

## 地球シミュレータを用いた宇宙環境シミュレータ開発と MUSCAT とのリンク

臼井 英之 (京都大学 生存圏研究所)、大村善治 (京都大学 生存圏研究所)、岡田 雅樹 (国立極地研究所)、荻野 竜樹 (名古屋大学 太陽地球環境研究所)、村田健史 (愛媛大学 総合情報メディアセンター)、杉山徹 (地球シミュレータセンター)、上田裕子 (宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部)

### 1. まえがき

人類の持続的発展を維持するためには、その生存できる領域を拡大してゆく必要があり、宇宙開発・宇宙利用を進めてゆくことは不可欠である。宇宙は宇宙プラズマと呼ばれる希薄な電離気体で満たされており、この宇宙プラズマ空間中に生起する様々な現象を定量的に理解する上で、宇宙プラズマ計算機シミュレーションは非常に有効な研究手段であることは、これまでの研究実績から明らかである。これまで宇宙プラズマシミュレーションは、衛星観測により発見された様々なプラズマ現象の詳細解析用ツールとして主に用いられてきたが、それを発展させた形で、宇宙開発・宇宙利用に不可欠な飛翔体環境の定量理解とその宇宙技術開発へのフィードバックを行うための工学的かつ実地的な宇宙仮想実験が出来る数値チェンバーである「宇宙環境シミュレータ: Geospace Environment Simulator (GES)」構築を行っている。この試みにより、これまでの宇宙プラズマ物理学の深化のための学術的なシミュレーションから、将来のエネルギー問題の解決策として検討されている宇宙太陽発電衛星等、将来の宇宙利用・技術開発に対して基礎的データを得ることが出来るシミュレーションへの質的変換をはかることを目指している。一方、平成 16 年度 JAXA 先端情報技術研究開発計画において「衛星帯電解析ソフト (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool: MUSCAT)」の開発が開始された。これは、衛星表面形状、素材特性を取り入れ宇宙プラズマ中の衛星表面電位の定常値を求めるものである。MUSCAT では宇宙プラズマダイ

ナミクスを解き進める上で近似的解法を用いることにより、衛星表面電位をできるだけ高速に求めることに主眼点を置く。このため衛星電位が定常値に落ち着くまでの非定常過程における周辺プラズマ応答は必ずしも正確ではない。一方、GES では非常に大規模なシミュレーションを行い、周辺プラズマの非定常応答をできるだけ正確に解き進めることにより最終的に衛星帯電定常値を得ることが出来る。GES を MUSCAT で得られる衛星帯電解の厳密解を与えるレファレンスとして利用し、MUSCAT 開発に貢献する。

### 2. 宇宙環境シミュレータ (GES)

平成 14 年度より、海洋研究開発機の地球シミュレータを使用した「宇宙環境シミュレータ」プロジェクトを開始した。このプロジェクトは、京都大学の村善治教授らを中心として、宇宙プラズマシミュレーション研究者 30 名あまりが参加して進められている (参考文献 1 参照)。

飛翔体環境シミュレーションを担当するプラズマ粒子シミュレーショングループと、主に磁気圏環境を担う MHD グループおよび両者を接続するハイブリッドシミュレーショングループの 3 グループと可視化を行うグループの 4 グループに分担してプロジェクトを進めている。特に、GES の中の静電シミュレーションツールを MUSCAT 検証用に用いる (図 1 参照)。

飛翔体近傍におけるプラズマ電磁環境を再現するためには、プラズマ粒子シミュレーションを行う必要がある (参考文献 2 参照)。プラズマ粒子シミュレーションは、電場および磁場をマ

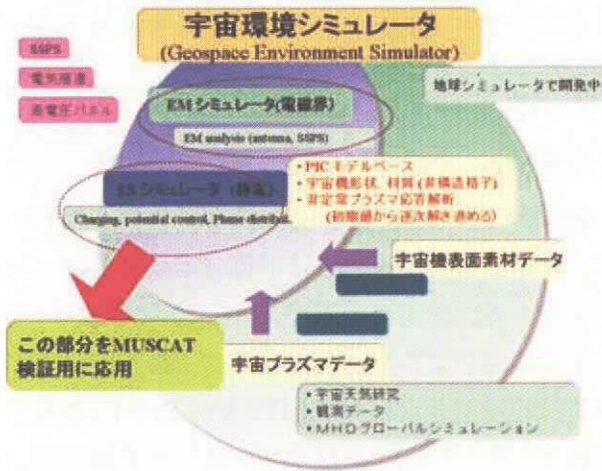


図1 宇宙環境シミュレータ概念図

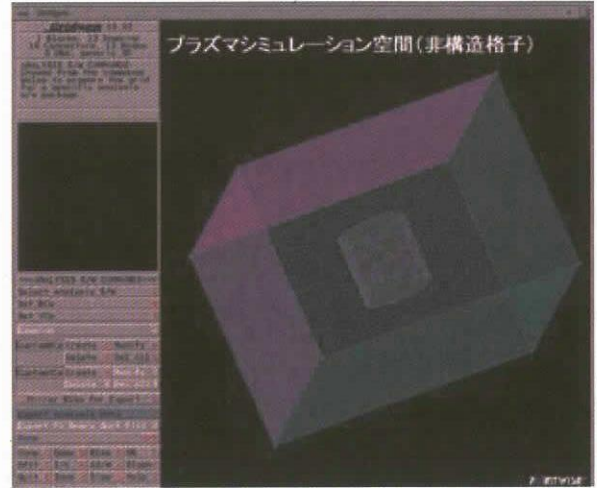


図3 非構造格子を使用した飛翔体近傍のグリッド生成例

ックスウェル方程式に従って解き進める一方、

**シミュレーション手法 (静電モデル)**

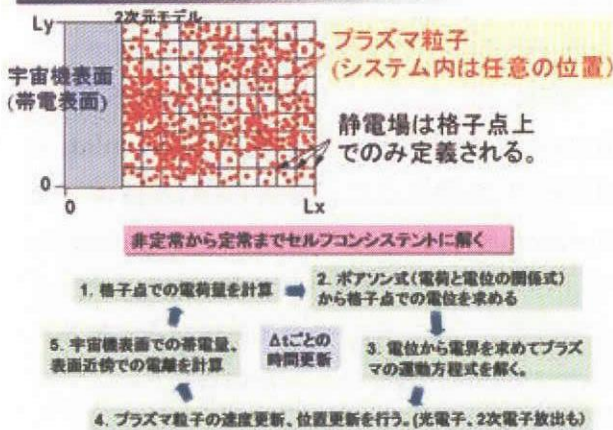


図2 静電シミュレーション手法

プラズマ粒子である電子、イオンをクーロン力とローレンツ力を考慮した運動方程式に従って解き進めるシミュレーション手法である。静電モデルの場合を図2に示す。電磁界を解く代わりに、ポアソン方程式により、電荷密度から各空間格子点における電位を求め、それから得られる電界値を用いてプラズマ粒子運動を解く。

これまで、直交格子によるシミュレーションコードのテストを行ってきたが、現在、4面体要素を基本要素とする非構造格子によるシミュレーションコードの開発を進めている。

図3は、すでに開発されている4面体要素を使った非構造グリッド生成例である。中央に円柱の衛星形状を配置し、周囲の空間を4面体に

表1. MUSCATとGESの特徴比較

項目	MUSCAT	GES
使用プラットフォーム	小規模PCクラスター (4~8CPU、メモリ10GB)	スパコン (メモリ数百GB以上)
メインアルゴリズム	シース計算 流入電子計算 (精度)	PIC PIC ※厳密解
解析アウトプット時間	詳細衛星モデル 簡略衛星モデル (IBNASCAP程度)	半日程度 数分程度
衛星設計解析での使い易さ	Try&Errorが容易で、衛星設計で繰返すフィジビリティスタディに有用	割当CPU時間、メモリ容量に依存するため、利用申請、計画が必要

MUSCATとパラメータ入力用GUIなどを共通化

**宇宙環境シミュレータ開発計画**



図4 GES 開発計画

よって格子生成を行っている。各衛星表面格子点に表面素材パラメータを与え、周囲にプラズマ粒子を分布させてシミュレーションを行うことにより、複雑な形状をもつ衛星表面電位計算、

周辺プラズマ応答について解析することができるようになる。

### 3. MUSCAT とのリンク

表 1 に MUSCAT と GES の性能比較を示す。MUSCAT は衛星設計エンジニアが短時間で衛星表面電位の解析を簡単に行えるようにするための解析ツールであり、利用するハードウェアも小規模の PC クラスタベースを用いる。一方、GES は膨大な数のプラズマ粒子のダイナミクスを近似なく逐次解き進めるため、必要となる計算機資源はスーパーコンピュータレベルとなる。また、たとえスーパーコンピュータを用いてもプラズマ非定常過程を解き進めるため、膨大な演算量が発生すると共に、大容量の数値データが生成される。しかし、MUSCAT と違って、周辺プラズマダイナミクスと衛星近傍電界とはセルフコンシステントに解かれるため、この意味で衛星表面を含むシミュレーション空間での電位分布の厳密解を得ることが可能である。予め決められたモデルで MUSCAT, GES でシミュレーションを行い、互いの結果を比較検討することにより MUSCAT の精度向上に貢献することができる。

また、シミュレーションに必要な入力パラメータは MUSCAT, GES とも共通化できるような工夫を行う必要がある。出力データも互いに可視化が容易に行えるような形式を用意し、比較検討できるようにする。

最後に、図 4 に GES 開発計画を示す。これまで 3 次元電磁粒子シミュレーションコード開発を地球シミュレータを用いて行ってきた。並行して昨年度から、宇宙太陽発電衛星 (SPS) などの大型宇宙建造物の軌道間輸送用イオン推進エンジンからの重イオン放出による宇宙プラズマ電磁擾乱に関するシミュレーションも開始しており、本格的な解析を行いつつある。また、上にも述べた非構造空間格子を用いた衛星近傍環境に関するシミュレーションに取り組んでおり、この静電シミュレーション部を用いて

MUSCAT 開発に貢献する。これらを総合的にまとめた形で GES として実用化する計画である。

### 4. まとめ

2003 年の「みどり 2 号」の事故に見られるように衛星帯電関連の定量把握は衛星設計時に必須である。米国では NASCAP (参考文献 3) がすでに開発実用化されているが、最新版は日本では利用できない。また ESA も SPIS (参考文献 4) という飛翔体-プラズマ相互作用解析ツールが開発中であるが、まだ実用化には程遠い。このような状況において、今回 JAXA が開発を開始した MUSCAT に対する期待は大きい。この MUSCAT 開発を成功させるために GES の静電モデルによって得られる厳密解を役立てる計画である。

2005 年 3 月には、京都において International School of Space Simulation (ISSS-7) が開催され、さらに 4 月には 9th Spacecraft Charging Technology Conference も JAXA において開催される運びとなった。これを好機として、宇宙飛翔体環境研究が進み、宇宙開発利用に資することを期待したい。

### 参考文献

- (1) 大村善治ほか、宇宙環境シミュレータ、  
<http://polaris.isc.nipr.ac.jp/~simulatr/>
- (2) 白井英之、岡田雅樹、宇宙機環境の計算機シミュレーション、日本宇宙航空学会解説記事・52 巻、126 ページ、2004 年 6 月
- (3) NASCAP homepage, NASA Glenn Research Center, Photovoltaic and space environments blanch, <http://powerweb.grc.nasa.gov/pvsee/software/NASCAP.html>
- (4) Spacecraft Plasma Interaction System, ONERA, <http://spis.onecert.fr/spis/index.html>