

K2-38

Mg-Al 雰囲気中における H₂O 液滴径と燃焼時間の関係

Relationship between droplet-size and combustion time of H₂O in Mg-Al atmosphere

○大室翼¹, 鈴木恭輔¹, 桑原卓雄²*Tsubasa Omuro¹, Kyosuke Suzuki¹, Takuo Kuwahara²

Abstract: We approach a gas-hybrid rocket using H₂O as a liquid oxidizer and Mg-Al as a fuel. Combustion characteristic of H₂O and Mg-Al is not studied well. In this study, we focused on relationship between droplet-size and combustion-time of H₂O in high temperature atmosphere of Mg-Al gas. As a result, combustion-time of H₂O increases with increasing of square H₂O droplet-size.

1. 背景

世界での宇宙技術開発は、月や地球近傍の小惑星、惑星での有人探査を視野に入れて進められている。ロケットの燃料タンクと酸化剤タンクの大きさには制限があるため運用時間に限りがある。そこで、より広範囲での調査を可能にするため、惑星現地で燃料と酸化剤を入手できる惑星探査用ロケットの開発が必要である。水(H₂O)は多くの惑星で存在が有望視されており、現地調達可能な酸化剤として適している。地球以外の惑星でも、地球と同じ金属が存在することがわかっている。このことから、H₂O を液体酸化剤として用いることができ、金属を燃料として用いることができるガスハイブリッドロケットが、惑星探査用ロケットに適している。Figure 1 にガスハイブリッドロケットの模式図を示す。

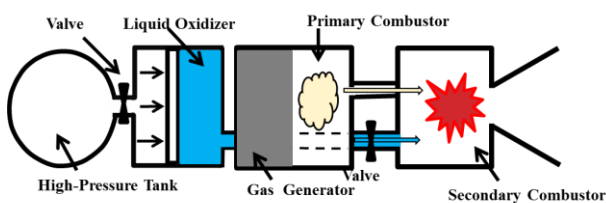


Figure 1. Gas-Hybrid Rocket

燃料に使う金属として、惑星にも多く存在する Mg と Al に着目した。Mg は着火しやすく、Al は H₂O との燃焼熱が高いという特徴がある。Mg と Al の合金であるマグナリウム(Mg-Al)はそれぞれの特徴を有している。そこで、燃料に使う金属は Mg-Al とする。また燃料として高温で多量の金属を用いる場合、Metal/Teflon/Viton のパイロラントを用いるのが有用であるため、燃料は Mg-Al/Teflon/Viton のパイロラントを用いる。

実際に H₂O と Mg-Al の燃焼は確認できている^[1]ので、実用化しロケットを設計する場合を考える。二次燃焼室の設計では燃焼室特性長(L*)が必要であり、次の式で与えられる。

$$L^* = \tau_c \frac{C_D P_c}{\rho_c} \quad (1)$$

ρ_c は燃焼室内の気体の密度、 P_c は燃焼室内圧力、 C_D はノズル排出係数、 τ_c は滞留時間である。(1)式より L* は τ_c が大きく影響する。燃焼室は、 τ_c が着火遅れ時間と燃焼時間の和より大きくなるように設計する^[2]。また τ_c を小さくすれば、L* を小さくでき燃焼室を小型化できる。

2. 目的

本研究では滞留時間に大きく関わる燃焼時間について着目した。H₂O と Mg-Al/Teflon/Viton を燃焼させ、燃焼時間を H₂O の初期液滴径ごとに取得した。そして H₂O の液滴径の大きさによる燃焼時間の変化を評価した。

3. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図を Figure 2 に示す。

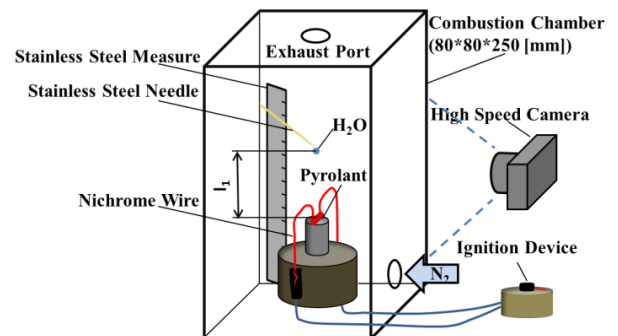


Figure 2. Experimental Equipment

容器内部を窒素置換させた状態で実験を行った。燃焼器の側面からハイスピードカメラ(600fps)を用いて燃焼状況を記録した。実験データを解析し、H₂O 液滴周りの輝炎発生時間を計測した。液滴は燃料片上部から鉛直方向に 60[mm] 地点 (I₁) に位置させた。初期液滴径 D は 4 方向から測定し (Figure 3) 平均化したものを用いた。

本研究で用いたパイロラント組成比を Table 1 に示す。



Figure 3.

Measurement Method

パイロラントは、質量 1.0 [g]、直径 7 [mm]、高さ 14 [mm]になるように圧填して作成した。

Table 1. Chemical Composition of the Pyrolant

| Sample Name | Mixture Fraction [mass%] | | |
|--------------------|--------------------------|-----------------|-------|
| | Mg-Al*1 (100μm) | Teflon (3μm) | Viton |
| Mg-Al/Teflon/Viton | 79.2 | 8.8 | 12 |

*1.Mg:Al=50:50

Table 2 に実験条件を示す。

Table 2. Experimental Condition

| Atomosphere Gas | N ₂ Atomosphere |
|--------------------------------|----------------------------|
| Temprature in Chamber | 298.15 [K] |
| Temprature in H ₂ O | 298.15 [K] |
| Pressure in Chamber | Atomosphere Pressure |

4. 実験結果及び考察

Figure 4 に液滴径 2.2 [mm]の燃焼の様子を示す。図中の矢印は液滴の懸垂位置を示している。

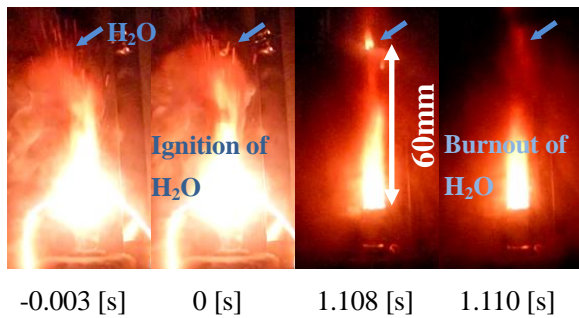


Figure 4. State of Combustion

H₂O 液滴と Mg-Al 燃焼ガスが反応し輝炎が確認できた時間を燃焼開始時間 0 [s] とし、輝炎が無くなる時間までを燃焼時間とした。

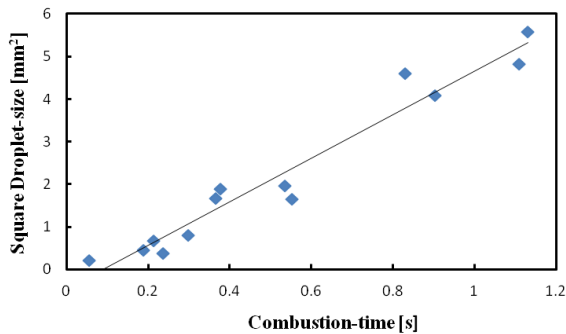


Figure 5. Relationship between Square Droplet-size and Combustion-time

Figure 5 に初期液滴径の 2 乗と燃焼時間の関係を示す。Figure 5 より燃焼時間が初期液滴径の 2 乗に比例することがわかる。Figure 5 の近似直線の傾き k_1 は 5.12 である。ここで燃焼中の液滴径の 2 乗の時間的变化は

一定であり

$$dD^2/dt = -k_1 = -5.12 \text{ [mm}^2/\text{s]} \quad (2)$$

となる。次に液滴の蒸発との関係を考える。蒸発による液滴径の 2 乗の時間的变化は以下の式で与えられる。

$$dD^2/dt = -k_2 = \frac{8\lambda(T_g - T_f)}{L\rho} \quad (3)$$

H₂O が 298.15[K]のときの熱伝導率 $\lambda=0.601 \text{ [J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K]}$ 、気化熱 $L=2250 \text{ [kJ/kg]}$ 、雰囲気温度 $T_g = 2700.15 \text{ [K]}$ 、初期温度 $T_f=298.15 \text{ [K]}$ 、密度 $\rho=1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ を(2)に代入すると

$$dD^2/dt = -k_2 = -5.13 \text{ [mm}^2/\text{s]} \quad (4)$$

となる。*2.O/F=0.72 の時の断熱火炎温度

(2), (4)式より、実験結果より得られた液滴径の 2 乗の変化と、算出した蒸発による液滴径の 2 乗の変化の値が近いことから、燃焼時間は蒸発時間によるものだと考えられる。また H₂O 質量変化を表している燃焼率 (dm/dt)は液滴の体積変化でもあるので

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{\pi D^3}{6} \right) = \frac{\pi k_1 D}{4} \quad (5)$$

となる。Figure 6 に燃焼率と液滴径の関係を示す。

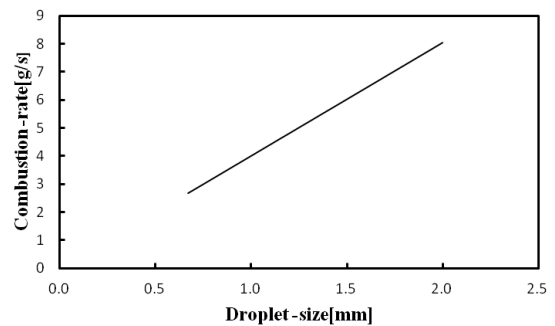


Figure 6. Relationship between Droplet-size and Combustion-rate

Figure 6 より燃焼率は液滴径に比例することがわかる。

5. まとめ

- 燃焼時間と初期液滴径の 2 乗は比例関係にある。
- 燃焼時間は蒸発時間による。
- 燃焼率は液滴径に比例する。

6. 参考文献

[1] 市川亮太 加藤美紀生, ”平成 23 年度日本大学理工学部卒業論文”(2012)
 [2] 桑原卓雄, ”ロケットエンジン概論”, 産業図書, pp.53-55,72-76(2009)
 [3] 田坂英紀, ”現象から学ぶ燃焼工学”, 森北出版株式会社, pp.61-65(2007)