

衛星帯電評価に用いる高解像度磁気圏リアルタイムシミュレータ

久保田 康文¹, 中溝 葵¹, 坂口 歌織¹, 田 光江¹, 久保 勇樹¹, 長妻 努¹, 田中 高史^{1,2}

¹ 情報通信研究機構, ² 九州大学

1. はじめに

衛星表面帯電は衛星障害の主要な原因の一つであり、サブストームに伴い磁気圏尾部から静止軌道へプラズマ粒子が注入(インジェクション)されることにより引き起こされる。特に衛星表面帯電には数 keV から十数 keV の電子が寄与している。したがって、サブストームに伴う静止軌道へのインジェクションのタイミングと電子密度、電子温度を予測することは、衛星帯電のリスクを避けるのに重要である。Nakamura [2012] では、LANL 衛星とグローバル MHD シミュレーションの比較から、LANL 衛星から得られた電子圧力と MHD シミュレーションから得られた圧力がよい相関があることを示している。一方、電子密度、電子温度は良い相関が得られないが、久保田他 [2019]では経験的な関係式を導入することにより MHD シミュレーションから電子密度、電子温度が得られることを示した。

サブストームに伴うインジェクションを予測するために我々は太陽風-磁気圏-電離圏結合系を扱えるグローバル MHD シミュレーションを用いて、磁気圏リアルタイムシミュレータを開発し運用している。本稿では、2 章で運用をしているリアルタイム磁気圏シミュレータについて述べ、3 章で帯電評価用の磁気圏マップについて述べる。4 章でまとめを述べる。

2. 磁気圏リアルタイムシミュレータ

磁気圏リアルタイムシミュレータは REPPU コードを用いている[Tanaka et al., 2017]。その特徴は全球を非構造格子で様の精度で解いているため高いロバスト性を持っており、強い太陽風電場を持つようなイベントも解くことができる[Kubota et al., 2017]。解像度は高解像度の水平方向に 30722 格子(Lev. 6)、半径方向に 240 格子となっている。

図 1 は 2019 年 3 月 28 日の磁気圏リアルタイムシミュレータのサマリープロットである。上から MHD シミュレーションから得られた静止軌道上真夜中の圧力、電離圏の極冠電位、電離圏の AU-AL index である。下段の線プロットは MHD シミュレーションの入力値となる DSCOVR 衛星から得られた太陽風パラメータである。上から太陽風磁場(By, Bz)、速度、密度、温度となっている。

度となっている。DSCOVR 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、太陽風データをリアルタイムで地球に送っている。そのため、観測された太陽風が地球に到達する約 1 時間前に磁気圏のシミュレーションを行い予報することができる。

図 1 の 12:30 UT に DSCOVR 衛星で観測された Bz 南向き成分の太陽風により(青矢印)、13:50 UT に AL index(シミュレーションは桃色の線)の下降とインジェクションによる静止軌道真夜における圧力の上昇が見られる(赤矢印)。また京都大学で公開されている AL index(観測は水色の線)の下降も見られ、MHD シミュレーションの結果とよい一致を示している。

図 2 は JAXA の SEES で公開されているみちびき衛星で観測された電子フラックスである。上から初号機、2 号機、4 号機の電子フラックス、次に初号機、2 号機、4 号機の 0.7MeV の電子フラックスの L 値分布、

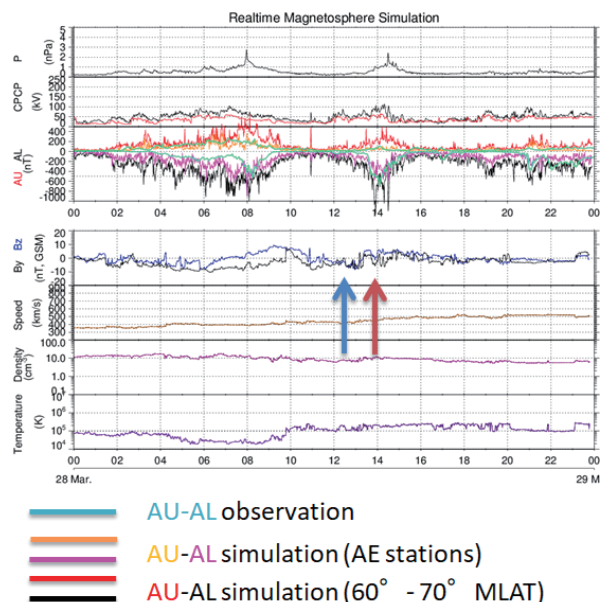


図 1. 2019 年 3 月 28 日の磁気圏リアルタイムシミュレータのサマリープロット。上から MHD シミュレーションから得られた静止軌道上真夜の圧力、電離圏の極冠電位、電離圏の AU-AL index である。下段の線プロットは MHD シミュレーションの入力値となる DSCOVR 衛星から得られた太陽風パラメータである。上から太陽風磁場(By, Bz)、速度、密度、温度となっている。

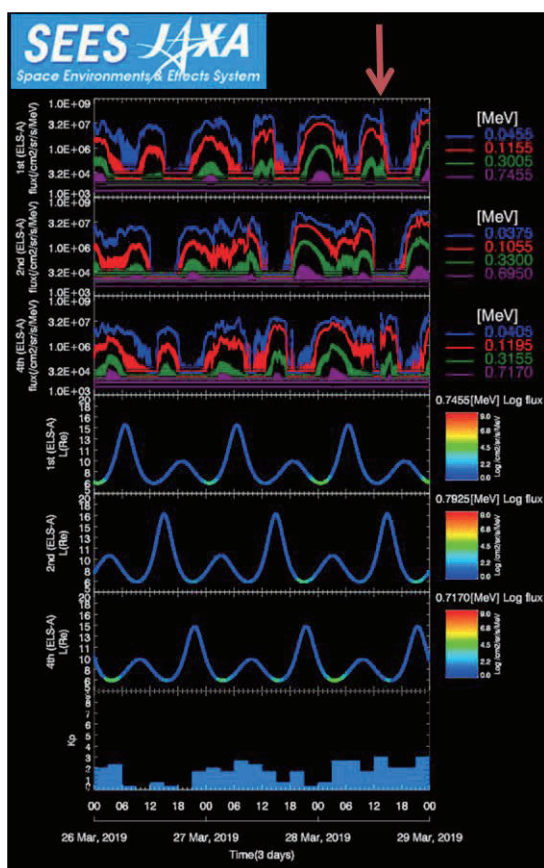


図2. 2019年3月28日のみちびき衛星で観測された電子フラックス。上から初号機、2号機、4号機の電子フラックス、次に初号機、2号機、4号機の0.7MeVの電子フラックスのL値分布、Kp指数となっている。

Kp指数となっている。

2019年3月28日の13:50 UT頃みちびき衛星の初号機は真夜近傍に位置しており、図2の一番上のパネルの青色の線は40 keVの電子フラックスを示すが、急激な上昇が観測されていることが分かる(赤矢印)。

3. 衛星帯電評価用磁気圏マップ

図3は磁気圏リアルタイムシミュレータから5分間隔で出力される圧力分布図である。上図が磁気赤道面の圧力と速度ベクトル分布を書いた図となっており、下図が半径6.6Re球面を磁気地方時(MLT:横軸)と磁気緯度(MLAT:縦軸)に展開した図である。黄色の線がみちびき衛星初号機の軌道となっており、赤の+印が衛星の位置を表している。上下図とも13:50 UTのインジェクションがおこる前の図である。上図の磁気圏尾部の速度場を見ると、100km/s以下の低速で反

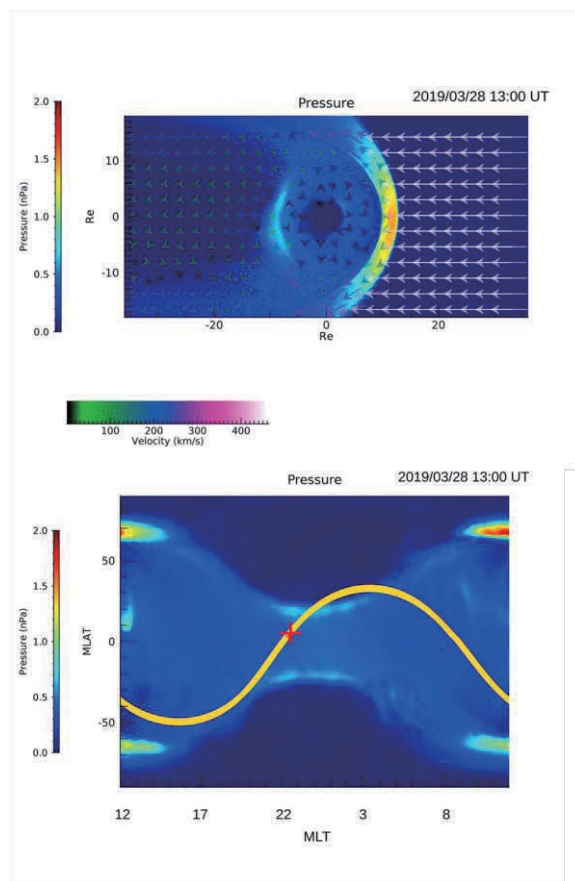


図3. 2019年3月28日の磁気圏リアルタイムシミュレータの出力結果。上図が磁気赤道面での圧力と速度ベクトルを書いた図。下図が半径6.6Re球面を横軸に磁気地方時(MLT)と縦軸に磁気緯度(MLAT)に展開して書いた図である。黄色の線がみちびき衛星の軌道となっており、赤の+印が衛星の位置を表している。上下図とも13:50 UTのインジェクションがおこる前の図である。

地球方向の流れであることが分かる。下図を見るとみちびき衛星は夜側22MLT付近に位置しプラズマシート中を通過している。

図4は図3と同じフォーマットで上図が13:50 UTで下図が13:55 UTのインジェクションがあった後の図となっている。上図では $X=-30\text{Re}$ 付近で500km/sを超える速い地球向きの流れ(インジェクション)が見られる。下図では上図のインジェクションに伴い半径6.6Re面の夜側の21-4 MLTにあるプラズマシートの圧力が $|\text{MLAT}|=10-20$ 近傍で高くなっていることが分かる。このとき、みちびき衛星は23MLT, 15 MLAT付近に位置し、プラズマシートのインジェクションによる高圧領域を通過していることが分かる。その後、みちびき衛星はプラズマシートより高緯度側に位置する低圧力のローブ領域を通過する。図2の40

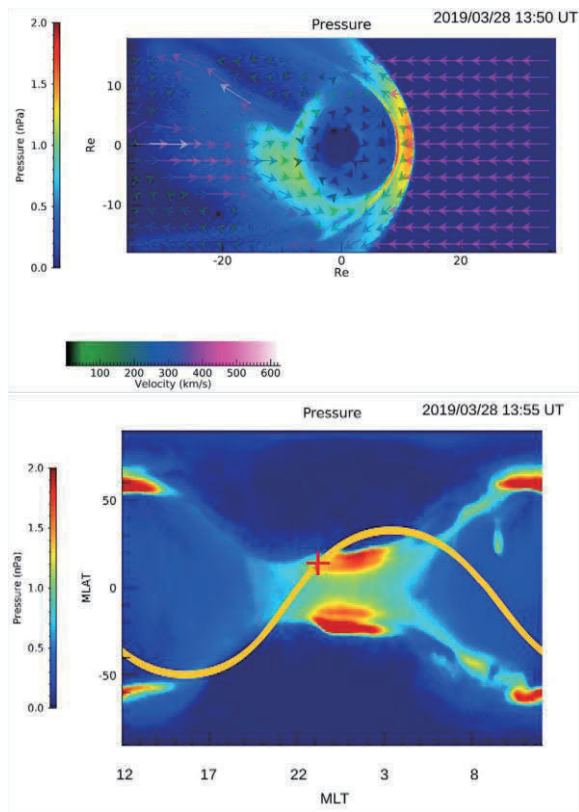


図 4. 図 3 と同じフォーマットである。上図が 13:50 UT の図で $X=30\text{Re}$ 付近で速い地球向きの流れ（インジェクション）が見られる。下図は 13:55 UT の図でインジェクションがおり地球中心からの距離 6.6Re , 21.4 MLAT 付近のプラズマシートの圧力が高くなっていることが分かる。

keV の電子フラックスの上昇と比較すると、13:00 UT ではプラズマシートを通過しており、13:50 UT にインジェクションにより急激に電子フラックスが上昇する。その後ローブ領域を通過するため急激に電子フラックスが減少し、シミュレーションから得られた圧力分布と電子フラックス変動がよく一致していることが分かる。

我々は上記の 5 分間隔で出力される磁気圏圧力カラーコンター図を用いて衛星帯電評価用の Web コンテンツを作成し、任意の衛星位置の圧力、密度、温度の数値データをユーザーに提供することを考えている。

4. まとめ

我々は高解像度磁気圏リアルタイムシミュレータを開発し運用している。リアルタイムの DSCOVR 衛星から得られた太陽風パラメータを入力値とすることで静止軌道上でのプラズマ環境を 1 時間前に予報し、衛

星表面帯電の評価に利用することを試みている。2019 年 3 月 28 日の例ではみちびき衛星で観測された電子フラックスの上昇時に磁気圏リアルタイムシミュレーションでもみちびき軌道上でインジェクションがあり、圧力の上昇があることを示した。また AU-AL index も観測とよく一致していることが分かった。今後、帯電評価用の磁気圏マップを用いた Web コンテンツを作成し任意の衛星位置の点の圧力、密度、温度の数値データをユーザーに提供することを考えている。

参考文献

- [1] Kubota, Y., T. Nagatsuma, M. Den, T. Tanaka, and S. Fujita (2017), Polar cap potential saturation during the Bastille Day storm event using global MHD simulation, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, doi:10.1002/2016JA023851.
- [2] Nakamura, M. (2012), Forecast of the plasma environment in the geostationary orbit using the magnetospheric simulation, J. Plasma Fusion Res., 88, pp. 83-86 (in Japanese).
- [3] Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2017), Global simulation study for the time sequence of events leading to the substorm onset, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 6210-6239, doi:10.1002/2017JA024102.
- [4] 久保田 康文, 中溝 葵, 坂口 歌織, 田 光江, 久保 勇樹, 長妻 努, 東尾 奈々, 田中 高史, 衛星帯電評価に用いる磁気圏リアルタイムシミュレータ, 第 15 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, p127-130, JAXA-SP-18-009, 2019-01-31.