

超小型衛星用導電性テザーシステムにおける電子エミッタの研究開発

○三輪徹(静大・工・院), 山極芳樹(静大・工・教授), 松井信(静大・工・助教), 能見公博(香大・工・准教)
佐野心治(静大・工), 浅井徳彰(静大・工), 溝口航(香大・工)

1. 研究背景

近年, 宇宙開発に伴いスペースデブリと呼ばれる地球の衛星軌道上を運動する人工物体の増加が問題となっている. スペースデブリは低軌道上で 7~8[km/s]で運動しており, 速度の 2 乗に比例する運動エネルギーにより宇宙機の安全に大きく関係している. また低軌道では, 打ち上げを行わない場合にもスペースデブリ同士の衝突によりその数が増えるため, 早急にデブリを除去する必要がある, 対策・方法について検討されている. スペースデブリ除去方法に有用とされる推進システムとして導電性テザー(EDT)が挙げられている. 2013 年度に予定されている香川大学能見研究室による STARS-II プロジェクトにおいて親子衛星 STARS-II(図 1)に搭載された EDT の作動実証が計画されている. ベアテザーによる電流収集に成功すれば, 世界初の軌道上実証となるため EDT 技術の確立に大きく役立つと考えられている.



図 1 STARS-II のイメージ図

2. EDT システム¹⁾

EDT システムは, 従来の化学燃料を用いた推進方法とは異なり推進剤を用いない推進方法として軌道間輸送, 宇宙デブリ処理等の広範囲な応用が期待されている. そして導電性のテザーとその両端で電子を収集するための電子コレクタ, 放出するための電子エミッタにより構成されるシステムである.

ある軌道上で長さ L [m] の導電性テザーを軌道半径方向に進展し, 軌道速度 v [m/s] で地球磁場 B [T] の中を運動すると, 導電性テザーには誘導起電力 $V = (v \times B) \cdot L$ が生じ, 周囲のプラズマ電位に対してテザーの上部は正に, 下部は負に帯電する. ここでテザーの上端にて電子を収

集し, 下端にて電子を放出すると, 周囲のプラズマ電位を介した電氣的閉回路が形成され, 電流 I [A] が流れる. この電流と地球磁場との相互作用によってローレンツ力 $F = (I \times B) \cdot L$ が発生し, 推力が得られる(図 2).

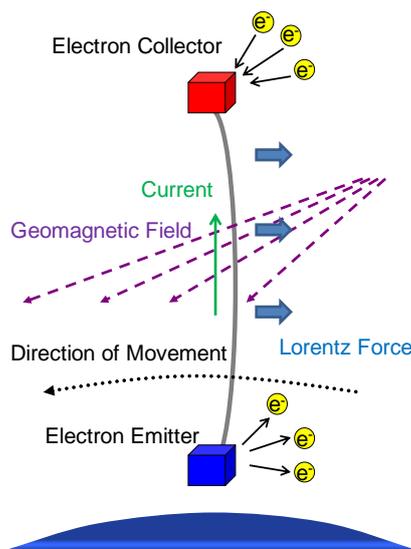


図 2 EDT の作動原理

3. STARS-II プロジェクト

3.1 STARS-II の目的

STARS-II は「テザー宇宙ロボット」(TSR)の宇宙技術実証を目的とした超小型衛星である. TSR は, 宇宙デブリ対応への利用が大きく期待でき, 2010 年 8 月に実施した観測ロケット S-520-25 実験では姿勢制御実験に成功した. 一方で JAXA 研究開発本部・未踏技術研究センターでは EDT デブリ除去衛星開発を進めており, EDT 事前宇宙実証実験を強く望んでいる. 宇宙デブリ問題解決には EDT が期待されているため, STARS-II のミッションに EDT 実験を加え, 目的を以下とする.

1. 重力傾斜を利用したテザー伸展
2. EDT によるベアテザーを用いた電流収集
3. 重力傾斜によるテザー張力を利用した TSR 制御
4. 張力制御によるテザー伸展回収

本研究では EDT によるベアテザーを用いた電流収集実験で用いる電子エミッタに関する設計, 評価を行う.

3.2 EDT によるベアテザーを用いた電流収集実験

本実験の目的は軌道上においてベアテザーを用いた電流収集を確認することである. 実験で測定する対象について手順と併せて以下に示す.

①誘導起電力

まずテザー下端と衛星子機とを電気回路上で切り離す。このときテザー下端には誘導起電力分の電位が負に沈み、衛星子機は周囲プラズマと同電位になる。ここでテザー下端と衛星子機の電位差を誘導起電力とみなし、値を測定する。

②電子収集電流

次にテザー下端と衛星子機とを電気回路上で接続する。このときテザーに流れる電流を測定することでベアテザーでの収集電流量を得ることが出来る。

③フィラメント電流

最後にフィラメントに電流をながし電子エミッタを作動させると電子収集電流が増加する。ここで電子エミッタの動作確認をするためにフィラメントに流れる電流を計測する。

④電子放出電流

本実験では衛星にプローブを搭載していないため、周囲プラズマの状態を知ることが出来ず、電子エミッタから周囲プラズマに放出される電流量を直接計測することは出来ない。そのため電子エミッタを作動させて増加したテザー電流量と OML 理論式より推測する必要がある。詳細を以下に示す。

※電子放出電流量の推測

ベアテザーによる収集電流量は以下の OML 理論式に従う²⁾³⁾。

$$I_e = eN_\infty L_1 r_t \sqrt{\frac{2eV_1}{m_e}} [\text{A}]$$

ここで e は電荷、 N_∞ はプラズマ密度、 L_1 は電子収集部テザー長さ、 r_t はテザー直径、 V_1 は周囲プラズマと電子収集部の電位差、 m_e は電子質量を表わす。

また衛星子機でのイオンの収集量は以下の式に従う。

$$I_i = eN_\infty S \sqrt{\frac{2eV_2}{m_i}} [\text{A}]$$

ここで S は衛星子機の導電部(イオン収集可能な部分)の面積、 V_2 は周囲プラズマとイオン収集部の電位差、 m_i はイオン質量を表わす。

ここで $I_e = I_i$ とすることにより V_1 、 V_2 を求めることが出来る。

電子エミッタを作動させると誘導起電力の電位分配が変化し、電子収集電流が変化する。

このとき I_e の増加量より V_1 を求めることが出来る。

また $I_e = I_i + \text{電子放出電流量}$ とすることにより電子エミッタから周囲プラズマに放出される電流量を推測することが出来る。

また誘導起電力が分配された場合、電子エミッタが作動していない状態での本実験で予想されるベアテザーによる収集電流量は式(3.1)よりテザー長さ L_1 5.91[m]、テザー直径 0.5[mm]、誘導起電力の電子収集部への分配 V_1 1.42[V]、2013年8、9月のプラズマ密度 $3 \times 10^{11} [\text{m}^{-3}]$ より

$$I_e = eN_\infty L_1 r_t \sqrt{\frac{2eV_1}{m_e}} = 1.0 \times 10^{-4} [\text{A}]$$

ここで、電位がテザーに均等に分配されると考えると収集量は半分程度の 0.05[mA]になる。したがって電子エミッタには 0.05[mA]以上の電子放出性能が要求される。

4. 熱電子放出カソード

STARS-II に搭載される電子エミッタには質量・電力の制限があり、搭載可能な電子エミッタの種類は限られる。そこで本実験では熱電子放出カソードを搭載するため本章で詳細を述べる。

4.1 熱電子放出カソード

熱電子放出カソードとは、タングステンなどの高融点金属を加熱することで真空準位より大きな熱エネルギー(仕事関数)を与えて電子放出を行う方法である。熱電子放出カソードの熱電子放出電流密度 J は、次の Richardson-Dushman の式で表される。また概略図を図1に示す。

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

$$A = \frac{4\pi m_e e k^2}{h^3}$$

ここで A は熱電子放出定数、 ϕ は仕事関数、 k はボルツマン定数、 T は温度、 m_e は電子質量、 e は電荷、 h はプランク定数を示す。熱電子放出定数は金属の種類によらず形状による値を持つため、熱電子放出カソードの放出電流量はカソード金属の仕事関数と温度によって決まる。そのため材質が決まっていれば、温度のみでカソードの放出電流量が容易に制御できるという利点を持つ。以上より質量、電力が制限されている条件で構造が簡易かつ低電力での作動が可能という点で電子エミッタに

は熱電子放出カソードを用いる。

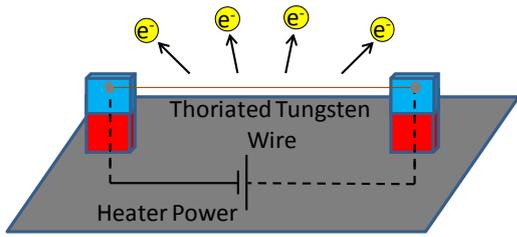


図3 熱電子放出カソード概略図

4.2 空間電荷制限効果

周囲プラズマの電位が電子エミッタより高い場合、電界は周囲プラズマから電子エミッタの方向に発生するので電子は周囲プラズマに向かって加速される(図4(b))。ここで、各々の電子には図4(a)に示すように電界が生じるため、後に放出された電子は先に放出された電子の電界により減速される(図4(d))。これが空間電荷制限効果である。電流密度がある閾値より大きくなると、減速された電子の密度が非常に高くなり、その電子が密集した場の電位が後に続く電子を反射するほどの大きさになる。つまり電子エミッタから放出される電流量がその閾値で制限されるということである。このときの電流量を空間電荷制限電流といい、一般的に2枚の平行平板間の空間電荷制限電流を1次元モデルで定式化したChild-Langmuirの式で表される。

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2e}{m_e} \right)^{1/2} \cdot \frac{V^2}{d^2} \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 V は電子エミッタと周囲プラズマとの電位差、 d は電子エミッタと周囲プラズマ間の距離(シース厚さ)を表す。

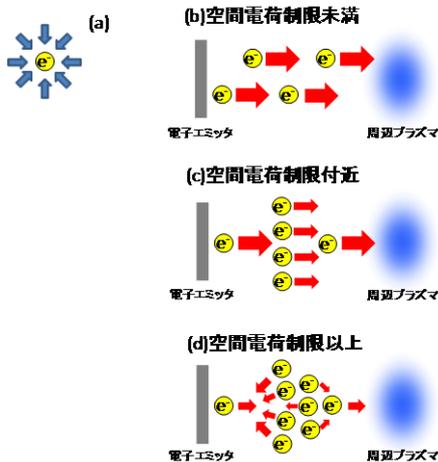


図4 空間電荷制限効果

Child-Langmuirの式より空間電荷制限電流はシース形状に依存するため、特にフィラメントを複数本配置し、シース形状が複雑になる場合にはシース形状を数値解析により調べる必要がある。数値解析に関しては6章以降で述べる。

また熱電子放出カソードの性能はフィラメントからの熱電子放出電流量とシース端到達電流量の両面から検討していく必要がある。

4.3 電子エミッタの効果

3.2節で熱電子放出カソードを用いない場合のテザー収集電流が0.05mAと示したが、熱電子放出カソードを用いることでどの程度テザー収集電流が増加するかを以下に示す。

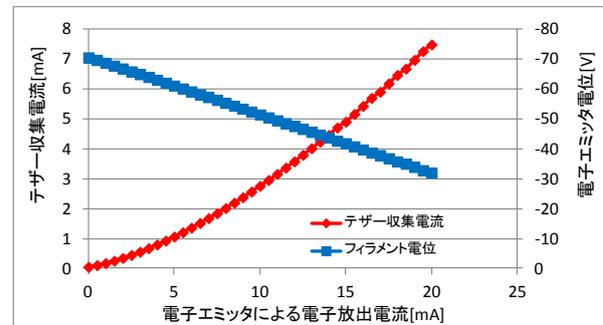


図5 電子エミッタの効果

図5より電子エミッタからの電子放出電流量が増加すればテザー収集電流量は増加することがわかる。また電子エミッタからの電子放出電流量がmAオーダーであれば電子エミッタの電位変化が測定可能であり、電子エミッタの効果を確認できる。

5. 数値解析手法

5.1 解析手法

電子エミッタによる電子放出の数値解析を考えた場合、フィラメントから放出される熱電子について空間電荷制限による影響の考慮が必要不可欠であり、粒子的な振る舞いを考慮する必要がある。そこで電子エミッタによる電子放出に関する数値解析手法として、プラズマ中の電子、イオンの運動を模擬可能なPIC法を採用することとした。本研究では、計算コストの問題よりイオンは考慮せず、電子の運動のみを解析した。

5.2 基礎方程式・フローチャート

PIC法に使用する基礎方程式はMaxwell方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

および、衝突項を含まない荷電粒子の運動方程式

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}$$

である。MHD 法や Hybrid 法の基礎方程式である電磁流体方程式などでは、プラズマを連続体として扱うためにいくつかの仮定が導入されるが、PIC 法では電磁界の時間発展と荷電粒子の運動を直接解いていく。

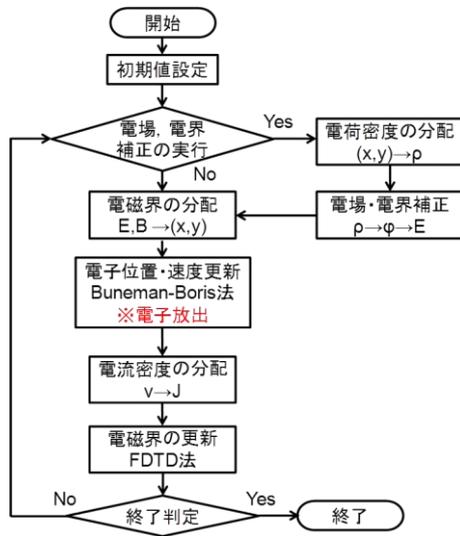


図6 フローチャート

図6に1ステップ更新を基にしたPICコードのフローチャートを示す。

5.3 電子放出模擬

5.3.1 フィラメントからの熱電子放出

フィラメントから放出される熱電子について設定する点として、位置、速度、放出する電子数が挙げられる。位置に関しては乱数を用いてフィラメント上のランダムな位置を配置してやればよい。また速度に関しては、熱電子放出の原理より仕事関数分のエネルギーを持つと考えられるので、運動エネルギーに換算し速度を次式のように与える。

$$v = \sqrt{\frac{2e\phi}{m_e}} [\text{m/s}]$$

放出する電子数は適当な値を設定し、その付近でパラメータとして変更した解析をすることが望ましい。本解析においてフィラメント1本から2mA, 4mA, 8mA, 16mAの4種類の熱電子放出を行った結果を以下に示す。

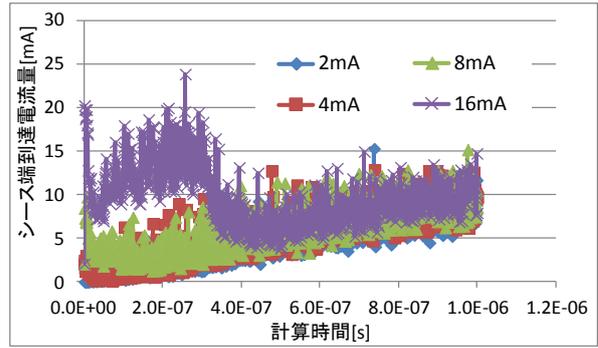


図7 熱電子放出電流量の変化による電子放出の挙動
図7より16mAではシース端到達電流量が制限され4mAと変わらなくなることがわかる。したがって本解析ではフィラメントからの熱電子放出電流量を4mAとした。

5.3.2 シース形状、シース端到達電流量の模擬

計算領域内に負電位のフィラメントを配置すると、フィラメントを中心とした電位分布に応じたシースが形成される。このとき、シース端に到達する電流量すなわちプラズマへの放出電子電流量を得るために電位分布の一定の電位にシース端を模擬し、シース端に到達した電子の数をカウントする必要がある。

シースを模擬するためにデバイの遮蔽を考える。これはフィラメントから放出された熱電子が遮蔽効果を無視できるほどの距離を移動すれば、フィラメントから周囲プラズマに電子放出されたとみなすことが出来るからである。一定電位分布の領域内に V_0 の電位を持つフィラメントを配置した場合、空間電位は以下の式で表される。

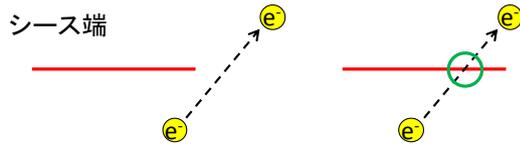
$$V(x) = V_0 \exp\left(-\frac{|x|}{\lambda_D}\right)$$

ここで λ_D はデバイ長を表す。以上より

$$V(\lambda_D) = \frac{V_0}{e}$$

の電位を持つ位置をシース端と定義することにする。

またシース端に到達する電子数はまず電位分布よりシース端の位置を決定した後、そこを通過する電子数をカウントすることにより定義する。シース端を通過するという判定は移動前後の粒子の位置情報より粒子の軌跡を線分で考え、その線分とシース端を模擬した格子点からなる辺に交点があるかどうかにより判断する。交点がある場合にはシース端に到達したと判断し、カウントする。図8に判定図を示す。



(a)到達しない場合(交点無) (b)到達する場合(交点有)

図8 シース端到達判定

この条件の問題点として、シース端に対して完全に平行な運動をしてシース端上を通過する電子に対して判定が行えない。しかし、実際そのような粒子は非常にまれであると考えられるため問題ないと判断した。

6. 数値解析結果

電子エミッタによる電子放出について、STARS-IIに搭載される状況を考慮した条件においてプラズマへの電子放出性能向上を目的とした解析を行う。

6.1 解析条件

本解析の条件を以下に示す。ここでプラズマ密度、電子温度は2013年8,9月の深夜0時頃のデータを参考に決定した。格子間隔、時間刻みは前章で示した通りプラズマ状態から決定される。

表1 数値解析条件

プラズマ密度	$3 \times 10^{11}[\text{m}^{-3}]$
電子温度	0.1[eV]
プラズマ周波数	$3 \times 10^7[\text{Hz}]$
格子間隔	0.5[mm]
格子数	400 × 400
時間刻み	$1 \times 10^{-12}[\text{s}]$
フィラメント電位	-66.6V

6.2 解析モデル

衛星子機の搭載面の都合より決定した配置モデルを以下に示す。金属板に絶縁材のマコールを介してフィラメントを取り付けている。本解析では以下の配置モデルについて検討する。

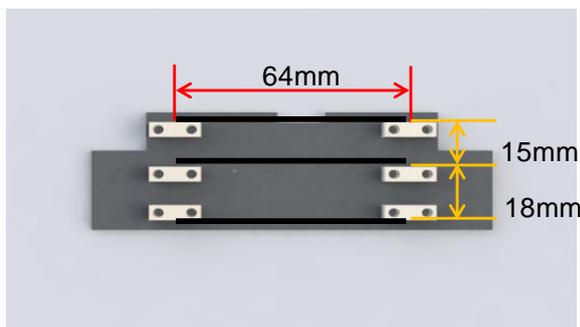
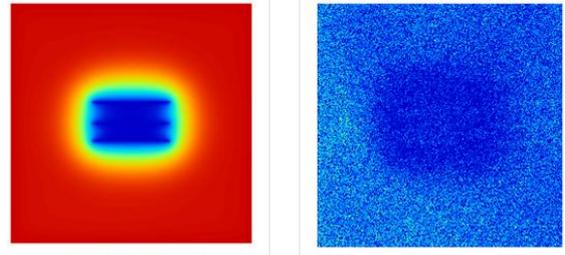


図9 解析モデル

6.3 解析結果

解析モデルについて $10^{-6}[\text{s}]$ での電位分布、電子密度分布を以下に示す。



(a)電位分布

(b)電子密度分布

図10 解析モデルの電位分布、電子密度分布

次にシース端到達電流量を以下に示す。

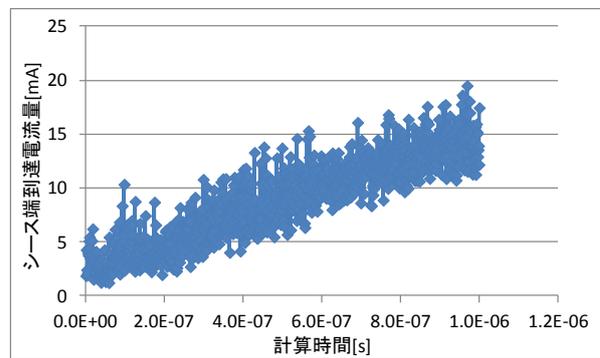


図11 シース端到達電流量

図11より解析モデルにおけるシース端に到達する電流量は $10^{-6}[\text{s}]$ で15[mA]程度であり要求性能を満たすことが分かる。電子エミッタの要求性能は満たすが、電子放出電流量を大きくすればするほどテザー収集電流は増加しEDTの性能が向上する。したがってフィラメントの配置を検討し電子放出電流量を増加させることを目的とし、解析を行った。

6.4 フィラメント配置による電子放出性能の向上

図9の解析モデルのフィラメントに関して2種類の配置変更により電子放出性能の向上を検討した。変更後の配置を図12, 13に示す。

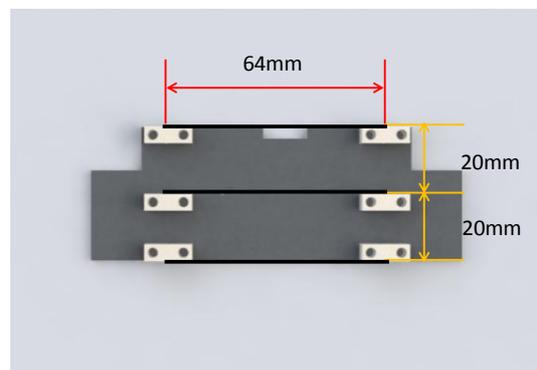


図12 改良配置1

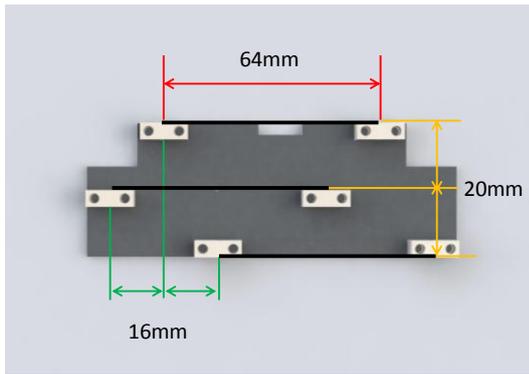


図 13 改良配置 2

改良配置 1 では解析モデルに比べフィラメントの取り付け間隔を広げた配置になっている。これはフィラメント周りに生じるシース端の表面積を拡大させるためである。またシース端の表面積をさらに拡大させるために改良配置 2 ではさらにフィラメント伸展方向に取り付け位置をずらしている。それによりシース断面の周長は以下のように変化した。ここでシース断面の周長はシース端の表面積を 2 次元での解析において評価するためのものである。

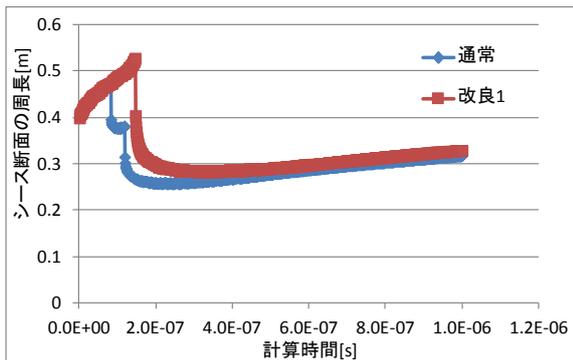


図 14 改良配置 1 におけるシース断面の周長変化

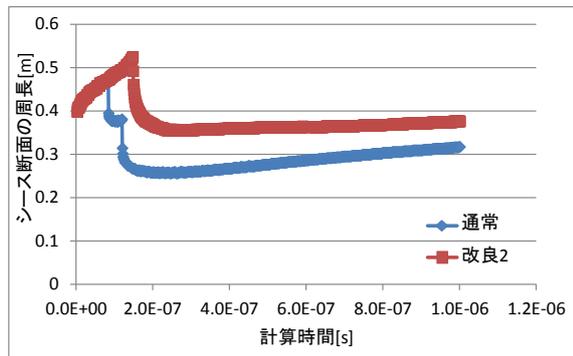


図 15 改良配置 2 におけるシース断面の周長変化

図 14, 15 よりシース断面の周長が増加していることが分かる。次にシース端に到達する電流量を以下に示す。

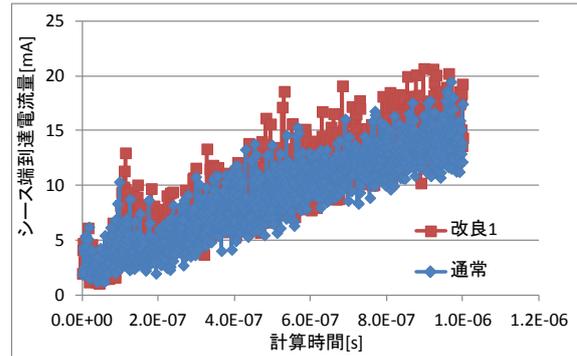


図 16 改良配置 1 におけるシース端到達電流量の変化

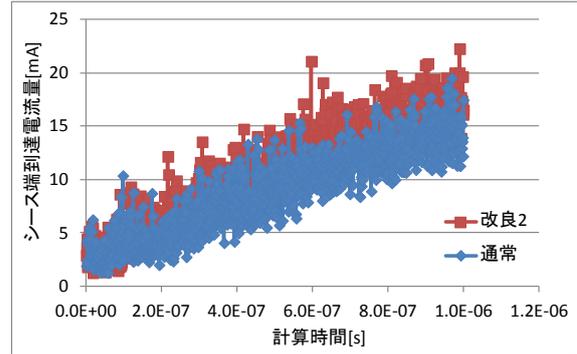


図 17 改良配置 2 におけるシース端到達電流量の変化

図 16, 17 よりシース端に到達する電流量が増加していることが分かる。したがってフィラメントの配置変更により電子放出性能を向上させることが可能であることが分かる。

7. まとめ

STARS-II に搭載される電子エミッタには熱電子放出カソードが適している。搭載可能な治具を用いた電子エミッタでは空間電荷制限効果により電子放出電流量が制限されるが要求性能として[mA]のオーダーを考えた際に、要求性能を満たすことが本解析において確認された。またフィラメントの配置を変更することにより電子放出性能を向上させることが可能であることが確認された。したがって STARS-II での EDT 作動実験において熱電子放出カソードのフィラメント配置を検討することにより EDT の性能向上が見られ、有用なデータ取得が可能になることが期待される。

参考文献

- 1) 山極芳樹, 竹ヶ原春貴, 小境正也, 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.101-108.
- 2) J.R.Sanmartin, R.D.Estes, "Theorbital-motion-limited regime of cylindrical Langmuir probes", PHYSICS OF PLASMAS, 1999
- 3) R.D.Estes, J.R.Sanmartin, "Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime", PHYSICS OF PLASMAS, 2000