地球接近天体による電離圏擾乱: 火球イベントのGPS-TEC観測による比較と日本上空のQZSS-TEC観測

愛(北海道大学 理学部 松下 地球惑星科学科 4年 宇宙測地学研究室)

1 はじめに

地球軌道の近くには多くの小さな天体が存在して いる。それらが地球に接近し、地上約300 kmの電離 圏を通過するとき、電離圏全電子数(TEC, Total Electron Content)の変動が予想される。本研究では、 GPS-TEC観測により火球由来の信号を検討した。ま た、TECの周期的特徴を理解しトレンド除去を行うた め、QZSS静止衛星を用いた長期間TEC観測も行った。



2 GNSS-TEC法

GNSS-TEC法は、GNSSを利用し、受信した周波数 の異なる2種類の波の位相(L1、L2)からTECを求める 手法である。衛星と地上局を結ぶ視線方向に積分した 電子の総数を斜めTEC(STEC)と呼び、受信した波の 位相差L4に比例関数をかけて求められる。衛星と局 の位置情報から、観測点を地上に投影したSIP(Sub Ionospheric Point)の位置や鉛直方向のTEC(VTEC)も 求められる。(日置他,2011)。



3 地球接近天体と電離圏の応答

地球接近天体が電離圏を通過すると、その成分に応 じてTEC変化が生じると考えられる。岩石などででき ている場合は、電離圏通過に伴い周囲の電子を押しの けることで、周辺の電子数が一時的に増加し、復元力 により上下に振動する。また、火球のように地上付近 で爆発を起こす場合は、爆発に伴う音波や重力波が大 気を伝わり電離圏でも擾乱が見られる(図3)。水分を 含む場合は、水蒸気と電離大気の化学反応により、電



4 火球による電離圏擾乱(2013年チェリャビンスク)

チェリャビンスク(2013)

まずチェリャビンスクの火球 イベントに伴うTEC変化をGPS で観測したところ、いくつかの 衛星にN字型のTEC変化が認め られた(*Ding et al.*, 2016)。擾乱 は火球が出現した日にだけ現れ ていることから、その日に特有 な火球イベント由来の信号であ る可能性が高い(図6)。火球と SIPの距離が遠いほど、擾乱が 起こる時刻は遅い。しかしその 速度は一定ではないことから、 直線的に1種類の波が伝搬して いるわけではなさそうである。 *Ding et al.* (2016)では、この時 間、領域におけるTEC擾乱は火 球の爆発に伴い発生した内部重 力波だと考えている。



<u>5 QZSS静止衛星で見る日本上空TEC変化</u>

• TEC時系列

データを得るため、 QZSS静止衛星を用い 冬に比べ夏のTEC値が 系統的に大きいが、こ れは太陽入射角の季節 変化が原因である。ま た、8月5日に不自然な 9)が、磁気嵐の発生を 示すDst指数の減少(図 10)も見られたことか



(上)火球爆発位置とgrtu局、周辺を飛ぶGNSS衛 図6 擾乱がみられる2衛星のデータと 星のSIP軌跡。(下)火球爆発時刻前後のVTECの近似曲線 前後の日のデータの比較 からの残差変化をSIP-火球の距離ごとに並べたもの。

ベーリング海上空(2018)

次に、ベーリング海上空の火 球イベントに伴うTEC変化を GPSで観測した。衝突直後に TEC減少(30番衛星)、周期20分 程度の継続した変動、衝突20分 後に0.5 TECU程度の正の変化(9) 番衛星)が観測された。30番衛 星の信号は前後の日にもみられ る(図8)ため、マルチパス起源の 可能性が高い。それ以外の信号 は火球が出現した日にのみ現れ た。9番衛星のTEC擾乱の振幅 は背景TECの約10%であり、 2013年のイベントに伴う擾乱の 振幅より大きかった。波面と視 線の角度が小さいため変化が強 く出やすく、信号が大きく見え た可能性がある。





星のSIP軌跡。(下)火球爆発時刻前後のVTECの近似曲線 前後の日のデータの比較 からの残差変化をSIP-火球の距離ごとに並べたもの。

図12 稚内局からQZSS衛星を見て得たTEC時系列 図13 稚内局からQZSS衛星を見て得たTEC のスペクトル解析(2019/1/1~2019/11/30)

Frequency(mHz)

時系列のスペクトル解析を行い、強さを 色で表して時系列順に並べたもの。

Frequency(mHz)

6 考察

(1)火球のGPS-TEC観測について

2013年チェリャビンスクの事例では、爆発直後にN字型のTEC変化が伝搬していく様子が見られた。Ding et al. (2016)によると火球の爆発に伴う内部重力波によるものである可能性が高い。

2018年ベーリング海上空の事例では、正のTEC変化、継続した変動などが見られた。振幅から推定すると爆 発の規模は2013年より大きいはずだが、公開されたエネルギー値は2013年の方が倍以上であった。波面と視 線の角度の違いになどによって2018年の信号が大きく見えた可能性が考えられる。

(2)日本上空のQZSS-TEC観測について

磁気嵐や光の強さの違いなど、TEC値は太陽活動の影響を強く受けていた。TEC時系列と太陽活動を比較 することで、それらの相互関係の理解が深まる。今後は太陽活動による変動を除去することで、地球外物質 等に由来する、短周期TEC変化の判別が期待される。

7まとめ

火球をGPS-TEC観測したところ、2013年の火球爆発直後にN字 型TEC擾乱の伝搬が見られた。2018年も爆発直後のTEC擾乱が見 られ、火球由来である可能性が考えられる。

稚内(0001)局からQZSS衛星を見て得たデータを用いてTEC時系 列の観測、スペクトル解析をした。TEC値やスペクトルの季節変化、 太陽活動に伴う電離圏擾乱などが見られた。

参考文献

NEWS | NASA Instruments Image Fireball over Bering Sea (https://www.ipl.nasa.gov/news/news.php?feature=7355) NASA OMNIWeb Data Explorer (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html) Ding, F., T. Mao, L. Hu, B. Ning, W. Wan, Y. Wang(2016), GPS network observation of traveling ionospheric disturbances following the Chelyabinsk meteorite blast, Ann. Geophys., 34(11), 1045-1051 日置幸介, 菅原守, 大関優, 岡崎郁也(2011), GPS-TEC法による地球物理学, 測地学会誌, 56(4), 125-134 Savastano, G., A. Komjathy, E. Shume, P. Vergados, M. Ravanelli, O. Verkhoglyadova, X. Meng, M. Crespi (2019), Advantages of geostationary satellites for ionospheric anomaly studies: Ionospheric plasma depletion following a rocket launch, *Remote Sensing*, 11(14), 1734-1750