

## 低軌道衛星と地上 GPS 受信機網の TEC データで観測された SED の高度構造

五井 紫<sup>1\*</sup>・齊藤昭則<sup>1</sup>・津川卓也<sup>2</sup>・西岡未知<sup>2</sup>

Analysis of the altitudinal structure of Storm-enhanced density  
using Total Electron Content data of space-borne  
and ground-based GPS receivers

Yukari Goi<sup>1\*</sup>, Akinori Saito<sup>1</sup>, Takuya Tsugawa<sup>2</sup> and Michi Nishioka<sup>2</sup>

(2013 年 1 月 8 日受付; 2013 年 3 月 31 日受理)

**Abstract:** The altitudinal structure of Storm-enhanced density (SED) was studied using the Total Electron Content (TEC) data of the GPS receiver on the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite and the ground-based GPS receivers. The GRACE-TEC data are derived from the GPS receiver on the GRACE satellite. A SED is a high-electron density phenomenon that extends from the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) toward the north-west in the northern hemisphere during geomagnetic disturbed time. Two SEDs were observed as TEC variations in the GRACE-TEC data and in the ground-GPS TEC data. The ground-GPS TEC data is the TEC data between the ground GPS receiver and the GPS satellites. The SED observed in the GRACE-TEC data appeared at higher latitudes than that in the ground-GPS TEC data. We concluded detected that the altitudinal structure of the SED would be different between at lower than at higher latitudes due to the effects of the eastward  $E \times B$  drift.

**要旨:** 低軌道衛星搭載 GPS 受信機と地上 GPS 受信機網の電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) データを用いて、地磁気擾乱時に北半球電離圏において赤道異常帯から北西方向へ高電子密度領域が細長く伸びる現象、Storm-enhanced density (SED) の電子密度高度構造の解明を行った。本研究では北米大陸で SED が発生していた 2 つの事例に対し、Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 衛星搭載の GPS 受信機による高度 500–20000 km の TEC データ (GRACE-TEC) と、地上-GPS 衛星間 TEC データを用いて、SED の観測を行った。その結果、2 つの SED を観測し、GRACE-TEC データでは、地上-GPS 衛星間 TEC データよりも 3–5° 程度高い緯度で SED が観測されることが明らかになった。これは、SED の低緯度側では高度 500 km 以上にあるプラズマは高度 500 km 以下にあるプラズマの 1/2 程度であるが、SED の高緯度側では高度 500 km 以上にあるプラズマは高度 500 km 以下にあるプラズマの 1.1–

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kita-sirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502.

<sup>2</sup> 情報通信研究機構 電磁波計測研究所. Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, Nukui-Kitamachi 4-2-1, Koganei, Tokyo 184-8795.

\* Corresponding author. E-mail: yukari@kugi.kyoto-u.ac.jp

2.7 倍であり、SED 内部において、高緯度ほど高い高度にプラズマ密度が増加しているためである。このような緯度-高度構造は、SED 内部の増加した東向き電場による  $E \times B$  ドリフトによるものと解釈される。

## 1. 背景

Storm-enhanced density (SED) とは地磁気擾乱時に赤道異常の極域側の端から高プラズマ密度領域が北半球において北西方向に細長く伸びる現象である (Coster *et al.*, 2007; Maruyama, 2006; Heelis *et al.*, 2009; Horvath and Lovell, 2010)。Millstone Hill Incoherent Scatter Radar では、地磁気嵐の期間の正午から日没直前の時間帯に中緯度から高緯度へ広がる SED が頻繁に観測された (Foster, 1993)。また、地上 GPS 受信機網の発展により広範囲の水平 2 次元観測が行われ、赤道異常から北西方向へ伸びる SED の緯度経度構造が明らかになった。Foster *et al.* (2002) では北米の地上 GPS 受信機網の電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) データで観測された SED を、Tsyganenko モデルを用いて磁気赤道面に投影すると、Image for Magnetopause to Aurora Global Exploration (IMAGE) 衛星の EUV により撮像されたプラズマブルームの形状と同じであると示唆された。SED が北西へ伸びる物理的な説明は、次のようにされている。地磁気嵐時に中緯度の電離圏高度において極向きの電場が大きくなり、subauroral polarization stream (SAPS) と呼ばれる西向きの強いプラズマ流が発生する。赤道異常から中緯度領域まで張り出した SED は、SAPS に押されて北西方向に伸びると考えられている (Foster and Burke, 2002; Foster and Vo, 2002; Foster *et al.*, 2007)。しかし、SED が赤道異常から高緯度側へ張り出す理由や、SED の高度構造はまだ明らかにされていない。

最近では、低軌道衛星に搭載された GPS 受信機の TEC データを用いて、SED の観測がされている。低軌道衛星搭載の GPS 受信機の TEC データでは、赤道異常帯よりも高緯度の領域で TEC の増加が観測された (Tsurutani *et al.*, 2004)。Mannucci *et al.* (2005) は地磁気嵐の発達と共に中緯度の TEC の増加が高緯度へ動く様子を観測し、中緯度の TEC の増加は SED によると考察した。Yizengaw *et al.* (2008) は The TOPographic EXplorer (TOPEX) 衛星や地上-GPS 衛星間の TEC データと IMAGE 衛星の EUV 撮像データを比べることで、プラズマブルームと SED の関係を経度ごとに調べた。プラズマブルームが観測された時に SED が観測される割合を調べた結果、アメリカで 100%、ヨーロッパで 50%、アジアで 20% であった。プラズマブルームと SED の観測割合が経度ごとに異なる原因として、北米大陸が地理緯度  $20^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 、地理経度  $60^{\circ}\text{W} \sim 130^{\circ}\text{W}$  という広範囲の地上 GPS 受信機網を持つことと、地理緯度と磁気緯度の差が大きい地域であることが挙げられる。

地上-GPS 衛星間 TEC データは水平方向の SED の構造を観測することができるが、SED は緯度経度方向に幅広い構造を持つため、広い観測網が必要である。低軌道衛星の TEC データは陸上や海上等の地形に依存することなく観測を緯度方向に連続して行うことができる。また、低軌道衛星の周期が短いことから、ほぼ同じ時間帯で経度方向の構造の観測が可能で

ある。これらのことから、SED のような緯度、経度方向に大きな構造を持つ現象の観測に適していると考えられる。また、低軌道衛星は高度が 500 km 程度の低い高度を飛翔するため、周期が 90 分という短時間で、SED の経度方向への断続的な観測も可能である。

本研究では低軌道衛星に搭載された GPS 受信機のデータと地上-GPS 衛星間 TEC データを比べることで、SED の高度構造を明らかにする。

## 2. 使用データ

### 2.1. GRACE-TEC データ

Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)衛星は 2002 年 3 月 17 日に高度約 500 km の極軌道に投入された。周回周期は約 90 分である。GRACE 衛星は A 機、B 機の 2 つから構成される双子衛星で、A 機と B 機の距離は約 220 km である。開発機構は NASA (米国) と DLR (ドイツ) であり、地球重力場の測定と電離圏および大気圏の垂直構造の観測を目的として開発された。当初の計画では 2007 年までのミッションであったが、観測期間が延長され、2012 年現在も飛翔している。GRACE 衛星の位置決定を行うために、衛星に GPS 受信機が搭載されており、本研究では、その GPS 受信機で得られる GPS データから TEC データを算出して使用した。

RINEX 形式で提供されている GRACE 衛星の GPS データは 10 秒サンプリングのデータであるので、GRACE 衛星の TEC データ (以下 GRACE-TEC) は 10 秒ごとのデータである。この TEC データの観測範囲は高度 500 km から 20000 km である。

GRACE-TEC の分解能はおよそ 0.5 TECU である。GRACE 衛星の位置情報は GNV (GPS Navigation Level 1 B Format Record) データとして 60 秒値で提供されているため、GRACE-TEC のサンプリングレートに合わせて補間し 10 秒値データとしたものを用いた。本研究では GRACE A 機の TEC データを用いた。

### 2.2. MIT-TEC データと Total Electron Content Data of American-Wide GPS Network (TEC-DAWN) データ

MIT-TEC データは MIT Haystack Observatory (米国) によって提供されている全球の TEC データである (<http://www.haystack.mit.edu/>)。MIT Automated Processing of GPS (MAPGPS) は、全球にある地上 GPS 受信機の GPS データを TEC に変換し、TEC データの分布を算出するソフトウェアである。MAPGPS を用いて作成されている MIT-TEC データの空間分解能は緯度  $1^\circ \times$  経度  $1^\circ$  で時間分解能は 5 分である。MIT-TEC データは各 GPS 衛星と地上 GPS 受信機を結ぶパス上の TEC を、電離圏高度 350 km と仮定して鉛直方向に投影した鉛直 TEC データの平均値である。

Total Electron Content Data of American-Wide GPS Network (TEC-DAWN) データは、北米地

域の地上-GPS 衛星間 TEC データである。TEC-DAWN データはアメリカに展開されている複数の GPS 受信機網を使用した TEC データで、範囲は地理緯度  $24^{\circ}\text{N}\sim 54^{\circ}\text{N}$ 、地理経度  $60^{\circ}\text{W}\sim 130^{\circ}\text{W}$ 、空間分解能は  $1.05^{\circ}\times 1.05^{\circ}$ 、時間分解能は 30 秒である。絶対値 TEC と、TEC の 1 時間移動平均を取り除いた TEC の変動成分の 2 種類のデータが提供されている。前述の MIT-TEC データが鉛直 TEC の平均値であったのに対して、TEC-DAWN データは個々の地上 GPS 受信機と GPS 衛星の間の視線方向 TEC の絶対値である。

### 3. 結果

北米大陸には地理緯度  $20^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、地理経度  $60^{\circ}\text{W}\sim 130^{\circ}\text{W}$  の広範囲に地上 GPS 受信機網がある。このように広い視野を持つ受信機網であることから、緯度、経度方向共に数千 km の構造を持つ SED の観測をすることができる。この地上 GPS 受信機網から得られる MIT-TEC データで SED が観測されたときに、GRACE 衛星がその上空を飛翔して観測した事例を 2003 年 5 月の 1 カ月間について調べた。その結果、5 月 21 日と 5 月 29 日の 2 つの事例を確認した。

SED は数時間かけて赤道異常帯から北西方向に伸びる。これに対して、GRACE 衛星が

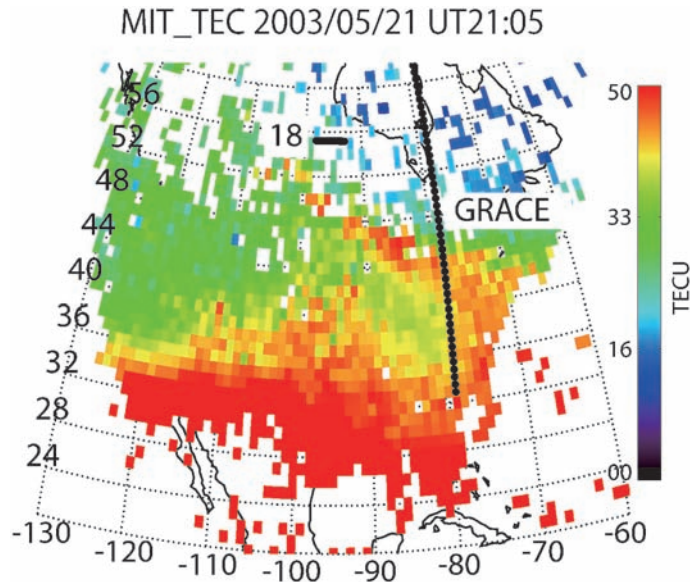


図 1 北米大陸 GPS 受信機網の TEC データ (MIT-TEC 2003 年 5 月 21 日 2105 UT) 「18」と記した黒線は PRN18 の GPS 衛星の軌道 (2101 UT~2109 UT) を、黒ドット線は GRACE 衛星の軌道 (2101 UT~2109 UT) を示す。

Fig. 1. TEC data between the ground and the GPS satellites (MIT-TEC) on 21 May, 2003. The black line with "18" indicates the orbit of PRN 18 from 2101 UT to 2109 UT. The dotted black line indicates the orbit of the GRACE satellite during the same time period.

SED の上空を通過するのは 5 分程度である。SED の時間変化のタイムスケールが数時間であるのに比べて、GRACE 衛星による SED の観測時間は非常に短い。そのため、GRACE 衛星が SED を観測している間に SED は変化しないものとして議論する。

### 3.1. 2003 年 5 月 21 日の事例

2003 年 5 月 21 日 2105 UT に MIT-TEC によって観測された SED を図 1 に示す。横軸は  $60^{\circ}\text{W}$  ~  $130^{\circ}\text{W}$  の地理経度を、縦軸は  $20^{\circ}\text{N}$  ~  $60^{\circ}\text{N}$  の地理緯度を表す。色は 0 TECU から 50 TECU の MIT-TEC データの大きさを表す。「18」と記した黒線は PRN18 の GPS 衛星の位置、黒ドット線は GRACE 衛星の位置を表し、それぞれ 2101 UT から 2109 UT の飛翔高度における位置を示した。この時間帯の  $K_p$  指数は 5-であった。なお、PRN (Pseudo Random Number) は、GPS 衛星の識別番号であり、PRN18 は 18 番の GPS 衛星を指す。

地理緯度  $20^{\circ}\text{N}$  ~  $35^{\circ}\text{N}$ 、地理経度  $80^{\circ}\text{W}$  ~  $120^{\circ}\text{W}$  付近の領域で赤道異常による TEC の増加が観測された。また、地理緯度  $40^{\circ}\text{N}$ 、地理経度  $70^{\circ}\text{W}$  付近から  $50^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\text{W}$  付近の領域に向かって SED が細長く伸びる様子が観測された。赤道異常から北西方向に伸びた SED の細長い構造のことを、SED の腕部と呼ぶことにする。このとき、GRACE 衛星は  $80^{\circ}\text{W}$  付近で、SED の根元を  $63^{\circ}\text{N}$  から  $30^{\circ}\text{N}$  に向かって飛翔した。また PRN18 の GPS 衛星は  $55^{\circ}\text{N}$  付近で  $100^{\circ}\text{W}$  から  $90^{\circ}\text{W}$  に向かって飛翔した。

GRACE-TEC データと TEC-DAWN データを用いて SED による TEC 変動の比較を行う。図 1 に示した MIT-TEC データは電離圏高度を仮定して視線方向 TEC を鉛直 TEC に変換した値であるため、各 GPS 衛星と受信機間のパスの違いを無視した事による誤差を含む。GRACE-TEC データと地上 TEC の値を比べる際には、GPS 衛星と受信機間のパスの違いによる誤差を含めないために、同一の GPS 衛星から得たデータを用いる必要がある。そこで、個々の地上 GPS 受信機の絶対値 TEC データである TEC-DAWN データを用いて、GRACE-TEC データとの比較を行った。

図 2 に、GRACE-TEC データと TEC-DAWN データの TEC 比較の際に、後述の条件で選択された地上 GPS 受信機と、2101 UT ~ 2109 UT の PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星の軌道を示す。横軸は地理経度を、縦軸は地理緯度を表す。「18」と記した黒線は PRN18 の GPS 衛星の飛翔高度での位置を表す。青線は GRACE 衛星の飛翔高度での位置を表す。 $80^{\circ}\text{W}$  に沿う黒ドット線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星を通るパスの地上との交点を表す。この交点のことを以下 GRACE-TEC のフットプリントと呼ぶ。TEC-DAWN データと GRACE-TEC データを比較するために、GRACE-TEC のフットプリントから経度に対して  $\pm 3^{\circ}$  の領域にあり、同じ緯度領域にある地上 GPS 受信機を 8 個選択し、その位置を受信機名と赤丸で図 2 に示した。最も低緯度に位置する CHA1 受信機は地理緯度  $32^{\circ}7'\text{N}$  で、最も高緯度に位置する KUUI 受信機は  $55^{\circ}2'\text{N}$  である。



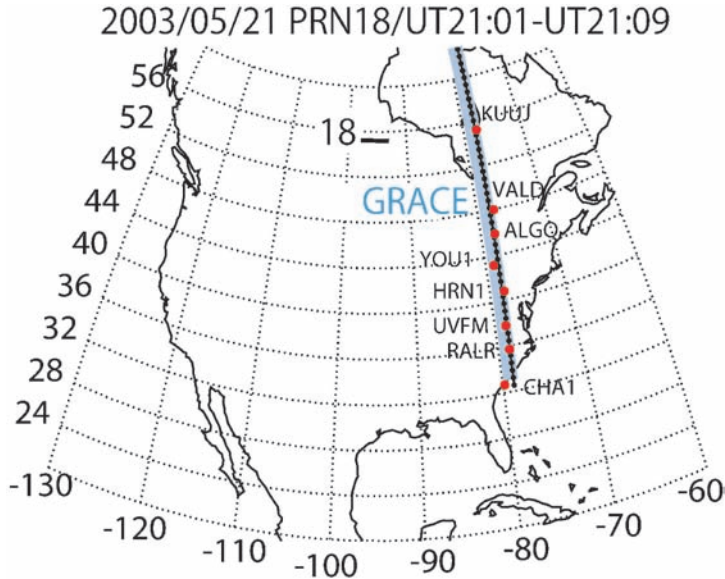


図 2 PRN18 の GPS 衛星の軌道（「18」と記した黒線）と GRACE 衛星の軌道（青線）（2003 年 5 月 21 日 2101 UT～2109 UT）  
 黒ドット線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星間を結ぶ直線と地上の交点を、赤丸は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星間を結ぶ直線のフットプリントから  $\pm 3^\circ$  の経度に位置する GPS 受信機の位置を示す。

Fig. 2. Orbit of PRN18 (black line with "18") and the GRACE satellite (blue line) from 2101 UT to 2109 UT on 21 May, 2003.

The dotted black line indicates the footprint of the path between PRN18 and the GRACE satellite on the ground. The red dots with the GPS receivers' name indicate the selected GPS receivers on the ground. The GPS receivers were located within  $3^\circ$  of the footprint.

### 3.1.1. GRACE-TEC データのバイアスの推定

GRACE-TEC データには GRACE 衛星の GPS 受信機のバイアスが含まれている。そのバイアスの値が不明なため、GRACE-TEC データの絶対値が不明である。そこで、電離圏とプラズマ圏のモデルを用いてバイアスを推定した。モデルは電離圏の経験値モデル、The International Reference Ionosphere model (IRI モデル) とプラズマ圏経験値モデル、Russian standard model of Ionosphere (SMI) を組み合わせた ISO\_IRI モデル (Gulyaeva, 2003; Gulyaeva and Titheridge, 2006) を使用した。

モデルには SED の効果が含まれていないため、SED よりも高緯度側にある地上 GPS 受信機の位置の電子密度プロファイルを計算して TEC を算出する。本研究では、SED や赤道異常の影響が少ないと思われる KUUI 受信機（地理緯度  $55^\circ 2'N$ , 地理経度  $78^\circ 4'W$ ）を選択した。高度 80–20000 km を TEC-DAWN データの観測範囲、高度 500–20000 km を GRACE-TEC デー

タの観測範囲として、各観測範囲に当たる領域での TEC を算出した。モデルと比べる観測データは 2003 年 5 月 21 日 2105 UT の KUUI 受信機の TEC データと、同時刻、同位置の GRACE-TEC データである。ISO\_IRI モデルの TEC 値は、TEC-DAWN データの観測する高度領域では 79.1 TECU、GRACE-TEC データの観測する高度領域では 34.0 TECU であった。モデルから推測される GRACE-TEC データの TEC-DAWN データに対する比率は 0.43 である。観測時にこの比率が適用できると仮定すると、観測された TEC-DAWN データにこの比率を乗じたものが GRACE-TEC データの絶対値となる。観測データでは、KUUI 受信機で観測された TEC-DAWN データは 24.6 TECU であった。したがって、これらの値から推定される GRACE-TEC データの絶対値は 10.6 TECU である。一方、同時刻に同位置で観測されたバイアスを含む GRACE-TEC データは 67.9 TECU であった。つまり、観測された GRACE-TEC データと推定された絶対値の差を GRACE-TEC データに含まれるバイアスの値とすると、この手法で推定された GRACE-TEC データのバイアスは 57.3 TECU である。以下、GRACE-TEC データの値は観測値から推定されたバイアスを引いた絶対値とする。

### 3.1.2. GRACE-TEC と TEC-DAWN の比較

図 3 に 2003 年 5 月 21 日 2101 UT~2111 UT の GRACE-TEC データを示した。横軸は 25°0'N~60°0'N の地理緯度を、縦軸は 0 TECU~80 TECU の TEC の値を示す。地理緯度 (G. LAT) に対応する磁気緯度 (M. LAT)、地理経度 (LON)、世界時 (UT)、地方時 (LT) を図の下部に示した。黒線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星の間の GRACE-TEC データを、GRACE 衛星の飛翔高度での地理緯度に沿って示したものである。この時の GRACE 衛星は地理経度 78°W 付近で、地理緯度 60°0'N から 25°0'N に向かって飛翔した。その軌道は図 2 の青線にあたる。その区間における GRACE-TEC の最小値は地理緯度 60°0'N での 8.5 TECU で、最大値は 25°0'N で観測された 27.5 TECU である。

各地上 GPS 受信機の名前を記した黒四角点は、2105 UT における PRN18 の GPS 衛星と各 GPS 受信機間の TEC-DAWN データを表す。地上 GPS 受信機の地理緯度に沿ってデータを点線で繋いで示した。TEC-DAWN データの最大値は CHA1 受信機での 52.5 TECU で、最小値は KUUI 受信機で観測された 24.6 TECU である。

地理緯度 55°2'N から 48°0'N にかけて、10.6 TECU から 19.5 TECU の TEC 増加が GRACE-TEC データで観測された。この緯度領域は、図 1 で示した SED の上を GRACE 衛星が飛翔した緯度領域、観測時間とほぼ同じである。このことから、この 55°2'N~48°0'N の GRACE-TEC データの変動は SED によるもので、GRACE 衛星が高緯度の SED のない領域から低緯度の SED のある領域へ飛翔したため TEC が増加したと考えられる。

TEC-DAWN データでは、KUUI 受信機 (地理緯度 55°2'N) から VALD 受信機 (48°0'N) にかけて、24.6 TECU から 37.6 TECU に TEC が増加し、VALD 受信機から YOU1 受信機 (43°2'N) にかけて、37.6 TECU から 50.1 TECU に TEC が増加した。YOU1 受信機から UVFM

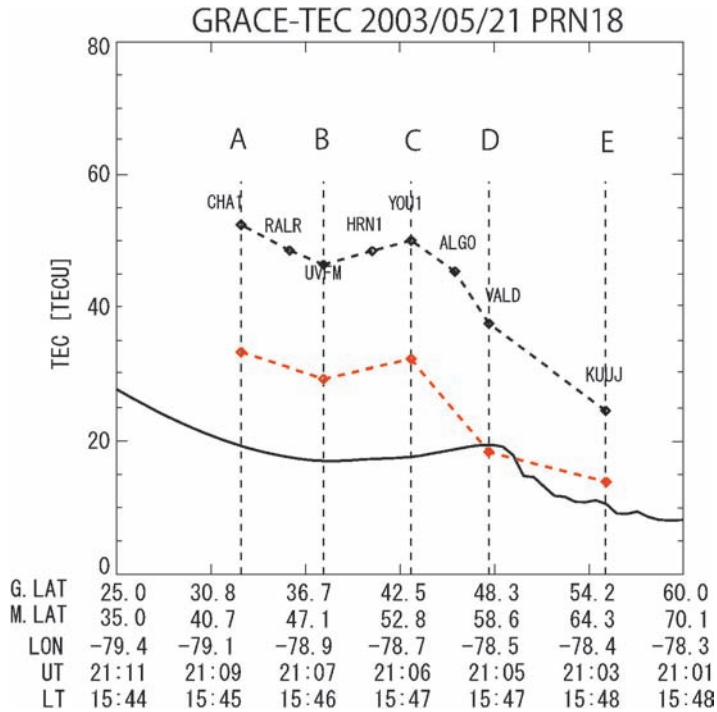


図 3 GRACE-TEC データ (2003 年 5 月 21 日 2101 UT~2111 UT)  
 黒線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星間の GRACE-TEC データを、  
 黒四角点は 2105 UT における PRN18 の GPS 衛星と各地上 GPS 受信  
 機間の TEC-DAWN を、赤四角点は地上-GRACE 衛星間の TEC デー  
 タを示す。

Fig. 3. Latitudinal profile of the GRACE-TEC data on 21 May, 2003.  
 The black line indicates the GRACE-TEC data from 2101 UT to 2111 UT.  
 The black squares with the ground GPS receivers' name indicate the TEC-  
 DAWN data at 2105 UT. The red squares indicate the TEC data between  
 the ground and the GRACE satellite.

受信機 (37°8'N) の間では、TEC が 50.1 TECU から 46.5 TECU まで減少した。UVFM 受信機から CHA1 受信機 (32°7'N) の間では、46.5 TECU から 52.5 TECU まで再び増加した。VALD 受信機から UVFM 受信機のある緯度領域は、図 1 で示された SED の地理経度 78°W 付近における SED の緯度とほぼ同じ領域である。このことから、VALD 受信機と UVFM 受信機の間で観測された TEC 変動は SED によるもので、KUJJ 受信機から YOU1 受信機の間では、SED のない領域から SED の腕がある場所にかけて観測したため TEC が増加したと考えられる。また、YOU1 受信機から UVFM 受信機の間では、SED の腕がある場所から SED のない領域を観測したため、TEC が減少したと考えられる。UVFM 受信機から CHA1 受信機にかけて再び TEC が増加し始めるのは、赤道異常帯を観測したためである。

これらの TEC 変動を空間変化とみなすとき、低緯度から高緯度に向かう方向で TEC の変



動をみると、GRACE-TEC データでは地理緯度  $48^{\circ}0'N$  から高緯度に向かって TEC が減少した。TEC-DAWN データでは地理緯度  $43^{\circ}2'N$  にある YOU1 受信機から  $48^{\circ}0'N$  の VALD 受信機に向かって TEC が急激に減少し始めた。TEC が高緯度に向かって減少し始める緯度から高緯度側を「SED の高緯度側」、TEC が低緯度に向かって減少し始める緯度から低緯度側を「SED の低緯度側」とすると、GRACE-TEC データにおける SED の高緯度側は TEC-DAWN データよりも  $4.8^{\circ}$  高い緯度で観測されたといえる。

図3における A から E で示す縦の点線は、TEC-DAWN データと GRACE-TEC データの振る舞いから決められた緯度である。各緯度の定義と意味は、以下の通りである。

A: 最も低緯度にある地上 GPS 受信機の地理緯度を示す。GRACE-TEC データも TEC-DAWN データも赤道異常帯を観測している領域である。図3では地理緯度  $32^{\circ}7'N$  である。

B: 高緯度に向かって TEC-DAWN データが増加し始める地上 GPS 受信機の地理緯度を示す。B から C の区間は、TEC-DAWN データが SED の低緯度側を観測した領域である。図3では  $37^{\circ}8'N$  である。

C: 高緯度に向かって TEC-DAWN データが減少し始める地上 GPS 受信機の地理緯度を示す。C から D の区間は、TEC-DAWN データが SED の高緯度側を観測した領域である。図3では  $43^{\circ}2'N$  である。

D: GRACE-TEC で TEC が減少し始める地理緯度を示す。また、TEC-DAWN データにおいては TEC の減少する度合いが緩やかになる緯度である。D から E の区間は、GRACE-TEC データが SED の高緯度側の境界を観測した領域と考える。図3では  $48^{\circ}0'N$  である。

E: TEC-DAWN データで最も高緯度の地上 GPS 受信機の地理緯度を示す。GRACE-TEC、TEC-DAWN データともに SED の外側を観測した領域と考える。図3では  $55^{\circ}2'N$  である。

A 地点から E 地点で、地上-GRACE 衛星間の TEC データを算出した。TEC-DAWN データは地上-GPS 衛星間の TEC で、GRACE-TEC データは GRACE 衛星-GPS 衛星間の TEC データである。TEC-DAWN データから GRACE-TEC データを差し引いた値は、地上-GRACE 衛星間の TEC の値である。各地点での GRACE-TEC データ (500-20000 km) を黒線、地上-GRACE 衛星間 TEC データ (0-500 km) を赤四角点、TEC-DAWN データ (0-20000 km) を黒四角点で図3に示す。算出された地上-GRACE 衛星間 TEC データは、E 地点が最小値で 14.0 TECU であった。また、最大値は A 地点の 32.8 TECU であった。B 地点から C 地点にかけて、29.3 TECU から 32.5 TECU への増加がみられた。C 地点から E 地点にかけて 32.5 TECU から 14.0 TECU の減少がみられた。地上-GRACE 衛星間 TEC データと TEC-DAWN データの SED の高緯度側が始まる緯度は同じ C 地点である。つまり、地上-GRACE 衛星間 TEC データに対して、GRACE-TEC データで観測された SED の高緯度側は  $4.8^{\circ}$  高い緯度にあることがわかった。

### 3.2. 2003年5月29日の事例

2003年5月29日2055UTにMIT-TECによって観測されたSEDを図4に示す。横軸は $60^{\circ}\text{W}$ ～ $130^{\circ}\text{W}$ の地理経度を、縦軸は $20^{\circ}\text{N}$ ～ $60^{\circ}\text{N}$ の地理緯度を表す。色は0TECU～50TECUのMIT-TECデータの大きさを表す。地理緯度 $53^{\circ}\text{N}$ 付近の黒線(18)は、2045UT～2052UTのPRN18のGPS衛星の観測位置を表す。地理経度 $80^{\circ}\text{W}$ 付近の黒ドット線は、同時間帯のGRACE衛星の飛行高度における位置を表す。この時間帯の $K_p$ 指数は8-であった。

地理緯度 $20^{\circ}\text{N}$ ～ $30^{\circ}\text{N}$ 、地理経度 $70^{\circ}\text{W}$ ～ $120^{\circ}\text{W}$ 付近の領域で赤道異常によるTECの増加が観測された。地理緯度 $35^{\circ}\text{N}$ 、地理経度 $70^{\circ}\text{W}$ 付近から $50^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\text{W}$ 付近の領域に向かってSEDが細長く伸びる様子が観測された。このとき、GRACE衛星は地理緯度 $45^{\circ}\text{N}$ 、地理経度 $83^{\circ}\text{W}$ 付近で、SEDの腕の上空を飛行した。また、PRN18のGPS衛星は $55^{\circ}\text{N}$ 付近で、 $85^{\circ}\text{W}$ 付近から $80^{\circ}\text{W}$ に向かって飛行した。

次に、TEC-DAWNデータとGRACE-TECデータを比較するために、GRACE衛星の軌道

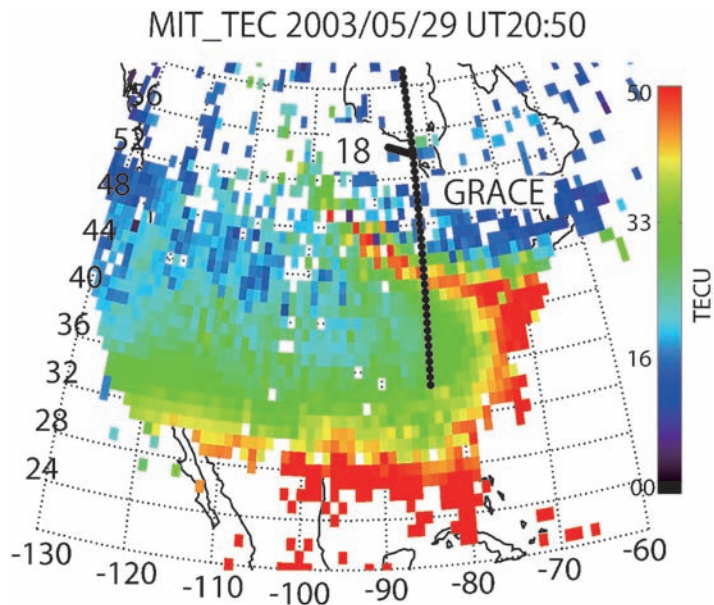


図4 北米大陸GPS受信機網のTECデータ(MIT-TEC 2003年5月29日2050UT)

「18」と記した黒線はPRN18のGPS衛星の軌道(2045UT～2052UT)を、黒ドット線はGRACE衛星の軌道(2045UT～2052UT)を示す。

Fig. 4. TEC data between the ground and the GPS satellites (MIT-TEC) on 29 May, 2003.

The black line with "18" indicates the orbit of PRN 18 from 2045 UT～2052 UT. The dotted black line indicates the orbit of the GRACE satellite during the same time period.

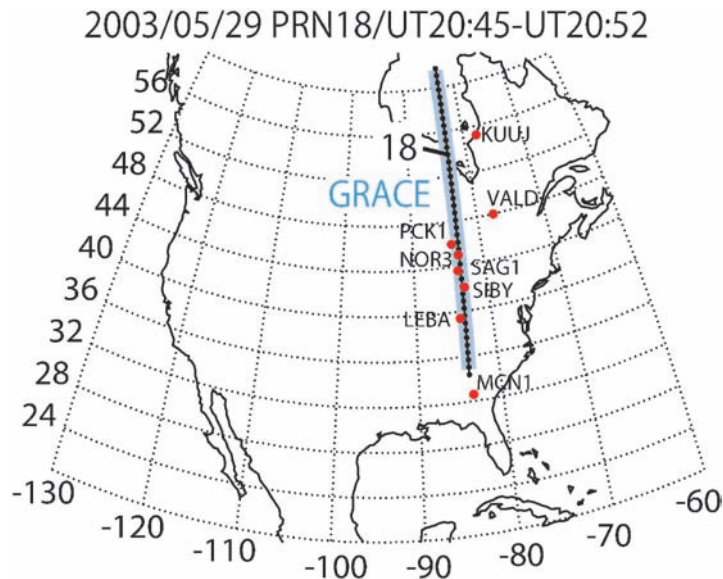


図 5 PRN18 の GPS 衛星の軌道（「18」と記した黒線）と GRACE 衛星の軌道（青線）（2003 年 5 月 29 日 2045 UT～2052 UT）  
黒ドット線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星間を結ぶ直線と地上の交点を、赤丸は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星間を結ぶ直線のフットプリントから  $\pm 3^\circ$  の経度に位置する GPS 受信機の位置を示す。ただし KUUI 受信機と VALD 受信機はフットプリントから  $\pm 5^\circ$  に位置する。

Fig. 5. Orbit of PRN18 (black line with "18") and the GRACE satellite (blue line) from 2045 UT to 2052 UT.

The dotted black line indicates the footprint of the path between PRN18 on the ground and the GRACE satellite. The red dots with the GPS receivers' name indicate the selected GPS receivers on the ground. Except for the KUUI and VALD receivers, the GPS receivers were located within  $3^\circ$  of the footprint.

付近の地上 GPS 受信機を選択した。選択された地上 GPS 受信機と、2045 UT～2052 UT の PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星の軌道を図 5 に示す。横軸は地理経度を、縦軸は地理緯度を表す。「18」と記した黒線は PRN18 の GPS 衛星の飛行高度での位置を、青線は GRACE 衛星の飛行高度での位置を表す。黒ドット線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星を通るパスの地上とのフットプリントを表す。このフットプリントから経度に対して  $\pm 3^\circ$  の領域にある地上 GPS 受信機 8 機の受信機名と位置を、黒文字と赤丸で示した。

図 6 に 2003 年 5 月 29 日 2045 UT～2054 UT の GRACE-TEC データを示す。図の形式は図 3 と同様に、横軸が地理緯度を、縦軸が TEC を表す。黒線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星の間の GRACE-TEC データを示したものである。この時間帯に GRACE 衛星は地理経度  $83^\circ\text{W}$  付近で、地理緯度  $60^\circ 0'\text{N}$  から  $25^\circ 0'\text{N}$  に向かって飛行した。その軌道は図 5 の青線にあ

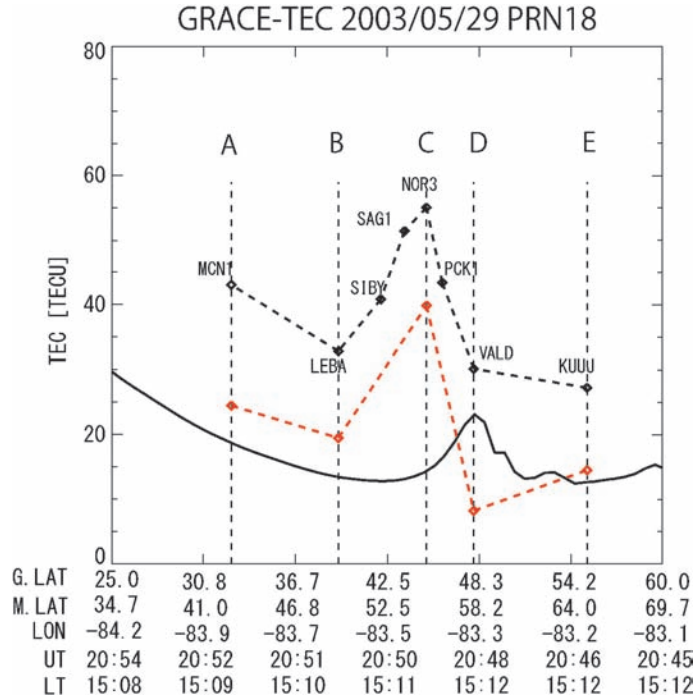


図 6 GRACE-TEC データ (2003 年 5 月 29 日 2045 UT~2054 UT)  
 黒線は PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星間の GRACE-TEC データを、  
 黒四角点は 2048 UT における PRN18 の GPS 衛星と各地上 GPS 受信  
 機間の TEC-DAWN を、赤四角点は地上-GRACE 衛星間の TEC データ  
 を示す。

Fig. 6. Latitudinal profile of the GRACE-TEC data on 29 May, 2003.  
 The black line indicates the GRACE-TEC data from 2045 UT to 2054 UT.  
 The black squares with the ground GPS receivers' name indicate the TEC-  
 DAWN data at 2048 UT. The red squares indicate the TEC data between  
 the ground and the GRACE satellite.

たる。この時間帯に観測された GRACE-TEC データの最小値は地理緯度  $54^{\circ}2'N$  で観測された  $12.5\text{TECU}$  で、最大値は  $25^{\circ}0'N$  で観測された  $29.6\text{TECU}$  である。

各地上 GPS 受信機の名前を記した黒四角点は、2048 UT における PRN18 の GPS 衛星と各地上 GPS 受信機間の TEC-DAWN データを示したものである。最も低緯度にある MCN1 受信機は地理緯度  $32^{\circ}6'N$  で、最も高緯度の KUUJ 受信機は  $55^{\circ}2'N$  である。TEC-DAWN データの最大値は NOR3 受信機での  $55.1\text{TECU}$  で、最小値は KUUJ 受信機で観測された  $27.3\text{TECU}$  である。

GRACE 衛星が地理緯度  $55^{\circ}2'N$  から  $48^{\circ}0'N$  に飛翔する間に、GRACE-TEC は  $12.8\text{TECU}$  から  $22.0\text{TECU}$  に増加した。また、地理緯度  $48^{\circ}0'N$  から  $45^{\circ}0'N$  にかけて、GRACE-TEC は  $22.0\text{TECU}$  から  $15.2\text{TECU}$  に減少した。この緯度領域は、図 4 で示した SED の上を GRACE 衛星が飛翔した緯度領域、観測時間とほぼ同じである。このことから、地理緯度  $55^{\circ}2'N$  か

ら  $45^{\circ}0'N$  の間の GRACE-TEC の変動は SED によるもので、GRACE 衛星が高緯度の SED のない領域から SED の腕の上空を通過するために TEC が増加し、SED の腕を通り抜けて SED のない領域へ飛翔したため TEC が減少したと考えられる。

TEC-DAWN データでは、KUJ 受信機（地理緯度  $55^{\circ}2'N$ ）から VALD 受信機（ $48^{\circ}0'N$ ）にかけて、27.3 TECU から 30.1 TECU に、VALD 受信機から NOR3 受信機（ $45^{\circ}0'N$ ）にかけて、30.1 TECU から 55.1 TECU に TEC が増加した。また、NOR3 受信機から LEBA 受信機（ $39^{\circ}4'N$ ）の間では、55.1 TECU から 32.8 TECU まで減少し、LEBA 受信機から MCN1 受信機（ $32^{\circ}6'N$ ）の間では、32.8 TECU から 43.1 TECU まで増加した。VALD 受信機から LEBA 受信機のある緯度領域は、図 4 で示された SED の地理経度  $83^{\circ}W$  付近における緯度とほぼ同じ範囲である。このことから、VALD 受信機と LEBA 受信機の間で観測された TEC 変動は SED によるもので、VALD 受信機から NOR3 受信機の間では SED の高緯度側を、高緯度から低緯度に向かって観測したため、TEC が増加したと考えられる。NOR3 受信機から LEBA 受信機の間では、SED の低緯度側を高緯度から低緯度に向かって観測したため、TEC が減少したと考えられる。LEBA 受信機から MCN1 受信機にかけて再び TEC が増加し始めるのは、MCN1 受信機よりさらに低緯度に赤道異常帯があるためだと考えられる。

これらの TEC 変動を空間変化とみなすと、低緯度から高緯度に向かう方向については、GRACE-TEC データでは地理緯度  $45^{\circ}0'N \sim 55^{\circ}2'N$  の範囲で SED による TEC の増加が観測された。TEC が高緯度に向かって減少し始める SED の高緯度側の始まりは  $48^{\circ}0'N$  で観測された。これに対して、TEC-DAWN データでは地理緯度  $39^{\circ}4'N$  にある LEBA 受信機から  $48^{\circ}0'N$  にある VALD 受信機の間で SED による TEC の増加が観測され、SED の高緯度側の始まりは地理緯度  $45^{\circ}0'N$  の NOR3 受信機で観測された。以上から、GRACE-TEC データで TEC-DAWN データよりも  $3.0^{\circ}$  高い緯度で SED の高緯度側が観測されたことがわかった。

#### 4. 考察

GRACE-TEC データと TEC-DAWN データを用いて SED の観測を行った。TEC が高緯度に向かって減少し始める緯度を SED の高緯度側が始まる緯度と定義し、2つのデータの間で観測される SED の高緯度側の始まる緯度を比較した。その結果、GRACE-TEC データで観測される SED は TEC-DAWN データで観測される SED よりも高緯度にあることがわかった。

2003 年 5 月 21 日の GRACE-TEC データでは地理緯度  $48^{\circ}0'N$  から TEC が減少し始めた。一方、TEC-DAWN データでは地理緯度  $43^{\circ}2'N$  の YOU1 受信機から TEC が減少し始めた。また、2003 年 5 月 29 日の GRACE-TEC データでは地理緯度  $48^{\circ}0'N$  で TEC が減少し始め、TEC-DAWN データでは地理緯度  $45^{\circ}0'N$  の NOR3 受信機から TEC が減少し始めた。2つの結果から、GRACE-TEC データで観測した SED は、TEC-DAWN データで観測するよりも  $3 \sim 5^{\circ}$



高い緯度で観測されることがわかった。

同じ現象を同じ時刻にほぼ同じ場所で観測しているにもかかわらず、観測される緯度が3-5°程度異なる理由について、以下のように2つの考察を行った。

#### 4.1. GRACE-TEC と TEC-DAWN データの高度差

図3と図6で示した GRACE-TEC データは、GRACE 衛星の飛翔高度約 500 km における地理緯度に沿ってプロットした。一方で、TEC-DAWN データは地上 0 km における各受信機の地理緯度に沿ってプロットした。2つのデータには約 500 km の高度差があることと、PRN18 の GPS 衛星が GRACE 衛星と地上 GPS 受信機に対して高緯度に位置していることから、TEC-DAWN で観測される SED が低緯度側にずれたと考えることができる。つまり、地上 GPS 受信機の地理緯度は、地上 GPS 受信機と PRN18 の GPS 衛星を結ぶパス上の地上 500 km での値に直すと、少し高緯度になるということである。

しかし、PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星を結ぶパスのフットプリントから地理経度が約 3° 前後の誤差の範囲内にある地上 GPS 受信機を選択したため、PRN18 の GPS 衛星と GRACE 衛星、PRN18 の GPS 衛星と地上 GPS 受信機との各距離に対するパスの差はないと考えている。これを確かめるために、各事例において SED の高緯度側の境界が始まる地上 GPS 受信機の地理緯度を使用し、PRN18 の GPS 衛星と各地上 GPS 受信機を結ぶパス上の高度 500 km での地理緯度をそれぞれ計算した。2003 年 5 月 21 日の事例では、YOU1 受信機が SED の高緯度側の境界の始まりにあたり地理緯度 43°2'N であった。この時の PRN18 の GPS 衛星と YOU1 受信機を結ぶパス上の高度 500 km での地理緯度は 43°5'N である。また 2003 年 5 月 29 日の事例では、NOR3 受信機が境界の始まりにあたり地理緯度 45°0'N であった。この時の PRN18 の GPS 衛星と NOR3 受信機を結ぶパス上の高度 500 km での地理緯度は 45°2'N である。以上から、TEC-DAWN データを高度 500 km でプロットすると、高緯度に 0.2-0.3° ずれることがわかった。GRACE-TEC データと TEC-DAWN データで観測された SED の観測緯度のずれは 3-5° 程度なので、地上 GPS 受信機と GRACE 衛星の高度差では説明することができない。

#### 4.2. SED の高度構造

低緯度側、高緯度側での SED の高度構造がそれぞれ異なるため、GRACE-TEC データと TEC-DAWN データの間で SED の観測緯度に違いが生じると考えた。それを明らかにするため、GRACE-TEC データと地上-GRACE 衛星間 TEC データの比率を、図3と図6で示したデータを使って計算し、表1に示した。数字の単位は TECU である。網がけされた数字はそれぞれのデータでの SED の高緯度側の領域を示す。

1 段目から 3 段目は A 地点から E 地点における GRACE-TEC データ、地上-GRACE 衛星

表 1 GRACE-TEC, 地上-GRACE 衛星間 TEC データ, TEC-DAWN データ, および GRACE-TEC の地上-GRACE 衛星間 TEC に対する比率. 網がけした数字は, 各データでの SED の高緯度側で観測した値を示す.

Table 1. GRACE-TEC, ground-GRACE TEC data, TEC-DAWN data, and the proportion of GRACE-TEC. The shaded numbers indicate the TEC data which was observed on the high-latitude side of the SED.

5 月 21 日	A	B	C	D	E
GRACE-TEC (500–20000 km)	19.7	17.2	17.6	19.5	10.6
地上-GRACE 衛星間 TEC (0–500 km)	32.8	29.3	32.5	18.1	14.0
TEC - DAWN (0–20000 km)	52.5	46.5	50.1	37.6	24.6
GRACE-TEC/地上-GRACE 衛星間 TEC	0.6	0.6	0.5	1.1	0.8

5 月 29 日	A	B	C	D	E
GRACE-TEC (500–20000 km)	18.7	13.6	15.2	22.0	12.8
地上-GRACE 衛星間 TEC (0–500 km)	24.4	19.2	39.9	8.1	14.5
TEC-DAWN (0–20000 km)	43.1	32.8	55.1	30.1	27.3
GRACE-TEC/地上-GRACE 衛星間 TEC	0.8	0.7	0.4	2.7	0.9

間 TEC データと TEC-DAWN データをそれぞれ表す. 4 段目は GRACE-TEC データの地上-GRACE 衛星間 TEC データに対する比率を表す. この比率が 1 より大きいと高度 500 km 以下よりも高度 500 km 以上で TEC が多いことを表す.

2003 年 5 月 21 日の事例では, A~E 地点での比率は 0.5 から 1.1 の間であった. A~C 地点の GRACE-TEC の地上-GRACE 衛星間 TEC に対する比率はほぼ同じであった. これに対して, D 地点での比率は 1.1 と他地点の約 2 倍であった. これは, 図 3 に示したように C 地点から D 地点にかけて GRACE-TEC データは増加したのに対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データは減少したことが理由と考えられる. GRACE-TEC データは 1.9 TECU 増加したのに対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データは C 地点から D 地点の間に 14.4 TECU 減少した. GRACE-TEC データの増加分に対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データが大幅に減少したため比率が上昇した. つまり, C 地点から D 地点では高度 500 km 以下で TEC が減り, 高度 500 km 以上では TEC が増加したということである.

2003 年 5 月 29 日の事例では, A~E 地点での比率は 0.4 から 2.7 の間であった. A 地点と B 地点はほぼ同じ比率であった. C 地点での比率は 0.4 で A, B, E 地点の約半分以下であった. 一方, D 地点での比率は 2.7 で, A, B, E 地点の 3 倍以上であった. C 地点の比率が小さいのは, 図 6 に示したように B 地点から C 地点にかけて GRACE-TEC データはほぼ値が変化しないのに対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データは増加しているためである. B 地点から C 地点にかけて GRACE-TEC データは 1.6 TECU 増加したのに対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データは 20.7 TECU 増加した. GRACE-TEC データの増加分に対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データ

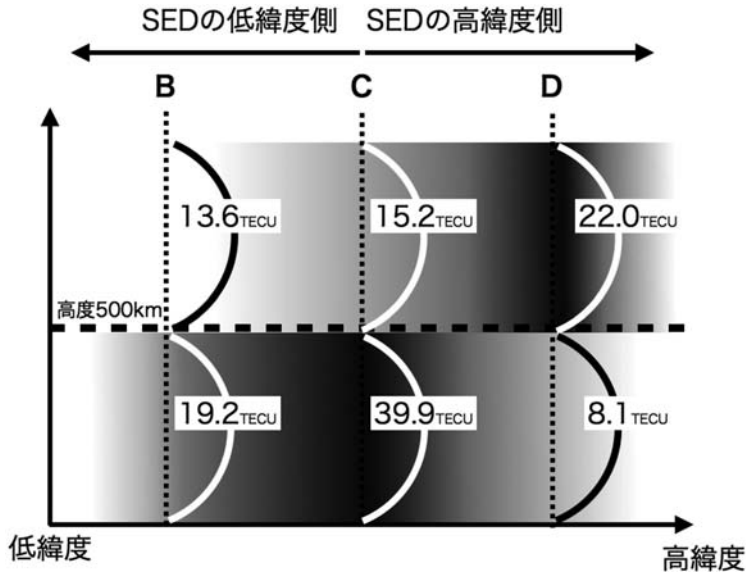


図 7 B, C, D 地点での SED の高度構造 (2003 年 5 月 29 日の事例の GRACE-TEC, 地上-GRACE 衛星間 TEC より推測)

黒ドット線は高度 500 km を示す. 色はプラズマ密度を表し, 濃色の領域は高プラズマ密度領域を, 淡色の領域は低プラズマ密度領域を示す. 黒ドット線より上の数字は GRACE-TEC の値を, 下の数字は地上-GRACE 衛星間の TEC データを示す.

Fig. 7. Altitudinal structure of the SED detected by the GRACE-TEC and ground-GRACE-TEC data on 29 May, 2003.

The horizontal dotted black line indicates 500 km height. The black and grey colors indicate the plasma density; the region colored dense black is the high plasma density region and the light grey color region is the low plasma density region.

率は大幅に増加したため, GRACE-TEC データの地上-GRACE 衛星間 TEC データに対する比率が下がった. つまり, この区間では, TEC は高度 500 km 以上の高い高度領域で少し増加し, 高度 500 km 以下の低い高度領域で著しく増加するということが考えられる.

D 地点の比率が大きいのは, 図 6 に示したように, C 地点から D 地点にかけて GRACE-TEC データは増加しているのに対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データが減少していることが理由である. C 地点から D 地点にかけて GRACE-TEC データは 6.8 TECU 増加したのに対して, 地上-GRACE 衛星間 TEC データは 31.8 TECU 減少した. つまり, この区間の高度 500 km 以上の高い高度領域では TEC が増加するが, 高度 500 km 以下の低い高度領域では TEC が著しく減少するということである. 以上から考えられる, B, C, D 地点における SED の高度構造を, 模式図として図 7 に示した.

横軸は地理緯度を表し, 左から右にかけて緯度が高くなる. 縦軸は高度を表し, 高度 500 km を黒ドット線で表した. 高度 500 km 以上および 500 km 以下における TEC は色の濃

淡で表している。濃色はプラズマ密度が高い場所、薄色はプラズマ密度が低い場所を示す。2003年5月29日に観測された GRACE-TEC と地上-GRACE 衛星間 TEC の B, C, D 地点での値を数字で表した。B 地点は SED の低緯度側の境界で、TEC 値は高度 500 km 以上で低く、高度 500 km 以下で高い。高度 500 km 以上の TEC 値は高度 500 km 以下の 0.7 倍である。C 地点は SED の内部で、TEC 値は高度 500 km 以上で低いが、高度 500 km 以下で著しく高い。高度 500 km 以上の TEC 値は高度 500 km 以下の 0.4 倍である。D 地点は SED の高緯度側の境界で、TEC 値は高度 500 km 以上で高く、高度 500 km 以下で低い。高度 500 km 以上の TEC 値は高度 500 km 以下の 2.7 倍である。

このような高度構造になるための物理的な説明を考える。まず、SED の少し高緯度側、地理緯度が少なくとも  $30^{\circ}\text{N}$  以上の中緯度域の高度 500 km 前後の領域について考える。例えば、図 7 の C 地点と D 地点の間の高度 500 km 付近は地理緯度  $45^{\circ}\text{N}\sim 48^{\circ}\text{N}$  の領域で中緯度域にあたる。SED の少し高緯度側の領域に東向き電場 (E) がかかると、中緯度域は磁場が少し傾いているためプラズマは  $E \times B$  ドリフトで高緯度かつ高い高度へ移動する。また、プラズマは磁力線に沿って低い高度にも拡散する。ここでのプラズマの動きは  $E \times B$  ドリフトの効果と拡散の効果のバランスで決まると考えられる。プラズマの動きは以下の 3 つの場合に考えられる。

- ・  $E \times B$  ドリフトと拡散の速度がともに等しい時で、 $E \times B$  ドリフト速度と拡散速度が釣り合い、プラズマが同じ高度を保ったまま高緯度へ平行移動する場合。
- ・ 拡散速度が  $E \times B$  ドリフト速度よりも大きい時で、プラズマが高い高度には移動せず、磁力線に沿って低い高度へ拡散して消滅する場合。
- ・  $E \times B$  ドリフトが拡散速度よりも大きい時で、プラズマが高緯度の高い高度領域へ磁力線を横切って移動する場合。

高緯度、つまり D 地点の高度 500 km 以上の高い高度で TEC の値が大きくなるためには、3 番目の「プラズマの  $E \times B$  ドリフト速度が拡散速度よりも大きい」ことが必要と考えられた。しかし、 $E \times B$  ドリフトと拡散の効果だけでは 2003 年 5 月 29 日の事例の D 地点で高度 500 km 以下のプラズマが減少することは説明できない。SED が西向きのプラズマ流である SAPS に押されて北西方向に伸びるという先行研究の結果と、D 地点が SED の高緯度側の端であることを考えると SAPS の影響も考えるべきだが、これについては今後の課題とする。

## 5. まとめ

北米の地上 GPS 受信機網と GRACE 衛星搭載の GPS 受信機の TEC データを用いて、2 つの SED の観測を行った。GRACE-TEC データと TEC-DAWN データで観測される SED による TEC の変化を比べた。TEC-DAWN データは絶対値 TEC データである。一方、GRACE 衛星の GPS 受信機には不明なバイアスがあり、GRACE-TEC データの絶対値も不明である。

電離圏経験値モデルとプラズマ圏モデルを組み合わせた IRI\_ISO モデルを用いて GRACE-TEC データのバイアスを計算した。GRACE-TEC データには 57.3 TECU のバイアスが含まれていると推定された。推定したバイアスを差し引いた値を GRACE-TEC データの絶対値とし、TEC-DAWN データと TEC の値の比較を行った。その結果、GRACE-TEC データでは TEC-DAWN データで観測される SED よりも 3-5° 高い緯度で観測されることがわかった。

観測高度範囲の違う GRACE-TEC データと TEC-DAWN データで観測される SED の緯度が異なる理由を 2 つ考えた。1 つ目は、2 つのデータの高度差により地理緯度がずれたという理由である。TEC-DAWN データは地表 0 km における地上 GPS 受信機の地理緯度に示した。一方で、GRACE-TEC データは GRACE 衛星の飛翔高度約 500 km の地理緯度に示した。そこで、地上 GPS 受信機と PRN18 の GPS 衛星を結ぶパス上の高度 500 km での地理緯度を計算して、地表での地理緯度との差を算出した。その結果、各地上 GPS 受信機の地理緯度は、GPS 受信機と PRN18 の GPS 衛星を結ぶパス上の高度 500 km において、0.2-0.3° 高くなることがわかった。GRACE-TEC データと TEC-DAWN データで観測される SED の緯度差は 3-5° のため、この説明では不十分であることがわかった。

2 つ目は、SED の高度構造そのものに理由があると考えた。GRACE-TEC データと TEC-DAWN データの差を地上-GRACE 衛星間の TEC データとして、各緯度での GRACE-TEC データと地上-GRACE 衛星間 TEC データの比率を調べた。赤道異常帯を観測する A 地点、TEC-DAWN データで観測される SED の低緯度側の境界にあたる B 地点、SED の腕の内部にあたる C 地点、SED の高緯度側の境界にあたる D 地点、完全に SED の外側である E 地点の 5 つの緯度で比率を計算した。その結果、D 地点では GRACE-TEC データが地上-GRACE 衛星間 TEC データの 1.1 倍から 2.7 倍程度の値であることがわかった。

この点により推測される SED の高度構造は以下の通りである。SED の低緯度側の境界では、高度 500 km 以上にあるプラズマは高度 500 km 以下にあるプラズマの 1/2 程度の値である。一方で、SED の高緯度側の境界では、高度 500 km 以上にあるプラズマは高度 500 km 以下にあるプラズマの 1.1 倍から 2.7 倍の値である。このような高度構造になる理由として、東向き電場による  $E \times B$  ドリフトと磁力線に沿った拡散の効果を考え、2 例の SED について解析を行い SED の高度構造を推定した。しかし、SED の一般的な高度構造を明らかにするためには、さらに多くの SED の事例を解析する必要がある。

GRACE-TEC データのような低軌道衛星のトップサイド TEC データは、地上 GPS 受信機がない海の上でも観測ができるので、全ての緯度、経度を網羅することができる。また低軌道であるため周期が短く、半年程で全ての地方時を網羅することができる。以上の利点から、SED のような空間的に大きい現象を観測するのに適したデータと言える。本研究の結果から、低軌道衛星 GRACE の TEC データで観測される SED と地上-GPS 衛星間 TEC データで観測される SED には 3-5° のずれがあることが明らかになった。このことから、トップサイ



ド TEC データを用いて SED を観測するには、地上-TEC データとのズレが生じることを考慮する必要があるといえる。

## 謝 辞

まず、GRACE 衛星のデータを提供して下さった German Aerospace Center (DLR) に深く感謝いたします。また、MIT-TEC データを提供して下さった MIT Haystack Observatory に感謝いたします。

## 文 献

- Coster, A.J., Colerico, M.J., Foster, J.C., Rideout, W. and Rich, F. (2007): Longitude sector comparisons of storm enhanced density. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L18105, doi: 10.1029/2007GL030682.
- Foster, J.C. (1993): Storm time plasma transport at middle and high latitudes. *J. Geophys. Res.*, **98**, 1675–1689, doi: 10.1029/92JA02032.
- Foster, J.C. and Burke, W.J. (2002): SAPS: A new categorization for sub-auroral electric fields. *EOS*, **83**, 393–394, doi: 10.1029/2002EO000289.
- Foster, J.C. and Vo, H.B. (2002): Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream. *J. Geophys. Res.*, **107**, 1475, doi: 10.1029/2002JA009409.
- Foster, J.C., Erickson, P.J., Coster, A.J., Goldstein, J. and Rich, F.J. (2002): Ionospheric signatures of plasmaspheric tails. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1623, doi: 10.1029/2002GL015067.
- Foster, J.C., Rideout, W., Sandel, B., Forrester, W.T. and Rich, F.J. (2007): On the relationship of SAPS to storm-enhanced density. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.*, **69**, 303–313, doi: 10.1016/j.jastp.2006.07.021.
- Gulyaeva, T.L. (2003): Variations in the half width of the topside ionosphere according to the observations by space ionosondes ISIS 1, ISIS 2, and IK 19. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, **4**, 201–207.
- Gulyaeva, T.L. and Titheridge, J.E. (2006): Advanced specification of electron density and temperature in the IRI ionosphere-plasmasphere model. *Adv. Space Res.*, **38**, 2587–2595, doi: 10.1016/j.asr.2005.08.045.
- Heelis, R.A., Sojka, J.J., David, M. and Schunk, R.W. (2009): Storm time density enhancements in the middle-latitude dayside ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **114**, A03315, doi: 10.1029/2008JA013690.
- Horvath, I. and Lovell, B.C. (2010): Traveling ionospheric disturbances and their relations to storm-enhanced density features and plasma density irregularities in the local evening and nighttime hours of the Halloween superstorms of 29–31 October 2003. *J. Geophys. Res.*, **115**, A09327, doi: 10.1029/2009JA015125.
- Mannucci, A.J., Tsurutani, B.T., Iijima, B.A., Komjathy, A., Saito, A., Gonzalez, W.D., Guarnieri, F.L., Kozyra, J.U. and Skoug, R. (2005): Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween Storms”. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12S02, doi: 10.1029/2004GL021467.
- Maruyama, T. (2006): Extreme enhancement in total electron content after sunset on 8 November 2004 and its connection with storm enhanced density. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L20111, doi: 10.1029/2006GL027367.
- Tsurutani, B., Mannucci, A., Iijima, B., Abdu, M.A., Sobral, J.H.A., Gonzalez, W., Guarnieri, F., Tsuda, T., Saito, A., Yumoto, K., Fejer, B., Fuller-Rowell, T.J., Kozyra, J., Foster, J.C., Coster, A. and Vasyliunas, V.M. (2004): Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. *J. Geophys. Res.*, **109**, A08302, doi: 10.1029/2003JA010342.
- Yizengaw, E., Dewar, J., MacNeil, J., Moldwin, M.B., Galvan, D., Sanny, J., Berube, D. and Sandel, B. (2008): The occurrence of ionospheric signatures of plasmaspheric plumes over different longitudinal sectors. *J. Geophys. Res.*, **113**, A08318, doi: 10.1029/2007JA012925.