

超高速衝突実験による CLOTH 検出部の微粒子衝突検出性能評価

Detection performance of CLOTH sensor validated by hypervelocity impact experiments

○實川 律子¹, 平井 隆之², 望月 悠行¹, 石岡 英悟¹, 中野 晴貴¹

長谷川 直³, 柳沢 俊史³, 新井 和吉¹, 矢野 創³

Ritsuko Jitsukawa¹, Takayuki Hirai², Hiroyuki Mochizuki¹, Eigo Ishioka¹, Haruki Nakano¹,

Sunao Hasegawa³, Toshifumi Yanagisawa³, Kazuyoshi Arai¹, Hajime Yano³

¹法政大学, ²千葉工業大学, ³宇宙航空研究開発機構

1. 緒論

地球周辺の宇宙環境には、大別して二種類の微粒子が存在する。一つは人工ゴミとして知られるスペースデブリである。スペースデブリは、低軌道上では平均 10 km/s で衛星に衝突し、直径数百 μm 程度の微小デブリでも衛星の運用に影響を及ぼす危険がある。もう一つは、深宇宙から飛来する、地球外起源の天然の固体物質(ダスト、宇宙塵)である。粒径 10 μm 以上のダストは、惑星系の構造を反映したダスト円盤を形成するため¹、太陽系のダスト分布を把握することで系外惑星系の理解につながると考えられている。したがって、これらの微粒子分布を把握することは、持続可能な宇宙活動や、惑星科学・天文学といった学術研究において重要である。地上観測で追尾可能なデブリは直径 10 cm 以上程度に限られ、より小さな微小デブリについては、これまで人工衛星や探査機に搭載した衝突検出器によるその場計測が進められてきたが、従来の衝突検出器は搭載質量の制約から、有効検出面積が小さく、統計的に十分な数の微粒子検出ができなかった。そのため微小デブリ分布の不確実性が大きい現状にある²。ダストについてもデブリ計測と同様の理由から、直径 10 μm 以上のダスト分布のその場計測はほとんど行われておらず、惑星間におけるダスト分布の詳細構造は明らかになっていない。

そこで我々は、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、人工衛星の基本構成機器(バス機器)である多層断熱材(Multi-Layer Insulation; MLI)に組み合わせた“複層薄膜貫通型微粒子衝突センサ(Smart MLI)”を提案し開発を進めている。バス機器をセンサ化することで、衛星に微粒子検出器を搭載する、という従来のデブリ・ダスト計測の概念を一転させ、ミッションに関わらず、種々の衛星自体が同時に微粒子検出器たりうる大きな特徴である。これにより微粒子検出数を増やし、従来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、Smart MLI の宇宙実証機である Cis-Lunar Object detector within Thermal Insulation(CLOTH)検出部の貫通、損傷に着目し、微粒子検出性能を検証する。超高速衝突実験と衝突解析コード(AUTODYN R16.0, ANSYS)を用いた数値解析から、宇宙空間で CLOTH への衝突が予想される微粒子衝突現象を模擬し、検出可能な衝突条件を推定する。ここで、CLOTH に対してミッション期間である半年間に衝突しうるダストの最大粒径は、1 AU におけるダストフラックスモデル³から、粒径 17 μm と予測されるため、この粒径以下のダストが CLOTH の検出対象とみなす。

2. CLOTH

CLOTHは、東京大学とJAXAが共同開発している2019年に打ち上げ予定の超小型深宇宙探査機 EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft (EQUULEUS)に搭載する Smart MLI である。CLOTHの構造は、微粒子が衝突すると信号を出力する検出部と出力信号を処理する回路部から成る。本研究で着目する検出部の構造を図1に示す。検出部は、一般的なMLIの3層目にPVDFセンサ層を挟み込む構造である。PVDFセンサ層では、IKAROS/ALADDIN⁴⁾で実績のある構造を採用した。微粒子が検出部の最外層を貫通し、3層目のPVDFセンサ層に衝突すると、PVDFの圧電効果により電圧信号が出力される。これを回路部で処理することで衝突粒子の物理量を把握することが可能である。検出機構において2層目のポリエステルネットはメッシュサイズが9.0 mesh/cm²と、衝突する微粒子の直径に対して十分大きく無視できる。

3. 超高速衝突実験

JAXA/ISASの二段式軽ガス銃(2-stage light gas gun; LGG)を用いて超高速衝突実験を行い、CLOTH検出部の損傷を評価した。衝突条件はミッション期間中に衝突が予測される現象を含む範囲とした。飛翔体は、ダスト模擬に多く用いられるソーダ石灰ガラス球を用い、粒径は5-30 μmとした。標的はCLOTH検出部とし、図2に示す

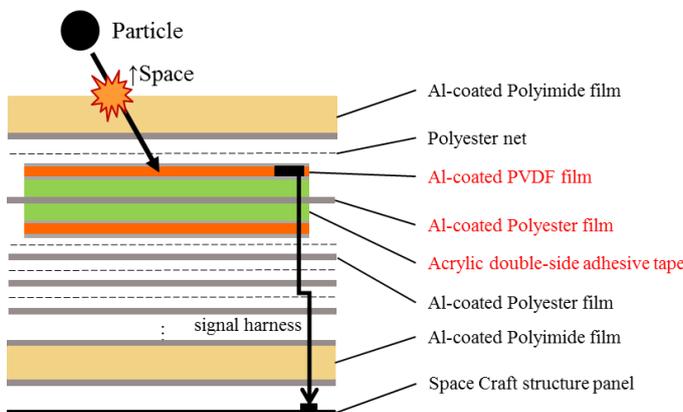


図1 CLOTH 検出部層構造。

ようにチェンバ内に設置した。飛翔体は1-7 km/sの間で衝突させた。

衝突後のCLOTH検出部に生じた衝突痕を、光学顕微鏡(DSX-510, OLYMPUS)を用いて観察、撮像した。衝突痕形状は、1-2 km/sの低速衝突においては、衝突痕外縁にリップを形成せず、打ち抜きの様相を呈した。一方で、高速衝突では、リップの形成が見られた。

4. 数値解析

EQUULEUS ミッション期間中に想定される衝突粒子は前述の通り粒径17 μm以下である。また、衝突するダストは、地球軌道へ飛来した彗星および小惑星起源の惑星間ダスト(スプラディックダスト)と、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(Earth-Moon Lagrange point 2 dust, EML2ダスト)の二種類と想定され、衝突速度は1-20 km/sと見積もられる。地上実験では実験装置の制約上、これら全ての衝突を再現することは難しい。そこで数値解析で実際の衝突を模擬しCLOTH検出部の微粒子検出性能を評価した。CLOTHの微粒子検出条件を、CLOTH検出部の最外層を貫通した場合と定義する。CLOTH検出部の解析モデルを作成し、この定義において、検出下限粒径を推定した。

CLOTH検出部最外層への微粒子衝突モデルは衝突現象の対称性から2次元軸対象モデルとした。飛翔体はソーダ石灰ガラス球、標的は検出部

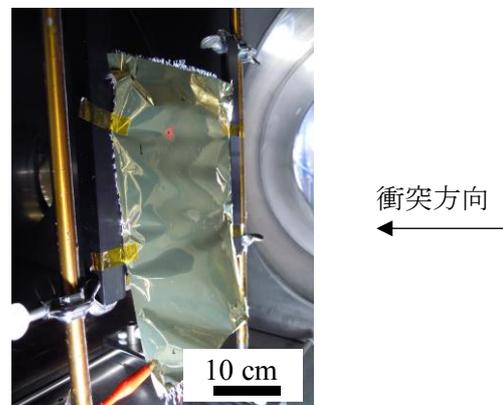


図2 チェンバ内に設置したCLOTH 検出部。

最外層のポリイミドフィルムとした。ソーダ石灰ガラスの材料モデルは、状態方程式(Equation of State; EOS)に多項式モデル、構成則および破壊則に Johnson-Holmquist モデルを採用した⁵⁾。ポリイミドの材料モデルは、EOS に Mie-Grüneisen 型線形衝撃 Hugoniot 状態方程式、構成則に Piecewise Johnson-Cook、破壊則にスポール破壊を定義した。ソルバーはいずれもラグランジュを用い、飛翔体と標的はそれぞれ 1800, 5000 メッシュで構成した。標的は端面固定とした。解析条件は超高速衝突実験の衝突条件を含む、ミッション期間中に想定される衝突現象とした。

まず、超高速衝突実験結果と数値解析結果を比較した。比較対象は、CLOTH 検出部最外層に形成された衝突痕とした。衝突痕は、図 3 に示すように、粒子が検出部を非貫通(Non-perforation: NP)の場合にクレータ径 D_c 、貫通(Perforation: P)の場合に貫通孔径 D_h と定義した。標的の表面に形成された、複数の衝突痕をそれぞれ円近似で測定し、平均径を求めた。貫通するか否かについては、衝突実験と数値解析の間で、概ね良好な一致を示した。しかし、各径の比較においては全体的に数値解析の方が過大評価している傾向が見られ、特に損傷形態が非貫通から貫通に変化した後に、数値解析結果が最大で 35%の過大評価であった。これは破壊則にスポール破壊を規定しており、薄膜内で応力波が往復することで、破壊が増進されたためであると考えられる。今後、破壊則について解析モデルを再検討することでより再現性の高い数値解析モデルを構築できると考える。

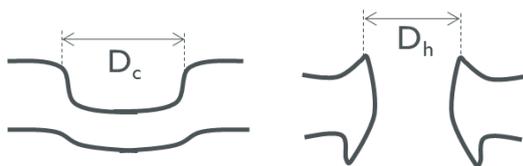


図 3 紙面上方向から粒子が衝突するとした時の衝突痕断面図に定義した D_c および D_h .

5. CLOTH 最外層における検出下限曲線

前章で述べた通り、数値解析が実現象よりも過大評価となる傾向が見られたが、貫通か非貫通かについては、今回実施した実験とシミュレーションにおいてすべて一致した。よって、この数値解析モデルを用い、検出部最外層の貫通、非貫通の判断による、検出性能評価は妥当であると考えられる。そこでこのモデルを用いて衝突微粒子が CLOTH 検出部の最外層を貫通した場合に検出できると仮定して、検出下限曲線を導出した。衝突が予測される、起源が異なる二種類の微粒子であるスポラディックダストと EML2 ダストは、それぞれ典型的な衝突速度 12 km/s および 2 km/s で衝突すると見積もられる。これらの衝突速度と検出下限曲線から、CLOTH の検出下限粒径は、スポラディックダストが粒径 0.6 μm 、EML2 ダストは粒径 6.9 μm と見積もられた。さらに、EQUULEUS のミッション期間中の衝突頻度は、1 AU のダストフラックスモデルから、粒径 17 μm 以下のスポラディックダストが 37 回、EML2 ダストは 3 回と予測される。これより CLOTH 検出部はいずれの粒子の衝突も十分に検出できることがわかった。

6. 結論と今後の課題

これまでの進捗と今後の課題について示す。

- 構築した微粒子衝突模擬解析モデルは、超高速衝突実験結果と貫通、非貫通の損傷形態についてよい一致を示した。
- 損傷量の比較においては、一部 30%程度の誤差が生じた。これは標的に規定した破壊則が原因であると考えられ、今後再検討する。
- 数値解析モデルから CLOTH 検出部の微粒子検出下限曲線を導出した。衝突が予測される、起源の異なる二つのダストの典型的な衝突速度における検出下限粒径は、スポラディックダストが粒径 0.6 μm 、EML2 ダストが粒径 6.9 μm であるを見積もられた。

- ・ スポラディックダストと EML2 ダストの衝突頻度予測は, EQUULEUS ミッション期間中に, 合計 40 回であり, CLOTH 検出部として十分な性能を発揮しているといえる.

参考文献

- 1) 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.
- 2) Krisko, P.H. et al. ORDEM 3.0 and MASTER-2009 modeled debris population comparison, Acta Astronautica, Vol. 113, pp.204-211, 2015.
- 3) Grün, E., et al.: Collisional Balance of the Meteoritic Complex, Icarus, Vol.62, pp. 244-272, 1985.
- 4) 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.
- 5) Zhang, X. et al.: Dynamic material model of annealed soda-lime glass, International Journal of Impact Engineering, Vol. 77, pp.108-119, 2015.