

ジメチルエーテルと窒素の混合気体を用いたアークジェット推進機の性能評価

○久岡成三（九工大・工・府），佐々山浩二（九工大・工・学），各務聡（宮崎大・工），橋武史（九工大・工院）

1 緒言

アークジェット推進機は，アーク放電により生成した高温のプラズマをノズルで膨張させ噴出することで推力を得る宇宙用推進機である¹⁾。この推進機は，電気推進機の中でも構造が単純であり，推力が比較的大きいといった長所をもつ。一方で，主に推進剤として用いられるヒドラジンは，有毒なため安全対策に高いコストがかかる。また，凝固点が高いので，液体として貯蔵するにはヒータが必要となる。さらには，気化するために用いる触媒が脆く，配管に詰まるという問題もある。

そこで，ヒドラジンに代わる新規推進剤として，ジメチルエーテル（以下 DME）を提案してきた。DME は，無毒で凝固点が高いことから，ヒータを用いなくても容易に液体として貯蔵することができる。また，適度な蒸気圧を有するため加圧用ガスが不要であり，温度調節により気体として供給することができる²⁾。

これまでに，DME を推進剤に用いてアークジェットを作動させ，高電圧モードと低電圧モードを有することや，従来のアークジェットと同様の性能が得られることを示した³⁾。その一方で，作動により煤が生成され，陰極の先端やコンストリクタの下流に付着し作動が困難となることや，プルームが振れるなど放電電圧が不安定となる問題があった。そこで本研究では，推進剤に DME と窒素（以下 N₂）の混合気体を用いることを着想した。N₂ は比較的作動が安定することが確認されている。また，煤を生成する炭素成分を持っていないため，電極への煤の付着を抑制することができると考えたためである。今回，DME と N₂ の混合割合を変えて実験を行い，各混合割合における作動の様子や性能について評価した。

2 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置及び実験条件

本研究で用いた推進機の形状を Fig. 1 に，その諸元を Table 1 に示す。陰極にはトリエーテッドタングステンを用い，陰極の直径を 2 mm，先端半頂角を 90°，電極

間距離を 1 mm とした。陽極には耐熱性に優れた銅タングステンを用いた。実験装置の概略を Fig. 2 に，実験条件を Table 2 に示す。推進剤は DME と N₂ の混合気体（以下 DME/N₂）を用いて，混合比は質量比で 10/0，9/1，7/3，5/5，3/7，1/9，0/10 とした。

2.2 実験方法

実験方法を以下に記す。真空チェンバ内に設置したスラストスタンドに推進機を取り付け，真空ポンプでチェンバ内を減圧する。次に，マスフローコントローラにより DME と N₂ を一定流量で供給する。供給した DME と N₂ は混合器により混合され，推進機へと送られる。推進機への推進剤の供給を確認後，定電流電源より放電電流を供給することで推進機を作動させ，各測定値を得る。

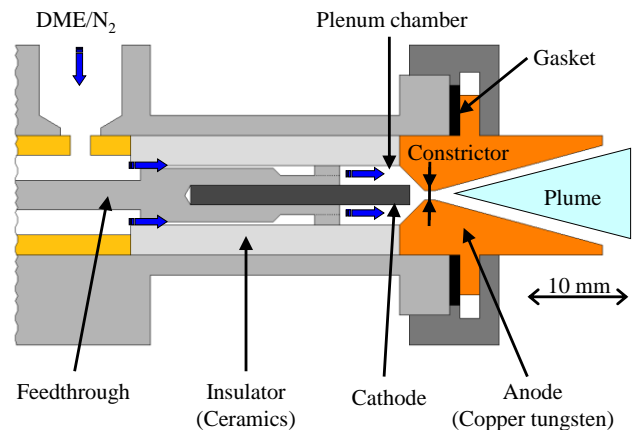


Fig. 1 本研究で用いた推進機の形状

Table 1 アークジェット推進機の諸元

陰極直径, mm	2
陰極先端半頂角, deg	90
コンストリクタ直径, mm	1
コンストリクタ長さ, mm	1
コンストリクタ上流角, deg	90
コンストリクタ下流角, deg	30
開口比	100
プレナムチェンバ直径, mm	6
電極間距離, mm	1

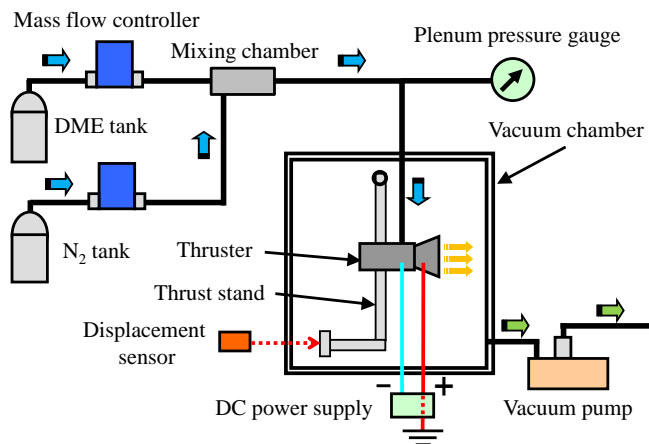


Fig. 2 実験装置の概略

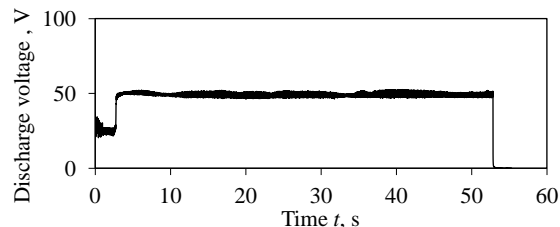
Table 2 実験条件

推進剤	DME/N ₂
推進剤流量, mg/s	40, 50, 60
放電電流, A	13, 20, 30
混合割合 (質量比)	10/0, 9/1, 7/3, 5/5 3/7, 1/9, 0/10

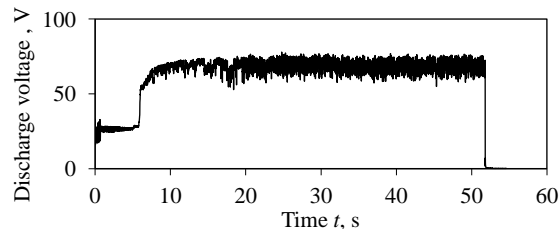
3 実験結果及び考察

放電電流 20 A, 推進剤流量 60 mg の場合における, 各混合割合での放電電圧の波形を Fig. 3 に, 混合割合 0/10, 5/5, 10/0 での作動後の陰極の様子を Fig. 4 にそれぞれ示す. DME の混合割合を高くすると, 放電電圧の振れが大きくなり, 電圧が急激に下がる現象も多くなった. また, プルームも時折火花状になるなど不安定になっていった. 作動実験後に陰極や陽極の様子を確認すると, 推進剤に DME が含まれる場合, 混合割合に関係なく, 陰極の先端部や陽極のコンストリクタ周辺への煤の付着が見られた. これらの結果より, DME を混合すると放電電圧及びプルームが不安定となるのは, DME に含まれる炭素から生成される煤が, 陰極や陽極に付着することで, アークの付着点が定まらないためであると考えられる.

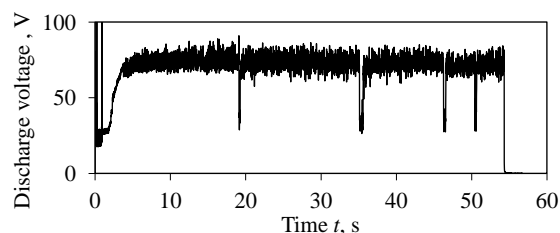
次に, Fig. 5 に比パワと比推力の関係を, Fig. 6 に比パワと推進効率の関係を示す. 推進剤が N₂ のみの場合から, DME の割合を増やしていくと, 比パワ, 比推力, 推進効率ともに高くなる傾向がみられた. しかし, DME の割合が 5/5 より高くなると, DME のみの場合と同等の比推力及び推進効率となった. また, 推進剤が DME のみの場合において比推力及び推進効率が最大となり, その値はそれぞれ 359 秒, 19% であった.



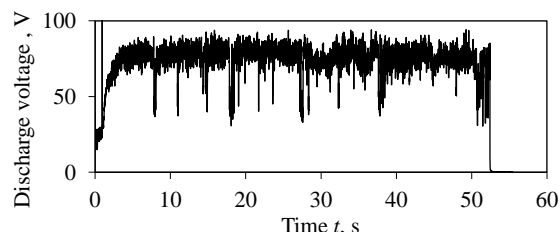
(a) DME/N₂ の混合割合 0/10



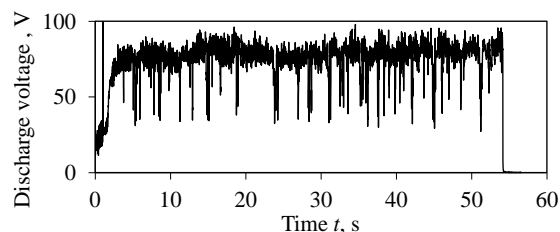
(b) DME/N₂ の混合割合 1/9



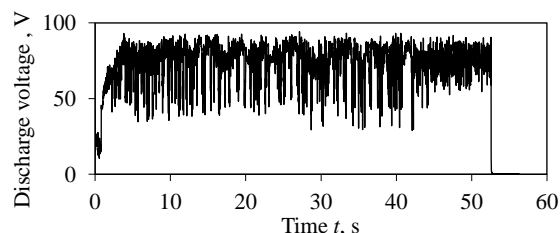
(c) DME/N₂ の混合割合 3/7



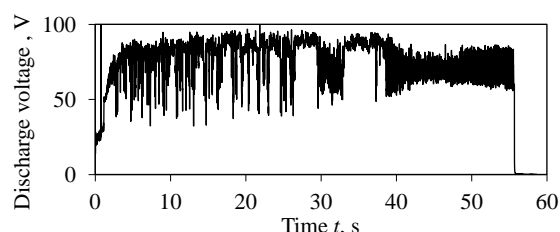
(d) DME/N₂ の混合割合 5/5



(e) DME/N₂ の混合割合 7/3



(f) DME/N₂ の混合割合 9/1



(g) DME/N₂ の混合割合 10/0

Fig. 3 各混合割合における放電電圧の波形 (放電電流 20 A, 推進剤流量 60 mg/s)

以上の結果より、DMEにN₂を混合することで、DME単体での場合に比べ、作動の安定化を実現させることはできた。一方で、推進性能は低下してしまい、また、作動を安定させるためにはN₂が非常に多く必要となってしまう。従って、DME/N₂の混合推進剤は、実用化するには不向きであるといえる。しかし、N₂以外の気体を混合することや、混合の方法を変えることで、今回以上の成果が得られる可能性があるため、今後更なる研究を行っていく予定である。

4 結論

本研究では以下の結論を得た。

- DMEの混合割合が高い場合、作動は不安定であったが、窒素を混合することで安定する傾向があった。
- DME/N₂の割合が0/10, 1/9, 3/7, 5/5の場合において、DMEの割合を大きくすると作動は不安定になったが、比推力及び推進効率は向上した。
- DME/N₂の割合が5/5, 7/3, 9/1, 10/0の場合において、比推力及び推進効率は同等であった。
- 推進剤がDMEのみの場合において、比推力及び推進効率は最大となり、それぞれの値は359秒、19%であった。
- 今回の実験では、煤の付着の抑制及び作動の完全な安定化には至らなかった。

参考文献

- 1) 栗木 恭一, 荒川 義博, 電機推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003
- 2) 日本DMEフォーラム, DMEハンドブック, オーム社, 2006
- 3) 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, Vol. 59 (2011), pp. 1-6



(a) DME/N₂の混合割合 0/10



(b) DME/N₂の混合割合 5/5



(c) DME/N₂の混合割合 10/0

Fig. 4 作動後の陰極の様子 (放電電流 20 A, 推進剤流量 60 mg/s)

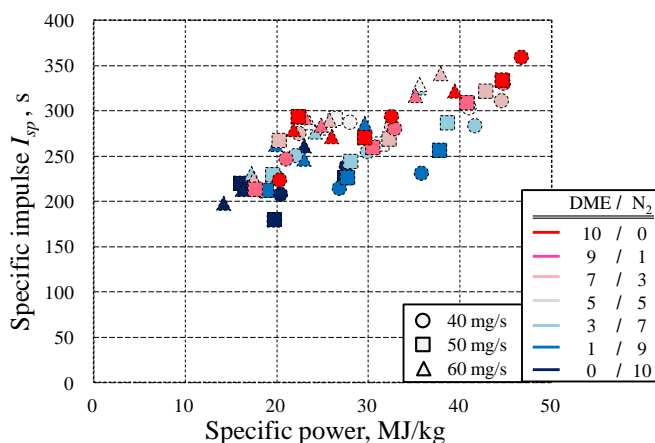


Fig. 5 比パワと比推力の関係

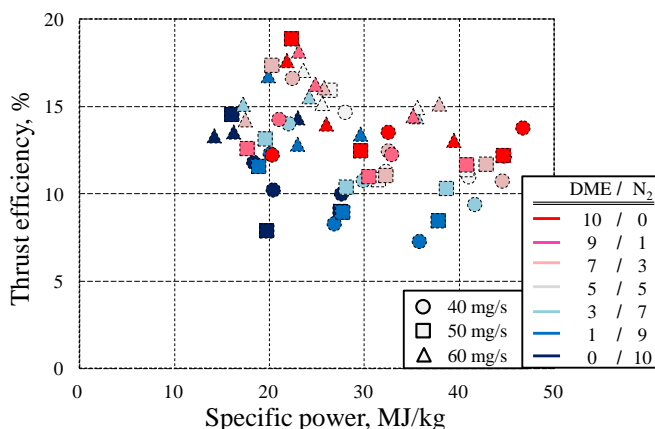


Fig. 6 比パワと推進効率の関係