

機関番号：13801

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560736

研究課題名 (和文) 宇宙塵を推進剤とする宇宙推進機に関する実験的基礎研究

研究課題名 (英文) Experimental Study about the Space Propulsion System
Using Stardust as Propellant

研究代表者

山極 芳樹 (YAMAGIWA YOSHIKI)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：30220255

研究成果の概要 (和文)：ミッション途上に存在する宇宙塵を推進剤にすることで地球から持参する推進剤の大幅な低減を図る新しい宇宙推進システムを提案した。宇宙塵を模擬した固体微粒子をプラズマを介して帯電させ磁場によるプラズマ閉じ込めに工夫を施した固体微粒子加速装置、さらには重力に依存しない新しい推進剤供給装置を設計・製作し、微粒子の加速性能を測定した。その結果、微粒子の帯電効率理論値に近い値が達成でき、推力値を従来に比べ1桁近く上昇させることができた。

研究成果の概要 (英文)：A new space propulsion system using stardust as propellant was proposed. It is expected that such system can reduce the propellant that we must bring from the earth. The new accelerator in which the solid micro particles that imitate stardust was charged through plasma and the new propellant supply module in which the supply was not depended by gravity were designed and produced, and the acceleration performance of micro particles was examined. As a result, a high charge efficiency that is almost the theoretical limit value is achieved, and one order higher value of thrust was obtained compared with the preceding study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究代表者の専門分野：宇宙工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：宇宙塵、宇宙推進、実験

1. 研究開始当初の背景

現在の宇宙推進システムの推進剤は地球から持参するため、将来想定される惑星へのミッションに際しては、大量の推進剤が必要となりペイロードが大きく制限される。このようなミッションにおいて、もし、ミッション途中で推進剤補給が可能になれば、地球か

ら持参する推進剤の量を大幅に増やすことができ、その分多くミッション機器搭載が可能となる。ミッション途中の推進剤補給ということでは、星間プラズマを利用する星間ラムジェットのアイディアがあるが、効果的な補給には現在の科学技術を超越した方法が必要とされる。これに対し、本研究では火星-木星

間の小惑星帯の豊富に存在し比較的容易に補給可能な推進剤として固体である宇宙塵に注目した。

2. 研究の目的

ミッション途上に存在する宇宙塵を推進剤にすることで地球から持参する推進剤の大幅な低減を図る新しい宇宙推進システムについて、宇宙塵を模擬した固体微粒子の加速と供給機構の実験を実施して、その実現の可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

プラズマ中に粒子を挿入した場合、イオンと電子の質量差から電子が先に粒子に到達し、粒子が負に帯電するという現象（図 1）を利用し、プラズマを介して宇宙塵を模擬した炭素の固体微粒子を帯電させ、静電加速を行って推力を得ることを考え、推進機を設計製作した。また、実運用を念頭に置いて重力を利用せずにプラズマ生成のためのアルゴンガスとともに微粒子を供給する推進剤供給装置を設計製作した。さらに、 μN 程度の微小推力が測定可能な推力測定装置を設計製作した。以上の装置を組み合わせ、固体微粒子の帯電特性と推力特性を評価した。

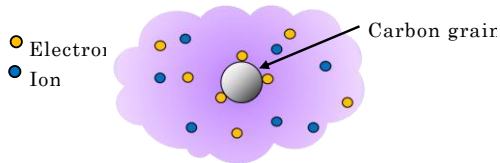


図 1 プラズマ中での固体微粒子の帯電。

(1) 推進機

推進機概念図を図 2 に示し、製作した推進機の写真を図 3 に示す。装置は耐熱材であるマコールに取り付けてあるフィラメントカソードとアノード、帯電室となる内径 120 mm、長さ 50 mm のパイレックス管で構成され、内部にプラズマが生成される。前述のように粒子の帯電にはプラズマを用いており、粒子には熱速度の大きな電子が付着するので負に帯電する^[2]。そのため、静電加速方式を採用した本装置の加速グリッドは正に印加してある。加速グリッドには直径 3 mm の孔が開いており、排出口 20×20 mm の開孔度は 34 % となっている。粒子は加速グリッドから 10 mm の位置に設けたアノード上部の推進剤供給口から投入され、プラズマ内で帯電された後、加速され排出される。なお、ネオジウム磁石と軟鉄板によって、磁気フィルターを排出口に形成しているため、電子はパイレックス管内部に閉じ込められている^[3]。

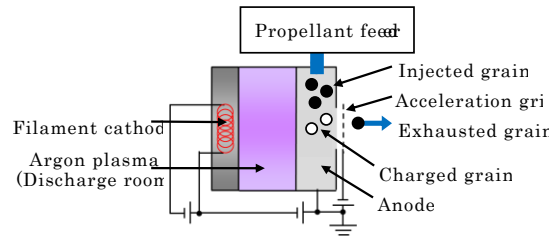


図 2 宇宙塵推進機の構成。

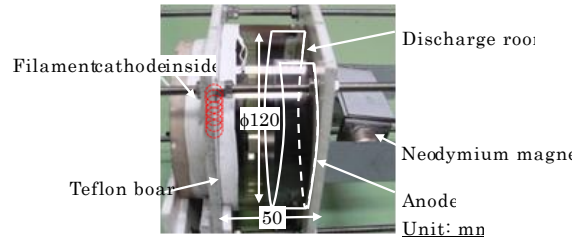


図 3 設計製作した宇宙塵推進機。

(2) 推進剤供給装置

実験に用いた推進剤供給装置のプロトタイプ（アクリルで製作）の写真と概略図を図 4 に示す。実機は粒子を入れるジュラルミン製の容器、DC - モーター、攪拌翼で構成される。小粒径粒子は前述の付着力が支配的なため、攪拌翼によって分離力を発生させている。粒子は攪拌翼によって攪拌され、容器内に充満する。その後、供給口から流入するアルゴンガスにより運搬され排出口を通り帯電室に到達する（図 5）。以上のように粒子がガスと共に運搬されることで重力に依存しない供給が可能となる。

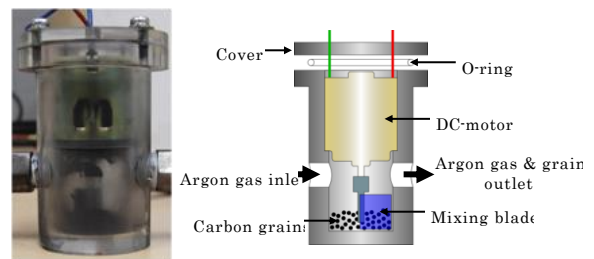


図 4 設計製作した推進剤供給装置。

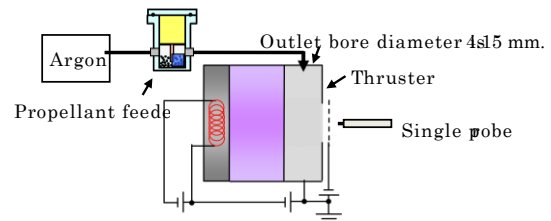


図 5 推進機と推進剤供給装置の構成。

(3) 性能評価試験方法

推進剤供給装置の供給流量性能について

は、攪拌翼を回転させるモーターへの電圧と微粒子流量の関係を一定時間作動前後の固体微粒子の質量差を計測することで求める。微粒子の帯電量については、図5のように単針プローブを使ってプラズマの密度と電子温度を測定したデータと、微粒子供給量から求めた推進機内の微粒子密度から理論値により推測する。推進機の推力は図6に示すような振り子式スラストスタンドで測定し、上記で求めた微粒子帯電量から導かれる理論推力と比較する。本スラストスタンドには推進機本体がアームによってナイフエッジ加工された梁に取り付けられている。また、アームには重心位置を支点近くに保つためのカウンターウェイトも取り付けられている。推力は振り子の変位をLED変位計の電気信号を通して測定することが可能になっている。キャリブレーションは質量が既知のおもりで微小推力を模擬して行った。また、配線類の摩擦が測定に大きく影響を及ぼすため、コイル状に巻いて床から浮かしてある⁵⁾。

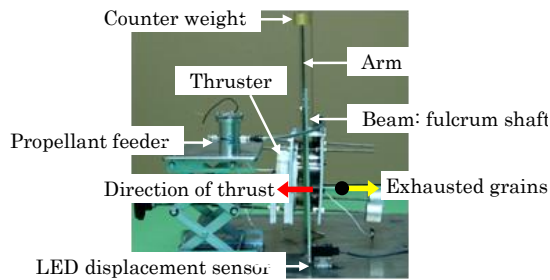


図6 推進機推力測定装置。

4. 研究成果

(1) 推進剤供給装置の性能

図7にモーター印加電圧と供給質量流量の関係を示す。これより印加電圧の増加に対して、2次曲線で供給質量流量も増加しており、攪拌翼のモーターへの印加電圧を変化させることで、供給微粒子の流量を調整できることが分かった。

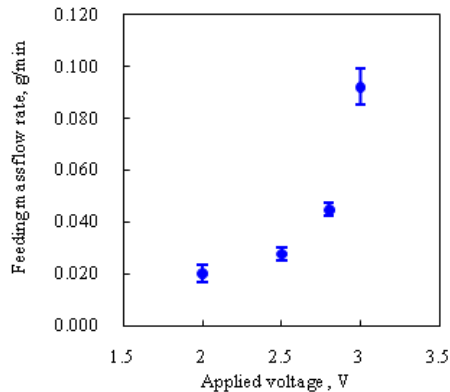


図7 固体微粒子供給量と攪拌翼モーター印加電圧の関係。

(2) 固体微粒子帯電量の見積

プローブ測定によって得られた推進機内のプラズマ密度電子温度状態における、微粒子へ流れ込む電子電流とイオン電流のつり合いから導かれるプラズマ中の微粒子付着電子数の理論値を微粒子数密度に対して図8示す。さらに表1には、固体微粒子供給流量から導かれる推進機内微粒子密度の推測値を示す。これらから、推進機内に供給された微粒子は、本実験の微粒子密度範囲 ($10^{10} \sim 10^{11} \text{m}^{-3}$) では、帯電量の理論限界値 (2×10^{16}) の50~100%帯電していると見積もられる。

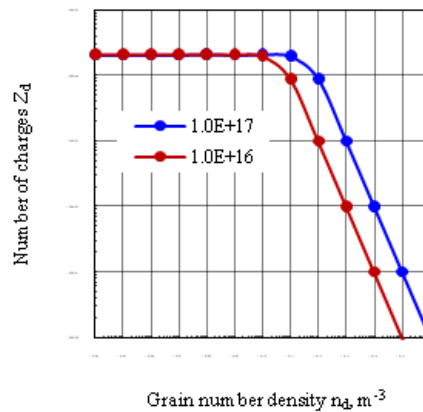


図8 本推進機における微粒子帯電量。

表1 推進機内微粒子密度。

Applied voltage, V	2.0	2.5	3.0
Feeding mass flow rate, g/min	0.020	0.028	0.092
Grain number density, m^{-3}	2×10^{10}	3×10^{10}	9×10^{10}

(3) 推力測定結果

スラストスタンドに推進機と推進剤供給装置を組み込み、推力測定を行った結果(加速電圧1kVの場合)を図9に示す。

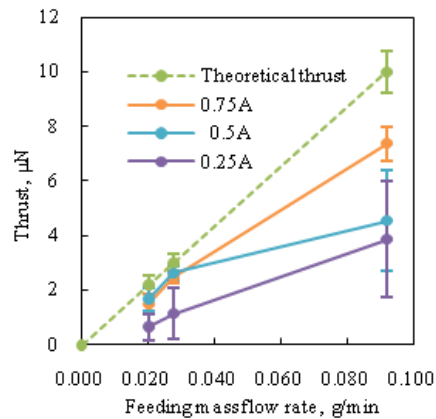


図9 本推進機の推力測定結果。

表中の理論推力 F は加速電圧 V_a , 粒子の質量 m_d , 質量流量 \dot{m}_d とした時に

$$F = \dot{m}_d \sqrt{\frac{2Z_d e V_a}{m_d}}$$

と表わされる。質量流量は表 4 の値, 付着電子数 Z_d は図 8 の帯電量の算出結果を用いた。本結果より, プラズマの放電電流が高い場合, ほぼ理論値に近い推力が得られたことがわかる。今回の実験で得られた最大推力は, 放電電流 0.75A, 加速電圧 1kV, 固体微粒子流量 0.9g/min において, 約 $7.3 \mu\text{N}$ で, このときの推進剤利用効率は 73% で, 以前の方式(自由落下方式の推進剤供給装置 + 接触帯電方式の推進機の組み合わせ)での性能(推力 $1.5 \mu\text{N}$, 推進剤利用効率 3%) に比べ, 大幅な性能改善が可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Ichinose D., Matsushita T., Matsui M., and Yamagiwa Y., “Plasma Charging and Acceleration of Micro-Particles for a Space Thruster”, Frontier of Applied Plasma Technology, 査読有, Vol.3, pp.120-122. (2010)
- ② Muto, K., Mizuno, Y., Inuzuka, H., Cao, Y. and Liu, Y., “Implementing Methods of PIC Simulation by a Special Purpose Computer System for Gravitational N-Body Problems”, Journal of Plasma and Fusion Research, 査読有, Vo.8, 00967-970. (2009)

[学会発表] (計 17 件)

- ① 石井克典, 松下太朗, 栗冠真平, 松井信, 山極芳樹, スターダスト推進機のための推進剤供給装置の開発, 平成 22 年度宇宙輸送シンポジウム, 2011.1.21, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原.
- ② Matsushita, T., Ishii, K., Matsui, M. and Yamagiwa, Y., “Research between Thrust and the Number of Charges in a Dusty Plasma Space Thruster, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including New Horizon Forum, 20011.1.7., Orlando World Center Marriott, Orlando, USA.
- ③ 松下太朗, 山極芳樹, 松井信, 石井克典, ダストプラズマ推進機に関する研究, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 20101,11.17, グランシップ, 静岡.

ほか 14 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山極 芳樹 (YAMAGIWA YOSHIKI)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号 : 30220255

(2) 研究分担者

犬塚 博 (INUZUKA HIROSHI)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号 : 80176411

國中 均 (KUNINAKA HITOSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・

宇宙科学研究所・教授

研究者番号 : 60234465

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :