

スペースデブリの超高速衝突に伴う電磁波放射に関する研究

山口翔太（東海大学），
万戸雄輝（徳島大学），塩田一路（工学院大学），
田中孝治（ISAS/JAXA），田中真（東海大学）

1. まえがき

微小隕石やスペースデブリの宇宙機への超高速衝突による損傷が、近年、宇宙環境利用の問題として認識が高まっている。その相対速度は、数 km/s～10km/s 以上に達する。デブリの衝突回避に関して、現在、地上からのレーダや光学望遠鏡を用いた観測による、人工衛星の軌道制御が行われている。地上からの観測で確認できるスペースデブリの大きさは10cmが限界であり、観測できないデブリへの対策が必要である。デブリ衝突の対策には、衝突時の損傷を防ぐシールド開発とともに、衝突破壊の伝搬を最小限にするための衝突現象の定量的解明、衝突が起きたこと及びその衝突の規模の検知もまた重要である。

我々は、より軽量なデブリシールドの開発[1]とともに、人工衛星の搭載機器に影響を与えうる超高速衝突による各種電氣的現象に関する基礎実験を行っている。特に、衝突による電磁波、衝突プラズマ、衝突発光、電位変動等の電氣的現象を同時観測による定量的評価と各現象の発生及び伝搬メカニズムの解明に取り組んでいる。[2,3]また、電磁波の発生は、この現象の応用により、デブリ衝突を検出し、衝突破壊の規模の推定に役立つと考えている。

これまで、飛翔体及びターゲットの材質や厚さの違いによりマイクロ波放射の程度が異なることを確認した[4]。電磁波の放射特性をより詳細に計測するために、3次元的に配置したアンテナ群によって電磁波の広がり空間的計測を試みている。

一方で、超高速衝突で発生するプラズマに関しては、プラズマの拡散モデルを構築し、電子温度、電子密度に加え、伝搬特性を調べてきた[3]。また、種々の素材の飛翔体やターゲットを用いて、プラズマ伝搬とターゲットの電位変動の関係を明らかにしつつある。

本論文では、超高速衝突現象における電氣的現象の統合的実験の概要に関して報告する。

2. 実験の構成

図1に、実験装置全体の構成を示す。飛翔体の加速器には JAXA 宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いた。また、電波計測を空間的に計測するためにアクリル製衝突実験チャンバを用いた。ターゲットを設置するチャンバ内は真空に保持する。ターゲットの素材はアルミ・銅を使用し、飛翔体の素材にはナイロン・ステンレスを用いた。今回実験で行ったターゲット・飛翔体の組み合わせを表1に示す。また、図2に各計測機器の配置を示す。電波計測のために 5.8GHz 帯方形パッチアンテナをターゲット周りに設置した。受信系はヘテロダイン方式を用いた受信システムを構成しており、受信感度を高めるべく低ノイズ増幅器(LNA)を用いた。次に、プラズマ計測であるがチャンバ内にプラズマプローブを設置した。また、高速度カメラとフォトダイオードを使い発光現象の観測を実施した。

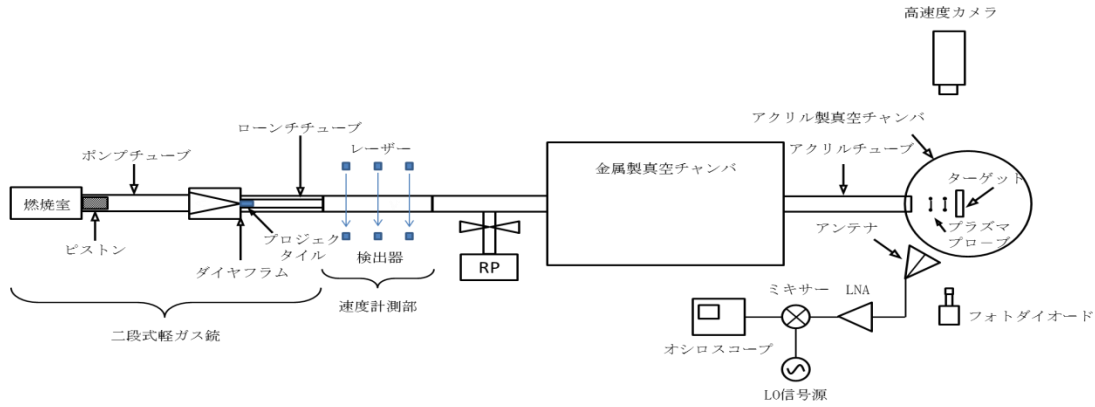


図1 アクリル製チャンバを用いた実験装置

表1 ターゲット・飛翔体組み合わせ

| Shot No. | Target material | Target size[mm] | Target thickness[mm] | Projectile material | Impact velocity[km/s] | Projectile diameter[mm] | Projectile mass[g] |
|----------|-----------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | Al | 110x110 | 25 | Ny | 6.904 | 7.0 | 0.218 |
| 2 | Al | 110x110 | 25 | Ny | 6.885 | 3.2 | 0.019 |
| 3 | Al | 110x110 | 40 | Ny | 6.960 | 3.2 | 0.019 |
| 4 | Cu | 110x110 | 25 | Ny | 6.890 | 3.2 | 0.019 |
| 5 | Cu | 110x110 | 25 | SUS | 6.554 | 3.2 | 0.133 |
| 6 | Al(L) | 330x330 | 25 | SUS | 6.494 | 3.2 | 0.133 |

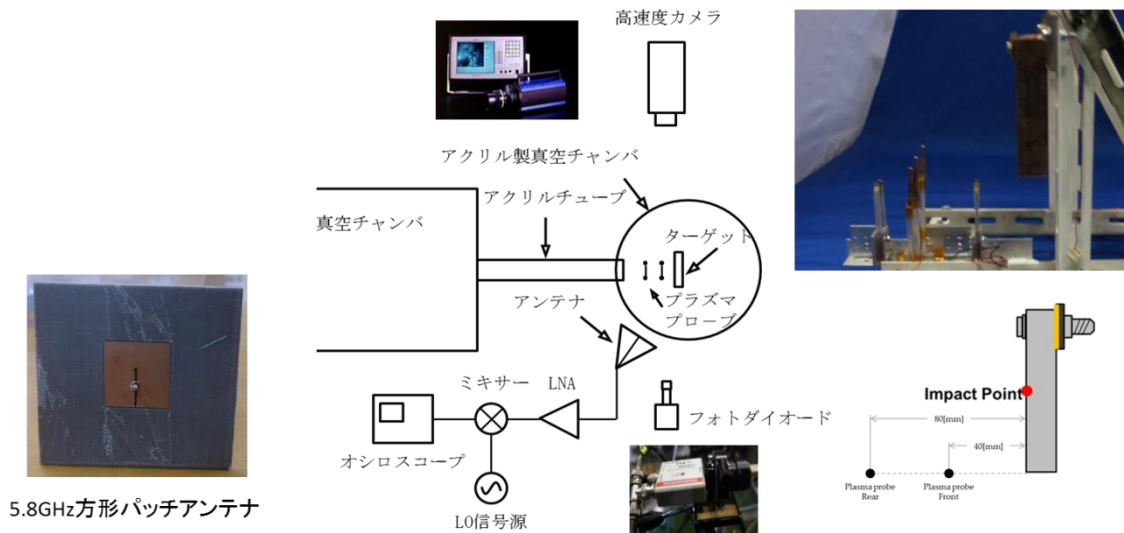


図2 各計測機器の構成

3. 結果及び考察

3.1 計測結果

図3に電磁波の受信結果、フォトディテクタにより計測した発光強度の時間変化、さらにプラズマプローブにより得られたプラズマ電流の変化を示す。ターゲットには厚さ25mmのアルミニウムを使用し、飛翔体には直径7mmのナイロン球を使用し、速度6.9km/sに加速して、衝突実験を行った。なお、衝突時刻の推定にはフォトディテクタにより観測された発光の立ち上がりを衝突開始として定義し時間軸を補正した。図3より、衝突開始直後、数 μ s後にプラズマプローブによりプラズマ電流の変動が起こり、これが約10 μ s間確認できた。一方で電磁波は衝突後、約80 μ s後から計測され、900 μ s後も受信していることが確認できた。図4では、ターゲットの電位変動の変化の様子を示す。電位変動に関して、衝突開始の約5 μ s前から電位が上昇し、衝突開始後電位が10 μ sの間で急激に減少していることが確認できた。

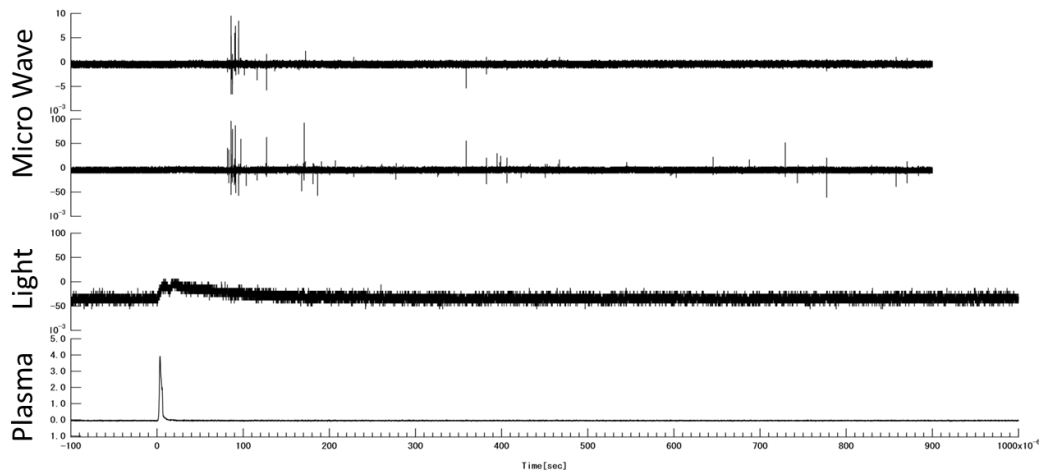


図3 電波・発光・プラズマ電位変動の観測

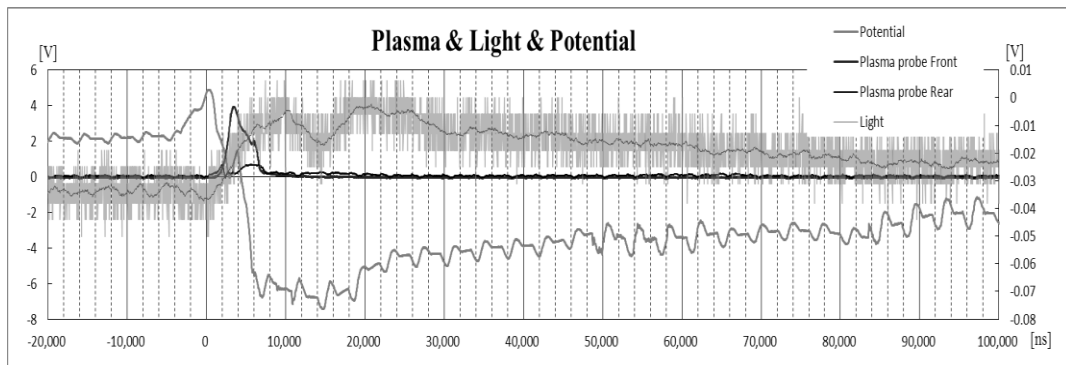


図4 電位変動・発光・プラズマ電位変動の観測

3.2 衝突エネルギーに対する依存性

衝突エネルギーに対する電磁波の放射強度とプラズマの伝搬速度の依存性について示す。図5に、衝突エネルギーに対する電磁波放射強度の依存性を示す。これから、衝突エネルギーに対して放射される電磁波の強さは必ずしも、衝突エネルギーのみに依存しないことが確認できた。図6に、衝突エネルギーに対するプラズマ速度の依存性を示す。衝突エネルギーの変化に対するプラズマの伝搬速度の変化はみられなかった。

4. まとめ

本論文では、超高速衝突による、電磁波、衝突プラズマ、ターゲット電位、衝突発光等の電氣的現象の同

時観測に関して述べた。衝突により発生する発光雲は、プラズマと中性気体分子の混在が予想され、高速度カメラによる光学観測とプラズマプローブによる電離気体の観測により、発光雲には電離気体が含まれ、その拡散速度は高速度カメラでの観測とプローブの観測でほぼ一致することがわかった。衝突により発生する電磁波は衝突開始から数十 μ sの時間的遅れがあり、また約800 μ s後も観測できることがわかった。また、衝突開始後の観測開始時間は、ターゲットや飛翔体の材質、衝突速度で異なることがわかった。今回の実験ではターゲットの電位が衝突開始約10 μ s以前から変動していた。これは、実験装置に由来する課題と考えられ、調査を行っている。衝突エネルギーに対する電磁波強度の依存性を調査しているが、衝突エネルギーのみには依存しないことがわかった。

今後は、実験条件を増やすことで、電氣的現象の各発生メカニズムを明らかにし、応用に役立てる取り組みを行っていく予定である。

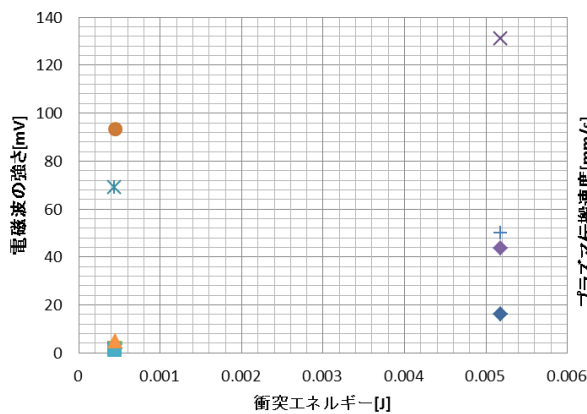


図5 衝突エネルギーに対する電波強度依存性

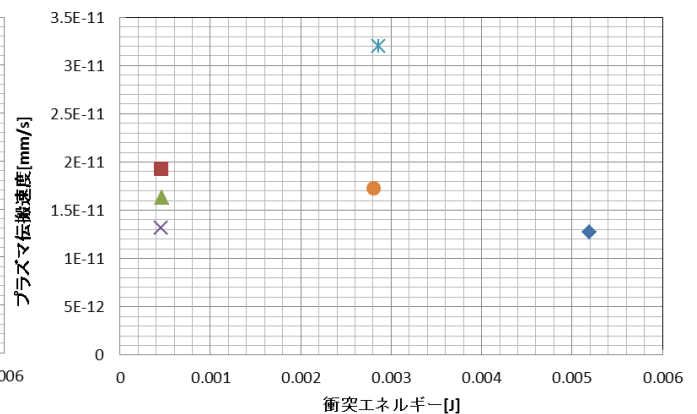


図6 衝突エネルギーに対するプラズマ伝搬速度依存性

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ガス銃を用いて行われました。二段式ガス銃の運用において長谷川直氏、鈴木絢子氏には多大な助力を頂いて感謝しています。

参考文献

- [1] 木下、桑折、田中、塩田、何、佐々木、矢ヶ崎、“斜め衝突を利用した衛星用デブリシールドの開発”、平成24年度スペースプラズマ研究会、11、宇宙科学研究所、相模原市、Feb,2013.
- [2] 長岡洋一、田中孝治、佐々木進、“超高速衝突により生じる衝突プラズマと電位変動”、平成23年度スペースプラズマ研究会、相模原、2月28-29日、2012.
- [3] 長岡洋一、田中孝治、佐々木進、“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”、日本航空宇宙学会論文集、Vol.60, No.2, pp.89-95, 2012.
- [4] 小林(正)、田中(真)、田中(孝)、牧、相馬、佐々木、“超高速衝突に伴う電氣的現象の研究”、宇宙科学に関する室内実験シンポジウム、1、宇宙科学研究所、Feb.,2015.