

太陽フレアに伴う電離層全電子数上昇の GPS 観測

日置 幸介

北海道大学理学研究院自然史科学部門

(2006 年 11 月 15 日受付, 2007 年 1 月 11 日改訂, 2007 年 1 月 12 日受理)

GPS Observations of Increases in Ionospheric Total Electron Contents Associated with Solar Flares

Kosuke Heki

Dept. Natural History Sci., Faculty of Science, Hokkaido University

(Received November xx, 2006; Revised xx xx, 2007; Accepted xx xx, 2007)

Abstract

Phase differences between the two carrier waves from Global Positioning System (GPS) satellites provide information on numbers of electrons integrated along line-of-sights. Sudden increase of electron densities in ionosphere is caused by enhanced ultraviolet flux by solar flares. Here I report two examples of such observations using globally deployed GPS stations. Dependence of such increase on solar zenith angles is addressed using stations distributed over the sunlit hemisphere. The height distribution of the electron increase is also discussed using data from stations along the night-day boundary.

1. GPS 網を用いた電離層研究

マイクロ波が電離層を通過すると、周波数の逆数に比例する遅延（時間遅れ）を受ける。全地球測位システム(GPS: Global Positioning System) 衛星が発射する 1.2 GHz (L1) および 1.5 GHz (L2) の L 帯のキャリア位相に周期をかけて差をとれば、それぞれの周波数における電離層遅延の差が得られる。この量は受信機と衛星を結ぶ視線に沿って積分した電離層の全電子数(TEC: Total Electron Content)に比例する（実際の位相データには定数のバイアスがのっているが、本研究のように短い時間スケールの変化の議論には差し支えない）。太陽天頂角の変化による日変化に加えて、電子密度は様々な電離層擾乱を反映して変化する。

連続 GPS 観測網が電離層擾乱の研究に有用であることはこれまでに多くの例で示されてきた。移動性電離層擾乱(TID: Traveling Ionospheric Disturbance) はオーロラ帯に起源を持つ

超高層大気の内部重力波を原因とする擾乱と考えられている。わが国では国土地理院の GPS 連続観測網 GEONET を利用した中規模および大規模 TID の観測研究が盛んである(Saito et al., 1998). 最近では多くの観測例に基づいた TID の移動方向や周期などの統計的研究も行われている(Tsugawa et al., 2004).

Northridge地震に伴う TEC 変動の報告(Calais and Minster, 1995)を嚆矢に固体地球に起源を持つ電離層擾乱の GPS による研究も増えてきた。2003 年 9 月の十勝沖地震の直後には、正(電子密度増加)のパルス状の TEC 擾乱が震源から南に秒速およそ 1 km で伝播する様子が GEONET によって観測された(Heki and Ping, 2005). この現象は、震源付近の地表(または海面)の隆起によって励起された大気音波が屈折しつつ上空に伝播して電離層に達して電子の濃淡を生じたというモデルで説明されている。2004 年 12 月のスマトラ・アンダマン地震では、このような地震時電離層擾乱(Coseismic Ionospheric Disturbance, CID)から震源過程を拘束する試みが初めて行われた(Heki et al., 2006). また浅間山の 2004 年 9 月の爆発的な噴火に伴って発生した TEC 変動の振幅を、既知のエネルギーの地上爆発による TEC 変動(Calais et al., 1998)と比べて噴火エネルギーを推定する試みもなされている(Heki, 2006).

熱圏の大気分子が太陽の紫外線等の電磁波によってプラズマ化されて生じたのが電離層であるが、太陽面での爆発(フレア)によってそれらのフラックスが急増すると TEC も増加する(Sudden Increase of TEC: SITEC). SITEC の GPS による観測研究も International GNSS Service (IGS)の公開 GPS データを用いた報告が出始めている(Zhang & Xiao, 2003; 2005). SITEC と逆の現象として日食による TEC の一時的な減少(Afraimovich et al., 2002)や、ロケット排気に大量に含まれる水や水素分子の超高層大気への拡散に伴う電離層の消失(日置・古屋, 2006)なども GPS によって観測されている。本論文では太陽フレアの発生に伴う TEC 変化の様々な様相を IGS や GEONET の GPS データを用いて調べた結果について報告する。

2. 太陽フレアによる TEC の急増

太陽黒点付近では太陽の対流層のダイナモで作られた磁力線の束が光球面を横切っており、通常対流が阻害されるため周りに比較して温度が低い。太陽フレアは、黒点の周囲で反対向きの磁力線が一旦切れて結びつく磁力線再結合(Magnetic reconnection)によって磁場の歪エネルギーが放出されて粒子が加速される現象である。太陽フレアはその時間発展の様子から二つのタイプに分かれる。ひとつは開始後 5 分以内に爆発的に極端紫外線(EUV)等の電磁波を放射し終える“Impulsive 型フレア”であり、もうひとつはこれらの放射を五分以上かけてゆっくり行う“Slow 型フレア”である。

詳しくみると Impulsive なフレアも、硬 X 線や EUV、マイクロ波が数分以内に放射される Impulsive な部分と、後続して主に軟 X 線がゆっくり放射される Slow な部分から構成される(Donnelly, 1976). Slow 型フレアは、Impulsive な成分を持たないフレアともいえる。フレアに伴う電磁波はおよそ 8 分後に地球に到着するが、EUV のフラックスが静穏時より有

意に増加するため、電離層の TEC の急増、すなわち SITEC をもたらす。また低層で増加した電子が短波帯の電波を吸収して通信を障害するデリンジャー現象が生じる。その後数十分から数日たって地球にやってくる高エネルギー粒子は衛星の誤動作や低緯度でのオーロラ、磁気嵐など様々な現象をもたらす。

X線は大気による吸収が大きいいため、太陽フレアの地上観測は主にマイクロ波で行われている。一方X線によるフレアの観測は宇宙から衛星によって常時行われている。米国の静止気象衛星GOES (Geostationary Operational Environment Satellite)でみた波長 1-8ÅのX線の強度が $1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ より大きなフレアがXクラスに分類され、それ以下のものは強度が一桁さがる毎に M, C, B, Aとクラス分けされる。フレアなどの太陽活動情報は、宇宙天気予報の一環として我が国では情報通信研究機構に所属する宇宙天気情報センター(Japan Space Weather Information Center, <http://swc.nict.go.jp/contents/index.php>)から一般に向けて定期発信されている。

3. GPS 網による SITEC の観測：太陽天頂角依存性

本研究では 2004 年 7 月 16 日 02:06UTに発生したXクラスとしては比較的小きなフレア(X1.3, すなわち 1-8ÅのX線強度が $1.3 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$)と、2003 年 10 月 28 日 11:10UTに発生した過去数十年で最大規模のフレア(X17.2)の二つに関して、International GNSS Service (IGS) 網 (一部GEONET) で観測されたSITECの例を紹介する。Figure 1 と Figure 2 はそれぞれのフレアに伴うSITECを観測したGPS局の位置と太陽天頂角、および太陽天頂角が比較的高い局と低い局のそれぞれにおけるTEC時系列である。

生の時系列は衛星の移動による仰角の時間変化や TEC 自体の日変化等を反映したゆっくりとした変化を示すが、ここでは多項式近似によりそれらの成分は取り除き数十分程度以下の現象を取り出した。視線ベクトルが電離層に斜交するため本来の TEC (Slant TEC) 時系列に見られる SITEC の値は衛星の仰角によって異なる。しかしこの図では視線の電離層への入射角の余弦をかけて、等価的に電離層を垂直に貫く視線における TEC (Vertical TEC)の値に換算してある(本論文では以後 Vertical TEC から求めた SITEC を議論する)。このため様々な仰角を持つ衛星からも一様な SITEC の値が得られている。本研究では、それらから最も仰角の高い4衛星での値の平均をその GPS 局における SITEC の値とし、平均値の周りのばらつきから SITEC 値の誤差を求めた。

いずれの例でもTECはフレアのImpulsive な成分に合わせて数分で急上昇した後、ゆっくりと増加分が減少してゆく。SITECの大きさはフレアの規模に依存し、2002/7/16 のフレアでは 1 TEC Unit (TECU)程度 (Figure 1), 2003/10/28 の巨大フレアでは 15 TECU程度であった ($1\text{TECU}=10^{16} \text{ electrons/m}^2$) (Figure 2)。同じフレアでは太陽天頂角が大きい観測点ほど SITECが小さくなる。それぞれのフレアに関して、SITECの値を太陽天頂角の関数として Figure 3 にプロットした。SITECの値は天頂角 60 度程度まではなだらかに下がり、その後急激に下がって天頂角 90 度 (太陽が地平線に隠れるところ) でゼロに近づく。

太陽天頂角 θ の点で電離層表面の単位面積が受けるエネルギー量は $\cos \theta$ に比例するから、単純に考えると SITEC の大きさもそれに比例するように思われる。しかし観測された SITEC の値と太陽天頂角の関係を見ると、大きな θ での SITEC の減少は $\cos \theta$ より明らかに急峻である(Figure 3)。また 2003 年の例では太陽天頂角が 90 度を超えても SITEC がゼロでないなど、 $\cos \theta$ よりやや複雑なモデルの必要性を示唆する。本研究では、フレアによる紫外線が大気中の分子を電離する高度の上に仮想的に厚さ d km の減衰層があると考え、その層を突き抜ける厚みの差が太陽天頂角依存性の原因であると考えた。Figure 3 の B 地点での SITEC(θ)は、太陽天頂角がゼロであるA地点での SITEC(0)に比べ、電磁波が減衰層中を長く突き抜ける分だけ小さくなり、

$$\text{SITEC}(\theta) = \text{SITEC}(0) [1 - \alpha (l(\theta) - d)/d] \quad (1)$$

となる。ここで d や $l(\theta)$ は Figure 3 に示す A,B 両地点で SITEC をもたらず紫外線が貫く減衰層の厚さであり、 α はA地点での減衰の大きさである。SITEC(0)をそれぞれ 0.6 と 7.0 TECU、 d を 200 km、 α を 0.12 としたときの曲線はおおむね観測値にフィットする (Figure 3)。

4. 日没後の SITEC と電子密度増加の高さ分布

2003/10/28 の大規模フレアでは Figure 2 のウルムチ局の例に見るように天頂角 90 度をやや越えた地帯でも若干の SITEC が見られる。Figure 4 にフレア発生時にすでに日没を迎えていたオーストラリア西部の GPS 局の TEC 時系列を示す。SITEC の値は一様でなく GPS 衛星の方位に依存しており、例えば太陽が沈んだばかりの西の空には未だに有意な SITEC が見られる。その原因のひとつとして、西の空ほど地球の影の上面が低い、すなわち受信機と衛星を結ぶ視線がわずかな影の部分を除いた大部分で太陽にさらされているという事実が考えられる (Figure 5)。

静穏時の電子密度は F2 層中の高度約 300-350 km 付近で最大になっている。一方太陽フレアの Impulsive な部分で放射される電磁波のスペクトルは静穏時より短波長側にシフトしているため、SITEC をもたらず電子密度増加の高度分布はそれと多少異なることが予想される。Donnelly (1976)は典型的な Impulsive 型フレアに伴う電子密度変化を計算し、電子密度の増加が F2 層よりかなり低い E 層から F1 層最下部に相当する高度 100-150 km 付近で最大になることを示した。本研究では日没直後の様々な GPS 点での TEC 時系列を比較して、異なる影の高さ(Shadow height) (Figure 5)における SITEC の値からこの事実を確かめてみる。2003 年 10 月の太陽フレアについて、太陽天頂角が 90 度以上で SITEC が観測された IGS 点を集め (Figure 6)、Leonovich et al. (2002)の手法に倣って太陽フレアによる電子密度増加の高度分布を調べてみたい。

Figure 6 は日没直後の IGS 点での TEC の時系列を、様々な影の高さで比較したものである。影が電離層高度より充分低い場合はほとんど影響をうけない(色の濃い曲線)が、影

の高度が増して電子密度の上昇が生じる高度があらたに影に入るに従って SITEC の値が小さくなる。Figure 6 では影の高度が 100 km 程度で SITEC は急激に小さくなるようである。

Figure 6 でみた影の高さと SITEC の大きさの関係を Figure 7 左に示した。同じ影の高度でも SITEC の値がかなりばらつくが、それは視線ベクトルの方向と太陽の方向の違いに起因するようである。すなわち同じ影の高度の衛星—受信機ペアでも、より昼夜境界線から遠い（近い）局からみた視線の方が大きな（小さな）SITEC を示すのである。同じ影高度なら時刻の遅い（境界線から遠い）視線の方が影の上でより太陽に近い大気中を通るため、フレアに伴う紫外線等が大気から受ける減衰が少ないからであろう。いま視線ベクトルと太陽の方向のなす角度 β を用いて経験的に本来の $\text{SITEC}_{\text{orig}}$ に

$$\text{SITEC}_{\text{corr}} = \text{SITEC}_{\text{orig}} - 0.8 \cos \beta \quad (\text{単位: TECU}) \quad (2)$$

という補正を施して得た $\text{SITEC}_{\text{corr}}$ を Figure 7 右に示す。ばらつきがかなり小さくなっていることがわかる。この事実は日没後の SITEC の大きさは単純に影の高度だけでモデル化できないことを示唆する。

Donnelly (1972) のモデル計算では、高さ 100-150 km あたりの電離層が SITEC を担っているとされる。しかし Figure 7 右にみる SITEC 量の急激な減少は影高度が 100 km 以下で起きている。このことから、SITEC を担う電子密度の増加が主に電離層最下部の D 層で起きていると主張するのはかなり無理がある。Figure 5 に示すように日没後の SITEC をもたらす太陽からの電磁波は、Figure 3 で示す通常の減衰層に加えて、地面すれすれの低層大気中も通過する。Figure 7 の曲線は、電子密度増加の高度分布だけでなく、SITEC をもたらした紫外線等がそれ以前に通過した大気層によって減衰された度合いを大きく反映しているであろう。

5. 結論

以上の議論は次のようにまとめることができる。

- (1) X クラスの Impulse 型太陽フレアでは GPS で全電子数 TEC の急増が明瞭に観測される。
- (2) 衛星毎の視線の電離層入射角の補正を行えば TEC の急増分 SITEC は複数の衛星の平均としてかなり精度よくもとめることができる (2004 年 7 月のフレアの例では標準偏差が 0.1 TECU 程度かそれ以下)。
- (3) SITEC の値にはフレア発生時の太陽高度角への依存性が見られるが、球殻状の吸収層を通過する距離に比例する減衰を仮定することで説明できる。
- (4) 日没後の SITEC には方位依存性が見られ、西の空での値が一般に大きい。
- (5) SITEC 量と地球の影の高さの関係には、フレアによる電子密度増加の高度分布に加えて低層大気による吸収の影響がみられる。

謝辞

本研究は 2004 年度に北海道大学地球科学科四年生として筆者の研究室で二本柳芳宣氏が行った卒業研究を発展させたものである。市川隆一博士(NiCT), 宮崎真一博士(東大地震研), 田部井隆雄博士(高知大学)には建設的なコメントをいただいた。太陽フレアと TEC の関係については国立天文台の野田寛大博士, 名古屋大学の津川卓也博士に色々ご教示いただいた。過去の太陽フレアの情報は主に情報通信研究機構(NiCT)宇宙天気情報センターのウェブサイトから得た。

参考文献

- Afraimovich, E.L., E.A. Kosogorov, and O.S. Lesyuta, Effects of the August 11, 1999, total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network (2002): *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, **64**, 1933-1941.
- Calais, E., and J.B. Minster (1995): GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1045-1048.
- Calais, E., J.B. Minster, M.A. Hofton, and H. Hedlin (1998): Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements, *Geophys. J. Int.*, **132**, 191-202.
- Donnelly, R.F. (1976): Empirical models of solar flare X ray and EUV emission for use in studying their E and F region effects, *J. Geophys. Res.*, **81**, 4745-4753.
- Heki, K. and Ping, J. (2005): Directivity and apparent velocity of coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.* **236**, 845-855.
- Heki, K. (2006): Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, Central Japan, inferred from ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14303, doi:10.1029/2006GL026249.
- Heki, K., Y. Otsuka, N. Choosakul, N. Hemmakorn, T. Komolmis, and T. Maruyama (2006): Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 Great Sumatra Earthquake with coseismic ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res.*, **111**, B09313, doi:10.1029/2005JB004202.
- 日置幸介, 古屋智秋 (2006): H-IIA ロケットの上昇に伴う電離層の局地的消失の GPS による観測, 日本測地学会 H18 秋季講演会.
- Leonovich, L.A., E.L. Afraimovich, E.B. Romanova, and A.V. Tashilin (2002): Estimating the contribution from different ionospheric regions to the TEC response to the solar flares using data from the international GPS network, *An. Geophys.*, **20**, 1935-1941.
- 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.
- Tsugawa, T., A. Saito, and Y. Otsuka (2004): A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan, *J. Geophys. Res.*, **109**, A06302, doi:10.1029/2003JA010302.

Zhang, D.H. and Z. Xiao (2003), Study of the ionospheric total electron content response to the great flare on 15 April 2001 using the IGS network for the whole sunlit hemisphere, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JA009822.

Zhang, D.H. and Z. Xiao (2005), Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JA010738.

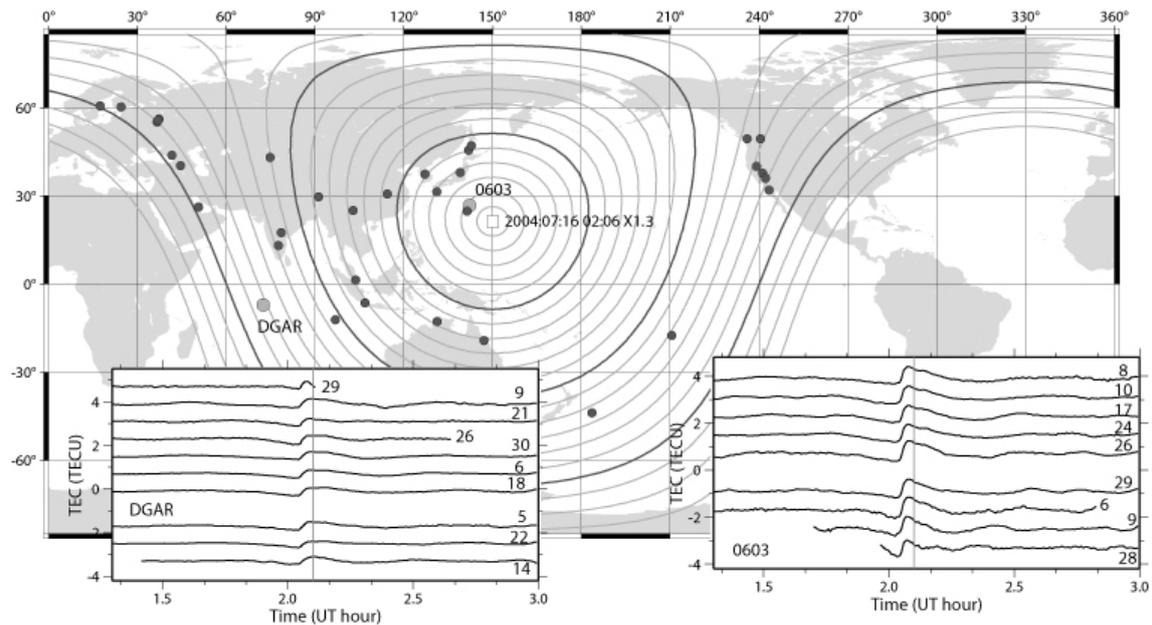


Fig. 1. Solid circles show GPS stations where Sudden Increase of TEC (SITEC) has been observed associated with the 2004/Jul/16 solar flare (X1.3). Contours of 5 degrees interval of solar zenith angles at the flare maximum (the angle is zero at the solid square in the Western Pacific Ocean) are also plotted. Time series of TEC after the penetrating angle corrections are shown for the two GPS points, namely DGAR (IGS point), Chagos Islands, Indian Ocean, and the point 0603 (GEONET point), Bonin Islands, Japan. Local times there are morning and nearly at the noon, respectively. Numbers attached to the time series indicate GPS satellite numbers.

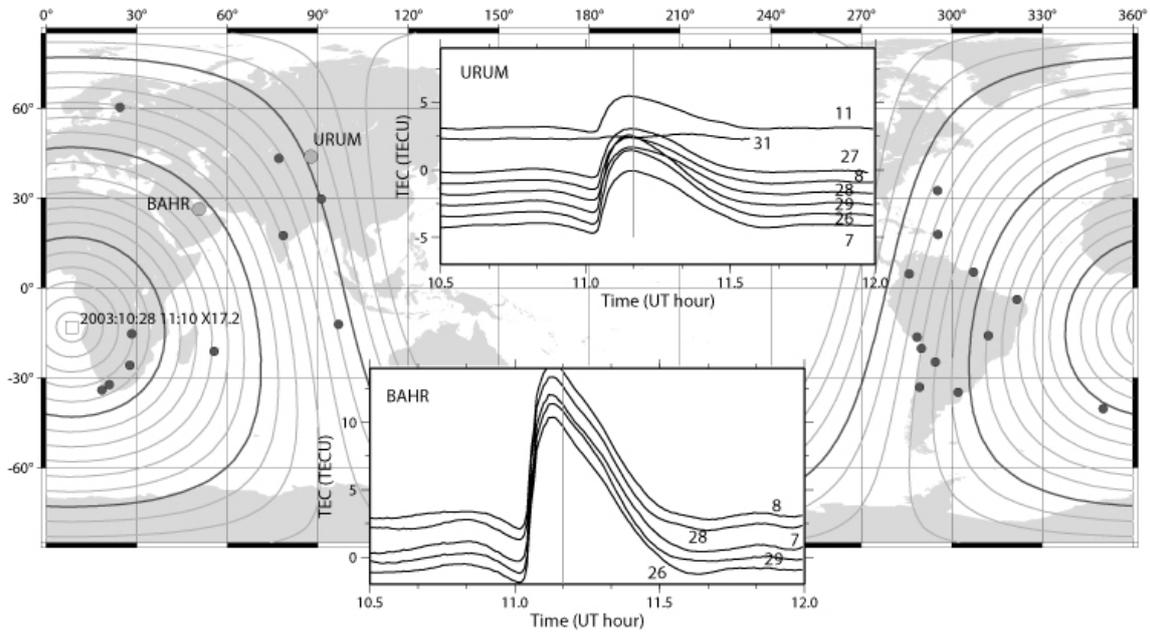
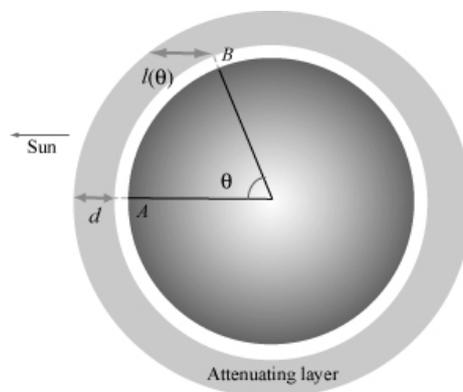


Fig. 2. SITEC associated with a large solar flare (X17.2) on 2003/Oct/28, plotted in the same way as Figure 1. TEC time series show those at the GPS points, URUM (IGS), western China, and BAHR (IGS), Bahrain, Southwest Asia. The solar zenith angle at URUM exceeds 90 degrees (i.e. after the sunset), but significant SITEC are seen for many satellites.



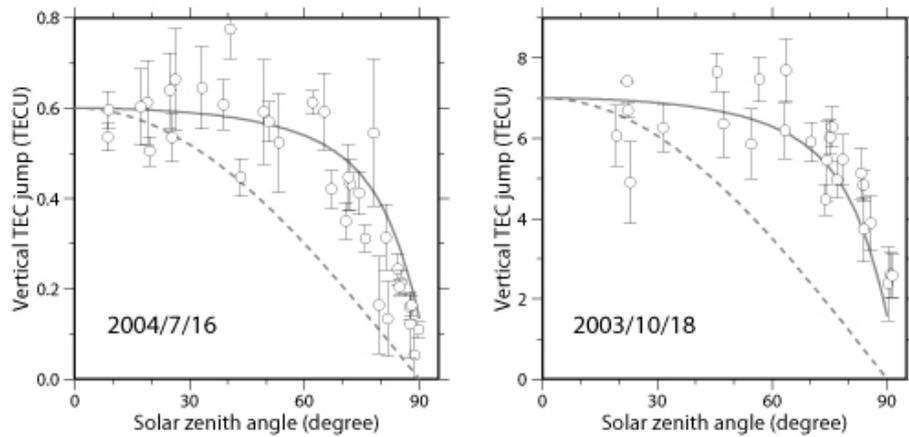


Fig. 3. SITEC gets smaller as the solar zenith angle θ increases, due to attenuation of EUV flux by a hypothetical layer. SITEC by the two flares shown in Figure 1 and Figure 2 are plotted as functions of θ . Solid gray curves show the attenuation model (see text) while dashed curves show simple cosine of θ .

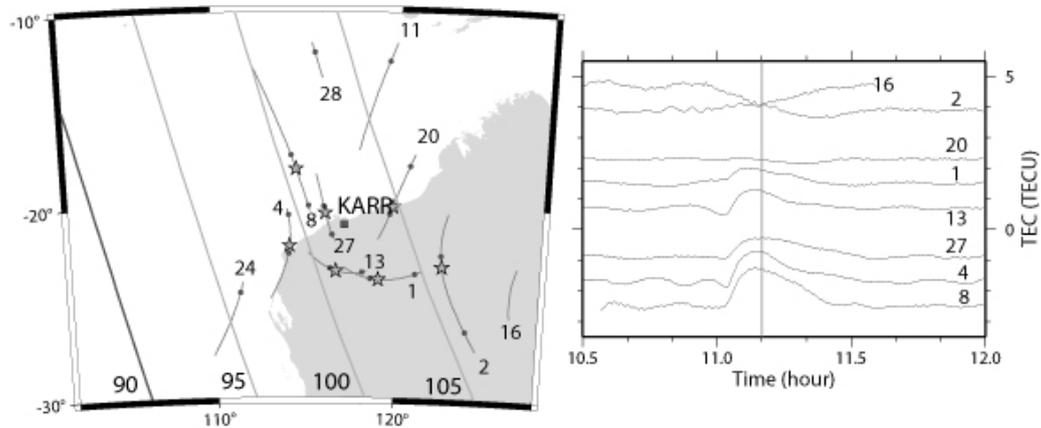


Fig. 4. SITEC at KARR station, Western Australia, associated with the 2003/Oct/28 large flare. Curves in the left figure show contour lines of solar zenith angles 90, 95, 100 and 105 degrees. Trajectories show ground tracks of points where line-of-sights penetrate hypothetical thin ionosphere as high as 300 km (stars indicate positions at the maximum of the flare). It is already after the sunset at KARR, but SITEC are seen for GPS satellites in the western sky (e.g. Sat. 4, 8). However, SITEC are not seen in satellites in the eastern sky (e.g. Sat. 2, 20).

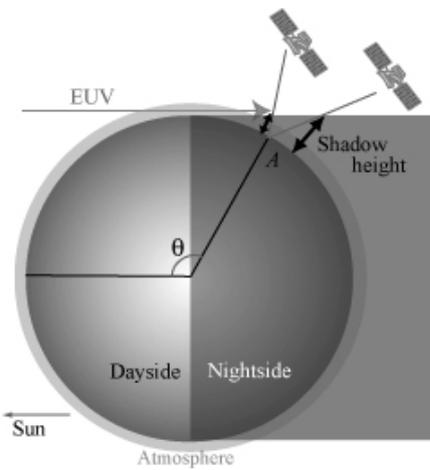


Fig. 5. “Shadow height” is defined as the height of the intersection between the line-of-sight and the Earth’s shadow. By comparing SITEC values for different shadow heights observed at GPS points with θ larger than 90 degrees, the height distribution of the electron density increases by solar flares might be inferred.

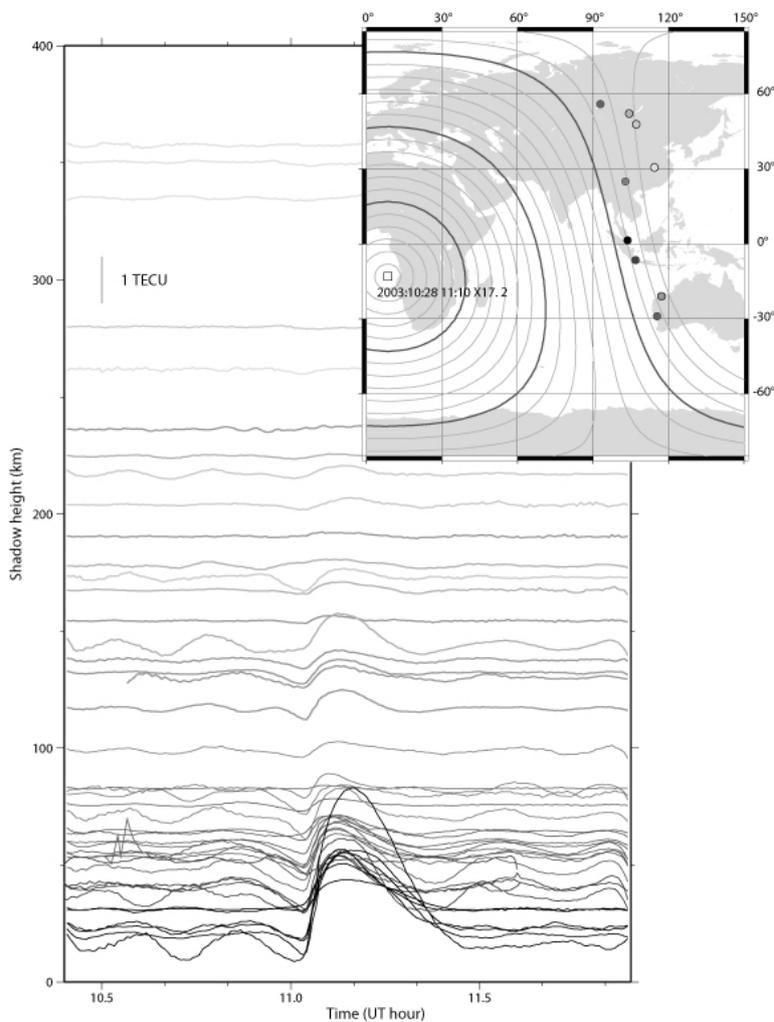


Fig. 6. Ten IGS stations with solar zenith angles larger than 90 degrees are selected (map). Symbols with darker colors denote smaller solar zenith angles. Vertical TEC time series are plotted at vertical positions that correspond to shadow heights (Figure 5) for the GPS satellite and receiver pairs. Colors of the curves are the same as those in the GPS points in the map.

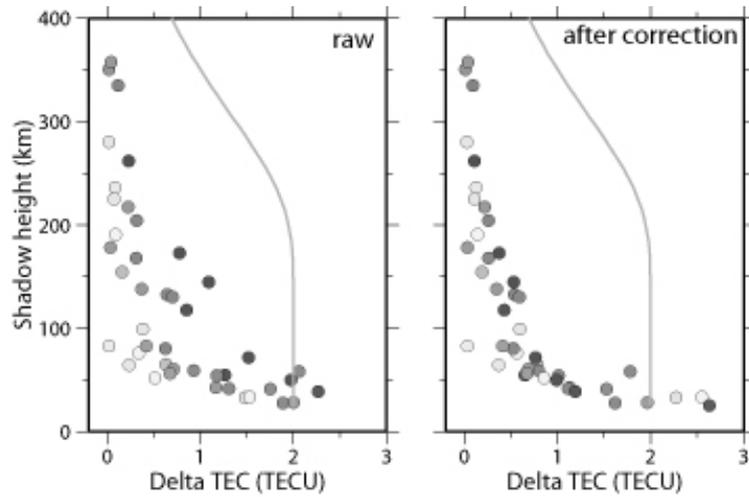


Fig. 7. (left) Relationship between the SITEC values and the shadow heights defined in Figure 5, for the ten IGS stations shown in Figure 6. Darkness of the symbol denotes the solar angle, or the angular distance between the receiver-to-satellite vector and the direction of the sun (darker symbols shows larger angles). Empirical corrections for the solar angle have been performed to minimize the dispersion (right). Gray curves show the dependence expected if the height distribution of the enhanced electron density is proportional to the electron density during the normal time.