

宇宙空間放電における微細デブリの加速現象

Acceleration phenomenon of nano-sized debris in space discharge

大津孝佳, ○中村 啓輔

Takayoshi OHTSU, ○Keishuke Nakamura

沼津工業高等専門学校

National Institute of Technology, Numazu College

プラズマと中性粒子の相互作用として、核融合の分野では、中性粒子が炉壁からプラズマ内に侵入し、プラズマ内で衝突を繰り返す、加速される現象が報告されている。この現象は、人工衛星などの宇宙空間放電によって発生するプラズマと、宇宙空間に存在する微細なデブリに於いても生じることが懸念される。そこで、この現象をシミュレーションによって解析し、下記のこと明らかとなった。①微細なデブリがプラズマによって加速される、②プラズマ温度が高いほど、加速後の速度が速く、加速される粒子数が増加する、③質量が炭素原子の10倍以下の微細なデブリに顕著に生じる。

1. はじめに

近年、通信や放送サービスの分野に於いて、低軌道衛星の利用が高まり、民間用の低価格で信頼性の高い宇宙機が要求されている。宇宙機の信頼性の観点に於いて、帯電や放電現象の解明、更に、低軌道では、デブリの影響も考慮する必要がある⁽¹⁻³⁾。このデブリの対策として、10cm以上では、動きを監視し、軌道を変え、衝突を回避する方法、mm、 μm 級のデブリに対しては、バンパーを付ける方法などにより、衝突による影響を少なくしている。また、月面での静電浮遊ダストなど、ナノサイズの微細粒子の解析が注目されている⁽⁴⁾。本研究では、放電プラズマと微細粒子の関係に着目し検討を行った。プラズマ中の中性粒子の振る舞いについては、核融合炉の分野にて、高エネルギーのプラズマ中に外部から中性粒子が侵入した場合、プラズマ粒子との衝突によって、入射時のエネルギーよりも高エネルギーになった粒子がプラズマから放出されることが研究されている⁽⁵⁻⁷⁾。しかし、低エネルギー領域での検討

はなされていない。そこで、プラズマと粒子という観点から、宇宙空間放電プラズマと微細デブリに着目し、プラズマ中の粒子輸送計算シミュレーションにより、宇宙空間での放電プラズマによる微細粒子の加速現象について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 シミュレーション

図1にプラズマ中の粒子輸送計算シミュレーションの流れを示す。初期値のプラズマ中に、微細粒子が侵入する。プラズマ密度と入射粒子のエネルギーから衝突断面積と平均自由行程を計算する。この衝突断面積はデータベースによって与えられる実験データを参照し、データがない場合は、粒子の半径やイオン化エネルギーによる近似値を用いた^(8,9)。次に、弾性衝突、電子電離衝突、イオン電離衝突、荷電交換衝突の衝突断面積の大きさに重み付けをし、乱数を用いて衝突の種類を決定し、その衝突によるエネルギーの計算を行った。更に、自由行程だけ進む

ごとに位置の判定を行い、宇宙機と衝突を起こすまで繰り返すモンテカルロ法を用いたシミュレーションとした。

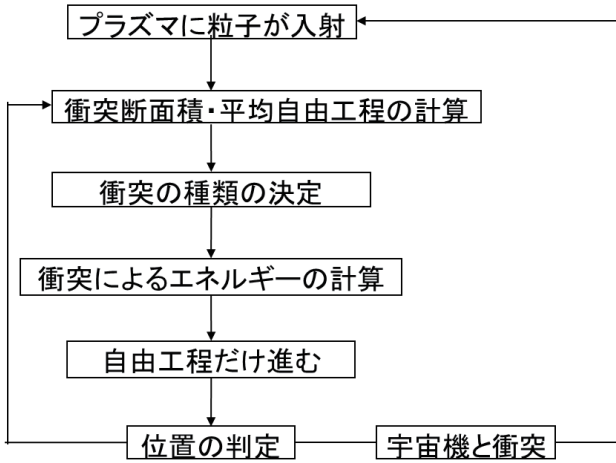


図 1.プログラムの流れ

2.2 シミュレーション条件

シミュレーションに用いたプラズマは、イオン温度・電子温度がともに高いアーク放電プラズマとした。図 2 に示すように、宇宙機表面でアーク放電が起き、放電箇所を中心に半円状モデルのプラズマが発生し、そこに微細デブリとして炭素原子が速度 7[km/sec]で侵入し、高エネルギーのプラズマ粒子と衝突するものとした。本シミュレーションにより、炭素原子がプラズマ粒子との衝突によって加速されるときエネルギー依存性、密度依存性、入射粒子の質量依存性を求めた。

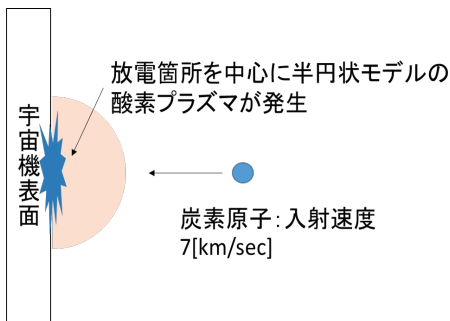


図 2.シミュレーションモデル

3. 実験結果

3.1 プラズマエネルギー依存性

表 1 に示すプラズマパラメータを用いたプラズマエネルギー依存性のシミュレーションの結果を図 3

に示す。ここで、プラズマの温度は 1,5,10,100[eV] とした。横軸は衝突した際の粒子速度、縦軸はその速度で衝突した粒子の個数である。プラズマの温度が高い場合、速度の分布が分散し、加速されて衝突する確率が高くなる。プラズマの温度が低い場合、入射粒子速度程度か、それ以下の速度で衝突する確率が高くなる。よって、プラズマのエネルギーが高いほど、加速された粒子の速度分布のピークは大きくなり、また、分布の幅が広がることが分かった。

100eV ほどのエネルギーを持ったプラズマが発生した場合、加速される確率は非常に高くなり、最大で 10 倍以上の速度となる。よって、高エネルギーのプラズマを発生させないことが重要である。また、1[eV]から数[eV]程度のエネルギーを持ったプラズマの場合、ほとんどの粒子が 10[km/s]以下であるが、加速された粒子では、入射粒子の 3 倍程度の 20[km/s]以上にまで加速されるものがあることが明らかとなった。

表 1. エネルギー変化

プラズマ半径[cm]	10
イオン温度[eV]	変更
電子温度[eV]	変更
プラズマ密度[1/cm ³]	10 ¹²
入射粒子数[個]	100000
プラズマ	酸素
入射粒子	炭素原子

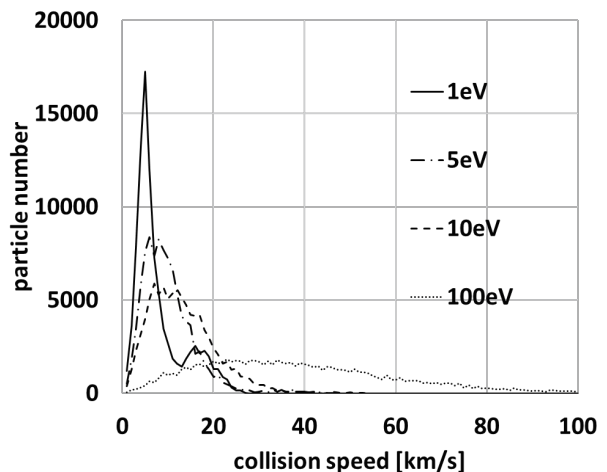


図 3.エネルギー依存性

3.2 プラズマ密度の依存性

表 2 に示すプラズマパラメータを用いたプラズマ密度依存性のシミュレーションの結果を図 4 に示す。横軸はプラズマの数密度、縦軸はそれぞれのプラズマ密度で最も加速されて衝突した粒子の速度である。プラズマ密度が低いときは、加速現象は起きず、プラズマ密度が $10^8[1/cm^3]$ 以上にて、加速現象が生じることが分かる。

表 3 は Houghton 氏らによる宇宙空間の高度と大気の数密度より求めた高度と大気の数密度の関係を示す。高度 100km で $10^{13}[1/cm^3]$ 、高度 200km で $10^{10}[1/cm^3]$ と高度が上昇するにつれて指数関数的に大気密度が減少している。イオン密度が大気密度と等しいとした場合、高度 400km 以下の宇宙空間の低軌道域で、粒子の加速が起きることが分かる。実際に発生するプラズマ密度は電離度が低く大気密度より低いことから、加速現象は、より低域で生じると考えられる。

表 2. 密度変化

プラズマ半径[cm]	10
イオン温度[eV]	1
電子温度[eV]	1
プラズマ密度[$1/cm^3$]	変更
入射粒子数[個]	100000
プラズマ	酸素
入射粒子	炭素原子

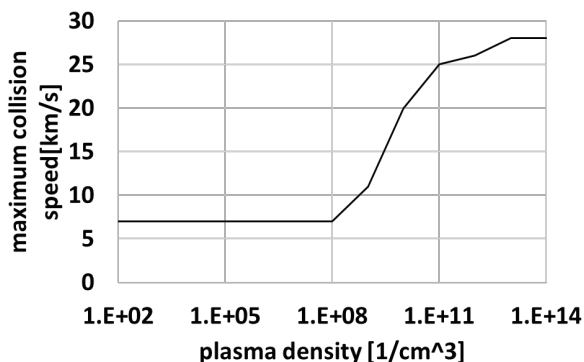


図 4.密度依存性

表 3. 高度と大気数密度の関係

高度[km]	数密度 [$1/cm^3$]
100	10^{13}
200	10^{10}
300	10^9
400	10^8
500	10^7
1000	10^4

3.3 入射粒子の質量依存性

表 4 のパラメータを用いて、入射粒子の質量依存性のシミュレーションを行った結果を図 5 に示す。横軸は対数的表示での質量、縦軸はその質量で最も加速されて衝突した粒子の速度である。質量が減少するにつれて加速される速度は増加する。これより、加速現象が生じるのは、炭素原子の 10 倍から 20 倍程度の質量までであることが分かった。

炭素原子の 10 倍の程度の質量とは、 $10^{25}[kg]$ のオーダーであり、衝突によって太陽電池などの機能劣化を引き起こすといわれている直径 0.1mm のデブリの質量は、 $10^{-9}[kg]$ のことから、宇宙機に機械的な影響を与えるような大きさのデブリの加速への影響は非常に小さい。

表 4.質量変化

プラズマ半径[cm]	10
イオン温度[eV]	1
電子温度[eV]	1
プラズマ密度[$1/cm^3$]	10^{12}
入射粒子数[個]	100000
プラズマ	酸素
入射粒子	炭素原子 (質量変更)

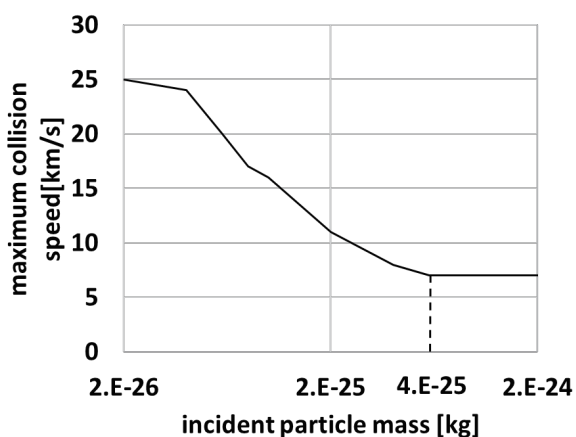


図 5.入射粒子の質量依存性

3.4 微細粒子衝突の影響

放電プラズマ中で加速された微細粒子が、宇宙機に衝突した際に与える影響として、①加速されて衝突することで、通常衝突するより表面に深く大きい傷ができるなどの耐食性への影響、②また、表面の小さな傷や表面状態の変化が、電荷の帯電や移動等の制電特性への影響などが危惧される。また、③加速された粒子の太陽電池表面へ影響による発電効率の劣化や露出した計測器やセンサー等にコンタミとして堆積し、信頼性や品質を低下させるなどことも懸念される⁽¹⁰⁾。このため、加速現象の原因となる放電プラズマの発生を防ぐ対策が重要である。

4. まとめ

放電プラズマによる微細粒子の加速現象についての検討を行い、以下のことが明らかとなった。

1. 放電プラズマによる加速現象は、高度 400km 以下の低軌道に於いて生じる。
2. 質量が減少するにつれて加速される速度は増加する。原子分子レベルの質量の粒子が、加速の影響を受ける。
3. 100eV ほどのエネルギーを持ったプラズマが発生する場合、加速される確率は非常に高くなり、最大で 10 倍以上となる。
4. 1 から数[eV]程度のエネルギーを持ったプラズマの場合、ほとんどの粒子が 10[km/s] 以下であるが、加速された粒子では、入射粒子の 3 倍程度の 20[km/s]以上にまで加速

されるものがある。

5. 耐食性や帯電放電特性の劣化、埋め込み、堆積など、小さいながら悪影響を及ぼす可能性が示唆される。
6. 加速現象は、放電プラズマ中で起きる二次的な現象であり、加速現象の原因となる放電を防ぐことが重要である。

5. 参考文献

- (1) 松本 晴久：“宇宙機の設計のための宇宙環境” 宇宙航空研究開発機構第 3 回宇宙学セミナー 京都大学 (2015)
- (2) 花田俊也, 吉川顕正, 山岡均, 北澤幸人, 柳沢俊史, 松本晴久 “宇宙天気科学・教育との連携によるスペースデブリの光学と軌道上計則”, 第 11 回宇宙環境シンポジウム, 大阪市 (2014)
- (3) Zook, H. A. ; Mccoy, J. E. (1991) “Large Scale Lunar Horizon Glow and a High altitude Lunar Dust Exosphere”, Geophysical Research Letter, vol.18, pp. 2117-2120
- (4) 北澤幸人, 松本晴久, 奥平修, 花田俊也, 東出真澄, 赤星保浩, 仁田工美, ”宇宙環境保全における微小デブリ研究の現状”, 第 12 回宇宙環境シンポジウム, 北九州市 (2015)
- (5) D. B. Heifetz, D. Post, et al., J. Comp. Phys. 46 (1982) 309-327
- (6) 竹永秀信:” 粒子輸送解析”, プラズマ・核融合学会誌 Vol.79, No.8 (2003) 790-804
- (7) 西村賢治:” トロイダルプラズマ中における中性粒子輸送”, 沼津工業高等専門学校研究報告, p 27-32. (2003)
- (8) Atomic and Molecular Numerical Databases
- (9) 酒井洋輔:” 弱電離プラズマの電子衝突断面積とその最近の話題”, プラズマ・核融合学会, Vol. 75 No. 2 P 96-103 (1999)
- (10) Katzan, C. M. ; Brinker, D. J. ; Kress, R. : “The effects of lunar dust accumulation on the performance of photovoltaic arrays ”, NAS3-25266 (1991)