

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760547

研究課題名(和文) インフレータブル可変形状部材によるゴッサマ適応構造システムの研究

研究課題名(英文) Gossamer Adaptive Structure Systems Using Inflatable Variable-Geometry Members

研究代表者：

仙場 淳彦 (SENBA ATSUHIKO)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：60432019

研究成果の概要(和文)：本研究は、将来の様々な高度宇宙ミッションを実現するために適応性を有するゴッサマ適応構造システムの概念を提案し、形状記憶ポリマを用いた適応型インフレータブル構造用メッシュや形状記憶ポリマ製可変長コイルなどの概念モデルを提案した。また、形状記憶ポリマと加熱源を組み込んだ展開型複合フィルム構造を提案した。実験結果より形状記憶ポリマをアクチュエータとして利用することにより安定した自己展開構造を構築できる可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study investigates a concept of gossamer adaptive structure systems that have variable geometry characteristics in order to achieve various advanced missions in orbit. We propose the use of shape memory polymers for the adaptive inflatable structures and the variable-length shape memory coil. Furthermore, the deployable composite film structure is proposed that combines the film structures and the actuators developed with shape memory polymers. It is shown that the deployment of the proposed film structure was stable when the shape memory polymer is used as an actuator for the deployment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：適応構造システム

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：形状記憶ポリマ、展開構造、適応構造、ゴッサマ構造、インフレータブル構造

1. 研究開始当初の背景

本研究は、ゴッサマ構造物と適応構造物の利点を活かした新たな構造システムに関して検討を行うため、各構造物の概要を以下に述べる。

ゴッサマ構造物は、薄膜、ケーブル、メッシュ等の軽量構造部材から構成され、面・体積密度の極めて小さい構造物である。例として、宇宙インフレータブル構造物やソーラーセイルなどが検討されている。インフレータブル構造物は、気体封入による膨張展開後に膜面の硬化を行い、スペースデブリ等の衝突

に対する耐久性を補うことが検討されてきた。しかしながら、長期運用、軌道上建設、超高精度指向制御などの高度なミッション要求に対応していくためには、軌道上における応力制御および形状調整等の適応性が今後重要になると考えられる。

一方、適応構造物は、構造物の物理的または幾何学的パラメータを目的や環境の変化に応じて変化させることのできる構造物として1980年代中頃に定義された。幾何学的パラメータ変化を用いた代表例として、可変形状トラス (Variable geometry truss: VGT)

が挙げられる。これは部材の長さを変化させることによりトラス構造物の形態を変化させることができ、宇宙空間における障害物回避やマニピュレータとしての応用可能性が提唱されてきた。しかし宇宙用マニピュレータとして利用する場合には、VGT の構造部材およびアクチュエータの軽量化を図ることが課題であると考えられる。

2. 研究の目的

上記のような背景から、ゴッサマ宇宙構造物に適応構造の概念を導入し、両者の利点を活かした構造システムとして、ゴッサマ適応構造システムの概念提案およびその具体的な構築方法を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、ゴッサマ宇宙構造物の軽量性を維持しながら、調整可能あるいは軌道上における様々な適応性を付与することを目的として、可変構造を実現するために従来のようなメカニカルなヒンジや電磁モータ等を用いる代わりに、スマート材料の一つである形状記憶ポリマ (Shape Memory Polymers, SMPs) を応用することを検討した。

(1) SMP の物性

本研究で可変性を持つ軽量構造部材として、温度変化により材料の弾性率が大きく変化するポリウレタン系 SMP であるダイアリイ (SMPテクノロジー社) を採用した。材料の温度をガラス転移温度より上昇させると、弾性率が低い状態 (ゴム状態) になり、同時に成形時に記憶された形状に回復する特性、すなわち形状回復効果を示す。また、ゴム状態において外力を作用させて与えた歪 (変形) を保ちながら冷却し、ガラス転移温度より低下させると、変形が保持される形状固定効果も示す。この二つの効果を利用して、ヒンジやボールネジ等を用いることなく、変形可能な構造部材が得られると考え、ゴッサマ宇宙構造物としての様々な利用形態および加熱装置の組み込み方法などを考慮し、概念モデルの試作とそれらを用いた基礎的実験を通して実現性を検証した。

(2) 実施手順

ゴッサマ適応構造物において、SMP 材料を適用する上で、まず SMP 材料の可変構造への適用形態を検討した。具体的には、①SMP 材と樹脂性メッシュを複合化した形状記憶メッシュ、②加熱用ヒーターと形状回復力を補うことを両立した形状記憶棒状部材、③SMP 製可変長コイル、④展開型フィルム構造およびそれらの統合によるインフレーターブル可変形状部材と軽量 VGT の概念提案を行った。以下、各検討項目の成果概要を示す。

4. 研究成果

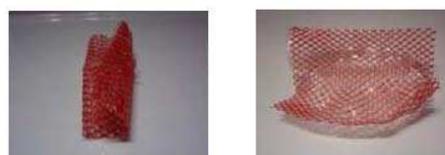
(1) 可変形状部材の概念検証

①形状記憶メッシュ (図 1)

図 1 は、SMP 材を用いて試作したインフレーターブル構造用の可変構造要素の写真である。樹脂メッシュの表面張力を用いて、SMP のコーティング系溶液を塗布することにより試作した複合メッシュ材である。この試作において用いた SMP のガラス転移温度は 55°C 前後であり、図 1 左図は、ゴム状態で与えた変形を冷却固定した状態であり、加熱後には再び右図の状態に形状回復することが確認された。すなわち、形状回復効果を持つインフレーターブル構造への可能性を確認した。なお、この試作では、SMP の加熱用ヒーターは組み込まれていないため、加熱方法については、後述のようにニクロム線などが用いることができる。

②形状記憶棒部材 (図 2)

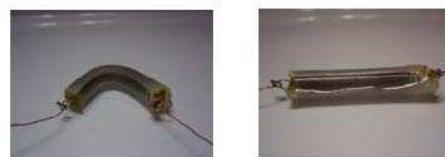
図 2 は、主剤と硬化剤を用いる 2 液混合タイプの SMP 溶液に予め金属バネを浸し、硬化させて製作した可変部材である。この試作結果より、SMP をガラス転移温度に加熱するために、内部の金属バネの左右端に電圧を印加し、電流を流すことにより、金属バネを熱線として用いることも可能であることが示された。また、同時に、バネの回復力を用いて、SMP の形状回復速度を増加させることもできる。本形態は、後述するインフレーターブル構造を用いた軽量 VGT のための伸縮部材として利用することも可能であると考えられる。



加熱前

加熱後

図 1 : SMP を用いた形状記憶メッシュ



加熱前

加熱後

図 2 : 形状記憶棒部材 (ヒータ組み込み型)



図 3 : SMP 製可変長コイル

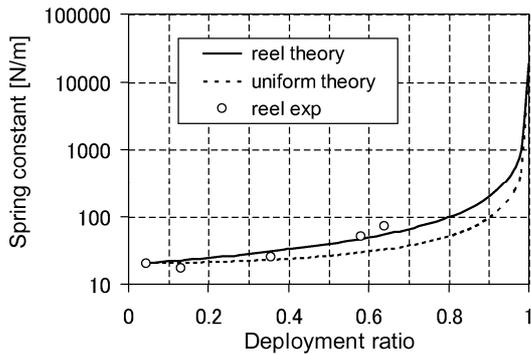


図4：SMP 可変長コイルの展開率とばね定数

③SMP 製可変長コイル (図3)

上述の①、②の形態のようにSMP材に曲げ変形を与えることにより、加熱後にその曲げ変形が回復することを利用するばかりではなく、ねじり変形を用いた形態を次に示す。すなわち、真直なSMP部材をコイル状に変形させて利用する方法である。

図3は、SMP製棒状部材を加熱し、ゴム状態にし、コイル状に変形させた後、冷却して変形を固定したものである。このコイルを再度加熱することにより、コイルが徐々に真直ぐの部材に形状回復する。従って、このコイルを張力安定構造の張力部材として構造物に組み込むことにより、ケーブルの繰り出し機構等の複雑な装置を用いることなく、軽量で簡素な構成の部材でありながら長さ調節を自動的に行う張力部材として利用できると思われる。

次に、提案した可変長コイルの展開率とばね定数を計測した結果を図4に示す。図4中の凡例、reel theory、uniform theory、reel expは、それぞれコイルが徐々に繰り出される場合の解析値、コイルが一様に伸びる場合の解析値、およびコイルを部分的に加熱し、徐々に繰り出される場合を模擬した実験結果である。この結果から、理論値と実験結果は、ともにコイルが展開するに応じて、ばね定数が急激に増加することが示された。これは、コイルとSMP棒が直列に結合された数学モデルにより、全体の等価なばね定数を求めることにより説明できる。つまり、展開率が大きい時に、SMP棒状部分の引張剛性が支配的になることにより、等価なばね定数が急激に増加する。このようなばね定数の特性を持つことから、展開初期には小さな張力、後期には大きな張力を与えるような張力安定構造への応用が考えられる。

④展開型複合フィルム構造 (図5)

本研究では、SMP部材を用いたインフレーター可変部材の検討を主に行ったが、派生的なコンセプトとして、ガス封入による展開力を与える必要がなく、材料自体の形状回復効果を用いた展開型フィルム構造の可能

性を検討した。図5は、薄いフィルム構造とその両端にSMP部材を複合化した自己展開可能な複合フィルム構造の概念図である。この応用として、薄膜太陽電池などを貼り付けた柔軟展開構造や、太陽光を推進力として利用するソーラーセイルなどのゴッサマ宇宙構造の展開構造が考えられる。

次に複合フィルム構造の試作を行った。複合フィルム構造として厚み100 μ mのポリエチレンフィルムを用いた。図6は試作モデルの写真である。一辺約22cmの正方形フィルムの両端に、ニクロム線と幅5mmのSMPの棒状部材をポリイミドテープで固定した。

図7は、ニクロム線に電流を流して加熱したときの展開過程の様子である。初期形状は、t=0の写真に示すように、SMP部材に大きな曲げ変形を与えた形状である。

図7の展開実験結果より、展開時間が長いこと、すなわち、展開速度が極めて小さく、展開時の動的な反動が加わることが少ない。この特徴は、従来太陽電池パネルの展開で用いられてきた、弾性ヒンジの拘束を解放する方法や、インフレーター構造のように流体圧力を用いる方法に比較し、展開時のダイナミクスへの配慮をそれほど必要とせず展開現象を予測できる利点があると考えられる。また、ヒンジや摩擦部のない展開機構により、重力環境下と微小重力環境下の展開特性の少ないことも利点と考えられる。

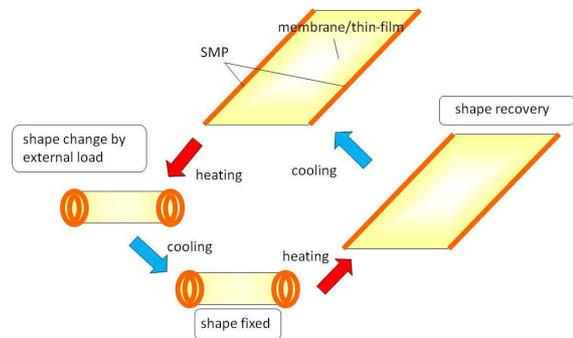


図5：SMP部材を用いた展開型複合フィルム構造のコンセプト

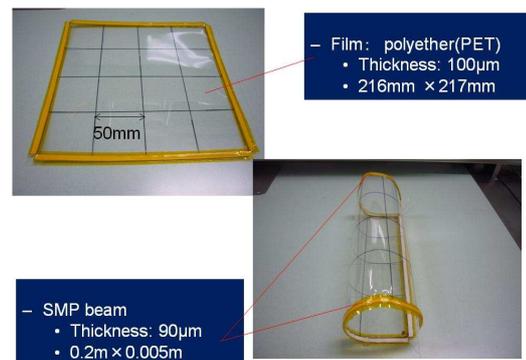


図6：SMP部材を用いた展開型複合フィルム構造試作モデル

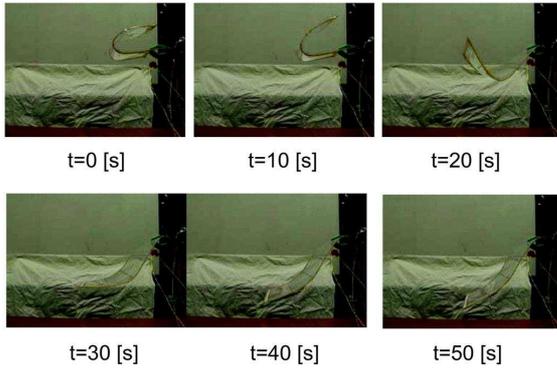


図7：展開型複合フィルム構造の展開過程

(2) インフレーター可変形状部材と軽量VGTの概念提案

将来のゴッサム適応構造物の軌道上建築や大規模構造の移動などを目的としてSMP材料を応用した軽量VGTの概念を提案した。1980年代に提唱されたVGTは、高い冗長性と伸縮可能な部材の導入により、トラスの幾何形状を大きく変化させることができる。既にVGTを宇宙用クレーンのように利用することは提案されてきたが、ゴッサム宇宙構造の建築を想定した場合には、使用時の荷重は比較的小さいため、剛性よりも軽量性に主眼が置かれるべきであると思われる。そこで、本研究では、形状記憶ポリマを用いた伸縮部材の概念を提案した。図8のようにインフレーターチューブの下部にトーラス部材を連結し、このトーラス部の材料を形状記憶ポリマとすることにより、部材の加熱と冷却のみを用いて、インフレーターチューブの長さを調整することができる。ただし、形状記憶ポリマは、加熱時にゴム状態となるため、この状態の構造部材としての剛性は不足することが課題である。特に、加熱中にVGTに外力が作用する場合などに生じる問題などについて、更に研究を重ねる必要がある。これらの検討結果は、今後報告する予定である。

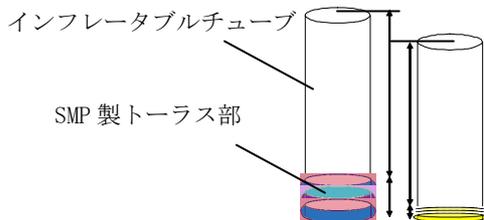


図8：SMPを用いたインフレーター伸縮部材の概念モデル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① Atsuhiko Senba and Yoshiro Ogi, “Development of Deployable Composite Thin-film Structures Using Shape Memory Polymer,” AIAA-2011-2104, 52nd AIAA/ ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2011/04/07, Denver (USA).
- ② 仙場淳彦、荻芳郎，“形状記憶ポリマを用いた展開型複合フィルム構造の検討,” 宇宙構造・材料シンポジウム (第26回)、2010/12/10、相模原.
- ③ 仙場淳彦、荻芳郎，“形状記憶ポリマを用いた軽量構造用アクチュエータの基礎検討,” 日本機械学会 2010 年度年次大会、2010/09/06、名古屋.
- ④ 荻芳郎、仙場淳彦，“形状記憶ポリマによる張力構造物の展開安定化の検討,” 宇宙構造・材料シンポジウム (第25回)、2009/12/04、相模原.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仙場 淳彦 (SENBA ATSUHIKO)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号：60432019

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

荻 芳郎 (OGI YOSHIRO)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号：00512005