

中緯度電離圏擾乱とその起源

[講演: 丸山 隆 (情報通信研究機構)]

情報通信研究機構 斎藤 享



1 電離圏嵐 (電離圏密度擾乱)

本稿では、電離圏嵐 (電離圏密度擾乱) について解説する。電離圏嵐とは、電離圏 (主に F 領域) 電子密度分布が通常の分布から正あるいは負に顕著に異なる様相を示す現象を言う。電子密度分布が通常より増加する現象を正相電離圏嵐 (ionospheric positive storm)、通常より減少する現象を負相電離圏嵐 (ionospheric negative storm) という。一般に、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。

2 電離圏電子密度擾乱の基礎過程

2.1 連続の式

電離圏 F 領域におけるイオンの主成分は酸素原子イオン (O^+) である。 O^+ の密度 (n_i) 変動は、以下の式 (連続の式) で表される。

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) + P_i - L_i \quad (1)$$

ここで \mathbf{v}_i は O^+ の流体速度である。右辺第 1 項は移流 (advection)、第 2 項は太陽極端紫外線 (EUV) による電離生成、第 3 項は消滅を表す。 O^+ の再

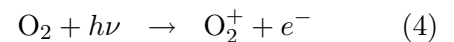
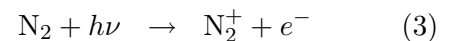
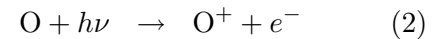
結合係数は非常に小さいので、主に中性大気粒子との組み替え衝突により他の分子イオンに変換され、より再結合係数の大きい解離再結合により消滅する。これら 3 項の平衡が崩れると、電子密度の変動が生じ、電子密度擾乱 (嵐) が発生する。

2.2 化学反応

電離圏 F 領域における主なイオン化学反応を以下に示す。

- 太陽極端紫外線電離

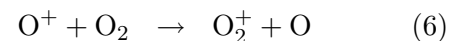
電離圏 F 領域の主な中性大気成分は O , N_2 , O_2 であり、太陽 EUV により以下のように電離され (photoionization) イオンを生成する。



式 (2) が式 (1) における P_i に対応する。

- 組み替え衝突

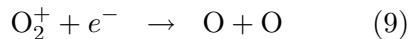
生成された O^+ , N_2^+ は、中性大気との衝突を介して以下のように変換される (rearrangement)。



式 (5) 及び (6) が式 (1) における L_i に対応する。

- 解離再結合

上記の過程で生成された分子イオンは、電子と結合して消滅、解離し、中性原子となる (dissociative recombination)。



3 負相電離圏嵐

電子密度が通常値よりも減少する現象を、負相電離圏嵐 (ionospheric negative storm) と呼ぶ。負相電離圏嵐の原因は、式 (1) 右辺第 3 項 (イオン消滅率) が增大することである。中性大気分子成分が増加 ($[\text{N}_2]/[\text{O}]$ が増加) することにより組み替え衝突が増加し、解離再結合によりより多くのイオンが消滅する。 $[\text{N}_2]/[\text{O}]$ を増加させるプロセスとしては以下のようなものが考えられる。

- 熱圏中性大気組成変化

極域におけるオーロラ活動に伴うエネルギー注入 (加熱) により、低高度の $[\text{N}_2]/[\text{O}]$ が大きな中性大気が上昇し、その $[\text{N}_2]/[\text{O}]$ が大きな中性大気が中低緯度に流入する。その結果、通常よりも $[\text{N}_2]/[\text{O}]$ が増大し、イオンの消滅が促進され電子密度が減少する。負相電離圏嵐の原因として最も多く見られるメカニズムである。

- 西向き電場による層高度の低下

極域におけるオーロラ活動に伴うエネルギー注入 (加熱) により、大気大循環が変化し、極から赤道に向かう中性風が増大する。赤道向き中性風はコリオリ力により西向きに向きを変える。最終的に、昼側で西向き、夜側で東向きの電場が生じる (擾乱ダイナモ; 3.3 節参照)。西向き電場は層を $[\text{N}_2]/[\text{O}]$ の大きい低高度へ押し下げる。その結果再結合が増大

し電子密度が減少する。また、極域の電場が急激に増大・減少した場合に低緯度に侵入する電場も電離圏を上下に運動させる。西向きの侵入電場 (極域電場の増大時の夜側、減少時の昼側) は、層を押し下げ電子密度を減少させる。中性風系の変化による擾乱ダイナモの効果に比べて電場の侵入は短時間の現象であり、西向き侵入電場による負相電離圏嵐の持続時間は一般的に短い。

- 極向き中性風による層高度の低下

イオンは磁場に沿った向きには非常に動きやすいので、極向きの中性風が増大すると、中性大気のドラッグ効果によりイオンは磁力線に沿って押し下げられる。低高度では $[\text{N}_2]/[\text{O}]$ が大きいいため、再結合が増大し電子密度が減少する。

3.1 実例：熱圏中性大気組成変化による負相電離圏嵐

図 1 に、2001 年 3 月 15 ~ 22 日の Kp 指数、及び稚内、国分寺、沖縄における f_oF2 の変動を示す。3 月 19 日までの f_oF2 が通常の変動をなぞっているのに対し、地磁気活動が活発化した 20 日以降、通常の変動から外れた変動が現れ、21 日には日出後もほとんど電離圏電子密度が上昇しない顕著な負相電離圏嵐が発生した。

これを電離圏全電子数 (total electron content: TEC) で見てみると (図 2)、日本上空全域にわたって長時間通常値の半分以下まで TEC が減少していることがわかる。

図 3 に、2001 年 3 月 19 ~ 21 日の AE 指数、稚内、国分寺、沖縄における電離圏ピーク高度 h_mF2 、 f_oF2 の変動を示す。3 月 19 日の夜以降、AE 指数が高い値を示し、極域のオーロラ活動が活発であったことがわかる。3 月 20 日夜間に電離圏ピーク高度は全地点において、赤道方向へ伝搬する波動状の変動を伴いながら上昇を示し、3 月 21 日の日出前までに通常よりも 100 km 以上上昇している。その後 3 月 21 日の日出を迎えるが、電子密度

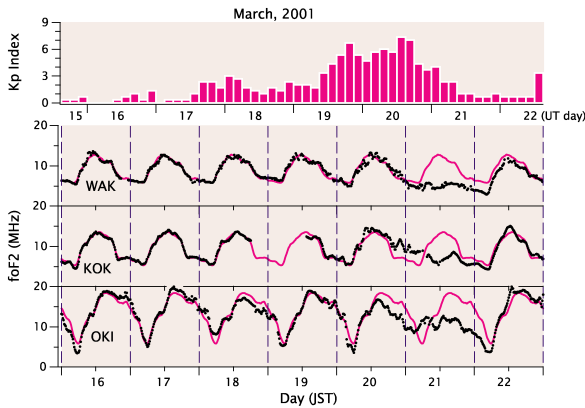


図 1: 2001 年 3 月 15~22 日の Kp 指数, 及び稚内, 国分寺, 沖縄における f_oF2 の変動

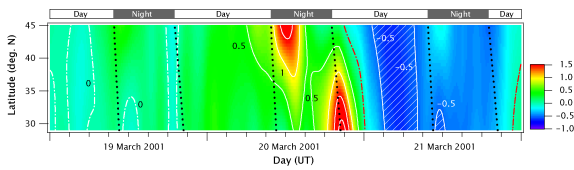


図 2: 2001 年 3 月 19~21 日の日本上空における TEC (通常値からの変動比) の変動.

は上昇せず通常よりも大きく減少した夜間並の値を取り続ける。

3.2 磁気嵐に伴う熱圏中性風変化

図 4 は, UARS 衛星によって観測された, 地磁気擾乱時の熱圏 (高度 240–260 km) 中性風 (静穏時からの変動分) である. 右側の図 (南北成分) に注目すると, 北半球では南向き, 南半球では北向き, すなわち両半球で赤道向きの熱圏中性風が強まり, その強さは緯度が高いほど大きいことがわかる. このことから, 地磁気擾乱時には極域の加熱に伴い, 赤道向きの熱圏中性風が強化されることがわかる.

図 5 は, CTIM モデルにより計算された, 地磁気擾乱時の熱圏中性風南北成分 (静穏時からの変動分) である. 特に夜間において赤道向きの熱圏中性風が強まることが示されている. これは, 電子密度の低い夜間の方が, 中性大気の運動に対

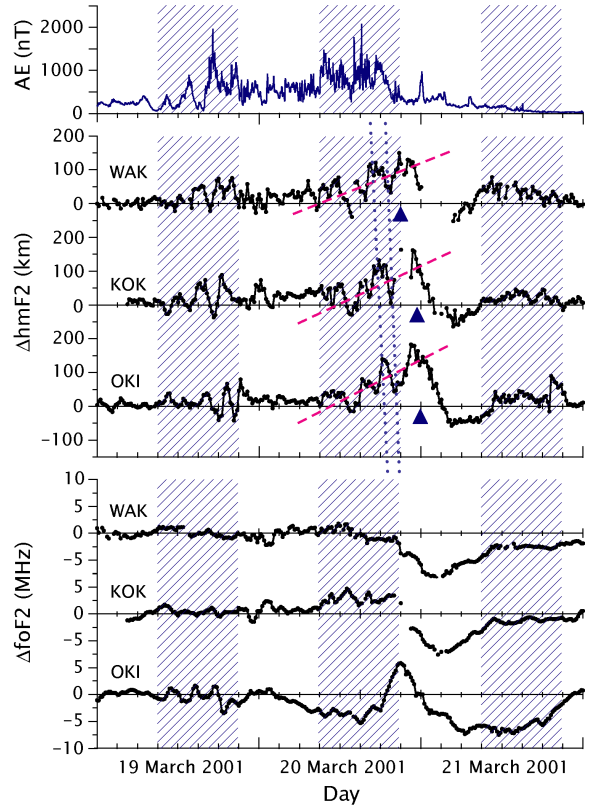


図 3: 2001 年 3 月 19~21 日の AE 指数, 稚内, 国分寺, 沖縄における電離圏ピーク高度 h_mF2 , f_oF2 の変動 (どちらも通常値からの変動分) .

して地球磁場に束縛されるプラズマが抗する効果 (イオンドラッグ) を受けにくく, 極域から吹き出した熱圏中性風がイオンドラッグによる減衰をあまり受けず, 低緯度まで達することができることを示す.

3.3 擾乱ダイナモ

極域から赤道方向に吹き出した熱圏中性風は, コリオリ力によって次第に西向きに方向を変えらる. 西向き熱圏中性風は F 領域においてイオンを $U \times B$ 方向 (赤道向き) に Pedersen 電流を生じさせ, 極向き分極電場を誘起する (図 6 上). 極向き電場は E 領域において東向き Hall 電流を発生させるが, 昼夜の電気伝導度の違いにより日没線付近で正電荷, 日出線付近で負電荷が過剰とな

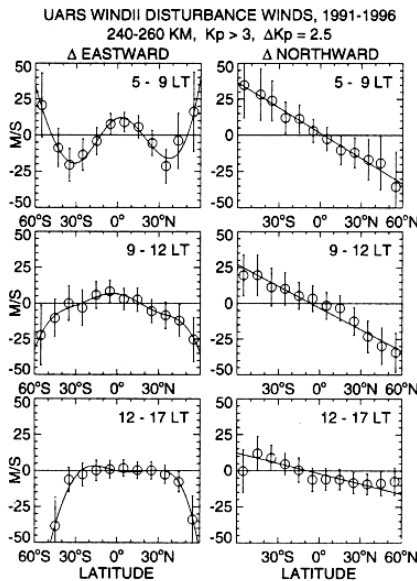


Figure 3. Latitudinal profiles of the seasonally averaged zonal and meridional disturbance winds for three local time periods.

図 4: 地磁気擾乱時の 5-9, 9-12, 12-17 LT における熱圏中性風 (季節平均済み, 擾乱成分) の緯度分布. 左: 東向き成分, 右: 北向き成分. [Fejer et al., 2000]

る. 結果として昼側で西向き, 夜側で東向きの電場が生じる. これを擾乱ダイナモ (disturbance dynamo) と呼ぶ. この電場の向きは, 静穏時のダイナモ電場 (昼側で東向き, 夜側で西向き) を打ち消す向きに生じる (図 6 下). 全球モデル計算を用いることにより, 擾乱ダイナモ電場の緯度・地方時分布特性が調べられている (図 7).

擾乱ダイナモが発達すると, 夜側で東向き電場が卓越し電離層高度が上昇する. 高高度においてはイオン・中性衝突周波数が減少するのでイオンドラッグが減少し, 極域からの $[N_2]/[O]$ の高い組成変化を伴う熱圏大気がより低緯度まで到達することができるようになると考えられる. 2001 年 3 月 21 日の負層電離圏嵐は, 3 月 20 日夜からの電離圏高度上昇を伴い, 擾乱ダイナモによる負層電離圏嵐の促進効果を強く示唆する.

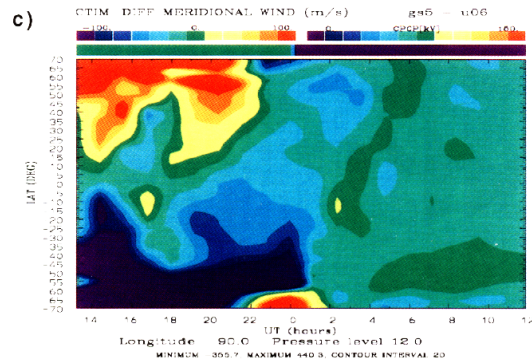


図 5: CTIM モデルにより計算された地磁気擾乱時の熱圏中性風南北成分 (擾乱成分) の緯度・地方時変化. [Fuller-Rowell et al., 1994]

3.4 負相電離圏嵐: まとめ

中低緯度における負相電離圏嵐の主な原因は, 大気組成の変化 ($[N_2]/[O]$ の増大) による電子・イオン再結合の増加である (図 8). 極域へのエネルギー流入の結果, 極域において熱圏中性大気の $[N_2]/[O]$ が増大し, ストームサージと呼ばれる赤道向き熱圏中性風により中低緯度へ運ばれ, 負相電離圏嵐を引き起こす. 極域へのエネルギー流入は同時に熱圏大気大循環を変化させ, 擾乱ダイナモ電場が生じ, 夜間で電離圏プラズマを衝突の少ない高高度へ持ち上げる. その結果イオンドラッグが減少し, 大気大循環の変動はより加速する. イオンドラッグの減少は, 赤道向きストームサージの減衰を抑制し, より低緯度まで大気組成変化の効果が達するようになる.

4 正相電離圏嵐

電子密度が通常値よりも増加する現象を, 正相電離圏嵐 (ionospheric positive storm) と呼ぶ. 正相電離圏嵐の原因は主に式 (1) 右辺第 3 項 (イオン消滅率) が減少することであるが, 第 1 項の移流が重要な役割を果たす場合もある. 中性大気の分子成分が減少 ($[N_2]/[O]$ が減少) することにより組み替え衝突が減少し, 解離再結合によるイオ

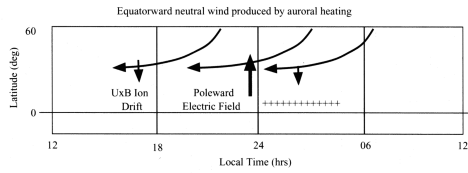


Fig. 16. Schematic representation of the poleward electric polarization field that is produced by equatorward and westward neutral winds resulting from a high latitude heat source.

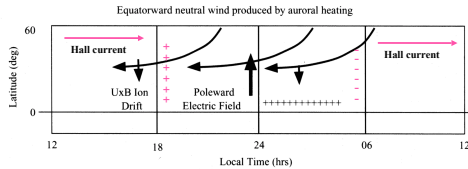


図 6: 擾乱ダイナモのメカニズムの模式図. 上: 西向き風による極向き分極電場, 下: 極向き分極電場による東西 Hall 電流と東西分極電場. (Heelis [2004] による.)

ン消滅率が減少する. 結果として式 (1) 右辺第 2 項 (イオン生成率) が優勢となり, 電子密度が増大する. 電子密度を増大させるプロセスとしては以下のようなものが考えられる.

- 熱圏中性大気組成変化
 $[N_2]/[O]$ が通常よりも減少した大気が流入することにより, イオン消滅率が減少し正相電離圏嵐となる. 極域の加熱により大気循環が変化し, 高緯度に上昇流が生じ低緯度には下降流が生じる. その結果, 低緯度では高高度の $[N_2]/[O]$ が少ない大気が卓越し, イオン消滅率が減少し電子密度が増大しうると考えられている. しかしながら, このプロセスは低緯度ではありうるが, 中緯度ではあまり有効でない (中緯度で下降流は生じにくく, 極域からの $[N_2]/[O]$ が大きい大気の進出による負相の効果は優勢) と考えられている.
- 東向き電場による層高度の上昇
 東向きの侵入電場により, 層が高高度へ持ち上げられる. 高高度では $[N_2]/[O]$ が小さいので組み替え衝突が減少し, 解離再結合によるイオン消滅率が減少する. 昼側ではイオン生成が優勢となり, 電子密度が増大する. 擾乱ダイナモが発達した夜側では擾乱ダイナモ電

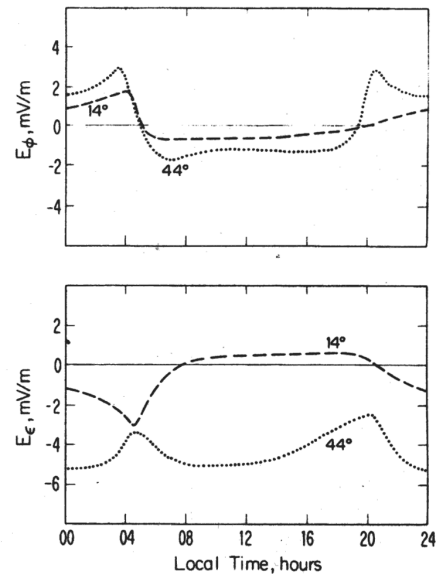


図 7: 全球モデル計算による擾乱ダイナモ電場. 上: 東西成分, 下: 赤道向き成分. [Blanc and Richmond, 1980]

場は東向きで層を持ち上げる効果がある. しかし夜側ではイオン生成がないため, 顕著な正相電離圏嵐とはならない.

- 赤道向き中性風による層高度の上昇
 赤道向きの中性風が増大すると, 中性大気のドラッグ効果によりイオンは磁力線に沿って押し上げられる. 高高度では $[N_2]/[O]$ が小さいため, 再結合が減少し昼側では電子密度が増大する.
- 移流による効果
 太陽 EUV による電離生成の少ない夕方, あるいは電離生成のない夜間において電子密度が通常より増加することがあり, dusk effect [Mendillo et al., 1970] として知られてきた. この現象は, 電子密度の高い領域 (発達した赤道異常帯) から高密度のプラズマが $E \times B$ ドリフトにより輸送されてくることにより生じると考えられている. しかし, その電場の起源はよく分かっていない.

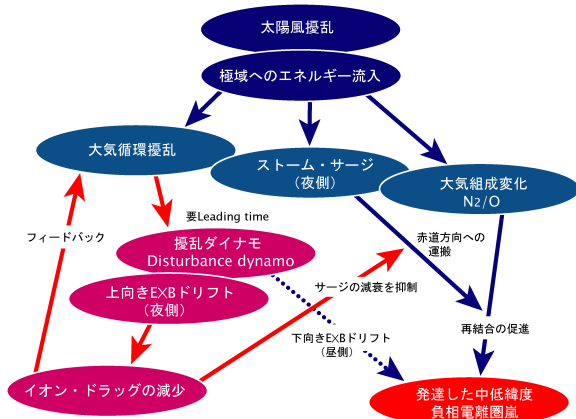


図 8: 負相電離圏嵐のメカニズム.

4.1 実例：層高度上昇による正相電離圏嵐

図 9 に、2001 年 11 月 1~7 日の Kp 指数、及び稚内、国分寺、沖縄における f_oF2 の変動を示す。11 月 5 日までの f_oF2 は通常の変動をなぞっているのに対し、地磁気活動が活発化した 11 月 6 日に、通常値を超える変動が見られる。この変動はより高緯度側で顕著である。

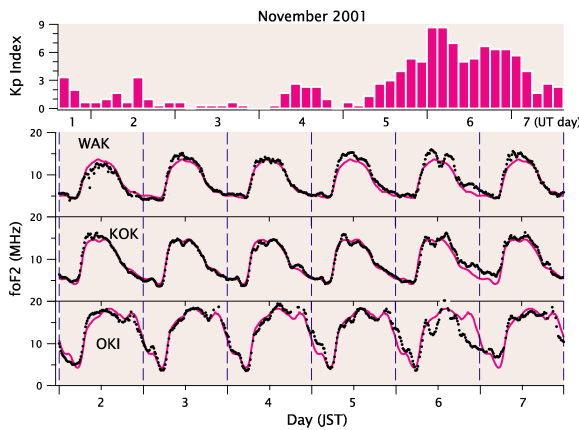


図 9: 2001 年 11 月 1~7 日の Kp 指数、及び稚内、国分寺、沖縄における f_oF2 の変動

これを TEC で見てみると (図 10), 通常値の倍以上増加していることがわかる。この TEC 変動は、日本上空全域にわたって見られる。

図 11 に、2001 年 11 月 5~6 日の国分寺におけるイオノグラムトレースの変動を示す。層が持

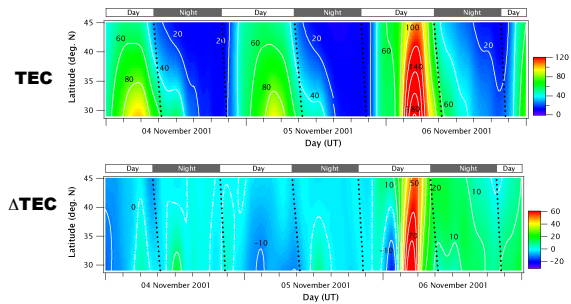


図 10: 2001 年 11 月 4~6 日の日本上空における TEC の変動。(上) 絶対値, (下) 通常値からの変動分.

ち上げられた後、 f_oF2 が増大していることがわかる。イオノグラムトレースは高さ方向の軸が伝搬遅延を含んだ virtual height であるので、下層の電子密度分布の影響を受け、virtual height の変動は必ずしも実高度の変動と一致しない。そこで、図 12 に 2001 年 11 月 2~6 日の電離圏 F 領域ピーク高度 (h_pF2) の変動を示す。2001 年 11 月 6 日 0151 UT (10:51 JST) に発生した磁気嵐急始 (SC) に対応して層高度が急激に上昇していることがわかる。この層高度の上昇はその後強弱を繰り返しながら約 11 時間にわたって継続している。

SC に伴う層高度の急上昇は、磁気圏電場の急激な増大に伴う東向き侵入電場によるものと考えられるが、通常侵入電場の継続時間は短いので、それだけでは 11 時間にわたる層高度の上昇を説明することは難しい。TEC の上昇と層高度の変動を比べてみると (図 13), 10~11 JST の層高度上昇は南北にわたって同時に起きているのに対し、18~21 JST 頃には層高度の上昇が北から南へ伝搬する様子が見られる。これは、極域の加熱に伴い増加した赤道向き熱圏中性風がプラズマを磁力線に沿って押し上げているものと考えられる。従って、この 2001 年 11 月 6 日の正相電離圏嵐は、侵入電場による層高度の上昇と、大気循環の変化に伴う赤道向き熱圏風による層高度の上昇が複合して起きたものと考えられる。

しかしながら現実にはより複雑で、11 月 6 日には

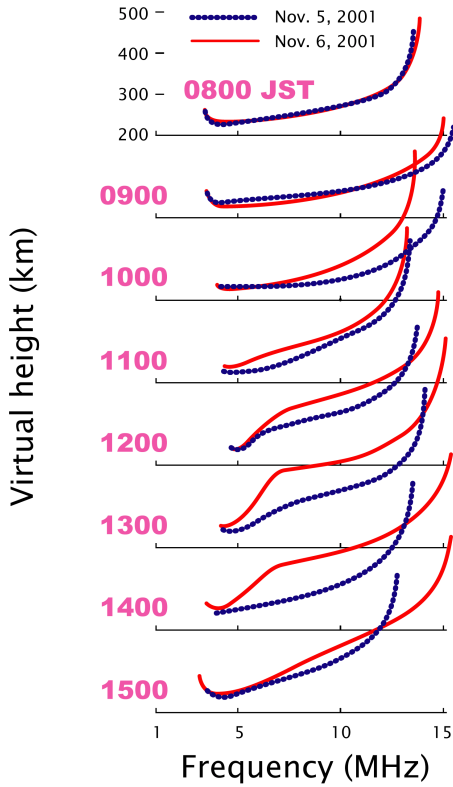


図 11: 2001 年 11 月 5 ~ 6 日の国分寺におけるイオノグラムトレースの変動.

図 9 の沖縄の f_oF2 にも見られるように、通常値よりも f_oF2 が減少している場所・時間帯が存在している。図 14 は日本上空の TEC 変動と、稚内、国分寺、沖縄の N_mF2 の通常値からの変動分を示す。沖縄では SC に先駆けて電離圏電子密度が減少している。また、夕方から夜間にかけて大きな電子密度の減少が見られる。前者については、SC 前からすでに地磁気活動は活発になっており擾乱ダイナモにより通常時の昼側の東向き電場が弱められ、また後者は同じく擾乱ダイナモの発達により磁気赤道における夕方の東向き電場の強化 (prereversal enhancement) の発達が阻害され、それぞれ赤道異常の発達が弱かったためと思われる。また後者の現象において、沖縄においては TEC よりも N_mF2 により顕著な電子密度減少が見られる。これは、電離圏ピーク付近は赤道異常の発達が阻害された影響を受けるものの、より

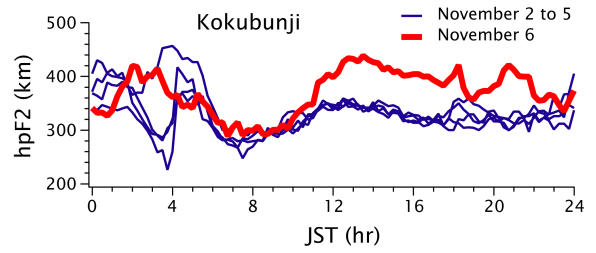


図 12: 2001 年 11 月 2 ~ 6 日の国分寺における h_pF2 の変動.

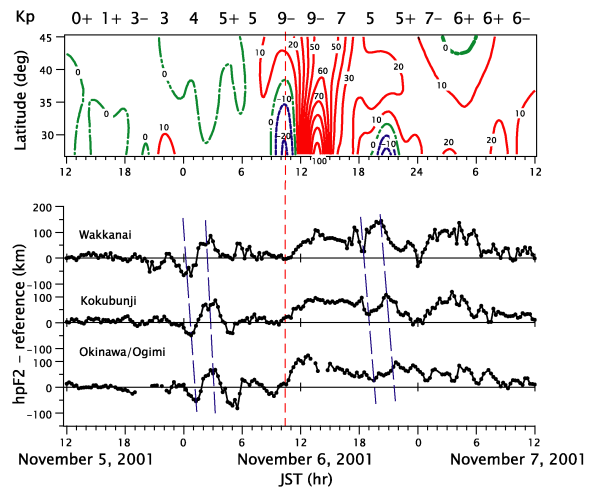


図 13: 2001 年 11 月 5 ~ 7 日日本上空の TEC 及び、稚内、国分寺、沖縄における h_pF2 の変動.

高い高度の電離圏は磁力線で結ばれたより高緯度側の正相電離圏嵐の影響を受けているため、鉛直方向の TEC としては正負の効果が相殺して電子密度変動を弱めているものと考えられる (図 15)。このように、実際の電離圏擾乱においては、正相・負相電離圏嵐の効果は同居しており、その効果の勝る方が現象として現れると考えられる。

4.2 実例：移流による正相電離圏嵐

図 16 に稚内、国分寺、山川、沖縄における 2004 年 11 月 5 ~ 10 日の F 領域最大電子密度 (N_mF2) を示す。11 月 8 日及び 10 日に強い正相電離圏嵐が見られ、それぞれ昼間と夕方 ~ 夜間の 2 回強い N_mF2 の増大が見られる。

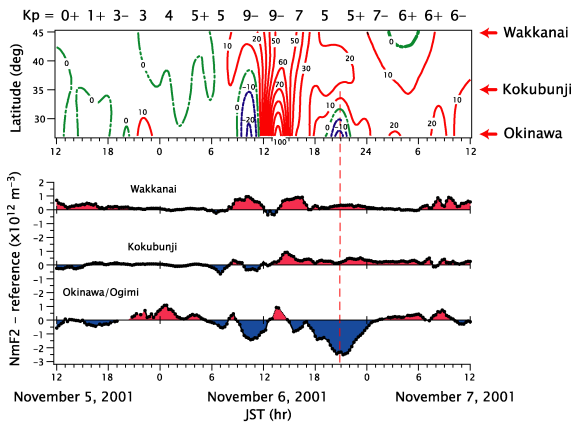


図 14: 2001 年 11 月 5 ~ 7 日日本上空の TEC 及び、稚内, 国分寺, 沖縄における $N_m F2$ (通常値からの変動分) の変動。

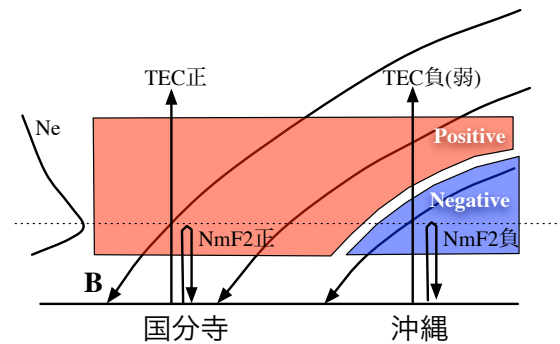


図 15: 正相・負相電離圏嵐の $N_m F2$, TEC に対する効果の緯度による現れ方の違い. [See also Maruyama and Nakamura, 2007, Fig. 8]

このうち 11 月 8 日を例にとり, 日本上空の TEC 変動を示したものが図 17 である. 静穏時(上)に対して, 11 月 8 日(中)は昼間で数倍, 夜間では 10 倍以上の TEC 増加が見られる. これを静穏時からの変動分(下)としてみると, 14-16 JST, 17-19 JST, 19-21 JST の 3 回, TEC の増大が起きていることがわかる. この 3 回の TEC 増大のうち 19-21 JST のものは, 日没後に発生し北(極)側でより増大が強いという特徴を持つ. このように日没後に発生する電子密度増大は, dusk effect として知られてきた現象に分類される. また, この電子密度増大は, 北から南へ伝搬しているよう

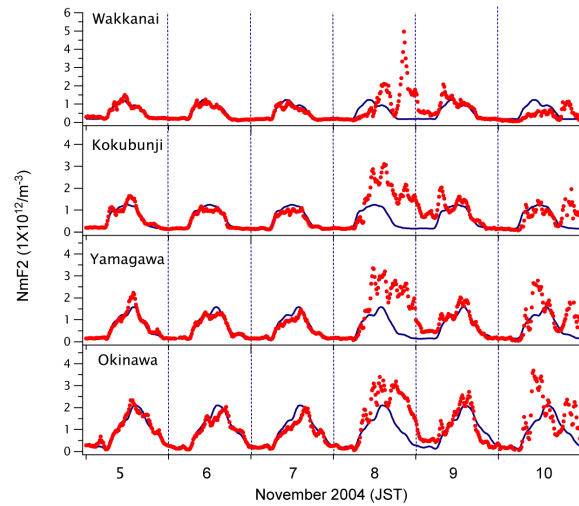


図 16: 稚内, 国分寺, 山川, 沖縄における 2004 年 11 月 5 ~ 10 日の $N_m F2$. 11 月 8 日及び 10 日に強い正相電離圏嵐が見られる.

に見える. 日没後であるので新たな電離はなく層高度上昇による電子密度増大の効果は考えられず, 南(赤道)側よりも北(極)側で増大が強いので, 東向き電場の増大による赤道異常の発達によるものとも考えられない. 従って, 何らかの原因で高密度のプラズマ塊が日本の高緯度側に流入したために起きた正相電離圏嵐と考えざるを得ない.

DMSP 衛星により観測された日本上空付近の電子密度, イオンドリフト速度データ(図 18)によると, 11 月 8 日に地上観測で強い電子密度増大が見られた北海道付近において電子密度が極大を持ち, 通常は東向きのイオンドリフト速度が西向きになっていることがわかる. このことを考えると, 南東-北西向きに延びた電子密度増大領域が北西向きに移動しながら日本上空を横切ったのではないかと考えられる(図 19). これは, storm enhanced density [SED; Foster, 1993] と呼ばれる, 北米大陸でしばしば観測される南東-北西方向に延びる細い(緯度・経度幅 $1-2^\circ$) 高電子密度領域が高緯度方向へ流れていく現象と酷似しており, 北米大陸以外で観測された初の SED であると考えられる. [Maruyama, 2006]

SED の生成メカニズムについては議論の尽き

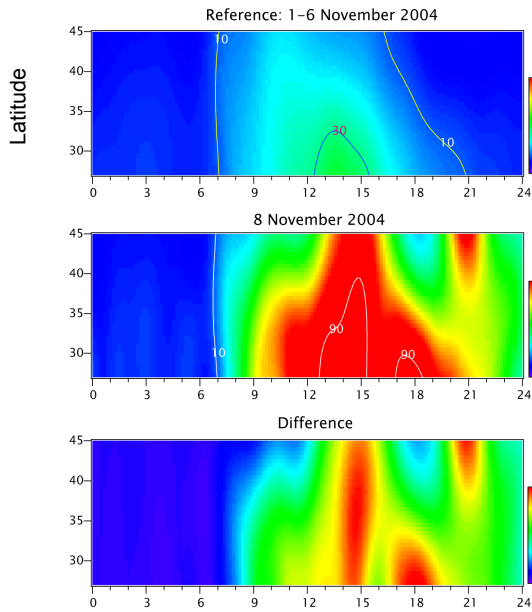


図 17: 日本上空における TEC の緯度・時間変化。上：静穏時（2004 年 11 月 1～6 日の平均），中：2004 年 11 月 8 日（絶対値），下：2004 年 11 月 8 日（静穏時からの変動分）。

ていないところであるが、以下のようなメカニズムを考えることができる。まず、磁気圏対流の急増に伴い、磁気赤道・低緯度域に電場が侵入する。モデル計算 [Senior and Branc, 1984] によれば、日没付近では東向き電場が強く侵入する（図 4.2）。強い東向き電場により持ち上げられた磁気赤道付近のプラズマが fountain effect により低緯度に堆積し、日没付近で赤道異常が強く発達する。同時に、11 月 8 日のように既に擾乱が続いており擾乱ダイナモが発達している場合、日没付近ではある程度の緯度以上の中低緯度で擾乱ダイナモによる電場が極向き・東向きとなる（図 6）。通常よりも高緯度側に発達した赤道異常に伴う高電子密度領域が極向き・東向き電場によって北半球では北西向きに運ばれることにより SED が形成されている可能性がある。SED に関しては現在精力的に研究が行われているところであり、今後の研究の発展が非常に興味深い現象である。

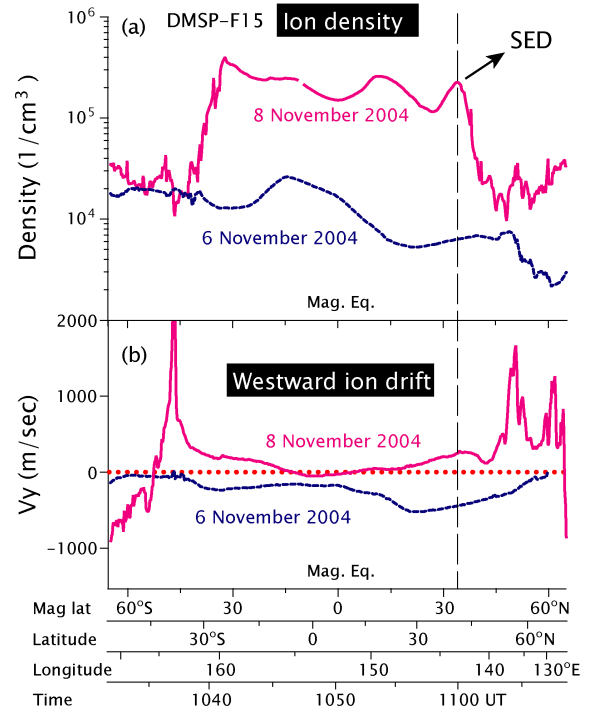


図 18: 2004 年 11 月 6 日及び 8 日に DMSP 衛星で観測された (a) イオン密度, (b) イオンドリフト速度（西向き正）。

4.3 正相電離圏嵐：まとめ

4.3.1 層高度上昇による正相電離圏嵐

正相電離圏嵐のうち昼側で発生するものの主な原因は、層高度の上昇により再結合率が減少することである（図 22）。層高度を上昇させる原因には主に（1）磁気圏対流の急増による東向き電場の侵入、（2）極域の加熱に伴う赤道向きの熱圏中性風の増大、が考えられる。電場の侵入は過渡的な現象であり、長時間持続する正相電離圏嵐を説明するためには、赤道向きの熱圏中性風と侵入電場の相乗効果が必要である。

4.3.2 移流による正相電離圏嵐（SED）

正相電離圏嵐のうち日没付近において短時間発生するものは、dusk effect と呼ばれ長い間存在は

Advection of high-electron density region

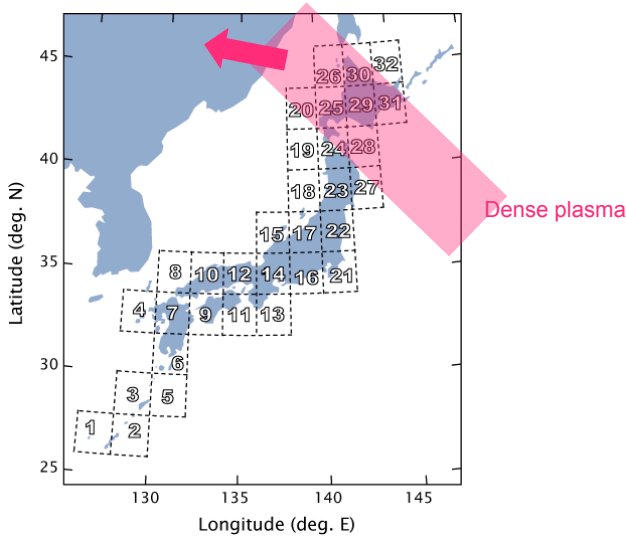


図 19: 2004 年 11 月 8 日の正相電離圏嵐を引き起こした高電子密度領域の移動 (模式図)。

知られていたものによく理解されて来なかった。この現象は SED と呼ばれる南東-北西に延び北西方向に移動する細長い電子密度増大領域であることが、最近の研究で明らかになってきた。SED を引き起こすメカニズムは議論の渦中にあるが、以下のようなものが考えられる。(1) 昼側で持続した正相電離圏嵐が起き、密度の高いプラズマが中低緯度に存在、(2) 何らかの原因(東向き電場の侵入など)で夕方赤道異常が発達、(3) 持続した地磁気擾乱により発達した擾乱ダイナモによる極向き・東向き電場により、持続した正相電離圏嵐および発達した赤道異常の影響を受けた低緯度の非常に密度の高いプラズマが西向き・極向きに運ばれ、中低緯度で SED として現れる。SED に関しては、最新の研究テーマであり、観測・理論(モデリング)の両面から更なる研究が必要とされている。

EQUATORIAL PERTURBATION

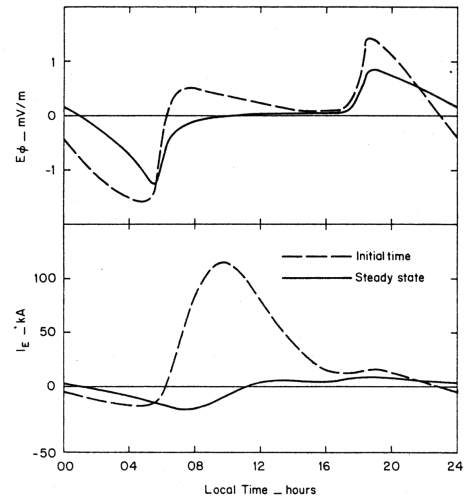


Fig. 17. Local time distributions of the eastward equatorial electric field (top panel) and of the total electrojet current generated by a 100 kV potential drop across the polar cap.

図 20: 赤道域における侵入電場の経度依存性(上)。(Senior and Branc, 1984) による。

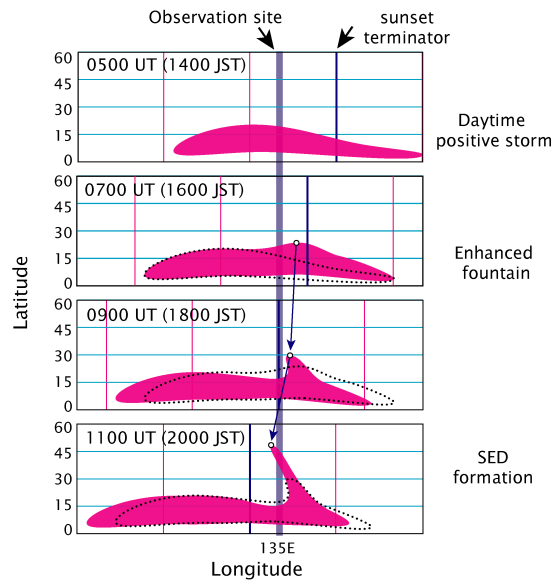


図 21: SED の形成メカニズム。(模式図)

5 まとめ

極めて大きな電離圏擾乱の発生においては熱圏ダイナミクスとダイナモ作用を介した熱圏-電離圏の結合過程がこれまで考えられていた以上に重要である。同程度の磁気嵐に対して、電離圏擾乱の規模はイベント毎に大きく異なる。イベント毎の違いを説明するためには、熱圏-電離圏相互作用におけるフィードバック効果が鍵ではないかと思われる。実際の電離圏擾乱においては、正相・負相電離圏嵐の効果は同居しており、より効果の勝る方が現象として現れる。

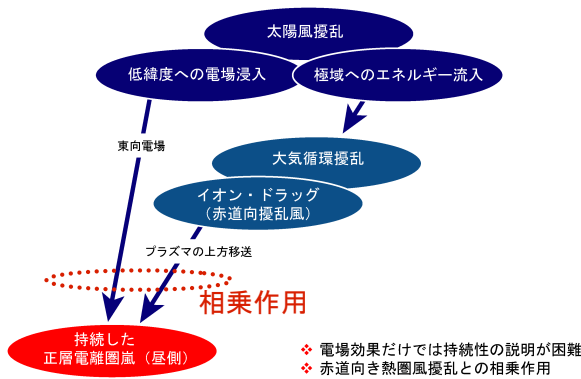


図 22: 層高度上昇による正相電離圏嵐のメカニズム。

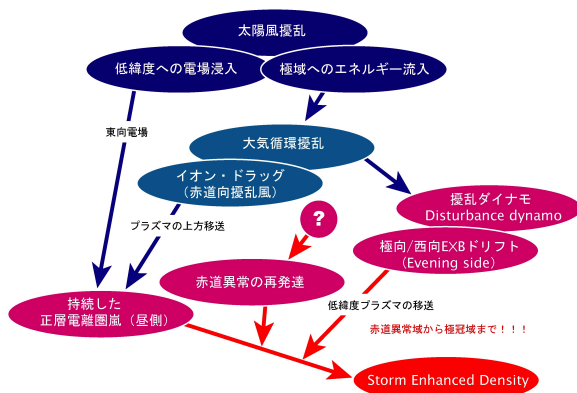


図 23: 移流による正相電離圏嵐 (SED) のメカニズム。

参考文献

Blanc, M., and A. D. Richmond, The ionospheric disturbance dynamo, *J. Geophys. Res.*, **85**, 1669–1686, 1980.

Fejer, B. G., J. T. Emmert, G. G. Shepherd, and B. H. Solheim, Average daytime F region disturbance neutral winds measured by UARS: Initial results, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1859–1862, 2000.

Foster, J. C., Storm time plasma transport at middle and high latitudes, *J. Geophys. Res.*, **98**, 1675–1689, 1993.

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.

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.

Maruyama, T., Extreme enhancement in total electron content after sunset on 8 November 2004 and its connection with storm enhanced density *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL027367, 2006.

Maruyama, T., and M. Nakamura, Conditions for intense ionospheric storms expanding to lower midlatitudes, *J. Geophys. Res.*, **112**, doi:10.1029/2006JA012226, 2007.

Mendillo, M., M. D. Papagiannis, and J. A. Klobuchar, Ionospheric storms at midlatitudes, *Radio Sci.*, **5**, 895–898, 1970.

Senior, C., and M. Branc, On the control of magnetospheric convection by the spatial distribution of ionospheric conductivities, *J. Geophys. Res.*, **89**, 261–284, 1984.