

MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool) の 3 次元衛星モデリング開発

○金 正浩、八田 真児、村中 崇信、細田 聡史、趙 孟佑 (九州工業大学)
上田 裕子、古賀 清一、五家 建夫 (JAXA)

Development of 3 D Spacecraft Modeling of MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool)

by

○Jeongho Kim, Sinji Hatta, Takanobu Muranaka, Satoshi Hosoda, and Mengu Cho (KIT)
Hiroko O. Ueda, Kiyokazu Koga, and Tateo Goka (JAXA)

ABSTRACT

The beta version of MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool), the numerical tool for charging-arc analysis of satellite, was released at the end of March, 2006. It contains GUI (Graphical User Interface), solver, parallelization, and validation experiment. We named GUI part as 'Vineyard'. It helps users to process spacecraft modeling and calculation by one-touch menu. It also provides several functions of spacecraft modeling (modeler) on the 3D basis as well. We have developed overall GUI functions with Java, and modeler with Java3D. In order to verify the validity of MUSCAT, some real spacecrafts, such as WINDS (Wideband Inter Networking engineering test and Demonstration Satellite), OICETS (Optical Inter-orbit Communication Engineering Test Satellite), and GOSAT (Greenhouse gases Observation SATellite), are being modeled and calculated. In this paper, we introduce Vineyard as GUI part of MUSCAT, and models of real spacecrafts made by the modeler as well as the calculation result of WINDS satellite model.

1. はじめに

最近数十年間、GEO (Geosynchronous Earth Orbit)、LEO (Low Earth Orbit)及びPEO (Polar Earth Orbit)衛星の電力レベルは、搭載機器の増加に応じて急激に増加してきつつある。しかし、電力の増加に伴い電力システム事故の危険性も高まっている。2003年10月にPEO衛星のみどり2号がオーロラ帯での帯電に起因した放電によって衛星電力の大半を喪失する事故を起こした¹⁾。GEO環境では磁気圏嵐などにより比較的低エネルギーの電子が大量に発生し、これが衛星を大きく負に帯電させる。LEOやPEO環境では、周囲に存在するプラズマが電荷を中和するため、一般的には大きな電位差は生じにくい。しかしPEO衛星では、オーロラ電子などによりしばしば衛星が大きく帯電することが報告されている²⁾。このような背景から、極軌道、低軌道衛星から静止軌道衛星まで、設計段階からの帯電障害のリスク評価、運用中の衛星の不具合解析ツールとして、汎用の衛星帯電解析ソフト(Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool : MUSCAT)の開発が進められている³⁾。MUSCATは2004年11月より開発が始まり、2006年3月にbetaバージョンを発表した。MUSCAT開発は、GUI(Graphical User Interface)、ソルバー、高速化計算そして実証実験から成る。MUSCATのソルバーおよび並列化による高速化計算のコードはFortranで作られており、複雑なパラメータ入力が必要である。また3次元の衛星形状や表面情報を入力するモデラも要求されており、このような作業をユーザに任せるとは手間がかかる。MUSCATではVineyardと名づけられたGUIを開発し、計算パラメータ入力のサポートや3次元衛星モデリングにおいて、ユーザが最適な環境でMUSCATの計算を行えるようになっており、この作業がワンタッチのメニュー形式で簡単に出来るように設計されている。GUIのコード開発はJava2、Java3Dで行われた。現在、Vineyard開発の基本的な内容である材料パラメータ、環境パラメータ、計算パラメータ、3Dモデラはほとんど完成しており、最終バージョンまでにはサーバとの通信機能と計算結果や衛星モデルの変換結果を表示する機能が追加さ

れる予定である。MUSCATの最終版は2007年4月にリリースされる予定である。

本稿では、Vineyardの機能、3次元衛星モデラを用いて作られた衛星モデリングの例と衛星の3次元グリッド表示について紹介する。

2. GUIの概要

2.1 MUSCATでのGUIの役割

GUIはMUSCATを支える主に三つの役割を担っている。

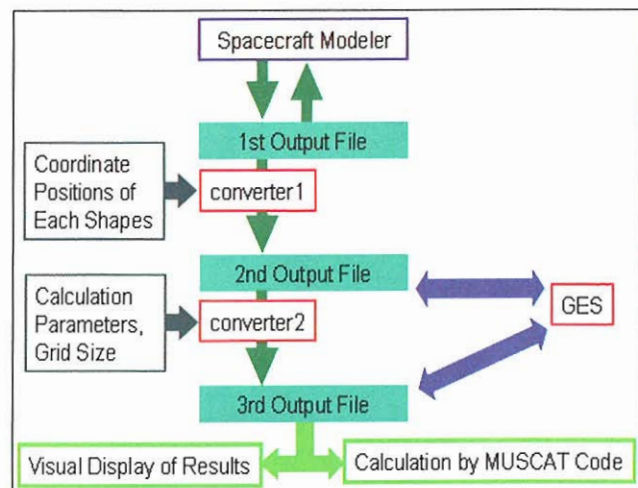


図1 MUSCATの一連の流れ

一つ目は衛星の帯電計算の流れをサポートすることである。MUSCATの計算は図1に示すように複雑な過程を経て行われている。まず衛星モデラのデータファイルはコンバータによりグリッドフォーマットのファイルに変換される。変換されたグリッドファイルは計算パラメータや環境パラメータを組み合わせ更に二次グリッドファイルに変換される。この二次グリッドファイルは'Geospace Environment Simulator (GES)'⁴⁾のフォーマットにも対応でき、最終的に

はソルバーにより取り込まれて計算が行われる。なお、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) における他の衛星計算を容易にするために二次グリッドファイルを XVL 形式へ変換する機能の開発も行われている。このすべての作業は多くの手間がかかり熟練の技術者でも慣れるまで苦勞を避けられない。Vineyard はこういった一連の流れをワンタッチベースの作業で済ませる事を目指して作られている。

二つ目の機能は実際の衛星のモデルを 3 次元で作ることである。図 2 に Vineyard の衛星モデル作成画面の一部を示す。図 2 の右 3 分の 2 を占めるパネル部分がモデラであり、精密な衛星モデルを作る事が出来る。JAVA3D を基本としたパラメータ設定は、用意された任意形状の図形を組み合わせる事で、解析する宇宙機の 3 次元モデルを作図する事が出来る。また同時に、二次電子放出係数、光電子放出係数、キャパシタンス等の計算に必要な衛星モデルの表面物性を面ごとに設定する事が出来る。

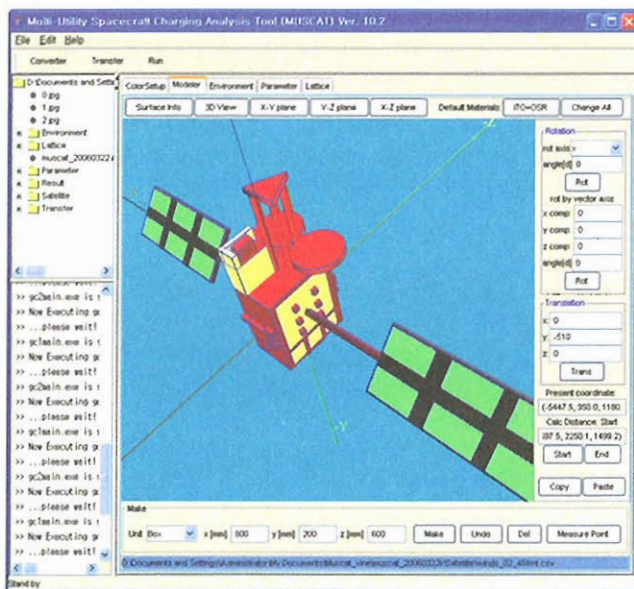


図2 WINDS衛星モデルとVineyardの概観

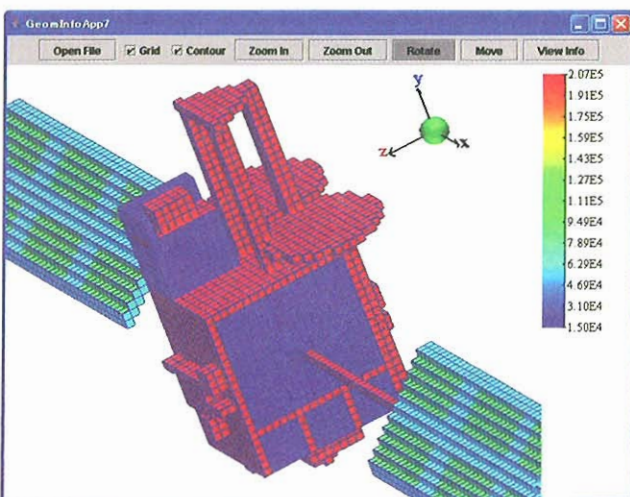


図3 WINDSの3次元グリッド表示

もう一つの機能は図 2 の 3 次元モデラのファイルをグリッドファイルに変換した 3 次元グリッドデータを表示する機能である。この機能は帯電の様子を表す表面電位分布も表示する。しかし、表面電位分布の表示はまだ開発中であり、現段階ではグリッド変換ファイルだけが表示できる。図 3 には WINDS 衛星モデルのグリッド変換ファイルを示

す。グリッド表示機能は矩形グリッドの一つの面が持っている値を色スペクトルの形で示す。色スペクトルは図 3 の右にある凡例に表れるように一番低い値は青色で、一番高い値は赤色で表れる。ユーザはグリッド表示のグリッド線表示の可否を決められる。そして、色スペクトル表示・非表示の選択も可能である。グリッド表示の図形は拡大、縮小、回転、移動が可能であり、面ごとの値を 'View Info' ボタンでチェックする。

2. 2 Vineyard

Vineyard はプロジェクトベースのシステムを採用している。材料、環境、計算パラメータファイルはインストールフォルダから 'New Project' メニューによって生成されたプロジェクトフォルダのサブフォルダにコピーされる。保存された各々のパラメータファイルは Vineyard の GUI によって編集する。図 4 には Vineyard の各パラメータ入力パネルを示す。このパネルらは図 2 に表す Vineyard の右パネルに各々パネルを選択するタブがついており、マウスで各タブをクリックすると右のパネルが切り替える仕組みになっている。

まず、材料パラメータの場合、'ColorSetup' タブのパネルで編集する。材料パラメータは衛星モデラの表面材料を設定するために用意された物である。帯電状況は表面材料の種類によって異なる。一般的に誘電体は導体より二次電子及び光電子放出係数が大きいいため、表面が正に帯電する。材料パラメータの違いは表面の帯電状態に大きく影響するため、煩雑な材料パラメータの管理を要求される。Vineyard ではこの材料パラメータのデフォルトリストを用意しており、3D モデラで新たな物体を追加するとき、リストから一つの材料を選択して衛星モデラの物体表面に適用する仕組みとなっている。また材料パラメータはユーザが必要に応じて新規に追加することも可能である。材料パラメータのリストは材料の名前ごとに整列されるため、ユーザが材料パラメータを追加する際は、材料の名前を重複しないようにする必要があるが、Vineyard では異なる材料パラメータに対して、異なる物体の色を適用しておりユーザの目で材料の区別が出来る。

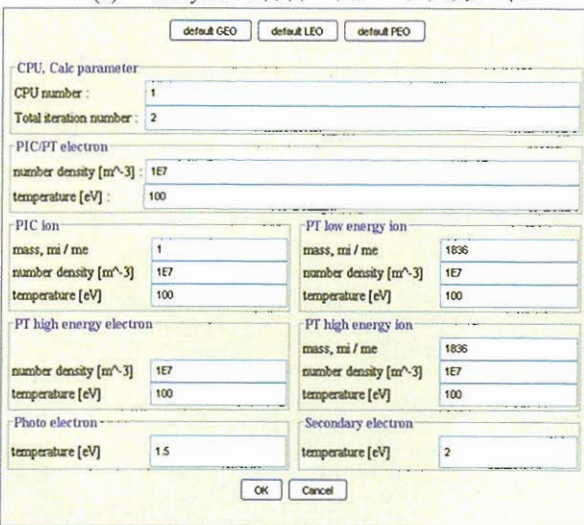
環境パラメータでは宇宙空間にある背景プラズマ電子、陽子、衛星の表面から放出される光電子、二次電子などの Atomic Mass Unit (AMU)、密度、温度などを設定する。Vineyard では PEO, LEO, GEO 環境に相当するデフォルト値が提供されており、ユーザが必要な部分を変更して使える。また計算に必要な CPU の数を記入して CPU の並列化を使うかどうかを選択する。

計算パラメータ設定は磁場ベクトル、太陽光ベクトル、衛星速度ベクトル及び様々な選択オプションを決定する。MUSCAT では計算に Particle-In-Cell (PIC) と Particle Tracking (PT)法を導入している。PIC は安定状態での衛星周りのシースを計算する。PT は表面に突入する電流量を計算し表面電位を更新する。PIC は LEO と PEO のプラズマ環境の計算に大きく関わっている。選択オプションでは、ユーザが PIC を考慮するか、double Maxwellian、光電子放出、二次電子放出、伝道電流などを考慮するかどうかを選択する。

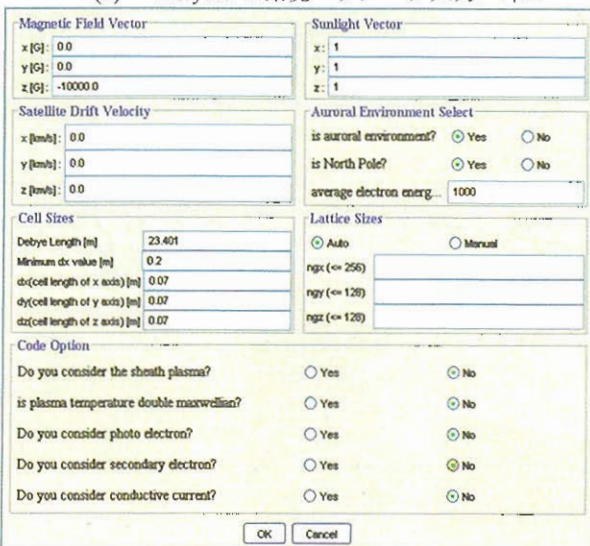
モデリング後、ユーザはコンバータボタンを押してモデルを計算機に引き渡せる形式に変換する。コンバータ機能は二つの実行ファイルを使って行う。コンバータが終わると、3次元の変換結果の表示ファイルと計算に使われるファイルが生成される。そして、計算に使用されるファイルを計算サーバに転送する機能と計算の結果を 3 次元に表示する機能も Vineyard に実装される予定である。



(a) Vineyardの材料パラメータ入力パネル



(b) Vineyardの環境パラメータ入力パネル



(c) Vineyardの計算パラメータ入力パネル

図4 Vineyardの各パラメータ入力パネル

2. 3 3D 衛星モデラ

衛星モデリングソフトウェア (モデラ) の機能は Java3D で開発されている。図 5 にモデラのコード構造を示す。図の中の Muscat は 3D モデリングのメインコードを示す。Arrange コードは箱、円錐、円柱などの基本物体の図形生成の機能を含んでいる。

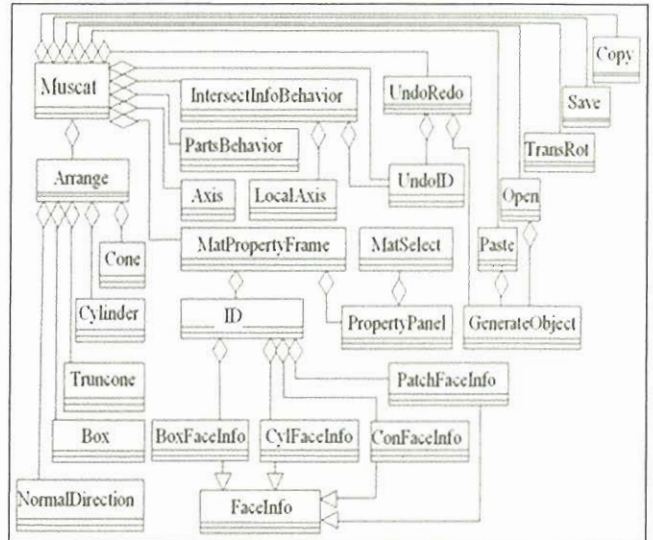


図5 3D モデラのソースコードの構造

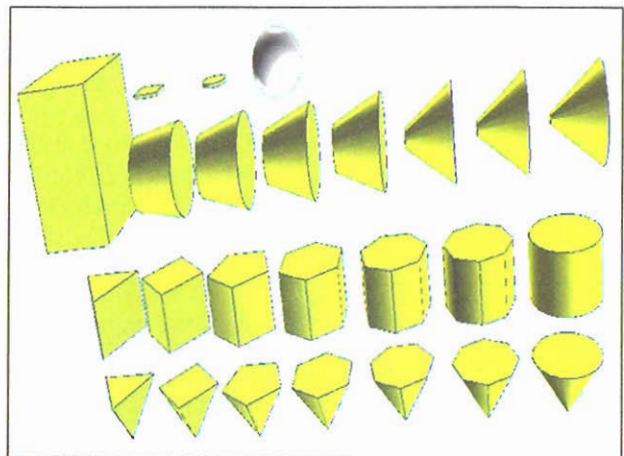


図6 モデラの基本図形一覧

Java3D では、一旦レンダリングが始まると、新たな図形要素を追加することが出来ない。そのために一定の数の図形を最初から作成し、スイッチをオフして図形がレンダリングされないようにする。そして、ユーザが新たな図形 (例えば、箱) の生成ボタンを押すと、一番目の箱のスイッチがオンになり、画面にレンダリングされる仕組みになっている。新たな図形を生成するときは番号が1ずつ増えながら選択された図形をオンにする過程を繰り返す。生成される図形の位置は以前作られた図形表面の任意の場所でマウスをクリックして、図 2 のモデラの下にある Make ボタンを押すと、マウスのクリック地点から垂直方向に新たな図形が組み立てられる。

ID コードは生成された図形の全般的な情報を管理する。それらはトランスフォーム、座標点、図形、材料パラメータ、図形の番号などの情報である。Open と Save はモデラファイルのテキストでの保存と取り込みに関与する。

3D モデラは図 6 に示すように箱、球、円柱、多角柱 (多角は 8 角形まで)、円錐、多角錐、円錐台などの基本図形を提供し、x、y、z 軸それぞれに対する大きさの変更により、いろいろな形の図形を組み立てられる。これらの図形要素に対して移動、回転、ズーム、結合の操作を行う事が出来る。そして、材料パラメータを面ごとに適用させると、色の違いによって材料の種類を判断できる。作図図形の保存と読み込み機能も付属していて、作られたモデルの形状と表面特性をテキストファイルで保存できる。ユーザイン

タフェイスをもっと強化するために Undo 機能とコピー、ペースト機能も組み込まれている。

2. 4 3次元グリッド表示

図 3 に示した 3 次元グリッド表示は図 7 順序図に従って作られている。まず、コンバータによって変換されたグリッドファイルはテキスト形式を持っている。グリッド表示はこのテキスト内容を読み込むことから始まる。読み込んだテキストからは座標点、面の値が配列に保存される。保存される前、Java3D の 3 次元画面表示方法に合わせ、全体の図形が画面に入れるように座標点の値は調節する。また、画面の原点が図形の中心点になるように調節を行う。保存された座標点を用い、Java3D の図形を面ごとに作り出す。Java3D の図形は各々 ID のオブジェクトを持っており、その ID に保存された面の値を与える。そして、表示された Java3D の図形は色スペクトル表示方法に従って面ごとに色を表示する。

計算結果の場合、表面電位の表示方法は 3 次元グリッド表示方法とほぼ同じになっており、データをテキストファイルに書き込む時の書き方が異なるだけであるため、表面電位の表示も図 7 の順序図に従って作る予定である。しかし、空間電位の場合は 2 次元のデータ表示になっているため、別途の順序図が必要である。そして、MUSCAT では 3 次元衛星モデルのある特定の所に測定点をつけて、一次元の表面電位値の時間履歴を x-y 座標にプロットする仕様も含まれているため、一次元プロット機能もつける予定である。このような未完成の機能は 2007 年の MUSCAT 完成版にはつけられる予定である。

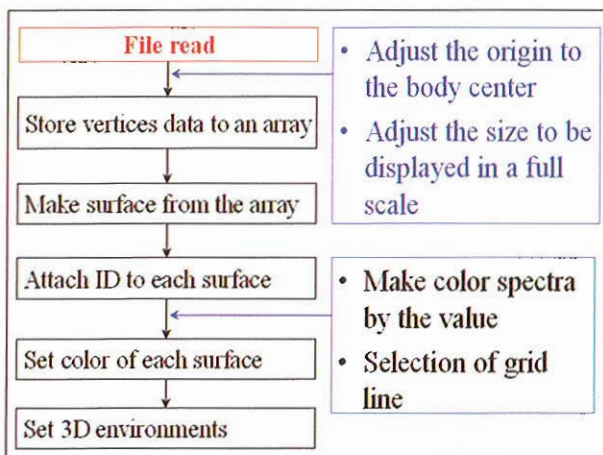


図 7 3次元グリッド表示の順序図

3. Converter および計算

3. 1 コンバータによるグリッドファイルへの変換

3D モデラから生成された衛星モデルはコンバータによって矩形グリッドに変換される。グリッド変換は二つのコンバータファイルによって行われる。一つ目は converter1、二つ目は converter2 と名づけられている。

Converter1 は 3D モデラファイルを用い、中間ファイルを作り出す。3D モデラの各々の図形の座標点、位置などは座標軸変換によって中間ファイルに変換される。

Converter2 は Converter1 が作った中間ファイルを用いて更なる変換を行い、最後の交換ファイルを作り出す。一連の最後の交換ファイルは二つのグループに分けられる。一つのグループは変換グリッドモデルを表示する目的で作られる。もう一つのグループはソルバーに渡され計算に使われる。ここでは図 2 の WINDS 衛星モデルを用い、フルグ

リッドサイズ (128x128x256) に変換したグループ 1 のファイル中一つの 3D イメージを図 8 に示している。図 8 のイメージで分かるようにグリッドは計算速度の向上のために矩形グリッドを使用している。イメージに現れる色分けは材料の種類を表す。

コンバータ 2 はパラメータファイルからセル 1 個の寸法を読み、自動的に適切なグリッドサイズを計算する。フルグリッドサイズ (128x128x256) が必要ない場合は、converter2 が自動的に小さいグリッドサイズを選択する。矩形グリッドの採用は Poisson 方程式を解くのに FFT 法を用いるためである。PIC 法を用いた計算はスーパーコンピュータでも長い計算時間がかかるため⁵⁾、FFT 法を使い計算速度の向上を図る。

図 9 には太陽光ベクターによる影の様子を表すグループ 1 のグリッドファイルを示す。太陽光ベクターは (1, 1, 1) 方向から入射する。太陽光の入射角度は太陽電池パドル両翼のノーマル方向であり、太陽光フラックスはパドル全体に均一な値 (0.58) を与える。そして、本体の右側はパドルと同じ色を表し、太陽光フラックスも同じく 0.58 の値になっている。衛星本体の左側に濃い青の影が映っているのは光がその面に届かないことを示している。この部位は太陽光フラックスの値がゼロであり、完璧に日陰の状態になっていることを示している。

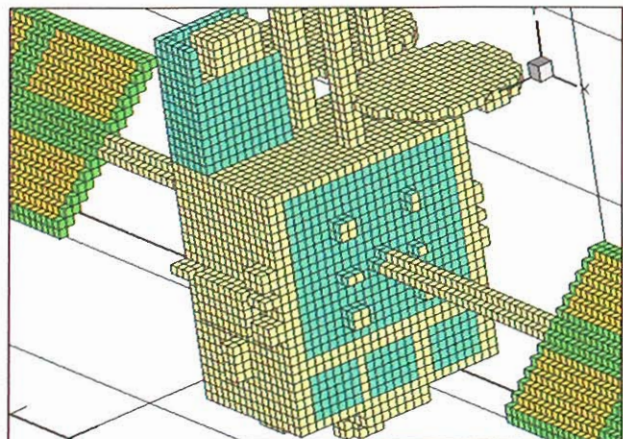


図 8 128x128x256 の矩形グリッドに変換された WINDS 衛星モデル

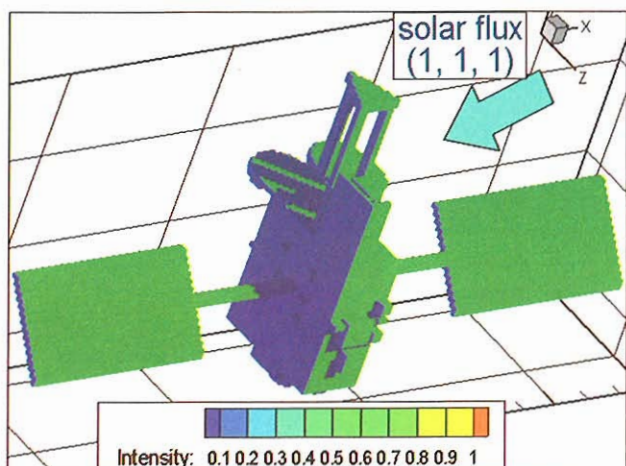


図 9 太陽光フラックス値を示す WINDS モデルのグリッド変換ファイル; 太陽光ベクターは (1, 1, 1)

3. 2 WINDS 計算及びその他の衛星モデル

グリッド変換ファイルのグループ 2 はソルバーに渡される。このファイルらは環境パラメータと計算パラメータを

含んでいる。これらのパラメータは各々の格子点に定義されている。ある格子点が衛星モデルの表面にあるのか中にあるのかは極めて重要な点である。これは帯電現象が衛星内部ではなく、衛星表面で行われるためである。すなわち、表面だけの計算に時間を使い計算時間を短縮する必要がある。MUSCAT では格子点にこの情報も入れ計算時に中をバイパスする仕組みになっている。格子点は他にもキャパシタンスマトリクス、表面及びバルク伝導度、光電子及び二次電子放出係数などの材料パラメータも含む。

ここでは図 9 の WINDS モデルを用いて表面帯電の計算を行った。並列化による計算速度の向上が完了していないため、フルグリッドサイズの 128x128x256 の計算は丸二日間の時間が必要である。

全般的な計算パラメータは次のようになっている。まず、256x64x64 のグリッドサイズで計算が行われた。平均電子密度は 10^7 m^{-3} 、電子温度は 10 keV に設定した。そして、double Maxwellian、光電子放出、二次電子放出、伝導電流などのフルオプションを入れて計算した。選択された環境パラメータの条件は最悪の環境と同等の厳しい条件に設定した。WINDS 衛星は GEO 軌道の衛星であるため、PIC オプションは入れなかった。計算は 1 CPU と 8 CPU の両方で行われた。8 CPU の場合、1 step あたり平均 1 時間かかるため、20 step 全体を完了するには 20 時間がかかった。そして、1 CPU より 8 倍の時間が短縮されたことを確認した。

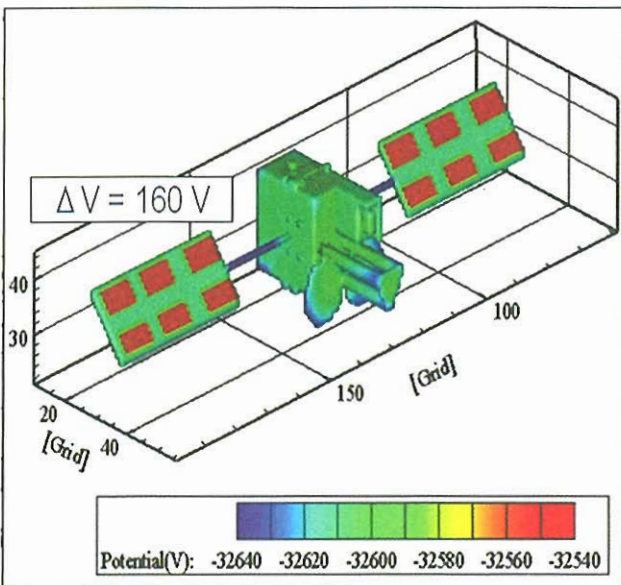
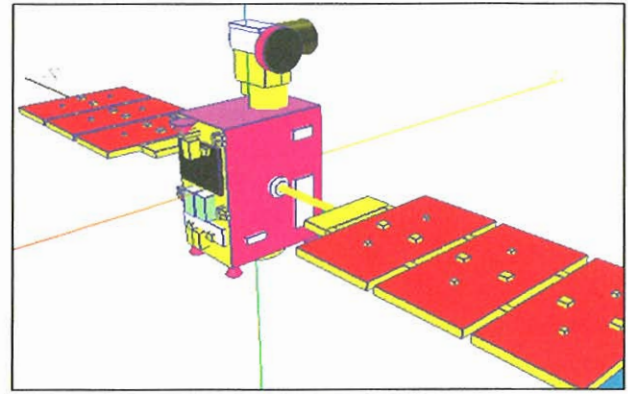


図 10 WINDS モデルの計算結果

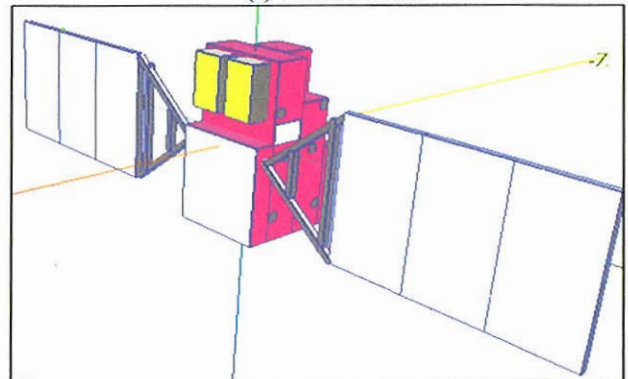
計算結果を図 10 に示す。この図によって、太陽電池のカバーガラスと太陽電池パドルの基板との間は乖離電圧が生じることが分かる。カバーガラスの材料は MgF_2 であり、絶縁材料で反射防止コーティングされている。基板は CFRP の導電性材料である。これらの材料を用い、最悪の GEO 環境条件で、乖離電圧は最大 160 V まで生成される結果になった。

図 8, 9, 10 は商用のソフトウェアを使って表示しており、まだ MUSCAT の GUI では完成していない。この機能については鋭意開発中である。

図 11 にはその他の衛星を 3 次元モデラで具現した物である。表示されているモデルは OICETS と GOSAT である。OICETS モデルは、以前により小さいグリッドサイズで計算されたことがある⁹⁾。GOSAT モデルの計算は現在 JAXA との共同研究で進行している。

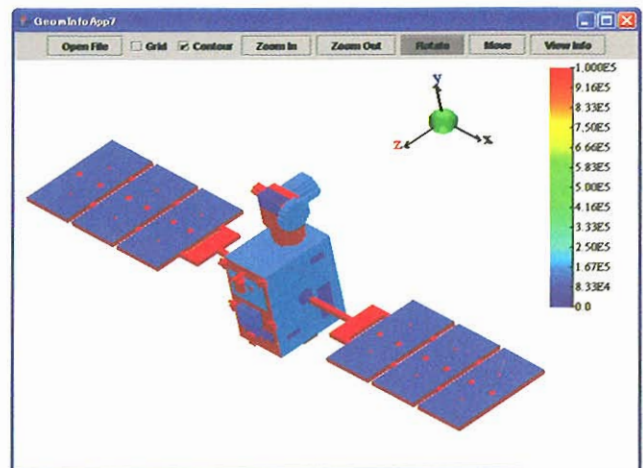


(a) OICETS model

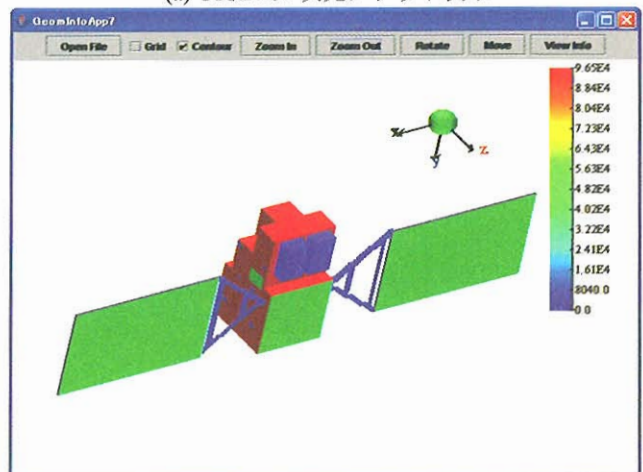


(b) GOSAT model

図 11 その他の実際の衛星のモデリングの例



(a) OICETS3 次元グリッド表示



(b) GOSAT3 次元グリッド表示

図 12 図 11 に示した衛星モデルの 3 次元グリッド表示

4. 結論

MUSCAT は三日間使い方のトレーニングを受けたエンジニアが、およそ半日程度で LEO、PEO、GEO 軌道用の衛星をモデリングし、正確な帯電解析を終えることを目標として開発されている。使いやすさは数値計算ツールとして、新たなキーポイントになっている。本研究では MUSCAT の GUI 機能を開発し、Vineyard と名づけた。そして、実際の衛星のモデルを作り、MUSCAT ソルバーによる検証を行い、計算に便利なユーザインタフェースを提供することを確認した。今後も GUI をさらに改善し続けることとともに、計算結果及びグリッド変換ファイルの表示も可能にすることを目標としている。

参考文献

- 1) S. Kawakita, H. Kusawake, M. Takahashi, H. Maejima, J. Kim, S. Hosoda, M. Cho, K. Toyoda, Y. Nozaki, "Sustained Arc between Primary Power Cables of a Satellite", 2nd International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibition, RI, USA, August, 2004.
- 2) Cooke, D. L., "Simulation of an Auroral Charging Anomaly on the DMSP Satellite", AIAA-98-0385, 36th Aerospace Science Meeting & Exhibit, January 12-15, 1998, Reno, NV.
- 3) Hatta, S., Muranaka, T., Hosoda, S., Kim, J., Cho, M., Ueda, H., Koga, K., Goka, T., "Multi-utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT): development overview", Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf., Tsukuba, Japan, 4-8 April, 2005.
- 4) Usui, H., Omura, Y., Okada, M., Ogino, T., Terada, N., Murata, T., Sugiyama, T., Ueda, H., "Development of Geospace Environment Simulator", Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf., Tsukuba, Japan, 4-8 April, 2005.
- 5) Birdsall, C.K. and Langdon, A.B. . Plasma Physics via Computer Simulation, McGraw-Hill, New York, 1985.
- 6) Hatta, S., Muranaka, T., Hosoda, S., Kim, J., Cho, M., Ueda, H., Koga, K., Goka, T., "Development Status of Multi-utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)", Proc. 56th International Astronautical Congress, Fukuoka, Japan, 17-21 October, 2005.