

ジメチルエーテルの添加によるアークジェットの電極損耗の抑制

Suppression of arcjet electrode erosion by adding dimethyl ether

○村田浩章（宮崎大学大学院工学研究科機械システム工学専攻）・各務聡・岸田利久（宮崎大学工学部機械設計システム工学科）・矢野康之（宮崎大学工学部教育研究支援技術センター）

○Hiroaki Murata (Department of Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki) ・ Akira Kakami ・ Toshihisa Kishida (Department of Mechanical Design Systems Engineering, University of Miyazaki) ・ Yasuyuki Yano (Technical Center, University of Miyazaki)

Abstract

This paper deals with arcjet thruster that uses dimethyl ether (DME) as additives to extend cathode lifetime. Since high power arcjet thrusters produces a relatively large thrust among electric propulsion devices, they are attracting attention as high power electric propulsion for augmenting transportation capacity and shortening the mission time. On the other hand, for high-power arcjet thrusters, cathode erosion shortens lifetime. Therefore, in this study, we propose to use DME as life-extending agent. Because DME produces soot in elevated temperature, we propose to apply produced carbon as a protection layer of cathodes. In this study, we prototyped a water-cooled 3-kW class arcjet thruster to show that DME addition reduces cathode erosion. Cathode erosion was evaluated for nitrogen propellant with 3-5 % DME. Addition of 5 % DME showed that electrode erosion 0.6 mg for 1800 s firing. Whereas no DME firing yields 2.3 mg cathode erosion.

1. 緒 言

近年、電気推進機は人工衛星の軌道保持や惑星探査機の主推進機に用いられる機会が増え、小惑星探査機はやぶさ2には電気推進の一種であるイオンエンジンが搭載されている¹⁾。本研究では、特にアークジェット推進機に注目した。

アークジェット推進機は、宇宙機の南北制御に利用されており、電気推進の中では、大推力が得られることから、大規模な宇宙輸送システムとして大電力のアークジェット推進機を用いることが考えられる²⁾。一方で、アークジェット推進機はカソードの損耗のために寿命が問題になっていた^{3,4)}。

そこで、推進剤にジメチルエーテル (DME) を添加し、カソードにあえて炭素を生成させて保護層とすることにより、カソードの損耗を抑制し、長寿命化を図ることを提案する。すなわち、DMEの熱分解により生成する炭素をカソードに付着させて電極を保護するのである。今回は、3 kW級の水冷式アークジェット推進機を試作して、DME添加による電極の損耗の防止効果について評価した。

2. 添加剤のジメチルエーテル (DME) について

DMEは、常温における蒸気圧が0.53 MPaの液化ガスであり、圧力と温度の調整により液体として貯蔵し、気体として供給することができる。また、液化DMEは1.59と比重が高いため、貯蔵タンクを小型化することが可能である。また、毒性が皆無で環境適合性に優れ、金属材料に対する反応性が少ないという長所を有する。さらに蒸気圧を利用して推進剤やDME自体を供給できるため、供給用の加圧ガスが不要となり、供給系の簡素化が可能である。高温下では、熱分解が起きるため、放電室内で炭素が生成する⁵⁾。これをカソードの保護として用いるのである。以上のような長所を有するため、DMEを添加剤とすることを提案した。

3. 実験装置

3.1 3 kW級水冷式アークジェット推進機 試作した3 kW級の水冷式アークジェット推進機を図1に示す。カソードには、電極損耗を抑えるためにトリエーテッドタンダステンを用い、水冷を行うアノードには、熱伝導に優れた銅 (C1100) を使用した。アークジェット推進機は、筐体内部の温度も高温になるため、カソード部と筐体の絶縁に

は耐熱性、機械加工性に優れているマシンナブルセラミックを使用した。また、推進剤として、アンモニアやヒドラジンが考えられるが、今回は、安全を考慮して窒素を使用した。

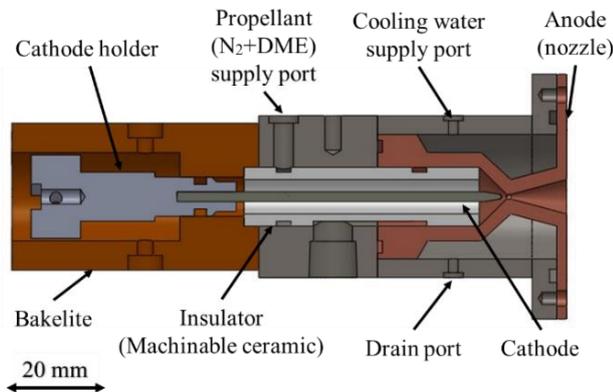


図1 水冷式アークジェット推進機

3.2 実験装置の概要 本実験に用いる実験装置全体の概略図を図2に示す。実験装置は、アークジェット推進機、推進剤・添加剤供給系、放電電力供給系、制御・計測系の4つに分けられる。推進剤である窒素は、高圧ポンプに貯蔵されており、マスフローコントローラを通してアークジェット推進機に供給される。また、添加剤として使用するDMEは、供給ライン上で予め窒素と混合してから供給する。放電電流は、アーク放電用電源から供給しているが、点火時のみイグニッショントランスにより高電圧パルス(4800 V)を供給している。また、実験時の放電電圧、放電電流、プレナム室圧力、推進剤と添加剤の質量流量、スラストスタンドの振子の変位をPCにより記録する。

3.3 推力測定 推力測定には、真空チャンバ内に設置した振り子式のスラストスタンドを用いた。このスラストスタンドは、推力によって生じた振り子の変位をレーザ変位計により計測し、推力を求めている。

4. 実験条件

表1に実験条件を示す。アークジェット推進機は1800秒間作動させているが、DMEは10~20秒程度の供給を断続的に行い、合計総供給時間が180秒となるようにした。というのも、DMEを添加することにより、アークジェット推進機の作動が不安定となり、作動が中断することがあったためである。推進剤流量は、特にアーク放電が安定し、再現性のあった100 mg/sとし、DME流量はDMEの濃度が0, 3, 5%となるように決定した。なお、カソードの損耗率は、実験前後のカソード重量の差を損耗量とし、消費電力量を除いた値とする。

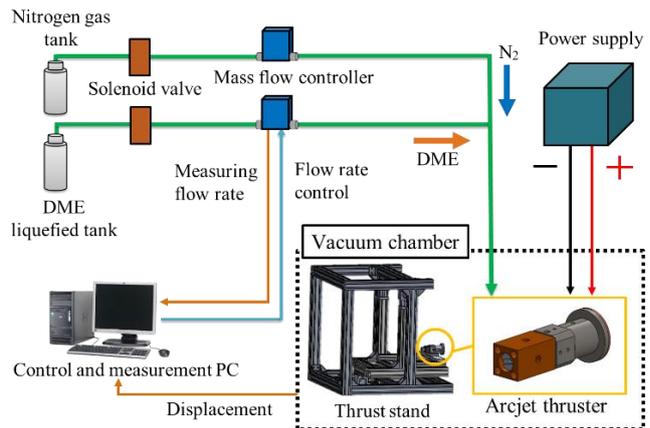


図2 実験装置の概略図

表1 実験条件

アークジェット推進機	水冷式
開放端電圧, V	200
放電電流, A	25
推進剤 / 添加剤	N ₂ / DME
N ₂ とDMEの合計流量, mg/s	100
DMEの濃度, %	0, 3, 5
アークジェット推進機の作動時間, s	1800
DMEの総添加時間, s	180
電極間距離, mm	1
ノズル開口比	50
初期圧力, Pa	5.0

5. 実験結果及び考察

5.1 放電電圧と推力 図3は、DME濃度0%の場合の放電電圧、放電電流、推力の時間変化である。作動開始から200秒後に放電電圧が振動し、これに伴い推力も変動している。しかし、1000秒以降では放電電圧、放電電流、推力ともに安定し、このときのブルームは図6のように安定していた。なお、このときの放電電力と推力は、それぞれ2.73 kW, 0.25 Nであった。この他の流量における作動と比較し、最も安定していたため100 mg/sを基準とした。

DME濃度が3%のときの時間変化を図4に示す。このとき、DMEを20回に分けて供給し、1回あたりの供給は10秒程度と短いため、図4では供給したタイミングを矢印で表記した。多くの場合、DMEを添加した時にわずかな電圧上昇があるが、安定して作動し続けた。しかし、800秒付近で7度目のDMEの添加を行ったとき、放電が極めて不安定になり、アークジェット推進機の作動が自発的に停止してしまった。そのため放電電圧は、開放端電圧の200 Vになっている。このような自発的な作動の停止は、1250秒, 1700秒におけるDME添加のときにも見られた。なお、このときの放電電力と推力は、それぞれ2.31 kW,

0.17 N であった。

図5は、DME濃度が5%のときの時間変化である。DME濃度3%の場合と同様にDMEの添加時刻は矢印で示している。図5のように、DMEの添加により放電が不安定になり、DMEを3%添加したときよりもアークジェット推進機の作動が頻繁に中断した。よって、放電の安定性を考えると、DMEの濃度は低いほうが良いと言える。なお、このときの放電電力は2.14 kW、推力は0.18 Nであった。

以上のように、DMEを添加することにより作動が不安定になった原因として次の2つが考えられる。1つ目として、アノードでもあるノズルのダイバージェント部に炭素が付着し、凸状の物体が多数できたためである。これにより、アークプラズマのアノードへの付着点が次々と変化することにより、プラズマの長さが変化して抵抗が変化し、電圧が変動したと考えられる。2つ目の理由として、窒素と比較しDMEは、電離や乖離に多くのエネルギーを必要とすることが挙げられる。そのため、DMEを添加すると放電電圧が急激に変動し、放電用電源に負荷が掛かり、放電用電源が追従できず作動が中断したと考えられる。

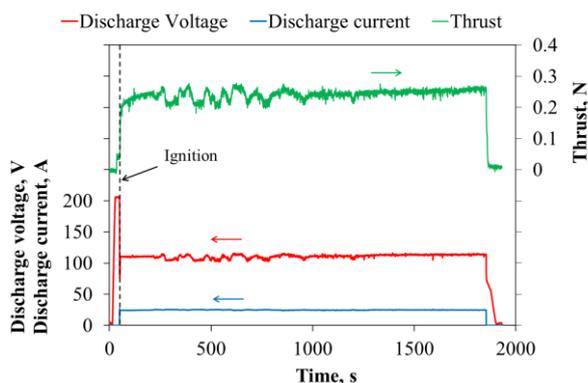


図3 DMEの濃度0%の場合の放電電圧，放電電流，推力の時間変化

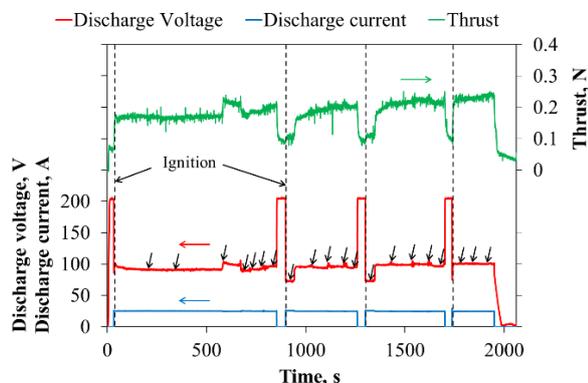


図4 DMEの濃度3%の場合の放電電圧，放電電流，推力の時間変化

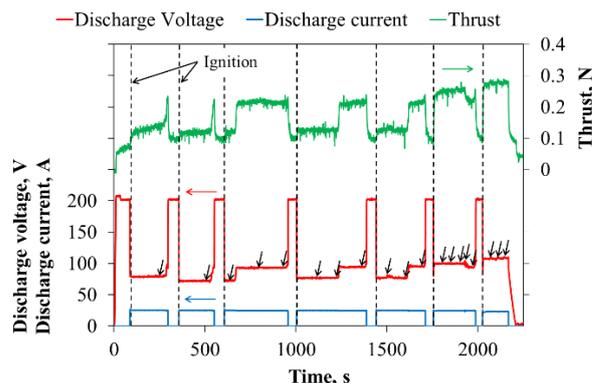


図5 DMEの濃度5%の場合の放電電圧，放電電流，推力の時間変化



図6 アークジェット推進機の作動時の様子

5.2 カソードの損耗量の比較 アークジェット推進機の作動前後のカソードの重量を測定し、カソードの重量変化を評価した。その結果を表2に示す。

表2 DME濃度ごとのカソード損耗量

		単位時間当たりのカソード損耗 [μg/s]	平均消費電力 [kW]	消費電力量当たりのカソード損耗量 [μg/kJ]
DME濃度 [%]	0	1.28	2.73	0.468
	3	0.44	2.31	0.192
	5	0.33	2.14	0.156

表2のように、DMEの添加により、単位時間当たりのカソードの損耗が少なくなり、DME濃度が5%のときに損耗を0.33 μg/sまで抑えられた。また、アークジェット推進機の消費電力は損耗量に影響するため、消費電力量当たりのカソード損耗量を求めた。この場合でも、DMEの添加によって、カソードの損耗は減少しており、DMEを添加しない場合の半分以下にまで抑えられた。ここで、DME濃度3%と5%を比較すると、5%の方が消費電力当

たりのカソード損耗量が少ないことから、DME 濃度の増加により、カソードの損耗量を減少できる可能性がある。

一方で、図 3～5 のように DME 濃度を高くすると放電が不安定になる傾向が見られた。よって、電極損耗の抑制と安定作動を両立するためには、DME 濃度を低くし、長時間の供給を行えばよいと考えられる。

6. 結 言

本研究において、以下の結論が得られた。

- ・ 推進剤に DME を添加し、カソードにあえて炭素を生成させることによりアークジェット推進機のカソードの損耗を抑制することを提案した。
- ・ 3 kW 級の水冷式アークジェット推進機を試作し、DME の添加によってカソードの損耗量への影響を調べた。
- ・ 窒素のみで作動させた場合、カソードは 1.28 $\mu\text{g/s}$ 損耗するが、DME を 3%添加すると 0.44 $\mu\text{g/s}$ 、5%だと 0.33 $\mu\text{g/s}$ に損耗を抑えることが出来た。
- ・ DME 濃度を高くすると放電が不安定になるが、カソードの損耗量は減少する傾向にあった。
- ・ 電極損耗の抑制と安定作動を両立するためには、DME 濃度を低くして、長時間にわたり供給すればよいと考えられる。

参考文献

- 1) 國中 均, 宇宙探査から発するイノベーション～「はやぶさ」小惑星探査の事例～, 第 30 回宇宙環境利用シンポジウム講演集, S-04, 2016.
- 2) 栗木 恭一, 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003.
- 3) 佐原 宏典, 都木 恭一郎, 栗木 恭一, 荒川 義博, 低電力 DC アークジェットの作動モードに関する研究, 日本航空宇宙学会論文集, 2000.
- 4) 萩原 和彦, 細田 聡史, 木村 逸郎, 國中 均, 都木 恭一郎, 栗木 恭一, 可視化実験による低電力 DC アークジェット放電部現象の考察, 日本航空宇宙学会論文集, 2000.
- 5) 各務 聡, 別府 真司, 毎熊 宗幸, 橘 武史, ジメチルエーテルを用いたアークジェット推進機の推力評価, 日本航空宇宙学会論文集, 2011.