粉体を推進剤とする高性能宇宙推進器の研究

Experimental Study on Powder Propellant Thrusters for Space Application

06111

研究者 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

宇宙輸送工学研究系 教授 國中 均 Hitoshi Kuninaka

An entirely new idea of using powdered material as propellant is suggested for the space propulsion system. Since powdered propellant does not need any high pressure system and temperature control for storage in spacecraft, it is very manageable propellant especially for small satellites and deep space probes. Moreover, although powdered propellant is one kind of solid propellant, it has controllability of propellant supply. The thruster we suggest consists of the propellant supply part using electrostatic adsorption and electromagnetic acceleration part. First we performed a fundamental experiment about electrostatic adsorption and showed the usefulness of this propellant supply system. Second, we made an experimental pulsed plasma thruster and compared some performances of thruster using solid propellant and powdered propellant. The thrust measurement instrument was newly developed in order to detect the impulse bit, average thrust and propellant consumption rate simultaneously.

研究の目的

1. 目的および背景

小型宇宙機に搭載されるマイクロスラスタは、冗長系の少なさからより信頼性の高いもの、つまり単純な構造のものが望まれる。こと推進剤に注目して考えると、気体や液体推進剤は高圧に保持する必要がある、また保温の必要があるという構造的複雑さを持っている。そのため固体推進剤を用いたパルス型プラズマスラスタなどはその単純な構造から注目されているが、このような固体推進剤は推進剤の供給が自由にできないという難点が存在し、ゆえに推力の安定供給、高精度制御、長寿命化という点で困難がある。そこでわれわれが提案するのが、粉体推進剤という新たな推進剤形式である。粉体は高圧系を必要とせずに高密度を保

ち温度補償の必要がない。また、一様供給が可能であれば、固体推進剤の持つ推力の安定供給、寿命の問題も解決する。本研究の目的は、固体表面に対する粉体の静電吸着を利用した推進剤供給方式の確立と、粉体推進剤を用いることにより、パルス型プラズマスラスタに、従来のように固体推進剤を用いたときにどのような現象の相違があるのかを確認することである。

2. 粉体推進の概要

粉体推進の概念図を図1に示す。粉体推進剤ははじめ容器に入っており、高圧電源により正に帯電する。帯電した粉体は静電的に絶縁体ローラへと引き付けられ、その外側表面に吸着する。この際、粉体の全部または一部が強磁性体である場合、マグネットローラを用いて吸着の過程を補助することができる。粉体推進

図1 粉体推進の概念図

剤ははじめ容器に入っており、高圧電源により正に帯電する。帯電した粉体は静電的に絶縁体ローラへと引き付けられ、その外側表面に吸着する。吸着した粉体は、絶縁体ローラの回転によって加速部に送られ、そこでパルス型電磁加速により加速され、推力を得る。

3. 静電吸着基礎実験

上記のような推進剤供給システムを構築するために、まず粉体の固体表面に対する静電吸着に関する基礎的な実験を行った。簡単のため、絶縁体ローラの変わりに絶縁体円盤を用いた。粉体容器の上部にはメッシュ電極があり、高圧電源によって+10kVにバイアスさせた。粉体容器上端と円板下面との間隔を1mmに固定して、一分間印加後の円板の質量増加を電子天秤で測定した。また、吸着後電位差を除いて一定時間放置し、吸着後の剥離状況を確認した。円板の材質はポリカーボネイト、アクリル、塩化ビニルで、どれも厚さ1mm、直径120mmのCDタイプの円板である。これらの円板の中心から半径50mm付近に粉体を吸着させた。使用した粉体は主に、トナー（粒径約 $10\mu\text{m}$ ）、テフロン（粒径約 $0.25\mu\text{m}$ ）である。いずれの粉体も、24時間後も吸着量の98%以上が残留しており、保存性はよいといえる。

4. 粉体推進剤パルス型プラズマスラスト

パルス型プラズマスラスト（PPT）は、先に述べたとおり、単純な構造のためにマイクロスラストとしての注目度が高い電磁加速器である。その写真を概念図を図2と3に示す。従来のPPTは、主に固体のテフロ

図2 製作したPPT

図3 PPTの回路

ンを推進剤とし、二枚の電極ではさむ形になっている。陽極・陰極間には高電圧が印加され、キャパシタにエネルギーが蓄えられる。スパークプラグに高電圧のパルスを与えることでスパークプラグと陰極の間にトリガ放電を起こし、それをきっかけとして陽極・陰極間の主放電が誘起される。初めは推進剤の表面を電流が流れる沿面放電であるが、そのときの熱により推進剤は昇華し、更なる放電により電離・プラズマ化する。主放電は数百kHzという高周波で起こるので、大電流により自己誘起磁場が形成される。この自己誘起磁場と主放電電流の相互作用により、プラズマにはローレンツ力が推進剤表面から離れる向きに働き、加速される。PPTの推進剤を粉体にする事で、次のようなメリットが考えられる。まず、固体推進剤PPTが持ち合わせる弱点の一つとして、形状の自由がきかないことが挙げられる。最も一般的な形の平行平板電極型PPTの場合、推進剤の形状は直方体に限られる。そのため、推進剤消費量が大きくなればなるほど、長い直方体の

推進剤を用意する必要がある。粉体推進剤を用いることでこのような問題は解消できる。また、平行平板電極型PPTの場合、推進剤が表面から削れていくためバネで押し出していくしくみになっていることが多いが、推進剤の表面は放電を繰り返すたびに変形していくため、その影響で推進器としての性能が変化してしまう。これに対し粉体推進剤を用い、一様供給と放電を繰り返すことで、常に推進剤表面が同じ状態で加速を続けることができると思われる。固体テフロン、セラミック塗布の粉体テフロン、多孔体塗布の粉体テフロンの500ショットのインパルスビットと圧力増加の履歴を計測した。実験条件は充電エネルギー3Jである。インパルスビット、圧力上昇値ともに、固体と粉体で大きな差は見られない。セラミックに塗布した粉体の場合、比推力が固体テフロンに比べ2割程度に低下してしまうことがわかった。ただし、圧力上昇の計測結果から昇華量は大きな差がないので、昇華しなかった推進剤の割合が多いと考えられる。多孔体に薄く塗布することでこの問題が解決した。

参考文献

- 1) 齊藤健史, 國中均, 「超小型衛星への応用を目指した粉体推進の研究」, 第50回宇宙科学技術連合講演会, 2006年11月.
- 2) 齊藤健史, 國中均, 「超小型宇宙機用粉体推進の開発」, 平成18年度宇宙輸送シンポジウム, 2007年1月.
- 3) Saito, T., Koizumi, H., and Kuninaka, H., "Development of the Powdered Propellant Propulsion," 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 2007.
- 4) Saito, T., Koizumi, H., and Kuninaka, H., "Pulsed Plasma Thruster Using Powdered Propellant," 30th International Electric Propulsion Conference, Sep. 2007.
- 5) 齊藤健史, 小泉宏之, 國中均, 「粉体を推進剤としたパルス型プラズマスラスタに関する実験的研究」, 第51回宇宙科学連合講演会, 2007年11月.
- 6) 齊藤健史, 小泉宏之, 國中均, 「粉体推進剤パルス型プラズマスラスタの高精度推力測定」, 平成19年度宇宙輸送シンポジウム, 2008年1月.