

43. たんぽぽ捕集パネル衝突デブリ推定式における 衝突角度の検討

○尾田佳至朗（法政大），東出真澄（JAXA），栗原愛美（法政大），新井和吉（法政大），
平井隆之（JAXA），長谷川直（JAXA），矢野創（JAXA），山岸明彦（東薬大）

1. 結論

近年の宇宙活動の発展に伴い、スペースデブリと呼ばれる人工物の残骸が地球周辺に増加している。これらは直径 1 mm 以下の大きさのものもあり非常に小さいが、高速度であるために人工衛星に衝突した際は衛星の任務遂行能力を奪う危険性がある。地上から観測可能なデブリは直径 10 cm 程度であるため、精確な微小デブリフラックスは把握できていないのが現状である。

本研究は、東京薬科大学の山岸教授が提案している「たんぽぽ計画」の一部として行う¹⁾。この計画では、国際宇宙ステーション（ISS）の軌道上に設置した捕集パネルを用い、微生物・有機物・宇宙塵の捕集を試みると共に、宇宙空間に微生物や有機物を曝露した後の変成について研究する。捕集パネルには直径 1 mm 以下の微小デブリも衝突すると考えられるため、微小デブリフラックス予測も同時に行う。

試験に使用する捕集パネルは、ISS の日本実験棟にある船外簡易取付機構（ExHAM）に取り付ける。図 1 に使用される捕集パネルの外観を示す。捕集パネルは微生物やデブリを捕集するエアロゲルとそれを固定するケース材で構成されている。エアロゲルは多孔性の乾燥

物質で、密度が非常に小さいという特徴を持つ。本計画では密度 0.01 g/cm^3 の前層と 0.03 g/cm^3 の後層の二層で構成されているシリカエアロゲルを使用する。ケース材にはアルミニウム合金を使用する。曝露試験期間は 1 年間で、試験後に地上に持ち帰る。これを 3 回行い、試験は完了となる。一回目の曝露試験は 2015 年 5 月に開始された。

たんぽぽ計画の目的の一つは、たんぽぽ捕集パネルに生じたクレータの直径や深さといった形状パラメータから衝突した粒子の運動エネルギーなどの物理量を推定することである。曝露試験後の捕集パネルに残された衝突痕を解析し、地上衝突試験および数値解析の結果と比較することで、衝突粒子の物理量の推定を目指す。エアロゲルとケース材との面積比は 6:4 であり、ケース材にも相当数のデブリが衝突すると考えられる。そこで本研究ではまずケース材に着目し、衝突クレータの形状パラメータから衝突粒子の物理量を求める推定式の構築を目指す。

これまでの研究から垂直衝突に対する推定式は得られている²⁾が、デブリ環境モデルによると捕集パネルに衝突する粒子は斜め衝突が多いことがわかっている⁴⁾。よって本研究の目的は、たんぽぽ捕集パネルケース材の衝突デブリ推定式に対する衝突角度の影響を調べることである。

2. 超高速衝突試験

これまで得られた衝突デブリ推定式に対する衝突角度の影響を調べるため、ISAS/JAXA 所有の二段式軽ガス銃を用いて衝突試験を行った。ターゲットにはエアロゲルケースと同じ材料である A7075 板材を使用した。厚さは 3 mm および 5 mm であり、表面にアロジン処理

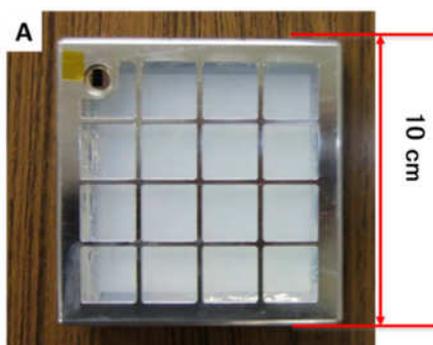


Fig.1 Tanpopo capture panel²⁾.

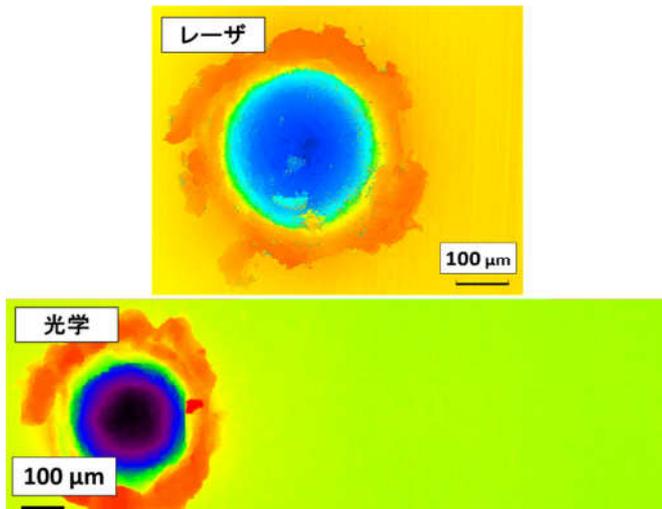


Fig.2 Craters observed with laser microscope and digital microscope.

を施したものを使用した。飛翔体にはデブリを模擬した直径 0.1 mm から 0.5 mm のアルミニウム球，酸化アルミニウム球，ステンレススチール球を使用した。アルミニウムおよび酸化アルミニウムは，デブリの主な成分であると考えられているために飛翔体材料に選定した。ステンレススチールはこれらの材料より密度が大きく，衝突痕の形状に与える影響を調べるために選定した。飛翔体は散弾法または単発で射出し，約 6.5 km/s で衝突させた。飛翔体がターゲットと垂直に衝突する角度を 0 度と定義し，衝突角度が 30 度および 45 度になるように設置した。試験は各条件につきクレータ数が 5 個以上になるまで行った。

3. クレータ計測手法の比較：レーザー顕微鏡とデジタルマイクロスコープ

ここで衝突クレータの撮影・計測方法について検討する。先行研究では，計測精度が高いレーザー顕微鏡 (KEYENCE VK870) を用いて撮影と計測を行っていたが，クレータ一つの計測に数時間と比較的長時間かかることが問題となっていた。そこで本研究では，計測時間の短縮を目的として，デジタルマイクロスコープを使用した計測方法を新たに検討し，同一クレータを用いたレーザー顕微鏡との比較計測を実施した。レーザー顕微鏡とデジタルマイクロスコープの撮影結果を図 2 に示す。撮影したクレータは，直径 100 μm のアルミニウム球を速度 6.302 km/s で垂直衝突させて試験で得られた

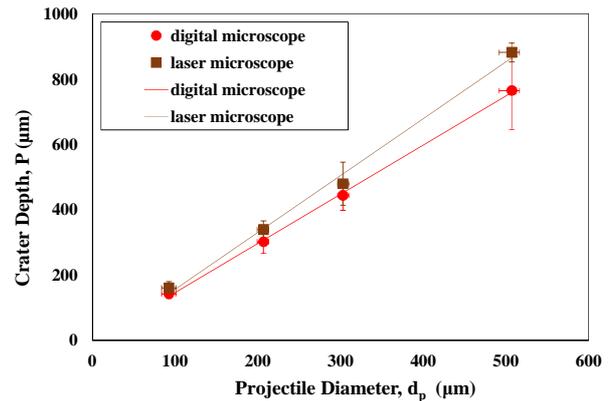


Fig.3 Comparison of crater depth at normal impacts of Al projectile at 6.5 km/s and projectile diameter measured with laser microscope²⁾ and digital microscope.

同一のものである。レーザー顕微鏡では，計測時間の制約から比較的クレータに近い領域しか撮影・計測することができない。一方，デジタルマイクロスコープでは計測時間を短縮できるため，より広範囲の撮影・計測が可能である。先行研究では直径 100~500 μm のアルミニウム球を速度約 6.5 km/s でアルミ板に衝突させる試験を行い，得られたクレータの深さをレーザー顕微鏡で計測した²⁾。本研究では，先行研究で計測されたアルミ板に形成されたクレータを任意に 10 点程度選択し，深さを光学顕微鏡で再計測した。図 3 に両顕微鏡の計測値を比較した結果を示す。ここで縦軸はクレータ深さ，横軸は飛翔体直径を表す。エラーバーはそれぞれ，縦軸はクレータ深さの標準偏差の 3 倍，横軸は飛翔体直径のばらつきの最大値と最小値を表す。同一クレータに対する両計測結果を比較したところ，これまでのレーザー顕微鏡を使った計測では，デジタルマイクロスコープを使った場合よりもクレータ深さを大きく見積もっていたことがわかった。光学顕微鏡のクレータ計測点数が少ないためエラーバーが重なっているが，衝突粒子径が大きくなるほど，クレータ深さの測定結果の差が大きくなる傾向が見られた。このクレータ深さの過大評価は，レーザー顕微鏡ではクレータに近い領域を計測していたため，衝突により隆起した部分を基準面として計測していたことが原因と考えられる。そこで本研究では，クレータ深さを正確に，かつ効率的に計測するため，デジタルマイクロスコープ (OLYMPUS 製

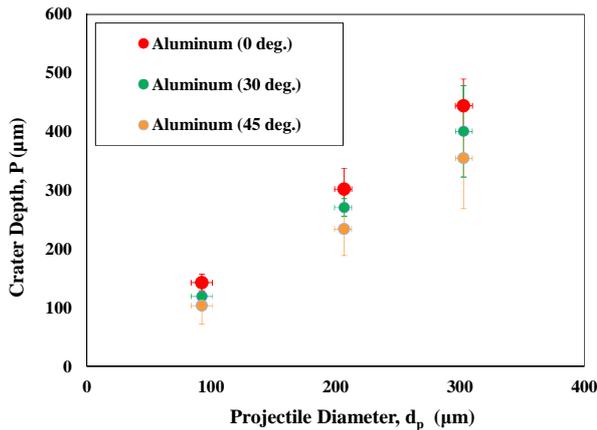


Fig.4 Comparison of crater depth and projectile diameter.

DSX510) を採用し、新たに取得した斜め衝突クレータの撮影・計測を行った。先行研究でクレータ深さが過大評価されていた垂直衝突クレータについても、そのすべてをデジタルマイクロスコップで再撮影・再計測した結果を用いる。撮影・計測の際、基準平面はクレータ直径の3倍以上離れた位置に設定した。

4. 衝突試験による斜め衝突の影響評価

斜め衝突試験を行い、クレータを撮影・計測した。まずクレータ深さと飛翔体直径の関係を調べた。図4に直径100, 200, 300 μmのアルミニウム球が0, 30, 45度で衝突した際に形成されたクレータの深さと飛翔体直径の関係を示す。エラーバーはそれぞれ、縦軸はクレータ深さの標準偏差の3倍、横軸は飛翔体直径のばらつきの最大値と最小値を表す。この結果よりクレータ深さは衝突角度の影響を受ける可能性があることがわかった。これは、衝突エネルギーのターゲット垂直方向成分がクレータ形成に影響を与えるためであると考えられる。また、材料毎にクレータ深さと飛翔体直径の関係が異なることがわかった。これは材料によって密度が異なるために、同直径であってもクレータ形成に関わる衝突エネルギーに差が生じるためであると考えられる。よって、クレータ深さは衝突角度と飛翔体材料の影響を受けることがわかったため、これら2つの推定方法を確立することができれば衝突粒子を推定できると考えられる。

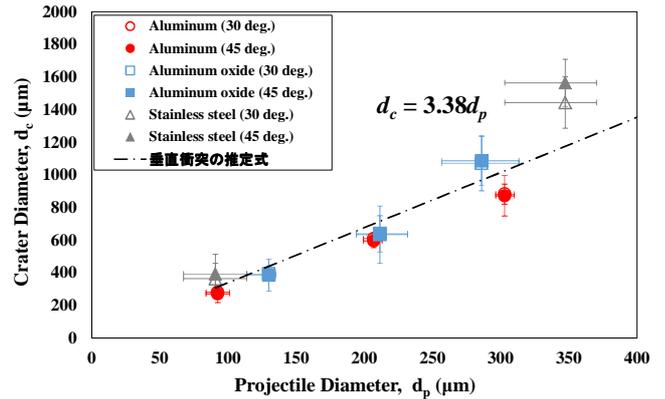


Fig.5 Comparison of crater diameter by projectile diameter.

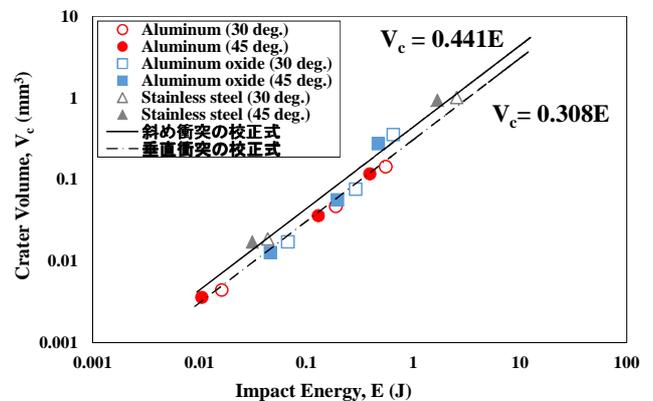


Fig.6 Comparison of crater volume by impact energy.

次に、クレータ直径と飛翔体直径の関係を示す。過去の研究により、6.5 km/sにおける垂直衝突ではクレータ直径と飛翔体直径は比例することがわかっている²⁾。6.5 km/sの垂直衝突で形成されたクレータをデジタルマイクロスコップで再計測をした結果、以下の(1)式を得た。

$$d_c = 3.38d_p \quad (1)$$

ここで d_c はクレータ直径(μm)、 d_p は飛翔体直径(μm)を表す。この式と斜め衝突試験の結果を図5に示す。30度と45度の斜め衝突の結果は、直径350 μmのステンレススチール球の結果を除いて、(1)式と良い一致を示した。

最後に、クレータ体積と衝突エネルギーの関係を示す。過去の研究により、垂直衝突では衝突速度に関らずクレータ体積と衝突エネルギーは比例することがわかっている³⁾。垂直衝突で形成されたクレータをデジタルマイクロスコップで再解析した結果、以下の(2)式を得た。

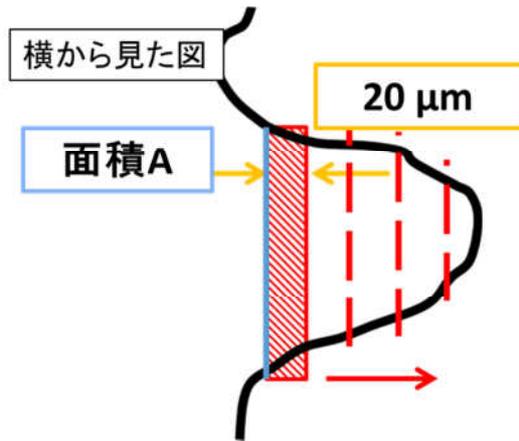


Fig.7 Measuring method of crater volume.

$$V_c = 0.308E \quad (2)$$

ここで V_c はクレータ体積(mm^3), E は衝突エネルギー(J)を表す. この式と斜め衝突を比較した結果を図 6 に示す. 斜め衝突の衝突エネルギーを求める際は, ターゲット法線方向成分のみの衝突速度を用いた. 斜め衝突試験の結果のみを用いて算出した校正式の傾きは, 垂直衝突の結果のみを用いて算出した校正式の傾きよりも大きな値になった. よって, 速度の法線方向成分を用いて衝突エネルギーを算出する方法では精確な評価はできないが, 衝突粒子をおおよそ推定できることがわかった.

5. 数値解析

試験で出すことができない速度域に関しては, 数値解析でデータを補完していく予定である. そこで, 衝突試験と数値解析の整合性確認のために, 直径 0.5 mm のアルミニウム球を 7 km/s で単発衝突させる試験を行った. なお, 今回はマシンタイムの時間的制約のため, 現時点では実験データは 1 点のみだが, 比較のために予備解析を行った. 衝突角度は 0 度および 45 度とした. 実験と同条件で衝突解析コード Autodyn を使用して数値解析を行った. 解析条件を表 1 に示す. ラグランジュ法で, 三次元モデルの解析を実施した. 解析で使用した飛翔体直径は, 実験直前に電子天秤で測定した重量から(3)式を用いて算出した.

Table 1 Simulation parameters of target and projectile.

	Target	Projectile
Ref. Density [g/cm^3]	2.804	2.7
EOS	Tillotson	Tillotson
Strength Model	von Mises	von Mises
Shear Modulus [kPa]	2.69×10^7	2.6×10^7
Yield Stress [kPa]	5.05×10^5	3.5×10^4
Failure Model	Plastic Strain	Plastic Strain
Plastic Strain [-]	2.0	0.41
Erosion	Geometric Strain	Geometric Strain
Erosion Strain [-]	1.01×10^{20}	1.01×10^{20}

Table 2 Comparison of the experiment and simulation of the crater formed by impact of $\Phi 500 \mu\text{m}$ Al projectile at 7 km/s.

	0 deg.		45 deg.	
	Depth [μm]	Volume [mm^3]	Depth [μm]	Volume [mm^3]
Experiment	756.8	1.08	630.4	0.53
Simulation	875.8	1.33	740.0	1.12

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi\rho}} \quad (3)$$

d_p は直径(μm), M は飛翔体重量(g), ρ は飛翔体密度(g/cm^3)を表す. 体積算出方法の模式図を図 7 に示す. クレータを深さ方向に 20 μm 毎に最低点まで輪切りにし, ある深さにおける衝突方向からみたクレータ領域の面積を算出した. その面積を持つ厚さ 20 μm の円柱の体積を積算した値をクレータ体積とした.

実験と解析の比較を表 2 に示す. 衝突角度 0 度と 45 度のどちらにおいても, 解析値のクレータ深さ, 体積は実験値よりも大きくなる傾向が見られた. この原因として, 実験で用いた飛翔体の重量を測定した機器の精度が考えられる. 衝突角度が 0 度の試験において計測した飛翔体重量の場合, 約 7%の誤差を持っていた. 実際の飛翔体重量が 7%小さければ, (3)式より飛翔体直径が約 2.4%小さくなり, 解析で得られるクレータも小さくなる可能性がある.

6. 結論

たんぼぼ捕集パネルケース材の推定式に対する斜め衝突の影響を調べるために, 衝突試験と数値解析を行った. 衝突角度 0~45 度の範囲では, クレータ直径と

飛翔体直径の関係は衝突角度の影響をほとんど受けな
いことがわかった。しかし衝突角度による差が微小で
明確に現れなかった可能性がある。実際は 60 度や 75
度など、より大きな角度で衝突することは十分に考え
られるため、衝突角度をより大きくした実験を行い、
衝突角度による影響を検証する必要がある。また、斜
め衝突における直径 350 μm のステンレススチール球の
試験結果が(1)式から外れてしまった理由は今後検討
する予定である。衝突速度のターゲット法線方向成分
のみを使って求めた衝突エネルギーで評価すると、斜め
衝突の推定式は垂直衝突の推定式よりも傾きがわずか
に大きくなる傾向が見られた。

実験と解析の比較をした結果、解析値が実験値より
も大きくなる傾向が見られた。電子天秤の測定精度が
原因ではないかと考えられるため、今後は重量の測定
精度を考慮に入れて解析の飛翔体直径を決定する必要
があると考えられる。

参考文献

- 1) Yamagishi et al., Trans. JSASS Aerospace Tech.
Japan, Vol. 12, No. ists29, pp. Tk_49-Tk_55,
(2014)
- 2) 高柳ら, 平成 26 年度宇宙科学に関する室内実験シ
ンポジウム, (2015)
- 3) 栗原ら, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, (2015)
- 4) 横堀ら, 第 16 回宇宙科学シンポジウム, (2016)