

メカノクロミズム金属錯体を用いた

スペースデブリ衝突貫通穴の位置表示に関する研究

楨原幹十朗¹, 長谷川美貴², 高橋 勇雄², 下瀬滋³,
高橋諒¹, 根元翔¹, 櫻井翔也², 土屋垣内絢子², 佐藤沙紀²

1: 東北大学, 2: 青山学院大学, 3: JAXA・宇宙科学研究所

1. はじめに

宇宙開発において、宇宙で長期運用されるスペースステーションがスペースデブリと衝突する問題は避けて通れない。スペースデブリと宇宙人工物の衝突は、低軌道上においては相対速度が 7 km/s にもなる[1]。今後さらなる有人宇宙開発、宇宙商業が盛んになれば、安全性が一番の問題になるだろう。現在の防護対策として、国際宇宙ステーション (ISS) の日本の実験モジュール (JEM) には、スタッフィング入りのダブルバンパシールド (Whipple bumper) が設置されている。しかし、JAXA の示しているデブリシールドの貫通限界曲線によると、デブリが平均衝突速度 7 km/s で衝突した場合、防護できるサイズは直径約 1.3 cm までである[2,3]。観測技術限界のために、地上から追跡可能なデブリサイズは 10 cm 以上であるため、1-10 cm のサイズのデブリに関しては常に危険であるのが実情である。

本研究チームは「あらゆるデブリ衝突に対して、現在のテクノロジーで、空気漏れ穴が生じない設計は不可能である」との確信に至っている。そこで、スペースデブリ衝突穴が生じない設計よりも、衝突貫通穴

が生じることを前提とする、その前提で、衝突後の穴修復作業に有益な空気漏れ貫通穴情報をスペースクルーに与える方法が現状での喫緊の重要課題であるとの考えに辿り着いた。デブリ衝突後には、その衝撃により電源系統がダウンする可能性が高い。よって、暗闇の中でも衝突穴の位置特定ができ、迅速に修復できるよう、衝突穴周りが畜光効果により発光し続けるシステムの構築は課題解決の一つである。

上記記述の新規表示システム構築の為に、JAXA/ISAS の新型二段軽ガス銃を用いる。

2. 衝突実験に向けた準備

2-1 メカノクロミズム金属錯体

衝突貫通穴を修復する為に、暗闇状況下でも畜光効果により光り続けるシステム構築を目指す。衝突後の空気漏れ穴を発光表示させる機構として光化学錯体であるメカノクロミズム金属錯体[4,5]を用いる。メカノクロミズム金属錯体は、本研究チームの一人である長谷川が精力的に追究し、近年発見・創設した新規物質であることから応用活用のポテンシャルは高い[4,5]。メカノクロミズム金属錯体は粉末物質である為、

壁塗料に混ぜることができ、宇宙構造にとって重量増にならない利点がある。

メカノクロミズム金属錯体が温度上昇に伴って蓄光効果により発光し続けることは確認されている。一方、近年開発されたばかりなので、超高速変形に対する詳細な特性は分かっていない。例えば、超高速衝突で生じる過激な温度や圧力の上昇が、メカノクロミズム金属錯体の光化学に与える詳細影響は未知である。また、メカノクロミズム金属錯体が剥落・飛散しにくいように強固に保持する塗料物質を選定する。更に、塗布塗料物質の最適な塗布量や塗布方法という基礎研究も遂行する。

2-2 SPH 数値衝突シミュレーション

本研究チームでは、SPH 法[6]に基づく数値衝突シミュレーションを開発した。SPH 法は物体を分割しその素片（粒子）の運動を追跡する手法である。計算格子を必要とせず、計算領域内の任意の点における物理量をその点の近傍に存在する複数の粒子が持つ物理量から補完することにより得るという特徴を持つ。そのため、超高速衝突破壊の数値解析にも広く適用されている。

超高速衝突実験前に数値計算により、トリガーとなる温度上昇値を求めることでメカノクロミズム金属錯体の設計値を事前に求める。Fig. 1 と Fig. 2 に、二枚 Whipple bumper のデブリ衝突を模擬した数値解析による温度上昇分布を示している。本解析では、衝突速度が 6.5 km/s、バンパの厚さを 1 mm (1 枚目)、4 mm (2 枚目)、オフセット距離を 110 mm とした。この結果から衝突貫通穴周りの温度を求め、メカノクロミズム金属錯体の分子設計の指標とする。塗

料物質についての数値解析は逐次行う。

纏めると、JAXA/ISAS のスペースプラズマ実験施設にある新型二段式軽ガス銃を用いるための、十分な準備が出来ていると言えるだろう。

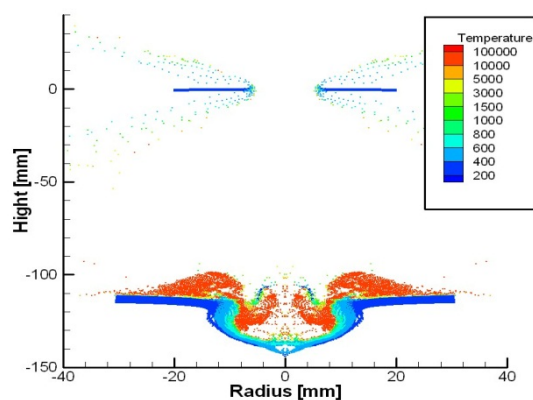


Fig. 1 SPH 数値解析結果

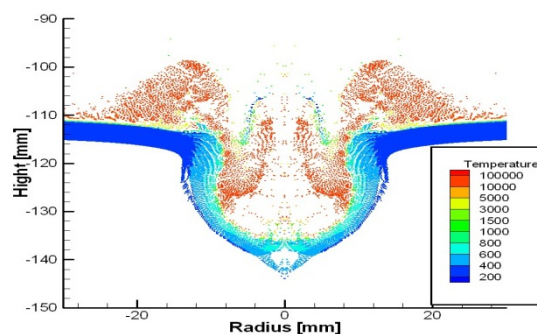


Fig. 2 衝突穴周りの温度上昇分布

3. 新型二段式軽ガス銃を用いた実験方法

3-1 高速実験の実験手順

超高速衝突実験には、JAXA/ISAS のスペースプラズマ実験施設にある新型二段式軽ガス銃を用いる予定である。

実験手順としては、最適化したメカノクロミズム金属錯体と塗布塗料物質を混ぜ合わせ最適厚さでアルミ標的板の二枚目に塗る。計測装置を設置した後、実際に超高速衝突実験を行う。模式図を Fig. 3 で示す。

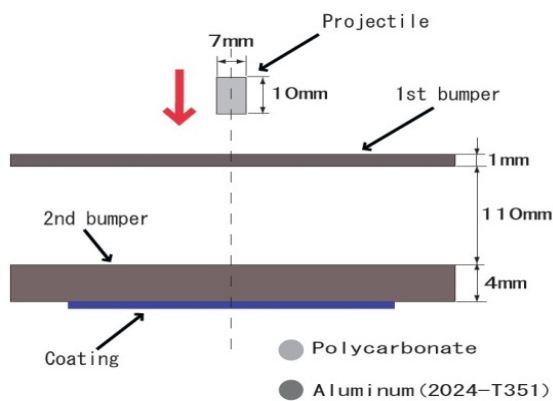


Fig. 3 実験構想図

3-2 実験に用いる計測機器

- 高温放射速度センサ：メカノクロミズム金属錯体の光発生トリガーは超高速衝突による急激な温度・圧力上昇である。そこで、温度をモニタする為に高温放射速度センサは必要不可欠である。高サンプリングで時系列的に二次元的に温度分布が測定できるので、メカノクロミズム金属錯体の特性を詳細に把握することが可能となる。
- 超高速カメラ：衝突直後に防護壁に塗ったメカノクロミズム金属錯体の一部は飛散することが考えられる。超高速カメラを用いてその飛散様子を捉える。捉えた飛散状況をフィードバックし、飛散しにくい塗布塗料物質の塗布量・塗布方法を検討する。
- ひずみゲージ：内壁板の面内外方向変形とメカノクロミズム金属錯体を混ぜた塗布塗料の剥落・飛散との相関関係を測定する為に、アルミ板にひずみゲージを貼る。超高速で歪データを蓄積するため、テープ方式データログを用いる。
- ホームビデオ：衝突直後からのメカノクロミズム金属錯体の発光変化を長時間時系列に記録する為に設置する。

4. 高速衝突実験結果の予想図

衝突実験後のバンパ衝突穴を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。Fig. 5 は金属錯体塗布有りの実験予想図であり、貫通穴周辺にハロー形状にメカノクロミズム金属錯体が発光する。

本研究では、衝突貫通穴周辺に塗料物質が残っていることを設計目標とし、衝突中心そのものの裏面の塗料物質の剥落・飛散は許容する。超高速衝突では衝突により標的内部に衝撃波が走り、アルミ板表面上で局所的に大きな圧力差が生じる（スポーリング）ので、衝突中心の塗料の剥落・飛散は現実的に避けられないからである。

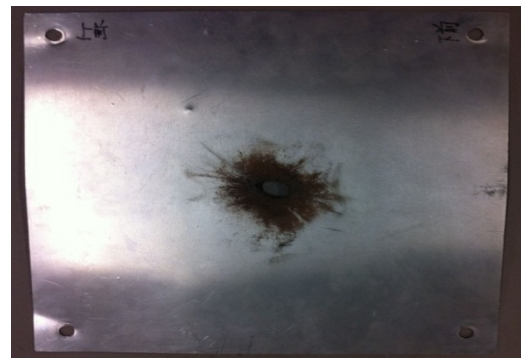


Fig. 4 メカノクロミズム金属錯体塗布無しの実験結果
(貫通穴周辺は温度上昇で少し焦げる)

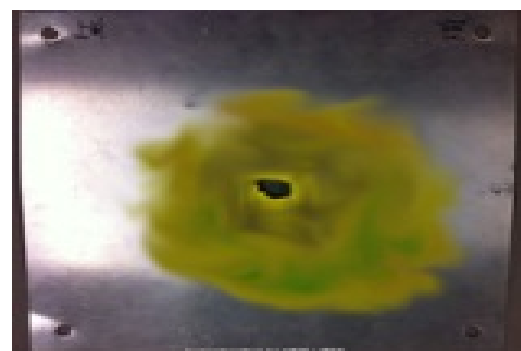


Fig. 5 メカノクロミズム金属錯体塗布有りの実験予想図
(貫通穴周辺は長時間発光)

5. 利用実験により得られる主要成果

次世代の宇宙ステーションをはじめとする宇宙構造への適用に向けて、更なる発展研究に繋がる卓越した成果が期待できる。スペースプラズマ共同施設利用による、期待される主な成果は以下である。

- 近年創生されたばかりの「メカノクロミズム金属錯体」が予期した通り衝突貫通穴周辺で効果的に長時間発光するかを検証を行う。提案する貫通穴表示システムの現実性の探索が可能である。
- 衝突実験から得られるデータより、急激な温度・圧力上昇に適した錯体分子設計にフィードバックできる。
- 衝突実験から得られるひずみ分布、塗料の剥落状況をつき合わせて、メカノクロミズム金属錯体などの塗布塗料に関して最適方法の確立が期待される。
- 衝突貫通防護では無く、衝突後の修復を念頭に置いた本研究は、スペースデブリ衝突研究の新たな研究領域を開拓する学術的特色を持つ。発想転換が新規の学術研究分野の創設につながる。
- 本提案システムの結果は、デブリ衝突のみならず、スペースコロニーや月面基地での隕石・宇宙塵衝突の修復作業にも有効活用される。将来に渡り活用されうる新規研究領域を創成するので宇宙開発・研究への意義は大きい。
- 宇宙開発のみならず、航空タービンや風力発電翼などのバードストライク問題にも活用できる。高精度装置による衝突位置を計測する手間を省け、大幅なコスト削減ができる。幅広い分野で発展研究に繋がることが期待できる。

6. 将来宇宙開発への本研究の位置づけ

現在の宇宙ステーションの内部構成の圧力壁は露出していないし、クルーが簡単に漏洩穴発見に動き回れるように設計されていない。しかし、我々が提唱する人命救助に関わる空気漏れ穴補修方法が確立されれば、その人命救助を念頭に置いた設計をすべきであり、実際に設計されるであろう。今回の提唱研究は、現在の宇宙ステーション適用を目指した即物的な研究ではなく、将来のあるべき有人宇宙活動の居住設計指針を見据えた研究であることを申し添えておく。

7. 参考文献

1. 榎原幹十郎, 小野田淳次郎, 「スペースデブリの衝突解析に関する工学モデル」, 第43回構造強度講演会, 2001.
2. 白木邦明ら, 「宇宙デブリ高速衝突試験結果の報告」, 日本航空宇宙学会誌, 1996, 44(512), pp. 520-529.
3. 白木邦明ら, 「JEM 与圧部構造の宇宙デブリ防御性能に関する性能評価シミュレーション」, 日本航空宇宙学会論文集, 1999, 47(544), pp. 189-196.
4. 長谷川美貴, 「希土類錯体の分子内・分子間の構造とエネルギー状態の相関に関する光化学研究」, 希土類, 2011, 59, pp. 1-10.
5. Miki Hasegawa, et al., “Ultra-thin emissive molecular devices: polarized emission of Ln(III) complex films,” Monatsh. Chem., 2009, 140, pp. 751-763 (Review Paper, Cover Page).
6. Monaghan, J. J. “An introduction to SPH,” Computer Physics Communications, 1998, 48, pp. 88-96.