

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630443

研究課題名(和文) マイクロプラズマアクチュエーター組み込みマイクロ噴霧再生燃焼システムの開発

研究課題名(英文) Development of regenerative micro-spray combustion system with a micro-plasma actuator

研究代表者

三上 真人 (Mikami, Masato)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20274178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：ミリサイズの円筒型マイクロプラズマアクチュエーターを金属メッシュを有する細径管燃焼器上流に設置し、マイクロプラズマアクチュエーターによる燃焼器への周囲空気供給により、細径管内の金属メッシュ背後に火炎を定在可能な条件が存在することが明らかとなった。また、熱還流による再生予熱を促進する燃焼器構造について、3次元数値計算を用いて確認を行った。これをもとに、液体燃料を用いた燃焼器の設計方針も示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a wire mesh by a cylindrical micro-plasma actuator which supplies ambient air to a narrow tube combustor and found a condition that the flame is stabilized behind the mesh. We have numerically examined the combustor structure which enhances heat recirculation from the burned gas to the unburned gas directly or indirectly and discussed appropriate structures of liquid-fueled combustor.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 マイクロ燃焼 プラズマアクチュエーター

1. 研究開始当初の背景

マイクロコンバスターとはコインサイズ程度の超小型燃焼器のことであり、超小型無人航空機(MAV)など超小型移動体や携帯機器用の超小型高密度エネルギー発生装置として期待されている。特に液体燃料を用いた場合そのエネルギー密度はリチウムイオン電池の100倍近くにもなるため、MAVの航続距離の飛躍的な増大が期待される。

マイクロコンバスターは世界的に多くの研究者が研究を行っている。しかし、気体燃料より密度が高く携帯性に優れている液体燃料をマイクロコンバスターに適用するには技術的に高いレベルを要するため、液体燃料をマイクロコンバスターに適用している研究者は極めて少ない。我々の研究グループは液体燃料をエレクトロスプレー技術で電気的に霧化し、金属メッシュを用いてその捕集と火炎の定在化を行うことで、ミリサイズの微小管内で液体燃料を定在燃焼させることができることを世界で初めて示した(Yuliati, Seo, Mikami, Combust. Flame, 2011)。ただし、実用化のためには、燃焼器のさらなる小型化および高負荷燃焼化、また、電気制御可能な空気供給法の開発が必要であり、さらに、空気供給系の必要動力も液体燃料の燃焼エネルギーから得られる電力内で賄うシステム化の検討も必要である。

2. 研究の目的

次世代の超小型高密度エネルギー発生装置として期待されている要素技術として微小空間内のマイクロ燃焼技術がある。液体燃料を用いるとそのエネルギー密度はリチウムイオン電池の100倍にもなる。本研究では、マイクロ燃焼をMAVなど超小型移動体のエネルギー源として用いる際の課題である電気制御可能な空気供給法として、マイクロプラズマアクチュエーター(MPA)による誘起流のマイクロ燃焼利用を試みる。液体燃料のエレクトロスプレー技術と熱再生技術によるマイクロ噴霧再生燃焼法をさらに進化させ、MPAを組み込むことで、液体燃料適用の次世代超小型高密度エネルギー発生システムの構築を試みる。

3. 研究の方法

(1)MPA 特性試験

誘電体バリア放電を利用した小型のマイクロプラズマアクチュエータ(MPA)によりプラズマを発生させることで誘引流を生じさせ、その流れの速度を計測した。MPAの誘電体としてポリイミドフィルムとガラスを使用し、電極には導電性銅テープを使用した。交流電源(PSI製: PSI-PG1040F)より交流電圧をMPAへ印可した。誘引流の速度を熱線流速計(KANOMAX製: MODEL 1011 ANE MOMETER)を用いて計測した。

さらに、このMPAを細径管燃焼器に組み込むことで、MPAによる流れ場変化および

プラズマ供給が管内火炎定在条件に及ぼす影響について調べるとともに、空気供給系をMPAとした場合の管内火炎定在の可能性についても確認を行った。

(2)静電噴霧と燃焼器の改良

液体燃料をシリンジポンプを用いてキャピラリーに供給した。キャピラリーに高電圧供給装置から電圧を印可し、対向電極であるメッシュを接地させ、マルチジェットモードの静電噴霧を形成した。使用した燃料は体積割合でn-ヘプタンを70%、エタノールを30%混合した燃料を使用した。静電噴霧の可視化にはレーザーシート法およびパルス光源によるバックライト法を用いた。

この静電噴霧を金属メッシュを接地電極かつ保安器とする3.5mm内径管燃焼器の燃料供給用に組み込み、燃焼試験を行った。燃料流量一定のもと、空気流量を変化させ、管内火炎定在条件を把握した。

細径管における再生予熱効果を促進する燃焼器構造についてはANSYS Fluentを用いた数値計算も実施し検討を行った。

4. 研究成果

(1)MPAによる誘引流特性と燃焼器への適用

誘電体バリア放電を用いた円筒型MPAの製作を行い、その誘引流特性について調べた。電極への印加電圧、周波数、電極寸法、電極間隔、電極形状の影響について詳細に調べた。図1にMPAの誘引流速度を示す。誘引流速度はMPA出口部において印加電圧6.0kV、周波数4.0kHzの場合には30cm/sを超えた。これより、細径管燃焼器と同程度の寸法のMPAにより燃焼器の空気供給に必要な流速が得られることが確認された。

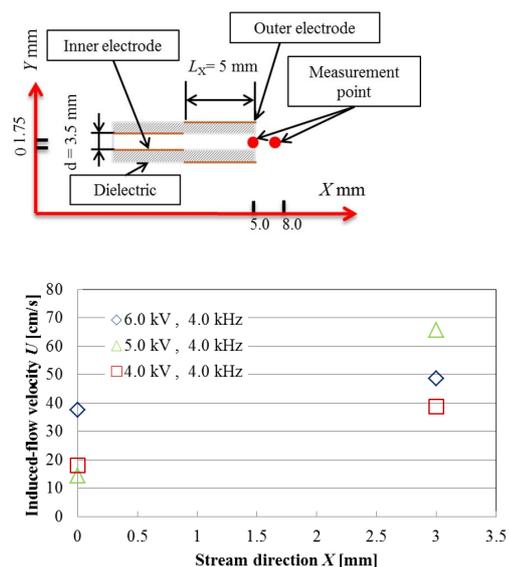


図1 円筒型MPAによる誘引流速度

この円筒型MPAを金属メッシュを有する細径管マイクロコンバスター上流にタンデム配

置し、空気をポンペから供給した状態でMPAを作動させ、管内誘引流およびプラズマ供給が火炎定在に与える影響について確認を行った。その結果、管内火炎定在条件範囲はMPAの作動の影響をほとんど受けないことが確認された。

次に、燃焼器へのポンペによる空気供給を行わず、側方に設置したMPAにより空気供給を行い、火炎を定在させることを試みた。この際、将来的な液体燃料適用への拡張のため、気体燃料を空気と予混合せず細径管から金属メッシュ上流に供給を行った。空気をポンペから供給せず、MPAにより外部空気を誘引し供給した場合でも、細径管内の金属メッシュ背後に火炎を定在可能な条件が存在することが明らかとなった（図2）。

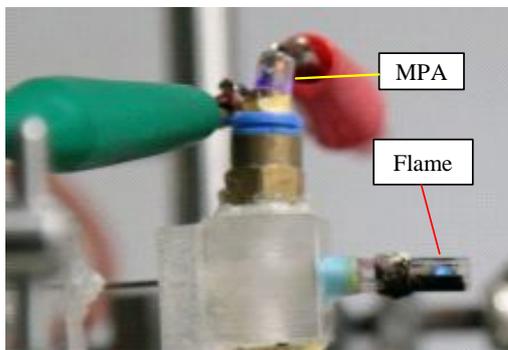


図2 円筒型 MPA のマイクロコンバスターへの適用

(2) 静電噴霧の改良と燃焼器の改良

液体燃料を用いた細径管燃焼器での高負荷燃焼を実現するために、液体燃料の静電微粒化モードとして、これまで用いてきたコーンジェットモードからマルチジェットモードへと変更することを検討した（図3）。印加電圧、キャピラリー・メッシュ間距離、キャピラリー径が噴霧形状に与える影響について詳細に調べた。その結果、細径管燃焼器への壁面への燃料付着を抑制できる噴霧形状を安定して形成可能な条件の存在を確認した。

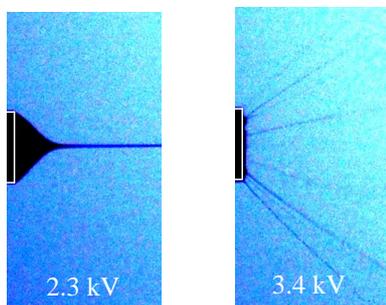


図3 静電噴霧のコーンジェットモード（左）からマルチジェットモード（右）への移行

マルチジェットモード静電噴霧を細径管型燃焼器の燃料供給に適用し、燃焼実験を行った（図4）。この静電微粒化モードを用い、既燃側管壁材質として熱伝導率の高い真鍮を用いることにより、噴霧液滴の微細化と再生予熱の促進とを可能とし、火炎定在可能条件の拡大が可能であることを確認した。壁面付着なく燃焼が可能な燃料流量はコーンジェットモードの場合と比べ約2倍となった。

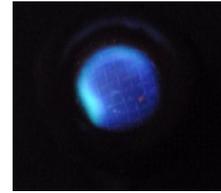


図4 マルチジェットモード静電噴霧適用時の細径管型燃焼器内に定在する火炎（下流側から観察）

金属メッシュを有する細径管型燃焼器における熱還流による再生予熱を促進する構造について、3次元数値計算により確認を行った。熱還流としては管壁やメッシュを通じた熱還流と、排気ガス循環時の熱還流とを対象とした。前者については、未燃側と既燃側の管壁の熱伝導率が、ガス温度分布（図5）、壁面温度、再生予熱割合、熱損失割合、火炎定在可能上限流速に与える影響について調べた。未燃側の管壁の熱伝導率が大きいほど火炎定在可能上限流速は低下するが、既燃側の管壁の熱伝導率が大きいほど増大することが明らかになった。後者については、管壁の熱伝導率が大きい場合には影響が小さいが、管壁の熱伝導率が小さい場合には火炎定在可能上限流速を増大させ有効であることを示した。また、液体燃料を用いる際の制約を考慮した場合も再生予熱効果についても数値解析を行い、液体燃料を用いた燃焼器の設計方針も示した。

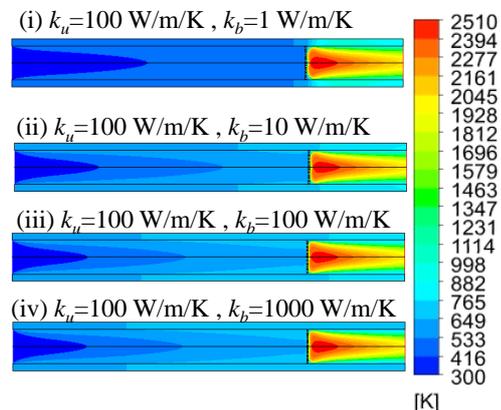


図5 未燃側と既燃側の燃焼器構造の異なる熱伝導率に対するガス温度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Fudhail Abdul MUNIR, Tsuyoshi TOKUMASA, Takehiko SEO, Masato MIKAMI, Approaches to Enhance the Combustion in Meso-scale Cylindrical Tube Combustors, Proceeding of The 26th International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, 2015, ISTP-26-033, USB

Fudhail Abdul MUNIR, Masato MIKAMI, Modeling of Propane-air Combustion in Meso-scale Tubes with Wire Mesh, Proceeding of The 10th Asia-Pacific Conference on Combustion, 査読有, 2015, ASPACC-2015-027, USB

Fudhail Abdul MUNIR, Masato MIKAMI, A Numerical Study of Propane-air Combustion in Meso-scale Tube Combustors with Concentric Rings, Journal of Thermal Science and Technology, 査読有, Vol. 10, No.1, 2015, p. JTST0008
DOI:10.1299/jtst.2015jtst0008

〔学会発表〕(計6件)

徳政剛, Fudhail Bin Abdul MUNIR, 瀬尾健彦, 三上真人, プラズマアクチュエータの小径管燃焼器への適応に関する研究, 第53回燃焼シンポジウム, 2015年11月16日~19日, つくば国際会議場(茨城県つくば市)

Fudhail Abdul MUNIR, Tsuyoshi TOKUMASA, Takehiko SEO, Masato MIKAMI, Approaches to Enhance the Combustion in Meso-scale Cylindrical Tube Combustors, The 26th International Symposium on Transport Phenomena, 2015年9月27日~10月1日, Leoben (Austria)

Fudhail Abdul MUNIR, Masato MIKAMI, Modeling of Propane-air Combustion in Meso-scale Tubes with Wire Mesh, The 10th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2015年7月19日~22日, Beijing (China)

徳政剛, 畠田直幸, Fudhail Bin Abdul MUNIR, 瀬尾健彦, 三上真人, マイクロプラズマアクチュエータを用いた誘引流特性の調査, 日本機械学会中国四国学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, 2015年3月5日, 近畿大学工学部(広島県東広島市)

Fudhail Abdul MUNIR, Naoyuki HATAKEDA, Takehiko SEO, Masato MIKAMI, Investigation of Wall Thermal

Conductivity Effects on Combustion Stability in Meso-scale Tube Combustors with Wire Mesh, 35th International Symposium on Combustion, WIPP, 2014年8月3日~8日, San Francisco (USA)

Naoyuki HATAKEDA, Fudhail Abdul MUNIR, Takehiko SEO, Masato MIKAMI, Experimental Study on Meso-scale Tube Combustors with Multi-jet-mode Electro-spray, 35th International Symposium on Combustion, WIPP, 2014年8月3日-8日, San Francisco (USA)

6. 研究組織

(1)研究代表者

三上 真人 (MIKAMI, Masato)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 20274178

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

小河原 加久治 (OGAWARA, Kakuji)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 70211125

南 和幸 (MINAMI KAZUYUKI)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 00229759

瀬尾 健彦 (SEO, Takehiko)
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 00432526

(4)研究協力者

フダイル ビン アブドゥル ムニル
(Fudhail Bin Abdul Munir)

畠田 直幸 (HATAKEDA, Naoyuki)

徳政 剛 (TOKUMASA, Tsuyoshi)