

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360074

研究課題名(和文)複合型アクチュエータの開発に伴う総合的評価システムの構築

研究課題名(英文)Evaluation of Flow Control Devices in the Development Process in Combined Type of 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,400,000円

研究成果の概要(和文)：受動と能動デバイスを組み合わせた複合型アクチュエータを提案し、アクチュエータ廻りの流れの構造を粒子画像流速計により計測して、せん断層の励起に有効な配置を最適化することにより、レイノルズ数の適用範囲が広く、空力特性に優れるデバイスを実現することを目的とする。円形衝突噴流や後方ステップ流れに応用して、空力特性や熱伝達特性に及ぼす各種デバイスの影響を明らかにし、流れの制御に有効なデバイスを実現した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the research is to study the flow structure induced by a combined type of actuator which is composed of a synthetic jet and fixed vortex generator and to develop the combined type actuator for flow control. The synthetic jet and plasma jet actuators promote the flow mixing and prevents flow separation, because it introduces a periodic disturbance which is more effective for the flow separation control. The fixed vortex generator provides with a longitudinal vortex structure with a common flow down motion. The vortex structure downstream of the combined actuator was measured by a scanning stereo-scopic particle image velocimetry. The experiments on the different kinds of the actuator and the combined type actuator were conducted in the two dimensional channel flow, the circular impingement jet and the backward facing step flow. Then, it is found that the combined actuator introduces an effective vortex structure for flow control and the improvement of the heat transfer.

研究分野：熱流体工学

キーワード：複合型アクチュエータ 能動制御 受動制御 剥離流れ 渦の干渉 シンセティックジェット プラズマアクチュエータ 渦発生器

### 1. 研究開始当初の背景

1960年代に受動制御デバイスによる乱流境界層の剥離制御技術の開発が始まり、航空機の翼や流体機械ディフューザに固定式渦発生器が装着され、実用化に至った。その後、1980年代になると、能動制御デバイスによる剥離制御の可能性を実証するための研究が着手され、音響スピーカーや振動フラップにより剥離せん断層を周期的擾乱により制御する研究が実施された。1990年代に入ると、MEMS技術に基づくマイクロアクチュエータが開発され、シンセティックジェット、プラズマアクチュエータなどを用いた剥離制御が多くの研究者により試みられた。併せて、PIV計測技術の進展により、マイクロオーダーの物体周りの流れ計測が可能となった。各種アクチュエータの開発・研究の隆盛と計測技術の発達により、2006年、米国航空宇宙学会第3回AIAA Flow Control会議(於 San Francisco)では Actuator Induced Flow Physics と題するセッションが初めて設置され、アクチュエータ周りの流れに関心が集まった。2008年第4回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実験、計測ならびに数値解析、そして閉ループ制御まで幅広い検討がなされ、米国と英、仏、独等EUの主要大学が航空機・自動車メーカーと連携して、基礎と応用技術の成果を発表していた。2010年第5回AIAA Flow Control会議(於 Chicago)では、プラズマアクチュエータの第1人者であるノートルダム大学 Corke 教授が Aerodynamics Awards 受賞記念講演でプラズマアクチュエータの現状と応用例を含めた将来展望を述べ、プラズマアクチュエータだけで5セッションの講演発表があり、欧米におけるプラズマアクチュエータに対する関心が高まっている状況である。一方、国内では2004年・2008年まで科学研究費特定領域研究「次世代アクチュエータ」により、基礎科学、医療福祉等の分野を対象としたアクチュエータが開発されたが、流体に関する採択課題は2課題と限られていた。従って、国内の流体工学分野では大学と企業が連携するような開発は極めて少なく、世界の最先端レベルに遅れを取ることが強く懸念される状況にあった。

### 2. 研究の目的

MEMS技術の進展に伴い、マイクロアクチュエータの開発、ならびに流れの制御に応用する研究開発が欧米で進み、日本では世界に比肩できるアクチュエータ開発が遅れている。既に開発されている各種アクチュエータを総合的に比較・検証できる指針が無く、各種アクチュエータの空力特性を含む試験法を検討して、流れの剥離制御効果を検証することが強く求められている。試験法ならびに制御効果の検証結果に基づく総合的評価システムが今後の開発に不可欠である。そこ

で、受動と能動デバイスを組み合わせた複合型アクチュエータを提案し、レイノルズ数の適用範囲が広く、空力特性、経済性、耐久性に優れたデバイスを実現することを第一の目的とする。さらに、過去の研究で構築された精緻な計測システムを用いて、空気力学特性と流れの構造を求め、アクチュエータの空力特性を比較・検討可能な試験法を提案することにも努める。次に、各種アクチュエータの空気力学特性の他に耐久性を含めた総合的評価システムを構築することを第二の目的とする。

その結果、総合的評価システムの利用が一般化すれば、省エネルギーで環境に優しい各種の流体機械の実現が期待される。

### 3. 研究の方法

研究代表者が所属する東京理科大学では、二次元チャンネル風洞、円形噴流、そして二次元ディフューザを用いて、シンセティックジェット、アクティブディンプル、プラズマアクチュエータにより発生する誘起流れの流動機構を粒子画像処理流速計(PIV)により明らかにする。さらに、Role Up 渦の3次元構造により発生限界を判別するため、マイクロステレオスキニングPIVを使用する。

研究分担者が所属する千葉工業大学では、過去に蓄積されたプラズマアクチュエータの基本特性に基づいて、後方ステップ流れ、そして複数の分岐・合流部を有するチャンネルにプラズマアクチュエータを適用し、剥離・再付着過程に及ぼすアクチュエータ誘起流れの影響をPIV計測と詳細な壁面静圧計測により明らかにする。

受動デバイスである渦発生器を上流に、その下流に能動デバイスであり、データベースが進むシンセティックジェットを配置した複合型アクチュエータを最初に試作する。基本空力特性を取得し、誘起流れの構造を明らかにする。渦発生器の翼の配置を流れ方向に関して末広配置にして、翼中央の流れが壁面に向かう Common Flow Down(CFD)形態とすることにより、壁近傍に渦構造を移動させることが可能となり、剥離抑制効果を確認する。更に、先細配置にすることにより Common Flow Up(CFU)形態となり、壁面から離れた渦構造を実現できることを確認する。

このような複合型デバイスを用いて、円形噴流せん断層に周期的な縦渦構造を与えて、衝突噴流の熱伝達特性に及ぼす複合型デバイスの影響を定量的に明らかにする。

### 4. 研究成果

PIV計測によりアクチュエータ誘起流れの周波数特性と渦構造を明らかにした。まず、Cross Flow中にシンセティックジェットを吹出す場合の Roll Up 渦が発生する限界を求めた。ストローク長さと Stokes 数の他ジェットと Cross Flow の速度比をパラメータに取り、ステレオPIVにより Roll Up 渦構造の有

無を確認し、あわせて、渦度ならびに循環値を求め、静止流体中の誘起流れ構造線図との相違を明らかにした。同様に、アクティブディンプルとプラズマアクチュエータにより発生する誘起流れを PIV 計測により求めた。後方ステップ流れの再付着距離に及ぼすプラズマアクチュエータの印加 Duty 比の影響も明らかにした。両大学で得られた空力特性データベースを構築し、両者を比較、検討した。

受動と能動デバイスにより構成される複合型アクチュエータを評価する場合、デバイスにより作り出される渦構造をデバイス毎に横渦、縦渦そして周期渦に分類し、単独デバイスで生じた渦とせん断層の渦との干渉に関する文献を広範に調査し、特に、定常渦構造と周期的な渦構造の干渉過程に関する研究結果に着目し、周期的渦構造とせん断層の成長について詳細に検討した。以上の調査結果に基づいて、受動と能動デバイスの組み合わせによる渦構造がせん断層の制御に及ぼす影響を定量的に評価する一覧を検討した。さらに、能動デバイスの中で現在速度場のデータが少ないプラズマアクチュエータに関してバースト波励起の時空間構造を明らかにし、剥離制御のための最適なアクチュエータ構造について検討した。併せて、マイクロ流体デバイスへの今後の展開に備えるため、空間での流体制御の高度化、ならびに流体温度計測法に関して検討した。さらに、剥離流れに対するデバイスの有効性を定量的に評価するため、後向きステップ流れにおける各種デバイスに関して、1960 年代から 2016 年までの広範な文献調査に基づいて、レイノルズ数と拡大比等の主要パラメータ、計測技術、ならびに制御デバイスの技術動向に関するチャートならびに検索が容易な文献 PDF データベースを作成した。バースト波によって作動するプラズマアクチュエータの制御効果を画像処理流速計等により実験的に調査し、通常用いられる連続駆動の場合に比較して、制御効果が優れる条件やその要因について明らかにし、制御効果の促進に関する指針を提供した。また、これまでに得られた研究成果を国内外の学術講演会で発表し、研究成果に対する他の研究者からの具体的な反応を確認し、4 年間の研究期間中に得られた成果を統合した。

両大学の研究連携については、研究課題が採択されてから直ちに連携方法の具体化に入り、2012 年 7 月以降、研究期間中、7 回の合同研究会を開催した。両大学の本研究課題に携わる教員・研究者ならびに修士課程学生と学部学生を交えた合同研究会では、デバイス製作から計測技術そして研究成果を含めた情報の共有化に努めた。さらに、連名で学術雑誌に投稿することにより、データの共有と現象の解釈に関する議論を深め、研究の更なる進展に努めた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- 1) Yoshiyasu Ichikawa, Masahiro Motosuke, Yuki Kameya, Makoto Yamamoto, Shinji Honami, 査読有, Three-dimensional flow characteristics measurement of a square array of multiple circular impinging jets using stereoscopic PIV and heat transfer correlation, *J. Visualisation*, 19, 2016, 89-101, DOI 10.1007/s12650-015-0296-8.
- 2) 大塚駿, 佐野正利, 野木優佑, 本阿弥眞治, バースト駆動を用いたプラズマアクチュエータによる後向きステップ流れの制御, 査読有, 日本機械学会論文集, 82 巻, 2016, DOI:10.1299/Transjsme.15-00628.
- 3) 松野隆, 本阿弥眞治, 藤井孝蔵, 関本論志, 飯田明由, プラズマアクチュエータの動向一流体計測法, 査読有, プラズマ・核融合学会誌, 91 巻, 661-664, 2015
- 4) Yuki Koide, Ryota Sasaki, Yuki Kameya, Masahiro Motosuke, A burst wave-induced plasma actuator for controlling separated flow over a backward-facing step at low Reynolds numbers, 査読有, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 66, 72-78, 2015.
- 5) Toshiaki Iwana, Koichi Suenagaa, Hiroya Shirai, Yuki Kameya, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Heat transfer and fluid flow characteristics of impinging jet using combined device with triangular tabs and synthetic jets, 査読有, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 322-329, 2015.
- 6) 澤田亮一, 金子貴之, 佐野正利, T 字分岐部のある正方形管内流の分岐損失と流動特性, 査読有, 日本機械学会論文集, 81 巻, 2015, DOI:10.1299/Transjsme.15-00100
- 7) 小川洋平, 田村渥, 佐野正利, 二次元オフセット噴流の流動特性と熱伝達, 査読有, 日本機械学会論文集, 81 巻, 2015, DOI:10.1299/Transjsme.15-00066
- 8) 佐野正利, 松本康平, 本阿弥眞治, プラズマアクチュエータによる複数の分岐・合流部を有するチャンネル流れの制御, 査読有, 日本機械学会論文集, 81 巻, 2015, DOI:10.1299/Transjsme.14-00605
- 9) Saneyuki Takano, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, A Study on Backward Facing Step Flow in Low Reynolds Number Manipulated by Synthetic Jets, *J. Fluid Science and Technology*, 査読有, 9, 2014, DOI: 10.1299/jfst.2014jfst 0047
- 10) 佐野正利, 小出悠起, T 字分岐部を有するチャンネル乱流の分岐損失と熱伝達に及ぼす角部形状の影響, 日本機械学会論文集, 査読有, 80 巻, 2014, 1-16.
- 11) 山根喜三郎, 山本誠, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 正方配列十字形衝突噴流の熱伝達特性と壁噴流の流動機構, 日本ガスター

- ビン学会誌, 査読有, 41 巻, 2013, 122-128
- 12) 山根喜三郎, 山本誠, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 正方配列マルチ衝突噴流の熱伝達特性に及ぼす吹出形状の影響, 日本ガスタービン学会誌, 査読有, 41 巻, 2013, 184-190
  - 13) 本阿弥眞治, ターボ機械の流れの計測について, 計測と制御, 査読有, 52 巻, 2013, 99-104
  - 14) 本阿弥眞治, アクチュエータ空力特性の向上に基づく流れの制御技術の新たな展開, 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有, 79 巻, 2013, 2670-2678
  - 15) 佐野正利, 杉山勇氣, 鈴木進, プラズマアクチュエータを用いたチャンネル流れの圧力損失と流動特性, 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有, 79 巻, 2013, 1208-1218.

[学会発表] (計 33 件)

- 1) Shinji Honami, Active Flow Control in Fluid Engineering by New Generation Actuators, ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Joint Conference (招待講演), 2015.7.26, Seoul, Korea.
- 2) Ryota Sasaki, Yuki Koide, Masahiro Motosuke, Spatiotemporal characterization of induced flow in burst wave induced plasma actuator, ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Joint Conference, 2015.7.29, Seoul, Korea.
- 3) Yasuyo Ono, Yuki Kameya, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, A Combined Type of a Flow Control Actuator Composed of the Synthetic Jet and Vortex Generator, 米国航空宇宙学会 AIAA SciTech, 2015.1.5, Kissimmee, USA.
- 4) 山田俊輔, 元祐昌廣, 石川仁, 佐野正利, 本阿弥眞治, レイノルズ数に依存する後方ステップ再付着流れの各種制御法, 機械学会流体工学部門講演会, 2015.11.8, 東京理科大学工学部, 東京
- 5) Yoshiyasu Ichikawa, Kojiro Nishiwake, Hiromu Wakayama, Makoto Yamamoto, Masahiro Motosuke, Three-dimensional measurement of near-wall velocity in millimeter channel by a single view imaging, ASME Inter PACK & ICNMM, 2015.7.9, San Francisco, USA.
- 6) Takuya Aida, Yuki Kameya, Masahiro Motosuke, Microfluidic temperature imaging based on fluorescent anisotropy, 19th Int Conf Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science, 2015.10.28, Gyeongju, Korea.
- 7) 佐々木良太, 小出佑輝, 近藤雄太, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, バースト波励起プラズマアクチュエータの時空間構造の解明, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2015.11.8, 東京理科大学工学部, 東京
- 8) 野木優佑, 大塚駿, 佐野正利, 本阿弥眞治, バースト波を用いたプラズマアクチュエータによる後向きステップ流れの制御 (流動特性), 日本機械学会流体工学部門講演会, 2015.11.7, 東京理科大学工学部, 東京
- 9) 重田晃佑, 西分康次郎, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 2 層マイクロ流路を用いた 3 次元粒子集束法の開発, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2015.11.7, 東京理科大学工学部, 東京
- 10) 相田拓也, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 蛍光異方性を用いた流体温度場イメージング法の開発, 日本伝熱シンポジウム, 2015.6.3, 福岡
- 11) 荻野哲也, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, レーザ誘起光熱効果を利用した液体マニピュレーション, 日本流体力学会年会, 2015.9.27, 東京工大, 東京
- 12) Shinji Honami, Recent Development of Flow Control Technology in Gas Turbine Application, Asian Congress on Gas Turbine (招待講演), 2014.8.20, Seoul, Korea
- 13) 本阿弥眞治, 実験流体力学活動の経緯, 日本航空宇宙学会流体力学講演会, 2014.7.4, 弘前
- 14) 岩名俊明, 永島祥平, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 能動・受動複合型デバイスによる衝突噴流の伝熱制御, 日本伝熱シンポジウム, 2014.5.23, 浜松
- 15) Daiki Sunada, Masahiro Motosuke, Optofluidic Particle Transportation by Radiation Pressure with Switching Functionality, 5th Int. Symposium Microchemistry and Microsystems, 2014.7.31, Singapore.
- 16) 大塚駿, 佐野正利, 本阿弥眞治, バースト波を用いたプラズマアクチュエータによる後向きステップ流れの制御, 日本機械学会年次大会, 2014.9.10, 東京電機大学, 東京
- 17) 小川洋平, 佐野正利, 二次元オフセット噴流の流動特性, 日本機械学会年次大会, 2014.9.10, 東京電機大学, 東京
- 18) 重田晃佑, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 光ファイバが不要なフローサイトメーターチップの開発, 第 6 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2014.10.22, 松江
- 19) 砂田大樹, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 液体光スイッチング機構を備えた光放射圧による粒子輸送デバイスの開発, 第 6 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2014.10.22, 松江
- 20) 小野恭代, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 定常ならびに周期性を有する渦の干渉過程, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2014.10.26, 富山大学, 富山
- 21) 市川賀康, 山本誠, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, マルチ円形衝突噴流の干渉が形成する 3 次元流動構造, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2014.10.25, 富山大学, 富山

- 22) 澤田亮一,佐野正利,正方形断面形状をもつT字分岐路流れの速度場計測,日本機械学会流体工学部門講演会,2014.10.25, 富山大学, 富山
- 23) Yoshisaburo Yamane, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Effect of Jet Shape of Square Array of Multi-impinging Jets on Heat Transfer, ASME Turbo Expo, 2013, San Antonio, USA.
- 24) Yasuyo Ono, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Phase-averaged scanning stereoscopic PIV measurement for classification of vortex regime of synthetic jet in cross flow, 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry, 2013.7.3, Delft, Netherlands
- 25) Saneyuki Takano, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, A study on backward facing step flow in low Reynolds number manipulated by synthetic jets -effect of different jet velocities-, 4th Int Conf Jets, Wakes and Separated Flows, 2013.9.20, Nagoya Univ., Nagoya
- 26) Yuta Yoshinari, Junki Hamada, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Control of separated flow in diffuser at low Reynolds number by active dimple, 14th Asian Congress of Fluid Mechanics, 2013.10.15, Hanoi, Vietnam.
- 27) Toshiaki Iwana, Koichi Suenaga, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Active control of impingement jet by synthetic jet, 24th Int Sympo Transport Phenomena, 2013.11.3, Tokyo Univ. Science, Yamaguchi.
- 28) Masanori Shishikura, Tatsuyuki Imaoka, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Separation control of diffuser flow by extremum seeking in low-Reynolds number, 12th Int Symp Fluid Control, Measurement and Visualization, 2013.11.22, Nara.
- 29) Yuki Koide, Mingpuo Lee, Masahiro Motosuke, Shinji Honami, Burst wave induced plasma actuator as an actuator to control separated flow over a backward facing step in low Reynolds number, 12th Int Symp Fluid Control, Measurement and Visualization, 2013.11.22, Nara.
- 30) 篠原勇太,松本康平,佐野正利,プラズマアクチュエータによる複数の分岐・合流部を有する流れの制御, 日本機械学会年次大会, 2013.9.10, 岡山大学, 岡山
- 31) Yoshisaburo Yamane, Shinji Honami, Effect of Cross Shaped Circular Jet Array on Impingement Heat Transfer, ASME Turbo Expo, 2012.6.12, Copenhagen, Denmark
- 32) Shinji Honami, Vortex Interaction of In-line Synthetic Jets Injected at Different Phase in Low Reynolds Number Cross Flow, AIAA Flow Control Conference, 2012.6.4, New Orleans, USA
- 33) 杉山勇氣,遠藤慶亮,佐野正利,チャンネル流れのプラズマアクチュエータによる制御, 日本機械学会年次大会, 2012.9.11, 金沢大学, 金沢

[図書] (計 2 件)

- ① Shinji Honami, Impingement Jet Cooling in Gas Turbines, Edited by R. Amano and B. Sunden, WIT Press, Chapter 6 Flow Control of Impingement Jets and Wall Jets, 総 231 頁, 分担 157-183, 2014.5.
- ② 杉山均, 佐野正利, 永橋優純, 加藤直人, 森北出版, はじめて学ぶ移動現象論, 総 243 頁, 分担 110-172, 2014.1.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

元祐 昌廣 (MOTOSUKE, Masahiro)  
東京理科大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 80434033

佐野 正利 (SANO, Masatoshi)  
千葉工業大学・工学部・教授  
研究者番号 : 20117708