

GPS 電波掩蔽法による電離圏観測：

大規模太陽フレアに伴う電子密度増加の高度分布

Ionospheric observations by GPS radio occultation:

Height distributions of electron density increases

by the 2006 X9.1 solar flare

北海道大学 理学部 地球科学科

宇宙測地学研究室

22060115

岡崎 郁也

Ikuya Okazaki

2010 年 1 月 29 日

指導教官：日置幸介

要旨

電離圏(電離層)は太陽から来る紫外線等の電磁波によって大気分子が電離している領域であり、その様相は太陽活動の影響を受けて常に変動している。中でも太陽フレアの影響は顕著で、電磁波の急増に伴って電離圏の電子密度も増加する。Donnelly (1976)によると、フレアには時間発展の異なる二つの放射成分(Impulsive と Slow)が存在する。これらは含まれる電磁波の波長に差があるため、電離圏での電子生成の高度分布が異なる。典型的なフレアにおける電子密度増加を計算した結果、静穏時に電子密度最大である F₂層よりも下部、E層の高度 110km 付近において増加が最大かつ長く継続することが示された。測位のための GPS (Global Positioning System)衛星は二種類の異なる周波数の搬送波を用いており、その位相差から電波の伝搬経路に存在する電子の総量を求めることができる。近年の GPS 衛星網の発達によって、電離圏の電子数が全球規模で定常的に観測できるようになった。例えば Zhang and Xiao (2003; 2005)によってフレアによる電離圏全電子数の急増(SITEC: Sudden Increase of Total Electron Content)の様々な太陽天頂角における詳細な観測が報告された。また、Heki (2006)は日没直後の GPS 局での TEC 観測から電子密度増加の高度分布の推定を行った。最近になって、GPS 受信機を搭載した低軌道衛星が複数個打ち上げられ、GPS 衛星が地平線に沈む直前や昇った直後の搬送波位相の変化から、大気の屈折率の高度プロファイルを推定する GPS 掩蔽観測が盛んに行われるようになってきた。本研究では、FORMOSAT-3/COSMIC 衛星による GPS 電波掩蔽観測で得られた電子密度鉛直プロファイルデータを用いて、太陽フレアに伴う電子密度増加の高度分布を調べた。フレア発生時の様々な地域のプロファイルから、主に太陽フレアの Slow な成分に起因すると思われる高度 100-110km における顕著な増加を確認した。一方 Impulsive な成分による、より広い高度範囲における電子密度の増加についてはそれほど顕著ではなかった。これは対象としたフレアの発生位置が太陽の周縁に近いため Impulsive な成分の多くが太陽の大気によって減衰を受けたためだと考えられる。夏・冬半球で増加の高度分布が異なることも観測された。また、Donnelly et al. (1976)の電子密度増加モデルと本研究の結果を比較し、今回観測されたフレアとモデルそれぞれの特徴についても議論する。

Abstract

Ionosphere is a layer where neutral atmospheric molecules are partially ionized due to solar radiation in e.g. infrared wavelengths. Its properties reflect solar activities. For example, solar flares enhance solar radiations, and cause sudden increase of ionospheric electron densities. Donnelly (1976) suggested that such an increase is composed of two components of different temporal evolution, i.e. impulsive and slow components. They have different frequency spectra, resulting in different height distributions of electron density increases. With a model calculation for a typical solar flare, Donnelly (1976) also showed that the largest and the longest-lasting electron density increase occurs at a height of ~ 110 km, within the E region where electron density is normally less than the F2 region. Global Positioning System (GPS) satellites are equipped with transmitters of two different carrier frequencies in the L band, and the phase differences between the two carrier waves can be converted into the total number of electron integrated along the line-of-sight (Total Electron Content, TEC). Recently large numbers of GPS receivers have been deployed worldwide, and such a global network made it easy to observe sudden increase of TEC (SITEC) associated with solar flares. However, GPS-TEC has an intrinsic difficulty in investigating the vertical distribution of electron density. Recently, multiple satellites with on-board GPS receivers were launched into low earth orbits, and have obtained numerous reflectivity profiles taken when the observed GPS satellites sinks below or rises from the horizon. In this study, we use electron density profiles taken with such GPS radio occultation measurements by FORMOSAT-3/COSMIC satellites, and studied the electron density increases associated with the X-class solar flare on Dec. 5, 2006. From profiles taken in various places in the sun-lit hemisphere, we identified significant increase of electron density at height 100-110 km due possibly the slow component of the flare. On the other hand, electron density increases for a wide range of height due to the impulsive component were not clearly seen. This is considered to reflect the occurrence of this flare near the edge of the solar disk, i.e. the impulsive component of the flare must have been selectively attenuated by the solar atmosphere. We established the standard profile as the median of the profiles on days before the flare, and obtained the profile of the electron density increase due to the flare by subtracting the standard profile from the profiles obtained after the flare. The profiles of these differences clearly showed peak heights, which showed slight north-south asymmetry and were a little different from the prediction.

目次

1	はじめに	4
1.1	電離圏 Ionosphere	4
1.2	太陽フレア Solar flare	6
1.2.1	太陽フレアとは	
1.2.2	太陽フレアの観測	
1.3	太陽フレアに伴う電離圏電子密度増加	9
1.3.1	太陽フレアの放射成分	
1.3.2	電離圏電子密度増加の高度・時間分布	
2	GPS-TEC 観測による先行研究	13
2.1	GPS: Global Positioning System (全球測位システム)	13
2.1.1	位置決定の基本原理	
2.1.2	TEC 観測	
2.2	Zhang and Xiao (2005)	16
2.3	Heki (2006)	19
3	観測・解析手法	23
3.1	GPS 電波掩蔽観測 GPS Radio Occultaion Observations	23
3.1.1	概要	
3.1.2	データ導出法	
3.1.3	FORMOSAT-3/COSMIC 衛星	
3.2	観測例	28
3.3	解析手法	29
4	観測・解析結果	30
4.1	地上局観測の結果	30
4.2	掩蔽観測の結果	32
5	考察・課題	41
5.1	結果のまとめ	41
5.2	考察	42
5.3	今後の課題	44
6	謝辞	45
7	参考文献	46

1 はじめに

1.1 電離圏 Ionosphere

熱圏という地球大気の最も高い層には、大気の原子・分子がイオンと電子に解離し、プラズマ化している電離圏(または電離層)と呼ばれる領域がある。大気を構成する窒素や酸素等の原子・分子が太陽光線に含まれる波長約 $0.1 \mu\text{m}$ (1000\AA) 以下の紫外線を吸収すると、その光のエネルギーが原子核のまわりを回転している電子を弾き飛ばす。これを光電離(Photoionization)といい、この光電離状態にある大気が電離圏である。

電離圏は高度約 60km 以上に存在し、電子密度の違いによって下から順に D 層 (D 領域とも呼ぶ、以下同様)(60-90km)、E 層(90-130)、F₁層(130-210)、F₂層(210-)等と呼ばれ、それぞれに電子密度の特に高い領域が存在する (図 1-1)。F₁、F₂ 両層は夜間には一つの F 層となり、D 層は消滅する。太陽からの紫外線は地球大気における進入過程で次第に吸収されていき高度 100km 程度に達する頃にはかなり弱くなっている。これはすなわちその分上層の大気を電離させているという事で、この点のみからいえば高度が高いほど電子密度も高いということになる。一方、大気は上層にいくほど薄くなるので同じ強度の紫外線を受ければ当然、低高度ほど電子の生成は多い。この兼ね合いの結果、ある高度で電子密度は極大となり、その上下で減少するという分布が形成される。この理論をチャプマン層生成という。

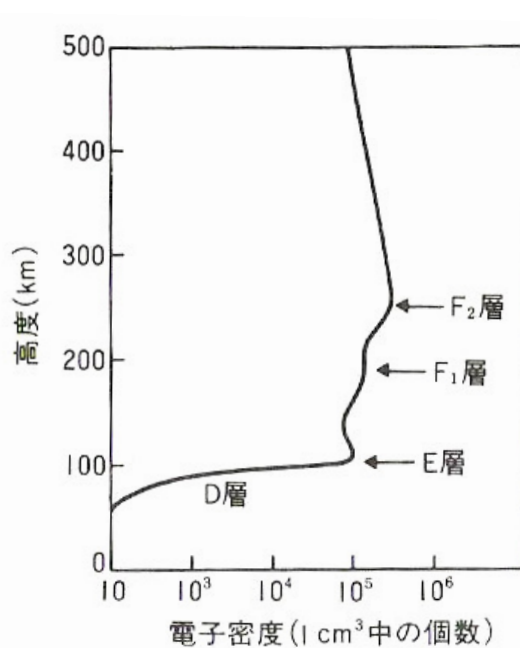


図 1-1 電離圏電子密度の高度分布. (小倉, 1999)

電離圏形成の基礎的な概念は前述の通りである。しかし、実際には電子生成の極大高度は大気による吸収の度合いから、太陽放射の波長ごとに異なる。加えて、生成された電子がイオンと衝突して元の原子・分子に戻る再結合(Recombination)という過程も起こっており、これは基本的に大気密度が高く粒子同士が衝突しやすい低高度ほど頻繁である。つまり、電離圏電子密度の高度分布は主として波長ごとに異なる電子生成極大高度と、再結合の割合に依存している。

表 1-1 はモデル大気を用いて計算された太陽放射の波長ごとの電子生成極大高度である(Yonezawa, 1966)。波長約 200-900Å の EUV(極端紫外線)によって高度 160-200km の F₁層が形成されている。F₂層に該当する高度帯がみられないが、これは再結合による電子の消失過程や鉛直方向の拡散等の要因で電子密度の極大が生成の極大より上方にずれているためである。低高度の E 層は主に波長 900Å 以上と 200Å 以下の EUV と、さらに短波長の軟 X 線(1-100Å)・硬 X 線(<1Å)によって形成されている。太陽フレアでは、静穏時にはごく微量な極めて短波長の X 線(0.1-30Å)が大量に放射され、電離圏下部の E 層・D 層を強く電離させることが知られている。

TABLE VII
The heights of maximum rate of electron production for strong emission lines in the solar spectrum for some solar zenith angles and model atmospheres

cos χ		0.98			0.80			0.50		
CIRA 1965 Model (12 hour)		II	V	VIII	II	V	VIII	II	V	VIII
Identification	wavelength (Å)	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)
HL γ - β	1025.7	103	103	103	104	104	104	107	107	107
CIII	977.0	109	109	109	110	110	110	113	113	113
OII, III	835-833	124	122	121	127	125	124	134	133	132
OIV	790.2, 790.1	157	163	169	162	169	177	174	186	200
Ov	629.7	162	169	177	167	176	186	180	195	212
Mgx	610	161	168	176	166	175	185	180	195	211
HeI	584.3	161	167	175	166	175	184	179	194	210
OIV	555.3-553.3	162	169	177	167	177	187	181	196	214
SiXII	500	161	168	176	166	175	185	180	195	211
HeII	303.8	148	150	152	152	156	159	163	171	179
Fexv	284.2	143	144	145	147	149	151	158	163	169
X-ray	68.0*	107	107	107	108	108	108	111	111	111
X-ray	44.5*	101	101	101	102	102	102	105	105	105

* These wavelengths are selected only because absorption coefficients are available for them, it does not necessarily mean that solar X-rays of these wavelengths are strong.

表 1-1 太陽 EUV(極端紫外線)・X 線放射による波長ごとの電子生成極大高度(km),ローマ数字は CIRA モデル大気の番号, χ は太陽天頂角を表す. (Yonezawa, 1966)

1.2 太陽フレア Solar flare

1.2.1 太陽フレアとは

太陽フレアとは、太陽表面の磁気エネルギーが熱エネルギーや運動エネルギーに変換されて粒子が加速、放出される現象である。太陽対流層のダイナモで作られた磁力線が歪み、押し付けられて密接した反対向きの磁力線同士が切れてつなぎ変わる磁気再結合(Magnetic reconnection)という現象によって発生し、様々な波長の電磁波の増光や、荷電粒子の放出等が観測される(図 1-2)。静穏時の太陽放射は可視光(波長約 3800-7500 Å)が最も卓越しており、電離に寄与している波長約 1000 Å以下の紫外線、X線は少ない(図 1-3)。それに対し、フレアの放射は EUV(極端紫外線)や軟 X線、硬 X線等の高いエネルギーをもった短波長の電磁波の割合が非常に大きい。

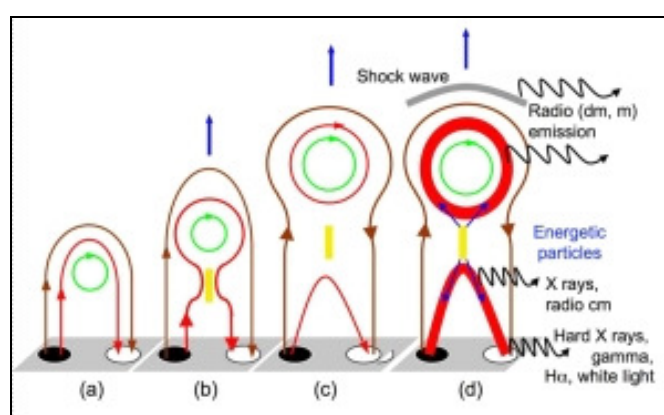


図 1-2 磁気再結合によるフレア発生の模式図。
(NMDB SPACE education より)

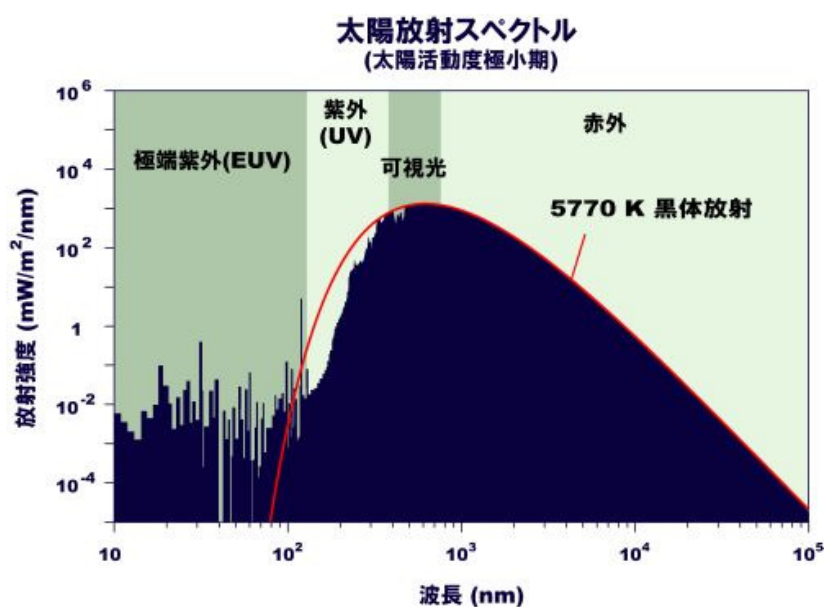


図 1-3 太陽活動極小期における太陽放射スペクトル分布。(NICT 電磁波計測研究センターより)

フレアは主に太陽の活動領域(黒点群)の中で発生する。その発生頻度は太陽の約 11 年の活動周期に大きく依存し、極大期では一日に十個以上発生することもあり、極小期には一か月に一個しか発生しないこともある。また、極大期ほど大規模なフレアが発生しやすい。フレアの規模は観測された X 線ピーク強度の大きさによって表 1-2 のようなクラスに分けて定義されている。各クラスの中でもさらに数字の大きさを M7 や X9 といった具合に表現する。X クラスの特に大規模なフレアの際には電離圏の異常による無線通信障害(デリンジャー現象)、磁気嵐による停電、宇宙空間の衛星機器の故障等、人間活動に悪影響を及ぼすこともある。

クラス	A	B	C	M	X
X 線強度 (Wm^{-2})	$10^{-8} \leq$	$10^{-7} \leq$	$10^{-6} \leq$	$10^{-5} \leq$	$10^{-4} \leq$

表 1-2 X 線強度による太陽フレアのクラス分類.

1.2.2 太陽フレアの観測

太陽フレア観測の歴史は 1859 年にイギリスの天文学者キャリントンによって白色光の増光として観測されたのが始まりである。その後 1930 年代に入って $\text{H}\alpha$ 線(6563\AA)による観測が普及し、フレア観測が活発に行われるようになる。1970 年代以降は人工衛星やロケット等の飛翔体を用いて宇宙空間から X 線や紫外線で観測する時代になった。現在では、アメリカ合衆国の NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)が運用する GOES(Geostationary Operational Environment Satellite)シリーズによって静止軌道上で太陽全面からの X 線放射強度が常時モニタされており、フレアの詳細な観測が可能である。前述のフレアの規模のクラス分類は GOES でみた波長 1.8\AA の X 線計測値による。我が国ではフレア等の太陽活動情報は情報通信機構(NICT: National Institute of Information and Communications Technology)に所属する宇宙天気情報センターから提供されている。



図 1-4 2001-現在運用中の GOES-12. (NOAA より)

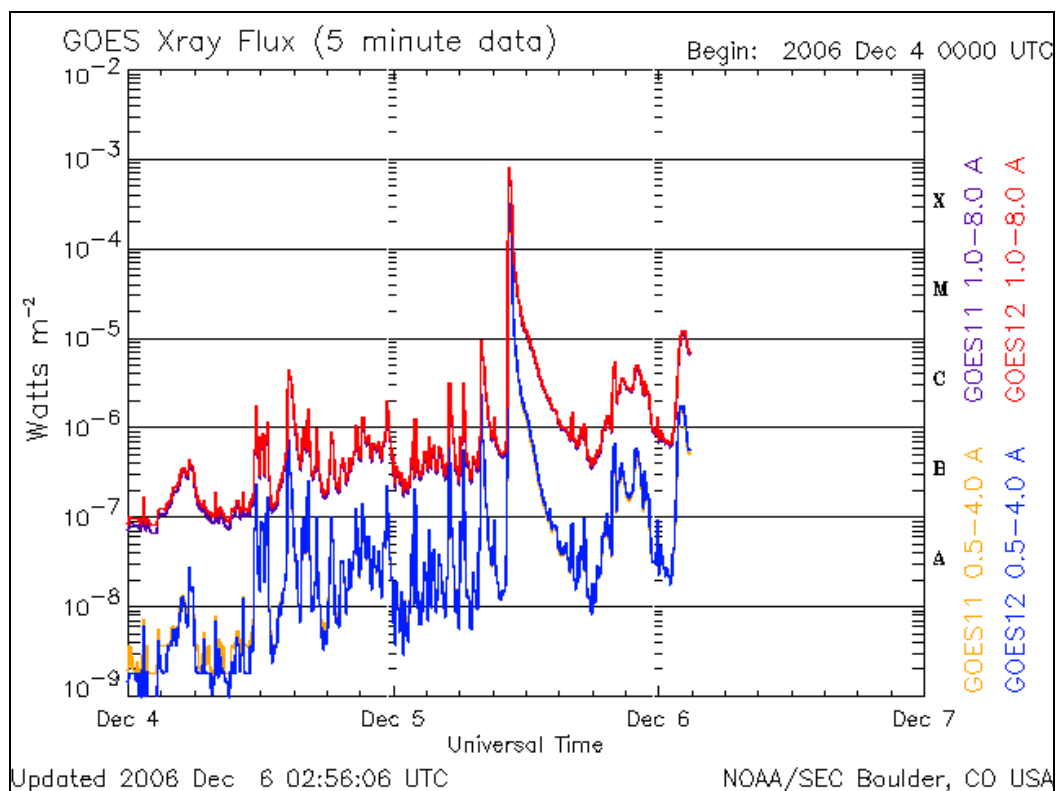


図 1-5 GOES によって観測された 2006 年 12 月 5 日の太陽フレア発生時 X 線強度. (宇宙天気情報センターより)

1.3 太陽フレアに伴う電離圏電子密度増加

電離圏は太陽放射中の EUV や X 線等の短波長の電磁波によって大気原子・分子が電離して形成されている。太陽フレアの際にはそれらのフラックスが急増し、その結果電離圏の電子密度増加が引き起こされる。特に、波長 100\AA 以下の X 線による低高度(100km 付近)、すなわち D 層・E 層での増加が著しいという点は既に述べた通りであるが、本章では Donnelly (1976)、Donnelly et al. (1976)の結果をもとに電子密度増加の高度分布と、その時間発展の様子についてさらに詳しく述べる。

1.3.1 太陽フレアの放射成分

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 5 分以内に爆発的に電磁波を放射し終える **Impulsive** 型フレアで、もうひとつは放射を 5 分以上かけてゆっくり行う **Slow** 型フレアである。**Impulsive** 型フレアをさらに詳しく見ると、主に硬 X 線や EUV、マイクロ波が数分以内に放射される **Impulsive** な成分と、軟 X 線を主とする **Slow** な成分に分かれている。つまり、**Slow** 型フレアとは **Impulsive** な成分をもたないフレアのことであるといえる。

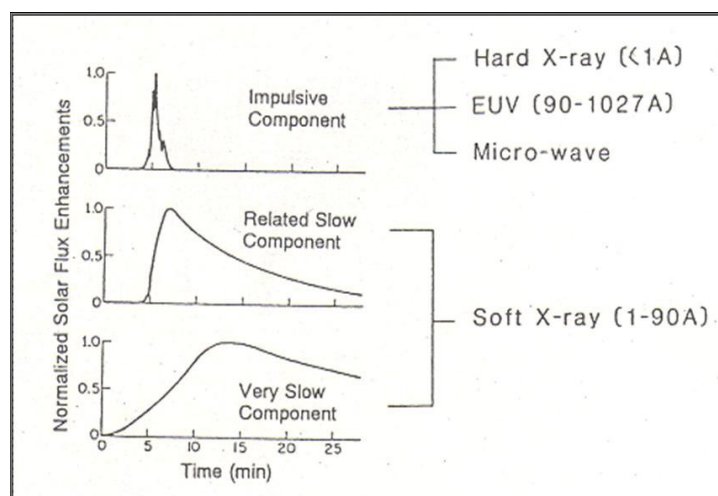


図 1-6 太陽フレアの Impulsive, Related Slow, Very Slow 成分の時間発展模式図と放射波長. (Donnelly, 1976)

TABLE 1. Spectra for Impulsive Flare Component

Wavelength, Å	Ion or Line	Model Impulsive Component Spectra,* 10^{-9} W m $^{-2}$					Iono- spheric Region
		A	B	C	D	E	
1025.7	H Ly β	0.8	0.5	1.9	0.8	0.5	E
991	Group N III	1.5	1.0	3.2	1.4	1.0	E
997	C III	8.5	5.8	9.9	8.4	5.6	E
972.5	H Ly γ	0.5	0.4	0.5	0.5	0.3	F
949.7	H Ly δ	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	E
937.8	H Ly ϵ	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	E
930.7, 926.2	H Ly ξ, η	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	E
911-1027	Minor	2.7	1.9	2.1	2.7	1.8	E
680-911	H continuum	7.6	5.2	14.5	7.5	5.0	F, E
834	Group O II, III	0.9	0.6	3.3	0.9	0.6	E, F
796-911	Minor	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	E, F
790	Group O IV	0.7	0.5	2.5	0.7	0.5	F
787.7	O IV	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	F
780.3	Ne VIII	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	F
770.4	Ne VIII	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	F
765	N IV, III	0.1	0.1	0.7	0.1	0.1	F
760	Group O V	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4	F
630-796	Minor	0.9	0.6	0.7	1.4	1.1	F
629.7	O V	3.1	2.1	1.2	5.0	4.5	F
625	Mg X	0.2	0.1	0.1	0.4	0.3	F
609.8	Mg X	0.4	0.3	0.3	0.7	0.6	F
584.3	He I	1.6	1.1	0.6	2.5	2.3	F
554	Group O IV	0.6	0.4	4.2	0.9	0.9	F
450-504	He I continuum	1.2	0.8	0.9	2.0	1.8	F
465.2	Ne VII	0.4	0.3	0.3	0.6	0.6	F
460-630	Minor	1.2	0.8	0.9	2.0	1.8	F
303.8	He II Ly α	9.5	6.4	8.1	8.2	5.6	F
280-460	Minor, Fe XV, XVI	9.1	6.2	7.0	4.9	3.5	F
228-280	He II, Fe XIII, XIV	5	5	4	5	7	F
200-228	He II continuum, Fe	10	14	8	10	13	F
90-200	Fe IX-XII	23	31	17	23	30	F, E
60-90	Fe XI-XVI	5	9	3	5	6	E
31-60	Si IX-XV, C VI	3	4	2	3	4	E
1-31	Minor	<1	<1	<1	<1	<1	D, E
<1	Hard X rays	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	D

The H α flare for spectra A and B is of importance 1B, location 23°N, 23°W, and time of occurrence 2114 UT March 27, 1967; for C, 3B, 25°N, 68°E, March 22, 1967; for D, 2B, 12°N, 80°W, March 12, 1969; and for E, 3B, 24°N, 32°W, April 21, 1969. Event references are as follows: for spectra A and B, *Donnelly and Hall* [1973]; for C, *Hall and Hinteregger* [1969]; and for D and E, *Kelly and Rense* [1972]. General references on the impulsive component are *Hall* [1971], *Neupert et al.* [1974], *Noyes* [1973], *Thomas* [1975], *Wood et al.* [1972], *Donnelly* [1970, 1971, 1973], *Donnelly et al.* [1973], *Kane* [1971, 1973], and *Kahler* [1973].

*The energy flux is normalized to $\Delta\Phi(\lambda < 1027 \text{ \AA}) = 10^{-9} \text{ W m}^{-2}$.

表 1-3 太陽フレア Impulsive 成分の放射スペクトル分布モデル, A-E はそれぞれ異なるデータを用いた結果. (Donnelly, 1976)

表 1-3 は観測されたフレアを基に計算された、Impulsive 成分における波長<1027 Åの放射強度を 100 とした時の各波長の含有率の分布モデルである。右列には電離圏のどの領域が主に電離されるかが書かれている。図中の A-E はそれぞれ異なるデータを用いた計算結果であるが、波長 90-200 Åの EUV が 17-31%程度と大部分を占めているのがわかる。この波長帯は E 層、F 層をまたぐ広範囲の電離に関わっているので、電子密度増加は高度において一様である。また、静穏時にはほとんど放射されない硬 X 線(<1 Å)という特に高いエネルギーをもつ X 線がわずかに含まれているため、電離圏下部の D・E 層の電子密度の有意な増加が起こる。結果、Impulsive 成分による電子密度増加は全体としては均一に、通常時の電子生成の様子とほぼ同じ分布になっている。

TABLE 2. Spectra for Slow Flare Components

Wavelength, Å	Major Ions	Model Slow Component Spectra,* 10^{-3} W m^{-2} or % of Total			Ionospheric Region
		X	Y	Z	
911-1027		1	2	5	E
796-911		2	3	6	E, F
280-796	Fe XV, Fe XVI, Mg X, He II	3	6	14	F
200-280	Fe XIV, Fe XV, He II	5	9	8	F
170-200	Fe XI-XIV, Ca XIV, Ca XV, Ca XVII	4	7	7	F
90-170	Fe XVIII-XXIII	5	9	8	E, F
60-90	Fe XI-XIII, Fe XVI, Si VIII	6	10	9	E
44-60	Fe XVI, Si IX-XII, Ni XVIII	4	11	19	E
31-44	Fe XV, S XIV, C VI	6	8	11	E
20-31	O VI	6	4	2	E
8-20	Fe XVII-XXV, Mg XII	26	23	10	E
4-8	Si XIII-XVI, Fe XXIV, Fe XXV	22	6	1	D, E
1-4	Fe XXII-XXV, Ca XIX	10	2	---	D

The soft X ray classification for X is \sim X25; for Y, X1; and Z, \sim M1. The H α flare for X is of importance 2B, location 12°N, 80°W, slow component peak time 1742 UT, and date March 12, 1969; for Y, 2B, 27°N, 64°W, 1737 UT, Aug. 1, 1967; and for Z, SB, 03°N, 08°E, 1342 UT, Sept. 18, 1971. Event references are as follows: for X, *Kelly and Rense* [1972]; for Y, *Kreplin et al.* [1970] and *Castelli and Richards* [1971]; and for Z, *Dere et al.* [1974]. General references on the slow component are *Braeckner* [1975], *Catalano and Van Allen* [1973], *Chambe and Sain* [1969], *Cowan and Widing* [1973], *Datlowe et al.* [1974], *Doschek* [1972], *Doschek et al.* [1973], *Drake* [1971], *Hall and Hinteregger* [1969], *Heath* [1973], *Horan* [1971], *Kastner et al.* [1974], *Kahler et al.* [1970], *Kelly and Rense* [1972], *Kreplin et al.* [1969, 1970], *Linsky et al.* [1976], *Neupert* [1971a, b], *Neupert et al.* [1967, 1973, 1974], *Noyes* [1973], *Pounds* [1970], *Purcell and Widing* [1972], *Thomas* [1975], *Walker* [1975], *Walker and Ruge* [1969], *Widing* [1975a, b], *Widing and Cheng* [1974], and *Wood et al.* [1972].

*The total energy flux is normalized to 10^{-3} W m^{-2} .

表 1-4 太陽フレア Slow 成分の放射スペクトル分布モデル, X-Z はそれぞれ規模の異なるフレアを想定. (Donnelly, 1976)

続いて、同様に Slow 成分における波長分布を表 1-4 に示す。図中の X、Y、Z はそれぞれ仮定するフレアの規模が異なり、X がクラス X25、Y がクラス X1、Z がクラス M1 のフレアについての計算結果である。Impulsive 成分で卓越していた波長 90-200 Å の EUV は Slow 成分では少ない。代わりに顕著なのは電離圏下部の電離に大きく関わる波長 < 30 Å の軟 X 線で、モデル X では放射全体の半分以上の割合を占めるという結果が出ている。つまり、Slow 成分による電子密度増加は、その多くが軟 X 線によって D・E 層で起こっているのである。また、大規模なフレアほど X 線の放射が強く、電離圏下部への影響が大きいともいえる。

1.3.2 電離圏電子密度増加の高度・時間分布

以上の特徴を高度分布プロファイルに表したのが図 1-7 である。波長 1-1027 Å の総放射強度を 10^{-3} W m^{-2} 、太陽天頂角を 30 度としたときの太陽放射の各成分による電子生成を表す。三本のプロファイルは A が Impulsive 成分、X が Slow 成分、そして H が非フレア時のものである。Impulsive 成分の電子生成は硬 X 線による高度約 100-130km での突出した電子生成を除き、非フレア時のものと非常に似ているのがわかる。一方 Slow 成分は高度 130km 以上の電子生成は非常に少なく、高度 105km の電子生成ピークが非常に大きい。Donnelly et al. (1976) ではこの結果と、実際に観測されたフレア時の全電子数 (TEC: Total Electron content) の変動を基に典型的な太陽フレアによる電離圏電子密度増加の高度・時間変化を計算し、モデル化した (図 1-8)。Impulsive 成分は高度約 110、140、250km の三つのピークをもち、突発的に増加、減少している。一方、Slow 成分は高度 100km にピークをもち、Impulsive 成分に遅れて現れている。

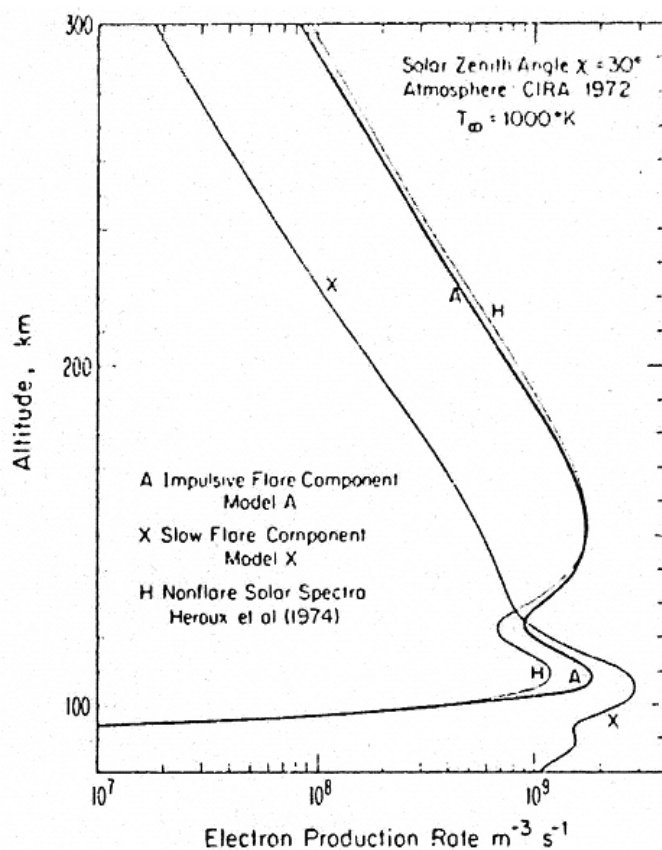


図 1-7 表 1-3,1-4 のスペクトル分布から求めたフレアによる電子生成の高度分布プロファイル.A が Impulsive 成分,X が Slow 成分,H が非フレア時のもので,放射強度を 10^{-3}Wm^{-2} に統一. (Donnelly et al., 1976)

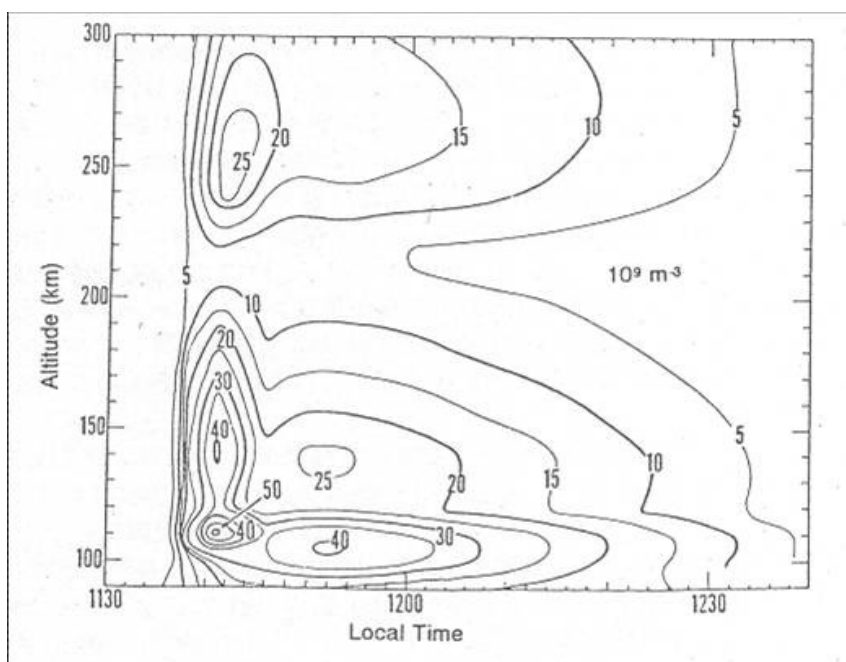


図 1-8 実際に観測されたフレア時の TEC (Total Electron Content) 時間変化と,図 1-7 の高度分布をもとに計算された電子密度増加分の高度・時間分布モデル. (Donnelly et al., 1976)

2 GPS-TEC 観測による先行研究

GPS(Global Positioning System)によって電離圏の TEC が全球で定常的に観測できるようになると、太陽フレアによる電子密度増加はより詳細な観測が可能となった。本章では、GPS による TEC 観測の原理と、それを用いた太陽フレアに関する主な先行研究 Zhang and Xiao (2005)と Heki (2006)について述べる。

2.1 GPS: Global Positioning System (全球測位システム)

GPS (Global Positioning System)とは全球測位システムともいい、地球上での正確な現在位置や時刻を知るための衛星システム群の総称である。複数の衛星から送られる電波を地球上の受信機で受信し、各電波の到達時間を計測することで高精度の位置決定を可能にしている。アメリカ合衆国が 1978 年から軍事上の航法支援を目的として打ち上げを開始、高度 2 万 km の軌道を約 12 時間周期で周回する 30 機ほどの衛星で構成されている。現在では本来の目的である位置決定の技術を用いた船舶・航空機の運行管理やカーナビゲーション、地殻変動検出等の利用の他、大気中での電波の屈折遅延を利用した気温や水蒸気量、電離圏の電子数等の観測(後述)も可能となっている。

2.1.1 位置決定の基本原理

GPS 衛星には安定度の高い原子時計が搭載されており、正確な時刻を常時発信している。もし、地上の受信機の時刻が衛星と完全に同期していれば、衛星の発信時刻と受信機の到達時刻の差に光速を掛けることで正確な距離を割り出せる。空間上の座標を決定するには三点からの距離を求める必要があるため、最低でも三機の衛星との距離が同時に分かれば位置決定が可能となる。しかし、衛星と受信機で時刻を完全に同期させることは厳密には不可能であるため、四機以上の GPS 衛星からの電波を受信することで受信機との時計の誤差を校正しつつ測位する。実際には、精度を上げるために全地球上で最低でも 4-6 機程度の衛星からの電波が常に受信できるように、衛星の数と軌道面が確保されている。

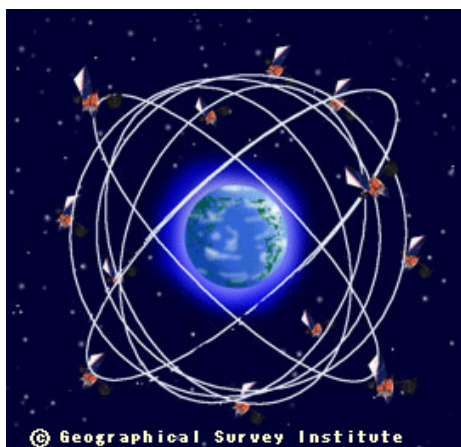


図 2-1 GPS のイメージ。(国土地理院より)

2.1.2 TEC 観測

GPS 衛星から到来する電波は地球大気を通過する際に屈折する。屈折によって電波の伝達経路がわずかに長くなることと、大気中の伝搬速度が遅くなることの相乗効果で、真空中と比べて伝達時間が遅れる(大気遅延)。遅延は主に乾燥大気、水蒸気、そして電離圏の電子によって起こる。これらは地球上での正確な位置決定を行う上では深刻な誤差となり得るため様々な方法で補正されるが、逆にこれらの遅延パラメータを取り出すことで GPS を用いて地球大気を観測することができる。ここでは、電離圏の電子による遅延を利用した TEC 観測について述べる。

ここでいう TEC(Total electron content)とは、GPS 衛星と受信機との間の経路上の電子の数の合計で、単位は el/m^2 もしくは $\text{TECU}(=10^{16}\text{el/m}^2)$ で表す。TEC は経路(s)に沿った電子密度の積分値である。

$$TEC = \int_{\text{receiver}}^{\text{satellite}} n_e(s) ds \quad (1)$$

n_e : 電子密度(el/m^3)

また、電離圏の電子による屈折率 N_1 は、電子密度と搬送波の周波数 f を用いて以下の式で近似できる。

$$N_1 = 1 - \frac{an_e}{f^2} \quad (2)$$

a : 定数

さらに、電離圏によって引き起こされる電波の遅延 Δt は屈折率 N_1 を使って次の式で表すことができる。

$$\Delta t = \int_{\text{receiver}}^{\text{satellite}} (N_1 - 1) ds \quad (3)$$

(3)式に(2)式、(1)式を代入すると伝播遅延 Δt は次のようになる。

$$\Delta t = -\frac{a}{f^2} TEC \quad (4)$$

(4)式を見ればわかるように、電離圏での伝播遅延は搬送波の周波数に依存している。この性質を利用するため、GPS 衛星の搬送波は L1(=1575.42Mhz)及び L2(=1227.60Mhz)という二つのバンド(周波数帯)が設定されている。

今、衛星から発信された L1、L2 の電波が受信機に到達する時間を t_1 と t_2 とすると、それらは衛星から受信機までの直線距離と光速から求められる時間 t 、電離圏による遅延(4)式を用いて以下の二式で表せる。

$$t_1 = t - \frac{a}{f_1^2} TEC \quad (5)$$

$$t_2 = t - \frac{a}{f_2^2} TEC \quad (6)$$

(5)式、(6)式より、TEC は GPS から得られるデータを用いて次の計算式で求めることができる。

$$TEC = \frac{t_1 - t_2}{a} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (7)$$

GPS 受信機の観測量は L 1 と L 2 の搬送波の位相であるので、それらに波長をかけて引き算し、光速で割ると(7)式の $t_1 - t_2$ に相当する量となる。ただし搬送波位相には未知のバイアスがあるので、一般的には計測開始時からの TEC の変化のみが求められる。

2.2 Zhang and Xiao (2005)

近年の GPS 地上局の充実に伴って、太陽フレアによる電離圏全電子数の急増(SITEC: Sudden Increase of Total Electron Content)の GPS 観測が Zhang and Xiao (2003)によって初めて報告された。ここではその発展である Zhang and Xiao (2005)の結果を紹介する。対象とするフレアは 2003 年 10 月 28 日に発生したクラス X17.2 という、非常に大規模なフレアである。全球で明確な SITEC が観測され、天頂角依存性が確かめられた。また、夏・冬半球で増加量に明らかな差があるという結果が出た。さらに、日出と日没地域における SITEC について地球の影や大気通過による吸収という説明がなされた。

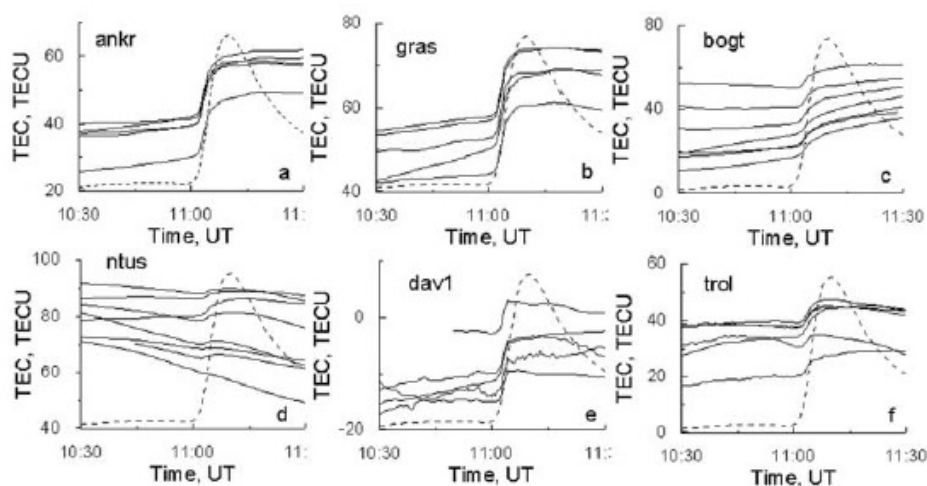


Figure 1. Temporal total electron content (TEC) curves derived from GPS data observed at six different GPS sites during the flare on 28 October 2003. The dashed line is the profile of the X-ray flux observed by the GOES (1~8 Å) during the flare. The GPS sites involved are shown in each panel. (a–b) Sites ankr (39.89°N, 32.76°E) and gras (43.75°N, 6.92°E). (c–d) Sites bogt (4.64°N, 285.92°E) and ntus (1.35°N, 103.68°E). (e–f) Sites dav1 (–68.58°N, 77.97°E) and trol (69.66°N; 18.94°E). It should be noted that some negative TEC values occurred in the figure because the instrumental biases are not removed during TEC calculation.

図 2-2 太陽フレア発生時の地上局 GPS-TEC の時系列変化(2003 年 10 月 28 日).a・b は比較的太陽直下に近い地点,c・d は日出と日没時,e・f が極域のもの.破線は GOES で観測された X 線強度の変化.前章で述べたように TEC にはバイアスがついているので絶対値はあまり意味をもたない. (Zhang and Xiao, 2005)

図 2-2 は色々な地点で得られた太陽フレア時の GPS-TEC 時系列変化である。複数の実線が様々な GPS 衛星の観測で得られた TEC 変動を表している。破線は GOES で観測された X 線強度の変化を TEC 変動と時系列を揃えて載せたものである。地点 a・b は中緯度の比較的太陽直下に近い地域、c・d はそれぞれ日出、日没の地域、e・f はそれぞれ南北の極域のデータである。全ての地域で TEC の急増(SITEC)が明瞭に観測されている。特に、太陽天頂角(Solar Zenith Angle: SZA)が小さい(太陽直下に近い)地点 a・b の SITEC は 17 TECU と非常に大きい。天頂角の大きい c と d では SITEC は a・b に比べると小さく、7 TECU 程度である。また、日出や日没に伴う TEC のゆるやかな上昇と下降も見られる。e・f の極域においても SITEC は確認できる。特徴的なのは e の南極地域の SITEC 約 5 TECU に対して f の北極地域が 8 TECU と有意に大きい点である。

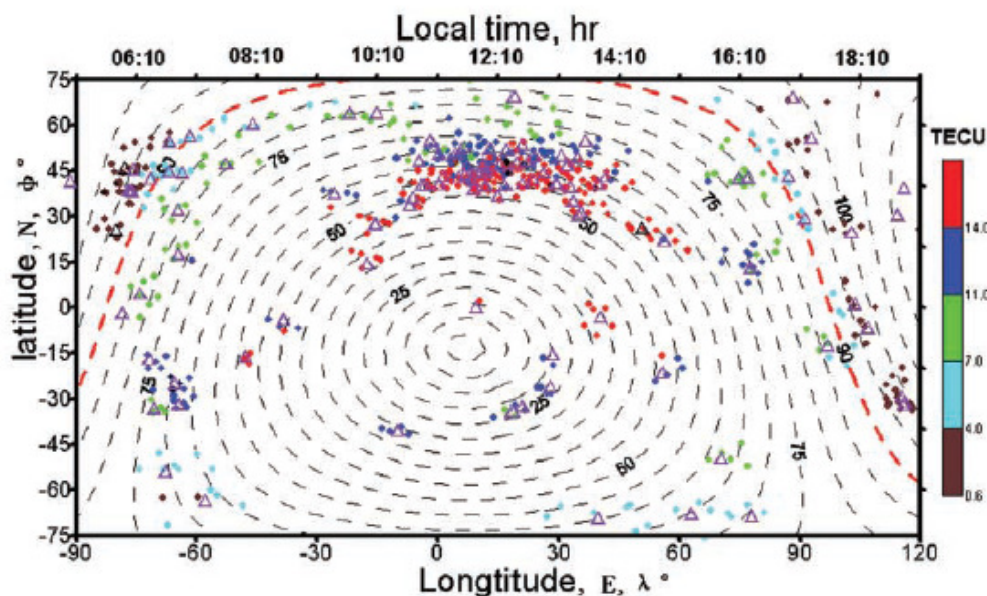


Figure 2. Distribution of the TEC enhancement on the sunlit hemisphere caused by the flare. The position of the dots indicates the latitude and the longitude of ionospheric penetration point (IPP). The open triangles represent the locations of the GPS sites selected. The dashed contour lines represent solar zenith angle (SZA) at 1110 UT. The upper axis shows the local time at 1110 UT in the dayside.

図 2-3 地球上の GPS 受信局で得られたフレア時の SITEC.破線は太陽天頂角のコンター(赤線は天頂角 90°).北半球において明確な天頂角依存の様子が分かる.また,夏・冬半球で SITEC の大きさに差が見られる. (Zhang and Xiao, 2005)

全球の GPS 局で観測された SITEC を比較したのが図 2-3 である。北半球の GPS 局が密な地域で天頂角が大きくなるにしたがって SITEC 量が減少している様子が分かる。緯度 60° 以上の地域を南北で比較してみると、南半球(夏半球)では 4-7 TECU(薄青)であるのに対して、北半球(冬半球)では 7-11 TECU(緑)と、ほぼ同じ天頂角($SZA=75^\circ$)であるにも関わらず明らかに大きいという結果が得られた。この結果については、この論文では具体的な説明はされていない。また、天頂角が 90° を越える日出前あるいは日没後の地域、つまり太陽放射が地表に届かないような地域においても SITEC が観測されることも分かった。これは、GPS 受信局の上空が地表付近のわずかな影の部分を除く大部分で太陽放射にさらされているためである。

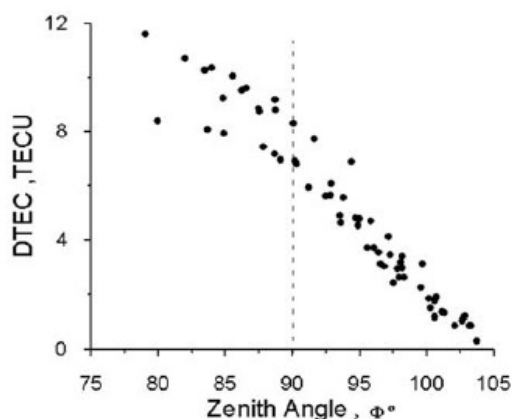


Figure 3. The TEC enhancement versus the solar zenith angle in the sunlit boundary region.

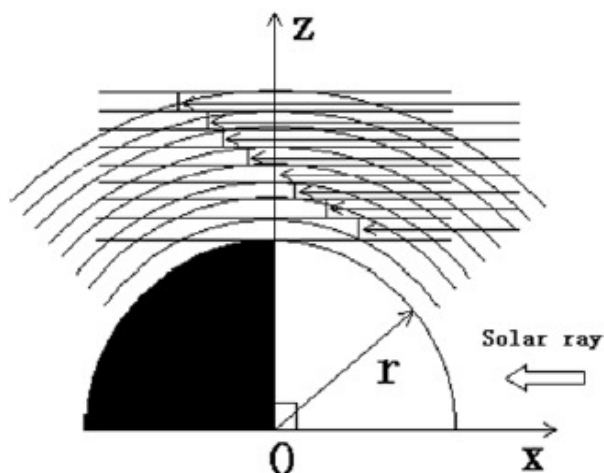


図 2-5 日出,日没地域における太陽放射の減衰を示す模式図.低高度ほど大気通過が長く吸収されやすい. (Zhang and Xiao, 2005)

図 2-4 太陽天頂角と SITEC 量との対応. 太陽天頂角 90° (日出または日没地点)を境に SITEC が急に減少している. (Zhang and Xiao, 2005)

このフレアから得られた太陽天頂角と SITEC 量との対応を図 2-4 に示す。天頂角 90° を境に SITEC 量が急に減少している。これは観測している GPS 局の上空が地球の影に入るためであるが、加えて図 2-5 にあるように大気による太陽放射吸収の度合いが大きくなる効果も含まれると予想されている。

また、Zhang and Xiao (2005)では、単位時間当たりの TEC 増加量(増加率)に二つのピークがあることを示した(図 2-6)。これはフレア放射の Impulsive と Slow の二成分を捉えている。

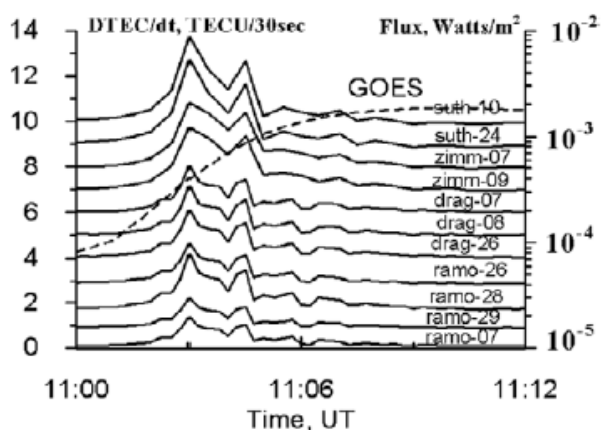


Figure 6. The rate of change of TEC derived from the observations by different satellite-receiver-pairs during the flare, the curves have been offset vertically for presentation purposes. The dashed line is the profile of the X-ray flux observed by the GOES (1~8 Å). The corresponding pair is labeled near each curve. Suth (-32.38°N, 20.81°E); Zimm (46.87°N, 7.47°E); Drag (31.60°N, 35.39°E); Ramo (-30.60°N, 34.76°E).

図 2-6 フレア発生直後の単位時間あたりの TEC 増加量(増加率)の時系列変化.破線は X 線強度.増加率の二つのピークは Impulsive 成分と Slow 成分に該当する. (Zhang and Xiao, 2005)

2.3 Heki (2006)

世界各地の GPS 局を用いた SITEC の観測(図 2-7,2-8)に加えて、太陽天頂角依存性について上層大気に一定の厚さをもつ減衰層を仮定したやや複雑なモデルを考案した。また、GPS 衛星と地上局間の経路の一部が地球の影に入る日没時のデータを用いて、電離圏電子密度増加の高度分布を推定した。影高度 100km 以下で SITEC が急激に減少するという結果が得られたが、これは Zhang and Xiao (2005)が示唆した地球大気による吸収の影響が多分に含まれているためであると考えられた。

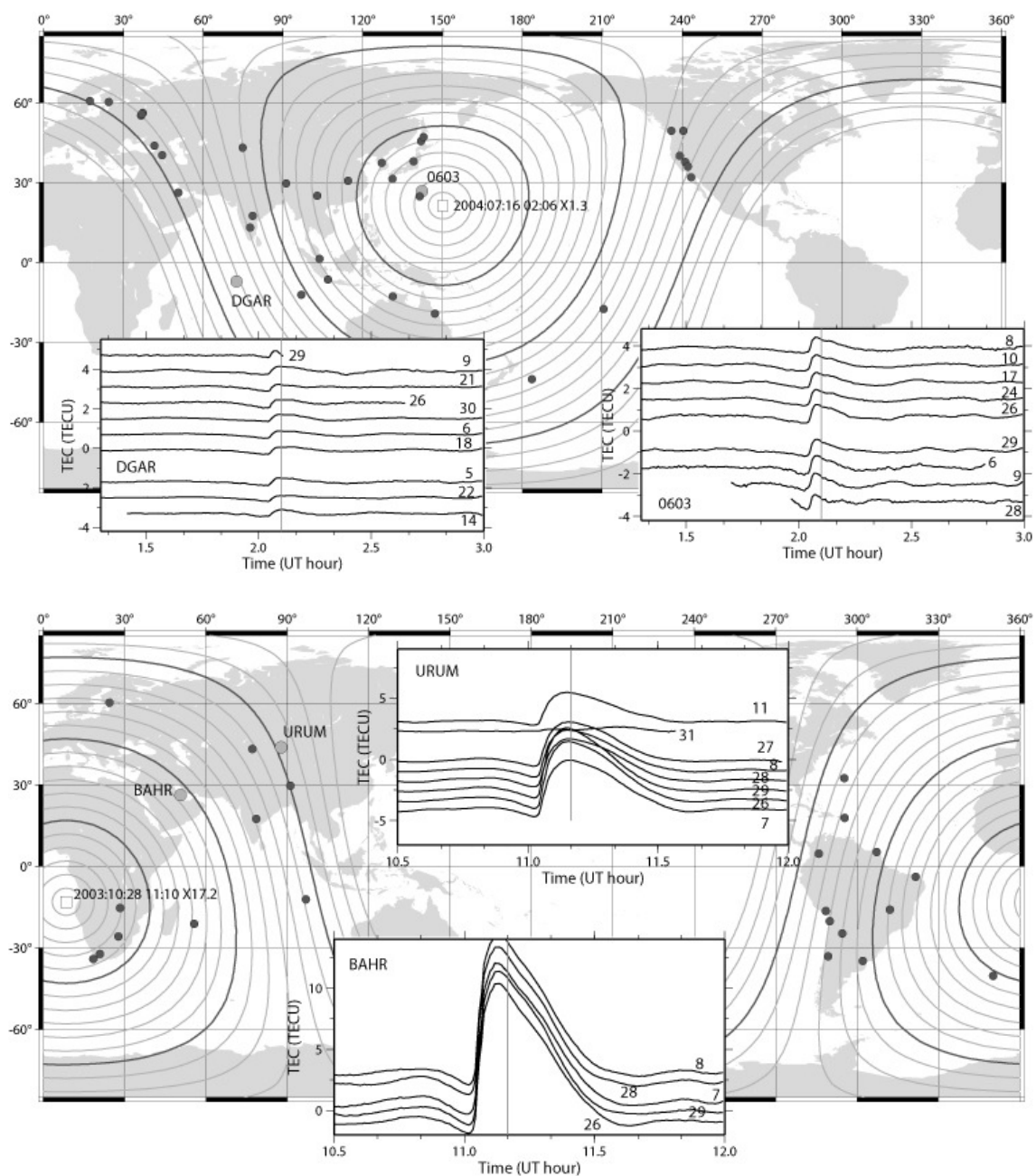


図 2-7(上) 2004 年 7 月 16 日発生,クラス X1.3 のフレアにおける SITEC.

図 2-8(下) 2003 年 10 月 28 日発生,クラス X17.2 における SITEC. (Heki, 2006)

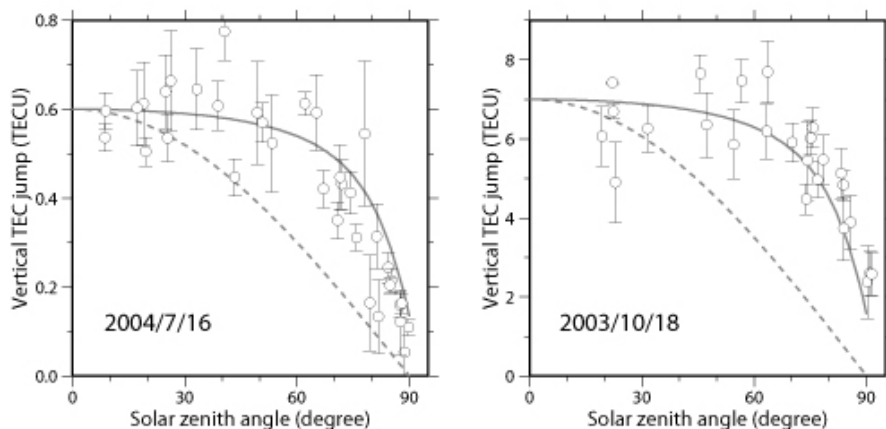


図 2-9 二つのフレアについて太陽天頂角と TEC 上昇量との対応. 実線がモデル式, 破線が $\cos \theta$ によるフィッティング. (Heki, 2006)

太陽天頂角 θ の点で電離圏が受ける太陽放射量は $\cos \theta$ に比例する。SITEC も単純に比例するかと思われるが、実際の観測では図 2-9 の通り、天頂角 60° 以下の範囲ではほとんど減らず、それを越えた所で急激に減少している。Heki (2006) では電離圏の上部に厚さ d km の太陽放射減衰層を仮定し、その層を通る長さの差が天頂角依存の原因であると考えて以下の式を求めた。

$$SITEC(\theta) = SITEC(0)[1 - \alpha(l(\theta) - d)/d] \quad (8)$$

ここで d と $l(\theta)$ は図 2-10 に示す減衰層の厚さである。 d を 200km、 α を 0.12 としたときの曲線は観測値におおむねフィットしている(図 2-9)。

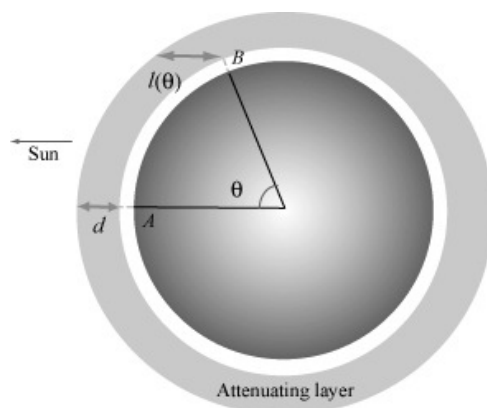


図 2-10 放射減衰層. (Heki, 2006)

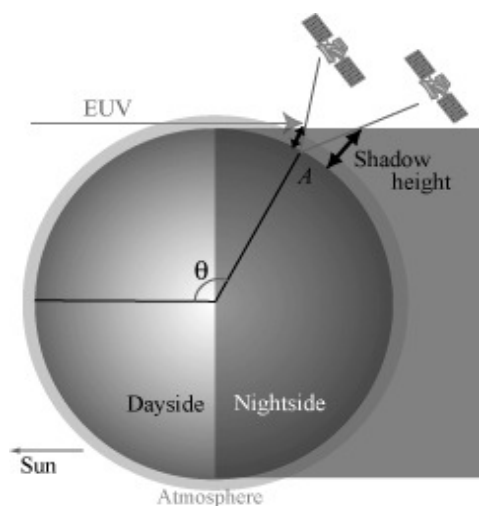


図 2-11 日没後の地域における GPS 衛星と地上局間の視線中の影高度(Shadow height)の差.電離圏のうち地球の影に入った部分には太陽放射は届かず,電子密度増加は起こらない. (Heki, 2006)

続いて、Heki (2006)では図 2-11 に示すように異なる影の高さ(Shadow height)における SITEC の値を用いて Donnelly (1976)で計算された電子密度増加の高度分布(前述)を確かめた。図 2-12 の結果をもとに SITEC と影高度の関係を示したのが図 2-13 である。Donnelly (1976)のモデル計算では高度 110-150km の E 層、F₁層が電子密度増加の大部分を占めているとされるが、図 2-13 の結果を見ると SITEC の急激な減少は影高度 100km 以下で起こっている。しかし、この結果から SITEC を担う電子密度増加が電離圏最下部の D 層で起こっているとするには無理がある。Zhang and Xiao (2005)でも述べられたように、天頂角の大きい地域では太陽放射が真横から来るため、その分手前の大気を通過する距離が長い。Heki (2006)の結果はこの大気通過による減衰の影響を大きく反映したものであるといえる。

以上、Zhang and Xiao (2005)でも Heki (2006)でも昼夜境界線のやや夜側の地上 GPS 局における SITEC のデータから、フレアによる電子密度増加の高度分布を求めようとしている。しかし、フレアに伴う電磁波はそれらの GPS 局の上空に達する前に地球大気によって減衰されてしまい、精度良く求められたとは言い難い。やはり昼側の様々な点における電子密度の高度プロファイルを取得できる GPS 電波掩蔽観測による直接観測が望ましい。

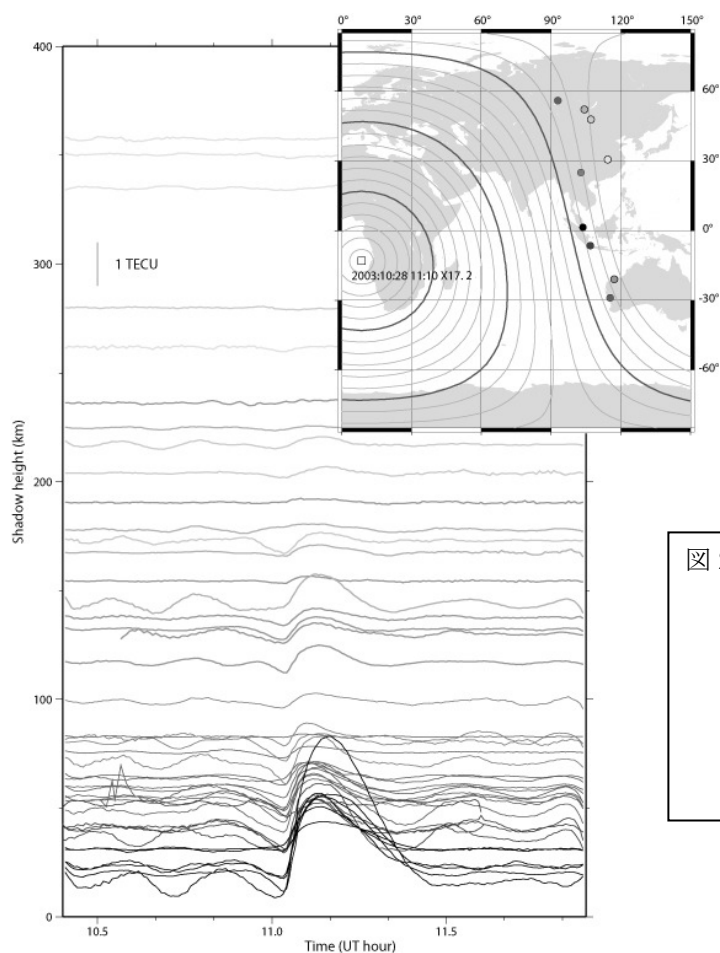


図 2-12 2003 年 10 月の太陽フレアについて、天頂角 90° 以上で SITEC が観測された点の時系列を異なる影の高さで比較。影高度 100km 程度で TEC 上昇が急激に小さくなっている。(Heki, 2006)

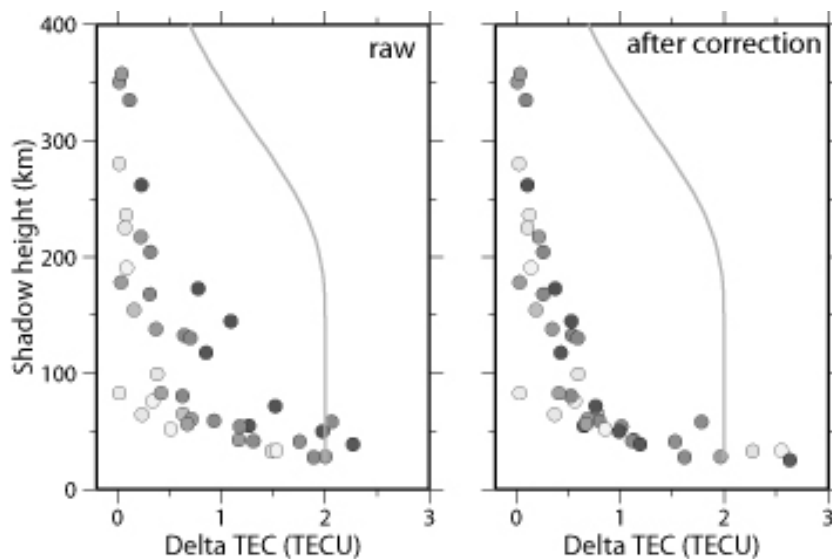


図 2-13 図 2-12 の結果から得た SITEC と影高度の対応。右図は衛星の視線方向と太陽との位置関係を考慮して値を補正したもの。実線はフレアによる電子密度増加が静穏時の高度分布と同じであると仮定したときの SITEC-影高度の関係。(Heki, 2006)

3 観測・解析手法

地上 GPS 局による観測(地上型 GPS 観測)で分かるのは TEC、つまり衛星-地上局間の電子の総数であり、電離圏電子密度の高度分布(鉛直プロファイル)を直接求めることはできない。また、電離圏の鉛直構造を調べる手法としてイオノゾンデやロケットによる直接観測が昔からあるが、これらは観測場所や回数が限られるため、断片的なデータしか期待できない。そこで、本研究では GPS 衛星と GPS 受信機を搭載した低軌道受信衛星を用いた GPS 電波掩蔽観測(GPS Radio Occultation Observations)という手法を用いる。

3.1 GPS 電波掩蔽観測 GPS Radio Occultation Observations

3.1.1 概要

掩蔽とは、月や惑星等の近くの天体に遠くの天体が隠れる現象であり、これを地球大気の観測に利用したのが GPS 電波掩蔽観測である。発信源の GPS 衛星と、受信機である低軌道(LEO: Low-Earth Orbiting)衛星で構成される。LEO 衛星から見て GPS 衛星が地球の地平線に沈む、または昇る際に電波は大気を掠めながらわずかに屈折、遅延する。この電波を受信し、屈折特性を解析することで大気の温度、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。ラジオゾンデ等の従来の地上観測に勝る高い精度と鉛直方向の高分解能に加え、地上設備の不要な宇宙型観測であるため陸海、極域を問わず全球を定常的に観測することができる。

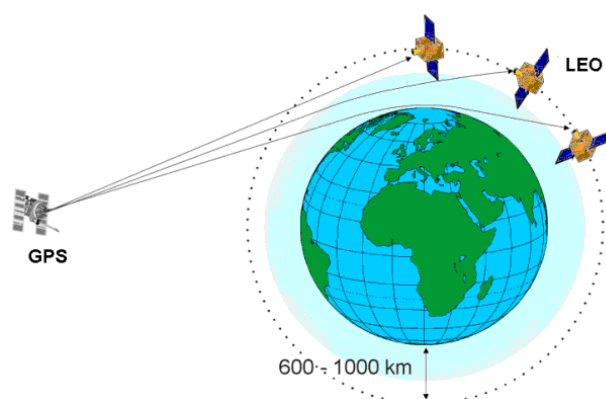


図 3-1 GPS 電波掩蔽観測の模式図。(Geodetic Data Archiving Facility より)

電波掩蔽観測の技術は最初、地球の遠方にある水星や金星等の惑星大気の構造を知る手段として 1960 年代にアメリカ合衆国で開発された(Mariner 計画)。同時に、発信衛星と受信衛星のペアによる地球大気の掩蔽観測の理論も提唱されていたが、高い軌道精度を有する複数の衛星の開発、打ち上げには当時の関心に比して莫大な費用がかかったため、実行されることはなかった。しかし、最近になって GPS 衛星網が発達したことで、これを発信源として利用する比較的低コストかつ安定した手法が確立され、地球大気の掩蔽観測が実現した。

3.1.2 データ導出法

掩蔽観測で得られるデータから屈折率プロファイルを求め、さらにそこから大気的气温、水蒸気量、電子密度等の各パラメータを導出するという過程は実際には非常に複雑である。ここではその全ては記載せず、Kursinski et al. (1997)で述べられた手順を基に簡潔に説明する。

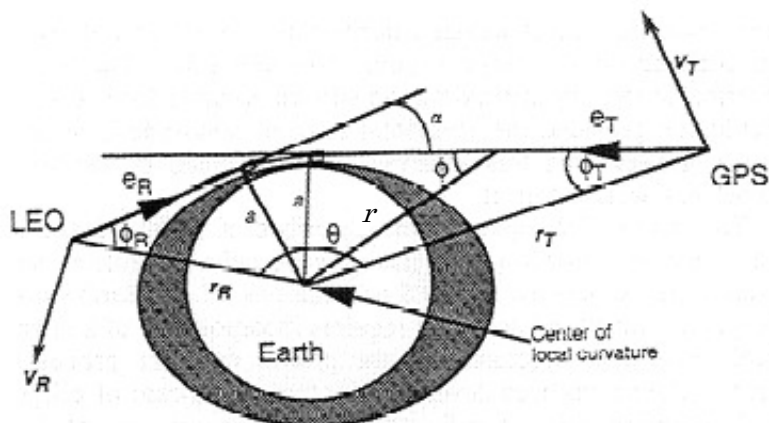


Figure 1. Instantaneous occultation geometry for the Global Positioning System (GPS) and low Earth orbiter (LEO) satellites defining variables for the derivation of α and a from Doppler shift, spacecraft position, and spacecraft velocity measurements.

図3-2 掩蔽観測における各衛星、観測点の位置関係. 屈折率高度プロファイルを得るには総屈折角 (Total Bending Angle) α を求める必要がある. (Kursinski et al., 1997)

・ 屈折率高度プロファイルの導出

屈折率は総屈折角 (Total Bending Angle) の Abel 変換で求められる。Total Bending Angle α は屈折率 $n(r)$ の積分として以下の式で表せる。

$$\alpha(a) = 2 \int_{r_t}^{\infty} d\alpha = 2a \int_{r_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n(r)^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (9)$$

r : 地球重心から搬送波経路までの距離

r_t は搬送波が通過した大気経路のうちの最も地球重心に近い点までの距離 (r の最小値) である。地球重心から見て r_t 以遠での屈折を大気突入時と脱出時について積分している。(9)式は Abel 変換を用いて $n(r)$ についての積分式(10)に変換できる。

$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da \right] \quad (10)$$

つまり、様々な a に対して実際に得られる観測量から Total Bending Angle α を導出できれば、その時点での大気の屈折率の高度分布が分かる。ここで α は図 3-2 より、(11)式で表せる。

$$\alpha = \phi_T + \phi_R + \theta - \pi \quad (11)$$

θ は GPS・LEO 両衛星の位置から分かるので、二つの未知量 $\phi_T \cdot \phi_R$ を受信データから求めればよい。受信機が受け取る GPS 衛星からの電波は、ドップラーシフトによって周波数が増減する。変化後の周波数を f_d (Doppler)、変化前を f_T (Transmitter) とすると f_d は(12)式で表せる。

$$f_d = \frac{f_T}{c} (V_T \cdot \hat{e}_T + V_R \cdot \hat{e}_R) = -\frac{f_T}{c} (V_T^r \cos \phi_T + V_T^\theta \sin \phi_T + V_R^r \cos \phi_R - V_R^\theta \sin \phi_R) \quad (12)$$

c : 光速

また、大気の球対称(水平方向に一様)を仮定すると、スネルの法則より

$$nr \sin \phi = \text{const} = a = nr_t \quad (13)$$

である。 $r \rightarrow \infty$ のとき、つまり $\phi = \phi_T$ または ϕ_R のとき、 $n=1$ であるから $\phi_T \cdot \phi_R$ は(13)式より

$$r_T \sin \phi_T = r_R \sin \phi_R = a \quad (14)$$

つまり(11)(12)(14)式より、実際の観測量であるドップラーシフトした搬送波の周波数 f_d から Total Bending Angle α が求められる。こうして様々な a について α が求められれば、(10)式を用いて高度の関数としての屈折率 $n(r)$ を求めることができる。(13)式が成り立つこと、つまり大気の球対称を前提としているため、水平方向の変化は値に含まれない。そのため、得られる屈折率はある程度の広がり(約 200-300km 四方)を持つ水平面での平均値である。また、現実には地球は楕円体であるため、球対称を仮定して計算された掩蔽観測のデータには、精度にほとんど影響は無い程度のわずかな誤差が生じる。

実際の GPS 電波掩蔽観測では、衛星同士の位置関係によって電波の経路が地表-大気圏外の間を時間と共に通過していく。この時の α の時間変化を追うことで n の高度による違い、つまり屈折率の高度プロファイルを得ることができるのである。

・ 電子密度の導出

ある高度での屈折率 N は依存するパラメータの値を用いて以下の式で表せる。

$$N = (n - 1) \times 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} + 4.03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1.4W \quad (15)$$

T が気温、 P が大気圧、 P_w が水蒸気圧、 n_e が電子密度、 f が搬送波の周波数、 W が大気中の微粒子(主に液体の水粒)の密度である。このうち、電子の影響は TEC 観測と同様に GPS の二種類のバンドで周波数依存性を利用して求めることができる。二種類の搬送波 $L_1 \cdot L_2$ の周波数を $f_1 \cdot f_2$ とすると、電子密度 n_e は屈折率の差をとることで(16)式で求められる。

$$n_e = \frac{N_2 - N_1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (16)$$

(A=4.03×10⁷)

気温、水蒸気量等の他のパラメータの導出については、本研究では考慮する必要が無いので省略する。

3.1.3 FORMOSAT-3/COSMIC 衛星

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) 衛星の電離圏電子密度プロファイルデータを CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center Version 2.0 (<http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.htm>) よりダウンロードして用いる。FORMOSAT-3/COSMIC は周期 95 分、高度 520km、軌道傾斜角 72 度の円軌道を周回する LEO(低軌道)衛星を、軌道面の昇交点傾度をずらした三つの軌道に 2 機ずつ、計 6 機配置することで、1 日あたり約 2500 の鉛直プロファイルデータを全球にわたって得ることができる。

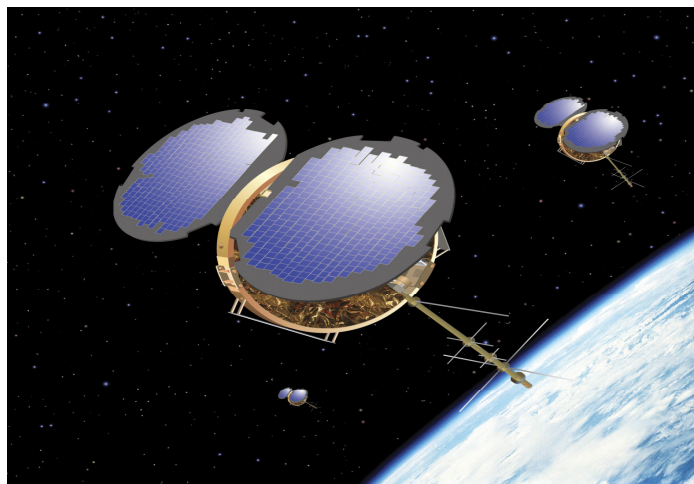


図 3-3 FORMOSAT-3/COSMIC 衛星。
(COSMIC web page より)

Occultation Locations for COSMIC, 6 S/C, 6 Planes, 24 Hrs

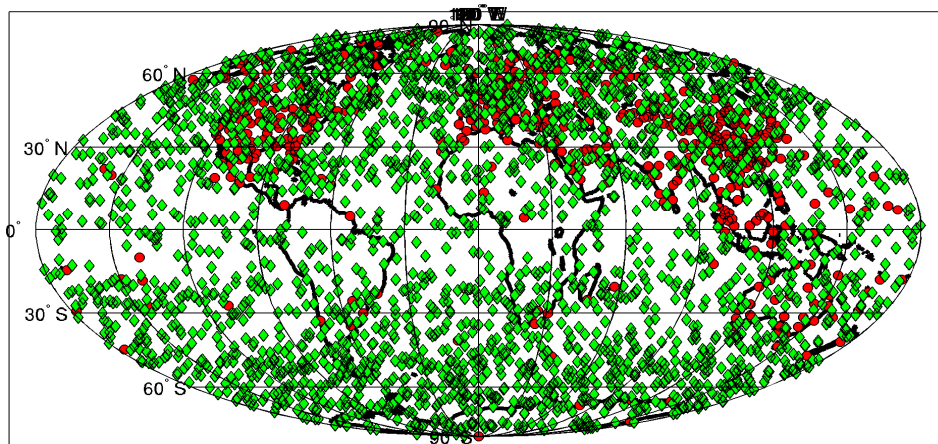


図 3-4 FORMOSAT-3/COSMIC による一日の観測点数(緑).
赤はラジオゾンデの観測点.軌道の性質上,赤道付近の
データ密度が低い. (COSMIC web page より)

3.2 観測例

FORMOSAT-3/COSMIC 衛星で得られた電子密度プロファイルの例を下図に示す。

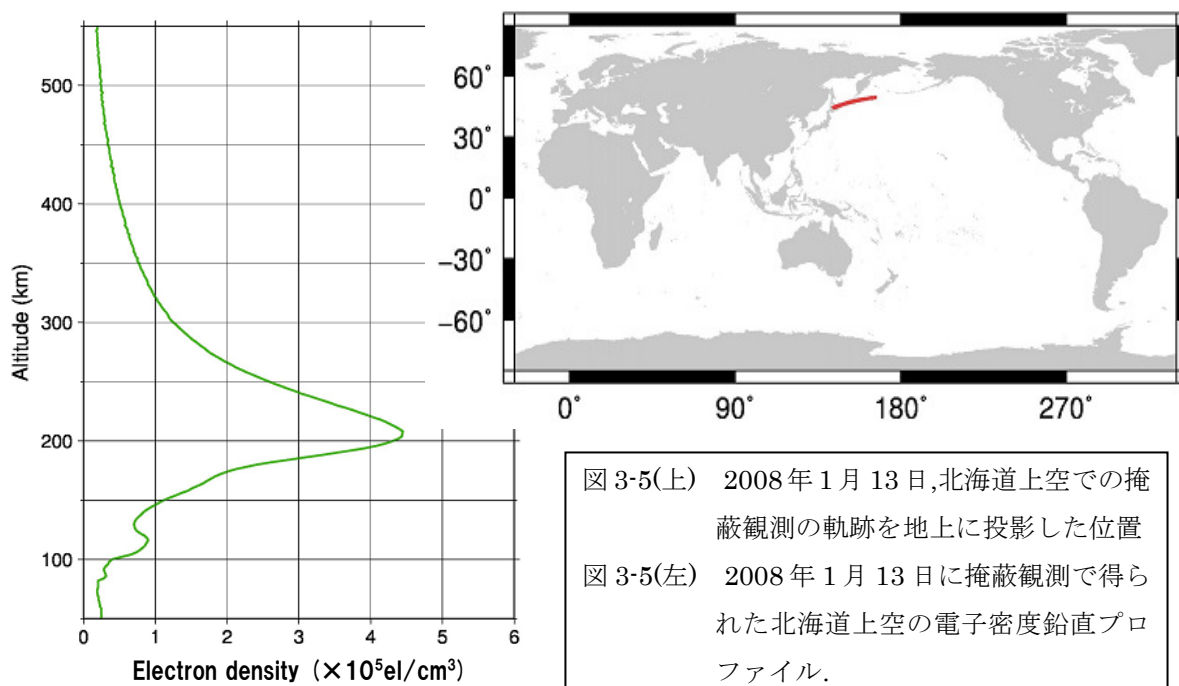


図 3-5(上) 2008 年 1 月 13 日,北海道上空での掩蔽観測の軌跡を地上に投影した位置
 図 3-5(左) 2008 年 1 月 13 日に掩蔽観測で得られた北海道上空の電子密度鉛直プロファイル.

GPS 電波掩蔽観測は GPS 衛星と LEO 衛星が移動しながら観測を行うため、図 3-5(上)のように観測域に水平方向の長さを持つ。つまり、得られるプロファイルは地上のある一点の鉛直上空の値ではなく、水平方向の変化を平均したものであることに注意しなければならない。また、一回の観測には数分程度の時間を要するため、非常に短い時間スケールで起こる変化は正しく反映されない(時間変化が高度方向の変化として現れてしまう)。本研究の場合、太陽フレアによる電離圏電子密度増加は地球の昼側の広範囲で起こるので、水平方向の広がりはさほど影響は無い。しかし、掩蔽観測がフレアによる突発的な増加の最中に行われている場合、高度プロファイルに影響が出てしまう可能性がある。

3.3 解析手法

本研究の対象は2006年12月5日に発生したクラス X9.1 の太陽フレアであり、COSMIC 衛星が打ち上げられてから2010年現在までで最大のものである。X線強度のピークが観測された10時35分(UT)の前後30分以内に地球の昼側で観測された電子密度プロファイルを集めた。得られたプロファイルを経緯帯、または Local Time ごとに五つのグループに分け、電子密度増加の様子を調べた。静穏時からの変化を見るために、前10日間(11月23日-12月2日)に得られたデータからプロファイルの中央値(Median)を作成する。Median は十分なデータ密度を保つように緯度15° ごと、Local Time 2時間ごとに区分して地域ごとに設定した。

また、Heki (2006)と同様に International GNSS Service (IGS)の地上 GPS データを用いたフレア時 SITEC の時系列解析(手法の詳細は Heki (2006)を参照されたい)も行った。さらに、Global Ionospheric Map(GIM)から10分ごとの全球 TEC 分布図を求めた。これら二つの地上型 GPS 観測による解析を掩蔽観測の結果と比較する。

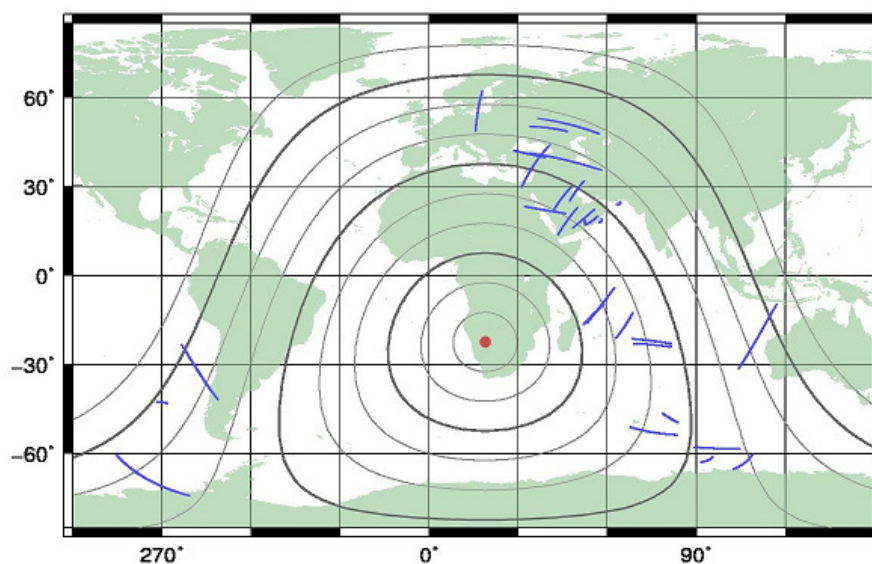


図 3-6 本研究の対象となる太陽フレア前後 30 分以内(10 時 05 分-11 時 05 分)に、地球の昼側で掩蔽観測が行われた場所(青い線)。同時に X 線強度最大時の太陽直下点(10 時 35 分 UT:-22.4N 18.9E)と天頂角のコンター(10° 間隔)を示す。

本研究では、特に顕著な増加が見られた地域のプロファイルについて、Median を差し引いた電子密度増加分のプロファイルを求め、その高度分布を調べる。また、Zhang and Xiao (2005)で報告された夏・冬半球で増加量が異なる可能性について検証するため、南半球と北半球の増加分プロファイルと比較する。さらに、Donnelly et al. (1976)の電子密度増加モデルから増加分プロファイルを取り出し、本研究で得られたプロファイルと比較する。

これらの結果から、対象の太陽フレアにおける電子密度増加の特徴について考察する。

4 観測・解析結果

4.1 地上局観測の結果

まず、地上 GPS 局による観測の結果を図 4-1 に示す。TEC の上昇が比較的ゆるやかなのは、本フレアが太陽の縁辺部で発生したものであるため、Impulsive な成分が太陽大気の吸収によってかなり失われているためと思われる（この点に関しては第 5 章で議論する）。

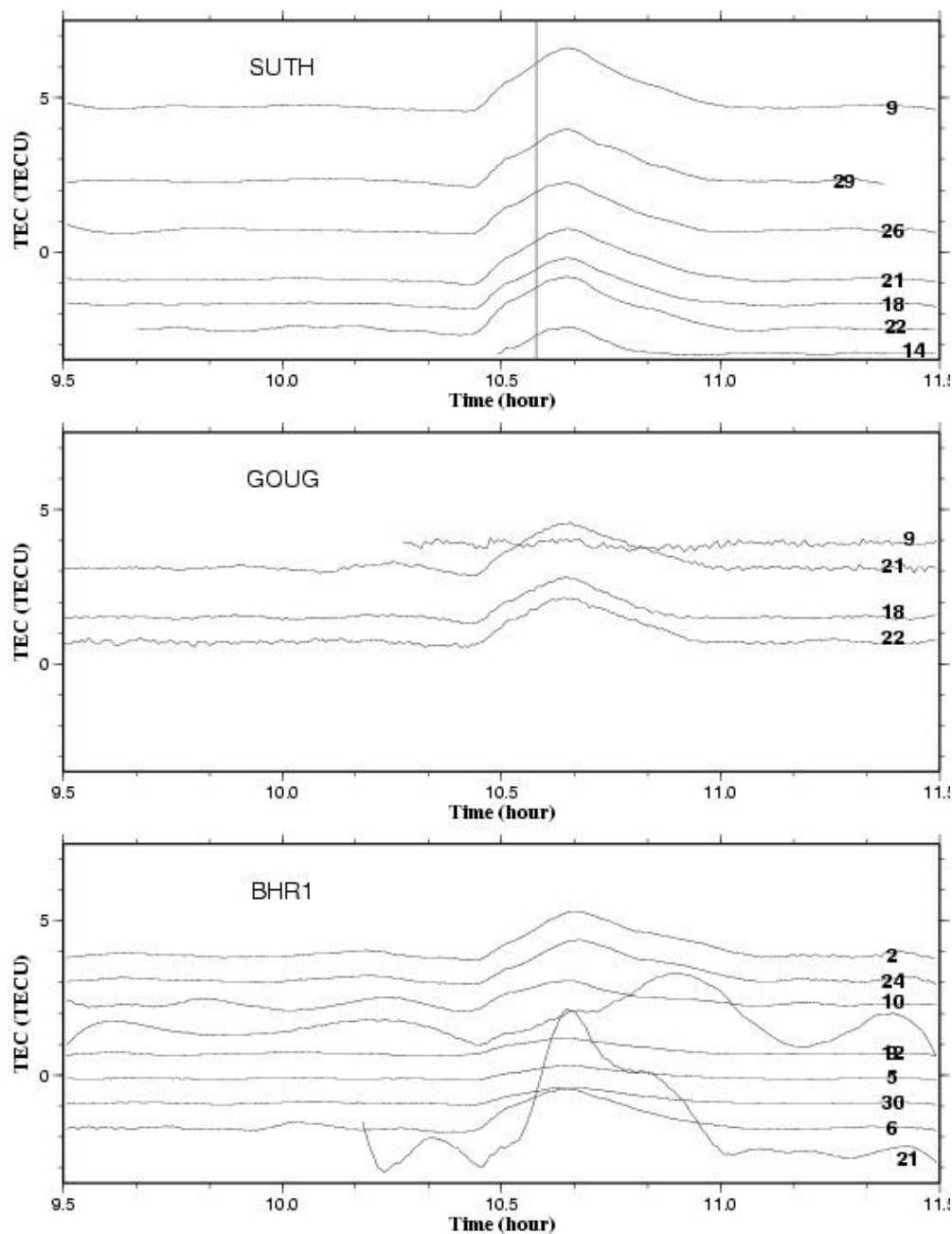


図 4-1 上から南アフリカ(Sutherland), ゴフ島(Gough island),バーレーン(Bahrain)の地上 GPS 局における太陽フレア時の TEC 変動.X線強度最大時(10 時 35 分 UT)を図最上部に縦線で示す.右の数字は GPS 衛星の通し番号である.SITEC 値は、太陽直下に最も近い南アフリカ局で約 2TECU 程度.ほぼ全てのデータに 10 時 27 分から 11 時 0 分頃にかけて SITEC が見られる.

次に GIM による TEC の分布を図 4-2 に示す。時間分解能が低いため GIM ではフレアの影響を確認できない。高い TEC を示す領域が南西方向に伸びている。また、図の中心下部にも TEC 異常が見られるが、これらはフレアの電磁波放射とは直接の関係は無いと思われる。

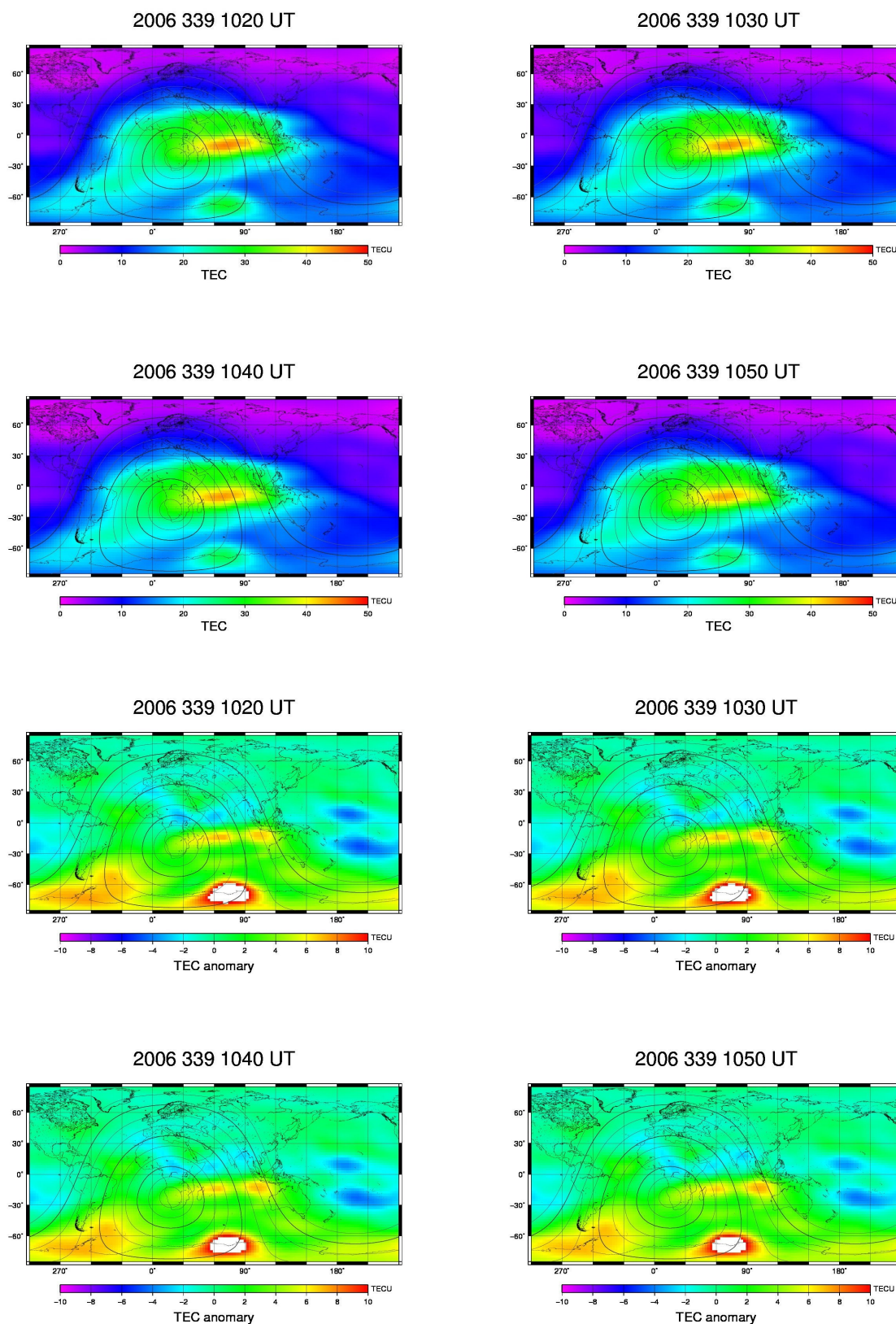


図 4-2 Global Ionospheric Map(GIM)より得られた太陽フレア前後における 10 分ごとの全球 TEC 分布.上段が TEC 値,下段が前 10 日間の平均からの差である.

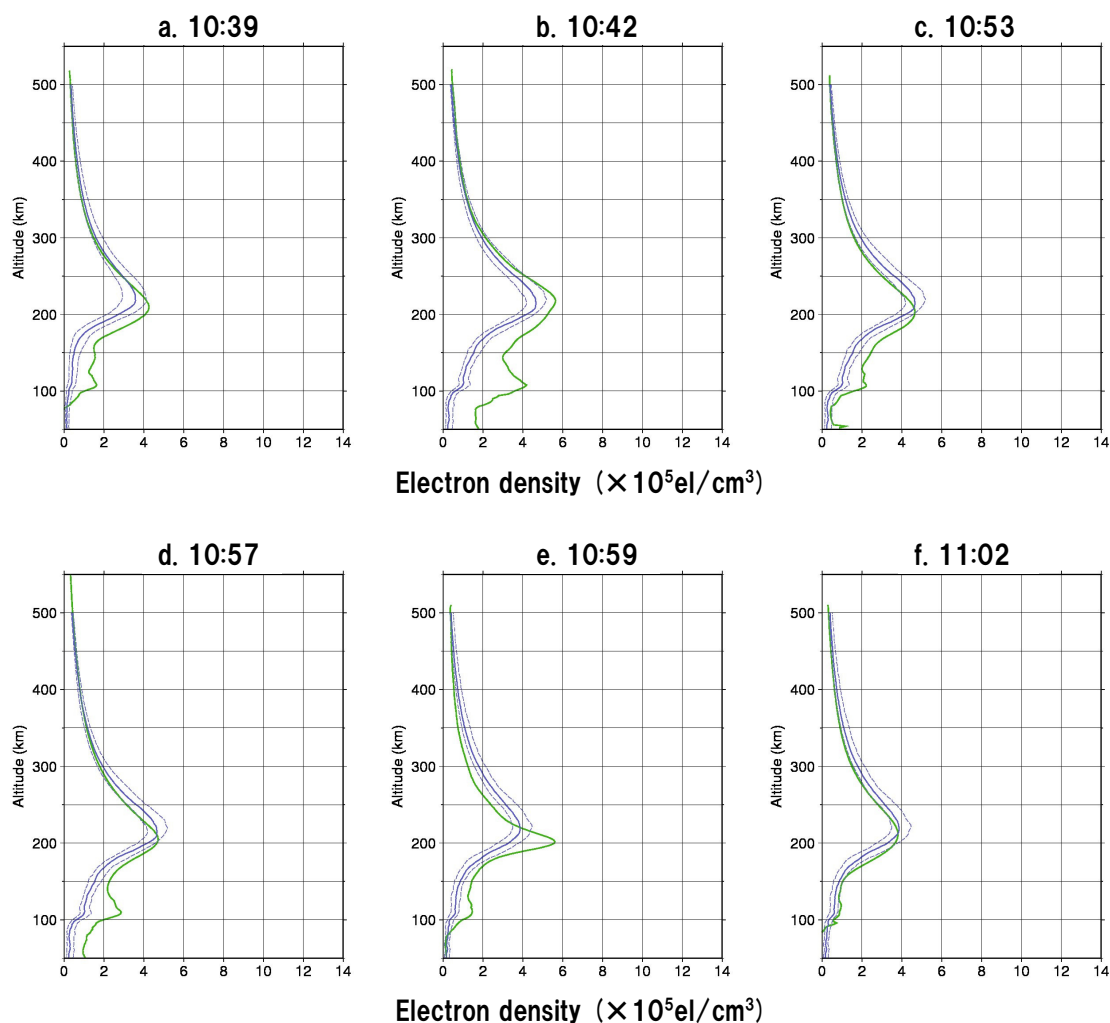
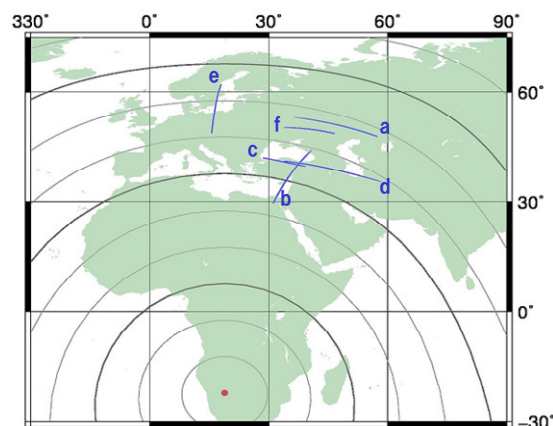
4.2 掩蔽観測の結果

続いて、太陽フレアの前後 30 分以内に地球の昼側で観測された電子密度高度プロファイルを五つのグループに分類して示す。各掩蔽観測のうち、電子密度最大の高度を観測した時刻をその観測の標準時刻として表示している。

1.北半球 中・高緯度

まず、北半球の中・高緯度で得られた電子密度高度プロファイル六つを図 4-3 に示す。プロファイル a から e で電子密度増加が確認できる。特に高度 110km での増加が目立つ。

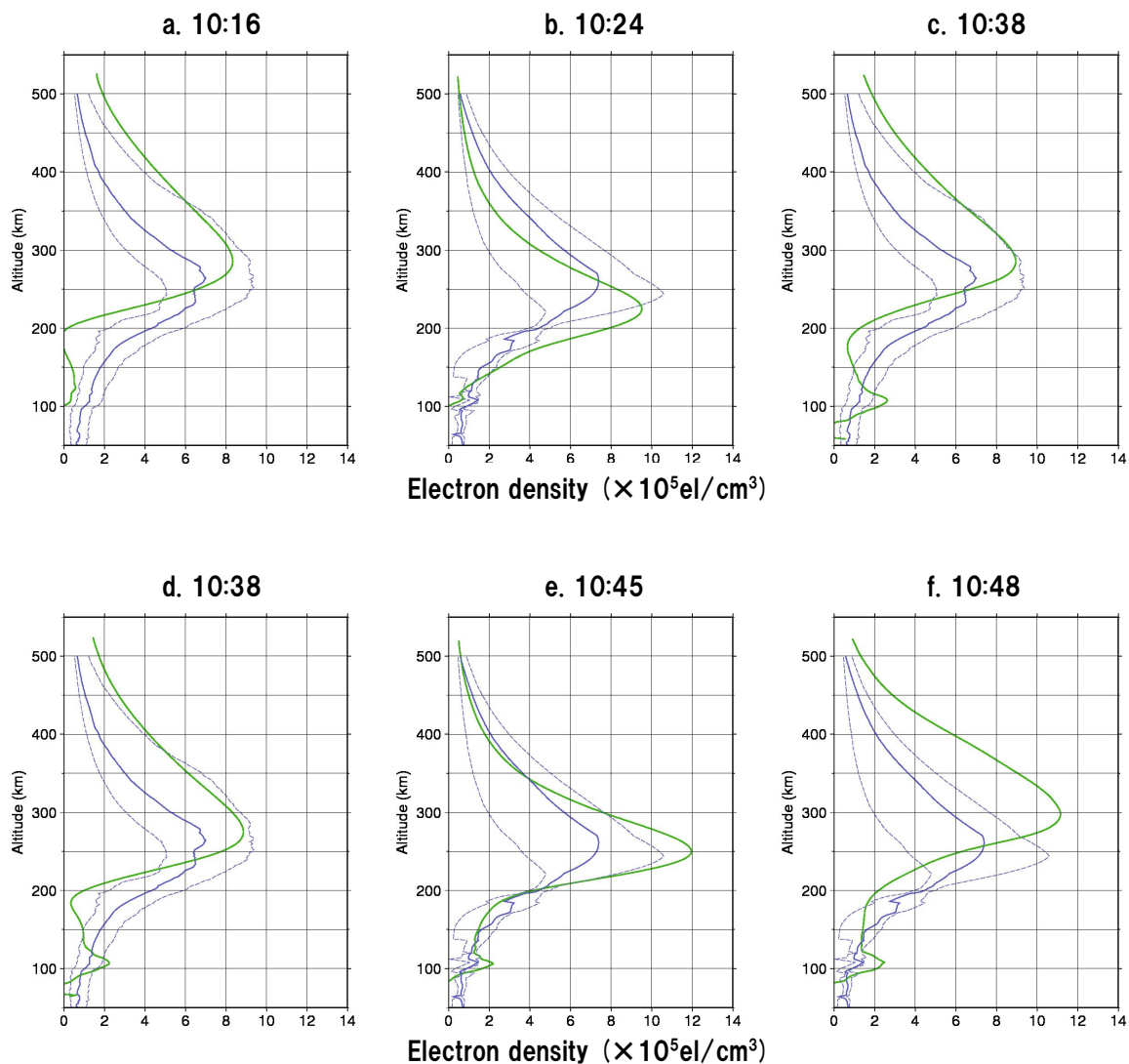
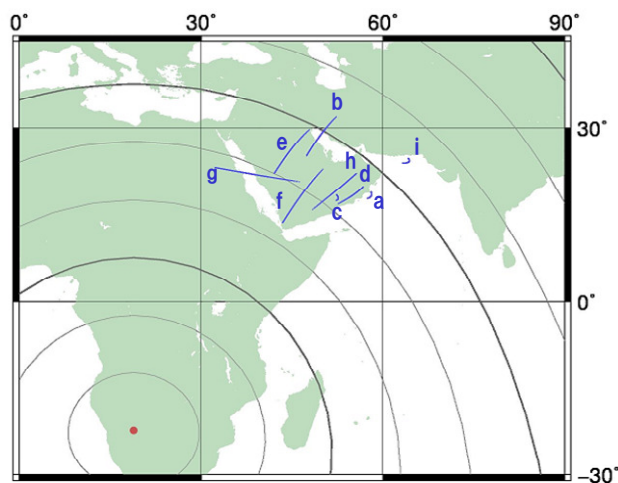
図 4-3 北半球の中・高緯度における電子密度高度プロファイル(下)とそれぞれの観測域(右).プロファイル中の緑が観測値,青の実線,破線がそれぞれ前 10 日間の Median と Quartile を示す.全体的な増加に加えて,高度 110 km に顕著なピークが見られる.

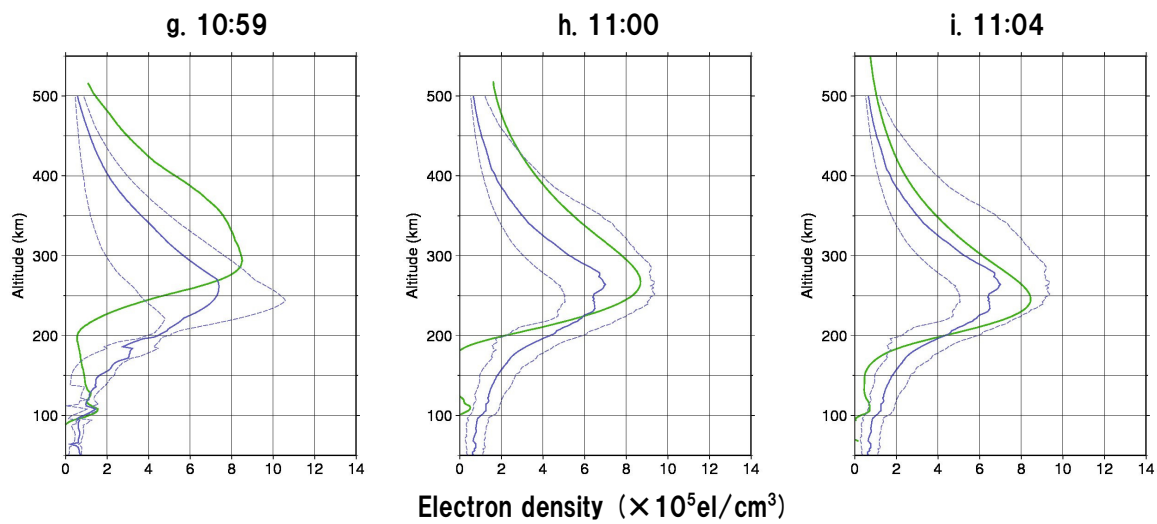


2.北半球 低緯度

次に、北半球の低緯度で得られた電子密度高度プロファイル九つを図 4-4 に示す。プロファイル c から g にかけて高度 110km での増加が見られるが、F 層では明確な増加は確認できない。

図 4-4 北半球の低緯度における電子密度高度プロファイル(下)とそれぞれの観測域(右)(図 4-3 と同様).高度 110km に増加のピークが確認できるが、F 層については明確な増加は見られない。(次ページに続く)

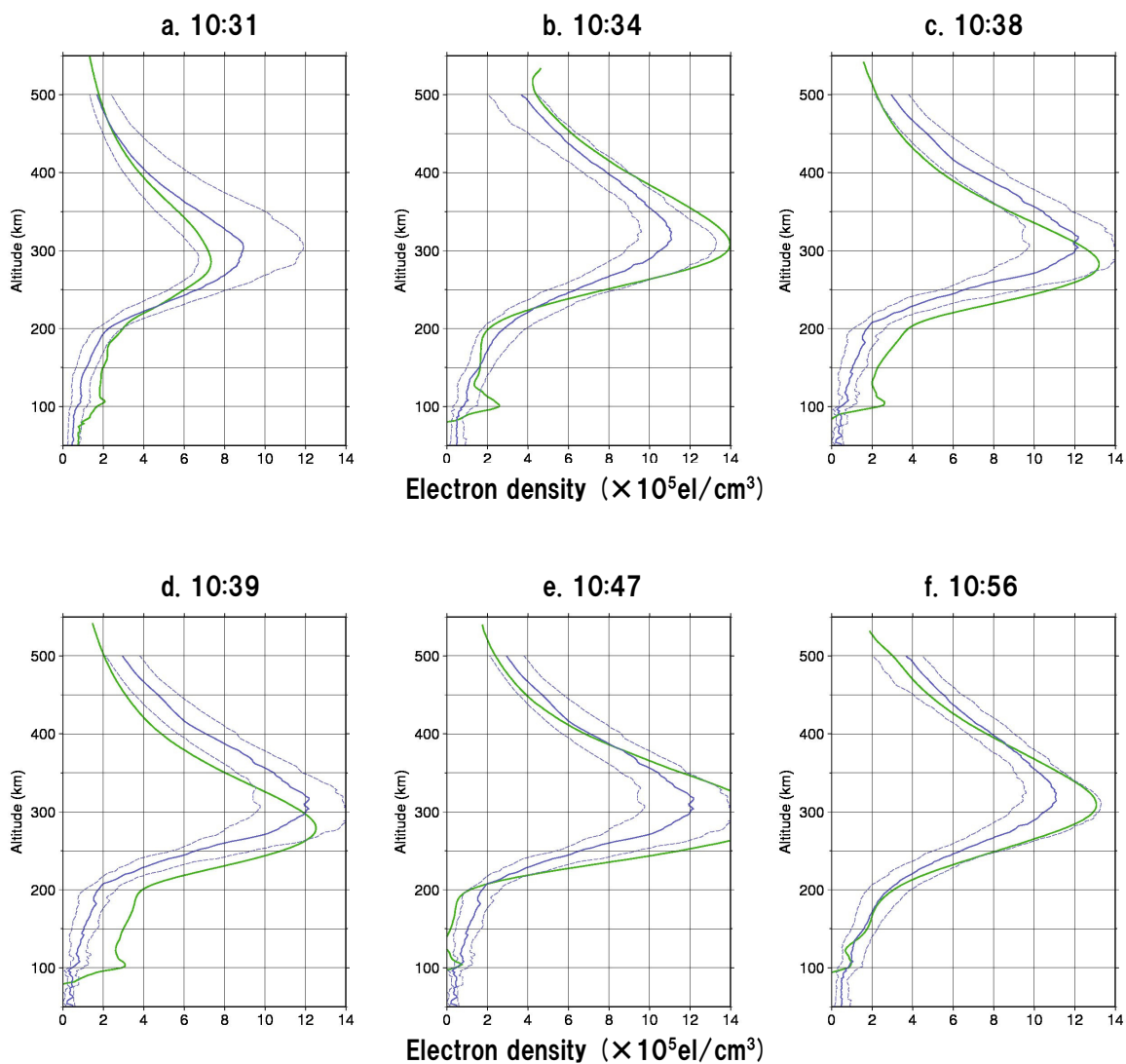
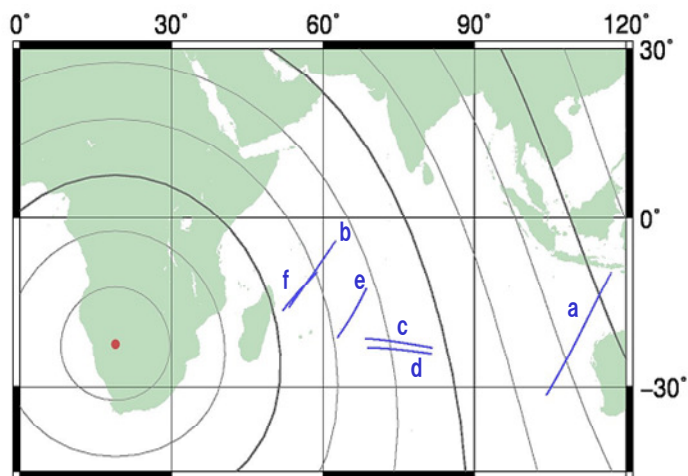




3.南半球 低緯度

南半球の低緯度で得られた電子密度高度プロファイル六つを図 4-5 に示す。プロファイル a から d にかけて高度 100km 付近の増加が見られるが、F 層での増加は見られず、静穏時とほぼ変わっていない。

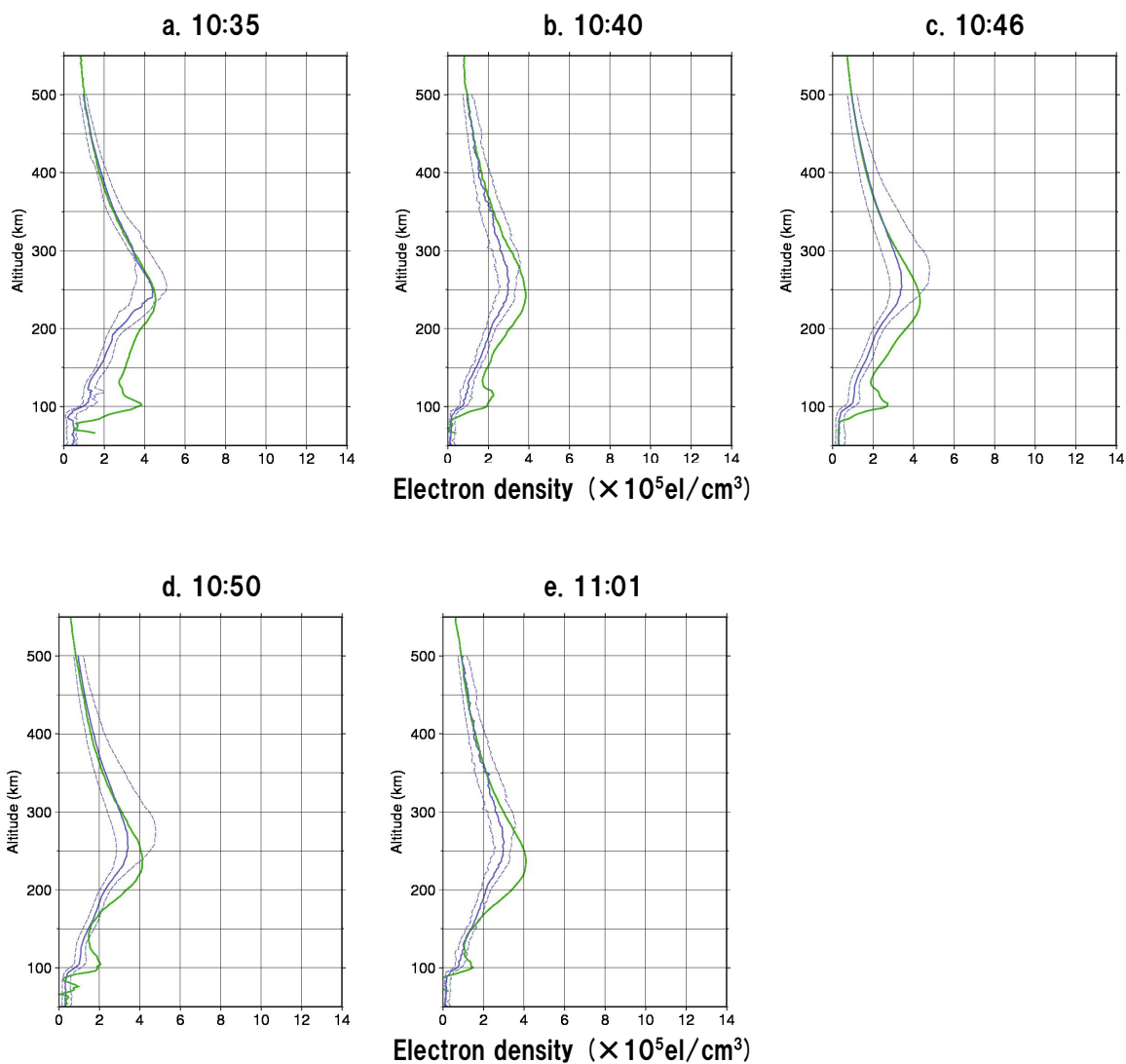
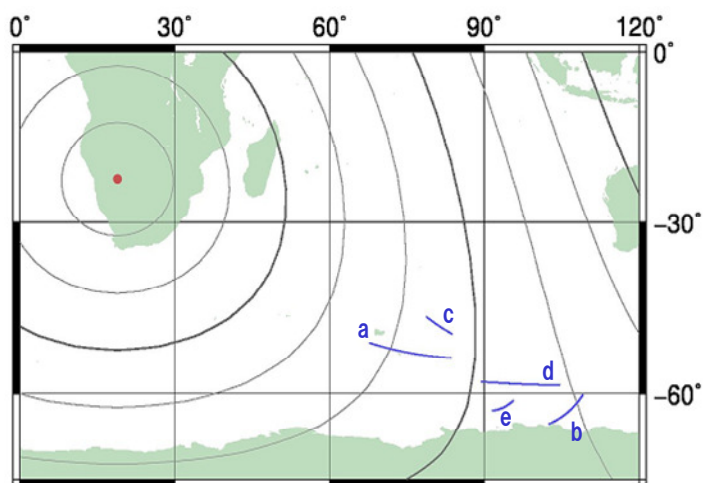
図 4-5 南半球の低緯度における電子密度鉛直プロファイル(下)とそれぞれの観測域(右)(図 4-3 と同様).低高度の増加は見られるが、F 層の電子密度は静穏時とほぼ変わっていない。



4.南半球 中・高緯度

南半球の中・高緯度で得られた電子密度高度プロファイル五つを図 4-6 に示す。北半球の中・高緯度(図 4-3)と同様にプロファイル a から c で高度 100km での増加が顕著に見られるうえ、F 層の増加も若干確認できる。

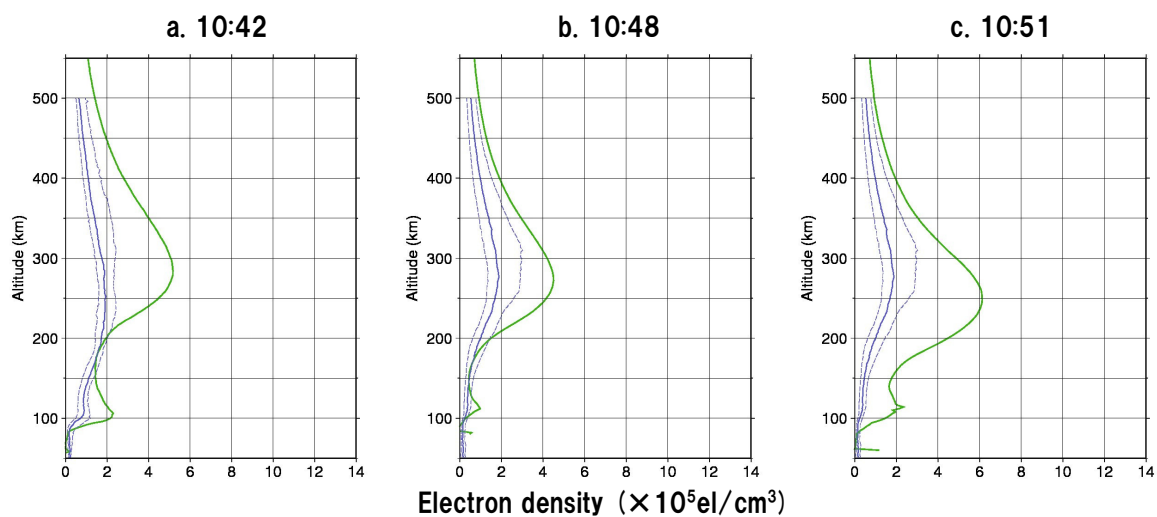
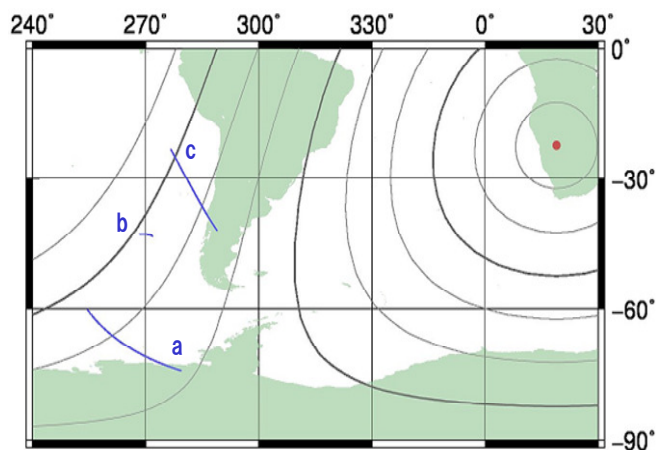
図 4-6 南半球の中・高緯度における電子密度高度プロファイル(下)とそれぞれの観測域(右)(図 4-3 と同様)。北半球の中・高緯度と同様に全体的な増加と低高度(E 層)のピークが確認できる。



5. 南半球 西側

南半球の太陽の西側で得られた電子密度高度プロファイル三つを図 4-7 に示す。他の地域に比べて太陽天頂角が大きい地域であるにも関わらず、電子密度増加が大きい。また、他のプロファイルではあまり見られない F 層での増加が顕著である。これはフレア放射の以外の影響を含んでいる(この点については第 5 章で議論する)。

図 4-7 南半球の太陽西側,天頂角の大きい地域における電子密度高度プロファイル(下)とそれぞれの観測域(右)(図 4-3 と同様).他グループに比べて太陽天頂角が大きい地域であるにも関わらず全体的に顕著な電子密度増加が見られる。

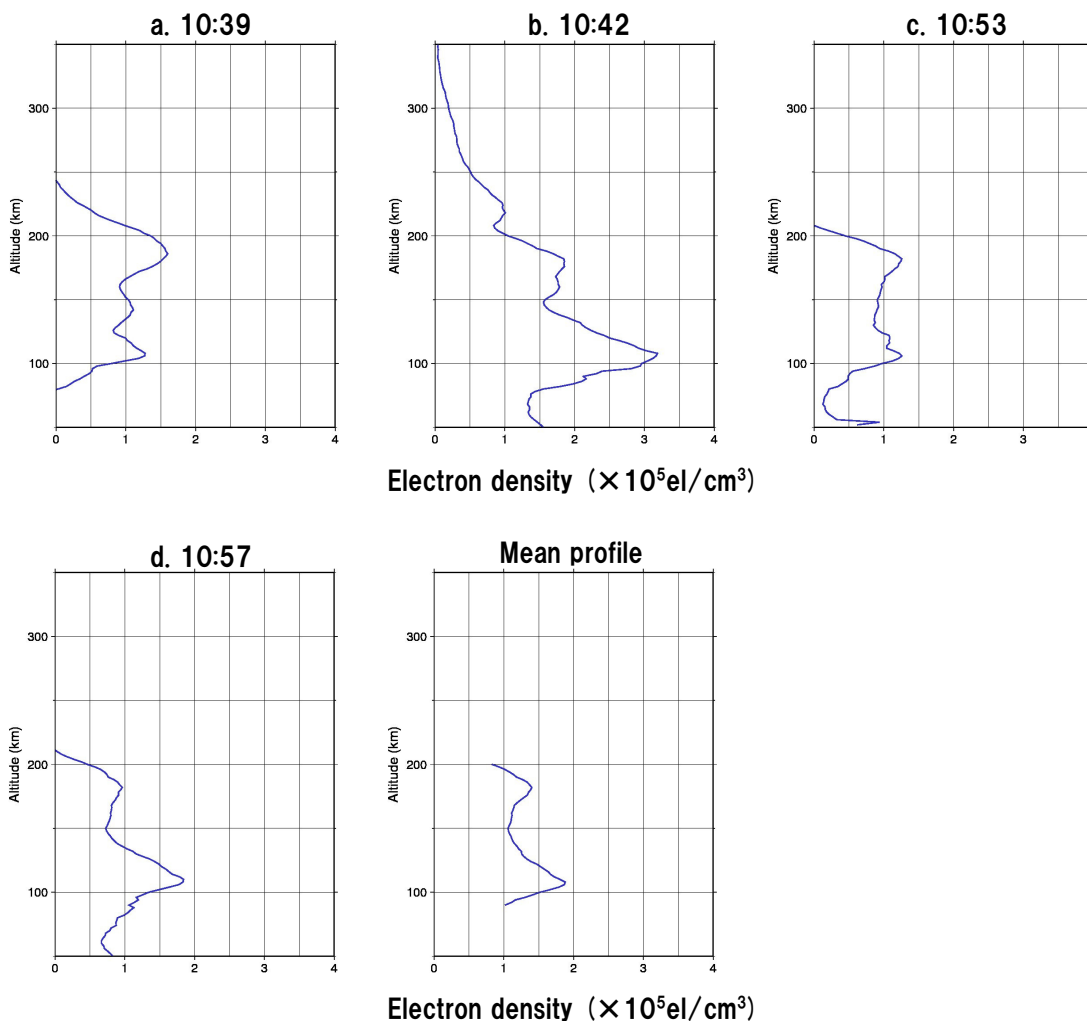
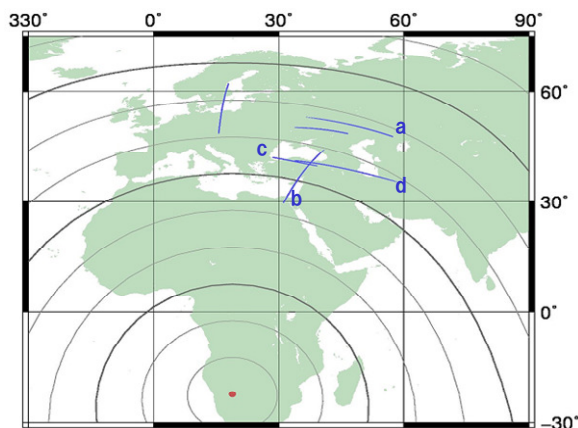


中・高緯度での観測のうち電子密度増加がはっきりと捉えられたプロファイルについて、静穏時(前 10 日間の Median)の値を差し引いた電子密度増加分のプロファイルを以下に示す。また、それらの値を相加平均した北半球、南半球の中・高緯度帯における電子密度増加分の平均高度分布を求めた。

・北半球

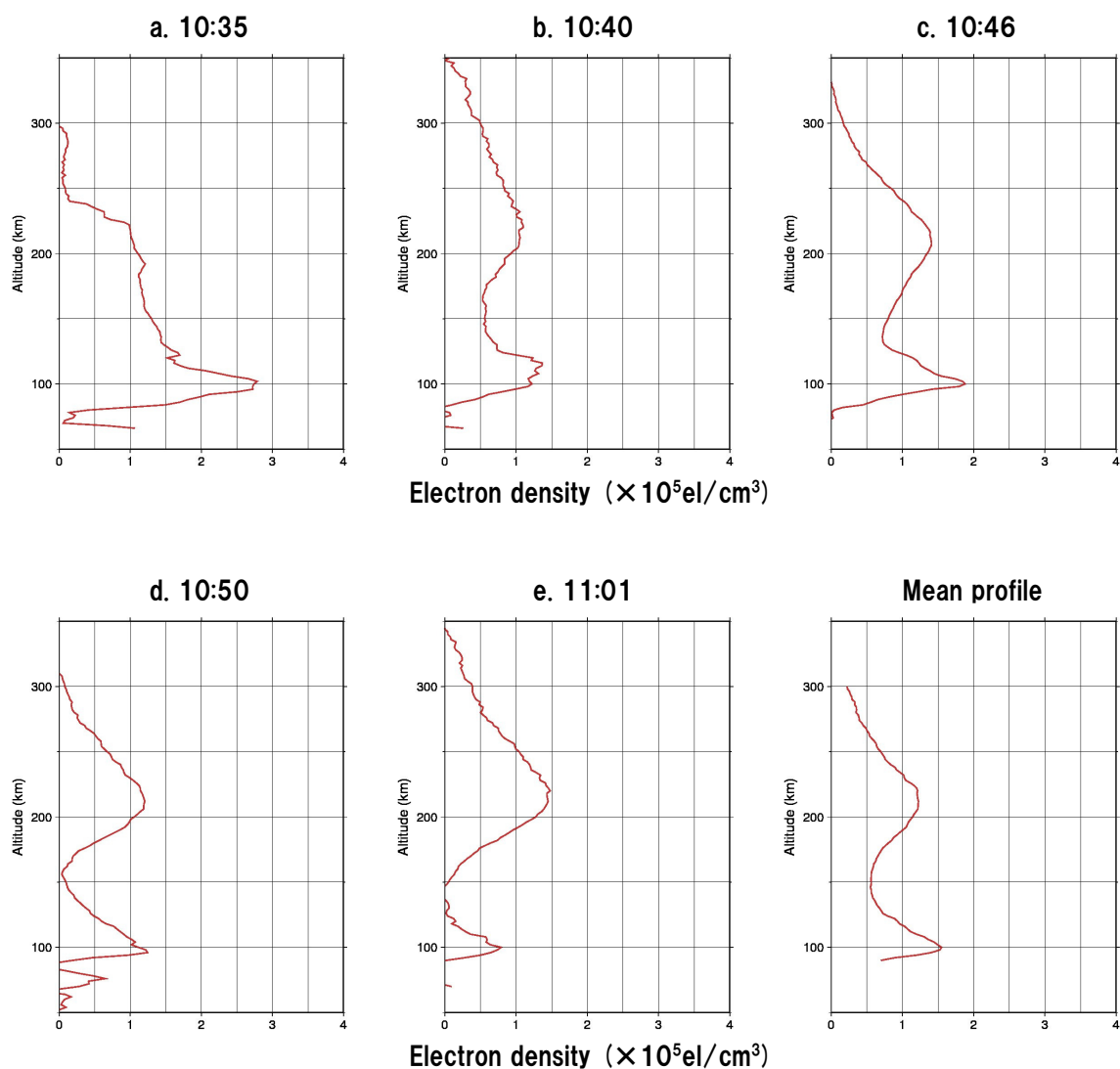
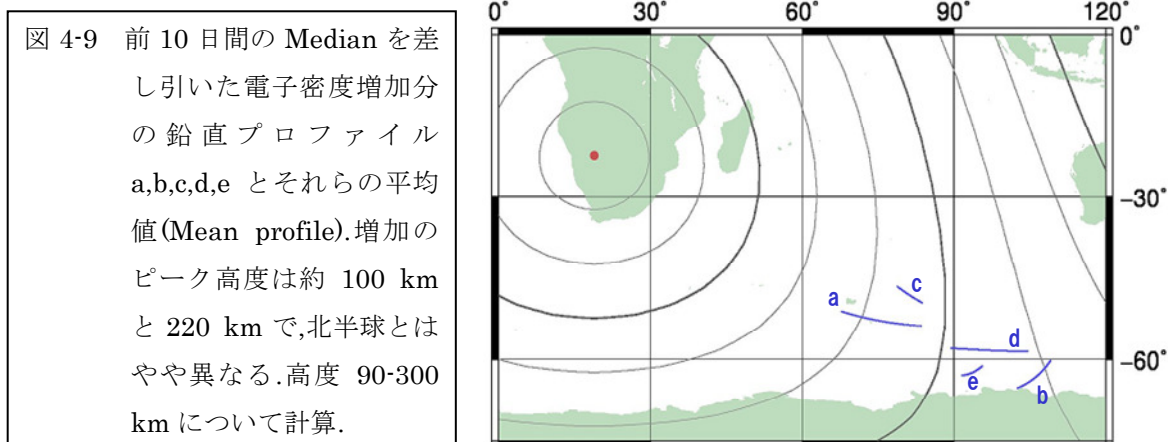
まず、北半球の中・高緯度の電子密度増加分プロファイル(a から d)とその平均(Mean profile)を図 4-8 に示す。個々の高度分布の様子には違いがあるが、高度 110km と 180km 付近には共通して増加のピークが見られる。Mean profile は増加が明瞭な高度 90-200km について計算。

図 4-8 前 10 日間の Median を差し引いた電子密度増加分の鉛直プロファイル a,b,c,d とそれらの平均値(Mean profile).高度約 110km と 180km に二つ増加ピークが見られる。Mean profile は増加が明瞭な高度 90-200km について計算。



・南半球

次に、南半球の中・高緯度の電子密度増加分プロファイル(a から e)とその平均(Mean profile)を図 4-9 に示す。北半球と同様に、すべてのプロファイルに一貫して二つのピーク高度が存在する。しかし、その高度は 100km と 220km 付近で、北半球と若干異なる。



南北の増加分平均プロファイル(図 4-8 と 4-9 の Mean profile)の比較を図 4-10 に示す。既に述べたように、南北のプロファイルでピーク高度が異なっている。また、増加量は高度 200km 以下に関して言えば、北半球のほうが南半球よりも大きい。

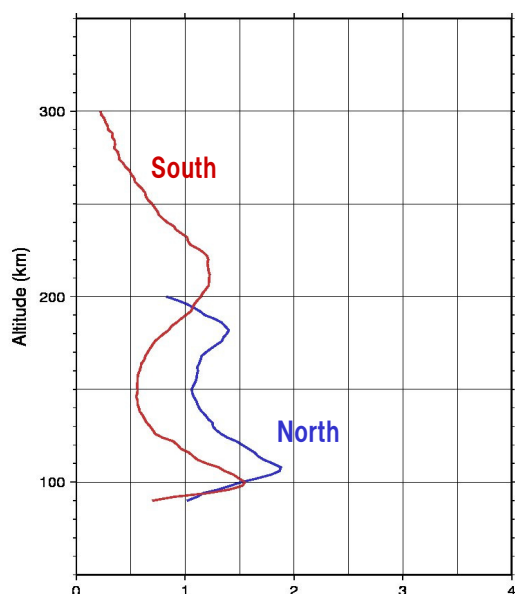


図 4-10 図 4-8,4-9 の Mean profile を比較.青が北半球,赤が南半球を示す.二つの地域の太陽天頂角はほぼ同じである.増加のピーク高度が南北で幾分異なるのが分かる.また,高度 200km 以下に関していえば北半球のほうがやや増加量が多い.

最後に、南北の増加分平均プロファイル(図 4-8 と 4-9 の Mean profile)と電子密度増加の時間・高度分布モデル(Donnelly et al., 1976)から取り出した 4 分ごとの電子密度増加分プロファイルの比較を図 4-11 に示す。モデルは高度 110、140、250km 付近の三つのピーク高度をもつ。最下部の高度 110km 付近のピークはモデルと一致しているが、他のピークについては有意に異なっている(第 5 章で詳しく述べる)。

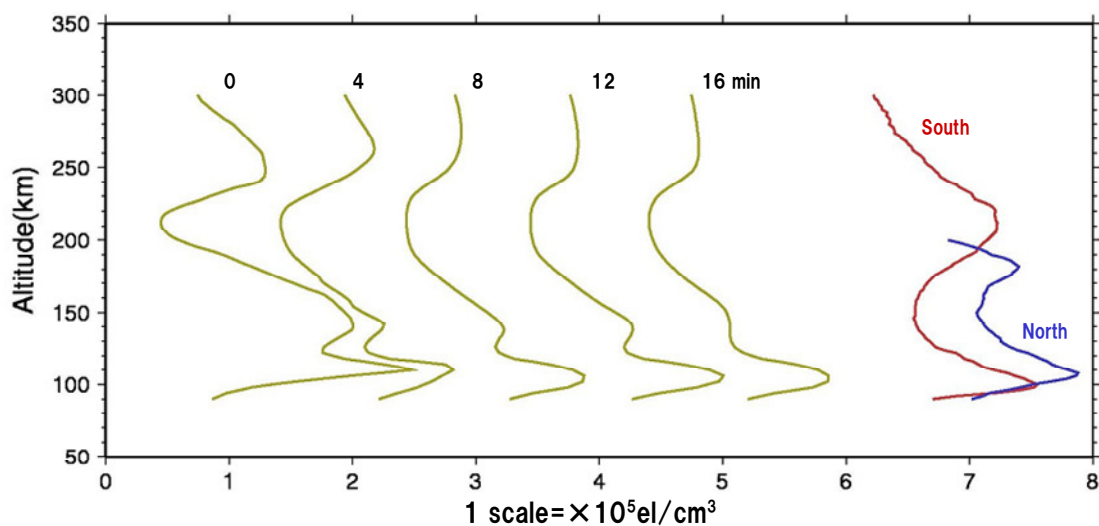


図 4-11 南北半球の Mean profile(右,青と赤)と Donnelly et al. (1976)の電子密度増加時間・高度分布モデル(図 1-8)から求めた増加分プロファイル(左,黄)との高度比較.モデルプロファイルは,図 1-8 から求めた単位時間ごとの増加高度分布を増加が最大となる時刻から 1 目盛につき 4 分ずつずらして 16 分後まで表示している.モデルと観測ではピーク高度の分布が大きく異なっている.

5 考察・課題

5.1 結果のまとめ

地上 GPS 局による TEC 変動の時系列解析(図 4-1)から、太陽フレアに伴う大きさ 2 TECU 程度のゆるやかな SITEC が観測された。しかし、GIM より得られた 10 分ごとの全球 TEC 分布では解析の時間分解能が低く、フレアの前後での TEC 変化は確認できなかった。

GPS 電波掩蔽観測によるフレア前後の電子密度鉛直プロファイル(図 4-3-4-7)から、電子密度増加の高度分布が得られた。分類した五つのグループ全てに共通して、高度 100-110km(E 層下部)での顕著な増加が確認された。一方で、高度 200km 以上の F 層での増加はいずれの地域でもはっきりと捉えられなかった。特に、太陽直下に近い低緯度帯ではフレアの発生していない平常時の電子密度が元々高い上に変動量もプロファイルによってまちまちであり(図 4-4,4-5)、太陽フレアの影響を明確に区別できなかった。しかし、高緯度帯においては平時の変動が比較的小さいため(図 4-3,4-6)、量的な解析を試みる事ができた。また、太陽直下点の西側でのプロファイル(図 4-7)では F 層の増加も含む非常に大きい電子密度増加が観測された。

平時の変動が小さく電子密度増加を捉えやすい高緯度帯について、基準となる前 10 日間の Median を差し引いた電子密度増加分のプロファイルを求めて平均化し、それらを南北の半球で比較した(図 4-8,4-9,4-10)。北半球では 110km と 180km、南半球では 100km と 210km にはっきりとピークが存在する。それぞれの Mean profile の大きさを比較してみると、低高度では北半球(冬半球)でより増加量が多いことが分かった。高度 200km 以上は北半球での増加が明瞭でなかったため、比較できなかった。

最後に、南北の Mean profile と Donnelly et al. (1976)の電子密度増加モデルの高度分布を比較(図 4-11)した。Donnelly et al. (1976)のモデルとは、E 層下部に顕著なピークが出る点は良く一致したが、より高い部分におけるピーク高度は有意に異なっていた。

5.2 考察

・フレアの発生位置と放射成分

今回観測した太陽フレアでは E 層での電子密度増加は明瞭に確認できたが、F 層の増加は明確ではなかった(図 4-3-4-6)。また、TEC の増減にかかった時間が 20 分程度と非常にゆるやかで、急激な立ち上がりが見られなかった(図 4-1)。これらの結果は、対象のフレアが Impulsive 成分の存在しない Slow 型フレアであることを示していると思われる。

Donnelly (1976)によると、Impulsive・Slow の成分比率は、フレアが太陽面のどの位置で発生したかに依存する。フレア放射のうち、Impulsive 成分の大部分を占める EUV は太陽大気による減衰が非常に大きい。そのため、フレアが太陽面の周縁部で発生した場合、Impulsive 成分の大半は太陽大気を通過する距離が長いいため消失してしまい、結果として Slow 成分のみが地球に到達する。

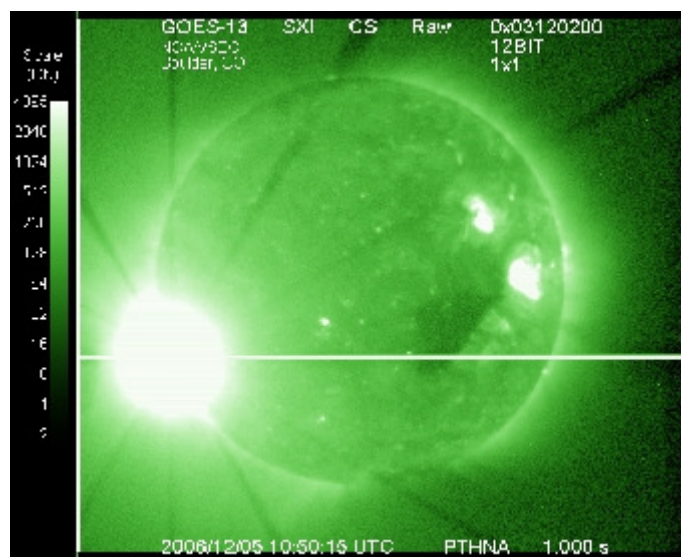


図 5-1 GOES によって観測された 2006 年 12 月 5 日フレア発生時の X 線画像.太陽面左端の強い発光部分が発生地点である.(NICT より)

図 5-1 から分かるように、今回のフレアはまさに太陽面の端で起こっており、Donnelly (1976) で説明された典型的な Slow 型フレアであるといえる。本研究の掩蔽観測による結果はフレアの発生位置による影響をよく反映し、Donnelly (1976)の結果を裏付ける観測例であるといえるだろう。

・ 南半球西側における電子密度増加

南半球の太陽の西側地域の電子密度増加は他の地域と様子が異なる(図 4-7)。a、b、c のいずれも増加量が他の地域と比べて非常に大きいうえに、F 層での増加が目立つ。これは先ほど述べた Slow 型フレアの特徴とは大きく異なるため、フレア放射以外の影響を含んでいると思われる。TEC の全球分布(図 4-2)を見てみると、掩蔽観測と同じ時間帯、地域で正の TEC 異常が現れている。太陽活動が活発な時期には、太陽放射中の荷電粒子が地球磁場に沿って大気中に侵入して極域付近で強い電流を流し、電離圏を異常に電離させることが知られている(Kamiyama, 1966)。特に、フレアの数時間後に到達する大規模な荷電粒子の放出では地上でオーロラが観測される。本研究で扱った X クラスのフレアの前にはそれより小さな C クラスのフレアがいくつか発生している(図 1-5)ことから、図 4-7 のプロファイルにはフレアの電磁波フラックス増加に伴う電子密度増加に加えて、荷電粒子による局所的な増加が含まれている可能性がある。

・ 電子密度増加分プロファイルの比較

Zhang and Xiao (2005)で示唆されたように、フレアによる電子密度増加は単純な太陽天頂角依存ではなく、夏冬の半球で様子が異なっている。北半球(冬半球)と南半球(夏半球)で電子密度増加分のプロファイルを比較したところ、増加の大きさとピーク高度に違いが見られた(図 4-9,4-8,4-10)。冬半球の増加量が多いという結果は Zhang and Xiao (2005)の結果と同じであるが、本研究の掩蔽観測では冬半球で高度 200km 以下のプロファイルしか得られなかったため、検証には不十分である。

・ モデルとの高度分布比較

Donnelly et al. (1976)の電子密度増加のモデルと、本研究で求められた電子密度増加を、高度プロファイルの形で比較した(図 4-11)。南北のどちらもモデルとは異なる高度分布を示しているが、これはモデルで想定されたフレアが典型的な Impulsive 型フレアであるためであろう。モデルプロファイルの高度 260km 付近に見られる最上部のピークは Impulsive 成分によるものであるため、今回観測された Slow 型フレアではそもそも現れていないものと思われる。最下部のピーク高度は 100-110km 付近にありモデルと一致している。二つ目のピークはモデルが約 140km 付近にあるのに対して、観測結果は 180km または 220km と、かなり異なっている。この原因は Impulsive 成分の有無だけでなく、モデルの条件にあると考えられる。第一章で述べたように、電離圏の F₁ 層は電子の鉛直方向の拡散や再結合によって電子生成の極大高度よりも高い位置に形成されている。Donnelly et al. (1976) のモデルは、こうした拡散や再結合の影響等を含まない単純化したものであり、そのため実際の観測よりも低い高度にピークが出ているのかもしれない。

5.3 今後の課題

GPS 電波掩蔽観測の電離圏電子密度プロファイルから、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。従来の地上型の TEC 観測では昼夜境界付近での地球の影を利用した間接的な観測しかできなかつたため、本研究は地球の昼側の広範囲で高度分布を直接求めた最初の例として意義深いといえる。しかし、一方で課題も多い。本研究では対象がひとつのフレアのみであり、さらに FORMOSAT-3/COSMIC 衛星のデータ公開後間もない期間の観測であったため、解析が非常に限定的である。2007 年以降は太陽活動が極小期に入ってしまったため、新たに大規模な太陽フレアを観測することができなかつた。今後再び太陽活動が活発になり複数のフレアを観測できるようになれば、本研究を発展させてより詳細な解析が可能になるだろう。また、本研究では掩蔽観測の水平方向の広がりをもまったく考慮していない。今回の観測で得られたプロファイルの中には非常に広い範囲にわたって得られたものもあり、無視できない変化が含まれている可能性がある。観測経路と太陽直下点とのなす角と距離に応じた値の補正を行って、ある一点のプロファイルとして求めることができれば、より精度の高い定量的な解析が可能になるかもしれない。

6 謝辞

本研究を進めていくにあたり、非常に多くの方々に助けいただきました。まず、研究テーマの相談、プログラミングや研究の進め方の指導、論文の校正などあらゆる面で私を支えて下さった担当教官の日置幸介教授に心より感謝申し上げます。一年間の課程を無事に終え、ここに論文を完成させることができたのは偏に日置教授のご指導のおかげです。本当にありがとうございました。また、掩蔽観測のデータ提供やメールを通じて質問にお答え下さった **Taiwan National Space Organization** の蕭俊傑殿にもこの場を借りてお礼申し上げたいと思います。さらに、PC の設定やプログラミングの助言等、親身に指導して下さいった当研究室の先輩方にもお礼申し上げます。特に、貴重な発表資料を提供して下さいった修士課程 2 年の菅原守氏と、**Fortran90** 入門を常に快く貸して下さいった修士課程 1 年の大関優氏には大変感謝しております。ありがとうございました。

7 参考文献

- D. H. Zhang and Z. Xiao, 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, JGR, 108, SIA6-1-6-11, 2003
- D. H. Zhang and Z. Xiao, Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data, JGR, 110, A03307, 2005
- E. R. Kursinski, G. A. Hajj, T. Schofield, R. P. Linfield, K. R. Hardy, Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, JGR, 102, 23,429-23,465, 1997
- 日置幸介, 太陽フレアに伴う電離層全電子数上昇の GPS 観測, 測地学会誌, 52, 319-328, 2006
- H. Kamiyama, Ionization and excitation by precipitating electrons, RISRJ, 20, 171-187, 1966
- 小倉義光, 一般気象学(第 2 版), 東京大学出版会, 1999
- R. F. Donnelly, 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
- R. F. Donnelly, K.Davies, R.N.Grubb and R.B.Fritz, F Region Enhancements Induced by Solar Flares, The Geophysical Use of Satellite Beacon Observations; Proceedings of the Symposium, Boston University, Boston, Mass., June 1-4 1976, 345-359, 1976
- T. Yonezawa, Theory of formation of the ionosphere, Space Science Reviews, 5, 3-56, 1966
- CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center Version 2.0
【<http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>】
- Geodetic Data Archiving Facility 【http://geodaf.mt.asi.it/html_old/index.html】
- 国土交通省国土地理院 【<http://www.gsi.go.jp/>】
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration 【<http://www.noaa.gov/>】
- NICT: 情報通信研究機構 【<http://www.nict.go.jp/>】
- NMDB Space Education 【<http://se.crd.yerphi.am/>】