

## 惑星間航行に向けたソーラーセイル周辺のプラズマ挙動基礎解析

○村中崇信 (JEDI/JAXA) , 上田裕子 (ISAS/JAXA, JST/CREST) , 臼井英之 (神戸大院) ,  
篠原育 (ISAS/JAXA)

Fundamental Analysis of Plasma Behavior around a Solar Sail for Interplanetary Flight  
by

Takanobu Muranaka, Hiroko O. Ueda, Hideyuki Usui, and Iku Shinohara (ISAS/JAXA)

Key Words: solar sail, 3D electrostatic full Particle-In-Cell Code, spacecraft charging, photoelectron emission

### 1. はじめに

現在, 本研究グループでは宇宙機とその周辺に存在するプラズマとの相互作用の詳細を解析するツールのひとつとして, 大型計算機での大規模並列演算用3次元完全粒子静電コードを開発している. 本コードは, Particle-In-Cell (PIC) 法<sup>1)</sup>に基づき, プラズマ中のイオンと電子について, 運動方程式を陽に解くことで直接軌道を求め, 静電場についてはフーリエ変換によって直接解を求めるため, それぞれについて厳密解を得ることができるという特徴を持つ. 現在開発の第一段階として, 3次元等幅直交格子を適用した計算モデルの基本機能の開発をほぼ完了した. 開発したコードを使用して, これまでに, 科学衛星による電位計測の高度化に関するシミュレーションなどを行ってきたが, ここでは, 本コードの新たな解析対象への展開として, 惑星間航行システムのひとつであるソーラーセイル周辺のプラズマ挙動解析を行った.

### 2. ソーラーセイル動作原理とプラズマ環境

ソーラーセイルは, その名が示すように, 太陽光圧を推進力として利用する宇宙機である. およそ  $\mu\text{Pa}$  程度の微小な太陽光圧から宇宙機の推力を得る為に,  $10^4\text{m}^2$  程度の面積の薄膜を, 太陽光圧を受ける帆として使用することが考えられている. ソーラーセイルは, 惑星間航行時には太陽風プラズマ環境中に存在する. このとき, セイルのスケール長が太陽風プラズマのデバイ長より大であるため, セイル周辺のプラズマ空間分布を解析する事は, セイル周辺に位置するペイロードおよび各種計測器の配置を決定する上で重要であると言える. また, 日照時における太陽風プラズマ環境では, 背景プラズマに加えて, 光電子電流が主要な電流成分であるため, この影響も考慮する必要がある.

### 3. ソーラーセイル周辺のプラズマ挙動解析

本節では, 開発した3次元完全粒子静電コードによる, ソーラーセイル周辺のプラズマ挙動解析結果について報告する. 主な解析目標は, 1) ソーラーセイルの構体浮動電位を求める事, 2) 放出光電子を含むソーラーセイル周辺のプラズマ空間分布を求める事, の2点である. 1) については, 宇宙機帯電解析ソフトウェアMUSCATによる予備的解析を参照した. また, 2) については, ソーラーセイルのスケール長による違いも検証した.

Table 1にシミュレーションに使用した各種パラメータを示す. シミュレーションに考慮した荷電粒子は, 背景電子, 水素イオン, および光電子である. 計算格子は光電子のデバイ長相当の長さ0.5mを空間刻み幅として構成した. Fig. 1に計算体系を示す. ソーラーセイルは航行時, 太陽光および太陽風に対して45度の傾斜角を持つが, ここでは簡単のためこれらがセイルに対して垂直入射するとした.

まず始めに, これらのプラズマ環境でのソーラーセイルの浮動電位を求めた結果, およそ+4.3Vの定常値が得られた. 本シミュレーション以前に, 細田と八田によって, MUSCATによる同ソーラーセイルモデルの帯電計算<sup>2)</sup>が実施された. この結果ではFig.2

Table 1. Computation parameters for a solar wind environment.

plasma density [ $\text{m}^{-3}$ ]	$6 \times 10^6$
plasma temperature [eV]	10
drift velocity [km/s]	470
mi/me (H <sup>+</sup> )	1836
Debye length [m]	9.6
photoelectron temperature [eV]	1.5
photoelectron current flux [ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ]	10
numerical domain	128*128*128
object size	1*28*28
dx [m]	0.5
dt [s]	$1.0 \times 10^{-7}$

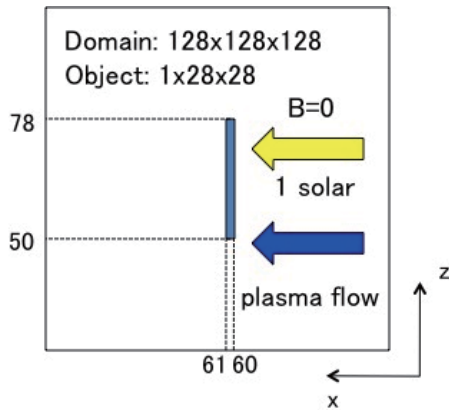


Fig. 1 Numerical domain and geometric condition of the simulation. The y-direction into the paper has the same geometry as the z-direction.

に示すように、ソーラーセイルの浮動電位定常値はおよそ+10Vとなり、裏面絶縁体との電位差である乖離電位も帯放電現象に問題ない程度である結果が得られている。ここで、MUSCATシミュレーションでは、太陽光および太陽風はソーラーセイル面に対して45度入射の条件で帯電計算が実行されており、また、荷電粒子の影響として、光電子に加えて、二次電子も考慮されている。

Fig. 3にシミュレーション結果によって得られた、背景イオンおよび電子の空間分布を示す。太陽風ドリフト速度は、背景イオンの音速に対してマッハ数10程度の超音速であるため、ソーラーセイルの下流で密度が希薄となるwake領域が発生する。一方、背景電子に対しては、同ドリフト速度は亜音速であるため、明瞭なwake領域は発生しない。このため、ソーラーセイルの下流では、背景電子が密となり、Fig. 4に示すように、負の空間電位が形成される。

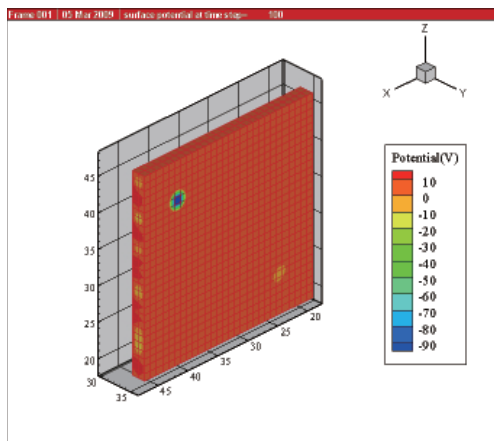


Fig. 2 Electric potential distribution on a conductor of a solar sail model obtained by MUSCAT analysis. We use the same plasma parameters for our computation as used in this simulation. The direction of the solar flux and the solar wind is 45 degrees from the normal of the surface.

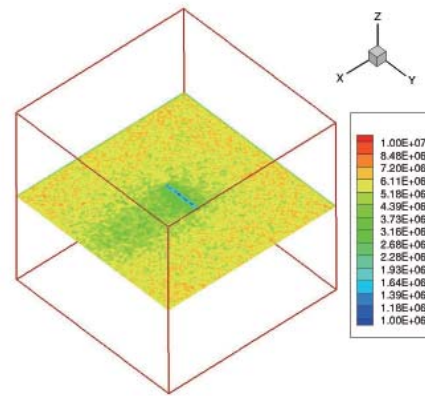
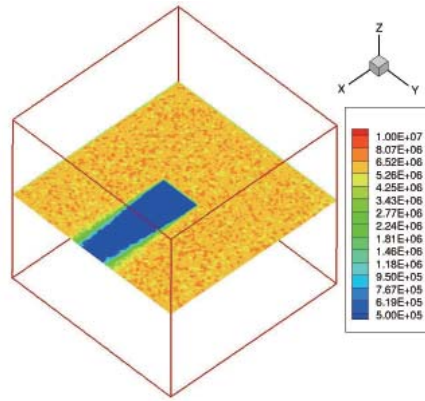


Fig. 3 Spatial distributions of the ambient ions (above) and electrons (below) at 0.5 ms in xy-plane ( $z=64$ ). Contours show the number density of the ions and electrons in  $m^{-3}$ . Numerical domain is  $128*128*128$  in  $X*Y*Z$  dimensions. A wake structure of ambient ions is recognized in the downstream region behind the model.

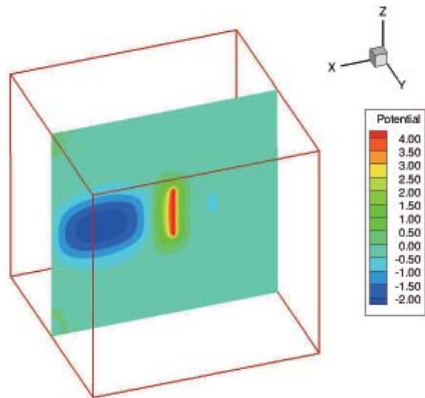


Fig. 4 Spatial distribution of the electric potential (V) in zx-plane ( $y=64$ ) at 0.5 ms. Negative potential up to  $-2.0$  V is shown in the downstream region behind the model due to ion wake.

Fig. 5にソーラーセイル中心でスライスした、光電子数密度の2次元空間分布の時間発展を示す。これらの図の中心に位置するセイルの右側が日照面で、この

面から光電子が放出される。放出された光電子は、

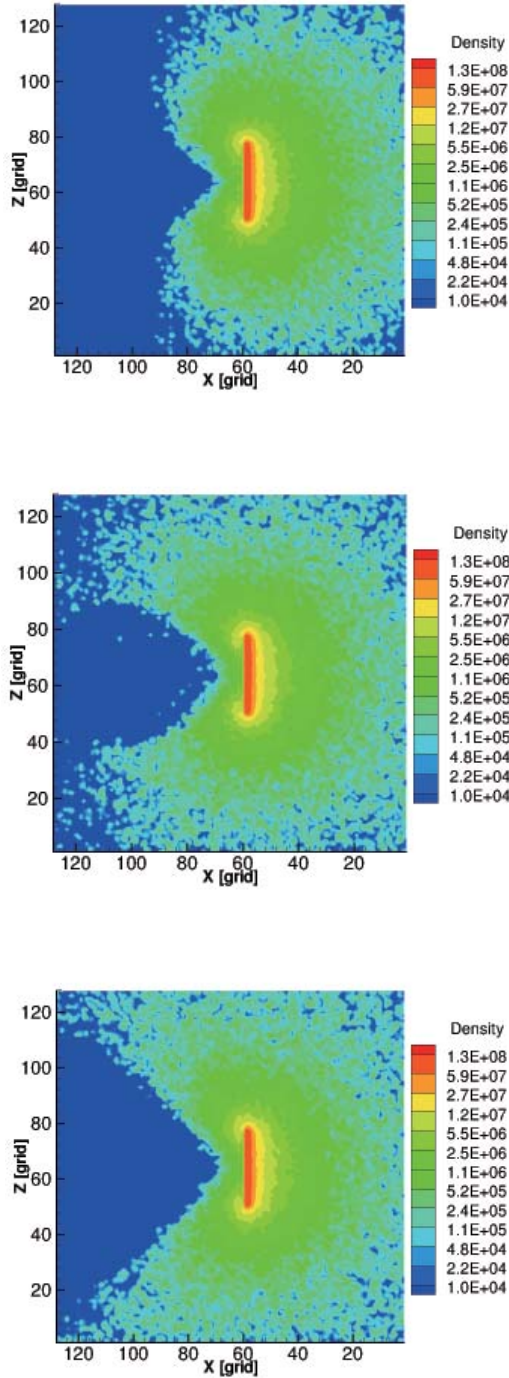


Fig. 5 Spatial distributions of the photoelectrons at  $t=0.025$  ms (top),  $0.125$  ms (middle) and  $0.5$  ms (bottom) in  $xz$ -plane, respectively. Contours show the number density of the photoelectrons in  $m^{-3}$ . Numerical domain is  $128*128*128$  in  $X*Y*Z$  dimensions. Part of photoelectrons originally emitted from the right hand side surface of the model in the figures diffuse to the rear surface of the model.

セイルの裏面へと拡散していく様子が確認出来るが、太陽風下流側で負の空間電位が形成される領域には、光電子は拡散できないことが分かる。また、本ケー

スではセイルの裏面中心近傍に拡散する光電子数密度は、背景電子数密度とおおよそ等しいオーダーとなった。

次に、ソーラーセイル周辺のプラズマ挙動に対する、セイルのスケール長の影響を調査する為に、セイル面積を前ケースの4倍として同様のシミュレーションを行った。セイルのサイズは $28*28*0.5(m)$ である。Fig. 6およびFig. 7に、それぞれ空間電位と光電子数密度の二次元プロットを示す。前ケースと同様に、ソーラーセイル下流側では、イオンwakeに起因する負の空間電位が形成されるが、その最小値が前ケースでは $-2V$ であったのに対して、本ケースでは $-6V$ まで低下した。空間電位の最小値が低下する事で、ソーラーセイルの裏面中心に拡散する光電子数密度も低下し、本ケースでは背景電子数密度と比較して2桁以上低い値となることが分かった。このように、ソーラーセイルのスケール長が変化すると、セイルの下流側に形成される空間電位に影響を及ぼし、セイル裏面近傍への光電子拡散範囲が変化するとと言える。

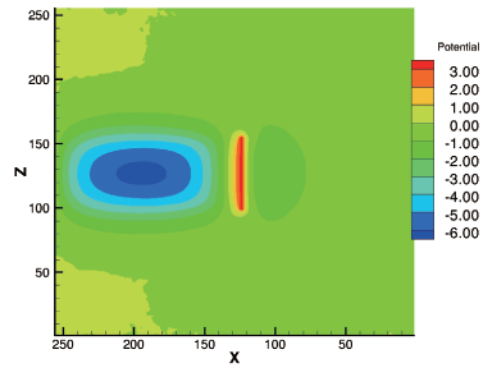


Fig. 6 Spatial distributions of the photoelectrons at  $t=0.5$  ms in  $xz$ -plane at  $y=128$  grid without plasma flow. Contours show the number density of the photoelectrons in  $m^{-3}$ . The X- and Z-axis are in grid number.

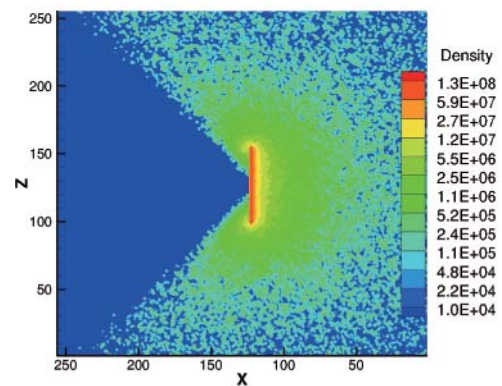


Fig. 7 Spatial distributions of the photoelectrons at  $t=0.3$  ms in  $xz$ -plane at  $y=128$  grid around the object of  $0.5m*28m*28m$ . Contours show the number density of the photoelectrons in  $m^{-3}$ . The X- and Z-axis are in grid number. Numerical domain is  $256*256*256$  in  $X*Y*Z$  dimensions.

#### 4. まとめ

本研究グループでは宇宙機とその周辺に存在するプラズマとの相互作用の詳細を解析するツールのひとつとして、大型計算機での大規模並列演算用3次元完全粒子静電コードを開発している。開発したコードを使用して、次世代惑星間航行システムのひとつと考えられているソーラーセイル周辺のプラズマ挙動の基礎的解析を行った。太陽風プラズマと光電子が存在する環境条件でこの解析を行った結果、以下の様な結論が得られた。

- 1) 太陽風プラズマと光電子環境では、ソーラーセイルの浮動電位は+4V程度となる。裏面が誘電体の場合の乖離電位は帯放電現象に問題ない程度である事がMUSCATによる解析から得られている。
- 2) ソーラーセイル裏面側では、イオンwakeに起因する負の空間電位が形成され、この領域への光電子拡散範囲に影響を及ぼす事が確認出来た。
- 3) ソーラーセイルのスケール長は、セイル裏面側に形成される負の空間電位の大きさを変化させ、その結果としてセイル裏面中心付近に拡散する光電子数密度を変化させる事が分かった。本シミュレーションの例では、大きさ14.0\*14.0\*0.5(m)のセイルの場合、この領域に拡散する光電子数密度は、ほぼ背景電子数密度と等しいオーダーであり、この4倍面積28.0\*28.0\*0.5(m)の場合、同光電子数密度は、背景電子数密度と比較して2桁以上少ない事が分かった。

#### 謝辞

MUSCATによるソーラーセイルの予備的帯電解析結果の提供に対して、JAXA宇宙科学研究本部の細田聡史氏、株式会社MUSCATスペースエンジニアリングの八田真児氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] Birdsall, C. K., and Langdon, A. B, *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [2] Hosoda, S., Tanaka, K., Toyoda, H., Miyake, H., “Fundamental Experiment for Charging Measurement on a Solar Sail Foil,” Space Plasma Workshop 2008, ISAS/JAXA, Sagamihara, March 6, 2009. (in Japanese)