

太陽フレアによる電離層全電子数
変化の定量的研究

二本柳 芳宣

**Quantitative study of the ionospheric total electron
content responses to solar flares**

Yoshinori Nihon'yanagi

北海道大学理学部・地球科学科

宇宙測地学研究室

2005年1月31日

HOKKAIDO UNIVERSITY
SPACE GEODESY 

要旨

太陽フレアによる電離層擾乱、ここではその中でも特に電離層全電子数突然増加 (SITEC: sudden increase of total electron content) と呼ばれる現象の GPS を用いた観測について報告する。SITEC は太陽フレア発生時の太陽放射の中でも特に極端紫外線 (EUV: Extreme Ultra Violet) や硬 X 線によって電離層の電離が急激に進むことによって生じる現象である。その大きさは太陽フレアの規模により異なり、例えば 2004 年 7 月 16 日 0206UT に発生した X1.3 クラスのフレアの際には、TEC 増加は最大で約 0.8TECU に達した ($1\text{TECU}=1.0 \times 10^{16}[\text{el}/\text{m}^2]$)。一般的にはフレアの X 線強度が大きくなるにつれて SITEC の大きさも大きくなるが、太陽フレアのもとになった黒点の太陽における位置や、電離層の状況、太陽天頂角などにも依存する。

ここでは、稚内 (北海道)、鳥羽 (三重)、枕崎 (鹿児島) の三点の GPS 受信局を用いて、いくつかの太陽フレア (2004 年 4~7 月) 発生時の SITEC の様子を観測した。太陽が地球の裏側 (日本に対して) にあるとき、すなわち日本が夜中の時には当然フレアによる TEC の変動は見る事が出来ない (太陽放射が届かない) ので、本研究では日本が昼間のときに発生した太陽フレアに限った。また、太陽フレアによる SITEC の大きさの Local Time への依存性を示す図を作成した。2004 年 7 月 17 日 0757UT (日本では夕方頃) に発生したフレアの様子からは、わずかながら日が沈むにしたがって SITEC が減少する傾向を確認することが出来た。

また、フレア発生時の TEC 変動比 (TEC 変動の時間微分) を見るとその波形や時定数にフレア毎に異なることが知られており、その波形とフレアの X 線強度分布の相関関係についても言及した。ここでは、2004 年 7 月 15 日と 7 月 25 日に発生したフレアの際の TEC 変動率を見た。前者後者ともに大きな一つのピークが見られた。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	GPSの基礎知識	
2-1)	GPS(Global Positioning System)	2
2-2)	GPS測位	
2-2-1)	測位原理	4
2-2-2)	測位演算	6
第3章	GPSを用いた電離層観測	
3-1)	GPSで観測できる電離層の様子	9
3-2)	GPSを用いたTEC測定法	10
3-3)	観測例	13
第4章	電離層の基礎知識	
4-1)	太陽がつくる電離層	14
4-2)	極端紫外線	15
4-3)	電離層の高さ	16
第5章	太陽フレア	
5-1)	太陽フレア	18
5-2)	太陽フレアの規模	20
5-3)	フレアのシナリオ(1)	21
5-4)	フレアのシナリオ(2)	22
第6章	太陽フレアと電離層の擾乱	
6-1)	太陽放射とTECの変動	23
6-2)	フレアと電離層の応答	24
6-3)	TECの変動とLocal Time	26
第7章	太陽フレアに起因する電離層擾乱の解析	
7-1)	層別解析	28
7-2)	非対称性	29
7-3)	フレアに固有の波形	31
第8章	終章	
8-1)	考察	34
8-2)	結論	35
8-3)	今後の課題	35
参考文献		36

第1章 はじめに

地震や火山の噴火などが電離層の擾乱を引き起こすことは以前から知られており、短波のドップラー・サウンディング観測などによって従来観測されてきた(Tanaka et al., 1984)。

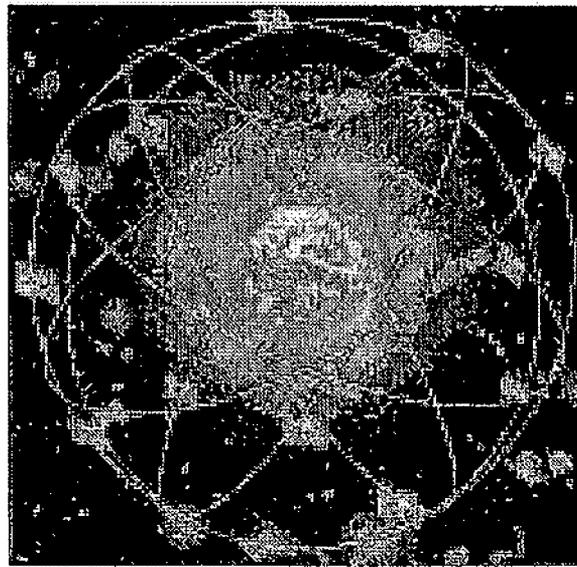
近年では、GPS (Global Positioning System, 全地球測位システム) を用いて電離層を調べることが注目されており、様々なことがわかってきている。電離層は太陽の紫外線によって大気の一部が電離している領域であり、太陽の活動度に大きな影響を受けており、日変化、季節変化、11年周期の変化などにより、常に変動している。ここでは、太陽フレアの発生に起因する電離層の擾乱に注目する。

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、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。

第2章 GPS と電離層の観測

2-1 GPS (Global Positioning System)

GPS 衛星は、地表高度約 20,000km の 6 つの軌道面に 4 個ずつ、計 24 個の衛星が投入されている(図 1)。衛星は原子時計を搭載し、L1 (1.575GHz) および L2 (1.228GHz) の 2 つの周波数の搬送波を衛星ごとに割り当てられたコード (ある周期をもったデジタル信号) で位相変調し送信している。どの GPS 衛星も同じ周波数の電波を用いているので、受信機には、コードで変調された搬送波が混信して届く。受信側では、目的とする衛星のコードを受信機内部で生成し、位相変調された信号を復調する。衛星から受信点までの電波伝播時間だけずらしたとき、信号中のコードと受信機で発生したコードのタイミングが合って変調された信号がうまく復調され、もとの搬送波が再生される。この過程を通し、混信した電波から目的の衛星の信号を取り出し、衛星から受信点までの電波伝播時間を決定することができる。これに光速を乗じ、衛星からの距離 (擬似距離) を求める。通常の単独測位では、擬似距離が観測量となる。相対測位では、2 点以上で搬送波の位相を同時観測し、後処理操作において位相差を作成する。そのため、相対測位は干渉測位とも呼ばれる。



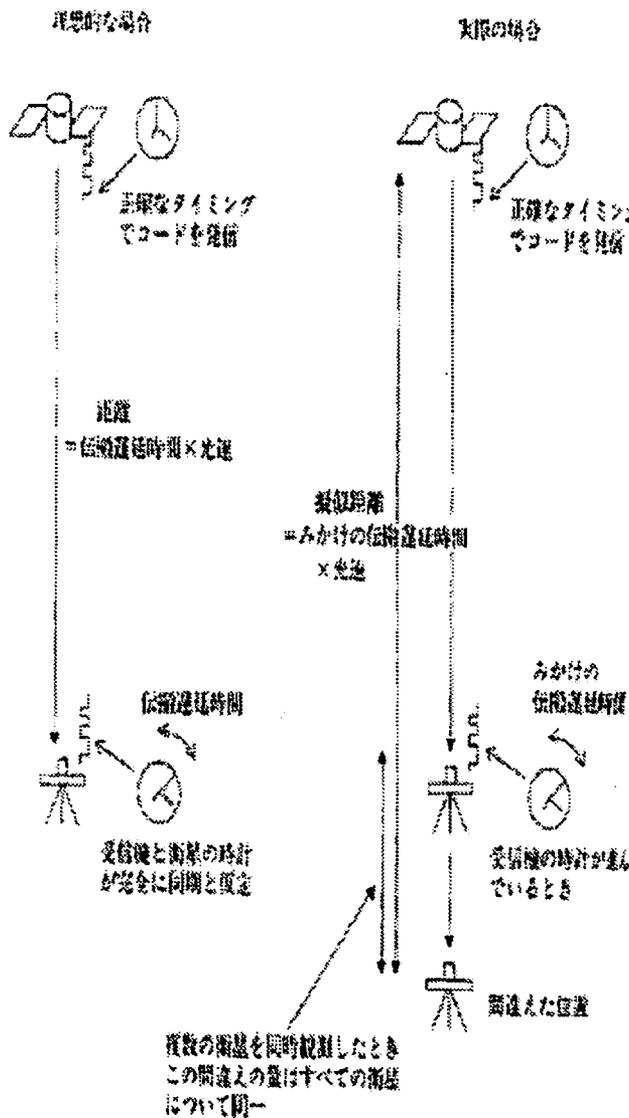
GPS衛星の配置
(Copyright © 日本測量協会)

図 1) GPS 衛星の配置図 (日本測量協会)。6 つの軌道面に 4 個ずつ、計 24 個が投入されている。

衛星は地球上の監視局によって追跡されている。各衛星は、送信電波に載せて、数時間前までの衛星の運動から予測した現在位置を放送している（放送暦）。これはリアルタイムで利用可能である。また、衛星の運行から1週間程度遅れるものの、地球上の多数の観測データから衛星が実際に運動した軌跡が精密に決定されている（精密暦）。いずれにせよ、GPS 測位では衛星位置は既知である。単独測位では、受信点は、衛星を中心に擬似距離を半径とする球面上のどこかに位置する。複数の衛星に対し同時に球面を描くと、球面が交わる点が求める受信点の位置である。相対測位では、基準点に対し、位相差の等しい点を結んだ等位相面が交わる位置が求める受信点の位置である。ただし、この場合は整数値パイアスの不確定性(ambiguity)によって複数の解の候補が存在するので、何らかの方法によって真の解を決定する必要がある。

2-2 GPS 測位

2-2-1 測位原理



GPS による測位は、利用者と衛星の距離を測定することによって行う。宇宙空間で位置の分かっている3つの人工衛星を用いることにより測位が可能になる。図2のように距離は衛星上の原子時計によって正確なタイミングで発信されている測位用の符号 C/A コードまたは P コードが受信機に到達するまでにどれだけ時間がかかったかを測定して求める。ここで、受信機の時計が衛星の時計と完全に同期していれば、その所要時間（伝播遅延時間）が分かる。しかし、現実的には受信機と衛星の時計を完全に同期させるということは、ほぼ不可能である。そこで、さらにもう一つの衛星を利用する。受信機の時計によってコードの到着時刻を測定して、形式的に伝播遅延時間を計算して距離を求める。これによって得られた距離は時間誤差と真の距離との和で、この距離のことを擬似距離 (pseudo-range) という。

測位のために使用するそれぞれの擬似距離には全て同一の受信機の時計誤差が含まれている。図3で示しているように、地球の中心を原点とした3次元座標 (x、y、z) と受信機の時計誤差 Δt の4個の未知数を解くので、4個以上の衛星

図2) コードによる距離測定 (塚寿彦、2002)

を同時か、同時とみなせるだけの短時間に測定することが大切である。

全GPS衛星は原子時計による正確なタイミングで測位用信号を発信
各衛星の位置（と速度および運動方向）は軌道情報により計算可能

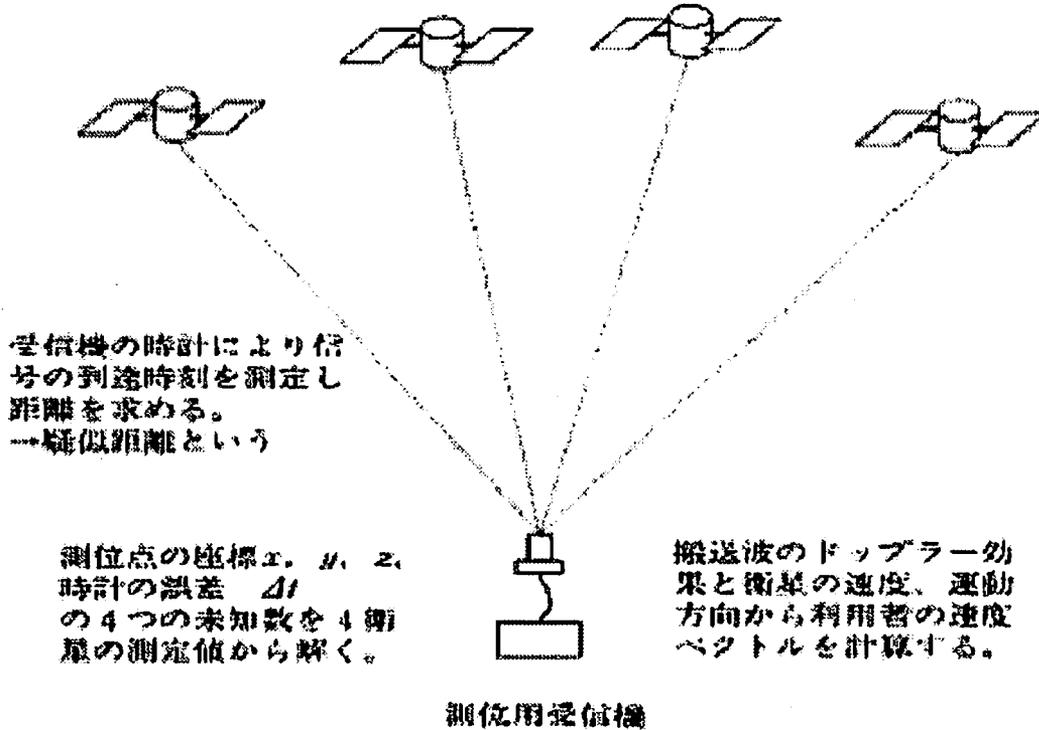


図3) 単独測位 (塚寿彦、2002)

2-2-2 測位演算

単独測位の測位計算は受信機で測定された各衛星との擬似距離をもとにして行う。4つのGPS衛星の位置は、軌道情報から計算される。ここで用いる3次元直交座標系は、地球の中心を原点、地球自転軸に沿って北方向を正方向とするZ軸、グリニッジ子午線と赤道面との交点方向にX軸、これら2軸と右手系をなすようにY軸を選ぶものとする。

この座標系で、受信局の座標を (x_0, y_0, z_0) とする。i番目の衛星の位置を (x_i, y_i, z_i) とする。観測点とi番目の衛星との距離は、ピタゴラスの定理から、

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = c \times (\tau_i + \partial \tau) \quad (2.1)$$

ここで、 τ_i は測定で得られたi番目の衛星の電波伝搬時間であり、 $\partial \tau$ は受信機の時計のずれ(正しい時刻より遅れているときを正とする)で、 c は光速であり、この式(2.1)の関係が観測している全ての衛星について成り立つ。また、観測点・衛星からの真の距離を r_{0i} とおく。

幾何学的には、 (x_i, y_i, z_i) を中心とした半径が $c \times (\tau_i + \partial \tau)$ の3球面の交点として観測点が求められる。

実際上の(2.1)式を解くことは2乗や平方根があり、容易ではない。そこで未知数を近似値と補正值の和であらわし、最小2乗法を使用して解く方法がとられる。

i番衛星と受信局位置との距離(擬似距離) r_i は、

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (2.2)$$

と表すことができる。また、未知数をその近似値と補正值の和で表すと、

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + \Delta x \\ y_n &= y_{n-1} + \Delta y \\ z_n &= z_{n-1} + \Delta z \end{aligned} \quad (2.3)$$

と表すことができ、これを式(2.1)に代入すると、

$$r_i = r_{n,i} + \frac{\partial r_i}{\partial x_i} \times \Delta x + \frac{\partial r_i}{\partial y_i} \times \Delta y + \frac{\partial r_i}{\partial z_i} \times \Delta z + s \quad (2.4)$$

となる。ここで出てくる r の x 、 y 、 z での偏微分は、次の式で表され、それぞれ衛星方向のベクトルの x 、 y 、 z 方向の射影（方向余弦）となっていることがわかる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial r}{\partial y} &= \frac{y-y_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}} \\ \frac{\partial r}{\partial x} &= \frac{x-x_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}} \\ \frac{\partial r}{\partial z} &= \frac{z-z_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}}\end{aligned}\tag{2.5}$$

ここで、それぞれを α 、 β 、 γ とおき、 $\Delta r = r_n - r_{n-1}$ とおくと、 i 番目の衛星からの擬似距離の補正值 Δr は、

$$\Delta r_i = \alpha \Delta x + \beta \Delta y + \gamma \Delta z + s\tag{2.6}$$

となり、4衛星分の4個の方程式ができる。

$$\begin{pmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \Delta r_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix}\tag{2.7}$$

具体的な計算法は、最初に x_0, y_0, z_0 を式 (2.2) に代入し近似距離 r_i を求める。実測された4衛星に対する擬似距離の差を Δr_i として、式 (2.7) に代入して Δx 、 Δy 、 Δz と s を求める。これらの値から初期値である x_0, y_0, z_0 にそれぞれ加え新しい初期値 x_0, y_0, z_0 を作成する。作成した初期値を式 (2.2) に代入し新しい近似距離 r_i を求め、新しい擬似距離との差 Δr_i を用いて新しい Δx 、 Δy 、 Δz と s を求めるという作業を繰り返すことにより、 Δx 、 Δy 、 Δz は0に収束し、これらが十分小さな値になった時点で計算を打ち切る。この時の初期値 x_0, y_0, z_0 を求めた受信局位置とする。また、 s は一定値に収束する。

また、実際の計算では、衛星は4個ではなく4個以上見えているので、(2. 7)の式の両辺に転置行列をかければよい。仮にn個の衛星が見えているとすると、

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 \end{pmatrix}, \quad \delta R = \begin{pmatrix} \Delta r \\ \Delta r \\ \dots \\ \Delta r \end{pmatrix}, \quad \delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix}$$

$$\delta R = A \cdot \delta X$$

となる。両辺にAの転置行列をかけると、

$$A^T \cdot \delta R = A^T \cdot A \cdot \delta X \quad (2. 8)$$

となる。次に両辺にAとAの転置行列をかけた行列の逆行列をかけると、

$$\delta X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \delta R \quad (2. 9)$$

となり補正值 Δx 、 Δy 、 Δz 、 s をもとめることが出来る。

第3章 GPSを用いた電離層観測

3-1 GPSで観測できる電離層の様子

電磁波は電離層を突き抜ける際に、その周期の2乗に比例した遅延を受ける。正確な位置を決定するために、GPS衛星はそれらの遅延を電離層での効果を消すように線形結合をして除去できるように、2つの異なったL-band (1.228GHzと1.575GHz) の電波を地上の受信局に向けて送信する。一方、単純に2つの周期による遅延の違いを長さで表すことにより、電離層の様子を観測することができる。具体的には、衛星と受信機の間全電子数TEC (Total Electron Content) がわかる。

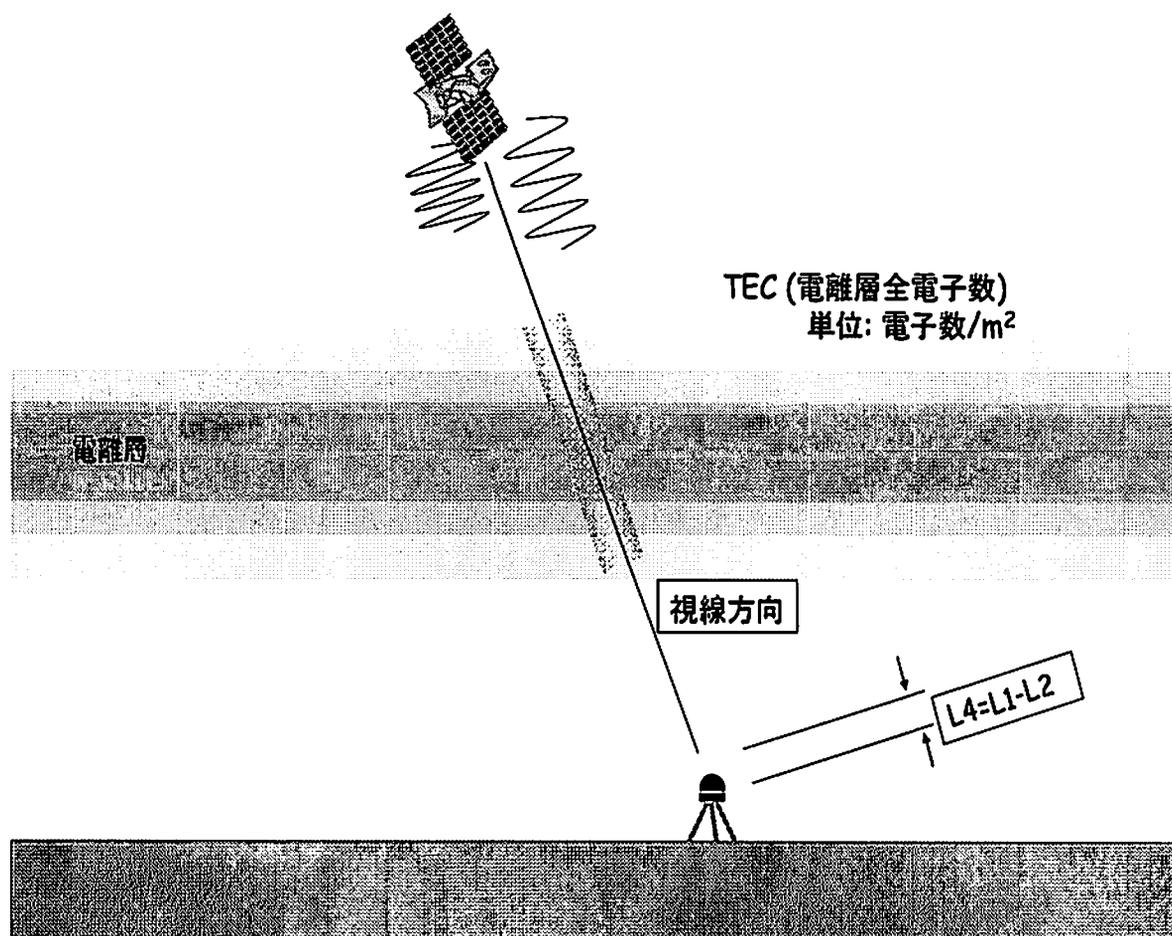
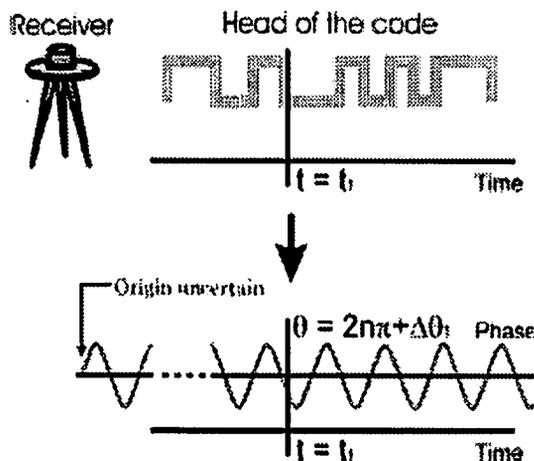


図4) GPSを用いたTEC測定の様式図

3-2 GPSを用いたTEC測定法



位相測定による距離 = 真の距離
 + 電離層での遅れ + 対流圏での遅れ
 + 整数値バイアス + 送受信機のバイアス

図5) 搬送波位相の測定 (津川卓也)

・ 搬送波の位相差を測定する

搬送波の波長 (L1:0.19m、L2:0.24m) は、搬送波に乗っている信号 (P:29.3m、C/A:293m) に比べて2~3桁程度短いので、搬送波を用いた方が測距の分解能はよい。

衛星からの信号が到着した瞬間の位相を測定することによって位相差を測定する。しかし、実質的波長の短さゆえの多重解の問題が生じる。例えばL1帯を使うと、多重解が20cmおきに現れるので、正解がどこにあるのかわからなくなるのである。これを位相不確定 (phase ambiguity) または正数値バイアス (integer bias) とよぶ。しかし、その瞬間の位相は正しいので次の2つのことが言える。

- 1) 波数の小数部分の差は本当の行路差の小数部分
- 2) 行路差の整数部分は本当かどうかわからない

位相測定をつづけていれば、波数の整数部分の繰り上がりは少数部分の変化からカウントできる。したがって一連の搬送波位相に対する整数値バイアスは一定である。しかし、電波が障害物で遮蔽される等の理由により位相測定が中断されると、その繰り上がりがわからなくなってしまう。これをサイクルスリップ (cycle slip) とよび、受信機の構造で必ず整数になる。

・ TECデータの算出

2つの周波数 f_1 (1.575GHz)、 f_2 (1.228GHz) を用いると、任意の衛星 s 、受信機 r における擬似距離 r_i 、搬送波位相による距離 L_i は以下のように表される。

$$r_1 = \rho + \sigma + I/f_1^2 + \tau_1^r + \tau_1^s \quad (2.10)$$

$$r_2 = \rho + \sigma + I/f_2^2 + \tau_2^r + \tau_2^s \quad (2.11)$$

$$L_1 = \rho + \sigma - I/f_1^2 + \lambda_1 n_1 + \varepsilon_1^r + \varepsilon_1^s \quad (2.12)$$

$$L_2 = \rho + \sigma - I/f_2^2 + \lambda_2 n_2 + \varepsilon_2^r + \varepsilon_2^s \quad (2.13)$$

ここで、 ρ は真の距離、 σ は対流圏での遅れ、 $\pm I/f_i^2$ は電離層での遅れ、 τ_i, ε_i は衛星、受信機に固有のバイアス、 $\lambda_i n_i$ は整数値バイアス (λ_i : 搬送波の波長) を表している。(i=1, 2)

電離層での遅れの項 $\pm I/f_i^2$ の定数 I は、

$$I = 40.3T \quad (2.14)$$

と表される。Tは伝播経路に沿って積分した電子密度、すなわちslant TECである。

(2.10)、(2.11)式より、

$$\begin{aligned} r_2 - r_1 &= I(1/f_2^2 - 1/f_1^2) + b_r + b_s \\ b_r &= \tau_2^r - \tau_1^r, b_s = \tau_2^s - \tau_1^s \end{aligned} \quad (2.15)$$

(2.12)、(2.13)式より、

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= I(1/f_2^2 - 1/f_1^2) + (\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2) + b_r' + b_s' \\ b_r' &= \varepsilon_1^r - \varepsilon_2^r, b_s' = \varepsilon_1^s - \varepsilon_2^s \end{aligned} \quad (2.16)$$

(2.15)、(2.16)式からslant TEC, T が求まる。

$$T = A(r_2 - r_1) - A(b_r + b_s) \quad (2.17)$$

$$T = A(L_1 - L_2) - A(\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2 + b_r' + b_s') \quad (2.18)$$

$$A = 40.3^{-1} (1/f_2^2 - 1/f_1^2)^{-1}$$

位相差から求めたslant TEC(2.18)のほうが、TECの変動をより正確に表すが、整数バイアスが含まれるため、絶対値は定まらない。そのため、TECデータにする場合には、位相差で求めたslant TEC(2.18)の値を、各衛星—受信機間の擬似距離で求めたslant TEC(2.17)の平均値で補正した値で記録されている。

測位における電離層誤差は I/f^2 ($= 40.3T/f^2$) の項で表されるので、1 TECU ($10^{16} \text{ el}/\text{m}^2$) あたり、L1帯 (1.575GHz) で約16cm、L2帯 (1.228GHz) で約27cmの誤差が生じることになる。

また、衛星—受信機間を結ぶ線と電離層との交点 (IPP : Ionospheric penetration point) が異なると、電離層を通る距離が変わり、TECの値が変わってしまうので、垂直方向に正規化しなければならない。それには、次のファクターをかけてやればよい。

$$S(el) = \frac{1}{\cos \left[\arcsin \left\{ \frac{R}{R+h} \cos(el) \right\} \right]} \quad (2.19)$$

ここで、 R は地球の半径、 h は電離層の高さ (ここでは、350kmとおくことにする)、 el は衛星軌道より出される衛星の仰角を表している。

3-3 観測例

GPSを用いたTECの観測例として、2003年十勝沖地震の際の電離層の擾乱を図6に示す。これは、地震発生時にちょうど北海道のほぼ真上を飛んでいたGPS衛星（No.24）を用いて、八戸、盛岡、鳴子（図7参照）のGPS局でTECの変動を時系列にしたものである。これに関する詳細は佐藤(2005)にまとめられている。

ただし、電離層は太陽の日周運動により、正午をピークとしてカーブを描くように変動する。ここでは、地震発生に起因するTECの擾乱のみを取り出すために、そのような長周期の変動は5次多項式近似を行うことにより除去した。

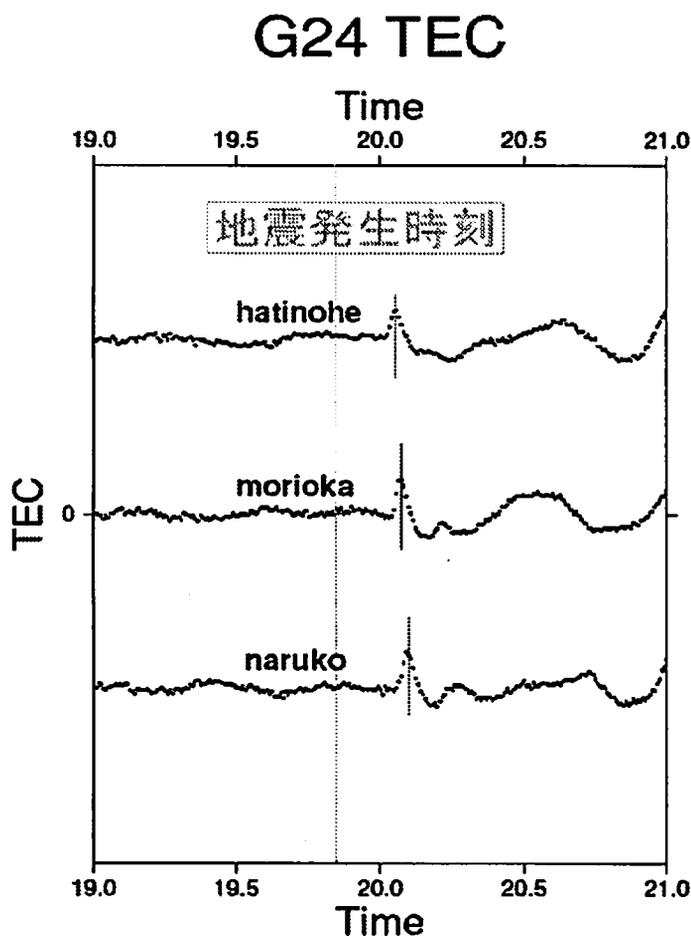


図6) 2003年十勝沖地震の際の各GPS局におけるTECの変動。Timeは世界時、単位は時間である。

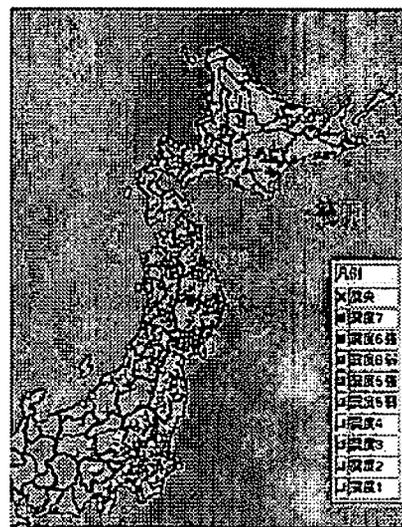
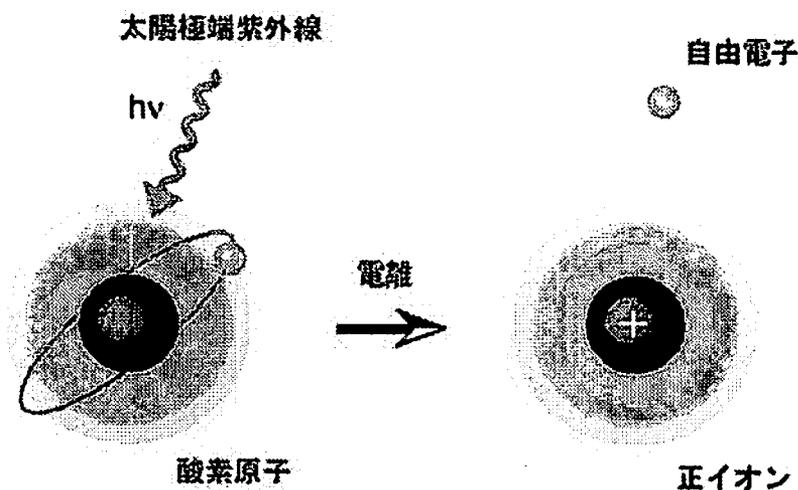


図7) 震源と各GPS局の位置関係

第4章 電離層の基礎知識

4-1 太陽がつくる電離層 (Ionosphere)

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 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 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）が入射すると、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濃くなった領域のことをいう。



CR Interpret and Radio Propagation Group

図8) 太陽極端紫外線の照射により起こる電離の概念図

(NICT、Ionosphere and Radio Propagation Group のホームページより)

4-2 極端紫外線 (Extreme Ultra Violet)

極端紫外線とは何か？太陽光は人間が目で感じ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なくてすんでいるのである。

また、可視光と違い、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9に示した太陽のウォルフ黒点数の変化から見る事ができる。

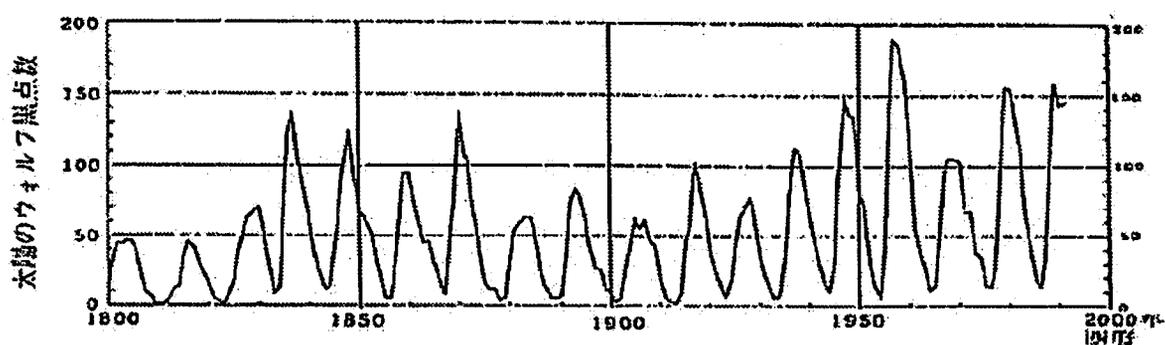


図9) 太陽のウォルフ黒点数 (塚寿彦、2002)

4-3 電離層の高さ

電離ガスのつくられる割合は、電離されるガスの濃度と電離を引き起こす極端紫外線強度の掛け算である。高度があまり高いと、太陽からの極端紫外線の強さは十分強いが、電離される気体の密度がうすくなる。そのため電離ガスはあまりつくられない。逆に、高度が下がりすぎると電離される気体の密度は高くなるが、極端紫外線は途中で吸収されてしまい、やはり電離ガスはつくられない。その結果、地上から約200kmの高さに電離層生成のピークが出来る。電離ガスは拡散して、最終的に、300km付近に電離層の最も濃くなる領域が出現する。

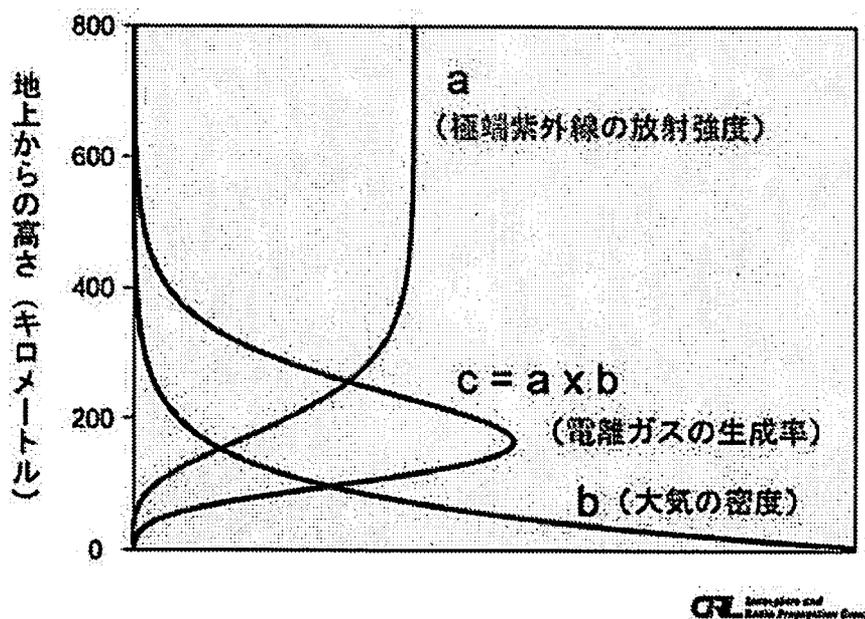


図10) 極端紫外線強度と大気の密度から見た電離ガスの生成率のグラフ
(NICT、Ionosphere and Radio Propagation Groupのホームページより)

電離層は高さにより、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) に分けられる。D領域は夜になると消滅し、二つのF領域は合体する。

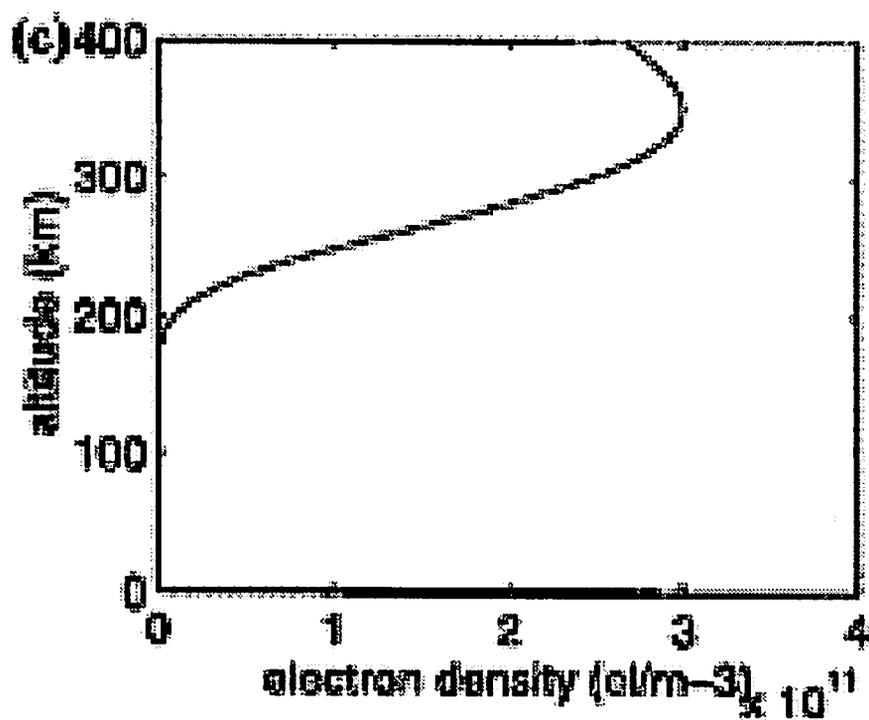


図11) 電子密度の高度分布を表したグラフ
(Calais et al, 1998)

5-1 太陽フレア

太陽の光球面（肉眼で見える太陽の表面）は約六千度で、水素原子の一部が電離しており、電流が流れやすい状態になっている。以下に太陽フレアの基礎的な事柄に関して小杉(1999)を参考に解説する。

光球面には粒状班と呼ばれる細かな粒々模様が一樣に広がり、光球面直下に対流層があることを示している。また、比較的大きな暗いスポット（黒点）が目につく。対流圏でのダイナモ作用によって作られた磁力線の束が浮上し、光球面を横切ると、その切り口が黒点となって見える。

黒点が暗く見える理由は、電磁流体力学によると、電気を流しやすい流体は磁力線を横切ってはいけない。そのため、強い磁力線があると、流体は磁力線の向きにそってしか動けず、自由な対流運動が妨げられる。

その結果、太陽内部からの熱の輸送の効率が下がり、黒点の温度は四千度以下にしかならず、六千度の周囲と比べると明るさが1桁ほど暗くなると考えられている。

それでも、流体の流れがまったくなくなってしまうわけではない。磁力線をひきずっての流れ、というものがあろうからである。実際、黒点やその周辺を観察すると、新しい磁場の浮上にともなつての黒点の誕生や運動が容易に見出せる。光球面下では基本的には流体の流れこそが支配者であり、磁場はその副産物としてダイナモ作用で作られひきずられるものである。

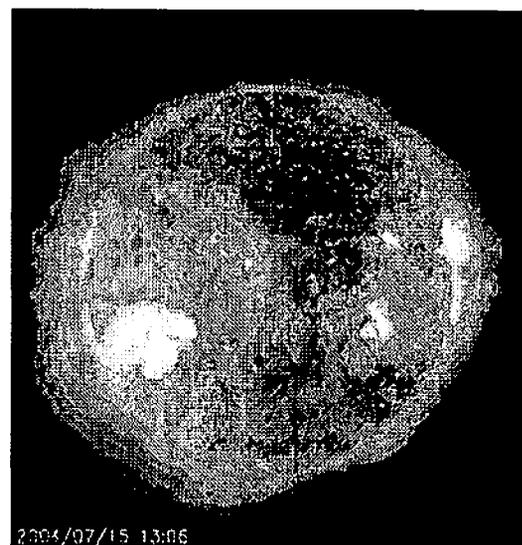


図12) 太陽フレア発生時の写真
(NICTの宇宙天気ニュースによる)

しかし、光球面を突き抜けてコロナに達した磁力線は、光球面下とは異なり、希薄な大気を圧

倒的に支配する存在である。また、磁力線は光球面に根ざしているため、複雑な磁場構造がコロナ中にできあがることはまれなことではない。

このようなプラズマ流体と磁場との複雑なせめぎあいのなかで、太陽フレアが発生する。太陽フレアは、黒点群の近くのコロナで起こる磁気プラズマ流体の爆発的エネルギー解放現象で、周辺の太陽コロナを数千万度に熱するとともに、電子やイオンを超高エネルギーにまで加速し、大量の太陽フレア粒子（太陽宇宙線）を作り出す。巨大なプラズマの「雲」を噴出して、惑星空間に衝撃波を形成することもある。

5-2 太陽フレアの規模

太陽フレアの規模を表すものとして、太陽フレアにより放射されたX線強度を表す「X線クラス」と、太陽表面の上層の彩層にある水素原子が出す輝線である $H\alpha$ 線の観測から定義されている「光学重要度」がある。ここでは、X線クラスに注目して述べることにする。

X線クラス : アメリカの気象衛星GOES (Geostationary Operational Satellite) によって常時モニターされている波長1~8 Åの軟X線の強度観測によって、強い順にX,M,C,B,Aのようにクラス分けされる。静穏時にはその強度は $10^{-7}[W/m^2]$ 程度であるが、大規模フレアが発生したときには 10^{-5} (Mクラス) から 10^{-4} (Xクラス) まで増加する。MクラスやXクラスのフレアでは、GPSを用いることによって、顕著なTECの増加(SITEC)を見ることが出来る。

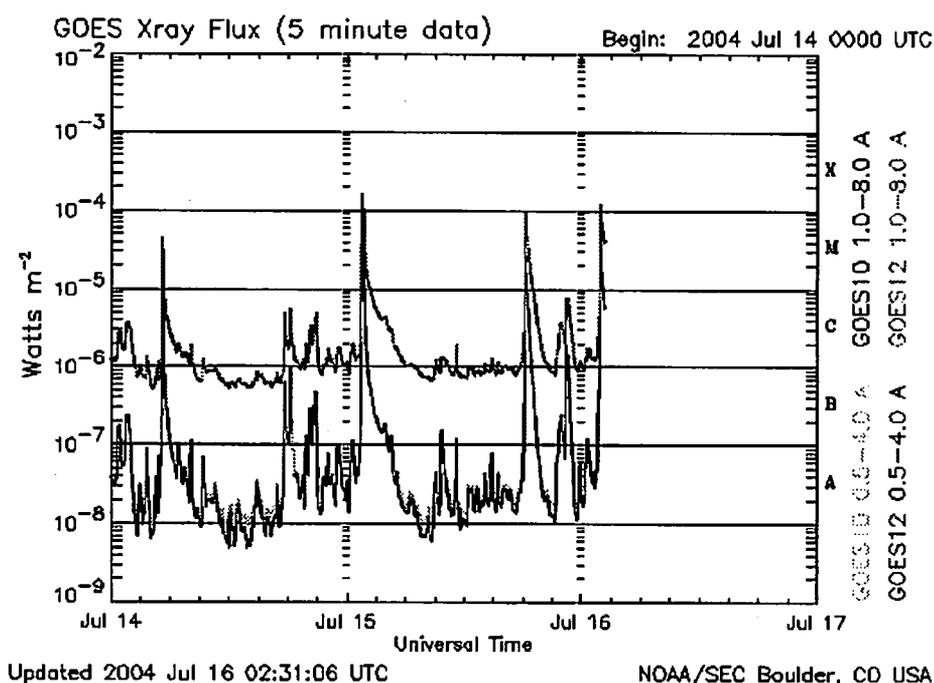


図13) GOESで見たX線強度のグラフ例。Jul15には二回Xクラスのフレアが起こっていることがわかる。(NICT宇宙天気ニュースより)

5-3 フレアのシナリオ (1)

太陽フレアの本質は「無衝突プラズマ中での磁気再結合」であるという仮説が現在では有力である。それは、コロナ中で反対向きの磁力線が互いに押し付けられると、間に強い電流が流れる薄い層ができ、そしてここを流れる電流が散逸するような状態が出現すると、反対向きの磁力線がいったん切れて相手方と結びつき(図14)、その際に磁場の歪みのエネルギーが粒子のエネルギーに転換される、というものである。

太陽の縁で起きたフレアを軟X線で観測すると、先端の尖ったカスプ状のループを見ることが出来る。図15のなかで光っているのが軟X線をだしているところで、これはフレアによって生じた高温のプラズマである。ループの形は磁力線の形を表しており、尖っている先端では、磁力線のつながり替え(磁気再結合、磁気リコネクション)が起こっていると考えられている。

しかし、この説には大きな問題点がある。どうやって逆向きの磁場と大面電流を用意するのかということである。この電流のエネルギーは、フレアで解放するエネルギーの総量以上であるはずで、フレアが発生する直前までどうやって安定に蓄積するかが問題である。

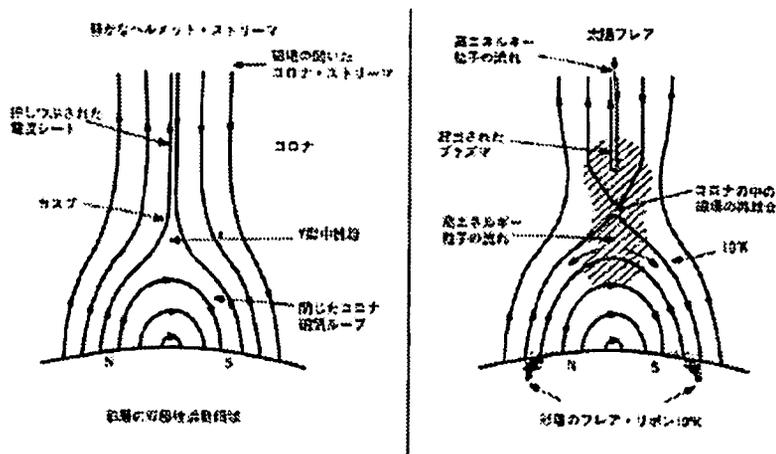


図14) 磁気再結合の概念図 (太陽の活動現象)

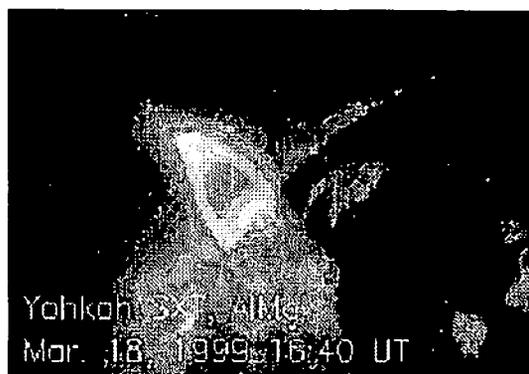


図15) 「ようこう」によって軟X線で見た太陽フレア (太陽の活動現象)

5-4 フレアのシナリオ (2)

(1) のシナリオに対して、異なる仮説がある。それは次のようなものである。すでに核融合プラズマ実験ではよく知られている現象を応用したもので、「高ベータプラズマ崩壊」理論と称するものである(柴崎, 2002)。フレアのエネルギー源は電流(磁場)ではなく、閉じ込められたプラズマの持つエネルギーだというものである。

太陽表面の重力は大きいにもかかわらず、表面のいたるところで重力に抗して大気が噴き出しており、さまざまな名前で呼ばれている。噴き出す際に加熱や粒子加速が伴う場合がある。その大規模なものがフレアである。太陽表面にはいたるところに磁場があり、曲がったループ状をしている。このループにプラズマが詰まると、電気を帯びた粒子はループに沿った運動しか出来ないため、大きな遠心力が発生し、この遠心力が重力や磁場の張力を超えると上空にプラズマが噴き出すという単純な原理である。この理論では磁場はエネルギー源ではなく、プラズマの熱運動や流れを遠心力で上昇運動に変換する触媒の役割をはたす。これにより、コロナ加熱などの謎が説明できるようになる。詳細は柴崎(2002)を参照のこと。

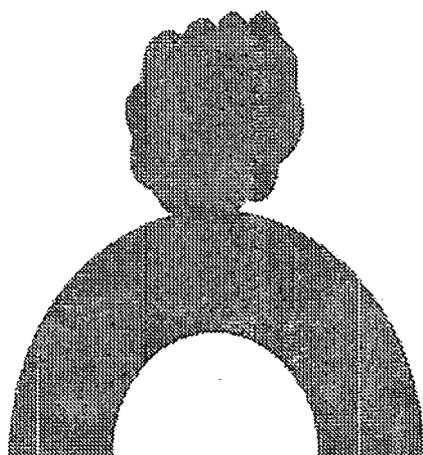


図 16) 磁気ループ頂上から高ベータプラズマによってプラズマ雲(バルーン)が上昇する概念図。(柴崎、2002)

第6章 太陽放射と電離層擾乱

6-1 太陽放射とTECの変動

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、そのうちの電離層総電子数（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。太陽フレアに伴うTECの増加は太陽放射（硬X線とEUV）が突然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。以下に小川（未発表資料）に基づいてそれらの基礎的な事柄について解説する。

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、マイクロ波電波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。

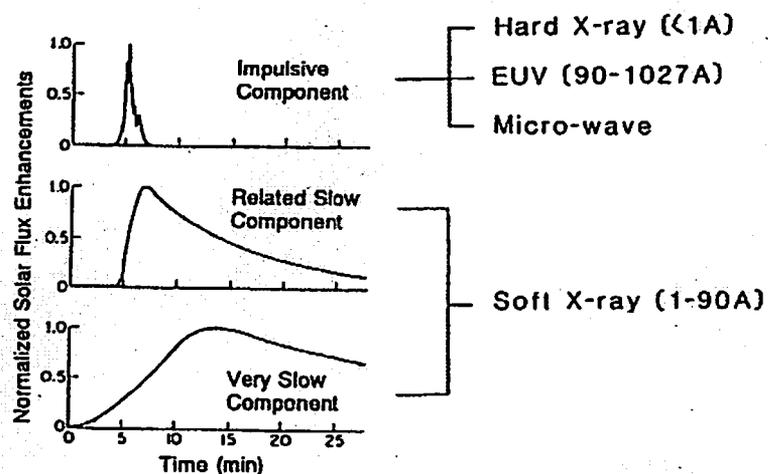


図 17) Impulsive 型フレアに伴う各放射成分の時間変化の模式図 (Donnelly, 1976)。

“Impulsive Component” は 1 Å 以下の硬 X 線、90-1027Å の EUV、マイクロ波帯電波を

含み、これらがほとんど同じ時間プロファイルで数分以内に消費される。Impulsive Component が止んだ頃に最大に達する“Related Slow Component”と、フレア開始前から徐々に始まる“Very Slow Component”は1-90Åの軟X線を主とするが、EUVも含む。一方、Slow型フレアでは急始相がなく、また各放射成分について明確な対応関係が見られない。

太陽フレアによる電離層の擾乱にはさまざまな種類がある。代表的なものとしては、短波障害(SWF: short wave fadeout)、突然位相変形(SPA: sudden phase anomaly)、そして電離層全電子数の突然増加(SITEC: sudden increase of total electron content)などである。SWF、SPAなどは電離層の中でも特に、D,E領域の部分の擾乱により発生し、SITECは主にF領域の部分の擾乱に起因することが知られている。このような対応関係から、ここで注目しているGPSによるSITECの観測は太陽フレア発生時のF領域の応答の様子を研究する上で、重要な指標となりそうである。

6-2 フレアとTECの応答

フレアはその規模により、クラス分けされている(5-2参照)。その規模の大きさに伴い、当然のようにSITECの大きさも変化する。

基本的には、X線強度が大きければTECの擾乱が大きく、X線強度が小さければTECの擾乱は小さいが、発生したフレアの太陽における位置などにも依存するため単純には言い切れない。まず、筆者が見出した2004年4~7月に発生した太陽フレアに起因するSITECのGPSによる観測例をいくつか示すことにする。観測点(ここでは、北海道、三重、鹿児島)が夜だとTECの変動を見ることはできないので、図18は日本が昼間のときのデータに限っている。

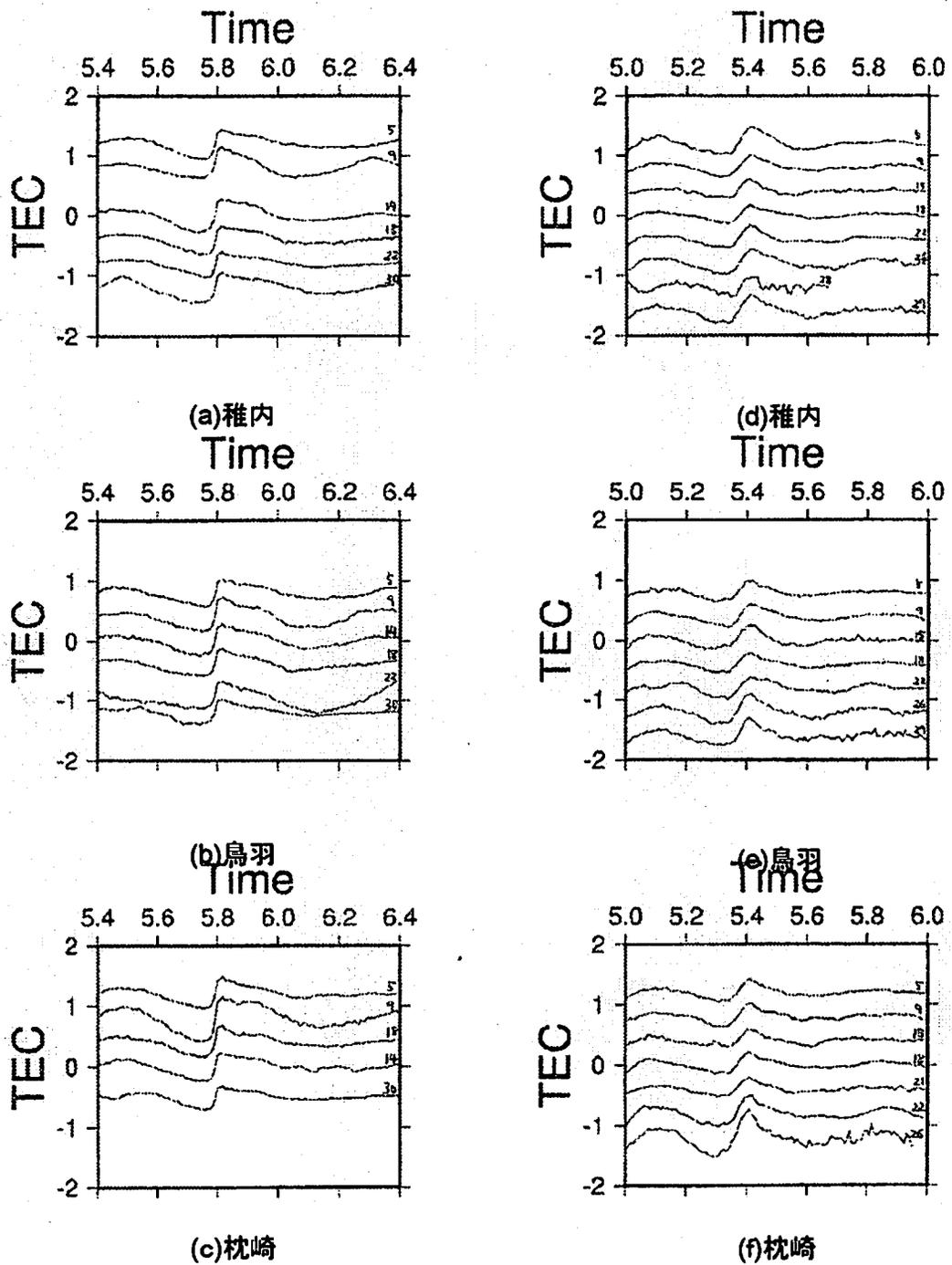


図 18) (a)~(c)は 2004 年 7 月 14 日に発生した太陽フレアによる SITEC の様子を日本にある GPS 局を用いて、TEC の時間変化として観測したもの (番号は GPS 衛星番号)。(d)~(f)は 7 月 25 日のフレアによるもの。5 次多項式近似をし、仰角補正を行っている。(Time は UT で、0.1=6min)

6-3 TEC の変動と Local Time

電離層の TEC は太陽が真上にあるときに最大値をとる。それは、SITEC の大きさにも現れるはずである。なぜなら、同じ割合で電離が進むとしたら、ベースの値が大きい方が、TEC の変動が大きいからである。ここでは、稚内（北海道）、鳥羽（三重）、枕崎（鹿児島）の三点の GPS 受信局とフレア発生時に観測可能であったいくつかの GPS 衛星のペアを用いて、TEC の変動を観測して平均値を出し、その大きさを三点の受信局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 19)。また、一つの GPS 受信局に対して、各 GPS 衛星と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 0551UT に発生した M7.1 のフレアの場合を示した。

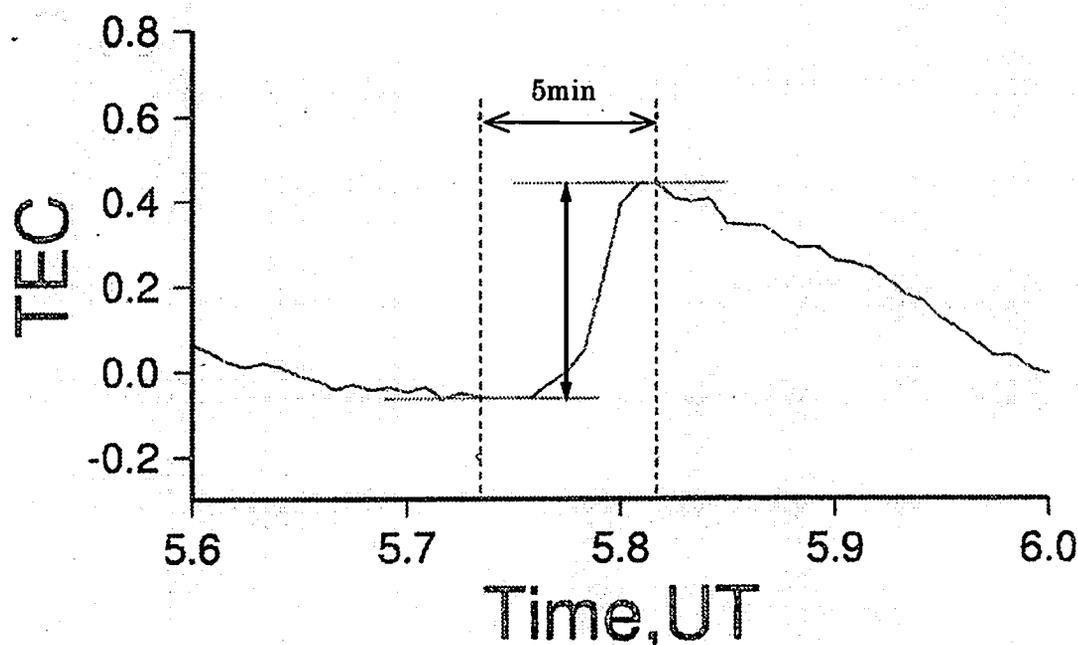


図 19) SITEC の大きさの取り方を示した例。右の破線は電子密度が最大になったときの時間。左の破線はその 5 分前の時間を表している。ここでは、そのときの差を SITEC の大きさとみなすことにする。(Time は 0.1=6min である)

図 20 はいくつかの太陽フレアについて、フレア発生時の稚内、鳥羽、枕崎の三点の Local Time における SITEC の大きさを比較し、その大きさを円の直径として表したものである（3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）。ある瞬間でのローカルタイムは西の局ほど遅いので、左から枕崎、鳥羽、稚内での SITEC の大きさを表している。2004年7月17日 0757UT（日本では夕方頃）に起こったフレアに注目して見ると、SITEC と Local Time に、太陽が既に沈みつつある東の局ほど擾乱が小さいという相関関係が見て取れる。しかし、太陽の天頂角と SITEC との相関関係をグローバルな視点で論議するには、この3点での観測では幅がやや狭すぎる。

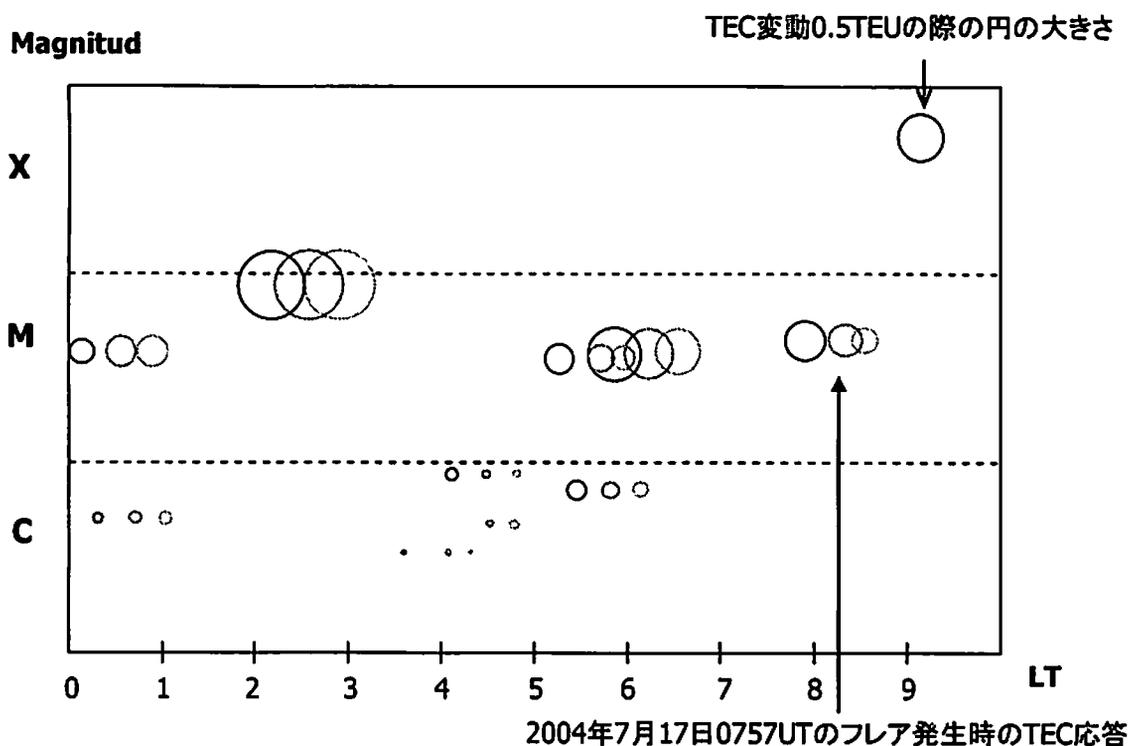


図 20) SITEC の大きさと Local Time との関係を稚内 (45.4° N, 141.2° E) , 鳥羽 (34.5° N, 136.8° E) , 枕崎 (31.2° N, 130.2° E) の三点での観測値を用いて図にした。

第7章 太陽フレアに起因する電離層擾乱の解析

太陽フレア発生に伴って電離層の擾乱が生じるが、中でも電離層全電子数の突然増加 (SITEC) に関して将来の研究テーマとして興味深いと思われる課題がいくつかある。

7-1 層別解析

太陽フレアの発生に伴って TEC が上昇することがわかっており、その大きさ等は、GPS などを用いて詳しく観測することが出来る。

しかし、電離層は低い方から D,E,F1,F2 層という異なった領域に分かれており、それぞれのフレアへの反応が異なることが予測される。太陽フレアによる SITEC において、どの領域が全体の TEC 上昇にどれだけ貢献しているかを調べることは興味深い研究課題である。

これを調べる方法として、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 で日の出や日の入りに相当する GPS 局での電離層の観測が有効であろう。日が沈んでいくと電離層の太陽に当たっている部分が下から減っていく。先に D 層、次に E 層、そして F1 層、F2 層の順番である (図 21 参照)。これにより、F2 層だけが太陽に照らされているときの TEC の変動等を取り出すことができる。こういった手法によって Leonovich et al(2002)は、2000 年 7 月 14 日に発生したフレアで、電離層の 300km 以上の領域が TEC の変動全体に最大 25%の貢献をしていることを確認した。

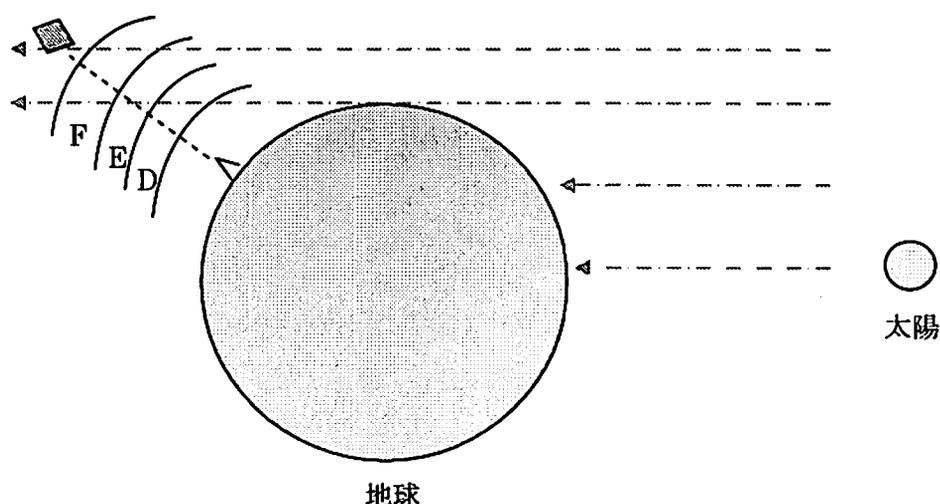


図 21) 日の出、日の入り境界での TEC の測定の概念図。この図の場合は電離層の中でも、E 層より上の領域の TEC 変動のみを観測することが出来る。

7-2 非対称性

太陽フレア発生時の TEC 変動が午前と午後 (local time)、又は、南北方向で非対称性を示すという説がある。Matsoukas et al(1972)によると、フレアによる SITEC は早朝 (local time) に小さいという。例えば、午前・午後でそれぞれ 12 回太陽フレアを観測したとき、午前は 3 回しか SITEC を検出できなかったのに対して、午後は 7 回検出することが出来たというものである。

Zhang and Xiao(2002)は、北緯 30~45° にある IGS (International GPS Service) の GPS 受信局で観測された SITEC の値を用いて、二つのフレアの際の SITEC の値について上で述べたことを確かめた。その結果 1997 年 11 月 6 日に発生したフレアの際の TEC 変動において、正午を境にはっきりとした非対称な特徴を、また 2000 年 7 月 14 日に発生したフレアの際においても、正午を境に 1997 年 11 月 6 日の場合よりは弱い非対称な特徴を見出した(図 22 参照)。しかし、1997 年 11 月 6 日の午前の SITEC は午後よりも午前の方が大きく、Matsoukas et al(1972)の結果とは一致しなかった。

Matsoukas et al(1972)が述べているように、このような不一致の原因としては、太陽の天頂角だけでなく、フレア発生の瞬間における TEC の絶対値や電離層内の中性子・電子の分布などがフレアによる TEC 上昇に影響しているのではないだろうか。フレアに対するグローバルな電離層の応答の特徴を理解するためには、フレア発生時の中性大気の組成のグローバルな分布も考えたさらなる研究・解析が必要であろう。

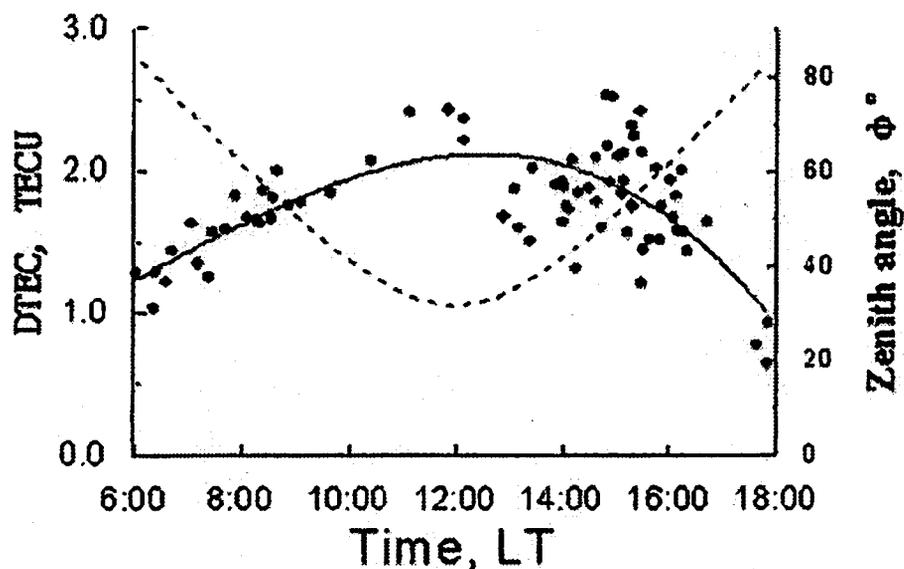


図 22) 北緯 30~45° に位置する GPS 局を用いて観測した TEC の増大を表す図 (Zhang et al., 2003)。破線は北緯 40° , 1330UT における太陽の天頂角を示したもの。ここでの緯度は視線方向が電離層を突き抜ける点の緯度をいう。

また、この Zhang and Xiao(2003)では南北方向の非対称性についても 2000 年 7 月 14 日のフレアの観測結果から言及している。結果としては、等しい天頂角においては南半球のほうが北半球と比べて SITEC の値が幾分大きい傾向が得られた (図 23)。これは、7 月 14 日においては、北半球が太陽方向に傾いている (地軸の傾き) ことによるものと思われる。

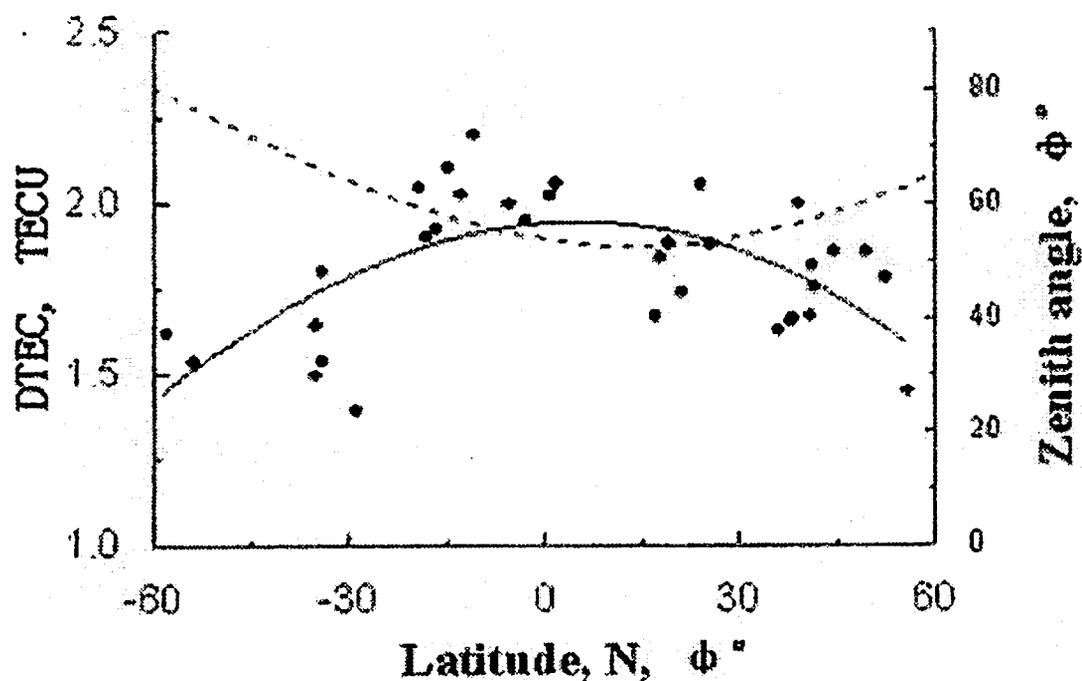


図 23) 0800~0900 (LT) 帯の南北方向の TEC の増大を表す図 (Zhang et al, 2003)。破線は 0830UT の太陽天頂角を表している。

7-3 フレアに固有の波形

太陽フレアによる電離層擾乱の変動比 (TEC 変動を時間微分したもの) とフレア発生時の硬 X 線や EUV の変動の間に深い関係があることは、Matsoukas et al(1972)などに示唆されている。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 線や紫外線の詳細な時間変化を観測することが可能になった。

Zhang and Xiao(2003)は、2000年4月15日に発生したフレアの際の TEC 変動の比を図にし、GOES や「ようこう」によって観測された X 線強度との関係を調べている。

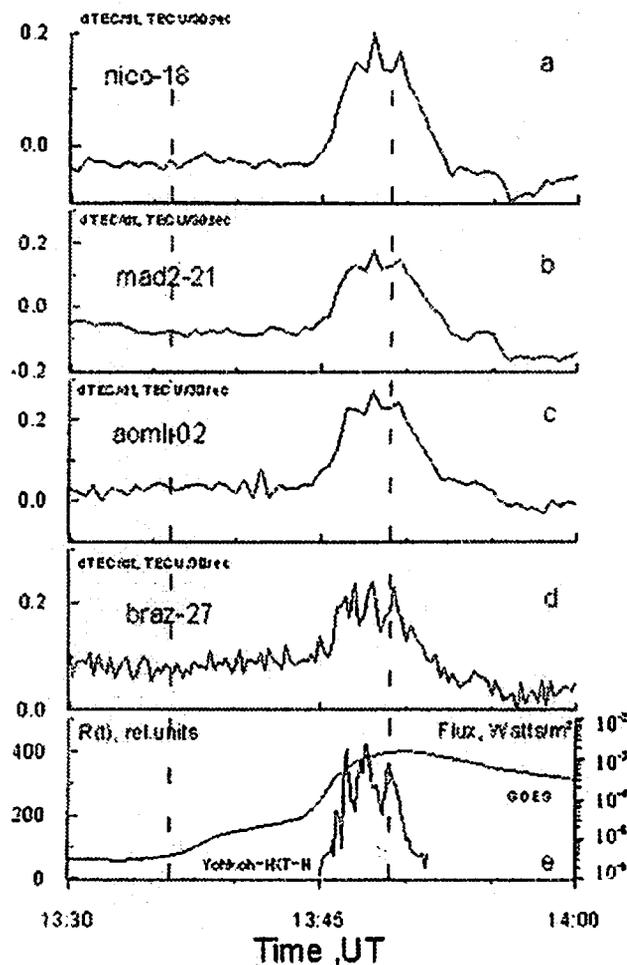


図 24) TEC の変動比と X 線観測値との比較
(Zhang and Xiao, 2003)

図 24 では TEC 変動の比と軟 X 線には相関関係は見られないが、ようこうで観測された硬 X 線との間にははっきりとした相関関係が見られた。また、Afraimovich et al.(2001)で指摘されているように、GPS のサンプリング間隔が通常 30 秒に 1 回であることは、SID (sudden ionospheric disturbances) の構造の詳細な解析にふさわしいとはいえない。そこで、図 24 d では間隔を 15 秒としてより詳細なデータを取っている。a,b,c の山では三つのピークを見ることが出来るが、d をみると最初のピークがさらに二つに分かれていることが見え、それらはようこうで見た硬 X 線の形と一致している。1352UT 以降の硬 X 線のデータはないが、d の 1354UT 付近で見られるような擾乱に対応した硬 X 線の反応が見られると予測できる。

図の中の nico は 35.14° N, 33.3° E、mad2 は 40.43° N, 355.75° E、aomli は 25.73° N, 279.84° E、braz は -15.95° N, 312.12° E の観測点であり、その横の数字は GPS 衛星番号をあらわしている。

また、図 24 の(e)は GOES(wave length=1—8Å)とようこう (53—93Kev の band)で観測された X 線強度の時系列である。

本研究でも同様に 2004 年 7 月 15 日 0141UT の X1.8 クラスのフレア、また 7 月 25 日 0551UT の M7.1 のフレア発生の際の電離層の TEC 変動率をそれぞれ図にしてみた(図 25,26)。ただし、サンプリング比は通常の 30 秒に 1 回である。TEC 変動率を見ることは TEC 変動が分かっているならば容易で、30 秒ごとの TEC の変化量 (TECU) をその時間で割ればよい。赤の点線は TEC の変動を表している。時間微分を見ることでより詳細な構造をみることができる。

2004 年 7 月 15 日、2004 年 7 月 25 日ともにひとつの大きなピークをもつことがわかる。さらに細かくみれば、25 日のほうには大きなピークの立ち上がり部分に小さなピークが見られる。このような構造はサンプリング比をあげることにより、より詳細な様子を見ることができる。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ねばならないのだが、詳細な X 線強度を表す図を得ることができなかった。

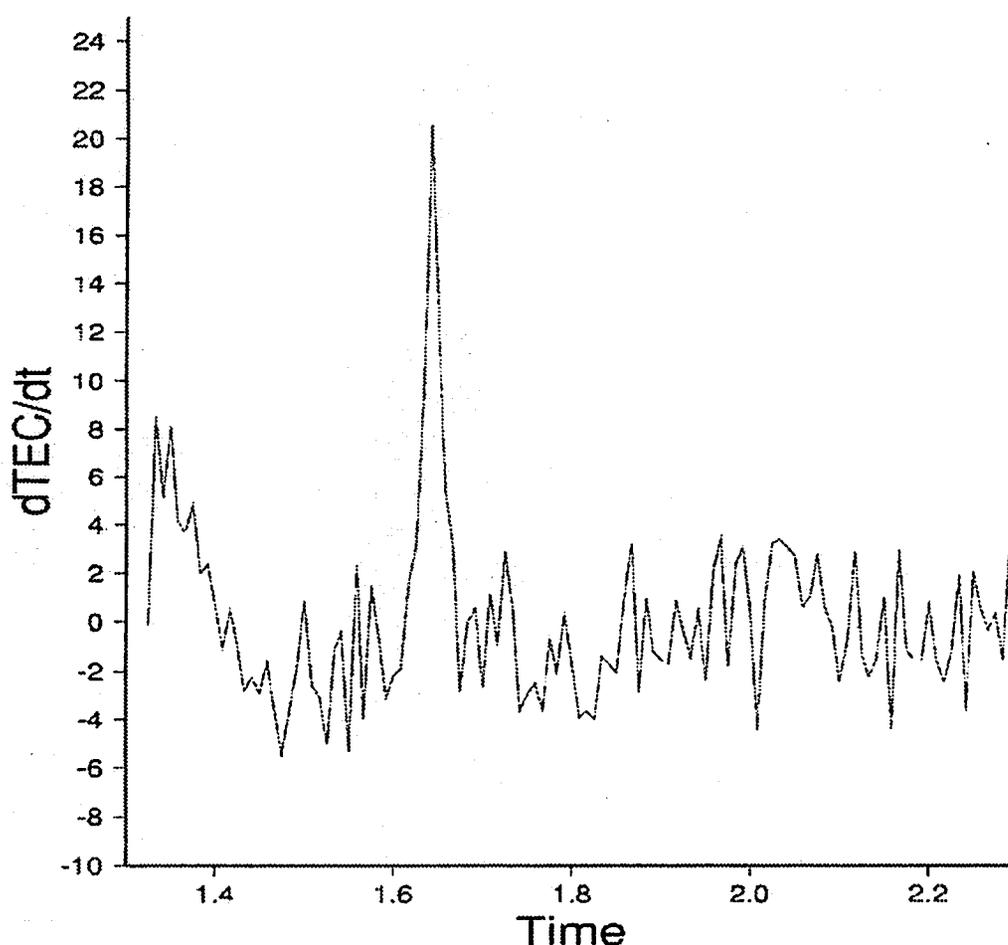


図 25) 2004 年 7 月 15 日に発生した太陽フレアによる SITEC の時間微分を示した図。
(Time は 0.1=6min)

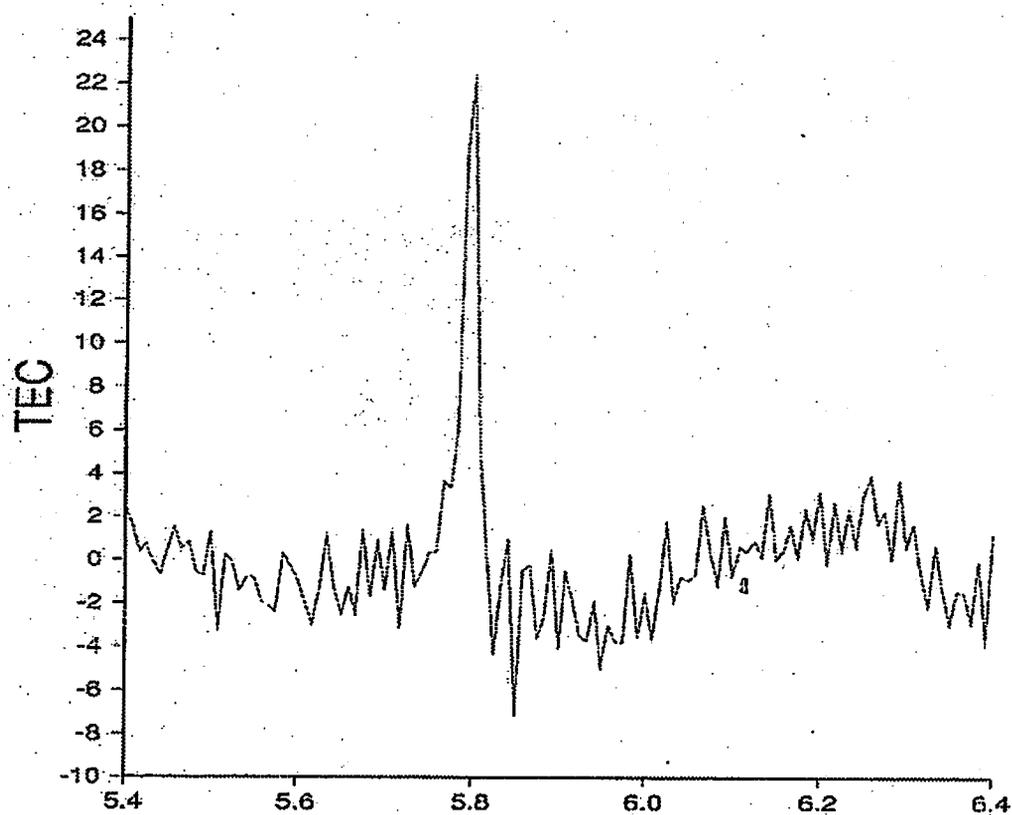


図 26) 2004 年 7 月 25 日に発生した太陽フレアによる SITEC の時間微分で表した図。
(Time は 0.1=6min)

第8章 終章

8-1 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と日本の GPS 局だけでは範囲が狭すぎるといわざるをえない。狭い範囲ながら 2004 年 7 月 17 日 0757UT に発生したフレアによる SITEC の大きさを三点（稚内、鳥羽、枕崎）で比較することで、天頂角への依存を見ることが出来たが、その変化の幅は小さい。

現在では、世界各地に分布する IGS のデータを容易に取得することが出来るので、それを利用した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べることにより、その構造に特徴があることがわかった (図 18)。17 日のフレアに比べると、25 日のフレアによる SITEC の変動は急始性が強いことがよくわかる。これは、太陽フレアのタイプの違いによるものかもしれない。

また、フレア発生時の TEC 変動の時間微分をみることにより、より詳細な TEC 変動の構造を見ることが出来る。ここでは、Zhang and Xiao(2003)の例で、その構造と太陽フレアの硬 X 線強度とに非常によい相関関係があることを示した。このことから、より高いサンプリング率（通常の GPS 観測のサンプリング比は 30 秒に 1 回の割合）で電離層の TEC 変動の時間微分を見ることによって、フレア発生時の硬 X 線強度の波形を予測できるようになる展望も開けた。また、2004 年 7 月 15 日、25 日のフレアの際の TEC 変動の時間微分の時系列を図に表した。25 日のほうには立ち上がり部分に小さな立ち上がりが見られる。これは、Zhang and Xiao (2003)と同様にこのフレアの特徴的な構造であると予測されるが、ここではそれに対応する GOES や「ようこう」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、その形状と X 線強度に相関があることは推察できる。

8-2 結論

電離層擾乱にはさまざまな種類のものがある。その中でもここでは太陽フレアによる電離層全電子数突然増加 (SITEC) に注目した。SITEC は太陽フレア発生時の太陽放射の中でも、特に極端紫外線 (EUV) や硬 X 線によって電離層の電離が進むことにより発生する。太陽フレアによる SITEC の大きさは、太陽フレア発生時の太陽の天頂角に依存している。ここでは、日本の GPS 局を用いた観測をいくつか行っているが、グローバルな天頂角の依存を考える時には、IGS のデータを用いて地球の半球面 (フレア発生時の太陽の照射部分) 全体にわたる SITEC を調べる必要がある。

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 層、E 層、F1 層、F2 層に分かれている。IGS のデータを用いて太陽フレア発生時の日の出・日の入りの部分での SITEC の観測することにより、フレアによる電離層の応答がどの領域でどの程度起こっているのかという層別解析が可能になると考えられ、Leonovich et al. (2002) はこの方法で 300km 以上の領域が TEC の増加に最大 25% の貢献をしていることを観測した。

フレア発生に起因する TEC の変動の時間微分を見ることにより、TEC 変動の構造の詳細を知ることが出来る。それが「ようこう」などで観測された太陽フレア発生時の硬 X 線の時系列とよく一致することが Zhang and Xiao (2003) で述べられている。ここでは、2004 年 7 月 15 日、25 日のフレアによる TEC 変動の時間微分を示したがそれに対応する「ようこう」の X 線強度の観測値が入手できなかったため、その対応関係について確かめることはできなかった。

8-3 今後の課題

日本の GPS データだけでは、日本が夜中の時に発生した太陽フレアによる SITEC は観測されない。IGS のデータを用い、よりグローバルな SITEC の観測を行うことが詳しくこの分野で観測例の数を増やす上で重要である。

電離層の層別解析についても、より多くのデータと照らし合わせて、フレアによる特徴的な波形の有無などについて IGS データを用いてより深く研究する必要がある。また、その結果から層別の反応の様子を見ることも出来るようになるかもしれない。

午前、午後でフレアに対する電離層の応答が異なるという説についても、いくつかのフレアによって検証する必要がある。また、非対称性が存在した場合は、なぜそのようなことが起こるのかということについても追求していくのも研究課題のひとつである。

参考文献

- Afraimovich, E.L., A.T. Altyntsev, E.A. Kosogorov, N.S. Larina, and L.A. Leonovich, *Detecting of the ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data*, *Geomagn. Aeron.*, 41(2), 208-214, 2001.
- Donnelly, R.F., *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, 1976.
- Calais, E., J. B. Minster, M. A. Hofton & M. A. H. Hedlin, 1998, *Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements*, *Geophys. J. Int.*, 132, 192-202
- Leonovich, L.A., E.L. Afraimovich, E.B. Romanova, and A.V. Tashilin, *Estimating the contribution from different ionospheric regions to the TEC response to the solar flares using data from the international GPS network*, *Ann. Geophys.*, 20, 1935-1941, 2002.
- Matsoukas, D. et al, *Correlation of solar radio bursts and sudden increases of the total electron content (SITEC) of the ionosphere*, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34, 1275-1283, 1972.
- 小杉健郎, 1999, 宇宙プラズマの爆発・粒子加速機構, 朝日新聞社.AERA MOOK. 「天文学がわかる」, 54-57
- 小川忠彦, 太陽フレアによる全電子数突然増加(SITEC)現象について — レビュー —, 未発表資料
- 佐藤真悠, 2005, 北海道大学理学部地球科学科卒業論文.
- 柴崎清登, 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
- T. Tanaka, T. Ichinose, T. Okusawa, T. Shibata, Y. Sato, C. Nagasawa, T. Ogawa, *HF Doppler observations of acoustic wave exhibited by the Urakawa-Oki earthquake on 21 March 1982*, *J. Atmos. Terr. Phys.* 46 (1984) 233-245.
- 塚寿彦, 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流通情報工学科卒業論文
- Zhang, D.H., Z. Xiao, K. Igarashi, and G.Y. Ma, *GPS-derived ionospheric total electron content response to a solar flare that occurred on 14 July 2000*, *Radio Sci.*, 37(5), 1086, doi:10.1029/2001RS002542, 2002.
- 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 International GPS Service network for the whole sunlit hemisphere*, *J. Geophys. Res.*, 108(A8), 1330, doi:10.1029/2002JA009822.