

# アルミニウム合金の調質および材質が エジェクタ形状へ与える影響

○葛谷加代子, 西田政弘, 加藤浩明, 林浩一 (名工大)  
長谷川直 (ISAS/JAXA)

## 1. はじめに

宇宙空間では、宇宙ゴミ（スペースデブリ）が急速に増加しており、宇宙構造物への衝突など宇宙の環境問題として深刻になっている。デブリ衝突によって発生する破片（エジェクタ）は二次デブリとなり、宇宙空間のデブリはさらに増え、衝突の危険性が高くなる。エジェクタによるデブリは数 mm サイズ以下と小さいことが多いが、最近、この微小デブリが宇宙機へ衝突するとワイヤーハーネスや機器の破損要因<sup>(1)</sup>になることや、静止衛星の機能不全を引き起こすことが報告されている<sup>(2)</sup>。エジェクタに関する研究は Murr ら<sup>(3)</sup>や沼田ら<sup>(4)</sup>によって行われ、Mandeville ら<sup>(5)</sup>や赤星ら<sup>(6)</sup>によって国際標準化が推進され、各国で関連の研究が進められている。しかし、エジェクタの構成や生成メカニズムには未だ不明な点が多い。

本研究では、材質や調質の異なるアルミニウム合金製のターゲットを用いて、デブリ模擬飛翔体を衝突させ、ターゲットの特性がエジェクタに与える影響について調べた。これまで得た結果のうち、アルミニウム合金 A1100 と A6061 ではエジェクタ形状に違いが表れることを報告している<sup>(7)</sup>。本報告では、その衝突現象に対して NASA 標準破砕モデル<sup>(8)</sup>が適用できるか比較を行った。また、エジェクタの飛散速度について調べた結果も示す。

## 2. 実験方法

材質および熱処理の影響を調べるため、4 種類のアルミニウム合金（A1100-O, A1100-H, A6061-O, A6061-T6）をターゲットとした。各ターゲットのサイズは直径 95 mm、厚さ 40 mm である。直径 7.14 mm のポリカーボネート球を飛翔体とし、二段式軽ガス銃を用いて実験を行った。衝突速度は 4 ~ 6 km/s である。図 1 のようにターゲット前方 50 mm の位置に検証板を設置し実験を行った。検証板（アルミ板、150 × 150 mm）には中心に飛翔体が通過する穴（直径 30 mm）をあけたものを使用した。また、飛翔体衝突後のエジェクタ挙動を高速度ビデオカメラ（Vision Research 社製、Phantom V710）で撮影した。

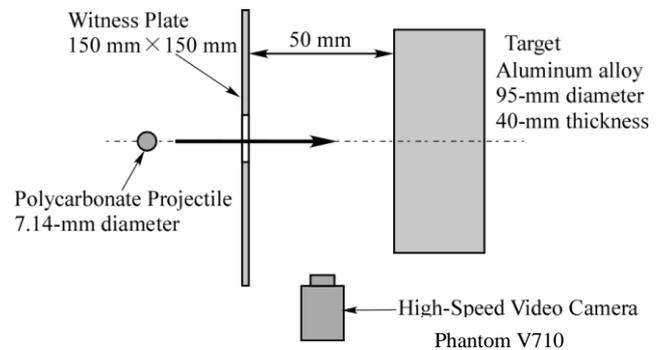


Fig.1 Experimental setup for hypervelocity impact

## 3. 実験結果・考察

実験後、チャンバ内からエジェクタを回収し、ターゲット由来かつ 0.001 g 以上のエジェクタに対し形状を測定した。エジェクタ寸法は図 2 のように  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ( $a \geq b \geq c$ ) を定義した<sup>(9)</sup>。

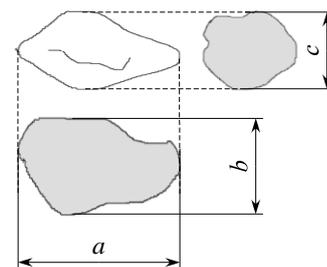


Fig.2 Size definition of ejecta

### 3-1 エジェクタ形状

昨年度、エジェクタ形状は視覚的に見て、A1100 では薄く、A6061 では厚みがあると報告した<sup>(7)</sup>。これを定量的に表すため、縦横比を用いて評価を行った。図 3(a)に  $b/a$ , (b)に  $c/a$  の累積個数分布を示す。

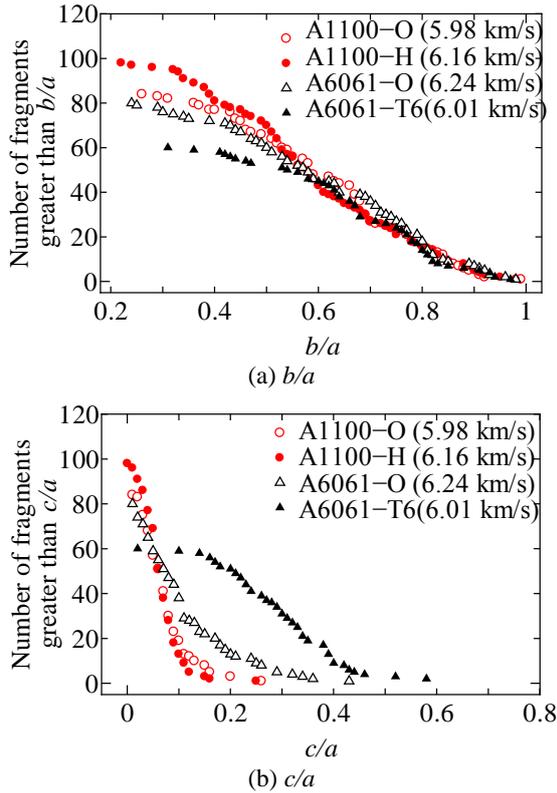


Fig.3 Size distribution

図3より  $b/a$  の分布はどのターゲット材においても近い傾向を示しているのに対し、 $c/a$  では A6061-T6 だけ分布傾向が異なっており、厚みのある形状を示していることがわかる。また、A6061 でも、O材は A1100-O や A1100-H に似た傾向を示している。これは、4種類のターゲット材を用いた引張試験によって得られた物性値<sup>(7)</sup> (降伏応力、引張強さ、伸び、硬さ) の傾向と似ていることから、機械的性質が影響していると考えられる。

### 3-2 NASA 標準破砕モデル<sup>(8)</sup>との比較

今回の衝突実験で回収されたエジェクタの測定結果と、衛星破砕を対象とした NASA の標準破砕モデル<sup>(8)</sup>を比較した。NASA 標準破砕モデル<sup>(8)</sup>で独立変数としている特性長さ  $L_C$  は

$$L_C = \frac{1}{3}(a+b+c) \quad (1)$$

と表され、衝突による破片の累積個数は

$$N(L_C) = 0.1 \cdot (M)^{0.75} \cdot (L_C)^{-1.71} \quad (2)$$

このとき、 $M$  は飛翔体の質量と衝突速度の 2 乗との積である。また、特性長さを用いて平均断面積  $A_x$  は

$$\left. \begin{aligned} A_x &= 0.540424 \cdot L_C^2, & L_C < 0.00167 \text{ m} \\ A_x &= 0.556945 \cdot L_C^{2.0047077}, & L_C \geq 0.00167 \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

面積質量比  $A/M$  は、 $L_C$  が 8 cm より小さいとき

$$D_{A/M}^{\text{SOC}}(\lambda_C, \chi) = N(\chi, \mu^{\text{SOC}}(\lambda_C), \sigma^{\text{SOC}}(\lambda_C)) \quad (4)$$

ここで

$$\mu^{\text{SOC}}(\lambda_C) = \begin{cases} -0.3 & \lambda_C \leq -1.75 \\ -0.3 - 1.4(\lambda_C + 1.75) & -1.75 < \lambda_C < -1.25 \\ -1.0 & \lambda_C \geq -1.25 \end{cases}$$

$$\sigma^{\text{SOC}}(\lambda_C) = \begin{cases} 0.2 & \lambda_C \leq -3.5 \\ 0.2 + 0.1333(\lambda_C + 3.5) & \lambda_C > -3.5 \end{cases}$$

$$\lambda_C = \log_{10}(L_C), \quad \chi = \log_{10}(A/M)$$

(5)

と表される<sup>(8)</sup>。

図4に特性長さ  $L_C$  の累積個数分布を示す。 $L_C$  が約 1 ~ 3 mm の範囲で、累積個数は A1100-O の方が A6061-T6 より多いことがわかる。グラフ上の実線は式(2)、点線は式(2)の係数を 0.04 に変更したものの、破線は式(2)の係数を 0.03 に変更したものである。 $L_C$  が約 1 ~ 3 mm の範囲において、A1100 では係数を 0.04、A6061 では係数を 0.03 にした場合に NASA のモデル<sup>(8)</sup>と一致することがわかった。また、A1100 では調質が異なっても  $L_C$  の分布傾向は変わらないが、A6061 では調質の違いにより傾向が異なる。

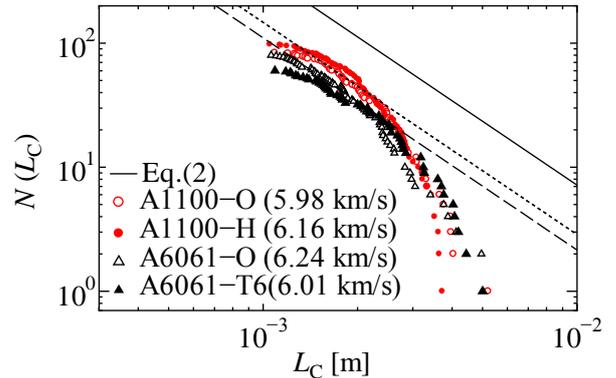


Fig.4 Comparison of size distribution

図5に示した平均断面積  $A_x$  と  $L_C$  の関係において、実験結果は NASA のモデル<sup>(8)</sup>とよく一致している。材質別にみると A6061 はばらつきが大きく、A1100 の方がより NASA のモデル<sup>(8)</sup>に近いと言える。

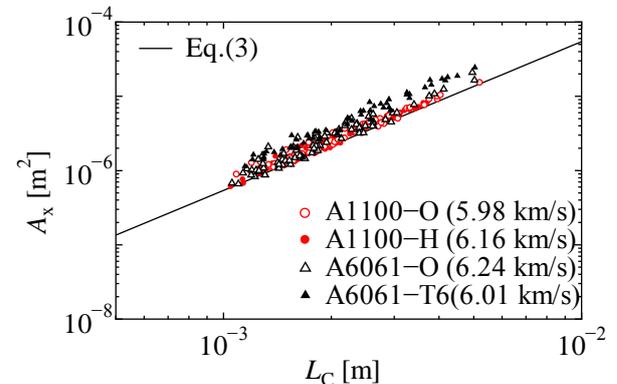


Fig.5 Comparison of average cross-sectional area distribution

また、NASA 標準破砕モデルでは、板状の破片を想定する場合には以下の算出式

$$A_x = \frac{1}{2}(L_C^2 + 2L_C \cdot c) \quad (6)$$

を用いている。この結果をもとに、波多ら<sup>(10)</sup>は破片質量を

$$M = \rho \cdot L_C^2 \cdot c \quad (7)$$

と算出し、面積質量比は

$$A/M = \frac{L_C/c + 2}{2\rho \cdot L_C} \quad (8)$$

で与えられるとした。この式 (8) は、分母に密度があるため材料により分布が変わることを示している。さらに特性長さの定義より  $L_C/c \geq 1$  なので、

$$A/M \geq 1.5/(\rho \cdot L_C) \quad (9)$$

とでき、与えた密度および特性長さに対し、最小値が存在することを報告している。

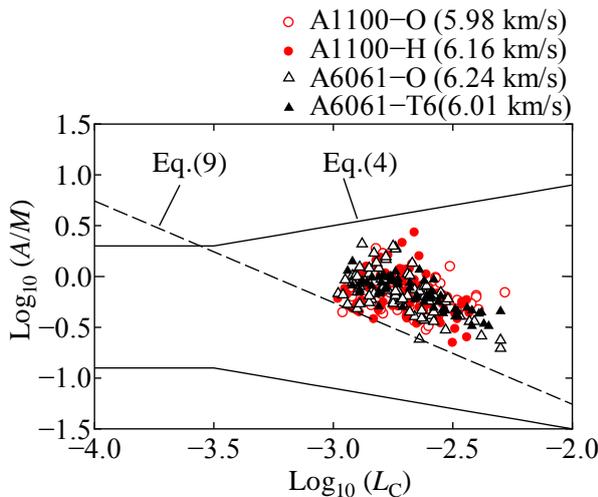


Fig.6 Comparison of area-to-mass distribution

図 6 の面積質量比  $A/M$  において実験結果は、ターゲットの材質・調質に関わらず実線で示した NASA モデル<sup>(8)</sup>の  $\pm 3 \sigma$  内のほぼ中心に分布しており、NASA モデル<sup>(8)</sup>が適用できると言える。

### 3-3 エジェクタ飛散速度

飛翔体衝突後のエジェクタ飛散速度を調べた。測定箇所はターゲットに対して垂直方向のエジェクタ先端 (図 7 の (b), (c) に破線で示した位置) である。衝突速度 4.15 km/s と 6.38 km/s の条件下で、衝突時から 12  $\mu$ s 後までの平均速度を測定した。その結果、

衝突速度 4.15 km/s におけるエジェクタの飛散速度は約 3.70 ~ 4.47 km/s (衝突速度の 0.9 ~ 1.1 倍程度)、衝突速度 6.38 km/s においては約 5.40 ~ 7.41 km/s (衝突速度の 0.8 ~ 1.2 倍程度) になることがわかった。

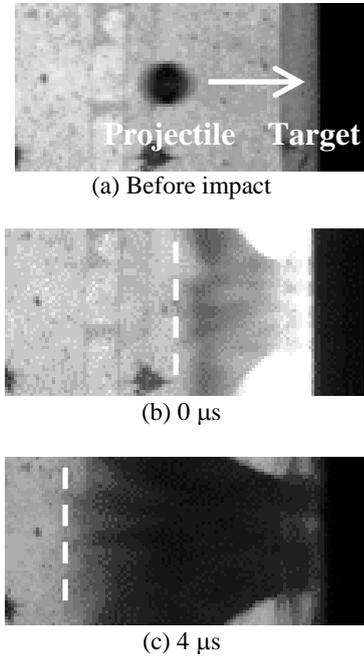


Fig.7 Images from high-speed video camera (A6061-T6, impact velocity 4.15 km/s)

### 4. まとめ

今回、アルミニウム合金のターゲットにポリカーボネート飛翔体を衝突させたときのエジェクタと NASA 標準破砕モデル<sup>(8)</sup>を比較した。また、高速度ビデオカメラを用いて衝突直後のエジェクタ飛散速度を測定した。結果を以下に述べる。

- エジェクタの縦横比は、A1100-O, A1100-H, A6061-O では薄くプレート状であるという傾向を示し、A6061-T6 は厚みのある形状を示すことがわかった。
- $L_C$  の累積個数は、係数を変えると NASA 標準破砕モデル<sup>(8)</sup>と一致した。係数は材質によって異なり、A6061 では調質の違いによる差もみられた。
- $A_x$  は NASA の平均断面積モデル<sup>(8)</sup>と一致するが、A6061 より A1100 の方がより一致することがわかった。
- $A/M$  に関しては、A1100 と A6061 は調質によらず NASA の面積質量比モデル<sup>(8)</sup> $\pm 3 \sigma$  内であり、波多氏らの下限値を用いると分布範囲を絞り込めることがわかった。
- A6061-T6 において、衝突直後のエジェクタ先端の飛散速度は、衝突速度 4.15 km/s ではその 0.9 ~ 1.1 倍程度、衝突速度 6.38 km/s では 0.8 ~ 1.2 倍程度となった。

参考文献：

- (1) [http://www.jaxa.jp/press/2004/05/20040521\\_midori-2-03\\_j.pdf](http://www.jaxa.jp/press/2004/05/20040521_midori-2-03_j.pdf)
- (2) <http://www.space.com/2983-nasa-atlantis-shuttle-radiator-struck-object-september-flight.html>
- (3) V.S. Hernandez, L.E. Murr, I.A. Anchondo, Experimental observations and computer simulations for metallic projectile fragmentation and impact crater development in thick metal targets, *Int. J. Impact Eng.*, 32 (2006) 1981-1999.
- (4) 沼田大樹, 菊池崇将, 孫明宇, 海保邦夫, 高山和樹：バリステックレンジを用いた高速垂直衝突におけるエジェクタの構成に関する実験的研究, 平成 18 年度 衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.221-222, (2007).
- (5) J.-C. Mandeville, M. Bariteau. : Contribution of secondary ejecta to the debris population, *Adv. Space Res.* Vol. 34. pp.944-950.(2004).
- (6) 赤星保浩, 菅原賢尚, 麻生和宏, 松本紫絵, 高良隆男, 鳴海智博, 松本晴久, 北澤幸人：超高速衝突エジェクタ実験方法ならびに計測方法の研究, 平成 21 年度 衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.189-192, (2010)
- (7) 西田政弘, 葛谷加代子, 加藤浩明, 林浩一, 長谷川直：第 54 回宇宙科学技術連合講演会講演集：JSASS-2010-4509, (2010)
- (8) N.L. Johnson, P.H. Krisko, J.-C. Liou, P.D. Anz-Meador. : Nasa's new breakup model of evolve 4.0, *Adv. Space Res.* Vol. 28, No.9. pp. 1377-1384, (2001)
- (9) 粉体工学の基礎編集委員会：粉体工学の基礎, pp.31-35, (1992)
- (10) 波多英寛, 花田俊也, 赤星保浩, 八坂哲雄, 原田昭治：NASA 標準破砕モデルの低速衝突への適用性の検討（第 2 報：静止軌道上物体間における最大衝突速度の考慮）, 日本航空宇宙学会論文集 vol.53, No.615, pp.160-165, (2005)

謝辞：

本実験の遂行にあたり、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部スペースプラズマ共同研究設備を利用しました。また、エジェクタ飛散速度の測定に際して、株式会社ノビテック 小西 信宇氏 にご協力いただきました。引張試験については 名古屋工業大学 北村 憲彦 先生、ビッカース硬さ試験については 糸魚川 文広 先生にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。