

# **Experiment on hyper - velocity collision with thin film structure** ※

~Detection of secondary debris by piezoelectric sensors~

**Yohsuke Saitoh**  
**Tokyo Univ. of Science**

**Syunkei Kosho & Makoto Tanaka**  
**Tokai Univ.**

**Koji Tanaka & Susumu Sasaki**  
**ISAS/JAXA**

## **Abstract**

In the advancement of space technologies, it is expected that many of spacecraft in the future will have a large structure that uses a variety of thin film materials. In case of large-scale structure like the Solar Power Satellite, the environment of the space debris that has become worse and worse every year cannot be disregarded. And, it is thought that the destruction by the space debris can't be avoided for such a large space infrastructure.

When the super-high-speed debris collides with the thin film material, it is considered that new debris are generated by destroying the thin film material.

To imitate the space debris collide with the spacecraft, the super-high-speed debris collided with the thin film material by using the Electromagnetic Launcher in this experiment. We aim to detect the secondary debris using piezo film sensors behind the thin film material, and to study the nature of the secondary space debris, especially the impact to the backward object.

We measured a space and velocity distribution of the secondary debris generated by the hyper - velocity collision with thin film the projectile made by polycarbonate. Collision strength of the secondary particle was estimated.

---

※ Presented at the 8 th SPS Symposium, 16-17 September, 2005

# 薄膜構造物への衝突実験 ～ ピエゾ素子を用いた2次デブリの検出 ～

齋藤 陽亮（東理大） 古性 俊慶（東海大）

田中 真（東海大） 田中 孝治（ISAS/JAXA） 佐々木 進（ISAS/JAXA）

## 1. 研究背景

### 1- i. スペースデブリ

スペースデブリとは、現在地球の周回軌道に存在する人工物体の中でも軌道などが制御できない物を言う。一般的な定義としては“現在並びに将来にわたって有用な役割を果たさない人工物体”と定義される。スペースデブリの発生要因として以下の4つが挙げられる。

- i) ロケットの打ち上げ時に必然的に発生するもの
- ii) 軌道上の人工衛星の劣化
- iii) 使用後の人工衛星・ロケットの残骸
- iv) ブレークアップ

そのようなスペースデブリが地球の周回軌道に無数に存在し、また秒速3キロから8キロもの超高速で飛んでいる。小さなスペースデブリといえども、大きな破壊力を持っている。

現在の地球からの観測では、静止軌道上のスペースデブリはメートルサイズ、低軌道でも数センチのサイズまでしか観測することができない。ブレークアップと呼ばれるデブリが何かに衝突することによってさらに多くのデブリが生まれることで、このような小さなデブリが増え続けている。ここではそのようなスペースデブリを2次デブリと呼ぶ。

### 1- ii. SPS への2次デブリの衝突破壊

SPS のような、軽量かつ大規模な構造を考えた場合、主要な材料は様々な薄膜材料を用いた構造様式になると考えられる。これまでの人工衛星などをスペースデブリから守る対策としては、多層構造によるデブリバンパーなどが考えられてきた。しかし、デブリバンパーの追加は質量増となる。

SPS の一例として発送電一体型パネルを考えた場合、まず太陽電池パネル面にデブリが衝突し、それによってデブリと破壊された太陽電池パネルを主要素とした2次デブリが発生する。それら2次デブリが送電面側にあるシステム部に飛散し、システム部の広範囲にデブリによる破壊が及ぶ可能性が十分に考えられる。

このように、デブリの衝突による2次デブリの発生現象を解明し、SPS の設計に十分生かされる必要があると考えられる。

## 2. 実験目的・概要

### 2- i. 実験目的

レールガンを用いて、超高速飛翔体を薄膜試料に衝突させて、デブリの衝突の模擬実験を行った。piezo素子を用いて衝突時に発生する2次デブリの検出を試みた。

- ・ 2次デブリの飛散範囲の計測
- ・ 2次デブリの速度範囲の計測

### 2- ii. レールガン概要

レールガンとは電磁飛翔体加速装置(EML)の1つで、EML装置の中で最も高速度達成の可能性を持った装置として多くの研究者に注目され、開発・研究されてきた。

レールガン本体は2本の金属レールとその間に置かれた飛翔体で構成され放電時には、飛翔体後部にアーマチャと呼ばれるプラズマの電流経路が形成される。飛翔体は2本のレールの間を移動出来るようになっていて、アーマチャには電流(アーマチャ電流)が電源よりレールを通して流れ、ローレンツ力が発生しこのローレンツ力によって飛翔体は加速される。ローレンツ力はアーマチャ電流の2乗に比例する。この事はアーマチャ電流を補給し続ければ幾らでも飛翔体加速度が増加することを意味し、レールガンで超高速度が達成させられる事を物語っている。

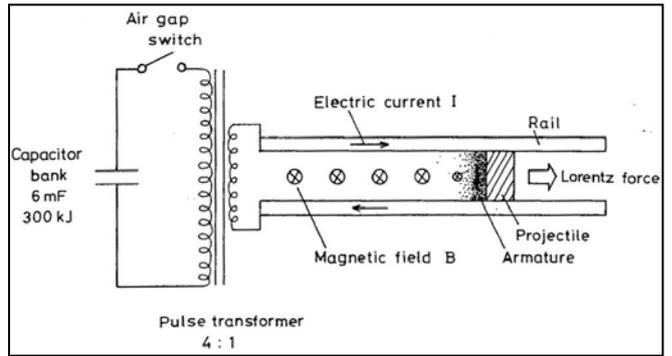


図1：レールガン回路図

本実験で使用したレールガンは、「HYPAC」とネーミングされたレールガンで1980年代末より宇宙科学研究本部(当時:宇宙科学研究所)で開発されてきた。

2-iii. ピエゾ素子概要

ピエゾ素子とは圧力などの力を加えると、ピエゾフィルムの両面間(表裏)に電荷が発生する物体である。図2にピエゾ素子の構造図を示す。

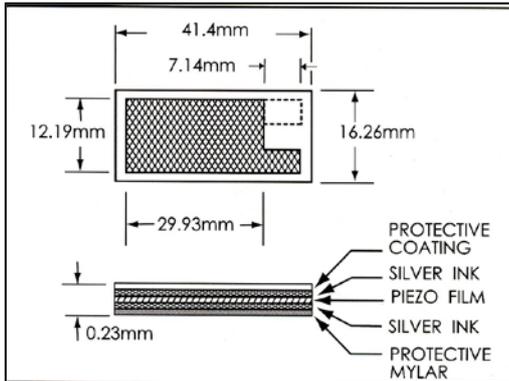


図2：ピエゾ素子の構造図

本実験で使用したものは、長さ約30ミリ・幅約12ミリのピエゾフィルムに銀蒸着を施し、その上に保護膜をコーティングした物を使用した。

実際の測定では、得られた電圧値からフィルムに与えられた力の計測を行った。

その換算値として、軸1方向(フィルム面に対して平行方向)と軸3方向(フィルム面に対して垂直方向)との2種類があるが、その配置から今回は3軸の方を用いて換算を行った。

2-iv. 真空チャンバー内配置概要

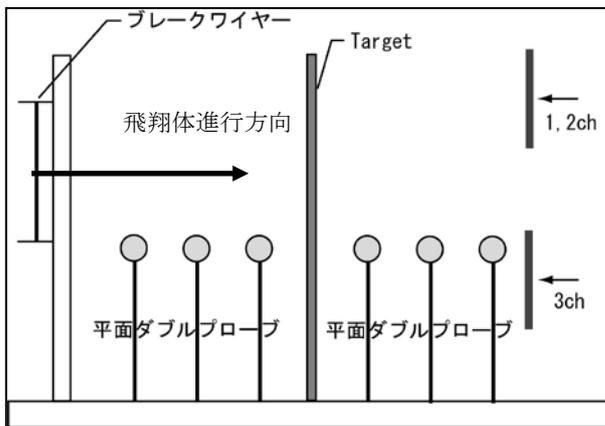


図3：真空チャンバー内の配置図(側面)

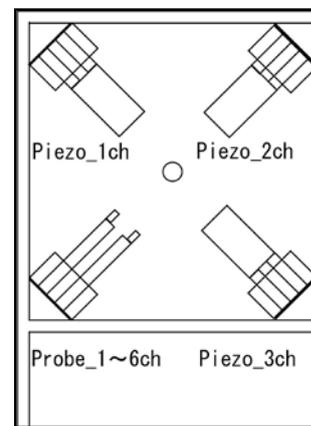


図4：真空チャンバー内の配置図(進行方向)

本実験ではレールガン後方に真空チャンバーを置き、その内部に図3及び4のように薄膜などを

配置し衝突実験を行った。図3が飛翔体進行方向に対して側面から見た図で、図4が飛翔体進行方向から見た図である。

飛翔体がターゲットに衝突し2次デブリを発生させる。飛翔体通過位置を取り囲むように、ピエゾ素子を3枚(1ch~3ch)ターゲット後方に配置することで、その2次デブリの検出を試みた。

実験時、チャンバー内はロータリポンプを用いて、数[Torr]まで減圧した状態で行った。今回の実験で使用した飛翔体はポリカーボネイト製で質量は約1[g]である。飛翔体の速度は実験毎に異なるが、今回の実験では3.7~4.6[km/s]であった。ブレークワイヤーとは、その位置に細い銅線を並べ、電圧を印加しておく。飛翔体が通過時にその銅線をきることでパルス電圧を発生し、それをデータ記録装置のトリガー信号として使用している。

### 3. 実験結果・考察

#### 3-i. 2次デブリの分布範囲

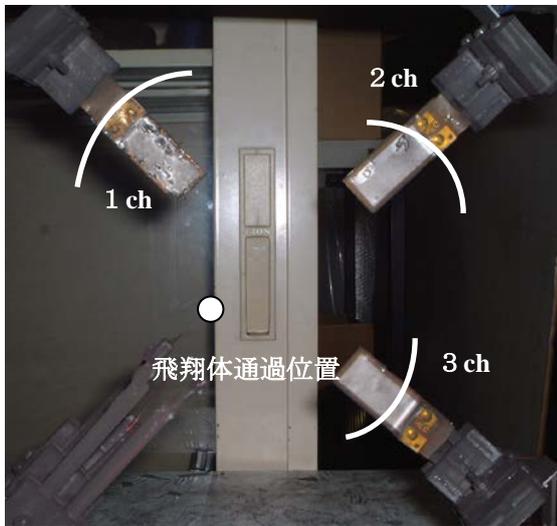


図5：実験後のピエゾ素子の様子

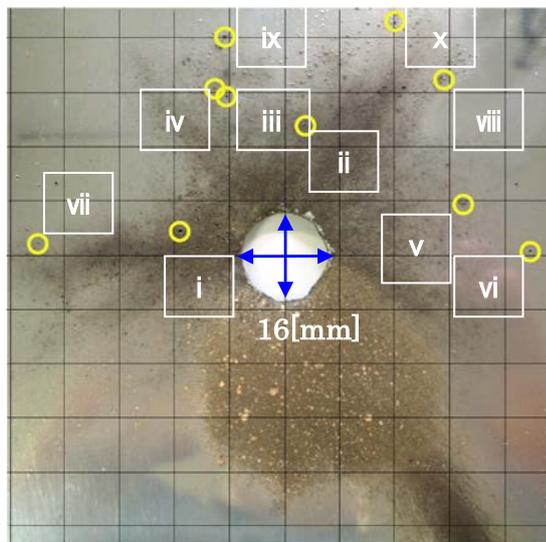


図6：2次デブリによる破壊の様子の写真

図5の写真は、ターゲットがアルミニウム500[ $\mu$ m]、飛翔体速度4.29[km/s]の実験後のピエゾ素子の様子である。素子や装置の破壊がみられる範囲を、それぞれ円弧で表している。

ピエゾ素子によって、破壊被害の度合いが大きく異なる事がわかる。それぞれのピエゾ素子の破壊範囲の立体角は表1に示す。

度合いの違いが何によるのかは検討中であるが、1つには飛翔体自身が球体ではなく円柱型であること、飛翔体が回転して飛ぶ場合があり、その当たり方に要因があるとも考えられる。

表1：ピエゾ素子の破壊の広がり（立体角）

1 ch	$\theta = 31.3^\circ$
2 ch	$\theta = 34.1^\circ$
3 ch	$\theta = 29.6^\circ$

表2：貫通破壊の広がり（立体角）

i	$\theta = 7.9^\circ$	vi	$\theta = 9.7^\circ$
ii	$\theta = 12.3^\circ$	vii	$\theta = 13.3^\circ$
iii	$\theta = 14.4^\circ$	viii	$\theta = 17.5^\circ$
iv	$\theta = 17.5^\circ$	ix	$\theta = 17.9^\circ$
v	$\theta = 18.5^\circ$	x	$\theta = 20.2^\circ$

図6の写真は、ターゲット後方にピエゾ素子を置くかわりに、アルミニウム500[ $\mu$ m]を配置し実験を行った後の結果である。図から2次デブリの空間的分布、サイズを調べた。この時の条件は、ターゲットには銅の10[ $\mu$ m]、飛翔体速度3.9[km/s]であった。大きな穴は飛翔体による貫通孔である。貫通孔か

ら放射状に煤がみられ、かつ細かい破壊が生じている。この中から、貫通という破壊を示した位置をピックアップした。

図6の丸印がそれである。それらが、ターゲット衝突時にどれくらいの立体角で飛散したかを前頁の表2に示す。この実験では立体角7.9度から20.2度の間に貫通孔がみられた。

3-ii. ピエゾ素子による2次デブリの検出

3-ii-i. Target(アルミニウム 100[ $\mu\text{m}$ ])、飛翔体速度(① 4.6[km/s], ② 4.1[km/s], ③ 3.7[km/s])

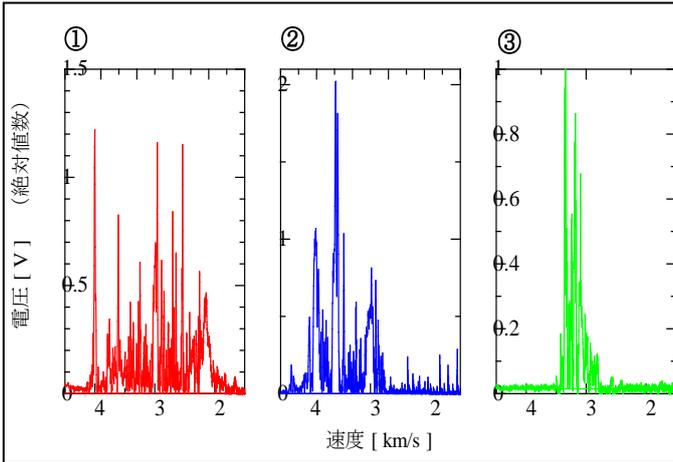


図7 : 2次デブリの速度範囲分布 (Al100[ $\mu\text{m}$ ])

図7のグラフは、横軸を2次デブリの速度(ターゲットの衝突位置とピエゾ素子の距離と到達時間から速度を換算)、縦軸をピエゾ素子での電圧にとった。実際の測定電圧は+に振れていたため、値をみやすく絶対値表示としている。

右に進むほど速度の遅い2次デブリの衝突現象と言える。2次デブリの速度は、飛翔体速度の約50~80[%]で衝突現象が終了していることがわかる。

3-ii-ii. Target(アルミニウム 500[ $\mu\text{m}$ ]) 飛翔体速度(4.29[km/s])

材料は同じでターゲットの厚さを変えた場合の実験を行った。グラフは図8に示す。2次デブリの速度は、1chは飛翔体速度の約60[%]で現象は終了したが、2ch, 3chに関しては約20[%]まで現象が続いた。

材料は同じでターゲットの厚さを変えた

3-ii-iii. Target(銅 500[ $\mu\text{m}$ ])、飛翔体速度(4.0[km/s])

ターゲットの種類に銅板を用いた結果を示す。ターゲットの厚さは500[ $\mu\text{m}$ ]である。図9のグラフにその結果を示す。1, 2, 3ch全てが飛翔体速度の約35[%]までの衝突現象を検知した。

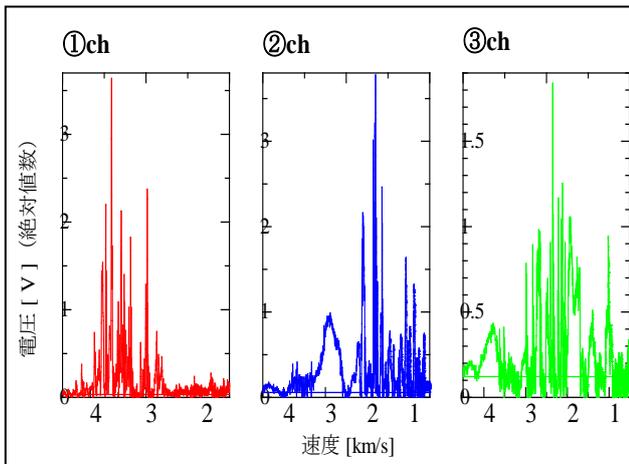


図8 : 2次デブリの速度範囲分布 (Al500[ $\mu\text{m}$ ])

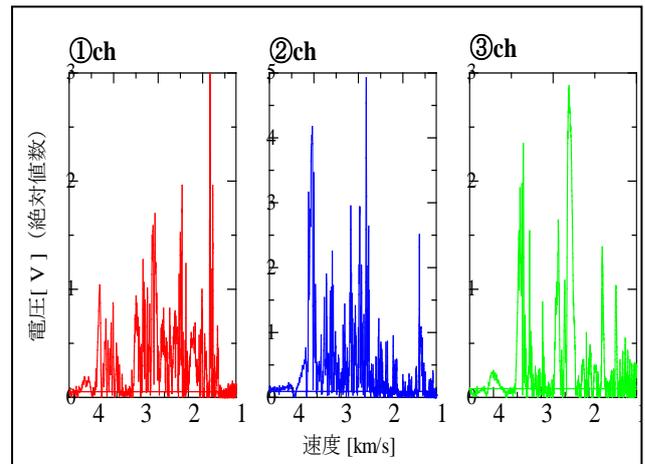


図9 : 2次デブリの速度範囲分布 (Cu500[ $\mu\text{m}$ ])

### 3-iii. 2次デブリの力の検証

piezo素子の検出電圧値を用いて、力の換算を行ってみる。但し、実際の測定電圧は正負の値が検出された。2次デブリのような微細な物質の衝突は、局所的な衝突の集合になるためと考えられる。換算には機械-電気変換  $13 \times 10^{-3}$  [V/N]を用い、最大ピーク値を変換した。下表がその換算値である。最大ピークを記録した時刻から、2次デブリの速度を計算した。

表3：アルミニウム 100[ $\mu$ m]

	換算力[ N ]	予想速度[km/s]	飛翔体速度[km/s]
①	557.59	4.00	4.6
②	923.98	3.58	4.1
③	457.42	3.34	3.7

表4：アルミニウム 500[ $\mu$ m]

	換算力[ N ]	予想速度[km/s]	飛翔体速度[km/s]
1 ch	1664.08	3.62	4.29
2 ch	1727.20	1.97	4.29
3 ch	10130.81	2.61	4.29

表5：銅 500[ $\mu$ m]

	換算力[ N ]	予想速度[km/s]	飛翔体速度[km/s]
1 ch	1372.25	1.54	4.0
2 ch	2253.23	2.47	4.0
3 ch	15878.95	3.05	4.0

## 4. まとめ

### 4-i. 2次デブリの分布範囲

アルミニウム 500[ $\mu$ m] を貫通するほどの破壊が、立体角  $8^\circ \sim 20^\circ$  の範囲でみられた。立体角  $30^\circ$  以上でも十分破壊力のある2次デブリが飛散している。

### 4-ii. piezo素子による2次デブリの計測

2次デブリの衝突は局所的な衝突の集合であるため、piezo素子によるデブリの数や力の検出は難しい。しかし時間的計測は可能であり、2次デブリの衝突の時間から2次デブリの速度分布の計測は可能と考えられる。

### 4-iii. 2次デブリの速度分布

デブリが衝突するターゲットの厚さが 500[ $\mu$ m]の方が、100[ $\mu$ m]に比べて2次デブリの速度分布範囲が大きい傾向が見られる。

アルミニウムと銅による種類の差は、今回の実験結果からは無いと判断できる実験結果だった。さらなる実験を行い検証を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 矢守章「電磁飛翔体加速装置開発の歩み- (I)」：宇宙科学研究所報告 第117号(2001年)
- [2] 狼嘉彰・富田信之・中須賀真一・松永三郎「宇宙ステーション入門」：東京大学出版会(2002年)
- [3] 高畑文雄・森英彦・池内了・輿石肇・戸田勸・新田慶治「宇宙技術入門」：オーム社(1994年)
- [4] 中富信夫「宇宙はここまでわかった」：主婦と生活社(1992年)