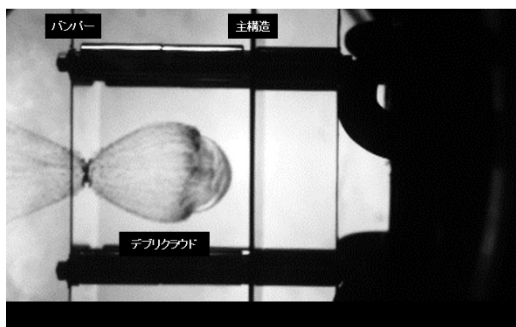


月周辺環境を想定した宇宙機に搭載する 隕石防御構造の衝撃評価技術

Hypervelocity Impact Evaluation Technology of MMOD Protection Structure Mounted on Spacecraft in Lunar Environment



仲鉢 貴臣*1
Takaomi Chubachi

遠藤 稔明*2
Toshiaki Endo

梓澤 直人*1
Naoto Azusawa

秋山 浩庸*3
Hiromichi Akiyama

近藤 宙世*4
Yusei Kondo

有人宇宙機では、船内のクルーの安全を保障するため、宇宙機に飛来するスペースデブリや隕石を防御する高性能な構造が必要となる。今後、月近傍での有人活動が活発化することが想定されることから、宇宙機の安全性向上や、構造軽量化に対する貢献が求められている。本報では、隕石衝突を模擬し、宇宙機に搭載される防御構造の性能を評価する手法として、二段軽ガスガンを用いた超高速衝突試験や衝撃解析ソフトウェアによる超高速衝突解析の実施事例を紹介する。

1. はじめに

月面開発のため、月周回軌道ステーション (Gateway) や月着陸機、月面探査車両の開発が、日本国内外を問わず進められている。また、月面での居住を目指した建設技術や発電技術に関する研究も取り組まれている。

中でも、有人での運用を想定したシステムでは、人命の喪失を防止するため、宇宙空間での飛来が想定されるスペースデブリや隕石 (MMOD: MicroMeteoroids and Orbital Debris) に対する防御構造を搭載する必要がある⁽¹⁾。有人宇宙機において一般的な MMOD 防御構造は、[図1\(a\)](#)のように、バンパーと呼ばれる部材を主構造の外面に隙間を空けて取り付けした Whipple シールドである⁽²⁾。現在運用中の国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の日本実験棟 (JEM: Japanese Experimental Module) や宇宙ステーション補給機 (HTV: H-II Transfer Vehicle) では、三菱重工業株式会社 (以下、当社) にて開発した MMOD 防御構造が搭載されており、スペースデブリや隕石の衝突による機能損傷は発生していない (図1(b))。



図1 MMOD 防御構造例

*1 総合研究所 強度・構造研究部

*3 総合研究所 製造研究部 技術士 (航空・宇宙部門)

*2 防衛・宇宙セグメント 宇宙事業部 技術部

*4 総合研究所 製造研究部

現在は、将来的な月近傍域の開発に備えてMMODと防御構造の衝突に関する評価技術の向上に取り組んでおり、本報では、当社が実施した衝突試験と衝突解析の事例を紹介する。特に、月周辺環境では隕石の飛来が想定されることから、飛来確率が高く衝突時のダメージが大きい密度 $3.5\sim 4.0\text{g/cm}^3$ の隕石をアルミナ飛翔体で模擬した評価事例を示す。

2. 有人宇宙機に搭載される MMOD 防御構造

図1(a)に示した Whipple シールドのように、主構造から隙間を空けてバンパーを設けることで、飛来した飛翔体がバンパーを貫通する際に破碎や融解、気化しながらデブリクラウドと呼ばれる破片群となって拡散し、主構造に加わるダメージを分散することができる⁽¹⁾(図2)。この効果によって、同じ板厚の一枚板構造に比べて主構造を貫通しづらくさせるため、同じ防御性能を実現する場合に、機体全体の重量を低減できる。また、図1(b)で示したように、バンパーと主構造の間に更に部材を取り付けることで、より防御性能の高い構造を実現できるとされており、ISS の実験モジュール Destiny や Columbus においても、類似の防御構造が取り付けられている^{(3),(4)}。

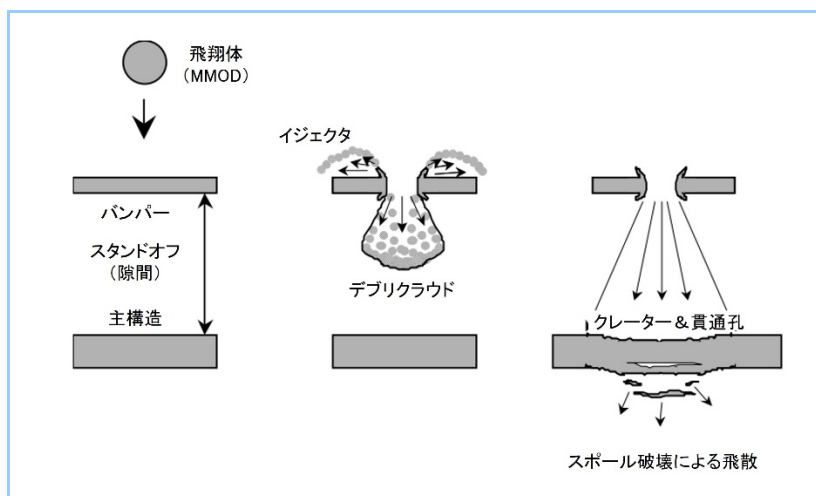


図2 Whipple シールドに飛来した飛翔体を防御する仕組み⁽¹⁾

3. 二段軽ガスガンを用いた超高速衝突試験^{(5),(6)}

MMOD の衝突速度は、一般的にスペースデブリで平均 9km/s 、隕石で平均 19km/s と言われており、有人宇宙機で防御する必要のある飛翔体の大きさは球形状として直径 $1\sim 10\text{mm}$ 以下程度とされる⁽¹⁾。これらの速度や直径の飛翔体を MMOD 防御構造に衝突させるためには、二段軽ガスガンと呼ばれる加速装置(図3)を利用する。

この装置では、図3(b)に示すように、火薬を点火してピストンを加速させ、管内部に充填された軽ガス(水素、ヘリウムなど)を圧縮する。軽ガスの圧力が一定値を超えるとダイアフラムが破壊され、ダイアフラムを突破した圧縮ガスが、発射管内部に設置された飛翔体とそのサボ(飛翔体を保持する樹脂製の容器)を加速させる。加速された飛翔体は、発射管を抜けて飛翔する間にサボを分離し、ターゲットに衝突する。火薬量の調整、ダイアフラムやサボの設計等、多くの試験技術が必要とされるため、これらの試験装置と試験技術を有する国内外の研究機関に協力いただきながら、試験評価を実施している。

図4(a)は、一般的なデブリ防御構造(Whipple シールド)に対して、隕石を模した飛翔体を約 3km/s と約 6km/s で衝突させた様子で、高速度カメラにより撮影した。撮影画像から、バンパー衝突後におけるデブリクラウドの速度(進行方向とその直交方向)や飛散状態を確認できる。例えば図4(a)-(i)では、デブリクラウドの前縁に破片が集中していることが分かる。これらの試験結果により、飛翔体材料や衝突速度について、デブリクラウドの様態との関係性を評価し、複雑な衝突現象を時刻歴で整理できるようになる。

図4(b)は、デブリクラウドの衝突を受けた主構造の様子で、主構造表面に形成されたクレーターの直径や深さ、貫通孔の大きさ等をマイクロSCOPEで計測している。計測結果から、デブリクラウド内に含まれる破片の大きさを推定し、4章に示す超高速衝突解析のモデル構築に対する一助となるデータを取得できる。

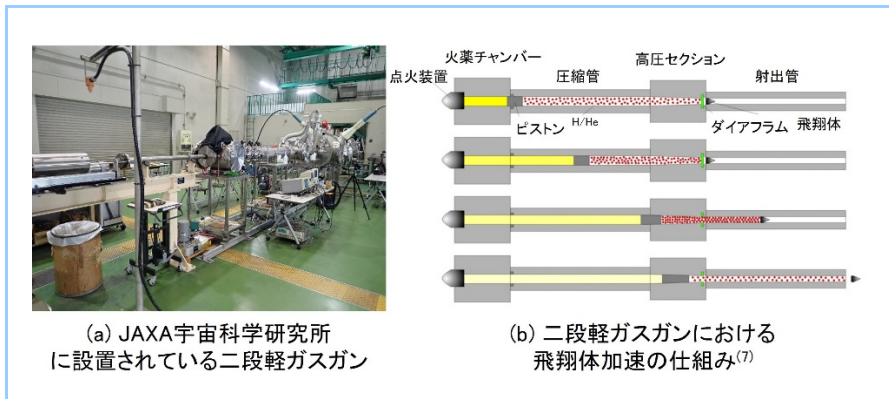


図3 超高速衝突試験を実現する試験装置(二段軽ガスガン)

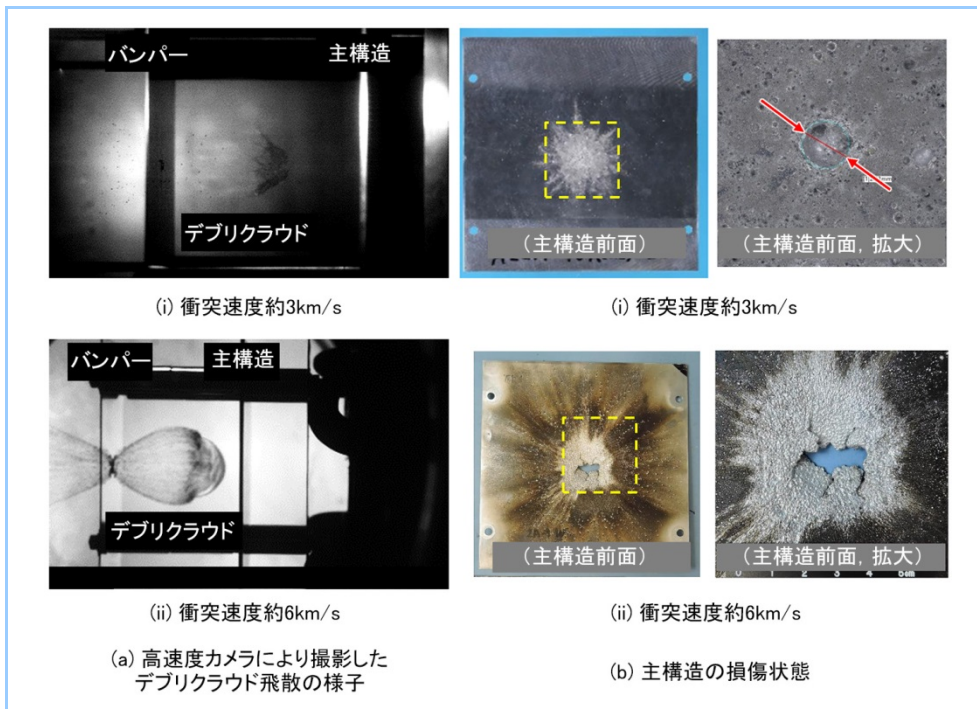


図4 二段軽ガスガンを用いた Whipple シールドに対する衝突試験結果

4. SPH 法による超高速衝突解析⁽⁵⁾⁽⁶⁾

二段軽ガスガンを用いた超高速衝突試験は、1ケースの準備にかかる時間の都合から、全てのパラメータの組合せで試験を実施することは困難である。そこで、試験結果をもとに超高速衝突解析モデルを構築し、これを用いた試験ケース数の削減が求められる。

飛翔体と MMOD 防御構造の衝突は、数十 μs 以内に貫通や相変化現象が生じる現象であることから、物体を粒子の集合体とみなして粒子間の相互作用から衝突現象を評価する SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法により衝突計算を実施した。衝突時には数十～数百 GPa もの高圧圧縮現象が生じることから、部材の材料モデルに状態方程式と強度則、破壊則が必要となるため、設定パラメータ数が数十個にわたる。さらには、材料のひずみ速度依存性にも影響されるが、 $10^5 \sim 10^7$ 1/s オーダのひずみ速度域における材料特性について述べた文献も多くない。

そこで、3章に述べた超高速衝突試験によって得られた試験結果をもとに、材料モデルの構築を行った。計算には Ansys 社の衝撃解析ソフトウェア AUTODYN[®]を用いて、ソフトウェアの材料ライブ

ラリに登録されている材料モデルをベースに、計算結果に大きく寄与するパラメータを分析し、飛翔体の破碎状態を再現できるようにするとともに、現実的な範囲での物性パラメータの調整を行った。

図5は、二次元軸対称モデルによる衝突計算を行った結果であり、主構造に形成されたクレーターの深さや直径、デブリクラウドの速度を評価している。今回対象とした試験ケースにおいては、解析結果と試験結果の差異は、クレーター深さ比+3.4% (解析結果/試験結果)、直径比-28.6%、デブリクラウド速度比+5.6%となり、クレーター深さや速度については概ね試験での破壊現象を再現できる結果であったが、クレーター直径で解析モデルの更なる検討が必要となる結果であった。今後は、モデルの精緻化に加えて、異なる衝突条件についても解析モデルの適用性検討を進めていく。

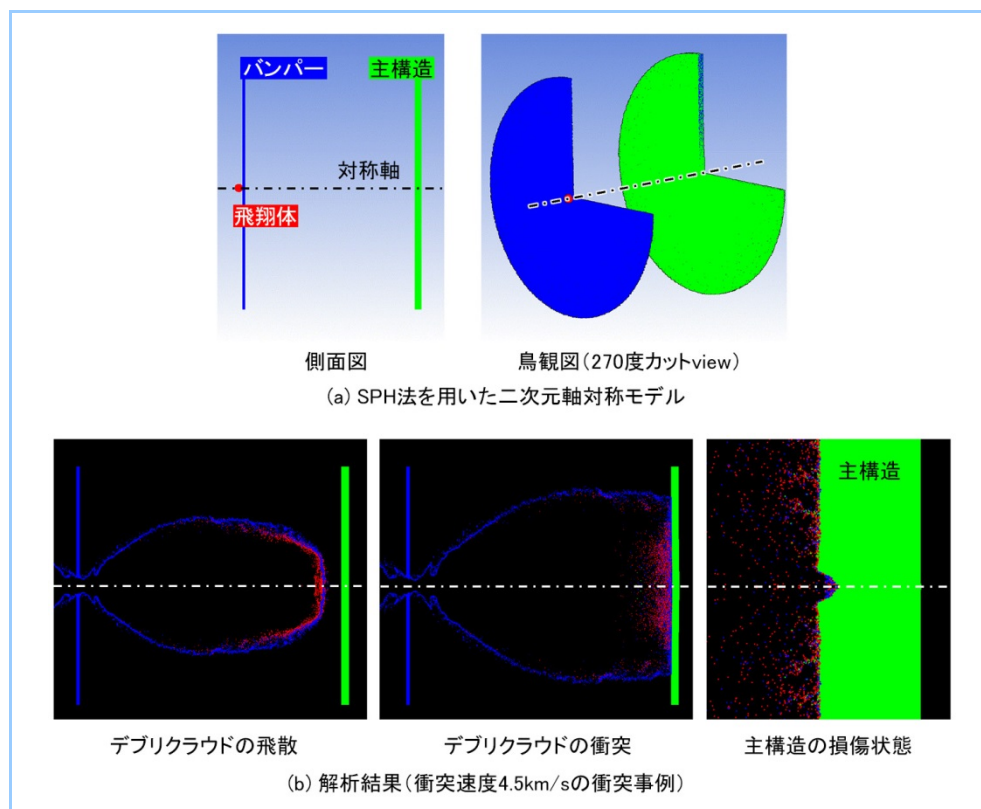


図5 AUTODYN[®]を用いた超高速衝突解析

5. まとめ

本報では、有人宇宙機に搭載される MMOD 防御構造の防御性能を評価する技術として、二段軽ガスガンを用いた超高速衝突試験と、衝撃解析ソフトウェアによる超高速衝突解析の事例を紹介した。超高速衝突試験については、国内外の二段軽ガスガン保有組織協力のもと実施しており、衝突速度 7km/s 以下の衝突条件であれば、MMOD に対する防御性能を評価可能である。また、衝撃解析については、本報で紹介したように、影響の大きいパラメータを現実的な範囲で調整することによって、実現象を再現可能である目途が得られた。

今後の課題としては、7km/s を超えた速度域での防御性能評価手法の確立が挙げられる。二段軽ガスガンで射出可能な飛翔体の速度は凡そ 7km/s までであり、これを超える速度での衝突試験は、飛翔体の大きさが制約される等、宇宙での衝突が想定される条件での試験が難しいという課題がある。成形爆薬を用いることで 10km/s を超える速度での衝突試験が可能であるが、飛翔体の形状や質量の制御が難しいとされている⁽⁸⁾。このほか、解析モデルの精緻化やモデル適用範囲の検証も実施する必要がある。これらの課題は、継続して取得する試験データを用いながら引き続き取り組んでいく所存である。

最後に、本報に示した研究開発を共同で実施いただいている宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

月周回有人拠点補給ミッション定義チームの内山崇氏と齊藤慧氏、また、試験を実施いただいている宇宙科学研究所の長谷川直氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Christiansen, E. L., et al., Handbook for Designing MMOD Protection, JSC-64399 Ver.A (2009)
- (2) Whipple, F. L., Meteorites and space travel, Astronomical Journal Vol.52 (1947) p.131
- (3) Kalinski, M. E., Hypervelocity impact analysis of International Space Station Whipple and Enhanced Stuffed Whipple Shields, Naval Postgraduate School Master's Thesis (2004)
- (4) Destefanis R., et al., Enhanced Space Debris Shields for Manned Spacecraft, International Journal of Impact Engineering Vol.29 Issues 1-10 (2003) p.215~226
- (5) 仲鉢 貴臣ほか, アルミニウム合金製防御構造に対するアルミナ飛翔体の超高速衝撃現象の検討, 第64回構造強度に関する講演会講演集 (2022) p.1-3
- (6) 仲鉢 貴臣ほか, アルミナ飛翔体とアルミニウム合金製防御構造の超高速衝突におけるスケール則の成立性評価, 第65回構造強度に関する講演会講演集 (2023) p.1-3
- (7) Putzar R., et al., Experimental Space Debris Simulation at EMI's Calibre 4mm Two-Stage Light Gas Gun, 5th European Conference on Space Debris Vol.5 Issue 1 (2009) p.1-7
- (8) 白木 邦明ほか, 成形爆薬による超高速衝突試験と飛翔体形状の影響評価, 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 49 No. 572 (2001) p. 300~309