

デブリ除去を目的としたテザーによる発電システムの考察

九州工業大学 工学部 電気電子工学科 4年 豊田研究室 11108118 安永士郎

1 研究背景

我々人類は、今まで国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) の建設及び研究、人工衛星による GPS 取得や気象予報、通信など様々な宇宙開発を行ってきた。そして、宇宙開発は私たちに多大な恩恵を与え、人類の繁栄にはなくてはならないものになっている。しかし、宇宙開発を進めるためには解決しなければならない問題がある。それは、これまでの宇宙開発により生み出されてきた「スペース・デブリ」と呼ばれる宇宙ゴミである。そこで、デブリを除去する方法としてエレクトロダイナミックテザーを用いた方法がある。エレクトロダイナミックテザー (Electro dynamic tether 以下 EDT と略す) とは、導電性の紐(tether)であり、テザーが地球磁場中を高速で横切って移動することによって、誘導起電力が発生する。その発生した誘導起電力によって、テザー周辺のプラズマから電子・イオンを収集することで、テザーに電子電流・イオン電流を流し、ローレンツ力を発生させることによって故障した宇宙機の加速や減速を行うことができる。減速モードでは、デブリ除去への利用が期待されており、また、発電を行うことができるため宇宙機の電源の充電を行うことも可能になるという利点もある。

2 研究目的

今まで主に行われてきた EDT に関する研究は、周辺プラズマから電子・イオンを収集することで得られる推進力やテザーの伸展回収、テザーの軌道変換評価シミュレーションなどを目的とした研究が多くなされてきた。この論文では、EDT システムのデブリ除去を目的としたテザーを用いて、実際に宇宙機の発電を行うことができるのかという考察を研究目的にしている。

3 EDT システム

3.1 EDT システム

EDT システムは、テザーを搭載した人工衛星が地球磁場を横切った際に発生する誘導起電力により、テザー周辺プラズマ環境から電子を収集することで、テザーに電流を流し、発生するローレンツ力を利用して減速や加速を行うシステムである。減速モードでは、宇宙機の軌道を降下させることが可能であり、加速モードでは、宇宙機の軌道高度を上昇させることができる。また、減速モードでは、発電も可能である。実際の EDT システムは、バッテリ

ーや電子を放出するための電子エミッタ、地球上の地上局と通信を行うための通信機などを搭載する。減速モードの発電によって、電子エミッタや通信機の電力を賄い、余った電力でバッテリーの充電を行うことが可能になる。図 1 に、EDT システムの概略図、図 2 に EDT 発電システム図を示す。

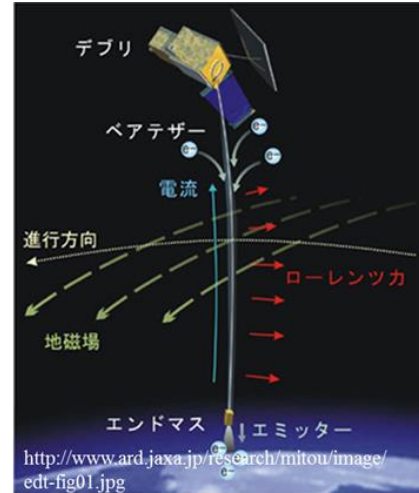


図 1 EDT システム概略図

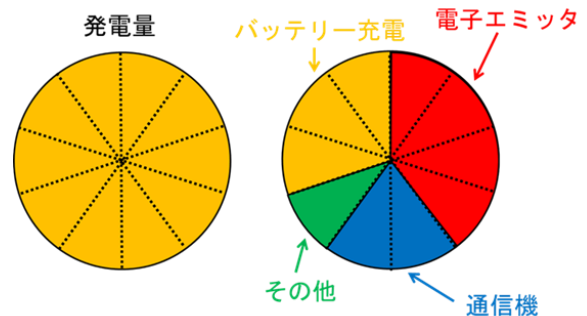


図 2 EDT 発電システム

3.2 EDT 基本原理

EDT を使用した衛星全体とデブリを EDT システムと呼ぶ。EDT システムには減速モードと加速モードの 2 種類があるが、まず図 3 では減速モード(発電モード)の動作原理について説明する。導電性テザーを取り付けた衛星が地球磁場中を高速で横切ることによってテザーに誘導起電力が発生し、電界が生じる。下式には、発生する誘導起電力を示す。式内の v : テザーが地球磁場中を横切る速度、 B : テザーが受ける地球磁場の水平成分、 L : テザーの長さを表している。

$$V_{emf} = v \times B \cdot L$$

このテザーに発生した誘導起電力によって、低地球軌道上のテザーは周辺プラズマに対して正の電位を持つ部分と負の電位を持つ部分とに分かれる。周辺プラズマに対して正の電位を持つ部分では、周辺プラズマから電子を収集し、逆に周辺プラズマに対して負の電位を持つ部分では、イオンを収集する。そのため、テザーに電流が流れ、そのテザー電流と地球の磁気によりテザーにローレンツ力が発生する。下式には、発生するローレンツ力を示す。式内の J : テザー電流、 B : テザーが受ける地球磁場の水平成分、 L : テザーの長さを表している。

$$F = J \times B \cdot L$$

このローレンツ力がテザーを搭載した人工衛星の進行方向と逆向きに働くと衛星は減速する。また、ローレンツ力が進行方向と同じ向きに働けば加速する。また、加速する際にはテザーに減速方向とは逆向きの電流を流さなければならないため、衛星に搭載した電源を利用することで、テザーに逆方向の電流を流す。図 3 には、EDT システムの減速モードの原理図を示し、図 4 には、EDT システムの加速モードの原理図を示す。

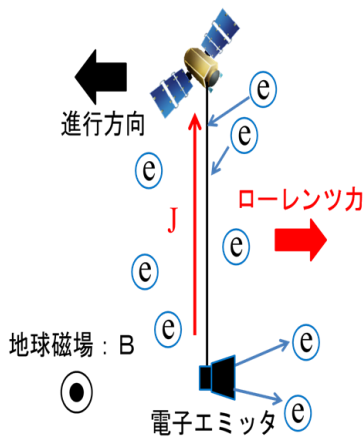


図 3 EDT システム(減速モード)原理図

(1)

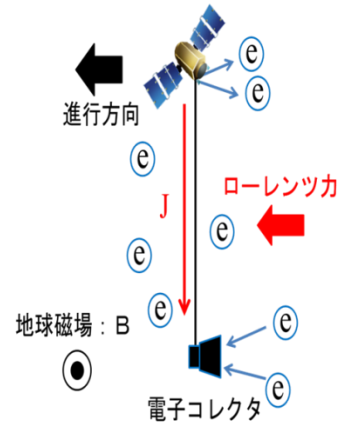


図 4 EDT システム(加速モード)原理図

(2)

4 研究方法

本研究において、電子エミッタとしてフィラメント、電子コレクタとしてベアテザー、バッテリーとしてコンデンサを用いて実験を行った。よって、フィラメントとベアテザーの性能を評価しなければならない。そこで、以下のような実験を行い、性能を評価した。

4.1 フィラメント特性測定試験

フィラメント特性を測定するために、まず作成したフィラメントを低地球軌道環境模擬チャンバー(LEO チャンバー)内に設置する。フィラメント特性測定試験回路図を図 5 に示す。LEO チャンバー内にプラズマを生成し、ソースメータを用いてプラズマ環境を測定する。フィラメントの温度を上昇させるために、電子放出用電源に電源を入れ、CC モードにし、時間をかけてゆっくりと電流を増やしていきフィラメントの温度を上昇させる。急激に電流量を上げていくとフィラメントが断線する恐れがあるので注意が必要である。フィラメントの温度を上げた後、発電電圧模擬電源の電源を入れ、発電電圧模擬電源の電圧を変化させ、フィラメントへの印加電圧を $-100V$ から $+20V$ まで $5V$ 刻みで変化させる。その時の電流値をデジタルマルチメータで抵抗 (330Ω) の両端を測定し、オームの法則から電流値を算出する。

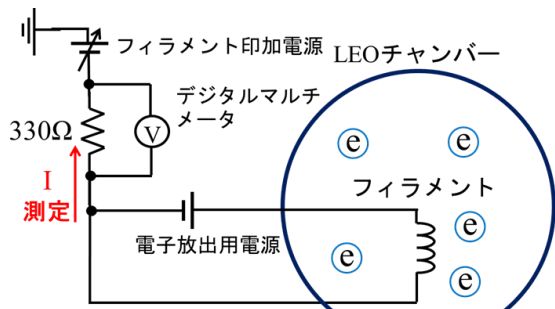


図5 フィラメント特性測定試験回路図

4.2 テザーサンプル電流収集性能試験

本実験の実験方法は、まずテザーサンプル(アルミ+導電性アラミド+ステンレス)を低地球軌道環境模擬チャンバー(LEOチャンバー)内にサンプル(暴露長:29.7cm)を設置する。図6にテザーサンプル電流収集性能試験回路図を示す。ソースメータを用いてベアテザーに0V~200Vバイアスし、回路に流れる電流を測定した。

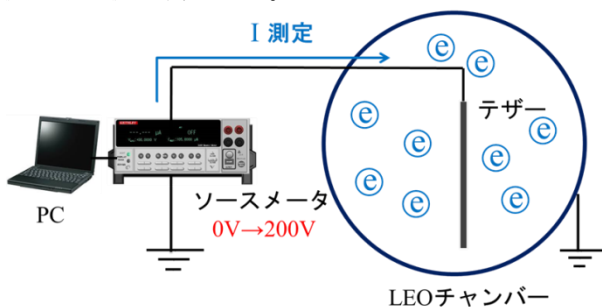


図6 テザーサンプル電流収集性能試験回路図

4.3 EDT 発電システム評価試験

本実験の実験方法は、まずテザーサンプルとフィラメントを低地球環境模擬チャンバー(LEOチャンバー)内に設置する。図7にEDT発電システム評価試験回路図を示す。

電子放出用電源に電源を入れ、徐々に電流を大きくしていき、フィラメントの温度を上げる。フィラメントの温度を上げた後、発電電圧模擬電源の値を0Vから100Vまで5V刻みで変化させていき、その時々テザーにかかる電圧値を表面電位計で測定する。テザーの電圧を測定するために本実験では、発電電圧模擬電源とテザーサンプルの間にアルミ板を設置し、表面電位計を用いて測定した。テザー電圧を測定した後、デジタルマルチメータの電圧値を測定し、オームの法則から回路に流れる電流値を算出する。また、テザー電圧を測定するために表面電位計を用いた理由として、テザー電圧測定のため一時的にグラウンドを設けることでもテザー電圧を測定することは可能であるが、この方法ではテザー電圧測定時に回路中の電流が変化するためあまり推奨される方法ではないと判断したためである。

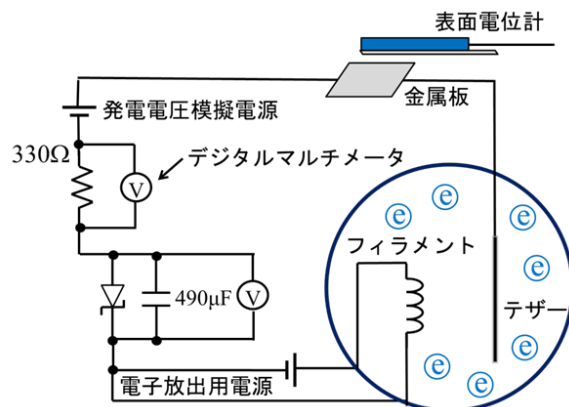


図7 EDT 発電システム評価試験回路図

5 研究成果

5.1 フィラメント特性測定試験結果

フィラメント特性測定試験結果を図8に示す

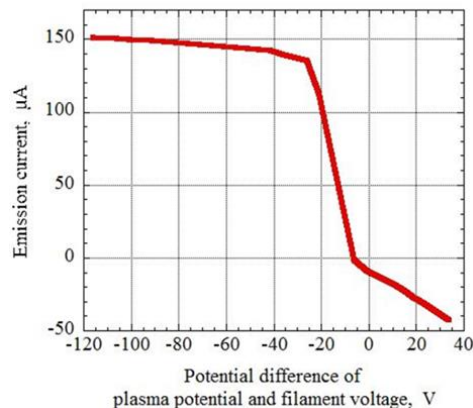


図8 フィラメント特性測定結果

5.2 テザーサンプル電流収集性能試験結果

図9にテザーサンプル電流収集性能試験結果を示す。

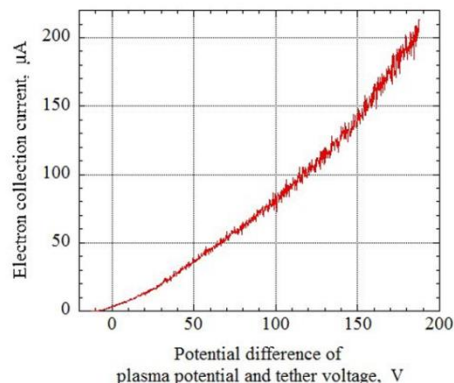


図9 テザーサンプル電流収集性能試験結果

5.3 EDT 発電システム試験結果

図 10 に EDT 発電システム試験結果を示す。

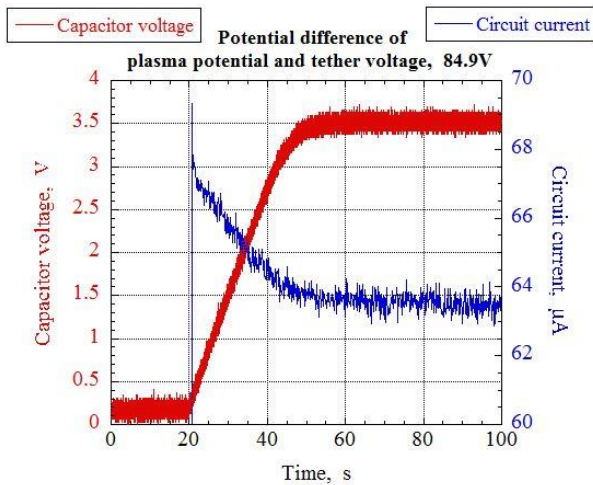


図 10 EDT 発電システム試験結果
(発電電圧模擬電源電圧=100V)

6. 結論

6.1 EDT 発電システム評価

発電システムを考案し、検証した。本実験で使用したフィラメント(電子エミッタ)、ベアテザー(電子コレクタ)の電子放出電流能力および電流収集能力を測定した。EDT 発電システム試験でのテザーの正常な電流収集を確認し、コンデンサへの充電も確認できた。また、コンデンサの充電が行われるにつれ、フィラメント(電子エミッタ)の電位分布が上昇し電子放出電流量が減少した際、テザーは電流収集量とフィラメントからの電子放出量のバランスを保つために、テザーにかかる電圧が減少することも確認できた。

また、実際の EDT システムを想定した回路設計も行った。

6.2 今後の課題

実際に EDT システムを想定した回路設計の改良と今回の実験では、回路は LEO チャンバー外に配置していたので、回路も LEO チャンバー内に入れて、より実際の EDT システムに近い状態での実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) 静岡大学 山極研究室
<http://mech.eng.shizuoka.ac.jp/yamagiwalab/>
- 2) 香川大学衛星開発プロジェクト
<http://stars.eng.shizuoka.ac.jp/>
- 3) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)研究開発部 導電性テザー
<http://www.ard.jaxa.jp/research/mitou/mit-edt.html>
- 4) http://www.zea.jp/audio/schematic/sc_file/005.htm
- 5) <http://www.tij.co.jp/jp/lit/ds/symlink/tl431.pdf>
- 6) 上妻健太郎 “デブリ除去を目的としたエレクトロダ

イナミックテザーの

電力収支評価”九州工業大学 卒業論文 2014

- 7) Hastings and Garrett, “Spacecraft Environment Interactions”, pp.199~pp.206

- 8) 高村秀一 著 “プラズマ理工学入門” 森北出版株式会社、1997年