

### Mg-Al/Teflon/Viton の燃焼速度特性 Burning Rate Characteristic of Mg-Al/Teflon/Viton

○市川亮太<sup>1</sup>, 加藤美紀生<sup>1</sup>, 松本幸太郎<sup>2</sup>, 桑原卓雄<sup>3</sup>

\*Ryota Ichikawa<sup>1</sup>, Mikio Kato<sup>1</sup>, Koutarou Matsumoto<sup>2</sup>, Takuo Kuwahara<sup>3</sup>

Abstract: We propose a gas hybrid rocket that uses H<sub>2</sub>O as an oxidizer. Mg-Al is exceptionally reactive with H<sub>2</sub>O. So we choose Mg-Al/Teflon/Viton as a propellant. We measured burning rate and pressure exponent of the propellant in nitrogen atmosphere. In addition we compared burning rate and pressure exponent of Mg-Al/Teflon/Viton with that of Mg/Teflon/Viton. We measured three times according to the pressure (0.15MPa, 0.4MPa, 0.65MPa, 0.9MPa, and 1.15MPa). As a result, burning rate of the propellant is improved 31% with Mg-Al.

#### 1. 背景

ガスハイブリッドロケットとは、一次燃焼室で固体推進薬を燃焼させて高温の燃料過剰ガスを発生し、その燃料過剰ガスを二次燃焼室で液体酸化剤と混合することで燃焼させて推力を得るロケットである<sup>[2]</sup>。燃料ガス加圧方式のガスハイブリッドロケットの構造図を Figure1 に示す。

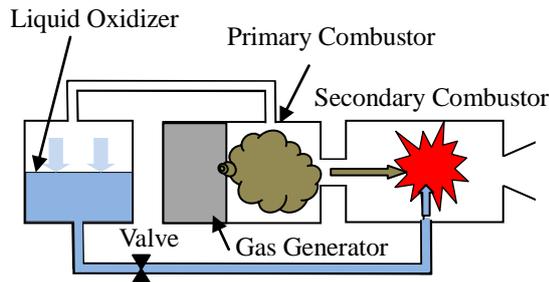


Figure 1. Gas-Hybrid Rocket

本研究では、他の酸化剤に比べ取り扱い性が良く、運用時の安全性が非常に高い H<sub>2</sub>O を酸化剤として用いるガスハイブリッドロケットを考案した。固体推進薬として、H<sub>2</sub>O との反応性が高い金属を考え、その金属を多量に含有する推進薬を検討した。比較的発熱量の高いマグナリウム(Mg-Al)を多く用いることができる Mg-Al/Teflon/Viton(MATV)を選定した。

Figure2 に MATV と Mg/Teflon/Viton(MTV) の理論比推力(Isp)を示す。計算条件は、燃焼器内圧力  $P_c=1\text{MPa}$  , 開口比  $A_e/A_t=100$  とした。金属含有量が 60% を超えるときの MATV と H<sub>2</sub>O の理論比推力(Isp)は 265 秒を超えており、MTV と H<sub>2</sub>O のときの Isp より、金属含有量に関わらず 5 秒程度向上する。

本研究では、窒素雰囲気下での MATV の燃焼速度特性を評価するために、燃焼速度と燃焼時の圧力履歴を

ストランド燃焼器を用いて取得し、MTV との燃焼速度特性の相対的な比較を行った。

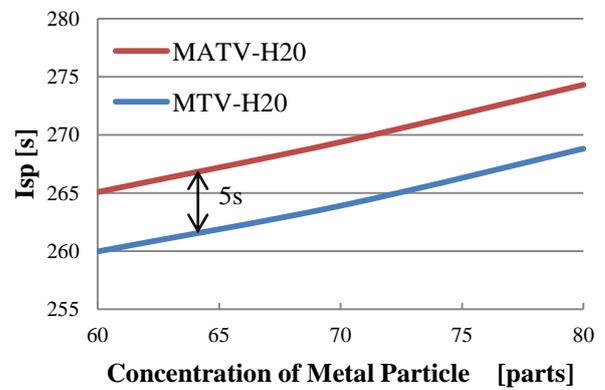


Figure 2. Relationship between Specific Impulse of the Propellant and Concentration of Metal Particle

#### 2. 理論

燃焼速度は燃焼表面における熱平衡式により決定することができる。推進薬が一次的に燃焼する場合を考えると、熱の移動は Figure3 に示すように、推進薬の燃焼表面において次のような熱平衡となっている<sup>[3]</sup>。

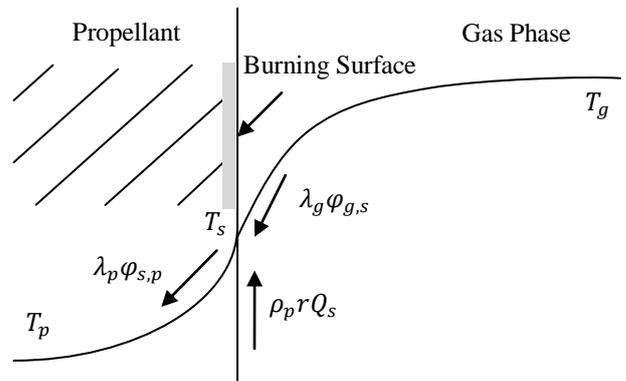


Figure 3. Thermal Balance of the Burning Surface

1: 日大理工・学部・航宇 2: 日大理工・院(前)・航宇 3: 日大理工・教員・航宇

よって熱平衡式は以下のように表すことができる<sup>[1]</sup>.

$$\lambda_p \left( \frac{dT}{dx} \right)_{s,p} = \lambda_g \left( \frac{dT}{dx} \right)_{s,g} + \rho_p r Q_s \quad (1)$$

ここで、 $T$ は温度、 $x$ は距離、 $r$ は燃焼速度、 $Q$ は燃焼表面における反応熱、 $\lambda$ は熱伝導率、 $\rho$ は密度、添え字の $g$ は気相、 $p$ は固相、 $s$ は燃焼表面、 $s, g$ は燃焼表面における気相、 $s, p$ は燃焼表面における固相、を示す。また Figure3 での $\phi$ は $(dT/dx)$ を示す。

### 3. 実験方法・実験装置

本研究で用いた試料の化学組成を Table1 に示す。

Table 1. Chemical Composition of the Propellant

Sample Name	Mixture Fraction [parts]			
	Mg (75 $\mu$ m)	Mg-Al (75 $\mu$ m)	Teflon (3 $\mu$ m)	Viton
MTV	90	-	10	12
MATV	-	90	10	12

推進薬は Table1 の組成で、質量 0.7g、直径 7mm、高さ 10mm になるように圧填して作成した。推進薬上面には着火性を改善するために黒色火薬を微量塗り、ストランドとした。

ストランドの着火には、ストランド上部に取り付けたニクロム線を電氣的に加熱することによって行った。燃焼器は窒素ガスで置換されたストランド燃焼器を用いた。燃焼器の側面には石英製の観察窓があり、ハイスピードカメラ(600fps)を用いて燃焼状況を記録した。圧力履歴を取得するために、燃焼器側面に取り付けられた圧力センサーを PC に接続して記録した。

実験は各組成、窒素雰囲気下で、0.15MPa、0.4MPa、0.65MPa、0.9MPa、1.15MPa の各圧力で 3 回ずつ行った。実験装置を Figure4 に示す。

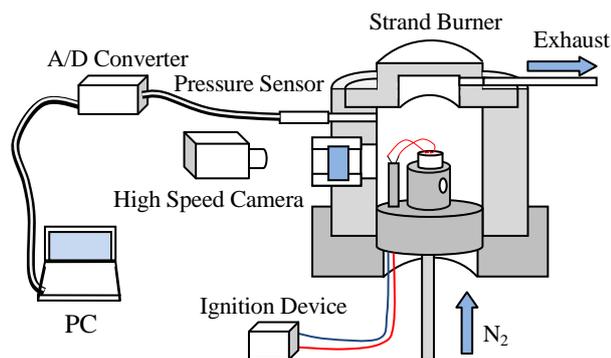


Figure 4. Experimental Apparatus

### 4. 実験結果・考察

Table1 に示した推進薬 A, B での、圧力と燃焼速度の関係を図 5 に示し、各圧力での燃焼速度を Table2 に示す。Figure5 に示したように、Mg を用いた推進薬のときと Mg-Al を用いた推進薬の場合では、圧力指数には大きな差はなく(相対誤差 1.7%)、ほぼ同じ値であると言える。しかしながら、MATV の燃焼速度は MTV と比較して、どの圧力に対しても平均して 31% 大きい。

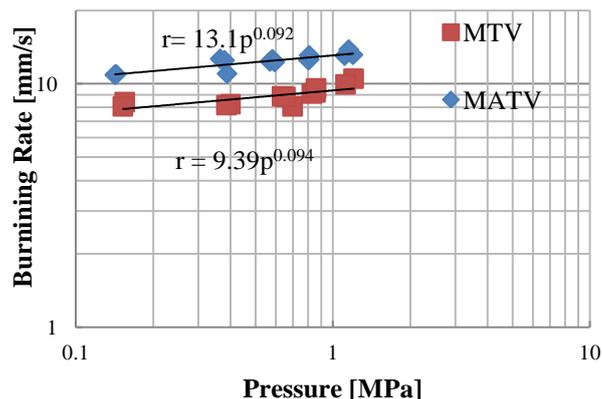


Figure 5. Relationship between Pressure and Burning Rate

一般的に固体推進薬の燃焼表面から固相への熱量移動量は、推進薬に含まれるバインダーの量や種類に影響する<sup>[3]</sup>。本研究ではバインダーである Viton が一定量なので、式(1)の左辺は一定とすると、燃焼速度 $r$ は右辺第一項に依存すると考えられる。右辺第一項は、気相から燃焼表面への熱量移動量を表わしているので、MATV は MTV に比べ、気相から燃焼表面への熱量移動量が大きいことが一因として上げられる。

### 5. まとめ

金属粒子を Mg から Mg-Al へ変えることで燃焼速度は 31% 増加する。

金属粒子を Mg から Mg-Al に変えても圧力指数に大きな変化は見られない。

### 6. 参考文献

- [1] 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, 防衛庁技術研究本部 技術部防衛庁技術研究本部技術部技術第 2 課 [編], pp.1-7, 1985.
- [2] 桑原卓雄：「ロケットエンジン概論」, 産業図書, pp.72-76, 2009.
- [3] 久保田浪之介 他：「プロペラント・ハンドブック」, 社会法人 火薬学会, pp.2-7, 247-278, 2005.