

平成 15 年度  
修士論文

オーロラサブストームに伴う  
イニシャル・ブライティング発生場所に関する研究

名古屋大学大学院理学研究科 博士課程（前期課程）  
素粒子宇宙物理学専攻（宇宙地球物理系）  
田中 雄一郎

2004 年 1 月 30 日



## 要旨

本研究では、磁気圏-電離圏を結ぶシステムで最も基本的な擾乱といわれているサブストームを引き起こす機構を理解するために、その始まりの徴候であるイニシャル・ブライトニング (IB) がどの場所で起きているかを、オーロラオーバル高・低緯度境界、つまり磁気圏プラズマシートのローブ/内部境界を参照して調べた。

サブストームは一般的に地磁気が荒れた時に頻繁に生じ、サブストームオンセット前の磁気圏擾乱の影響を少なからず受けるため、IB 発生場所の決定が不確定になる。そのため、1997-1999 年に生じたサブストームイベントから、IB 発生 of 6 時間前まで AE 指数で活動が見られないものを取り上げ、Polar 衛星の画像データを中心に、IB のオーロラオーバルの高・低緯度境界に対する位置を統計的に調べた。

さらに、そのうち、DMSP 衛星が IB 付近を横切ったイベントを数例取り上げ、DMSP 衛星の粒子データからオーロラオーバルの領域を選別し、さらに IB に関しては、デジタルデータを基に、オーロラオーバル中で発光が強くなった位置を定量的に調べた。

上記の解析の結果は、次のようにまとめられる。

1. 前の磁気圏活動の影響を受けず、孤立して生じたサブストームイベントの IB は、そのスケールによって発生する緯度は変わるが、オーロラオーバルの高・低緯度境界に対する相対的な位置として見ると、そのオーロラオーバルの緯度方向の中心付近で生じることが統計的に示された。即ち IB はオーロラオーバルの低緯度境界付近や高緯度境界付近で起きるのではない。
2. 孤立した IB のオーロラオーバルに対する発生位置は、先行する IMF  $B_z$  成分に関連しており、IMF  $B_z$  成分の値が小さい程、オーロラオーバルの低緯度境界より IB が発生する傾向が見られた。
3. DMSP との同時データが得られた 1 例では、IB 発生位置の中心は、DMSP の降下粒子データと磁場データから求められる Central Plasma Sheet (CPS) の領域 (沿磁力線電流の Region 2 の領域) に存在することが推定された。
4. また、別の DMSP との同時データが得られた 1 例では、IB 発生位置と高エネルギー ( $\sim 10$  keV) と低エネルギー ( $< 10$  eV) の降下イオンの境界がほぼ一致していた。高エネルギーのイオンと低エネルギーのイオンの境界が存在することは、加速されたイオンと減速されたイオン、すなわち下向き沿磁力線電場と上向き沿磁力線電場の境界が存在し、その境界領域で IB が生じていた可能性があることが、この結果から推測された。



# 目次

要旨	i
<b>第1章 イントロダクション</b>	<b>1</b>
1.1 地球磁気圏	1
1.2 地球電離圏	2
1.3 FUV (Far UltraViolet) オーロラ	3
1.4 磁気圏サブストーム	4
1.4.1 オーロラオーバル	4
1.4.2 磁気圏サブストーム、オーロラサブストームの概観	5
1.4.3 サブストームの研究	6
1.5 研究の背景、特徴および目的	7
1.5.1 本研究の背景	7
1.5.2 本研究の特徴および目的	8
<b>第2章 観測ツールおよび使用するデータ</b>	<b>17</b>
2.1 Polar 衛星	17
2.2 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 衛星	18
2.3 AE 指数	19
<b>第3章 オーロラサブストームに伴うイニシャル・ブライティング のイベント選出の過程</b>	<b>23</b>
3.1 AE 指数、Polar UVI によるサブストームイベントの選出	23
3.2 1997年1月11日、10:24:56-10:25:24 UT に生じた サブストーム IB イベント	26
3.2.1 Polar UVI によるオーロラ観測結果	26
3.2.2 WIND 衛星による IMF 観測結果	26
3.2.3 オーロラオーバルの発光強度の時間変化	27
<b>第4章 1997-1999年に発生した39イベントのイニシャル・ブライティング 発生位置に関する統計解析結果、およびその考察</b>	<b>41</b>
4.1 オーロラオーバルの高・低緯度境界と、イニシャル・ブライティング (IB) 発生位置の分布	41
4.2 オーロラオーバルの高・低緯度境界の値で規格化した時の、	

IB 発生位置の分布	42
4.3 オーロラオーバルに対する IB 発生位置の統計解析	42
4.3.1 IB 発生位置のヒストグラム化	42
4.3.2 IB 発生位置の IMF 依存性	43
4.4 考察	44
<b>第5章 DMSP 衛星による粒子データと、イニシャル・ブライティング</b>	
<b>発生位置の対応関係、およびその考察</b>	<b>53</b>
5.1 DMSP 衛星がオーロラオーバルを通過したイベントの抽出	53
5.2 1997 年 1 月 7 日 (イベント 1)	54
5.2.1 イベントの概要	54
5.2.2 DMSP 衛星通過時の Polar UVI オーロラ画像と DMSP 降下粒子の比較	56
5.2.3 降下粒子データから推測した IB 発生位置	57
5.2.4 IB 発生位置と沿磁力線電流分布の比較	58
5.2.5 5.2 節のまとめ	59
5.3 1997 年 1 月 8 日 (イベント 2)	59
5.3.1 イベントの概要	59
5.3.2 DMSP 衛星通過時の Polar UVI オーロラ画像と DMSP 降下粒子の比較	60
5.3.3 降下粒子データから推測した IB 発生位置	61
5.3.4 5.3 節のまとめ	62
5.4 DMSP 衛星の粒子データと、Polar UVI のオーロラ画像 のずれに対する考察	62
<b>第6章 まとめと今後の課題</b>	<b>77</b>
6.1 まとめ	77
6.2 今後の課題	78
<b>参考文献</b>	<b>81</b>
<b>謝辞</b>	<b>87</b>

# 第1章 イントロダクション

## 1.1 地球磁気圏

地球は双極子（dipole）で近似できる磁場を持っており、この磁場は、太陽から吹きつける約 300 - 800 km/s のプラズマ流（太陽風）によって閉じ込められている。この地球磁場が閉じ込められた空間は、磁気圏（magnetosphere）と呼ばれている。地球から太陽方向に向かって約 10 地球半径（ $R_E$ ）離れた所に、地球磁気圏の境界が存在し、その境界部分に薄い層状の電流が流れている。この電流は磁気圏境界電流（magnetopause current）と呼ばれ、地球磁場の大部分を地球磁気圏内に閉じ込めている。

太陽風の圧力と地球磁場の磁気圧との関係から、地球磁気圏の昼側は太陽風により圧縮され、夜側は反太陽方向に引き延ばされた形状となる。この磁気圏の夜側の領域は、磁気圏尾部（magnetotail）と呼ばれ、少なくとも 6000  $R_E$  まで引き伸ばされていると考えられている。図 1.1 は磁気圏の北半分と手前側の一部を切り取って内部を示した、磁気圏構造の概略図である。

磁気圏は、主として陽子（プロトン）と電子からなるプラズマによって満たされており、そのプラズマの性質の違いからいくつかの領域に分けられているが、大きく分けると 2 つの領域に分類できる。1 つは地球の中低緯度につながる、閉じた磁力線から成る内部磁気圏であり、もう 1 つは地球の高緯度につながる磁力線から成る外部磁気圏である。

内部磁気圏は双極子磁場の影響が強く、そのうち地球に近い部分（約 4  $R_E$  以内）はプラズマ圏（plasmasphere）と呼ばれる領域で、電離圏粒子に磁気圏粒子が混入しており、高密度（ $10^8 - 10^{10} \text{ m}^{-3}$ ）で低エネルギー（ $0.1 - 10^2 \text{ eV}$ ）のプラズマで満たされている。内部磁気圏のうち、地球から遠い部分（約 6 - 7  $R_E$ ）は環状電流（ring current）粒子の領域である。環状電流とは、磁気圏尾部の荷電粒子が地球方向に注入された際に磁場ドリフトを受け、電子とイオンが逆向きに加速されることが原因で生じる電流である。

外部磁気圏のうち、夜側の領域では双極子磁場よりも尾部構造をした磁場が支配的で

あり、北半球につながる磁力線と南半球につながる磁力線が、ほぼ反平行となる。したがって、磁気赤道面付近では磁場の強さがほぼ 0 になる。ここは磁気中性面 (neutral sheet) と呼ばれている。こうした反平行の磁場が安定に存在しうるのは、磁気中性面の周りに高温のプラズマ (温度:  $10^3 \sim 10^4$  eV、数密度:  $0.1 \sim 3.0 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ ) が存在し、反平行の磁場が作り出す磁気中性面に向かう磁気圧とプラズマ圧がつりあっているためである。この高温プラズマが存在する閉じた磁力線領域は、プラズマシート (plasmashet) と呼ばれ、オーロラを発光させる高エネルギー粒子の主要な供給源である。

プラズマシートを外側から取り巻く平行磁場の領域 (開いた磁力線領域) は、テイルローブ (tail lobe) と呼ばれ、その外縁は太陽風磁場と磁気圏の境界に相当する。テイルローブには低温のプラズマ ( $1 \sim 10$  eV) が存在し、地球磁場の磁力線は太陽風の磁力線とつながっていると考えられている。また、テイルローブの磁力線を電離圏に投影した領域はポーラーキャップ (polar cap: 極冠) と呼ばれている。

外部磁気圏のうち、昼側の領域では、磁気圏境界面に特徴的な磁場の配位が見られる。磁気圏の前面の閉じた磁力線と、太陽風の磁場と再結合して尾部のほうに流されている磁力線の境界にみられるこの構造はカusp (cusp) と呼ばれている (図 1.2 参照)。カusp領域では、磁場が弱くなるため、太陽風のプラズマが直接、地球磁気圏に入り込むことができる。この領域を磁力線に沿ってたどると、平均としては昼側の磁気緯度 75 度付近に対応する。ただし、太陽風の動圧や後述の惑星間空間磁場などにより、その緯度は変動する。

## 1.2 地球電離圏

地球の超高層大気中には、中性の気体と、電離されたイオンおよび電子からなる電離気体 (プラズマ) が共存している。この不完全電離し、地球磁気圏と電磁氣的に結合している領域は電離圏 (ionosphere) と呼ばれている。電離源としては、太陽からの極端紫外線や X 線などの電磁波と銀河宇宙線、太陽宇宙線、そしてオーロラ降下粒子などの粒子がある。電離されたイオンと電子は大気分子、原子を含む化学反応を経て、形を変えながら最終的にはイオンと電子が再結合して中性の分子、原子にもどることによ

り消滅する。この電離圏は、高度によっていくつかの領域に分けられている。高度 70 ~ 90 km の範囲を D 領域、高度 90 ~ 140 km を E 領域、高度 140 ~ 200 km を F1 領域、高度 200 ~ 1000 km を F2 領域と呼んでいる。F 領域に現れる電子密度最大の高度を境として、それより下側（ボトムサイド）と上側（トップサイド）を区別して呼んでいる。図 1.3 に電子密度の高度分布の例を示す。高度（縦軸）及び密度（横軸）を対数で表している。電離圏のプラズマは、前述のプラズマ圏ににまで広がっており、プラズマ圏とその外側の電子密度が低い領域との境界を、プラズマ圏境界面（plasmaopause）と呼ぶ。

### 1.3 FUV(Far UltraViolet) オーロラ

オーロラの発光は、複数の輝線やバンドから形成されている。これらの輝線やバンドは、磁気圏から電離圏へ降り込む粒子と電離圏の中性大気の相互作用により作り出される。電離圏の中性大気（主に  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $O$ ）は、磁気圏から降り込む粒子により電離、あるいは励起される。励起状態にある分子や原子、及びそれらのイオンは、光としてエネルギーを放出し基底状態に戻る。この光がオーロラとして観測され、そのうち紫外線の発光領域（波長：120-200 nm）にあたるものを FUV (Far UltraViolet) オーロラと呼ぶ。

FUV オーロラの主なものとしては、OI 1304、OI 1356 の 2 つの輝線と、 $N_2$  LBH (Lyman-Birge-Hopfield) のバンドがある [e.g., Torr et al., 1995]。LBH は波長帯が 140-180 nm であり、窒素分子を



の様に励起させることによって発光する。LBH のうち、140 nm に近い波長域では、酸素分子による吸収が強く効いており、170 nm より長波長側ではほとんど酸素分子による吸収は無視できることから、LBH-Short (140 – 160 nm) と、LBH-Long (160 – 180 nm) に分け、酸素分子の吸収の度合いについて分類している [e.g., Torr et al., 1995]。

これらの FUV オーロラは、大気による吸収のため地上からは観測することはできないが、後述の Polar 衛星などの高高度衛星がオーロラオーバルを全体的に捕らえるには

最適なオーロラである。また、LBH の発光強度は降り込み粒子のエネルギーフラックスに比例する [e.g., Strickland et al., 1983; Germany et al., 1998] ことから、後述のオーロラサブストームなどの現象を捉えるのによく用いられている。

Polar 衛星 UVI の主な観測波長はこの LBHL と LBHS であり、Altitude-Adjusted Corrected GeoMagnetic ( AACGM ) 磁気座標系 [Baker and Wing, 1989] にマッピングする時の発光高度は、120 km としている。AACGM 座標系とは、同じ磁力線上にあるものは、その高度に関わらず同じ位置に表示される様に設定された磁気座標系である。オーロラなどの発光をマッピングするのによく用いられる [e.g., Baker and Wing, 1989]。

## 1.4 磁気圏サブストーム

### 1.4.1 オーロラオーバル

オーロラは地球の磁石の軸を取り巻くように、電離圏内に楕円形に出現する。これをオーロラオーバル ( auroral oval ) といい、そこから伸びる磁力線は、カスプ、プラズマシートにつながっている。オーロラオーバルの緯度は、統計的には、昼側では磁気緯度 75 度程度、夜側では磁気緯度 65 度程度に位置する。オーロラは、比較的是っきりした構造を伴うオーロラと、ぼんやり光るオーロラに大別されるが、前者をディスクリートオーロラ、後者をディフューズオーロラと呼んでいる。図 1.4 にオーロラオーバルの模式図を示す。

この2つのオーロラ領域は、オーロラの形状だけでなく降り込む粒子の特性の違いも表している。オーロラオーバルのディスクリートオーロラに対応する高緯度側領域には、1-5 keV、時には 10 keV 付近に強いピークを持つエネルギースペクトルを持つ電子が降下し、一方でディフューズオーロラに対応する低緯度側領域には特に際立ったピークは持たないが高エネルギー側にまで伸びたエネルギースペクトルを持つ電子が降り込んでいることが、衛星やロケット観測により明らかになっている ( 図 1.5 参照 )。ディスクリートオーロラ上部の降下粒子の「平均エネルギーと緯度」の関係が、アルファベットの V を逆にした形に見えることから、「inverted-V 構造」と呼ばれ、これはディスクリートオーロラの中心で強い加速メカニズムが働いていることを示している。Winningham et al. [1975] は、こういった夜側オーロラオーバルの降り込み粒子の特性の違いから、その源に対応する磁気圏プラズマシートを2つの領域に分け、加速を受けて

いる高緯度側を BPS (Boundary Plasma Sheet)、一様なエネルギーフラックスを持つ低緯度側を CPS (Central Plasma Sheet) と定義した (図 1.6 参照)。現在の BPS/CPS の解釈は、その後の磁気圏の観測から、*Feldstein and Galperin* [1985] などによって改良されたものが用いられている。

この夜側オーロラオーバル領域に関しては、*Newell et al.* [1996a, 1996b] が DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 衛星の降下粒子のデータを用いて、細かく定量的に領域の判別を行い、さらに *Carbary et al.* [2003] が、Polar UVI のオーロラ画像によるオーロラオーバルの境界と、DMSP 衛星の降下粒子データによる境界の対応関係を調べた。この *Newell et al.* [1996a, 1996b] の夜側オーロラオーバルの領域判別方法は、オーロラオーバルを扱う際に幅広く用いられている。

#### 1.4.2 磁気圏サブストーム、オーロラサブストームの概観

ほとんどの太陽風は、地球磁気圏をかすめて吹き抜けていくが、太陽風自身が持つ惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field : IMF) が南成分を持つと、大量のエネルギーが磁気圏に注入される。図 1.7 に示す様に、太陽風磁場が南成分を持っていると、地球前方の磁気圏境界面で、磁力線どうしの結合 (磁気再結合 : magnetic reconnection) が起こる [*Dungey*, 1961]。太陽風の磁力線とつながった地球磁力線は、開いた磁力線となり下流 (夜側) へと運ばれる。その様なプロセスを経て、太陽風の運動量やエネルギーが地球磁気圏に持ち込まれるとともに、太陽風プラズマは磁気圏に入り込み、磁気圏尾部に蓄積される。この蓄積された粒子やエネルギーは、非周期的に内部磁気圏や電離圏に解放され、同時に激しい磁場擾乱を引き起こす。この擾乱現象を磁気圏サブストームと呼んでいる。以後、磁気圏サブストームのことを単純に「サブストーム」と呼ぶことにする。

オーロラサブストームは、オーロラに現れるサブストームの一つの側面で、サブストームを目で見て判断できる現象である。このオーロラサブストームはオーロラのブレイクアップと呼ばれる現象によって特徴付けられており、*Akasofu* [1964] はそのブレイクアップが規則性を持って出現することを見出した。図 1.8 に、オーロラサブストームの発達過程の様子を示す。

サブストームは、成長相 (growth phase)、爆発相 (expansion phase)、回復相 (recovery phase) の 3 つの段階に分けられており、このサブストームの始まり (オンセット) は、

夜側のオーロラアークが突然輝き出すことによって確認することができる [Akasofu, 1964]。このオンセットにともなってオーロラオーバル中のアークが最初に発光することをイニシャル・ブライティング (Initial Brightening : IB) と呼び、以後 IB と記述することにする。

また、サブストームは少なくとも 1 回は、バルジとして極方向に発展するオーロラブレイクアップを含んでいるが、極方向に発展しないオーロラブレイクアップも存在し、その現象はシュードブレイクアップ (pseudo-breakup) と呼ばれている [e.g., Ohtani et al., 1993; Kamide, 2001]。このシュードブレイクアップは、サブストームを起こすプロセスと物理的に同じであると考えられている [Rostoker, 1998]。しかし、オーロラサブストームは極方向に発展する発光によって定義されている [Akasofu, 1964] ことを考慮に入れると、本研究において、シュードブレイクアップの最初の発光は IB として扱わないことにする。

#### 1.4.3 サブストームの研究

サブストームの研究における最も大きな問題の一つとして、爆発相の開始をトリガーする機構を知ることが挙げられる。

Baker et al. [1996] は、磁気圏の近尾部に磁気再結合が発生し、新しい X 点を作り、これがサブストームを駆動するという Near-Earth Neutral Line (NENL) モデルを提唱した。この NENL は、反地球方向にプラズモイドを放出し、地球向きに早いプラズマ流 (Bursty Bulk Flow : BBF) を生成し、サブストームを引き起こす重要な現象として考えられている。NENL による地球向きの早いプラズマ流を制止することで、サブストームはトリガーされるものと思われる。過去の多くの磁気圏尾部の観測から、NENL は統計的に  $X \sim -20 R_E$  GSM 付近に生じるということが示唆されている [e.g., Miyashita et al., 2000 and references therein]。しかし地球向き BBF がサブストームの期間にずっと続くのかどうかということは未だはっきりしておらず、NENL の生成だけではサブストームを引き起こすのに必要なエネルギーと磁気フラックスを、内部磁気圏に伝えることができない [e.g., Angelopoulos et al., 1994] ことを考えると、NENL モデルは、サブストーム爆発相を開始する機構を、完全に説明できていないと言える。

一方、Lui [1996] は、サブストームの成長相時にプラズマシートが薄くなり、磁気圏の尾部電流層の電流密度が増大することで、近尾部の電流層で局所的に不安定が生じ、

その不安定がサブストームを駆動するという、Current Disruption (CD) モデルを提唱した。CD が始まると、尾部電流が減少し、磁場のダイポール化が起こる。このダイポール化は、同時に磁場と電場の変動を伴い、カレントウェッジ (尾部電流が磁力線を介して、電離圏に迂回する現象) を引き起こす。CD モデルは、このカレントウェッジといったサブストームに特有な電流系を説明できるが、プラズモイドの形成を必ずしも説明できず、完全にサブストームの現象を説明するには至っていない。

*Shiokawa et al.* [1997] は、サブストーム時に磁気圏近尾部と磁気圏中尾部で地球向き高速プラズマ流に有意な差があることから、両者の境界付近で何らかの減速メカニズムが働いていると推測し、「フロウブレーキングメカニズム」を提唱した。しかし、*Ohtani et al.* [2002] は、そのブレーキングメカニズムが必ずしもサブストームの IB を引き起こすとは限らないという結論を出し、このブレーキング理論もサブストームエクспанションを説明するには至っていない。

磁気圏と電離圏の応答のタイミングに関しては、*Miyashita et al.* [2003] が、サブストーム中の磁気圏尾部の変化とオーロラ活動を対応付け、磁気圏尾部の全圧の減少とオーロラブレイクアップが、時間的にほぼ一致することを発見した。また、*Ieda et al.* [2001] や *Slavin et al.* [2002] は、サブストーム時に NENL で生成されたプラズモイドと、オーロラ爆発の対応関係を調べた。それによると、プラズモイドが観測された時には、小さいものまで含めればオーロラ爆発がほぼ生じており、その時間差も  $\pm 1$  分の範囲内で一致していることから、両者はほぼ 1 対 1 に対応しているという結論を得た。

こういった磁気圏の詳細な研究から、オーロラサブストームの IB を、磁気圏の現象とタイミング的に対応付けることは、ある程度行われて来た。しかし、IB が磁気圏のどこで起きるかについては、上記の様にサブストームのトリガーの機構を知る上で重要であるが、未だ判明していない。

## 1.5 研究の背景、特徴および目的

### 1.5.1 本研究の背景

オーロラサブストームの IB は、サブストームのオンセットと関連していると考えられ、サブストームの物理過程を理解する上で重要な現象である。発生の平均的な場所は、

サブストームによって様々であるが、磁気緯度 60-70 度、22-23 時 MLT 付近に出現すると言われている。

また、*Akasofu* [1964]や *Lyons et al.* [2002]等で述べられているように、真夜中付近に静穏時に存在するアークよりも低緯度側に新たなアークが生じ、それがブレイクアップのオーロラに発展する場合がしばしば見られることが報告されている(図 1.9 参照)。しかし、従来行われてきた地上オーロラ観測では視野が狭く、オーロラオーバルすべてを観測することが不可能であるため、IB がプラズマシートのどの場所で発生するのか、言い換えればオーロラオーバルのどの位置で起きるのか、については未だはっきりしていない。観測的には磁気圏内の衛星観測等のプラズマ流や磁場観測からも、サブストームのオンセットは磁気圏の比較的内部で発生することが示唆されているが、正確な発生場所の同定については不明の点が多い。

また、*Murphree et al.* [1991]は、Viking 衛星によって得られた画像を *Tsyganenko* [1987]磁場モデルを用いて磁気圏の  $XY$  GSM 平面に投影し、IB は磁気圏尾部の  $10 R_E$  より内側に相当することを示唆した。しかし、*Tsyganenko* [1987]の磁場モデルは、サブストーム時に特有の、はげしく変動する尾部構造を持つ磁場形状を考慮しておらず、磁力線のマッピングに問題がある。

### 1.5.2 本研究の特徴および目的

磁気圏-電離圏を結ぶシステムで最も基本的な擾乱といわれているサブストームのトリガー機構は、サブストームの物理機構を理解する上で重要であるが、現在まで磁気圏のどの場所で、どのような物理プロセスで起きているのかがはっきりしていない。本研究では、サブストームのオンセットに対応する IB がどの場所で起きているかを、オーロラオーバルの高・低緯度境界、即ち磁気圏プラズマシートの境界を参照して調べることで、磁気圏のどの場所でトリガーされているかを理解することを目的としている。

まず、高緯度磁場ステーションの地磁気データを用いて、約 1400 のサブストームイベントから孤立して生じたサブストームを選びだした。その孤立して生じたサブストームについて Polar UVI のオーロラ画像を検証し、IB がはっきりと同定できたイベントを用いて統計研究を行った。

孤立したサブストームとして、AE 指数のデータを見て、IB の以前 6 時間に擾乱が見

られないものを取り上げた。サブストームは、そのオンセット以前の磁気圏の状態の影響を受けてしまうため、磁気圏の擾乱の影響を受けないイベントを選び出し、クリアなサブストーム IB の位置を調べるためである。AE 指数だけからでは、地上磁場観測点のカバレッジの問題で、擾乱を見逃す可能性があるため、さらに Polar 衛星のオーロラ画像を用いて孤立したオーロラサブストームを選び出した。さらに、低高度衛星である DMSP 衛星が IB 付近を横切ったイベントを選び出し、その粒子データからオーロラオーバルを BPS/CPS 領域に分離し、その領域と IB を比較し、クリアなサブストームの IB が磁気圏のどの領域に相当するのか、ということを理解することを目的としている。

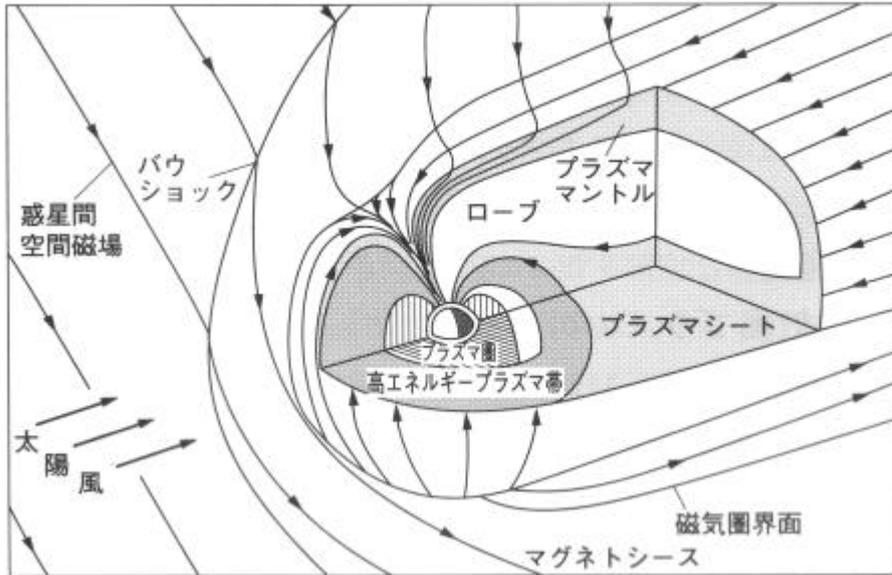


図 1.1: 地球磁気圏の構造図 [恩藤他, 2000]

磁気圏の北半分と手前側の一部を切り取って内部を示した磁気圏構造の概略図である。磁気圏の主な名称とその特徴については、本文参照。

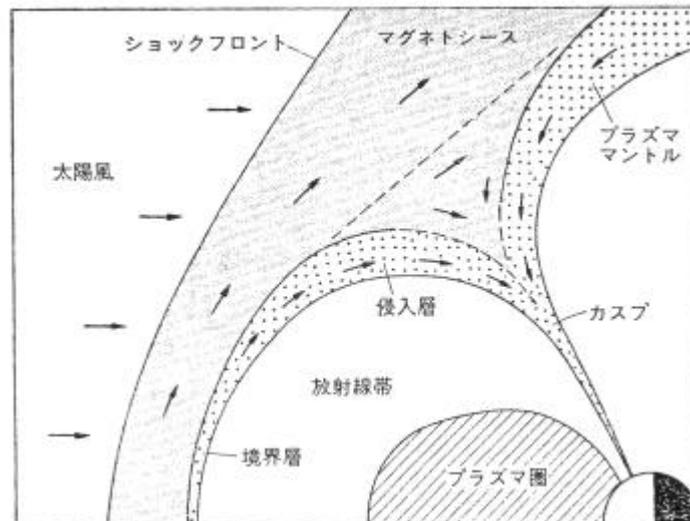


図 1.2: 昼間側磁気圏境界の構造 [福西他, 1983]

カスプ領域では、太陽風プラズマが直接地球に降下している様子がとらえられる。

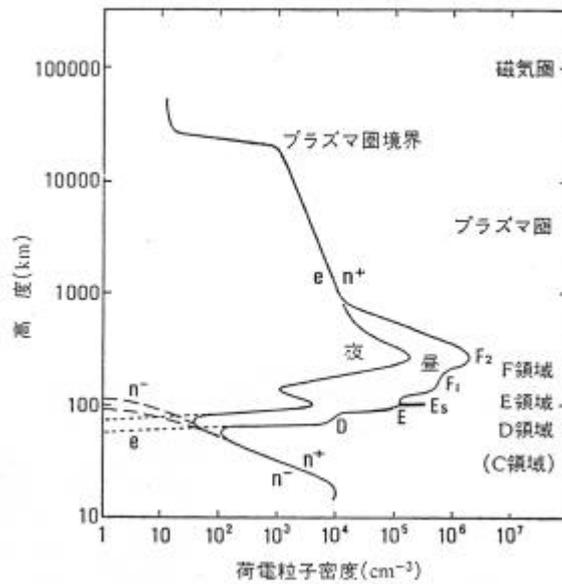


図 1.3: 地球上層大気における電子密度の標準的な高度分布 [福西他, 1983]

電離圏は高度ごとに、D 領域 (70-90 km)、E 領域 (90-140 km)、F1 領域 (140-200 km)、F2 領域 (200-1000 km) と区分されている。電離圏のプラズマが磁気圏に広がっている領域をプラズマ圏と呼び、プラズマ圏とその外側の電子密度が低い領域との境界をプラズマ圏境界と呼ぶ。

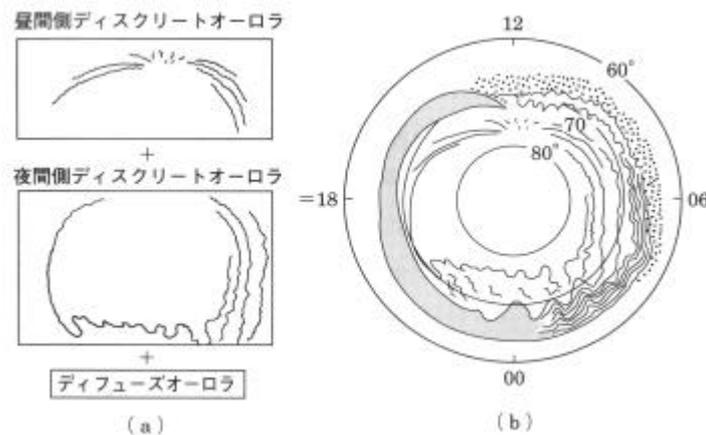


図 1.4: (a) オーロラオーバルを構成するディスクリートオーロラとディフューズオーロラ  
(b) オーロラオーバル全体の模式図 [恩藤他, 2000]

昼側には放射状に伸びるディスクリートオーロラがあり、夜側には真夜中前付近を中心にカーテン状のオーロラが出現する。一般的に、(b)の様に夕方側では、高緯度側のディスクリートオーロラと低緯度側のディフューズオーロラがはっきりと区別できるが、朝側では両者を区別するのが困難である。

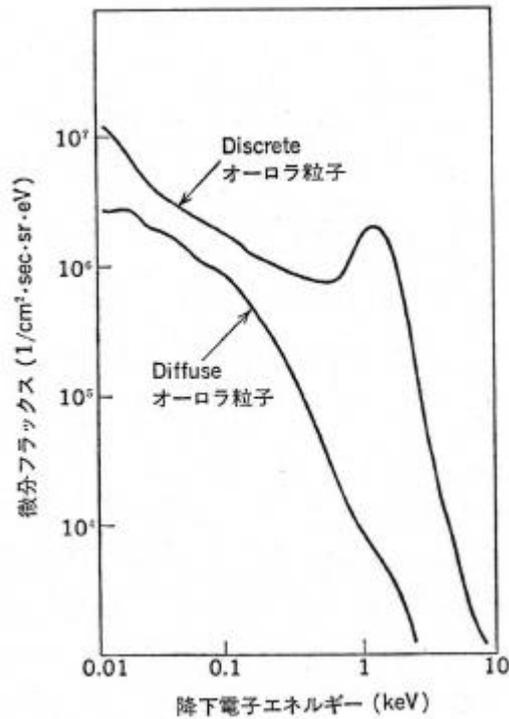


図 1.5: 高度 1400 km で、極軌道衛星 ISIS 2 号が捉えたディスクリートオーロラとディフューズオーロラに対応するオーロラ降下電子のエネルギースペクトルの例 [上出, 1987]  
 ディスクリートオーロラ粒子には、3-4 keV のエネルギーフラックスに鋭いピークが見られるが、ディフューズオーロラにはこの様なピークほとんど見当たらないことが分かる。

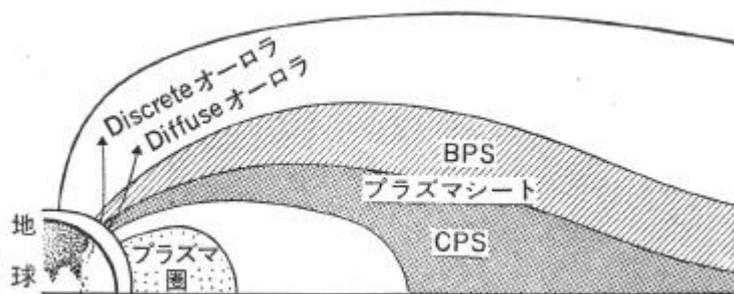


図 1.6: ディスクリートオーロラとディフューズオーロラの降下粒子の源 [上出, 1987]  
 Winningham *et al.* [1975]は、磁気圏プラズマシートのうち、ディフューズオーロラの降下粒子の源にあたる領域を CPS (Central Plasma Sheet)、ディスクリートオーロラの降下粒子の源にあたる領域を BPS (Boundary Plasma Sheet) と定義した。(詳しくは本文参照。)

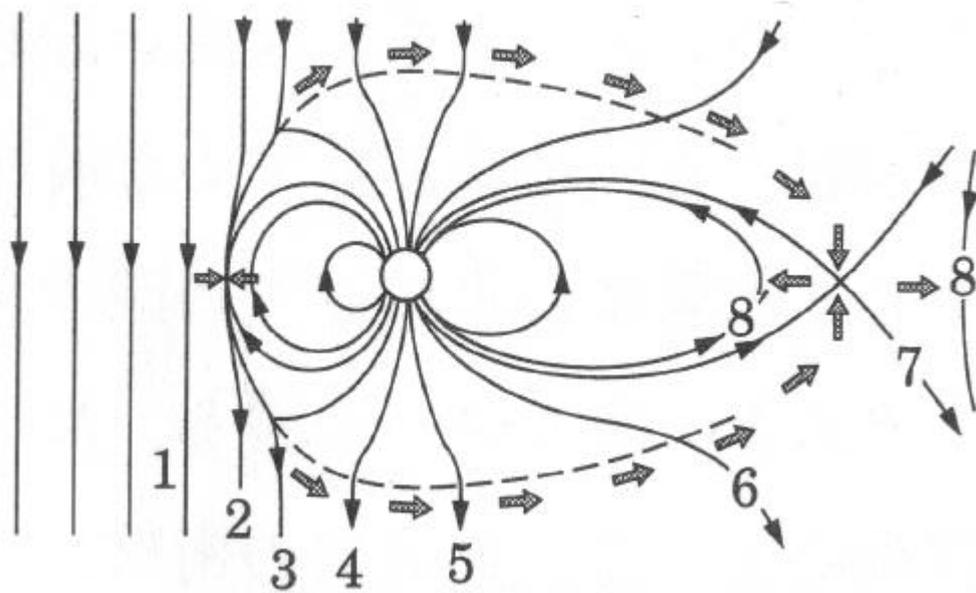


図 1.7: 昼間側磁気リコネクションの模式図 [Dungey, 1961]

最も効率よく磁気リコネクションが起こっている場合、すなわち IMF が完全に南を向き、地球から発する北向きの磁力線が融合している様子が描かれている。磁気圏の昼間側境界（太陽側）で磁力線は切断され、IMF とつながり、太陽風により夜側に運ばれて磁気圏尾部が形成される。下に示す数字（1-8）に従って、磁力線は運動する。

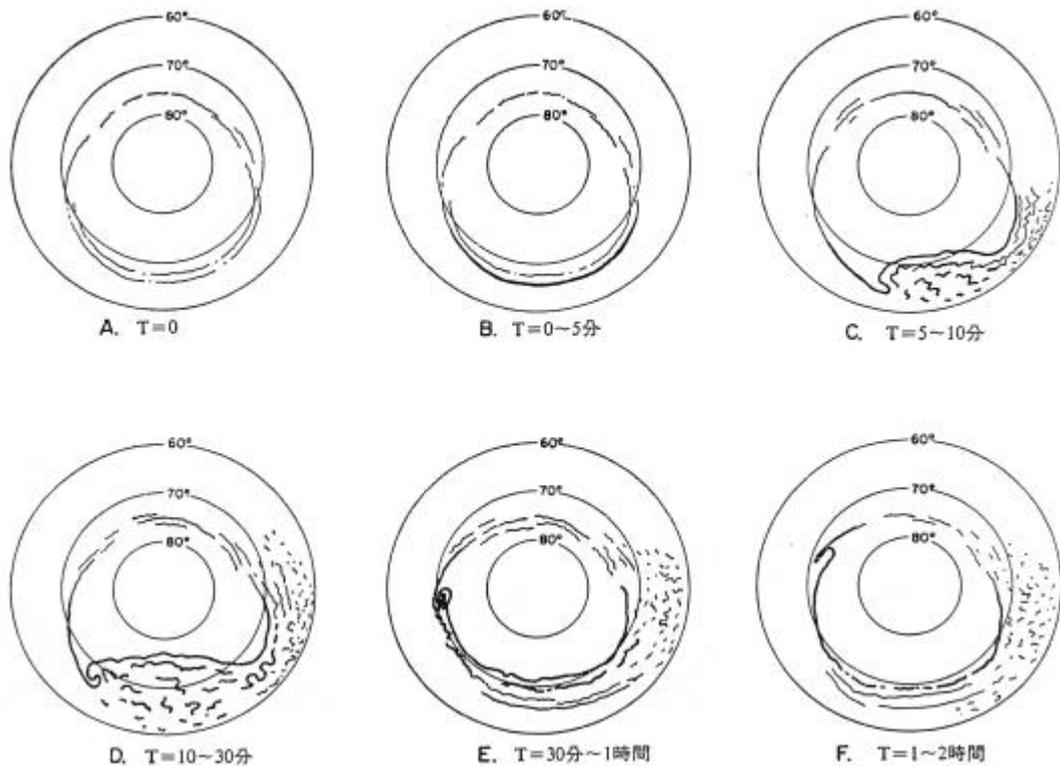


図 1.8: オーロラサブストームの発達過程 [Akasofu, 1968]

真夜中付近のオーロラが突然明るく輝き始めるブレイクアップの時刻を  $T=0$  (min) とする。

- A. ( $T=0$  以前) 静穏なカーテン状のオーロラがオーロラオーバルに沿って出現している。
- B. ( $T=0-5$ ) 真夜中付近で突然アークが発光し、ブレイクアップする。
- C. ( $T=5-10$ ) ブレイクアップしたアークはバルジと呼ばれ、極に向かって発展する。(20-100 km/min)
- D. ( $T=10-30$ ) バルジが、最も極に達する。西端のオーロラバルジが、高速で西向きに伝搬する。(Westward Traveling Surge)。 (~ 100 km/min)
- E. ( $T=30-60$ ) 最も極に達したアークがだんだん赤道方向に後退しはじめる。
- F. ( $T=60-120$ ) もとの静穏な状態のオーロラにもどる。

B-D を爆発相 (Expansion Phase) と呼び、E-F を回復相 (Recovery Phase) と呼ぶ。(おおよそのタイムスケールは  $T$  の値を参照。)

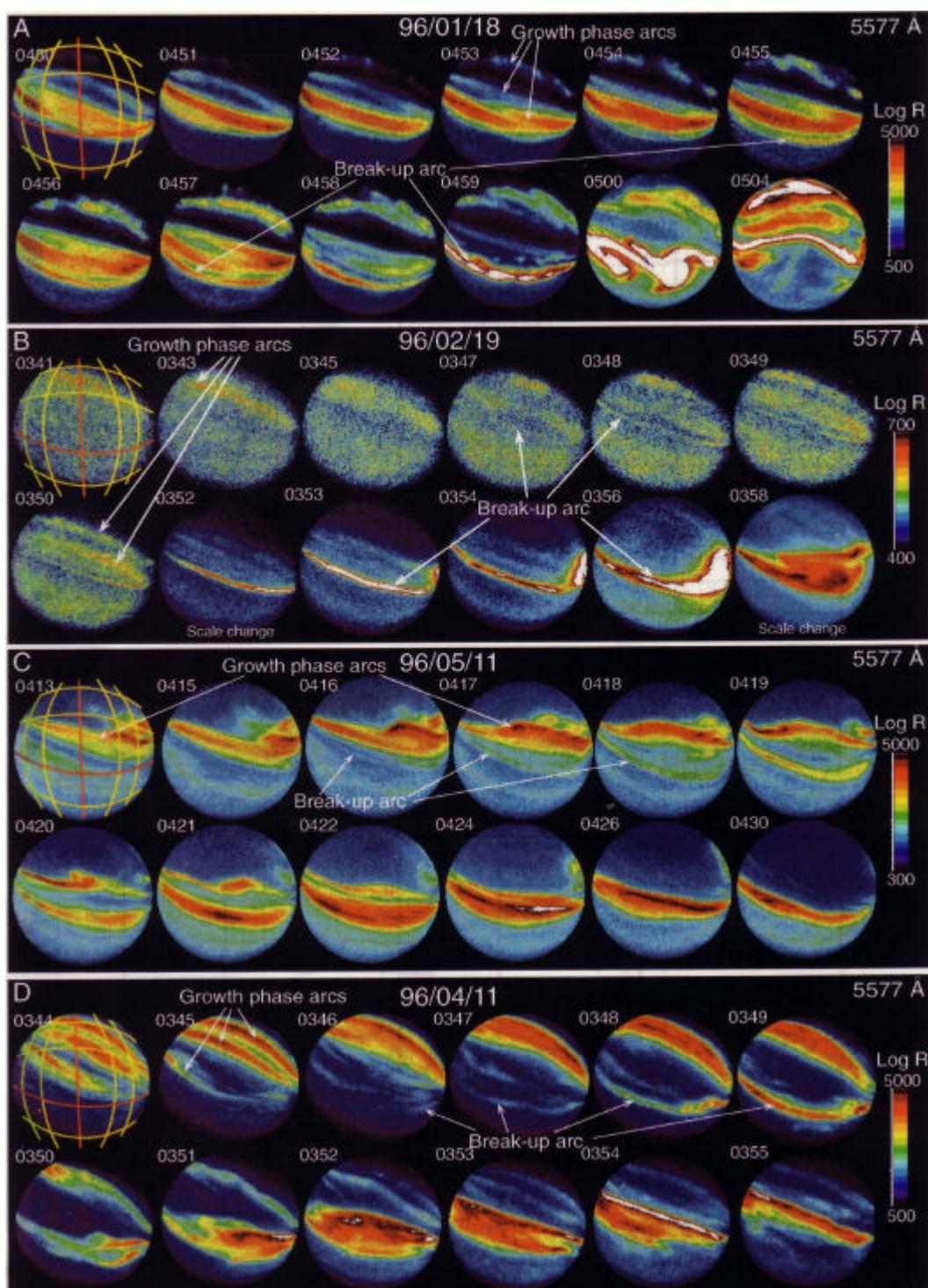


図 1.9: 静穏時のアークとブレイクアップ時のアークの様子 [Lyons et al., 2002]

地上観測による、サブストームオンセット前とオンセット後のオーロラ画像の図。真夜中付近に静穏時に存在するアークよりも低緯度側に新たなアークが生じ、それがブレイクアップのオーロラに発展する場合がしばしば見られることを示唆している。



## 第2章 観測ツールおよび使用するデータ

本研究では、孤立したオーロラサブストームのイベントを選び出し、そのイニシャル・ブライティング (IB) のオーロラオーバルに対する位置を同定するために、複数の観測機器のデータを用いた。以下に用いた観測データを示す。

- Polar 衛星 UVI オーロラ 18、36 秒値 (Univ. Washington、POLAR)
- AE 指数 Quick Look データ (京都大学地磁気世界資料解析センター)
- DMSP 降下粒子データ (JHU/APL、Auroral Particle and Imagery)
- WIND 衛星 IMF 60 秒値、1 時間値 (NASA/GSFC、CDAWeb)
- ACE 衛星 IMF 16 秒値、1 時間値 (NASA/GSFC、CDAWeb)

孤立したサブストームイベントの選出を、AE 指数の地磁気データ、IB とオーロラオーバルの同定を Polar 衛星データ、オーロラオーバル領域及び磁気圏内構造 (BPS/CPS) との対応の降り込み粒子による同定を DMSP 衛星データを用いて、それぞれ行った。さらに IMF は WIND 衛星と ACE 衛星の磁場データを利用した。この章では、これらの観測機器のうち、主に利用したものの特性を簡単に紹介し、またそれらを用いることでどのような利点があるかについて述べる。

### 2.1 Polar 衛星

Polar 衛星は、オーロラなどの極域電離圏の現象を広範囲に観測することを目的として、1996 年 2 月 24 日に打ち上げられた。軌道傾斜角は  $86^\circ$ 、近地点は  $1.8R_E$  で遠地点は  $9R_E$ 、周期は 17.6 時間である。また、Polar 衛星は 1 年に  $17^\circ$  の割合で、遠地点の緯度が変化する (図 2.1 参照)。Polar 衛星の特徴としてまず挙げられるのは、高分解能で多波長にわたる全球的なオーロライメージの撮像ができることである。イメージの撮像は磁気圏の全体像を掴む上で非常に重要である。Polar 衛星は一度にオーロラオーバル

全体を視野に収めることができるため、オーロラオーバルを同時刻・多波長での観測、比較することが可能となった。

もう一つの特徴として、定常的に継続して極域のイメージ撮像を行うことができることが挙げられる。安定してデータが得られることから、グローバルな視点での統計的解析も可能となった。

UVI (UltraViolet Imager) は、Polar 衛星が持つ、紫外線帯の波長で撮像を行っているイメージャーの一つで、オーロラサブストームの研究等によく用いられている。観測波長は130–190 nm であり、LBHL (Lyman-Birge-Hopfield band Long) :160–180 nm と、LBHS (Lyman-Birge-Hopfield band Short) : 140–160 nm の2波長帯が UVI の主な観測波長である。1.3 節で述べたが、LBHL、LBHS は共に窒素分子による発光である。また、LBHL の発光強度は降下電子のエネルギーと比例しており、また LBHL と LBHS の比をとることでさらに正確な降下電子のエネルギーを求められることが知られている [Torr *et al.*, 1995]。表 2.1 に Polar UVI の概要を示す。Polar UVI のブラウザイメージは、NASA Ultraviolet Imager のウェブページ (<http://science.nasa.gov/uvi/default.htm>) から引用した。

## 2.2 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program) 衛星

DMSP 衛星は、高度約 830 km の太陽に同期した軌道を持つ、低高度衛星の一つである。複数の DMSP 衛星が、真昼と真夜中を通る軌道、朝方と夕方側を通る軌道上で観測を行っている。軌道周期はおよそ 101 分であり、降下電子と降下イオンのエネルギースペクトルを測ることができる粒子スペクトロメーター (SSJ/4) を搭載している (エネルギーレンジ : 30 eV-30 keV)。さらに、DMSP 衛星の中には、磁場計測器と電場ドリフト計測器をオンボードで搭載しているものがあり、その衛星が極域電離圏上部を通過すると、降下粒子等に伴う電場と磁場を測ることができる。また、DMSP 衛星は掃天型フォトメーターを搭載しており、オーロラの細かい空間構造を観測することができる (空間分解能 : 約 7 km)。

高度約 830 km の低高度を飛行する極軌道衛星である DMSP 衛星のデータにより、発光層に入る直前のオーロラ降下粒子のエネルギースペクトルを観測できることから、IB が起きた場所付近をほぼ同時刻に DMSP 衛星が通過していれば、BPS/CPS 領域と IB の

位置との関係を調べることが可能である。

DMSP の粒子データは、JHU/APL (Johns Hopkins University / Applied Physics Laboratory) Auroral Particles and Imagery のウェブページ (<http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/index.html>) から引用した。

### 2.3 AE 指数

AE 指数は、Auroral Electrojet 指数の略語で、サブストームやオーロラ嵐など、極域の地磁気活動度をモニターするための指数である。北半球のオーロラ帯（磁気緯度  $65-70^\circ$ ）の経度方向にほぼ等間隔に位置する磁力計（12 個）の、北向き成分を重ね合わせて、変動の最大値 AU と、最小値 AL の差で表される。単位は nT で、1 分値と 1 時間値のデータが提供されている。AE 指数は、オーロラ帯を流れるエレクトロジェット電流量を見積もるために用いられ、サブストームのスケールやオンセットを知る際に有用である。本研究では、高緯度地磁気ステーションの磁場データと併せて、孤立したサブストームのイベントを選び出すために利用した。

観測点の分布の制限から、サブストームを必ずしも同定できるとは限らないが、少なくとも AE 指数で擾乱のあったイベントを取り除くことができる。即ち、孤立したサブストームでは、その直前の AE 指数は静穏でなければならない。但し、逆は成り立たず、オーロライメージ等も用いて、孤立したサブストームであることを確かめる必要がある。

図 2.2、表 2.2 に AE を導出する際に用いている磁気ステーションを載せる。AE 指数の Quick Look のデータは、京都大学地磁気世界資料解析センターのウェブページ (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html>) から引用した。

表 2.1: Polar UVI の基本的なパラメータ

Polar UVI の概要	
Wavelength range (five filters)	130-190 nm
Full aperture	12.13 cm <sup>2</sup>
Full solid angle	1.53 x 10 <sup>-2</sup> (sr.)
Field of view (full angle)	8 Degrees
Number of spatial elements	36728
Size of spatial elements at photocathode	74 x 87 μm
Typical sensitivity per spatial element at photocathode	0.1 (Photoelectrons/R/37 sec)
Angular resolution	~ 0.036 Degrees
Data rate	12 Kpbs
Power	21 W
Mass	21 kg

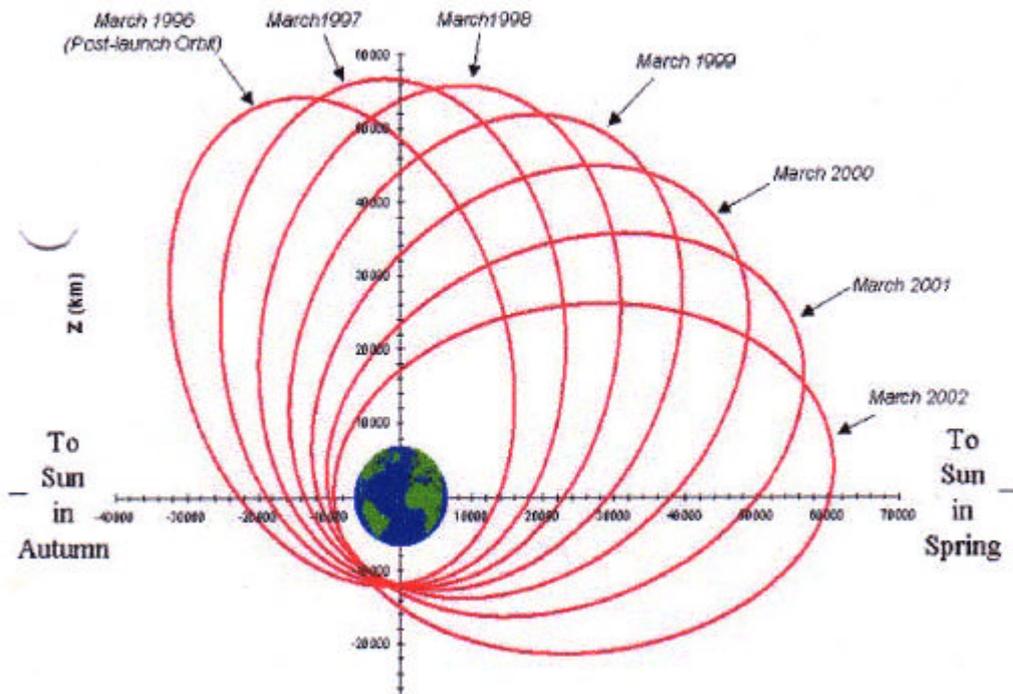


図 2.1: Polar 衛星の打ち上げからの軌道

1996年2月24日に打ち上げられた Polar 衛星は、軌道傾斜角 86 度、近地点が  $1.8 R_E$ 、遠地点が  $9 R_E$  であり、1 年に 17 度の割合で、遠地点の緯度が変化する。

表 2.2: AE ステーションのリスト

Observatory	IAGA Code	Geographic Coord.		Geomagnetic Coord.	
		Lat.(°N)	Long.(°E)	Lat.(°N)	Long.(°E)
Abisko	ABK	68.36	18.82	66.04	115.08
Dixon Island	DIK	73.55	80.57	63.02	161.57
Cape Chelyusk	CCS	77.72	104.28	66.26	176.46
Tixie Bay	TIK	71.58	129.00	60.44	191.41
Cape Wellen	CWE	66.17	190.17	61.79	237.10
Barrow	BRW	71.30	203.25	68.54	241.15
College	CMO	64.87	212.17	64.63	256.52
Yellowknife	YKC	62.40	245.60	69.00	292.80
Fort Churchill	FCC	58.80	265.90	68.70	322.77
Poste-de-la-Bal	PBQ	55.27	282.22	66.58	347.36
Narsarsuaq (Narssarsuaq)	NAQ	61.20	314.16	71.21	36.79
Leirvogur	LRV	64.18	338.30	70.22	71.04

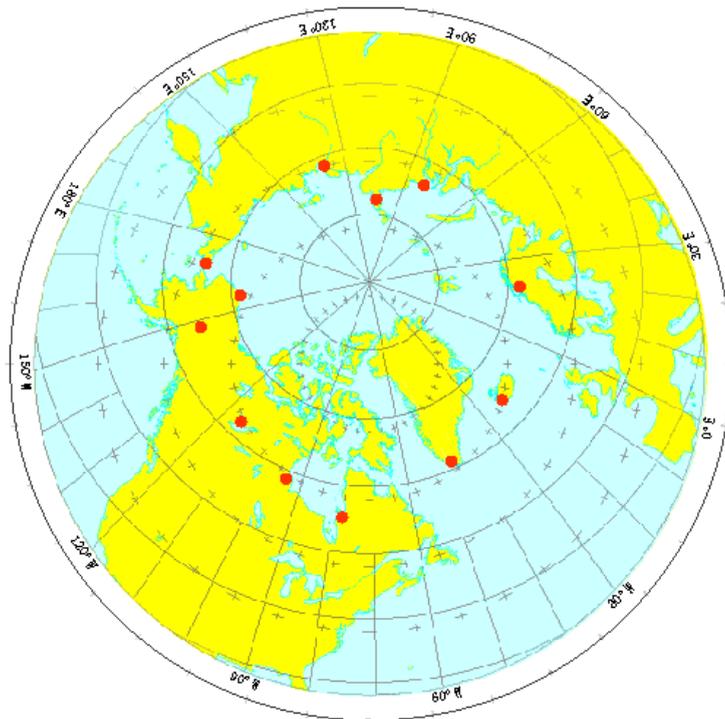


図 2.2: AE ステーションの位置

12 の AE ステーションの地磁気 H 成分の最大値 (AU 指数) と、最小値 (AL 指数) の差から、AE 指数を導出している。

(京都大学地磁気世界資料解析センターのウェブページから引用)

# 第3章 オーロラサブストームに伴うイニシャル ブライティングのイベント選出の過程

## 3.1 AE 指数、Polar UVI によるサブストームイベントの選出

Kan Liou 博士は、Polar UVI のオーロラ画像から、約 1800 例のサブストームイニシャル・ブライティング (IB) のリストを作成した。

(IB の時刻は、Polar UVI のオーロラ画像を調べ、サブストームのバルジに発展する最初の発光が見えたイメージの終わりの時刻と、その前のイメージの終わりの時刻によって決められている。つまり、誤差が 1-2 分程度あるということになる [Liou *et al.*, 1999, 2000].)

本研究では、そのリストを参考にして、AE 指数のデータが引用できる 1997-1999 年の 3 年間に生じた 1422 例の IB イベントを解析した。そのイベントを以下に述べる、地磁気擾乱の条件、オーロラの条件を用いて、表 3.1 の様に絞り込んだ。

表 3.1 の(3)：地磁気擾乱の条件と、(4)：オーロラの条件を用いて IB を選出した過程を以下に記す。

- ・ 地磁気擾乱の条件：

約 6 時間ほど磁気圏の状態が静穏であれば、オーロラオーバルはそれ以前のサブストームの影響をほぼ受けないこと [e.g., Gorney *et al.*, 1987] を考慮して、IB の 6 時間前まで AE 指数の変動が見られないイベントを絞り込んだ。さらに、その中で、ポーラーキャップとオーロラ帯の地磁気ステーションを含む、高緯度地磁気ステーションの暫定磁場チェーンデータを調べ、以下の様にしてイベントを絞り込んだ。IB 前のポーラーキャップにおける磁場変動は、サブストーム成長相の電離圏対流の増大を表している [Kokubun and Iijima, 1975]。したがって、IB 前 6 時間の間に、オーロラ帯の地磁気ステーションにおける地磁気 H 成分の変動が見られるものを取り除いた。

上記の条件を満たす AE 指数の 1 例を図 3.1 に図示する。図 3.1 は 1997 年 1 月 11 日の AE 指数の Quick Look のデータである。10:24:56-10:25:24 UT の間に IB が発生したこのオーロラサブストームは、その 6 時間前の間、AE 指数上で地磁気擾乱活動が見られないことが分かる。同様に、3 年間の全 IB イベントに関して、AE 指数と、オーロラ帯地磁気ステーションの地磁気 H 成分の変動を全て調べ、1422 例から 95 イベントを選出した。

次に、選出した 95 イベントの中で、以下の条件を満たすイベントに絞り込んだ。

・ オーロラの条件：

1. IB が Polar 衛星の視野に収まっている。
2. IB 前後の画像で、オーロラオーバルがはっきりと見えている。
3. IB 前後の画像が、連続して得られている、つまり IB 付近にデータのギャップが無い。

その結果、95 イベントから 39 イベントに絞り込んだ。最終的には、39 イベントについて解析を行った。

表 3.2 に、(4)の条件を満たす 39 イベントのリストを示す。一般的に、Polar UVI は、有限の画像積分時間（18.4 秒と 36.8 秒）を持つため（第 2 章参照）、IB が 2 つの連続するオーロラ画像の間で起きることがしばしばある。そのため、IB 直後のオーロラ画像だけでなく、その直前のオーロラ画像データから得られるオーロラオーバルの高・低緯度境界の値も同時に参照する。

Polar UVI は観測モードによって、LBHL、LBHS、1304 nm、1356 nm などのフィルターを使い分けている。（波長フィルターに関しては第 2 章や *Torr et al.* [1995] を参照。）波長の違いにより感度が異なることがあるため、基本的には IB 直後の画像と、IB 直前の画像は同波長のものを使用することにする。以後、IB 直後のオーロラ画像を、IB 時のオーロラ画像と記述する。

Polar UVI のオーロラブラウザイメージには、

1. 観測される画像が、「LBHL」であるもの。（pt=1）

2. 観測される画像が、「LBHL」、「LBHS」、そしてデータが得られていない「データギャップ」から成っているもの。(pt=2)
3. 観測される画像が、「LBHL」、「LBHS」の他に「1304 nm」や「1356 nm」などがばらばらに並んでいるもの。(pt=3)

の3つのパターンがある [e.g., *Torr et al.*, 1995]。これら区別は、上記の1、2、3の数値を用いて、表3.2の「pt」の欄に記載した。

IB 時の画像と同じ波長で、その1つ前の画像のオーロラオーバルの高・低緯度境界の値を参照する必要性を前述した。その際 pt=1 の場合は容易に参照できるが、pt=2、pt=3 の場合は、2つの同波長のオーロラ画像が得られる時間が空いてしまい、両者のオーロラオーバルの値を比較するのが困難になる可能性がでてくる。そのため、「pt」の値を参照することで、今注目しているイベントにおけるオーロラ画像のパターンがどうなのかを把握し、IB 時のオーロラオーバルと、IB 前の同波長のオーロラオーバルを比較するのに役立たせることができる。

表3.2の「IB oval」の欄にIB 時のオーロラオーバルの高・低緯度境界を、「IB' oval」の欄に、IB 時と同波長で時間的にもっとも近い画像のオーロラオーバルの低・高緯度境界を記載した。さらに両者の時間差を「Diff」の欄に掲載した。「Diff」に「\*」の注釈があるものは、IB 時と同波長の画像が、IB 直前に得られたイベントであることを意味する。つまり、両者の時間間隔が空いていないイベントであると言える。

さらに、ここで異なる波長による Polar UVI の感度の違いについて言及する。

IB 自身は発光が強いため、その位置の中心は観測波長の感度によらない。しかし、オーロラオーバルの高・低緯度境界は一般的にオーロラ発光強度が IB に比べて弱いため、観測波長の感度によってその幅が変化する場合がある。図3.2は、感度の良い観測波長によって得られたオーロラオーバルの高・低緯度境界を赤い線で、感度の悪い観測波長によって得られたオーロラオーバルの高・低緯度境界を黒い線で示している。

オーロラオーバルの形状が時系列データで見て IB 発生時以前にあまり変化していないイベントに限り、IB 時の観測波長によるオーロラオーバルが黒い線で書かれたオーバルで、IB 前の別波長の画像によるオーロラオーバルが赤い線で書かれたオーバルだった場合は、オーロラオーバルの高・低緯度境界の値として、感度の良い赤い線のオー

バルを引用できるとした。

IB 以前に、IB 時の観測波長よりも感度が良い波長で観測されたオーロラオーバルが確認できた場合に、参照できる高・低緯度境界を表 3.2 の「Sense」の欄に記載した。

また、Polar 衛星は、図 2.1 が示す様に、1997 年から 1999 年に向かうにつれて遠地点は極地方から赤道よりに移ってきている。表 3.2 の「Polar 位置」の欄に、IB 時の Polar 衛星の位置を GSM 座標系で記載した。これは、Polar 衛星がオーロラオーバルを斜めから見ていたのか、まっすぐ見下ろしていたのか、という情報を与える。次節 3.2 では、表 3.2 の 39 例のうち、典型的な孤立したサブストームにおける IB の例を 1 つ紹介する。

### 3.2 1997 年 1 月 11 日、10:24:56-10:25:24 UT に生じたサブストーム IB イベント

#### 3.2.1 Polar UVI によるオーロラ観測結果

1997 年 1 月 11 日、10:24:56-10:25:24 UT に生じた IB は、表 3.2 の 39 イベントの中の No.5 のイベントである。このイベントは、Polar 衛星による IB 付近の画像が連続して得られている「孤立したサブストームの IB」の典型的な例である。図 3.3 は、Polar UVI によって得られた光学データを磁気座標上にプロットしたものであり、磁気極をとりまく楕円形の発光領域はオーロラオーバルである。図 3.3 は、Polar UVI のデータギャップを除いており、観測波長が LBHL、LBHS の 2 つの画像からなっている。ここで Polar UVI のデータギャップとは、画像積分時間（18.4 秒と 36.8 秒）のデッドタイムが原因でオーロラ画像が得られていない期間を意味する。

図 3.3 から、22:45 MLT 付近（赤い矢印で示している部分）で生じた IB が、時間の経過とともにバルジに発展していく様子が見えてくる。図 3.4 に、IB 発生場所付近の領域を拡大した図を示す。図 3.4 から、IB はオーロラオーバルの高・低緯度境界付近からではなく、その中心付近から生じている様子が見てとれる。

#### 3.2.2 WIND 衛星による IMF 観測結果

次に、人工衛星 WIND の磁場計測器によって得られた、IB 発生時刻付近の IMF の  $z$

成分 ( $B_z$ ) を図 3.5 に示す。横軸が UT となっており、磁場がゼロのレベルを赤線で示した。

WIND 衛星の位置 (55.5, -61, -16) GSM と WIND 衛星が観測した太陽風速度  $V_x \sim -550$  km/sec を考慮すると、WIND 衛星で観測された IMF が地球磁気圏に到着するのに 20 分前後かかる。そこで、IB 発生時の IMF の情報は、WIND 衛星においては 20 分前、つまり 10:05 UT 付近の IMF 情報に着目する。(図 3.5 において青線で書かれた時間である。)

09:00 UT から 10:05 UT までの IMF  $B_z$  が負である期間が、サブストーム成長相にあたりと考えられ、昼間側磁気リコネクションを伴って夜側に運ばれた磁力線とプラズマが磁気圏尾部に蓄えられている期間であると考えられる。09:00 UT 以前に注目すると、IMF  $B_z$  が約 2 時間ほど正であることから、このサブストームの成長相以前に磁気圏にエネルギーが注入されていた可能性が低く、孤立して生じたサブストームの IB イベントであったことが判断できる。

### 3.2.3 オーロラオーバルの発光強度の時間変化

MLT を固定して、オーロラオーバルを緯度方向に輪切りにすることで、オーロラ発光の緯度方向の分布を詳しく調べることができる。図 3.6 の様に、IB が発生した MLT を中心にして、 $-1$ ,  $0$ ,  $1$ , ... のように分けて緯度方向に輪切りにし、各 MLT での発光の緯度分布の時間変化について議論する。

図 3.7~図 3.10 に、IB が発生した場所である 22:45 MLT (=22.75 MLT) を中心にして、図 3.6 の様に MLT を  $-1$  から  $1$  の 9 つの MLT に分け、各 MLT セクターにおいて緯度方向に輪切りにしたオーロラオーバルの、発光強度の緯度分布を示す。図番号が増えるにつれて、時間が経過していることを示している。また、図 3.9、図 3.10 はそれぞれ、IB 直前と IB 時のオーロラ発光分布を表している。

1 つのセクターの幅は、0.07 MLT (=4.2 min MLT) であり、縦軸がオーロラ発光強度 ( $\text{photon cm}^{-2} \text{s}^{-2}$ )、横軸が磁気緯度 (50-80 度) である。この期間の Polar UVI の観測モード (pt=2) においては、観測波長は LBHL と LBHS の 2 種類があり、さらに積分時間はそれぞれ 18.4 秒と 36.8 秒の 2 種類がある。図 3.7~図 3.10 が示す様に、積分時間の短いものは、発光の弱い部分にノイズが乗りやすくなるが、発光のピークの位置に影響は無い。図 3.3 のオーロラ画像のオーロラオーバルを見ると、おおよそ  $10 \text{ photon cm}^{-2} \text{s}^{-2}$  以上において発光が確認できる。このことから、 $10 \text{ photon cm}^{-2} \text{s}^{-2}$  をオーロラオーバル

の発光値の目安にする。

IB 発生時刻である 10:24:56-10:25:24 UT 前後に注目すると、図 3.8 の 10:23:52 UT では、 $10 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$  程度の発光が、各 MLT セクターの磁気緯度 63-67 度あたりに一様に分布している。10:24:57 UT の発光分布である図 3.9 を見ると、22.57-22.64 MLT と 22.92-22.99 MLT において、磁気緯度 66 度付近に発光が強くなっている部分が見られる。しかし積分時間が 18.4 秒と短く、発光強度の値の変動が大きくなっているため、この図から発光のピークが判断しづらい。図 3.10 を見ると、22.85-22.92 MLT、22.92-22.99 MLT で 65 度付近に、 $30 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$  を越す強い発光が起こっているのが確認できる。さらに、IB の発生した MLT の近辺において、発光分布は MLT 方向にはそれ程変化していない。このことから、IB は MLT 方向に広がって (~15-20 min MLT) 分布している様子が確認できる。また、発光の分布のピークが左右対称に近い形で時間発展していることから、この 1997 年 1 月 11 日、10:24:56-10:25:24 UT に生じた IB は、オーロラオーバルの高・低緯度境界比べて、その中心付近で起こっていることが改めて確認できる。

次章では、表 3.2 の 39 イベントをもとにして、IB 発生位置を統計的に解析した結果について議論する。

表 3.1: IB イベントの選出過程

(1)	(2)	(3)	(4)
1997	610	40	15
1998	403	29	11
1999	409	26	13
計	1422	95	39

(1) : 年、(2) : 1997-1999 年の 3 年分の全 IB イベント数、(3) : 地磁気擾乱の条件 (本文参照) を満たすイベント数、(4) : 地磁気擾乱の条件とオーロラの条件 (本文参照) を満たすイベント数

表 3.2: 1997-1999 年の IB 39 イベントのリスト

No.	Polar yy mm dd	IB Start UT hh mm ss	IB End UT hh mm ss	IB MLT	IB oval (Deg)	IB' oval (Deg)	Sense	Diff m:ss	IB Mlat (Deg)	IB波長	pt	Polar位置 GSM (X,Y,Z)
1	97 1 7	17 28 10	17 28 56	2230-2240	63.3-69.6	64.0-69.3		2:45	65.0-66.7	LBHS	2	(-2, 0, 8.5)
2	97 1 8	14 11 33	14 12 0	2050-2100	69.3-73.8	69.0-73.4		*18	71.0-72.4	LBHL	2	(-1.5, -2, 8.5)
3	97 1 9	0 37 36	0 38 22	22	64.5-69.7	64.5-68.6	高: 69.0	2:45	66.2-67.6	LBHS	2	(0, 2, 6.5)
4	97 1 9	7 47 5	7 47 33	2320-2330	63.1-69.7	63.1-69.3		*19	64.4-68.6	LBHL	2	(1, -1.5, 8.5)
5	97 1 11	10 24 56	10 25 24	2240-2250	61.3-68.3	61.3-68.0		*19	63.0-66.7	LBHS	2	(-0.5, 1.5, 9)
6	97 1 12	7 24 43	7 25 11	2320-2330	62.8-70.0	62.4-69.3	低: 61.4	*19	64.5-68.3	LBHL	2	(1, -2.5, 7.5)
7	97 1 18	2 14 15	2 15 37	2330-2340	62.1-68.6	62.1-68.3		*19	63.1-67.2	LBHS	2	(0, -3, 8)
8	97 1 19	9 41 37	9 42 5	2320-2330	64.5-69.0	64.5-69.3		*19	65.2-67.9	LBHL	2	(0, 3, 8)
9	97 2 7	18 42 56	18 43 33	0	65.2-68.3	65.5-68.3		*19	66.6-67.2	LBHL	2	(-3, -3.5, 4.5)
10	97 2 17	19 55 36	19 56 3	2330-2340	60.7-65.5	61.4-65.9		*18	62.4-63.1	LBHL	2	(-1.5, -0.5, 8.5)
11	97 3 3	6 38 25	6 39 8	23	64.1-67.9	64.1-67.2		2:45	65.5-66.9	LBHS	2	(-2, -2, 6)
12	97 8 17	1 50 43	1 51 20	2120-2130	62.4-71.7	63.8-70.3		*37	65.9-68.0	LBHL	1	(-0.5, -4, 7)
13	97 8 28	2 8 37	2 9 4	22	64.1-69.7	64.1-69.0	高: 70.0	*19	65.9-66.6	LBHL	2	(-1.5, -3.5, 6.5)
14	97 9 29	1 3 20	1 3 47	0000-0010	63.8-67.6	63.8-67.2		*19	65.2-66.6	LBHS	2	(2, -1.5, 8)
15	97 11 30	2 45 9	2 45 36	2210-2220	67.9-71.0	68.6-70.3	低: 66.6	*19	69.0-70.3	LBHL	2	(1, -1, 8.5)
16	98 1 14	9 0 14	9 1 1	2230-2240	64.5-70.3	65.2-69.3		5:49	65.9-69.3	LBHL	3	(0, -1.5, 6.5)
17	98 1 25	3 53 31	3 54 8	2330-2340	58.6-65.9	60.0-65.9		*37	60.3-64.8	LBHL	1	(2, 3, 7.5)
18	98 1 27	7 56 0	7 56 36	2320-2330	61.4-68.3	62.1-68.3		*36	63.8-66.9	LBHL	1	(1.5, 5, 5.5)
19	98 5 20	8 18 24	8 18 51	2230-2240	64.8-67.2	64.8-66.9		*19	65.9-66.6	LBHL	2	(-1, -2.5, 5.5)
20	98 9 4	1 34 24	1 35 1	2320-2330	61.7-66.6	62.1-65.9		*37	63.4-64.5	LBHL	1	(-4, -4, 5)
21	98 9 6	11 26 29	11 27 6	2220-2230	61.0-67.6	61.4-67.6		*37	63.8-65.9	LBHL	1	(-0.5, 0.5, 8)
22	98 9 7	2 32 59	2 33 46	2210-2220	62.1-69.0	62.4-69.0		2:45	65.2-67.2	LBHS	2	(-1.5, -3, 8.5)
23	98 11 4	8 57 28	8 58 5	2210-2220	65.5-68.6	65.5-67.9		*37	66.6-67.9	LBHL	1	(2, 0, 5)
24	98 11 30	3 44 13	3 45 0	0030-0040	65.2-69.7	65.2-69.7		2:45	66.6-67.6	LBHS	2	(-1.5, 2.5, 8.5)
25	98 12 3	7 7 7	7 7 33	2240-2250	64.1-67.9	64.1-67.9		*18	65.5-66.6	LBHS	3	(0.5, 1, 7.5)
26	98 12 23	6 12 39	6 13 16	2240-2250	65.2-69.3	65.5-69.3		*37	66.9-67.9	LBHS	1	(-0.5, 4, 8)
27	99 1 6	7 44 17	7 44 54	2330-2340	61.7-71.4	61.0-71.4		*37	66.6-68.6	LBHL	1	(0, 6, 6.5)
28	99 1 11	19 9 18	19 9 54	1	62.8-69.3	62.8-69.0		*36	64.5-66.2	LBHL	1	(-1.5, -1, 6.5)
29	99 1 12	11 39 23	11 39 50	2150-2200	63.4-68.6	63.8-68.6		6:08	64.5-67.2	1304	3	(-1, 2.5, 7.5)
30	99 1 17	0 33 50	0 34 17	2330-2340	64.1-70.0	判定不能	判別不能	*19	65.9-68.3	LBHL	2	(-0.5, -1.5, 6)
31	99 1 21	10 31 29	10 32 6	2110-2120	64.5-67.9	64.5-67.6		*37	65.5-65.9	LBHL	1	(-0.5, 2, 7)
32	99 1 30	8 28 33	8 29 10	2310-2320	61.7-67.9	62.1-67.9		*37	65.2-65.5	LBHL	1	(0.5, 2, 7.5)
33	99 2 4	14 10 5	14 10 42	1	62.1-66.2	62.1-66.2		*17	63.1-64.8	LBHL	1	(-1, 2, 7)
34	99 3 27	22 26 39	22 27 26	2200-2210	62.1-67.2	62.1-67.2	判別不能	2:45	64.5-65.9	LBHS	2	(0.5, -0.5, 7.5)
35	99 4 9	14 4 29	14 5 6	2230-2240	65.5-68.6	65.9-68.6		*37	66.6-67.2	LBHL	1	(0.5, 1.5, 7.5)
36	99 5 22	3 55 44	3 56 21	23	66.9-71.4	66.6-71.0		*37	68.3-69.0	LBHL	1	(3.5, -1.5, 7.2)
37	99 9 6	20 6 5	20 6 42	2340-2350	62.1-65.2	62.4-64.5		*37	63.1-63.8	LBHL	1	(-2, -2.5, 6.7)
38	99 9 12	0 59 38	1 0 15	2310-2320	64.5-67.6	64.5-67.2		*37	65.9-66.6	LBHL	1	(-1.5, -2.7, 7.2)
39	99 11 28	5 25 26	5 26 3	0110-0120	64.8-70.0	64.8-70.0		*37	66.2-68.6	LBHL	1	(-0.5, 2, 7.5)

(左から順に) イベントナンバー、時刻 (年,月,日) 開始時刻 (UT)、終了時刻 (UT)、IB MLT (Deg) : IB の発生した MLT、IB oval (Deg) : IB 時のオーロラオーバル高・低緯度境界、IB' oval (Deg) : IB の 1 つ前 (同波長で一番近い画像) のオーロラオーバル高・低緯度境界、Sense : IB 時の波長より感度が良くオーロラオーバルの幅が広い画像がある場合のその高・低緯度境界値、Diff : IB と、同波長で見た時の一つ前の画像との時間差、IB Mlat (Deg) : IB の磁気緯、IB 波長 : IB 時の Polar UVI の観測フィルターの波長、pt : Polar UVI ブラウザイメージの画像のパターン (本文参照)、Polar 位置 (GSM 座標系) : Polar 衛星の位置

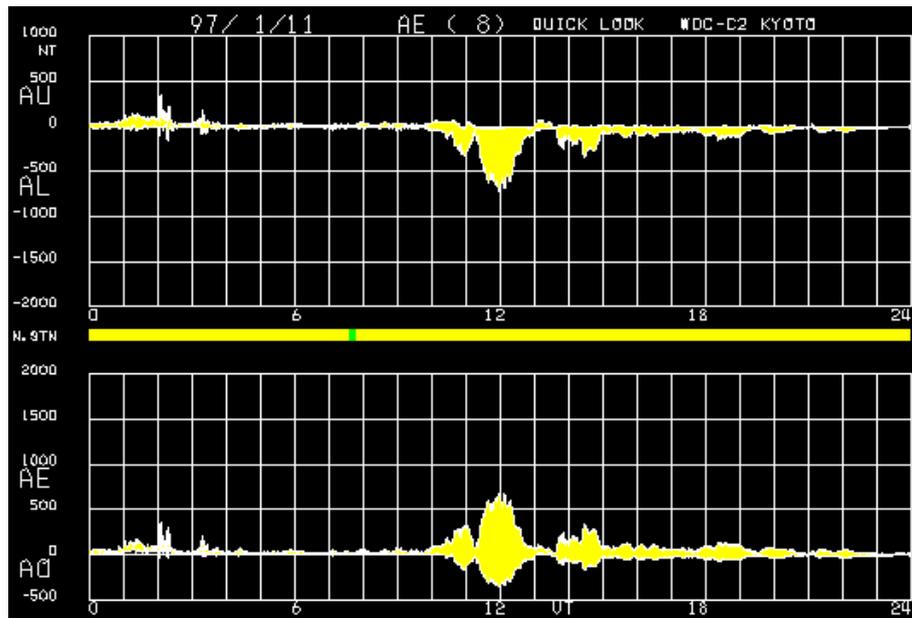


図 3.1: 1997 年 1 月 11 日の AE 指数の Quick Look のデータ

(京都大学地磁気世界資料解析センターウェブページより引用)

縦軸：磁場強度 (nT)、横軸：UT である。上から順に、AU, AL, AE, AO 指数を表しており、12 の AE ステーションの磁場変動の最大値 (AU) と最小値 (AL) を引いた値が、AE 指数である。

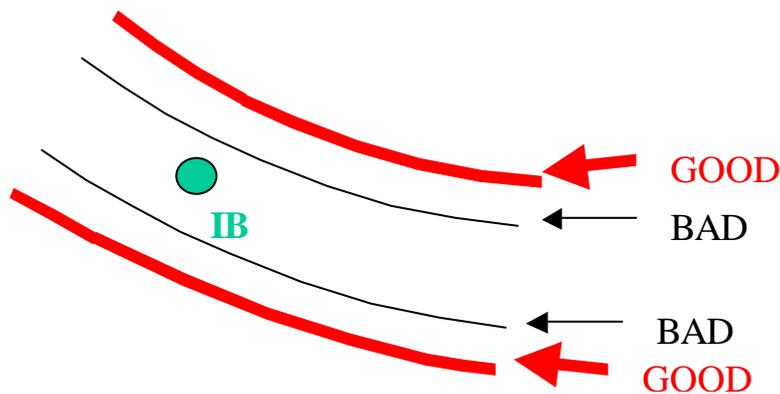
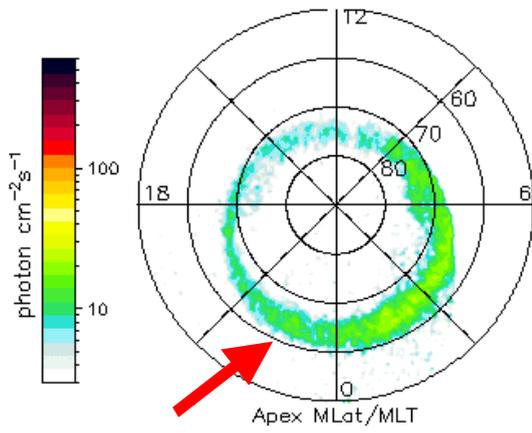


図 3.2: 感度の悪い波長で見たオーロラオーバル (黒線：BAD) と、感度の良い波長で見たオーロラオーバル (赤線：GOOD) の概念図

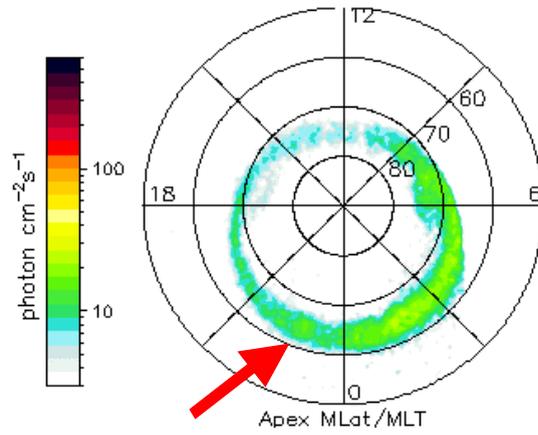
IB 自身は発光が強く、その中心は波長の感度によらず一定であるとし、オーロラオーバルは、IB 前にあまり変動していなければ、その高・低緯度境界は感度の良い方の値を参照することができるかと仮定した。但し、実際に GOOD と BAD で緯度の差はそれほど無い例の方が多い。

11 Jan 97 10:21:44 UT



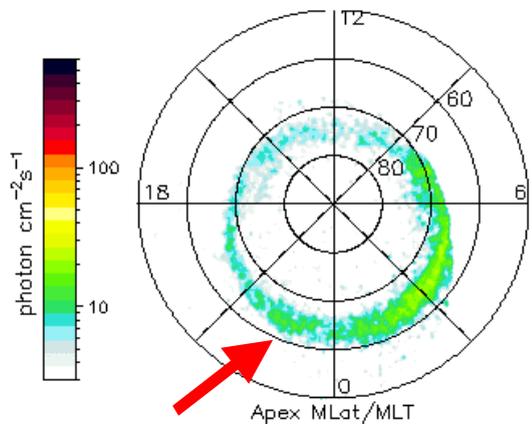
(a) 10:21:44 UT, LBHS

11 Jan 97 10:22:03 UT



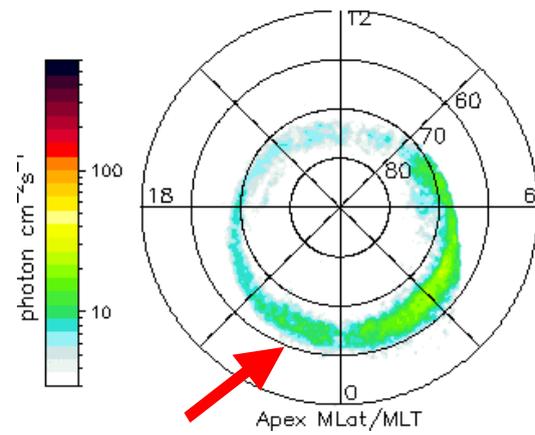
(b) 10:22:03 UT, LBHS

11 Jan 97 10:23:34 UT



(c) 10:23:34 UT, LBHL

11 Jan 97 10:23:53 UT



(d) 10:23:53 UT, LBHL

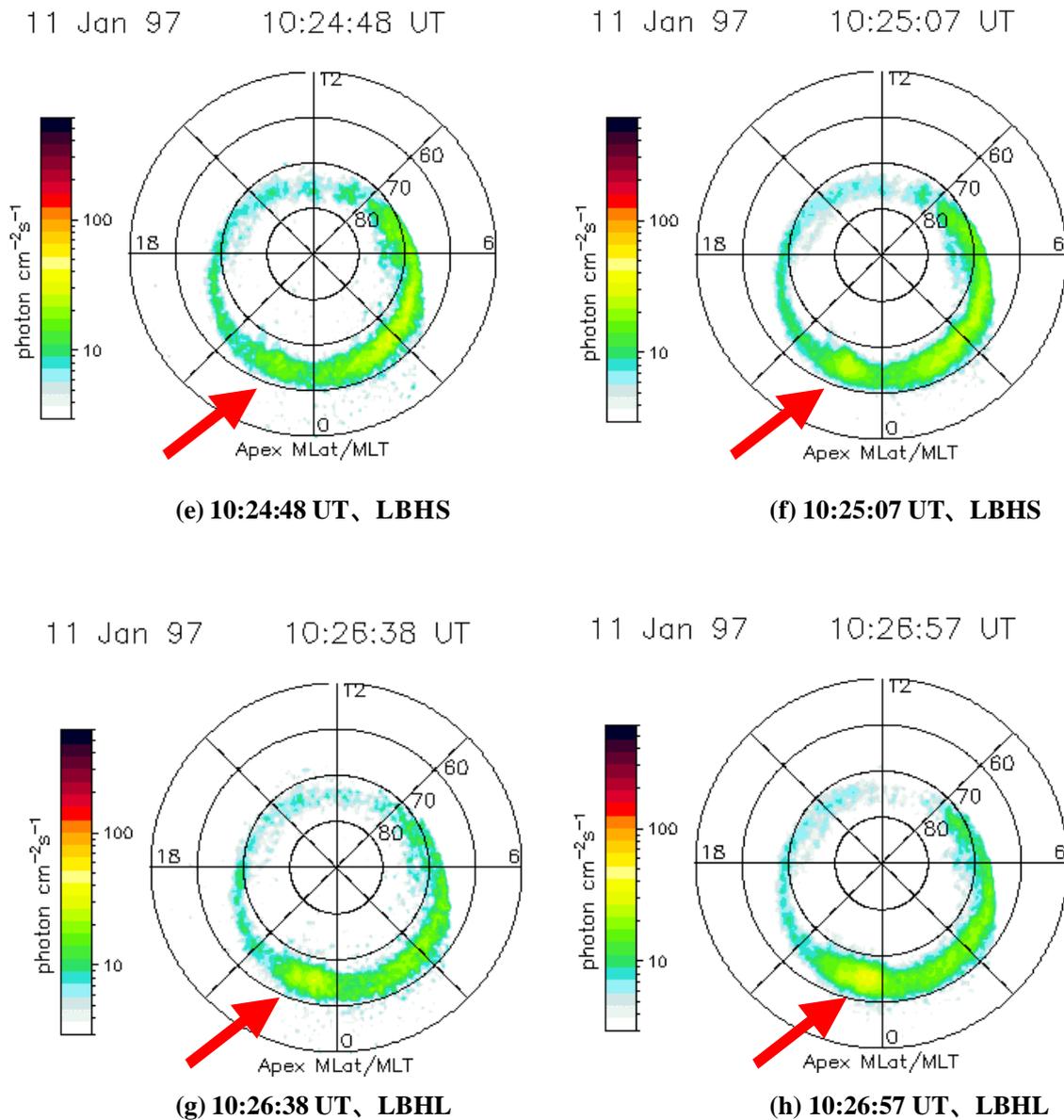


図 3.3: Polar UVI による 1997 年 1 月 11 日、10:24:56-10:25:24 UT に発生した IB の観測結果 (NASA/Polar UVI ウェブページより引用)

赤い矢印は、IB 発生位置を示している。Polar UVI によるオーロラ画像を、磁気緯度と MLT の関数で表示している。(ポーラープロット)

発光強度は対数スケールのカラーバーで示している。22:45 MLT 付近で生じた IB が、時間の経過とともにバルジに発展していく様子がとらえられる。

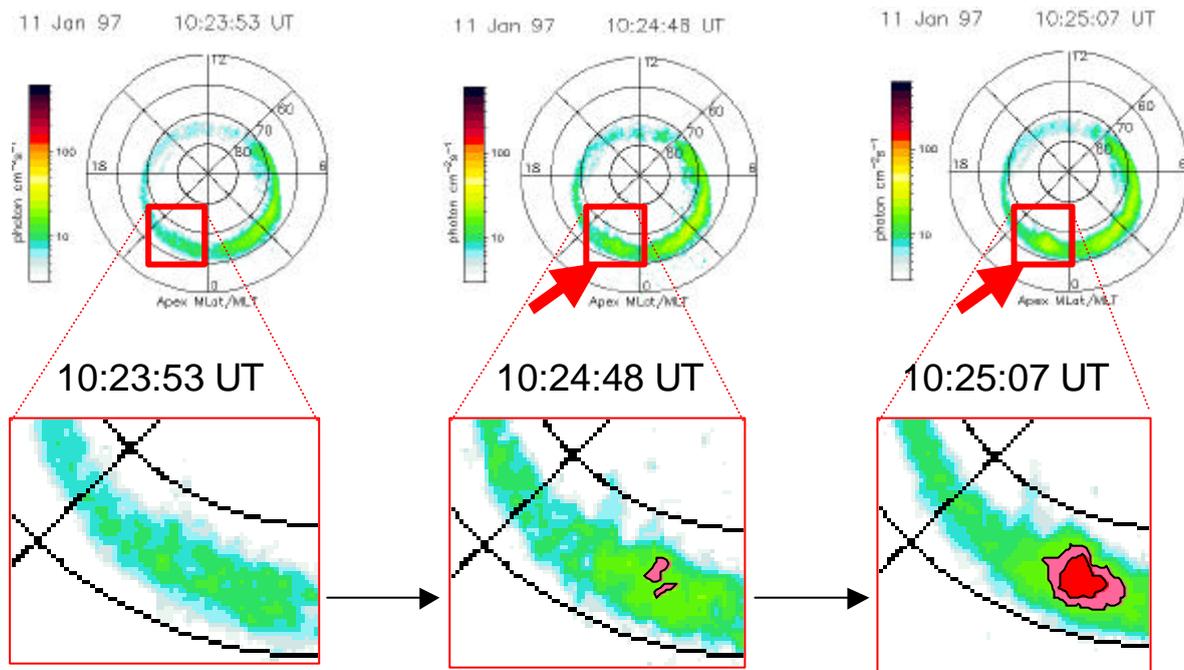


図 3.4: IB 発生位置を拡大したオーロラ図

(NASA/Polar UVI ウェブページより引用)

図 3.3 の IB 発生時刻前後の 3 つの図を取り上げ、21:00-0:00 MLT の部分を拡大した図。IB の色の变化をコンターで表示させ、発光の強い部分を目立たせてある。

(図のフォーマットは、図 3.3 と同じ)

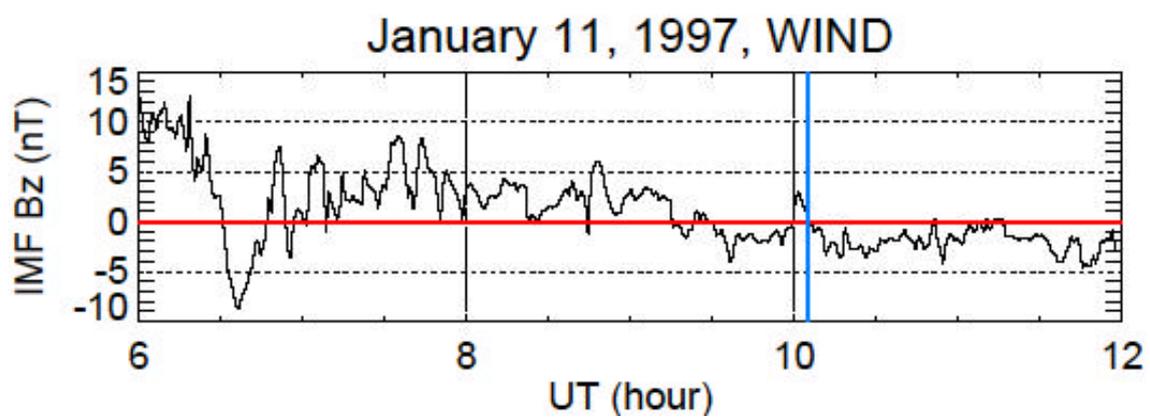
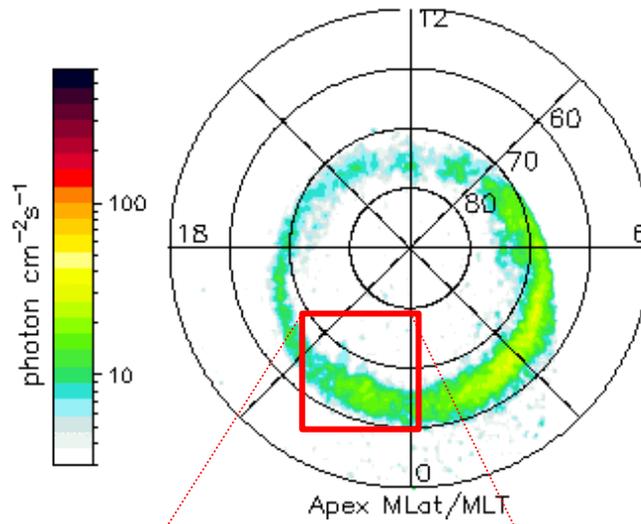


図 3.5: WIND 衛星による IMF  $B_z$  の観測結果

縦軸：IMF  $B_z$  成分の磁場強度 (nT)、横軸：UT (hour)である。

磁場がゼロのレベルを赤線で示した。IBが発生した時間帯の IMF は青線の時間に相当する。

11 Jan 97 10:24:48 UT



10:24:48 UT

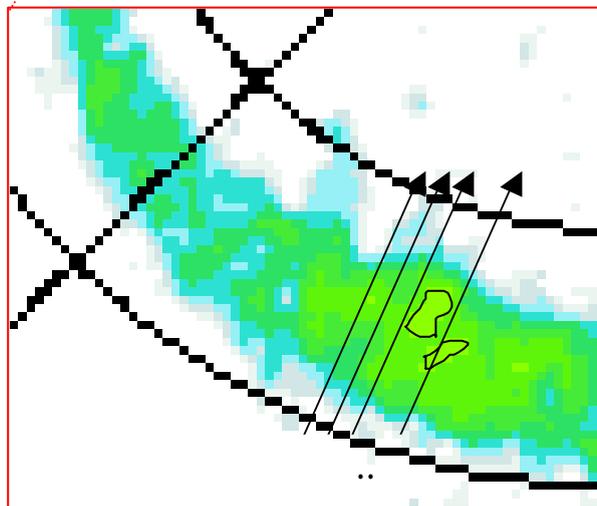


図 3.6: オーロラオーバルを緯度方向に輪切りにする様子

IB が発生した MLT を中心にして , , ... の様に同じ MLT に分けて、緯度方向に輪切りにする様子を示す。図 3.7-3.10 に、9 つの MLT で輪切りにした時の、発光強度の緯度分布を示す。(図のフォーマットは図 3.3、図 3.4 と同じ)

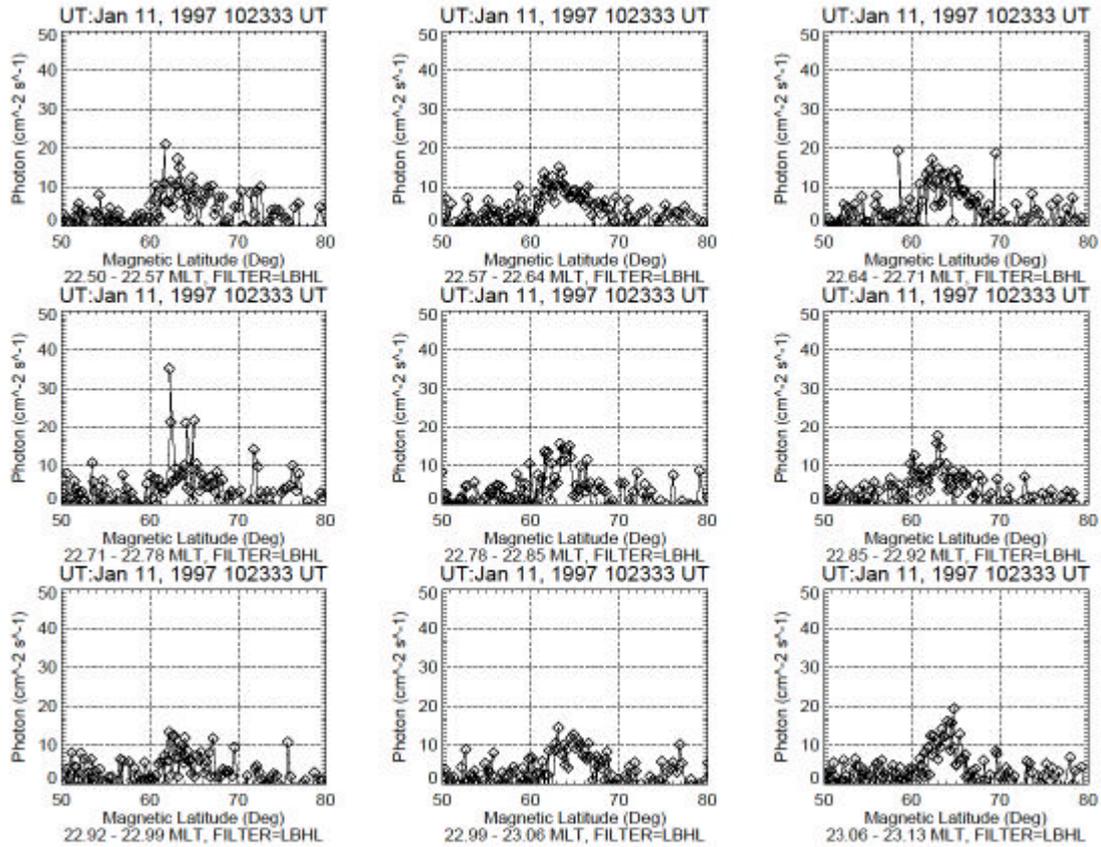


図 3.7: 10:23:33 UT のオーロラオーバルを

9 つの MLT に分けた時のオーロラ発光強度の緯度分布

横軸：磁気緯度（度） 縦軸：発光強度（ $\text{photon cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）

波長：LBHL、画像積分時間：18.4 sec

左上から順に : 22.50-22.57 MLT、 : 22.57-22.64 MLT、 : 22.64-22.71 MLT、  
 : 22.71-22.78 MLT、 : 22.78-22.85 MLT、 : 22.85-22.92 MLT、 : 22.92-22.99 MLT、  
 : 22.99-23.06 MLT、 : 23.06-23.13 MLT の 9 つの MLT セクター（1 セクター = 4.2 分）  
 に分けた時の、それぞれのオーロラ発光強度の緯度分布を表す。

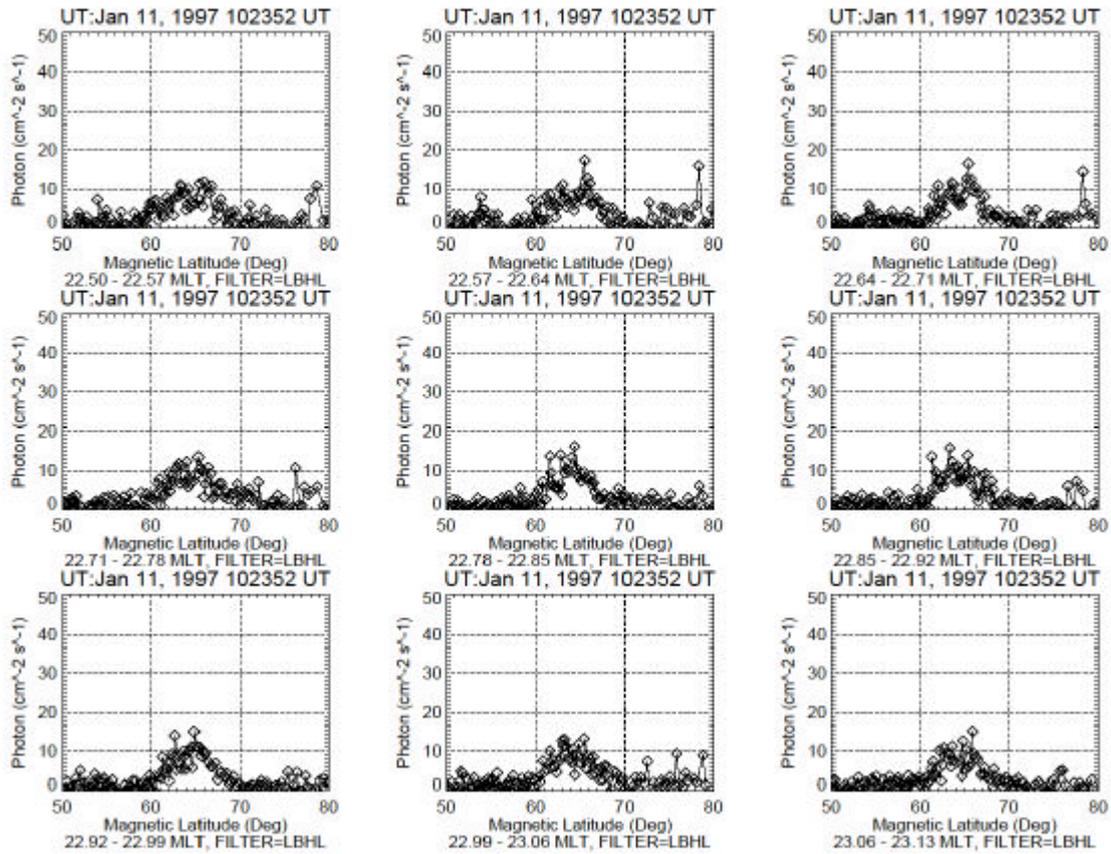


図 3.8: 10:23:52 UT のオーロラオーバルを

9 つの MLT に分けた時のオーロラ発光強度の緯度分布

横軸：磁気緯度（度） 縦軸：発光強度（ $\text{photon cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）

波長：LBHL、画像積分時間：36.8 sec

（図の構成は、図 3.6 と同じ。）

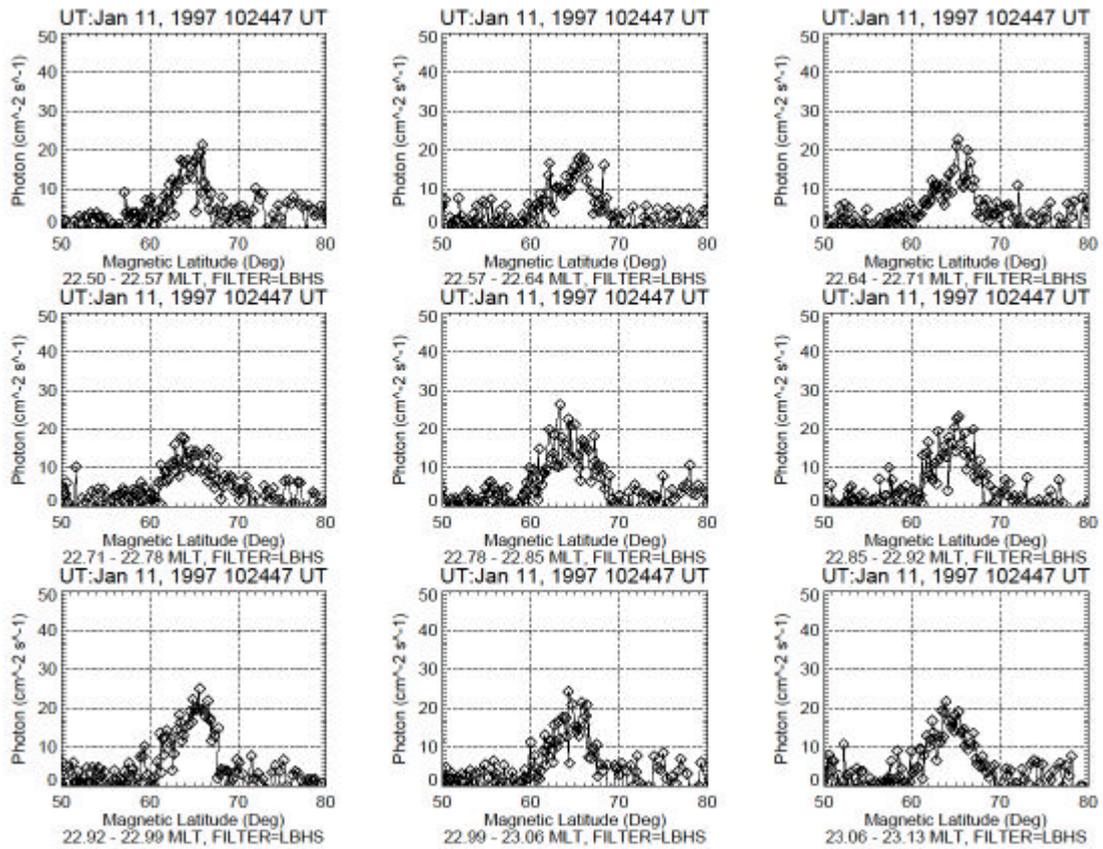


図 3.9: 10:24:47 UT のオーロラオーバルを

9 つの MLT に分けた時のオーロラ発光強度の緯度分布

横軸：磁気緯度（度） 縦軸：発光強度（ $\text{photon cm}^2 \text{s}^{-1}$ ）

波長：LBHS、画像積分時間：18.4 sec

（図の構成は、図 3.6 と同じ。）

（IB 発生時刻前）

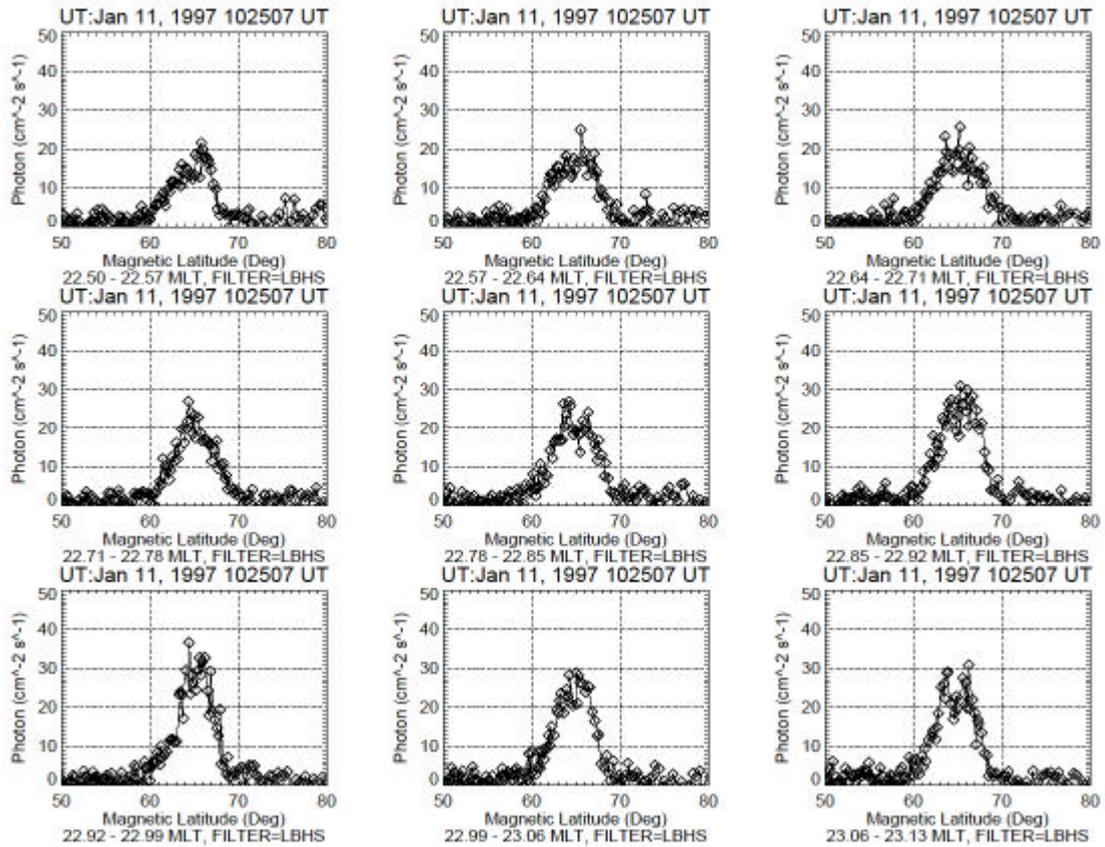


図 3.10: 10:25:07 UT のオーロラオーバルを

9 つの MLT に分けた時のオーロラ発光強度の緯度分布

横軸：磁気緯度（度） 縦軸：発光強度（ $\text{photon cm}^2 \text{s}^{-1}$ ）

波長：LBHS、画像積分時間：36.8 sec

（図の構成は、図 3.6 と同じ。）

（IB 発生時刻）

## 第4章 1997-1999年に発生した39イベントのイニシャル・ブライティング発生位置に関する統計解析結果、およびその考察

第3章で絞ったイニシャル・ブライティング (IB) が発生した位置を、IB 時のオーロラ画像とその一つ前のオーロラ画像を参照しながら、オーロラオーバルの高・低緯度境界に対して統計的に調べた。その際、一つ前のオーロラオーバルは IB 時と同波長の画像のものを使用し、IB 時の観測波長より感度の良い画像のデータがあれば、その画像のオーロラオーバル高・低緯度境界の値を利用することを第3章で述べた。(オーロラオーバル高・低緯度境界の値は、表 3.2「Sense」の欄に表記。)

表 3.2 の 39 イベントの中で、オーロラオーバルの幅が IB 前より IB 時の方が明らかに広がっているものが 4 例存在した。ナンバー15、16、17、23 のイベントがそれに相当する。ナンバー15、17、23 は IB 時にオーロラオーバルの高緯度境界が広がっているイベント、ナンバー16 は IB 時と IB 前の画像の時間差が 5 分以上開いているイベントである。これらのイベントは、オーロラオーバル高・低緯度境界に対する IB の位置を調べる際に曖昧さが残る。

大幅にオーロラオーバルが広がっているイベントはほぼないが、曖昧さを無くすために、この章では表 3.2 の 39 例から、前述の 4 例を差し引いた 35 例に関して統計解析を行った結果について議論する。ここで、IB の発生位置は観測された IB の中心の位置とし、オーロラオーバルは  $4 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上、IB は  $30 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上の発光とする。

### 4.1 オーロラオーバルの高・低緯度境界と、イニシャル・ブライティング (IB) 発生位置の分布

図 4.1 に、35 例の IB 発生位置を示す。横軸が全 35 例あるイベントの番号で、縦軸が磁気緯度である。オーロラオーバルの幅を黒線、IB の中心を赤プロットで示している。

図 4.1 を見ると、イベントによって IB の発生緯度が大きく変動している様子が分か

る。これは、サブストームに先行する IMF の状態や地磁気の状態などによって、ポーラーキャップの大きさが変動し、その結果オーロラオーバルの位置や幅がイベントによって変化することが原因と考えられる。

本研究の目的は、磁気圏プラズマシートに相当するオーロラオーバル中において、緯度方向のどの場所で IB が生じるかを明らかにすることであり、IB の緯度そのものではない。そのため、次節 4.2 では、IB の発生位置を、オーロラオーバルに対して相対的に調べた結果について議論する。

#### 4.2 オーロラオーバルの高・低緯度境界の値で規格化した時の、IB 発生位置の分布

35 イベントのオーロラオーバルの高・低緯度境界を 0-1 で規格化し、その中での IB が示す値を図 4.2 に示す。図 4.2 は、横軸が全 35 例あるイベントの番号で、縦軸がオーロラオーバルの低緯度境界の磁気緯度を 0、高緯度境界の磁気緯度を 1 で規格化した時の値であり、IB の中心を赤でプロットしている。

図 4.2 から、どのイベントについても IB はオーロラオーバルの中心付近に分布していることが確認できる。

次節 4.3 では、この IB の相対的な位置の統計解析を行った結果について議論する。

#### 4.3 オーロラオーバルに対する IB 発生位置の統計解析

##### 4.3.1 IB 発生位置のヒストグラム化

曖昧な IB イベントを除いた全 35 イベントについて IB の中心値のヒストグラムを作成した。その結果が、図 4.3 である。図 4.3 は、横軸がオーロラオーバルの低緯度境界を 0、高緯度境界を 1 で規格化した値で、縦軸がイベント数であり、図 4.2 の IB の中心値を 0.05 の BIN に分け、IB 時のオーロラオーバル (図 4.3 上図) と IB 前のオーロラオーバル (図 4.3 下図) について、ヒストグラム表示した図である。この図 4.3 を見ると、下図の IB 前のオーロラオーバルで規格化した IB の方がヒストグラムに広がりを持っているが、イベント数が最も多いのは、規格化値 0.5 付近つまりオーロラオーバルの中心付近で生じている IB である。

前の磁気圏活動の影響を受けず、孤立して生じたサブストームイベントの IB は、そ

のスケールによって発生する緯度は変わるが、オーロラオーバルの高・低緯度境界に対する相対的な位置としてみると、そのオーロラオーバルの緯度方向の中心付近で生じる可能性が高いということが、この 35 例の IB の統計解析から考えられる。

#### 4.3.2 IB 発生位置の IMF 依存性

前節 4.3.1 において、孤立して生じたサブストームの IB 発生位置は、オーロラオーバルの高・低緯度境界と比較して、相対的に中心付近で生じる可能性が高いことが示された。IB 発生位置は、主に季節と IMF に依存しており [e.g., *Liou et al.*, 2001]、IB の発生緯度そのものは、一般的に IMF  $B_z$  成分の値が小さくなる程低緯度側で生じる [e.g., *Liou et al.*, 2001; *Kamide*, 2001] ことが知られている。しかし、IMF  $B_z$  成分の値が小さくなると、磁気圏の対流が活発になりプラズマシートが圧縮されることから、オーロラオーバルも IB と同じように低緯度に移動する。そのためオーロラオーバルに対する相対的な位置が IMF  $B_z$  成分によってどう変化するかはよく分かっていない。

孤立して生じたサブストーム IB のオーロラオーバル高・低緯度境界に対する相対的な位置が、先行する IMF の状態によりどの様に変化するのかについて調べた。

##### ● IMF による分類方法

オーロラオーバル高・低緯度境界に対する IB の発生位置を、IB 発生前の IMF  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  成分の大きさで、大きく 2 つに分類する。その際、IMF は衛星から地球磁気圏境界面に届くまでの時間を補正した時の、IB 発生前 1 時間の平均値を使用する。過去の研究によって、AE 指数が 30-60 分前の IMF  $B_z$  成分と良い相関を示すこと [e.g., *Meng et al.*, 1973; *Arnoldy*, 1971] から、サブストームに関連する IMF 依存性を統計的に調べるには、IMF の 1 時間平均値を用いるのが妥当であることが、*Liou et al.* [2001] によって報告されており、本研究でもそれにならって解析した。

##### ● IMF 依存性の評価

表 4.1 に、4.3.1 節の図 4.3 で出した 35 例の IB イベントの、IMF  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  成分の 1 時間平均値を記載した。35 イベントを各成分の大きさによって、大きく均等に 2 つに分類するために、 $B_x \geq 0$  と  $B_x < 0$ 、 $B_y > 0$  と  $B_y \leq 0$ 、 $B_z > -1$  と  $B_z \leq -1$  (単位は nT) の様

に、IMF の 3 成分をそれぞれ 2 つに分類し、オーロラオーバル高・低緯度境界に対する IB の発生位置を色分けしてヒストグラム化した。その結果を図 4.4 に示す。

図 4.4 の(a)、(b)を見ると、オーロラオーバル高・低緯度境界に対する IB の発生位置は、IMF  $B_x$  と  $B_y$  成分には依存せず、一様に分布しているように見える。しかし(c)を見ると、IMF  $B_z$  成分が小さい程、オーロラオーバルの低緯度側境界よりに IB が多く分布しているように見える。図 4.4 の(c)を分かりやすくした分布図が図 4.5 である。

図 4.5 は、IB のオーロラオーバル高・低緯度境界に対する相対的な発生位置を、0.0-0.5 (低緯度側：赤) 0.5-1.0 (高緯度側：青) と大きく 2 つに分類した時の  $B_z > -1$  と  $B_z < -1$  の違いによる分布を示している。図 4.5 から、IMF  $B_z$  の値が小さい程、IB の発生位置はオーロラオーバルの低緯度側にシフトしている様子が確認できる。

#### 4.4 考察

本解析で得られた IB 発生位置の IMF  $B_z$  依存性は、*Jayachandran et al.* [2002b]による結果と一致するものであった。*Jayachandran et al.* [2002b]は、プロトンオーロラオーバルの低緯度境界と IB の発生位置を比較し、IMF  $B_z$  が小さくなるほど IB 発生位置がオーロラオーバルの低緯度境界に近くなることを示した。プロトンオーロラオーバルの低緯度境界は、SuperDARN レーダーによる電離圏 E 領域からの後方散乱の情報から見積もられている [e.g., *Jayachandran et al.*, 2002a]。

IB の発生位置が、先行する IMF の状態により、オーロラオーバル中で低緯度や高緯度に変移するということは、磁気圏尾部におけるサブストーム爆発相のオンセットの位置が、地球方向や、反地球方向に変移することを意味する。オンセットの位置を支配する要因の一つとして、IMF  $B_z$  成分が挙げられると考えられる。第 3 章で取り上げた、孤立して生じたサブストームの IB においても、その発生位置は、先行する IMF  $B_z$  成分と関係を持っている可能性が高い。

磁気圏の対流は、IMF  $B_z$  の値そのものよりも、IMF  $B_z$  の符号と強度 (絶対値) が重要であると考えられている。そのため、IB のオーロラオーバルに対する相対的な位置の IMF  $B_z$  依存性を磁気圏対流と結びつけて考察するためには、イベント数を増やし、IMF  $B_z$  を負、0 付近、正の 3 つに大きく分類してその依存性を調べるのが、今後の

課題として残される。

オーロラ粒子の源である磁気圏プラズマシートの領域と IB 発生位置を対応づけるには、降下粒子の情報が必要である。そのため、DMSP 衛星が観測した降下粒子のデータと、Polar UVI が観測したオーロラオーバルおよび IB とを次章で比較し、議論する。

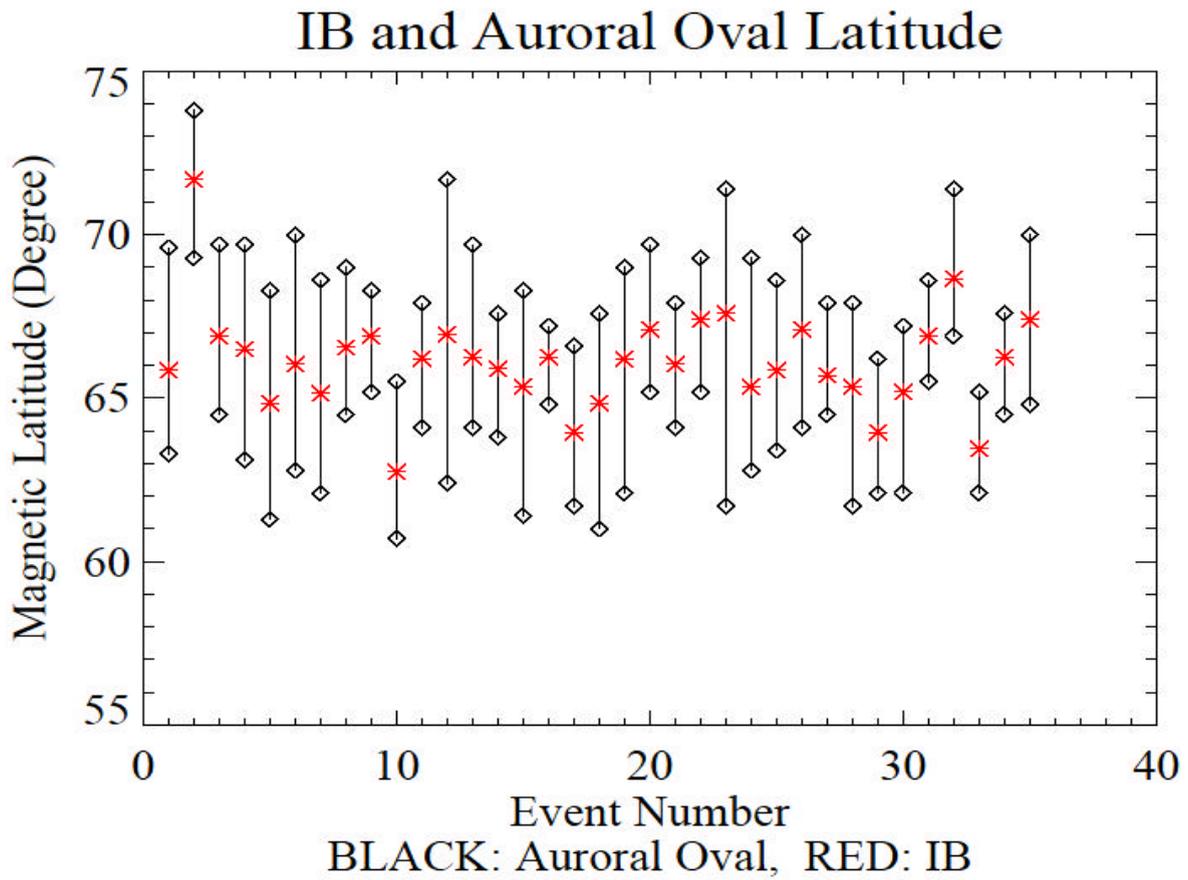


図 4.1: オーロラオーバルと IB の分布

オーロラオーバル (黒線) と、IB の中心 (赤プロット) を表示縦軸: 磁気緯度 (55-75 度) 横軸: イベントの番号 (1-35)

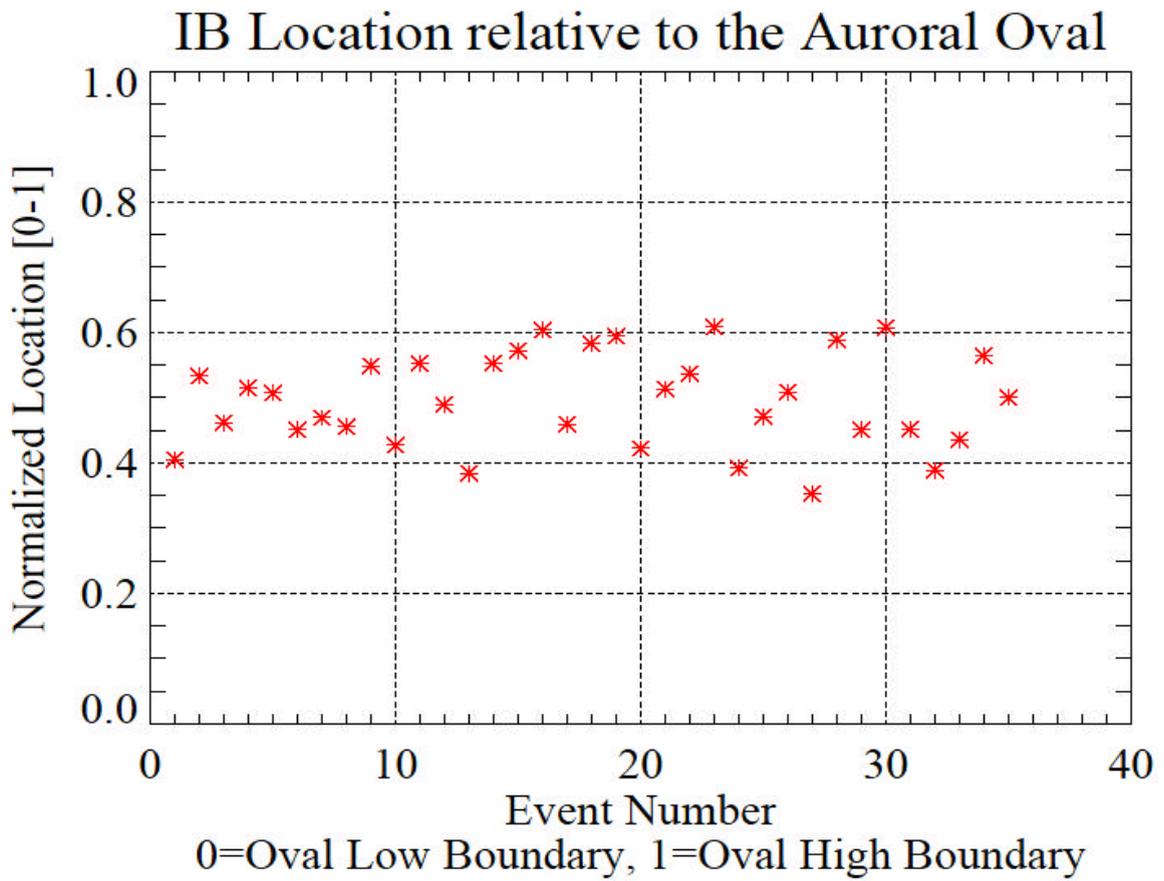


図 4.2: オーロラオーバルで規格化した時の相対的な IB 発生位置

IB の中心位置を赤プロットで表示。

縦軸：オーロラオーバルの高・低緯度境界で規格化した時の値（0-1）

横軸：イベントの番号（1-35）

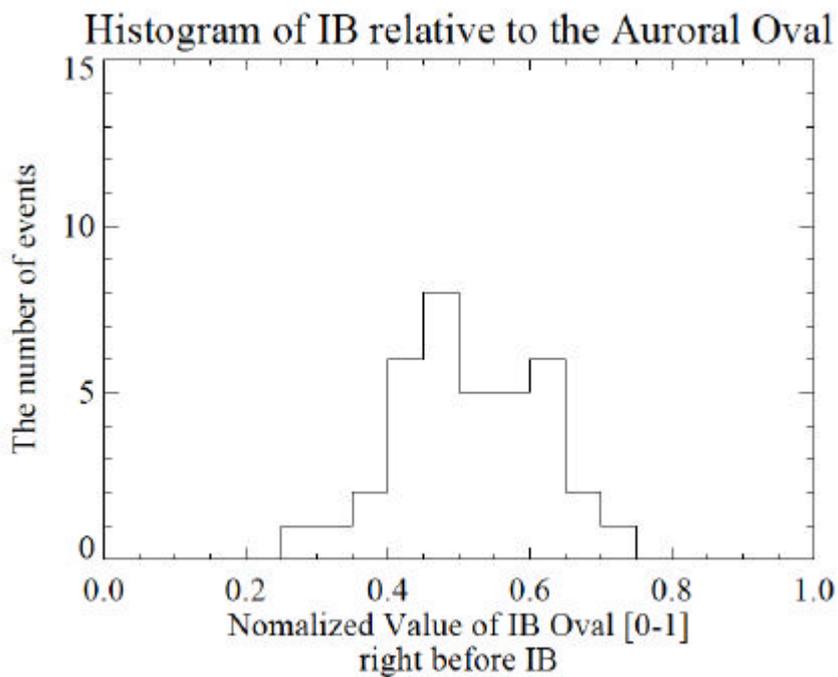
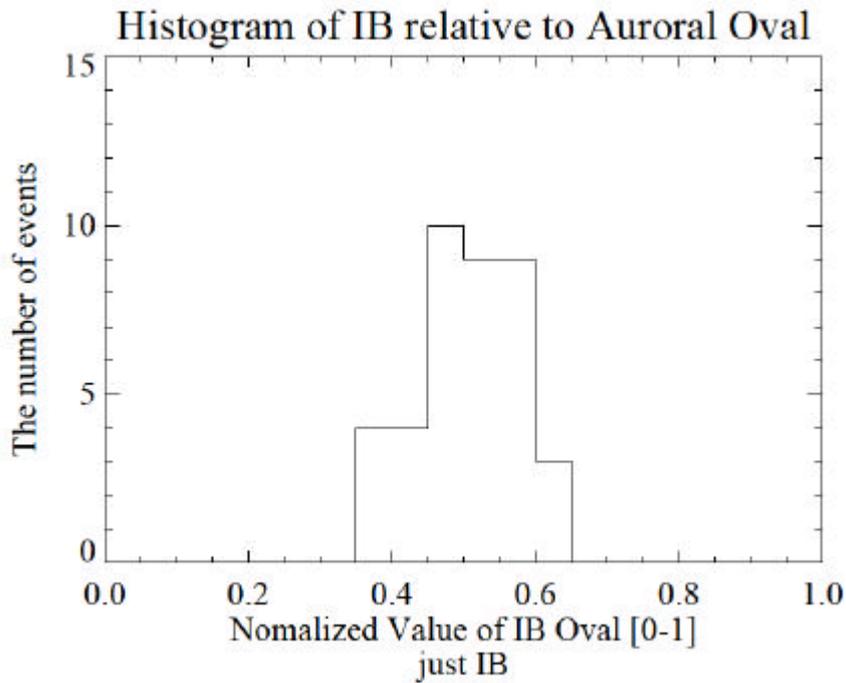


図 4.3: IB 35 イベントのヒストグラム

上図：IB 時のオーロラオーバルで規格化した時の、IB の中心値のヒストグラム  
 下図：IB 前のオーロラオーバルで規格化した時の、IB の中心値のヒストグラム  
 横軸：規格化値 [0-1]、縦軸：イベント数である。

表 4.1: IMF 各成分の 1 時間平均値

No.	IMF Sat	IB IMF hh:mm	$B_x$ (nT)	$B_y$ (nT)	$B_z$ (nT)	No.	IMF Sat	IB IMF hh:mm	$B_x$ (nT)	$B_y$ (nT)	$B_z$ (nT)
1	WIND	17:13	×	×	×	21	WIND	10:40	-2	-4	0.8
2	WIND	13:53	-2	3.0	-0.3	22	WIND	1:39	2.9	-3.8	-0.7
3	WIND	0:19	0.2	1.4	-0.3	23	WIND	8:32	×	×	×
4	WIND	7:28	-5	1.1	-0.1	24	WIND	3:38	-5	1.3	-2
5	WIND	10:05	-3.8	5	-0.3	25	WIND	6:55	-1.8	4.5	1
6	WIND	7:05	-1.2	4	-1.8	26	WIND	5:58	1.2	4.8	-2.5
7	WIND	1:33	2	0	-4	27	ACE	6:37	3.1	-9	-2.4
8	WIND	8:56	2.5	-3	-1.5	28	WIND	19:03	0.7	-5.5	-2.4
9	WIND	17:46	2.2	-1.9	0	29	ACE	10:32	3.5	-2.1	-2.8
10	WIND	19:00	-0.5	-1	-2	30	WIND	0:28	-4.2	-0.9	-0.3
11	WIND	5:46	3	-1.6	-0.1	31	ACE	9:38	-7.9	4	1
12	WIND	1:11	-2	1.2	-1.5	32	ACE	7:25	-2.9	4.5	-0.4
13	WIND	1:34	-2	4.5	-0.5	33	ACE	12:58	6	-4	-4
14	ACE	0:11	-0.3	3.5	0.1	34	ACE	21:13	-3.1	1.6	-1.2
15	WIND	1:40	×	×	×	35	ACE	12:56	3	-2.5	0.5
16	WIND	7:55	×	×	×	36	ACE	2:59	-1.7	1	0.7
17	WIND	2:57	×	×	×	37	ACE	18:56	0	5	-3
18	WIND	7:01	1	1	-3.5	38	ACE	0:00	1.2	-1.7	-2.5
19	WIND	7:22	-2.3	4	0.5	39	ACE	4:21	0.9	-6	-3
20	WIND	0:55	-1.5	-1.7	-0.6						

左から順に、No. : イベントナンバー、IMF Sat : IMF を観測した衛星、IB IMF : IB 時の IMF を衛星が観測した時間、 $B_x$  : IB 前の IMF  $B_x$  成分 1 時間平均値、 $B_y$  : IB 前の IMF  $B_y$  成分 1 時間平均値、 $B_z$  : IB 前の IMF  $B_z$  成分 1 時間平均値 を表す。

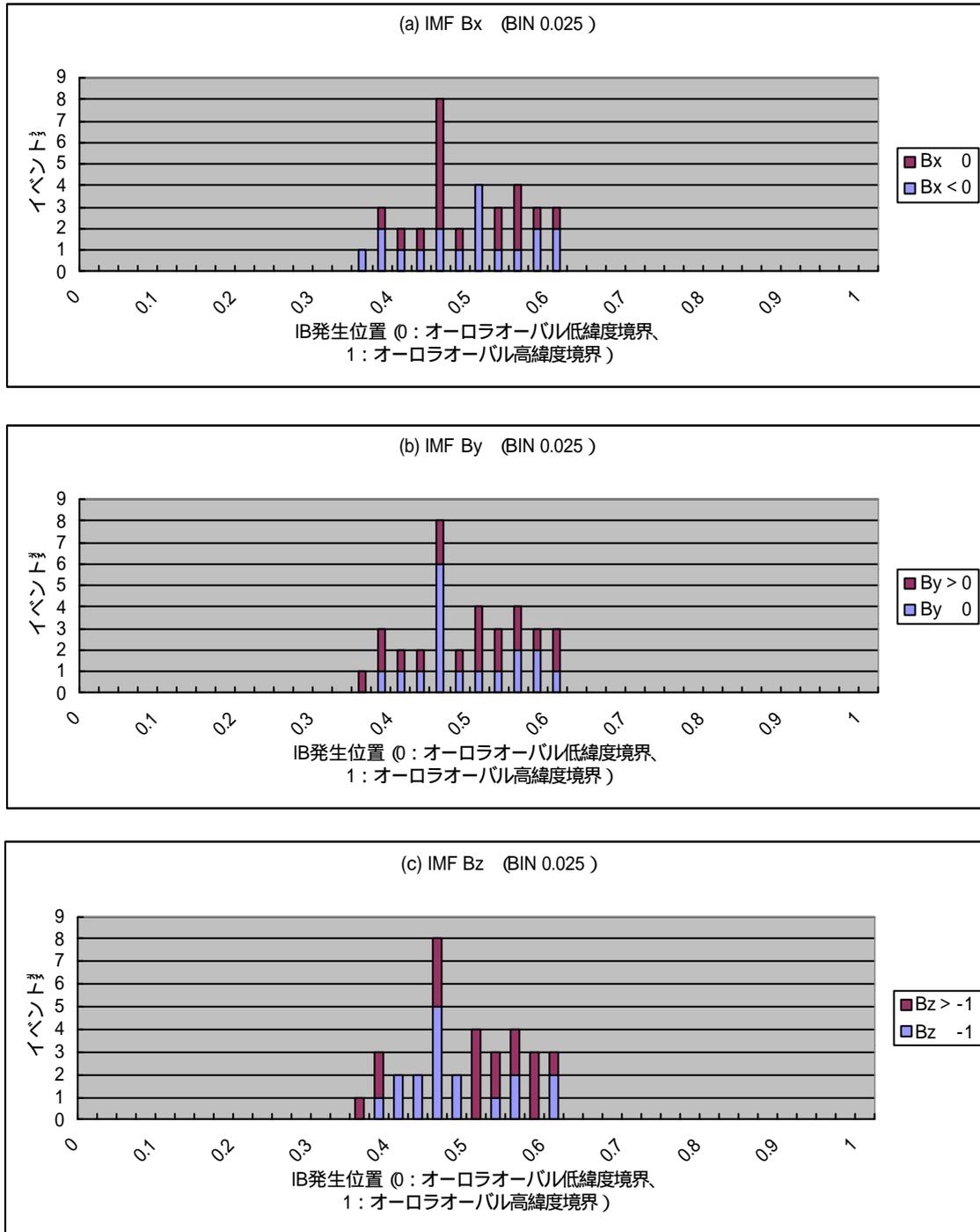


図 4.4: 35 例の IB 発生位置の IMF 依存性

(a) IMF  $B_x$  依存性、(b) IMF  $B_y$  依存性、(c) IMF  $B_z$  依存性 (IMF の単位: nT)  
 横軸はオーロラオーバル高・低緯度境界に対する相対位置、縦軸はイベント数である。  
 IMF の 1 時間平均値の大小で大きく 2 つに分け、それぞれを色分けして表示している。

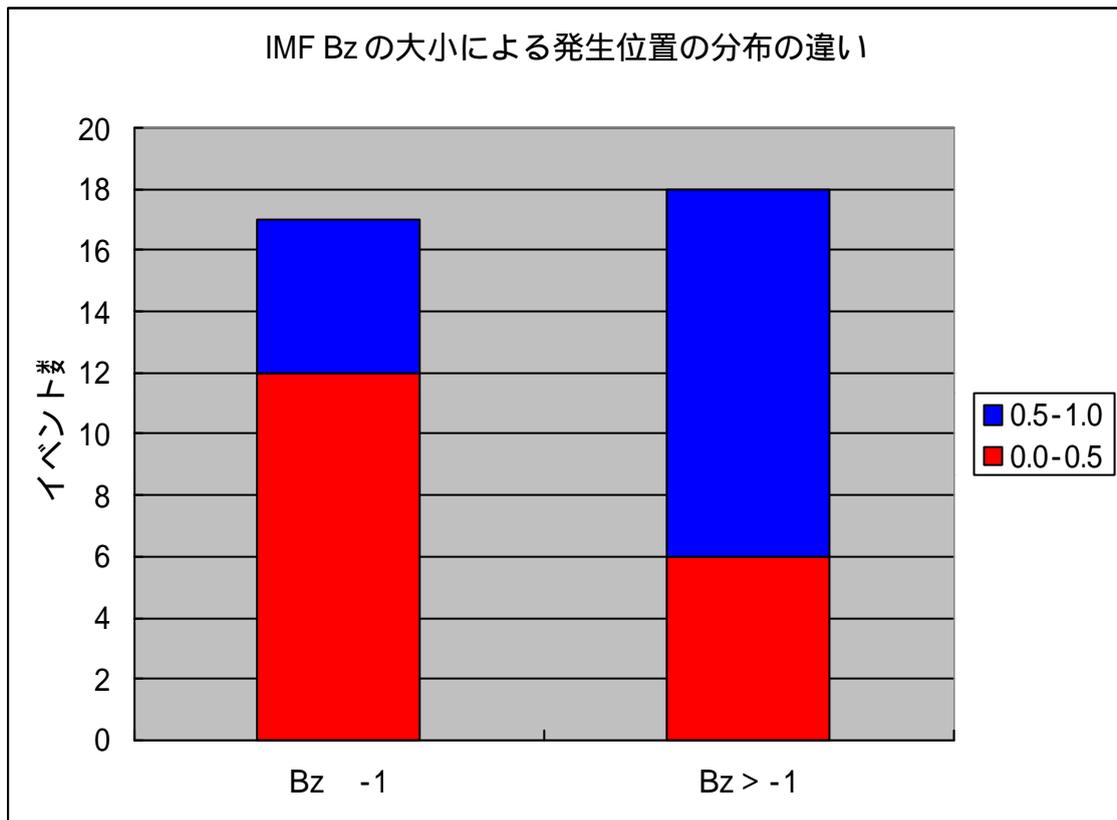


図 4.5: 35 例の IB 発生位置の IMF  $B_z$  依存性

図 4.4 ( c ) の IB 発生位置を、オーロラオーバルの低緯度側 : 0.0-0.5 ( 赤 ) とオーロラオーバルの高緯度側 : 0.5-1.0 ( 青 ) の 2 つに分類した。

その時の IMF  $B_z < -1$  と IMF  $B_z > -1$  による IB 発生位置の分布の違いを示す。

( IMF の単位 : nT )

IMF  $B_z$  は 1 時間平均値で、縦軸はイベント数である。



## 第 5 章 DMSP 衛星による粒子データと、イニシャル ブライティング発生位置の対応関係、およびその 考察

第 3 章において、地磁気とオーロラで見て孤立したサブストームイニシャル・ブライティング (IB) イベントを、1997-1999 年の 3 年間のリストから 39 例に絞った。さらに第 4 章では、IB 発生時刻前後にオーロラオーバルが広がっている、曖昧な 4 イベントをはぶいた 35 例について、IB 発生位置のオーロラオーバルに対する相対的な位置を調べた。その結果、IB はオーロラオーバルの低緯度境界や高緯度境界付近ではなく、中央付近で生じることが明らかになった。また、先行する IMF  $B_z$  成分が小さくなるほど、IB の発生位置はオーロラオーバルの低緯度側にシフトすることが示された。この章では、IB とほぼ同時にその近傍を通過した DMSP 衛星による降下粒子のエネルギースペクトログラムのデータと、オーロラオーバルを比較し、磁気圏内における IB の発生位置について議論する。

### 5.1 DMSP 衛星がオーロラオーバルを通過したイベントの抽出

DMSP 衛星の粒子データと、Polar UVI のオーロラ画像とを比較するためには、両者の同時データが必要である。本解析では、以下の条件を満たすものを、ほぼ同時の現象として選び出し、使用した。

- ・ DMSP 衛星が UT にして IB の約 40 分前から約 10 分後までにオーロラオーバルを通過している。
- ・ DMSP 衛星が、MLT の夕方 (18-24 MLT) 側を通過し (F10、F11、F12、F14 の 4 つの衛星の軌道が、それに該当する。) さらに IB と比較して 3 MLT 以内のオーロラオーバルを通過している。

上記条件を満たす同時観測のうち、オーロラの形状や IB の位置、DMSP の通過する時間及び軌道から判断した結果、

- イベント 1( 1997 年 1 月 7 日、IB 17:28:10-17:28:56 UT、DMSP 16:54-17:00 UT )
- イベント 2( 1997 年 1 月 8 日、IB 14:11:33-14:12:00 UT、DMSP 13:52-13:57 UT )

の 2 イベントを抽出した。なぜなら、この 2 つのイベントは、DMSP 衛星の軌道がオーロラオーバルをほぼ垂直に横切っており、また、降下粒子の高・低緯度境界を同定できているため、Polar UVI によるオーロラ画像と DMSP 衛星による粒子データを比較するのに、利用できるデータの中では最も良いイベントであったからである。

この章では、オーロラオーバルに対する IB の相対的位置を、オーロラオーバルの内部・外部の降下粒子との対応も含めて詳細に理解することを目的としている。そのため、後述する DMSP 衛星と Polar UVI との境界位置の緯度差に注意しながら、イベント 1 とイベント 2 の 2 つの IB イベントについて事象解析を行った結果について述べる。

## 5.2 1997 年 1 月 7 日(イベント 1)

### 5.2.1 イベントの概要

1997 年 1 月 7 日、17:28:10-17:28:56 UT に生じた IB イベントは、その約 43 分前に、DMSP F12 衛星が IB 発生場所に比べて 2:26 MLT 昼側のオーロラオーバルを通過している。第 3 章 3.1 節の IB 選別条件の所で述べた様に、この IB が発生した 6 時間前までは磁気圏は静穏であった。また、後述する様に DMSP F12 衛星がオーロラオーバルを通過してから IB が起きるまで、オーロラオーバルに大きな変動は見られなかった。その時に DMSP F12 衛星が観測した降下粒子スペクトログラムを図 5.1 に示す。図 5.1 の下図に注目すると、16:55:02 UT ごろに b2i を通過し、16:55:12 UT ごろに b1e を通過し、16:55:23 UT ごろに b4s を通過し、16:56:04 UT ごろに b5e を通過している。これらの指標は、Newell *et al.* [1996a, 1996b]による「夜側オーバルの領域判別方法」に基づくもので、以下に簡単に指標の説明を載せる。

- b2i: 高エネルギー降下イオンの低緯度側境界に相当する。この b2i は磁気圏尾部のニュートラルシート電流の地球側境界に相当し [e.g., *Feldstein and Galperin*, 1985]、午後側 Region 2 沿磁力線電流 [e.g., *Iijima and Potemra*, 1976]の最も低緯度側境界を表すのにも用いられる [*Fujii et al.*, 1990]。
- b1e: ゼロエネルギーの電子が $E \times B$ ドリフトを受ける領域の、地球側境界に相当する。エネルギーがゼロのイオンと電子は、磁場曲率ドリフトや磁場勾配ドリフトを受けないので、基本的に両者の境界は一致する (b1e=b1i)。
- b4s: structured な降下電子と、unstructured な降下電子の境界に相当する。b2 境界の近辺には、5-10 km のスケールで、空間的に構造を持たない (unstructured) 電子の降り込みが多く見られ、さらに高緯度には非常に構造を持った (structured) 電子の降り込みが見られる。周りのエネルギースペクトログラムとの相関係数が 0.6-0.95 の範囲にあるものを unstructured、0.0-0.4 の範囲にあるものを structured として定義し、分類している。
- b5e: 降下電子の高緯度側境界に相当する。磁気緯度にして約 0.2 度以内に、エネルギーフラックスがファクターで 4 以上小さくなっている所に適用されている。一般的に IMF が南向きの時には、高緯度境界は非常にはっきりとしているが、IMF が北向きの時には、図 5.1 の上図の様にポーラーレインや subvisual dazzle と呼ばれる、オーバルに比べて低いエネルギーの降り込みが見られることがしばしばある。
- (BPS/CPS に関しては、1.4.1 節を参照。)

表 5.1 に、このイベント 1 における、*Newell et al.* [1996a, 1996b]の領域判別による境界位置と BPS/CPS の領域を、UT と磁気緯度と MLT で示す。表 5.1 より、DMSP 衛星は、オーロラオーバルを通過する際に、その軌道の MLT がほとんど変化していないことが分かる (DMSP の通過した軌道: 20:22-20:15 MLT)。DMSP 衛星の軌道と、その時のオーロラオーバルの図を重ねたものを、図 5.2 に示す。図 5.2 で、DMSP 衛星がオーロラオーバルの高・低緯度境界を通過した時刻は、16:55:00-16:56:04 UT である。その時刻前後に、Polar 衛星から得られたオーロラ画像を見ると、IB 発生時刻までオーロラオーバルはその位置を変えていないため、IB 時と同じ波長である LBHS のフィルターで 16:55:34-16:56:11 UT に得られたオーロラ図と、DMSP 衛星の降下粒子データとを、次

節 5.2.2 で比較する。

### 5.2.2 DMSP 衛星通過時の Polar UVI オーロラ画像と DMSP 降下粒子の比較

図 5.3 は、図 5.2 の 16:55:23 UT に得られた Polar UVI のオーロラ画像を図 3.6 の様に緯度方向に輪切りにした図で、DMSP 衛星がオーロラオーバルを通過した MLT (20:22-20:15 MLT) の領域内における、オーロラ発光強度の緯度分布を表したものである。図 5.3 上図は、オーロラ発光強度の分布図に、表 5.1 に記載した降下粒子の境界 (b2i, b1e, b4s, b5e, BPS/CPS) を重ねて表示している。夜側オーロラオーバルの高・低緯度境界は、降下粒子の b1e と b5e 境界に対応する [Newell *et al.*, 1996a, 1996b]。しかし、一般的に b1e より低緯度側に降りこんでいるイオンはエネルギーが高く、約 25 keV 以上のエネルギーを持つプロトンが降り込むと FUV のオーロラが発光する可能性があること [e.g., Mende *et al.*, 2003] を考慮すると、b2i~b1e の間の降下イオン (プロトン) のエネルギーフラックスに注意する必要がある。

BPS/CPS の境界は、図 5.1 の下図が示す様に、降下電子のエネルギースペクトログラムに inverted-V 構造 (1.4.1 節参照) がみられる部分の低緯度側境界とした。

図 5.3 の上図は、降下粒子の境界をそのままオーロラ発光強度の分布図上にプロットしたものである。バックグラウンドレベルの発光強度がおよそ  $4 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であることから、 $4\text{-}5 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上の発光が有意に見られる部分をオーロラオーバルとする。70.5 度付近に位置している発光ピークの高緯度境界と b5e の位置を比較すると、b5e が約 0.7 度、低緯度側にシフトしているのが分かる。Polar UVI と DMSP 衛星のデータは、ほぼ同時刻のデータであるので、DMSP 衛星による降下粒子分布と Polar UVI によるオーロラ分布とは、基本的に一致するはずである。しかし、Polar UVI のオーロラ画像の高・低緯度境界と DMSP 衛星の粒子の高・低緯度境界は、データを磁気座標系にマッピングする際や、感度の違いによる不整合等が原因で必ずしも一致せず、統計的に 2-3 度のばらつきを持つガウス分布で近似できる [e.g., Carbary *et al.*, 2003] ことが知られている。

そこで、オーロラオーバルの発光ピークの高緯度境界と、b5e を合わす為に、降下粒子の境界をすべて 0.7 度高緯度側にシフトさせて表示させたものを、図 5.3 の下図に示す。今回の 0.7 度の違いは、前述のマッピングや感度の違いによる誤差であると考えることとして図 5.3 の下図を見ると、降下粒子の境界を 0.7 度ずらしてオーロラの分布と

重ね合わせた結果、b1e-b5e と、68-70.5 度付近にピークを持つオーロラオーバルが一致している様子が確認できる。また、71.5 度付近にあるオーロラ発光の小さなピークと、図 5.1 の下図における 16:56:08 UT 付近での降下電子のエネルギーフラックスの増加が一致しており、さらにオーロラオーバルの低緯度側に見える 67.5-68 度付近の発光の小さなピークは、b2i-b1e の高エネルギー（25 keV 以上）イオンの降り込みが原因であると考えれば説明が付く。

以上のことを考慮すると、DMSP 衛星が観測した降下粒子は、Polar UVI が観測したオーロラの磁気座標系からみて約 0.7 度高緯度側にずれていたと推測することができる。このずれに関しては、5.4 節で考察する。

DMSP 衛星のデータ（図 5.1）から、BPS と CPS の領域の緯度幅は、それぞれ 0.8 度と、1.8 度であった。この緯度幅の比は、近傍の MLT 領域のオーロラオーバルでも同じ比であると仮定すると、その約 43 分後に、2:26 MLT 真夜中側で生じた IB の MLT 領域においても、BPS と CPS の緯度幅を推定することができる。次節 5.2.3 ではこの考えに基づき、IB の発生位置を、降下粒子から得られる BPS/CPS 領域と結びつけて議論する。

### 5.2.3 降下粒子データから推測した IB 発生位置

前節より、オーロラオーバルとそれに相当する DMSP 衛星の降下粒子のデータから、DMSP の通過した MLT 領域では、BPS/CPS の緯度幅の比が 0.8:1.8 で分布していることを述べた。図 5.4 に、IB 発生時のオーロラオーバルを示す。この図は、DMSP 通過時に比較したオーロラオーバルと同じ波長（LBHS）である。さらに、図 5.3 と同様にして、IB が発生した時刻（16:55:23 UT）、IB が発生した MLT（20.50-20.67 (=22:30-22:40) MLT）におけるオーロラ発光強度の緯度分布を調べた。その結果を図 5.5 に示す。（IB の磁気緯度：65.0-66.7 度）

DMSP 衛星通過時から IB 発生まで、約 43 分の時間の開きがあるが、オーロラオーバルの形状がその 43 分間にあまり変動していないことを考慮して、その間 BPS/CPS の比は保たれていると仮定した。さらに、前節で述べた様に、BPS/CPS の比はオーロラオーバルの MLT 方向に一定であるとした。その時の BPS/CPS 領域を、図 5.5 のオーロラ発光強度の分布上に重ねて表示した。

図 5.5 を見ると、オーロラオーバルと BPS/CPS 領域を対応させた結果、CPS 領域中で IB によるオーロラ発光のピークが現れているのが確認できる。この IB の発生領域と沿

磁力線電流の分布との比較については、次節 5.2.4 で議論する。

#### 5.2.4 IB 発生位置と沿磁力線電流分布の比較

前節で、DMSP-F12 衛星の降下粒子データから IB 発生位置を推測した結果、その位置は CPS 領域に相当していたことが確認された。

DMSP-F12 衛星は、磁場計測器と電場ドリフト計測器をオンボードで搭載しており（2.2 節参照）、イベント 1 の 16:55:00-16:57:00 UT にオーロラオーバルを通過した時、DMSP-F12 衛星の磁場計測器はデータを取得していた。その時に得られたデータを図 5.6 に示す。図 5.6 の上 4 つのパネルは、図 5.1 とほぼ同じ時刻、同じフォーマットの粒子データであり、一番下のパネルは磁場計測器による磁場データである。

図 5.6 の磁場データの見方を説明する。DMSP 衛星の磁場データは、沿磁力線座標系（field-aligned coordinate）で書かれており、 $x$  座標は磁力線に平行な向き、 $y$  座標は衛星の軌道を  $x$  座標に垂直な面に投影した向き、 $z$  座標は、 $x, y$  と右手系を成す向きを表している。イベント 1 の様な極方向に向かう軌道では、 $y$  軸は北向きで  $z$  軸は東向きに相当する [e.g., Ohtani et al., 1996]。

青色の線（DBY）は南北方向の磁場変動、赤色の線（DBZ）は東西方向の磁場変動に相当する。さらに、正の変動は太陽方向に変動していることを意味し、負の変動は反太陽方向に変動していることを意味する。また、縦破線は磁場変動の東西成分のピーク的位置、縦点線は磁場変動の南北成分のピーク的位置を示す。

図 5.7 に、低高度衛星が観測した磁場変動と Region 1、Region 2 沿磁力線電流の分布の様子をポンチ絵で示す。図 5.7 は、一様なシート状の電流層を仮定した場合、磁場変動のピークを境にして、沿磁力線電流が Region 1 と Region 2 の領域に分離されていることを意味している [Iijima and Potemra, 1976]。以上のことを考慮して図 5.6 の磁場データを見る。

16:55:23-16:56:04 UT に存在する明確な inverted-V 構造に伴って、磁場の変動が生じている様子が確認できる。その磁場変動の東西成分のピークである縦破線と南北成分のピークである縦点線の領域付近を境にして、その低緯度側で Region 2、高緯度側で Region 1 の沿磁力線電流が分布していると考えられる（図 5.7 参照）。

ここで、5.2.3 節で調べた IB の発生位置と DMSP 衛星の磁場データとを比較すると、IB の発生位置は図 5.6 の「IB」と書かれた位置に相当する。この位置は、図 5.7 を参考

にすると、磁場変動の様子から沿磁力線電流の Region 2 の領域に相当していることが分かる。

以上のことから、イベント 1 における IB は、Region 2 の沿磁力線電流の領域で発生していたと考えられる。

#### 5.2.5 5.2 節のまとめ

1997 年 1 月 7 日の 17:28:10-17:28:56 UT に生じた IB イベントにおいて、

1. Polar 衛星から得られたオーロラオーバルの高・低緯度境界と、それに相当する DMSP 衛星の降下粒子のデータから得た高・低緯度境界の間にずれ（約 0.7 度）が存在する。（*Carbary et al.* [2003]を参考にして、補正した。）
2. DMSP 通過時から IB 発生までの約 43 分に、BPS/CPS 領域の比があまり変動していない。（オーロラオーバルの形状はあまり変化していない。）
3. BPS/CPS の比はオーロラオーバルの MLT 方向に一定である。

の 3 つの仮定をすると、IB の中心は降下粒子の CPS 領域内で発生していたことが確認され、さらに Region 2 の沿磁力線電流の領域に存在していたことが示された。

### 5.3 1997 年 1 月 8 日(イベント 2)

#### 5.3.1 イベントの概要

1997 年 1 月 8 日、14:11:33-14:12:00 UT に生じた IB イベントは、その約 16 分前に、DMSP F10 衛星が MLT にして IB 発生場所の 40 分 MLT 昼側のオーロラオーバルを通過していたイベントである。その F10 の粒子スペクトログラムを図 5.8 に示す。

図 5.8 を見ると、13:54:16 UT ごろに DMSP-F10 衛星が降下電子領域の低緯度境界を通過し、13:56:10 UT までの期間、非常に複雑な構造をした降下電子領域を通過していることが分かる。さらに、より高緯度（磁気緯度：72-73 度付近）においてエネルギーの低い降下電子の領域が確認できる。DMSP F10 衛星による降下粒子データは *Newell et al.* [1996a, 1996b]による夜側オーバルの領域判別の指数が引用できないため、降下電子

の構造から目で見えて判断し、図 5.8 の様に[1]-[7]の境界に区分した。表 5.2 に、DMSP F10 衛星が[1]-[7]の境界を通過した時の UT と磁気緯度と MLT を示す。

[6]-[7]の間の低エネルギーのわずかな降りこみは、subvisual drizzle [Newell et al., 1996a, 1996b]に対応するのか、ポーラーレインに対応するのか、それともこの領域もオーバルに含まれるのか、ということは、降下電子のスペクトログラムの情報からだけでは分からないため、Polar UVI のオーロラ画像と比較しながら、議論を進める。

DMSP 衛星の軌道と、オーロラオーバルの図を重ねたものを、図 5.9 と図 5.10 に示す。図 5.9 は 13:53:19 UT のオーロラ図で、図 5.10 は 13:56:23 UT のオーロラ図である。2 つの絵は、共に IB 時と同波長 (LBHL) で、画像積分時間も同じ (36.8 秒) であり、かつ時間差も 3 分程度であるが、両者を比較するとオーロラの発光の様子が変化しているのが分かる。さらに、表 5.2 を見ると、DMSP 衛星は、オーロラオーバルを通過する前後で、その軌道が約 1 MLT ほどずれているのが分かる。(DMSP の通過した MLT : 20:55-19:56 MLT )

上記の降下粒子スペクトログラムが複雑なこと、DMSP の軌道が MLT にして 1 時間程度広がってしまっていること、さらにオーロラの発光が変化していることを考慮して DMSP による降下粒子の境界にあたる MLT を[1]-[7]の 7 つのセクターに分け、13:53:19 UT と 13:56:23 UT の 2 つの時間帯におけるオーロラオーバルのオーロラ発光強度の緯度分布と、降下粒子の境界との位置の比較を行った結果について述べる。

### 5.3.2 DMSP 衛星通過時の Polar UVI オーロラ画像と DMSP 降下粒子の比較

図 5.11 は、DMSP 衛星が図 5.8 で示した境界[1]-[7]の 7 つの MLT における、オーロラ発光分布とその境界の位置を、横軸：磁気緯度、縦軸：発光強度でプロットしたものである。図 5.11 の上図は 13:53:18 UT の分布図で、DMSP 衛星がオーバルの低緯度境界を通過する直前のオーロラに相当し、下図は 13:56:23 UT の分布図で、DMSP 衛星がオーバルを通過中のオーロラに相当する。上図と下図を見比べると、[2]の 20.72-20.82 MLT、[3]の 20.57-20.67 MLT、[4]の 20.52-20.62 MLT、[5]の 20.20-20.30 MLT で、下図の方がオーロラの発光強度が強くなっていることから、オーロラの発光の様子がこの約 3 分間に変化していることが分かる。しかし、 $5 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上の発光領域 (緑色の線より上の領域) に注目すると、各 MLT での、オーロラ発光のピークの幅は変動しておらず、しかも上図と下図で、共に[1]と[7]の境界 (青色の線) が、オーロラオーバルの低緯度

境界、高緯度境界と非常に良い一致を示している。このことから、DMSP 衛星が観測した降下粒子は、Polar UVI が観測したオーロラの磁気座標系と同じ位置にマッピングされており、両者の位置にずれはほとんどないと判断できる。また、[6]-[7]の間の低エネルギー電子の降り込み領域もオーバルに含まれると考えられる。

次節 5.3.3 では、DMSP 衛星の軌道の MLT 変化と、IB 前のオーロラ発光強度の変化を考慮に入れながら、IB 発生位置について議論する。

### 5.3.3 降下粒子データから推測した IB 発生位置

図 5.12 の上図は 1997 年 1 月 8 日 14:11:25 UT のオーロラ分布図で、下図は同日の 14:11:43 UT のオーロラ分布図である。その両方に[1]-[7]の境界位置を重ねてプロットしたものである。IB 発生位置の 20.83-21.00 MLT を取っており、IB 発生時間は図 5.12 の上図と下図の間に相当する。降下粒子による[1]-[7]の境界位置の MLT が変化しているため、IB 発生 MLT (20.83-21.00 MLT) に近い境界[1] (20.87-20.97 MLT) は信頼できるが、境界[7] (19.90-20.00 MLT)に近づく (IB 発生位置から遠ざかる)につれて、その境界位置の信頼性が小さくなっていることが予想される。

しかし図 5.12 の上図と下図を見比べると、オーロラオーバルの高・低緯度境界と、境界[1],[7]は良い一致を示している。つまり、境界[1]と境界[7]の間の 1 時間の MLT 差による影響はほとんど無いと言える。

また、このイベント 2 は、5.3.1 節の冒頭で触れた様に、DMSP 衛星が IB に非常に近い時間に、非常に近い位置を通過していたイベントである (時間差: 16 分、位置差: 40 分 MLT)。また、IB 前にオーロラの発光強度が変化していることを述べたが、オーロラオーバルの幅には、あまり変化がみられなかった。つまり、発光強度に相当する降り込み粒子の量は変化しているが、磁気圏の特徴のある構造とそれらの境界の位置にはあまり変化が見られないと推測できる。このことから、DMSP 衛星が観測した降下粒子と IB 発生直前の降下粒子のエネルギースペクトログラムは類似していると仮定し、DMSP 衛星が観測した降下粒子のデータから見積もった境界と、IB の位置を比較する。

まず、IB が最も強くなっている位置は磁気緯度にして 70.4 度であった。その位置を DMSP 衛星の降下粒子スペクトログラム上に重ねて、図 5.13 にピンク色の線で表示した。前述の通り、このイベント 2 における降下粒子のエネルギースペクトログラムは非常に複雑な構造をしており、BPS/CPS 領域を単純に分離することは困難であるが、図

5.13 を見ると 2 つの特徴的な様子を確認することができる。

一つは、図 5.13 の、茶色の丸で囲んである降下電子領域に見られる。IB 発生位置の前後に降下電子のエネルギースペクトログラムが不連続になっている様子が見てとれる。

もう一つの特徴は、図 5.13 の、オレンジ色の丸で囲んである降下イオン領域に見られる。その領域に注目すると、IB 発生位置と、高エネルギーイオン ( $\sim 10$  keV) と低エネルギーイオン ( $< 10$  eV) の境界とが一致している様に見える。これらの 2 つの特徴が何を意味しているかは、このイベントだけから判断することはできないが、高エネルギーのイオンと低エネルギーのイオンの境界が存在するということは、加速されたイオンと減速されたイオン、すなわち下向き沿磁力線電場と上向き沿磁力線電場の境界が存在し、その境界付近で IB が生じている可能性があることが推測される。

#### 5.3.4 5.3 節のまとめ

1997 年 1 月 8 日の 14:11:33-14:12:00 UT に生じた IB イベントは、DMSP 衛星が IB に非常に近い時間に、非常に近い位置を通過していたイベントである (時間差 : 16 分、位置差 : 40 分 MLT)。IB 前にオーロラの発光強度が変化している様子が、図 5.9 と図 5.10 から確認されたが、図 5.11 の様にオーロラの発光分布を調べた所、オーロラオーバルの幅にはあまり変化がみられなかった。つまり、発光強度に相当する降り込み粒子の量は変化しているが、磁気圏の特徴のある構造とそれらの境界の位置にはあまり変化が見られないと推測できる。そのことから、DMSP 衛星が観測した降下粒子と IB 発生直前の降下粒子のエネルギースペクトログラムは類似していると仮定し、DMSP 衛星が観測した降下粒子のデータから見積もった境界と、IB の位置を比較した。

その結果、IB は、図 5.13 で示したような加速が途切れた領域付近で起きており、また低エネルギー ( $< 10$  eV) と高エネルギー ( $\sim 10$  keV) の降下イオンの境界と一致しているように見られる特徴があることが確認された。

### 5.4 DMSP 衛星の粒子データと、Polar UVI のオーロラ画像のずれに対する考察

5.2 節において、DMSP 衛星による降下粒子の境界と、Polar UVI によるオーロラの境

界を比較した際に、両者にずれが存在した。

人工衛星観測による FUV オーロラ画像の高・低緯度境界と、粒子の降り込みの高・低緯度境界とは必ずしも一致しないことが過去に報告されており、*Kauristie et al.* [1999] は、Viking の FUV オーロラ画像と、降下粒子の高・低緯度境界の関係を統計的に調べた所、特に真夜中と朝側において、降下粒子の境界が FUV オーロラの境界に比べ、平均的に 2 度ほど高緯度に位置していることを発見した。

また、*Carbary et al.* [2003] は、MLT を 1 時間と 3 時間のセクターに区切り、その MLT のセクターごとに、DMSP 衛星の降下電子と Polar UVI のオーロラ画像の高・低緯度境界とを統計的に比較した。トータル 23,000 個のイベントにおいて、DMSP 衛星の境界値を中心にして Polar UVI の境界位置を磁気緯度 1 度のピンでヒストグラムを取った結果、Polar UVI の境界位置がガウス分布で近似でき、その半値幅は 3-4 度に及ぶことを示した。また、両者の差に強い MLT 依存性があることも示唆している。

5.2 節のイベント 1 において、DMSP 衛星の降下粒子の境界は、Polar UVI の境界に比べて、0.7 度低緯度に位置していた。

しかし、*Carbary et al.* [2003] はあくまで統計的な議論をしているため、4.2 節の 1 イベントにおける 0.7 度のずれが、何に相当するのかを言うのは難しく、統計的に許される範囲内にあると言及することしかできない。考えられる原因としては、Polar 衛星と DMSP 衛星のデータを磁気座標系にマッピングする際や、感度の違いによる不整合等が挙げられる。

Polar UVI のオーロラ画像と、DMSP 衛星の降下粒子データが一致しない原因を探求することが、今後の課題として残される。

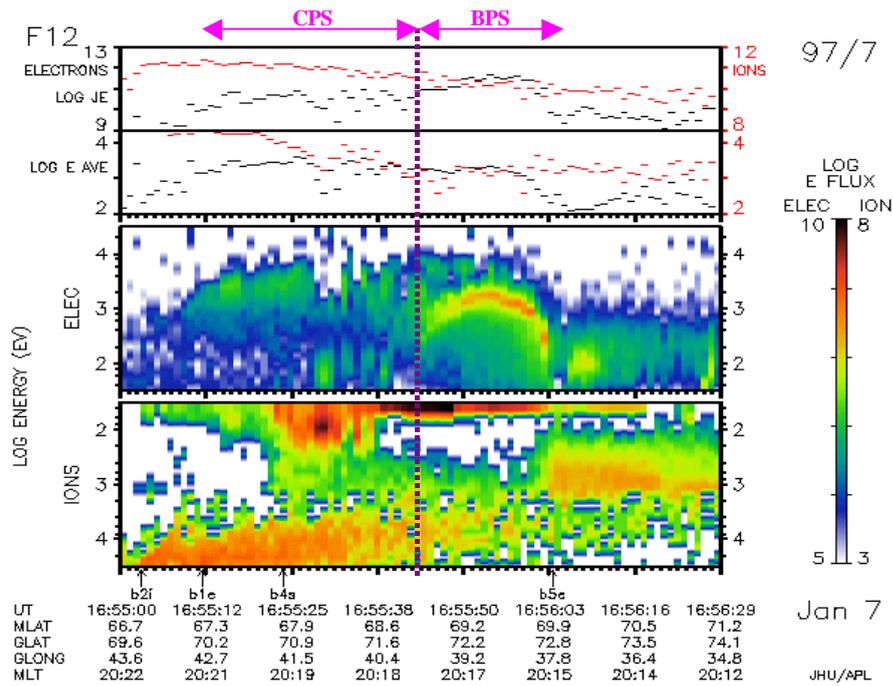
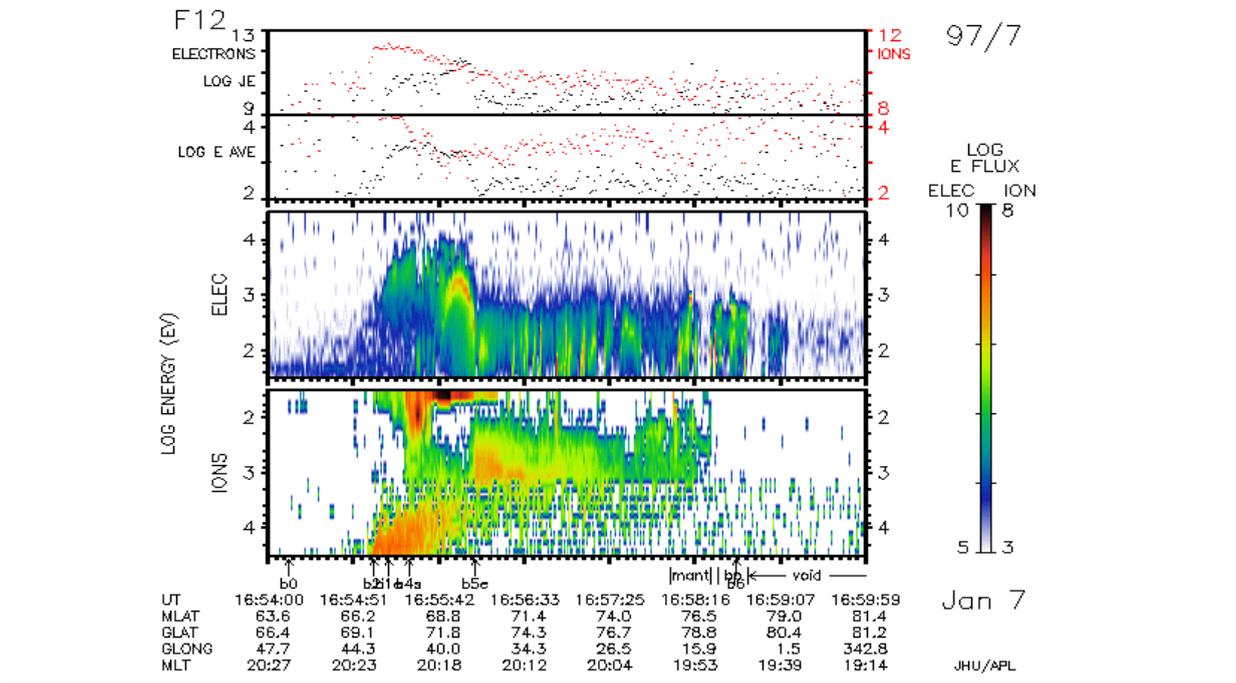


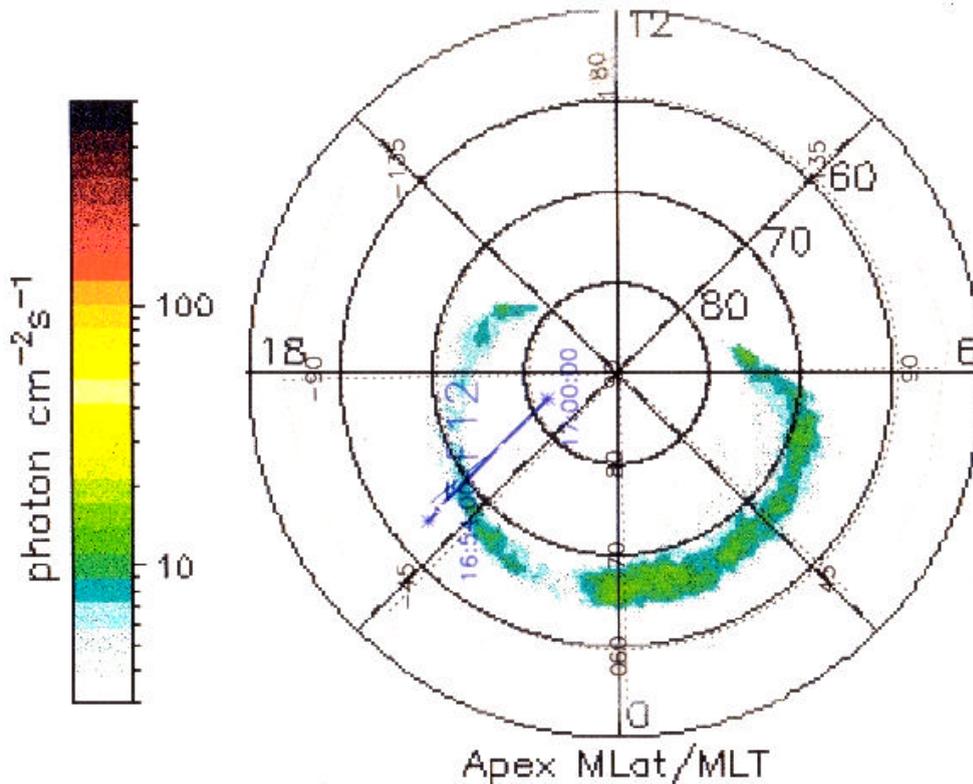
図 5.1: 1997 年 1 月 7 日の DMSP-F12 衛星による粒子スペクトログラム

上図 16:54:00-16:59:00 UT のデータ、下図 16:55:00-16:56:30 UT を拡大したデータ

上のパネルから順に、・電子（黒）とイオン（赤）のエネルギーフラックス ( $\text{eV}/\text{cm}^2\text{s sr}$ )、・電子とイオンの平均エネルギー (eV)、・電子のエネルギースペクトログラム、・イオンのエネルギースペクトログラムである。(カラーバーはパネルの右側)

表 5.1: 1997 年 1 月 7 日 16:54-17:00 UT に DMSP-F12 衛星がオーロラオーバルを通過した時の、降下粒子の境界位置と、BPS/CPS の領域

DMSP境界	UT (hh:mm:ss)	磁気緯度 (Deg)	MLT (hh:mm)
b2i	16:55:02	66.8	20:22
b1e	16:55:12	67.3	20:21
b4s	16:55:23	67.9	20:20
b5e	16:56:04	69.9	20:15
DMSPのオーバル		67.3-69.9	20:15-20:21
BPS		69.1-69.9	20:15-20:17
CPS		67.3-69.1	20:17-20:21



**Jan 7, 1997 16:55:23 UT, LBHS, 36.8 sec DMSP:F12**

図 5.2: 1997 年 1 月 7 日 16:55:02-16:56:04 UT に DMSP-F12 衛星がオーロラオーバルを通過した時のオーロラ図と、DMSP 衛星の軌道

DMSP 衛星の軌道をオーロラ画像のポーラープロット上に重ねて表示している。

(図のフォーマットは図 3.3 と同じ)

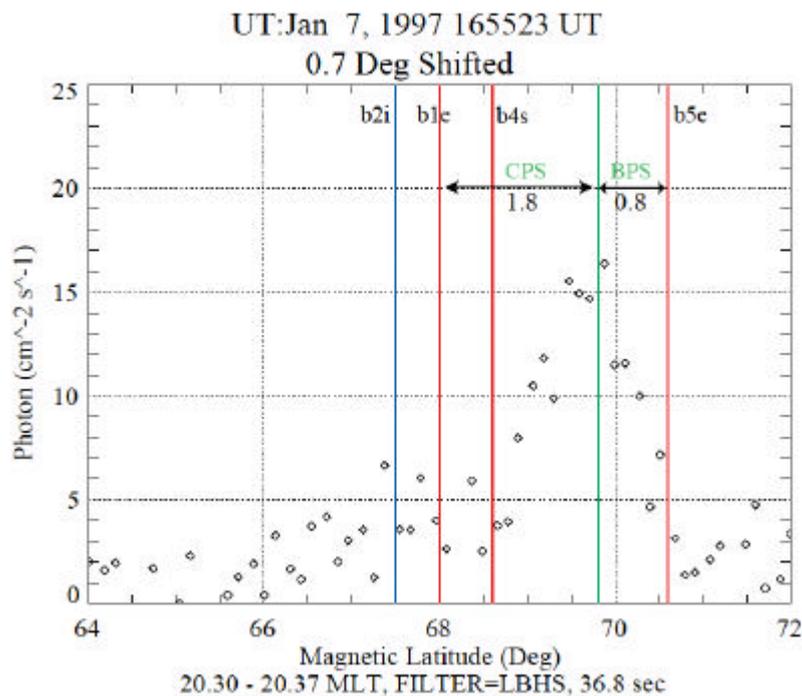
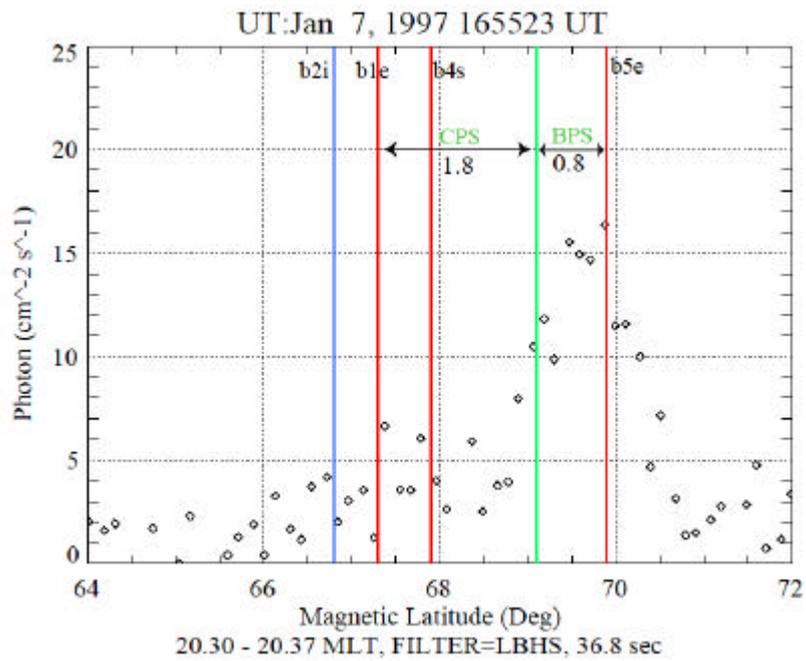


図 5.3: DMSP 衛星がオーロラオーバルを通過した UT (16:55:23 UT) と MLT (20.30-20.37 MLT) におけるオーロラの発光強度の緯度分布と、降下粒子から見積もった境界位置の図

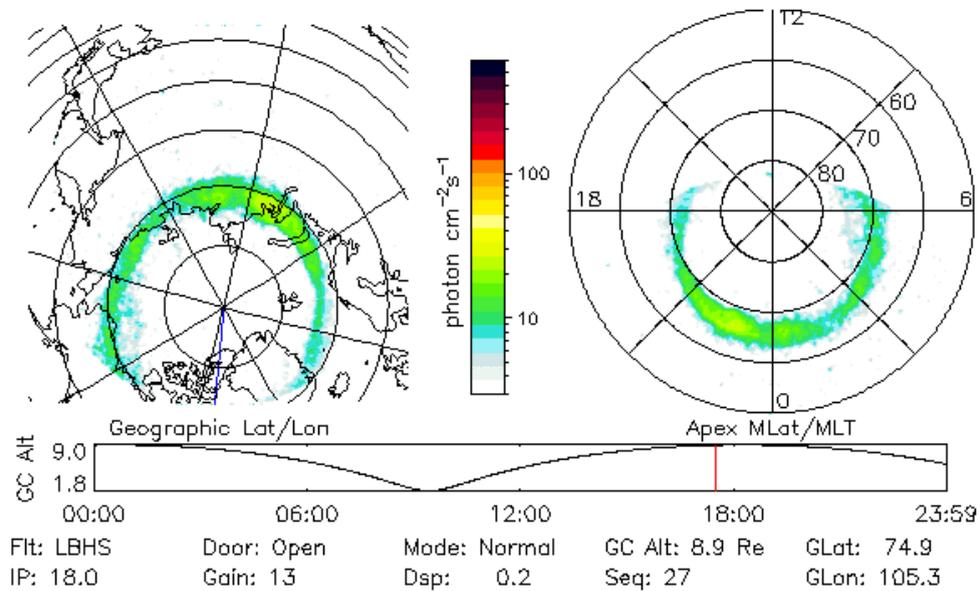
(b2i[青], b1e[赤], b4s[赤], b5e[赤]、CPS/BPS[緑]に関しては本文参照。)

上図: DMSP 降下粒子の境界をそのままプロットした図

下図: DMSP 降下粒子の境界をオーロラの境界で補正してプロットした図

横時: 磁気緯度、縦軸: 発光強度である。 (BPS/CPS の比は、0.8 : 1.8)

Ultraviolet Imager 07 Jan 97 17:28:48 UT



**Jan 7, 1997 17:28:48 UT, LBHS, 18.4 sec**

図 5.4: IBが発生した時刻 (1997年1月7日, 17:28:48 UT) のオーロラオーバル図

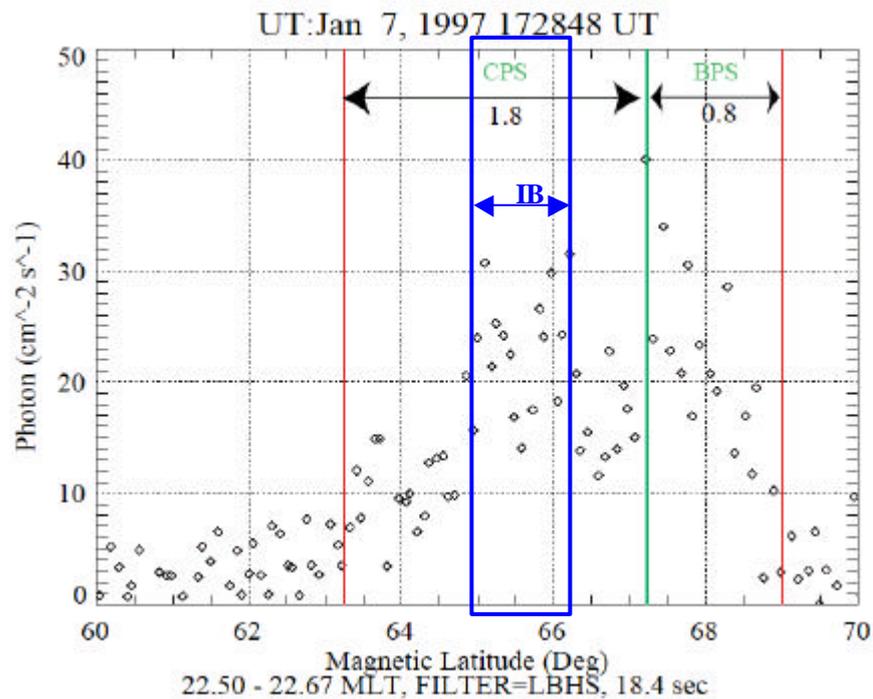


図 5.5: IBが発生時 (1997年1月7日 17:28:48 UT)の MLT (22.50-22.67 MLT)におけるオーロラの発光強度の緯度分布と、図 4.2 下図から見積もった BPS/CPS 領域

F12

7 Jan 1997

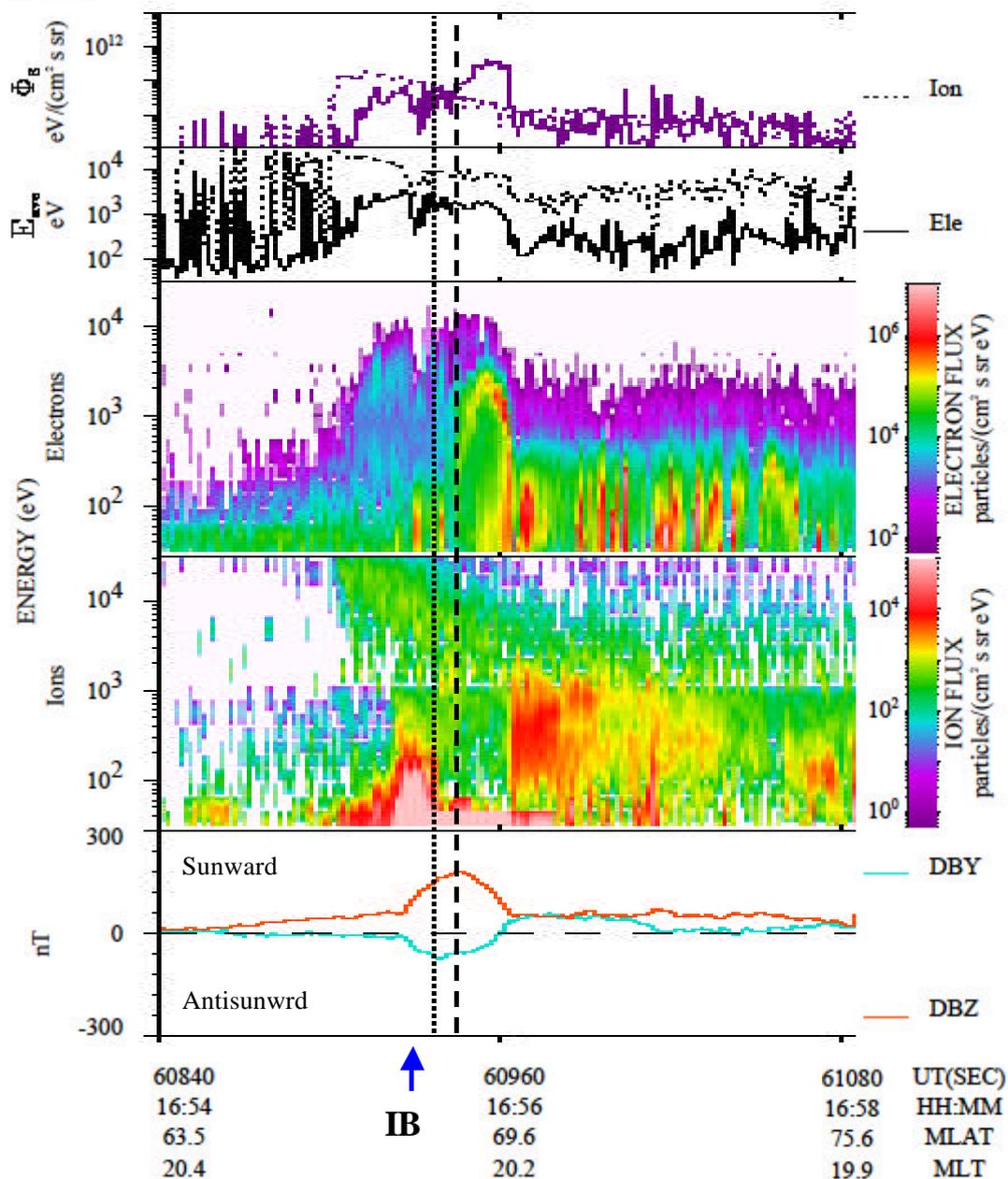


図 5.6: 1997 年 1 月 7 日の DMSP-12 衛星による粒子スペクトログラムと磁場データ  
 上から順に、エネルギーフラックス、平均エネルギー、電子のエネルギースペクトログラム、イオンのエネルギースペクトログラム、磁場データ（青：南北成分、赤：東西成分）  
 縦破線は磁場変動の東西成分のピーク、縦点線は磁場変動の南北成分のピークを示す。  
 （磁場データの見方の詳細は、本文や図 5.7 を参照。）

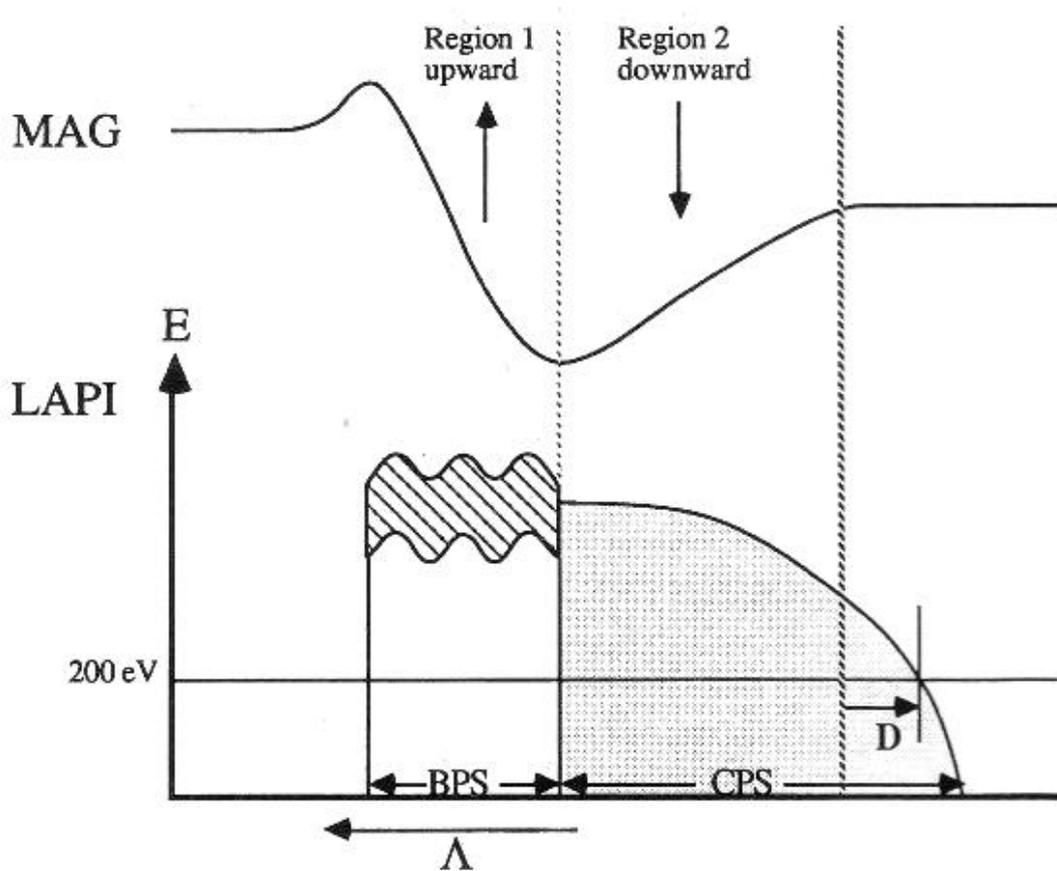


図 5.7: 低高度衛星が観測した磁場変動と Region 1、Region 2 沿磁力線電流の分布の様子[Fujii et al., 1990]

一様なシート状の電流層を仮定した場合、磁場変動のピークを境にして、沿磁力線電流が Region 1 と Region 2 の領域に分離されている。さらに両者の境界は、BPS/CPS の境界に相当している。

MAG (MAGnetometer) と LAPI (Low-Altitude Plasma Instrument) は DMSP 衛星に類似した低高度衛星である DE-1 の磁場計測器と粒子計測器の名称である。

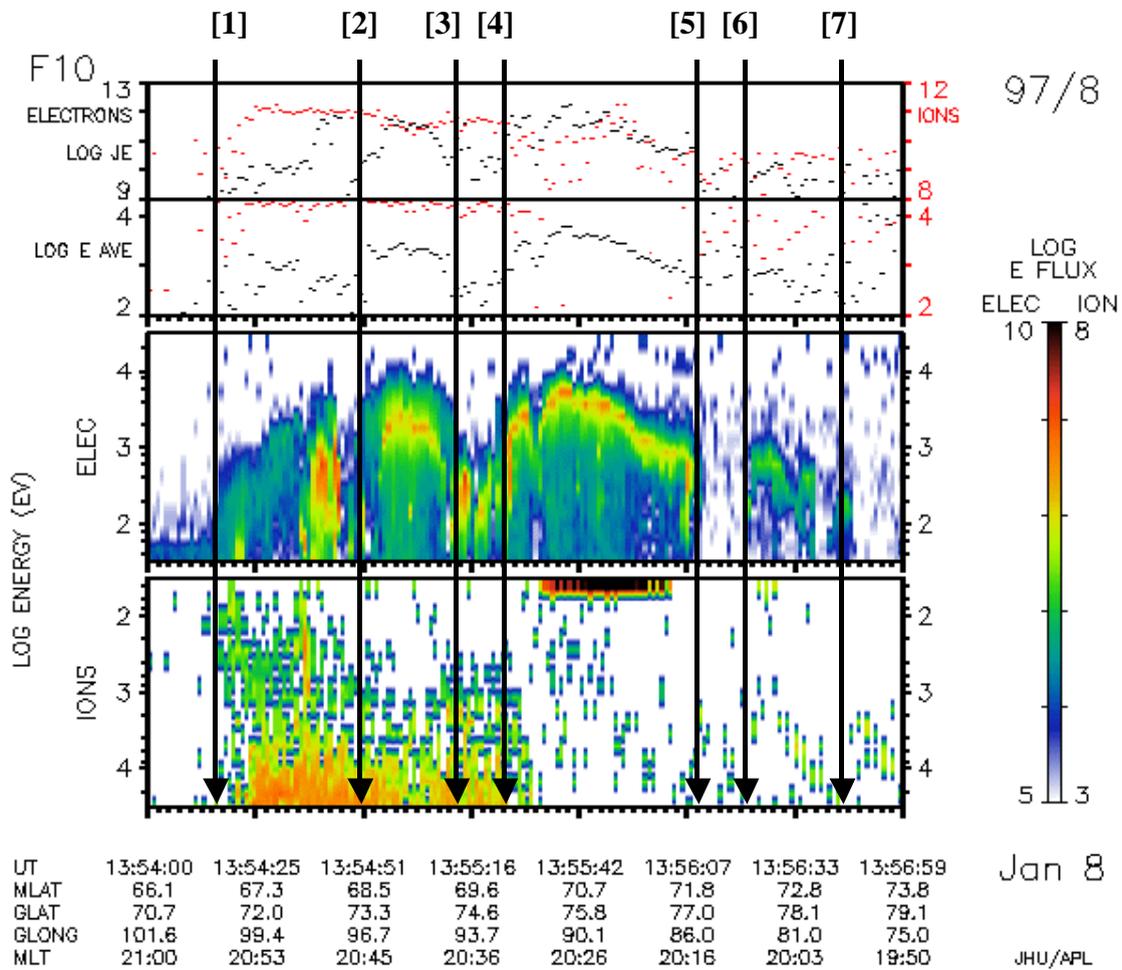


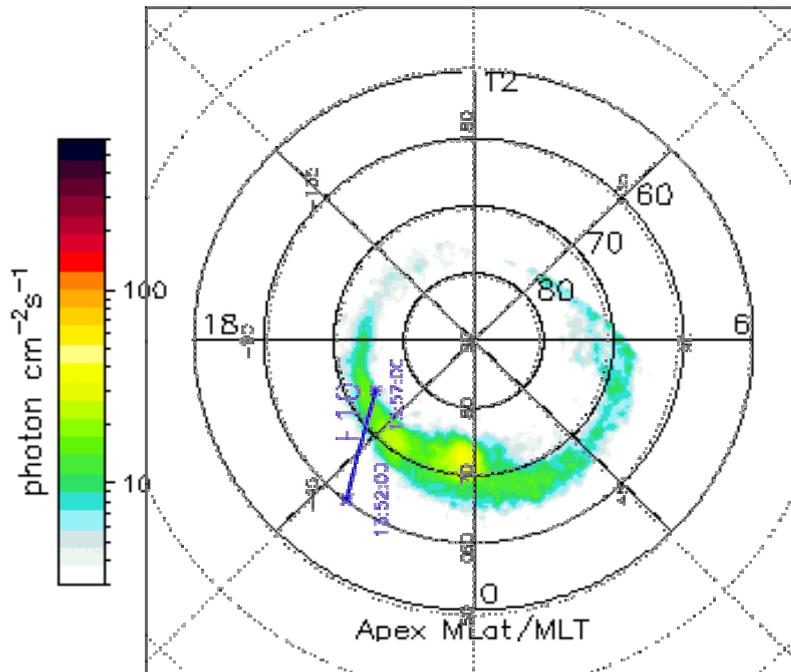
図 5.8: 1997 年 1 月 8 日 13:54-13:57 UT に DMSP-F10 衛星が観測した  
粒子スペクトログラム

F10 衛星の降下粒子データは *Newell et al.*, [1996a, 1996b] による夜側オーバルの領域判別の指数が引用できないため、降下電子の構造から目で見えて判断して、[1]-[7]の領域に区分した。

(図のフォーマットは、図 5.1 と同じ)

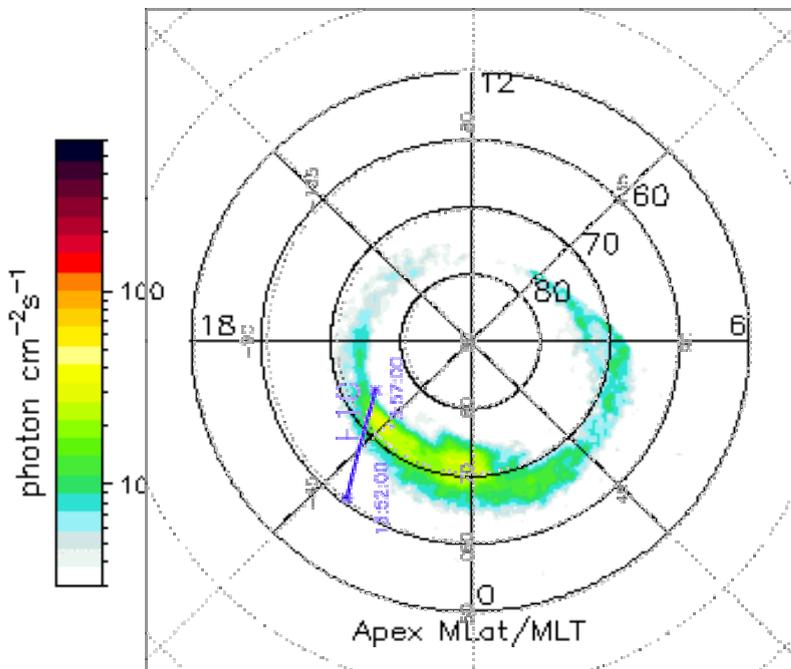
表 5.2: 1997 年 1 月 8 日 13:54-13:57 UT に DMSP-F10 衛星がオーロラオーバルを通過した時の、降下粒子の境界位置[1]-[7] (図 5.8 と本文参照。)

	UT (hh:mm:ss)	磁気緯度(Deg)	MLT (hh:mm)
[1]	13:54:18	66.94	20:55
[2]	13:54:49	68.38	20:46
[3]	13:55:14	69.47	20:37
[4]	13:55:21	69.82	20:34
[5]	13:56:10	71.9	20:15
[6]	13:56:22	72.4	20:08
[7]	13:56:49	73.3	19:57



**Jan 8, 1997 13:53:19 UT, LBHL, 36.8 sec DMSP:F10**

図 5.9: 1997 年 1 月 8 日 13:53:19 UT に DMSP-F10 衛星がオーロラオーバルを通過した時のオーロラ図と、DMSP 衛星の軌道



**Jan 8, 1997 13:56:23 UT, LBHL, 36.8 sec DMSP:F10**

図 5.10: 1997 年 1 月 8 日 13:56:23 UT に DMSP-F10 衛星がオーロラオーバルを通過した時のオーロラ図と、DMSP 衛星の軌道

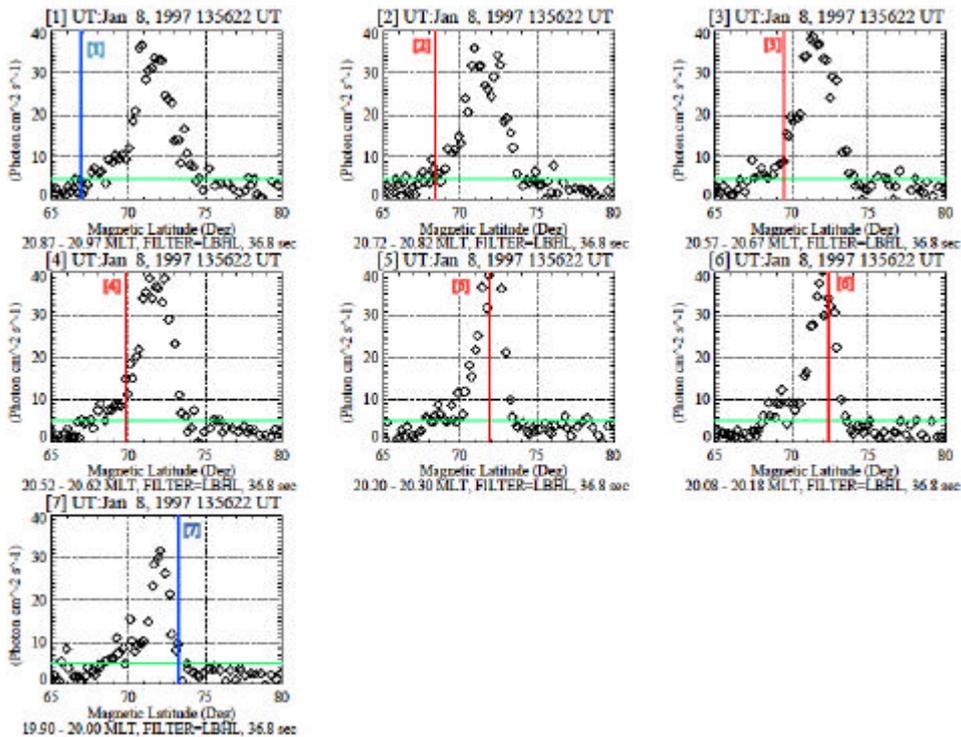
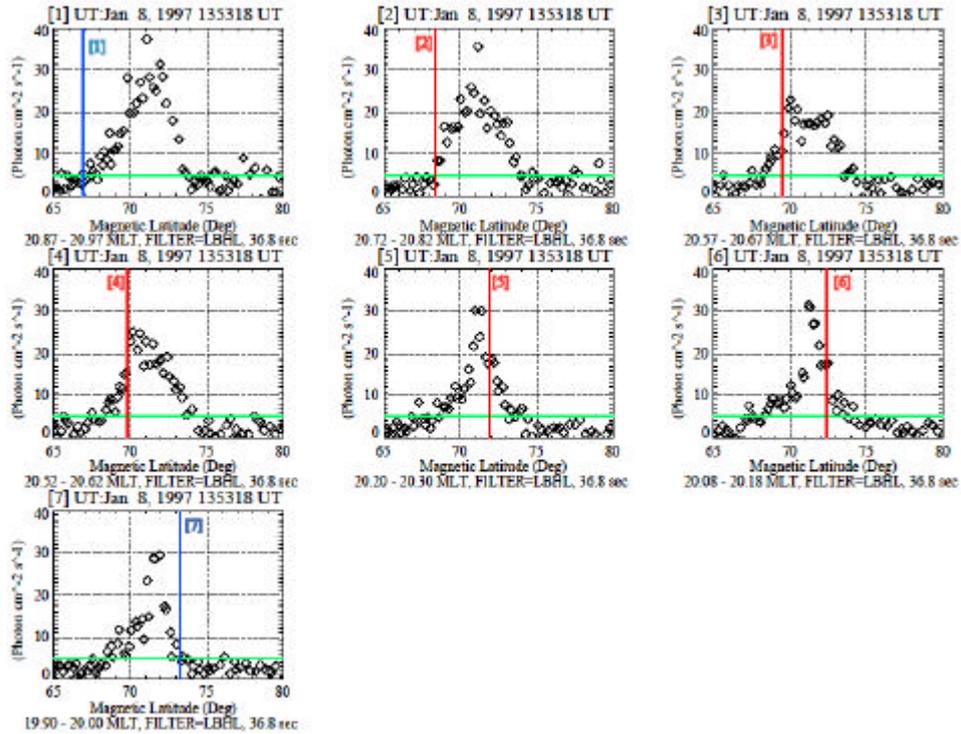


図 5.11: 図 4.6 の境界[1]-[7]の 7 つの MLT ( 1 セクター=0.1 分 MLT ) でのオーロラ発光分布と降下粒子の境界位置の比較。[1]と[7]の境界は青で、[2]-[6]の境界は赤で書かれている。

上図 : 13:53:18 UT 時のオーロラ発光分布、 下図 : 13:56:22 UT 時のオーロラ発光分布

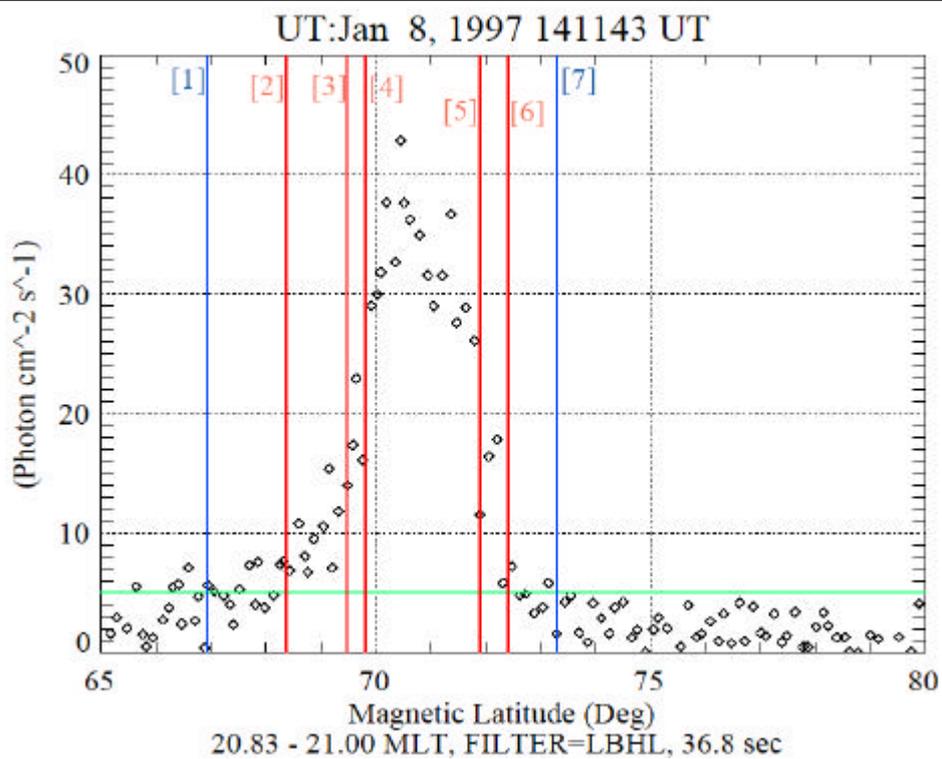
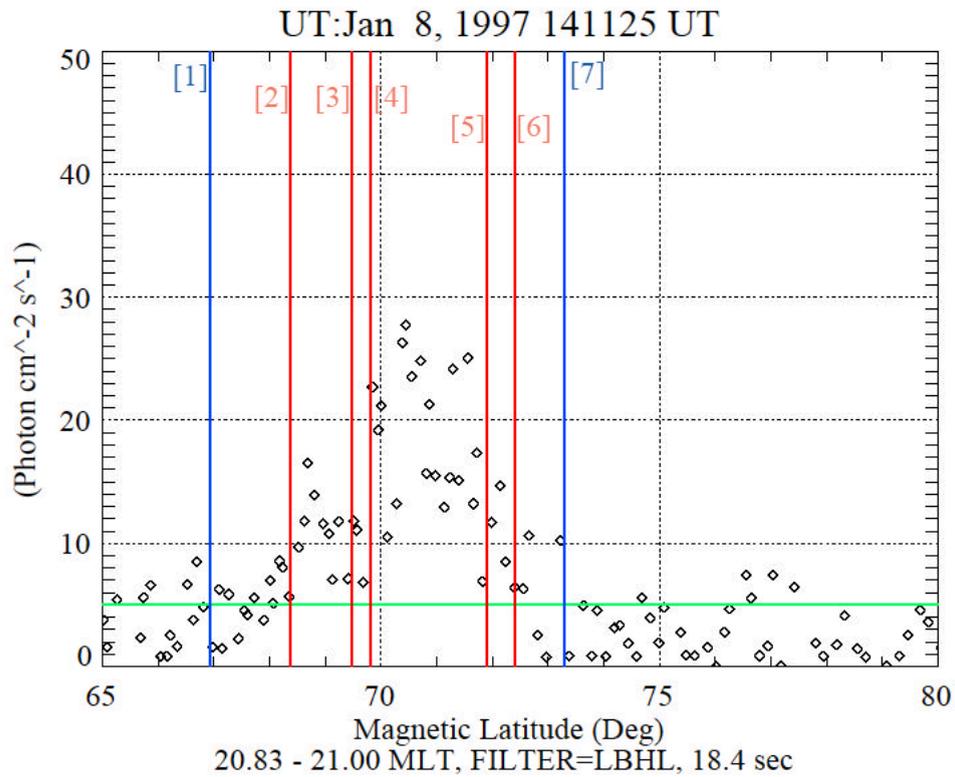


図 5.12: IB 発生 MLT ( 20.83-21.00 MLT ) で切った時のオーロラ発光強度の緯度分布と [1]-[7]の境界位置を重ね合わせた図。

上図 : 14:11:25 UT、下図 14:11:43 UT。 IB 発生時刻は、上図と下図の間に相当する。

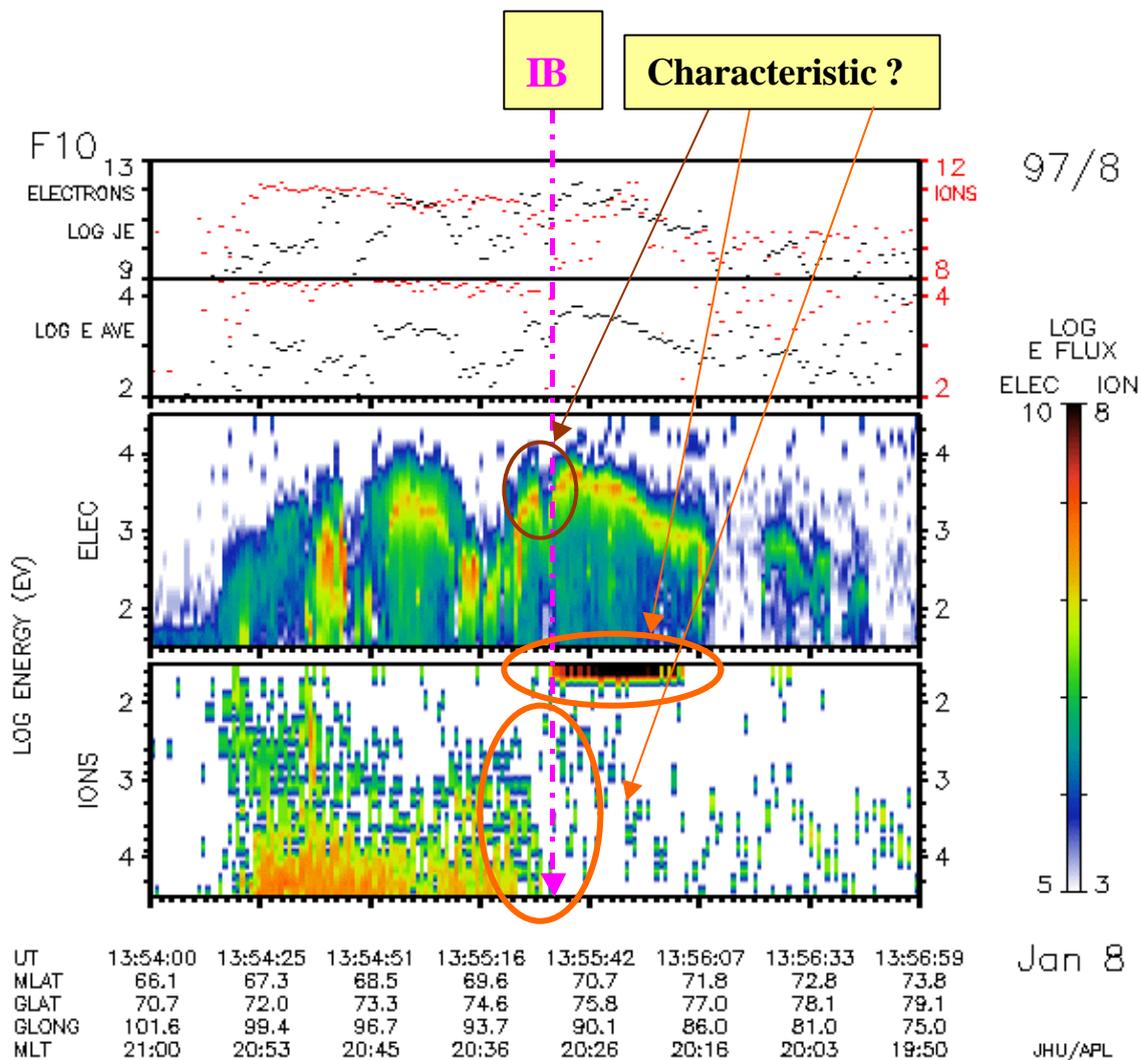


図 5.13: 1998 年 1 月 8 日 13:54-13:57 UT を通過時の DMSP 衛星が観測した  
降下粒子スペクトログラムと、IB 発生位置

降下電子のスペクトログラムから、IB 発生位置においてエネルギースペクトログラムが不連続になっている様子が見られ、降下イオンのスペクトログラムから、IB 発生位置が高エネルギーと低エネルギーの降り込みの境界位置に相当している、という特徴が見られた。  
(図のフォーマットは、図 5.1 と同じ)



## 第6章 まとめと今後の課題

### 6.1 まとめ

本研究では、磁気圏-電離圏を結ぶシステムで最も基本的な擾乱といわれているサブストームのイニシャル・ブライティング (IB) の発生場所を調べるために、Polar 衛星、DMSP 衛星、地上磁場ネットワークのデータを主に用いて解析を行った。

サブストームは一般的に地磁気が荒れた時に頻繁に生じ、サブストームオンセット前の磁気圏擾乱の影響を少なからず受けてしまい、IB 発生場所の決定が不確定になる。そのため、1997-1999 年に生じたサブストームイベントから、IB 発生前の 6 時間前まで AE 指数で活動が見られないものを取り上げ、Polar 衛星の画像データを中心に、IB のオーロラオーバルの高・低緯度境界に対する位置を統計的に調べた。

さらに、そのうち、DMSP 衛星が IB 付近を横切ったイベントを数例取り上げ、DMSP の粒子データからオーロラオーバルの領域を選別し、さらに IB に関しては、デジタルデータを基に、オーロラオーバル中で発光が強くなった位置を定量的に調べた。

上記の解析の結果、以下の観測事実及び結論が得られた。

- I. 前の磁気圏活動の影響を受けず、孤立して生じたサブストームイベントの IB は、そのスケールによって発生する緯度は変わるが、オーロラオーバルの高・低緯度境界に対する相対的な位置としてみると、そのオーロラオーバルの緯度方向の中心付近で生じることが統計的に示された。即ち IB はオーロラオーバルの低緯度境界付近や高緯度境界付近で起きるのでは無い。
- II. 孤立した IB のオーロラオーバルに対する発生位置は、先行する IMF  $B_z$  成分と関係しており、IMF  $B_z$  成分の値が小さい程、オーロラオーバルの低緯度側境界よりに IB が発生する傾向が見られた。この結果は、*Jayachandran et al., [2002b]*の結果と一致するものであった。
- III. 1997 年 1 月 7 日のイベント 1 において、DMSP 衛星の降下粒子の境界と、Polar UVI のオーロラ画像による境界が約 0.7 度ずれていたと仮定した場合、IB 発生位置の中心は、DMSP の降下粒子データから推測した CPS の領域に存在し、さ

らに DMSP の磁場データから推測した沿磁力線電流の Region 2 に存在していた。

- IV. 1997年1月8日のイベント2において、IB 発生位置と、高エネルギー( ~ 10 keV ) と低エネルギー ( < 10 eV ) の降下イオンの境界が一致している様子が確認された。高エネルギーのイオンと低エネルギーのイオンの境界が存在するということは、加速されたイオンと減速されたイオン、すなわち下向き沿磁力線電場と上向き沿磁力線電場の境界が存在し、その境界領域で IB が生じていた可能性が高いことが推測された。

## 6.2 今後の課題

孤立したサブストームを取り上げ、オーロラオーバルの高・低緯度境界に対する相対的な IB の発生位置をより統計的に精度よく調べるためには、イベント数を増やす必要がある。

オーロラオーバルを広く、精度良く同定するためには、オーロラの観測波長を、LBHL と LBHS だけでなく、可視光や X 線などを含め、多波長で観測することが望まれる。

オーロラオーバルをより正確に同定するためには、Polar UVI のオーロラ画像と、DMSP 衛星の降下粒子データが一致しない原因を探求する必要がある。

磁気圏の対流は、IMF  $B_z$  の値そのものよりも、IMF  $B_z$  の符号と強度 ( 絶対値 ) が重要であると考えられているため、IB のオーロラオーバルに対する相対的な位置の IMF  $B_z$  依存性を磁気圏対流と結びつけて考察するためには、イベント数を増やし、IMF  $B_z$  を負、0 付近、正の 3 つに大きく分類してその依存性を調べる必要がある。

事象解析においては、DMSP と Polar 衛星の他に観測機器を増やし、IB 前後の磁気圏-電離圏における情報を多く得て、より正確に IB を同定する必要がある。

例えば、IB 前の静止軌道衛星 ( LANL や GOES 等 ) によるサブストーム時のプラズマインジェクションの情報を調べることで、地磁気データとオーロラ画像以外のデータから、孤立したサブストームの同定が行える。また、静止軌道衛星の磁場データを用いれば、サブストーム時のカレントウェッジの位置が見積もれ、IB の位置と対応付けが可能になり、サブストームオンセットの理解につながる。

FAST 衛星による高時間分解能オーロラ粒子観測から得られる精度の高い降下粒子の情報を DMSP と併用することで、磁気圏プラズマシートの領域分けが、より精度良く行える。

EISCAT レーダー等の地上レーダーを同時に用いることにより、IB 時の電離圏のプラズマ温度や密度の緯度分布を理解することが可能となる。

GEOTAIL 衛星による磁気圏遠尾部のプラズマフローの情報を用いることで、IB 前後の磁気圏遠尾部のプラズマ流が分かり、IB の位置と、プラズマの流れの対応関係を調べることが可能となる。

さらに、地上磁場チェーンデータを用いることで、電離圏エレクトロジェット的位置と IB の位置を比較することができる。

以上の様に IB を様々な角度から捕らえることによって、磁気圏-電離圏結合系でサブストーム IB が発生するメカニズムについて、理解が深まると考えられる。



## 参考文献

- 恩藤 忠則, 丸橋 克英, ウェーブサミット講座 宇宙環境科学, オーム社, 2000.
- 上出 洋介, オーロラと磁気嵐, 東京大学出版会, 1987.
- 福西 浩, 国分 征, 松浦 延夫, 南極の科学 2, オーロラと超高層大気 (国立極地研究所編), 古今書院, 1983.
- Akasofu, S.-I., The development of the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, 12, 273-282, 1964.
- Akasofu, S.-I., Polar and magnetospheric substorms, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland., 1968.
- Angelopoulos, V., C. F. Kennel, F. V. Coroniti, R. Pellat, H. E. Spence, M. G. Kivelson, R. J. Walker, W. Baumjohann, W. C. Feldman, and J. T. Gosling, Statistical characteristics of bursty bulk flow events, *J. Geophys. Res.*, 99, 21257-21280, 1994.
- Arnoldy, R. L., Signature in the interplanetary medium for substorms, *J. Geophys. Res.*, 76, 5189, 1971.
- Baker, K. B., and S. Wing, A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes, *J. Geophys. Res.*, 94, 9139-9143, 1989.
- Baker, D. N., T. I. Pulkkinen, V. Angelopoulos, W. Baumjohann, and R. L. McPherron, Neutral line model of the substorms: Past results and present view, *J. Geophys. Res.*, 101, 12975-13010, 1996.
- Carbary, J. F., T. Sotirelis, P. T. Newell, and C.-I. Meng, Auroral boundary correlations between UVI and DMSP, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2002JA009378, 2003.
- Dungey, J. W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47-48, 1961.
- Feldstein, Y. I., and Y. I. Galperin, The auroral luminosity structure in the high-latitude upper atmosphere: Its dynamics and relationship to the large-scale structure of the Earth's magnetosphere, *Rev. Geophys.*, 23, 217-275, 1985.
- Fujii, R., R. A. Hoffman, M. Sugiura, Spatial relationships between region 2 field-aligned currents and electron and ion precipitation in the evening sector, *J. Geophys. Res.*, 95, 18939-18947, 1990.

- Germany, G. A., J. F. Spann, G. K. Parks, M. J. Brittnacher, R. Elsen, L. Chen, D. Lummerzheim, and M. H. Rees, Auroral observations from the POLAR Ultraviolet Imager (UVI), in *Geospace Mass and Energy Flow, Geophys. Monogr. Vol. 104*, edited by J. L. Horwitz, D. L. Gallagher, and W. K. Peterson, pp. 149-160, AGU, Washington, D. C., 1998.
- Gorney, D. J., D. S. Evans, The low-latitude auroral boundary: Steady state and time-dependent representations, *J. Geophys. Res.*, *92*, 13537-13545, 1987.
- Gotz Paschmann, Stein Haaland, Rudolf Treumann, Space Science Series of ISSI, *Vol. 15, Auroral Plasma Physics*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Ieda, A., D. H. Fairfield, T. Mukai, Y. Saito, S. Kokubun, K. Liou, C.-I. Meng, G. K. Parks, and M. J. Brittnacher, Plasmoid ejection and auroral brightenings, *J. Geophys. Res.*, *106*, 3845-3857, 2001.
- Iijima, T., and T. A. Potemra, The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by TRIAD, *J. Geophys. Res.*, *81*, 2165-2174, 1976.
- Jayachandran, P. T., J. W. MacDougall, D. R. Moorcroft, J.-P. St-Maurice, D. R. Moorcroft, P. T. Newell, and P. Prikryl, Coincidence of the ion precipitation boundary with the HF E region backscatter boundary in the dusk-midnight sector of the auroral oval, *Geophys. Res. Lett.*, 10.1029/2001GL014184, 2002a.
- Jayachandran, P. T., J. W. MacDougall, D. R. Moorcroft, J.-P. St-Maurice, K. Liou., and P. T. Newell, Substorm onset location and the equatorward boundary of the proton auroral oval, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2002GL015484, 2002b.
- Kamide, Y., Some “missing” elements of constraint in substorm initiation modeling, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *63.*, 635-642, 2001.
- Kauristie, K., J. Weygand, T. I. Pulkkinen, J. S. Murphree, and P. T. Newell, Size of the auroral oval: UV ovals and precipitation boundaries compared, *J. Geophys. Res.*, *104*, 2321-2331, 1999.
- Kokubun, S., and T. Iijima, Time-sequence of polar magnetic substorms, *Planet. Space Sci.*, *23*, 1483-1494, 1975.
- Liou, K., C.-I. Meng, A. T. Y. Lui, P. T. Newell, M. Brittnacher, G. Parks, G. D. Reeves, R. R. Anderson, and K. Yumoto, On relative timing in substorm onset signatures, *J. Geophys. Res.*, *104*, 22807-22817, 1999.

- Liou, K., C.-I. Meng, P. T. Newell, K. Takahashi, S.-I. Ohtani, A. T. Y. Lui, M. Brittnacher, and G. Parks, Evaluation of low-latitude Pi2 pulsations as indicated of substorm onset using Polar ultraviolet imagery, *J. Geophys. Res.*, *105*, 2495-2505, 2000.
- Liou, K., P. T. Newell, D. G. Sibeck, C.-I. Meng, M. Brittnacher, and G. Parks, Observation of IMF and seasonal effects in the location of auroral substorm onset, *J. Geophys. Res.*, *106*, 5799-5810, 2001.
- Lui, A. T. Y., Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models, *J. Geophys. Res.*, *101*, 13067-13088, 1996.
- Lyons, L. R., I. O. Voronkov, E. F. Donovan, E. Zesta, Relation of substorm breakup arc to other growth-phase auroral arcs, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2002JA009317, 2002.
- Mende, S. B., C. W. Carlson, H. U. Frey, L. M. Peticolas, N. Østgaard, FAST and IMAGE - FUV observations of a substorm onset, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2002JA009787, 2003.
- Meng, C.-I., B. Tsurutani, K. Kawasaki, and S.-I. Akasofu, Ross-correlation analysis of the *ae* index and the interplanetary magnetic field Bz component, *J. Geophys. Res.*, *78*, 617, 1973.
- Miyashita, Y., S. Machida, T. Mukai, Y. Saito, K. Tsuruda, H. Hayakawa, and P. R. Sutcliffe, A statistical study of variations in the near and middistant magnetotail associated with substorm onsets: GEOTAIL observations, *J. Geophys. Res.*, *105*, 15913-15930, 2000.
- Miyashita, Y., S. Machida, K. Liou, T. Mukai, Y. Saito, C.-I. Meng, and G. K. Parks, Relationship between magnetotail variations and auroral activities during substorms, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2001JA009175, 2003.
- Murphree, J. S., R. D. Elphinstone, L. L. Cogger, and D. Hearn, Viking optical substorm signatures, in *Magnetospheric Substorms, Geophys. Monogr. Ser., Vol. 64*, edited by J. R. Kan, T. A. Potemra, S. Kokubun, and T. Iijima, pp. 241-255, AGU, Washington, D. C., 1991.
- Newell, P. T., Y. I. Feldstein, Yu. I. Galperin, and C.-I. Meng, Morphology of nightside precipitation, *J. Geophys. Res.*, *101*, 10737-10748, 1996a.
- Newell, P. T., Y. I. Feldstein, Yu. I. Galperin, and C.-I. Meng, Correction to "Morphology of nightside precipitation", *J. Geophys. Res.*, *101*, 17419-17421, 1996b.
- Ohtani, S., B. J. Anderson, D. G. Sibeck, P. T. Newell, L. J. Zanetti, T. A. Potemra, K. Takahashi, R. E. Lopez, V. Angelopoulos, R. Nakamura, D. M. Klumpp, and C. T. Russell, A multisatellite study of a pseudo-substorm onset in the near-Earth magnetotail, , *J. Geophys.*

- Res.*, 98, 19355-19367, 1993.
- Ohtani, S., L. G. Blomberg, P. T. Newell, M. Yamauchi, T. A. Potemra, and L. J. Zanetti, Altitudinal comparison of dayside field-aligned current signatures by Viking and DMSP-F7: Intermediate-scale field-aligned current systems, *J. Geophys. Res.*, 101, 15297-15310, 1996.
- Ohtani, S., R. Yamaguchi, H. Kawano, F. Creutzberg, J. B. Sigwarth, L. A. Frank, and T. Mukai, Does the braking of the fast plasma flow trigger a substorm?: A study of the August 14, 1996, event, *Geophys. Res. Lett.*, 10.1029/2001GL013785, 2002.
- Provisional geomagnetic data plots, *published by* Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University.
- Rostoker, G., On the place of the pseudo-breakup in a magnetospheric substorm, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 217-220, 1998.
- Shiokawa, K., W. Baumjohann, and G. Haerendel, Braking of high-speed flows in the near-Earth tail, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1179-1182, 1997.
- Slavin, J. A., D. H. Fairfield, R. P. Lepping, M. Hesse, A. Ieda, E. Tanskanen, N. Ostgaard, T. Mukai, T. Nagai, H. J. Singer, P. R. Sutcliffe, Simultaneous observations of earthward flow bursts and plasmoid ejection during magnetospheric substorms, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2000JA003501, 2002.
- Sotirelis, T., P. T. Newell, C.-I. Meng, Shape of the open-closed boundary of the polar cap as determined from observations of precipitating particles by up to four DMSP satellites, *J. Geophys. Res.*, 103, 399-406, 1998.
- Sotirelis, T., and P. T. Newell, Boundary-oriented electron precipitation model, *J. Geophys. Res.*, 105, 18655-18673, 2000.
- Strickland, D. J., J. R. Jasperse, and J. A. Whalen, Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 88, 8051-8062, 1983.
- Torr, M. R., D. G. Torr, M. Zukic, R. B. Johnson, J. Ajello, P. Banks, K. Clark, K. Cole, C. Keffer, G. Parks, B. Tsurutani, and J. Spann, A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission, *Space Sci. Rev.*, 71, 329-383, 1995.
- Tsyganenko, N. A., Global quantitative models of the geomagnetic field in the Cislunar magnetosphere for different disturbance levels, *Planet. Space Sci.*, 35, 1347-1358, 1987.
- Winningham, J. D., F. Yasuhara, S.-I. Akasofu, and W. J. Heikkila, The latitudinal morphology

of 10-eV to 10-keV electron fluxes during magnetically quiet and disturbed times in the 2100-0300 MLT sector, *J. Geophys. Res.*, 80, 3148-3171, 1975.



## 謝辞

本研究にあたり、御指導と御協力をいただいた数多くの方々に心から感謝の意を表します。指導教官である藤井良一教授には、研究の心構えや問題点の指摘、問題の捉え方やデータの見方など、研究を進める上において幅広い御指導をいただきました。野澤悟徳助教授には、研究のみならず、社会生活に共通する心構えや、ものの見方を教わりました。小川泰信助手には、夜遅くまで研究について非常に多くの助言を頂き、研究が行き詰まった時には多くの相談を受けていただきました。

総合解析部門の宮下幸長博士には、サブストームに関する知識を数多く伝授していただき、また論文を数多く紹介していただきました。豊川第2部門の塩川和夫助教授には、修士1年生の時に非常に分かりやすい講義をしていただき、そのおかげで地球磁気圏の基礎を身に付けることができました。ジョンスホプキンス大学応用物理研の Kan Liou 博士、カリフォルニア大学バークレー校の George K. Parks 教授、Matthew Fillingim 博士には、Polar UVI のデータを提供していただきました。京都大学地磁気世界資料解析センターには、AE 指数を始めとする地磁気のデータをいただきました。Air Force Research Laboratory の Denig William 博士には、DMSP 衛星の磁場データをいただきました。

研究室の先輩である足立和寛さん、岩橋弘幸さんには、研究室に入ってきた時からいろいろと面倒をみていただき、研究やそのほかいろいろなことについて相談にのっていただきました。富田修平君とは同じ学年として共に励まし合い、苦労を分かち合うことができました。後輩の櫻井彰宏君、岡田慶吾君、津田卓雄君、藤村昌樹君には、研究や論文の文書校正など、様々なことを手伝ってもらいました。研究支援推進員である山口敏明さん、そして、秘書である岸田純玲さん、山口洋子さんには論文のコピーからファックスなど、研究を進める上でのサポートをしていただきました。21世紀 COE 研究員である元場哲郎さんには、研究の合間に食事に連れて行っていただいたり、差し入れをしていただいたりして、心の休まる時間をいただきました。ほんとうにありがとうございました。

本論文を通じて、これまでお世話になった皆様に感謝の気持ちを述べることができ、本当にうれしく思います。太陽地球環境研究所・東山第2部門を始め、地球惑星・地球電磁気学の輝かしい未来と、皆様の充実した将来を願い、謝辞とさせていただきます。