

# 宇宙機材料へのデブリ衝突によるマイクロ波放射

相馬 央令子, 牧 謙一郎(JAXA), 長岡 洋一(総研大), 田中 孝治(JAXA),  
高野 忠(日大), 長谷川 直(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（平均 10km/sec）する[1]。現在、スペースデブリの対策として、飛翔しているデブリの観測と、宇宙機に直接デブリ検出計を設置し衝突したデブリを確認する方法がある[2]。飛翔しているデブリの観測は、レーダや光学望遠鏡[3]を用いたものが知られている。レーダで確認できる飛翔する宇宙デブリの大きさは 10cm が限界である[4]。これより、1cm 以上 10cm 未満のデブリへの対策が必要となる。

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[5]。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[6]。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、衝突速度を 3.9~4.9km/sec とし、ターゲットに実際に宇宙機に用いられているアルミ表皮と CFRP 表皮のアルミハニカムサンドイッチパネルを用いる。得られた観測波形からマイクロ波放出電力を計算し、ターゲットの破壊の規模との関連を明らかにする。

## 2. マイクロ波観測システム

図 1 に、超高速衝突により発生するマイクロ波を検出する地上実験系を示す。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ー内は真空で保たれている。チャンバー一窓の近傍に受信アンテナを設置する。

受信系を図 2 に示す。22GHz, 2GHz の 2 つの周波数帯を用いる。両周波数帯ともヘテロダイン方式を採用し、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次節で説明する。また、アンテナとターゲット間距離は 40cm である。

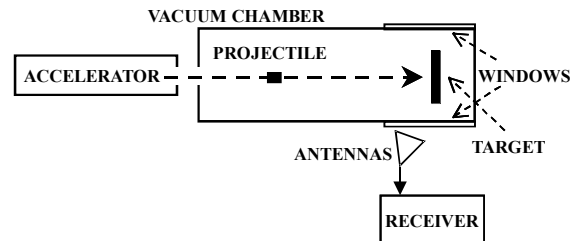


図 1. 実験系

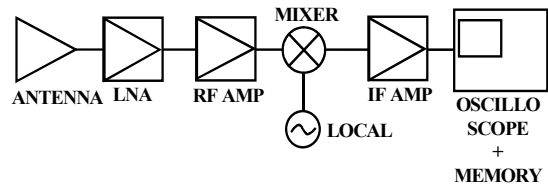


図 2. 22GHz 帯, 2GHz 帯受信系

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 - 500	83
2G	1.85-2.25	0 - 120	54.15

## 3. ターゲット材料

実験で用いるターゲットの材料特性を表 2 に示す。今回用いるターゲットは、一般的に宇宙機の外部から見えるほとんどの構造材料に使われているハニカムサンドイッチパネルである。ハニカムサンドイッチパネルは、蜂の巣状のハニカムコアとそれをはさむ表皮からなる。ハニカムコアの材料は、質量の軽いアルミが一般的である。表皮は、目的によってアルミ、CFRP などが用いられる。アルミ表皮ハニカムサンドイッチパネル(以下アルミハニカム)は、衛星構体を構成するパネルのうち、搭載機器からの発熱をできるだけ拡散する目的から電子機器を搭載する部分に用いられる。CFRP 表皮ハニカムサンドイッチパネル(以下 CFRP ハニカム)は、軽量化の目的から電子部品の無い部分に多く用いられる。

表 2. ターゲットの材料特性

No.	材 料	特 性
1	アルミ表皮 アルミハニカム サンドイッチパ ネル	大きさ：110 mm x 110 mm 表皮：Al7074-T81 厚さ=0.6mm コア：1/4-5056-0007p パネル厚さ 25mm
2		大きさ：100 mm x 100 mm 表皮：Al 2024 - T81 厚さ=0.635mm コア：1/8-5056-0007p パネル厚さ 25mm
3		大きさ：100 mm x 100 mm 表皮：Al 2024 - T81 厚さ=0.635mm コア：1/8-5056-0007p パネル厚さ 25mm
4	CFRP 表皮 アルミハニカム サンドイッチパ ネル	大きさ：110 mm x 110 mm 表皮：CFRP=M60J 3ply クロス材 厚さ=0.3 mm コア：1/4-5056-0007p パネル厚さ 25 mm
5		大きさ：148 mm x 110 mm 表皮：CFRP=M60J 3ply クロス材 厚さ=0.3 mm コア：1/4-5056-0007p パネル厚さ 25.4 mm
6		大きさ：149 mm x 100 mm 表皮：CFRP=M60J 3ply クロス材 厚さ=0.3 mm コア：1/4-5056-0007p パネル厚さ 12.7 mm

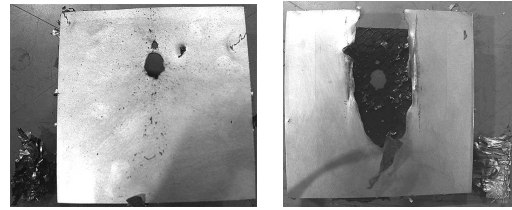
#### 4. 実験結果

##### 4-1.アルミ表皮ハニカムパネルの場合

アルミハニカムの衝突後のターゲット(No.1)を図 3 に示す。衝突速度は 4.93km/sec である。飛翔体はターゲットを貫通し、表の表皮に直径 1cm の円形の穴を作り、ハニカムコアの 9 割、裏の表皮の 1/3 を吹き飛ばしている。なお、全ての実験においてターゲットの裏面が縦方向に破壊されているのは、ターゲットが縦に平行した 2 本の鉄骨に設置されていたためである。

図 4 にこの時のマイクロ波観測波形を示す。横軸は時刻、縦軸は電圧で、衝突時刻は 51.7μsec である。22GHz 帯、2GHz 帯共に断続した強い信号が 100μs 付近から 900μs 以上続いているのがわかる。時間の経過と共に、信号の出現間隔が徐々に広がり、レベルも低くなってきている。両周波数帯ともにほぼ同じタイミングで信号が出ている。

また、受信系の特性で電圧値が飽和しているため、実際の信号はこれより大きいと考えられる。この回のみ 22GHz 帯は受信系の調整ミスにより、マイナス側の信号が出ていない。



(a)表 (b)裏

図 3. 衝突後のターゲット(アルミハニカム)No.1

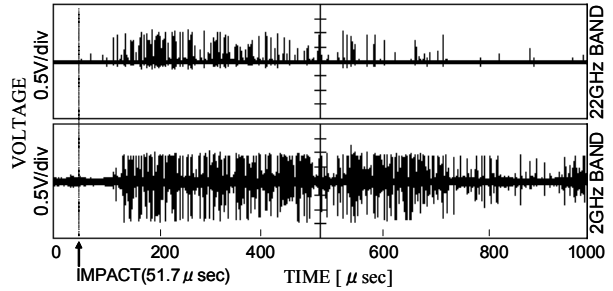
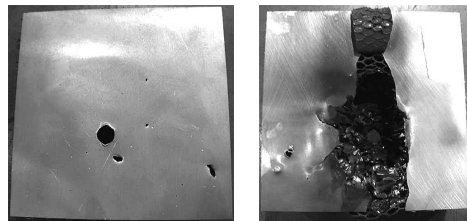


図 4. アルミ表皮アルミハニカム  
サンドイッチパネルの実験結果(No.1)

アルミハニカムの衝突後のターゲット(No.2)を図 5 に示す。衝突速度は 4.49km/sec である。表の表皮が直径約 8mm、裏の表皮が全体の 1/3 破壊され、ハニカムコアは全体の 1/4 吹き飛ばされている。

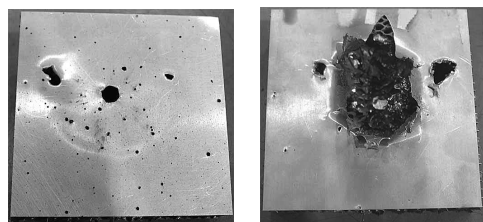
アルミハニカムの衝突後のターゲット(No.3)を図 6 に示す。衝突速度は 3.89km/sec である。表の表皮が直径約 8mm、裏の表皮が全体の 1/9 破壊され、ハニカムコアは全体の 1/5 吹き飛ばされている。

マイクロ波は No.1 の実験と同様に、No. 2, No.3 共に断続した強い信号が衝突時刻から 600μs 以上続いている。



(a)表 (b)裏

図 5. 衝突後のターゲット(アルミハニカム)No.2



(a)表 (b)裏

図 6. 衝突後のターゲット(アルミハニカム)No.3

#### 4-2.CFRP 表皮ハニカムパネルの場合

CFRP ハニカムの衝突後のターゲット(No.4)を図7に示す。衝突速度は4.21km/secである。飛翔体は、ターゲットを貫通し、表のCFRP表皮を直径10mm、裏の表皮を直径40mm破壊し、ハニカムコアの1/9を吹き飛ばしている。こちらも、アルミハニカム同様に表の表皮より裏の表皮の方が破壊が大きい。

図8にマイクロ波観測波形を示す。衝突時刻は61.3μsecである。22GHz帯では、衝突後すぐに強い応答が150μsec程続き、その後は広範囲で雑音レベルに近い信号が断続的に出現している。この回のみ受信系の調整ミスにより、マイナス側の信号が出ていない。

2GHz帯では、衝突後150μsec後に高いレベルの信号が150μsec程続いている。その後は22GHz帯と同様にして、広い間隔で雑音レベルに近い信号が継続している。22GHz帯と2GHz帯で信号のタイミングの一致は見られない。

アルミハニカムと比較すると、両周波数帯共に応答がだいぶ少なくレベルも低くなっている。

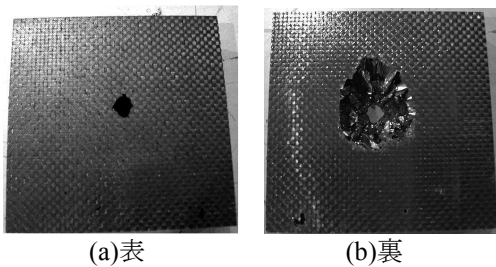


図7. 衝突後のターゲット(CFRP ハニカム)No.4

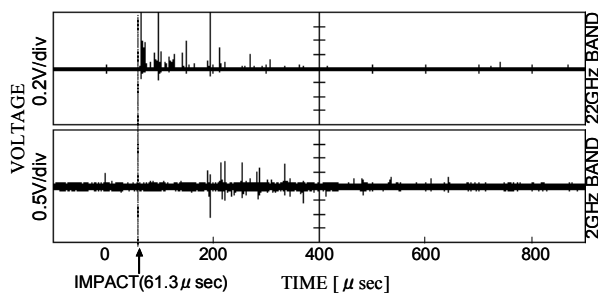


図8. CFRP 表皮アルミハニカム  
サンドイッチパネルの実験結果(No.4)

CFRP ハニカムの衝突後のターゲット(No.5)を図9に示す。衝突速度は4.42km/secである。表の表皮が直径約8mm、裏の表皮が直径約40mm破壊され、ハニカムコアは全体の1/9が吹き飛ばされている。

CFRP ハニカムの衝突後のターゲット(No.6)を図10に示す。衝突速度は4.48km/secである。表の表皮が直径約8mm、裏の表皮が直径約30mm破壊され、ハニカムコアは全体の5%が吹き飛ばされている。

マイクロ波は、No.4の実験と同様に、No.5, No.6共に断続した強い信号が200μs以上続いている。

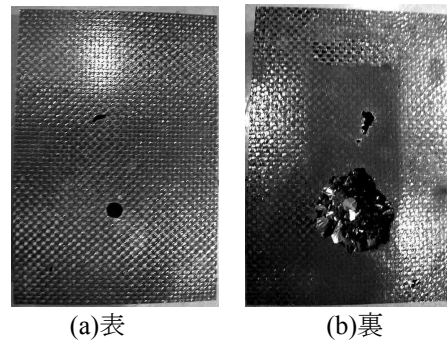


図9. 衝突後のターゲット(CFRP ハニカム)No.5

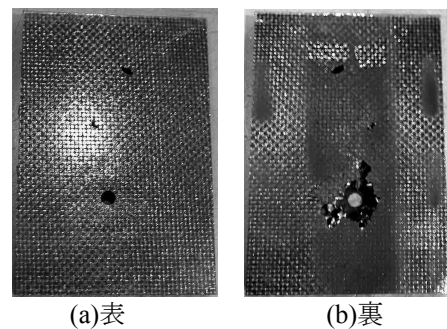


図10. 衝突後のターゲット(CFRP ハニカム)No.6

#### 5. 放出電力と破壊の規模の関係

観測波形からマイクロ波の放出電力を推定する。パルス状包絡線の中の信号がほとんど正弦波状であることから、これを同周期で振幅が $V_0$ 、継続時間が $T$ の連続波とみなし、受信機の較正曲線から出力電圧 $V_0$ に対する入力電力 $P_0$ を求める。これに継続時間 $T$ を乗ずることで該当するパルスのエネルギーが得られる。この過程を観測時間中に現れる全ての極短パルス信号について行い、観測時間中の受信全エネルギーを求める。これをフリスの伝達式に代入することで、衝突により放射される全電力 $P_e$ を求める[5]。

次に破壊の規模について考える。表の表皮の破壊体積は、楕円柱に近似する。楕円の縦横の半径をそれぞれ $a$ ,  $b$ [mm]、表皮の厚さを $h$ [mm]とすると体積 $V$ は $V = \pi abh$  [mm<sup>3</sup>]と求まる。また、ハニカムコアは、図11のように破壊の規模を錐台に近似して求める。破壊されたハニカムの表の面積を $A$ [mm<sup>2</sup>]、裏の面積を $B$ [mm<sup>2</sup>]とし、ハニカムの厚さを $h$ [mm]とすると

$$V = \frac{(A+B+\sqrt{AB})h}{3} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (1)$$

となる。なお、実験No.1のアルミハニカムにおいては、ハニカム部分が9割以上吹き飛ばされているため、式(1)ではなく直方体に近似して破壊体積を求める。

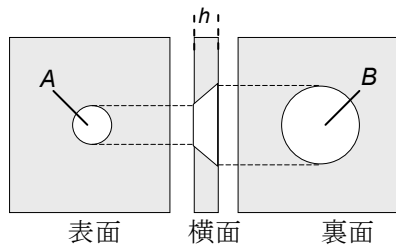


図 11. ハニカムコアの破壊の規模の近似

図 12 に表の表皮の破壊の体積と放射電力の関係を示す。図 13 にハニカムコアの破壊の体積と放射電力の関係を示す。どちらも横軸は破壊体積、縦軸は放射電力である。また、ここで裏の表皮と比較しなかったのは、前述の通りターゲットが縦に平行した 2 本の鉄骨に設置されていることから裏の表皮の実際の破壊の規模が不明瞭だからである。

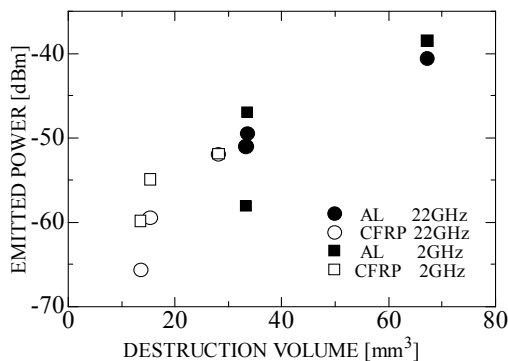


図 12. 表の表皮の破壊体積と放射電力の関係

図 12,13 より、放射電力は全体として、表皮の強度の高い CFRP ハニカムより強度の低いアルミハニカムの方が大きくなっている。図 12 より、放射電力が表の表皮の破壊体積に依存していることがわかる。図 13 においても同様に放射電力がハニカムコアの破壊体積に依存している。

アルミハニカムの実験では、実験 No.2 と No.3 のターゲットの特性が同じであることから、放射電力もほぼ同量になったと考えられる。また、CFRP ハニカムにおいては、ハニカムコアが他のターゲットの 1/2 の厚さであった実験 No.6 のものが一番放射電力が低い。以上より、放射電力はターゲットの破壊の規模に依存していることがわかる。

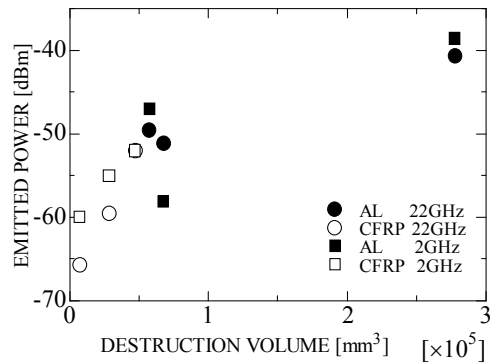


図 13. ハニカムコアの破壊体積と放射電力の関係

## 6. まとめ

アルミハニカム材への超高速衝突によるマイクロ波放射を実験的に確認した。得られた結果を以下に示す。

- (1) アルミ表皮パネル、CFRP 表皮パネルをターゲットに衝突実験をした結果、強いパルス状の信号が確認された。
- (2) アルミ表皮パネルで 600 $\mu$ sec 以上、CFRP 表皮パネルでは 200 $\mu$ sec 以上の信号の継続が見られた。
- (3) 実験結果から放射電力を計算した結果、最大でアルミ表皮パネルで -40.6dBm、CFRP 表皮パネルで -52.0dBm となった。
- (4) 表の表皮の破壊体積およびハニカムの破壊体積が大きいほど、放射電力も大きいことを確認した。
- (5) ハニカムサンドイッチパネル構造においても、放射電力は破壊の規模に依存することを確認した。

## 参考文献

- [1] Interagency Report on Orbital Debris, The National Science and Technology Council, 1995.
- [2] H. Fukunaga, N. Hu and F. Chang, Structural damage identification using piezoelectric sensors, *Int. J. Solids and Structures*, vol.39, pp.393-418, 2002.
- [3] T. Schildknecht, U. Hugentobler and M. Ploner, Optical surveys of space debris in GEO, *Adv. Space Res.*, vol.23, no.1, pp.45-54, 1999.
- [4] T.W. Thompson and R.M. Goldstein, Radar detection of centimeter-sized orbital debris: preliminary Arecibo observations at 12.5-cm wavelength, *Geophys. Res. Lett.*,
- [5] 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.
- [6] 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.