

Al-水 アークジェット of 作動特性

○柳田 直人(東海大・院), 大島 真, 山田 達也(東海大・学), 堀澤 秀之(東海大・工)

Naoto Yanagida, Makoto Ohata, Tatsuya Yamada, Hideyuki Horisawa
(Department of Aerospace Engineering, Tokai University)

Keyword: DC arcjet, Water and Aluminum Plasma-Jet, Chemical Equilibrium Computation

In this study, development of water-Al fed arcjet, for which water and aluminium were fed to the thruster as the propellant, was conducted. As the first step, chemical equilibrium computation of a water-Al fed arcjet was performed, in which plenum temperature, chemical composition, specific impulse, etc, were obtained. From the results, it was shown that thrust performance of the water-Al fed arcjet was as well as that of hydrazine arcjet.

1. はじめに

近年, 宇宙開発技術の発展に伴って, 大型衛星の他にもマイクロサット, ナノサットのように呼ばれる小型衛星の開発も活発に行われるようになった. さらに, 宇宙利用の需要は増え, 民間利用も徐々に拡大しはじめたこともあって, 人工衛星に課せられるミッションは多様化する傾向にある. このミッションの多様化は即ち衛星に搭載する推進機への要求に結び付く. この様々な要求に応えられるように多種多様な推進機の可能性を探求していく必要がある.

本研究では小型衛星用の低電力アークジェット推進機の高性能化を目指して, 高い化学エネルギーを抽出可能な新しい推進剤の開発を目標としている. この推進機は電熱加速型推進機の一つであり, アーク放電によって供給される熱エネルギーを受けた推進剤が, ノズルによって気体力学的に加速され高速で噴射することにより推力を発生する. 一般的な特徴として, 構造

が簡単で化学推進より高い比推力が得られ, 推力電力比が高いことが挙げられる. しかし, 現在アークジェット推進機の推進剤として広く用いられるヒドラジンは強い毒性・化学的不安定性を持つため, 取り扱いが困難であり, 安全性に大きなリスクが生じる. またそれによる管理コストの増加などの問題もあるため, 容易に利用できるものではない.

これらの理由から, 本研究ではアークジェット推進機の推進剤に水とアルミニウムを用いる方式を提案する. これはアーク放電による電熱加熱に加え, 水分子中の酸素とアルミニウムの反応により発生する化学エネルギーにより高い熱エネルギーが得られ, 推進機の高性能化が期待できる. 本報告では, 化学平衡計算を利用し, アルミニウムを添加した水(以後, 水-Al 推進剤)を推進剤として用いた際の反応生成物や温度, 比推力などの推進性能の予測を行った. また, アークジェット推進機の陰極棒の一部にアルミ

ニウムを利用し、アーク放電時の加熱により、アルミニウムが蒸発する様子を実験的に観察した。本報ではこれらの結果について説明する。

2. 化学平衡計算原理および方法

2.1 化学平衡計算

本研究で行った化学平衡計算における断熱火炎温度・化学平衡組成決定までのフローチャートを図1に示す。本方法のように等エンタルピを仮定したエネルギーバランス法を用いた計算では、まず化学反応前の貯気槽状態での化学組成と温度を指定することにより、燃烧前のエンタルピを決定する。その後、燃烧時（温度・組成変化時）の温度を仮定し、そこから算出される化学組成よりエンタルピを算出し、燃烧前のエンタルピと比較する。これが一致したと見なせる温度に十分に収束するまで繰り返し計算を行う。収束時の温度を断熱火炎温度、組成を化学平衡組成とした。なお、燃烧時の化学組成はJANAFの熱化学データ表に記載された平衡定数を元に計算する。さらに、推進性能を計算する場合は、ノズル開口比や圧力比等を指定し、得られた断熱火炎温度から準一次元ノズル解析によって比推力等を予測する。

本研究においては、NASA-Glenn Research CenterのS. Gordon and B. J. McBrideにより開発されたNASA-CEA¹⁾を利用した。このコードは前述した一連の計算を行うプログラムがまとめられており、GUI版を用いることで比較的容易に利用可能である。利用にあたり、本研究では反応に電熱加熱の過程を含めるため、電力による熱入力成分を生成エンタルピに加えることとした。

2.2 水を推進剤に用いる利点

水は自然界に多く存在し、常温で化学的に安

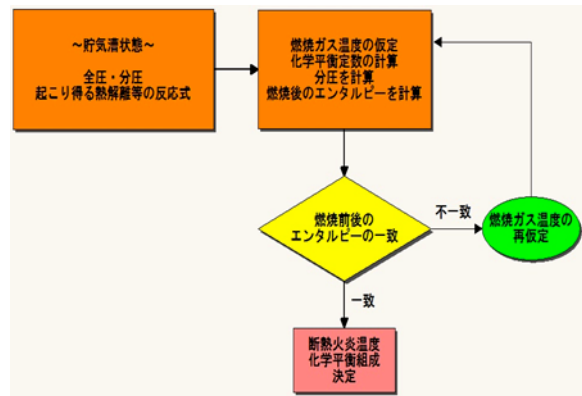


図1 化学平衡計算フローチャート

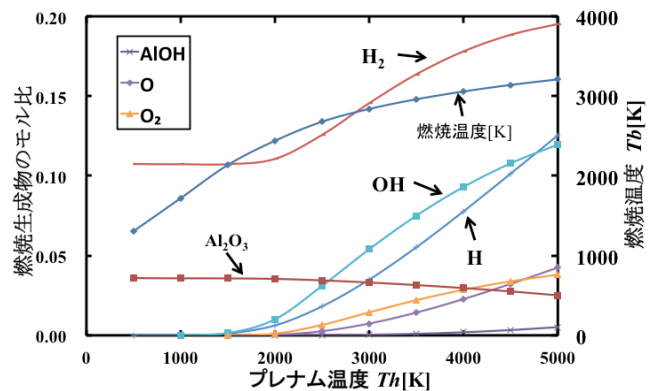


図2 加熱温度と化学平衡組成と燃烧温度の関係

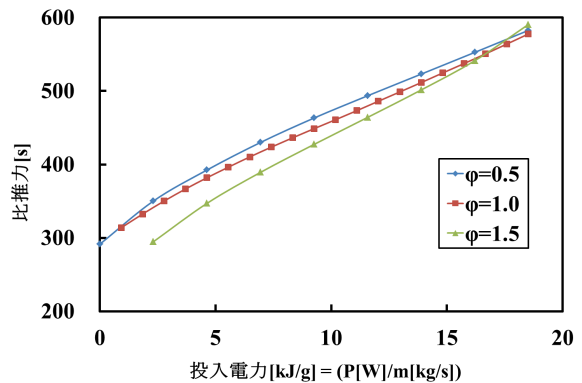
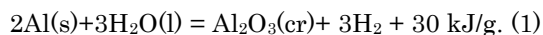


図3 当量比 ϕ を変化させた時の投入電力と比推力の関係

定な物質である。また、人体に対して無害である。電気推進機の推進剤として多く用いられる安定な希ガス推進剤の貯蔵には高压ガスタンクが必要であるが、水はその必要がない。またア

ークジェットで頻繁に使用されるヒドラジンは化学的に不安定で毒性がある。このため希ガスやヒドラジンといった推進剤と比較し、水推進剤は入手性に富み、貯蔵コストが安く、取り扱いが非常にしやすいといった特性をもつ。さらに、温度・圧力の低い広い領域においては水とAlの混合は安全な材料とすることが出来る。けれども、Al表面を高エネルギー密度で刺激させると水とAl添加の燃焼反応が起こせることが出来る。水を酸化剤としたAlの燃焼は、化石燃料と比較して単位質量でとても高いエネルギー密度を発生させることが出来る。水とAlの反応を表す総括反応式を(1)に示す。



さらに、水とAlの混合したものはとても扱いやすく、仮に高エネルギー密度発生源を持たせられなかったら熱ロケットエンジンの推進剤として上質材料にすることができる。本研究ではAl(固体またはパウダー状のどちらか)と水の混合の燃焼を目的としたアーク放電の使用の効果を研究した。さらに、アークジェットスラストの推進剤を得るために混合使用の利点として推進性能または効率の改善もまた調べた。

3. 化学平衡計算の結果及び考察

図2に重量比で水:Al = 9 : 1として貯気槽を加熱しつつ水とAlを混合した場合の、燃焼生成物モル比の変化を示す。この図より加熱温度が1000 Kを超えた辺りから多くの化学種が発生しており、このことからこの程度の温度から活発な反応が起こると考えられる。また加熱温度が1000 Kを至らなくてもアルミナが発生する反応があることがわかる。

図3は水とAl推進剤の当量比を0.5, 1.0, 1.5

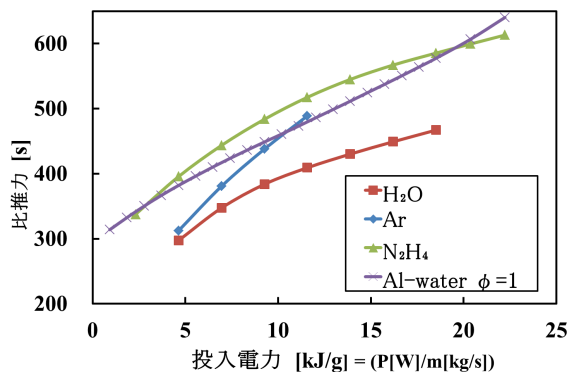


図4 各種推進剤との比較

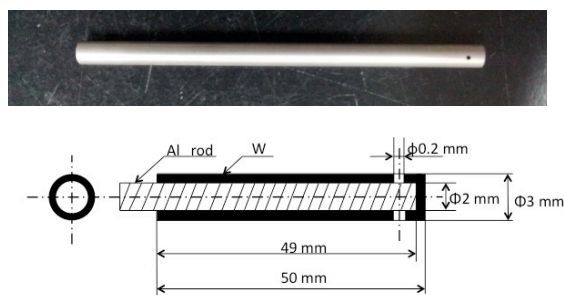


図5 二重陰極棒の写真(上)と概略図(下)

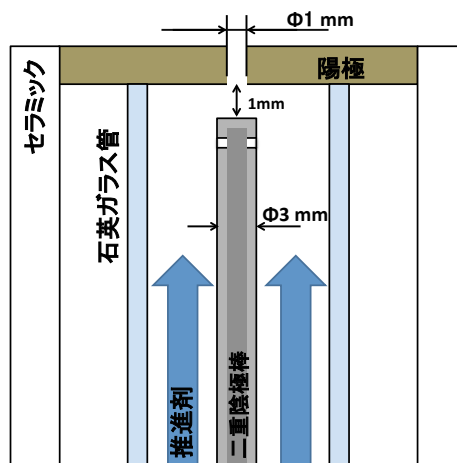


図6 模擬アークジェット概略図

ごとの投入電力に対する比推力 I_{sp} の変化を表す。この図より当量比 $\phi = 0.5$ の場合が他と比べてわずかに大きいことがわかる。

図4は水-Al推進剤と各種推進剤とのと運輸

電力に対する比推力を計算したグラフを表す。この結果より投入電力が低い領域と高い領域においてはヒドラジンよりも最大8%ほどの向上を確認することができた。

4. 二重陰極棒を用いた作動実験

図5に作動実験で使用した二重陰極棒を示す。この陰極は、外側が中空のタングステン製（外径3mm、内径2mm、先端部分に直径0.2mmの燃料噴射孔が2か所）で内側にアルミニウム製の丸棒（直径2mm）を挿入した二重構造である。アーク放電による加熱により、内部のアルミニウムが先端付近において熔融・蒸発し、先端付近の燃料噴射孔（2か所）から放電室内に噴射され、放電室内の推進剤ガス（例えば水蒸気）と反応することを狙った構造である。

図6に実験で用いたアークジェットの概略図を示す。本実験では、上記の二重陰極棒を用いてアルミニウム蒸気がどのように燃料噴射孔から噴射されるかを確認するために、放電室の壁を石英ガラス製として、放電室内部を可視化できる模擬アークジェット装置を構築した。本体は窒化ホウ素（BN）製で、陽極は真鍮製で、ノズル出口部を鉛直上方に向けて大気に開放している。図7に全体的な実験装置と観察装置の概略図を示す。放電時に二重陰極棒の燃料噴射孔から噴射されるアルミ蒸気の挙動については、HDカメラを用いて観察した。今回は水蒸気を発生させるためにリボンヒータを可視化用模擬アークジェット本体および配管に巻きつけて加熱を加えながらの実験を行った。水の供給方法はチューブポンプを用いて約2mg/s供給できるように設定した。

また今回はプラズマの熱量を計測するために図8に示す熱量計も製作した。材質は銅で円弧型に加工し断熱材として表面にアロンセラミック

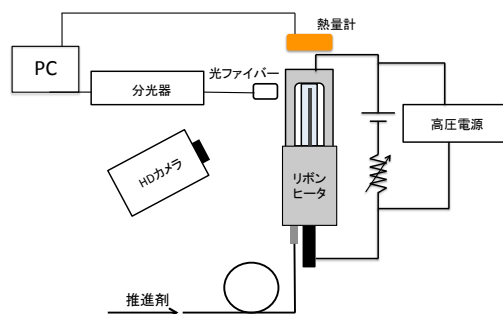


図7 実験・観測装置配置概略図



図8 熱量計

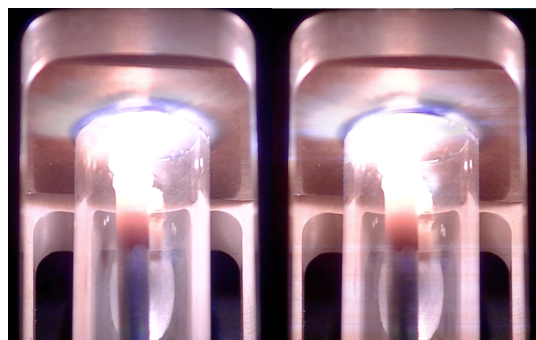


図9 Ar(左)と Ar + H₂O(右)での放電画像

クを薄く塗った上にガラスウールを付けている。温度計はT型熱電対(銅とコンスタンタン)を用いて熱量計本体に取り付けている。アークジェットの駆動は直流電源（最大電圧500V、最大電流40A）および放電点火電源を用いて行った。本実験では、放電電圧および放電電流、熱量計の温度変化の時間変化を計測した。また、回路に流れる電流は外部抵抗機で調整し、13A程度とした。

4.1 放電室内部の可視化実験

図 9 に放電室内部可視化用模擬アークジェットを用いて放電実験を行いその様子を撮影した結果を示す。図 9 の左が推進剤アルゴン、右が推進剤アルゴンに水を添加した際の放電実験の画像である。また、実験結果まとめを表 1 に示す。推進剤アルゴンの時の放電電流 14 A、放電電圧 19 V で投入電力は 258 W である。アルゴン流量は 208 mg/s であった。推進剤アルゴンに水を添加の時の放電電流は 13 A、放電電圧は 21 V で投入電力は 267 W であった。流量は 210 mg/s であった。またもう一つの推進剤(アルミ)の質量流量は、二重陰極棒の放電作動前後の質量差と作動時間から算出した。この結果アルミの質量流量はアルゴンの時は 1.6 mg/s、水蒸気の時 は 3.5 mg/s となった。HD カメラからの画像では推進剤アルゴンとアルゴンに水を添加した際の画像で大きな違いと放電部の発光強度が大きすぎるためにアルミの噴出は画像からは確認することができないが、アルミの質量欠損量で計測した結果から実際にはアルミが噴出していたことがわかる。

この時の分光スペクトルを図 10 に示す。図より 300 と 400 nm でアルミの原子スペクトルと 700~900 nm の間でアルゴンの原子スペクトルを確認することができた。

推進剤アルゴンとアルゴンに水を添加した際の実験結果を表 1 にまとめた。表 1 より推進剤アルゴンよりアルゴンに水を添加した際の結果が投入電力も大きくなってしまっているがそれ以上に大きい熱量が発生していることがわかる。これによりアーク放電により二重陰極棒から噴出したアルミが水と反応していることがわかる。

これらのことから、二重陰極棒の採用により、微小流量のアルミ蒸気を放電室に供給可能で

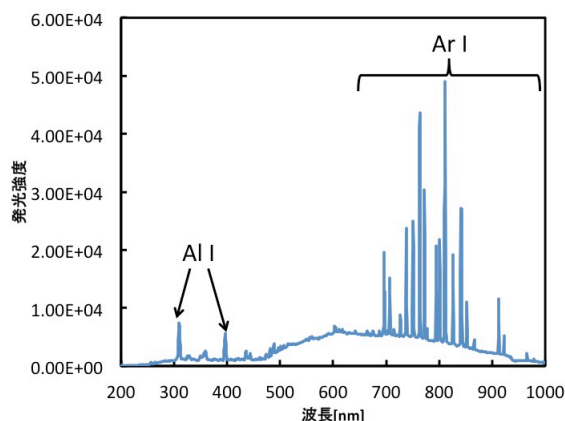


図 10 分光で得られたグラフ

(放電電流 14 A、放電電圧 19 V、質量流量：208mg/s (Ar)、1.6mg/s (Al))

表 1 放電実験結果

	Ar	Ar+H ₂ O
放電電流 [A]	14	13
放電電圧 [V]	19	21
投入電力 [W]	258	267
動作時間 [s]	10	10
Al 減少量 [mg/s]	1.6	3.5
発生熱量 [J/s]	0.6	21.2
受け取った熱量の割合 [%]	0.2	0.8

あることが確認された。今後は、推進剤ガスに水蒸気を用いて分光計測などの評価を行う予定である。

5. まとめ

本研究では、NASA-CEA を用いた化学平衡計算によって水と Al の反応や、水-Al 推進剤を用いたアークジェット推進機の性能予測を行った。これによって、水と Al の反応がアークジェット推進機によって現実的に達成しうる温度域で生じる事を確認した。また水-Al 推進剤を用いた推進機の性能(比推力)は低比入力な領域で有利となることを確認した。低比入力域において、取り扱いの容易さなども考慮すると、水-Al 推進剤の利用には十分なメリットがあると考えられ

る.

放電室内部可視化用模擬アークジェットを用いた実験においては、二重陰極棒を採用することにより電極形状を維持したまま放電を行うことができた。また、この陰極棒にあけた横穴より微小流量のアルミ蒸気を放電室に供給可能であることが確認できた。今回製作した熱量計より、推進剤アルゴンの時よりアルゴンに水を添加した際の結果がより大きい熱量が発生していることが確認できた。これにより水とアルミを反応させていることが確認できた。今後は熱量計の改善を行い熱量計測の精度を向上させるとともに、完全な水蒸気での放電実験を行い化学反応による発生エネルギーの計測を行う予定である。

参考文献

- 1) S. Gordon and B. J. McBride, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications," NASA Reference Publication 1311 (1996)
- 2) 光田章一, "水プラズマ溶射法", 金属表面技術, Vol.36, No.3(1985), p.88-95
- 3) 水谷幸夫, 燃焼工学, 第3版 (2002, 森北出版)
- 4) 栗木恭一, 荒川義博 電気推進ロケット入門
- 5) ROBERT G. JAHN, "Physics of Electric Propulsion"
- 6) National Institute of Standards and Technology