

## グローバル電離圏嵐：正相電離圏嵐

[ 講演: 陣 英克 (情報通信研究機構) ]



情報通信研究機構 斎藤 享

### 1 正相電離圏嵐の発生過程

正相電離圏嵐 (ionospheric positive storm) とは, 電離圏 (主に  $F$  領域) 電子密度分布が通常より増加する現象をいう。地磁気嵐などに伴って起きる電子密度擾乱を電離圏嵐と呼び, 地磁気静穏時における赤道異常の発達の日々変動などによる電子密度変動は電離圏嵐とは呼ばない。

表 1 に, positive storm の主な要因として考えられるものを示す。本節では, これらの物理過程についてそれぞれ解説する。

#### 1.1 太陽フレア

図 1 は, SOHO 衛星によって観測された太陽フレアの極端紫外線 (EUV) 画像である。太陽フレア時には X 線だけでなく EUV も爆発的に増加し, 一時的に電離圏の電離生成率が急増する。その結果, 電離圏電子密度が急増する。この効果はフレアの減衰とともに急速に減少するため継続時間はごく短い。しかし, 短時間の現象であるものの巨大フレアに伴う電子密度増加は大きく, 2007 年 7 月 14 日の現象 (Bastille Day event) では電離圏全電子数 (TEC) が 5 TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ), 2003 年 10 月 28 日の現象 (Halloween event) では 25 TECU の増加が Tsurutani et al. [2006] により報告されている。また, GPS 観測網を用いた

TEC の全球観測 [Zhang and Xiao, 2005] により, 太陽フレアによる TEC 急増 (sudden increase of TEC; SITEC) の全球分布が観測され (図 2), 太陽天頂角が  $60^\circ$  より高い領域で 14 TECU 以上増加したことがわかっている。

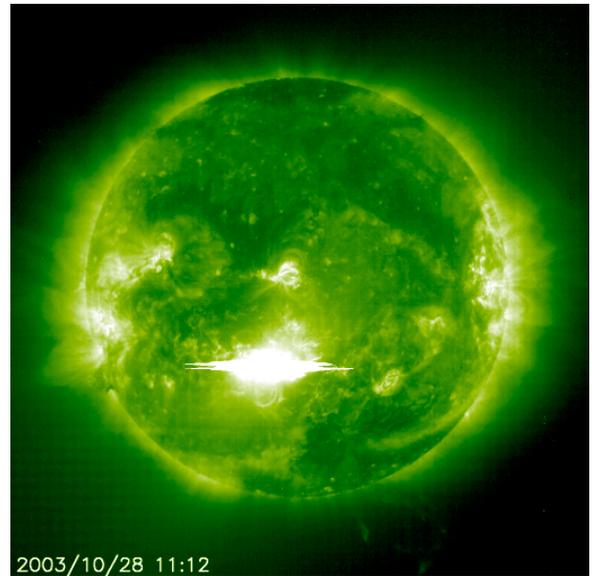


図 1: EUV で見た 2003 年 10 月 28 日の太陽フレア。(SOHO 衛星)

#### 1.2 磁気圏からの電場侵入

磁気圏電場が急増すると, 極冠域に印可される電場が急増する。この電場は, Region-2 沿磁力線電流によって一部遮蔽されるが, 一時的に低緯度

表 1: Positive storm の主な要因. [e.g. Prölss, 1995]

現象	電子密度増加の過程
太陽フレア	太陽極端紫外線 (EUV) 増加による電離生成率増加
磁気圏からの電場侵入	東向き電場による層高度上昇に伴う $[N_2]/[O]$ 減少 Fountain 効果の増大
伝搬性大気擾乱 (TAD)	赤道向き風による層高度上昇に伴う $[N_2]/[O]$ 減少
熱圏風のグローバルな変化	赤道向き風による層高度上昇に伴う $[N_2]/[O]$ 減少 (中緯度) 高高度の大気下降に伴う $[N_2]/[O]$ の減少 (低緯度)
Dusk effect / SED	高密度領域の移流

まで電場が侵入する (under-shielding). この電場は Region-2 電流が十分増加して極冠域の電場を完全に遮蔽するまで (通常 2~3 時間程度) 継続する. 電場の向きは昼側で東向き, 夜側で西向きである (図 3). 逆に, 磁気圏電場が急減すると, Region-2 電流が過剰となり, Region-2 電流が十分減少するまで低緯度に昼側で西向き, 夜側で東向きの電場が一時的に現れる (over-shielding).

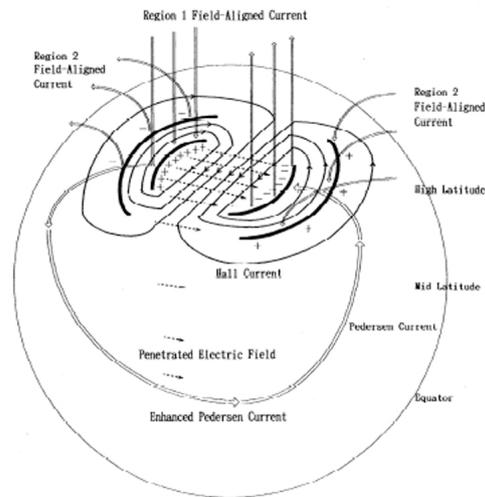


図 3: 極冠域電場の低緯度への侵入. [Kikuchi et al., 1996; Richmond et al., 2003]

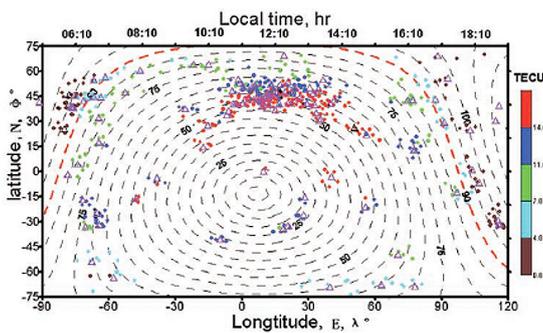


図 2: 2003 年 10 月 28 日のフレア直後の TEC 変動. [Zhang and Xiao, 2005]

密度が増大する. 図 4 は, 東向き侵入電場に対する電離圏の応答 (Millstone Hill IS レーダーによる観測, 数値計算) である. この現象は過渡的な東向き侵入電場によるものであるため, 継続時間は一般的に短い (2~3 時間程度).

1.2.1 層高度上昇による positive storm

電離圏に東向き電場が印可されると,  $E \times B$  ドリフトにより電離圏は上昇する. 高い高度では  $[N_2]/[O]$  が小さいのでイオン消滅率が減少し, 昼側では光電離生成は依然として存在するため電子

1.2.2 侵入電場による赤道異常の発達

昼側磁気赤道・低緯度電離圏では,  $E$  層ダイナモにより東向き電場が生じ,  $E \times B$  ドリフトにより上昇したプラズマが磁力線に沿った拡散に

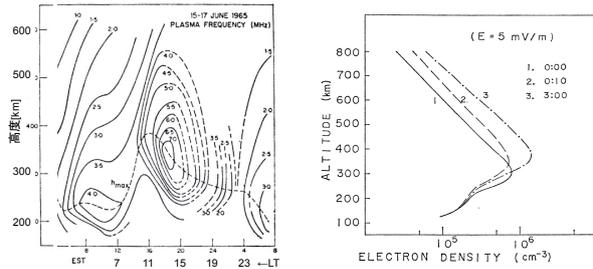


図 4: 東向き電場が印可された場合の電離圏変動. 左: Millstone Hill IS レーダーによる観測, 右: 数値計算結果 [Tanaka and Hirao, 1973]

より磁気赤道から  $10\sim 20^\circ$  離れた低緯度域に集積し, 電子密度分布の極大 (赤道異常) を形成する (fountain 効果). 磁気赤道域電離圏に東向き電場が侵入すると, 通常のダイナモ電場に重畳してより強く磁気赤道電離圏を上昇させ, 通常よりも高緯度により密度の高い赤道異常を形成する. 2003 年 10 月 29 日の現象では, 赤道異常の極大が磁気緯度  $30^\circ$  に達し, 最大 TEC が電場侵入前の 4 倍以上に達したことが CHAMP 衛星により観測されている (図 5). この時, 磁気赤道域では電場侵入前に比べ TEC が減少し, 負相電離圏嵐となっている.

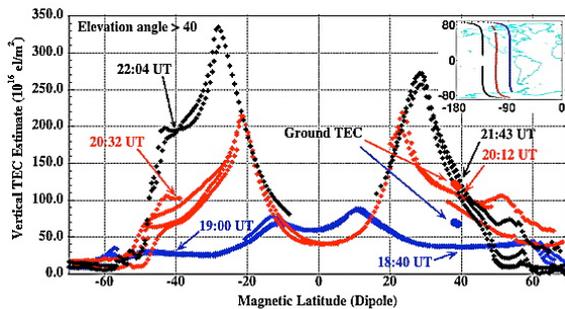


図 5: CHAMP 衛星により観測された, 2003 年 10 月 29 日の侵入電場による赤道異常の発達. [Mannucci et al., 2005]

図 6 は, 電場侵入前と侵入後の電子密度の緯度分布を数値モデル (SAMI2 [Huba et al., 2000]) によって計算したものである. 赤道異常の高緯度側への移動, 赤道異常帯での最大密度の増加, 磁

気赤道域での電子密度減少が再現されている.

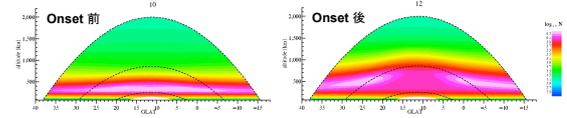


図 6: SAMI2 モデルにより計算された電子密度の緯度・高度分布. 左: 電場侵入前, 右: 電場侵入後. 横軸は地理緯度.

### 1.3 伝搬性大気擾乱 (TAD)

極域の加熱により伝搬性大気擾乱 (traveling atmospheric disturbances; TAD) と呼ばれる熱圏中性大気の擾乱が赤道方向に放出される. TAD は赤道向きの熱圏中性風 ( $100\sim 200\text{ m s}^{-1}$  程度) が位相速度  $600\sim 700\text{ m s}^{-1}$  で赤道向きに伝搬する現象である. 赤道向きの熱圏中性風はプラズマを磁力線に沿って押し上げる. 東向き侵入電場の場合と同様に, 高い高度では  $[N_2]/[O]$  が小さいのでイオン消滅率が減少し, 昼側では電子密度が通常よりも増大する. この現象も継続時間は短い (2 時間程度, 図 8 左図参照).

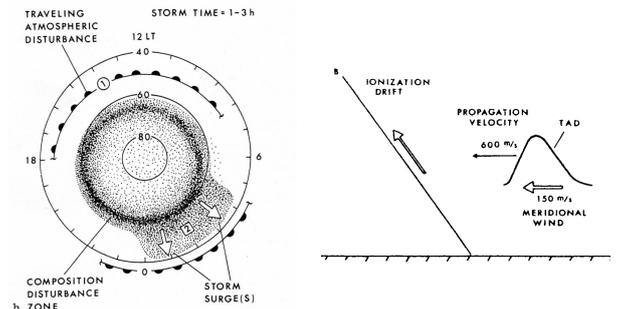


図 7: 極域エネルギー流入と TAD, 電離圏変動. 左: 極域から発生する TAD, ストームサージ, 右: TAD による電離圏高度変動. [Pröls, 1993]

### 1.4 熱圏風のグローバルな変化

極域の持続的な加熱により, 熱圏中性風の大循環が変化する. その結果, 電子密度分布が変化する

る。この様子を全球数値モデルを用いて計算した結果を図 8 に示す。赤道向きの TAD の後、次第に赤道向き風速が増大する。これは電離圏を押し上げ、 $[N_2]/[O]$  の減少により電子密度増大を生じる。また、極域における加熱による上昇に伴い、低緯度側では  $[N_2]/[O]$  の小さい中性大気が下降し電子密度増大に働く。 $[N_2]/[O]$  の減少領域は次第に低緯度へ移動し、中緯度には  $[N_2]/[O]$  の増大領域が進出する。 $[N_2]/[O]$  の小さい中性大気の下降による正相電離圏嵐の効果は、低緯度で現れやすい。

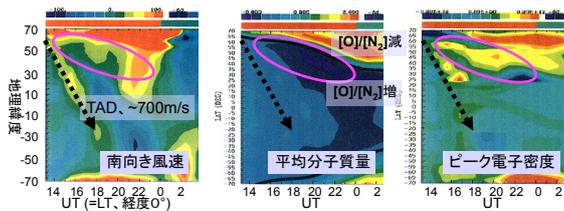


図 8: 磁気嵐に伴う熱圏中性大気、電子密度の変動の全球モデル計算結果。[Fuller-Rowell et al., 1994]

## 2 実際の現象を複雑にする要因

現実の positive storm は、これまでに述べてきた過程で単純に説明できない複雑な変動を示す。以下に、現実の positive storm が複雑なものになる原因として考えられるものの一部を紹介する。

### 2.1 複数の要因の重なりあい

これまでに述べてきたように、positive storm の要因と考えられる過程は複数ある。実際の現象においては、これらの過程が同時に作用し、互いにその効果を強めあい、又は打ち消しあう。それぞれの効果の現れるタイミングにより、電離圏電子密度に現れる変動は複雑なものとなる。

図 9 は、2003 年 10 月 29 ~ 30 日に発生した大規模電離圏嵐時の数値計算による再現である。左図は TEC の緯度断面であり、侵入電場と熱圏中性（磁気）南北風の効果が互いに強めあい、TEC の

極大が増幅されている。これは、磁気赤道における fountain 効果に加えて、赤道向き熱圏中性風が（図 9 右）層高度を高く保ちイオン消滅率を低くするためであると考えられる。

この他、熱圏中性風の positive storm に対する効果を正しくするためには、極域のエネルギー流入の南北非対称、磁気赤道と地理赤道のずれ（背景風の磁気南北非対称）、磁気偏角（地理東西風が磁気南北成分を持つ）などを考慮する必要がある。

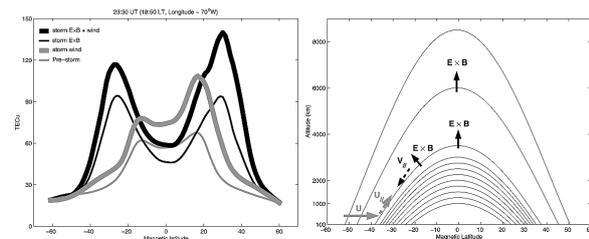


図 9: 2003 年 10 月 29 ~ 30 日の大規模電離圏嵐時の、各擾乱要素の TEC に対する効果の数値計算結果。左: TEC の緯度断面、右: 磁気子午面内におけるプラズマのダイナミクス。[Lin et al., 2005]

### 2.2 擾乱ダイナモ

地磁気擾乱が続くと、熱圏中性大気の大循環が変化し、擾乱ダイナモ (disturbance dynammo) が生じる（図 10、詳しくは本ハンドブック「中緯度電離圏擾乱とその起源」を参照）。擾乱ダイナモは昼側で西向き、夜側で東向きの電場を誘起するので、under-shielding の侵入電場と打ち消しあい、over-shielding の侵入電場と強めあう。従って、侵入電場は地磁気擾乱との相互のタイミングによって、その効果の現れが異なることになる。

## 3 未解決問題/興味深い課題

最後に、positive storm に関連して、未だ解決されていない問題、今後の研究において興味深い課題について述べて、本稿のまとめとする。

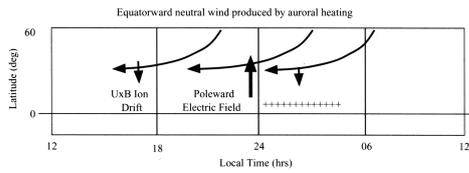


Fig. 16. Schematic representation of the poleward electric polarization field that is produced by equatorward and westward neutral winds resulting from a high latitude heat source.

図 10: 擾乱ダイナモの模式図. [Heelis, 2004]

- 現象ごとに異なる様相  
これまでに述べてきた positive storm の各要因のうち、どれが支配的になるかは現象ごとに異なる。現象ごとにどれが支配的であったかを推定することはできる。しかし、現象ごとにある過程が支配的になるように何が決められているのかは未だ理解されていない。
- 電離圏嵐時のエネルギー収支・輸送  
極域に流入したエネルギーが低緯度へ運ばれていく過程で、どれくらいのエネルギーが輸送されどこで消費されていくのか、MTI 領域における極域～赤道域の結合過程を考える上で、定量的な議論が必要である。
- 電離圏嵐の正・負相の現れるタイミング  
地磁気嵐が起きた時に、どのタイミングでどの相（正負）が現れるのか予測することは、実用的な観点（短波放送・通信、衛星通信、衛星測位など）からも重要である。
- これまでに考えられてきた過程では説明できない現象  
現象によっては、これまでに述べてきた過程単一あるいはそれらの合成では説明できないものも報告されている。以下はその一例である。図 11 は、2004 年 4 月 3 日に Millstone Hill IS レーダーで観測された電子密度、東西電場である。この例では、東向きの電場が 10 時間にわたって継続している。電場侵入は通常 2~3 時間しか継続しないと考えられており、電場侵入であるとすればなぜこれほど長時間継続したのか、電場侵入でないとするれば

何が東向き電場を発生させたのか、今後の研究が待たれるところである。

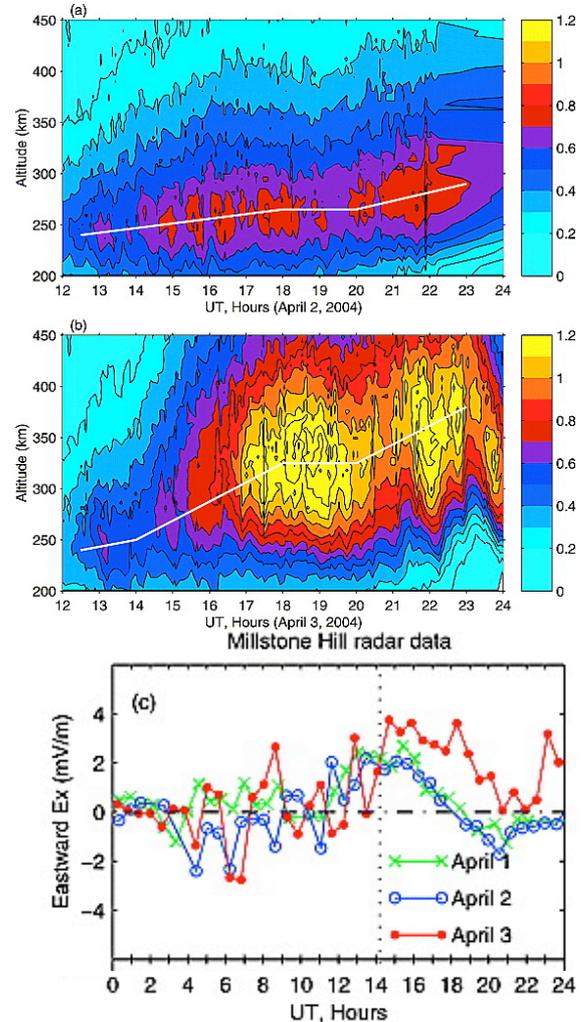


図 11: Millstone Hill IS レーダーの観測結果. 上: 2004 年 4 月 2 日 (静穏時) の電子密度, 中: 2004 年 4 月 3 日 (擾乱時) の電子密度, 下: 2004 年 4 月 1~3 日の電場の東西成分. [Huang et al., 2005]. [See also Swisdak et al., 2006]

## 4 まとめ

Positive storm は、太陽フレア時の EUV 強度増加や、極域電場の侵入、TAD、熱圏風の変化な

どが要因となって発生する。現実にはそれらが同時に起こり、そのタイミング・力関係により電離圏嵐を現象ごとに異なった複雑なものにする。大局的に見た電離圏嵐の描像（エネルギー収支、輸送過程、どのような条件でどの過程が卓越するかなど）は未だ理解が進んでいない。個々の現象においても、メカニズムが未解明な現象が数多くあり、これらを研究することにより新たな発見が期待される。

## 参考文献

- Fuller-Rowell, T. J., M. V. Codrescu, R. J. Moffett, and S. Quegan, Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **99**, 3893–3914, 1994.
- Huang, C. S., J. C. Foster, L. P. Goncharenko, P. J. Erickson, W. Rideout, and A. J. Coster, A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JA010865, 2005.
- Heelis, R. D., Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: a tutorial, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **66**, doi:10.1016/j.jastp.2004.01.034, 2004.
- Huba, J. D., G. Joyce, and J. A. Fedder, Sami2 is Another Model of the Ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model, *J. Geophys. Res.*, **105**, doi:10.1029/2000JA000035, 2000.
- Kikuchi, T., H. Lühr, T. Kitamura, O. Saka, and K. Schlegel, Direct penetration of the polar electric field to the equator during a DP 2 event as detected by the auroral and equatorial magnetometer chains and the EISCAT radar, *J. Geophys. Res.*, **101**, doi:10.1029/96JA01299, 1996.
- Lin, C. H., A. D. Richmond, R. A. Heelis, G. J. Bailey, G. Lu, J. Y. Liu, H. C. Yeh, and S.-Y. Su, Theoretical study of the low- and midlatitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 superstorm: Relative importance of the neutral wind and the electric field, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2005JA011304, 2005.
- Mannucci, A. J., B. T. Tsurutani, B. A. Iijima, A. Komjathy, A. Saito, W. D. Gonzalez, F. L. Guarinieri, J. U. Kozyra, and R. Skoug, Day-side global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween Storms”, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2004GL021467, 2005.
- Prölss, G. W., On explaining the local time variation of ionospheric storm effects, *Ann. Geophys.*, **11**, 1–9, 1993.
- Prölss, G. W., Ionospheric F-region storms, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. 2, edited by H. Volland, chap. 8, pp. 195–248, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1995.
- Richmond, A. D., C. Peymirat, and R. G. Roble, Long-lasting disturbances in the equatorial ionospheric electric field simulated with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JA009758, 2003.
- Swisdak, M., J. D. Huba, G. Joyce, and C.-S. Huang, Simulation study of a positive ionospheric storm phase observed at Millstone Hill, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2005GL024973, 2006.
- Tanaka, T., and K. Hirao, Effects of an electric field on the dynamical behavior of the ionosphere and its application to the storm time disturbance of the F-layer, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 1443–1452, 1973.
- Tsurutani, B. T., F. L. Guarinieri, T. Fuller-Rowell, A. J. Mannucci, B. Iijima, W. D. Gonzalez, D. L. Judge, P. Gangopadhyay, A. Saito, T. Tsuda, O. P. Verkhoglyadova, and G. A. Zambon, Extreme solar EUV flares and ICMEs and resultant extreme ionospheric effects: Comparison of the Halloween 2003 and the Bastille Day events, *Radio Sci.*, **41**, doi:10.1029/2005RS003331, 2006.
- Zhang, D. H., and Z. Xiao, Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JA010738, 2005.