

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630397

研究課題名(和文)超高速宇宙浮遊物の宇宙機への衝突による宇宙機電位変動の研究

研究課題名(英文)Change of electrical potential of spacecraft induced by a hyper-velocity impact of space debris

研究代表者

佐々木 進 (Sasaki, Susumu)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・名誉教授

研究者番号：00092221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：JAXA 宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃を用いて各種ターゲットへの超高速衝突実験を行い、衝突時に発生するターゲットの電位変動とともに、アンテナを用いた電波計測、プラズマプローブを用いた衝突プラズマの計測、高速度カメラによる画像観測、フォトディテクタによる発光計測を行い、超高速衝突で発生する電磁現象の全体像を明らかにした。放射される電波については、強度だけでなく、直線偏波のアンテナを水平と垂直に設置しその偏波を計測した。電位変動は、衝突発光とほぼ同じ時刻で観測されるのに対して、電磁波は、必ず、衝突推定時刻よりも数10 μ sec以降に観測され始めるという興味深い事実を見いだした。

研究成果の概要(英文)：Electrical phenomena induced by hyper velocity impact has been extensively studied using a two-stage light gas gun at ISAS/JAXA. We measured the potential change of the target, the electromagnetic radiation by antennas, the impact plasma by double probes, the images by a high-speed camera, and the photo emission by optical detectors. We measured the intensity and polarization of the radiated electromagnetic waves. The potential variation of the target was observed simultaneously with the impact flash. However, the electro-magnetic waves were detected several ten microseconds after the hyper-velocity impact, which is one of the new findings. The results of our study will be used to predict the electrical effects associated with the space debris/meteoroids impacts on spacecraft structure.

研究分野：宇宙エネルギー工学

キーワード：超高速衝突 電位変動 電磁波放射 衝突プラズマ

1. 研究開始当初の背景

微小隕石やスペースデブリは、宇宙機に相対速度で数 km/sec~数十 km/sec という超高速で衝突する (①、②)。この時、宇宙機に甚大な物理的破壊を引き起こすため、デブリシールドの研究が活発に行われてきた。しかし、デブリ衝突のような超高速衝突では、物理的な破壊現象の他に、電位変動やプラズマの発生、電磁波の発生が報告されている。電位変動やプラズマの発生は、宇宙機に対して電氣的な故障や短絡現象を誘発し電源の損失を起こす可能性がある。

宇宙機に対して深刻な影響を与える可能性があるデブリに関しては、サイズが大きな物は地上からの観測によりカタログ化され、衝突を回避する衛星運用が行われている。しかし、地上からのレーダ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、それよりも小さなデブリとの衝突は確率的に発生する (③)。このような、確率的に発生するデブリ衝突を検出し、また、その規模を推定する技術は重要である。デブリ衝突により発生する電磁波発生現象を解明できれば、デブリ衝突の発生、位置の特定、規模の推定ができる可能性がある (④、⑤)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、デブリ衝突のような超高速衝突における電位変動、衝突プラズマ、電磁波を同時観測することで、発生する電磁現象を総合的に捉えることである。

3. 研究の方法

超高速衝突実験には、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃を使用した。最大直径7mm、重さ約0.2gのプロジェクタイトを7km/sまで加速することができる。使用したプロジェクタイトはナイロン、アルミニウム、ステンレス、チタンである。ナイロンのみ直径7mmと3.2mmの球を使用した。他の金属球のサイズは3.2mmである。ターゲットについても、アルミニウム、銅、ス

テンレスなど異なる金属材料を使用し、また、誘電体材料としてガラスを用いた衝突実験を行った。

電波計測に関しては、3次元的に配置したアンテナによって電波の広がり方を空間的に捉えた。飛翔体の運動エネルギーを同等として放射される電波の比較を行い、電磁波発生のメカニズムの解明を目指した。

図1に、実験系全体の構成を示す。また、図2にアンテナの配置を示す。ターゲットを設置するチャンバ内は真空に保たれている。アクリル製のチャンバを用いて、図2のようにアンテナを3次元的に配置した。

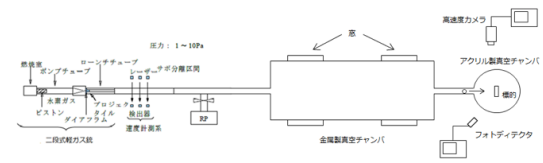


図1 アクリル製チャンバを用いた実験系全体の構成

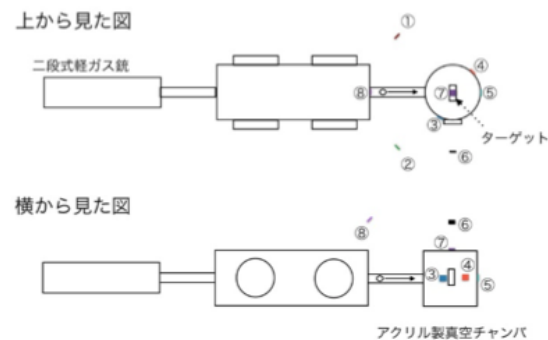
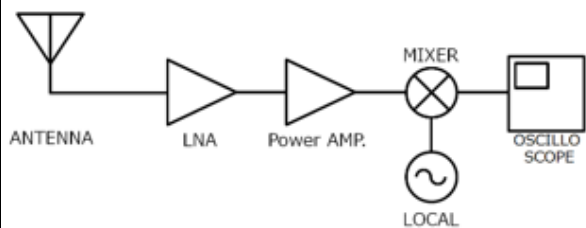


図2 アンテナの配置

アンテナの周波数は 22GHz・5.8 GHz・2GHz・300MHz を使い、複数の受信系をターゲットの周りに配置した。図3に5.8GHzの受



(a) 5.8GHz band

図3 受信系の構成

信系の構成を示す。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、受信感度を高めるために低雑音増幅器(LNA)を使用している。記録装置はサンプリング周波数4GHzのデジタルオシロスコープを用いる。観測時間は1msecである。

電位計測に関しては、金属ターゲットの電位変化をデジタルオシロスコープで計測した。

衝突プラズマは、ダブルプローブに固定バイス電圧を印加して計測を行った。図4にターゲットとプラズマプローブを示す。

衝突発光現象はフォトディテクタを用いて計測した。

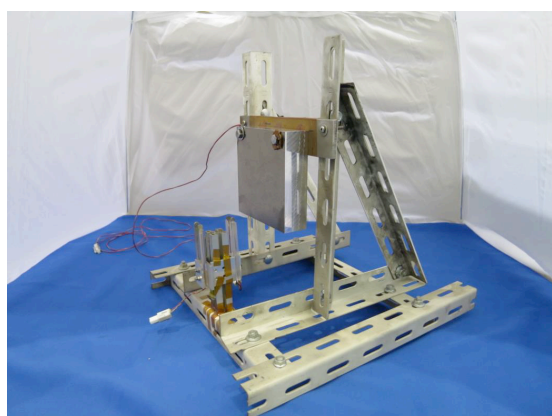


図4 ターゲットとプラズマプローブ

4. 研究成果

(1) フォトディテクタを用い、以前は、数 μs の精度しかなかった衝突時刻推定精度を10ns程度の精度まで改善した。また、各計測の時刻を同期した解析を行った。

(2) 金属ターゲットに関して衝突後の電位の変化の計測に成功した。

(3) 衝突後に発生するプラズマ計測を行った。

(4) 超高速衝突により発生する電磁波の計測に成功した。図5に5.8GHz帯に関して、自由空間損失・ケーブル損失・アンプゲインを較正した各アンテナ位置の受信波形を示す。

図5に点線で示した326.2 μsec に飛翔

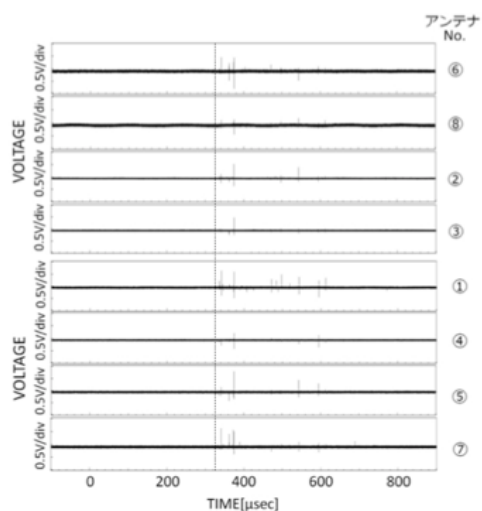


図5 飛翔体速度6.83km/sにおける衝突時の電波強度の波形

体が衝突したと推定される。衝突時刻の推定には、衝突時の発光をフォトディテクタで捉えたデータを使用している。ターゲットにはアルミニウムの厚み30mmの平板を用い、飛翔体はナイロン $\phi 7mm$ で速度は6.83km/sである。図6にターゲットと飛翔体の材質の違いにおける最大電圧値の違いを示す。各ショットで運動エネルギーを同じとして計算している。

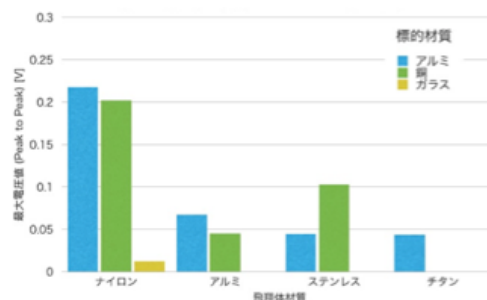


図6 標的と飛翔体の材質の違いにおける最大電圧値の差

(5) 本研究では、非金属であるアクリル製の真空チャンバを用いて実験を行った。また、受信系を最大8セット用い衝突点周りにアンテナを配置して衝突時に放射される電波の

空間的な広がりを解明した。

(6) ターゲットとプロジェクタイトルの素材の違いによる発生電波の強度差を定量的に比較した。プロジェクタイトルの素材が金属よりもナイロンの場合の方が放射される電波が大きいことがわかった。ターゲットがガラスの場合においては、アルミニウムや銅といった金属材料に比べ、放射される電波が小さいことがわかった。

プロジェクタイトルがナイロン球の場合、どのアンテナ位置においても同時刻に同程度の電波を受信した。プロジェクタイトルが金属球の場合、アンテナ位置によって信号強度が異なる場合が多かった。これは、衝突後の飛翔体の飛散状況によって信号強度が変化している可能性を示している。

(7) 本研究では 22GHz・2GHz・300MHz と複数の周波数帯で計測を行い、各周波数帯での電磁波計測に成功した。

(8) 直線偏波のアンテナを用い、直行させた二つのアンテナを用いることで、衝突により発生する電磁波の偏波に関するデータを取得した。

(9) ターゲットがアルミニウム、プロジェクタイトルがナイロンの場合において、どのアンテナ位置においても同時刻に同程度の電波を受信した。

(10) 電磁波の発生は、必ず、衝突推定時刻よりも数 $10\mu\text{sec}$ 以降に電波を受信し始めることが明らかになった。

(11) Autodyn を用いたシミュレーションソフトを用い SPH 法により衝突現象の解析を行った。飛翔体と標的の材質・速度・サイズを実験と同じに設定し、計算を行った。図 7 に飛翔体速度 3.6km/s におけるシミュレーションの結果を示す。シミュレーションの画像は圧力分布が色で表されており、赤い部分が 0.15GPa、緑の部分が 0Pa を表している。実験で電磁波が計測された時刻とシミュレーションによる破壊や応力の時間変化との比

較を行った。

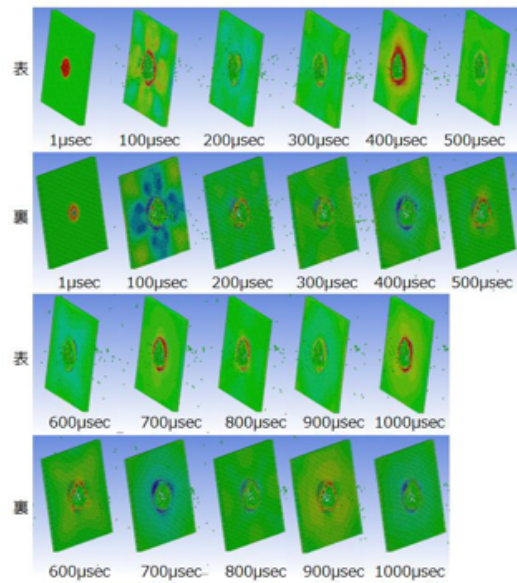


図 7 翔体速度 3.6km/s における衝突シミュレーション結果

従来の超高速衝突の研究が、主に構造破壊という観点から行われてきたのに対し、本研究では、従来国内外ともに殆ど研究例がなかった超高速衝突で発生する電磁現象に注目し、衝突ターゲットの電位、プラズマ、電磁波動計測により電磁現象の全体像を明らかにした。これにより宇宙機への超高速衝突による宇宙機電位変動を予測するための基礎的な知見が得られた。今後更に多くのパラメーター（プロジェクタイトル、ターゲット、速度）での実験を行うことにより、宇宙機へのデブリや微小隕石の衝突による電位変動や電磁的影響を定量的に見積もることが可能となると考えられる。

<引用文献>

- ① 八坂哲雄：宇宙のゴミ問題 裳華房 1997年
- ② NASA：Orbital Debris Quarterly News Volume 15, Issue 3, July 2011

- ③ 藤井雅之ほか：全天型デブリ/ダスト検出器の構成素子の応答, Space Utiliz Res, 23, pp.171-174, 2007.
- ④ 相馬央令子：超高速衝突に伴うマイクロ波放射の特性および宇宙デブリ衝突検出の検討博士論文
- ⑤ 牧謙一郎, 高野忠, 相馬央令子, 石井健太郎, 吉田真吾, 中谷正生：岩石圧縮破壊に伴うマイクロ波放射の観測, 地震, 第2 輯, 第58 巻, 第4 号, p p.375-384, 2006.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

- ① Masakazu Kobayashi, Makoto Tanaka, Koji Tanaka and Susumu Sasaki, ” Basic Experiment on Electromagnetic Irradiation Caused by Hypervelocity Impact” , 65th International Congress (IAC2014), 2014, Toronto.
- ② 小林正和、田中真、田中孝治、牧謙一郎、相馬央令子、佐々木進, 「超高速衝突に伴って発生する電氣的現象に関する基礎研究」, 第15回宇宙科学シンポジウム, 2015, 相模原.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 進 (SASAKI, Susumu)

宇宙航空研究開発機構・名誉教授

研究者番号: 00092221

(2) 研究分担者

田中孝治 (TANAKA, Koji)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号: 90321570

牧謙一郎 (MAKI, Kenichiro)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 50392121