

磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道環境予測：観測との統計解析

中村 雅夫、坂田 智 (大阪府立大学)、島津 浩哲、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)

**Statistical analysis for GEO plasma environment prediction using real-time
magnetosphere simulation and observation**

M. S. Nakamura, T. Sakata, H. Shimazua, H. Shinagawa, S. Fujita, T. Tanaka

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・統計解析をおこない、静止軌道プラズマ環境と衛星帯電予測についても述べる。

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-NEC SX-6 (現在はSX-8Rに更新) の1ノードを占有して、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測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/home.html>)

静止軌道プラズマ環境と衛星表面帯電

静止軌道のプラズマ環境は、太陽風の変化による磁気圏の擾乱にともない大きく変化する。特に、衛星障害の原因となるプラズマ環境の1つとして、磁気圏尾部からの数~数十 keV の電子の侵入があげられる。衛星周辺プラズマから衛星への電流収支を考えた場合、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、イオンに比べて電流収支への影響が大きく、衛星電位を決めるのに重要な役割を果たしている。つまり、数~数十 keV の電子が増加すると、周辺プラズマからの電子電流が増大し、時としてマイナス数 kV まで衛星電位を低下させる。その結果、放電が起こる可能性が高まり、衛星障害が起こる危険性がある。一般に、静止軌道への数~数十 keV の電子の侵入は、地磁気擾乱に伴っておこり、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。

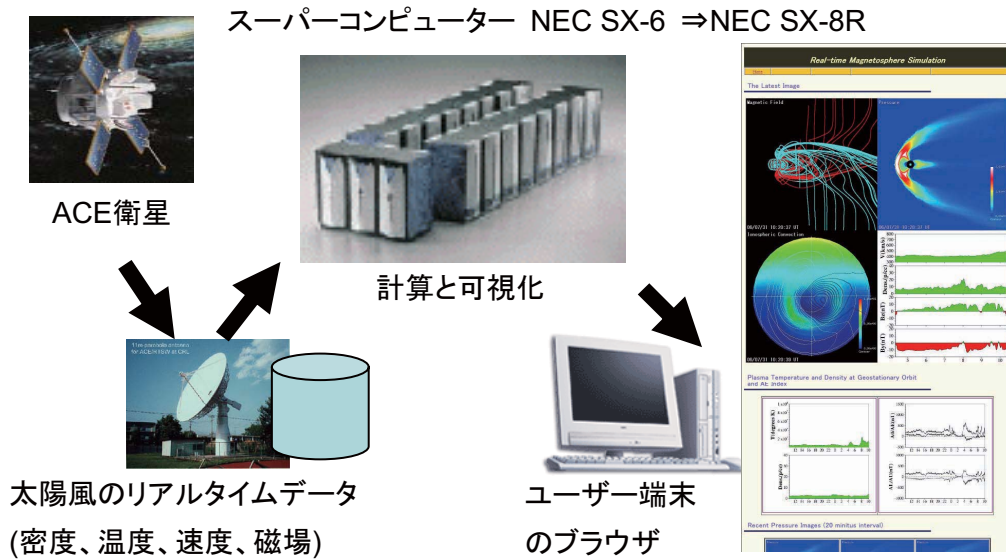


図1：情報通信研究機構のリアルタイム磁気圏シミュレーションシステムの概要

計算手法と計算結果

磁気圏シミュレーションでは、電磁流体 (MHD) 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計算することができる。しかし、プラズマを流体近似したため、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。また静止軌道プラズマ環境の影響として、衛星表面帯電を考えた場合、数～数十 keV の電子が重要であるのに、実質的にイオン流体運動だけを取り扱っているという問題がある。

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

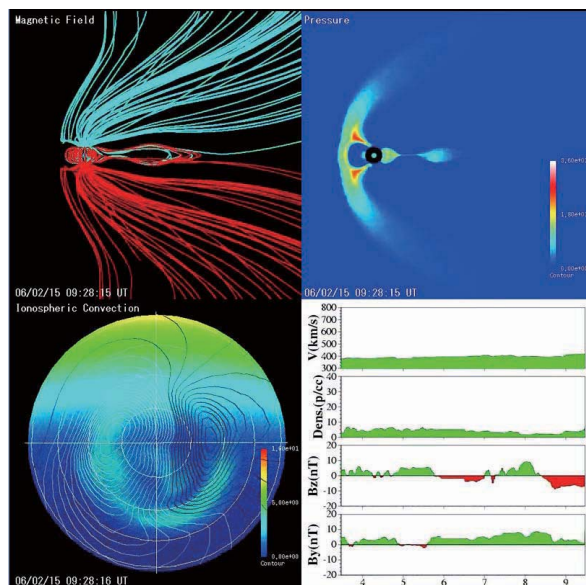


図2：2006年2月15日09:28UTの計算結果。磁力線 (左上)、子午面内のプラズマ圧力分布 (右上)、極域電離層の等電位線と電気伝導度分布 (左下)、計算に用いた直前6時間の太陽風データ (右下)。

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、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。この図は約1分毎に更新され、1日毎に動画としてアーカイブされている。

観測との比較と統計解析

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）を5分平均した値を用いた。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、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時の夜側の観測結果と計算結果の静止軌道の真夜中位置での値を比較した。この日、観測と計算結果の両方で、静止軌道での大きな圧力上昇が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。ここでは図は示さないが、イオンの観測と計算結果が定量的に合っていない[中村 et al., 2006]。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比較的良く合っている。このことは、電子は、プラズマ・インジェクションのときに、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変動と定量的に良く合致したと考えられる。しかし、密度と温度については定量的な合致は見られず、計算結果で得られる密度は、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、観測でよく見られる0.5個/ccと仮定して、計算結果の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てみた。その結果、温度上昇のタイミングや観測での温度上昇値が、電子圧力より良く一致することがわかった。

この再計算した温度と観測で得られた電子温度との分散図を、図4に示す。ほぼ全ての点が、図中の線より下に分布している。つま

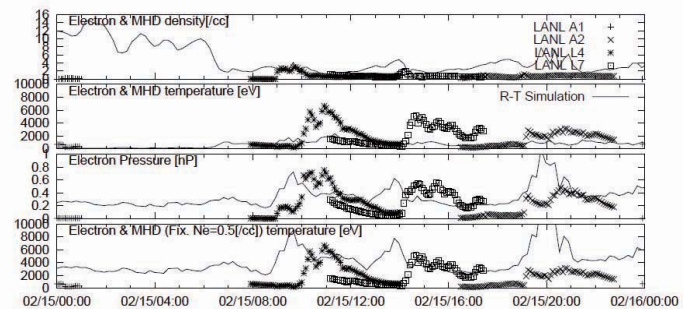


図3：2006年2月15日に4機のLANL静止軌道衛星(A2,A1,L4,L7)が観測した夜側(MLT:21時~3時)の、上から電子密度、電子温度、電子圧力の5分平均値に、計算結果の静止軌道の真夜中位置で得られた密度、温度、圧力を重ねて示した。一番下のグラフは、密度を0.5個/ccと置いて計算結果の圧力から再計算した温度。計算結果は、観測に比べ太陽風の到達時間(約1時間)だけ前にシフトしている。

り、この線は観測される電子温度の上限値を示している。ただし、計算結果から再計算して求めた結果は、多くの場合電子温度を過大に予測していることがわかる。これは、計算結果においては、磁気圏が荒れた状態が、観測より長く続く傾向があること。また、観測においては、電子温度や圧力の上昇は、実際には局所的な現象で、静止軌道上での電子温度の最大値が必ずしも全て衛星で観測されているわけではないことなどが原因と考えられる。

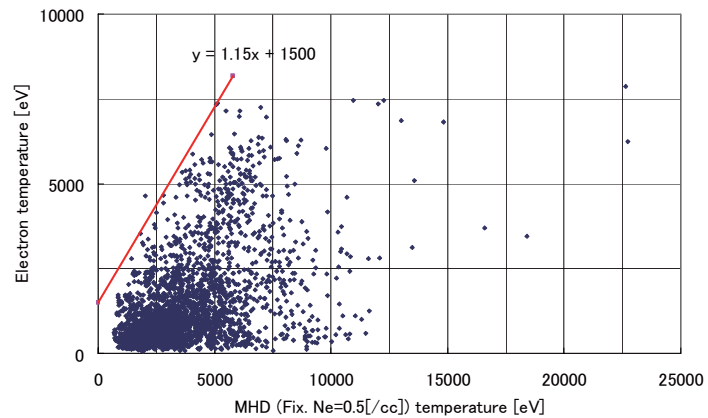


図4：2006年2月分の計算結果の圧力から密度を0.5個/ccと仮定して再計算した温度と、観測で得られた電子温度の分散図。

いずれにせよ、電子温度の上限値を示すことだけでも、衛星電位の最大値を予測する上で、十分意味があると考えられる。

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、静止軌道のプラズマ環境、特に電子温度の上限値の約1時間前予測の可能性を示した。この電子温度上昇は、衛星表面帯電と直接関係があるため、衛星帯電予測として活用できると考えられる。

参考文献

- 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
- 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.