

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04572

研究課題名（和文）多様な大きさのスペースデブリに適用可能な金属鉋によるデブリ捕獲技術の実現

研究課題名（英文）Study on harpooning metal anchors for capturing space debris of various sizes.

研究代表者

田中 宏明（Hiroaki, Tanaka）

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）・システム工学群・教授

研究者番号：90532002

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）：金属鉋を用いたスペースデブリ捕獲技術に関して、自由落下中の固定されていない回転する構造物への金属鉋撃ち込み試験装置を開発、実験を行うとともに、関連する数値解析モデルを構築した。次に、金属製鉋によるスペースデブリ捕獲に適した鉋先端形状に関する検討として、4種類の先端部を有する金属製鉋の撃ち込みに関する数値解析と実験を実施した。その結果、先端円錐形状鉋は貫入速度が比較的小さく、また、花弁状に対象物を裂きながら貫入することで貫入後に十分な保持力が得られた。これらの研究を通して多様な多様な大きさのスペースデブリに適用可能な金属鉋によるデブリ捕獲技術に関する見通しを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、宇宙開発においてスペースデブリが大きな問題となり、能動的なデブリ除去の重要性が増している。本研究は、能動的なデブリ除去において金属製鉋を用いてデブリを捕獲することを目指したものであり、本捕獲方法の適用範囲や効率的な鉋形状に関する知見を得るなど、社会的にも有意義な結果が得られている。また、この研究では世界初の試みとして自由落下中の固定されていない構造物への金属鉋撃ち込み試験装置を開発、実験を行っており、従来評価できていなかった挙動評価を行うなど学術的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：An experimental system for harpooning a metal anchor to free-falling rotating targets was developed, and experiments were carried out. The corresponding numerical models were also developed. The simulation results were compared with the experimental results for fixed and free-falling targets. It was found that Johnson-Cook models can be applied for simulating the penetration behaviors of harpooning a metal anchor to a debris structure. Then, we investigated the effects of the shapes of harpoon tips on penetration behavior. Four types of harpoon tips were employed, and their penetration behaviors were compared. By comparison, it was revealed that the conical tip was suitable for the harpoon method.

研究分野：スペースデブリ，宇宙構造，宇宙システム

キーワード：スペースデブリ 宇宙ゴミ除去 Active Debris Removal 金属製鉋 Harpoon

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スペースデブリは宇宙開発における重大な問題である。NASA の試算では今すぐ宇宙開発を中止してもスペースデブリ同士の衝突によりスペースデブリ数が増加していくとされており、今後の宇宙開発においてスペースデブリを出さないだけでなく、現在存在するスペースデブリの除去 (Active Debris Removal, 以下 ADR) が喫緊の課題である。ADR では、スペースデブリに"接近"後、デブリを"捕獲"、その後"除去"を行うが、"接近"に関しては ETS-VII や HTV で培われた技術の転用が期待でき、除去については例えば JAXA による導電性テザーシステムなど開発が進められている。"捕獲"に関しても、ロボットアームやネットを用いたシステムなど多くの方法が提案されているが、それぞれ課題を抱えた状況であり、基本的な研究が進められている。それらの捕獲方法の中で金属鋸をスペースデブリに撃込み捕獲する方法が、その簡易性・多様なデブリを対象とできる高い適用性から注目を集めており、JAXA や ESA・エアバス等で開発が進められている。申請者らもこの方法に注目し研究を実施しており、JAXA, ESA 等の研究と同様に「固定用治具に固定されたデブリ模擬構造」への試験および対応する数値解析によりその実現可能性を確認している。しかし、固定用治具に固定されたデブリ模擬構造では、金属鋸の撃込みにより姿勢等が変化しないため、これらの研究は大きな慣性を持つ大型デブリへの撃込みに相当するものとなる。つまり、金属鋸によるデブリ捕獲方法は、その適用可能範囲の広さが利点と期待されている方法であり、スペースデブリのサイズは多様であるにもかかわらず、現在のところ大型のデブリ捕獲に関する研究しか行われていない状況であった。

2. 研究の目的

大型デブリから小型デブリまで、多様なスペースデブリに統一的に適用可能な金属鋸を用いたスペースデブリ捕獲技術の実現を目指し、大型デブリに相当する固定されている対象物、および、小型デブリに相当する固定されていない対象物への鋸撃込みに関する試験方法・装置、および、解析方法を確立し、それらを用いて金属製鋸によるデブリ捕獲に適した鋸先端形状についての指針を得ることを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

2節で述べた目的に対して、以下の3段階での研究を行った。

- (1) 自由落下中の固定されていない構造物への金属鋸撃込み試験装置を開発、試験を実施した。この装置では電磁石を用いて供試体を固定し、撃込み直前に電磁石を切ることで、自由落下中の供試体への撃込み試験を可能とした。さらに、固定に用いる電磁石の切り離し時間に差をつけることで、対象構造に任意の運動を与えることを可能とした。
- (2) 撃込み時の現象を表現できる統一的なモデルを構築した。この数値解析では、材料の構成則モデルとして Johnson-Cook モデルを用いることで、供試体の破壊を伴う貫入現象を数値解析により表現することが可能である。材料パラメータの他、要素サイズや要素タイプの違いにより、貫入挙動に違いが見られることを確認し、固定された構造物への撃込み試験、および、固定されていない対象への撃込み試験結果との比較を通して、妥当なパラメータ、要素タイプを決定した。
- (3) 金属製鋸によるスペースデブリ捕獲に適した鋸先端形状に関する検討として、先端が円錐形状、先端球、平形状、二山形状の4種類の先端部を有する金属製鋸の撃込みに関する数値解析と試験を実施し、その際の貫入現象、必要貫入速度および貫入後の状態を評価、比較した。

4. 研究成果

(1) 自由落下中の固定されていない構造物への金属鋸撃込み試験装置を開発、試験を実施した。この装置ではタイマー付きリレーを介してスイッチに取り付けられた電磁石に試験板を取り付けることで試験板を保持し、リレーにより電磁石の切り離しタイミングを変えることで、試験板に運動を与えることができる。開発した装置を図1に、金属製鋸撃込みの様子を図2に示す。試験の結果、対象物の回転角度が貫入状態に与える影響が大きいことを確認した。特に金属鋸先端角度の半分が対象物の回転角度の余角よりも大きい場合、貫入が困難となる。また、別途数値解析で評価の結果、回転角速度の影響はあまり大きくないことを確認した。

(2) 金属製鋸撃込みによるデブリ捕獲に関する数値解析を目指し、固定されたターゲット、および、自由落下するターゲット、双方への撃込み現象を表現可能な数値解析モデルの構築を行った。二種類の材料モデル(2直線近似等方硬化則, Johnson-Cook モデル)および、メッシュ形状の異なる数値解析モデルを作成、解析を行い、先の試験結果との比較を行った。比較の結果、材料モデルとして Johnson-Cook モデルを用い、メッシュタイプとして三角柱メッシュを利用することとすることで、金属製鋸の撃込みににおける貫入現象を適切に表現できることを明らかにした。立方体メッシュを用いた場合、必要な撃込み速度は近い値となるものの撃込み後の形状が実験結果と大きく異なる結果となった(図3)。この数値モデルを用いることで、様々な大きさ・形のスペースデブリへの金属鋸撃込みについても解析評価が可能となる。

(3) 金属製鋸によるスペースデブリ捕獲に適した鋸先端形状に関する指針を得るために、先端が円錐形状、半球形状、平形状、二山形状の4種類の先端部を有する金属製鋸の撃ち込みに関する数値解析と試験を実施し、その際の貫入現象、必要貫入速度および貫入後の状態を評価、比較した。また、撃ち込み対象に対して角度を変化させた解析、試験を実施し、撃ち込み角度と貫入特性の関係についても評価を行った。その結果、先端二山の形状を用いることで、全体的により少ない速度での貫入が可能となるが、貫入孔部が円板として切り出されてしまうため、新しいデブリが生じてしまうこと(図4)、また、貫入によりきれいな円孔が生じるため、貫入後の保持力が得られないことを確認した。一方、先端円錐形状鋸は貫入速度が比較的小さく、また、花卉状に対象物を裂きながら貫入することで貫入後の保持力が得られた。先端半球形状、平形状の鋸では必要貫入速度が円錐形状に比べても高いケースが多く、また、貫入後に保持力が得られないなど先端円錐形状鋸に劣ることを明らかにした。このことから、金属製鋸単体での結合強度については先端円錐形状鋸が最も優れていると言える。

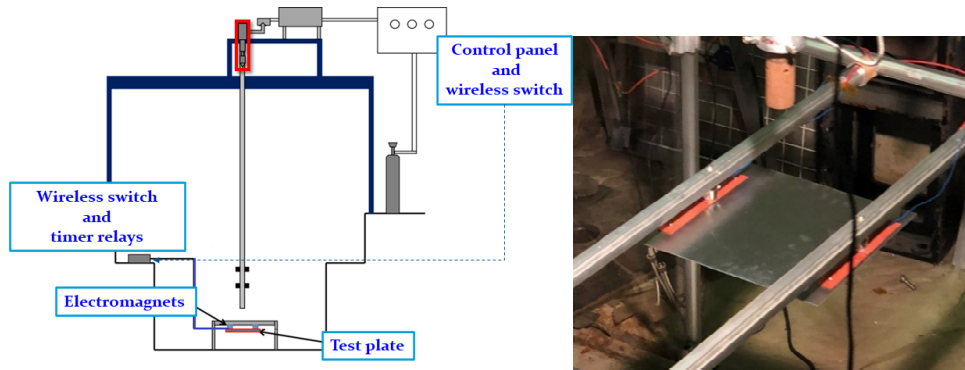


図1 回転する自由落下物体への金属製鋸撃ち込み試験装置(左:概観,右:試験板保持部)

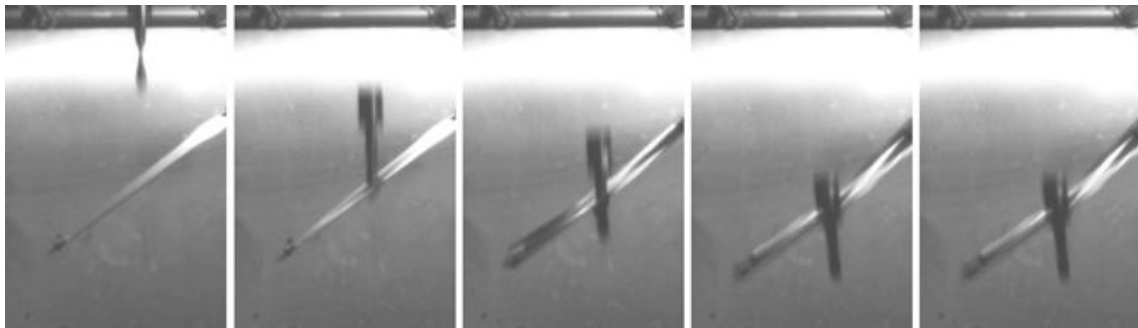


図2 回転する自由落下物体への金属製鋸撃ち込みの様子

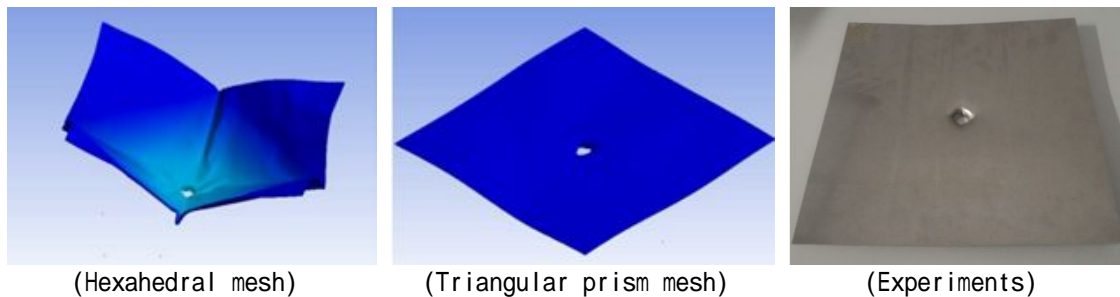


図3 解析による変形状評価結果(自由落下中への撃ち込み)の比較

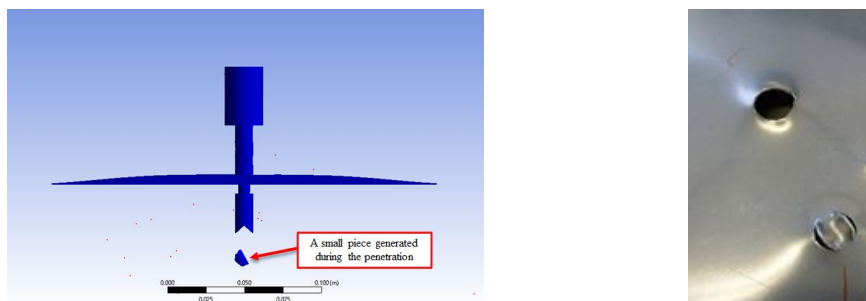


図4 先端二山鋸の撃ち込みによる小デブリの発生(左:解析結果,右:実験結果)

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 0件）

1. 著者名 Ba Thanh Long Nguyen, Hiroaki Tanaka, Hidehiro Hata	4. 巻 61
2. 論文標題 Experimental Study on Lodging a Metal Anchor into Free-falling Targets for Space Debris Mitigation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 219-225.
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.61.219	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 田中宏明
2. 発表標題 金属鋳によるスペースデブリ捕獲に向けた鋳先端形状に関する解析的評価
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中宏明
2. 発表標題 スペースデブリ模擬構造への金属鋳撃込みにおける鋳先端形状の影響に関する数値解析および実験評価
3. 学会等名 第29回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中宏明, 玉置悠人
2. 発表標題 スペースデブリ捕獲に向けたデブリ模擬構造への金属鋳撃込みに関する数値解析
3. 学会等名 第9回 スペースデブリワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Tanaka
2. 発表標題 Study on Harpooning a Metal Anchor to Free-Falling Rotating Targets for Capturing Space Debris
3. 学会等名 The 16th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Tamaki, Hiroaki Tanaka
2. 発表標題 Penetration Characteristics of Metal Harpoons with Various Tip Shapes for Capturing Debris
3. 学会等名 8th European Conference on Space Debris (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Tanaka and Ba Thanh Long Nguyen
2. 発表標題 Numerical Simulation on Harpooning a Metal Anchor for Capturing Space Debris
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中宏明, 網谷奨太, 梨本実里
2. 発表標題 固定されていない回転物体への金属鉋撃ち込み試験装置開発
3. 学会等名 第 28 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中宏明, 小山将弘, 村松泰輔, バ タイン ロングエン, 岡本博之, 河本聡美
2. 発表標題 先端二山形状鋳のデブリ模擬構造への撃込み試験
3. 学会等名 第60 回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中宏明, グエン バ タイン ロン
2. 発表標題 スペースデブリ捕獲に向けた金属製鋳撃ち込みに関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第 27 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2018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