

# 超高速衝突に伴う電磁波放射に関する基礎研究

小林正和(東海大)、田中真(東海大)、

田中孝治(JAXA)、牧謙一郎(JAXA)、相馬央令子(JAXA)、佐々木進(JAXA)

## 1. まえがき

微小隕石やスペースデブリは、宇宙機に超高速で衝突(相対速度で数 km/sec~数十 km/sec)する。デブリ衝突検出に関しては、レーダや光学望遠鏡を用いたものが知られている。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、1cm 以上 10cm 未満のデブリへの対策が必要である。

我々は約 1cm の飛翔体を加速器で加速させ、超高速衝突において発生するマイクロ波の検出に成功した[1]。この現象を応用し、すでにデブリ衝突を検出するシステムを提案している[2]。これまで、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。

本論文では、衝突時のエネルギーが低い条件での実験に着目し、飛翔体速度が 1~3km/sec 程度で衝突実験を行いメカニズムの解明を目的とした。

## 2. 実験の構成

図 1 に、実験系全体の構成を示す。飛翔体の加速器には二段式軽ガス銃を用いる。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。チャンバの窓近傍に受信アンテナを設置する。

各周波数帯における受信系の構成を図 2 に示す。22GHz 帯、2GHz 帯、300MHz 帯の 3 つの周波数帯を用いる。22GHz 帯、2GHz 帯に関してはヘテロダイン方式を採用しており、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。各受信系の観測周波数(RF)帯域、中間周波数(IF)帯域、利得を表 1 に示す。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。

飛翔体は質量約 0.2g、直径 7mm の球形をしたナイロンで、ターゲット材料については厚さ 7mm のアルミ板を用いた。また、アンテナとターゲット間距離は約 60cm である。

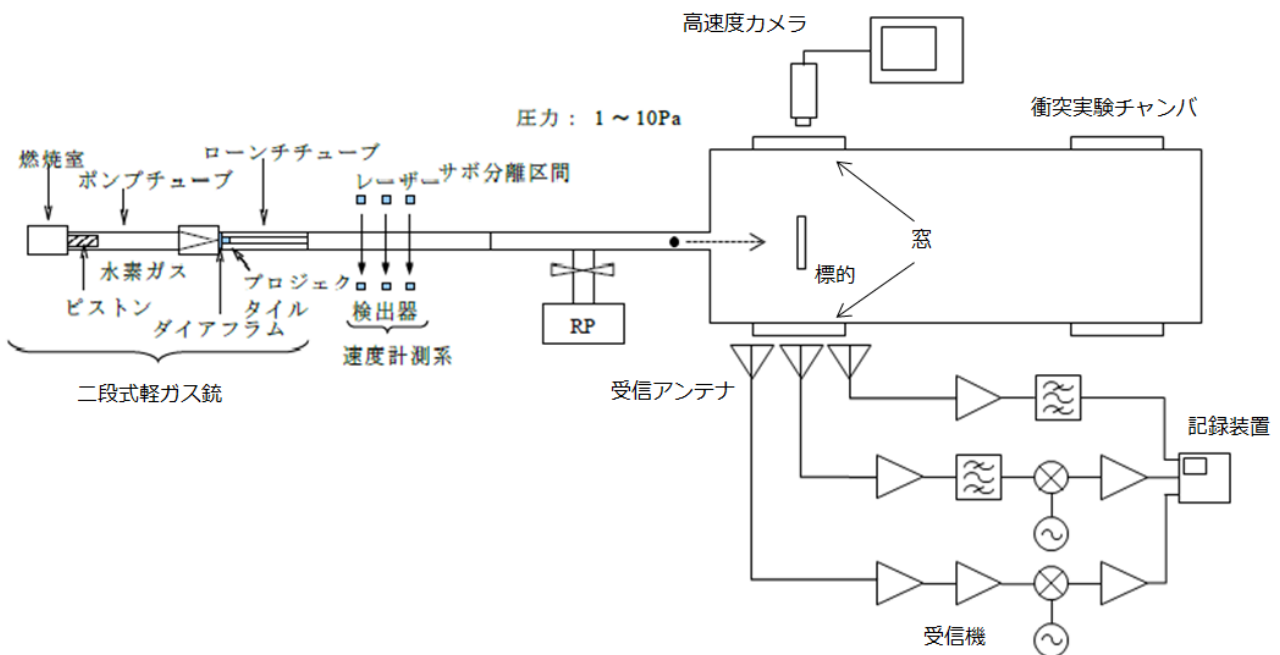


図 1 実験系全体の構成

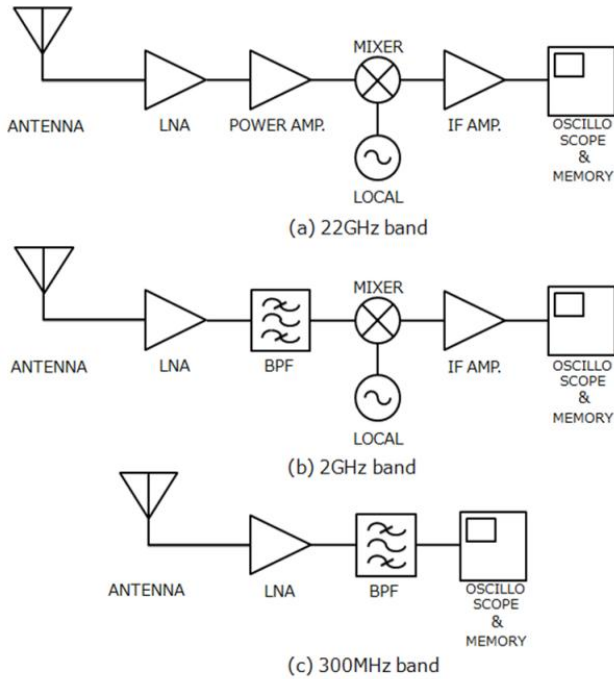


図2 各周波数帯受信系構成

表1 受信系特性

周波数帯 [GHz]	RF 帯域 [GHz]	IF 帯域 [MHz]	利得 [dB]
22	22-23	0-1100	83
2	1.8-2.2	0-350	38
0.3	0.29-0.31		31

### 3. 実験結果

#### 3-1 衝突前と衝突時の比較

図3に衝突前の波形を示す。また、図4に衝突時の波形を示す。

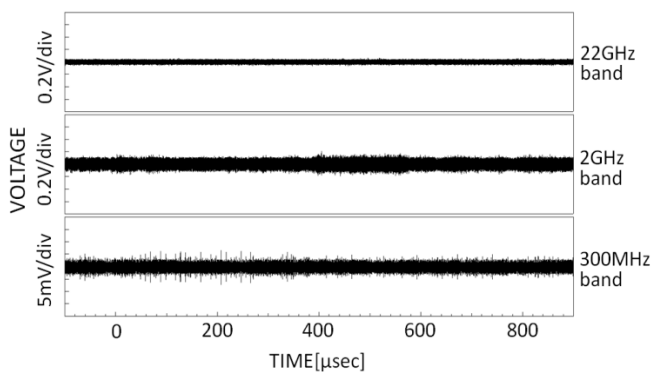


図3 衝突前の波形

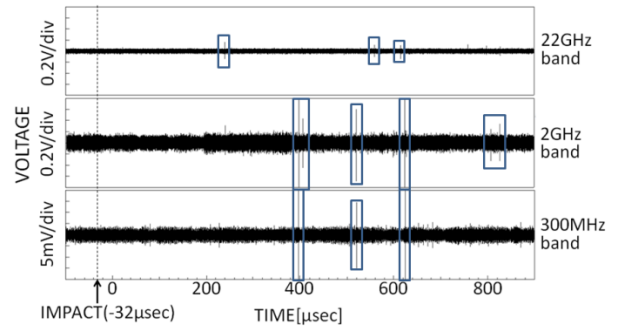


図4 飛翔体速度 1.2km/sにおける衝突時の波形

図3と図4を比較すると、波形の違いが見える。図4の青枠で囲ったところにパルス状の波形が見られる。波形を受信した時間帯は衝突から数百 $\mu$ sec後である。

#### 3-2 パルス波形および周波数

飛翔体速度 3.1km/sにおける衝突時の波形を図5に示す。

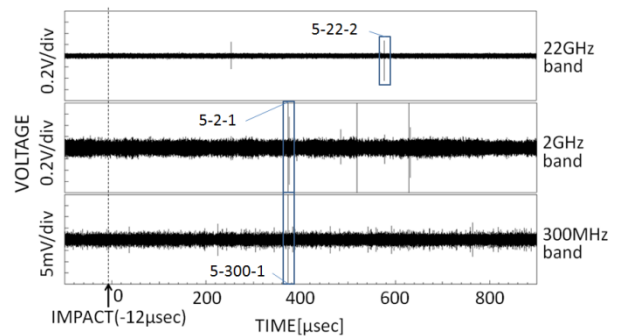


図5 飛翔体速度 3.1km/sにおける衝突時の波形

図5における5-22-2を拡大した波形を図6に示す。パルス幅は0.1 $\mu$ secである。

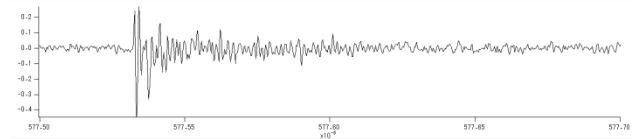


図6 図5における5-22-2を拡大した波形

図5における5-2-1を拡大した波形を図7に示す。パルス幅は0.2 $\mu$ secである。

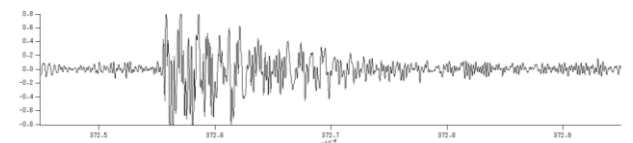


図7 図5における5-2-1を拡大した波形

図5における5-300-1を拡大した波形を図8に示す。

ルス幅は  $0.3 \mu \text{ sec}$  である。

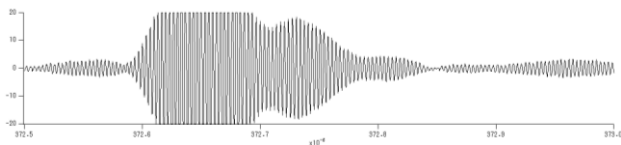


図 8 図 5 における 5-300-1 を拡大した波形

### 3-3 高速度カメラ画像との比較

高速度カメラの画像と衝突時の波形を比較する。図 9 に高速度カメラが見ている向きを示す。図 1 に示すように、高速度カメラはアンテナの設置してある反対側のチャンバの窓の前に設置してある。高速度カメラから見て右から左に向かって飛翔体が進み、左側でターゲットに衝突する。

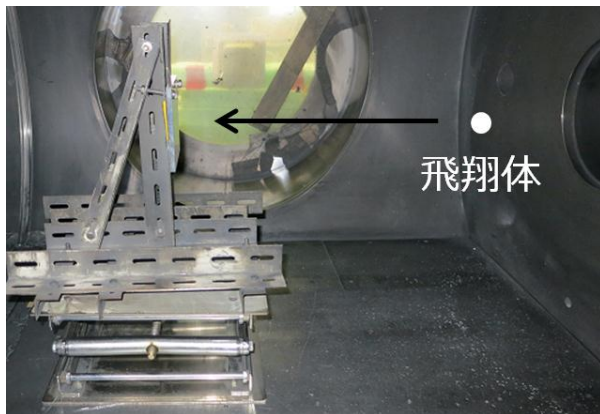


図 9 高速度カメラのしている向き

図 10 に飛翔体速度  $2.1 \text{ km/s}$  における波形と、高速度カメラの画像を比較した図を示す。発光現象が衝突後  $104 \mu \text{ sec}$  持続していることが確認出来る。

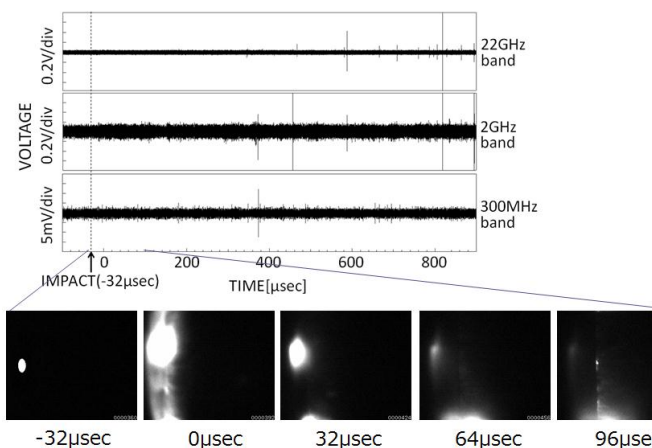


図 10 飛翔体速度  $2.1 \text{ km/s}$  における高速度カメラの画像

### 3-3 シミュレーションとの比較

シミュレーションには Autodyn というソフトウェアを用いた。SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法で解析を行った。飛翔体とターゲットの材質・速度・サイズを実験と同じに設定し、計算を行った。図 11 に飛翔体速度  $2.1 \text{ km/s}$  における波形と、シミュレーションによる結果を比較した図を示す。また、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  $0.3 \text{ GPa}$ 、緑の部分が  $0 \text{ Pa}$  を表している。

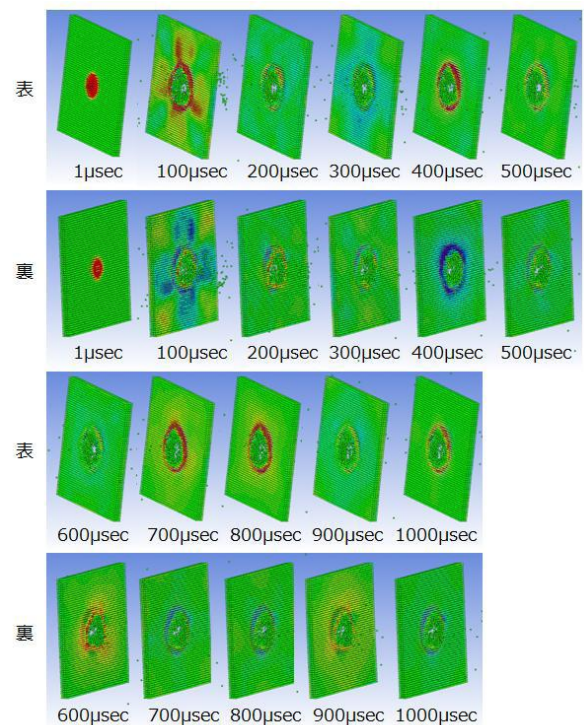


図 11 飛翔体速度  $3.6 \text{ km/s}$  におけるシミュレーション結果

## 4. 考察

図 3 と図 4 を比較すると、衝突前には見られないパルス状の信号を衝突より数百  $\mu \text{ sec}$  後に受信していることが分かる。このパルス状の信号は衝突後、数百  $\mu \text{ sec}$  後に起きたなんらかのイベントによって発生した電磁波だと考えられる。

図 6・図 7・図 8 よりパルス幅は  $0.1 \sim 0.3 \mu \text{ sec}$  であることが分かる。イベントが発生している時間幅も  $0.1 \sim 0.3 \mu \text{ sec}$  程度であることが考えられる。

図 10 より、メインの衝突での発光が持続している時間に各周波数帯で電波を受信していない。図 10 で見られた

発光雲は、過去に実験により中性気体の一部が電離したプラズマ状態であることがわかっている。プラズマ中からの電磁波放射は十分に考え得ることであるが、本実験では発光現象終了後に電磁波が観測されているため、プラズマとは別のメカニズムによる発生が考えられる。

図 11 より、衝突による圧力分布が見てとれるが、アルミニウムの引張試験時の引張強さを考えると赤い部分で破壊現象が起きている可能性が考えられる。

## 5. 結論

本論文では、超高速衝突による電磁波放射のメカニズム解明を目的として、以下の結論を得た。

過去の研究では飛翔体速度 4km/s 以上の速度でマイクロ波計測を行っていたが、超高速衝突においては様々な物理現象が発生し、電磁波の発生メカニズムについては解明が困難であった。本研究においては、飛翔体速度 1.2~3.6km/s と過去の研究よりも遅い速度でのマイクロ波計測を行った。過去の実験で得た波形とは異なり、衝突より数十  $\mu$  sec 後のマイクロ波は受信されず、衝突より数百  $\mu$  sec 後にパルス状の信号を受信した。また、高速度カメラの画像より発光雲が見られ、プラズマが発生していることが分かった。

今後は、物理現象の分離の為に低速度での実験を行うことでメカニズムの解明が期待出来る。また、低速度で実験を行う際には電磁波の電力が現状より小さくなることが考えられる。受信システムとして、最小受信電力がノイズレベルに依存しており、周波数帯の変更や受信環境の改善により、現状より小さな信号を計測出来る可能性があり今後行なっていかなければならない。

## 謝辞

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。二段式軽ガス銃の運用において長谷川直氏、小野瀬直美氏に多大な助力を頂いて感謝しています。

## 参考文献

- [1] T. Takano, Y. Murotani, K. Maki, T. Toda, A. Fujiwara, S. Hasegawa, A. Yamori and H. Yano, Microwave emission due to hypervelocity impacts and its correlation with mechanical destruction, J. Appl. Phys., vol.92, no.9, pp.5550-5554, Nov. 2002.
- [2] 相馬央令子,石井健太郎,牧謙一郎,高野忠,矢守章,マイクロ波によるデブリ衝突検出系の検討,第 47 回宇宙科学技術連合講演会, 1E7, 2003.
- [3] K. Maki, E. Soma, M. Toshinai, T. Takano, A. Fujiwara, and A. Yamori, "Microwave Emission due to Hypervelocity Impacts and Its Dependence on Target Materials", Asia-Pacific Microwave Conference, vol. 2, Seoul, Korea, pp.587-590, Nov. 2003.