

Basic Experiment of Carbon Nanotube Actuator for Space Applications

Daichi Matsumoto¹, Satoshi Yamaguchi², Koji Tanaka³, Yoshiki Yamagiwa¹,
Kenichiro Maki³, Susumu Sasaki³

¹Shizuoka University, Faculty of Engineering,

²Tokyo Institute of Technology

³ ISAS/JAXA 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210 Japan

Abstract:

Solar Power Satellite (SPS) which has been drawn attention as a future clean energy system remains many issues which should be studied. Construction of a large scale solar panel and transmitting antenna is one of the important subjects toward SPS. We are developing a flatness maintaining system, which utilizes a smart actuator system, of a large-scale panel antenna for SPS. We produced a carbon Nano-tube (CNT) actuator experimentally that is expected to be a light weight and an easy controllability, and carried out the basic experiments in order to evaluate characteristics and performance of the CNT actuators. The CNT actuator consists of CNT electrodes and a separator impregnated with ionic liquid. The CNT actuator works like a capacitor, so the deformation of the CNT actuator can be controlled electrically. We measured and evaluated the dependence of the deformation and the stress on the thickness of the actuators. Also, we evaluated a performance of the actuators under vacuum environment.

カーボンナノチューブアクチュエータの宇宙応用のための基礎実験

○松本大地（静岡大学），山口哲史（東京工業大学），田中孝治（JAXA），山極芳樹（静岡大学）
牧謙一郎（JAXA），佐々木進（JAXA）

1. 序論

近年，再生可能エネルギーを利用した発電手法として太陽発電の需要が急増しているが，発電が天候に大きく左右されることや夜間の発電ができないことなどが，他の多くの発電方式との違いであり，太陽発電の欠点であると言える．一方，宇宙空間で太陽発電を行う太陽発電衛星(SPS)は昼夜や天候に左右されることなく発電ができる．さらに，大気による太陽光の減衰がないことも利点の一つであり，SPS は地上で行う一般的な太陽発電よりもはるかに効率が良いと考えられる．

SPS 実現のためには様々な課題が存在するが，その中でも，効率に大きな影響を及ぼす大型送電アンテナの平坦度維持は重要な課題の1つである．SPS は数 km オーダーの大きさが検討されており，太陽光が当たる面と当たらない面の温度差によって Fig.1 のように超大型アンテナパネルが熱変形を生じると考えられ，それにより送電効率が低下する．送電効率を維持するためには送電アンテナ面の平坦度維持制御システムが必要となる．本研究では，効率や応答性などに優れると考えられるカーボンナノチューブ(CNT)アクチュエータによってパネルの平坦度維持を行うことを研究目標としている．

本稿では，まず，SPS について簡単に説明し，CNT アクチュエータの概念や構造に加え，他のアクチュエータとの特徴の違いについて述べる．次に，宇宙環境適応試験の一つとして真空試験の結果を示す．また，アクチュエータの厚さと変位量，応力，電荷量の関係についての実験結果を示し，考察を行う．

2. SPS について

SPS は 1GW 級を検討しているため，2km×2km 程度のサイズが必要となる¹⁾．また，一枚当たりのパネルサイズは 4m×2m×0.05m を考えており，このパネルを組み合わせることで 100m×100m の SPS のユニットを建設し，さらに，このユニットを連結させ，2km×2km の巨大構造物を構築する．発電した電力は伝搬効率の観点からマイクロ波を用いて地上に送ることが検討されている．Fig.2 に SPS の構想図を示す．

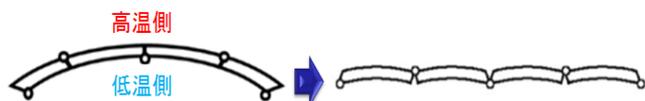


Fig.1 パネルの組み合わせと平坦度維持

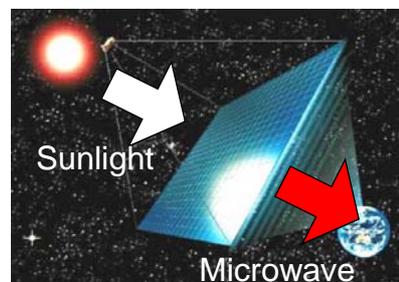


Fig.2 SPS の構想図(USEF モデル)

3. CNT アクチュエータについて

3.1 CNT アクチュエータの原理

CNT 膜は，微細構造により表面積を大きくできるため，大容量コンデンサへの応用が検討されている．この時，電解液の陽イオンと陰イオンの体積差が大きければ，CNT 膜で構成した電極間の変形量に差が生じ，アクチュエータとしての応用が可能である．Fig.3 に CNT アクチュエータの概念図を示す²⁾．これは 2 つの CNT 電極層とセパレータ層からなるもので，電極である CNT 層に電圧をかけると，セパレータに含まれているイオン液体の陽イオンが陰極に陰イオンが陽極に移動する．このとき陽イオンと陰イオンの体積差から陽極側に凸に変形を起こす．この変形を力として利用したのが CNT アクチュエータである．このアクチュエータは電気的な制御が可能で，電流の極性を変化させることによって変形方向を変えることができる．

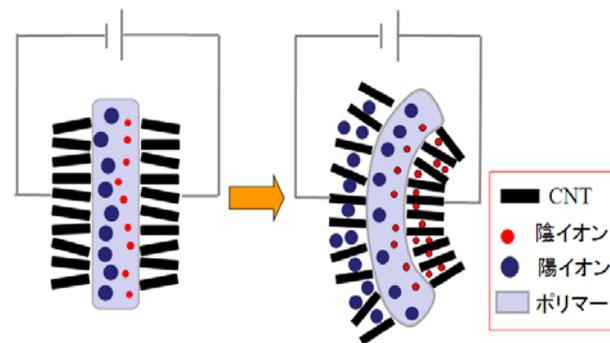


Fig.3 CNT アクチュエータの原理

3.2 イオン液体

イオン液体とは常温において液体で存在する塩のことをいう³⁾．本研究で必要となるイオン液体は低融点かつ陽イオンと陰イオンの体積差が大きいものである．これらを考慮してイオン液体を採用した．融点は 15°C で両イオ

ンの体積比は1:2.7である。

3.3 CNT アクチュエータの評価項目

宇宙空間で用いることを想定しているため、サイズや重さに加え、耐宇宙環境性やパネルを動かすときに重要になる変位量や応力評価を行う。CNT アクチュエータの動作は、電気2重層キャパシタの原理と同様であるため、電極に蓄えられる電荷量、消費電力の評価は、キャパシタの特性評価方法を参考とした。また、平面度維持に必要な力は制御完了までの時間6分、パネルサイズ50m×50m×0.05mのとき、ヒンジの摩擦などを考慮して0.12Nと見積もられている⁴⁾ため、本研究でもこれを参考にした。

4. CNT アクチュエータの作製

Fig.4に示すようにイオン液体を含ませた電解質フィルム(セパレータ)をCNT電極で挟み、加熱圧着を行い、3層構造のアクチュエータを作製した。

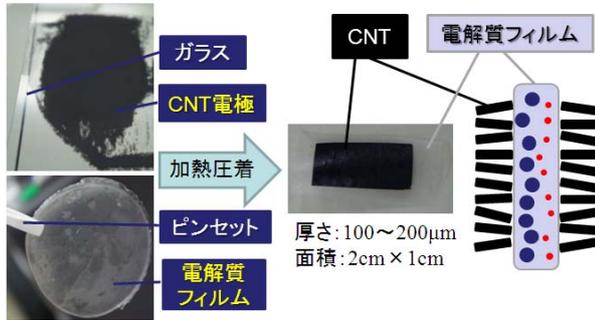


Fig.4 CNT アクチュエータの作製



Fig.5 変位測定方法

5. CNT アクチュエータの特性評価実験

5.1 変位量、電荷量、発生力に関する実験

5.1.1 実験方法

アクチュエータの両側を電極ではさみ電圧を印加するために必要な治具を製作し、変位量を測定した。測定方法はFig.5のように重力の影響がでないように治具と定規を置き、カメラで撮影し、変位量を計測した。20mmあるアクチュエータの長さの5mmを電極で挟み、残りの15mmを自由に動けるように設置した。アクチュエータに印加する電圧はイオン液体の分解の上限電圧を考慮して3Vとし、その時に流れる電流をFig.6の回路図に示すように非接触電流計で読み取る。読み取った電流値をデータロガーに記録する。また、測定した電流の時間積分からアクチュエータに供給した電荷量を算出した。

発生力はFig.7に示すセンサーを用いて、変位量と同様に15mmを自由に動けるように設置し、測定を行った。

また、印加電圧も同様に3Vとした。

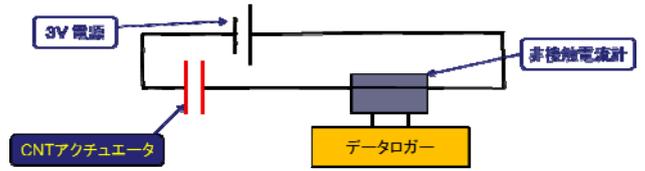


Fig.6 実験回路図



Fig.7 微小荷重測定センサーと発生力測定方法

5.1.2 測定結果

Fig.8~10に示すように、アクチュエータの厚さが大きくなると、変位量、電荷量、発生力も大きくなる傾向を示した。ここで、横軸のエラーバーはアクチュエータの長さ方向(20mmの方向)における厚さのバラつきを示す。

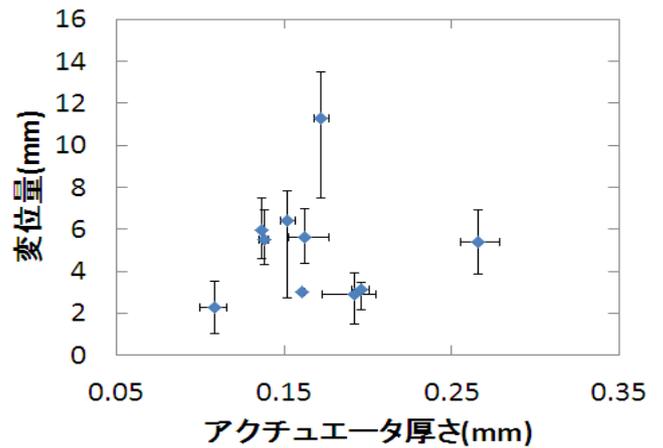


Fig.8 アクチュエータの厚さと変位量の関係

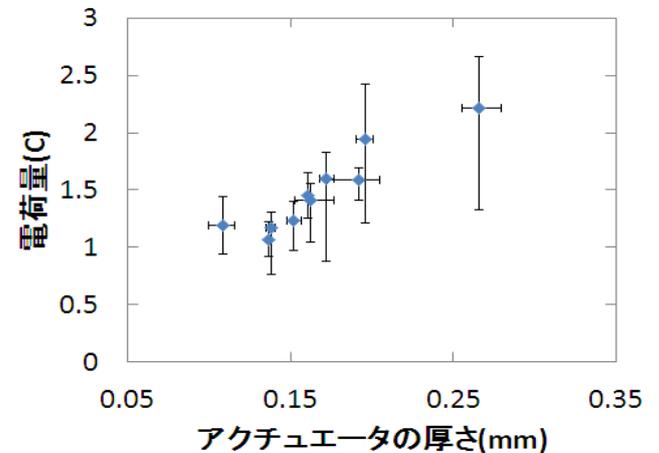


Fig.9 アクチュエータの厚さと電荷量の関係

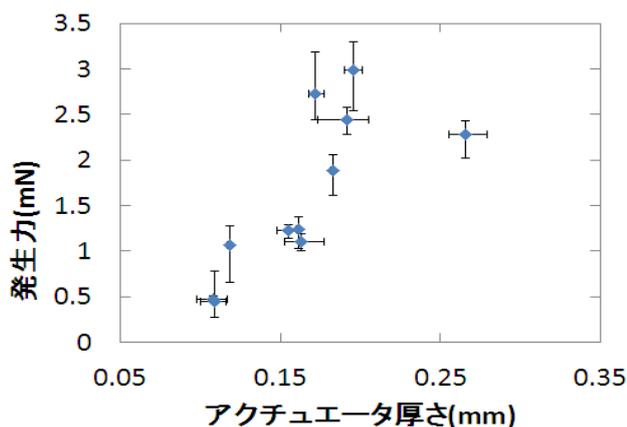


Fig.10 アクチュエータの厚さと発生力の関係

5.2 真空試験

5.2.1 実験装置

耐宇宙環境性を確かめる実験の1つとして真空試験を行った。真空試験に用いた実験装置を Fig.11 に示す。アクチュエータの変位量、発生力を測定する方法は前節と同様である。電源の極性を変え、-3V 電圧を印加し、その時の変位量や電荷量をマイナス表記で示す。また、これまでの試験においてアクチュエータが湿度の影響を受けることが明らかになってきたため、本試験においてドライエアを用いて大気圧環境に戻した。

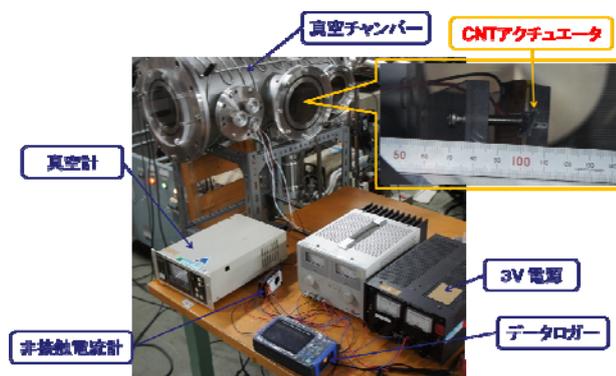


Fig.11 真空実験装置

5.2.2 実験結果

実験に使用したアクチュエータの仕様を表1に示す。チャンバー内の圧力は $2 \times 10^{-3}(\text{Pa}) \sim 5.5 \times 10^{-4}(\text{Pa})$ である。実験結果を Fig.12, 13 に示す。このアクチュエータの外気環境での発生力は平均2.7(mN)で真空環境のときは平均6.2(mN)となり発生力は2倍以上上昇した。ドライエアを入れて大気環境に戻しても、発生力はほぼ低下しなかったことから、CNT アクチュエータの発生力に大気中の湿度が大きく影響していることが考えられる。また、外気環境に戻すと発生力は平均3.0(mN)となり、真空試験前の元の水準に戻った。また、Fig.13の電荷量の試験結果を見ると、真空環境(乾燥環境)にすると電荷量が低下していることが確認できる。本研究での電荷量とは充電時に流れた電流値の積分であることから、電荷量の低下とは消費電力の低下も意味する。

表1 真空試験に用いたアクチュエータの仕様

CNT 電極1の厚さ(μm)	76.3(標準偏差8.2)
CNT 電極1の面積(mm ²)	20.4×10.4
CNT 電極2の厚さ(μm)	97(標準偏差7.8)
CNT 電極2の面積(mm ²)	20.3×10.3
セパレータの厚さ(μm)	41.3(標準偏差0.5)
セパレータの面積(mm ²)	22×12
アクチュエータの厚さ(μm)	196(標準偏差4.5)
アクチュエータの作製から試験までの日数	3ヶ月

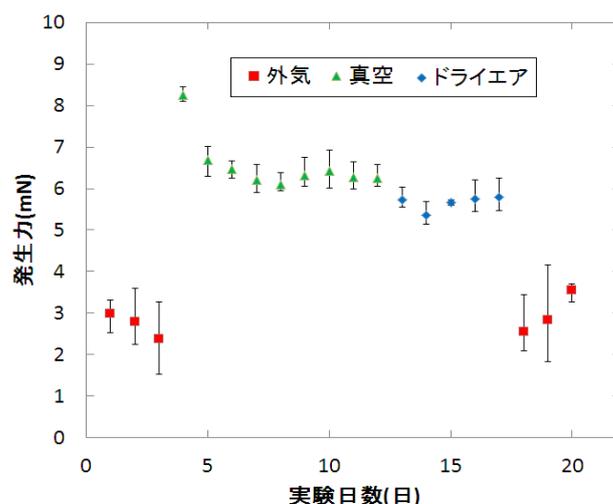


Fig.12 真空実験日数と最大発生力との関係

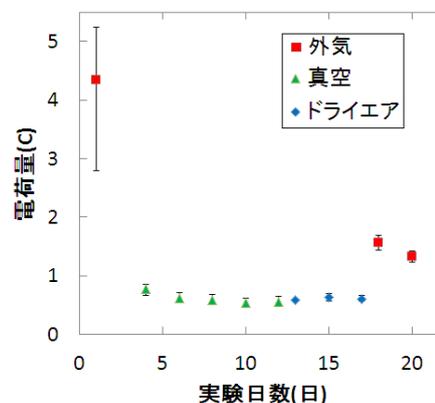


Fig.13 真空実験日数と電荷量との関係

Fig.14にはCNTアクチュエータの時間と電流値の関係を示した。これは真空試験時のものであるが、大気(外気)環境でも同じような変化になる。ここで電圧印加後、すぐに電流値は0に近づくということが言える。一方、Fig.15のように電力の供給を0にしてもしばらくの間、発生力は維持される。Fig.15に示した試験では10分間3Vを印加したのち、電力の供給を0にし、10分間放置しても最大発生力の約90%を維持した。

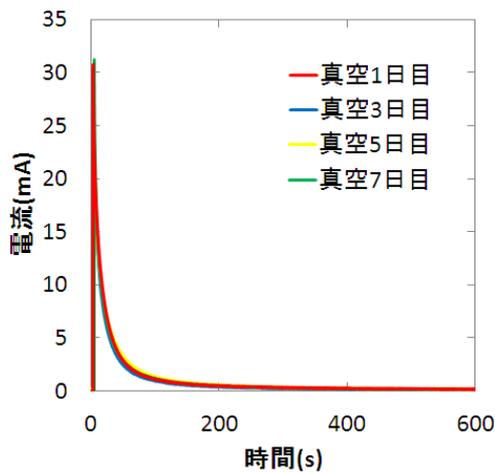


Fig.14 CNT アクチュエータの電流値

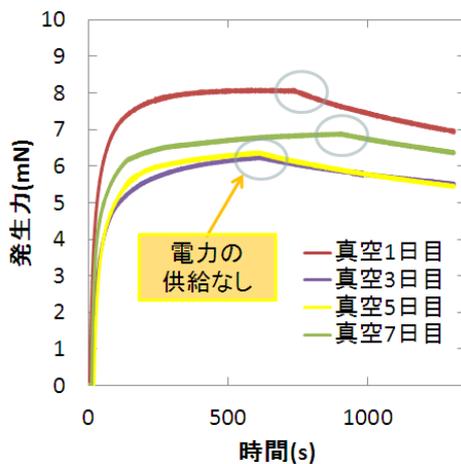


Fig.15 電力供給の停止と発生力

6. 考察

厚さと性能の関係については、アクチュエータの厚さが大きくなると、内部に多くのイオンが存在し、多くの電荷量を蓄えることが可能となり、それによって大きな変位量、発生力を得られることが可能になっていると考えられる。

真空環境における発生力の増加に関しては真空（乾燥）環境において CNT 電極内部の水分量が減るため CNT 電極のヤング率の増加が考えられる。これによって、アクチュエータの発生力が増加したのではないかと予測している。これは式(1)の CNT アクチュエータの発生力の理論式⁹⁾からも説明ができる。また、電荷量に関しては外気環境と乾燥環境との間の誘電率の差が影響していると考えた。イオン液体の比誘電率は 2.5 であるのに対して水の比誘電率は 80 と両者の間に大きな差がある。これによって湿度の影響を受けるような外気環境では誘電率が大きくなり、式(2)によって、C が大きくなり、 $Q=CV$ の式から電荷量 Q が大きくなるためと考える。

$$F = \frac{E_c \cdot b \cdot \epsilon \cdot h_c (h_c + h_s)}{l} \quad \dots (1)$$

$$C = \int \frac{\epsilon}{4\pi\delta} dS \quad \dots (2)$$

ここで、

E_c : CNT 電極のヤング率, h_c : CNT 電極の厚み,

h_s : セパレータの厚み,

b, ϵ, l : アクチュエータの幅, ひずみ, 長さ

C : 静電容量, ϵ : 誘電率, δ : 電気 2 重層の厚さ,

S : 電極界面

7. まとめ

本稿では SPS について簡単に説明し、SPS の熱応力による変形を補正するための CNT アクチュエータの原理や構造、基礎実験結果を示した。その中で、アクチュエータの厚さの変化によって、変位量、電荷量、発生応力が大きく変化することが、実験的に分かった。また、これには内部に蓄えられるイオンの量が影響していることが考えられた。さらに、真空試験においては真空環境で消費電力の低下と発生力の増加が確認できた。この結果から CNT アクチュエータは真空環境において非常に有用性が高いアクチュエータであると考えられる。

また、3V 印加後にしばらく経過すると消費電力がほとんど 0 になることや、電力の供給をストップしても発生力を維持する点などは、SMA やモーターにはほとんど見られない CNT アクチュエータの利点であると考えている。本研究での試算において、CNT アクチュエータと SMA の消費電力の比較では、同じ大きさの SPS を CNT アクチュエータでは SMA の 0.12% の電力で平面度維持可能であるという結果が得られた。

今後の課題として更なる耐宇宙環境試験の実施や再現性、駆動寿命などの検証などが考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構, 平成 17 年度 太陽光発電利用促進技術調査 成果報告書, pp100, (2006).
- 2) 安積欣志, 福島孝典, 他 6 名, “カーボンナノチューブとイオン液体からなる高分子アクチュエータの応答性能” 日本機械学会第 14 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2006).
- 3) 遠藤守信, 飯島澄男: ナノカーボンハンドブック, 株式会社エヌ・ティー・エス, pp463-468, (2007).
- 4) 山口哲史, 小田原修, 和田裕之: 形状記憶合金を用いたスマートアクチュエータによるパネル展開と平面度維持の基礎実験, 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 修士学位論文, pp26, (2010).
- 5) G Alici, N. N. Huynh : Sensors and Actuators A, 132, 616, (2006).