

### 1. はじめに Introduction

電離圏(電離層)は太陽から来る紫外線などの電磁波によって大気が電子とイオンに分離している領域であり、その様相は太陽活動による影響を受けて常に変動している。特に太陽フレアに起因する変化は顕著で、電磁波フラックスの急増に伴って電離圏電子密度の増加が起こる。

Donnelly (1976)によると、フレアには時間発展や電子密度増加の高度分布が異なる二つの放射成分がある。従来のGPS地上局によるTEC(Total Electron Content:全電子数)観測では高度分布を求めるとは難しく、こうしたフレアの特徴はまだ十分に観測されていない。そこで本研究では、高分解能の電子密度鉛直プロファイルを得られるGPS電波掩蔽観測という新しい手法を用いる。観測で得られた電子密度プロファイルから電子密度増加の高度分布を求め、その特徴について考察した。観測対象は2006年12月5日に発生したクラスX9.1の大規模フレアである。

### 2. GPS電波掩蔽観測 GPS radio occultation observations

#### 掩蔽 (Occultation)

月や惑星などの近くの天体の背後に、遠くの天体が隠れる現象。

#### GPS電波掩蔽観測とは

発信源のGPS衛星と、受信機である低軌道 (LEO: Low-Earth Orbiting) 衛星から成る。LEO衛星から見てGPS衛星が地球の地平線に沈む、または昇る際に大気を掠めながらわずかに屈折して到来する電波を受信する。その屈折特性を解析することで大気の大気密度、水蒸気量、電離圏の電子密度に依存する屈折率高度プロファイルを得る手法。高精度、鉛直方向の高分解能、さらには陸海、極域を問わず全球を観測できる利点を持つ。なお、各パラメータの導出方法の詳細は Kursinski et al. (1997) を参照した。



図1: 掩蔽観測の模式図 (Geodetic Data Archiving Facilityより)

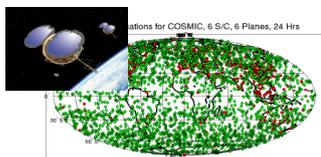


図3: FORMOSAT-3/COSMICによる1日1回の掩蔽観測点(緑) 赤はラジオゾンデの観測点 (COSMIC web page提供)

本研究では、2006年4月に米国と台湾の共同で打ち上げられた FORMOSAT-3/COSMIC (Taiwan's Formosa Satellite Mission #3/Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate) 衛星のデータを CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center Version 2.0 (<http://cosmic-ic.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>) よりダウンロードして用いる。FORMOSAT-3/COSMICは6機のLEO衛星によって1日あたり約2500の鉛直プロファイルデータを全球に渡って得ることができる。

### 3. 太陽フレアの二つの成分 Two components of solar flares

太陽フレアが発生すると、太陽硬X線 (<1 Å) や軟X線 (1-90 Å)、極端紫外線 (EUV: 90-1030 Å) などの電磁波が突発的に増加し、電離圏の電子密度が急増する。

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分以内で爆発的にEUV、硬X線などを放射し終える "Impulsive" 型フレアであり、もうひとつはこれらの放射を5分以上かけてゆっくり行う "Slow" 型フレアである。Impulsive 型フレアも詳しくみるとEUV、硬X線などを短時間で放射する Impulsive な成分と、軟X線を中心とする Slow な成分に分かれている。つまり、Slow型フレアとはImpulsive成分のないフレアであるといえる。

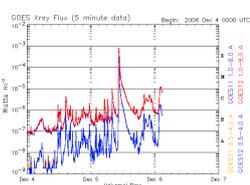


図4: 2006年12月のフレア発生時のX線強度 (NICT 情報通信研究機構 web pageより)

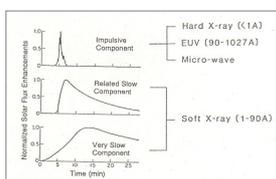


図5: Impulsive 型フレア発生時の各放射成分の時間変化の模式図 (Donnelly et al., 1976)

### 4. 電離圏の応答 Ionospheric responses

Donnelly (1976) によると、フレアに伴う電離圏の電子密度増加は、放射成分ごとに高度分布が異なる。EUVを主とするImpulsive成分の増加高度分布はほぼ均一で通常時の太陽放射に近い。一方、Slow成分は軟X線を主としており、これは電離圏下部のD、E層まで到達して強い電離を引き起こす。

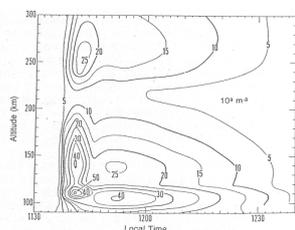


図7: 実際に観測されたフレアによるTEC変動を基に計算された電子密度増加の高度分布モデル (Donnelly et al., 1976)

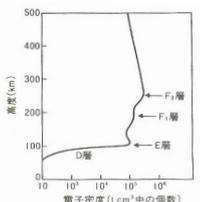


図6: 平均的な電離圏の鉛直構造 (小倉, 1999)

図7はTEC変動を基に計算された典型的なImpulsive 型フレア時の電離圏電子密度増加の高度分布モデルである。高度110km付近の増加が最も大きく、Slow成分の卓越がみられる。他に140km、260kmにもやや小さいピークがみられる。本研究では2006年12月5日に発生した大規模フレアによる電離圏電子密度の鉛直プロファイルへの影響を調べ、上記の電子密度増加の高度分布を確かめる。

### 5. 地上局観測の結果 Observational results by GPS-TEC

図8は、フレア発生時の最大X線強度が観測された2006年12月5日10:35(UT)前後のTEC変動の様子である。フレア発生に伴うSITEC(Sudden Increase of TEC)が見られるが、急激な立ち上がり無く、過去のフレアによるSITEC(Heki, 2006 図8上)と比べて非常にゆるやかである。これは前述したフレアの二種類の放射成分のうち Impulsive成分を含まない、Slow型フレアに該当する特徴である。しかし、TECの値は鉛直方向の総量を表すため、この結果だけでは高度分布まで推定することはできない。

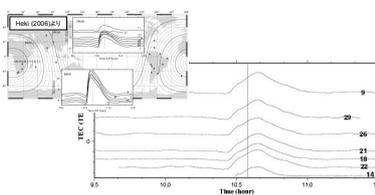


図8: 2006年12月5日フレア発生時の南アフリカGPS地上局におけるTEC変動(下)とHeki (2006)で観測された2003年10月フレアのTEC変動(上)

### 6. 掩蔽観測の結果 Observational results by GPS radio occultation

以下にGPS電波掩蔽観測による結果を示す。掲載されている掩蔽観測の電子密度プロファイルは、フレア発生の前後30分以内に地球の真上で観測された結果の一例である。また、平時時の基準としてフレア発生日の前10日間での中央値(Median)をとっている。

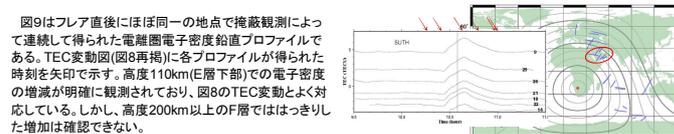


図9: フレア直後にほぼ同一の地点で掩蔽観測によって連続して得られた電離圏電子密度鉛直プロファイルである。TEC変動図(図8再掲)に各プロファイルで得られた時刻を矢印で示す。高度110km(E層下部)での電子密度の増加が明確に観測されており、図8のTEC変動とよく対応している。しかし、高度200km以上のF層でははっきりした増加は確認できない。

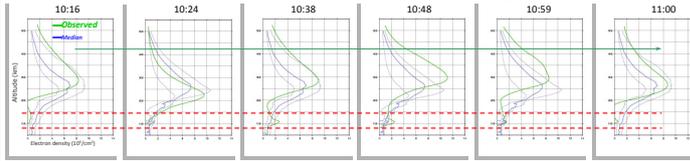


図10: 2006年12月5日10:35(UT)前後にアラビア半島上空で連続して得られた電子密度鉛直プロファイル(下段)とその観測地域(右上) TEC変動(図8)を再掲

太陽からの距離(=太陽天頂角)がほぼ同じで、緯度が異なる4地点のプロファイルと比較した(図10)。01、02が低緯度、03、04が中、高緯度でのプロファイルである。いずれの地域でも高度100-110km付近(E層)の顕著な増加は確認できる。しかし、高高度のF層は高緯度地域ではやや増加が見られるが、低緯度地域ではほとんど変化していない。基準値を見ると分かるように、太陽直下に近い低緯度では静穏時(非フレア時)の変動が元々高く、そのためフレアの影響が埋もれていると考えられる。一方低緯度地域は静穏時の変動が非常に小さく、電子密度増加が分かりやすい。

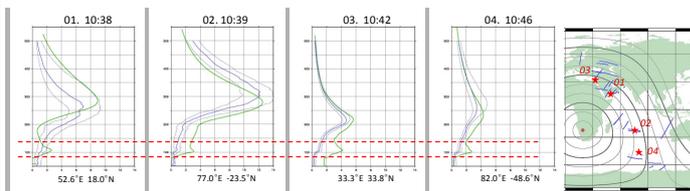


図11: フレア発生直後に地球上の様々な地域で得られた電子密度プロファイル(左)とその観測点(右)

南北それぞれの中、高緯度地域で電子密度プロファイルから基準となるMedianの値を差し引いた増加量の平均プロファイル(図11)。北半球側では110kmと180kmに、南半球側では100kmと210kmに明らかな電子密度増加のピークが見られる。また、これらのピーク高度が北半球側と南半球側で明らかに異なるものも分かる。増加量で見ても、南半球側よりも北半球側のほうが大きいという結果が得られたが、観測点が少ないうえに高高度の増加が不明瞭であるため、詳しいことは分からない。

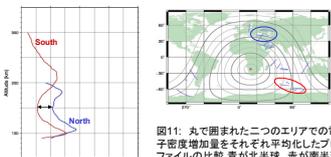


図12: 2006年12月5日フレア発生時のX線画像 NICT web pageより

### 7. 発生位置と放射成分の関係 Locations and components of flares

今回観測したフレアは①TEC上昇がゆるやかであったこと、②電子密度増加が低高度のみ卓越していたこと等から、前述のSlow型フレアに該当すると思われる。

太陽フレアは太陽表面の黒点帯で発生する。Donnelly (1976)によると、太陽フレアのImpulsive-Slow放射成分の割合はこの黒点帯が太陽面のどの位置で起こったかに依存する。太陽面の端でフレアが起こった場合、太陽大気による減衰を受けやすいImpulsive成分はそのほとんどが消失してしまう。結果、地球に到達するのはSlow成分のみとなる。図12に示す通り、今回のフレアはまさに太陽面の端で起こっているのが分かる。

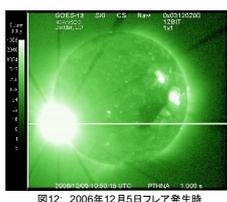


図12: 2006年12月5日フレア発生時のX線画像 NICT web pageより

### 8. まとめ Summary

・GPS電波掩蔽観測の電離圏電子密度プロファイルから、従来の地上型のTEC観測では求められなかった太陽フレアに伴う電子密度増加の高度分布を得ることができた。地上局観測のTEC変動と電子密度鉛直プロファイルの増減は比較的良好に対応している。

・地上局TEC観測のデータを見ると、今回のフレアは急な立ち上りの無いゆるやかな変化をしている。掩蔽観測の電子密度プロファイルで見ても、Slow成分由来の低高度の増加は確認できたが、Impulsive成分由来の急激な増加は見られなかった。これらの結果からフレアがSlow型フレアに当てはまることが分かった。この結果は太陽面上での発生位置の影響をよく反映している。

・緯度の異なる4地点のプロファイルを見ても、E層の増加は確認できるがF層の増加は不明瞭ではないという結果であった。中、高緯度地域では静穏時の電離圏が非常に安定しているため、太陽フレアによる電子密度増加の観測に適しているといえる。

・北側と南側で基準値を差し引いた電子密度増加量のプロファイルを求めた。いくつかの観測の平均プロファイルから明確な電子密度増加のピーク高度が得られた。また、地域によって電子密度増加のピーク高度が異なるという結果が得られたが、これが南北の違いなのか、緯度帯によるのか、局所的な違いであるのかは本研究の段階では分からない。

・掩蔽観測を用いた本研究で、今まで観測されなかった太陽フレアの特徴を示すデータを得ることができたが、まだまだデータ量が不十分である。今後、大規模フレアの発生が増加するにつれて観測データが充実すれば、より詳細な解析が可能となるだろう。

### 9. 参考文献 References

[1] R. F. Donnelly (1976), Empirical Models of Solar Flare X Ray and EUV Emission for Use in Studying Their E and F Region Effects, JGR, 81, 4745-4753, 1976  
[2] R. F. Donnelly, K. Davies, R.N. Grubb and R.B. Fritz (1976), F Region Enhancements Induced by Solar Flares. The Geophysical Use of Satellite Beacon Observations; Proceedings of the Symposium, Boston, Mass., June 1-4 1976. 345-359, 1976  
[3] E. R. Kursinski, G. A. Hajj, T. Schofield, R. P. Linfield, K. R. Hardy (1997), Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, JGR, 102, 23,429-23,465, 1997  
[4] 日置孝介 (2006), 太陽フレアに伴う電離圏全電子数上昇のGPS観測, 測地学会誌, 52,319-328,2006.  
[5] CDAAC (<http://cosmic-ic.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>)