

令和元年6月17日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18942

研究課題名（和文）超大型宇宙構造物を実現する粉末成形技術の構築

研究課題名（英文）Development of Additive manufacturing for large space structure

研究代表者

山川 宏（YAMAKAWA, HIROSHI）

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：00097263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：大型の宇宙構造物は、ロケットなどの輸送手段の制約より、部品状の組み立て手順が一般的である。しかしながら、粉末・液体などの輸送に適した形状を柔軟に変更できる状態で輸送し宇宙空間において剛性付与が可能とすることにより、大型宇宙構造物の構築が効率的となる。本研究では、宇宙空間における粉末の成型技術の構築を目的に、導電性材料やスーパーエンジニアリング・プラスチックの一種であるポリエーテルイミドを使用した真空中・熱荷重が作用する環境において構造物を作成する技術を実証及び検討した。宇宙環境において制作することにより強度面において約1割程度の向上が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙環境における材料積層技術は効率的な製造様式として期待できるが、制作上の困難となる点や制作した材料の特性および構造の特性が不明である。本研究では、このような観点から、宇宙空間における環境を模擬し、付加製造技術を真空環境及び輻射熱が入力される環境において構築し、実際に製造実験を実施した。材料特性について各種の試験を実施し、結晶の大きさに相違がみられるなど、特徴的かつ有用な知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：Large space structures generally have a part-like assembly procedure due to the limitations of vehicles such as rockets. However, by enabling transportation in a flexible manner in a state where the shape suitable for transportation of powder, liquid, etc. can be changed, and stiffening in space, construction of a large space structure becomes efficient. In this research, for the purpose of constructing powder molding technology in space, create a structure in an environment where thermal load is applied in vacuum using polyetherimide which is a kind of conductive material and super engineering plastic. Demonstrated and examined. About 10% improvement in strength was seen by producing in space environment.

研究分野：宇宙工学

キーワード：宇宙工学 構造力学

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

デオービットを実現するための機構として、伸長な導電性テザーを伸展し、テザーに電流が流れ、地磁場との相互作用によりローレンツ力が発生し軌道高度の低下を実現できるものである。技術的には、狭小な空間に材料を通過させることで、細い形態に加工する。この細い状態を連続的に実施することにより長くなり、荷重様式や材料の相変態を利用するなど様々な加工法が存在している。真空中に液体を噴霧し冷却・乾燥することにより、食品・医薬品加工に活用する例や凝固法により重力の影響を低減するため水中に伸長な成型品を留置する食品加工の例が見受けられるものの、真空および微小重力の両者を考慮した方法は無く、また、宇宙空間における推進装置のように加工装置自体が微小重力下に置かれ、加工にともなう力学的影響を顕著に受けることを考慮した例は存在しない。そこで、申請者らは宇宙空間におけるデオービット技術の確立に向け、展開膜の活用や SPINAR 機構を活用する人工衛星の設計や制作を通し、消費電力量が少なく、簡便で、確実となる方法を模索し、簡素なテザー伸展技術の確立が不可欠であり、噴射前後の空間の圧力差を利用し噴射ノズル内部の狭窄した空間を通過する方式により材料を整形し細く伸長な導電性テザーを作成および伸展する着想に至った。宇宙空間は、微小重力環境、真空環境、輻射熱の無遮蔽環境であることを特徴とし、宇宙構造物の設計及び製作において十分に考慮しなければならない。また、宇宙構造物は、地上からのロケットを使用した打ち上げにおいては、効率的に収納されることが必要となり、軽量であることも求められるため、剛性が低く変形機能を有する構造物が多い。

これらの諸点を考慮すると、粉体のような極めて収納性が良く変形可能な材料により、微小重力環境を考慮した粉体成型による構造物の形成が極めて有効である。真空環境による粉体の射出にかかわる圧力差に起因する変動要素の制御や輻射熱による温度変動が大きく発生する環境に適合する成型物の特性を把握した粉体射出成型技術の確立により、宇宙空間において任意に構造物の成型が可能になるものと考えられる。また、このような環境において、粉体を射出することにより、慣性力の発生による姿勢変化などの外力となることも想定される。これらを背景として以下の研究目的を定め2年間の研究を実施した。

### 2. 研究の目的

宇宙空間での構造物は、ロケットなどの輸送手段を利用するため費用が高く、搬送品の容積および重量を小さくする必要がある。また、上空での部品類の組立は困難が伴い現実的では無く、展開・伸展等の機械的機構により、太陽光の受光や通信アンテナとして利用のため大きな表面積を有する構造物へ変形している。このため、従来より機械式展開構造が多く用いられているが、特に真直で長い構造を収納する場合には、展開による精度低下が懸念される。テザー構造のようなものであると、巻き取ることにより収納することが想定されるが、巻癖などの存在が強く懸念される。そこで、構造物の廃棄を目的としたデオービットへの配慮が求められ、テザー構造を粉体成形し、もしくは伸展機構の構築として粉体成形技術を活用することを目的とした。すなわち、研究目的として、以下の各項目を目的とし記載順にて優先度が高いものとして取り組んだ。

- (1)宇宙空間において導電性を有するテザー構造（単線・複線）を粉体成形する方法の構築
- (2)無重力空間における空間に対する粉体成形品の射出の力学の解明
- (3)(2)の成果を生かしたシミュレータの構築
- (4)真空環境・輻射熱環境における実験を実施しデータを取得するとともに、(3)の有効性を確認する。

### 3. 研究の方法

以下の各事項について実施計画を立案し実施した。

(1)粉体射出機構の構築 真空環境での使用を想定した粉体の射出機構を設計し製作する。ここでは、地上と比較して次のような状況変化を想定して設計する。地上と比較して、1気圧が0気圧となること、重力による成型物が所定の場所にとどまる状況から、無重力空間に漂う状況となること。

#### (2)制御機構の構築

粉体を射出するための圧力を制御する方法を検討する。真空チャンバの中での試験を想定した操作可能な形態で構築する。

#### (3)試験環境(真空チャンバ)の準備

真空環境における検証のため、2段階に分けて検討する。はじめに低真空の環境において、装置の正常性が保たれることを確認した後に、本学で所有する高真空を実現する真空チャンバで噴射試験を実施する。この環境では、さらに軌道上における輻射熱の入射環境を付与することが可能であり、熱真空環境における試験を実施する。

#### (4)伸展制御の検討

射出後の構造物は移動速度の変動により慣性力が発生し、粉体成型直後の部位や構造の強度の限界に達した個所より構造破壊を起因となる可能性がある。このため、構造破壊を防止するための粉体の射出制御を検討する。

#### (5)試験計画の詳細の策定及び実験環境の整備

真空中長い真空チャンバを設置し重力環境や航空機による微小重力環境において長距離伸展試験を実施する。

(6) テザー挙動予測シミュレータの開発

粉体成型時に生じるガスなどが宇宙空間に射出され、スラスタ機構に類似した軌道変更要素となる。このため、粉体の射出方向により軌道低下を効率的に実施する射出方向を計算する。

(7) 衛星軌道での実験計画

実際の宇宙空間での試験運用の機会を得て、実証するための活動を実施する。

#### 4. 研究成果

(1) 粉体射出機構の構築 噴射ノズルおよび導電性噴射剤による成形後の線材および噴射剤の機械的性質を確認した。寸法が異なる噴射ノズルを購入し、大気圧環境下にて噴射実験を実施し、成形後の線材の機械的性質を確認した。噴射した線材の成型および保持のために、必要となる保持構造を構築した。衛星寸法を意識し小型の歯車にて歯面中央部を線材が通過する機構を構築した。下方に噴射した際の破断の有無、変形を記録し測定した。

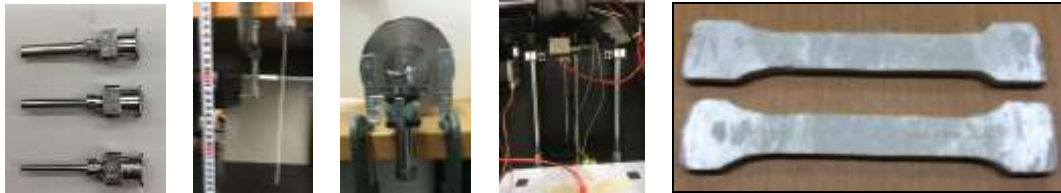


図1 導電性材料と ULTEM にニードルによる射出機構および伸展の様子と平板構造

(3) 制御機構の構築と試験環境(真空チャンバ)の構築 約 2.5[m]程度の長尺の真空チャンバを制作した。この際、格納する噴射ノズルおよびその制御回路を収納可能とし、噴射に伴う力学的情報を取得する力センサも収納可能とした。(1)と同様に、下方に噴射した際の破断の有無、ひずみをカメラで記録し測定した。製作する電気回路の真空環境における設置や稼働を確認した。すなわち、気密性の確認、真空環境の特性維持などの基本特性を計測した。



図2 長尺真空チャンバーと電気信号・通電コネクタ

(4) 真空環境実験(真空・熱) 実施する試験として大気中実験および真空環境実験を実施した。すなわち、線状の材料を成形し、真空チャンバー内における積層を可能とするようにシステムを構築した。3次元プリンタおよびその制御部分を購入し、材料として ULTEM を使用した実験環境を構築した。生成した試験片について、形状および機械的性質(引張試験)を計測し、また、電気的性質(導電性・電気抵抗)を測定した。微小重力環境実験では航空機実験を計画した。すなわち、航空機内に装置を設置し、約 15 秒間に実現される微小重力空間に、ULTEM を積層する実験を計画した。航空機の運航がなされない期間が一定期間存在し、計画することとどまった。真空環境と大気環境において、積層した試験片の力学的特性を比較検討した結果、真空中における機械的特性(剛性)が約 1 割程度大きく、また、SEM による界面観察の結果、結晶粒が真空中の方が大きいことが認められた。これを理由とし、破断荷重は約 1 割程度真空中で作成した構造体のほうが大きい結果となった。



図3 射出環境における温度分布(左)及び真空中(中央)・大気中(右)の破面観察結果

(5)テザー挙動予測シミュレータの開発 テザーの伸展挙動の際に、テザーに生じる内力を算出するシミュレータを構築した。これにより、テザー伸展初期から終期までに必要な力学的特性を算出することができた。ここでは、テザー端点に比較的に大きな質量を有した軽量なテザーが質量移動を伴い伸展する挙動を宇宙軌道上を想定した運動方程式を立式し解を得た。テザー中間・端点の姿勢（変位）、内力、衛星挙動を予測可能とした。ここでは、伸展運動に伴う破断荷重の超過の有無を検証するとともに、伸展方向の基礎的な制御方法についても検討した。

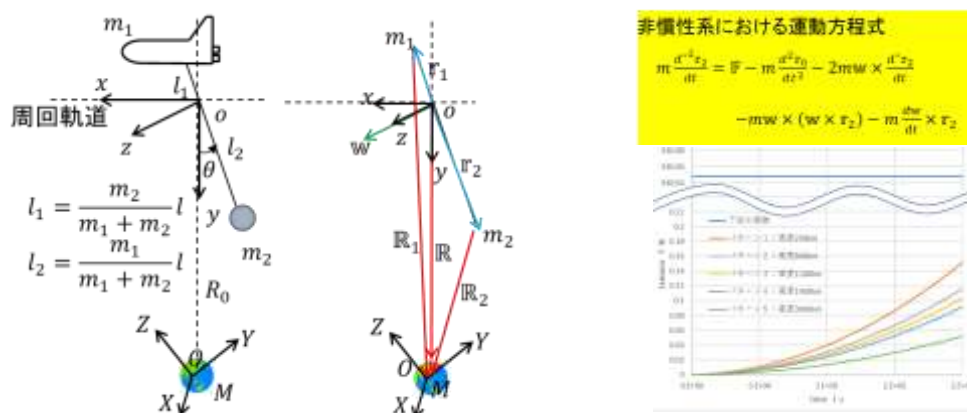


図4 テザー進展運動と運動時における張力変動及び破断荷重（実験値）との比較

(6)衛星軌道での実験計画 小型の人工衛星のミッションとしての実現可能性を検討した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計2件）

[1] Katsumata, N, Kume, M, Higuchi, K, Deployment behavior control using cables and bi-shape memory alloy convex tape booms, ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING, Vol.9, No.7, 2017

[2] Data assimilation using particle filter for real-time identification of organ properties

Nakano, S, Miura, S, Victor, P, Torisaka, A, Miyashita, T, JOURNAL OF ENGINEERING, Vol.14, pp. 517-521

〔学会発表〕（計9件）

[1] 長谷川 翔一, 三浦 智, ヴィクター パルケ, 宮下 朋之, 階層モジュラー型宇宙構造物の自己構築システムに関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-B12

[2] 三浦 智, 熊井 雅人, Parque Victor, 宮下 朋之, 月面洞窟内のサンプル採取を目指したパラメータ励振による振動制御に関する研究, 2A2-A09

[3] Parque Victor, 小林 正和, 宮下 朋之, On Route Bundling in Triangulated Space, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2017, pp. 753-754

[4] Parque Victor, 小林 正和, 宮下 朋之, 東 正毅, On Path Planning using Log-Aesthetic Curves, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2017, pp. 19-20

[5] Parque, V, Ogawa, K, Miura, S, Miyashita, T, Spiral Folding of Thin Films with Curved Surface, 2018 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics Conference

[6] Parque, V, Miyashita, T, Obstacle-Avoiding Euclidean Steiner Trees by n-Star Bundles, 2018 IEEE 30th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence

[7] Parque, V, Miyashita, T, Unranking Combinations using Gradient-based Optimization, 2018 IEEE30th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence

[8] Ayako Torisaka, Kohei Ogawa, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita and Hiroshi Yamakawa, Study on in-plane and out-of-plane deformation considering elastic plasticity of membrane, AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.01

[9] Shunosuke Shimizu, Kosei Ishimura, Tomoyuki Miyasita, Victor Parque, Structural analysis of thermally induced stick-slip on deployable mast, AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.01

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名： 宮下朋之

ローマ字氏名： MIYASHITA Tomoyuki

所属研究機関名： 早稲田大学

部局名：理工学術院

職名： 教授

研究者番号（8桁）：20329080

研究分担者氏名： 勝又暢久

ローマ字氏名： KATSUMATA, Nobuhisa

所属研究機関名： 室蘭工業大学

部局名：工学研究科

職名： 准教授

研究者番号（8桁）：60534948

研究分担者氏名： 鳥阪綾子

ローマ字氏名： TORISAKA, Ayako

所属研究機関名： 首都大学東京

部局名：システムデザイン研究科

職名： 助教

研究者番号（8桁）：70449338

研究分担者氏名： 三浦智

ローマ字氏名： MIURA Satoshi

所属研究機関名： 早稲田大学

部局名：理工学術院

職名： 助教

研究者番号（8桁）：70724566

研究分担者氏名： Par que Victor

ローマ字氏名： PARQUE Victor

所属研究機関名： 早稲田大学

部局名：理工学術院

職名： 准教授

研究者番号（8桁）：50745221

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。