

DME を推進剤に用いたアークジェットスラスタの作動の改善

○久岡 成三, 佐々山 浩二 (九工大・工・院), 林 晃一 (九工大・工・学)
各務 聡 (宮崎大・工), 橋 武史 (九工大・工院)

1 緒言

アークジェットスラスタとは、宇宙用推進機の一つであり、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ることにより推力を得る¹⁾。このスラスタは、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。現在、推進剤として主に使用されているヒドラジンは、化学推進機と併用が可能であり、過去に実績があるため信頼性が高い。その一方で、毒性が非常に強いいため、安全コストが高くなる。また、凝固点が高いため、液体での貯蔵にはヒータが必要であり、気化させ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 は無毒であり、凝固点が低いことから、ヒータを用いなくても容易に液体での貯蔵ができる。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の供給が可能となる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、作動により生成された煤が、陰極の先端やコンストリクタの下流に付着し、作動が困難となるだけでなく、ブ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、煤の生成・付着を抑制し、作動及び放電を安定させるために、DME に亜酸化窒素（以下 N_2O ）を混合することを着想した。今回、DME と N_2O の混合割合を変えて実験を行い、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

本研究で用いたスラスタの形状を Fig. 1 に、スラスタの諸元を 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、陰極先端半頂角を 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。推進剤には DME と N_2O の混合気体（以下 DME/ N_2O ）の他に、酸素原子の有無による影響を調べるために DME と N_2 の混合気体（以下 DME/ N_2 ）も用いた。

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タスタンドにスラスタを取り付け、チェンバ内を減圧する。次に、マスフローコントローラを用いて推進剤を一定流量で供給する。供給した推進剤は混合器により混合され、スラスタへと送られる。スラスタ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スラスタを作動させ、各測定値を得る。

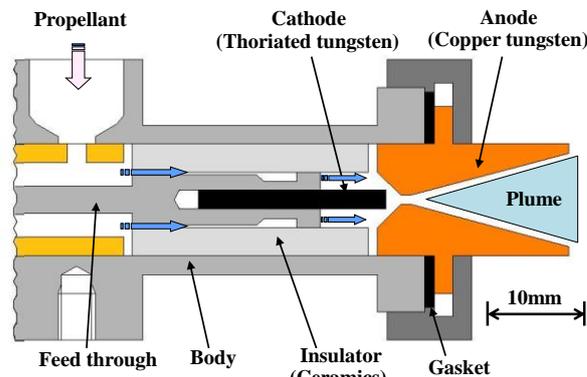


Fig. 1 本研究で用いたスラスタ 形状

Table 1 本研究で用いたスラスタ 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 |

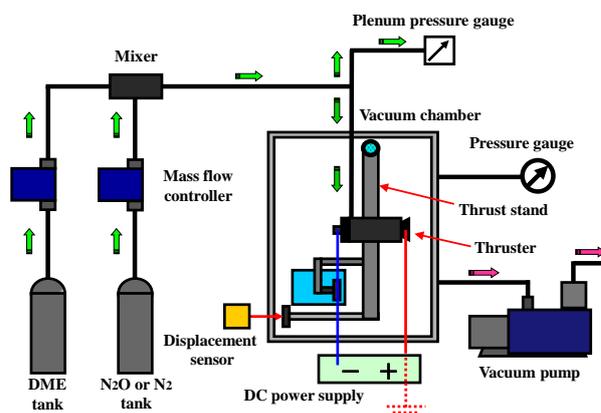


Fig. 2 実験装置 概略

Table 2 実験条件

| | |
|-------------|---|
| 推進剤 | DME/ N_2O , DME/ N_2 |
| 推進剤流量, mg/s | 40 (40/0, 35/5, 30/10, 0/40), 50 (50/0, 45/5, 40/10, 0/50), 60 (60/0, 55/5, 50/10, 45/15, 0/60) |
| 放電電流, A | 13, 20, 30 |

3 実験結果及び考察

推進剤が DME, N₂O, N₂ のみの場合の作動を比較する。DME 及び N₂O を用いるとブルームは不安定であったのに対し, N₂ を用いた場合にはブルームは安定していた。DME のみの場合にブルームが不安定であったのは, 電極に煤が付着することで, アークスポットが変化したためであり, N₂O のみの場合に不安定であったのは, 電極が損耗することでノズルの形状などが変化したためであると考えられる。

次に, DME に N₂O 及び N₂ を混合した場合の作動を比較すると, どちらもブルームは不安定なままであった。これは, どの混合割合においても DME の混合割合が高いため, 作動により電極に煤が付着したためであると考えられる。なお, 電極への煤の付着量や付着の仕方は, 今回の混合割合では, N₂O 及び N₂ を混合しても, DME のみでの結果と大きな差はみられなかった。

推進剤流量 60 mg/s, 放電電流 30 A での DME/N₂O 及び DME/N₂ の放電電圧の波形を Fig. 3 に, 作動後の陰極の様子を Fig. 4 に示す。N₂O を混合しても, DME のみの結果と大きな違いはみられなかった。しかし, 標準偏差をとって比較してみると, 放電電流 30 A での結果では, N₂O を混合した場合, N₂O の混合量を増やすと波形が安定に向かう傾向が見られた。一例として, 推進剤流量 60 mg/s, 放電電流 30 A での放電電圧の平均値と標準偏差を Table 3 に示す。N₂ を混合した場合はこの傾向が見られなかったことから, 作動の安定化には, 酸素原子が含まれることや, N₂O が高温状態となると発熱分解が始めることが影響していると考えられる。

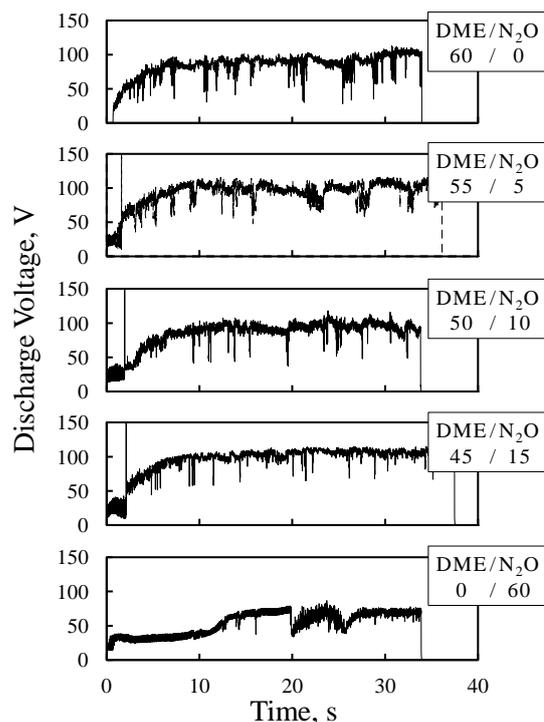
推進剤流量 60 mg/s, 放電電流 30 A での DME/N₂O 及び DME/N₂ における比パワと比推力の関係を Fig. 5 に示す。今回の混合量において, DME/N₂ の場合は DME のみのときと同等で変化がみられなかったのに対し, DME/N₂O の場合は比推力の低下がみられた。これは, DME/N₂O での作動では, これまで電極に付着していた煤の一部が CO や CO₂ などになることでノズルから噴出され, その影響でガスの平均分子量が増加したためであると考えられるが, 今回の実験では詳細な理由は判明しなかった。

以上の結果より, DME に今回よりも多量に N₂O を混合することで作動の安定化を図ることができると考えられる。

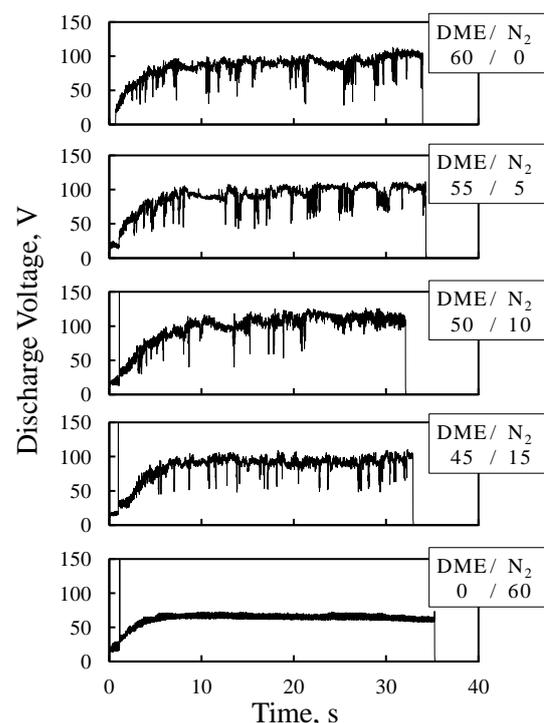
4 結論

DME に N₂O を混合することで, 以下の知見を得た。

- 今回の混合量では, 煤の生成の抑制及び作動の安定化には至らなかった。
- 放電電流 30 A での作動では, 放電電圧が安定に向かう傾向がみられた。
- N₂O を混合することにより, 比推力が低下した。



(a) DME/N₂O での放電電圧波形



(b) DME/N₂ での放電電圧波形

Fig. 3 各条件における放電電圧の波形
(推進剤流量 60 mg/s, 放電電流 30 A)

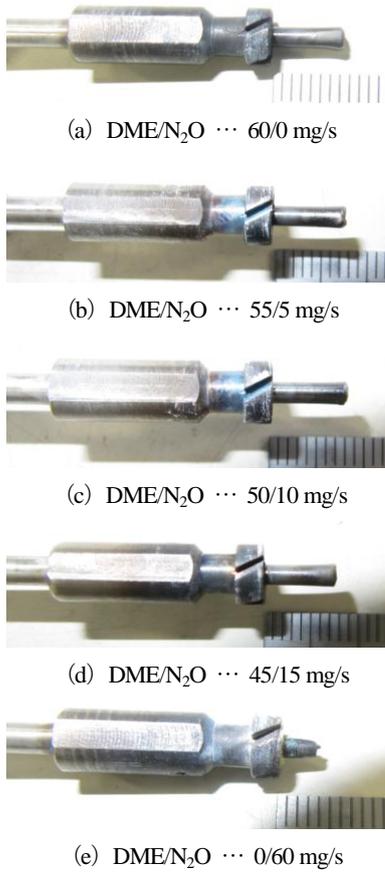


Fig. 4 作動後の陰極の様子
(推進剤流量 60 mg/s, 放電電流 30 A)

Table 3 放電電圧の平均値及び標準偏差
(推進剤流量 60 mg/s, 放電電流 30 A)

| 推進剤流量, mg/s | DME/N ₂ O | | DME/N ₂ | |
|-------------|----------------------|---------|--------------------|---------|
| | 平均値, V | 標準偏差, V | 平均値, V | 標準偏差, V |
| 60/0 | 88.0 | 9.4 | 88.0 | 9.4 |
| 55/5 | 97.1 | 10.2 | 93.5 | 11.5 |
| 50/10 | 94.3 | 8.7 | 103.9 | 8.7 |
| 45/15 | 106.5 | 6.0 | 91.1 | 8.7 |
| 0/60 | 65.5 | 8.6 | 65.5 | 2.9 |

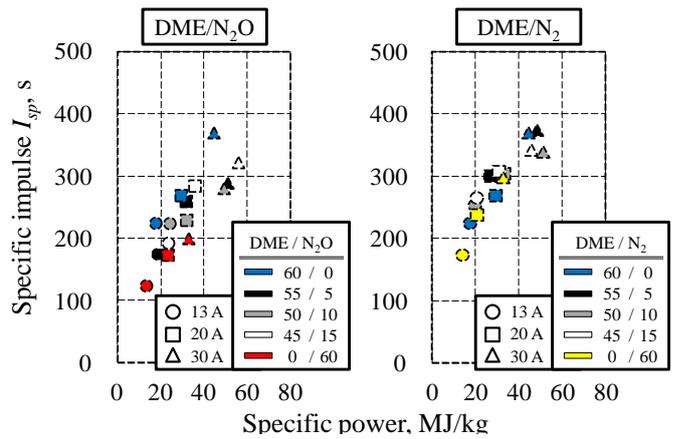


Fig. 5 比パワと比推力の関係
(推進剤流量 60 mg/s, 放電電流 30 A)

参考文献

- 1) 栗木 恭一, 荒川 義博, 電気推進ロケット入門, 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, 橋 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