

磁化同軸プラズマガン生成プラズモイドによる金属片への運動エネルギー付与の評価

Energy transfer to metallic fragment by Magnetized Coaxial Plasma Gun-generated plasmoids

○宮川龍聖¹, 橋壁優太¹, 小野間綾優¹, 松平夏奈¹, 小林大地², 浅井朋彦²

*Ryusei Miyakawa¹, Yuta Hashikabe¹, Ayu Onoma¹, Kana Matsudaira¹, Daichi Kobayashi², Tomohiko Asai²

Abstract: The rapid growth of space development has intensified the problem of orbital debris, particularly fragments of 1–100 mm that are difficult to avoid or shield against. This study investigates plasmoids generated by a magnetized coaxial plasma gun as a potential method for debris removal. Metallic fragments of centimeter scale were used as debris analogs. Plasma parameters such as electron density, velocity, radius, and length were characterized in a quartz chamber. Impact experiments in a metal chamber, combined with high-speed imaging, enabled quantitative evaluation of momentum transfer. Results provide initial verification of plasmoid-based impulse delivery for space debris mitigation.

1. 研究背景・目的

近年、政府・民間の宇宙開発が加速して打上げ数が増える一方、地球周回軌道ではスペースデブリが急増し、宇宙環境の持続可能性を脅かしている^[1]。スペースデブリとは、運用終了衛星やロケット残骸、ミッション中に発生した破片など軌道に存在する不要な人工物の総称で、速いもので約8 km/s で周回するため、数センチの破片でも運用中の衛星や宇宙ステーションに致命的損傷を与え得る^[2]。

このような事態を防ぐには、既存デブリを除去する技術の開発とともに、将来の発生を抑制する仕組みが必要である。現状では、10 cm 以上のデブリは回避行動によって衝突を防ぐことができ、1 mm 以下のデブリについては防御技術の研究が進んでいる。その一方で、1 mm から10 cm の中間サイズのデブリは最もリスクが高いと考えられ、除去の必要性が強調されている^[3]。

磁化同軸プラズマガン(Magnetic Coaxial Plasma Gun: MCPG)を用いてプラズモイドを生成・射出し、数cm程度のスペースデブリに対して衝突させることで、デブリの軌道を変化させる手法が提案された。本研究では、スペースデブリを模擬した金属片にプラズモイドを衝突させ、金属片に与えられた運動エネルギーの変化を評価することで、本手法が将来的にスペースデブリの除去手段の一つになり得る可能性について、初期的な検証を行う。

光学計測が容易な石英チェンバーにMCPGを接続して、石英チェンバー内に射出されたプラズモイドのパラメータ(電子密度、速度、形状)を計測した。次に、同一のMCPGを石英チェンバーと同等な体積を持つ金属チェンバーに接続し、チェンバー内部に金属片を吊るす。射出プラズモイドの衝突による金属片の運動エ

ネルギー変化は高速度カメラで推定し、運動エネルギーの移行を定量的に評価する。

2. 実験方法

石英チェンバーを用いた実験装置系(図1)において、ヘテロダイン型レーザー干渉計、モノクロメーター、トリプルプローブ、高速度カメラの同時計測を行い、プラズモイドの線積分電子密度、速度、半径及び長さを求める。MCPGは一つのパルス電源でプラズモイドの生成から加速まで実現できるため、装置構成が簡潔化され、生成と加速のタイミングの制御も容易になる。さらに、電源から投入したエネルギーを効率よくプラズモイドの運動量に変換でき、ターゲットへの運動量伝達効率の向上が期待できる。

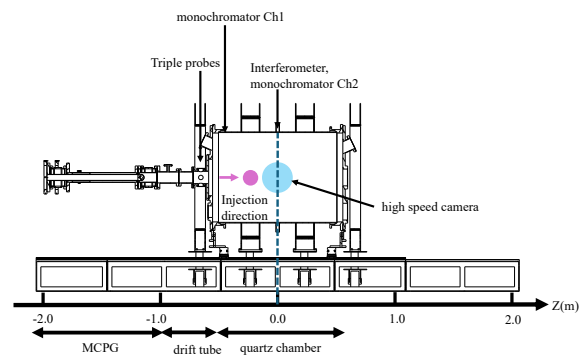


Figure 1. Diagram of Experimental apparatus of a quartz chamber

次に、金属チェンバーを用いた実験系(図2)でプラズモイドを金属片に衝突させる実験を行う。ステンレス紐を用いてデブリを模擬した金属片(アルミニウム製、直径2.2 cm, 2.2 g)を金属チェンバーの内部に吊るす。側面の石英窓から高速度カメラを用いて金属片の運動の様子を計測する。なお、本研究では、MCPGの射出口から石英チェンバーの中央までの距離と、金属

1: 日大理工・院(前期)・物理 2: 日大理工・教員・物理

チェンバー内の金属片までの距離を等しく設置し、金属チェンバーにおいても同様のプラズモイドの電子密度が得られるものと仮定して評価を行った。

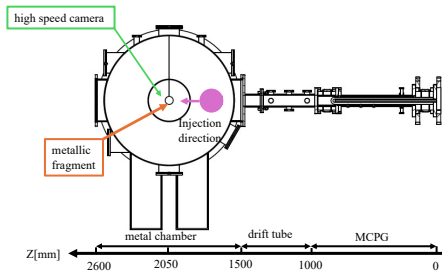


Figure 2. Diagram of Experimental apparatus of a metal chamber

3. 実験結果

プラズモイドの運動エネルギーは、 $m_i N v_{ct}^2 / 2$ (m_i : 水素イオンの質量, N : プラズモイドの粒子数, v_{ct} : 速度) として計算する。ドリフト管での電子密度(n_e)_dはトリプルプローブにより測定し、プラズモイド体積を円柱体として仮定することで粒子数を $N_d = (n_e)_d V_d$ とした。速度はモノクロメーターの計測結果より飛行時間法を用いて算出した。石英チェンバー内の平均電子密度 $(n_e)_q$ は干渉計を用い、線積分電子密度 $\int n dl$ をプラズモイドの直径 $2r$ で除算して推定した。金属片に関しては、移動距離と質量から速度を算出し、最下点における金属片の運動エネルギーを $mv^2/2$ 、最高到達点における位置エネルギーを mgh として求めた。

石英チェンバーにおける実験結果を以下表 1 にまとめた。(充電電圧は 10 kV, ガス圧 0.10 MPa)

Table 1. Experimental results in quartz chamber

	Electron density [$\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$]	Speed[km/s]	Kinetic energy[J]
drift tube	7.2	28	0.34
quartz chamber	3.8	28	0.12

以上の結果より、ドリフト管から石英チェンバー中央までの移送過程でプラズモイドのエネルギーは 65% 減少した。

次に金属チェンバーで、プラズモイド衝突時とガスのみ噴射する時の金属片の様子を観測した。実験結果は表 2 に示す。ガスのみの場合は金属片が最下点での瞬間速度の算出が困難なため、表中の速度は最下点から最高到達点までの平均値である。このため、最下点における運動エネルギーは算出していない。

Table 2. Experimental results in metal chamber

	Speed [$\times 10^{-3} \text{ m/s}$]	Kinetic energy [$\times 10^{-5} \text{ J}$]	Potential energy [$\times 10^{-7} \text{ J}$]
Plasma injection	310	3.5	6.5
Gas only injection	8.3		1.9

これよりプラズモイドから金属片への運動エネルギー伝達率は 0.026% となり、位置エネルギーは運動エネルギーの 2.0% であった。ガスのみと比べてプラズモイドがより効率的に金属片へエネルギーを与えることが確認された。なお、プラズモイドの断面積は金属片の断面積の約 17 倍であるため、全ての粒子が衝突には寄与していないと考えられる。

また、放電条件を充電電圧 15 kV, ガス圧-0.04 MPa に変えての実験を行った。また、プラズモイドの体積を同程度と仮定し、エネルギー変換効率も 0.026% と同程度と仮定して、金属片に伝達されるエネルギーを見積もった。それらの結果を表 3 にまとめた。

Table 3. Predicted energy transfer to metallic target

	Speed[km/s]	Kinetic energy[J]	Energy transferred [$\times 10^{-3} \text{ J}$]
No bias current No external field	92	9	2.3
bias current:0.5A No external field	115	39	10
bias current:0.5A external field:2.0kV	87	55	14

4. 今後の展望

プラズモイドが金属片に衝突する際の衝突面積の違いによる応答を明らかにするため、プラズモイド半径よりも小さい範囲で金属片の半径を変化させた実験を行う予定である。また、プラズモイドの速度を増大させることで運動エネルギーを高められるため、今後は高速な条件下で金属片に衝突させ、エネルギー伝達量の評価する。なお、本研究ではプラズモイドの電離度は考慮せず、実際の粒子数、エネルギーは推定値より小さい可能性がある。さらに、ターゲットを金属から絶縁性プラスチックに変更し、電磁気学的な作用の有無を評価することを目指す。

5. 参考文献

- [1] ESA, ESA Space Environment Report 2025, https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2025, (参照日 2025 年 9 月 20 日)
- [2] 河本聡美, スペースデブリ除去の概要, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 日本航宇宙学会, 56巻, JSASS-2012-4066(2012)
- [3] JAXA, スペースデブリの除去, <https://www.kenkai.jaxa.jp/crd2>, (参照日 2025 年 9 月 20 日)