

# 宇宙プラズマ中における電界センサー特性に関する 計算機シミュレーション

Computer simulations on characteristics  
of electric field sensors in space plasma

**研究代表者：** 深澤 伊吹（京都大学大学院工学研究科）  
fukasawa.ibuki.87x@st.kyoto-u.ac.jp

**研究分担者：** 小嶋 浩嗣（京都大学・生存圏研究所・教授）  
Kojima.hirotsugu.6m@kyoto-u.c.jp  
担当：プラズマ波動の再現性評価  
栗田 怜（京都大学・生存圏研究所・准教授）  
kurita.satoshi.8x@kyoto-u.ac.jp  
担当：電界センサー特性の理論的評価  
臼井 英之（神戸大学大学院システム情報学研究科・教授）  
h-usui@port.kobe-u.ac.jp  
担当：アルゴリズム評価  
三宅 洋平（神戸大学・計算科学教育センター・准教授）  
y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp  
担当：電界センサーモデル評価  
草地恒史郎（神戸大学・大学院システム情報学研究科・修士1年）  
神戸大学・大学院システム情報学研究科・修士1年  
担当：パラメータ依存性評価

## **研究目的 (Research Objective):**

将来の宇宙利用や開発に向けて、地球磁気圏環境の精確な計測および定量的な理解は必要不可欠である。我が国ではこれまでに磁気圏探査衛星 GEOTAIL をはじめとする様々な科学衛星によりプラズマ現象の観測が精力的に行われてきた。宇宙空間におけるプラズマ波の発生と伝播を理解するためには、その位相速度や波数ベクトルなどの特性を明らかにすることが重要である。このような波動特性を探査機の観測によって求める手法の一つに、干渉計計測がある。干渉計計測では、異なる空間間における観測対象の波形の位相差が得られるため、観測点間の距離と位相差から位相速度を算出することができる。単一の科学衛星による干渉計計測は、静電波のような比較的波長の短いプラズマ波動に適応可能というメリットがある。しかし、観測点間の距離が電界センサーの種類に依存するため、観測結果の解釈に不確実性が生じることが知られている。また、電界センサーのみならず衛星本体の影響を受けて電界波面にひずみが生じる可能性が示唆されている。観測結果から精確な位相速度を得るためには、宇宙

機本体を含む現実的なプラズマ環境モデルに基づく評価が重要である。

申請者達の研究グループでは、これまでにアンテナ特性解析にプラズマ運動論的効果を取り入れるために、かねてより宇宙プラズマ現象の解析に用いられてきた三次元電磁粒子計算機実験手法を応用してきた。この手法を更に発展させることにより、センサーや衛星本体の実際的なモデリングを用い、かつプラズマの種々のパラメータを自由に変化させ、宇宙プラズマ中におけるセンサー特性を現実的な計算時間で定量的に把握することを本研究の目的とする。本報告書では、特にインターフェロメトリ計測における観測点間の距離の評価とその考察について記す。

### 計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、神戸大学が中心になり開発が行われた宇宙飛行体プラズマ環境解析用コード(EMSES)[Miyake et al., 2006]を用いた。EMSESはParticle-in-Cell法による三次元電磁粒子シミュレーション手法を採用しており、内部境界としてセンサーのモデルを実現している。

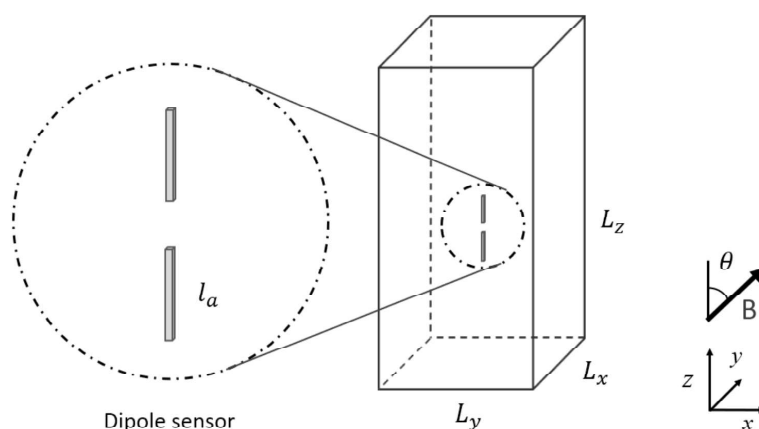


Fig.1 本研究における3次元シミュレーションモデル. 中央に電界センサーモデルを配置してある.

シミュレーションモデルを Fig. 1 に示す。本研究では  $32 \times 32 \times 256$  grid の3次元空間を取り、1grid 当たり 512 個の超粒子を使用している。境界条件は電磁場、粒子の両方に対して周期境界をそれぞれ設定した。シミュレーション中央にセンサーエレメント2本を  $\Delta r$  の間隙を持たせて配置した。 $z$  軸並行方向に背景磁場を取り、シミュレーション空間に初期条件として電子ビームを挿入し、背景磁場と並行方向にラングミュア波を励起させた。なお、本報告書のシミュレーションにおいては電子の初期速度分布にバンプオンテイル不安定性を採用した。センサーのポテンシャルの波形の時間差を用いてラングミュア波の位相差を算出し、この位相差とラングミュア波の位相速度より、観測点間の距離を求めた。

## 研究成果 (Accomplishments) :

シミュレーションから得られた観測点間の距離の時間遷移を Fig.2 に示す。シミュレーション開始時から一定の時間領域( $\omega_{pet} < 100$ )ではラングミュア波が生成過程であるため、省略してある。水平方向の点線は、センサーの中心間距離を示している。Fig.2 より、観測点間の距離はおおよそセンサーの中心間距離と一致することが明らかになった。

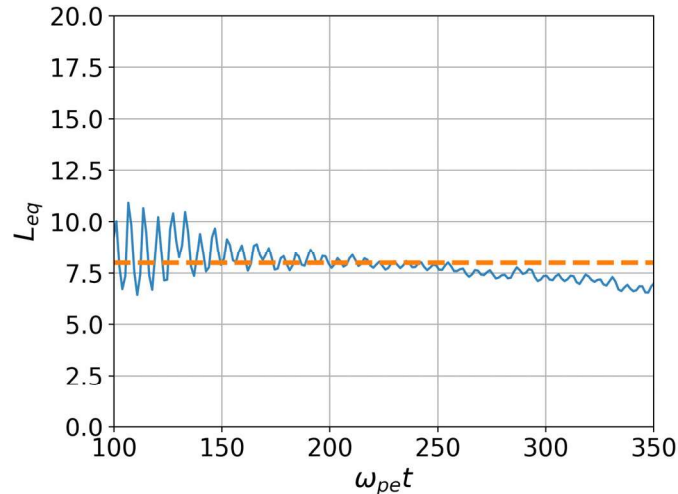


Fig.2 観測点間距離の時間遷移. 水平方向の点線は、センサーの中心間距離を示す.縦軸は grid 数を表す.

この結果を解釈するために、センサー周囲のラングミュア波の波面をプロットした。結果を Fig.3 に示す。図の中央の灰色の直線は、センサーの位置を示している。Fig.3 より、各要素の等位相面はセンサーに対して  $z$  軸対称であることがわかる。そのため、センサーのポテンシャルは、おおよそセンサー中心が位置する  $z$  平面のポテンシャルと等しくなる。これは、観測点間距離がセンサー中心点に等しくなるという計算の結果と一致する。

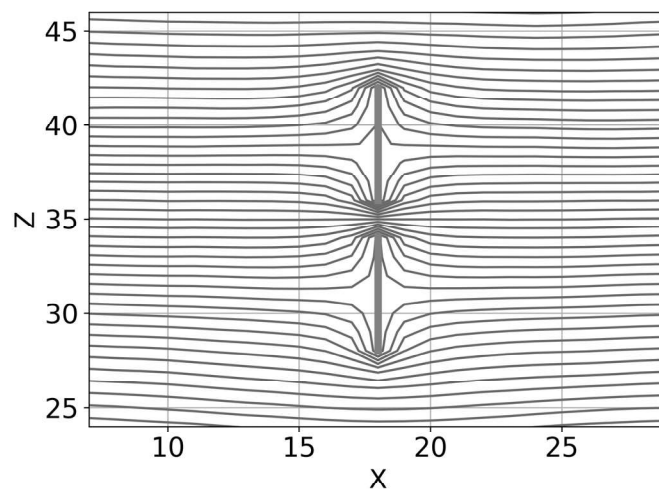


Fig.3 センサー周囲のラングミュア波の波面.

加えて、Fig.2 より観測点間の距離が時間とともに減少しているところがわかる。この原因は解明できていないが、プラズマとセンサー素子の相互作用が原因の1つではないかと考えられる。具体的には、センサーのフローティングポテンシャルなどが要因となっているために、時間とともに観測点間の距離が減少していると考察される。この傾向を説明することは、観測結果を精確に解釈するうえで重要であり、さらなる詳細なシミュレーションが必要である。

本研究では、単一宇宙機によるインターフェロメトリ技術を評価するために、3次元フルPICシミュレーションを実施した。2つのモノポール電界センサーを用いた単一の科学衛星によるインターフェロメトリ計測では、各センサーが対象波の位相をピックアップする距離間に不確定性がある。本シミュレーションでは、電子ビームにより励起されたラングミュア波が存在する場合の2つのモノポール電界センサーを扱った。シミュレーションの結果、ラングミュア波を観測するための距離は、センサーの中心間距離とほぼ等しいことがわかった。また、各センサー素子周辺の等価面の特徴は、推定された距離から導かれる様子と一致した。我々は、シミュレーションモデルの妥当性を検証するために、単純なセンサーモデルから干渉計技術に関する研究を行った。本研究で使用したEMSESシミュレーションコードは、シミュレーション空間内の宇宙機本体を扱うことができる機能を有している。シミュレーションの次の目標は、観測点間距離に対する、宇宙機本体の影響を明らかにすることである。さらに、実際の宇宙船観測では、宇宙船が回転している場合や、波面がセンサーに対して必ずしも垂直でない場合がある。このような現実的な状況についても検討する必要があると考える。また、電界センサーの長さが宇宙空間の静電気波の長さと同程度となる可能性があるため、センサー素子の長さとお観測対象波の波長の関係における観測点間距離の依存性を明らかにすることも重要である。

## 参考文献 (References) :

Miyake, Y., and H. Usui, Particle-in-cell modeling of spacecraft-plasma interaction effects on double-probe electric field measurements, *Radio Science*, 51(12), <https://doi.org/10.1002/2016RS006095>, 2016.

## 公表状況 (Publications) :

(ポスター)

1. Ibuki Fukasawa, Yohei Miyake, Hideyuki Usui, Koshiro Kusachi, Satoshi Kurita, Hirotsugu Kojima, "Simulation Study on Characteristics of Electric Field Sensors Applied to the Interferometry Technique", 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting (URSI-JRSM 2022), Tokyo, September 2022
2. 深澤伊吹, 白井英之, 三宅洋平, 草地恒史郎, 栗田怜, 小嶋浩嗣, "Particle Simulations on Characteristics of Electric Field Sensors Applied to the Interferometry Technique in

Space Plasmas”, 地球電磁気・地球惑星連合学会, 相模原, 2022年11月

(口頭)

3. Ibuki Fukasawa, Yohei Miyake, Hideyuki Usui, Koshiro Kusachi, Satoshi Kurita, Hirotugu Kojima, " Computer Simulation on Antenna Impedance of Electric Field Sensors in Magnetized Plasmas", Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba, Japan, May 2022