

超高速衝突により生じる衝突プラズマと電位変動

○長岡洋一（総研大）、田中孝治（ISAS/JAXA）、佐々木進（ISAS/JAXA）

概要

スペースデブリの超高速衝突による衝突プラズマの生成と伝播は、帯電した太陽電池パドルの放電などを引き起こす危険性がある。本研究は超高速衝突により宇宙機が被る電氣的な影響を評価することを目的に行っており、これまでには衝突プラズマが宇宙機に与える影響を評価すべく、衝突プラズマに関連した計測を行ってきた。⁽¹⁾ 一方、衝突によりプラズマが生成されると、プラズマ生成の初期では高速電子の離脱によりターゲットが正に帯電し、極めて短い時間のうちにターゲット電位が正電位に変動すると考えられる。今回は新たに、衝突直後のターゲット電位がどの程度変化するかを試験的に計測した。その結果、直径 3.2mm のアルミ球が秒速 5.5~6.0km で Al, Cu, Ag の金属薄板（厚さ 0.5mm~3mm）に衝突した場合、電位変動の最大値は+4 ~ +8V 程度であり、電位変動の大きさはターゲット材質とターゲット厚さに依存する傾向があった。

キーワード：超高速衝突、スペースデブリ、衝突プラズマ、電位変動

1. 研究背景と目的

図 1 に示すように、宇宙機へのスペースデブリの超高速衝突による重要な問題として、(1) ターゲットの貫通、(2) イジェクタの二次的衝突、(3) 衝突プラズマの発生、(4) 衝突部での電位変化、(5) 電磁波の放射などが挙げられる。(1)~(2) は宇宙機に対して機械的な影響を、(3)~(5) は電氣的な影響を及ぼすと考えられる。衝突は宇宙機に多くの影響を及ぼすが、本論文では、特に、衝突プラズマと電位変化に注目した。衝突プラズマは衝突位置から周囲の空間へと伝播していき、太陽電池などの露出した電気部品との干渉や帯電した宇宙機表面での放電を引き起こす可能性がある。また、衝突部での電位の変化は宇宙機の搭載回路に影響を及ぼす可能性がある。特に、宇宙太陽発電衛星（SPS）のように大面積の太陽電池パネルを有する衛星では、衝突確率が高いことと多くの電気部品から構成されるために衝突による電氣的影響が深刻であると考えられる。

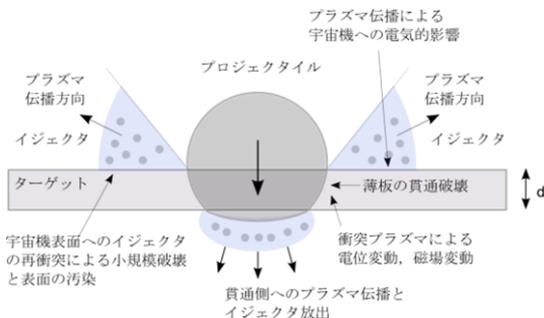


図 1. 宇宙機に対する超高速衝突の影響

2. 実験方法

2-1 実験配置

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用して、金属薄板に対する超高速衝突実験を行った。プラズマプローブによる衝突プラズマの計測、ターゲット電位の計

測を行った。衝突プラズマの計測に使用したプラズマプローブの配置を図 2 に示す。プラズマプローブは、衝突側に 10 個 (Ch1-Ch10) 設置した。衝突位置からプローブまでの距離は、衝突側では 60~200mm 程度である。ターゲットの電位変動を計測する場合は、図 3 に示すようにして計測装置と接続とした。ターゲットと実験治具はカプトンテープで絶縁させた。図 4 に電位計測での等価回路を示す。ターゲットが持つ全静電容量は 500~600pF であった。

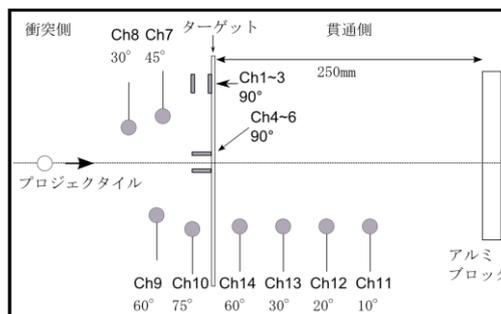


図 2. プラズマ計測での実験配置。

2-2 実験条件

プロジェクトイルにはスペースデブリの衝突を模擬するために直径 3.2mm、質量 47mg のアルミ球を使用し、ターゲットには厚さ 0.5~3.0mm のアルミニウム、銅、銀の金属薄板を用いた。プロジェクトイルの衝突速度は 5.5~6km/s であった。衝突で生じるガス雲とプラズマの伝播に対する残留ガスの影響を低減させるために、実験時の実験チャンバーの残留ガス圧力が 4×10^{-2} Pa 以下（空気の平均自由行程 25cm 以上）の状態にして実験を行った。また、ターゲット電位の計測は計 5 回行った。

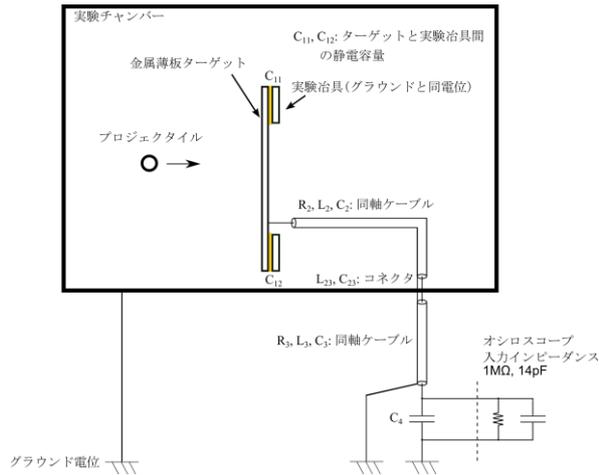
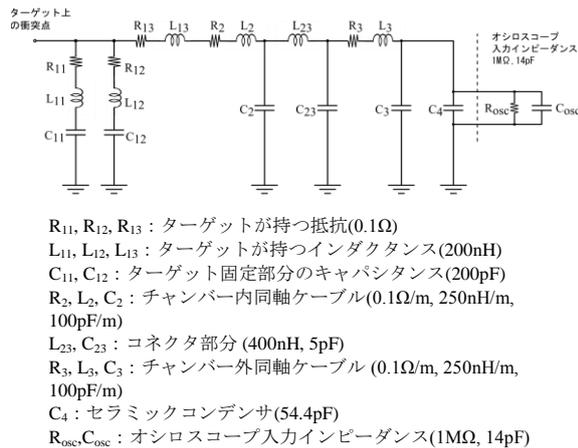


図3. 電位計測の実験配置。実験チャンバーと実験治具はグラウンド電位となっている。実験治具表面に絶縁性のテープ(カプトンテープ)を貼ってターゲットをグラウンド電位から浮かせて、ターゲットとグラウンド間の容量に生じる電位を計測した。



- R₁₁, R₁₂, R₁₃: ターゲットが持つ抵抗(0.1Ω)
- L₁₁, L₁₂, L₁₃: ターゲットが持つインダクタンス(200nH)
- C₁₁, C₁₂: ターゲット固定部分のキャパシタンス(200pF)
- R₂, L₂, C₂: チャンバー内同軸ケーブル(0.1Ω/m, 250nH/m, 100pF/m)
- L₂₃, C₂₃: コネクタ部分(400nH, 5pF)
- R₃, L₃, C₃: チャンバー外同軸ケーブル(0.1Ω/m, 250nH/m, 100pF/m)
- C₄: セラミックコンデンサ(54.4pF)
- R_{osc}, C_{osc}: オシロスコープ入力インピーダンス(1MΩ, 14pF)

図4. 電位計測における測定系の等価回路

3. 電位変動の計測結果

衝突後に生じるターゲット電位の変化を計測した結果を図5に示す。この波形のように、いずれの場合も信号の立ち上がり後に時間と共に減衰していく6MHzの正弦波が乗っていたが、これは計測回路中のLC成分による振動である。ターゲット電位の変化は、イオンよりも速い速度を持つ電子がターゲット近傍から離脱し、ターゲットの電位が正になったことが原因であると考えられる。電位変動の最大値は、4Vから8V程度であった。今回得られた結果を表1にまとめた。材質ごとで電圧の最大値を比較すると、アルミニウム、銀、銅の順で大きくなっていった。また、アルミニウムの場合は厚さが厚くなるほど、僅かではあるが大きくなる傾向があった。これらの材料や厚さによる傾向は、プラズマの生成量と関係していると予想される。

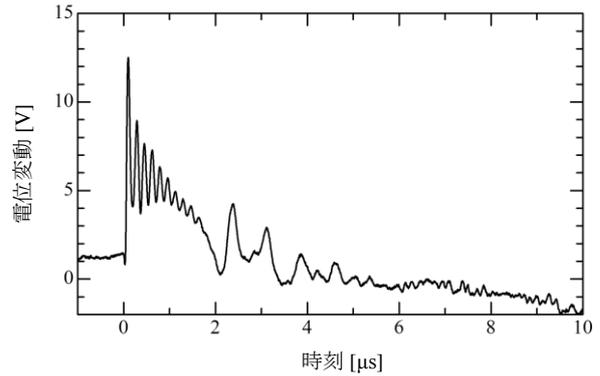


図5. ターゲットの電位計測結果。Cu ターゲット、厚さ500μm

表1. ターゲット電位の計測結果

ターゲット材質	ターゲット厚さ [μm]	電位の最大値 [V]
Al	0.3	3.4
Al	1.0	3.7
Al	3.0	4.2
Cu	0.5	8.2
Ag	0.5	6.8

4. 衝突によるプラズマ生成と電位の変化

プロジェクタイトルがターゲットに衝突すると、高温ガスと電離気体(プラズマ)が発生する。衝突で生じるプラズマは、全体としては正負等量であると考えられるが、一般的に電子の速度はイオンの速度よりも非常に高速であるため、プラズマ生成過程の初期(衝突の初期)では単位時間あたりにターゲットから放出される電子は正イオンよりも非常に多くなり(電子電流 > イオン電流)、ターゲットは時間と共に正に帯電していく。ターゲットには、その時点での電荷量とターゲットが持つ静電容量に応じた電位が発生するので、離脱することができる電子は、その時点のターゲットの電位よりもエネルギーが高いもののみとなる。エネルギーが高い電子から順に離脱していくと考えると、離脱可能な電子は、ターゲットが最終的に到達する電位 V 以上のエネルギーを持っているもののみであるので、粒子のエネルギー分布を $f(\epsilon)$ とすると、電子の総量に対する離脱電子の割合は、粒子のエネルギー分布を $V \sim \infty$ まで積分して求めることができる。これにターゲットの電位が V になるまでに発生した電子の総量 N_e をかけると、離脱電子数 ΔN_e となる。ターゲットとグラウンド間の静電容量に蓄えられた電荷 Q は離脱電子数と素電荷の積で表され、 $Q = e \Delta N_e$ となる。 $Q = CV$ であるので $e \Delta N_e = CV$ となり、

$$\frac{CV}{e} = N_{total} \int_V^{\infty} f(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

ここで、 C はターゲットの静電容量[F]、 V は発生電位[V]、 e は素電荷であり 1.602×10^{-19} [C]、 N_{total} はプラズマの総発生量、 $\int f(\epsilon) d\epsilon$ の項は離脱した高いエネルギー

を持つ電子の割合を表しており、 N_{total} と $\int f(\epsilon)d\epsilon$ の積は離脱電子数となる。(1)式で右辺に未知数 V を移すと(2)式のようになる。

$$\frac{C}{eN_{total}} = \frac{\int_V^{\infty} f(\epsilon)d\epsilon}{V} \quad (2)$$

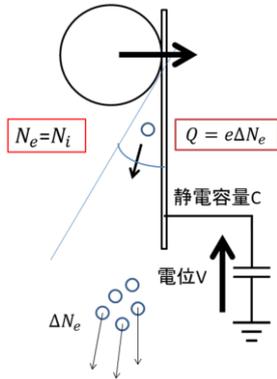
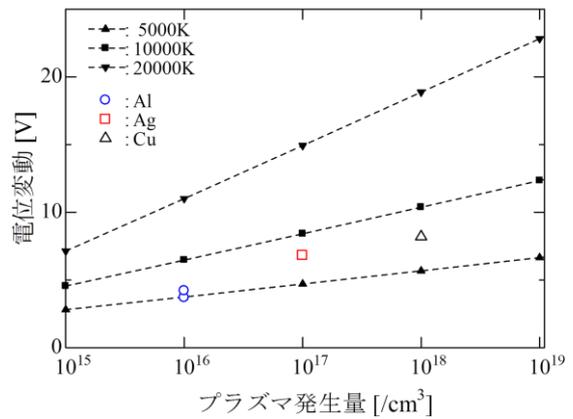


図6. 電位変動のメカニズム

実験時と同じ条件で $C=500\text{pF}$ として、(2)式から電位 V を求めた。ここでは、プラズマプローブからプラズマ密度を求めた時と同じく、過去に行った衝突実験での温度計測結果を基に 5000K と 10000K の温度で計算を行った。プラズマ発生量が $10^{15}\sim 10^{19}$ 個の範囲で電位を計算した結果を図7に示す。プローブデータから求めたプラズマ総量は、アルミニウムの場合は 10^{16} 個のオーダー、銀の場合では 10^{17} 個のオーダー、銅の場合は 10^{18} 個のオーダーであったので、電位の大きさはアルミニウムと銀の場合では $3.7\sim 6.5\text{V}$ であり、銅の場合では $5.2\sim 9.4\text{V}$ である。仮定する温度による計算結果の違いあることを考慮してもこれらの計算結果は、表1に示した計測結果と比較してほぼ同じ程度の大きさであった。よって、電位の発生原因は、高いエネルギーを持つ電子の離脱によりターゲットが帯電したためであると結論される。

mg オーダーの物体が宇宙機に数 km/s で衝突した場合は 1eV 前後の温度のプラズマが生じ、衝突部の電位変化の大きさは数V程度であった。一方、秒速数十kmの衝突の場合では発生するプラズマは数 eV 程度であるので、微粒子の衝突の場合でも(1)式が成り立ち、同程度のプラズマ発生数であるとするならば、本実験で計測された電圧の数倍以上の電圧が生じると予想される。ここでは、一例として 20000K での計算結果を示した(図7)。



5. まとめ

二段式軽ガス銃を使用して超高速衝突実験を行い、プラズマプローブによる衝突プラズマの計測とプラズマ伝播に起因するターゲット電位の変動を計測した。ターゲット電位の変動は、衝突後に発生したプラズマのうち、ターゲット電位に打ちかかって離脱した電子によりターゲットが帯電したために生じていると考えられる。離脱電子による電荷 Q とターゲットとグラウンドとの間の静電容量 C から発生電位 V を計算することができ、実験結果をおおよそ説明できることを示した。

これらの実験データから mg オーダーの物体が宇宙機に数 km/s で衝突した場合に生じる電位は数V~十数V程度となると考えられる。この電圧は搭載機器の動作電圧程度からそれ以上の大きさであり、電圧の立ち上がりも高速であるため、衝突の電位変動で発生したノイズが原因となって宇宙機の搭載回路が誤動作する可能性がある。衝突プラズマの伝播とともに、衝突で生じる衝突部の電位変化による電気的影響も宇宙機の運用にとって非常に重要な影響を及ぼすと考えられる。

謝辞：本研究は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所のスペースプラズマ共同利用設備の二段式軽ガス銃を用いて行われました。実験にご協力いただいた共同利用運用担当者に深謝いたします。

引用：(1)薄板構造への超高速衝突により発生するプラズマの伝播特性、長岡洋一、田中孝治、佐々木進、日本航空宇宙学会論文集、2012年、Vol.60, No.2