

PTFE フィルム内電荷蓄積過程のモン テカルロシミュレーション

Monte-Carlo Simulation of Charge Accumulation
Process into PTFE Films for Spacecraft

渡邊 力夫 (武蔵工業大学工学部機械システム工学科)
rwata@sc.musashi-tech.ac.jp

田中 康寛 (武蔵工業大学工学部機械システム工学科)
tanaka@eml.mes.musashi-tech.ac.jp

1. 研究背景及び目的

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テフロン® (C_2F_4) 等の絶縁体が、熱制御材料として使用されている。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(主に電子および陽子)環境下で帯電してしまう(Fig.1)。蓄積した電荷は、一定量に達すると放電を起こし、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 (Surface charging) と内部帯電 (Internal charging) の二つに分けることが出来る (Fig.2)。表面帯電とは、低エネルギーの電子が、宇宙機表面材の表面に蓄積して帯電することを指し、内部帯電とは、高エネルギー

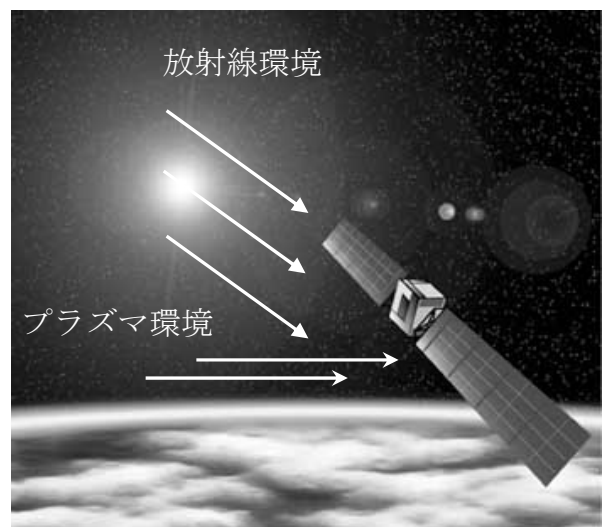


Fig.1 Space Environment

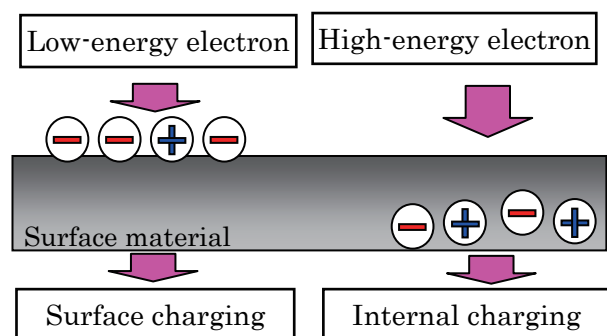


Fig.2 Two type of charge accumulation

の電子が表面材内部にまで侵入して帯電することを指す。表面帯電に関しては、1970 年代から問題として指摘され、それにともない低軌道環境での研究が数多く行われてきた^[1]。しかし 90 年代以降、宇宙機の不具合原因として内部帯電が挙げられるようになった^[2]。本大学では、1999 年に、実際の宇宙空間での計測可能なシステムとして、PIPWP 法 (Piezo-electric Induced Pressure Wave Propagation method: 圧電素子誘起圧力波法) を応用した電子線照射中での誘電体内部の電荷蓄積を測定する手法と装置の開発に成功した^[3]。また、これらの実験結果を検証するために、モンテカルロ法を用いて誘電体内に蓄積した電

子を粒子追跡する計算コードも開発された。しかし、モンテカルロ法による粒子追跡では、時間ステップは粒子と対象材料原子との平均衝突時間(おおよそ 10^{-16} 秒)と非常に短く、かつ定量的に信頼できるデータを得るためには、粒子数をある程度多数追跡しなければならない。そのためには並列計算の導入が必要不可欠で、今年度は並列コードの開発に主眼をおいて研究を進めた。

具体的には、宇宙機用表面材料として良く用いられているテフロン[®] (polytetrafluoroethylene, PTFE)を対象として、電子線照射下のフィルム内部の電荷蓄積過程をシミュレートすることにより、帯電現象の解明を行うことを目的とする。得られた電荷分布からは電界分布および電位分布を算出する。計算結果は他の計算結果及び電子線照射実験の結果と比較をし検討を行う。

2. 計算手法

電子の追跡は3次元ニュートン方程式を用い、外力として自己誘起電界を考慮する。テフロンは炭素とフッ素からなるが、電子と分子との散乱過程のモデルは未だ提唱されていないため、ここでは炭素原子とフッ素原子がランダムに分布していると仮定して、電子-炭素原子、電子-フッ素原子の反応を別個に扱った。考慮した反応は弾性散乱、電離、フォノン干涉、ポーラロン効果、電子捕捉の各素反応である。反応モデルは Palov らのモデルを参照した^[4]。このモデルに基づき、電子エネルギーの

関数として衝突断面積を計算した(Fig. 3)。電子のエネルギーは 1eV から 30keV を考慮したので、相対論効果は無視した。計算時間ステップとしては、平均衝突時間を採用した。得られた3次元の電荷分布は Fig. 4 に示す計算対象の x 方向の分布に射影し、一次元の電荷分布に変換した。これは一次元の電荷分布を計測する実験にあわせたものである。一次元の電荷分布をポアソン方程式に従って積分することにより、電界および電位の分布を得た。現在のところ、MPI を用いた並列計算には成功したが、KDK 計算機での並列化計算では未実現であり、早急に計算結果を得る予定である。

3. 計算結果及び考察

計算はPentium 4を8台並列で使用した計算機で行った。Figure5は30keVの電子を10,000個入射させたときの電荷密度分布である(本計算では、電離反応後に生じた二次電子も追跡

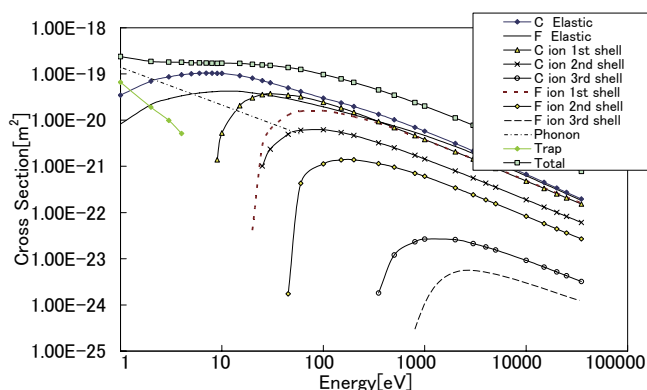


Fig.3 Cross sections for electron-Teflon[®]

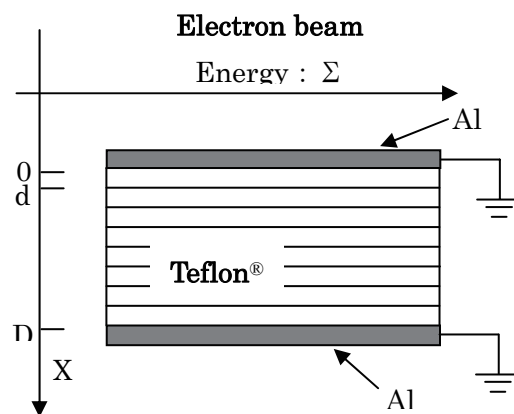


Fig.4 Simulation model

しているため、計算粒子数は加速度的に増加する)。Fig.6 は、電荷密度分布から得られた電界分布を Fig.7 は電位分布を示す。帯電のピーク値は表面から $5\mu\text{m}$ 程度侵入した場所にあり、最大侵入深さは約 $15\mu\text{m}$ である。また、照射面直下には電離反応に起因する正電荷が蓄積していた。電界は、正電荷蓄積により正に拡大した後、一定の負電界となった。図中に示した分布は、それぞれ 200 から 1600 ループ後の結果を示している。本計算では、粒子ごとにことなる平均衝突時間を積分時間ステップとして採用しているため、同一ループにおいては経過時間が粒子によってことなる。1600 ループにおける経過時間はおよそ $3.6 \times 10^{-12}\text{s}$ である。実時間レベルのシミュレーションを行うためには大規模な計算機の使用が前提となることがわかる。非常に短い時間ながら、電荷蓄積の様子と電界および電位の発達が見られたことは、テフロンフィルムの電荷蓄積特性の一端が明らかにされたことになる。

得られた計算結果を検証するために、他の計算結果と本計算結果の電荷密度分布を比較する。Fig.8 はその結果で、(a)には電子エネルギーが 20keV および 30keV における電荷密度分布を棒グラフで示し、(b)に

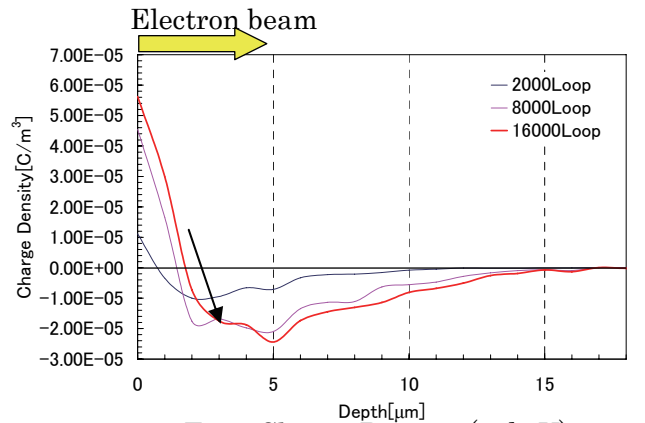


Fig.5 Charge Density (30keV)

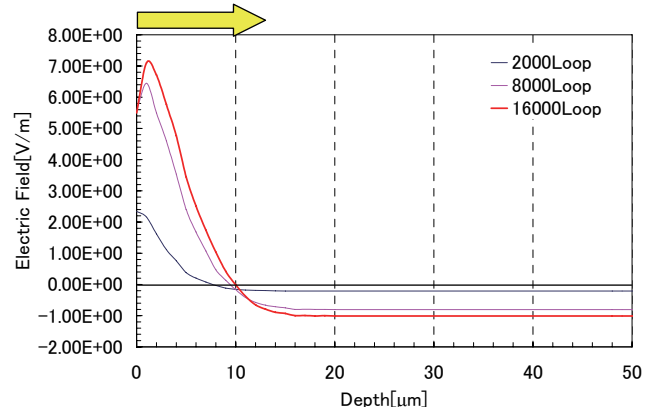


Fig.6 Electric Field (30keV)

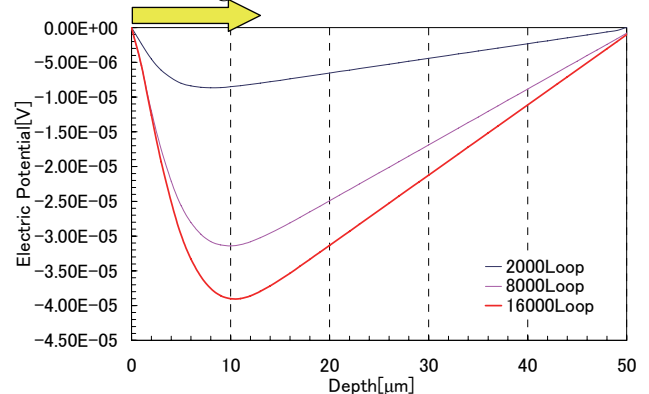


Fig.7 Electric Potential (30keV)

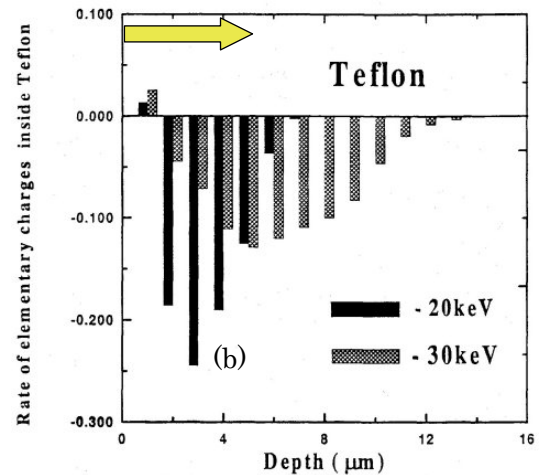
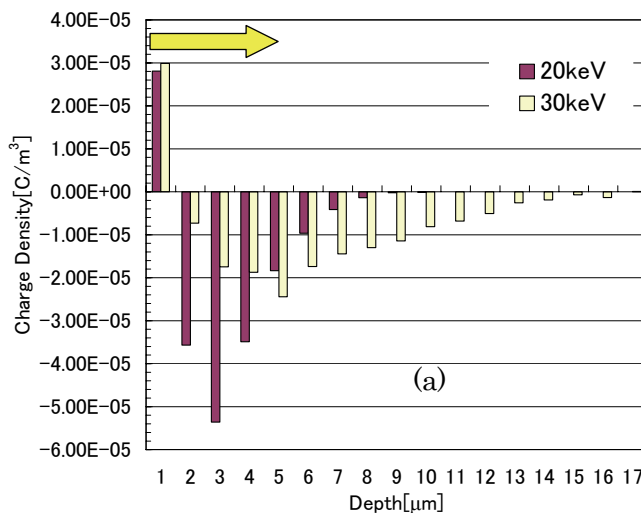


Fig.8 Comparison with Palov's result; a) Present, b) Palov's^[4]

は Plaov らの結果を示す^[4]. 照射面直下の正電荷を除けば, おおむね同様な傾向を示しており, 本計算が妥当であることを示している. ただし, 照射面直下の正電荷は電離反応が起

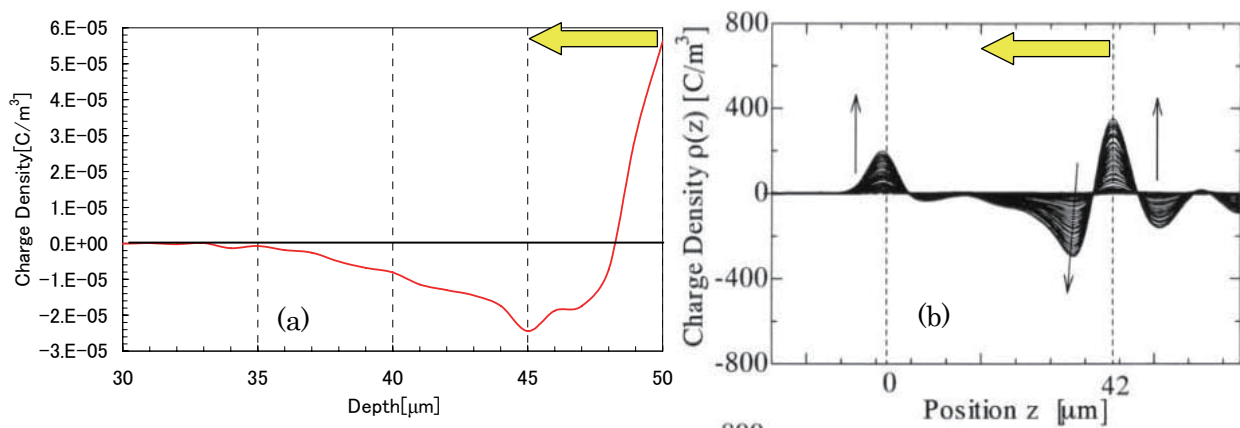


Fig.9 Comparison with experimental result; a) Present, b) Experiment^[5]

こりすぎていることを示し, 本計算の電離反応モデルに再検討の余地がある. 次に, 実験結果との比較検討を行った. 結果を Fig. 9 に示す. Fig. 9(a)は 30keV 電子入射時の計算結果を示しているが, 実験結果と合わせるために, 照射面を右側としている. Fig. 9(b)は 30keV の電子線をテフロンフィルムに照射させた際の内部電荷密度分布を計測した例である^[5]. 二本の点線はフィルム上下面を示し, ここには電極があることから, フィルム内部に蓄積した電荷による正の誘起電荷が存在している. 計算結果と比較すると, 蓄積電荷のピーク位置が約 $5\mu\text{m}$ で, 最大侵入深さが約 $15\mu\text{m}$ であるという特徴が, 計算・実験の両方に共通してみられ, 本計算結果が実現象をうまく再現していることがわかる. ただし, 電荷密度の絶対量は計算の方が大幅に低く, 今後実時間のシミュレーションを行った際には, 検討事項となる.

4. 結論

宇宙機用表面断熱材としてよく使われる PTFE フィルムに高エネルギー電子が蓄積する過程をモンテカルロ法により再現した. 計算の結果, 本計算はテフロンフィルム中に侵入・蓄積する電子の挙動を正確に再現していることがわかり, 今後実時間のシミュレーションが実現すれば蓄積電荷量の定量的な比較を行うことができると考えられる.

参考文献

- [1] H. Garrett and A. C. Whittlesey, IEEE Trans. Plasma Sci.,28(2000), pp2017-2028
- [2] N. John Stevens, Spacecraft Charging Study of A GEO Communications Satellite, AIAA, 98-0984, 1998
- [3] 田中宏樹, 武蔵工業大学修士論文, 2000
- [4] A. Palov, H. FUJII and S. HIRO, Jpn. Appl. Phys. Vol.37, 1998, pp. 6170-6176.
- [5] F. Fukuyoshi, N. Osawa, Y. Tanaka, T. Takada, R. Watanabe, N. Tomita and R Liu, 9th Spacecraft Charging Technology Conference, April, 2005, Tsukuba, Japan