

次世代磁気圏-電離圏結合 MHD シミュレーションを用いたバスターユーイベントにおける極冠電位の飽和の研究

Polar cap potential saturation during the Bastille Day storm using global MHD simulation

久保田康文¹、長妻努¹、田光江¹、田中高史²、藤田茂³

¹情報通信研究機構、²九州大学、³気象大学校

Y. Kubota¹, T. Nagatsuma¹, M. Den¹, T. Tanaka², S. Fujita³

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Kyushu University,

³Meteorological College

1. はじめに

極冠電位は磁気圏-電離圏対流の強さを表す基本的な物理量である。極冠電位の値は太陽風電場が小さい場合は太陽風電場に比例して増加するが、太陽風電場が大きくなると、おおよそ 200 kV 程度で飽和する。Siscoe et al. [2002a,b]は解析的な方法から極冠電位は太陽風電場、太陽風動圧、電離圏電気伝導度に依存し、極冠電位の飽和は region1 電流に制限を与える太陽風動圧に依存することを示した。また MHD シミュレーションを用いて解析的に導出したモデルと結果が一致していることを示した。Kivelson and Ridley [2008]は Siscoe の解析モデルと同等の解析モデルを実際の 13 イベントの磁気嵐に適用し極冠電位を良い一致で再現した。この解析では電離圏の電気伝導は大きく変動しないと仮定して一定としている。

2000年7月15日のバスターユーイベントはX-class フレアに伴い太陽風速度が 1000 km/s、太陽風磁場が -59 nT のような大きな太陽風電場を持ち、AE index が 3000 nT、Dst が 300 nT に達した磁気嵐である。このような極端なイベントではオーロラ粒子の降り込みにより電気伝導度が大きく変動することが考えられるため、極冠電位の飽和に対して region1 電流の飽和だけでなく、電離圏電気伝導度の変動の効果が影響することが考えられる。

本研究では、磁気圏-電離圏結合 MHD シミュレーションを用いて非常に強い太陽風電場と動圧であったバスターユーイベントについて、極冠電位の飽和に対して EUV やオーロラによる電気伝導度変化の効果を議論する。

本稿では、2章で使用したモデルについて述べ、3章においてシミュレーション結果について述べる。4章でまとめを述べる。

2. シミュレーションモデル

共著者の田中高史氏が開発を行っている次世代磁気圏-電離圏結合 MHD シミュレーションモデルを用いた。全球を三角格子で一様の精度で解いているため高いロバスト性を持つ。解像度は水平方向に 7682 格子、半径方向に 240 格子となっている。本研究で用いた電気伝導度モデルは以下のように与えた。EUV による Pedersen 伝導度と Hall 伝導度は

$$\sigma_P = \sigma_H = k_0 \cos(\text{SZA}) \quad (1)$$

として与えた。SZA は太陽天頂角である。k₀ はバスターユーイベント時の値を用いた。オーロラによる Pedersen 伝導度は

$$\sigma_P = k_1 \sqrt{P \sqrt{T}} + k_2 j_{\text{up}} \quad (2)$$

として与えた。第1項は diffuse オーロラ、第2項は discrete オーロラによる電気伝導度を示す。P, T, j_{up} それぞれ磁気圏内部境界の圧力、温度、上向きの沿磁力線電流(FAC)を示す。k₁, k₂ は任意の係数である。Hall 伝導度は $\sigma_H = 3.5\sigma_P$ とした。他の磁気圏-電離圏結合の内部境界条件は Tanaka [2000]と同様である。

太陽風パラメータは OMNI の 5 分値の太陽風データについて 2000 年 7 月 15 日、12:00-20:20 の期間を用いた。磁軸は 15.6° 傾けた。

オーロラによる電気伝導度の影響を調べるため 2通りの場合の電気伝導度モデルを用いて計算を行った。1つは EUV とオーロラによる電気伝導度の効果を入れた場合である。もう1つは EUV による電気伝導度の効果だけ入れた場合である。今後、最初の場合を normal case、後の場合を only EUV case と呼ぶ。

3. バスターユーイベントの計算結果

図1はバスターユーイベントの normal case の計算結果である。上からインプットの太陽風の By, Bz, 速

度、密度で、次に極冠電位と比較のために太陽風パラメータから導出した太陽風電場ポテンシャル、計算結果の極冠電位、Kivelson モデルで使われた電気伝導度、計算結果の AE index となっている。横軸は 12:00 UT からの時間を示している。

まず極冠電位と AE index について計算結果 (赤線) が観測 (黒線) とおおよそ一致していることがわかる。極冠電位の飽和に着目すると、青い影で覆っている 2 か所の領域で大きく飽和している。最初の領域では Bz が -20 nT 程度に達し、太陽風速度が 1000 km/s 程度である。その時の太陽風電場ポテンシャルが 400 kV 程度となっているが極冠電位は 200 kV 程度に飽和している。後の領域では Bz が -59 nT 程度に達し、太陽風速度が 1000 km/s 程度である。その時の太陽風電場ポテンシャルが 1000 kV 程度となっているが極冠電位は 240 kV 程度に飽和している。Kivelson の解析モデル (緑線) の極冠電位と比べると、シミュレーション結果の方が観測と近くなっている。Kivelson モデルでは電離圏の電気伝導度モデルを 10 mho で一定としており、電気伝導度のオーロラ活動による上昇が考慮されていないためと考えられる。

図 2 は極冠電位と極冠電位に寄与している電気伝導度と FAC の時間変動の図で normal case と only EUV case を比較している。上のパネルが平均した電気伝導度、2 番目のパネルが全 FAC の強度となっており、黒線が normal case、赤線が only EUV case を表している。電気伝導度の平均と FAC の全量をシミュレーション結果から求める際に極冠電位に寄与している領域を選ぶため FAC のある閾値以上の領域で平均と積分を行った。閾値はシミュレーション結果の極冠電位と平均した電気伝導度と全 FAC 量から導出した電位がおおよそ等しくなるように選んだ。3 番目のパネルが極冠電位で黒線が観測、赤線が only EUV case、青線が normal case である。緑線が平均した伝導度と全 FAC 量から導出した only EUV case の電位で、黄線が同様に求めた normal case の電位であり、それぞれシミュレーション結果とほぼ等しくなっているのが分かる。

まず極冠電位について normal case と only EUV case を比較すると Bz が -59 nT に達する 480 min 付近のところで normal case は 240 kV 程度であるのに対して only EUV case は 700 kV 程度にもなり only EUV case では飽和の効果が弱くなっていることが分かる。次に全 FAC 量を見ると normal case と only

EUV case でほぼ同じ値であることが分かる。また太陽風動圧が弱い 100 min と 300 min の間で太陽電場ポテンシャルの変動と比較して全 FAC 量の値が飽和していることが分かる。一方平均した電気伝導度を見ると、only EUV case ではほぼ一定して 6 mho であるのに対し、normal case では太陽風が高動圧、高電場である 480 min で 19 mho に達する。このことから太陽風が高動圧、高電場の場合、極冠電位の飽和にはオーロラによる電気伝導度の上昇が大きく寄与していることが分かる。

4. まとめ

極端太陽風 (強電場、強動圧) がインプットであったバスターミユイベントについて磁気圏-電離圏結合 MHD シミュレーションを行った。極冠域の基本的な物理量である極冠電位と AE index について観測をおおよそ再現することができた。極冠電位の飽和について、太陽風が強電場、強動圧のようなイベントでは region1 電流の飽和に加えてオーロラによる電離圏電気伝導度の上昇が重要であることが分かった。通常太陽風の場合は電気伝導度は上昇せず region1 電流の飽和が効いてくると対比的である。

参考文献

- [1] Kivelson, M. G., and A. J. Ridley (2008), Saturation of the polar cap potential: Inference from Alfvén wing arguments, *J. Geophys. Res.*, 113, A05214, doi:10.1029/2007JA012302.
- [2] Siscoe, G. L., G. M. Erickson, B. U. Ö. Sonnerup, N. C. Maynard, J. A. Schoendorf, K. D. Siebert, D. R. Weimer, W. W. White, and G. R. Wilson (2002a), Hill model of transpolar potential saturation: Comparisons with MHD simulations, *J. Geophys. Res.*, 107(A6), 1075, doi:10.1029/2001JA000109.
- [3] Siscoe, G. L., N. U. Crooker, and K. D. Siebert (2002b), Transpolar potential saturation: Roles of region 1 current system and solar wind ram pressure, *J. Geophys. Res.*, 107(A10), 1321, doi:10.1029/2001JA009176.
- [4] Tanaka, T., The state transition model of the substorm onset, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, 21,081-21,096, 2000.

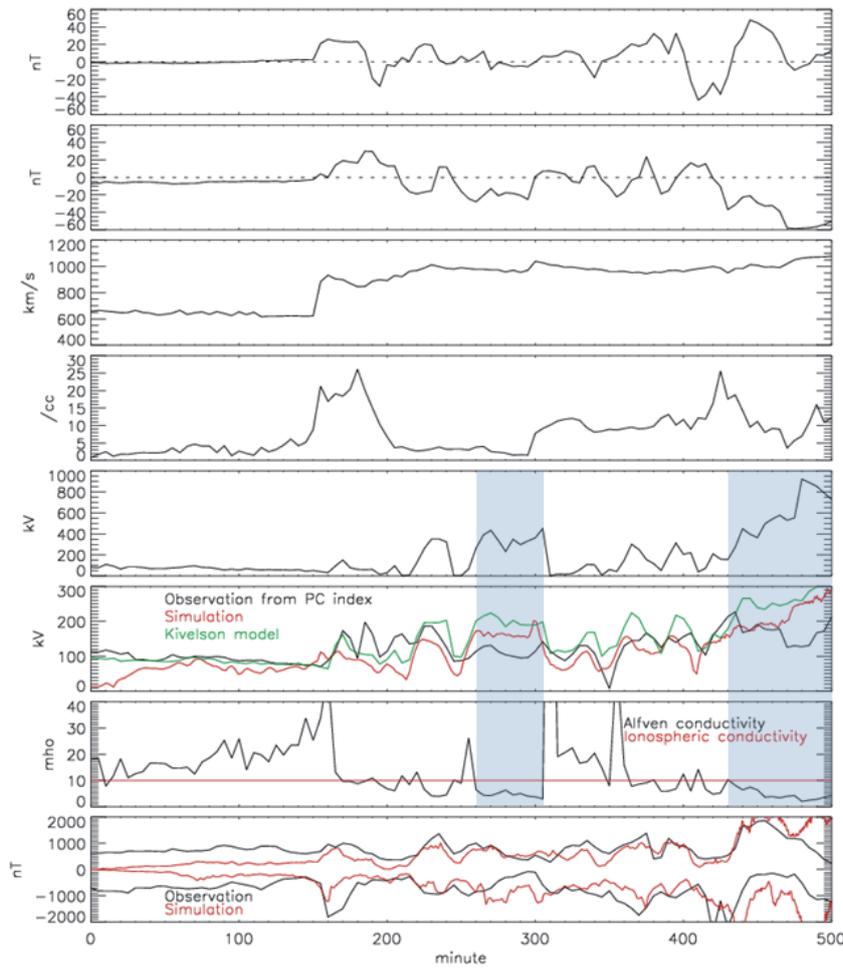


図1. バスティーユイベントの normal case の計算結果 (極冠電位と AE index)。上から太陽風の By, Bz, 速度、密度、太陽風電場ポテンシャル、極冠電位 (黒が観測、赤がシミュレーション、緑が Kivelson モデル)、Kivelson モデルで使われた Alfvén conductivity(黒)と電気伝導度 (赤)、AE index(黒が観測、赤がシミュレーション)。

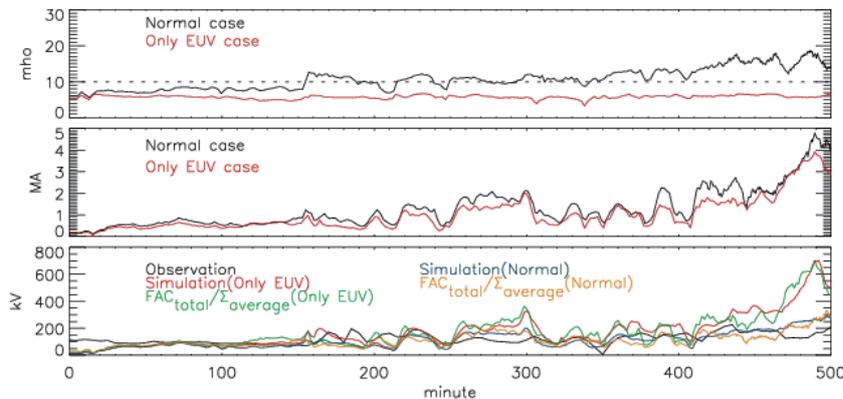


図2. 極冠電位に寄与している電気伝導度と FAC の時間変動。上から平均した電気伝導度 (黒が normal case、赤が only EUV case)、全 FAC の強度 (黒が normal case、赤が only EUV case)、極冠電位 (黒が観測、赤が only EUV case、青が normal case、緑が平均した伝導度と全 FAC から求めた only EUV case の電位、黄が平均した伝導度と全 FAC から求めた normal case の電位)。