

K-16

ハイブリッドロケットエンジンの液滴燃焼の数値解析 Numerical Simulation of Droplet Combustion in Hybrid Rocket Engines

○神山大成¹, 高橋晶世²*Taisei Koyama¹, Akiyo Takahashi²

Hybrid rocket engines using wax have low combustion efficiency because fuel droplets may be ejected from the nozzle without reacting with the oxidizer or before the reaction is complete. This study analyzes droplet combustion in an engine by running simulations of heat transfer, thermal diffusion, pyrolysis and combustion of droplets. Finally, the time required for the reaction between the droplet and the oxidizer in the combustion chamber can be predicted, contributing to the implementation of a design that takes into consideration the improvement of combustion efficiency.

1. 研究背景

ハイブリッドロケットエンジンは異なる相をもつ燃料と酸化剤を搭載し、推進するロケットである。一般的に固体の燃料と液体の酸化剤を組み合わせて用いられる。燃料成分と酸化剤成分が物理的に分離しているため安全性が高く、固体燃料に汎用の高分子樹脂等が使用されるため管理が容易である。しかし、低い燃料後退速度や低燃焼効率が課題として挙げられ、固体液体ロケットよりも開発が遅れている。

ワックス系燃料を用いたハイブリッドロケットが低燃焼効率である要因の1つとして、火炎からの熱流束により固体燃料表面が熔融し、流れに巻き上げられた液滴が酸化剤と反応せずに、あるいは反応が完結する前にノズルから放出されることが挙げられる。

ハイブリッドロケットエンジンにおける数値解析の既往研究としてエンジン内の燃焼を模擬するため固体燃料にパラフィンワックスを用いた燃料の形状変化が時間的・空間的にモデル化された。その結果、実験データとのより正確な比較を可能としている^[1]。また、燃料液滴の大きさと供給速度が、燃焼の完全性、温度、酸化剤流れの境界層における拡散火炎の位置に及ぼす影響が調べられた。その結果、局所的な混合気体の温度低下や燃料液滴近傍における燃料気体の濃度上昇が示され、気体燃料の流れに燃料液滴が加えられたことで火炎厚さと火炎温度はわずかに減少する。しかし、火炎位置には液滴の移動による大きな変化は生じず、ほぼ静止したままであることが分かった^[2]。このようにワックス系燃料のハイブリッドロケットエンジンの数値解析に関する既往研究は多数存在するが、液滴に着目してその分解や燃焼を予測する研究は少ない。

2. 研究目的

マイクロクリスタリンワックス（以下 wax）の液滴の燃焼を数値的に模擬することで、燃焼室内で液滴と酸化剤の反応にどの程度の時間を要するのか予測できるように、燃焼効率向上に配慮した設計実施に寄与する。

3. 解析方法

非定常球対称1次元における以下の支配方程式を用いて解析を行う。

$$\frac{\partial \rho_{fuel}}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \rho_{fuel} V_{fuel} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_v} \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

ただし、 t は時間、 ρ_{fuel} は燃料成分の密度、 r は半径、 V_{fuel} は燃料成分の拡散速度、 T は温度、 ρ は密度、 λ は熱伝導率である。ここで、式(1)と式(2)において簡略化のため空気密度、液滴密度を一定とする。

Figure 1 に液滴の解析場を示す。ただし、原点は $r_s = 0.0$ mm、 r 軸端点は $r_e = 5.0$ mm、液滴球半径は $r_0 = 0.05$ mmである^[3]。

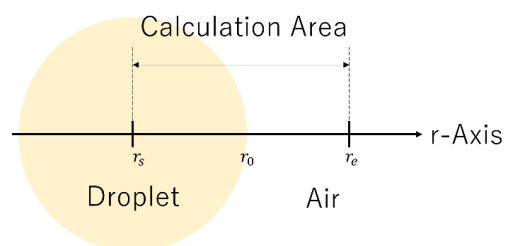


Figure 1. Analytical Field

今回、Python(Jupyter Notebook ver6.5.2)を使用して wax の液滴の数値解析を行う。解析で用いた wax と空気(窒素)の物性値および初期条件を Table 1 に示す^[4]^[5]^[6]。液滴は高温空気に常に曝されるものとする。

Table 1. Physical Property and Initial Conditions

	Microcrystalline wax (C ₄₄ H ₉₀)	Air
Temperature (Melting point) [K]	374	2000
Density [kg/m ³]	788	0.177
Thermal conductivity [W/(m·K)]	0.04	0.109
Specific heat at constant pressure [kJ/(kg·K)]	2.92	1.28

4. 解析結果及び考察

数値解析で得られた温度履歴を Figure 2 に示す。

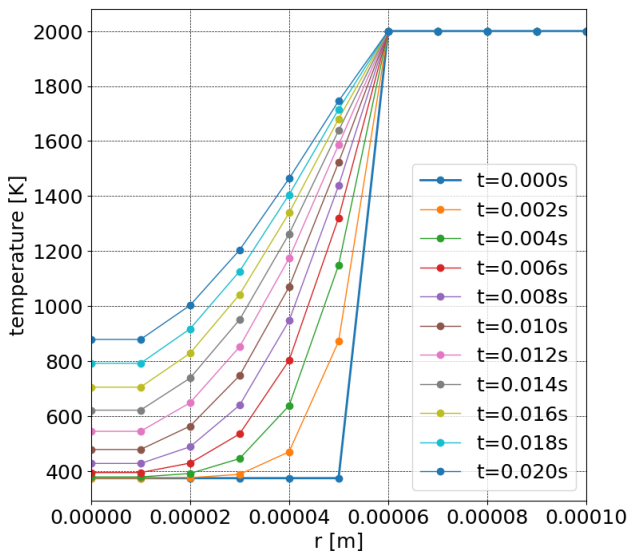


Figure 2. Temperature History

時間が経過するごとに液滴と空気の温度差が小さくなり、それぞれの間で熱移動が行われていることが確認できる。計算時間を延ばしていくと液滴表面が熱分解する温度に達し、やがてそれぞれの温度差がなくなると考えられる。また、マイクロクリスタリンワックスの熱分解温度は 673 K である^[7]から液滴が発生してから 0.016 s~0.018 s 間に熱分解が始まっていると考えられる。

5. 今後の方針

- 液滴の熱伝導解析まで進行中。液滴の気化成分の拡散、熱分解、燃焼の数値解析を今後実施する。
- 得られた解析結果から2次元モデルの構築を目標として実施する予定である。

6. 参考文献

[1] Mario Tindaro Migliorino, et al. : “Numerical Simulations of Fuel Shape Change in Paraffin–Oxygen Hybrid Rocket Engines”, Journal of Propulsion and Power, pp1-15, 2023

[2] V. A. Kosyakov, et al. : “Numerical study of the effect of fuel droplets on the combustion proceeding under typical conditions of hybrid rocket engine”, Thermophysics and Aeromechanics volume 30, pp93-108, 2023

[3] Christian Paravan, et al. : “Diagnostics for Entrainment Characterization in Liquefying Fuel Formulations” , AIAA Propulsion and Energy Forum, pp1-15, 2018

[4] Elena Toson, et al. : “FEASIBILITY STUDY OF PARAFFIN-BASED FUELS FOR HYBRID ROCKET ENGINE APPLICATIONS”, International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion Vol.13, 2014

[5] Miqdam T Chaichan, et al. : “THERMAL CONDUCTIVITY ENHANCEMENT BY USING NANO-MATERIAL IN PHASE CHANGE MATERIAL FOR LATENT HEAT THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS”, SAUSSUREA ISSN Vol. 5(6), pp48-55, 2015

[6] Genya Naka, et al. : “Prediction of Space and Time Distribution of Wax-based Fuel Regression Rate in a Hybrid Rocket”, AIAA Propulsion and Energy Forum, pp9-10, 2020

[7] Nikita V. Muravyev, et al. : “Macro- vs Microcrystalline Wax: Interplay of Evaporation and Decomposition under Pressure Variation”, Energy Fuels 2017 , pp8534-8539, 2017