

DC アークジェットの高軽量化・長寿命化

○ 中田大将 (室蘭工業大学)、杵淵紀世志 (JAXA)、木下昌洋 (東京大・院)、國中均 (JAXA)

Light-weight, Long-life DC arcjet

Daisuke Nakata (Muroran Institute of Technology), Kiyoshi Kinefuchi (JAXA),

Masahiro Kinoshita (The University of Tokyo) and Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Key Words: DC arcjet, cathode, thermal analysis, hydrogen

Abstract

With light-weight solar panel, it is anticipated that arcjets enables us fast and efficient interplanetary cargo transportation. Next generation arcjets should have lighter-weight design and prolonged lifetime. In this paper, some good solutions are proposed. It is shown that the radiator mass can be drastically reduced by the effective use of propellant as a coolant at the lower temperature region on the radiator. Resulting thruster weight of 1.3 kg including the radiator is possible assuming 2.1 kW of anode heat load at 150 A of the discharge current. For the lifetime issue, replaceable cathode system is proposed. The trade-off study is necessary between the total lifetime and the system weight.

1. 背景

宇宙用太陽電池の革新は目覚ましく、薄膜太陽電池¹⁾や集光型太陽電池²⁾により数kg/kW程度の比重量を有する超軽量型太陽電池の実用化もそう遠くはないと考えられている。電気推進機の重量はこれまで電源重量に対して無視できるレベルであったため鑑みてこれらできなかったが、今後は性能を総合的に評価する指標として注目される。各国では直流電源装置やスラスタヘッドの高軽量化に本格的に取り組んでいる。

アークジェットは現在軌道上にある電気推進の約2割を占めている³⁾が、これは2トン級以下の衛星においてヒドラジン化学スラスタとのタンク共用メリットがあるためであり、純粋な電気推進としては推力電力比と比推力の積に相当する推進効率が低く、寿命も短い(～1500時間程度)ことからホールスラスタ等に対して後塵を拝している。

このような背景の中、著者らは大電力電気推進による月・惑星カーゴ輸送においてもアークジェットの本質的高軽量をさらに追及することで、ホールスラスタと同等かそれ以上のミッション適合性を有する候補となる可能性について指摘している。アークジェット/MPDスラスタとも小さな放電室に数百kW以上のパワを投入することが可能であるが、そのサイジングは熱設計によって定まる。また、寿命については半世紀にわたる研究開発の結果、プラズマ物理の観点からの大幅な向上は難しいことが分かって

いるが、陰極交換機構を用意することで月・火星ミッションに必要な程度の寿命を確保するシステムが可能であることを示す。

2. 熱解析

これまでの経緯⁴⁾⁵⁾において、水冷15kWアークジェットを用いた実機試験およびMSC NASTRAN2012を用いたFEM解析から下記の点を確認している。

A1: 水冷アークジェット(図1)により陽極への熱流束を実験的に取得した(図2)。熱流束は放電電力ではなく放電電流に比例し、 $Q_{anode} = 14J$ の関係にある。

A2: FEM解析により、メッシュ依存性その他を考慮し約100K程度の誤差で温度分布を予測できる。

A3: 水冷アークジェットにより測定された熱入力を参考に、重量最適化された放射冷却アークジェットを設計しFEM解析で熱的なFeasibilityを確認した。その結果、150A級アークジェットを2600gの重量で設計可能である(図3～6)。このうち、後部ラジエタ重量が約半分を占める。

A4: 後部ラジエタにおいて推進剤による convection cooling を適用すると、ラジエタ重量を半分程度以下にすることが可能である(図7, 8)。

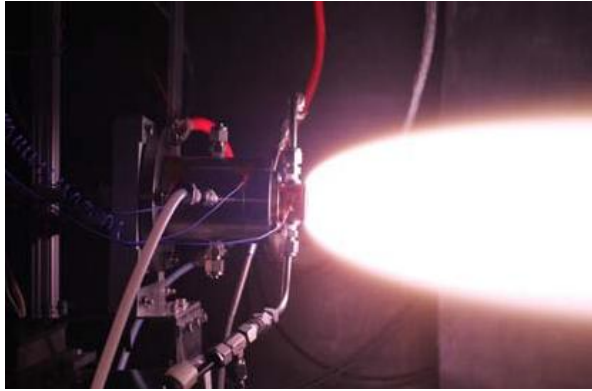


図 1 : JAXA 水冷アークジェット

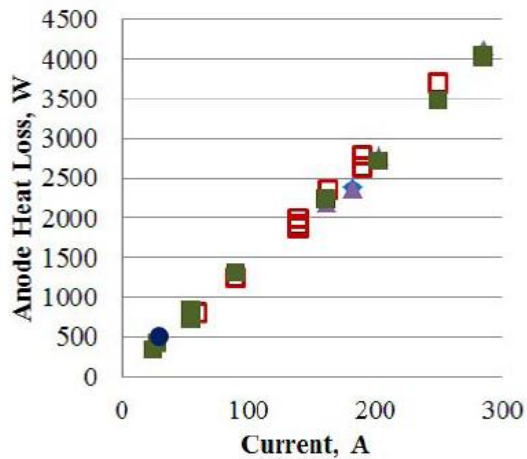


図 2 : 流量・陰極材料を様々に変えた場合の陽極への熱入力 (水冷アークジェットの水冷温度上昇幅から算定)。おおよそ $Q_{anode} = 14 J$ の関係にある。

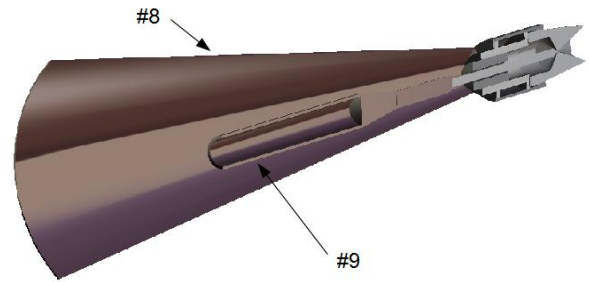


図 4 : 軽量の放射冷却アークジェットの FEM 解析モデル全体図。銅製ラジエタの末端温度は 350 K 以下となっており、ここで電源に接続される。

表 1 : 放射冷却アークジェットの各部重量

#	Name	Material	Mass, g
#1	Anode	Tungsten	720
#2	Cathode	Thoriated Tungsten	70
#3	Housing	Molybdenum	219
#4	Insulator	Boron Nitride	88
#5	Base Plate	Molybdenum	14
#6	Cathode Base	Copper	137
#7	Cathode Sleeve	Molybdenum	84
#8	Anode Radiator	Copper	914
#9	Cathode Radiator	Copper	364
	Total		2612

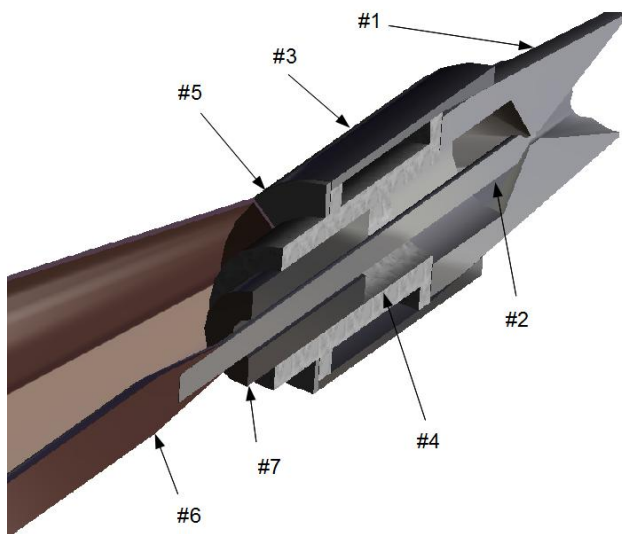


図 3 : 軽量の放射冷却アークジェットの FEM 解析モデル。放電室内部の代表的な寸法は水冷アークジェット実機と同じである。

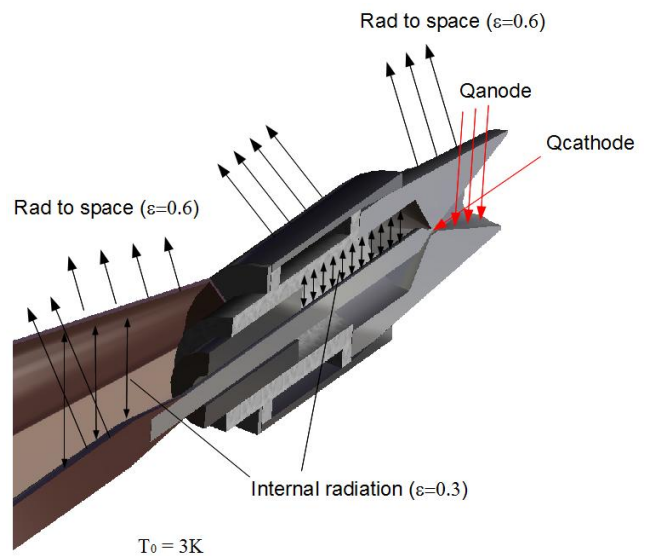


図 5 : 熱解析の諸条件。150 A の放電を想定し、 Q_{anode} は 2100 W、 $Q_{cathode}$ は 150 W を計上した。

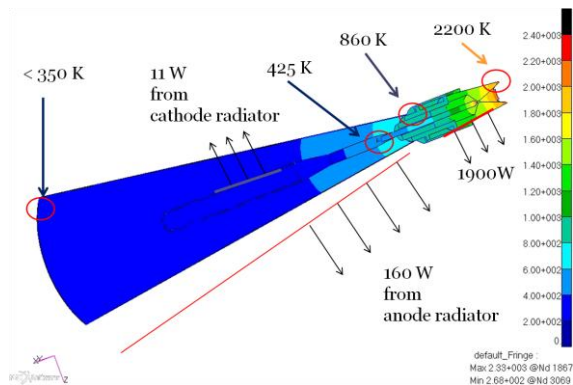


図 6：設計された放射冷却アークジェットの熱解析

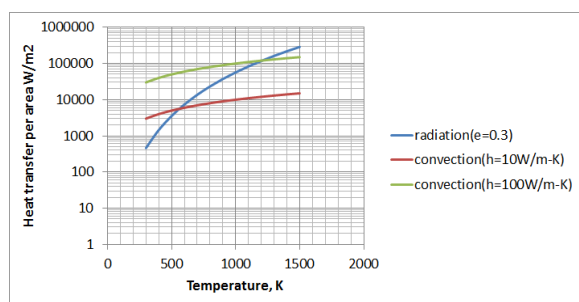


図 7：温度差に対する熱輸送量の比較。温度差の 4 乗に比例する放射冷却は 600 K 上の温度差がある場合に $h=10\text{W/m-K}$ の convection cooling よりも多くの熱を同一面積から捨てられる。

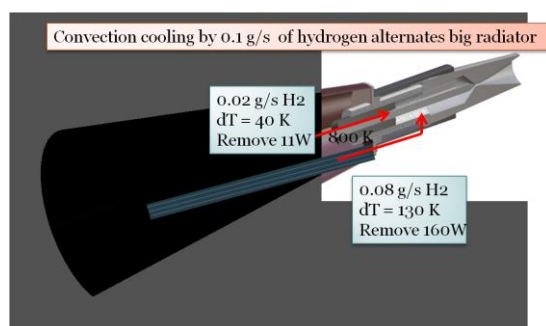


図 8：水素を推進剤として convection cooling することによりラジエタの大半を削減可能。

Unknown な事項としては下記の点が挙げられる。

B1：陰極の熱入力モデル

B2：高温材料物性、特に放射率

著者らはアーク消弧後の陰極先端温度（正確には先端から 3 mm 手前の温度）を放射温度計で測定し、温度の減衰曲線とフィッティングを行うことにより陰極への熱入力量および放射率を推定した。詳細のセッティングは別稿⁶⁾に記す。

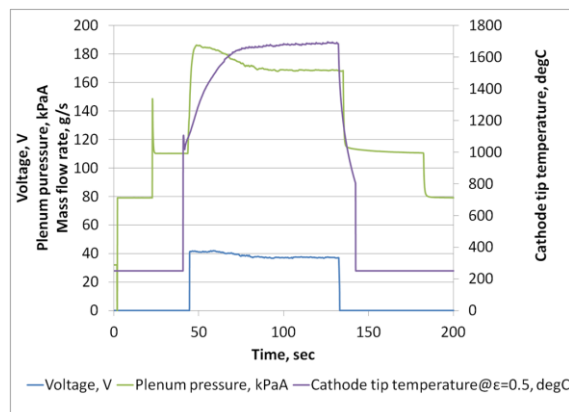


図 9：180A ロッド陰極 電極間距離 2 mm、窒素 0.1 g/s における陰極先端温度の測定例。

表 2：陰極への熱入力、陰極表面の放射率をパラメータとした場合のカソード先端（チップから 3 mm 手前）温度の比較

	Q=90 W	Q=120W	Q=180W	Exp.
$\epsilon = 0.1$	1930 K	2430 K	3230 K	2460 K
$\epsilon = 0.3$	1760 K	2130 K	2720 K	2092 K
$\epsilon = 0.5$	1660 K	1980 K	2490 K	1960 K
$\epsilon = 0.7$	1580 K	1880 K	2350 K	1880 K

表 2 では解析において陰極への熱入力を $Q=90, 120, 180\text{W}$ 、また $\epsilon=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ と仮定した場合の FEM 解析によって得られた温度、また放射温度計の出力に対して $\epsilon=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ を適用した場合の実験値を併記している。これによると、いずれの放射率でも $Q=120\text{ W}$ の時が実験とよく一致しており、この程度の熱入力であったと推定することが出来る。陰極において熱入力が電流に比例するか否かは定かでないが、 W/A の単位で記載するならば 0.66 W/A と記すことが可能である。田原ら⁷⁾による陰極先端温度の計測例によれば、陰極先端温度の電流依存性は低いため、陰極への熱入力を W/A で整理すると、低電流放電であるほど大きな値となる、即ち陰極熱入力は電流に対して線形ではないことを示唆している。

放射率については図 10 に示す通りフィッティングを行った結果、 $\epsilon=0.3$ から 0.7 の間であると考えられる。放射温度計の測定誤差に埋もれるため、この間での特定には今後さらに精査が必要である。

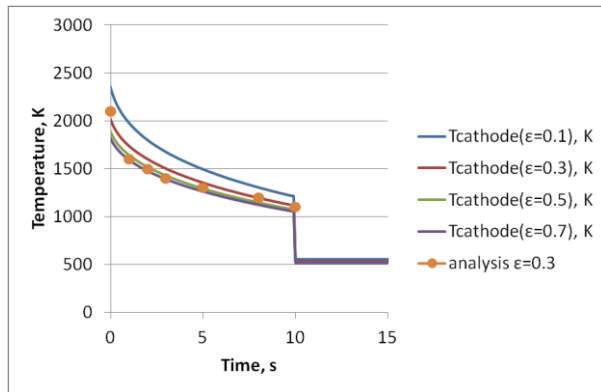


図 10：アーク消弧後の陰極先端温度に対するフィッティングによる放射率の推定。 $\epsilon = 0.3$ から 0.7 の間であると推定できる。

3. 陰極寿命

アークジェットの寿命を決定する要因としては陰極先端の損耗が支配的である。一般に鉛筆状の先端はアーク放電の安定を保つ上で重要であり、電極間距離の増大による放電電圧の増大と放電安定性の低下といった観点から End of Life が定義される。

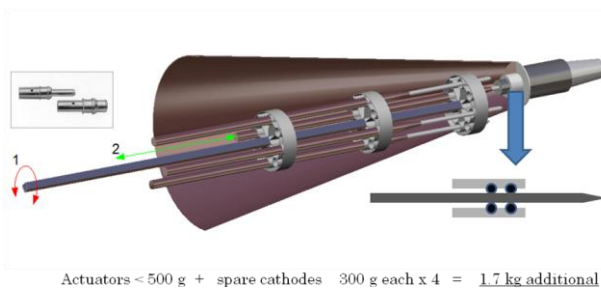


図 11：リボルバ式陰極交換機構

放電プラズマ物理の観点から陰極寿命の大幅な増大は見込めないため、システムの観点から図 11 に示すような陰極交換機構を提案する。アークジェットでは簡素な構造が幸いして、イオンエンジンのグリッド、ホールスラストの内壁などと異なり、陰極を部分的に交換する機構の採用は現実的である。キーとなる技術課題は 1) 信頼性の高い着脱式電流コネクタ、2) 高温部での長期シール性確保、3) メカニカル機構 である。1) についてはマルチコンタクト社のコネクタなどを採用し、実証する予定である。2) についてはデュボン社カルレッツ O リングなどを採用し、実証予定である（ $\sim 600\text{K}$ 程度まで対応可能）。3) についてはウォームギアを用いた駆

動機構により、シンプルでかつ大きなトルクを達成できる。設計上の重量はアクチュエーターが 500 g で交換用陰極は 1 本 300 g となる。陰極重量がそれなりにあるため、あまり多くのスペアカソードを搭載することは、熱設計による軽量化と相反する。多くとも 4 本程度のスペアカソードが妥当である。

1 本あたりの寿命については現行の $1000\text{-}1500\text{ h}$ から 2000 h 程度となれば、4 本のカソードで 1 年程度の実稼働時間を確保でき、月・火星へのカーゴ輸送に対応できる。ホローカソードを用いた寿命延伸策の可能性についても取り組んでいる⁷⁾。

4. まとめ

以下の事項を提言し、まとめとする。

- ・アークジェットは本質的に比重量が小さいため、軽量の太陽電池が実現した暁には月・惑星間カーゴ輸送を担う候補として有力である。
- ・熱設計により 0.17 kg/kW 程度の比重量を持つアークジェットが可能であり、推進剤による convection cooling を期待するとさらに半分程度の比重量が可能である。
- ・実験により陰極の熱入力を明らかにした。 180 A の放電電流において約 120 W の熱入力があると考えられる。
- ・陰極交換機構により寿命を延伸できるが、重量メリットを損なわないためには 4 本程度のスペア陰極が妥当な本数である。これ以上のスペアを有することは重量メリットを損なう。

参考文献

- [1] Osamu, M. et. Al.: Outer Planetary Exploration using Solar Power Sail, JSASS-2013-1082(2013)
- [2] Brandhorst, H. W.: Ultralight, Compact, Deployable, High Performance Solar Concentrator Array for Lunar Surface Power, AIAA-2006-4104 (2006)
- [3] Hoskins, et al., 30 Years of Electric Propulsion Flight Experience at Aerojet Rocketdyne, IEPC 2013-439

- [4] Nakata et. al., Technical Challenges for Advanced Arcjets, ISTS 2013o109
- [5] Nakata et. al., Development of Long-life Lightweight Arcjets, IEPC 2013-292
- [6] 木下 他、DC アークジェットの高電圧カソード適用に関する研究 平成25年度宇宙輸送シンポジウム STEP2013-039, 2013
- [7] Tahara et al., Experimental and numerical studies of a 10 kW water-cooled arcjet thruster , IEPC 91-015, 1991