

1D06 新型全固体イオンエンジンを有する 小型衛星周りの金属推進剤挙動のDSMC解析

○渡邊保真，鳥居未早輝（豊田工業大学），大幸祐介（名古屋工業大学）

DSMC Analysis of Metal Propellant around Small Satellite with Solid-state Ion Engine

Yasumasa Watanabe, Misaki Torii (Toyota Technological Institute) and Yusuke Daiko (Nagoya Institute of Technology)

Key Words : DSMC, Rarefied flow, Ion engine

Abstract

This study performs preliminary numerical simulation of rarefied metal propellant flowfield around 3U-size small satellite equipped with novel solid-state ion thruster. Newly proposed ion thruster comprises Ag metal propellant processed with ion conductive glass material layer and grid electrodes to discharge accelerated Ag ions into space. Rarefied silver flow was simulated with Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method to clarify propellant behavior around satellite. Silver concentration estimated from the analysis suggest moderate accumulation on one of the satellite surfaces and also suggests negligible impact on side walls with solar cells.

1. はじめに

小型衛星を利用した宇宙開発および宇宙利用への需要が近年急速に増大している。従来の人口衛星では、信頼性や寿命を確保する上で大型のものとなることは避けられなかったが、近年ではデバイスの信頼性や運用期間についてある程度妥協することで、小型、軽量、廉価な人工衛星が着目されている。2003年ごろに最初の超小型衛星が打ち上げられて以降、急速に商業衛星の打ち上げと運用が活発化している。

人工衛星に作用する空気抵抗を打ち消すことで運用期間の長期化を行い、あるいは、軌道を変更して運用の自由度を確保するためには、推進器を搭載することが不可欠となる。一方で、小型衛星では、サイズと重量に対する制約が厳しいことから、従来の化学燃料を用いたエンジンの搭載は困難である。そのため小型衛星や小型宇宙機では、イオンエンジンを搭載する衛星が増加しており、商用のイオンエンジンユニットが販売されるなど利用のハードルも低下してきており、推進剤としてXeガスをイオン化して噴射することで推力を得ることが可能となっている。はやぶさで使用されたようなXeガス、すなわち、高圧ガスを推進剤として搭載したイオンエンジンでは、Xe推進剤を保持するため、高圧ガスタンクを搭載する必要がある。このため、さらに小さな超小型衛星では、標準的な3U規格サイズのもので総重量4kgとなる制約から、気体を推進剤とするイオンエンジンも搭載が困難である。そこで、筆者らはエンジンの小型化と推進剤管理の簡易化を目指し、固体金属を直接イオンに変換して放射することのできるイオン伝導性

ガラスに着目し、これを用いた新型の全固体イオンエンジンを提案する。大幸らの開発した銀イオン伝導性ガラス[1]では、固体銀とイオン伝導性ガラスを接合し、ガラスを局所的に先鋭化した上で電圧を印加することで大気中から真空環境下に至るまで銀イオンを放射することができる。提案するイオンエンジンでは、図1の概要図の通り、イオン伝導性ガラスの背面に固体銀を接合し、正面に引き抜き電極を配置することで銀のイオン化と加速を同時に実施し推進器として利用するものである。

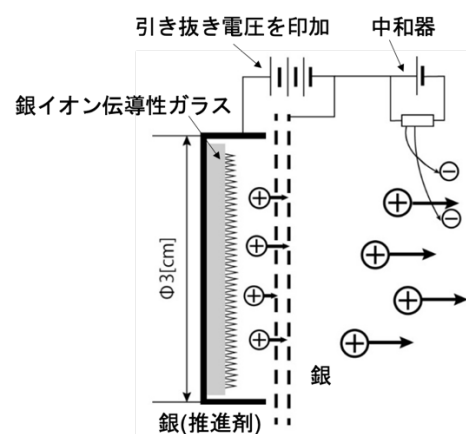


図1 提案する新型全固体イオンエンジンの概要

本イオンエンジンでは、気体あるいは液体の推進剤を使用しないことから推進剤タンク自体を削減することができ、推進器構造の大幅な簡素化と軽量化を同時に実現可能であり、毒性のある推進剤でもな

いため、開発・製造時の管理も大幅に簡略化できる。本推進器について、使用するガラスの性質を基に理論推力等を推算すると[2]、直径30mmのイオン伝導性ガラスに対して、30 μ m間隔で磨りガラス状にスパイクを配置することで、1mN以上の推力を実現できることになる。3Uサイズの4kg超小型衛星で1mN推力を3分間噴射すると、地球低軌道から軌道高度にして100m弱の遷移を実現可能であり実用レベルである。また、月探査機EQUULEUSのエンジンである水レジストジェットエンジンAQUARIUSでは月への軌道変更を4mNクラスの推力で実現しており、深宇宙探査を行う上でも十分なものとなる。

宇宙空間に放射された銀イオン・銀原子は、周囲の高真空環境により大きく拡散する振る舞いを示す。特に、提案する銀イオンエンジンでは、従来のXeイオンエンジンと異なり金属を推進剤とすることから、拡散した金属粒子が衛星本体に付着する懸念がある。そのため、本研究では、推進器から噴射される銀粒子が衛星本体に与える影響を評価すべく銀粒子の噴射後の流体挙動について解明することを目的とする。

2. 数値解析手法

銀イオン・銀粒子の3Uサイズ人工衛星周りでの挙動を解明するため、数値解析を行った。提案する ϕ 30 mm推進器の出口付近における銀の状態量からクヌーセン数Kn

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 P L}$$

を推算する。ここで、 λ は平均自由行程、Lは代表長さ、 k_B はボルツマン定数、Tは温度、 σ は粒子直径、Pは全圧である。想定する運用条件下においてKn数を推算すると、 $Kn \approx 26.5 > 1$ となるため、銀イオンエンジン噴射口付近の流れは希薄気体流れであると考えられる。そのため、流れの解析手法としてDirect Simulation Monte Carlo Method (DSMC法)[3,4]を用いて流れ場のシミュレーションを行った。過去のイオンエンジン研究においては、MUSES-CはやぶさのイオンエンジンからのXe粒子解析[5]にもDSMC法が使用されており、解析手法の選択としては妥当であると考えられる。

解析では、図2に示すような小型衛星とその天板に設置された ϕ 30銀イオンエンジンを想定し、銀イオン・銀粒子の振る舞いについて調べた。矩形側面からなる小型人工衛星の対称性から、X-Y面、X-Z面で切り分けた4分の1の空間に対して解析を実施した。銀イオンエンジンの噴射口から単位時間あたりに放射される銀粒子の数は 5.58×10^{18} /sであるので、代表粒子数を 5.48×10^9 個としてDSMC解析を実施した。また、解析対象の銀粒子は、中和器により中

性となった銀粒子であるため、人工衛星壁面に衝突した際に付着する可能性がある。そのため、壁面反射のモデルとして、通常のDSMC解析[3,4]で用いられる衝突反射モデルを適用し、衝突後473[K]ボルツマン分布に従う速度でランダム方向に放出するとして解析を行った場合と、壁面衝突時に速度0となって壁面に積層してゆく衝突付着モデルの双方で解析を行い比較した。

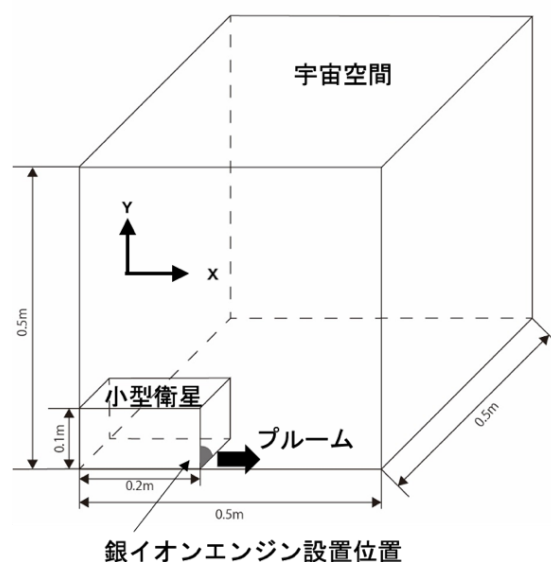


図2 解析設定

粒子の統計処理に用いる背景格子は、図2の解析対象となる空間に対し、各軸方向200セルに分割して計算を行った。

3. 解析結果

X-Y対象面内における粒子数密度の解析結果の一例を図3に示す。

図3(a)は壁面反射モデルを衝突反射モデルとした場合のAg数密度分布であり、図3(b)は壁面反射モデルを衝突付着モデルとした場合のAg数密度分布である。人工衛星天板が存在する $X = 0.2$ mより右側での粒子数密度分布はほぼ同様であるが、 $Y > 0.1$ m, $X < 0.2$ mの衛星側面に相当する位置では、天板で銀粒子が積層しない衝突反射モデルにおいて大きく-X方向に広がっているのに対し、天板で銀粒子が積層する衝突付着モデルでは-X方向への広がり度合いは小さくなっている。これは、天板での付着により、衝突反射モデルでは側面に回り込んでいた一部の粒子が付着により固定されたため、粒子同士の衝突が少なくなり側面への回り込みが弱くなったためであると考えられる。

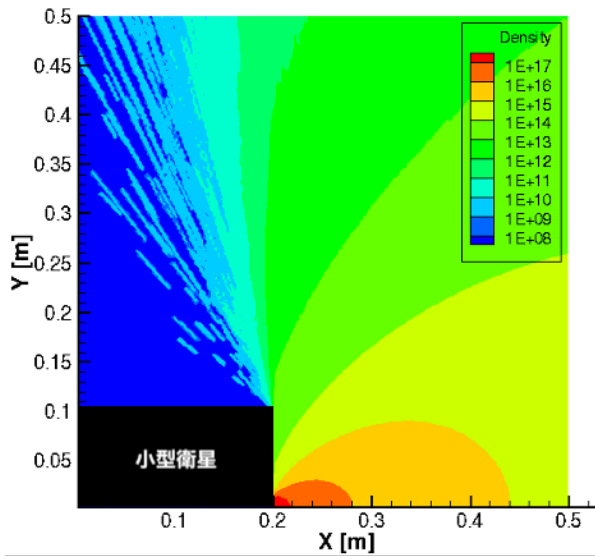


図 3 (a) 衝突反射モデルによるAg数密度分布

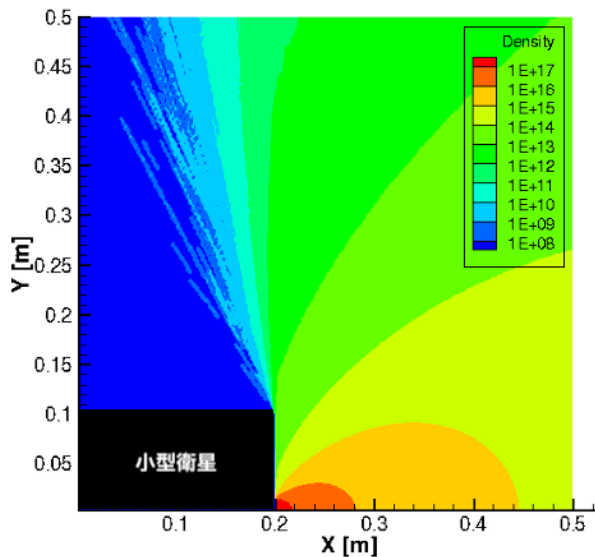


図 3 (b) 衝突付着モデルによるAg数密度分布

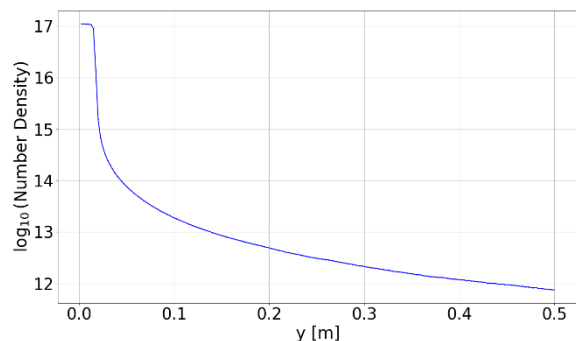


図 4 $x=0.2$ における天板付近から側面方向での銀粒子数密度分布

衝突付着モデルにおける $x=0.2$ 上での数密度分布をプロットすると、図 4 の通りとなる。ブルーム

中心の $10^{17}/\text{m}^3$ の粒子数密度から、+Y方向に進むにつれて、粒子数密度が大きく減少し、 $Y=0.5$ では $5 \times 10^{11}/\text{m}^3$ となり、おおよそ5桁減少していることがわかる。

図 3, 4 で見られる+Y方向にかけての急速な数密度低下は、先行研究であるMUSES-Cはやぶさのイオンエンジン周りのXe粒子DSMC解析[5]でも観察されており、本研究での結果と定性的に一致する。そのため、解析結果についてもある程度の妥当性があると考えられる。

衛星側面への粒子の回り込みは、過去のXeイオンエンジンや、従来から使用される宇宙用姿勢制御ノズル周りでも見られた現象である。本研究で提案する銀イオンエンジンでは、推進剤が金属であるため回り込んだ銀イオンが太陽電池パネルに付着すると大幅な発電効率低下を引き起こす可能性がある。図 3 の解析により、衛星側面に希薄な回り込みがあるので、この領域にソーラーセルを配置しないよう人工衛星を設計する必要があることがわかる。

さらに、粒子数密度が比較的高い天板部において、DSMC解析の壁面条件を衝突付着モデルとした場合での、 $X=0.2$ 位置における衛星天板表面上での単位時間、単位面積あたりの銀粒子付着速度を解析した。解析結果を図 5 に示す。

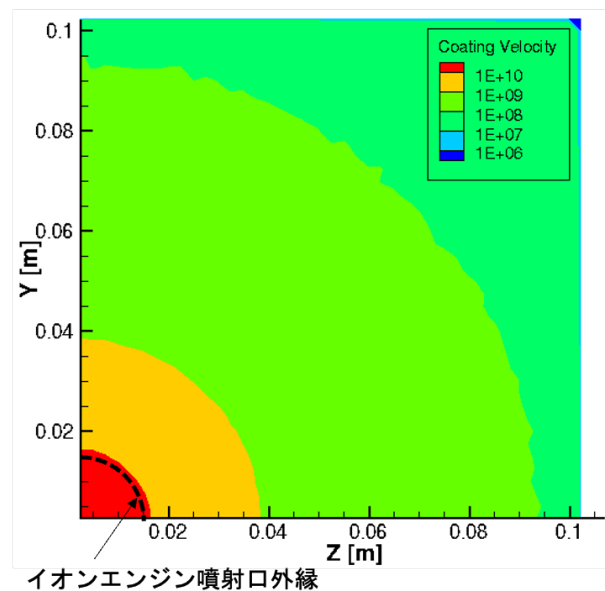


図 5 イオンエンジンを設置した小型衛星天板面上における単位時間、単位面積あたりの銀粒子付着数速度の分布

小型衛星の天板、すなわち、銀イオンエンジン設置面における粒子の付着が確認できる。イオンエンジン噴射口外縁部付近では、衝突粒子数が比較的多

いため、単位時間、単位面積あたりの付着速度が 10^{10} / $\text{m}^2\cdot\text{s}$ 程度であった。銀イオン推進器から離れるに従い付着速度は急速に減少し、天板の角では3桁以上低い付着速度となることがわかる。提案するエンジンはパルス的に、必要な時間だけ用いるため、連続運転する場合に比べると、天板での積層銀粒子数は少なくなる。一方で、運転時間数によっては噴射口付近に設置した観測機器等が、銀の積層・コーティングによって影響を受ける可能性があるため、実際に本推進器を搭載する際には詳細に積層速度を評価する必要がある。

4. まとめ

新規提案を行う全固体銀イオン推進器による放出銀粒子の、小型衛星周囲での振る舞いを解明するため、DSMC法による解析を実施した。放出される粒子の分布は非常に拡散的であり、ブルームの逆方向にも拡散する粒子が一定数存在する。これは過去のXeイオンエンジンでの知見とも合致するものであった。この解析により、人工衛星天板での銀イオン積層速度、及び、衛星側面での回り込み銀粒子の存在領域が判明し、衛星設計の際の機器配置制限領域を明らかにすることができた。

5. 謝辞

本研究は2024年度豊田理研スカラーPhase2の助成を受けたものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Daiko Y. et al., “Palm-Sized Ag⁺ Ion Emission Gun Operated at Room Temperature in Non-Vacuum Atmosphere”, *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(9), 1800198
- [2] 渡邊保真, 大幸裕介, “金属推進剤を使用する新規全固体イオン推進機開発に関する基礎検討”, 令和6年度宇宙航行の力学シンポジウム, ISAS2024-SFMA-029, JAXA宇宙科学研究所, 2024.
- [3] Bird, G.A., “Molecular Gas Dynamics”, Oxford University Press, 1976.
- [4] Cercignani, C.: The Boltzmann Equation and Its Applications, Springer, New York, 1988
- [5] Hyakutake T. et al., “DSMC-PIC Analysis of a Plume from MUSES-C Ion Engines”, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.* Vol. 46, No. 151 ,2002.