

薄板構造への超高速衝突により生じるプラズマの分布計測

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

1. 研究背景と目的

宇宙機の大型化・大電力化にともない、大型で薄型の太陽電池が用いられるようになると考えられる。大型の太陽電池パネルでは、スペースデブリやマイクロメテオロイドの衝突は不可避である。宇宙機に対するスペースデブリ等の超高速衝突では、1) 太陽電池パネルの貫通、2) 衝突時に発生するイジェクタの再衝突による表面の劣化、3) 衝突で誘起されたプラズマの伝播、4) 被衝突物での電流発生とそれに伴う電位変動の4つが重要である（図1）。1) では、太陽電池セルの直列接続部分の断線による発電量の低下を引き起こす可能性がある。2) では、透過光の減少による太陽電池の発電性能の劣化を招く可能性がある。3) では、衝突面に沿った方向にプラズマの伝播が生じ、太陽電池など露出した電気部品との干渉や帯電した機体表面での放電を引き起こす可能性がある。4) では、バス部の電位が変動し、搭載機器の動作等に影響を及ぼす可能性がある。

本研究の目的は、薄型太陽電池へのスペースデブリやマイクロメテオロイドの超高速衝突が与える影響を解明し、その影響を最小限に止めるための手段（設計）を見出すことである。本稿では、プローブ計測から得られた衝突プラズマの伝播特性と太陽電池に対する衝突プラズマの影響評価について述べる。

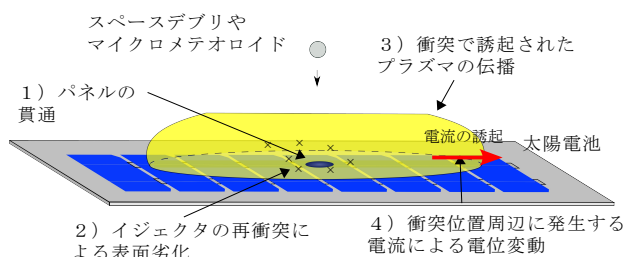


図1. 薄板構造に対する衝突現象

2. 実験方法

2-1. 実験配置と実験装置

宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて衝突実験を行った。図2に実験チャンパー内の配置を示す。実験チャンパー内には、薄板ターゲットとプラズマプローブを設置した。プロジェクタイトルが衝突する側を衝突側、プロジェクタイトルが貫通していく側を貫通側と呼ぶことにする。また、プローブの設置角度と衝突プラズマの伝播角度は、ターゲット面に垂直方向から定義する。プラズマ計測には2つの電極を有するダブルプローブを使用した。直径6mmの円板型電極を10mmの間隔で向かい合わせ、電極間には10Vの電圧を印加した。プラズマ計測回路の検出抵抗の値は、衝突側は1Ω、貫通側は20Ωであった。衝突側に8個（Ch1-Ch3, Ch8-12）、貫通側に4個（Ch4-Ch7）の計12個設置した。衝突位置からプローブまでの距離は、衝突側45, 60, 75度方向で60mm程度、衝突側90度方向で100~200mm程度、貫通側で40mm~140mm程度である。衝突で生じる発光現象の観測には高速度カメラ

（Hyper Vision HPV-1、島津製作所）を使用した。高速度カメラは衝突位置を見るようにプロジェクタイトルの飛行方向に対して垂直に設置し、撮影間隔2μsで102コマの画像を撮影した。

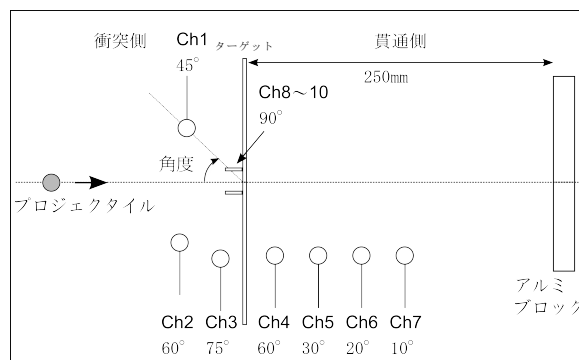
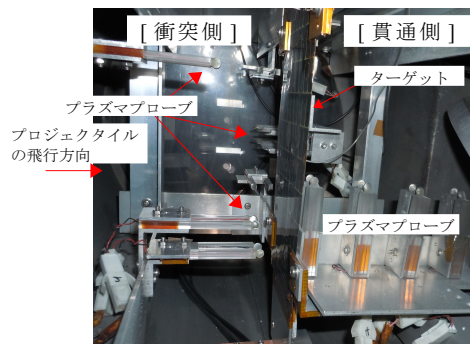


図2. 上：実験チャンパー内のターゲット部の写真、下：チャンパー内の配置図（Ch8~10は図と垂直方向に配置）

2-2. 実験条件

二段式軽ガス銃を用いてこれまで計23回の実験を行った。ターゲットには厚さ100~500μmの金属板6種類（Al, Ti, Cu, Ag, Ta, W）と構造全体の厚さが235μmの薄膜太陽電池を用いた。プロジェクタイトルは直径2.0mm（質量11mg）、直径3.2mm（質量47mg）のアルミ球で、衝突速度は5.3~6.3km/sであった。また、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、実験チャンパーの残留ガス圧力が0.1Pa程度以下（空気の平均自由行程10cm以上）で実験を行った⁽¹⁾。

3. 実験結果

3-1. プラズマプローブによる衝突プラズマの計測

プラズマプローブによる計測結果の代表例としてターゲットにチタン（厚さ100μm）を用いた時のCh8とCh9のプローブ電流波形を図3に示す。このグラフの縦軸の電流値はプローブ位置に到達したプラズマの密度に比例した量を示している。これらのデータから伝播距離と方向に対するプラズマ密度の依存性を調べるとともに、プラズマの伝播速度を求めた。

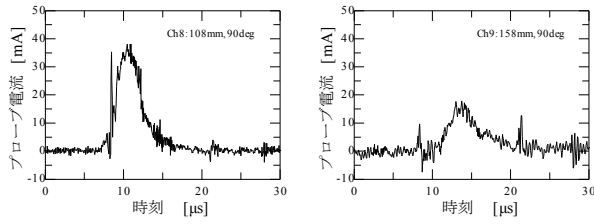


図 3. プローブ電流の時間変化
(ターゲット Ti, 厚さ 100μm)

3-2. 高速度カメラによる発光雲の観測結果

高速度カメラにより撮影された発光雲の代表例を図 4 に示す。衝突側では面に沿った発光雲の伝播を観測し、これにより発光雲の拡散速度を求めることができる。なお、発光雲は励起された中性ガス及びプラズマの存在を表していると考えられる。

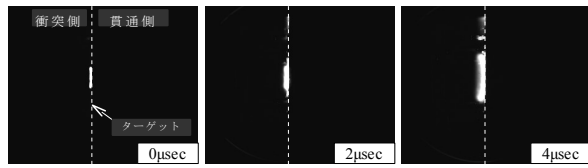


図 4. 高速度カメラで観測した発光雲の伝播
(ターゲット Cu, 厚さ 500μm)

3-3. ターゲットとグラウンド間での電流発生

金属同士の衝突でターゲットからグラウンドに流れた電流の計測結果を図 5 に示す。ターゲットからグラウンドに流れる方向を正としている。ピーク値が数百 mA の電流が振動的に流れることが観測された。この電流は宇宙機の場合は、太陽電池パネルの電位変動、すなわちバス電圧の変動をもたらす。

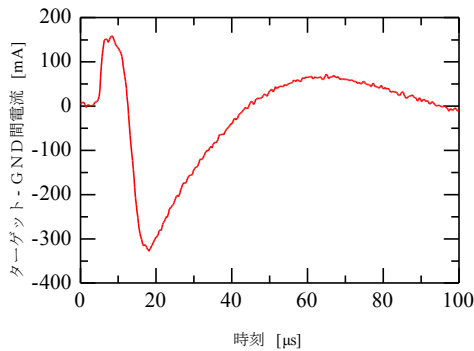


図 5. ターゲット-GND 間に流れる電流。衝突イベントは時刻 3 μs である (ターゲット Cu, 厚さ 500μm)

4. 考察

4-1. 衝突プラズマの伝播特性

4-1-1. 伝播によるプラズマ密度の減衰

ダブルプローブ理論を適用し、プローブ電流のピーク値からプラズマ密度 n_p [cm⁻³] を求めた。ここでは、電子温度が 5000~10000[K] の範囲にあり、プラズマ粒子がプロジェクトイル材質のみから構成される場合とターゲット材質のみから構成される場合を仮定して計算を行った。図 6 に伝播にともなうプラズマ密度の減衰を示す。これらの代表的な例では、衝突プラズマの密度は空間に伝播すると共に伝播距離に反比例して急速に減衰していく。

プローブで計測されたプラズマは、プロジェクトイルとターゲットの接触位置で生じたものであると考えられる。この接触位置はプロジェクトイルの貫通とともにターゲット面上を移動していくので、衝突によるプラズマ生成位置はある速度で移動する。速度 V_d で移動する部分から熱平衡プラズマ (熱速度 V_{th}) が放出されているとする。それぞれの角度に対して伝播するプラズマ粒子がドリフトマクスウェル分布をしていると仮定すると、速度分布関数は次のように表される。

$$f(v) = n_0 \left(\frac{1}{2\pi v_{th}^2} \right)^{1/2} e^{-\frac{(v-v_d)^2}{2v_{th}^2}} \quad (1)$$

衝突位置から距離 ℓ の位置でのプラズマ密度は、以下の式で表される。

$$n_p = \frac{n_0}{\ell^3} \left(\frac{1}{2\pi v_{th}^2} \right)^{1/2} (v' + v_d) e^{-\frac{v'^2}{2v_{th}^2}} \propto \frac{1}{\ell^3} \quad (2)$$

ただし、 $v' = v - v_d$ である。このモデルによるとプラズマ密度は伝播距離の 3 乗に反比例して減衰する。

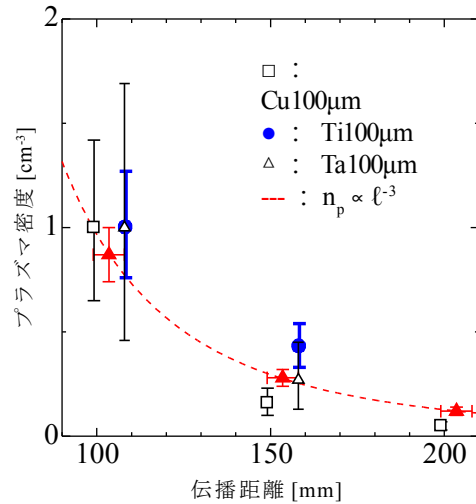


図 6. プラズマ密度と伝播距離の関係

4-1-2. プラズマ密度、伝播速度の角度依存性

ここでは、プラズマ密度が距離の 3 乗に反比例して減衰すると仮定し、実測値を衝突位置から 100mm の位置における密度に換算して実験結果を比較した。図 7 に示すように、プラズマの密度は伝播角度に依存しており、いずれの実験でもプラズマ密度の最大値は 60~80 度の範囲に存在し、密度は 10^{13~14}[cm⁻³] のオーダーであった。また、面方向 (90 度方向) に伝播するプラズマも 10^{12~13}[cm⁻³] のオーダーであり、高密度のプラズマが表面付近を伝播する。

プラズマの伝播速度と伝播角度の関係を図 7 に示す。衝突側の 45, 60, 75, 90 度方向で伝播速度を比較すると、面に近いほど伝播速度が速いという傾向があった。Cu の場合、45 度方向では衝突速度よりも遅く、60 度から 90 度方向での伝播速度は、衝突速度と同じ程度から 2 倍程度であった。

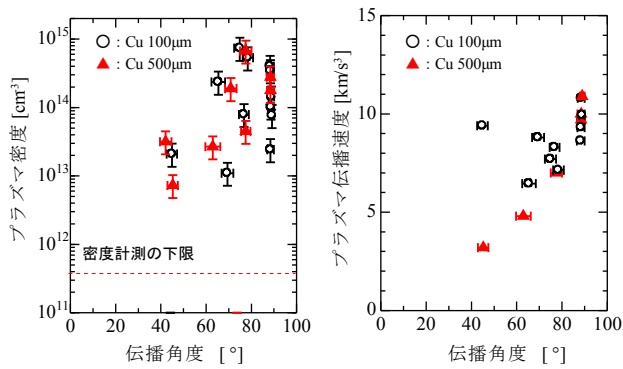


図7. 左：プラズマ密度と伝播角度の関係、右：プラズマの伝播速度と伝播角度の関係

4-2 発光雲とフラグメントの伝播速度

高速度カメラの画像から求めた発光雲の伝播速度とフラグメント速度について面内の速度分布を図8にまとめた。また、プラズマの速度（ピーク時刻から求めた速度）を同時に示した。プラズマ、発光雲、フラグメントの伝播速度はほぼ同じであり、いずれもプロジェクトイル速度よりも高速で飛散・伝播していた。このことは、これらがいずれも同じメカニズムで放出されたと考えることができる。今後解析を進め、高速で放出されるメカニズムを解明する。

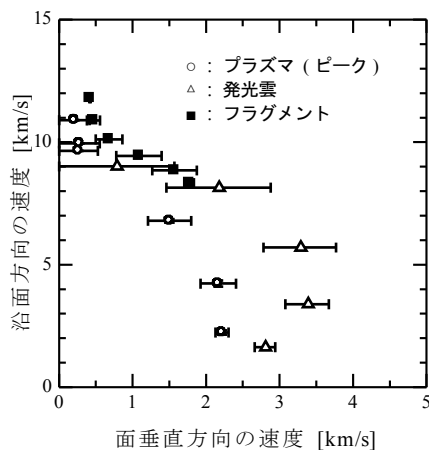


図8. プラズマの伝播速度、発光雲速度、フラグメント速度（ターゲット Cu, 厚さ 500μm）

5. 太陽電池に対する衝突プラズマの影響評価の一例

実験室および宇宙環境におけるプラズマ密度と太陽電池の放電開始電圧の研究からバス電圧が 100~200V の場合には、プラズマ密度 $10^{10}[\text{cm}^{-3}]$ 程度から放電が開始されるという研究結果が報告されている⁽²⁾。実験結果よりプラズマ密度の減衰がほぼ距離の 3 乗に比例しているとした場合、衝突プラズマが影響を与える範囲は衝突位置から 10cm の位置でのプラズマ密度が $10^{13}[\text{cm}^{-3}]$ であるとする、衝突位置から半径 100cm でプラズマ密度が $10^{10}[\text{cm}^{-3}]$ となる。このように衝突で生成されたプラズマの伝播により広い範囲に影響が及ぶ可能性がある。

6. まとめと今後の課題

これまでの実験結果をまとめると、（１）プラズマ密度はおおよそ伝播距離の 3 乗で減衰する、（２）伝播は主に $60\sim 90^\circ$ の範囲であり、伝播速度は 90° に近いほど大きい、（３）プラズマの伝播速度は発光雲、衝突フラグメントとほぼ同じである、（４）衝突で生じるターゲット-グラウンド電流のピーク値は数百 mA であった。これらの実験事実を説明するメカニズムについては、（１）はドリフトマクスウェリアンの仮定でほぼ説明ができた。（２）～（４）については、今後更に実験を行い、モデルを明らかにする予定である。また、本稿では太陽電池に対する影響の一例として伝播するプラズマの影響を解析し、広範囲に影響が及ぶ可能性を示した。

今後本研究で得られるモデルを用いて、スペースデブリやマイクロメテオロイドが薄型太陽電池に衝突した際の影響を予測し、影響を最小限に止めるための方策を明らかにする計画である。

謝辞：本実験を行うにあたり、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同研究設備の二段式軽ガス銃を使用させていただきました。

参考文献：(1) 薄板ターゲットへの超高速衝突で発生するガス雲の伝播の研究、長岡洋一、田中孝治、長谷川直、佐々木進、2010、平成 21 年度スペースプラズマシンポジウム、(2) N. J. Stevens, High voltage system-plasma interaction summary, paper presented at workshop on Space Technology Plasma Issues in 2001, NASA JPL, Sep. 1986