

(論文内容の要旨)

本論文は、科学衛星搭載用の電界アンテナとプラズマ間の相互作用を高精度に解析可能な計算機実験手法を確立し、宇宙プラズマ環境中が波動観測用電界アンテナの電気諸特性に与える影響を論じたもので、6章から成っている。

第1章は序論であり、衛星プラズマ波動観測における電界アンテナ特性の重要性を論じた。プラズマ環境中アンテナ特性に関する過去の理論的、観測的研究の結果をまとめるとともに、プラズマ波動観測など実用面への応用という観点から、本論文で取り扱う計算機実験研究の必要性、優位性を議論した。

第2章では、電磁粒子プラズマ計算機実験におけるアンテナ・衛星の導体表面の数値取り扱いの手法を検討した。本章では、導体近傍における電流密度計算の適切な境界処理手法を新たに提案した。また、本手法で得られた電流密度情報を元に、電荷連続式を時間的に積分して電荷密度の計算を行うことにより、粒子の衝突や光電子放出による導体表面の電荷蓄積が自動的に正確に解けることを示した。本手法は、電磁波動の送受信を行う電界アンテナの特性解析において必須の技術であるのに加え、従来はほとんど静電的な取り扱いのみで計算機実験がなされてきた衛星・プラズマ間相互作用の研究を、電磁的作用も含めて自己矛盾なく解析できるように拡張するものである。

第3章では、開発した計算機実験コードを用い、ダイポールアンテナのインピーダンス特性を解析した。一様プラズマ中の解析においては、過去のアンテナインピーダンス理論から導き出される、電子プラズマ周波数でのインピーダンス共振などの基本的特性が、本コードにより正しく再現できることが確認された。次にイオンシース形成時には一様プラズマ中と比較して、低周波アンテナ容量値の減少、およびインピーダンス共振のQ値の低下が見られた。以上の傾向は、従来のイオンシースの同軸円筒線路モデルの結果とよく一致するものである。一方でイオンシースの幅を強制的に変化させる計算機実験を行ったところ、シース幅が大きくなるほどアンテナ容量値は同軸円筒線路モデルから値から離れ、アンテナそのものの真空中での容量値に漸近することが確認された。以上の結果により、従来のシース理論モデルが、シース幅が小さい場合にのみ適用可能であることを見出すとともに、本計算機実験がより一般的なシース環境に適用可能な解析手法であることを示した。

第4章では、外部磁気圏の希薄プラズマ中を想定し、アンテナや衛星の日照面から放出される光電子がアンテナ特性に与える影響を解析した。まず光電子放出時に、アンテナ表面に形成される光電子高密度領域の存在を確認した。この光電子環境中でのインピーダンス特性解析を行った結果、(1)真空中でのアンテナ特性と比較して、低周波数域でのアンテナインピーダンス実部の値が上昇し、虚部に関してはその絶対値が減少すること、(2)上記効果は、抵抗 R と容量 C を並列に接続した等価電気回路で表現できること、(3)光電子の密度が高いほど R の値は小さくなるが、 C の値は光電子密度には大きく依存しないこと、を見出した。さらに、アンテナ導体から流出する光電子電流およびアンテナに流入する背景プラズマ電流を理論的に定式化することにより、抵抗 R の値が光電子電流の関数でよく表わされることがわかった。この考察により、本解析で確認されたインピーダンス変化は導体表面近傍に存在する光電子のダイナミクスに伴う導電電流が原因であることが明らかとなった。本計算機実験結果で得られた光電子効果は、GEOTAIL 衛星におけるインピーダンス値の衛星スピン依存性として実際に観測されるなど、日照中の衛星搭載用電場観測器における普遍的かつ重要な現象であるといえる。

第5章においては、電界アンテナ特性の解析手段として新たに波動受信の模擬計算機実験手法を導入するとともに、水星磁気圏探査衛星 BepiColombo/MMO に搭載予定の新型アンテナのモデリング、特性解析を行った。本電界アンテナの原理は、衛星から進展されたブームの両端に取り付けられた、二つの短小センサーの電位差とセンサー間距離から電界値を求めるものであるが、計算機実験ではこの方法により測定される電界値が実際の値より小さくなることが判明した。これはセンサー間の電気的実効距離がセンサー間物理距離より短くなることを示唆し、電界データ較正の際に注意すべき結果である。次に、新型アンテナに搭載予定のガード電極およびバイアス電流回路を数値モデルとして計算機実験に取り込み、正しく機能することを確認した。ガード電極は、センサー導体と衛星・ブーム導間の光電子による電気的結合を、減少させる効果をもつ。一方、現在想定されているガード電圧設定では、上記の光電子による電気的結合効果が完全には抑圧されず、電界センサーの電流電圧特性に影響を及ぼしていることが見出された。以上の結果は実際のアンテナ設計に向けたプラズマ環境の影響の事前定量評価、およびガード電圧値などの最適設計のために、本計算機実験手法が有効となり得ることを実証するものである。

第6章は結論であり、本論文で得られた結果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、科学衛星搭載用電界アンテナの大規模プラズマ計算機実験を用いた特性解析手法を開発し、それを用いて衛星プラズマ擾乱環境下での電界アンテナの電気特性を研究し、得られた知見をまとめたものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 電磁粒子計算機実験に金属表面での電流計算境界処理、電流を用いた電荷更新手法を導入し、金属物体周辺のプラズマ環境擾乱を解析できる数値手法を確立した。これにより、従来はほとんど静電的取り扱いのみでなされてきた衛星・プラズマ間相互作用の数値実験が、電磁的作用も含めて行えるように拡張された。
2. ダイポールアンテナのインピーダンス解析を行い、プラズマ波動放射、またはイオンシースの影響によるプラズマ周波数付近での特性変化を確認した。シース幅が大きい場合に従来のシース理論モデルとは異なるアンテナ容量値となることを見出され、本数値手法がより一般のシース環境に適用可能であることが実証された。
3. 光電子放出環境での特性解析を行った結果、アンテナ表面周辺の光電子自身の運動に伴う電流成分が低周波インピーダンス変化に寄与していることが明らかにされた。これは太陽光が照射する科学衛星システムでは普遍的な現象であり、アンテナや衛星など複数の導体間で複雑な光電子電流ループを形成する状況での電界アンテナの精密設計に対して、重要な知見を与えるものと高く評価できる。
4. 将来衛星用アンテナに搭載されるガード電極およびバイアス電流回路の数値モデルを構築し、正しく機能することを確認するとともに、光電子電流によるセンサー・衛星導体間のカップリングがセンサー特性に影響を及ぼすことを見出した。これは、将来衛星搭載アンテナにおけるガード電圧・バイアス電流の最適設計のための新たな方法論を与えるものであり、非常に価値が高い。

以上要するに本論文は、高精度の3次元計算機実験を用いて、プラズマや衛星周辺の光電子の運動が、電界アンテナの電気特性に与える影響を詳細に解析したものであり、衛星システム・プラズマ間相互作用の定量理解や波動観測用アンテナ精密設計など、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年2月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認められた。