

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04479

研究課題名（和文）応力場伝播の可視化による超高速衝突損傷機構の解明およびデブリ衝突損傷抑制への応用

研究課題名（英文）Evaluation of hypervelocity impact damage mechanism by visualization of stress field propagation and its application to space debris impact damage mitigation

研究代表者

川合 伸明（Kawai, Nobuaki）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・応用科学群・准教授

研究者番号：60431988

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、将来の宇宙機の耐デブリ衝突性能向上を目標に、超高速衝突損傷の形成・進展機構を明らかにし、衝突損傷抑制および制御の方法論を構築すべく実施された。超高速衝突損傷の進展過程および応力波の伝播過程の実時間可視化手法を構築し、ターゲットの多層構造化が超高速衝突損傷の形成過程に与える影響を評価した。その結果、脆性材料の超高速衝突破壊において、高分子材料からなる衝撃減衰層を適切に配置することにより、衝撃減衰層背後の脆性材料層における損傷形成・進展を抑制することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙機の超高速衝突損傷は、対象材料の機械物性と形状とを変数とした経験的な損傷評価式により評価されている。そのため、デブリ衝突への耐性向上を図る際、構造材料の機械的特性を向上させる以外の指針・方法論が無く、劇的なデブリ耐性の向上は難しいのが現状である。そのような状況に対して、本研究では、超高速衝突により生じる応力波と異種材接合界面との相互作用に着目し、多層化条件を最適化することにより、損傷を抑制することに成功している。本成果は、接合・積層条件のデザインにより超高速衝突損傷を抑制・制御するという新たな耐スペースデブリ設計指針に資するものとして期待される。

研究成果の概要（英文）：This study was conducted to clarify the formation and propagation mechanisms of hypervelocity impact damage and to develop a methodology for mitigating and controlling of impact damage, with the goal of improving the debris impact resistance of future spacecraft. A real-time visualization method was developed for the formation process of hypervelocity impact damage and the propagation process of impact-induced stress waves, and the effect of the multi-layered structure of the target on the formation process of hypervelocity impact damage was evaluated. As a result, we succeeded in mitigating the formation and propagation of damage in the brittle material layer by appropriately layering polymeric materials as a shock-attenuation layer in the hypervelocity impact failure of the brittle materials.

研究分野：固体衝撃科学

キーワード：超高速衝突 衝撃破壊 応力波 高速度可視化計測 スペースデブリ

1. 研究開始当初の背景

現代社会における我々の生活様式は、通信衛星や GPS 衛星に代表される宇宙インフラ抜きでは成立しないと言っても過言ではない。しかし、宇宙空間を超高速で飛び交うスペースデブリ（宇宙ゴミ）と宇宙インフラとの過酷な衝突問題が、今後の宇宙開発における重大な障害として懸念されている。宇宙開発の進展に伴い、デブリの総数は増加し続けており、現在、地球上からの監視が不可能な微細なデブリを含めると、その総数は 1 兆個にも上ると言われている。また、デブリの空間密度が高くなることによりデブリ同士が衝突し、新たなデブリが発生し続けるという現象も懸念されており、デブリ環境は悪化の一途をたどっている。近年、宇宙ミッションにおけるデブリ排出抑制のための国際的ガイドライン策定されるなど、デブリ環境悪化に対する対策がとられ始めている。しかし、デブリ環境を劇的に改善させることは現状困難であり、今後も宇宙インフラはスペースデブリとの衝突危機に晒され続けることになる。

このような状況において、宇宙インフラのデブリ衝突に対する耐性の重要性が増していくことは間違いない。スペースデブリは宇宙空間を数 km/s で移動していることから、デブリ耐性の評価において超高速衝突損傷に関する知見は必要不可欠となる。超高速衝突に代表される衝撃荷重による損傷の形成・進展は、瞬間的な荷重により生じる応力波の伝播挙動と密接に関係している。しかしながら、超高速衝突という特殊条件での破壊試験が必要なことから、その実験例は限られており、超高速衝突損傷機構の定量的な理解は未だ不十分である。その結果、超高速衝突損傷は、経験的な損傷評価式により評価されるに留まり、デブリ衝突への耐性評価においては、準静的な破壊試験で取得される材料の機械的特性に依存しているのが現状である。今後予想されるデブリ環境の悪化に宇宙インフラが対応していくためにも、超高速衝突損傷機構に基づいた損傷評価・構造設計により損傷を抑制・制御し、デブリ衝突に対する耐性を飛躍的に向上させる新たな設計思想が必要である。

2. 研究の目的

以上のような背景から、デブリ衝突による宇宙インフラの損傷に対して、損傷進展機構に基づいた損傷抑制・制御の方法論の提案を目標とし、以下の事項を研究目的とした。

- (1) 超高速衝突に伴う損傷形成・進展機構を超高速度可視化による実時間観察により明らかにする。
- (2) 実時間観察で得られた損傷形成機構の知見に基づいて応力波の伝播条件を制御し、超高速衝突損傷の抑制・制御を達成する。

3. 研究の方法

本研究では、被衝突体内部における応力場と損傷の進展過程を超高速度撮影することにより、応力波伝播挙動と損傷形成との関係性を評価するとともに、ターゲットの多層化による応力波伝播条件の変化が超高速衝突損傷形成に与える影響を評価した。試験材料に透明材料を用いることにより、可視光による内部観察が可能となることから、脆性材料のモデル材として最も一般的なガラス材料であるソーダライムガラス、延性材料のモデル材として耐衝撃透明材料として幅広く用いられているポリカーボネートを試験材料として用いた。

超高速衝突実験は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所に設置されている二段式軽ガス銃を用いて行った。衝突体には、直径 3.2 mm のアルミニウム合金 (A5052) 球を用い、衝突速度は約 3 km/s とした。本研究では、衝突方向への応力波伝播および損傷進展を明瞭に可視化するため、板状試験片の側面を衝突面とする Edge on Impact と呼ばれる衝突実験法を採用しており、衝突面は $60 \times 15 \text{ mm}^2$ とした。弾道軸方向にソーダライムガラスおよびポリカーボネートのブロックを重ねることにより多層構造ターゲットとし、各ブロック間はエポキシ樹脂により接着した。超高速衝突現象の高速撮影においては、試験体からの散乱光により、損傷組織・構造を可視化すると共に、偏光シャドウグラフ法により試験体内部に生じる応力場変化の可視化を行った。いずれの可視化法においても衝突現象は、超高速度ビデオカメラ HPV-X (Shimazu Corp.) を用いて記録された。撮影角度が弾道軸に対して 90° となるよう設置し、撮影速度は $0.5 \mu\text{s/frame}$ とした。散乱光撮影では、照明に 2 台のフラッシュランプを用い、散乱光での撮影となるようカメラ撮影軸から外れた位置に配置した。偏光シャドウグラフ撮影では、光弾性効果を利用して応力場を可視化するため、高速度カメラおよび光源それぞれの前に偏光板および $1/4$ 波長版を挿入した。光源にはパルスレーザー CAVILUX® (Cavitar Ltd.) を用い、高速度カメラの露光タイミングと同期して、波長 640 nm、パルス幅 10 ns のレーザーパルスを照射した。

4. 研究成果

- (1) ガラスの複層化による超高速衝突損傷への影響評価

ソーダライムガラス 2 層重ね合わせターゲットに対して行った衝突実験では、ソーダライムガラスの衝突損傷は、弾道軸方向への損傷に比べ、衝突面および上下面に沿った損傷進展が卓越すると共に、接合界面に沿っても損傷が形成されており、その損傷は衝突側部位に留まらず、界

面を介して後方部位にも進展していく様子が確認された。偏光シャドウグラフ画像からは、接合界面における損傷は、上下面を伝播する損傷とは独立して形成しており、応力波面の界面到達から約 2 μs 後に、損傷が形成されていることが明らかとなった。衝突によって生じた応力は、縦波（粗密波）と横波（せん断波）とに分かれて伝播するが、ガラス内部の孤立損傷に対して、せん断波が到達した際に、孤立損傷からの顕著な亀裂進展が確認されている。したがって、本測定で観測された、界面における応力波面到達からの損傷形成のタイムラグは、縦波音速（約 5.5 km/s）で先行伝播する粗密波面に遅れて伝播するせん断波の界面到達により損傷形成したことが原因と考えることもできる。しかし、約 2 μs という遅れは、ソーダライムガラスの横波音速（約 3.5 km/s）から計算されるタイムラグ（約 3.5 μs ）よりも短い。したがって単純に衝突点からのせん断波の伝播と結論づけることはできない。しかし、せん断波は、粗密波の界面反射の際にも生じることから、その効果により界面に損傷が生成するまでの遅延時間とも考えられる。何れにせよ、現時点で明確な結論を得ることはできておらず、継続的な検証が必要である。

ソーダライムガラス 3 層重ね合わせターゲットで実施した高速衝突実験では、2 層重ね合わせターゲットの時と同様、衝突点から伝播する損傷とは独立して、各界面を起点として損傷が形成され内部に伝播している様子が確認された。また、2 層重ね合わせターゲットの時と同様、応力波面の各接着界面への到達と界面での損傷形成との間には、数 μs のタイムラグが確認された。波面到達から損傷形成までの時間差は第 1 層と第 2 層の界面では 1 μs 以下、第 2 層と第 3 層の界面では約 2 μs と、衝突点から離れるに従い長くなる傾向を示した。これは、応力波が伝播する過程で減衰することにより、界面での損傷形成に影響を及ぼしたものと考えられる。

(2) ポリカーボネート層を含んだガラスターゲットの多層構造化による超高速衝突損傷への影響評価

応力波の減衰による界面での損傷形成の変化をより顕著に観察するため、ソーダライムガラスの 3 層構造ターゲットの中間層を、応力減衰層としてソーダライムガラスより衝撃インピーダンスの低いポリカーボネートに置き換え実験を行った。10 mm 厚、および 5 mm 厚のポリカーボネートを中間層に用いた実験において、いずれも最前面のガラス層は、全体に渡って損傷が伝播した一方、最背面のガラス層においては、損傷が形成されないという結果となった。前述の通り、ポリカーボネートの衝撃インピーダンスは、ソーダライムガラスより小さいことから、ソーダライムガラスからポリカーボネートへの応力波入射の際、応力が大きく減少する。更に応力波伝播による減衰効果が加わり、ポリカーボネート層とガラス層の接着界面での損傷形成が抑制されたと考えられる。続いて、伝播する応力波に対して応力減衰層を導入することにより損傷伝播を抑制するのではなく、衝突により生じる衝撃応力を低下させることによる衝突損傷の抑制効果を評価する目的で、20 mm 厚のソーダライムガラスを、同じく 20 mm 厚のポリカーボネートで挟み込んだ 3 層重ね合わせターゲットへの超高速衝突実験を実施した。本実験条件では、応力波がターゲット全体を通過した時点で、ガラス層の両側界面に沿って損傷が形成され、その損傷がガラス層全体に伝播していくことが観察された。アルミニウムが秒速 3 km でソーダライムガラスおよびポリカーボネートに衝突した際の衝撃応力は、それぞれの衝撃圧縮データを用いることにより約 22 GPa、約 16 GPa と見積もられる。従って、本 3 層構造ターゲットで生じている衝撃応力は大きく低減されているはずである。加えて、ポリカーボネート層の厚さは 20 mm と、中間層としてポリカーボネートを挿入した 3 層ターゲットで用いられているポリカーボネート層より最大 4 倍の厚みとなっている。にも関わらず、ガラス層全体が損傷する結果となったことは、応力波減衰により損傷を抑制させるためには、単純に応力減衰させるだけでは意味がなく、応力減衰層の適切な配置が必須であることを示している。

本研究では、散乱光イメージングおよび偏光シャドウグラフ法による超高速可視化計測により、超高速衝突により透明材料の内部に形成される損傷の進展過程や応力波の伝播過程の実時間観察を行い、ターゲット内部における界面・異種層の存在が衝突損傷の形成・進展に与える影響を評価した。本結果は、ソーダライムガラスのような脆性材料における衝突損傷において、応力波と界面・異種層との相互作用の理解が非常に需要であることを明示すると共に、接合・積層条件のデザインにより損傷形成を制御できる可能性を示唆するものである。現代の構造材料の高機能化において、材料の複合化は最も基本的かつ重要な手法の 1 つである。接合界面と衝突損傷形成との関係性の評価は、今後も継続して取り組んでいくべき重要な課題である。また、本研究により得られた、超高速衝突損傷の形成・進展過程の高速度可視化情報は、超高速衝突損傷の形成プロセスの解明に寄与するだけでなく、数値シミュレーション画像との直接比較による衝突損傷材料モデルの検証にも大きく役立つものである。今後の継続的な研究により得られる成果は、宇宙機におけるスペースデブリ問題だけでなく、応力波の伝播を伴う衝撃問題全般において、構造材料の損傷評価・耐衝撃設計に応用可能であり、人間社会の安全向上にも大きく寄与するものとして期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nobuaki Kawai, Tomo Uemura, Kazuma Watanabe, Sunao Hasegawa	4. 巻 -
2. 論文標題 In-Situ Observation of Stress-Field Propagation and Damage Formation in Hypervelocity-Impacted Glass Materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Hypervelocity Impact Symposium	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/HVIS2022-27	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 川合伸明、長谷川直
2. 発表標題 ガラスの超高速衝突損傷進展における異種層の影響
3. 学会等名 2023年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川合伸明、長谷川直
2. 発表標題 多層構造透明ターゲットにおける超高速衝突損傷挙動
3. 学会等名 令和5年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nobuaki Kawai, Kazuma Watanabe, Sunao Hasegawa
2. 発表標題 Hypervelocity-Impact Damage Formation and Propagation in Multilayered Glass
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Impact Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川合伸明、西村慎悟、長谷川直
2. 発表標題 超高速飛翔体によるポリカーボネートの貫入挙動
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川合伸明、渡辺和真、長谷川直
2. 発表標題 多層構造のガラス材における超高速衝突損傷進展挙動
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺和真、川合伸明、長谷川直
2. 発表標題 超高速衝突損傷進展挙動における複層構造の影響
3. 学会等名 令和4年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuaki Kawai, Tomo Uemura, Kazuma Watanabe, Sunao Hasegawa
2. 発表標題 In-situ observation of stress-field propagation and damage formation in hypervelocity-impacted glass materials
3. 学会等名 The 16th Hypervelocity Impact Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川合伸明、上村朋、渡辺和真、長谷川直
2. 発表標題 超高速衝突損傷の形成・進展における接合界面の影響
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上村朋、渡辺和真、川合伸明、長谷川直
2. 発表標題 透明材料を用いた超高速衝突損傷進展過程の高速度可視化計測
3. 学会等名 令和3年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川合伸明、上村朋、渡辺和真、長谷川直
2. 発表標題 超高速衝突損傷の形成・進展における非衝突体内部に存在する界面の影響
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	長谷川 直 (Hasegawa Sunao)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------