

軌道間輸送機用JxBアークスラスターの基礎研究

三重野 哲

静岡大学創造科学技術大学院、422-8529 静岡市駿河区大谷

久永 容嵩

静岡大学理学部、422-8529 静岡市駿河区大谷

アブストラクト：将来の軌道間輸送機とし、太陽エネルギーを利用した宇宙滞在型・電気推進輸送機を検討している。この輸送機に用いる JxBアークスラスターの基礎研究成果を紹介する。固体+ガスの推進剤を用い、パルス放電により、小型・高性能なスラスターを目指している。

1 序論

これまで大きく立ちはだかっていた宇宙への壁が崩され、人類の広範な宇宙進出が始まろうとしている。その中で、高性能な通信設備、宇宙基地用の設備、月面基地用設備などの重量物を、いかに安く運ぶかが課題となっている。一方、地上400 kmの地球軌道では、大量のデブリが周回しており、人工衛星を用いたデブリ除去活動が急務となって来ている。ここでは、この課題を解決して行くため、重量物資を安価に運ぶ、宇宙滞在型・軌道間輸送機の基礎研究成果を目指した活動を行っている。図1に、その輸送法の概念図が示されている。地表から地球低軌道へは、化学推進のロケットを用いて貨物運び、そこで、宇宙滞在型輸送機に貨物を受け渡し、その後、この輸送機が静止軌道や月周回軌道へ貨物運ぶ形である。この輸送機のエネルギー源として、太陽エネルギーを使い、推進剤として、安価な材料（鉄、アルミ、炭素、ポリマーなど）を用いる高性能スラスターが、ここでの目標である。

電化スラスターとして、ホールスラスターやMPDアークスラスターが有名であるが、[1] 我々は、JxBアークジェット利用のスラスターを検討している。[2] 図2が、JxBアークジェットスラスターの概念図である。太陽パネルで得られた電気エネルギーをキャパシターに充電し、上下のレール型電極に供給し、トリガー機構により放電を起こす。電流と垂直方向に定常磁場を与え、推進剤を含むプラズマが、JxB方向に加速され、ノズルより噴出する。この方法は、基本的に低電圧・大電流のパルス放電であり、帯電が無い。また、推進剤として種々の気体・固体を利用可能であり、安価な、再利用の鉄、アルミ、炭素、ポリマーの使用が

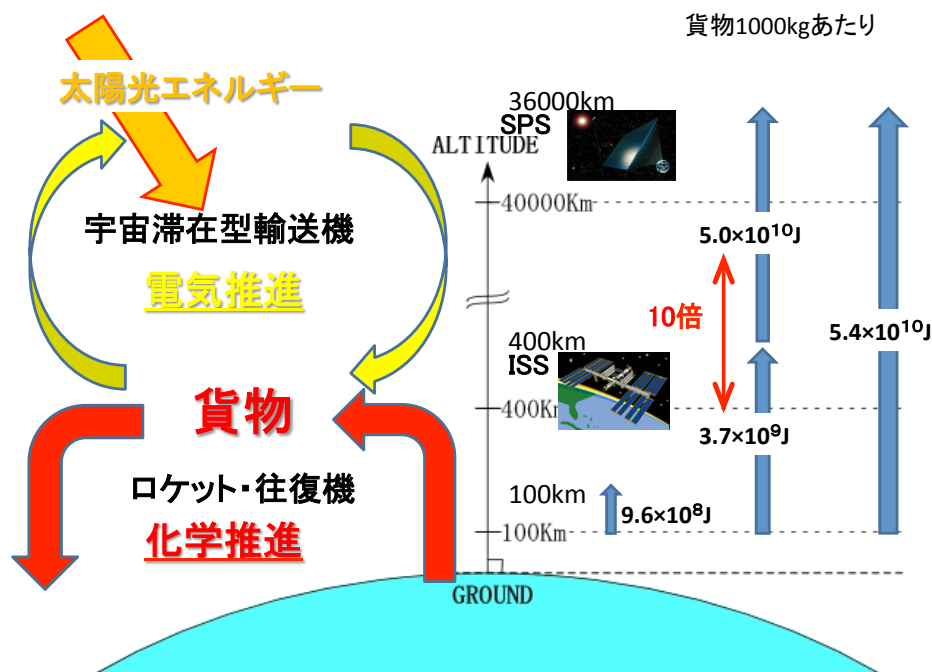


図1 宇宙滞在型・軌道間輸送機を用いて、貨物を高高度に運ぶ方法の概念図。

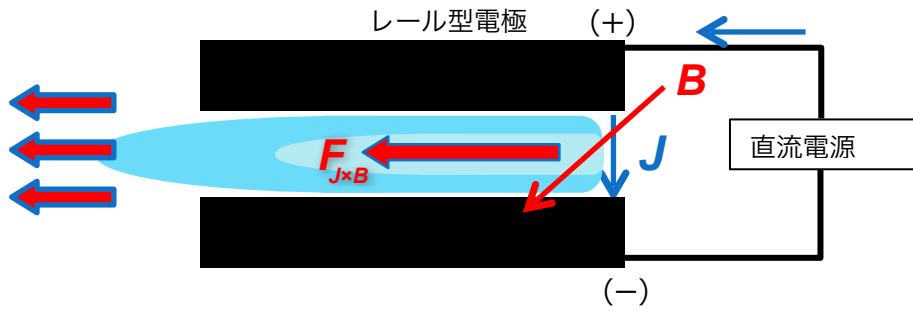


図2 JxBアークスラスターの概略図。

可能である。[3] ここでは、小型原型装置を用いた基礎実験であるが、研究により、ホールスラスターなどの他のスラスターとの性能比較を行って行きたい。

2 実験方法

図3は、実験に用いた装置の概略図と写真である。1896 x 470 x 365 mmの直方体型ステンレス製真空容器内に、スラスター電極、定常磁場用ヘルムホルツコイル ($B=0 \sim 50$ mT)、電子型ロードセル (IMADA社、ZTA-DPU)、原料ロッド導入装置が設置されている。装置は、ロータリーポンプ (ULVAC社、D-650D) で排気され、ピラニ真空計とマノメーター真空計でモニターされている。容器内は、アルゴンガスの充填により、 $p=0.2 \sim 20$ kPaに維持される。スラスター電極は、厚さ22 mmのグラファイト直方体電極で、約10 mmの間隔をあけて、上下に固定してある。上部電極の右側には、約8 mmの穴があり、上部から金属ワイヤ (ロッド) を導入することができる。このワイヤの接触が放電のトリガーとなる。ここでは、直径1 mmの鋼線を用いている。放電電流は、 $I_d=100 \sim 500$ A、放電電圧は、 $V_d=30 \sim 40$ V、放電時間は、 $T_d=0 \sim 10$ sである。推力測定には、直径約100 mmのMo円板とロードセルを用いた。また、プラズマ状態は、側面に置かれた高速カメラにより記録された。

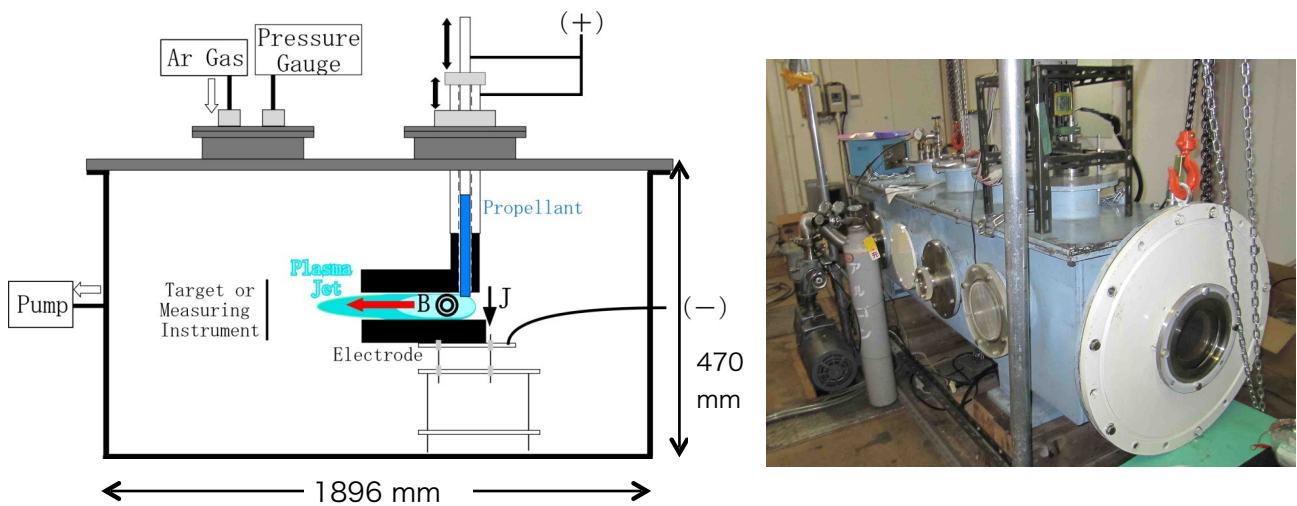


図3 実験装置の概略 (側面図) とその写真。

3 実験結果

3-1) プラズマジェットの様子

図4は、典型的なプラズマジェットを側面より記録した画像である。ここで、放電電流 $I_d=500$ A、定常磁場 $B=30$ mT、 $p(\text{Ar})=10$ kPaとなっている。鉄ワイヤの接触点弧により、確実に放電を開始できる。また、放電時間は、 $T_d=1 \sim 2$ sである。観測された動画より、放電に2つのモードがある。放電開始後、電極右側で発生したプラズマが勢いよく左側に吹き出し、Mo板に照射される (A-mode。約0.5 s続く、鉄とアルゴン



図4 側面から見た放電。左：A-mode (上下電極の間でのプラズマ噴出)。右：B-mode (電極端からのプラズマ噴出)。

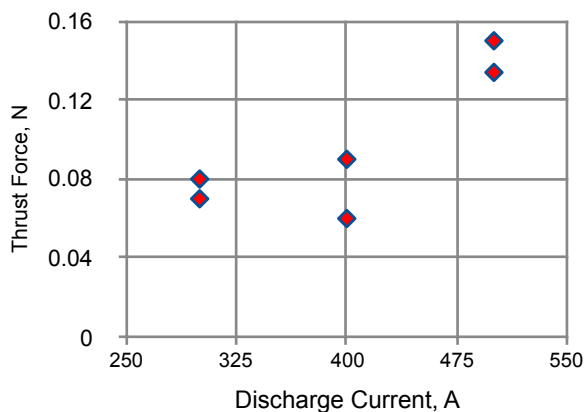


図5 放電電流と推力の関係。

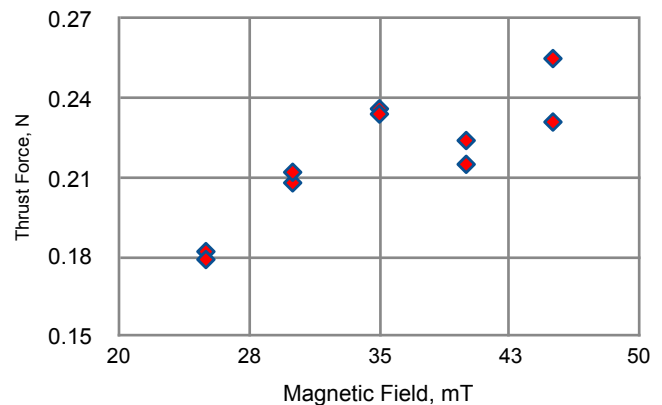


図6 印加磁場と推力の関係。

のプラズマ)。次に、プラズマが電極左端に移動し、端部からプラズマが噴出する (B-mode。0.5 ~ 2 s 続く。プラズマは扇状に広がり、Mo板の広い部分に照射される。アルゴンのプラズマと見られる)。両モードでは、似た値の推力が出ている。

3-2) 推力と放電電流の関係

$B=27.5$ mT, 電極間距離 $d_g=10$ mm, $p(\text{Ar})=10$ kPa, 1 mm ϕ 鉄線利用での、放電電流と推力の関係が図5に示される (2回づつ測定している)。放電電流と共に推力が上昇する傾向にある。

3-3) 推力と印加磁場の関係

放電電流 $I_d=500$ A, 電極間距離 $d_g=10$ mm, $p(\text{Ar})=10$ kPa, 1mm ϕ 鉄線利用の条件で、印加磁場と推力の関係が、図6に示される。ほぼ、印加磁場と共に推力が上昇している。

3-4) 推力と電極間距離の関係

放電電流 $I_d=500$ A, $B=27.5$ mT, $p(\text{Ar})=10$ kPa, 1mm ϕ 鉄線利用の条件で、電極間距離と推力の関係を測定した結果が図7である。 $d_g=10\sim 12$ mmの所で最適値がある。

3-5) 推力とArガス圧力の関係

放電電流 $I_d=500$ A, $B=27.5$ mT, 電極間距離 $d_g=10$ mm, 1mm ϕ 鉄線利用の条件でガス圧力と推力の関係を測定した。この場合、 $p=5\sim 20$ kPaでは、ほぼ一定の有効推力を得ることができたが、 $p<5$ kPaにすると、単調に推力が落ちてしまった。鉄の昇華だけでは、十分なプラズマガスを作ることができず、プラズマ噴出が弱くなると考えられる。今後、アルゴンガスと固体から発生するガスが、プラズマ噴出にどのような役割をするか詳細に調べる予定である。

3-6) 推進性能の概算

これまでの実験研究から、このJxBアークジェットスラスタでは、推力 ~ 0.3 N (~ 1000 N/m²)、比推力 ~ 1000 s、放電電流 500 A (1 s 程度のパルス)、消費電力 15 kW、推進剤 (1 mm ϕ の鉄線+Arガス) が得

られている。従来のホールスラスタやMPDスラスタに比べ、やや劣る値である。[4] 電極形状や磁場の増加により改善をする計画である。

3-7) カートリッジ型電極の試作

この放電は、繰り返しのパルス放電が可能であるが、徐々に上下の炭素電極が消耗し、絶縁板へのすす堆積が起きる。この寿命を克服するために、カートリッジ型電極を開発している。体積 160 cm³ の直方体で、炭素電極とセラミック絶縁板からできている。また、その周囲に磁場用永久磁石を取り付けることができる。

$I_d=500A$, $T_d\sim 1s$, $p(Ar)=10kPa$, $B=50mT$, 1mmφ鉄線を用い、繰り返しのパルス放電を行い、約0.21Nの推力を得ている。

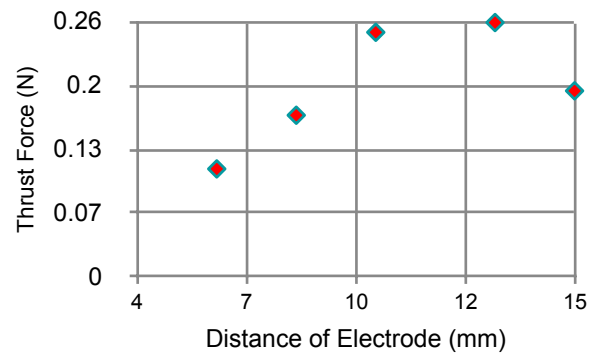


図7 電極間距離と推力の関係。

4 展望

今後、種々のR&Dによる改良が必要であるが、将来的な目標として、図8の様な利用を考えている。複数のスラスタアレイを双翼とする宇宙滞在型・軌道間輸送機である。太陽エネルギーは、翼内にあるキャパシターに蓄電され、充電されると、パルス放電に使われ、繰り返しの推力が得られる。輸送機の尾部につけられたロボットアームが、運搬物資を高軌道へと運ぶ。推進剤は、定期的に補充する必要がある。目標推力は、4N、放電パワー、100 kW、放電サイクル1 Hzである。

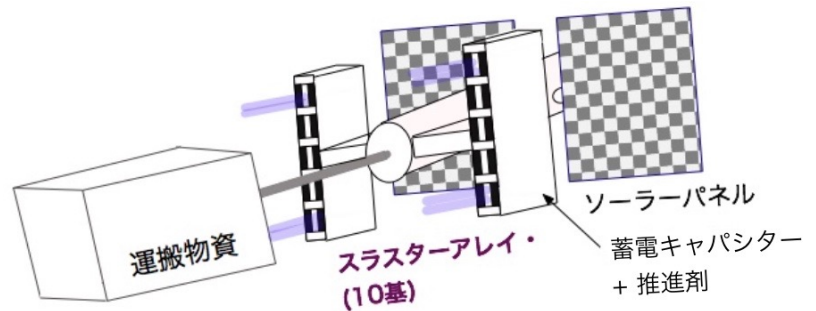


図8 このスラスタアレイを用いた軌道間輸送機の想像図。

5 まとめ

安価な軌道間輸送機として、太陽エネルギーと安価な推進剤の利用を検討している。そこで、 JxB アークジェット・スラスタを使うため、その基礎研究を行っている。鉄+Ar (アルミ+Ar, 炭素+Ar) 推進剤を用いた小型の装置にて、0.3 N程度の推力を得ている。そして、永久磁石とパルスガス入射を利用した、カートリッジ型推進装置を検討中である。今後、正確な性能測定を行い、固体のみで推力を出す方法を検討する。ホールスラスタやMHDスラスタとの多面的性能比較を行う予定である。

参考文献

- [1] 杵淵 紀世志ほか、JAXA資料, STEP-2016-011 (2016) 1。
- [2] R. G. Jahn, "Physics of Electric Propulsion", McGraw-Hill, New York, 1968.
- [3] 久永容嵩、静岡大学・大学院理学研究科・修士学位論文 (2015.03)。
- [4] 栗木恭一、荒川義博、「電気推進ロケット入門」(2003年、東京大学出版会)。

備考：2015年3月6日にJAXA宇宙科学研究所において開催された、第34回スペースエネルギーシンポジウムにて発表。

Basic study of JxB arc thruster to develop space transporters

Tetsu Mieno

Graduate School of Science & Technology, Shizuoka University,
Ooya, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan

Yoshitaka Hisanaga

Faculty of Science, Shizuoka University,
Ooya, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan

Abstract :

Now, new space transportation methods have been studied and developed in the world. We are interested in new transportation methods from Earth's low orbits to Earth's stationary orbits or to Moon's orbits, in which the solar energy and cheaper propellants could be used. As a first step, we are studying about JxB arc thrusters for this future transportation. In this design, the solar energy is obtained by flat panels on the transporter and stored in large capacitors. Then, arc discharge is ignited using this energy between two rail-type electrodes. By steady magnetic field made by magnets, the plasma is accelerated to the JxB direction and jetted out. The discharge voltage is low, and the pulsed-discharge current is high. There is no charging, and many kinds of propellants can be used like iron, aluminum, carbon, polymers.

We developed a prototype JxB arc thruster in Shizuoka University. In a box-type vacuum chamber (1896 x 470 x 365 mm), the thruster was set. The thruster is made of 2 graphite electrodes (22 mm thick) and 2 solenoid-type coils. A steel wire (1mm in diam.) is fed vertically to the upper electrode, and makes a trigger of the discharge. Usually, the discharge current $I_d=100-500$ A, the discharge voltage $V_d=30-40$ V, the discharge time $T_d=0-10$ s, the gap distance $d_g=10$ mm, argon gas pressure $p=10$ kPa. The thrust force is measured by a load cell (IMADA Co.) with a 100 mm diam. of Mo target, and the plasma is recorded by high-speed cameras.

We measured the thrust force as functions of discharge current, I_d , applied magnetic field, B , gap distance, d_g and argon pressure p . As a result, the maximum thrust force is around 0.25 N when $I_d=500$ A, $B=27.5$ mT, $p=10$ kPa, $d_g=10$ mm, $T_d\sim 1$ s. By feeding the iron wire, we could repeat the discharge.

By the repetition of the discharge, the graphite electrodes will be gradually eroded and the insulators will be damaged. So, we are developing new cartridge-type electrodes, which has 160 cm³ of volume, made of carbon electrodes and ceramic insulators. The magnetic field is provided by solid magnets, and an iron wire makes the triggering.

Though the thrust properties are still lower than those of the hole thrusters, we will be able to develop this thruster and show good performance near future. The target is thrust force of 4 N by an array of the thrusters, discharge power of 100 kW and the discharge cycle of 1 Hz using the solar energy.

Reference:

[1] R. G. Jahn, "Physics of Electric Propulsion", McGraw-Hill, New York, 1968.