

## 電界放出カソードのイオン衝撃による電極損耗

○田中善信，島田温子（静大工・院），井本伸（静大工）  
大川恭志（JAXA），山極芳樹，松井信（静大工）

Keyword : Field Emission Cathode, Carbon Nanotube, Ion Bombardment

## 1. 目的および背景

現在 JAXA にてカーボンナノチューブ（CNT）を使用した電界放出型カソード（FEC）について研究・開発が行われている。FEC は、電子を宇宙空間へ放出する電子放出装置の一つである。他の電子放出装置に比べ、作動ガスが不要で小型化が容易であることなどから、エレクトロダイナミックテザー（EDT）システム<sup>(1)</sup>への適用が期待されている。

EDT システムは、テザーに電流を流すことで地球磁場との間に発生するローレンツ力を利用し、推力を得るシステムである（図 1）。推進剤不要で推力を得られることから、軌道上の大型のデブリ安価に排除するためのシステムとして期待されている。

しかし、EDT システムでは、地球磁場という微弱な磁力を用いて推力を得るため、大型のデブリを地球周回軌道から遷移させるためには、約 260 日(6000 時間)程度かかると試算されている<sup>(2)</sup>。そのため、JAXA で FEC の耐久性能評価のため、長時間動作実験が行われた<sup>(3)</sup>。

本研究では、長時間動作実験で生じる電極損耗と電子放出性能の変化に関する実験・解析結果を報告する。

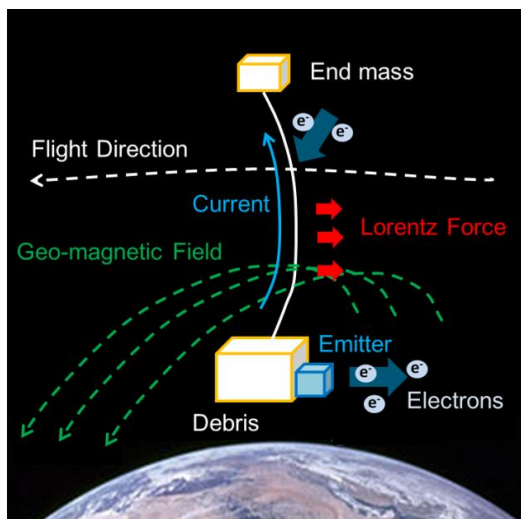


Fig. 1 EDT 概略図

## 2. 電界放出型カソード（FEC）

電界放出とはゲート電極，エミッタ電極の 2 枚の電極間に強電界を印加することでエミッタ電極から電子を引き出す電子放出方法である。本来，電子を真空中に放出するには，電位障壁を超えるようなエネルギーを電子に与えなければならないが，電界放出では固体表面に強電界を印加することで，電子に対する電位障壁が非常に薄くなることを利用している。これによって，電子は自身の持つ波動性から，薄くなった電位障壁を透過する（トンネル効果という）ことで固体中から放出される。エミッタ電極に尖鋭性の良い CNT を用いることによって，表面電場を強めることができ，より低い印加電圧でも大きな電流を得ることができる<sup>(4)</sup>。そのため JAXA では CNT-FEC を用いて研究を行っている。図 2 に本研究で使用する FEC の電界放出の原理図を示す。

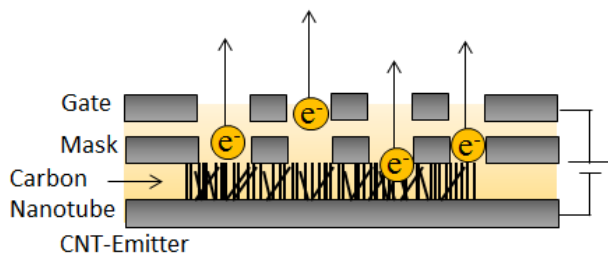


Fig. 2 電界放出原理

電界放出により得られる電流密度  $j$  [A/m<sup>2</sup>] は電場  $E$  [V/m]，エミッタの仕事関数  $\phi$  [eV]，プランク定数  $h$ ，素電荷  $e$ ，電子質量  $m_e$  を用いて，以下の Fowler-Nordheim の式により与えられる。

$$j = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \phi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m_e}}{3heE} \phi^{\frac{3}{2}}\right) \quad (1)$$

ここで，電界  $E$ ，エミッタの仕事関数  $\phi$  以外は定数であるので，電界放出電流は， $E$  および  $\phi$  に依存する。さらに電場  $E$  はゲート

- エミッタ電極間の電位差  $V[V]$  に比例しゲート - エミッタ電極間距離  $d[m]$  に反比例するため、電極間隔が一定の場合、電圧を制御することで電界放出電流を制御することが出来る。

### 3. 長時間動作実験による電極損耗

JAXA で行われた長時間動作実験は、図 3 に示す 8 つのカソードユニットからなる 8ch-FEC を用いて行われた。一定量の電子放出に必要な電圧の個体差を補正するため、8 つのエミッタ電極はそれぞれ異なる調整抵抗を介して電源に接続されている。実験に使用した各カソードユニットの構成を図 4 に示す。

実験はターボ分子ポンプとオイルロータリーポンプからなる排気系によって  $5 \times 10^{-5} [Pa]$  まで減圧された真空チャンバ内で行われる。チャンバ内に積極的なガス導入は行っていないため、残留ガスの主成分はチャンバ壁面に吸着した水分子であると考えられる。

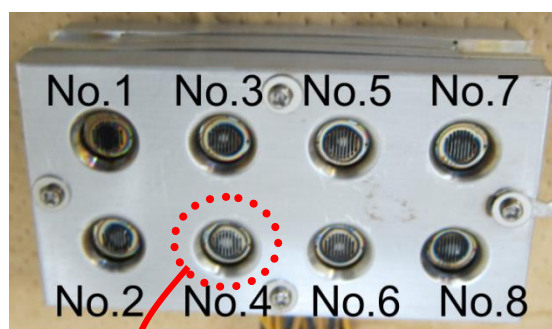


Fig. 3 8ch-FEC 俯瞰図

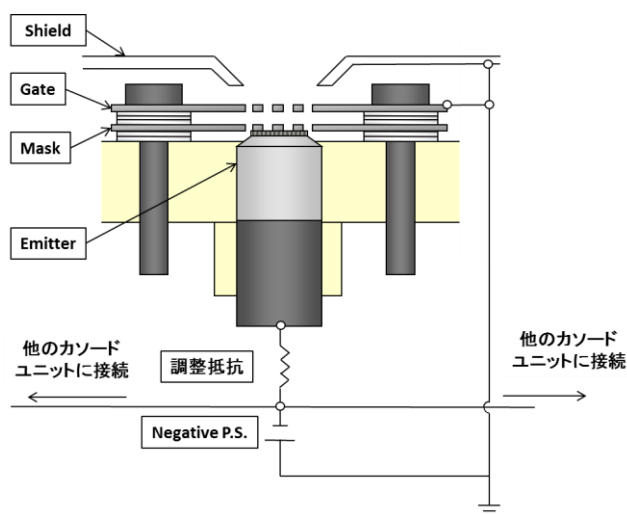


Fig. 4 カソードユニット回路図

長時間動作の結果、エミッタの電子放出性能は徐々に劣化 (3mA の電子放出に必要な電圧が上昇) していき、1500 時間で動

作電圧が 1000V に到達し、実験は終了した(図 5)。実験中、No.8 のエミッタ電極で絶縁破壊による損傷及び電流・電圧の急激な変動が確認されたが、他の 7 つのエミッタでは絶縁破壊は観測されなかった。

長時間動作実験後のエミッタを観察したところ、No.3,4,5,6 のエミッタに、同様の形状の損耗が見られた。そのうち最もはっきりと損耗が現れた No.4 の写真を図 6 に示す。電極表面が損耗する理由には、ジュール熱による CNT の損傷、静電場による CNT の引き抜き、残留ガスと CNT の化学反応による酸化などが考えられるが、観察の結果、この損耗は電子との衝突によってイオン化された残留ガスがエミッタ電極表面をスパッタしたために生じたものであると推測された<sup>(5)</sup>。

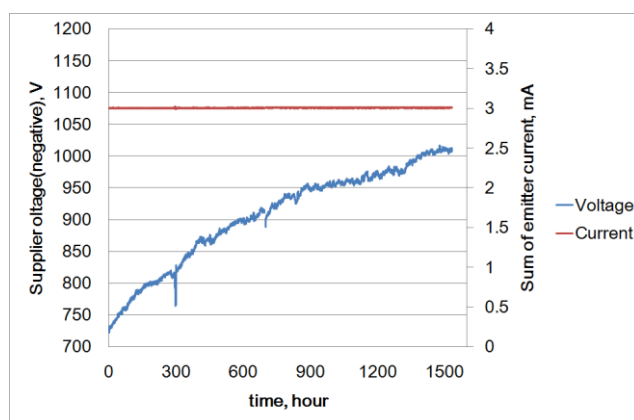


Fig. 5 3mA の電子放出と、電子放出維持のためエミッタ電極に印加された電源電圧の時間変化(1500 時間実験)

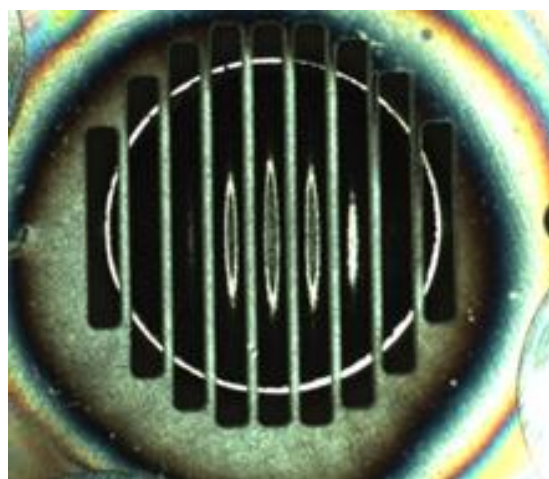


Fig. 6 ゲート電極真上からの俯瞰図(No.4, 1500 時間実験)

### 4. イオン数密度変更実験

エミッタ電極表面に生じた模様、イオン衝撃によるものであることを確認するため、8ch-FEC を用いて 150 時間の長時間

動作実験を行った。この実験ではエミッタ・マスク・ゲート電極は新品のものを使用しており、調整抵抗の値も異なるが、その他の実験装置の構成は1500時間動作実験と同じである。また、1500時間の動作実験に対して、動作時間を減らしてイオン衝撃以外の損耗要因を減らすと共に、Ar ガスを導入することにより雰囲気ガス圧を高めてイオン生成量を増やし、イオン衝撃による影響を加速することで1500時間動作実験と同程度のイオン流入を確保している。1500時間動作実験と150時間動作実験での実験条件を比較した表を以下に示す。

Table 1 1500 時間・150 時間動作実験条件

	単位	1500 時間実験	150 時間実験
動作時間	hour	1500	150
チャンバ内ガス種	-	H <sub>2</sub> O	Ar
チャンバ圧力	Pa	5×10 <sup>-5</sup>	5×10 <sup>-4</sup>
エミッタ電流	mA	3	
シールド電位	V	接地	
ゲート電位	V	接地	
マスク電位	V	エミッタと同電位	
エミッタ電位	V	3mA 電子放出に必要な電圧	

150 時間実験の結果、1500 時間実験と同様にエミッタの電子放出性能は徐々に劣化していき、150 時間で動作電圧が約 1000V まで到達した(図 7)。長時間動作実験後のエミッタを観察したところ、No.3 のエミッタに、1500 時間動作実験で観察されたものと同程度の損耗が見られた(図 8)。これらの結果から、エミッタ電極表面に現れた模様はイオン衝撃によるものであること、イオン衝撃と電子放出性能劣化の間に関係があることがわかった。

EDT システムはスペースデブリの分布及びテザー寿命から、高度 800~1000km での運用が想定される。軌道高度 1000km では O<sup>+</sup>および H<sup>+</sup>が支配的であり、エミッタ電極電位が-1000V の時、エミッタへのイオンフラックスは O<sup>+</sup>と H<sup>+</sup>を合わせて最大で 2.5×10<sup>15</sup> ions/m<sup>2</sup>s 程度になる。これに対し、地上実験で生成されるイオンフラックスは 1500 時間実験において 7.47×10<sup>15</sup> ions/m<sup>2</sup>s 程度であり、軌道上でのイオンフラックスに対して 3 倍程度の影響があったと考えられる。

EDT システムの運用期間は約 260 日(6000 時間)程度になると試算されており、地上実験における寿命の 4 倍が要求される。

次章以降では、イオン衝撃が電子放出性能劣化速度に与える影響を評価し、その対策を検討した。

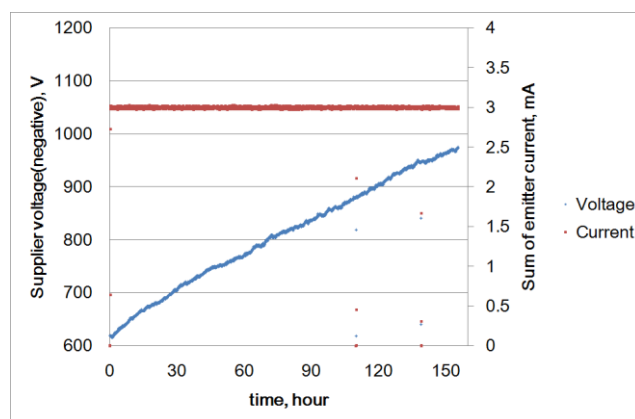


Fig. 7 3mA の電子放出と、電子放出維持のためエミッタ電極に印加された電源電圧の時間変化(150 時間実験)

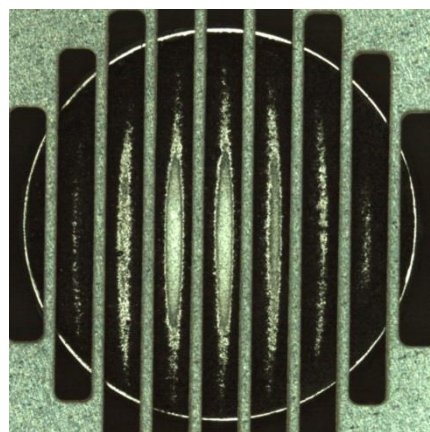


Fig. 8 ゲート電極真上からの俯瞰図(No.3, 150 時間実験)

## 5. イオン衝撃による電子放出性能劣化

本章ではカソードの各電極電位およびアノード電位を任意に操作することで、生成されたイオンの流入先を制御し、イオン衝撃の影響度を確認した。

エミッタ電極に負電位を印加し、ゲート電位とアノード電位を接地電位とすると、イオンは大きく負に帯電したエミッタ電極によって回収される。これに対し、エミッタ電位をアノード電位と同じにし、ゲート電極に正電位を印加すると、イオンはゲートの正電位に反発してアノードに回収される。このように電極電位を操作することでイオン衝撃を防ぐこともできるが、この場合ほとんど全ての電子がゲート電極に回収されてしまい、電子放出装置としての機能不全に陥ってしまうため、この電位条件をとることはできない。

これらの実験回路図と実験条件を図 9、表 2 に示す。なお、本

実験ではイオン衝撃による影響を明らかにするため、8ch-FECにおいてシールド電極を用いず、カソードユニット8台のうち1台のみを用いて実験を行った。

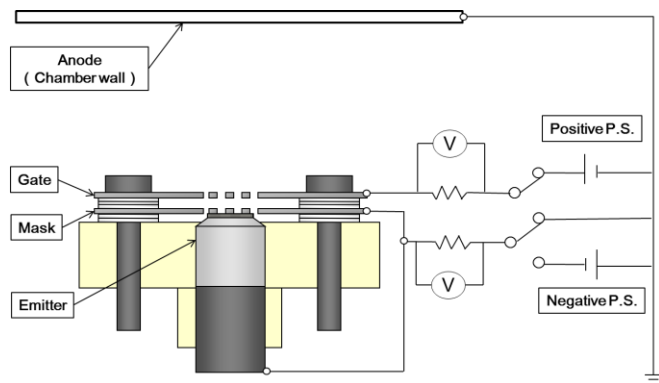


Fig. 9 実験回路

Table 2 実験条件

		イオン衝撃あり	イオン衝撃なし
ガス種	-	Ar	
チャンバ圧	Pa	$5 \times 10^{-4}$	
エミッタ電流	mA	0.5	
動作時間	hour	6	
アノード電位	V	接地	
マスク電位	V	エミッタ電極と同電位	
ゲート電位	V	接地	0.5mA 電子放出に必要な正電位
エミッタ電位	V	0.5mA 電子放出に必要な負電位	接地

本実験では、電子放出性能の劣化を、0.5mA の電子放出電流に必要な電圧の変動を用いて評価する。この電圧変動はばらつきが多く、特に電子放出開始時には不安定になる傾向が経験上得られている。本実験は、再現性の確認のためイオン衝撃なし、イオン衝撃あり、イオン衝撃なしの順で繰り返し実験を行っているが、図 10 に示すように、各回とも初めの 2 時間程度が特に不安定になる。一定時間電子放出を行うことにより、電圧変動が安定する傾向から、この不安定性の原因として、残留ガス吸着による CNT からの電子放出不安定<sup>6)</sup>が考えられるが、詳細は不明である。このことから、本実験での電子放出性能劣化速度比較においては、始めの 2 時間分のデータを除いた、残り 4 時間のデータを比較に用いた。

電圧の時間変化でイオン衝撃の有無を比較した結果を図 11 に示す。この図から、イオン衝撃ありの場合、イオン衝撃なしに比べて電圧上昇が 5V/hour 程度早く、約 2 倍の速度で劣化していくことがわかる。また、イオン衝撃なしの電極電位状態で実験を繰り返したところ、イオン衝撃ありの場合に比べて十分小さい誤差範囲内で再現性が得られた。

この結果から、電子放出性能劣化におけるイオン衝撃の影響度はおよそ 5 割程度であることがわかる。

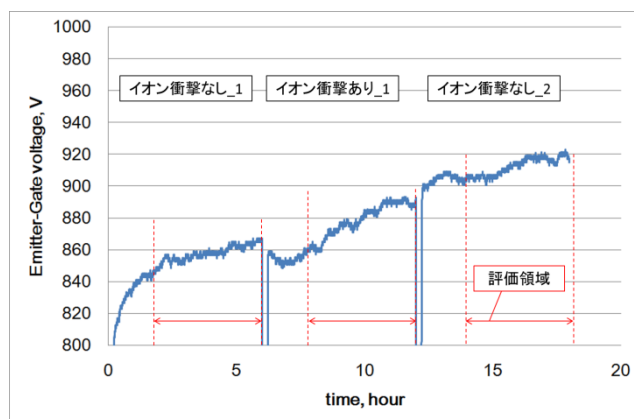


Fig. 10 電子放出性能劣化速度比較

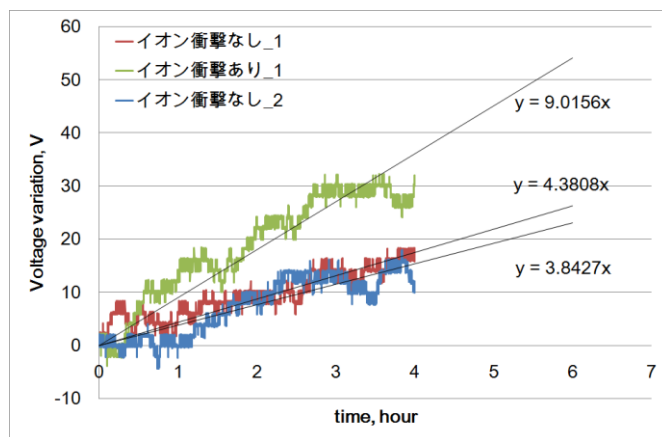


Fig. 11 電子放出性能劣化速度比較

## 6. シールド開口径によるイオン衝撃対策

イオン衝撃対策として、シールド開口径を変化させることの効果を数値解析的に検討した。本解析ではまず PIC 法<sup>7)</sup>を用いて電子軌道を計算した。そのうえで、各グリッドの電子流量に対応したイオンを配置し、静電場中でのイオン軌道を計算した。ただし、本実験では外部磁場を加えておらず、電子電流によって発生する磁場変動も微弱であるため、磁場は無視して計算を行っている。境界は、上下右端を開放系条件、カソード対称軸となる左端を反射境界条件とした。



本解析では、ここまでの実験で使用してきた 8ch-FEC ではなく、簡素化のため平らなシールド形状を持ち、一つのカソードユニットからなる 1ch-FEC (図 13) について解析する。解析の流れ (図 12) と解析条件 (表 2)、解析モデル概要を以下に示す。

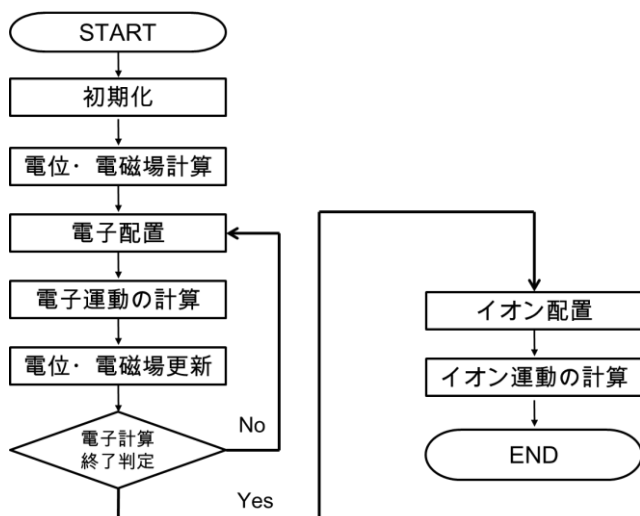


Fig. 12 解析フローチャート

表 2 解析条件

イオン種	-	Ar+
シールド開口径	mm	$\phi 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10$
計算領域	mm×mm	20×30
計算格子	mm	0.05
エミッション電流	mA	0.5
アノード電極 (チャンバ壁) 電位	V	接地
シールド電極電位	V	接地
ゲート電極電位	V	接地
マスク電極電位	V	-1000V
エミッタ電極電位	V	-1000V

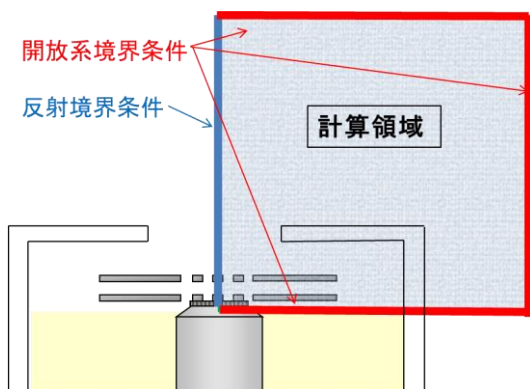


Fig. 13 計算領域と、境界条件

解析結果を図 14 に示す。図中の電子放出効率とは、各シールド電極開口径において、エミッタ電極から放出された電子のうちシールド電極に回収されることなく、カソード系の外に放出される電子の比率を示す。このグラフから、 $\phi 7$  までは電子がシールド電極に回収されることなく放出されるが、 $\phi 7$  以下ではシールド径が狭くなるにつれて電子放出効率が低下することがわかる。これは、エミッタ電極から放出された電子がシールド電極に回収されてしまうためである。

解析結果におけるイオン流入数比率とは、各シールド開口径においてエミッタ電極に流入するイオン数を、シールド開口径が  $\phi 10$  の時にエミッタ電極へ流入するイオン数を基準とした数比率で表したものである。この結果を見ると、シールド径を狭めるに従い、エミッタ電極へのイオン流入数が減っていきることがわかる。しかし、このイオン流入数減少のほとんどは、シールド電極に電子が回収されることによって電子放出効率が低下したために、初期イオン生成数が減少したことによるものである。

計算結果からは、シールド径を  $\phi 10$  から  $\phi 4$  にしたとしても、イオン流入量は 9%程度しか抑えられず、イオン衝撃による性能劣化が全体の電子放出性能劣化の半分以上を占めるとして計算しても、寿命は 5%程度しか伸びない。それに対し、電子放出効率が 12%程度も低下してしまうため、シールド電極開口径によるイオン衝撃対策は非効率であると考えられる。

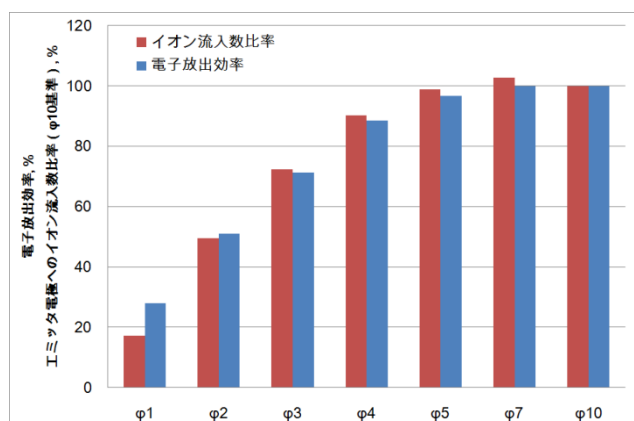


Fig. 14 シールド径と電子放出効率

## 7. 引出電極構成によるイオン衝撃対策

本章では、もう一つのイオン衝撃対策として、電子引出をマスク電極 1 枚、ゲート電極 1 枚の合計 2 枚で行う従来の方法に対し、マスク電極 2 枚、ゲート電極 1 枚の合計 3 枚で行う場合

のイオン流入について検討した。引出電極 3 枚でのカソード構成を図 15 に示す。

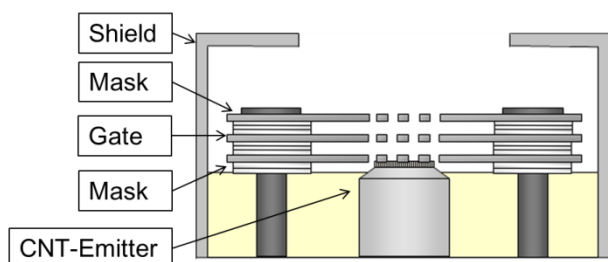


Fig. 15 3枚引出電極によるカソード構成

引出電極を 3 枚にすると、エミッタ電極表面の電場強度はおよそ 28%低下してしまう。これは、ゲート電極上部にエミッタ電極と同じ負電位を持ったマスク電極が現れたことで、エミッタ電極-ゲート電極間の電場強度が弱まるためである。そのため、3 枚電極構造において 2 枚電極状態と同量の電子放出を行うためには、エミッタ電極-ゲート電極間電位差を約 1.4 倍にしなければならない。そのため、イオン流入の比較を行う際には、2 枚電極構成の場合はエミッタ電極電位を-700V、3 枚電極構成の場合には-1000V として解析を行った。解析手法は、マスク電極が増えたこと以外はシールド開口径によるイオン衝撃対策で行った解析と同じである。ただし、シールド開口径は $\phi 10$ とした。

両カソード構成において、各電極及び計算領域外に流出したイオン数比率の解析結果を図 16 に示す。この図から、3 枚電極構成にすることでマスク電極へのイオン流入量が増え、エミッタ電極へのイオン流入を約 30%削減できると予想される。4 章で述べたように、イオン衝撃による電子放出性能劣化が全体のおよそ半分を占めていると仮定すると、そのさらに 3 割が 3 枚電極構成によって改善されるので、全体として性能劣化速度を 15%低減することができる。

本研究で行った長時間の動作実験では調整抵抗を用いていたが、実際の運用では冗長性を持たせるため、各カソードユニットに別々の電源を用いると考えられる。そのため、調整抵抗による電流調整の必要がなくなり、調整抵抗における電圧降下がなくなり、より低い電源電圧で電子放出が可能になる。そのため、表面電場強度が 28%低下したとしても、2 枚電極構成よりも長寿命化が図れると考えられる。しかし、軌道上での運用時間である約 260 日(6000 時間)程度の寿命を達成するには、さらに低い電圧で電子放出できるように改善していく必要がある。

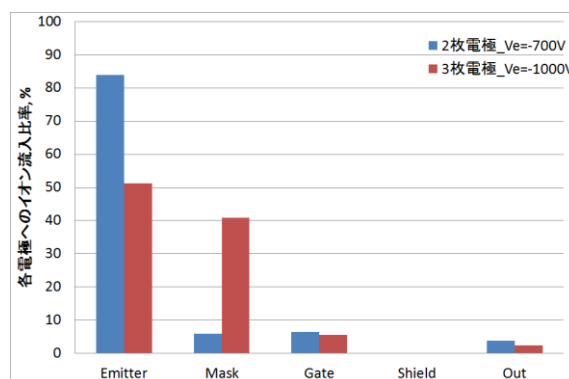


Fig. 16 2枚電極構成及び3枚電極構成における各電極へのイオン流入比率

## 8. まとめ

EDTシステムへの適用を目的としたFECの長時間動作試験の結果、エミッタ電極表面がイオン衝撃によって損耗するとともに、電子放出に必要な電位差が上昇することがわかった。

イオン衝撃への対策としてシールド開口径を変更したが、イオン流入の低減には有効でないことがわかった。しかし、引出電極構成を変えることでイオン流入を防ぐことができ、寿命向上に有効であることがわかった。

今後の課題として、引出電極構成を変えた時の電子放出性能の向上、イオン衝撃以外の電子放出性能劣化要因の調査及び対策が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 山極芳樹, “エレクトロダイナミックテザー”, 日本航空宇宙学会誌, 第 52 巻, 第 603 号, 2004
- 2) Satomi Kawamoto, “Strategy for Active Debris Removal Using Electrodynamic Tether”, Trans. JASS Space Tech. Japan, Vol. 7, No. ists26, pp. Pr\_2\_7-Pr\_2\_12, 2009
- 3) Yasushi Ohkawa, “A Carbon Nanotube Field Emission Cathode for Electrodynamic Tether Systems”, IEPC, 2011
- 4) 小間篤, “表面物性工学ハンドブック第 2 版”, 丸善, 2007
- 5) Yoshinobu Tanaka, “Durability Characteristics of Carbon Nanotube Field Emission Cathode”, ists29, 2013
- 6) 畑浩一, “多層カーボンナノチューブ清浄表面での各種単一ガス分子の吸着挙動と反応性”, 応用物理, 第 78 巻, 第 4 号, 2009
- 7) 電気学会・マイクロ波プラズマ調査専門委員会編, “マイクロ波プラズマの技術”, オーム社, 2003