

観測ロケット S 520-25 号機搭載用ベアテザーを用いた プラズマ収集実験

住野 諒*¹, 田中 孝治*², 山極 芳樹*³, 佐々木 進*²,
下山 学*², 阿部 琢美*², 神戸 篤*³, 若槻 賢*³,
佐原 宏典*¹, 藤井 裕矩*⁴

Laboratory Experiment on Plasma Collection by Bare Tape Tether for Sounding-Rocket S-520-25

Makoto SUMINO*¹, Koji TANAKA*², Yoshiki YAMAGIWA*³, Susumu SASAKI*²,
Manabu SHIMOYAMA*², Takumi ABE*², Atsushi KANBE*³, Masaru WAKATUKI*³,
Hironori SAHARA*¹ and Hironori HUJII*⁴

Abstract

The primary objectives of the sounding rocket experiment, S-520-25, are to deploy an electro-conductive bare tape tether in space and to study the electron current-collection by the tape tether when biased positively. Before the space experiment, we have carried out laboratory experiments on the plasma collection by the tape tether in a large space science chamber at ISAS/JAXA. This paper presents the major results on the current-voltage characteristics of the tape tether in the plasma environment which simulates the ionospheric plasma. It was found that the tether current approached the prediction by the Orbit Motion Limit (OML) theory as the tether voltage was increased up to 500 V. In the high voltage region more than 200 V, we often observed the discharge at the surface of the tether that damaged the tether material.

Keywords: Space Experiment, Plasma Collection, Space Tether

1. Introduction

現在、首都大学東京を中心として日・米・欧の共同プロジェクトとして、観測ロケットを利用したテザー実験が計画されている。図1に観測ロケット実験の概要を示す^[1]。この実験では弾道飛行する ISAS/JAXA の S-520 観測ロケットを用い、300 m のベアテザーを伸展して宇宙空間におけるエレクトロダイナミックテザーの基礎実験となる電離層中でのプラズマ収集実験が予定されている。まず高度 100 ~ 300 km において、ホロカソードプラズマ源 (HC) とベアテープテザー間に最大 500 V の電圧をかけ、テザーシステムと周辺プラズマの間に電氣的閉回路を形成し、テザー中に電気が流れることを実証し、

* 1 Tokyo Metropolitan University

* 2 ISAS/JAXA

* 3 Shizuoka University

* 4 Kanagawa Institute of Technology

テザーに与える電位に対する電子収集能力を評価する (Phase B)。また、ブームとテザー間に電圧を印加し、OML (Orbital Motion Limit) 理論の検証実験が計画されている (Phase A)。実験の概念図を図2に示す。Phase Aでは、異なる高度での実験により異なるプラズマ密度において、ブームに正、テザーに負の電位を与えることで、プローブ代表長とデバイ長の異なる状況で、電子電流収集、イオン電流収集に関して広範囲領域にデータ収集を行い、ラングミュアからOMLにわたる広範囲の電子収集理論の検証を行う。我々はその観測ロケットの宇宙実験の事前実験として地上でスペースサイエンスチャンバーにより観測ロケット実験の行われる低軌道上プラズマを再現し事前検証と校正実験を行った [2]。

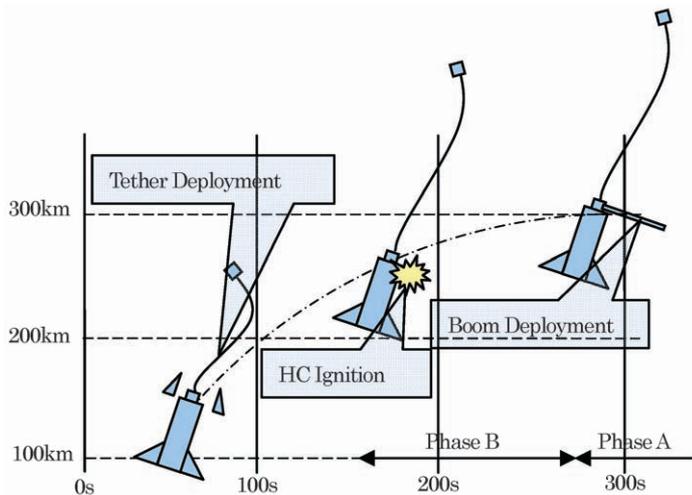


図1 観測ロケット実験概要

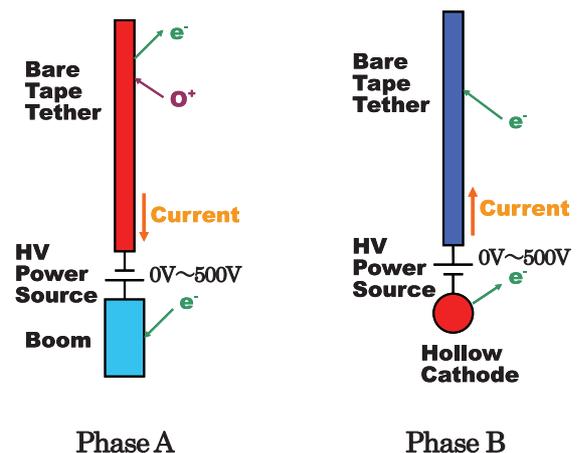


図2 プラズマ収集実験

2. 実験方法

2.1. 実験概要

実験は、ISAS/JAXAにある奥行き5m、直径2.4mのスペースサイエンスチャンバー(図3)を使用した。作動ガスはアルゴン、到達圧力は 1×10^{-4} [Pa]である。このチャンバーにより低軌道のプラズマ環境を模擬し、異なるプラズマ密度でテープテザーに印加する電圧を変えプラズマ収集の評価を行った。実験条件は図2に示す。さらに地上実験でのOML理論の検証を行うために電子、電流収集の広範囲のデータを取り、そのデータをOML理論の理論値と比較した。

2.2. 実験配置

今回二種類の実験回路で実験を行った。まずチャンバー内に設置されたテザーを直流電源へ接続し、電流計測用抵抗Rを介してグラウンドへとつながっているもの(図4)。また、より観測ロケット実験環境に近いチャンバー内にあるテザーと円柱プローブの間に抵抗と直流電源をつないだものである(図5)。テザーと円柱プローブはチャンバー壁からは絶縁されている。直流電源は-500Vから+500Vまでの電圧を出力する。抵抗Rは収集電流量により10kΩから100MΩまで変えた。抵抗Rの両端の電圧を測ることによりプラズマ電流を得る。使用したテープテザー(図8、9)は幅25mmの2枚のアルミテープをPET (Polyethylene terephthalate) 樹脂に蒸着したものでありPET樹脂の厚さは45μmである。テザーの形状は2mm×25mmから25mm×500mmの計8本、プローブはφ3mm×50mm、φ5mm×50mm、φ20mm×100mmの三種類である。電流収集量がプラズマ源の性能で決まり、またテープテザーの長さによっても制約されるため、異なる幅、長さの試料を準備した。それらをアルミ製の治具にそれぞれ10cm以上の間隔を開けてカプトンテープで取り付けた。円柱プローブとテザーへの電圧印加はそれぞれにテフロン被覆のケーブルを用いテザー側ではアルミ蒸着面にケーブルを導電性接着剤であるドウタイトで接着する。円柱プローブ、円盤プローブはスペースサイエンスチャンバー内のプラズマ密度を測定するためのものである。プローブおよびテザーとそれらの取り付け治具の設置を図6、7に示す。



図3 スペースサイエンスチャンバー

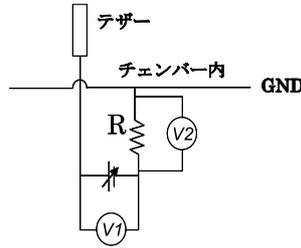


図4 実験回路1

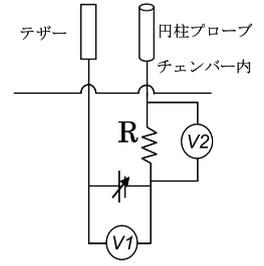


図5 実験回路2

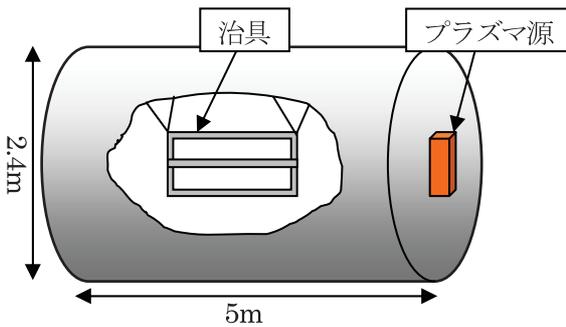


図6 チャンバー内部

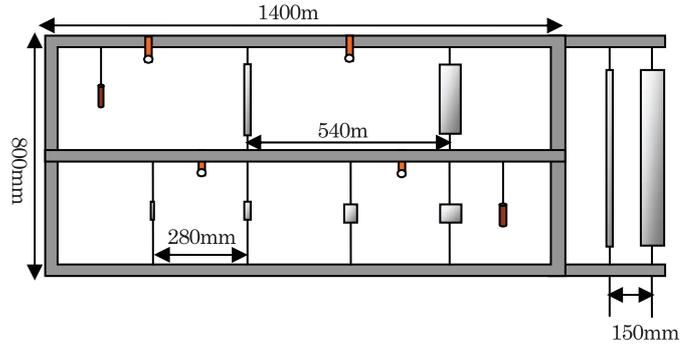


図7 治具に取り付けたテザー，プローブの配置図

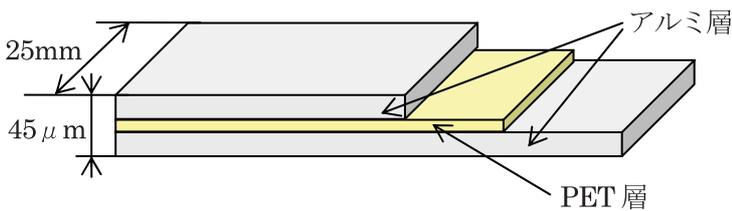


図8 テザーの断面図



図9 テープテザー

3. 実験結果

3.1. テザー電流収集実験結果

まず実験回路1でそれぞれのテザーによる電流収集実験を行った。図7がチャンパー内に設置した治具とそれに取り付けたテザーとプローブの配置図である。テザーの配置によってプラズマ密度に多少の差は出てしまうが今回は桁違いでないかぎり同じプラズマ密度とみなして実験を行った。実験中の動作時圧力は 1.0×10^{-2} [Pa] である。電流収集量とテザーのサイズの関係を知るために、長さが一定で幅が異なる4本のテザーにより実験を行った。サイズはそれぞれ $2 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $10 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ である。図10が初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^5 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ の実験結果、図11が初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ の実験結果である。観測ロケット実験が行われる低軌道上 $200 \sim 300 \text{ km}$ のプラズマ密度は $10^4 \sim 10^6 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ である。初期プラズマ密度と記したのは実験中にチャンパー内のプラズマ密度がテザーにより収集され減少するからである。この二種類のプラズマ密度の電流収集特性を調べるためにそれぞれのテザーの 200 V 付近の電流収集密度を比較した。図12は初期プラズマ密度が $1.0 \times 10^5 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ で、図13は初期プラズマ密度が $1.0 \times 10^6 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ でそれぞれ横軸がテザーの長さ、縦軸が電流収集密度である。この二つのグラフを比べてみると電流収集特性に大きな違

いが見られた。プラズマ密度 $1.0 \times 10^5 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ではテザーの幅が小さくなるに従って電流収集密度が上昇しているがプラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ではそのような特性は見られない。つまりテザーの幅が小さくなるに従って電流収集効率が上昇し、それは低密度プラズマではより顕著に現れるということである。同じようにテザーの幅が一定で長さが異なるテザーにより二種類のプラズマ密度で電流収集特性の変化を調べたが大きな違いは見られなかった。

3.2. 電流急増現象

プラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ，動作時圧力 $1.0 \times 10^{-2} \text{ [Pa]}$ の条件でテザーによる電流収集実験中にある一定の電圧を超えると収集電流が急増する現象が起きた (図14)。これは明らかに理論値とは異なる現象である。よって実験中にチャンバー内で放電が生じていると思われる。そこでそれぞれのテザーの面積と電流急増現象が発生した時の電圧との関係をグラフに表してみた。図15は横軸がそれぞれのテザーの面積、縦軸が電流急増現象が発生した時の電圧である。このグラフを見てわかるようにテザー面積が大きくなるに従って電流急増現象はより低い電圧で発生している。

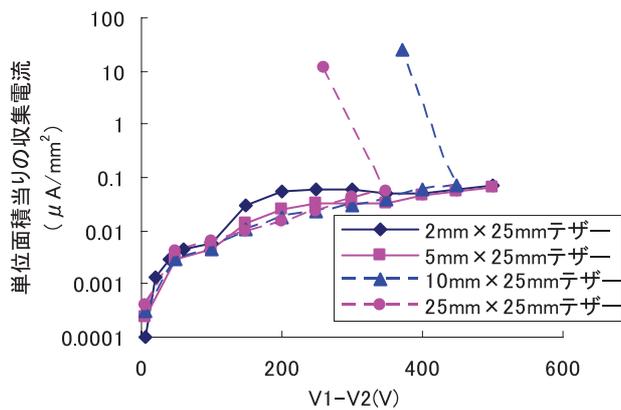


図10 単位面積当たりの収集電流量 (初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ，電子温度 1.0 (eV) ，実験回路1)

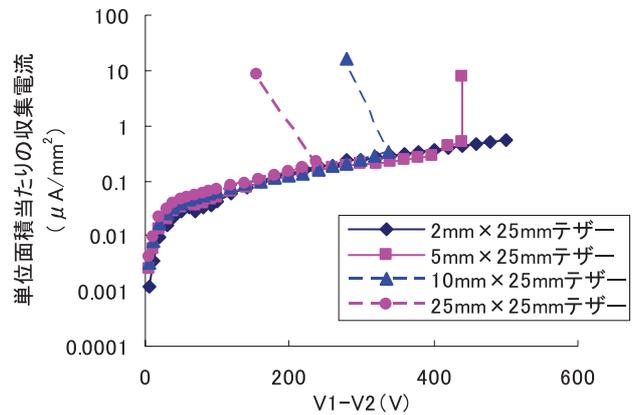


図11 単位面積当たりの収集電流量 (初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ，電子温度 0.6 (eV) ，実験回路1)

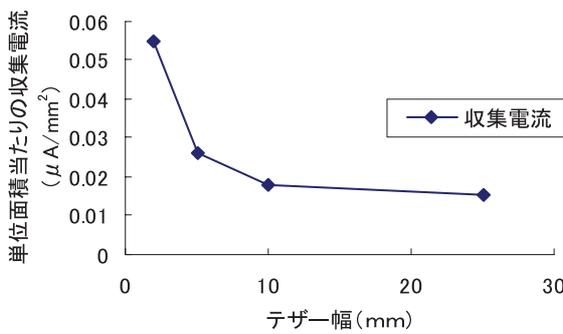


図12 低プラズマ密度 ($1.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) におけるテザー幅に対する収集電流特性 (電子温度 1.0 (eV) ，実験回路1， $V1 - V2 = 200 \text{ V}$)

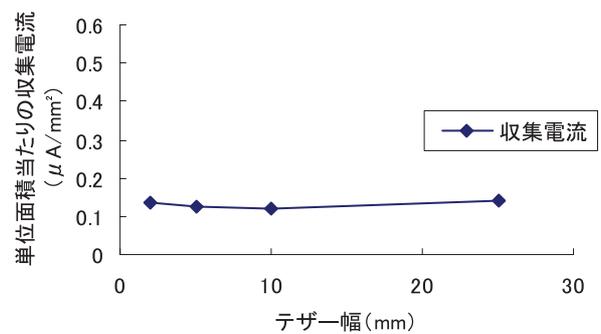


図13 高プラズマ密度 ($1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$) におけるテザー幅に対する収集電流特性 (電子温度 0.6 (eV) ，実験回路1， $V1 - V2 = 200 \text{ V}$)

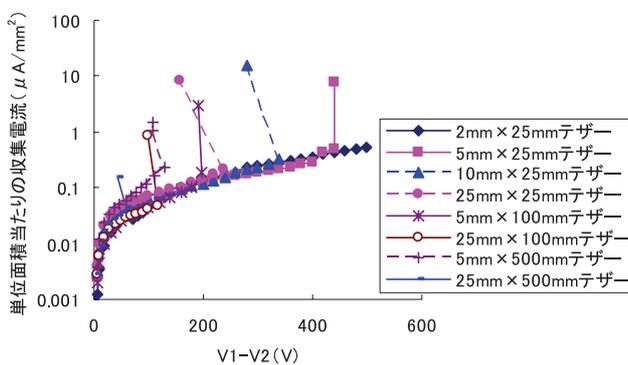


図14 電流急増現象 (初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ，電子温度 0.6 (eV) ，実験回路1)

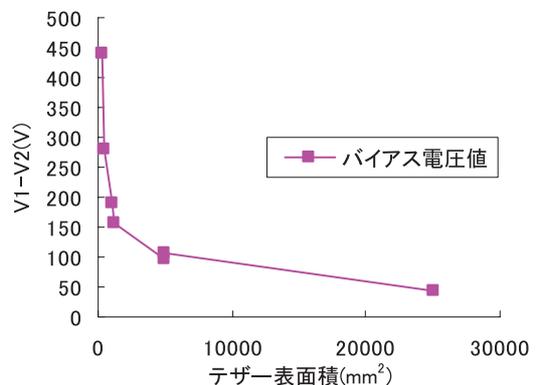


図15 電流急増現象とテザー表面積の関係 (初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ，電子温度 0.6 (eV) ，実験回路1)

3.2.1. Ar ガスによる圧力との関係

電流急増現象はプラズマ密度 $1.0 \times 10^5 \text{ (cm}^3\text{)}$ 、つまり低密度プラズマでは発生しなかった。このことから電流急増現象はプラズマ密度に依存することがわかる。さらにチャンパー内の Ar ガスによる圧力の依存性を調べるために異なる圧力で電流収集実験を行った。図 16 は圧力が $9.7 \times 10^{-3} \text{ [Pa]}$ のグラフ、図 17 は圧力が $1.9 \times 10^{-2} \text{ [Pa]}$ のグラフである。圧力のみ依存性を確かめるために初期プラズマ密度はどちらも $1.0 \times 10^5 \text{ (cm}^3\text{)}$ となるように調整した。結果は圧力が $9.7 \times 10^{-3} \text{ [Pa]}$ の時は電流急増現象が発生せず、 $1.9 \times 10^{-2} \text{ [Pa]}$ の時のみ発生した。このことから電流急増現象は圧力に依存し、圧力が高いほど発生しやすいと言える。高度 200 ~ 300 km の宇宙空間では気圧は $1.0 \times 10^{-7} \text{ [Pa]}$ 程度なので実際の観測ロケット実験時には電流急増現象は起こらないと思われる。しかし、テザーからのアウトガスが発生し周辺の気圧が上昇すると電流急増現象が起こる可能性がある。また、電流急増現象の直接的な原因を確かめるために電流急増現象発生時のチャンパー内の映像をカメラで撮影した。その結果チャンパー内で白く光り放電しているのが確認された。図 18 の点線で囲んだ部分はその様子を示している。映像から判断すると電流急増現象の原因はグロー放電であると思われる。

3.2.2. テザーの耐久性

電流収集実験後にチャンパー内のテザーを確認するとそのいくつかに皺のようなものが確認された。テザーごとの実験履歴を詳しく確認してみると皺や断線の生じたものは電流急増現象^[3]によるものであることが分かった。実際の観測ロケット実験ではこのような皺や断線は好ましくない。よってテープテザーの電流収集によって起こる熱に対する耐久性を調べた。実験方法は図 19、20 のように真空チャンパー内にテザーを設置し安定化電源を直列に接続して電流を流し、テザーに皺が確認されるまで電流値を上げていくというものである。チャンパー内は真空状態であるがプラズマは発生させていない。つまり今回の実験では電流による熱の耐久性のみで電子衝突による熱の発生は考慮していない。この実験の目的はテープテザーが観測ロケット実験で流れる電流によって発生するジュール熱に対してどれほどの耐久性を持っているかを確かめることである。1 A から始めて 5 分おきに 1 A ずつ電流値を上げていった。このように長さの異なるテザーを同時に実験しその結果を比較することにより実際の観測ロケットで使用される 300 m のテザーに起こる現象を予測できる。結果は 7 A まで上昇させた数分後にすべてのテザーに皺が発生するのが確認された(図 21)。実際の観測ロケット実験では最大でも 3 A までしか電流は流れない予定なので耐久性は問題ないと思われる。

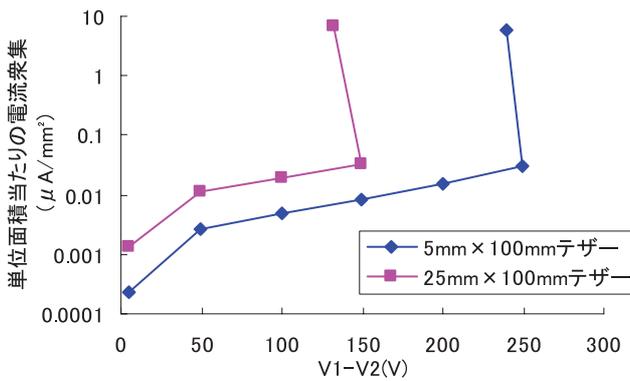


図 16 $1.9 \times 10^{-2} \text{ [Pa]}$ における単位面積当たりの収集電流 (実験回路 1)

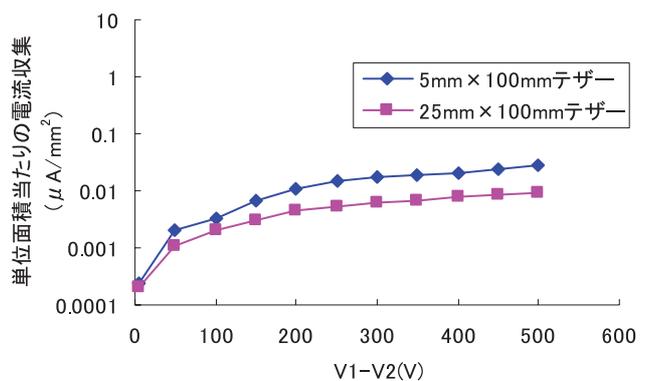


図 17 $9.7 \times 10^{-3} \text{ [Pa]}$ における単位面積当たりの収集電流 (実験回路 1)

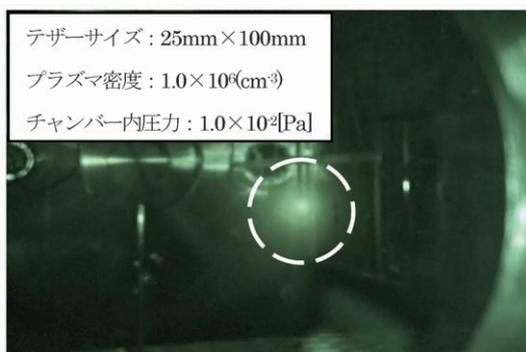


図 18 グロー放電画像

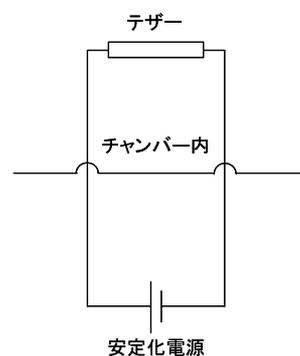


図 19 実験回路 3

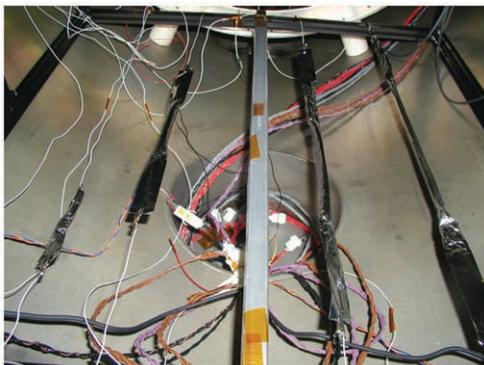


図20 実験後チャンバー内写真

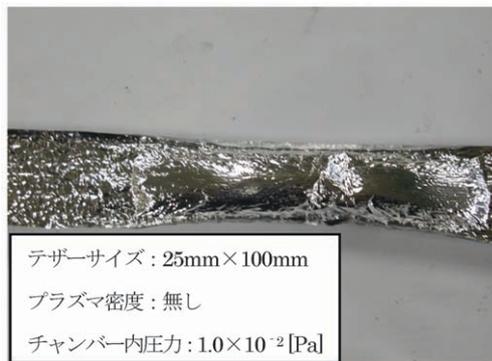


図21 皺のできたテープテザー

3.3. 理論値との比較

3.3.1. OML 理論とは

OML 理論について説明するために、まず正にバイアスされたプローブによるプラズマ中の荷電粒子収集について考える [4]。プローブによる電流収集は、プローブ代表長（円筒の場合直径）がデバイ長より十分大きい場合は Langmuir 理論に従う。Langmuir 理論に従えば収集電流は電子温度と周辺プラズマ密度のみに依存し、プローブポテンシャルが遮断され近くを通過する荷電粒子はポテンシャルを感じず通過する。一方でプローブ代表長がデバイ長程度もしくはデバイ長より小さい場合は OML 理論に従い周辺プラズマ密度とともに電圧にも依存し、その収集電流量は Langmuir 理論によるものより大きくなる。これは近くを通過する荷電粒子がプローブポテンシャルを感じてプローブに引き付けられることによって起こる。つまり同じプラズマ密度ならばプローブ径が小さい方が電子収集効率は上がる（図22）。また、同じプローブ径ならばプラズマ密度が低い方がシースは広がり電子収集効率が上がる（図23）。OML 理論の式は

$$I_{OML} = eN_{\infty}L \frac{p}{\pi} \sqrt{\frac{2e\Phi_p}{m_e}} = eN_{\infty}L_b 2R_b \sqrt{\frac{2e\Phi_p}{m_e}} \quad : \text{ブーム} \tag{2.1}$$

$$= eN_{\infty}L_t 2 \frac{w_t}{\pi} \sqrt{\frac{2e\Phi_p}{m_e}} \quad : \text{テープ} \tag{2.2}$$

となる。eは電荷、 N_{∞} はプラズマ密度 (m^{-3})、Lはプローブ長、pはプローブ周長、 Φ_p はプラズマとプローブ間の電位差、 m_e は電子質量、 L_b はブーム長、 R_b はブーム半径、 L_t はテープテザー長、 w_t はテープテザー幅である。

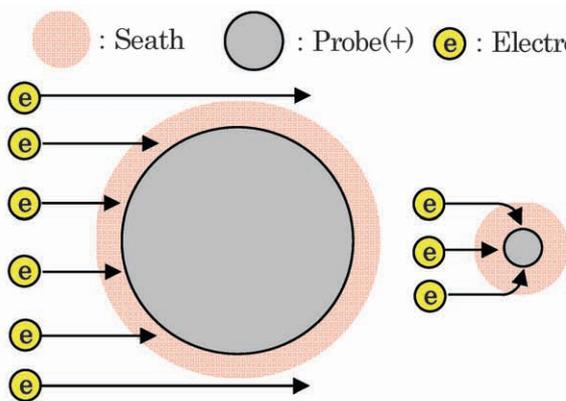


図22 正にバイアスされたプローブの電流収集 (同じプラズマ密度で異なるプローブ径)

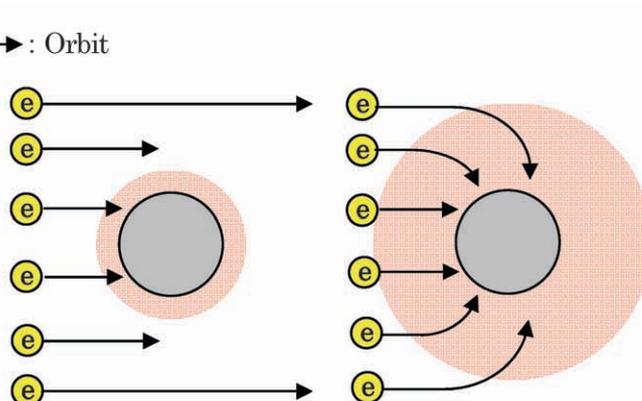


図23 正にバイアスされたプローブの電流収集 (同じプローブ径で異なるプラズマ密度)

3.3.2. 比較結果

3.3.2.1. 実験回路1によるデータ

まず実験回路1によって得られた実験データを OML 理論による理論値と比較した。図 24 は初期プラズマ密度 1.0×10^5 (cm^{-3})、図 25 は初期プラズマ密度 1.0×10^6 (cm^{-3}) である。両方とも $5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ テザーによる実験データである。x 軸がテザーにかかった電圧、y 軸が収集電流である。実験中のプラズマ密度の変化は OML 理論値に反映してある。グラフを見て分かるようにどちらも電圧が上がるに従って実測値が理論値に漸近して近づいている。図 24 の低密度プラズマでの実測値の方が図 25 の高密度プラズマによるものより理論値に対して収集電流が高いことがわかった。これはおそらくプラズマ密度が低いことによりシースが広がりテザーの端効果によりより多くの電子を収集したためだと思われる。

3.3.2.2. 実験回路2によるデータ

実験回路2 (図5) は観測ロケット実験の条件をチャンバー内で再現した回路である。こちらの実験データも OML 理論による理論値と比較した。初期プラズマ密度は 1.0×10^6 (cm^{-3})、プローブは $\phi 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の円筒プローブ、そしてテザーのサイズは $5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ である。今回は電子質量を用いた OML 理論とイオン質量を用いた OML 理論の二つの理論値と比較している。二つの理論値が異なる理由を説明する。実験回路2は実験回路1とは違いグラウンドとチャンバーから絶縁されていて浮いている状態である。つまりチャンバー壁全体からイオンが流入する実験回路1とは違いテザーとプローブによって閉回路を形成しているため負極側から流入するイオンがより制限される。イオンと電子の流入量の割合は決まっているので電子の流入量も実験回路1の場合より制限される。よって実測値は電子質量を用いた OML 理論よりイオン質量を用いた OML 理論により近づくことと予想される。図 26 は電源の正極をプローブに接続し負極をテザーに接続したグラフである。つまりこれは観測ロケット実験における PhaseA となる。今回の実験では図5の実験回路2のプローブがブームを模擬したものとなっている。グラフを見てわかるように実測値は電子質量を用いた OML 理論よりイオン質量を用いた OML 理論により近い値となっているのが分かる。

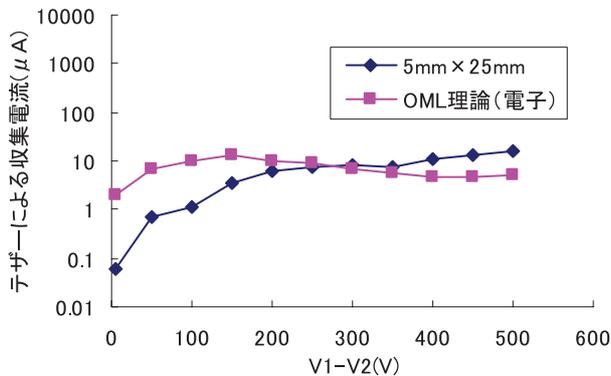


図 24 総面積当たりの電流収集量と理論値の比較 (初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 電子温度 1.0 (eV), 実験回路1)

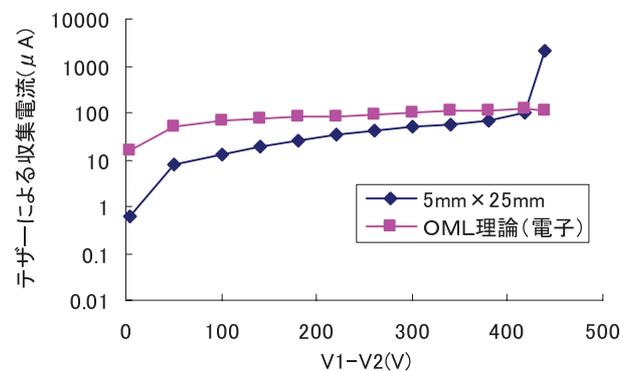


図 25 総面積当たりの電流収集量と理論値の比較 (初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 電子温度 0.6 (eV), 実験回路1)

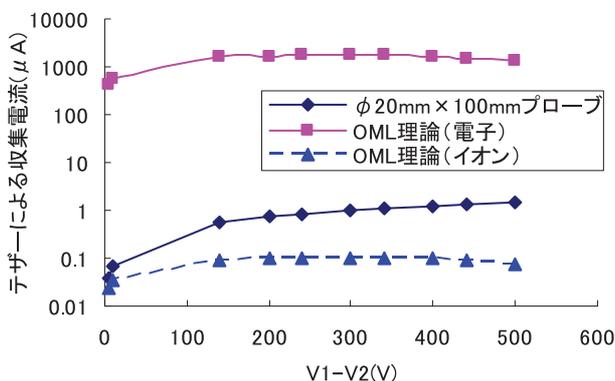


図 26 総面積当たりの電流収集量と理論値の比較 (電源の正極をプローブに、負極をテザーに接続, 初期プラズマ密度 $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 電子温度 0.6 (eV), 実験回路2)

4. 考 察

今回ベアテープテザーを用いたプラズマ収集実験を行った結果、幅が狭い場合、あるいはプラズマ密度が低いほど単位面積当たりの収集電流が大きくなることが分かった。これはOML理論の性質に従っており理論値と比較した結果、テザーに掛かる電圧が高いほど理論値に漸近して近づくことが分かった。さらにチャンバーでのプラズマ収集実験ではある一定の電圧を超えると収集電流が急増する電流急増現象が発生することが確認された。この現象はチャンバー内の圧力とプラズマ密度に依存しており、圧力がより低い場合は発生しないことが分かった。つまりこれは地上でのチャンバー実験特有の現象であり実際の観測ロケット実験では発生しないことが予想される。そして電流急増現象によって引き起こされたテザーに皺や断線が発生したことによりテザーの耐久性の問題が浮かび上がった。テザーの電流によって発生する熱に対する耐久性は実験結果からは問題ないことがわかった。

5. 今後の課題

今回のプラズマ収集実験ではプラズマ密度が実験中を通して不安定であった。よって今後はチャンバー内で一定のプラズマ密度を保つ実験条件を確立する必要がある。またテザーの耐久性については問題も多く今後実験を続けていく必要がある。さらに次回実験で使用予定のより高いプラズマ密度が生成可能な高密度流プラズマ発生装置を用いて実験を行う予定なのでそれを使った新たな実験方法を確立する必要がある。

References

- [1] Takeo Watanabe, Hironori A. Fujii, Hirohisa Kojima, “Quick Deployment of Bare Tape Tether and Introduction of the Sounding Rocket Experiment”, AAS 07-370, AAS Astrodynamics Specialist Conference, Aug. 19-23, 2007.
- [2] Masaya Kozakai and Haruki Takegahara, “Evaluation of Plasma Contactor Ground Experiments for Electrodynamic Tether” 27th IEPC, IEPC-01-242, Oct. 15-19, 2001, Pasadena, CA, USA.
- [3] David L. Cook, and Ira Katz, “Ionization-Induced Instability in an Electron-Collection Sheath”, J. Spacecraft, Vol. 25, No. 2, March-April, 1998.
- [4] 池田哲平, 中邨康広, 大津広敬, 山極芳樹, 河本聡美, 大川恭志, 中島厚, “電子コレクタとしての複数本ベアテザーの電流特性”, 第51回宇宙科学技術連合講演会 講演番号1E05, 2007年10月.