低軌道での原子状酸素曝露を想定したカーボンナノチューブ電界放出カソードの性能評価

○島田温子，田中善信（静大工・院），井本伸（静大工），大川恭志，松本康司（JAXA），
田川雅人（神戸大），松井信，山極芳樹（静大工）

Keyword：Field Emission Cathode, Carbon Nanotube, Atomic Oxygen

1.　目的および背景

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 [1]．宇宙航空研究開発機構（JAXA）では，デブリ除去衛星用のデオービット技術として導電性テザー（EDT）システム（図 1）が検討されている．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．

デブリ除去ミッションは高度約 600～1000 km 間で行われる．EDT システムをデブリ除去衛星で用いる場合，LEO 環境は高密度 AO 環境であるため 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，酸素分子中または酸素イオン中における FEC の性能評価は行われており，酸素分子及び酸素イオン環境下において FEC の性能が劣化することが示されている [2]．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 [3]．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 [4] 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 1×10^{20} /cm^2 となる．

本研究では LEO での軌道速度相当の 8 km/s で AO を FEC に照射し，AO 照射による FEC の電子放出性能変化を調べた．また，上記の AO 曝露量を目標値とし，本研究で使用している FEC の AO 照射に対する耐久性に関して実験結果から考察を行った．ここで，軌道上において FEC を作動させる場合，FEC の電子放出表面を進行方向に対して平行方向に設置することから，AO 照射方向に対しても同様に平行方向に設置した．AO 照射後の電流電圧特性を AO 照射前の特性と比較し，FEC の定電流動作試験及び CNT エミッタ表面観察を行った．さらに，蛍光板を用いた発光実験により FEC の電子放出分布を明らかにし，AO 照射による FEC の性能変化に関して考察を行った．

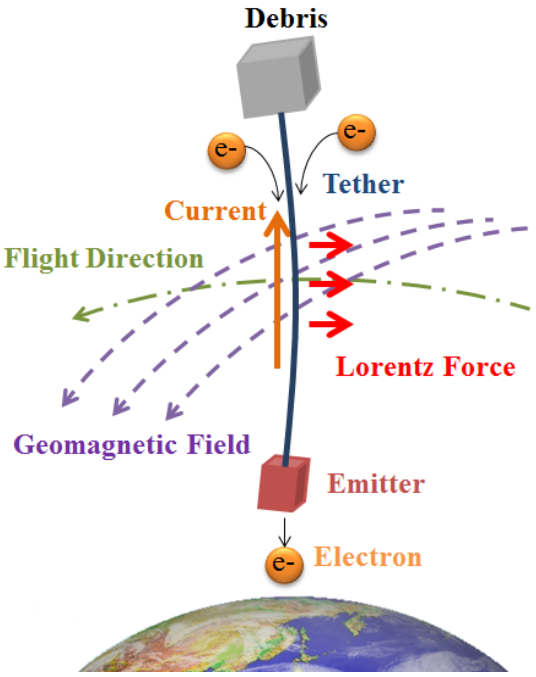


図 1　導電性テザーシステム

This document is provided by JAXA.

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 2 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．

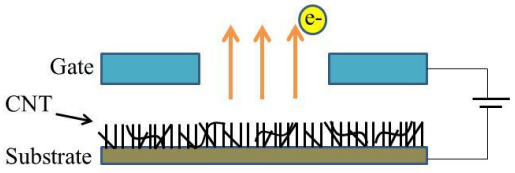


図 2　FEC 原理

電界放出によって得られる電流密度は次式で表される．

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

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，ϕ は仕事関数，F は先端の表面電界である．このとき，F は

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

と表される．このとき β は電界増倍係数，E は電極間電界である．

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，EDT システムの電子源としてはメリットが大きく有効であるといえる．

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．また，電子顕微鏡（SEM）で表面観察を行い，蛍光板を用いた FEC の電子放出分布の観察によって AO 照射による影響の考察を行った．AO 照射は神戸大学の AO 照射試験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 [5]．本実験では，FEC の電子放出表面に対して平行方向から照射を行った．また，宇宙機の姿勢保持精度が悪く，わずかに迎角を持ってしまう場合を想定し，AO 照射方向に対して 10 度傾けたケースも実施した（図 3）．AO 照射量が 3×10^{18}, 1×10^{19}, 3×10^{19}, 1×10^{20}, 2×10^{20} /cm^2 に達した各時点で電流電圧特性を取得した．また，これらの照射量を高度 800 km における AO 照射相当時間で表すと表 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．

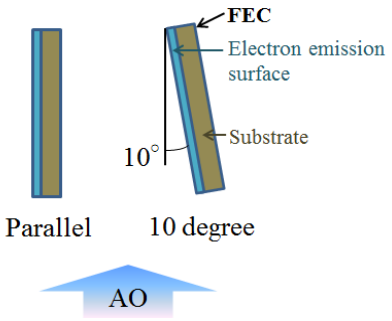


図 3　AO 照射方向

表 1　照射条件

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

FEC の概観を図 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，ゲート電極からなり，ゲート電極はスペーサーによりエミッタと絶縁されている．電流電圧特性取得実験及び定電流動作試験における

This document is provided by JAXA.

回路図を図 6 に示す．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．定電流動作試験では，エミッション電流 Ie=1 mA（一定）で 50 時間の電子放出を行い，そのときの印加電圧の変化により性能評価を行った．また，SEM を用いて AO が照射された照射部，AO が照射されていない非照射部の観察を行った．さらに，FEC に対する AO 照射の影響を調べるため，蛍光体にエネルギーを持った電子が衝突することによって発光する現象を利用し，FEC の電子放出分布の観察を行った．本実験では，ITO ガラス基板に蛍光体を堆積させた蛍光板を作製し [6]，アノード板として用いた．実験回路図は図 6 と同様である．

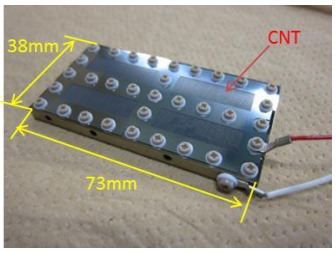


図 4　FEC 概観

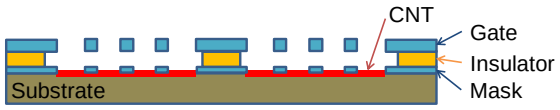


図 5　FEC 構造

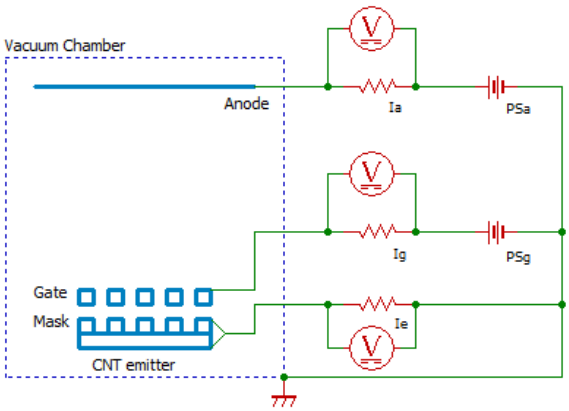


図 6　実験回路図

4.　実験結果

4. 1　電流電圧特性取得

AO 照射前後における電流電圧特性の変化を図 7 に示す．ここで，AO 照射後の電流電圧特性は軌道上での運用を想定した場合に推定される AO 照射量である 1×10^{20} /cm^2 照射後のものである．AO 照射後の電流電圧特性から，AO 照射後においても 1-mA の電子放出が可能であることが示された．一方で，平行方向，10 度方向に設置したいずれの場合においても AO 照射後には引出電圧が上昇していることがわかる．これは，FEC の電子放出性能の劣化を示している．本実験で使用している FEC の構造上（図 5），平行方向に設置した場合には，CNT エミッタ表面に AO が直接衝突することはない．しかし，図 7 に示すように FEC の性能が劣化していることから AO が直接当たらない平行面においても FEC の電子放出性能が劣化することが示された．これは，AO の活性による CNT の酸化が原因ではないかと示唆される．

また 10 度方向に設置したケースでは，AO 照射前にほぼ同様の電流電圧特性を示していたにもかかわらず，AO 照射後には平行方向に設置した FEC よりも性能劣化が大きいことがわかる．1-mA エミッション時の引出電圧で比較を行うと表 2 のようになる．表 2 に示すように，平行方向では照射前後の電圧比が 1.48 であるのに対して，10 度方向では 1.68 であることから，引出電圧の増加が大きいことがわかる．

以上より，AO 照射による FEC の電子放出性能の変化が示された．また，EDT システムの運用で想定される AO 照射量（1×10^{20} /cm^2）が照射された場合では，電子放出性能の劣化は生じるものの，電子放出は可能であることが示された．

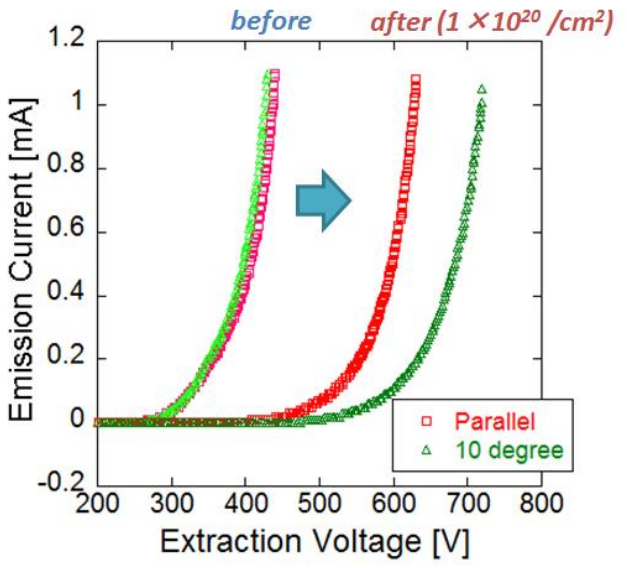


図 7　AO 照射前後の IV 特性比較．1×10^{20} /cm^2.

This document is provided by JAXA.

表 2　引出電圧比較（1-mA エミッション）

Case	引出電圧[V]		照射前後電圧比
	照射前	照射後（1×10^{20} /cm^2）	[-]
平行	423	628	1.48
10 度	427	719	1.68

次に，AO 照射量と引出電圧の変化に関して述べる．AO 照射量と引出電圧の変化を図 8 に示す．このとき，引出電圧は 1-mA エミッション時の引出電圧を示している．図 8 よりいずれの方向に設置しても照射量の増加に伴って引出電圧が上昇していることがわかる．一方で，引出電圧の増分は照射量に比例せず，徐々に小さくなることが示されている．EDT システムの運用で想定される AO 照射量（1×10^{20} /cm^2）以上の AO が照射された場合においても，一定の性能を維持することが可能であることが示唆される．

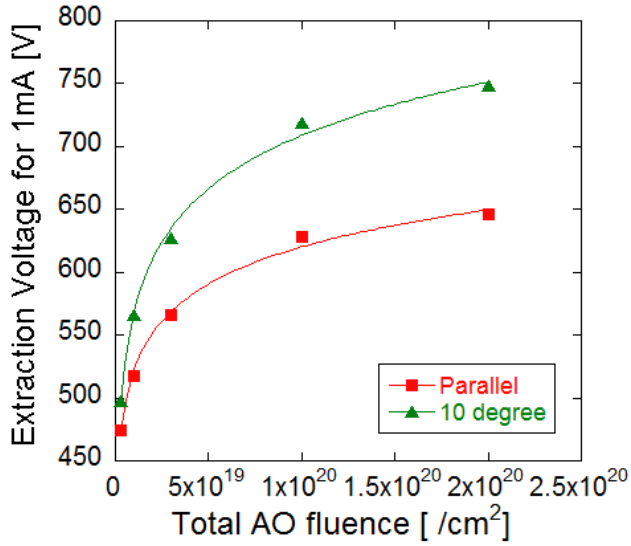


図 8　AO 照射量に伴う 1-mA 引出電圧の推移

4. 2　定電流（1-mA）動作による電子放出特性変化

AO 照射前後における定電流動作試験結果を図 9 に示す．本実験では，平行方向照射の FEC を用いて AO 照射試験の前後で 1-mA エミッションの定電流放出を 50 時間行った．図 9 に示した引出電圧比とは動作開始直後の電圧に対する比である．図 9 より，AO 照射前の定電流動作では引出電圧比が上昇することはなく，ほぼ変化していないことがわかる．一方で，AO 照射後の定電流動作では引出電圧比が時間経過とともに増加していることが示されている．このとき，引出電圧は動作直後では 670 V であったのが，50 時間動作後では 720 V まで上昇した．この異なる電圧変化は，AO 照射によるものであると示唆され，AO の活性による化学的影響であると考えられる．

EDT システムの運用時には，AO 環境下で電子放出を継続させる必要があるため，FEC の性能評価においてこの現象を無視することはできない．今後，AO 環境下，またはそれと同等の環境下において試験を行う必要がある．

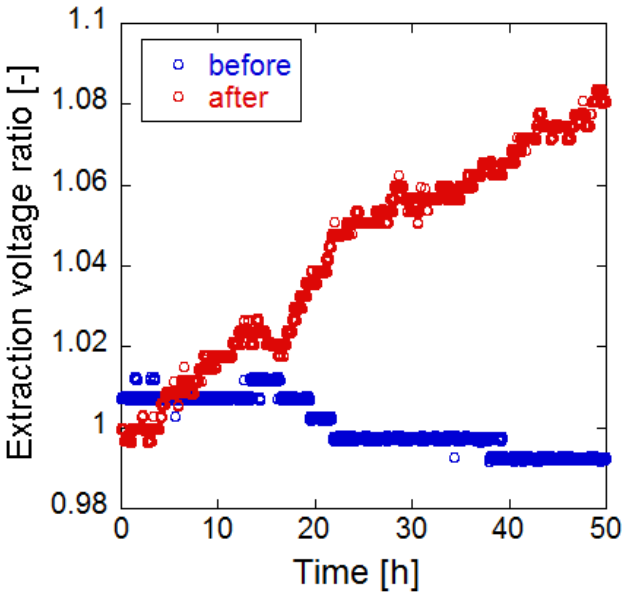
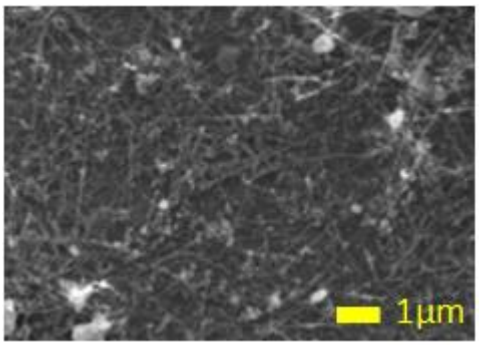


図 9　定電流動作による引出電圧の時間変化．
平行照射，2×10^{20} /cm^2.

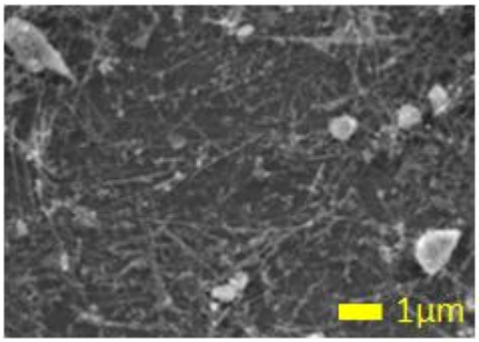
4. 3　CNT エミッタ表面観察

SEM を用いて CNT エミッタの表面観察を行った．図 10 に平行照射した FEC の CNT エミッタ表面の SEM 画像を示す．



(a)

This document is provided by JAXA.



(b)

図 10　CNT エミッタ表面の SEM 画像.
(a)非照射部，(b)照射部

図 10(a)の AO に曝されていない非照射部を見ると，基板上に白い糸のような CNT が確認された. 図 10(b)は AO が照射された照射部の画像であるが，こちらも図 10(a)と同様に CNT が確認され, CNT の減少などの FEC の性能劣化の原因となるような損耗は観察されなかった．先行研究において，AO 垂直照射を行った際に今回と同様に CNT エミッタ表面観察を行ったところ，CNT の消失を確認したことから AO 照射によって CNT が消失するという事象は示されている [7]. 一方，本実験においては CNT が存在していることが確認された．これは，FEC の性能劣化の要因は電界放出材料である CNT の消失だけでなく, AO による CNT そのものの劣化，つまり CNT の酸化による影響があるということが示唆される.

4. 4　蛍光板を用いた FEC の電子放出分布観察

AO 平行照射により FEC の性能劣化が確認され，4.3 において FEC のエミッタ表面に CNT の損耗は確認されなかった．ここでは，FEC の性能劣化の要因を調べるために蛍光板を用いた FEC の電子放出分布の観察を行った．AO 照射を行っていない FEC と AO 平行照射を行った FEC の発光分布の比較観察を行う．図 11，12 に AO 非照射 FEC，AO 平行照射 FEC の発光分布をそれぞれ示す．まず，図 11 の AO 非照射の発光分布を見ると，FEC の形状が発光分布にも表れており，FEC の電子放出分布を示していることがわかる．また，発光はほぼ均一であり FEC 全体から電子放出が行われていると考えられる．一方，図 12 の AO 平行照射を行った FEC の発光分布では，図の右上部分での発光が特に強く，他の箇所でも発光の強い輝点が観察された．この発光分布から，AO 照射を行った FEC では発光の強い輝点箇所から電子放出が行われていると示唆される．従って，発光分布の観察から AO 照射を行ったことにより電子放出が不均一になったといえる．また 4.3 で示された CNT の存在に関しては，CNT は基板上に存在するものの電子放出には寄与していないものもあるということが考えられる．よって，AO 照射による FEC の性能劣化には CNT 自身の劣化による影響が大きいと考えられ，劣化の過程に関しては今後さらなる検証が必要である.

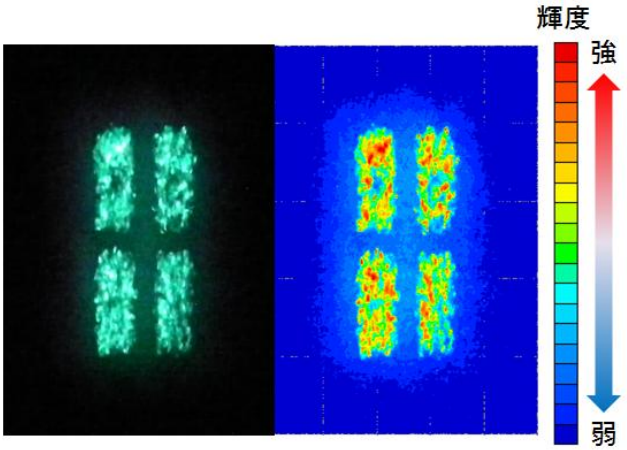


図 11　AO 非照射 FEC の発光分布

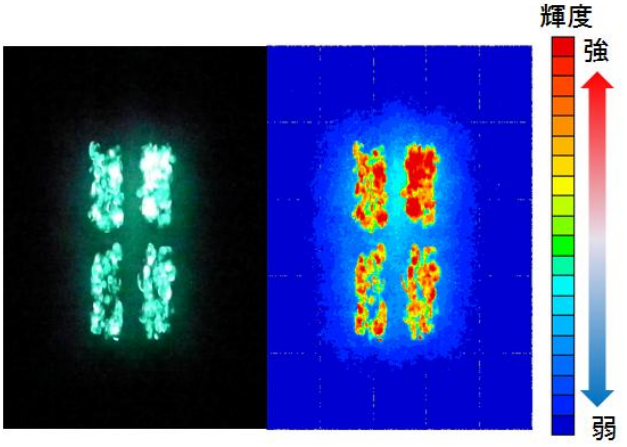


図 12　AO 平行照射 FEC の発光分布

5.　結論

LEO 環境におけるカーボンナノチューブ電界放出カソードの性能評価のために，原子状酸素照射試験を行った．LEO 環境を模擬するために AO の速度を 8 km/s，照射量は

This document is provided by JAXA.

1×10^{20} /cm^2 を目標値とし，電子放出面に対する AO 照射方向は EDT システムでの運用を想定して平行及び迎角 10 度とした．電子放出特性は AO 平行照射によって劣化することが示され，わずかに迎角を持つだけでも劣化傾向に違いが生じることが確認された．一方で，デブリ除去システムとしての運用を想定した場合に推定される AO 照射量では，FEC の性能劣化は生じるものの一定の性能を維持することは可能であることが示された．しかし，定電流動作試験より AO 照射を行った FEC では長時間の動作により電子放出性能が劣化することから，今後のさらなる検証が必要である．

また，AO 平行照射では SEM による観察の結果，CNT の損耗は確認されず，CNT は基板上に残存していることが示された．しかし，蛍光板を用いた発光分布確認実験により，AO 照射された FEC では電子放出分布が不均一であり，基板上に残存している CNT の一部は電子放出に寄与していないことが示唆された．これにより，FEC の性能劣化の要因は AO の活性による CNT の酸化の影響が大きいと考えられる．

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) Charles, J. Gasdaska. et al: Testing of Carbon Nanotube Field Emission Cathodes, *AIAA 2004-3427*, 2004.
3) 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.
4) 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
5) Shimamura, H., Baba, S. and Miyazaki, E.: Handbook of the Combined Space Effect Test Facility, *JAXA-RM-10-013*, 2011.
6) 中瀬貴文，比村治彦，塩野剛司，竹内信行．：蛍光体を ITO 膜付ガラス盤上へ塗布する簡易な方法，J.Plasma Fusion Res. Vol.89, No.3 (2013) 180-183.
7) Shimada, A., Tanaka, Y., Ohkawa, Y., Matsumoto, K., Tagawa, M., Matsui, M. and Yamagiwa, Y.: Effect of Atomic Oxygen Irradiation on Field Emission Cathodes in Low Earth Orbit. *29th ISTS*,2013.

This document is provided by JAXA.