

導電テザーロケット実験用ホローカソード作動およびテザー・ブーム荷電粒子収集性能確認実験

○山極芳樹, 高木暁生, 吉村尚倫 (静岡大),
田中孝治, 佐々木進 (JAXA/ISAS)

1. はじめに

エレクトロダイナミックテザー (EDT) は、導電製のワイヤまたはテープに電流を流し、地球磁場との干渉でローレンツ力を発生させることで推進剤なしの推進が可能 (図1)^{1), 2)} で、軌道変換、宇宙デブリ除去、宇宙構造物の軌道維持、発電等多くの応用が考えられ、将来の宇宙開発において大変有益な技術である。この EDT に電流を流すためには、テザー両端で電子を放出・回収し、周辺プラズマとの間で電気的閉回路を形成する必要がある。電子放出源としては、電子銃やホローカソード、電子収集装置としては、テザー端に取り付けられた金属球やホローカソードが一般的であるが、近年、ベアテザーという新たな高効率電子収集方式のテザー³⁾が提案され、注目を集めている。2010年8月、日本の大学・JAXA チームにより、JAXA の観測ロケット S-520-25 号機を利用して、このベアテザーの宇宙検証実験を含んだテザーロケット実験が実施された。EDT の宇宙検証実験は過去に NASA を中心に実施された例⁴⁾があるが、それらはすべて、旧来の電子銃・ホローカソード・金属球の組み合わせであり、ベアテザーの宇宙検証実験は、今回が世界初の試みであった。ここでは、そのテザーロケット実験におけるテザー荷電粒子収集実験装置のうちのホローカソードについての地上実験とロケット実験結果の概要について述べる。

2. テザーロケット実験 (T-REx) の概要

今回のテザーロケット実験 (T-REx) は、首都大・静岡大で提案されていたベアテープテザーの展開実験・EDT 作動実験と香川大で提案されていたテザーロボット実験を組み合わせたもので、

- *折りたたみベアテープテザー展開実証実験
- *EDT 作動およびテザー電子収集理論検証実験 (理学実験)
- *テザーロボット作動検証実験

の3つの実験を実施し、宇宙環境におけるテザー基礎技術・理論の実証・データ取得を目的としている。

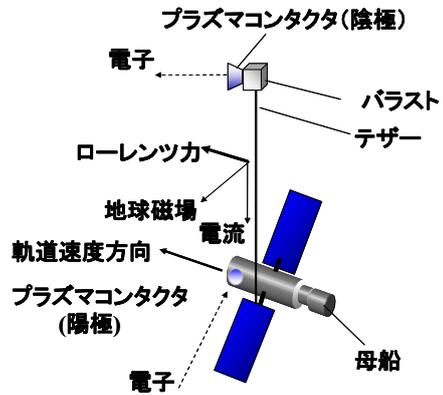


図1 エレクトロダイナミックテザーの作動原理.

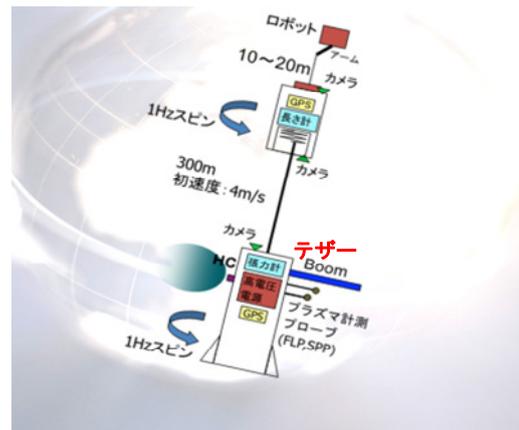


図2 T-REx 実験装置構成の概略図.

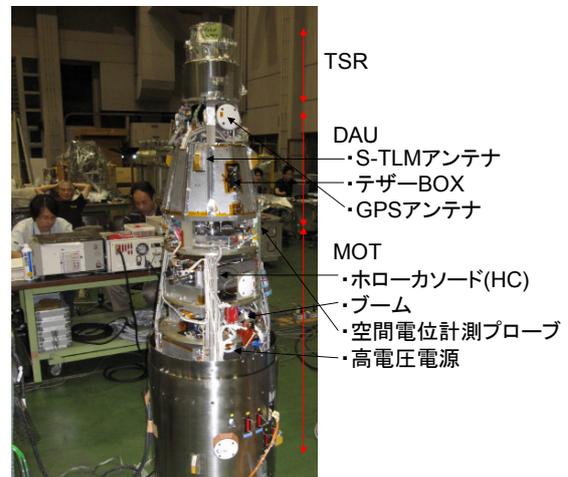


図3 ロケット頭胴部 (テザー実験部) 組み立て.

実験装置構成の概略を図 2 に示す。また、その組み立て状態を図 3 に示す。基本的な構成は親機 (MOT)、子機 (DAU) と両者をつなぐテープテザーである。MOT は、S-520-25 号機 2 段目本体に取り付けられ、重量 580kg、全長 8m、直径 0.52m、DAU は、重量 30kg、全長 0.65m、直径 0.21m で、母船には高速点火ホローカソード (FAST-HC)、ブーム、ラングミュアプローブを含む各種計測機器、子衛星にはテザーロボット (TSR) とベアテープテザーが搭載されている。テープテザーは幅 25mm、長さ 300m で 25 μ m の PET フィルムを 10 μ m のアルミ箔でサンドイッチ したもので、折りたたまれてコンテナに収納され、展開後は、MOT と DAU がこのテープテザーで繋がれることになる。高速点火ホローカソード (図 4) はキセノンガスを作動ガスとして高電圧印加後 5 秒以内の点火し最大 5 A の電子放出能力をもつ。ブームは表面に銅を蒸着させた PET フィルムで、アルゴンガスを供給して展開する。展開後は直径 36mm、長さ 4m の円筒形となる。実験は最大高度 300km の弾道飛行で、約 8 分間の実験時間となり、テープテザー展開実験、EDT 作動実験、テザーロボット実験、荷電粒子収集理論 (OML 理論) 検証実験の順で実験が実施される (図 5)。

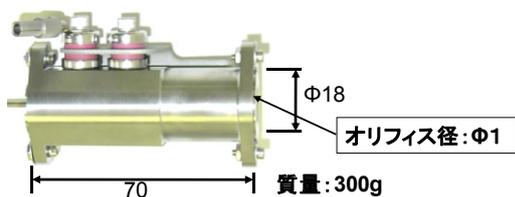


図 4 高速点火ホローカソード。

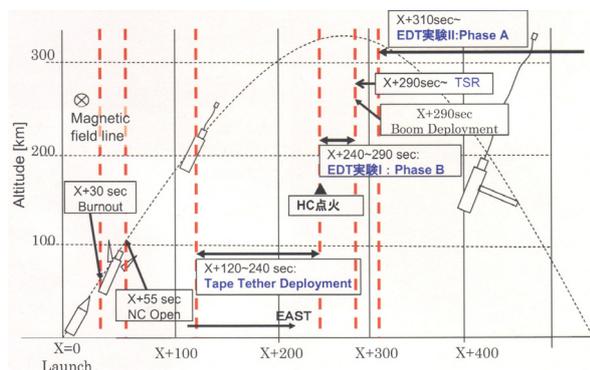


図 5 T-REx 実験のタイムシーケンス。

このうち、EDT 作動検証はホローカソードによる電子放出とベアテザーによる電流収集を組み合わせることで行う (Phase B)。OML (Orbital Motion Limit) 理論検証は、ブームによる電子収集とテザーによる

イオン収集を組み合わせることで実施する (Phase A)。OML (Orbital Motion limit, 軌道運動制限) 理論とは、ベアテザーのような導体 (プローブ) がプラズマ中にある場合、それによる電流収集は、プローブ代表長 (たとえば円筒の場合は直径) がデバイ長程度もしくはデバイ長より小さい場合は、近くを通過する荷電粒子は導体のポテンシャルを感じてプローブに引き付けられ、周辺プラズマ密度とともに電圧にも依存するようになり、その収集電流量は、一般的なプローブで用いられる Langmuir 理論 (導体代表長がデバイ長より十分大きい場合) によるもの (図 6 左) より大きくなる (図 6 右)、というもので、ベアテザーの電子収集に適用できると考えられている理論であり、今回はそれを宇宙環境で検証する。

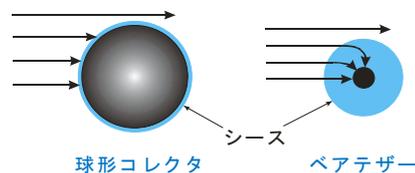


図 6 プローブとシース厚さの違いによる電子収集状態の違い。

3. ホローカソード作動実験

ロケット実験に先立ち、地上において大型スペースチャンバを利用して高速火ホローカソードの作動確認試験を行った。図 7 に実験の構成を示す。

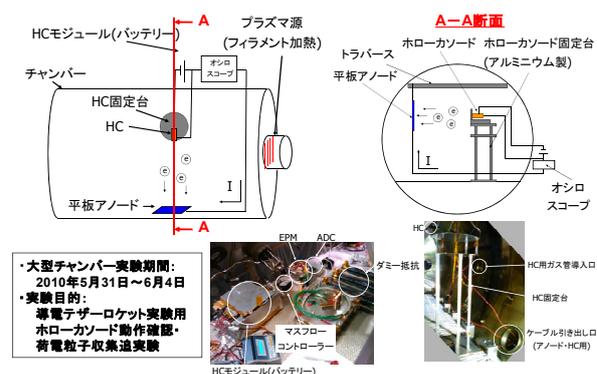


図 7 ホローカソード・チャンバ試験構成図。

表 1 ホローカソード点火特性。

キセノン流量 [scm] *バルブ開度から換算	<8	11	20	40
HC動作	×	△	△	○
終了時チャンバ内圧力 [Mpa]	1.5×10^{-3}	3.0×10^{-3}	9.7×10^{-3}	1.9×10^{-2}

ホローカソード点火特性は表 1 に示すとおりであ

り、安定な点火を行うには、40sccm 程度のキセノンを作動ガスとして流す必要があることが分かったが、この際の実験時間でのガスタンク減少量は 15%程度であるので問題なく、これをロケット実験の設定値とした。

7. ロケット実験結果

7.1. ロケット実験理学実験結果の概要

テザーロケット実験装置は8月31日午前5時、観測ロケット S-520-25 号機により打ち上げられた。

理学実験に関する装置および実験結果の概要は下記のとおりである。

- ・ベアータペテザーの展開：130m展開
- ・ブーム展開：予定通りの4m展開
- ・高速点火ホローカソード作動実験：作動ガス供給、高電圧印加後 0.8 秒で点火確認（図 8）
- ・テザー及びブームによる荷電粒子収集実験：実験電源モジュールの不具合により高電圧が印加されず、データ取得できず
- ・ラングミュアプローブによる周辺プラズマ特性計測：約 400 秒までデータ取得
- ・ポテンシャルプローブによるプラズマ-テザー間電位計測：phase A, phase B に渡って電流-電圧特性取得

以上のように、ブーム展開、高速点火ホローカソードは予定通りの作動が確認され、テザーも目標値の 300m には届かなかったが展開されたが、本来の目的であるテザーおよびブームによる荷電粒子収集実験は高電圧電源モジュールの不具合によりデータ取得ができなかった。しかしながら、テザーが約 130m 展開されたことにより生じた誘導起電力による荷電粒子収集のデータおよび空間電位プローブによる荷電粒子収集特性のデータが取得された形となった。以下にこの 2 種類の荷電粒子収集データの詳細を述べる。

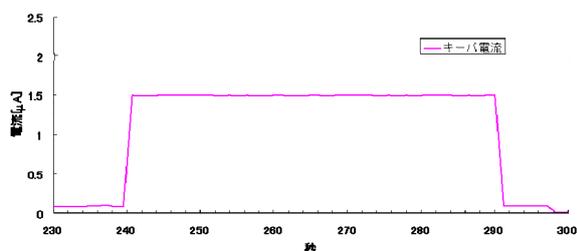


図 8 ホローカソードの点火データ。

7.2. テザーによる誘導起電力に起因する荷電粒子収

集

図 9 に打ち上げ後 200 秒以降のテザーの電流・電圧のデータを示す。打ち上げ後 240~300 秒の phase B において平均電圧 2.27V、平均収集電流 $3.7 \times 10^{-2} \text{A}$ が観測されていることが分かる（誘導起電力は“テザー中”の電流を親機側から子機側へ（電子を子機側から親機側へ）流す電位であるので、-の値として観測される）。Phase B においてはホローカソードの作動により十分な電子が供給されカソード側は、ほぼ、周辺プラズマ電位になっており、テザーは周辺プラズマに対して正となり電子を収集していたと考えられる。また、テザー自体も GPS のデータから 130m の展開の状態を保っていたと考えられる。

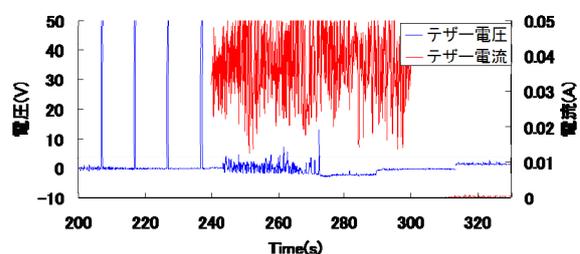


図 9 理学実験におけるテザー電流・電圧データ。

ラングミュアプローブのデータから、打ち上げ後 240~300 秒のプラズマ密度は $1.3 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$ 、また、磁気プローブデータからテザーと垂直方向の磁場強度は $2 \times 10^{-5} \text{T}$ 、GPS データより磁場を横切る方向の飛行速度は 1000m/sec、テザー長さ 130m とすると、誘導起電力 ($=B \times v \times L$) は 2.57V となる。また、この電圧がテザーにかかった場合、OML 理論による電子収集量は $3.9 \times 10^{-2} \text{A}$ と算出される。これらは観測データ（平均電圧 2.27V、平均収集電流 $3.7 \times 10^{-2} \text{A}$ ）とほぼ一致し、観測データがテザー展開による誘導起電力、およびその電圧による電子収集データであることがわかる。一方、打ち上げ後 300 秒以降はホローカソード作動停止により、電子源がなくなり、誘導起電力による荷電粒子収集があったとしても、ブームにおけるイオン収集で制限されてその値は μA 以下であり、また、テザー自体子機のリバウンドで進展状態を保っていないので、観測値から誘導起電力による荷電粒子収集状態の判断は難しい。

7.3. 空間電位プローブによる荷電粒子収集

空間電位プローブは、前述のように、周辺プラズマとテザー間の電位差を計測するため、高電圧の正端側において印加した高電圧とは逆方向に同じ高電

圧をかけて電圧－電流特性を計測するものであったが、テザー、ブームに高電圧が印加されなかったことから、そのデータは空間電位プローブ自体に周辺プラズマに対して高電圧を印加した場合の荷電粒子収集特性のデータが取得された形となった。

図 10 に空間電位プローブによる収集電流観測データを示す。Phase B 後半から Phase A にかけて収集電流データがきれいに取得されている。空間電位プローブには、2 秒ごとに 0V, -20V, -100V, -200V, -300V, -400V, -500V, -400V, -300V, -200V, -100V, -20V の電圧を 200ms の間に鋸波状にかけているが、それに応じたイオン電流量が観測されていることがわかる。図 11 は、観測値と球プローブをスライスして 2 次元状に近似した場合の OML 理論値を比較したものである。非常に荒い近似であるが、オーダー的には一致しており、本イオン収集は OML 理論に従うであろうことが推測される。

プローブに-500V もの高電圧を印加して電圧－電流特性を取得したデータは世界初であり、宇宙環境での OML 理論を検証する貴重なデータが取得されたことになる。ただし、OML 理論自体は 2 次元理論に対して、空間電位プローブは球形であるので、観測データとの厳密な比較については、OML 理論の 3 次元化を含めた理論拡張が必要であり、今後の検討が必要である。

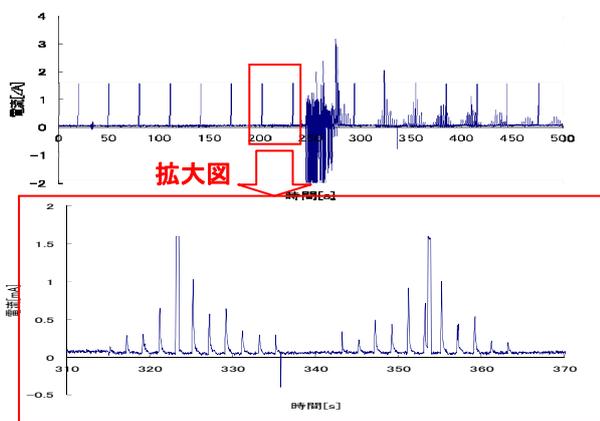


図 10 空間電位プローブによる収集電流（イオン電流）観測データ。

8. まとめ

観測ロケット S520-25 号機を使つてのベアテープテザーの作動実験およびテザーとブームによる荷電粒子理論（OML 理論）検証実験は、実験電源モジュールの不具合により本来の目的とするデータの取得には至らなかったが、高速点火ホローカソードの宇宙での作動は問題なく検証され、テザーによる誘導

起電力に起因する収集電流と高電圧を印加した空間電位プローブによるイオン収集電流のデータを得ることができた。これらは、本実験目的の宇宙環境における OML 理論検証を、違った形ではあるが可能にする貴重なデータであり、今後の理論との比較により、宇宙環境での荷電粒子収集の物理現象解明と将来のテザーを含めた宇宙機設計に新たな知見がもたらされることが期待できる。

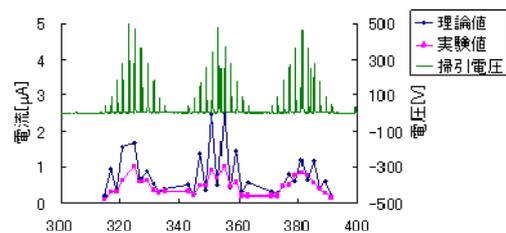


図 11 空間電位プローブによる収集電流（イオン電流）観測データと OML 理論値の比較。

参考文献

- 1) Cosmo, M. L. and Lorenzini, E. C.: *Tethers in Space Handbook—Third Edition*, Prepared for NASA MSFC by Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA, 1997.
- 2) 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.
- 3) Sanmartin, J. R., Martinez-Sanchez, M. and Ahedo, E.: Bare Wire Anodes for Electrodynamic Tethers, *Journal of propulsion and Power*, **9** (1993), pp.353-360.
- 4) Sasaki, S., Oyama, K. I., Kawashima, N., Obayashi, T., Hirano, K., Raitt, W. J., Myers, N. B., Williamson, P. M., Banks, P. M. and Sharp, W. F.: Tethered Rocket Experiment (CHARGE-2): Initial Results on Electrodynamics, *Radio Science*, **23** (1988) 975-988.
- 5) Stone, N. H. and Bonifazi, C.: The TSS-1R Mission; Overview and Scientific Context, *Geophysical Research Letters*, **25** (1998), pp.409-412.
- 6) Estes, R. D. and Sanmartin, J. R.: Cylindrical Langmuir Probes Beyond the Orbital-Motion-Limit Regime, *Physics of Plasmas*, **7** (2000), pp.4320-4325.
- 7) Sanmartin, J. R. and Estes, R. D.: Interface of Parallel Cylindrical Langmuir Probes, *Physics of Plasmas*, **8** (2001), pp.4234-4239.