

論文の内容の要旨

氏名：齊 藤 允 教

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Anchoring Location of Triple Flame under Acoustic Oscillations
(音響振動を受ける Triple Flame の保炎位置)

ロケットエンジンやジェットエンジンの燃焼器では振動燃焼が生じる事がある。これは、燃焼器内の流体振動と非定常な熱発生が連成することにより生じる。振動燃焼を予測するために、従来は単一燃料液滴や予混合火炎を用いて、音場中での燃焼速度や火炎形成位置、あるいは火炎の熱発生振動に対する応答などが調査されてきた。一方で、実際の燃焼器では空間的な燃料濃度の不均一性によって、Triple Flame と呼ばれる火炎が燃焼器内での火炎の基部、すなわち保炎点に生じていることが指摘されている。従って燃焼器内での火炎形成位置を予測するためには、Triple Flame の保炎位置を明らかにすることが必要である。Triple Flame は火炎に流入する直前の燃料濃度こう配によって燃焼速度や火炎形成位置が変化することが特徴である。音響振動によって、直前の燃料濃度こう配の変化が予想されるため、音場中での Triple Flame の保炎位置を予測するためには、燃料濃度こう配を支配する上流の混合層に及ぼす音響振動の影響を明らかにすることが必要である。本研究は、音響振動によって変化する混合層の形状および燃料濃度こう配を明らかにすることで、音響振動を受ける Triple Flame の保炎位置の予測法を構築することを目的とした。

実験に使用するバーナは 10 mm × 60 mm の矩形出口を並列に 4 箇所有するマルチスロットバーナを用いた。このバーナは、中央に燃料と空気の混合層を二次元的に形成することが可能であり、この混合層中に安定した Triple Flame を二次元的に形成させることが可能である。共鳴管両端に設置したスピーカを周波数 0.5 kHz で駆動し、共鳴管内部で 0.5 波長となる様に定在波を形成させることにより音響振動を発生させた。音圧は、信号発生装置から発生する正弦波信号をパワーアンプにより任意の音圧へ増幅することで調整し、共鳴管両端に設置した差圧センサにより取得した。火炎および混合層形成位置が、定在波の速度振動の腹の位置となる様にバーナを共鳴管内へ設置した。音圧を変化させ、空間的に静止している状態での Triple Flame の浮き上がり高さおよび火炎曲率を音圧毎に取得した。浮き上がり高さおよび火炎曲率は、デジタル一眼レフカメラによって撮影した映像から火炎面の二値化画像を取得し、火炎面を放物線近似することにより求めた。また、燃焼速度を PIV 計測により取得した。混合層の形状はシュリーレン法により可視化し、高速度カメラにより撮影した。燃料濃度こう配 ∇Y_f は、 $|(Y_u - Y_l)/(x_u - x_l)|$ で定義した。ここで、 Y_u , Y_l はそれぞれ上可燃限界および下可燃限界での燃料の質量分率、 x_u および x_l はそれぞれの濃度の位置である。

実験と並行して数値計算を行い、音場中での混合層の詳細な検討を行った。計算は二次元の非定常計算により行った。速度と圧力の連成には SIMPLE 法を、空間の差分化には圧力に対して 2 次精度の風上差分を、その他には 3 次精度の MUSCL 法を用いた。数値計算は大きく分けて 2 種類の手法により検討を行った。一つは、計算領域下部に速度流入境界を設け、計算領域内へガスを流入させる。計算領域の東西の境界条件を移動境界とし、実験と同じ周波数で東西に振動させることで音響振動の影響を模擬した (Case 1)。もう一方の方法 (Case 2) は、あらかじめ燃料と空気の境界面の形状を正弦関数で与え、計算領域周囲の境界条件を圧力流出境界とし、計算領域外からの物質の流入を与えない条件とした。

音響振動を印加する（音あり）実験に先立ち、音響振動を印加しない（音なし）条件で当量比のみを変化させた場合の Triple Flame の浮き上がり高さの計測を行った。その結果、混合気の当量比の増加に伴って浮き上がり高さが増加し、そのときの火炎曲率はほぼ一定であった。また、拡散方程式の特殊解を用いて各当量比、各浮き上がり高さの非燃焼での燃料濃度こう配を算出した結果、浮き上がり高さによらずほぼ一定であることが分かった。火炎の浮き上がり高さは、燃焼速度と火炎に流入する局所の未燃ガス流速が釣り合う位置で決定される。本実験は、非燃焼時の噴流の流速が流れ方向に減速しない範囲で行ったため、浮き上がり高さが変化しても火炎が空間的に静止していれば燃焼速度は一定であると考えられる。燃焼速度と火炎曲率は相関があるため、火炎曲率の実験結果からも燃焼速度

は火炎が定在している限りほぼ一定であると考えられる。また、火炎曲率は火炎直前の燃料濃度こう配と相関がある。従って本実験環境において、火炎の浮き上がり高さは、燃料濃度こう配が変化した場合、変化前の燃料濃度こう配と同じ値を持つ高さへ Triple Flame が移動することで浮き上がり高さが変化したと考えられる。

音なしでの実験結果を踏まえ、音響振動を混合層に与え、各音圧での Triple Flame の火炎曲率および浮き上がり高さを取得した。Triple Flame の浮き上がり高さは、音圧の増加に従い減少した。また、音圧の増加に伴い、音圧に対する浮き上がり高さの変化が小さい領域から次第に大きい領域へと転じ再び小さい領域へと転ずる事が明らかとなった。このとき、定在している火炎先端の曲率および PIV により計測した燃焼速度はほぼ一定であった。PIV の結果からも分かるように、音なしでの実験結果同様、火炎が空間的に静止している状態では、音響振動印加時においても燃焼速度はほぼ一定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り、音なし時の燃焼速度を与える燃料濃度こう配の位置が、上流側へ移動することで火炎の浮き上がり高さが変化したと考えられる。

上記の現象を検討するため、数値計算による検討および Triple Flame 上流の混合層の幾何形状のモデル化を行った。モデル化に先立ち、混合層をシュリーレン法により可視化した。音なしの場合、混合層は下流へ向かって直線状に存在するが、音ありの場合、流れに対して直角方向の流体振動により蛇行した混合層が観察された。特筆すべき特徴として、混合層にカスプが形成されることが明らかとなった。一次元の拡散モデルでは、燃料と空気の境界面を通じて、濃度こう配の方向へと燃料の拡散は進行する。音ありの場合、燃料と空気の境界面は、噴流と直角方向の流体振動により正弦波状に変形する。正弦波状に変形した境界面に対して垂直方向へと拡散が進行するモデルを解析的に求めた結果、実験により観察された混合層の蛇行、およびカスプの形成を再現することができた。また、Case 1 の数値計算によって、 ∇Y_F は音圧の増加に伴い減少することが明らかとなった。

モデルにより再現された混合層と燃料濃度こう配を結びつけるパラメータとして、蛇行する燃料と空気の境界面の幾何形状を記述可能な音響ストローハル数 St および蛇行した混合層の波長と拡散によって厚くなる混合層の厚みの比 K を新たに導入した。 St と K が同じであれば、蛇行する混合層は相似となることが新たに明らかとなり、また St と K の関係によって混合層形状は 3 種類の代表する形状に分類できる事が明らかとなった。 $K > 4\pi St$ では、蛇行した混合層にカスプは形成されない。このとき、火炎先端に流入する混合層に流入角が生じることで、見かけの混合層は厚くなる。 $K > 4\pi St$ の領域では、カスプが形成されないため、混合層の厚み、すなわち燃料濃度こう配は St で整理でき、 a を比例定数とすると音なしの燃料濃度こう配と比較して $\cos\{a \tan^{-1}(2\pi St)\}$ 倍となる。 $K < 4\pi St$ では、主流方向の拡散によって、カスプが形成される。 $K \ll 4\pi St$ では、蛇行した燃料と空気の境界面の谷が主流方向の拡散によって埋まるため、火炎に流入する混合層の燃料濃度こう配は、流体振動の振幅に支配されると考えられる。

音なしでの燃料濃度こう配 ∇Y_F^0 で無次元化した無次元濃度こう配 $\nabla Y_F / \nabla Y_F^0$ を定義すると、 K と St を決定すれば混合層の幾何形状が決定できることから分かるように、これら 2 パラメータを決定することで無次元濃度こう配も一意的に求まる事が、モデルと Case 2 の数値計算両者により明らかとなった。

音なしでのある燃料濃度こう配を有する高さは、 St の増加によって減少することが明らかとなった。また、この時の St に対する高さの変化の大きさは、 St が小さい領域では小さく、その後変化率は次第に増加し、 St が大きい領域では再び小さくなる事が明らかとなった。これは、音圧の増加に対する Triple Flame の浮き上がり高さの減少の傾向と一致した。このことから、音圧の増加に伴い減少する Triple Flame の浮き上がり高さの減少のメカニズムは、音なし時の燃料濃度こう配を有する高さが音響振動によってより上流側へと移動することが支配的な要因であると考えられる。

以上、本研究によって音響振動を受ける Triple Flame の浮き上がり高さを変化させる上流の幾何形状は K と St によって記述できることを明らかにした。本研究の成果により、音場中での Triple Flame の保炎位置の予測が可能となり、振動燃焼発生の予測へ貢献できると考えられる。