

再生プラスチック燃料を使用したハイブリッドロケットの開発

石田大和¹, 楠井里萌¹, 船見祐揮², 坂野文菜³, 中山昇⁴,
高野敦¹, 喜多村竜太¹
¹ 神奈川大学, ² 防衛大学校, ³ 日本大学, ⁴ 信州大学

Development of hybrid rocket using recycled plastic fuel

Yamato Ishida¹, Rimo Kusui¹, Yuki Funami², Ayana Banno³,
Noboru Nakayama⁴, Atsushi Takano¹, Ryuta Kitamura¹
¹ Kanagawa University, ² National Defense Academy
³ Nihon University, ⁴ Shinshu University

Abstract

A hybrid rocket fuel was developed by recycling the runner (frame) of an ABS plastic model. An X-ray inspection was performed to confirm internal defects in the regenerated fuel, and a thermal analysis was performed to compare it with the conventionally used ABS resin. The total impulse was well reproduced in two combustion tests using conventional ABS resin fuel and four combustion tests using recycled plastic. In addition, we conducted a launch test, and although we did not break the altitude record, we succeeded in demonstrating a launch using recycled plastic as fuel.

1. 緒言

2022 年度から、打上試験および燃焼試験で使用するハイブリッドロケットエンジンの燃料に再生プラスチックを用いたものを使用することになった。これまでは市販の ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)樹脂を使用していたが、今回用いた再生プラスチックは普段廃棄されているガンダムプラモデルのランナー(枠)を再利用するもので、環境に配慮した燃料となっている。またこの取り組みを通して、プラスチックへのリサイクルへの関心を喚起するとともに、ハイブリッドロケットを広く知ってもらおう契機となることを狙った。しかし、ガンダムプラモデルの使用済みランナーも ABS 樹脂に絞って再生プラスチック燃料を作成したものの、使用可能かどうか不明瞭であったため、以下の分析を行った。再生プラスチック燃料内部に空孔がないかを調べるために X 線検査を、ガス化温度や吸熱発熱挙動を調査するために熱分析を行い、その結果から再生プラスチックを用いたグレインの評価を示す。

2. 再生プラスチック燃料の評価

2.1 再生プラスチック燃料の X 線検査

2022 年度から初めて再生プラスチック燃料を使用してハイブリッドロケットエンジンを開発することになった。そのため、使用する再生プラスチック燃料の信頼性を確認するため、X 線検査で燃料内部に空孔や異物がないか等を解析した。また、市販の ABS 燃料と再生プラスチック燃料の密度の違いも調べるため、ABS 燃料と再生プラスチック燃料との相対密度も求めた。

再生プラスチック燃料 X 線写真を図 1 に、ABS 燃料と再生プラスチック燃料との相対密度の表を表 1 に示す。表 1 より、従来使用していた ABS 燃料と再生プラスチック燃料との密度の違いは他の要因と比べて無視できるレベルであった。また、図 1 より空孔があったものの、極微小であることと、後から穴を空ける部分に集中していたため、燃焼時に影響はなく、使用してよいと判断した。

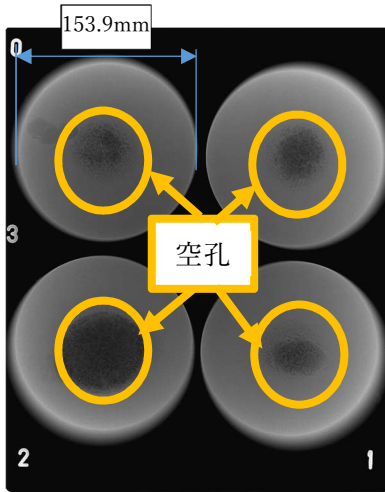


図1 再生プラスチック燃料 X線写真

表1 ABS燃料と再生プラスチック燃料との相対密度

	密度[g/cm ³]	相対密度
ABS燃料と3Dプリンタ製燃料	0.994	0.952
再生プラスチック燃料(計測数21)	1.039~1.042	0.993~1.000

2.2 再生プラスチック燃料の熱解析

2022年度は打ち上げ試験までに8回燃焼試験した。そのうち再生プラスチック燃料を使用した3回目および4回目の燃焼試験において、アプレータを突き破り火災が噴き出した。FTA(Fault Tree Analysis)で検討した結果、再生プラスチック燃料に関する原因とそれ以外の原因に大別された。再生プラスチック燃料は金型から離型するための添加剤などが含まれていると思われるため、複雑な分解反応、燃焼反応燃焼反応が起きたことが推定原因の1つとして挙げられた。そのためガス化温度や吸熱発熱挙動を調査する熱分析を行った。

再生プラスチック燃料と3Dプリンタで作成していない購入品ABS燃料の示差熱分析のグラフを図2に、ガラス転移温度時の熱挙動のグラフを図3に示す。左縦軸が熱重量変化の割合、右縦軸が温度差、横軸が温度を示す⁽¹⁾⁽²⁾。また、青色実線が購入品ABS樹脂、紫色破線が再生プラスチック樹脂、緑色点線がDTAベースラインを示す。さらに、上の2本の線がTG曲線、下の3本の線がDTA曲線を示す。また、吸熱発熱反応は、ベースラインから上側に凸が発熱反応、下側に凸で吸熱反応を示している。図2より、熱分解開始温度は、再生プラスチック樹脂の方がおよそ20°C低く⁽³⁾、熱分解温度帯でそれぞれの試料に発熱反応が認められた。発熱反応のピークがより顕著に現れたのは購入品ABS樹脂であったが、今まで使用していた購入品ABS樹脂との熱挙動の違いは特になかった。熱分解後も購入品ABS樹脂の発熱反応が顕著に現れたものの、全体的な熱挙動の明確な違い

は現れなかった。

また、ガラス転移温度時の熱挙動を詳細に比較するため、昇温速度を変えてそれぞれの試料を測定したが、図3より全体的な熱挙動の明確な違いは現れなかった。示差熱分析やガラス転移温度時の熱挙動を比較したときに「熱挙動の違いは特になかった」、「熱挙動の明確な違いは現れなかった」という表現は、分子量が一意に決まらない高分子材料は熱分析において20[°C]の違いは測定誤差として判断されることが多いためである。これらの結果より、熱分析の範囲内においては、再生プラスチック燃料と購入品のABSには有意な差はないと判断した。

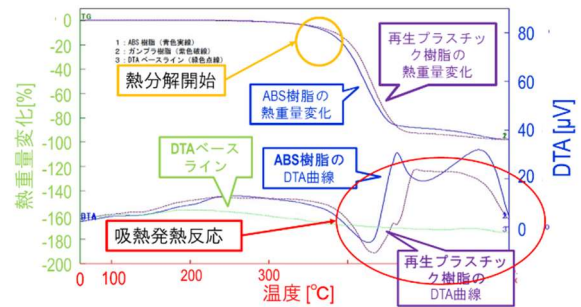


図2 再生プラスチックと購入品ABSの示差熱分析のグラフ

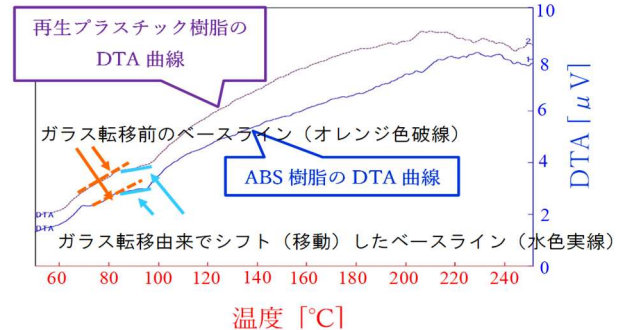


図3 ガラス転移温度時の熱挙動のグラフ

これらの分析では解析できなかった推定原因は残ったものの、エンジンのアプレータを突き破り火災が噴き出す原因は、ノズル・ハウジングとグレイン間の隙間から燃焼ガスがリークした可能性が高いものと判断した。そのため、ノズル・ハウジングの接合面の設計を見直し、Oリングでシールした。同時にグレインとハウジングのはめあい長さを長くし、ラピンスシール効果を狙った。ハウジング部分の改善前と改前後の図を図5に示す。

残りの一部の推定原因は、グレイン単体での評価は困難と考え、燃焼試験で確認することとした。エンジンの改良の結果、4回連続で燃焼試験に成功し、不具合は無くなったと判断した。

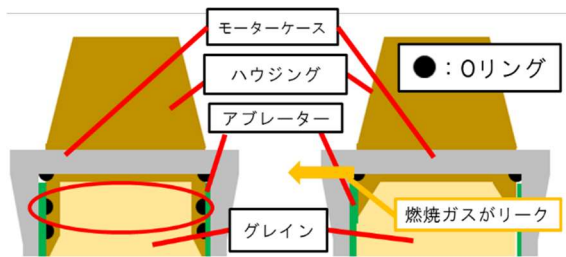


図5 ハウジング部分 (左;改善後, 右;改善前)

3. 打ち上げ試験

燃焼試験の結果を受け、再生プラスチック燃料を使用したロケットの打ち上げには問題が無いと判断し、ロケットの打ち上げ試験を行った。打ち上げには成功したが、機体は回収できなかったため、打ち上げ後のエンジンの状況は確認できなかった。地上から撮影した動画より、打ち上げ8秒後までは正常燃焼の火炎が確認できた。テレメトリのデータを分析した結果、最高高度は、テレメトリのデータの気圧から得た結果が3706[m]、GPSから得られた結果が4066[m]であった。2021年度打ち上げでは気圧高度を採用しているため今年度記録と単純比較できるという理由もあり、気圧から取得した最高高度を、実績の最高高度として採用した。実績の最高高度を直前に行ったシミュレーションと比較した結果、高度は約1000m低かった。点火時にランチャー上に数秒居座ったことが原因であると考えられた。また、図4の高度計測結果のグラフよりエンジンの焼損などによると思われる高度の不連続は見られなかった。

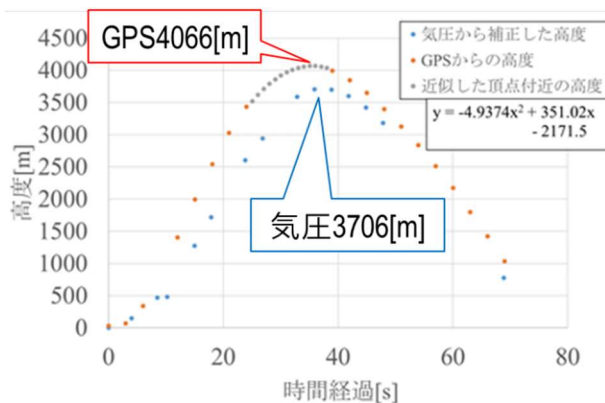


図4 高度計測結果

4. 結論

燃料に関しては、再生プラスチック燃料を使用した試験ではアブレータを突き破り火炎が噴き出したものの再生プラスチック燃料が原因ではなく、燃料として使用することに関しては問題ないことが分かった。

再生プラスチック燃料を使用した打ち上げには成功した。テレメトリの結果等から、気圧から取得した、実績の最高高度は3707[m]を示した。参考としてGPSの最高高度は4066[m]を示した。高度計測結果のグラフよりエンジンの焼損などによると思われる高度の不連続は

見られなかった。

以上の結果より、再生プラスチック燃料はハイブリッドロケット燃料として代替可能であることを実証できた。

参考文献

- (1) JIS K7121 プラスチックの転移温度測定方法 : DSC カーブを用いた融点やガラス転移点の算出方法
- (2) 熱分析の基礎 | 4 章 TG-DTA とは? , <https://www.an.shimadzu.co.jp/ta/support/faq/fundamentals/tg-dta.htm>, 参照日 2022年9月5日
- (3) JIS K7120 プラスチックの熱重量測定方法 : TG カーブを用いた熱分解/蒸発の開始温度の算出方法