

Basic Experiment of Deployment and Flatness Maintaining System for SPS Large-scale Panel ¹

Satoshi Yamaguchi*, Koji Tanaka**, Susumu Sasaki**, Osamu Odawara*

*Tokyo Institute of Technology Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering
4259 Nagatsuta, Midori, Yokohama, Kanagawa

**ISAS/JAXA
3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa

Abstract

Very large deployable antenna panels that consist of antenna elements, microwave circuits, control and power circuits and power generation devices are major portions of the Solar Power Satellite (SPS). Heat cycle on the orbit will cause a distortion of the antenna panel of the SPS and result decrease of power transmission efficiency. Therefore, it is necessary to maintain the flatness of the panel. On the other hand, a famous 2-D deployment method called "MIURA ORI" cannot be used for the panel because it has thickness. So, we have been studying a reliable 2-D deployment and a profile irregularity maintaining method that utilizes a smart actuator. The smart actuator consists of the shape-memory alloy (SMA) and a controller. We carried out the deployment experiment using the smart actuators.

We made a four panel trial system for one dimensional experiment in order to confirm a basic function of the smart actuator. In this experiment, the flatness was set the angle by $\pm 5^\circ$. Two types of the SMA coil with open angles of 140° and 220° were processed in shape-memory treatment with heat. A property of the processed SMA was evaluated. It was confirmed that the SMA coil can be used for the panel deployment experiment.

The angle control system that consists of the LED, the sensor and a control circuit were made and evaluated.

2-D development experiments using the 32 panels system were executed, and the operation of the 2-D deployment system was confirmed.

SPS 用大型パネルの展開と面精度維持のための基礎実験*

山口 哲史 (東京工業大学)

田中 孝治 (ISAS/JAXA)

佐々木 進 (ISAS/JAXA)

小田原 修 (東京工業大学)

1. はじめに

宇宙での高効率な太陽光利用による大規模な太陽光発電が計画されている。そのため送電方法としてマイクロ波を利用した太陽発電衛星 (SPS) に関する研究が行われている。SPS 実現のための課題として、大型送電アンテナの展開と面精度維持は重要である。本研究では、大型アンテナの基本構造と考えられるパネル展開構造とその面精度維持制御機構の開発を目的とする。

SPS は太陽電池パネルと送電用アンテナを一体化した送電一体パネルを使用する案が考えられている。そのため送電パネルは太陽電池、アンテナ、回路を含むため厚みがあり、厚板構造物の展開が必要である。そのため、信頼度の高い 2 次元展開機構が必要となってくる。また軌道上の熱サイクルによる変形が生じるため、送電アンテナ面の平面度が悪化し、送電効率が低下するため送電アンテナ面の平面度維持制御システムが必要である。そのため厚板構造物の 2 次元展開と平面度維持を行うことができるスマートアクチュエーターの開発に取り組んでいる。スマートアクチュエーターとは、アクチュエーターと制御回路を合わせたものである。

本研究では、2 次元展開と平面度維持制御が可能なスマートアクチュエーターを作成し、4 枚パネルによる展開と平面度維持の実験と 32 枚パネルによる 2 次元展開実験及び無線制御の実験を行った。

2. 展開パネル

2.1. アクチュエーターの比較

スマートアクチュエーターに使用するアクチュエーターに求められる要素は、軽量で構造が単純であることである。軽量であれば打ち上げコストを軽減することが可能である。また構造が単純であれば、故障が少なくなるため信頼度が高くなる。これらの条件からアクチュエーターの比較を行った。

モーターと SMA (形状記憶合金) の比較を示す。応力を比較すると、モーターの質量が 1g 場合、5.7mNm のトルクを発生する。SMA は回復応力が 400MPa 発生する。よって条件として線径が 0.7mm、本数が 2 本とした場合、発生応力が 300N となる。これをアクチュエーターの形状に加工した場合、600mNm のトルクを発生させることができる計算となる。発生するトルクで比較すると SMA のほうが有利である。

次に可動範囲で比較すると、モーターは回転運動であるため無制限に動くことができる。しかし SMA は変形を回復させることでトルクを発生させるため変形許容範囲内でのみ動かすことができる。そのため可動範囲はモーターのほうが有利である。しかし、今回はパネルの展開と面精度維持に使用するため可動範囲は 200° あれば十分に使用可能である。そのため SMA でも問題なく応用することができる。

信頼性について比較する。信頼性は、部品数が少ない構造がより有利となる可能性が高い。そのため部品数で考えるとモーターのほうが SMA より多くの部品を必要とするため、モーターは SMA に比べて信頼度が低くなると推定できる。

宇宙環境適応性ということで考えると、モーターは宇宙空間で使用するためには軸受けの潤滑を考慮する必要がある。しかし、SMAは必要としないため適応性もSMAのほうが優れている。

これらのことからモーターよりもSMAのほうが宇宙機で必要とされる条件への適合に優れているため、スマートアクチュエーターに使用するアクチュエーターはSMAとした。

2.2. スマートアクチュエーターの構成

アクチュエーターに使用するSMAにはTi-Niの合金を記憶処理して使用した。このSMAは約80°Cの相転移点を境に低温側(マルテンサイト相)では通常の金属同様自由に変形することが可能で、高温側(オーステナイト相)では記憶した形状に復元するという性質を持つ。この性質を利用し、SMAを図1のように140°と220°の角度にしたねじりコイルバネの形状を記憶させた。そのSMAを通電加熱し形状を回復させることによりパネルの展開と平面度維持が可能となる。平面度の維持は2つのSMAのどちらかに通電することによってパネルを開いたり閉じたりすることで行う。平面度維持はパネルが熱変形したときの補償である。図2に熱変形補償について示した。

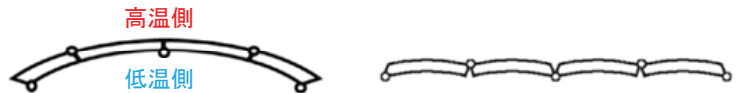
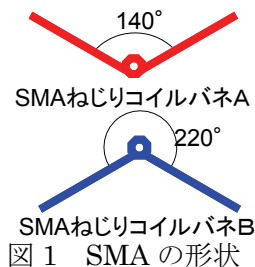


図2 熱変形補償

今回の実験で使用するスマートアクチュエーターは制御回路と形状記憶を行った二つのSMA、そして光センサとLEDによって構成されている。光センサとLEDはパネルの角度を検知するために使用している。スマートアクチュエーターの概略図を図3に、実際の写真を図4に示した。

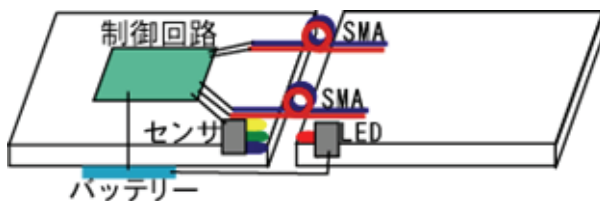


図3 スマートアクチュエーターの概略図

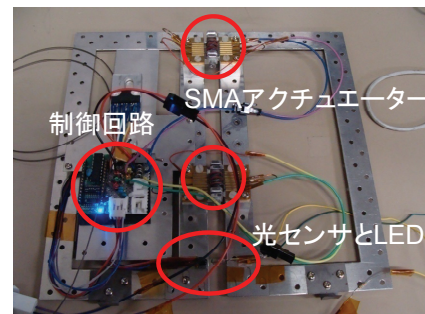


図4 実際の写真

2.3. 面精度維持システム

平面度維持はパネルの角度の変化をLEDと光センサによって感知し、SMAを動かし、パネルの角度を制御する。平面度維持のための角度の感知はデジタル制御とアナログ制御の二つが考えられる。デジタル制御の場合は、上・中・下の3つのセンサを用いて、どのセンサが大きく反応しているかによって角度を判別する。それによってSMAを動作させて平面度を維持する。この場合3つのセンサの違いだけで判断するため正確な制御ができないが、プログラムを簡略化することが可能である。アナログ制御の場合は3つのセンサを用いる点では同じであるが、中央のセンサから出てくる電圧によって角度を検知する。しかし中央のセンサだけではどちらに傾いているかわからない。そのため上下についているセンサを利用して、大きく反応をしているほうに傾いていることが分かる。その値によってSMAを加熱して平面度を維持する。アナログ制御の場合は電圧の値によって角度を大まかに検知するため精度のよい平面度維持が可能となるが、プログラムが複雑になってしまう。今回はパネルの角度を大まかに検知し、制御する必要があるためアナログ制御を

使用した。パネルの角度検知の図を図 5 に示した。

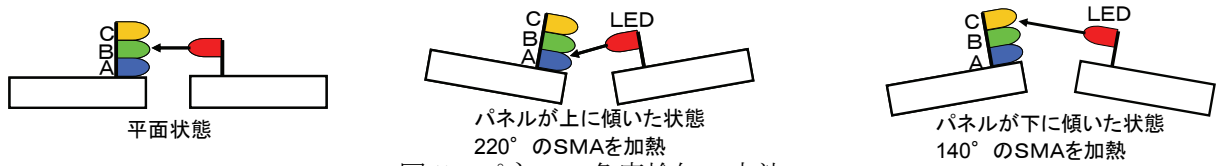


図 5 パネルの角度検知の方法

3. 実験方法と結果

3.1. SMA の特性評価

SMA の記憶処理は所定の形状で固定して、400℃で 1h 保持した。形状はねじりコイルばねとして、巻き数は 3 以上、記憶角度は 130° 以上とした。これは過去の実験により巻き数が 3 以下の場合や角度が 120° の場合には疲労が起ってしまうことが確認されているからである。

記憶角度を設定するため、角度による発生応力の違いを測定した。角度は 140° と 160° のものを比較した。測定方法としては、ねじりコイルばね状の SMA の一方を固定して、もう一方に荷重を加えてそのときの回復率で発生応力を評価している。回復率は記憶角度を回復角度で割った値である。測定結果を図 8 に示した。

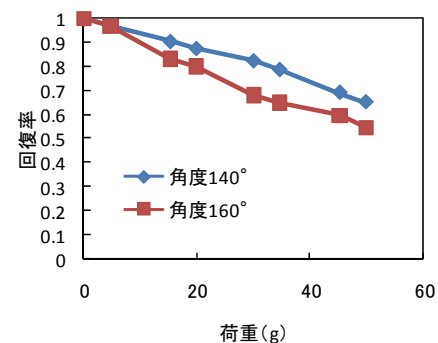


図 8 荷重と回復量の関係

この結果から 140° のほうが 160° よりも発生応力が大きいことが分かる。

次に巻き数による発生応力の違いを評価した。巻き数は 3~6 のものを使用した。また記憶角度は先ほどの結果から 140° とした。実験方法は記憶角度での違いを測定した時と同じ方法である。発生応力は減少角度で評価しており、減少角度は記憶角度から回復角度を引いたものである。測定結果を図 9 に示した。この結果をみると、巻き数が増えると減少角度が増加している。これは発生応力が小さくなったことと変形量が大きくなったという二つのことが考えられる。

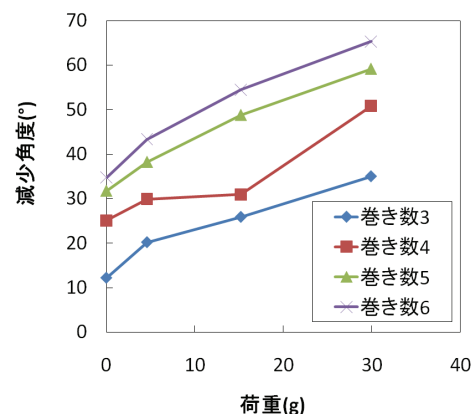


図 9 巻き数と減少角度の関係

この二つの実験結果から今回の実験で使用する SMA は記憶角度を 140°、巻き数を 3 とした。次にこの条件で作成した SMA の疲労特性を評価した。評価方法としては、SMA に変形と回復を繰り返して評価を行った。このときに加える荷重はパネルの重量である 50g とした。100 回の繰り返しを行ったが、疲労は見られなかった。よって今回の展開と平面度維持の実験で使用することが可能であると判断した。

3.2. 角度検知回路の実験

パネルの角度制御は光センサから出力される電圧値で行うため、角度と電圧値の関係を調べる必要がある。そのため LED と光センサを実際のパネルに取り付けて角度を変化させていき、電圧値を測定した。図 10 に角度検知回路の回路図を、図 11 に測定結果を示した。

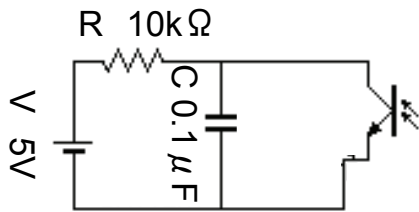


図 10 光センサ部の回路図

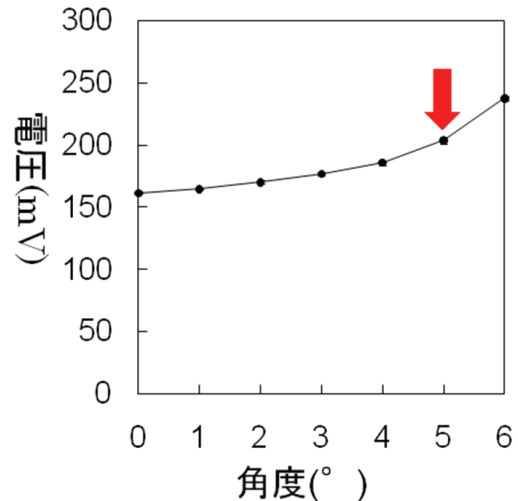


図 11 角度による電圧値の変化

この実験の結果の電圧値をプログラムに使用した。今回はパネルの角度を±5°で制御することを考えているため角度が5°のときの電圧値である200mVを使用した。またパネルの展開時のプログラムも3つのセンサがどれも反応していない状態とするため条件として15°のときの電圧値を利用した。

3.3. 4枚パネルの展開と面精度維持

パネルの展開と平面度維持の実験を行った。パネルの展開の過程を図12に示した。

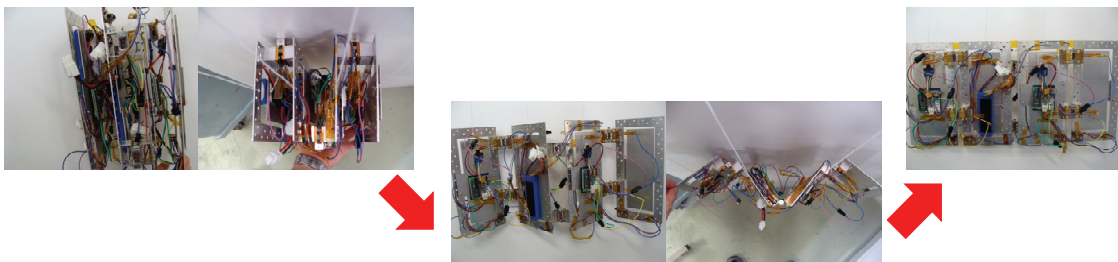


図 12 4枚パネルの展開過程

展開実験を行った結果、パネルの展開プログラムは正常に作動していることを確認した。またSMAは通電加熱が行われてから40秒で反応することが分かった。しかしLEDとセンサの位置関係により、誤作動を起こすことがあった。

平面度維持実験を行った結果、SMAの温度変化により維持プログラムが正常に作動していることを確認した。そして2枚での平面度維持は可能であったが、4枚での平面度維持は不完全であった。また数回SMAを使用するだけで劣化が起こってしまった。これは所定の角度にパネルがならなかったためSMAが連続加熱され、再記憶が起こったと考えられる。

この4枚の実験によりわかった課題としてLEDとセンサの位置の問題、SMAの再記憶が起こる問題、SMAの発生応力不足、吊り具の不具合があげられる。

3.4. 再記憶時間と発生応力の測定

3.4.1. 再記憶時間の測定

SMA の再記憶が起こる時間を測定した。この時間をもとにシステムによる SMA の保護をする。測定方法は SMA を 180° の角度で固定して、一定時間加熱後冷却を行い、再度加熱し、回復角度が減少したところを再記憶時間とした。その結果、2 分の加熱を行った SMA は再記憶を起こしていた。そのためシステムに 2 分以上加熱をしないという条件を入れることによって再記憶が起こらないようにすることができる。しかしさらに条件を明確にするため、温度条件を測定する必要がある。

3.4.2. 発生応力の測定

発生応力不足が考えられたため、実際に SMA が発生する応力と SMA の線径の違いを測定した。測定はバネばかりを使用して行った。また冷却方法による発生応力の違いについても測定を行った。図 13 に測定結果を示した。

結果として線径が太くなるほど発生応力は大きくなることが分かった。そして冷却方法による発生応力の違いは見られなかった。

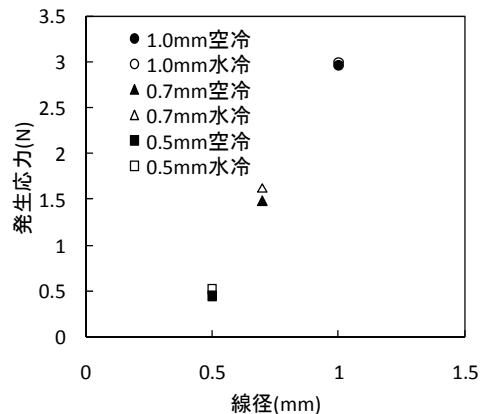


図 13 SMA の発生応力

3.5. 32 枚パネルの展開実験

32 枚パネルによる 2 次元展開と無線制御の実験を行った。展開過程を図 15 に示した。

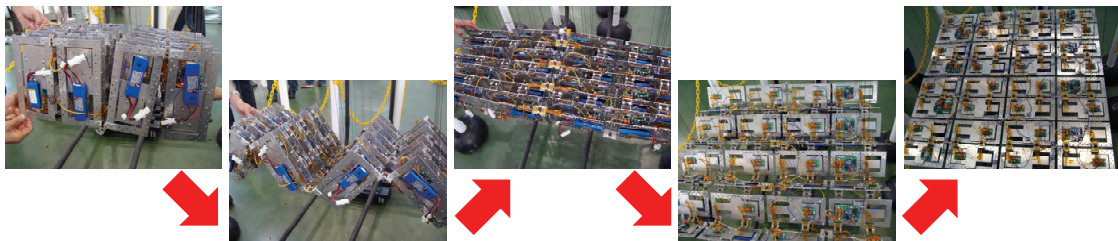


図 14 32 枚パネルの展開過程

実験の結果、2 次元展開の動作と無線制御を確認することができた。また無線制御により、各列を個別に展開することが可能であることも確認することができた。

4. まとめ

今回の実験で展開・平面度維持プログラムが正常に動作することを確認した。4 枚パネルの実験では展開は可能であった。しかし平面度維持は 2 枚での動作は可能であったが、4 枚では平面度維持ができなかった。4 枚パネルで平面度維持ができなかった理由としては、SMA の発生応力不足と吊り具の不具合が考えられる。また 32 枚パネルによる 2 次元展開の動作と無線制御を確認することができた。

今後の予定としては、4 枚パネルに改良を加えて再実験を行う。改良点は 3 つあり、一つ目は SMA の本数もしくは SMA の線径を太くして発生応力を大きくする。二つ目は吊り具と吊り方の改良、三つ目が LED とセンサの位置の変更である。次に実寸大のパネルでの平面度維持実験を行う。そして 32 枚パネルによる展開と平面度維持の実験を行う。それらの結果から大型パネルへ応用するためにシミュレーションを行う予定である。