

「汎用宇宙機帯電解析ツール(MUSCAT)の解析機能の開発」

八田真児, 村中崇信, 細田聡史, 金正浩, 趙孟佑⁽¹⁾, 上田裕子⁽²⁾, 古賀清一⁽³⁾, 五家建夫⁽³⁾

(1) 九州工業大学宇宙環境技術研究センター (LaSEINE)

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1

(2) 宇宙航空研究開発機構 情報・計算工学センター (JEDI)

(3) 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部(IAT) 環境計測グループ

ABSTRACT

MUSCAT は地球低軌道(LEO)、静止軌道(GEO)並びに極軌道(PEO)それぞれの環境に相当する、帯電状態を含む宇宙機-宇宙プラズマ相互作用を解析する計算ツールである。本開発プロジェクトは2004年11月に開始され、2006年3月にβ版がユーザーテストのために公開された。ベータ版では宇宙環境を模擬するために必要な要素の大部分を既に含んでいる。この要素とは、1)高機能なグラフィカル・ユーザー・インターフェース(GUI)、2)各種物理現象を模擬するために必要な数値解析機能、3)高速計算機能、4)検証実験結果およびスーパーコンピュータによる大規模高精度計算結果との相互比較による妥当性の検証である。1)として、MUSCAT ユーザーは GUI を用いて衛星形状と表面材料物性を容易に入力し、解析モデルを作成することが出来る。2)として、MUSCAT は光電子放出、2次電子放出、誘電体表面の導電電流による効果に加え、GEO プラズマのダブル・マクスウェル分布、PEO におけるオーロラ電子電流の効果を解析モデルに含んでいる。3)として MUSCAT は並列ワークステーション上での並列計算機能を実装している。さらに4)として MUSCAT の解析結果は検証実験結果と非常に良好な一致を示した。また、MUSCAT の試験的な運用を Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) に対して行った。この目的の一つは地上試験と平行して現実の詳細な衛星形状を用いて GOSAT の帯電状態を推定することであるが、もう一つの目的は MUSCAT の性能検証である。MUSCAT は2007年3月に完成予定である。

1. INTRODUCTION

JAXA の調査の結果、極軌道の大型衛星である「みどり II 号」の喪失事故原因が、大電力ワイヤ・ハーネスとプラズマ環境の干渉によるものであることが推定され、帯電問題対策が重要な課題として認識されるようになった。[1,2]

帯電による電力システム障害を防ぐには、衛星設計段階において帯電放電問題の定量的な解析が必要である。帯電放電問題を考慮する際の最も重要な要素は、宇宙空間の雰囲気プラズマに対する衛星の電位(衛星電位)と、衛星各部の表面が衛星グラウンドに対して保持する電位(乖離電位)である。

上記の状況を踏まえ、JAXA は極軌道の衛星の帯電状態を計算できる解析ツールの開発を九州工業大学と共同で実施することを決定した。本開発プロジェクトは国立極地研究所(NIPR)、情報通信研究機構(NICT)、京都大学との共同研究でもある。[3] 開発対象の数値解析ツールは「汎用宇宙機帯電解析ツール: Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)」と名づけられた。開発完了後には衛星設計段階における帯電障害発生リスクの推定、宇宙環境の最悪値を採用した解析による、適切な地上試験条件の選定、また実際の衛星に不具合が発生した場合には原因が帯電であるか否かの推定に利用される。

第2回宇宙環境シンポジウムでは著者らは開

発の初期段階における開発の進捗状況について報告した。[4] 本報告では第2回宇宙環境シンポジウム以降の開発進捗状況と、その結果を記す。重要な進捗点を要約すると、1) GUIとソルバーの統合、2) 地上実験による妥当性検証の進展、3) ダブル・マクスウェル分布の再現、オーロラ電流と導電電流の導入、発電に代表されるバイアス電位を保持する面などの重要な物理モデル再現機能の付加、4) ユーザーテストのためのベータ版の公開である。以下により詳しく紹介する。

2. MUSCAT GUI: “Vineyard”の開発

MUSCATのGUIの衛星解析モデル作成機能はJava3Dに依っている。[5] 過去の開発によって物理形状と物理的物性を解析モデルに与えるためのほとんどの機能は開発済みであった。そこで、次の段階である統合解析環境の開発に着手した。衛星モデルの作成機能に加えて、統合解析環境には、衛星モデルからソルバーが利用可能なデータ形式に変換する機能、宇宙環境入力機能、計算パラメータ入力機能、クライアントPC-サーバーワークステーション間でデータを交換する機能、解析結果を可視化する機能などを備える必要がある。この統合解析環境を“Vineyard”と呼ぶ。データファイルの相互関係を図1に示す。“Vineyard”はJavaで開発され、Windows® PC上で動作可能である。装備された4つのデータ入力パネルは表面物性パラメータ作成、衛星モデル作成、宇宙環境入力、数値解析制御の各機能に割り当てられている。図2aには衛星モデル作成パネルの外観を、図2bにはソルバーに転送される計算格子を示す。両図中の色の違いは表面物性の違いを示している。作成された解析データをコンピュータ間で転送する機能は目下開発中である。開発中の現在は商用ソフトウェアで代用して開発に利用している。

3. ソルバー機能の開発

ソルバーのアルゴリズムについては参考文献を

参照されたい。[6,7] 現在はソルバーの主要部分に対して、種々の解析機能を付加している段階である。この付加的な解析機能には新たに、ダブル・マクスウェル分布の背景プラズマ電流、オーロラ電子電流と体積導電率が加えられた。オーロラ電流は単一温度かつ磁場に沿ってドリフトする高エネルギー電子ビームとして取り扱っている。また、GEOにおけるダブル・マクスウェル分布はオプション機能である。これらの

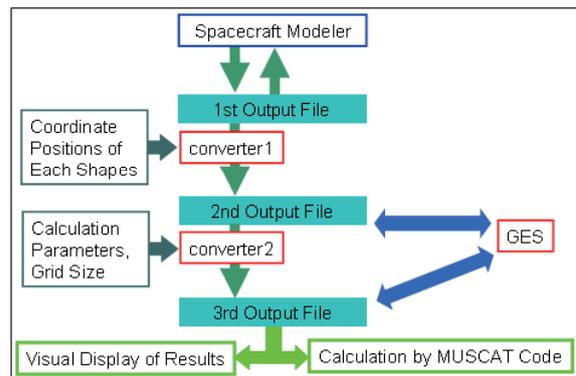


図1 解析データファイルの相互関係

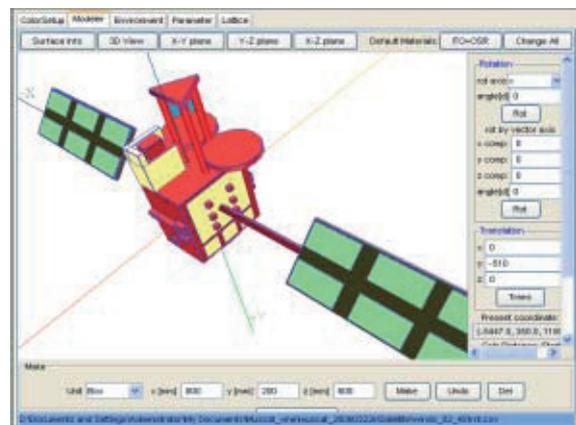


図2a 衛星モデラによって作成されたWINDS

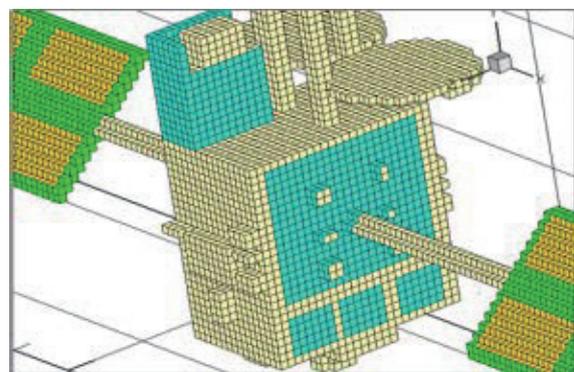


図2b “Vineyard”によって生成された計算格子

機能により、GEO、LEO、PEO の軌道環境を模擬することができる。

上記の他に衛星の電気的特長を模擬する機能が加えられた。一つは太陽電池アレイ面に代表されるバイアス電圧を印加された表面を模擬するための機能、もう一つは衛星グラウンドに接地されていないか、または抵抗を介して接地された部分を模擬する機能である。

また、定性的解析の範囲内ではあるが、実際に軌道投入が予定されている PEO 衛星である GOSAT に対して予備的な解析を行った(図 3a、3b)。これにより改善のための知見が取得され、MUSCAT の開発にフィードバックされた。

4. 実験による妥当性の検証

MUSCAT の妥当性評価のための検証実験は九州工業大学宇宙環境技術研究センター(LaSEINE)に設置された極軌道環境模擬実験装

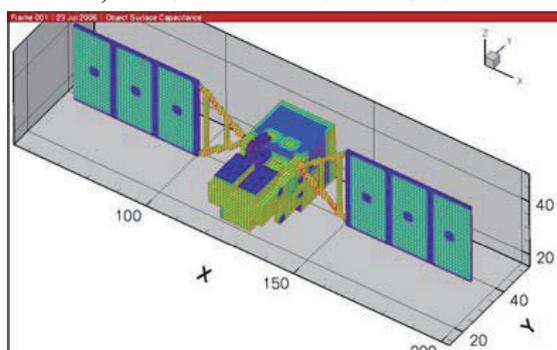


図3a GOSATの計算格子(256x64x64)

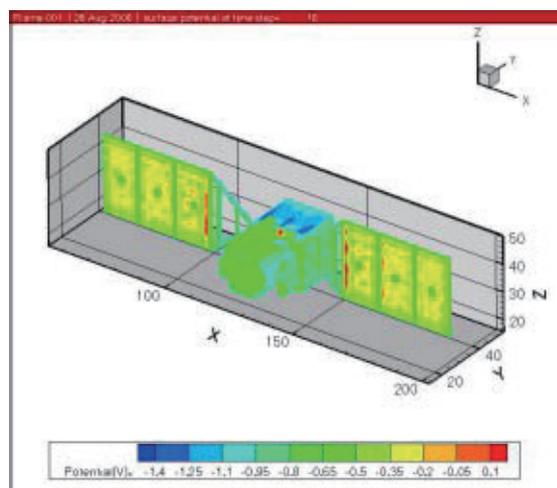


図 3b GOSAT 表面の電位分布

置にて実施された。この装置は通称 PEO チャンバーと呼ばれており、図 4 に示す。このチャンバーでは ECR プラズマ源で生成された密度 $10^{11} \sim 10^{12}/m^3$ の雰囲気プラズマと電子銃から照射される高エネルギー電子ビームを同時に利用可

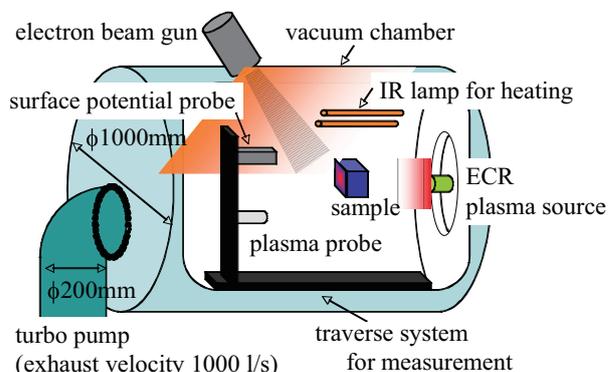


図 4 PEO チャンバー概略図

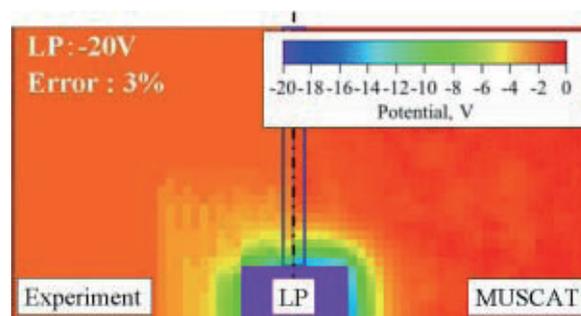


図 5 立方体サンプル周囲の 2次元ポテンシャル分布(検証実験と MUSCAT の解析結果)

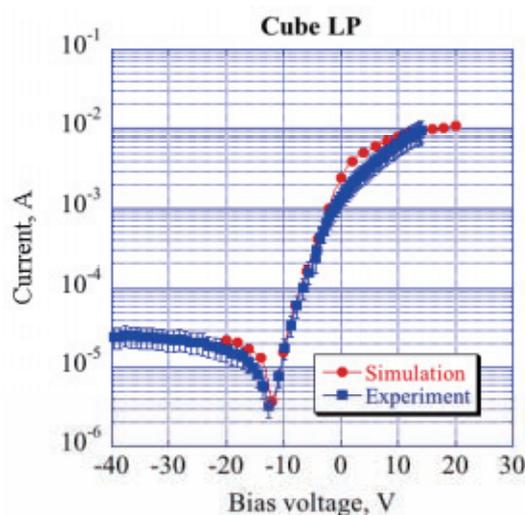


図 6 立方体サンプル収集電流の I-V 曲線 (検証実験と MUSCAT の解析結果)

能であり、これによって極軌道環境を模擬することが可能である。電子ビームのエネルギーは最高 30keV、電流は最大で 300 μ A である。プラズマ診断にはラングミュア・プローブとエミッシブ・プローブを用いた。検証実験の第一段階として、ラングミュア・プローブ自体を導体サンプルとし、周囲のポテンシャル並びに、収集電流の I-V 曲線を取得した。この導体サンプルは立方体形状としたが、これは直交格子系を採用している MUSCAT と相互比較し易いように配慮したものである。一辺の長さはこの環境におけるデバイ長 λ_D が 6mm であることから 10 λ_D に相当する 6cm とした。図 5 には -20V にバイアスしたサンプル周辺の空間ポテンシャル分布を示す。実験結果と MUSCAT による解析結果はポテンシャルの値と分布の両方で非常に良好に一致している。図 6 には I-V 曲線の比較を示す。図中のバイアス電圧の実験値は接地から計測した値から、プラズマのポテンシャルの値を補正した値である。一方、MUSCAT の解析では外部境界条件は 0V のディリクレ条件である。この比較においても双方は非常に良く一致している。

6. 総括

MUSCAT の開発は 2004 年 11 月に JAXA と九州工業大学の共同研究として開始され、ユーザーフィードバックのためのベータ版の公開が 2006 年 3 月になされた。

GUI を備えた統合解析環境“Vineyard”が開発された。“Vineyard”の機能を大別すると衛星モデルを含む 3 次元データの入出力と、GUI 上のデータ形式からソルバーのデータ形式への変換である。

オーロラ電流と導電電流の再現機能が新たに付加された。また、オプションとしてダブル・マクスウェル分布を導入可能となった。これらの機能により、MUSCAT は GEO、LEO、PEO の基本的な環境での解析が可能となった。

九州工業大学に設置された PEO チャンバーを利用して MUSCAT の妥当性の検証実験が実施

された。立方体形状のラングミュア・プローブとエミッシブ・プローブを用いてラングミュア・プローブ周囲の空間電位分布と収集電流の I-V 曲線を取得し、MUSCAT による数値解析結果と比較検討した。この結果、実験結果と数値解析結果は非常に良好に一致し、MUSCAT の解析機能の妥当性が示された。

最終版は 2007 年 3 月に完成の予定である。

REFERENCE

- [1] Nakamura, M., “Space Plasma Environment at the ADEOS-II anomaly,” Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf., Tsukuba, Japan, 4-8 April, 2005.
- [2] Kawakita, S., Kusawake, H., Takahashi, M. et al, “Investigation of Operational anomaly of ADEOS-II Satellite,” Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf., Tsukuba, Japan, 4-8 April, 2005.
- [3] 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.
- [4] 金正浩、八田真児、村中崇伸、細田聡史、趙孟佑、上田裕子、古賀清一、五家建男、「MUSCAT(Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool) の開発状況」、JAXA-SP-05-024、第 2 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集、pp.61~65、2005 年 12 月 12 日、13 日、筑波宇宙センター
- [5] Kim, J., Hatta, S., Muranaka, T., Hosoda, S., Cho, M., Ueda, H., Koga, K. and Goka, T., “Simulation of Spacecraft Charging by Using Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT),” Proceedings of 2005 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp.263-266 Hanyang Univ., Ansan, Korea, Nov.03-04, 2005.
- [6] Birdsall, C.K. and Langdon, A.B, “Plasma Physics via Computer Simulation,” McGraw-Hill, New York, 1985.
- [7] Cho, M. and Hastings, D.E., “Dielectric Charging Processes and Arcing Rates of High Voltage Solar Arrays,” J. Spacecraft and Rockets, Vol. 28, No.6, pp.698-706, 1991.