

低圧水蒸気雰囲気におけるアルミニウムワイヤの 持続燃焼機構に関する実験的研究

○万浪義史, 西井啓太, 秋山茉莉子, 室原昌弥, 小泉宏之, 小紫公也 (東京大学大学院)

Experimental study on combustion characteristics of an aluminum wire in water vapor under low-pressure environments
Yoshihito Mannami, Keita Nishii, Mariko Akiyama, Masaya Murohara, Hiroyuki Koizumi, Kimiya Komurasaki (The University of Tokyo)

Key Words: Small-size Spacecraft, Metal Bulk, Water-Metal Combustion, Low Pressure, Water Vapor

Abstract

Dependence of ambient pressure of water vapor on the occurrence of self-sustained combustion of aluminum wire and its mechanism were experimentally studied. Images of combustion phenomena were obtained from high-speed camera, and such parameters as vapor pressure inside combustion chamber, applied currents, and applied voltage were measured with data logger. Results showed that aluminum combustion consisted of several different phases such as Joule heating of the wire, wire separation, self-sustained combustion, and ultimate flame extinction. Results also showed that only in two cases out of four trials under a vapor pressure of 3 - 4 kPa were seen self-sustained combustion, leaving a possibility that water vapor pressure of 3 - 4 kPa represents the combustion limit state. Moreover, results also showed that the timing of wire separation is independent of ambient pressure of water vapor, which indicates that wire temperature is not the sole element critical for the occurrence of self-sustained combustion.

1. 序論

近年, 小型宇宙機の打ち上げ回数が増加傾向にある[1]. しかし, 小型宇宙機に推進機が搭載された例は未だに少ない. 小型宇宙機の運用において推進機導入が実現すれば, 月や火星そして深宇宙にまでミッションの遂行範囲が広がることが見込まれる[2].

小型宇宙機のミッションが多様化するためには, 宇宙機自身の多軸姿勢制御や軌道遷移等が必要となる. 従って, 要求される推力や比推力の推進性能が各ミッションに応じて異なる. また, 小型宇宙機については, 宇宙環境での運用において推進性能が要求される一方, 地上開発や衛星搭載においては安全性や取扱性も要求される. 安全性の確保は取扱コスト削減にも繋がるので, 小型宇宙機を開発するにあたり重要視される.

推進剤にはこれまでヒドラジンやキセノンが多く用いられてきた. 前者は引火性や腐食性があり, また後者は常温常圧で気体であるために高圧タンクが必要となり, 小型衛星で望ましいとされる高ペイロードが実現しにくい. そこで, 推進剤に水を用いることが提案されている[3]. 水は常温常圧で液体であるため安全性が高く且つ取扱性に優れ, 宇宙環境での入手可能性が高い点で大きなメリットがある. D.C.

Guerrieri et al. は液体貯蔵のガスジェットスラスタの推進剤候補として95種類の推進剤について比較検証し, 水の推進剤としての優位性を示した[3]. また, 水を推進剤とした推進機の実績も複数あり, 水を推進剤とした複数の小型宇宙機が連携航行に成功したという事例も報告された[4-5]. 以上の特性と実績より, 水を推進剤とする小型推進機についての研究に広い注目が集まる.

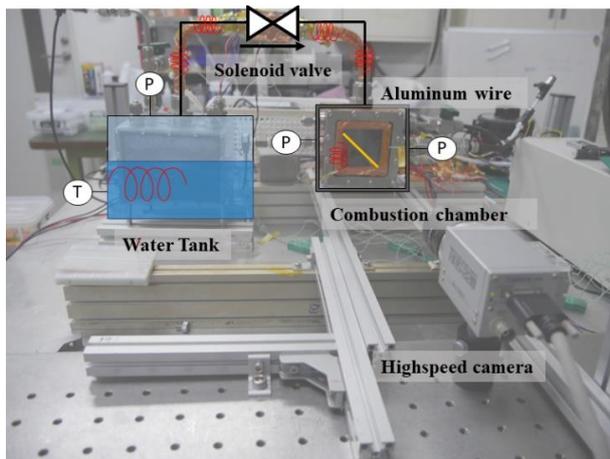
小型宇宙機への搭載を最終目的として推進機を開発する際には, 推力や比推力の他に搭載性, 安全性, そして取扱性に関する制約が大きくなる. そこで, 搭載エネルギー密度が高く安全な固体金属を燃料とし, 酸化剤の水として両者を反応させ, その反応熱を推進機に応用する研究が進められている[6]. この推進機運用が実現されれば短期間での衛星軌道遷移等, 100 mN-1 Nもの大推力が求められるミッション遂行が可能となる. 固体金属燃料としては, エネルギー密度が高く安全性にも優れるアルミニウムやマグネシウムなどが注目されている[7]. 固体燃料の昇温は比表面積が大きい程容易であること等を受けて, これまで粉体金属燃料の持続燃焼が研究として多く取り上げられてきた[8-14]. しかし, これまでには100 kPa以上の雰囲気圧力での検証がほとんどで, かつ水を酸

化剤とした研究は事例が少ない。また、粉体燃料輸送系の宇宙環境での実用例が少なく、輸送系の搭載によって推進機自体の構造が複雑となる。これまで8.11 – 203 kPaにおける非粉体金属燃料の燃焼機構について調査された事例は存在するが、低圧水蒸気雰囲気における固体金属の持続燃焼機構について詳細に調査された事例は少ない[17-18]。一方で、比表面積の小さい塊状形状の金属燃料は一般的に昇温しにくく、安定的な持続燃焼が得られにくい。その点、ワイヤ形状の方が塊状よりも持続燃焼に至りやすく、マグネシウムワイヤ燃焼についてはこれまで西井らによって調査された[6]。しかし、雰囲気圧力10 kPa付近のマグネシウム低圧燃焼では酸素欠損酸化が持続燃焼を阻害している可能性があることを述べた。しかし、モル比熱がマグネシウムより大きくて安価なアルミニウムワイヤの低圧水蒸気における燃焼について研究

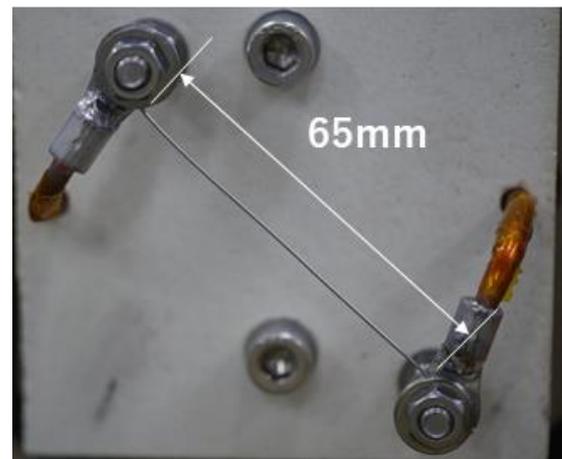
された例は少ない。よって本研究では、アルミワイヤの低圧水蒸気における着火および持続燃焼機構の雰囲気圧力依存性について検証し、小型宇宙機のスラストの設計に必要な知見を獲得することを目的とする。

2. 実験装置

実験装置および測定系はFig.1のように設置した。アルミワイヤの固定と導入部は直径4 mmの銅製の2本の棒とM4ナットで製作し、燃焼室の後壁から1/4インチ用チューブアダプターを通して導入している(Fig.2)。本実験は密閉系で実施した。水蒸気は、水供給タンク内に装備されたヒーターでタンク内の液体の水が加熱されることで、飽和蒸気圧で供給される。供給用の配管にはヒーターが取り付けられており、水蒸気が管内で凝縮するのを防いでいる。電磁弁については、SMC社製のVX235PAAをMVとして導入した。



(a) Experimental setup



(b) Al wire fixed inside the combustion chamber

Figure 1. Experiment setup consisting of water tank, combustion chamber, high speed camera, and solenoid valves, and (b) Aluminum (Al) wire fixed inside the combustion chamber. One solenoid valve (MV) is attached with stainless tubes, connecting water tank with combustion chamber. Real lines represent the tubes through which water vapor passes. K-type temperature sensors are attached onto the combustion chamber wall from outside, on the tube downstream and upstream of MV, and on water tank. Pressure sensors are mounted onto the combustion chamber and water tank from outside. Heater is set around the tube upstream and downstream of the main valve, outside of combustion chamber, and in liquid water in the tank. Aluminum wire is fixed inside the combustion chamber as shown in (b). The length of the wire is fixed to 65 ± 1 mm.

圧力センサー (Keyence AP-43 / 長野計器株式会社製KP-15) と電磁弁 (MV) は、24Vの直流電源により駆動される。アルミニウム線の燃焼の観察には高速度カメラおよびカメラで行った(Fig.1(a))。アルミワイヤへの電流印可電源にはKIKUSUI社製のPWX750MLFを用い、データロガーにはGL900およびGL820を用いた。Alワイヤを流れる電流の印可、

データロガーの収録、および高速度カメラの収録は、信号発生器(TEXIO FGX-2220)で生成された立ち上がり信号により同時に開始される。

3. 実験条件

実験条件をTable 1 および Table 2 に示す。雰囲気圧力依存性について議論するため、アルミニウムワイヤの線径、長さ、印可電流はそれぞれ0.2 mm、

65 ± 1 mm, 10 A に固定した。酸化剤は水蒸気のみを用い、水蒸気圧力は4-30kPaの間で変化させた。合計で10回の試行のうち、30 kPa付近で2回ずつ、10 kPa 付近で4回ずつ、4 kPa 付近で4回ずつ実験を行った。また、今回アルミワイヤの着火および持続燃焼の有無について検証するため、それぞれの現象について定義が必要となる。今回の検証では、高速度

カメラによるデータを参照することにし、着火については断線直後に瞬間的な発光のあるものと定義し、持続燃焼は白色生成物の付着が見られ、かつ断線後に100 ms 以上の連続した発光が高速度カメラで観察されたものと定義した。今回定義づけた着火と持続燃焼の現象を反映したものをFig.3に示した。



(a) Al wire ignition

(b) Al wire self-sustained combustion

Figure 3. Images representing the definition made in this study on Al wire ignition (a) and self-sustained combustion (b).

Table 1. Experimental Conditions for aluminum combustions

Material	Aluminum (>99.9% purity)
Diameter	0.2 mm
Length	65±1.0 mm
Heating Current	10 A
Oxidizer	H ₂ O
Oxidizer Pressure	3-30 kPa
Temperature	Saturation Temperature °C
	30 ± 1 kPa : 2
Repetition of parameters	10 ± 1 kPa : 4
	3 ± 1 kPa : 4

Table 2. Experimental Conditions for camera recording

Part	Setting
Highspeed camera	1000 Hz
Video Camera	60 Hz

4. 実験結果

今実験では、アルミニウムワイヤの低圧水蒸気下での持続燃焼発生機構について検証した。Table1およびTable2の通り実験をしたところ、雰囲気圧力30 kPaでは2回中2回、10 kPaでは4回中4回、4 kPaでは4

回中2回において持続燃焼が見られる結果となった。その時の高速度カメラ画像の時系列をFig.2、雰囲気圧力や燃焼器内外壁温度、印加電流、印加電圧を時系列のグラフにした図をFig.3に示す。ワイヤは電流が印可された後ジュール加熱により赤熱し、その後

断線を経て持続燃焼の進展に至った。Figure.4 によると、(a)ではワイヤが赤熱して線上の発光が既に見られているのに対して、50 ms 程経過すると球状に近い発光が見られた。これはワイヤの周囲に気相火炎が存在し、断線してから時間が経過してワイヤ自身の反応熱によって持続燃焼していることを示している。2800 ms 経過した時点で明らかな発光が見られなくなり、消炎に至った。Figure.5 は横軸に時間を取り、縦軸に各測定パラメータを取った時系列のグラフと、燃焼後の生成酸化物の画像である。燃焼器圧力、印可電圧、そして印可電流は測定値であり、ワイヤへの投入電力は電圧と電流の測定値から算出したものである。よって、Fig.5における $t = 0$ s はワイヤへの電流印可開始時刻を意味しており、その0.5 s後にワイヤへの投入電力が0となることからワイヤが断線したものと判断した。また、生成酸化物の画像から、燃焼発生後は白色の酸化アルミニウムが生成することが分かった。Figure 6. に雰囲気圧力30 kPa, 10 kPa, 3 kPaにおける時系列グラフを示す。Figure 6. より、10 Aの電流を印可してからアルミニウムワイヤが断線するまでに要する時間は $t =$

0.53 – 0.56 s となり、雰囲気圧力によって大きく変化しなかった。雰囲気圧力と持続燃焼の有無の関係を表したプロット図をFig.6 に示す。これは印可電流と、印可電圧から算出したアルミワイヤへの投入電力をワイヤ体積で除したものである。Figure.6の右図より、雰囲気圧力4 kPa付近では持続燃焼したケースと持続燃焼しなかったケースがそれぞれ2回ずつ見られた。

5. 考察

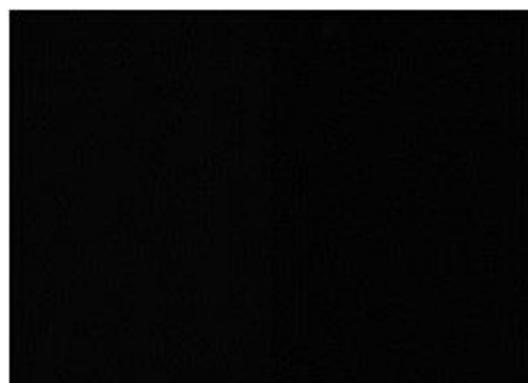
実験結果において、雰囲気圧力30 kPaでは2回中2回、10 kPaでは4回中4回、4 kPaでは4回中2回において持続燃焼が見られる結果となったことを述べた。この結果から、10 kPaおよび30 kPaの雰囲気圧力においては持続燃焼に至る傾向が強くなり、3 kPaの雰囲気圧力付近においては持続燃焼に至りにくくなるのが分かる。また、電流印可を開始してからアルミニウムワイヤが断線するまでに要する時間は雰囲気圧力に大きく依存しないこともFig.5から示された。また、試行した10回のうち全てにおいて断線は確認されている。よって、ワイヤの断線自体はワイ



(a) Wire separation and ignition ($t = 0$ ms)

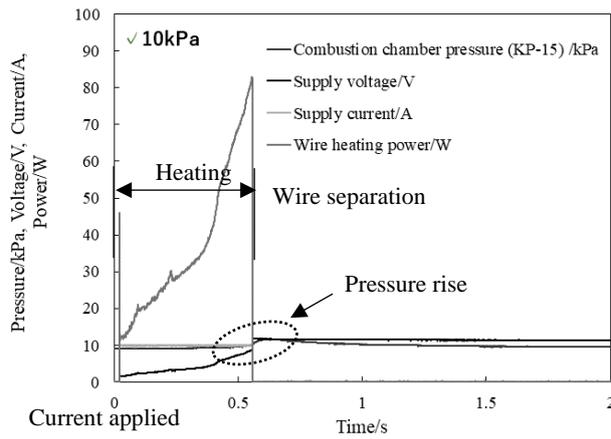


(b) Self-sustained combustion ($t = 50$ ms)



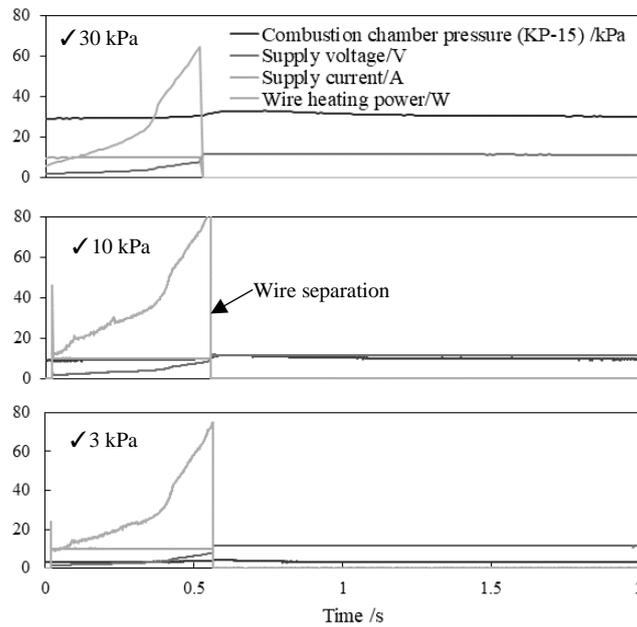
(c) Flame extinction ($t = 2800$ ms)

Fig.4 Images of 0.2 mm aluminum wire ignition and combustion obtained by high-speed camera under 10 kPa of water vapor. (a) – (c) represent Al wire ignition, self-sustained combustion, and flame extinction, respectively. Note that $t = 0$ ms represents the time of wire separation in this figure.



(a) Time history of measured parameters before and after ignition.

(b) Image of Al oxide product after combustion.



(c) Time history of measured parameters before and after ignition in ambient pressure of 30 kPa, 10 kPa, and 3 kPa from the top.

Figure 5. Time history of measured parameters before and after ignition and an image of oxide product after self-sustained combustion. The peak of wire heating power represents the maximum amount of power put into the Al wire and the separation timing of the wire.

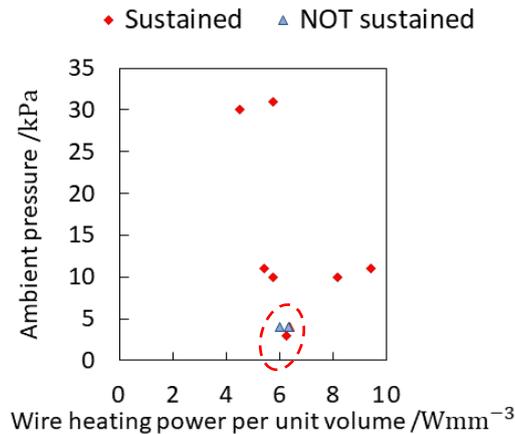


Figure 6. Plotted diagram indicating ambient pressure of water vapor and the occurrence of self-sustained combustion. X-axis represents wire heating power per unit volume and y-axis represents the ambient pressure of water vapor.

ワイヤの昇温と大きく関わることが分かる。これらの結果から、着火から断線を伴って持続燃焼に移行するためにはアルミワイヤ周辺のガス状態が重要となり、雰囲気圧力の考慮が必要となる。

周囲の酸化剤に触れることが原因でアルミニウムを覆うように存在する酸化被膜は、アルミニウム燃焼を阻害することが一般的に知られている[15-16]。アルミニウム燃焼が実現するためには、酸化被膜の融点までアルミ燃料を加熱し、純アルミと酸化剤が十分に反応させることが望ましい[9]。今回の結果において、電流を印可してからアルミワイヤが断線するまでに要する時間が雰囲気圧力によって大きく変化しないという結果が得られた。従って、アルミが断線することとアルミワイヤが持続燃焼に至ることは切り分けて考える必要があり、アルミワイヤが断線する時点までにどれだけの熱発生率を有しているかが重要となる。そして、雰囲気圧力4 kPa付近で低圧側の燃焼限界が存在する可能性があることがFig.6からわかる。

6. 結論

低圧水蒸気雰囲気下におけるアルミニウムワイヤ燃焼の雰囲気圧力依存性について実験的に調査するため、直流電流印可によるジュール加熱でワイヤを加熱し、持続燃焼発生の有無と機構について観察した結果、下記のことから分かった。

- ・ 3-10 kPaにおいて、持続燃焼が発生した際には強い発光および白色の酸化アルミニウムが見られる。
- ・ 高速度カメラの画像データにより、アルミニウムワイヤに電流を印可した後に赤熱し、火炎の発生を伴って断線が起り、持続燃焼に至る。
- ・ 燃料の昇温だけではアルミワイヤの燃焼について十分な議論ができず、反応確率の目安となりうる雰囲気圧力の考慮が必要である。
- ・ 3-10 kPaの範囲では、高圧側で持続燃焼に移行しやすい

今回の議論で燃焼限界状態に言及したが、今後は金属温度および水蒸気の雰囲気圧力による燃焼限界状態についての定量的評価を今後の課題としたい。

参考文献

- 1) SpaceWorks, Nano/Microsatellite Market Forecast, 9th Edition.
- 2) A.Poghosyan et al., CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions, Progress in Aerospace Sciences 88(2017) 59-83
- 3) D. C. Guerrieri, M. A. C. Silva, A. Cervone, E. Gill,

- Selection and Characterization of Green Propellants for Micro-Resistojets, Journal of Heat Transfer (2017), Vol.139.
- 4) D. Gibbon, I. Coxhill, D. Nicholini, R. Correia, J. Page, The Design, Development and inflight Operation of a Water Resistojet Micropropulsion System, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (2004) 3798.
- 5) Y. Nakagawa, H. Koizumi, H. Kawahara, K. Komurasaki, Performance characterization of a miniature microwave discharge ion operated with water, Acta Astronautica 157 (2019) 294-299.
- 6) 西井啓太, 秋山 茉莉子, 室原 昌弥, 万浪 義史 (東京大学大学院), 小泉宏之 (東京大学), 超小型ハイブリッドモータへ向けた水と金属の低圧燃焼基礎実験, 日本航空宇宙学会
- 7) J.M. Berthorson, Y. Yavor, J. Palecka, W. Georges, M. Soo, J. Vickery, S. Goroshin, D. L. Frost, A. J. Higgins, Metal-water combustion for clean propulsion and power generation, Applied Energy 186(2017) 13-27.
- 8) D.S.Sundaram, V.Yang, Y.Huang, G.A.Risha, R.A.Yetter, Effects of particle size and pressure on combustion of nano-aluminum particles and liquid water, Combustion and Flame 160(2013) 2251-2259
- 9) J.M.Berthorson, Y.Yavor, J.Palecka, W.Georges, M.Soo, J.Vickery, S.Goroshin, D.L.Frost, A.J.Higgins, Metal-water combustion for clean propulsion and power generation, Applied Energy 186(2017) 13-27
- 10) A. A. Gromov et al. Characterization of Aluminum Powders: III. Non-Isothermal Oxidation and Combustion of Modern Aluminized Solid Propellants with Nano metals and Nano oxides, Propellants Explos. Pyrotech (2020) 45 1-12
- 11) Y. Feng et al. Effect of ambient temperature on the ignition and combustion process of single aluminum particles, Energy 162(2018) 618-629
- 12) Y.Yavor, Enhanced hydrogen generation from aluminum-water reactions, International journal of hydrogen energy 38(2013) 14992-15002
- 13) X. Huang et al., A review: Feasibility of hydrogen generation from the reaction between aluminum and water for cell applications, Journal of Power Sources 229(2013) 133-140
- 14) Z. Y. Deng et al., Physicochemical Mechanism for the Continuous Reaction of c-Al₂O₃Modified Aluminum Powder with Water, J. Am. Ceram. Soc. (2007), 90 [5] 1521-1526
- 15) E.Czech, T. Troczynski, Hydrogen generation through massive corrosion of deformed aluminum in water, International journal of hydrogen energy 35(2010) 1029-1037
- 16) A.V.Parmuzina, O.V.Kravchenko, Hydrogen of

aluminum metal to evolve hydrogen from water,
International journal of hydrogen energy 33(2008)
3073-3076

- 17) 湯浅 三郎, 金属の着火と燃焼の特性, 日本燃焼
学会誌 (2013) 第45巻-133号 152-163
- 18) A. G. Merzhanov, Aluminum Ignition, Combustion
and Flame (1977) 29, 1-14