

導電性テザーシステム軌道上実証実験を想定した 電界放出カソードの複数台同時動作における性能評価

Parallel Operation of Field Emission Cathodes in Preparation for an On-Orbit Demonstration of an Electrodynamic Tether System

○井本 伸・湯浅 直樹・橘 薫(静大)・大川 恭志・河本 聡美(宇宙航空研究開発機構)・
山極 芳樹(静大)

○Shin Imoto・Naoki Yuasa・Kaoru Tachibana(Shizuoka University)・Yasushi Ohkawa・Satomi Kawamoto(JAXA)・
Yoshiki Yamagiwa(Shizuoka University)

Abstract (概要)

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. We conducted experiments of FEC parallel and the single operations in a vacuum and plasma environment. The decrease in the emission currents during the FECs parallel operation compared to the single operation was 10 % when the voltage between the emitter and plasma is 60 V. The higher voltage between the emitter and plasma, the emission current decrease became smaller. In addition, the gate currents due to plasma electrons during the FECs parallel operation were lower than the single operation because the plasma sheath surface area decreases compared to the single operation. Therefore, if the voltage between the emitter and plasma is high, it is conceivable that the decrease in the emission currents due to the parallel operation is little or none.

記号の説明

V_{emf} : 誘導起電力	J_{CL} : 空間電荷制限電流密度
V_{orb} : 軌道方向速度	ω : 真空中の誘電率
B : 地球磁場強度	S : シース厚さ
L_{tether} : テザー長さ	λ_D : デバイの長さ
F : ローレンツ力	V_{p-e} : エミッター-プラズマ間電位差
I_{tether} : テザー電流	T_e : 電子温度
J : 電流密度	V_a : アノード電位
e : 素電荷	V_g : ゲート電位
F_E : 先端表面電界	I_e : エミッション電流
B : 地球磁場強度	I_g : ゲート電流
h : プランク定数	V_e : エミッタ電位
ϕ : 仕事関数	d_{a-e} : エミッター-アノード間距離
m_e : 電子質量	
β : 電界増倍係数	
E : 電極間電界	
V : 電極間電圧	
B : 地球磁場強度	
r_{tip} : エミッタ先端の曲率半径	
d : 電極間距離	

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 の電子放出制御アルゴリズムの考案とその有効性評価および FEC 複数台同時動作時の電子放出特性評価のために、FEC の単体動作および 2 台同時動作を行い FEC 複数台動作時の電子放出性能低下メカニズムの基礎評価と FEC の 8 台同時電子放出実験を実施した。

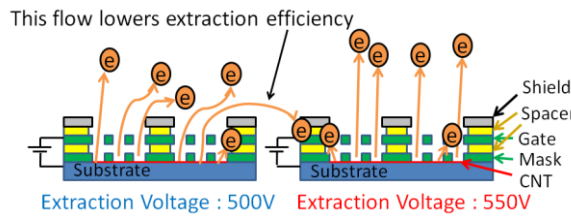


図 1 FEC の構造と 2 台同時動作時の電子の流れの概念図（引出電圧の低い FEC から放出された電子は引出電圧の高い FEC に吸い取られる可能性がある）

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、テザー下端部（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気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。

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

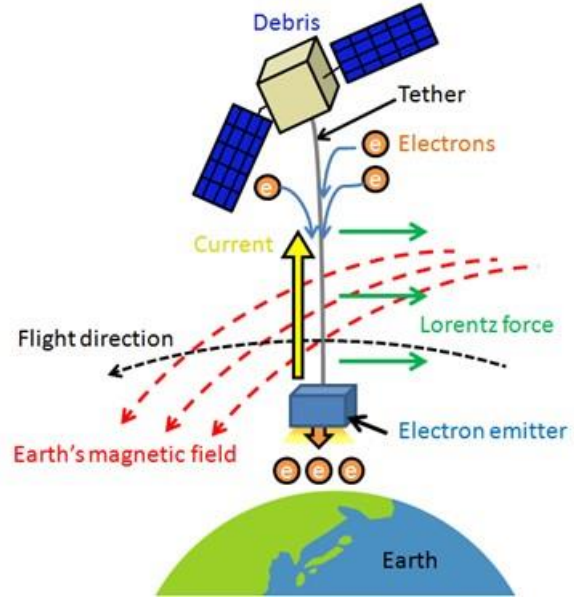


図 2 軌道上の EDT システムの動作原理

3. 電界放出カソード (FEC)³⁾

3.1 電界放出カソードの原理と構造 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。

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

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。エミッタ先端が放物面である時、 F_E は

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

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

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。

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⁴⁾。

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

ここで ϵ_0 は真空中の誘電率、 V は電極間電位差、 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。

FECの軌道上での運用を想定した場合、電子をFECから真空中に放出するための陽極に相当するものは宇宙空間には存在せず、周辺プラズマによりEDTシステム周辺に形成されたシース端までの距離が電極間距離に相当する。シースとは、導体表面電位とプラズマ電位の差により生じる電荷層のことであり、シース厚さは導体表面電位の及ぶ範囲ということになる。シース厚さ S は次式で表される⁵⁾。

$$S = \frac{\sqrt{2}}{3} \lambda_D \left(\frac{2V_{p-e}}{T_e} \right)^{3/4} \quad (3.2.2)$$

ここで、 λ_D はデバイ長、 V_{p-e} はエミッタ-プラズマ間電位差、 T_e は電子温度である。上記の式はチャイルド・ラングミュアシースと呼ばれ、シース内のイオン電流密度を一定としたときに得られる式である。上式よりシース厚さはエミッタとプラズマの電位差に依存していることがわかる。シース厚さ、空間電荷制限電流密度ともにエミッタ電位が変化することで値が変わるため動作環境、すなわち軌道上を想定した電子放出性能を見積もることは極めて重要である。

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⁶⁾。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。

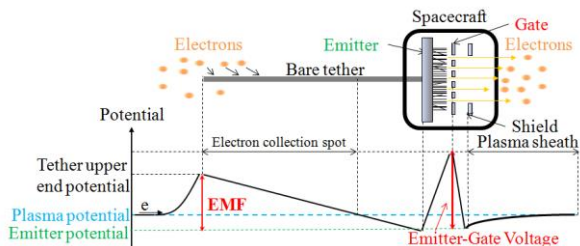


図3 FECを搭載したEDTシステムの電位分布

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。

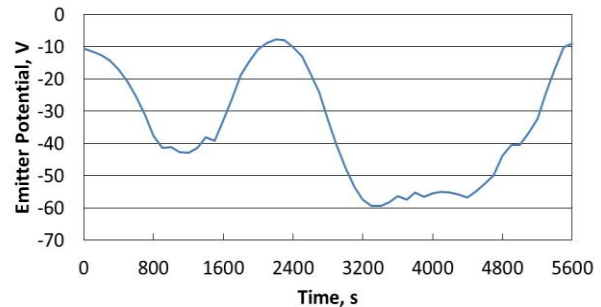


図4 テザー長さ700mの時のISS軌道でのエミッタ電位変化の例（数値シミュレーション）

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。また、2台同時動作におけるFECの配置については2台のFECを実証実験で用いられる物と同形状のアルミ製ベースプレート上に図7のように配置した。

図8には8台同時電子放出実験に使用したFECをアルミプレート上に配置した様子を示す。図9にはその時の実験環境を示す。8台同時動作ではチャンバ内壁にカプトンフィルムを巻きチャンバ壁電位の影響を排除し、プラズマ環境と真空環境の電子放出性能の整合性を確認し試験の簡易化を図り、プラズマを生成せず真空環境にてアノード板を用いることで電子放出実験を行った。チャンバ壁電位の影響除去によりチャンバ壁への漏れ電流がなくなり、正確な電子放出性能を測定することが可能となり、プラズマを生成せずにプラズマ環境における電子放出性能を推測することが可能となる。

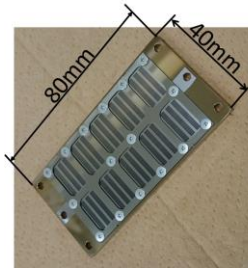


図5 FECの外観

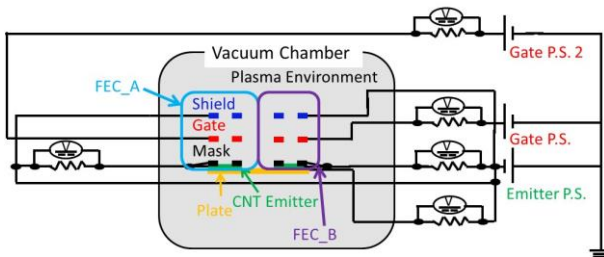


図6 FEC2台同時動作時の回路図

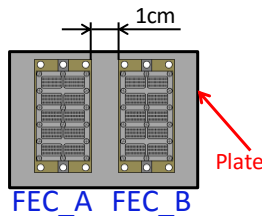


図7 アルミのベースプレートに設置した2台のFEC

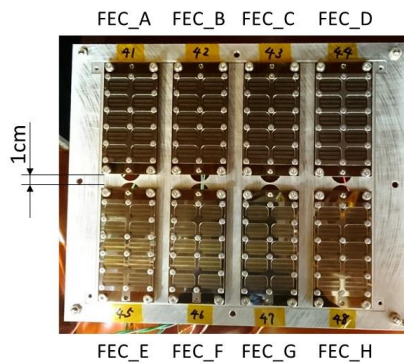


図8 アルミのベースプレートに設置した8台のFEC

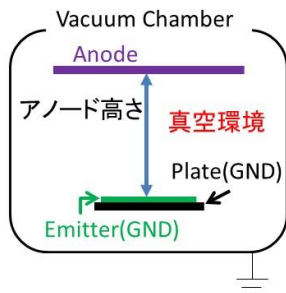


図9 8台同時動作実験環境

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。また、本実験では実証実験環境を模擬するためにプラズマを ECR イオン銃にて生成した。主なプラズマパラメータを表2に示す。表3には8台同時電子放出試験条件を示す。

表1に示すように FEC1 台からの最大エミッション電流は 2.2mA 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 0.45mA となっている。このことから FEC1 台からのエミッション電流量は 2.2mA を超えないように制御しつつ、ゲート電流は 0.45mA 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。

表1 EDT 実証実験の条件⁷⁾

実証軌道	ISS 軌道の 20km 以上下側 (高度 300~400km)
軌道傾斜角	52°
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	2.2mA
ゲート電源1つ 当たりの最大電力	0.5W (最大ゲート電流 0.45mA)

表2. 本実験と実証実験のプラズマパラメータの比較

	本実験	実証実験
圧力, Pa	8.2×10^4	10^9 オーダ
電子密度, m^{-3}	7.1×10^{11}	最大 1×10^{12}
電子温度, eV	9.8	0.1-0.2
プラズマ電位, V	19	基準電位(0V)

表3. 8台同時動作試験条件

チャンバ内環境	真空
圧力, Pa	8×10^5
エミッタ-アノード間距離, m	14cm, 17cm, 20cm
アノード電位 (V_a), V	40V, 50V, 65V
エミッタ電位, V	0 (グランド電位)
ゲート電位	エミッション電流 2.2mA or ゲート電流 0.45mA 達成まで 上昇

図10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。図中の I_e はエミッション電流、 I_g はゲート電流、 V_g はゲート電圧を示す。図10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 2.2mA をオーバーしたら 2.2mA を下回るまでゲート電圧を 1V 下げ、

エミッション電流が 2.2mA 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。

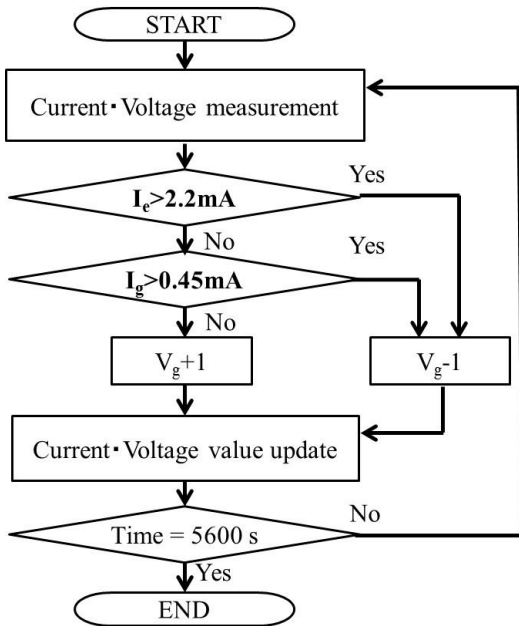


図 10 FEC 制御のフローチャート

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 2.2mA の上限を、ゲート電流にも 0.45mA の上限値を設け、図 10 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 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れ幅を考慮してゲート電流の上限値を 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 0.45mA である。単体動作及び 2 台同時動作の実験結果から、すべての FEC が同一のエミッタ電位をとるためエミッタ電位に対する引出効率に着目してそれらと比較することで 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すなわち、テザー電流 I_{tether} および引出効率 η はそれぞれ次式で表される。

$$I_{tether} = I_e - I_g \quad (6.1)$$

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

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。

また実証実験で予定されている 8 台同時動作も真空環境にて行い、エミッション電流 2.2mA もしくはゲート電流 0.45mA 到達時の引出効率及び FEC1 台当たりのテザー電流を比較し、プラズマ環境における電子放出性能を推測した。

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 0.45mA の条件で FEC_A を単体動作させた場合の実験結果を図 11 に、図 12 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 11 より、全時間領域においてゲート電流は 0.45mA 付近で維持されており、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 2.2mA を超えないようにゲート電圧が制御されていることが分かる。また、図 12 より、そのときのゲート電流は 0.45mA よりも減少していることが分かる。したがって、2.2mA のエミッション電流を取得しゲート電流を最大限抑制しており、制約条件がある中で最大限の引出効率を達成する制御としてこの制御方法は有効であると考えられる。

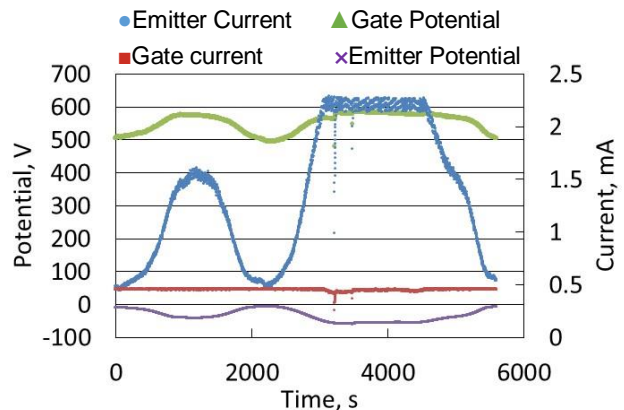


図 11 単体 FEC 動作時の電流と電圧の変化

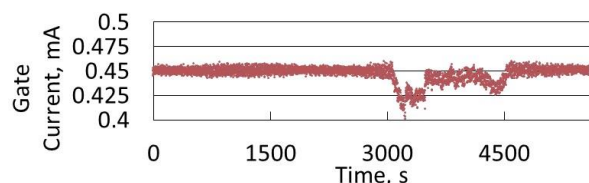


図 12 FEC 単体動作時のゲート電流の変化

7.2 単体動作と 2 台同時動作時の電子放出性能 単体動作と 2 台動作時の電子放出性能比較はすべての FEC が同一のエミッタ電位をとるため、エミッタ電位に対する引出効率において電子放出性能を比較する。図 13 にプラズマ環境

中における FEC_A と FEC_B の単台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の結果を示す。引出効率が負の値をとるのはプラズマ中には電子が存在し、CNT から放出された電子が存在しない場合でもプラズマ中の伝がゲート電極に流入してゲート電流が発生するためである。図 13 より、単体動作時よりも 2 台同時動作時の方が、引出効率が低下していることが分かる。さらにその傾向はエミッタ電位が浅い領域ほど顕著であることが分かる。これは 2 台同時動作時において、プラズマ中からゲートに引き寄せられる電子と CNT から放出される電子の総量が単体動作時よりも多くなった結果、FEC の近くに電子が多く存在することになり、空間電荷制限効果が顕著に表れ、CNT からプラズマ中に放出される電子の量が減少したためであると考えられる。

一方で、エミッタ電位が負に深い領域では単体動作時と 2 台同時動作時の引出効率に大きな差は見られない。これは、2 台動作によって FEC 周辺に発生するシース表面積が減少したためだと考えられる。図 14 に単体動作時のシースが発生する様子と 2 台動作時のシースが発生する様子を示す。図 14 のようにシースはドーム状に発生する。2 台の FEC の距離が近いとそれぞれのシースが干渉するため図 12 のように 2 台の FEC を覆うようなシースが形成されると考えられる。この場合 FEC1 台当たりのシース表面積は単体動作時よりも減少することになり、プラズマ中の電子はシースを介してやり取りされるためプラズマ中の電子がゲート電極に引き寄せられる量が単体動作時よりも減少することになる。図 15 にシースの形状を完全な半球と仮定したときの 2 台動作時のシース表面積の減少率を示す。図 15 のようにシース厚さが大きくなるほど 2 台動作時のシース表面積は単体動作時に比べて減少していく。図 16 にエミッタ-プラズマ間電位差が 40V の時のプラズマ中電子によるゲート電流について単体動作時の平均値と 2 台動作時の平均値の比較を示す。図 16 より 2 台動作時の方がプラズマ中電子に起因するゲート電流は減少していることが分かる。その減少率は最大 20% となっている。エミッタ-プラズマ間電位差が 40V のとき、シース厚さは (3.2.1) 式より 14cm となり、図 15 よりシース厚さ 14cm のとき 2 台動作時のシース表面積の減少率は 32% である。シースの形状が完全な半球ではないため誤差が生じているものの、プラズマ中の電子がゲート電極に引き寄せられる量は複数台動作時の方がシース表面積の低下によって減少すると考えられる。シース厚さが大きくなるほど、FEC 台数が増えるほど複数台動作時のシース表面積の減少率は大きくなるため、複数台動作時においてはエミッタ電位が負に深いほどプラズマ中電子によるゲート電流が減少し、その分エミッション電流を稼ぐことができるため単体動作時と複数台動作時で引出効率の差はほとんどなくなると考えられる。

また、エミッタ電位が負に深いほどプラズマ中電子のゲート電極への引き寄せ量は減少する。図 17 に CNT が塗布されていない FEC を用いてゲート電極に流入するプラズマ中の電子量 (ゲート電流) を測定した結果を示す。図 17

からプラズマ中の電子はエミッタ電位が負に深くなるほどゲート電流は減少していることが分かる。これは、エミッタ電位が負に落ちているほどプラズマ中の電子が跳ね返されたためであると考えられる。上記の結果からエミッタ電位が負に深い領域ではプラズマ中の電子に起因するゲート電流は少なくなり、さらに、複数台同時動作させるとシース表面積が減少しその減少率はエミッタ電位が負に深いほど大きいことから、エミッタ電位が負に深ければ複数台動作による引出効率の低下は数%以下に留まると考えられる。

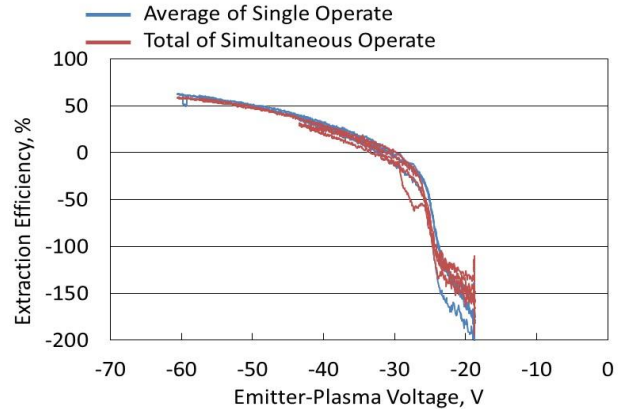


図 13 単体動作時と 2 台動作時の引出効率

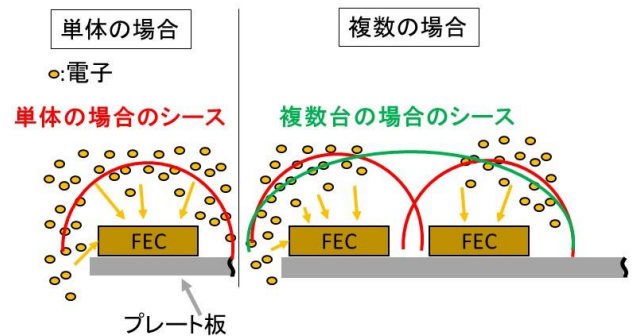


図 14 単体動作時と 2 台同時動作時のシース形状の違い

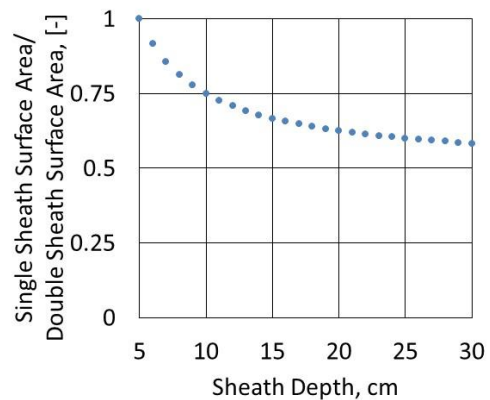


図 15 シース厚さに対する 2 台動作時の FEC1 台当たりのシース表面積の減少率

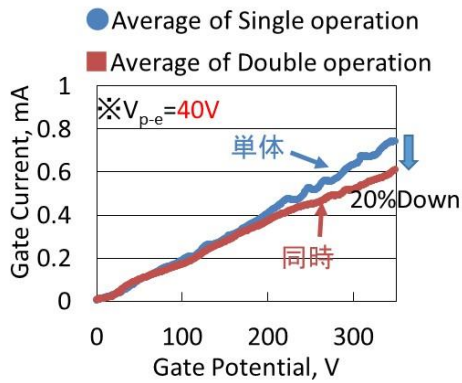


図 16 単体動作時と2台同時動作時のプラズマ中の電子に起因するゲート電流の比較

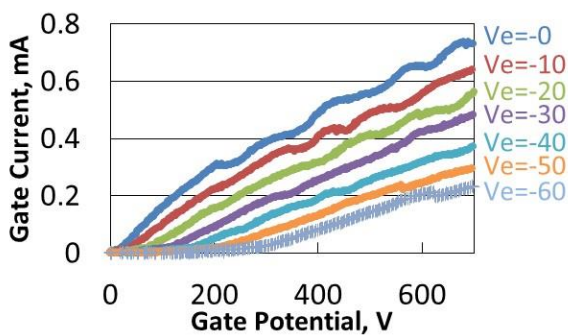


図 17 プラズマ中の電子に起因するゲート電流測定結果

7.3 8台同時電子放出試験 8台同時電子放出試験は実証実験で実際に用いられる電源 (FEC コントローラ) を使用して実施した。この電源はエミッタ電位とアルミプレート板の電位をグランド (GND) 電位、すなわち実証実験においては HTV 電位に接続して初めて機能するものとなっている。したがって、本試験においてもエミッタ電位は GND 電位に接続しなければならず、負電位に落とすことができない。そのため本試験は真空中においてアノード板を用いてアノード板電位を正電位とすることでエミッタ-プラズマ間電位差を模擬した。

7.3.1 真空環境とプラズマ環境の電子放出性能の整合性

本試験は真空環境において実施したため真空チャンバ内にプラズマが生成されていない。真空環境において正確な電子放出性能を取得するためには、チャンバ壁への漏れ電流を除去する必要がある。なぜなら、チャンバ壁は GND 電位を持っており、CNT から放出された電子がアノード板ではなくチャンバ壁へ漏れてしまうためである。そこで、図 18 に示すようにチャンバ内壁にカプトンフィルムを巻き付けることでチャンバ壁電位を遮蔽し漏れ電流を除去した。このチャンバ内で真空環境とプラズマ環境の両方で FEC 単体の電子放出実験を行い、両者の引出効率を比較することで整合性評価を実施した。このとき、チャンバ内壁にカプトンフィルムを巻き付けたことでプラズマパラメータが変化している。フィルムが巻かれているときのチャンバ内プラズマパラメータを表 4 に示す。

プラズマ環境におけるシース厚さ S およびエミッタ-プ

ラズマ間電位差 V_{p-e} と真空環境のエミッタ-アノード間距離 d_{a-e} (シース厚さに相当) およびエミッタ-アノード間電位差 V_{a-e} (エミッタ-プラズマ間電位差に相当) を合わせて実験を行った。その条件を表 5 に示す。表 4 のように 3 ケースで試験を行った結果を図 19 に示す。図 19 は真空環境及びプラズマ環境における FEC 単体動作時の引出効率を比較しており、プラズマ環境における引出効率はプラズマ中の電子に起因するゲート電流を除いて算出したものとなっている。図 19 からエミッタ電位が $-13V, -28V$ の 2 ケースでは、ゲート電位が大きい範囲では真空環境とプラズマ環境の引出効率は 10% 程度の差に収まっていることが分かる。エミッタ電位が $-3V$ およびゲート電位が小さい場合引出効率に大きな差が発生した原因としては、エミッタ電位が負に浅い場合プラズマ中の電子がゲート電極に引き寄せられる量が多く、チャンバ内プラズマの電子密度が減少したことでシース厚さが理論値よりも大きくなり CNT から放出された電子がシース端まで到達できなくなったため引出効率が低下したことが考えられる。このケースの場合、ゲート電位が高くなるとプラズマ電子の引き寄せ量も大幅に増えるため益々チャンバ内の電子密度が減少し、シース厚さが理論値よりも大幅に大きくなることで引出効率に大きな差が生じたと考えられる。一方、エミッタ電位が負に深いケースでは、プラズマ中の電子がゲート電極に引き寄せられる量は減少し CNT から放出される電子によってチャンバ内の電子密度の減少が抑制されシース厚さが理論値と一致し、真空環境とプラズマ環境の引出効率の差が小さくなったと考えられる。したがって、エミッタ電位が負に深くゲート電位が大きい範囲では、本試験環境においてはプラズマ環境における電子放出性能を真空環境にて取得可能であると考えられる。



図 18 フィルムを内側に張り付けたチャンバ内の様子

表 4. フィルムを巻いた時のプラズマパラメータ

	本実験
圧力, Pa	8.2×10^{-4}
電子密度, m^{-3}	8.9×10^{11}
電子温度, eV	15
プラズマ電位, V	37

表 5. 整合性評価実験の条件

	プラズマ環境	真空環境
空間電位, V	プラズマ電位 = $-37V$	アノード電位 = $-37V$
シース厚さ, cm	14, 17, 20	
エミッタ-アノード間距離		14, 17, 20
エミッタ電位, V	3, 13, 28	3, 13, 28
ゲート電位, V	sweep	sweep

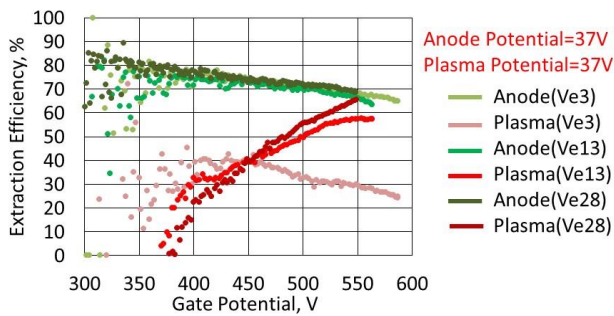


図 19 プラズマ環境と真空環境における引出効率の比較

7.3.2 8 台同時電子放出試験結果

前節でプラズマ環境と真空環境の電子放出性能整合性が確認できたことを述べた。したがって 8 台同時動作試験を真空中に実施したときの結果からプラズマ環境における電子放出性能を推測できると考えられる。図 20 に 8 台同時動作の引出効率と単体動作時の平均引出効率および FEC1 台当たりのテザー電流値を比較したグラフを示す。図 20 からアノード電位が高くなるほど引出効率およびテザー電流は単体動作と 8 台動作で差が少なくなっており、アノード電位 65V のときの引出効率の低下はおおよそ 3% になっていることが分かる。これはアノード電位が高くなることで空間電荷制限の影響が緩和されたためであると考えられる。ここで、シース厚さ（真空中ではエミッター-アノード距離）と空間電荷制限に着目して考察する。本試験ではプラズマ環境に合わせるため、アノード電位が高くなるにつれてエミッター-アノード間距離も大きくなっている。空間電荷制限はエミッター-アノード距離が大きいくほど厳しくなり、エミッター-アノード間電位差が高いほど緩和される。本研究では、シース厚さはチャイルド・ラングミュアシースの式（(3.2.2) 式）で求めた。一方、一次元の場合の空間電荷制限電流密度もチャイルド・ラングミュアの式（(3.2.1) 式）である。両式は一方の変形式であるため、(3.2.2) 式を(3.2.1) 式に代入した場合空間電荷制限はエミッター-アノード間電位差や距離に関わらず一定の値になってしまう。しかしながら、図 20 よりアノード電位が高い方が明らかに空間電荷制限電流は緩和されていることがわかる。これは、電子が 3 次元的に発散するため、エミッター-アノード距離が高い方がアノード板到達時の電子の発散幅が広く、より多くの電子をアノード板が引き寄せることができたためであると考えられる。また、プラズマ環境で発生するシースはドーム形状であり平板であるアノード板よりも表面積が大きいため、電子を引きつける有効面積が増えることから空間電荷制限は宇宙空間ではさらに緩和されると考えられる。

その他に本試験よりも実証実験の方が電子放出に有利な点があり、宇宙空間の方が高真空度であること、エミッタ電位が-100V 程度まで落ち込むこと、本研究により得られたエミッタ電位が負に深い場合複数台動作による電子放出性能の低下はほとんどないという結果を考慮すると電子放出性能は本試験よりも優れた結果を示すことが予想される。

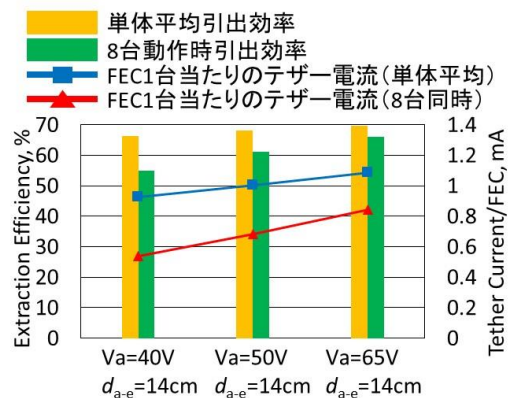


図 20 8 台同時動作と単体動作の引出効率とテザー電流

8. 結論

本研究では、最大限のテザー電流を取得する制御法構築とその妥当性評価および FEC 複数台動作時の性能評価のため、EDT 技術実証実験を模擬した条件下での単体動作および 2 台同時動作試験による複数台動作時の電子放出性能の基礎評価および真空中における 8 台動作試験を行った。

その結果、制約条件がある中でテザー電流を最大限取得する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。また、プラズマ環境にて FEC を複数台動作させたときエミッタ電位が負に深ければ性能低下はほとんどない（ $V_e = -60V$ で 5% 以下）ことが明らかとなった。FEC が 8 台に増えてもその傾向に変化はなく、軌道環境の方が高真空度であり、エミッタ電位が-100V 程度になるため FEC1 台当たりのテザー電流は少なくとも 1mA 程度になることが予想される。

参考文献

- 1) Kawamoto, S., Ohkawa, Y., Kitamura, S. and Nishida, S. : Strategy for Active Debris Removal Using Electrodynamic Tether, Trans. JSASS Aerospace Tech Japan, **7**, ists26, 2009, pp. Pr_2_7-Pr_2_12.
- 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, **52**(2004), pp.11-18.
- 3) 高木俊宜, : 電子・イオンビーム工学, 電気学会, オーム社, 1995, pp.37-38.
- 4) De Visschere, P., Woestencorghs, W. and Neyts, K. : Space-charge limited surface currents between two semi-infinity planar electrodes embedded in a uniform dielectric medium, Organic Electronics, **16**(2015), pp.212-220.
- 5) Lieberman, A. M. and Lichtenberg, J. A. : Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005, pp. 636-641.
- 6) Kawamoto, S., Makida, T., Sasaki, F., Ohkawa, Y. and Nishida, S. : Precise numerical simulations of electrodynamic tethers for an active debris removal system, Acta Astronautica, **59**(2006), pp.139-148.
- 7) Ohkawa, Y., Kawamoto, S., Okumura, T., Iki, K., Horikawa, Y., Kawashima, K., Miura, Y., Takai, M., Washiya, M., Kawasaki, O., Kasai, T., Uematsu, H., Inoue, K. and Tsujita, D. : Preparation for On-Orbit Demonstration of Electrodynamic Tether on HTV, IEPC-2015-301 / ISTS-2015-b-301.