

K2-70

## 定在音場中の Triple Flame の燃焼速度と浮き上がり高さに関する研究 Study on Lift-Off Height and Burning Velocity of Triple Flame in Standing Acoustic Fields

○本橋和典<sup>1</sup>, 杉生信成<sup>2</sup>, 齊藤允教<sup>3</sup>, 田辺光昭<sup>4</sup>\*Kazunori Motohashi<sup>1</sup>, Sugi Nobuaki<sup>2</sup>, Masanori Saito<sup>3</sup>, Mituaki Tanabe<sup>4</sup>

Abstract: Burning velocity of triple flame is measured by particle-image velocimetry. Triple flame was formed two-dimensionally at anti-node of velocity oscillations using multi-slot burner which has a constant flow velocity along the streamwise. Propane was employed for fuel. Sound pressure is up to 0.12 kPa and frequency is around 0.5 kHz. As a result, increase in the sound pressure yields the decrease in the lift-off height with almost constant burning velocity. It is thought that lift-off height of triple flame is decreased by fuel concentration gradient which triple flame can stabilize is moved to the upstream by acoustic oscillations.

### 1. 緒言

ガスタービン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により Triple flame[1]と呼ばれる火炎が存在する[2]. また, ジェットエンジンの燃焼器やアフターバーナにおいて燃焼振動が起こる[3]. 燃焼振動の発生条件は Rayleigh の条件[4]として知られている. Rayleigh の条件から燃焼振動の発生は圧力変動と発熱変動の位相差によって決定される. そのため発熱位置や燃焼速度が重要である. Saito ら[5]は定在した Triple flame の火炎面曲率から燃焼速度はほぼ一定であることを推測し, Triple flame の浮き上がり高さの変化の原因を燃料濃度こう配であるとした. しかし, 定在した Triple flame の燃焼速度が一定であることを確認していない. 本研究では定在させた 2 次元的な Triple flame に音響振動を加え, 燃焼速度が一定であることを確認することで音響振動が浮き上がり高さに与える影響について議論する.

### 2. Triple flame の構造と特徴

Figure 1 に Triple flame の火炎構造および混合層の幅と Triple flame の浮き上がり高さの関係について示す.

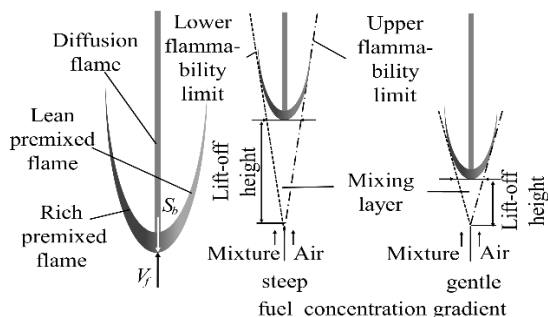


Figure 1. Triple flame structure and relation between mixing layer and lift-off height

Figure 1 のように Triple flame は過濃予混合火炎, 希薄予混合火炎, 拡散火炎の 3 つの火炎から形成される火炎である. Triple flame が定在する場合, 燃焼速度  $S_b$  と未燃予混合気の流速  $V_f$  がつりあう. そのため本研究では従来の研究[6]と同様に火炎先端に流入する局所の未燃混合気流速を燃焼速度  $V_f$  として定義した. Figure 1 中の破線は希薄可燃限界, 一点鎖線は過濃可燃限界の燃料濃度の位置であり, それらの内側を混合層と定義した.

### 3. 実験及び解析方法

#### 3. 1. 実験装置

Figure 2 に実験装置の概略図を示す.

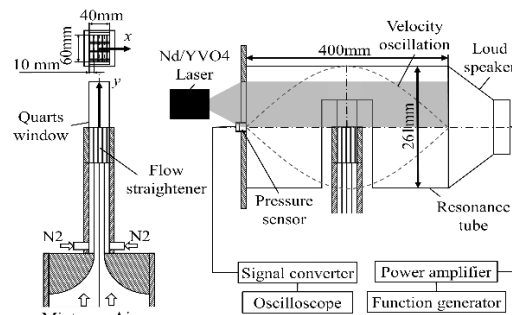


Figure 2. Schematic of experimental apparatus

本研究では, 矩形出口を四箇所備えるマルチスロットバーナを用いた. 内側の 2 つのノズルの噴流を主流部とし, それぞれ燃料/空気予混合気と空気を噴出させた. 外側 2 つのノズルからは窒素を同流速で噴出させ, 主流部にせん断による渦の影響が及ばないようにした. また, 非燃焼時には流れ方向に対して主流部の流速は一定であることを確認している[5]. 共鳴管の片側に窓を有した固定壁を設置した. もう一方に設置したスピーカによって音響振動を発生させることで共鳴させた.

速度振動の腹の位置とバーナの中心を一致させ、速度振動が主流部に及ぼす影響が最大となる条件で実験を行った。音圧は固定壁に設置した圧力計を用いて圧力変動の腹の位置で計測した。音圧は 0.00 kPa から 0.12 kPa まで変化させた。プロパン/空気予混合気の当量比は 3 とし、ノズル出口流速を 1.3 m/s とした。座標は Fig. 2 のように流れ方向を y 軸、流れ方向に対して直交方向を x 軸とした。

### 3. 2. PIV 計測及び解析方法

連続発振のレーザシート光を固定壁に設置した窓から共鳴管内に入射させ、バーナノズルの中心を通した。撮影にはハイスピードカメラを用いた。カメラの撮影速度は 5000 fps とした。トレーサ粒子には酸化チタン粉（粒子径 20  $\mu\text{m}$ ）を用いた。解析には Flure1.3[7]を使用した。燃焼速度を計測した点の y 座標を浮き上がり高さとした。

### 4. 実験結果及び考察

Figure 3 に Triple flame の燃焼速度及び浮き上がり高さと音圧の関係を示す。燃焼速度  $V_f$  は 10 周期（画像枚数 100 枚）の平均をとっている。エラーバーは標準偏差を表している。

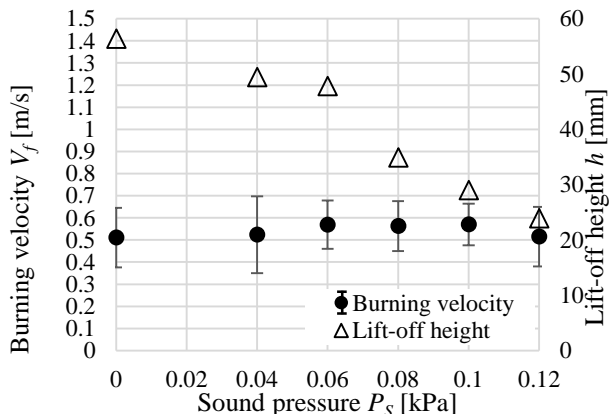


Figure 3. Relations between sound pressure, burning velocity and lift-off height

$P_s=0.00$  kPa の時  $V_f$  は 0.51 m/s となった。この値はプロパンの層流燃焼速度 0.43 m/s[8]よりも高い。これについては Lee ら[9]が Triple flame の火炎最上流端へ流入する流れ方向速度が理論混合比濃度中の 1 次元断熱層流予混合火炎の燃焼速度よりも高いことを示しており、本実験でも過去の研究と同様の結果となった。Figure 3 より各燃焼速度のばらつきを考慮すると燃焼速度はほぼ一定であるといえる。以上より、音響振動を定在した Triple flame に加えても燃焼速度に与える影

響は小さいといえる。浮き上がり高さは、 $P_s=0.00$  kPa のとき  $h=56$  mm となり、音圧を上昇させることで減少し  $P_s=0.12$  kPa のときに  $h=24$  mm となった。Nagai ら[6]は火炎面曲率と燃焼速度に相関関係があることを示している。Saito ら[5]は音響振動を Triple flame に与えても火炎面曲率が顕著な変化が見られないことを示している。また、本実験により燃焼速度に変化が顕著に見られないことが明らかになった。そのため火炎の浮き上がり高さを支配する要因は噴流の流速と火炎先端の燃料濃度こう配であると考えられる。すなわち、音響振動によって燃料濃度こう配が緩やかになることで、火炎が定在することが出来る燃料濃度こう配の位置が上流へ移動することにより浮き上がり高さが減少すると考えられる。

### 5. 結言

音圧を上昇させても定在した Triple flame の燃焼速度の変化はほとんど見られなかったが浮き上がり高さは減少した。以上から、音響振動によって燃料濃度こう配が緩やかになることで、火炎が定在することの出来る燃料濃度こう配の位置が上流へ移動することにより浮き上がり高さが減少すると考えられる。

### 6. 参考文献

- [1] Phillips, H., : "Flame in a buoyant methane layer" Tenth Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute, pp.1277-1283, (1965)
- [2] Rebecca, O., John, A., : "Structure of hydrogen triple flames and premixed flames compared" Combustion and Flame 175, pp1552-1565 (2010)
- [3] 新岡嵩ほか, 燃焼現象の基礎 pp.17-29.291-298, (2001)
- [4] Rayleigh, L. : "The Theory of Sound" Dover, New York Vol2, p.226, (1945)
- [5] 齋藤允教ほか:「音響振動が Triple Flame の曲率および浮き上がり高さに及ぼす影響」, 日本航空宇宙学会論文, 印刷中
- [6] 永井良卓ほか:「Triple Flame の燃焼速度に及ぼす火炎面曲率の影響」, 日本機械学会論文集(B 編) Vol.70, No.691, pp.780-788, (2004).
- [7] Kyle P. Lynch, <http://fluere.sourceforge.net/>, (2011)
- [8] 樺山紘一ほか: 火の百科事典, pp.626-627
- [9] Lee, B.J. and Chung, S.H.: "Stabilization of Lifted Tribraichial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet", Combust and Flame, Vol109, N, pp163-172, 1997.