津川 卓也1、大塚 雄一2、齊藤 昭則3

[1] 情報通信研究機構

狭い日本のGPS 受信機網のTEC観測では限界があることも分かってきた。

[2] 名古屋大学 太陽地球環境研究所

[3] 京都大学 大学院理学研究科 地球物理学教室

1. はじめに

GPS 測位で利用される電波は地球の電離圏を通過するため、電波の周波数に依存する伝搬遅延が生 じる。GPS衛星の2周波の電波の遅延量の差を測ることにより、電離圏プラズマの量(全電子数)を算 出することができる。1990年代半ばからのGPS受信機網を利用した電離圏全電子数(Total Electron Content: TEC)観測は、定常的に高時間分解能で電離圏を観測できることから、近年の電離圏観測にと って重要な役割を担っている。日本では、国土地理院によって、現在約1,200点からなるGPS受信機網 (GEONET)が運用されている。このGPS受信機網データから得られた高時間・空間分解能(緯度経 度0.15°×0.15°、30秒値)のTECデータを利用して、電離圏電子密度擾乱の一種である伝搬性電離圏擾乱 (TID)の水平構造が初めて観測され[Saito et al., 1998]、さらに中規模TIDの統計的特徴[例えば、 Tsugawa et al., 2006]等、電離圏電子密度擾乱の新しい性質が明らかにされてきた。一方で、TID がど こからどこまで伝搬しているのか、波面がどこまで伸びているのかなどの議論については、観測領域の

北米域では、現在1,600点以上のGPS 受信機が設置・運用されているが、従来の北米域のTECデータ は低分解能のものしかなかった(例えば、MIT Haystack Observatoryが提供している緯度経度1^o×1^o、5 分値の全球TECマップ等)。本研究では、日本の高密度GPS受信機網データに適用していた解析技術を 北米域のGPS 受信機網データに適用することで、北米上空のTECデータを従来よりも高時間・空間分 解能で算出することに成功した。本稿では、*Tsugawa et al.* [2007]を基に、このTECデータ(TEC Data of American-Wide GPS Network: TEC-DAWN)の導出手法と、発見された中規模TIDの新しい特徴を 紹介する。

2. 手法

現在、北米域には 1,600 点以上の GPS 受信機が設置・運用されている。図 1 に北米域の GPS 受信機 分布を示す。これらの GPS データは、Continuously Operating Reference System (CORS)、 Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC)、及び International GNSS Service (IGS) の FTP サー バーで提供されている。ほとんどすべての GPS 受信機で、2 周波 (fi = 1,575.42 MHz, f2 = 1,227.60 MHz) による擬似距離および搬送波位相の観測データが、30 秒毎に提供されている。

受信機から衛星をみた視線方向(LOS)のTEC(I_s)は、以下の式(1)によって得られる[*Mannucci* et al., 1999]。



図 1. 北米域に展開されている 約 1,600 点か らなる GPS 受信機網。

$$I_{s} = \frac{1}{40.3} \frac{f_{1}^{2} f_{2}^{2}}{f_{1}^{2} - f_{2}^{2}} \left[(L_{1} - L_{2}) - (\lambda_{1} n_{1} - \lambda_{2} n_{2}) + b_{r} + b_{s} \right]$$
(1)

ここで、 L_1 、 L_2 は搬送波位相(距離に変換したもの)、

 $\lambda_1 n_1$ 、 $\lambda_2 n_2$ は整数値バイアス、 b_r 、 b_s はそれぞれ受信機、衛星のバイアスである。鉛直方向のTEC(I)は、 $I = I_s \cdot S$ として得られる。ここで、S(slant factor)は、LOSの電離圏高度(250 - 450kmと仮定)における長さと電離圏の厚み

(200km)の比で与えられる。本研究では衛星・受信機のバイアス推定及びTEC絶対値の算出を行わず、TEC変動成分(各



図2. 2006年7月20日の夜間(03:30 - 06:10 UT) に観測された中規模TID。波面が北西-南東方向に2,000km以上伸び ていることがわかる。

LOSにおけるTECの1時間移動平均からの差)にのみ着目して解析している。また、サイクルスリップ や鉛直TECへの変換による誤差を少なくするため、LOSの天頂角が60°以上のTECデータは利用してい ない。相対的なTEC変動の精度は、理論的には0.01 - 0.02 TECU(1 TECU=10¹⁶/m²)であり、GPS 搬送波の波長(L₁:0.19 m、L₂:0.24 m)の約1%に相当する [*Spilker and Parkinson, 1996*]。

すべてのLOSで得られるTECデータを用いることで、北米上空のTECを2次元で30秒ごとに得ることがで きる。図2で示されるように、電離圏高度(高度300kmと仮定)にマップされたTECデータは、西経60-130°、 北緯24-54°の広い領域をカバーする。このTECマップのピクセルサイズは、緯度・経度0.15°×0.15°である が、受信機点が少なくTECデータが得られない領域をできるだけ埋めるため、各ピクセルで10分の移動平均 を行い、更に緯度・経度方向に7×7ピクセルの移動平均を行っている。結果として、この北米上空TEC変動 マップにより、10-60分の時間スケール、緯度・経度1.05°×1.05°以上の空間スケールを持つTEC変動が、 30秒サンプリングで観測可能である。このような広範囲かつ高時間・空間分解能の電離圏観測は過去に例が ない。

3. 中規模 TID の観測

図2は、2006年7月20日の夜間(03:30 - 06:10 UT)に観測された北米上空TEC変動で、20分毎のスナ ップショットである。この日は、Kp指数が0+から1の間を維持しており、地磁気的に非常に静穏であっ た。図2から、波長200 - 500kmで北西 - 南東方向に伸びた波面を持つ波状構造が、03:50 UTあたりで 徐々に現れ、100-150 m/sの速度で南西方向に伝搬し、05:50 UTあたりで見えなくなっていることが確 認できる。波長や伝搬方向、速度が、日本上空でよく観測される夜間中規模TIDの特徴と同じであるこ とから、北米上空で観測されたこの波状構造は、典型的な夜間中規模TIDであると考えられる。本研究 により明らかにされた夜間中規模TIDの新しい特徴としては、以下のことが挙げられる。

- 中緯度からサブオーロラ帯の領域(磁気緯度35-55%)でも夜間中規模TIDが出現・伝搬する。
- 波面が2,000 km以上伸びている。
- 出現時には既に波面が長い。



図3. 2006年11月28日の昼間(19:20 - 22:00 UT)に観測された波長300-1,000kmの中規模TID。午後の時間帯 (21:00 - 22:00UT)で、南東方向に伝搬するTIDと、南西方向に伝搬するTIDが重なっていることがわかる。

• 出現・伝搬後、2 - 4時間程度で構造が見えなくなる。

これまでの研究で、夜間中規模TIDの生成にはプラズマ不安定(Perkins不安定等)が重要な役割を担っ ていることが知られている[例えば、Shiokawa et al., 2003; Garcia et al., 2000]。また、Kelley and Makela [2001]は、水平方向に有限の波面を仮定して作られた波面方向の分極電場が、南西方向伝搬に 重要であるというモデルを提唱している。本研究で観測された夜間中規模TIDの波面の向きはPerkins 不安定に矛盾しない。しかし、中緯度からサブオーロラ帯まで2,000 km以上も波面が伸びていることを 考えると、すべての夜間中規模TIDの南西方向伝搬をKelley and Makelaモデルで説明するのは難しい。

図3は、2006年11月28日の昼間(19:20 - 22:00 UT)に観測された北米上空TEC変動の20分毎のスナ ップショットである。この日のKp指数は1から2+の間であり、地磁気的に静穏であった。19:20 - 21:00 UTに、波長300 - 1,000km、北東 - 南西方向に2,000km以上伸びた波面を持つ波状構造が、100 - 200 m/s の速度で南東方向に伝搬している。観測時間帯や伝搬方向・速度が、日本上空でよく観測される昼間中 規模TIDの特徴と同じであることから、この波状構造は昼間中規模TIDであると考えられる。南東方向 に伝搬する昼間中規模TIDは午後の中頃まで見られるが、午後遅く(21:20 - 22:00 UT)には南西方向 に伝搬する中規模TIDも観測されている。本研究により明らかにされた昼間中規模TIDの新しい特徴と しては、以下のことが挙げられる。

- サブオーロラ帯よりも高緯度(磁気緯度55°以上)から、中・低緯度まで伝搬する。
- 午後中頃から遅くにかけては、伝搬方向の異なる2つの中規模TIDが重って伝搬する。
- 波面が経度方向に2,000 km以上伸びている。

昼間の中規模TIDは、大気重力波によって生成されていると考えられている[Kotake et al., 2007]。上記の特徴から、中低緯度で見られる昼間中規模TIDを引き起こす大気重力波の起源は、オーロラ帯の2つの異なる場所にあると考えられる。

4. TEC-DAWN データベース

我々のグループでは、北米域に展開されているGPS 受信機網データの収集、北米上空のTECデータ

の算出、及びデータベース化を自動で行うシステムを開発・運用中であり、WWWを利用して北米上空 TECマップのクイックルックを提供している(http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/GPS/TEC-DAWN/)。 GPSデータ(RINEXファイル)は、下記のGPS受信機網のFTPサーバーから取得している。

- CORS (ftp://www.ngs.noaa.gov/cors/rinex/)
- SOPAC (ftp://garner.ucsd.edu/pub/rinex/)
- IGS (ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/)

提供しているデータとしては、2004 - 2007年までの10分毎の北米上空のTEC変動・TEC絶対値の2次元 分布のプロットと、そのアニメーションがある。Google Earth上にこれらのプロット・アニメーション を表示させるためのKMLファイルも提供している。今後、過去及び準リアルタイムのGPSデータ収集、 TEC算出を行い、データベースを充実させていく予定である。また、先行して京都大学のグループが、 GEONETデータを利用して日本上空のTECデータ(TECファイル、ATECファイル、GRIDファイル等) を提供している(http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp)が、これらのデータ解析に用いられている基本的な プログラムを供用できるよう、TEC-DAWNのTECデータも同じデータフォーマットで提供していく予 定である。

5. おわりに

本研究では、北米域の約1,600点からなるGPS受信機網データを利用して、北米上空の広域・高解像 度全電子数(TEC-DAWN)2次元マップを作成した。TEC-DAWNマップの観測領域は、24-54°N、 60-130°W、空間解像度は1.05°×1.05°(0.15°×0.15°、7×7ピクセルスムージング)、時間分解能は 30秒である。このような広域かつ高解像度の定常的な電離圏観測は過去に例が無い。本稿では、このTEC データによって捉えられた夜間及び昼間の中規模TIDを紹介したが、その他にも磁気嵐に伴う大規模 TIDや電離圏トラフ等の既知の現象や、従来知られていない電離圏現象(例えば、線状に1,000 km以上 細長く伸びた領域でTECが増大・減少し、数10分で消滅する現象)も観測されている。このように、 TEC-DAWNは、非常に有用な新しい電離圏観測手法であると言える。

参考文献

- Garcia, F. J., M. C. Kelley, J. J. Makela, and C.-S. Huang (2000), Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric disturbances at midlatitudes, J. Geophys. Res., 105, 18,407–18,415.
- Kelley, M. C., and J. J. Makela (2001), Resolution of the discrepancy between experiment and theory of midlatitude F-region structures, Geophys. Res. Lett., 28, 2589–2592.
- Kotake, N., Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Tsugawa, and A. Saito (2007), Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California, Earth Planets Space, 59, 95– 102.
- Mannucci, A. J., B. A. Iijima, U. J. Lindqwister, X. Pi, L. Sparks, and B. D. Wilson (1999), GPS and ionosphere, in Review of Radio Science 1996–1999, edited by W. R. Stone, pp. 625–665, URSI, Ghent, Belgium.
- Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki (1998), High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, Geophys. Res. Lett., 25, 3079–3082.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, C. Ihara, T. Ogawa, and F. J. Rich (2003), Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance at midlatitude, J. Geophys. Res., 108(A4), 1145, doi:10.1029/2002JA009639.
- Spilker, J. J., and B. W. Parkinson (1996), Overview of GPS operation and design, in Global Positioning System: Theory and Applications, vol. 1, pp. 29–56, Am. Inst. of Aeronaut. and Astronaut., Reston, Va.
- Tsugawa, T., N. Kotake, Y. Otsuka, and A. Saito (2006), Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: A short review, GPS Solutions, 11, 139–144, doi:10.1007/s10291-006-0045-5.
- Tsugawa, T., Y. Otsuka, A. J. Coster, and A. Saito (2007), Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America, Geophys. Res. Lett., 34, L22101, doi:10.1029/2007GL031663.