

電界減速によるスペースデブリ除去技術の開発

○佐々木麗双, 増井博一, 豊田和弘, 趙孟佑(九工大)

Development of Space Debris Removal Technology by Moderating Electrostatic Force

Reiso Sasaki, Hirokazu Masui, Kazuhiro Toyoda and Mengu Cho(KIT)

1. 目的および背景

デブリは相対速度 10[km/s]で宇宙機に衝突することもあり、致命的なダメージを与える可能性がある。本研究の目的は電界減速によるスペースデブリ除去技術を開発することである。研究の対象はサイズが 1[cm]以下のスペースデブリである。サイズが小さくても高速で衝突するため、宇宙機に致命的な損傷をあたえることがあり、そしてデブリの効果的な除去技術が存在しない。そこで、網電極を利用したデブリ除去技術を開発し、最終的にはデブリの増加を抑制していきたい。

2. 研究原理

2.1 帯電原理

図 1 はデブリ除去原理図である。網電極をプラズマ環境中で正にバイアスすると、網電極の周囲に電子シースができる。デブリが電子シース内を通過すると負に帯電させられ、網電極を通過すると網電極によって速度方向とは反対方向に働く力によって減速させられる。それに伴ってデブリは軌道低下し、最終的に大気圏に突入することで燃え尽き、除去される。

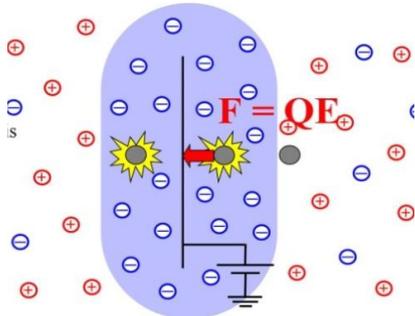


図 1 デブリ除去原理図

デブリの半径を a として帯電する電荷量を見積もると、ガウスの定理より

$$4\pi r^2 |E| = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

ゆえに

$$|E| = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2)$$

無限遠点を基準にとると、

$$V = -\int_{\infty}^a \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{a} - 0 \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 a} \quad (3)$$

であるから

$$C_d = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_0 a \quad (4)$$

となり、コンデンサ容量が求まる。

よって、エネルギーを求めると、

$$U = \frac{1}{2} C_d V^2 \quad (5)$$

と求めることが出来る。ここで求めた V には空間電位に対する浮遊電位の差が当てはまりその分だけ負に帯電することができ、低地球環境パラメータの電子温度 0.4eV 程度のエネルギーを持つことができると考えられる。

$$Q = CV = 4\pi\epsilon_0 a (V_s - V_f) \quad (6)$$

上式より、浮遊電位を小さくして電圧差を大きくすることが重要となってくる。

2.2 印加電圧による高度低下

網電極に電圧を印加すると、網電極を通過するデブリは帯電させられ、高度を低下していく。デブリが網電極を通過すると、速度は v_0 から v_1 まで減速し、高度は h_0 から h_2 まで低下したとすると、以下の式が成り立つ。

$$\frac{1}{2} m v_1^2 - G \frac{Mm}{R + h_0} = \frac{1}{2} m v_2^2 - G \frac{Mm}{R + h_2} \quad (7)$$

$$\frac{m v_2^2}{R + h_2} = G \frac{Mm}{(R + h_2)^2} \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} m v_1^2 + U \quad (9)$$

ここで、 M と m はそれぞれ地球とデブリの質量で、

R は地球半径である。

デブリを直径 a の球と考えると、デブリの質量 m は以下ようになる。

$$m = \frac{4\pi a^3}{3} \rho \quad (10)$$

式(5)と(8)より以下の式が求まる。

$$h_2 = \frac{GM}{\frac{GM}{R+h_0} + \frac{6e_0 V_{bias}^2}{ra^2}} - R \quad (11)$$

ここで $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ 、 $a = 100 \text{ mm}$ と $50 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $h_0 = 800 \text{ km}$ と 400 km のデブリの高度と網電極への印加電圧の関係を図2と図3に示す。

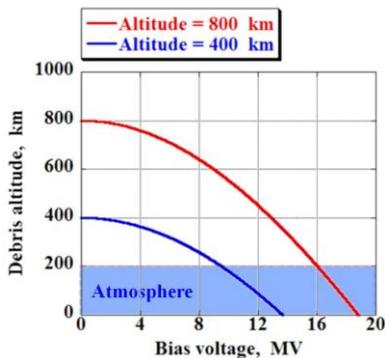


図2 デブリ高度と印加電圧($a = 1[\text{mm}]$)

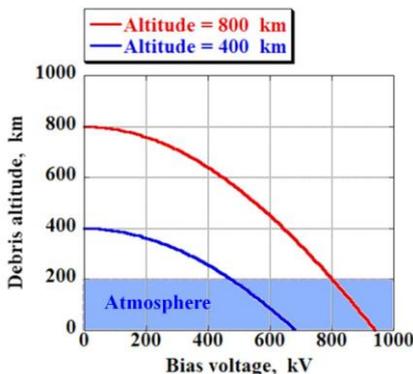


図3 デブリ高度と印加電圧($a = 50[\mu\text{m}]$)

網電極通過後のデブリを一気に大気圏へ落とすには数100 kVから数10 MVの印加電圧が必要であることが分かった。

3. 実験手法

3.1 浮遊電位

本研究はデブリを帯電させることで初めて電界による除去が可能となる。故に、帯電量を知ることが非常に大事になってくる。式(6)のように帯電量を知るためには浮遊電位と空間電位が非常に大事になっ

てくる。まず、その中の浮遊電位の測定について述べる。以下に浮遊電位の測定回路図を示す。

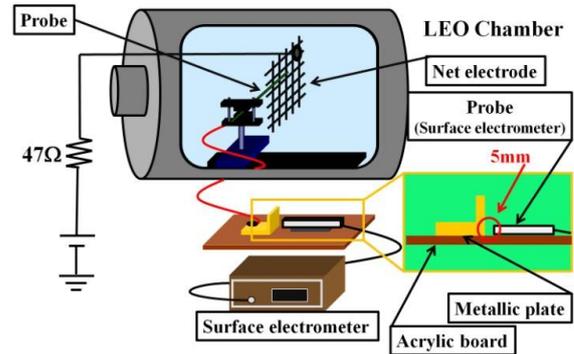


図1 浮遊電位測定回路

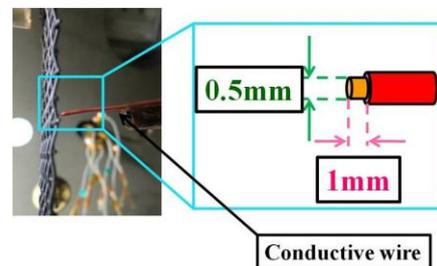


図2 浮遊電位測定用プローブ

真空チャンバー内は Xe のプラズマ環境となっており、その中に網電極と測定用プローブを図4のように設置する。網電極は正にバイアスされ、プローブはチャンバーの外の金属板と接続される。測定に使用するプローブの先端は非常に細い(図5参照)。プローブ先端の電位と外に接続された金属板の電位は等しいので、その電位を表面電位計で測定する。

浮遊電位は数十 V 程度で、印加電圧に比べて非常に小さかった。

3.2 空間電位

次に空間電位について述べる。図6に空間電位測定回路を示す。網電極をチャンバー内に設置し、ステージに固定されたエミッシブプローブを網電極から0cm となるところに設置する。真空チャンバー内は Xe のプラズマ環境状態であった。空間電位の測定方法はまず、網電極に正バイアスをする。エミッシブプローブの先端はタングステンを用いており、これに大電流を流すと赤熱化し、熱電子が放出する。もう一つの電源を使って熱電子放出量を制御する。空間電位と熱電子制御用の電源電圧が等しくなったとき、熱電子制御用電源の電流がゼロとなる。故に、電流がゼロとなる電源電圧が空間電位となる。

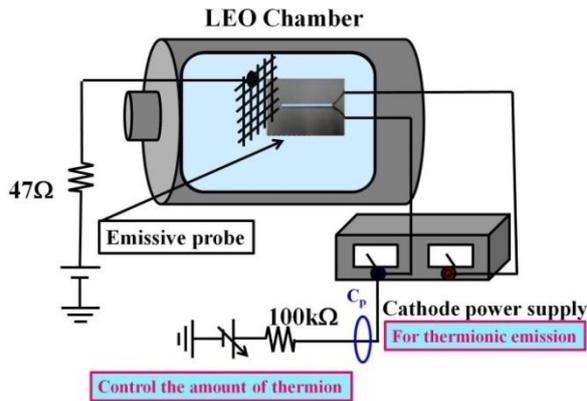


図 6 空間電位測定図

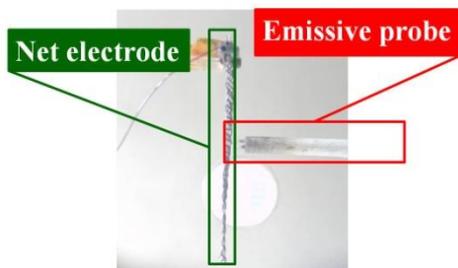


図 7 エミッシブプローブ

3.3 原理検証試験

図 11 の電界による力の机上計算を確認するために検証試験を行った。検証試験回路を図 8 に示す。Xe のプラズマ環境状態にした真空チャンバー内に網電極を入れ、その前にサンプルを細い PE ライン(直径: 0.1mm)によって吊るした。サンプルは電界による力の影響を観測しやすくするために質量が軽く、導電性の絶縁体を使用した。

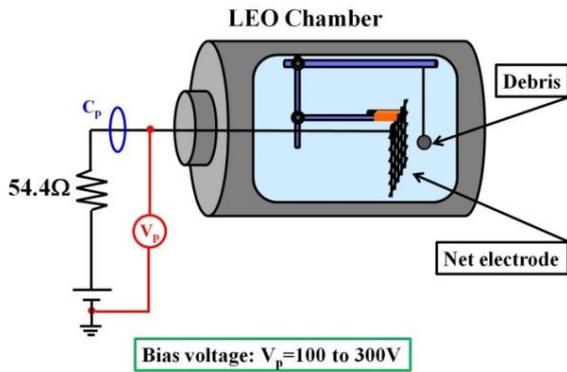


図 8 検証試験回路

4. 実験結果

4.1 帯電量

空間電位及び浮遊電位は本学が所有する LEO チャ

ンバーと JAXA 宇宙科学研究所が所有するスペースチャンバーを使用した。LEO チャンバーは網電極への印加電圧の限界が 300 V 程度だったので、体積が 4 倍あるスペースチャンバーを利用してより大きな印加電圧を印加した。以下に LEO チャンバーとスペースチャンバーを利用して測定した浮遊電位と空間電位を示す。

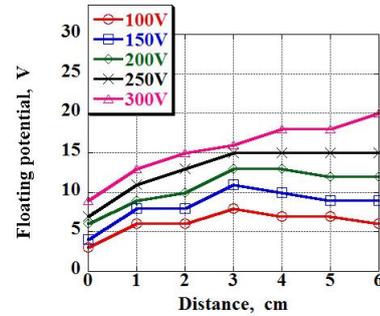


図 9 浮遊電位(LEO)

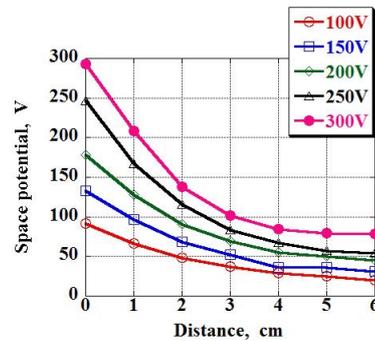


図 10 空間電位(LEO)

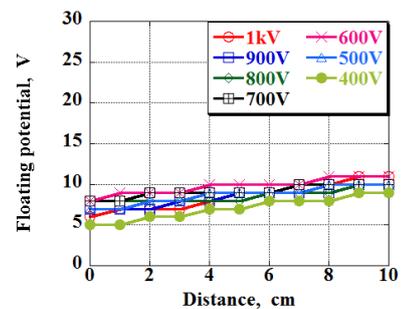


図 11 浮遊電位(スペースチャンバー)

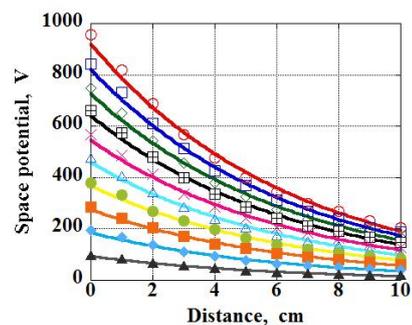


図 12 空間電位(スペースチャンバー)

浮遊電位は印加電圧比べて小さく、おおよそ数10V程度であった。空間電位は網電極の距離に対して指数関数的に減少する結果が得られた。また、網電極の周囲の空間電位は印加電圧とほとんど同じであった。

浮遊電位及び空間電位から式(6)を利用してデブリの半径 $a = 1 \text{ mm}$ の帯電量を計算した。帯電量からデブリに働く力を評価できる。

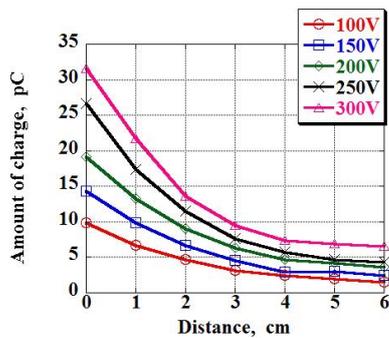


図13 デブリ帯電量(LEO チャンバー)

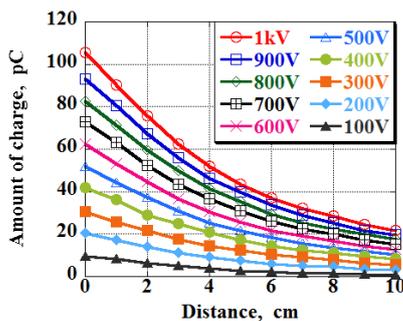


図14 デブリ帯電量(スペースチャンバー)

4.2 原理検証試験

原理検証試験は動画撮影によってサンプルの動きを撮影した。動画を元に推測した電界による力を図15に示す。図16は帯電量を元に計算した電界による力である。推測値と計算値の桁数からデブリは実際に帯電し、電界による力を受けたことを確認した。推測値が計算値より大きいのはサンプルを吊るしたPEラインが帯電したためである。

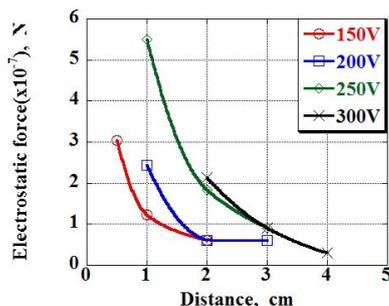


図15 電界による力の推測値

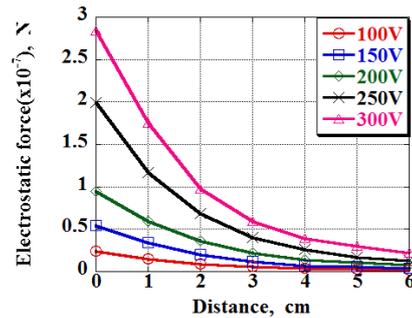


図16 電界による力の計算値

5. まとめ

LEO チャンバーを利用して印加電圧 300 V までの浮遊電位と空間電位を測定し、帯電量を計算した。また、スペースチャンバーを利用して 1 kV の印加電圧までの浮遊電位と空間電位を測定した。さらに定電量を計算した。

原理検証試験よりデブリが実際に帯電をし、電界による力を受けていたことを確認した。

デブリを宇宙から除去するには数 100 kV 以上の印加電圧が必要ですので、現在はパルス波の高電圧印加を検討している。今後はパルス波高電圧印加状態の試験をする必要がある。

参考文献

- 1) <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNV16i1.pdf#search='nasa space debris 2012>
- 2) <http://www.ard.jaxa.jp/info/event/pdf/2005ver03.pdf>
- 3) DanielHastings & Henry Garrett,:
Spacecraft-Environment Interactions., p.154-156