

# 表面処理したアルミ合金厚板の超高速衝突損傷

山口太一（法政大・院） 堀江孝佑（法政大・院） 東出真澄（JAXA）  
長谷川直（JAXA） 佐藤英一（JAXA） 新井和吉（法政大）

## 1. 緒論

近年、人類の宇宙開発の進展に伴い、スペースデブリと呼ばれる宇宙ゴミが年々増加している。その多くは、現在利用されていない人工物体やその破片などであり、地球周回軌道上を秒速数 km という超高速で飛翔している。スペースデブリと宇宙機が衝突した場合、甚大な被害が予想される[1]。

また、現在に至るまで数多くの宇宙構造材料の超高速衝突実験が行われてきている。それらの実験では、高速衝突による材料の破壊現象の解明やデブリシールドの貫通限界方程式、損傷形状の損傷予測式の構築などの研究が行われている[2,3]。将来の宇宙開発には、宇宙構造材料のスペースデブリ衝突による損傷を抑えることが不可欠である。しかしながら、これまでの超高速衝突実験において、材料に施す表面処理が損傷に及ぼす影響に関する報告は極めて少ない。

そこで本研究では、宇宙構造材料の超高速衝突損傷を軽減させるため、材料の表面処理について着目した。宇宙構造材料として広く使用されている比強度の優れたアルミ合金を用いて、材料の表面処理が超高速衝突損傷に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験方法

試験片の概観を図1に示す。試験片は、表面処理をしていないアルミ合金厚板試験片(図1(a))と衝突面のみに表面処理した試験片(図1(b))の2種類であり、材質はA6061-T651である。表面処理には、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)コーティングを用いた。DLCコーティングは、材料の表面に微粒子投射処理(FPB: Fine Particle Bombarding)[4]を施し表面改質層を形成した後、DLCでコーティングを施す方法で

ある。DLC膜厚は1.01 $\mu\text{m}$ 、その下にWPC処理によりタングステンの浸透メッキ層、さらにその下のWPC処理によるアルミ合金基材の硬化層が存在する。ターゲット形状は直径130mm、板厚25mmの厚板円盤である。試験片表面のマイクロビッカース硬さを測定(5回平均)したところ、表面処理していない試験片は108.7HV、表面処理した試験片は147.2HVであった。

超高速衝突実験には、2013年にJAXA宇宙科学研究所から法政大学へ移設された二段式軽ガス銃(藤原銃)と宇宙科学研究所(ISAS/JAXA)に設置されている新型二段式軽ガス銃を用いた。飛翔体は直径7mmのポリカーボネート球で、ターゲットに対して垂直に衝突させた。飛翔体衝突速度は1km/s~7km/sである。衝突速度7km/sの実験は、新型二段式軽ガス銃を用い、それ以外の実験は二段式軽ガス銃(藤原銃)を用いて行った。

衝突実験を行った後、クレータ深さ、クレータ直径、クレータ体積、リップル体積の測定を行った。測定には、三次元形状測定機((株)キーエンス、(VR-3000/VR-3200))を用いた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 クレータ形状

表面処理した試験片と表面処理していない試験片のクレータ直径と衝突速度の関係を図2に、クレータ深さと衝突速度の関係を図3に示す。クレータ直径とクレータ深さには、表面処理の有無による影響はほとんど現れないことがわかった。

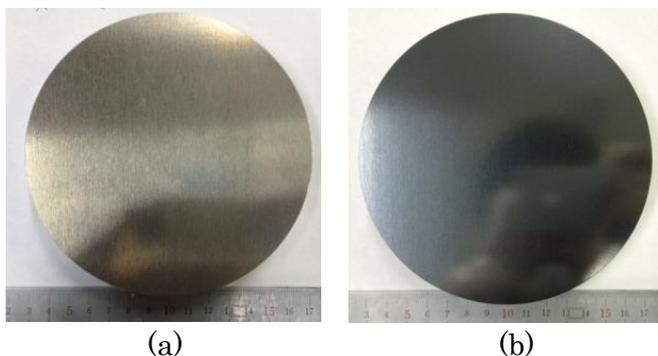


Fig.1 Images of test specimens

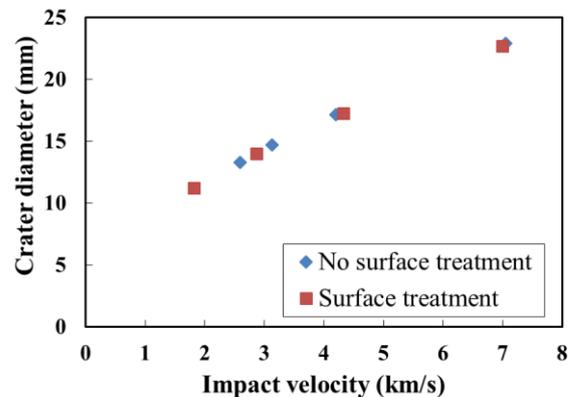


Fig.2 Relation of crater diameter and impact velocity

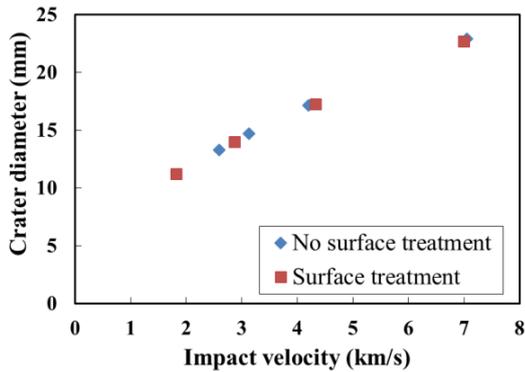


Fig.3 Relation of crater diameter and impact velocity

### 3. 2 クレータ体積

クレータ体積と衝突速度の関係を図4に示す。クレータ体積も表面処理の有無による影響はほとんど見られないことがわかった。クレータ体積と衝突エネルギーの関係を図5に示す。クレータ体積は衝突エネルギーに対して線形的に増加し、次式の関係があることがわかった。

$$V = 0.26E$$

ここで、 $V$ はクレータ体積( $\text{mm}^3$ )、 $E$ は衝突エネルギー(J)である。しかし、この式は直径7mmのポリカーボネート球をA6061-T651厚板円盤に対して衝突させた場合のみの結果であるため、今後、飛翔体直径、飛翔体密度およびターゲット密度を変化させた超高速衝突実験を行う必要がある。

### 3. 3 損傷質量

衝突前後の試験片質量の差を損傷質量と定義し、損傷質量と衝突速度の関係を図6に示す。衝突速度が約3km/s以上において、表面処理した試験片は表面処理していない試験片よりも、損傷質量が減少することがわかった。また、衝突速度7km/sにおける試験片の損傷は裏面にDetached spallが生じた。そのため、クレータ損傷により生じる損傷質量に加え、裏面における材料の剥離量が増加した。

表面処理の有無によって損傷質量の差が生じる理由として、クレータの損傷量の違いによるもの、または、リップルの剥離量の差によるものが挙げられる。クレータ形状およびクレータ体積に表面処理の有無による影響が現れないことから、クレータの損傷量の違いによるものではなく、リップルの剥離量に差が生じたため損傷質量の差が生じたと考えられる。

そこで、三次元形状測定機により、クレータ近傍に生じる

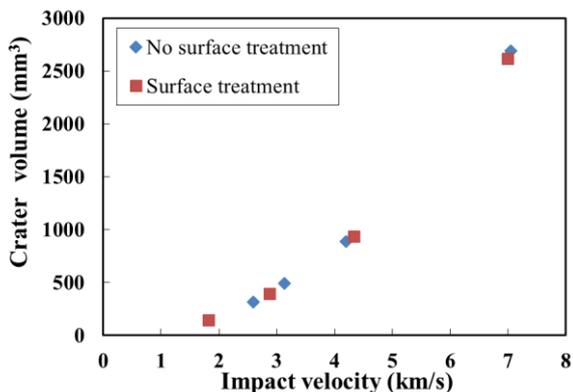


Fig.4 Relation of crater volume and impact velocity

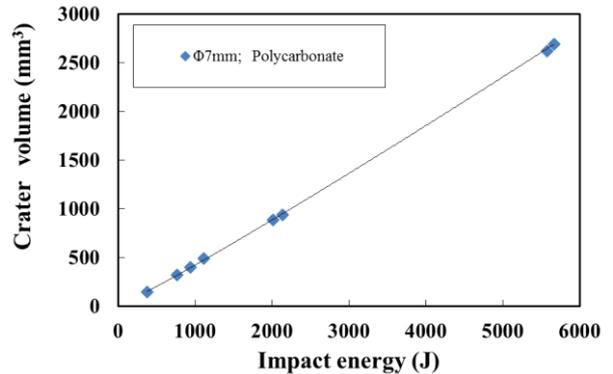


Fig.5 Relation of crater volume and impact energy

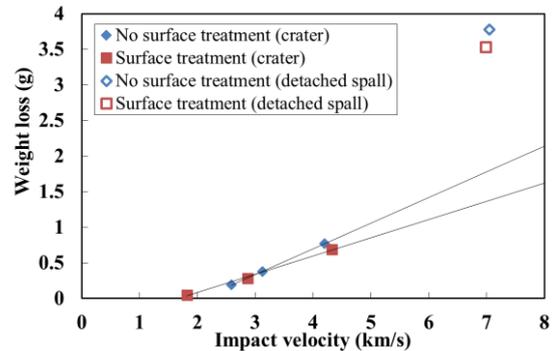


Fig.6 Relation of weight loss and impact velocity

リップルの体積を測定し、リップル体積と衝突速度の関係を図7に示す。衝突速度7km/sにおける試験片のリップルは大きく変形してしまったため、リップル体積を正確に測定することができなかった。そのため、衝突速度7km/sの実験結果は図7から除いている。衝突速度が約3km/s以上において、表面処理した試験片は表面処理していない試験片より、リップル体積が増加している。これは、表面処理によってリップルの剥離量が減少したためであると考えられる。今後、剥離量の減少が、DLC薄膜による影響なのか、またはWPC処理による表面改質層の影響なのかを調べる必要がある。

衝突実験後の全てのイジェクタを回収し、ターゲット由来のイジェクタとプロジェクタ由来のイジェクタに区分けすることで、ターゲット由来のみのイジェクタの総質量を測定した。ターゲット由来のみのイジェクタ総質量と衝突速度の関係を図8に示す。衝突速度7km/sの実験では、正確にイジェクタを回収することができなかった。図8より、衝突速

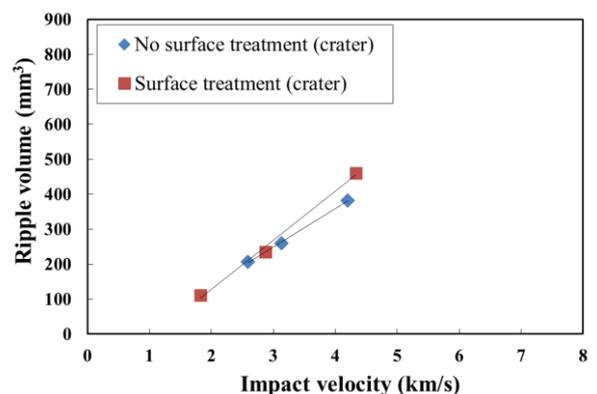


Fig.7 Relation of ripple volume and impact velocity

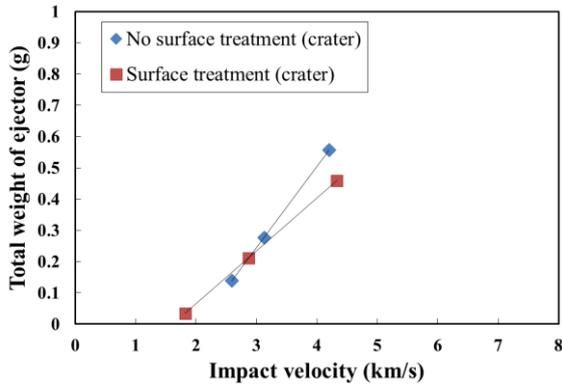


Fig.8 Relation of total weight of ejector and impact velocity

度が約 3km/s 以上において表面処理した試験片は、表面処理していない試験片より、ターゲット由来のイジェクタ総質量が減少していることがわかる。これは、前述のように、リップルの剥離量が減少したため、イジェクタ質量が減少したものと考えられる。

損傷質量、リップル体積およびイジェクタ総質量において、衝突速度 3km/s 付近から表面処理の有無による損傷質量の差が生じ始めている。その理由として、衝突速度 3km/s 付近から、飛翔体の衝突エネルギーがターゲットの損傷に対して熱的影響を及ぼし始めたためであると考えられる。

#### 4. 結論

表面を DLC コーティングしたアルミ合金厚板に対して超高速衝突実験を行った結果、以下のことがわかった。

1. 超高速衝突において、クレータ直径、深さおよび、体積は材料の表面処理の影響を受けないことがわかった。
2. クレータ体積を精度良く測定することができ、クレータ体積は衝突エネルギーに対して、線形的に増加することがわかった。
3. 表面処理した試験片は表面処理してない試験片よりも、損傷質量が減少することがわかった。損傷質量の差は衝突速度 3km/s 付近から生じ始めた。
4. 表面処理による損傷質量の減少は、リップルの剥離量が減少したためであると考えられる。また、リップルの剥離量が減少したことで、イジェクタ総質量も減少したものと考えられる。

#### 謝辞

本研究は、ISAS/JAXA から法政大学に移設された藤原銃と ISAS/JAXA の新型二段式軽ガス銃を使用させて戴きましたこと、厚く御礼申し上げます。また、今回の試験片作製して戴きました(株)不二 WPC 様に、深く感謝致します。さらに、衝突実験後の試験片観察は、(株)キーエンス様の御協力によって行わせて戴いたものであり、厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 八坂哲雄, 宇宙のゴミ問題—スペースデブリ—, (1997), p.58, 裳華房
- 2) S. Ryan and E. L. Christiansen : Micrometeoroid and Orbital Debris (MMOD) Shield Ballistic Limit Analysis Program, NASA/TM-2009-214789, 2009
- 3) E. L. Christiansen : Handbook for Designing MMOD Protection, NASA/TM-2009-214785, 2009
- 4) T. Horiuchi, M. Kano, K. Yoshida, M. Kumagai, T. Suzuki, "Method of Applying DLC Coating on Aluminum Alloys", Tribology Online, 136, 5(2), 2010