

1L06 軌道上実証実験を想定した電界放出カソード 複数台動作時の性能評価

○井本伸, 島田温子 (静岡大学), 大川恭志, 河本聡美 (JAXA), 山極芳樹 (静岡大学)

Experiment of Parallel Field Emission Cathode Operation Preparing for On-orbit Demonstration
Shin Imoto, Atsuko Shimada (Shizuoka University), Yasushi Ohkawa, Satomi Kawamoto (JAXA) and
Yoshiki Yamagiwa (Shizuoka University)

Key Words: Field Emission Cathode, Carbon Nanotube, Parallel Operation of FECs

Abstract

Research of debris removal system using electrodynamic tether (EDT) system has been conducted in JAXA. The EDT system needs active electron emission device in order to drive large electric current through the tether for obtaining adequate de-orbit thrust. A field emission Cathode (FEC) can be a good option of the electron emitter because of its simplicity and potential performance. In the EDT systems, it is expected that several FEC units operates in parallel because of redundancy requirement. Since the interaction between the cathode units may cause instability or performance degradation, experiments of FEC parallel operation is required prior to practical on-orbit operation. This paper describes the result of double FEC operation tests.

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) がエミッション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。

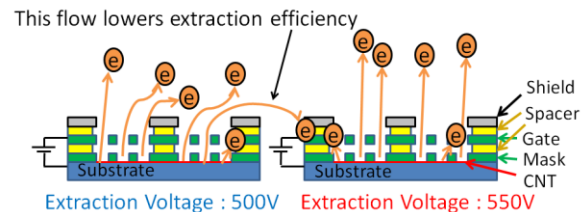


図 1 FEC の構造と 2 台同時動作時の電子の流れの概念図 (引出電圧の低い FEC から放出された電子は引出電圧の高い隣の FEC に吸い取られる可能性がある)

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．

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

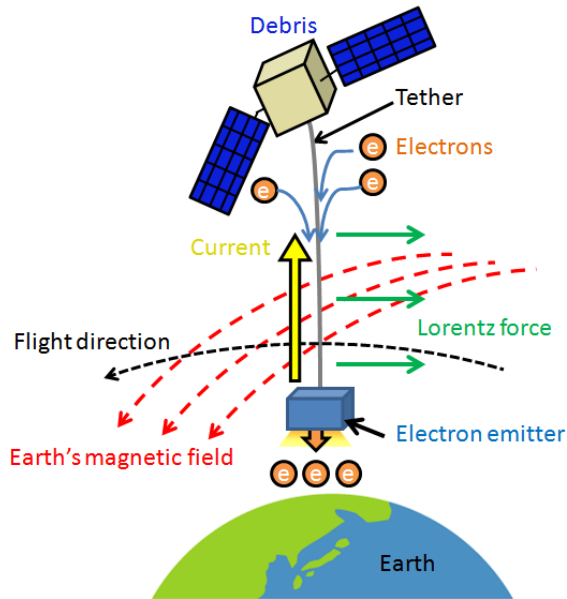


図2 軌道上の EDT システムの動作原理

3. 電界放出カソード (FEC) ⁽³⁾

FEC は主にエミッタ電極とゲート電極で構成される (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エミッタ材料 (CNT) 表面の電界が $10^9 \sim 10^{11} \text{V/m}$ オーダ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．

$$J = \frac{e^3 F_E^2}{8\pi h \phi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m_e}}{3heF} \phi^{\frac{3}{2}}\right) \quad (3.1)$$

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．エミッタ先端が放物面である時， F_E は

$$F_E = \beta E \quad (3.2)$$

$$E = \frac{2V}{r_{tip} \ln(4d/r_{tip})} \quad (3.3)$$

と表される．このとき β は電界増倍係数， E は電極間電界， r_{tip} はエミッタ先端の曲率半径， 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．

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エミッタ電位として割り当てられ，ゲート電極に電源を用いて正電圧を印加することでエミッタ-ゲート間に電位差を発生させ，エミッタ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氣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．

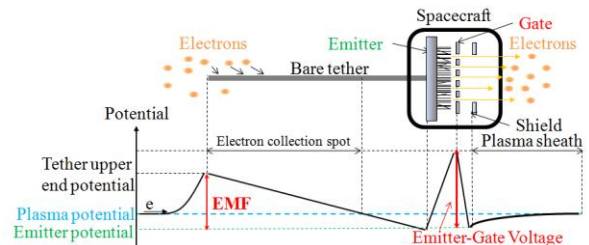


図3 FEC を搭載した EDT システムの電位分布

EDT システムのエミッタ電位は，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エミッタ電位の時間変化 (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．エミッタ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エミッタ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 周分のエミッタ電位の変動を模擬して実験を行った．

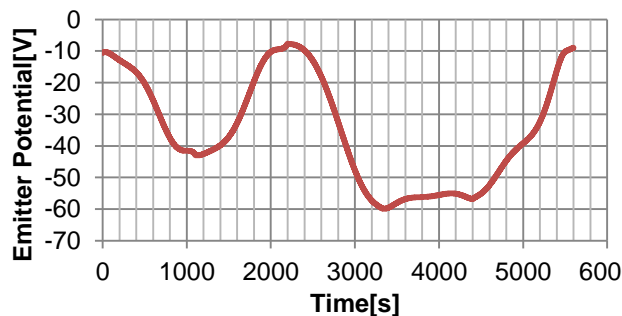


図4 テザー長さ 700m の時の ISS 軌道でのエミッタ電位変化の例 (数値シミュレーション)

5. 実験装置及び実験方法

本研究で用いた FEC は図 1 に示したように CNT が塗膜されたエミッタ電極，引出電極であるゲート電極，マスク電極，シールド電極から構成されている。マスク電極は，エミッタ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ゲートへ流れ込む電流を低減させる役割を持つ。シールド電極はイオンスパッタや中性粒子の衝突などからエミッタを守る役割がある。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。エミッタ電位を時間変化させゲート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ゲート電源を 1 台として行った。

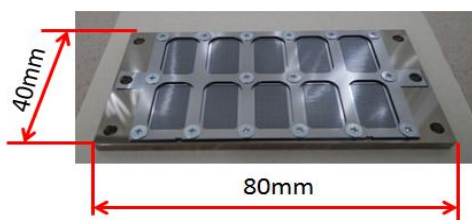


図5 FEC の外観

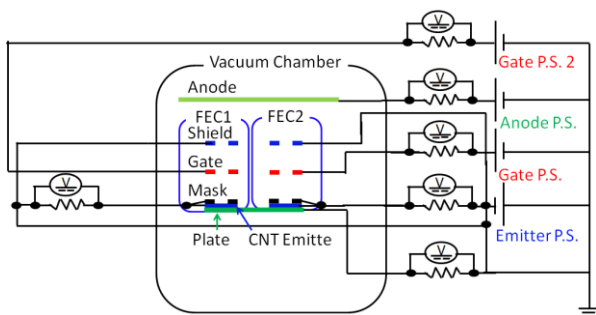


図6 FEC2 台同時動作時の回路図

実験では複数台の FEC を図 7 のようにアルミ製ベースプレート上に配置した。同図には各 FEC の個体識別名称 (FEC_A~FEC_D) も記載した。

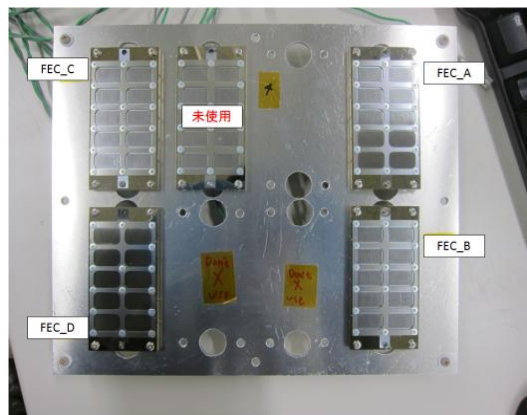


図7 アルミのベースプレートに設置した FEC

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 台当たりの最大エミッション電流	3mA
ゲート電源 1 つ当たりの最大電力	0.5W (最大ゲート電流 0.5mA)

表 1 に示すように FEC1 台からの最大電子放出量は 3mA であり，ゲート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 3mA を超えないように制御しつつ，ゲート電流は 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，ゲート電流を最小に抑える制御が要求される。エミッタ電位は先述の通り自律的に割り当てられ，制御することはできないため，ゲート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。

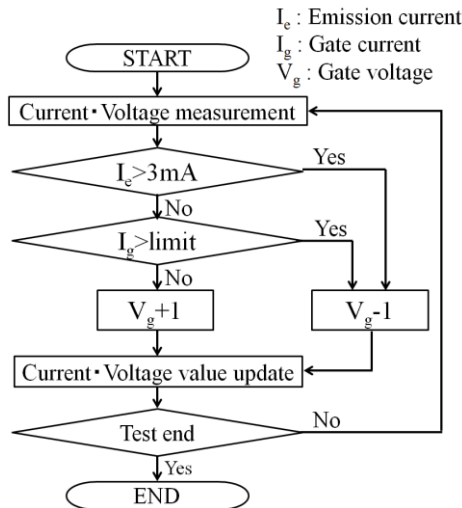


図 8 FEC 制御のフローチャート

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、この制御ではエミッション電流値が 3mA をオーバーしたら 3mA を下回るまでゲート電圧を 1V 下げ、エミッション電流が 3mA 下回っている時はゲート電流の上限値に達するまでゲート電圧を 1V ずつ上昇させ、ゲート電流が上限値を上回ったら上限値を下回るまでゲート電圧を 1V ずつ下げるようになっている。

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エミッタ電位が負の時は CNT から放出された電子はゲート電極を通り抜け FEC 外部へ放出されるが、エミッタ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、ゲート電極に戻ってくる。このため、ゲート電圧を適正に制御しなければ、エミッタ電位が負に浅い領域では CNT から放出された電子はゲート電極へ流れ込み過剰なゲート電流が発生する。過剰なゲート電流はゲート電極の熱変形や 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エミッション電流、ゲート電極へ流れ込む電子電流をゲート電流、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、エミッション電流に 3mA の上限を、ゲート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ゲート電圧を制御することにより、エミッタ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。

本実験ではゲート電流の上限値を 0.1mA, 0.25mA および 0.4mA として 3 ケースの実験を行った。各ケースにおける単体動作及び 2 台同時動作の実験結果

を比較し、FEC 外部への放出電流量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 はエミッション電流、 I_g はゲート電流である。

7. 実験結果と考察

7.1. 電子放出制御の有効性 (単体動作)

ゲート電流上限値 0.4mA の条件で FEC_A を単体動作させた場合の実験結果を図 9 に、図 10 にゲート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ゲート電流は 0.4mA 以下に維持されており、ゲート電流の増大を防止するゲート電圧制御が有効であることが分かる。またエミッタ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エミッション電流が増加し、同電流が 3mA を超えないようにゲート電圧が制御されており、このときゲート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、エミッタ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、ほぼエミッション電流=ゲート電流となるようにゲート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、ゲート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。

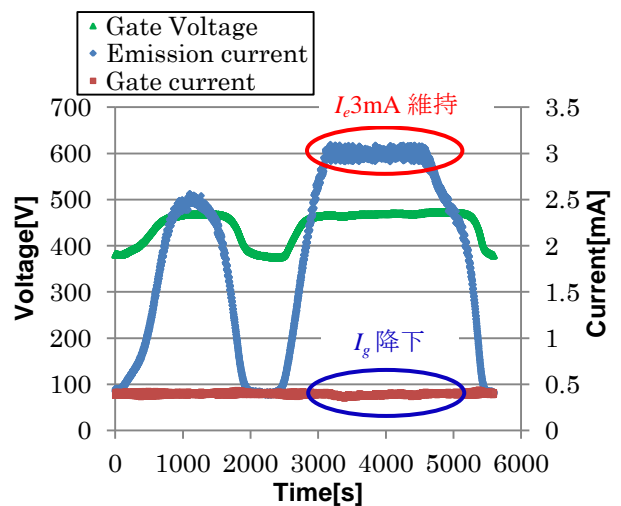


図 9 単体 FEC 動作時の電流と電圧の変化

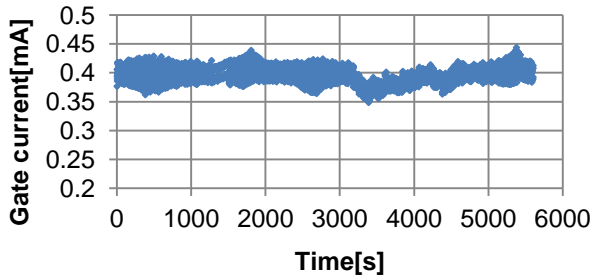


図 10 FEC 単体動作時のゲート電流の変化

図 11 にゲート電流の上限値を 0.1mA, 0.25mA, 0.4mA に設定した場合の, FEC 外部への放出電流とエミッタ電位の関係を示す (供試体は FEC_A). 図 11 よりゲート電流上限値に関わらずエミッタ電位が負に深いほど FEC 外部へ放出される電子電流は多いことが分かる. また, ゲート電流上限値が大きいほど FEC 外部へ放出される電子電流は大きいことが分かる. 同図よりゲート電流上限値による定性的な傾向の違いがないことが示されたため, 以降の 2 台同時動作の評価ではゲート電流上限値 0.4mA のケースを使うこととする.

- ◆ Extraction current from FEC (I_g upper limit 0.1mA)
- Extraction current from FEC (I_g upper limit 0.25mA)
- ▲ Extraction current from FEC (I_g upper limit 0.4mA)

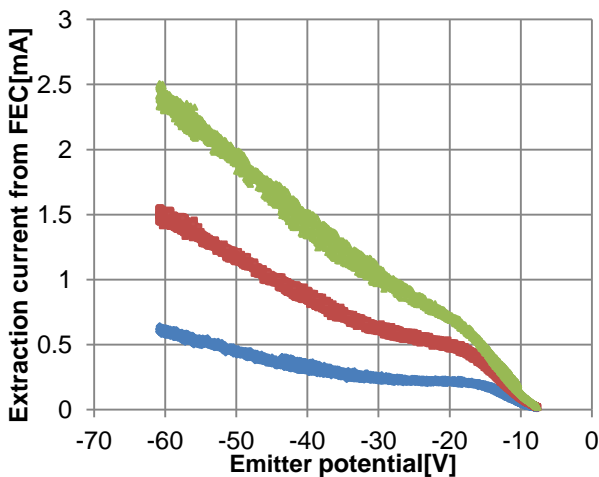


図 11 最大ゲート電流を変化させた場合の, FEC 外部への放出電流とエミッタ電位の関係

7.2. FEC 個別制御の有効性

本節では FEC_A と FEC_B を用いて FEC の 2 台同時動作を行い単体動作時との電子放出性能の比較を行った結果を示す. ここではゲート電源を 1 台のみ用いた場合 (2 台の FEC のゲート電圧が同一) と 2 台用いて FEC を個別に制御する場合 (2 台の FEC の

ゲート電圧を個別に制御) についてどちらが有効かを述べる. 図 12 にエミッタ電位 0~-100V におけるゲート電圧同一制御時と個別制御時の放出電流を, 図 13 に引出効率をそれぞれ示す.

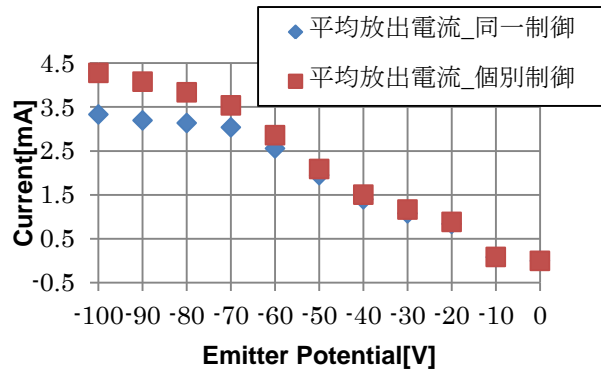


図 12 エミッタ電位 0~-100V における放出電流

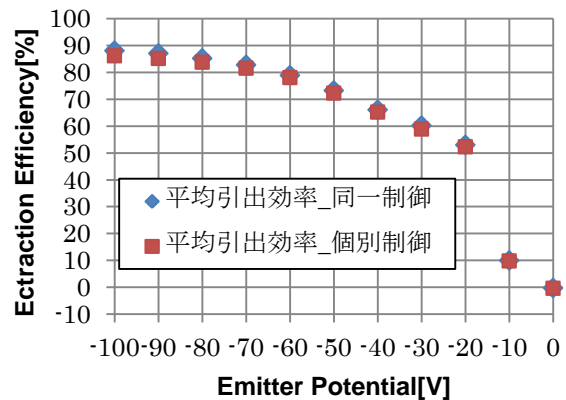


図 13 エミッタ電位 0~-100V における引出効率

図 12, 図 13 ではエミッタ電位 0~-100V で 10V ごとにデータを取得して比較を行っている. 図 12 よりエミッタ電位が負に深いほど同一制御時よりも個別制御時の放出電流が大きくなっていることが分かる. 一方, 図 13 を見ると同一制御時の方が引出効率はわずかに高くなっている. これは同一制御では FEC 間でゲート電圧の差が無い場合, 供試体間での電子の授受による損失が小さいためと考えられる. しかし図 12 より同一制御の場合は, 放出電流の絶対値が小さい. エミッタ電位が深いほどその傾向が顕著になることから, EDT の長さが長くなるほど (つまり EMF が大きくなるほど) 同一制御では各 FEC から最大限の放出電流が得られなくなることが予想される. 従って制御プログラムは複雑になるが, EDT システムの将来性や冗長性の観点から FEC1 台に対してゲート電源を 1 台搭載し, ゲート電圧の制御を FEC1 つ 1 つに対して行うことが各 FEC から最大限の放出電流を得るのに有効であることが分かる.

7.3. 単体動作時と2台動作時の比較

図14に、FEC_AとFEC_Bの単体動作および両者の同時動作時のエミッション電流とゲート電圧を、図15に引出効率を示す。図7に示した通り、FEC_AとFEC_Bは近接している。

図14より、単体動作におけるエミッション電流はFEC_Aの方がFEC_Bよりも大きく、単体としての電子放出性能はFEC_Aの方が良いことが分かる。また単体動作の場合も2台同時動作の場合も、エミッション電流が3mAを超えないように適正にゲート電圧が制御されていることが分かる。一方、2台動作時のエミッション電流はFEC_A、FEC_B共に単体動作時よりも減少しており、図15からも2台動作時の引出効率が単体動作時よりも低下していることが分かる。これはFEC_Bの方が引出電圧が高いため、2台同時動作においてはFEC_Aから放出された電子がFEC_Bのゲート電極に流入することによるものと考えられる。

複数台同時動作による上記のような引出効率の低下は、FEC相互間の距離やアノードとの距離、およびゲート電極部位の露出面積等の影響を受けると考えられるため、今後、これらのパラメータを考慮してのさらなる評価が必要となる。

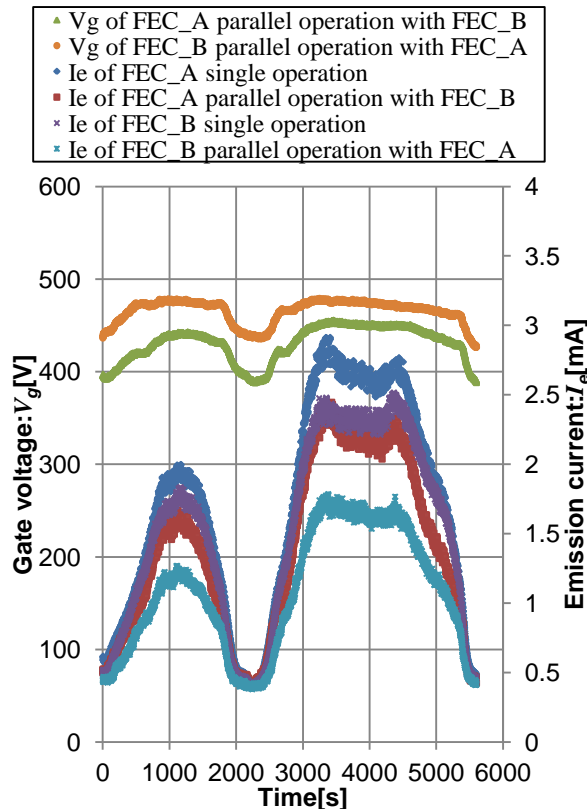


図14 単体および2台同時動作時のゲート電圧とエミッション電流

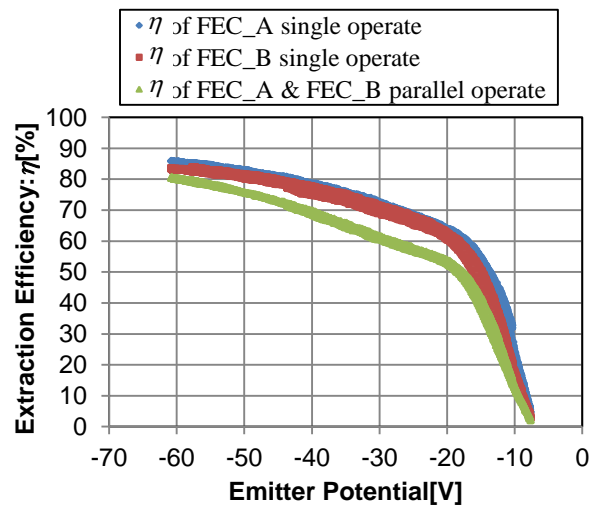


図15 単体および2台同時動作時の引出効率

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(FEC)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、ゲート電流を適正值に保つためには、エミッション電流とゲート電流に上限値を設け、エミッタ電位の変化に応じてゲート電圧を制御する手法が有効であることが示された。さらに、ゲート電源をFEC1台に対し1台設け、FEC毎にゲート電圧を制御することが各FECから最大限の放出電流を得るのに有効であることが分かった。また、2台同時動作時のそれぞれのFECのエミッション電流値は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。

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.