

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

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)

Prediction of geosynchronous satellite surface charging using real-time magnetosphere simulation

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静止軌道夜側のプラズマ環境を推定し、その推定値を用いた静止軌道衛星表面帯電の予測手法について述べる。

はじめに

静止軌道上での衛星障害の約4分の1は表面帯電にともなう放電が原因と考えられている。そのため、静止軌道衛星の表面帯電を予測することで、衛星障害を予防したり、障害が発生した場合でも、迅速な原因究明に役立てたりすることができる。衛星帯電予報には、静止軌道上のプラズマ環境を予測する必要があるため、情報通信研究機構でおこなわれている3次元の電磁流体 (Magneto-hydrodynamics: MHD) 計算手法を用いたリアルタイムで磁気圏シミュレーションの結果を利用する [Tanaka, 1994, Den, et al., 2006]。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リアルタイムに地球へ送っている。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 (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。その計算結果から、静止軌道のプラズマ環境を推定し、衛星帯電を予測する。

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。一般に、静止軌道への数~数十 keV の電

子の侵入は、磁気圏・地磁気擾乱に伴っておこり、地上でオーロラの爆発的発光（ブレイクアップ）を伴うサブストームが観測されるため、磁気圏サブストーム・プラズマ・インジェクションとも呼ばれる。

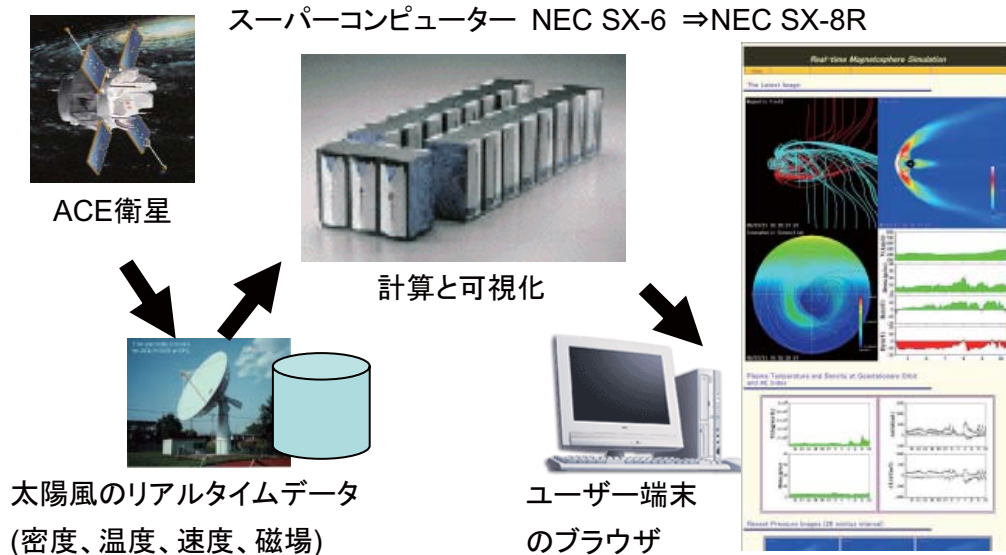


図1：情報通信研究機構のリアルタイム磁気圏シミュレーションシステムの概要
(公開 URL: <http://www2.nict.go.jp/y/y223/simulation/realtime/home.html>)

計算手法に関する留意点

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。この計算手法は、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している。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、粒子効果による非断熱的な加熱・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、対して実質的にイオン流体運動を取り扱っている。

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2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。計算結果が約1時間後の磁気圏を計算していることを考慮すると、プラズマ・インジ

エクシジョンの発生タイミングを定性的に予測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は定量的に合わないことが明らかになっている[中村 et al., 2006, 2008]。まず図の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とがわかる。このことは、電子はプラズマ・インジェクションのときに、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、観測頻度が高い値の 0.5 個/cc 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、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。

この再計算による温度の推定値と観測で得られた電子温度との分散図を、図3に示す。ほぼ全ての点が、図中の線（電子温度の推定値＝観測された電子温度）より下に分布している。つまり、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、推定した温度は、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、計算では、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。

この電子温度の推定値を用いて、衛星電位の最悪値を予測する。衛星の電位の計算には過去の研究[Cho, et al., 2005]で得られたプラズマ環

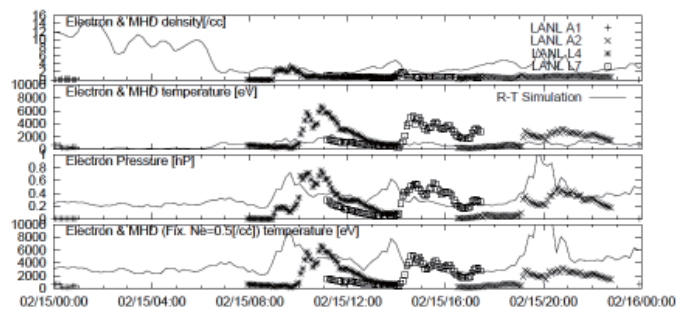


図2：2006年2月15日に4機のLANL静止軌道衛星（A2,A1,L4,L7）が観測した夜側（MLT：21時～3時）の、上から電子密度、電子温度、電子圧力の5分平均値に、計算結果の静止軌道の真夜中位置で得られた密度、温度、圧力を重ねて示した。一番下のグラフは、密度を0.5個/ccと仮定して計算結果の圧力から再計算した温度。計算結果は、観測に比べ太陽風の到達時間（約1時間）だけ前にずれている。

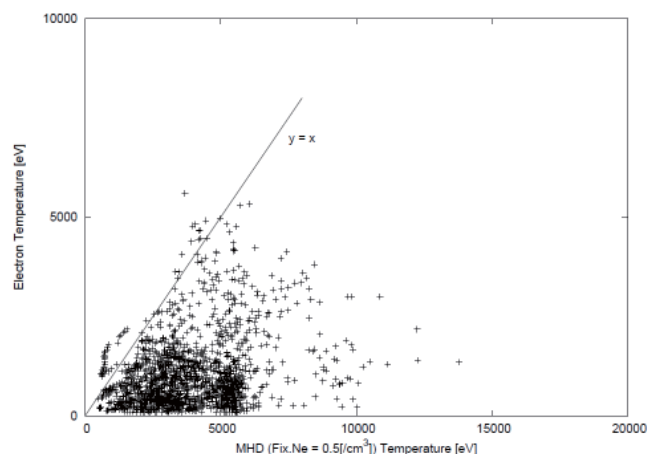


図3：2006年1月-4月の計算結果の圧力から密度を0.5個/ccと仮定して推定した電子温度と、観測で得られた1時間後の電子温度の分散図。

境と静止軌道衛星 (ETS-8) の電位および乖離電圧の対応表を用いた。ただし、衛星電位を求めるためには、電子温度の他に、電子密度とイオンの温度と密度が必要である。ここでは、電子密度を 0.5 個/cc とイオンの温度と密度は、観測から得られる分布の主要部分の下端の値を用いて推定をおこなった。その結果を用いて静止軌道衛星(ETS-8)図4に示す。この図から衛星帯電がおこることを、約1時間前に予測できていることがわかる。ただし、電位の値は、観測結果と異なっている。

これは、モデルとして用いた衛星(ETS-8)と LANL 衛星の形や素材などの違いや、推定に用いた対応表の精度が十分でないためであると考えられる。

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から、静止軌道のプラズマ環境、特に電子温度の上限値を約1時間前に推定し、それを用いて静止軌道衛星の表面帯電を約1時間前に予測することの可能性を示した。

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
- ・中村 雅夫、他、「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」、第5回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集、JAXA-SP-08-018、2008
- ・Cho, M., S. Kawakita, M. S. Nakamura, M. Takahashi, T. Sato, Y. Nozaki; Number of arcs estimated on solar array of a geostationary satellite, *J. Spacecraft and Rockets*, 42, 740, 2005.
- ・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.

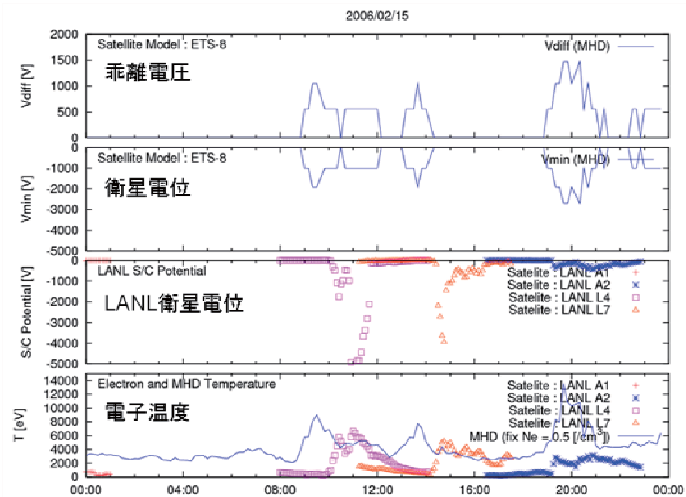


図4：2006年2月15日の静止軌道衛星 ETS-8 の乖離電圧、衛星電位の予測、夜側 (MLT : 21 時～3 時) の4機の LANL 静止軌道衛星 (A2,A1,L4,L7) の電位、電子温度の推定値と観測値。