

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656195

研究課題名（和文）宇宙プラズマを利用したデブリ除去方法の開発

研究課題名（英文）Development of debris removal method using space plasma interaction

研究代表者

豊田 和弘 (TOYODA KAZUHIRO)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10361411

研究成果の概要（和文）：宇宙プラズマと電圧を印加した網電極との干渉を利用したスペースデブリ除去技術の開発を行った。真空容器内でプラズマを発生させ網に電圧を印加することで、デブリを模擬した球体を帯電させ、電界により力を加えることに成功した。振り子の傾きから求めた力と理論値は良く一致しており、宇宙空間でもデブリに力を加えることができることがわかった。

研究成果の概要（英文）：The space debris mitigation method was developed using the interaction between space plasma and biased mesh electrode. The pseudo-debris was charged and attracted by electric field from mesh electrode by means of applying voltage on mesh electrode in a vacuum chamber filled with plasma. The electric force measured with pendulum angle was agreed with theoretical one.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	0	2,500,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,200,000	210,000	3,410,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙環境・スペースデブリ

1. 研究開始当初の背景

現在有人宇宙活動が行われている低地球軌道では年々スペースデブリが増え、宇宙機への衝突事故が起こっている。数センチ以上のデブリの軌道は記録され、それを避けるために軌道を変更することもある。しかし数ミリ程度の小さなデブリの位置は把握できないだけでなく、数も桁違いに多くなる。また宇宙機もデブリも毎秒8km程度で軌道周回するため平均衝突速度は毎秒10kmとなり、数ミリラスのデブリでも人工衛星に大きな被害を与える。それはスペースシャトルの

窓が毎回数十マイクロメートルクラスのデブリの衝突によって傷がつくため交換されていることから明らかである。このような状態では安心して宇宙活動を行うことはできない。数が多く且つ被害を与える小さなデブリを除去する技術に関する研究は殆ど進んでおらず、宇宙活動を進めていくには必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では数ミリ以下の小さなデブリを除去する方法を提案し、実験的に検証するこ

とを目的としている。

低地球軌道ではプラズマが存在しており、宇宙機の帯電を引き起こす厳しい環境となっているが、それを逆にデブリ除去に利用する。宇宙に浮かべた電極に正電圧を印加すると電子が引き寄せられる。ここにデブリが飛んでくると、引き寄せられて加速された電子によりデブリは負に帯電する。負に帯電したデブリが電極を通過したあとは電界によって電極方向へ引き寄せられ減速する。これによりデブリは減速し高度を落とすことになる。

3. 研究の方法

(1)宇宙空間にデブリの進行方向に対して垂直に巨大な網を展開し、正の高電圧をバイアスする。正にバイアスされた網電極とプラズマ環境の干渉により負のシースを形成する。デブリがこの負のシースの中に入ると負に帯電させられる。負に帯電したデブリが正バイアスされた網電極を通過すると、デブリと網電極の間の電界による力によってデブリは減速させられる。減速させられたデブリは負のシースを通過してもその軌道は低下し、やがて大気圏に突入し、燃え尽きる。以下にその概念図を示す。

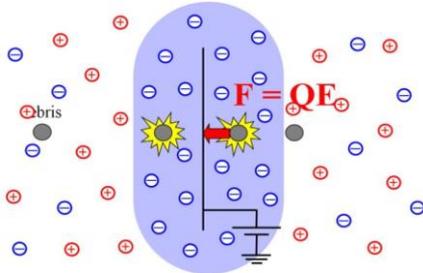


図1 デブリ減速原理

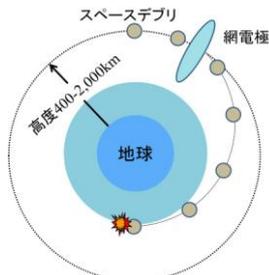


図2 デブリ減速概念

ここで、デブリの帯電原理について詳しく述べる。宇宙はプラズマ環境となっている。このプラズマ環境の中に正にバイアスした網電極を入れると、正にバイアスされた網電極とプラズマが干渉する。網電極は正にバイアスされているため、その周囲では電子とイオンのバランスが崩れ、電子が網電極に引き寄せられ、イオンは引き離される。そのため、網電極の周囲では電子が支配的となり、負のシースを形成する。そこにデブリが飛んでくると、網電極の左側ではデブリと空間電位の間に電位差が生じる。デブリの電位は周辺プラズマから集める電流がゼ

ロとなるような電位になる。デブリの表面電位は空間電位に対して負に沈むため、デブリは一気に負に帯電させられる。網電極を通過後、右側では電子は網に向かって加速するように電界が生じているため、デブリは飛ぶ方向と逆方向に電界による力 F が働く。そのため負に帯電したデブリは減速させられることになる。デブリとプラズマ間の電流が 0 となる電位が浮遊電位である。デブリの表面上で電荷密度を σ 、その面積を A とすると、

$$\frac{d\sigma}{dt} A = I_{\text{from surface}} - I_{\text{to surface}} = I_{\text{net}} \quad (1)$$

であらわすことができる。これは電荷密度の時間変化分とその面積の積が正味の電流値となることを示している。また、デブリの表面上の電流のやり取りの間には次のような関係がある。浮遊電位は電流値のバランスで決まり、この $I_{\text{net}} = 0$ となるときの電位が浮遊電位となる。また、デブリの半径を a とするとデブリの静電容量は

$$C_d = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_0 a \quad (2)$$

となる。またエネルギーを求めると、

$$U = \frac{1}{2} C_d V^2 \quad (3)$$

となる。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。

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

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)実験装置

以下に試験で用いた装置を示す。

地球低軌道は地球大気の大気圏構造上では電離圏と呼ばれ、太陽紫外線によって地球大気が電離された濃いプラズマが存在する。電離圏に存在するプラズマは太陽紫外線が原因となって発生したものである。そのため、プラズマ密度は太陽活動周期に大きく影響される。真空チャンバーはステンレス製で、直径が 1.0m 、奥行き 1.2m である。チャンバーの排気には粗引き用のロータリーポンプ、ターボ分子ポンプを用いた。

プラズマ環境を真空チャンバー内で模擬するために、ECR プラズマ源を使用した。作動ガスには電離しやすく、取り扱いの比較的容易なキセノン(Xe)を使用した。

スペースデブリ模擬サンプルは網電極とは異なる電荷の帯電をし、電界によって網の方向に引き寄せられる。この引き寄せられる動きを確

認するためにストロボスコープを利用した。

(3) 実験手法

① 異常電流収集確認試験

プラズマ環境下で網電極を正にバイアスし、負のシースを形成する。バイアス電圧を大きくしていくと、シースは大きくなり、より離れた電子まで作用する。やがて周囲のチャンバ GND やプラズマ源と繋がり、大電流が流れ、異常電流収集となる。実宇宙では異常電流収集は起こり得ないので、正しい評価をするために、異常電流収集が起こらない環境で試験をする必要がある。

新しく購入したターボポンプを取り付けることで、圧力を低くすることができ、以前は 200V で発生していた異常電流収集が 300V 以上まで発生しなくなった。これにより 300V まで電圧を印加して実験をすることが可能になった。

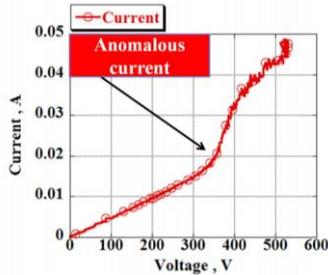


図 3 異常電流収集

② 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(4)のように帯電量を知るためには浮遊電位と空間電位を測定する必要がある。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。

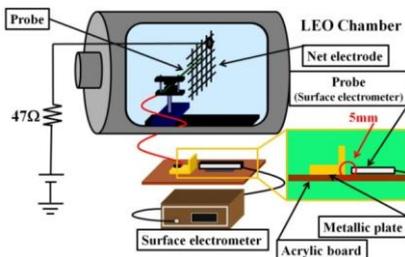


図 4 浮遊電位測定回路図

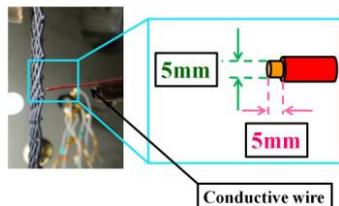


図 5 浮遊電位測定用プローブ
真空チャンバ内は Xe のプラズマ環境とな

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。網電極への印加電圧は 100V から 300V であった。浮遊電位はプローブを網電極から 1 cm 間隔で移動させ、0cm から 6cm まで測定した。

表 1 浮遊電位測定試験環境

パラメータ	値
真空度	5×10^{-3} , Pa
プラズマ電圧	29, V
飽和電流	9×10^{-5} , A
プラズマ温度	2, eV
プラズマ密度	9×10^{11} , m^{-3}

図 6 に浮遊電位の測定結果を示す。浮遊電位は網電極への印加電圧に比べて小さく、おおよそ 20V 以下であった。

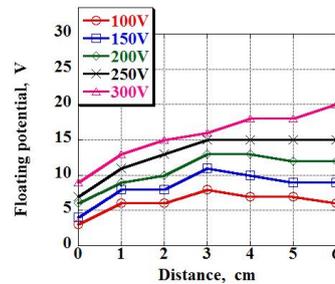


図 6 浮遊電位

③ 空間電位

次に空間電位について述べる。図 7 に空間電位測定回路を示す。網電極をチャンバ内に設置し、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 となる場所に設置する。真空チャンバ内は Xe のプラズマ環境状態であった。ステージを網電極から 1cm ずつ遠ざけながら空間電位を測定する。そうすることで網電極の周囲の空間電位分布を知ることができる。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。

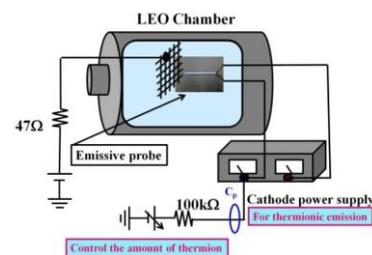


図7 空間電位測定図

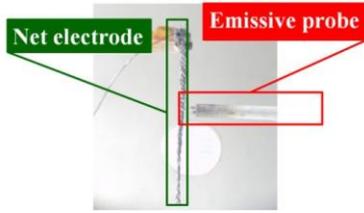


図8 エミッシブプローブ

表2 空間電位測定試験環境

パラメータ	値
真空度	2×10^{-3} , Pa
プラズマ電圧	11, V
飽和電流	3×10^{-4} , A
プラズマ温度	3, eV
プラズマ密度	2×10^{12} , m^{-3}

図9に空間電位の測定結果を示す。網電極からの距離が0cm程度の時の空間電位は印加電圧とほぼ等しかった。そして距離が離れるにつれて空間電位は小さくなった。

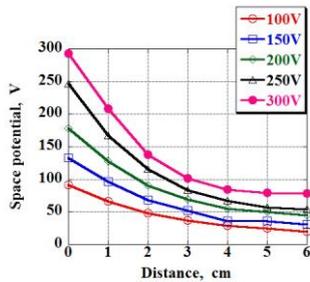


図9 空間電位

図6の浮遊電位の結果と図9の空間電位の結果から以下の式を利用してデブリの帯電量を計算した。半径 a は試験サンプルの半径(1mm程度)を使用していた。

$$Q = CV = 4\pi\epsilon_0 a (V_s - V_f) \quad (5)$$

図10にデブリ帯電量の計算結果を示す。

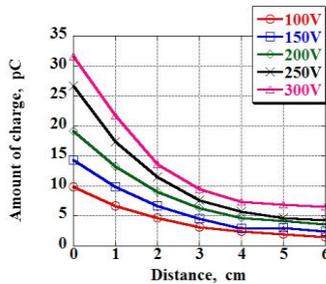


図10 デブリ帯電量

電界による力はデブリの帯電量とその位置で

の電界によって計算できる。電界による力の計算式を以下に示す。

$$F = QE \quad (6)$$

電界は空間電位の微分によって計算できるので、電界による力は図11のようになる。

$$E = -\frac{\delta V_s}{\delta x} \quad (7)$$

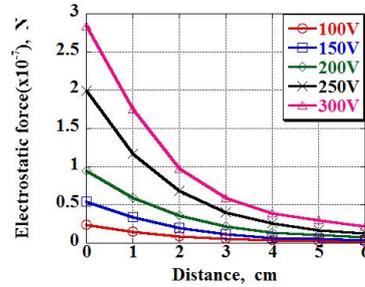


図11 電界による力

④ 原理検証試験

図11の電界による力の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12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(図13参照)を細いPEライン(直径:0.1mm)によって吊した。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。

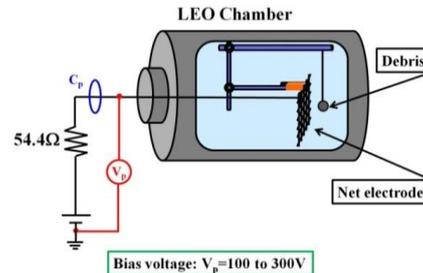


図12 検証試験回路



図13 デブリ模擬サンプル

表3 検証試験環境

パラメータ	値
真空度	2×10^{-3} , Pa
プラズマ電圧	10, V
飽和電流	2×10^{-4} , A
プラズマ温度	2, eV
プラズマ密度	2×10^{12} , m^{-3}

表4に検証試験の結果を示す。サンプルは網か

ら 1.3cm 離れた位置に固定され、表 4 には印加電圧とサンプルの移動距離を示す。網電極への印加電圧は 100V から 300V であった。サンプルの直径は分かっているので、それから単位ピクセル当たりの長さも分かる。試験前後のデブリの位置のピクセルの違いから移動距離を計算できる。

表 4 検証試験結果

印加電圧	移動距離, mm	力, N
100V	0	0
150V	0.3	3.2×10^{-8}
200V	0.9	9.6×10^{-8}
250V	1.5	1.6×10^{-7}
300V	1.8	1.9×10^{-7}

図 14 に網電極に 300V を印加したときのデブリの移動角のイメージ図を示す。

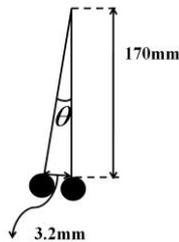


図 14 デブリ移動角

移動角 $\theta = 0.6^\circ$ であった。PE ラインの重さを無視し、サンプルの動きを振り子と考えると、重さ 1.85mg のサンプルに働く力は式(8)のようになる。

$$F = mg \tan \theta = 1.85 \times 10^{-6} \times 9.8 \times \tan(0.6) \quad (8)$$

$$= 1.9 \times 10^{-7} [N]$$

図 11 の計算により、印加電圧 300V、網からの距離 1.3cm の位置の電界による力は式(9)となる。

$$F' = QE = 1.5 \times 10^{-7} [N] \quad (9)$$

表 5 電界による力の比較

印加電圧	検証試験結果, N	計算, N
100V	0	1.3×10^{-8}
150V	3.2×10^{-8}	3.0×10^{-8}
200V	9.6×10^{-8}	5.1×10^{-8}
250V	1.6×10^{-7}	1.0×10^{-7}
300V	1.9×10^{-7}	1.5×10^{-7}

表 5 に網電極とサンプルの間に働く電界による力の計算と検証試験の結果を示す。印加電圧 100V の時の検証試験結果が 0N となっていたのはサンプルの移動距離が小さく、力の計算ができなかったためである。印加電圧 150V から 300V の検証試験の結果と計算がほぼ一致することから電界減速によるスペース・デブリ除去

法の原理を検証することができた。

⑤ パルス波電圧印加試験

図 15 にパルス波電圧を網電極に印加した際の試験回路を示す。真空チャンバー内は原理検証試験と同じである。真空チャンバー外の回路はパルス波を発生させる回路である。原理検証試験と同時にパルス波電圧印加試験を行っているため、試験環境は全く同じであった。

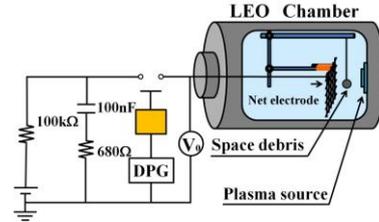


図 15 パルス波電圧印加試験

表 6 検証試験環境

パラメータ	値
真空度	2×10^{-3} , Pa
プラズマ電圧	10, V
飽和電流	2×10^{-4} , A
プラズマ温度	2, eV
プラズマ密度	2×10^{12} , m^{-3}

網電極への印加電圧 V_0 を図 16 に示す。実際に網電極に 6kV のバイアスが掛かるのはおよそ 0.2ms であった。

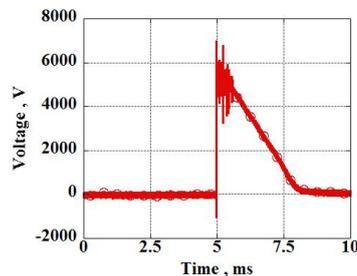


図 16 網電極印加電圧

サンプルは動いているものの、ほとんど変位はなかった。これは網電極への電圧印加の時間が短いからと考える。また、サンプルの材質は絶縁体であるため、二次電子放出係数が大きく、網電極へ電圧を印加した瞬間のサンプルの動きは網電極とは反対方向であった。

⑥ 落下試験

図 17 に落下試験回路を示す。図 18 は試験コンフィギュレーションである。

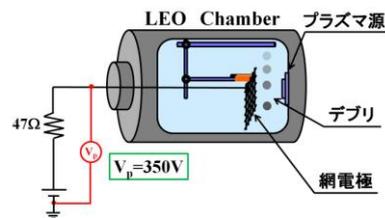


図 17 落下試験回路図

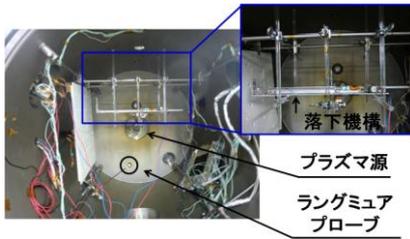


図 18 落下試験コンフィギュレーション

落下機構にデブリ模擬サンプルをセットし、1個ずつ落下させる。落下機構の下に網電極を設置し、電圧をバイアスする。落下したデブリ模擬サンプルは帯電させられ、網電極の方向に引き寄せられる。ストロボスコープとカメラを用いて落下時のデブリ模擬サンプルの軌跡を確認する。図 19 に試験結果を示す。

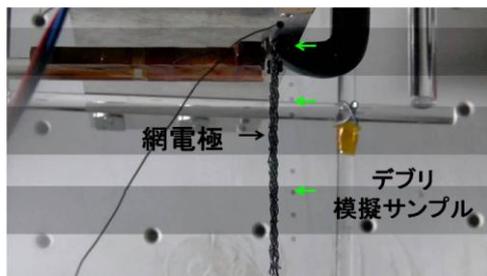


図 19 落下試験結果

網電極によってサンプルが引き寄せられたことは確認できなかったが、ストロボスコープによるカメラ撮影は成功した。

4. 研究成果

電界減速によるデブリの除去法において、デブリの帯電量を見積もることは非常に大事である。そのためには網電極の近くの浮遊電位と空間電位を知ることが必要となるが、今回の実験ではそれらを測定することができた。また、帯電量と網電極の周囲の電界を計算することで電界により力を机上計算した。原理検証試験において印加電圧とサンプルの移動距離の関係の結果が見積りと一致することを検証できた。試験後、プラズマなしの真空環境で同様の試験を行ったが、サンプルは移動しなかった。以上の結果より、プラズマ環境下で網電極に電圧を印加すると、負のシース内のデブリは帯電させられ、網電極とデブリの間に電界による力が働くことが確認できた。

また、原理検証試験と同時にパルス波印加電圧試験を行ったところ、サンプルは網電極とは反対方向に動いた。これはサンプルの材質が二次電子放出係数の大きい絶縁体であった可能性がある。

落下試験ではサンプルが網電極によって引き寄せられたことは確認できなかったが、ストロボスコープによるカメラ撮影は成功した。今後も落下試験を行い、ストロボ写真によってサンプルの軌跡を確認する予定で

ある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① Kazuhiro Toyoda、他、Experimental Investigation of Space Debris Removal Method using Electrostatic Force in Space Plasma、50th AIAA Aerospace Sciences Meeting、2012年1月11日、ナッシュビル(米国)
- ② Reiso Sasaki、他、Research and Development of a Debris Removal Method Using Interaction between Space and Electrode with Applied Voltage、The 28th International Symposium on Space Technology and Science、2011年6月9日、沖縄県

[その他]

ホームページ等

<http://laplace.ele.kyutech.ac.jp/>

<http://laseine.ele.kyutech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

豊田 和弘 (TOYODA KAZUHIRO)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10361411