

## 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

中村 雅夫 (大阪府立大学)、島津 浩哲、小原 隆博 (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) のリアルタイム磁気圏シミュレーションから得られる静止軌道のプラズマ環境と衛星観測との比較解析をおこない、静止軌道プラズマ環境予報とそれに関連する衛星帯電予報についても述べる。

### はじめに

情報通信研究機構では、3次元の電磁流体 (Magneto-hydrodynamics: MHD) 計算手法を用いてリアルタイムで磁気圏シミュレーションがおこなわれている。そのシステムの概要を図1に示す。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引力がつりあうラグランジュ第1点にあり、太陽風の観測データを地球にリアルタイムに送っている。ACE衛星から送られた太陽風の密度、温度、速度、磁場を逐次入力パラメーターとして、スーパーコンピューターNEC SX-6の1ノード (8CPU, 64GFLOPS, 64Gbyte) を占有して、磁気圏シミュレーションがおこなわれている。太陽風は平均すると約400km/sの速度を持ち、ACE衛星の位置を通過した太陽風は、約1時間後に地球磁気圏に到達する。したがって、計算結果は、約1時間後の磁気圏の状態を予報していることになる。この計算結果は、リアルタイムにインターネット上に公開されている。 (<http://www2.nict.go.jp/y/y223/simulation/realtime/>)

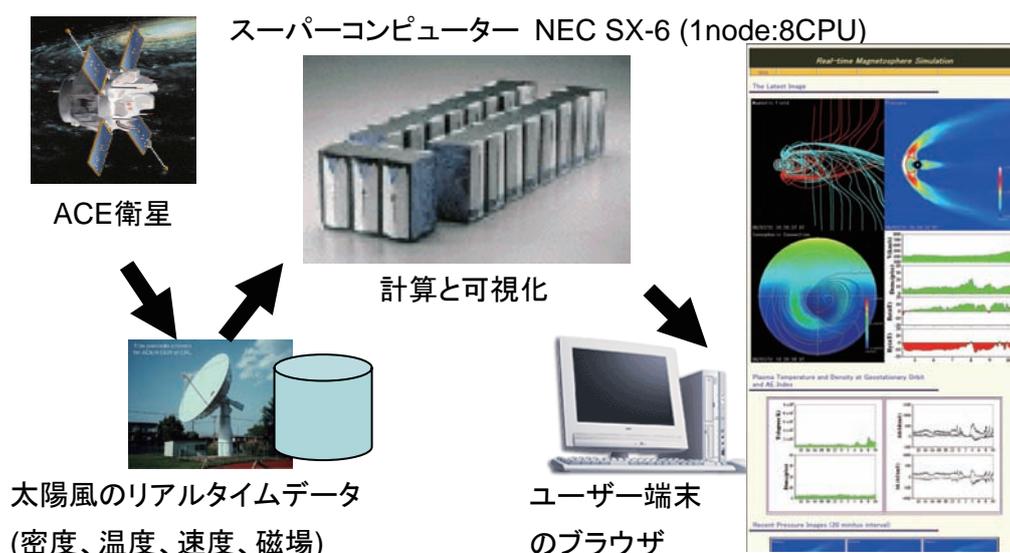


図1：情報通信研究機構のリアルタイム磁気圏シミュレーションシステムの概要

## 静止軌道プラズマ環境

静止軌道の夜側は、地球の双極子磁場が支配する内部磁気圏と太陽風の変化によりダイナミックに変動する磁気圏尾部との境界領域に位置している。そのため、衛星障害の原因となり得るプラズマ環境として、(1) 内部磁気圏の双極子磁場に補足された放射線帯外帯の外側境界領域の高エネルギー電子 (>数百 keV) の存在、(2) 磁気圏尾部からの中エネルギー(数~数十 keV)電子の侵入、(3) 銀河放射線や太陽高エネルギーイオンの到来があげられる。(1) は衛星表面素材を通過して衛星内部帯電や放射線劣化を、(2) は表面素材や衛星構体に電荷を与え衛星表面帯電を、(3) は半導体素子でシングルイオン・イベント・アップセットなどを引き起こす。本研究では、(2) に着目して研究をおこなう。磁気圏尾部からの静止軌道への中エネルギー電子が侵入は、中エネルギーイオンの侵入も伴い、地磁気擾乱を引き起こし、地上でオーロラ・ブレイクアップがしばしば観測されるため、サブストーム・プラズマ・インジェクションとも呼ばれる。ただし、次に述べるようにイオンの衛星帯電への影響はあまり大きくない。地球の真夜中側から地球の双極子磁場領域に侵入した電子は朝側へ、イオンは夕方側へとドリフト運動する。これは、静止軌道のプラズマ観測結果や表面帯電の発生場所が主として真夜中から朝側にかけて分布することに合致する。

## 衛星表面帯電

衛星構体の周辺プラズマに対するキャパシタンスは数~数十 pF 程度で、わずかな電荷が蓄積することで容易に帯電する。周辺プラズマから衛星への電流収支を考えたとき、電子は、イオンに比べて約 1800 倍軽く、同じ温度なら熱速度が約 40 倍も速いので、電流収支に大きな影響がある。つまり、電子はイオンに比べて衛星電位を決めるのに重要な役割を果たす。また日照では、光電子放出による数 eV の電子の放出も無視できないほど大きい(例: アルミでは数十  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ )。静止軌道では、通常、プラズマ密度・温度ともそれほど大きくなく、日照側面の光電子放出の影響で、衛星電位は±数十 V の範囲で、電流収支がゼロの定常状態にある。一方、日陰では、光電子放出がないため、電子温度のオーダーまで負に帯電する。しかし、プラズマ・インジェクションで中エネルギー電子が増加すると、周辺プラズマからの電子電流が増大し、日照でも衛星が負電荷を蓄積するため、数 kV まで衛星電位が低下する。その結果、放電が起こる可能性が高くなり、衛星障害が起こる危険性がある。

## 計算手法と計算結果

磁気圏シミュレーションでは、変形 3 次元極座標格子を用いた電磁流体計算手法が用いられている。この計算法は、イオンと電子から成るプラズマを 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効率よく計算することができる。しかし、ここで 2 つの問題がある。1 つは、プラズマを流体近似した

ため、プラズマの粒子的性質を十分に取り扱いえず、粒子効果が効く加熱・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こと。もう一つは、静止軌道プラズマ環境として中エネルギー電子に着目しているのに、実質的にイオン流体運動を取り扱っているということである。これらの点を念頭に置き、計算結果と観測との比較結果を見ていく必要がある。

図2に、2006年2月15日09:28UTの計算結果を示す。磁気圏尾部に、磁力線のループ構造に囲まれたプラズマの圧力が高い領域がある。これはプラズモイドと呼ばれ、磁気圏尾部方向に放出される。プラズモイドの発生と同時に、反対（地球）方向の流れが生じ、内部磁気圏領域のプラズマ圧を上昇させる。これは、サブストーム・プラズマ・インジェクションに相当し、計算結果がサブストームの発生を定性的に再現していることを示している。

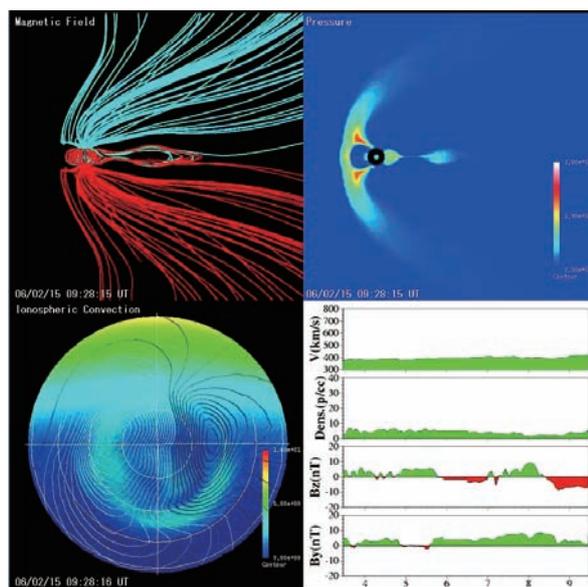


図2：2006年2月15日09:28UTの計算結果。磁力線（左上）、子午面内のプラズマ圧力分布（右上）、極域電離層の等電位線と電気伝導度分布（左下）、計算に用いた直前6時間の太陽風データ（右下）。

### 観測との比較

計算結果と観測とを比較するため、Los Alamos National Laboratory (LANL)の静止軌道衛星搭載の Magnetospheric Plasma Analyzer (MPA)の Key Parameter として公開されている、イオン密度(0.13-45 keV/e)と電子密度(0.03-45 keV/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）とを用いた。図3に、2006年2月15日の計算結果と観測データを示す。ただし、夜側のプラズマ・インジェクションに着目しているため、磁気地方時 (MLT)で 21~3 時の観測結果のみ示した。この日は、観測でも計算結果でも、プラズマ・インジェクションによる、静止軌道での圧力上昇が3回見られた。ACE 衛星位置での太陽風が地球に到達するのに約1時間かかることを考慮すると、計算結果は、プラズマ・インジェクションの発生タイミングを定性的に再現していることがわかる。しかし、定量的に見ていくと、観測されたイオンの圧力や温度は、シミュレーションの値より十倍近く大きい。一方、密度は計算結果が、観測より大きく変動している。つまり、計算結果とイオンの観測と比べた場合、密度・温度・圧力とも定量的に合致しない。これは、磁気圏尾部のプラズマシートにおけるイオンの粒子的非断熱加熱が、計算では取り入れられていないためと考えられる。実際、地球近傍の磁気圏尾部のプラズマシートでは、イオンの温度は、

電子に対して十倍程度高く、静止軌道の観測結果も、ほぼその結果を反映している。しかし、電子の圧力変動に着目すると、計算結果と観測が定量的に良く合っていることがわかる。このことは、次のような理由によるものと考えられる。電子は、質量が小さいため、磁気圏尾部で粒子的非断熱加熱が効かない。そして、プラズマ・インジェクションのときには、流体的な断熱過程による圧力上昇を受けると考えられる。そのため、電磁流体計算から得られる圧力変動と定量的に良く合致すると考えられる。しかし、プラズマ・インジェクション直前のプラズマシートの密度には、イオンの粒子的加熱が取り入れられていないため、大きな不確かさがあり、密度と温度については定量的な合致は見られない。衛星帯電の電位を正確に予報するためには、電子の密度と温度を知ることが必要で、これらを予測すること今後の研究課題である。

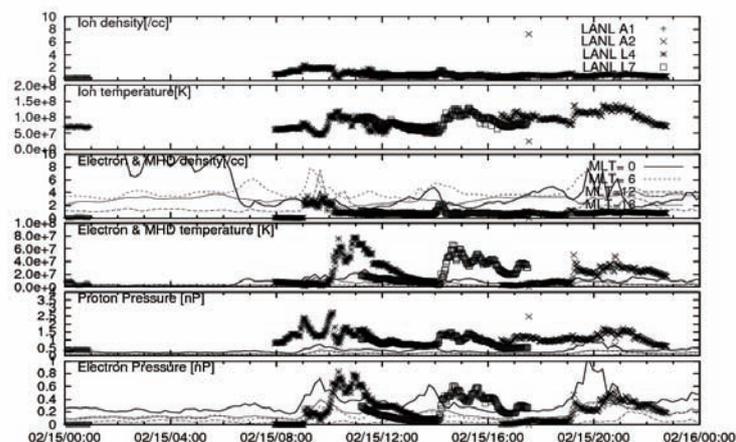


図3：2006年2月15日に4機のLANL静止衛星（A2,A1,L4,L7）が観測した夜側（MLT：21時～3時）の、イオン密度・温度、電子密度・温度、イオンと電子の圧力のグラフ。グラフ中にシミュレーションの静止軌道上(MLT=0,6,12,18)で得られた結果を重ねて示した。計算結果は観測に比べ太陽風の到達時間（約1時間）だけ前にシフトしている。

## まとめ

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を用いた、静止軌道へのサブストーム・プラズマ・インジェクションによる電子圧力変動の約1時間前予報の可能性を示した。この電子圧力上昇は、衛星表面帯電と直接関係があるため、衛星帯電予報として活用できる。今後、シミュレーションの予報精度向上や電子圧力に対して密度と温度を求める方法などの研究をさらに進める必要がある。

## 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.