

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目： 基盤研究 (B)

研究期間： 2006 ~ 2008

課題番号： 18360093

研究課題名 (和文) マイクロ実験流体力学による総合的制御システムの構築

研究課題名 (英文) A Construction of Integrated Flow Control System by using
Micro Experimental Fluid Dynamics

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：

計測システムの高度化に関して、ステレオならびにダイナミックマイクロ PIV の高精度化を達成し、剥離・再付着流れに応用した。さらに、2 素子型マイクロセンサの静・動特性試験を実施し、物性値の影響を考慮したセンサ特性を明らかにした。実験技術の高度化に関し、各種のガスを使用可能なマイクロセンシング脈動風洞を完成させ、高速デバイスによりシンセティックジェットの高速度を実現し、制御効果を総合的に評価可能なシステムを構築した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2007 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
総 計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：マイクロ熱流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学(5004)

キーワード：マイクロ熱流体，実験流体力学，流れの制御，マイクロアクチュエータ，
マイクロセンサ，ステレオマイクロ PIV，マイクロデバイス，マイクロジェット

1. 研究開始当初の背景

実験流体力学は、計測技術と実験技術の高度化を目指すものであり、高度化が達成されれば、現象解明に威力を発揮する。通常のレイノルズ数域における乱流研究に対して実験流体力学の果たした役割は大きく、乱流現象の解明に大きく貢献してきた。近年、MEMS に対する関心が高まり、半導体製造技術、特に、マイクロマシニング技術の進展が著しく、それに基づいて、各種マイクロデバイスの開発が進んでいる。熱流体工学の分野でも、これらのマイクロデバイスを利用した流れの解析や流れの制御を目的とした研究に関心が集まり、マイクロ流体工学の研究に多くの研究者が取り組み始めている。MEMS 技術が流

体工学の分野に応用されると、レイノルズ数が著しく低くなり、クヌードセン数が増加することによる計測上ならびに実験実施上の幾つかの課題が生じ、研究者は試行錯誤的に解決を図りながら研究を進めている。したがって、マイクロ熱流体工学においては、研究の黎明期にあたり、計測ならびに実験技術の高度化を指向した解析手法の確立が強く求められている状況にある。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、MEMS (Micro Electro Mechanical System) による低レイノルズ数流れの総合的制御システムを構築することである。低レイノルズ数マイクロセンシング風

洞を利用した精緻なマイクロ実験技術と適切なマイクロ計測技術に基づいて、マイクロデバイス個々の試作と評価を踏まえて、流れ場や温度場の解析に高度な計測技術と実験技術を適用し、熱流体現象の解明と制御手法の的確な評価システムを構築することが目標である。

3. 研究の方法

研究代表者が従来取り組んできた実験流体力学に基づく解析手法をマイクロ熱流体に適用し、マイクロ実験流体力学(Micro Experimental Fluid Dynamics)の観点から、低レイノルズ数流れの混合促進や流量制御などの今後、解決を迫られる問題に取り組む。

(1) マイクロ熱流体現象を高度化したマイクロ計測システムによる実験的な解析

(2) 熱流体解析に基づく先進的マイクロ制御デバイスの開発

(3) 制御則の適切な選択ならびに有機的な連携に基づく熱流体解析の体系的な構築

特に、熱流体解析に関しては、マイクロ実験流体力学の推進、特に、熱流体計測技術の先端化と普遍化を目指し、高空間分解能を有する粒子画像処理流速計、ならびに優れた周波数特性と空間分解能を持つマイクロ薄膜センサを実現し、併せて、流れ場や温度場の制御の有効性を検証可能なマイクロアクチュエータ評価システムを構築する。

4. 研究成果

計測システムの高度化に関して、ステレオマイクロ PIV の高精度化に努めると同時に計測技術のノーハウを集積し、システムの汎用化を達成した。次に、ダイナミック PIV システムの利用を拡大するため、高時間分解能の精度を確保した計測を達成し、ディフューザ剥離流れに応用し、剥離、再付着現象の順流率特性を明らかにした。さらに、異種ガスを用いた 2 素子型薄膜マイクロセンサの静・動特性試験を実施し、各レイノルズ数におけるデータを集積し、電気熱連成解析により実験データを補完し、実験条件を網羅したデータベースを構築し、物性値の影響を総合的に評価可能な普遍式を得た。

実験技術の高度化に関し、異種ガスを使用可能なマイクロセンシング脈動風洞を完成させ、ヘリウム中におけるマイクロセンサの特性試験を実施した。高速駆動マイクロアクチュエータの試作に取り組み、直径 500 ミクロンオーダのシンセティックジェットの高速度を実現した。特に、高周波パルス電源を用いて、安定したパルス発生ならびにピエゾアクチュエータの作動を達成した。併せて、従来と異なる縦渦を誘起しやすいピッチ角に設定し、さらに、旋回角を広範に設定し、吹出し位相におけるジェットの特性をステ

レオマイクロ PIV 計測により求めた。位相平均渦構造より、ジェットの混合促進効果の原因を明らかにし、総合的に混合効果を評価した。さらに、アクチュエータの高度化を図るため、プラズマジェットにも取り組み、壁面ジェットの生成に成功した。

以上の計測技術と実験技術の高度化により構築された評価システムを用いて、幾つかの低レイノルズ数流れにおける剥離、再付着流れの制御を試み、評価した。すなわち、低レイノルズ数後方ステップ流れの再付着過程をシンセティックジェットにより制御し、制御効果をマイクロ薄膜センサで評価した。レイノルズ数が 600 付近では順流率は緩やかに回復し、レイノルズ数により順流率の空間勾配が変化することから、再付着点付近には揺動する流れが存在することを明らかにした。再付着距離がレイノルズ数とともに増加から減少に遷移するレイノルズ数域に着目し、再付着点付近から下流へ向かい揺動する壁面近傍の流れの周波数解析結果を得て、このレイノルズ数域の流れでは、再付着点下流域で順流率の回復に大きな変化を示すことから、壁面近傍流れの周期的な挙動と横渦の発達過程の関係を明らかにした。

このようにして、マイクロ実験流体力学に基づく低レイノルズ数域における剥離、再付着流れを総合的に評価する成果を得て、所期の目的を達成した。

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)

(1) [雑誌論文](計 25 件)すべて査読有

- 1) T. Hayashi, J. Taki, Y. Nakanishi, M. Motosuke and S. Honami, "Experimental Study on Control of an Impinging Jet Heat Transfer Using Triangular Tabs," J. Fluid Science and Technology, Special Issue on Jets, Wakes and Separated Flows, Vol. 4 No. 2 pp292-303 (2009)
- 2) Y. Honda, H. Hattori, M. Motosuke and S. Honami, "Effect of Actuating Mode in Active Vortex Generators on the Behavior of Longitudinal Vortex Pair," Proc. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2009-1502, 10P (2009.1)
- 3) T. Nitta, K. Okamoto, S. Yamada, M. Motosuke and S. Honami, "Development of Closed-loop Control System of Reattachment Flow in Low Reynolds Number," Proc. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA-2009-0147, 10P (2009.1)
- 4) S. Yamada, K. Okamoto, T. Nitta, M. Motosuke and S. Honami, "Flow Structures by Synthetic Jets over a Backward Facing

- Step in Low Reynolds Number," Proc. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA-2009-0576, 10P (2009.1)
- 5) T. Iai, M. Higashiura, M. Motosuke and S. Honami, "Behavior of Synthetic Jet in Cross Flow at Low Reynolds Number" Proc. 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conf., I121, 2P (2008.10)
 - 6) M. Ando, M. Motosuke and S. Honami, "Phase-averaged Behavior of a Horseshoe Vortex with Longitudinal Vortex" Proc. 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conf., L112, 4P (2008.10)
 - 7) D. Akutsu, M. Motosuke and S. Honami, "Temperature Measurement of Microfluids with High Temporal Resolution by Laser Induced Fluorescence" Proc. 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conf., B314, 4P (2008.10)
 - 8) T. Hayashi, J. Taki, M. Motosuke and S. Honami, "Experimental Study on Control of an Impinging Jet Heat Transfer Using Triangular Tabs," Proc. 2nd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, (2008.9)
 - 9) S. Honami, K. Yamagata and M. Motosuke, "Separating Shear Layer Development over Backward Facing Step with Vortex Generator Jets Injection," Proc. 2nd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, (2008.9)
 - 10) A. Iijima, T. Tanabe, M. Motosuke and S. Honami, "A Study of Separation and Reattachment Process in Gas-Liquid Two Phase Flow," Proc 12th Asian Congress of Fluid Mechanics, (2008.8)
 - 11) H. Nagayo, S. Kamiunten, M. Motosuke and S. Honami, "Effect of Operation Mode on Static and Dynamic Characteristics of Thermal Micro Flow Sensor," Proc. 6th Int. ASME Conf. Nanochannels, Microchannels and Minichannels, ICNMM2008-62206, 7 頁(2008.6)
 - 12) J. Shimakawa, M. Motosuke and S. Honami, "Local Microflow Control Using Photothermal Viscosity Distribution," Proc. 6th Int. ASME Conf. Nanochannels, Microchannels and Minichannels, ICNMM2008-62207, (2008.6)
 - 13) H. Hattori, M. Motosuke and S. Honami, "Periodic Behavior of Longitudinal Vortex Pair by Active Vortex Generator," AIAA-2008-4074, 10p (2008.6)
 - 14) M. Higashiura, M. Motosuke and S. Honami, "Interaction of Synthetic Jet with Diffuser Separation flow in Low Reynolds Number," AIAA-2008-3772, 10p (2008.6)
 - 15) 上運天昭司, 永代秀友, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, " マイクロフローセンサと制御回路の SPICE を用いた電気 - 熱連成解析 " 電気学会論文集 E 編 128 巻 2 号, 頁 53-58 (2008.2)
 - 16) S. Yamada, K. Okamoto, M. Motosuke and S. Honami, "A Study of Periodic Flow Behavior Over Backward Facing Step in Low Reynolds Number," Proc. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 10p AIAA-2008-0775 (2008.1)
 - 17) 山田俊輔, 松本達矢, 岡本圭太, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, " 低レイノルズ数領域における後方ステップ流れ - はく離再付着過程における周期的挙動, " 日本機械学会論文集 B 編 073 巻 736 号 7 頁(2007.12)
 - 18) M. Higashiura, M. Motosuke and S. Honami, "The Effects of the Synthetic Jet on the Mixing Promotion in Low Reynolds Number," Proc. 5th ASME/JSME Fluids Engineering Conf., FEDSM2007-37211, 9p (2007.8)
 - 19) S. Kamiunten, H. Nagayo, M. Motosuke and S. Honami, "Electro-Thermal Modeling of The Micro Flow Ssensor with Feedback Control Circuit Using SPICE," Proc. ASME IPACK2007, (2007.7)
 - 20) M. Motosuke, J. Shimakawa and S. Honami, "Microflow Behavior of Liquid in the Presence of Laser-Induced Temperature Gradient," Proc. ASME ICNMM2007 5th Int Conf. on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, (2007.6)
 - 21) D. Sugisaki, M. Motosuke and S. Honami, "Heat Transfer and Flow Characteristics due to Interaction of Longitudinal Vortices by Vortex Generator Array," Proc. ASME Turbo Expo., ASME GT2007-28189, (2007.5)
 - 22) 山田俊輔, 松本達矢, 佐川裕達, 高井正人, 本阿弥眞治, " 低レイノルズ数領域における後方ステップ流れ - はく離再付着領域壁面近傍の時間平均挙動, " 日本機械学会論文集 B 編 72 巻 723 号 頁 6 (2006.11)
 - 23) S. Yamada, T. Matsumoto, T. Nagumo and S. Honami, "Streamwise and Spanwise Flow Structures over Backward Facing Step in Low Reynolds Number," ASME Int. Congress, ASME 2006-14245 (2006.11)
 - 24) K. Watanabe, D. Suzuki, T. Nakatsuka, T. Nagumo and S. Honami, "A Flow Study on Micro Pulsed Jet Cross-flow Interaction by Micro Particle Image," ASME Int. Congress, ASME 2006-14195 (2006.11)
 - 25) S. Okamoto and S. Honami, "Dynamic Interaction of the Logitudinal Vortices by Active Vortex Generators, Proc. Flow Control Conference, AIAA 2006-3181,

(2006.6)

(2)〔学会発表〕(計 20 件)

- 1) 本間伸洋, 安藤正晴, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "可動渦発生器による縦渦と馬蹄形渦の干渉に関する研究" 日本ガスタービン学会定期講演会, 日立市(2008.10)
- 2) 本田裕規, 服部浩和, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "固定及び可動渦発生器による縦渦対の相互作用に関する研究" 日本機械学会年次大会, 横浜(2008.8)
- 3) 山田俊輔, 岡本圭太, 新田貴志, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "シンセティックジェットによる低レイノルズ数域後方ステップ流れにおける位相平均挙動" 日本機械学会年次大会, 横浜(2008.8)
- 4) 元祐昌廣, 遊佐幸樹, 永代秀友, 上運天昭司, 本阿弥眞治, "異種気体を用いた MEMS センサの出力特性評価" 日本機械学会年次大会, 横浜(2008.8)
- 5) 居合徹, 井瀬皓一, 東裏雅司, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "低レイノルズ流れにおけるシンセティックジェットの挙動 ステレオPIVを用いた三次元計測" 日本機械学会年次大会, 横浜(2008.8)
- 6) 安藤正晴, 本間伸洋, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "可動渦発生器による縦渦と翼まわりの馬蹄形渦の干渉に関する研究" 日本機械学会年次大会, 横浜(2008.8)
- 7) 阿久津大, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "レーザー誘起蛍光法を用いた高い時間分解能を有するマイクロ流体温度場計測" 日本機械学会年次大会, 横浜(2008.8)
- 8) 竹内洋之, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "レーザー誘起界面張力勾配を利用した単一微小気泡の操作" 第 45 回日本伝熱シンポジウム, つくば国際会議場(2005.5.21)
- 9) T. Ogawa, Y. Watanabe, A. Murakami & S. Honami, "Shock Wave Oscillation Phenomena Depending on Boundary Layer Conditions in Transonic Flow," 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno USA, (2008.1)
- 10) T. Fukada, D. Noguchi, M. Motosuke, S. Honami & Toshimichi Sakai, "Aerodynamic Characteristics in the Dump Diffuser Combustor -Effects of Split Flow at a Flame Dome-," 9th Int. Gas Turbine Congress Tokyo, Japan (2007.12)
- 11) 元祐昌廣, 嶋川純, 本阿弥眞治, "流体の局所的な温度変化を利用した光学的物質移動技術に関する研究" 日本機械学会熱工学コンファレンス 2007, 京都大学(2007.11.23)
- 12) 岡本圭太, 山田俊輔, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "シンセティックジェットによる低レイノルズ領域における後方ステップ流れの制御" 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会, 広島大学(2007.11.18)
- 13) 永代秀友, 上運天昭司, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "熱型マイクロ壁面せん断応力センサの動特性評価方法の開発" 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会, 広島大学(2007.11.18)
- 14) 林智希, 本間伸洋, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "可動渦発生器による縦渦と干渉する馬蹄形渦に関する研究" 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会, 広島大学(2007.11.18)
- 15) 飯島亜美, 田辺孝司, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "気液二相流におけるはく離・再付着過程に関する研究" 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会講演番号, 広島大学(2007.11.17)
- 16) 井瀬皓一, 東裏雅司, 南雲貴志, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "ステレオ PIV を用いた Micro-Synthetic-Jet の周期的挙動に関する研究" 日本機械学会創立 110 周年記念年次大会, 関西大学(2007.9.12)
- 17) 嶋川純, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "レーザーを用いた流体局所加熱によるマイクロチャンネル内流動制御" 日本機械学会創立 110 周年記念年次大会, 関西大学(2007.9.11)
- 18) 服部浩和, 岡本伸介, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "可動渦発生器下流の縦渦における渦形態ダイナミクスに関する研究" 日本機械学会創立 110 周年記念年次大会, 関西大学(2007.9.10)
- 19) 東裏雅司, 井瀬皓一, 山田俊輔, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "低レイノルズ数におけるディフューザはく離流れの様相" 日本流体力学会年会, 東京大学(2007.8.6)
- 20) 本間伸洋, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, "可動渦発生器による縦渦の生成と消滅に関する研究," 日本流体力学会年会, 九州大学, (2006.9)

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・助教
研究者番号: 80434033