

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760663

研究課題名(和文) 繰り返し形状フォーミング可能な適応構造システムの研究

研究課題名(英文) On Adaptive Structure Systems with Repeatable Shape Forming Ability

## 研究代表者

仙場 淳彦 (SENBA, Atsuhiko)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：60432019

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)：本研究は、形状記憶ポリマを構造材料として用いることにより従来の構造システムを革新することを目的とし、以下の成果を得た。まず、ソーラーセイル等に代表される膜構造のしわやたるみを抑制するため、形状記憶ポリマに予め与えた変形を宇宙空間で再加熱する方法を提案し、その実現性を実験的に明らかにした。また、宇宙空間で形状記憶ポリマ部材を加熱する方法として、塗料状ヒーターを用いることを見出し、その有効性を調べた。その結果、塗布厚の調整により、形状記憶ポリマ部材の形状回復を損なうことなく、一様に近い加熱が行えること、および、塗布前後の粘弾性特性の変化に関する知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a novel concept of adaptive structure systems by using shape memory polymers as the structural materials. The results obtained through this study are summarized as follows. Firstly, the use of a pre-elongated shape memory polymer element was proposed and verified in laboratory experiments to show its ability reduce the slack and wrinkled area of flexible thin membrane space structures such as solar sails. Secondary, the painted heater on the surface of the shape memory polymer elements was studied to show its effectiveness to efficiently and uniformly heat up the temperature of the elements above its glass transition point. Further, it was shown that the heater layer did not affect the capability of the shape recovery of the element by tuning the thickness of the layer but slightly change the visco-elastic properties, which must be considered when the elements are subjected to dynamic force.

研究分野：適応構造システム

キーワード：形状記憶ポリマー 可変構造

## 1. 研究開始当初の背景

航空宇宙構造物工学の歴史において、1980年代中頃に我が国で提唱された可変形状トラス (Variable Geometry Truss) に代表される適応構造の概念は、構造物の役割を単なる支持構造から機能的構造へと変化させた。また、2000年台初頭には膜やケーブルなどの超軽量構造を用いたゴッサマ構造に関する研究開発が世界中で行われるようになり、我が国でも2010年5月に厚さ  $7.5\mu\text{m}$  という薄膜を14m四方に展開する構造を持つソーラー電力セイル (イカロス) が実現され、世界中から技術力の高さが認められた。また、天文観測用の衛星では、開口径10mを超える大きなパラボラアンテナを  $0.1\text{mmRMS}$  レベルの形状誤差に抑えるという極めて厳しい形状精度要求が求められるようになった。また、スペースデブリから宇宙構造システムを守る技術の必要性も高まる一方である。まさにゴッサマ構造に加え適応構造のような軌道上における構造自体の特性変化・形状変化による適応が現実不可欠な時代になった。

上記の適応構造が次世代の宇宙構造システムの実現に大きな可能性を持つ一方で、軌道上で形状変化を行うことや、環境変化に適応するなどを実際に行うためには、過去に用いられてきた構造材料では十分ではないため、形状記憶材料や圧電材料などのいわゆるスマート材料と呼ばれる次世代材料を宇宙構造に利用することが検討され始めている。申請者は、適応構造システムの研究を行い[1]、近年では特にスマート材料の一つである形状記憶ポリマ (SMP: Shape Memory Polymer, 以下、SMP) に着目し、将来の宇宙構造への応用を考慮して様々な応用可能性を検討してきた[2]。

## 2. 研究の目的

本研究では、宇宙科学および宇宙工学の持続的発展を支えるために、宇宙用構造材料と構造様式の両面から従来の構造システムを革新することを目指す。具体的には宇宙構造材料として実用化されていない SMP を用いた可変形状部材の提案とそれらが宇宙空間で自在に変形・結

合・分離を繰り返し行う形状フォーミング (Shape Forming)、すなわち、軌道上で理想的な構造システムを適応的に形成する宇宙構造様式につながる要素技術の提案とその検証を行うものである。

## 3. 研究の方法

### 3-1. SMP 部材を用いた膜構造の形状調整方法の提案

膜にたるみが生じた場合に SMP パッチ状部材によって膜の張力を回復させ、構造を安定させる方法について述べる。Fig. 1 のように膜の表面に引張の予歪を与えた SMP パッチが固定された1次元モデルを考える。膜の両端は支持構造に固定されており、支持間が膜の長さよりも小さいとき、膜の張力がゼロとなり、膜は容易に座屈する。ここで、膜の長さよりも支持間が  $L$  だけ小さい場合を想定する。このとき、SMP パッチをガラス転移温度以上に加熱すると、SMP パッチが収縮し、SMP パッチ両端に挟まれた領域の膜に圧縮力を与え、逆にその他の膜は張力が回復するという原理である。すなわち、膜の張力が低下した Fig. 1 第2図の状態から、第3図の状態のような座屈変形が局所化した状態になる。

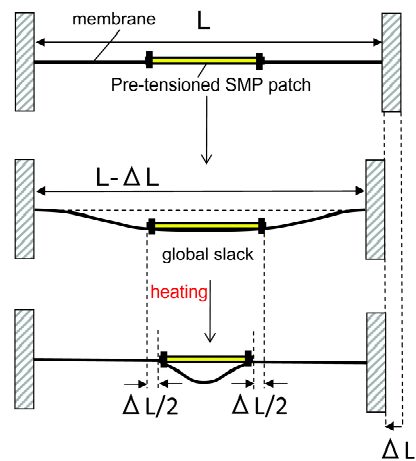
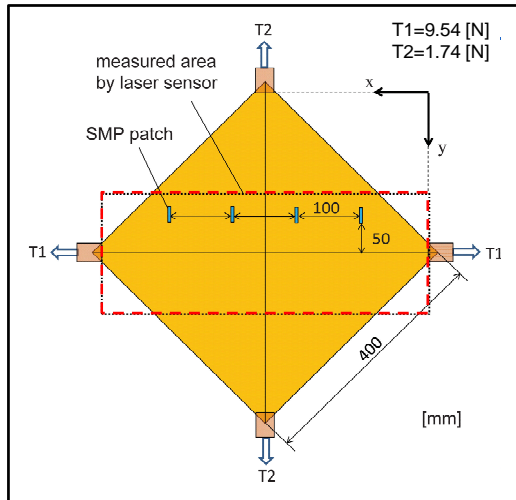


Fig. 1 : Concept of the shape control of membrane using a SMP patch.

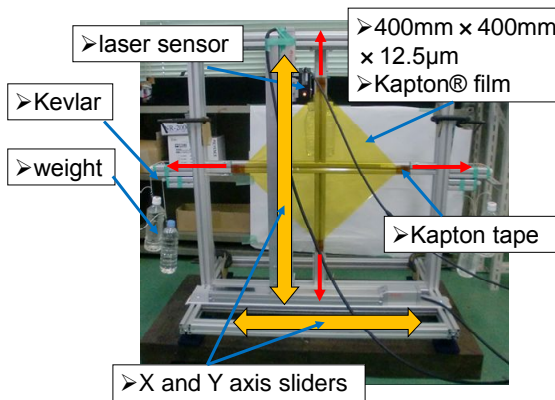
膜面構造のたるみの除去への有効性を検証するために、Fig. 2 のような1辺400mmの正方形膜にSMPパッチを4つ配置してFig. 1で示されるパッチの収縮により膜の張力の適切な付与ができることを、面外変形の変化的変化を考察することにより確認した。

膜面上でSMPパッチが収縮することによる膜の面外変形への影響が計測された。Fig.

3(a), (b) は、それぞれ、Fig. 2(a) 中の正方形膜の  $x=100$  mm,  $150$  mm の線上の面外変位の  $y$  方向に沿った分布を示す。Fig. 3(a) のように制御前後で比較した場合、変位が減少した領域と増加した領域が混在する結果となった。一方、Fig. 3(b)の結果では、膜の端部に生じた、たるみ領域が減少することが明らかになった。このことによって、提案する膜の形状制御手法の妥当性が確認された。



(a): Membrane model and SMP patches 図



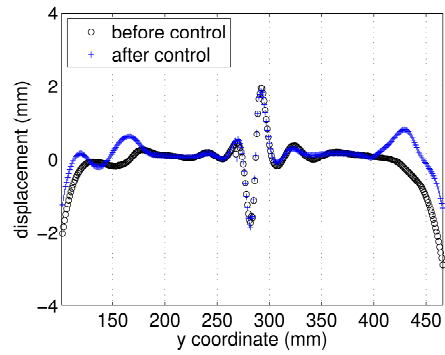
(b) : Experimental setup

Fig. 2: Shape control experiment for the membrane structure using a SMP patch.

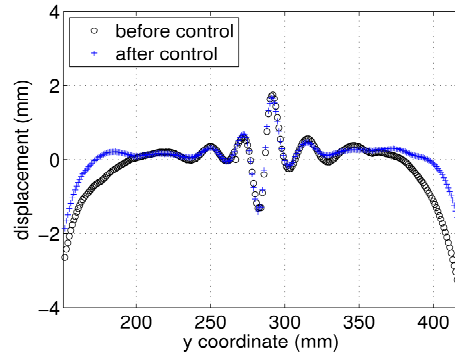
### 3 - 2 . 塗料状ヒーターを用いた形状記憶ポリマ部材の加熱方式の提案

#### (1) 塗料状ヒーターによる SMP 部材加熱実験

Fig. 2 に示す膜構造の形状制御実験においては、SMP 部材の加熱のため、外部からハロゲンランプによる輻射熱を与える方式を採用した。



(a) Displacement at  $x=100$  mm



(b) Displacement at  $x=150$  mm

Fig. 3: Results for wrinkle control

宇宙空間において SMP 部材を実際に運用するためには、部材と一体化された形で加熱できる仕組みが理想的と考えられる。そこで、炭素系微粒子を分散させたポリウレタン系の塗料状ヒーター(©Carbo e-Therm)を用いて SMP 部材を塗布した表面から加熱する方式を検討した。Fig. 4 に矩形の SMP フィルムに塗料ヒーターを塗布した写真を示す。また、Fig. 5 に赤外線サーモグラフィによって、表面温度を計測した結果を示す。予備実験の結果、本ヒーターで SMP のガラス転移温度への加熱が行えることを確認した。

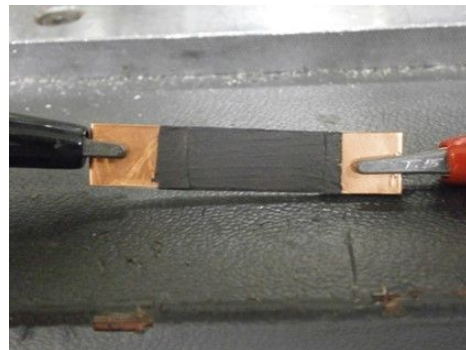


Fig. 4: SMP film coated with paint heater.

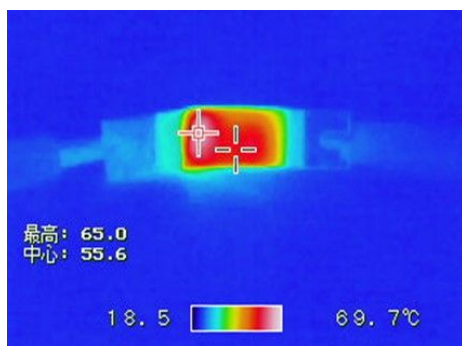


Fig. 5: Photograph of the SMP film coated with paint heater.

(2) 塗料状ヒーター塗布前後の粘弾性パラメータの同定による粘弾性特性の評価

幅 10mm, 長さ 60mm, 厚み 1mm の形状記憶ポリマ製矩形試験片に対し, 塗料状ヒーターを約 80  $\mu\text{m}$  の厚さに塗布し, 塗料塗布前後の粘弾性特性の相違を評価することにより, SMP 部材の本来の目的である, 適応構造システムにおける可変構造の要素として機能することに妨げる要因がないか検証した。

Fig. 6 に粘弾性モデルを示す。本実験では, 二つの並列パネと一方のパネに直列接続されたダッシュポットからなる標準モデルを採用した。引張試験と応力緩和試験の二つの試験データを取得し, 本モデルの 3 つのパラメータを同定することにより, 塗料状ヒーターの塗布前後の粘弾性特性の評価に用いた。

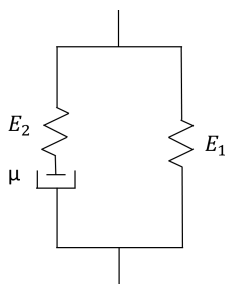


Fig. 6: Schematic of a linear standard model

以上の実験結果より, 以下の知見が得られた。

応力緩和率は, 塗料状ヒーターの塗布後の方が塗布前よりも小さな値を示した。試験片の弾性率については, 塗料状ヒーター塗布前後の相違は, ガラス転移温度以上では顕著であり, 塗料状ヒーター

塗布後の方が塗布前よりも弾性率は大きかった。

試験片の粘性については, ガラス転移温度以下で顕著であり, 塗料状ヒーター塗布後の方が塗布前よりも粘性が小さい傾向を示した。

#### 4. 研究成果

上述の各検討の結果, 本研究で目的とする繰り返し形状フォーミング可能な適応康応システムの要素技術に関する以下の知見が得られた。

(1) 形状記憶ポリマを構造材料として用いることにより従来の構造システムを革新することを目的とし, 以下の成果を得た。まず, ソーラーセイル等に代表される膜構造の「しわ」や「たるみ」を抑制するため, 形状記憶ポリマに予め与えた変形を宇宙空間で再加熱する方法を提案し, その実現性を実験的に明らかにした。

(2) 宇宙空間で形状記憶ポリマ部材を加熱する方法として, 塗料状ヒーターを用いることを見出し, その有効性を調べた。その結果, 塗布厚の調整により, 形状記憶ポリマ部材の形状回復を損なうことなく, 一様に近い加熱が行えること, および, 塗布前後の粘弾性特性の変化に関する知見を得た。これらを設計に考慮することにより, 形状記憶ポリマ部材に不可欠な加熱層が構造材料としての粘性や弾性特性を改善するように利用できる可能性もあり, 今後さらに異なる加熱層厚や部材形状などの組み合わせに関する検討を行うことが必要である。

#### <引用文献>

1. 仙場淳彦, 古谷 寛, 2次元適応構造物における可変幾何パラメータを用いた自己システム同定, 日本航空宇宙学会宇宙技術, Vol. 5, pp. 1-7, 2006.
2. Atsuhiko SENBA and Yoshiro Ogi, Development of Deployable Composite Thin-film Structures Using Shape Memory Polymer, AIAA-2011-2104, Proc. of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Denver, CO, April 7th, pp. 1-7, 2011.

3. J. Leng, X. Lan, Y. Liu, and S. Du:  
Shape-memory Polymers and Their  
Composites, Progress in Material  
Science, Vol. 56, pp. 1077-1135,  
2011.

## 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

A. SENBA, et al., Evaluation of  
Viscoelastic Parameters of Active  
Structural Elements Using Shape  
Memory Polymers with a Painted Heater,  
26th Int. Conf. on Adaptive  
Structures and Technologies, Kobe  
(JAPAN), 2015.11.

A. SENBA, et al., A Shape  
Control Method for Large Membrane  
Structures Using Shape Memory  
Polymer Films with Pre-elongation,  
29th Int. Sympo. on Space Technology  
and Science, Nagoya (JAPAN), 2013.6.

A. SENBA, et al., Wrinkle/Slack  
Control Using Shape Memory Polymer  
Films for Large Membrane Structures,  
54th AIAA/AMSE/ ASCE/ AHS/ASC  
Structure, Structural Dynamics, and  
Materials Conf., Boston (USA),  
2013.4.

仙場淳彦, 他, 形状記憶ポリマフィルム  
による正方形膜のリンクル/スラッ  
ク制御実験, 第56回宇宙科学技術連合  
講演会, 別府国際コンベンションセン  
ター(大分県別府市山の手町),  
2012.11.

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/asenba13/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

仙場 淳彦 (SENBA, Atsuhiko)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 60432019

### (2)研究協力者

萩 芳郎 (OGI, Yoshiro)