

ISO11227 改訂に伴う Ejecta 評価実験

○藤村洋佑¹ 赤星保浩¹ 高良隆男¹ 乗松功一¹

Yassine Serbouti¹ 福田悠希¹

(1 : 九工大)

1. 研究背景

これまでの宇宙開発は「科学技術」の振興に注力していたが、近年は「科学技術」、「産業振興」、「安全保障」を一体とした宇宙開発を進めていく必要がある。宇宙開発が新たな段階へと移行していく上で、スペースデブリの問題は無視できない障害となりうる。スペースデブリは増加の一途をたどっており、人工衛星同士の衝突や破壊実験などにより、急速にその数を増やしている。人工衛星等の宇宙機を設計する際、デブリの衝突リスクを評価しなければならないため、宇宙開発機関はデブリ環境モデルを開発し、これを利用することによって運用高度、期間に宇宙機の表面にデブリが衝突する確率を見積もっている。しかし、数百[μm]から数[mm]サイズ域においては、軌道上の衝突データの不足等により各モデル間に差異が生じている^[1]。この微小デブリの主な発生要因はデブリやメテオロイドが軌道上の宇宙機や別のデブリに衝突した際に生じる二次デブリ(ejecta)と言われており^[2]、地上模擬衝突試験を行うことで ejecta の評価を行っているが、各機関で実験手順や評価手法が異なるなど、データの共有や統一的な評価が困難となっている。このような現状を踏まえて、2012年に ejecta 評価実験の手順・評価手法を定めた国際標準規格 ISO11227 が制定された。

本研究では、現行規格の改訂を2017年に控え、軌道上のデブリ衝突環境により近い試験の導入のため、改訂案として斜め衝突試験の提案を行った。九州工業大学宇宙環境技術ラボラトリー超高速衝突試験センターが所有する二段式軽ガス銃を利用して衝突試験条件の選定および ejecta データの収集、垂直衝突試験との比較を行ってきたが^[3]、斜め衝突試験の装置依存性および試験結果の再現性が未確認であったため、宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science ; ISAS) が所有する二段式軽ガス銃を用いて同様の斜め衝突試験を行った。本稿では ISO11227 で規格化されている較正試験の斜め衝突試験について述べる。

2. 実験概要

2.1 二段式系ガス銃

Fig.1 に九州工業大学における実験装置の概略図を示す。スペースデブリの超高速衝突を模擬するために、飛翔体加速装置として二段式軽ガス銃を使用した。作動原理は火薬の発破によってピストンが押し出され、ポンプチューブ内の水素ガスを圧縮し、既定圧力に達するとポンプチューブとロンチチューブの圧力差を仕切るポリエチレン製の隔膜を破壊し、飛翔体を装填したサボをロンチチューブから射出する。サボはサボ分離区間の空気抵抗によって飛翔体と分離し、飛翔体のみが試料室内に設置してあるターゲットに衝突する仕組みとなっている。ポンプチューブに充填する水素ガスの圧力を 1.30[MPa]、サボ分離区間を 7[kPa]、試料室内の圧力を 0.1[Pa]以下に設定し、サボ分離区間との圧力差をポリエチレンフィルムによって仕切っている。飛翔体速はレーザーカット法を用いて計測を行い、5[km/sec]前後で実験を行う。

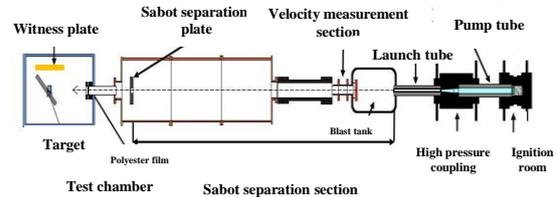


Fig.1 Configuration of experimental setup

2.2 実験条件

Ejecta 評価試験に使用する飛翔体には規格案においてアルミニウム合金 A2017 及び A2024 が推奨されており、本実験では直径 1 ± 0.1 [mm] の A2017 ジュラルミン球を使用した。ターゲットには較正実験で規格化されている熔融石英ガラス(50×50×20[mm])を使用した。またガラスの端面の損傷を防ぐために周囲をスポンジとゴムで覆い、アルミケースに入れて実験を行った。Fig.2 にターゲットの構成を示す。衝突角度は 0~60[deg.]に設定し、試験前後の質量差からターゲットから放出された ejecta の質量を算出した。また、放出された ejecta をウィットネスプレート(検証版)に衝突させることによって衝突痕を得た。Fig.3 にターゲットとウィットネスプレー

トの構成図を示す。ウィットネスプレートは表面を機械研磨した銅板を使用し、ターゲット上方 100mm の位置に設置した。

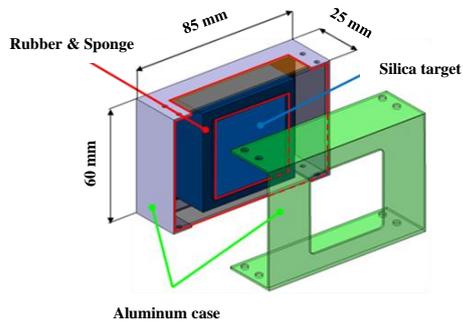


Fig.2 Target holder

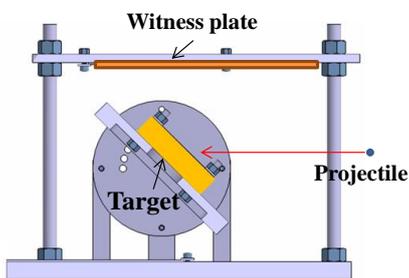


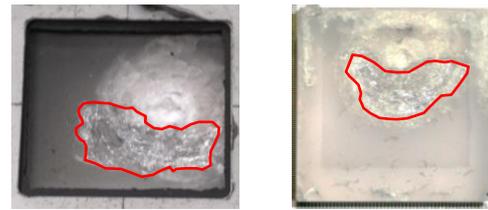
Fig.3 Setup of target and witness plate

3. 実験結果

Table 1 に衝突角度 45° の実験結果を示す。Test No.13-028 から 13-050 は九州工業大学、2788 から 2789 は ISAS における実験である。Fig.4 に実験後のターゲットの画像を示す。また、顕微鏡および画像処理ソフトを使用し、ウィットネスプレートの解析を行った。顕微鏡で実験前後のプレートの表面をスキャンし、差分処理、二値化処理を行うことによって ejecta の衝突痕を検出することで衝突痕分布図を作成した。作成した衝突痕分布図の一例を Fig.5 に示す。

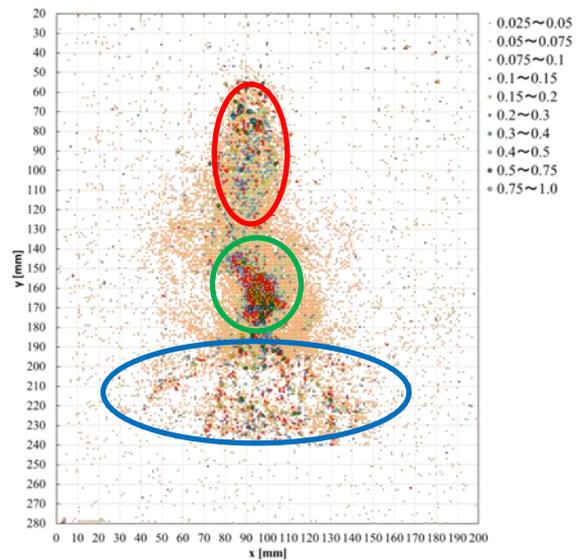
Table 1 Experimental results
(Impact angle: 45° [deg.])

Test No.	Projectile Velocity [km/sec]	Projectile Mass [mg]	Ejecta Mass [mg]
13-028	5.25	1.5	491.7
13-031	5.24	1.5	551.5
13-033	5.18	1.5	654.4
13-038	5.32	1.6	664.5
13-050	4.88	1.6	429.9
2788	5.38	1.5	627
2789	5.56	1.5	632

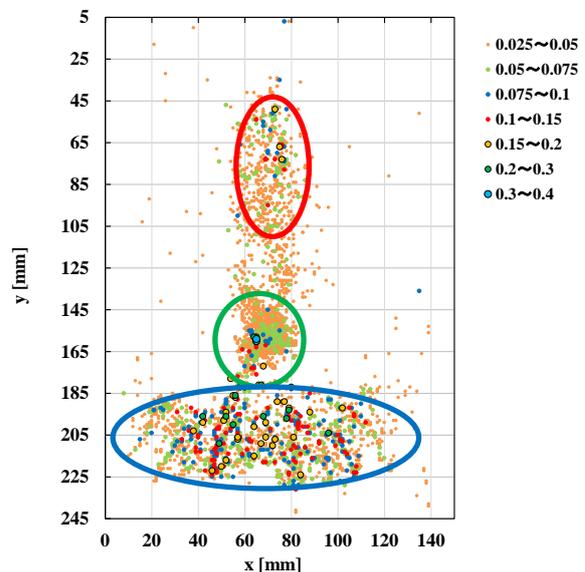


(a) Kyutech (b) ISAS

Fig.4 Silica target after experiment



(a) Kyutech



(b) ISAS

Fig.5 Size distribution of impact crater

4. 考察

4.1 Ejecta 質量と剥離現象

Table 1 より衝突角度 45° の斜め衝突較正試験において、ejecta 質量は 500 から 600mg 程度であることから、ejecta 質量に関しては同様

の結果が得られたと言える。また、45[deg.]以外の角度で実験を行った場合と ejecta 質量の比較を行うと、Table2 に示すように、衝突角度 15 から 30[deg.]の実験においては、ejecta 質量が 120 から 170mg 前後であることから、斜め衝突試験において 45[deg.]が最も ejecta が放出されていることがわかる。

角度増加に伴う ejecta 質量の増加の要因は Fig.4 の画像中に示す赤枠部の剥離に因るものと考えられる。衝突角度が 45[deg.]および 60[deg.]の斜め衝突試験において着弾位置下部にガラス表面が剥がれ落ちた箇所が確認された。Fig.6 に Test No.2788 の実験後に発見された剥離片の画像を示す。Fig.6 に示した破片の質量が 200mg 程度であることから、この剥離が生じるかによって、ejecta 質量が大きく変化すると考えられる。この剥離は九州工業大学および ISAS の両実験設備において確認されている点や 0, 15, 30[deg.]の斜め衝突試験では確認されていない点から、設備に依存するのではなく衝突角度に依存すると考えられる。

Table 2 Experimental results
(Impact angle: 15, 30 [deg.])

Test No.	Impact Angle [°]	Projectile Velocity [km/s]	Projectile Mass [mg]	Ejecta Mass [mg]
14-157	15	4.89	1.5	177.3
14-159		4.67	1.5	120.4
14-147	30	4.63	1.6	141.6
14-149		5.21	1.7	140.0
14-150		4.76	1.5	152.7



Fig.6 Spalled fragment

4.2 衝突痕分布図

九州工業大学および ISAS の両実験において、Fig.5 の衝突痕分布図に示すように、得られた衝突痕分布図は y 軸におよそ 200mm 前後に収まっており、衝突痕が集中している箇所が 3 箇所あることなどから、同様の衝突痕分布図が得ら

れたと考えられる。

5.結論

熔融石英ガラスを用いた較正斜め衝突試験において、以下の知見が得られ、試験の再現性が得られた。

- Ejecta 質量

九州工業大学および ISAS の斜め衝突試験において、衝突角度が 45[deg.]の場合、ejecta 質量は 500 から 600mg 程度であり、同様の結果が得られたと言える。

- 着弾位置下部の剥離

着弾位置下部のガラス表面の剥離は九州工業大学、ISAS のどちらの実験設備でも確認された。剥離は衝突角度が 45[deg.]および 60[deg.]の時のみ確認されており、剥離の発生は衝突角度に依存すると考えられる。衝突角度以外にもターゲットの材質やサイズにも依存する可能性があるため、更に検証する必要がある。

- 衝突痕分布図

九州工業大学および ISAS の斜め衝突試験において、衝突角度が 45[deg.]の場合、衝突痕分布図は 250×150 ウィットネスプレートのサイズに収まっており、衝突痕が集中している箇所も類似している点から、同様の結果が得られていると考えられる。

参考文献

[1] Sinya FUKUSHIGE, Yasuhiro AKAHOSHI, Yukihiro KITAZAWA, Takeo GOKA, "Comparison of Debris Environment Models; ORDEM 2000, MASTER 2001 and MASTER 2005", IHI Engineering Review Vol. 40 No. 1 February (2007), pp. 31-41.

[2] J.C. Mandeville, M. Bariteau, 2004. Contribution of secondary ejecta to the debris population, ADVANCE IN SPACE RESEARCH.

[3] 乗松功一, 赤星保浩, 高良隆男, Faure Pauline, 中本裕史, 藤村洋佑, "ISO11227 における微小デブリの斜め衝突実験の必要性の検討", 衝撃波シンポジウム講演論文集 (Mar. 2014), pp.347-348.