

# 化学援用 DC アークジェット推進機

○浅沼和貴（東海大・院），柳田直人，武中駿（東海大・学），堀澤秀之（東海大・工）

Kazuki Asanuma, Naoto Yanagida, Satoshi Takenaka, Hideyuki Horisawa

(Department of Aerospace Engineering, Tokai University)

## Abstract

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いまって、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としてアルミニウムを添加した水を提案する。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。またアルミニウムと水の反応を観察するため、アルミ電極を用いた水中放電試験を大気圧中で行い、生成物の解析を行った。さらに、アルミニウムの酸化反応を利用した推進機の動作を確認するために、電極（陰極）にアルミニウム、推進剤に空気を使用した推進機の点火実験を行い、作動特性を取得した。これらの結果について報告する。

## 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、燃焼前のエンタルピを決定する。その後、燃焼時（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、燃焼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、燃焼時の化学組成は 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-CEA<sup>1)</sup> 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圧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。

図 2 に圧力 0.1 MPa の水、ヒドラジン、アルゴン、窒素に対して電力を投入した場合を想定し計算を行った結果を示す。尚、投入電力に関しては単位質量(質量流量) に対する投入エネルギーを表わした比入力で示している。この図より、水の電力投入による温度変化は他に比べ小さいことが分かる。これは特にアルゴン、窒素と比べると水の定圧比熱  $cp$  が比較的大きいため、この様子は図 3 に示した。またこのことから、水を用いたプラズマジェットは投入電力すなわち推進剤のエンタルピを増大してもアルゴン、窒素の場合と比べ、プレナム温度の上昇を抑制することが可能である。これにより推進機本体

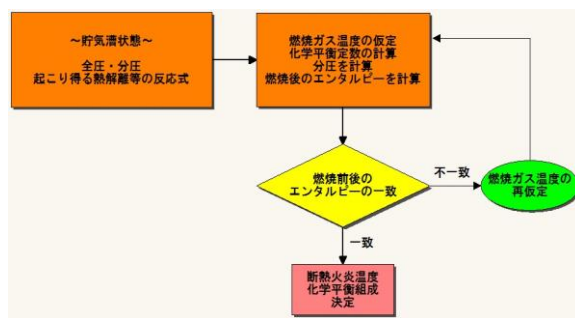


図 1 化学平衡計算フローチャート

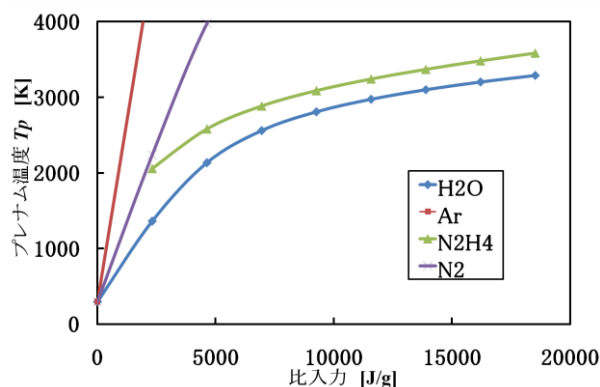


図 2 比入力とプレナム温度( $T_p$ )の関係

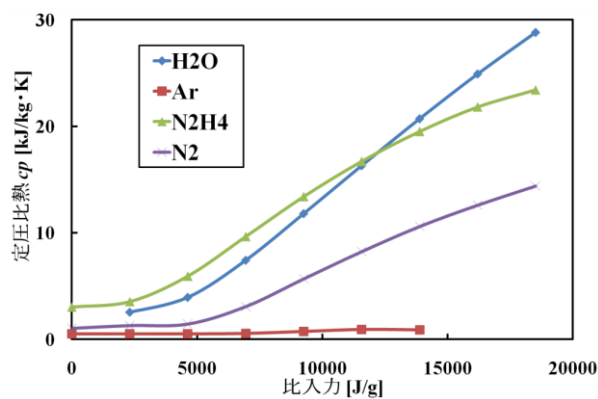


図 3 比入力と定圧比熱( $cp$ )の関係

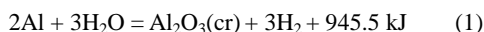
への熱損失を抑えることが可能で、アルゴンや窒素ガスを利用した場合に比べ熱効率が高いとする報告<sup>2)</sup>もある。

### 2.3 水-AI の反応

前項で述べた内容は、高温な水が非常に大きなエンタルピを持つことを示す。言い換えれば高温・高エンタルピ状態の水を作るためにはその分大きなエネルギーを投入する必要がある。

本研究では水を高エンタルピ状態にするために、水にアルミニウム粉末を添加し、AI の酸化熱によってエネル

ギーを発生する方法を取った。水と Al の反応を表わす統括反応式を式(1)に示す。この酸化発熱反応によって水をさらに高温まで加熱することが可能となる。



### 3. 化学平衡計算の結果および考察

図4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。図中では 2000 K を超えた辺りから多くの化学種が発生しており、現実的にはこの程度の温度から活発な反応が起こると考えられる。なお、低温時にもアルミナが発生する反応がある事がわかる。

水-Al 推進剤を用いた際の比入力に対する比推力の変化を図5に示す。図中にはヒドラジン、水+Al、水+Mg、Air+Al を推進剤とした際の比推力を加えてプロットし、比較を行った。また、ノズル開口比は 100、プレナム圧力 0.1 MPa を想定した。

図5より、低比入力になるに従って水-Al 推進剤(当量比  $\phi=1.0$ ) の比推力はヒドラジンをを用いた場合の比推力に近い値をとる。また比入力が 1000 J/g 以下の領域では水-Al 推進剤の比推力はヒドラジンを上回っている。また後述する実験では Air と Al の反応を援用したスラスタの性能を取得している。そのため比較として Air+Al 推進剤を図中に表したが、結果として水+Al 推進剤の比推力が上回っており、低比入力の領域では推進剤に Al と水を用いることが高性能化につながる事が確認された。

また図6には水-Al 推進剤の各当量比  $\phi$  について、それぞれの比入力に対する比推力  $I_{sp}$  の値を示した。図6より水単体の場合は、比入力が低くなるに従って比較的高比入力な段階から比推力が著しく低下している。これに対して、当量比を大きくする、すなわち Al を加えるにつれて低比入力な領域の比推力が上昇していることがわかる。また、比入力 10000 J/g を超える条件では当量比が低い方が高い比推力を示している。このように比入力の領域によって当量比に最適値があることが判明した。ただし、本報告では水+Al 推進剤が有利となる低比入力領域での利用が目的のため、化学エネルギーを効果的に作用させるためには当量比  $\phi=0.4$  程度以上の Al 添加が好ましいことがわかる。

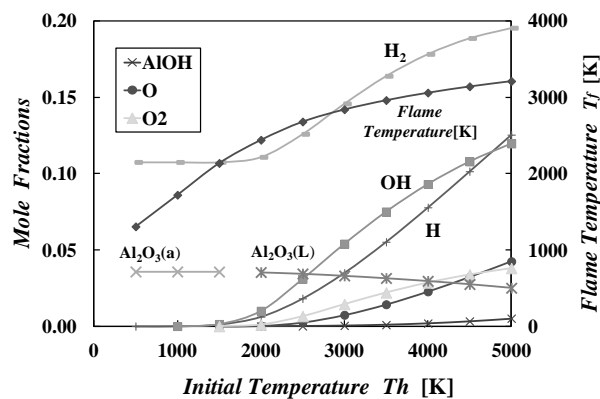


図4 加熱温度(Th)と化学平衡組成と燃焼温度(Tb)の変化

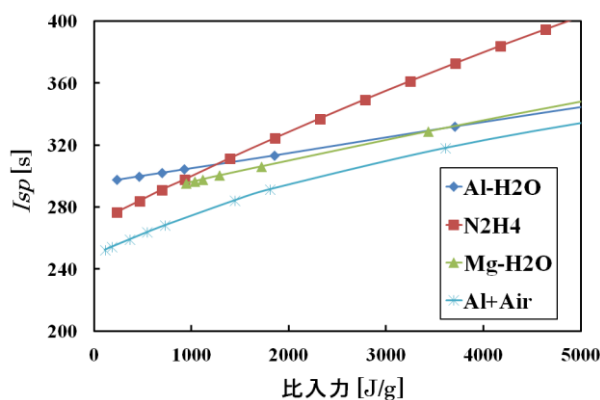


図5 比入力と比推力(Isp)の関係

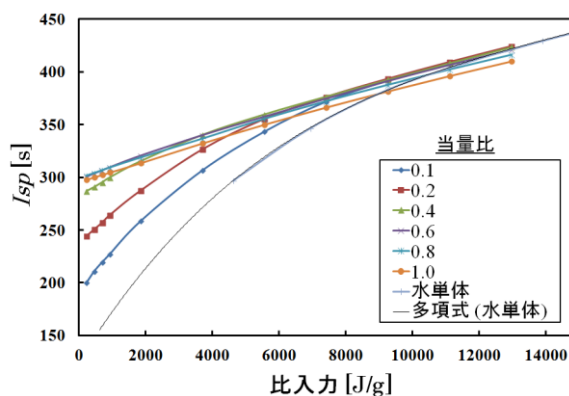


図6 当量比  $\phi$  ごとの比入力と比推力(Isp)の関係

### 4. 実験

今回、水とアルミニウムの反応を観察するために Al 電極の水中放電実験と、Al の酸化反応を実際の推進機で確認するために Al を陰極に使い空気を酸化剤とする推進機の作動実験を行った。これらの実験内容と結果を述べる。



図7 アルミニウム電極対向部分

#### 4.1 アルミニウム電極水中放電実験

アルミニウムと水の放電による化学反応を観察することを目的として、アルミニウム棒を水中で放電させる実験を行った。アクリル製の水槽内部に陽極・陰極とも Al 製の丸棒を対向させ、水槽外部から放電点火用の高圧電源、定常放電用の低圧直流電源を接続した。実験時は水槽を任意の量の水で満たし、その中にある 0.5~3 mm 程度の間隔で設置した Al 電極間で放電を発生させた。図 7 にアルミニウム電極を水中で対向させた放電間隙部を示す。実験時には水温をサーミスタを用いて計測し、水温の変化と水の質量から総入熱量を算出した。

#### 4.2 アルミニウム電極水中放電実験結果

電極に低電圧を印加すると、微小な電流が流れ気泡が発生する。この段階では目に見えてプラズマが発生することはなかった。さらに放電点火用の高電圧をパルス状に加えると、最大 2 s 程度の連続した発光が観測された。発光時には大きな音、気泡も観測され、また 10 A 程度の電流を計測した。低電圧のみを加えた状況とは明らかに異なりプラズマが生成されたといえる。ただし 2 s 以上の継続的な発光は観測されず、基本的には点火用高圧電源を遮断すると発光は停止した。これは直流電源のみではプラズマを生成するような持続放電が起きにくいことを示しており、原因としては水の大きな熱容量による電極の冷却効果（熱損失）や放電による電極形状の変化などが考えられる。この実験の代表的な温度履歴を図 8 に示す。なお、この実験の際の初期水量は 500 g であった。図 8 中では投入熱量も並べて示した。図 8 から、水温の上昇量と電力による入力の見積もることで、化学エネルギーの発生を確認できた。また長時間にわたる安定した放電は観測できず、Al 電極の形状の変化が非常に大きく影響を与える点が確認できた。

さらに実験後に水中に残された生成物の解析を行った。

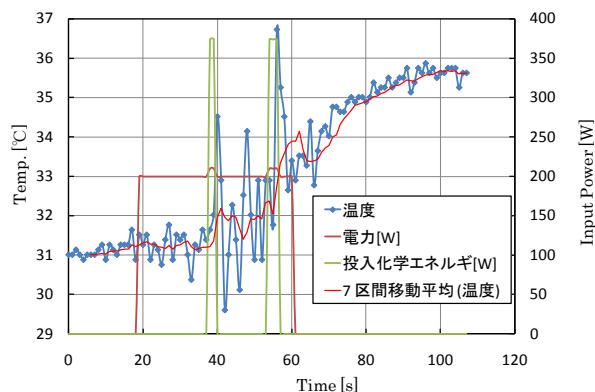


図8 アルミニウム電極水中放電時の水温の時間履歴

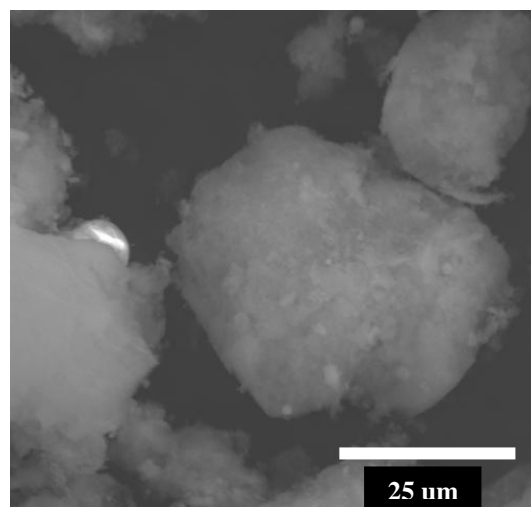


図9 Al 電極水中放電実験での生成物

式(1)より、一般的に Al と水が反応した場合には反応後にアルミナが生成する。実験後の生成物を電子顕微鏡で観察したものを図 9 に示す。多くは図 9 に挙げたような 25 μm から 50 μm 程度の粒径の粒子であったが、局部的に集塊しているものもあり、粒径分布は様ではなかった。また X 線光電子分光法による解析では、酸素およびアルミニウムが検出された。これにより酸素とアルミニウムの化合物、すなわちアルミナが生成しており、実験では水とアルミニウムの化学反応が発生していたと考えられる。

#### 4.3 アルミニウム陰極推進機作動実験

本実験はアルミニウムを実際の推進機の陰極に用いた場合の動作を確認することが目的である。アルミニウムの推進機中での基本的な酸化反応を確認するために、推進剤(酸化剤)には空気を用いた。また実験は 1.0 Torr 程度の真空度に保たれた真空チャンバ内部で行った。電源に

は通常のスラスタ運転時と同様、放電開始用の高圧電源と定常放電用の直流電源を用いた。さらに mN クラスの推力を計測するスラストスタンドを新規開発し、推力計測を行った。

#### 4.4 アルミニウム陰極スラスタ作動実験 結果

大まかに 2 種のスラスタの動作状況が視認された。点火から動作前半までは激しい発光を伴うブルームが観測でき、動作後半ではブルームは比較的暗い状況が観測された。放電電流は点火後に直流電源に切り替えてからも動作全体にわたって比較的安定していた。動作前半の激しい発光時の模様を、高速度カメラにより減光させ撮影した画像を図 10 に示す。さらに取得した作動パラメータを表 1 に示す。条件 I と条件 II の 2 つのデータではスラスタの電極間距離と外部抵抗を変化させ実験を行った。どちらの実験でも比較的 low thrust の領域で動作している。また、酸化剤である Air に含まれる酸素の流量が Al の供給量に比べ非常に多い動作になっていたことがわかる。今回の実験では平均比推力は 100 s 以下の低い値をとっているが、図 10 に挙げた激しい反応の際には推力も上昇し、流量一定を仮定した場合には瞬間的に 140 s 程度の比推力となった。

実験後には、実験前と比べ電極形状が変化しており、動作状況の変化は、放電時の陰極形状の変化が大きく影響していると考えられる。また動作前半の激しい発光を伴う作動条件の方が性能としては高い結果となった。そのため電極間距離が本来の設定条件に近い動作前半が好条件であると考えられ、今後この反応の持続できる陰極の推進機の設計を目標とする。現在はそれに向けた新型の電極の開発を行っている。

## 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



図 10 激しい発光を伴うブルーム

表 1 Air+Al スラスタ 作動パラメータ

条件 I		条件 II	
電極間距離[mm]	0.6	電極間距離[mm]	1.5
外付けR[Ω]	13.2	外付けR[Ω]	15.9
空気流量[SLM]	3	空気流量[SLM]	3
放電電圧[V]	25	放電電圧[V]	40
平均電流[A]	10.8	平均電流[A]	7.79
作動時間[s]	2.9	作動時間[s]	5.5
平均電力[W]	270	平均電力[W]	311.6
電極質量欠損[mg]	1.6	電極質量欠損[mg]	0.8
Al/O <sub>2</sub> モル比	0.0435	Al/O <sub>2</sub> モル比	0.0115
質量流量[mg/s]	65.2	質量流量[mg/s]	64.8
推力[mN]	60	推力[mN]	60.2
比推力[s]	93.8	比推力[s]	94.8
比入力[J/g]	4141	比入力[J/g]	4809

メリットがあると考えられる。

実験においては、アルミニウム電極同士の水中での放電を観察した。この実験では長時間の持続的な放電は確認されず、水を液体の状態で大量に放電部に供給した場合放電が不安定となり持続的な放電が生じにくくなる事が予測された。また水温の上昇および生成物の解析から、放電は水とアルミニウム電極の化学反応を伴っていたと考えられた。さらに酸化剤に Air、陰極に Al を用いた推進機を動作させ、基本的なパラメータを取得した。これにより化学反応を援用した推進機の作動を観察し、電極形状の変化がスラスタのパラメータに与える影響を実験的に確認した。これらの実験により化学援用アークジェット推進機の電極形状の設計指針を明らかにすることができた。今後、電極形状の変化の影響を考慮した新型電極の開発を行う。また実際に水を推進機へ導入し、水-Al 推進剤の性能を実験的に計測した上で、CEA によって算出された理論値と比較する予定である。

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)