

令和 4 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15217

研究課題名（和文）流速変動を基にした燃焼騒音から周方向モード燃焼振動への遷移機構のモデル化

研究課題名（英文）Modeling of the transition mechanism from combustion noise to tangential-mode combustion instability via velocity perturbations

研究代表者

庄司 烈 (Shoji, Takeshi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：20833172

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：実験室スケールの単管及び環状弱旋回燃焼器を用いた大気圧水素希薄予混合燃焼試験中に発生する燃焼振動中の火炎と流れ場の干渉メカニズムを明らかにした。単管燃焼器では、燃焼振動中に渦構造を伴う平坦形状の火炎が世界で初めて観測された。本現象は、強い圧力変動と流速変動を伴う、大規模スケールの渦と火炎の干渉が関与する水素火炎特有の現象であることが明らかとなった。環状燃焼器では、周方向モード圧力変動のピークが約1300Hz付近に観測された。また、隣接する火炎の干渉により、火炎間の軸方向流速が加速する様子が確認された。火炎の干渉による流速場の変化が、周方向モード燃焼振動の発生と関連している可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガスタービン・航空機エンジン等の燃焼器で発生する燃焼振動は、強い発熱率・圧力・流速変動を伴うため、燃焼器の構造破壊に直結する。実機燃焼器においては、軸方向モードの振動に加えて、より抑制されにくい周方向モードの振動が発生する可能性があり、燃焼器運用の安全性に多大な影響を与える。また近年、水素航空機開発の機運が急速に高まっており、航空エンジン用低NOx燃焼器の水素燃料対応に向けた技術開発が世界的に加速している。そのため、本研究成果である水素燃焼器特有の燃焼振動中における火炎や流れ場の干渉理解は、学術的意義及び燃焼振動が発生しにくい燃焼器の最適設計に繋がる技術的試験の獲得に寄与する。

研究成果の概要（英文）：The present study explores flame-flow interaction during combustion instability based on a series of atmospheric, lab-scale lean-premixed hydrogen combustion experiments using single and annular low swirl combustors. For the single combustor, a relatively flat flame involving large-scale vortical structures is first observed in the present study. This flame structure is caused by the interaction between large-scale vortices and flame with strong pressure and velocity fluctuations, which is a unique phenomenon of a hydrogen premixed flame. For the annular combustor, single-tone, azimuthal pressure oscillations are observed at a frequency of approximately 1300 Hz. Also, axial velocity acceleration in between two adjacent flames is confirmed caused by the flame-flame interaction. The phenomenon is possibly associated with the onset of azimuthal-mode combustion instability in an annular combustor.

研究分野：燃焼工学

キーワード：環状燃焼器 弱旋回流 水素火炎 燃焼振動 希薄予混合 モード解析 光学計測 遷移現象

1. 研究開始当初の背景

ジェットエンジン燃焼器で発生する燃焼振動は、燃焼器の甚大な損傷に直結するため、その発生を防ぐことがエンジン開発の重要課題となっている。加えて、燃焼振動は近年機運が高まっている水素航空機開発において解決すべき課題となることが必至であるにも関わらず、水素火炎の燃焼振動現象にはいまだ未解明の部分が多々あるため、本研究の取り組み課題の重要性は高いと言える。

従来研究から、燃焼振動は周期的に変動する発熱率・圧力・流速が形成するフィードバック機構により駆動されることが知られている。しかし、燃焼振動への遷移が発熱率・圧力・流速変動の具体的に何をトリガーとして発生するかの物理メカニズムは未だに明らかでない。燃焼振動の発生メカニズムが明らかになることで、燃焼器をより安全かつ能力を最大限に引き出した運用が可能となる。そのため、燃焼振動発生メカニズムの究明は学術的及び技術的重要性が高い。

本課題に対し、燃焼振動状態における発熱率と圧力の相関関係は従来から研究されているが、極度に過渡性の高い遷移区間で圧力・発熱・流速場が密接な相互相関を持つに至るプロセスを、高時空間分解能の精密計測を用いて解明する実験的研究例は世界的に見てもほぼ皆無である。そのため軸方向及び周方向モード燃焼振動への詳細な遷移プロセスは未だ明らかでない。

2. 研究の目的

本研究では、(1) 単管弱旋回燃焼器、及び、(2) 環状弱旋回燃焼器を用いた大気圧水素燃焼試験を行い、燃焼振動現象に係るパラメータである発熱率・圧力・流速変動の相互干渉を、周期性と位相差の相関によって分析する。分析を通じて、特に流速変動の寄与の観点より、安定燃焼から燃焼振動への遷移プロセスを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 単管燃焼器試験

単管弱旋回燃焼器及び計測システムの概要を図1に示す。水素と空気は燃焼器上流に設置されたスタティックミキサで十分に混合される。予混合気は燃焼器下部から燃焼器内へ流入し、二つの整流板と一つのスワローを通過して、バーナ出口へ流れる。スワローは、中心部の直径25mmの多孔板(3.6mmの孔が19個)とその周囲に環状に設置された12枚の軸流ペーンによって構成される。各ペーンは燃焼器中心軸に対して37度の傾斜角を持つ。スワローは燃焼器出口から43mm上流に設置されており、そのスワロー数は約0.39である。バーナ出口平面には、内径100mm、厚み2mmの石英管を設置し、燃焼器内の火炎及び流れ場の様子を可視化する。石英管の高さは500mm(条件1)と300mm(条件2)の二種類を使用し、燃焼振動中の異なる火炎と流れ場の挙動を比較する。本研究で実施した代表的な試験条件と計測項目を表1に示す。バーナ出口における初期バルク流速 V_m を15m/s、当量比 Φ を0.22あるいは0.25に設定し、4秒間かけて空気流量一定のまま燃料流量を線形的に上昇させることで、 Φ を0.27あるいは0.32まで上昇させる。これにより、安定燃焼から燃焼振動への遷移過程を観測する。

本供試体に対しては、燃焼器内圧力変動、OH*自発光画像、Particle Image Velocimetry (PIV) による流速場を高時間分解能で同時に計測した。燃焼器内圧力変動は、 $(x, y, z)=(0, 35, 0)$ mmのバーナ出口平面内にフラッシュマウントした水冷式圧力センサー(Kulite WCT-312-5SG)によって、サンプリング周波数200kHzで5秒間計測した。

OH*自発光画像計測(以下、OH*計測と呼ぶ)は、奥行き方向に積算されたOH*自発光強度を2次元画像として取得する手法である。OH*自発光強度は発熱率と正の相関があることが知られている。OH*計測では、高速度カメラ(Photron SA-X2)にイメージインテンシファイア(Lambert Hicatt 25D)、UVレンズ(Sodern type CERC0 2178, 100mm, f/2.8)、バンドパスフィルタ(Semrock FF01-320/40)、ショートパスフィルタ(Edmund Optics TS OD4-400/50)を装着して使用した。イメージインテンシファイアの露光時間は50 μ mに設定した。

流速場は、2次元PIV計測(カメラ1台、2次元2成分)を実施することで取得した。PIV計測では、高速度カメラ(Phantom v2512)にレンズ(Nikon, Nikkor 105mm, f/5.6)及びバンドパスフィルタを装着して使用した。光源は532nmの光を発するNd:YAGレーザ(Edgewave GX600-2-L)を40kHz、つまり各レーザパルス間の時間幅を25 μ sに設定して使用した。レーザ出力は約60W(各パルス約1.25-1.5mJ)に設定した。トレーサ粒子として平均粒径2.7 μ sのSiO₂(Liquid Gas MSF-30M)を使用した。

また、OH*計測と2次元PIV計測を同時に行うため、燃焼器とカメラの間にダイクロイックミラー(DIM-150C15-4-R250/410-T532)を設置した。本ミラーは532nmの波長の光を透過し、310nm付近の波長を持つOH*自発光を反射する。

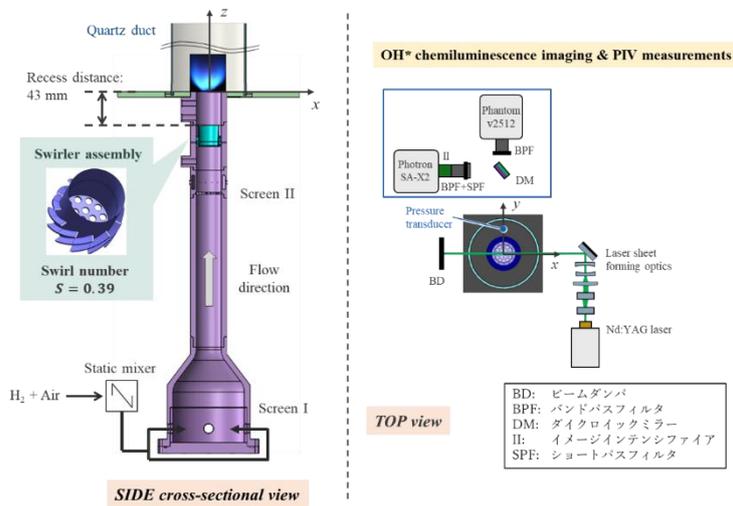


図 1. 弱旋回燃焼器及び計測システム概略図

表 1. 実験条件 (単管燃焼器試験)

バルク流速 V_m (m/s)	当量比 Φ	空気流量 (L/min)	燃料流量 (L/min)	石英管高さ (mm)	計測項目
15→15.3 (遷移)	0.22→0.27 (遷移)	793.0 (固定)	72.9→89.5 (遷移)	500 (条件 1)	圧力変動, OH*自発光画像, 2次元 PIV
15→15.4 (遷移)	0.25→0.32 (遷移)	763.7 (固定)	81.9→104.9 (遷移)	300 (条件 2)	圧力変動, OH*自発光画像, 2次元 PIV

(2) 環状燃焼器試験

環状燃焼器及び計測システムの概要を図2に示す。本試験では水素、メタン、水素/メタン混合燃料の三種類の燃料を用いた。スタティックミキサで混合された予混合気は燃焼器下部から流入後、燃焼器下部に設置されているフローディバイダーを経由して、内径 30mm の 12 個の流路へ均一に分配される。各流路は二つの整流板と一つのスワローを備える。スワローは、中心部の直径 22.5mm の多孔板 (3.07mm の孔が 19 個) とその周囲に環状に設置された 12 枚の軸流ペーンによって構成される。各ペーンは燃焼器中心軸に対して 37 度の傾斜角を持つ。スワローは燃焼器出口から 43mm 上流に設置されている。流路の出口平面には、内側と外側にそれぞれ石英管が設置されている。また、内筒 (内径 136mm, 厚み 2mm) と外筒 (内径 250 mm, 厚み 3 mm) の燃焼器出口平面からの高さはそれぞれ 150~335mm (1mm 刻み) と 250~400mm (15mm 刻み) の範囲で調整できるようになっている。本研究で実施した代表的な試験条件と計測項目を表2に示す。バーナ出口におけるバルク流速 V_m , 及び当量比を固定し、定常状態における圧力・発熱率変動・流速を計測する。

本供試体に対しても、燃焼器内圧力変動、OH*自発光画像、Particle Image Velocimetry (PIV) による流速場を高時間分解能で計測した。燃焼器内圧力変動は、バーナ出口平面内にフラッシュマウントした5つの水冷式圧力センサー (Kulite WCT-312-5SG) によって、サンプリング周波数 200kHz で 5 秒間計測した。本資料では PT1 のデータのみを示す。

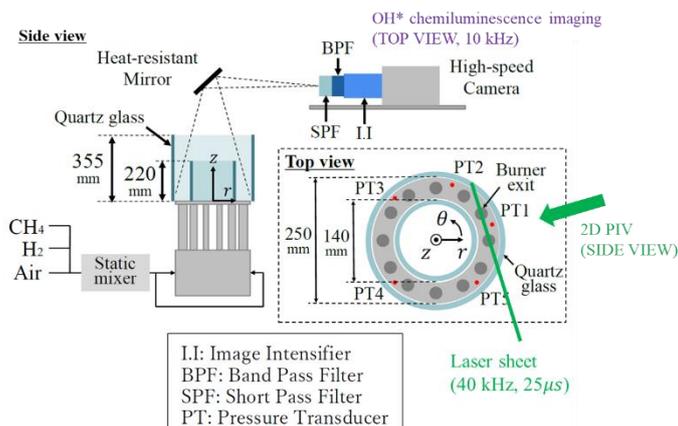


図 2. 環状燃焼器及び計測システム概略図

環状燃焼器内断面における発熱率変動の特性を分析するため、OH*計測は、燃焼器下流側に設置したミラーを介して燃焼内をカメラで覗き込む形で実施した。一方2次元PIV計測は、隣接する二つのバーナで生成される火炎の干渉を観察することを目的として行った。レーザシートを二つのバーナ出口上を通過するよう設置し、燃焼器の横方向にカメラを設置した。OH*計測と2次元PIV計測に使用したカメラやレンズの構成、及びレーザ光源は単管燃焼器試験と同様のものを適用した。

表 2. 実験条件 (環状燃焼器試験)

燃料	バルク流速 V_m (m/s)	当量比 Φ	空気流量 (L/min)	燃料流量 (L/min)	計測項目
水素	5	0.4	2180	365	圧力変動, OH*自発光画像, 2次元PIV
メタン	4	0.9	1868	168	圧力変動, OH*自発光画像
混合	5	0.5	2262	226/57	圧力変動

4. 研究成果

(1) 単管燃焼器試験

単管燃焼器試験により得られた主な知見を以下にまとめる。

- ① 安定燃焼から燃焼振動への遷移後において、条件1では約260Hz、条件2では約400Hzの周波数を持つ燃焼振動の発生が確認された(図3)。いずれの燃焼振動も、石英管の軸方向長さが1/4波長に対応するモードと考えられる。
- ② 条件1では火炎は燃焼器中心軸対象にお椀型の形状をとる(図4)。また、流速分布は中心軸付近に低流速領域を伴うダブルピーク形状をとる。これは弱旋回流れ場における典型的な特性である。一方条件2では、安定燃焼時は条件1同様の特性が見られるものの、燃焼振動が発生すると、火炎形状は比較的平坦となり、流速分布は先細ノズルに見られるTop-hat形状をとる。これは弱旋回流れ場非典型的な特性であり、本研究によって世界で初めて確認された。
- ③ 条件2についてより燃焼振動中における火炎と流れ場の特性を詳細に分析した(図5)。その結果、弱旋回流れ場に非典型的な特性は、バーナ出口周辺における強い流速変動が原因となって形成される渦構造と火炎の干渉により、火炎形状と流れ場の特性が大きく変化することに起因する。これにより、流速変動が燃焼振動中における火炎と流れ場の特性の決定に強く影響していることが示唆された。

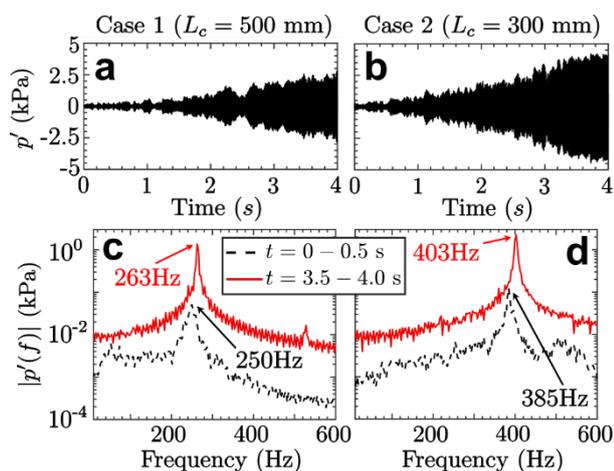


図3. (a, b) 時系列圧力変動データ p' . (c, d) 0.5秒間の時系列データ p' に対するパワースペクトル. (a, c) 条件1, (b, d) 条件2.

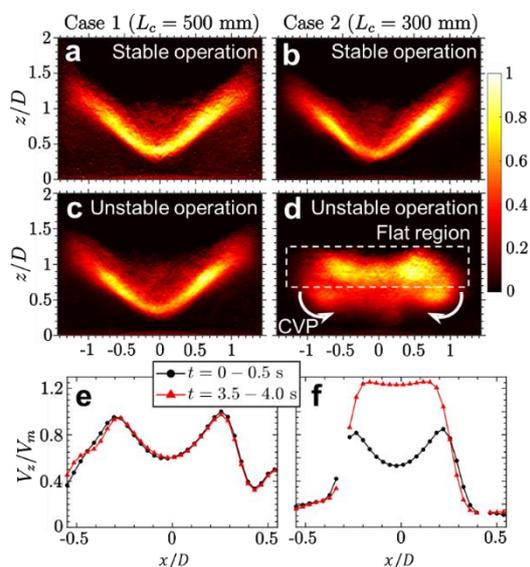


図4. (a-d) 平均アーベル逆変換 OH*画像. (e, f) $z=5\text{mm}$ におけるバルク流速正規化された軸方向流速の半径方向分布. (a, c, e) 条件1, (b, d, f) 条件2. (a, b) $t=0-0.5\text{s}$, (c, d) $3.5-4.0\text{s}$.

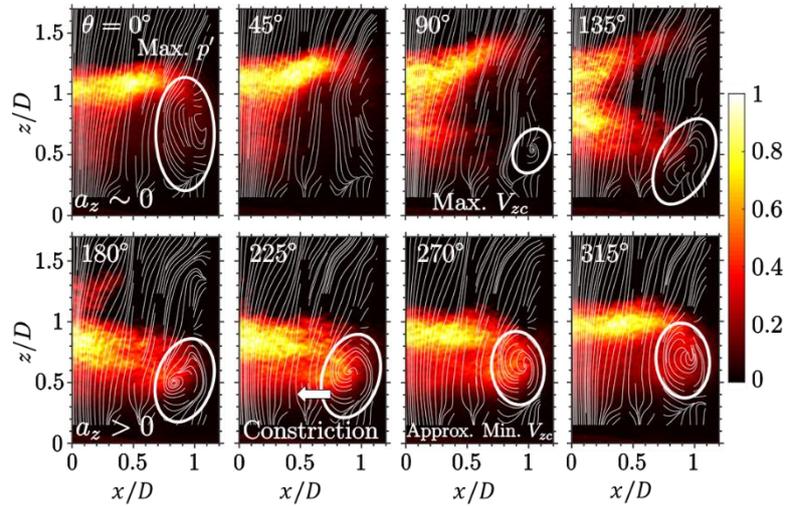


図5. 条件2の $t=3.5\text{--}4.0\text{s}$ における位相固定平均アーベル逆変換 OH*画像と位相固定平均流線.

(2) 環状燃焼器試験

環状燃焼器試験により得られた主な知見を以下にまとめる.

- ① 表2に示す各試験条件において、非燃焼時に計測された圧力変動と比較して、強い圧力変動が確認された(図6). スペクトル解析の結果、1300Hz付近にピークを持つ圧力振動が確認された(図7). これは、環状燃焼器内における圧力変動の腹及び節の位置が周方向に移動する周方向モードの振動に対応すると考えられる.
- ② 水素燃料試験で取得した流速場から、隣接する二つのバーナ間において、軸方向流速が加速される領域が形成されることが確認された(図8). また、本領域は時刻によって周方向に揺らぐことも観測された. これにより、周方向モードの圧力変動と流速場が干渉し、燃焼室内の火炎及び流れ場の特性に影響を及ぼしていることが示唆された.

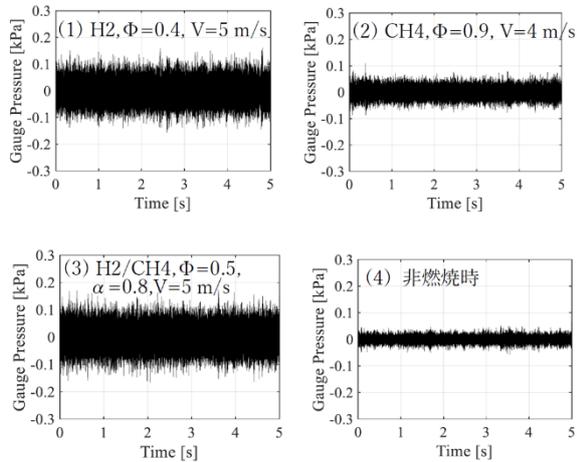


図6. 環状燃焼試験で取得した時系列圧力変動データ (PT1)

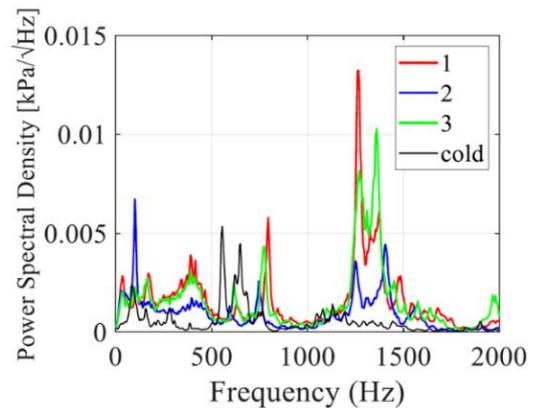


図7. 圧力データに対する平均パワースペクトル

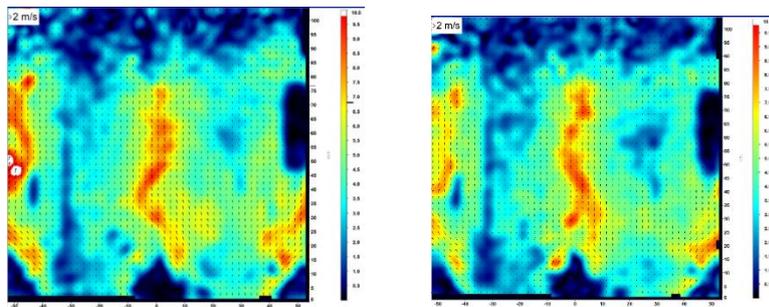


図8. 水素燃料試験において取得したある時刻における瞬時流速場データ.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shoji Takeshi, Tachibana Shigeru, Suzuki Terukazu, Nakazumi Yoshihiro, Yokomori Takeshi	4. 巻 38
2. 論文標題 A new pattern of flame/flow dynamics for lean-premixed, low-swirl hydrogen turbulent jet flames under thermoacoustic instability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 2835 ~ 2843
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.proci.2020.05.040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takeshi Shoji, Shigeru Tachibana, Terukazu Suzuki, Yoshihiro Nakazumi, Takeshi Yokomori
2. 発表標題 A new pattern of flame/flow dynamics for lean-premixed, low-swirl hydrogen turbulent jet flames under thermoacoustic instability
3. 学会等名 The 38th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Shoji, T. Suzuki, S. Tachibana, T. Yokomori
2. 発表標題 Unsteady dynamics of flames and pressure fluctuations in a lean-premixed low-swirl combustor during the transient process from stable operation to thermoacoustic instability
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shoji, S. Tachibana, T. Suzuki, Y. Nakazumi, T. Yokomori
2. 発表標題 Detailed Mechanism on Flow Pattern Switching under Thermoacoustic Instability for Low-Swirl H2 Jet Flames
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------