

導電性テザーシステム搭載用カソードの複数台同時動作における性能評価

○井本伸（静大・院），島田温子（静大工・院），湯浅直樹（静大・学），大川恭志，河本聡美（JAXA），山極芳樹（静岡大学）

Keyword : Field Emission Cathode, Carbon Nanotube, Parallel operation of FECs

1. 序論

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では導電性テザー（EDT）を利用したデブリ除去システムの研究が進められている。EDT システムの電子源として、低電力動作可能で作動ガスが不要な電界放出カソード（FEC）が有力視されており、電界放出に有利な先鋭性に優れた形状で、機械的強度の高いカーボンナノチューブ（CNT）が Emission 材料の候補となっている¹⁾。

デブリ除去用 EDT システムでは冗長性を保つために複数の FEC と電源を搭載して同時動作させ、搭載した全ての FEC から最大限電子放出をすることが望まれる。しかし FEC の電子放出性能は組立時の電極ミスアライメントや CNT 配列状態のバラツキ等の影響を受けやすく、個体差が大きい。そのため複数の FEC 間で電位差が発生し、電子引出電圧が高い FEC に他の FEC から放出された電子が引き寄せられ FEC 外部へ放出される電子が減少（電子引出効率が低下）することが懸念される。図 1 に FEC の電極構造および 2 台同時動作時の電子の流れの概念図を示す。

本研究では、JAXA が計画を検討している EDT 技術実証実験環境を想定し、FEC の複数台動作時の電子放出制御手法の評価のために FEC2 台同時動作の電子放出性能を取得した。

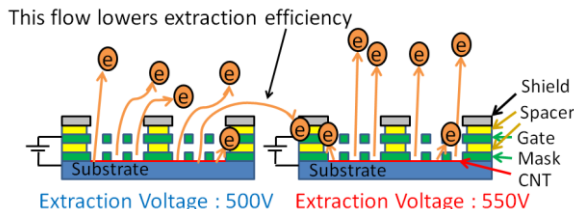


図 1 FEC の構造と 2 台同時動作時の電子の流れの概念図（引出電圧の低い FEC から放出された電子は引出電圧の高い隣の FEC に吸い取られる可能性がある）

2. 導電性テザー（EDT）システム²⁾

EDT システムの動作原理を図 2 に示す。ある軌道上において周回している EDT システムが長さ L_{tether} のテザーを地球側へ伸展した状態で、磁場強度 B の地球磁場中を軌道速度 v_{orbit} で軌道運動することによりテザーに誘導起電力（EMF） V_{emf} が生じる。このときの EMF は次式で求められる。

$$V_{emf} = (v_{orbit} \times B) \cdot L_{tether} \quad (2.1)$$

この EMF によってテザー上端部（地球と反対側）は周辺プラズマ電位に対して正に、テザー下端側（地球側）は負に帯電する。正に帯電したテザー上端部で電子を収集し、テザー下端部に取り付けられた FEC によって電子を放出することで周辺プラズマを介した電氣的閉回路が形成され、テザーに電流 I_{tether} が流れる。このテザー電流と地球磁場が干渉することでテザーにローレンツ力が発生する。このローレンツ力がデブリの軌道方向とは逆向きに作用することで、デブリ高度を徐々に下げて大気圏に再突入させ EDT システムごと燃やし尽くすことでデブリを除去する。このときのローレンツ力 F は次式で求められる。

$$F = (I_{tether} \times B) \cdot L_{tether} \quad (2.2)$$

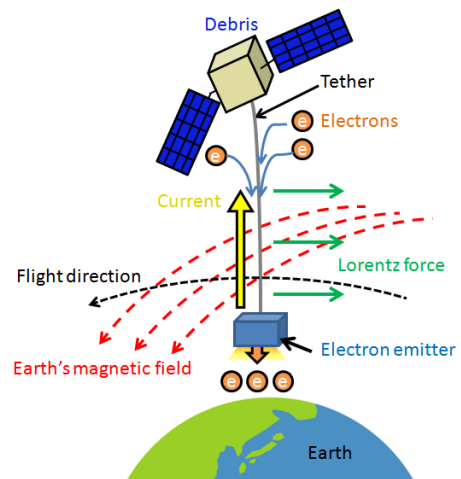


図 2 軌道上の EDT システムの動作原理

3. 電界放出カソードの原理と空間電荷制限効果

3.1 電界放出カソードの原理と構造

FEC は主に Emitter 電極と Gate 電極で構成される (図 1 参照) . 電界電子放出は, 上記の両電極間に電位差を発生させ Emitter 材料 (CNT) 表面の電界が $10^9 \sim 10^{11} \text{V/m}$ オーダーに達した時に発生する. これは電子に対するポテンシャル障壁が高電界によって薄くなり, 電子の波動性によって電子がポテンシャル障壁を通り抜けることが可能となるためである. これをトンネル効果と呼び, この現象を利用して電子放出が行われる. 電界放出により得られる電流密度 J は Fowler-Nordheim の式で表わされる.

$$J = \frac{e^3 F_E^2}{8\pi h \phi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m_e}}{3heF_E} \phi^{3/2}\right) \quad (3.1.1)$$

ここで, e は電気素量, h はプランク定数, m_e は電子質量, ϕ は仕事関数, F_E は先端の表面電界である. Emitter 先端が放物面である時, F_E は

$$F_E = \beta E \quad (3.1.2)$$

$$= \frac{2V}{r_{tip} \ln(4d/r_{tip})} \quad (3.1.3)$$

と表される³⁾. このとき β は電界増倍係数, E は電極間電界, r_{tip} は Emitter 先端の曲率半径, d は電極間距離, V は電極間電位差である.

CNT 型 FEC は作動ガスが不要, 簡易な構造, 低電力での動作が可能というメリットから EDT システムの電子源として有力とされている.

3.2 空間電荷制限効果

CNT 型 FEC には欠点も存在し, その一つが空間電荷制限効果による放出可能電流の制限を受けることである. 空間電荷効果とは, 空間内に同種の荷電粒子が多く存在すると粒子同士がクーロン斥力によって反発し合い, 空間内に存在し得る粒子が制限されてしまうことである. 一般的に空間電荷制限電流密度 J_{CL} は次の Child Langmuir の式で表わされる.

$$J_{CL} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{V_0^{3/2}}{d^2} \quad (3.2.1)$$

ここで ϵ_0 は真空中の誘電率, V_0 は電極間電圧, d は 2 枚の無限平行板の距離である. この式は 2 枚の無限な広さを

持つ平行板 (どちらかの平板から電子を放出させる) に V_0 の電位差を与えた場合の式である.

4. EDT システム搭載時の FEC の電位変動

EDT システムに FEC を搭載した時, FEC はテザー下端部 (地球側) に取り付けられる. この状態で軌道を周回することでテザーに EMF が発生する (式 (2.1)). この EMF によるテザー上の電位はプラズマ電位に対して正負に自律的に割り当てられる⁴⁾. FEC にはプラズマ電位に対して負側の電位が Emitter 電位として割り当てられ, Gate 電極に電源を用いて正電圧を印加することで EmitterGate 間に電位差を発生させ, Emitter より電子放出を行う. テザーがプラズマ電位に対して正の電位を持つ領域で電子を収集することにより周囲プラズマを介して電気的閉回路が形成されテザーに電流が流れローレンツ力がテザーに発生する (式 (2.2)). この時の EDT システムの概念図及び電位分布を図 3 に示す.

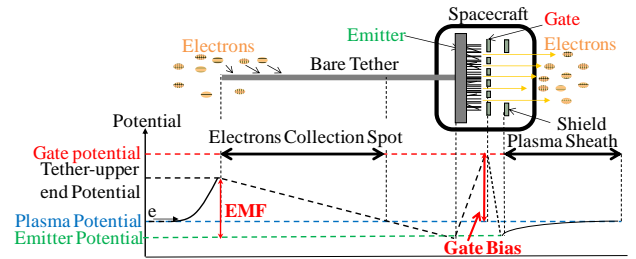


図3 FEC を搭載した EDT システムの電位分布

EDT システムの Emitter 電位は, 軌道周回中の地球磁場やテザーの振動角の変化により時間変化する. 図 4 に実証実験で想定されている ISS 軌道における地球一周分の Emitter 電位の時間変化 (JAXA による解析結果の一例) を示す. 図 4 の結果は高度 350~440km でテザー長さ 700m, 軌道傾斜角 51.6° のときの EMF の時間変化から算出された解析値である. Emitter 電位が宇宙プラズマに対して負になるほど空間電荷効果が弱まるため電子放出には有利である. 本研究では, 空間電荷効果の影響が強くなる Emitter 電位が負に浅い地球 1 周回領域を切り出し, ISS 軌道における地球 1 周分の Emitter 電位の変動を模擬して実験を行った.

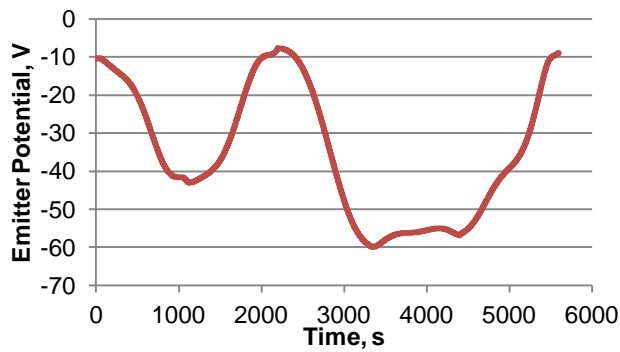


図4 テザー長さ700mの時のISS軌道でのEmitter電位変化の例 (数値シミュレーション)

5. 実験装置および実験方法

本研究で用いたFECは図1に示したようにCNTが塗膜されたEmitter電極，引出電極であるGate電極，Mask電極，Shield電極から構成されている。Mask電極は，Emitter表面に取り付けられ，CNTから放出された電子の軌道を湾曲させGateへ流れ込む電流を低減させる役割を持つ。Shield電極はイオンスパッタや中性粒子の衝突などからEmitterを守る役割がある。実験で使用したFECの外観を図5に示す。図5に示したFECは図1に示した構造図の通りに組み上げたものとなっている。

図6に2台同時動作時の実験回路図を示す。Emitter電位を時間変化させGateに正電圧を印加することで2台同時動作実験を行った。また単体実験は図6に示した回路図においてGate電源を1台として行った。また，Anode電位はプラズマ電位を模擬するために0Vとした。なお真空中実験のチャンバ内圧力は 10^{-5} Paオーダーである。

2台同時動作実験ではFECが隣接する形となるようにアルミ製ベースプレート上に配置した(図7)。

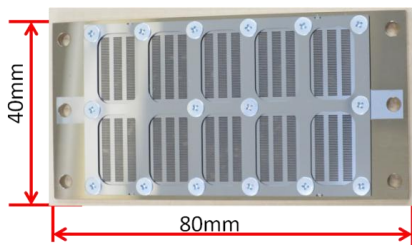


図5 FECの外観

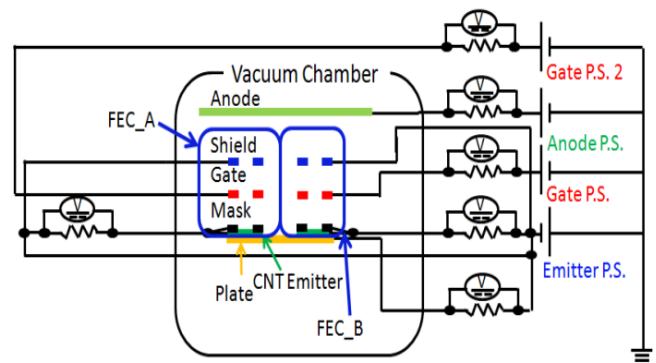


図6 FEC2台同時動作時の回路図

設置中点距離5.0cm

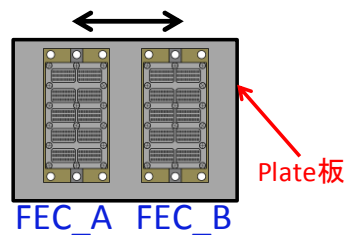


図7 アルミのベースプレートに設置したFEC

6. 実験条件

本実験はJAXAが検討しているEDT技術実証実験環境を想定して行った。主な条件を表1に示す。

表1 EDT実証実験の条件

実証軌道	ISS軌道 (高度 350~440km)
軌道傾斜角	51.6°
テザー長さ	700m
FEC搭載台数	8
FEC1台当たりの最大Emission電流	2.2mA
FEC1台当たりの最大Gate電力	0.5W (最大Gate電流 0.5mA)

表1に示すようにFEC1台からの最大電子放出量は2.2mAであり，Gateに流すことのできる最大電流は実証実験にて使用される電源の仕様から0.5mAとなっている。このことからFEC1台からの放出電流量は2.2mAを超えないように制御しつつ，Gate電流は0.5mA以下となるように制御する必要がある。EDTシステムとしては8台の各FECから最大

限の電子を放出することが望ましいため、FEC から最大限の電子を放出し、Gate 電流を最小に抑える制御が要求される。Emitter 電位は先述の通り自動的に割り当てられ、制御することはできないため、Gate 電極に印加する電圧を制御することによって電子放出を制御することになる。図 8 に電子放出制御を実現するためのフローチャートを示す。

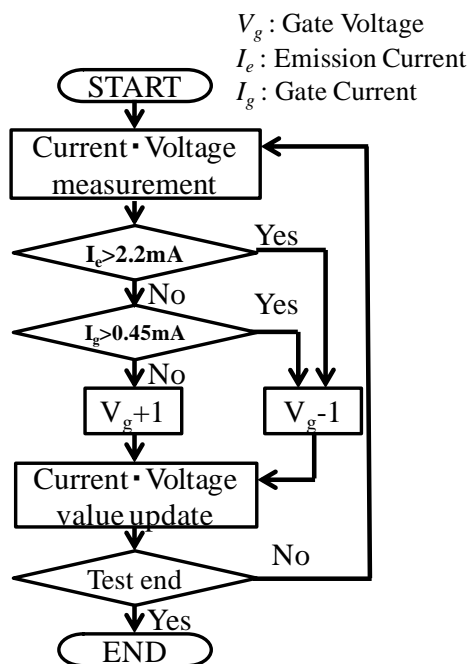


図 8 FEC 制御のフローチャート

図 8 に示したフローチャートにおける、電流電圧測定から更新までの 1 ループの時間は 1 秒であり、この制御では Emission 電流値が 2.2mA をオーバーしたら 2.2mA を下回るまで Gate 電圧を 1V 下げ、Emission 電流が 2.2mA 下回っている時は Gate 電流の上限値に達するまで Gate 電圧を 1V ずつ上昇させ、Gate 電流が上限値を上回ったら上限値を下回るまで Gate 電圧を 1V ずつ下げる制御を行う。

FEC の電子放出の性質として、宇宙プラズマ電位に対して十分に Emitter 電位が負の時は CNT から放出された電子は Gate 電極を通り抜け FEC 外部へ放出されるが、Emitter 電位がプラズマ電位に近くなると電子は宇宙プラズマに到達することができず、Gate 電極に戻ってくる。このため、Gate 電圧を適正に制御しなければ、Emitter 電位が負に浅い領域では CNT から放出された電子は Gate 電極へ流れ込み過剰な Gate 電流が発生する。過剰な Gate 電流は Gate 電極の熱変形や EDT システムの電力増加を招く。ここで CNT から放出される電子電流を Emission 電流、Gate 電極へ流れ込む電

子電流を Gate 電流、FEC 外部へ放出される電子電流を FEC 外部への放出電流として定義すると、Emission 電流に 2.2mA の上限を、Gate 電流にも上限値を設け、図 8 のようにそれら上限値を超えないように Gate 電圧を制御することにより、Emitter 電位が時間変化する場合でも最大限の FEC 外部への放出電流を得ることができると考えられる。

本実験では 1 秒 1V の制御を行うため、ゲート電圧が 1V 上下した時のゲート電流の振幅を考慮して Gate 電流の上限値を 0.45mA として実験を行った。なお、実証実験におけるゲート電流の上限値も 0.45mA である。単体動作及び 2 台同時動作の実験結果を比較し、FEC 外部への FEC の電子放出の制御と引出効率に着目して FEC2 台同時動作時の電子放出性能評価を実施した。FEC 外部への放出電流量 I および引出効率 η はそれぞれ次式で表される。

$$I = I_e - I_g \quad (6.1)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{I_g}{I_e}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (6.2)$$

ここで I_e は Emission 電流、 I_g は Gate 電流である。

7. 実験結果

7.1 電子放出制御の有効性 (単体動作)

Gate 電流上限値 0.45mA の条件で FEC_B を単体動作させた場合の実験結果を図 9 に、図 10 に Gate 電流の時間変化を示す。両図の時間軸は図 4 の時間軸に対応する。両図より、全時間領域において Gate 電流は 0.45mA 程度に維持されており、Gate 電流の増大を防止する Gate 電圧制御が有効であることが分かる。また Emitter 電位が負に深い領域 (3000s~4500s) では空間電荷制限が緩和されて Emission 電流が増加し、同電流が 2.2mA を大きく超えないように Gate 電圧が制御されており、このとき Gate 電流が上限値よりもやや低下していることが図 10 から分かる。一方、Emitter 電位が負に浅い領域 (2000~2300s 付近など) では、FEC 外部への電子放出ができない状態となり、ほぼ Emission 電流 = Gate 電流となるように Gate 電圧が制御されている。これらの結果から、図 8 に示した今回の制御方法が、Gate 電流を抑えつつ最大限の FEC 外部への放出電流を得るのに有効であることが分かる。

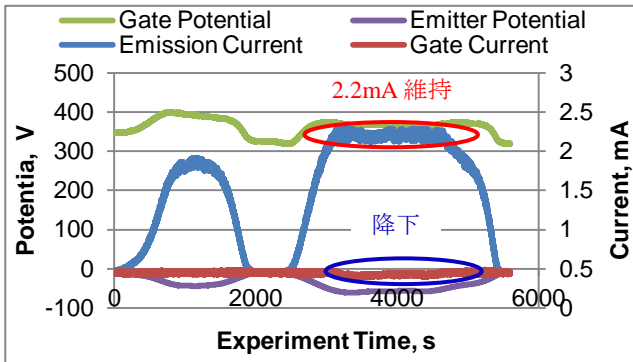


図9 単体 FEC 動作時の電流と電圧の変化

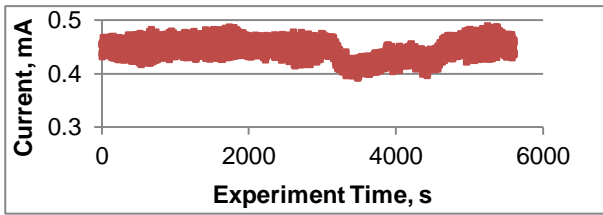


図10 FEC 単体動作時の Gate 電流の変化

7.2 単体及び2台動作時の比較(Emmitter-Anode 距離 17cm)

図11に、FEC_AとFEC_Bの単体動作時のEmission電流とGate電圧を、図12に単体動作時及び2台同時動作時の引出効率を示す。図7に示した通り、FEC_AとFEC_Bは近接している。

FEC_AとFEC_BのGate電位差は約150Vである(図11)。FEC間の距離が短く電位差が高いが、予想に反して図12からもわかるように2台同時動作時の引出効率は大きな劣化を示さなかった。

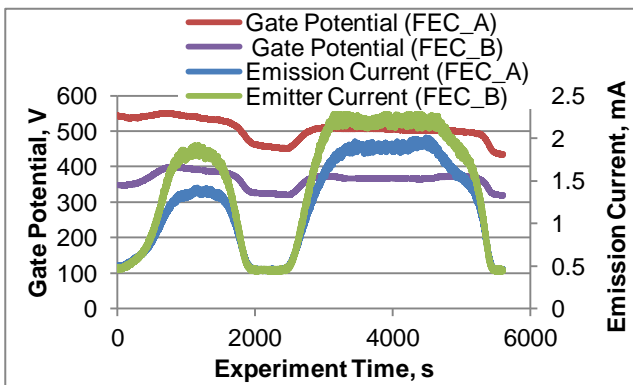


図11 単体動作時の Gate 電圧と Emission 電流(Emmitter-Anode 距離 17cm)

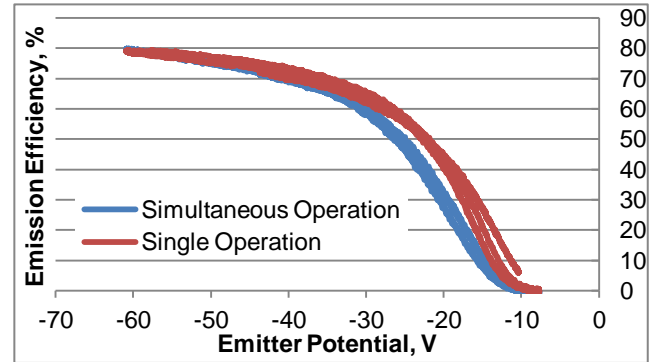


図12 単体動作時の平均引出効率と2台同時動作時の全体引出効率(Emmitter-Anode 距離 17cm)

7.3 単体及び2台動作時の比較(Emmitter-Anode 距離 8cm)

図13にEmmitter-Anode間の距離(E-A距離)が17cmの場合と8cmの場合における単体動作時及び2台同時動作時の引出効率を示す。図13からE-A距離8cmの場合は単体動作時に比べ2台同時動作時の引出効率の低下が大きいことが分かる。

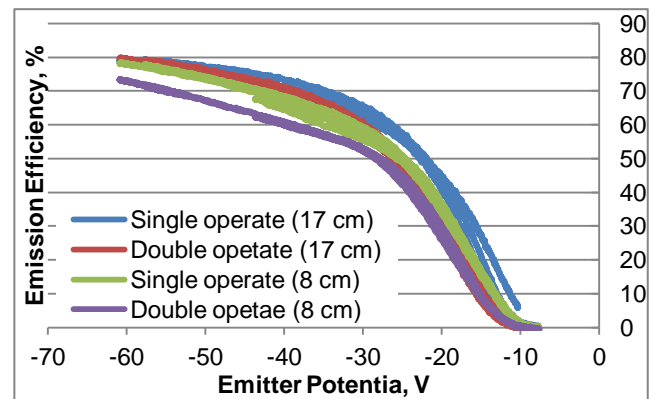


図13 単体動作時の平均引出効率と2台同時動作時の全体引出効率(Emmitter-Anode 距離 17cm&8cm)

E-A距離が短い方の引出効率が悪いという結果となった。しかし、先述した空間電荷制限について考えてみると平行板の距離、すなわちE-A距離が短い方が空間電荷制限電流は大きくなることは明らかである。理論とは逆の結果となった原因を以下より考察する。

Gate-Anode (G-A)間の電流は空間電荷制限電流に支配されると考えられる。陰極が負電位をもつ場合の空間電荷制限電流は次の式で表わされる⁹⁾。

$$J_{G-A} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{[V_e^{1/2} + (V_e + V_a)^{1/2}]^3}{d_{G-A}^2} \quad (7.3.1)$$

ここで V_e は Emitter 電位, V_a は Anode 電位, d_{GA} は G-A 間距離である. この式から G-A 距離が短ければ短いほど空間電荷制限電流は大きくなると考えられる. 図 14 に E-A 間距離が 17cm および 8cm の時の FEC_B の空間電荷制限電流と Anode 電流を, 図 15 に放出電流を示す.

図 14 から空間電荷制限電流および Anode 電流は E-A 間距離が短い, すなわち G-A 間距離が短い方が大きい. 一方, 図 15 から放出電流は E-A 間距離が長い方が大きな値となっている. ここで, Anode 電流は CNT から放出された電子が Anode 板に到達した電子電流のことであり, 放出電流は CNT から放出された電子電流 (Emission 電流) から Gate 電流を差し引いた電流のことである. このときチャンバ壁は接地されており, Emitter 電位はチャンバ壁に対して負電位であることから, E-A 間距離が長い場合, Emitter と Anode 板の間からチャンバ壁に向かって電子が逃げていくことで, 本来なら Gate に戻ってくる電子がチャンバ壁に流れたと考えられる. その結果チャンバ壁に電子が流れていく分空間電荷制限は緩和され, E-A 間距離が長いほど放出電流が増えたと予想される.

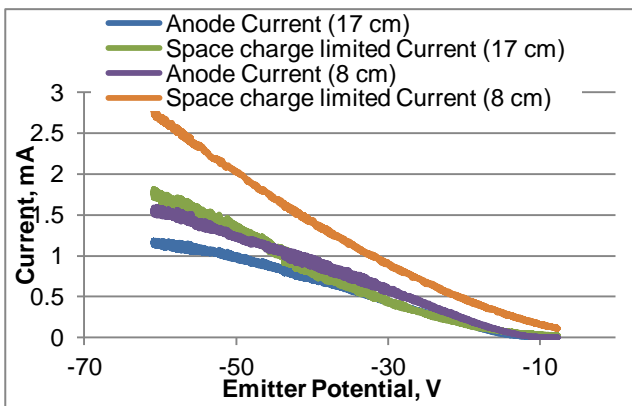


図 14 FEC_B の単体動作時の Anode 電流と空間電荷制限電流 (Emitter-Anode 距離 17cm&8cm)

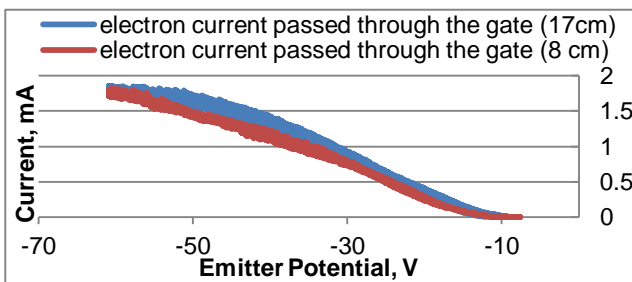


図 15 FEC_B の単体動作時の放出電流 (Emitter-Anode 距離 17cm&8cm)

このことから, 2 台同時動作時においても E-A 間距離が短く, FEC 間距離が近く, FEC 間電位差が大きければ FEC 間で行き来する電子が増加し空間電荷制限効果が大きく表れると考えられる. さらに E-A 間距離が近いと Anode 板から放出された Anode 板近傍の 2 次電子が Gate に流入する可能性がある. 上記の各点が, E-A 間距離の長い場合のほうが短い場合よりも引出効率が良くなった原因と考えられる.

8. 結論

本研究では, EDT 技術実証実験環境を想定した電界放出カソードの性能評価のため, 軌道周回による電位変動を模擬した条件下での単体動作および 2 台同時動作試験を行った.

その結果, FEC 外部への放出電流を最大限確保しつつ, Gate 電流を適正值に保つためには, Emission 電流と Gate 電流に上限値を設け, Emitter 電位の変化に応じて Gate 電圧を制御する手法が有効であることが示された. また, 真空中における 2 台同時動作時のそれぞれの FEC の Emission 電流値は Anode 板が低いほど単体動作時より減少し, 引出効率が低下することが確認された. E-A 間距離が大きいと, チャンバ壁への電子放出の割合が高くなり FEC の電子放出性能は高くなることが確認された.

参考文献

- 1) S. Kawamoto, Y. Ohkawa, *et al.*, “Strategy for Active Debris Removal Using Electrodynamic Tether”, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, Vol. 7, No. ists26, pp. Pr_2_7-Pr_2_12, 2009.
- 2) 山極芳樹, 竹ヶ原春貴, 小堺正也, 大西健夫, 田原弘一 “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 年.
- 3) 電気学会, “電子・イオンビーム工学” オーム社, 1995 年.
- 4) S. Kawamoto, *et al.*, “Precise numerical simulations of electrodynamic tethers for an active debris removal system” *Acta Astronautica* 59 (2006) 139 – 148.
- 5) George Jaffé “On the Currents Carried by Electrons of Uniform Initial Velocity” *Phys. Rev.* 65, 91 (1944)