

グローバル MHD シミュレーションを用いた 太陽風動圧の大きな急上昇に対する磁気圏応答

Global MHD simulation of the magnetospheric response to large and sudden enhancement of the solar wind dynamic pressure

久保田康文¹、片岡龍峰²、田光江¹、田中高史³、長妻努¹、藤田茂⁴

¹情報通信研究機構、²国立極地研究所、³九州大学、⁴気象大学校

Y. Kubota¹, R. Kataoka², M. Den¹, T. Tanaka³, T. Nagatsuma¹, S. Fujita⁴

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²National Institute of Polar Research, ³Kyushu University, ⁴Meteorological College

1. はじめに

太陽風の衝撃波や動圧のインパルスが磁気圏に衝突することによって、sudden commencement (SC) と呼ばれる地磁気水平成分の急上昇が観測される。極域の SC の磁場変動は両極の変化を示し、最初の変動 preliminary impulse (PI) と、その後の変動 main impulse (MI) から成る。一方、中低緯度の SC の磁場変動はステップ的な上昇を示す。この変動は DL と呼ばれる。このような急激に変化する地磁気変動は時として、地上の送電線網に誘導電流を流し、停電などの障害の要因となることがある。

Araki et al. [1997] は磁気圏境界が静止軌道よりも内側に来るような強い動圧を持つ太陽風が衝突した場合、中低緯度で 200 nT を超えるような極端に強く rise time が短いシャープな SC の観測を報告している。この特異な SC は中低緯度で観測されたがシャープな磁場変動をするため PI の特徴に近く、PI と DL の重ね合わせの磁場変動と考えられる。

DL の場合、SC の磁場強度は太陽風の動圧に依存し、また rise time は磁気圏の effective length (約 30Re) を通過する時間で決まる [Araki et al., 2004]。一方、PI について磁場強度と rise time が何で決まるかは明らかになっていない。Fujita et al [2003a, 2003b] は磁気圏・電離圏結合 MHD シミュレーションを用いて極域の PI を再現しメカニズムを明らかにしている。PI を作る電流は太陽風衝撃波の磁気圏衝突に伴い、磁気圏でダイナモが生成され沿磁力線電流を通して電離圏に流入する。ダイナモは

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{2} \frac{dV^2}{dt} + \mathbf{V} \nabla p \quad (1)$$

の様に書ける。式(1)の右辺第1項である慣性項がダ

イナモに大きく貢献する。つまり、PI は速度と密度に依存すると考えられる。

本研究では、強い動圧を持つ太陽風が磁気圏に衝突した場合についてシミュレーションを行い、PI の磁場変動を調べることを目的としている。PI の磁場強度と rise time の太陽風依存性を調べるため、速度で動圧を上げた場合と密度で動圧を上げた場合のシミュレーションを行い結果を比較した。

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 30722 格子、半径方向に 240 格子となっている。磁気圏・電離圏結合において重要な内部境界条件は Tanaka [2000] と同様である。

太陽風パラメータ $N=5$ [/cc], $V=372$ [km/s], $B_y=2.5$ [nT], $B_z=4.3$ [nT], $T=2 \times 10^5$ [K] で準定常まで計算した状態から、表1のように太陽風動圧を2から16倍の太陽風パラメータを入れて、シミュレーションを行った。太陽風動圧は密度で動圧を上げた場合と速度で動圧を上げた場合をそれぞれ行った。

動圧	2倍	5倍	10倍	16倍
密度 [/cc]	10	25	50	80
速度 [km/s]	526	832	1176	1488

表1. 計算に用いた太陽風パラメータ

3. PI の太陽風依存性

図1は磁気緯度 63° 、ローカルタイム 15 時における、地磁気水平成分の磁場変動を示している。上段が太陽風動圧 5 倍の計算結果、下段が太陽風動圧 10 倍の計算結果である。また左列が密度を上げて太陽風動圧を上げた計算結果で、右列が速度を上げて太陽風動圧を上げた計算結果である。最初のピークが PI で、後のピークが MI である。太陽風動圧 5 倍の計算結果を見ると、同じ動圧にも関わらず、密度で動圧を上げた PI の変動に比べて、速度で動圧を上げた PI の磁場強度が強くと rise time が短いことが分かる。また速度で動圧を上げた場合、動圧 5 倍の計算結果よりも動圧 10 倍の計算結果の方が PI の磁場強度が強くと rise time が短いことが分かる。一方、密度で動圧を上げた場合、動圧 5 倍と動圧 10 倍の磁場変動はほとんど変わらない。

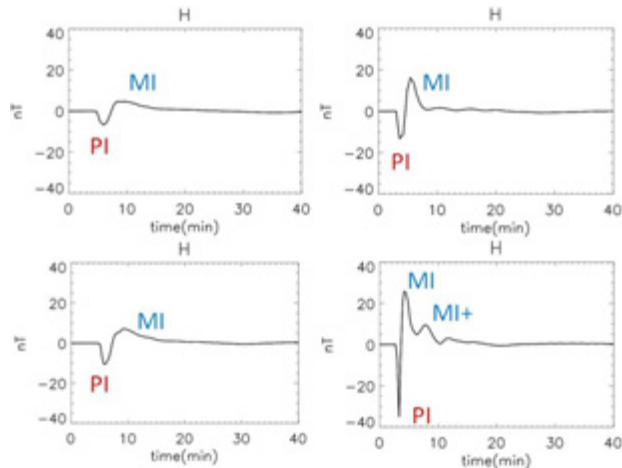


図 1. 地磁気水平成分の磁場変動。上段が太陽風動圧 5 倍の結果、下段が動圧 10 倍の結果。左列が密度を上げて太陽風動圧を上げた結果で、右列が速度を上げて動圧を上げた計算結果である。

図 2 は PI 磁場強度の太陽風動圧依存性 (左図) と rise time 依存性 (右図) を示している。三角の点が太陽風動圧を速度で上げた計算結果、菱形の点が太陽風動圧を密度で上げた計算結果である。密度で動圧を上げた計算結果に比べて速度で動圧を上げた計算結果の方が、PI 磁場強度が強くと動圧に依存していることが分かる。また、密度で動圧を上げた計算結果と比べて速度で動圧を上げた計算結果の方が rise time が短いことが分かる。速度で動圧を上げた場合の PI の effective length は $3.5R_e$ である。

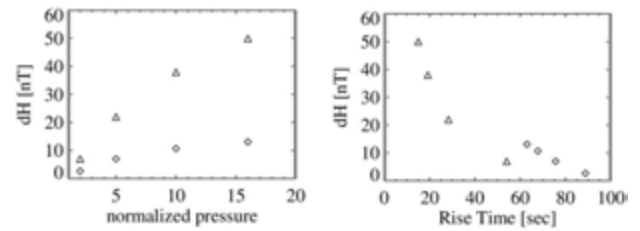


図 2. PI 磁場強度の太陽風動圧依存性 (左図) と rise time 依存性 (右図)

図3は太陽風動圧 5 倍の計算結果について磁気圏赤道断面の $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ のカラーコンターの上に電流ベクトルを書いた図である。上の図が密度で太陽風動圧を上げた計算結果で、下の図が速度で太陽風動圧を上げた計算結果である。白枠の領域の電流ベクトルを見ると、 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ が負の領域でダイナモにより電流が強くなることがわかる。密度で動圧を上げた場合に比べて速度で動圧を上げた場合の方が $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ が大きいことが分かる。ダイナモにより強くなった電流が沿磁力線電流を通して電離圏に流れ込み、強い PI の磁場変動を作っている。

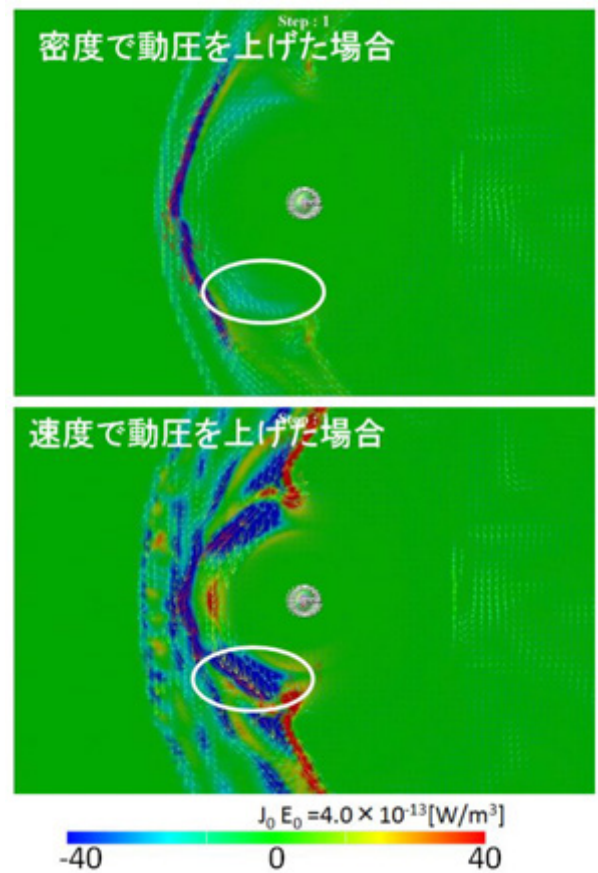


図 3. $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ のカラーコンターと電流ベクトル

4. まとめ

PI の磁場強度は DL の場合とは異なり太陽風動圧ではなく、太陽風速度と密度にそれぞれに依存することが分かった。特に太陽風速度に対して大きく依存する。また rise time は密度で動圧を上げた計算結果と比べて速度で動圧を上げた計算結果の方が短いことが分かった。これは、シャープで強い SC を形成するためには高速な太陽風の衝撃波が衝突する必要があることを示唆している。PI を作る電流は太陽風衝撃波の磁気圏衝突に伴い、磁気圏でダイナモが生成され沿磁力線電流を通して電離圏に流入する。太陽風速度が上がると磁気圏赤道面で慣性項によるダイナモが大きくなり、それに伴って地磁気水平成分の強度が大きくなることが分かった。

参考文献

- [1] Araki, T., S. Fujitani, M. Emoto, K. Yumoto, K. Shiokawa, T. Ichinose, H. Luehr, D. Orr, D. K. Milling, H. Singer, G. Rostoker, S. Tsunomura, Y. Yamada, and C. F. Liu, Anomalous sudden commencement on March 24, 1991, *J. Geophys. Res.*, Vol.102, No. A7, p. 14075-14086, 1997.
- [2] Araki, T., T. Takeuchi, and Y. Araki, Rise time of geomagnetic sudden commencements -Statistical analysis of ground geomagnetic data-, *Earth Planets Space*, 56, p289-293, 2004.
- [3] Fujita, S., T. Tanaka, T. Kikuchi, K. Fujimoto, K. Hosokawa, and M. Itonaga, A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 1. Generation of the field-aligned current associated with the preliminary impulse, *J. Geophys. Res.*, Vol.108, No. A12, 1416, doi:10.1029/2002JA009407, 2003.
- [4] Fujita, S., T. Tanaka, T. Kikuchi, K. Fujimoto, and M. Itonaga, A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 2. Plasma processes in the main impulse, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. A12, 1417, doi:10.1029/2002JA009763, 2003.
- [5] Tanaka, T., The state transition model of the substorm onset, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, 21,081-21,096, 2000.