

れいめい衛星搭載のラングミュアプローブ特性に関する

PIC シミュレーション - 進捗報告 -

白井 英之、今里 康二郎（京都大学 生存圏研究所）、

上田 裕子（宇宙航空研究開発機構）、岡田 雅樹（国立極地研究所）、

1. まえがき

平成 17 年度にオーロラ撮像を主目的とした小型科学衛星「れいめい」が打ち上げられた。れいめいには、オーロラ電流などの高エネルギー粒子計測の他に、極域における背景プラズマパラメータ計測のために 2 種類のパッチ型ラングミュアプローブ(CRM)が搭載されている。ひとつは衛星筐体を基準電位としたシングルプローブであり、もうひとつは、筐体電位から絶縁されたダブルプローブである。ラングミュアプローブによるプラズマパラメータ推定(参考文献 1)は非常に古典的であり、すでにその手法は確立している。しかし、衛星表面に搭載されたパッチ型プローブの場合、衛星本体やその環境によってプラズマパラメータ推定がどの程度影響を受けるかについては自明ではない。この影響の定量理解には、事前に地上実験による検証が必要であるが、極域プラズマ環境をチェンバー内で実現することは困難である。このような状況の元、本研究では、数値シミュレーションを用いて衛星環境における CRM 特性を把握し、衛星観測データの較正時の基礎データとして役立てる。

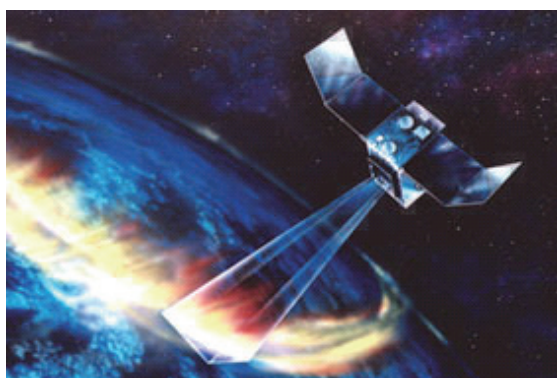


図 1 小型科学衛星れいめい(概念図)

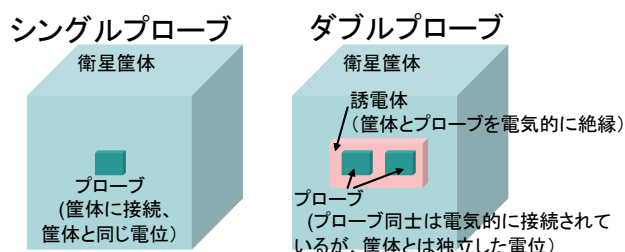


図 2 衛星搭載シングルプローブとダブルプローブ(概念図)

2. シングルプローブ特性

図 2 に示すように、シングルプローブは衛星筐体を基準電位とする。そのため、オーロラ電流による急激な衛星の負帯電がある場合、その負電位を基準電位としてプローブ電流が測定されるため、それから推定される背景電子の温度、密度は正確とはいえない。一方、ダブルプローブの場合、基本的にはプローブは衛星筐体から電気的に絶縁されており、また筐体に対して面積が小さいため、たとえ急激なオーロラ電流により筐体が負に帯電しても、その影響を受けにくい。

そこで本研究では、まず、れいめい衛星表面に接地されたシングルプローブモデルを用いて、オーロラ電流がある場合とない場合でプローブ特性の違いを PIC モデルシミュレーションにより検証し、シングルプローブ特性による背景プラズマパラメータ推定の誤差について調べた。背景プラズマパラメータとしては、プラズマ数密度は $1.00 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 、電子の熱速度 0.5 eV ($2.97 \times 10^5 \text{ m/s}$)、酸素イオンの熱速度 0.5 eV ($1.73 \times 10^3 \text{ m/s}$)、衛星に対するドリフト速度 $8.65 \times 10^3 \text{ m/s}$ とした。簡単のために、プローブ

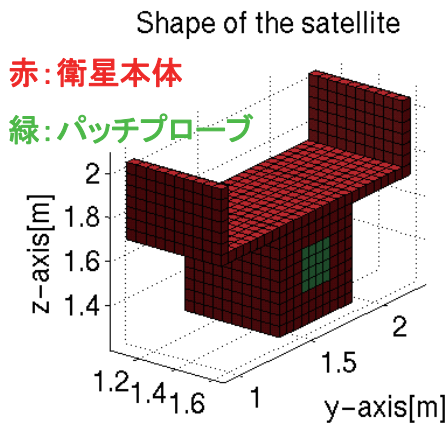


図3 レイメイとシングルプローブモデル

面積、電子ビームパラメータは任意に設定した。図4に、シングルプローブの電位挿印により得られるプローブ電流の時間変化を示す。プローブ電位は衛星筐体を基準にして、-5V から 5V まで挿印させた。

図4左図にオーロラ電流成分がない場合についての衛星筐体電位とプローブ電位の時間変化を示す。極域プラズマ環境では、赤線で示したように、衛星が背景電子の流入によりプラズマ電位に対して負に帯電する。これに対してプローブ電位挿印を緑色の線で示したように行った。この場合、赤線の衛星筐体電位の変動が若干見られるが初期の浮遊電位からの変動はあまり大

きくない。しかし、図4右図に示したように、オーロラ電流成分がある場合、衛星の負帯電が顕著となり筐体浮遊電位が初期に大きく下がる。本モデルでは、時間 $=0.8 \times 10^{-4}$ t までは衛星電位を基準にしてプローブは-5V 低い電位を設定しており、この時点で衛星システムとしてはほぼ浮遊電位となっている。その後、衛星電位を基準に生電位方向に挿印するが、プローブ電位が浮遊電位より正になっていくため、その分オーロラ電子がプローブのみならず、衛星筐体全体でも多く取り込まれるため、筐体電位は逆に大きく下がっていくのが見える。

これらの状況において得られたプローブ電流、特に電子電流から背景電子の温度、密度の推定が可能である。図5にプローブの電流-電圧特性を示す。青船の電子電流に関する近似曲線を用いて以下の式から電子温度が算出できる。

$$\frac{d \ln I_e(V)}{dV} = -\frac{e}{kT_e}$$

オーロラ電子がない場合（左図）の場合、上式から推定できる電子温度は約 0.65eV であり、シミュレーションのパラメータ設定地である 0.5eV に対して 1.3 倍大きい。一方、オーロラ電子がある場合（右図）では、推定背景電子温度は 3.8eV であり、パラメータ設定値とは大きくかけ離れている。この原因は、プローブ電位

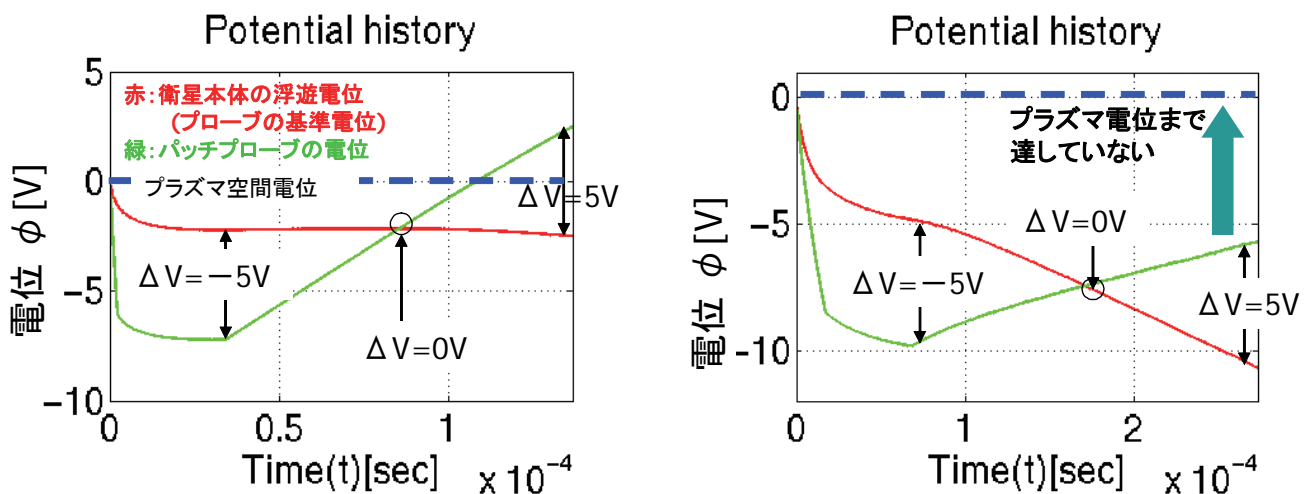


図4：オーロラ電流がない場合（左図）とある場合（右図）の衛星筐体およびプローブ電位の時間変化

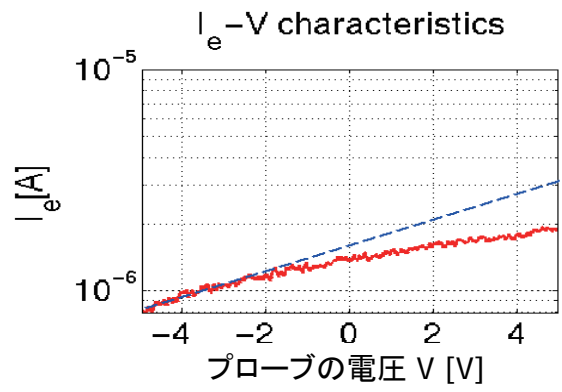
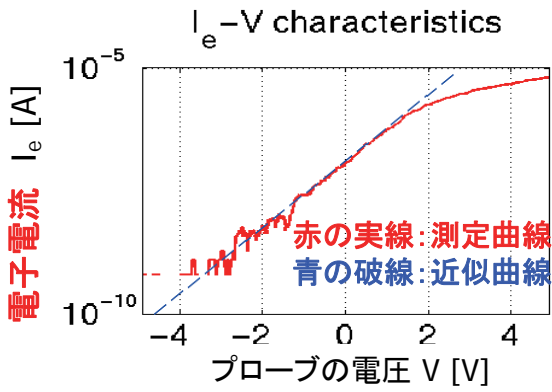


図5：オーロラ電流がない場合（左図）とある場合（右図）の電子電流－電圧特性曲線。

挿印における基準電位、すなわち衛星筐体電位が時間的に大きく変動（図4右の赤線）しているために正しい電流電圧特性が得られなかったためと考えられる。すなわち、オーロラ電流など、電子ビームが存在するプラズマ環境ではシングルプローブによる背景プラズマパラメータ推定は困難であることが本粒子シミュレーションでも示すことができた。

3. ダブルプローブの基本シミュレーション

本来なら、れいめい搭載モデルのダブルプローブ特性を数値シミュレーションで行うべきであるが、本研究では、これに先立ち、ダブルプローブ単体での特性を定量把握する目的で、ダブルプローブそのものの基本特性シミュレーションを行った。

ダブルプローブでは、一方のプローブ電圧を基準として他方の電位を挿引する。プローブ同士は接続されているため、各プローブに入る正味の電流値は等しく、それをプローブ電流とする。図6にプローブ電位の時間変化を示す。浮遊電位に達した後、 $-5V$ から $5V$ までの電位挿引を行った。緑色の線で示されたプローブには主にイオン電流、赤線で示されたプローブには電子電流が主に流れる。

図7に電流電圧特性曲線を示す。ダブルプローブ法の電子温度を求める式は経験的に以下のように与えられる。無衝突プラズマでは、 $A1=4$, $A2=3.28$ である。

$$\frac{kT_e}{e} = - \frac{\sum I_i}{A_1 \left(\frac{dI_p}{dV_d} \right)_{V_d=0} - A_2 \left(\frac{dI_p}{dV_d} \right)_{V_d=V_{sat}}}$$

図中の青の破線の傾き(青色、緑色)、イオン電

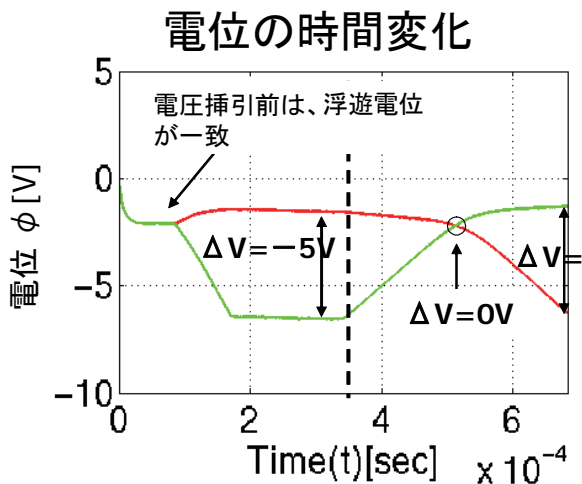


図6：ダブルプローブの電位変化

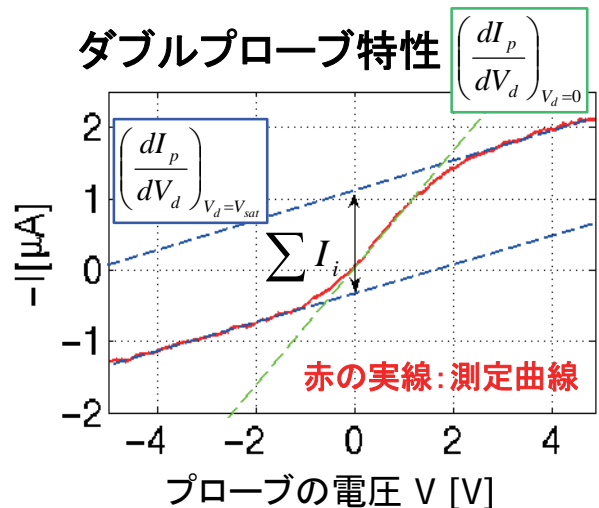


図7：ダブルプローブの電流電圧特性

流値から電子温度 T_e を求めることができる。シミュレーションで設定した電子の熱速度は 0.5eV であるが、電流電圧特性を下式にいれて得られる電子温度推定値は 0.512eV であり、設定値の約 1.02 倍となった。この結果から明らかなように、ダブルプローブによる背景プラズマパラメータ推定は誤差が少ない。

衛星電位は I/C (流入電流と静電容量の比) が大きい場合急激な時間変化を示す。ダブルプローブの場合、衛星本体とは絶縁されており衛星本体に比べて I/C (流入電流と静電容量の比) が小さいため、電位の時間変化は衛星筐体に比べて緩やかといえる。このため、ダブルプローブはオーロラ電流などの突発的環境変化の影響を受けにくい。(一方、第 2 章で示したように、シングルプローブは筐体に接地されているためその電位変動の影響を大きく受ける。)

4. まとめ

プラズマシミュレーションによる本研究では、まず、宇宙環境中でのシングルプローブ特性の取得とそれによるプラズマパラメータ推定について、オーロラ電流依存性について調べた。オーロラ電流により、衛星筐体が大きく負に帯電する場合は、シングルプローブでは背景プラズマパラメータの推定は困難であることを示した。また、続いて、ダブルプローブの基本特性の取得とプラズマパラメータ評価について検討し、オーロラ環境において衛星本体の浮遊電位変動に影響されにくいダブルプローブ計測の有効性を示した。

本研究は進行中であり、れいめい衛星観測データとプラズマシミュレーションデータの直接比較・検討までには至っていない。ただ、本報告にあるように、少なくとも、プラズマシミュレーションを応用することにより、衛星環境下での測器特性取得の有効性を示すことができた。今後、より詳細な「れいめい衛星環境」を元にしたプラズマシミュレーションを行い、実際の観測データ(背景プラズマパラメータ)の較正

に役立てることを目指す。

参考文献

堤井信力、プラズマ基礎工学、内田老鶴圃、1995.