

磁気圏環境における光電子電流計測に関する シミュレーション研究

○村中崇信 (JEDI/JAXA), 上田裕子 (ISAS/JAXA, JST/CREST), 白井英之 (京大生存圏), 篠原育 (ISAS/JAXA)

Numerical Analysis for measurement of photoelectron current in the magnetospheric plasma
Takanobu Muranaka (JEDI/JAXA), Hiroko O. Ueda (ISAS/JAXA, JST/CREST), Hideyuki Usui (RISH/Kyoto Univ.),
and Iku Shinohara (ISAS/JAXA)

Key Words : Photoelectron current, spacecraft potential, magnetospheric plasma, 3D full Particle-In-Cell Code

Abstract

A three-dimensional electrostatic full Particle-In-Cell code has been developed to analyze spacecraft-plasma interactions quantitatively. We adopted the code to evaluate the correlation between the floating potential of a spacecraft and the photoelectron current in the magnetospheric plasma environment by comparing the computation results and the observation ones by the GEOTAIL spacecraft. The numerical model of the velocity distribution function of the photoelectron was proposed to consider the correlation and the space charge effect of the photoelectron around a spacecraft was also discussed.

1. はじめに

宇宙機搭載電位プローブによる宇宙空間電位計測を精度よく行うためには、プローブ電位の基準電位となる宇宙機電位を正しく評価する事が必要不可欠である。宇宙機周辺には、宇宙環境由来の背景プラズマや宇宙機自身が放出する荷電粒子が存在することが知られているが、宇宙機はこれらの荷電粒子と相互作用し、宇宙機に流入する正味の電荷量によって宇宙機電位が決定される。ところで、地球磁気圏においては、背景プラズマ密度が0.1/cc程度と非常に希薄であり、宇宙機日照面より放出される光電子が最も支配的な電流成分となる。宇宙機に流入する背景イオンはほぼ無視出来るオーダーであり、宇宙機電位は、光電子と宇宙機に流入する背景電子のバランスによって決定される^{1,2}。従って、このような希薄な背景プラズマ環境においては、放出光電子のフラックス値に加えて、そのエネルギー分布、あるいは、速度分布を知る事が、宇宙機電位の飽和値を評価する上で必要不可欠である。一方、観測衛星による電子電流計測では、背景電子と光電子を区別して計測する事は不可能である。また、計測する電子は宇宙機に流入するものに限られ、宇宙機から放出する光電子そのものを計測する事も不可能である。

本研究では、我々がこれまでに開発してきた3次元完全粒子静電コードを適用して、速度分布に関する放出光電子のモデル化を行い、シミュレーションによってGEOTAIL観測データより解析的に得られた、宇宙機電位と光電子電流の相関について検証を行う。また、宇宙機周辺に拡散する光電子の静電的影響に

についても解析を行った。

2. コードの概要

開発した計算コードは3次元full-Particle-In-Cell (PIC)³ 静電モデルに基づいている。プラズマはイオンと電子それぞれを粒子として扱い、運動方程式(1)を陽に解くことで軌道を求める。ここで、 x, v, q, m, t はそれぞれ、粒子の位置、速度、電荷量、質量、時間であり、 E, B はそれぞれ、静電場および静磁場である。 j は粒子の種類を表す。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \vec{x}_j}{dt^2} &= \frac{q_j}{m_j} (\vec{E} + \vec{v}_j \times \vec{B}) \\ \frac{d \vec{x}_j}{dt} &= \vec{v}_j \end{aligned} \quad (1)$$

静電場は、ポアソン方程式(2)を解く事で、格子点上の空間電荷によって決定される。

$$-\epsilon_0 \nabla^2 \phi = \rho \quad (2)$$

ここで、 ϵ_0, ϕ, ρ はそれぞれ、真空の誘電率、電位、電荷密度を示す。

計算空間は3次元等幅直交格子であり、電位の境界条件は外部境界で電位を0としている。また、宇宙機表面の電位はCapacity Matrix法⁴により求めている。プラズマの運動と静電場はセルフコンシステントになるようにそれぞれを更新する。

コードは高速計算を達成するために、空間領域に対してMPI並列化が施されている。

3. 磁気圏環境における宇宙機電位と光電子電流の相関

3-1 GEOTAIL観測データによる解析結果

図1にNakagawa等による、GEOTAILによるプラズマ密度、温度の観測データから求めた、宇宙機電位に対する光電子電流値のグラフを示す¹。前述した様に、実際の計測では光電子のみを選択的に計測することは不可能であるため、宇宙機電位が定常であるとき、(3)式から求められる、宇宙機に流入する正味の背景電子電流と、宇宙機から放出される正味の光電子電流が等しいとして、正味の光電子電流を決定している¹。

$$I_e(V_s) = en_e A \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{eV_s}{kT_e}\right) \quad (3)$$

ただし、 I_e , V_s , e , n_e , m_e , k , T_e はそれぞれ、背景電子電流、宇宙機電位、電気素量、電子密度、電子質量、ボルツマン定数、電子温度であり、 A は宇宙機の表面積で、GEOTAILの場合は 18.7m^2 である。宇宙機への正味電流を考慮する際、背景イオン電流は微量のためその影響を無視している。また、プラズマの温度は等方的であると仮定している。図1のグラフ中の3本の回帰曲線は、光電子エネルギー分布関数が3つのMaxwell型分布関数の線形結合で良く記述される事を示している。この場合の3つの温度は1.6, 3.0, 8.9 eVと求められる¹。

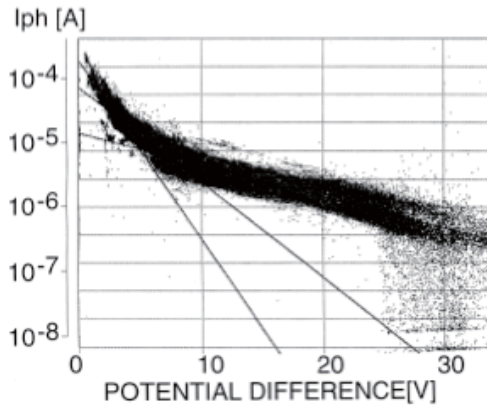


図1 GEOTAILによるプラズマ密度、温度計測から解析的に求められた正味光電子電流と宇宙機電位¹(横軸POTENTIAL DIFFERENCEに相当)。

3-2 磁気圏プラズマ環境における光電子放出シミュレーション

この解析結果に基づいて、本研究では光電子の速度分布関数を2つのMaxwell分布でモデル化し(複数のMaxwell分布の線形結合で表現した)、宇宙機電位と光電子電流の相関を観測データに基づく解析結果

と比較検討した。プラズマパラメータは次の通りである。背景プラズマは、磁気圏ローブ領域を仮定し、密度 $0.1/\text{cc}$ 、温度 100eV の電子とプロトンから成る。光電子電流は総フラックス $50\mu\text{A}/\text{m}^2$ とし、温度 1.5eV の光電子 $45\mu\text{A}/\text{m}^2$ と、温度 5.0eV の光電子 $5\mu\text{A}/\text{m}^2$ の和で定義した。計算空間は、格子幅 $dx=0.5\text{m}$ の等幅矩形格子で構成される直交座標系で、GEOTAIL衛星モデルは $X*Y*Z=4*4*3$ 格子で定義した。日照面は+X面とし、この面から光電子を放出させた。また、ポアソン式を解く際の境界条件は、外部境界で電位0とした。構築した光電子放出モデルは、日照面から設定したフラックス量を満たす様に放出面からコサイン分布で電子を放出する。

図2に1.6ms経過後の光電子温度 1.5eV と 5.0eV の光電子それぞれについての空間分布を示す。これらの図から分かる様に、十分時間が経過した後、光電子は宇宙機周辺にほぼ等方的に広がっている。また、放出面に相当する+X面近傍では、光電子密度が高く

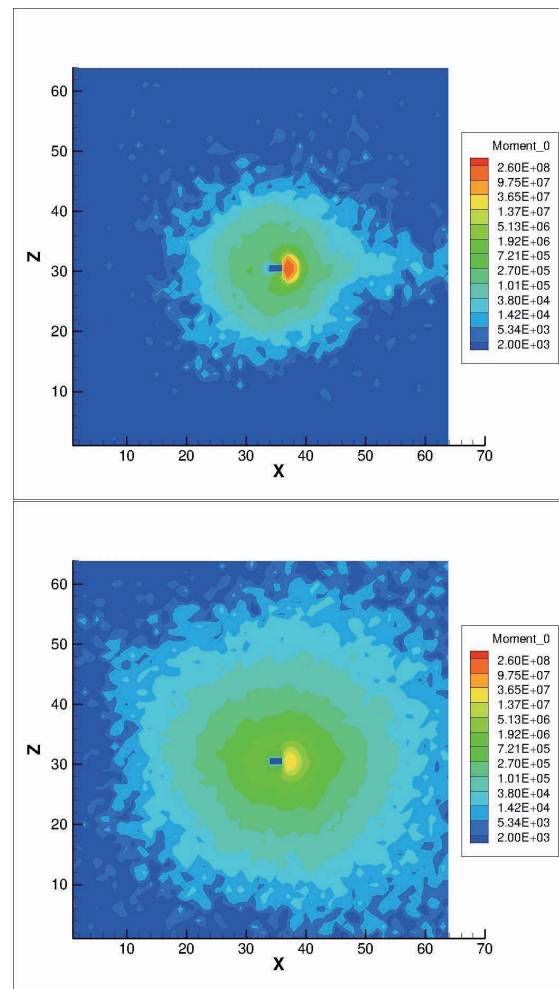


図2 光電子温度 1.5eV (上)と 5.0eV (下)各成分それぞれの空間分布。中央宇宙機モデルから右方向に光電子が放出されている。

なっている事が分かる。

図3にt=0からt=1.6msまでに得られた宇宙機電位に対する、正味の光電子電流値を示す。シミュレーションで得られた宇宙機電位に対する正味光電子電流は、物体周辺に厚いシーブが形成されているときの電流収集理論である、Orbital Motion Limited (OML)理論から得られる解析解と比較的良好一致を示している。OML理論から計算される、宇宙機電位に対する正味電流密度は以下の様に表される⁵。

$$j_{net}(V_s) = j_{0e}(1 + eV_s / kT_e) - j_{0i} \exp(-eV_s / kT_i) - j_{ph0} \exp(-eV_s / kT_{ph})(1 + eV_s / kT_{ph}) \quad (4)$$

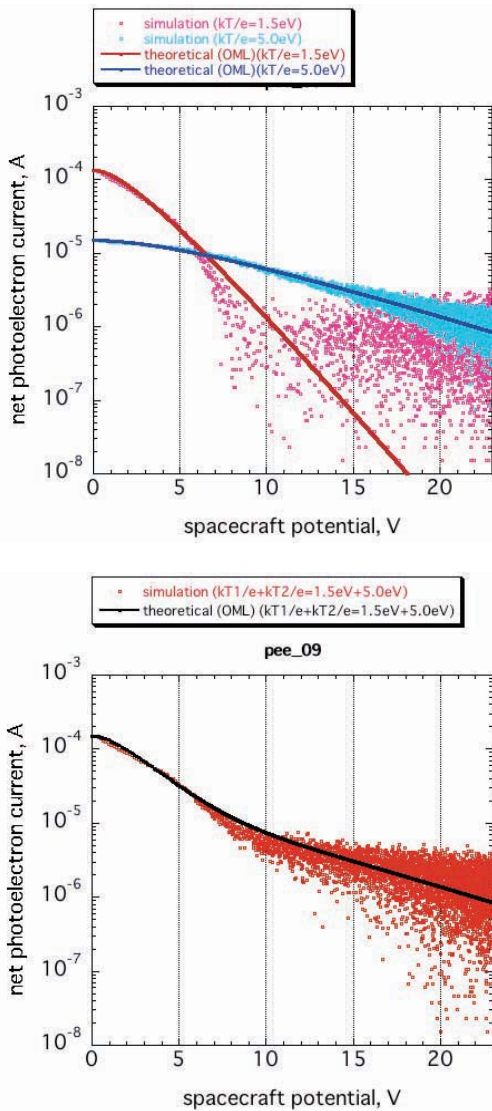


図3 宇宙機電位と正味光電子電流。2つの温度成分それぞれについて（上）と、これらの和による総量（下）。実線はOML理論から得られる解析解を示し、点はシミュレーション結果を示す。

ただし、

$$j_{0e,i} = en_{e,i} \sqrt{kT_{e,i} / 2\pi m_{e,i}} \quad (5)$$

ここで、 j_{net} , T_i , T_{ph} , j_{ph0} はそれぞれ、正味電流密度、イオン温度、光電子温度、宇宙機電位0Vの時に放出される光電子電流密度である。また、(5)式の添字、 e, i はそれぞれ、電子、イオンを示す。また、OML理論を適用する際に衛星は導体球とした。正味の光電子電流密度は(4)式の右辺第三項に相当する。光電子の速度分布モデルに複数のMaxwell分布関数の線形結合を使用する際は、(4)式の右辺第三項は各光電子速度分布に対してそれぞれ同様に記述されたものの総和となる。

ところで、OML理論には光電子の空間電荷効果の影響は考慮されていないが、理論値とシミュレーション結果が良い一致を示した事から、電流収集に対して、図2に見られる宇宙機周辺に拡散した光電子の空間電荷効果の影響はほとんどないと考えられる。

次に、シミュレーション結果を観測データと比較検討するために、定常状態における宇宙機電位に対する正味光電子電流値を求めた。前述した様に、宇宙機電位は背景電子電流と正味光電子電流のバランスで決定されるので、ここでは背景電子密度をパラメータとして宇宙機電位を変化させた。図4に、この結果を示す。参考のために、光電子温度1.5eVの1Maxwell光電子モデルによる結果を合わせて示している。1Maxwell光電子モデルの計算結果から逆算される光電子温度は、設定値1.5eVとほぼ一致した。光電子2Maxwellモデルでは、観測データに見られる様に複数（ここでは2本）の回帰曲線により温度が求められる。回帰曲線から求められる光電子温度は設定

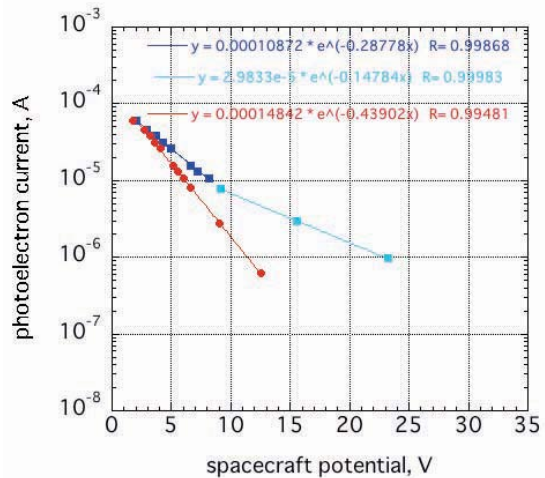


図4 定常状態の宇宙機電位に対する、正味の光電子電流。赤は1Maxwell、青は2Maxwellモデル。この結果は速度空間3成分を含んだものであるため、グラフから得られる値は3/2kT_{ph}である。

値1.5eV, 5.0eVに対して, それぞれ2.3eV, 4.5eVとなっているが, 設定値との差については, 現在解析を進めている.

4. まとめ

本グループでは, 宇宙機と宇宙機周辺に存在するプラズマとの相互作用を詳細かつ定量的に評価するために, 3次元full-PIC静電コードを開発している. 現在までに開発が完了したコードの機能⁶を適用して, GEOTAILのプラズマ観測データから求められた, 宇宙機電位と光電子電流の相関について検証した. 実機では直接選択的に計測不可能な光電子について, 2Maxwell型速度分布により速度分布関数のモデル化を行った. 光電子電流と宇宙機電位の相関をシミュレーションと理論値と比較した結果, 電流収集は理論値と良く一致しており, 収集電流に対して, 宇宙機周辺に拡散する光電子の静電的影響は無視出来る事が分かった. 次に, これについてのシミュレーション結果を, 実機観測データから得られた解析解と比較した. その結果, 宇宙機電位と光電子電流の相関が定性的には一致した. 本研究で示した, 光電子放出モデルによって, 磁気圏日照面における宇宙機電位をある程度予測する事が可能であると考えられが, 複数のMaxwell分布で光電子速度分布をモデル化する場合, それぞれのフラックス値や温度の定量的検討を引き続き行っている.

参考文献

- [1] Nakagawa, T., Ishii, T., Tsuruda, K., Hayakawa, H., and Mukai, T., "Net Current Density of Photoelectrons Emitted from the Surface of the GEOTAIL spacecraft," Earth, Planets and Space, vol. 52, pp283-292, 2000.
- [2] Ishisaka, K., "Analysis of GEOTAIL Spacecraft Potentials and Its Application to the Magnetospheric Plasma Diagnostic," Ph. D thesis, Mar. 2000.
- [3] Birdsall, C. K., and Langdon, A. B., Plasma Physics via Computer Simulation, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [4] Hockney, R. W., and Eastwood, J. W., Computer Simulation Using Particles, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1988.
- [5] Hastings, D., and Garrett, H., Spacecraft-Environment Interactions, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, UK, 1996.
- [6] Muranaka, T., Ueda, H. O., Usui, H., and Shinohara, I., "Evaluation of Electric Field Probe On-board Spacecraft Using a 3D Full PIC Simulation, " Proc. 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, Japan, 1-8 June, 2008.