

超高速衝突におけるターゲットの運動量に関する研究

林 浩一 (鳥羽高専), 西田 政弘 (名工大), 小田 寛 (JAXA),
黒崎 裕久 (JAXA), 柳沢 俊史 (JAXA), 東出 真澄 (JAXA)

1. はじめに

一部のスペースデブリは、時間とともに光度が振動的に変化する現象が見られることから、自身が回転しながら地球を周回していると考えられる。一方スペースデブリの衝突による脅威は宇宙開発の障害となるため、その除去が求められており、導電性テザーをはじめとしたスペースデブリ除去技術の開発が行われている。スペースデブリ除去技術の開発にあたっては、スペースデブリの回転を考慮する必要があり、それにはスペースデブリが回転するメカニズムを知る必要がある。筆者らは、スペースデブリの回転が微小スペースデブリの超高速衝突による運動量の移動に起因している可能性を考えた。物体が衝突する際の運動量移動に関しては、Yanagisawa ら(1,2), Walker ら(3), Hoerth ら(4)や Stickle ら(5)などにより多くの研究が行われているが、そのほとんどが脆性材料に対する衝突現象に着目したものであり、スペースデブリに多いと考えられる延性材料に関する知見は少ない。そこで本研究では延性材料である 2 種類のアルミニウム合金をターゲットにした場合の、超高速衝突現象においてターゲットが獲得する運動量を実験的に調べた。

2. ターゲットが獲得する運動量

ターゲットに飛翔体が超高速衝突した場合、図 1 に示すようにジェットとイジェクタが噴出し、クレータが形成される。このような衝突現象においてターゲットが獲得する運動量

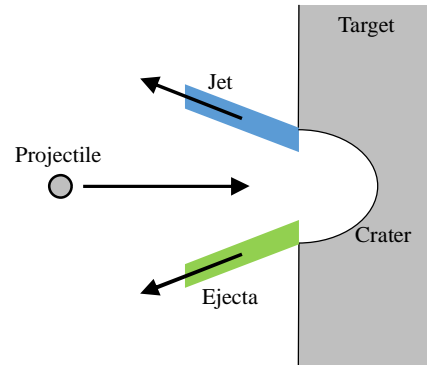


図 1 超高速衝突によるジェットとイジェクタの噴出

p_{total} は、衝突前の飛翔体が持つ運動量を p_{in} 、衝突により生じるジェットとイジェクタの運動量をそれぞれ p_{jet} 、 p_{ejecta} とした場合、

$$p_{total} = p_{in} + p_{jet} + p_{ejecta} \quad (1)$$

となる。衝突前の飛翔体が持つ運動量に対する、ジェットとイジェクタの運動量の大きさの比 η を

$$\eta = \frac{p_{jet} + p_{ejecta}}{p_{in}} \quad (2)$$

と定義すると、式(1)は次のように表される。

$$p_{total} = p_{in}(1 + \eta) \quad (3)$$

3. 実験方法

本研究では、超高速衝突においてターゲットが獲得する運動量を測定するために、ターゲットを図 2 に示すような剛体振り子とし、JAXA/ISAS の横型二段式軽ガス銃を用いて加速した飛翔体を衝突させた。式(3)において、 p_{in} はあらかじめ電子天秤で測定した飛翔体質量

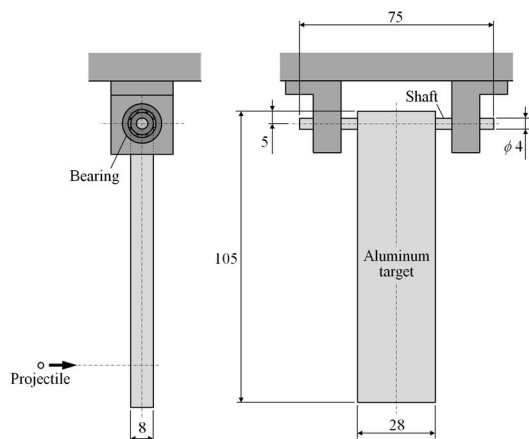


図2 剛体振り子型ターゲット

表1 ターゲット材質の主な機械的性質

	AP2000-T851	5052-H112
Tensile Strength [N/mm ²]	455	226
Yield Strength [N/mm ²]	352	118
Elongation [%]	10	19
Hardness, Brinell	130	47

と、二段式軽ガス銃における飛翔体速度計測結果をもとに算出した。一方 η は、飛翔体衝突による振り子ターゲットの最大角変位 θ を高速カメラで撮影した映像より求め、エネルギー保存則

$$Mgd(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (4)$$

および運動量保存則

$$p_{in}(1 + \eta)l = I\omega \quad (5)$$

を用いて算出した。ここで M はターゲットの質量、 I はターゲットの回転中心まわりの慣性モーメント、 d は回転中心からターゲット重心までの距離、 l は回転中心から飛翔体衝突点までの距離であり、それぞれ実験後にターゲットを測定した値を用いている。また ω は飛翔体衝突直後のターゲットの角速度、 g は重力加速度である。

実験は直径 1mm のアルミニウム合金 (2017-T4) 球を飛翔体とし、およそ 3~7 km/s の速度範囲でターゲットに垂直衝突させた。ターゲットには、ロケットボディーに使われる 2219-T87 や 2219-T62 と機械的性質が近い AP2000-T851 (白銅) と、一般的な工業製品に使用される 5052-H112 を用いた。両者の主な機械的性質を表 1 に示す。

4. 実験結果

ターゲットに飛翔体が超高速で衝突すると、図 3 に示すように飛翔体衝突点からイジェクタが噴出する。イジェクタの噴出方向は飛翔体の入射方向に対して角度を有しているが、飛翔体入射向きに対して反対向きの速度成分が主であることがわかる。図 4 は衝突実験後にテストチャンバーから回収されたイジェクタのうち、比較的サイズが大きなもの写真である。衝突前の飛翔体直径 1 mm よりも一辺のサイズが大きないジェクタが、超高速衝突により噴

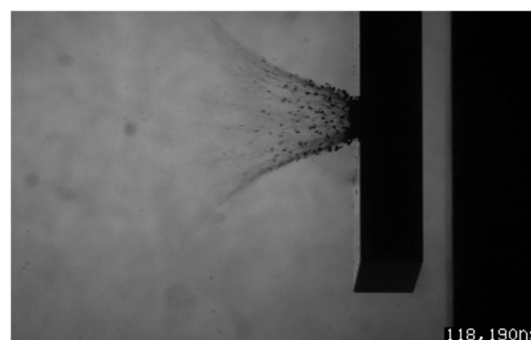


図3 ターゲットから噴出するイジェクタ (衝突速度 6.829 km/s)



図4 回収されたイジェクタ

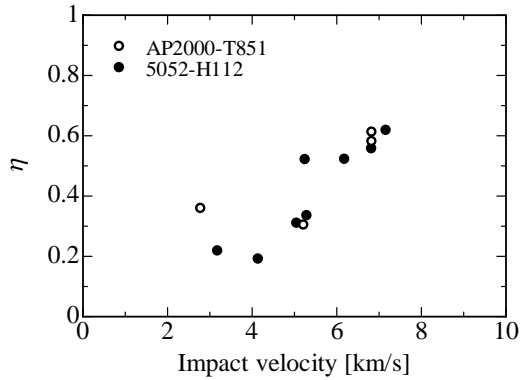


図5 η と衝突速度の関係

出している。イジェクタ噴出後、ターゲットは回転方向に変位する。図5は高速度カメラによる映像から得られたターゲットの最大角変位をもとに求めた η と、衝突速度の関係を示したものである。 η が大きくなるほど、衝突前の飛翔体が持つ運動量に対してターゲットが獲得する運動量が大きくなることを表している。ターゲットの材質が AP2000 の場合と A5052-H112 の場合では共に、衝突速度が高くなるほど η が増大する傾向が見られた。しかし低軌道上において実際にスペースデブリ同士が衝突する速度は約 14 km/s であり、本実験結果のみでは、その衝突速度域における η の値を推測することが困難であるため、今後は更に高い速度域での実験を行うことが必要であると考えている。またターゲット材質の違いが η に及ぼす影響については、実験データ数が少ないこともあり、明確な差の有無を確認することができなかった。

5. まとめ

アルミニウム合金同士の超高速衝突において、ターゲットが獲得する運動量を実験的に調べた。その結果、衝突速度が高くなるほど、衝突前の飛翔体が持つ運動量よりも大きな運動量をターゲットが獲得することを確認できた。

謝辞

本研究の高速度カメラ撮影は、株式会社ナックイメージテクノロジーの協力で行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1). Yanagisawa, M., Eluszkiewicz, J. and Ahrens, T.J.: Angular Momentum Transfer in Low Velocity Oblique Impacts: Implications for Asteroids, *Icarus*, **94** (1991), pp. 272-282.
- (2). Yanagisawa, M. and Hasegawa, S.: Momentum transfer in oblique impacts: Implications for asteroid rotations, *Icarus*, **146** (2000), pp. 270-288.
- (3). Walker, J.D., Chocron, S., Durda, D.D., Grosch, D.J., Derek N. M., Richardson, C., Asphaug, E.: Momentum enhancement from aluminum striking granite and the scale size effect, *International Journal of Impact Engineering*, **56** (2013), pp. 12-18.
- (4). Hoerth, T., Schafer, F., Hupfer, J., Millon, O. and Wickert, M.: Momentum Transfer in Hypervelocity Impact Experiments on Rock Targets, *Procedia Engineering*, **103** (2015) pp. 197-204.
- (5). Stickle, A., Atchison, J., Barnouin, O., Cheng, A., Crawford, D., Ernst, C., Fletcher, Z. and Rivkin, A., Modeling Momentum Transfer from Kinetic Impacts: Implications for Redirecting Asteroids, *Procedia Engineering*, **103** (2015), pp. 577-584.