

帯電解析ソフトウェアの機能拡張作業報告

○ 八田真児, 金正浩 (MUSCAT スペース・エンジニアリング株式会社)
 村中崇信、細田聡史 (JAXA/ISAS)、趙孟佑 (九州工業大学)、古賀清一 (JAXA/ARD)

S. Hatta, J. Kim (MUSCAT Space Engineering Co., Ltd.), T. Muranaka, S. Hosoda (JAXA/ISAS),
 M. Cho (Kyushu Institute of Technology) and K. Koga (JAXA/ARD)

Key Words: Charging, PIC, Particle Tracking

Abstract

MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool) is developed for prediction of arching frequency on spacecraft surface. Several expansion functions such as “auto parametric-run”, “inner charging analysis”, “optional distribution function of auroral electron energy” and etc. are added by JAXA from 2007 to 2009.

1. 目的および背景

MUSCAT(汎用宇宙機帯電解析ツール) は (1) 衛星設計段階における帯電予測、(2) 帯電試験の条件設定、(3) 不具合発生時の帯電検証、を目的として開発された帯電設計支援ソフトウェアである。本ツールは 2004 年 11 月~2007 年 3 月にかけて、九州工業大学、JAXA、京都大学、極地研究所、情報通信研究開発機構、等の協力によって開発された。この開発体制を図 1 に示す。

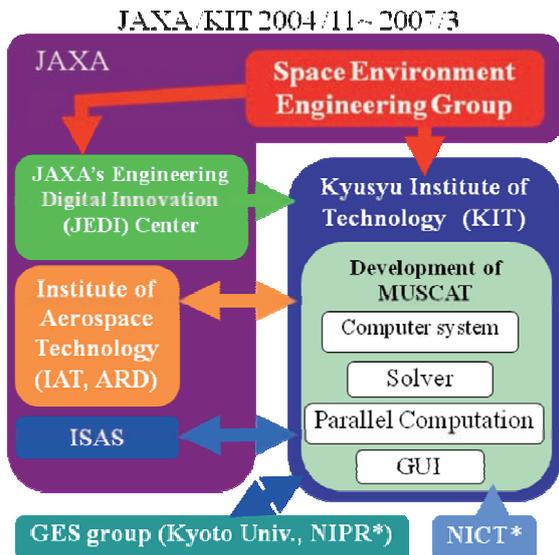


図 1 MUSCAT の開発体制

開発完了より、MUSCAT はソルバーに加えて、3D 衛星モデリング機能、宇宙用材料データベース、解析結果可視化機能、サーバークライアント通信システム、環境データベース等を具備した、解析専門家 [テキストを入力してください]

ではない一般の衛星エンジニアにも容易に利用できるソフトウェアとなった。[1][2]

しかしながら、ソフトウェアはメンテナンス、バージョンアップが必要であり、この作業を本稿の著者らが持続的に実施している。以下では 2007 年 4 月~2010 年 8 月の期間において実施した拡張作業のうち、特に成果が顕著なもの幾つかを報告する。

1.1 ソルバーの概要

MUSCAT のソルバーは Particle Tracking (PT)法によって衛星表面の収集電流を計算し、特に高密度の背景プラズマが存在する低軌道では Particle In Cell (PIC)法によって空間電荷を計算する。いずれも粒子法であり、かつ確率解法である。空間電位の計算には Poisson 方程式を解く必要があるが、これは FFT 法を用いている。[3]

2. 拡張作業内容

これまでの拡張作業の一覧を表 1 に示す。

表 1 2007 年以降の拡張作業 (一部省略)

拡張作業内容	実施年
衛星部品グループ化	2007
環境データベース	2007~2009
パラメトリック・ラン自動集計	2009~2010
単一 OS 動作	2008
中和模擬	2008
内部帯電解析機能	2009
オーロラ電子モデル拡張	2009
表面解像度改善	2010

これらのうち、「パラメトリック・ラン自動集計」、「表面分布解像度の改善」、「オーロラ電子モデル拡張」、「内部帯電解析機能」について報告する。

2.1 データベース拡張とパラメトリック・ラン自動集計

パラメトリック・ラン機能は、大きく2つに分けられる。一つはユーザーが任意の宇宙環境の範囲でパラメータを入力するものであり、もう一つは用意されたデータベースを読み込むものである。データベースから読み込む場合には、個々の宇宙環境に対して、その発生確率が与えられる。MUSCATでは発生確率付きの環境データベースをGEO環境及びPEO環境について整備した。GEO環境のデータベースは3時間ごとの地方時における環境の発生確率の総和を100%としている。環境パラメータは電子温度、電子密度、イオン温度、イオン密度の4種類である。

PEO環境では環境パラメータは背景プラズマ密度、オーロラ電子温度、オーロラ電流密度の3種類である。また、表2に示すように環境を区分している。

表2 PEOデータベースの環境区分

	地域	年	季節変動	磁気地方時
選択区分	北極域	1996(極小)	1月	1.5
			4月	4.5
			7月	7.5
		2000(昼間)	10月	10.5
			1月&7月	13.5
	南極域	2003(極大)	4月&10月	19.5
				22.5
			平均	通年平均
		夜間		

合計で $2 \times 4 \times 7 \times 11 = 616$ 通りの選択が可能であり、それぞれにおいて、発生確率の総和は100%である。実用上は地域を北極域と南極域の2通り、長期変動については年平均、季節変動については通年平均、を選択し、磁気地方時については夜間と昼間の2通り、あるいは全日の1通りとし、合計4通りあるいは2通りの環境でパラメトリックに解析すればよい。

PEOデータベースの元データはDMSP/SSJ4の高度840kmにおけるデータである。そのため、他の高度での背景プラズマ密度を補完する必要があるが、これにはInternational Reference Ionosphere (IRI)が与えるプラズマの高度分布を利用した。すなわち、IRIが与える高度840kmでの密度を ρ_0 、IRIが与える解析対 [テキストを入力してください]

象の衛星の軌道高度での密度を ρ_h とし、本データベースが与えるプラズマ密度を ρ_{DMSP} とすると、パラメトリック・ランの計算中で利用すべきプラズマ密度は、

$$\rho = \rho_{DMSP} \frac{\rho_h}{\rho_0} \quad (1)$$

によって与えられる。

自動集計機能はMUSCATの解析によって得られた放電閾値到達時間と環境発生確率から、軌道上運用時間1秒あたりの放電発生頻度を計算し、集計する機能である。数式で表現するならば、

$$N[1/sec] = \sum_{env.} (P_{env.} / T_{discharge}) \quad (2)$$

ここで $P_{env.}$ は環境の発生確率、 $T_{discharge}$ は放電閾値到達時間である。

従って、このNに軌道上運用時間を掛けることによって、放電回数が予測される。実際のMUSCATの運用上では、MUSCATによる帯電解析時に設定した計算ステップ数以内に放電閾値に到達しないことはしばしば発生する。そのため、自動集計のみでは漏れがあるので、個々の計算結果についてはユーザーの目によって確認する必要がある。

2.2 表面分布解像度の改善

一般的な科学プロットツールでは、面を囲む計算格子点が物理的な値を保持している場合には、グラデーションによって表現することが多い。しかし、MUSCATの開発言語であるJava3Dでは、1つの面要素に対しては1色しか与えることが出来ない。面要素を4分割して計算格子点に対応させれば表示は可能であるが、現在のPCの性能ではメモリ消費量と画像処理能力の観点から困難が生じる。そのため、過去においては四角形の面要素を囲む4格子点の平均値を表示することにどまった。そこで新たに、4分割が必要な部分のみ分割し、それ以外は分割しない表示機能を開発した。これを図3に示す。

旧表示機能では面は4つの格子点に囲まれた部分であるが、新表示機能では、面は格子点に対応している。また、凸部や凹部では4分割した面要素を組み合わせて格子点の値を表現している。

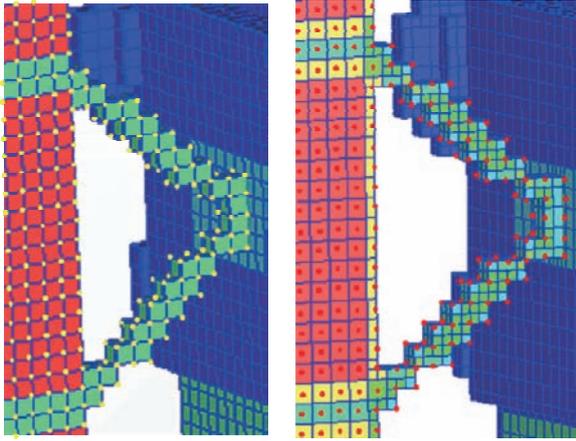


図3 左：旧表示 右：新表示機能

2.3 オーロラ電子モデルの拡張

現実のオーロラ電子分布を解析上有用なモデルとする上で、MUSCAT では磁力線方向のみの Maxwell 分布を採用してきた。すなわち、COS 則に基づいて外部境界から流入するモデルである。2009 年においては、(1) 流入方向は全方向（等方的）及び沿磁力線方向（北極域では磁力線方向、南極域では反磁力線方向）、(2) エネルギーについては Maxwell 分布及びエネルギープロット上で Maxwell 分布が一定量シフトした分布、の 2 種類を設定可能なように拡張作業を実施した。エネルギーを独立変数とした Maxwell 分布のフラックスは、

$$\Gamma = \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} \left(\varepsilon^{\frac{1}{2}} \right) \exp(-\varepsilon) \varepsilon^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \quad (3)$$

ただし、 $\varepsilon = \frac{mv^2}{2kT}$

従って、エネルギー軸上でシフトした分布のフラックスは、シフト量を E_0 とすると、

$$\Gamma = \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} \left((\varepsilon' + \varepsilon_0)^{\frac{1}{2}} \right) \exp(-\varepsilon') \varepsilon'^{\frac{1}{2}} d\varepsilon' \quad (4)$$

ただし $\varepsilon_0 = E_0 / kT$, $\varepsilon' = \varepsilon - \varepsilon_0$,

また、エネルギーの分布関数は、

$$F(\varepsilon') = \frac{(\varepsilon' + \varepsilon_0)^{\frac{1}{2}} \exp(-\varepsilon') \varepsilon'^{\frac{1}{2}}}{\int_0^{\infty} \left((\varepsilon' + \varepsilon_0)^{\frac{1}{2}} \right) \exp(-\varepsilon') \varepsilon'^{\frac{1}{2}} d\varepsilon'} \quad (5)$$

式(5)よりエネルギーを抽出出来るので、超粒子速度を決定出来る。また、粒子の速度ベクトルは COS 則に従う。北極域において磁力線方向に沿った電子の

[テキストを入力してください]

入射を仮定をする場合には、磁界のベクトルとの内積が正の粒子のみを導入し、南極域の反磁力線方向の入射を仮定する場合には、磁界のベクトルとの内積が負の粒子のみを導入する。

2.4 内部帯電解析機能

衛星内部の誘電体は、通常は衛星構体に遮蔽されているため、帯電することはないが、MeV オーダーの高エネルギー電子は構体を貫通することが可能であるため、その一部は誘電体内部に達し、内部帯電を引き起こす。[4]

そこで、2009 年度には新たな試みとして、内部帯電解析機能の開発を開始した。この機能は GUI の衛星モデリング機能の一部のみを従来の MUSCAT と共有するが、それ以外については事実上全くの新規開発ツールである。衛星内部に配置された誘電体の電位の変動を計算することがツール開発の目的であるが、誘電体内部での電荷の変動を厳密に計算する手法を短期間で開発することは困難である。そこで、初期の機能開発に当たっては、誘電体と衛星構体との間に抵抗 R とキャパシティ C を仮定し、誘電体に電荷が蓄積する速度と、誘電体から衛星構体に逃げる漏れ電流のみを考慮するモデルを採用した。従って、衛星の電位によって衛星周囲に生じる電界や誘電体に蓄積した電荷によって衛星内部に生じる電界の影響はモデルに含まれていない。また、誘電体内部の電荷分布に対して Poisson 方程式を解くということもおこなっていない。

高エネルギー電子の入力データには JAXA の SEES (Space Environments & Effects System) の提供する“捕捉電子数フラックス”を利用する。外部境界より入射した電子は空間中では等速直線運動をする。一方、物体内では次の Bethe の式に基づいてエネルギーの減衰を受ける。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{m_0 c^2}{\beta^2} NZ \times$$

$$\left[\ln \left(\frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma - 1} \cdot m_0 c^2}{I} \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left[\frac{(\gamma - 1)^2}{8} + 1 - (2\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right] \right]$$

$$\beta = v/c, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad E = (\gamma - 1)m_0 c^2$$

ここで E はエネルギー、 x は飛程、 N はアボガドロ数、 Z は原子番号、 m_0 は電子質量、 r_0 は電子の半径である。また、散乱は等方的であると仮定している。

3. おわりに

今後の人工衛星の高機能化の方向性は大きく3つに分けられると考えられる。1つは「大型化、多機能化」の流れである。もう一つは「小型化、単能化、編隊化」である。更に科学衛星等の「特異化」である。これらいずれの方向性の高機能化においても、人工衛星の帯電問題は重要であり続ける。これに対応できるよう、今後も MUSCAT の機能拡張を続行する予定である。

直近においては、計算可能領域の拡大と追跡粒子の分布関数モデルの改善を検討している。計算可能空間領域の拡大は、空間電位構造の再現性に問題を引き起こす、衛星ラム前方に発生するバウ・ショックの再現に有効である。また、大幅な帯電が発生すると衛星に到達可能な仮想粒子が減少する場合があるが、これを分布関数モデルの改善によって解決出来ると期待出来る。

本報告の内、2.4 の内容については、九州工業大学先端機能システム工学科の岩田稔助教の指導を頂いた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) Hatta, S., Muranaka, T., Kim, J., Hosoda, S., Ikeda, K., Kurahara, N., Cho, M., Ueda, H.O., Koga, K. and Goka, T., "Accomplishment of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT) and its Future Evolution," IAC-07-C2.I.14, proceedings of 58th International Astronautical Congress, Hyderabad, India, 24-28 Sept. 2007.
- 2) Hosoda, S., Muranaka, T., Kim, J., Hatta, S., Kurahara, N., Cho, M., Ueda, H.O., Koga, K., Goka, T. and Kuninaka, H., "Laboratory Experiments for Code Validation of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)," proceedings of 10th Spacecraft Charging Technology Conf., Biarritz, France, 18-21 June 2007.
- 3) 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.
- 4) Hastings, D. E. and Garrett, H., "Spacecraft-Environment Interactions", Cambridge University Press, 2004, Cambridge.

[テキストを入力してください]