

PTFE フィルム内に蓄積する高エネルギー電子のモンテ - カルロシミュレーション

Monte-Carlo simulation of high energy electrons accumulated inside a PTFE film

渡邊 力夫 [1]

Rikio Watanabe[1]

[1] 武蔵工大

[1] Dept. of Mech. Sys. Engr., Musashi Inst. of Tech.

人工衛星などの宇宙機の表面には、本体内部に搭載された電子機器を適正な温度状態に保持するために、様々な誘電体が熱制御材として使われている。現在の主流はPTFE(poly tetra fluoro ethylene, Teflon[®]) や PolyImide(Kapton[®]) などの絶縁性、耐熱性にすぐれた高分子材料である。熱制御材料は、そのまま宇宙機表面材として宇宙に露出した状態となる。そのため、これらの材料は、宇宙環境、とりわけプラズマ環境・放射線環境下で帯電してしまう。蓄積した電荷は、一定量に達すると放電を起こし、宇宙機に搭載された電子機器の動作異常や絶縁破壊による故障を引き起こす。このため、宇宙機の信頼性向上・長寿命化のためには、宇宙機表面材料の帯電現象を解明し、帯電を抑制・防止する技術を開発することが不可欠である。

宇宙機帯電は表面帯電と内部帯電の二つに分けることができる。表面帯電は、地球周回低軌道を周回する人工衛星などが、高密度のプラズマ中に晒されるため、プラズマとの間に生じる電位差により電流収集が起こって帯電する現象である。宇宙機の表面は導体よりむしろ誘電体で囲まれていることが多いため、導体の部分と誘電体(絶縁体)の部分で電位差が生じ放電が起こる。この表面帯電現象に起因する不具合は、人工衛星が地球周回軌道上を周回するようになった1970年代から問題視され、NASA や米軍などを主体にして対策の研究がなされ、効果的に抑止できるようになった。一方、内部帯電は、静止軌道や極軌道など高エネルギー荷電粒子が多く存在する環境において起こる。すなわち、数百keV から数 MeV の電子などが宇宙機表面材もしくは筐体内に侵入し、熱制御材・ケーブル皮膜・配線基板などの誘電体内部に蓄積する。適切な電荷緩和措置がとられていない場合には、蓄積した電荷により誘電体内部に電界が誘起され、それが絶縁破壊強さを超えると絶縁破壊を起こし、それにとまって放電が起こる。宇宙機にとっては放電現象による電気・電子機器の故障は機能停止に至る重大な危険をはらんでいる。内部帯電現象に関しては、宇宙機故障原因の半数を占めると言われながらも、直接的な計測手法がないため十分な解明が行われてこなかった。

本大学においては、地上において絶縁体内部帯電計測実験を行い、試料内部の電荷蓄積状態を計測することに成功している。この計測装置の性能は、近年ますます高性能化しており、将来、宇宙空間において実際に計測が行える可能性が高い。その一方で、絶縁体内部に進入する電子の動きを個々に追跡し、電荷蓄積の様子を把握するというシミュレーションによる研究も必要とされている。電子の運動をシミュレートする方法は莫大な計算負荷となるが、シミュレーションによる解析は、条件設定が自由であるため、実験では難しい高エネルギー電子線を入射させた場合や、測定誤差のない理想的な状態での絶縁体内部の電荷蓄積過程の解明を行うことができる。そこで、本研究では、宇宙機用絶縁材料の代表である PTFE フィルムに対して電子線照射した場合を模擬し、実験結果との比較をすることにより内部帯電現象の解明を行うこととする。具体的には、フィルム内に侵入した電子の運動をモンテ - カルロ法により個々に追跡し、電荷蓄積の様子を計算機上でシミュレートする。入射粒子は電子とし、対象となる PTFE(C₂F₄) は炭素(C)原子とフッ素(F)原子が1:2でランダムに分布しているとした。散乱現象としては弾性散乱と非弾性散乱を考慮し、非弾性散乱には電離、フォノン効果、ポーラロン効果、電子捕捉を考慮に入れた。これらの散乱現象の衝突断面積を予め計算し、入射エネルギーの関数として表にしておく。モンテ - カルロ法による粒子追跡は確率的な手法なため、対象粒子数を十分大きくする必要がある。このため、通常計算量は莫大なものになってしまう。そこで本研究では Pentium4 ベースの並列計算機を構築し、必要最低限の計算能力を確保した。解析の結果、以下のことがわかった。

- (1) PTFE フィルム内の電子の運動をモンテカルロ法により再現できた
- (2) 電荷密度分布及び帯電ピーク深さについては、以前の計算結果及び実験結果との一致をみた
- (3) エネルギー蓄積分布についても試料は異なるが、他の計算結果とほぼ同傾向の分布を得た

これらは工学上重要な解析ツールとなるが、観測された電荷分布から入射粒子のエネルギーやフラックスを逆算する手法を確立すれば、宇宙環境下での放射線研究に役立てることが出来る。