

アルミ粉末混合水アークジェット推進機の開発

○浅沼和貴, 人見亮輔 (東海大・院), 堀澤秀之 (東海大・工), 船木一幸 (JAXA/ISAS)

Development of Water and Aluminum Powder Fed Arcjet

Kazuki Asanuma, Hitomi Ryosuke, Hideyuki Horisawa (Department of Aerospace Engineering, Tokai University)

Funaki Ikkoh (JAXA/ISAS)

Key Word: Arcjet, Water and Aluminum Powder Fed Arcjet, chemical equilibrium computation

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, 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開発も活発に行われるようになった. さらに, 宇宙利用のシーンは増え, 民間利用も徐々に拡大しはじめた事も相まって, 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といえるだろう. 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の多様化に結び付くと考えられ, この様々な要求に応えられるように多種のスラスタの可能性を探求していく必要がある.

本研究では, 新たな推進剤の可能性を研究するための対象としてアークジェット推進機を選択した. 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

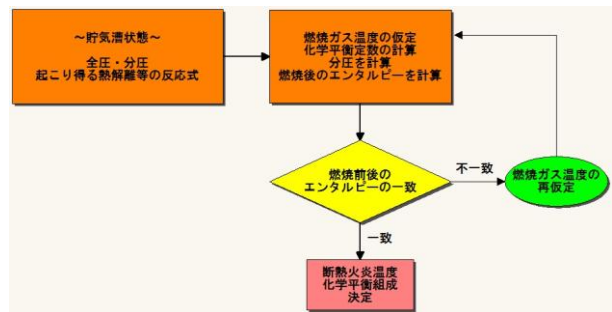
ない.

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用いることを提案する. 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, WAAL 推進剤) を推進剤として用いた際の反応や, スラスタの性能予測を行った. 本論ではそ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.



本方法のような等エンタルピーを仮定したエネルギーバランス法

図1 化学平衡計算フローチャート

を用いた計算では、まず燃焼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、その時の化学組成から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い、この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-CEA¹⁾ を利用した。このコードに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。本研究では電熱加熱の過程が含まれるため、投入電力を生成エンタルピに加えることにより計算に含めた。

2.2 水を推進剤に用いるメリット

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压ガスタンクが必要であるが、水はその必要がない。アークジェットで使用されるヒドラジンは化学的に不安定で毒性がある。従って、水は推進剤として入手性に富み、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、質量 108 mg/s の水、ヒドラジン、アルゴン、窒素に対して電力 P [W] を投入した場合のプレナム温度の変化を示す。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 c_p が比較的大きいため、この様子は図 3 に示す。また、水を用いたプラズマジェットは投入電力すなわち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。このことから、推進機本体への熱損失を抑えることが可能で、アルゴンや窒素

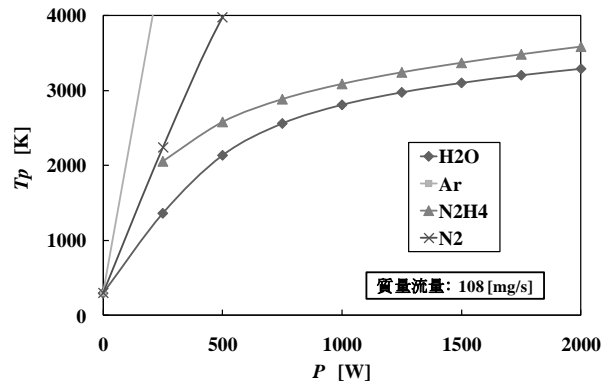


図 2 投入電力(P)とプレナム温度(T_p)の関係

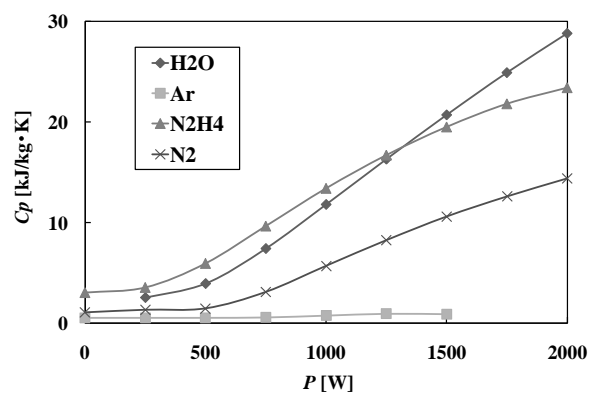


図 3 投入電力 P と定圧比熱 c_p の関係

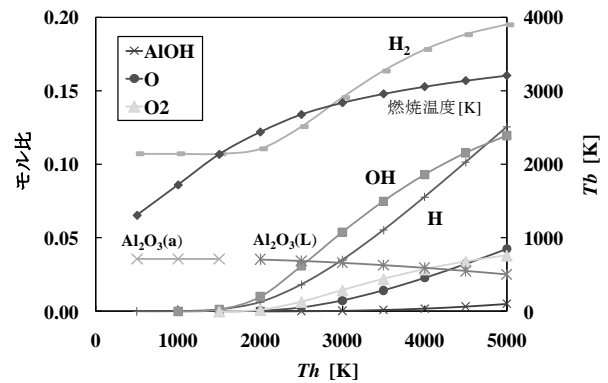


図 4 加熱温度(Th)と化学平衡組成と燃焼温度(T_b)の変化

ガスを利用した場合に比べ熱効率が低いとする報告²⁾もある。

2.3 水-Al 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。つまり高温・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ー状態にするために、水に

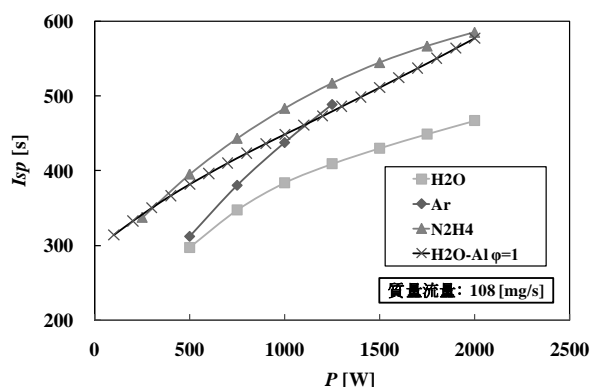
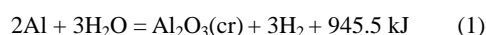


図5 投入電力と比推力の関係

アルミニウム粉末を添加し、Al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。この反応によって水を更に加熱する事がAlを添加する主な目的となる。



3. 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。

WAAL推進剤を用いた際の投入電力による比推力の変化を図4に示す。図中にはヒドラジン、アルゴン、水を推進剤とした際の比推力をプロットし、比較を行った。質量流量は108 mg/s、ノズル開口比100、プレナム圧力0.1 MPaを想定し、計算を行った。電力Pの範囲は2000 Wまでとした。

この電力の範囲ではヒドラジンと比較してWAAL推進剤の比推力での差は最大でも8%程度であり、大きな差とはいえない。また特に投入電力が200 W程度以下の低電力領域および2000 W以上の高電力領域においてはヒドラジンを用いる場合と同程度以上の比推力が得られる。更に水とWAAL推進剤を比較すると、水にAlの添加することにより比推力が向上しており、水とAlの反応が効

果的な影響を及ぼすといったことが予測できる。

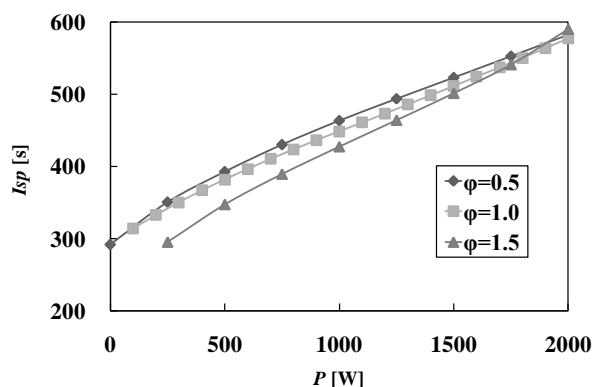


図6 当量比 ϕ ごとの投入電力(P)と比推力(I_{sp})の関係

また図6にはWAAL推進剤の当量比 ϕ を0.5, 1.0, 1.5ごとの投入電力Pに対する比推力 I_{sp} の変化を表わす。図より、 $\phi=0.5$ と1.0の比推力は同程度であるが $\phi=0.5$ の場合がわずかに大きいことがわかる。

4. 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、それを水-Al推進剤を用いたアークジェットスラスタ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によって現実的に達成しうる温度で起こる事を確認できた。またWAAL推進剤を用いたスラスタの性能(比推力)は他の推進剤と比較しても劣るものではないと考えられる。これによって、取り扱いの容易さなども考慮に入れば、WAAL推進剤の利用には十分なメリットがあると考えられる。

今後、実験によってWAAL推進剤を用いたアークジェットスラスタの性能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)