

マイクロ波を用いた化学・電気デュアルモードスラスタの試作 Design of Chemical/Electric Dual-mode Thruster Using Microwave

○ 藤原 祐一^{*1}, 山戸 葵維^{*2}, 矢野 康之^{*3}, 各務 聡^{*2}
Yuichi Fujihara, Aoi Yamato, Yasuyuki Yano and Akira Kakami

^{*1} 宮崎大学大学院工学研究科工学専攻機械・情報系コース

^{*2} 宮崎大学機械設計システム工学科, ^{*3} 宮崎大学工学部教育研究支援技術センター

^{*1} *Department of Mechanical Design Systems Engineering, University of Miyazaki*

^{*2} *Department of Mechanical Design Systems Engineering, ^{*3} University of Miyazaki, Technical Center, University of Miyazaki*

1. 序論

ロケットの空きスペースに小型衛星を相乗りさせるピギーバック方式の利用機会の増加や、コストの低下により、大学やベンチャー企業等が小型衛星を製作し打ち上げるに至っている。今後、小型衛星によるフォーメーションフライトなどのミッションを小型衛星で実現し、活躍の場を広げるには軌道制御や姿勢制御のためのスラスタが必要である。しかし、小型衛星には重量や容積に制約があり、従来のスラスタをそのまま搭載することは困難であるため、小型で高性能な小型スラスタが必要となる。また、安全性の観点から推進剤には低毒性が求められる。

そこで、亜酸化窒素(N_2O)/ジメチルエーテル(DME)を推進剤とし、化学・電気の 2 つのモードで作動するマイクロ波スラスタを提案する。化学推進モードでは、従来の二液式スラスタとして作動し、電気推進モードでは、アークジェットやレジストジェットのように推進剤に電気エネルギーを与えてターナルエンタルピーを増加させて、比推力を向上させる。また、本スラスタでは、無電極放電を用いるため長寿命化を図る。

このように提案するスラスタは、デュアルモードで作動し、マイクロ波は、化学推進モードではスパークプラグ、電気推進モードでは熱源として用いており、無電極放電によって、スラスタの長寿命化を図る。本稿では、提案したスラスタの試作および実験系の構築を行ったので、これについて紹介する。

2. 提案するスラスタ

化学推進モードでは、燃料に DME、酸化剤には N_2O を使用して、従来の二液式スラスタと同様な作動をする。Fig.1 は

NTO/N_2H_4 二液式スラスタと N_2O/DME 二液式スラスタ^{1,2)}の基本的な構成である。 N_2O/DME は気化が容易なため、気体として燃焼室に供給することにより、律速段階である蒸発時間を 0 にできることから、推力室の小型化が可能となる。また、 N_2O の比重が 1.53、DME が 0.67 であるため、 I_{sp} 最大となる $O/F=3.5$ であれば比重は 1.34 となり、従来の NTO/N_2H_4 よりも高く、タンクの小型化が可能である。理論比推力を化学平衡計算プログラム NASA-CEA (Chemical Equilibrium with Applications)³⁾により算出したところ NTO/N_2H_4 が 318 s、 N_2O/DME が 290 s と遜色ない。

一方、電気推進モードでは、完全に解離したときの平均分子量が N_2O よりも小さい DME を推進剤に使用する。DME の解離したとき平均分子量は 5.1 でアンモニア(NH_3)と近いため、MET(Microwave Electro-thermal Thruster)の研究⁴⁾から 300 s 台の比推力が得られると考えられる。また、マイクロ波プラズマによって、エネルギーを推進剤に与えるため、無電極放電が可能で電極の劣化の問題がない。それに対し、アークジェットではジュール熱による電極の損耗、レジストジェットでは高温によるヒータの劣化などのためにスラスタの寿命が短いという問題があった。

また、本スラスタで使用する N_2O と DME は共に毒性が皆無な液化ガスで、蒸気圧はそれぞれ 6.4 MPa、0.6 MPa であることから、自己の蒸気圧による供給が可能である。よって、窒素等の加圧ガスが不要となり、供給系を簡素化することが出来る。

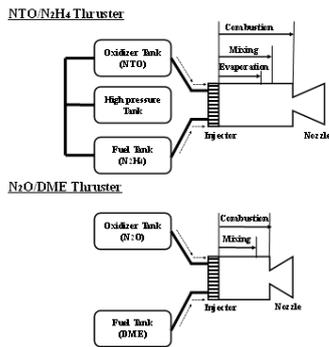


Fig. 1 NTO/N₂H₄ 二液式スラスタと N₂O/DME 二液式スラスタについて

3. 試作したスラスタ

3.1 スラスタの概要 試作したデュアルモードスラスタは、Fig. 2 に示すように、スラスタはノズル、推力室、アンテナ、マイクロ波伝送系、混合器、燃料および酸化剤供給系で構成されている。その諸元を Table 1 に示す。化学推進モードでは、気体燃料(DME)を酸化剤気流中(N₂O)に混合器により混合し、予混合ガスとして推力室に供給する。その予混合ガスをマイクロ波プラズマにより点火し、推力を得る。本来はマイクロ波で点火することを想定しているが、今回の設計では gas direct breakdown を起こすことが困難なため、スパークプラグにより点火する。

電気推進モードでは、気体燃料である DME を推力室へ供給し、マイクロ波プラズマにより加熱することでトータルエンタルピーを増加させ推力を得る。設定推力は 330 s, 設定推力を 30 mN とした。なお、先述の通り、今回の設計では、マイクロ波による gas direct breakdown が困難なため、スパークプラグを用いてマイクロ波プラズマを誘起する。

3.2 ノズルおよび推力室 Figure 3 に試作したノズルと推力室の構造を示す。一般に、宇宙機用のノズル開口比は 50 以上であるが、今回は大気中で試験するためコンバージェントノズルを使用しスロート径を 1.0 mm とした。

推力室は、円筒共振器を兼ねた設計にすることにより、構造の簡素化を図った。円筒共振器とは、導体で閉じ込められた円筒状の容器のことで、特定の周波数の電磁界振幅が増大する共振現象が起きる。今回はこれを利用してマイクロ波による確実なプラズマ生成を図った。なお、簡素さ、小型化の

ために、Fig. 4 のようなモードを有する TE₁₁ モード⁵⁾を採用した。また、化学推進モードにおける化学反応、電気推進モードにおける熱交換の促進のため、推進剤をスワール方向に供給している。

3.3 マイクロ波伝送系およびアンテナ 研究で使用したマイクロ波電源は、周波数が 2.45 GHz, 定格出力が 200 W である。この周波数は、電波法により工業的に定められたものであるため、電源や周辺機器が安価で入手性に優れている。このマイクロ波電源から供給されたマイクロ波は、反射波を減衰するスリースタブチューナを経て、特性インピーダンス 50 Ω の N 型同軸ケーブルより出力される。また、アンテナは構造が簡素で基本的なアンテナの代表である半波長ダイポールアンテナを使用した。Fig. 5 にシミュレーションソフト Open FDTD より解析を行った半波長ダイポールアンテナの電場分布図を示す。Fig. 5 に示す電場強度の値がマイクロ波による絶縁破壊の値より低いため、3.2 で述べたように、スパークプラグを設け 10 kV/m ピークの微小放電によって点火させる。

3.4 混合器 Figure 6 に Solid Works の Flow Simulation を用いて O/F(酸化剤燃料比)が 3.5 のときのコイル状の流路を流れる過程で推進剤を混合させる混合器の数値解析の結果を示す。混合器出口で質量割合が 0.22 であり、混合できた場合の燃料の質量割合と等しいことから、十分に混合しているといえる。

3.5 燃料および酸化剤供給系 N₂O/DME は、高圧ボンベに貯蔵されており、それぞれの流量はマスフローコントローラにより一定に保つ。また、燃料供給の開始と中断を瞬時にできるように供給ライン上に電磁弁を設置した。

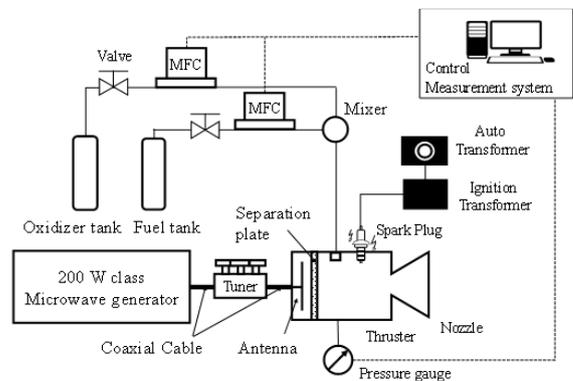


Fig. 2 試作したデュアルモードスラスタの概略図

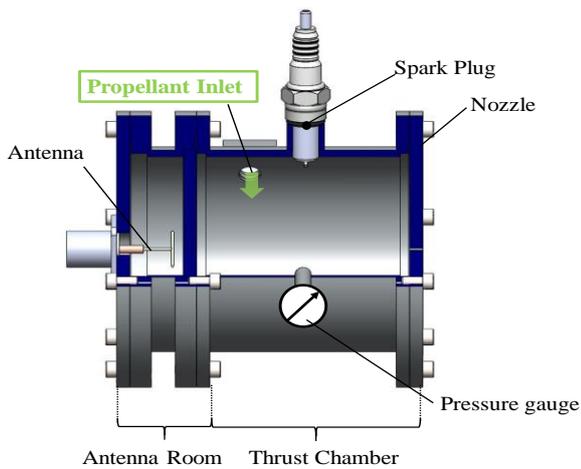


Fig. 3 試作したノズルと推力室の構造

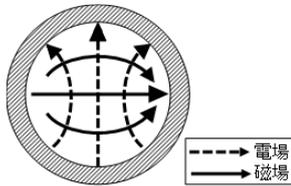


Fig. 4 TE₁₁モードの場合に作用する電磁場の方向

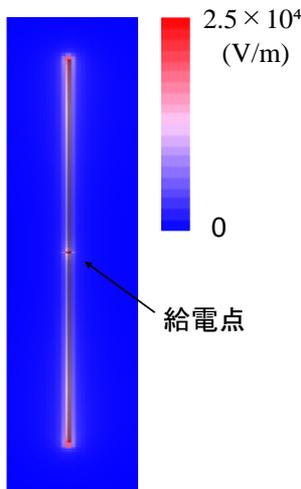


Fig. 5 半波長ダイポールアンテナの電場分布図

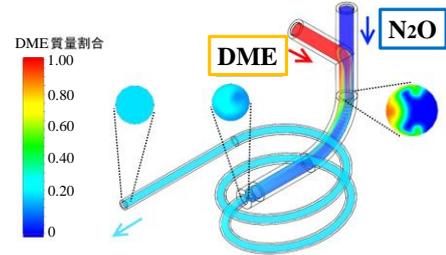


Fig. 6 混合器の数値解析結果

4. 今後の予定

真空中において、提案するスラスタのデュアルモードの作動実証をし、推力測定を行う。また、デュアルモード作動に適したアンテナや円筒共振器の固有モードの選定を Open FDTD といったシミュレーションソフトにより行い、それらを使用した実験を積み重ねることで、スラスタの小型化や、マイクロ波プラズマの生成効率の向上を図る。

5. 結言

- マイクロ波を用いた化学・電気デュアルモードスラスタを提案した。
- 無毒で環境適合性に優れた推進剤として、亜酸化窒素/ジメチルエーテルを提案した。
- 化学推進モードでは、従来の化学スラスタとして作動させ、スパークプラグの代わりにマイクロ波プラズマを使用した。
- 電気推進モードでは、無電極放電により長寿命化を図った。
- 試作したスラスタは推力室と円筒共振器を兼ねており、構造の簡素化を図った。

参考文献

- 1) 仲町一郎, 大木不二雄, 田中元治, 千原秀昭: 化学大辞典, 株式会社東京化学同人, 1989
- 2) 日本 DME フォーラム編: DME ハンドブック, オーム社, 2012
- 3) Gordon, S. and McBird, B.J.: Computer Program for Calculation of Complex Equilibrium Compositions and Applications, NASA Reference Publication 1311, 1996.
- 4) Kevin D. Diamant, Byron L. Zeigler, and Ronald B. Cohen: Microwave Electro-thermal Thruster Performance
- 5) 岡田文明, マイクロ波工学基礎と応用 p.174-175

Table 1 それぞれのモードにおける推進機の諸元

(a) 化学推進モード		(b) 電気推進モード	
理論推力, N	0.4	設定推力, mN	30
理論比推力, s	290	設定比推力, s	330
設計燃焼室圧力, MPa	0.4	推進効率, %	45
O/F	3.5	比パワー, MJ/kg	10
開口比	50	推力電力比, mN/kW	300
		推進剤流量, mg/s	10