

軌道間輸送機用固体推進剤 $J \times B$ アークジェット推進器の開発

久永 容嵩、三重野 哲（静岡大学大学院理学研究科）

1. 目的および背景

宇宙太陽光発電の実用化にあたって、発電衛星の建造に必要な大量の物資を、いかに安価に宇宙に運ぶかは重要な課題である。輸送コスト削減のための地上から地球低軌道までは、H-II B ロケットやスペースプレーンを利用して貨物を輸送し[1,2]、そこから地球低軌道に常駐する物資輸送機（太陽エネルギー駆動）を用いて静止軌道まで運ぶ輸送システムが構想されている。図1にはこの輸送システムのモデルを示している。そして、本研究ではこの物資輸送機用 $J \times B$ アークジェット推進器[3]の開発をテーマとしている。[4,5]このような輸送モデルの軌道滞在型輸送用として、宇宙太陽エネルギーと安価な推進剤の利用が不可欠である。

今回、 $J \times B$ アークジェット用実験装置を開発した ($J \times B$ - III)。その簡略化されたモデルが、図2に示されている。プラズマ化した推進剤が加速され、噴出する。約500Aのパルス変動放電において、プラズマジェットの噴出に成功した。推進剤としてグラファイト棒や鉄棒を用い、いずれも、蒸発、噴出の様子が観察された。

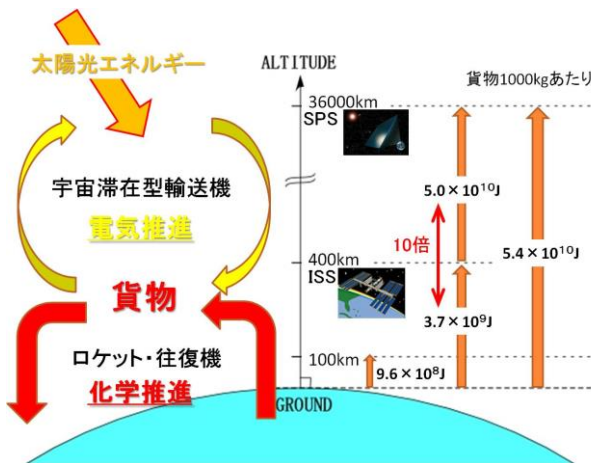


図1 静止軌道までの輸送システムのモデル。

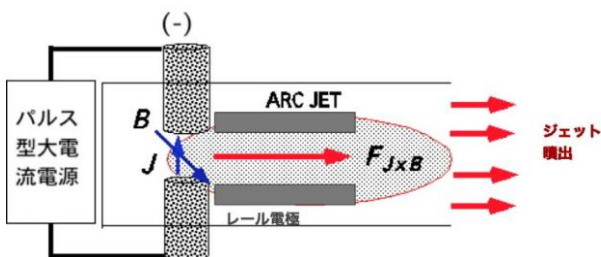


図2 $J \times B$ アークジェット推進の概略。

2. 実験装置と実験方法

静岡大学において開発された $J \times B$ アークジェット用実験装置 ($J \times B$ - III) の概略が図2に示される。装置の写真は、図3に示される。470×500×1900 mmの直方体型ステンレス鋼製真空容器内の右側に矩形ヘルムホルツ型磁場コイル (外径: 400 mm×250 mm×90 mm) が置かれ、その中に、垂直方向放電電極が置かれている。下側電極は、直径 50 mm の皿状炭素であり、上側電極は、推進剤供給を兼ねたロッド状で、直径 $d_r=5-20$ mm で金属推進剤の時は $\phi 20$ mm の炭素筒の中に金属ロッドを入れた。また、モーター駆動により上下に動かすことができる。

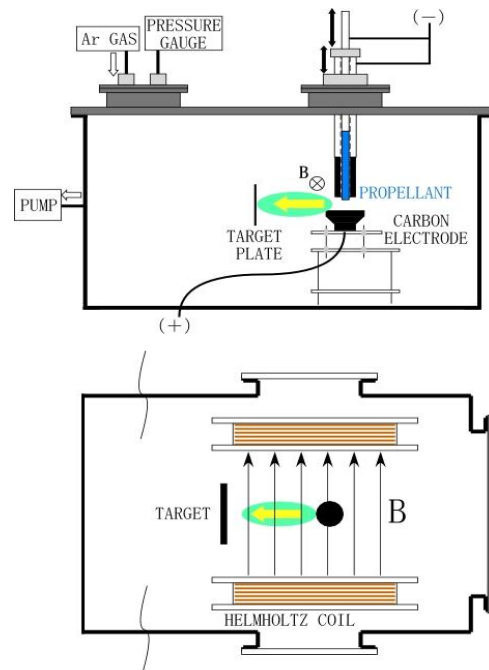


図3 $J \times B$ - III 装置の概略 (側面図と上面図)。



図4 $J \times B$ - III 装置の写真。

電極下流、約 10 cm の所に金属製ターゲット板が置かれている。

磁場電流は、 $I_c = 0 - 40 \text{ A}$ ($B_x = 0 - 14 \text{ mT}$)、アーク放電電源は、 $I_d = 0 - 500 \text{ A}$ 、放電電圧 $V_d = 20 - 40 \text{ V}$ 程度、パルス変調型である。変調周期は、1 s 程度、duty 比は、20 - 50% 程度である。放電用補助ガスとして Ar、0 - 13 kPa が用いられた。通常実験では、磁場強度 $B_y = 7 \text{ mT}$ 、放電時間 1 分程度である。

アークジェットを観測に、ハンディ型 CCD カメラ、高速度カメラが用いられた。

3. 実験結果

最初に、直径 6 mm のグラファイトロッド陽極を用いた基礎実験を行った。図 5 は、その時の放電電圧の磁場依存性（放電電流を変えた場合）である。磁

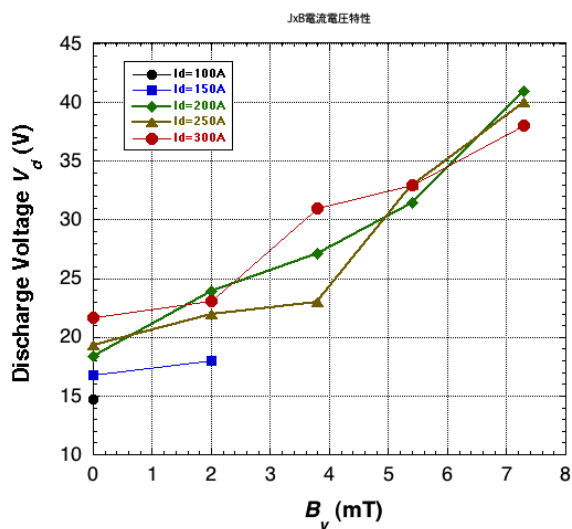


図 5 印加磁場に対する放電電圧 V_d の関係（放電電流 $I_d = 100 - 300 \text{ A}$ ）。炭素陽極、 $p(\text{Ar}) = 13 \text{ kPa}$ 。

場強度 $B_y = 0 - 7 \text{ mT}$ 、 $I_d = 200 - 300 \text{ A}$ 、 $p(\text{Ar}) = 13 \text{ kPa}$ にて安定な放電が持続している。しかし、 $I_d = 100 - 150 \text{ A}$ の範囲では、磁場印加によりプラズマ噴出が起き、消弧する。図 6 には、典型的なアークジェットの写真が示されている。ここに、定常放電、 $I_d = 300 \text{ A}$ 、 $B_y = 4 \text{ mT}$ 、 $p(\text{Ar}) = 13 \text{ kPa}$ である。安定してアークジェット噴出を持続する事ができた。この場合の炭素蒸発率は、6 mg/s 程度である。

次に直径 3 mm の鋼鉄ロッド陽極を用いた。図 7 は、準定常パルス放電、 $I_d = 500 \text{ A}$ 、 $B_y = 4 \text{ mT}$ 、 $p(\text{Ar}) = 10 \text{ kPa}$ の時の典型的なアークジェットの写真である。この場合、上部鉄推進剤が熱溶解で下部電極に落下する傾向が見られた。よって、鉄の場合は、下電極を陽極とし、下電極に落ちた溶融鉄を蒸発させて、ジェット噴出する形とした。この方法により、かな

り安定したパルスアークジェットを実現することができた。この場合の鉄蒸発率は、10 mg/s 程度である。

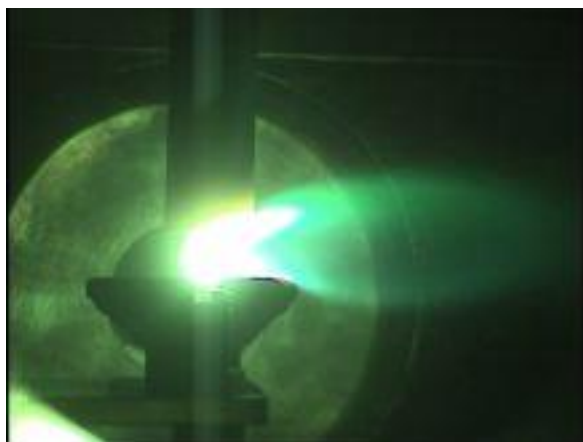


図 6 炭素推進剤の時のアークジェットの写真。 $I_d = 300 \text{ A}$ 、定常放電、 $B_y = 4 \text{ mT}$ 。



図 7 鉄推進剤の時のアークジェットの写真。 $I_d = 500 \text{ A}$ 、準定常放電、 $B_y = 4 \text{ mT}$ 。

通常の実験では $I_d = 100 - 500 \text{ A}$ などで準定常的に電流を変化させているが、偶発的に $I_d = 500 \text{ A}$ の放電がパルスのように開始する様子が観察された。図 8 にその際の写真が示されている。同条件下で電流を準定常的に変化させた場合の写真である図 9 と比較すると、パルスのように開始されたジェットのほうが激しいことが見て取れる。このことを踏まえ、イグナイターを用いたパルス放電実験を準備中である。

現在、推力測定装置を製作中であり、種々の放電条件でどのような推力特性が得られるか、試験実施予定である。



図 8 一度放電が途切れた後に、 $I_d=500A$ の放電がパルス的に開始した時のアークジェット写真。鉄推進剤、 $p(\text{Ar})=5\text{kPa}$ 、 $B_y=4\text{mT}$ 。



図 9 $I_d=100-500A$ でパルス変調させた時のアークジェット写真。図 8 との比較。鉄推進剤、 $p(\text{Ar})=5\text{kPa}$ 、 $B_y=4\text{mT}$ 。

4. まとめ

- 1) 宇宙太陽光発電の実現には安価な輸送用電気推進システムが必要。
- 2) これまで、ガス推進剤を用いた $J \times B$ 定常アークジェットの発生に成功している。[2]
- 3) 今回、大型の実験装置： $J \times B - III$ を開発し、実験を開始した。
- 4) グラファイト、鉄などの固体推進剤を用いたアークジェット実験を進めている。ビデオカメラ観察により、パルスアーク放電において、安定してアークジェットを発生することができた。
- 4) 種々の固体推進剤に対して、アーク放電の特性や推力の測定を実施していく予定である。

参考文献

- 1) S. Alan Stern : "The Low-Cost Ticket to Space", Scientific American, April, 2013 (日経サイエンス, 8号, 77-81, 2013年) .
- 2) 吉岡完治、早見均、松岡秀雄 : 「宇宙太陽光発電衛星のある地球と将来」、慶応義塾大学出版会、2009年
- 3) R. G. Jahn: Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, 1968, 257-316.
- 4) T. Mieno, T. Kihara, S. Wada: 「スペースタグボート用 $J \times B$ アークジェットエンジンの基礎研究」、第 27 回宇宙エネルギーシンポジウム講演集、JAXA、pp.122-125、2008.
- 5) 三重野哲ほか : 「太陽光利用軌道輸送機用アークジェットエンジンの基礎実験」、第 14 回 SPS シンポジウム講演集、東京、pp. 24-27、2011.

Abstract

The development of ***JxB*** Arc Jet Propeller Using Solid Propellants for orbit transporter
Yoshitaka Hisanaga, Tetsu Mieno (Grad. School of Sci., Shizuoka Univ.)

Dept. Physics, Shizuoka Univ.

Ooya, Suruga-ku, Shizuoka-shi, 422-8529 Japan

TEL & FAX: 81-54-238-4750

In order to realize space solar power satellites, the development of cheap transportation methods among the Earth orbits is necessary. For the orbit transporters, we are studying about the ***JxB*** arc jet thruster using solid propellants, which will be operated using space solar energy. Solid propellants are cheaper than rare gases and handier than gaseous propellants. In a proto-type plasma chamber, the pulse-modulated ***JxB*** arc jet has been successfully examined using carbon or iron propellant. The arc jet properties have been measured using this machine.

Presented at the Sixteenth SPS Symposium, 3-4 October, 2013