

Basic study of carbon nanotube actuators for shape controlling of large-scale space structure

Tatsuya Yamagami¹, Kazuyoshi Arai¹, Koji Tanaka²

1 Hosei University, 2 ISAS/JAXA

Abstract:

Solar Power Satellite (SPS) is studying as a new energy source, operating on the geostationary orbit. It is expected that SPS can generate electricity several times more efficiently than the solar power system on the ground, because SPS can provide energy unaffected by weather conditions regardless of day and night. The tethered SPS studied in Japan is made from a lot of power generation and transmission panel units which have solar power generation parts and microwave energy transmission parts. This model has a thermal deformation problem. As incident solar energy to the SPS will be varied during orbital motion, temperature difference between power generating side and power transmitting side of the power generation and energy transmission panel will change cyclically. Temperature difference will cause a deformation of the large-scale panel and decreasing the efficiency of both power generation and energy transmission. In our research, actuators mount between each panel units to control angular among them for keeping the flatness of the large-scale panel of the SPS. The purpose of this study is to develop carbon nanotube actuators (CNA) for SPS. We study CNA's basic characteristics and effect of space simulated environment to use CNA in space. In this report we describe relationships of actuator's generating force, capacitance, and temperature in vacuum environment.

大型宇宙構造物形状制御用カーボンナノチューブアクチュエータに関する基礎研究

山神達也¹, 新井和吉¹, 田中孝治²

1 法政大学, 2 ISAS/JAXA

1. 序論

太陽発電衛星(SPS: Solar Power Satellite)は宇宙空間で太陽電池による大規模な発電を行ない, その電力をマイクロ波やレーザーを用いて地球上へ無線送電するというコンセプトを持つ衛星である. SPSは宇宙空間で太陽光発電を行うので, 地上のように発電量が天候に左右されず, 昼夜の影響を受けない. よってマイクロ波無線電力伝送の効率が約50%であっても平均的には地上での太陽光発電の数倍ものエネルギー生成が可能となるとされており, 次世代の発電システムとして実現が期待されている.¹⁾

現在, 実現可能性の高さを重視したSPSのモデルとして太陽電池と送電用アンテナを一体としたパネルと, 姿勢制御用カウンターウエイトとしての役割を持つバス部をテザーによって繋ぐモデルが提案されている. USEFによるテザー型SPSの構想図を図1に示す.

2006年度のUSEFによる構想では, パネルの面積は2.4 km×2.6 kmにも及ぶ²⁾. 静止衛星軌道上を周回するSPSでは, 太陽光を受ける発電面とその裏側の送電面のために周期的な温度差が生じる. その温度差により発電面は膨張し, 送電面は収縮するので衛星全体が湾曲することが懸念される. 衛星全体の湾曲に伴いアンテナ面も湾曲することで, マイクロ波ビームの形成に悪影響を及ぼし, 送電効率が低下する. 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, それらを制御することで全体の变形を最小化し, 平坦度を保持するという方法が検討されている. その方法の模式図を図2に示す.

テザー型SPSの建設には多数のパネルユニットが連結されることになるため, 制御用のアクチュエータも多数設置する必要があるため, アクチュエータの重量が大きな問題となる. またSPSは宇宙空間で, 発電所としての長期の運用を目指していることから, アクチュエータにも長期運用に耐えうるロバスト性, 省電力, 耐宇宙環境性などが要求される. この要求を満たすアクチュエータとしてカーボンナノチューブ(以下CNT)を用いたアクチュエータの採用を検討している.

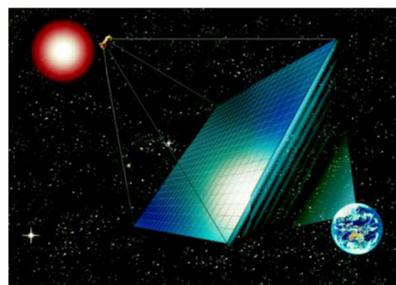


図1 テザー型SPS構想図 (USEF)

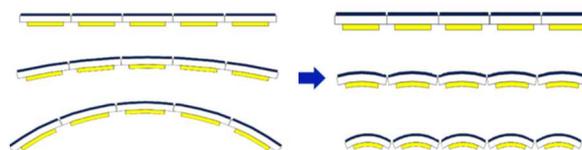


図2 アクチュエータによるSPSの平坦度制御

2. CNT アクチュエータ

カーボンナノチューブアクチュエータ(以下CNA)は、イオン液体を含むセパレータをCNT電極で挟むバイモルフ構造を形成した高分子アクチュエータである。³⁾ 本研究での対象とするCNAは、ポリマーを基材としてイオン液体⁴⁾、CNTを分散させた電極層とCNTを含まず、イオン液体のみを分散させたセパレータ層からなる。その構造と動作原理の模式図を図3に示す。CNAの内部では正のイオン(カチオン)と負のイオン(アニオン)が分散しており、電圧を印加することによりそれらが負極層側、正極層側にそれぞれ偏り、電気二重層を形成する。カチオン、アニオンの体積差によって正極、負極で体積差が生じ、CNA全体が屈曲変形する。イオン液体は揮発性が非常に低く⁴⁾、真空中においてもCNAは駆動が可能である。しかしCNAを宇宙空間で利用するには温度環境による影響を評価する必要がある。既往の研究において、低温真空環境下でのCNAの変形挙動に関する評価が行われているが⁵⁾、宇宙環境を想定した環境での、その他の特性に関する評価は行われていない。そこで本研究では、CNAの屈曲時の発生力の温度依存性を検証するため、低温真空環境及び高温真空環境下で発生力の計測を行った。

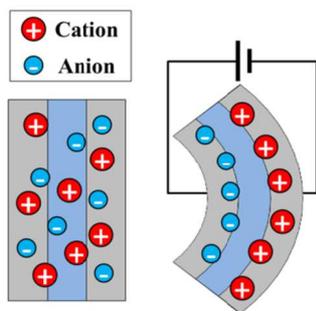


図3 CNAの構造と動作原理

3. 実験構成

発生力はひずみゲージ式ロードセルを用いて計測を行う。電圧印加時にCNAに流入する電流量を微小電流計によって計測し、その値を時間積分することで屈曲の際CNAに蓄えられた電荷量を求める。試験は真空チャンバーを用い0.5 Pa以下の状態で行い、ペルチェ素子によってCNAを囲むアルミニウム製の箱を冷却・加熱し、その輻射熱によってCNAの温度を変化させた。CNAの温度測定は赤外線カメラを用いて行う。この時、熱電対を赤外線カメラの視野内に取り付け温度補償を行う。試験系の概略図を図4に示す。

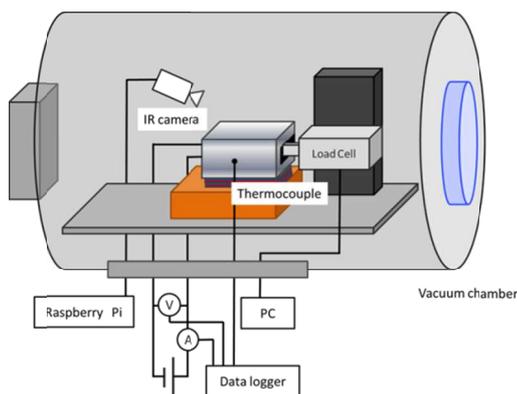


図4 CNA発生力温度依存性試験装置概略

4. 結果・考察

4.1 低温真空環境

CNAが0°C以下まで冷却された状態で、電圧の印加を開始し、約20分後に印加を停止し、その後10分放電を行った。このときCNAに印加する電圧の値は1.5V、2.0V、2.5Vの3パターンとした。冷却を行わず常温状態でも同様に発生力を計測し、その結果を比較する。低温環境での結果を図5、常温環境での結果を図6に示す。また低温、常温環境それぞれの印加電圧ごとの最大発生力と発生までの時間を表1に示す。

CNA が低温環境にある場合では、常温環境と比べ、最大発生力が向上し、力が最大になるまでの時間は遅くなるという結果が示された。この時 CNA に蓄えられる電荷の低温と常温での比較を行った。代表的な例としてそれぞれ 2.0V を印加した際の流入電流のグラフを図 7 に示す。この結果をもとに得られた電荷量は、低温で 0.16 [C]、常温で 0.25 [C]であった。

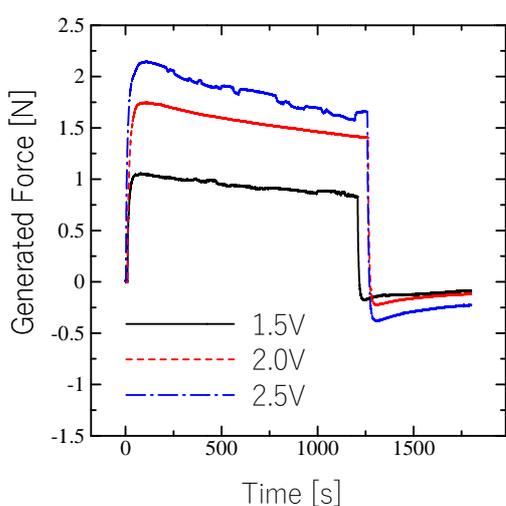


図 5 低温真空環境での CNA 発生力

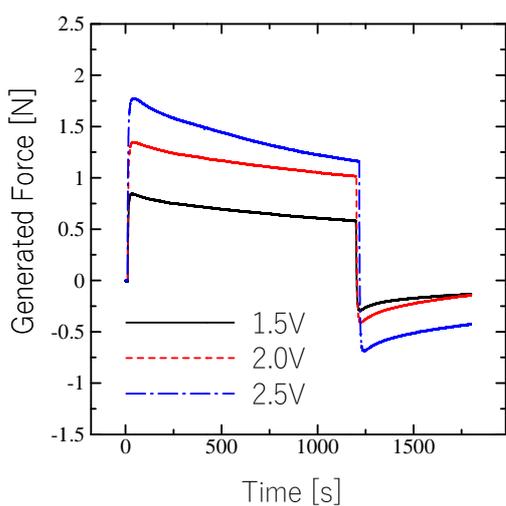


図 6 常温真空環境での CNA 発生力

表 1 低温および常温環境における電圧毎の CNA 最大発生力と最大値発生までの時間

		最大発生力 [mN]	発生時 [s]
低温	1.5V	1.06	68.3
	2.0V	1.75	94.4
	2.5V	2.15	102.3
常温	1.5V	0.85	21.7
	2.0V	1.35	25.2
	2.5V	1.77	31.3

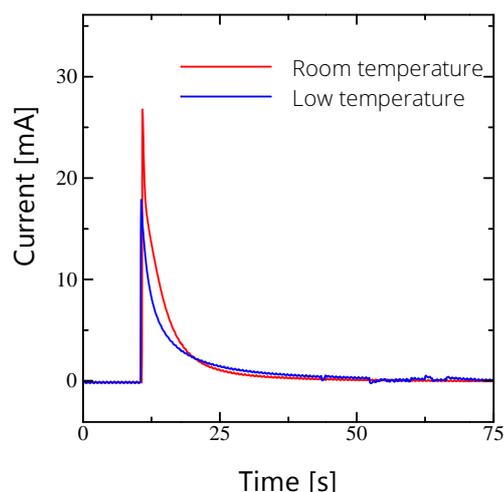


図 7 低温と常温での CNA 電荷量比較

4.2 高温環境試験

CNA が 80°C以上まで加熱された状態で、電圧の印加を開始し、約 10 分後に印加を停止し、その後 10 分放電を行った。このとき CNA に印加する電圧の値は 2.0V とした。加熱を行わず常温状態でも同様に発生力を計測し、その結果を比較した。その結果を図 8 に示す。高温環境では常温環境と比較すると、著しく発生力が低下し、放電後の挙動も異なった。この時 CNA に蓄えられる電荷の高温と常温での比較を行った。流入電流のグラフを図 9 に示す。この結果をもとに得られた電荷量は、高温で 0.58[C]、常温で 0.21 [C]であった。

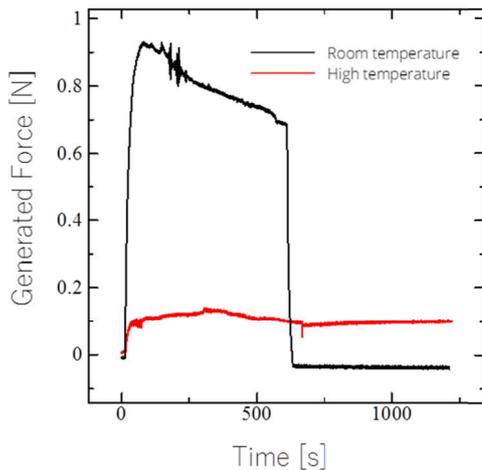


図8 高温と常温でのCNA発生力の比較

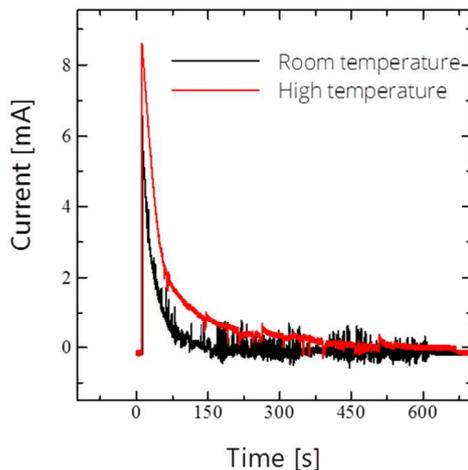


図9 高温と常温でのCNA電荷量比較

4.3 考察

上記の試験結果を通して、温度と最大発生力は負の相関関係にある傾向が示された。対して温度と蓄えられる電荷量は正の相関関係にある傾向が示された。つまり温度の上昇に伴い、蓄えられる電荷量が増加し、電気二重層がより強く形成されるにも関わらず、発生力は低下するという結果となっている。この事から温度変化に伴う剛性の変化がCNAの発生力の大部分を担っており、内部のイオン分布よる変形量の大きさの影響は小さいという事が示された。そのためCNAの発生力を正

確に予測し、制御するためには、CNAの剛性の温度依存性を評価することが課題となる。

5. 結論

SPSのような宇宙大型構造物の形状制御を目的とし、カーボンナノチューブを用いた高分子アクチュエータの真空環境下での発生力の温度依存性を評価した。温度と最大発生力は負の相関関係にあり、特に高温環境では著しく発生力が低下するため、宇宙利用のためには何らかの対策が必要となる。

今後の展望としては、CNAの剛性と発生力の関係を明らかにするため、CNAの剛性の温度依存性を調べるとともに、より細かく温度を制御し、発生力のデータを取り、発生力と温度の関係式を明らかにしてゆく。

参考文献

- 1) 佐々木進：NHKサイエンスZERO 宇宙太陽光発電に挑む。NHK出版，2011。
- 2) 無人宇宙実験システム研究開発機構：平成18年度 太陽光発電利用促進技術調査成果報告書，2006。
- 3) 樋口敏郎,大岡昌博:アクチュエータ研究開発の最前線, ISBN978-4-86043-386-4, 2011。
- 4) 吉田 隆：イオン性液体の機能創成と応用, ISBN4-86043-046-8, 2004。
- 5) 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。