

## 火星用ダクテッドロケットの燃料となる Mg - Al の融点 A melting point of Mg-Al becoming the fuel of ducted rocket for the Mars

○小島直輝<sup>1</sup>, 大場貴徳<sup>1</sup>, 牛島正道<sup>2</sup>, 村松旦典<sup>2</sup>, 桑原卓雄<sup>2</sup>

\*Naoki Kojima, Takanori Ohba, Masamichi Ushijima, Akinori Muramatsu, Takuo Kuwahara

Abstract: When the human will explore Mars in the future, it will be thought that a propulsion engine to carry surveying instruments efficiently in Mars will be necessary. We suggest ducted rocket as the rocket engine. Because the carbon dioxide which holds most of Mars atmosphere becomes the oxidizer on ducted rocket on Mars, it is set to use the Mg-Al which is the alloy of Mg and Al as the metal fuel which reacts with the carbon dioxide. Therefore we examine the physical characteristics such as melting points of the Mg-Al which is included in fuel to progress in performance of ducted rocket.

### 1. 研究背景

将来、人類が宇宙に進出するために地球から近い火星の詳細な環境を知る必要があり、火星の探査装置を効率的に運搬できる推進機関が必要と考えられる。

火星の大気成分の約 95%は二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が占めており、その CO<sub>2</sub>を酸化剤として利用できる推進機関を使用すれば、燃費の面でより効率的な火星探査装置の輸送が可能となる。その推進機関としてダクテッドロケットに着目した<sup>[1]</sup>。この火星用ダクテッドロケットは CO<sub>2</sub>を酸化剤とし、火星大気圏内を超音速で飛行し目的地まで素早く火星探査装置を輸送することができる。

火星用ダクテッドロケットの燃料として、高い燃焼熱を持つ Al と高い着火性を持つ Mg の合金で CO<sub>2</sub> と反応するマグナリウム(Mg-Al)を選定した。Mg-Al は一次燃焼器内で高温になり、一次ノズルから二次燃焼器内に噴出され、この高温の Mg-Al と二次燃焼器内に流入する CO<sub>2</sub>が反応し、発生する生成ガスを二次ノズルから高速で噴出させ、推力を得る。ダクテッドロケットの構造上の理由から、飛行するマッハ数により二次燃焼器内の温度や圧力は変化し、燃料の着火特性などに影響する。

融解していない未燃焼の Mg-Al が二次燃焼器内へ噴出されると、二次燃焼器内での Mg-Al の融点が下がることで Mg-Al が低温度で着火しやすくなる。それにより、着火特性がさらに向上できると考えられる。

本研究ではマッハ数によって変化する二次燃焼器内の圧力が Mg-Al の融点に与える影響を求めため、異なる圧力状態における Mg-Al の融点を実験的に求める。また、実験値の比較のため、Differential Scanning Calorimetry(DSC)を用いて Mg-Al の融点の測定も行った。

### 2. 理論

これまでの研究で、火星用ダクテッドロケットのマッハ数の有効範囲は約 3.0~4.5 であることが明らかになった<sup>[2]</sup>。本研究ではマッハ数とその範囲内の 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 の場合を考える。マッハ数の変化による二次燃焼器内の圧力変化を Table 1 に示す。この圧力を基本にして融点を求める。

Table 1. Secondary combustor pressure to Mach number

Mach number	Secondary combustor pressure, kPa
3.0	16.1
3.5	31.6
4.0	61.3
4.5	101.3

### 3. 実験方法・実験装置

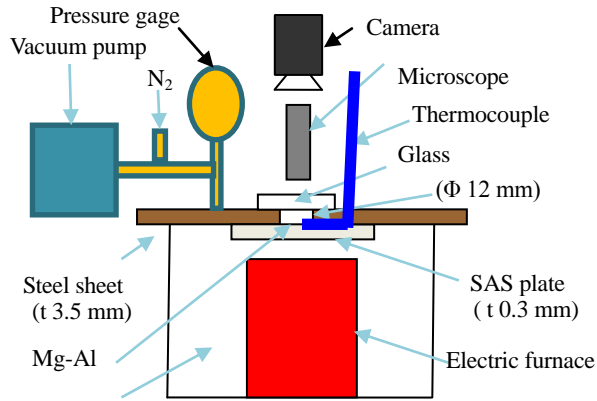
本研究では、Mg-Al は Mg と Al の比率が質量比で Mg:Al=50:50%(Mg-Al(50:50))のものを用いた。

#### 3-1. DSC を用いた Mg-Al の融点の測定

DSCを用いて CO<sub>2</sub>中における Mg-Al の融点を求めた。Mg-Al は CO<sub>2</sub>で密閉したものを容器に入れた。昇温速度は 20 °C/min, 測定温度は 300~873 K, Mg-Al の質量は約 1 mg であった。

#### 3-2. 圧力を変化させたときの Mg-Al の融点の測定

実験装置の概略図を Figure 1 に示す。装置内を窒素(N<sub>2</sub>)置換して行い Mg-Al の融点を求めた。また、装置内の圧力は理論でも述べたとおり、16.1 kPa, 31.6 kPa, 61.3 kPa, 101.3 kPa の 4 点の圧力で測定を行い、Mg-Al の粒子の面積が広がっていく瞬間を融点と判断し、各圧力での融点の値を求めた。



Pressure (16.1 kPa, 31.6 kPa, 61.3 kPa, 101.3 kPa)

Figure 1. Experimental devices

#### 4. 実験結果・考察

##### 4-1. DSC を用いた Mg-Al の融点の測定

DSC による熱分解特性データを Figure 2 に示す。

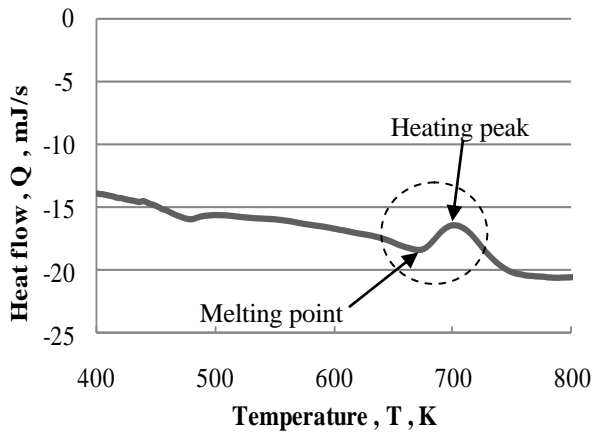


Figure 2 .Heat flow to Temperature of DSC

Figure2 より、680 K で吸熱反応のピーク値、703 K で発熱のピーク値をとっている。よって、680 K で吸熱反応が起き、703 K で発熱反応が起きている。これより、680 K で融解して、703 K で燃焼していると判断できる。よって、CO<sub>2</sub> 中ではこの点が Mg-Al(50:50)の融点と考えられる。

##### 4-2. 異なる圧力状態における Mg-Al の融点

圧力変化による融点の実験値を Figure 3 に示す。Figure 3 から得られるように、圧力の上昇とともに、融点が増加する。Figure 3 より、N<sub>2</sub> 中の 101.3 kPa での融点は 755 K であった。また、文献により同じ雰囲気での融点は 738 K であったので、この実験は誤差が少ないと考えられる<sup>[3]</sup>。

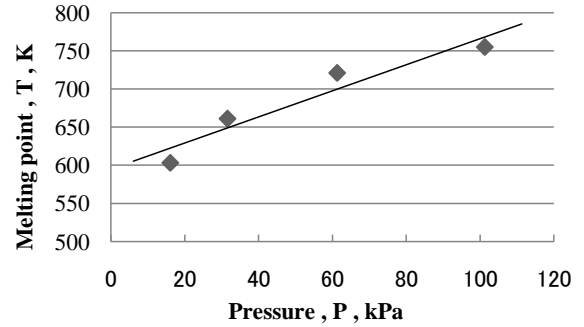


Figure 3.Melting point to Puressure

CO<sub>2</sub> 中で測定した DSC の融点と N<sub>2</sub> 中での融点に差が生じたのは、CO<sub>2</sub> の濃度が原因であると考えられる。CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub> 混合ガス中では一定の圧力の中で CO<sub>2</sub> の濃度を変化させると、CO<sub>2</sub> の濃度が高いほど融点が低くなる<sup>[4]</sup>。よって、DSC では CO<sub>2</sub> の濃度が 100%であったためにこのような差が生じたのだと考えられる。

また Figure 3 で Mg-Al の融点が変わったのは、圧力の変化により体積が変化したのが原因だと考えられる。一般的に融点は体積変化に大きく依存している。以上の関係は下のクラペイロンの式で表せる。

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\lambda}{T\Delta v} = \frac{\lambda}{T(v_L - v_S)} \quad (1)$$

ここでλは融解熱、Pは圧力、Tは温度、v<sub>L</sub>、v<sub>S</sub>は液体、固体の体積である。Mg-Alは融解すると体積は増加するのでΔv=v<sub>L</sub>-v<sub>S</sub>>0が成り立つ。したがってdP/dTも正となるので、圧力Pが減少すれば融点Tも低くなる<sup>[5]</sup>。よって、圧力を変化させたことで融点が変わったのだと考えられる。

#### 5. まとめ

- ・圧力が減少すると Mg-Al の融点も下がる。
- ・圧力が 101.3 kPa において、CO<sub>2</sub> 中では 680 K、N<sub>2</sub> 中では 755 K で Mg-Al の融点となる。

#### 6. 参考文献

- [1] 牛島正道：第 47 回飛行機シンポジウム 「火星大気中におけるダクトドケットの作動特性」、pp.739-742, 2009 年。
- [2] 原秀樹：「平成 22 年、日本大学理工学部 卒業論文」、pp.1-4, 2010 年。
- [3] 関東金属株式会社：データ安全シート, 2005 年。
- [4] 畑和明, 高温高压流体技術研究所：「超臨界二酸化炭素中でのポリマーの熱物性測定」, 2002 年。
- [5] 下井守 化学同人：「化学入門」, pp.10. 1989 年