

## 原子状酸素照射によるカーボンナノチューブ電界放出カソードへの影響と対策評価

○島田温子, 井本伸 (静大・院), 湯浅直樹 (静大・学), 大川恭志, 松本康司 (JAXA),  
田川雅人 (神大), 山極芳樹 (静大)

Keyword : Field Emission Cathode, Carbon Nanotube, Atomic Oxygen

## 1. 序論

近年, 低軌道上に存在するスペースデブリが問題となっている。今後, 能動的なデブリ除去を実施しない限り, 新たな衛星打上等が無い場合でもデブリの数は増加することが予測されている<sup>1)</sup>。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では, スペースデブリ除去技術として導電性テザー (EDT) システム (図 1) の適用が研究されている。EDT システムとは, テザーと呼ばれる導電性の紐が地球磁場を横切ることにより発生する誘導起電力によって電流が生じ, 地球磁場と干渉させることによりローレンツ力を得て推進する推進システムである。EDT システムの電子放出源としては, 作動ガスが不要である点や, 低電力動作が可能である点から電界放出カソード (FEC) が有望であり, 機械的強度に優れる点や, 高アスペクト比を持つ点からカーボンナノチューブ (CNT) 型を採用している。

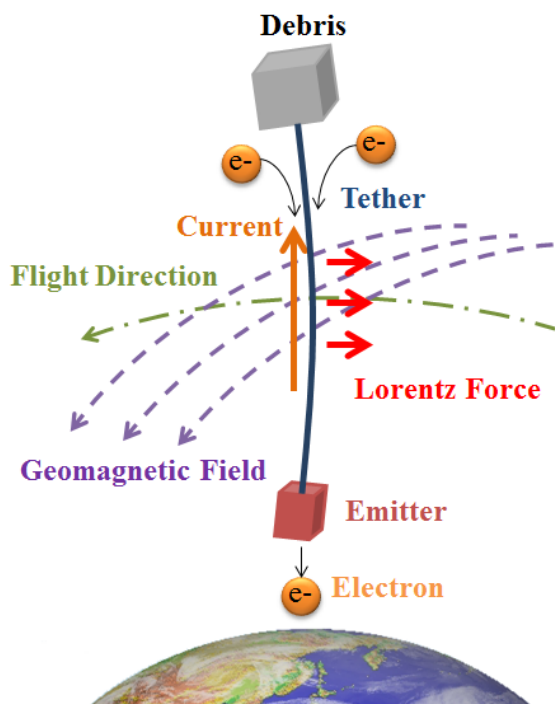


図 1 導電性テザー (EDT) システム

デブリ除去ミッションは高度約 600~1000 km 間で行われる。EDT システムをスペースデブリ除去システムとして用いる場合, LEO 環境は高密度原子状酸素 (AO) 環境であるため (図 2)<sup>2)</sup>, AO の衝突によって FEC の電子放出性能が劣化する懸念がある。これまでの研究で, 酸素分子ガス中における FEC の性能評価は行われており, 酸素分子ガス環境下において FEC の性能が劣化することが示されている<sup>3)</sup>。他の研究では, 単層 CNT からの電界放出において酸素環境では水素, 水蒸気やアルゴンなどのガスより性能が劣ることが示されている<sup>4)</sup>。しかし, AO 環境での評価は行われておらず, FEC 性能への AO による影響を明らかにすることが求められている。

また, デブリ除去用に EDT システムを運用する場合には長期間の運用が想定されている。JAXA で行われている EDT を用いたデブリ除去衛星の高度変化の時間経過シミュレーション<sup>5)</sup>によれば, デブリ除去に要する EDT システムの作動時間は約 6,000 時間である。このシミュレーションは長さ 10 km の EDT を使用し, 1,400 kg のロケットの一部を軌道傾斜角 83 度の軌道で高度 1,000 km からデブリを除去することを条件としている。このとき, デブリ除去衛星への AO 曝露量は約  $1 \times 10^{20} / \text{cm}^2$  となる。

本試験では, 実際のミッションを想定した AO 環境に対する FEC の性能変化を地上試験によって評価することを目的とした。そこで, 軌道運動方向に対するカソード設置方向の影響およびその時に生じる AO 衝突速度による影響を評価した。また, AO 曝露後の FEC の耐久性の評価を行った。さらに, AO による FEC の性能劣化低減を目的とし, CNT への耐 AO 材料の蒸着を施した結果について述べる。

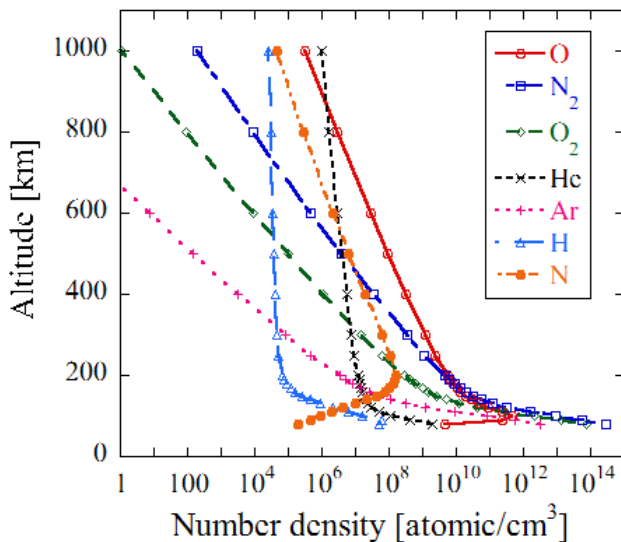


図 2 大気組成 (太陽活動極大期, 昼間) <sup>2)</sup>

## 2. 電界放出カソード (FEC)

電界放出カソードは、電界放出を利用したカソードである。電界放出とは、試料表面に強電場をかけることで、試料表面から電子を放出させる現象である。原理図を図 3 に示す。試料表面に強い電界が加えられると電子に対するポテンシャル障壁の厚みが非常に薄くなる。電子は波動の性質を持っているため、このようなポテンシャル障壁の中で減衰はするが電子の波は浸透する。つまり、ポテンシャル障壁の他方に、電子の波の振幅があるということになり、電子は見かけ上ポテンシャル障壁を通り抜けることができる。これをトンネル効果という。この現象によって電子放出が行われる。電界放出には、表面電界として  $10^9$  V/m ほどの高電界が必要である。電界放出によって得られる電流密度は次式で表される。

$$J = \frac{e^3 F^2}{8\pi h \phi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m_e}}{3heF}\phi^{3/2}\right) \quad (2.1)$$

上式を Fowler-Nordheim の式といい、電界放出の基本式である。ここで、 $e$  は素電荷、 $h$  はプランク定数、 $m_e$  は電子質量、 $\phi$  は仕事関数、 $F$  は先端の表面電界である。このとき、 $F$  は

$$F = \beta E \quad (2.2)$$

と表される。このとき  $\beta$  は電界増倍係数、 $E$  は電極間電界である。また、エミッタ先端が放物面で、陽極が無限平板である場合、先端に生じる電界  $F$  は次式で表される。

$$F = \frac{2V}{r_t \ln(2d/r_t)} \quad (2.3)$$

このとき、 $r_t$  は先端の曲率半径、 $d$  は電極間距離、 $V$  は電極間電圧である。上式より、曲率半径が小さいエミッタの方が電界放出に必要な電界を得やすいことがわかる。

FEC は他のカソードに対して、作動ガスが不要、簡易な構造、低電力での動作が可能というメリットを持つ。一方で、空間電荷制限を受けてしまい、高圧電源が必要というデメリットを持つが、簡素化が求められる EDT システムの電子源としてはメリットの方が大きいと考えられる。

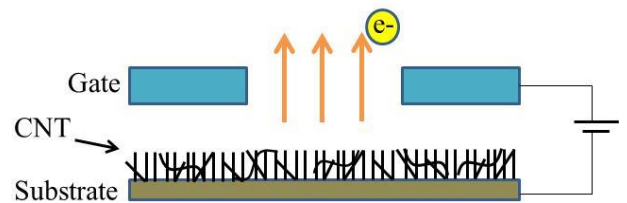


図 3 FEC 原理

## 3. 実験装置及び実験方法

本実験では、AO 照射前後に FEC の電流電圧特性取得試験及び定電流 (1-mA) 動作試験を行い AO 照射による FEC の性能変化を評価した。AO 照射は神戸大学のレーザーデトネーション型 AO 発生装置を用いてレーザーデトネーション法により行った。レーザーデトネーション法とは、Physical Science Inc. により開発された AO 発生法であり、この方法によって軌道速度と同じ 8 km/s での AO 照射が可能である。このときの AO の並進エネルギーは 5 eV である<sup>9)</sup>。AO 照射量が任意の値に達した各時点で電流電圧特性を取得した。参考照射量における高度 800 km での AO 照射相当時間は表 1 に示す値となる。ここで、“照射量”とは AO の流れに対して垂直方向における単位面積当りの AO 原子数であり、角度方向には依らない。

表 1 照射条件 (参考)

照射量 [ /cm <sup>2</sup> ]	高度 800km における照射相当時間 [日]
$2 \times 10^{20}$	1100
$1 \times 10^{20}$	550
$3 \times 10^{19}$	150
$1 \times 10^{19}$	50
$3 \times 10^{18}$	15

FECの外観を図4に、構造を図5に示す。本研究で用いたFECは、CNTエミッタ、マスク電極、ゲート電極およびシールド電極からなり、ゲート電極はスペーサーによりエミッタ、マスク電極およびシールド電極と絶縁されている。電流電圧特性取得実験及び定電流動作試験における回路図を図6に示す。ただし、後述する4章および6章で使用したFECは図7で示したFECであり、シールド電極の無い構造である。エミッタを接地し、ゲートに正電圧を印加することにより電界電子放出を行う。以下、ゲート-エミッタ間に印加される電圧を引出電圧と呼ぶ。定電流動作試験では、エミッション電流を一定電流(1-mA)で50時間の電子放出を行い、そのときの引出電圧の変化により性能評価を行った。

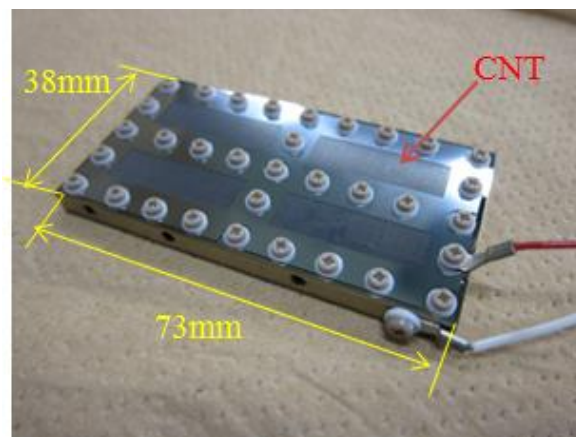


図7 FEC外観(4章, 6章で使用)

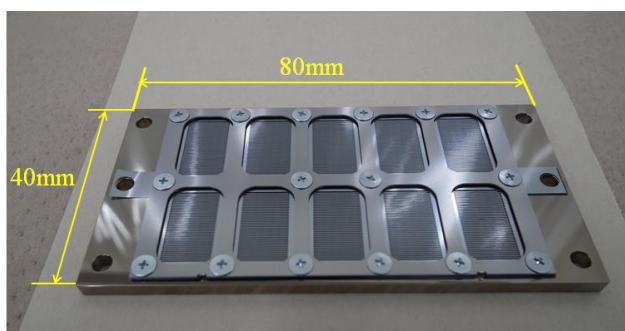


図4 FEC外観

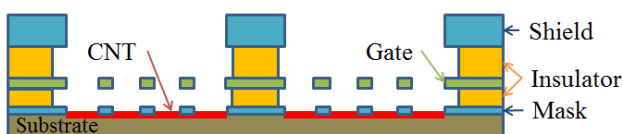


図5 FEC構造

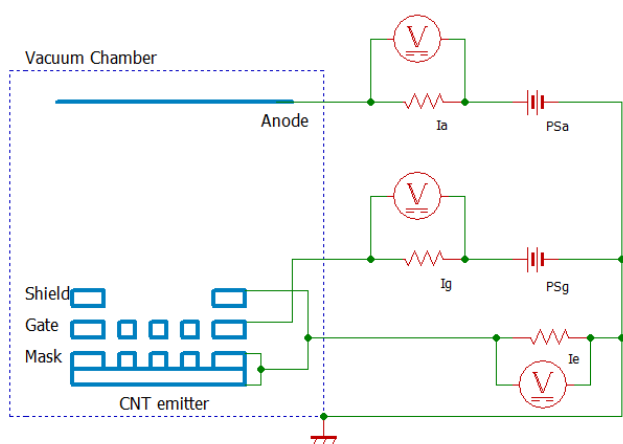


図6 実験回路図

#### 4. 軌道運動方向に対するカソード設置方向の影響

ここでは軌道運動方向に対して、平行方向および垂直に設置した場合の影響について述べる。3台のFECの電子放出面をそれぞれAO流に対して図8のように設置した。ここで、“迎角 $10^\circ$ ”は平行方向に設置した場合に、宇宙機の姿勢保持精度が悪く、わずかに傾いてしまう場合を想定している。このように設置したFECに対してAO照射を行った。AO照射前後の電流電圧特性を図9に示す。凡例の“Parallel”, “10 degree”および“Perpendicular”はそれぞれ、平行、迎角 $10^\circ$ および垂直方向に設置した場合を示す。また、“before”がAO照射前、“after”がAO照射後( $3 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ 照射後)を示す。

図9より、3台のFECの照射前の電子放出性能はあまり変わらないが、照射後の電子放出性能に大きく違いが生じていることがわかる。平行に設置したFECでは、約500Vで1mA放出しており、迎角 $10^\circ$ では、約600V程度で1mAを放出していることがわかる。一方で、垂直方向に設置したFECの電子放出性能は、900V近く電圧を印加しても0.1mA程度しか電子放出していないことがわかる。これらの結果から、垂直方向に設置した場合に対して、平行や迎角 $10^\circ$ に設置した場合の性能劣化は小さいことがわかる。これにより、軌道運動方向に対して平行方向にカソードを設置することにより、FECの電子放出性能の劣化が抑えられることが判明した。さらに、電子放出面が軌道運動方向に平行な面から $10^\circ$ 程度傾いたとしても、著しい性能劣化が見られないことがわかった。

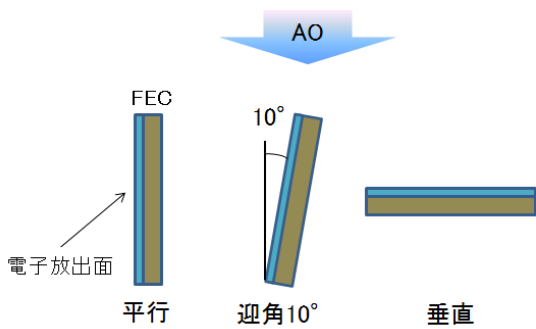


図 8 AO 流に対するカソードの設置角度

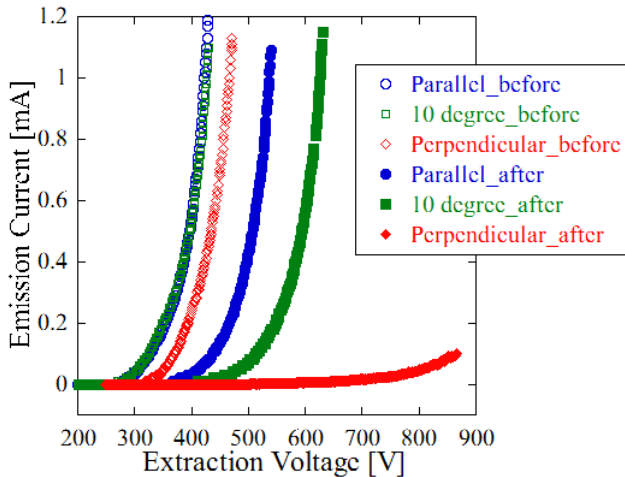


図 9 軌道運動方向に対するカソード設置角度による AO 照射前後の電流電圧特性の変化 (after:  $3 \times 10^{19} / \text{cm}^2$  照射後)

## 5. AO 衝突速度 (軌道速度) による影響

4 章より、AO 照射によるカソード設置方向の影響について、その性能劣化の傾向に違いが生じるということが示された。ここでは、垂直および平行方向照射時において、軌道速度相当で AO が照射されることによる AO の衝突の影響の有無を確認した。

垂直および平行照射時において、不活性粒子の照射による劣化促進の有無を調査することによって、AO 照射による軌道速度の影響を評価する。本試験では、AO 単体で照射を行った FEC と、不活性粒子として Ar を AO と混合で照射を行った場合の劣化傾向の比較を行う。AO 単体の照射試験は、これまでと同じ照射方法で行った。AO+Ar の混合照射試験は、AO 単体照射と同じく、レーザーデトネーション型 AO 照射装置により行った。供給ガスとしては、 $\text{O}_2 + \text{Ar}$  (60% : 40%) の混合ガスを使用した。このとき、生成される混合ビームにおいて、AO および Ar は軌道速度相当である 8 km/s 相当のエネルギーを持つ。この混合ガスにより生成された AO と Ar のフラックス比はおよそ 3 : 2 となった。参考まで

に、このフラックス比は軌道高度において約 200~250 km 付近の超低軌道環境に近い値を示している。詳細な混合ビームのフラックスの算出方法に関しては参考文献 7) を参照されたい。AO 単体および AO+Ar 混合照射の両者において、任意の照射量を設定し、各照射量に達した時点で電流電圧特性を取得した。

図 10 および図 11 に AO 単体と AO+Ar 混合照射の引出電圧比の変化を比較したグラフを示す。ここで、引出電圧比は、AO 照射前の引出電圧に対する各照射量時の引出電圧の比である。図 10 は垂直方向照射、図 11 は平行方向照射時の結果である。凡例の“AO(100%)”は AO 単体照射を示し、“AO+Ar[AO+Ar]”は AO+Ar 混合照射の結果を示しており、AO と Ar の合計の照射量を示している。“AO+Ar[AO]”は同じく AO+Ar 混合照射の結果を示しているが、照射量は AO のみの照射量を示している。まず、図 10 より、AO 単体照射に対して AO+Ar 混合照射の引出電圧比が大きいがわかる。また、AO+Ar 混合照射において、AO のみの照射量で比較しても、AO と Ar の合計の照射量で比較しても、AO 単体照射より劣化が大きいことがわかり、Ar の衝突が性能劣化に大きく影響しているといえる。一方で、図 11 から、平行照射では AO 単体照射と AO+Ar 混合照射の性能劣化の程度は変わらないことがわかる。従って、平行照射時には Ar の影響は受けていないといえる。

これらの結果から、垂直照射では、衝突による性能劣化の影響が大きく、これはガス種の活性、不活性を問わないことがわかった。また、平行照射では、不活性粒子は劣化に関与していないといえる。さらに、垂直照射の結果から、衝突が生じていれば劣化が大きくなることが判明した為、平行照射時には、Ar も AO も軌道速度相当で衝突することはないと考えられる。よって、AO 垂直照射時には AO の衝突の影響と、AO の活性による CNT の性質の変化が劣化に影響していると考えられ、AO 平行照射時には、AO の衝突による劣化はなく、AO 雰囲気下に FEC の電子放出面が曝されることで劣化が生じたものと考えられる。また、AO+Ar 混合の垂直照射においては、Ar が混合されていることによって劣化が促進されていると考えられる。これは、AO よりエネルギーの高い (質量の大きい) Ar が照射されたことによって基板と CNT との接着が取れたことによるものか、CNT に化学吸着した AO に Ar が衝突することによって AO の脱離反応が促進されている可能性などが示唆される。

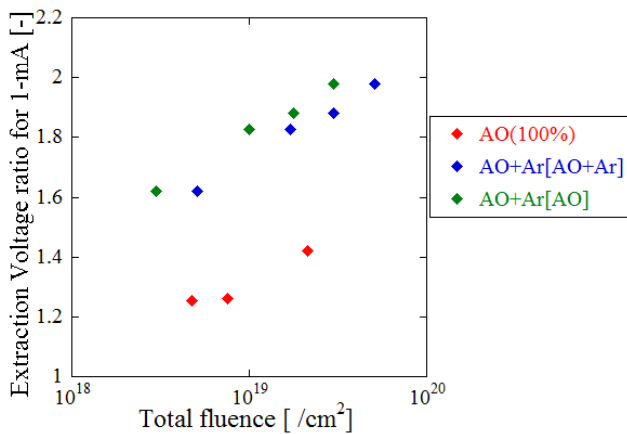


図 10 垂直照射における AO 単体と AO+Ar 混合照射の引出電圧比の変化

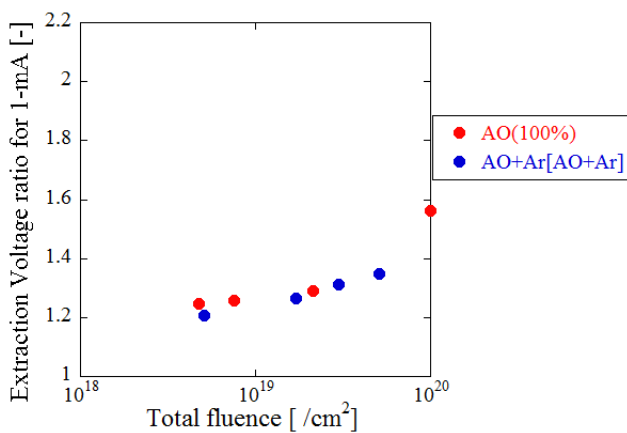


図 11 平行照射における AO 単体と AO+Ar 混合照射の引出電圧比の変化

## 6. 耐久性の評価

図 12 に 1 mA 定電流動作試験の結果を示す。本試験では平行方向照射の FEC を用いて AO 照射試験の前後で 1-mA の定電流動作を 50 時間行った。ここで AO 照射後は  $2 \times 10^{20}$  /cm<sup>2</sup> 照射後である。引出電圧比の時間変化を見ることにより FEC の耐久性を確認する。図 12 より、AO 照射前は 50 時間の動作において引出電圧比はほとんど変化していないことがわかる。一方、AO 照射後の引出電圧比は時間経過とともに増加していることが示されている。

この異なる電圧変化は、AO 照射による劣化に起因するものと考えられる。AO 照射後の電圧変化は照射前に対して不安定であることが図 12 からわかる。また、AO 照射後の FEC は絶縁破壊等の異常放電を引き起こしやすくなっている。この動作の不安定性は CNT の結晶性の低下が原因であると考えられる。結晶性の低い CNT と結晶性の高い CNT では、異常放電の起こる電界強度に違いが生じることが報告され

ており、結晶性の低い CNT の方が低電界で異常放電が発生することが判明している<sup>8)</sup>。つまり、AO 照射によって元々あった CNT の欠陥が大きくなる、または新たに生じた欠陥によって、CNT の結晶性が低下したことが、FEC 動作を不安定にしていると示唆される。CNT の結晶性については、ラマン分光による評価が可能と考えられるため、今後、本推察の確認のためには、ラマン分光の実施を検討する必要がある。

一方で、表 2 より AO 照射前後の定電流動作時の引出電圧値が大きく違うことがわかる。電圧が高いということは、それだけ CNT 先端にかかる電界が大きいということであり、劣化が生じやすい状態である。従って、図 12 で示されている AO 照射後の電圧変化の原因が高電圧動作による影響であるとも推察され、一概に AO 照射による劣化のみが影響しているとはいえず、原因の究明には至っていない。一方で、AO 照射によって FEC の性能が劣化し、電子放出に必要な電圧が増加することは示されているので、AO 照射後の FEC の耐久性が劣化することは確かである。

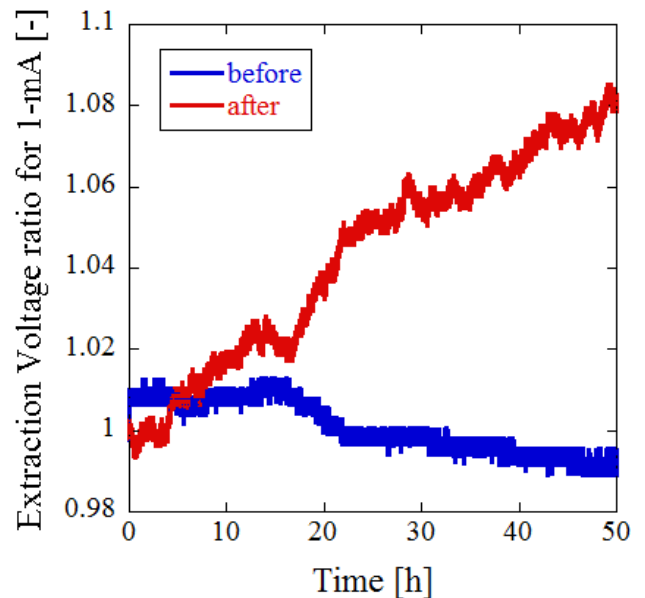


図 12 定電流 (1-mA) 動作における引出電圧の時間変化 (after :  $2 \times 10^{20}$  /cm<sup>2</sup> 照射後)

表 2 AO 照射前後の 1-mA 定電流動作前後の電圧変化

	1-mA 引出電圧 [V]	
	動作前	動作後 (50 時間経過後)
AO 照射前	409	406
AO 照射後	667	721

## 7. 性能劣化低減の為の対策

6章より、AO照射後では性能劣化が進み易いことが判明した。高電圧化を防ぐために、さらなる性能劣化低減の対策が求められる。そこで、AO対策として耐AO材料をCNTに蒸着した場合を評価する。カーボン材料であるCNTは、AO等の活性酸素との反応性が高いと考えられるため、その表面を耐AO材料で覆うことで、その化学的な反応の抑制が期待される。

### 7.1 CNTへの耐AO材料の蒸着

AO対策として耐AO材料の蒸着を行うが、この対策にはデメリットが存在する。電界放出では式(2.3)より、エミッタ材料の先端の曲率半径が小さいほど高電界が生じる。CNTはこの点からも、高アスペクト比を持つ電子放出材料として有効であるといえるが、蒸着を行うことによりそのCNTの先鋭性が失われてしまい、蒸着をしていないFECに対して初期の電子放出性能が悪くなると考えられる。そこで、まず蒸着膜厚の選定を行った。本試験では、耐AO材料としても知られる $\text{SiO}_2$ を用いて、CNTに真空蒸着を行った。蒸着膜厚は3種類とし、それぞれ11、25、121Åである。これら3種類の蒸着膜厚で $\text{SiO}_2$ 蒸着を行ったFECの性能評価試験を行った。図13がその結果である。凡例はそれぞれの蒸着膜厚を示している。膜厚が厚い順に電子放出性能が悪くなるのがこの図からわかる。また、一番膜厚の厚い121Åの電流電圧特性が綺麗な曲線となっていないのは、電圧上昇時に絶縁破壊が生じており、最終的には3mAに達する前にショートしてしまった為である。この結果から、蒸着膜厚が厚いものでは電子放出性能も悪く、動作が不安定となることがわかった。

以上の点から、本試験では蒸着を行っていないFECの性能とも大差がない、11Åの蒸着膜厚を採用する。

走査型電子顕微鏡(SEM)を用いてFECのCNTエミッタ表面の観察を行った。図14に $\text{SiO}_2$ 蒸着FECのエミッタ表面のSEM画像を示す。また、比較の為、蒸着を行っていないFECのSEM画像を図15に示す。各図において、1μm程度の粒子形状の物質が確認できる。これは、基板とCNTとを接着する接着剤である。基板上の白い糸のようなものが、CNTである。図14と図15を比較すると、 $\text{SiO}_2$ がCNTに粒子形状でまばらに蒸着していることがわかる。

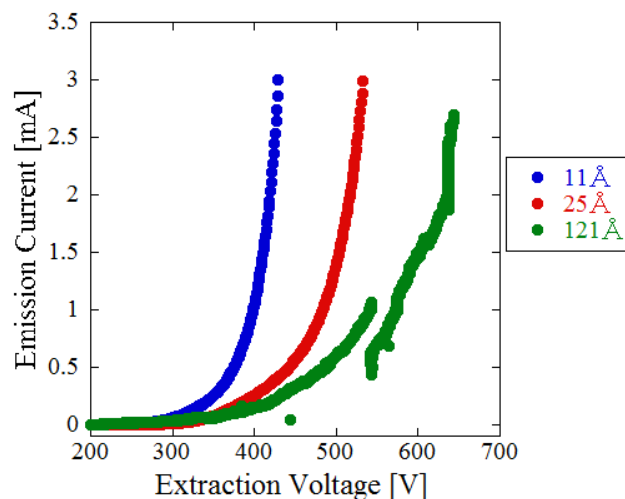


図 13 蒸着膜厚の違いによる電流電圧特性の違い

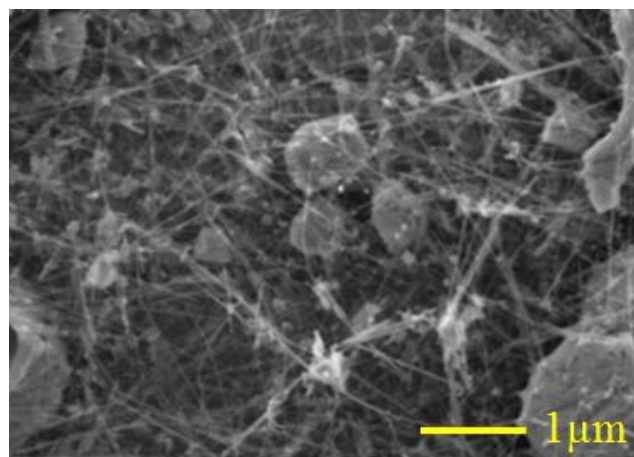


図 14  $\text{SiO}_2$ 蒸着 FEC のエミッタ表面の SEM 画像

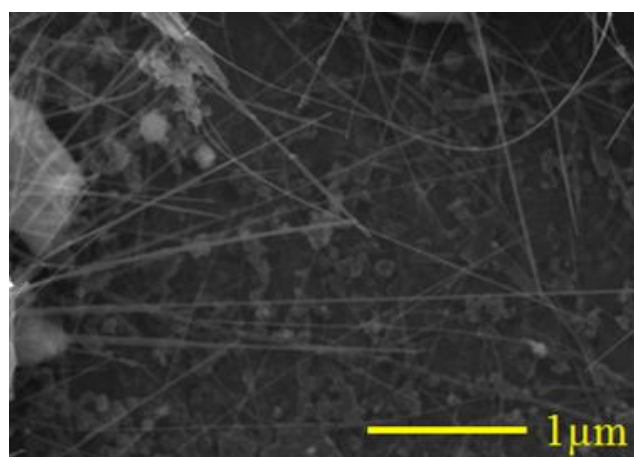


図 15 蒸着無し FEC のエミッタ表面の SEM 画像

## 7.2 蒸着による AO 対策の評価

SiO<sub>2</sub>蒸着を行った FEC (以下, SiO<sub>2</sub>蒸着 FEC) と蒸着していない FEC (以下, 蒸着無し FEC) に AO 照射を行い, 両者の性能変化を比較することによって, 蒸着の効果を評価する. SiO<sub>2</sub>蒸着 FEC および蒸着無し FEC の AO 照射前と  $1 \times 10^{20} / \text{cm}^2$  照射後の電流電圧特性を図 16 に示す. ここで, 凡例の before は AO 照射前であり, after は  $1 \times 10^{20} / \text{cm}^2$  照射後を示す. また, w/o.C は蒸着無し FEC, SiO<sub>2</sub> は SiO<sub>2</sub> 蒸着 FEC を示す. 以下のグラフにおいても同様である.

図 16 より, 蒸着の有無に関わらず, AO 照射によって FEC の電子放出性能が劣化することがわかる. しかし, AO 照射後の電流電圧特性から, 蒸着無し FEC に対して SiO<sub>2</sub> 蒸着 FEC の方が, 性能が良いことがわかる. 表 3 より, 個体差の影響を考慮した電圧増加率を比較しても, SiO<sub>2</sub> 蒸着 FEC の電圧増加率が低いことから, 蒸着による性能劣化低減の効果が表れているといえる.

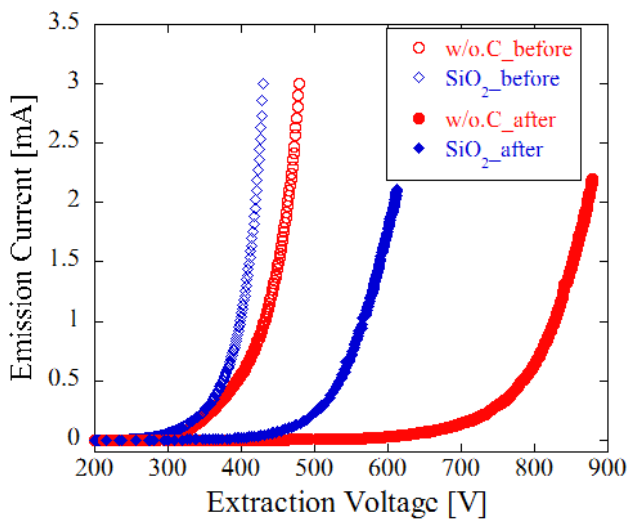


図 16 AO 照射前後の蒸着 FEC の電流電圧特性変化 (after :  $1 \times 10^{20} / \text{cm}^2$  照射後)

表 3 AO 照射前後の蒸着 FEC の電圧増加率の変化

	1-mA 引出電圧 [V]		電圧増加率 [-]
	AO 照射前	AO 照射後 ( $1 \times 10^{20} / \text{cm}^2$ )	
蒸着無し	464	872	1.9
SiO <sub>2</sub> 蒸着	420	608	1.5

## 7.3 蒸着による AO 対策の考察

実験結果から, CNT エミッタ表面への耐 AO 材料の蒸着により, FEC の性能劣化を抑えられることが示された. ここでは, 蒸着の効果に関して考察をする. EDT システムをデブリ除去衛星として用いる場合には長期間の運用が必要となることは 1 章で述べた. したがって, AO 対策として蒸着の効果の持続性について検討する必要がある.

図 17 に単位 AO 照射量当たりの 1-mA 引出電圧増加率の変化を示す. この指標は, 各照射量時点での 1-mA 引出電圧を 1 つ前の照射量時点での 1-mA 引出電圧で除した値であり, 各 AO 照射区間における電圧の増加率が単位 AO 照射量当たりどの程度であるかを示している.  $3 \times 10^{18} / \text{cm}^2$  照射時点に注目すると, ここでは, 蒸着無し FEC に対して SiO<sub>2</sub> 蒸着 FEC の引出電圧の増加率が低いことがわかる. つまり, 照射開始から  $3 \times 10^{18} / \text{cm}^2$  照射までの区間では, 蒸着による劣化低減の効果が表れているといえる. この傾向は,  $1 \times 10^{19} / \text{cm}^2$  照射時点まで同様であるが,  $3 \times 10^{19} / \text{cm}^2$  照射以降は, 蒸着無し FEC とほぼ同様か上回る増加率を示している. これは, 蒸着により保護されていた CNT がむき出しになったことによって, これまで劣化していなかった箇所が悪化し始めた為と示唆されるが, 差が微小である為, さらなる評価が必要であると考えられる.

さらに, 図 14 で示したように, SiO<sub>2</sub> が CNT にまばらに蒸着されていた点も持続性に影響していると考えられ, 蒸着材料の選定や CNT のコーティング方法などの検討を今後行う必要がある.

以上により, 本実験における蒸着の AO 対策としての効果は, AO 照射初期の段階で大きく,  $3 \times 10^{19} / \text{cm}^2$  以上の AO が照射されると, 蒸着による劣化低減の効果が失われると考えられる. AO による FEC の性能劣化は, 照射初期段階でその影響が顕著であるため, この「初期段階での AO 対策効果」は結果的には動作期間に渡って影響することとなり, 耐 AO 材料の CNT への蒸着は FEC の長寿命化にとって有効であるといえる.

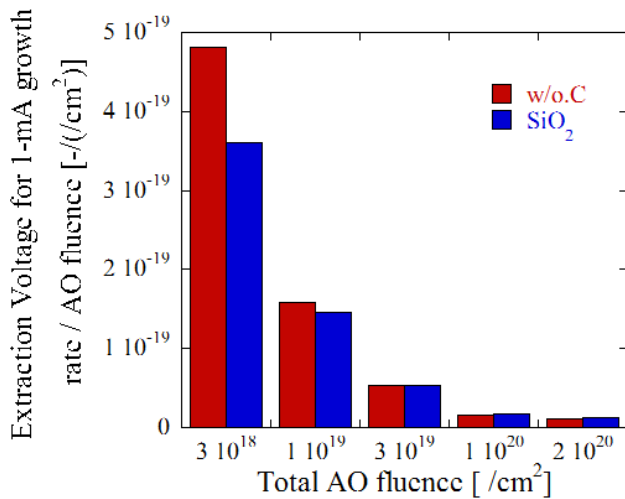


図 17 単位照射量当たりの 1-mA 引出電圧増加率

## 8. 結論

本論文では、実際のミッションを想定した AO 環境に對する FEC の性能変化を地上試験によって評価することを目的とし、AO 照射による FEC の電子放出性能の変化を評価した。

まず、軌道運動方向に対するカソード設置方向の影響評価では、FEC の電子放出面を軌道運動方向に対して平行に設置することによって、垂直方向照射時に生じるような著しい劣化が生じないことがわかった。この垂直および平行方向照射時の異なる性能変化は、AO 衝突速度が大きく影響していると示唆された。そこで、AO+Ar の混合照射と AO 単体照射を比較することによってその影響を調査した。その結果、垂直方向照射では、活性を問わず粒子の高速衝突による物理的要因が劣化に大きく関与していることが判明し、平行方向照射では、粒子の高速衝突の影響はなく、AO 雰囲気下に曝されている状態での吸着等による化学的要因による劣化があることがわかった。さらに、AO 平行照射した FEC の耐久性を評価したところ、AO 照射後の FEC は照射前に比べて性能劣化が進み易いことが判明した。そこで、AO による FEC の性能劣化低減を目的とし、CNT への耐 AO 材料の蒸着を行い、AO 照射試験による評価を行った。蒸着による劣化低減対策は、照射初期段階において効果が顕著に表れ、これが動作期間に渡って影響することから有効であると判明した。

## 参考文献

1) J. -C. Liou, and N. L. Johnson.: Risks in Space from

Orbiting Debris, Science Vol.311 (2006), pp. 340-341.

- 2) 国立天文台編, “理科年表”, p.817, 2002.
- 3) Charles, J. Gasdaska. et al: Testing of Carbon Nanotube Field Emission Cathodes, *AIAA 2004-3427*, 2004.
- 4) Kenneth, A. D. and Babu, R. C.: The environment stability of field emission from single-walled carbon nanotubes, *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999), No. 19, 8.
- 5) Kawamoto, S., Ohakawa, Y., Kitamura, S. and Nishida, S.: Strategy for active debris removal using electrodynamic tether, *Trans. JSASS Space Tech.* vol. 7, No.ists26, pp. Pr\_2\_7-Pr\_2\_12, 2009
- 6) Shimamura, H., Baba, S. and Miyazaki, E.: Handbook of the Combined Space Effect Test Facility, JAXA-RM-10-013, 2011.
- 7) 田川雅人, 渡邊大樹, 他, “超低軌道環境を模擬するための中性アルゴンガスのフラックス測定”, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2013-4118, 2013.
- 8) 小向拓治, “熱 CVD 法によるカーボンナノチューブの合成および電界電子放出素子への応用に関する研究”, 2005 年度高知工科大学博士論文.