定在音場中の Triple Flame の時間的応答 Time Response of the Triple Flame in a Standing Acoustic Field

○片田理紗子¹, 駒橋明江¹, 杉生信成², 田辺光昭³ *Risako Katada¹, Akie Komahasi¹, Nobuaki Sugiu², Mitsuaki Tanabe³

Abstract: Oscillation mode which include flame shape change was investigated in acoustic field. The triple flame was formed two-dimensionally by a multi-slot burner. Shape change of the triple flame was photographed by a high-speed camera. Propane was used as fuel. Equivalence ratio of air-fuel mixture was 3. The acoustic frequency was about 0.5 kHz and sound pressure was 0.24 kPa. Proper Orthogonal Decomposition (POD) analysis was performed to the obtained image sequence. As a result, transverse motion of the triple flame in the direction of velocity oscillation was related to acoustic oscillations. The oscillation mode which has frequency component of twice the acoustic frequency correspond to the triple flame width oscillation.

1. 緒言

ロケットエンジン等の定在火炎を用いる燃焼器内で は,燃料と酸化剤が不均一に混合することで燃料濃度 勾配が生じ, Triple flame^[1]と呼ばれる火炎が形成され る^[2].また、この種の燃焼器内では燃焼振動が生じ燃 焼器の破壊に至ることがある. 燃焼振動の発生条件と して, 圧力変動と熱発生変動の位相差で決定する Rayleighの判定条件式^[3]が提唱されている. そのため 火炎の発熱変動や発熱位置を予測することは重要であ る. Triple flame の燃焼強度と曲率の変化については Hirota ら^[4] が関連付けている. Sugiu らは火炎面曲率 の変化と音響振動による火炎位置の変化に関係性があ ることを示した^[5].しかし,その詳細なメカニズムに ついては明らかになってない. メカニズムを解明する ためには、火炎形状の変化に含まれる振動モードが重 要だと考えられる.本研究では、定在音場中の火炎の 形状変化に含まれる振動モードを明らかにするため, 定在させた Triple flame に音響振動を印加し, 高速度カ メラを用いて直接撮影を行った.得られた画像に対し Snapshot POD を行うことで、火炎形状の変化を互いに 相関のない成分に分け、それぞれの振動モードを考察 した.

2. 実験及び解析方法

2.1 実験装置及び実験条件

矩形出口を4つ有するマルチスロットバーナーを用い て実験を行った.スロットサイズは幅10mm,奥行き 60mmである.実験装置概略図をFig.1に示す.内側 2つのノズルから予混合気と空気を噴出させ,主流部 を形成させる.主流部に対し外気とのせん断による渦 の影響が及ばないようにするため,外側2つのノズル から窒素を主流と同流速で噴出させる.共鳴管の両側 にスピーカーを設置し,逆位相で駆動させることで共 鳴管内に定在音場を発生させる.



Figure 1. Schematic of experimental apparatus

音圧は、圧力振動の腹に設置した圧力センサを用いて 取得した.周波数は約0.5 kHz,音圧0.24 kPaの音を印 加して実験を行った.周波数は常に共鳴状態となるよ うに微調節した.燃料にはプロパンを使用し、予混合 気の当量比は3とした.ノズル出口流速は1.3 m/s に設 定した.速度振動が主流部に及ぼす影響が最大となる よう速度振動の腹の位置で火炎を形成した.座標は、 流れ方向をy軸、流れ方向に対し直交方向をx軸とし た.画像は高速度カメラを用いて直接撮影によって取 得した.撮影速度は、10,000 fps である.

2.2 火炎画像の解析方法

解析をするにあたり,固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition: POD)を用いた.これはデータ 行列を特異値分解によって正規直交行列と対角行列の 組み合わせに分解する手法である.正規直交行列のう ち時間情報を持つものを Chronos,空間情報を持つもの を Topos と呼ぶ.対角行列の成分は特異値である.成

1:日大理工・学部・航宇 2:日大理工・院(前)・航宇 3:日大理工・教員・航宇

分同士は,相関がないため別々の現象として考察する ことが可能である.今回は印加した音響振動の25周期 分にあたる 526 枚の火炎画像データに対し Snapshot POD を行った.

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 は、2 種類の火炎の動きに対するモード分布図の模式図である. Fig. 3 は 0.24 kPa における Mode 分布図を示す. Fig. 4 に各モードの Chronos と火炎位置の x 方向の時間変化を示す. Fig. 5 に Fig.4 の振動波形に対し周波数解析をした結果を示す.



Left : move of flame Right: topos

Left : change of flame width Right: topos







Figure 4. Displacement of the flame and chronos (0.24 kPa)





Chronos は Topos 画像におけるコントラストの時間的 変化を表している. Topos では chronos が正のときで元 の色が強調され,負のときでは明暗が逆転する.火炎

が Fig.2の左上のように左右に動くとき, Topos は右上 のように交互に配色される. Fig.2 左下のように火炎の 幅が変化するとき, Topos は右下のように火炎先端を軸 にして軸対称のような配色となる. Fig.3 に示す Mode 1の Topos は、左右の火炎共に右が暗く左が明るい. こ れは Fig. 2 上段に示した x 軸方向へ火炎が振動する際 の分布である. Fig.4 に示す Chronos は周期性を有して おり、このモードの時間変化が周期性を持つ.この振 動の信号の変化は, Fig.4 に示されている x 軸方向の火 炎の変位に一致する.火炎振動波形と Mode 1 の chronos からは, Fig. 5 に示すように 500Hz 近傍で同じ周波数 成分が検出され、その周波数は、印加した音の周波数 に一致していた.以上より, Mode1 は火炎の x 軸方向 の並進運動に対応していると考えられ、この振動は音 響振動による流体の変位によって生じたと考えられる. Mode 2 の Topos は、外側が明るく内側が暗い. これは Fig. 2 下段のように火炎の幅が変化する際の振動分布 である. Chronos も Mode 1 と同様に周期性を有してお り、このモードの時間変化が周期性を持つ. Mode 2の Chronos からは, Fig.5 に示すように印加した音の2倍 の周波数が検出された. Sugiu らは混合層は印加した音 の周波数で蛇行し、燃料濃度勾配の変化は印加した音 の2倍の周波数で変動することを理論計算で示した^[5]. 濃度勾配と火炎曲率には相関があることが Nagai ら^[6] によって示されている.以上より, Mode 2 は火炎曲率 の変動に対応しており、印加した音の2倍の周波数で 濃度勾配が変動すると考えられる.

4. 結言

POD 解析により,火炎の振動モードの特定を行った. これより, *x* 軸方向の振動が音響振動によって生じる ものだと確認できた.また,印加した音の2倍の周波 数成分をもつ振動モードでは火炎幅が変化する.

5. 参考文献

[1] Phillips, H., : 10th Symp. (Intl.) Combust, the Combustion Institute, pp.1277-1283, (1965)

[2] Rebecca, O., John, A., : Combustion and Flame 175, pp1552-1565 (2010)

- [3] Rayleigh, L.: Dover, New YorkVol2, p.226, (1945)
- [4] 廣田光智ら:日本機械学会論文集(B 編), 67 巻, 661 号, pp.203-210, (2001)
- [5] Sugiu, N., et al. : 30th ISTS, 2015-a-55 (2015)
- [6] 永井良卓ら: 日本機械学会論文集(B 編), 70 巻, 691
- 号, pp.218-226, (2004)