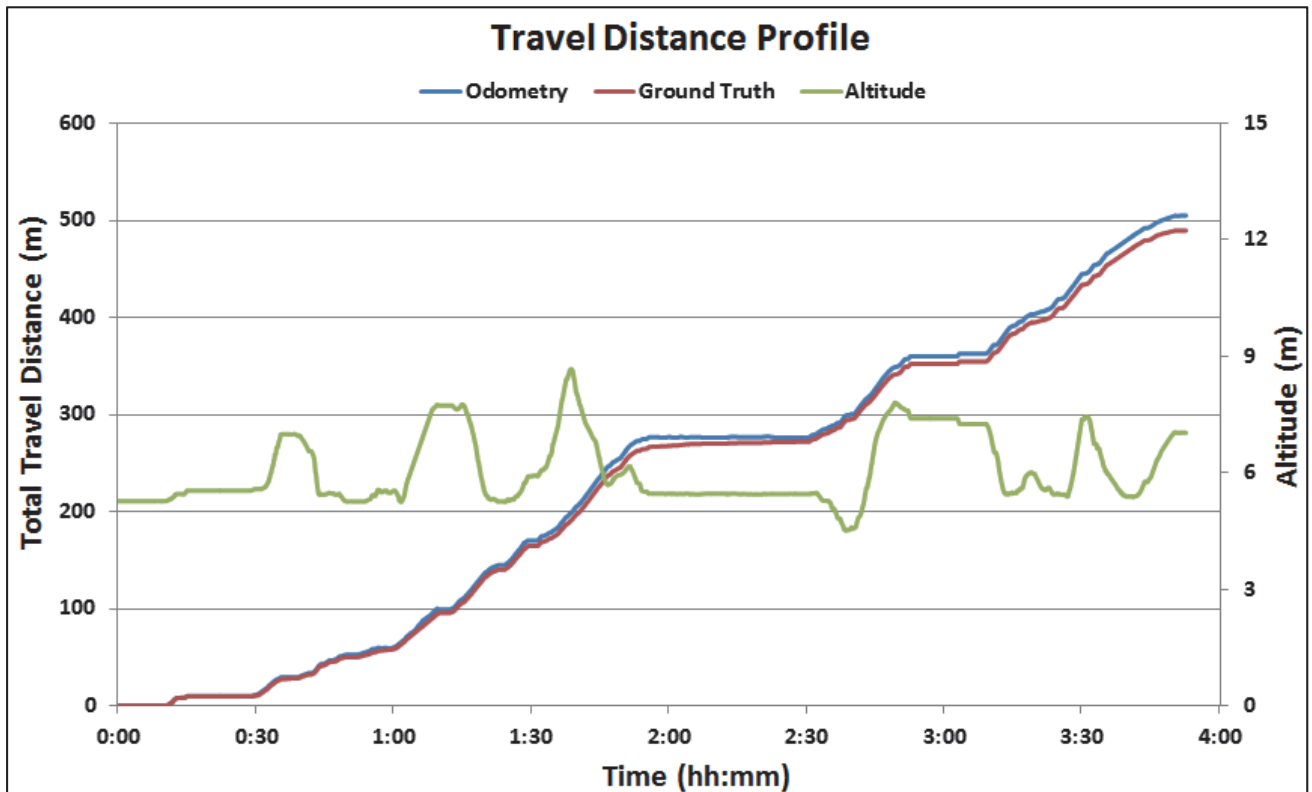


Figure 3: The total cumulative travel distance over time, as measure by Moonraker's on-board odometry vs externally measured ground truth. Altitude is also displayed against the right axis to indicate the location of slopes.

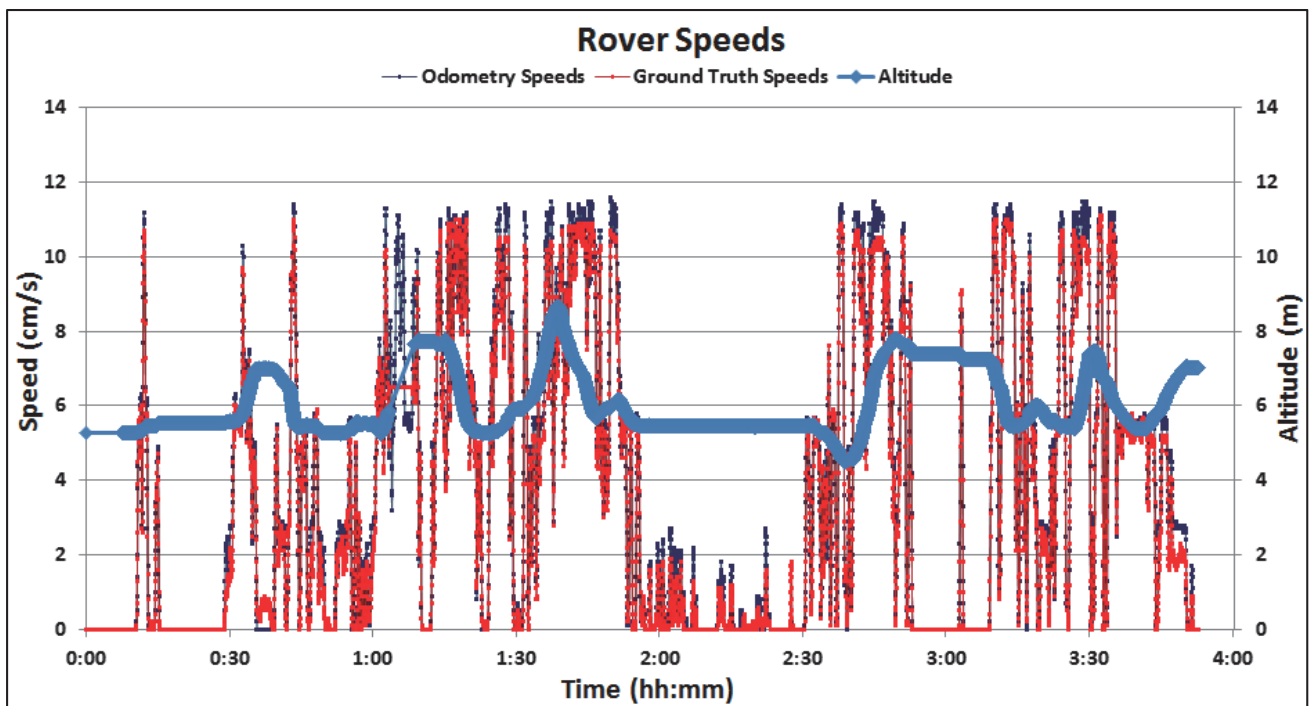


Figure 2: The speed of Moonraker throughout the test as measured by odometry vs ground truth. The difference between them indicates slippage.

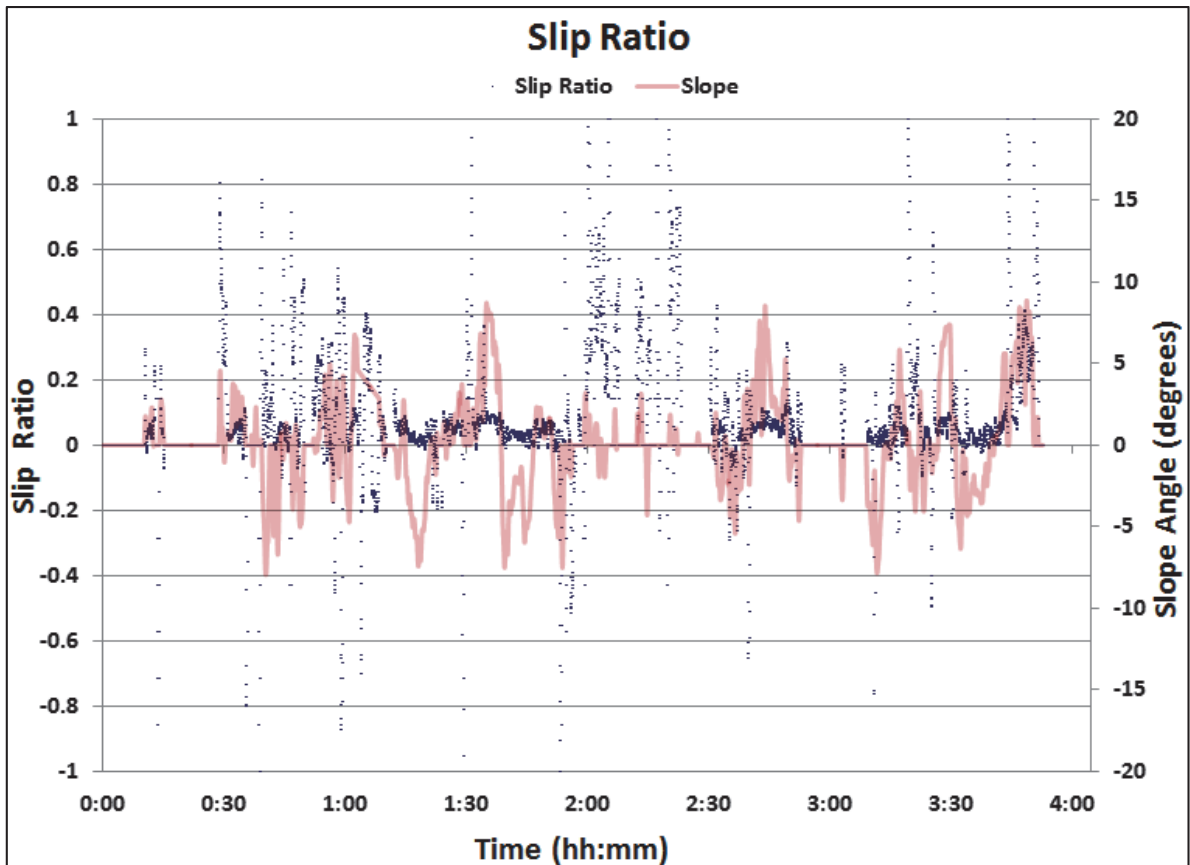


Figure 4: The slip ratio is calculated every 2 seconds throughout the field test, and is displayed here in conjunction with the corresponding slope angle. The data points cluster around strong clear slippage events.

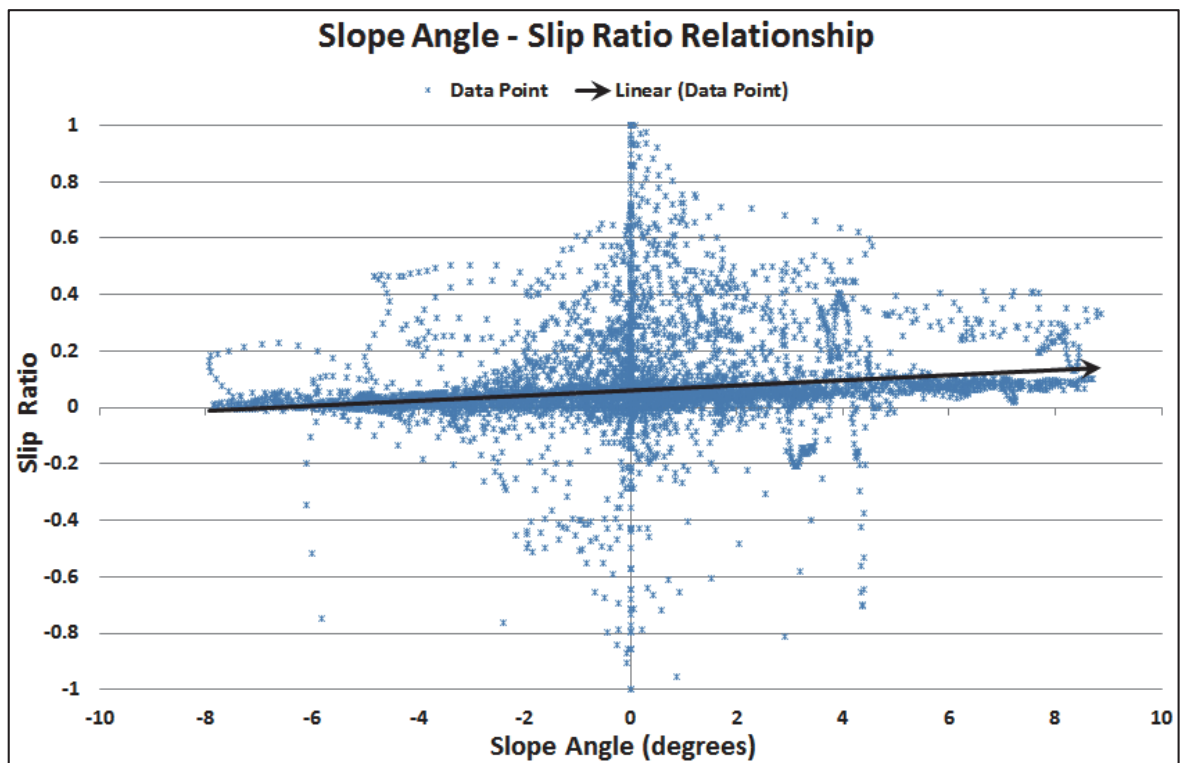


Figure 5: SS

The total distance traveled over time is shown in Figure 3, with the altitude of the rover overlaid to visualize where in the test the major slopes were encountered. Both the distance, as estimated by the motor odometry, and the ground truth data are displayed together; their divergence over time is small but readily apparent. By the end of the ground truth data collection at the 3:50 mark, the wheel odometry-based distance estimation indicated a total 505m distance traveled, while the ground truth measured 489.6m. This represents a total average slip ratio of 0.03, which is consistent with lab-based sandbox tests.

The speed of the rover at each moment, as estimated through odometry and through ground truth, are displayed together in Figure 4; the altitude is again overlaid to visualize when slopes are encountered. Notice how the odometry registers consistently higher than the ground truth throughout the field test by varying amounts. This difference indicates that slippage is occurring at these times.

The slip ratio was calculated every two seconds according to the formula:

$$(1 - ((\text{rover speed})/(\text{wheel speed})))$$

This dataset was then median filtered to remove outliers. Figure 5 shows the slip ratio as clusters of data points along the timeline of the field test. The resulting slip ratios occasionally vary widely, but also cleanly cluster together.

When each slip ratio data point is plotted according to the angle of the slope at the time the measurement was taken, we get Figure 6. The majority of points are clustered between -0.1 and 0.2 slip ratio. There is a clear linear trend from a slight negative slip (slipping forward) on downward slopes of 8° to a small positive value at 0° to 0.1 slip ratio at 9° upward slope.

There are data points outside of this linear trend and artifacts that follow trajectories across the graph. These appear to be transient-state slip ratios during turning maneuvers. For example, the period from 2:00-2:30, where only maneuvers were performed with negligible forward motion, contribute a great deal to these divergent values. This linear trendline can therefore be used to estimate the slip ratio of the rover at any given time using only an IMU to determine the angle of the slope that the rover is traversing.

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. Development of a Visual Odometry Feature tracking localization system
2. Conducted extensive experiments investigating the terramechanics of skid steering
3. Integration of pre-flight model of lunar micro-rover
4. Conducted intensive high fidelity field tests of lunar micro-rover at a lunar analog environment in Hamamatsu, Japan

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Kazuya Yoshida, Nathan Britton and John Walker
Development and Field Testing of Moonraker: a Four-Wheel Rover in Minimal Design

【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. iSAIRAS 2014 (International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space)

【受賞・特許等】

Google Lunar XPRIZE Milestone Mobility Prize
(Team Hakuto)



氏名 藤巻 義信

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

実環境X線吸収測定による高温電極の物質輸送経路の解明

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

我々の研究グループでは、これまで固体酸化物形燃料電池（SOFC）の高性能化・高信頼性化を目的として、実用多孔質空気極電極反応分布および電極反応機構の解明に取り組んでいる。現在、交流インピーダンス法などの電気化学的手法や電極構造の3次元構築情報を考慮した数値計算による電極反応評価が広く行われている[1, 2]が、これらはいずれも間接的な評価に過ぎず、電極における反応を直接評価できる実験的な手法の確立が求められている。これまで、我々の研究グループで μm オーダーに集光した高輝度硬X線を利用したX線吸収分光法（XAS）による直接評価手法を開発してきた[3]。本研究では、この手法をさらに発展させ、高温で雰囲気・印加電圧を制御しながらサブ μm オーダーの高位置分解能でX線吸収分光測定を行うことが可能な装置を開発した。この装置を用い、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ (LSC64)多孔質空気極における酸素ポテンシャル分布を評価することにより、電極反応場ならびにその分布の直接観測に成功した。また、平行して同一電極で交流インピーダンス測定を実施し、伝送線モデルを用いた解析からも酸素ポテンシャル分布を評価した。

本研究ではFig. 1に示す3電極セルを作製し、873 K、 $P(\text{O}_2) = 10^{-2}$ bar、電極過電圧-140 mV (印加電圧：-700 mV)の直流分極下で*in-situ*マイクロX線吸収分光測定を行った。得られたCo K吸収端のXANESスペクトルをFig. 2に示す。測定は定常状態において電極/電解質界面から1 μm おきに移動させて実施した。Fig. 2から、電極/電解質界面に近づくにつれ、吸収端位置の低エネルギー側へのシフトが観測された。これは、分極に伴い電極/電解質近傍の酸素ポテンシャルが低下したことを示している[4]。観測された吸収端エネルギー値から対応する実効酸素分圧を求め、電極/電解質界面からの距離に対してプロットしたものをFig. 3に示す。電解質界面での酸素ポテンシャルは、電極過電圧から計算される実効酸素分圧とほぼ一致した。一方、界面近傍での酸素ポテンシャルの低下は、界面から離れるにつれて緩和され、4 μm 程度離れた位置では開回路時と同程度の酸素ポテンシャルになる様子が観測された。この結果より、本研究で用いたLSC64多孔質空気極では電解質近傍およそ4 μm の領域で電極反応が進行していることが示唆された。

*In-situ*マイクロXAS測定と平行して、873 K、 $P(\text{O}_2) = 10^{-2}$ bar、OCVの条件下で交流インピーダンス測定を行った。得られたインピーダンススペクトルと伝送線モデルによるフィッティング結果をFig. 4に示す。このフィッティング結果から得られた電極反応抵抗と酸化物イオンの拡散抵抗を用いて、LSC64多孔質空気極内部のファラデー電流分布を算出した。得られたファラデー電流分布図をFig. 5に示す。Fig. 5から電極/電解質界面近傍およそ1 μm で電極反応が終了していることが分かり、X線吸収分光測定の結果と界面近傍における酸素ポテンシャル分布の挙動が概ね一致する結果が得られた。

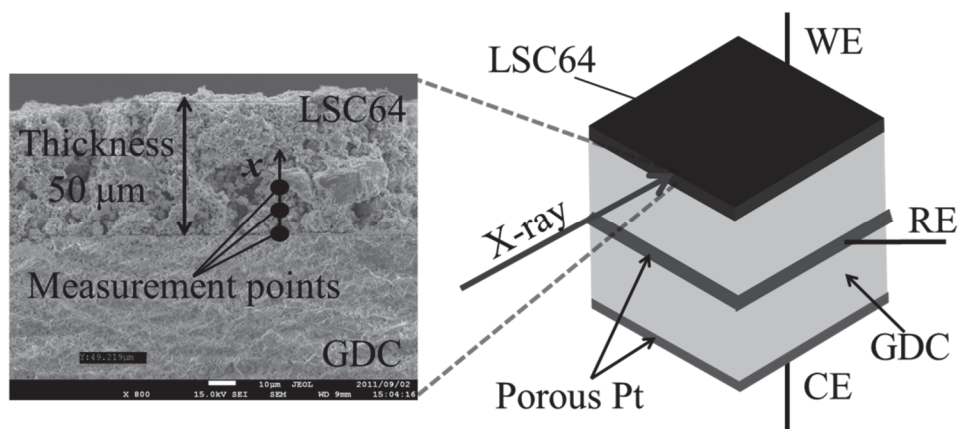


Figure 1. Schematic illustration of the electrochemical cell with its cross-sectional SEM image.

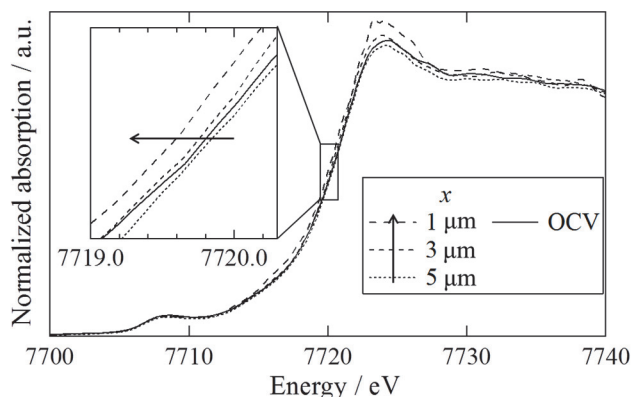


Figure 2. Co K-edge XANES spectra of the porous $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ electrode under cathodic overpotential of -0.14 V in $P(\text{O}_2) = 10^{-2}$ at 873 K. x expresses the distance from the electrode/electrolyte interface.

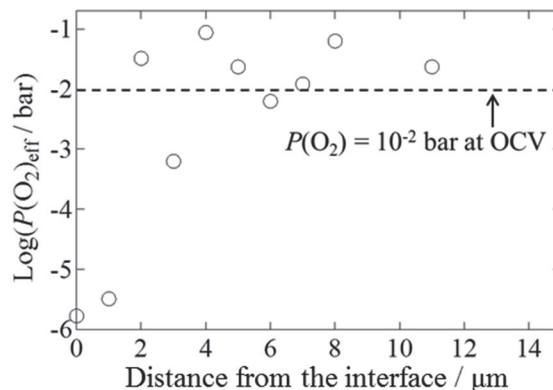


Figure 3. Distribution of $P(\text{O}_2)_{\text{eff}}$ in the porous $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ electrode under cathodic overpotential of -0.14 V as a function of the distance from the electrode/electrolyte interface. The dashed line indicates atmospheric $P(\text{O}_2)$, 10^{-2} bar.

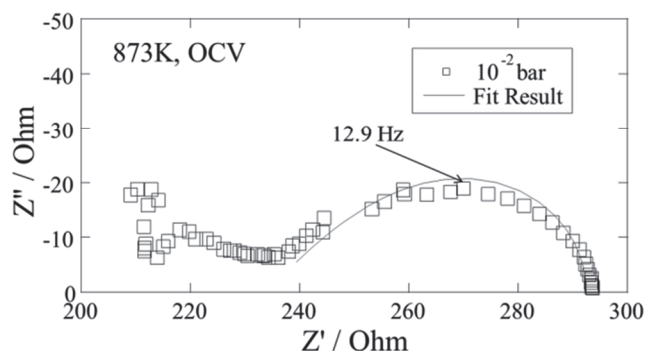


Figure 4. AC impedance spectra of the porous $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ electrode in $P(\text{O}_2) = 10^{-2}$ bar at 873 K under OCV and simulated impedance spectra by using transmission line model.

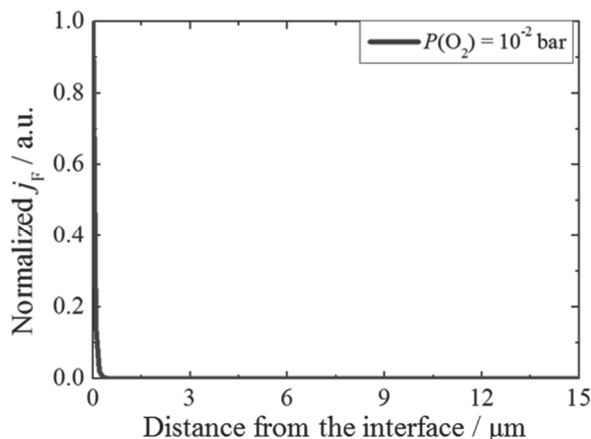


Figure 5. The ratio of the calculated Faradaic current j_F at the each position in the LSC64 electrode to the total current through the electrode/electrolyte interface.

本年度は、電極反応場の定量的な評価を目指して、柱状電極を模擬した緻密膜パターン電極を用いた評価にも取り組んでいる。緻密膜パターン電極を用いた実験では、先述の*in-situ*マイクロXAS測定による直接評価手法の他、 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 同位体酸素交換後を行い、二次イオン質量分析(SIMS)測定によって得られた ^{18}O の分布から電極反応場の評価も行っている。

- [1] S.B. Adler, J.A. Lane, B.C.H. Steele, *J. Electrochem. Soc.*, **143** (11), 3554-3564 (1996)
- [2] J. Joos, T. Carraro, A. Weber, E. Ivers-Tiffée, *J. Power Sources*, **196**, 7302-7307 (2011)
- [3] 雨澤浩史, 未順秋, 北村尚斗, 内本喜晴, 富井洋一, 佐瀬麻耶, 開米篤志, 佐藤一永, 川田達也, 第32回固体イオニクス討論会 (平成18年11月27-29日, 九大)
- [4] Y. Oriksa, T. Ina, T. Nakao, A. Mineshige, K. Amezawa, M. Oishi, H. Arai, Z. Ogumi, and Y. Uchimoto, *J. Phys. Chem.*, **115**, 16433-16438 (2011)

平成26年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

<国際会議>

名 称：The 15th Korea-Japan Students' Symposium

主催団体：東北大学、Seoul National University

開催国：韓国、ソウル

開催期間：2014年11月11日～13日

役割：日本側学生オーガナイザー、Chairman

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. SOFC多孔質空気極における酸素ポテンシャル分布の直接評価
SOFC多孔質空気極における電極反応場ならびにその分布の直接観測を目的として、その場マイクロX線吸収分光測定を用いた酸素ポテンシャル分布の直接評価に取り組んでいる。
2. $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ 緻密膜パターン電極を用いた有効反応場の定量的解明
SOFC多孔質空気極における電極反応場を定量的に評価し、その形成に及ぼす因子を明らかにするために、MEMS技術を用いて柱状電極を模擬した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ パターン電極を作製し、その場マイクロX線吸収分光測定による酸素ポテンシャル分布の直接評価を行っている。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. “Direct Evaluation of Effective Reaction Area in SOFC Cathodes by in situ Micro XAS”, K. Amezawa*, Y. Fujimaki, T. Nakamura, Y. Terada, K. Nitta, F. Iguchi, K. Yashiro, H. Yugami and T. Kawada, 2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco, California, 2014.4.21-25
2. “Evaluation of Electronic Structures of an $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ Dense Thin Film Electrode by In-Situ Soft X-Ray Absorption Spectroscopy in Controlled Temperature and Atmospheric Conditions”, R. Oike*, Y. Tamenori, Y. Fujimaki, T. Nakamura, K. Yashiro, T. Kawada, K. Amezawa, 2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco, California, 2014.4.21-25
3. “Direct Evaluation of Electrochemical Reactions in Solid Oxide Fuel Cells under Operation”, K. Amezawa*, Y. Fujimaki, T. Nakamura, K. Nitta, Y. Terada, F. Iguchi, H. Yugami, T. Kawada, CIMTEC 2014 6th Forum on New Materials, Italy, Montecatini Terme, 2014.6.15-19
4. “Evaluation of Oxygen Chemical Potential Distribution in an SOFC Porous Cathode by In-situ Micro XAS and 3D Microstructure Modeling”, Y. Fujimaki*, J. Joos, T. Carraro, T. Nakamura, K. Yashiro, T. Kawada, H. Iguchi, Y. Hiroo, K. Nitta, Y. Terada, A. Weber, Ellen Ivers-Tiffée, and K. Amezawa, 2014 Electrochemistry Workshop, Monterey, California, Oral presentation (Invited), 2014.7.6-9 招待講演
5. “Evaluation of Oxygen Potential Distribution in an SOFC Cathode by Various Approaches”, Y. Fujimaki*, H. Watanabe, Y. Terada, T. Nakamura, Y. Keiji, S. Hashimoto, T. Kawada, and K. Amezawa, The 2nd students' Associated Symposium of Environmental Leaders, Miyagi, Poster presentation, 2014.8.3-4
6. “Collaboration project of the efforts to improve the performance and the reliability of Solid Oxide Fuel Cell”, Y. Fujimaki*, Joint Congress of Environmental Leader Program 2014, Sendai, Japan, Poster presentation, 2014.9.6
7. “Designing an Air Electrode Using Kinetic Parameters Obtained with Model Electrodes”, T. Kawada*, R. A. Budiman, Y. Fujimaki, H. Kudo, Y. Uzumaki, T. Nakamura, K. Yashiro, S. Hashimoto, K. Amezawa, 2014 Asian SOFC Symposium and Exhibition, Busan, Korea, 2014.9.21-24
8. “ $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ 緻密膜パターン電極を用いた電極反応場形成因子の定量的評価”, 藤巻義信*, 中村崇司, K. Develos-Bagarinao, 山地克彦, 八代圭司, 川田達也, 井口史匡, 湯上浩雄, 雨澤浩史, 2014年電気化学秋季大会, 北海道大学, 口頭発表, 2014.9.27-28
9. “Effective Reaction Area in Solid Oxygen Fuel Cell Cathodes”, K. Amezawa*, Y. Fujimaki, T. Nakamura, K. Nitta, Y. Terada, F. Iguchi, H. Yugami, K. Yashiro, T. Kawada, 11th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, 2014.10.8-10

10. “Analysis of the factors governing formation of electrochemically active area in an $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ dense patterned electrode”, Y. Fujimaki*, T. Nakamura, K. Develos-Bagarinao, K. Yamaji, K. Yashiro, T. Kawada, F. Iguchi, H. Yugami, K. Amezawa, 15th Korea-Japan Students’ Symposium, Seoul, Korea, Poster Presentation, 2014.11.11-13
11. “ $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ 緻密膜パターン電極を用いた電極反応場の定量的解明”, 藤巻義信*, 中村崇司, K. Develos-Bagarinao, 山地克彦, 八代圭司, 川田達也, 井口史匡, 湯上浩雄, 雨澤浩史, 第40回固体イオニクス討論会, 東京, 口頭発表, 2014.11.16-18
12. “ $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ 緻密膜パターン電極を用いた酸素同位体交換による電極反応場の定量的評価”, 藤巻義信*, 中村崇司, K. Develos-Bagarinao, 山地克彦, 八代圭司, 川田達也, 井口史匡, 湯上浩雄, 雨澤浩史, 電気化学会 第82回大会, 横浜国立大学, 口頭発表, 2015.3.15-17

【研究費の獲得】

名称：日韓文化交流基金

期間：2014年11月10日～11月14日

氏名 韓 笑波 (Han Xiaobo)



所属 医工学研究科・D3

研究課題

せん断応力に対する血管内皮細胞/平滑筋細胞の共存培養モデル内の平滑筋細胞の応答およびシグナル伝達のメカニズム

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

In this year, I have been focusing on vascular smooth muscle cells (SMCs) responses to fluid shear stress (SS) in a co-culture model system. SMCs are lying in the tunica media layer outside the intimal endothelial cell (EC) monolayer, and can regulate vessel diameter to control blood pressure and flow. Former studies conducting EC-SMC co-culture experiments have revealed that ECs exposed to a physical level of SS affect unsheared SMC functions associated with the development of atherosclerosis through cellular interactions [1,2]. Recently, Meng's group [3] explored that SMCs could respond to high SS and play a role in the formation of cerebral aneurysms. As for better understanding of the relationship between the local hemodynamics and blood vessel pathology, it is important to explore SMC behaviors under different SS conditions. Therefore, I constructed an EC-SMC co-culture model with contractile phenotype-controlled SMCs, which is similar to normal healthy arterial walls. Then, we use the co-culture model in flow-exposure experiments to explore relationship between SS and changes of phenotype and MMPs (MMP-2 and -9) production of SMC in the co-culture model.

Figure 1 shows a result of the flow-exposure experiment using the co-culture model. The phenotype of SMC is confirmed by the related expression levels of two typical contractile proteins: α -SMA and calponin in SMC. The conditions of flow-exposure experiment include a 2 Pa of SS similar to the normal straight vessel, a related high SS of 10 Pa similar to cerebral bifurcation. As shown in Fig.1, compared with SMC cultured in serum-free medium for 15 days (QM15) that indicate a contractile state, the expression of α -SMA and calponin of SMCs in the statically co-cultured model decreased. There was no obviously difference of that between SMCs at QM15 and SMCs in the model after flow-exposure to 2 Pa, while the expression of α -SMA and calponin decreased in SMCs after flow-exposure to 10 Pa compared to QM15. This suggests that the serum-containing CM could change the contractile SMC phenotype to the synthetic phenotype. SS could influence the phenotype of SMCs in the co-culture model. A SS of 2 Pa could keep SMCs in a contractile phenotype, while related high SS could induce a synthetically phenotype change of SMCs.

Figure 2 shows the result of MMPs production from SMC in the co-culture model after flow-exposure experiment. Compared with QM15, both MMP-2 and MMP-9 production from SMC cultured in statically co-culture model increased. A SS of 2 Pa contained MMPs production same to QM15, which is similar to former report [4]. While a high SS of 10 Pa induce higher MMPs production from SMC compared to QM15. Since high SS could induce a tendency of synthetically phenotype change of SMCs as described above, the change of MMPs production from SMC under different SS conditions could be caused by the function change of SMCs. Overexpression of MMPs is thought to be crucial during the initiation of cerebral aneurysms, therefore this result may suggest how high SS influence blood vessel remodeling during the formation of cerebral aneurysms.

In the next stage, I would like to explore the mechanisms of SMC responses to different SS conditions. As SMC are not directly exposed to SS, I think the change of gene expression from EC under SS in co-culture model could play an important role in SMC responses, and I would like to confirm it.

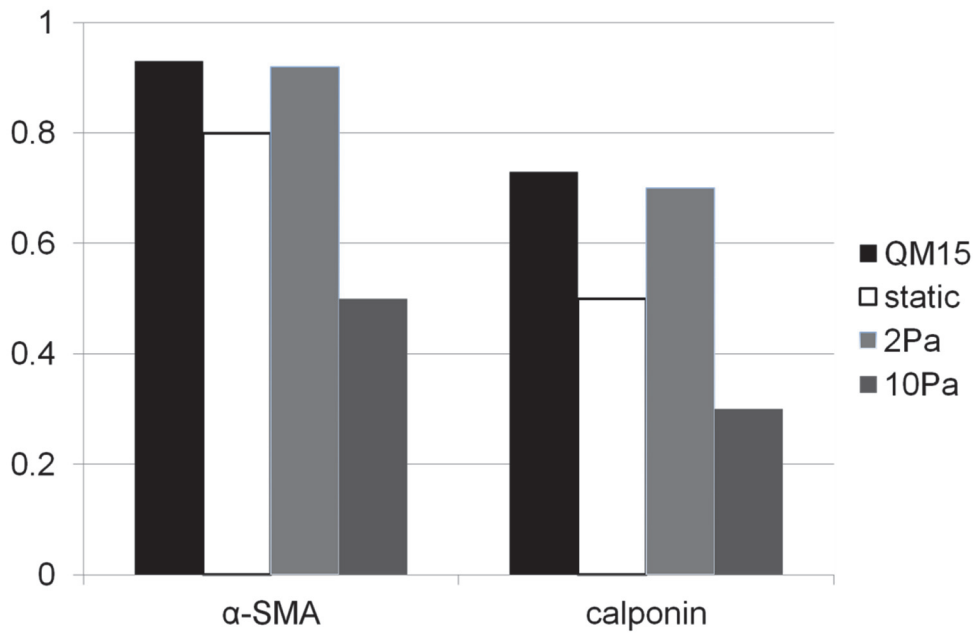


Fig.1 The expression of contractile proteins of SMC at QM15; in co-culture model statically cultured by CM for 72h; after 72h flow-exposure to a SS of 2 Pa or 10 Pa in co-culture model. Data were normalized to the expression of β -actin, n=1.

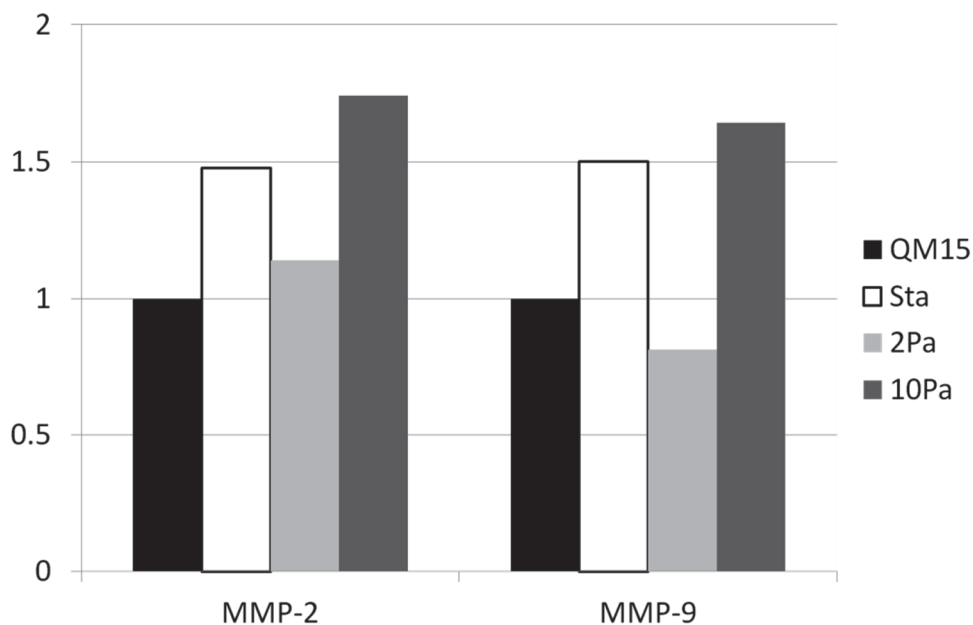


Fig.2 Changes in MMP-2 and -9 productions from SMCs cultured with QM for 15 days; in the co-culture models after static culturing; after 72h flow-exposure to a SS of 2 Pa or 10 Pa in co-culture model. n=1

References

- [1] Tsai, M. C., L. Chen, J. Zhou, Z. Tang, T. F. Hsu, Y. Wang, Y. T. Shih, H. H. Peng, N. Wang, Y. Guan, S. Chien, and J. J. Chiu, *Circ. Res.* 105(2009), 471–480.
- [2] Wang, H. Q., L. X. Huang, M. J. Qu, Z. Q. Yan, B. Liu, B. R. Shen, and Z. L. Jiang, *Endothelium* 13(2006), 171–180.
- [3] Meng, H., Z. Wang, Y. Hoi, L. Gao, E. Metaxa, D.D. Kolega, *Stroke*, 38(2007), 1924-1931.
- [4] Sakamoto, N., T. Kiuchi, M. Sato, *Annals of Biomedical Engineering*, 39(2011), 2750–2758.

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. ヒト血管と同じく収縮型を維持する平滑筋細胞と内皮細胞の共存培養モデルが作った。
2. 共存培養モデルを用いて、内皮細胞にせん断応力を負荷するときの平滑筋細胞の形質変化と平滑筋細胞からのMMPs産生量変化を調べた。高いせん断応力に対して、共存培養モデル内の平滑筋細胞は収縮型から合成型への形質変化が見られました。さらに、高いせん断応力は共存培養モデル内の平滑筋細胞からのMMPs産生を促進する。これは血管壁の脆弱化を誘発する可能性が示唆された。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Makoto Ohta, Sho Matsumoto, Xiaobo Han, Mingzi Zhang, Yujie Li, Kaihong Yu, Hitomi Anzai
Development of Image Guided Minimal Invasive Treatments
[The Fourth Japan-Switzerland Workshop on Biomechanics (JSB2014), Shima, Japan, September 1-4, 2014]
2. Makoto Ohta, Hitomi Anzai, Mingzi Zhang, Yujie Li, Xiaobo Han, Kaihong Yu, Toshio Nakayama
The concept of Bundle of Inflow (BOI) for reducing flow in aneurysm
[7th World Congress of Biomechanics (WCB2014), Boston, Massachusetts, July 6-11, 2014]
3. 松本 翔, 韓 笑波, 小林 尚俊, 太田 信
せん断応力環境下においてNiTiワイヤの表面加工が内皮化に与える影響
[日本機械学会2014年度年次大会, 9月7-10日, 東京]

氏名 羽田 城司



所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D1

研究課題

ポリマーの熱輸送に関する分子動力学機構

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

代表的なポリマー液体である直鎖アルカン飽和液の熱輸送特性について、分子動力学シミュレーションによる解析がタンら[1]によって行われ、分子間及び分子内エネルギー伝搬が熱輸送特性に与える寄与が定量的に計測されている。しかしながら、CとHをひとまとめの準原子として扱うUnited-Atom (UA)モデルを用いているためにC-H結合の熱輸送特性への寄与は明らかにされていない。熱伝導解析における分子モデルの影響という視点では、Muller-Platheのグループ[2,3]によって、全ての原子を考慮するAll-Atom (AA)モデルとUAモデルを含めてシステマティックに分子モデルを変えて熱伝導率を計測する研究が行われ、基本的には分子内自由度が大きいほど熱伝導率が大きくなるという結果が得られ、またUAモデルがより正確に熱伝導率を再現するようであると結論している。一方で、どのような分子運動あるいは分子間・分子内相互作用が熱伝導率に寄与するかという詳細までは追求されていない。本年度は、AAモデルを用いて、メタンおよびブタンの飽和液について熱流束を構成する分子動力学機構を解析することで、熱伝導を再現する分子動力学シミュレーションにおける分子モデルの影響を検討した。

メタン及びブタンの分子モデルにはOPLS-AAモデル[4]を選択した。OPLS-AAモデルは有機液体のシミュレーションに広く使われているモデルであり、分子内相互作用として、2サイト間の伸縮、3サイト間の曲げ、4サイト間の二面角によるものが存在する。分子間相互作用としては、Lennard-Jones (LJ) ポテンシャルおよびクーロンポテンシャルが存在する。4サイト以上離れている場合は分子内にもLJおよびクーロンポテンシャルが存在する。飽和密度のメタン及びブタンを系内に導入し、RNEMD法[5]を用いて計算系内に一定の熱流束を発生させた。以下の多体ポテンシャルにおける分子動力学表現式[6]を用いて熱流束を構成する分子運動あるいは分子内・分子間相互作用の寄与を計測した。

$$J_z V_{\text{CV}} = \sum_s \left(\frac{1}{2} m v_{z,s}^2 + \varphi_s \right) v_{z,s} + \sum_{\text{all } n\text{-body potentials}} \sum_{s_1} \sum_{s_2 > s_1} \cdots \sum_{s_n > s_{n-1}} \left[\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^{n-1} \sum_{\beta=\alpha+1}^n \left(\mathbf{F}_{s_\alpha, U} \cdot \mathbf{v}_{s_\alpha} - \mathbf{F}_{s_\beta, U} \cdot \mathbf{v}_{s_\beta} \right) (z_{s_\alpha} - z_{s_\beta}) \right] \quad (1)$$

目標温度は比較のためにタンら研究[1]と同様に臨界温度の0.7倍とした。メタン及びブタンの計測結果をそれぞれFig. 1及びFig. 2に示した。図よりAAモデルでは分子運動によりポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーが輸送される寄与がUAモデルに比べて増大していることが分かる。

分子運動による熱伝導率へ寄与を詳細に検討するために、比熱及び自己拡散係数を計測した。分子運動による熱伝導率へ寄与は液体の密度、比熱、及び自己拡散係数の積と相関があることが気体分子運動論からの類推[7]される。計測結果はTable 1に示した。表よりメタン及びブタンの双方について、分子運

動による熱伝導率への寄与及び積の値共にAAモデルの方が大きく評価されていることが分かる。液体密度及び自己拡散係数についてはAAモデルであってもUAモデルであっても近い値である。一方で、比熱はAAモデルがUAモデルに比べ大きな値を取る。すなわち、比熱が実験値に近いのはUAモデルの場合であり、AAモデルの値は過大評価である。

AAのようなFlexibleなモデルは、分子の平均的形狀変化を自然に追えるという利点がある。一方で、本来量子化されていて基底状態にある自由度に古典力学的エネルギーが分配されてしまうという問題がある。熱物性を再現するシミュレーションを行うためにはC-H結合等リジットに扱ったほうが良い自由度が存在し、分子自由度による熱輸送機構を考えると、AAモデルとUAモデルではUAモデルの方がアルカンの熱伝導率を再現するポテンシャルモデルとして適切であることを本研究で示した。

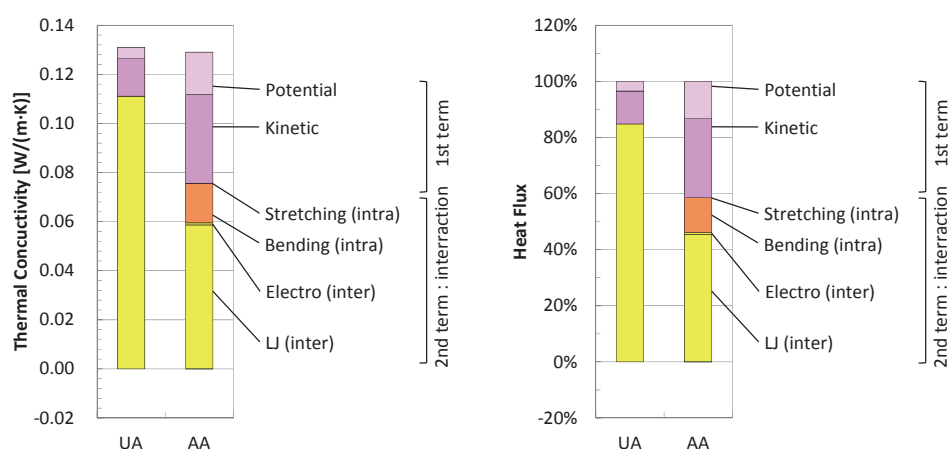


Fig. 1 Contributions of each term and each interaction to thermal conductivity and heat flux in saturated liquid methane at $0.7T_c$, where T_c is the critical temperature. “1st term” and “2nd term” denote contributions of molecular motion and inter-/intramolecular interactions, respectively.

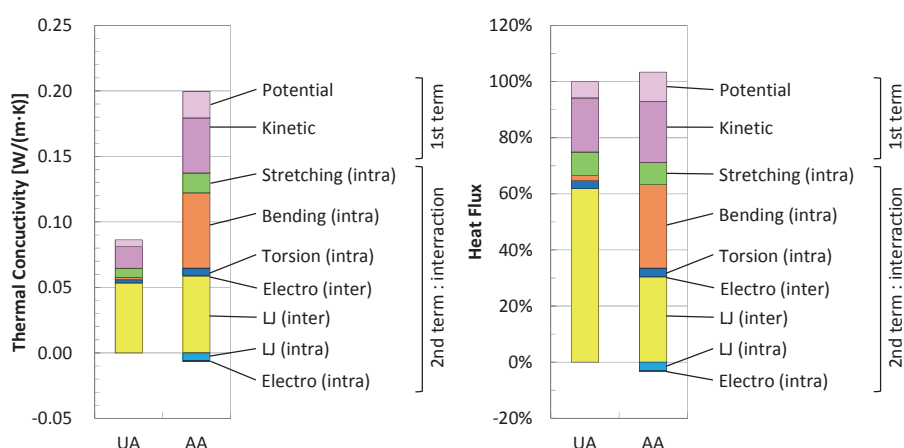


Fig. 2 Contributions of each term and each interaction to thermal conductivity and heat flux in saturated liquid butane at $0.7T_c$, where T_c is the critical temperature. “1st term” and “2nd term” denote contributions of molecular motion and inter-/intramolecular interactions, respectively.

Table 1 Simulation results for AA model and UA model with experimental data.

CH ₄		AA	UA	Expt. ⁸
T_{ave}	[K]	134.0	133.0	133.4
C_V	[kJ/kg·K]	6.57	1.20	3.70
ρ_{liq}	[kg/m ³]	414	378.6	388.5
D	[m ² /s]	9.55×10^{-9}	10.8×10^{-9}	N/A
$C_V \times \rho_{\text{liq}} \times D$	[W/(m·K)]	2.60×10^{-2}	4.91×10^{-3}	N/A
λ_{total}	[W/(m·K)]	0.129	0.131	0.178
$\lambda_{\text{transport}}$	[W/(m·K)]	5.34×10^{-2}	2.00×10^{-2}	N/A
λ_{intra}	[W/(m·K)]	1.61×10^{-2}	N/A	N/A
λ_{inter}	[W/(m·K)]	5.95×10^{-9}	11.1×10^{-2}	N/A

C ₄ H ₁₀		AA	UA	Expt. ⁸
T_{ave}	[K]	286.5	303.9	303.9
C_V	[kJ/kg·K]	5.83	1.54	1.74
ρ_{liq}	[kg/m ³]	559.4	540.4	556.1
D	[m ² /s]	7.62×10^{-9}	10.5×10^{-9}	N/A
$C_V \times \rho_{\text{liq}} \times D$	[W/(m·K)]	2.49×10^{-2}	8.74×10^{-3}	N/A
λ_{total}	[W/(m·K)]	1.93×10^{-1}	8.63×10^{-2}	9.40×10^{-2}
$\lambda_{\text{transport}}$	[W/(m·K)]	6.23×10^{-2}	2.17×10^{-2}	N/A
λ_{intra}	[W/(m·K)]	7.20×10^{-2}	1.13×10^{-2}	N/A
λ_{inter}	[W/(m·K)]	5.89×10^{-9}	5.33×10^{-2}	N/A

References

1. T. Ohara, Tan C.-Y., D. Torii, G. Kikugawa and N. Kosugi, J. Chem. Phys. 135, 034507 (2011).
2. M. Zhang, E. Lussetti, Lui's E. S. de Souza and F. Muller-Plathe, J. Phys. Chem. B, 109, 15060 (2005).
3. E. Lussetti, T. Terao and F. Muller-Plathe, J. Phys. Chem. B, 111, 11516 (2007).
4. W. L. Jorgensen, D. S. Maxwell and J. Tirado-Rives, J. Am. Chem. Soc. 118, 11225 (1996).
5. P. Jund and R. Jullien, Phys. Rev. B 59, 13707 (1999).
6. D. Torii, T. Nakano and T. Ohara, J. Chem. Phys. 128, 044504 (2008).
7. R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, *Transport Phenomena Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 268 (2002).
8. JSME Data Book, "Thermophysical Properties of Fluids", 254 (1983).

平成26年度の研究業績

【研究内容】

熱伝導現象を再現する分子動力学シミュレーションにおける分子モデルの影響

【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

先述した本年度の研究内容を Fluid Phase Equilibria に投稿予定



氏名 許 書涵 (Hsu Shu han)

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

積層した金属ワイヤメッシュの熱音響機器計算ための円管モデリング

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、振動流場で積層した金属ワイヤメッシュに対して温度勾配による音響パワーの増幅の実験に基づき、円管モデリング化した等価流路半径 r_{eff} を提案した。

気体が充填された気柱管内に設置した狭い流路の束の軸方向に、閾値を超えた急な温度勾配を与えると、管内気柱が振動し始める。この現象を熱音響振動と呼び、エンジンとして利用することができる。熱音響エンジンで最も重要な部品は狭い流路の集合の蓄熱器である。蓄熱器に求められるのは、振動流体が等温可逆的な熱力学的過程を経験できるように十分に狭い流路を持つことである。そのため、狭い流路を容易に達する積層した金属ワイヤメッシュを蓄熱器として使用しなければならない。

しかし、蓄熱器は積層ワイヤメッシュで構成され、その流路が大変に複雑である。そのため、熱音響エンジンの設計にとって困難であった。なぜならば、今までの設計手法として、一様規則的な流路からまとめた熱音響理論に基づく伝達行列の方法が使われるようになってきた。金属ワイヤメッシュ蓄熱器の使用として、この設計手法を適用するのが困難であった。

複雑流路の蓄熱器の音響パワーの生成と減衰について、従来の熱音響理論では予測することは困難な現状のため、本研究では、複雑流路の蓄熱器を一様な円管の集合体を見なして、実験で得られた温度勾配がある蓄熱器前後の音響パワーの計測結果と伝達行列に基づく計算を利用して、等価流路半径 r_{eff} を評価した。図1に、その等価流路半径 r_{eff} の概念を示す。そうすれば、ロットの近似条件からの熱音響基礎方程式[1, 2]により、音響パワーの散逸と増幅を同時に理解でき、基礎熱音響理論に基づく伝達行列の設計方法も利用できるようになる。

この評価手法を検証するため、一様流路の蓄熱器の実験にも行った。図2に、0.45 MPaのArあるいはHeで、一様流路の1200セルのハニカムセラミックスの実験結果を示す。四角マーカー◆であらわしたデータは等価流路半径である。実線で表したデータはハニカムセラミックスの実際流路半径である。実際の流路半径とほぼ一致として、 r_{eff} の評価手法は信頼できる。続いて、図3の(a)~(d)と(e)~(h)に、それぞれ0.45 MPaのArあるいはHeで30, 50, 60, 100 meshの実験的等価流路半径の結果を示す。マーカーは実験的等価流路半径である。曲線は、円管モデリングの考えを踏まえて、前年度で検証された散逸を見積もれる大林の経験式[3]で導出した等価流路半径の予測である。データ値と予測を比較して、アルゴンとヘリウムの場合では、最大誤差が8%により、経験式の予測と実験的等価流路半径はほぼ一致することを示した。

以上の実験結果から見ると、実験からもとめた r_{eff} は流速振幅の増加につれて小さくなった。経験式は温度が高くなるとより小さな流路半径を与えるので、経験式からの予測と実験的等価流路半径は定性的に一致している。等価流路半径と経験式を比較して、蓄熱器前後の温度差がゼロの時、すなわち散逸効果だけ適用する場合では、等価流路半径と経験式のずれは最大10%(He, mesh No.50の実験)であり、経験式は抵抗の形式だけではなく、流路半径の形式でも信頼できるといえる。蓄熱器前後の温度差がある場合には、ずれは1~8%程度であり、ほぼ一致を示している。したがって、抵抗の経験式から決めた等価流路半径を予測する式は温度差の有無に問わず、いずれの場合にも適用できるといえる。

本研究では積層ワイヤメッシュ蓄熱器に対する等価流路半径 r_{eff} を評価するための方法を示した。 r_{eff} を用いて伝達行列の成分を構成すれば、熱音響エンジン全体に対する音場と、その音場によって決定されるエネルギー変換効率を計算により求めることができる。本研究の結果は、熱音響エンジンの設計に役立つことに期待されている。

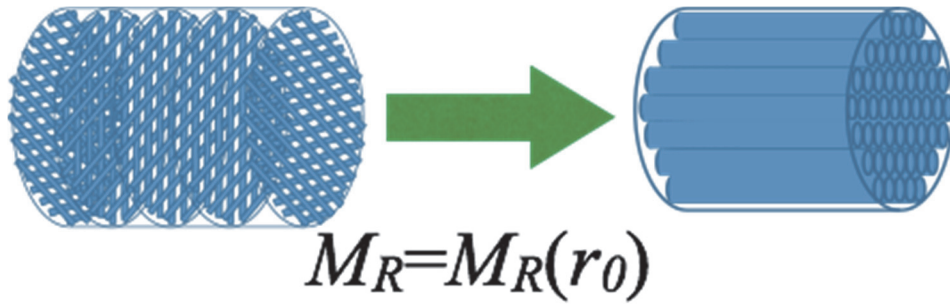


図1 複雑流路を有する蓄熱器の円管モデリング。
複雑流路の蓄熱器の伝達行列 M_R は等価流路半径の関数を見られる

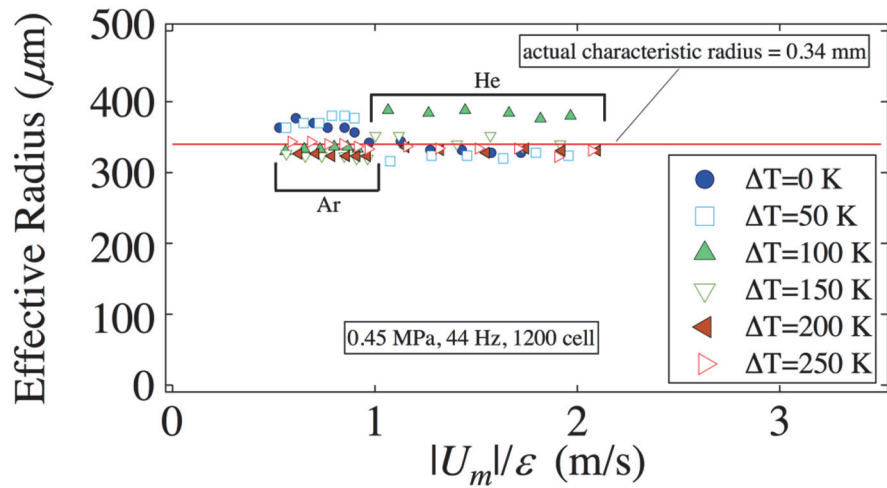


図2 一様流路の蓄熱器の場合で流速と等価流路半径の関係。

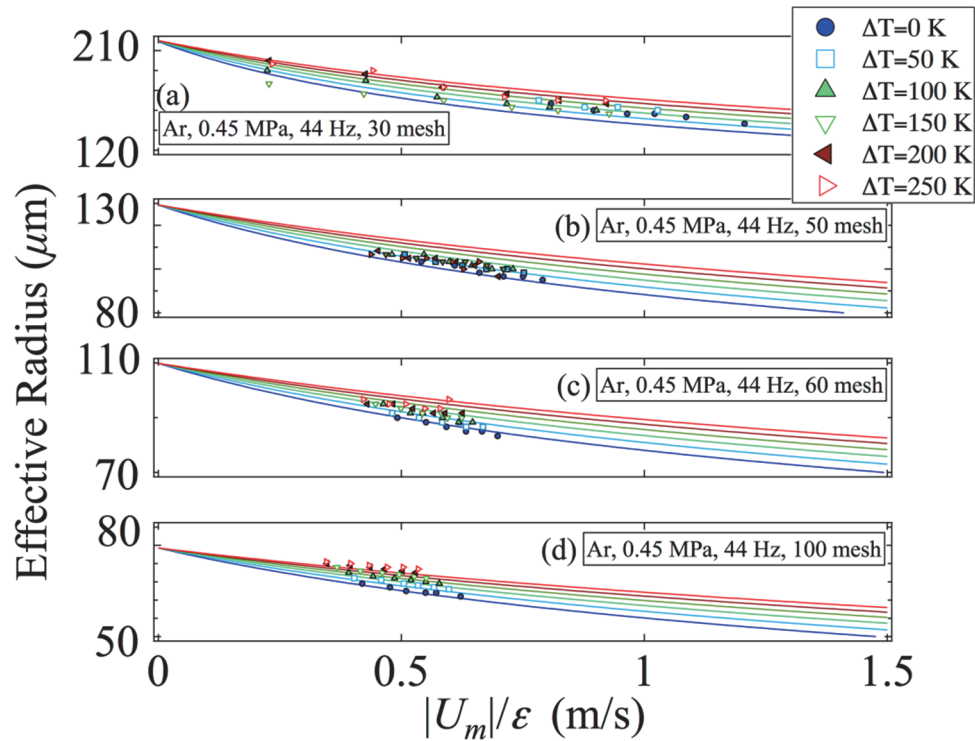


図3(a)~(d) 積層した金属メッシュの蓄熱器の場合、アルゴンでの流速と等価流路半径の関係。

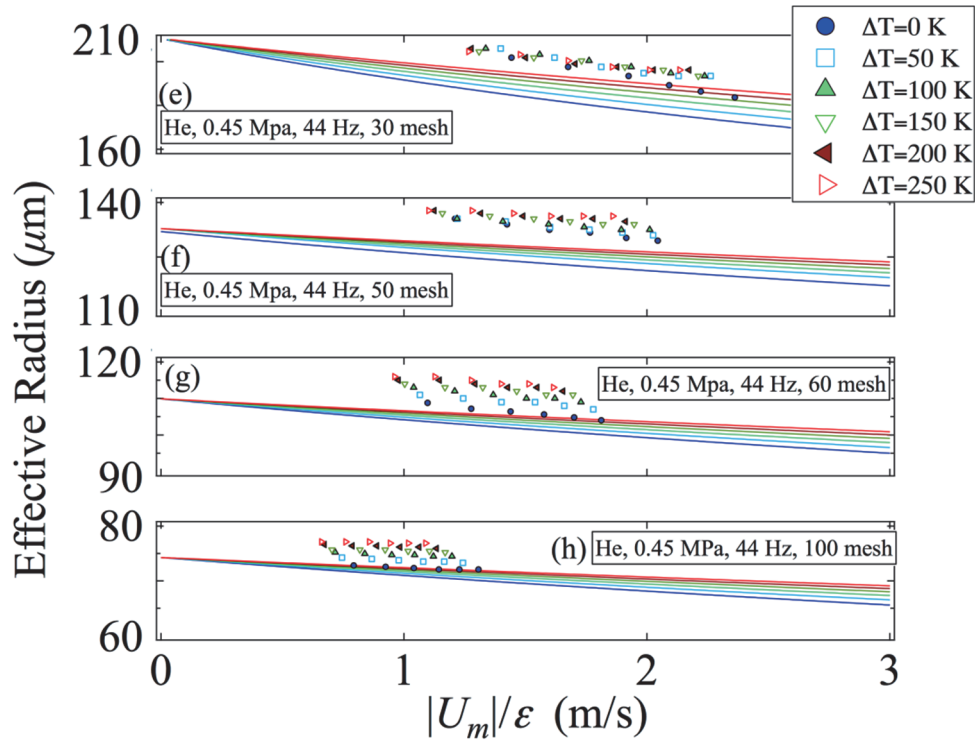


図3(e)~(h) 積層した金属メッシュの蓄熱器の場合、ヘリウムでの流速と等価流路半径の関係.

- [1] A. Tominaga, Fundamental Thermoacoustics (Uchida Rokakuho Publishing Co., Tokyo, 1998).
- [2] G. W. Swift, Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators (J. Acoust. Soc. Am., Melville, NY, 2002).
- [3] A. Obayashi, S. H. Hsu, and T. Biwa, “Amplitude dependence of thermoacoustic properties of stacked wire meshes,” J. Cryo. Soc. Jpn. 47, 562–567 (2012).

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Shu han HSU, Tetsushi BIWA
Modeling of stacked mesh screen for predicting thermoacoustic power amplification
The 21st International Congress on Sound and Vibration, (2014)



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・D2

研究課題

反応性プラズマによる活性化微粒子成膜技術の開発

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、昨年度に開発した単粒子衝突試験システムを用いてコールドスプレー粒子の付着メカニズムの検討を行った。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可能である。本装置を用い、直径約1mmのAl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付着挙動をまとめたグラフをFig. 2に示す。グラフから、Al粒子はAl基材上に約440m/s以上から付着することが可能であることが確認された。このときの速度は一般に臨界速度と呼ばれる。Al粒子/Cu基材およびAl粒子/Ni基材における臨界速度はそれぞれ約350m/sおよび約310m/sと評価された。一方、今回実験を行った速度範囲内において、Al粒子はTi基材およびSUS304基材上に付着できないことが確認された。この結果は基材材料によって粒子の付着挙動が大きな影響を受けることを示している。

基材材料の影響を詳細に分析した結果、基材表面酸化膜の除去しやすさ(厚さ)が粒子の付着に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。基材表面酸化膜の除去しやすさをXPSによって評価した結果をFig. 3に示す。酸素が消失するまでのArスパッタリング時間が短いほど酸化膜が除去しやすいことを示している。グラフから、NiおよびCuは極めて酸化膜を除去しやすいことがわかる。この傾向は、単粒子衝突試験におけるAl粒子の付着挙動と一致している。一方、グラフから、AlおよびTiは酸化膜を除去しにくいことがわかる。ここで、Table 1に示した各材料の硬さ試験結果から、AlとTiの硬さを比較すると、TiはAlの6倍程度の硬さを有している。Al粒子が衝突する際、Al基材は十分塑性変形して酸化膜を除去可能であるが、Ti基材は変形が少なく酸化膜の除去が困難であることが推測される。従って、単粒子衝突試験において、Al粒子はAl基材上に比較的速い速度域で付着が可能となるが、Ti基材上には付着できなかったものと考えられる。また、SUS304に関しては、酸化膜は比較的除去しやすいことが確認された。しかしながら、Al粒子の付着は確認されていない。一般に、SUS304の表面には不動態と呼ばれる保護性の酸化膜が形成している。実際にAl粒子の衝突によりこの保護性の酸化膜を除去する場合は、やはり基材の十分な塑性変形が必要になるものと推測される。しかしながら、Tiの場合と同様にSUS304はAlに比べかなり硬いことから、Al粒子の衝突による基材の塑性変形が十分ではなく、Al粒子は付着できなかったものと考えられる。

以上の結果から、実際のコールドスプレーにおいて、様々な金属粒子を効率的に様々な金属基材表面に付着させるためには、衝突前に粒子・基材表面の酸化膜を除去することが有効であると考えられる。本研究ではスプレー中に粒子・基材表面の酸化膜を効率的に除去する手段として、反応性プラズマに着目した。現在、スプレー中の作動ガスを直接プラズマ化することで酸化膜の高速還元を可能とする新しい成膜技術の試作機を製作中である。

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 単粒子衝突試験システムを用いたコールドスプレー粒子付着メカニズムの解明
コールドスプレー粒子付着メカニズムの解明するため、単粒子衝突試験システムを用いて、様々な材料について臨界速度の測定や付着粒子の観察等を詳細に行い、臨界速度に及ぼす材料因子の特定を試みている。その結果、特に粒子・基材表面の酸化膜が粒子の付着に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。
2. 反応性プラズマによる活性化微粒子成膜技術の開発
スプレー中に粒子・基材表面の酸化膜を効率的に除去する手段として、反応性プラズマに着目した。現在、スプレー中に作動ガスを直接プラズマ化することで酸化膜の高速還元を可能とする新しい成膜技術の試作機を製作中である。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. K. Ito, Y. Ichikawa, K. Ogawa, Influence of Substrate Materials on Deposition Behavior of Cold Spray Emulated Pure Single Al Particle, Asian-Pacific Conference on Fracture and Strength 2014 and the International Conference on Structural Integrity and Failure, pp.519-523, Australia, 12/2014

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 伊藤潔洋, 市川裕士, 小川和洋, コールドスプレー模擬単粒子衝突試験によるAl粒子のミクロ組織に及ぼす衝突速度依存性, 日本機械学会M&M 2014材料力学カンファレンス, OS1807, 福島, 7/2014
2. 伊藤潔洋, 小川和洋, コールドスプレー模擬単粒子衝突試験装置の開発, 日本溶射学会第99回(2014年度春季)全国講演大会, 106, 東京, 6/2014

【研究費の獲得】

名称：一般財団法人先端加工機械技術振興協会 平成26年度研究助成

期間：2014年10月～2015年9月

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26年度における本卓越拠点に対する取り組み

非圧縮性SPH法にアーク溶融池内流動に関わる諸現象の効果を組み込み、TIG溶接のシミュレーションプログラムを開発し、接合過程のシミュレーションを行った。10x10のステンレス棒を二本平行に並べ上面を加熱し、熱源を走査して二つの材料が一体になる様子を計算した。

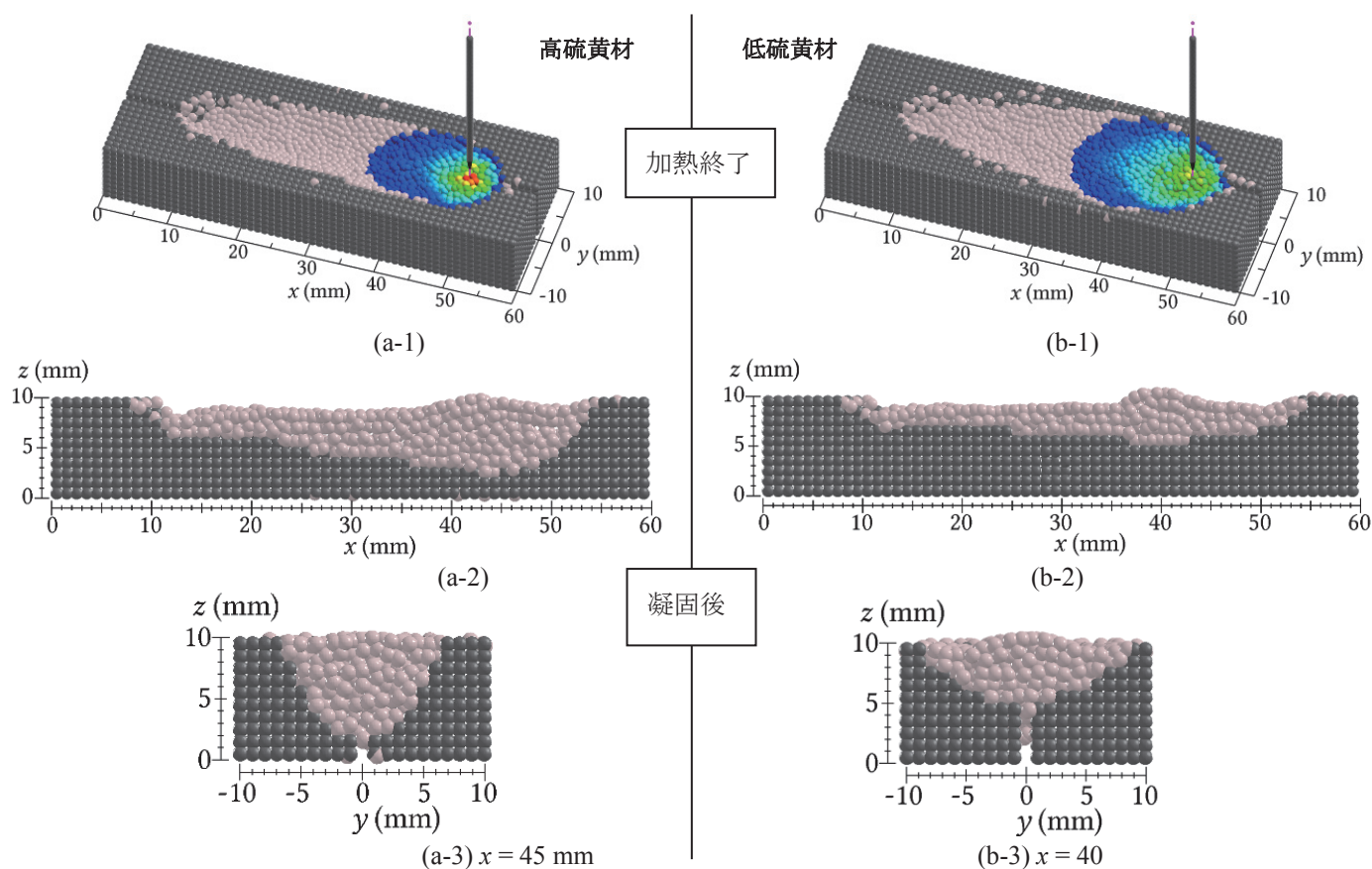


Fig. 1 (a)高硫黄材および(b)低硫黄材のウェルド形状. 上段: 加熱終了時 $t = 15.4$ sにおける俯瞰図. 中段: 凝固終了後の長手方向中央断面($y = 0$). 下段: 最深部断面. 濃灰および淡灰色はそれぞれ固体の未融解部分と凝固部分、その他の色は液体部分の温度を示す. 細棒は陰極のイメージであり加熱位置を示す.

図1はシミュレーションの結果であり、長さ60mmの棒の一端から10mmの位置から50mmの位置まで一定の速度で熱源移動し加熱したものである。図中の陰極棒はイメージであり計算には含まれない。

材料はステンレス鋼SUS304であり硫黄添加した高硫黄材および低硫黄材の二種類の材料物性についてそれぞれ計算を行った。隙間を空けて置かれた二つの材料の一部が融解して一体化する様子を計算できた。粒子法を用いることでギャップを伴う複雑な条件の溶接過程を計算できることが示された。また、

材料物性により流れ場および温度場に違いが現れ溶け込み形状に差が生じることが確認できた。

本研究では、この他に計算手法の数値粘性低減のための改良を試み粒子法的一种であるMPS法の非圧縮近似スキームとの比較を行った。

平成26年度の研究業績

【研究内容】

粒子法による溶融池形成シミュレーションおよび接合シミュレーション

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. 伊藤真澄, 伊澤精一郎, 福西祐, 茂田正哉, 非圧縮性SPH法を用いたTIG溶接における溶融池形成シミュレーション, 日本溶接学会論文集 Vol.32, No.4, (2014), pp.213-222.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Masumi Ito, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi and Masaya Shigeta, Numerical Simulation of Joining Process in a TIG Welding System Using Incompressible SPH Method, The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, Osaka, Japan, (November 26-28, 2014) , pp.19-20, USB memory.
2. 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 溶接学会論文集 第 33 巻 (2015) (審査中)
3. 伊藤真澄, 西尾悠, 伊澤精一郎, 福西祐, 茂田正哉, アーク溶接における接合過程のSPHシミュレーション, 溶接学会平成26年度秋季全国大会, 黒部市 (2014.9.10--12)



氏名 加藤 昂大

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D1

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26年度における本卓越拠点に対する取り組み

燃料消費量が少なく、燃焼排出物の排出量が少ない希薄燃焼方式では、不安定な燃焼が生じやすいことが課題として挙げられる。実際のガスタービン燃焼器内の雰囲気圧力は、1.0 MPaを超える。そのため、高圧環境下において燃焼試験を行い、噴霧燃焼特性に対する雰囲気圧力の影響を明らかにするとともに不安定性が生じるメカニズムについて調べる必要がある。本年度は、大気圧環境下において燃焼試験を行い、噴霧特性と火炎の関係について調べ基礎燃焼特性を把握した。図 1、2に燃料噴射弁として用いられる同軸気流噴射弁および燃焼試験装置の概略図を示す。同軸気流噴射弁は、高速の旋回空気流で液膜を挟み込むことで微粒化する構造になっている。酸化剤は空気、燃料にはエタノールを用いた。図3にデジタルカメラで撮影した火炎画像を示す。 Q_A 、 Q_F 、 Q_S はそれぞれ噴射弁出口から供給される空気、燃料、燃焼器内に供給される掃気用の空気の体積流量である。火炎はコーン形状に形成され、噴射弁出口における空気流速および掃気用の空気を含めた空気の供給量に応じて火炎形成位置および火炎形状が変化した。図3 (a)、(b)、(c)を比較すると空気流速を上げるにつれて、火炎形状が明確なコーン形状になるとともに、火炎基部が噴射弁から離れ、火炎がリフトしていることが分かる。これは、空気流速が上がるにしたがってインナーとアウターの旋回空気流間で強いせん断が発生し、微粒化が促進されていることに加え、酸化剤と燃料の混合が促進されているためであると考えられる。また、明らかに噴霧形状の変化にともなって火炎の形状が変化していることから噴霧特性と火炎は密接に関係していると言える。次に、噴射弁から供給される空気流量を一定として、掃気用の空気流量を上げ、燃焼容器内への空気供給量を多くした場合(図3 (a)、(d)、(e))、火炎形状が不安定な形状からコーン形状へと変化し、掃気用の空気流量が600 [slm]の場合ではコーン内側の角度が大きく広がり、平らなベル形状へと変化した。これらの条件は、当量比が1よりも高い燃料過濃条件であり、酸素が不足した状態で燃焼しているため、掃気用空気流量が増加するにつれて周囲空気から供給される酸素が多くなり、火炎形状が変化したと考えられる。図4に当量比および噴射弁出口から供給される空気流量の関係を示す。保炎範囲は、いずれの条件においても当量比が1より高い条件にあり、供給される空気流量が多くなるにつれて保炎限界曲線が、当量比が1の条件に近づくことが分かる。これは、噴射弁出口の空気流量に比例して空気流速が増加するため、スワール流によって噴霧コーン内に強い再循環領域が形成されるとともに微粒化が促進された結果、安定した熱の供給が再循環領域から行われ、当量比が1の条件で保炎されたと考えられる。これらのことから、安定した燃焼を行うためには、強い再循環領域を形成し、粒径の小さな液滴の供給することができる空気流速が高い条件でなければならないことが分かった。

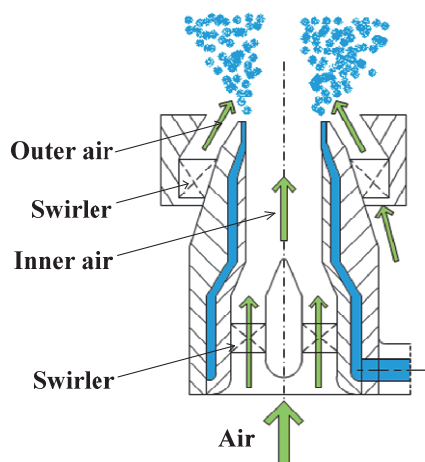


図1. 同軸気流噴射弁

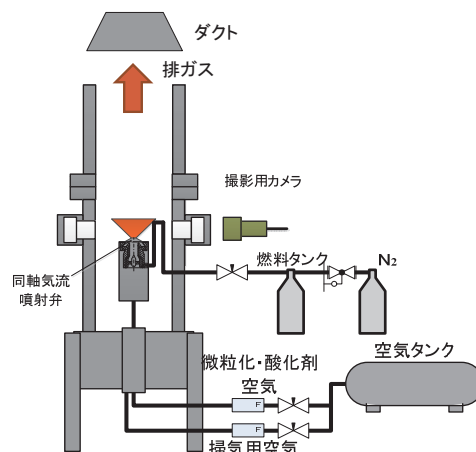
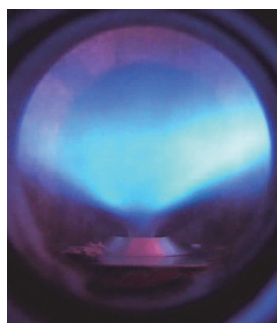


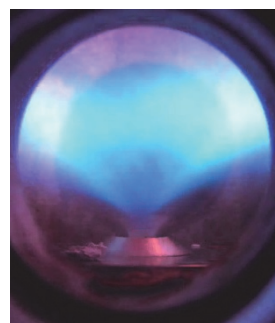
図2. 燃焼試験装置概略図



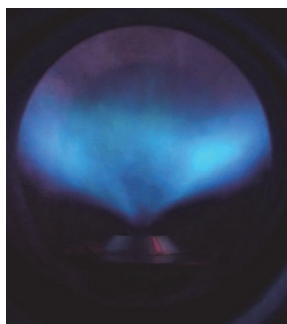
(a) $Q_A = 100$ [slm],
 $Q_F = 30$ [ml/min],
 $Q_S = 200$ [slm]



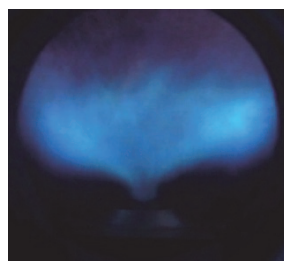
(b) $Q_A = 235$ [slm],
 $Q_F = 50$ [ml/min],
 $Q_S = 230$ [slm]



(c) $Q_A = 300$ [slm],
 $Q_F = 60$ [ml/min],
 $Q_S = 240$ [slm]



(d) $Q_A = 100$ [slm],
 $Q_F = 30$ [ml/min],
 $Q_S = 400$ [slm]



(e) $Q_A = 100$ [slm],
 $Q_F = 30$ [ml/min],
 $Q_S = 600$ [slm]

図3. 噴霧火炎画像

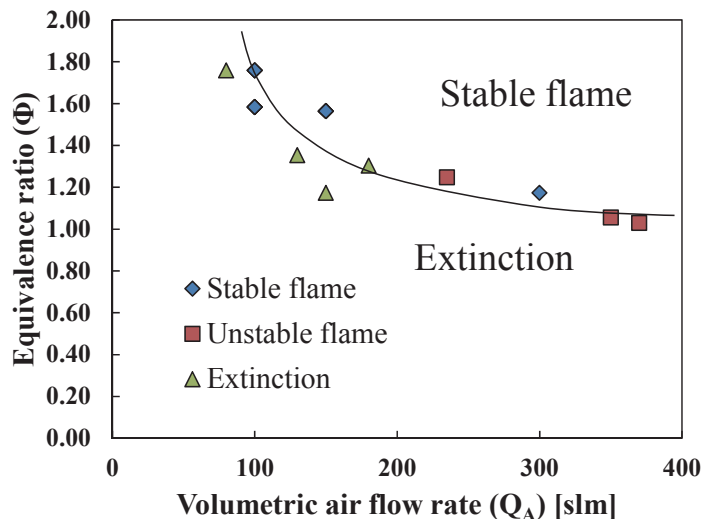


図4. 当量比と噴射弁出口空気流量の関係

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 同軸気流噴射弁の噴霧燃焼特性に関する研究
噴霧燃焼において燃焼過程は燃料噴霧特性に強く影響を受ける。そのため、ガスタービン用燃料噴射弁である同軸気流噴射弁を用いて噴霧特性と燃焼特性の関係について実験的に研究を行っている。
2. 高圧環境下における同軸気流噴射弁の噴霧特性および噴霧形成メカニズムに対する液体物性値の影響
代替燃料として注目を浴びているバイオ燃料は、燃料によって液体粘度や表面張力などの液体物性が異なる。そのため、燃料の液体物性を模擬した試験液体を製作し、その噴霧特性を調べることで燃料噴霧特性への影響を明らかにしている。さらに、二次元模擬噴射弁を用いて液膜微粒化過程へのそれらの影響も同時に調べている。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. 加藤昂大, 鈴木聡一郎, 工藤琢, 加藤壮一郎, 伊藤光紀, 早川晃弘, 小林秀昭
高圧環境におけるプレフィルミング型気流噴射弁の噴霧特性および噴霧形成過程
日本液体微粒化学会学会誌, 23巻, 79号, pp. 53-60 (2014).
2. Kodai Kato, Soichiro Suzuki, Taku Kudo, Soichiro Kato, Mitsunori Itoh, Masahiro Uchida, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi
Effects of Ambient Pressure and Liquid Properties on Atomization Characteristics of an Airblast Atomizer
Proceedings of 26 th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (USB), ABS-293, Germany, September (2014).

【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 Ambient Pressure on Atomization Behavior of Airblast Atomizer
35TH International Symposium on Combustion, Poster presentation, W3P016, 2014.(査読有り)
2. Kodai Kato, Soichiro Suzuki, Taku Kudo, Soichiro Kato, Masahiro Uchida, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi
Effect of Liquid Properties on Atomization Behavior and Characteristics of an Airblast Atomizer in a High Pressure Environment
Proceedings of 52nd Symposium (Japanese) on Combustion, pp. 48-49.

氏名 加藤 茂樹



所属 医工学研究科医工学専攻・D2

研究課題

リンパ行性薬剤投与とソノポレーションを組み合わせた腫瘍リンパ節治療法開発

平成26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、我々の研究室では、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 13 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経由して腋窩リンパ節へ送達することが可能となった(図1)。そこで先ず、腋窩リンパ節に腫瘍細胞である MRL/KM-Luc 細胞を接種し、リンパ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腋窩リンパ節に抗がん剤の送達を行った。また、微小気泡を抗がん剤と同時に注射して腋窩リンパ節に送達し、外部から超音波を照射することでリンパ節内のリンパ洞から抗がん剤を組織に漏出させた。抗がん剤の漏出は、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ソルビシンを使用したことで、ドキソルビシンの蛍光(赤)を顕微鏡で検出した。また、抗がん剤の一般的な投与経路である全身投与との比較を行った。ドキソルビシンの腫瘍腋窩リンパ節内での分布は、超音波と微小気泡を併用したことで他の群より、有意にドキソルビシンの蛍光シグナルが増加した(図2)。微小気泡に超音波を照射すると、微小気泡が崩壊する際に発生する衝撃波や、微小気泡が崩壊した際に生じる気泡が超音波場でキャビテーション気泡となり力学的作用が発生することが知られている。すなわち、これらの力学的作用が細胞膜の透過性を一過的に亢進させ外来分子である抗がん剤がリンパ洞外へ漏出したと考えられる。

また、治療介入の影響による腫瘍腋窩リンパ節の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2)。

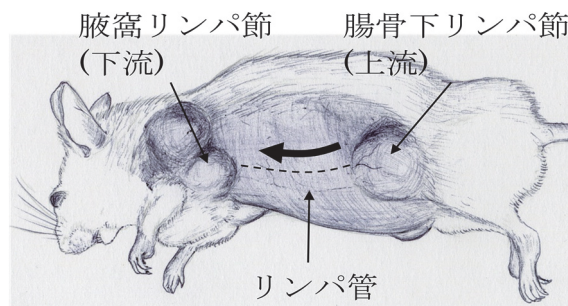


図1 MXH10/Mo-*lpr/lpr* マウスの概略図

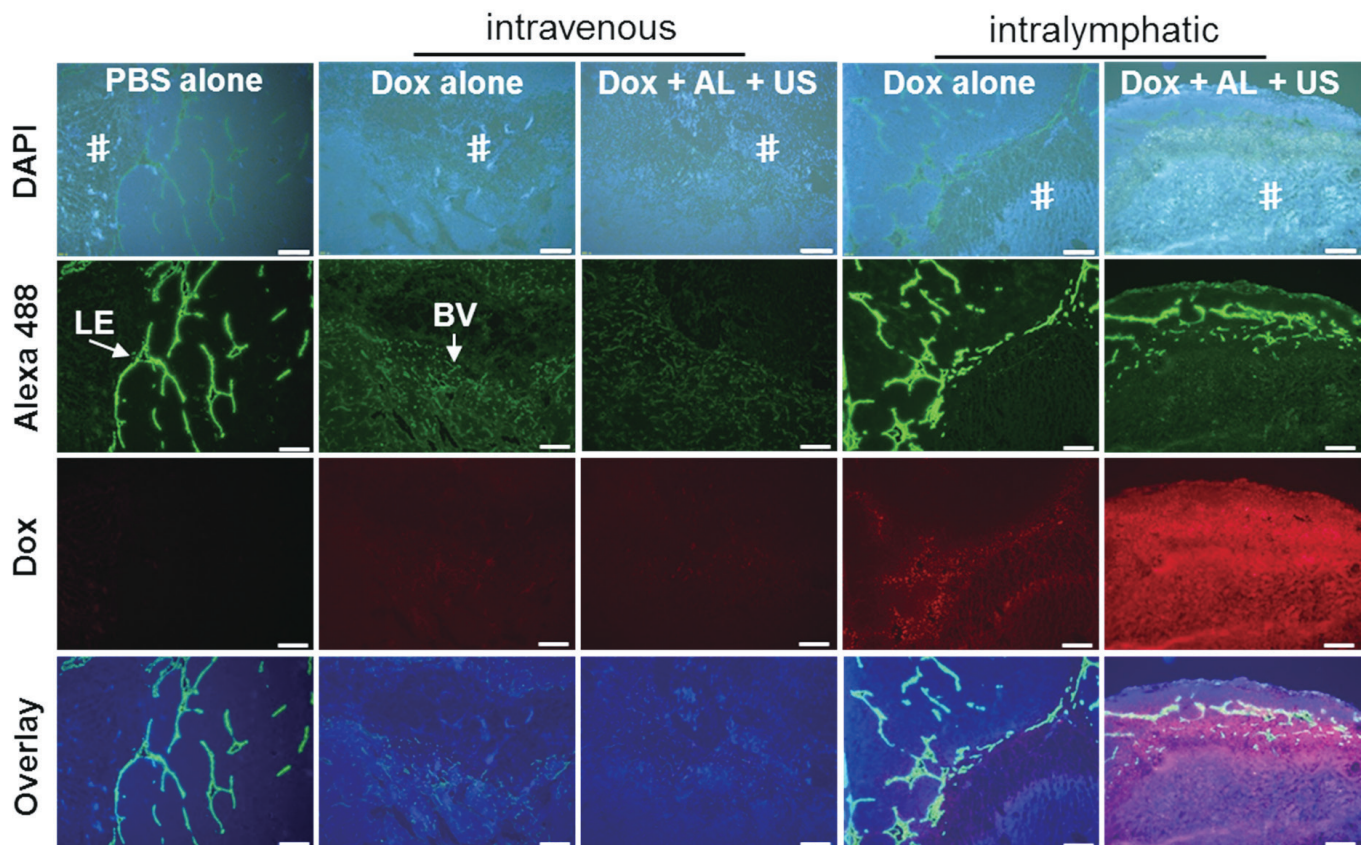


図2 腫瘍腋窩リンパ節の凍結蛍光免疫染色画像

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

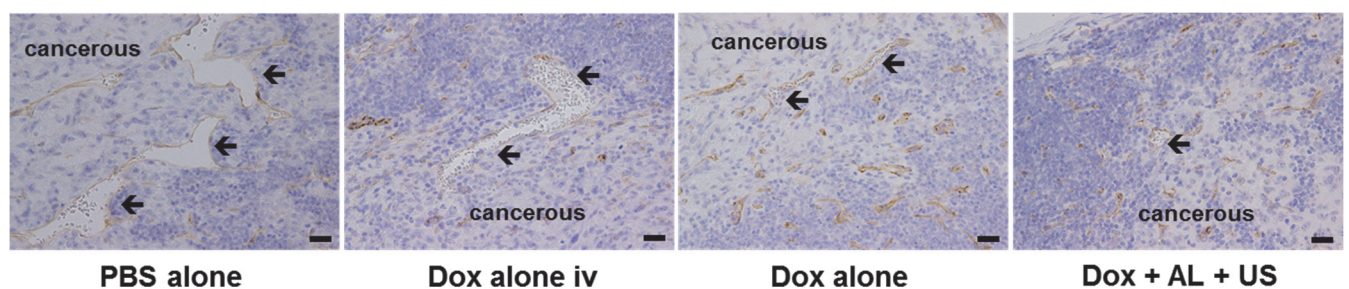


図3 腫瘍腋窩リンパ節のパラフィン免疫染色画像

矢印は血管を示す。Dox+AL+US において血管密度が減少した。

平成26年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

<国際会議>

名称: The 11th International Conference on Flow Dynamics

主催団体: 東北大学流体科学研究所

開催国: 日本

開催期間: 2014.10.8 ~ 2014.10.10

役割: Floor Leader

平成26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増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** を用いて解析する。
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**, Shirai Y, Kanzaki H, Sakamoto M, Mori S, Kodama T. Delivery of molecules to the lymph node via lymphatic vessels using ultrasound and nano/microbubbles. *Ultrasound Med Biol.* 2015 (in press)

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. **Kato S**, Shirai Y, Morikawa H, Sakamoto M, Mori S, Kodama T. Novel antitumor therapy for tumor bearing lymph node by lymphatic administration and sonoporation with a combination of nano/micro Bubbles and Ultrasound. 9th International Workshop on Biomaterials in Interface Science, Program & Abstracts: 35, Aug 26-27, 2014, Zao, Miyagi, Japan. [口頭発表]
2. **Kato S**, Shirai I, Mori S, Kodama T. Treatment for Tumor-bearing Lymph Node by Lymphatic Administration with a Combination of Nano/Micro Bubbles and Ultrasound. Drug Discovery & Therapy World Congress 2014, Conference Program & List of Delegates: p2, Jun 16-19, 2014, Memorial Convention Center Boston, MA, USA. [口頭発表]



氏名 河川 健太郎

所属 工学研究科バイオロボティクス専攻・D1

研究課題

量子分子動力学法に基づく化学機械研磨プロセスシミュレータの開発およびGaN基板研磨プロセスの検討

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

窒化ガリウム(GaN)はエレクトロニクス材料として応用が期待されている。一方で、加工が困難であることが実用化へのネックとなっている。原子レベルの平坦性が求められる研磨プロセスについて、加工原理の理解による高精度・高効率なプロセス設計が強く求められている。GaN基板は高い化学的安定性を有することから、高効率なGaN CMPには研磨液の強い化学的作用が必要であると示唆されている。しかし、実験的手法では、研磨液の化学的作用が研磨特性に及ぼす影響を評価することができないため、高効率なGaN CMPの設計指針は得られていない。そこで、高効率なGaN CMPプロセスの設計指針を得るために、我々が開発したTight-binding量子分子動力学法に基づくCMPシミュレータを活用することで、研磨液の化学的作用が研磨性能に与える影響について解析を行った。最初に、研磨液として、従来のCMPプロセスで広く用いられている水酸化ナトリウム(NaOH)水溶液および過酸化水素(H_2O_2)水溶液の2つについて比較・検討を行った。シミュレーションで用いたモデルを図1(a), 2(a)に示す。最安定面であるGaN(0001)表面上に SiO_2 砥粒モデルを配置し、基板・砥粒間に、 H_2O 分子9個とNa原子4個、OH基4個を均一に分散させたNaOH水溶液環境モデル〔図1(a)〕、および H_2O 分子12個と H_2O_2 分子2個を均一に分散させた H_2O_2 水溶液環境モデル〔図2(a)〕を作成した。各モデルにおいて、砥粒に対して垂直方向の圧力と、水平方向のすべり速度を与えることで研磨シミュレーションを行った。その結果、NaOH水溶液環境下において、摩擦面で溶液中のOH $^-$ がGaN基板表面に吸着する様子が観察された〔図1(b)〕。一方、 H_2O_2 水溶液環境下においては、摩擦面で溶液中の H_2O_2 分子が分解して生成したOHラジカルがGaN基板表面に吸着する様子が観察された〔図2(b)〕。ここで、吸着構造について着目すると、OH $^-$ は基板表面のGa原子直上に吸着したのに対し〔図1(b)〕、OHラジカルは基板表面の6員環の中心サイト上で2個のGa原子に吸着する〔図2(b)〕という非常に興味深い相違が明らかとなった。次に、GaN基板表面のGa-N結合についてABP: Atomic Bond Populationを解析することで、各環境におけるOH $^-$ 、OHラジカルの表面吸着がGaN基板表面の結合状態へ与える影響について検討を行った。1層目のGa原子と2層目のN原子間のGa-N結合についてABPを算出し、その平均値の時間変化をグラフ化したものを図3に示す。図3より、NaOH水溶液環境下においてOH $^-$ の吸着後、ABPの値が初期値の0.473から0.480程度まで増加した。これはOH $^-$ の吸着により基板表面のGa-N結合が強まったことを示している。一方、 H_2O_2 水溶液環境においては、OHラジカルが表面に吸着するとABPの値が初期値の0.473から0.465程度まで減少した。これは、OHラジカルの吸着により基板表面のGa-N結合が弱まったことを示している。これらはOH $^-$ とOHラジカルの吸着構造〔図1(b), 2(b)〕、ならびに、それらの電子数の違いに起因すると考えられる。以上より、OH $^-$ の吸着により基板表面が安定化するのに対して、OHラジカルの吸着により表面が脆弱化することを明らかにした。この結果は、高効率なGaN CMPを実現するためにはOHラジカルが活性種として化学的に有利であることを示している。

Tight-binding量子分子動力学法によるダイナミクス解析から、GaN CMPにおいてOHラジカルが活性種として化学的に有利であることが示された。しかし、前節の図2で示したように4個のOHラジカル

(H_2O_2 分子2個)がGaN基板に作用する場合、Ga-N結合が脆弱化した一方、GaN基板が研磨される様子までは観察されなかった。実験的には、活性種が高濃度で存在する環境下で研磨プロセスが進むことが示唆されていることから、次にOHラジカルが高濃度で存在する環境を再現したGaN CMPシミュレーションを行った。シミュレーションは、16個の H_2O 分子が存在する純水環境を初期状態として、4.0 ps間隔で合計16個のOHラジカルを研磨液に供給することで高濃度OHラジカル水溶液環境を再現した。そして、砥粒に垂直方向の圧力と水平方向のすべり速度を与える研磨シミュレーションを行った〔図4(a)〕。合計16個のOHラジカルを供給したCMPシミュレーション結果を図4に示す。34 psにおいて、研磨液内に供給された8個のOHラジカルは、GaN基板表面に存在する8個全ての6員環中心サイトを占有した〔図4(b)〕。

その後、さらにOHラジカルが基板表面に作用すると、表面に吸着したOH基と研磨液中のOHラジカルとの化学反応により、GaN基板表面の6員環中心サイトに吸着O原子が新たに生成するとともにH₂O分子が生成した〔図4(c)〕。44 psにおいて、GaN基板表面に吸着したO原子が、砥粒からの圧力により、基板内部へと押し込まれることで、Ga酸化物を生成するプロセスが観察された。また、このO原子の押し込みにより、GaN基板のGa-N結合の解離が起こり、基板内のN原子間にN-N結合が新たに生成した〔図4(d)〕。その後も、上記の吸着O原子の生成、O原子の基板内への押し込み、Ga-N結合の解離が連続的に起こることで、基板内で生成したN-N結合がN₂分子として脱離する様子が観察された〔図4(e)〕。さらに、Ga-N結合の解離によって生成するGa原子の未結合手にOHラジカルが結合することで、最表面のGa原子がGa(OH)₃分子を生成し、表面から脱離する様子が観察された〔図4(e)〕。以上より、GaN表面に存在する吸着サイト数以上のOHラジカルが、GaN基板と化学反応することで、吸着O原子が生成することを明らかにした。さらに、この吸着O原子が、摩擦面で砥粒の機械的作用により基板内に押し込まれることで、高い化学的安定性を有するGaN基板表面が酸化されるトライボケミカル反応を解明した。このトライボケミカル反応により、強い共有結合であるGa-N結合が解離し、基板のN原子から揮発性のN₂分子、さらにGa原子から可溶性のGa(OH)₃分子を生成することを明らかにした。このように、高硬度なGaN基板の研磨が進行するメカニズムを解明することに成功した。

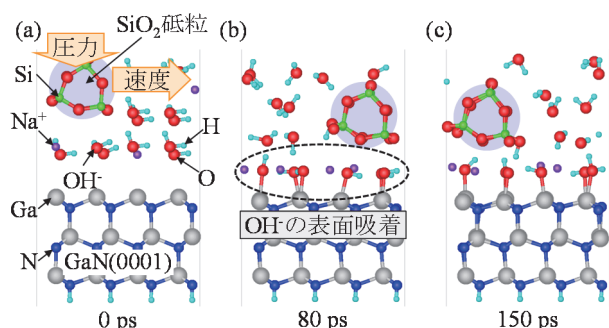


図1 NaOH水溶液環境下におけるGaN(0001)表面のCMPシミュレーション [(a) 0 ps, (b) 80 ps, (c) 150 ps]

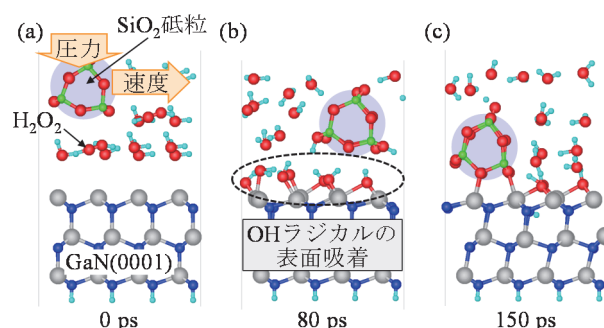


図2 H₂O₂水溶液環境下におけるGaN(0001)表面のCMPシミュレーション [(a) 0 ps, (b) 80 ps, (c) 150 ps]

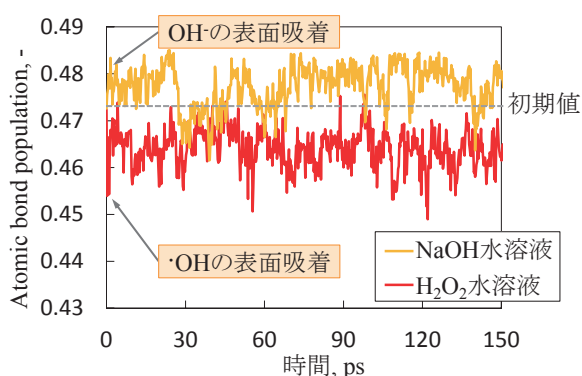


図3 CMPシミュレーションにおける、表面Ga-N結合のAtomic bond population(ABP)の平均値の時間変化

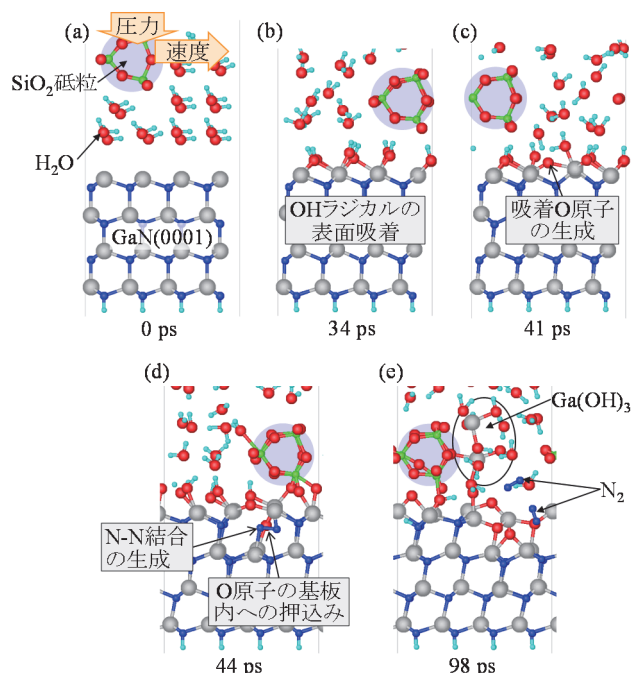


図4 16個のOHラジカルを追加したGaN CMPシミュレーション [(a) 0 ps, (b) 34 ps, (c) 41 ps, (d) 44 ps, (e) 98 ps]

平成26年度の研究業績

【研究内容】

- 高効率なGaN基板研磨に向けた研磨液の設計指針として、活性種としてOHラジカルが化学的に有利であることを明らかにした。
- OHラジカルを用いたGaN研磨プロセスにおいて、OHラジカルの化学的作用によりGaN基板を酸化することで基板内のGa-N結合を解離するプロセスを解明。
- OHラジカルによるGaN基板の酸化反応により基板内のN原子がN₂分子としてGa原子がGa(OH)₃分子として脱離する研磨プロセスを解明。さらに、摩擦面において砥粒の機械的作用が化学反応を促進するメカニズムを明らかにした。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Kentaro Kawaguchi, Takehiro Aizawa, Yuji Higuchi, Nobuki Ozawa, and Momoji Kubo, "Chemical Mechanical Polishing Mechanisms for Gallium Nitride: Quantum Chemical Molecular Dynamics Simulations", *Proceeding of International Conference on Planarization/CMP Technology*, (2014) 39.

【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. 河口健太郎, 會澤豪大, 樋口祐次, 尾澤伸樹, 久保百司, トライボロジスト, “量子分子動力学シミュレーションによる難加工材料の化学機械研磨メカニズムの解明”, **59** (2014) 780.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. (Oral) Kentaro Kawaguchi, Takehiro Aizawa, Yuji Higuchi, Nobuki Ozawa, and Momoji Kubo, "Atomistic Control of Chemical Reaction Dynamics during Chemical Mechanical Polishing of Gallium Nitride: Quantum Chemical Molecular Dynamics Simulations", 7th International Conference on Multiscale Materials Modeling, Berkeley, California, USA (October 2014).
2. (Oral) Kentaro Kawaguchi, Takehiro Aizawa, Yuji Higuchi, Nobuki Ozawa, and Momoji Kubo, "Chemical Mechanical Polishing Mechanisms for Gallium Nitride: Quantum Chemical Molecular Dynamics Simulations", International Conference on Planarization/CMP Technology, Kobe, Japan (November 2014).
3. (Oral) Kentaro Kawaguchi, Takehiro Aizawa, Yuji Higuchi, Nobuki Ozawa, and Momoji Kubo, "Quantum Chemical Molecular Dynamics Approach to Chemical Mechanical Polishing Processes of Gallium Nitride by SiO₂ Abrasive Grain", Pacific Rim Symposium on Surface, Coatings & Interfaces, Kohala Coast, Hawaii, USA (December 2014).
4. (Oral) Kentaro Kawaguchi, Yuji Higuchi, Nobuki Ozawa, and Momoji Kubo, "Quantum Chemical Molecular Dynamics Simulations of Gallium Nitride Chemical Mechanical Polishing Processes", The 9th General Meeting of ACCMS-VO, Okinawa, Japan (December 2014).



氏名 李 康一 (Lee Kang-il)

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

次世代高効率ガスタービンのための革新的ボータレス傾斜機能遮熱コーティングの開発

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

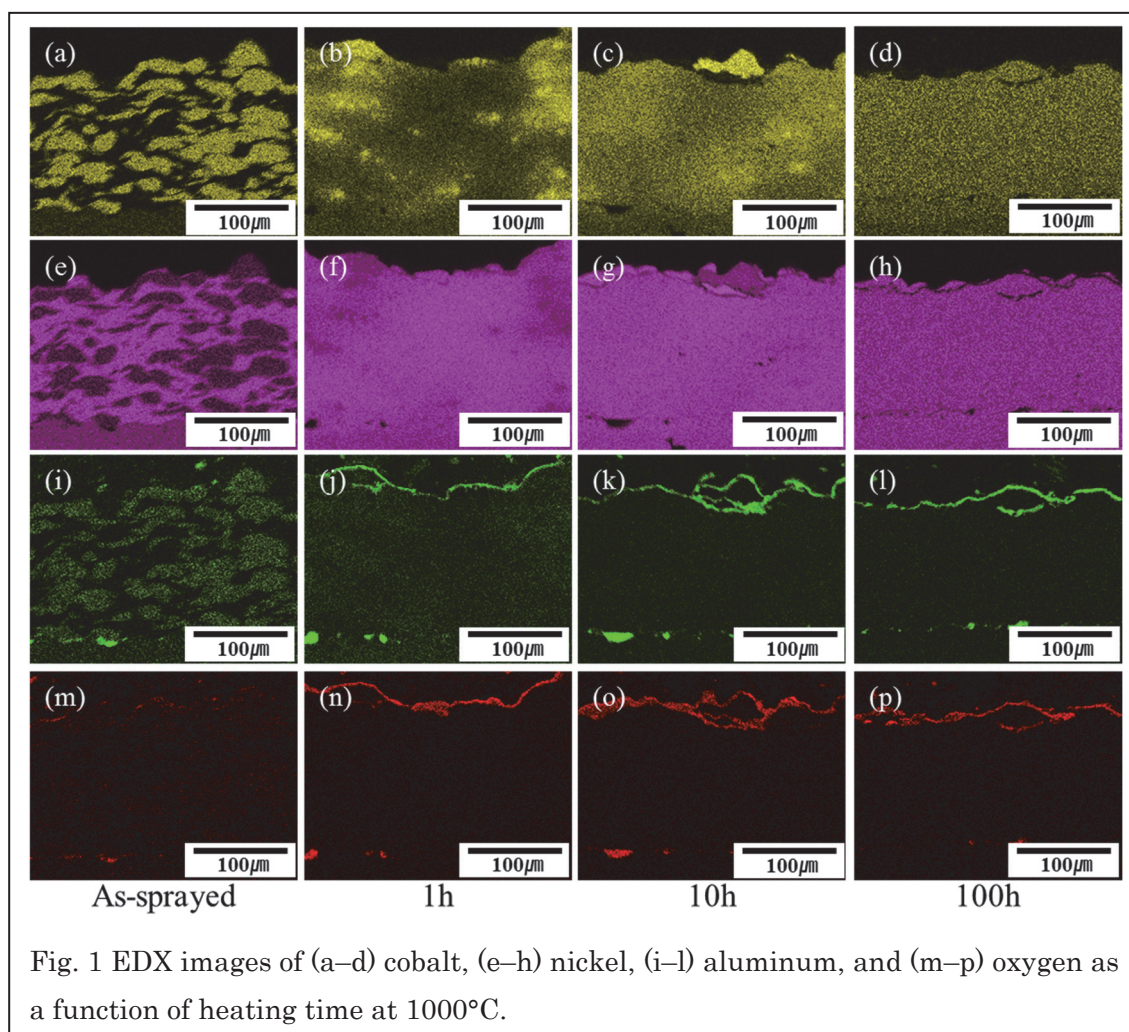


Figure 1 shows the element mapping results of the oxides grown on the surface and the movement of the elements as a function of heating time at 1000°C. In the as-sprayed coating, the boundaries between Ni and CoNiCrAlY are clearly observed in Fig. 1(e). However, the two different materials are gradually mixed by interdiffusion of the powders with heat treatment of 100 h. Consequently, after heat treatment for 100 h, the movement of elements is stabilized and the elements are completely mixed; therefore, boundaries and agglomerated particles are not observed. As can be seen

from the results, extensive interdiffusion occurred until uniform distribution was obtained at a certain temperature.

The different TGO compositions have different influences on the thermal cyclic behavior of TBCs. It has been reported that Al_2O_3 exhibits better adhesion to YSZ coatings and a lower growth rate than other oxides, such as NiO , Cr_2O_3 , and spinel. Ni/Cr mixed oxides in TGOs grow rapidly, resulting in high volumetric expansion stress in the YSZ coating, which promotes the failure of TBCs. The continuous and uniform alumina-based TGO formed on the cold-sprayed bond coat protects the bond coat from fast oxidation.

TGO growth occurs at the surface when the metallic bond coat is exposed to high temperature in atmospheric air. Investigations have shown that, as compared with other oxides, Al_2O_3 preferably forms at the bond coat surface because the oxidation of aluminum requires a lower oxygen partial pressure and lower Gibbs free energy of formation than other metal components, such as Ni, Cr, etc. In this result, it was mainly formed Al_2O_3 on the surface; however, nickel oxides have also been observed in Fig. 1(h,p).

The previous experiment in atmospheric air furnace heat treatments at 1000°C formed mainly thick Ni oxides due to superabundant amounts and diffusion of Ni. These Ni oxides can lead to faster delamination between the top coat and bond coat in TBCs. Pretreatment in a glass tube was thus carried out to prevent formation of Ni oxides and encourage formation of a thick Al_2O_3 layer on the bond coat.

Figure 2 shows a specimen in the glass tube. This specimen with the glass tube was heat treated at 1000°C for 100 h in an atmospheric air furnace. Oxygen was removed as much as possible from the glass tube by a vacuum pump. The glass tube can prevent growth of other oxides by supplying minimum oxygen, thereby enabling thick Al_2O_3 oxide to form. After pretreatment in glass tube, almost similar phenomenon in pore and porosity was observed compared to typical oxidation test in the coating layer.

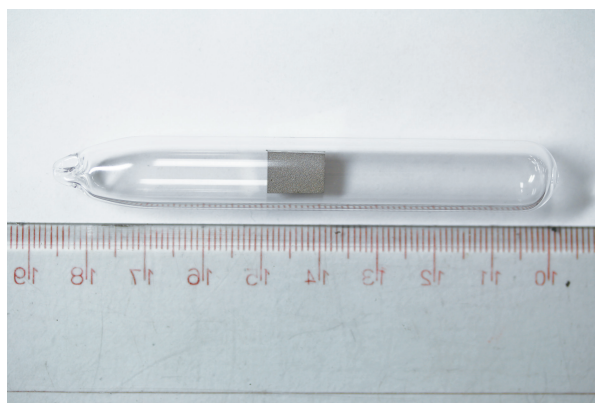


Fig. 2 As-sprayed specimen in glass tube for pretreatment

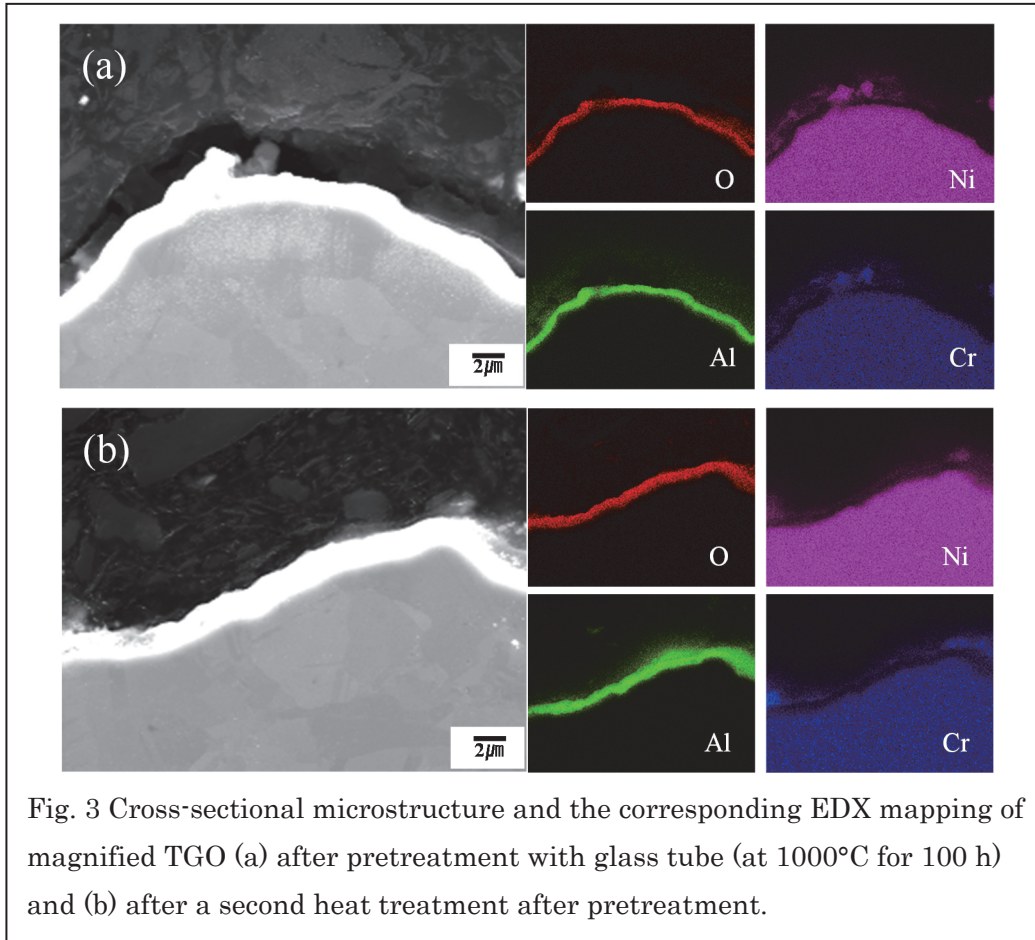


Figure 3(a) shows the TGO cross-section and the corresponding elemental mapping after heat treatment in the glass tube. The Al_2O_3 TGO layer was continuously formed with an average thickness of approximately 2 μm . The slight presence of other oxides such as NiO and Cr_2O_3 on the Al_2O_3 are confirmed after heat treatment in the glass tube. This result shows that the glass tube had a significant effect on the reduction of Ni oxides and the formation of a stable Al_2O_3 TGO.

After that, heat treatment of the specimen without the glass tube was carried out a second time at 1000°C for 100 h in an atmospheric air furnace to verify the effect of the pretreatment with the glass tube. As can be seen from Fig. 3(b), the TGO after heat treatment in the atmospheric air furnace was almost unchanged in comparison with the specimen after pretreatment. From these results, it is apparent that the stable Al_2O_3 oxide formed by the glass tube prevented the formation and continuous growth of other oxides, such as NiO , Cr_2O_3 , and spinel, after heat treatment in air.

The results of this study indicate that TBCs with a Ni-CoNiCrAlY bond coat after pretreatment should have a longer lifetime than those with a Ni-CoNiCrAlY bond coat before pretreatment.

平成26年度の研究業績

【研究内容】

In this study, the effect of nickel powder addition to cold sprayed CoNiCrAlY coatings was investigated. In order to reduce production cost of cold spray and improve the deposition efficiency of CoNiCrAlY coatings, pure nickel (Ni) powder was added to the CoNiCrAlY and the resulting powder was cold sprayed using nitrogen (N₂) as the working gas. Deposition efficiency was increased as compared with a CoNiCrAlY coating without Ni under the same spray conditions. The microstructural characterization and phase analysis of the feedstock powders and the as-sprayed coatings were carried out by scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). In the SEM images, the particle boundaries between Ni and CoNiCrAlY in the as-sprayed coating were clearly observed. Also, a significant amount of the CoNiCrAlY powder was encapsulated in the coating. To confirm the oxidation behavior of CoNiCrAlY with the Ni coating, heat treatment was carried out at 1000°C in ambient air. After heating, most of the boundaries between Ni and CoNiCrAlY disappeared and many pores were generally observed in the coating by interdiffusion of the powders. Over time, most of these pores disappeared by interdiffusion; thus, the number of pores decreased and the hardness of the coatings increased. In the EDX analysis of the coatings, movement of elements was definitely confirmed. Furthermore, the elements of thermally grown oxide (TGO) were analyzed to confirm the effect of CoNiCrAlY with Ni coatings, and a large quantity of NiO was observed on the coating layer. Because NiO can lead to faster delamination of thermal barrier coatings (TBCs), pretreatment in low oxygen partial pressure was carried out to prevent the formation of excess NiO. This pretreatment successfully prevented the growth of NiO TGO.

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. K.I. Lee, K. Ogawa, “Improved Deposition Efficiency of Cold-Sprayed CoNiCrAlY with pure Ni Coatings and its High-Temperature Oxidation Behavior after Pre-treatment in Low Oxygen Partial Pressure”, Materials transactions, The Japan Institute of Metals, Vol.55, No.9, in press 2014
2. oK.I. Lee, K. Ogawa, “Effect of Nickel Powder Mixing on CoNiCrAlY Coatings by Cold Spray”, JSME/ASME 2014 International Conference on Materials and Processing, ICMP2014-4962, Detroit, USA, (June 2014).

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. oK.I. Lee, K. Ogawa, “Effect of Nickel Powder Mixing on the Deposition Efficiency of Cold Sprayed CoNiCrAlY Coatings”, International Workshop on Security Science and Engineering of Advanced Energy System, Lyon, France, (February 2014)



氏名 李 尚昱 (Lee Sang Wook)

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D3

研究課題

LESを用いた擬似衝撃波を伴う超音速流に関する研究

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、擬似衝撃波を伴う流れ場に燃料噴射を行い、擬似衝撃波が噴射気体における影響について Large Eddy Simulation を用いて調べた。その一つステップとして中心差分計算である compact scheme with lowpass filter を用いて計算を行いおよび 壁面摩擦や熱流束の正しく計算し、さらにコストを減らす方法である wall model method を用いた。この方法を用いることで以前のコード (SLAU) より7分の1のコストで計算ができ、さらに比較的悪い条件でもよい結果を見せることが出来た。

マッハ2.5の圧縮性流れ場に擬似衝撃波を立てさらに噴射をいれた(Fig 1)。結果、擬似衝撃波のより生じる圧縮膨張の繰り返す現象の影響に沿って燃料が動き始め、2点空間相関より主流方向に斜めになった相関が擬似の圧縮区間で何回も生じていることが確認できた。このことはモル分率のPDF結果でも確認でき擬似衝撃波が燃料ミッシングに影響を与えていることを明らかにした。

さらに、Hydrocarbon系の燃料であるメタン、エチレンの噴射を上条件で噴射し、また Jet to crossflow momentum flux ratio が違う場合、擬似衝撃波を伴う流れ場に行く違う点を調べた。結果、J が多きほど擬似衝撃波に大きな影響を与えることがあり、さらに圧力損失が大きくなった。また、エチレンよりメタンが比熱比大きくさらにマッハ数、圧縮性の影響でミッシング影響が大きかった(Fig 2)。この結果より、擬似衝撃波を伴う流れ場ではメタンのほうが乱流ミッシングがいいことを明らかにした。

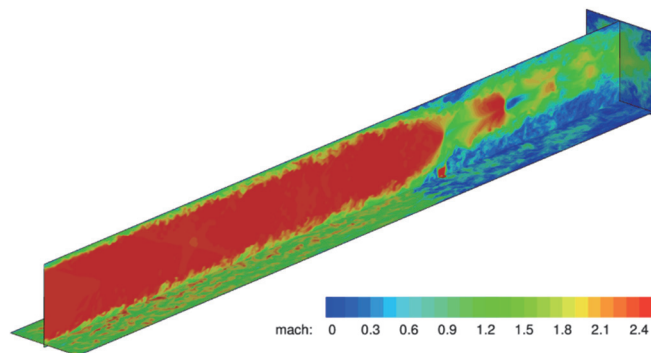


Fig. 1 Mach number distribution

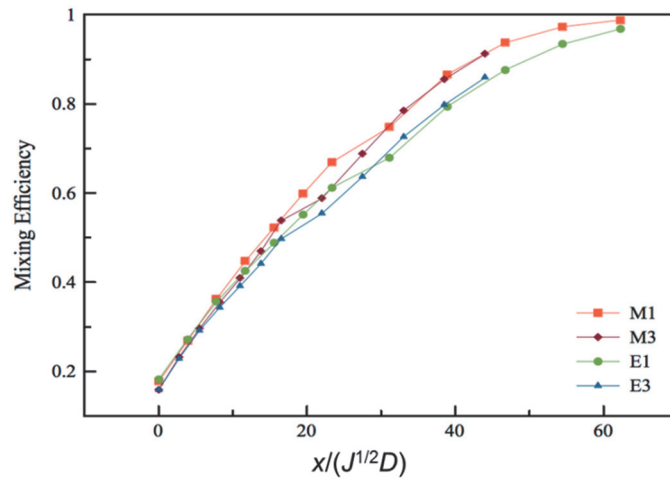


Fig. 2 Mixing efficiency

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 擬似衝撃波を伴う流れ場を解析できる新たなLESコードの開発
2. 1のコードにさらに噴射を行い計算できるコードの開発
3. 乱流ミッシングに擬似衝撃波に影響を明らかにしたこと
4. メタン、エチレンの噴射が擬似衝撃波に影響することを明らかにしたこと

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Lee, S. W., Ogino, Y., Sawada, K., (2014) Large Eddy Simulation of Pseudo-Shock Waves Using Wall model. Open Journal of Fluid Dynamics, 4 ,321-333. (accepted)
2. Lee, S. W., Ogino, Y., Sawada, K., (2015) LES of Air Transverse Jet into a Supersonic Flow with Pseudo-Shock Waves (Submitted)

氏名 LI YUJIE



所属 工学研究科バイオロボティクス専攻・D2

研究課題

Comparison of Flow Pattern in Cerebral Aneurysm among PIV, CFD and MRI

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

During this year, the research is about the comparison of flow pattern in cerebral aneurysm among PIV, CFD and MRI, of which the research background, purpose, methods, current results and related information are introduced as following.

Cerebral aneurysm rupture has been one of those most dangerous disease threatening people's health, and with those current medical facilities, aneurysms are possible to be detected before it rupture. Since the process of the treatment to aneurysms also has a high risk that may cause some severe damage to the patient, medical doctors are faced with a hard decision of whether to treat those aneurysms or not^[1].

In order to discuss the condition of the aneurysm by evaluating the intra-aneurysmal flow patterns, velocity vector fields inside the patient-specific aneurysm has been selected to study with different methods in many researches, like particle image velocimetry (PIV), cine phase-contrast (PC) MR imaging (MRI) and computational fluid dynamics (CFD)^[2]. However, each method has its own advantages and limitations. Therefore, the purpose of this research is to learn the accuracy and difference in the results of measurement or calculation by different methods of PIV, MRI and CFD. Comparison of flow pattern and velocity magnitude at same position in the aneurysms in the results of these three methods will be taken out.

In this research, a realistic model was used. The aneurysm has been detected on a 3T MR imaging scanner (MAGNETOM Verio 3T, Siemens) by using a 12 channel head matrix coil. With the scanned data, an original STL file of the blood vessel with aneurysm has been created. With the original STL file, two silicone models have been manufactured (R-tech Co. Ltd.) as shown in Fig.1. Plane A located around the aneurysm neck has been selected as the target plane to compare the hemodynamic results among PIV, MRI and CFD.

Considering of the geometrical changes that might have been caused during the fabrication with the 3D printer, the silicone phantom were scanned by a Micro-CT scanner (ScanXmate-D180RSS270, Comscantec Co. Ltd.) and a STL has been reconstructed. After this processing, the silicone phantom geometry and the geometry used for CFD simulation are considered to be equivalent.

Working fluid has been created and used in both MRI measurement and PIV experiment, which has similar property to human blood. For the two manners, slightly different compositions of materials have been used in the working fluid to meet the requirements of each method, which may lead to some discrepancies in the properties of the working fluid.

For this research, silicone model was connected into a circulation system, which had corresponding working fluid running in the system under a boundary condition collected from the patient data. 3D cine PC MR imaging and PIV experiment were performed respectively. A straight tube with 1-meter-length has been added to the inlet of the silicone phantom, in order to provide enough distance for the flow to be fully developed before entering the aneurysm.

In CFD simulation, with the reconstructed STL file, tetrahedral mesh has been generated with 3 boundary layers in a commercial meshing software (ANSYS ICEM CFD, ANSYS Inc.), and the mesh volume is 1.9 million. A steady flow condition was applied for the simulation. Reynolds number at inlet was controlled as closed as possible to that of the PIV experiment and the MRI measurement. Traction free pressure outlet and rigid wall have been set as boundary conditions. The flow simulation was performed by using a commercial solver (Ansys Fluent Inc., USA) based on finite volume method.

The results are shown in figure 1, flow patterns on Plane A in different methods have been displayed, the flow rotates in the anti-clockwise direction, generating a vortex in the center of the plane in a similar way. However, it is obvious to find out that flow pattern at the top area of Plane A obtained from MRI is different, in which no separate point can be seen. The average velocity on the target plane in each method has been calculated. While results of flow patterns in different methods tend to be in accordance with each others, the velocity magnitudes apparently show disagreement to some extent, in which the velocity magnitude calculated in CFD is higher than those in PIV and MRI.

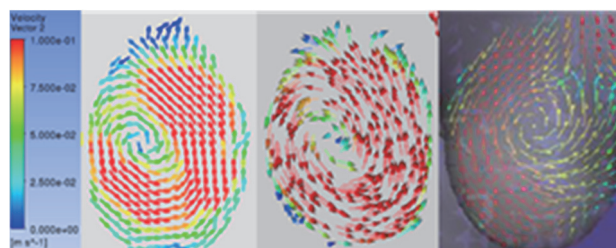


Fig.1 Flow patterns on Plane A : PIV, CFD, MRI (from left to right)

[1] Matthew D. Ford, et al., PIV-measured versus CFD-predicted flow dynamics in anatomically realistic cerebral aneurysm models, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol.130 (2008).

[2] Haruo Isoda, et al., Comparison of hemodynamics of intracranial aneurysm between MR fluid dynamics using 3D cine phase-contrast MRI and MR-based computational fluid dynamics, *Neuroradiology*, Vol.52 (2010).

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. The establishment of circulation system for PIV experiment, as well as the working fluid, which are based on the real condition in clinics.
2. The performance of PIV experiment and the corresponding analysis with the experiment data.
3. The micro-CT scanning of the silicone model and the reconstruction of the geometry using the scanned data.
4. CFD Simulation with the reconstructed model and corresponding post processing.
5. Comparison of the flow pattern and average velocity in the aneurysm model obtained from each method.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Yujie Li, Hitomi Anzai, Toshio Nakayama, Yasumoto Shimizu, Yukihiisa Miura, Aike Qiao and Makoto Ohta, Simulation of hemodynamics in artery with aneurysm and stenosis with different geometric configuration, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.9, No.1, 2014.
2. Yujie Li, Hitomi Anzai, Toshio Nakayama, Makoto Ohta, Discussions of pressure distribution in artery with stenosis and aneurysm, *ELyT Workshop*, Frejus, France, February 2014.
3. Yujie LI, Yuuya YONEYAMA, Haruo ISODA, Takafumi KOSUGI, Takashi KOSUGI, Makoto OHTA, Comparison of flow pattern in cerebral aneurysm among PIV, CFD and MRI, 27th Bioengineering Conference JSME, Niigata, Japan, January 2015.

氏名 三宅 哲



所属 情報科学研究科情報基礎科学専攻・D3

研究課題

タービン多段長翼列を通る非定常湿り蒸気流れの数値的研究

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本研究では、蒸気タービン低压段に対して、凝縮を考慮した非定常三次元解析が可能な計算プログラム「数値タービン」を開発し、これまで三菱重工が開発したタービン試験機を対象に多段翼列において平衡凝縮および非平衡凝縮がどのように生じるのかを解析してきた[1][2]。ところが、蒸気タービンにおける凝縮現象は相似則が成立しないことが示唆されており、翼長の短い低アスペクト比の試験機における流れ場と翼長の長い実機タービンにおいては流れ場が異なる可能性がある。従って、実機タービンの性能向上のために実機の流動解析が求められていた。そこで、三菱重工の開発した実機蒸気タービン低压最終長翼列三段[3]に対して数値タービンを新たに適用し、実機における非定常三次元非平衡凝縮流れを解析した。まず、実機における遷音速動場場について評価した。実機タービン低压段においては翼長の増加に伴い動翼周速が増加し局所的に衝撃波が発生することが知られている。図1はタービン出口側から見た三段目静動翼列における絶対マッハ数分布の瞬間値である。静翼ハブ側において超音速域が形成されており、翼後縁から斜め衝撃波が発生している。また、この斜め衝撃波が翼後縁から延びる後流と干渉している様子が確認できた。さらに、チップ側においても衝撃波の発生が示唆されている。しかし、回転速度成分が付加された絶対系では動翼の評価が難しいため、図2に三段目動翼チップ側における相対マッハ数分布の瞬間値を示す。動翼流路において流れ場が加速されており、翼背面から垂直衝撃波、また翼後縁から斜め衝撃波が生じていることがわかる。翼後縁から生じた斜め衝撃波は隣の翼面に衝突し反射衝撃波として垂直衝撃波と合流する形となっている。衝撃波前後において流速の低下が確認でき、また衝撃波通過後に後流が散逸している様子も確認できた。図3は三段目静動翼チップ側における湿り度分布の瞬間値である。静翼から動翼へ周期的にかつ連続的に後流が流入していることが確認でき、移動境界条件が適切であることがわかる。また湿り度は動翼流路において急激に増加していることがわかる。これはチップ側における流速の増加に起因している。動翼流路においては、主流と後流が交互に流入する非定常流動場であるため、この既に液滴の存在する主流に相当領域で凝縮が進んだ。さらに、衝撃波前後において湿り度が減少しており、衝撃波と凝縮の関係について示すことができた。

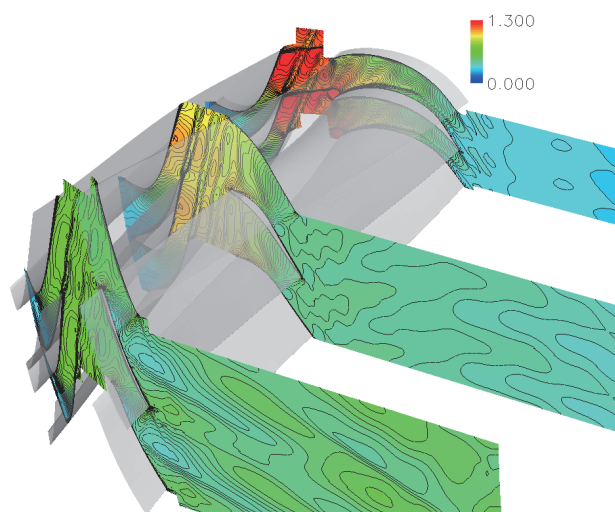


図1 三段目静動翼列における絶対マッハ数分布の瞬間値.

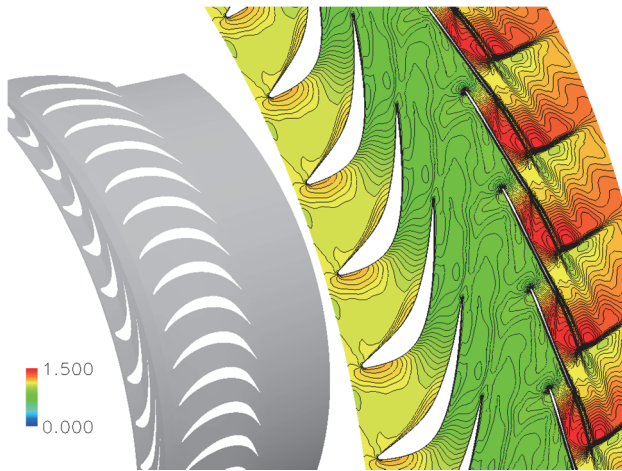


図2 三段目静動翼翼端における相対マッハ数分布の瞬間値.

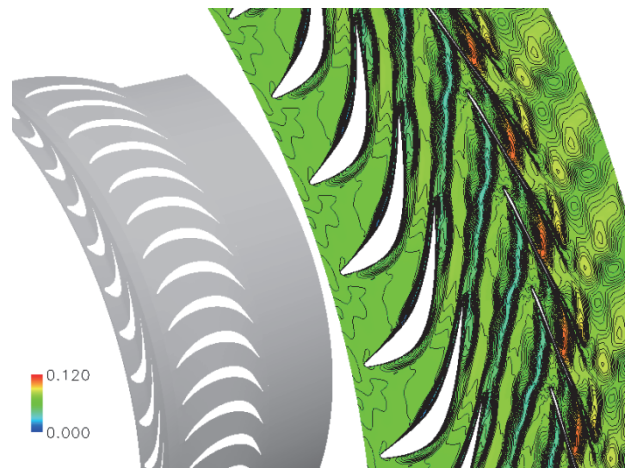


図3 三段目静動翼翼端における湿り度分布の瞬間値.

[1]Miyake, S., Sasao, Y., Yamamoto, S., Tabata, S., Miyawaki, T. and Ooyama, H., Proc. ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68828, (2012), CD-ROM.

[2]Miyake, S., Yamamoto, S., Sasao, Y., Monma, K., Miyawaki, T. and Ooyama, H., Proc. ASME Turbo Expo 2013, GT2013-94832, (2013), CD-ROM

[3]三菱重工技報 Vol. 40, No. 4, (2003).

平成26年度の研究業績

【研究内容】

タービン多段長翼列を通る非定常湿り蒸気流れの数値的研究

実機蒸気タービン定圧段における非定常三次元凝縮流動を解析した。実機における遷音速流れにおける凝縮について解明した。特に、非平衡凝縮と後流や二次流れ渦、衝撃波との干渉について着目した。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Miyake, S., Koda, I., Yamamoto, S., Sasao, Y., Momma, K., Miyawaki, T. and Ooyama, H, “Unsteady Wake and Vortex Interactions in 3-D Steam Turbine Low Pressure Final Three Stages,” Proc. ASME Turbo Expo 2014, GT2014-25491, (2014), CD-ROM.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 三宅哲，笹尾泰洋，山本悟，
非平衡凝縮を伴う蒸気タービン多段長翼列の三次元非定常流動解析，
日本機械学会 2014年度年次大会，（2014）．
2. 岩崎俊樹，三宅哲，山本悟，
蒸気タービン低圧最終段を通る三次元非定常流動シミュレーション，
第28回数値流体力学シンポジウム，（2014）．



氏名 中野 裕士

所属 工学研究科バイオロボティクス専攻・D3

研究課題

大きな横滑り角における車両の運動制御

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、大きな横滑りにおける車両運動制御のための、統合型制御器設計を提案した。本設計手法は、車両における4輪の駆動力と操舵角という2種類の形式の異なる制御入力を統合し、車両の前後方向並進運動、左右方向並進運動、ヨー回転運動という平面3自由度の車両運動を制御するための入力として用いる手法である。

入力の実現方法は次のようになっている。4輪の駆動力は車輪の駆動トルクにより発生させる。これは、電気モーターを用いることにより容易に実現することが出来る。次に、前輪の操舵角によって、前輪の横力を発生させる。そのために、前輪の操舵角を操作することにより、前輪の前後方向と進行方向とのなす角である横滑り角をタイヤ摩擦の線形領域に保つ。これにより、操舵角によって線形に前輪の横力を操作することが可能となる。

提案した統合型制御器設計に基づく車両運動制御システムの有効性を評価するため、シミュレーション及び実験を行った。図1および図2に示す実験結果より、本制御器設計の有効性を示した。

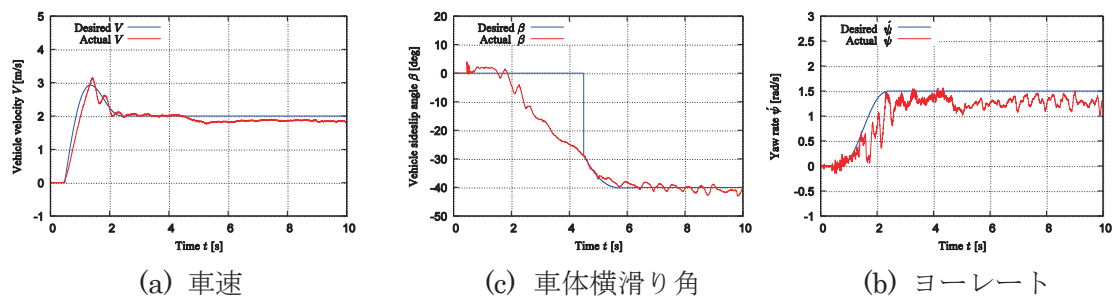


図1 実験結果（平面3自由度の車両の状態）

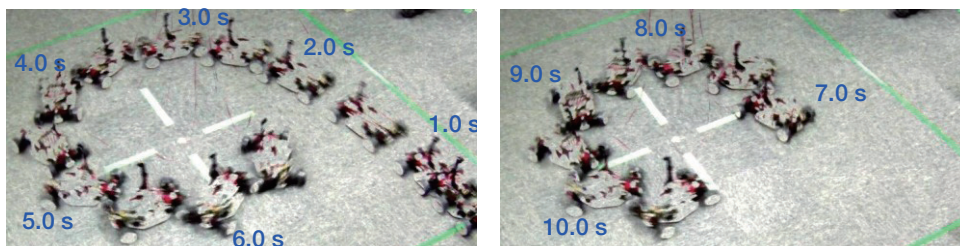


図2 実験における車両の運動の様子

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 統合型制御器設計に基づく4輪独立駆動電気自動車の運動制御
統合型制御器設計に基づいた4輪独立駆動電気自動車の大きな横滑りにおける車両運動制御システムの有効性を、シミュレーション及び実験を通して評価し、その有効性を示した。
2. 統合型制御器設計に基づく後輪2輪独立駆動電気自動車の運動制御
統合型制御器設計に基づいた後輪2輪独立駆動電気自動車の大きな横滑りにおける車両運動制御システムの有効性を、シミュレーションを通して評価し、その有効性を示した。

3. 大きな横滑り角における車両の軌道追従制御
統合型制御器設計に基づく4輪独立駆動電気自動車の運動制御システムと、移動ロボットで用いられる軌道追従制御法を応用し、大きな横滑りにおける車両の軌道追従制御法を提案した。提案手法の有効性を、実験を通して示した。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. H. Nakano, J. Kinugawa, and K. Kosuge, "Control of a Four-Wheel Independently Driven Electric Vehicle with a Large Sideslip Angle", Proceedings of The 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 265-270, 2014.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. H. Nakano, J. Kinugawa, and K. Kosuge, "A Motion Control Algorithm of a Vehicle with a Large Sideslip Angle," Proceedings of 2014 JSAE Annual Congress (Autumn), vol. 103-14, pp. 1-4, 2014 (in Japanese)



氏名 NGUYEN HOANG HUNG

所属 Department of Nanomechanics • D1

研究課題

Growing AlN thin film by using electron cyclotron resonance (ECR) reactive sputtering

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

AlN was emerging as one of the most popular and effective materials in the world of piezoelectricity. In recently, much attention has been paid on fabricating AlN thin films for applications in a micro-electronics field, especially as an important component of energy harvesters [1] and surface acoustic wave (SAW) [2] or bulk acoustic wave (BAW) [3] devices. It has been the most standard lead-free piezoelectric material for such application because of the high piezoelectric properties.

In this year (2014/04 to 2014/12), I investigated ECR sputtering conditions to deposit stoichiometric AlN thin film on Si (100) substrates. By changing condition and using N₂ plasma, I have optimized the deposition process to get thin film of AlN. Obtained thin film showed high density and smoothness. The thin film consisted of [110]- and [100]-oriented domains. I have also clarified the advantages of film deposited by ECR sputtering in comparison to normal (RF, DC) sputtering for Energy harvester applications.

For more details, to optimize the growth condition of Al nitridation, I investigated composition of the thin films deposited at room temperature by changing N₂/Ar gas flow rate (Figure 1). Composition of the films increases almost linearly with N₂/Ar flow rate, and reaches to almost stoichiometric value (N : Al ~ 1 : 1) when the ratio of the N₂/Ar = 2. The optimal conditions to grow AlN thin film was shown in table 1.

Thin films crystallinity were decided by conducting X-ray diffraction. Figure 2 shows XRD 2θ patterns of the stoichiometric films deposited at different temperatures. Since thin films did not show any peak of AlN for growth temperature of up to 350°C, regardless of normal nitrogen, I have employed plasma N₂ generated by an assistant ion gun. At 350°C, a peak of AlN (110) and (100) diffraction planes appeared, indicating that crystallinity of the film was improved by using plasma nitrogen.

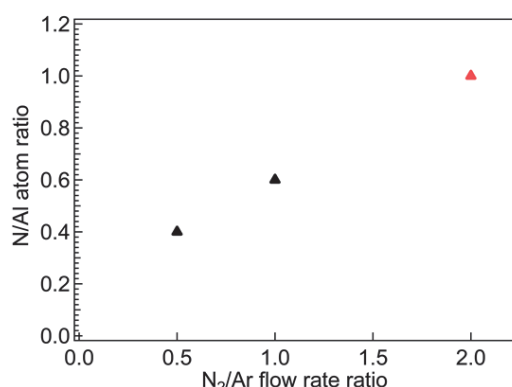


Figure 1. Dependence of Al and N ratio in the thin film deposited at room temperature as a function of Ar and N₂ flow rate.

Table 1. Depositing conditions

Substrate temperature	RT – 350°C
Ar gas flow rate	0.6 sccm
N ₂ gas flow rate	1.2 sccm
Ar ion beam current	12 mA/cm ²
N ₂ ion beam current	4 mA/cm ²
ECR microwave power	100 W (both guns)
Ar accelerating voltage	2000 V
N ₂ accelerating voltage	20 V
Back pressure	5x10 ⁻³ Pascal
Depositing pressure	0.33 Pascal

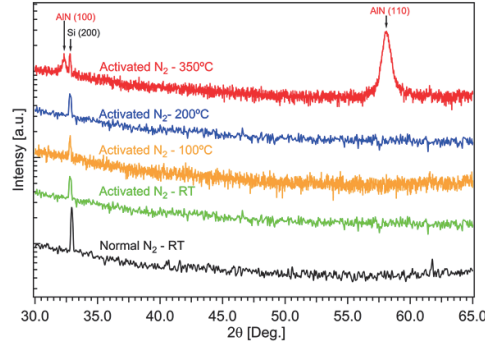


Figure 2. X-ray 2θ-θ scan of AlN deposited on Si at various substrate temperatures.

For energy harvester application using AlN thin film, one of the highest obstacles for developers is the leakage current between top and bottom electrodes through the thin film caused by many micro cracks appear on surface of the film especially when thin films thickness increase. By using ECR sputtering, the kind of cracks was prevented. To make it clearer, a typical cross-sectional and plane view FE-SEM images of the thin film deposited by ECR and RF sputter were shown in Figure 3. As shown in the figure, the film deposited by RF sputtering has nonuniform morphology and a lot of cracks could be found on the surface while the film made by ECR sputtering is uniform densely packed, high homogeneity without any hole through the film.

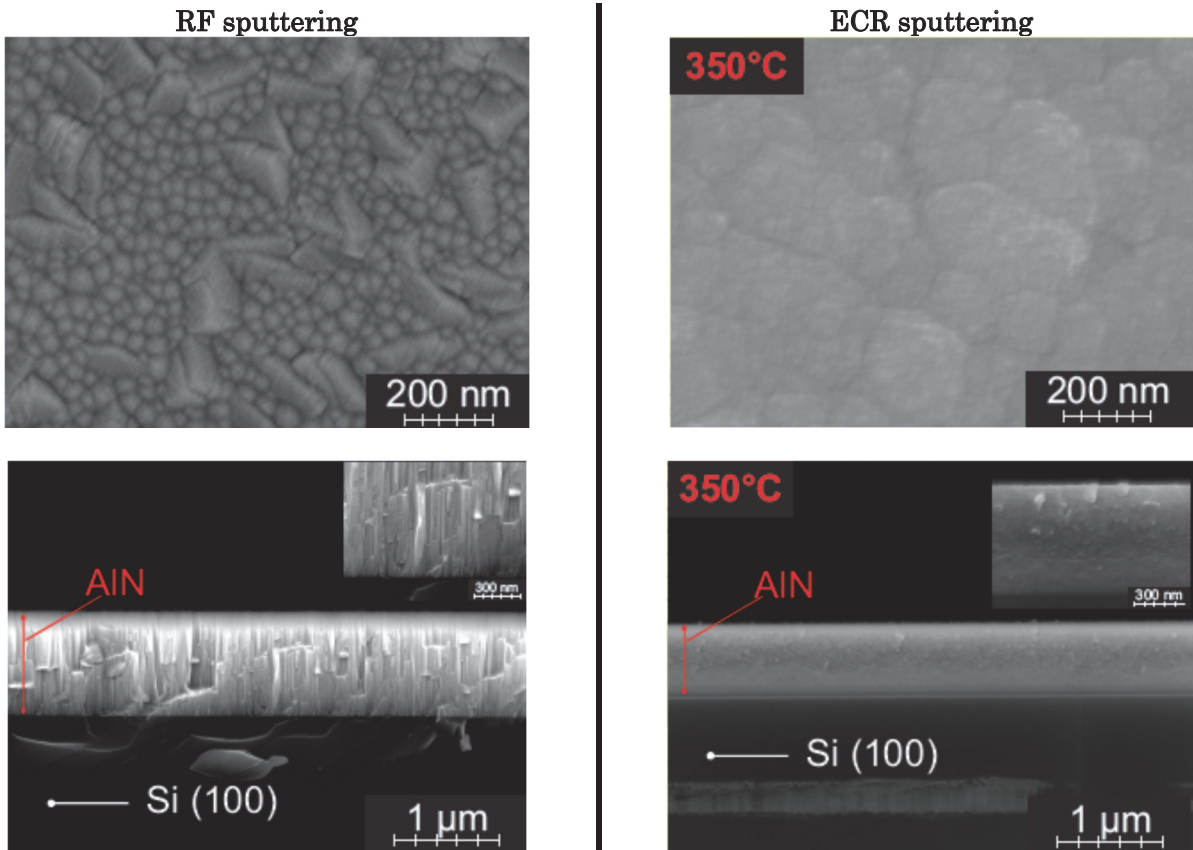


Figure 4. Cross-sectional FE-SEM and plane view images of AlN thin film deposited by RF and ECR sputtering.

- [1] Zhang J, Cao Z, and Kuwano H 2011 Jpn. J. Appl. Phys. **50** 09ND18.
- [2] Chen S W, Lin H F, Sung T T, Wu J D, Kao H L and Chen J S 2003 Elec. Lett. **39** 1691.
- [3] Hara M. and Kuwano H. 2012 Jpn. J. Appl. Phys. **51** 07GC11

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. ECR investigation and maintenance

First, the ECR chamber was investigated the compatibility to deposit AlN from Al target and N₂ reactive gas. In order to prevent bad effects of leaked oxygen through the original Teflon gases tube into the chamber on thin film properties, the Teflon tubes were totally replaced by metal-made Swagelok tubes.

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 ECR chamber. These processes were optimized through many times of deposition by changing the condition as: Back pressure, deposition pressure, gases flowrate ratio, deposition temperature, N₂ with and without ion

3. Characterization of thin films properties

The deposited films were evaluated to decide the best deposition conditions. The typical process was shown previously. I can access and use the machine to characterize properties of thin film smoothly, including of scanning electron microscopy, EDX spectroscopy (FE-SEM, Hitachi SU-70), X-ray diffraction (XRD, Bruker D8) and atomic force microscopy (AFM, Nikon TE2000-U).

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Nguyen Hoang Hung, Hiroyuki Oguchi, Hiroki Kuwano

AlN thin film growth using electron cyclotron resonance reactive sputtering

Journal of Physics: Conference Series 557 (2014) 012047

doi:10.1088/1742-6596/557/1/012047

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Conference: The 14th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (POWERMEMS2014)

Sponsor: University of Hyogo

Country: Japan

Date: 2014.11.18 ~ 2014.11.21

Role: Author

Title of contribution: AlN thin film growth using electron cyclotron resonance reactive sputtering

氏名 野村 勇樹



所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D3

研究課題

サービスロボットの汎用制御モジュールの設計と評価

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、開発した汎用制御モジュールの有用性を示すために、RT(RobotTechnology)コンポーネントを利用したサービスロボットの制御システムを構築し、シミュレーションおよび実機による作業を行わせた。

まず、非恒常な人間の生活空間でも、環境や作業。使用ロボットの変化に対応できるように、ロボット制御システムのいくつかの要素機能をモジュール化し、それらを組み合わせるという手法をとる(図1)。このシステムは、一部の要素機能を交換することにより変化する環境に対応できるという利点がある。モジュールは既存のソフトウェアプラットフォームであるRTミドルウェアを利用することで開発効率・再利用性を向上させる。

次に、ロボット使用者やシステム構築者に対するユーザビリティを高めるためにロボットの構造を吸収し、指令入力を統一できる汎用制御コンポーネントを開発する。汎用制御コンポーネントでは一般的なサービスロボットのリンク構造を網羅する概念モデルを用意し、そこにロボットのモデル構造をマッピングしていく(図2)。それによってロボットごとのリンク構造の違いを吸収し、入出力データの統一化を図る。また、サービスロボットに必要とされる動作をいくつかに分類することによって使用者からの指令を統一化する。

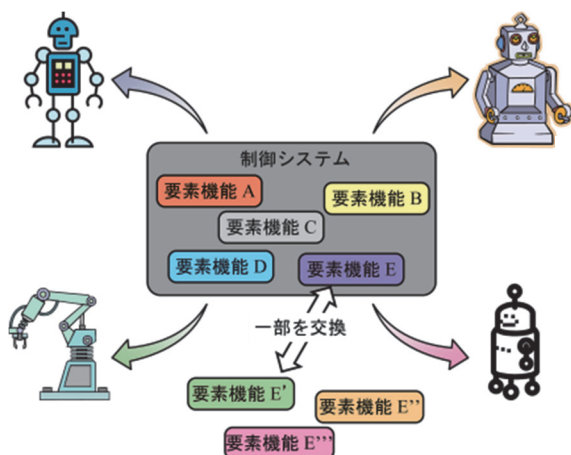


図1. 構築するシステムの概念図

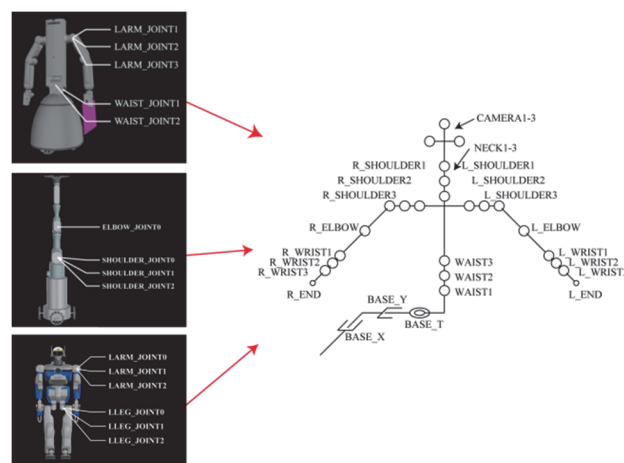


図2. 仮想モデルへのマッピング

開発したモジュールを中心に構築したシステムを検証するために、特定の環境下で作業を達成できる枠組みを構築した。視覚モジュールや手先軌道補間モジュール・作業計画モジュール等を開発し、それらを組み合わせて数種類のロボットに食器片付け作業のシミュレーションを行わせた(図3)。こうして構築したシステムを実際のロボットにも適用する(図4)。異なる種類のロボットを使用した場合にも一部のモジュールを交換するだけで同様の指令で同様の作業を遂行できるようになったことがわかる。

本研究によってサービスロボットの使用者・開発者にとって扱いやすく実用的なロボット制御システムを構築することができた。

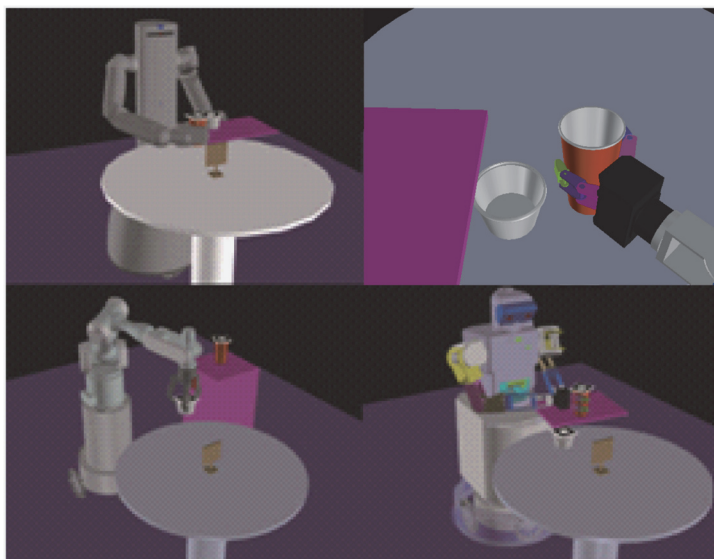


図3. 食器片付けシミュレーション



図4. 構築したシステムを利用した実機動作

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 汎用制御モジュールの開発
提案した設計要求を満たすモジュールをRTミドルウェアを利用して実現する。ロボット構造の差異を吸収し、指令入力を統一することでシステムユーザビリティを向上させることができる。
2. ロボット制御システムの開発
具体的な作業を実現するため、作業計画モジュール・環境認識モジュール・マニピュレーションモジュールなどの複数のモジュールをRTミドルウェアを利用して実現する。そしてそれらを組み合わせてロボットの制御システムを実現する。安全かつ確実に作業を達成することのできるロボットシステムの枠組みを構築することができる。
3. シミュレーションおよび実機での検証
開発したロボット制御システムを利用してシミュレーションおよび実機での実験を行う。開発したロボット制御システムの有用性を検証する。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. ○T. Tsujita, A. Konno, S. Komizunai, **Y. Nomura**, T. Owa, T. Myojin, Y. Ayaz and M. Uchiyama, “Humanoid Robot Motion Generation for Nailing Task,” IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1024-1029, July, 2008.
2. ○S. Komizunai, T. Tsujita, F. Nishii, **Y. Nomura**, T. Owa, A. Konno, and M. Uchiyama, “Experiments on Hammering a Nail by a Humanoid Robot HRP-2,” 17th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control, July, 2008.
3. ○T. Tsujita, A. Konno, S. Komizunai, **Y. Nomura**, T. Owa, T. Myojin, Y. Ayaz and M. Uchiyama, “Analysis of Nailing Task Motion for a Humanoid Robot,” Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, July, 2008.
4. ○**Y. Nomura**, T. Kikuchi, A. Konno, and M. Uchiyama, “Application of the Robot Service by using RT Components”, International Conference on Advanced Mechatronics 2010, October, 2010.
5. ○**Y. Nomura**, S. Ogawa, T. Kikuchi, A. Konno, and M. Uchiyama, “Verification of the Versatility of the RT Modules by the Multiple Robots Platform”, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, December, 2010.

【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. T. Tsujita, A. Konno, **Y. Nomura**, S. Komizunai, Y. Ayaz and M. Uchiyama, “An Impact Motion Generation Support Software”, Cutting Edge Robotics 2009, IN-TECH, Austria, ISBN 978-3-902613-46-2, 2009.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. ○**野村勇樹**, 横堀壽光, 杉浦隆次: “ノイズ科学による血管壁動態挙動解析と非侵襲血管疾患診断法”, 企業と学術研究機関との出会いーMEET2006秋ー, 2006年11月. (ポスター発表)
2. ○辻田哲平, 小水内俊介, **野村勇樹**, 大輪拓矢, 西井文哉, 明神智也, 近野敦, 内山勝, “ヒューマノイドロボットによる釘打ち動作の解析”, 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 資料番号2H17, 2007年9月. (口頭発表)
3. ○小水内俊介, 辻田哲平, 西井文哉, **野村勇樹**, 大輪拓矢, 近野敦, 内山勝, “ヒューマノイドロボットによる釘打ち作業”, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 予稿集, pp. 531-532, 講演番号 2B2-5, 2007年12月. (口頭発表)
4. ○辻田哲平, 小水内俊介, **野村勇樹**, 大輪拓矢, 近野敦, 内山勝, “ヒューマノイドロボットの釘打ち動作の評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 講演番号2P1-F11, 2008年6月.
5. ○**野村勇樹**, 大輪拓矢, 近野敦, 内山勝, “ヒューマノイドロボットによる掘削作業”, 第51回自動制御連合講演会, 講演番号317, 2008年11月. (口頭発表)
6. ○**野村勇樹**, 小水内俊介, 近野敦, 内山勝, “冗長マニピュレータ搭載型全方向移動ロボットのための制御システムの構築”, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 資料番号3D1-6, 2009年12月. (口頭発表)
7. ○小水内俊介, **野村勇樹**, 菊地隆浩, 近野敦, 内山勝, “食器片付けのための作業計画コンポーネントの開発”, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 資料番号3D1-4, 2009年12月. (口頭発表)
8. ○**野村勇樹**, 小水内俊介, 菊地隆浩, 近野敦, 内山勝, “RT コンポーネントを活用したロボットサービスの実現例”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010年6月. (ポスター発表)
9. ○**野村勇樹**, 小川修平, 菊地隆浩, 近野敦, 内山勝, “複数ロボットプラットフォームによる RT モジュールの汎用性検証”, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 2010年9月. (口頭発表).

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・D2

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26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℃の乾燥ガス(大気組成)環境中と水蒸気環境中で繰返し負荷き裂進展試験を実施し、疲労き裂型損傷に対する環境の影響を調査した。

本実験において測定された、乾燥ガス環境中および水蒸気環境中の1サイクル当たりのき裂進展速度をTable 1に示す。また、き裂進展速度を繰返し負荷周波数に対して整理したものをFig.1に示す。両環境とも周波数が低い0.01 Hzの条件において、き裂進展速度が速くなる傾向がある。本実験は、応力拡大係数および応力比が一定の条件下で実施されている。そのため、環境効果のない疲労き裂進展であれば、1サイクル当たりのき裂進展速度は負荷周波数には依存せず一定の値を示す。したがって今回観察された差は環境効果によるものと考えられる。繰返し負荷周波数が低い条件下において、1サイクル当たりにき裂先端が環境と作用する時間が増加することで、より速いき裂進展速度が観察されたと考えられる。また、き裂進展速度の周波数依存の程度は、乾燥ガスおよび水蒸気環境の違いによって異なることが判明した。

より詳細な環境の影響を調査するため、試験後のき裂内面ならびに先端部に形成された酸化物に対して、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope ; SEM)ならびにエネルギー分散型X線分光装置(Energy Dispersive X-ray Spectrometer ; EDS)を用い微視組織観察を実施した。Fig.2に両環境中試験後の観察結果を、負荷条件毎のき裂長さも併せて示す。水蒸気環境中において、両条件下ともに、通常の直線的な疲労き裂とは異なり、き裂は屈曲する傾向を示した。またどちらの条件下においても、き裂面において粗大化された酸化物が確認され、特に周波数の低い条件側ではより粗大な酸化物の形成が顕著であった。この酸化物はき裂面の片側のみに存在する傾向がある。乾燥ガス環境中の周波数の小さい条件下においては、き裂は図中の上下に分岐しており、上部き裂においては、水蒸気環境中と同様のき裂形状、酸化物形状が確認された。下部き裂においてはき裂先端にて、酸化物が合金側に侵入して行く様に形成している。周波数の大きい条件においては、き裂は直線的であり、粗大化された酸化物も存在しない。

Fig.2を拡大した、乾燥ガス環境中における周波数の低い条件下での下部き裂の拡大図および同位置でのEDS分析結果である元素マッピング像をFig.3に示す。合金内部において試験中に熱時効により析出されたM₆C炭化物を通過するように酸化が合金側に進行していることが確認された。

これらの結果より、1サイクル当たりに、より長期間き裂先端が環境にさらされることでき裂面に粗大な酸化物が形成され、この酸化物が疲労き裂をより加速させる可能性が考えられる。また、水蒸気環境中では一般的に乾燥ガス環境中より酸化速度は速い傾向を示すため、周波数の大きい条件下において、水蒸気環境は乾燥ガス環境より大きい環境効果を示し、き裂が加速しているものと考えられる。今後はこの粗大化された酸化物の形成要因およびそれがき裂進展を加速させるメカニズムを詳細に検討するべきである。

Table 1 Obtained crack growth rates

Environment	Frequency [Hz]	da/dN [m/cycle]	da/dt [m/sec]
Steam	0.01	6.2×10^{-9}	6.2×10^{-11}
	0.02	1.3×10^{-9}	2.5×10^{-11}
Air	0.01	7.6×10^{-9}	7.6×10^{-11}
	0.02	1.5×10^{-10}	3.0×10^{-12}

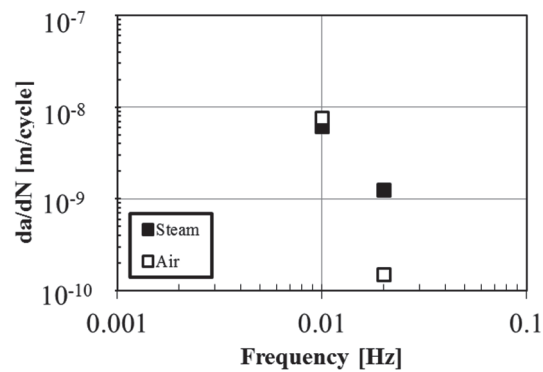


Fig.1 Dependence of crack growth rates on frequency of applied loading

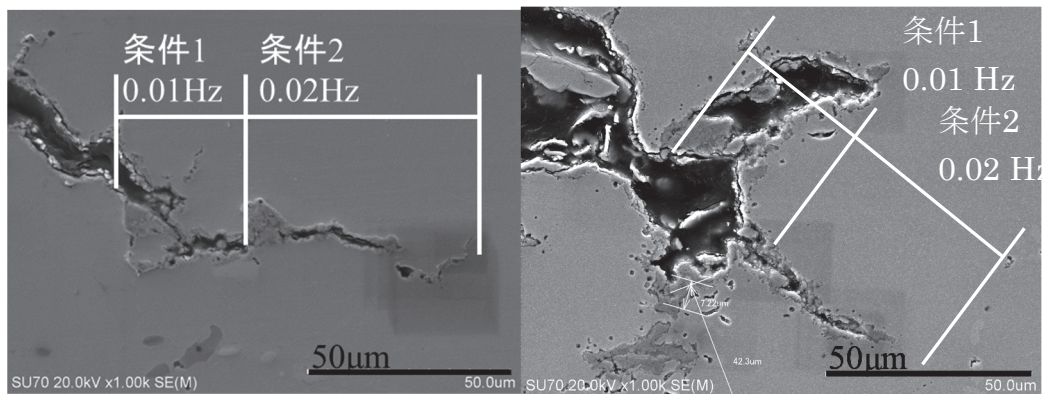


Fig.2 Cross-sectional SEM images of the crack after the test,
(a) in steam environment (b) in dry air environment

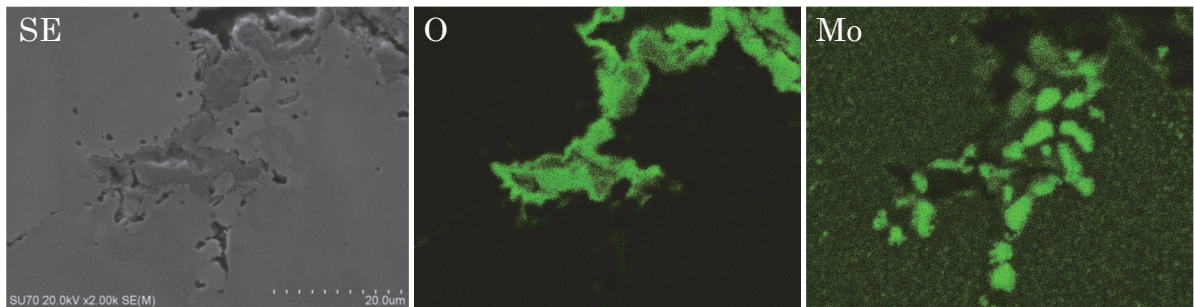


Fig.3 SEM and EDS images of crack after the test in dry air environment

平成26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。

氏名 尾関 郷



所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D3

研究課題

クリープ・疲労条件下における一方向凝固Ni基超合金の
非平衡科学に基づく破壊寿命則の導出と微視損傷挙動解析

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本研究では、ジェットエンジンや火力発電用ガスタービンの動翼材として使用される一方向凝固Ni基超合金の破壊挙動の解明や寿命則の構築を目標としている。ガスタービン動翼の構造設計において、流体工学はもちろんのこと構造力学や材料強度の観点からの評価も重要なものである。本研究では材料強度の観点からガスタービン動翼材の強度信頼性について研究を行っている。

本年度は、一方向凝固Ni基超合金について弾塑性クリープ有限要素法解析を用いたき裂成長シミュレーションを行ってきた。本解析では、弾性域ではフックの法則に従い、塑性およびクリープ変形則は下記に示す構成則を用いた。塑性変形における加工硬化係数 H^p は式(1)を用いた。また、クリープ領域の変形抵抗係数 H^c は、Norton則を用いて得られる式(2)を用いた。

$$H^p = n_1 c \left(\alpha + \bar{\varepsilon}_p^{n_1-1} \right) \quad (1)$$

$$H^c = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}_p} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{A(t + C_1)} \right)^{\frac{1}{n}} \bar{\varepsilon}_p^{\left(\frac{1}{n}-1 \right)} \quad (2)$$

ここで、 n_1 , C_1 , α は定数、 c は加工硬化係数、 $\bar{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみ、 $A(\text{MPa} \cdot \text{h}^{-1})$ と n はNorton則の定数、 t は時間である。解析モデルをFig. 1に示す。解析領域はFig. 1に示すDEN試験片の両側切欠き部を含む矩形で囲まれた4.0mm四方の領域である。解析モデルは力学的対称性を考慮して、矩形領域の4分の1の斜線部とした。また、解析モデルは長さ0.25mmの初期き裂を有するモデルと切欠きを持つモデルの2種類を用い、それぞれのモデルについて物性値に変化を与えて解析を行った。

本解析ではき裂成長を模擬する手法として節点解放手法を用い¹⁾、き裂はx軸上を成長する直線き裂モデルとした。また、実際のクリープ試験においては、き裂発生する前に切欠き周りにクリープ損傷領域が確認される。そこで、本研究においてはき裂成長解析を、十分にクリープ領域を拡大させた後に節点解放を行うように改良した。

本解析により得られた初期き裂をもつモデル (Model 1) におけるき裂成長曲線をFig. 2に示す。Fig. 2より、予損傷を模擬した場合ではき裂成長曲線に定常域はあられず、き裂の発生と同時に急激に成長する結果となった。過去の研究において、き裂発生前に損傷領域が広がっていると、き裂は急激に成長するという報告があることから²⁾、本解析で得られたき裂成長挙動は妥当であると考えられる。すなわち、クリープのき裂成長挙動と寿命には、予損傷の効果が大きく影響を与えることを解析的アプローチから明らかとなった。

また、本解析において物性値の分布を与えた場合のき裂成長特性をFig. 3に示す。Fig. 3より、寿命時間に変化はみられたが、き裂成長挙動においては変化があらわれなかった。これは変位曲線や切欠きモデルについても同様の結果であった。

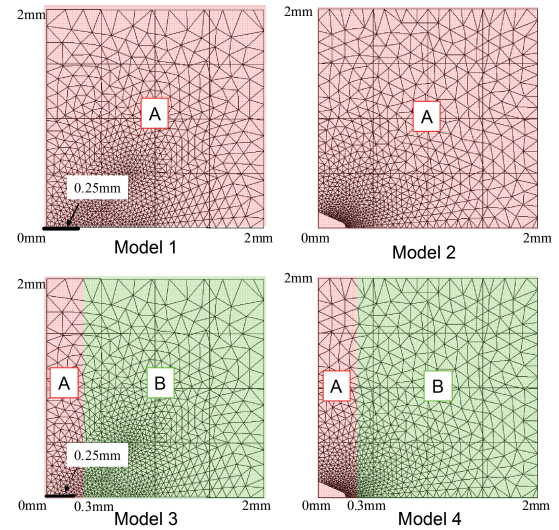
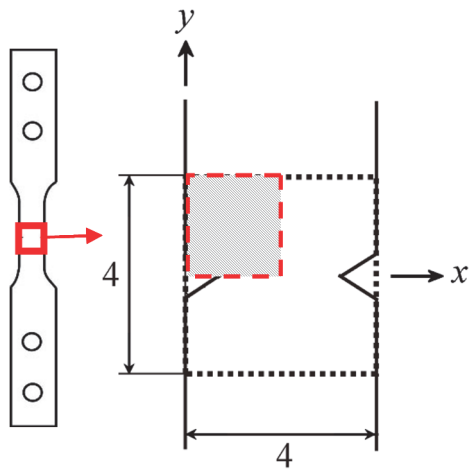
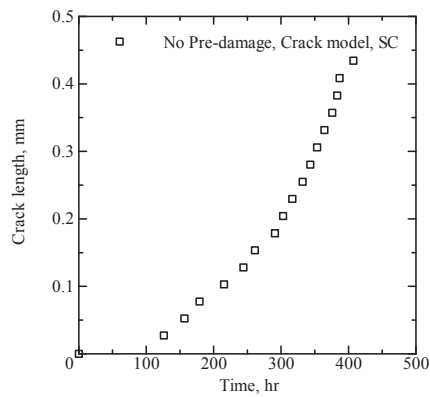
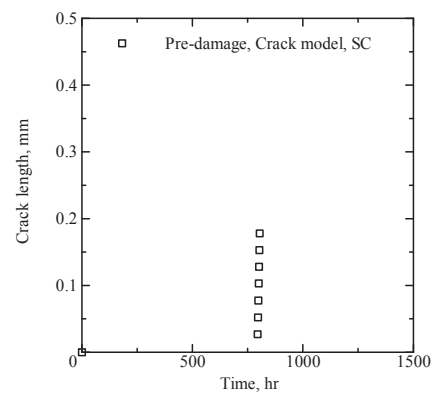


Fig. 1 Analytical model with grain distribution

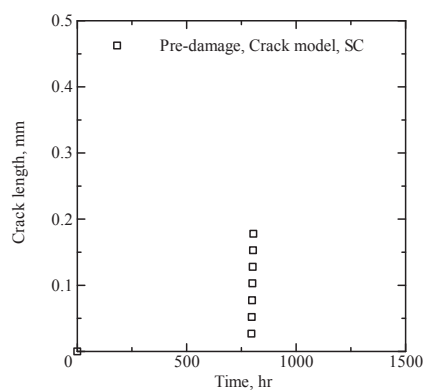


(a) Crack growth characteristics without pre-damage

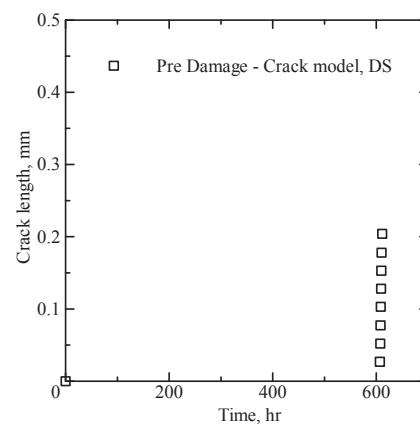


(b) Crack growth characteristics with pre-damage

Fig. 2 Crack growth characteristics.



(a) Model 1



(b) Model 3

Fig. 3 Crack growth characteristics .

- 1) H. Takeuchi, A. T. Yokobori, Jr., S. Hosono, D. Kobayashi and K. Sato: J. Japan Inst. Metals, **71**, 452-457(2007).
- 2) 横堀壽光, 栗山卓, 横堀武夫, 加古卓三, 日本機学会論文集(A), **52**-477, pp.1221-1227 (1986).

平成26年度の活動（シンポジウム・国際会議のオーガナイザーを含む）

＜国際会議＞

名 称：The 11th International Conference on Flow Dynamics

主催団体：東北大学流体科学研究所

開 催 国：日 本

開催期間：2014.10.8 ～ 2014.10.10

役 割：Floor Leader

平成26年度の研究業績

【研究内容】

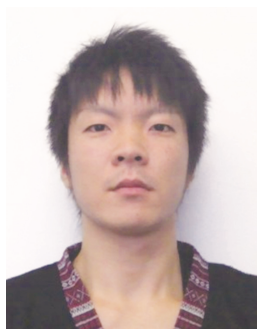
1. クリープ疲労条件における一方向凝固Ni基超合金のき裂成長挙動のまとめ
2. 弾塑性有限要素法解析によるクリープき裂成長挙動解析

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Go Ozeki, Ryuji Sugiura, A. Toshimitsu Yokobori, Jr., Takashi Matsuzaki
In-situ Observation of Crack Growth Behavior Related to Deformation and Fracture Life for Directionally Solidified Ni-base Superalloy CM247LC under Creep-Fatigue Condition
Proceedings of ECCC Creep & Fracture 2014 3rd International ECCC Conference May 5-7, 2014, Rome, Italy

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 尾関 郷、横堀壽光、杉浦隆次、南雲佳子
数値解析による一方向凝固Ni基超合金のき裂成長挙動におよぼす結晶方位の効果
日本機械学会東北支部 第50期総会・講演会、仙台市、(2015.3.13)



氏名 齋藤 明

所属 工学研究科バイオリボティクス専攻・D2

研究課題

細胞-GUV電気融合による巨大人工物の導入

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

我々は機能を持った分子ロボットを構築し、生細胞内で活躍させることを目標としている。生細胞への導入に関して、リポフェクションやウィルスベクター等の従来の方法は、導入できる物質の種類と大きさに制約がある。そこで今年度は、生細胞に巨大人工物を導入するための新規な手法を開発し、それによって導入可能な物質を検討した。まず人工物を内包させた巨大リポソーム(GUV)を界面通過法によって作成し、生細胞と混合した後、交流と直流電場を組み合わせた電氣的刺激によって細胞-GUV間の膜融合を引き起こさせ、細胞内空間に人工物を導入した。具体的には、分散したHeLa細胞と人工物入りGUVを電気融合チャンバーに投入し、交流電圧をかけることで電場の方向に沿ってGUVと細胞が配列させた。直後に高圧の直流電圧を瞬間的に印加することによってGUVと細胞の接触した膜部分を破断させた(図1)。共焦点顕微鏡、フローサイトメータを用いて、この実験手法によってGUVから細胞へ物質が導入されることが確認された。さらに、複数の人工物(1 μ mのポリスチレン蛍光ビーズ、蛍光タンパク質プラスミド(mCherry)、磁気ビーズ等)を同時に導入することにも成功した(図2)。これら細胞は致命的なダメージを負わず、コンフルエントにまで増殖することが確認された。また、磁気ビーズを導入させたHeLa細胞に、外側から磁場を与えることによって細胞自体を回転させることにも成功した(図3)。本法は、生細胞に対して複数の遺伝子と人工物を同時に導入できる新しい方法であるため、今後は細胞内のメカニズム解析や人工細胞モデルの構築などに役立つと考えられる。

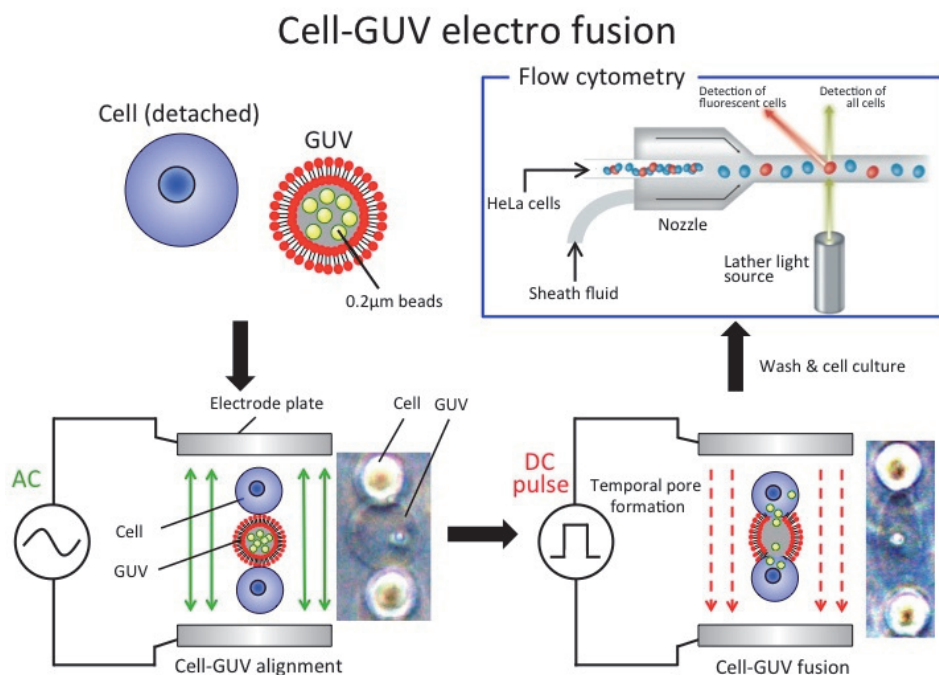


図1 Cell-GUV電気融合法の手順

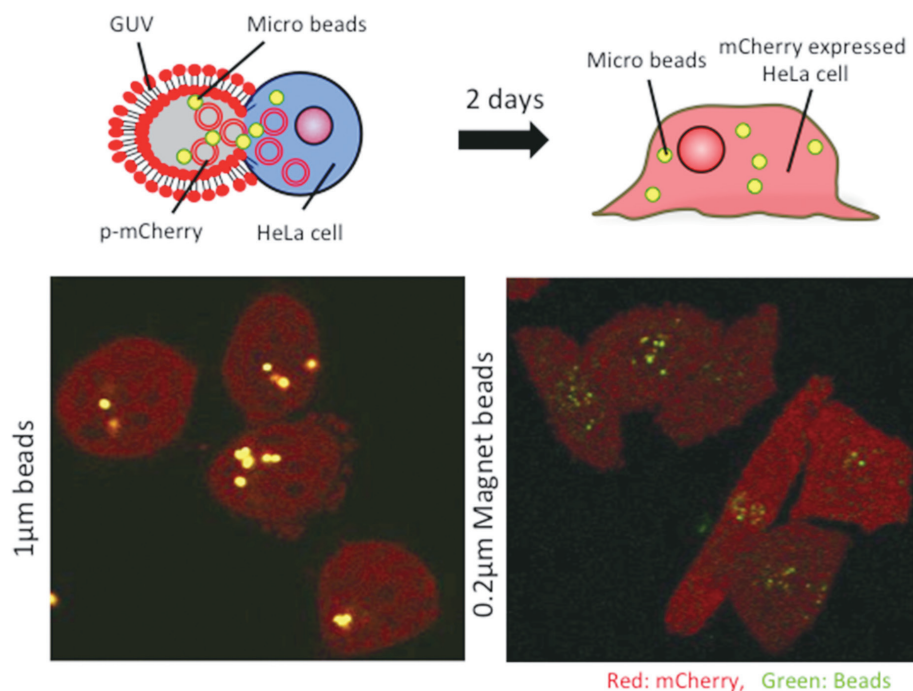


図2 電気融合法によりビーズを導入された細胞

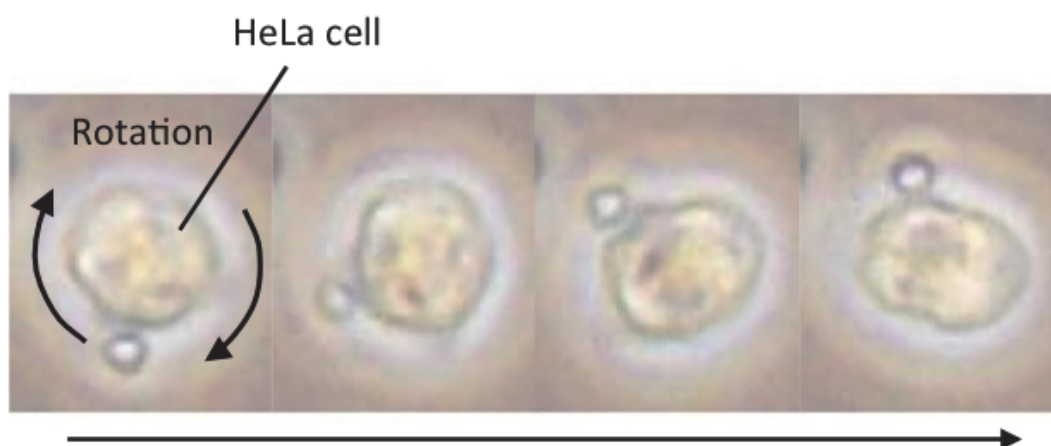


図3 外部磁場によって回転する磁気ビーズ内包細胞

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 各条件における細胞・GUV電気融合の導入率の計測
フローサイトメータを使用し、電気融合によって導入した人工物の蛍光を検出し、導入効率を計測する。電圧、負荷時間、リボソーム膜の電荷や硬さなどを選定し、最適な融合効率を検証している
2. 複数種巨大人工物の同時導入
本融合法を用いて、プラスミドやマイクロビーズといった巨大人工物を生細胞へ複数種同時に導入できることを共焦点顕微鏡で観察し確認した。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Akira C. Saito, Toshihiko Ogura, Kei Fujiwara, Satoshi Murata, Shin-ichiro M. Nomura, “Introducing micrometer-sized artificial objects into live cells: A method of cell-giant unilamellar vesicle electrofusion”, *PLOS ONE*, 9(9), e106853, 2014. DOI:10.1371/journal.pone.0106853

2. **Akira C. Saito**, Tsubasa S. Matsui, Taiki Ohishi, Masaaki Sato, and Shinji Deguchi, "Contact guidance of smooth muscle cells is associated with tension-mediated adhesion maturation", *Experimental Cell Research.*, 327, 1-11, 2014.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

【国際会議】

1. ○**Akira C. Saito**, Toshihiko Ogura, Kei Fujiwara, Satoshi Murata, and Shin-ichiro M. Nomura, "Simultaneous and efficient introduction of multiple μm -sized objects into live cells by a novel cell-GUV electrofusion technique", IUPAB, #390, Brisbane, Australia, August 3-7, 2014. **(Poster)**
2. ○**Akira C. Saito**, Toshihiko Ogura, Kei Fujiwara, Satoshi Murata, and Shin-ichiro M. Nomura, "Introducing Large DNA Nanostructures Into Living Cells Mediated by Cell-GUV Electrofusion", 11th Annual Conference Foundations of Nanoscience, **P206**, Snowbird Cliff Lodge, Snowbird, Utah, USA, April 14-17, 2014. **(Poster)**
3. Daiki Komatsu, ○**Akira C. Saito**, Kei Fujiwara, Satoshi Murata, and Shin-ichiro M. Nomura, "Cell Crawler: Magnetoliposome Controlled by External Rotating Magnetic Field", 11th Annual Conference Foundations of Nanoscience, **P213**, Snowbird Cliff Lodge, Snowbird, Utah, USA, April 14-17, 2014. **(Poster)**

【国内学会】

1. ○**齋藤 明**, 小椋 利彦, 藤原 慶, 村田 智, 野村 M. 慎一郎, 細胞-GUV電気融合法による巨大人工物導入について, P12, 愛知県名古屋市 西浦温泉 ホテルたつき, 2014年8月8-11日. (ポスター発表)
2. ○**齋藤 明**, 小椋 利彦, 藤原 慶, 村田 智, 野村 M. 慎一郎, "Introducing micro-meter size objects into live cells mediated by cell-GUV electro fusion", 第52回日本生物物理学会年会, 2P179, 札幌コンベンションセンター, 2014年9月25-27日. (ポスター発表)
3. ○**齋藤 明**, 小椋 利彦, 野村 慎一郎, "細胞—GUV電気融合法による複数種 μm サイズ人工物の同時導入", 生命医薬情報学連合大会, #107 E-03, 仙台国際会議場, 2014年10月2-4日. (ポスター発表)
4. ○**Akira C. Saito**, Toshihiko Ogura, Satoshi Murata, and Shin-ichiro M. Nomura, "Introduction of DNA nanostructures and multiple μm -sized objects into live cells by a novel cell-GUV electrofusion method", CBI学会2014年大会, P5-09, タワーホール船堀, 2014年10月28-30日. (ポスター発表)

【学術雑誌】

1. 齋藤 C. 明, 野村 M. 慎一郎, "細胞のメカノトランスダクション研究の新技法提案: リポソームから細胞内への「巨大」人工物導入法", 細胞工学(学研メディカル秀潤社), Vol. 33, No.9, 928-933, 2014.

【受賞・特許等】

受賞日: 2014年8月10日

受賞名: 第54回生物物理若手の会「ポスター賞」

組織名: 生物物理若手の会

特許申請中: 小椋 利彦, 野村 慎一郎, **齋藤 明**. リポソームを用いた細胞内への物質導入方法, 特願2014-59898, 独立行政法人科学技術振興機構

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26年度優秀研究奨励プログラム



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・D1

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26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、タップ工具への切りくずの巻きつき防止メカニズムの解明を試みた。まず、タップ工具への切りくずの巻きつきメカニズムを明らかにするために、タップ加工中の様子を高速ビデオカメラにより詳細な観察を行った。その結果、切りくずの工具への巻きつき発生プロセスは2種類存在することが明らかとなった。

- ・タイプⅠ：1つの溝から排出される切りくずのカール直径がタップのねじれ溝に沿って拡大し、次第に切りくずのピッチがねじれ溝に沿って拡大するようになり、切りくずがタップ工具のねじれ溝に巻きつくことで、切りくずが残留(図1)
- ・タイプⅡ：異なる複数のねじれ溝から排出される切りくず同士が互いに絡み合い、切りくずの排出挙動が妨げられることで、切りくずのカール直径及びピッチ形状が拡大し、タップ工具自身に巻きつくことで、切りくずが残留(図2)

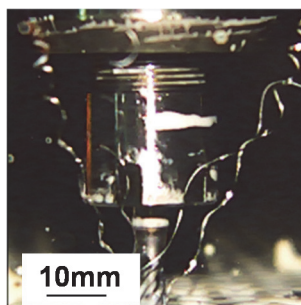
この観察結果から切りくずの巻きつきを防止するためには、発生する切りくずのカール直径を小さくすることが重要であることが明らかとなった。この結果は、昨年度における本研究の結果とも一致している。[1]

また、本研究ではカール直径を小さくする要因の1つとして、工具表面の摩擦特性に着目している。そのため、本年度は加工時の工具表面に発生する摩擦特性を計測する方法を検討した。従来、タップ工具における切削抵抗の算出は、切削トルクとスラスト力の計測にとどまっており[2]、工具刃先での切削抵抗の算出は行われてこなかった。そこで、タップ工具における直交座標系 F_M ・ F_T ・ F_{Z^*} を工具刃先における直交座標系 F_X ・ F_Y ・ F_Z に変換するモデルを考え、切削トルクとスラスト力から刃先で発生する切削抵抗を算出する式を構築した。算出式を以下に示す。

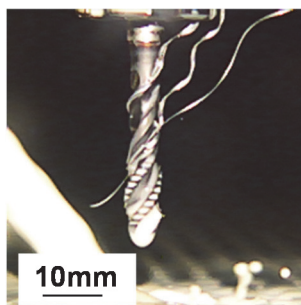
$$\begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\alpha_n \cos\theta & -\sin\alpha_n \sin\theta \cos\beta + \cos\alpha_n \sin\beta & \sin\alpha_n \sin\theta \sin\beta + \cos\alpha_n \cos\beta \\ \sin\theta & \cos\alpha_n \cos\beta & -\cos\theta \sin\beta \\ -\cos\alpha_n \cos\theta & \cos\alpha_n \sin\theta \cos\beta + \sin\alpha_n \sin\beta & -\cos\alpha_n \sin\theta \sin\beta + \sin\alpha_n \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_M \\ F_T \\ F_{Z^*} \end{pmatrix} \quad (1)$$

α_n : rake angle β : chamfer angle θ : flute helix angle

図3に式(1)から得られた切削抵抗と正規化された切りくずのカール直径 D_n の関係を示す。同図に示されるように、算出された切削抵抗の値が725N以上となる場合には、 D_n の値が1を下回っており、切りくずのカール直径を小さくしていることを明らかにした。



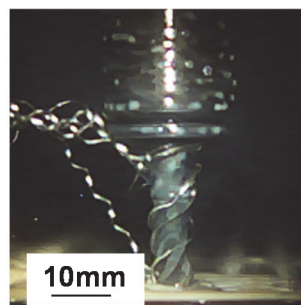
(a)タップ加工中



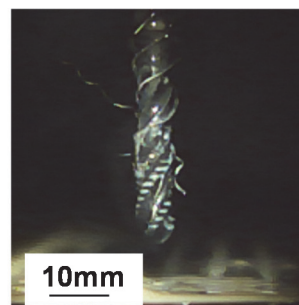
(b)加工終了後

図1 切りくずの巻きつき

発生プロセス(タイプ I)



(a)タップ加工中



(b)加工終了後

図2 切りくずの巻きつき

発生プロセス(タイプ II)

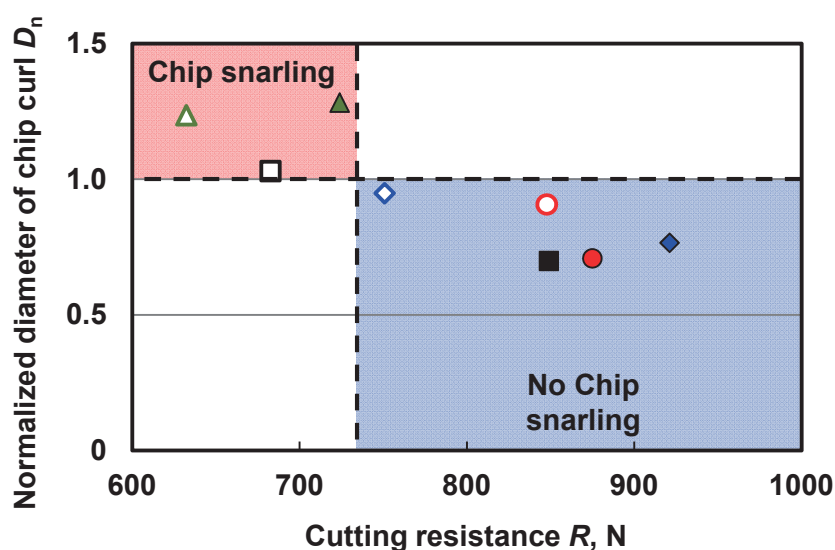


図3 切削抵抗と正規化された切りくずのカール直径の関係

[1]Y. Saito, T. Yamaguchi, K. Shibata, T. Kubo, W. Watanabe, T. Sawabe, and K. Hokkirigawa, Proceedings of the 16th Nordic Symposium on Tribology, (2014)

[2]S. Rhowmick, M.J. Lukitsch, A.T. Alpas, Journal of Material Processing Technology, Vol. 210, (2010), pp. 2142-2153.

平成26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. Y. Saito¹⁾, T. Yamaguchi²⁾, K. Shibata³⁾, Y. Kadota⁴⁾, T. Kubo⁵⁾, W. Watanabe⁵⁾, T. Sawabe⁵⁾, and K. Hokkirigawa⁶⁾, 「Development of New Tapping Covered with Nickel/Abrasive Particles Composite Film」, 『Proceedings of the 16th Nordic Symposium on Tribology』, 2014.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Y. Saito, T. Yamaguchi, K. Shibata, Y. Kadota, T. Kubo, W. Watanabe, T. Sawabe, and K. Hokkirigawa, 「Development of New Tapping Covered with Nickel/Abrasive Particles Composite Film」, The 16th Nordic Symposium on Tribology, Aarhus, Denmark, June, 2014.

2. 齋藤庸賀，山口健，柴田圭，門田友希，久保武史，渡部亘，沢辺輝雄，堀切川一男，「硬質粒子を電着させたタップ工具の切りくず巻きつき抑制及び工具寿命向上効果」，『日本トライボロジー学会トライボロジー学会』，A14，東京，2014年5月．
3. 門田友希，齋藤庸賀，山口健，柴田圭，久保武史，渡部亘，堀切川一男，「硬質粒子電着タップによるめねじ加工表面の評価」，A31，盛岡，2014年11月

【受賞・特許等】

特願2013-105424，「CBN装甲工具の製造方法及び該製造方法で製造されたCBN装甲工具」，沢辺輝雄，久保武史，堀切川一男，山口健，柴田圭，齋藤庸賀，2014年

【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：2013年1月-2015年3月



氏名 佐藤 寛是

所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D1

研究課題

ナノカーボンを用いた低摩擦システム

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

「摩擦・摩耗の低減」は、省エネルギーを目指す上での必須の課題である。ナノカーボン材料は、添加剤としての使用が行われ始め、トライボロジー特性の向上に寄与するという報告があり、理想的にはナノサイズのベアリングとして機能することも報告されている。本研究ではナノカーボン材料を用いた低摩擦・耐摩耗システムの実現を目指す。

ボールオンディスク型摩擦試験機を用い、ナノカーボンが添加された潤滑油を用いて軸受鋼同士の摩擦試験を行った。同条件においてボールの摩耗量を比較すると、ナノカーボンが添加された潤滑油を用いることにより摩耗量が約70%減少していることがわかる(図1)。また、摩擦試験を行った後に再び幅広い荷重・速度条件での摩擦特性を評価した。潤滑油のみを用いて摩擦させた後と比べ、ナノカーボン添加潤滑油を用いて摩擦させた後では摩擦特性が向上していることがわかる(図2)。また、ナノカーボン存在下において摩擦させた後では、潤滑油のみの場合でも摩擦特性が向上しているためナノカーボン存在下によっては低摩擦に寄与するような界面が形成されたと考えられる。

ナノカーボンを用いた低摩擦システム実現のためにナノカーボンが界面にて摩擦されるとどのように変化するかの基礎実験を行った。リングオンディスク型摩擦試験機を用い、SiCディスク上にナノカーボン粒子を蒸着させた後、SiCリングと摩擦させた。3種類のナノカーボン材料に対して同様の試験を行い、摩擦試験後のSiC表面を観察したところ、摩擦により形成された膜(トライボフィルム)がディスク上に存在していることが明らかになった(図3)。また、トライボフィルムの形成過程を観察したところ、摩擦回数によりトライボフィルムの平滑化が進行しているようであった。しかし、トライボフィルムの表面をより詳細に観察したところ、ナノカーボンの形状が確認でき、摩擦方向に平行に配向していることがわかる(図4)。従って、ナノカーボン自体は破壊されずその形状を保持した状態で摩擦により配向していくものと考えられる。

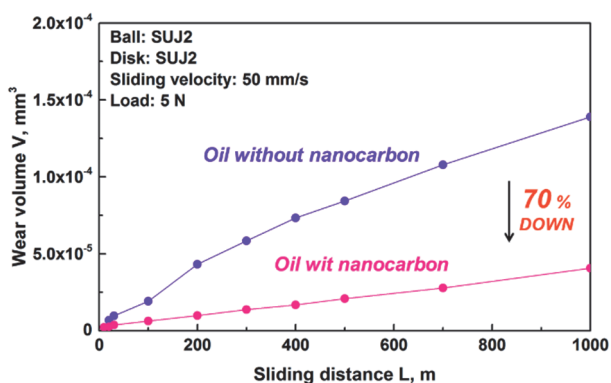


図1 摩耗量に及ぼすナノカーボン添加の影響

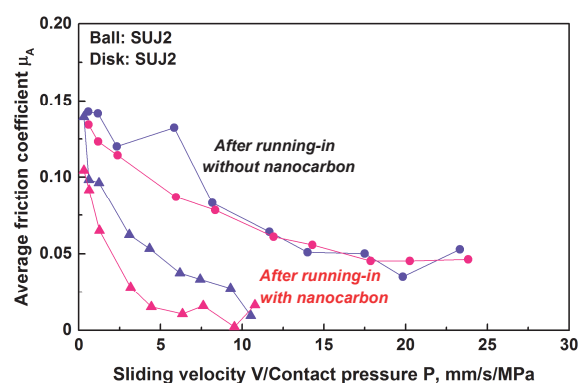


図2 なじみ後の摩擦特性に及ぼすナノカーボン添加の影響

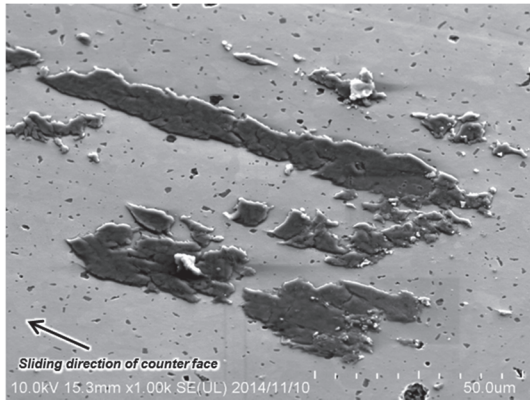


図3 表面に形成されたトライボフィルム

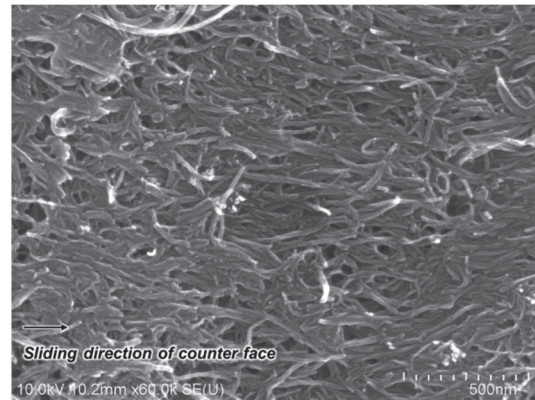


図4 トライボフィルムの拡大図

平成26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： Eleventh International Conference on Flow Dynamics
 主催団体： 東北大学流体科学研究所
 開催国： 日本
 開催期間： 2014.10.08~2014.10.10
 役割： 学生セッションオーガナイザー

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. ナノカーボン材料の摩擦界面への供給方法の検討
 固体潤滑剤は能動的に摩擦界面に侵入することが難しいとされている。ナノカーボン材料を固体潤滑剤として利用することを考えるといかに摩擦界面にカーボンの粒子を供給するかが大きな課題となる。そこで添加剤として液体へ分散させての供給方法や粉末での供給が可能になるような試験方式や表面テクスチャを施した試験片を用いた実験を行っている。
2. 摩擦により形成されるナノカーボン由来の膜（トライボフィルム）の観察・評価
 摩擦界面にてナノカーボン材料は膜状になって存在することがあることを明らかにした。ナノカーボンを用いた低摩擦・耐摩耗システムのためには、このトライボフィルムの形成・性質を制御することが重要であると考えられる。そのためトライボフィルムの形成過程の観察やトライボフィルムの構造や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. 佐藤寛是, 神田航希, 金嶋恵一郎, 宮越貴之, 北野智哉, 金箱秀樹, 足立幸志, 補助人工心臓用メカニカルシールにおける摩擦の周期的変動機構, トライボロジー会議2014春 東京, B31, 東京, 2014年5月.

<共著>

2. 神田航希, 佐藤寛是, 足立幸志, トライボロジー会議2014春 東京, B31, 東京, 2014年5月.
3. Koki Kanda, Hirotsuna Sato and Koshi Adachi, Friction Properties of SiC/SiC in Plasma Protein Solution, Swiss-Japanese Tribology Meeting, Zurich, Switzerland, September 2014.

<発表予定>

4. 佐藤寛是, 竹野貴法, 足立幸志, カーボンナノ粒子を用いたトライボフィルム形成に及ぼす表面形状の影響, トライボロジー会議2015春 姫路, 2015年5月.
5. Hirotsuna Sato, Takanori Takeno and Koshi Adachi, In situ Formation of Lubricious Carbon Films by Added Carbon Nanoparticles, International Tribology Conference, Tokyo 2015, September 2015.



氏名 佐藤 優

所属 工学研究科量子エネルギー工学専攻・D3

研究課題

The Interaction between Magnetic Island and poloidal Flow
in TU-Heliac

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

Nuclear Fusion, which is ultimate a method of the electric generation. The nuclear fusion not only have many benefit compare with other method of the electric generation, but also have the many problems for realization, it is mainly the difficult what is the energy supply and confinement which are required for fusion reaction, and which must be sustained for utilizing the electric power plant. In present, it is considered that two type of the method of the energy production, former is inertial confinement fusion and latter is magnetic confinement fusion, both are studied actively. Among these, the latter has many projects, experimental results and theories, so that is expected realization and is promoted big project, which is called ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

To generate the fusion reaction on the magnetic confinement fusion, it is necessary to confine ionized gas, which is called plasma, under the high density and high temperature for long period of time. As the vessel for confining the plasma, magnetic baskets that construct the nested magnetic surface are used. Why the magnetic field is be used that is because superheated plasma cannot be confined by usual materials. However, many problems are generated by using magnetic field, such as the instabilities are caused by the interaction between plasma and confinement field, so that it is necessary to control these instability and accomplish the sustainable fusion reaction for realizing the fusion power plant. There are the key issues on the controlling fusion reaction, which are the plasma flow and magnetic topology. The former relates the plasma confinement closely because the plasma flow relates an important phenomenon, that is H-mode. The H-mode is one of the confinement improved modes, it is considered that the interaction between macro-scale plasma flow (laminar flow) and micro-scale plasma flow (turbulent flow) is important. The latter also relates plasma continent strictly what is the topological breaking by perturbation field. When coil allocation error or the perturbation field induced externally, the nested confinement field is breaking topologically, which generates a magnetic chaos, such as magnetic island or stochastic sea. This chaos increases the particle transport of plasma, which results in confinement degradation, so that the topological breaking is unexpected phenomenon for plasma confinement. However, this phenomenon is expected for utilizing the plasma control in present. On H-mode plasma, an intermittent phenomenon occurs, which is called edge-localized modes (ELMs). The H-mode plasma has steepened pressure gradient at plasma edge caused by the edge transport barrier, and which gradient exceed threshold, heat pulses burst out to the fusion reactor wall. Since this heat pulse has high energy, the collided wall be damaged and which results in ephemerization, that is ELMs. To control ELMs, it is necessary to relax the steepen pressure gradient and the topological breaking are effective for which because the actively created magnetic chaos promotes the particle transport and which results in relaxation of the pressure gradient. Thus, topological breaking is attractive topic. However, the physical behavior is unclear because of the difficulty of manipulating the topological breaking. In the case of the nested magnetic configuration, plasma can be written with the magnetic topology that is easy to manipulation, but in the case of that configuration with topological breaking, this simplification cannot be used, so the computational approach is necessary for manipulating the calculation of plasma physics under the topological breaking. The manipulating difficulty implies difficulty to anticipate the physical phenomenon theoretically or computationally, that is, excellent potential to acquire the new insight by experiment. From these possibilities, a series experiments have performed the interaction between magnetic island and plasma flow in Tohoku-University Heliac

(TU-Heliac). The TU-Heliac has an ability for study of island-plasma interaction as following reasons, i) selectivity of magnetic configuration for selecting current ratio of three type coils, 1 center conductor coil, 2 vertical coils and 32 toroidal coils, ii) controllability of poloidal flow using an electrode made from LaB_6 (lanthanum hexaboride) which is inserted in plasma and flows an electrode current I_E which and toroidal field $\mathbf{B}$ drive $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ poloidal flow and iii) excitation of magnetic island with induced perturbation fields using an external perturbation field coils (PFCs).

For the effective experiment, a multi-point Mach probe was developed, which has three measuring points so that much information can be measured at one discharge. The dumping effect of magnetic island on poloidal flow was evaluated. It was realized that the experimental value could be described if the dumping force was inverse proportional to the poloidal flow velocity. In the case of sweeping the driven force using electrode biasing, the dumping force evaluated by a driven force when poloidal flow increased drastically in the case of electrode biasing, which increased with the magnetic island width. This tendency implies that the threshold of normalized viscosity was increased. Due to the interaction between the magnetic island and poloidal flow, an interesting phenomenon was observed, which is that the plasma confinement improved by magnetic island. This experimental result is contradicted for general understanding as described above, so the interesting phenomena were evaluated in detail. The radial transport decreased at outer region of plasma, on the other hand, that increased at inner region of plasma. By the island, the flow shear was increased at the outer plasma. The energy transport from radial to poloidal direction evaluated by the Mach probe was smaller (greater) at inner (outer) region of plasma than that by exciting the island. It is considered that these results imply the confinement improvement that is caused by the increasing the shear of the poloidal flow velocity due to the island. From these evaluation, we can state a scenario as follows,

By exciting the island at $r \sim 0.5$, at a high biasing phase, the potential changed as shown in Fig. 1 (a). The potential gradient, which indicates the velocity of $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ poloidal flow $v_{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}$, decelerated in the inner plasma including the region of the island, but decelerated in the outer plasma. Therefore, the flow shear at the outer island region increased: that is, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ shearing rate $\Omega_{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}$ increased as shown in Fig. 1 (b) and (c). If $\Omega_{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}$ reflects the suppression of the radial transportation in the radial direction, the radial transport was suppressed as in Fig. 1 (d).

These descriptions of these experimental results are compatible with each other.

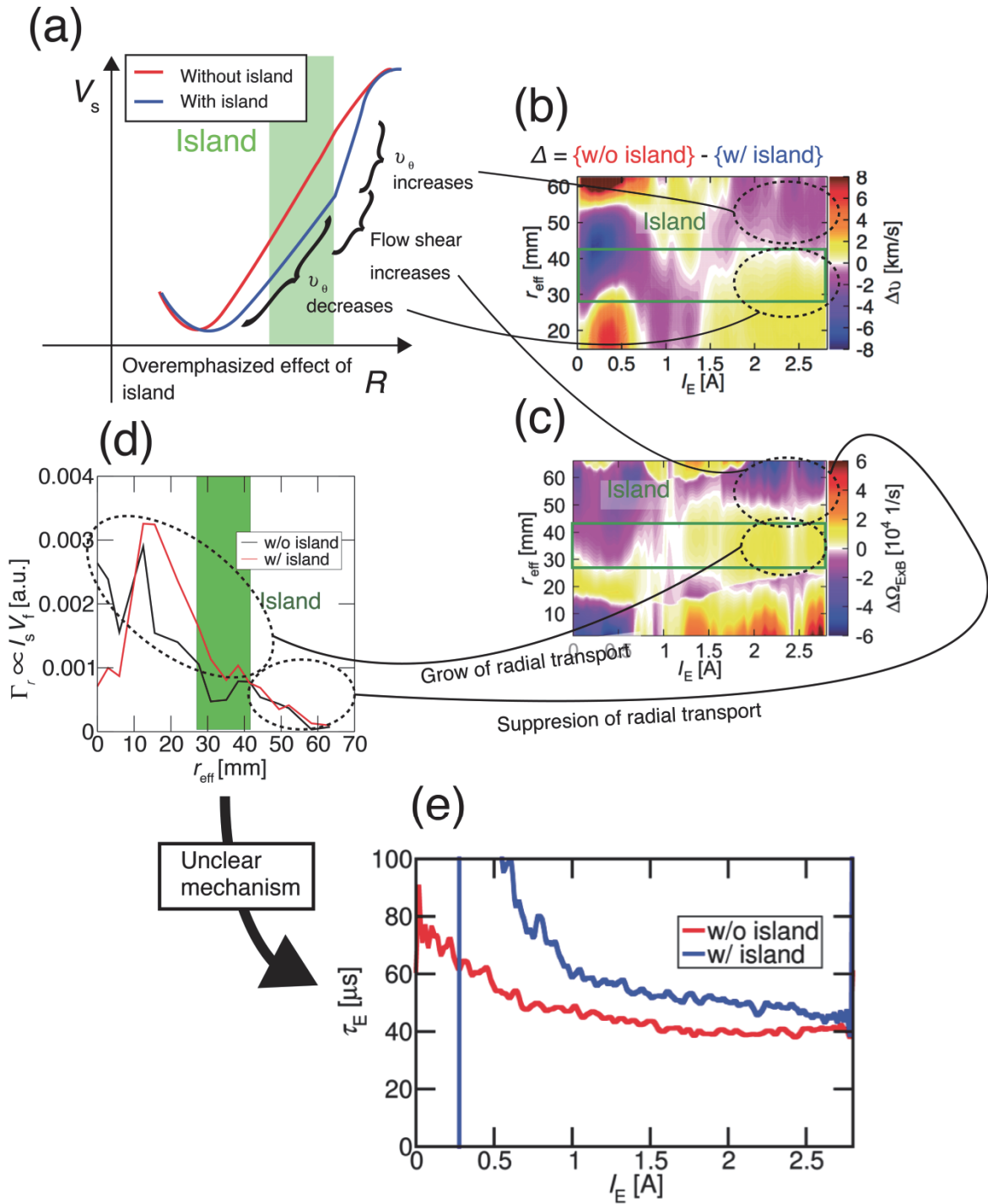


Fig. 1 Scenario of confinement improvement due to the island.

平成26年度の研究業績

【研究内容】

The Interaction between Magnetic Island and poloidal Flow in TU-Heliac

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 佐藤優、北島純男、石井啓一、小池都司、奥利大、岡本敦、高山正和、鈴木康博、横山雅之、稲垣滋、西村清彦、高橋裕己、
“東北大学ヘリアック装置における磁気島とポロイダルフローの相互作用”
第10回核融合エネルギー連合講演会、茨城県つくば市（エポカルつくば）、10月（2014）



氏名 沈 忠茂 (Shim Choong-Moo)

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

加圧水型軽水炉の模擬環境中疲労試験による時空間解析及びき裂挙動

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

Environmental fatigue life in light water reactor is addressed by using cumulative usage factor (CUF). With the long term operation of the reactor, the CUF increases towards to the defined life time. For considering aging management and safe long term operation, like an extension of plant life, detailed analysis of environmental fatigue mechanism is necessary. Especially for the austenitic stainless steels, it is known to exhibit fatigue life in pressurized water reactor (PWR) primary water by a factor of 20 lower in relative to those in air. For these reasons, it is important to understand crack growth behavior in PWR primary water, however, most of studies have focused on long crack behavior in PWR primary water or surface short crack behavior in air. In this study, by means of the smooth specimen with various cycles, short fatigue crack growth behavior was investigated under the strain-controlled low cycle fatigue at temperature of 325°C in simulated PWR primary water.

The average number of cracks and those of cracks below 5 μm were examined from each section. The crack growth rates obtained by the largest crack depth and the number of cycles from each test were shown in Fig. 1(a). The crack growth rate was not based on the same specimen, but it helped us to understand its trend during the fatigue damage. A simple point-to-point method was employed for the calculation of the crack growth rate,

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{da_{i+1} - da_i}{dN_{i+1} - dN_i} \quad (1)$$

where ΔN and Δa denoted the cyclic interval and crack depth respectively and a_i was the maximum crack depth observed at N_i cycles. The crack growth rates may accelerate considerably in the vicinity of 110 cycles as shown in Fig.1(a). The average number of cracks was increased with increasing the number of cycle as shown in Fig.1(a). However, the average number of cracks below 5 μm was increased and decreased between 41 to 50 cycles and 50 to 110 cycles, respectively, after that it was remained from 110 to 140 cycles. For this result, it is thought that more than half of crack initiation may occur in the early stage.

Histograms for the average number of cracks versus their depth in one cross section were plotted to confirm crack distribution simply as shown in Fig.1(b). Every histogram obtained from crack examined of four cross sections has similar behavior. Therefore, it was possible to express histogram as the representative crack distribution. The result also indicated that an increase in the number of cycles led the location of crack depth distribution gradually from small size to large size.

Based on the result obtained, It seems that a strain increment occurs to open cracks already initiated, thereby exposing the underlying matrix to the environment and increase in stress concentration occur on the crack tips by propagating every crack.

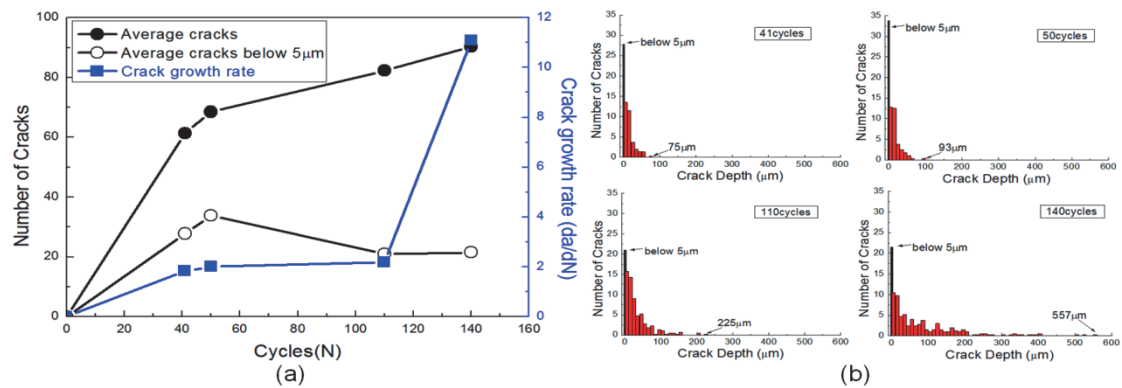


Fig. 1. Crack distribution examined along 4 longitudinal cross sections in the gauge length with 41, 50, 110 140cycles - (a) the average number of cracks and crack growth rate, (b) Histogram analysis

平成26年度の研究業績

【研究内容】

short fatigue crack behavior of type 316 stainless steel for low cycle fatigue tests with various cycles at temperature of 325°C in simulated PWR primary water was investigated. The following conclusions can be derived from these tests:

The average number of cracks was increased with increasing the number of cycles, however, those of below 5 μm in depth was decreased and increased between 41 to 50cycles and 50 to 110cycles, respectively, and then remained until 140cycles. Based on this result, more than half of cracks initiated before 41cycles. Moreover, the estimated crack growth rate was increased considerably in the vicinity of 110cycles

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. Choongmoo SHIM, Yoichi TAKEDA, Jiro KUNIYA and Tetsuo SHOJI
Short Fatigue Crack Behavior during Low Cycle Fatigue Tests of 316 Stainless Steel in Simulated PWR Primary Water
The 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology, pp.51-52 (2014.11.2-5)



氏名 相馬 達哉

所属 工学研究科化学工学専攻・D1

研究課題

気液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26年度における本卓越拠点に対する取り組み

回転アトマイザにおけるノズル上の液膜流れの数値シミュレーションを実施した。塗料供給開始時には特徴的な挙動を示す水頭が現れるものの、一定時間経過後には定常状態に達し、形成される液膜の厚さは一定となることがわかった。この時の液膜厚さが無次元数と相関があることを見出し、回転数、流量、粘度、表面張力係数および半径方向距離からなる3つの無次元数によって式(1)に示す無次元液膜厚さの予測式を提案した。

$$\frac{\delta}{r} = 2.29 \left(\frac{\mu^2}{\rho \sigma r} \right)^{0.137} \left(\frac{\rho r^3 N^2}{\sigma} \right)^{-0.440} \left(\frac{\rho Q^2}{\sigma r^3} \right)^{0.232} \quad (1)$$

この式による予測値を共同研究者による測定値と比較したところ良好に一致することが確認され (Fig. 1)、申請者による解析と共同研究者の開発した非接触の膜厚測定手法は相互に妥当性を補強した。また、流量 が時間的に変化する場合、当初は非定常性が現れ上述の予測式は適用できないと予測していたが、上式に流量の経時変化を入力し得られた予測値は数値解を良好に再現し (Fig. 2)、提案した式が非定常な液膜の変動も予測できることを示した。

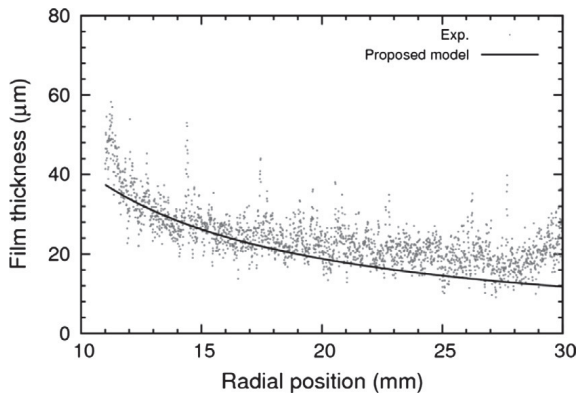


Fig. 1 Comparison of proposed model with the experimental value at $r = 13.4$ mm (35 krpm, 70 mPa s, 60 mN/m) [1].

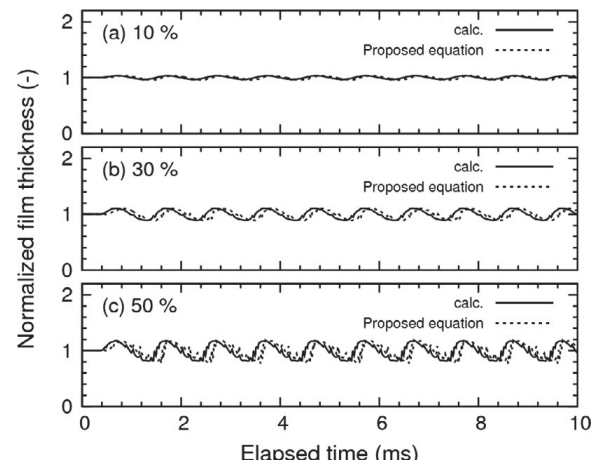


Fig. 2 Comparison of the fluctuating film thickness with the proposed equation at $r = 13.4$ mm (35 krpm, 70 mPa s, 60 mN/m) [1].

また、計算の高速化を目的に、構造格子を用いたSimplified Marker and Cell(SMAC)法に対して、質量流量の保存性が高い新たな流出境界条件を提案した。本流出境界条件は、ノイマン条件を適用し算出した流出境界上の速度を、解析領域全体の質量流量の保存性を満たすように式(2)により修正する。

$$u_o = \dot{u}_o + \frac{F_1 - F_o - \sum \frac{\rho_p^{n+1} - \rho_p^n}{\Delta t} \Delta V_p}{\sum \rho A|_o} \quad (2)$$

ここで、 u_o は流出境界上の速度、 $\dot{u}_o$ はノイマン条件によって算出した仮の流出境界上の速度、 F_1 および F_o はそれぞれ流入境界、流出境界上の質量流速、 A は断面積、 ΔV_p はセル体積、 ρ_p^n は n タイムステップにおける密度である。検証としてバックステップ流れを解析し、SMAC法において取り扱われる従来の流出境界条件と収

束性および計算時間を比較した。その結果、本流境界条件は収束性が高いことを示した。

[1] T. Soma, T. Katayama, J. Tanimoto, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki, D. Nakai, G. Kitamura, M. Miura, T. Asakawa, M. Daikoku, T. Haneda, Y. Hatayama, M. Shirota and T. Inamura, Liquid film flow on a high speed rotary bell-cup atomizer, International Journal of Multiphase Flow, 70, 96-103 (2015)

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 遠心アトマイザーにおける微粒化現象の数値シミュレーション
遠心微粒化を利用した自動車塗装装置の効率化を目標に、微粒化現象のシミュレーションを実施している。ノズル上に形成される液膜流れの解析を行うとともに、空中における液滴のふるまいを把握するため、表面張力モデルの選定を行い、解析を試みている。
2. 質量流量の保存性を保証する収束性の高い自由流境界条件の提案
計算の高速化を目的に、構造格子を用いたSimplified Marker and Cell(SMAC)法に対して、質量流量の保存性が高い新たな流境界条件を提案した。

【査読論文（査読付き国際会議論文を含む）】

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. Yohsuke Matsushita, Sohey Nozawa, Tomoyuki Katayama, Tatsuya Soma, Yasuhiro Saito, and Hideyuki Aoki
Outflow boundary condition for the unsteady-state fluid flow computation with variable density on the collocated grid
Computational Thermal Sciences, 6(5), 425-437 (2014)

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 相馬達哉, 片山知雪, 雨宮駿, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之
高速回転ベルカップ塗装機における噴霧粒子径と塗着効率の関係
塗装工学, 49(11), 379-389 (2014)
2. Tatsuya Soma, Tomoyuki Katayama, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki
Outflow Boundary Condition for the Simplified Marker and Cell Method on a Staggered Grid in the Finite Volume Method
11th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, October 8-10 (2014)
3. 谷本惇一, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之
褐炭チャーのCO₂およびH₂Oガス化反応速度の測定と定式化
第14回日本伝熱学会学生発表会講演論文集, pp. 3-4, 仙台, 5月10日 (2014)
4. 松下洋介, 片山知雪, 横井智記, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 青木秀之
PSI-CELL Modelの修正
第23回日本エネルギー学会大会, pp. 26-27, 福岡, 7月20-21日 (2014)
5. 谷本惇一, 赤尾津翔大, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 村尾明紀
異なる昇温速度において生成した石炭チャーの反応性の検討
第51回石炭科学会議, 仙台, 10月22-23日 (2014)
6. 片山知雪, 雨宮駿, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之
非構造格子を用いたSMAC法による非圧縮性流体解析における流境界条件
熱工学コンファレンス2014, E225, 東京, 11月8-9日 (2014)

氏名 田中 康基



所属 工学研究科バイオロボティクス専攻・D1

研究課題

ホットワイヤによる還元・窒化処理を用いたキャビティ内の圧力制御が可能なウェハレベルCu-Cu接合技術の開発

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

原子層堆積法における堆積膜の品質は、反応前駆体の化学状態や供給の均一性によるところが大きい。そのため、熱流動場を最適化することで高品質な薄膜を少ない原料で高速に堆積できると考えられる。そこで、有限堆積法によるCFD解析を利用し、チャンバ内の流入口バッフルや基板ステージ形状の最適化を行った。

従来からチャンバ流入口にバッフルを配置することで膜質が改善されるとされていた。そこで、細い流入口を持つ円管モデルを作成し、流入口後流に配置するバッフルの形状を変えて流れ場への影響を検討するため、定常解析を行った。結果として、図1に示すように大きなバッフルを配置することでバッフル後流に対する整流効果が得られることが明らかとなった。

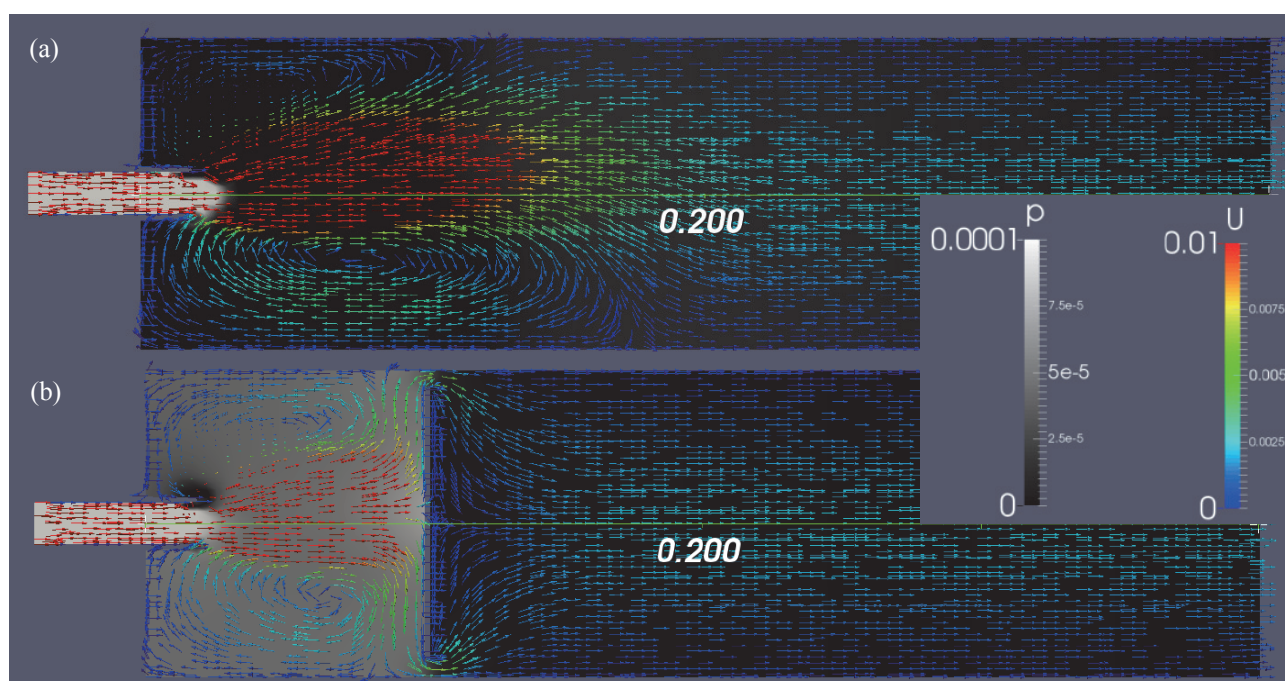


図1 バッフルによる流れ場への影響 (a) バッフルなし (b) バッフルあり

原料ガスが反応前駆体として薄膜堆積に寄与するためには、多くの場合で加熱が必須となる。一般に原料ガスは加熱された壁面からの熱伝達によって加熱されるが、管中心付近を流れるガスと管壁付近を流れるガスとで温度差が生じると考えられる。バッフルを挿入することにより、すべてのガスは強制的に管壁付近を流れることで均一に加熱されることが期待される。そこで、同様のモデルにおいて定常熱流動解析を行った。結果として、図2に示すように、壁面を200℃まで加熱したのに対して数度ではあるが、バッフルを挿入したことにより管中心付近の温度が上昇していることが確認できる。また、加熱円管内では浮力による流れの乱れが生じるが、この乱れもバッフルによってある程度緩和できると考えられる。

反応前駆体の均一な供給という観点からは、基板を設置するステージ周辺の流れ場を最適化することが重要となる。とくに、スループットの観点からチャンバ内にはできる限り多くの基板を導入すること

が望ましいが、一方で多くの基板を導入すると堆積膜の膜厚や膜質が不均一になるといった問題がある。ここでは、図3に示すような円管内に傾斜を付けたサンプルステージを想定し、上流と下流側の傾斜にそれぞれ基板を設置するものとした。傾斜が大きいほど円管の容積が小さくて済むが、流れが乱れるリスクが高まる。結果として、図3に示すように、傾斜角30度では乱れは生じなかったが、40度では後流側の基板設置個所表面で乱れが発生している。実機を使用した成膜実験においても下流側の膜質が不均一となる結果が出ており、CFD解析の真空装置設計手法としての有用性が示された。

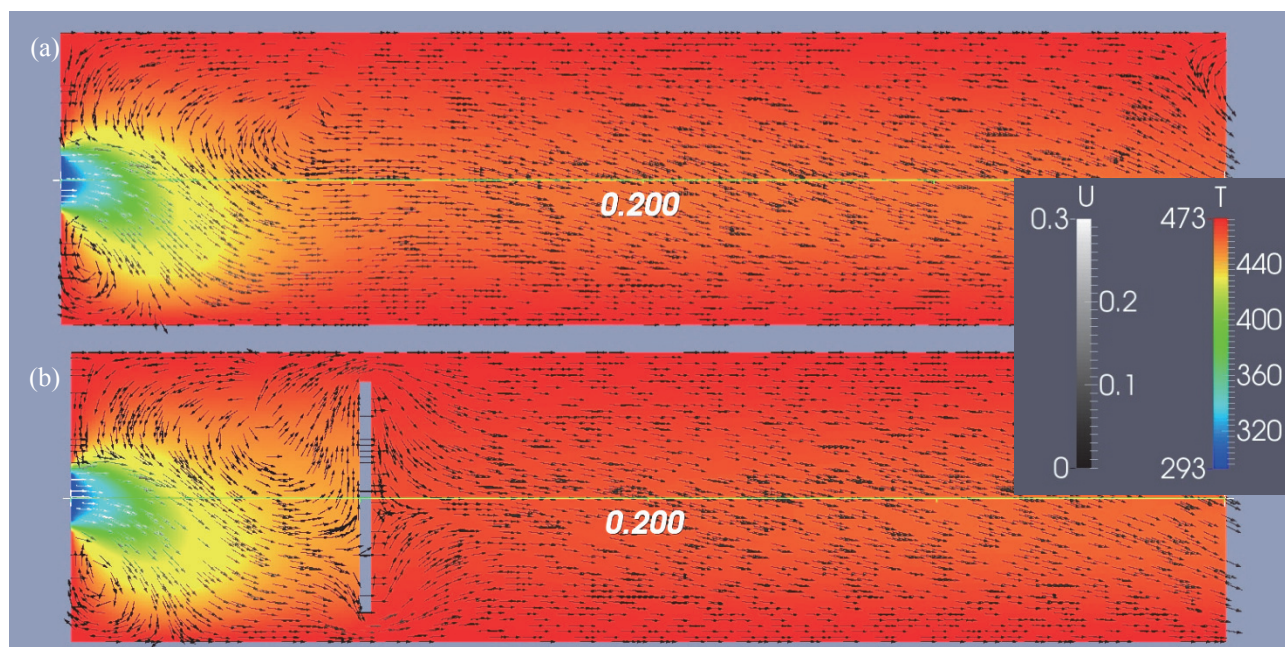


図2 バッフルによる温度場への影響 (a) バッフルなし (b) バッフルあり

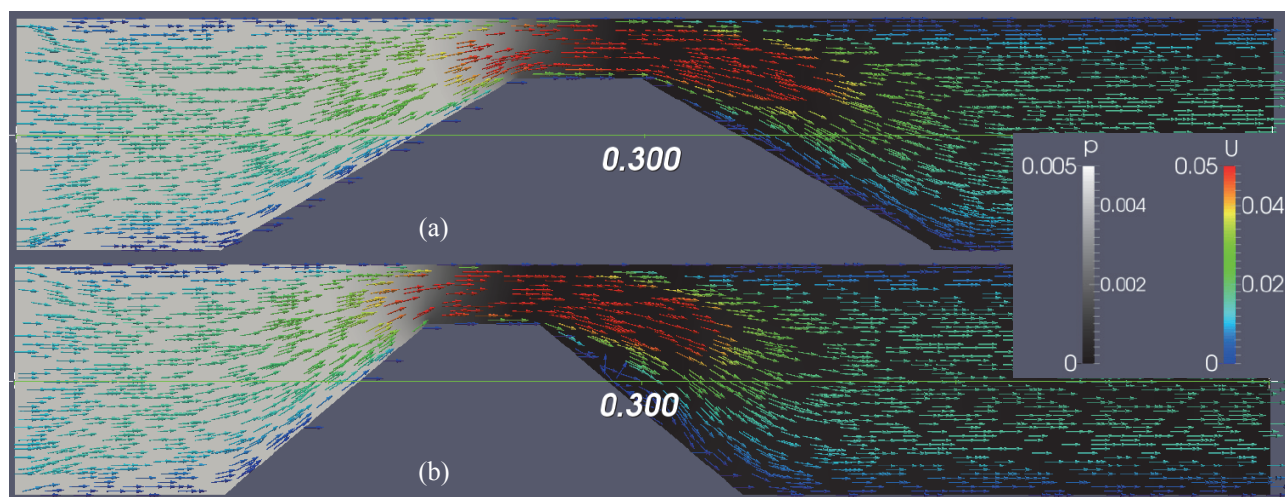


図3 基板ステージ周辺の流れ場 (a) ステージ傾斜角：30度 (b) ステージ傾斜角：40度

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. ホットワイヤによって生成した原子状水素によるSU-8フォトレジストの除去
高アスペクト比マイクロめっき金型の作製等に有望な一方で、除去が困難な化学増幅型フォトレジストSU-8について、ホットワイヤで生成される原子状水素を利用することで、穏やかな条件下での除去を可能にした。また、複数の原子状水素源やX線光電子分光法を利用することで、SU-8除去メカニズムの解明や残渣の分析を行った。

2. リモート型ホットワイヤ原子状水素源を用いたセレン化亜鉛の化学気相堆積
マイクロ赤外線デバイスの窓材として使用するため、赤外波長域でワイドかつフラットな透過特性を有するセレン化亜鉛の低温高速堆積を試みている。
3. ホットワイヤによる還元・窒化処理を用いたキャビティ内の圧力制御が可能なウェハレベルCu-Cu接合技術の開発
Au-Au接合に替わる安価で歩留まりの高い接合技術としてCu-Cu接合技術を開発するため、ホットワイヤで生成した原子状水素による還元処理を利用したCu-Cu接合が可能な装置を製作している。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. K. Tanaka, M. Kumano and S. Tanaka, “Removal of SU-8 by Two Types of Hot Wire Atomic Hydrogen Sources”, APCOT 2014, Oral session, June 29-July 2, Daegu, Korea
2. 田中康基, 熊野勝文, 田中秀治, リモート型ホットワイヤ原子状水素源を用いたセレン化亜鉛の化学的気相堆積の可能性検討, 第11回Cat-CVD研究会, 東北大学, ポスター発表, 7月・2014年



氏名 鵜飼 孝博

所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D3

研究課題

大気状態を考慮したソニックブーム波形の不確かさ評価

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、低ソニックブーム波形に関する乱流効果を明らかにするため、乱流干渉が立ち上がり時間の長い波形に及ぼす影響を実験的に調査した。

東北大学流体科学研究所の弾道飛行装置を用いて実験を行った。図1に計測機器の配置を示す。弾道飛行装置では、模型を射出し模型周辺の圧力場の計測が可能である。模型はブラスト管から射出され圧力変換器P1およびP2において圧力波を計測した後、キャッチタンクにおいて回収される。また、P1の前方に乱流場を生成させるパイプを設置し、P1では乱流干渉した圧力波形が計測可能である。

図2に模型から発生した等エントロピー的な圧縮波およびエントロピー増加を伴う衝撃波の最大過剰圧の変化量 $\Delta P_{p1}/\Delta P_{p2}$ 、 $\Delta P_{s1}/\Delta P_{s2}$ をそれぞれ示す。ここで下付きの数字1および2は、二カ所の圧力変換器P1およびP2において計測された値を表す（図1）。また、表1に $\Delta P_{p1}/\Delta P_{p2}$ 、 $\Delta P_{s1}/\Delta P_{s2}$ の平均値および標準偏差を示す。P1およびP2において計測された最大過剰圧が一致する場合、 $\Delta P_1/\Delta P_2 = 1.0$ となるが、本結果では、模型が減速するため、P2における最大過剰圧が小さくなり、乱流干渉がない場合においても $\Delta P_1/\Delta P_2$ の平均が1.0以上となる。等エントロピー的な圧縮波の場合（図2 (a)、表1）、たとえ乱流が干渉したとしても $\Delta P_{p1}/\Delta P_{p2}$ のバラつきおよび平均値は、乱流干渉がない値とほぼ一致した。一方、エントロピー増加を伴う衝撃波の場合（図2 (b)、表1）、乱流干渉によって、 $\Delta P_{s1}/\Delta P_{s2}$ が大きくバラつき、平均値が増加した。乱流場では、大小様々な渦が存在し、大スケールの渦が小スケールの渦にエネルギー供給している。衝撃波と乱流干渉の根底となるのは、渦の衝撃波干渉である。衝撃波と渦が干渉した際は、干渉によって歪んだ衝撃波波面から衝撃波反射／回折が発生する[1, 2]。また、衝撃波波面がフォーカスし、非常に急峻な圧力上昇が発生する[3, 4]。いずれもエントロピーが高い圧縮波における現象である。本研究で扱った立ち上がり時間が長い波形は、等エントロピー的な圧縮波であり、たとえ大小様々な渦を含む乱流場を通過したとしても、圧力波の波面において反射や回折が強く発生しないと考えられる。

本研究では、低ソニックブーム波形に及ぼす乱流干渉効果の解明を目指し、立ち上がり時間が長い圧力波形に及ぼす乱流干渉の影響を実験的に評価した。エントロピー増加を伴う衝撃波では、乱流干渉によって衝撃波の最大過剰圧の標準偏差は大きくなる。一方、等エントロピー的な圧縮波は、たとえ乱流が干渉しても圧力値が変動しないことが分かった。

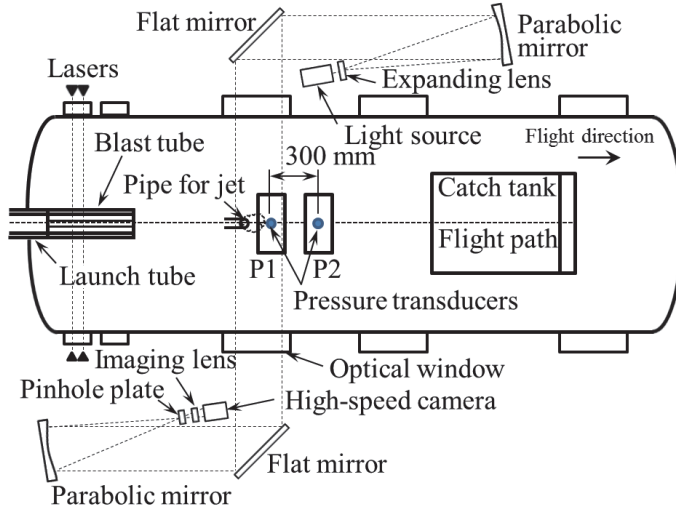


図 1 計測部における計測機器の配置

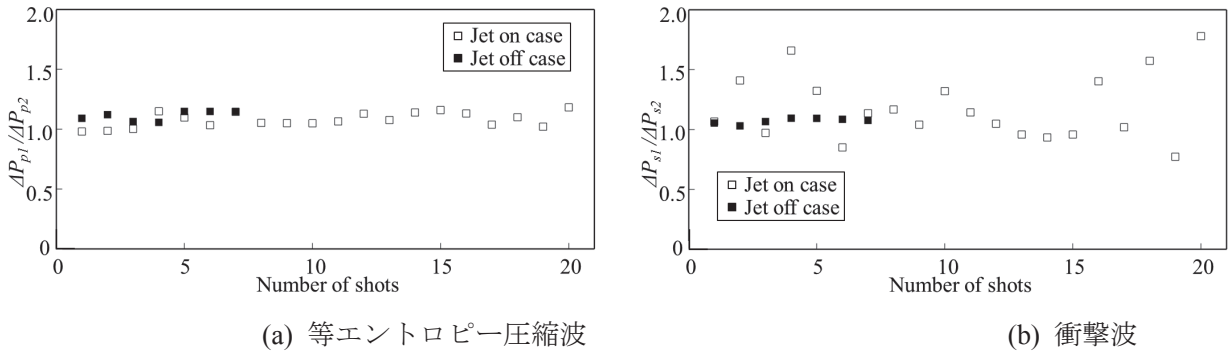


図 2 P1 に対する P2 の圧力変化量

表 1 統計結果

		乱流干渉なし	乱流干渉あり
$\Delta P_{p1}/\Delta P_{p2}$	平均値	1.11	1.08
	標準偏差	0.04	0.06
	平均値	1.07	1.18
$\Delta P_{s1}/\Delta P_{s2}$	標準偏差	0.02	0.28

- [1] F. Grasso, S. Pirozzoli, "Shock-wave-vortex interactions: Shock and vortex deformations, and sound production," Theoret. Comput. Fluid Dynamics Vol. 13, pp. 421-456 (2000).
- [2] A. Chatterjee, "Shock wave deformation in shock-vortex interactions," Shock Waves Vol. 9, pp. 95-105 (1999).
- [3] M. Aver'yanov, Ph. Blanc-Benon, R.O. Cleveland, V. Khokhlova, "Nonlinear and diffraction effects in propagation of N-waves in randomly inhomogeneous moving media," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 129, pp. 1760-1772 (2011).
- [4] M.V. Aver'yanov, V.A. Khokhlova, O.A. Sapozhnikov, Ph. Blanc-Benon, R.O. Cleveland, "Parabolic equation for nonlinear acoustic wave propagation in inhomogeneous moving media," Acoust. Phys. Vol. 52, pp. 623-632 (2006).

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 乱流場の生成
パイプまたはスリットノズルを用いて乱流場を生成し、熱線風速形を用いた乱流場評価を行い、衝撃波干渉に適した乱流場を生成させた。
2. 光学可視化による衝撃波波面の歪みの評価
強い密度変化を発生する模型を射出し、乱流と干渉させた。衝撃波波面の歪みを光学可視化し、同時に圧力波形も計測して、衝撃波波面の歪みの様子と圧力波形の変化を関連付けた評価も行った。乱流干渉によって広い範囲で高密度場が現れた。
3. 衝撃波強度が衝撃波と乱流干渉に及ぼす影響の実験的評価
レーザーによって発生した衝撃波を乱流場に通過させて乱流効果を評価した。レーザー出力を調整し、衝撃波強度を変更させた。衝撃波強度が強いほど乱流による圧力変動が大きいことが分かった。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. T. Ukai, K. Ohtani, S. Obayashi, “Validation of Measurement Accuracy for Near-Field Pressure of Supersonic Projectiles in a Ballistic Range.” *Measurement* (accepted).
2. T. Ukai, H. Zare-Behtash, K. H. Lo, K. Kontis, S. Obayashi, “Effects of Dual Jets Distance on Mixing Characteristic and Flow Path within a Cavity in Supersonic Crossflow,” *International Journal of Heat and Fluid Flow* Vol.50, pp.254-262 (2014).
3. H. Zare-Behtash, K. H. Lo, T. Ukai, K. Kontis, S. Obayashi, “Experimental Investigation of Impinging Shock Cavity Interactions with Upstream Transverse Jet Injection,” *Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan* Vol.12 No.ists29, pp. 57-62 (2014).

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. T. Ukai, Y. Saito, K. Miyakoshi, T. Yamaguchi, K. Ohtani, S. Obayashi, “Long Rise-Time Pressure Signature through Jet Turbulence in a Laboratory-Scale Experiment,” 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS2014-3.4ST, Russia (2014) Oral.

氏名 和田 康典



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

平板表面上に形成される非定常なはく離の制御

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、逆流を検知するための計測システムの改良を行った。本研究でははく離領域の判別としてWeiらが提案したdirection-sensitiveプローブを用いている[1]。過去の計測では熱線から生じる熱ウェイクが微弱なため、冷線の検出精度が低いことが問題であった。そこで熱線の放熱量を上昇させるため、タングステン線の直径を 5μ から 50μ へと10倍大きくし、またCTA回路の電流増幅用トランジスタを変更することでより多くの電流を熱線に流せるようにした。さらに冷線の出力信号をアナログ増幅することで出力信号のS/N比を大きくし、増幅後のノイズの影響を小さくする工夫をした。図1(a)に過去の計測システム、(b)に改良後の計測システムによる測定結果を示す。両者とも定常なはく離流れを対象としている。図1の左側は上流側の冷線から得られた信号 S_f の時間平均 $\overline{S_f}$ の分布、右側は下流側の信号 S_b の時間平均 $\overline{S_b}$ の分布である。この図から、過去の計測システムでは、上流側の冷線は熱ウェイクを検知しているが、下流側の冷線は全く機能していないことがわかる。それに対し改良後の計測システムでは、下流側の冷線でもはく離領域付近の低速の順流領域における熱ウェイクを精度良く捉えられており、検知能力が改善されていることが確かめられた。

また、改良を行った計測システムをNishioらのはく離制御装置に組み込むことではく離制御を試みた[2]。図2に装置概略図を示す。下流平板上に設置したセンサーが逆流を検知すると、スピーカーが駆動しはじめ、乱流生成部で攪拌により生成した乱れをスリットを通して境界層内へと供給するようになっていく。センサーは逆流だけを検知できればよいので、1対の熱線と冷線で構成されている。実験は非定常なはく離流れを対象として行った。図3に逆流領域のアンサンブル平均結果から求めた逆流領域面積の時間変化を示す。制御なし(a)の場合に比べて制御あり(b)の場合では、ほとんどの位相において逆流領域が半分以下まで抑えられている。逆流領域面積の値は、制御なしの場合 $1.51 \times 10^{-2} m^2$ であるのに対し、制御を行うと $7.08 \times 10^{-3} m^2$ まで減少させることができた。

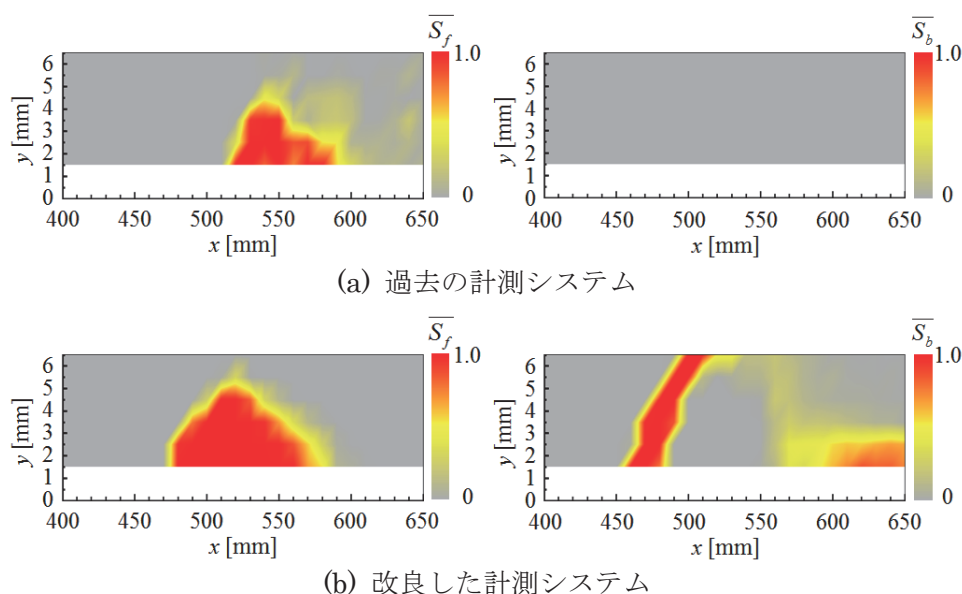


図1 上流側(左)と下流側(右)の冷線信号の時間平均分布

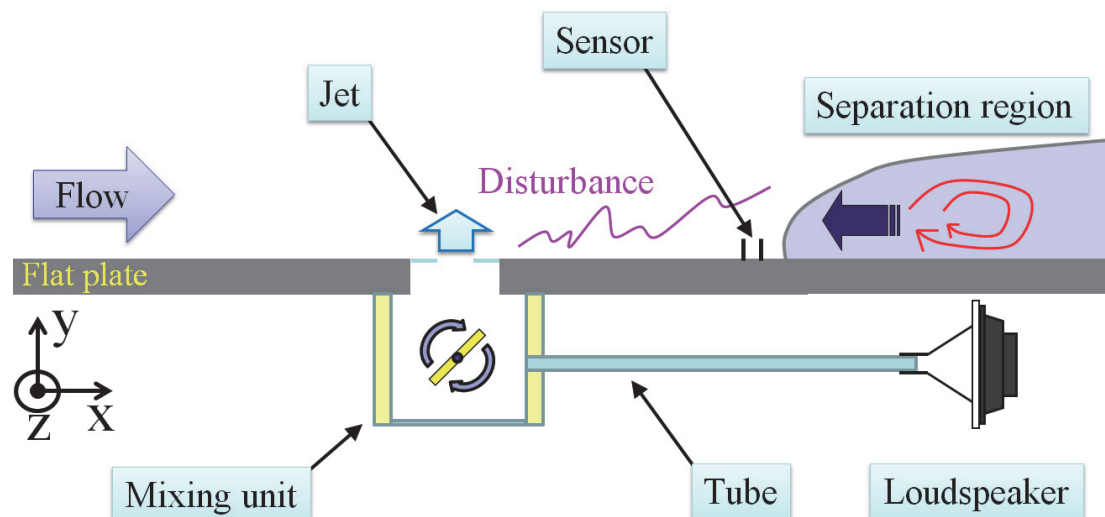


図2 はく離制御装置

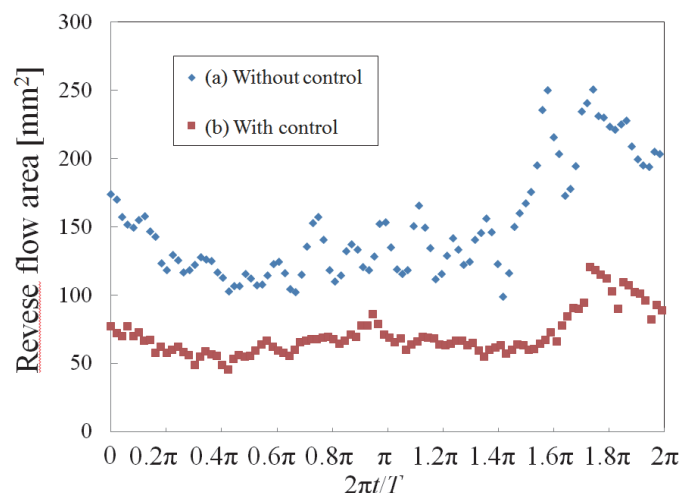


図3 逆流領域面積の時間変化 (a)制御なし (b)制御あり

[1] QING-DING Wei and H. Sato, J. Fluid Mech., Vol.143, (1984), pp.153-172.

[2] Yu Nishio, Takuo Endo, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.9, No.3, (2014), pp. 1-8.

平成26年度の研究業績

【研究内容】

間欠噴流を用いた非定常性の強いはく離流れの能動制御

非定常性の強いはく離流れを効果的に制御するシステムを開発することを目的としたもので、今年度では逆流を検知するための計測システムに改良を施すことではく離の検出能力の向上を図った。その効果を風洞実験により検証したところ、検出能力が改善されていることが確かめられた。また間欠噴流を用いた制御装置に改良した計測システムを組み込み、はく離の能動制御を行ったところ、従来の装置を用いた場合と比較してはく離領域を半分以下にまで抑えることができた。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 和田康典, 西尾悠, 伊澤精一郎, 福西祐
間欠噴流を用いた非定常性の強いはく離流れの制御
日本機械学会東北支部 第50期総会・講演会

氏名 薛 高鵬 (Xue Gaopeng)



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

極低温立体計測のための静電駆動型XYZマイクロステージ

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

In this year, I designed, fabricated and tested a novel assembled comb-drive XYZ-microstage (Fig. 1) that produces highly decoupled motions into X-, Y-, and Z-directions for the three-dimensional (3D) scanning stage of magnetic resonance force microscopy (MRFM).

In several decades, MRFM, as an effective characterization method, has been applied to various fields including physics, chemistry, biology and material science [1]. As it can realize measurements of spin and radicals through a non-invasive method in nanometer scale, MRFM is one of the promising approaches for 3D imaging technique of biological samples [2] (Fig. 2). Microscanners for cryogenic measurements using MRFM require large stroke at low temperature with small affections to thermal variation. Various XYZ-microstages based on electrostatic actuators have been reported in literatures [3, 4]. However, the microscale displacements into out-of-plate direction are small due to limited planer structures [3] and space limitation of movements into vertical direction [4]. It is difficult to achieve large displacements into three-dimensional directions using a monolithic XYZ-microstage.

The XYZ-microstage based on assembling technology consists of three separated parts, i.e., a comb-drive XY-microstage, two comb-drive Z-microstages and a bottom silicon base substrate. The separated parts are assembled together by using micro manipulators and a guide block of stainless steel. The two Z-microstages are vertically mounted and fixed by the conductive glue onto the two parallel grooves of the silicon base substrate. Then, the XY-microstage with holes is mounted on the Z-microstages with pillars. The pillars of Z-microstages are inserted into the holes of the XY-microstage and fixed by the conductive glue (Fig. 3). It is demonstrated that the assembled XYZ-microstage can achieve large displacements of 25.2 μm in X direction, 20.4 μm in Y direction and 58.5 μm in Z direction.

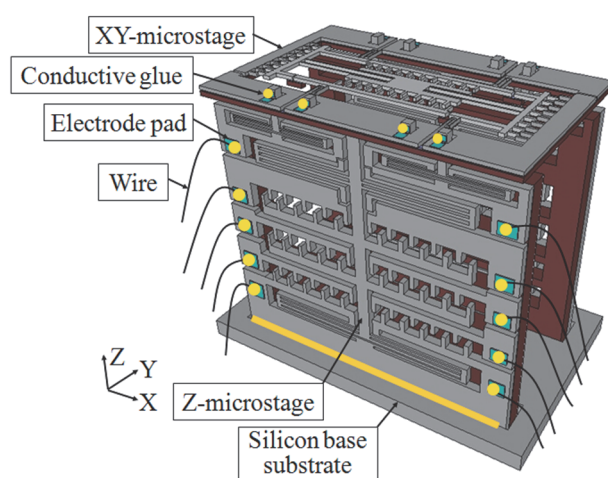


Fig. 1. Schematic view of the proposed XYZ-microstage.

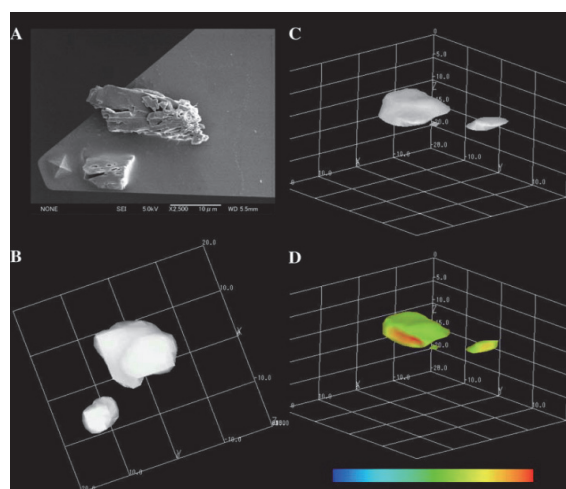


Fig. 2. 3D image from MRFM

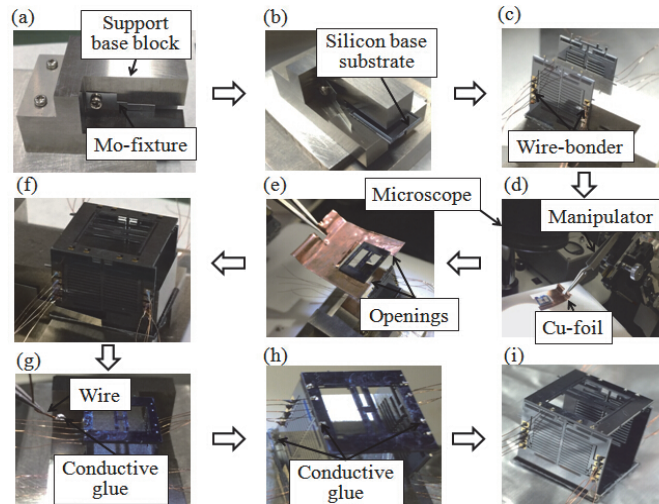


Fig. 3. Fabrication process of the XYZ-microstage based on assembling technology.

- [1] O. Klein et al., Eur. Phys. J. B, vol. 17, pp. 57-68 (2000)
- [2] S. Tsuji et al., Journal of Magnetic Resonance, 167, pp. 211-220 (2004)
- [3] X. Liu et al., J. Micromech. Microeng., vol. 17, no. 9, pp. 1796-1802 (2007)
- [4] K. Laszczyk et al., SENSOR ACTUAT A-PHYS., vol. 163, pp. 255-265 (2010)

平成26年度の研究業績

【研究内容】

Design, Fabrication and test of a novel assembled comb-drive XYZ-microstage that produces highly decoupled motions into X-, Y-, and Z-directions for the 3D scanning stage of MRFM.

【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, “ASSEMBLED COMB-DRIVE XYZ-MICROSTAGE WITH LARGE DISPLACEMENTS FOR LOW TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEMS”, Proc. Int. Conf. Microelectromechanical systems, Estoril, PORTUGAL, pp. 14-17, 18-22 Jan., 2015.
2. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Chip-Level Microassembly of XYZ-Microstage with Large Displacements”, IEEEJ transactions on sensors and micromachines (Accepted)

【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, “MICROSTAGE DRIVEN BY COMB-DRIVE ACTUATORS FOR LOW TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEMS”, The 7th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT2014), E-T08-0101, Daegu, Korea, Jul., 2014.
2. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “Assembled comb-drive XYZ-microstage integrated with capacitive displacement sensor for low temperature measurement systems”, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 島根県松江市, 2014年10月.
3. Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, “ASSEMBLED COMB-DRIVE XYZ-MICROSTAGE WITH LARGE DISPLACEMENTS FOR LOW TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEMS”, Microelectromechanical systems 2015, Estoril, PORTUGAL, Jan., 2015.

【受賞・特許等】

受賞日：2014年10月22日

受賞名：31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム優秀発表の奨励賞

組織名：日本電気学会E部門



氏名 山口 賢悟

所属 工学研究科バイオロボティクス専攻・D2

研究課題

汎用的かつ低コストなロボットハンドの実現
-把持機構と吸着機能の融合-

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、これまで開発したロボットハンドの指に劣駆動機構を加えることで、より汎用的なロボットハンドの開発を行った。劣駆動とは、自由度の数よりアクチュエータの数が少ないシステムのことである。適切に設計した劣駆動機構を備えたロボットハンドは、センサを用いることなく関節角度を把持物体に合わせることが可能で、アクチュエータの数も抑えることができる。このため、劣駆動機構を採用することで、より汎用的かつ低コストなロボットハンドを実現することができる。

一般的な劣駆動ロボットハンドは日常用品のハンドリングを目的としている。本研究では、工場で行っている作業の自動化を目的に、新たな劣駆動機構を提案する。提案する機構は、劣駆動による握力把握（指と掌を用いた、握るような把持形態）に加えて、指先を平行に開閉することによる精密把握（指先を用いた、摘まむような把持形態）を実現することができる。また、近年盛んに製品化されている双腕ロボットに用いることを想定し、指を伸ばすことにより掌と指全体を利用したハンドリングも実現することができる。

提案する劣駆動機構のリンク構造を図1に示す。この構造は、5節リンクのリンク長を調整し、平行4節リンクとして用いることで、指先の平行開閉を実現している。また、冗長自由度をストップとバネによって拘束することにより、把持の際に指を把持物体に合わせて曲げることができる。さらに、リンク構造とストップにより、指の回転動作と平行開閉動作を自動的に切り替えることができる。指の開閉の様子を図2に示す。

開発したロボットハンドを図3に示す。2台のモータを内蔵し、3本の指の開閉と、2本の指の掌周りの回転を行うことができる。このロボットハンドをマニピュレータに搭載し、工具を把持した実験の様子を図4に示す。物体の把持の際は、ロボットハンドのモータを一定トルクで回転させている。この単純な制御にもかかわらず、劣駆動機構によって、異なるサイズの物体の握力把持を実現することができている。

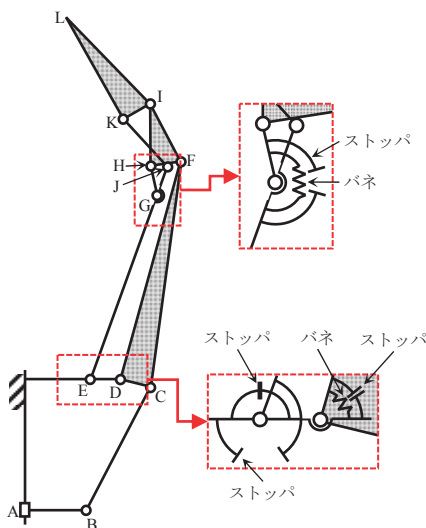


図1 提案する劣駆動リンク

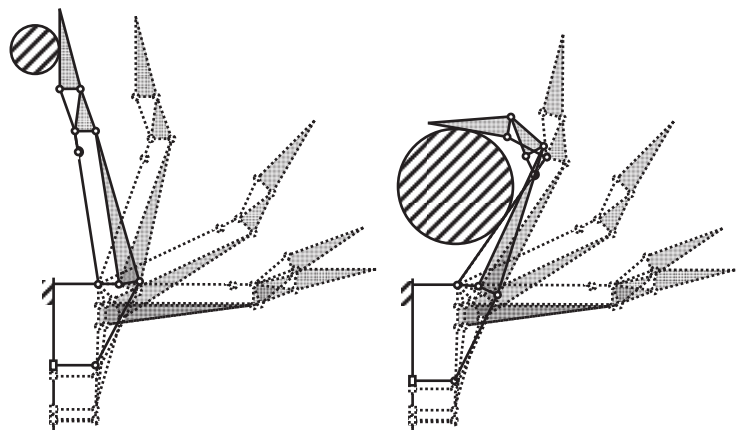


図2 リンクの開閉動作

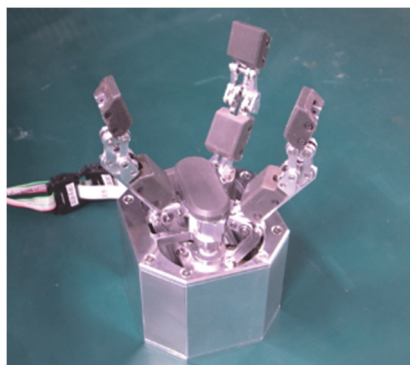


図3 劣駆動ロボットハンド

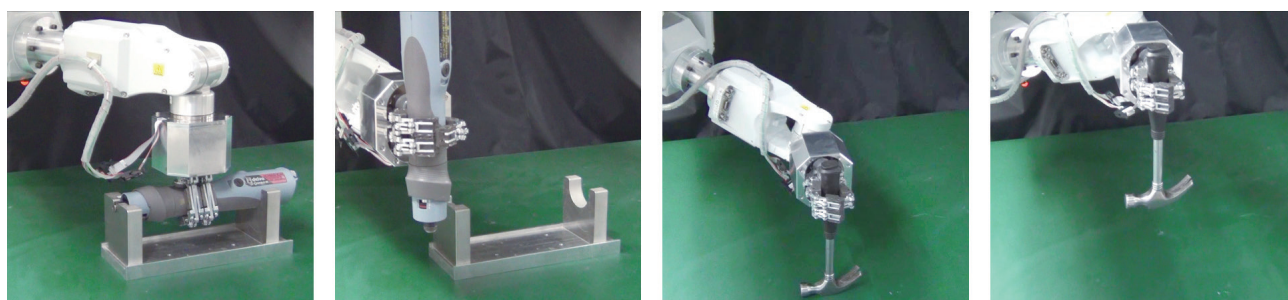


図4 工具の把持の様子

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. ロボットハンドの劣駆動リンクの考案
指先を平行開閉することによる精密把持と、劣駆動による把持物体に合わせた握力把持を、1台のモーターで実現する劣駆動リンク機構を考案した。
2. 劣駆動ロボットハンドの試作
提案する劣駆動リンク機構を有するロボットハンドを製作し、実験によりその有効性を示した。

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 山口賢悟、平田泰久、小菅一弘
小型部品ハンドリングデバイスの開発
第6報：位置・姿勢誤差を有する部品の把持手法の提案
日本ロボット学会学術講演会、2014年9月
2. 山口賢悟、平田泰久、小菅一弘
吸着機能を有するロボットハンドによる物体ハンドリング実験
日本ロボット学会学術講演会、2014年9月



氏名 山本 雄大

所属 工学研究科 航空宇宙工学専攻・D1

研究課題

自己給電・デジタル制御システムによる圧電振動発電

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

私たちの生活する環境中には振動があふれている。自動車や家電が発生する振動や、自然の風や波が励起する振動などである。振動エネルギーを利用した発電技術は、エネルギーの無駄をなくす意味や、電力網から隔離された環境（移動体や宇宙、海底など）における電力源、また災害時における非常用電源として注目を集めている。私たちの開発する「自己給電・デジタル制御システムによる圧電振動発電」の技術は、振動発電デバイスにマイクロプロセッサを用いた高度なデジタル制御を適用することで、効率良く且つ賢く振動エネルギーを回収し利用することを目的としている。加えて、一次電池などを用いず、振動から得たエネルギーのみを使ってプロセッサを駆動（自己給電）することで、外部電源を必要としない独立した発電システムを構築している。

本年度の研究取り組みとして、主に自己給電・デジタル制御発電システムの多自由度振動への拡張を行った。昨年までの研究は、主に1自由度の振動を対象としており、多モードの振動が混在するような複雑な振動は取り扱わなかった。当研究分野においても、構造振動を単振動と仮定した研究は多く見受けられるが、多自由度を対象とする発電システムは少ない。しかし、実際に自然界に存在する振動は、複数の振動モードをもった多自由度振動であり、振動発電デバイスにはそのような複雑な振動から効率良くエネルギーを回収することが求められる。私たちの開発する発電システムではデジタル制御を用いるため、複雑な振動に対し「モード解析」を行うことが可能であり、制御対象とするモードを選択した上で効率的な制御を行うことができる。

多自由度化にあたり、実験対象構造物を図1に示すような2自由度のバネマス構造に変更した。この構造物は2つのマスを有し、上のマスは圧電素子を介してプラットフォームに吊下げられており、下のマスはバネを介して上のマスに吊下げられている。したがって、鉛直軸上においてこの構造物は2自由度であり、加振器からの入力によって1次振動モードと2次振動モードが混成した振動をとる。我々の振動発電システムでは、圧電素子に接続したハーベスティング回路内のON・OFFスイッチを開閉することで、構造物の振動に対応した効率的な発電を行う。構造変位の計測、モード解析、スイッチ制御の判断は、全てハーベスタ回路上のマイクロプロセッサが行い、その駆動電力は振動エネルギーを元としている。我々は、2自由度実験構造物の諸パラメータを元に制御プログラムを作製し、プロセッサに書き込んだ。1次振動モードと2次振動モードに対する制御量の重みづけは1:1とした。

振動発電において、構造物の振幅に対する発生電圧の高さは、発電性能の1つの指標と見ることができる。2自由度構造物を、2つの振動モードの強度比を変えた入力によって加振し、構造振幅に対する発生電圧の高さを比較することで、入力の振動モード比に対する発電性能の評価を行った。また従来の振動発電手法として、スイッチによる制御を行わないハーベスタ回路をスタンダードハーベスタとし同様の実験において、自己給電デジタル制御発電システムとの比較を行った。入力の振動モード比を表1に、実験の結果を図2に示す。図2よりスタンダードハーベスタでは、どのような振動モー

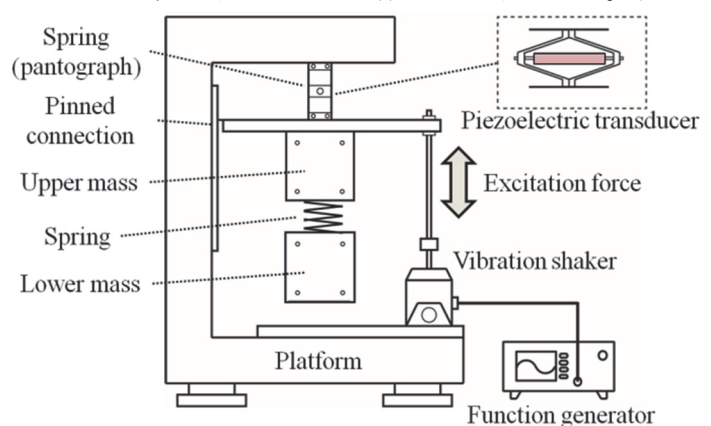


図1 2自由度実験構造物

ド比の入力においても、構造物の振動振幅に対する発生電圧は、ほぼ一定である。一方、自己給電デジタル制御発電システムでは、構造物の振動振幅に対する発生電圧は、入力振動モード比により異なり、1次振動モードのみ又は2次振動モードのみの条件で発生電圧が高くなることがわかる。しかし、どの条件においても、スタンダードハーベスタよりも高い電圧を発生しており、スイッチ制御による発電性能の向上が確認できる。

以上の実験結果より、自己給電・デジタル制御発電システムが多自由度振動に対して効果的に制御を行い、発電能力を向上させられる事が確かめられた。今後の研究展開として、プロセッサプログラムにおいて各振動モードに対する制御量の重み付けを変更する事などにより、1次モードと2次モードが混成する条件における発電効率の向上を見込んでいる。

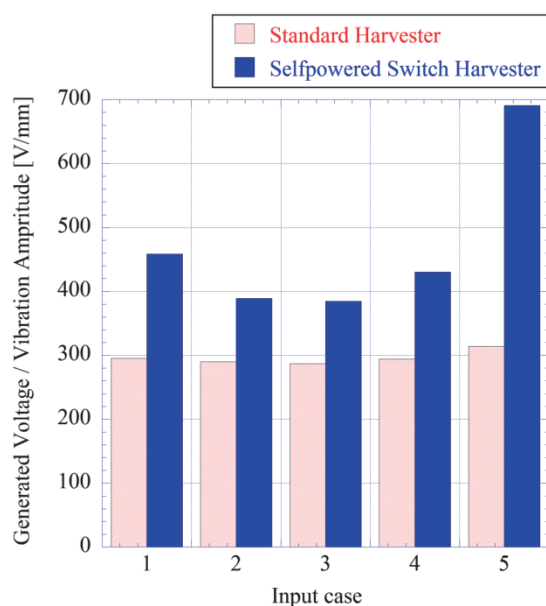


図2 各入力振動モード比に対する発生電圧の比較

表1 入力の振動モード比率

Input case	Input modal ratio
	1st mode : 2nd mode
1	1 : 0
2	1 : 0.5
3	1 : 1
4	0.5 : 1
5	0 : 1

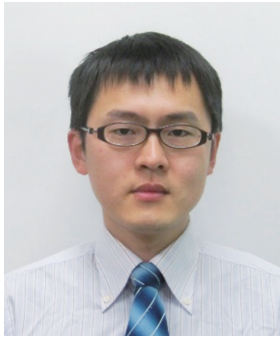
平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 自己給電・デジタル制御発電システムの多自由度振動への適用
2. 2自由度振動構造物における自己給電・デジタル制御発電システムの発電能力評価
3. 振動発電シミュレーションプログラムの構築と制御パラメータの設計

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Yuta Yamamoto and Kanjuro Makihara
Comprehensive Assessment of Smart Energy-Harvesting from Multimodal Vibrations
The 12th International Conference on Motion and Vibration Control
Sapporo, Japan (2014.8.3-7)
2. Yuta Yamamoto, Kenji Yoshimizu and Kanjuro Makihara
Smart Energy-Harvesting from Various Vibrations with Digital Regulation Approach
The 12th International Conference on Motion and Vibration Control
Miyagi, Japan (2014.10.8-10)
3. Yuta Yamamoto, Kenji Yoshimizu and Kanjuro Makihara
Synthetic Assessment of Self-Powered Energy-Harvesting including Robustness Evaluation
Journals of the Japan Society of Mechanical Engineers
(査読中)



氏名 楊 猛 (Yang Meng)

所属 工学研究科ナノメカニクス専攻・D2

研究課題

高機能カーボン系材料を応用した次世代超高感度ひずみセンサの開発

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本年度は、グラフェン材料を用いた高感度ひずみセンサの設計指針を確立することを目標として、第一原理計算とタイトバインディング近似モデルを併用し、グラフェンの基本物性を支配するシートサイズ、エッジ形状、層数などの構造要素を考慮し、三次元ひずみが負荷される時、グラフェンシート電気伝導特性の変化を予測することを試みた。図1に示すように、折変形や曲げ変形が負荷されるグラフェンの状態を模擬して、解析モデルを作成した。図1 (a)に示す N_s と N_d はそれぞれグラフェンひずみ領域に含まれる単位胞の数、幅方向にあるカーボンダイマーの数である。第一原理計算を用いて図1 (b)の曲げ変形と図1 (c)の折り変形が負荷されたAGNRの電子バンド構造を検討した。図2 (a)に示すように、曲げ変形量の増加（二面角の増加）によらず最高被占軌道(HOMO)のエネルギーは変化せず一定値を保っていた。一方、二面角が一定の臨界値を超えると、図2 (b)に示すように第二最低空軌道(2nd LUMO)のエネルギーが低下し、バンドギャップの急激な減少が観察された。分子軌道の空間分布分析より2nd LUMOは π 軌道が混成した状態でシート内側（曲げ凹面）に局在化しており、曲げ変形に起因する軌道混成によりAGNRの電子バンド構造が変化し、電気伝導性が大きく変化することを明らかにした。

また、グラフェン電子構造・電気伝導性のひずみ応答特性及びその構造支配因子(層数、幅、長さなど)の影響を実験的に研究した。図3に示すように、 SiO_2/Si 基板上に転写したグラフェンシートを用いて、電子ビームリソグラフィプロセス及び酸素プラズマエッチングにより、様々な構造要素(層数、幅、長さ)を有するグラフェンパターンを作製した。金属蒸着により電極を形成した後、フレキシブルなポリジメチルシロキサン(PDMS)基板上にグラフェンデバイスを転写し実験用ひずみセンサの作製に成功した。作製したセンサに折変形と曲げ変形を負荷し、グラフェンの電気抵抗の変化を測定することで、グラフェンの電気伝導特性の三次元ひずみ依存性を実証し、ひずみ応答特性の各構造支配要素依存性も調べた。

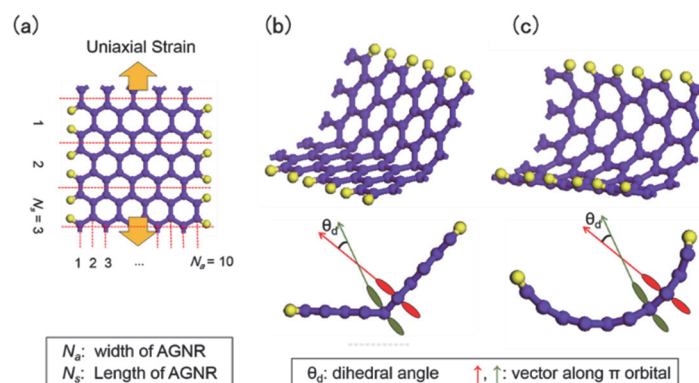


図1 軸方向ひずみ(a), 曲げ変形(b), 折変形(c)が負荷されたグラフェンの解析モデル

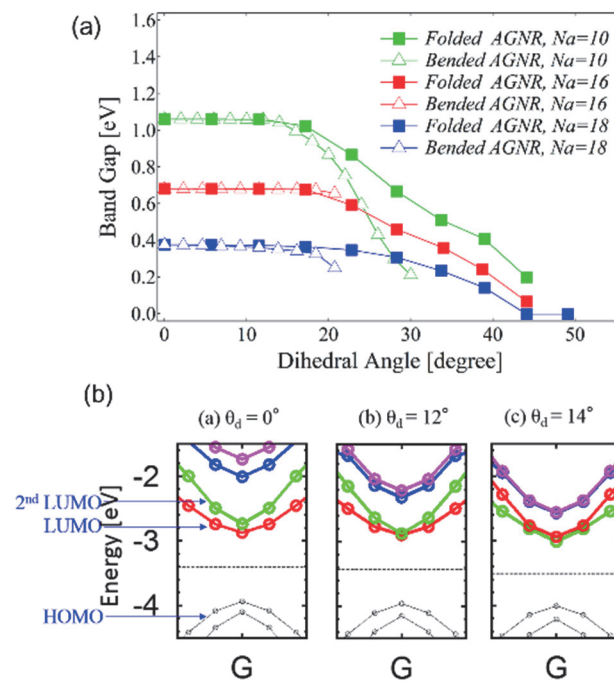


図2 (a)曲げ変形と折変形が付加されたアームチェアグラフェンナノリボンバンドギャップの二面角依存性
(b)折変形したアームチェアグラフェンナノリボン電子バンド構造の二面角依存性

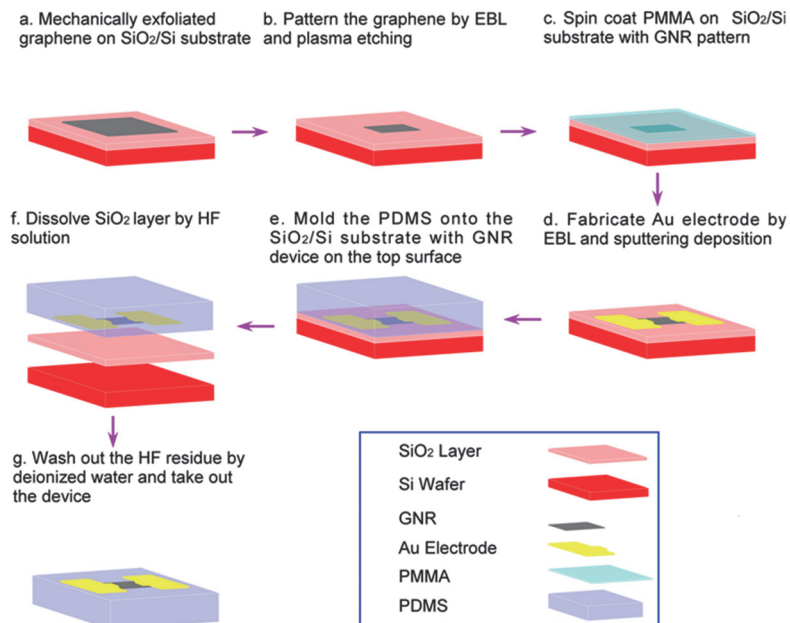


図3 グラフェンひずみセンサの作製プロセス

平成26年度の研究業績

【研究内容】

1. 三次元歪負荷下のグラフェンの電子構造・電気伝導特性の歪み感受性の構造支配因子の解析
グラフェンひずみセンサの感度の構造支配因子の究明を目標として、第一原理とタイトバインディング近似グリーン関数法を併用し、グラフェンの基本物性を支配するシートサイズ、エッジ形状、層数などの構造要素を考慮し、引張ひずみが負荷される時、グラフェンの電子バンド構造と電気伝導特性の構造要素依存性を解析的に検討している。
2. グラフェン電子バンド構造・電気伝導特性のひずみ依存性の実験的検証
グラフェンナノ材料を用いた高感度ひずみセンサの開発を目的として、フレキシブルのPDMS基板上にグラフェンひずみセンサを作製し。弯曲変形したグラフェンひずみセンサの電気特性を評価することにより。グラフェン電子構造・電気伝導性のひずみ応答特性及びその構造支配因子(層数、幅、長さなど)の影響を実験的に研究し、そのひずみ応答特性に優れたセンサ構造の最適化設計を行っている。

【査読論文（査読付き国際会議論文集を含む）】

1. Meng Yang, Masato Ohnishi, Ken Suzuki, and Hideo Miura, “The effect of strain on the electronic properties of graphene nanoribbons”, Proc. of ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, No. 39635, (2014).
2. Masato Ohnishi, Meng Yang, Ken Suzuki, and Hideo Miura, “Change in spatial distribution of state densities of carbon nanotubes under anisotropic strain field”, Proc. of ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, No. 39470, (2014).
3. S. Takabayashi, M. Yang, S. Ogawa, H. Hayashi, R. Jesko, T. Otsuji, and Y. Takakuwa, 'Relationship between the Structure and Electrical Characteristics of Diamond-Like Carbon Films', Journal Of Applied Physics, 116(9), 093507 (2014).
4. Susumu Takabayashi, Meng Yang, Takanori Eto, Hiroyuki Hayashi, Shuichi Ogawa, Taiichi Otsuji, and Yuji Takakuwa, 'Controlled Oxygen-Doped Diamond-Like Carbon Film Synthesized by Photoemission-Assisted Plasma', Diamond and Related Materials 53 (2015) 11-17.

【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. Journal of Applied Physics
2. Diamond and Related Materials

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 楊猛, 大西正人, 鈴木研, 三浦英生, 「ひずみ負荷によるグラフェン電子物性の変化」, 日本機械学会M&M2013 OS0204, 福島大学, 2014年7月.
2. 楊猛, 大西正人, 鈴木研, 三浦英生, 「グラフェンナノリボン電気特性に及ぼすひずみの影響」, 本機械学会第27回計算力学講演会 (CMD2014), CD-ROM, 0109, (岩手大学工学部, 岩手県盛岡市, 2014年11月22日～24日)
3. Meng Yang, Masato Ohnishi, Ken Suzuki, and Hideo Miura, “Strain-induced Change of Electronic Conductivity of Graphene Sheets and Nano-Ribbon”, The 1st INSA de Lyon-Tohoku Univ. Mini-Workshop, - International Workshop on Security Science and Engineering of Advanced Energy Systems, INSA Lyon, Lyon, France, (February, 2014).
4. Meng Yang, Masato Ohnishi, Ken Suzuki and Hideo Miura, “THE EFFECT OF STRAIN ON THE ELECTRONIC PROPERTIES OF GRAPHENE NANORIBBONS”, ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition(IMECE2014), CD-ROM, IMECE2014-39635, pp.1-6, (Palais des congrès de Montréal, Montreal, Canada, November 14-20, 2014)
5. (Poster Presentation)Meng Yang, Masato Ohnishi, Ken Suzuki, Hideo Miura, “Development of Graphene-Based Flexible Strain Sensors”, ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition(IMECE2014), (Palais des congrès de Montréal, Montreal, Canada, November 14-20, 2014)



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・D1

研究課題

乱流の初生過程に関する研究

平成26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。本研究では、平板境界層中に置いた物体列の下流にストリーク構造を形成し、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。

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 値を基に定義し、そのしきい値を変えて時々刻々の体積を算出した。 Q 値のしきい値の大きな回転の強い渦は、噴流の噴射直後に減衰する一方で、時刻 $t=155$ を境に増加に転じている。本研究ではこの時刻を乱流の初生時刻とし、渦構造の体積が増加する理由を考察するため、渦が伸長されている領域の体積が時間的にどのように変化しているかを調べた。図2にその結果を示す。渦の伸長の強さは渦度ベクトルとひずみ速度テンソルの第1固有値に属する固有ベクトルの内積 I によって評価し、そのしきい値を変えて等値面内部の体積の時間変化をプロットしている。図2より、渦の体積が増加に転じる少し前に、渦の伸長が強く起こっている領域も増加に転じることが分かった。実際に伸長の強い領域付近ではその後の時刻で強い渦の体積が増加している様子も確認できたことから、渦の伸長が起こると相前後して渦構造が強化されることが示唆された。

次に $t=155$ における渦構造の内、どの部分で乱流が初生するのかをより局所的に判定することを目的として、図1に示す乱流の初生時刻の前後の時刻 $t=50$, $t=300$ における流れ場を取り上げ、それら2つを見分けることを試みた。層流と乱流ではその変動に含まれる波数に違いがあると考え、局所的な位置における波数情報を検知するために、Wavelet変換を用いた。図3に $t=50$, $t=300$ における渦構造を示す。色づけは流れ方向の渦度変動 ω'_x に対応している。 $t=50$ では噴流によって形成された単純な渦のみが存在するのに対し、 $t=300$ では渦が複雑に絡み合った乱流状態となっている。図3に示した流れ場における $y=3$, $z=0$ 線上での速度変動波(上図)とそのWavelet変換結果(下図)を図4に示す。Wavelet変換結果は横軸に空間 x を、縦軸に波数 α をとっている。 $t=50$ では変動を構成する波数帯域が狭い範囲であるのに対し、 $t=300$ では波数帯域が広範囲にわたっている。ここから波数帯域の広さを基に局所的な乱流の判定が可能と考えられた。しかし $y=4.5$, $z=1$ における同様のWavelet変換を行ったところ、波数帯域に差は見られなかった。以上より、Wavelet変換を用いた局所的な乱流領域の判定はできなかった。

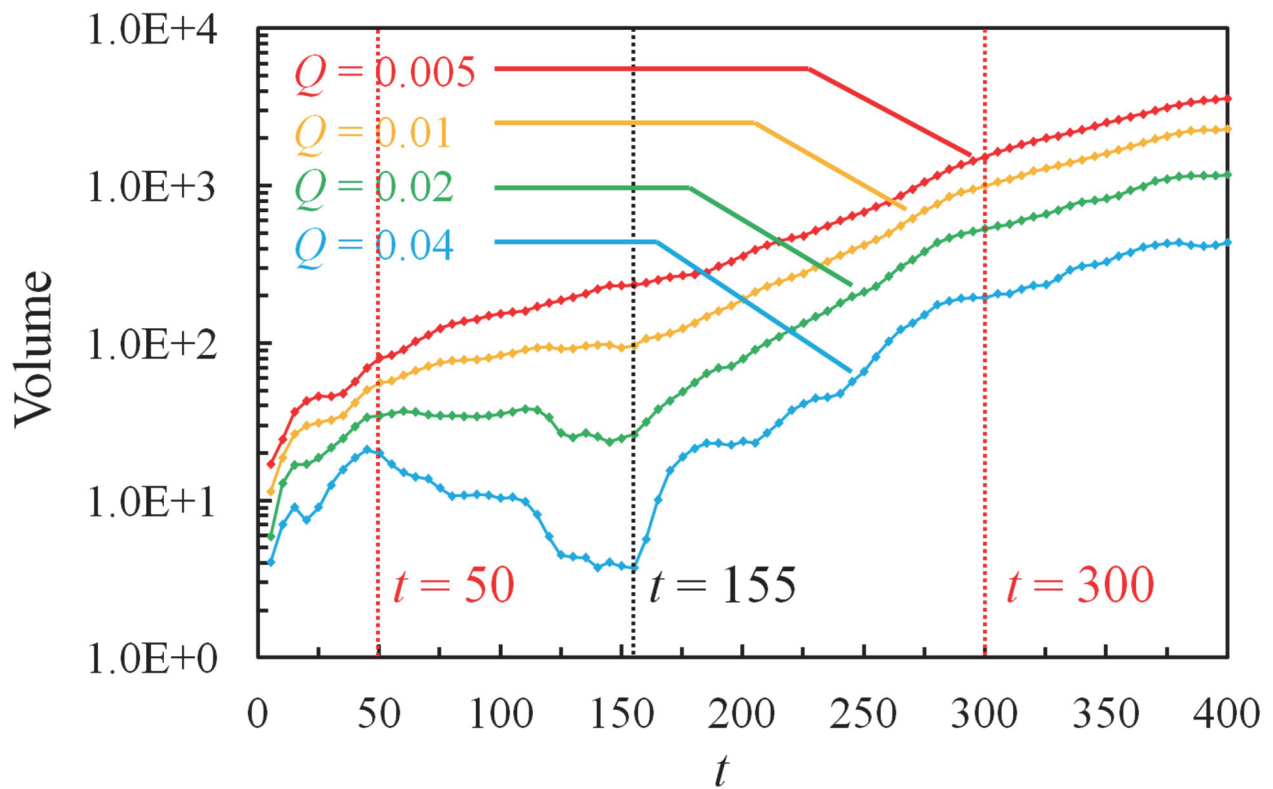


図1 渦構造の体積の時間変化

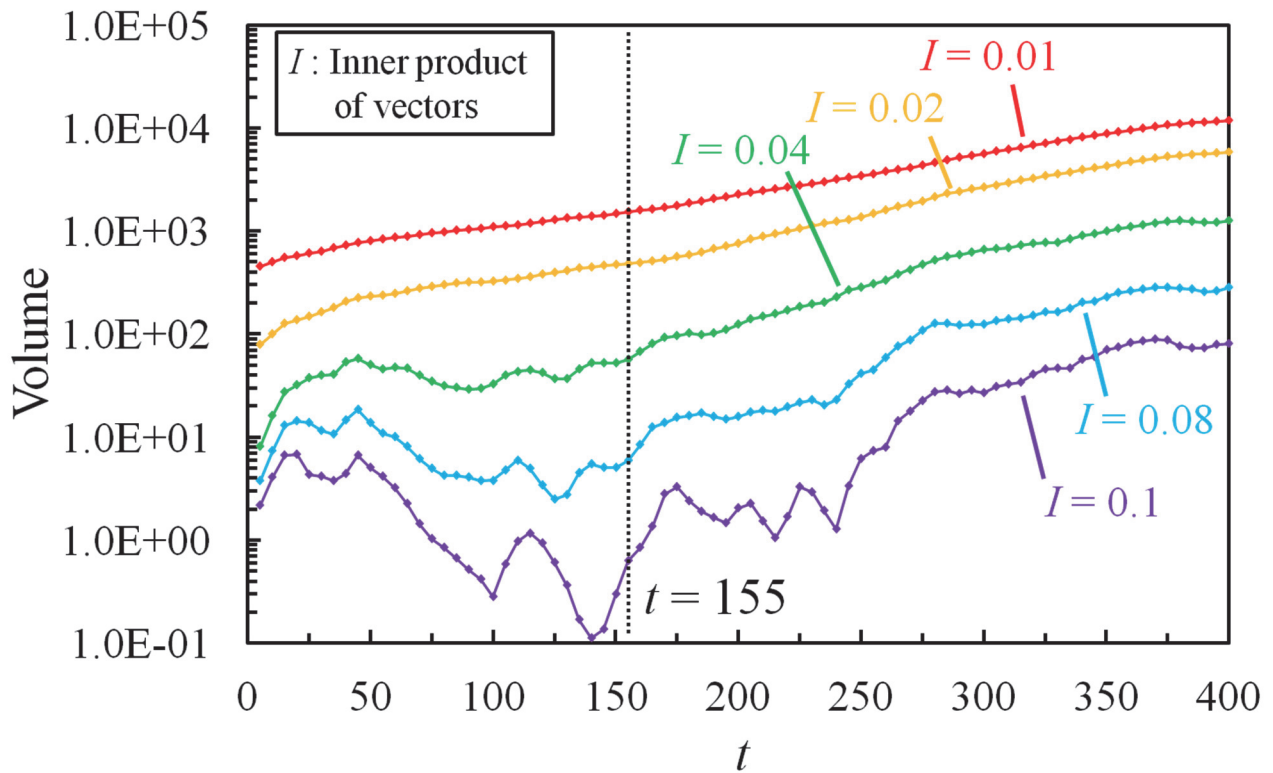


図2 渦の伸長領域の体積の時間変化

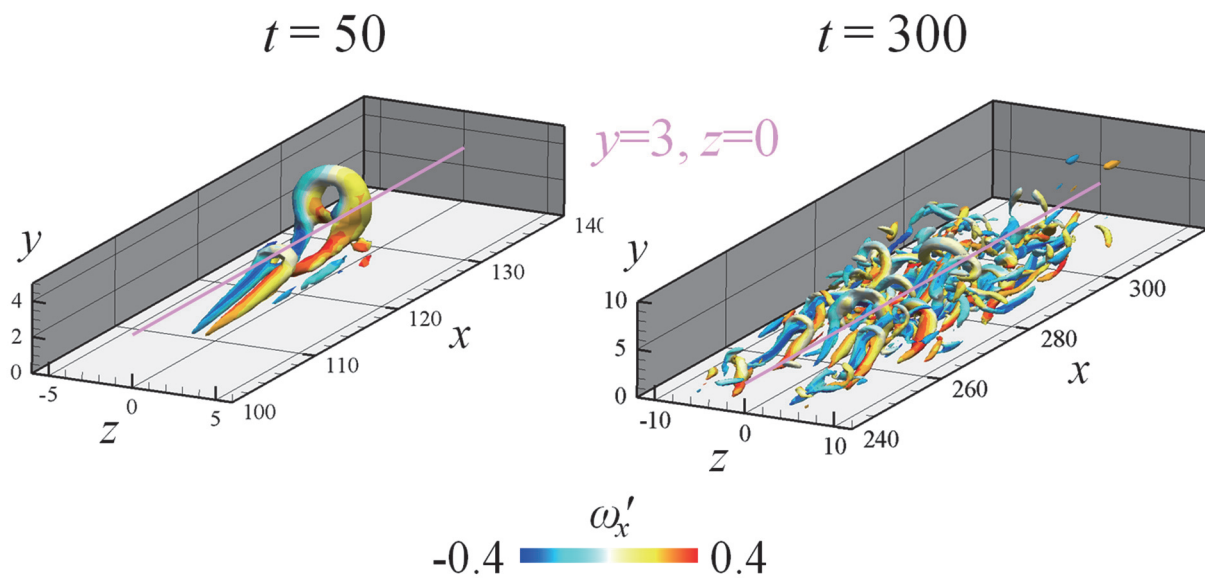


図3 $t=50, t=300$ における渦構造

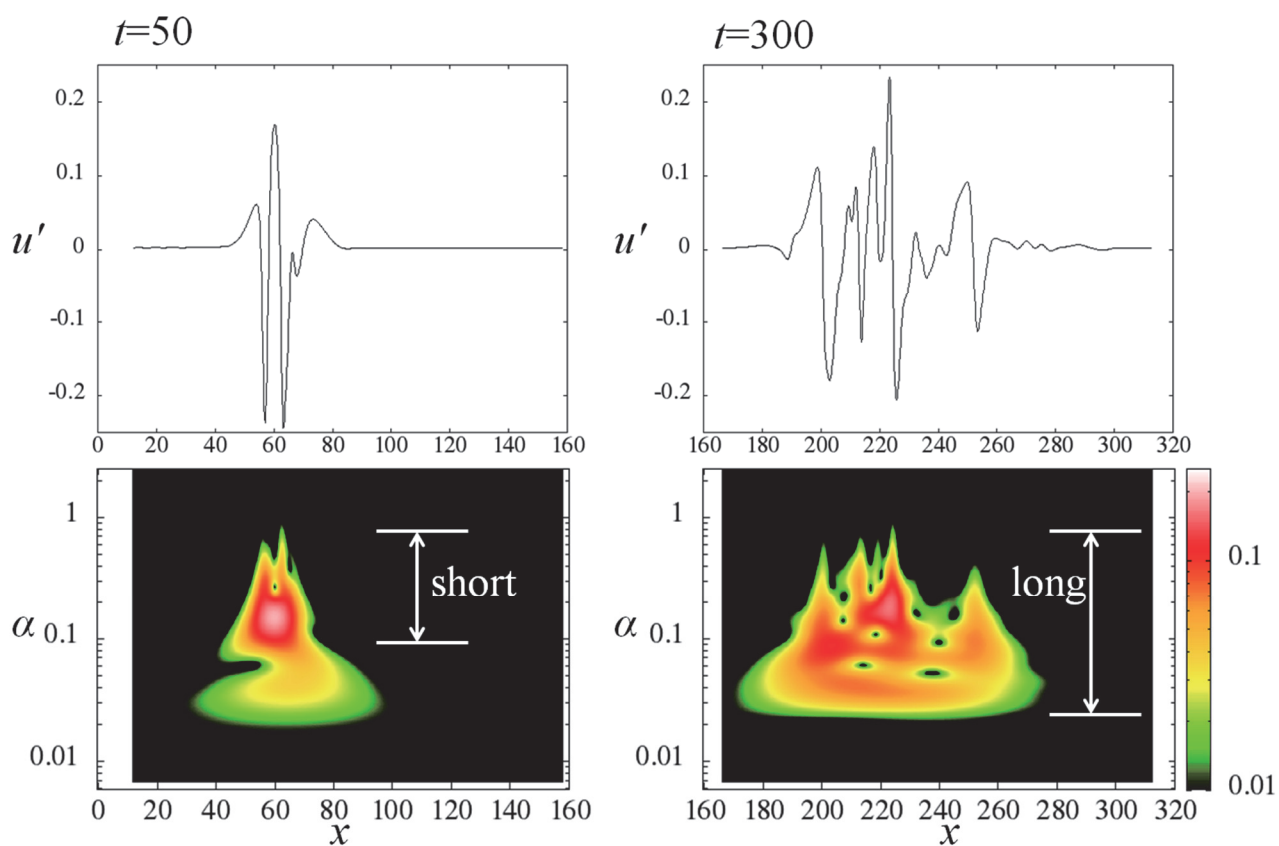


図4 $y=3, z=0$ における速度変動波形とそのWavelet変換結果

[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.

平成26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）

- ・ 国際会議派遣採択
- ・ 国際インターンシップ派遣採択

平成26年度の研究業績

【研究内容】

- ・ 遷移境界層中における渦構造の増加
噴流によって直接的に境界層内に形成された渦構造は時間の経過と共に減衰し、ある時刻からその体積は増加に転じる。その理由を探るために渦の伸長が強く起こっている領域の体積の時間変化を取ったところ、渦の伸長が起こるのと相前後して強い渦ができることが示唆された。
- ・ Wavelet変換を用いた局所的な乱流領域の評価
局所的な位置における波数が占める帯域の広さに着目して解析を行ったが、速度変動波形をとる平板からの高さ及びスパン方向位置によって特性が変化し、層流領域と乱流領域を区別する方法とはならなかった。

【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,
Wavelet-based identification of localized turbulent regions in a transitional boundary layer,
The 67th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (DFD),
San Francisco, USA, (November 23-25, 2014), p.68.
2. 国際学会
Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi,
Identification of Local Turbulent Regions in a Transitional Boundary Layer Using Wavelet
Transformation,
Eleventh International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, (October 8-10, 2014),
p.434-435, USB Memory.
3. 国内学会
吉川 穰, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐,
遷移境界層中の乱流初生領域における渦構造,
第92期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, (2014-10), GS42, USBメモリ.

氏名 湯口 雄大



所属 工学研究科航空宇宙工学専攻・D1

研究課題

不整地かつ微小重力の環境に適応する小惑星探査ロボットの把持移動技術の確立

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

本研究では、ロッククライミングのように小惑星表面を掴みながら移動する、小惑星探査ロボットの開発を目指している。本年度は、(1)小惑星表面の把持に有用なロボットの手先形状の選定、及び(2)微小重力環境に適した移動制御法について検討した。

まず、(1)では、手先と小惑星表面との間の最大静止摩擦係数を指標とすることにより、把持の安定性を定量的に評価した。手先形状として、円錐・球面・平面の3種類の形状を想定し、各形状の手先と小惑星表面との摩擦係数について、摩擦理論を用いて定式化した。次に、試験片を製作し、模擬小惑星表面(以下、模擬表面)との摩擦係数計測実験を行った。なお、模擬表面には、粗さが規格化された布ヤスリとアルミナ板を使用し、表面粗さの影響も調べた。その結果、円錐形状の最大静止摩擦係数が5.04と最も大きく、一番滑らかなアルミナ板でも1以上を計測した。また、理論値は、滑り速度に対する動摩擦係数の減少傾向を上手く表現していることを確認した。その後、試験片を装着した把持機構を用いて二次元微小重力環境下での模擬表面把持実験を行い、把持可能な最大開き角 θ を調べた(図1)。その結果、円錐形状は156度まで把持することができ、表面の僅かな傾斜を利用した把持ができることを明らかにした。さらに、手先が滑りを生じない条件式を、把持機構の重心に作用する力とモーメントの平衡式に代入することで、把持力の静的なつり合い条件を定式化した。そして、この式を基に把持可能な最大開き角 θ を算出した。その結果、把持実験との誤差が全形状において10%以内であり、ほぼ一致することを確認した(表1)。したがって、ロボットの手先形状について、円錐形状の実用性を理論と実験の双方から明らかにした。

次に、(2)では、ロボットの歩行動作に着目した。小惑星は微小重力環境であるため、移動の際には、遊脚の動作が支持脚に与える反動の影響が、地球上よりも遥かに大きくなる。そのため、この反動が把持機構の限界把持力を上回ると、把持機構が小惑星表面から離れてしまう。そこで、ロボットの冗長自由度を利用した無反動軌道を生成することにより、支持脚へ反動を与えない歩行動作を実現した。方法として、まず小惑星表面を把持しているリンクをベース、それ以外のリンクをマニピュレータとみなす。次に、ベースの慣性行列、及びベースとマニピュレータとの干渉慣性行列を用いて、ロボット全体の運動量・角運動量を定式化する。この式から、ロボット全体の初期運動量・角運動量を維持するような拘束条件を与えることにより、無反動軌道上での遊脚動作が可能となる。この制御モデルを、遊脚と支持脚が入れ替わる度に切り替えることにより、連続した無反動歩行ができる。制御則の有効性は、シミュレーションにより検証した。なお、条件として図2におけるx軸方向を無反動とした。その結果、図2のアニメーションと図3の支持脚にかかる力のグラフの通り、x軸方向に対して力をほとんど生じさせることなく、ロボットを移動させることができた。このことから、制御則の有効性を確認した。

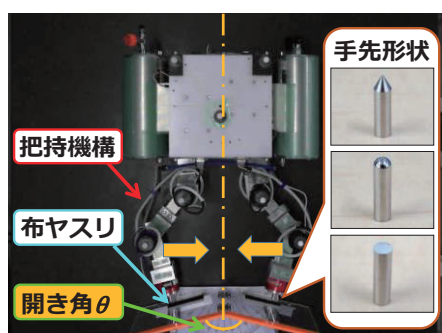


図1 模擬小惑星表面把持実験

表1 最大開き角の理論値及び実験値

	Theory	Experiment	Error
Cone	79°	78°	1.3%
Hemisphere	63°	57°	9.5%
Cylinder (thick)	66°	61°	7.6%
Cylinder (thin)	72°	65°	9.7%

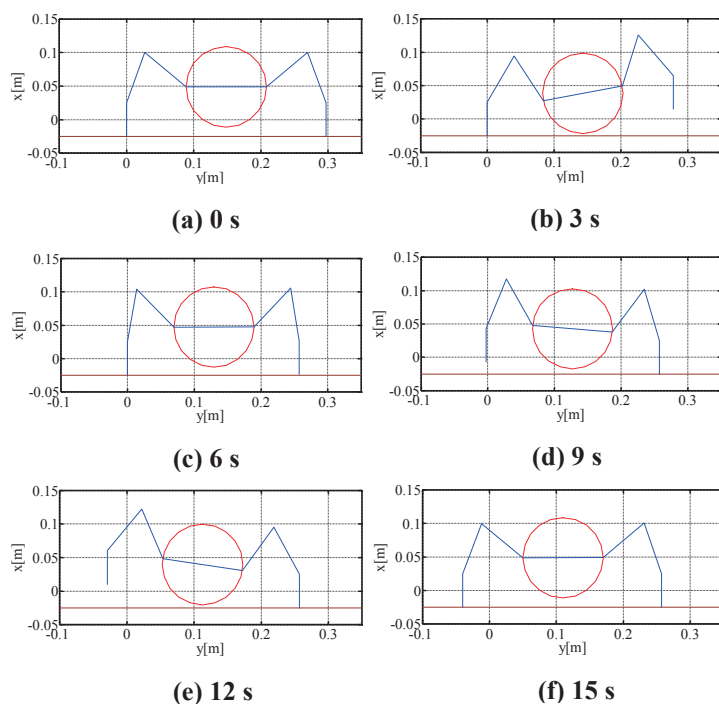


図2 小惑星探査ロボットの移動の様子

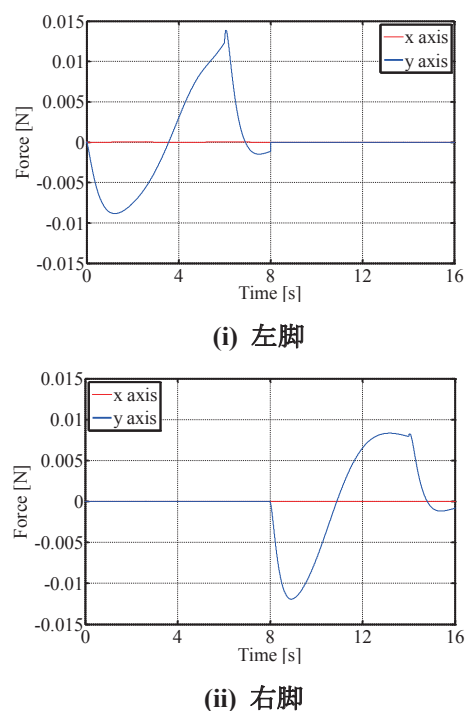


図3 移動時に支持脚に発生する力

平成26年度の研究業績

【査読論文（査読付き国際会議論文を含む）】

1. Yudai Yuguchi, Warley F. R. Ribeiro, Kenji Nagaoka, 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. (Accepted)
2. Yudai Yuguchi, Warley F. R. Ribeiro, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida, “Experimental Evaluation of Gripping Characteristics Based on Frictional Theory for Ground Grip Locomotive Robot on an Asteroid”, in Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Seattle, WA, USA, May, 2015. (Accepted)
3. Ryo Yoshimitsu, Yudai Yuguchi, Akinori Kobayashi, Riku Takano, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida, Satoko Abiko, Hiroki Nakanishi, Mitsushige Oda, Hiroshi Ueno, “Dynamic Simulator for HTV Capture with Space Station Remote Manipulator System”, in Proc. the 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS), Montreal, Canada, June, 2014, Session 9b (CD-ROM).

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. 湯口雄大, 永岡健司, 吉田和哉, “小天体表面把持移動ロボットのための摩擦理論に基づく把持特性の実験的評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2014, 富山, 2014年5月.

【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26年度優秀研究奨励プログラム

期間：平成26年度

氏名 張 明子 (Mingzi Zhang)



所属 工学研究科 バイオロボティクス専攻・D2

研究課題

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

平成26年度における本卓越拠点に対する取り組み

Flow diverter (FD) intervention is becoming increasingly popular for treatments of cerebral aneurysms (CAs) while post-stenting complications like delayed rupture and post-stenting stenosis are frequently reported. Structural optimizations of FDs performed by previous works usually use intra-aneurysmal average velocity (AAV) as the objective function, whereas intra-aneurysmal maximum velocity (AMV) is also a sensitive parameter to evaluate the post-stenting hemodynamic such as thrombosis phenomena or stenosis. To reduce the risk of involving in such complications, during this year's study, we introduced a design optimization method for the practically applied 3D helix-like FD wire structure. By using either AMV or AAV, this method is able to improve the device flow-diverting performance with maintaining its original porosity and helix-like structure.

The optimization process was realized automatically by the combination of computational fluid dynamics (CFD) and simulated annealing (SA). Random modification was performed at each stage to slightly alter the starting phase of an arbitrarily selected sub-wire, followed by a CFD simulation to achieve its corresponding hemodynamic behaviours. We employed lattice Boltzmann method (LBM) as fluid solver, and AMV as the objective function of SA procedure to evaluate the modification outcomes.

This method was applied to two idealized aneurysm geometries: the Straight(S) Model and the Curve(C) Model.(Fig. 1) 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.

【学術雑誌・専門書等（査読あり）】

1. ZHAO Xi, LIU Youjun, DING Jinli, ZHANG Mingzi, FU Wenyu, BAI Fan, REN Xiaochen and QIAO Aike. Multiscale Study on Hemodynamics in Patient-Specific Thoracic Aortic Coarctation. Statistical Atlases and Computational Models of the Heart. Imaging and Modelling Challenges Lecture Notes in Computer Science, 2014, Vol. 8330: 57-64.
2. MA Liancai, LIU Youjun, ZHAO Xi, REN Xiaochen, BAI Fan, DING Jinli, ZHANG Mingzi, WANG Wenxin, XIE Jinsheng, ZHANG Hao, ZHAO Zhou and HAN Hua. Hemodynamic Influence of Different Pulmonary Stenosis Degree in Glenn Procedure: A Numerical Study. Advances in Mechanical Engineering, 2014, Vol. 2014, Article ID 472370. doi:10.1155/2014/472370.

【国際会議・学会・学術雑誌への発表（査読なし）】

1. OHTA Makoto, NAKAYAMA Toshio, COURBEBAILLISSE Guy, ANZAI Hitomi, ZHANG Mingzi, et al. Endovascular Coil Interaction within Intracranial Aneurysms. ElyT Lab Workshop, 19-21st, 2014, FRANCE.
2. OHTA Makoto, ANZAI Hitomi, ZHANG Mingzi, LI Yujie, et al. The Concept of Bundle of Inflow (BOI) for reducing flow in aneurysm. The 7th World Congress on Biomechanics, 5-11th July 2014, Boston, US. (Invited Speech)
3. ZHANG Mingzi, ANZAI Hitomi, OHTA Makoto. Model study of Single Ventricular Heart Syndrome and its Treatment[C]. ElyT Lab Workshop, 19-21st, February 2014, FRANCE.
4. ZHANG Mingzi, OHTA Makoto, ANZAI Hitomi. A Study of Optimization of Realistic-like Flow Diverter for Cerebral Aneurysm. The 4th Japan-Switzerland Workshop on Biomechanics, 1-4th September 2014, Mie, JAPAN
5. ZHANG Mingzi, ANZAI Hitomi, OHTA Makoto. A Development on Strut Structure Optimization of Flow Diverter for Intracranial Aneurysm. The 7th World Congress on Biomechanics, 5-11th July 2014, Boston, US.
6. ZHANG Mingzi, ANZAI Hitomi, Bastien CHOPARD, OHTA Makoto. A Development of Manufacture-oriented Optimization Strategy for Flow Diverter Stent based on Cylindrical Spirals. Proceedings of the 11th International Conference on Flow Dynamics, Oct. 8-10, pp.314-315, 2014, Sendai, Japan.
7. ZHANG Mingzi, ANZAI Hitomi, Bastien CHOPARD, OHTA Makoto. Structure Design of Flow Diverter Stent. International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 17-20th November 2014, New Orleans, US.

【マスコミ発表等】

1. 太田信, 安西眸, 吉田裕貴, ZHANG Mingzi, Li Yujie, 中山敏男. ステンツの最適デザインを考える. 脳神経外科速報, 2014, vol. 24(5), pp. 532-537.

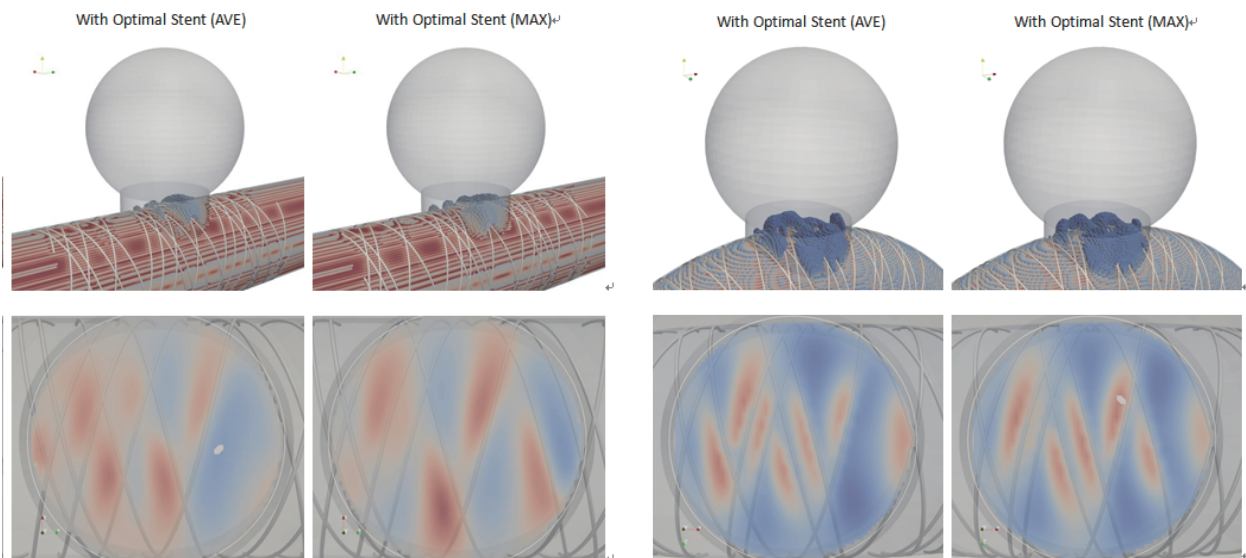


Figure 1. The initial and optimized FD structures in the straight(left) and the curved model(right)

