

リアルタイム磁気圏シミュレーションを用いたサブストーム・インジェクション の予測の研究

相菌 正樹、坂田 智、中村 雅夫 (大阪府立大学)、
村田 健史、亘 慎一、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)

はじめに

衛星の表面帯電に伴う放電は静止軌道上での衛星障害の原因の一つと考えられている。そのため、衛星の表面帯電を予測することで、運用を工夫して衛星障害を未然に防いだり、障害が発生しても迅速な原因究明や早期復旧ができると考えられる。衛星の表面帯電を予測するには、静止軌道におけるプラズマ環境を予測する必要がある。そこで、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を利用することによって、衛星表面帯電予報の実用化につなげることが本研究の目的である。リアルタイム磁気圏シミュレーションは、3次元電磁流体計算 (MHD) 手法によりリアルタイムに磁気圏の変動を計算している。その入力パラメータは、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 点にある ACE (Advanced Composition Explorer) 衛星が観測した太陽風の密度、温度、速度、磁場である。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 時間で地球に到達する。そのため、このシミュレーションは約 1 時間後の磁気圏の状態を計算していると考えられる [Den, et al., 2006]。このシミュレーションに用いられている MHD 手法は、イオンと電子からなるプラズマを 1 流体と近似しており、プラズマの質量の大部分を占めるイオンの運動を主として計算していると考えられる [Tanaka, 1994]。

衛星帯電を引き起こす静止軌道プラズマ環境の主要な要因は、太陽風擾乱により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現象 (サブストーム・インジェクション) が突発的に発生することである。その際、静止軌道夜側に高温の電子が増加し、衛星電位をマイナス数 kV にまで低下させてしまうことがある。衛星表面が帯電すると放電を起こすことがあり、それが衛星障害につながる可能性がある。

シミュレーションと観測値との比較

シミュレーションの予測精度を出すために、シミュレーションの結果と観測値とを比較した。その際に、Los Alamos National Laboratory (LANL) の静止衛星 4 機による静止軌道プラズマ環境観測結果のうち、イオン (0.13-45keV/e) の密度と電子 (0.03-45keV/q) の密度とそれぞれの温度 (磁場に平行成分と垂直成分の平均値) を 5 分平均した値、そこから計算した圧力の値を用いた。ただし、サブストーム・インジェクションに着目してい

るため、シミュレーションデータのうち静止軌道真夜中位置でのデータと、磁気地方時 (MLT) 21~3 時の夜側での観測値とを用いて比較をした。その結果、シミュレーションデータ (温度、密度、圧力) とイオンの観測値 (温度、密度、圧力) は定量的に合致していなかった[中村, et al., 2006, 2008]。シミュレーションデータ (温度、密度) と電子の観測値 (温度、密度) も定量的に合致していなかったが、図 1 の一番上のグラフのように、シミュレーションの圧力上昇のみ、観測される電子圧力上昇と定量的に合致している場合が多かった[中村, et al., 2006, 2008]。このことは、サブストーム・インジェクションの際、電子が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、それと電磁流体計算から得られる圧力上昇とが定量的に合致したことが理由と考えられる。したがって、この電子圧力上昇はサブストーム・インジェクションを表していると考えられるため、サブストーム・インジェクションの予測に用いた。

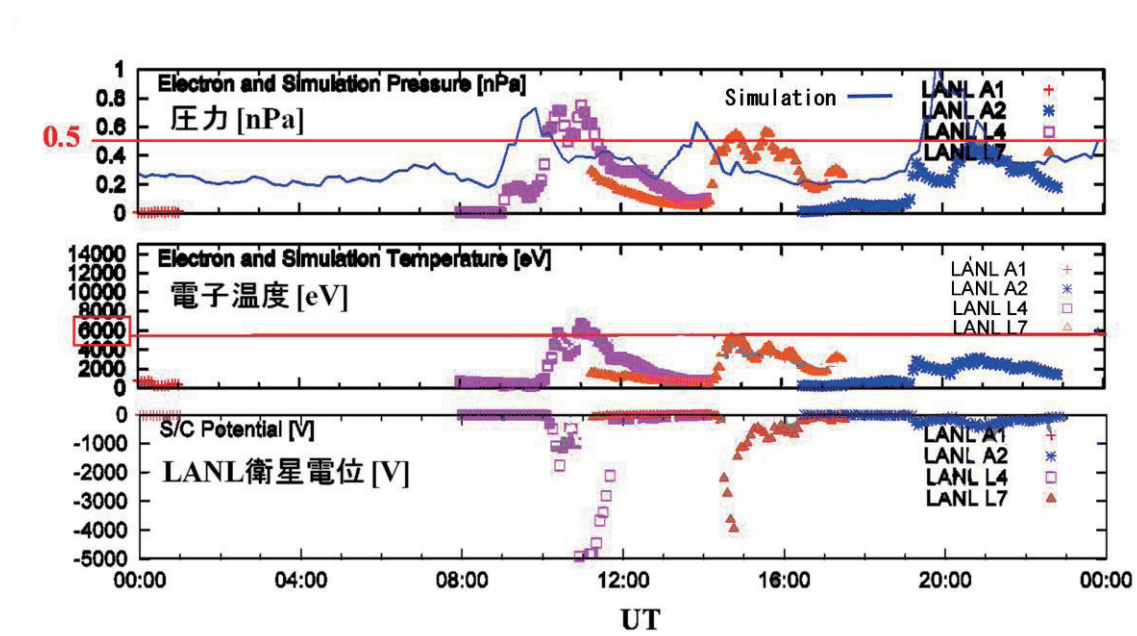


図 1 2006 年 2 月 15 日に 4 機の LANL 静止衛星 (A1,A2,L4,L7) が観測した夜側 (MLT : 21~3 時) の上から電子圧力とシミュレーション圧力 (青い実線) を重ねたグラフ、電子温度の 5 分平均値のグラフ、衛星電位のグラフ。ただし、一番上のグラフはシミュレーションが観測結果より太陽風の到達時間 (約 1 時間) だけ前にずれている。

サブストーム・インジェクションの予測精度の検証

2006 年 1 月~4 月のデータを用いて、シミュレーションの圧力が、何分後 (delay) から何分間 (interval) 観測される電子圧力と最も相関が良くなるのかを調べた。その際、シミュレーション圧力と電子圧力がそれぞれ閾値 (ここでは 0.5 nPa) を超えた場合をサブストーム・インジェクションと考えた。これは、サブストーム・インジェクションにより、電子温度が 6 keV 以上、電子圧力が 0.5 nPa 以上で衛星障害につながるような帯電が生じる可能性が

高いと推測されるからである[坂田, et al., 2011]。その一例を図 1 に示す。シミュレーション圧力と電子圧力の相関を調べるために、シミュレーションの圧力が閾値を超えたか否か、そして特定の Delay と Interval の組み合わせの間に観測された電子圧力が一度でも閾値を超えたか否か、によって事象を表 1 のように 4 種類に分類し、その数を数えた。

表 1 シミュレーション圧力と観測された電子圧力の分類表

	電子圧力 \geq 閾値(0.5 nPa)	電子圧力<閾値(0.5 nPa)
シミュレーション圧力 \geq 閾値(0.5 nPa)	N_1	N_2
シミュレーション圧力<閾値(0.5 nPa)	N_3	N_4

予測精度の検証に用いる指標として、地上の天気予報でも用いられている適中 (的中) 率、一致率、見逃し率の 3 つを使用する。適中率は、サブストーム・インジェクションが起っていた場合とそうでなかった場合をシミュレーションが正しく予測している確率であり、

$$\text{適中率} = \frac{N_1 + N_4}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} \times 100$$

と表される。一致率は、シミュレーションがサブストーム・インジェクションが起ると予測していた場合のうち、実際にそれが起こった確率であり、

$$\text{一致率} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \times 100$$

と表される。見逃し率は、シミュレーションがサブストーム・インジェクションが起ると予測していない場合のうち、実際にはそれが起こった確率であり、

$$\text{見逃し率} = \frac{N_3}{N_3 + N_4} \times 100$$

と表される。これらの指標をさまざまな Delay と Interval の元で算出した。図 2 に適中率の結果を示す。この図より、delay が約 70 分、interval が約 10 分で適中率が約 85% となり、最も良くなった。このことから、このシミュレーションは約 70~80 分後の磁気圏の状態をかなり予測できていることがわかる。

次に、図 3 と図 4 に一致率と見逃し率についての結果を示す。図 3 から一致率については、短い Interval で Delay が 70 分前後で確率が最も高くなる傾向が明確ではな

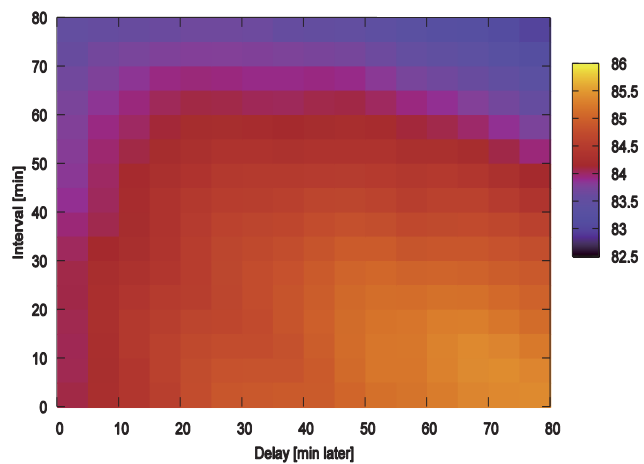


図 2 2006 年 1 月 1 日から 2006 年 4 月 31 日までの 4 ヶ月間におけるシミュレーション圧力の観測された電子圧力に対する適中率

いが見られる。また、図4から見逃し率は、短い Interval では Delay が 50～60 分ほどで最も確率が低くなる傾向がわずかながら見られる。

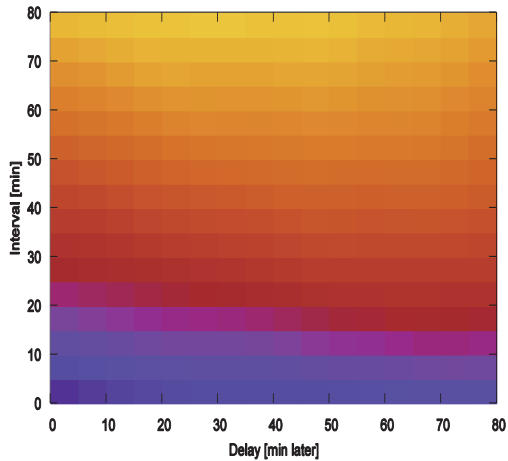


図3 2006年1月1日から2006年4月31日までの4ヶ月間におけるシミュレーション圧力の観測された電子圧力に対する一致率

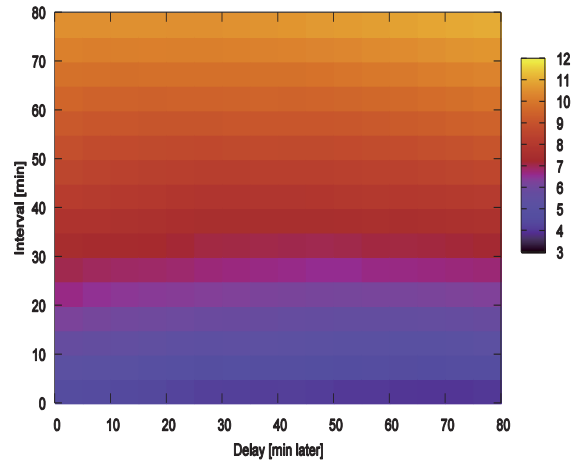


図4 2006年1月1日から2006年4月31日までの4ヶ月間におけるシミュレーション圧力の観測された電子圧力に対する見逃し率

まとめ

リアルタイム磁気圏シミュレーションと観測を比較し、サブストーム・インジェクションの予測精度を検証した結果、シミュレーションの結果から約1時間後のサブストーム・インジェクションを予測できていることがわかった。その予測精度は70～80分後の適中率で約85%であり、一致率で約35%である。よって、このシミュレーションを衛星表面帯電予報に利用することは可能であると考えられる。今後、予測精度を向上させる手法を考案し、またシミュレーションの圧力上昇が観測された電子の圧力上昇とよく合致する物理機構を明らかにしていくことが必要である。

参考文献

- ・ Den, M., et al.; “Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic 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. Compt. Phys.*, Vol. 111, pp.381-389, 1994.

- ・坂田 智、「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と衛星表面帯電予測の研究」平成 22 年度大阪府立大学修士論文、2011
- ・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