

速度振動を受ける燃焼中のワックス燃料の火炎挙動と振動周波数 に関する考察

森田 貴和^{*1}, 阿部 宗生^{*2}, 楊 彦声^{*1}

^{*1} 東海大学

^{*2} 日立パワーソリューションズ

Consideration on flame behavior and oscillatory frequency of wax fuel during combustion subject to velocity oscillation

Takakazu MORITA ^{*1}, Hiroki ABE^{*2}, Yansheng YANG^{*1}

^{*1} Tokai University

^{*2} Hitachi Power Solutions Co. Ltd

ABSTRACT

Entrainment generated by the steady flow in wax-based hybrid rocket motors produces wax droplets that are directly supplied to the gas phase. On the other hand, we investigated the unsteady droplet supply mechanism caused by the velocity oscillation of the gas flowing through the fuel port. In our combustion experiments, we confirmed that the flame formed on the fuel surface caused back-and-forth oscillation along the flow direction. The flame motion developed, often resulting in large pulsed combustion. At the same time, wax droplets were often scattered. In this study, we consider these mechanisms from the one-sided amplitude spectrum of the pressure oscillation measured in the combustion experiments.

Keywords: Hybrid rocket, Combustion instability, Wax fuel, Velocity oscillation, Liquid layer

1. はじめに

代表的な低融点燃料であるワックスは燃料後退速度が高いため、ハイブリッドロケットへの応用に向けて研究・開発が行われている。同燃料は表面上に比較的厚い液層を有しており、そこからエントレインメントにより気相中に液滴が供給されることがわかっている⁽¹⁾⁽²⁾。なお、この過程は燃料ポート内の流れが定常状態で生じることを基本としている。一方、燃焼器の内部では気柱振動や渦流動により速度振動が存在しており、これがあるレベルを超えるとエントレインメント以外の非定常効果が生じる可能性がある。著者らはこれまでに燃料室上流側に円柱を設置し、渦流動を発生させたワックス燃料の燃焼実験においてパルス状の燃焼がしばしば発生し、さらに燃焼後の様子から液滴が周囲に飛散していることが確認された⁽³⁾。この円柱の有無により、液滴の発生量が大きく異なっており、速度振動による気相への液滴供給メカニズムの存在が示唆された。次に、ワックス燃料表面上に形成される液層の一部が突沸を起こして液滴が飛散する様子を高速度カメラにより確認した。加えて同液層の厚さを評価し、圧力振動との関係を見出した⁽⁴⁾。さらに、燃料表面上に形成される火炎が主流方向に対し前後振動を起こすことにより、振幅が小さく、周期的な圧力振動を生じさせていることを確認した。また、その振動が急激に発達・消散することによりパルス状に見えていることを確認し、一連の非定常過程をモデル化した⁽⁵⁾。本研究では、燃焼実験で得られた圧力振動のスペクトルから得られた結果について初期検討を行った。

2. 渦流動下でのワックス燃料の燃焼実験

2.1. 実験装置

酸化剤に気体酸素，燃料に合成ワックスの一種であるFisher-Tropschワックスを用いた．実験で使用したワックス燃料は日本精蝋製のFT0070である．燃料の形状はスラブ状で，燃焼面積が縦（主流方向）に80 mm，横に25 mmになるように成型した．燃焼器は，火炎の挙動を高速カメラで撮影できるように側面に観測窓を設けている．また，燃焼器の内断面は30 mm×30 mmの矩形になっていて，考察が簡単になる2次元的な燃焼状態を保つことができる．今回の実験では，振動燃焼による圧力波形を大きくするために，燃焼器内に生じる渦流動や気柱振動を励起源とした．そのために燃焼器の上流側に整流管を設け，流れを一様にした上で，流れに対して直角・水平に直径4 mmの円柱を配置し，カルマン渦を発生させた．

2.2. 実験装置

燃焼実験における圧力測定ではミネベアミツミ製の小型・高応答型圧力計PRC-2MPaを使用し，サンプリングタイム0.1msで計測した．燃焼器の全長が703mmの時の圧力履歴を図1に示す．

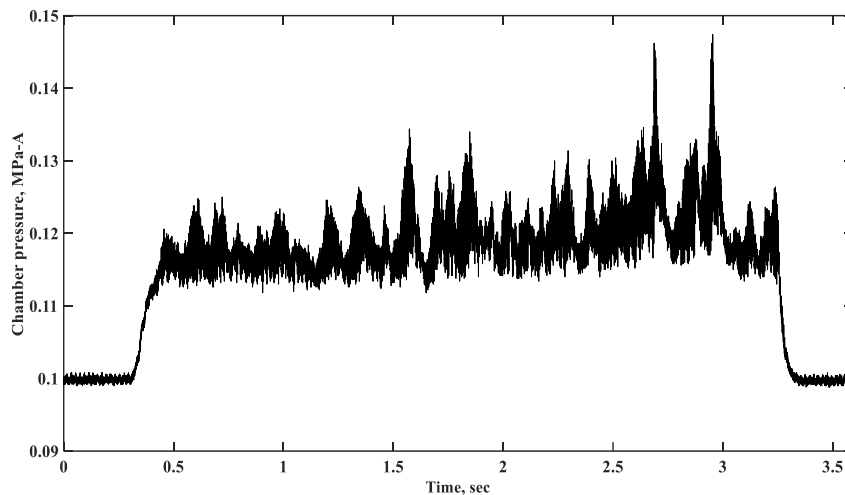


Fig. 1 Pressure-time history in the combustion chamber

同様の条件で高速カメラで撮影した結果によると，火炎が固体燃料表面上を流れの方向に沿って前後に運動する様子が観測された．ここではこれを火炎の前後振動と呼ぶ．また，それが何回か前後振動をするうちに，徐々に燃焼圧が高くなり，ついには燃焼器上流側へ火炎が速く，かつ大きく伝播した．その直後，火炎の前後振動は急速に減衰し，これがしばしば繰り返された．この過渡的な過程全体で圧力は大きなパルス状に変化したため，ここではこれをパルス状の燃焼と呼ぶ．このパルス状の燃焼においては上流側へのみ速く火炎が伝播し，下流へは主流に流されていくように比較的ゆっくり伝播した．また，上流側へは燃料が設置されているよりもさらに上の方まで火炎が強く拡がって伝播した．図1の圧力振動から片側振幅スペクトルを求めた結果を図2に示す．45.5 Hzの小さなピークがパルス状の燃焼，244.0 Hzのピークは管内の音波の定在波の基本モードおよび火炎の前後振動，488.5 Hzのピークは音波の第2高調波の振動モードに相当している．一方，低周波域の4.5 Hz辺りに振動モードがあることが確認された．パルス状の燃焼は圧力履歴からやや不規則な周期で発生することが分かっており，振幅スペクトルが広がっている．本研究では，スペクトルを計算する際にMATLABを使用した．離散フーリエ変換の際に使うトレンドの除去には，主として移動平均を求める関数であるmovmeanを使用した．次に，整流筒を短くし，燃焼器の全長を512 mmにして同様の実験を行った．その結果，火炎の前後振動は320.9 Hz，パルス状の燃焼の周波数は62.3 Hzになった．火

炎の前後振動の周波数に対する燃焼器の全長の影響について図3に表す。これより燃焼器の全長が増加すると、同周波数が低下することが分かる。火炎の前後振動は燃焼器内に生じる軸方向の音響定在波の基本モードと同じ傾向になっている。

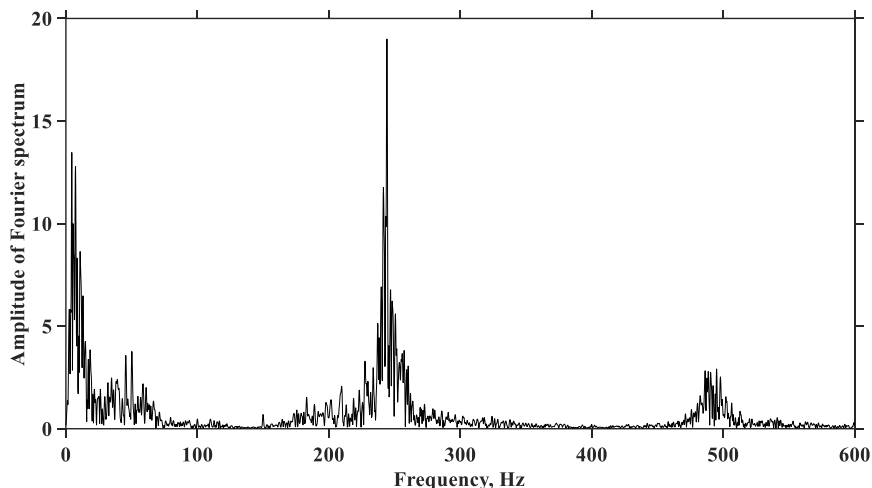


Fig. 2 One-sided amplitude spectrum of pressure oscillation in the combustion chamber

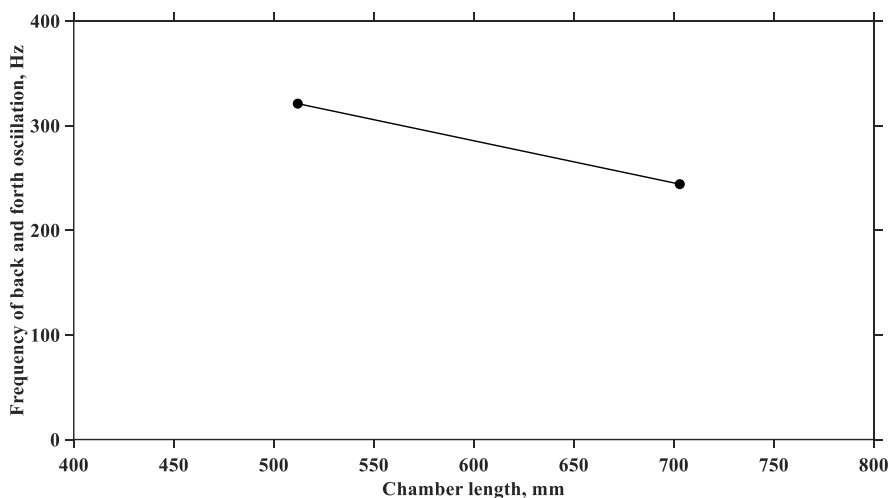


Fig. 3 Effects of chamber length on the frequency of back and forth oscillations of the flame

パルス状の燃焼の周波数に対する燃焼器の全長の影響について図4に表す。図3と同様に燃焼器の全長が増えると、周波数が低下する。図3と図4から火炎の前後振動の周波数とパルス状の燃焼の周波数の比を取ると、ほぼ同じ値となった。これより、パルス状の燃焼は火炎の前後振動に依存して変化していると思われる。今回の実験条件では、火炎の前後振動の周波数と音波の定在波の基本モードのそれはほぼ同じであったが、燃料長さが燃焼室の全長と比べて十分小さく、長さの違いによる効果については今後詳しく調べる必要がある。なお、全長が長い方の酸化剤質量流束は 9.50 kg/sm^2 、燃料後退速度は 0.39 mm/s 、特性排気速度は 582 m/s 、全長が短い方の燃焼器の酸化剤質量流束は 9.22 kg/sm^2 、燃料後退速度は 0.29 mm/s 、特性排気速度は 547 m/s であった。特性排気速度の算出に際しては、亜音速ノズルでの特性排気速度の評価式を使った⁽⁴⁾。両者において酸化剤質量流束はほ

ば同じとみなしてよいにも関わらず、燃料後退速度は大きく変化した。これは全長が長くなった際に気柱振動と共鳴し、DCシフトしたためと考えられる。

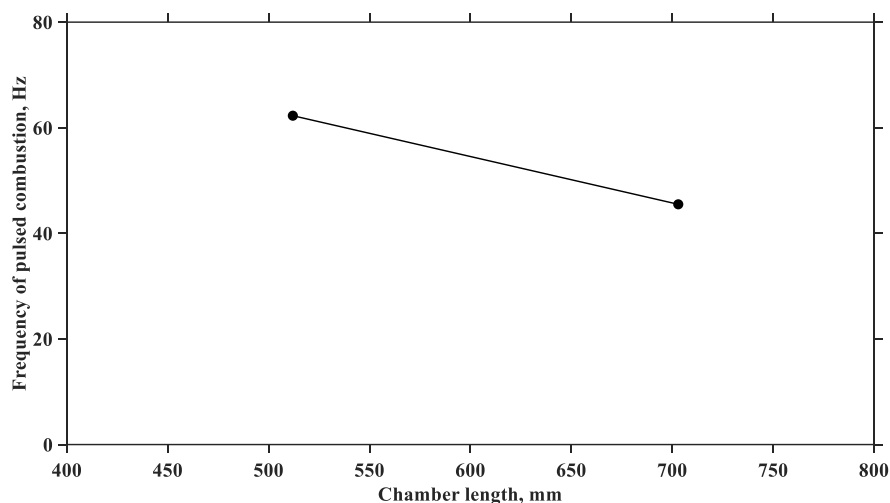


Fig. 4 Effects of chamber length on the frequency of the pulsed combustion

3. 結 言

燃焼器の全長を変えてワックス燃料と気体酸素をハイブリッド燃焼させ、そこで生じた燃焼圧の振動を測定し、火炎の前後振動とパルス状の燃焼について周波数特性を求めた。今回の条件の下では、火炎の前後振動の周波数は軸方向の音響定在波の基本モードの周波数とほぼ同じであった。パルス状の燃焼については火炎の前後振動の周波数に依存していると考えられる。

参考文献

- (1) Karabeyoglu, A. : Combustion Instability and Transient Behavior in Hybrid Rocket Motors, Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 218 (2006), pp. 351-411.
- (2) Nakagawa, I., and Hikone, S. : Study on the Regression Rate of Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels, Journal of Propulsion and Power, Vol. 27, No. 6 (2011), pp. 1276-1279.
- (3) Lim, S., Deguchi, Y., Kurosawa, Y., Morita, T., and Lee, J. : Preliminary Study on the Interaction Between Vortex Shedding and Acoustic Oscillations in Hybrid Rockets, Proceedings of the 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2017-o-5-12 (2017).
- (4) 阿部宗生, 森田貴和, 伊田拓未 : 突沸を伴う低融点燃料の振動燃焼に関する考察, 東海大学工学部紀要, Vol. 60, No. 1 (2020), pp. 105-112.
- (5) 阿部宗生, 森田貴和 : 速度振動を受けるワックス燃料の振動燃焼の可視化, 東海大学工学部紀要, Vol. 61, No. 1485 (2021), pp. 57-60.