電離層プラズマ—高電圧ソーラーパネル間 相互作用の数値解析*

田原 弘一**・高木 一樹**・安井 利明**・吉川 孝雄**

(受理1996年11月29日, 掲載決定1997年3月1日)

Numerical Analysis of Interactions of High Voltage
Solar Panels with the Ionospheric Plasma

Hirokazu TAHARA, Kazuki TAKAGI,
Toshiaki YASUI and Takao YOSHIKAWA

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, 1-3, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka)

(Received November 29, 1996, Accepted March 1, 1997)

1. ま え が き

近年の宇宙開発の進展に伴い, 高度1000 km 以下の低地球軌道 (Low Earth Orbit: LEO) 上において, 宇宙ステーションに代表される大型大電力宇宙構造物を建設することが計画されている. これら宇宙構造物では大電力を供給するために, 出力電圧が高いソーラーパネルを利用することが検討されている. しかしこの高電圧ソーラーパネルは電離層プラズマで取り囲まれるため, 帯電放電, 材料劣化, イオンドラグなどの様々な現象を引き起こし, 将来これらが深刻な問題になることが懸念されている¹⁻⁵⁾. これは Fig. 1 の左側のソーラーパネルに示すように, 電離層プラズマに曝されたパネル導電部 (パネルの表に張られた, 多数の太陽電池素子を接続するコネクタ) の電位がそのプラズマ電位に対して大きく負になることに起因する.

そこで本研究では, 電離層プラズマと高電圧ソーラーパネルとの干渉現象を調べるために, 高電圧ソーラーパネル周りの3次元プラズマ粒子運動を数値解析し, イオンシース形状, 挙動を明らかにすると共に, そのイオン運動について検討した.

2. 計算モデルと解析方法

計算を行うにあたり, 3次元空間内を単純な長方形の板状の高電圧ソーラーパネルが高度500 km の軌道上で7.6 km/s の軌道速度で飛行するモデルを考えた. ソーラーパネルの長さとは幅はそれぞれ5 m と1 m, 厚さは零とし, 一方の面を導電面, もう一方の面を絶縁面とする. また高度500 km の酸素プラズマの密度は $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ であり, イオンは無衝突運動をし, 電子はボルツマン分布に従うとする. すなわち, ソーラーパネルの電位はプラズマ電位に対して深く負に沈みその周りにはイオンシースが発達するので, イオンについてのみ粒子の追跡を行った. こうして, 次の計算上の仮定を行う. 1) 電離層をプラズマとみなす. 2) 電子の分布はボルツマン分布 (電子温度0.2 eV) とする. 3) イオン温度は零とする. 4) イオンは無衝突である. 5) 地磁気の影響は無視する. 6) イオンがソーラーパネルに衝突する時, 中性化される.

基礎方程式は次にポアソンの方程式, イオンの運動方程式, 電子に関するボルツマン平衡の式で構成される.

$$\nabla^2 V = -\frac{e}{\epsilon} (N_i - N_e) \quad (1)$$

$$M \frac{dv}{dt} = -e \nabla V \quad (2)$$

* 平成8年10月30日 第37回真空に関する連合講演会で講演

** 大阪大学基礎工学部 (〒560 大阪府豊中市待兼山町1-3)

Fig. 1 Interactions of high voltage solar panel with ionospheric plasma and calculated space potential distribution under applied voltage of -250 V . Mesh numbers of 0-50, in which an interval between meshes corresponds to 50 mm in the real interval, are used in the right side solar panel.

$$N_e = N_0 \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \quad (3)$$

ここで、 e は電気素量、 ϵ は真空誘電率、 k はボルツマン定数、 N_0 は中性プラズマ数密度、 N_i はイオン数密度、 N_e は電子数密度、 V は電位、 T_e は電子温度、 M はイオン分子質量、 v はイオン速度、 t は時間である。計算方法として Particle-In-cell (PIC) 法を用い、その境界条件としてパネル導電面に一定の電位を与え、パネルの絶縁面と計算領域の外周の電位を零とした。実際のパネル上の電位は Fig. 1 左図のように一定とはならず太陽電池素子の接続状態と人工衛星本体の電位分布に依存した、ある分布を持つはずであるが、本解析では簡単化のために一様分布を仮定した。繰り返し計算は電場の空間分布がほぼ定常状態になったとき止め解を求めた。

3. 計算結果と検討

導電面の電位が -1 kV のソーラーパネルがプラズマ流中に平行に置かれた時の空間電位分布を Fig. 2, イオン電荷の密度分布を Fig. 3 にそれぞれ示す。また Fig. 1 の右図にプラズマ流に垂直に対面した -250 V のソーラーパネル周りの電位分布を示す。但し、これらの図中では長さの単位として計算メッシュ (50×50) を直接使用しており、1 メッシュ間隔は 50 mm に相当する。ソーラーパネルの幅 1 m は 20 メッシュになる。

計算結果からイオンシースが十分に計算領域内で収束していることがわかる。高電圧ソーラーパネルの周りに形成されたイオンシースは導電面側に大きく広がり、

Fig. 2 Calculated space potential distribution around solar panel under -1 kV . Equipotential lines of -10 , -100 and -200 V are drawn. Mesh numbers of 0-50, in which an interval between meshes corresponds to 50 mm in the real interval, are used.

Fig. 2, Fig. 3 のようにパネルが流れに平行に飛行する場合はシースが流され下流域で厚くなる。さらに、イオンシースは導電面のみならず絶縁面側にも形成されることがわかる。Fig. 3 のイオン電荷の密度分布はこれらシース形状とよく対応している。プラズマ流に平行に置かれたソーラーパネル周りのイオンは Fig. 4 に示すように、そのシースが十分広がっているのだからかなり遠方から

Fig. 3 Calculated positive charge density distribution around solar panel under -1 kV. Mesh numbers of 0–50, in which an interval between meshes corresponds to 50 mm in the real interval, are used.

軌道を曲げられソーラーパネルに衝突する。特に、絶縁面側を通過するイオンも導電面側に回り込みパネルに衝突するのでそれに起因する化学スパッタリングによる表面材料の劣化には十分注意する必要がある。

4. ま と め

本研究では、LEO 上の宇宙飛翔体の高電圧ソーラーパネルと電離層プラズマとの干渉現象を明らかにするために、PIC 法による 3 次元プラズマ粒子シミュレーションが行われた。ソーラーパネル周りのイオンシースの形状、挙動が明らかにされ、高速イオンの衝突による材料劣化特性、イオンドラッグなどを具体的に見積もることが可能になると期待される。

Fig. 4 Calculated trajectory of ions around solar panel under -1 kV. Ions with 7.6 km/s move from the left side toward the right one. Mesh numbers of 0–50, in which an interval between meshes corresponds to 50 mm in the real interval, are used.

〔文 献〕

- 1) H. Tahara, L. Zhang, M. Hiramatsu, T. Yasui, T. Yoshikawa, Y. Setsuhara and S. Miyake: J. Appl. Phys., **78** (1995) 3719.
- 2) 田原弘一, 張 麓璐, 平松美樹, 安井利明, 吉川孝雄: 日本航空宇宙学会誌, **43** (1995) 170.
- 3) 田原弘一, 張 麓璐, 平松美樹, 安井利明, 吉川孝雄: 真空, **38** (1995) 391.
- 4) H. Tahara, A. Ogo, L. Zhang, T. Yasui and T. Yoshikawa: 20th Int. Symp. on Space Technol. and Science, Gifu, ISTS-96-b-38p, 1996.
- 5) 田原弘一, 小河 敦, 張 麓璐, 安井利明, 吉川孝雄: 日本航空宇宙学会誌, 1997, 印刷中.