

複層薄膜貫通型微粒子衝突センサの有効性の実証

Validation of the microparticle penetration sensor within multi-layered thin films

○ 實川 律子¹, 平井 隆之², 望月 悠行¹, 石岡 英悟¹,
長谷川 直², 柳沢 俊史², 新井 和吉¹, 矢野 創²

Ritsuko Jitsukawa¹, Takayuki Hirai², Hiroyuki Mochizuki¹, Eigo Ishioka¹,
Sunao Hasegawa², Toshifumi Yanagisawa², Kazuyoshi Arai¹, Hajime Yano²

¹法政大学, ²宇宙航空研究開発機構

1. 緒論

現在, 地球周辺の宇宙環境には, 運用を終えた衛星やロケットの破片など, 人類が宇宙開発の過程で廃棄してきた様々なゴミ(スペースデブリ)が存在する. スペースデブリの大きさは数 μm から数 m まで様々であり, 例えば低軌道上の人工衛星には平均 10 km/s で衝突する危険性がある. 特に直径 1 mm 以下の微小デブリは, 衛星に致命的損傷を与えるにも関わらず, 地上からの観測が困難であり, 現在も分布を正確に把握できていない¹⁾. また, 1990 年代から軌道上でのデブリ衝突検出器によるその場観測も行われているが²⁾, センサの質量が大きいことで衛星への負担が大きいものにも関わらず, 一方で, 有効検出面積は小さいことから, 大型デブリの検出は限られている. そのため, 直径数百 μm 程度のデブリの分布データは, これまでスペースシャトル等で地球に回収された人工衛星表面上の衝突痕からのみ推定されている.

一方で深宇宙では, 直径 1 mm 以下の地球外起源の固体物質(ダスト, 宇宙塵)の観測が行われている. ダストは小天体同士の衝突などによって生じる微粒子で, 既往の研究からダストの放出源, つまり起源は小惑星, 彗星, 太陽系外の星間塵など様々であることが知られている³⁾. 恒星の周りには, ダスト円盤⁴⁾が観測されている. 特に $10 \mu\text{m}$ 以上の大きさのダストは, 惑星との力学的作用を受けて, 円盤内での分布に非対称性がある. このようにダストは惑星系の構造を反映していると考えられることから, その研究意義が高まっている. 宇宙塵についても, 深宇宙探査機に搭載された衝突検出器によるその場計測が進められてきたが, デブリ計測同様, センサ質量や面積の制約が問題となっている.

そこで, 我々の研究グループは, センサ質量と面積の制約を解消する方策として, 衝突検出器として宇宙実績のある圧電性ポリフッ化ビニリデン(Poly Vinylidene-Difluoride, PVDF)フィルムセンサを人工衛星の構成部品に組み合わせた“複層薄膜貫通型微粒子衝突センサ”を提案し開発を進めている. 衛星に必須の機器をセンサ化することで, 従来の, 衛星に微粒子検出器を搭載するというデブリやダスト計測の概念を一転させ, 衛星自体がそのミッションに関わらず,

同時に微粒子検出器であるとしたことが大きな特徴である. これによって微粒子検出数を増やし, これまでよりも格段に高い統計精度での微粒子分布計測の実現を図る.

本研究では, 複層薄膜貫通型微粒子衝突センサの宇宙実証機会である“CLOTH”のフィルム各層の貫通, 損傷に着目した検出性能評価を目的とする. 特に, センサの故障評価, CLOTH が検出可能なダスト直径の下限値の調査を行う. なお, 本研究は特許出願中のため, センサ構成に関する詳細は省略している.

2. 複層薄膜貫通型微粒子衝突センサ CLOTH(Cis-Lunar Object detector within Thermal insulation)

CLOTH は, 東京大学と JAXA が共同開発している 2018 年に打ち上げ予定の超小型深宇宙探査機 EQUULEUS(EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft)に搭載する複層薄膜貫通型微粒子衝突センサである. CLOTH の構造は, 微粒子の衝突を受け信号を発するセンサ部と衝突から得られた信号を処理するエレキ部から成る. センサ部は, 衛星の構成部材と圧電性 PVDF フィルムを組み合わせた多層構造であり, 本研究は, CLOTH のセンサ部に焦点を当て, 超高速衝突実験および数値解析により, 衝突による PVDF フィルム表裏の短絡といった故障評価, 検出感度評価を行う. CLOTH の最外層の厚さ(t)は, EQUULEUS ミッション立案段階で想定されていた $25 \mu\text{m}$ 厚(t_{25})と $12.5 \mu\text{m}$ 厚($t_{12.5}$)の高分子材フィルムの二種類の設計があった. 本実験では, CLOTH の最外層の厚さが, 損傷度合や, CLOTH センサ部の故障に与

Table 1 Impact flux of each particle diameter ($\rho=2.53 \text{ g/cm}^3$: Imitate dust particle) at CLOTH sensor area in mission period.

Particle diameter (μm)	Flux ($/0.06 \text{ m}^2\text{year}$)
2.5	23.1
5.0	10.9
10	5.5
25	1.7
30	1.3
40	0.7

える影響の違いについても調査する。

3. ダスト粒径毎の CLOTH への衝突頻度予想

CLOTH のセンサ部面積は 0.06 m^2 である。CLOTH がミッション期間 1 年間に、衝突回数 1 回以上の十分な数の微粒子検出が可能であるか検証した。1 AU (= 約 1 億 5 千 km) における標準的ダスト分布モデル⁶⁾を用いて粒径毎の衝突頻度を推定し、表 1 に示した。ミッション期間中に検出が予想される最大粒径の粒子は $30 \mu\text{m}$ であると推定された。よって、CLOTH のセンサ部の故障評価では、最大粒径以上の粒子である、粒径 $50 \mu\text{m}$ を用いた。

4. 超高速衝突実験によるセンサ故障評価

JAXA/ISAS の二段式軽ガス銃を用いて超高速衝突実験を行い、CLOTH がミッション期間中に経験すると想定される衝突で故障しうるか検証した。飛翔体は密度(ρ) $2.4 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$ 、直径 $50 \mu\text{m}$ のソーダライムガラス球を用い、 7 km/s で衝突させた。ソーダライムガラスはダスト粒子の模擬材料としてしばしば用いられる。ターゲットには最外層の厚さが t12.5 と t25 の二種類の CLOTH を使用した。なお、後述の Sporadic ダストの CLOTH に対する平均衝突速度は 12 km/s であることに注意されたい。

衝突実験後の CLOTH の損傷観察には、デジタルマイクロスコープ(OLYMPUS, DSX-510)を使用し、CLOTH に衝突によって生じた、貫通孔径、クレータ深さやクレータ直径を測定した。PVDF センサ表面に生じたクレータ深さは t25 では約 $14 \mu\text{m}$ 、t12.5 では t25 のおよそ 2 倍の約 $27 \mu\text{m}$ であった。いずれの場合もセンサの故障は見られず、実験後も検出性能を維持していた。したがって CLOTH に衝突しうる最大粒径以上の粒子が衝突した場合であっても、最外層の厚さに関わらず、センサは故障しなかったため、ミッション期間中にセンサが微粒子検出機能を喪失する可能性は低いとわかった。

5. 数値解析による微粒子検出性能評価

数値解析には衝突解析コード(AUTODYN)を用いた。まず、超高速衝突実験と同一の、衝突粒径 $50 \mu\text{m}$ 、衝突速度 7 km/s の衝突条件で解析と実験の整合性を確認した。整合性確認のための数値解析モデルを図 1 に示す。三次元二軸対称モデルで、飛翔体およびターゲットには、Lagrange 法を用い、総メッシュ数は $13,554(\text{t}12.5)/15,354(\text{t}25)$ とした。超高速衝突実験と数値解析で、CLOTH に生じた貫通孔径の比較を行ったところ、表 2 に示す結果が得られた。最外層厚さ t12.5 の CLOTH では、超高速衝突実験では $88.1 \mu\text{m}$ であったのに対し、数値解析では約 $83 \mu\text{m}$ と、超高速衝突実験と数値解析で良い一致が見られた。

次に、地上実験で再現が難しい衝突速度、粒径領域を含めた、直径 $1.0 \sim 100 \mu\text{m}$ (密度 2.53 g/cm^3)、衝突速度 $0.1 \sim 30 \text{ km/s}$ において、CLOTH への衝突を模擬した。これによって、CLOTH の検出下限を調査した。この解析で用いた簡易解析モデルを図 2 に示す。三次元二軸対称モデルで、飛翔体およびターゲットには Lagrange 法を用い、総メッシュ数は $36,000 \sim 72,000$ (飛翔体の大きさに依る) とした。

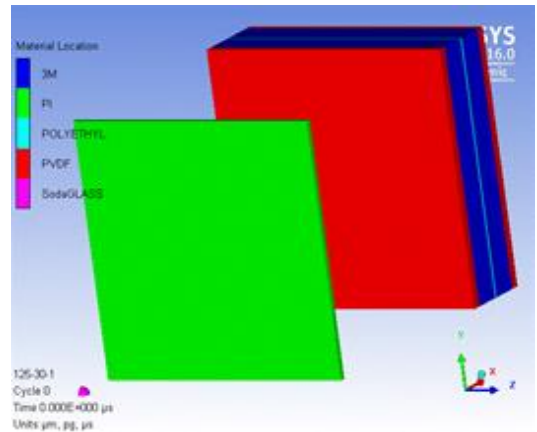


Fig. 1 3D-Quarter model for validity evaluation (particle: soda-lime glass (particle diameter $50 \mu\text{m}$), impact velocity: 7 km/s , target: CLOTH (t12.5)).

Table 2 Comparison of penetrating hole on CLOTH outermost layer between simulation and experiment.

Outer most layer thickness(μm)	t12.5	t25
Simulation(μm)	83	78
Experiment(μm)	88.1	52.2

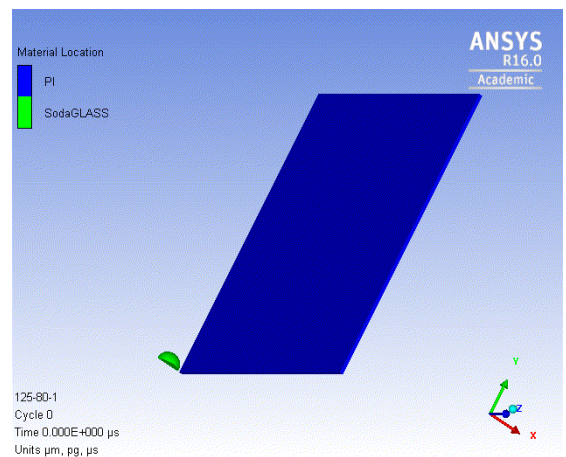


Fig. 2 3D-Quarter model for perforating propriety (particle: soda-lime glass (particle diameter $80 \mu\text{m}$), impact velocity: 1 km/s , target: CLOTH (t12.5)).

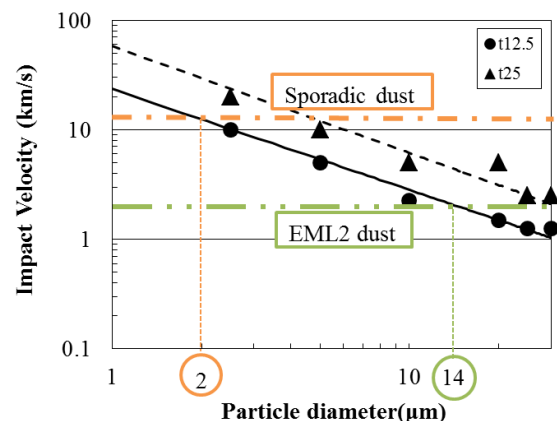


Fig. 3 Penetration limits of impact particles ($\rho=2.53 \text{ g/cm}^3$). Also typical impact velocity line of Sporadic dust and EML2 dust are shown in the graph.

得られた CLOTH の微粒子検出下限曲線を図 3 に示す。ここで、CLOTH に衝突するダストは Sporadic ダストと EML2 ダストの二種類と予想される。Sporadic ダストは彗星、小惑星を起源とし、太陽輻射圧の制動効果により地球軌道まで落ちてきた惑星間ダストを指す。Sporadic ダストは、EQUULEUS 探査機のミッション軌道上で衝突する際には典型的な衝突速度が 12 km/s であると推測される^{8),9)}。一方、EML2 ダストは一時的に地球-月系に捕獲された小天体からの二次放出ダストで、EML2 ダストの典型的な衝突速度は約 1 km/s である。これらから CLOTH が Sporadic ダストと相対速度 12 km/s で衝突する場合、2 μm 以上の粒子を検出可能、また、EML2 ダストと相対速度 2 km/s で衝突する場合、14 μm 以上の粒子を検出できるとわかった。

6. 結論と今後の課題

結論と今後の課題について、以下に示す。

結論

- ・ 実際に軌道上で経験する可能性のある粒子よりも大きい、粒径 50 μm の粒子を用いて衝突実験を行った。実験後の厚さの異なる二種類の CLOTH の損傷度合いを、顕微鏡を用いて観察した。粒子検出を担う PVDF センサにも損傷を受けたが、衝突後も持続的に検出機能を維持していたことがわかった。これから、EQUULEUS 探査機に確率的に衝突しうる最大直径の粒子衝突が発生しても、CLOTH は最外層の厚さに関わらず、故障しない可能性が高いことがわかった。
- ・ 数値解析によって、CLOTH が EQUULEUS 軌道上で経験する、典型的な衝突速度、粒径の微粒子衝突を再現した。この結果、CLOTH への衝突が予想される、起源の異なる二種類のダストは、それぞれ、典型的な衝突速度 12 km/s の Sporadic ダストであれば 2 μm、衝突速度 2 km/s の EML2 ダストであれば 14 μm 以上の粒子が検出可能であると見積もられた。

今後の課題

- ・ 数値解析は、主に地上実験が困難な衝突条件の再現を目的とするが、図 3 に見られるように、データが十分であるとは言えない。CLOTH の検出感度をより詳細に検討する必要がある。
- ・ CLOTH に EQUULEUS 軌道上で衝突する粒子の衝突速度域は、1 km/s ~ 20 km/s と、低速域を含む。よって、数値解析の妥当性評価のためにより広い衝突条件の範囲での衝突実験が必要である。特に、1 km/s 周辺の低速域での衝突実験を行うことが要求される。
- ・ CLOTH が実際に経験すると予想される衝突条件、典型的な衝突速度と、粒径における衝突事例の地上実験での再現は難しい。そこで、まず超高速衝突実験で得られている PVDF センサからの信号を数値解析で再現し、これを実際に EQUULEUS 軌道上で得られる衝突現象における PVDF センサからの出力信号の解釈へとつなげる。
- ・ CLOTH の断熱性能については未だ詳細を明らかにできていない。複層薄膜貫通型微粒子衝突セン

サの実用化へ向けては、別途、断熱性能評価は必要である。

参考文献

- 1) P.H. Krisko et al. ORDEM 3.0 and MASTER-2009 modeled debris population comparison, Acta Astronautica, Vol. 113, pp.204-211, 2015
- 2) Clark, et al.: The Long Duration Exposure Facility (LDEF), Mission 1 Experiments, NASA SP-473, 1984.
- 3) 佐々木晶ら：宇宙塵の起源（〈特集〉新世紀の宇宙塵研究）、遊・星・人：日本惑星科学会誌、Vol.6, No.4, pp.291-301, 1997.
- 4) Stark, C. C. & Kuchner, M. J. : The Detectability of Exo-Earths and Super-Earths Via Resonant Signatures in Exozodiacal Clouds, The Astrophysical Journal, Vol. 686, No1, pp.637-648, 2008.
- 5) Hirai, T., et al.: Microparticle impact calibration of the Arrayed Large-Area Dust Detectors in INterplanetary space (ALADDIN) onboard the solar power sail demonstrator IKAROS, Planetary and Space Science, Vol.100, Cosmic Dust IV, pp. 87-97, 2014.
- 6) Grün, E., et al.: Collisional Balance of the Meteoritic Complex, Icarus, Vol.62, pp. 244-272, 1985.
- 7) Shu, A., et al.: Cratering studies in Polyvinylidene Fluoride (PVDF) thin films, Planetary and Space Science, Vol.89, pp.29-35, 2013.
- 8) Nesvorny, D. et al.: COMETARY ORIGIN OF THE ZODIACAL CLOUD AND CARBONACEOUS MICROMETEORITES. IMPLICATIONS FOR HOT DEBRIS DISKS, the Astrophysical Journal, Vol.713, No.2, pp.816-836, 2010.
- 9) Grün, E., et al.: Orbital and physical characteristics of micrometeoroids in the inner solar system as observed by Helios 1, Planetary and Space Science, Vol.28, No.3, 1980.