

ISO11227 の改訂に向けた斜め衝突再現実験

○田上翔悟 赤星保浩 高良隆男 福田悠希
(九工大・工)

1. 序論

宇宙開発が進むに連れて、近年スペースデブリは増加の一途をたどっており問題視されている。この現状を踏まえて各宇宙開発機関は様々なデブリ対策を講じているため、比較的サイズの大きいデブリに関しては対応可能となっている。これに対して対策が不十分とされているのは数百[μm]から数[cm]のデブリである。このサイズ域のデブリの発生要因の大半を占めるのは、微小隕石やデブリが宇宙構造物に衝突することで発生する二次デブリ“Ejecta”であると言われており^[1]、デブリ環境モデルを開発することで衝突リスクを見積もろうとしているが、Ejectaに関する実験データが少なく、機関毎に実験手順、方法が異なるため実験データの比較や共有が難しい。このような背景を踏まえて Ejecta に関する評価試験の手順・方法を定めた国際標準規格の策定を図り、2012年9月15日に ISO11227 の制定に至った^[2]。この規格は制定後 5 年以内に改訂を要請される可能性があり、今年に第 1 回目の改訂を迎える。

本研究では、現在の規格に記載されていない斜め衝突の試験方法を定め、宇宙機用材 (ISO11227 の第 6 章に対応) を用いた斜め衝突実験の結果を整理し、さらに他機関の装置を用いて再現性の確認を行い、現在の規格の改訂箇所および改訂案を作成することを目的とする。

2. 実験装置

2.1 二段式軽ガス銃

Fig. 1 に九州工業大学における実験装置の概略図を示す。デブリの超高速衝突を模擬する飛翔体加速装置として、二段式軽ガス銃を使用した。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 1 Pa サボ分離区間との圧力差をポリエステルフィルムによって仕切っている。飛翔体速度はレーザカット法を用いて計測を行い、5 km/s 前後で実験を行う。

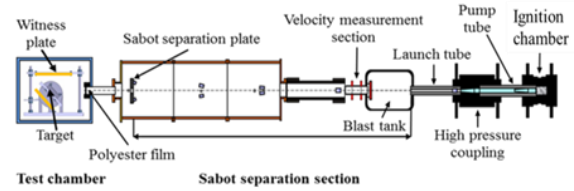


Fig. 1 Configuration of experimental setup

2.2 実験条件

本研究では宇宙機用材料として太陽電池アレイコーポン(以下 SAC)を 2 種類、CFRP ハニカム(以下 CFRP)、アルミハニカム(以下 Al)をターゲットとした斜め衝突試験を行った。飛翔体の入射角は 15, 30, 45, 60 deg に設定し、ターゲットに対して直径 1 mm、質量 1.5 mg の A2017 球の飛翔体を衝突させ、実験前後のターゲット質量の差から放出された Ejecta の質量を算出した。また銅製のウィットネスプレート(以下 WP)に Ejecta を衝突させ、衝突痕を得た。WP は表面を機械研磨した JIS C 1100P-1/4H の銅板を使用した。15, 30 deg の場合、ターゲット上方 100 mm の位置に 1 枚、ターゲット後方 50-100 mm の位置に 1 枚、ターゲット前方 50-100 mm の位置に 1 枚設置し、45, 60 deg の場合、ターゲット上方 100 mm の位置に 1 枚、ターゲット後方 50-100 mm の位置に 1 枚設置し、衝突面と背面両方から放出される Ejecta の衝突痕を得た。Fig. 2 に衝突角度 15, 30 deg のターゲット及び WP の配置図を、Fig. 3 に 45, 60 deg の場合のターゲットおよび WP の配置図を示す。なお、ターゲット上方の WP を Top、前方を Front、後方を Back とする。

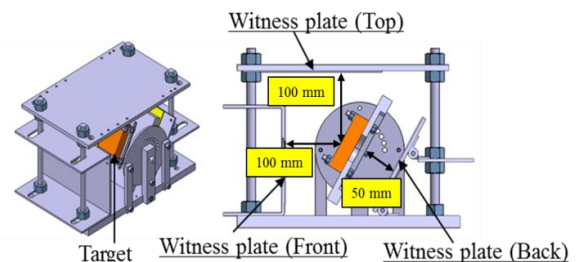


Fig. 2 Oblique impact in 15 and 30 deg

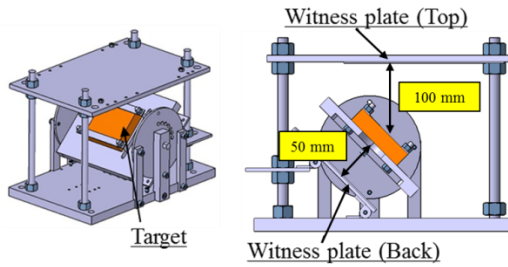


Fig. 3 Oblique impact in 45 and 60 deg

3. 実験結果

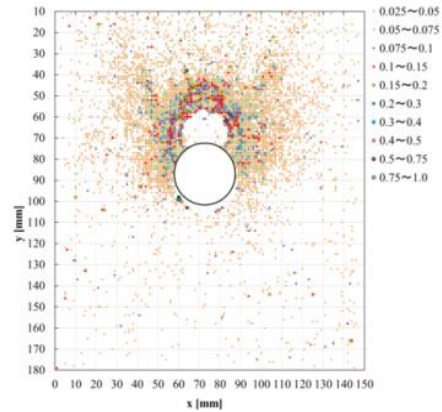
3.1 再現実験

九州工業大学で得られた斜め衝突試験の結果が、他機関の実験設備で同様の結果が得られるか再現実験を行った。Table 1 に試験結果の 1 例を示す。Test No. が 4 桁のものが ISAS, 5 桁のものが九州工業大学で行われた試験結果である。また Fig. 4 に 1 例として衝突角度 15 deg の Front の WP に検出された Ejecta 衝突痕のサイズ別分布図を示す。また、衝突角度 15 deg, 30 deg, 45 deg のサイズ別衝突痕数から再現性を確認するため、サイズ別衝突痕数を衝突痕数合計で除した割合を Table 2, Table 3, Table 4 に示す。

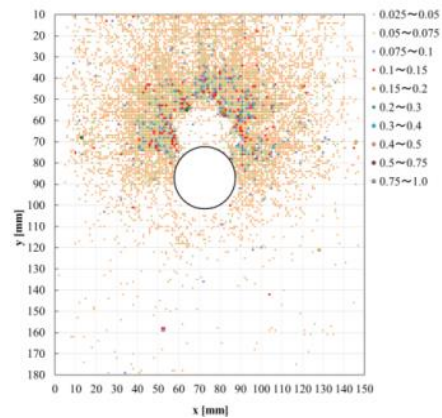
Ejecta 質量について、多少の誤差はあるものの、ISAS, 本学共に同程度の Ejecta 量が確認された。衝突痕サイズ別分布図に関しても、両施設において、同じ位置に円環状の衝突痕が確認され Ejecta の飛散状況も同程度であった。最後にサイズ別割合に関して、衝突痕数が 1 番多い、0.025~0.05 mm のサイズ域で最大 5.5 % の誤差に収まっており、各サイズ域において微小な誤差しか確認されなかった。

Table 1 Experimental results

Test No.	Impact angle [deg]	Target	Velocity [km/s]	Ejecta mass [mg]
3571	15	SAC	5.35	51.2
3570	30	SAC	5.37	80.0
3568	45	SAC	5.29	58.5
3575	45	CFRP	5.53	11.0
3576	45	Al	5.34	6.0
16-064	15	SAC	4.87	28.3
16-063	30	SAC	4.88	41.4
16-037	45	SAC	4.88	46.0
16-051	45	CFRP	4.68	8.3
16-052	45	Al	-	2.7



3571



16-064

Fig. 4 Size distribution

Table 2 Percentage by size which impact in 15 deg

Test No.	Size	0.025~0.05	0.05~0.075	0.075~0.1
		[mm]	[mm]	[mm]
3571	Front	78.6 %	14.3 %	4.4 %
16-064	Front	83.5 %	13.3 %	2.2 %

Table 3 Percentage by size which impact in 30 deg

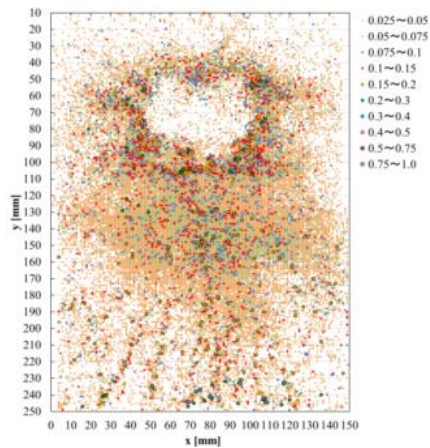
Test No.	Size	0.025~0.05	0.05~0.075	0.075~0.1
		[mm]	[mm]	[mm]
3570	Front	78.8 %	15.9 %	3.7 %
16-063	Front	78.1 %	16.3 %	3.8 %
3570	Top	80.5 %	13.5 %	3.8 %
16-063	Top	86.0 %	10.9 %	2.2 %

Table 4 Percentage by size which impact in 45 deg

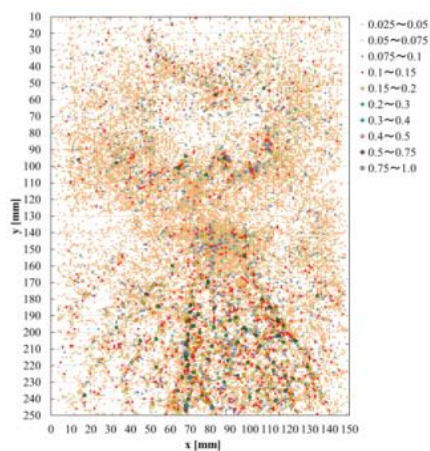
Test No.	Size	0.025~0.05	0.05~0.075	0.075~0.1
		[mm]	[mm]	[mm]
3568	Top	78.3 %	14.8 %	4.1 %
16-037	Top	78.7 %	13.7 %	4.3 %

3.2 衝突角度 60 deg

斜め衝突をする際、現行規格に 15 deg 刻みで記載するように指定されているため、改訂に向け 60 deg の実験を行った。60 deg の実験は傾きが大きくなるため見かけの面積が小さくなり実験成功率が格段に落ちるため 1 発のみのデータとなっている。実験は 45 deg と同じ設置条件で行った。Fig. 5 に 60 deg 衝突痕分布図と比較のため 45 deg についても示す。



(a) 60 deg



(b) 45 deg

Fig. 5 Size distribution

4. 考察

4.1 斜め衝突試験の再現性の確認

斜め衝突試験において ISAS の二段式軽ガス銃を用いて再現実験を行った結果、Ejecta 質量において若干の質量差が見られたが、これは飛翔体の着弾位置の差や太陽電池が異なる事が原因であると考えられる。SAC はハニカム材をコア材とした複合材料であり、着弾位置が六角柱の空洞上か壁面上かで放出される Ejecta の質量に差が生じるためである。また 2 種類の太陽電池背面の CFRP フィルムの種類が異なるため質量差が生じたと考えられる。

宇宙機用材料内部の破壊状況を確認するため、福岡県工業技術センター機械電子研究所機械技術課が所有するマイクロフォーカス X 線 CT システムを用いて、内部の破壊状況を確認した。Fig. 6, Fig. 7 にスキャン画像を示す。ISAS-3568 の破壊状態が Test No. 16-037 と比べて内部のアルミハニカムを多く破壊していることが確認できた。従って Ejecta 量も破壊具合に比例して増加していると考えられる。

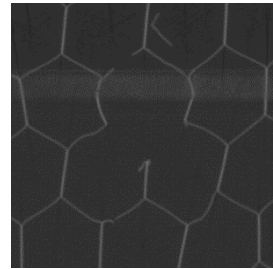


Fig. 6 X-ray CT image (ISAS-3568)

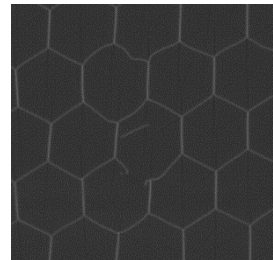


Fig. 7 X-ray CT image (Test No. 16-037)

サイズ別衝突痕分布図については、同程度の位置に環状分布が確認され Ejecta の飛散状況も同等であり、さらにサイズ別割合からも誤差が無かったため、再現性があると考えられる。

4.2 衝突角度 60 deg 斜め衝突について

衝突角度 60 deg で実験を行った結果、Fig. 5 に示す通り、衝突角度 45 deg と同形状の衝突痕分布図であり、45 deg と同じ設置条件で捕集できることが考えられる。しかし再現性を得ていなく、また本学でもデータが少ないため、よりデータを収集する必要がある。

4.3 改訂案の検討

本年度までの研究成果から、斜め衝突試験を現行規格に導入する上で、改訂箇所および改訂案の検討を行う。ISO11227 は全 8 章および付録資料 A~E で構成されている。現在、付録資料である Annex C に“Ejecta measurement methods”として九州工業大学で実施された垂直衝突試験をガイドラインとして紹介している。従って、第 1 回改訂は本章ではなく付録資料 Annex C に、本学で行われてきた斜め衝突試験の試験手順、条件をガイドラインに導入する。

5.結論

ISAS が所有する二段式軽ガス銃を用いて SAC, CFRP, A1 を用いた斜め衝突試験を行うことで, Ejecta 質量およびサイズ別衝突痕分布図の両方において一定の再現性が確認された. また衝突角度 60 deg の実験に成功し, 改訂に向けより良い実験結果を取得することができた. 従って, 本年度までの研究成果から, 2017 年の改訂案を以下のように作成した.

<u>改訂箇所</u>	ISO11227 Annex C Ejecta measurement methods b)
<u>改訂内容</u>	・宇宙機用材料を用いた垂直衝突 ・斜め衝突試験のガイドラインの導入
● <u>宇宙機用材料を用いた垂直衝突</u>	
Front:	ターゲット中心から前方 50~100 mm の位置に垂直に設置 サイズは少なくとも 180×150×2 mm, 250×150×2 mm を推奨 円孔有り
Back:	ターゲット中心から後方 50~100 mm の位置に垂直に設置 サイズは少なくとも 180×150×2 mm, 250×150×2 mm を推奨
● <u>斜め衝突試験のガイドライン</u>	
I. <u>衝突角度 15 deg ~ 30 deg の場合</u>	
Top:	ターゲット中心から上方 50~100 mm の位置に水平に設置 サイズは少なくとも 250×150×2 mm を推奨
Front:	ターゲット中心から前方 50~100 mm の位置に垂直に設置 サイズは少なくとも 180×150×2 mm, 250×150×2 mm を推奨 円孔有り
Back:	ターゲット中心から後方 50~100 mm の位置に平行に設置 サイズは少なくとも 180×150×2 mm, 250×150×2 mm を推奨
II. <u>衝突角度 45 deg ~ 60 deg の場合</u>	
Top:	ターゲット中心から上方 50~100 mm の位置に水平に設置 サイズは少なくとも 250×150×2 mm を推奨
Back:	ターゲット中心から後方 50~100 mm の位置に平行に設置 サイズは少なくとも 180×150×2 mm, 250×150×2 mm を推奨

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費基盤研究(B) (24360351)の支援を受け実施しました. 支援に対し謝意を表します. また, 2014, 2016 年度共同利用において, 宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃をお借りし, ISO11227 改訂案の妥当性を検証するための試験を実施しました. ご支援/ご協力に感謝申し上げます. また, 宇宙機用材料内部の破壊状況観察のため, 福岡県工業技術センター機械電子研究所 機械技術課にご協力頂きました.

参考文献

- [1] J.C. Mandeville, M. Bariteau, 2004. Contribution of secondary ejecta to the debris population, ADVANCE IN SPACE RESEARCH.
- [2] ISO 11227, Space systems -- Test procedure to evaluate spacecraft material ejecta upon hypervelocity impact.