

大型発電パネル制御用カーボンナノチューブアクチュエータの 基本特性評価[†]

Characteristics evaluation of Carbon Nanotube Actuators for realizing the Solar Power Satellite

山 神 達 也^{*1‡}・田 中 孝 治^{*2}・藤 本 健 晋^{*3}
Tatsuya YAMAGAMI, Koji TANAKA and Kensin FUJIMOTO

現在宇宙太陽光発電衛星(SSPS)の実現可能性が高いモデルとして、発電電一体パネル型が検討されている。これは一方の面にソーラーパネルを設置し、もう一方の面に送電用のアンテナアレーを搭載した多数のパネルを組み合わせたモデルである。SSPSは静止衛星軌道上で運用されるため、衛星本体と太陽の位置関係は周期的に変化する。これに伴い衛星全体の熱変形も周期的に生じることとなる。マイクロ波による送電精度は衛星全体の平坦度に影響を受けるため、高効率な電力利用を実現するためには熱変形の制御は重要な課題となる。本論文では、衛星全体の平坦度の保持のためのパネル間の角度制御を目的とした、カーボンナノチューブを用いた高分子アクチュエータに関する研究について論じる。

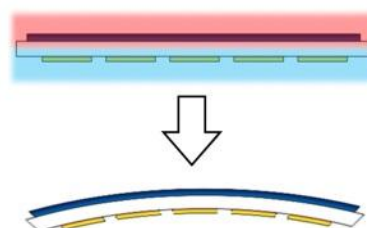
Currently, the model of Space Solar Power Systems (SSPS) constructed from power generation and transmission panels is considered feasible models. This model made from a lot of panel units which have solar panels and microwave antenna array with different side. SSPS orbits on geostationary satellite orbit, so positional relation of sun and satellite will change cyclically. And it cause satellite's cyclic thermal deformation. Controlling deformation is important problem to realize efficient power transmission, because flatness of satellites influence the power transmission efficiency of microwaves. We describe experimental result of carbon nanotube actuators (CNA) aimed to control angular among the panel units for keeping flatness of satellite.

Keywords : Carbon nanotube actuator, Control of flatness

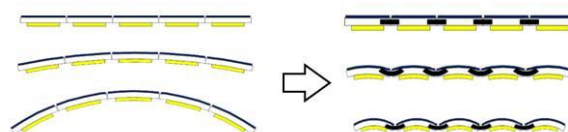
1. 研究背景

SPSは宇宙空間で太陽電池を用いて大規模な発電を行い、その電力をマイクロ波やレーザー等によって無線で地球に送る衛星である¹⁾。SPSは天候や昼夜の影響を受けないので、安定して高効率な再生可能エネルギー利用が可能となる。一方でSPS実現へ向けては無線送電の高効率化、輸送コスト、展開組立、デブリへの対策等の課題が多く存在している。その一つとして、現在最も実現可能性が高いとされる発電電一体パネル型のSPSの周期的な熱変形がある。軌道上を周回する衛星の日照条件は周期的に変化し、太陽を向く発電面とその裏側の送電面との温度

分布も変化するので膨張・収縮が周期的に起こり、衛星全体が変形する(第1図)。この膨張収縮によってアンテナ面の平坦度が下がることでマイクロ波ビームの精度、すなわち送電効率が低下してしまう。この問題を解決するために、パネルユニット間にアクチュエータを分散配置し、制御することが検討されている(第2図)。



第1図 SSPSの熱変形



第2図 アクチュエータによる平坦度維持制御

この制御用アクチュエータとしてカーボンナノチューブを用いた高分子アクチュエータ²⁾(以下CNA)の試作、評

[†] 第2回宇宙太陽発電シンポジウム, 2016年12月19-20日, 東京にて発表

[‡] Corresponding author: Tatsuya YAMAGAMI.
E-mail:yamagami.tatsuya@ac.jaxa.jp

^{*1} 法政大学

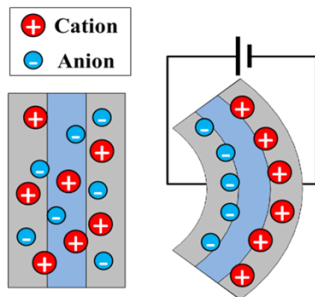
〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2,
Hosei University, 3-7-2, Kajinocho, Koganei-shi, Tokyo 184-8584, Japan

^{*2} ISAS/JAXA 相模原キャンパス
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1,
Yoshinodai, Chuo-ku Sagami-hara-shi, Kanagawa, 252-5210, Japan

^{*3} 静岡大学
〒432-8011 静岡県浜松市中区城北3丁目5-1, Shizuoka University
3-5-1, Johoku, Naka-ku Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8011, Japan
©SSPSS

価を行った。

CNA は 2 つの電極層がセパレータ層を挟み込む三層構造をとる。電極層は CNT, イオン液体, ポリマーからなり, セパレータ層はイオン液体, ポリマーからなる。この様に CNT やイオン液体をポリマーでバインドすることによってゲル状態のフィルムとなり, 空中での駆動が可能となる。イオン液体とは常温で液体となるイオン性物質のことをいう。電圧の印加により各層に含まれるイオン液体のカチオンとアニオンのそれぞれが負極, 正極に移動し CNA 内部で電気二重層が生じる。CNA に用いるイオン液体のカチオンとアニオン間に体積差があるので, イオンの偏りは電極の膨張収縮へと現れ, CNA が屈曲変形する(第 3 図)。

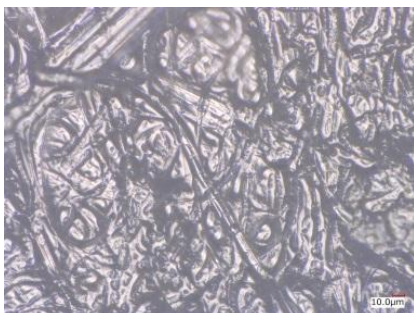


第 3 図 CNA 概略図

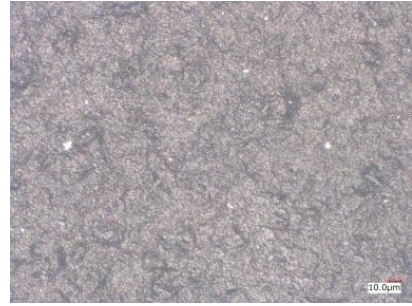
CNA の特徴として $100\sim 150\ \mu\text{m}$ 程度の薄膜形状であり, $\sim 0.2\ \text{g}/\text{cm}^3$ 程の低密度という事が挙げられる。また, CNA の変形のメカニズムは化学変化によるものではなく, イオンの移動による体積効果であるため, 繰り返し使用でき, 理論的に長寿命なアクチュエータとなる。さらにイオンの移動によって電気二重層を形成することからキャパシタと同様にエネルギーの貯蓄が可能であり, 電力の回生利用が期待される。以上のような利点から SPS のような宇宙大型構造物の形状制御用アクチュエータとして CNA の使用を検討した。

2. カーボンナノチューブ電極の試作

CNA の性能向上を目的として, 電極層の製法の改善を行った。先行研究³⁾では, 電極層を製作する際, カーボンナノチューブを他の原料の混合を行った後に 2 時間の超音波分散を行っていた。本研究では他の原料と混合する前に, カーボンナノチューブを水中で 24 時間分散を行い, 電極層を試作した。先行研究で試作された CNA と本研究で試作した CNA の表面を光学顕微鏡で観察したものを第 4, 5 図に示す。



第 4 図 24 時間水分散工程なし電極表面



第 5 図 24 時間水分散工程あり電極表面

第 4, 5 図から, 事前の分散工程によって表面の凹凸が小さくなっていることがわかる。また, 電極の密度も先行研究でのものでは平均 $0.56\ \text{mg}/\text{mm}^3$ 本研究のものでは平均 $1.50\ \text{mg}/\text{mm}^3$ となった。このことから, 水中での分散工程を経ることによってカーボンナノチューブの分散が進み, より均一かつ密に CNA 中に配置されたと考えられる。

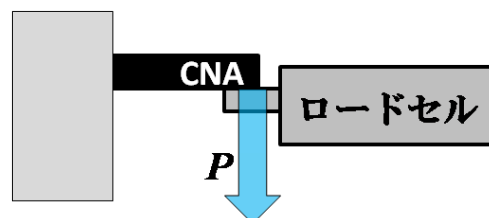
3. CNA の特性評価

3.1 発生力評価 試作した CNA (第 6 図) の発生力の計測試験を行った。

方法としては, 第 7 図のように電極でクランプした CNA の先端をロードセルに接触させ, 電圧を印加し, 先端発生力を計測する。

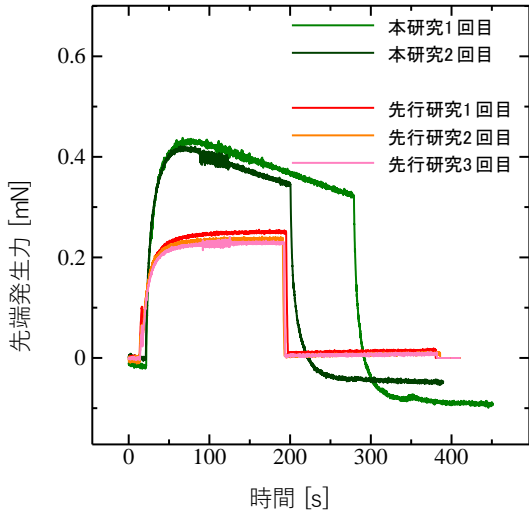


第 6 図 試作 CNA



第 7 図 CNA 発生力試験概略図

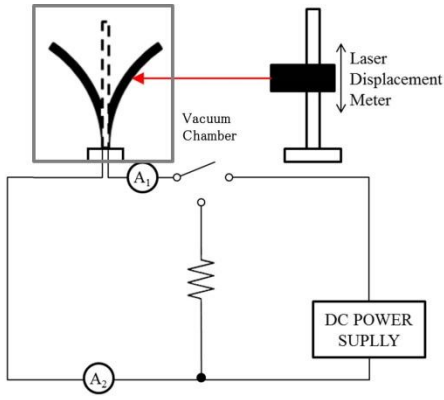
本実験はすべて真空環境下で行った。これは宇宙環境を模擬するとともに, CNA が大気中の水分を吸湿し, イオン液体のアニオン, カチオンの移動が阻害され, 再現性を失うことを防ぐためである⁴⁾先行研究および本研究での発生力試験の結果を第 8 図に示す。このときの印加電圧は $1.5\ \text{V}$ であり, 突出長さは $20\ \text{mm}$ とした。



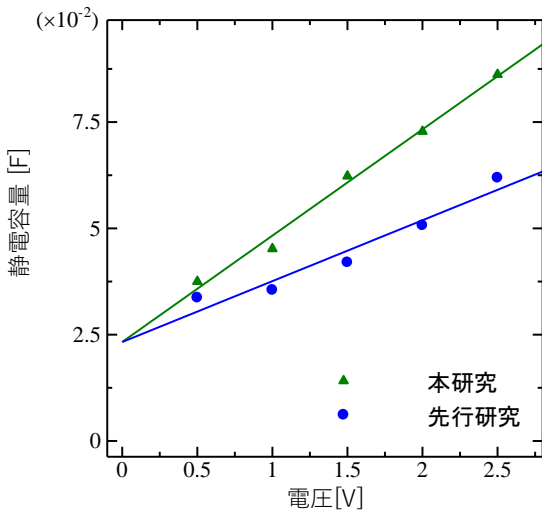
第8図 発生力試験結果

先行研究でのCNAの最大発生力は平均約0.25 mNであるのに対し本研究のCNAの最大発生力は平均約0.43 mNとなり、CNAの発生力が向上したことが示された。

3.2 静電容量評価 CNAの駆動時の流入電流、流出電流、印加電圧を計測することによって、CNAのキャパシタとしての静電容量を算出した。形状計測の実験構成を第9図に示す。先行研究および本研究での静電容量試験の結果を第10図に示す。



第9図 静電容量試験概略図

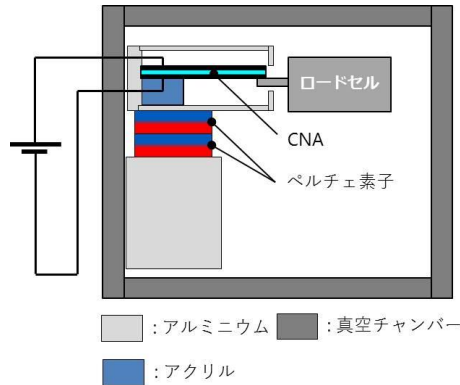


第10図 静電容量試験結果

先行研究の静電容量に対し、本研究の静電容量は平均で33.9%向上した。

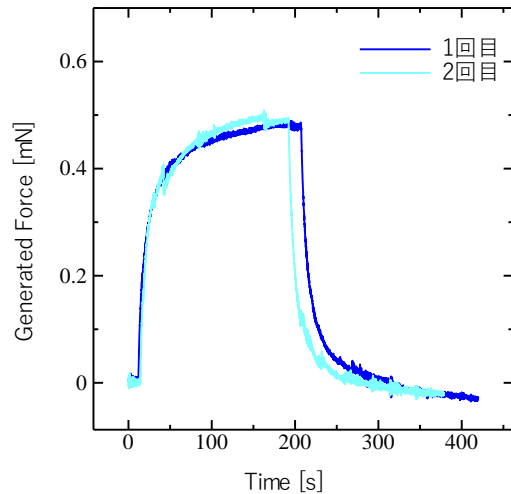
4. 耐宇宙環境評価

4.1 低温環境での発生力評価 原料となるイオン液体の融点以下での低温環境でCNAの性能に変化が生じるか確認するため、CNAを冷却した状態で発生力の測定を行った。計測の実験構成を第11図に示す。



第11図 低温状況での発生力試験概略図

装置の冷却にはペルチェ素子を用い、CNAを囲む低温のアルミニウムによる輻射冷却によって真空でのCNAの冷却を行った。ペルチェ素子は2段重ねて使用し8.0 Vの電圧を印加した。この時CNAの表面温度は約-5 °Cまで低下した。低温環境で、1.5 V電圧を印加した時の発生力測定の結果を第12図に示す。

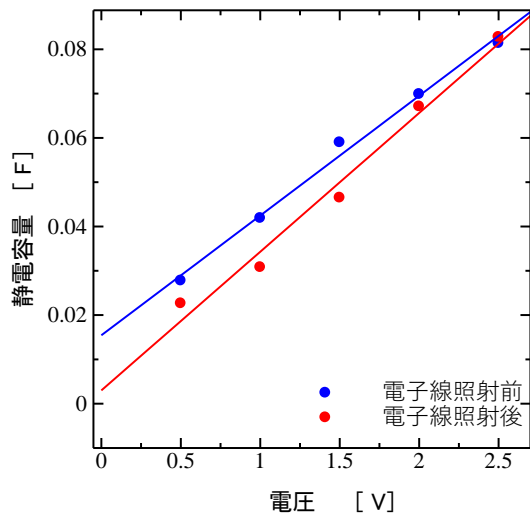


第12図 低温状況での発生力試験結果

低温環境下での最大発生力は平均0.50 mNとなり、3.1章で述べた常温環境での平均最大発生力0.43 mNよりも発生力が向上していることが示された。

4.2 電子線照射前後の性能比較 3.2章に述べたような静電容量の計測を電子線照射の前後で行い、電子線がCNAの性能に影響を及ぼすかを確認した。

CNAへの総ドーズ量は20 kradとした。電子線照射前後での静電容量の測定結果を第13図に示す



第13図 電子線照射前後での静電容量の比較

電子線照射前の静電容量に対して、電子線照射後の静電容量は13.7%低下した。ただし、同一のCNAの静電容量を複数回測定した時の平均の誤差が約10%であることを加味すれば、電子線がCNAの静電容量に対して著しい影響を及ぼすことはないと考えられる。

5. 結論

本研究では、先行研究でのCNAの製法に対し、混合前の24時間にわたる水中分散工程を加えることでCNAの

性能が向上を図った。また試作したCNAの低温状況下での発生力試験、電子線照射前後での静電容量を測定することによって宇宙環境適応性を評価した。

本研究で製作したCNAは、先行研究で試作評価されたSPSの形状制御が可能とされたものと比較しより良い結果が取れていることから本実験でのCNAもまたSPSの制御が可能であるといえる。

宇宙環境適応性に関しては、低温真空環境での発生力試験の結果は、CNAが含有するイオン液体の融点以下でも利用可能だという事を発生力からも裏付けるものとなった。電子線照射前後での性能比較の結果もまた、電子線がCNAの性能を著しく劣化させることはないことを示すものとなった。

以上よりSPSの形状制御用アクチュエータとしてのCNAの利用の可能性は充分にあるということが言える。

参考文献

- 1) 中野不二男: クリーンなエネルギーをつくる太陽光発電衛星, 一柳みどり編集室, 東京(2009).
- 2) 樋口俊郎, 大岡昌博: アクチュエータ研究開発の最前線, エヌ・ティー・エス, 東京(2011), pp. 71-79.
- 3) 久米孝志, 山極芳樹, 田中孝治: 宇宙大型構造物の形状制御・維持を目的としたカーボンナノチューブアクチュエータの宇宙適応性と変形挙動の評価 静岡大学大学院修士論文 (2016).
- 4) 渡邊正義, 片岡敏明, 瀧上壽雄, 松本一, 早瀬修二, 村井伸次, 佐藤貴哉, 大野弘幸: イオン性液体の機能創成と応用, エヌ・ティー・エス, 東京 (2004), pp. 70-72.

(2015. 12. 25 受付)