

軌道上実証実験を想定した電界放出カソードの性能評価

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

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，低電力動作可能で動作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 FEC1 台から最大限の電流を得ようとしても 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。FEC の電極構造，および 2 台同時動作時の電子の流れを図 1 に示す。

本研究では，JAXA が 2015 年度に実施予定の HTV による EDT 技術実証実験を想定し，FEC の複数台動作時の電子放出制御手法の評価のために FEC を 2 台同時動作させ，電子放出性能を取得した。

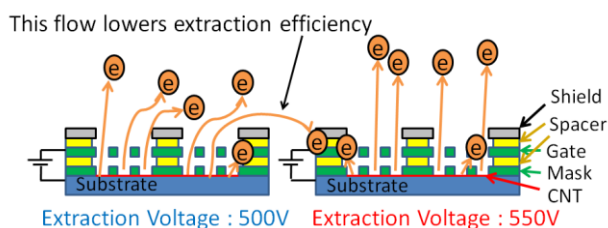


Fig. 1 Flow of electrons in parallel operation of two FECs.

2. 導電性テザー（EDT）システム⁽²⁾

EDT システムの作動原理を図 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。このときの誘導起電力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。

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

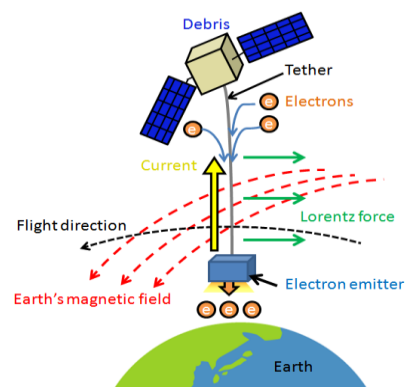


Fig. 2 Schematic of EDT system operation on orbit.

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。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。

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

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

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

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

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_{ip} 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 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⁾。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。

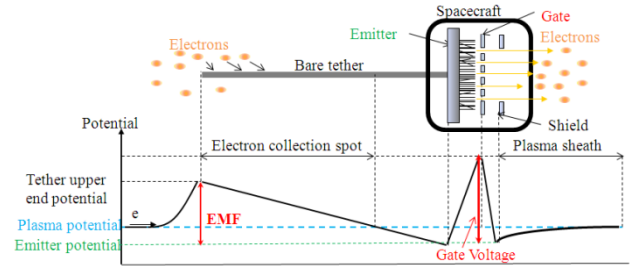


Fig. 3 Potential distribution of EDT system with FEC.

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り、ここでは、電子放出にとって最も不利となる地球 1 周回を切り出した。本研究ではこのエミッタ電位の変動データを使用し、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。

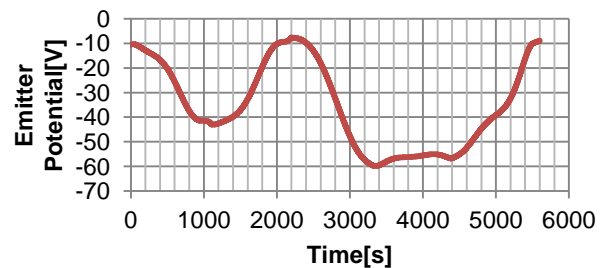


Fig. 4 Example of emitter potential variation in ISS orbit (Numerical simulation). Tether length is 700m.

5. 実験装置および実験方法

本研究で用いた FEC の構造は図 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。

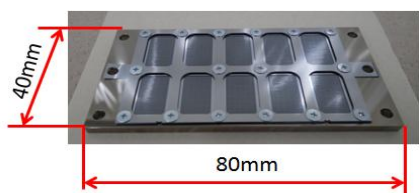


Fig. 5 Appearance of the FEC.

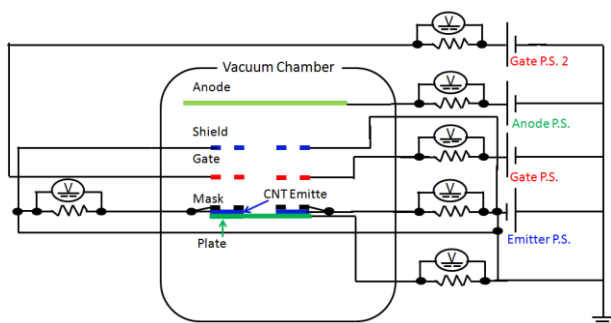


Fig. 6 Circuit diagram for parallel FEC operation.

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。

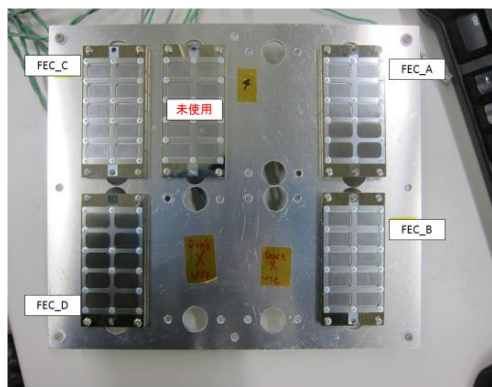


Fig. 7 FECs on aluminum base plate.

6. 実験条件

本実験は 2015 年度に JAXA が実施予定の HTV による EDT 技術実証実験を想定して行った。主な条件を表 1 に示す。

Table 1 Expected Conditions of EDT experiment on HTV.

Demonstration orbit	ISS orbit (altitude 350~440km)
Inclination	51.6°
Tether length	700m
Number of FEC unit	8
Maximum emission current per single FEC	3mA
Maximum power per single gate P.S.	0.5W (Maximum gate current 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るため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。

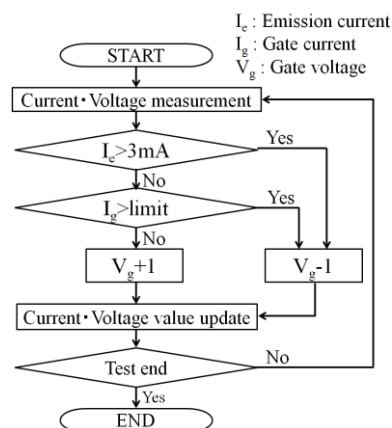


Fig. 8 Flow chart of FEC control.

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。このことから、ゲート電流に上限値を設け、それを超えないようにゲート電圧を制御することが第一に必要となる。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。

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秒とする。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

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。図9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。

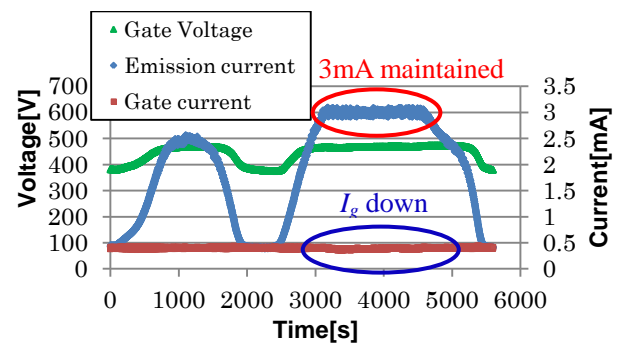


Fig. 9 Currents and voltage variation in single FEC operation.

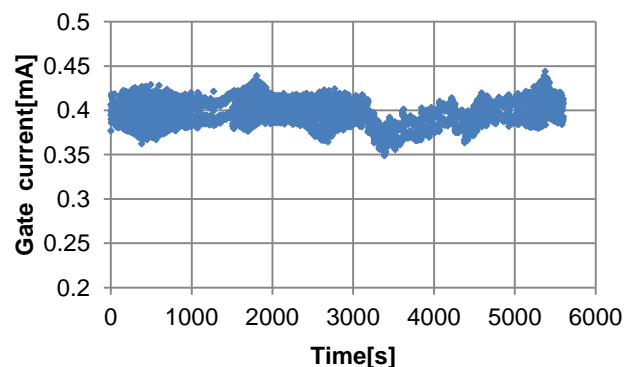


Fig. 10 Gate current variation in single FEC operation.

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。

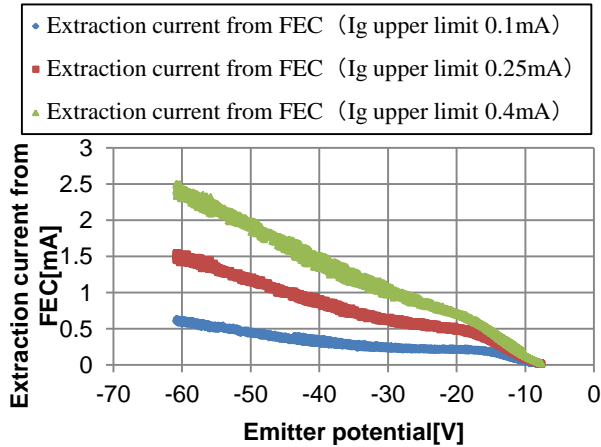


Fig. 11 Extraction current from FEC plotted against emitter potential in three maximum gate current cases.

7. 2 単体動作と2台動作の比較 (FEC間が近距離の場合)

図 12 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 13 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 12 より、単体動作 (single) 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 (Parallel) 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 13 から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。

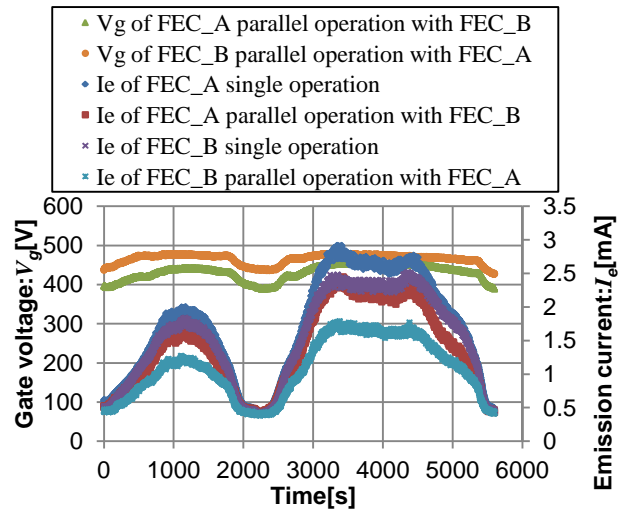


Fig. 12 Gate voltages and emission current in single & parallel operation (FEC_A & FEC_B. Located side by side on based plate.) .

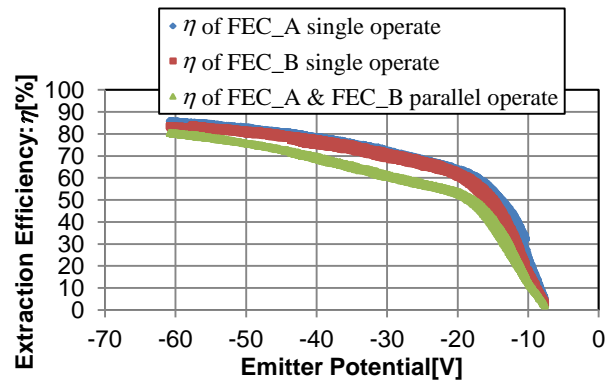


Fig. 13 Extraction efficiency in single & parallel operation (FEC_A & FEC_B. Located side by side on based plate.) .

7. 3 単体動作と2台動作の比較 (FEC間が遠距離の場合)

図 14 に FEC_A と FEC_D の単体動作時および2台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 の通り、この組み合わせは FEC 間の距離が大きいケースとなる。

図 14 より FEC 間の距離が大きい場合は、2台動作時のエミッション電流は単体動作時と同程度であることが分かる。また図 15 より、引出効率についても単体動作時及び2台動作時の差が、FEC の距離が近い時に比べ小さい。これは距離が遠くなったことで FEC 同士の電子の流入出が減少し、2台動作による影響が少なくなったためであると考えられる。本結果より、FEC を複数台動作させる場合には、各 FEC 間

の距離が全体性能に影響することが示された。宇宙機への搭載を検討する場合には、搭載可能なフットプリントと FEC 性能要求とのトレードオフが必要となる。

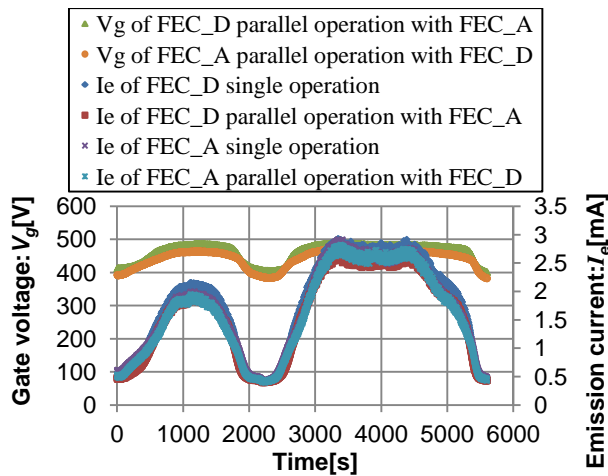


Fig. 14 Gate voltages and emission current in single & parallel operation (FEC_A & FEC_D. Located on opposite sides on based plate.) .

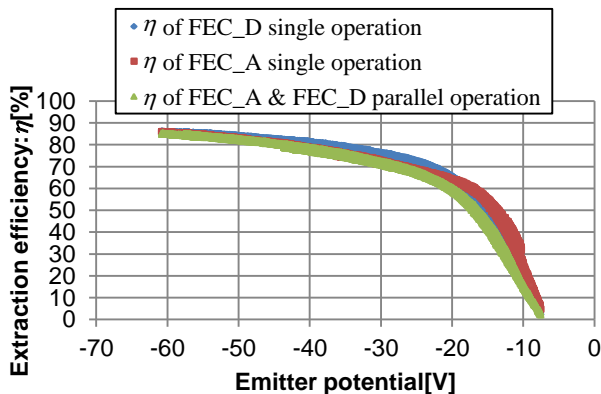


Fig. 15 Extraction efficiency in single & parallel operation (FEC_A & FEC_D. Located on opposite sides on based plate.) .

7.4 単体動作と2台動作の比較(FECの性能差が大きい場合)

図16にFEC_CとFEC_Dの単体動作時と2台動作時のエミッション電流とゲート電圧を、図17に引出効率を示す。ここでは、性能個体差の大きいFEC間の相互作用を評価するために、電子引出に必要なゲート電圧に100V程度の違いがあるFEC2台を選定した。ベースプレート上の配置としては、図7の通り近接している。

図16より、電子放出性能の差が小さい場合(図12)と同様に、エミッション電流は2台動作時の方が単体動作時と

比べて2台とも減少していることが分かる。また図17より、FEC個体間のゲート電圧差が大きい今回の場合の方が、図13の場合と比較して、2台同時動作による引出効率の落差が大きい。これはFEC間の電位差が大きいため、ゲート電圧の大きいFEC_Cのゲート電極に、電子がより引き寄せられやすくなったからであると考えられる。また、全ての結果において2台動作時の方が単体動作よりもエミッション電流が低くなっているが、これは引出電圧の低いFECにも引出電圧の高いFECから放出された電子がゲートの正電圧に引き寄せられ、全体のゲート電流が増加しているためであると考えられる。

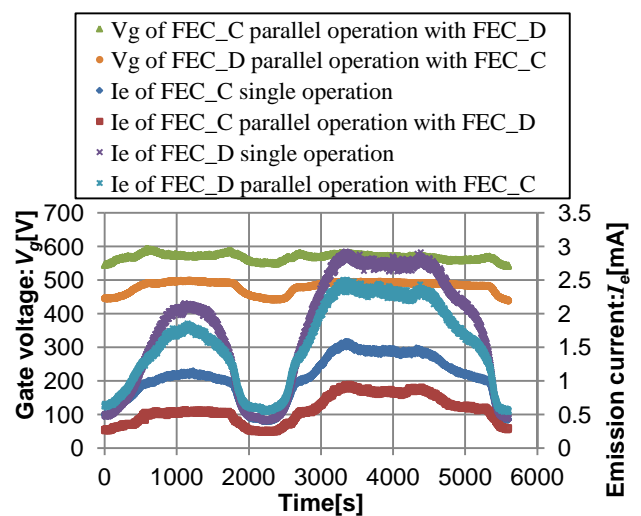


Fig. 16 Gate voltages and emission current in single & parallel operation (FEC_C & FEC_D. Having large difference in required gate voltage.) .

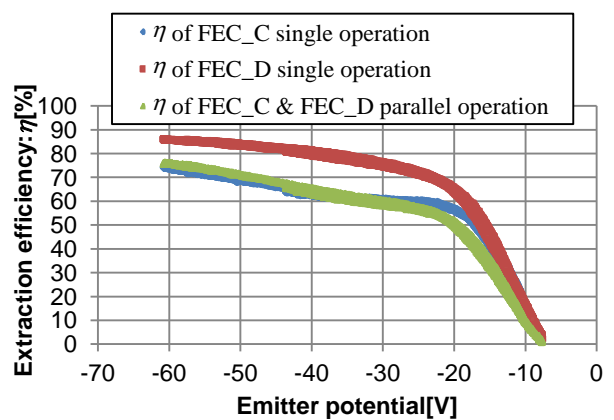


Fig. 17 Extraction efficiency in single & parallel operation (FEC_C & FEC_D. Having large difference in required gate voltage.) .

8. 結論

本研究では、軌道上実証実験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分かった。また、2台同時動作時のエミッション電流値は2台とも単体動作時より減少し、引出効率が低下することが分かった。さらに、2台同時動作時の FEC 間距離が小さいほど、また両者のゲート電圧の差が大きいほど引出効率が低下することが示された。

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, 小塚正也, 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.