A detailed space simulation background featuring a large Earth in the center, a crescent Moon in the bottom right, and several satellites in orbit. A bright sun is visible in the upper left. The text is overlaid on this scene.

宇宙環境シミュレータ

-宇宙機環境評価-

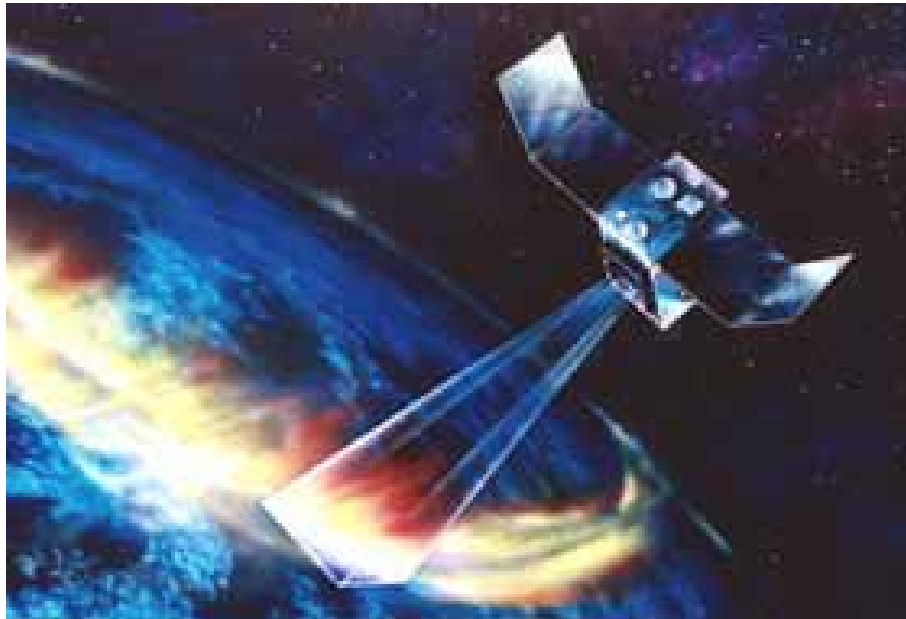
宇宙環境シミュレータ開発プロジェクトチーム
代表: 大村善治
(京都大学 生存圏研究所)

18年度研究計画

H17年度までに開発された領域分割型電磁粒子シミュレーションコード(NuSPACE)の検証を具体的な宇宙機環境事例を用いて行う。

具体的には、H17年度に打ち上げられた小型科学衛星「れいめい」搭載の宇宙環境計測用新型ラングミュアプローブに着目し、(1)その特性に関する数値シミュレーションを行い、さらには(2)宇宙データとNuSPACE数値実験データの比較検討を行うことにより、NuSPACEシミュレーションの妥当性を検証する。

「れいめい衛星」について



- 2005年8月23日打ち上げ
- オーロラ微細構造の解明
- 極軌道、高度は610～670km

ラングミュアプローブ方式を用いたプラズマ電流モニター (CRM: Plasma Current Monitor) により衛星近傍のプラズマ密度・温度を導出。

地上試験におけるプローブ特性取得は困難

- オーロラ環境の実現、衛星形状の影響について定量理解が困難

プラズマ数値シミュレーションを応用して、衛星形状、オーロラ環境を考慮したプローブ特性(電流電圧特性)取得、それによる背景プラズマパラメータ評価

ラングミュアプローブ

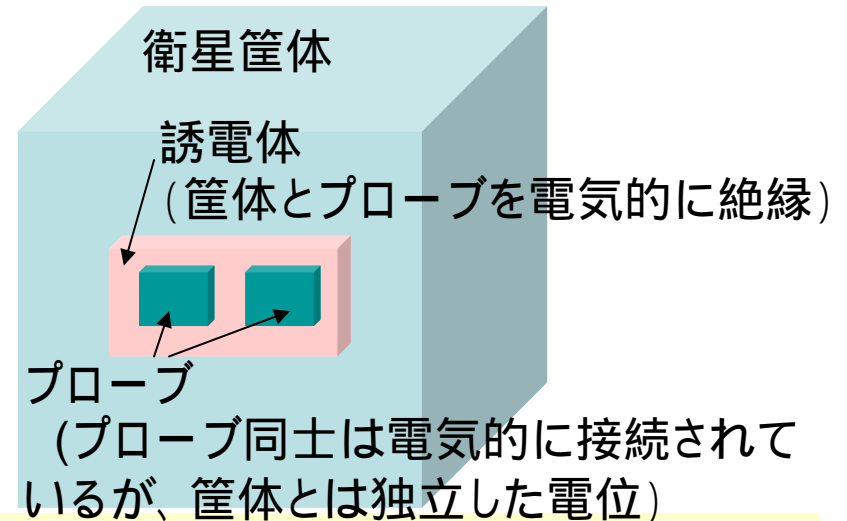
宇宙環境下にあるプローブの電圧を挿引し、得られる電流電圧特性曲線から
プラズマ環境データ(温度、密度)を推定

シングルプローブ



- 衛星が帯電すると、衛星筐体の浮遊電位が変動
- プローブの基準電位も変動
- プローブ電流電圧特性に誤差

ダブルプローブ



- オーロラ電流により衛星筐体の浮遊電位が変動しても、プローブの基準電位は変動しにくい。
- プローブ電流電圧特性に誤差が入りにくい

れいめい衛星ではどちらも搭載されている。
それぞれの信頼性について数値シミュレーションで評価。

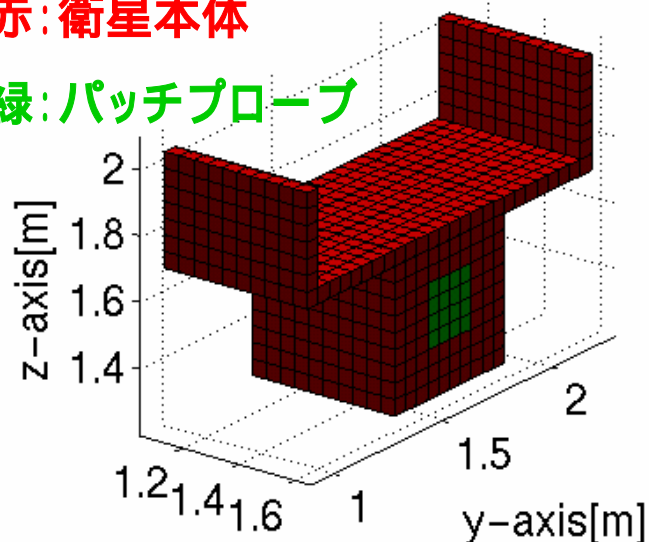
シングルプローブモデル

シングルプローブは衛星筐体に接地。筐体電位を基準に電位挿引

Shape of the satellite

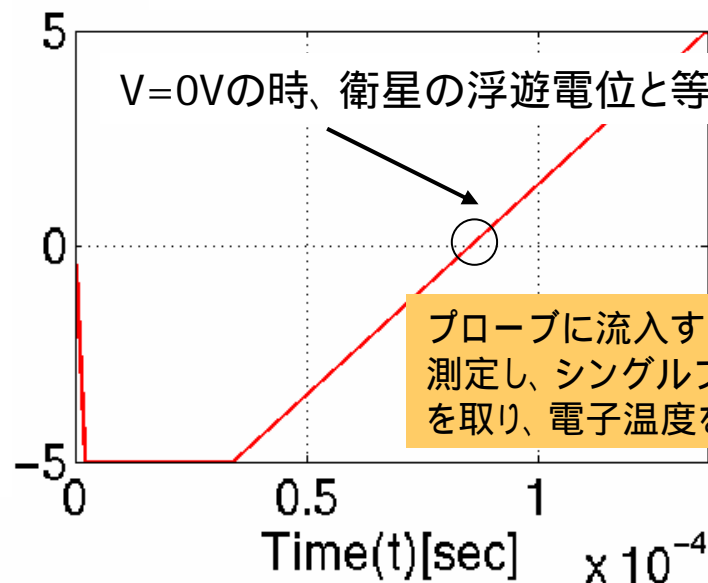
赤: 衛星本体

緑: パッチプローブ



衛星に対するプローブの
相対電圧 V [V]

プローブ電圧の時間変化



背景プラズマパラメータ

プラズマ数密度 $1.00 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$

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 ($1.73 \times 10^3 \text{ m/s}$)

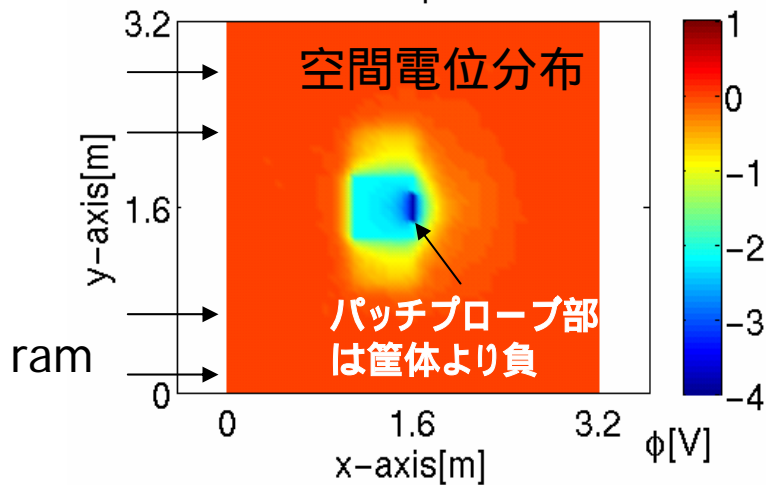
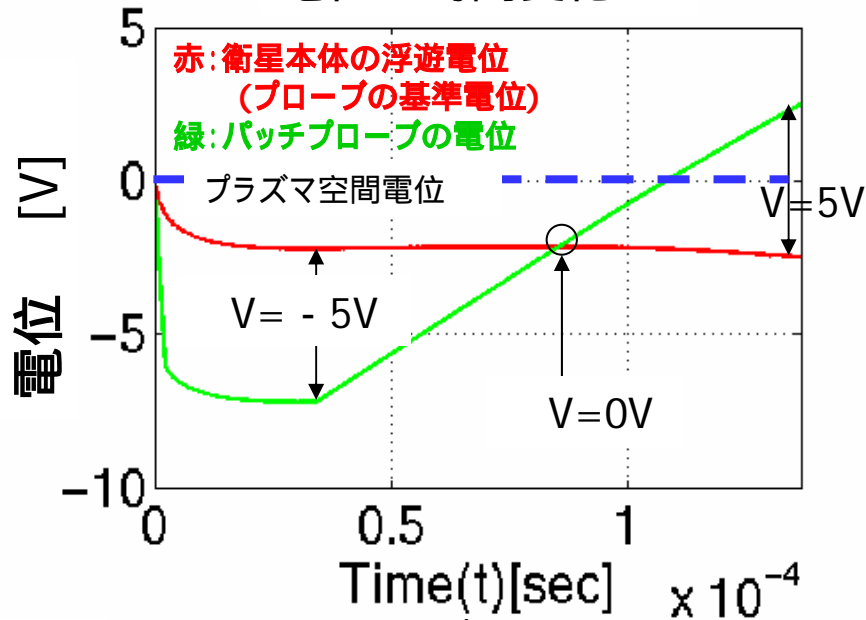
ドリフト速度 1.12 eV ($8.65 \times 10^3 \text{ m/s}$)

傾向を調べるために、まずは、プローブ面積、プラズマ環境パラメータ (電子ビームを含む) などはこちらで任意に設定

衛星の浮遊電位の時間変化

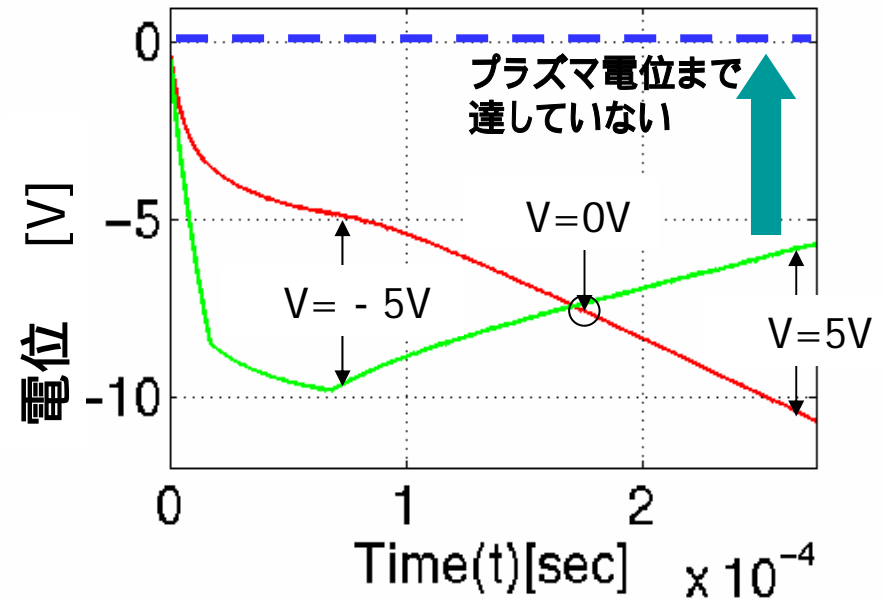
電子ビームがない場合

電位の時間変化



電子ビームがある場合

電位の時間変化



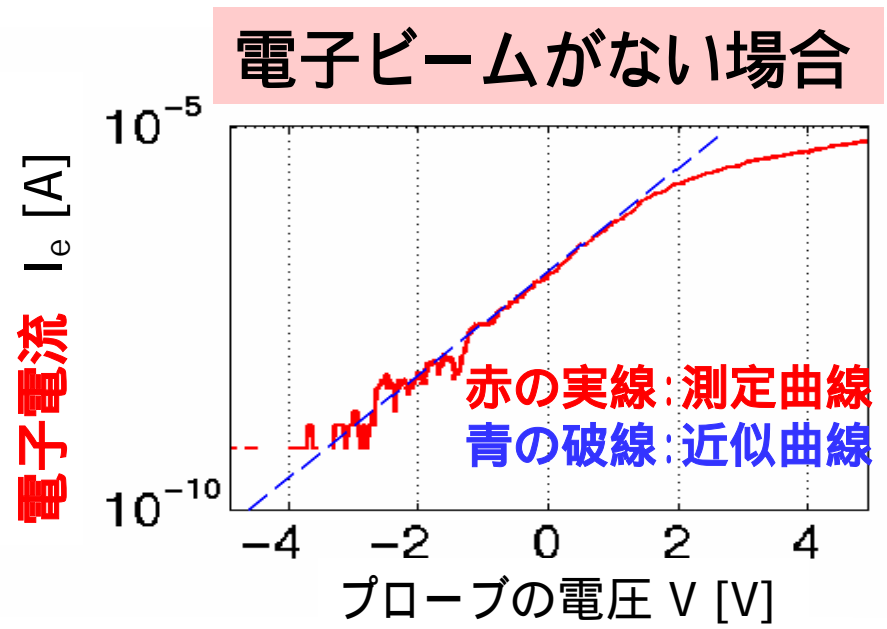
シングルプローブと衛星の電位変化が同じであるため、電子ビームによる衛星の負帯電が顕著な場合はプローブ電圧挿引が背景プラズマ電位まで到達せず、正確な電流電圧特性が得られない。

シングルパッチプローブの電圧-電流特性

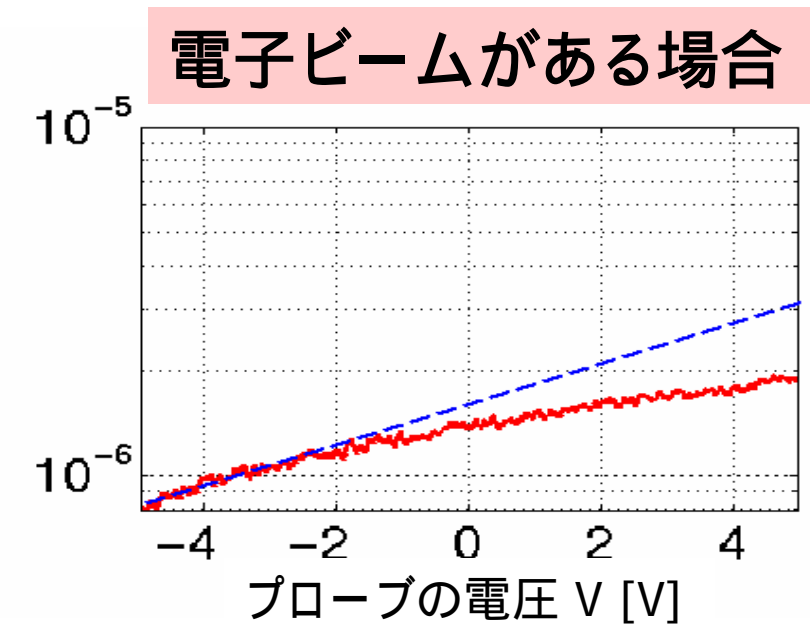
$$\frac{d \ln I_e (V)}{dV} = -\frac{e}{kT_e}$$

【シングルプローブ法の電子温度を求める式】
ただし、eは素電荷、kはボルツマン定数。

図中の青の破線の傾きから電子温度 T_e を求める。



設定値 電子温度 0.5 eV
測定値 0.650eV (1.30倍)

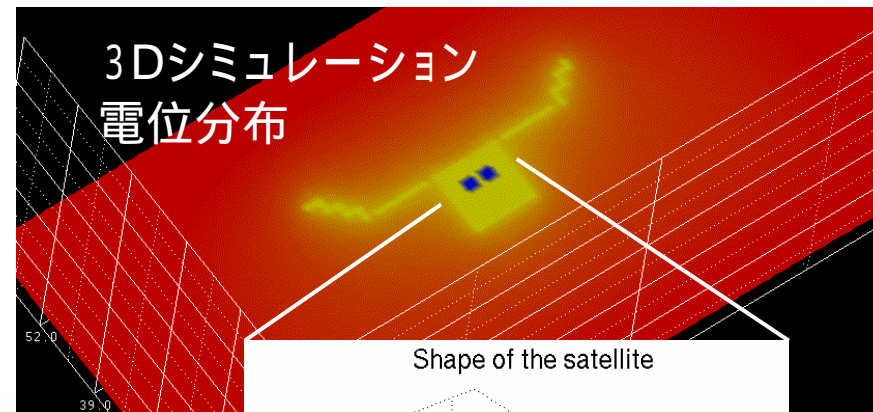


電子ビーム環境ではシングルプローブによる背景プラズマパラメータ推定は困難

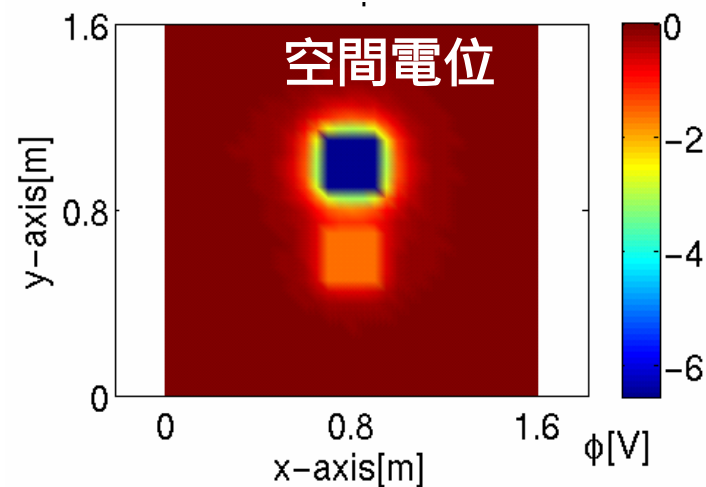
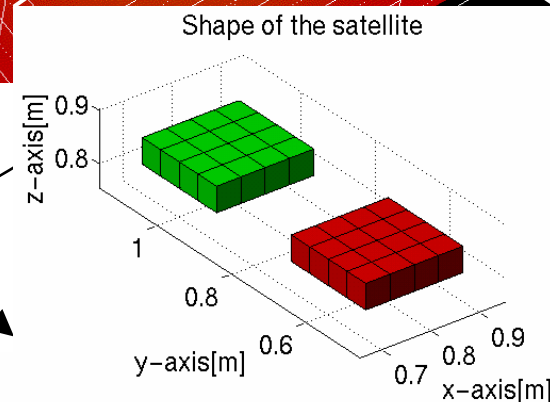
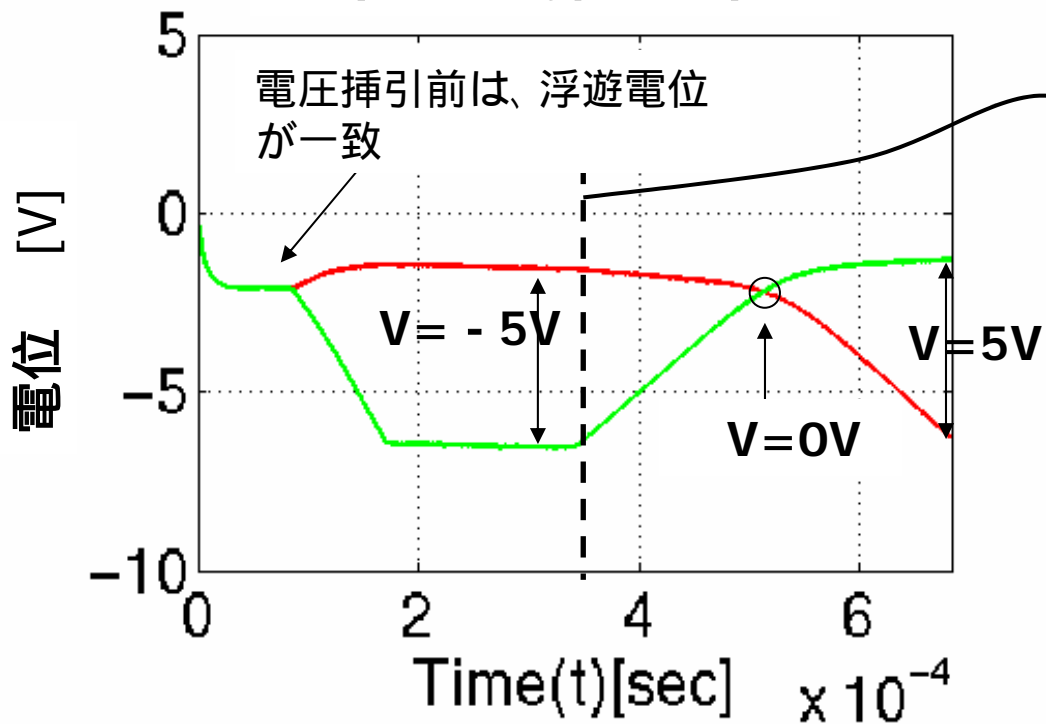
誤差 大!

ダブルプローブモデル (基本モデル)

- プロブは衛星筐体から電氣的に絶縁。
(シングルプローブとは違う。)
- プロブの浮遊電位を基準としてプローブ間の電圧 V を $-5V$ から $+5V$ まで挿引し電流電圧特性を取り、電子温度を求める。



電位の時間変化



プラズマの空間電位: = 0V

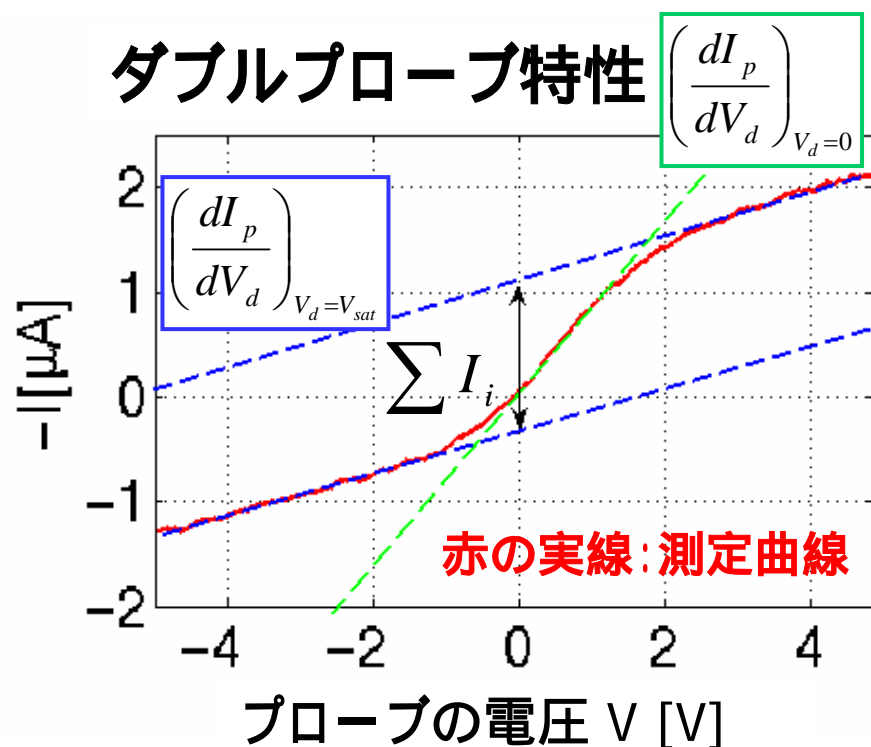
ダブルプローブ電流電圧特性

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

【ダブルプローブ法の電子温度を求める式】

無衝突プラズマでは、 $A_1=4$, $A_2=3.28$

図中の青の破線の傾き(青色、緑色)、イオン電流値から電子温度 T_e を求める。



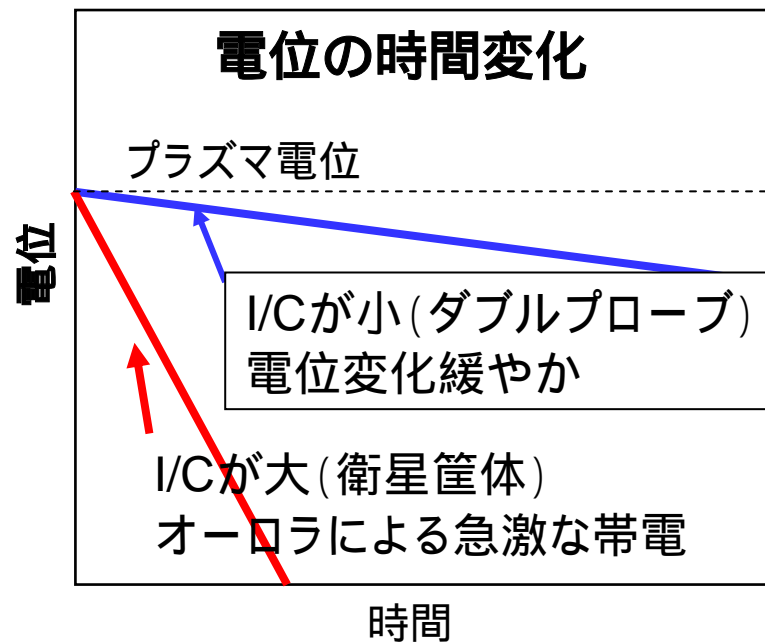
設定値 電子の熱速度 0.5eV

測定値 0.512eV (1.02倍)

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。

れいめい搭載のダブルプローブ特性について

1. ダブルプローブは衛星本体に比べて 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。
2. そのため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。(シングルプローブは筐体の電位変動の影響を大きく受ける。)



これまでのプラズマシミュレーションにより、以下の2点が確認できた。

- ダブルプローブ浮遊電位がオーロラ環境に影響を受けにくい
- ダブルプローブ基本特性による背景プラズマ環境推定が可能

現在、れいめい衛星上のダブルプローブ特性の取得に関するプラズマシミュレーションを実行中

まとめ

具体的な宇宙機環境事例を用いて、H17年度までに開発された3次元領域分割型電磁粒子シミュレーションコード (NuSPACE)の検証を開始した。

- H17年度に打ち上げられた小型科学衛星「れいめい」搭載の宇宙環境計測用新型ラングミュアプローブに着目
- プラズマシミュレーションによる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
- ダブルプローブの基本特性の取得とシングルプローブとの比較

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数値シミュレーションで示した。

達成度

当初目的の60%程度

- れいめい衛星搭載Langmuirプローブのモデリング、およびプラズマシミュレーションを用いたシングル/ダブルプローブ特性の取得、それによる背景プラズマパラメータ推定とその評価

(プラズマシミュレーションを応用した、衛星環境下での測器特性取得の有効性を示した。)

- ただし、れいめい衛星観測データは現在解析中であり、プラズマシミュレーションデータとの直接比較・検討までには至っていない。



- 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)の校正に役立てることを目指す。**