

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18280

研究課題名(和文)形状記憶合金を用いた宇宙用伸展ブームの展開力制御

研究課題名(英文)Deployment Control of Shape Memory Alloy Boom for Space Structures

研究代表者

勝又 暢久(Katsumata, Nobuhisa)

室蘭工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：60534948

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文):記憶した形状に戻る性質のある形状記憶合金を応用することで、簡便かつ省スペースで搭載可能な新たな宇宙用伸展ブームを提案した。また、大型衛星のような姿勢制御系を持たない超小型衛星への搭載を視野に入れ、ケーブルとロータリーダンパで構成される同期展開機構を開発し、新たな伸展ブームが同期的に安定して展開することを示した。

また、形状記憶合金は温度変化に対して剛性が変化するため、そのデメリットを補うために形状記憶合金とは性質が反対の形状記憶ポリマーの併用を検討した。両者を組み合わせることにより、互いの特性を活かした新たなSMA-SMPブームが設計された。

研究成果の概要(英文):This study aims to demonstrate the synchronous and stable deployment of a newly proposed boom system that consists of cables, a rotary damper, and shape memory alloy with a memorized convex tape shape. Through a shaft, a rotary damper is connected to a reel, and cables wound around the reel are connected to the shape memory alloy boom tips. The deployed part consists of bi-shape memory alloy convex tape booms. The boom is deployed using only the shape recovery force of the shape memory alloy. By installing cables and a rotary damper, the deployment behavior of each boom is controlled, and each boom is deployed synchronously owing to the resistance force of the damper to a leading deploy boom. Moreover, the structural stiffness control concept of the proposed shape memory alloy bi-convex tape boom is considered by combining shape memory polymer. The combined use of shape memory alloys and shape memory polymers control the bending stiffness, even if the boom temperature is change.

研究分野：宇宙構造物工学

キーワード：スマートアクチュエータ 宇宙用伸展ブーム 形状記憶合金 形状記憶ポリマー

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽電池セルやアンテナなどの宇宙構造物は、宇宙空間で大面積が必要になる。しかし、輸送時はロケットフェアリング内に収まるようコンパクトに収納できる必要がある。そのため、高い収納効率と大面積への展開が可能な宇宙展開構造物は必須の技術である。

(2) 一辺約 10cm 程度の立方体で構成される Cube-Sat という超小型衛星が、近年では大学や民間で活発に開発されている。超小型かつ軽量であることから、大型衛星のように展開構造物を搭載するハードルは高い。しかし、スペースデブリを増やさないという観点から、衛星の寿命を終えた後、短時間で大気圏に突入して燃え尽きさせるための機構：デオービット機構の搭載が義務付けられている。衛星が運用された軌道・高度によっては、超小型衛星だとしても膜面などの帆を張ることで、デオービットを行う必要がある。

2. 研究の目的

(1) 上記の背景を踏まえ、超小型衛星にも搭載でき、シンプルかつ信頼性・安定性の高い宇宙展開構造物のニーズは高いと考えた。そこで本研究では、温度変化によって特性が変化する高機能材料（スマートマテリアル）に着目し、スマートマテリアルの形状回復力を用いた伸展ブームの開発を目的とした。具体的には、形状記憶合金（SMA）と形状記憶ポリマー（SMP）を用いた伸展ブームの開発を目的として研究した。

(2) SMA や SMP などのスマートマテリアルの温度変化による形状回復力を展開力として用いる場合、伸展機構はシンプルになるが、伸展力制御が困難となる。急激な伸展は、超小型衛星の姿勢挙動に悪影響を与えるため、伸展ブームの安定した伸展挙動が重要となる。そこで、スマートマテリアルを用いた伸展ブームの安定した展開を実現するため、温度制御以外の展開制御方法を開発し、安定した展開挙動の実現を目的とした。

(3) SMA は、変態温度 (A_f) 以上では剛性が高くなり変形しにくく、 A_f 以下の温度では剛性が低くなり変形しやすくなる。一方、SMP は SMA と逆の温度特性を持っており、ガラス転移点温度 (T_g) 以上では剛性が低くなり変形しやすく、 T_g 以下の温度では剛性が高くなり変形しにくくなる。周囲の温度環境が約 $-100 \sim +100^\circ\text{C}$ の範囲で劇的に変化する宇宙環境において、この温度変化による剛性の変化は扱いにくい特性である。そこで、本研究では、SMA と SMP を併用し、温度変化に対する剛性変化が少なくなり、かつ温度変化による伸展

力を利用できる新たな伸展ブームの開発と実証を目的とした。

3. 研究の方法

(1) SMA と同期展開機構を用いた SMP 伸展ブームの展開実験

この展開実験は、目的の (1) と (2) に対応する。まず伸展ブームとしては、図 1 に示す SMA 伸展ブームを製作した。SMA の形状回復力を用いてブームの展開は行われる。SMA は、市販の巻き尺と同じような、曲率を持った板形状に形状記憶された SMA 板材を用いた。この巻き尺形状の SMA 板材を 2 枚組み合わせ、SMA Bi-Convex Tape Boom としてブームを構成した。SMA の加熱方法は、製作の容易さ、加熱の安定性と局所加熱を避ける観点から、発熱塗料 Carbo e-Therm を用いた。Carbo e-Therm を用いることにより、従来のニクロム線過熱より SMA 全体を均一に加熱することが可能になった。

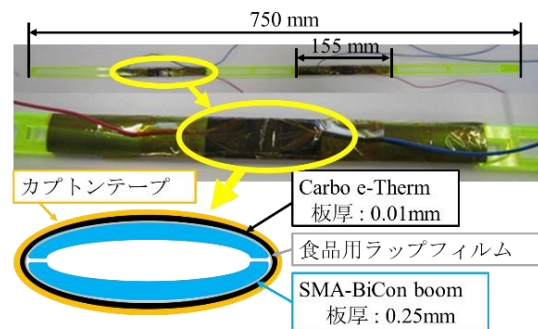
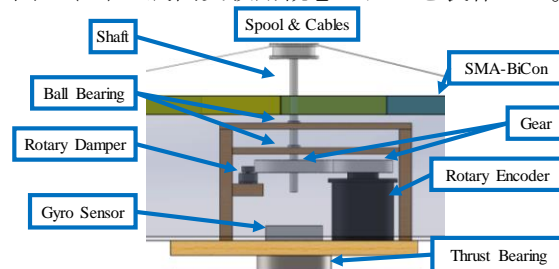
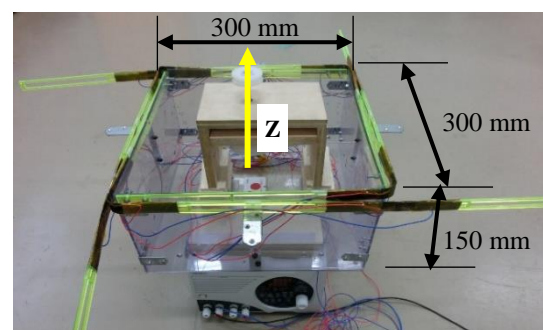


図 1 SMA 伸展ブームと断面構成

次に、同期展開を図 2 (a) のように設計し、図 2 (b) の展開実験用概念モデルを製作した。



(a) 同期展開機構の仕組み



(b) 展開実験装置の外観

図 2 同期展開機構と展開実験装置の概要

同期展開機構とは、複数本の伸展ブームが時間変化に対して同時に展開するよう制御する機構である。超小型衛星の場合、リアクションホイールやスラスターなど、通常の衛星で使われる姿勢制御機能を空間的制約から装備できないことが一般的である。そのため、衛星の姿勢制御に影響を与えないためにも、複数本のブームの同期的、かつ安定した展開が必要となる。この同期展開を可能にするため、本研究ではケーブルとロータリーダンパで構成させる同期展開機構を考案し、実際の展開実験を通して同期展開機構の有用性も評価した。

展開実験のために製作した概念モデルの概要は以下である。4本のSMA伸展ブームが中心構体外周に巻き付けられており、それぞれのブームの先端は、同期展開機構に接続されている。同期展開機構は、ケーブル、ケーブルを巻き取るリール、シャフトとロータリーダンパで構成されており、リールとロータリーダンパはシャフトを介して接続されている。リールに巻き取られているケーブルをSMA伸展ブームの先端につなぐことで、伸展ブームと同期展開機構は接続されている。この機構がない場合、加熱によってAf点に達したSMAから形状回復効果によって展開する。そのため、それぞれのブームの温度変化が均一でない限り、ブームも均一に展開しない。しかし本機構がある場合、先に展開しようとするブームの展開力はケーブルを介してロータリーダンパに伝わり、ダンパの制動力によって抑制される。そのため、それぞれのブームが展開するタイミングを一番遅れて展開するブームに合わせる事が可能となる。展開は2段階の断続展開とし、4本のブームの加熱部は電源と並列回路で接続した。2段階の断続展開の展開挙動の概要を図3に示す。また図4に、同期展開機構を使用しなかった場合の各ブームの展開挙動とZ軸まわり(図2(b)の黄色矢印)の角速度の関係を示し、図5に同期展開機構を試用した場合を示す。それぞれの図において、左縦軸は展開率(赤・青・黄・緑のカラー線)に対応し、右縦軸はZ軸方向の角速度(黒線)に対応している。左縦軸に対応する4本のカラー線の重なり度合いが大きいほど、展開の同期性が高いと評価できる。

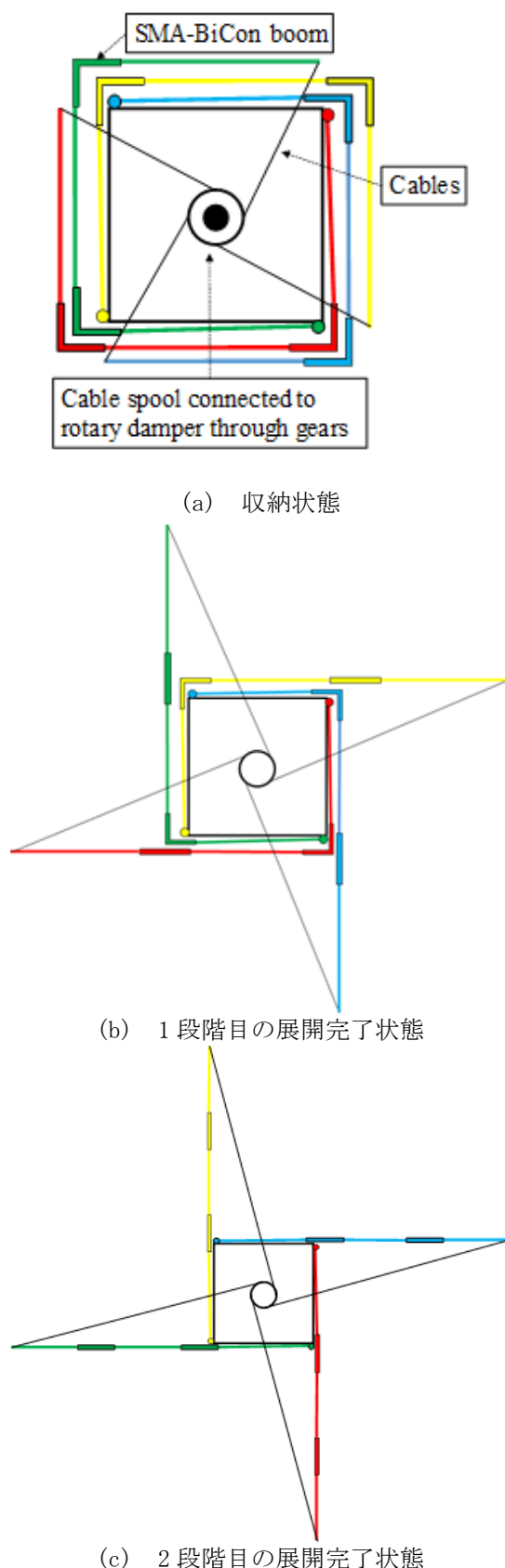
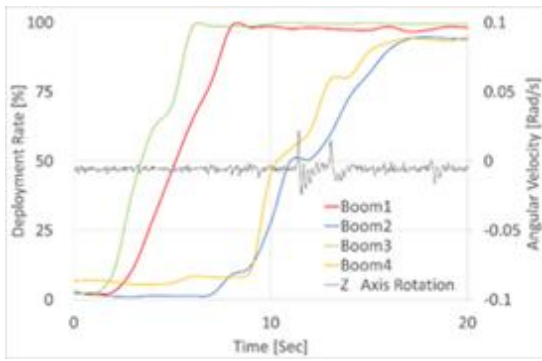
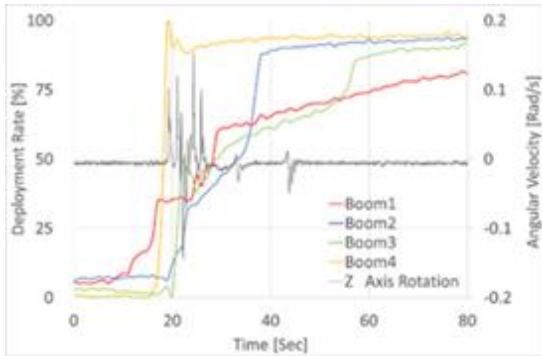


図3 同期展開機構を用いた展開挙動の概要

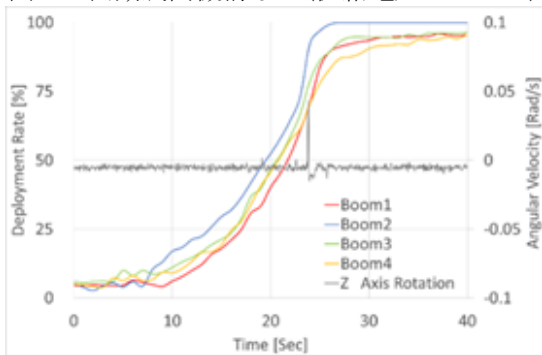


(a) 展開 1 段階目

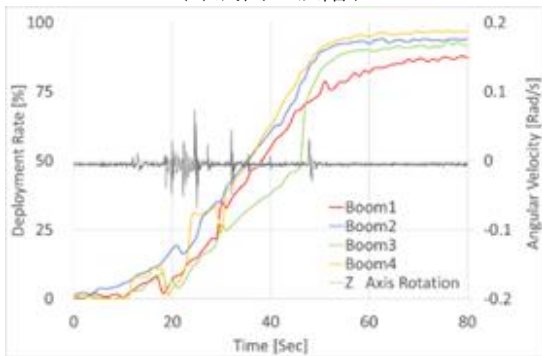


(b) 展開 2 段階目

図 4 同期展開機構なし(供給電圧: 10.0 V)



(a) 展開 1 段階目



(b) 展開 2 段階目

図 5 同期展開機構あり(供給電圧: 10.0 V)

どの実験においても、並列に接続した SMA 伸展ブームに一定電圧を供給するだけで、ブームの伸展は行われた。しかし同期展開機構がない場合には、図 4 のようにそれぞれのブームが個別に展開し、展開時の反動によって角速度変化も複数回発生することが分かった。図 4 と図 5 の展開率を比較すると、同期展開機構があることにより、展開の同期性が向上

したことは明らかである。また、角速度のピーク値を比較すると、同期展開機構がある場合は、同期展開機構がない場合に比べて約半分に抑制できている。また、急激な角速度変化の回数も減少している。展開挙動が衛星の姿勢に与える影響を考慮すると、大きな角速度変化とその発生回数は少ないほうがよい。したがって、SMA 伸展ブームと同期展開機構を併用することで、簡便かつ安定した展開が行えることが示された。

(2) SMA と SMP を組み合わせた新たな伸展ブームの設計と固有振動数・曲げ剛性の算出
本実験は、目的の(3)に対応する。SMA の Af 点以下の温度におけるヤング率は、Af 点以上の温度のヤング率に比べて、約 5~6 割程度に減少する。そのため、展開後の曲げ・ねじり剛性の低下を防ぐためには、温度変化に対して反対の特性をもつ SMP を併用することで、Af 点以下の温度においても曲げ・ねじり剛性を確保することができると考えた。しかし SMA が金属であるのに対し、SMP は高分子材料であるため、ヤング率のオーダーが約 10~100 倍異なる。そこで、曲げ剛性やねじり剛性が一致するよう、SMP の板厚を増加させることで設計した。板厚を調整することで SMA と SMP の曲げ剛性が一致するように設計した場合に期待される構造特性の概要を、図 5 に示す。また曲げ剛性が一致するように設計した SMA-SMP ブーム試験片の断面構成を、図 6 に示す。

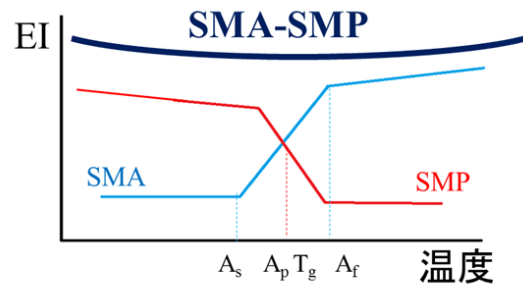


図 5 SMA-SMP ブームに期待される構造特性

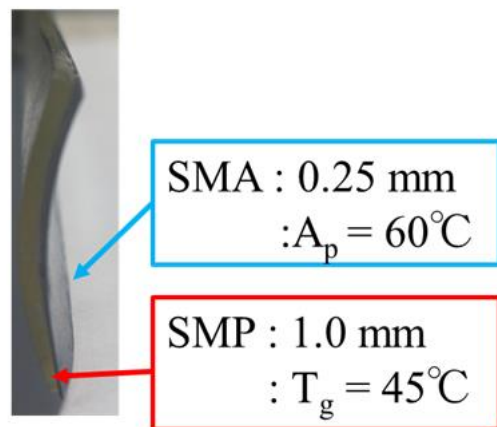


図 6 SMA-SMP ブームの断面図

図5のような理想的な構造特性を得るためには、板厚も含めた曲げ剛性を一致させるだけでなく、SMA と SMP の相変態点を一致させることも重要になる。そこで、SMA の変態ピーク温度 A_p と SMP のガラス転移温度 T_g が一致するように SMP を選定し、温度変化に依存しない曲げ剛性となるよう調整した。

温度に対する曲げ剛性変化を調べるため、片持ち梁の拘束条件で自由振動させ、固有振動数を計測した。また、温度変化を考慮するため、温めた状態の試験片が空気中で自然冷却される過程において、数回の振動応答を計測した。振動中の試験片の温度は熱電対により計測した。固有振動数は自由振動応答をFFT解析することで算出した。曲げ剛性は、Rayleigh法による集中質量化した1自由度系モデルに対し、得られた固有振動数から算出した。算出に用いた近似式を式(1)に示す。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{140}{33m} \frac{3EI}{l^3}} \quad (1)$$

図7と図8は、上記の方法により得られたSMAブーム、SMA-SMPブームの温度変化に対する固有振動数と曲げ剛性の関係である。左縦軸が曲げ剛性、右縦軸が固有振動数を表し、横軸が温度である。

図7と図8の曲げ剛性を比較すると、SMAのみのSMAブームの場合(図7)は、15°C付近で0.015 Nm²であるのに対し、SMPを併用したSMA-SMPブーム場合(図8)は、曲げ剛性が温度変化に対して一定の0.04 Nm²となった。SMPを併用することにより、曲げ剛性は低温時に比べ約2.7倍に上昇した。したがって、SMA-SMPブームは形状回復効果を維持しつつ、SMAの低温時における曲げ剛性低下を改善し、更には温度変化に対して一定の曲げ剛性を保つことが実証された。

4. 研究成果

(1) SMA 伸展ブームと同期展開機構を組み合わせた展開実証を行い、4本のブームの安定した同期展開が行えることを示した。ケーブルとロータリーダンパによる制動力でブームが同期展開したことにより、展開時の角速度のピーク値が約半分程度に抑制され、発生回数が減少することも示された。

(2) SMA と SMP を併用した新たな伸展ブームを設計・開発し、固有振動数計測と曲げ剛性の算出を行った。実験結果から、SMA-SMPブームの低温時における曲げ剛性は、SMAブームのそれと比べて約2.7倍に上昇した。またSMA-SMPブームは、形状回復効果を維持しつつ温度変化に対して一定の曲げ剛性を有することも示された。

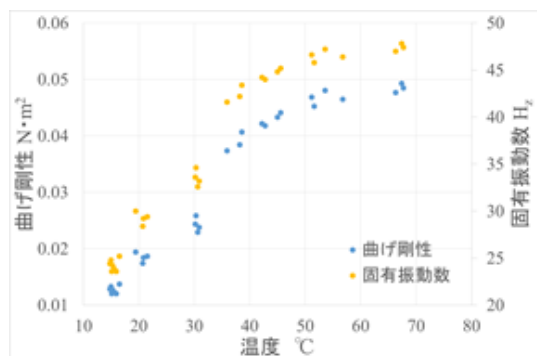


図7 SMAブームの温度と曲げ剛性の関係

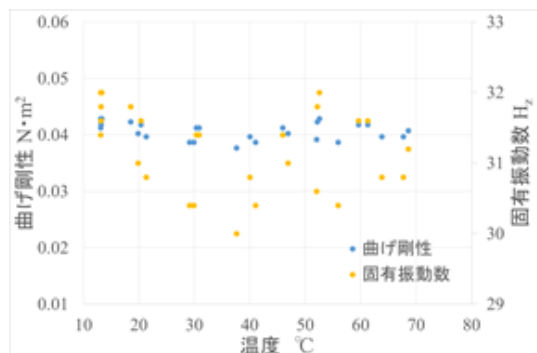


図8 SMA-SMPブームの温度と曲げ剛性の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① KATSUMATA, Nobuhisa、KUME, Masaru、HIGUCHI, Ken, Deployment behavior control using cables and bi-shape memory alloy convex tape booms, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, Issue. 7, 2017, <https://doi.org/10.1177/1687814017707909>

[学会発表] (計1件)

- ① KATSUMATA, Nobuhisa、KUME, Masaru、HIGUCHI, Ken、Deployment Behavior Control using Cables and Bi-SMA-Convex Tape Booms, 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST2015), 2015

[その他]

ホームページ
<http://www3.muroran-it.ac.jp/sslslab/>

6. 研究組織

研究代表者
勝又 暢久 (KATSUMATA, Nobuhisa)
室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60534948