

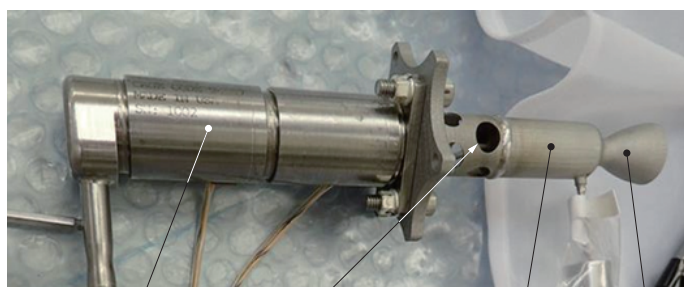
宇宙利用の拡大へ！ 超小型衛星用スラスタ

3D プリンタを用いた低コスト低毒スラスタの開発

超小型衛星用のスラスタとして、3D プリンタにより製造コストを低減し、毒性が低く安全な推進薬を用いることで、製造から運用に至るライフサイクルコストを抑えた推進系をユーザーに提供する。

株式会社 IHI エアロスペース
基盤技術部 基盤技術室

五十嵐 真二



バルブ 供給配管部 燃焼室 ノズル
超小型衛星用低毒スラスタ概要図



推力レベルが 4 N のスラスタ燃焼試験

超小型衛星に求められるスラスタとは

近年、質量 50 ～ 150 kg の超小型・小型衛星は、ベンチャー企業や大学関連での研究・開発の進展により、多数の打ち上げ計画がある。これらの超小型衛星には姿勢制御用としてフライホイールや磁気トラッカーと呼ばれる機構部品が用いられてきたが、軌道変換や軌道高度維持のためのガス噴射を行う推進装置（スラスタ）の搭載は進んでいない。

軌道変換や軌道高度維持の機能を付与することにより、複数同時打ち上げ後に衛星自体の推進力で目的の軌道に展開するコンステレーションが可能になるほか、これまでより衛星寿命を延長することができる。

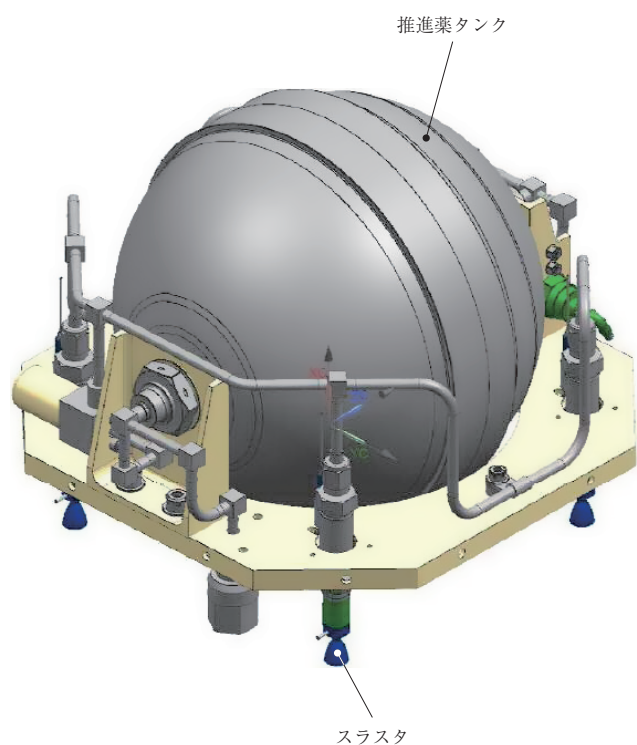
超小型衛星用のスラスタに求められる機能は、大き

く分けて以下の 3 点である。

- ① 小型・軽量
- ② 安価
- ③ 高い安全性

従来用いられているヒドラジンを燃料としたスラスタは、上記の①を満足するが、毒性が高いために取り扱いが困難であり、安全対策のために製造から運用に至るライフサイクルコストが増大する。一例として、ヒドラジンを取り扱う際には、SCAPE (Self-Contained Atmospheric Protective Ensemble) スーツと呼ばれる空気供給機能付き保護具の着用が必要であり、さらに空気供給設備も必要になる。

このような理由により、超小型衛星に対してヒドラジンを燃料としたスラスタの採用は進んでいない。一



推進装置概要図

方で、毒性の低い推進薬として過酸化水素やコールドガス（窒素など化学反応を伴わないガス）が用いられることはあるが、推進性能が低いことから適用範囲は限られていた。

世界のスラスタ開発の現状と IA の活動

ヒドラジンの代替として、低毒かつ高性能な推進薬の研究が約 20 年前から欧米や日本で進められてきた。低毒推進薬としては HAN（硝酸ヒドロキシルアンモニウム）を用いたもの、ADN（アンモニウムジニトラミド）を用いたものがある。しかし、これらの低毒推進薬のうち実用に至った例は少なく、普及も進んでいない。その理由としては、低毒推進薬の燃焼温度が高温となることから、既存の燃焼室材料では耐えられなかったり、燃焼を支援する触媒が劣化により寿命が短くなったりする問題があった。そのため燃焼室材料や触媒の高耐熱化が必須であり、高コスト化の要因となっていた。

低毒推進薬のもう一つの課題として、毒性は低いものの、高エネルギー物質であることから、扱い方によっては爆発的な燃焼を起こす自触媒作用と呼ばれる

性質があり、これを制御する必要があった。株式会社 IHI エアロスペース (IA) では、そのような異常燃焼に至らないような組成を見だし、スラスタ燃焼試験により安全でかつ応答性が高く、ヒドラジンの代替となり得ることを確認してきた。しかしながら、前述のとおり、低毒推進薬の燃焼温度が高温となることに起因する燃焼室材料や触媒の高耐熱化を満たしたうえで低コスト化することができず、実用化に至っていない。

加えて、これまで研究されてきた低毒スラスタは、噴射開始信号に対する燃焼ガス噴射の応答性が低いという問題があり、応答性の向上も課題となっていた。

IA が具現化した低コスト低毒スラスタ

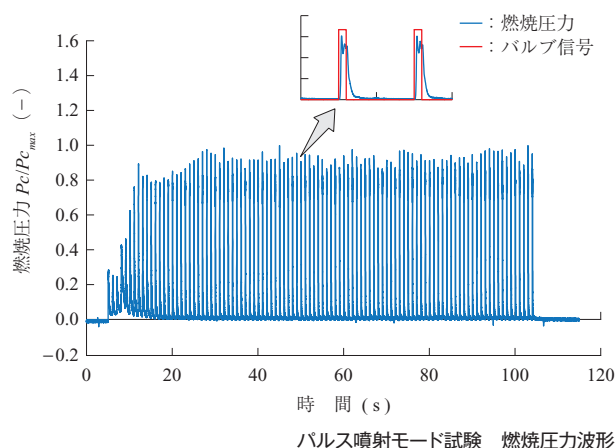
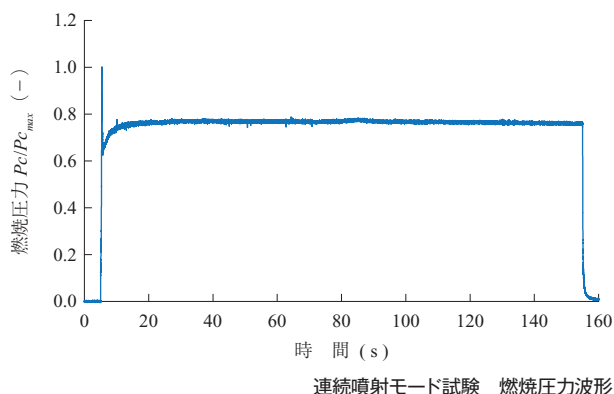
IA ではターゲットとする超小型衛星をコンステレーション衛星とし、低コスト・早期実現でスラスタを提供するための開発を行うこととした。

超小型衛星用の低コスト推進系実現のため、以下の 2 点の取り組みを行った。

- ① 使用する燃料を低毒推進薬とし、取り扱い・運用に特別な対処を不要とする。
- ② 3D プリント技術を用いることで部品点数を削減し、製造コストの低減を図る。

取り組み①を実現するため、推進性能はヒドラジンに対して若干低くなるが、燃焼ガスの温度は同等な低毒推進薬 HNP を開発した。前述のとおりこれまでの低毒推進薬は燃焼ガスの温度が約 2 000℃ と高温なため、高価な耐熱合金を用いる必要があり、製造コストが増加する要因の一つであった。HNP を用いることで、スラスタの構成部品に特別な高耐熱材料を必要とせず、製造コストを低減することが可能となる。

HNP は HAN / HN / メタノール / 水から構成されている。HAN は、元はアメリカで砲弾射出用に開発された液体発射薬から派生した一液推進剤で、ヒドラジンと比べて低毒性で高い燃焼性能が得られるものである。HN（硝酸ヒドラジン）は、既存のヒドラジン（無水ヒドラジン）に比べて低毒性で HAN と同様に高い燃焼性能が得られるものであり、HAN の自触媒作用を抑制し、燃焼を制御しやすくする機能も持っている。メタノールは燃焼性能を高めるために配合され、水は HAN および HN の溶媒として配合さ



れている。燃焼の自触媒作用がない組成を見いだしたことで、低毒かつ安全な推進薬の開発に成功した。

取り組み②の背景は、スラスタの主要部品数だけで10以上あり、溶接やろう付けなどから成る精密な組み立て作業が必要となることが挙げられる。これに対して3Dプリンタ技術の適用により部品点数を削減し、組み立て作業の削減による製造コストの低減を図る。

近年、3Dプリンタは大幅に技術が進展し普及も進んでおり、産業界において第四次産業革命を起こすともいわれている。具体的には、微細な金属粉末を均一に敷き詰め、レーザーなどを用いて層状に成型していく技術であり、複雑な形状でも一体成型ができ、製造装置のワークサイズ範囲内であれば、複数個を同時に成型することで、1個当たりの製造コストを低減することが可能となる。適用先としてはタービンブレードなどの航空宇宙部品や自動車部品の試作品、および医療用部品などがある。

今回、小型のスラスタに求められる微細な流路を実現できる高精度3Dプリンタ技術を採用し、一体成型によって部品点数を削減（従来比約75%減）し、組み立て工程を削減することで低コスト化を試みた。

このコンセプトを実証するため、スラスタの形状は以前から実績のあるヒドラジンを燃料とするスラスタと同等の設計で試作し、推力レベルが4Nのスラスタ燃焼試験により性能を評価した。

低コスト低毒スラスタ試作品の燃焼試験実証

燃焼試験はIA相生試験場（兵庫県）にて宇宙空間での使用を模擬した真空チャンバー内で実施した。

スラスタの燃焼は連続的に推力を発生する連続噴射モードと、短時間の噴射を繰り返すパルス噴射モードがある。試作した低コスト低毒スラスタは連続噴射、パルス噴射ともに、次に示すように超小型衛星用として十分な能力を有していることが分かった。

【連続噴射モード】

燃焼圧力波形で確認できるように、燃焼圧力は速やかに定常状態に達し、定常状態ではスパイク状の燃焼圧力変動もなく、安定して燃焼している。

【パルス噴射モード】

燃焼圧力のパルス波形は10パルス程度で定常状態に達し、その後は、波形のばらつきは少なく、安定したパルスが発生している状態が確認できる。噴射開始信号に対する燃焼ガス噴射の応答性も良く、低毒スラスタの課題であった応答性の向上についても本スラスタは、従来のヒドラジンをを用いたスラスタと同等レベルであることが分かった。

低コスト低毒スラスタの基本性能

燃焼試験により得られたスラスタの基本性能は以下のとおりである。推力1～3N、パルス回数4000回以上、トータルインパルス1000N・s以上（推力×時間）、比推力170s（ I_{sp} ：単位質量の推進薬で単位推力を発生できる時間、単位は秒（s））、スループット1.0kg（推進薬最大使用量）以上であった。

基本性能をベースに超小型衛星が本スラスタを使用することによって得られる軌道上での速度増分 ΔV と必要なHNP推進薬量を試算した。横軸に ΔV を取り、縦軸に推進薬量を示す。衛星質量が50kgのと

き、0.8 kg の推進薬量で $\Delta V = 25$ m/s 以上の速度増分を得られることが分かる。この ΔV によって超小型衛星の軌道を変更することや、軌道高度維持ができるようになる。一方、同じ ΔV を $I_{sp} = 80$ s の過酸化水素で実現する場合は、推進薬量が 1.8 kg と HNP の 2 倍以上必要となり、衛星質量が増大してしまう。

低コスト低毒スラスタの活躍の場

超小型衛星に低コスト低毒スラスタを適用することで、以下のような効果が期待できる。

【軌道変換・姿勢制御】

超小型衛星に軌道を変更する機能を付与することで、地球観測を行う超小型衛星をコンステレーション衛星として複数軌道上に配置する。衛星ユーザーが望む観測点および頻度で地球観測を行う取り組みや、これまで実現できなかった観測対象に対する宇宙観測や惑星探査の実現につながることを期待されている。IA が開発した低毒スラスタは応答性が高いことから、姿勢制御にも適用でき、衛星運用時の自由度が増すと考えられる。

【軌道高度維持】

衛星は軌道上の希薄な大気による空気抵抗を受けて速度が低下し、スラスタがなければ高度も徐々に低下し、軌道高度を維持できない。

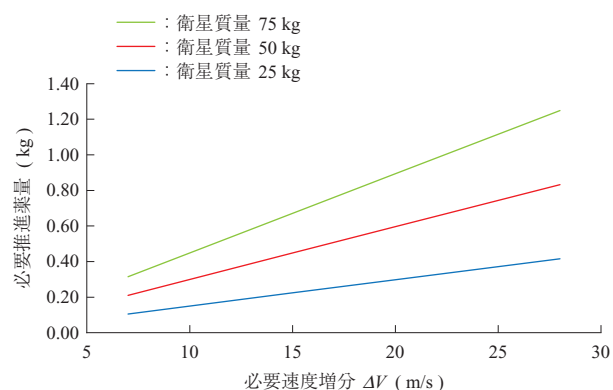
軌道高度維持の適用例として、衛星質量 50 kg、 $50 \times 50 \times 50$ cm サイズの衛星を想定した場合、前述の試算結果の推進薬量 0.8 kg で得られる $\Delta V = 25$ m/s によって、約 2 年間の軌道高度維持が可能となる。

【ピギーバック】

大型ロケットによる主衛星の打ち上げに相乗りするピギーバックと呼ばれる衛星打ち上げ機会に対して、ヒドラジンを充填した超小型衛星の搭載は、現時点までにおいて認められていない。低毒スラスタはヒドラジンに比べて安全性が高いことから、ピギーバックの推進系として搭載が認められる可能性があり、超小型衛星の打ち上げ機会の増加につながると見込まれる。

【デオービット】

各国の宇宙開発の活発化に伴い、軌道上に残存する運用を完了した衛星などのデブリ（宇宙ごみ）の問題も今後さらに顕在化してくると予想されている。運用が完了した衛星を積極的に大気圏に突入させ、軌道



(注) I_{sp} (比推力): 170 s

低コスト低毒スラスタを用いた軌道上での速度増分 ΔV と必要推進薬量

上から除去するデオービットと呼ばれる技術にも本スラスタが活躍する。

今後の展開

ここでは、3D プリント技術を用いた低コスト低毒スラスタを紹介した。一方、超小型衛星への推進系の適用にはスラスタだけでなく、推進薬タンクやバルブ、構造部材などのコンポーネントを仕上げていく必要があり、別途開発中である。

今後は以下の取り組みを予定している。

- (1) 推進系として必要な各コンポーネント（スラスタ、タンク、バルブ、構造部材、配管など）の性能を精査し、超小型衛星用推進系プロトタイプを完成させる。
- (2) お客さまへの推進系プロトタイプの紹介と、そこからのフィードバックにより、製品の早期完成・販売につなげる。

問い合わせ先

株式会社 IHI エアロスペース

営業部

電話 (0274) 62 - 7663

<https://www.ihi.co.jp/ia/>