

## 3-3 電離圏嵐と全電子数

### 3-3 Ionospheric Storm and Variation of Total Electron Content

#### 3-3-1 GEONET 観測による電離圏全電子数の 変動 — TEC 嵐と SED —

##### 3-3-1 Observations of TEC Disturbances with GEONET — TEC Storm and SED —

丸山 隆 馬 冠一 中村真帆

MARUYAMA Takashi, MA Guanyi, and NAKAMURA Maho

#### 要旨

電離圏全電子数 (TEC) が極めて大きく増加する現象として二つの事象を解析した。最初の例は磁気嵐にともなって 2001 年 11 月 6 日に発生した。日本全国をカバーする GPS 受信機網 (GEONET) から求められた TEC の値は低緯度側 ( $27^{\circ}$  N) で 200 TEC unit、高緯度側 ( $45^{\circ}$  N) で 100 TEC unit に達した。これらの値は静穏日の平均的な値の 2 倍である。この TEC 増加の主な原因は磁気擾乱にともなう磁気圏電場の低緯度への浸入によるものであった。二つ目の例は 2004 年 11 月 8 日に発生した SED (storm enhanced density) である。TEC の増加は日没後に高緯度側で発生し、TEC の値は 100 TEC unit に達した。この値は同じ緯度における静穏日の日中の最大値より大きく、静穏日の同時刻の値の 20 倍に相当する。磁気圏電場の浸入に加えて、擾乱ダイナモ電場が西北西に移動する SED の形成に大きく関与していたと思われる。

Two extreme ionospheric disturbances during which total electron content (TEC) was enhanced were analyzed. The first event was during a magnetic storm on 6 Nov. 2001. TEC derived from a dense GPS receiver network in Japan, GEONET, reached 200 TEC unit during daytime at lower latitudes ( $27^{\circ}$  N) of the GEONET coverage and 100 TEC unit at high latitudes ( $45^{\circ}$  N). These values are twice the quiet-time level. The major cause of the TEC enhancement was found to be the prompt penetration of magnetospheric electric field to lower latitudes during sunlit hours. The second event was a storm enhanced density (SED) occurred on 8 Nov. 2004. An extreme enhancement of TEC was observed at higher latitudes after sunset, and TEC reached 100 TEC unit. This value was higher than that of the daytime maximum value and 20 times the TEC values at the same local time on quiet days. In addition to prompt penetrating magnetospheric electric fields, a disturbance dynamo electric field is thought to play an important role in the generation of SED which moved the WNW direction.

#### [キーワード]

電離圏全電子数, TEC 嵐, SED, 磁気擾乱, 擾乱電場

Ionospheric total electron content, TEC storm, SED, Magnetospheric disturbances, Disturbance dynamo

# 1 緒言

電波は社会のさまざまな場面で我々の生活を便利で豊かなものしている。電波の持つ大きな特徴のひとつは遠方まで伝播する性質にある。短波帯の伝播は電離圏と地表のあいだで反射を繰り返し地球の反対側ですら到達するので、かつては、短波通信や放送が海外との情報伝達の重要な手段であった。衛星の利用が社会のなかで定着すると、電離圏を通過する高い周波数の電波がさまざまな目的で用いられるようになった。しかし、衛星電波に対しても電離圏は完全な透明媒質ではない。特に、GPS 衛星のような UHF 帯の電波では伝播遅延や強度揺らぎなどの影響が強く現れる。その影響の強弱は電離圏の状態に大きく左右され、その電離圏は常に変動し続ける。

電離圏電子密度の変動には大きく分けて、規則性をもって現れるものと突発的なものがある。規則性変動の原因はおよそ 11 年周期の太陽活動度、地球の公転に伴う季節変動、昼夜の違いなどはっきりした周期性を持っていて、モデル化しやすい(例えば文献[1][2])。これに対して、太陽活動の急激な変化(太陽フレア、コロナホール)は磁気嵐から熱圏変動の一連の地球超高層大気の影響(じょうらん)を引き起こし、突発的に電離圏が変動することがある[3]-[7]。この現象は電離圏嵐と呼ばれる。電子密度が減少する場合を負相電離圏嵐、増加する場合を正相電離圏嵐と呼ぶが、正相嵐が先行し引き続いて負相嵐になる場合や、片方しか現れない場合、緯度によって正相嵐と負相嵐に分かれる場合など、電離圏嵐の振舞はそのつど大きく違う。一般的には電離圏嵐は地球規模での電子密度変動であるが、磁気嵐ともなって比較的狭い範囲で電子密度の急上昇が見られる場合がある。日没前後に電子密度が通常の数倍から 20 倍以上と極めて大きく増加する現象(SED: storm enhanced density)である。SED は昼間の正相電離圏嵐と密接に関連している。負相の電離圏嵐については臨界周波数  $f_oF_2$  の低下によって短波通信に使用可能な最高周波数が低下することから、イオノゾンデ観測データを用いた研究が精力的になされてきた。今日では、GPS 衛星など電離圏を通過する電波の遅延に関連して正相嵐が重要性を増している。衛星電波の遅延は、受信機までの伝

播路に沿って電子密度を積分した値である全電子数(TEC: total electron content)に比例し、TEC の値と遅延量の関係は、GPS 衛星を例にとれば図 1 のようになる。習慣で  $1 \times 10^{16}$  個/m<sup>2</sup> を 1 TEC unit と呼ぶ。規則的な変動や突発的な擾乱によって TEC は数 TEC unit から ~200 TEC unit まで変動する。

電離圏の観測手法もかつてのイオノゾンデによる  $f_oF_2$  だけでなく、GPS 衛星による TEC を用いた研究も活発になっている。これは、ひとつにはイオノゾンデに比べて GPS 受信機は設置が容易であり、観測点の数が多く得られていることにもよる。しかし、 $f_oF_2$  と TEC は電離圏嵐の指標として似たような振舞もするが、完全に一致するわけではないので、より詳しい研究には両方のデータを相補的に用いるのが賢明である。イオノゾンデのもうひとつの重要な機能は、電離圏高度の観測である。電離圏変動には光化学反応が大きな役割を持っているが、これは高さに大きく依存する。また電離圏高度変動は大気やプラズマのダイナミクスが直接的に反映されていることから、電離圏嵐の機構を解明する上で  $f_oF_2$  や TEC と並んで重要なパラメータである。

本稿では、国土地理院が整備した二周波 GPS 衛星受信機網(GEONET: GPS Earth Observation Network)データの解析から得られた TEC マップ、日本国内 4 カ所のイオノゾンデ観測から得られた  $f_oF_2$  と  $h_mF_2$  (最大電子密度高度)を用いて、宇宙

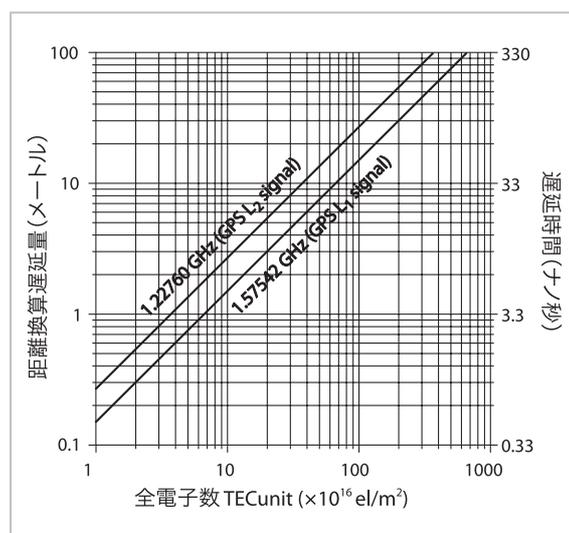


図1 GPS 衛星の L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub> 信号の電離圏遅延量と TEC の関係

天気として重要性の高い正相電離圏変動について二つの極めて大きな事例を扱う。最初は 2001 年 11 月 6 日に発生した電離圏嵐である。のちに述べるようにこの嵐は極めて異例で、 $foF_2$  で見るとそれほど大きな事象ではないのに対して、TEC では記録的な増加を示した。これが TEC 嵐と称した所以である。二つ目は 2004 年 11 月 8 日の日没後に観測された SED である。電離圏嵐は電子密度を増加させる効果、減少させる効果、これを持続させる効果が複雑に絡んで観測されるような変動となる。そこで、先ず次の節では電離圏嵐の機構について解説をする。続いて、用いたデータについて述べたのちに二つの事象を詳しく考察する。

## 2 電離圏嵐の機構

負相電離圏嵐の主要な要因は大気組成の変動であり、その起源は磁気嵐によって極域にエネルギーが注ぎ込まれることにある。組成が変わった熱圏大気は移動性大気擾乱 (TADs: traveling atmospheric disturbances) として緯度の低い地域まで伝播する [8]。組成の変化は  $[N_2]/[O]$  比の増大として特徴づけられ、電離圏プラズマの消滅係数の増大、したがって電子密度の減少を引き起こす。TAD の最初の段階では赤道向きの風が強まり (equatorward surge)、これが傾いた磁力線に沿ってプラズマを押し上げる。高高度では電子消滅率が小さいので、この現象が日中に発生した場合には、電子密度の増加を引き起こす。このように、負相電離圏嵐に先立って正相電離圏嵐が発生する場合があるが、それは equatorward surge の発生した時間帯に大きく依存する。正相電離圏擾乱のもう一つの要因は、東向きの電場 ( $E$ ) によってプラズマが磁場 ( $B$ ) と直角の方向 ( $E \times B$ ) に押し上げられる ( $E \times B$  ドリフト) ことである。風の場合と同様に、高高度で電子消滅率が小さくなり、これが日照時間中に起こると電子密度の増加を引き起こす。この東向き電場の起源には大きく二つある。一つは、磁気圏対流電場が強まり低緯度にまで浸入する場合 [9] であり、他は極域にエネルギーが注ぎ込まれたために起こる大気循環の変動がひき起こす擾乱ダイナモ作用 (disturbance dynamo) [10][11] である。

実際の電離圏嵐ではいくつもの要因が絡み合い、あるものは協同して擾乱を増強し、またあるものは互いに打ち消しあう [3]。Forbes 他 [12] および Forbes [13] は緯度方向に並んだイオノゾンのデータを用いることで複数の擾乱要因を分離しようとした。しかし、一般には主要な擾乱要因は時間とともに入れ替わり、それぞれの擾乱過程の重要性も事象ごとに異なるので、擾乱要因を完全に決定することは容易くない。

$foF_2$  は電離圏嵐を特徴づける最も基本的なパラメータであるが、複雑な擾乱の全容を知るには充分とはいえない。電離圏 F 層が東向き電場あるいは赤道向きの熱圏中性大気風で高高度へ押し上げられたとしても、時間帯や高度上昇の速さによっては  $foF_2$  が増加する場合も減少する場合も起こり得る。Rishbeth [14] が解説しているように、電離圏からプラズマ圏へのプラズマの流出は場合によって  $N_mF_2$  ( $N_mF_2 [m^{-3}] = 1.24 \times 10^{10} (foF_2 [MHz])^2$ ) を減少させ得るが、その効果の度合いは中性大気風と  $E \times B$  ドリフトにより大きく変動する。F 層の最大電子密度高度 ( $hmF_2$ ) の上昇による  $foF_2$  の低下は磁力線に沿ったプラズマの再配分と高度プロファイルの変化によって起こる。日中のプラズマ圏は電離圏プラズマを吸い出し、夜間は電離圏にプラズマを補給する役割を持っている。 $hmF_2$  の上昇によって  $foF_2$  が上昇する効果は電子消滅係数の低下と電離圏下部における新しい電離の進行によるものである。二つの相反する効果のどちらが優勢になるかによって、最終的な  $foF_2$  の増減が決まる。同様に、西向き電場による下方への  $E \times B$  ドリフトあるいは極向きの熱圏中性大気風によって F 層高度が低下するときにも、 $foF_2$  が上昇する場合と低下する場合の両方がある。上昇は電子密度プロファイルの変形によって起こり、低下は電子消滅係数の増加によって起こる。この場合の  $foF_2$  の上昇は一時的なもので、やがて電離圏下部での消滅の効果が勝り  $foF_2$  は低下に向かう。

近年、GPS 衛星の電波を用いた TEC の観測が行われ、これを用いて電離圏嵐が調べられるようになった。電離圏嵐のときの TEC の振る舞いは基本的には  $foF_2$  の振る舞いに似ているが、必ずしも同じではない。例えば、磁力線に沿ったプラズマの再配分により  $foF_2$  が変化するとき、再配

分だけではプラズマの消滅も生成も行われなから、積分値である TEC は大きく変化しない。しかし、電子消滅係数の増大によって  $f_oF_2$  が低下するときには、TEC も減少する。このときも TEC の減少は電離圏からプラズマ圏に至るので、電離圏下部での電子消滅率の変化に対して  $f_oF_2$  ほどにはすぐに追従せず、 $f_oF_2$  と TEC の変化の時間推移は異なる。このように振る舞いが異なる二つの観測値を併せて解析することは、電離圏嵐の解釈にとって極めて有効である。

### 3 データ

国土地理院の整備した GEONET は 1200 以上の GPS 受信機からなり、二つの周波数で送信されている P コードを用いて衛星-受信機間の TEC を推定することが出来る。推定の方法にはさまざまなものが提案されているが、我々は Ma と Maruyama [15] の方法を用いた。受信機網のカバーする(衛星電波が電離圏高度を通過する点の直下)国内を図 2 に示すような 32 のセル(緯度/経度各 2 度間隔)に分割し、各セルの中では鉛直換算 TEC は一定であるとの仮定の下に最小自乗法で TEC を推定した。TEC の推定には、二つの異なった周波数の電波が電離圏中で受ける伝播遅延量が異なることを利用しているが、衛星あるいは受信機にも固有の周波数間バイアス(電子回路内部での二つの周波数間での遅延量の差)があって、これも同時に解いている。衛星および受信機のバイアスは 24 時間で変動しないと仮定し、24 時間のデータセットから 32 セル 15 分毎の TEC を推定した。このようにして得られた TEC データをもとに、経度の異なるセルに対して経度と LT は相互に可換(15 度のずれが 1 時間に対応)であるとして、24 時間の TEC データ(24×4×32)から球関数フィッティングの方法で時刻(LT)と緯度の TEC マップを作成した。このようにして作成した TEC マップについて静穏時と擾乱時で差分マップを作ると、TEC に現れる電離圏嵐の様相が視覚的に得られる。

イオノゾンデは図 2 に示すように、稚内、国分寺、山川、沖縄の 4 か所で運用されていて、15 分毎にイオノグラムが得られる。観測所の位置などは表 1 にまとめてある。イオノグラムからは  $f_oF_2$  の

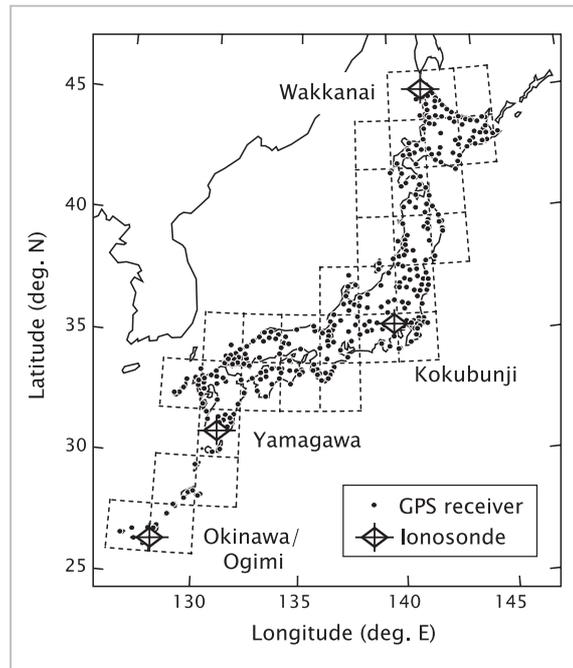


図2 TEC を求めるために用いた GEONET 受信機の分布

ほかに伝送係数  $M(3000)F_2$  を読み取った。電離圏高度としては  $M(3000)F_2$  をもとに Shimazaki [16] に基づく経験式に下部電離圏での遅延補正を行った次の関係式 [17] を用いて  $h_mF_2$  を求めた。

$$h_mF_2 = \frac{1490}{M(3000)F_2 + \Delta M} - 176 \quad (\text{km}) \quad (1)$$

$$\Delta M = \frac{0.18}{X_E - 1.4} \quad \text{for } X_E > 1.7 \quad (2)$$

$$X_E = \frac{f_oF_2}{f_oE} \quad (3)$$

Berkey と Stonehocker [18] はこの式がイオノグラム・トレースから逐次計算で実高度を求める方法に比べても十分正確であることを確かめている。イオノグラム・トレースの読み取りには多大の労力と時間を要するが、ここで用いる  $M(3000)F_2$  はイオノグラムの標準的な読み取りパラメータのひとつであり、比較的容易に求めることができる。式(3)に  $f_oE$  が現れるが、 $f_oE$  はスプラディック E 層の影響や雑音電波の混信によりしばしば読み取り不能になることがあるので、代わりに、Muggleton [19] の経験式を用いた。E 層のパラメータは太陽天頂角と太陽活動度指標でよく記述でき、電離圏嵐の影響が少ない。 $f_oF_2$  および  $h_mF_2$  についても静穏時の振舞いを求めておいて差分をとって、変動分を議論した。

表1 各観測所の位置

	地理緯度	地理経度	磁気伏角
稚内	45.39°N	141.69°E	59.8°
国分寺 (東京)	35.71°N	139.49°E	49.3°
山川	31.20°N	130.62°E	44.5°
沖縄/大宜味	26.68°N	128.16°E	37.8°

## 4 2001年11月初めの宇宙天気事象

### 4.1 擾乱の全体像

図3に2001年11月5日から8日までの惑星間空間磁場および地磁気変動パラメータを示す。最上段のグラフはラグランジュ(L<sub>1</sub>)点のACE衛星で観測された惑星間空間磁場の南向き成分(IMF Bz)を示す。ここで、L<sub>1</sub>点から地球までの太陽風の伝播時間を考慮し、横軸を1時間ずらしてある。中段の二つのグラフは地磁気擾乱指数のASYM-HとSYM-H<sup>[20]</sup>である。ASYM-H指数(asymmetric disturbance index)はオーロラ・サブストームの良い指標とされている。SYM-H指数(symmetric disturbance index)は、指数の導出に用いている観測所が若干異なり時間分解能が高い点を除けば、基本的にはD<sub>st</sub>指数と同じである。最下段はもう一つの地磁気擾乱指数K<sub>p</sub>である。11月6日の01:51 UTにSC(storm sudden commencement)で示したように磁気嵐が始まり、非対称赤道環電流が直ぐに発達している。ここでK<sub>p</sub>指数は9-まで達した。磁気嵐の急始に先立つ7時間に亘ってIMF Bzは南を向き、11月5日の19:00 UTから赤道環電流が徐々に発達している。これに対応してK<sub>p</sub>指数は3-から5まで増大した。

図4に11月2日から7日の期間に稚内から沖縄までの4観測所で観測されたN<sub>m</sub>F<sub>2</sub>の変動をK<sub>p</sub>指数とともに示す。15分ごとのN<sub>m</sub>F<sub>2</sub>を黒丸で、静穏日の平均的なN<sub>m</sub>F<sub>2</sub>を実線で示した。ここで、静穏日の変動として11月2日から4日までの平均値を用いた。11月6日の地磁気擾乱に伴い、N<sub>m</sub>F<sub>2</sub>が全観測所で変動していることが分かる。変動は日出とともにN<sub>m</sub>F<sub>2</sub>の増加で始まり、やがて減少に転じている。低緯度の観測所ほどN<sub>m</sub>F<sub>2</sub>の減少が早くはじまり、減少幅も大きい。緯度の低い3観測所では、12:00 JSTにN<sub>m</sub>F<sub>2</sub>の擾乱が再び正に

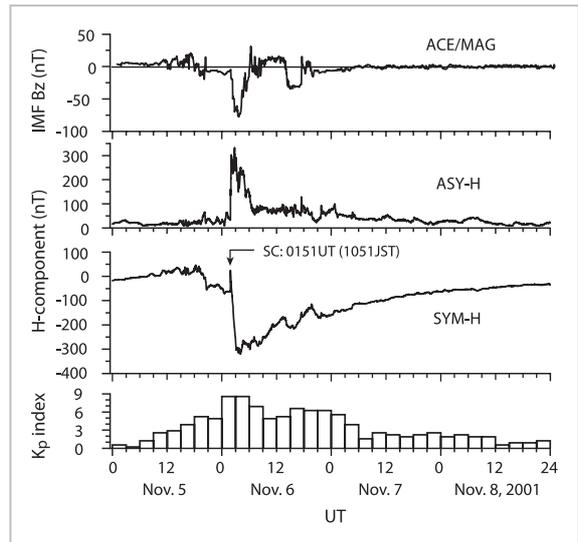


図3 2001年11月初めの磁気擾乱指数

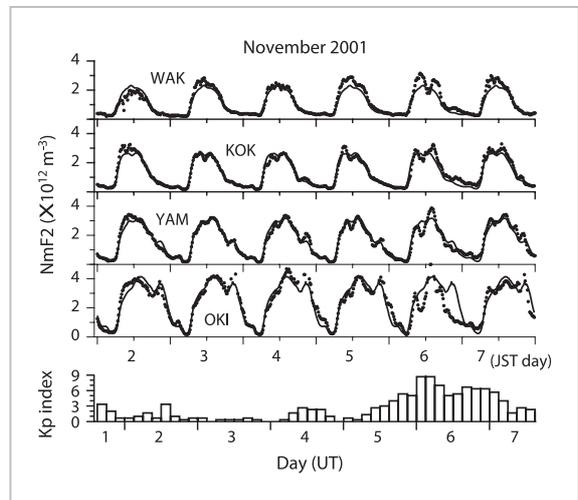


図4 F層最大電子密度の変動

なり、これより遅れて稚内でも13:30 JSTに正に転じている。その後、高緯度側の稚内と国分寺では夜中まで静穏日より高い状態が続いているが、低緯度側の山川と沖縄では15:00 JST付近で再び負の擾乱に転じている。特に沖縄では、N<sub>m</sub>F<sub>2</sub>の低下が激しく夜中まで低い状態が継続している。

擾乱が正に転じるのは、山川で 22:00 JST、沖縄では翌日の 01:30 JST である。このように、 $N_mF_2$  で見た電離圏擾乱の様相は緯度・時間ともに極めて複雑であるが、沖縄の夕方を除いて、磁気嵐の大きさの割にはその変動量は小さい。

TEC の緯度 - 時間分布マップを図 5 に示す。最上段は  $N_mF_2$  の場合と同じく 11 月 2 日から 4 日までの静穏日の分布を表し、等高線に添えた数値は TEC unit ( $10^{16}$  個/ $m^2$ ) である。TEC は日出とともに増加し、北の端 ( $45^\circ N$ ) では正午頃に、南の端 ( $27^\circ N$ ) では 14:30 JST 頃に極大に達する。30 度付近より低緯度では日没後に二つ目の小さなピークがある。これは東向き電場による  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトの増加、いわゆる prereversal enhancement によって赤道異常が再発達したものである。中段は磁気嵐の起こった 11 月 6 日の TEC 分布を示す。昼間に TEC が極めて大きく増加していることが分かる。TEC が極大になるのは南の端 ( $27^\circ N$ ) では 13:45 JST、北の端 ( $45^\circ N$ ) では少し遅れて 14:15 - 14:30 JST である。

擾乱の様子をさらに明瞭に表すために、11 月 6 日の TEC マップから静穏日のマップを差し引いた差分 ( $\Delta$  TEC) マップを最下段に示す。差分マップは TEC の異常増加をはっきりと表しているばかりでなく、増加の開始時刻が全緯度範囲ほぼ同

時で 11:00 JST と 12:00 JST の間にあることを示している。しかし、TEC 増加分がピークに達する時間は緯度とともに遅い時間にシフトしている。その様子は点線で示され、南の端で 13:45 JST、北の端では 14:45 JST となっている。およそ  $33^\circ N$  より高緯度側では TEC 増加がピークに達した後も中程度の正の擾乱状態が真夜中まで持続している。もうひとつ差分マップで明らかになったのは異常増加に先立ち低緯度側で 09:00 - 11:30 JST に一旦 TEC が減少している点である。その減少の大きさも増加の場合と同様に低緯度ほど大きい。

ここで扱っている TEC は GPS 衛星から地上までの電子密度を電波の伝播経路に沿って積分した値であるから、F 層最大電子密度高度からの寄与が大きい。したがって、 $N_mF_2$  と TEC の変動に見られる電離圏嵐の様相は似ているはずである。図 6 の上ふたつのグラフは 11 月 5 日の 12 時 JST から 7 日の 12 時 JST について TEC と  $N_mF_2$  の擾乱成分を比較したものである。稚内について比べると、大規模擾乱の  $\Delta$  TEC と  $\Delta N_mF_2$  の様相は、予想に反して、以下に述べるようになり異なったものである。 $\Delta$  TEC は 11 月 6 日の 06:00 JST から徐々に増加し、11:00 JST になると増加が加速、14:45 JST に極大に達した後は単調に減少している。 $\Delta N_mF_2$  で見ると、10:00 と 15:30 JST 付近に緩やかなピークを示し、その間には負の値まで落ち込んでいる。同じ時間帯に  $\Delta$  TEC は急激に上昇している。

低緯度側の国分寺、山川、沖縄の  $\Delta$  TEC と  $\Delta N_mF_2$  は 09:00 から 15:00 JST まで良く似た変動傾向である。両方とも 10:30 JST 前後に負の値を示し、14:00 JST 付近を中心に正の値を示している。しかし、定量的に比較すれば、正および負の変動の振幅はかなり異なっている。 $\Delta$  TEC では正の変動が極めて大きい (沖縄の緯度で約 100 TEC unit) のに対して、負の変動はそれほどでもない (沖縄の緯度で約 20 TEC unit)。一方、 $\Delta N_mF_2$  では正の変動幅は負の変動幅と同程度かそれより小さい。このような食い違いは低緯度ほど大きい。もうひとつ  $\Delta$  TEC と  $\Delta N_mF_2$  の違いで目を引くのは、沖縄の緯度で 21:00 JST を中心に見られる落ち込みが  $\Delta N_mF_2$  では非常に深いものに対して、 $\Delta$  TEC では極浅い点である。

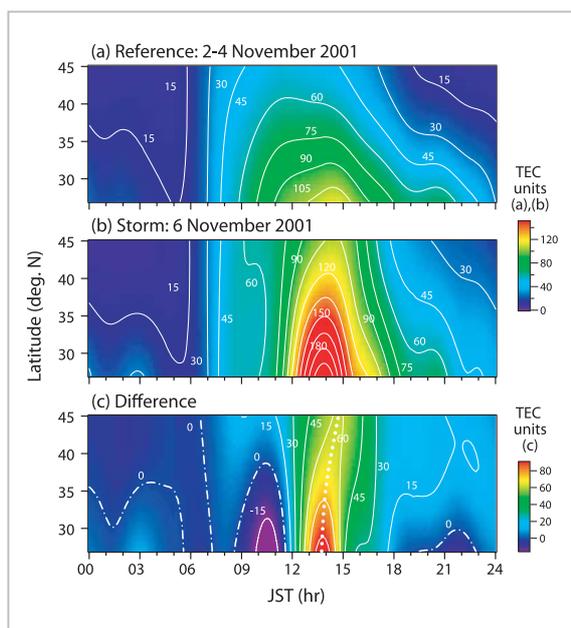


図5 TECの擾乱 - (a) 静穏日の平均的な振る舞い、(b) 2001年11月6日のTEC嵐、(c) 静穏日との差

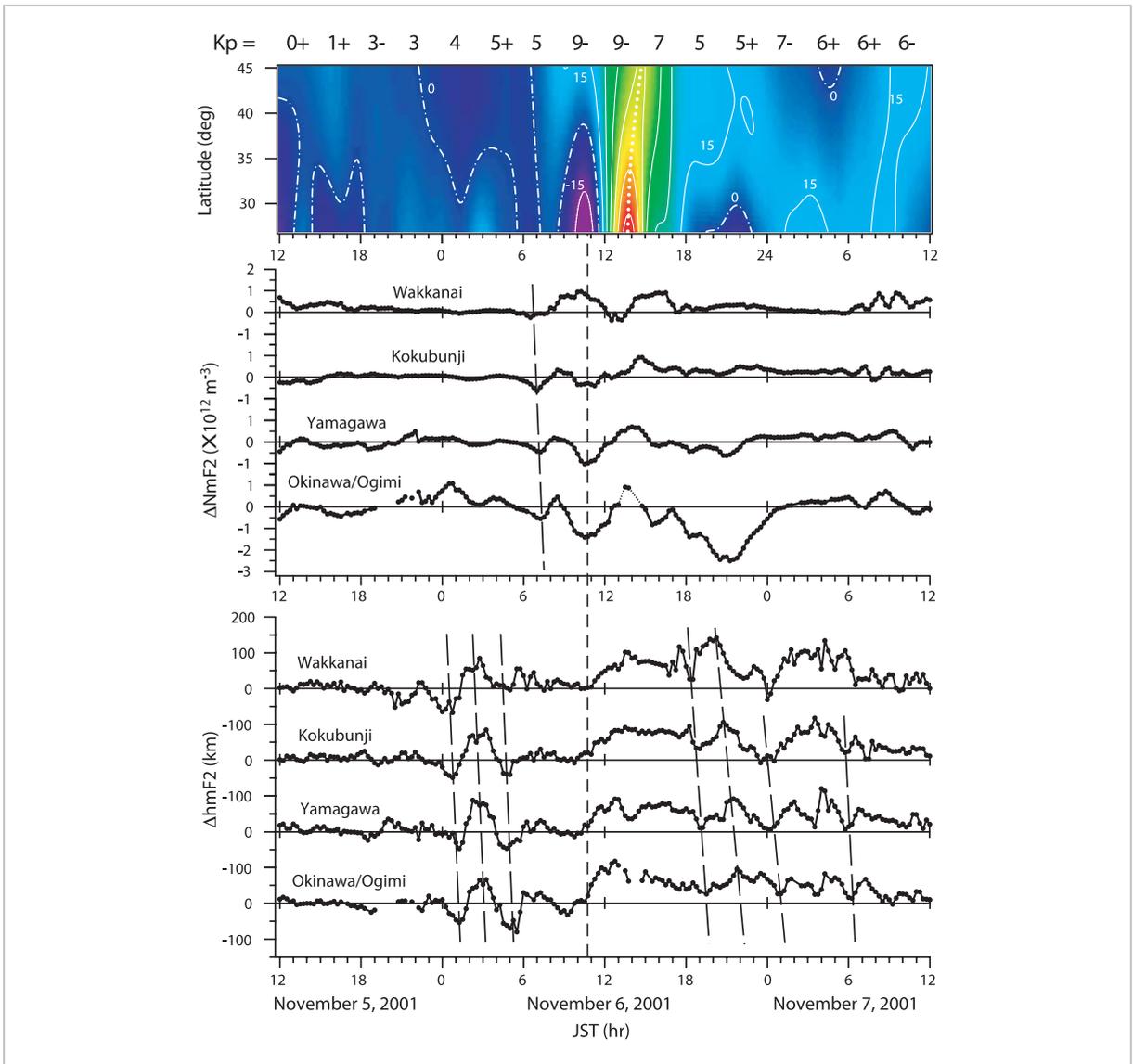


図6 TEC、F層最大電子密度、F層高度の各静穏日平均値からの差

2001年11月6日の電離圏擾乱はこのように極めて複雑であった。擾乱の背景にある物理プロセスを一つ一つ解きほぐすには、 $N_mF_2$ とTECの変化だけでは難しいが、電離圏高度の変動を同時に解析すると、さまざまなプロセスが見えてくる。図7は11月2日から6日までの国分寺の $h_mF_2$ を24時間ごとに重ね描きしたもので、静穏日である2日から5日までを細い実線、擾乱日である6日を太い実線で示してある。夜間、特に真夜中から日出までの時間帯では日々変動が大きい、昼間については擾乱日を除いて毎日ほぼ同じように変化している。11月6日の11時頃から高度が上昇、静穏日との差が最大で100 kmに達した後、高度の高い状態は真夜中近くまで継続している。

TECあるいは $N_mF_2$ と同様に擾乱日の値から静穏日の値を差し引いた $\Delta h_mF_2$ を求めて、図6の最下段に示す。図8はこのときの毎正時のイオノグラムのスケッチ(Oモードのみ)で、実線は擾乱日、点線は比較のための前日のイオノグラムである。

#### 4.2 考察

電離圏擾乱の様相を複雑にしているのは主要な要因が時間の推移とともに、また緯度によって変わってくるためであるから、以下時間を追って考察する。

##### 4.2.1 11月6日07時JSTより前

図6を見ると、この時間帯にはTECおよび $N_mF_2$ ともに静穏日との違いはほとんど見られない

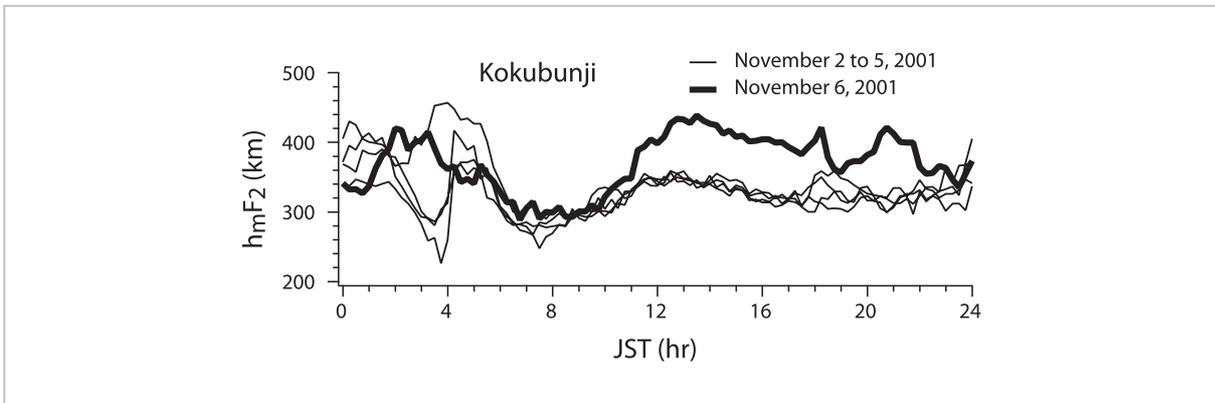


図7 2001年11月2-6日のF層高度の変動

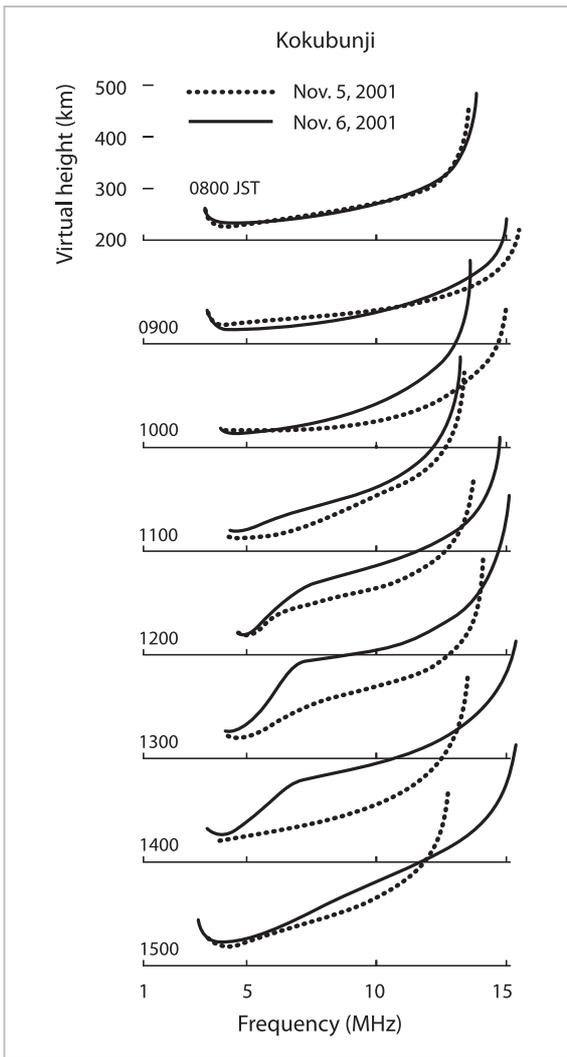


図8 TEC嵐とその前日のイオノグラム・スケッチ(Oモード)

が、 $h_mF_2$  は大きく変動している。 $\Delta h_mF_2$  の位相が低緯度ほど遅い時間にシフトしている(図中の傾いた長い破線)ことから、この擾乱は移動性電離圏擾乱(TIDs: travelling ionospheric disturbances)

であると考えられる。破線の傾きからその伝播速度は 740 m/s と推定され、一般的な大規模 TID (LSTID: large-scale TID) の速度である。同様な TID は 11 月 6 日の 18:00 JST から 7 日の 06:00 JST にも見られ、こちらの伝播速度は 350 から 700 m/s と推定される。大きな  $h_mF_2$  の変動にも関わらず、TEC と  $N_mF_2$  がほとんど擾乱を受けていないのは夜間の TID の特徴である。一般的に  $h_mF_2$  の変化の原因としての TID と電場あるいは中性大気風の効果を分離するには、ここで用いたような緯度方向のイオノゾンデ・チェーンは極めて有用なデータを提供する。

#### 4.2.2 11月6日7時から11時JSTまで

図3のように、IMF Bz は南を向き、 $K_p$  指数も弱い磁気擾乱を示している。図6に見られるこの時間帯の電離圏の特徴は、低緯度側で特に明瞭な TEC の減少であり、09:00 から 11:00 JST まで緯度  $38^\circ N$  より南では  $\Delta TEC$  が負になっている。この TEC の落ち込みに対応して沖縄、山川、国分寺で  $N_mF_2$  が減少していて、その発生時間は  $\Delta TEC$  に比べて 30 分ほど遅れている。高さを見ると、変動は小さく、沖縄で  $\Delta h_mF_2$  が弱い正の擾乱から弱い負の擾乱に変わるが、緯度が高くなるにつれてその傾向ははっきりしなくなる。図8に示したイオノグラムでは、08 時では、11 月 5、6 日ともにほとんど同じトレースであったのが、6 日の 09 時には周波数の低い部分で高度が下がり、 $foF_2$  が低下し始める。さらに 1 時間後には  $foF_2$  が大きく低下している。

TEC、 $N_mF_2$  ( $foF_2$ )、 $h_mF_2$  の比較結果を総合すると、そこには二つの相反する電離圏嵐のプロセスが明らかになる。高緯度側では赤道向きの風に

よる弱い正相嵐が始まり、低緯度側では西向き電場による一時的な負相嵐が起こって、二つの効果は緯度 38° N 付近で均衡する。

#### 4.2.3 11月6日11時から16時JSTのTEC異常増加

一連の擾乱の中で、この時間帯の TEC 増加がもっとも重大である。沖縄の緯度では2時間の間に TEC が 100 TEC unit 上昇し、緯度の高い稚内でも 50 TEC unit 増加した。急激な TEC 増加は緯度に依らずほとんど同時に始まったと見られるが、極大に達した時刻は緯度が高くなるにつれて遅くなっている。図 6 上段の TEC 変動が極めて大きいのに比べれば、中段に示した  $N_mF_2$  の変動はそれほど大きくなく、 $\Delta N_mF_2$  の符号すら変わっている。F 層高度の上昇も全観測所で 11:00 JST から同時に始まって、中段から下段を貫く破線で示したように TEC の増加開始とほぼ一致している。高度の上昇は2時間後には平衡状態になり、高い状態は翌日まで続いている。以下項を追ってこれら特徴の起源をひとつずつ解明する。

##### 磁気圏電場の浸入

$\Delta \text{TEC}$  と  $\Delta h_mF_2$  が各緯度で同時に上昇したことは、磁気圏電場の低緯度電離圏への浸入現象(例えば文献[9][21]–[23])として良く理解できる。11月6日 01:51 UT の磁気嵐急始の7時間前から IMF Bz が南向きの状態が続いていて、02:00 UT 頃に南向きの Bz が強くなるとともに ASY-H も増加している。Spiro 他[22]の理論計算によれば、このようなときの電場の擾乱は東向きで、観測された  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトによる電離圏高度上昇と一致する。また、このときの低緯度の磁場観測データも東向き電場の浸入を裏付けている[23]。

沖縄における F 層高度の上昇率と地磁気の伏角から電場強度を推定することができる。図 6 で  $h_mF_2$  の上昇開始から 30 分の間の曲線の傾きから、上昇速度は 28 m/s となり、東向き電場に換算して 1.4 mV/m である。磁力線に沿った F 層の下降が誘起される[24]ことを勘案するとさらに大きなものなると考えられる。

##### プラズマ圏への散逸

TEC の増加に比べて  $N_mF_2$  の変化が小さいことは、電離圏プラズマの上方(プラズマ圏)への散逸が最大電子密度の上昇を抑制したものと考えられる。F 層ピークより充分上の高度で、プラズマ拡

散方程式の平衡状態を表す一般解は次式のようになる。

$$N = N_1 e^{-(h-h_0)/2H} + N_2 e^{-(h-h_0)/H} \quad (4)$$

ここで、 $N$  は高度  $h$  における電子密度、 $H$  は中性大気のスケール・ハイトである。右辺の第一項は拡散平衡を表し、第二項は拡散平衡からのずれを表すフラックス解である[14]。F 層ピークと  $O^+ - H^+$  の遷移高度の中間領域では磁力線に沿ったプラズマ流束(フラックス)が次のように近似できる[14]。

$$\Phi = \left( \frac{D_m}{2H} \right) N_2 \sin I \quad (5)$$

ここで、 $D_m$  は F 層ピークにおけるプラズマの拡散係数、 $I$  は磁気伏角である。上側電離圏(topside ionosphere)が拡散平衡状態にあれば  $N_2$  はゼロであるが、普通は電離圏とプラズマ圏のプラズマのやり取りがあって、昼間は上向きの流束( $N_2 > 0$ )、夜間は下向きの流束( $N_2 < 0$ )がある。

図 6、7 にあるように、昼間に  $N_2$  が正のとき電離圏高度が突然 100 km 持ち上げられたとする。この高度上昇は F 層ピーク近傍の中性大気のスケール・ハイト(~80 km)より大きく、イオン-中性大気間の衝突周波数の減少によりプラズマの拡散係数が増大するため、(5)式の上向きの流束は  $e$  倍以上に増加する。この問題の定量的な取り扱いの本特集号の他の論文[25]に詳しく述べられている。

##### TEC の増加

電離圏下部で、ある一定の高さの電子密度を考える。電離圏が急激に持ち上げられると、上向きの密度勾配を持つ電離圏下部領域では最初に電子密度が急減する。しかし、電子密度は光化学平衡に近づくまで新たな電離の進行によって補償され、その結果、TEC は増大する。補償にかかる時間はおよそ  $1/\beta$  ( $\beta$  は電子の再結合係数)であり、高度 250 km で約  $10^3$  s、高度 350 km では約  $10^4$  s となる。最大電子密度高度付近では消滅率の低下による密度上昇と上向き散逸流束の増加による密度減少が競合し、TEC の瞬時 ( $10^3$  s) の増大にもかかわらず  $N_mF_2$  の回復に 2~3 時間 ( $10^4$  s) の遅れがでる。

上の説明は図 8 に示した 1 時間ごとのイオノグラムの変化と整合する。11 時 JST に F 層の高度

上昇が開始、トレースは上にずれ始める。この時点では  $N_mF_2$  ( $foF_2$ ) は増加していない。12~13 時には、さらにトレースの上昇が続くが、低高度 (イオノグラムの低周波数端) では光化学平衡に保つ作用 (密度減少を補償) が強く働いていることが分かる。トレースの 7 MHz 付近から下の折れ曲がった部分は通常この時期にははっきりと現れない F<sub>1</sub> 層に対応する。  $foF_2$  は 12 時には増加がはっきりして、その後高い状態で推移している。15 時になると、新しい電離の進行による補償はほぼ全周波数 (全高度) 領域にわたるとともに  $foF_2$  は高い状態を維持している。静穏日のこの時間には  $foF_2$  の減少が始まるので、図 6 (中段、Kokubunji) に示されている静穏日との差  $\Delta N_mF_2$  は最大になる。

#### TEC 増加の時間遅れ

TEC の異常増加が磁気圏電場の低緯度浸入で説明されたが、このような電場は緯度に依らず同時に働くはずである。実際  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトによる F 層の上昇開始は図 6 最下段に示したように同時であった。それにも関わらず、図 5 下段に点線で示したように TEC 増加分が最大に達する時間は緯度が高くなるにつれて遅くなる傾向にある。緯度が高くなると、磁力線の長さが長くなり、プラズマ圏を通過する部分の割合が増える。そのため、電離圏からプラズマ圏にプラズマが拡散するのに要する時間が長くなるのが TEC 増加を遅くしている原因と考えられる。

#### 4.2.4 16 時 JST から真夜中にかけての回復期

TEC の異常増加から静穏日レベルへの回復の様相は図 6 から分かるように 33°N を境に緯度によって大きく異なる。まず低緯度側では、 $\Delta \text{TEC}$  は 21:45 JST まで下がり続け、その下がり方は低緯度ほど大きい。ところが高緯度側では、50 から 30 TEC unit までに急速に下がった後は 17:00 から 23:00 JST までほぼ一定の高いレベルを保っている。図 6 最下段の  $\Delta h_mF_2$  に見られる電離圏高度の変化は、TID による上下変動の重畳は見られるものの、すべての緯度で静穏日より高い状態が継続している。したがって、高緯度側では赤道向きの風による高度上昇が電子消滅を抑え、昼間にプラズマ圏に蓄えられたプラズマが下方へ拡散する効果と相まって高い TEC 状態が維持されたと考えられる。

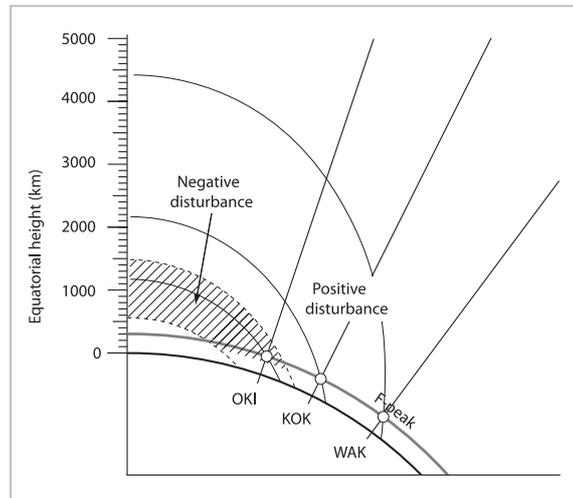


図9 緯度によって異なる電離圏嵐の正相と負相：高緯度側の正相嵐は赤道向きの熱圏中性大気風による電離圏高度の上昇、低緯度側の負相嵐は東向き電場の衰退による fountain 効果の減少による

図 5 下段の低緯度、日没後の負の  $\Delta \text{TEC}$  は 21-23 時を中心に観測され、静穏日に見られる電場の prereversal enhancement による TEC 日変化 (上段) の二つ目のピーク (赤道異常の再発達) の時間より少し遅い。一連の地磁気/熱圏擾乱によって擾乱ダイナモ電場 [10] が発達し、prereversal enhancement の前後の電場が変調を受け [26]、西向きへの反転 (reversal) が早まったことが負の  $\Delta \text{TEC}$  の原因と考えられる。Prereversal enhancement 前後の電場の効果は低緯度側で顕著である [27] から、赤道向きの熱圏中性大気風 (緯度の低下とともに弱まる) による正層嵐の効果に打ち勝ったことになる。また、負相嵐が TEC よりも  $N_mF_2$  で顕著なのは、緯度構造が反映されたものである。すなわち、図 9 に模式的に示したように、 $N_mF_2$  は低緯度の最大電子密度高度 (F-peak) の局所的な値であるのに対して、TEC は高度方向に積分した値であり、F-peak より高高度の磁力線は高緯度側の F-peak に繋がっているため、そこでの正相嵐の効果が及んでいるのである。

#### 4.2.5 真夜中以降

この時間になると、TEC および  $N_mF_2$  ともに静穏日のレベルと大差なくなるが、一般的な傾向として  $\Delta \text{TEC}$  は低緯度ほど大きく、夜間に東向きになる擾乱ダイナモ電場の効果が現れている。 $\Delta h_mF_2$  が高緯度ほど高いにも関わらず TEC が静穏日まで回復 (減衰) しているのは継続した南向き

の熱圏風で中性大気の組成変動が起きているとも考えられる。いずれにしても、一連の擾乱はほぼ終息した。

## 5 2004年11月8日の宇宙天気事象

### 5.1 擾乱の全体像

太陽活動度が下がりつつあるこの時期、2004年11月7日に強い磁気嵐が発生した。図10はACE衛星で観測したIMF Bz (上段)、AE 指数 (中段)、および Dst 指数 (下段) である。Dst は IMF が南を向いた11月7日の21:00 UT から減少を始め、06:00 UT に最大 -373 nT に達した。磁気嵐回復相の縦の点線はここで述べる TEC の異常増加が観測された時間である。

図11に TEC の変動を時間 - 緯度座標上のマップとして表す。高度 200 km における日出と日没の時刻が点線で示してある。a は静穏日の標準的な変動として11月1-6日 (JST) の平均、b は擾乱の観測された11月8日の TEC 変動である。静穏日と擾乱日の差  $\Delta$ TEC が c に示してある。 $\Delta$ TEC は日出からしばらくして徐々に増加し始め、3回にわたって大きな上昇が見られる。最初は14:00~15:00 JST に全緯度範囲に亘って起こり、高緯度側で僅かながら時間遅れが見られる。二つ目は日没に近い17:00~19:00 JST で、最初と異なり緯度が37°Nより低緯度側に限られている。最後は21:00 JST 頃に35°Nより高緯度側で起こっている。

TEC の増加は 4 で詳しく解析した事例と同様に、F 層高度の変動を伴っている。そこで、2004

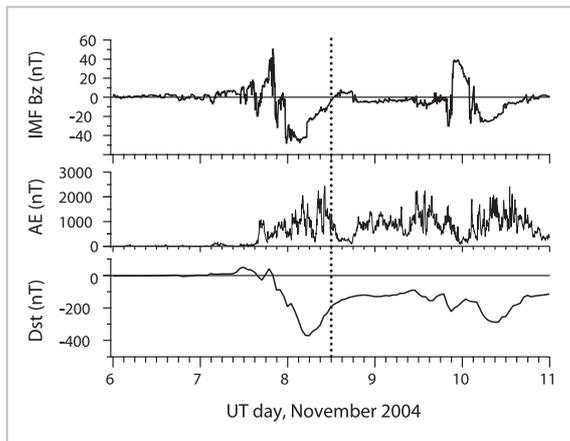


図10 2004年11月初めの磁気擾乱指数

年のこの例についても  $h_mF_2$  の変動を4つの観測所について示したのが図12である。黒丸を線で結んだのが11月8日の擾乱日、実線は静穏日11月1-6日の平均である。稚内と国分寺のプロットに G で示したのは、イオノグラム・トレースの歪みが大きく、またトレースの先端が大きな伝播遅延のためイオノグラムの範囲を超える高高度に達していると見られ  $h_mF_2$  が計算されていない時間である。時間を追って詳しく見てみると、白

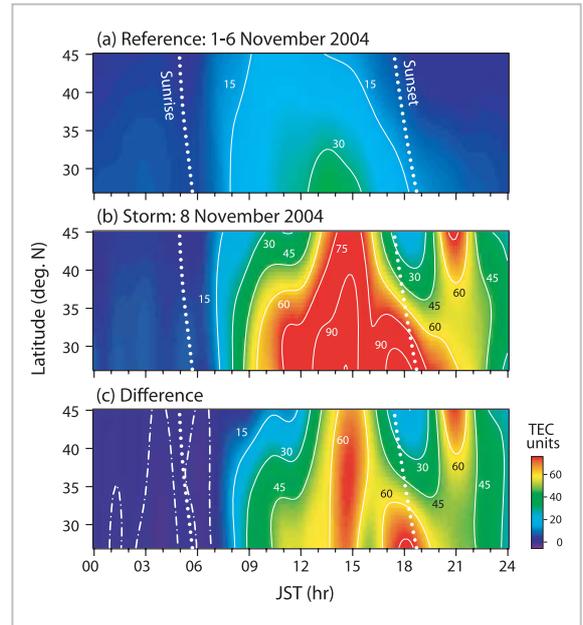


図11 TEC 嵐と SED を示す TEC の変動 - (a) 静穏日の平均的な振る舞い、(b) 2004年11月8日の TEC 嵐と SED、(c) 静穏日との差

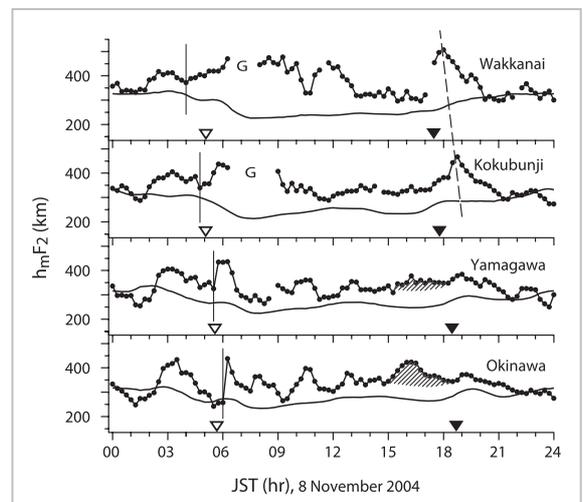


図12 各観測所における F 層高度の変動

線で結んだ黒丸は2004年11月8日の擾乱、実線は地磁気静穏日2004年11月1-6日の平均を示す。

の逆三角で示した日出時刻の前後に高度上昇が起こっていて、日没(黒の逆三角)過ぎまで高くなっている。日出後の F 層の上昇が  $\Delta$ TEC の緩やかな増加に対応している。日出直後は太陽天頂角が大きいため、2001 年の事例のような急激な TEC 増加にはつながっていない。高度上昇は稚内では 04:00 JST に起こり、緯度の低下とともに遅くなって沖縄では 06:00 JST になっている。上昇の始まりは低緯度ほどステップ状に明瞭になっている。この点が **4** で取り上げた東向き電場による TEC の増加と異なり、高緯度側に起源をもつ移動性大気擾乱 (TADs: traveling atmospheric disturbances) もしくは equatorward surge<sup>[28]</sup> による。

14:00 - 15:00 JST の顕著な TEC 増加では高緯度側でピークの時刻に遅れがあるものの、ほぼ同時に急増が開始している。これは **4** で取り上げた事例によく似ていて、磁気圏電場の侵入による  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトが原因ととれるが、一つ異なる点は  $h_m F_2$  の挙動である。この TEC の急激な増加に対応した  $h_m F_2$  の上昇が必ずしもはっきりしない。既に赤道向きの熱圏大気風が強まり、F 層高度がかなり上昇していたことと、系統的でなく原因の明確でない上下動が重畳しているためと推測される。

15:00 ~ 18:00 UT に沖縄で緩やかな  $h_m F_2$  のピーク(図 12 で影を付けた部分)が見られる。このピークは山川でも僅かながら認められるが、国分寺と稚内には見られない。明らかに二つ目の TEC 急増(18:00 JST)に対応している。このときの沖縄での  $h_m F_2$  上昇の開始から TEC がピークに達するまでの時間は約 3 時間であった。

最後に、21:00 JST の突出した TEC 上昇である、すこし早い時間帯に図 12 に破線で示したような TID の特徴(緯度の低下とともに変動の位相が遅れる)を示す高度上昇が見られる。稚内では 20:15 JST までに高度変動は静穏日の値にまで戻っており、その後で急激な TEC の増加が始まっている。F 層高度の上昇が日没後に中緯度で発生しているから、TEC の変動要因は明らかに **4** で議論した正相電離圏嵐の機構とは異なる。これは、SED (storm enhanced density) と呼ばれる現象で、わが国で観測されるのは極めてまれである。次の節で、この SED について詳しく解析する。

## 5.2 Storm enhanced density (SED)

図 11 は電離圏擾乱の緯度分布と時間推移の大概を良く表しているが、経度方向には幾つかのセルに亘って平均化されている。そこで SED の空間変動をより詳しく調べるために、図 13 に示したセル番号 22、23、24、25 (141°E の南北チェーン)とセル番号 19、24、28 (41°N の東西チェーン)を選び、セルごとに時間推移を示したのが図 14 である。南北方向を比較した図 14a を見ると、43°N(セル 25)では破線で示した日没の後 TEC が増加し始めて、20:30 JST にピークに達している。この間の TEC 増加量は 75 TEC unit であり、TEC 値は同じ緯度で当日の昼間の値より大きくなっている。緯度が下がるにつれて、TEC 増加の開始およびピーク時刻ともに遅く、37°N(セル 22)では 45 分遅れている。また、TEC 増加量も低緯度ほど小さく、37°N では 20 TEC unit である。見かけの擾乱の伝播速度は赤道方向へ 8°/hr と見積もれる。次に、東西方向を比較した図 14b を見ると、日没後の TEC 増加は東ほど早く始まり、見かけ上の擾乱の伝播速度は西方向へ 8°/hr である。これは、日没線の移動速度のおよそ半分に対応する。

赤道方向へ伝播する TEC 擾乱はオーロラ帯に起源をもつ TAD との関連を強く連想させる。確かに稚内と国分寺における 18:00 JST 付近の F 層

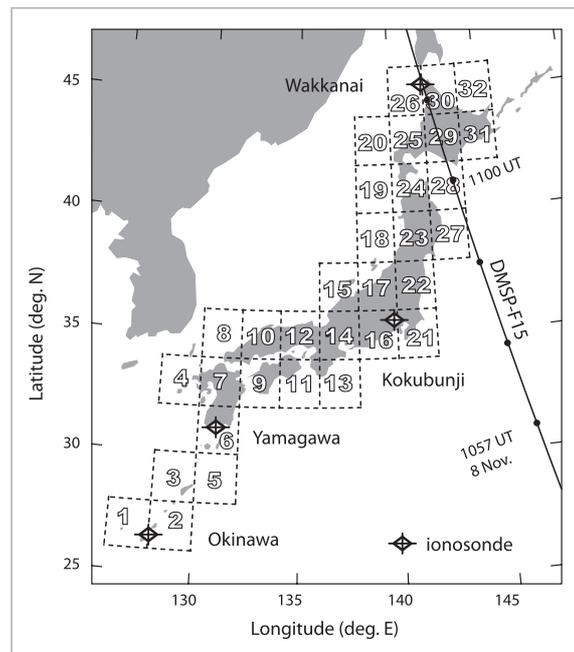


図13 TECを求めるためのセルの分割

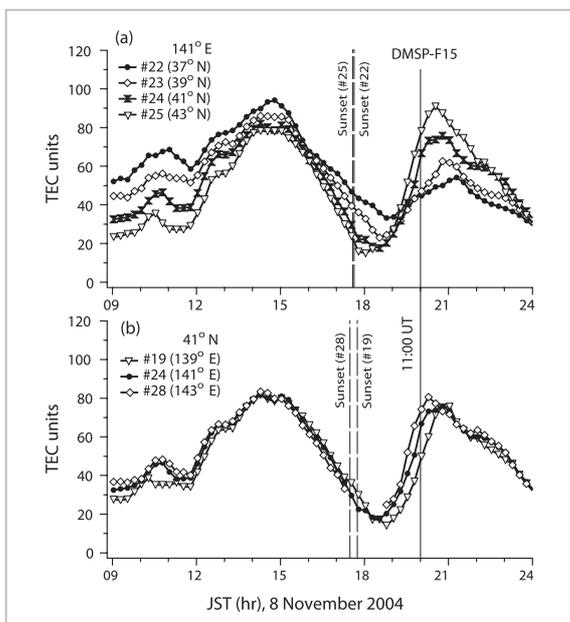


図14 (a)南北に並んだセルの TEC 変動、  
(b)東西に並んだセルの TEC 変動

高度の変動は TAD の特徴を現している、その直後に TEC が1時間で 53 TEC unit 増加している(セル 25)。これは流束に換算すると  $10^{14} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  に相当する。L~1.5 程度の中緯度では、磁力線に沿う  $\text{H}^+$  流束によって磁気共役点の電離圏密度は互いに結びついている[29]。もし、ここで観測されたような TEC の増加が TAD によって電離圏が高高度に支えられている条件下での反対半球からのプラズマ流束によるものであるとすれば、電離圏上端における  $\text{H}^+$  の沿磁力線流束は限界流束 (limiting flux) [30] より二桁大きくなければならない。したがって、TEC 増加を TAD によって引き起こされた TID とするのは無理であり、水平方向の移流を考えなければならない。

図 15a に示したのは、DMSP-F15 衛星によって観測された高度 850 km における全イオン密度である。実線は 11 月 8 日(このときの軌道が図 13 に示されている)、破線は比較のための静穏日である 11 月 6 日のデータ(軌道はほぼ 11 月 8 日と同じ)である。この衛星は太陽同期軌道で軌道はほぼ南北(軌道傾斜角  $98.4^\circ$ )であるから、図は緯度変化を表している。11 月 8 日のイオン密度は全緯度範囲に亘り静穏日より上昇していて、長い破線で示した ( $41.1^\circ \text{N}$ ,  $143.4^\circ \text{E}$ ; 11:00 UT; 20:00 JST) に密度の「こぶ」が見られる。電子密度(全イオン密度)の増加が  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトによる移流で引き起

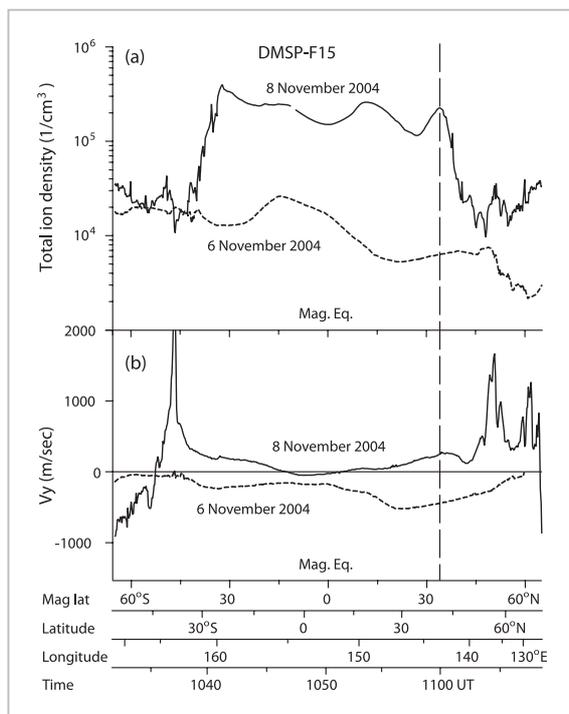


図15 DMSP 衛星による全イオン密度と西向きイオン・ドリフト速度

こされたならば、高電子密度構造は磁力線に沿っているはずである。DMSP 衛星で 850 km 高度に観測された密度上昇の位置を磁力線にそって TEC を求めた際の球殻高度[15] 400 km まで投影すると ( $43.5^\circ \text{N}$ ,  $143.1^\circ \text{E}$ ) になり、セル番号 29 に対応する。20:00 JST のセル番号 27 から 30 までの TEC はそれぞれ、54.7、74.2、95.7、85.2 TEC unit であった。したがって、DMSP 衛星で観測された密度ピークと地上 GPS ネットワークの結果は合致する。図 15a では磁気赤道に近い位置  $19^\circ \text{N}$  (磁気緯度  $12^\circ \text{N}$ ) にもうひとつの密度上昇域があり、赤道異常の北側の山(クレスト)が見られる。これは静穏日には見られなかったもので、11 月 8 日には東向き電場が強く、赤道異常が発達していたことが分かる。

図 15b には 15a と同じ軌道上の西向きイオン・ドリフト速度(軌道と直角な水平成分)が示されている。密度上昇域の速度は  $\sim 250 \text{m/s}$  であって地表に投影すると  $220 \text{m/s}$  となり、TEC 上昇構造前面 (frontal structure) の移動速度、 $8^\circ/\text{hr}$  ( $200 \text{m/s}$ ) より僅かに早い。磁力線直角に北向きのドリフト速度成分  $40 \text{m/s}$  が同時に観測されているので、TEC 上昇構造前面の南向き運動は見かけのもので、実際の密度上昇域の運動は ESE 方向から

WNW 方向への流れであったと推測される。南北および東西に並んだセルの間の TEC 変動から推定した見かけの擾乱の伝播速度が西方向および赤道方向ともに  $8^\circ/\text{hr}$  であったことを考えると、図 16 に模式的に示したような TEC 増加域の動きが描ける。このような磁気擾乱時のプラズマ密度上昇と特異な流れは SED に特有のものである。さらに、図 15b で、DMSP 衛星は高緯度側にいわゆる SAPS (subauroral polarization stream) の西向き高速プラズマ流を観測している。SAPS もまた SED/TEC plume に強く関連した現象である [31][32]。

これまでの研究 [32] - [34] から SED/TEC plume は低緯度側に赤道異常の発達による正相電離圏嵐を伴っているが、赤道異常と SED の密度増加域は同一経度では比較的密度の低い領域で互いに分離されて見える。しかし、赤道異常の発達による低緯度の高い電子密度が SED/TEC plume の高い電子密度の起源であるという意味で二つの領域は結びついている [33]。このような観点からも、ここで取り上げた擾乱の例は昼間に強い TEC 嵐が起こっていて、SED/TEC plume と考える根拠がある

DMSP 衛星で観測された密度上昇域のイオン・ドリフト速度  $250 \text{ m/s}$  (地表に投影すると  $220 \text{ m/s}$ ) は、同じく地表に投影した日没線の移動速度

( $41^\circ\text{N}$  で  $400 \text{ m/s}$ ) より遅い。したがって、高電子密度領域は東側 (かつ南側) で早い LT (地方太陽時) に形成されたことになる。図 11 で注目するのは 18:00 JST に低緯度側で観測された TEC の増加で、15:00~18:00 JST の高度上昇に対応している。これは赤道異常が高緯度側まで発達したものと見る事が出来る。16:00 JST に F 層高度は最大に達し、上向きの  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトは停止している。TEC の増加が最大に達したのはその 2 時間後であり、その時間遅れは一般的な電場応答のモデル計算とも合致する [35]。この時間帯の電場擾乱の起源は定かではないが、昼間の強い TEC 嵐に引き続いて赤道異常がさらに高緯度側に伸びたことが SED の形成に強く関連している。

もうひとつの SED 形成にとっての重要な点は、中低緯度における持続的な西向き/極向きの移流の駆動源である。前に述べたように、F 層高度は昼間を通じて高い状態が維持されてきた。これは赤道向きの熱圏中性大気循環が強まったことを意味している。このような大気風の擾乱は擾乱ダイナモ電場を作り出す。モデル計算 [10] によれば、終日  $5 \text{ mV/m}$  の極向き電場が、また 19 時 LT 過ぎの夜間には中緯度 ( $41^\circ$ ) で  $1 \sim 3 \text{ mV/m}$  の東向きの電場が作られる。これが SED の駆動源であると考えられる。

## 6 まとめ

本稿では今日的な電離圏宇宙天気として重要な電離圏全電子数 (TEC) の異常な増加現象として二つの事例を取り上げて、その発生の物理過程を詳しく解析した。ひとつは日中に発生した全電子数嵐 (TEC storm) であり、他は日没後に観測された SED (storm enhanced density) である。いずれも電離圏擾乱の原因は太陽フレアに端を発して、太陽風擾乱、太陽風と磁気圏の相互作用を経由して熱圏/電離圏にエネルギーが伝播した一連の宇宙天気事象の結末である。その概要を図 17 に模式的に示す。この二つの事例は我が国の経度において観測された TEC の異常増加としては 11 年の太陽活動度周期中で最大級のものであった。「我が国の経度」と断ったのは、本稿で考察したように電離圏嵐はその駆動源としての磁気擾乱の発生時刻が重要であり、東アジアで大きな電離圏擾乱を

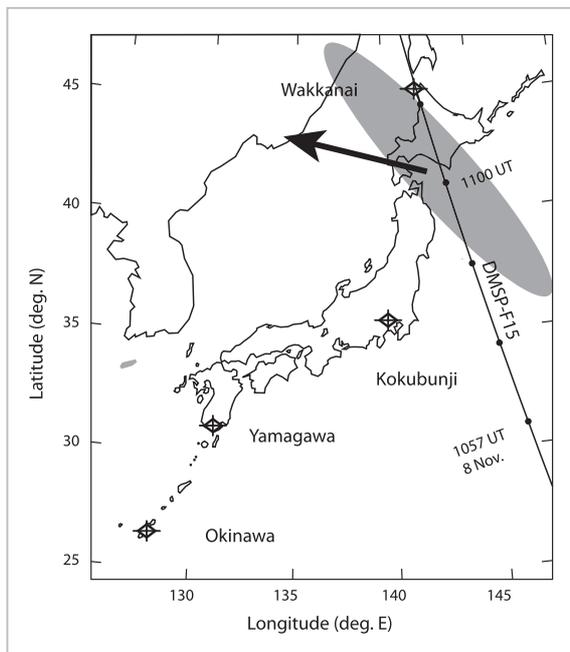


図 16 2004 年 11 月 8 日の SED の概念図

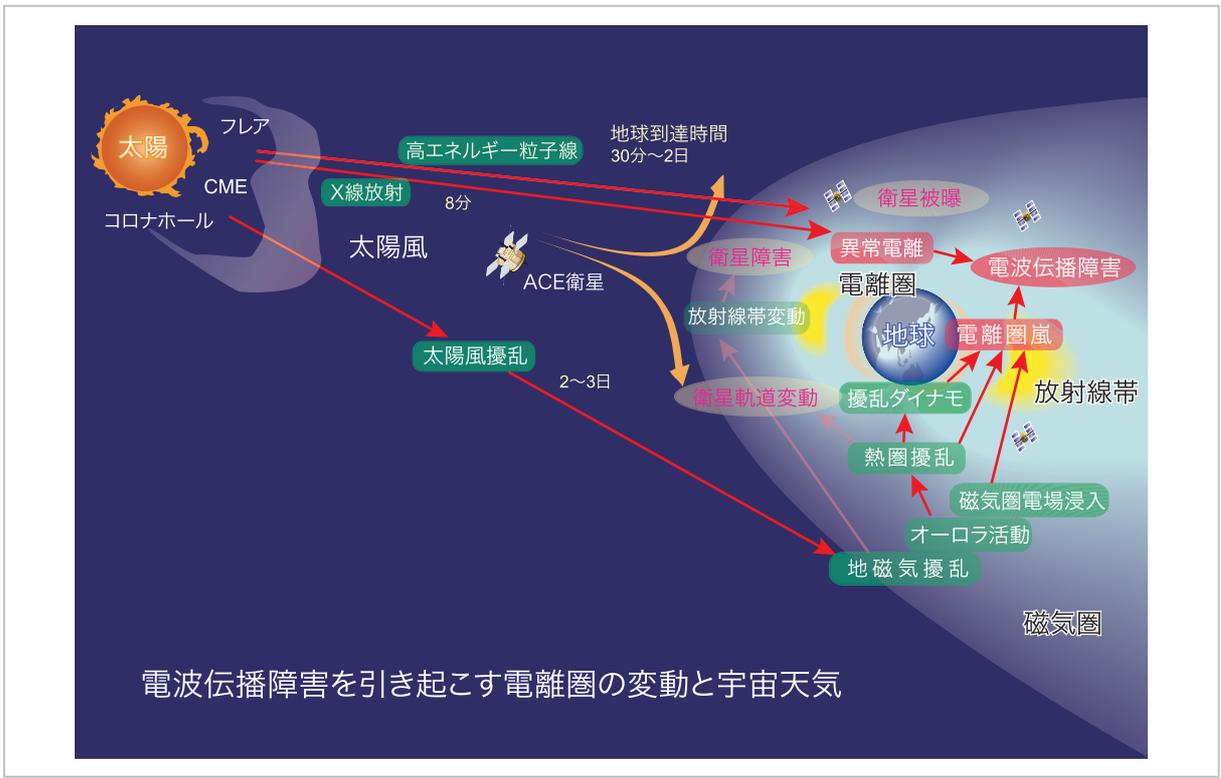


図17 電波伝播障害の発生と電離圏擾乱の起源

発生させた磁気擾乱であっても米国の経度では必ずしも大きな電離圏擾乱を引き起こしていないからである。電離圏擾乱は経度と時刻に強く関係した現象であるのに対して、磁気擾乱は太陽風と地球の関係であり、太陽風擾乱は地球の存在とは無関係に発生する。然るに、太陽面現象から地球上のある経度域における電離圏擾乱を予測するには、図17にまとめた擾乱の「原因」と「結果」の連鎖を全過程で数時間の時間精度で予測しなければならない。磁気嵐の発生が予測できるという程度では、そのタイミング如何によっては正相嵐にも負相嵐(強い負相嵐の発生条件については文献[36]

を参照)にもなり得るのであるから、電波伝播障害発生予測には全くもって心もとない。宇宙天気としての現実的な対処には電離圏擾乱の初期相からその後の推移を予測するような技術を開発することもひとつの有効な手立てである。そのためには本稿で取り上げたような詳しい事後解析を重ねることが重要である。

謝辞

GEONETは国土地理院によって整備・運用されています。そのデータ公開に強く感謝いたします。

参考文献

- 1 D. Bilitza, and B. W. Reinisch, "International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters", Adv. Space Res., Vol.42, pp.599-609, 2008.
- 2 丸山隆, "太陽 EUV 代理指標を用いた日本上空の標準電離圏全電子数モデル", 本特集号, 3-3-5, 2009.
- 3 T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, R. J. Moffett, and S. Quegan, "Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms", J. Geophys. Res., Vol.99, pp.3893-3914, 1994.

- 4 T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, H. Rishbeth, R. J. Moffett, and S. Quegan, "On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms", *J. Geophys. Res.*, Vol.101, pp.2343-2353, 1996.
- 5 G. W. Prölss, "Ionospheric F-region storms", in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol.2, edited by H. Volland, pp.195-248, CRC Press, Boca Raton, Fla.,1995.
- 6 G. W. Prölss, "Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere", in *Magnetic Storms*, Geophysical Monograph 98, edited by B. T. Tsurutani, W. D. Gonzales, Y. Kamide, and J. H. Arballo, American Geophysical Union, Washington, D. C., 1997.
- 7 M. J. Buonsanto, "Ionospheric storms – Review", *Space Sci. Rev.*, Vol.88, pp.563-601, 1999.
- 8 G. W. Prölss, "Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes", *Planet. Space Sci.*, Vol.35, pp.807-811, 1987.
- 9 M. C. Kelley, B. G. Fejer, and C. A. Gonzales, "An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.6, pp.301-304, 1979.
- 10 M. Blanc, and A. D. Richmond, "The ionospheric disturbance dynamo", *J. Geophys. Res.*, Vol.85, pp.1669-1686, 1980.
- 11 B. G. Fejer, 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.*, Vol.27, pp.1859-1862, 2000.
- 12 J. M. Forbes, M. Codrescu, and T. J. Hall, "On the utilization of ionosonde data to analyze the latitudinal penetration of ionospheric storm effects", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.15, pp.249-252, 1988.
- 13 J. M. Forbes, "Evidence for the equatorward penetration of electric fields, winds, and compositional effects in the Asian/Pacific sector during the September 17–24, 1984, ETS interval", *J. Geophys. Res.*, Vol.94, pp.16,999-17,007,1989.
- 14 H. Rishbeth, "On the F2-layer continuity equation", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.48, pp.511-519, 1986.
- 15 G. Ma, and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan", *Ann. Geophys.*, Vol.21, pp.2083-2093, 2003.
- 16 T. Shimazaki, "World-wide daily variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer", *J. Radio Res. Labs.*, Vol.2, pp.85-97, 1955.
- 17 P. A. Bradley, and J. R. Dudeney, "A simple model of the vertical distribution of electron concentration in the ionosphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.35, pp.2131-2146, 1973.
- 18 F. T. Berkey, and G. H. Stonehocker, "A comparison of the height of the maximum electron density of the F<sub>2</sub>-layer from real height analysis and estimates based on  $M(3000) F_2$ ", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.51, pp.873-877, 1989.
- 19 L. M. Muggleton, "A method of predicting  $f_oE$  at any time and place", *Telecommun. J.* Vol.42, pp.413-418, 1975.
- 20 T. Iyemori, and D. R. K. Rao, "Decay of the *Dst* field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation", *Ann. Geophys.*, Vol.14, pp.608-618, 1996.
- 21 B. G. Fejer, C. A. Gonzales, D. T. Farley, M. C. Kelley, and R. F. Woodman, "Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions, 1. The effect of the interplanetary magnetic field", *J. Geophys. Res.*, Vol.84, pp.5797-5802, 1979.

- 22 R. W. Spiro, R. A. Wolf, and B. G. Fejer, "Penetration of high-latitude-electric-field effects to low latitudes during SUNDIAL 1984", *Ann. Geophys.*, Vol.6, pp.39-50, 1988.
- 23 T. Kikuchi, K. Hashimoto, and K. Nozaki, "Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm", *J. Geophys. Res.*, Vol.113, A06214, doi:10.1029/2007JA012028, 2008.
- 24 T. Maruyama, " $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  instability in the F-region at low- to midlatitudes", *Planet. Space Sci.*, Vol.38, pp.273-285, 1990.
- 25 陣英克, 丸山隆, "大きな磁気嵐中に観測された全電子数と  $NmF2$  の異なった振舞", 本特集号, 3-3-2, 2009.
- 26 L. Scherliess, and B. G. Fejer, "Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields", *J. Geophys. Res.*, Vol.102, pp.24,037-24,046, 1997.
- 27 J. A. Murphy, and R. A. Heelis, "Implications of the relationship between electromagnetic drift components at mid and low latitudes", *Planet. Space Sci.*, Vol.34, pp.645-652, 1986.
- 28 G. W. Prölss, "On explaining the local time variation of ionospheric storm effects", *Ann. Geophys.*, Vol.11, pp.1-9, 1993.
- 29 G. J. Bailey, P. A. Simmons, and R. J. Moffett, "Topside and interhemispheric ion flows in the mid-latitude plasmasphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.49, pp.503-519, 1987.
- 30 P. G. Richards, and D. G. Torr, "Seasonal, diurnal, and solar cyclical variations of the limiting  $H^+$  flux in the earth's topside ionosphere", *J. Geophys. Res.*, Vol.90, No.A6, pp.5261-5268, 1985.
- 31 J. C. Foster, P. J. Erickson, A. J. Coster, J. Goldstein, and F. J. Rich, "Ionospheric signatures of plasmaspheric tails", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.29, 10.1029/2002GL015067, 2002.
- 32 J. C. Foster, and W. Rideout, "Midlatitude TEC enhancements during the October 2003 superstorm", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, L12S04, doi:10.1029/2004GL021719, 2005.
- 33 J. C. Foster, "Storm time plasma transport at middle and high latitudes", *J. Geophys. Res.*, Vol.98, No.A2, pp.1675-1689, 1993.
- 34 M. Vlasov, M. C. Kelley, and H. Kil, "Analysis of ground-based and satellite observations of F-region behavior during the great magnetic storm of July 15, 2000", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.65, pp.1223-1234, 2003.
- 35 C. H. Lin, 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.*, Vol.110, A12312, doi:10.1029/2005JA011304, 2005.
- 36 T. Maruyama, and M. Nakamura, "Conditions for intense ionospheric storms expanding to lower-midlatitudes", *J. Geophys. Res.*, Vol.112, A05310, doi:10.1029/2006JA012226, 2007.

まる やま なかし  
**丸山 隆**

上席研究員 博士(工学)  
超高層大気物理

**馬 冠一 (Ma Guanyi)**

中国科学院国立天文台教授  
博士(理学)  
超高層大気物理、衛星通信測位



なかむら まほ  
**中村真帆**

新世代ネットワーク研究センター光・  
時空標準グループ専攻研究員  
博士(工学)  
超高層大気、情報工学