

Fundamental study of flatness control of large panels on solar power satellites*

Takashi Kume (Shizuoka University), Koji Tanaka (ISAS/JAXA)
Yoshiki Yamagiwa (Shizuoka University)

Key Words: SPS, Carbon nanotube actuator.

Abstract

Solar power satellite (SPS) has a large-scale structure that consists of antenna and solar array panels. SPS is able to generate electrical energy more efficiently than the solar power system on the ground because generating energy by sunlight in the orbit is not affected daylight hour and weather unlike the one on the ground. However, thermal deformation that will be caused by the temperature differences between solar panel side and antenna side will reduce the efficiency of electrical power generation and wireless power transmission. So, we proposed a shape maintaining system that using carbon nanotube actuator (CNA). CNA is expected to have high adaptability for space environment. We evaluated the dependency on the physical properties such as density of CNT, ionic liquid and Young's modules of the CNA by experiments. For the purpose of structural modeling of CNA, we clarified the relationship between the physical properties and deformation as well as the generative force.

* Presented at the 17th SPS Symposium, 21-22 October, 2014

太陽発電衛星を構成する 大面積パネルの形状制御に関する基礎研究†

○久米 孝志（静岡大学），田中 孝治（宇宙航空研究開発機構），山極 芳樹（静岡大学）

1. 緒 言

1.1 研究背景

エネルギー問題は、いつの時代においても人類の生活において重要な課題である。特に、近年では化石燃料の枯渇の懸念や環境への影響などの議論が活発になってきており、その課題の解決策が求められるようになってきた。

そこで注目されているのが、太陽光をエネルギー源に用いる太陽光発電である。太陽光発電は太陽光があるかぎり半永久的に発電が行えるシステムであり、化石燃料への依存性や環境への影響が少ないため、クリーンな電力源の一つとして、普及している。

しかし、地上での太陽光発電は日照時間や設置場所の天候に左右され、安定して発電を行える電力源として使用することは難しい。そこで提案されたのが、太陽発電衛星である。

1.2 太陽発電衛星(SPS : Solar Power Satellite)

太陽発電衛星(Fig.1-1)とは、宇宙空間で太陽電池により発電を行い、無線送電により地上へ電力を送る衛星である。地上と異なり宇宙空間で受光し、発電を行うため、日照時間や天候の影響を受けない効率的な発電が可能となる。

無線送電を用いることにより懸念される送電時のエネルギーロス、マイクロ波を用いた場合の大気減衰は 1%以下ほどになっており、その他システム中の発熱などを考慮しても、98%ほどの高効率な送電が可能である。^[1]

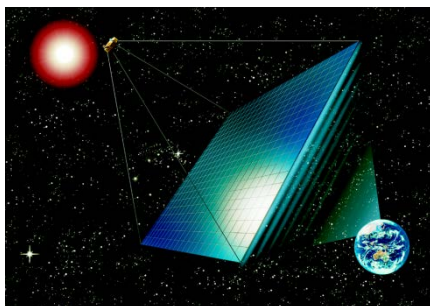


Fig.1-1 Solar Power Satellite

しかし、SPS の実現において解決すべき課題がいくつかあり、その一つが、発電パネルの熱変形である。

SPS は、発電用の太陽電池と送電用のアンテナが表裏に設置されているパネルが、多数並列に並ぶように構成されている。発電面は太陽側、送電面は地球側を向いているため、パネルの表裏で温度差が生じ、熱変形によるひずみが発生する。(Fig.1-2)

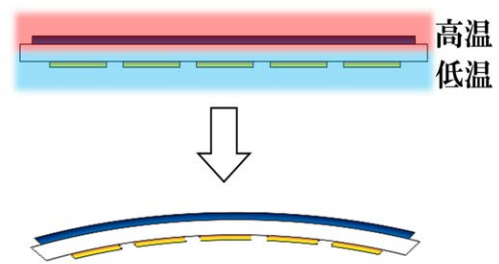


Fig.1-2 パネルの熱変形

現在構想されている SPS モデルは、全体が $2 \times 2[\text{km}^2]$ といった巨大なもので、この熱変形による形状変化量はかなり大きいと予測される。そのため、このひずみが発生してしまうと、マイクロ波による送電精度と効率の低下が起こる可能性が高く、SPS の発電効率が低下する。

このひずみへの対策として、パネル間にアクチュエータを設置し、機械的にパネルの角度を調節するという方法を提案する。(Fig.1-3)

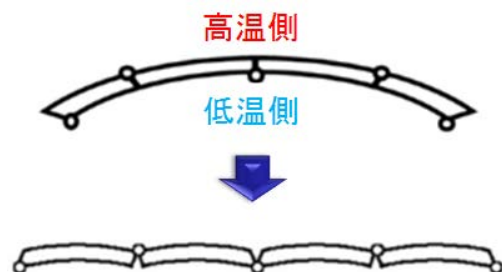


Fig.1-3 パネル角度の調整

この機構により、SPS 全体の平面度を維持し、送電効率の低下を防ぐ。

ここで重要となるのは、当機構に用いられるアクチュエータの選定である。耐宇宙環境適応性と、大

規模な SPS を構成するために搭載される発送電一体型パネルの量も多くなることから、パネル間に設置されるアクチュエータの数量も同様に多くなり、その密度の小ささも重要となる。

ここで、我々は低密度ながら高い変形量と発生力をもつ、カーボンナノチューブを用いた高分子アクチュエータを使用することを提唱する。

1.3 Carbon Nanotube Actuator (CNA)

カーボンナノチューブアクチュエータ(CNA : Carbon Nanotube Actuator)は、高分子アクチュエータの一つである。

CNA は、既存のアクチュエータ(PZT)と比較しても、高い発生力と変形量を持つ。(Fig.1-4)

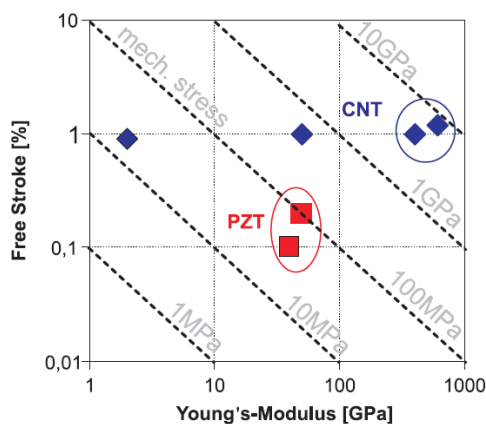


Fig.1-4 圧電素子(PZT)と CNA の比較

また、高分子アクチュエータの特徴として、薄膜形状である故の軽量さを持ち、変形原理に含有イオンの移動による体積効果を用いているため、劣化が少なく、真空中でも動作が可能とされる。

以上のことから、CNA は、SPS の発送電一体型パネルの形状制御に用いるアクチュエータとして、適していると考えられる。

	軽量化	真空動作	効率	コスト
CNA	◎	○?	○	×
圧電素子	○	×	○	○
モータ	×	○	○	○
形状記憶合金	○	○	△	○

Fig.1-5 CNA と既存アクチュエータ

1.4 CNA 動作原理

CNA は三層構造の薄膜系状になっており、中央にアニオン・カチオンの移動を可能にするイオン液体

を含有させたセパレータ、それを挟み込む形にして、CNT を分散させた電極層を圧着させている。

構造的には電気二重層コンデンサと同じ構造になっており、静電容量や抵抗値など電気的な特性に関しては、同様な評価が可能である。

動作原理としては、一様にイオンが分布している非電圧印加状態から、両側の CNT 電極に電圧を印加し、セパレータを介して両側の電極層にイオンを移動させる。そのイオンの移動により、それぞれの電極で含有するイオン総体積が変化し、電圧印加前後で膨張-収縮が発生する。ここで膨張-収縮が起こっている電極はセパレータを挟んで圧着されているため、Fig.1-6 のように変形が生じ、この変形により力が発生する。

イオンの移動の原理は電気二重層コンデンサと同じで、そのため CNA はコンデンサ的な性質も持ち合わせている。つまり、静電容量と抵抗値を定めることができ、電気的パラメータからも CNA の性能を評価することが可能である。

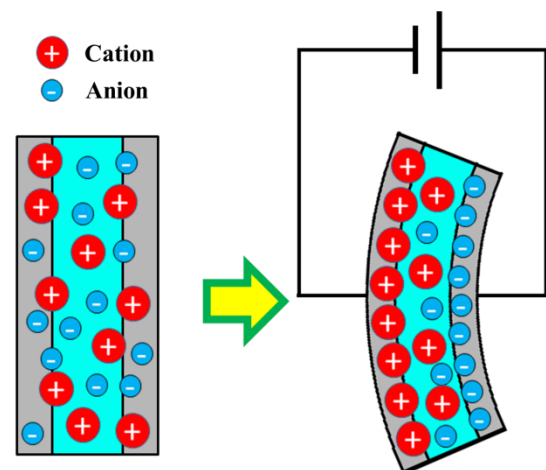


Fig.1-6 CNA 構造と駆動原理

1.5 従来の研究と本研究の目的、

CNA の先行研究において、アクチュエータ動作の数値化やそれに影響するパラメータの予測がなされている。本研究では、そのアクチュエータ挙動へ影響する要素の検証と整理、挙動のモデル化における過去の理論式の改良への指針を図る。

2. 実験・計測

まず、アクチュエータ挙動への影響要素とし、変形量・発生力に対してどのように関わってくるかを調べるパラメータを整理する。

本研究では、製造時に調節が可能な値として、CNA 内の CNT 密度とイオン液体量から、静電容量と弾性係数、そして変形量と発生力に対しての関係性を調べる。

そこで、含有している CNT 量とイオン液体量がそれぞれ異なるアクチュエータを用意し、アクチュエータごとに弾性係数、静電容量、発生力、変形角度を計測した。

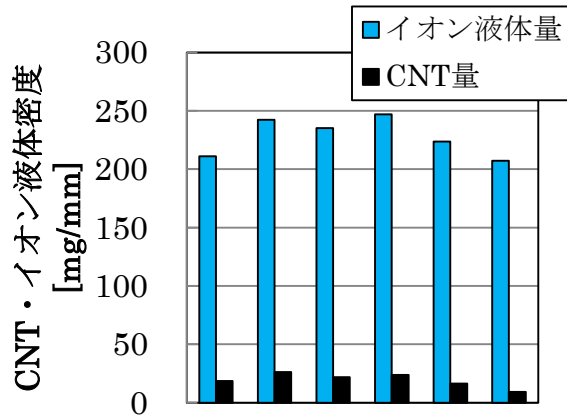


Fig.2-1 各 CNA 含有イオン液体・CNT 量

また、本実験は大気中の水分の影響を排除するとともに宇宙環境性能評価のため真空チャンバー内で実験を行う。

2.1 アクチュエータ挙動計測方法

変形量の計測としては、Fig.2-2 のように CNA の電圧印加前後を二次元化し、その先端の変形角度 θ を算出した。

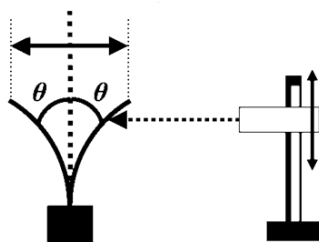


Fig.2-2 CNA 変形量計測

発生力と剛性に関しては、CNT を片持りに見立て、変形時の先端部分での発生力をひずみゲージ式ロードセルを用いて計測した。

2.2 静電容量計測

静電容量計測に関しては、CNA 駆動時の流入電流と、電圧印加後にショート回路に接続した CNA か

ら放出される電流を計測し、時間積分したものを充電電荷量 Q とし、クーロンの法則から静電容量 C を求めた。

3. 結果

3.1 CNT 密度の影響

Fig.3-1, Fig.3-2 に CNT 量の変化による静電容量、また発生力、変形角の推移を示す。

両図から、CNT 量の増加に連れて各々が上昇していることがわかる。

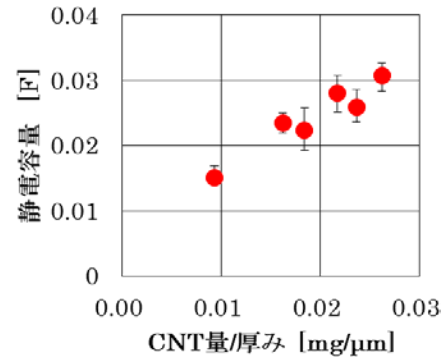


Fig.3-1 CNT 量と静電容量

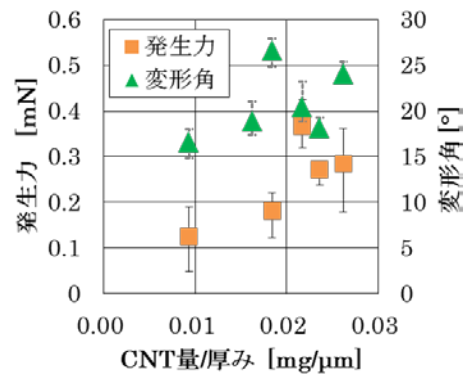


Fig.3-2 CNT 量と挙動

3.2 イオン液体の影響

Fig.3-3 に、イオン液体量と静電容量の関係を示す。イオン液体の増加に連れ、静電容量も上昇している。

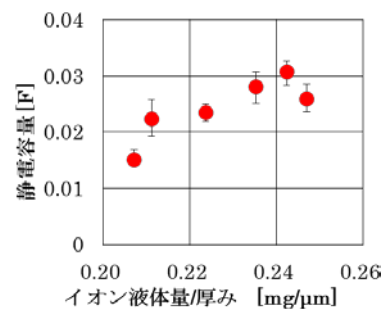


Fig.3-3 イオン液体量と静電容量

3.3 CNA 弾性係数の影響

Fig.3-4 に、弾性係数と変形角の相関図を示す。CNA の弾性係数が上昇するに連れて、やはり変形角が減少していることがわかる。

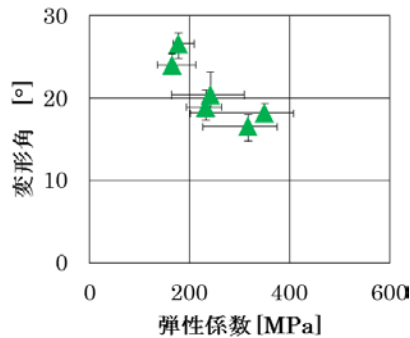


Fig.3-4 弾性係数と変形角度

4. 考察

計測結果より、それぞれの相関を整理すると、Fig.4-1 のようになる。

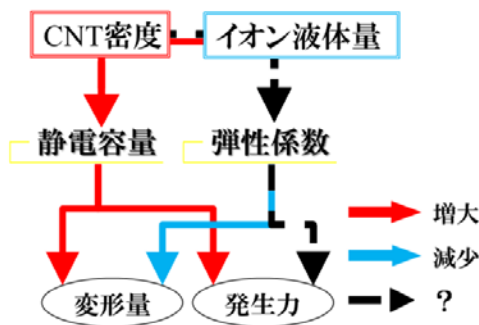


Fig.4-1 CNA 挙動への影響

今回確認できたのは、CNT 量とイオン液体量は、静電容量を増加させるということである。

また、静電容量が増加するという事は、電気二重層コンデンサの原理から考えると、電極へのイオンの移動量が増加しているということである。

つまり、静電容量の増加はイオンの移動による体積変化効果も大きくなっているということであり、CNT・イオン液体量を調整することにより、静電容量の増減を介して間接的にアクチュエータの変形量・発生力をコントロールすることができる。

また、Fig.3-4 から弾性係数が変形角を抑制している結果が見られる。しかし、CNT 量とイオン液体量の CNA 弾性係数への影響は、今回の計測では明確な関係性を確認することができなかった。そのため、

その関係性を確認は今後の課題とし、各量の最適解を出すことを目標のひとつとする。

また、得られた結果と、先行研究^[2]において提示された CNA 挙動のモデル式(1), (2)によって算出した理論値との比較を行った(Fig.4-2)

Fig.4-2 を見ると、電圧上昇により実験値と理論値にズレが生じている。ということは、理論式において考慮していない電圧による変化が発生している可能性が高い。そこで、また、理論式による予測を正確にするため、各項の電圧に対する変化(弾性係数、静電容量)を今後確認していくことも展望のひとつとする。

$$S_{\infty} = \frac{\alpha C_0^2 U_e^2}{2\kappa} \quad (1)$$

$$C^{-1} = C_0^{-1} - \alpha S \quad (2)$$

(S:変位, C:静電容量, α :クーロン結合係数, U:印加電圧, κ :剛性パラメータ)

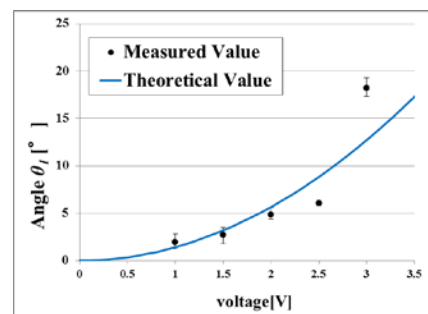


Fig.4-2 実験値と理論値の比較

5. 結語

CNA の挙動に対して、主に CNT 量、イオン液体量がどのように影響を及ぼすかを定量的に確認することができた。また、設計のための理論式においても改良の指針を確認した。

重ねて、CNA の耐宇宙環境性能評価もを行い、宇宙応用に向けた CNA の開発研究を進めていく。

文 献

- [1]川村光男, マイクロ波基礎工学, pp.249.
- [2] JOHANNES RIEMENSCHNEIDER, Modeling of Carbon nanotube actuators.Part.1.Modeling and Electrical properties. , Journal of intelligent material systems and structures. , VOL:20(2),pp.245-250,