

## GAP/AP 推進薬を用いた小型固体モータの EM 試験

### EM test of micro solid motor using the GAP / AP propellant

○長尾 一輝\*, 幡野 慎太郎\*, 高砂 民明\*, 古澤 修平\*, 和田 豊\*,

馬場 開一\*\*, 小田 達也\*\*, 堀 恵一\*\*\*, 長谷川 克也\*\*\*

\*千葉工業大学, \*\*日油株式会社, \*\*\*ISAS/JAXA

○Kazuki Nagao\*, Shintaro Hatano\*, Tamiaki Takasago\*, Syuhei Hurusawa\*, Yutaka wada\*,

Kaiichi Baba\*\*, Tatsuya Oda\*\*, Keiichi Hori\*\*\*, Katsuya Hasegawa\*\*\*

\*Chiba Institute of Technology, \*\*NOF CORPORATION,

\*\*\* Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

## 概要

本研究では、宇宙空間へのアルミナ微粒子の排出を防ぐため、金属燃料を含まない固体推進薬を用いた小型モータの開発を行っている。固体推進薬には、燃料兼結合剤として高エネルギー物質であるグリシジルアジドポリマー (Glycidyl Azide Polymer 以下 GAP) , 酸化剤として過塩素酸アンモニウム (Ammonium Perchlorate 以下 AP) を用いた。本実験ではまず、ストランドバーナ試験を行い、燃料と酸化剤の質量割合による推進薬の性能を調査した。また、エンジニアリングモデル (EM) のモータを作製し、着火性能や、燃焼の安定性の評価を行った。

## 1. 緒言

### 1.1 研究背景

近年、小型人工衛星の開発は、従来の大型人工衛星に比べ製造コストや、開発期間の削減により活発化している。しかし、運用期間の短い小型人工衛星は、スペースデブリの増加をもたらしてしまう。そこで 2002 年に制定された IADC (国際機関間スペースデブリ調整委員会) スペースデブリ低減ガイドラインに始まり、国連や ISO (国際標準化機構) ではスペースデブリに関する国際ルールを制定している。2019 年には、ISO-24113 において、運用時の地球周回軌道へのスペースデブリの意図的放出の制限や、運用終了後の廃棄処置などで新たな規制項目を追加した。そこには、LEO (低軌道), GEO

(静止軌道) 保護域に 1 mm 以上の固体モータのスラグの排出を制限することが追加された。また、人工衛星の運用終了後には、25 年以内に保護域からの離脱が求められている。この廃棄処置の成功確率について 90 %以上であることが要求された<sup>1)</sup>。そこで、小型人工衛星のスラスタに対しての要望として、①急激な軌道遷移 (デオービット), ②長期保存からの確実な作動, ③推進器の小型軽量化等が挙げられる。これらを可能にするものとして固体推進系に着目した。

### 1.2 研究目的

従来の固体推進薬は燃料兼結合剤に末端水酸基ポリブタジエン (Hydroxyl-Terminated

PolyButadiene 以下 HTPB), 酸化剤に AP, 助燃剤にアルミ粉末を使用している。金属粉は, 燃焼終了後に集塊してノズルから放出されることによりスペースデブリとなっていた。そこで本研究は, 金属燃料を使用しない推進薬として高エネルギー物質である GAP を燃料兼結合剤に使用した。GAP/AP 固体推進薬を用いて, 小型人工衛星の急激な軌道遷移や微小重力場での大きな移動を可能にする推進系として超小型固体スラスタを提案し, その実用化を目指す。

## 2. GAP/AP 推進薬

GAP/AP 推進薬は, 高密度, 高燃焼速度であり, 金属燃料を使用しないためスペースデブリの発生がない。本実験で使用した GAP は, ヒドロキシ基を 4 つ含む (日油株式会社製) Tetra-ol GAP である。推進薬の製造方法は, GAP プレポリマに固体の AP 粒子を混合攪拌させ硬化させた。製造過程で気泡が含まれると燃焼させた際に気泡部分で燃焼表面積が増大し圧力の上昇を起こす恐れがあるため真空脱泡を行い推進薬中の気泡を全て抜く必要がある。また, 化学平衡計算プログラム NASA\_CEA<sup>2)</sup>を用いて燃料兼結合剤と酸化剤の質量割合を変化させた場合の比推力  $I_{sp}$ , 断熱火炎温度  $T_c$  を求めた。図 1 に計算条件として燃焼室圧力が 3 MPa の海面上比推力と  $T_c$  の結果を示す。本実験で使用し

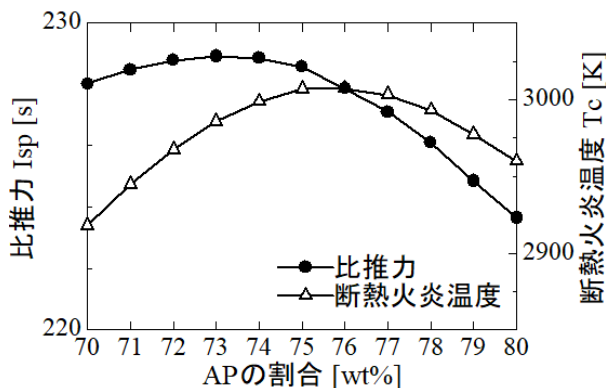


図 1 AP の質量割合による CEA 結果

た推進薬の質量割合は, 他の条件より比較的作製の容易な GAP30 wt%/AP70 wt% (以下 GAP30/AP70), 比推力が最大である GAP27AP73, 作製時の脱泡操作の限界である GAP20AP80 を使用した。

## 3. スtrandバーナ試験

### 3.1 実験方法

strandバーナ試験を行い, 推進薬の燃料と酸化剤の質量割合による線燃焼速度及び圧力指数の測定を行った。燃焼器内部に試料を設置し, 窒素加圧後に試料上端に接触させたニクロム線により点火させ  $P_c$  [MPa] を取得した。試料の寸法は, 10×10×50 mm とした。線燃焼速度  $\dot{r}_b$  [mm/s] は, 試料高さ  $l$  [mm] を圧力履歴から求めた燃焼時間  $t_b$  [s] から導出した。また  $\dot{r}_b$  に式 (3-1) の Vieille の法則を使用した。

$$\dot{r}_b = aP_c^n \quad (3-1)$$

ここで,  $a$  は実験から得られる定数,  $n$  は圧力指数である。一般的な固体推進薬では,  $0.2 < n < 0.8$  が適切な圧力感度であるとされている。

### 3.2 実験結果

図 2 に本実験の結果, 及び表 1 に結果から得られた  $a$  と  $n$  の値を示す。また, AP100 wt% のデータを比較として記載した<sup>3)</sup>。全ての試料とも圧力  $P$  指数は, 安定条件の範囲に入った。GAP/AP 推進薬の線燃焼速度は, GAP の高線燃焼速度の影響を受けており, 最高  $I_{sp}$  に近づくほど低圧側での線燃焼速度が高くなることが分かった。また, GAP の圧力指数よりも GAP/AP の圧力指数は低く, 圧力に対して線燃焼速度の急激な上昇は見られなかった。

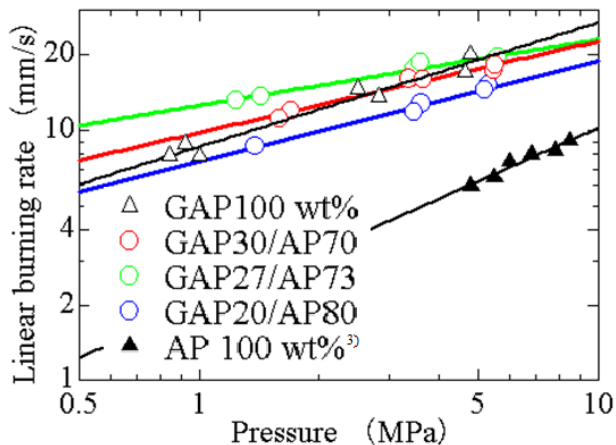


図 3 各試料の圧力における線燃焼速度

表 1 各試料の定数  $a$  と圧力指数  $n$

| 試料名        | $a$   | $n$  |
|------------|-------|------|
| GAP100 wt% | 8.59  | 0.50 |
| GAP30/AP70 | 9.78  | 0.36 |
| GAP27/AP73 | 12.56 | 0.26 |
| GAP20AP80  | 7.53  | 0.40 |
| AP100 wt%  | 2.00  | 0.71 |

燃室圧力  $P_c = 3 \text{ MPa}$ , ノズルスロート径  $D_t = 3.4 \text{ mm}$ , 燃焼時間  $t_b = 2.05 \text{ s}$  とし点火薬の量  $w_i [\text{g}]$  を調節し, 推進薬に着火して継続燃焼するかを評価した.

#### 4.2 実験結果及び考察

表 2 と図 4 に本実験の結果を示す. 全体的に見て, 燃焼前半は点火時の圧力の立ち上がりを確認でき, その後定常燃焼に入り, 燃焼後半に急激な圧力上昇を迎えている.

表 2 燃焼実験結果

| 実験番号                      | #1   | #2   | #3   | #4    | #5    | #6   |
|---------------------------|------|------|------|-------|-------|------|
| $w_i [\text{g}]$          | 0.53 | 0.30 | 0.01 | 0.005 | 0.004 | 0.03 |
| 点火時圧力 $P_i [\text{MPa}]$  | 7.05 | 7.35 | 5.6  | 2.47  | 0.94  | 0.81 |
| 着火遅れ時間 [s]                | -    | -    | -    | 0.67  | 2.33  | -    |
| 定常燃焼圧力 [MPa]              | 8.95 | 3.75 | 2.92 | 2.32  | 0.97  | -    |
| 定常燃焼時間 [s]                | 0.42 | 0.5  | 1.16 | 1.32  | 0.14  | -    |
| $\dot{r}_b [\text{mm/s}]$ | 72.9 | 64.6 | 26.8 | 24.5  | -     | -    |
| $D_t [\text{mm}]$         | 3.46 | 5.04 | 3.42 | 3.49  | 3.40  | 3.33 |
| $A_i/A_t$                 | 0.38 | 0.41 | 0.39 | 0.38  | 0.39  | 0.18 |
| 着火確認                      | ○    | ○    | ○    | ○     | ○     | ×    |

#### 4. EM モータ燃焼実験

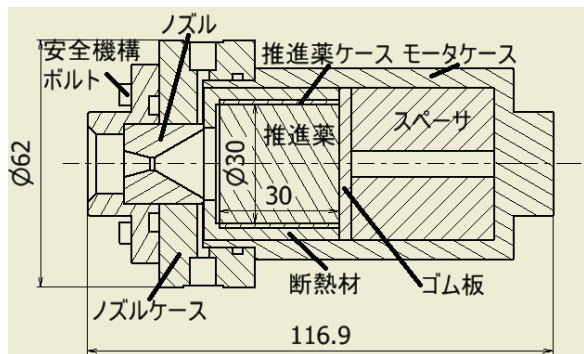


図 2 EM モータ概略図 (unit:mm)

##### 4.1 実験方法

本実験では, EM モータを作製して, 着火性能や, 燃焼の安定性の評価を行った. EM モータの概略図を図 3 に示す. また, 推進薬は端面燃焼方式を採用し,  $\phi 30 \times 30 \text{ mm}$  のものを使用した. また, 製造性の良さから推進薬の質量割合は, GAP30/AP70 を使用した. 実験条件は燃

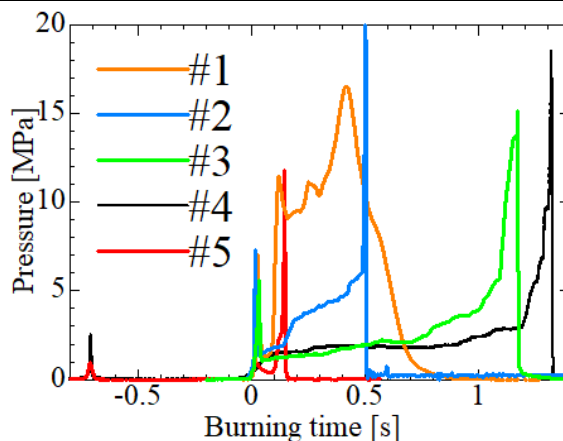


図 4 各試料の圧力履歴

まず, #1 は点火直後に  $10 \text{ MPa}$  を超える高い圧力で燃焼している. これは, 点火薬が適正量を大幅に超え推進薬が端面燃焼せず燃焼表面積が増大してしまったと考えられる. 燃焼後の観察により, モータケースと断熱材の間から火炎が回り込み推進薬の後端からも燃焼したと

推測される。火炎の回り込みを防止するために断熱材と推進薬後端のゴム板をセメダインで固定した。以降の実験からは、火炎の回り込みは見られなかった。#2, #3, #4 は、着火後に圧力が一定に推移する領域が確認できた。燃焼途中に圧力が上昇する原因は推進薬中の気泡によって燃焼表面積が増大し  $P_c$  の上昇を招いた。また、燃焼後半のピーク圧力の原因は、推進薬の硬化不良が挙げられる。同じ製造方法で作製した推進薬を軸方向に切り出して観察した。その結果、推進薬後端側は、硬化不良を起こし未硬化の領域が確認された。Greg らの研究<sup>4)</sup>では、高圧力雰囲気下での Uncured GAP と Cured GAP の線燃焼速度を取得している。図 5 に示すように Uncured GAP の線燃焼速度は、6 MPa 付近までは Cured GAP との差異が見られないが、7 MPa 以上で、6 MPa 時の 2 倍ほどまで急激に上昇している。図 4 のグラフからも 6~7 MPa 付近で急激な圧力上昇が起きていることから推進薬の後端は未硬化領域であり正常に燃焼ができていなかったと考える。また、#5 は推進薬の未硬化領域である後端から着火させたものであり着火直後に圧力上昇がみられる。最後に #6 は、不点火の結果であるが、 $w_t$  は、着火しているものと比較して多いものとなった。しかし

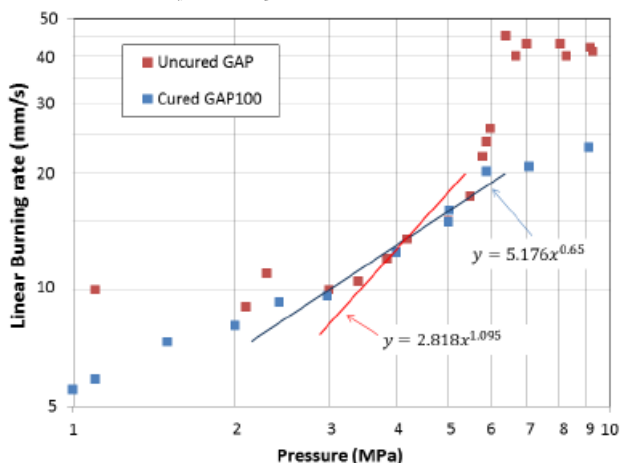


図 4 Cured GAP と Uncured GAP の線燃焼速度の比較<sup>e4)</sup>

点火時の圧力は他の条件と比較すると低く 0.81 MPa となり着火時のような圧力上昇がみられなかった。点火時の圧力上昇がみられなかった原因として、点火薬の燃焼速度の低下、ノズルスロート部を通るイグナイタ線の遮蔽面積の変化が挙げられる。点火薬は、吸湿性の少ないものを使用しており劣化は考えにくい。そこで、ノズルスロート断面積  $A_t$  とノズルを通るイグナイタ断面積  $A_i$  の比をとり遮蔽率  $A_i/A_t$  を求めた。すると点火時は約 4 割であったが、不点火時は、約 2 割ほどであり点火薬の燃焼ガスが抜けてしまったのではないかと考える。

## 5. 結言

- ・ GAP/AP の圧力感度は適切であり、線燃焼速度は GAP の方が支配的である
- ・ EM モータ燃焼時の急激な圧力上昇は、推進薬の硬化不良によるものである
- ・ 点火薬量を適切にし、火炎の回り込みを防止することで安定燃焼を示唆している
- ・ 推進薬の製造方法を確立すること
- ・ ノズルスロート部の遮蔽率及び点火薬量と圧力の関係を求める

## 6. 参考文献

- 1) ISO “ISO 24113:2019 Space systems” Space debris mitigation requirements. (2019)
- 2) S.Gordon, B.J.McBride “Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications” NASA Reference Publication 1311, (1996)
- 3) Raymond Friedman, R. G. Nagent, K. E. Rumbel: “DEFLAGRATION OF AMMONIUM PERCHLORATE”, Symposium (International) on Combustion, Vol.6, No.1, pp.612-618 (1976)
- 4) Garg, A., “A Study on the Combustion Characteristics of GAP Gas Generator” pp.77 (2015)