

# 小型衛星における電離層観測と、電位制御用の電子銃の開発

○宮崎貴大<sup>1)</sup>, Josaphat Tetuko Sri Sumantyo<sup>1)</sup>, 小山孝一郎<sup>2)</sup>,

阿部琢美<sup>3)</sup>, 中園智幸<sup>3)</sup>, 児玉哲哉<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>千葉大学, <sup>2)</sup>台湾国立成功大学, 九州大学, <sup>3)</sup>JAXA

[zakky6310tkhr@chiba-u.jp](mailto:zakky6310tkhr@chiba-u.jp)

## 1. はじめに

日本での電離層観測は地上からの観測を含めると50年以上も前から行われており、電離層の変動が短波を用いる通信や測位衛星電波を用いる精密な測位などに及ぼす影響について研究されている。電離層観測衛星としては、日本で初めての実用衛星である『うめ』をはじめとした大型衛星が使用されていたが、今後は衛星技術の発達とともに地球観測衛星は従来の大型で長期運用のものから低コスト、短期運用の小型のものへと変化し、最新の観測機器の使用が可能となっている。また、小型衛星を多数用いた小型衛星群による大規模な観測が計画されている。千葉大学の当研究室でも地球の地殻変動を観測する小型衛星 GAIA シリーズの運用を計画している。

電離層は大気中の主な成分である窒素が太陽からのエネルギーによって電子と正イオンに電離したプラズマ状態となっている。衛星での観測は、一般的なプラズマ測定器であるラングミュアプローブ法によって行われる。しかしながら、小型衛星のように衛星構体が少ない場合、衛星の電位が負の方向に大きく変化することが問題となる。この問題の解決策として、熱電子放出を用いた衛星電位の制御方法を提案する。

本稿では、スペースチェンバーを使用し、試作した電子銃を用いた、小型衛星の電位制御実験の結果について報告する。

## 2. 研究の概要

### 2.1. ラングミュアプローブ法について

ラングミュアプローブ法は1927年にラングミュアによって発表されたプラズマの測定方法<sup>2)</sup>である。プラズマ中に金属の電極(プローブ)を挿入し、基準電極(チェンバー壁や衛星構体など)間に電圧を印加するとプラズマ中の電子がプローブに引き寄せられ、電流が流れる。この時の電流と電圧の関係から電子温度と電子密度を計算することができる。電子温度と電子密度はプラズマを知るための重要なパラメータとなる。図1に実験で使用し

たラングミュアプローブの回路の略図を示す。

プローブで測定された電流は、数 $\mu\text{A}$ 程度と微小なので、オペアンプを使用した電流電圧変換回路によって増幅され電圧として得られる。得られる電圧にはプローブに印加した電圧も含まれているため、差動アンプや計装アンプで印加電圧を除去し、電圧に変換されたプローブ電流のみを測定する。

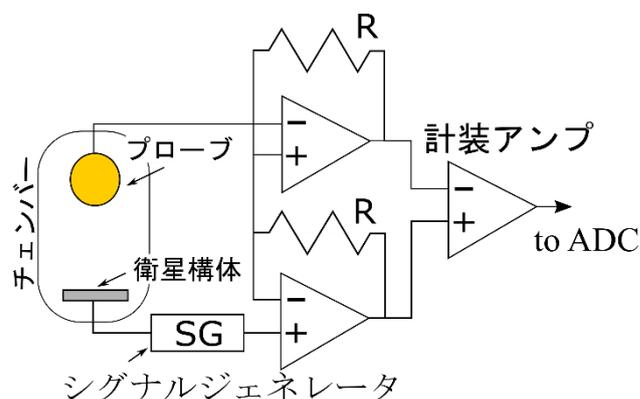


図1. 実験で使用したラングミュアプローブ

### 2.2. 衛星構体グラウンドの変化

ラングミュアプローブのようにプローブと基準電極となる衛星構体の間に電圧を加える測定器の場合、電離層内において衛星構体の電位(構体グラウンド)が電極に加える電圧を増加させると負の方向へ沈む現象が見られる。大型衛星のように構体グラウンドが十分な面積として確保できる場合では問題とならないが、小型衛星や超小型衛星のようにソーラーパネルや他の観測機器の取り付けで十分な面積が確保できない場合には正常な電離層観測が行えない。衛星電位変動のメカニズムは図2のようになる。

一般的に電離層を飛行する人工衛星は衛星構体に電子が飛び込むため負電位となっている。これは、電子の熱速度が正イオンの熱速度よりも速いため衛星に到達する電子の量が多いためである。この状態を①に示す。

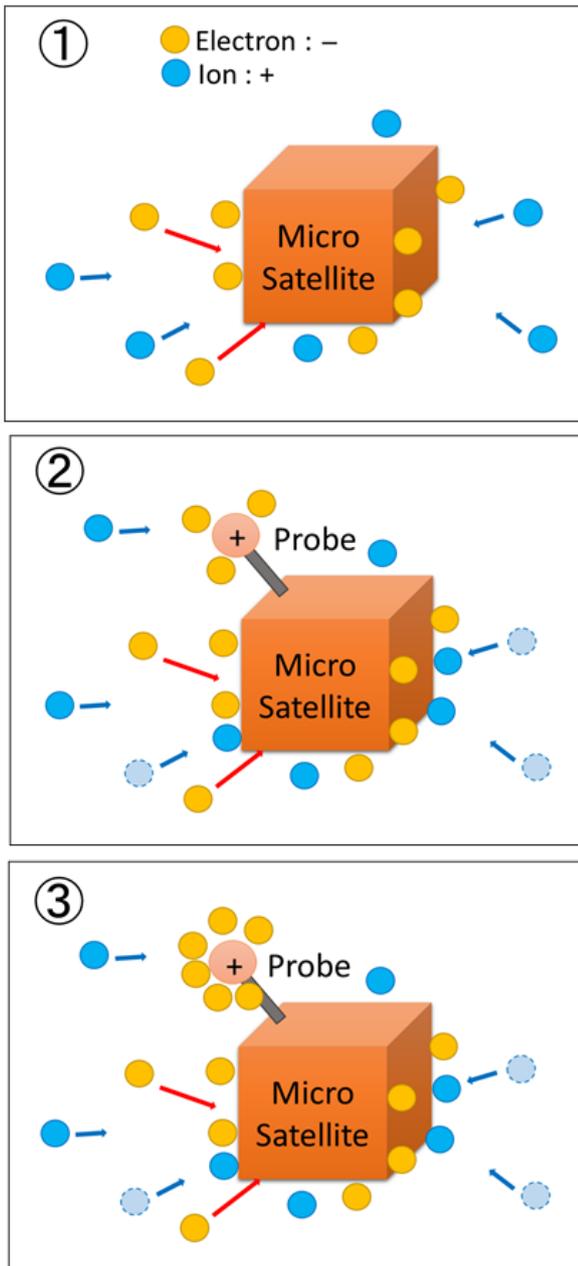


図2. 衛星電位変動のメカニズム

②では、ラングミュアプローブを使用し、プローブに電圧を加え始めた様子を示している。プローブに電圧が印加されるとプローブには電子が引き寄せられプローブに電流が流れる。この際、衛星は電気的な中性を保つ、つまり衛星に収集される電子の量と正イオンの量を同じにするために、基準電極となる衛星構体で正イオン(点線青丸で表されたイオン)が収集される。

更にプローブ電圧を更に上昇させると、プローブで収集される電子の量も増加する。当然ながら衛星構体で収集される正イオンの量も増加するが、収集される量は衛星構体の面積で決まる。しかし、衛星構体には電子が飛び込んでくるため、正イオ

ンの収集を阻害し、収集される正イオンの量が中性を保つのに必要な量よりも少なくなる。このため、衛星電位は①の場合よりも更に負の電位をとる。

### 2.3. 熱電子放出と電位制御

衛星電位の変動は、衛星構体に溜まっている電子によって正イオンの収集が阻害され起きると考えられる。このため、溜まっている電子を衛星構体から何らかの方法で除去・放出し正イオンの収集量を増やすことで改善できると思われる。今回の実験では、熱電子放出と呼ばれる方法を用いて電子の放出を行った。

熱電子放出とは、熱エネルギーを用いて、金属内の自由電子を外部へ放出する方法で、1880年代には、T.A.Edisonの実験で確認されており、その後O.W.Richardsonによって理論的な裏付けが行われた。<sup>3)</sup>

電子を放出するための金属としては、高温での耐久性、電子の放出性の観点から、タングステンを用いた。タングステンは硬く、割れやすいため本実験では直径0.15mmのタングステン線を用いてタングステンコイルを作成し、電流によって加熱することで熱電子を放出する電子銃を作成した。図3に作成した電子銃を示す。

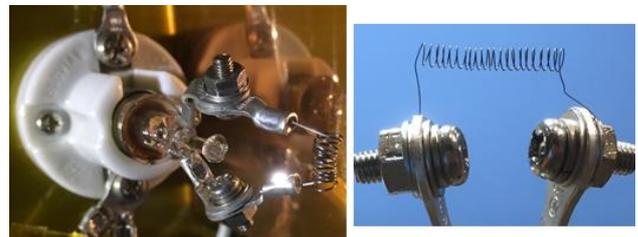


図3. 作成した電子銃

## 3. 実験と考察

### 3.1. 実験に使用したシステム

実験では、チェンバー内にアルミニウム製の小型衛星模型(20cm×20cm×20cm)を設置した。模型の内部にはラングミュアプローブ測定システム、通信システム、バッテリーを搭載している。衛星電位の測定には、衛星構体とチェンバー壁を絶縁しフローティングさせる必要がある。チェンバーの内部と外部とをつなぐフランジにはフローティングできるものもあるが、チェンバー外にあるさまざまな機器からのノイズが測定に影響を及ぼすため、本実験では、Xbeeと呼ばれる無線モジュールを使用し完全に絶縁した状態で測定した。チェンバー外から通信モジュールを通して、測定データの受信、ラングミュアプローブに印加する周波

数や電圧を変更できる。図 4 に模型内部の様子を示す。

電子銃の出力は、ラングミュアプローブのプローブ電流が数  $\mu\text{A}$  程度であるため、事前に行ったタングステンの熱電子放出実験の結果より 1.7A の電流をタングステンコイルに流し 3~5  $\mu\text{A}$  程度の熱電子を放出した。

図 5 に実験時の様子を示す。衛星模型には、衛星構体に見立てた 20cm×20cm の銅板を使用した。(図 5 のグラウンド面)



図 4. 作成した衛星模型内部の様子



図 5. 使用中の電子銃(左)と  
チャンバー内に設置された測定システム(右)

### 3.2. 構体グラウンド変化による影響

図 6 に上からチャンパー壁と接続し、衛星構体の面積が無敵大の場合、接続を切断しフローティングした場合、電子銃を使用した場合の実験結果を示す。

衛星構体とチャンパー壁を接続した場合は、プローブ電圧と印加電圧は等しいためグラフでは重なっている。また、衛星電位はチャンパー壁の電位となるため 0V で一定となる。

フローティングの状態では、印加電圧が約 2.25V 付近でプローブ電圧が上昇しなくなる。この時、衛星電位は負の方向へ沈んでいることがわかる。沈んだ電圧とプローブ電圧を足し合わせると印加

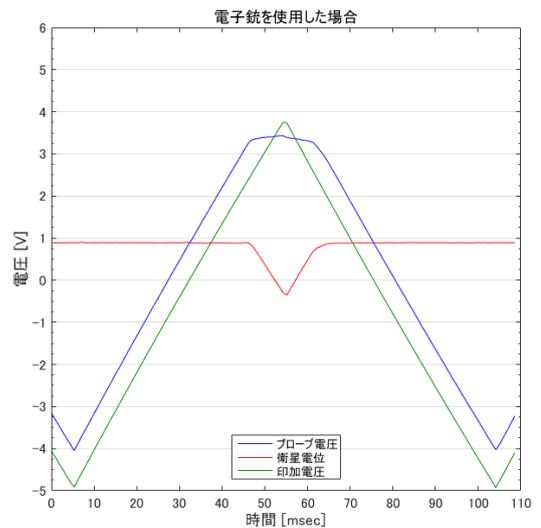
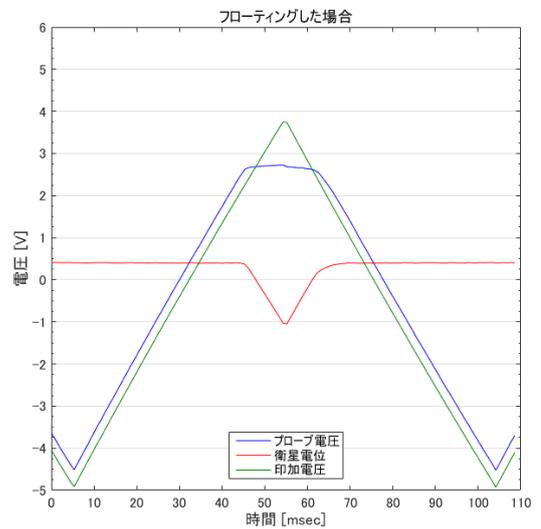
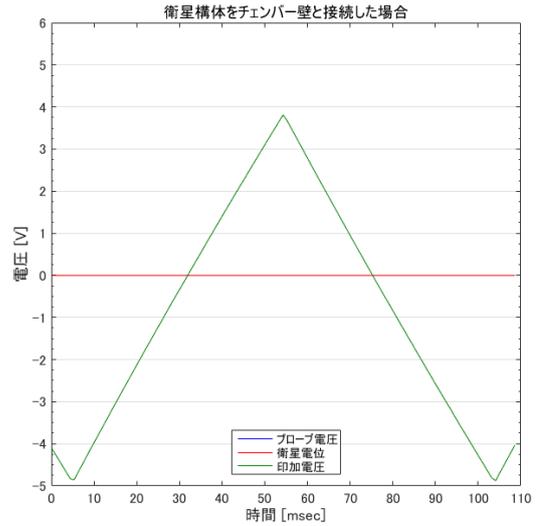


図 6. 実験結果

電圧と等しくなることもわかる。

電子銃を使用した場合には印加電圧が約 2.5V 付近でプローブ電圧が上昇しなくなることがわかる。

これらのことから、電子銃を使用した場合、使用しない場合よりも約 0.25V 高い印加電圧まで測定できるようになることがわかる。

衛星電位について 3 つの状態を比較したグラフが図 7 である。電子銃を使用した場合には、フローティングした場合と比べて約 0.22V 程度、正の方向へ改善していることがわかる。改善が 0.2V に留まった原因には、電子の放出によって正イオンを収集できる場所ができたが、その場所に再度電子が飛び込み正イオンの収集が阻害されていることが考えられる。よって熱電子の放出量を約 10 倍程度多くし、正イオンの収集量を確保する必要があると思われる。

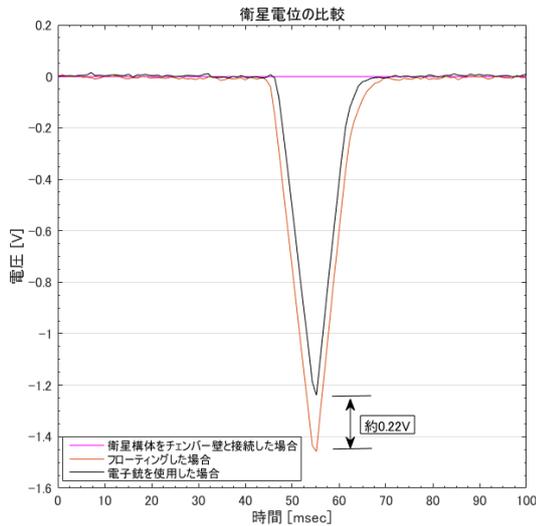


図 7. 衛星電位の比較

## 謝辞

本研究のプラズマチェンバ実験は、『宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同研究設備』を利用して行いました。また、千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用（平成 26 年度、平成 27 年度）の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 井村 信義, スマンティヨ ヨサファット テトオコ スリ, 宮崎 貴大 宇宙科学技術連合講演会講演集 58, 6p, 2014-11-12
- 2) I. Langmuir and H.M. Mott-Smith, Gen. Elec. Rev. 27, 443,

538, 616, 762, 810 (1924).

- 3) William Henry Preece, "Glow-Lamps raised to High Incandescence", Proceedings of Royal Society, 219/230, (Mar.26, 1885)