

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04215

研究課題名(和文) 旋回羽根角度時間可変燃焼器の開発に基づく燃焼安定化制御への応用

研究課題名(英文) Application to Combustion Stabilization Control by Development of Swirl Vane Angle Time Variable Combustor

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、羽根角度の時間可変を可能とする旋回羽根を新たに開発し、その旋回羽根を予混合燃焼器に設置した。そして、羽根角度の時間変化性能を明らかにした。さらに、この羽根角度可変旋回羽根をもつ燃焼器に形成される火炎先端の位置が連続的に上流および下流方向へ往復移動可能であることを示した。その際に火炎先端周りの流速分布と火炎挙動をレーザー画像計測し、両者の時間変化特性を明らかにした。さらに、火炎位置を判断するために高速度カメラを導入し、火炎安定化システムを構築した。そして、円管内で誘発された火炎の逆火を安定化させて、その火炎位置を一定範囲内に保持することが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、燃焼負荷(空気比および総流量)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開発し、予混合気燃焼器を模擬した円筒型燃焼管内で形成する予混合火炎の位置を連続的に上流および下流方向へ往復移動可能であること初めて示した報告例である。また、構築した火炎位置安定化システムを適用することで、一度逆火を開始した予混合火炎先端位置を旋回流強さのみを制御することで、一定範囲内に保持することが可能であることを示したものである。このことは、今後高度化するとともに、逆火防止の方策が難しくなる、ガスタービン燃焼器をはじめとする大型燃焼器での安定燃焼実現のために寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new swirl vane that can change the vane angle with time and installed the swirl vane in the premixed combustor. Then, the time change performance of the vane angle was clarified. Furthermore, it was shown that the flame tip position formed in the combustor with this variable-vane-angle swirler could be reciprocated continuously in the upstream and downstream directions. At that time, the flow velocity distribution near the flame tip and the flame behavior was measured by the laser image measurements, and both temporal change characteristics were clarified. Furthermore, a high-speed camera was introduced into this system to determine the flame tip position, and a flame tip position stabilization system was constructed. And it was shown that it is possible to stabilize the flashback of the flame induced in the circular tube with swirling flow and keep the flame tip position within a specific range.

研究分野：燃焼工学

キーワード：予混合火炎 旋回羽根 時間可変角度 燃焼安定化

1. 研究開始当初の背景

2011年に発生した東日本大震災とそれに伴う福島原子力発電所の事故によって、現在天然ガスを燃料とする火力発電による電力供給が緊急の課題となっている。また、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酸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、ガスタービンを初めとする大型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、局所的な高温領域が発生し、光化学スモッグ・酸性雨の原因となる窒素酸化物(NO_x)排出を増加させる要因となる。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る。また、工業用燃焼器は管壁で覆われており、旋回流を伴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より複雑となる。

2. 研究の目的

本研究では、レーザ応用による時系列画像計測を開発し、管内旋回流をとまなう燃焼場における火炎の動的挙動の可視化を可能として、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、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となり、 NO_x やCOの排出物が増加することになる。そこで、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開発し、火炎の安定化制御への応用を検討する。

3. 研究の方法

希薄予混合燃焼器を模擬した予混合燃焼器を図1に示す。燃焼室には室内にレーザを導けるように石英ガラス製の円筒管を用いている。さらに旋回羽根の手前でメタン(CH_4)と空気を混合し、旋回羽根により旋回を与えている。旋回強さは混合状態に直接影響を与える重要なパラメータである。このため、これまでの研究によって、他のパラメータを変更することなく、旋回強さのみを制御するために、旋回羽根に冠歯車とステッピングモータを組み込み、歯車式の出口角度制御可能な旋回羽根を開発した。しかしながら、この歯車式旋回羽根ではバックラッシュが生じるために旋回羽根角度を十分な速度で変化させることが困難である。このため、図2に表すような新規の独立時間可変旋回羽根を設計開発した。この概略図では4枚の各旋回羽根にステッピングモータをそれぞれ軸付けした図になっているが、実際には円周上に配置した36枚すべての旋回羽根に独立のステッピングモータを直接軸付けする。この新規の時間可変旋回羽根を用いることで、旋回羽根角度を十分な変化速度で増減可能になると考える。そして、旋回流強度の時間可変制御が可能になると考える。

また、図3に実験装置全体図を示す。予混合器内の瞬間的な流れ場を可視化するために、時系列粒子画像流速(PIV)測定を実施した。メタンは天然ガスの主燃料であり、燃料として使用した。時系列PIV測定では可燃性オリーブオイルをトレーサとして使用した。この可燃性トレーサを使用すると、流れ場だけでなく詳細な火炎形状も測定できる。粒子表面で反射された散乱

光の画像は、測定領域の正面に設置された高速カメラ (Photron FASTCAM 1024 × 1024 pixels) で計測した。図1において、 x 軸は円筒形ガラスの中心軸からの半径方向の距離を、 y 軸は円管の頂部からの軸上方向の距離をそれぞれ表す。 x - y 測定面では火炎の挙動と流れ場の間の相互作用が可視化される。図3において、黒線で表された流路系では流路を2つに分岐させている。1つの流路は PIV 測定に使用されるオイル粒子を生成するバブラーを通過し、もう1つの流路は空気流量に関連する指定された実験条件を満たすように調整をし、その後燃焼器に供給する。時系列 PIV 測定では波長 $532 \pm 1 \text{ nm}$ の連続発振半導体励起固体レーザー (MGL-N-532A, 定格出力 4W) によりレーザーシートを形成した。高速度カメラのサンプリング周波数は1000Hzとした。PIV 測定に基づく空間分解能は 0.21 mm とした。この空間解像度は、 $215 \times 215 \text{ mm}$ に相当する $1024 \times 1024 \text{ pixels}$ という比較的広い領域を対象にするために設定した。

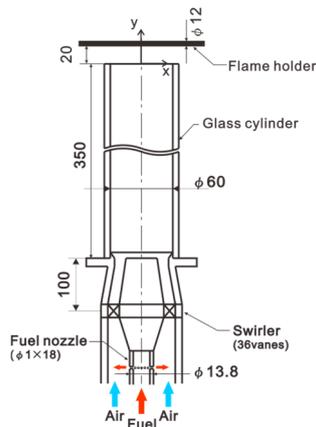


図1 実験用予混合燃焼器

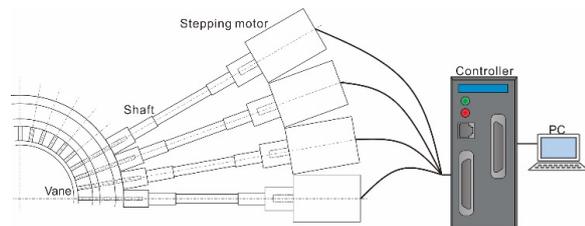


図2 羽根角度時間可変旋回羽根の概略図

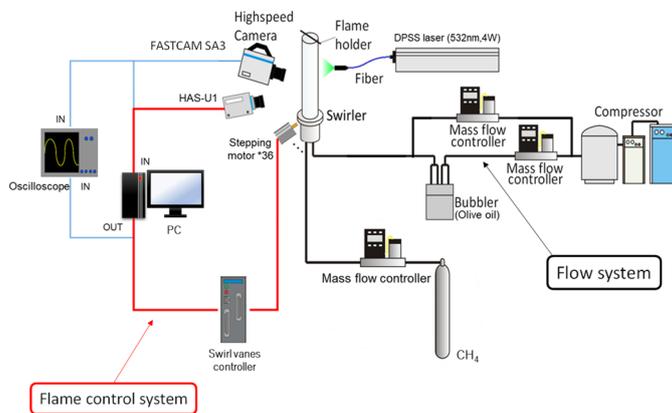


図3 火炎安定化システムと流れ系の概略図

4. 研究成果

まず、時間可変角度旋回羽根による火炎の非定常挙動を分析した。表1に実験条件を示す。空気流量、 Q_{air} は 50 NL/min に設定され、メタン流量は時間的に一定とした。未燃混合気の時間平均速度は 0.31 m/s としている。この条件では、時間可変角度旋回羽根を使用して燃焼場の旋回流強度を変化させ、その時の火炎挙動と流れの応答を調べるために、比較的遅い流量と弱いスワール数を設定した。条件 A では、旋回羽根角度は初期に 25° に設定し、 35° まで増加させ、再び 25° に戻した。メタン流量は逆火限界に相当する 2.81 NL/min であり、初期角度 25° での空気比は 1.87 であった。スワール数 S は、旋回羽根の形状 (R_i : 内径, R_o : 外径, α : 旋回羽根

の出口角度) から式 (1) を使用して計算される.

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1-R^3}{1-R^2} \quad (R = R_i / R_o) \quad (1)$$

測定範囲は円筒管上部の中心軸を原点としている. 旋回羽根の動作速度は, 1 往復あたり ± 0.349 rad/s, 1000 ms であった. 条件 A の場合には, 旋回羽根を往復の前半で $+0.349$ rad/s, 往復の後半で -0.349 rad/s で動作させ, その後旋回羽根を停止させた.

図 4 に実験条件における旋回羽根の出口角度の時間変化を示す. これは円管を使用せずに羽根の真上に高速度カメラを設置し, 50NL/min の空気流を維持したときの出口羽根角度の時間変化を測定したものである. 図 4 は条件 A において, 角速度が正から負に変化する際に最初は旋回強度が増加し, その後減少に転じているが, 時間遅れはほとんどないことを示している.

図 5 は条件 A における PIV 計測により得られた瞬時軸方向速度分布を表し, そのうち 10 個のサンプルが時系列順に抽出されている. これらの図では, 流れは下から上方向へ流れており, 下流方向が正で赤, 上流方向が負で青を表す. 図中の t は旋回羽根角度の変化と高速度カメラ撮影開始からの経過時間を示している. 図中では炎が存在する部分が黒い領域に相当する. すべての図の同じ黒い点は, ガラス表面の反射により流速が計測できなかった領域を表す. 図中の $t = 1058$ ms および 1150 ms では, 羽根角度が初期値から増加し, 旋回強度が増加するにつれて, 旋回流による中心軸上の負圧が増加すると考えられる. その後, 渦の強さが弱まると, $t = 1702$ ms と 1950 ms で中心軸上の流れ場が下流方向の流れに変化することが観測できた. 火炎の伝播挙動に着目すると, 火炎先端付近の流れの方向に沿って火炎が伝播することが確認された. この図では, 火炎が上流方向に伝播するときは上流方向に気体の流れがあり, 火炎が下流方向に後退するときは下流方向に気体の流れが存在する. $t = 1312$ ms および 1500 ms で火炎伝播が上流方向から下流方向に変化すると, 火炎先端付近の上流方向の流れが弱まった.

次に, この可変角度旋回羽根を用いて管内予混合火炎の位置の変化を判断し, 火炎位置の安定化を試みるためのシステムを開発した. そして, このシステムを用いて, 火炎の逆火抑制への適用を試みた. そのため, 図 3 に赤線で示す火炎位置の安定化システムを組み込んだ. 円管内の火炎位置を判断するために, 別の高速度カメラ, DITECT 製 HAS-U1 300×1280 pixels を導入した. 本研究で用いた旋回羽根角度の変化設定について説明する. 上述のように, トレーサとしてオリブ粒子を用いており, 火炎領域ではオリブ粒子が消失するために, 測定範囲におけるトレーサ粒子からの散乱輝度分布が変化する. そこで, この高速度カメラを用いて, 火炎を毎秒 100 コマで連続計測し, 指定した間隔でコンピュータにデータを送信する. 前後の輝度値を比較することで, 火炎が上流方向へ移動したのか, あるいは下流方向へ移動したのかを判断し, それを補正する方向に旋回羽角度を変化させるプログラム命令をその都度実行させ, 火炎位置の安定化を試みた.

表 1 実験条件

Case	Air flow rate Q_{air} [NL/min]	Vane angle α [°]	Swirl number S [-]	Angular velocity [rad/s]	Air ratio [-]
A	50	25⇔35	0.421⇔0.633	± 0.349	1.87

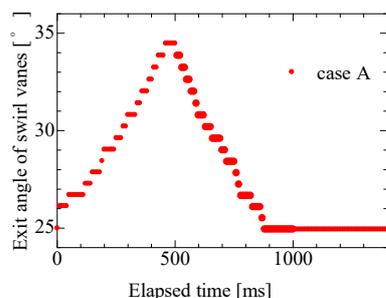


図4 旋回羽根角度の時間変化 (条件 A)

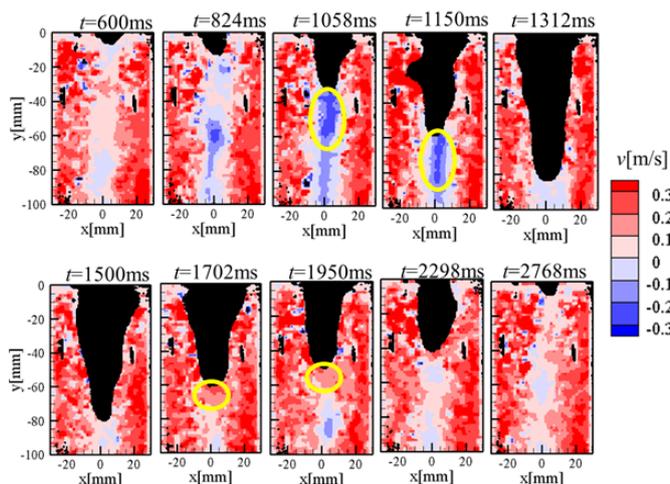


図5 火炎挙動と軸方向速度分布の時間履歴 (条件 A)

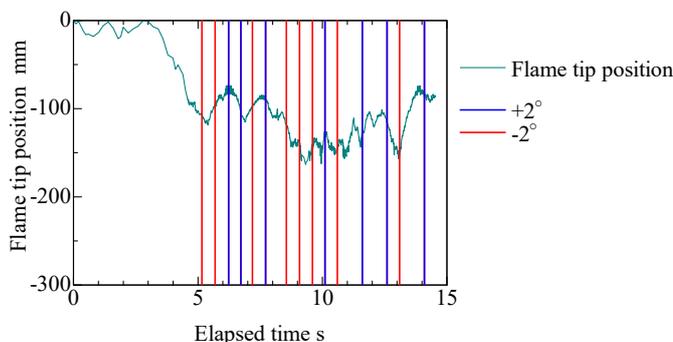


図6 安定化システム動作時の火炎先端位置および羽根角度を変更する命令の時間履歴

図6は安定化システム動作時の火炎先端位置および、羽根角度を変更するための命令の時間履歴を示したものである。横軸は計測を始めてからの経過時間、縦軸は火炎位置を示している。また、緑色の実線が火炎先端位置を示している。また、青色と赤色の縦線が、それぞれ旋回羽根角度を $+2^\circ$ 、 -2° 動かすためにコンピュータから信号を出力している時刻を示している。実験では、火炎を制御するためのプログラムを実行し、計測を始めた直後にメタン流量を増加させて逆火を誘発させた。このため、火炎位置が $t=3.0\text{ s}$ から $t=5.2\text{ s}$ にかけて約 120 mm 上流方向に移動したのち、旋回羽根の角度が変化した影響で、火炎位置が下流方向へ 42 mm 程度戻っている。以後、この実験では 15 s の間、火炎の位置を測定範囲内に保持することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 小宮山 正治, 濱口 典大, 西田 哲	4. 巻 87
2. 論文標題 旋回流を伴ったターバ管内の火炎挙動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaharu Komiyama, Takafumi Kumazaki, Satoshi Nishida	4. 巻 16
2. 論文標題 Reciprocating propagation of premixed flame using time-variable-angle swirl vanes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jtst.2021jtst0022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 生川 拓歩, 小宮山 正治, 西田 哲, 水野 友輔
2. 発表標題 円管内予混合火炎の角度可変旋回羽根による安定化
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野 友輔, 小宮山 正治, 西田 哲, 生川 拓歩
2. 発表標題 時間可変旋回羽根による予混合火炎挙動の制御
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野友輔, 小宮山正治, 西田哲, 安倍響平
2. 発表標題 時間可変旋回羽根を用いた円管内予混合火炎挙動の安定化
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nguyen Ngoc Hai, 小宮山正治, 西田哲
2. 発表標題 周田旋回流強さの変化による拡散燃焼特性の解析
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安倍 響平, 小宮山 正治, 坂下 陽亮, 西田 哲
2. 発表標題 時間可変旋回羽根による予混合火炎の伝播挙動の解析
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西田 哲 (Nishida Satoshi) (30377783)	岐阜大学・大学院工学研究科・准教授 (13701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------