

## リアルタイム磁気圏シミュレーションデータを用いた 静止軌道プラズマ環境および静止衛星表面帯電の予測

坂田 智、中村 雅夫 (大阪府立大学)、品川 裕之 (情報通信研究機構)、  
藤田 茂 (気象大学校)、田中 高史 (九州大学)

### 概要

情報通信研究機構 (NICT) によって行われているリアルタイム磁気圏シミュレーションの結果と静止衛星の観測値との比較・解析を行った。その結果から得られた静止軌道プラズマ環境および静止衛星表面帯電の予測手法を紹介し、シミュレーションの予測精度の検証について述べる。

### リアルタイム磁気圏シミュレーション

2003 年より、NICT によってリアルタイムな磁気圏シミュレーションが行われている [Den, et al., 2006]。図 1 にそのシステムの概要を示す。ACE (Advanced Composition Explorer) 衛星は、地球から太陽方向に約 150 万 km 離れた太陽と地球の重力が釣り合うラグランジュ第 1 点にあり、太陽風の観測データを地球に送っている。ACE 衛星によって観測された太陽風の磁場、速度、温度、密度を入力パラメータとして、スーパーコンピューター NEC SX-8R の 1 ノードを占有して磁気圏シミュレーションが行われている。太陽風は平均約 400km/s の速度を持っているため、ACE 衛星通過後、約 1 時間で地球磁気圏に到達する。したがって、シミュレーション結果は約 1 時間後の磁気圏の状態を計算していると考えられる。

磁気圏シミュレーションの計算には、3次元の電磁流体 (Magneto-hydrodynamics: MHD) 計算手法が用いられている [Tanaka, et al., 1994]。この計算手法は、イオンと電子からなるプラズマを 1 流体と近似して解く方法で、実質的に、プラズマの質量の大部分を担っているイオンの流体的運動を計算していることになる。しかし、プラズマを流体近似したことにより、プラズマの粒子的性質を取り扱えず、粒子効果による加熱・加速や、内部磁気圏の強磁場領域におけるドリフト運動などが正しく取り扱えない。また、衛星表面帯電には電子が重要なパラメータとなっているが、MHD 計算では実質的にイオンの流体運動を取り扱っているという問題がある。

### 静止軌道プラズマ環境と静止衛星表面帯電

太陽風が乱れると、磁気圏尾部のプラズマシートから高温 (数~数十 keV) のプラズマが静止軌道夜側に注入される突発的な現象 (サブストーム・プラズマ・インジェクションと呼ばれる) が発生することがある。その際、静止軌道夜側に高温の電子が増加するが、衛星表面の電位は電子温度に依存するため、衛星表面は周囲の宇宙空間に対してマイナス数 kV の電位を持つことがある。表面が帯電すると放電を起こすことがあり、その結果衛星

障害が発生する危険性がある。

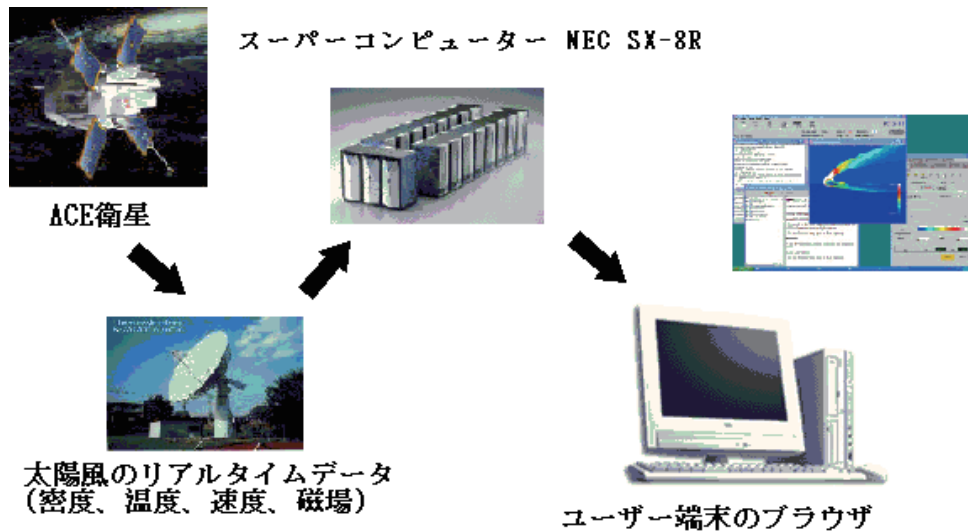


図 1：情報通信研究機構のリアルタイム磁気圏シミュレーションシステムの概要  
(公開 URL: <http://www2.nict.go.jp/y/y223/simulation/realtime/home.html>)

### シミュレーションと観測の比較

シミュレーション結果と観測結果とを比較するため、Los Alamos National Laboratory (LANL) の静止衛星に搭載された Magnetospheric Plasma Analyzer (MPA) の Key Parameter として公開されている、イオン密度 (0.13-45keV/e) と電子密度 (0.03-45keV/q) とそれぞれの温度 (磁場に平行成分と垂直成分の平均値) を 5 分平均した値を用いた。ただし、磁気圏サブストームによるプラズマ・インジェクションに着目しているため、シミュレーション結果のうち静止軌道真夜中位置での値と、磁気地方時 (MLT) 21~3 時の夜側での観測値とを用いて比較した。その結果、イオンの観測とシミュレーション結果は定量的に合致していなかった[中村, et al., 2006, 2008]。次に、電子の観測とシミュレーションとを比較した結果について述べる。図 2 に、2006 年 2 月 15 日のシミュレーション結果と電子の観測結果とを示す。図の圧力に着目すると、シミュレーションの圧力が上昇した約 1 時間後に、観測された電子圧力も上昇しており、シミュレーション結果と観測結果が比較的良く合っていることがわかる。この原因としては、電子はプラズマ・インジェクションの際、磁気圏尾部から流体的な断熱過程による圧力上昇を受けることから、電磁流体計算から得られる圧力上昇と定量的に良く合致したことが考えられる。しかし、密度と温度については定量的な合致は見られず、シミュレーションで得られる密度は、ほとんどの場合観測よりかなり大きな値となっている。そのため、密度を観測頻度が高い  $0.5 \text{ 個/cm}^3$  と仮定して、圧力から再計算して求めた温度と観測で得られた電子温度を比較した。その結果、再計算したシミュレーションの温度は、観測される電子温度の上限値を推定してい

ると考えられることが分かった。また、推定した電子温度の上限値から、衛星のモデル計算等を用いると、乖離電圧と衛星電位の予想最悪値を求めることができる [中村, et al., 2009]。

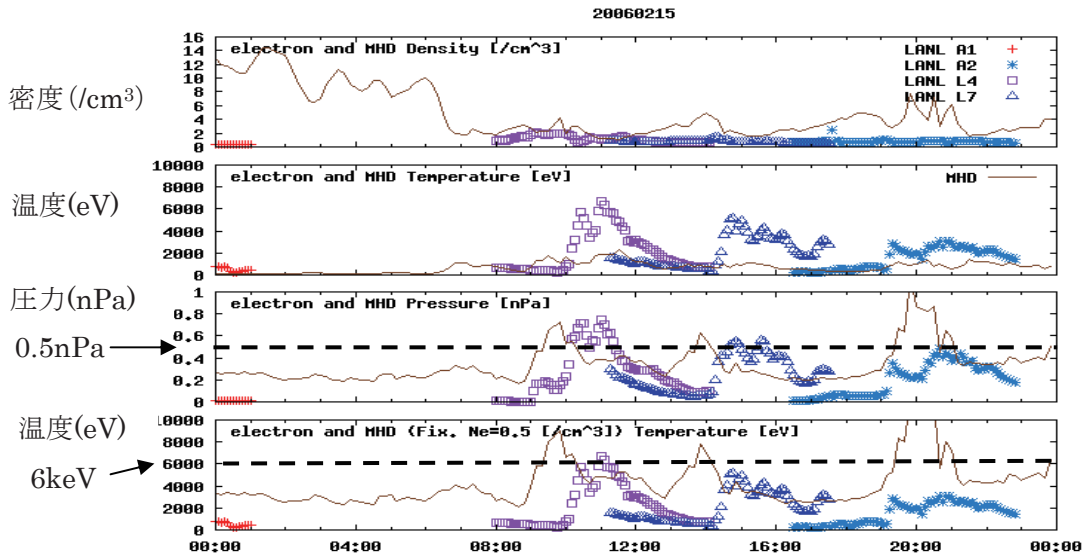


図2：2006年2月15日に4機のLANL静止衛星（A1,A2,L4,L7）が観測した夜側（MLT：21～3時）の、上から電子密度、電子温度、電子圧力の5分平均値に、シミュレーション結果の静止軌道真夜中位置で得られた密度、温度、圧力を重ねて示した。一番下のグラフは、密度を0.5個/cm<sup>3</sup>と仮定してシミュレーション結果の圧力から再計算した温度。シミュレーション結果は、観測に比べ太陽風の到達時間（約1時間）だけ前にずれている。

### シミュレーションの予測精度の検証

2006年1月～4月において、シミュレーション結果が35分～2時間後に観測される電子圧力と電子温度をどの程度予測できているのかを調べた。この時間幅は、太陽風の速度が700km/sの場合、約35分後に太陽風が磁気圏に到達することと、シミュレーションに対する実際の磁気圏の反応が最大で約2時間遅れる場合までを想定して設定した。また、シミュレーションの圧力が0.5nPaのとき、シミュレーションから予想される電子温度の最悪値は約6keVとなる（図2の一番下のグラフ）。静止軌道夜側の電子温度が6keV以上のときに、障害が発生する危険な衛星帯電が生じると考え、0.5nPaと6keVを予測精度の検証を行う際の判断基準とした。つまり、シミュレーションの圧力が0.5nPa以上か以下かによって、危険な衛星帯電の可能性を判断した。

そこで、以下の4つの条件の下で、その条件を満たすシミュレーションのデータ数を計算し、シミュレーションの予測精度を検証した。①ある時刻のシミュレーションの圧力が0.5nPa以上で、かつその35分～2時間後に電子圧力も0.5nPa以上となる場合 ②ある時刻のシミュレーションの圧力が0.5nPa以上で、かつその35分～2時間後に電子温度が

6keV 以上となる場合 ③ある時刻のシミュレーションの圧力が 0.5nPa 以下であるが、その 35 分～2 時間後に電子圧力が 0.5nPa 以上となる場合 ④ある時刻のシミュレーションの圧力が 0.5nPa 以下であるが、その 35 分～2 時間後に電子温度が 6keV 以上となる場合 この計算で得られた結果を表 1 に示す。

表 1：ある時刻のシミュレーションの圧力が 0.5nPa 以上または以下の場合に、その 35 分～2 時間後に観測された 0.5nPa 以上の電子圧力と 6keV 以上の電子温度のデータ数とその割合

	電子圧力 $\geq 0.5\text{nPa}$	電子温度 $\geq 6\text{keV}$
シミュレーションの 圧力 $\geq 0.5\text{nPa}$ (全体の約 14%) (データ数 17677)	① 割合：約 24.4% (全体の約 3.5%) (データ数 4315)	② 割合：約 4.47% (全体の約 0.6%) (データ数 791)
シミュレーションの 圧力 $\leq 0.5\text{nPa}$ (全体の約 86%) (データ数 105493)	③ 割合：約 3.81% (全体の約 3.3%) (データ数 4016)	④ 割合：約 0.3% (全体の約 0.3%) (データ数 316)

### まとめ

予測が正しかった場合、つまり、シミュレーションの圧力が 0.5nPa 以上でかつその 35 分～2 時間後に電子の圧力も 0.5nPa 以上であった割合は全体の約 3.5%であり、シミュレーションの圧力が 0.5nPa 以下でかつその 35 分～2 時間後に電子の圧力も 0.5nPa 以下であった割合は全体の約 83%であった。従って、これらの割合を足し合わせた約 86%がシミュレーションの予測精度となる。また、電子圧力の上昇 (0.5nPa 以上) のみの予測精度は約 24%であり、そのうち、電子温度上昇 (6keV 以上) の予測精度は約 4.5%であった。

### 今後の課題

さらに予測精度の検証を進める上で、以下の 2 つの課題に取り組む必要がある。1 つ目は、MLT21～3 時の観測値を比較対象としたことである。電子は静止軌道夜側から朝側にドリフトするため、例えば MLT23～5 時頃までの観測値を比較対象とすることで、より適切にシミュレーションの予測精度の検証を行うことができると考えられる。2 つ目は、比較した期間が 4 ヶ月と短期間なことである。より長期間のデータを用いた比較を行うことで、太陽活動や季節変化を考慮した解析が可能になる。

### 参考文献

- Den, M. et al.; “Real-Time Earth’s Magnetosphere Simulator with 3-Dimensional MHD

Code”, *Space Weather*, 4, S06004, doi:10.1029/2004SW000100, 2006

・ Tanaka, T.; “Finite Volume TVD Scheme on an unstructured Grid System for Three-Dimensional MHD Simulations of Inhomogeneous Systems Including Strong Background Potential Fields”, *J. Geophys. Res.*, 111, 381, 1994.

・ 中村 雅夫、他、「磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道プラズマ環境予報」、第3回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集、JAXA-SP-06-035、2006

・ 中村 雅夫、他、「磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道衛環境予測：観測との統計解析」、第5回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集、JAXA-SP-08-018、2008

・ 中村 雅夫、他、「リアルタイム磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道衛星表面帯電予測」、第6回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集、JAXA-SP-09-006、2009