

## MUSCAT 帯電解析手法について

趙孟佑(九州工業大学)

## 1. はじめに

この程、Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT) の開発を行うことになったが、本稿では MUSCAT の基本的アルゴリズムについて説明する。衛星の帯電を考える上で、衛星本体の電位と衛星表面の絶縁体の電位の 2 種類の電位を考える必要がある。通常の衛星は、本体の金属構造物を衛星回路の接地点として使用しているが、衛星電位とは周辺のプラズマ電位を基準とした衛星本体金属構造物の電位である。衛星電位を決定するものは、図 1 に示すように、衛星本体に流れ込む正負の電荷のバランスである。周辺からの負電流（主に周辺プラズマからの電子流入）と正電流（主に周辺からのイオン流入と光電子や 2 次電子の放出）は衛星電位に依存し、この正負の電流が均衡するように電位が決まる。衛星表面の絶縁体は衛星本体と異なった電位を有することができ、衛星電位と絶縁体電位の差を乖離電圧(Differential Voltage)ともいう。絶縁体電位は、図 2 に示すように表面の各部で正負の電流が均衡するように決められる。

## 2. 基本的アルゴリズム

衛星電位、絶縁体電位の過渡的な変動を計算するには、以下の手順で行えばよい。

1. 衛星各部に流入する電子とイオンのフラックスを計算
2. 衛星表面から流出する光電子、2 次電子、2 次イオンのフラックスを計算
3. 各電流を全て足し併せて、衛星構体への全電流を計算
4. 絶縁体表面各部での各種電流密度を全て足し併せて全電流密度を計算
5. 衛星構体、表面各部の電荷の増減を計算
6. 衛星構体、表面各部のキャパシタンスより電位を計算

上記の 1 から 6 を繰り返すことで、定常状態が存在するとすれば、各部の電位は一定値に収束する。MUSCAT においても、基本的にも上記の方法により衛星表面の各部の電位の時間変化を計算することになる。

衛星帯電解析法としては、NASCAP をはじめとして様々なものが存在するが、どれも基本的なアルゴリズムは同様であり、1.2 での流出入する電子、イオンのフラックスの計算方法が異なっているだけであると思われる。図 3 に MUSCAT のフローチャートを示す。MUSCAT においては、荷電粒子のフラックスを計算するのに、粒子軌道追跡法 (Particle Tracking Method : PTM) を使用する。PTM は粒子の分布関数の一部分に相当する超粒子について、運動方程式を積分して粒子軌道を計算するものである。衝突を無視できるときは、運動方程式の右辺にはローレンツ力しか

でてこそ、極めて単純なコードである。

荷電粒子の軌道は、衛星周辺の電位構造によって決まる。GEOのようにプラズマ密度が低ければ、シース厚が非常に大きくプラズマの空間電荷を無視して衛星表面の電荷だけを考慮した Laplace 方程式によって電界計算を行って周辺の電位構造を決定できる。しかしながら LEO のようにシース厚が衛星の代表的長さよりも遥かに短くなると、シース形状を決定するのに背景プラズマの空間電荷を無視するわけにいかない。MUSCAT においては、LEO 環境では、Particle-in-Cell (PIC) 法を用いて衛星周辺の電位構造を決定する。PIC 法は、空間電荷と self-consistent な電位構造を計算することができるが、タイムステップが電子プラズマ周波数の逆数を超えられないため、数秒を超えるような帯電過程を PIC 法だけで計算することは、現実には不可能である。

衛星表面の電荷分布が変化したとすると、周辺のプラズマはイオンプラズマ周波数の時間スケールで新たな表面電荷の分布に追従でき、LEO の場合は ms 程度である。よって、ms 程度以上の時間スケールでは、周辺のシース構造は準定常状態にあると見てよく、衛星表面電荷分布の更新に応じてはるかに長い時間スケールで変化していく。この ms 程度よりも長い時間スケールでは衛星周辺の電位構造は一定であると仮定し、PTM 法によって粒子軌道を追跡して、衛星表面各部への荷電粒子のフラックスを計算する。これによって、衛星表面の電荷密度を更新し、新たな表面電位を計算する。この後、周辺プラズマが新しい表面電位に適應するまでの間、PIC 法によって計算を行う。表面電位の急激な変化によって周辺プラズマにはステップ的な擾乱が与えられるが、イオンプラズマ振動の数周期分が経過した後は擾乱が止んで、準定常のプラズマ状態となる。そうなったところで、再度 PTM 法によって粒子軌道の計算を行い、表面各部の電荷を更新し、以下それらを繰り返す。

### 3. 計算例

MUSCAT の完成時には 3 次元コードであるが、現在 3 次元コードは開発中であるため、2 次元コードにより計算例を示す。図 4 に示すような ALOS (Advanced Land Observation Satellite) の太陽電池パドルの裏面の帯電を計算することとした。ALOS は高度 690km の極軌道に 2005 年に打上げ予定であるが、LEO 衛星としては ISS に次ぐサイズの太陽電池パドル (22mx3m) を有している。パドル裏面がオーロラ電子とウェークの組み合わせによって極付近で大きく負に帯電する可能性があるために、どこまで帯電するか計算を行った。

主な仮定としては、

- (1) ALOS のパドルが長辺方向に十分長いとして、パドルを横切る 2 次元平面で考える。
- (2) 周辺の電離層プラズマの状態として以下の状態を仮定する。

プラズマ密度  $2.0 \times 10^{10} \text{m}^{-3}$

電子温度 0.2eV

イオン温度 0.2eV

イオン等価原子量 : 13

デバイ長 : 0.024m

イオン熱速度 :  $1.2 \times 10^3$  m/s

イオンマッハ数 : 5.9

イオン軌道運動エネルギー : 3.6eV

衛星軌道速度 7.2km/s

イオン Ram 電流密度 :  $j_{ram} = 2.3 \times 10^{-5}$  A/m<sup>2</sup>

イオン thermal 電流密度 :  $j_{th} = 1.5 \times 10^{-6}$  A/m<sup>2</sup>

これらの値は最悪帯電状態（1200 秒オーロラ帯に日陰状態で飛行した後に、脱出直後に蝕明けとなる状態）である 2006 年 1 月 30 日 06:10(UT)の ALOS 軌道状態に相当している。

(3)ALOS の電離層プラズマに対する機体電位は-60V である。

(4)オーロラ粒子は等方的にあらゆる方向から流入する。

(5)図 5 に示す計算領域において、高さ 3.08m、厚み 0.04m の板をおき、左側の境界からプラズマ流がやって来る。デフォルトの条件では、プラズマ流に向いた側（セル面）は-60V の一定電位をもち、Wake であるパドル裏面の中心部分は絶縁体であり、1m<sup>2</sup>あたり  $1.7 \times 10^{-7}$ F の静電容量をもっている。パドル裏面の端部は CFRP が露出していることを考慮して、-60V の電位をもっている。

計算は以下のステップで行った。

(1)パドルの 4 つの側面全てが-60V の電位を有していると仮定して、周辺のプラズマ状態を計算し、これを初期値とする。図 6 に初期状態を示す。これはオーロラ帯に入る前に衛星が-60V に帯電していて、Wake の絶縁体が帯電していない状態に相当する。

(2)絶縁体部分へのイオン電流密度を計算する。計算方法は、境界の各グリッドから 1000 個のテスト粒子を計算領域に入れ、それらの粒子の軌道を運動方程式

$$\frac{dv}{dt} = \frac{q}{m} E \quad (1)$$

に基づいて計算する。粒子軌道を計算している際、計算領域中の電位分布は一定であると仮定する。これはテスト粒子が領域を横切る程度の時間(~ms)では、衛星の帯電状態は変化せず、よって周辺電位分布も一定であると考えられるからである。

(3)絶縁体部に到達したテスト粒子の個数から、絶縁体表面への入射イオン電流密度  $j_i$  を計算する。

(4)式(2)に基づいて、絶縁体表面電位を更新する。ここで  $dt_L$  は帯電計算の時間ステップであり、後述する PIC 計算の時間ステップ  $dt_s$  より遥かに長い時間スケールである。 $dt_L$  については、衛星

表面電位が十分に变化して周辺のプラズマ密度分布や電位分布が变化するのに十分な時間で考える。今回の計算の場合、1秒とした。また式(2)中の  $j_a$  はオーロラ電子の電流密度である。オーロラ電子の軌道計算は行わず、(エネルギーが十分高いので衛星が発する電場の影響を受けずほぼ直進して衛星表面にあたると仮定)、仮定した値( $j_a=1.6 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ )で一定とした。尚、 $C=1.7 \times 10^{-7} \text{ F/m}^2$  である。

$$\delta V = \frac{(j_i - j_a) dt_L}{C} \quad (2)$$

(5)式(2)の  $\delta V$  を使って、衛星絶縁体表面電位を更新した後に、その電位に適応する周辺プラズマシースの形状を Particle-in-Cell(PIC)法を使って計算する。PIC法では、イオンと電子の両方について空間電荷を考慮した電位構造を計算する。PIC法をイオンプラズマ振動の6.3周期分だけ計算して、周辺プラズマの新たな配置を計算する。この計算をする際、計算時間の短縮のためにイオンの質量は電子の10倍であると仮定した。

(6)新たに計算された周辺プラズマの空間電荷による電位構造 (i.e.シース) に基づいて、計算境界よりテストイオン粒子を入れてその軌道を計算して、絶縁体表面へのイオン電流密度を計算し、式(2)より表面電位を更新する。

(7)以下、帯電計算時間ステップ  $dt_L$  の積み重ねが予め決められた時間(この例の場合 90s)に達するまで(5)と(6)を繰り返す。

図7に30秒後のパドル周辺電位分布と、イオン軌道の例を示す。図8にパドル裏面に沿ったイオン電流密度分布と表面電位分布を示す。この計算例では、90秒後にはパドル裏面の電位は最高で-5000Vを超えており、放電発生の可能性を有していることがわかる。今回の計算例ではPOWERPC2GHzで約400MBのメモリを使って8日間要した。

#### 4. おわりに

粒子軌道追跡法とPIC法を併用したMUSCATの帯電解析手法について、例を交えて解説した。今後の課題としては、3次元化、2次電子・光電子等の表面相互作用の追加、並列化、GUIによる任意形状物体のモデリング、実験・比較計算(GES等)による計算コードの検証、計算結果出力グラフィックスルーチン、ビームエミッション等の能動電流の追加等があるが、PIC法部分を省略してNASCAP並の実行時間で済ませる簡易バージョンの作成も最終的には重要である。

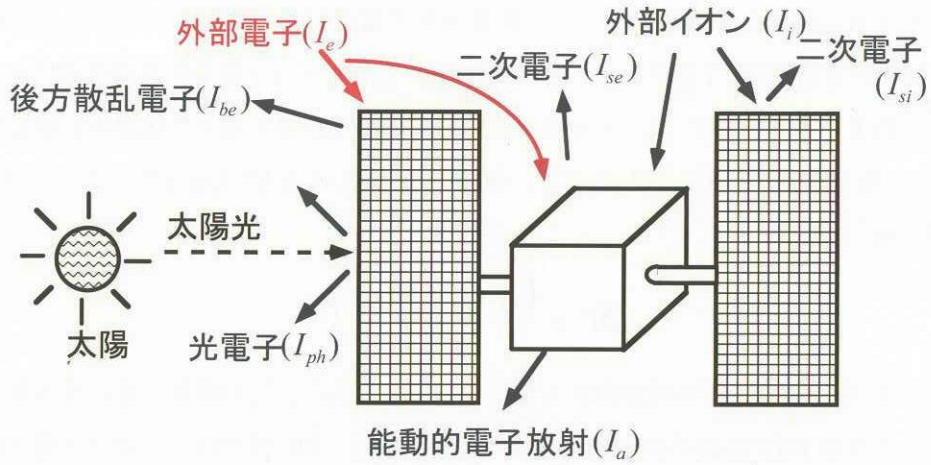


図 1：衛星本体の電位の決定に関わる電流

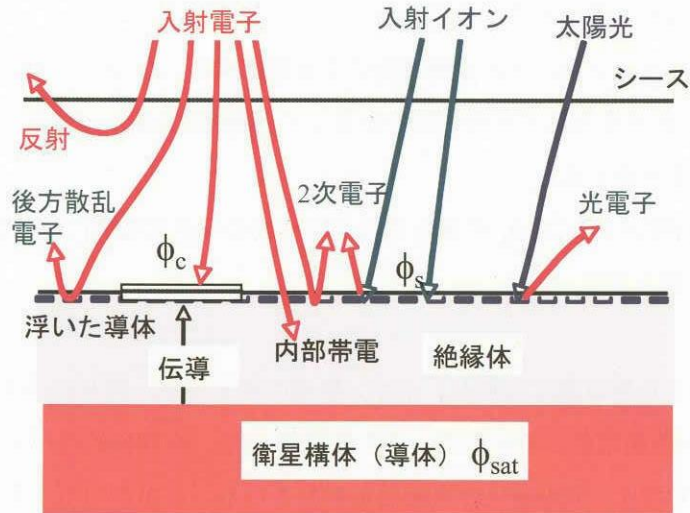


図 2：衛星絶縁体表面の電位の決定に関わる電流

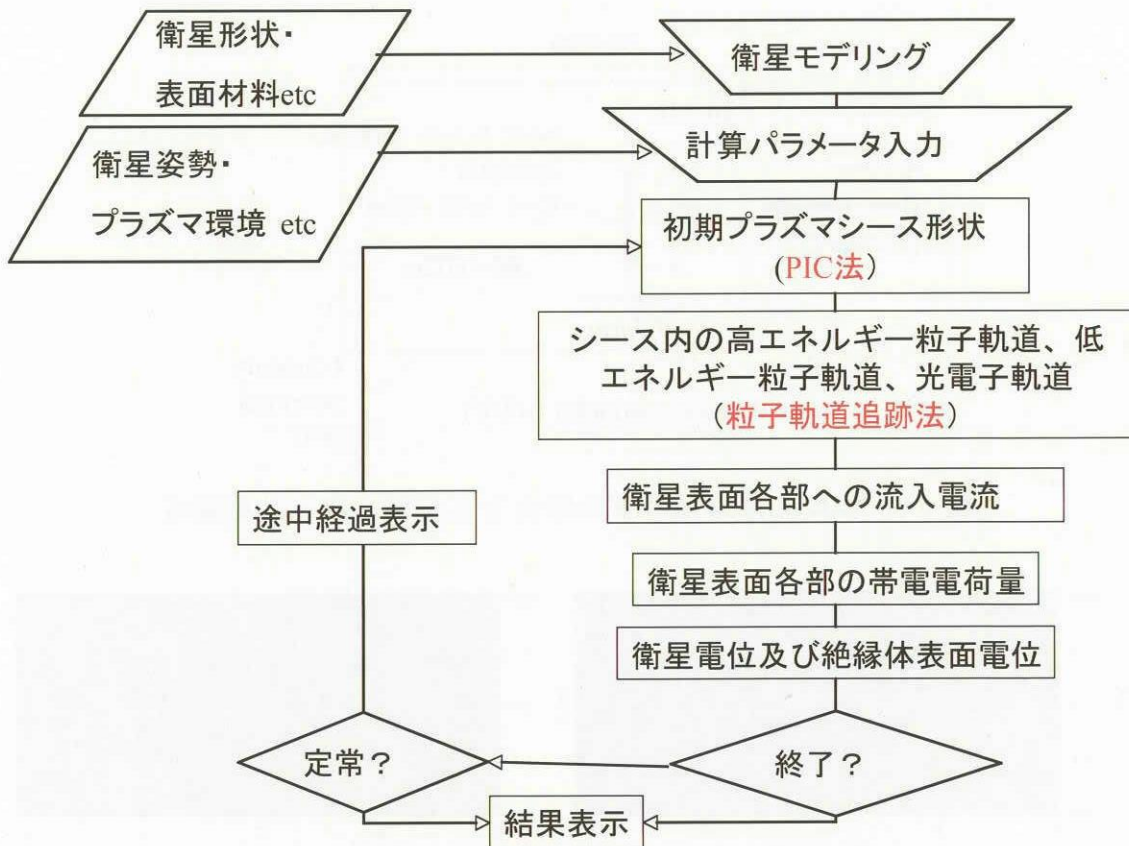


図 3 : MUSCAT のフローチャート



図 4 : ALOS の絵と北極近傍でのプラズマ流れの向き



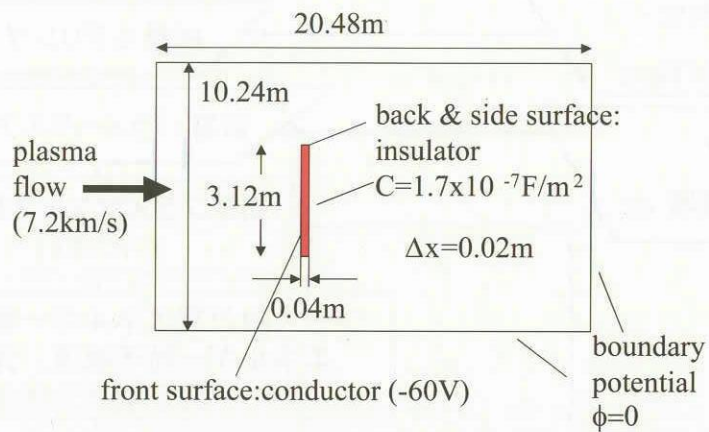


図 5 : ALOS 太陽電池パドル断面を含んだ 2 次元計算領域

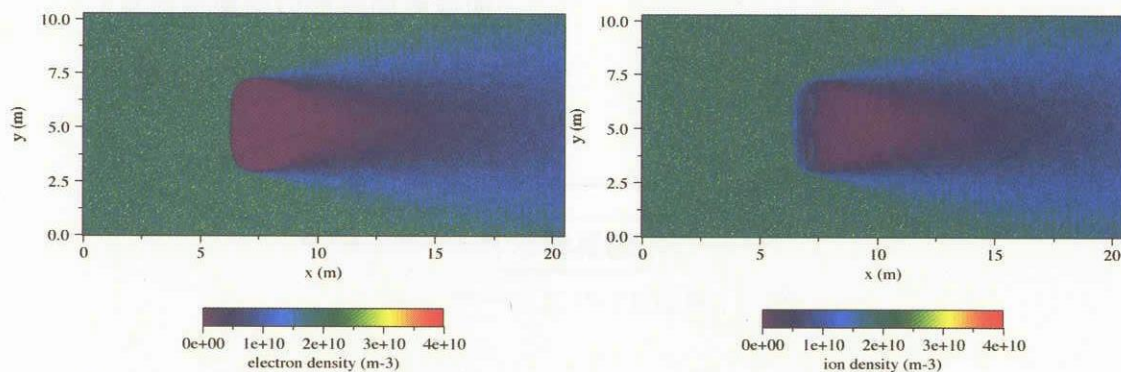


図 6 : 計算の初期状態 (電子密度分布(左)、イオン密度分布(右))

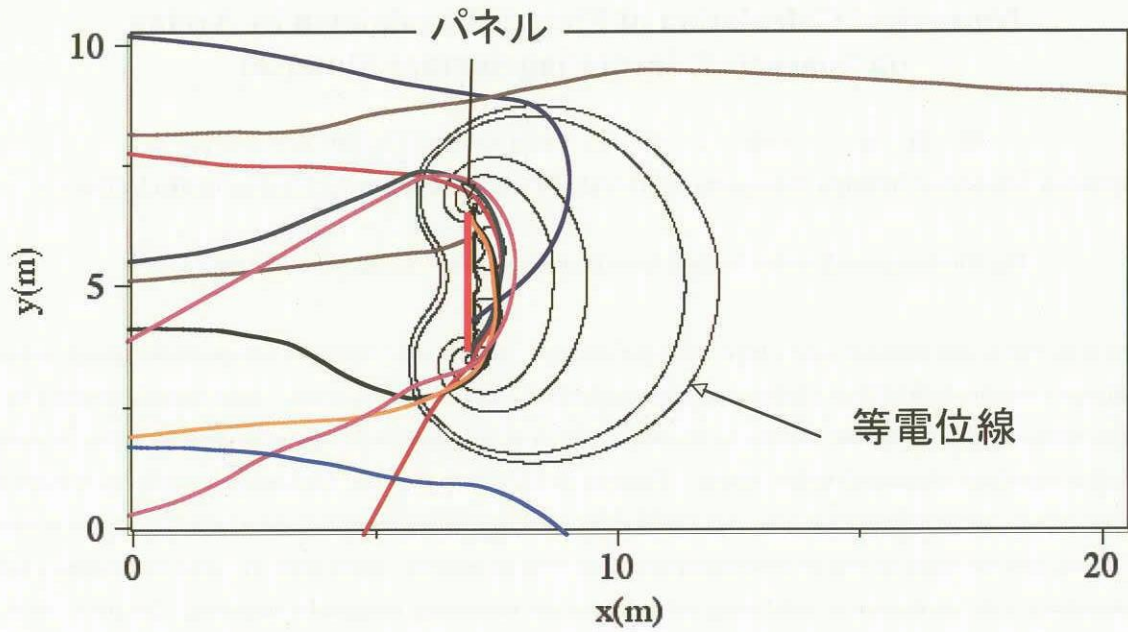


図 7 : 30 秒後のパネル周辺の電位構造とイオン軌道の例

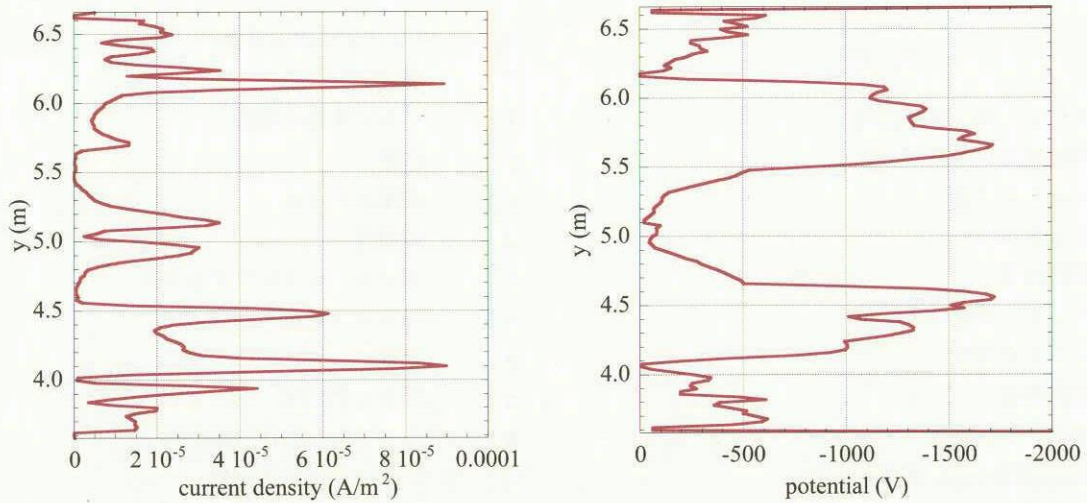


図 8 : 30 秒後のパネル裏面のイオン電流密度分布(左)と電位分布 (右)