

令和元年6月20日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06115

研究課題名(和文) 旋回角度可変による管内予混合火炎動的挙動のレーザ画像解析と安定燃焼向上への応用

研究課題名(英文) Laser image diagnostics of in-cylinder premixed flame dynamic behavior with variable swirl vane angle and its application to stable combustion improvement

研究代表者

小宮山 正治 (Komiya, Masaharu)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40178372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：可変式旋回羽根付きスワローを用い、空気流量と空気比一定の状態では、燃焼器を模擬した円管内の旋回強さを独立的に変化できるシステムを新たに構築した。さらに、高時間分解能を有する時系列PIV計測により、管内の旋回強さが変化している間の予混合火炎の動的挙動について、火炎周りの流れ場変化と共に同時に捉え、両者の相互関連性を明らかにした。また、旋回流強さを時間的に増加させる、あるいは減少させる変化を与えることによって、火炎の位置を上流側あるいは下流側に移動させ、制御することが可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境負荷低減の観点から希薄予混合火炎が大型燃焼器に利用される場合が増加している。これは窒素酸化物排出の低減効果が大きいためであるが、一方では逆火による燃焼器損傷の危険性が生じ、火炎状態の安定性向上が重要となる。また、燃焼器内では混合促進のために強い旋回流を伴う。本研究では旋回強さを制御可能とする可変旋回羽根を新たに設計し、流れと火炎の相関性を明らかにするとともに、燃焼状態の制御の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Using a variable swirl-angle vane, a new system has been developed that can independently change the swirling strength in a circular pipe simulating a combustor with constant air flow and air ratio. Furthermore, by the time-series PIV measurements, the dynamic behavior of the premixed flame while the swirling strength in the pipe was changing was measured simultaneously with the flow fields around the flame behavior, and the correlation between the two was clarified. In addition, it was shown that it is possible to move and control the flame position upstream or downstream by increasing or decreasing the strength of the swirling flow temporally.

研究分野：燃焼工学

キーワード：予混合火炎 旋回羽根 流れの可視化 火炎の制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

政府のエネルギー白書では、電源に占める化石燃料(天然ガス、石炭、石油)の比率が88%に達し、第1次石油危機の起きた1973年度の80%を上回っていることが指摘されている。一方では、ICPP(気候変動に関する政府間パネル)で議論されているように二酸化炭素排出拡大に伴う地球温暖化と気候変動は地球全体で早急に解決の糸口を見いだすべき重要な課題となっている。火力発電所で使用されるガスタービンの高効率化は二酸化炭素排出抑制に寄与する必要項目であり、このためには燃焼器温度の高温化が肝要となる。しかしながら、ガスタービンを初めとした大型工業燃焼器に使用される希薄予混合燃焼に関して、逆火の危険性から旋回羽根後流で燃料と空気を急速に混合する必要があり、混合状態が不完全で不均一性が高い予混合状態で火炎を形成するために、高温領域の発生を促進し、光化学スモッグ・酸性雨の原因となる窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )排出を増加することになる。このため、燃焼器の高温化のためには逆火の危険性を抑制させて均一な混合状態を促進し、安定した火炎状態を維持するための燃焼法を確立することが急務となっている。

2. 研究の目的

工業用燃焼器は管壁で覆われており、旋回流をともなう流れによる渦崩壊や渦心の歳差運動による火炎の非定常挙動が複雑となる。このような管内で安定した火炎状態を維持するための燃焼法を確立するためには予混合火炎の詳細な構造解析が必要であり、レーザ応用による時系列画像計測(PIV: Particle Image Velocimetry)が有用となる。さらに、これらの計測技術を応用して、管内旋回流をともなう燃焼場における火炎の動的挙動の可視化を行い、その非定常伝播特性を解析することが燃焼現象の理解および安定燃焼法の確立には重要であると考えられる。燃焼状態を変化させるためには一般的に、燃焼負荷(空気比および総流量)を変える必要があるが、これを行うと火炎状態が不安定になり、 $\text{NO}_x$ 排出量が増加することになる。このため、本研究では燃焼負荷一定の下で、旋回流強さのみを変化させる時間可変旋回羽根を新たに考案製作し、安定火炎状態の制御への適用性を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

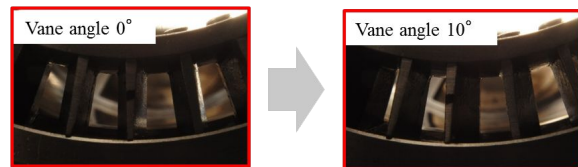
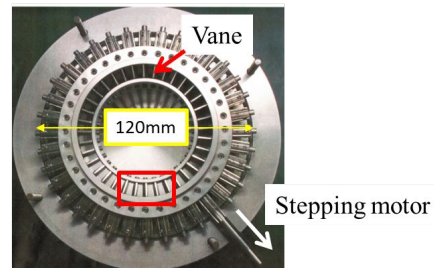
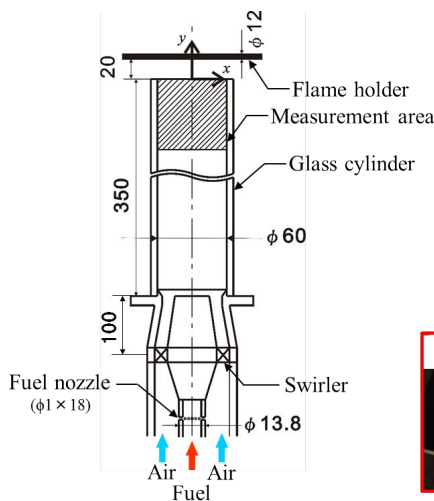


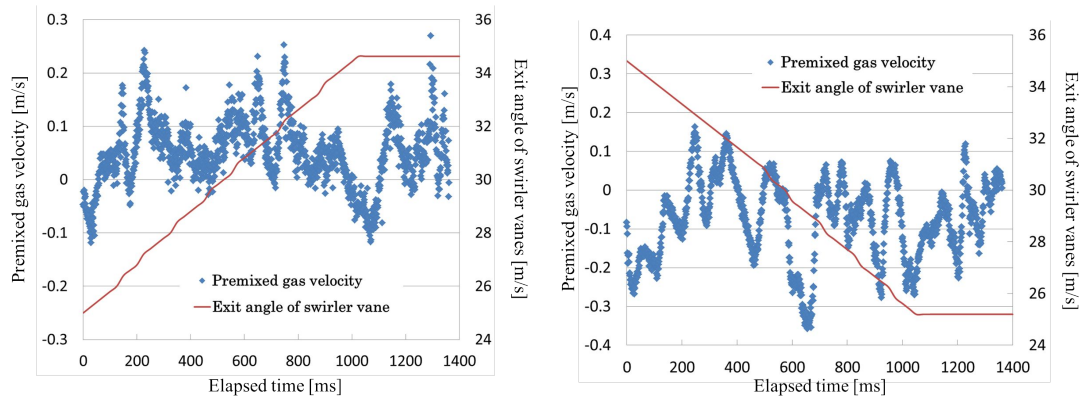
図1 モータ可変旋回羽根付燃焼器

図2 モータ可変旋回羽根付スワール

表1 実験条件

条件	空気流量 $Q_{air}$ [NL/min]	羽根角度 [degrees] 変化 $\alpha$	スワール数 $S$ [-] 変化	スワール数 $S$ 平均変化 速度 [1/s]	空気比 $\lambda$ [-]
A	50	25.0 → 35.0	0.421 → 0.633	0.212	1.87
B		35.0 → 25.0	0.633 → 0.421		

本研究では予混合燃焼が行われている燃焼器の1つを模擬した実験用燃焼器(図1)を対象に実験を行った。燃料については、天然ガスの主成分であるメタン( $\text{CH}_4$ )を用いた。燃焼器底部より燃料と空気を別々に取り入れ、燃焼器中心軸にあり直径1mmの穴が18個空けられた燃料ノズルから燃料を噴き出し、周囲の空気と混合させ、その混合気をスワールに通すことにより旋回を与えた。本実験で用いたスワールは図2で示すように、36枚の羽根から成り立って



(a) 条件 A ( $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = -60 \text{ mm}$ )

(b) 条件 B ( $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = -80 \text{ mm}$ )

図 3 未燃予混合気の軸方向流速と旋回羽根角度の時間的变化

おり、羽根角度はステップモータによって制御でき、旋回流の強さを独立に変化させることができる仕組みになっている。このステップモータは、後述の高速カメラによる撮影開始のトリガにもなっているため、ステップモータによる羽根角度の変化開始と同時に高速カメラの撮影が開始されるようになっている。そして、スワラ通過後の未燃予混合気は、燃焼器の閉鎖空間を模擬したガラス円筒管（長さ 350 mm 内径 60 mm）の内部を流れ大気中へ開放される。ガラス円筒管の材質については、レーザー光を透過し、円筒管内部の火炎形状と流れ場を可視化できるようにするため、合成石英とした。また、ガラス円筒管上端より 20 mm 上方に保炎器として直径 12 mm のセラミック製円柱を設置した。特に、旋回強さを変化した時における火炎先端の動的挙動と周囲の未燃予混合気の流れ場を同時に捉えるため、図 1 の斜線部が示すガラス管出口付近の領域に対して時系列 PIV 計測を導入し、両者の相互関係について考察を行った。また、使用する座標系については、ガラス管上端面における中心を原点とし、半径方向に  $x$  軸を、ガラス管軸上方向に  $y$  軸を設定した。表 1 には実験条件を示した。実験条件は旋回強さを表すスワール数を  $S = 0.421$  から  $0.633$  へ強めた実験条件 A とその逆に  $S = 0.633$  から  $0.421$  へ弱めた実験条件 B とした。いずれの条件でも空気流量は  $50 \text{ NL/min}$  とした。

次に、実験用燃焼器を含む全体的な実験装置について述べる。PIV 計測では、流れ場に混入させたトレーサ粒子がレーザーシート面内を移動する量から面内 2 次元速度成分測定を行う。本実験では、このトレーサ粒子として直径約  $1 \mu\text{m}$  のオリブオイル粒子を利用し、コンプレッサから供給された空気に混入させ実験用燃焼器に導いた。PIV 用の光源には波長  $514.5 \text{ nm}$  の連続発振 Ar+レーザー (Spectra Physics 社製 Stabilite2017, 定格出力  $6\text{W}$ ) を用いた。このレーザー光をファイバに入射させ、ファイバ出口に取り付けたコリメータによって厚さ  $1 \text{ mm}$  のレーザーシートを作成した。さらに、トレーサ粒子からの散乱光強度を測定する高速カメラ (Photron 社製 FASTCAM SA-3 model 120K-M2  $1024 \times 1024 \text{ pixels}$ ) をレーザーシート前面に配置し、前方散乱光を検出することにより、トレーサ粒子からの散乱光強度を強め、相対的にガラス管表面における反射の影響を低減した。

#### 4. 研究成果

計測開始から終了までの予混合気の軸方向速度について、その時間的变化を図 3 に青色のプロットで示す。これらの図中では赤線で旋回羽根角度の時間的变化も一緒に示しているため、旋回強さの変化に対する流れ場の応答が明らかとなる。図 3 においても、各図の(a), (b)は、それぞれ実験条件 A, B に対応している。着目した一点については、図 3(a)では  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = -60 \text{ mm}$ 、図 3(b)では  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = -80 \text{ mm}$  の点とした。

スワール数  $S = 0.421$  から  $0.633$  へ旋回強さを強めた実験条件 A の結果を示す図 3(a)から述べると、スワラの羽根角度が旋回強さを強める方向へ変化している間は、逆流はほとんど見られないことが分かる。しかし、旋回羽根の角度変化が始まってから、未燃の混合ガスが平均流速にてスワラから火炎先端の平均位置へ流れるために要する時間  $t_0$  (約  $1000 \text{ ms}$ ) だけ経った頃に、図 3(a)でも明らかとなった一時的な逆流を観察することができる。一方、旋回強さを  $S = 0.633$  から  $0.421$  に弱めた時における流れ場の応答については、図 3(b)が示すように、旋回強さを弱める方向に羽根角度を動かしている間も、流速が  $0.1 \text{ m/s}$  以下の低速ながらも下流への流れが頻りに現れていることが分かる。

旋回強さの変化が火炎の動的挙動に及ぼす影響を、未燃予混合気の流れ場との相互関係と共に示す。図 4 は、燃焼場において時系列 PIV 計測を行い、その結果を時系列に並べたものである。図中では、未燃予混合気の軸方向流速に関して、下流方向 (図面で上方向) を赤色で、上流方向 (図面で下方向) を青色でそれぞれ表す。また、燃焼が生じている領域はトレーサ粒子

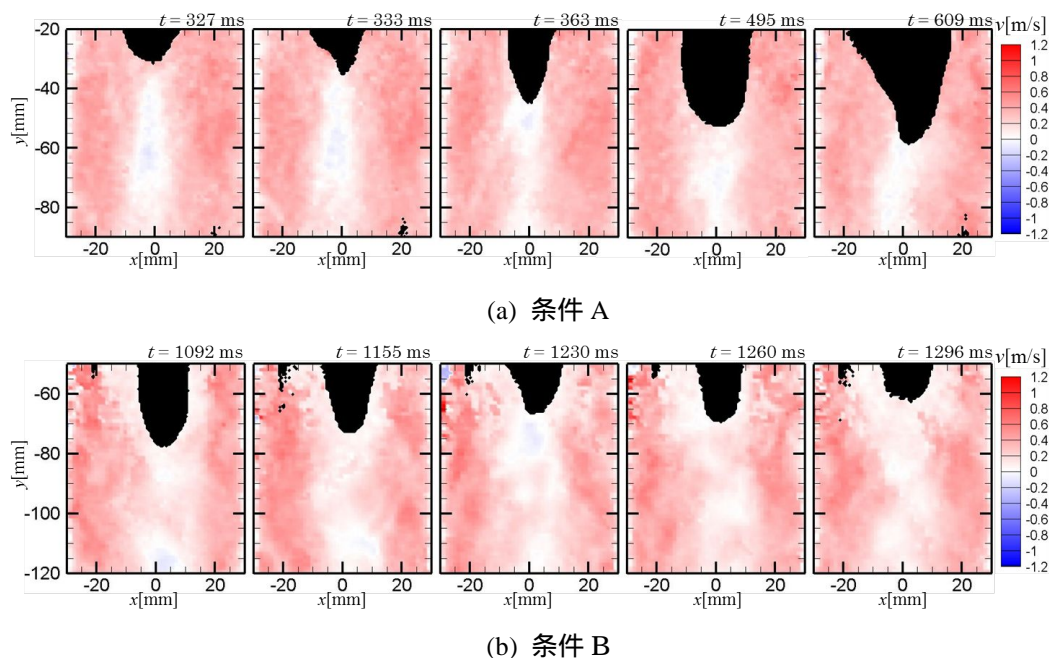


図 4 旋回強さ変化時の軸方向速度分布と火炎挙動の時系列変化

が消失することから流速を検出することは困難であるが、火炎形状を明確に求めることができ、黒い領域で示した。そして、図 4(a), (b)は条件 A, B に対応している。まず、スワール数を  $S = 0.421$  から  $S = 0.633$  へ変化させ、旋回強さを強めた条件から述べる。燃料流量  $Q_{fuel}$  については、 $S = 0.421$  における逆火限界値（空気比  $\lambda = 1.87$ ）とした。また、ここでは、特に火炎が  $y = -30$  mm から  $y = -60$  mm へ火炎が移動していくときに着目した結果を述べる。図 4(a)における  $t = 333$  ms の結果では、未だ初期状態から半径方向に幅が広がっていない低速領域へ、細長くなった火炎先端が入り込み始める様子が捉えられている。その後も火炎はその先端を尖らせて上流へと移動している様子がわかる。しかし、 $t = 495$  ms のように、下流へ流れる未燃予混合気が火炎先端に衝突すると火炎先端は丸くなり、火炎が横に広がると共に上流への火炎移動が止まる。

続いて、スワール数を  $S = 0.633$  から  $S = 0.421$  へ旋回強さを弱めた条件 B について述べる。ここでは、特に、火炎が  $y = -80$  mm から  $y = -60$  mm へ移動していくときに注目して考察を行う。燃料流量についても、 $S = 0.633$  における逆火限界値（空気比  $\lambda = 1.92$ ）と設定している。図 4(b)における  $t = 1155$  ms では、下流方向へ流れる未燃予混合気が火炎先端に衝突し、火炎先端の形状は、下に凸から平坦に変わっている。その後、予混合気の流れと共に、火炎は下流方向へ押し戻される。しかし、火炎先端の上流側に存在する未燃予混合気の流れ方向は常に下流方向とはならず、 $t = 1230$  ms における瞬時場のように上流方向にもなるため、火炎が上流側へ移動することもあるが、全体を通しては、火炎が徐々に下流側へ押し戻されることが観察された。

本研究では、可変式旋回羽根付きスワラを用い、空気流量と空気比一定の状態、燃焼器を模擬した円管内の旋回強さを独立に変化できるシステムを新たに構築した上、高時間分解能を有する時系列 PIV 計測により、管内の旋回強さが変化している間の予混合火炎の動的挙動について、火炎周りの流れ場変化と共に同時に捉え、両者の相互関係について以下の知見を明らかにした。

旋回強さを強めると、燃焼器中心軸に沿って定常状態では見られない強い逆流が一時的に観測された。また、旋回強さを弱めると、一時的に旋回流の渦構造が崩壊し、燃焼器中心軸にまで下流への流れが生成される。旋回強さを弱める速さが遅い場合は、下流への流れが断続的に現われ、火炎は上下に行き来しながら下流側へと伝播していく。また、旋回流強さを時間的に増加させる、あるいは減少させる変化を与えることによって、火炎の位置を上流側あるいは下流側に移動させ、制御することが可能であることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

(1) Komiyama, M., Hamaguchi, F. and Nishida, S., “Unsteady Flame Behavior in a Tapered Circular Tube with Swirling Flow”, Proceedings of 29th International Symposium on Transport Phenomena, 査読あり, (2018), Paper No. ISTP29-161.

(2) Komiyama, M. and Utsumi, Y., “Interaction Behavior between Diffusion Flame and a Vortex with Surrounding Airflow”, Proceedings of 8th European Combustion Meeting, 査読あり, (2017), Paper

〔学会発表〕(計 6 件)

- (1) 井神 友宏, 安倍 響平, 小宮山 正治, 森山 達也, 青木 修一, “周囲旋回流をともなう拡散火炎の燃焼特性”, 第 5 6 回燃焼シンポジウム, 査読なし, (2018).
- (2) 熊崎 貴文, 小宮山 正治, 大浜 紳一, 西田 哲, “旋回流強さの変化による円管内予混合火炎の非定常挙動”, 第 5 6 回燃焼シンポジウム, 査読なし, (2018).
- (3) 安江 皓一, 小宮山 正治, 西田 哲, “LIF による不均一濃度場における希薄予混合燃焼の挙動解析”, 第 55 回燃焼シンポジウム, 査読なし, (2017).
- (4) 濱口 典大, 小宮山 正治, 熊崎 貴文, 西田 哲, “旋回羽根角度が変化する円管内での動的火炎挙動の解析”, 第55回燃焼シンポジウム, 査読なし, (2017).
- (5) Komiyama, M. and Warot, W., “Concentration Measurement of Lean Premixed Flame in a Cylindrical Burner by LIF”, 36th International Symposium on Combustion, Work-in-Progress, 査読なし, (2016), Paper No.WIP5P045 .
- (6) 濱口 典大, 小宮山 正治, 市川 雄一, “スワール数の変化が及ぼす円管内予混合火炎の非定常挙動への影響”, 第54回燃焼シンポジウム, 査読なし, (2016).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<https://www1.gifu-u.ac.jp/~komilab/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：西田 哲  
ローマ字氏名：Nishida Satoshi  
所属研究機関名：岐阜大学  
部局名：大学院工学研究科  
職名：准教授  
研究者番号 ( 8 桁 ) : 30377783

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。