

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360087

研究課題名（和文） MEMS ベースアクチュエータによる剥離再付着流れの制御に関する
戦略的展開研究課題名（英文） Strategic Development on Flow Control of Separation and
Reattachment Process by MEMS Based Actuators

研究代表者

本阿弥 眞治（HONAMI SHINJI）

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：30089312

研究成果の概要（和文）：

アクティブディンプルとプラズマアクチュエータの性能を向上させ、アクティブディンプルをディフューザ剥離流れに適用し、剥離せん断層の成長促進に有効な周波数、ディンプル深さ、そしてレイノルズ数範囲を得た。シンセティックジェットを静止空気中と横断流中に吹出した場合のジェットの渦構造をステレオ画像処理流速計により明らかにした。更に、各種アクチュエータの特徴を纏め、選択の際に参考となる指標を得た。

研究成果の概要（英文）：

The effort for performance improvement of the active dimple and plasma actuator was conducted. The appropriate parameters such as frequency, dimple depth and Reynolds number range resulting in the effective development of the separating shear layer were obtained, when the active dimple was applied to the separated diffuser flow. The vortex structures of the synthetic jet which depended on the injection conditions were also clarified when the jet was injected into the quiescent fluid or the cross flow. The characteristics table of different kinds of actuator which showed the benefit and deficit of the actuator depending on the operating conditions was obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2010 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2011 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学，流体力学

キーワード：アクチュエータ、流れの制御、アクティブディンプル、プラズマアクチュエータ、
シンセティックジェット、ステレオ画像処理流速計、剥離流れ

1. 研究開始当初の背景

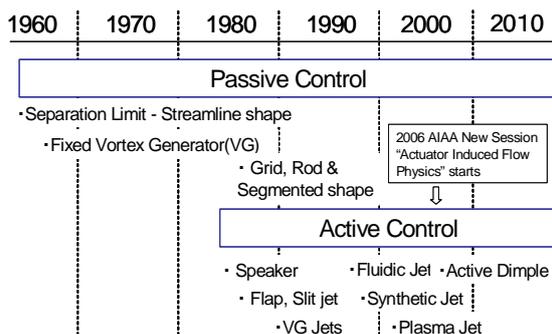
表 1 に流体力学における剥離流れ制御デバイスの変遷を示す。1960 年代に開発された渦発生器は、現在も航空機の翼やエンジンカウルの剥離制御に用いられている。1980

年代に乱流現象の解明とその制御技術の開発が盛んになり、現在、一部実用化に至っている。一方、例えば、航空用エンジンの軽量化を推進するには、エンジン重量の 35% を占める低圧タービンの小型化が必須となり、羽

根枚数の減少により、タービン翼の高負荷化に伴う低レイノルズ数域での層流剥離と再付着過程の現象解明とその制御が再び重要な課題となっている。そこで、低レイノルズ数から高レイノルズ数域での包括的な制御技術の開発が求められている。特に、機器の小型化に伴う低レイノルズ数域での制御技術に関しては、統一的な対策が採られているわけではなく、研究者は、各種のアクチュエータを用いて、個々の流れ場に対して対症的に対応している。

2008年1月AIAA Aerospace Sciences 会議(於 Reno)の流れの制御のセッションでは、Synthetic Jet, Plasma Actuator 等、MEMS 技術に基づくアクチュエータのデバイス基本流体特性の解明や実際に剥離流れに用いた場合の成果が多数見られた。さらに、2008年6月AIAA Flow Control 会議(於 Seattle)では、19のセッションでアクチュエータ周りの流れのEFDならびにCFD解析から、閉ループ制御、応用技術まで幅広い検討がなされ、米国勢と英、仏、独等EUの主要大学が航空機の機体・エンジンメーカーあるいは自動車メーカーと連携して、基礎と応用技術の成果を盛んに発表していた。尚、日本からの参加が少なく、国内のこの分野の国、大学と企業が連携した開発が立ち遅れ、10年後の日本の流れの制御技術の工学的応用の面で、世界の最先端レベルに遅れを取ることが強く懸念されていた。そこで、各種アクチュエータ周りの流れの挙動を先端的計測技術により明らかにし、各種アクチュエータを包括的に比較、検討して、開発指針を明確にすることが強く求められていた。

表1 剥離流れ制御デバイスの変遷



2. 研究の目的

航空機、高速鉄道、そして自動車の抵抗低減と低騒音化は緊急な課題であり、いずれも、物体後流の剥離現象の制御が鍵を握る。即ち、流れが不安定となる領域近傍で効率が最大となり、高効率、低騒音を実現するには、流れの不安定に起因する剥離流れの制御が不可欠である。近年、地球環境の保護、ならびに化石燃料の有効利用を視野に入れたエネルギー変換技術が強く求められ、マイクロ・ナ

ノ技術に基づく先進技術との統合化技術の開発が注目を集めている。本研究では、最近のマイクロ技術により製作されたMEMSベース先進アクチュエータを用いた流れの剥離、再付着過程の制御技術の評価と提案、そして、高レイノルズ数(Re=10⁵)から低レイノルズ数(Re=10²)域に亘る剥離、再付着流れを対象とする広範な現象を俯瞰して、各種アクチュエータを選択する際の指針を提供することが本研究の目的である。併せて、今後の各種アクチュエータの開発において、流れ場の条件とアクチュエータの駆動条件を統合した新たな流れの制御技術の戦略的展開を目標とする。

3. 研究の方法

研究期間の前半には、周期性擾乱の流れに与えることができるアクティブディンプルとプラズマアクチュエータの高性能化に向けて、まず、プラズマアクチュエータのそれぞれの電極配置や印加電圧波形などを検討して、誘起流れの高速化に努める。アクティブディンプルでは、ディンプル底面の振幅を増加させるためのピエゾアクチュエータの改良や高周波数駆動の実現を試みる。更に、運動量と周期性擾乱を同時に与える混合型アクチュエータの開発を視野に入れる。併せて、既存のシンセティックジェット等のアクチュエータの高機能化に取り組み、複数のシンセティックジェットを用いて、直列、あるいは並列配置によるジェット間の干渉過程を比較し、更に、ジェット間の相互干渉が強い場合の渦構造を求め、剥離抑制に効果的なジェットの配置や吹出し位相差等の組合せを実験により検証する。

既に開発した計測システムの高度化に努め、ステレオマイクロ画像処理流速計(SPIV)ならびに小型回転熱線流速計など多角的な計測手法を駆使して、アクチュエータ周りの流れの挙動を明らかにする。

研究期間の後半には、剥離せん断層の不安定性に起因する不安定波の周波数の統一的な推定法の確立を目指し、各種の周期性擾乱を与えた場合の制御効果をレイノルズ数の広い範囲に亘って明らかにする。

以上の結果に基づいて、最終的に、広範なレイノルズ数域における剥離現象、特に、剥離せん断層の成長・減衰過程の解明、ならびに剥離せん断層の再付着過程の抑制、制御に関する戦略的な展開を進める。最終年度には、個々の流れ場や流れの条件に対して、制御に有効な各種アクチュエータマップを作成し、アクチュエータの選択を容易にすることを試みる。この様にして、アクチュエータ周りの流れに視点をおいて、剥離制御に関する研究の体系化に努める。

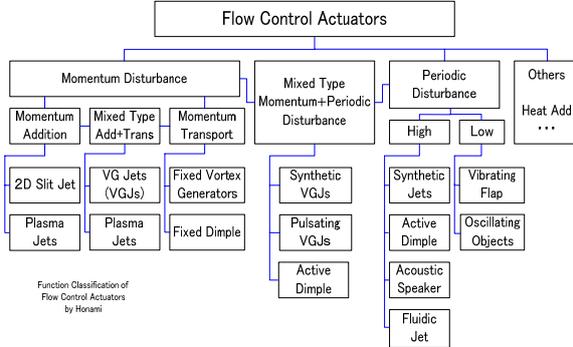
4. 研究成果

研究計画により得られた成果を項目毎に以下に列記する。

(1) 各種アクチュエータの機能分類

本研究において対象としたアクチュエータに関して、他の研究者による文献を含めて調査し、併せて、研究代表者が過去の研究により蓄積した知見に基づいて、各種アクチュエータにより生じられた流れの機能によって発生する擾乱を運動量輸送型と周期性擾乱型に分類し、両者の得失を検討し、表 2 に結果を纏めた。尚、Cattafesta らは、アクチュエータの機能、即ち、ジェット、可動物体、プラズマ等によって分類している。[Annu. Rev. Fluid Mech., 2011]

表 2 流れ制御アクチュエータ機能分類



(2) 各種アクチュエータの高性能化・高機能化
アクティブディンプル、プラズマアクチュエータ、シンセティックジェット等、個々のアクチュエータの高性能化について、得られた研究成果を以下に列記する。

① アクティブディンプル

アクティブディンプルに関しては、従来に比べ、増幅機能付デバイスとしたことにより振幅を 5 倍に増加した piezo アクチュエータを新たに採用した。ディンプル底面の最大振幅が 0.5mm となるアクティブディンプル

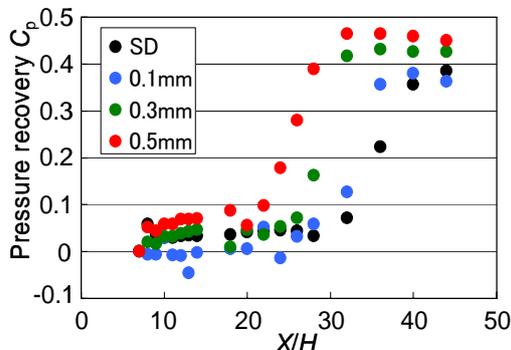


図 1 ディフューザの性能改善に及ぼすアクティブディンプル底面の振幅の影響 ($Re_H = 650, L = 0.5\text{mm}$ and $F_{AD} = 50\text{ Hz}$)

を二次元流路に装着し、ディンプルにより誘起される二次流れを画像処理流速計により計測し、誘起流れが最大となるディンプル深さを求め、併せて、誘起流れの位相平均挙動を明らかにした。更に、アクティブディンプルをディフューザ剥離流れに適用し、再付着距離、ならびに剥離せん断層の成長促進を高速ビデオカメラで可視化し、併せて、壁面静圧回復係数より、アクティブディンプルの有効性を確認し、図 1 に示す。ディンプルの振幅を 0 から 0.5mm まで増加すると性能改善が認められる。併せて、せん断層の成長促進に有効な周波数とディンプル底面の振幅、そしてレイノルズ数範囲を線図に纏めた。

② プラズマアクチュエータ

プラズマアクチュエータの電極形状と両電極の配置、そして絶縁体の厚さ等について誘起流れの観点から検討した。更に、印加電圧の初期こう配の影響を調べるために、電源回路の改良を試み、初期こう配の設定を自由に選択できる電源回路を完成させた。以上の改善の結果、静止した空気中で、誘起速度が毎秒 2m を達成し、アクチュエータの実用化に目途を得た。しかし、研究期間内では、誘起流れに関する基本特性の把握に終わり、剥離流れへの適用には至らなかった。

③ シンセティックジェットの高性能化

シンセティックジェットを静止流体中とクロスフロー中に吹出した場合のジェットの渦構造をステレオ画像処理流速計により明らかにし、渦構造中の渦度と循環値により、渦の干渉形態を定量的に示した。ここで、吹出しパラメータには、ストークス数と無次元ストローク長さを選び、渦構造が発生しない形態、ヘアピン渦、巻き上がり渦や箸型きの渦形態を分類し、吹出しパラメータの関係を線図に表し、図 2 に示すように渦構造の発生限界を得た。ここで、 S はストークス数、 L は無次元ストローク長さに相当し、ジェットの周波数と強さを無次元化したものである。流れ場が静止流体かクロスフローかによって、適用可能なシンセティックジェットの吹出しパラメータの選択を容易とする指標を提供した。

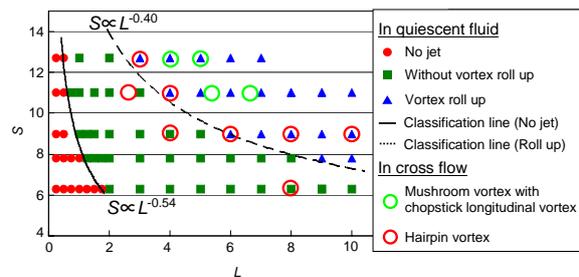


図 2 シンセティックジェットの渦構造

(3) 計測システムの高度化

計測システムの高度化について主に取り組んだステレオ画像処理流速計(SPIV)の高精度化の成果を述べる。PIV計測にとってカメラ校正を行う校正面とシート光を照射し、計測を行う計測面との間にズレが存在すると、速度ベクトルの不確かさの増加につながる。高精度な計測結果を得るためにはこのズレを補正する必要がある、本研究では、構築したレーザ光シート位置補正方法を検討し、まず、2台のカメラの同時刻画像同士を直接相互関連法によってズレを検出し、次に、両カメラの検査領域位置のズレから回帰直線のパラメータを求め、片方のカメラ画像のデータの位置を補正する方法を提案し、校正版による検証により、不確かさが大きい面外速度については、10%に低減して、補正方法の有効性を確認した。併せて、本補正法は光学系等のハードウェア上の補正ではなく、画像処理ソフトウェア上で実施できるので、利便性向上のメリットは大きい。

(4) 各種アクチュエータの総括

多くの研究者により提案された剥離抑制方法とその有効性の中から、剥離流れの代表として、後方ステップ流れとディフューザ流れを選択し、受動デバイスとして渦発生器、能動デバイスとして、シンセティックジェット、プラズマアクチュエータ、アクティブディンプルを対象に選び、各デバイスを総括して評価を試みた。剥離流れの制御に適するデバイスと適用レイノルズ数の関係、ならびにデバイスの構造や価格、そして耐久性を含めた比較を試み、それらの結果を表3に示す。このような比較により、剥離流れの制御用デバイスを選択する際の基準を提案し、各種アクチュエータの利用に際し、有益な情報を提供している。

表3 各種デバイスの総括

	受動デバイス		能動デバイス		
	渦発生器	シンセティックジェット	プラズマアクチュエータ	アクティブディンプル	
運動量擾乱	輸送	付加	付加	輸送	
周期性擾乱	無	有	有	有	
駆動周波数	—	高い	高い	中程度	
適用レイノルズ数	低	○	○	○	○
	中	○	○	○	○
	高	○	○	△	△
制御対象領域	境界層全域	境界層外縁	壁近傍	壁近傍	
構造	簡単	やや複雑	簡単	複雑	
価格	廉価	普通	高価	普通	
耐久性	優れる	普通	劣る	やや劣る	

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計13件)

- ① Yoshisaburo Yamane, Yoshiyasu Ichikawa, Makoto Yamamoto & Shinji Honami, “Effect of Injection Parameters on Jet Array Impingement Heat Transfer,” International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, 査読有Vol.4 No.1, (2012.2) pp27-34
- ② Hiroyuki Takeuchi, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, “Noncontact bubble manipulation in microchannel by using photothermal Marangoni effect,” Heat Transfer Engineering, 査読有Vol. 33, No. 3, pp. 234-244 (2012).
- ③ Masahiro Motosuke, Jun Shimakawa, Shinji Honami, “Particle Migration by Optical Scattering Force in Microfluidic System with Light-absorbing Liquid,” Journal of Heat Transfer, 査読有 Vol. 34, No. 5, 051025 (2012).
- ④ 山田俊輔, 本阿弥真治, 岡本圭太, 新田貴志, 元祐昌廣, 石川仁, “低レイノルズ数域における後方ステップ流れの制御に関する研究(安定性解析を利用したSynthetic jetによる再付着流れの制御),” 日本機械学会論文集 査読有B編 077巻775号 頁680-688 (2011.3)
- ⑤ Toru Iai, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “Behavior of Synthetic Jet in Cross Flow at Low Reynolds Number” J. Fluid Science and Technology, 査読有Vol. 5 No. 1, pp35-44 (2010.1)
- ⑥ Shoji Kamiunten, Hidetomo Nagayo, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “Coupled Electro-Thermal Analysis of a Micro Flow Sensor with Control Circuit Using SPICE,” Journal of Electronic and Communication in Japan, 査読有 Vol.93, No.1 pp58-64, (2010.1)
- ⑦ 元祐昌廣, 嶋川純, 本阿弥真治, “光誘起局所粘性分布下におけるマイクロ流動構造の解明,” 日本機械学会論文集 査読有B編 076巻764号 頁588-594 (2010.4)
- ⑧ 竹内洋之, 元祐昌廣, 本阿弥真治, “光熱マランゴニ効果による微小流路内気泡の操作特性” 日本機械学会論文集 査読有 C編, 76巻, 768号 (2010.8) 頁1939-1941
- ⑨ Shinji Honami, Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2010, “Control of Flow Separation by Actuators of Different Kinds,” Invited Lecture (2010.9) Sept. 27-30, Marriott Kingsgate Conference Center, Cincinnati, Ohio USA.

- ⑩ Masahiro Motosuke, Jun Shimakawa, Dai Akutsu & Shinji Honami, "Noncontact Manipulation of Microflow by Photothermal Control of Viscous Force," International Journal of Heat and Fluid Flow, 査読有 Vol.31, No.6, pp1005-1011 (2010.12).
- ⑪ Tomoki Hayashi, Junichi Taki, Yuta Nakanishi, Masahiro Motosuke and Shinji Honami, "Experimental Study on Control of an Impinging Jet Heat Transfer Using Triangular Tabs," J. Fluid Science and Technology, 査読有 Vol. 4 No. 2 pp 292-303(2009.5)
- ⑫ Masahiro Motosuke, Dai Akutsu & Shinji Honami, "Temperature Measurement of Microfluids with High Temporal Resolution by Laser Induced Fluorescence" J. Mechanical Science and Technology, 査読有 Vol. 23, No.7 (2009.7) pp.1821-1828
- ⑬ Shinji Honami, "Control of Separation and Reattachment in an Internal Flow - An Overview and Recent Issues -," Invited Lecture, Proc. 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAF), September 8-11, 2009, GyeongJu Korea(2009.9)

[学会発表] (計 20 件)

- ① Kenji Iwabuchi , Kazuya Kurihara, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, "Classification of Vortex Regime and Three-dimensional Vortex Structure of Synthetic Jet in Quiescent Fluid," 50th AIAA Aero Space Sciences Meeting, Nashville, Tennessee USA(2012.1)
- ② Yasuhiro Majima, Masahiro Motosuke, Shunsuke Yamada and Shinji Honami, "Control of Backward Facing Step Flow in Low Reynolds Number by Synthetic Jets -Flow Structure in Common-phase and Counter-phase Injection-"50th AIAA Aero Space Sciences Meeting, 2012, Nashville, Tennessee USA(2012.1)
- ③ Junki Hamada, Masahiro Motosuke and Shinji Honami, "Fundamental Characteristic of the Induced Flow by Active Dimple," 50th AIAA Aero Space Sciences Meeting, Nashville, Tennessee USA(2012.1)
- ④ Yoshisaburo Yamane, Makoto Yamamoto & Shinji Honami, "Effect of Cross Shaped Circular Jet Array on Impingement Heat Transfer, ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68199 (2012.6) (To be presented)
- ⑤ Toru Iai , Kenji Iwabuchi1, Masahiro Motosuke and Shinji Honami, "Vortex Interaction of In-line Synthetic Jets Injected at Different Phase in Low Reynolds Number Cross Flow," AIAA-1283904, 6th AIAA Flow Control Conference, New Orleans (2012.6) (To be presented)
- ⑥ Masaharu Andoh, Satoshi Tanabe, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, "Effects of Co-rotating Longitudinal Vortices on Turbulent Structures in the Leg of The Horseshoe Vortex" ASME Turbo Expo 2011, ASME GT2011-46246, Vancouver Canada (2011.6) 10 頁
- ⑦ Takuya Kojima, Yuki Honda, Masahiro Motosuke and Shinji Honami, "Active Control of Flow Separation Upstream of Fence by Using Extremum Seeking with Active Vortex Generator" Proc 10th Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, ISAF10-036, Brussels, Belgium (2011-7) 8 頁
- ⑧ Satoshi Tanabe, Masahiro Motosuke and Shinji Honami" Effect of Interaction Between Horseshoe Vortex and Longitudinal Vortices Around Blade with Angle of Attack" Proc 10th Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, ISAF10-037, Brussels, Belgium (2011-7) 8 頁
- ⑨ Masaharu Andoh, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, "Interaction Between Horseshoe Vortex and Longitudinal Vortices from the Vortex Generators," ASME Turbo Expo 2010, ASME GT2010-23222, Glasgow UK (2010.6)
- ⑩ Toru Iai, Kenji Iwabuchi, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, "Vortex Behavior of In-line Synthetic Jets in Cross Flow at Low Reynolds Number," AIAA-2010-4412, 5th AIAA Flow Control Conference, Chicago 8p (2010.6)
- ⑪ Hirokazu Hattori, Masanori Morikawa, Masahiro Motosuke and Shinji Honami, "Behavior of Co-rotating Longitudinal Vortices from Vortex Generators Installed at Inside and Outside of Turbulent Boundary Layer," 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 2010, Matsue, Japan (2010.9)
- ⑫ Kenji Iwabuchi, Toru Iai, Masahiro Motosuke & Shinji Honami "Effect of Jet Spacing on Interaction Process and Three-Dimensional Vortex Structure of Multiple Synthetic Jets in Cross Flow," The Third Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2010, Marriott Kingsgate Conference Center, Cincinnati, Ohio USA. (2010.9)

- ⑬ Satoshi Tanabe, Masaharu Andoh, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “Interaction between Horseshoe Vortex and Co-rotating Longitudinal Vortices with Different Configuration,” The Third Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2010, Marriott Kingsgate Conference Center, Cincinnati, Ohio USA. (2010.9)
- ⑭ Yasuhiro Majima, Takashi Nitta, Masahiro Motosuke and Shinji Honami, “Control of Backward facing Step Flow in Low Reynolds Number by Synthetic Jets -Effect of Counter-phase Injection,” The Third Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2010, Marriott Kingsgate Conference Center, Cincinnati, Ohio USA. (2010.9)
- ⑮ Yutaro Mashiko, Tomoki Hayashi, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “Experimental Study on Heat Transfer Promotion and Longitudinal Vortex Structure in an Impinging Jet Using Triangular Tab,” The Third Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2010, Marriott Kingsgate Conference Center, Cincinnati, Ohio USA. (2010.9)
- ⑯ Masaharu Andoh, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “Interaction of Longitudinal Vortex with Horseshoe Vortex~ Configuration Effect of Longitudinal Vortex ~,” AIAA Fluid Dynamic Conference, AIAA-2009-4176, San Antonio(2009.6)
- ⑰ Toru Iai, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “Vortex Behavior of Vertical and Inclined Synthetic Jets in Cross Flow at Low Reynolds Number,” AIAA Fluid Dynamic Conference, AIAA 2009-4178, San Antonio (2009.6)
- ⑱ Koichi Yamagata, Tadashi Morioka, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “A Role of Longitudinal Vortex on the Separating Shear Layer Development over a Backward Facing Step,” AIAA 2009-4180, San Antonio (2009.6)
- ⑲ Hidetomo Nagayo, Shoji Kamiunten, Masahiro Motosuke & Shinji Honami, “Heat Balance of Micro Hot-film Sensor Elements Under the Different Gas Operation,” Proc.ASME IPACK’09, IPACK2009-89120, 2009, San Francisco, California, USA (2009.7)
- ⑳ Kenichiro Maruyama, Hideyuki Taguchi, Daisaku Masaki, Hiroaki Kobayashi, Motoyuki Hongoh, Shinji Honami, “Estimation of a Pre-Cooling Effect on the Small Pre-Cooled Turbojet Engine System,” Proc. Asian Congress on Gas Turbines ,

ACGT2009-TS63, 2009, Tokyo (2009.8)

〔図書〕 (計 1 件)

本阿弥真治他、日本機械学会、機械実用便覧改訂第 7 版全 1109 頁、2011.12、出版分科会主査(委員 13 名、執筆者 88 名)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本阿弥 真治 (HONAMI SHINJI)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：3 0 0 8 9 3 1 2

(2) 研究分担者

元祐 昌廣 (MOTOSUKE MASAHIRO)

東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：8 0 4 3 4 0 3 3

(3) 連携研究者

なし