

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： 小嶋 浩嗣（生存圏研究所）
Kojima.hirotsugu.6m@kyoto-u.c.jp

研究分担者： 深澤伊吹（京都大学大学院工学研究科）
fukasawa.ibuki.87x@st.kyoto-u.ac.jp
担当：シミュレーション解析

臼井 英之（神戸大学大学院システム情報学研究科）
h-usui@port.kobe-u.ac.jp
担当：アルゴリズム評価

三宅 洋平（計算科学教育センター）
y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp
担当：電界センサーモデル評価

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：プラズマ中のセンサー特性

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。プラズマ波動の解析に用いられる主な機器の一つに電界センサーがある。プラズマ波動の電界強度、位相データを得るためには、電界センサーで得たデータを、センサーや内部回路の特性に基づいて較正を行う必要がある。しかし、導体であるセンサーは電離気体であるプラズマと相互作用を起し、真空中の場合とは異なる特性を示す。そのため、現在の較正方法ではデータの較正が正しく行われておらず、観測結果の解釈に悪影響を及ぼすことが懸念されてきた。また、近年では小型衛星に搭載可能な電界センサーの需要が高まっている。小型衛星では、重量削減や姿勢制御の方式の都合により、センサー長を短くすることが一般的であるが、センサーが短くなり観測対象の波長と同程度になると、アンテナの特性は複雑になることが予想されている。そのため、宇宙プラズマ環境におけるセンサー特性の定量的な理解が待たれている。

この問題を解決するために、これまで宇宙プラズマ中のダイポールアンテナ特性に関する理論的研究が多くの研究者により行われてきた。しかし、理論的アプローチで

はアンテナの電流分布や周囲のプラズマの分布に特有のシース構造に近似が用いられており、実際の電流分布やプラズマ運動論効果は考慮されていない。加えて将来の衛星ミッション搭載用のアンテナの開発・設計などの光学的な応用のためには、より現実に近いアンテナ形状や衛星本体の影響も考慮した解析を行う必要がある。しかしそれには、扱うパラメータが多く計算が複雑になるため、従来の理論的な取り扱いではほとんど不可能に近い。

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效果を取り入れるために、従来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地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。

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翔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。

シミュレーションモデルをFig.1に示す。本研究では $64 \times 64 \times 128$ gridの三次元空間を取り、1gridあたり1024個の超粒子を使用している。境界条件は電磁場においては吸収境界を、粒子においては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 Δr の間隙を持たせて配置した。

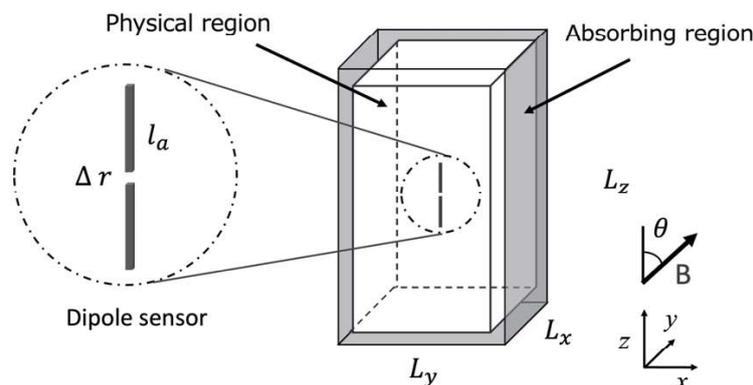


Fig.1 本研究で用いたシミュレーションモデル.

アンテナインピーダンスはFig.2[a]に示すように、デルタギャップ給電法[Luebbers et al., 1992]を採用した。デルタギャップ給電法は、2つのセンサーエレメントの中央に電界の励振点を設定し、励振点における電場と磁場の時間変化からアンテナインピ

ーダンスを算出する手法である。本研究では、初期応答を回避するため、Fig. 2[b]に示すようなガウシアンパルスを励振した。

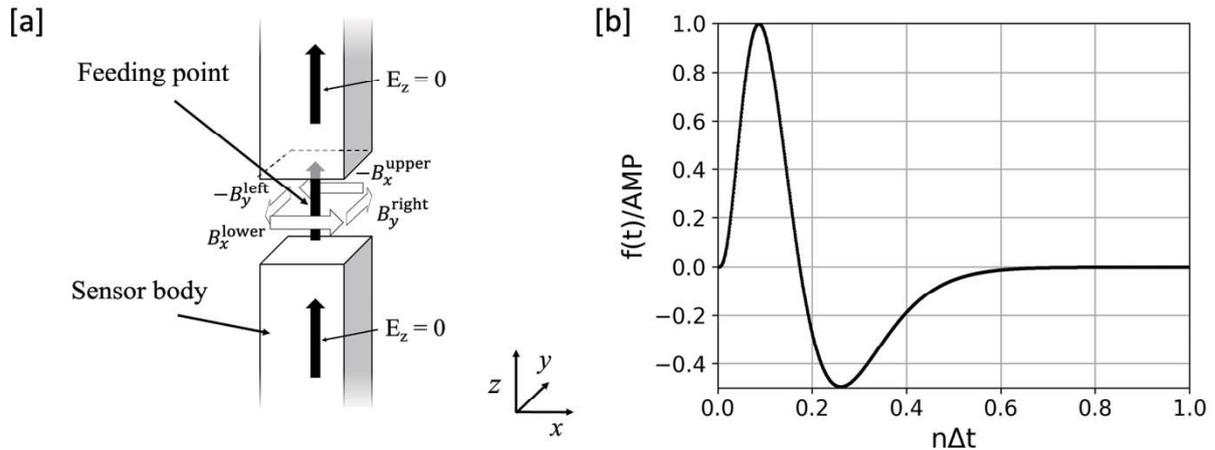


Fig.2 励振点周囲の模式図[a]と入力に用いたガウシアンパルス[b].

研究成果 (Accomplishments) :

まず、プラズマ中におけるシース構造の確認を行うために電界を励振せず、プラズマ中にセンサーを放置した場合の結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、センサー周囲の電子密度が減少していることがわかる。これは、プラズマ中のセンサーが電子によって負に帯電しているためである。このように、負に帯電したセンサーの周囲では電子の密度が小さくなり、逆にイオンの密度が高くなる。このような構造はシース構造と呼ばれている。本実験により、シミュレーションにおいてシース構造を実現したことを確認した。

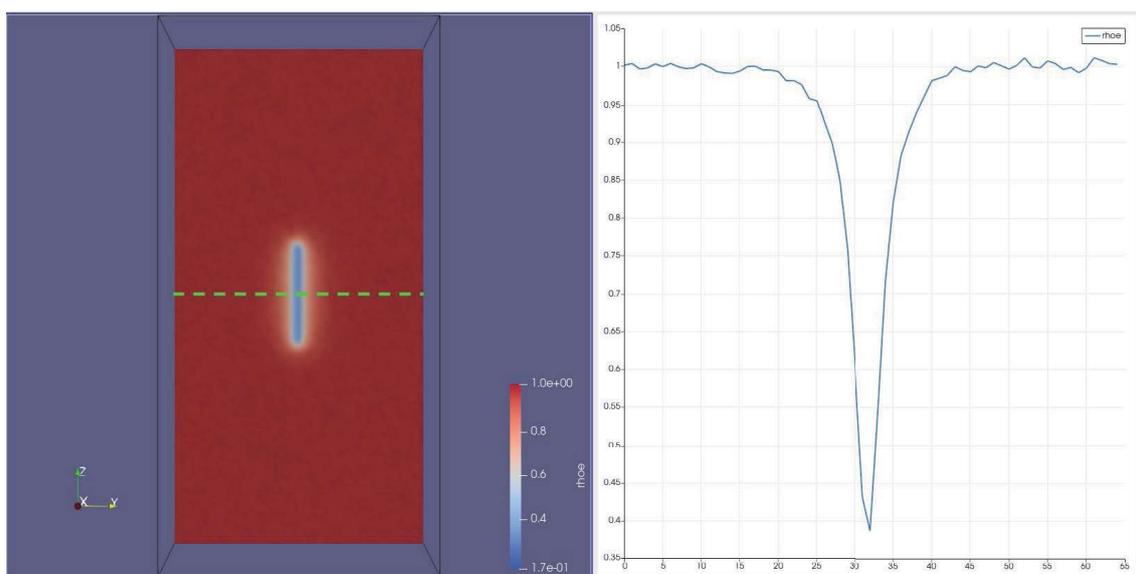


Fig.3 シミュレーション空間全体の電子密度(左)と左図点線における電子密度(右).

次に、シミュレーションから得られたアンテナインピーダンスの一例を示す。Fig. 4では光速 $c (=25)$ に対して、プラズマ温度をそれぞれ 1.0, 1.2, 1.4 とした。結果から、点線で示された Upper Hybrid Resonance (UHR) 周波数付近にインピーダンス共振が起きていることがわかる。また、プラズマ温度が高くなるにつれてレジスタンスのピークの値が小さくなることがわかる。これはプラズマ温度が高くなるとセンサーの周囲に形成されるシース幅が大きくなり、センサーの特性が真空中の状態に近くなるためと推測される。また、サイクロトロン周波数の整数倍にあたる $\omega = n\Omega_{ce}$ ($n=1, 2, 3, 4$) において、小さなインピーダンス共振が起きていることがわかる。特に、 $n=3$ で顕著である。背景磁場とセンサーが成す角度 θ を 90° としていることから、これらのインピーダンス共振は Electron Cyclotron Harmonics (ECH) 波に関連するものであることが推測される。

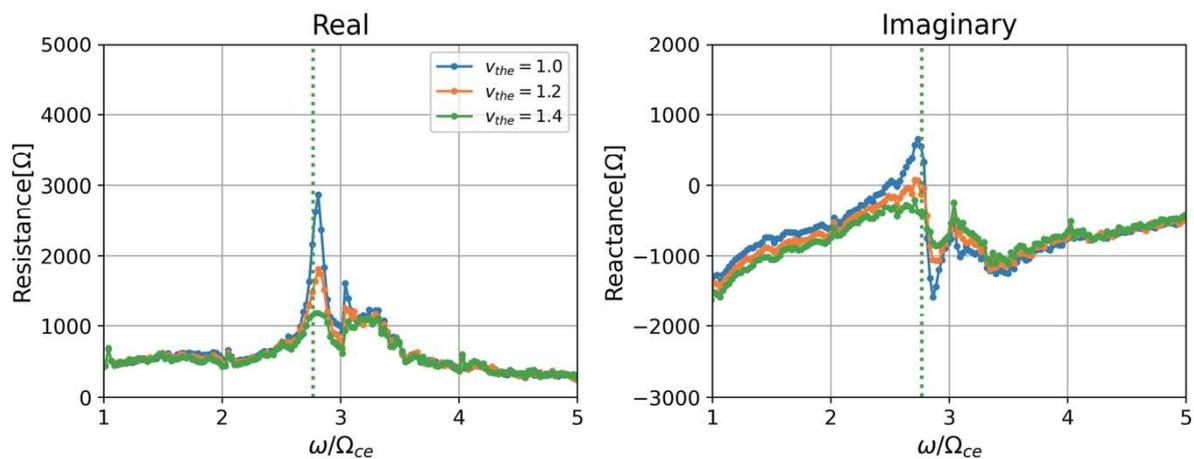


Fig.4 プラズマ温度を変化させた場合のアンテナインピーダンス. 点線は UHR 周波数を表す.

これらの結果より、シミュレーションにおいてプラズマ中のセンサー周囲のシース構造がアンテナインピーダンスのピークの大きさに影響を与えると考えられる。また、UHR 波や ECH 波など、プラズマ波動がインピーダンスの形状を決定する可能性が示唆された。これらはプラズマ線形分散とセンサー長との関係について検討がなされた。本研究では熱速度の他にアンテナインピーダンスに関連するとされるプラズマ周波数やセンサーと外部磁場のなす角度、センサー長などを変化させ、アンテナインピーダンスとの関係について詳細に検討した。そして、計算機シミュレーションによりセンサーのインピーダンスをアンテナ長、プラズマ温度、密度との関係を参照して導出できることを示した。

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.

Luebbers, R., Chen, L., Uno, T., & Adachi, S., FDTD calculation of radiation patterns, impedance, and gain for a monopole antenna on a conducting box, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 40(12), <https://doi.org/10.1109/8.204752>, 1992.

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. 深澤 伊吹, 伊藤 友哉, 小嶋 浩嗣, 三宅 洋平, 臼井英之, 栗田 怜, Electric Field Sensor Impedance in Magnetized Plasma by Particle-in-Cell Simulation, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン開催, 2021 年 6 月
2. 深澤 伊吹, 栗田 怜, 三宅 洋平, 臼井英之, 小嶋 浩嗣, Study on Electric Field Sensor Impedance in Magnetized Plasma by PIC Simulation, 地球電磁気・地球惑星圏学会, オンライン開催, 2021 年 11 月