

## イオノゾンデを用いたオーロラサブストーム時の電離圏変動

渡邊穰次<sup>1\*</sup>・石井 守<sup>2</sup>・松田佳久<sup>3</sup>

Variations in the ionosphere during an aurora substorm as observed by an ionosonde

Joji Watanabe<sup>1\*</sup>, Mamoru Ishii<sup>2</sup> and Yoshihisa Matsuda<sup>3</sup>

(2008年7月4日受付; 2008年9月22日受理)

**Abstract:** In order to obtain a better understanding of the influence of precipitating electrons on the ionosphere, we tried to estimate their effect from ionosonde observation data (ionograms) during an aurora substorm. In this analysis we used 72 aurora substorm events identified from the geomagnetic variation for one year beginning from October 1st, 1997. We have adjusted the time axis of the growth phase, the expansion phase, and the recovery phase of each event so that different events can be expressed on a common time axis. Observed ionogram data (fmin, ftEs, h'Es) are plotted on this normalized time axis and the features of the ionogram are examined in each phase. As a result, the mean values of fmin and ftEs increased, and the mean values of h'Es decreased from the growth phase to the expansion phase. We have concluded that there is a high possibility of an increase of the flux of 10–100keV precipitating electrons from the growth phase to the expansion phase.

**要旨:** 荷電降下粒子が電離圏に与える影響をよりよく理解するため、本研究では、オーロラサブストーム時の降下電子の影響が、イオノゾンデ観測データにどのように現れるかの検証を試みた。1997年10月1日からの1年間を対象として、地磁気変動をもとにオーロラサブストームのイベントを72例選出し、成長相、爆発相、回復相の各フェーズで時間軸を規格化した。選出した全イベントと同時観測されたイオノグラム読み取りデータ (fmin, ftEs, h'Es) を規格化された時間軸で整理し、それぞれのフェーズでの特徴を検討した。その結果、成長相から爆発相にかけて、fmin と ftEs の平均値は増加し、h'Es の平均値は下降する傾向が見られた。以上のことから、イオノグラムにみるオーロラサブストーム時の電離圏変動は、成長相から爆発相にかけて 10–100 keV 程度のエネルギーをもつ電子の降下量の増大を反映した可能性が大きいと結論した。

<sup>1</sup> 首都大学東京大学院都市環境科学研究科。Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, 1-1, Minami-Osawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397.

<sup>2</sup> 情報通信研究機構。National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-8795.

<sup>3</sup> 東京学芸大学教育学部。Department of Education, Tokyo Gakugei University, 4-1-1, Nukui-Kitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501.

\* Corresponding author. E-mail: watanabejoji@gmail.com

## 1. はじめに

オーロラサブストームは極域の電離圏を研究する上で重要な現象である。オーロラの原因となる荷電降下粒子は、磁力線に沿って極域の超高層大気に入流し、この領域の力学、化学過程等に強く影響を与えている。先行研究では、衛星による観測やモデル計算など様々な方法によってオーロラサブストームの形態が研究されている。Kamide and Kokubun (1996) はサブストーム時の極域電離圏の電場と電流を計算し、サブストームのフェーズによって電場と電流がどのように変化するかをまとめた。

また、先行研究では様々な方法によって、オーロラサブストーム時の降下電子の運動エネルギーと電離圏電子密度の関係が調査されている。Rees (1963) は降下電子の運動エネルギーとその到達する高度の計算を行い、エネルギーが強いほど低い高度の電離・励起に寄与することを示した。これは電離圏 E 領域の電子密度の高度プロファイルが降下電子のエネルギーに依存することを意味する。Tanaka *et al.* (2006) は、オーロラ光の強度と銀河雑音吸収量から降下電子のエネルギー分布を計算し、サブストームの経過に伴って降下電子のエネルギー分布が変化することを示した。Opgenoorth *et al.* (1994) は、欧州非干渉散乱レーダー (EISCAT) を用いて早朝の時間帯におけるオーロラサブストームの回復相では、他の時間帯と比べて高いエネルギーをもつ電子 (10 keV 以上) の降下が起こり、比較的低高度 (105 km 付近) の電離が起きていることを示した。これらはサブストームのフェーズ及び地磁気地方時によって降下電子のエネルギー分布が変わることを意味する。

このように EISCAT に代表される IS レーダーは、極域電離圏と降下電子との関係を研究するのに、有効な手段であるが、その運用コスト等の問題から長期間の連続データは比較的少ないのが現状である。

南極の昭和基地では、イオノゾンデによる電離圏の観測が 1959 年から定常的に行われており、長期のデータセットを持つ。このような長期のデータセットを用いることにより太陽活動、季節、磁気地方時などへの依存等を統計的に調査することが可能となる。本研究では、サブストームの形態研究の一つとして、イオノゾンデで見たオーロラサブストーム時の電離圏がどのように変動するか検証を試みた。また、先行研究とは異なるアプローチとしてイオノゾンデを用いてオーロラサブストーム時の電子密度のピーク高度がどのように変動するか検証を試みた。

## 2. 使用データと解析

本研究では、南極昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) に設置された、イオノゾンデ、3 軸フラックスゲート磁力計及び All-Sky Imager (ASI) の観測データを用いた統計的研究を行った。本研究の目的は、オーロラサブストームの各フェーズにおいて、電離圏がどのような変動の傾向を示すかを統計的に調べることにある。このためにまず、1997 年 10 月 1 日からの 1 年間

を対象として地磁気 X 成分データを用いてオーロラサブストームのイベントを選出した。次に、その各フェーズを成長相、爆発相、回復相の 3 フェーズに区分し、各イベントの時間軸を線形に規格化して各フェーズに合わせる操作を行った（詳細は 2.2.2 項参照）。次に、同時観測されたイオノグラム読み取りデータをその規格化に合わせて変換し重ねた。最後に、各パラメーターの変動の関係を検討するために、各パラメーター間の相関図を作成し相関係数を計算した。この章では、使用データ及びデータ解析の手法を説明する。

## 2.1. 使用データ

### 2.1.1. イオノグラム読み取りデータ

オーロラサブストーム時の電子密度高度プロファイルの変動を知るために、イオノゾンデにより観測されたイオノグラムを用いた（図 1）。読み取ったパラメーターは 3 つある。D 領域電子密度の指標として  $f_{min}$ （反射波の最低周波数）、オーロラ Es 層の最大電子密度高度として  $h'Es$ （オーロラ Es 層の最低見かけ高度）、 $f_tEs$ （オーロラ Es 層の最大電子密度）である。ここで  $f_tEs$  を使ったのは、オーロラ Es 層等のスプラディック E 層は反射エコーの厚みが薄く、正常波と異常波の区別が難しいことから E 領域反射波の尖頭周波数を読み取ったためである。読み取り方は、Piggott (1977) を参考にした。データは 15 分値である。読み取りの精度は、高度分解能が 2 km、周波数分解能が 0.1 MHz である。イオノゾンデ（装置型名 10B）の仕様は、送信尖頭出力が 10 kW、観測周波数範囲が 0.50–29.48 MHz、周波数分解能が

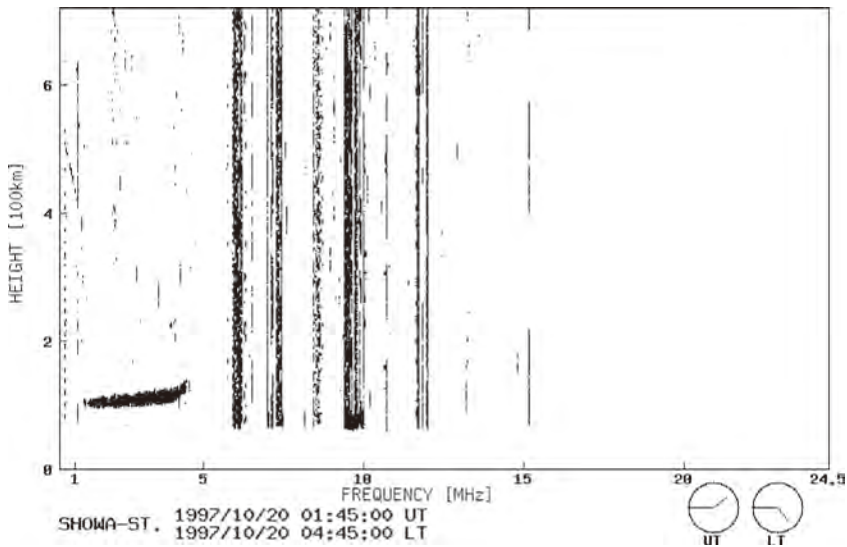


図 1 イオノグラムの例 (1997 年 10 月 20 日 0145 UT, 南極昭和基地).  
Fig. 1. Example of an ionogram (0145 UT October 20th 1997, Syowa Station).

20 kHz, 送信繰り返し周波数が 50 Hz, 観測高度範囲が 60–1500 km, 高度分解能が 1 km, 強度情報分解能が 1 bit である.

### 2.1.2. 地磁気 3 成分 (X, Y, Z) デジタルデータ

オーロラサブストームのイベントを選出するために, 3 軸フラックスゲート磁力計により観測された地磁気 X (南北) 成分と, Y (東西) 成分と, Z (鉛直) 成分データを用いた. データは 10 秒値を用いた. 3 軸フラックスゲート磁力計の仕様は, X 成分の測定レンジが +1250 ~ -3750 nT, Y と Z 成分の測定レンジが  $\pm 2500$  nT, デジタル記録分解能が 16 bit, サンプルング周波数が 20 Hz である.

### 2.1.3. オーロラ全天画像データ

事例解析の際にオーロラサブストームの時間変化, 及び空間変化を知るために, All-Sky Imager (ASI) 及び All-Sky Camera (ASC) により撮像された全天画像データ (波長は 557.7 nm, 630.0 nm, 427.8 nm, 及び Panchromatic) を用いた. 期間は 2001 年 3 月 19 日, 6 月 2 日, 2002 年 3 月 12 日, 6 月 4 日, 8 月 2 日, 2003 年 3 月 1 日, 5 月 10 日, 7 月 20 日, 10 月 14 日, 2004 年 6 月 15 日の 10 日間分を用いた. ASI 及び ASC の仕様を表 1 に示す (Taguchi *et al.* (2004) の Table 1 を一部改変).

表 1 ASI および ASC の仕様.  
Table 1. Specifications of the ASI and ASC optics

	ASI	ASC
Optical front-end	Fish-eye lens 6 mm F1.4	Fish-eye lens 8 mm F2.8
Imaging lens	Special lens	Special lens
F number of total optics	0.98	1.54
Focal length of total optics	4.322	
Field-of-view	180°	180°
Diameter of image circle	12.1 mm	12 mm
Length of optics	593 mm	
Total length including camera	840 mm	
Weight	20 kg	
Camera mount	C-mount	
Filter change	Motor-driven	No filter
Clear aperture of filter	66 mm	
Maximum incident angle at filter	6.66°	
Focusing	Motor-driven	
Filter	557.7 nm, 630.0 nm, 427.8 nm	No filter (panchromatic)
Sensitivity (counts/s/KR/pixel)	557.7nm : 100 630.0nm : 127 427.8nm : 127	
Pixel	512×512	512×512

## 2.2. 解析

### 2.2.1. イベント選出方法

オーロラサブストームのイベントを選出するために、初めに、1997年10月1日から1年間分の地磁気3成分データを全期間にわたって時系列にプロットした図を作成した。次に、目視により典型的な単発サブストーム発生時の地磁気X成分のじょう乱が起こっているもの (Kamide *et al.* (1996), fig. 1 参照) を選出した。選出するサブストームの基準としては、地磁気サブストームの典型的な変動、つまり西向き電流時にはX成分が2-3時間の間に200-400 nT程度の減少の後に回復するものを採用し、東向き電流時には同程度の時間スケールの中で、200 nT程度の増加の後に回復するものを採用した。選出する際には、前後のじょう乱が電離圏に与える影響を排除するために、連続してじょう乱が起こっている場合は対象外とした。この手順によって72例のイベントを選出した。なお、観測期間には昼間時も含まれることから、オーロラ全天画像によるイベント選出は行わなかった。そして、選出したサブストームの各フェーズは、Kamide *et al.* (1996) の fig. 1 を参考にして目視により決定した。成長相の開始は、静穏であったX成分がじょう乱し始める時とした。爆発相の開始は成長相よりもX成分の変化率が大きくなる時とした。回復相の開始はX成分が減少する場合(西向き電流時)は、その最大変化の時とし、X成分が増加する場合(東向き電流時)は、最大変化の手前とした。回復相の終了は、X成分のじょう乱が静穏に戻った時とした。

### 2.2.2. データ処理の方法 (規格化と平均値の計算)

72例のサブストームイベントと同時観測されたイオノグラム読み取りデータを重ねてプロットする際には、イベントごとにフェーズの時間幅が異なるため、代表例のフェーズ時間幅(成長相: 45分, 爆発相: 30分, 回復相: 60分)との割合を用いて時間軸方向に線形に規格化した。このため、時間軸の単位は実時間のスケールとは異なったものとなっていることは注意すべきである。

規格化したデータの平均値を計算する際には、15分ごとの規格化された時間幅内のデータを用いて平均値を計算し、その値は計算に用いたデータの時間情報(規格化された時間)の平均値上にプロットした。

## 3. 結 果

### 3.1. 事例解析結果

図2に磁力計、イオノゾンデ、ASIの同時観測結果の一例(2003年3月1日1900 UT-2400 UT)を示す。上から地磁気3成分(青: X, 緑: Y, 赤: Z),  $f_{min}$ ,  $fEs$ ,  $h'Es$ , 南北ケオグラム(557.7 nm)を示す。ケオグラムの縦軸は天頂角(上が磁南)、色は輝度を示す。1930 UTごろから極側で輝いていたオーロラが赤道側に移動し、2000 UTでは全天で激しく輝いていることがわかる。このオーロラサブストームの爆発相(2000 UT)においては静穏時(1900 UT)

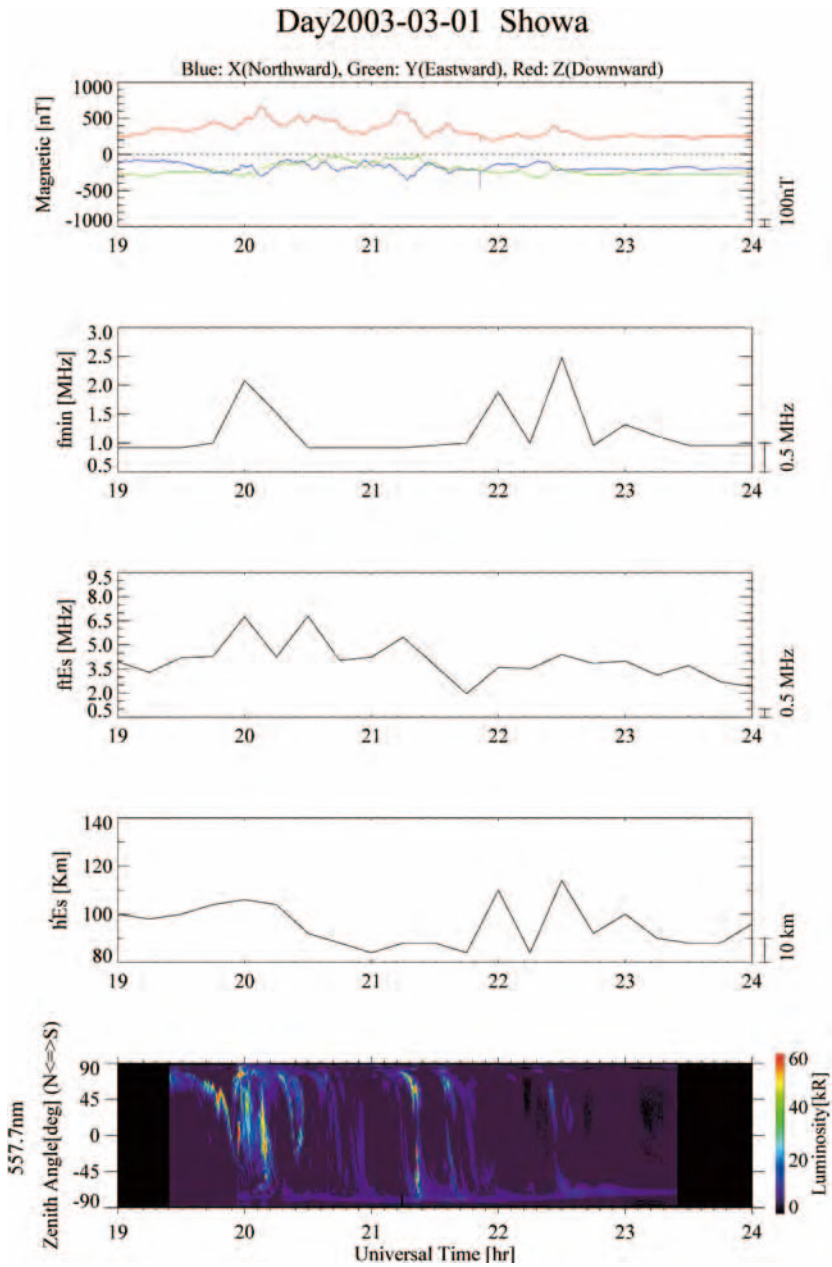


図 2 同時観測結果の一例 (2003 年 3 月 1 日 1900 UT-2400 UT). 上から地磁気 3 成分,  $f_{min}$ ,  $f_{tEs}$ ,  $h'Es$ , オーロラ南北分布を示す.

Fig. 2. An example of simultaneous observations (1900 UT-2400 UT March 1st 2003). The three components of the magnetic field,  $f_{min}$ ,  $f_{tEs}$ ,  $h'Es$  and 557.7 nm optical aurora distributions are shown from the top to bottom panels.

と比べて  $f_{min}$  は 1.2 MHz,  $f_{tEs}$  は 2.8 MHz それぞれ上昇していた. この観測時間帯の地磁気じょう乱指数 ( $K_p$  指数) は 1800 UT から 2100 UT までが 3- であり, 2100 UT から 2400 UT までも 3- であった.

### 3.2. 統計解析結果

図 3 に 72 例のオーロラサブストーム発生時のイオノゾンデ同時観測結果を示す. 上から地磁気 X 成分変化量 (規格化された時間軸上の 0 における値からの差),  $f_{min}$ ,  $f_{tEs}$ ,  $h'Es$  を示している. 縦の点線が各フェーズを区切っていて, 左から成長相, 爆発相, 回復相を示す. 横軸は規格化された時間を示す. 赤線は西向き電流時のイベントを示し, 黒線は東向き電流時のイベントを示す. エラーバーのついた青線は平均値を示す. エラーバーの幅は上下とも標準偏差である.

72 例のオーロラサブストーム発生時のイオノグラム読み取り値の変動傾向を以下に述べる.  $f_{min}$  の平均値は成長相オンセット時の 1.22 MHz から爆発相の中盤まで単調に増加し, 1.73 MHz となった. その後は 0-0.2 MHz 程度の増加または減少を示した.

$f_{tEs}$  の平均値は成長相オンセット時の 3.72 MHz から爆発相の序盤まで単調に増加し, 4.84 MHz となった. その後は 4.3 MHz 付近をほぼ水平に推移した.

$h'Es$  の平均値は成長相オンセット時の 106 km から回復相の序盤まで単調に下降し, 98 km となった. その後は 100 km 付近を推移した.

東向き電流時のイベントと西向き電流時のイベントを別個に分類した解析も行ったが顕著な傾向は見られなかった. なお, この解析では D 領域の電子密度が増加し電波吸収量が増大することにより, D 領域よりも上層からの反射エコーが遮へいされることによる, 使用できるデータの減少が見られた. その割合は成長相が 22%, 爆発相が 38%, 回復相が 49% であった.

### 3.3. 各パラメーターの関係

図 4 にフェーズごとの各パラメーター間の相関図を示すが, 有意な線形的相関は得られなかった. 図 4 (g) に示した回復相における  $h'Es$  対  $f_{min}$  の変動の関係ではデータは右下 ( $h'Es$  が低く,  $f_{min}$  が大きい部分) に多く分布し, 図 4 (a) に示した成長相における  $h'Es$  対  $f_{min}$  の変動の関係ではデータは左上 ( $h'Es$  が高く,  $f_{min}$  が小さい部分) に多く分布していた.

## 4. 考 察

本研究の結果は, イオノグラムにみるオーロラサブストーム時の電離圏変動は, 成長相から爆発相にかけて降下電子のエネルギースペクトルと降下量の変化を反映した可能性が大きいことを支持している. 以下にその論拠を述べる.

図 3 に示した 72 例のオーロラサブストーム発生時の  $f_{min}$  の平均値は, 成長相から爆発相

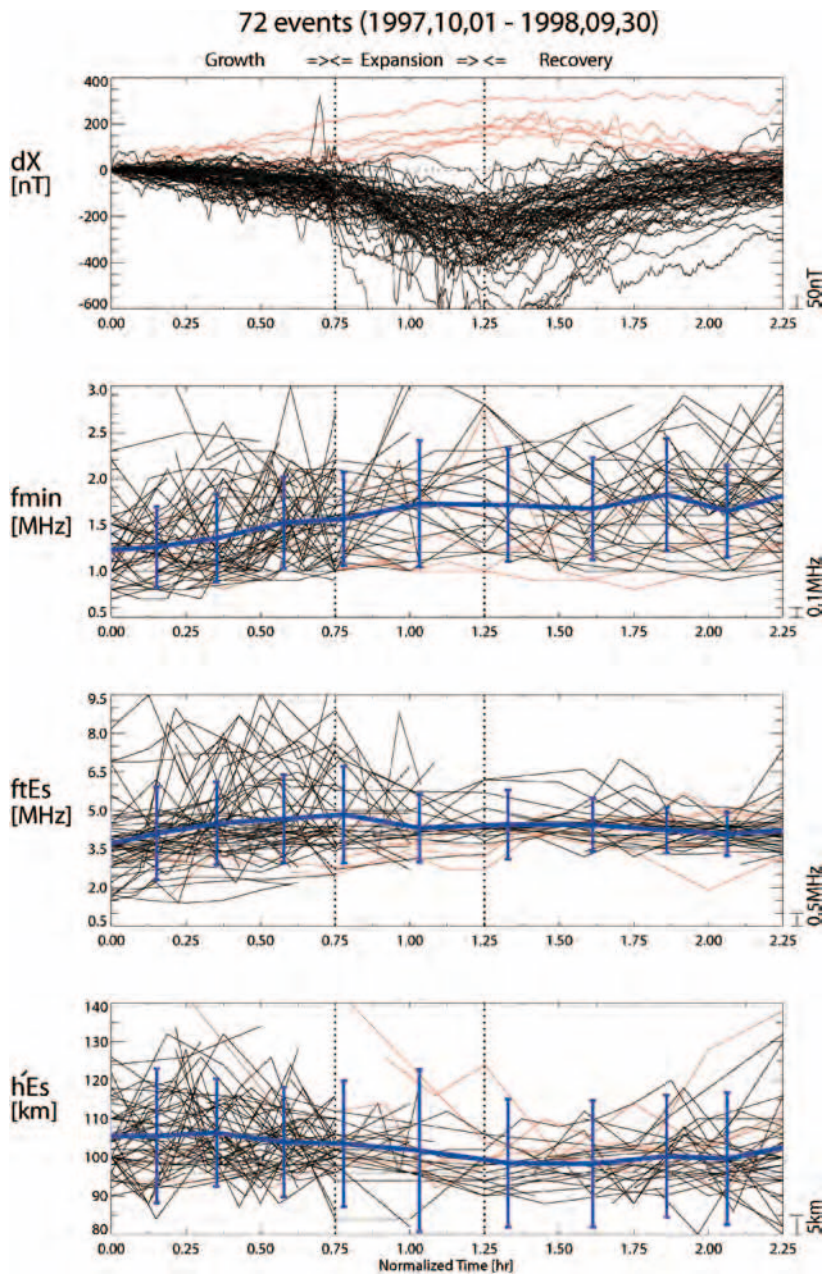


図 3  
Fig. 3



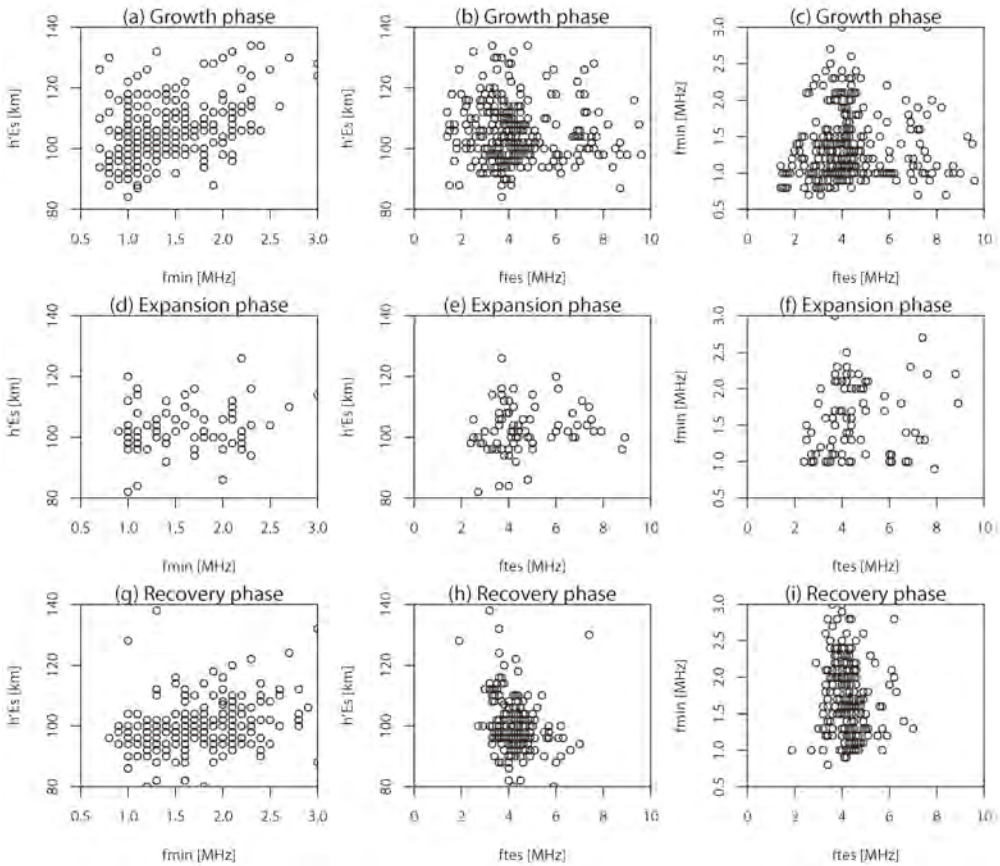


図 4 各パラメーター間の相関図 ((a)成長相の  $h'Es$  対  $fmin$ , (b)成長相の  $h'Es$  対  $ftEs$ , (c)成長相の  $fmin$  対  $ftEs$ , (d)爆発相の  $h'Es$  対  $fmin$ , (e)爆発相の  $h'Es$  対  $ftEs$ , (f)爆発相の  $fmin$  対  $ftEs$ , (g)回復相の  $h'Es$  対  $fmin$ , (h)回復相の  $h'Es$  対  $ftEs$ , (i)回復相の  $fmin$  対  $ftEs$ ).

Fig. 4. Scatter plots for each parameter ((a)  $h'Es$  vs.  $fmin$  during the growth phase, (b)  $h'Es$  vs.  $ftEs$  during the growth phase, (c)  $fmin$  vs.  $ftEs$  during the growth phase, (d)  $h'Es$  vs.  $fmin$  during the expansion phase, (e)  $h'Es$  vs.  $ftEs$  during the expansion phase, (f)  $fmin$  vs.  $ftEs$  during the expansion phase, (g)  $h'Es$  vs.  $fmin$  during the recovery phase, (h)  $h'Es$  vs.  $ftEs$  during the recovery phase, (i)  $fmin$  vs.  $ftEs$  during the recovery phase).

図 3 (反対側) 72 例のオーロラサブストーム時の電離圏変動。上から地磁気 X 成分変化量,  $fmin$ ,  $ftEs$ ,  $h'Es$  を示す。縦の点線が各フェーズを区切っていて、左から成長相, 爆発相, 回復相を示す。横軸は規格化された時間を示す。赤線は西向き電流時のイベントを示し、黒線は東向き電流時のイベントを示す。青線は平均値を示す。エラーバーの幅は上下とも標準偏差である。

Fig. 3 (opposite). Variations in the ionospheric parameters of 72 samples in the aurora substorm. Magnetic X-component,  $fmin$ ,  $ftEs$ , and  $h'Es$  are shown from the top to bottom panels. The substorm phases are shown by dotted vertical lines. The horizontal axis shows normalized time. Red lines and black lines show eastward and westward current events respectively. Blue lines are mean values. Heights of vertical error bars represent standard deviations

の中盤まで単調に増加していた。fmin は D 領域の電子密度の増加により低周波数の電波が吸収されることを利用して D 領域電子密度の指標として用いられる。ここで fmin の平均値が増加していることは、成長相から爆発相にかけて数 10-100 keV 程度のエネルギーをもつ降下電子の降下量が増加し、高度の低い D 領域まで降下電子が侵入し、電離を引き起こしているためと考えられる。

次に、図 3 に示した 72 例のオーロラサブストーム発生時の ftEs の平均値は、成長相から爆発相の序盤まで単調に増加していた。ftEs はオーロラ Es 層尖頭周波数であり、オーロラ Es 層の最大電子密度として用いられる。ここで ftEs の平均値が増加していることは、成長相から爆発相にかけて、数 keV 程度のエネルギーをもつ降下電子の降下量が増加し、E 領域での電離が増加したためと考えられる。

次に、図 3 に示した 72 例のオーロラサブストーム発生時の h'Es の平均値は、成長相から爆発相の終わりまで単調に下降していた。h'Es はオーロラ Es 層の最大電子密度みかけ高度であり、オーロラ Es 層の最大電子密度高度として用いられる。ここで h'Es の平均値が下降していることは、成長相から爆発相にかけて 10 keV 程度のエネルギーをもつ降下電子の降下量が増加し、E 領域の比較的低高度まで降下電子が侵入することで、最もよく電離される高度が低下したためと考えられる。

以上の成長相から爆発相にかけて、fmin と ftEs の平均値が増加し、h'Es の平均値が下降する傾向は、先行研究の知見とも一致する。Opgenoorth *et al.* (1994) の Fig. 2 には EISCAT を用いたオーロラサブストーム時の電子密度高度プロファイルが示されており、成長相から爆発相にかけて D 領域電子密度の増加、及び E 領域電子密度の増加をみることができる。del Pozo *et al.* (2002) はオーロラサブストームの成長相において降下電子のエネルギースペクトルの 1-200 keV 成分が増大することを示している。

図 4 に示した各パラメーターの変動の関係には線形的相関がみられなかった。もし、降下電子のエネルギースペクトルの形状が維持されたままフラックスの増大が見られるとしたら、fmin と ftEs の変動に正の線形相関が見られることを期待した。あるいは Rees (1963) で示すような、単一エネルギービームの場合には、降下電子のエネルギーが 10 keV から 100 keV に増大してゆくと E 領域の電離が下がるとともに D 領域の電離が増大することから、逆相関となる可能性もあった。しかし、ここで各パラメーターの間に相関が見られなかったことは、今回の結果が上記のような単純な考え方では説明できず、D 領域の電離を増大させる降下電子現象と E 領域の電離を増大させる降下電子現象は互いに独立した異なるメカニズムで起こることを示唆している。

図 4 (g) に示した回復相における h'Es 対 fmin の変動の関係ではデータは右下 (h'Es が低く、fmin が大きい部分) に多く分布し、図 4 (a) に示した成長相における h'Es 対 fmin の変動の関係ではデータは左上 (h'Es が高く、fmin が小さい部分) に多く分布している。これは、

回復相にて D 領域がより電離されていることを示す。これは Opgenoorth *et al.* (1994) で特に朝側でよく見られる現象として紹介されているものに一致する。また、Tanaka *et al.* (2006) ではオーロラアークの低緯度側では  $\kappa$  分布ないし double Maxwellian 分布のように、高エネルギー側にスペクトルが高い分布が見られることを紹介しているが、今回の結果は、サブストームの各フェーズで降下電子の加速機構に違いがあることを示唆している。例えば、イオノグラムデータは D 領域の遮へいのためにデータ数が減少しているが、この割合は爆発相 (38%) よりも、回復相 (49%) で大きくなっている。これは回復相での降下電子エネルギーの増加を示していると考えられる。

## 5. ま と め

本研究は、オーロラサブストーム時の降下電子の影響が、イオノゾンデ観測データ (イオノグラム) にどのように現れるかの検証を試みた。その結果は、成長相から爆発相にかけて、 $f_{min}$  と  $fEs$  の平均値は増加し、 $h'Es$  の平均値は下降する傾向が見られた。これは、先行研究の知見とも一致する (Opgenoorth *et al.* (1994), del Pozo *et al.* (2002) 参照)。以上のことから、イオノグラムにみるオーロラサブストーム時の電離圏変動は、成長相から爆発相にかけて数 keV-100 keV 程度のエネルギーをもつ電子の降下量の増大を反映した可能性が大きいと結論した。今後は、オーロラサブストームが発生した時間帯や季節、規模などイベントの条件をより細かく設定し、それぞれの条件に対応するイオノグラムの特性を明確化し、その原因となる降下電子の特徴を推定する必要がある。また、人工衛星や IS レーダー等、降下電子のエネルギーを測定できる他の手法との同時観測による比較検証が必要であろう。近い将来には PANSY レーダーの建設が昭和基地において検討されていることから、PANSY とイオノゾンデの同時観測により本研究の展開が期待できる。

## 謝 辞

匿名のレフリーの方 2 名には、本稿の改訂にあたり有益なご助言を頂きました。深く感謝いたします。本研究で使用したオーロラ全天画像データ、及び地磁気 3 成分データは、国立極地研究所の田口 真博士、門倉 昭博士よりご提供していただきました。心より感謝申し上げます。情報通信研究機構の加藤久雄氏、福嶋公子氏、中村真帆博士にはイオノグラムデータについて多くのご助言をいただきました。研究を進めるに当たり多くのご助言をいただきました。斎藤 享博士、陣 英克博士をはじめとする、情報通信研究機構の電波伝搬障害研究プロジェクトの皆様にご心より感謝いたします。

## 文 献

del Pozo, C. F., Honary, F., Stamatiou, N. and Kosch, M. J. (2002): Study of auroral forms and electron

- precipitation with the IRIS, DASI and EISCAT systems. *Ann. Geophys.*, **20**, 1361–1375.
- Kamide, Y. and Kokubun, S. (1996): Two-component auroral electrojet: Importance for substorm studies. *J. Geophys. Res.*, **101** (A6), 13027–13046.
- Kamide, Y., Sun, W. and Akasofu, S. -I. (1996): The average ionospheric electrodynamics for the different substorm phases. *J. Geophys. Res.*, **101** (A1), 99–109.
- Opgenoorth, H. J., Persson, M. A. L., Pulkkinen, T. I. and Pellinen, R. J. (1994): Recovery phase of magnetospheric substorms and its association with morning-sector aurora. *J. Geophys. Res.*, **99** (A3), 4115–4129.
- Piggott, W. R. (1977): *イオノグラムハンドブック：高緯度現象に関する追録*. 東京，郵政省電波研究所，247 p.
- Rees, M. H. (1963): Auroral ionization and excitation by incident energetic electrons. *Planet. Space. Sci.*, **11**, 1209–1218
- Taguchi, M., Ejiri, M. and Tomimatsu, K. (2004): A new all-sky optics for aurora and airglow imaging, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **18**, 140–148.
- Tanaka, Y. -M., Kubota, M., Ishii, M., Monzen, Y., Murayama, Y., Mori, H. and Lummerizheim, D. (2006): Spectral type of auroral precipitating electrons estimated from optical and cosmic noise absorption measurements. *J. Geophys. Res.*, **111**, A11207, doi:10.1029/2006JA011744.