

超小型深宇宙探査機 EQUULEUS 搭載の
ダスト計測器 CLOTH における地上校正実験;

PET ネット層衝突時の実験データ取得方法の検討

Calibration Experiments of EQUULEUS-CLOTH;
Study for Data Acquisition at Hypervelocity Microparticle Impacts on PET Net

○岩田 翔也¹, 平井 隆之², 中澤 淳一郎³, 膽澤宏太¹, 長谷川 直⁴, 新井 和吉¹, 矢野 創^{4,3,1}
¹法政大学, ²千葉工業大学, ³総合研究大学院大学, ⁴宇宙航空研究開発機構

1. 結論

宇宙空間を航行する惑星探査機や地球周回衛星に衝突する微粒子をリアルタイムで計測するその場計測は、微粒子のサイズや速度といった物理量のほかに、軌道上の位置や時刻の情報が得られるため、太陽系に存在する宇宙塵や地球周回軌道上の微小スペースデブリの分布を把握する上で極めて有効な手段である。

宇宙空間における宇宙塵やデブリを対象としたその場計測には半世紀以上も歴史があるが、多くの検出器は検出面積が小さくても機器質量が大きいため、宇宙機全体のリソースを逼迫してしまうという課題があった。例えば検出面積を 1 m² 程度まで拡大しようとする、従来の検出器では、宇宙機全体の質量リソース内で成立しえないほど機器質量が大きくなってしまふ。そこで本研究では、宇宙航空研究開発機構 (以下, JAXA), 千葉工業大学, 法政大学と共同で、圧電性ポリフッ化ビニリデン (Poly Vinylidene DiFluoride, 以下, PVDF) フィルムを宇宙機外壁の大部分を覆う多層断熱材 (Multi Layer Insulation, MLI) の内部に組み込んだ “Smart MLI” 技術の研究開発を行ってきた¹。その “Smart MLI” 技術初の宇宙実証の機会として、技術実証機 “CLOTH” (Cis-Lunar Object Detector within Thermal Insulation) が、東京大学と JAXA が共同で開発した超小型深宇宙探査機 “EQUULEUS” (EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft) に搭載され、2022 年中に打ち上げられる予定である。“CLOTH” の主な目的は、Smart MLI 技術の宇宙実証に加えて、有人宇宙探査を含む将来の宇宙港構想に向けた宇宙環境調査への貢献、とりわけ地球-一月系第 2 ラグランジュ点 (EML2) 領域のダスト環境の世界初の測定であり、理学・工学双方に有益な宇宙実測データが得られることが期待されている²。

宇宙実測データを適切に解釈するために、現在も地上

校正実験を続けている。その際、以下の 3 つの課題が挙げられている。1 つ目は、CLOTH センサ部における多層フィルム中の層間の大きさがセンサ出力に与える影響の評価、2 つ目は、CLOTH 内部 PVDF の信号出力メカニズムの解明、3 つ目は、CLOTH 内部のポリエステルネット (以下, PET ネット) 層へダストが衝突する際のデータ取得方法の検討である。本研究では主に 3 つ目の課題に取り組み、二段式軽ガス銃による衝突実験の技術的制約上、10 ミクロンオーダーのプロジェクタイトルを単発で確実に衝突させることが困難な PET ネットの代わりに、PET フィルムを用いて実験データを取得する方法を検討した。具体的には、超高速衝突を再現する数値解析を用いて PET ネットに相当する PET フィルムの厚さを見積り、その厚さの PET フィルムを用いた超高速衝突実験よりセンサ出力波形データを取得した。

2. CLOTH センサ部の構成

CLOTH は検出部 (CLOTH-S: センサ) と信号処理回路部 (CLOTH-E: エレキ) から構成されている。CLOTH-S の PVDF 層までの模式図を図 1 に示す。CLOTH-S がダスト衝突を検出するパターンは、2 層目の PET ネットに衝突しても信号が出力される場合 (図中左) と、PET ネットに衝突せずに PVDF へ直接ダスト (あるいはその破片) が到達する場合 (図中右) の 2 つがあり、それぞれの確率は面積比より 21%, 79% である³。

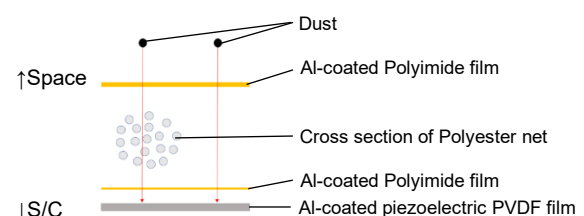


Fig.1 Layered structure of CLOTH-S above PVDF film.

3. PET ネット衝突時のセンサ出力波形データ取得

本章では、PET ネットの代わりに用いる PET フィルムの厚さ決定過程、超高速衝突実験について詳細に述べる。なお、ダストが PET ネットに衝突しない場合の衝突実験データは PET ネットをセンサ供試体から省くことで比較的容易に取得可能である。

3.1. PET フィルムの厚み決定

実験で用いる PET フィルムの厚さを決定する際、衝突微粒子の条件として、粒径は EQUULEUS ミッション期間中に想定しうる最大直径 20 μm 、衝突速度は地上衝突実験で安定運用が可能で、惑星間塵の典型的な衝突速度範囲にある 6 km/s を用いた。数値解析上でモデル化するために、デジタルマイクロスコープ (VHX-5000, (株)キーエンス) を用いて PET ネットの構造を明らかにした。その結果、PET ネットは断面直径 20 μm の糸 18 本が束になっており、束が一重、二重、三重となっている箇所が存在していた。次に、画像解析ツール(Image J /Fiji)⁴⁾を用いて PET ネット全面積に対する一重、二重、三重部分それぞれの面積割合を調査した結果、一重部分が 92.7%であり、一重部分にダストが衝突する確率が非常に高いことがわかった。これより、一重部分への衝突に着目し、直径 20 μm のダストが衝突する糸の本数をモンテカルロシミュレーションにより見積もった。PET ネットの構造を観察すると、糸は束の結び目に近いほど密に詰まっており、逆に結び目から遠いほど疎に詰まっていた。そのため、束断面最大時と最小時の 2 通りでシミュレーションを行った。その結果、束断面最大時と最小時の両方で共通して糸 4 本と衝突する頻度が比較的高かったため、糸 4 本衝突を PET フィルム厚決定時の基準とした。

PET 糸 4 本と等価な衝突強度の PET フィルムの厚みを決定するために衝突解析コード (Ansys Autodyn)⁵⁾ を用いた。PET 糸 4 本との衝突パターンのうち、飛翔体と PET 糸 4 本の重心が同一直線上に存在する最も衝突強度の大きい場合をパターン(A)、**図 2** のように PET 糸 4 本をかすめて衝突する場合をパターン(C)とした。また、同様に飛翔体が PET フィルムに衝突する場合をパターン(B)とした。飛翔体(衝突微粒子)が衝突前に持つ運動エネルギーを K_p [J]とし、パターン(A), (B), (C)におけるターゲット貫通後に飛翔体が持つ運動エネルギーをそれぞれ、 $K_{coaxial}$ [J], K_{film} [J], $K_{partial}$ [J]とした。このとき、フィルムの厚さを変化させ、計算後に解析ソフトウェア上で確認した運動エネルギーの値が以下の不等式を成り立た

せるように PET フィルム厚を求めた。その結果、25 μm の厚さが妥当であったため、厚さ 25 μm の PET フィルムを衝突実験に採用することとした。数値解析の計算例を**図 3, 4**に示す。これらはパターン(B)において厚さ 25 μm の PET フィルムをターゲットとした際の飛翔体衝突前 (**図 3**) と飛翔体貫通後 (**図 4**) のターゲットの外観を示している。

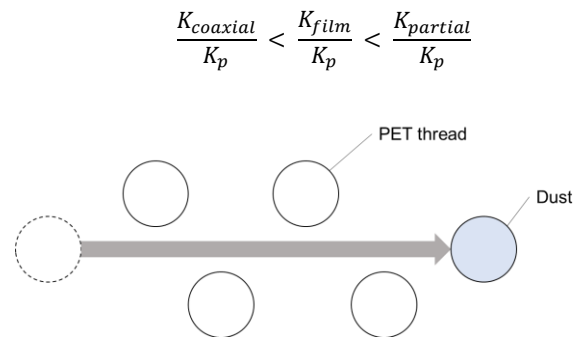


Fig. 2 Concept of the numerical simulation model in pattern (C).

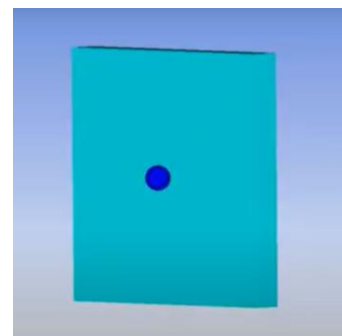


Fig. 3 Example of simulation setup at pattern (B). Target simulates the PET film (thickness is 25 μm).

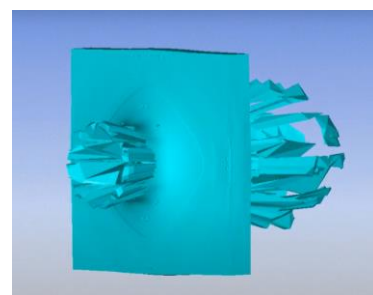


Fig. 4 Appearance of the target after the projectile penetrated.

3.2. 超高速衝突実験によるセンサ出力波形データ取得

図 1 に示した CLOTH-S の構造において、宇宙側から PVDF までのフィルムのみで作成したセンサ供試体と、同様のものに厚さ 25 μm の PET フィルムを加えたセンサ供試体の二種類を作製し衝突実験で用いるターゲットとした。超高速衝突実験には JAXA/ISAS の二段式軽ガス銃を使用した。その結果、ダストを模擬した飛翔体の単発衝突によるセンサ出力波形データを取得できた。両ターゲット合わせて単発衝突データが 3 つと少ないが、うち 2 つのデータを比較した結果を表 1 に示す。ここでは出力波形の波高値をセンサ出力として評価に用いている。なお、それぞれのショットにおいて衝突した飛翔体の推定直径が想定していた 20 μm より小さいが、これはガンデブリが衝突した、あるいは飛翔体を持つ直径のばらつきによる影響と考えられる。表 1 より、PET フィルムを用いたターゲットでは、PET フィルム無しのターゲットと比較して、飛翔体質量が小さいにも関わらず出力が 4 倍近く大きく出ている。この際の両ターゲットにおいて、顕微鏡観察の結果から飛翔体は PVDF 層まで到達していなかったことがわかっている。したがって、両データの信号出力は PVDF へ微粒子が直接衝突したことによるものではないと考えられる。

CLOTH の開発段階では、PVDF より外側のフィルムを貫通して PVDF へ微粒子が衝突することでのみ信号出力が得られると仮定していたが、過去の実験で微粒子が PVDF に到達しない場合でも信号出力が得られることが確認されており本実験結果で再現したこととなる。このことを考慮すると、宇宙空間における CLOTH の検出可能な範囲は、より小さな粒径やより遅い速度まで拡大し、ダスト検出の機会が増大することが見込まれる。また、微粒子衝突によってフィルム間の接触が誘起され PVDF へ運動量が伝達される可能性を数値解析で検証したところ、その可能性は低いことが判明した。これより、本実験で用いたターゲットにおいては各フィルムの端点を留めているテープ部を経由して運動量が PVDF に伝達されている可能性が高いと考えられる。一方で、CLOTH フライトモデルでは各層のフィルムは糸で縫われて束ねられているため、この縫合部から最外層が受

けたダスト衝突の運動量が PVDF 層へ伝搬する可能性がある。さらに、表 1 の結果を考慮すると、フライトモデルにおける PET ネットや本実験で用いた PET フィルムによって、最外層が受けた運動量が PVDF フィルムへ伝搬されやすくなる可能性も示唆された。以上より、今後は PVDF フィルムに飛翔体が衝突する場合、しない場合に分けて地上校正実験でセンサ出力波形データを取得、整理する必要がある。

4. 結論と今後の課題

本研究の結論を以下に示す。

- 衝突実験の性質上単発微粒子を衝突させることが難しい PET ネットを、ネットに相当する厚さを有する PET フィルムで代用する実験方法を検討した。
- フィルムを挿入したターゲットから得られたセンサ出力値は PET フィルムを挿入しなかった場合よりも大きくなる結果が確認できた。
- 実験結果より衝突微粒子が PVDF 層まで到達していなかったにも関わらず、有意な波高値の出力が得られた。

また、今後の課題は以下の通りである。

- CLOTH-S を模擬した供試体において PET フィルム有無のそれぞれの条件で衝突実験データを拡充する。
- CLOTH-S 内部の PVDF フィルムセンサの出力メカニズムを解明する。
- 地上校正実験の結果を踏まえ、宇宙実験で得られるセンサ出力波形データの校正を行う。また、宇宙実験によるセンサ出力波形データの特徴を再現するような地上校正実験を行っていく。

謝辞

本研究は JAXA 技術習得生の研修の一環として行ったものであり、衝突実験では JAXA の超高速衝突実験共同利用施設を利用させていただきました。また、衝突痕分析では宇宙科学研究所が所有するデジタルマイクロスコープを使用させて頂きました、御礼申し上げます。最後に、Smart MLI 技術の宇宙実証機会や開発予算をいただいた、EQUULEUS プロジェクト関係者のみなさまに感謝申し上げます。

Table 1 Signal output comparison between the target with PET film and ones without the film

Target	Projectile Diameter [μm]	Impact Velocity [km/s]	PVDF Output [V]
w/ PET film	11.80 \pm 3.07	6.173	0.3
w/o PET film	3.25 \pm 0.85	6.162	1.2

参考文献

- 1) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, 平井隆之, 矢野創, 「多層断熱材, 宇宙機, 損傷診断装置, 及び非検出物の検出方法」, 特開 2019-111936, 2019-07-11
- 2) 矢野創, 小さな躯体でシスルナ空間のダスト環境を解明, (2021), ISAS ニュース 2021年6月号(No.483).
- 3) 實川律子, 多層断熱材一体型微粒子衝突センサの性能評価, (2019), 2018年度修士論文.
- 4) Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, Available:<http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997-2012.
- 5) ANSYS AUTODYN: Theory Manual Revision 4.3, Concord, CA, 2005.