

# 酸化剤の一部に H<sub>2</sub>O を用いた固体推進薬の燃焼特性

加藤 吉揮(日大・理工・学)  
笹木 隆史(日大・理工・学)  
生出 翔 (日大・理工・院)  
高橋 賢一 (日大・理工)  
桑原 卓雄 (日大・理工)

## 1. 研究背景

2011 年に世界各国の 14 の宇宙機関からなる国際宇宙探査協働グループ (ISECG : The International Space Exploration Coordination Group) によって国際宇宙探査ロードマップ (Global Exploration Roadmap) が作成された。国際宇宙探査ロードマップとは、月、地球近傍の小惑星、火星への実現可能な探査の進め方を定めるための国際的な取り組みを示すものである。その中で今後 25 年間の有人・無人宇宙開発は月・火星を目指し、将来人類が長期に渡って探査活動することを目標としている。それに伴い、観測や物資輸送の手段として固体ロケットを使用することが想定されている。

しかし、現行の H-2A ロケットで地球から燃料や酸化剤を輸送すると、1 回の打上げに 85~120 億円が必要とされ、莫大なコストがかかってしまう。宇宙輸送のコストは質量に依存するので、質量の削減は必須条件である。

コストを抑える方法として「その場資源有効利用 (ISRU : In-Situ Resource Utilization)」という概念が重要となってくる。つまり推進薬の原料を月・火星で現地調達し、地球から打上げるペイロードを極力減らして打上げコストを抑えてしまうというものである。これまでの月・火星の探査結果から、その表面や地殻内にマグネシウム (Mg)、アルミニウム (Al) などの金属や、H<sub>2</sub>O の存在が有望視されており、これら現地の資源である金属及び H<sub>2</sub>O を用いた固体ロケットが注目され始めている<sup>[1]</sup>。しかし、H<sub>2</sub>O を酸化剤に用いた固体推進薬についての研究はほとんどなされておらず、H<sub>2</sub>O が固体推進薬の燃焼特性に及ぼす影響は不明な点が多い。

よって本研究では固体推進薬中で H<sub>2</sub>O がどのような役割を果たすかを明らかにすることを目的とし、ストランド燃焼器内での推進薬の燃焼をハイスピードカメラで撮影するとともに、H<sub>2</sub>O の質量比が燃焼速度と圧力指数に与える影響について求めた。次に

示差走査熱量測定装置(DSC 装置)を用いて推進薬の熱分析を行い、発熱量と発熱ピーク温度を取得し、燃焼速度の律速因子を求めた。

## 2. 金属の選定

本研究で用いる固体推進薬に使用する金属の選定条件を以下 3 項目とした。

- ① H<sub>2</sub>O との燃焼熱が高いこと。
- ② 月・火星での存在率が高いこと。
- ③ 理論真空比推力 I<sub>vac</sub> が高いこと。

上記の 3 項目により、金属の選定を行った。

### 2.1 H<sub>2</sub>O との燃焼熱

図 1 に H<sub>2</sub>O と各種金属の燃焼熱の高さを示す。燃焼熱の計算は大気圧下での燃焼を仮定し、総括反応式より算出した。

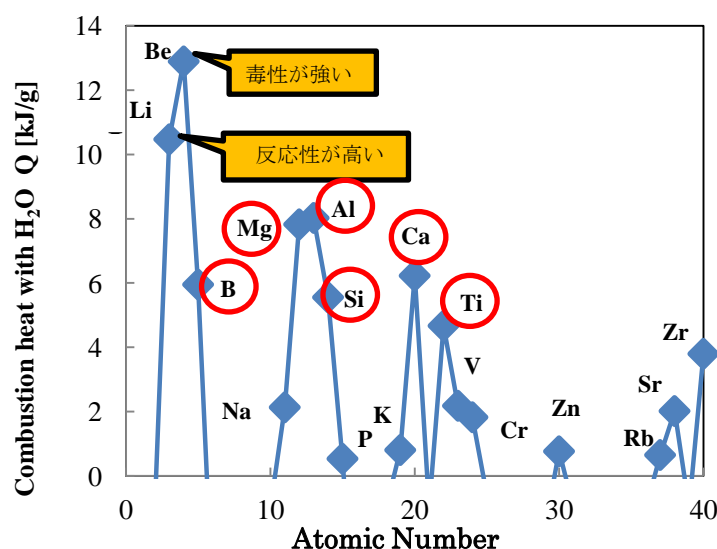


図 1. H<sub>2</sub>O と各種金属の燃焼熱

図 1 より、リチウム (Li) とベリリウム (Be) が H<sub>2</sub>O との燃焼熱が高い。しかし、Li は H<sub>2</sub>O と爆発的に反応し、Be は人体に対して強い毒性をもつ。した

がって取り扱いに危険が伴うことから、これらは使用する金属の候補から除外する。以上より、Li と Be 以外で H<sub>2</sub>O との燃焼熱が高い金属として、ボロン (B)、マグネシウム (Mg)、アルミニウム (Al)、ケイ素 (Si)、カルシウム (Ca)、チタン (Ti) 等が候補として挙げられる。

## 2.2 月・火星での存在率

図 2 に各種金属の月・火星での存在率の高さを示す。存在率はこれまでの月・火星表面での探査結果より得られた推定値を用いる。

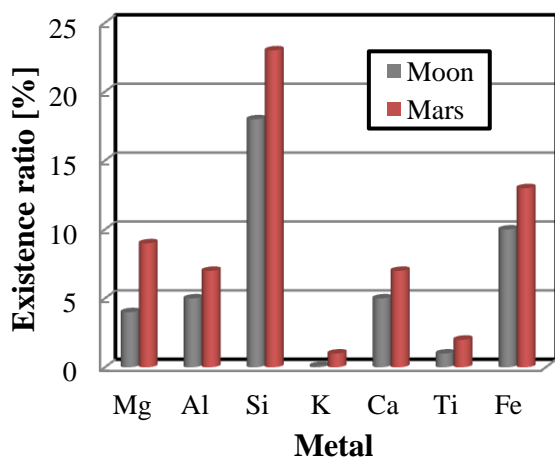


図 2. 月・火星での各種金属の存在率

図 2 より、月・火星ではケイ素 (Si) が最も多く存在し、次いで鉄 (Fe)、Mg、Al、Ca 等が比較的多く存在する。よって、H<sub>2</sub>O と燃焼熱が高く、月・火星にも比較的多く存在する Mg と Al が適している。

## 2.3 理論真空比推力

H<sub>2</sub>O と金属を反応させるためには金属を高温にする必要がある。そこで、従来からロケットモータの点火薬として用いられている金属/Teflon (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>) に注目し、これに H<sub>2</sub>O を組み込んだ、Mg/Teflon/H<sub>2</sub>O、Mg-Al/Teflon/H<sub>2</sub>O、Al/Teflon/H<sub>2</sub>O の Ivac を計算し、比較を行う。計算条件を表 1 に示し、化学平衡ソフト NASA-CEA を用いて取得した計算結果を図 3 に示す。

表 1. 計算条件

推進薬組成	Metal/Teflon/H <sub>2</sub> O
推進薬組成比 [parts]	80/20/0-80
燃焼室圧力 P [MPa]	1
開口比 A <sub>e</sub> /A <sub>t</sub> [-]	100

図 3 より、Mg、Mg-Al、Al とともに H<sub>2</sub>O の割合が増えると Ivac が向上することが分かる。H<sub>2</sub>O が 80% の時に Al が最も高い値を示すが、Al は燃焼が中断

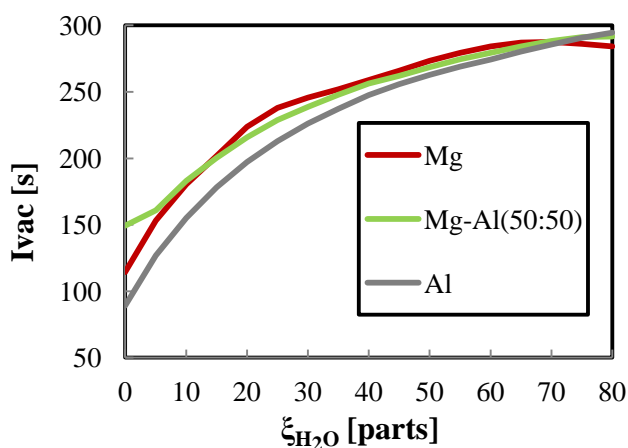


図 3. 各推進薬の理論真空比推力

してしまう<sup>[2]</sup>ため候補から除外する。Mg-Al と Mg の最大 Ivac は 5s 程度の差がある。しかし、最大 Ivac 時の断熱火炎温度を比較すると、Mg-Al より Mg の方がより高温となる。以上より、断熱火炎温度がより高温な Mg を本実験で使用するものとした。ここで、Teflon は撥水性が非常に強く、そのままの状態では H<sub>2</sub>O と混合することができない。そこで、親水性のポリマーであるポリエチレンオキサイド

(PEO : (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>n</sub>) を微量混入し、推進薬のバインダーとして使用する。以上のことから H<sub>2</sub>O を用いた、Mg/Teflon/PEO/H<sub>2</sub>O を推進薬に選定した。

## 3. 実験方法・実験装置

### 3.1 推進薬組成

Mg 粒子は月・火星での製造性を想定し、平均粒径 75μm の破砕品を使用した。

表 2 に本実験で使用した推進薬の組成を示す。本実験では H<sub>2</sub>O の質量比が燃焼速度特性にどのように影響を与えるかを求めるため、推進薬組成のうち Mg/Teflon/PEO の割合を固定し、H<sub>2</sub>O の割合のみを外割で変化した。

表 2. 推進薬組成 [parts]

Prop.	Mg	Teflon	PEO	H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-0	80	19.4	0.6	0
H <sub>2</sub> O-5				5
H <sub>2</sub> O-10				10

### 3.2 燃焼速度

推進薬は表 2 の組成で質量約 1g, 直径 7mm, 高さ 16mm の円柱型になるように 1370N の力で 30s 間圧填して成型し, 端面燃焼させるために側面に ABS 樹脂を塗布した. また, 着火性改善のため上面に過塩素酸アンモニウム(AP)を微量添加し, 作成した.

推進薬の着火には上面に取り付けたニクロム線に着火装置を用いて出力 30W で約 1s 間電圧をかけ, 電氣的に加熱することにより着火した. 燃焼時の状況は観察窓を通してハイスピードカメラで記録した. 同時に燃焼器側面に取りつけられた圧力センサを A-D コンバータを介して PC に接続し, 燃焼時の圧力履歴を取得した. 次に燃焼速度  $r$  の算出方法を示す. 推進薬高さを  $h$ , 燃焼時間を  $t$  とすると燃焼速度は(1)式より算出できる.

$$r = \frac{h}{t} \quad (1)$$

燃焼時間は, ハイスピードカメラの映像より求める. さらに圧力指数は  $r$  を用いて Vieille の法則より,

$$r = aP^n \quad (2)$$

で求めることができる. ここで  $P$  は燃焼室圧力,  $n$  は圧力指数,  $a$  は推進薬の組成や初期温度に依存する定数であり, エンジン設計時には温度変化に対して一定性能が保持できるよう, 圧力指数の低い推進薬が求められる. 表 3 に実験条件を, 図 4 に実験装置図をそれぞれ示す.

表 3. 実験条件

雰囲気ガス	N <sub>2</sub>
初期温度 [K]	293
燃焼室圧力 [MPa]	0.15, 0.4, 0.6, 0.8, 1.1
撮影速度 [fps]	600
測定回数 [times]	3

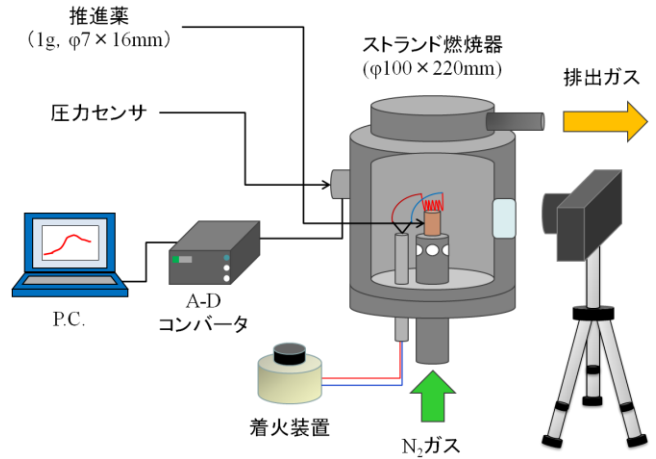


図 4. 燃焼速度測定装置図

### 3.3 示差走査熱量測定(DSC)

DSC 装置 (株式会社リガク製 DSC8230)を用いて各組成について発熱量と発熱ピーク温度を求めた. DSC は, 試料と基準物質に生じる温度差信号を検出し DSC 信号として出力する装置で, 試料に発生した熱エネルギーの変化を再現性良く定量的に検出する装置である. まず, 熱量既知の基準物質と測定したい試料を SUS の容器内に入れ, 圧填機で密閉する. その後不活性ガスを流しながら昇温する. 表 4 に熱分析条件を, 図 5 に DSC 装置図を示す.

表 4. 熱分析条件(DSC)

試料重量 [mg]	0.7
基準物質	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
容器	SUS sealed
雰囲気ガス	N <sub>2</sub>
昇温速度 [K/min]	20

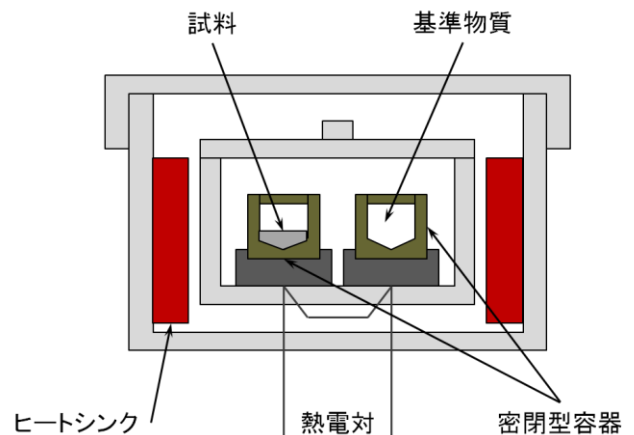


図 5. DSC 装置

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 燃焼速度

推進薬の燃焼の様子を図 6 に示す。

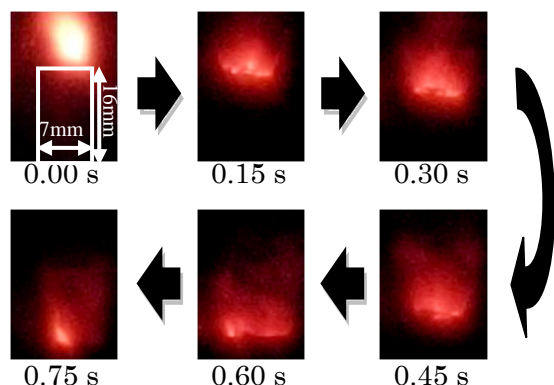


図 6. 試料の燃焼 (H<sub>2</sub>O-5, 0.4MPa)

推進薬は着火すると激しく発光した後、端面燃焼することが分かる。実験結果を図 7 に示す。

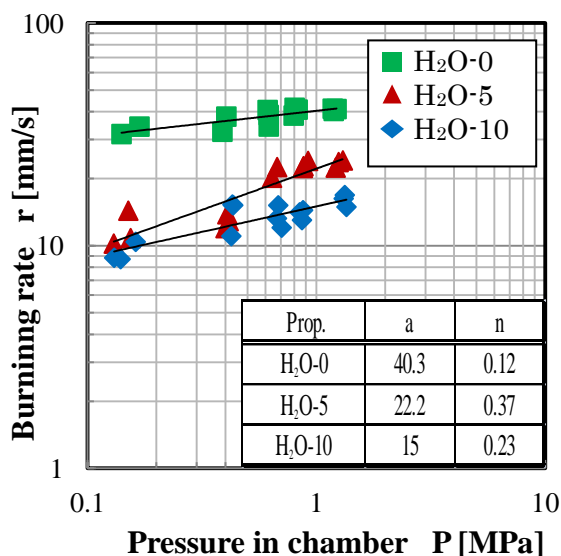


図 7. Mg/Teflon/PEO/ H<sub>2</sub>O の燃焼速度

図 7 より、各組成において燃焼室圧力が高くなるにつれて燃焼速度が増加しており、H<sub>2</sub>O-0 のときに最も高い値を示した。圧力増加に伴い、気相から燃焼表面への熱の流入量が増加したため、燃焼速度が増加したと考えられる。また、H<sub>2</sub>O-0、H<sub>2</sub>O-5、H<sub>2</sub>O-10 のとき圧力指数はそれぞれ 0.12、0.37、0.23 であり、H<sub>2</sub>O を混入した試料は混入していない試料よりも圧力依存性が高いことが分かった。

### 4.2 示差走査熱量測定(DSC)

DSC の測定結果を図 8 に示す。

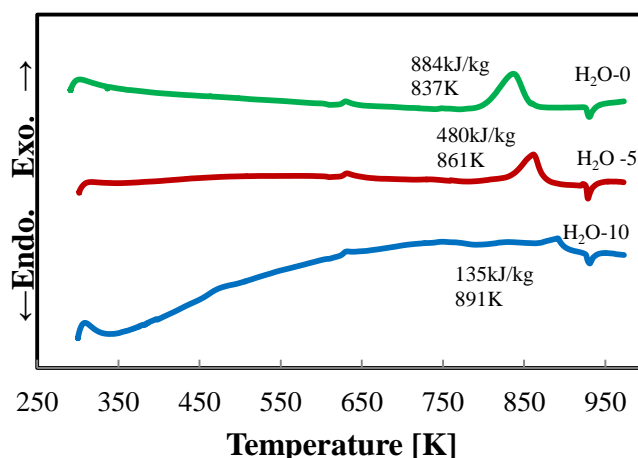


図 8. 各組成における DSC の測定結果

図 8 より、H<sub>2</sub>O が増加すると発熱量は減少し、発熱ピーク温度が高温側へ移行することが分る。Mg/Teflon は約 823K で発熱分解する<sup>[3]</sup>ため、この発熱ピーク温度は燃焼表面温度と考えられる。さらに、圧力が増加すると燃焼表面温度も増加する<sup>[4]</sup>ことから、PEO と H<sub>2</sub>O の分解ガスの発生によりセル内部の圧力が増加し、燃焼表面温度が増加したものと考えられる。また、燃焼表面での発熱量が減少したことが燃焼速度の減少に至った要因として考えられる。

## 5. まとめ

- H<sub>2</sub>O が増加すると燃焼速度が減少する。
- H<sub>2</sub>O を混入すると圧力指数が高くなる。
- H<sub>2</sub>O が増加すると発熱量が減少する。
- H<sub>2</sub>O が増加すると燃焼表面温度が増加する。

## 6. 参考文献

- [1] G. A. Risha: “Aluminum-Ice (ALICE) Propellants for Hydrogen Generation and Propulsion”, AIAA Paper, No2009-4877, 2009.
- [2] 加藤美紀生他, “酸化剤として H<sub>2</sub>O を用いたガスハイブリッドロケットの燃焼特性”, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2011-041, 2012.
- [3] 久保田浪之介, “マグネシウム/テフロン燃焼速度”, 技術研究本部技報, 1986-03, pp.1-7, 1985.
- [4] 久保田浪之介他, “プロペラントハンドブック”, 社団法人火薬学会, pp.157, 2005.