

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

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, 東尾 奈々², 田中 高史³

¹ 情報通信研究機構、² 宇宙航空研究開発機構、³ 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、電子温度を予想することは、衛星帯電のリスクを避けるのに重要である。

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ている。しかしながら、グローバル MHD シミュレーションでは MHD 流体としての密度、温度、圧力の導出しかできないため、これを電子の密度、温度、圧力に換算するためには、観測との比較による経験的なモデルを考える必要がある。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かった。そのため、電子密度、電子温度について、観測との比較から経験的なモデルを導出する必要がある。

本稿では、2 章で開発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 章で電子密度、電子温度について経験的なモデルを導出するため LANL 衛星の観測と MHD シミュレーションの比較について述べる。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 PEPPU 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一樣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]。リアルタイムでシミュレーションするため、解像度は比較的低い水平方向に 7682 格子、半径方向に 240 格子となっている。

図 1 はテスト版の磁気圏リアルタイムシミュレータの出力例である。上段のカラーコンターは左から MHD シミュレーションから得られた磁気圏子午面の圧力と磁力線、電離圏上の沿磁力線電流、電離圏上の電気伝導度である。中段の線プロットが上から 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インプットとなる 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(B_y , B_z)、速度、密度、温度となっている。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 2018 年 8 月 19 日の 16:30 UT に DSCOVR 衛星で観測された B_z 南向き成分の太陽風により、18:00 UT に AL index 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。このとき JAXA の SEES で公開されているみちびき衛星の 40 keV の電子フラックスの上昇が見られ、また京都大学で公開されている AL index 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。

3. LANL 衛星データと MHD シミュレーションの比較

LANL 衛星データと MHD シミュレーションを比較するため、2006 年 2-4 月の期間で AE index の上昇があり、LANL 衛星で電子温度の上昇と衛星電位の下降が見られた 12 イベントを選び MHD シミュレーションを行い観測と比較した。図 2 はその 1 例の 2006/2/15 のイベントである。横軸は 0:00 UT からの時間を分単位で示している。上から、太陽風磁場南北成分、太陽風速度、太陽風密度、極冠電位、AU-AL index、LANL 衛星で観測された電子密度、電子圧力、電子温度、衛星電位、衛星位置の MLT と L、衛星軌道である。実線が観測、赤線が MHD シミュレーションである。

太陽風磁場が 550 min 頃南向きになり、600 min に

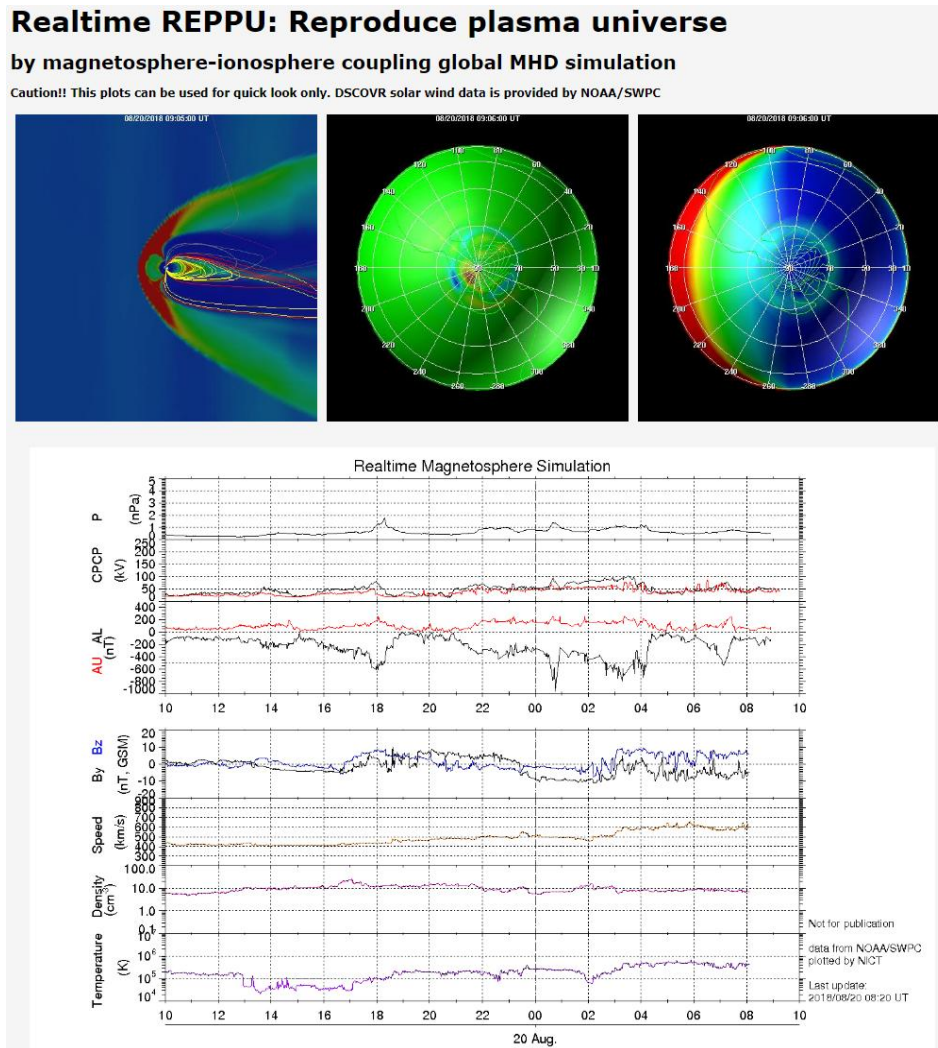


図1. 磁気圏リアルタイムシミュレータの出力例 (テスト版)。上段のカラーコンターは左から MHD シミュレーションから得られた磁気圏子午面の圧力と磁力線、電離圏上の沿磁力線電流、電離圏上の電気伝導度である。中段の線プロットが上から MHD シミュレーションから得られた静止軌道上真夜の圧力、電離圏の極冠電位、電離圏の AU-AL index である。下段の線プロットは MHD シミュレーションのインプットとなる DSCOVR 衛星から得られた太陽風パラメータである。上から太陽風磁場(B_y , B_z)、速度、密度、温度となっている。

AL index が下降した際に、LANL 衛星は静止軌道の 23 MLT 付近から真夜中を通過しており電子圧力の 2 回の上昇を観測している。その際電子温度は 7 keV 程度で、電子密度は $1/cc$ 程度であった。電子温度の上昇に伴い、衛星が帯電し衛星電位は最初に -2.5 kV、2 回目に -6 kV 以下に下降していることが分かる。一方、MHD シミュレーションの計算結果を見ると、2 回の圧力上昇を良く再現していることがわかる。相関係数を取ると、0.8 と高い相関になった。また、シミュレーションで 2 回目の圧力上昇では磁気圏尾部のリコネ

クションに伴いプラズモイドの放出と、静止軌道へのインジェクションが見られた。温度と密度については、Nakamura [2012] と同様にシミュレーションでは温度は小さく、密度が大きい値になることが分かった。

次に電子密度、電子温度について、経験的なモデルを導出するため LANL 衛星データと MHD シミュレーションのインジェクションがあった時のピーク値の比較を行った。ピーク値は圧力のピークのタイミングが 30 分以内で合ったイベントを抽出し、その結果 12 イベント中 8 イベントあった。その時 MHD シミュレ

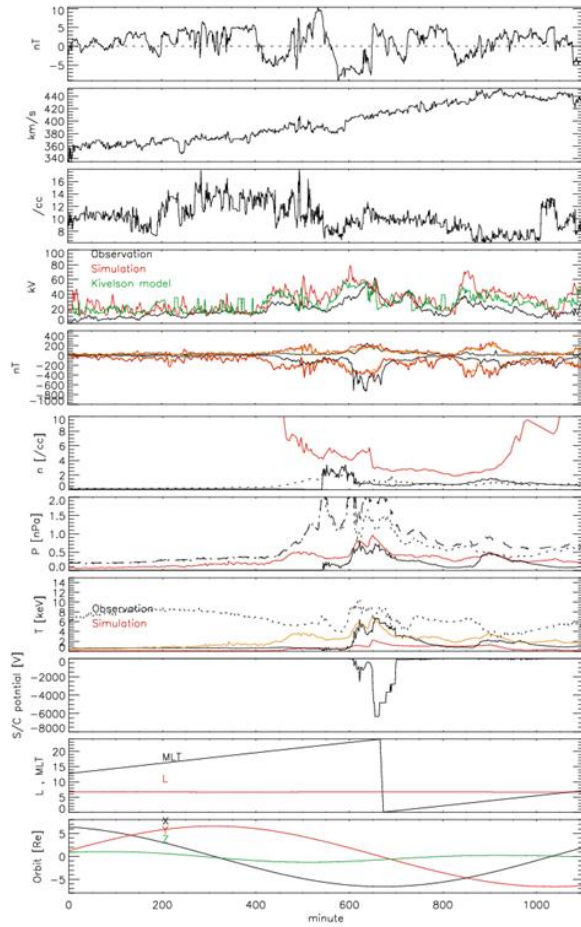


図2. LANL衛星の粒子観測とMHDシミュレーションの比較。横軸は0:00 UTからの時間を分単位で示している。上から、太陽風磁場南北成分、太陽風速度、太陽風密度、極冠電位、AU-AL index、LANL衛星で観測された電子密度、電子圧力、電子温度、衛星電位、衛星位置のMLTとL、衛星軌道。実線が観測、赤線がMHDシミュレーションである。参考のためイオンの物理量を点線で書いている。点鎖線はトータル圧力である。また、温度の黄線は電子密度を1/ccと仮定しMHDシミュレーション圧力から導出した温度である。

ーションでプラズモイドの放出と静止軌道へのインジェクションがあったことも確認した。図3は8イベントのLANL衛星の観測とMHDシミュレーションのピーク値の比較である。左図が電子密度、右図が電子温度である。横軸がMHDシミュレーション、縦軸がLANL衛星の観測である。密度の図を見ると、インジェクション時の値がMHDシミュレーションでは2-20/ccの密度を取るのに対し、LANL衛星の観測は多くのイベントでほぼ1/ccであったことが分かった。また温度の図を見ると、MHDシミュレーションと

LANL衛星の観測ではおおよそ傾き3の比例関係になっていることが分かった。また、温度の赤のプロットはLANL衛星の電子密度観測がほぼ1/ccであったことから電子密度を1/ccと仮定してMHDシミュレーションの圧力から導出した温度を使ってプロットしたものである。その場合、おおよそ傾き1の正比例関係になっていることが分かった。

以上の結果から得られた簡単な経験モデルとして、電子密度を1/ccで一定と仮定し、温度はMHDシミュレーションから得られた圧力から導出する方法を用いる。図2の温度の黄線は電子密度を1/ccと仮定しMHDシミュレーション圧力から導出した温度を書いている。観測の変動を良く再現していることが分かる。上のモデルはピーク値の比較から得られたものであるが、観測値の密度の時間変動に比べ温度の変動が大きいことと、MHDシミュレーションで得られた圧力が観測と良い相関を持つため、時間変動もよく再現できていることが分かる。相関係数を取ると0.75と高い相関になった。

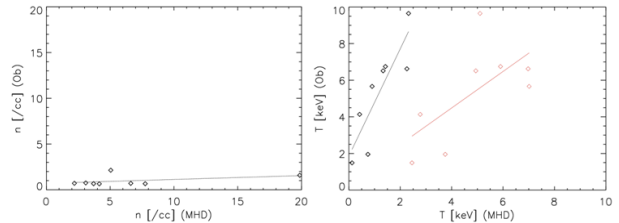


図3. サブストームに伴うプラズマ粒子注入時のLANL衛星の観測とMHDシミュレーションの比較。左図が電子密度、右図が電子温度である。横軸がMHDシミュレーション、縦軸がLANL衛星の観測である。温度の赤のプロットは電子密度を1/ccと仮定しMHDシミュレーション圧力から導出した温度を用いたものである。

4. まとめ

我々は磁気圏リアルタイムシミュレータを開発し、静止軌道上でのプラズマ環境を予報することで、衛星表面帯電の評価に利用することを試みている。テスト版の磁気圏リアルタイムシミュレータを開発し、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インプットすることで、電離圏の極冠電位、AU-AL index、静止軌道の圧力を1時間前に予報できることを示した。MHDシミュレーションは、静止軌道の電子圧力変動は良い相関があるが、電子密度、電

子温度に対しては良い相関が得られない。そのため、電子密度、電子温度について、観測との比較から経験的なモデルを導出する必要がある。LANL 衛星データと MHD シミュレーションを比較し経験的なモデルを作成すること試みた。観測と MHD シミュレーションの比較から、電子密度を 1/cc で一定と仮定し、温度は MHD シミュレーションから得られた圧力から導出する方法を用いると電子密度と電子温度の時間変動をよく再現できることが分かった。

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.