

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04561

研究課題名(和文) 応力波伝播条件の構造的制御によるスペースデブリ衝突損傷の制御・抑制

研究課題名(英文) Control and Suppression of Space Debris Impact Damage by Structural Control of Stress Wave Propagation Conditions

研究代表者

川合 伸明 (KAWAI, Nobuaki)

熊本大学・産業ナノマテリアル研究所・准教授

研究者番号：60431988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、応力波の伝播条件を制御することにより、超高速衝突損傷を制御・抑制する方法論の提案を目指し研究を進めてきた。まず、超高速衝突による損傷過程を可視化し評価すべく、被衝突体内部に生じる応力場伝播および損傷形成・進展の実時間可視化計測法の確立に取り組み、偏光シャドウグラフ法および散乱光撮影法の併用により応力場伝播および損傷進展を実時間可視化計測することに成功した。続いて、異種材料を重ね合わせたターゲットを使用した超高速衝突実験に、上述の可視化計測法を組み合わせることにより、異種界面において応力波伝播および損傷形成の挙動変化を実時間可視化し、その変化過程を評価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

宇宙機へのスペースデブリ衝突に代表される超高速衝突損傷の評価は、主に事後観察結果に基づく損傷形状評価式や貫通限界曲線といった経験式により行われてきた。本研究において、超高速衝突に伴う応力波伝播および損傷進展の実時間可視化計測法が構築されたことにより、応力波伝播過程と損傷形成・進展過程との実時間情報の直接比較から両者の関係性を評価し、超高速衝突損傷機構を実験的に検討することが可能となった。本成果は、これまで材料の機械的特性に頼っていた超高速衝突損傷の耐性向上に対して、損傷進展機構に基づいた構造設計により衝突損傷耐性の向上を図るという方法論に繋がるものとして大きな意義を持つものである。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have been studying to propose a methodology to control and suppress hypervelocity-impact damage by controlling the propagation conditions of stress waves. In order to visualize and evaluate the damage process caused by hypervelocity impact, we have developed a real-time visualization method of stress field propagation and damage formation/progression inside the impacted sample, and succeeded in real-time visualization of stress field propagation and damage propagation by using polarized light shadowgraph and scattered light imaging. By combining the developed visualization methods with a hypervelocity-impact experiment using a target made of stacked dissimilar materials, we succeeded in visualizing the behavioral change of stress wave propagation and damage formation at the dissimilar interface in real time and evaluating the change process.

研究分野：固体衝撃科学

キーワード：超高速衝突 衝撃破壊 応力波伝播 高速度可視化計測 スペースデブリ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

悪化し続けるスペースデブリ環境を背景に、宇宙機のデブリ衝突に対する損傷軽減化の重要性は増している。スペースデブリは宇宙空間を数 km/s で飛び交っていることから、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。超高速衝突による損傷進展機構は、応力波の伝播過程と密接に関係しており、通常の準静的な破壊とは大きく異なる。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、超高速衝突破壊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、事後観察結果に基づく経験式により評価されるにとどまり、デブリ衝突への耐性を強度や破壊靱性といった材料の機械的特性に頼っ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制御・抑制し、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機の損傷を制御・抑制するための構造的な方法論の提案を将来的な目標とし、その目標に達するべく本研究では以下の事項を目的として設定した。

- (1) 超高速衝突に伴う損傷形成・進展機構を実験的に評価・検討するため、超高速衝突下における応力波伝播および損傷形成・進展の過程を実時間可視化計測する手法を確立する。
- (2) 確立された実時間可視化計測法により、単一材料からなる被衝突体における超高速衝突損傷の形成・進展機構を評価する。また、複数材料からなる被衝突体への超高速実験から、異種界面の存在が応力波伝播および損傷形成に与える影響を評価し、超高速衝突損傷の構造的抑制・制御に向けた知見を得る。

3. 研究の方法

本研究では、被衝突体内部における応力波と損傷の進展過程を超高速度撮影することにより、超高速衝突損傷機構を評価するとともに、構造条件の変化による損傷形成・進展への影響評価を行った。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。そこで試験材料としては、脆性材料のモデル材として石英ガラス、高分子材料のモデル材としてポリカーボネートおよび PMMA (アクリル) を用いた。実時間可視化計測法および超高速衝突実験の詳細を以下に示す。

これまでも超高速衝突現象の実時間計測は行われてきており、その撮影法には明るい光源が得やすく、実験配置が簡便であるという理由からシャドウグラフ法が用いられてきた。しかし、シャドウグラフ法では損傷が影絵として撮影されることから、損傷形状の輪郭を可視化することはできても、損傷の組織・構造を可視化することはできない。また、シャドウグラフ法による応力波の可視化は屈折率の空間変化率に依存するため、変化率が急峻となる圧縮応力波面の形状を可視化することはできるが、波面がなだらかとなる希薄波の伝播過程や、応力場そのものの分布状況を可視化することはできない。以上の点から、本研究では、非衝突体からの散乱光による高速度撮影を行うことにより損傷組織・構造の可視化を試みると共に、偏光シャドウグラフ法により被衝突体内部に生じる応力場変化を可視化することを試みた。

いずれの可視化法においても衝突現象は超高速度カメラ HPV-X (Shimazu Corp.) を用いて記録された。カメラは、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 500 ns/frame とした。散乱光撮影では、光源に 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 $1/4$ 波長版を挿入している。光源にはパルスレーザー CAVILUX[®] (Cavitar Ltd.) を用いており、レーザーの波長およびパルス幅はそれぞれ 640 nm, 10 ns である。レーザーの照射タイミングは高速度カメラの露光タイミングと同期されている。

超高速衝突実験は、二段式軽ガス銃と呼ばれる飛翔体射出装置を用いて、衝突速度 ~ 7 km/s の速度域で行った。衝突体形状は球形とした。衝突体の材質は、衝突体の変形性状が衝突損傷に与える影響を評価することを目的に、機械的特性が延性的なアルミ合金および脆性的な超硬合金を用いた。可視化計測システムは、二段式軽ガス銃の速度計測システムと連動したディレイパルスシステムにより、衝突直前のタイミングで撮影トリガーをかける方式とした。ディレイパルスの遅延時間は射出速度から自動的に計算されることから、方法式により射出速度に関係なく安定した超高速度撮影が可能となった。

4. 研究成果

- (1) PMMA への超高速衝突における応力波伝播および損傷形成

図 1 に、衝突速度 3.6 km/s の条件で撮影された散乱光撮影画像および、偏光シャドウグラフ画像の、衝突現象初期における比較を示す。散乱光画像では、従来のシャドウグラフ法の影絵イ

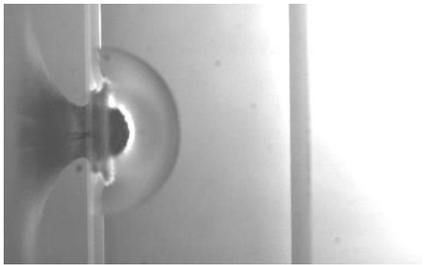
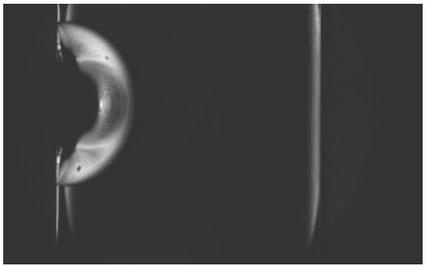
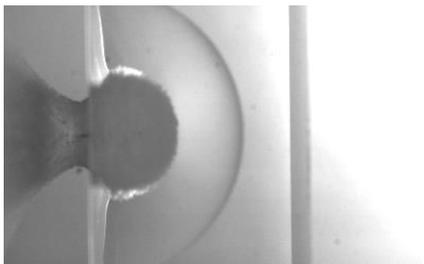
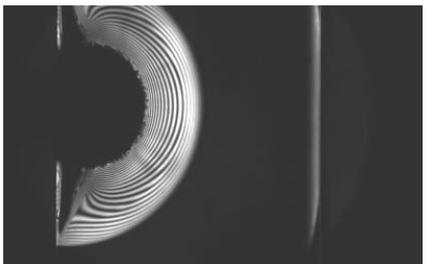
衝突後時間	散乱光撮影画像	偏光シャドウグラフ画像
at 3.5 μ s		
at 6.5 μ s		

図1 PMMA 試験体に対して Al 合金球が 3.6 km/s で衝突した際の散乱光画像および偏光シャドウグラフ画像の比較

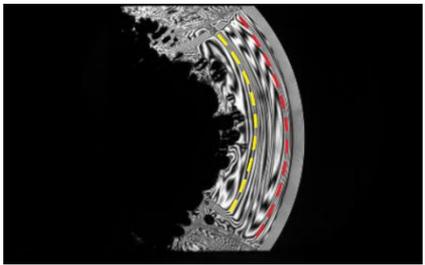
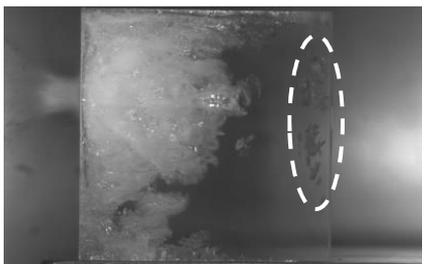
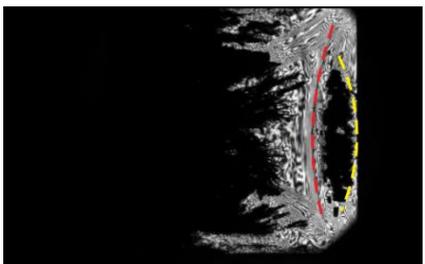
衝突後時間	散乱光撮影画像	偏光シャドウグラフ画像
at 8.0 μ s		
at 12.5 μ s		

図2 石英ガラス試験体に対して Al 合金球が 3.1 km/s で衝突した際の散乱光画像および偏光シャドウグラフ画像の比較

メージと異なり、損傷の表面形状が明瞭に可視化されていることが分かる。また、偏光シャドウグラフ画像においては、透過光強度は応力複屈折に依存するため、衝突により伝播していく応力場の形状が可視化されていることがわかる。まず散乱光画像に着目すると、本衝突条件では Al 球衝突体が衝突後変形・破壊し、半球状のクレータを作りながら PMMA ターゲットに貫入していることが分かる（衝突後 3.5 μ s）。また、そのクレータを取り囲むように、衝突面側から細かな針状のクラックからなる損傷領域が形成されていく様子も確認できる（衝突後 6.5 μ s）。この損傷形成の過程を、偏光シャドウグラフ画像と比較していくと、衝突により生じた応力波の伝播領域において、貫入損傷の周囲に伝播する応力波とは異なる応力場が存在し（衝突後 3.5 μ s）、その応力場に沿って上述の特徴的な損傷領域が進展していることが分かる（衝突後 6.5 μ s）。貫入損傷周りの応力場は、衝突体の貫入過程で生じた塑性流動に伴う残留応力に起因するものといえる。塑性変形領域と弾性変形領域との境界には大きなひずみ不整合による応力が生じると考えられ、その応力を解放させる形で境界面に沿って特徴的なクラック損傷が進展していく様子が明らかとなった。

(2) 石英ガラスへの超高速衝突における応力波伝播および損傷形成

図2に、衝突速度 3.1 km/s の条件で撮影された、石英ガラスの散乱光撮影画像および偏光シャ

ドウグラフ画像を示す。まず散乱光画像に着目すると、衝突点から弾道軸上を中心に損傷が進展していく様子が確認できる。損傷の伝播挙動に関して、衝突後 $8.0 \mu\text{s}$ での画像中の破線で囲まれた領域内で見られるように、衝突点からの連続的な損傷領域の前方に孤立した損傷領域が生じ成長していく様子が確認された。また、衝突後 $12.5 \mu\text{s}$ の画像中での破線で囲まれた領域内に示されているように、衝突により生じた応力波が伝播し、裏面の自由表面で反射した後、急激な内部損傷形成を誘起している様子が確認された。このような損傷メカニズムはスポール破壊と呼ばれる現象と類似する。しかし、通常スポール破壊面は平面状の連続面として形成されるのに対し、本実験では不連続な損傷点が多数形成されている。この損傷形状の違いは、クラック形成パスとなりやすい結晶粒界が存在しないアモルファス材料である石英ガラスの特徴を反映したものと考えられる。続いて、偏光シャドウグラフ撮影により取得された画像に着目し、スポール状の損傷に関して伝播する応力場とスポール状損傷の形成タイミングとの関係性を評価した結果、偏光シャドウグラフ画像において赤色の破線で示された応力波部分が衝突裏面で反射し、黄色の破線で示された応力波部分と干渉したタイミングで、スポール状損傷が形成されていることが確認された。脆性材料における超高速衝突損傷の形成・進展に関しては、応力波同士の干渉に加え、応力波と損傷との干渉も強く影響を及ぼすことが示唆されることから、今後は、試験体の境界条件を変化させることにより、反射応力波の状態を変化させ、応力波の干渉形態と損傷形態・進展との関係性を評価していく必要がある。

(3) PMMA とポリカーボネートの重ね合わせターゲットへの超高速衝突における損傷形成

図3に、衝突面にポリカーボネート、その背面にPMMAを重ね合わせたターゲットに対して、 2.2 km/s の速度で超硬合金球を衝突させた際の散乱光撮影画像を示す。撮影タイミングは衝突後 $100 \mu\text{s}$ である。画像から明らかな通り、界面付近においてPMMA側で著しく損傷が形成されている様子が確認できる。同衝突条件で取得された偏光シャドウグラフ画像からは、衝突により生じた応力波が界面に到達し、反射および透過していく様子が確認されたものの、その応力波伝播挙動の変化により損傷が形成される様子は確認されなかった。このことから、衝突体に先行して伝播している応力波と界面の干渉が、界面付近におけるPMMAの損傷拡大に寄与しているわけではなく、衝突体の界面部における貫入過程においてPMMAの損傷拡大に寄与する現象が生じていることが明らかとなった。今後も、界面条件と界面付近の損傷形態の関係性を調査し、超高速衝突損傷における異種界面の与える影響を明らかにしていく予定である。

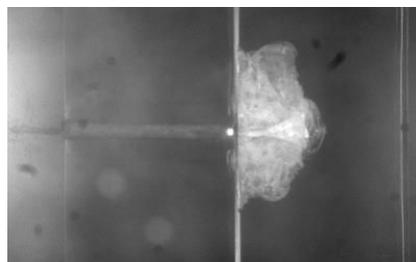


図3 ポリカーボネートとPMMAの重ね合わせ試験体に対して超硬合金球が 2.2 km/s で衝突した際の衝突後 $100 \mu\text{s}$ における散乱光画像

以上に示した通り、本研究では、散乱光撮影により損傷形状だけでなく損傷組織も含めた時間変化情報を取得することに成功するとともに、偏光シャドウグラフ撮影により衝突誘起による応力場の時間変化過程の描像を得ることに成功した。その結果、衝突損傷の形成・進展と応力波伝播挙動との関係性を評価することが可能となり、「超高速衝突損傷機構を実験的に明らかにし、損傷進展機構に基づいた構造設計により損傷を制御・抑制する」という耐スペースデブリ設計に向けての基礎となる技術・知見を獲得したと言える。また、本成果は、超高速衝突損傷メカニズムの解明において様々な撮影方法による実時間計測を組み合わせることの有用性を示すものであり、それらの情報は、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し得るものとして期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawai Nobuaki, Nagano Mikio, Hasegawa Sunao, Sato Eiichi	4. 巻 142
2. 論文標題 In-situ observation of damage evolution in polycarbonate subjected to hypervelocity impact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Impact Engineering	6. 最初と最後の頁 103584
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijimpeng.2020.103584	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長野幹雄, 川合伸明, 長谷川直, 北園幸一, 佐藤英一	4. 巻 84
2. 論文標題 微小デブリの超高速衝突を受けた石英ガラス板における 球面応力波による三次元内部損傷の進展挙動	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 18-00012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.18-00012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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, 末永恭太郎, 上村朋, 長谷川直
2. 発表標題 透明材料を用いた超高速衝突に伴う応力場伝播および 損傷進展の可視化計測
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川合伸明, 富崎竜司, 淵野祥伍, 長谷川直
2. 発表標題 ガラス材料への超高速衝突における応力場伝播過程の 実時間可視化計測
3. 学会等名 第13回材料の衝撃問題シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuaki Kawai, Mikio Nagano, Sunao Hasegawa, Eiichi Sato
2. 発表標題 In-situ observation of damage evolution in polycarbonate subjected to hypervelocity impact
3. 学会等名 15th Hypervelocity Impact Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuaki Kawai, Mikio Nagano, Sunao Hasegawa, Eiichi Sato
2. 発表標題 Real-time observation of stress-wave propagation and hypervelocity-impact-damage formation in transparent material
3. 学会等名 10th International Symposium on Impact Engineering 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 淵野祥伍, 富崎竜司, 長谷川直, 川合伸明
2. 発表標題 透明ポリマー材料での超高速衝突現象の高速度可視化計測
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富崎竜司, 淵野祥伍, 長谷川直, 川合伸明
2. 発表標題 ガラス内部における超高速衝突誘起応力場伝播過程の高速度可視化計測
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長野幹雄, 川合伸明, 長谷川直, 佐藤英一, 北園幸一
2. 発表標題 微小デブリの超高速衝突を受けた石英ガラス板における裏面側の剥離状損傷のその場観察
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川合伸明, 長野幹雄, 長谷川直, 佐藤英一
2. 発表標題 ポリカーボネートにおける超高速衝突損傷の進展挙動評価
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川合伸明, 長野幹雄, 長谷川直, 佐藤英一
2. 発表標題 透明ポリマー材料への超高速衝突における応力波伝播および損傷形成過程の実時間可視化観測
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長野幹雄, 川合伸明, 長谷川直, 佐藤英一, 北園幸一
2. 発表標題 微小デブリの超高速衝突を受けた石英ガラス板における終局破壊の進展過程解明
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------