

# 亜酸化窒素/ジメチルエーテル二液式推進機の 真空雰囲気下における作動実験

○浦岡 佑 (宮大・院), 岩男 佳和 (宮大・学)  
矢野 康之 (ものづくり教育実践センター), 各務 聡 (宮大)

## 1. 緒言

1957年にソビエト連邦が人類初の人工衛星『スプートニク1号』を打ち上げてから現在まで、数多くの人工衛星が打ち上げられてきた。このような宇宙機は、地球や他天体の重力、太陽からの放射圧力、高層大気の圧力など様々な力の影響を受けるため、軌道保持や姿勢遷移のために二液式推進機が搭載されている。燃料としては主に性能や信頼性に優れているヒドラジン( $N_2H_4$ )が、また、酸化剤として四酸化二窒素(NTO)などが利用されている。ヒドラジンとNTOは自燃性を有するため、イグナイタを用いることなく混合させるだけで点火することができる。一方で、毒性が非常に強いため、地上での取り扱いには特別な処理が必要となる。そこで、本研究では、無毒で環境適合などに優れる、亜酸化窒素( $N_2O$ )/ジメチルエーテル(DME)二液式推進機を提案し、性能評価を行った。これまでの研究により、真空下での推力生成は確認できたが、中断と再開を繰り返し、作動が不安定となっていた。そこで、バッファと保炎版により、真空下での安定した作動を実現することを目的とした。

## 2. $N_2O$ /DME 二液式推進機

酸化剤である $N_2O$ は、常温・常圧にて無色透明の液化ガスであり、人体に対して無毒である。さらに、質量比で36%の酸素を含んでいるため空気よりも可燃性が強い。また、麻酔効果があることから、酸素と併用し麻酔薬として使用されている。燃料であるDMEは、無色の液化ガスであり、25℃での飽和蒸気圧が0.6 MPaと適度に高く、比重が1.53であることから比重が1である $N_2H_4$ よりも多量を搭載できること、C-C結合をもたないために燃焼時に煤が発生しないこと、分解速度が速いためオゾン層を破壊しないという特徴をもつ。この $N_2O$ /DME二液式推進剤を用いることにより次のような利点を有する。

- 液化ガスである $N_2O$ とDMEは、液体で貯蔵し気体で供給できるため、律速段階である蒸発時間をゼロにできることから燃焼室の小型化が可能となる。
- 蒸気圧は、25℃で $N_2O$ が3.18 MPa、DMEが0.6 MPaであるため自身の蒸気圧を用いて供給でき、pressurantが不要となることから構造を簡素化できる。
- 凝固点は、 $N_2O$ が-102℃、DMEが-142℃と低いため貯蔵にはヒーターが不要である。
- 燃焼室圧力0.4 MPaのときの開口比50のノズルを使用した場合の理論真空比推力は281 sである。

## 3. 実験装置および条件

**3.1 実験装置** 真空容器の概略図をFig. 1に示す。本研究における全ての実験は、この一辺0.4 mの立方体型の真空容器で行った。推力を計測するために、スラストスタンドを真空容器に設置した。このスラストスタンドは、弾性ヒンジを支点とした振り子であり、推力により生じた変位をレーザー変位計で計測し推力を算出した。

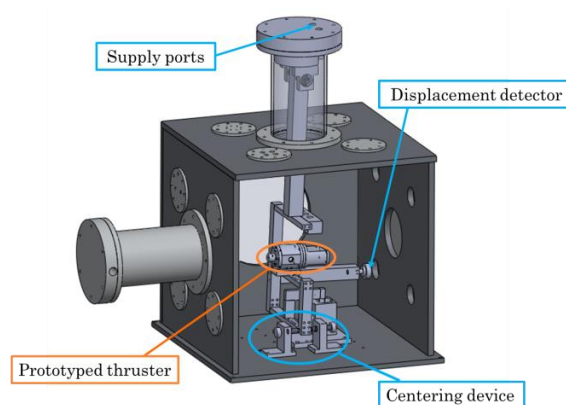


Fig. 1 スラストスタンドを設置した真空容器

**3.2 提案する推進機** 試作した推進機(0.4 N級)の概略図をFig. 2に示す。点火時の圧力スパイクを抑制するために保炎板(噴射器)の上流にバッファを設けている。 $N_2O$ とDMEはこのバッファを通ってから保炎板の直径1 mmの13個の穴を通して燃焼室に供給される。 $N_2O$ とDMEは自然性がないため、スパークプラグにより点火する。このスパークプラグは商用交流をイグニッショントランスにより昇圧しているため、1秒間に60回作動している。0.4 N級の推力を生成するためにノズルのスロート断面積を0.785 mm<sup>2</sup>、開口比は大気圧下で最適膨張となる1.3を用いている。これは大気圧下で作動させるときの最適膨張の値である。また、混合を促進させるために、Fig. 3に示すように、衝突角を0°と30°として実験を行った。推進機の諸元をTable 1に示す。

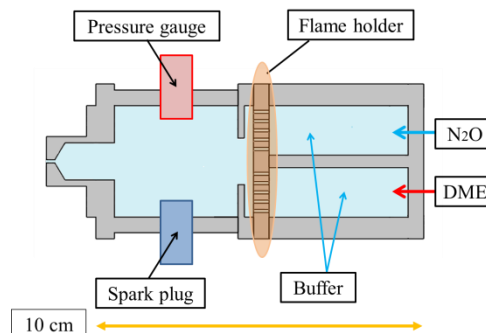
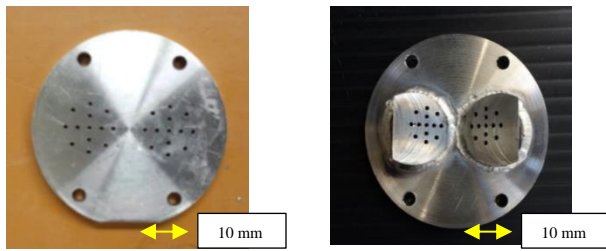


Fig. 2 試作した推進機の概略図



(a) 衝突角 $0^\circ$  の保炎板 (b) 衝突角 $30^\circ$  の保炎板

Fig. 3 製作した保炎板

Table 1 推進機の諸元

設計推力	N	0.4
理論比推力	s	208
全長	mm	122
幅	mm	49
スロート断面積	mm <sup>2</sup>	0.785
開口比 (大気圧設定)		1.3

Table 2 実験条件

混合比 (O/F)		3.5
推進剤流量	mg/s	219
設定燃焼室圧力	MPa	0.4

**3.3 実験条件** O/Fは理論比推力が最大となる3.5とし、燃焼室圧力は自己の圧力で供給することを想定してDMEの蒸気圧より低い0.4 MPaとした。実験条件をTable 2に示す。

#### 4. 実験結果および考察

**4.1 衝突角 $0^\circ$  の場合** 衝突角 $0^\circ$  のときの燃焼室圧力、推力の時間変化をFig. 4に示す。点火を開始した直後、燃焼室圧力は上昇し、ノズルから断続的にブルームが発生していた。これは点火後すぐに消炎したものの、スパークプラグが60 Hzで繰り返し作動しているために点火と消炎を繰り返したためである。約300秒間スパークプラグを繰り返し作動させたが、断続的な燃焼が続き、スパークプラグなしでは保炎できなかった。この燃焼時の性能は、比推力 $I_{sp}$ は33 s、 $C^*$ 効率は25.2%であった。

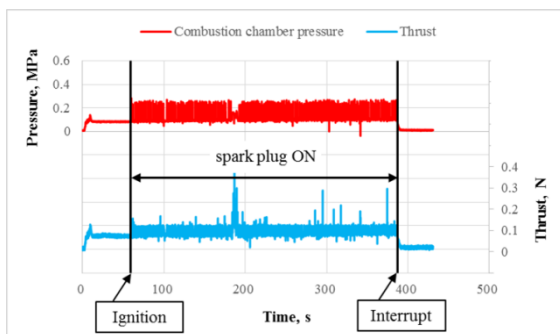


Fig. 4 O/F=3.5, 衝突角 $0^\circ$  の時間変化

**4.2 衝突角 $30^\circ$  の場合** Table 2の実験条件で衝突角 $30^\circ$  の保炎板を使用した場合の燃焼室圧力、推力の時間変化をFig. 5に示す。Fig. 5のように、スパークプラグの作動開始直後は点火の直後に消炎し、スパークプラグの繰り返し作動によって点火していたため圧力が大きく変動している。約10秒後に燃焼が安定し、ノズルからブルームが安定的に発生していた。これ以降は、スパークプラグをオフにしても燃焼が維持していた。安定燃焼に達した直後はブルームが非常に薄かったが、燃焼が安定してから約80秒後、ノズルが赤熱し始めるとともにブルームが明るくなり目視できるようになった。このときの比推力 $I_{sp}$ は113 s、 $C^*$ 効率は62.1%であった。 $I_{sp}$ 効率は約54%で $C^*$ 効率は60%程度であることから、燃焼室における燃焼が完了していないため、噴射混合方法や燃焼室の改良が必要である。

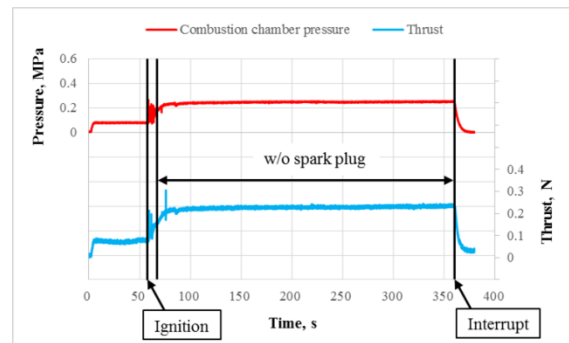


Fig.5 O/F=3.5, 衝突角 $30^\circ$  の時間変化

#### 5. 結論

本研究では以下のような結論が得られた。

- 無毒で環境適合性に優れた $N_2O/DME$ 二液式推進機を提案した。
- 圧力スパイクを抑制するためのバッファと燃焼を保持させるための保炎板を搭載した推進機を試作した。
- 混合を促進させるために衝突角の異なる保炎板を製作し、それぞれを真空下で作動させ、性能評価を行った。
- 衝突角 $0^\circ$ の場合、点火と同時にブルームが発生し、中断と再開を繰り返し断続燃焼が発生した。
- 衝突角 $30^\circ$ の場合、10秒の遅れがあったが、安定燃焼を実現できた。燃焼時にノズルの赤熱反応が見られ、ブルームの発生を確認できた。安定燃焼時の性能は、比推力 $I_{sp}$ は113 s、 $C^*$ 効率は62.1%であった。

#### 参考文献

- (1) 黒石竜太, 浦岡佑, 矢野康之, 各務聡, 大気圧および真空下での $N_2O/DME$ 推進剤を用いた小型推進機の性能評価, 平成25年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2013-065, 2014年1月17日, 神奈川県相模原市。
- (2) 仲町一郎, 庄司不二雄., ガス燃焼の理論と実際, 財団法人省エネルギーセンター, 2012。
- (3) 木村逸郎, ロケット工学, 養賢堂, 1994