

# 基準電位が変動する飛翔体上で動作する

## ラングミュアプローブの開発

阿部 琢美 (宇宙科学研究所)、田寺 慶樹 (東海大学工学部)

### Development of Langmuir Probe for use on charging spacecraft

Takumi Abe (Institute of Space & Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

Yoshiki Tatera (Tokai University)

#### 1. はじめに

宇宙空間を飛翔する人工衛星等の電位は、高エネルギー粒子の入射や飛翔体上で行うアクティブ実験によって大きく変動する場合がある。周囲のプラズマに対して大きく帯電した飛翔体上で、電子温度や電子密度推定のためにラングミュアプローブを用いた場合、飛翔体の電位を基準に電位を掃引するため、このような状況下では熱的プラズマの電子温度・密度を求めるために必要な電流範囲をカバーできないことが予想される。こうした環境においては、回路が自ら飛翔体の電位を推定し、電子温度・密度推定に必要な印加電圧の範囲を決定できる自律型のラングミュアプローブ回路が必要となる。

#### 2. 本研究の目的と開発の経緯

上記の背景のもと、本研究の目的は飛翔体が背景のプラズマに対して大きく帯電した場合でも有効に機能し電子温度と電子密度の推定を可能にするラングミュアプローブ用の回路を開発することにある。

我々はこのような問題意識から同じ目的で回路の開発を開始し、製作した回路を電離圏プラズマ環境を模擬した真空チェンバー内に設置し、機能確認試験を行った。しかし、開発した回路は自分自身の基準電位を適切に推定することが出来なかった。このため、本研究では基準電位推定のための回路内ロジックの問題点を洗い出し、解決できるよう見直しを行ない、どんな条件でも電位を適当に見つけられるように、回路内のロジックに対して変更を加えることとする。

#### 3. 飛翔体帯電時の問題点と基準電位決定ロジック

通常飛翔体上で使用されるラングミュアプローブにおいては、飛翔体の電位を基準として  $3 V_{p-p}$  [V] 程度の電圧掃引を行うことが多い。低高度電離圏を飛翔する観測ロケットの場合は  $-1 V$  程度に帯電することが多く、この電圧掃引で必要な範囲をカバーできる。しかしながら、これより大きく負または正に帯電した場合には、 $3 V_{p-p}$  [V] の掃引では電子温度・密度の推定に必要な電子減速電界領域をカバーできない。このような状況において必要な電流-電圧特性を得るためには、電気回路が自らの電位を見つけ出し、掃引すべき電圧範囲を決定させる必要がある。

図 1 にラングミュアプローブの電流-電圧特性を示す。プラズマの電位である空間電位は領域①

と②の境界付近に位置し、この低電圧側で電子電流の変化が最も大きくなる。逆に考えると電子電流の電圧に対する変化率（これはプローブ電流の変化率にほぼ等しい）が最大となる電圧からプローブからみた空間電位（基準電位）を決定し、これを基準に掃引電圧範囲を定めればよいことになる。このように考えた結果、最初に開発したラングミュアプローブでは下記のようなロジックで電圧掃引範囲を決定することにした（図2参照）。

- 1) 広い電圧範囲(0~100 V)を粗いステップで掃引する (V1 掃引)
- 2) V1 掃引時の電流値の立ち上がり部分の傾きが最も大きい部分の電圧を基準電圧とする
- 3) 基準電圧に対して-3~+1 [V]の範囲で電圧掃引(V2)を行い、この電子温度と密度推定のための電流-電圧特性を得る

### 電流-電圧特性

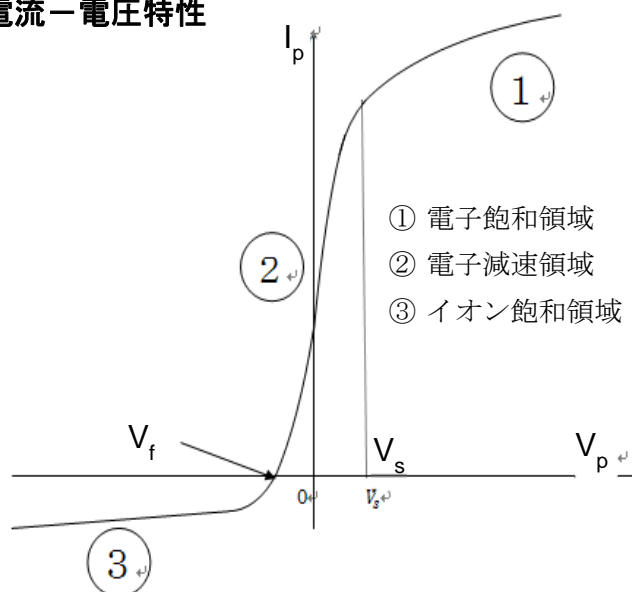


図1. ラングミュアプローブの電流-電圧特性

#### 4. 初期開発の回路の問題点

我々はこのように開発したラングミュアプローブ用回路を大型スペースチェンバー内に設置し、その機能を確認した。図3にその実験の概要図を示す。電気回路部およびプローブはチェンバーや電源供給のアースから絶縁し、直流電源を使用してバイアスを印加して、帯電状態を模擬した。しかしながら、-20, -30, -40 Vのバイアス電圧を印加した場合に回路により決定された基準電圧（電流傾きが最大となる電圧）はこの値よりも12~16 V大きく、模擬した帯電電位を正確に決定しているとは言えなかった。

帯電電位を正確に導出できない原因を調べるためにプローブ電流の変化を詳しく調べたところ、電子飽和電流領域において電流値にノイズが重畳していたために2点間の差分から計算した傾きが局所的に大きくなって、そこを基

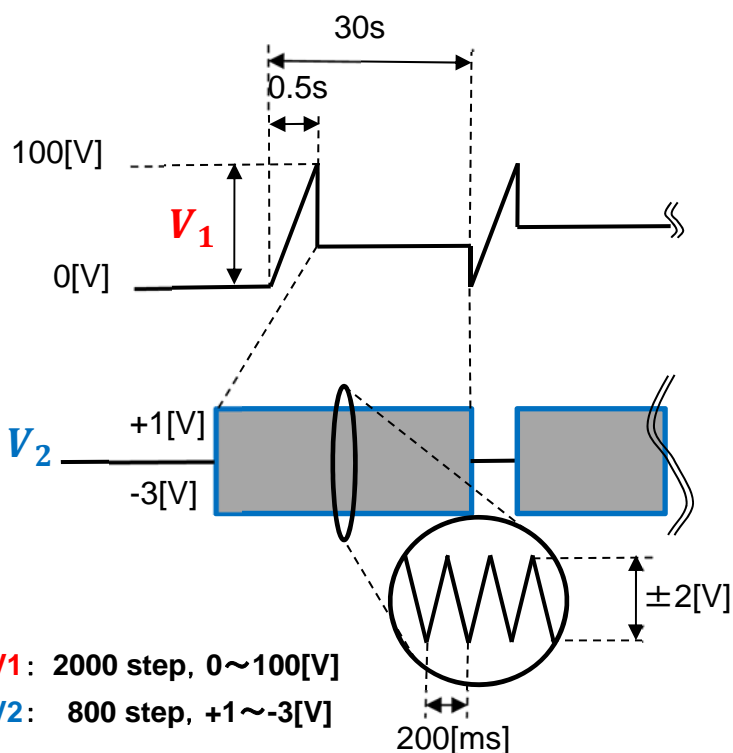


図2. 電圧掃引シーケンス

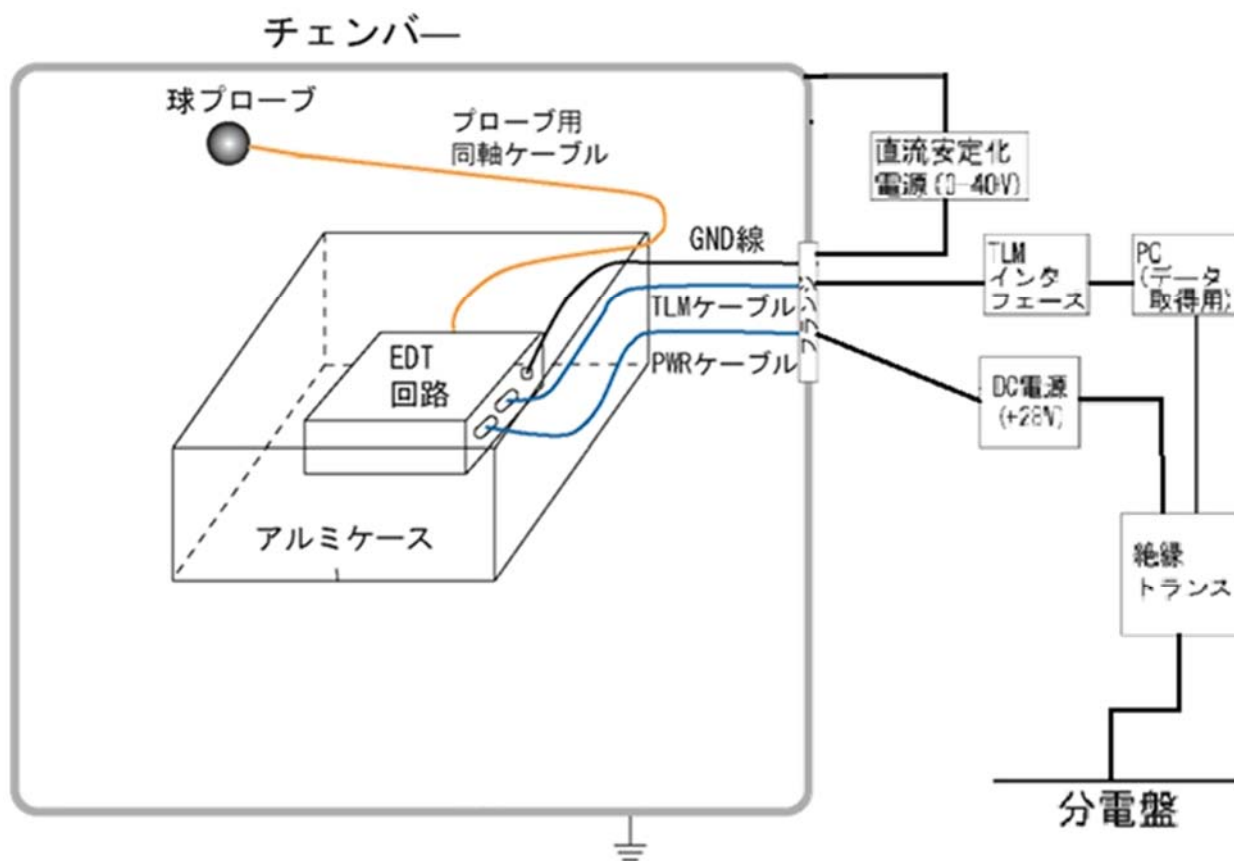


図3. 基準電位決定ラングミュアプローブ回路の機能実証の実験概要図

準電位と判断していたためであることがわかった。このため、このような電流ノイズによる偽の傾きによる影響を避けて、真の傾き最大の電圧を探し出すロジックを考案する必要があると結論された。

## 5. 新たな基準電位決定ロジック

電流値にノイズが重畳している場合は電流差分値が増大した直後に負になるか、またはその逆のパターン（いったん負になった後に急に増大）となるはずである。そのため、電流値が連続して増加している中で、傾きが最大になるタイミングのデータを探すという条件にすれば、電流値に重畳したノイズの影響が避けられるであろうと考えた。この場合の基準電位決定のロジックは以下のようなになる。このロジックは改良版のラングミュアプローブ回路に実装された。

- 1) 電流差分値が8点連続して正であると言う条件の場合に、2)に進む
- 2) 連続した8点の電流差分値の平均を、それまでの平均の最大値と比較し、大きければ3)に進む
- 3) 連続する8点の電流差分値のうちの4点目の値をそれまでの最大値と比較し、大きければ2)で求めた平均最大値とともに、メモリに記憶する
- 4) この手順をV1の掃引電圧0~100Vの全ての場合の電流値に対して繰り返し、全体の中で電流値傾きの最大が観測された時の電圧を求め、基準電位とする

## 6. 改良した回路の機能実証試験

4に述べた方法と同じ実験装置および手順により、改良したラングミュアプローブの回路の機能実証試験を行った。試験では、前回同様に回路に対して負の直流電圧を印加し、マイナス数 10 V に帯電している状況を模擬した。

実験結果を表 1 に示す。左から第 1、2、3 列目はそれぞれ回路に印加したバイアス電圧、回路が決定した基準電圧、データの解析により求めた空間電位である。基準電位と空間電位を比較すると概ね近い値を示していることから、このロジックを用いるとプラズマ空間電位に近い電位を決定できることがわかる。しかしながら、バイアス電圧が-50、-60、-65 V の場合には空間電位よりも 2 V 程度大きな値を基準電位と決定しているところがある。これらについて取得データを詳細に調べた結果、飽和電子電流領域で連続して電流値が増加している中で傾きが大きくなっているデータを検出したためであることがわかった。このように基準電位を決定した場合に、回路が電子温度と密度の推定に必要な電圧範囲をカバーしているか否かについて、今後詳しく検討する必要がある。

バイアス電圧 [V]	得られた基準電 位[V]	プラズマ空間 電位[V]
-30	34.5	34.2
-35	38.5	38.6
-40	43.3	43.2
-45	50.4	49.1
-50	57.3	55.0
-55	59.4	59.4
-60	66.2	64.5
-65	72.5	70.0
-70	72.8	72.9
-75	79.9	78.4
-80	83.5	82.6

表 1. 改良版ラングミュアプローブ回路の機能確認試験結果

## 7. まとめ

本研究では、飛翔体の電位が大きく変動した場合においてもプラズマに対する自らの電位を決定し、電子温度と電子密度の推定が可能なように掃引電圧範囲を決定する自律型ラングミュアプローブ回路の開発を行った。これまでの結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 初期開発で製作された回路の問題点を明らかにし、回路内ロジックの修正を検討、プログラム化を行なった。
- 2) 大型スペースチェンバー内にプラズマを生成し実証実験を行った結果、本電子回路が強制的に印加したバイアス電圧に近い電流傾き最大の電圧を捉えることが出来ていることを確認した
- 3) 上記実験の 11 例中の 3 例では、空間電位よりも数 V 高い電圧を決定しており、これは電子飽和電流中の大きな傾きを検出したためと考えられるため、このようなデータを比較対象から除外するロジックを考案する必要がある。