

ハイブリッドロケットに用いる 低融点熱可塑性樹脂燃料の燃焼機構解明に関する研究

坂野 文菜

学位授与：千葉工業大学（2022年3月22日）

ハイブリッドロケットは、高頻度な打上需要が見込まれる観測ロケット、そして新宇宙探査機や有人飛行用ロケットに対応する次世代型推進機として注目されている。パラフィン等に代表される低融点ポリマーを固体燃料に用いることで従来の熱硬化性樹脂燃料と比較して優れた燃料後退速度（燃料の消費速度）を獲得したが、いまだ実運用に耐える十分な燃料後退速度が得られていないこと、そして推進剤性能を左右する燃焼効率の低さが現在の課題である。それゆえ、固体燃料のガス化に着目した燃料組成の改善の観点から、熱分解挙動の解明および燃焼機構の確立は必須である。そこで本研究では、パラフィンを主成分とし、燃料の大型化に求められる十分な機械的物性と接着性を有する低融点熱可塑性樹脂（low-melting-point thermoplastic, LT）燃料の熱分解挙動に着目し、境界層拡散火炎の燃焼機構にかかわる相変化・熱分解プロセスの解明を目的とした。多成分系熱可塑性樹脂の熱分析は複数の現象が同時に発生することで解析を困難にさせるため、一般的な手法に視覚的計測を取り入れ、形状や色の変化など直接的な情報から相変化反応の詳細な評価を実施した。さらに、高温環境で急速に加熱される固体燃料表面の熱分解生成物は反応活性が非常に高いことが予想されるため、イオン付着イオン化質量分析法を用いて熱分解ガスをダイレクトに測定する発生気体分析を実施した。これらの実験から気泡発生を含む相構造と急速加熱環境特有の芳香族炭化水素を含む熱分解生成物の存在を明らかにし、LT燃料表面の相変化・熱分解プロセスを議論した。以下に各章の概要を述べる。

第1章 “序章” では、ハイブリッドロケットに用いられる固体燃料の特徴および現在の課題を概説し、本研究の目的と意義について述べた。

第2章 “ハイブリッドロケット燃料” では、実用的な固体燃料に求められる事項を述べたうえで、それらの

要求事項を満たすLT燃料の特徴を説明した。

第3章 “熱分析と発生気体分析” では、燃焼中の燃料表面近傍で発生する溶融、ガス化、そして燃焼に至る相変化プロセスの解明を目的として、熱分析、発生気体分析および速度論解析を実施した。試料観察技術やダイレクトな質量分析手法を用いて、多成分系燃料かつ熱可塑性樹脂であるLT燃料の相変化挙動と発生ガス挙動を明らかにした。LT燃料は大気圧・不活性雰囲気下において「固相→溶融層→気液二相→気相」に至る熱可塑性樹脂特有の相変化挙動を有すると結論付けた。また発生ガスの挙動から、気液二相で観察された気泡はLT燃料の構成成分であるポリスチレン系エラストマやキシレン樹脂由来の熱分解生成物であることが示された。

第4章 “LT燃料の温度場・火炎温度測定” では、ラボスケールのモータ内部で燃焼する固体燃料の燃料表面近傍の温度プロファイルを測定し、境界層拡散火炎を形成する燃料表面は最大 $1.4 \times 10^4 \text{ K s}^{-1}$ で急速に昇温されることを明らかにした。また複数の測定手法を用いることで、燃焼室圧力 2.0 MPa の高圧条件下では断熱火炎温度 3200 K に対して 17 % 低い火炎温度を持つことを明らかにし、推進剤性能の低下を招く一因であると結論付けた。

第5章 “LT燃料の急速加熱実験” では、第4章で明らかとなった急速加熱環境を模擬した熱分解実験を実施し、LT燃料のメイン成分であるパラフィンオイルの急速熱分解プロセスについて考察した。第3章に示す従来の加熱環境における発生気体分析では m/z 200 以上の MS ピークが検出されていたが、 $5.0 \times 10^3 \text{ K s}^{-1}$ 以上の急速加熱環境では m/z 100 前後の炭化水素のガス発生が認められた。これは、パラフィン系の燃料表面で生成が予想される C1 種や C2 種と比較して高い m/z であった。さらに、ベンゼンやスチレンなどの芳香族炭化水素を含む熱分解ガスが発生することを本実験から明らかにした。

第6章 “LT燃料の相変化・熱分解プロセスの考察” では、第3章から第5章の成果を踏まえて、LT燃料表面の相変化・熱分解プロセスを考察した。熱可塑性樹脂であるLT燃料は、従来の固体推進薬の燃焼構造と比較

E-mail : banno.ayana@nihon-u.ac.jp

現連絡先の機関 日本大学理工学部航空宇宙工学科：
274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

学会受付 2022年8月31日

して、熔融層を無視できない厚さで形成することが明らかとなった。さらに気相火炎帯の燃料過多領域で生成される m/z 100 程度の炭化水素と芳香族炭化水素の存在を明らかにした。さらに、境界層拡散火炎を伴う燃料表面の分子拡散および乱流拡散の観点、そして低融点系燃料に共通する燃料表面の形状変化の特徴から、ベンゼンを含む熱分解生成物の一部は未燃の状態で燃焼器外部に排出される可能性が十分であると結論付けた。この結果を踏まえ、推進剤の性能を表す特性排気速度向上にむけた燃料開発の提案を行った。

第7章“総括”では本論文を総括し、本研究で用いた分析化学的手法が他の炭化水素系を用いたハイブリッドロケット燃料の燃焼機構の調査に応用できることを示し、急速加熱環境下の発生気体分析が燃焼シミュレーションの精度向上に大きく寄与すると結論を述べた。

公表論文

- 1) A. Banno, Y. Wada, Y. Mishima, T. Tsugoshi, N. Kato, K. Hori, R. Nagase : *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul.*, **18**, 4 (2019).



Digest of Doctoral Dissertation

Combustion Mechanism of Low-Melting-Point-Thermoplastic fuel in Hybrid Rocket

Ayana BANNO

E-mail : banno.ayana@nihon-u.ac.jp

Department of Aerospace Engineering, College of Science and Technology, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba 274-8501

(Awarded by Chiba Institute of Technology dated March 22, 2022)

Hybrid rocket is considered the next-generation propulsion system for sounding rockets, new space probes, and human-crewed flight rockets. Paraffin-based multi-component thermoplastic fuel has a higher regression rate than conventional thermosetting fuel. However, its suitable regression rate for real operation has not been determined and its combustion efficiency, which affects propellant performance, is still low. Therefore, in this study, we focused on the pyrolysis of paraffin-based low-melting-point thermoplastic (LT) fuel to elucidate its phase changes and pyrolysis processes. To analyze the multiple phenomena that occur when heating multi-component thermoplastics, a detailed evaluation of the phase changes was conducted by incorporating visual observation into the conventional method. It was found that LT fuel has the phase-structure characteristics of thermoplastics, forming a melted layer of non-negligible thickness under an inert environment at atmospheric pressure. Furthermore, since the pyrolysis products on rapidly heated surfaces are sensitive to secondary reactions, the analysis of evolved gases was conducted using ion attachment-mass spectrometry, which analyzes gases non-destructively. The pyrolysis gases detected included benzene and styrene under rapid heating conditions. This paper discusses the phase changes and pyrolysis processes occurring on the surface of LT fuel based on thermal analysis, evolved-gas analysis, and flame-temperature measurements.

(Received August 31, 2022)

Keywords : Hybrid rocket; LT fuel; Flash pyrolysis; TG-DSC; Py-IA/MS.