

平成 21 年度 博士学位論文

粒子エネルギー観測を用いた衛星電位計測機器の  
小型化に関する原理検証

倉原 直美

小型衛星やハイブリッドロケットを中心とした民間の宇宙開発が近年活発化してきており、宇宙開発は実利用の段階へと進みつつある。宇宙産業を確立するためにかかせないのが人工衛星をはじめとする宇宙機の信頼性向上である。宇宙機は開発費が数 100 億円かかることもある高額なシステムであるため、宇宙機をいかに過酷な宇宙環境から守り、安全に運用するかという技術が必須である。本研究では宇宙機事故原因の約半数を占める宇宙機の帯電・放電現象に着目し、小型の帯電電位観測装置を開発することを目的としている。特に、数十 kg クラスの超小型衛星への搭載や大型衛星での測定機会の増加を図るために装置の小型化に重きを置いている。

本論文の第 1 章ではこのような研究背景と従来の帯電観測装置についてレビューを行い、現状の帯電観測の問題点、幅広い帯電測定範囲を確保するために複数の機器を一つの宇宙機に搭載している場合が多いということや、各種の計測装置を小型衛星に搭載するにはサイズの的にも電力的にも大きすぎるということを指摘している。そこで、計測装置の小型化と、+数 V $\sim$ -20kV の帯電電位の測定という 2 つのことを達成するために新しい型の静電分析器、二段平行平板型静電分析器を開発することを研究目的として定義している。

第 2 章では静電分析器を利用した帯電観測装置の原理について述べている。本帯電観測装置では、粒子の軌道をまげてエネルギーを解析するための偏向電極が 2 枚の平行平板電極を 2 段に重ねた形状になっている。この偏向電極はスリットをもつ外装に納められており、スリットから進入した粒子が偏向電極間を通過していく過程でそのエネルギーに応じて分類され、4 枚あるうちのいずれかの電極で収集されるか偏向電極を通り過ぎてコレクタに到達する。各電極での収集電流のうち、2 段目の電極の電流-電圧特性を解析することでプラズマエネルギーを取得することができる。

帯電電位の観測は、宇宙機が帯電している時と帯電していない時で計測されるプラズマエネルギーが変化するという現象を利用する。宇宙機がプラズマ中で帯電した場合、宇宙機表面に到達する粒子は宇宙機周辺に形成されたシースの中を通過することになるが、このときシース内の電界によって粒子は加速もしくは減速される。通常、宇宙機は負に帯電するので、宇宙機周辺には

イオンシースが形成されている。宇宙機に向かってやってくるイオンはシース中で加速され、電子は減速されてエネルギーの低いものははじき出される。よって、負帯電した宇宙機表面でイオンのエネルギーを観測した場合、元々のエネルギーからイオンシースによって加速された分だけ大きくなっているため、このエネルギーの増分を解析することで宇宙機帯電電位を見積もることができる。

第3章では二段平行平板型静電分析器の原理検証試験について述べている。測定原理を検証するために、1段目と2段目の電極の高さを変えて2種類の静電分析器原理検証モデルを製作し実験室プラズマ中で原理検証試験を行った。試験時のプラズマ環境は、プラズマ密度  $5.4 \times 10^{12} \text{m}^{-3}$ 、プラズマ電位 1.2V、電子温度 0.73eV であった。この環境下において二段目の電極でプラズマエネルギーが観測でき、測定する帯電電位が変わると二段目電極で観測されるプラズマエネルギーも変化することが確認できた。エネルギー変化量から見積もる帯電電位が、計測された実験値と理論値においてよく一致した。電極間に加える電圧として、帯電電位の10分の1程度の印加電圧が必要であることが確認された。

第4章では数値解析シミュレーションにより原理検証試験の結果を検討している。数値解析の結果が、静電分析器の電流—電圧特性と帯電電位計測において実験データをよく再現できることを確認した。第5章では原理検証試験の結果と電極サイズによる分析器の精度と効率の解析結果から、極軌道を想定して実際の衛星に搭載する二段平行平板型静電分析器の設計を行っている。第6章では本研究の総括を行い、二段平行平板型静電分析器を用いた宇宙機の帯電電位計測は実現可能であると結論づけている。今後の課題として、 $10^{12} \text{m}^{-3}$  台のプラズマ密度下では  $0.1 \mu\text{A}$  程度の電流収集量であるため、より低密度な環境では収集電流量を増やすこと、また電極シースの分析器外部への漏れ出しの検討が必要であることを指摘している。