

## 3-3-2 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

### 3-3-2 *Different Behaviors of TEC and NmF2 Observed During Large Geomagnetic Storms*

陣 英克 丸山 隆

JIN Hidekatsu and MARUYAMA Takashi

#### 要旨

我々は、磁気嵐時における電離圏全電子数(TEC)と F 領域最大電子密度(NmF2)の振舞について調べている。中規模の磁気嵐時には両者は大体似たような時間変動をするが、大きな磁気嵐の際には両者が非常に異なる振舞をする場合もある。我々は、観測された TEC と NmF2 の異なる振舞が、どのような電離圏の乱れ(擾乱)を反映しているのか、数値シミュレーションを用いて調べた。その結果、電離圏擾乱を駆動する要因が急激に電離圏に作用する時や、複数の擾乱駆動源が同時に電離圏に作用する時などに、TEC と NmF2 の振舞が異なることが分かってきた。したがって、TEC と NmF2 両者の観測は磁気嵐時の電離圏応答について、擾乱発生機構を知るための重要な手掛かりを与えうる。

We investigated behaviors of total electron content (TEC) and maximum F-region electron density (NmF2) observed at middle latitudes during geomagnetic storms. Although TEC and NmF2 disturbances were similar during moderate storms, they were sometimes quite different during severe storms. By using numerical simulation, we suggest that different TEC and NmF2 disturbances can be caused by effects of F-region plasma dynamics enhanced when storm drivers operate suddenly or effects of more than one storm drivers operating simultaneously. Therefore, observations of such TEC and NmF2 disturbances include important information on the plasma dynamics in the F region and on the operating storm drivers.

#### [キーワード]

電離圏, 全電子数, foF2, 磁気嵐, シミュレーション  
Ionosphere, TEC, foF2, Magnetic storm, Simulation

## 1 まえがき

電離圏の密度分布は一定ではなく、日変化があり、季節や太陽活動周期(約 11 年)に伴う変動がある。規則的な変動のほかにも、太陽表面爆発(フレア)に伴って磁気嵐が起こると、そのエネルギーの一部は電離圏に流入し、不規則な電離圏密度の乱れ(擾乱)を生じる。近年 GPS 衛星を使った衛星測位が社会に普及していく中で、衛星測位の主要な誤差源である電離圏密度の擾乱は大きな障害となるため、擾乱の発生機構や予測に向けた研究が進められている。

電離圏擾乱を駆動する過程は様々あり、若干専門的だが、主に次のものが知られている

- ① 磁気圏起源電場の侵入：電離圏の外側には磁気圏があり、極地域の電離圏と磁気圏は磁力線でつながっている。磁気圏プラズマの運動に伴う電場は、通常は極地域の電離圏だけにかかっているが、磁気嵐の時には磁気圏運動が活性化し、電場が極地域から中低緯度の電離圏に侵入してくる。この侵入電場が電離圏プラズマの運動を励起し、密度の擾乱につながる。
- ② 熱圏大気循環の変化：磁気圏から磁力線に

沿って振り込んだ粒子や電流が、極地域の熱圏大気を加熱し、その影響で全球的な大気循環が乱される。熱圏大気は磁力線方向に電離圏プラズマを引っ張るため、大気循環の変化は電離圏の密度擾乱につながる。

- ③ 熱圏大気組成の変化：②で述べた極地域における熱圏大気の加熱によって、大気が膨張し、比較的重い分子が持ち上がってくる。これが中低緯度まで流れ出すと、イオンとの化学反応を促進するため、電離圏密度の減少を引き起こす。

①～③のほかにも、電離圏ダイナモ(文献[1]にて説明)の静穏時からの乱れ、極地域で発生する波動の伝播による擾乱などがある(詳しくは文献[2]などを参照されたい)。実際には、大きな磁気嵐の際に観測される電離圏擾乱の様子は非常に複雑であり、上記の擾乱過程がどう寄与しているのか理解するのは容易でない。しかも、磁気嵐ごとに擾乱の様相が異なるため、どのような条件でどの擾乱過程が卓越するか調べることは、現在の重要な研究課題である。

本研究では、電離圏擾乱の発生機構を理解するため、日本上空で観測された電離圏全電子数(TEC)とF領域最大電子密度(NmF2)の振舞について調べている。NmF2は、電子密度の高度分布のうち、F2領域で最大となる密度の値である。NmF2はイオノゾンデで観測されるF2領域臨界周波数(foF2)から求まる。TECは文献[3]のアルゴリズムで計算された、電子密度を高度方向に積分した量である。密度の濃いF2領域が最もTEC

に寄与するので、通常はTECとNmF2の日変化パターンは大体同じである。図1に国内イオノゾンデ観測地点(北から稚内、国分寺、山川、沖縄)におけるTECとNmF2の変動の相関を示した。地磁気擾乱の乱れ具合を表すKp指数がそれほど大きくないうちは( $K_p < 6$ )、各地点においてTECとNmF2変動の関係を示す直線がほぼ原点を通り、傾きも大体同じである。しかし大きな磁気嵐の時には( $K_p > 6$ )、TECとNmF2変動の関係を示す直線の傾きが $K_p < 6$ の時と異なり、原点を外れている。つまり、異なるTECとNmF2の振舞があることを表す。本稿では、そのような観測例を幾つか紹介し、違いを生じる原因について解析した結果を報告する。そして、TECとNmF2の振舞の違いは、磁気嵐時におけるF領域プラズマのダイナミクスや、電離圏擾乱を駆動した要因を理解するための手掛かりを与える、有用な情報であることを紹介する。

## 2 TECとNmF2の観測

### 2.1 中規模な磁気嵐における電離圏擾乱

まず、比較的中規模の磁気嵐が起きた際のTECとNmF2の観測例を紹介する。図2aには、磁気嵐の規模を示す指標としてDstと、稚内上空で観測されたTECとNmF2について、2002年4月17日から6日間の時間変化を表示している。日本標準時間(JST)で18日頃からDstの値が下がり始め、5日間ほど磁気圏擾乱が継続している。この間、19日と21日の2回にわたってTECとNmF2

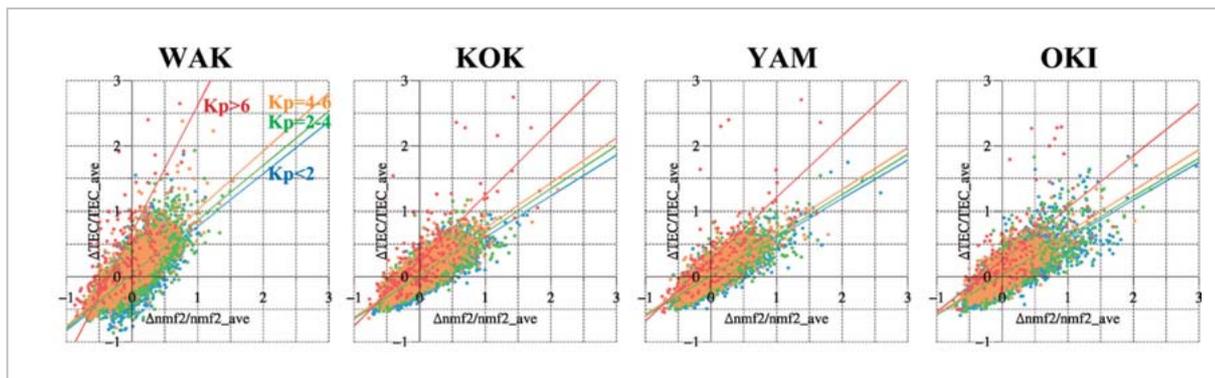
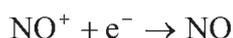


図1 国内イオノゾンデ観測点におけるNmF2とTECの変動の相関

稚内(WAK)、国分寺(KOK)、山川(YAM)、沖縄(OKI)におけるTECとNmF2変動の相関を示す。期間は山川が2002-2006年、それ以外の地点で2001-2006年である。各データ点は1時間平均値であり、変動は月平均からのずれを規格化して表す。地磁気擾乱の指標であるKp指数の大きさに色分けしている。

が月中央値から大きく下回っており、いわゆる電離圏負相嵐 (negative storm) が起きている。TEC と NmF2 の減少の割合は共に 40–60 % であり、時間変化のタイミングも大体同じである。この負相嵐を起こした要因としては、熱圏大気の組成が変化して分子成分が増加し、F 層の主要なイオンである  $O^+$  が



といった化学反応の促進によって減少した可能性が考えられる。ここに挙げた要因は、同期間において高度 400 km 付近をドイツの CHAMP 衛星が飛んでおり、中性大気質量の増加を観測していることから裏付けられる [4]。

次の図 2b では、2006 年 4 月 13 日から 3 日間の Dst、TEC、NmF2 の観測データが示されている。Dst は 14 日に下がり、-100 nT くらいに達した。この時、TEC と NmF2 は月中央値の 2 倍くらいにまで増加し、いわゆる電離圏正相嵐 (positive storm) が起きている。このような正相嵐を起こす要因として考えられるのは、前章で述べた磁気圏電場の侵入か、熱圏大気循環の変化による可能性が考えられる。前者は東向き電場が電離

圏プラズマを磁力線と垂直方向に、後者は赤道向きに加速した熱圏中性風が電離圏プラズマを磁力線に沿った方向に持ち上げる。高度が上昇すると、電離圏プラズマにとっては背景大気の密度・組成が変化し、負相嵐の場合とは逆に、相対的に分子成分が減少する。したがって、化学反応による  $O^+$  イオンの消滅が少なくなり、密度が増加する。このイベントにおいても、TEC と NmF2 の増加割合と時間変化は大体同じである。

## 2.2 大規模な磁気嵐における電離圏擾乱

次に比較的大規模な磁気嵐が起きた際の TEC と NmF2 の観測例を紹介する。図 3 は 2004 年 11 月 7 日から 2 日間の Dst、TEC、NmF2 の時間変化である。TEC と NmF2 の図には、赤線で稚内 (磁気緯度 36.6° N) と黒線で国分寺 (磁気緯度 26.8° N) 上空の観測値を示した。Dst は 8 日から下がり始めて -400 nT 近くまで達している。図 2 で例示した 2 つの磁気嵐に比べ、非常に大きな磁気嵐である事が見て取れる。TEC と NmF2 を見ると 8 日に顕著な正相嵐が起きており、国分寺上空では日中そして日没後も正相嵐が続いている。国分寺における擾乱の変化割合は、TEC と NmF2 で異なり、日中で TEC が月平均値の 6

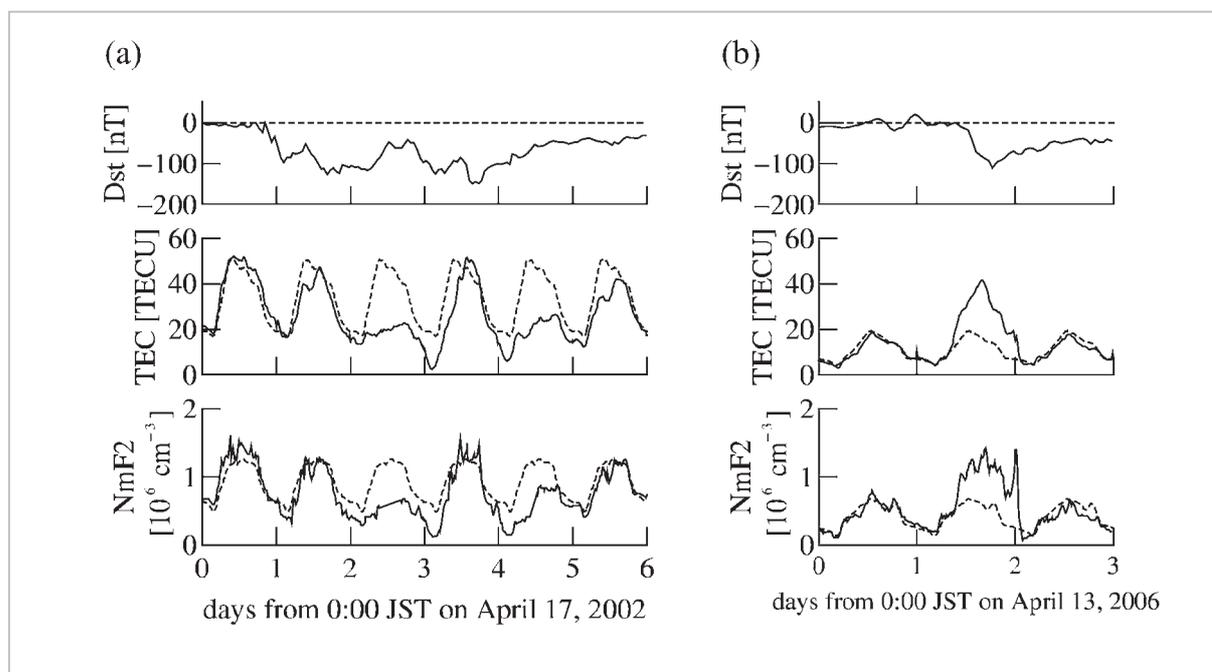


図2 中規模の磁気嵐における電離圏擾乱の観測

上から Dst 指数、TEC、NmF2 の時間変化を示す。(a) は稚内で、2002 年 4 月 17–22 日の観測データ、(b) は国分寺で 2006 年 4 月 13–15 日の観測データを表示している。両方の図で、点線は比較として載せた月中央値である。

倍程度に達するのに対し、NmF2 は最大で 3 倍程度である。稚内における TEC と NmF2 の振舞の違いはさらに大きく、8 日午前中で TEC は増加するのに対して、NmF2 は逆に月平均値から減少し、午後になってから増加する。また、稚内と国分寺における擾乱の違いも大きい。稚内では、日中と日没後の両方に顕著な TEC (と NmF2) のピークが現れる。国分寺でも日没後のピークがあるが、稚内より小さい。日没後のピークは SED と呼ばれる現象と解釈される [5]。

もう 1 つの大きな磁気嵐の例として、図 4a に 2001 年 11 月 6 日の Dst、および稚内上空の NmF2、hpF2 (F2 領域の密度がピークとなる高度)、TEC の観測を示した。この例では、Dst が 11 時 JST 付近から下がり、ほぼ同時に TEC が増加し、hpF2 も上昇している。一方、NmF2 は減少し始め、2 時間ほど経った 13 時 JST から増加している。このように、Dst の下がるタイミングで TEC と NmF2 は全く逆の変化をしている。この時間帯で、他の観測からは電離圏の赤道異常の極方向への広がりが確認されており [6]、強い東向きの電場が電離圏に作用した可能性が高いと考えられる (電場と赤道異常の関係については文献 [1] に記述がある)。図 4a の hpF2 の上昇は、この東

向き電場によるものであろう。ところで、このイベントでは TEC は日本上空で全体的に増加しており、国内に 4 地点あるイオノゾンデ (北から稚内、国分寺、山川、沖縄) のうち、NmF2 の減少が観測されたのは稚内だけであった [7]。

### 3 TEC と NmF2 の異なる振舞について考察

以下では、大きな磁気嵐の際に観測される TEC と NmF2 の異なる振舞について、その原因を考察する。図 4b は、磁気圏から電離圏に電場が侵入した状況において、TEC の増加と NmF2 の減少が同時に起こる場合を (図 4a の観測に相当)、数値シミュレーションで再現した例である [8]。ここではシミュレーションモデルとして、米国海軍研究所で開発された電離圏数値モデル (SAM2 [9]) を使用した。図 4b の上から 1 段目は、モデルに入力した電場 (背景電場との差分) の時間変化を表示している。11 時 (稚内での時刻) から東向きに増加し、12 時でピークを持ち、13 時に終息するような電場を与えた。ピークの大きさは磁気赤道上の高度 300 km で 2.8 mV/m とし、比較的大きい磁気嵐に相当する値である。図 4b の 2-4 段目は、1 段目の入力電場に対応するシミュレーション結果であり、稚内上空の NmF2、hmF2、TEC の時間変化を示している。(なお、灰色の線は磁気嵐時の電場を加えていない場合の結果である。) hmF2 の時間変化より、F 領域プラズマは 11 時から東向き電場によって上昇し、入力した東向き電場の終息する少し前で最高 (静穏時との差は 120 km) に達し、その後は拡散でゆっくり下降する事が分かる。NmF2 は 11 時過ぎから 2 時間ほど一時的に減少し、その後増加に転じる。一方、TEC は 11 時過ぎから単調に増加する。図 4a の観測と比較すると、シミュレーションは hmF2、NmF2、TEC の変化傾向を再現している事が分かる。ただし、定量的にはやや一致しない。hmF2 の上昇と NmF2 の減少度合いは、観測で 90 km と 40 % 程度だが、シミュレーションでは 110 km と 20 % 程度である。しかし、シミュレーションでは、電場を加える前からプラズマの温度を高くするよう設定すると、同じ入力電場に対応する NmF2 の減少度合いが大きくなり (hmF2 の上昇

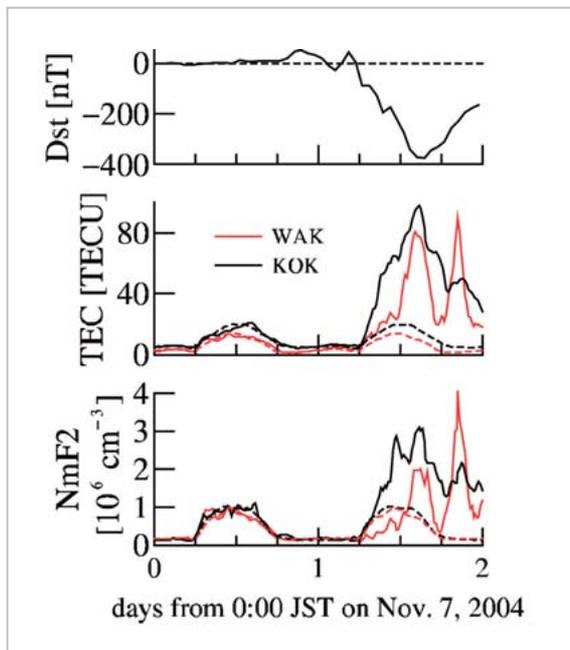


図3 大規模の磁気嵐における電離圏擾乱の観測 1

図 1 と同じで、Dst 指数と、稚内 (赤線) と国分寺 (黒線) における TEC と NmF2 の観測データを示す。データ期間は 2004 年 11 月 7-8 日である。

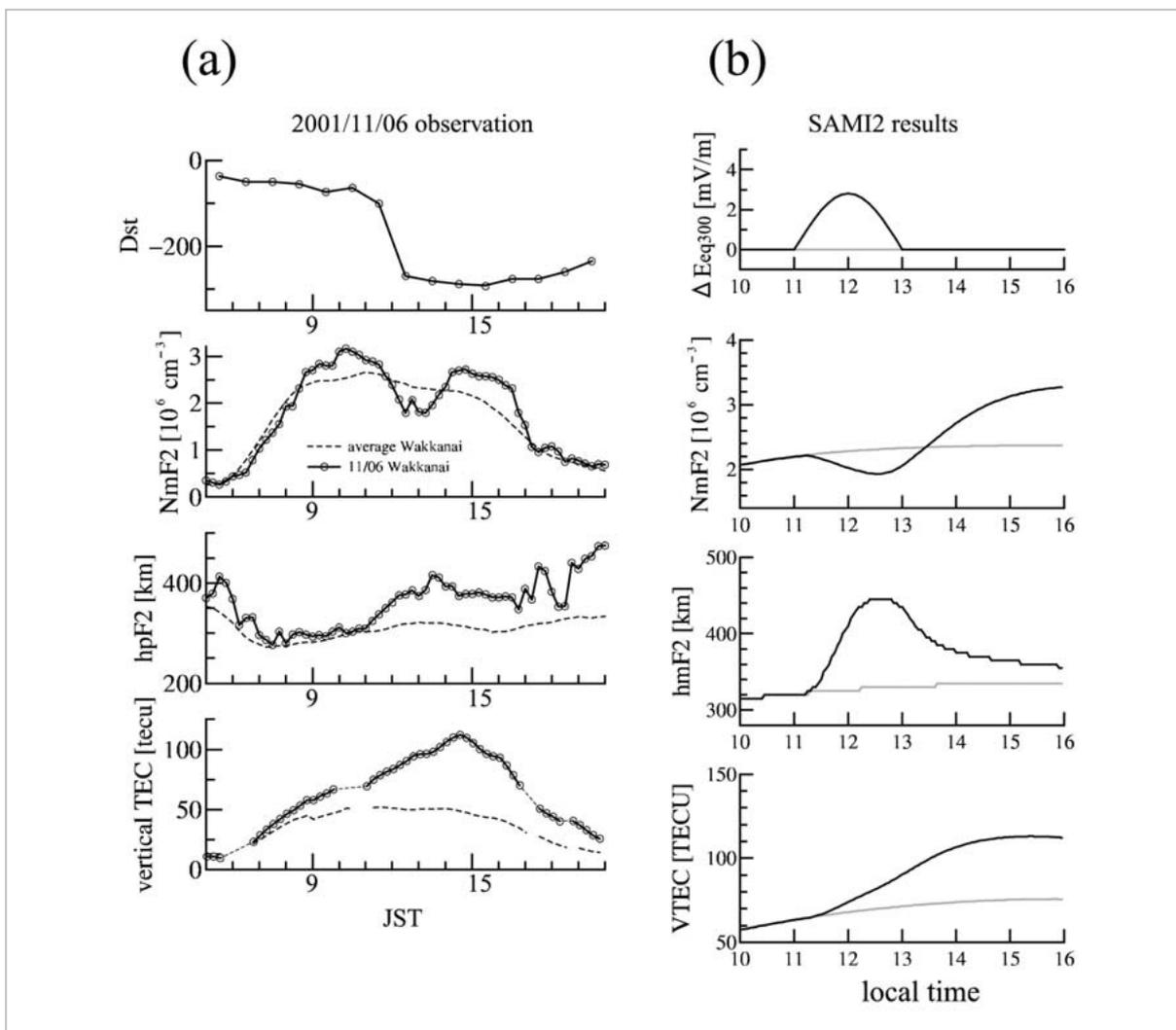


図4 大規模の磁気嵐における電離圏擾乱の観測と数値シミュレーションによる再現

(a)は2001年11月6日のDst指数と、稚内で観測されたNmF2、hpF2、TECの時間変化を示す。(b)は上からSAMI2に入力した電場(磁気赤道上で、高度300km、背景電場との差分で東向きを正にとる)と、計算された稚内上空のNmF2、hmF2、TECを示す。灰色の線は、静穏時(電場を作用していない場合)の変動である[8]。

度合いも小さくなり)、観測された値に近づく。つまり、この観測イベントにおいては、電場の侵入する前から、別の擾乱要因の影響によって電離圏が静穏時と異なる状態だった可能性もある。

図4bの計算例で、東向き電場が作用し始めた直後の電子密度の高度分布を示したものが図5aである。同じく磁力線方向の電子フラックスを示したものが図5bである。両図ともに縦軸はhmF2を基準にした高度である。図5aを見ると、ピーク密度付近では静穏時より電子密度が減少しており、ピークより下の高度では逆に電子密度が増加している。高度を固定して考えた場合、ピークより下の高度では電離圏の上昇に伴って密度の小さい層に取って変わられる。しかし、高度が低

いほど中性大気の密度が濃く光化学反応の進みが速いので、ピークより下では元の密度に素早く戻ろうとする。従って、図5aのようにhmF2を基準に見た場合、ピークより下では電子密度が増加する。電場が作用した直後のTEC増加は、主にこの部分の寄与である。一方ピーク付近から上では、高度上昇後、プラズマの運動効果が光化学反応の効果を上回る。図5bを見ると、磁力線に沿った電子フラックスが増加している。これは高度が上昇してイオンと中性大気との衝突が減り、磁力線に沿ってプラズマが拡散し易くなったためである。フラックスの発散により、F層ピーク付近の電子密度が減少する。さらに、磁力線沿いのフラックス増加の効果に加え、磁力線と垂直方向

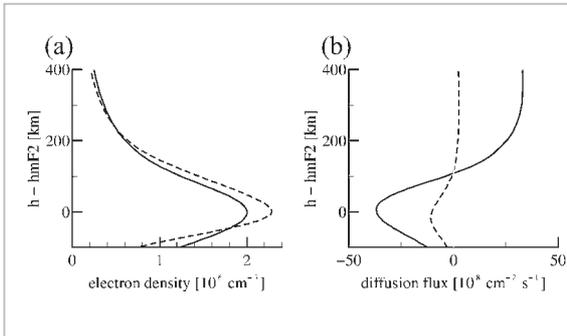


図5 電場が作用した直後の電離圏高度分布

SAMI2で計算した(a)電子密度と(b)電子フラックスの高度分布(稚内上空)。実線(点線)は東向き電場をかけた(かけていない)計算の結果を示している。フラックスは、磁力線に沿った成分であり、上向きを正としている。縦軸は、hmF2を基準にした高度である[8]。

(極向き/上向き)の電場ドリフトによって、磁力管の体積が大きくなり、プラズマの密度が減少する効果もある。そして、NmF2減少の数時間後には、光化学反応の寄与が大きくなり、NmF2増加となる。

他に TEC と NmF2 が異なる振舞をする原因としてありうるのは、擾乱を駆動する要因が同時に複数作用する場合などである。例えば、図3に示した2004年11月8日の磁気嵐では、状況的にその可能性がある。このイベントでは、8日明け方から日本の低緯度で TEC と NmF2 が増加しており、さらに hpF2 も上昇していた。これは、磁気圏電場の侵入などによる正相嵐と考えられる。一方、稚内では TEC、hpF2 は増加するものの、NmF2 は明け方からしばらく静穏時に対して小さかった。NmF2 の減少は6時間ほど継続しているため、図3bや図4で説明したメカニズム(一時的にプラズマの運動が卓越する効果)ではなさそうである。むしろ、夜間に分子成分の多い大気が

極地域から流れて日本の高緯度に到達し、つまり負相嵐を起こす要因と、正相嵐を起こす侵入電場などが同時に作用した可能性が考えられる。

## 4 むすび

本稿では、磁気嵐時における TEC と NmF2 の振舞について観測例を紹介した。中規模の磁気嵐時には両者は大体似たような時間変動をするが、大きな磁気嵐の際には両者が非常に異なった振舞をする場合もある。TEC と NmF2 が異なる振舞をする場合、その原因は幾つか考えられる。例えば、磁気圏起源の電場など電離圏擾乱を駆動する要因が急激に作用した時に、F 領域ピーク付近では一時的にプラズマの運動効果が卓越する一方で、F 領域下部では光化学反応の効果が卓越するため、TEC と NmF2 で変化が異なる。また、正相嵐と負相嵐を駆動する要因が同時に作用した場合なども、TEC と NmF2 で変化が異なりうる。したがって、TEC と NmF2 両者の観測は、地磁気静穏時に相互補完的な役割を持つだけでなく、地磁気擾乱時には両者の組み合わせから電離圏擾乱を駆動する要因の詳細についての情報を引き出し、現象の状況把握や将来的な予測につながる。

## 謝辞

本研究では、米国海軍研究所(Naval Research Laboratory)で開発された電離圏数値モデル(SAMI2)を使用している。また、Dst 指数は京都大学地磁気世界資料解析センターによって提供されたものである。厚く感謝致します。

## 参考文献

- 1 陣英克, "電離圏ダイナモについて", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-3-7, 2009.
- 2 G. W. Prolss, "Ionospheric F-region storms" in "Handbook of Atmospheric Electrodynamics" edited by H. Volland, CRC Press, Chapter 8, pp.195-248, 1995.
- 3 G. Ma and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan", Ann. Geophysicae, Vol.21, pp.2083-2093, 2003.
- 4 J. M. Forbes, G. Lu, S. Bruinsma, S. Nerem, and X. Zhang, "Thermosphere density variations due to the 15-24 Apr. 2002 solar events from CHAMP/STAR accelerometer measurements", J. Geophys. Res., Vol.110, A12S27, doi:10.1029/2004JA010856, 2005.

- 5 T. Maruyama, "Extreme enhancement in total electron content after sunset on 8 Nov. 2004 and its connection with storm enhanced density", Geophys. Res. Lett., Vol.33, L20111, doi:10.1029/2006GL027367, 2006.
- 6 B. Tsurutani, et al., "Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric field", J. Geophys. Res., Vol.109, doi:10.1029/2003JA010342, 2004.
- 7 T. Maruyama, G. Ma, and M. Nakamura, "Signature of TEC storm on 6 Nov. 2001 derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan", J. Geophys. Res., Vol.109, doi:10.1029/2004JA010451, 2004.
- 8 H. Jin and T. Maruyama, "Temporary Decrease in Daytime F-region Peak Electron Density due to Eastward Electric Field Penetration during Magnetic Storm", J. Geophys. Res., Vol.113, A05305, doi:10.1029/2006JA011928, 2008.
- 9 J. D. Huba, G. Joyce, and J. A. Fedder, "Sami2 is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model", J. Geophys. Res., Vol.105, pp.23,035-23,053, 2000.



陣 英克

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ専攻研究員 理学博士  
超高層大気物理

丸山 隆

上席研究員 博士(工学)  
超高層大気物理