

1. はじめに

地震や噴火などが、電離層の擾乱を引き起こすことは、すでに既知のことであり、ドップラー観測などにより、そのようにはみることができた。

近年では、GPSを用いて電離層の様子を見るのが注目されており、様々なことがわかってきている。また、電離層は太陽の紫外線によって電子とイオンに解離している領域であり、当然太陽活動に大きな影響を受けており、その日変化、季節変化、年変化などにより、常に変動している。ここでは、太陽フレア発生起因の電離層の擾乱に注目することにする。

太陽フレアにより生じた硬X線、極端紫外線(EUV: extreme ultraviolet)は電離層の中性大気をイオン化し、その電子密度を急増させる。それによって、急激な電離層障害と呼ぶべきものが多々起こる。例えば、急激な周波数偏差(SFD: sudden frequency deviation)、位相変形(SPA: sudden phase anomaly)、短波障害(SWF: short wave fadeout)、電離層全電子数の急増(SITEC: sudden increase of total electron content)などである。ここでは、GPSを用いた2004年4~7月に起こった太陽フレア発生時のSITECの観測について述べる。

2. 極端紫外線と電離層の応答

地球の表面は大気で覆われている。その密度は地表付近で約 $1g/m^3$ で、上空へ行くほど希薄になる。500kmの高度では、 10^{-12} 程度に減少する。そこへ太陽の紫外線(エネルギーの高い極端紫外線)が射すと、原子から電子が飛び出してイオンになる。この作用を電離とよび、電子とイオンからなる気体は電離ガス(プラズマ)とよばれている。電離層はプラズマ状態の大気が集まった領域のことをいう。ここでは、350kmを電子密度が最大になる高度として考えている。

極端紫外線とは何か?太陽光は人間が目で見ることのできる可視光と、それより波長の長い赤外線、波長の短い紫外線に分かれる。紫外線の中でも特に波長の短いものを極端紫外線という。極端紫外線は酸素原子や、窒素分子、酸素分子を電離する。電離によって吸収されるため地上まで届くことはない。この電離作用によって生物は有害な極端紫外線を浴びてくることがある。

また、可視光に近い、極端紫外線は太陽活動の11年周期変化で大きく変化する。太陽活動の11年周期は、図1に示した太陽のウォルフ黒点数の変化から見ることが出来る。

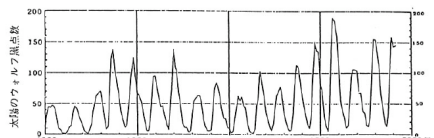


図1) 太陽のウォルフ黒点数(塚本寿, 2002)

3. 太陽フレアの2つのタイプ

太陽フレアに伴って突発的に増加する太陽軟X線(1~90Å)や極端紫外線(EUV: 90~1030Å)は電離層の電子密度を急増させるため、電離層の擾乱が発生する。この電離層の擾乱には様々な個別現象が含まれるが、ここでは、そのうちの電離層全電子数(Total Electron Content: TEC)の増加に注目する。TECは太陽放射の日変化、季節変化、年変化に応じて変動するほか、太陽放射以外の要因でも常に変動している。TECの変動は太陽放射(硬X線とEUV)が突発的に増加することに伴う現象であり、電離層擾乱の一種である。

太陽フレアは時間発展の様子から大きく2つに分けることができる。

- 1) Impulsive型フレア: フレア開始5分以内に爆発的にEUV、硬X線、マイクロ波放射を放射し終えるタイプのフレア。
- 2) Slow型フレア: 放射が5分以上の時間をかけてゆっくりと放射されるタイプのフレア。

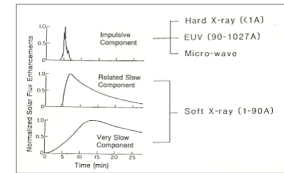


図2) Impulsive型フレアに伴う各放射成分の時間変化の模式図(Donnely 他, 1976)。

4. フレアとTECの応答

図3(a)~(c)は2004年7月25日の05:51(UT)、(d)~(f)は2004年7月14日05:23(UT)に発生したMクラスのフレアによるSITECの様子を3点に示したものである。それぞれ、緯度はM6.2, M7.1である。この図では、フレア以外の太陽活動による長周期的なTECの変動を除くために、5次多項式近似を、また、仰角補正を行っている。比べてみるとその形にそれぞれ特徴があることが分かる。7月25日のTECの変動は急激性が強いのに比べて、14日の方はゆっくりとした立ち上がりであることが分かる。これは、上で示したような太陽フレアのタイプによるものであると推測される。また、(d)の毎量29などでTECの変動が極めて鋭く観測できないのは、衛星の仰角が低いために電波が物などに反射してしまうなどの障害のためと考えられる。

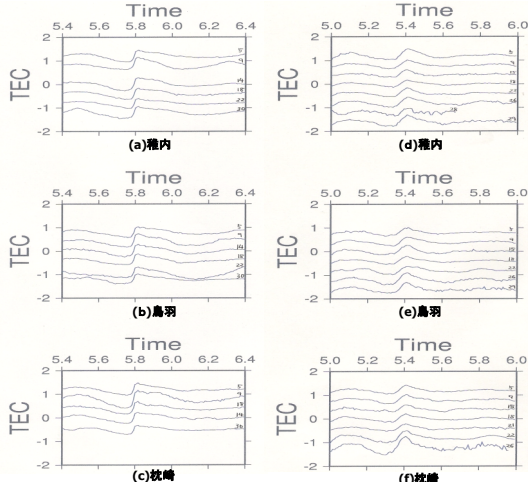


図3) (a)~(c)は2004年7月14日に発生した太陽フレアによるSITECの様子を日本にあるGPS局を用いて、観測した図(番号はGPS衛星番号)。(d)~(f)は7月25日のフレアによるもの、5次多項式近似をし、仰角補正を行っている。(TimeはUTで、0.1=6min)

5. TECの変動とLocal Timeの相関関係

電離層のTECは太陽の天頂角に依存する(太陽が真上にあるときに最大)。それは、SITECの大きさに比例するはずである。なぜなら、同じ割合で電離層が薄むとしたら、ベースの値が大きい方が、TECの変動が大きいためである。ここでは、稚内(北海道)、島羽(三重)、秋崎(鹿児島)の三点のGPS受信機とフレア発生時に観測可能なあつたいくつかのGPS衛星のペアを用いて、TECの変動を観測。その大きさを三点の電離層で比較してみることにした。

ここでは、フレア発生時のSITECの大きさを、フレア発生時のTEC変動の最大値とその5分前のTECの値との差を用いて表すことにした(図4)。また、一つのGPS衛星ペアに対して、各GPS衛星上のペアでみた観測値を平均した。例として、ここでは、2004年7月25日05:51UTに発生したM7.1のフレアの場合を示した。

図4はいつかの太陽フレアについて、フレア発生時の稚内、島羽、秋崎の三点のLocal TimeにおけるSITECの大きさを比較し、その大きさを円の大きさとして表したものである(5つの円を1セットとして、ある一つのフレアに対するSITECの大きさをそれぞれのLocal Timeでの比較している)。太陽は真上から昇ってくるので、左から秋崎、島羽、稚内の順でSITECの大きさを表している。2004年7月17日07:57(UT)に発生したフレアに注目して見ると、SITECとLocal Timeとで述べたような相関関係が見られる。しかし、太陽の天頂角とSITECの相関関係をグローバルな視点で論議するには、この3点での観測では情報が足りない。

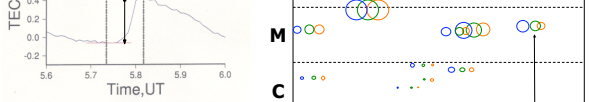


図4) SITECの大きさを取り方を示した例。右の破線は電子密度が最大になったときの時間。左の破線はその5分前の時間を表している。ここでは、そのときの差をSITECの大きさとみなすこととする。(Timeは0.1=6minである)

Magnitude TEC変動0.5TEUの時の円の大きさ

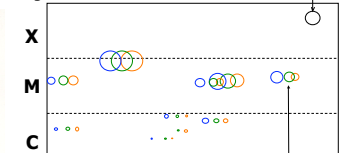


図5) SITECの大きさとLocal Timeとの関係を稚内(45.4°N, 141.2°E)、島羽(34.5°N, 136.8°E)、秋崎(31.2°N, 130.2°E)の三点での観測値を用いて比較した図。

6. フレアに固有の波形

太陽フレアによる電離層擾乱の観測値(TEC変動を時間積分したもの)とフレア発生時の硬X線やEUVの観測値の間に強い相関があることは、Matsoukas et al(1972)などですでに言及されている。しかし、その詳細については当時の技術では観測することはできなかった。GOESのような太陽監視衛星を用いられるようになってからは、フレア発生時のX線や紫外線の観測値を得ることが可能になった。

わたしたちは2004年7月15日01:41(UT)のX1.8クラスのフレア、また7月25日05:51(UT)のM7.1のフレア発生時の電離層のTEC変動をそれぞれ観測してみた(図6, 7)。ただし、サンプリング比は通常の30秒に1回である。TEC変動は見ることはTEC変動が分かれば容易で、30秒ごとのTECの変化量(TECU)をその時間差で割ればよい。

2004年7月15日01:41(UT)、2004年7月25日のフレアともいづれもこの大きなimpulsiveなピークが一つ見える。さらに注目すれば25日のほうにはその立ち上がり部分に小さなピークをみとることができる。さらに詳細な観測を見るためにはより細かいサンプリング比での観測が必要である。本来であれば、このような特徴とフレア発生時のX線強度との相関関係を確かめなければならないのだが、詳細なX線強度を表す図を得ることができなかった。

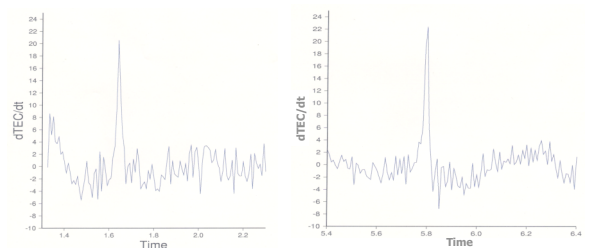


図6) 2004年7月15日に発生した太陽フレアによるSITECの時間微分を示した図。(Timeは0.1=6min)

図7) 2004年7月25日に発生した太陽フレアによるSITECの時間微分を示した図。(Timeは0.1=6min)

7. 層別解析

電離層の層別解析は興味深い研究課題の一つである。電離層は高さ領域により、自由電子の生成・減少の異なるD領域(70~100km付近)、E領域(100~150km)、F1領域(150~200km)、F2領域(200km以上)に分けられ、それぞれ反応の仕方が異なる。太陽フレアが発生したときに太陽に照らされている地球の半球の端の部分。すなわちlocal timeで言えば、日の出、日の入りの部分のGPS局での電離層の観測により、それぞれの反応の様子が見られる。

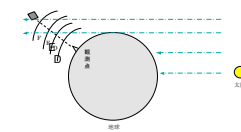


図8) GPSを用いた電離層擾乱の層別解析の概念図。

8. 考察

ここでは、日本のGPS局を用いて日本が昼間の際のTECの変動を見た。しかし、太陽天頂角による依存や南北方向の依存などを考えるには日本のGPS局だけでは非常に範囲が狭すぎることを示さない。その狭い範囲ながら2004年7月17日07:57(UT)に発生したフレアによるSITECの大きさを三点(稚内、島羽、秋崎)と比較することで、天頂角の依存を見ることが出来る。が、その信頼性は低い。

現在は、IGSのデータを容易に取得することが出来るので、それを利用してグローバルな電離層の擾乱の観測が必要であると考えられる。また、IGSのデータを用いることにより、電離層擾乱の層別解析などの可能性も出てきた。

2004年7月14日05:23(UT)、7月25日の05:51(UT)に起こったフレアによるSITECの様子をそれぞれ比較することにより、その構造に特徴があることがわかった(図3)。17日のフレアに比べると、25日のフレアによるSITECの変動は急激性が強いことが分かる。これは、太陽フレアのタイプによるものと推測される。

また、フレア発生時のTEC変動の時間積分をみると、より高いサンプリング比(通常の30秒に1回の割合)で電離層のTEC変動の時間積分を見ることが出来る。より高いサンプリング比の観測の波形を予想できるようなものという思いも膨らんだ。また、2004年7月15日、25日のフレア発生時の硬X線強度の時間積分の時系列を比較した。この二つの例でピークに目立った特徴は見られないが、Zhang and Xiao(2002)では、ピークにさらに3つのコブが見られるようなものがあることも報告されている。ここではそれに対応するGOESなどによるX線強度の時系列と比べることができなかった。しかし、過去の論文などから、その形状と観測値との相関を検出することが出来るかと推測される。

9. 参考文献

Eric Calais, J. Bernard Minster, Michelle A. Hofton & Michael A. H. Hedlin, 1998, Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements, Geophys. J. Int., 132, 192-202
小杉健郎, 1999, 宇宙プラズマの爆発・電子加速機構, 朝日新聞社, AERA WOOK 天文学がわかる, 54-57
柴崎清貴, 2002, 太陽活動におけるプラズマの果たす役割 - 新たな太陽フレアシナリオ -, 国立天文台ニュース, 103, 4-6
塚本寿, 2003, 太陽フレアによるGPS測位への影響, 東京海洋大学海洋工学部遠隔通信工学卒業論文
Zhang, D.H., and Z. Xiao, 2002, Study of the ionospheric total electron content response to the great flare on 15 April 2001 using the International GPS Service network for the whole sunlit hemisphere, J. Geophys. Res., 108(A8), 1330, doi:10.1029/2002JA009822.