

低圧水蒸気中における金属ワイヤ燃焼

およびハイブリッドスラスタ応用に関する研究

Study on the Combustion of a Metal Wire and Water Vapor for Application to a Hybrid Thruster

学生証番号 47186060 氏名 秋山 茉莉子
(指導教員 小泉 宏之 准教授)

Key Words : Small Spacecraft, Thruster, Hybrid Rocket, Water, Magnesium

1. 序論

昨今の宇宙開発において、1 – 50 kg 級の小型宇宙機は中心的な役割を果たす。その打上数は年々増加しており、今後も当面増加の予想がなされている¹。小型宇宙機には、開発期間を短縮、そして開発費用を低価格に抑えられる、という2つの大きな特徴があり、宇宙開発のサイクルを素早く回すことを可能にした。多くの小型宇宙機は、地球周回軌道における、観測や通信等の商業用であったり、教育や技術実証を目的としていたりしてきた。一方で、近年では小型宇宙機を用いた探査ミッションの提案も多くなされ、それを遂行する小型宇宙機も数少ないながら出現し始めている。例えば、National Aeronautics and Space Administration (NASA) が打ち上げた Mars Cube One (MarCO) は、2019年、世界で初めて惑星間航行に成功した小型宇宙機として話題となった²。しかし、依然として地球周回軌道を離れる小型宇宙機は稀有であり、適用ミッション拡大のためには、小型宇宙機の軌道間輸送技術の確立及び実証が不可欠である。

軌道間輸送の担い手は推進機である。小型推進機は現在活発に研究開発が行われ、実証が加速する段階にある。特に、上述のような軌道間輸送のためには、数 km/s の速度増分を生み出さる小型推進機の実現が望まれる。

小型推進機への要求として、その多くが相乗りで打ち上げられるという背景から「安全性が高いこと」、そして、体積・質量・電力等のリソースが限られることから「充填密度が高いこと」が挙げられる。これらを満たすような推進機として、マグネシウム (Mg) およびアルミニウム (Al) を燃料、水を酸化剤とするハイブリッドスラスタを提案する。先行研究においては、粉体の燃料金

属と水の燃焼について多く扱われてきた^{3,4}。粉体金属であるのは、反応性を高めるためである。一方で、小型推進機への応用の観点からは、無重力下における粉体の扱いが不要で、物質的にも安定側である、塊状の金属が好ましい。しかし、粉体金属に比べて塊状金属を扱った先行研究は非常に稀である。

よって、本研究の目的は、0.1 mm オーダーのマグネシウムワイヤの水蒸気雰囲気中の燃焼について実験的に解明すること、および、得られた結果から、ハイブリッドスラスタの推進性能を推算／評価することである。

2. 手法

実験系の系統図を図1に示す。本研究では、Mg ワイヤの端面をトリア入りタングステンワイヤとの交流放電により加熱する方式をとった。この手法の利点としては、着火した場所を特定しやすいことが挙げられる。交流放電のための入力には家庭用電源から取得したため、周波数は50 Hz である。本研究では2つの変圧器を介して、電圧を100 V から最大10 kV まで昇圧した。水蒸気の供給に際しては、ヒーターが取り付けられたタンクに液体の純水を入れ、水温を上げることにより飽和水蒸気圧を上げて、気液分離により生成した水蒸気を供給するという方式をとった。

本研究では、録画した燃焼時の動画を、30 fps のレートで画像に分割し、各画像の平均輝度値から、輝度値の時間履歴をプロットし、着火および燃焼終了の判定に用いた。それぞれの判定に際し、その燃焼実験における最高輝度を基準とした輝度値の閾値を設定した。

実験に用いた Mg ワイヤは純度 99.5% 以上のものであり、直径は、0.2 mm, 0.5 mm, 0.8 mm の3種

類を用いた。水蒸気雰囲気圧として、10 kPa, 50 kPa, 70 kPa の 3 パラメータを選定した。本研究では、電極間距離は管理しておらず、2–5 mm 程度であった。また、着火のための放電時間は試行を重ね、自燃観測に適した時間を選定した。なお、酸化剤が酸素および空気の実験も行ったが、本稿では割愛する。

3. 結果

Mg ワイヤが燃焼する際には、白い閃光を伴っていた。燃焼終了後には燃焼器内部に白い粉体の残渣が見られた。これは Mg ワイヤと水蒸気の反応により生成した酸化マグネシウムである。

着火のために電極に投入した電力と水蒸気圧力との関係について、水蒸気圧力およびワイヤ直径との明確な相関は読み取れないものの、概ね 5 W 程度に収まっていることがわかり、小型推進機として賄える電力の大きさであるとわかった。着火時間の逆数を着火のしやすさと考えて、水蒸気圧力に対してプロットしたところ、各水蒸気圧力でワイヤ直径が小さいほど、着火しやすいという傾向が見られた。最後に、燃料後退速度の平均値と水蒸気圧力との関係について、グラフを図 2 に示す。直径 0.5 mm のワイヤでは圧力依存性が低いのに対し、直径 0.2 mm のワイヤでは水蒸気圧力の増加に伴って燃料後退速度が変化していることがわかる。

4. 考察

Mg ワイヤをハイブリッドスラスタに搭載する場合の理論推力、比推力及びスロート径について、実験で得られた、ある水蒸気圧力における燃料後退速度から推算した。混合比を 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 と変化させたところ、推力は、直径 0.5 mm および 0.8 mm どちらのワイヤ径についても、混合比が 2.0 のときに最大推力となり、その値は、0.5 mm のとき 60 mN, 0.8 mm のとき 90 mN となった。一方、真空中比推力は混合比 1.0 と 1.5 で概ね同じ値 320 s ほどをどちらの直径においても取り、これが最大値であった。スロート径は、1 mm のオーダーという結果となった。

5. 結論

本研究では、Mg ワイヤの水蒸気雰囲気中における燃焼について、実験的に調査した。また、得られた燃料後退速度からハイブリッドスラスタの推進性能を推算した。結論として以下を得た。

- Mg ワイヤの着火に必要な電力はワイヤ直径や水蒸気圧力に依らず 5 W 程度である。各水蒸気圧力において、ワイヤ直径が小さいほど着火しやすいという結果が得られた。

- Mg ワイヤの燃料後退速度は、ワイヤ直径が 0.5 mm の場合圧力に依らず一定とみなせたが、0.2 mm の場合、水蒸気圧力によって大きく変化する傾向が見られた。
- ハイブリッドスラスタに Mg ワイヤ供給方式を応用した場合、推力は直径 0.8 mm のワイヤの場合に混合比 2.0 で最大値約 90 mN, 比推力はいずれの直径の場合にも混合比 1.0 もしくは 1.5 において 320 s ほどであった。スロート径は 1.0 mm 程度であり、小型宇宙機への応用可能性があることがわかった。

参考文献

[1] SpaceWorks, “2019 Nano/Microsatellite Market Forecast, 9th Edition”, January 2019.
 [2] NASA Jet Propulsion Laboratory, “Mars Cube One”, <https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/marco.php> (accessed January 28, 2020).
 [3] Miller, T.F., Herr, D., “Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water”, 40th AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA 2004-4037, 2004.
 [4] Huang, L., Xia, Z., Zhang, W., Huang, X., Hu, J., “Combustion of a single magnesium particle in water vapor”, *Chinese Physics B*, Vol. 24, No. 9, 2015, 094702-1 – 094702-8.

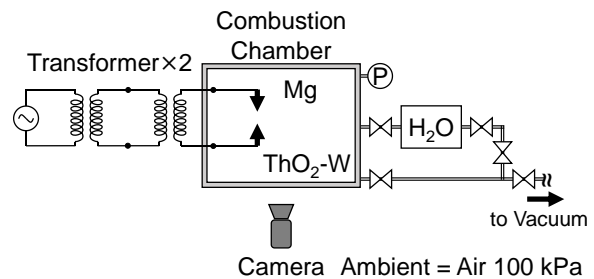


図 1 実験系系統図.

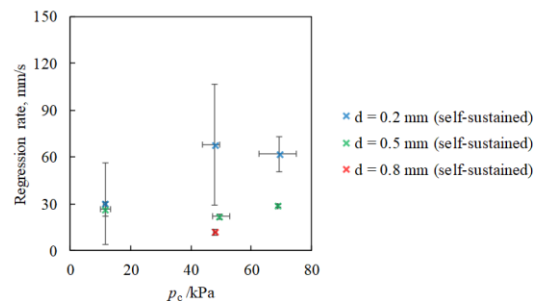


図 2 燃料後退速度平均値.