

平成 18 年度

修士論文

極域電離圏で発生するイオン上昇流と
オーロラサブストームとの関係

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）

澤津橋 磨由子

2007 年 1 月 29 日

要旨

地球磁気圏へのプラズマの供給源としては、太陽風プラズマに加え、極域電離圏内のイオンが挙げられる。この極域電離圏からのイオン流出は地球磁力線に沿って発生し、酸素や窒素などの電離圏を構成するほぼすべての原子・分子イオンが含まれている。特に磁気嵐のときには電離圏起源の酸素イオン密度が増加することにより磁気圏内のイオン組成や平均質量が変化するほどの影響を与えることが明らかにされつつある。さらに、サブストームの規模が大きい時は、小さい時に比べ約 10 倍のフラックスでイオンが磁気圏へと流出していることが報告されている。この極域電離圏から磁気圏へのイオンの流出過程の全容を理解する事は、磁気圏-電離圏結合を理解する上で非常に重要である。しかしながら、実際にイオンが流出し始める極域電離圏内では、サブストームとイオンの沿磁力線上向きの流れ（イオン上昇流）の発生機構に関する因果関係が未だ十分に明らかにされていない。そこで本論文では、2000 年 5 月から 2002 年 12 月までの EISCAT（欧州非干渉散乱）レーダーデータと IMAGE（Imager for Magnetopause – to – Aurora Global Exploration）衛星 WIC（Wideband Imaging Camera）データの同時観測からサブストームを含む特徴的な 13 イベントを抽出し、オーロラサブストームとイオン上昇流との因果関係を精査した。その結果、イオン上昇流の規模に (1) サブストームのバルジ発生領域との相対的位置関係と (2) サブストームのフェーズに依存した、以下の特徴が得られた。

- (1) オーロラサブストーム発生中のバルジの高緯度側内部及びその高緯度側境界では、低緯度側内部やその低緯度側境界に比べて、沿磁力線イオン速度及びフラックスが約 3 倍大きかった。特にイオンの沿磁力線上向き速度とフラックスはバルジの高緯度側境界領域で最大値を示し（それぞれの平均値は約 180 m s^{-1} と $3.7 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）、平均電子温度も 2400 K と高かった。イオン温度とイオンの沿磁力線上向き圧力勾配力もバルジの高緯度側境界領域で最も高い値を示していた。このイオン温度の上昇は、電離圏対流電場の増大による摩擦加熱に起因する。そのため、この速度の大きいイオン上昇流は、バルジの高緯度側境界に特有な南北成分の強い電場領域で発生していた可能性を指摘した。
- (2) サブストームのバルジに対する領域の違いによって、サブストームのフェーズによるイオン上昇流の特徴に違いが見られた。バルジの高緯度側外部以外の領域ではエクспанションフェーズからリカバリーフェーズにかけて平均沿磁力線イオン速度が小さくなるのに対し、バルジの高緯度側外部では 10 m s^{-1} から 100 m s^{-1} へと大きくなっていった。これらの解析結果から、リカバリーフェーズには極冠域でイオン上昇流を引き起こす加速源が発生していると考えられる。

目次

1	序章	
1.1	磁気圏.....	1
1.2	電離圏.....	2
1.3	オーロラサブストーム.....	4
1.4	イオン流出現象.....	5
1.5	イオン上昇流.....	7
1.6	本研究の目的.....	8
2	観測機器および使用するデータ	
2.1	EISCAT レーダー.....	18
2.1.1	EISCAT レーダーから得られる物理量.....	19
2.1.2	観測モード.....	20
2.2	IMAGE 衛星.....	21
2.3	IMAGE 磁場チェーン.....	21
2.4	AE 指数.....	22
3	EISCAT レーダーと IMAGE 衛星の同時観測イベントの抽出およびイオン上昇流の定義	
3.1	オーロラサブストームリストについて.....	28
3.2	EISCAT レーダーと IMAGE 衛星の同時観測イベント抽出.....	30
3.3	EISCAT レーダーとバルジの相対的な位置関係の分類方法.....	31
3.4	サブストームのフェーズの分類方法.....	31
3.5	サブストームの規模の分類方法.....	31
3.6	イオン上昇流の定義.....	32
4	2001 年 9 月 25 日 20 - 2230 UT のサブストームイベントの解析結果および考察	
4.1	イベントの概要.....	39
4.2	トロンソ UHF レーダーと IMAGE 衛星の同時観測結果.....	40
4.3	ESR と IMAGE 衛星の同時観測結果.....	41
4.4	サブストームのフェーズとイオン上昇流との関係.....	42
5	複数のオーロラサブストームイベントを用いたイオン上昇流の解析結果および考察	
5.1	領域ごとにおけるイオン上昇流の特徴について.....	58
5.2	サブストームのフェーズによるイオン上昇流の	

特徴の違いについて.....	60
5.3 サブストームの規模によるイオン上昇流の特徴について.....	60
5.4 サブストーム時のイオン上昇流と プラズマ加熱との関係.....	60
5.5 各領域のイオンに働く加速度とサブストームとの対応.....	62
5.6 イオン上昇流とサブストームとの対応についての考察.....	63
5.6.1 バルジ内外の各領域におけるイオン上昇流と その生成機構について.....	63
5.6.2 イオン速度の高度分布について.....	65
5.6.3 イニシャルブライティング領域でのオーロラ発光と イオン上昇流の時間差や磁気圏で観測される イオン流出との関係について.....	65
6 まとめと今後の課題.....	91
Appendix.....	94
謝辞.....	114
参考文献.....	115

第1章 序章

1.1 磁気圏

太陽から惑星間空間に向かってプラズマが常時放出されており、このプラズマの流れを太陽風と呼んでいる。プラズマは磁場を閉じ込める性質がある為、太陽風は惑星間空間磁場 (Interplanetary magnetic field : IMF) を伴っている。また、地球は磁石に例えられる様に固有の双極子磁場を持っており、太陽風との相互作用によって磁気圏を形成する。太陽風動圧によって地球磁場は前面で圧縮される。この時、太陽風プラズマの動圧と地球磁場の磁気圧のバランスによって磁気圏の大きさは決められる。磁気圏の境界を磁気圏界面と呼び、地球中心から磁気圏界面までの距離は、太陽方向に地球半径の約 11 倍、側面で約 15 倍、反太陽方向には、彗星の尾の様に、地球半径の数百倍程度よりも長く伸びている。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を示している。磁気圏は、プラズマ密度や温度、磁気圧とプラズマ圧の比などによって、いくつかの領域に分けられており、それぞれ名称がつけられている。内部磁気圏として知られている約 $4 R_E$ (R_E : 地球半径) まで広がっている磁気圏内部は、プラズマ圏と呼ばれており、磁場が閉じた領域である。プラズマ圏は、 $1 - 10 \text{ eV}$ の電離圏起源の粒子で構成されており、密度が高い領域である。また、プラズマ圏同様に磁場が閉じた領域で約 $7 R_E$ まで広がっている領域は放射線帯と呼ばれている。放射線帯は、二重構造を持っており、地球に近い領域を内帯、遠方の領域を外帯と呼んでいる。内帯は、 50 MeV 以上のプロトンが主成分で、 $1 - 5 \text{ MeV}$ の電子も存在している。一方外帯は、 1 MeV 以上の電子が主成分となっている。電子の分布は、内帯と外帯の間に明確な隙間 (スロット) を持っている事が知られている。放射線帯より外側で、夜側 (反太陽側) には、プラズマシートと呼ばれている領域がある。プラズマシートはローブに挟まれており、熱いプラズマがシート状にたまっている。ローブは磁気圏尾部の中で、比較的高緯度からのびた平行磁場の領域で、 $1 - 10 \text{ eV}$ の希薄なプラズマで満たされている領域である。一般的にローブの磁力線は開いており、惑星間空間磁場と結合していると考えられている。また、ローブの磁力線を地球に投影した領域は極冠域と呼ばれている。この極冠域にはエネルギーの低い (数百 eV) ポーラーレインと呼ばれる降り込みが起きている事が知られている。

太陽風起源の粒子は、衝撃波面であるバウショックを通過する事で加熱され、一部の粒子は、図 1.2 の様なカスプと呼ばれる、閉じた磁力線と開いた磁力線の

境界領域に侵入する。カスプ領域は磁場が弱くなる為、太陽風起源の粒子が直接磁気圏に侵入する事が出来る。このカスプ領域の磁力線をたどると、昼間側の磁気緯度 75 度付近に対応するが、カスプの位置は惑星間空間磁場などにより変動する。また、大部分の粒子は、磁気圏境界面に沿って流れて行き、バウショックと磁気圏境界面の間領域であるマグネトシースと呼ばれる領域に侵入する。それらの粒子は、マントル粒子となり、一部は磁気圏尾部中心部に存在するプラズマシートに侵入する。プラズマシートの磁場は反平行の為、磁気赤道付近では磁場の強さがほぼ 0 になる。このプラズマシートは、高温のプラズマ (1 – 10 keV) で満たされており、オーロラを発光させる高エネルギー粒子の重要な供給源である。Winningham *et al.* [1975] は、降下粒子の特性の違いから、その降下粒子の源に対応するプラズマシートを 2 つの領域に分けている。ディスクリットオーロラを発生させるような、加速を受けた 1 – 10 keV の粒子を電離圏へ降下させる領域を BPS (Boundary Plasma Sheet : BPS) といい、ディフューズオーロラを発生させるような 1 keV 前後の平均エネルギーを持つ粒子を降下させる領域を CPS (Central Plasma Sheet : CPS) と定義している。

1.2 電離圏

地球の超高層大気では、中性大気と、電離された電子とイオンが共存してプラズマ状態になっている。プラズマは $n_i \cong n_e \cong n$ (n_i :イオン密度、 n_e :電子密度、 n :プラズマ密度) とおくに十分な程中性であるという準中性である。この様なプラズマ状態の領域は、電離圏と呼ばれ、磁気圏と磁力線を介して結合している。中性大気は高度 100 km までは乱流効果によって N_2 が 78.1 %、 O_2 が 21.0 % と組成が均一であるが、高度 100 km 以上では拡散効果や化学反応によって組成が不均一となる。高度 100 km 付近で O_2 の解離によって O も加わり、高高度になるにつれて、軽い He や H が主要になる。電離圏のプラズマは、太陽から放射される極端紫外線などの電磁波、銀河宇宙線、太陽宇宙線、オーロラ粒子などによって電離されて生成される。生成されたイオンと電子は再結合して中性大気粒子に戻ることによって消滅する。電離圏は、高度ごとにいくつかの領域に分けられており、D 領域 (高度 70 – 90 km)、E 領域 (高度 90 – 130 km)、F 領域 (高度 130 – 600 km) と呼ばれている。

D 領域は、太陽放射のライマン α (波長 121.6 nm) 線を電離エネルギー源とする NO の電離が顕著である。極域では、時としてオーロラ粒子や太陽プロトンによる電離作用によって電子密度の増加が起きる。

E 領域では、紫外線 (波長 80 - 102.6 nm) による O_2 の電離、軟 X 線 (波長 1 - 10 nm) による N_2 、 O_2 、 O の電離、ライマン α (波長 121.6 nm) による NO の電離、電子 (1 - 30 keV) やプロトン (10 keV - 1 MeV) による電離が主な電離機構である。 E 領域の特徴として、極域では、オーロラ粒子のような高いエネルギーの粒子が降りこみ、 E 領域の電子密度の増加も起きている。また、図 1.3 に見られる様に、イオンと電子の中性大気との衝突周波数およびジャイロ角周波数との関係から、電流が流れる事が挙げられる。 E 領域では、電子は中性大気との衝突周波数よりも磁力線の周りを旋回するジャイロ角周波数の方が大きく、無衝突として扱える。即ち、電子は、磁場と電場に垂直方向に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト運動をしている。一方イオンは、 E 領域の上部では中性大気との衝突が大きく $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ の方向から外れた運動をし、下部では中性大気と一緒に運動している。これらの事から、高度 110 km 付近では、電子の運動によって担われるホール電流が、磁場と電場に対して垂直方向に流れる。その上部では、電子によって担われるホール電流に加えて、イオンの運動によって担われるペダーソン電流が電場方向に流れる事になる。

F 領域では、極端紫外線 (80 - 15 nm) や電子 (1 keV 以下) の降り込みによる O 、 O_2 、 N_2 の電離が主な電離機構である。日中 2 つの電子密度のピークが現れ、高度が低い層を F_1 層 (高度 170 km 付近)、高い層を F_2 層 (高度 300 km 付近) と呼んでいる。夜になると日中に比べて電子密度は減り、 F_1 層と F_2 層が合併して一つの F 層になる。 F_1 層は夏の日中に出現しやすく、 F_2 層は電離圏電子密度の高度分布における最大電子密度を持ち、常時存在している。 F_1 層の形成は、電離源による生成とイオン化学反応による消滅によって支配されている。一方 F_2 層の形成は、生成と消滅に加えてプラズマの拡散運動による輸送の効果が重要な働きをしている。高高度になると、プラズマと中性大気との衝突が減少する為、プラズマの拡散が起こりやすくなる。その結果、プラズマの密度は拡散平衡分布 (重力と圧力勾配がつりあう状態) に近づく。イオンと電子の質量差により、両者の拡散速度に差が生じるが、イオンと電子の分極から生じる磁力線方向の両極性電場の働きにより電子とイオンは等しい速度で拡散運動をする。このように電子とイオンが互いにひきずり合う形で拡散する事を両極性拡散 (ambipolar diffusion) と呼んでいる。極域の夜間の F 領域の電子密度変化の特徴として、低エネルギー電子の降下による電離が重要となる事と、ポーラーパッチと呼ばれる電子密度の高いプラズマの塊が電離圏対流の時間変化に伴って極冠域を夜側へと向かって輸送する現象が見られる事が挙げられる。

F 領域の主要なイオンは、図 1.4 に見られる様に、高度 180 km 以下では NO^+ 、 O_2^+ イオンであり、高度 180 km から高度 600 km 付近までは O^+ イオンとなっている。高度 400 km から H^+ や He^+ イオンも見られ、高度 700 km 以上では H^+ や He^+

が主要なイオンになっている。

1.3 オーロラサブストーム

太陽風の南北磁場が南向きになると、磁気圏の前面の磁場と磁気再結合（リコネクション）を起こす。その結果、大量の粒子が磁気圏へと流入する [Dungy, 1961]。リコネクションの模式図を図 1.5 に示す。太陽風の南北磁場が南向きになると地球前方の磁気圏境界面で、磁力線どうしの結合が起きる。そして、太陽風の磁力線と繋がった地球の磁力線は、開いた磁力線となり、夜側へと運ばれる。このような過程によって太陽風の運動量やエネルギーが磁気圏へと流入すると共に、磁気圏尾部に蓄えられる。磁気圏尾部ではローブの磁気圧が強くなり、プラズマシートが薄くなる。それと同時にプラズマシートの地球側境界の位置が地球側に近づいてくる。その結果、蓄えられた粒子やエネルギーが電離圏へと流入し、オーロラを発生させると同時に地磁気の擾乱を引き起こす。この現象を磁気圏サブストームと呼んでいる。以後、サブストームと呼ぶ。

サブストームの研究は長い歴史を持っており、何がサブストームをトリガするかが大きな問題となっている。サブストームの発生機構の主なモデルとして2つ挙げる。1つ目は NENL (Near-Earth Neutral Line : NENL) モデルと呼ばれるものである。これは、磁気圏の近尾部に磁気再結合が発生し、磁力線の繋ぎ変えが起きている X 点が新たに出来、これがサブストームを駆動するというモデルである [Baker et al., 1996]。NENL は反地球方向にプラズモイドを放出し、地球向きの速いプラズマ流を生成する。このプラズマの速い流れが地球近傍に達するとオーロラのブレイクアップになると考えられる。NENL による地球向きの速いプラズマ流を制止する事で、サブストームがトリガーされるものと思われる。2つ目はカレントウェッジモデルと呼ばれるものである。磁気圏夜側の尾部電流がサブストーム時に寸断されて地球の極域に流れ込み、オーロラ西向き電流として夕方側に回り込んだ後に、再び磁気赤道面に戻る事が観測されている [Clauer, 1974]。このように電流の寸断がブレイクアップの原因となるというモデルである。しかしながら、これらのモデルはサブストームのトリガー機構を完全に説明するまでには至っていない。

上記に示した様にサブストームが起きると、地磁気や、磁気圏へのエネルギー流入やオーロラ活動が大きく変化する。オーロラサブストームはその内の1つの側面で、サブストームを目で見て判断する事ができる現象である。オーロラサブストームの概念は、Akasofu [1964] が全天カメラのデータを用いてまとめ

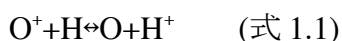
ており、図 1.6 にオーロラサブストームの発達過程を示す。

オーロラサブストームの過程は、成長相 (growth phase)、爆発相 (expansion phase)、回復相 (recovery phase) の 3 つに分類されている。オーロラサブストームは、夜側のオーロラアークが突然輝き出すことで開始する。この、オーロラアークが最初に発光する事をイニシャルブライティング (Initial Brightening : IB) と呼ぶ。イニシャルブライティングより前の約 1 時間続く期間を成長相と呼ぶ。成長相は惑星間空間磁場が南向きになる事によって始まる。その結果、対流電場が強くなり、惑星間空間磁場と地球磁場が磁気再結合する事によって太陽風のエネルギーが磁気圏へと運ばれて行く。イニシャルブライティングから約 30 分の間に、オーロラアークが広がり、極方向へと移動するポールワードエクспанション (PoleWard Expansion : PWE) が起きる。またこの期間、 E 領域を流れるオーロラエレクトロジェットも増加する。イニシャルブライティングからポールワードエクспанションで最も高緯度側に広がるまでの期間を爆発相と定義している [Rostoker et al., 1980]。イニシャルブライティングから約 30 分 - 2 時間後、オーロラアークは低緯度側へと移動し、磁気圏が元の状態に戻る期間を回復相と呼ぶ [Rostoker et al., 1980]。以上がオーロラサブストームの基本的な描像であるが、サブストームの規模などによって上記の時間は変化する。Frey et al. [2004] は、IMAGE 衛星 FUV (Far Ultra - Violet imager) を用いて 2000 年 3 月から 2002 年 12 月までの間の約 2400 程のサブストームのイニシャルブライティングの位置について統計解析を行った。その結果、統計的なイニシャルブライティングの位置は、磁気地方時 (Magnetic Local Time: MLT) で 23 MLT、磁気緯度 66.4 度である事がわかった。

1.4 イオン流出現象

磁気圏から電離圏へ粒子やエネルギーが流入するのとは対照的に、磁気圏のプラズマの供給源として電離圏から磁気圏へイオンが流出している現象が起きている。1960 年代、高緯度の開いた磁力線上では、電離圏内の水素イオン (H^+) やヘリウムイオン (He^+) などの軽いイオンが磁気圏へと流出していく事が予想された。この予測は、電離圏での粒子の圧力が高緯度極冠域から伸びている磁気圏尾部での圧力よりも大きい為、圧力勾配により密度の高い電離圏から低い磁気圏尾部へと磁力線に沿ってプラズマが流れて行くというものだった [Dessler and Michel, 1966; Bauer, 1966; Nishida, 1966]。1968 年、この軽いイオン (H^+ , He^+) の磁気圏への流出は、太陽風にちなんで極風 (Polar Wind) と名づけ

られた [Axford, 1968]。1970年代に ISIS 2 衛星によって、さらに 1980年代には DE 1 衛星によって実際に極風が観測された [Hoffman and Dobson, 1980]。古典的な極風理論では、軽いイオン (H^+ 、 He^+) は重力に打ち勝って磁気圏へと流出する事が出来るが、1.2 節で示した電離圏高高度の主要なイオンである O^+ 、 NO^+ 等の重いイオンは磁気圏へと流出する事が出来ないと考えられていた。また、上部電離圏では、水素原子が多く存在する為、 O^+ イオンは、



の様な荷電交換反応によって酸素原子に変わってしまう。これらの理由から比較的重いイオン (O^+ 、 NO^+) は磁気圏へと流出する事が出来ないと考えられていた。しかし、磁気嵐時に O^+ が H^+ よりも多く存在している事から電離圏起源の O^+ が磁気圏へと流出している事が Shelley et al. [1972] によって予測された。これは後に、S3-3 衛星によって 0.5 keV 以上の H^+ や O^+ が上昇している事が観測された。また、Alouette I サウンダーによって上部電離圏 (~500 km) で O^+ イオン上昇流の存在が初めて明らかにされた [Lockwood and Titheridge, 1981]。上部電離圏 (高度 1000 km 以下) で 1 km s^{-1} を超えるイオン上昇流が夜側オーロラ帯と昼間側のクレフト領域で起きている事が、DE 2 衛星 [Heelis et al., 1984]、EISCAT レーダー [Wahlund et al., 1992] によってそれぞれ観測された。1990年代に入ると、質量分析器を搭載したあけぼの衛星によって電離圏起源の O^+ イオン等が加熱を伴って流出している現象が観測された [Watanabe et al., 1992; Abe et al., 1993a,b]。図 1.7 は、あけぼの衛星によって観測された H^+ 、 He^+ 、 O^+ が流出していく様子を示している。どの高度においても H^+ が一番大きな速度を持ち、 He^+ 、 O^+ の順に速度が小さくなっていく。 O^+ は、高度 5000 km から速度が増加し、遠地点の高度 10,000 km では、 4 km s^{-1} の速度を持っている。図 1.8 は DE 1 衛星によって観測された 0.01 – 17 keV の H^+ (左図) と O^+ (右図) の流出率を示している。横軸は地磁気活動を示す係数である Kp 、縦軸はイオン流出率を示しており、太陽活動度を示す $F_{10.7}$ を 3 つに分類してイオン流出率を示している。 O^+ 、 H^+ 共に、すべての活動度で Kp の増加に伴い流出率は増加している。 Kp が 0 から 6 に変化すると、 O^+ 流出率は約 20 倍増加し、 H^+ は約 4 倍増加する。また、 O^+ は太陽活動度が高くなるにつれ、流出率は増加しているが、 H^+ は太陽活動度による変化はほとんど見られない。この事から、イオン種によって加速の描像が異なることがわかる。以上のさまざまな結果から、軽いイオン (H^+ 、 He^+) だけでなく重いイオン (O^+ 、 NO^+) までもが磁気圏へと流出していくという事が明らかになった。

イオン流出とオーロラ活動との関係について Wilson et al. [2001] が FAST 衛星

と Polar 衛星を用いて調べた結果、オーロラの発光と O^+ 流出には数分の時間差で密接な関係がある事がわかった。磁気圏内で観測される電離圏起源のイオン流出過程は、特徴によって 2 つに分類される [Yau and Andre, 1997]。1 つ目は、上記に示した極風や上部電離圏からの O^+ イオン上昇流の様なバルクな流れである。2 つ目は、イオンビームやイオンコニックスの様な 10 eV から数 keV のエネルギーを持ったイオンの流れである。イオンビームは磁力線に沿って上向きの強い電場によって磁力線方向にイオンが加速される現象で、高度 5000 km 以上で観測される。一方イオンコニックスは磁場に垂直方向に加熱されたイオンが上方へ流出する現象で、ロケットや ISIS 2 によって高度 1000 km 以下で観測されている [Klumpar, 1979; Yau et al., 1983]。

Wilson et al. [2004] は、1996 年 12 月 – 1997 年 2 月の間の Polar 衛星と FAST 衛星の同時観測データを用いて、サブストーム時の様に大量の粒子エネルギーや電磁エネルギーが電離圏へと流入する場合、イオン流出にどのような影響が見られるかを統計的に調べた。具体的には、オーロラサブストームと夜側オーロラ帯及び極冠域のイオン流出率との関係をサブストームの規模とフェーズごとに調べている。表 1.1 は、サブストームの継続時間によって分類した規模の大きいサブストーム (Group 1) と小さいサブストーム (Group 2) それぞれの、夜側オーロラ帯と極冠域の高度 3500 km 以上、10 eV 以上のエネルギーを持った平均 O^+ 、 H^+ イオンフラックス量を示している。その結果、図 1.9 に示す様に、夜側オーロラ帯の流出率は、サブストームの規模に関わらず、オンセット後約 20 分の間にオンセット前の流出率の約 2 倍に増加している。また、サブストームの規模が大きくなる程、夜側オーロラ帯のイオン流出率の割合は増加していた。規模が小さいサブストームから規模が大きいサブストームにかけて、 O^+ イオン流出率も H^+ イオン流出率も共に約 10 倍に増加する事がわかった。しかしながら、サブストームの規模やフェーズごとに、具体的にどのように電離圏からイオンが上昇しているかについては明らかにされていない。

1.5 イオン上昇流

電離圏のイオンが磁気圏へと流出していく過程において、加熱や加速が起き始める電離圏内では、イオン上昇流という現象が起きている。このイオン上昇流は、重いイオン (O^+ 、 NO^+) のイオン流出過程を知る上で大変重要な役割を担っている。イオン上昇流は、沿磁力線上向きに $100 - 1000 \text{ m s}^{-1}$ 程度の速度を持ってイオンが上昇していく現象である [Bates, 1974; Winsor et al., 1986; Williams

and Jain., 1986; Jones et al. 1988; Winser et al., 1989; Wahlund and Opgenoorth. 1989]。イオン上昇流が始める F 領域では O^+ イオンが多く存在する為、主に O^+ イオンが上昇していると考えられる。

地球の脱出速度 (11 km s^{-1}) を超える速度を持つイオン流出と区別して、イオン上昇流と呼ばれている。また、電離圏では、イオン上昇流の他にイオン下降流も観測されている。これは、上昇したイオンの内、地球から脱出するのに十分なエネルギーを得られなかったイオンが重力によって下降したものと考えられている [Endo et al., 2000]。

Wahlund et al. [1992] は 1989 年と 1990 年に行った EISCAT レーダーを用いた観測からイオン上昇流を以下の 2 つに分類し、Type1、Type2 と呼んでいる。Type1 は、電離圏電場の増大を伴って起きるイオン上昇流である。イオン温度の上昇や磁場に垂直方向の電場が増大するという特徴を持っている。この事から Type1 イオン上昇流は、垂直方向の強い電場増大によるイオンと中性大気の摩擦加熱によってイオンの温度が上昇し、その圧力勾配によってイオンが沿磁力線上向きへと押し上げられる事で起きている。Type2 は、電子温度の上昇や、垂直方向の弱い電場が見られるという特徴を持っている。この Type2 イオン流出は沿磁力線電場の増大によって生み出されたプラズマ不安定によってイオンが加熱される事で起きているのではないかと考えられている [Wahlund et al., 1992]。

EISCAT レーダーを用いたイオン上昇流の研究は現在までに色々と報告されている。Ogawa et al. [2003] では、ESR と DMSP 衛星の同時観測データを用いて、昼間側のどの領域でイオン上昇流が発生するのかを示している。統計的な研究として、Foster et al. [1998] は、1984 – 1996 年間の UHF レーダーデータを用いてイオン上昇流の日変化、季節変化、太陽活動変動について示している。しかしながら現在までにオーロラサブストームとイオン上昇流との関係を詳細に調べた研究は行われていない。

1.6 本研究の目的

1.4 節で示した様に、電離圏起源の酸素イオンが電離圏から磁気圏へと流出している様子が人工衛星観測から明らかになっている。また、サブストームの規模が大きくなる程、夜側オーロラ帯の O^+ イオン流出率は約 10 倍に増加する事がわかっている [Wilson et al., 2004]。しかしながら、サブストームの規模やフェーズごとに、具体的にどのように電離圏からイオンが上昇しているかについては明らかにされていない。サブストーム時に電離圏でどのような要因でイオン上

昇流が起きているのか、どれくらいの上昇イオンフラックスを伴っているのかを知る事は、電離圏起源である重イオンの磁気圏への流出過程を理解する上で重要となる。

そこで本研究では、まず電離圏イオンの沿磁力線上向き速度やイオンフラックスが、サブストームのフェーズやオーロラバルジとの位置関係、サブストームの規模により、どのような特徴の違いが見られるかを理解する事を目的としている。さらに、そのイオン上昇流の特徴の違いが、どのようなメカニズムで生じているかを知るために、電離圏内のイオンや電子の加熱の特徴を合わせて理解することを目的とする。

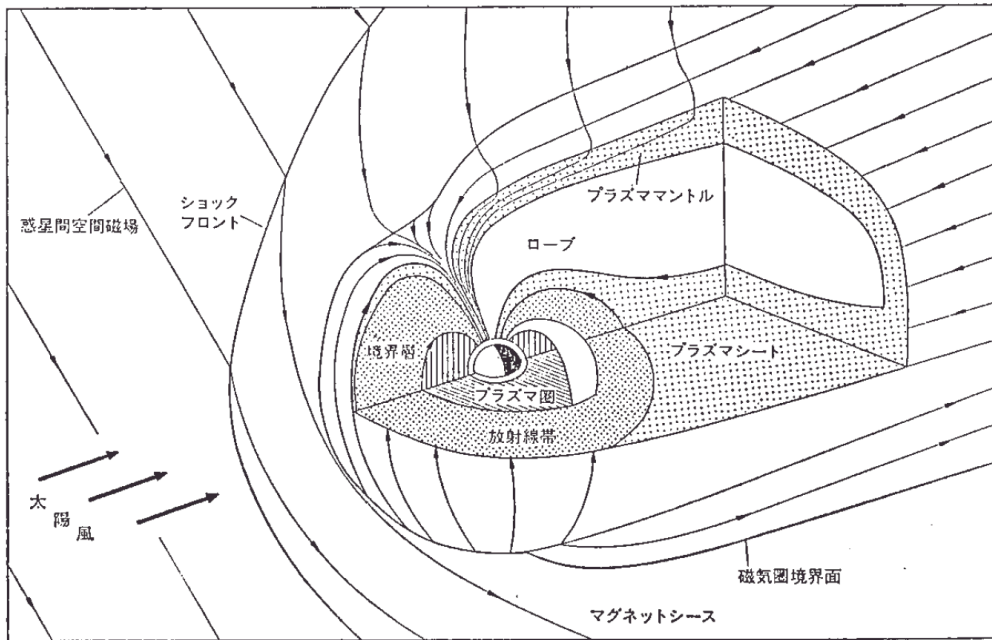


図 1.1: 地球磁気圏の構造図 [福西 他, 1983]。磁気圏の北半分と手前側の一部を切り取って内部を示した磁気圏構造の概略図。

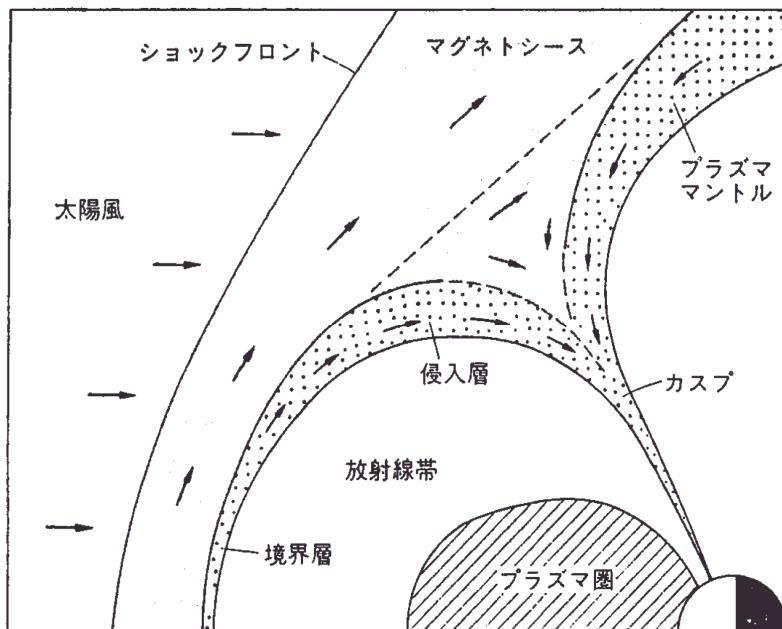


図 1.2: 昼間側磁気圏境界の構造 [福西 他, 1983]。

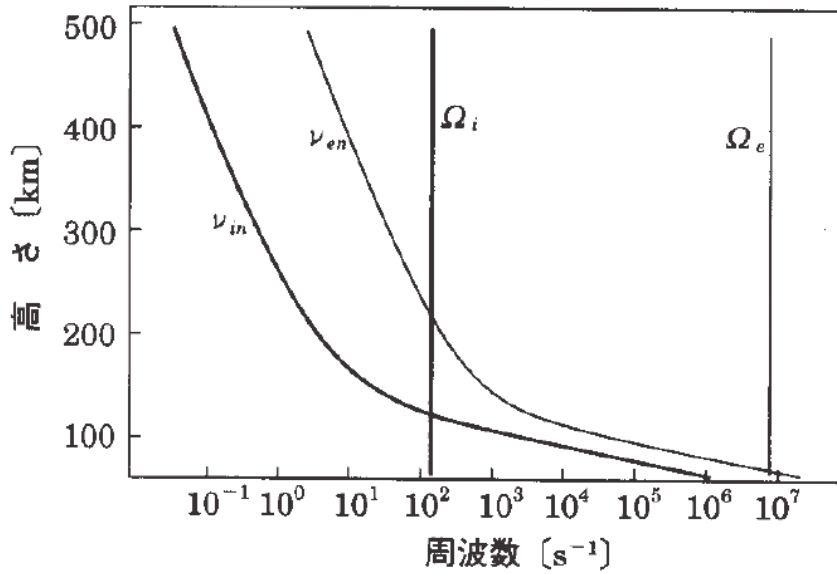


図 1.3: イオンと電子についての中性大気粒子との衝突周波数(ν_{in} 、 ν_{en})およびジャイロ周波数 (Ω_i 、 Ω_n)との関係を示している。イオンは O_2^+ を仮定している。太陽活動極大期の春分の東京上空の 12 時の値を示している。 [恩藤 他, 2000]

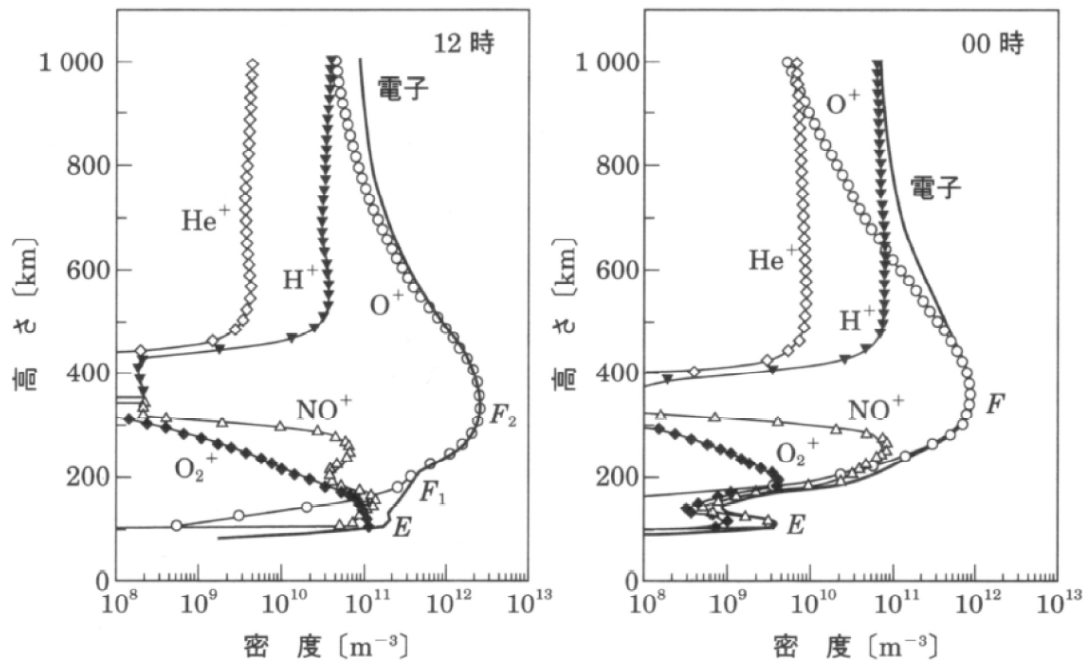


図 1.4: 電離圏を構成するイオンの高度分布。左図は、太陽活動極大期の昼 (12 時 LT)、右図は夜 (0 時 LT) のイオンの高度分布の数値モデルを示している。 [恩藤 他, 2000]

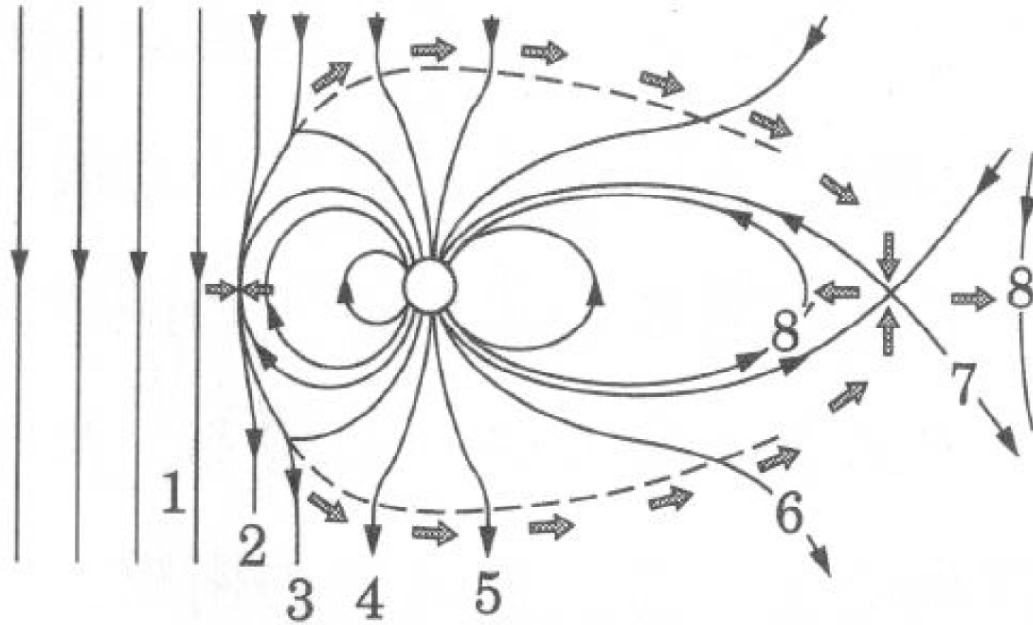


図 1.5: 昼間側磁気リコネクションの模式図 [Dungey, 1961]。太陽風の磁力線が南向き成分を持ち、地球の北向きの磁力線と昼間側で融合した結果、磁気圏の境界 (太陽側) で磁力線は切断され、太陽風により磁力線が夜側に運ばれていく様子が描かれている。数字 1 → 8 に従って、磁力線が運動する。

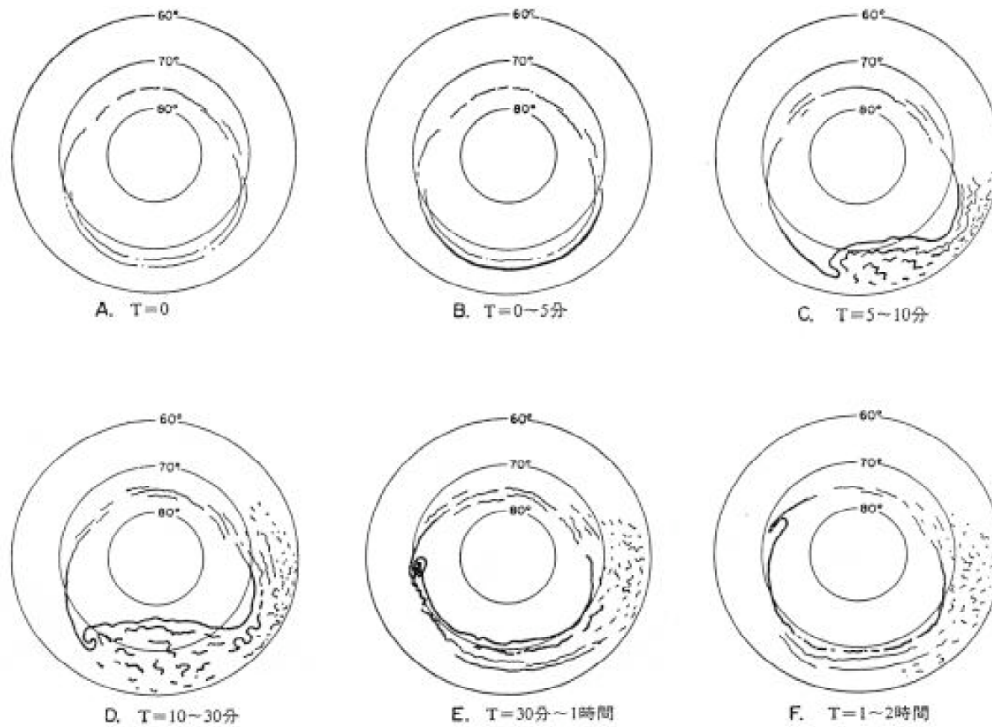


図 1.6: オーロラサブストームの発達過程を示す模式図。 [Akasofu, 1968]

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 $T=0$ 分とする。

- A ($T=0$ 分以前). 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 ($T=0-5$ 分). 真夜中付近で突然アークが発光する、ブレイクアップが起きる。
- C ($T=5-10$ 分). ブレイクアップしたアークがオーロラバルジと呼ばれ、バルジが極方向に発展 (Polward expansion : PWE) していく。
- D ($T=10-30$ 分). バルジが最も極に達する。バルジの西側で激しい光の渦が出現し、西向きに移動していく。この現象を西向きオーロラサージ (westward traveling surge) と呼ぶ。
- E ($T=30$ 分 - 1 時間). バルジが赤道方向に後退し始める。
- F ($T=1-2$ 時間). 元の静穏な状態に戻る。

サブストームの開始から終わりまでの時間は典型的には 2 時間程度である。

B - D の期間を爆発相 (expansion phase)、E - F の期間を回復相 (recovery phase) と呼ぶ。以上が基本的な描像であるが、サブストームの規模などによってこれらは変化する。

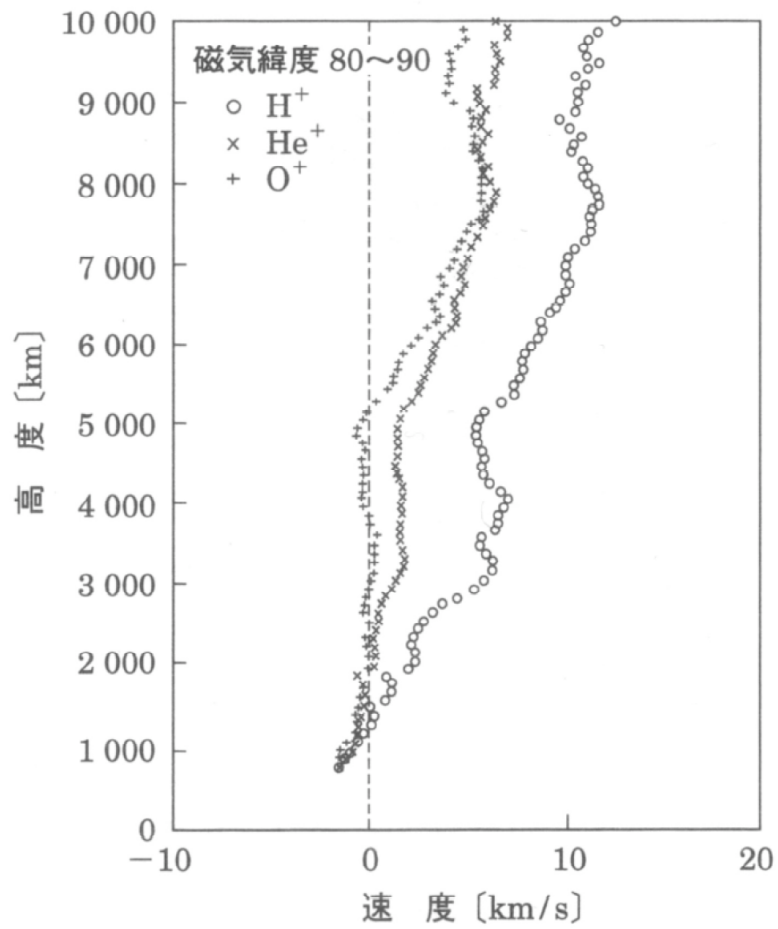


図 1.7: あけぼの衛星が観測した電離層イオン (H^+ 、 He^+ 、 O^+) の流出を示している。縦軸は、衛星高度、横軸は磁力線に平行な速度分布を示している。速度の正は上向きイオンの流れ、負は下向きのイオン流れを示している [Abe et al., 1993]。

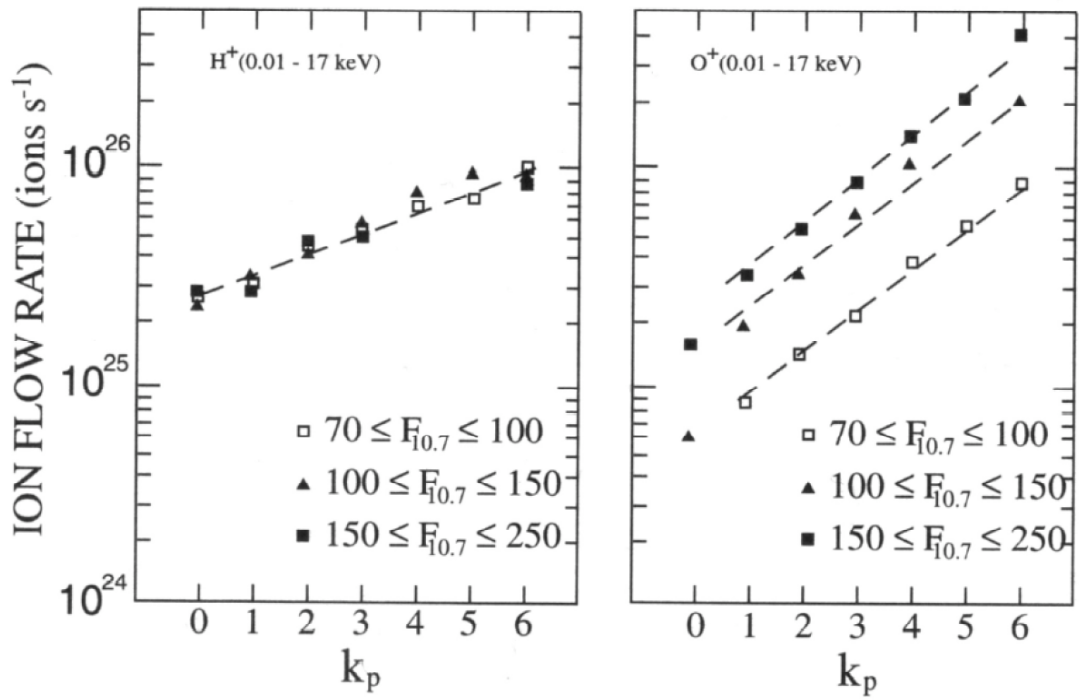


図 1.8: DE-1 衛星で観測された高エネルギー (0.01 - 17 keV) の H^+ (左図) と O^+ (右図) のイオンの流出率。[Yau et al., 1988]

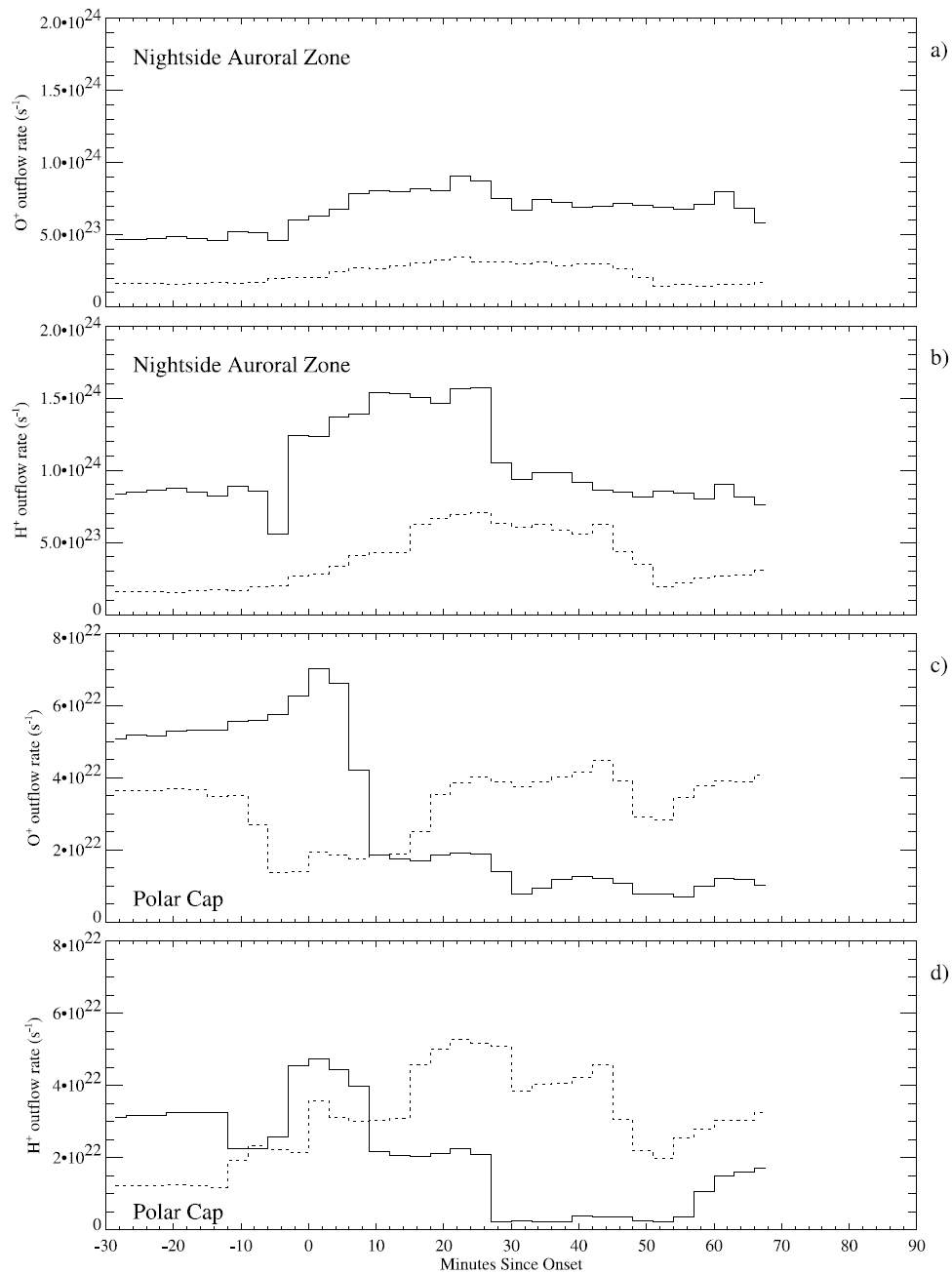


図 1.9: FAST 衛星によって観測された、サブストームに伴い、夜側オーロラ帯や極冠域から流出する O^+ 、 H^+ イオンの流出率を (a) – (d) にそれぞれ示している。横軸は、オンセットからの時刻、縦軸はイオン流出率を示している。実線は規模の大きいサブストーム、点線は規模の小さいサブストームを示している [Wilson et al., 2004]。

Table 2. Average Ion Fluxes ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

$\Delta t, \text{min}$	Group 1		Group 2		Group 1		Group 2	
	Flux	Number	Flux	Number	Flux	Number	Flux	Number
	<i>Nightside Auroral Zone O⁺</i>				<i>Nightside Auroral Zone H⁺</i>			
-30-0	3.2×10^6	552	4.0×10^6	557	3.1×10^6	552	7.3×10^6	557
0-30	4.5×10^6	649	5.6×10^6	761	6.8×10^6	649	1.1×10^7	761
30-60	3.8×10^6	680	4.8×10^6	1163	8.7×10^6	680	5.6×10^6	1163
60-90	1.9×10^6	347	4.5×10^6	115	3.6×10^6	347	1.1×10^7	115
	<i>Polar Cap O⁺</i>				<i>Polar Cap H⁺</i>			
-30-0	4.3×10^5	417	6.7×10^5	560	1.4×10^5	417	4.1×10^5	560
0-30	2.9×10^5	657	2.4×10^5	571	4.4×10^5	657	2.8×10^5	571
30-60	5.6×10^5	596	1.8×10^5	275	5.8×10^5	596	5.5×10^4	275
60-90	4.7×10^5	228	2.9×10^5	124	3.5×10^5	228	5.6×10^5	124

表 1.1: FAST 衛星によって観測された、サブストームに伴って夜側オーロラ帯や極冠域から流出する O^+ 、 H^+ イオンのフェーズと規模ごとの流出フラックスを示している [Wilson et al., 2004]。一番左側がサブストームの 30 分ごとに分類したフェーズを示している。左側は O^+ の流出フラックスで、右側が H^+ の流出フラックスを示している。上段は、夜側オーロラ帯、下段は極冠域からの流出を示している。Group1 が規模の大きいサブストーム、Group2 は規模の小さいサブストームを示している。Number は観測イベント数を示している。

第 2 章 観測機器および使用するデータ

本研究では、極域電離圏で発生するイオン上昇流とオーロラサブストームとの関係を調べる為に、以下に挙げる複数の観測機器による同時観測データを使用した。

- EISCAT レーダー (沿磁力線イオン上昇流の同定のため)
- IMAGE 衛星 WIC データ (オーロラサブストームの時間・空間変動の情報を得るため)
- IMAGE 地上磁場チェーン (サブストームの規模を知るため)
- AE 指数 Quick Look データ (サブストームの規模を知るため)

この章では、これらの観測機器の特性と利点について述べる。

2.1 EISCAT レーダー

EISCAT (European Incoherent SCATter) レーダーは、EISCAT 科学協会 (イギリス、ドイツ、フランス、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド及び日本が加盟) によって運営されている非干渉散乱 (Incoherent Scatter: IS) レーダーシステムである。EISCAT レーダーシステムは、UHF (Ultra High Frequency) レーダーシステム、VHF (Very High Frequency) レーダーシステム、ESR (EISCAT Svalbard Rader) の 3 つのレーダーシステムから構成されている。それぞれのレーダーの位置を図 2.1 に示す。また、これら 3 つのレーダーシステムについて順に述べる。

UHF レーダーは、スカンジナビア半島北部に設置されており、送信周波数 931 MHz で、口径 32 m のパラボラ型アンテナ 3 機によって構成されている。送受信機はノルウェーのトロムソ (地理緯度 69.59°N, 地理経度 19.22°E, 磁気緯度 67.11°N, 磁気経度 129.17°E) にあり、その他に受信機が、スウェーデンのキルナ (地理緯度 67.86°N, 地理経度 20.44°E, 磁気緯度 65.35°N, 磁気経度 115.46°E) とフィンランドのソダンキラ (地理緯度 67.36°N, 地理経度 26.63°E, 磁気緯度 63.92°N, 磁気経度 119.99°E) に設置されている。世界で唯一の 3 局方式の IS レーダーである。このレーダーの大きな特徴は、トロムソから送信した電波の散乱波を 3 地点で同時受信する事で、3 次元速度ベクトルの導出や、磁場に直交方

向の電場ベクトルを精度良く導出する事が出来る事である。

VHF レーダーは、送信周波数 224 MHz で 30 m × 40 m のパラボリックシリンダー型アンテナ 4 枚から構成されている。送受信機は、トロムソに設置されており、アンテナを電氣的に 2 方向に向けて観測する事が出来る。このレーダーは UHF レーダーに対し高高度または低高度の観測をする事が出来るという特徴がある。

ESR は、スバルバール諸島のロングイヤビン (地理緯度 78.15°N, 地理経度 16.03°E, 磁気緯度 74.72°N, 磁気経度 129.17°E) に設置されており、送信周波数は 500 MHz、口径 42 m の沿磁力線固定式と 32 m の可動式のパラボラ型アンテナである。このレーダーは高緯度に設置してある為、極冠域や太陽風のプラズマ粒子が直接地球に降りこむカusp領域を観測する事が出来るという特徴がある。本研究では、緯度の異なるトロムソ UHF レーダーと ESR42 m アンテナの 2 つのレーダーを用いる事で、オーロラサブストームの発達過程におけるイオン上昇流の時間発展や緯度による特徴の違いを知る事が可能である。

2.1.1 EISCAT レーダーから得られる物理量

IS レーダーである EISCAT レーダーは、電離圏内の自由電子によるトムソン散乱を利用している。プラズマ中では荷電粒子が動いて電場を遮蔽するデバイ遮蔽という現象が起きる。その遮蔽が有効になる長さをデバイ長と言い、電子が自由電子として振る舞える範囲はデバイ長以内である。電離圏におけるデバイ長は、電子密度 $n_e \sim 10^{11} \text{m}^{-3}$ 、電子温度 $T_e \sim 10^3 \text{K}$ として

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \sim 6.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

(k_B : ボルツマン定数、 ϵ_0 : 真空の誘電率、 e : 電荷素量) となる。EISCAT レーダーで用いている送信波長は電離圏における電子のデバイ長 λ_D よりも長い。この為、実際の IS レーダーでは、電子による散乱波ではなく、イオンに捕獲された電子の散乱波を受信する事になる。また、ドップラーシフトにより、散乱波の周波数は送信波の周波数からずれる事から、観測した速度はレーダーの視線方向のイオン速度を示している。

受信スペクトルの模式図を図 2.2 に示した。図の様にイオンの熱運動によってスペクトル線は広がり、イオンのバルクな運動により中心周波数がシフトする。この様な受信したスペクトルを基に、イオン組成を仮定する事により、電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の 4 つの物理量を直接求める事が可能

である。受信強度から電子密度、イオンラインの幅からイオン温度、イオンラインの凹みからイオン温度と電子温度の比を求める事が出来る。さらに、EISCAT レーダーの物理量と中性大気モデル、地球磁場モデルを組み合わせる事によって、電離圏電場、中性風速度、電流、電気伝導度などを間接的に求める事が可能である。

本研究では、直接得られる4つの物理量を基にイオン上昇流の特徴を調べた。まず1章で述べたように、イオン上昇流に効果的にエネルギーを与える事が出来るソフトな粒子 (< 500 eV) の降りこみや、磁気圏から電離圏への熱の流入の指標としては、高度 250 km 付近の電子密度増加や高高度 (600 km) 付近の電子温度上昇を用いている。また、イオン上昇流発生の原因となる摩擦加熱については、高度 600 km のイオン温度の上昇を指標として用いている。

2.1.2 観測モード

EISCAT レーダーの観測は年間約 2500 時間行われている。その半分の観測時間は各国共通の実験である CP (Common Program) に割り当てられる。残りの半分の観測時間は、各国の研究者による独自の実験である SP (Special Program) に使われる。CP には CP-1 から CP-7 まで7種類のモードが存在する。本研究では、沿磁力線方向にビームを固定した観測である CP-1 モードとビームを4方向へ向ける観測である CP-2 モードを使用した。トロムソ UHF レーダーの CP-2 モードは6分間の周期でビームを4方向に向けて観測している。ESR の CP-2 モードは1999年までは可動式の 32 m アンテナのみを用いて、トロムソ UHF レーダーと同様に4方向を観測していた。2000年以降は、沿磁力線方向に固定式の 42 m アンテナと 32 m アンテナが1分おきに交互に観測を行い、1周期は6分である。CP-2 モードでは沿磁力線方向のデータのみを使用した。3章でイベント抽出をした結果、本研究で用いた CP-2 モードは ESR のみである。EISCAT レーダーは高度約 90 – 1000 km の範囲を観測する事が出来る。高度分解能は、E 領域で約 3 km、F 領域で約 22 km とそれぞれの高度におけるスケールハイトの約半分に設定されている。スケールハイトは $H = kT/mg$ で定義され、大気の厚さを示している。 k はボルツマン定数、 T は温度、 m は大気分子質量を示している。1.2 節で示した様に組成や温度が高度ごとに変化する為、スケールハイトも高度ごとに変化する。その為、EISCAT レーダーではスケールハイトの約半分の高度分解能で観測をしている。

2.2 IMAGE 衛星

IMAGE (Imager for Magnetopause – to – Aurora Global Exploration) 衛星は、地球磁気圏の撮像専用とした初めての衛星として 2000 年 3 月 25 日に打ち上げられた。軌道周期が 14.2 時間、近地点が高度 1,000 km、遠地点が高度 45,600 km の楕円軌道衛星である。また IMAGE 衛星は 1 年に約 40 度の割合で遠地点の緯度に変化し、始めの 2.5 年間は北半球を観測していた。本研究ではこの期間の EISCAT レーダーとの同時観測サブストームイベントについて調べた。搭載機器の一つである FUV (Far Ultra – Violet imager) は、3 つの撮影波長の異なるカメラ (WIC・SI・GEO) で構成されており、衛星のスピン周期 2 分ごとに 5 – 10 秒オーロラを観測し、50 km の空間分解能で観測している。IMAGE 衛星 FUV は、遠紫外線波長で極域全体のオーロラを時間・空間分解能良く撮像する事が出来るという特徴があり、サブストームの時間・空間変化を知る事が可能である。本研究で用いた WIC (Wideband Imaging Camera) は、140 – 180 nm を使った撮像である。図 2.3 に IMAGE 衛星 WIC 画像の例 (2001 年 9 月 25 日) を示す。発光強度はカウント数で示されている。カウント数が 23 の時、明るさを示す 100 Rayleigh に変換する事ができる [Mende et al., 2000]。表 2.1 に IMAGE 衛星 WIC の概要を示す。

2.3 IMAGE 磁場チェーン

IMAGE (Internationally Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) 磁場チェーンは、図 2.4 に示す様にエストニア、フィンランド、ドイツ、ノルウェー、ポーランド、ロシア、スウェーデンに設置してある 29 の地磁気計によって構成されている。オーロラエレクトロジェットや 2 次元電流システムを研究する事が目的で設置されており、地理緯度 58 – 79 度の幅に渡るエレクトロジェットの研究に適しているという特徴がある。また、オーロラ領域の地磁気活動を長期間に渡り、質の高いデータを簡単に得る事が出来るという特徴もある。本研究では IMAGE 磁場チェーンを用いて、EISCAT レーダーが設置してあるロングイヤビンとトロムソのサブストーム発達時の地磁気活動の変動を調べた。さらに、サブストームのフェーズの分類の為に使用した。具体的には、地磁気の南北成分 (H) が擾乱している期間をエクспанションフェーズ、地磁気が元の状態に

戻る期間をリカバリーフェーズと定義している [Rostoker et al., 1980]。図 2.5 に IMAGE 磁場チェーンの例 (2001 年 9 月 25 日) を示す。

2.4 AE 指数

AE (Auroral Electrojet) 指数は、オーロラ活動に伴う地磁気の変化を指数化した物で、サブストーム発達の指標になる [Rostoker et al., 1980]。AE 指数は、北半球のオーロラ帯において経度方向に比較的等間隔に分布した 12 個の磁力計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。また、オーロラ帯を流れるオーロラエレクトロジェット電流の変動を指標化したものである為、サブストームの大きさを知る際に用いられる。本研究では、サブストームの規模を分類する指標の一つとして利用した。図 2.6 に本研究で用いた AE 指数の Quick Look データの例 (2001 年 9 月 25 日) を示している。

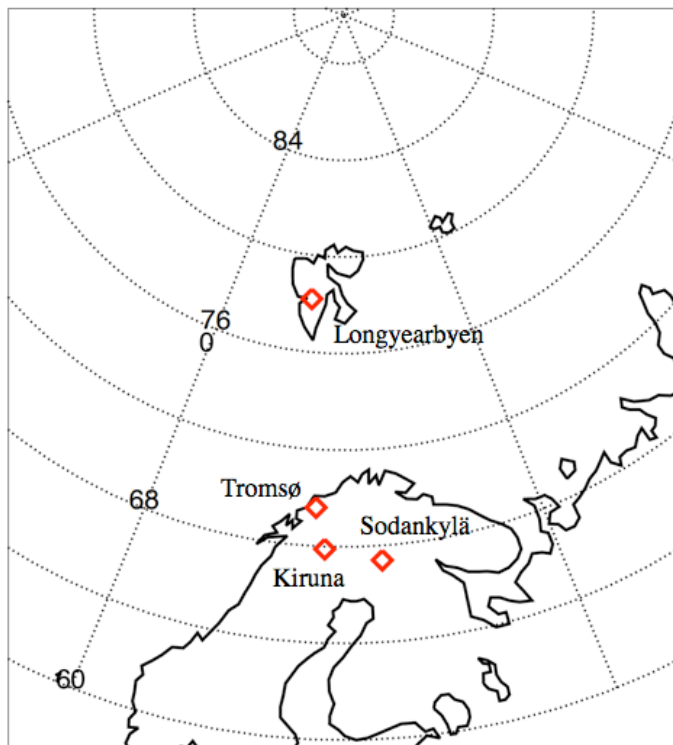


図 2.1: EISCAT レーダーの位置
赤いダイヤ印がレーダーの地点を示している。

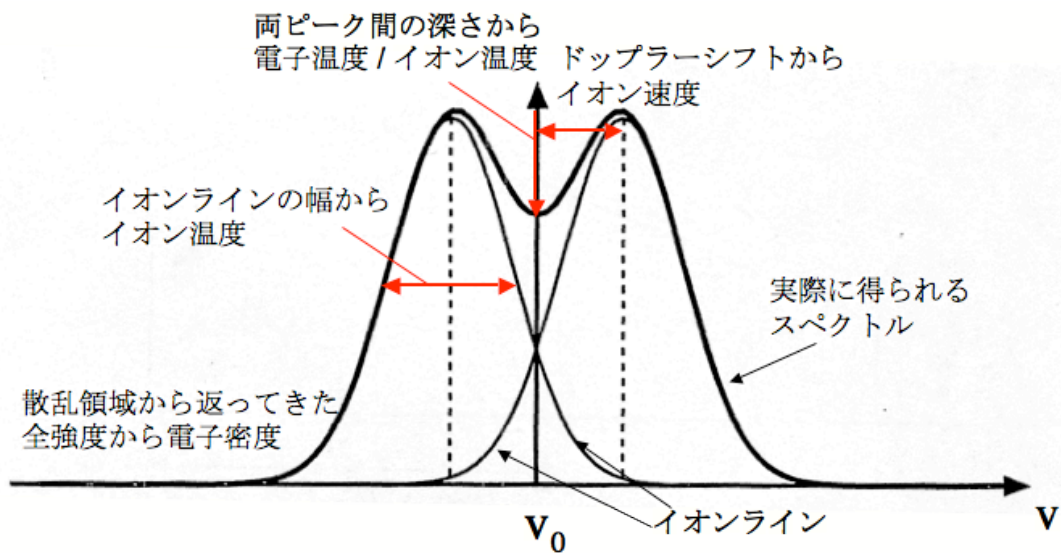


図 2.2: 受信するスペクトルの模式図 [Introduction to incoherent scatter measurements]

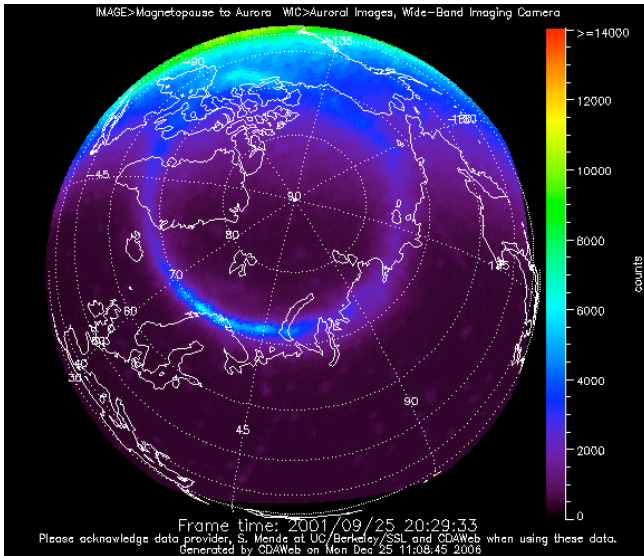


図 2.3: 2001 年 9 月 25 日 2029 UT の IMAGE 衛星 WIC 画像の例。

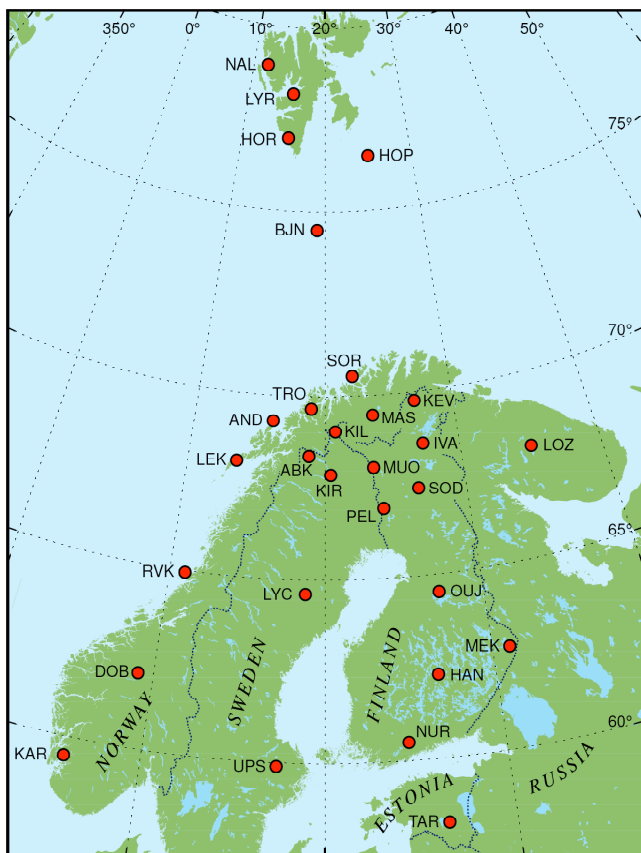
(NASA/GSFC、CDAWeb のページより引用)

北半球を斜め上空から撮像している。スカンジナビア半島やスバルバル諸島がしっかりと捉えられている様子が良くわかる。右端のカラースケールが発光強度を示すカウント数を表している。赤色になるほど発光が強い事を表している。この画像の時刻、夜側のトロムソ上空付近でイニシャルブライティングが起きている様子を示している。

IMAGE 衛星 WIC の概要	
波長	140 – 180 nm
初期遠地点	40 度
遠地点	45,600 km
近地点	1000 km
軌道周期	14.2 時間
視野	17×17 度
時間分解能	2 分
空間分解能	50 km
長さ	直径 2.25 m、高さ 1.52 m
重さ	494 kg
パワー	250 W

表 2.1: IMAGE 衛星の基本的なパラメーター

IMAGE Magnetometer Network



October 2004

図 2.4: IMAGE 磁場チェーンの観測位置。

赤丸は地磁気計が設置されている 29 地点を示している。本研究では LYR、TRO の地磁気データを用いた。

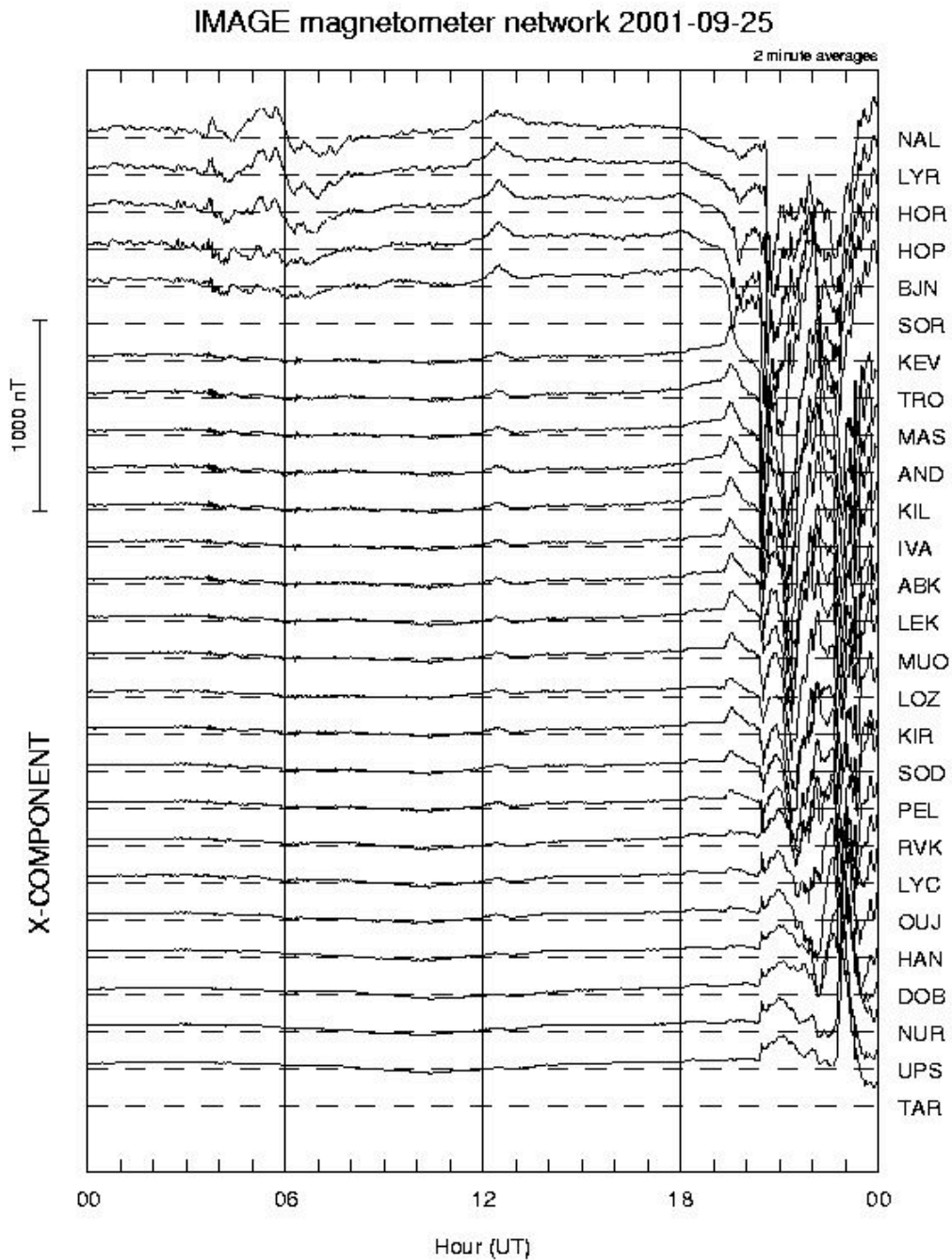


図 2.5: 2001 年 9 月 25 日の IMAGE 磁場チェーン。(IMAGE 磁場チェーンのウェブページより引用)

縦軸は地磁気の南北成分の変動と 29 の地磁気計の位置を示している。TRO がトロムソ、LYR がロングイヤビンを示している。横軸は時間を示している。2030 UT 頃、トロムソやロングイヤビンで地磁気の擾乱が起きている事がわかる。

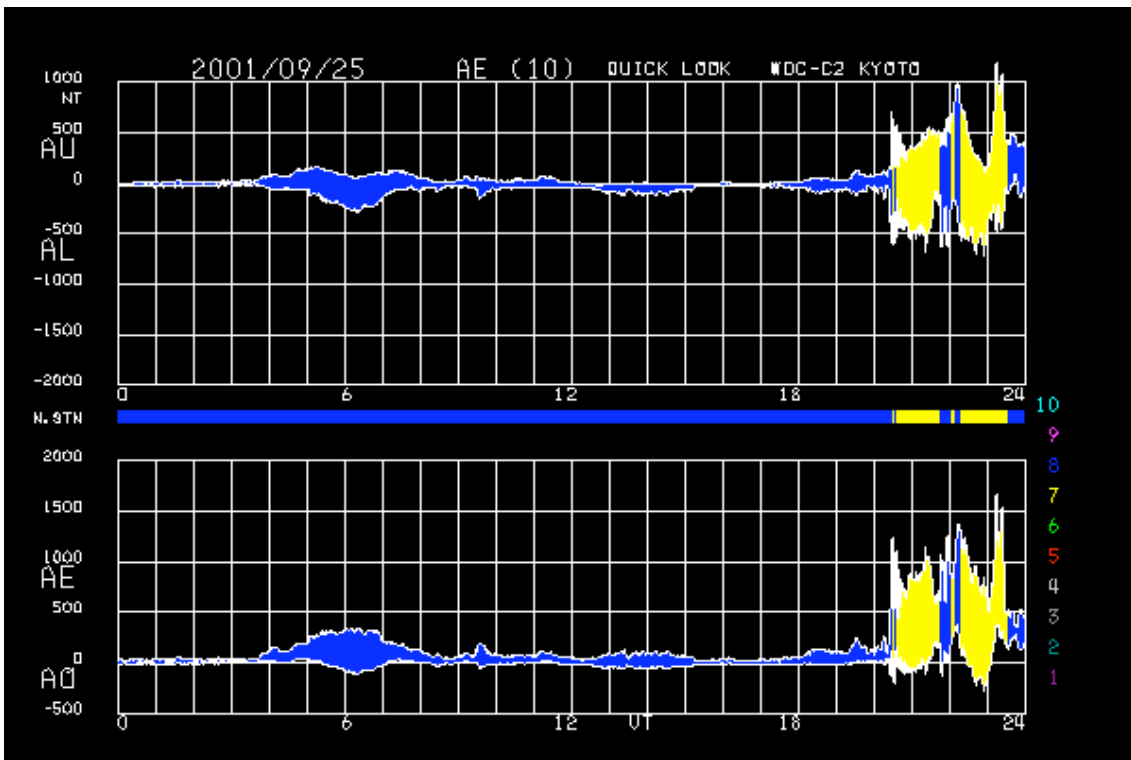


図 2.6: 2001 年 9 月 25 日の AE 指数の Quick Look データ。

(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)

縦軸は磁場強度、横軸は時間を示している。上から AU、AL、AE、AO 指数を示している。12 個の磁力計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 の差で表わしたものが AE 指数である。図 2.5 で地磁気擾乱が見られた 2030 UT 頃、AE 指数は約 1000 nT を示している。

第3章 EISCAT レーダーと IMAGE 衛星の同時観測イベントの抽出およびイオン上昇流の定義

EISCAT レーダーと IMAGE 衛星によるオーロラサブストームの同時観測イベントをできる限り多く抽出するため、本研究では IMAGE 衛星 FUV データを用いて作成された、オーロラサブストームイベントのリストが掲載されている *Frey et al. [2004]* の情報を基に、同時観測イベントを調べた。

3.1 オーロラサブストームリストについて

Frey et al. [2004] には、2000 年 5 月から 2002 年 12 月の約 2.5 年間の IMAGE 衛星 FUV データを用いたオーロラサブストームイベントリストが掲載されている。このサブストームイベントの同定基準は、次の 3 つである。

- (1) オーロラの局所的発光が明確に起きている。
- (2) オーロラオーバルの境界が極方向に拡大し、少なくとも 20 分間広がっている。
- (3) 前のサブストームオンセットから少なくとも 30 分過ぎていた場合は、別のイベントとする。

以上の 3 つを満たしたイベントについて、オーロラサブストームのイニシャルブライティングの情報をリストに記載している。具体的にはイニシャルブライティングについて次の 5 つの情報が得られている。

- (1) 時刻 (年・月・日・UT)
- (2) 用いた FUV (WIC、SI-13) 機器
- (3) 地球中心からの衛星の距離
- (4) イニシャルブライティングの明るさ
- (5) イニシャルブライティングの位置 (x/y ピクセル、地理緯度、地理経度、磁気緯度、磁気経度)

イニシャルブライティングの明るさや、位置情報は、最も明るいピクセルの情報が記載される。これは、イニシャルブライティングが起きている IMAGE 衛星画像の中で、視覚的に決定されたオーロラの中心から近い、最も明るいピクセルと定義されている。

サブストームのバルジの中のどの領域でイオン上昇流が発生していたかを調べる上で、バルジに対するレーダー観測領域の相対的な位置関係を決めることが重要である。例えば、レーダー観測領域がバルジ内部を観測していたのか、

あるいは境界領域を観測していたのかによって、極域電離圏から磁力線をたどって到達する磁気圏領域が変わると考えられる。この領域分けには光学的な手法と粒子観測の2つの方法が用いられてきている。

粒子観測については、DMSP衛星の様な、低高度を飛翔する人工衛星に搭載された粒子測定器を用いた夜側オーロラ帯の境界の同定 [Newell *et al.*, 1996a,b] が挙げられる。例えば、夜側の極冠域境界 (Polar cap boundary: PCB) は、地磁気擾乱時には4倍以上のエネルギーフラックスのシャープな落ち込みによって通常は同定される [Newell *et al.*, 1996a,b]。

Wild *et al.* [2004] は、IMAGE衛星WICデータによって得られるオーロラの極側の境界が、FAST衛星やDMSPデータによる降下粒子の境界がよく一致することを示した。しかしながら、衛星カメラ観測では、センサーの感度による違いと思われるオーロラの分布の違いも存在する。その一例として、IMAGE衛星WICデータ (波長: 140-180 nm) とSI-13データ (波長: 130-140 nm) による同時観測結果から、SI-13データオーロラの分布がWICデータによるオーロラ分布に比べてより極側に位置することが報告されている [Wild *et al.*, 2004]。

そこで、本研究では観測機器の違いによる境界の同定の不確定さをできる限り除去するため、Frey *et al.* [2004]の中でのオーロラサブストームイベントリストに記載されている複数のカメラデータ (WIC、SI-12、SI-13データ) のうち、WICデータのみをオーロラの分布の同定のために用いた。

3.2 EISCAT レーダーと IMAGE 衛星の同時観測イベント抽出

本研究では、3.1 節で示した 2000 年 5 月から 2002 年 12 月の IMAGE 衛星のサブストームリストを用いて、

- ・ IMAGE 衛星 WIC データ
- ・ ESR の CP データ、トロムソ UHF レーダーの CP・SP データ

の同時観測サブストームイベントを調べた。

約 2.5 年間の IMAGE 衛星 WIC と ESR、トロムソ UHF レーダーそれぞれの同時観測イベント数は、以下の通りであった。

- (1) IMAGE 衛星 WIC と ESR との同時観測イベント: 172 イベント
- (2) IMAGE 衛星 WIC とトロムソ UHF レーダーCP データとの同時観測イベント: 7 イベント
- (3) IMAGE 衛星 WIC とトロムソ UHF レーダーSP データとの同時観測イベント: 20 イベント

本研究では、オーロラサブストームとイオン上昇流の関係を調べる為に、夜側オーロラ帯でイニシャルブライティングが起きたイベントを使用した。また同時に、夜側オーロラ帯で見られるバルジ付近をレーダーが観測しているイベントを選んだ。具体的には、IMAGE 衛星と EISCAT レーダー (ESR、トロムソ UHF レーダー) との同時観測サブストームイベントの中から以下の 2 つを満たしたイベントを使用した。

1. イニシャルブライティングの位置が、夜側である 18 - 06 MLT 以内のイベントを選ぶ。
2. IMAGE 衛星の画像から、スカンジナビア半島やスバルバル諸島を捉えており、その付近でサブストームに伴う発光が見られたイベントを選ぶ。

その結果、

- ・ IMAGE 衛星 WIC と ESR との同時観測イベント: 9 イベント
- ・ IMAGE 衛星 WIC とトロムソ UHF レーダーCP データとの同時観測イベント: 1 イベント (この 1 イベントは、ESR とも同時観測しているイベント。)
- ・ IMAGE 衛星 WIC とトロムソ UHF レーダーSP データとの同時観測イベント: 3 イベント

であった。

上記の 13 個のサブストームイベントについて、IMAGE 衛星のサブストームリストを表 3.1 に示す。また、EISCAT レーダーの観測リストを表 3.2 に示す。

3.3 EISCAT レーダーとバルジの相対的な位置関係の分類方法

本研究では、EISCAT レーダーとバルジとの位置関係によって 5 つの領域に分類した。具体的には、バルジの「高緯度側外部 (HO)」、「高緯度側境界 (HB)」、「高緯度側内部 (HI)」、「低緯度側内部 (LI)」、「低緯度側境界 (LB)」の 5 つある。本節ではこの領域分けの定義について述べる。

バルジに対するレーダーの位置を、まず IMAGE 画像から視覚的に確認し、さらに緯度方向の発光強度の分布から判断した。視覚的にバルジと認識できる領域からレーダーの観測地点が緯度方向に約 1 度以上離れている場合を外部、約 0.5 度以上 1 度未満の距離の時を境界、約 0.5 度未満を内部と定義した。なお、バルジに対してレーダーの位置が極側にある場合を高緯度側、バルジに対して赤道側の場合を低緯度側と呼んでいる。さらに、バルジの内部の高緯度側と低緯度側の基準はバルジの緯度方向の広がりを中心から極側を高緯度側内部、赤道側を低緯度側内部と分類した。図 3.1 に上記の方法で定義した 5 つの領域の例を示している。

3.4 サブストームのフェーズの分類方法

抽出した 13 個のサブストームイベントについて、EISCAT レーダーが観測している時のフェーズを調べる為、IMAGE 衛星 FUV 画像と IMAGE 磁場チェーンデータを使用した。IMAGE 衛星 FUV 画像からポールワードエクспанションをして最も高緯度側へ達するまでの期間をエクспанションフェーズ、その後オーロラの発光が弱まり元の状態に戻る期間をリカバリーフェーズと分類した。同時に各イベントの IMAGE 磁場チェーンデータから、2.3 節の様にエクспанションフェーズ、リカバリーフェーズに分類した。

3.5 サブストームの規模の分類方法

サブストームの規模の分類方法として *Wilson et al. [2004]* ではサブストームの継続時間によって分類している。また、サブストームの規模の指標として *AE* 指数が良く用いられる [*Rostoker et al., 1980*] 事から、本研究では、抽出した 13

個のサブストームイベントについて、表 3.3 の示す様に以下の 4 つを指標としてサブストームの規模を調べた。Quick Look の AE 指数、EISCAT レーダーの地点での IMAGE 磁場チェーンの地磁気の変動値、強い発光領域が一番広がった時のバルジの緯度・経度方向の広がり、サブストームの継続時間の 4 つである。サブストームの規模が大きい程、AE 指数やレーダーの地点での地磁気変動も大きくなる。それと同時に、強い発光領域の広がりも大きくなると考えられる。以上 4 つの指標を基に調べた結果、2001 年 9 月 25 日、2001 年 2 月 13 日のイベントはサブストームの規模が大きいと言える。他のイベントに関してはサブストームの規模が小さいと分類した。

3.6 イオン上昇流の定義

Foster et al. [1998] では、イオン速度が 100 m s^{-1} 以上もしくはイオンフラックスが $10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の時にイオン上昇流が起きていたと定義している。本研究では *Foster et al.* [1998] で用いられているイオン速度とフラックスの値に加え、EISCAT レーダーの利点の一つである“イオン速度の高度分布の情報が得られる”という事を利用して、次の様にイオン上昇流を定義した。図 3.2 左図の様にイオン速度が 100 m s^{-1} 以上で高度方向に連続してイオンが上昇しているのと同時に、右図の様に $10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の高度方向に一定のイオンフラックスを伴ってイオンが上昇している時をイオン上昇流が起きていたと定義した。また、図 3.2 に示す様に高度 400 – 500 km 付近からイオンが上昇し始めている。そこで本研究では、イオン上昇流の特徴を明確に知る為に、高度約 600 km のイオン速度などの電離圏パラメーターの分布を 4 章以降のプロットに主に用いた。

年/月/日	IB の時刻 [UT]	IB の MLT	X	Y	Dist. [km]	Count	Geog. [度]	Pos. [度]	Geomag . [度]	Pos. [度]
2000/10/24	2217:18	2142	75	155	42264	5386	64.13	330.39	66.28	60.83
2001/02/06	1957:41	2223	53	33	32145	11782	70.15	31.29	66.24	113.57
2001/02/07	1810:21	2136	193	68	45040	8096	72.22	46.86	67.7	127.46
2001/02/09	1956:02	2243	92	55	38490	5768	72.63	35.29	68.51	118.73
2001/02/11	0102:33	0040	140	55	42475	4475	64.98	343.47	65.05	72.43
2001/02/13	1610:10	2212	198	72	46295	6130	73.5	91.0	68.04	164.91
2001/03/06	1855:51	2249	133	88	45511	16437	70.74	53.91	66.09	132.28
2001/03/06	1944:56	2237	144	89	48595	5270	71.99	34.17	67.93	117.30
2001/09/25	2029:33	2306	81	130	42941	6376	70.11	24.58	66.53	108.32
2001/10/18	1923:11	2157	56	141	51284	2796	70.39	22.84	66.91	107.22
2001/11/06	1654:22	0231	61	61	46735	8482	67.4	145.24	61.25	212.06
2002/02/17	2207:08	2239	60	42	49515	2982	66.07	358.2	64.39	84.82

表 3.1: 抽出した 13 イベントのイニシャルブライティングについての IMAGE 衛星のサブストームリスト。

左から、イベントの年/月/日、イニシャルブライティングの時刻、イニシャルブライティングの MLT、画像の x/y ピクセル、衛星の地球からの距離、明るさを示すカウント数、地理緯度、地理経度、磁気緯度、磁気経度を示している。カウント数が 23 の時、100 Rayleigh として換算する [Mende et al., 2000]。

年/月/日	EISCAT レーダー	レーダーの MLT	開始時刻 [UT]	終了時刻 [UT]	観測モード
2000/10/24	ESR	0117	1000	2330	CP-2
2001/02/06	ESR	2257	0000	2300	CP-2
2001/02/07	ESR	2110	1430	2400	CP-2
2001/02/09	ESR	2256	0100	2400	CP-2
2001/02/11	ESR	0402	0100	2400	CP-2
2001/02/13	ESR	1910	0100	2400	CP-2
2001/03/06	UHF	2125	0800	2330	CP-1
2001/03/06	UHF	2215	0800	2330	CP-1
2001/09/25	ESR	2329	0930	2400	CP-1
	UHF	2259	1500	0000	CP-1
2001/10/18	UHF	2153	1500	2200	CP-1
2001/11/06	ESR	1954	0000	2300	CP-1
2002/02/17	ESR	0107	2100	2400	CP-1

表 3.2: 抽出した 13 イベントの EISCAT レーダーの観測リスト。

左からイベントの年/月/日、EISCAT レーダーの種類 (ESR または トロムソ UHF)、レーダーの位置 (MLT)、観測開始時刻、観測終了時刻、観測モードを示している。

年/月/日	IB の時刻 [UT]	AE 指数 [nT]	レーダ ーの地 点	地磁気 変 動 [nT]	バルジの広がり 経度方向: [度] 緯度方向: [度]	継続 時間 [時間]
2000/10/24	2217:18	300	LYR	180	緯度方向: 5 経度方向: 45	2
2001/02/06	1957:41	500	LYR	200	緯度方向: 5 経度方向: 50	2.5
2001/02/07	1810:21	200	LYR	180	緯度方向: 5 経度方向: 40	2
2001/02/09	1956:02	250	LYR	200	緯度方向: 5 経度方向: 45	2
2001/02/11	0102:33	250	LYR	20	緯度方向: 5 経度方向: 45	1.5
2001/02/13	1610:10	1000	LYR	400 以 上	緯度方向: 15 経度方向: 100	2.5
2001/03/06	1855:51	200	TRO	50	緯度方向: 10 経度方向: 50	1
2001/03/06	1944:56	200	TRO	100	緯度方向: 10 経度方向: 50	2
2001/09/25	2029:33	1000	TRO	400 以 上	緯度方向: 15 経度方向: 100	2.5
			LYR	400 以 上		
2001/10/18	1923:11	100	TRO	30	緯度方向: 15 経度方向: 100	1
2001/11/06	1654:22	600	LYR	200	緯度方向: 5 経度方向: 60	2
2002/02/17	2207:08		LYR	230	緯度方向: 5 経度方向: 30	2

表 3.3: 抽出した 13 イベントのサブストームの規模の分類。

左からイベント日時、イニシャルブライトニングの時刻、Quick Look の AE 指数、EISCAT レーダーの位置、レーダーの地点での IMAGE 磁場チェーンによる地磁気変動、強い発光領域が一番広がった時のバルジのおおよその広がり、おおよそのサブストームの継続時間を示している。

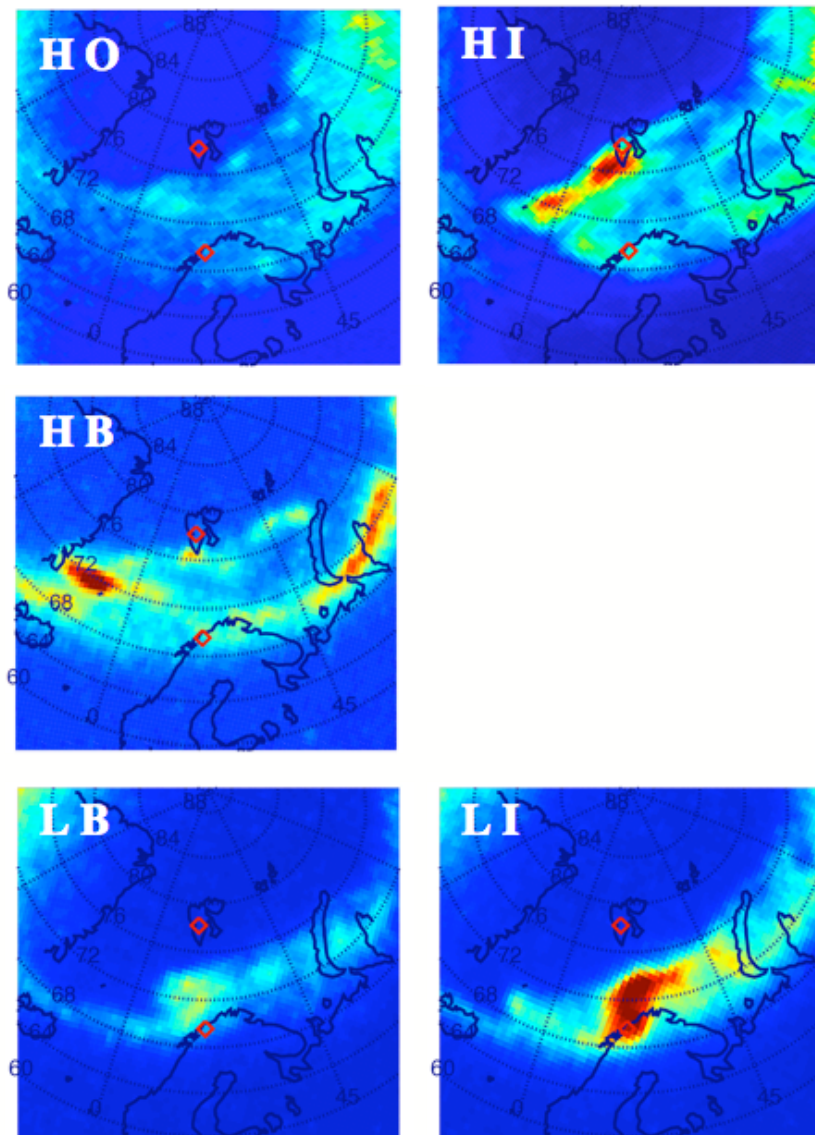


図 3.1: バルジとレーダーの相対的な位置によって分類された 5 つの領域の例。左上から順に、高緯度側外部 (HO、上側の赤いダイヤの位置)、高緯度側境界 (HB、上側の赤いダイヤの位置)、高緯度側内部 (HI、上側の赤いダイヤの位置)、低緯度側境界 (LB、下側の赤いダイヤの位置)、低緯度側内部 (LI、下側の赤いダイヤの位置)を示している。

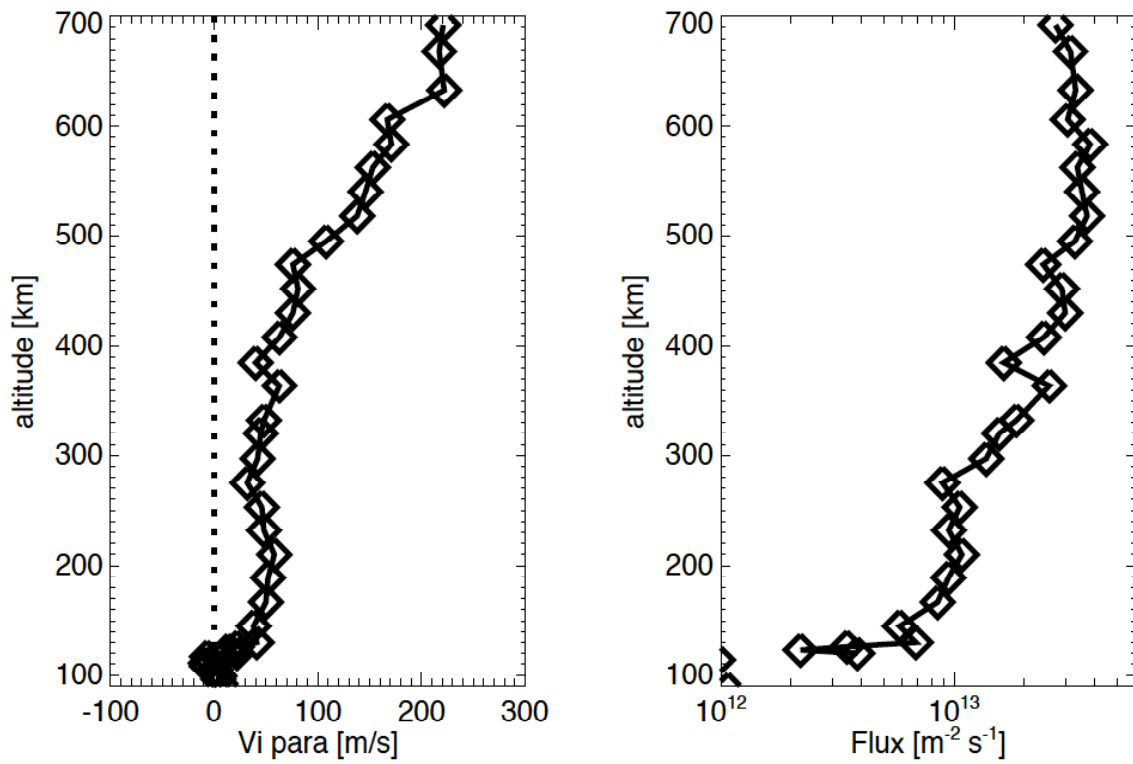


図 3.2: EISCAT レーダー (トロンソ UHF レーダー) から得られたイオン速度 (左図)、イオンフラックス (右図) の高度分布の観測例を示している。

第4章 2001年9月25日 2000 – 2230 UT のサブストームイベントの解析結果および考察

3章で抽出した EISCAT レーダーと IMAGE 衛星の同時観測サブストームイベントの 13 イベント中で、ESR とトロムソ UHF レーダーが同時に稼働しているイベントが 2001 年 9 月 25 日 2000 – 2230 UT に唯一存在していた。本章では、このサブストームイベントを用いて、両レーダーとバルジとの相対的な位置関係や、サブストームのフェーズの違いによって、イオン上昇流にどのような特徴の違いが見られるかを示す。このイベント以外の 11 イベントについては、Appendix に結果の概略をすべて掲載した。

4.1 イベントの概要

図 4.1 の IMAGE 衛星 WIC 画像で見られる様に、2001 年 9 月 25 日 2029 UT にトロムソ上空 (UT + 2.5 hours = 2259 MLT) 付近でイニシャルブライティング (2306 MLT、地理緯度 70.11 度) が起きた。その後、ポールワードエクспанションでバルジが広がっていき、イニシャルブライティングから約 10 分後の 2039 UT から ESR がバルジの高緯度側内部を観測し始めた。その後、2118 UT 頃まで ESR はバルジの高緯度側内部、トロムソ UHF レーダーはバルジの低緯度側内部をそれぞれ観測していた。バルジが低緯度側へと移動して行く過程で、2120 – 2137 UT 頃まで ESR はバルジの高緯度側境界を観測しており、2139 – 2153 UT 頃まではバルジの高緯度側外部を観測していた。2155 – 2201 UT の期間、バルジの中を ESR が観測していたが、2203 UT 以降 ESR はバルジの高緯度側外部を観測していた。一方、トロムソ UHF レーダーは、バルジが低緯度側へと移動して行く事により、2128 UT 頃からバルジの高緯度側内部を観測し始め、2145 – 2201 UT までバルジの高緯度側境界を観測していた。2203 UT 以降はトロムソ UHF レーダーでもバルジの高緯度側外部を観測していた。2230 UT 以降は、衛星の視野からレーダーが外れていた為、2029 – 2230 UT までの期間をサブストームイベントとして用いる。また、イニシャルブライティングの前の 30 分間をグロースフェーズ、バルジが最も極側に広がるまでの 2029 – 2102 UT までの期間をエクспанションフェーズ、2104 – 2230 UT までの期間をリカバリーフェーズと分類した。このイベントは、AE 指数が 100 nT、レーダーの地点での発光強度は 100 – 400 Rayleigh、イニシャルブライティングが起きてから約 2 時間継続

した規模の大きいサブストームイベントであった。この期間、緯度の異なるトロムソ UHF レーダーと ESR の両レーダーが観測しており、オーロラサブストームに伴うイオン上昇流の時間・空間的な特徴を調べる事ができる非常に良いイベントだと言える。

4.2 トロムソ UHF レーダーと IMAGE 衛星の同時観測結果

図 4.2 は、上図から IMAGE 衛星データによる発光強度、トロムソ UHF レーダーによる高度 600 km の電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度、イオンフラックスの 1930 – 2248 UT までの時間変化を示している。1.2 節で述べた様に、E 領域以上の高度域で、電子密度とイオン密度がほぼ同じと仮定できる為、イオンフラックスは電子密度とイオン速度の積を用いている。また、図 4.3 は、トロムソ UHF レーダーから得られた、高度 80 から 650 km までの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示している。正のイオン速度の値は、沿磁力線上向きを示している。一番下の段にレーダーが観測している領域を各色で示している。図 4.1 と図 4.2、図 4.3 を比較する事で、バルジとレーダーとの相対的な位置関係によるイオン上昇流の特徴の違いを詳細に調べる事ができる。4.1 節で示した通り、サブストームの期間中、トロムソ UHF レーダーの観測していた領域が時間的に変化していた。そのため、観測していた 4 つの領域ごとに、バルジの発光強度とイオン上昇流の特徴を調べた結果をそれぞれ以下に述べる。

- (1) バルジの低緯度側内部を観測していた期間 (2029 – 2126 UT) では、イニシャルブライティングで発光強度の増大が見られてから約 4 分の時間差を持ってイオン速度増加や、電子温度上昇が見られた。また、レーダーがこの領域を観測している期間での発光強度は約 200 – 300 Rayleigh で、平均イオン速度は約 80 m s^{-1} 、平均イオンフラックスは $2.4 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった。この時イオン温度は 200 K 上昇し、電子温度は 800 K 上昇していた。
- (2) バルジの高緯度側内部を観測していた期間 (2128 – 2143 UT) では、発光強度は約 100 - 200 Rayleigh で、平均イオン速度は 120 m s^{-1} 、平均イオンフラックスは $5.0 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった。この時イオン温度は 350 K 上昇し、電子温度は 540 K 上昇していた。
- (3) バルジの高緯度側境界を観測していた期間 (2145 – 2201 UT) では、発

光強度は約 100 Rayleigh で、平均イオン速度は4つの区間では最も大きく 260 m s^{-1} 、イオンフラックスの平均値も最も大きく $8.8 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。この時イオン温度は 600 K 上昇し、電子温度は 2200 K 上昇していた。

- (4) バルジの高緯度側外部を観測していた期間 (2203 – 2230 UT) では、発光強度は約 70 - 100 Rayleigh で、平均イオン速度は約 100 m s^{-1} 、平均イオンフラックスは $2.7 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。この時イオン温度は 410 K 上昇し、電子温度は 1300 K 上昇していた。

また、上記のバルジの低緯度側内部を観測していた 2038 UT 付近と、バルジの高緯度側内部を観測していた 2136 UT 付近、バルジの高緯度側境界を観測していた 2150 UT 付近、バルジの高緯度側外部を観測していた 2210 UT では、図 4.4 に示す様にイオン速度の高度分布に異なる特徴が見られた。図 4.4 の 2150 UT 付近まではイオン速度が高高度になるにつれて増加している。一方 2210 UT 付近では、高度 400 km 付近で 100 m s^{-1} を超えるが、高度 400 km 以上ではイオン速度が減少する分布になっていった。

4.3 ESR と IMAGE 衛星の同時観測結果

図 4.5 は、図 4.2 と同様に上図から IMAGE 衛星データによる発光強度、ESR による高度 600 km の電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度、イオンフラックスの 1930 – 2248 UT までの時間変化を示している。また、図 4.6 は、ESR から得られた、高度 80 から 650 km までの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示している。4.2 節と同様に、図 4.1 と図 4.5、図 4.6 を比較する事で、バルジとレーダーとの相対的な位置関係によるイオン上昇流の特徴の違いを詳細に調べる事ができる。サブストームの期間中、ESR が観測していた領域が時間的に変化していた。そこで、観測していた 3 つの領域ごとにバルジの発光強度とイオン上昇流の特徴を調べた結果、領域ごとで異なる特徴が見られた為、3 つに分類し結果を述べる。

- (1) バルジの高緯度側内部を観測していた期間 (2039 – 2118 UT、2155 – 2201 UT) では、発光強度は約 150 - 400 Rayleigh で、イオン速度は $100\text{-}400 \text{ m s}^{-1}$ で変化しており、平均すると 120 m s^{-1} である。イオンフラックスの平均値は約 $2.5 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。この時イオン温度は 370 K 上昇し、電子温度は 540 K 上昇していた。この領域を観測していた期間、図 4.7 に見られる様に発光強度が強くなると、イオン速度やイオンフラックスは大きくなるという特徴が見られた。

- (2) バルジの高緯度側境界を観測していた期間 (2120 – 2137 UT) では、発光強度は約 100 Rayleigh で、平均イオン速度は 100 m s^{-1} 、平均イオンフラックスは $2.2 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった。この時イオン温度は 300 K 上昇し、電子温度は 1400 K 上昇していた。
- (3) バルジの高緯度側外部を観測していた期間 (2139 – 2153 UT、2203 – 2230 UT) では、発光強度は約 50 - 100 Rayleigh で、平均イオン速度は 54 m s^{-1} 、平均イオンフラックスは $1.2 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった。この時イオン温度は 400 K 上昇し、電子温度は 1600 K 上昇していた。

4.4 サブストームのフェーズとイオン上昇流との関係

サブストームのフェーズとイオン上昇流との関係を調べる為に、領域ごとにイオン速度とイオンフラックスをグロースフェーズ、エキスパンションフェーズ、リカバリーフェーズの 3 つのフェーズに分類し比較した。イオン速度とサブストームのフェーズとの関係を図 4.8 と図 4.9 に、イオンフラックスとサブストームのフェーズとの関係を図 4.10 と図 4.11 に示している。グロースフェーズにはイオン速度が 0 m s^{-1} 、イオンフラックスが $0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ に近い値であった。エキスパンションフェーズになると、グロースフェーズと比べてすべての領域においてイオン速度もイオンフラックスも大きく増加する傾向が見て取れる。レーダーがバルジの内部を観測している時と、バルジの境界や外部を観測している時でフェーズによる特徴の違いが見られた。レーダーがバルジの高緯度側内部を観測している時、平均イオン速度はエキスパンションフェーズでは 160 m s^{-1} であったのに対し、リカバリーフェーズでは 90 m s^{-1} と、速度が小さくなっている。平均イオンフラックスについては、エキスパンションフェーズで $3.5 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、リカバリーフェーズで $3.0 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であり、それほど変化は見られなかった。また、低緯度側内部では平均イオン速度はエキスパンションフェーズで 100 m s^{-1} であったのに対し、リカバリーフェーズでは 60 m s^{-1} と速度小さくなっている。平均イオンフラックスはエキスパンションフェーズで $2.5 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、リカバリーフェーズで $2.3 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ で同程度であった。レーダーがリカバリーフェーズの時にバルジの境界を観測している時は、 $300 - 400 \text{ m s}^{-1}$ のバルジの内部に比べて速いイオン速度や、 $1.0 \times 10^{14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の平均イオンフラックスを伴って発生しているイオン上昇流が見られた。レーダーがバルジの高緯度側外部を観測していた時、エキスパンションフェーズでは平均イオン速度は 0 m s^{-1} であったのに対し、リカバリーフェーズでは平均イオン速度は 100 m s^{-1} であった。

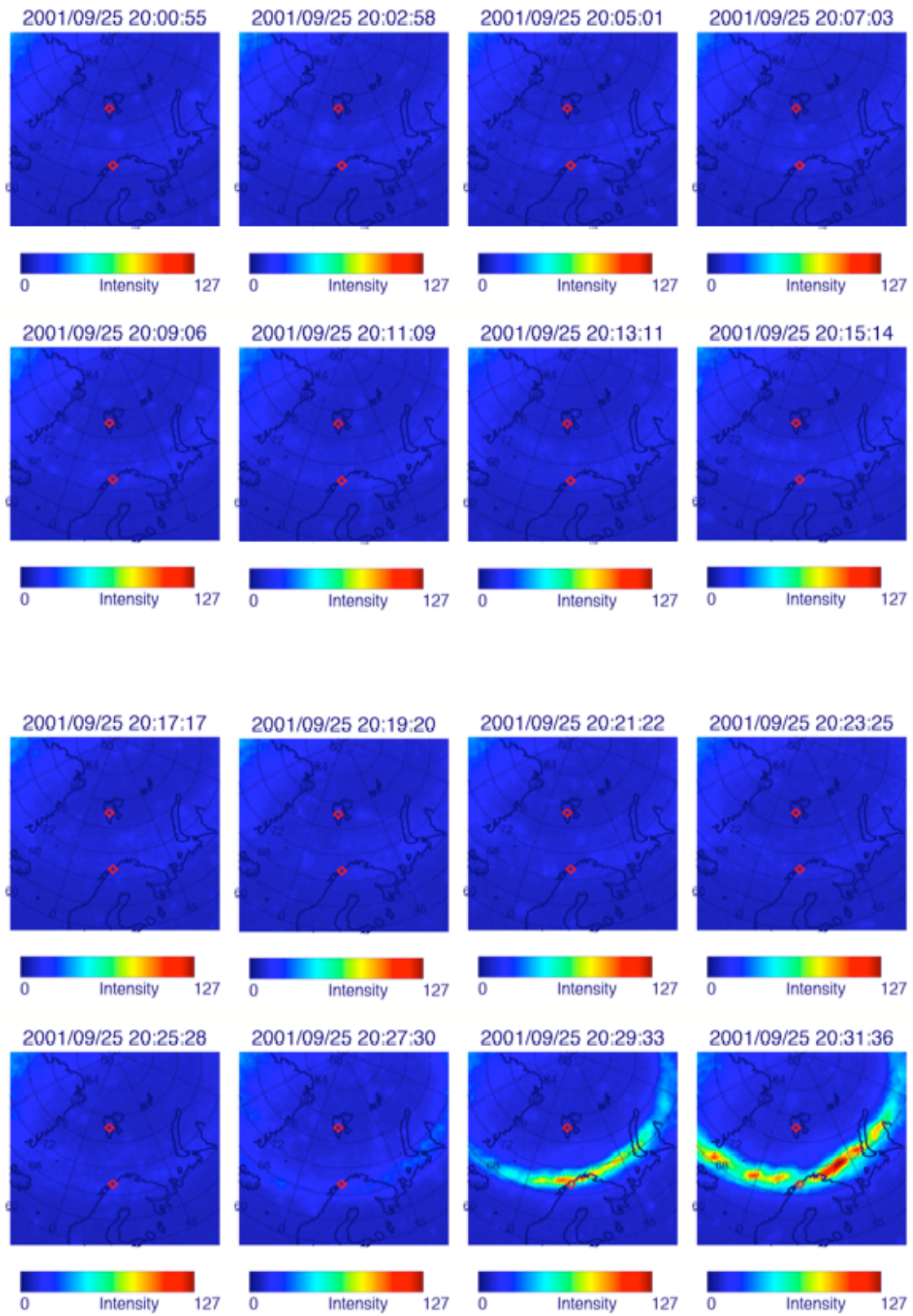


図 4.1: 図のキャプションについては 4 ページ後に記載。

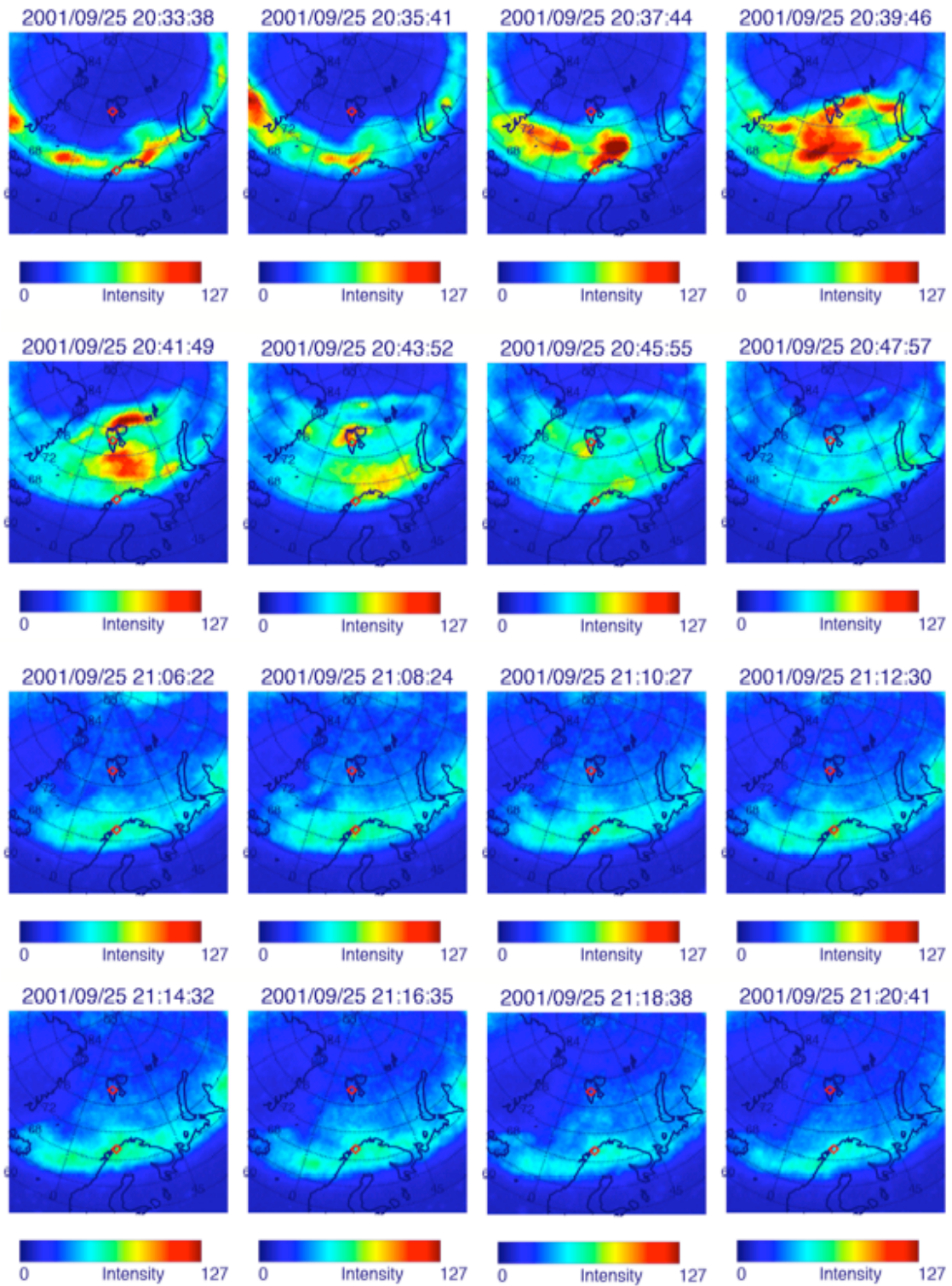


図 4.1: (続き)

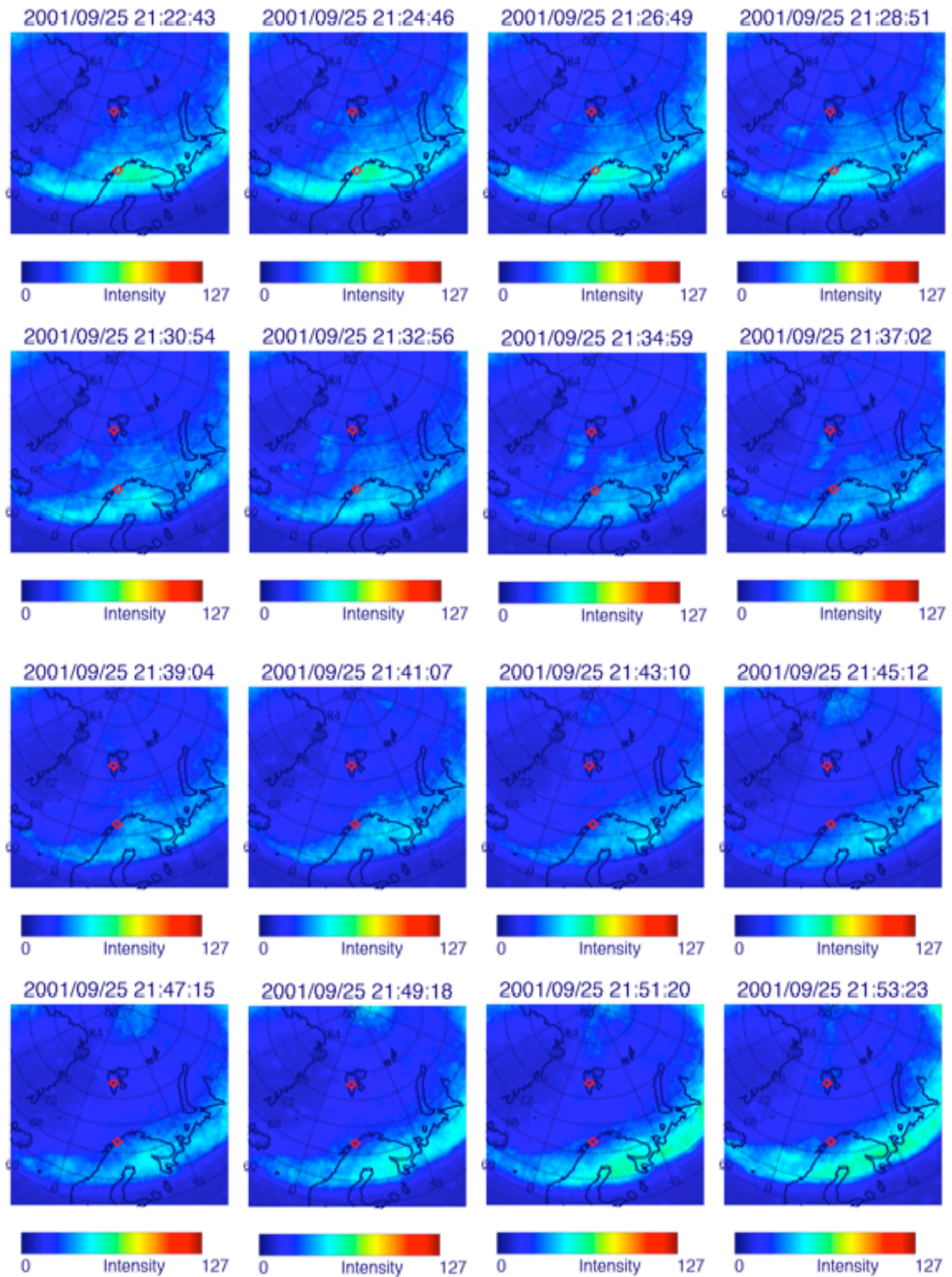


図 4.1: (続き)

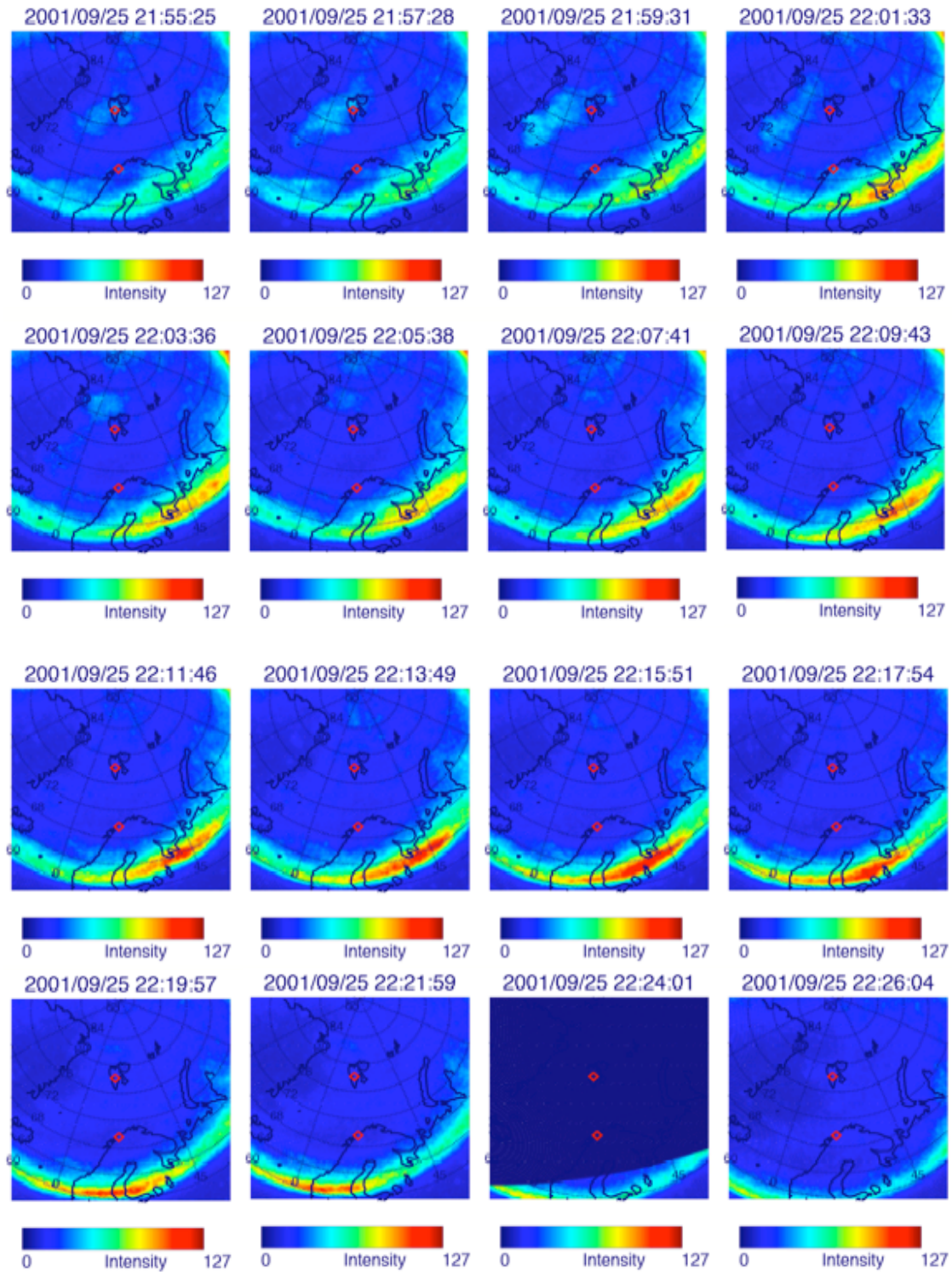


図 4.1: (続き)

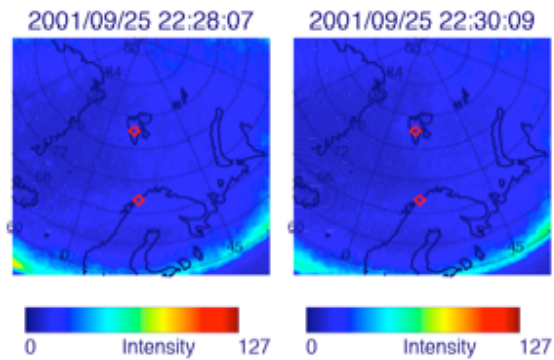


図 4.1: 2001 年 9 月 25 日 2000 – 2230 UT の IMAGE 衛星 WIC 画像。この時間以降は衛星の視野がレーダーを捉えていないのに加え、データ自体が無い時間もある為、本研究では使用しなかった。各画像の上側に日付と時刻を示している。画像は約 2 分ごとに得られている。色は相対的な発光強度を示しており、暖色になる程発光が強い事を示している。図中の赤色のダイヤ印については、高緯度側（図の上側）がロングイヤビン、低緯度側（図の下側）がトロムソの位置を示している。

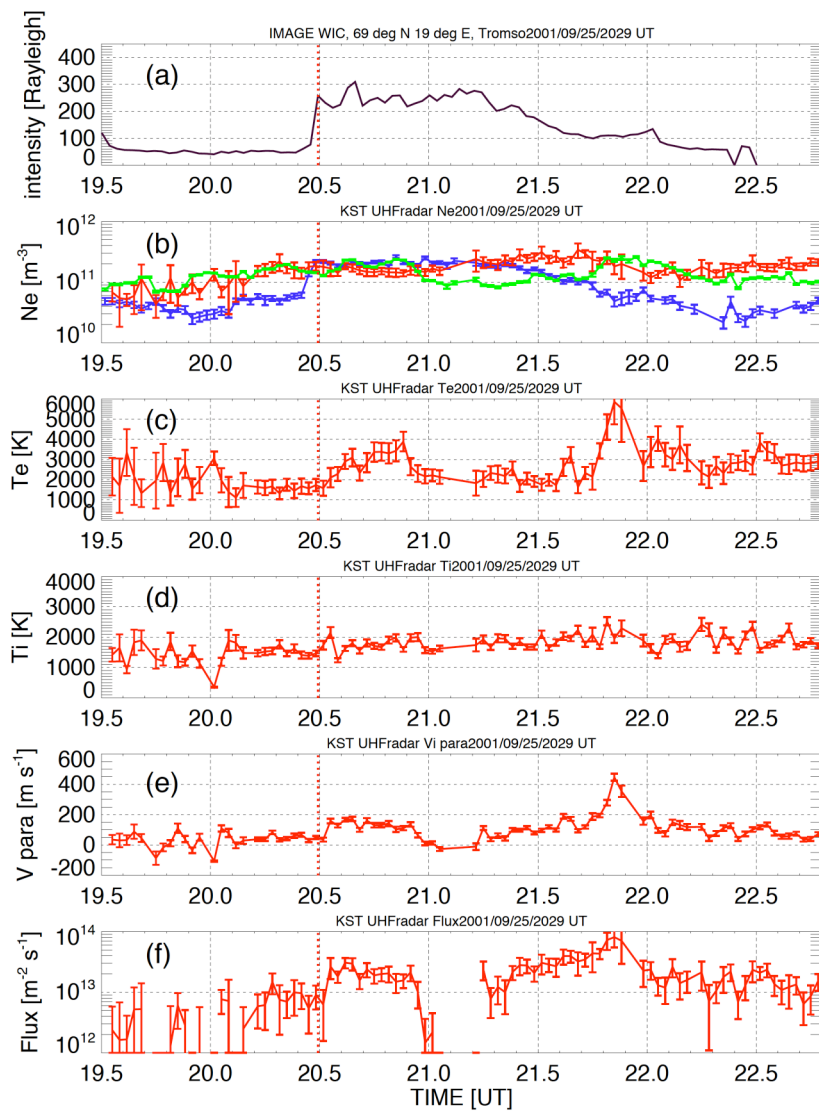


図 4.2: 2001 年 9 月 25 日 1930 – 2248 UT のサブストームイベントのトロムソでの結果。 IMAGE 衛星とトロムソ UHF レーダーの同時観測データの時間変化を示している。上から順に、IMAGE 衛星によるトロムソ上空の発光強度、トロムソ UHF レーダーによる電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。イオンフラックスは、電子密度と沿磁力線イオン速度との積から求めた。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度 600 km、緑色は高度 250 km、青線は高度 110 km の値を示している。縦に引かれた赤色の点線は、イニシャルブライティングの時刻を表す。

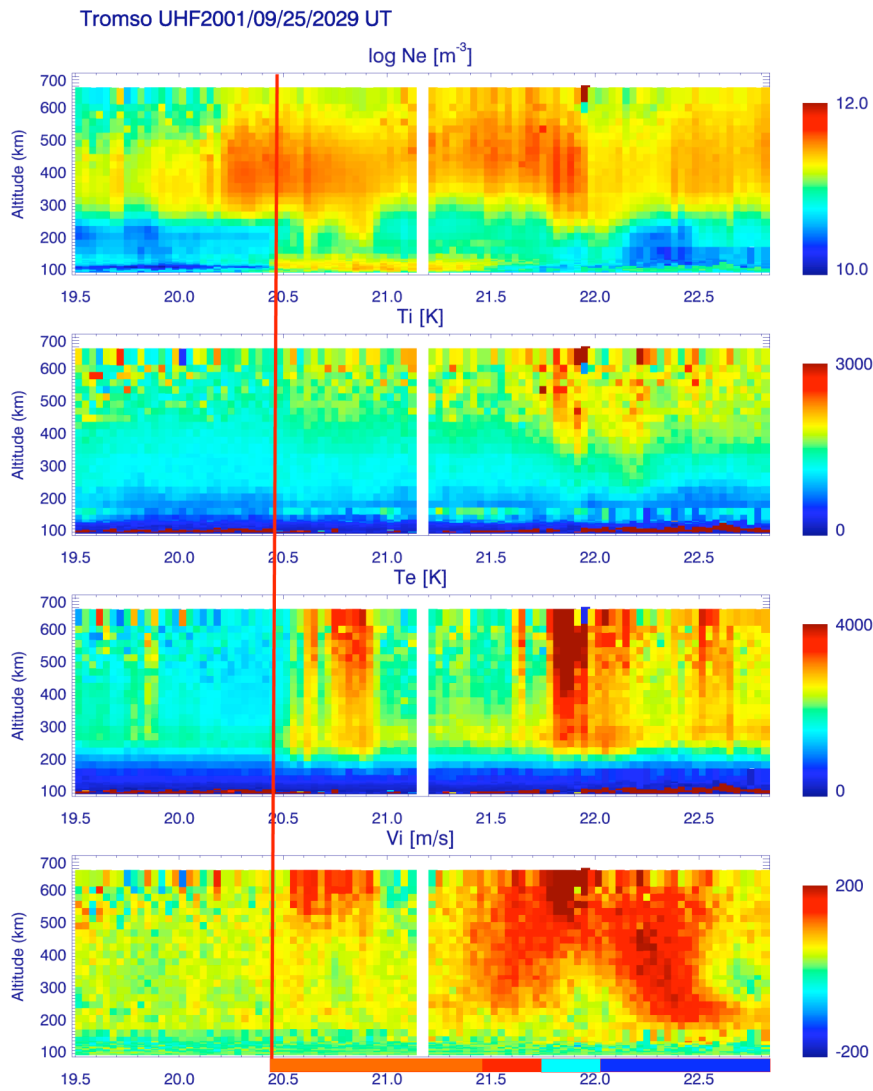
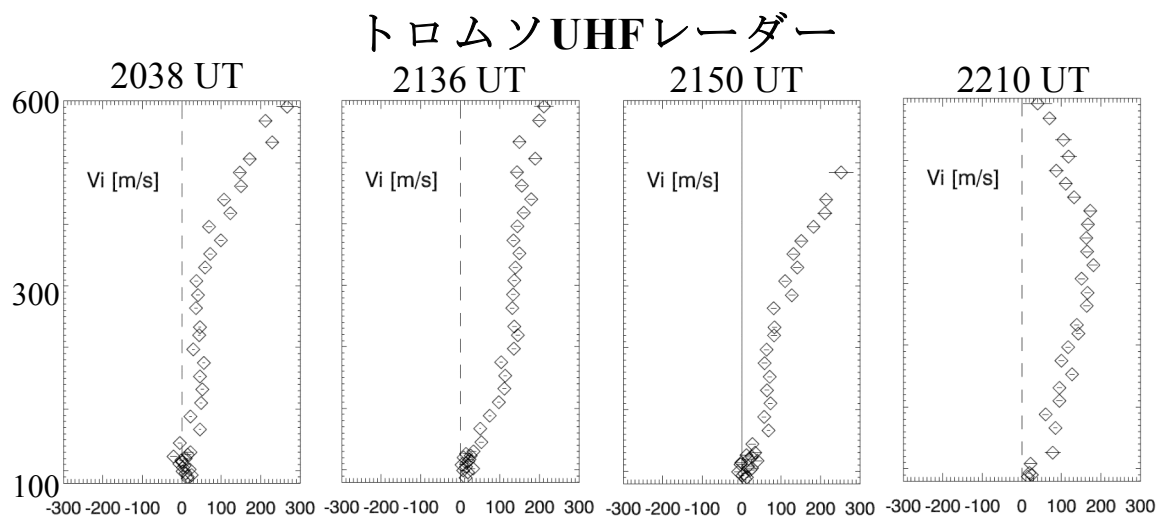


図 4.3: 2001 年 9 月 25 日 1930 – 2248 UT のサブストームイベントのトロムソでの結果。 上図からトロムソ UHF レーダーによる電子密度、イオン温度、電子温度、沿磁力線イオン速度を示している。縦軸は高度、横軸は時間、色はそれぞれの物理量の大きさを示しており、暖色が大きい値を示している。赤線はインシヤルブライティングの時刻を示している。一番下段の色分けは、バルジとレーダーの相対的な位置関係を示している。オレンジ色は低緯度側内部、赤色は高緯度側内部、水色は高緯度側境界、青色は高緯度側外部を示している。



ESR

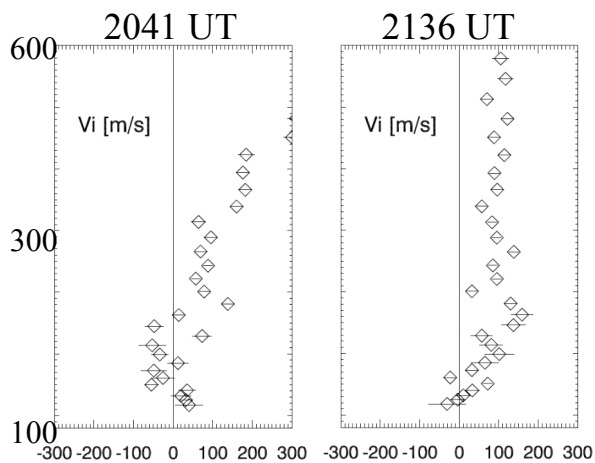


図 4.4: 2001 年 9 月 25 日に得られたトロムソ UHF レーダー (上側のパネル) と ESR (下側のパネル) のイオン速度の高度分布の例。横軸はイオン速度 [m s^{-1}]、縦軸は高度 [km]、図の上部に時刻を示している。

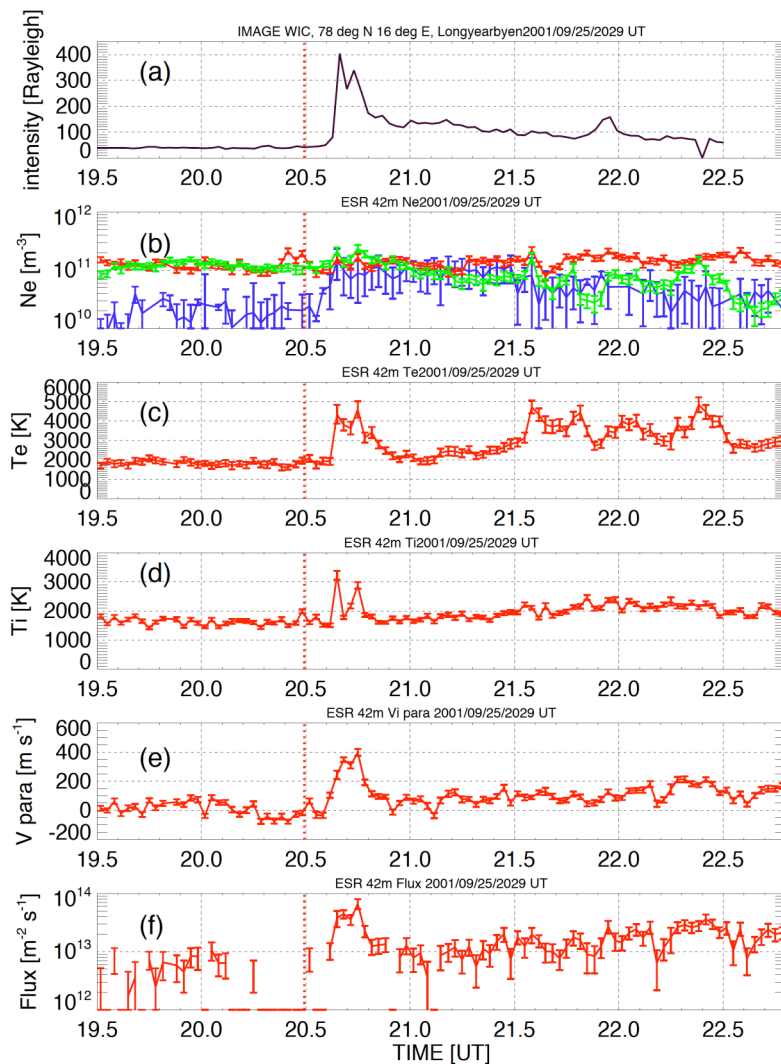


図 4.5: 2001 年 9 月 25 日 1930 – 2248 UT のサブストームイベントのロングイヤビンでの結果。 IMAGE 衛星と ESR の同時観測データの時間変化を示している。上図から IMAGE 衛星によるロングイヤビン上空の発光強度、ESR による電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。イオンフラックスは、電子密度と沿磁力線イオン速度との積から求めた。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度 600 km、緑色は高度 250 km、青線は高度 120 km の値を示している。赤の点線はイニシャルブライティングの時刻を示している。

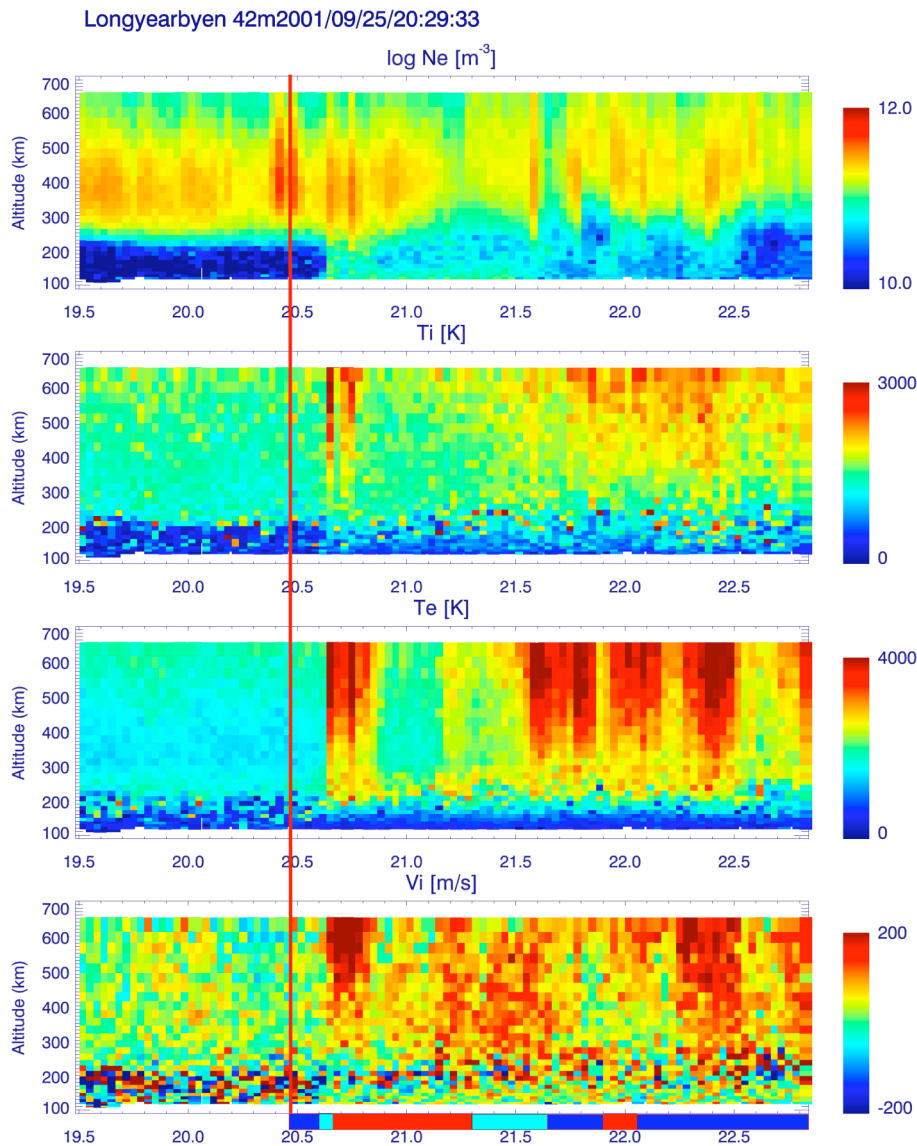


図 4.6: 2001 年 9 月 25 日 1930 – 2248 UT のサブストームイベントのロングイヤビ
ンでの結果。 上図から ESR による電子密度、イオン温度、電子温度、沿磁力
線イオン速度を示している。縦軸は高度、横軸は時間、色はそれぞれの物理量
の大きさを示しており、暖色が大きい値を示している。赤線はインシャルブラ
イトニングの時刻を示している。一番下段の色分けは、バルジとレーダーの相
対的な位置関係を示している。赤色は高緯度側内部、水色は高緯度側境界、青
色は高緯度側外部を示している。

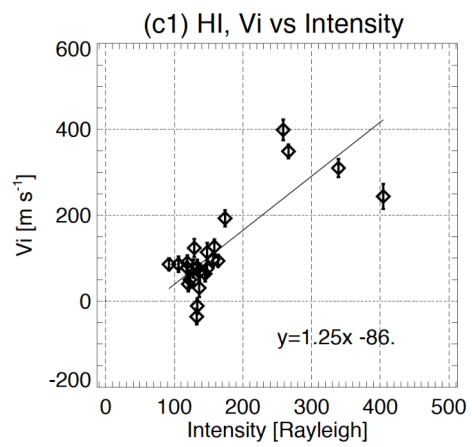


図 4.7: ESR がバルジの高緯度側内部を観測していた時の発光強度とイオン速度の対応関係を示している。横軸は発光強度、縦軸はイオン速度を示している。

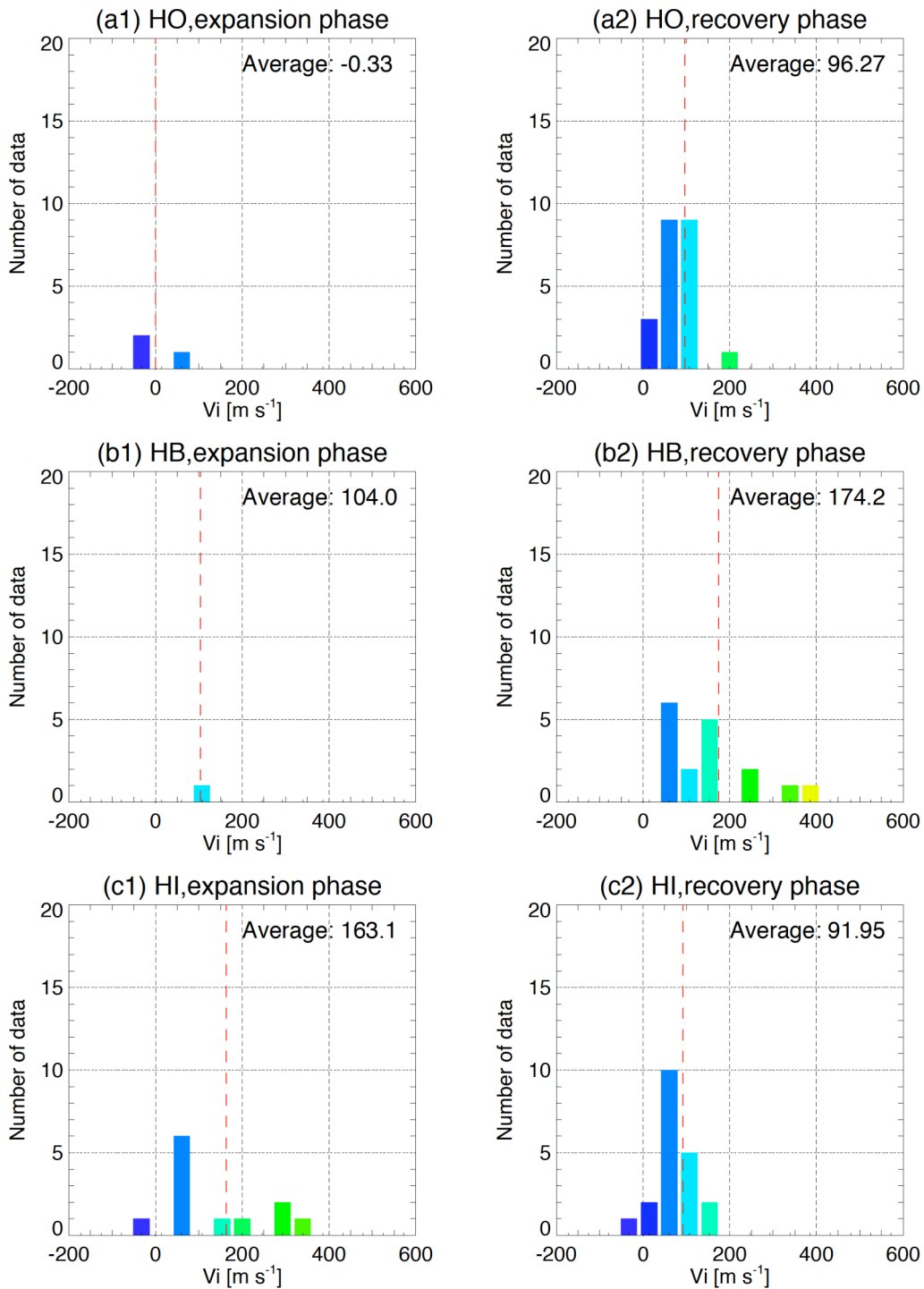


図 4.8: 各領域でのサブストームのフェーズとイオン速度との関係を示している。この結果は、トロムソ UHF レーダーと ESR の結果を含めて示している。横軸はイオン速度、縦軸はデータ数を示している。赤色の点線が各図の右上に示している平均イオン速度を示している。(a) 高緯度側外部、(b) 高緯度側境界、(c) 高緯度側内部を示している。

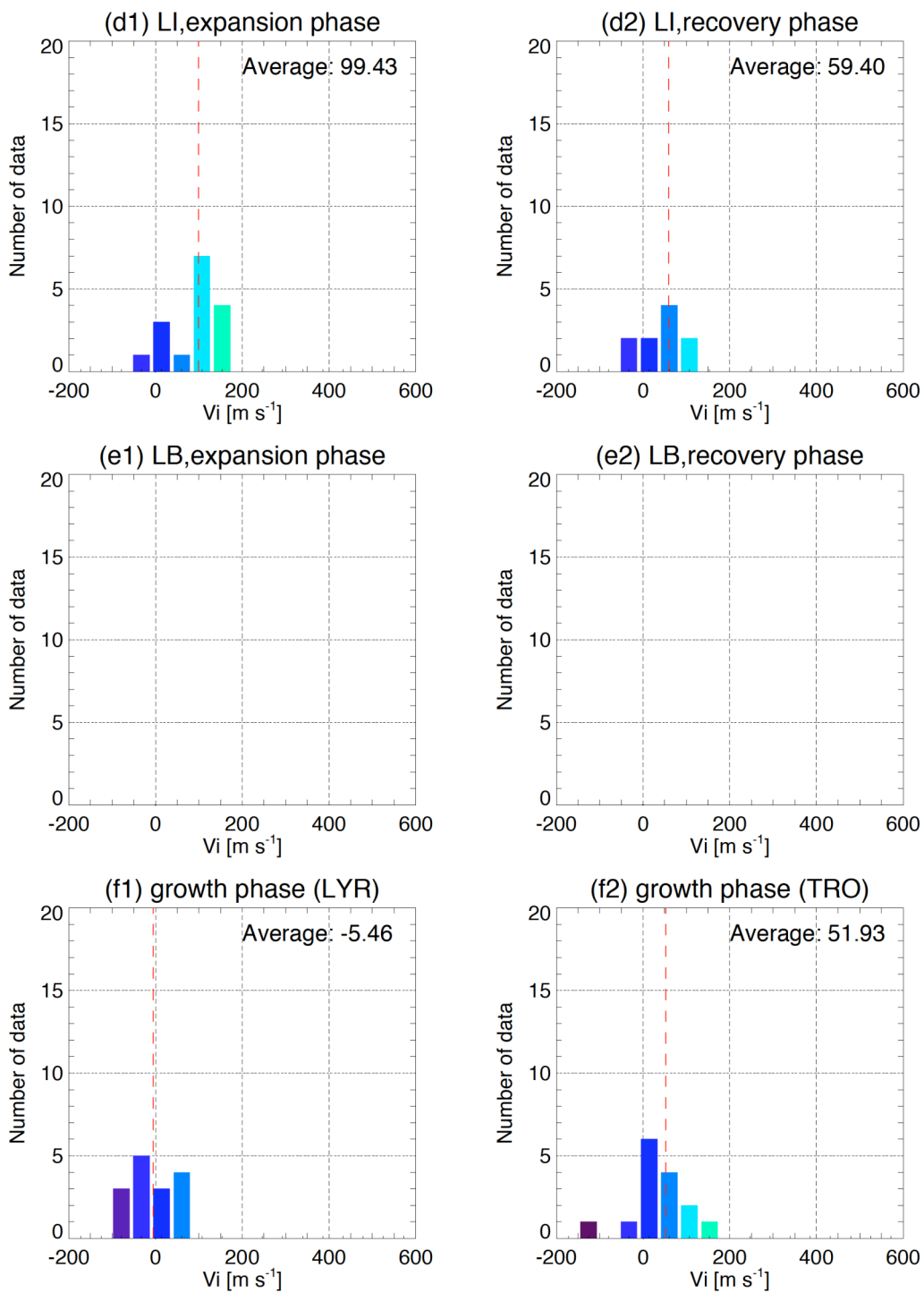


図 4.9: 図 4.8 と同様の形式で示している。(d) 低緯度側内部、(e) 低緯度側境界を示している。このイベントで低緯度側境界を観測していなかった。

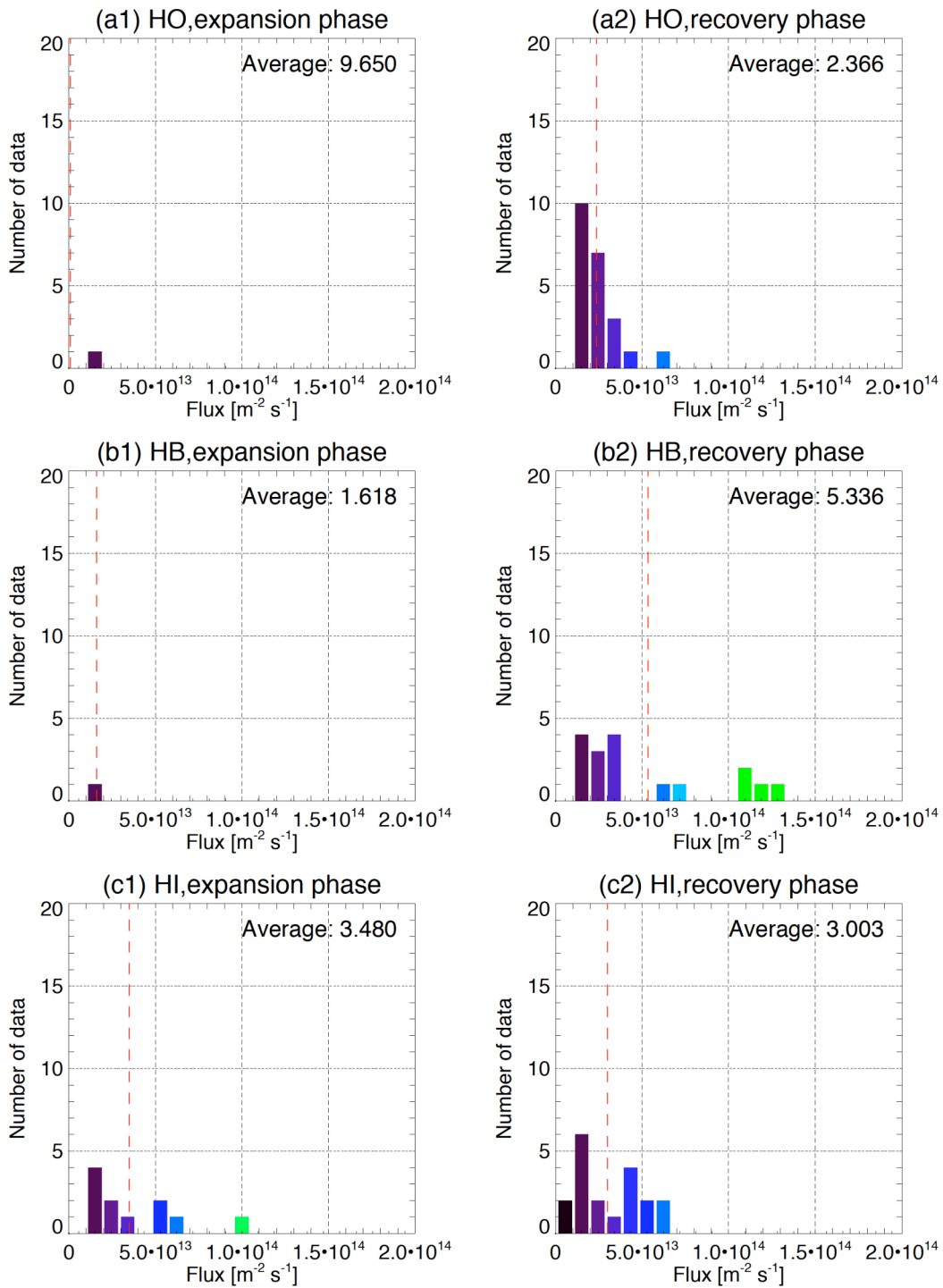


図 4.10: 各領域でのサブストームのフェーズとイオンフラックスとの関係を示している。この結果は、トロンソ UHF レーダーと ESR の結果を含めて示している。横軸はイオン速度、縦軸はデータ数を示している。赤色の点線が各図の右上に示している平均イオンフラックスを示している。(a) 高緯度側外部、(b) 高緯度側境界、(c) 高緯度側内部を示している。

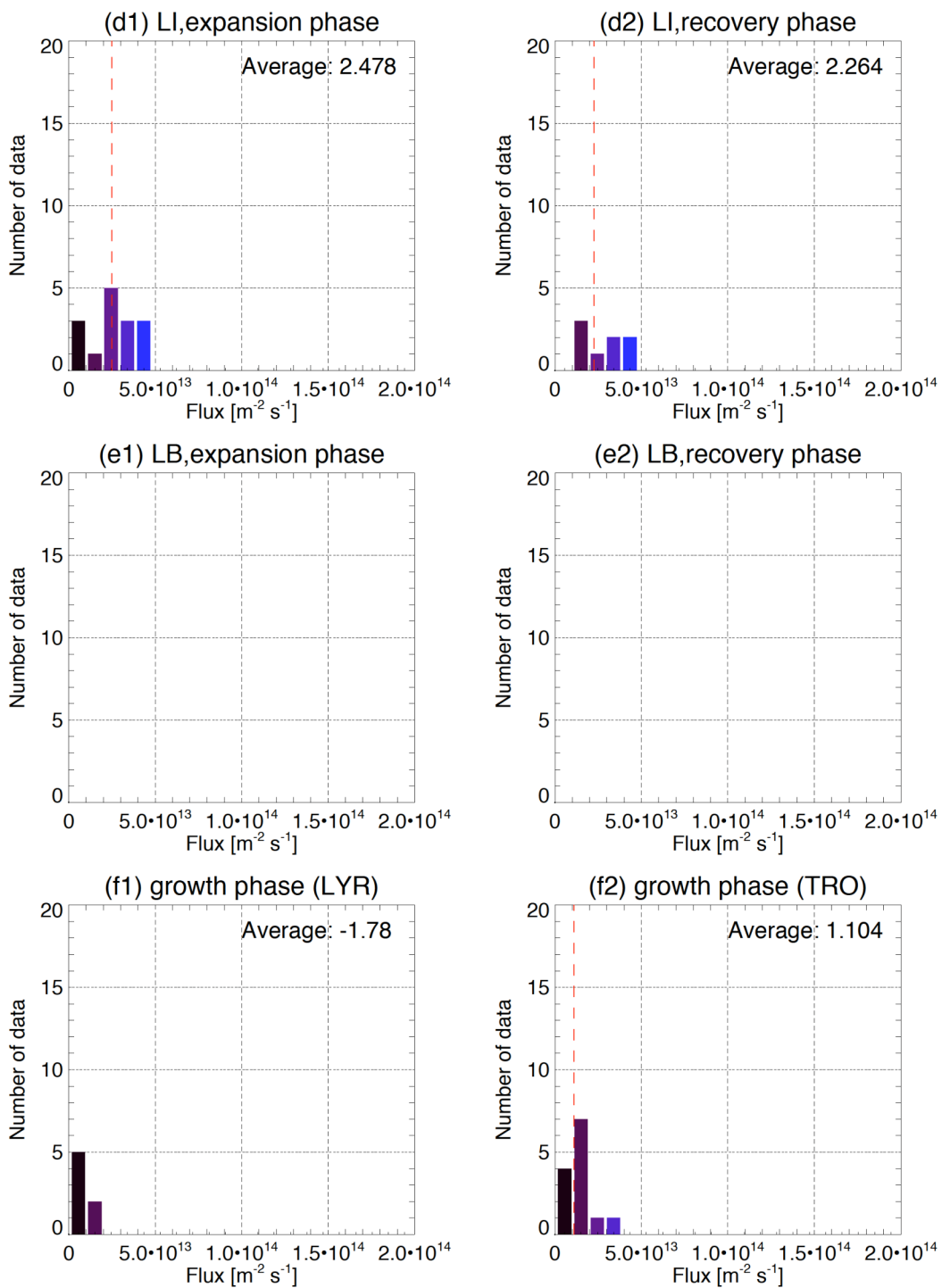


図 4.11: 図 4.10 と同様の形式で示している。(d) 低緯度側内部、(e) 低緯度側境界を示している。このイベントで低緯度側境界を観測していなかった。

第5章 複数のオーロラサブストームイベントを用いたイオン上昇流の解析結果および考察

本論文では、2000年5月から2002年12月までのEISCATレーダーとIMAGE衛星WICデータを用いて得られた、13例のサブストーム同時観測イベントから、オーロラサブストームに伴って発生するイオン上昇流の特徴を調べた。本章では、サブストームのバルジに対する領域（バルジの内外部や境界など）やフェーズの違い、サブストームの規模により、イオン速度やイオンフラックス、加熱や加速にどのような特徴の違いがみられるかを詳細に調べた結果を、順に説明する。

5.1 領域ごとにおけるイオン上昇流の特徴について

図5.1及び図5.2は、オーロラサブストームのバルジに対する、レーダー観測領域の相対的な位置関係を基に区分した、各領域における高度600 kmのイオン速度の分布を表す。各パネルは上から順に、(a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、(c) バルジ内部の高緯度側、(d) バルジ内部の低緯度側、(e) バルジの低緯度側境界領域における観測結果である。左側のプロット(a1~e1)はオーロラの発光強度とイオン速度との関係を表す。規模の大きいサブストームイベント(表3.4参照)については赤色で表示している。右側の図(a2~e2)は、それぞれの観測領域におけるイオン速度の分布を表す。縦に引かれた赤いダッシュ線は、各領域のイオン速度の平均値であり、その値は各パネルの右上に書かれている。また、サンプル数、偏差、平均イオン速度が 100 m s^{-1} 以上である割合が各パネルの右上に書かれている。

まず、バルジの高緯度側外部(図5.1 a1)では、発光強度が 100 Rayleigh 以下の部分にデータサンプルが集中する。イオン速度は 0 m s^{-1} を中心に分布し、その平均速度は、約 40 m s^{-1} であった。また、割合としては小さいけれども、イオン速度が 200 m s^{-1} を超えるケースも幾つか存在していた。バルジの高緯度側境界までレーダーの観測領域が近づいたとき(図5.1 b1)もオーロラ発光強度は依然として弱く、規模の小さいサブストームの場合には 100 Rayleigh 以下であり、規模の大きいサブストームの場合には 150 Rayleigh 以下である。しかしながら、そのときのイオン速度の分布(図5.1 b2)は、バルジの高緯度側外部の場合と明確に異なっていた。高緯度側境界領域でのイオン速度の平均値は、約 180 m s^{-1} であり、データの分布の中心も 200 m s^{-1} に存在する。バルジ内部の高緯度側領

域をレーダーが観測していたとき（図 5.1 c2）も、同様に沿磁力線イオン速度の分布は上向きにシフトしている。但し、その平均値（約 120 m s^{-1} ）は、高緯度側境界領域でのイオン速度の平均値に比べて若干小さく、分布のピークは $50 - 100 \text{ m s}^{-1}$ の部分に位置していた。このバルジ内部の高緯度側領域では、オーロラ発光強度とイオン速度との間に、よい相関関係が見られた（図 5.1 c1）。発光強度が低い（ $< 150 \text{ Rayleigh}$ ）場合には、イオン速度が $50 - 100 \text{ m s}^{-1}$ を中心に分布するのに対し、発光強度が高く（ $> 150 \text{ Rayleigh}$ ）なると、イオン速度が 200 m s^{-1} を超えるようになる。この発光強度とイオン速度との良い相関関係は、サブストームの規模の大きいとき（赤いダイヤのサンプル）ほど、より明確に見られた。図 5.1 c1 のパネルの右下に書かれている式は最小 2 乗フィッティングをしたときの、イオン速度と発光強度の関係を表し、その式で表せる直線を黒色で引いている。

一方、同じバルジ内部でも、低緯度側領域ではイオン速度分布の特徴が異なっていた。イオン速度の分布の平均値は約 80 m s^{-1} であり、分布のピークは $0 - 100 \text{ m s}^{-1}$ の部分に位置していた（図 5.2 d2）。オーロラ発光強度との対応（図 5.2 d1）については、発光強度が強くなる場合においてもイオン上昇流の速度は $0 - 200 \text{ m s}^{-1}$ の部分に分布し、発光強度が低い場合と違いが見られなかった。このことは 4 章のケーススタディーで述べたように、規模の大きいサブストームを 2 つの EISCAT レーダーで同時観測をした場合においても、高緯度側内部と低緯度側内部のイオン速度分布の同様な特徴の違いが、明確に得られていた。より低緯度のバルジの（低緯度側）境界（図 5.2 e1, e2）では、イオン速度分布の平均値（約 60 m s^{-1} ）がさらに小さくなる。速度分布も $0 - 100 \text{ m s}^{-1}$ の部分に集中しイオン上昇流が起きていなかった。

図 5.3 及び 5.4 は、オーロラルサブストームのバルジ内外の各領域における沿磁力線上向きイオンフラックスの変化を表す。図 5.1 及び図 5.2 のイオン速度の各パネルと同じように、上から順に、(a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、(c) バルジ内部の高緯度側、(d) バルジ内部の低緯度側、(e) バルジの低緯度側境界領域の、それぞれのイオンフラックス分布を表す。左側のプロット (a1~e1) はオーロラの発光強度とイオンフラックスとの関係を表し、右上の数値はすべてのフラックス（上向きも下向きも）を含んだ平均値を表す。また、サンプル数、偏差、平均イオンフラックスが $10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上である割合が各パネルの右上に書かれている。図 5.3 a2 より、バルジの高緯度側外部でのフラックスは、そのほとんどのサンプルが $10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ を下回っていた。平均フラックスは $3.7 \times 10^{12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ である。

バルジの高緯度側境界（図 5.3 b1）では、 $10^{14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ を上回るイオンフラックスが約 1 割見られた。上向きフラックスの平均値も全領域の中で一番大きく、

$3.5 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった (図 5.3 b2)。バルジ内部の高緯度側領域 (図 5.3 c1) では、イオン速度の分布と同様に、発光強度と良い相関関係が見られた。発光強度が 200 Rayleigh を超えるときのイオンフラックスは $4 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上であった。より低緯度側のバルジ内部領域 (図 5.4 d1) では、平均上向きフラックスが高緯度側に比べて小さくなり ($1.4 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)、かつサンプルの分布に散らばりが見られた。サンプルがこのプロットに含まれる同時観測イベントは 3 例 (具体的には、2001 年 9 月 25 日、3 月 8 日、10 月 18 日のトロムソ UHF データ) あり、イオン速度分布の特徴は似ていたが、背景の電子密度が大きく異なっていたため、フラックスの分布に偏りが見られていた。それより低緯度のバルジの (低緯度側) 境界領域では、イオンフラックス分布の平均値 (約 $0.8 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) がさらに小さくなっていた (図 5.4 e1, e2)。

5.2 サブストームのフェーズによるイオン上昇流の特徴の違いについて

図 5.5 及び図 5.6 は、オーロラサブストームのフェーズ毎におけるイオン速度を、図 5.1 や図 5.2 と同じくバルジとの相対的な位置関係を基に区分し示した図である。各パネルは順に、(a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、(c) バルジ内部の高緯度側、(d) バルジ内部の低緯度側、(e) バルジの低緯度側境界領域に相当し、左側 (a1~e1) にエクспанションフェーズのイオン速度分布を、右側 (a2~e2) にリカバリーフェーズのイオン速度分布を示す。図 5.6 の一番下側のプロット (f1 と f2) は、サブストームのイニシャルブライトニング前の 30 分間のイオン速度の分布を表し、グロースフェーズもしくはサブストーム前の電離圏状態を示す指標として用いる。左側にロングイヤビンの ESR で観測された高緯度側 (主に極冠域) のイオン速度分布を、右側にトロムソ UHF アンテナで観測された低緯度側 (主に夜側オーロラオーバル域) のイオン速度分布を表す。そのグロースフェーズのイオン速度分布の平均値は、ESR で -6 m s^{-1} 、トロムソ UHF では約 50 m s^{-1} であり、ともに 0 m s^{-1} 付近に中心をもつ分布をしていた。エクспанションフェーズのバルジの高緯度側外部のイオン速度分布 (a1) も同様な分布をしている。この高緯度側外部では、リカバリーフェーズになると沿磁力線上向きに分布が多少広がり、平均速度が約 100 m s^{-1} に上がる。バルジの高緯度側境界では、エクспанションフェーズでもリカバリーフェーズでも変わらず約 200 m s^{-1} の上向き平均イオン速度であった。バルジの内部では、高緯度側 (c1 と c2) も低緯度側 (d1 と d2) も共に、エクспанションフェーズからリカバリーフェーズにかけて、平均イオン速度が小さくな

る特徴が見られた。

フェーズ毎におけるイオンフラックスの変化 (図 5.7 と 5.8) について、グローースフェーズ時にロングイヤビンでは $-1 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の下向きフラックス (図 5.8 f1)、トロムソ上空では $1.1 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の上向きフラックス (図 5.8 f2) であったのに対し、エキスパンションフェーズ時にはバルジの高緯度側外部 (図 5.7 a1) を除くすべて領域で、上向きフラックスの増加が見られた。最大の上向きフラックスを持つ領域は、バルジの高緯度側境界領域であり、その大きさは、 $3.3 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった (図 5.7 b1)。エキスパンションフェーズからリカバリーフェーズにかけては、バルジの高緯度側外部で顕著な上向きフラックスの増加 (具体的には、平均フラックスが $1.3 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ に増加) が見られた (図 5.7 a2) が、それ以外の領域では有意な特徴の違いが見られなかった。

5.3 サブストームの規模によるイオン上昇流の特徴について

図 5.9 は、オーロラサブストームの規模毎におけるイオン速度をバルジとの相対的な位置関係を基に区分し示した図である。各パネルは順に、(a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、バルジ内部の高緯度側、バルジ内部の低緯度側、バルジの低緯度側境界領域に相当し、左側にサブストームの規模が大きい時のイオン速度分布を、右側にサブストームの規模が小さい時のイオン速度分布を示す。図 5.10 は、図 5.9 と同様の形式で示したオーロラサブストームの規模毎におけるイオンフラックス分布を示している。図 5.9 から、サブストームの規模によってイオン速度の値の違いは見られなかった。一方、図 5.10 よりイオンフラックスにはサブストームの規模の違いが見られた。バルジの高緯度側境界から低緯度側境界までの領域内すべての平均イオンフラックスは、サブストームの規模が小さい時は $1.8 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、サブストームの規模が大きい時は $3.0 \times 10^{13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった (図 5.10 b)。このことから、サブストームの規模が大きい時は小さい時に比べ平均イオンフラックスが約 1.7 倍大きくなるという事がわかった。

5.4 サブストーム時のイオン上昇流とプラズマ加熱との関係

サブストーム時における高度 600 km の電子及びイオン温度変動の特徴をまと

め、イオン上昇流との対応を調べた。図 5.11 及び図 5.12 は、オーロラルサブストーム発生時のバルジに対する、レーダー観測領域の相対的な位置関係を基に区分した、各領域における高度 600 km の電子温度変化を表す。図の順序やフォーマットは図 5.1 から図 5.4 までと同じく、(a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、(c) バルジ内部の高緯度側、(d) バルジ内部の低緯度側、(e) バルジの低緯度側境界領域でのオーロラ発光強度と電子温度との対応関係を表している。バルジの高緯度側外部 (図 5.11 a2) では、電子温度の平均値が約 1800 K と低いけれども、3000 K 以上の温度になるサンプルも若干存在する。そのようなサンプルは規模の大きいサブストーム (図 5.11 a1 の赤いダイア) に見られ、さらにオーロラ発光強度が 50 - 100 Rayleigh に増えている場合によく見られる。このときのイオン速度は、図 5.1 a1 より沿磁力線上向きに 100 m s^{-1} であったことが分かる。バルジの高緯度側境界 (図 5.11 b2) では電子温度は高くなり、平均温度は 2400 K になっていた。ただしオーロラ発光強度と電子温度の上昇との有意な関係は見られない。

一方、バルジの高緯度側内部領域 (図 5.11 c1, c2) では、オーロラ発光強度と電子温度との間に良い相関関係が見られる。具体的には、オーロラ発光強度が 200 Rayleigh を超えるときに、3500 K 以上の温度に上昇している。平均温度は 2600 K であり、高緯度境界より若干 (約 200 K) 高い。低緯度側内部 (図 5.12 d1, d2) の電子温度の広がりの特徴は、バルジの高緯度側境界や高緯度側内部領域に近い。しかし、高緯度側内部領域で見られたような、オーロラ発光強度との良い対応は見られず、発光強度が 200 Rayleigh を超えるときでも電子温度のサンプルは 2500 K 付近に分布する。低緯度側境界 (図 5.12 e1, e2) では電子温度が低くなり、1700 K 付近に分布していた。

次に、図 5.13 及び図 5.14 にイオン温度の分布を示す。各領域におけるイオン温度の平均値 (a2~e2) を見ると、高緯度境界 (図 5.13 b2) で一番高い値 (約 2000 K) になっていたことが見て取れる。バルジの高緯度側内部 (図 5.13 c2) も平均温度が高く、1800 K であった。それに対し、バルジの低緯度側内部とバルジの高緯度外部では、イオンの平均温度がほぼ同じ (1600 K 弱) であった。オーロラ発光強度との対応については、バルジの高緯度側内部 (図 5.13 c2) で発光強度の増加とイオン温度上昇に正の相関が見られるが、電子温度と発光強度の対応に比べるとはっきりしない。バルジの低緯度側内部 (図 5.14 d2) や低緯度側境界 (図 5.14 e2) では、バルジの高緯度側外部 (図 5.13 a2) と分布の特徴が似ており、平均イオン温度も同程度であった。

電子温度やイオン温度とサブストームのフェーズとの対応について、図 5.15 から図 5.18 を用いて以下に述べる。図 5.15 及び図 5.16 は電子温度の分布を、図 5.17 及び図 5.18 はイオン温度の分布を、サブストームのフェーズ及びバルジに

対する相対的な領域毎に表している。図のフォーマットは図 5.5 や図 5.6 と同様である。グロースフェーズの電子温度の平均値は、高緯度側の ESR (図 5.16 f1) と低緯度側のトロムソ UHF レーダー (図 5.16 f2) で共に 1600 K であった。エクспанジョンフェーズ (a1~e1) になると、高緯度側外部以外では平均電子温度が 2000 K から 2500 K まで上昇し、バルジの内部 (高緯度側 (図 5.15 c1) と低緯度側 (図 5.16 d1) の両方) で電子温度がピークとなる。その後リカバリーフェーズ (a2~e2) になると、バルジの高緯度側の内部 (図 5.15 c2) と境界 (図 5.15 b2) で電子温度が更に高くなり、平均約 2700 K となる。さらに、バルジの高緯度側の外部 (図 5.15 a2) でも電子温度が 2100 K に上昇する。バルジの低緯度側内部 (図 5.16 d2) や低緯度側境界 (図 5.16 e2) は温度が下がり、特に低緯度側境界ではグロースフェーズ時の平均電子温度と同程度 (約 1650 K) まで下がっていた。

イオン温度の時間変化 (図 5.17 及び図 5.18) については、電子温度の時間変化と比べて、より高緯度側領域で温度上昇が見られている。具体的に言うと、エクспанジョンフェーズにはバルジの高緯度境界 (図 5.17 b1) 及び高緯度側内部 (図 5.17 c1) でイオン温度が最も高く (1800 K)、それ以外の領域ではグロースフェーズのときのイオン温度 (トロムソやロングイヤビンで共に 1400 - 1500 K) と同程度の値である。リカバリーフェーズに移るとバルジの高緯度境界 (図 5.17 b2) でさらにイオン温度上昇が起き、バルジの高緯度側外部 (図 5.17 a2) でも顕著な温度上昇 (1800 K) が生じる。それ以外の領域 (バルジの高緯度や低緯度内部 (図 5.17 c2、図 5.18 d2)、低緯度側境界領域 (図 5.18 e2)) では、エクспанジョンフェーズからリカバリーフェーズにかけて平均イオン温度の変化が見られない。

5.5 各領域のイオンに働く加速度とサブストームとの対応

電離圏のイオンには、電子との両極性拡散電場による力やイオン自身の圧力勾配力、中性大気によるドラック等の力が働き、沿磁力線方向にイオンを加速する。ここではイオンに働く力がサブストームのバルジ内外の各領域で、さらにフェーズによってどのように違いが見られるかを調べた。

図 5.19 は電子の圧力勾配力の分布を各領域で表したものである。左側のパネルは順にバルジの高緯度側外部 (a2)、高緯度側境界 (b2)、高緯度側内部 (c2) を表し、右側はバルジの低緯度側内部 (d2)、低緯度側境界 (e2) を表す。加速度の大きさは、高緯度側内部領域が平均的に最も大きく (5.4 m s^{-2})、高緯度側外

部や低緯度側境界に対して約 1.4 倍の値を持つ。その電子の圧力勾配力のサブストームのフェーズ毎に分類した結果が、図 5.20 及び図 5.21 である。グロースフェーズの電子の圧力勾配力 (図 5.21 f1, f2) は平均的には $3 - 4 \text{ m s}^{-2}$ であるのに対し、エクспанションフェーズにはバルジの高緯度側境界やバルジ内部で $4.6 - 5.5 \text{ m s}^{-2}$ の大きさに増えていることが分かる。リカバリーフェーズに移ると高緯度側外部及び内部で加速度が増え、高緯度側境界ではほとんど変わらない。

一方イオンの圧力勾配力の分布 (図 5.22) には、より顕著な領域依存性が見られる。イオンの圧力勾配力が大きいのはバルジの高緯度側境界 (b2) の約 4.7 m s^{-2} であり、他の領域に対して最大 1.5 倍の加速度を平均的に持つ。その時間変化を見ると、グロースフェーズのときにはロングイヤビン上空で約 3.2 m s^{-2} であったのが、エクспанションフェーズにはバルジの高緯度側境界でのみ大きくなる。リカバリーフェーズに移っても同様の傾向が見られ、はっきりとした時間変化は起きていなかった。

5.6 イオン上昇流とサブストームとの対応についての考察

前節までに述べてきた、13 例のサブストーム同時観測イベントから、オーロラサブストーム中のバルジの内部及びその高緯度側境界で、顕著なイオン速度及びフラックスの大きさのイオン上昇流が発生していることが明らかになった。本章では、それ以外にも得られた観測結果を踏まえ、オーロラサブストーム時のイオン上昇流の発生メカニズムや、磁気圏で観測されるイオン流出との関係について考察する。

5.6.1 バルジ内外の各領域におけるイオン上昇流とその生成機構について

本解析で最も平均速度の大きいイオン上昇流が得られた領域は、エクспанションフェーズとリカバリーフェーズ共に、バルジの高緯度側境界であった。まず、この高緯度側境界で、顕著なイオン速度及びフラックスの大きさのイオン上昇流が発生している理由について考察する。

この高緯度側境界でのイオン上昇流発生時には、電子温度上昇及びイオン温度上昇を共に伴っている場合が多い (例えば、Appendix に掲載された 2001 年 2 月 6 日の ESR データを参照)。特に、イオン温度の上昇に伴うイオン上昇流が頻

繁に発生することが、この領域でのイオン上昇流の特徴として挙げられる。このイオン温度上昇は、電離圏電場の増大による摩擦加熱に起因する。このことに関して、*Fujii et al.* [1994] は DE 2 衛星データから、サブストームのバルジの高緯度側に “Spike-like” な南北成分の強い電場が存在することを明らかにしている。バルジの高緯度側境界では、この強い電場領域で発生していたイオン上昇流を EISCAT レーダーで観測していた可能性が考えられる。EISCAT トロムソ VHF レーダーを低い仰角 (30°) で北を向けた観測においても、緯度幅の狭いイオン温度の上昇領域が報告されており、そこでは $1.5 - 3 \text{ km s}^{-1}$ の高速の対流が起きている [*Fox et al.*, 2001]。その電場の増大領域のすぐ低緯度側では、*F* 領域の電子温度上昇 ($1200 - 3000 \text{ K}$) が報告されている [*Fox et al.*, 2001]。その電子温度のピークの緯度は、極側境界より約 2° 低緯度側で位置する [*Aikio et al.*, 2006]。また、この電子温度の上昇領域は、サブストームエレクトロジェット領域が $1 - 1.5 \text{ km s}^{-1}$ で極方向に伝わるのと同じように高緯度に移動する。この電子温度上昇はソフトな電子 ($<500 \text{ eV}$) の降り込みに起因していると考えられ、このソフトな降下電子は電離圏イオンを上向きに上昇させるエネルギーを供給していると考えられる。このように、バルジの高緯度側では、境界及び内部領域でイオン上昇流が発生しやすい状況であることが分かる。

一方バルジの低緯度側では、オーロラの発光強度の強弱に関わらず、イオンの平均上向き速度は $100 - 200 \text{ m s}^{-1}$ であった。この領域では電離圏電場はほとんど増加しないため、ソフトな電子の降り込みや熱の流入がイオン上昇流のエネルギー源となる。IMAGE 衛星 WIC カメラで得られるオーロラ画像は、ハードな降下粒子によるオーロラ発光分布を表しており、ソフトな電子の降り込みの様子を観測してはいない。特に規模の大きいサブストーム時には、ハードな粒子の降り込み及びそれに起因する *E* 領域の電子密度増加がバルジの低緯度側で継続して起きているのに対し、ソフトな電子の降り込みは数十分間と間歇的に起きていた (4 章のケーススタディーの結果を参照)。そのため、バルジの低緯度側では発光強度とイオン上昇速度に良い相関が見られなかったと考えられる。

リカバリーフェーズでは、ほぼすべて領域で上昇イオン速度が減少するのに対し、バルジの高緯度側外部だけは逆に上向きイオン速度が約 100 m s^{-1} と大きくなる。このことは、イオン上昇流を引き起こす加熱・加速源が極冠域でも供給されていることを意味する。特に規模の大きいサブストーム時には、エキスパンションフェーズでバルジが高緯度側へ広がると共に、極冠域での局所的かつ間歇的なオーロラ発光が極冠域全体で観測されていた。そのような発光に対応して極冠域電離圏でイオン上昇流が起きていた。極冠域電離圏内では **cleft ion fountain** に代表される下向きのイオンの流れ (イオン下降流) が通常観測されるけれども、規模の大きいサブストームのリカバリーフェーズでは極冠域全体で

イオン上昇流が卓越することも考えられる。

5.6.2 イオン速度の高度分布について

イオン速度の高度分布には、高度 400 km 付近から高度と共にイオン速度が上昇する分布を持つ場合 (図 4.4 の 2038 UT の結果を参照) と、高度 300 km またはそれ以下から速度が増加し始め、それ以降は高度方向に一定の速度 ($100 - 200 \text{ m s}^{-1}$) の速度を持つ場合 (図 4.4 の 2136 UT や 2210 UT の結果を参照) がある。前者は通常、電子温度もしくはイオン温度の上昇を伴うが、後者はそれらの温度上昇を必ずしも伴わないことが多い。後者の様な速度分布を引き起こす原因として、中性風のドラッグの効果が考えられる。夜間の高緯度 F 領域では、平均して南向きの中性風速度を持つ [Killeen *et al.*, 1995]。トロムソやロングイヤビンでの磁場は、天頂から南に約 15 度及び 8 度傾いていることから、南向きに流れる中性大気によるドラッグ効果により、イオンは沿磁力線上向きに動かされる。例えば、図 4.4 の 2136 UT に挙げたトロムソでのイオン速度を中性風のドラッグで説明するには、トロムソもロングイヤビンも 800 m s^{-1} 程度の南向き中性風速度が必要となる。サブストーム発生時には、磁気圏からの多大な粒子及び電子エネルギーの注入に伴う大気のジュール加熱により、そのような速い速度をもつ中性風が夜側熱圏で発生し、電離圏イオンを沿磁力線上向きに動かしたことが考えられる。

5.6.3 イニシャルブライティング領域でのオーロラ発光とイオン上昇流の時間差や磁気圏で観測されるイオン流出との関係について

電離圏イオンの磁気圏への加熱過程や流出経路を知る上で、例えばサブストーム発生からイオン上昇流が起きるまでの時間差の情報は大変有益である。Wilson *et al.* [2001] は FAST 衛星データ ($10 \text{ eV} - 1 \text{ keV}$) とオーロラ発光分布とその時間変化を基に、電離圏から流出した O^+ イオンが高度 3000 - 4000 km に到達するまでに、5 - 10 分かかると見積もった。しかしながら、4 章で触れたように、電離圏でのイニシャルブライティングからイオン上昇流発生までにも数分の時間差がある。これはサブストームのイニシャルブライティングを担うハードな降り込み [e.g. Olsson *et al.*, 1996] が起きてから、ソフトな電子の降り込みが

起きるまでに時間差があるからと考えられる。イニシャルブライトニングに対する電離圏イオン上昇流の時間差の特徴は、4章のイベントのみならず、統計解析に用いた2001年10月18日のシュードブレイクアップ (Pseudobreakup) の際にも2 - 5分程度の時間差が見られた。このことは、電離圏でのイオン上昇流の発生から、磁気圏で電離圏起源イオンが観測されるまで時間差がほとんど無いことを意味する。*Nose et al., 2006* は磁気嵐サブストーム時のサブストームのオンセット時刻とIMAGE衛星で観測されるENA (Energetic Neutral Atom, 10 eV - 210 keV) 及びGeotailで観測される酸素イオンと水素イオンのエネルギー密度比 (9 - 210 keV) を調べた結果を報告している。サブストーム直後にはENAの突発的な変化がみられている。また、磁気圏プラズマシートにいたGeotailでは、サブストーム直後にエネルギー密度比の変化が見られたため、衛星観測領域にいた低エネルギー (熱的) 酸素イオンが、その場で加熱を受けてGeotailで観測可能なエネルギー帯にまで加速されたことを提案している。FAST衛星データによって観測される低エネルギーの酸素イオン (10 eV) は電離圏からFAST飛翔高度まで到達するのに10分程度の時間を必要とする。そのため、今回のイオン上昇流発生までの時間差 (約2 - 5分) の結果も、磁気圏のローカルな場での電離圏起源イオンの加熱が効いていると考えられる。

今回の解析では、バルジに対する相対的な位置情報を基にして、バルジの高緯度側及びその高緯度側内部でイオン上昇流がよく観測されることを示した。磁気圏での人工衛星観測 (例: FAST衛星) でも、オーバルとの相対的な位置関係に基づいた座標系を用いたイオン流出のデータ解析が*Andersson et al. [2004]* により行われている。その結果では、夜側オーロラ帯の酸素イオンの流出量は極側で一番高く、このことは本研究で得られた結果 (イオン上昇流の発生頻度がバルジの高緯度側で多いこと) と類似する。但し、電離圏から上昇したイオンは対流電場により磁場に垂直方向にも流されるため、オーバルの極側にイオンが到達するには電離圏から衛星観測高度 (~3000 km) までの間に更なる加速が必要であると考えられる。

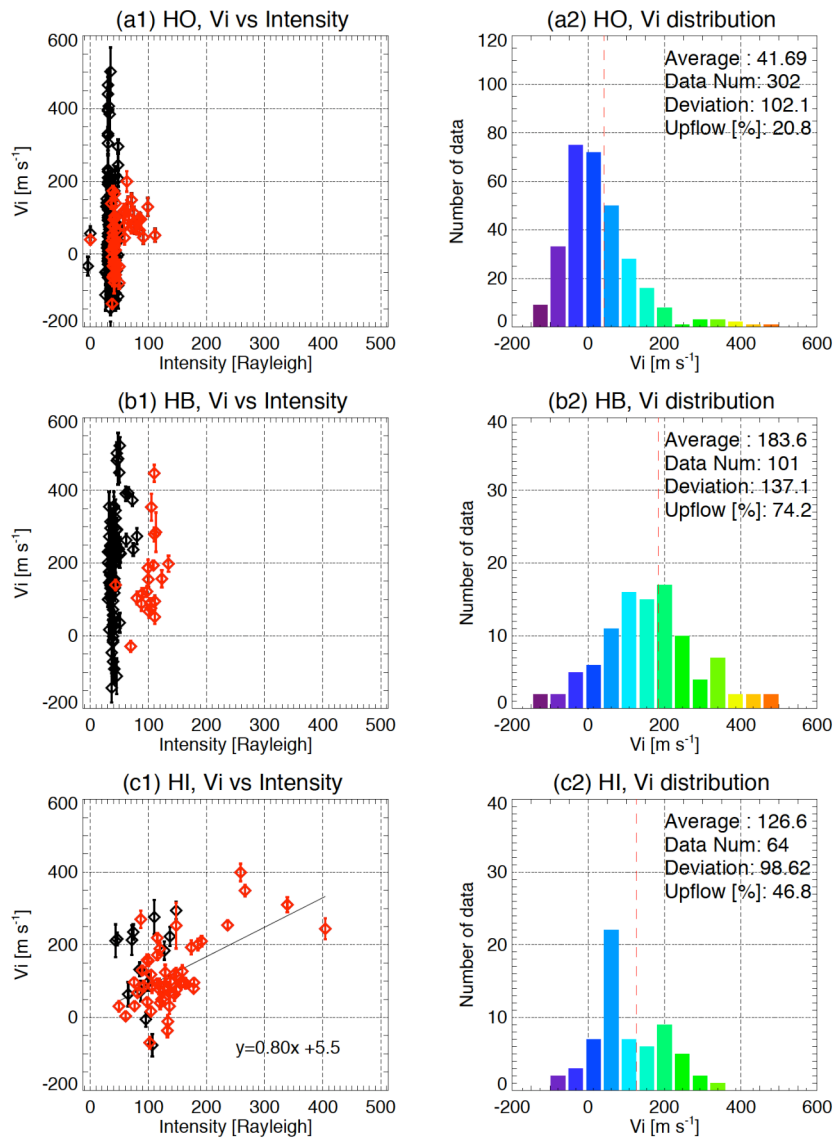


図 5.1: オーロラサブストームのバルジに対する領域ごとのイオン速度の特徴を示す。各パネルは (a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、(c) バルジ内部の高緯度側における観測結果である。左側のプロット (a1~c1) はオーロラの発光強度とイオン速度との関係を表す。規模の大きいサブストームイベントについては赤色で表示している。右側の図 (a2~c2) は、それぞれの観測領域におけるイオン速度の分布を表す。縦に引かれた赤いダッシュ線は、各領域のイオン速度の平均値で、各パネルの右上に書かれている。また、サンプル数、偏差、平均イオン速度が 100 m s^{-1} 以上である割合が各パネルの右上に書かれている。

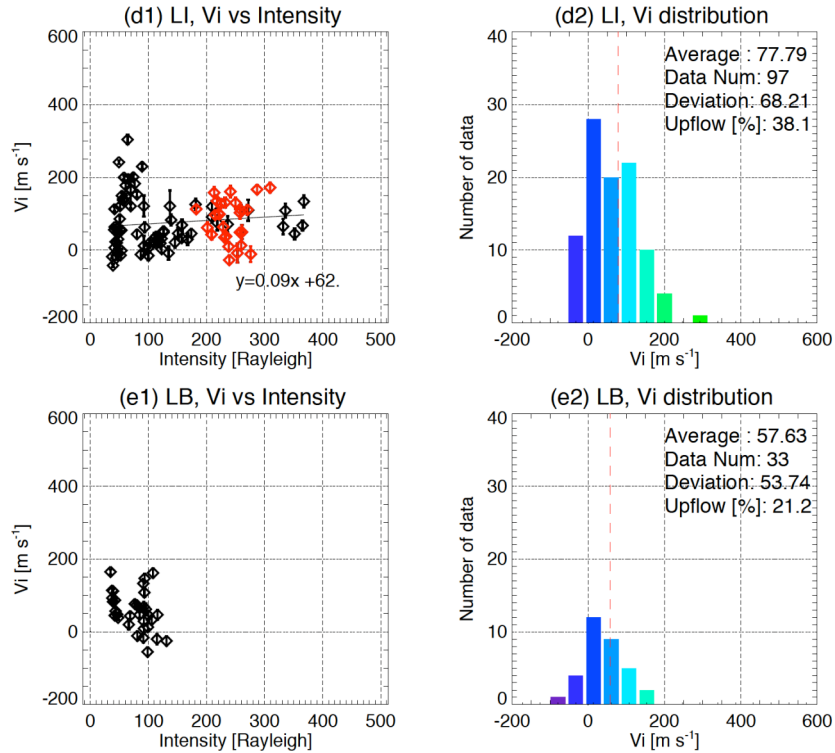


図 5.2: オーロラサブストームのバルジに対する領域ごとのイオン速度の特徴を示している。各パネルは (d) バルジ内部の低緯度側、(e) バルジの低緯度側境界領域における観測結果である。左側のプロット (d1~e1) はオーロラの発光強度とイオン速度との関係を表す。規模の大きいサブストームイベントについては赤色で表示している。右側の図 (d2~e2) は、それぞれの観測領域におけるイオン速度の分布を表す。縦に引かれた赤いダッシュ線は、各領域のイオン速度の平均値で、各パネルの右上に書かれている。また、サンプル数、偏差、平均イオン速度が 100 m s^{-1} 以上である割合が各パネルの右上に書かれている。

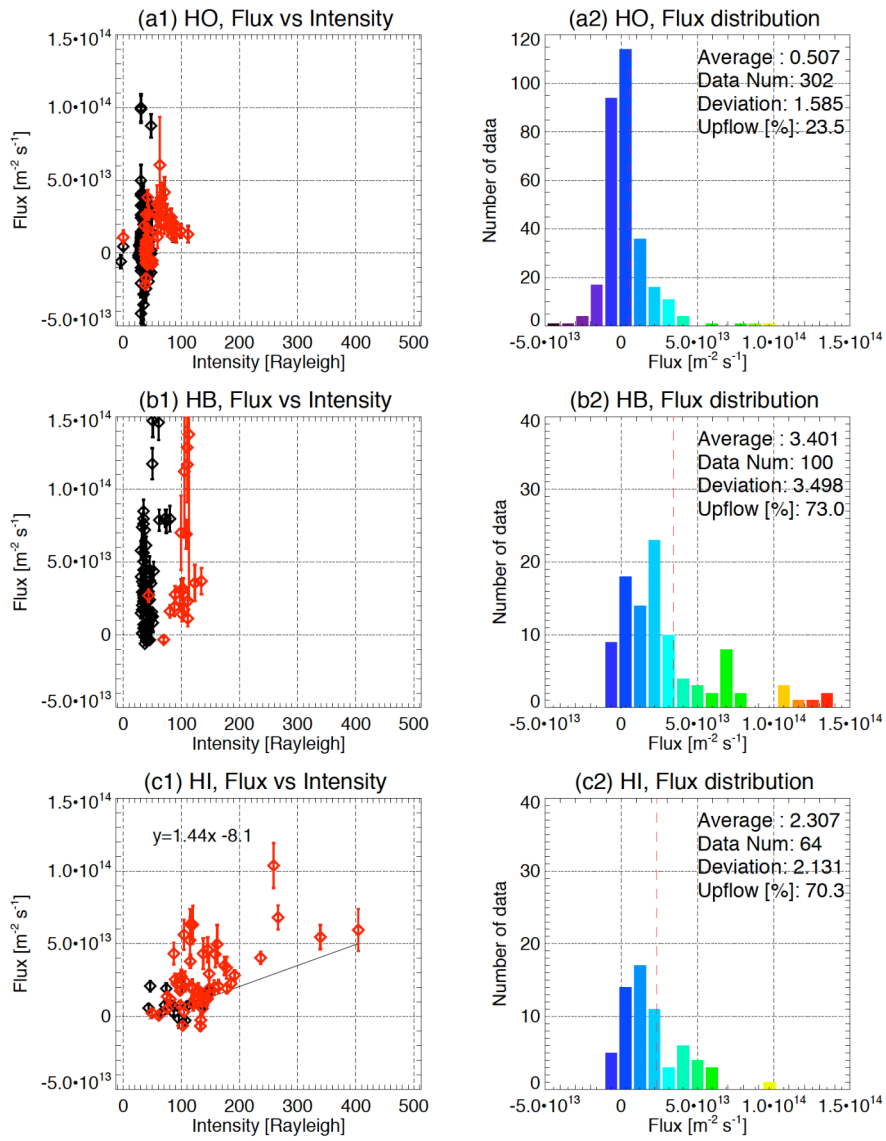


図 5.3: オーロラルサブストームのバルジ内外の各領域における沿磁力線上向きイオンフラックスの変化を表す。図の形式は図 5.1 と同様。

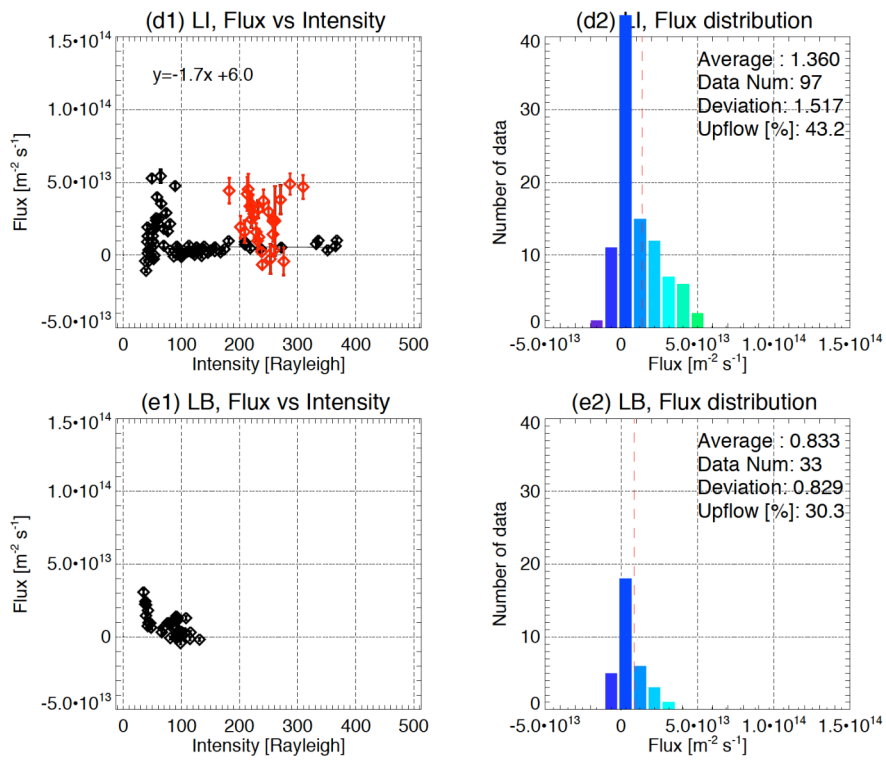


図 5.4: オーロラルサブストームのバルジ内外の各領域における沿磁力線上向きイオンフラックスの変化を表す。図の形式は図 5.2 と同様。

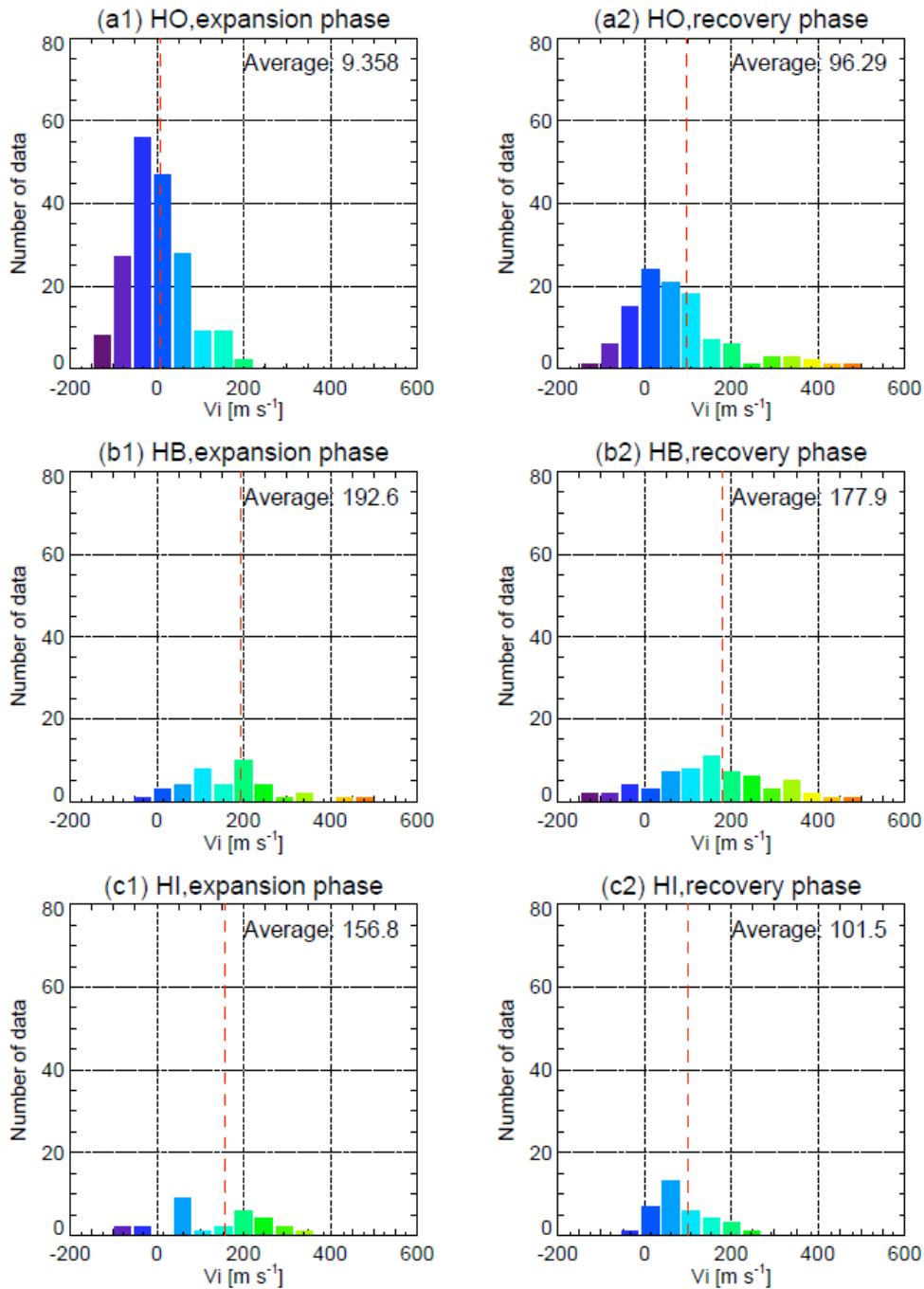


図 5.5: オーロラルサブストームのフェーズ毎におけるイオン速度をバルジとの相対的な位置関係を基に区分し示した図である。各パネルは (a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、(c) バルジ内部の高緯度側に相当し、左側(a1~c1)にエクспанションフェーズのイオン速度分布を、右側(a2~c2)にリカバリーフェーズのイオン速度分布を示す。縦に引いた赤いダッシュ線はイオン速度の平均値で、各パネルの右上に書かれている。

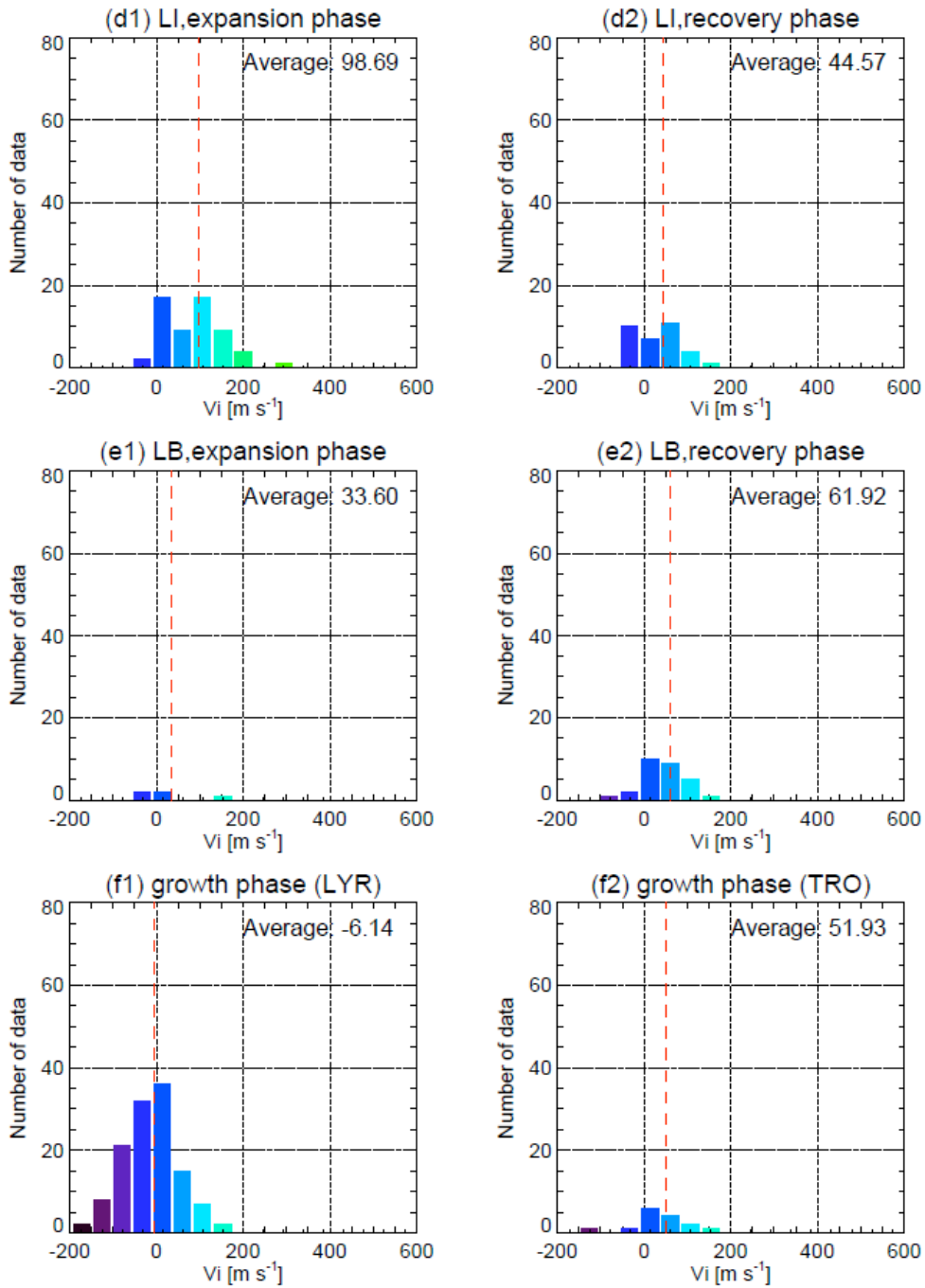


図 5.6: オーロラルサブストームのフェーズ毎におけるイオン速度をバルジとの相対的な位置関係を基に区分し示した図である。各パネルは (d) バルジ内部の低緯度側、(e) バルジの低緯度側境界領域に相当し、左側 (d1~e1) にエクспанションフェーズのイオン速度分布を、右側 (d2~e2) にリカバリーフェーズのイオン速度分布を示す。一番下側のプロット (f1 と f2) は、サブストームのイニシャルブライティング前の 30 分間のイオン速度の分布を表す。左側に ESR、右側にトロムソ UHF アンテナによるイオン速度分布を表す。

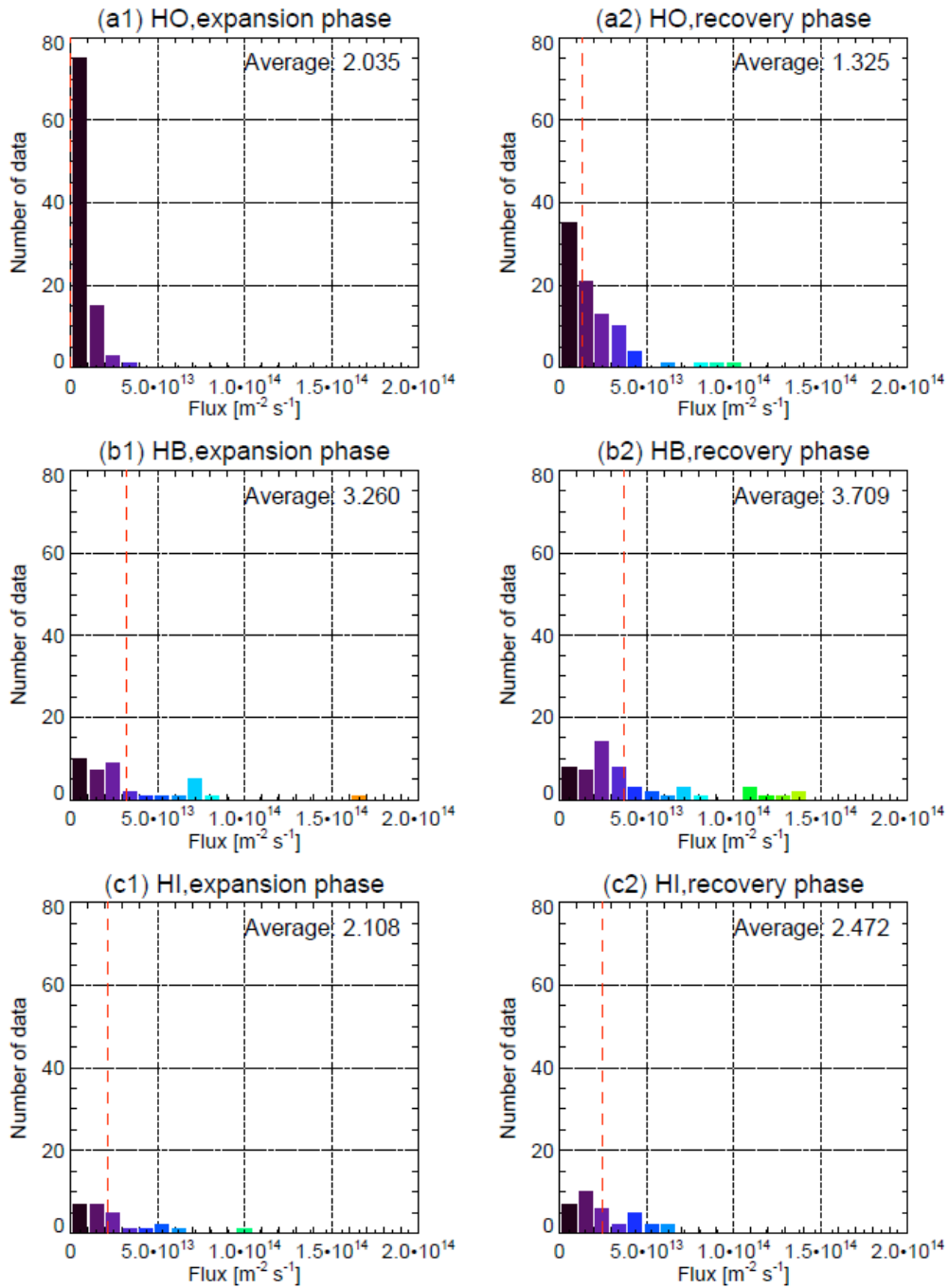


図 5.7: オーロラルサブストームのフェーズ毎におけるイオンフラックスを、バルジとの相対的な位置関係を基に区分し示した図である。図 5.5 と同様の形式で示している。

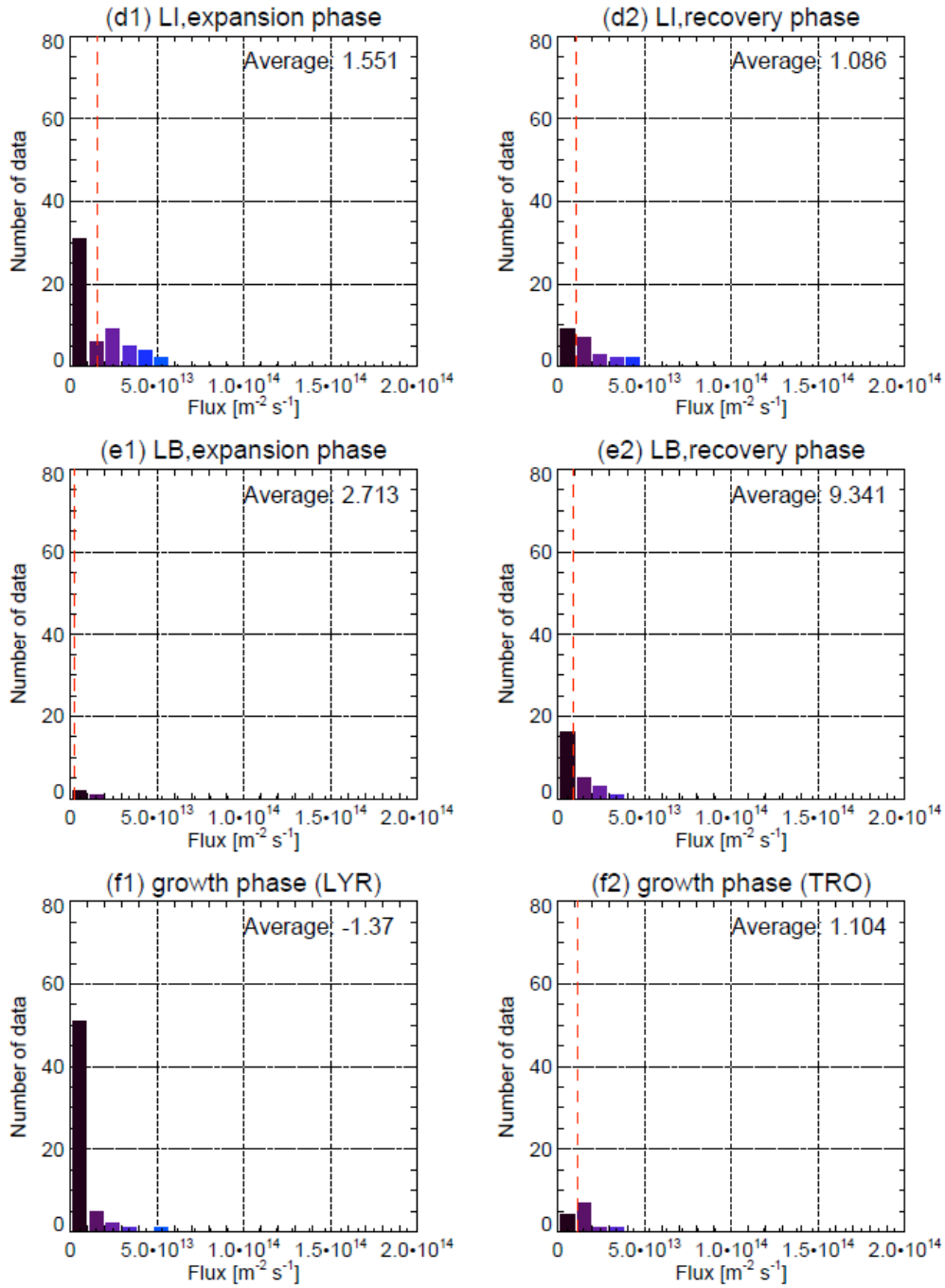


図 5.8: オーロラルサブストームのフェーズ毎におけるイオンフラックスをバルジとの相対的な位置関係を基に区分し示した図である。図 5.6 と同様の形式で示している。

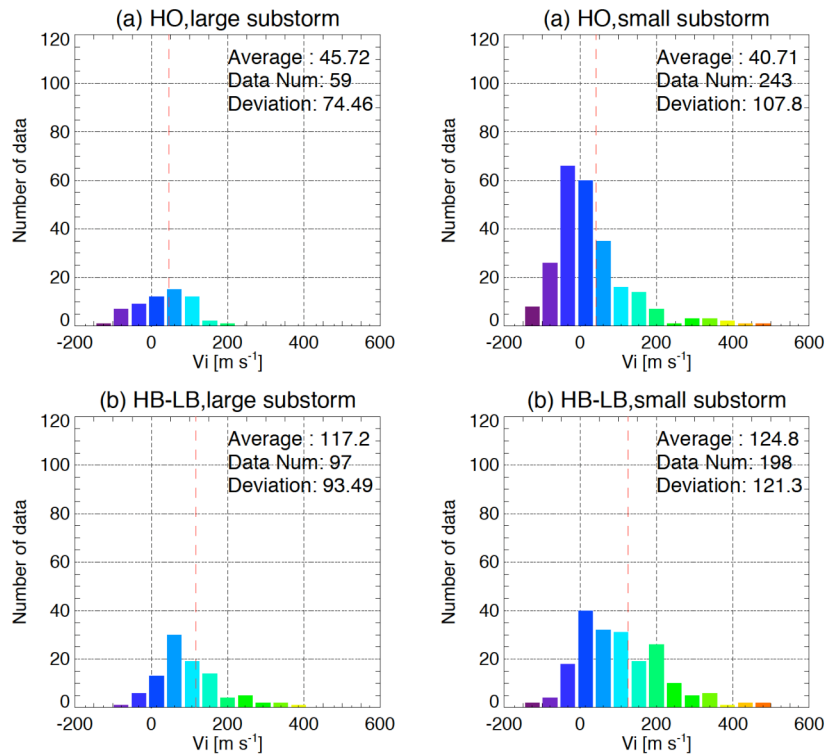


図 5.9: オーロラサブストームの規模毎におけるイオン速度をバルジとの相対的な位置関係を基に区分し示した図である。各パネルは順に、(a) バルジの高緯度側外部、(b) バルジの高緯度側境界領域、バルジ内部の高緯度側、バルジ内部の低緯度側、バルジの低緯度側境界領域に相当し、左側にサブストームの規模が大きい時のイオン速度分布を、右側にサブストームの規模が小さい時のイオン速度分布を示している。

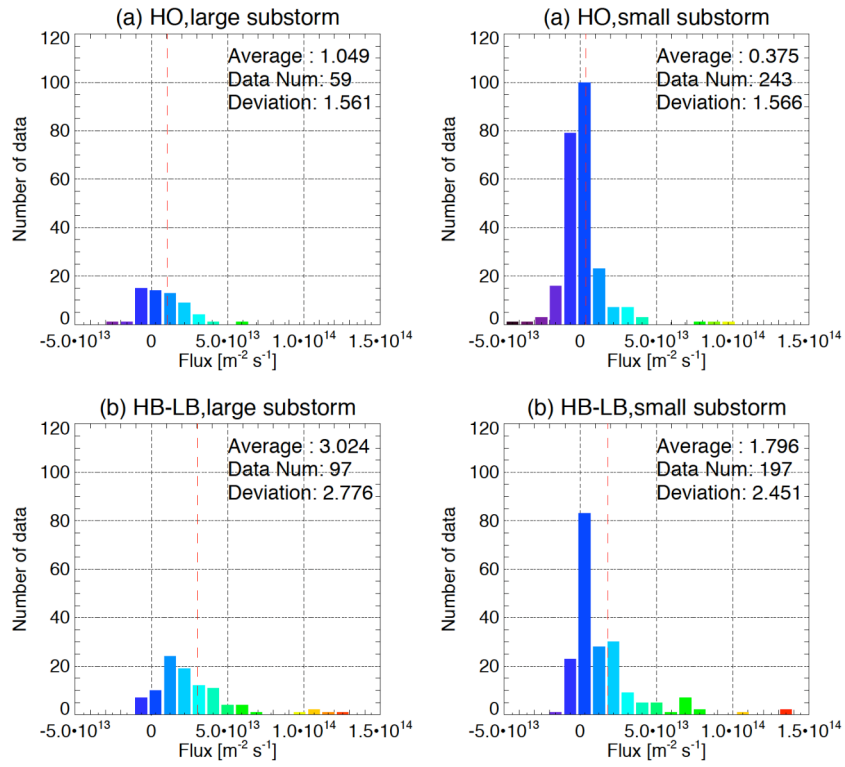


図 5.10: 図 5.9 と同様の形式で示したオーロラサブストームの規模毎におけるイオンフラックス分布を示している。

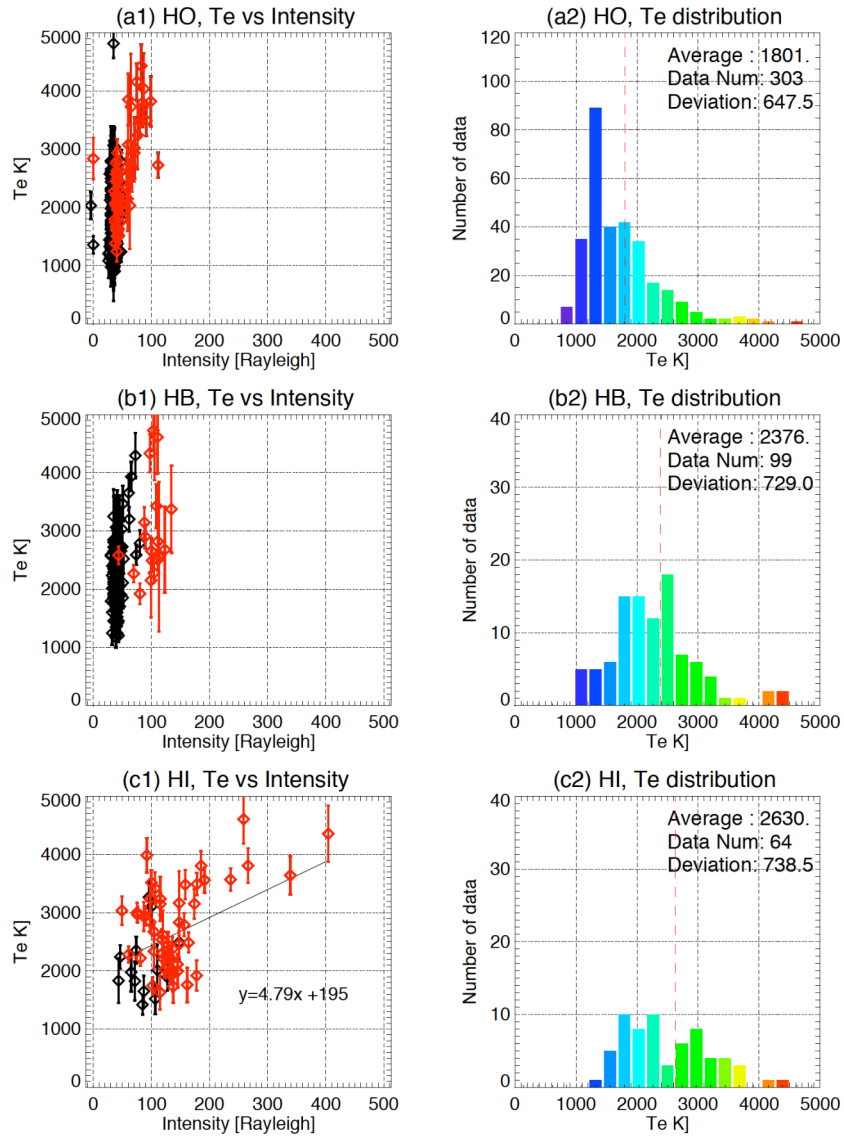


図 5.11: オーロラルサブストーム発生時のバルジに対する、レーダー観測領域の相対的な位置関係を基に区分した、各領域における高度 600 km の電子温度変化を表す。図 5.1 と同様の形式で示している。

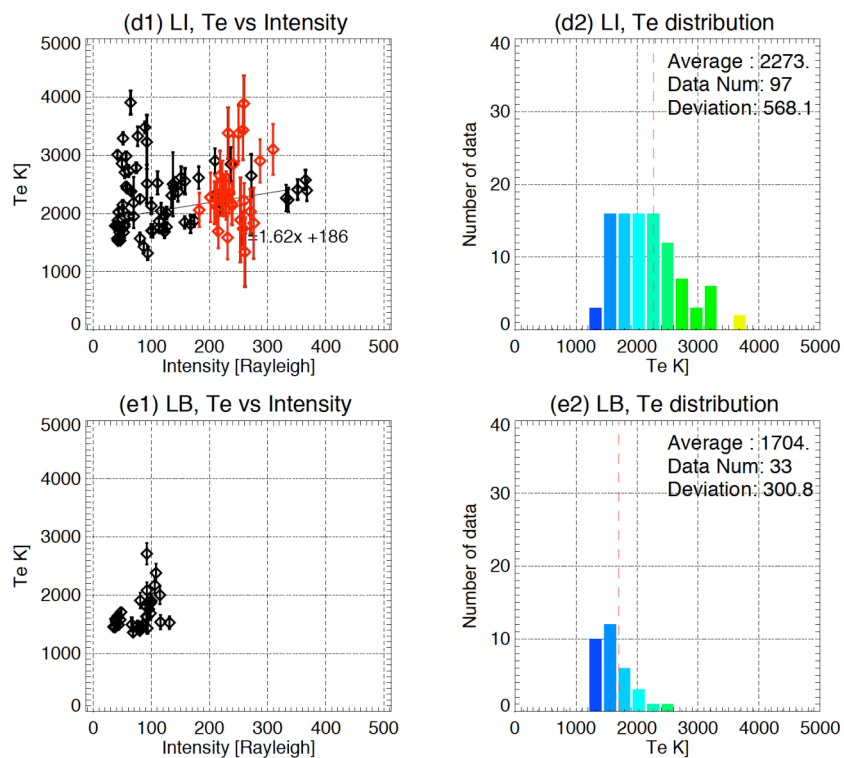


図 5.12: オーロラルサブストーム発生時のバルジに対する、レーダー観測領域の相対的な位置関係を基に区分した、各領域における高度 600 km の電子温度変化を表す。図 5.2 と同様の形式で示している。

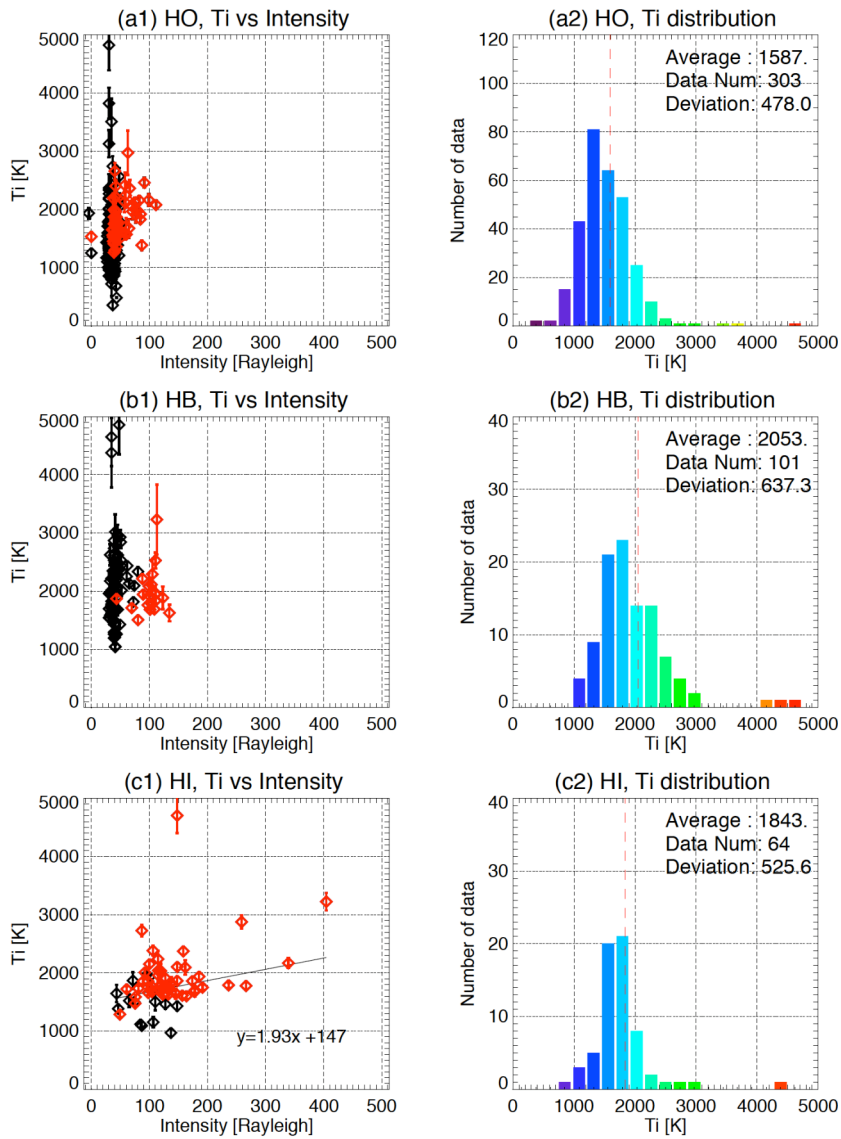


図 5.13: オーロラルサブストーム発生時のバルジに対する、レーダー観測領域の相対的な位置関係を基に区分した、各領域における高度 600 km のイオン温度変化を表す。図 5.1 と同様の形式で示している。

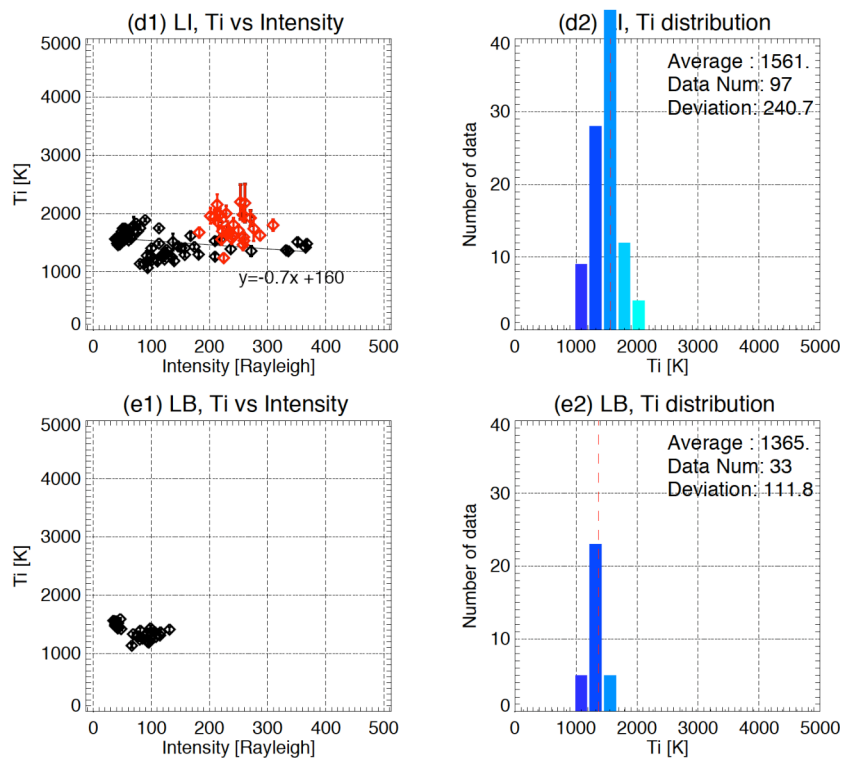


図 5.14: オーロラルサブストーム発生時のバルジに対する、レーダー観測領域の相対的な位置関係を基に区分した、各領域における高度 600 km のイオン温度変化を表す。図 5.2 と同様の形式で示している。

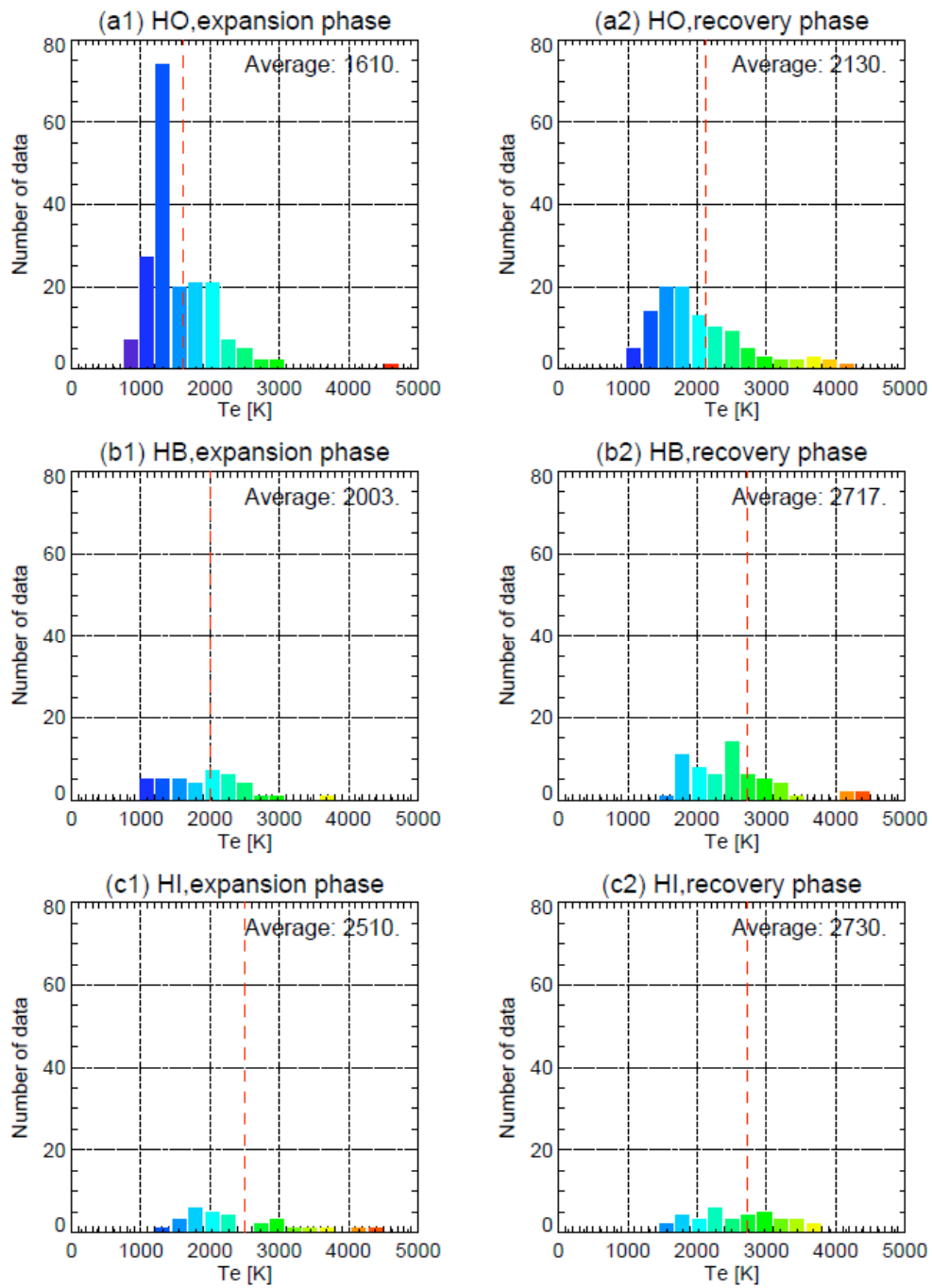


図 5.15: 電子温度とサブストームのフェーズとの対応について示している。サブストームのフェーズ及びバルジに対する相対的な領域毎に表している。図 5.5 と同様の形式で示している。

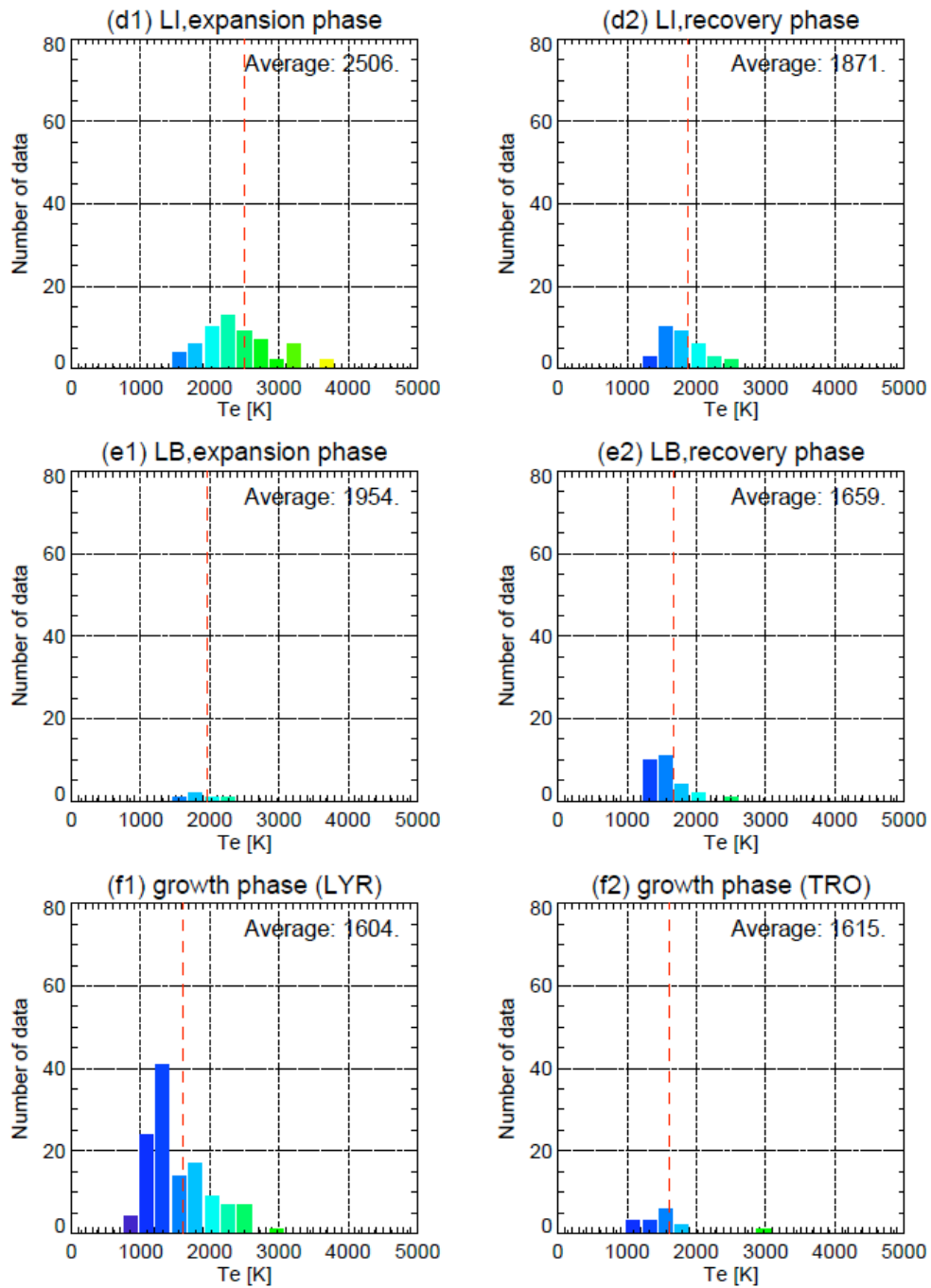


図 5.16: 電子温度とサブストームのフェーズとの対応について示している。サブストームのフェーズ及びバルジに対する相対的な領域毎に表している。図 5.6 と同様の形式で示している。

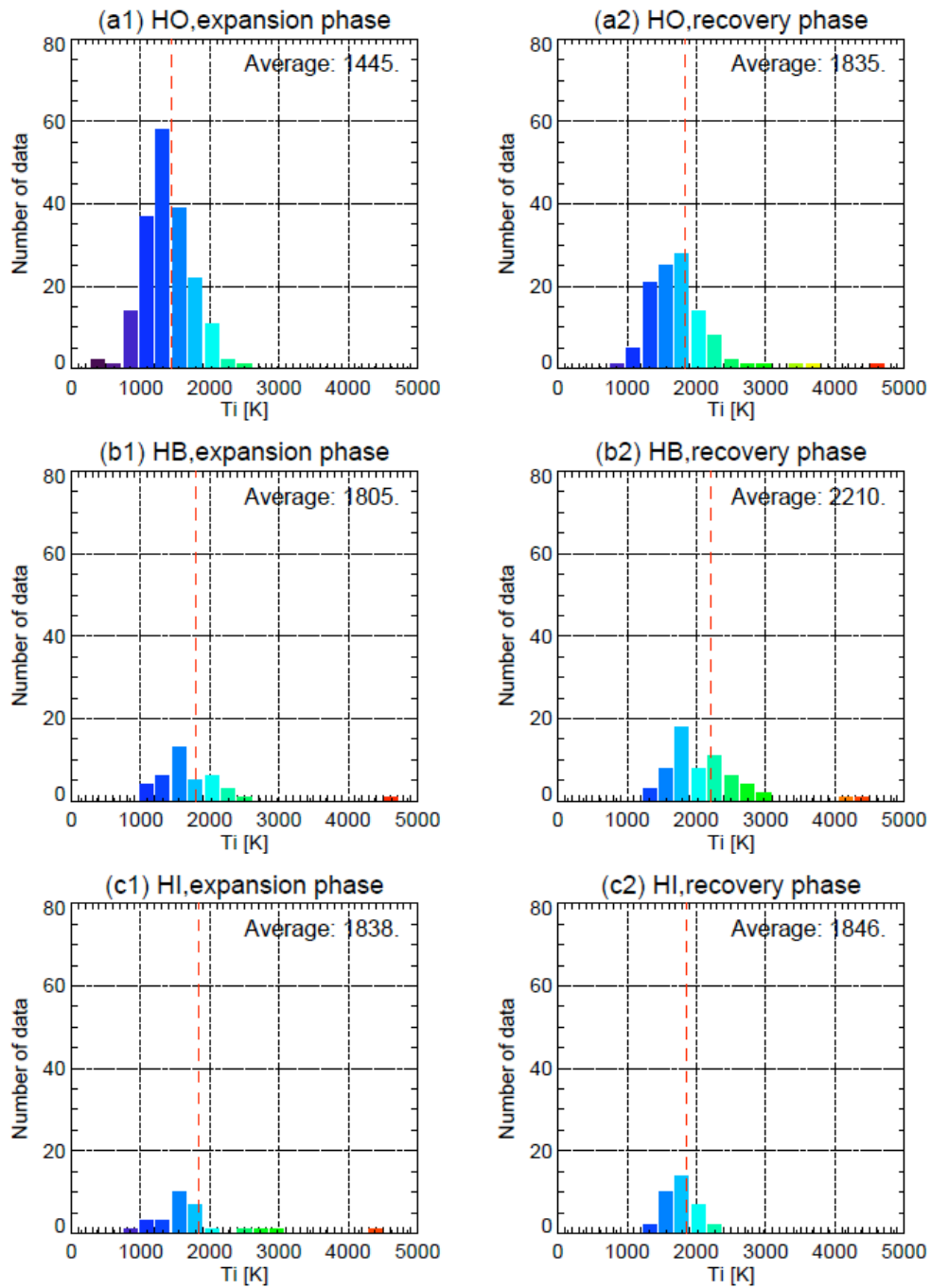


図 5.17: イオン温度とサブストームのフェーズとの対応について示している。サブストームのフェーズ及びバルジに対する相対的な領域毎に表している。図 5.5 と同様の形式で示している。

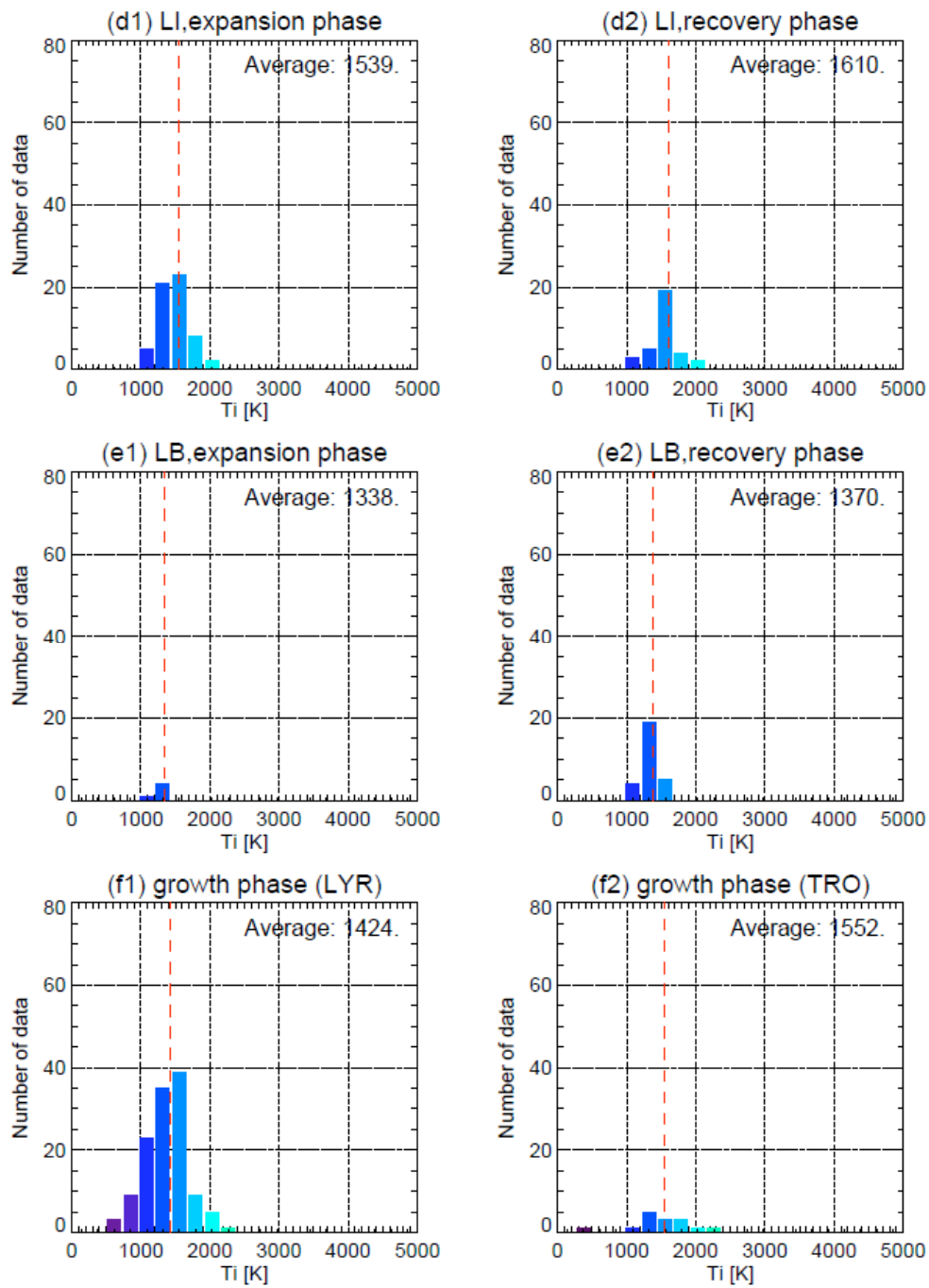


図 5.18: イオン温度とサブストームのフェーズとの対応について示している。サブストームのフェーズ及びバルジに対する相対的な領域毎に表している。図 5.6 と同様の形式で示している。

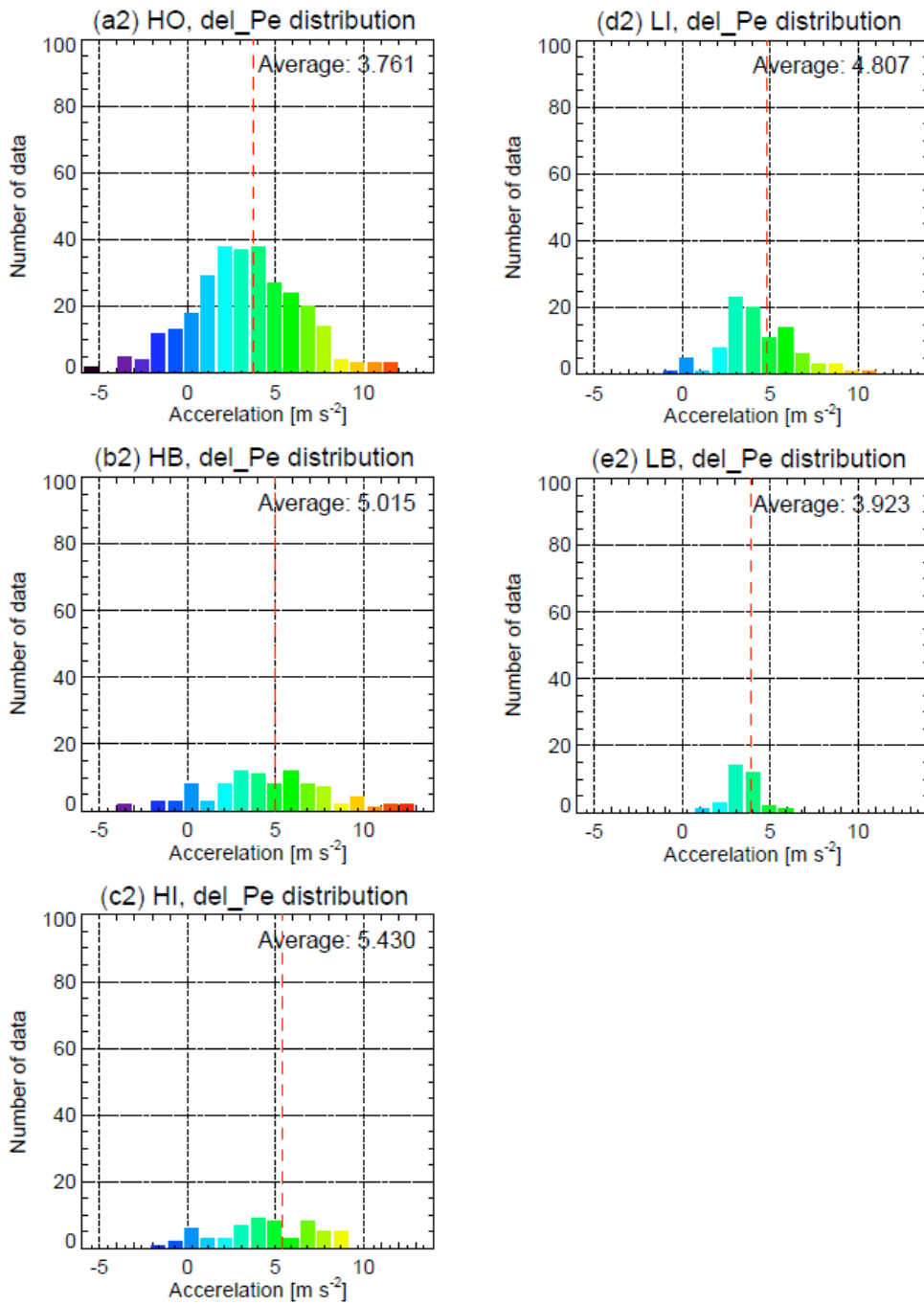


図 5.19: 電子の圧力勾配力の分布を示す。パネルは (a2) バルジの高緯度側外部、(b2) 高緯度側境界、(c2) 高緯度側内部、(d2) 低緯度側内部、(e2) 低緯度側境界を示している。赤のダッシュ線は電子の圧力勾配力の平均値を示しており、右上に示している。

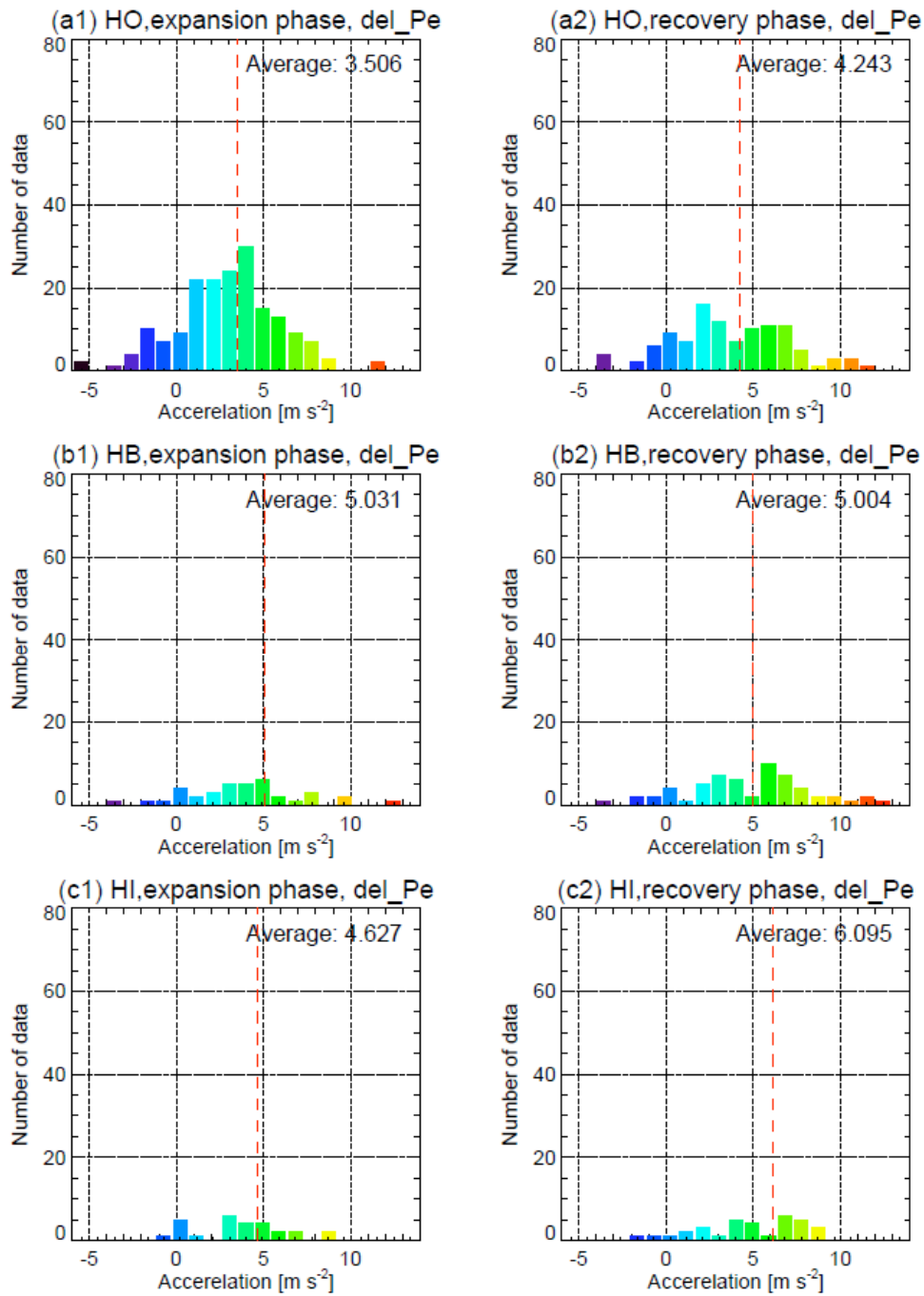


図 5.20: 電子の圧力勾配力のフェーズごとの分布を示す。パネルは (a) バルジの高緯度側外部、(b) 高緯度側境界、(c) 高緯度側内部を示している。赤のダッシュ線は電子の圧力勾配力の平均値を示しており、右上に示している。

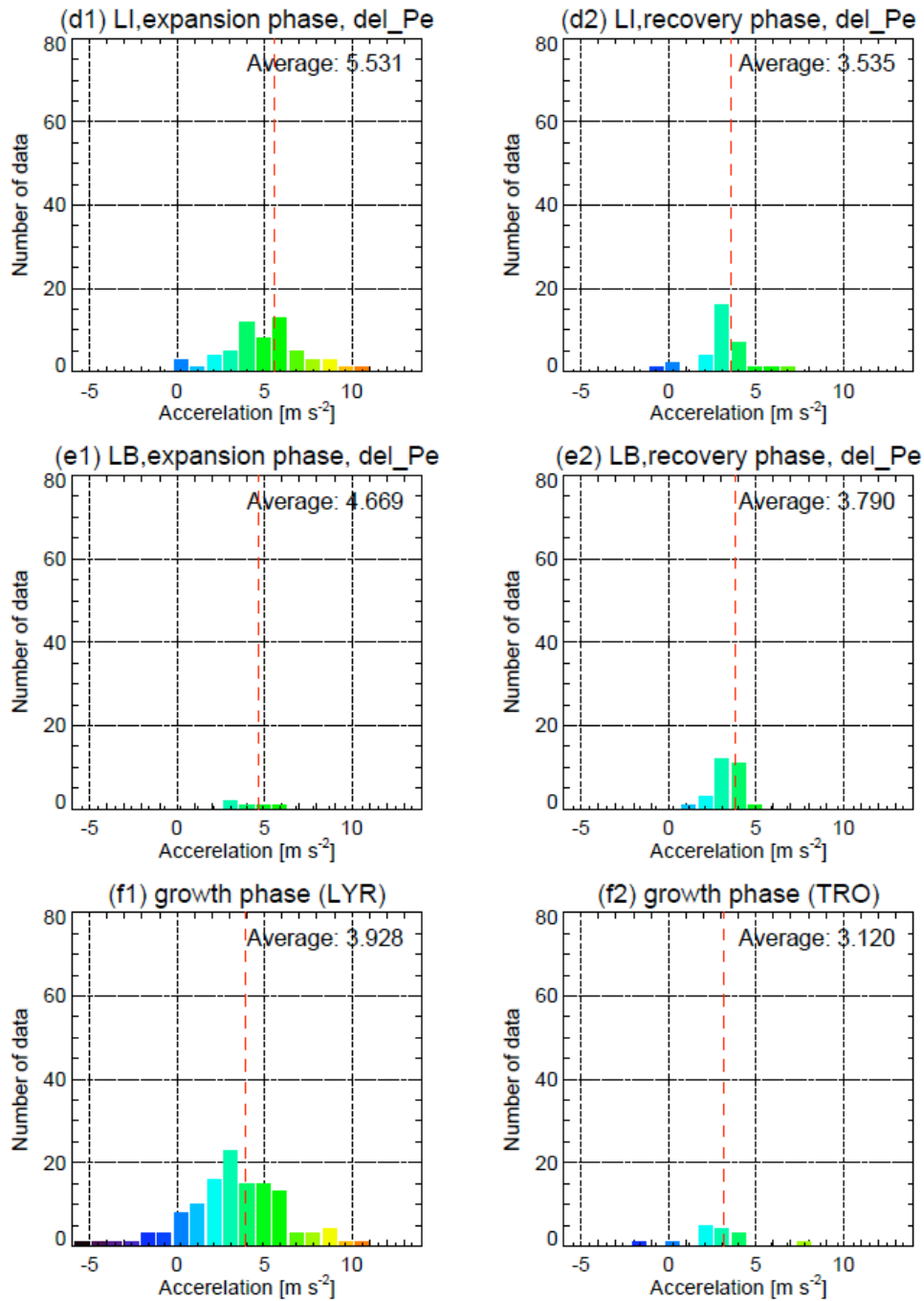


図 5.21: 電子の圧力勾配力のフェーズごとの分布を示す。パネルは (d) 低緯度側内部、(e) 低緯度側境界を示している。(f) はグロースフェーズの電子の圧力勾配力を示している。赤のダッシュ線は電子の圧力勾配力の平均値を示しており、右上に示している。

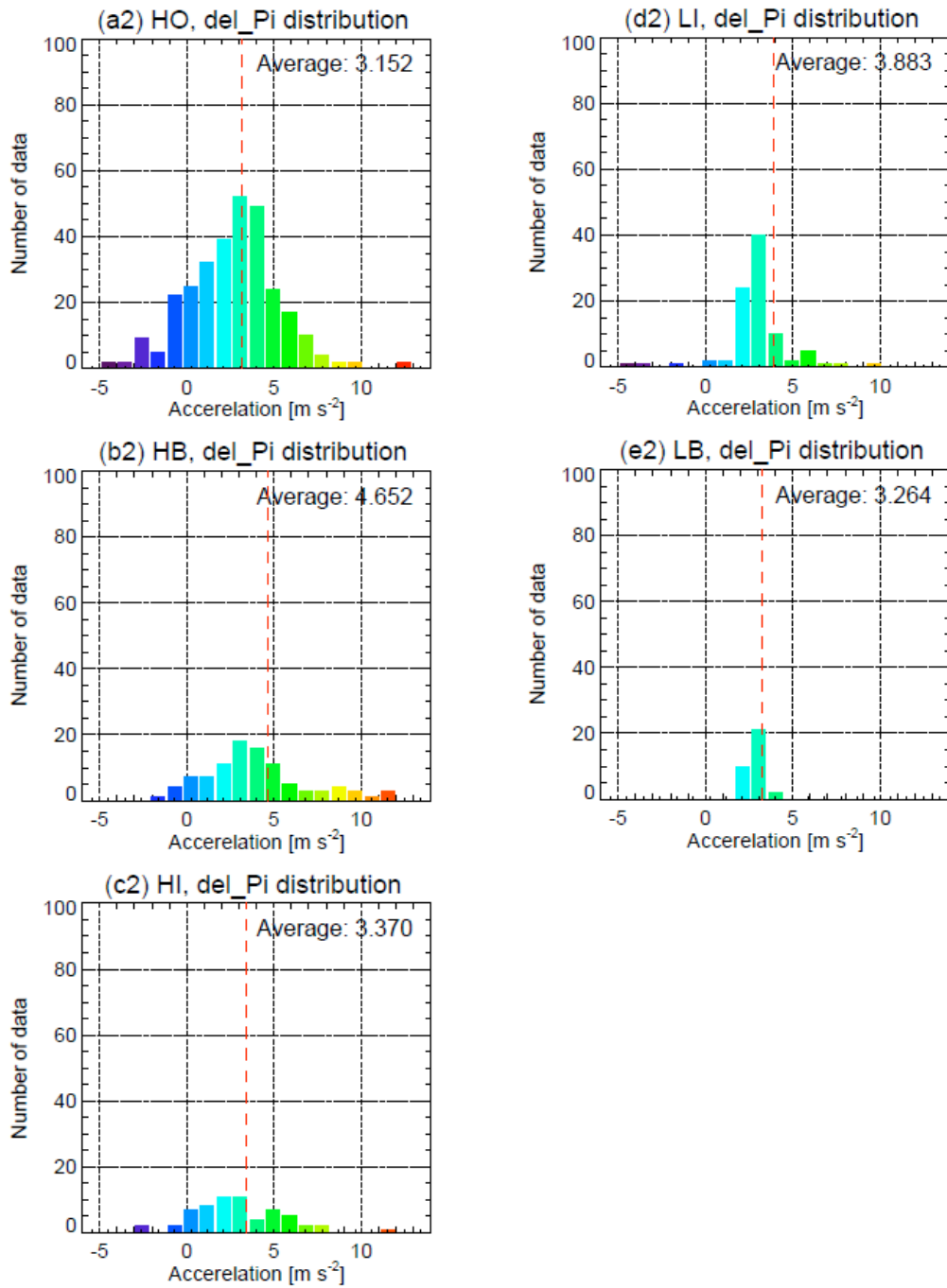


図 5.22: イオンの圧力勾配力の分布を示す。図 5.19 と同様の形式で示している。

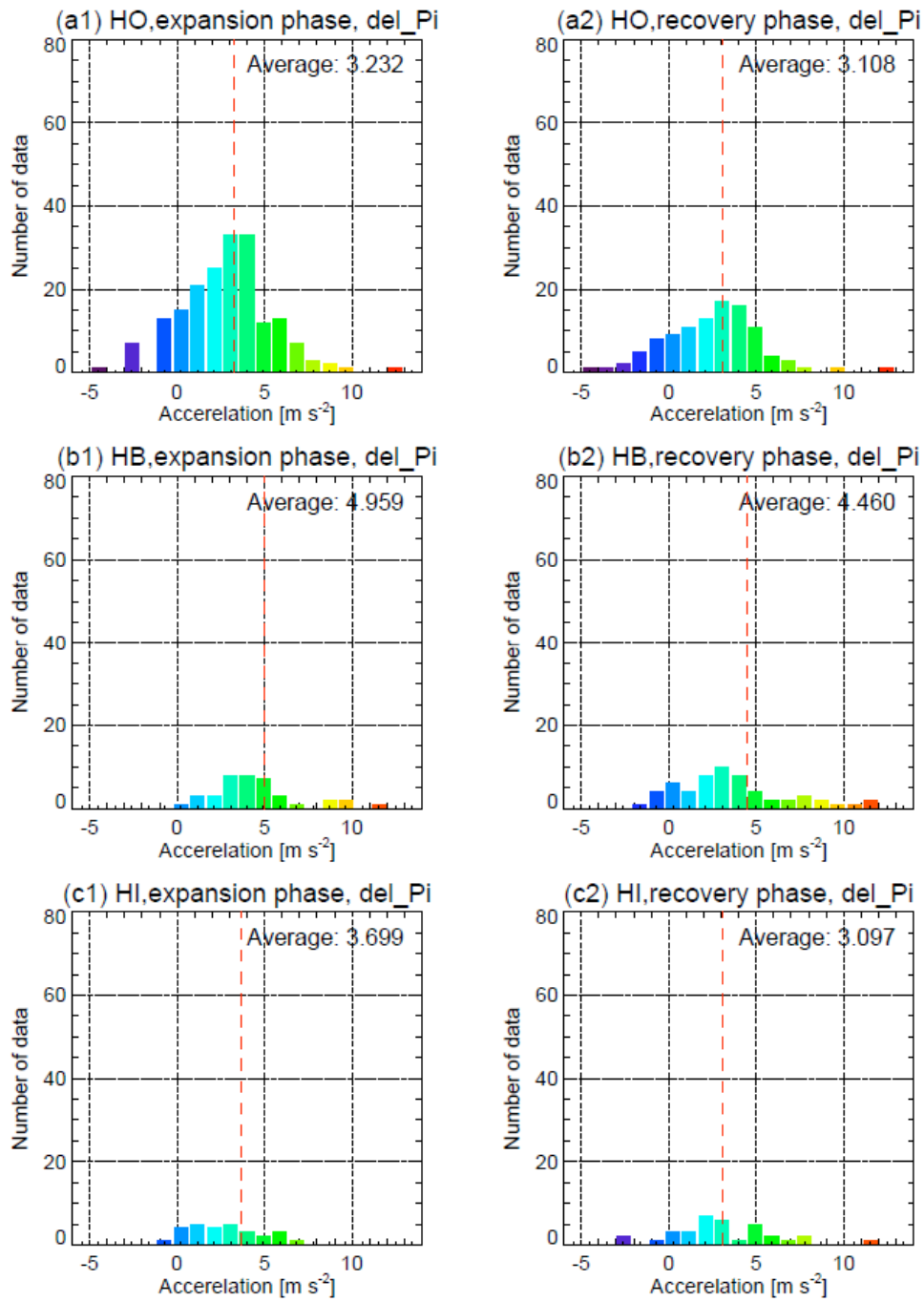


図 5.23: イオンの圧力勾配力のフェーズごとの分布を示す。図 5.20 と同様の形式で示している。

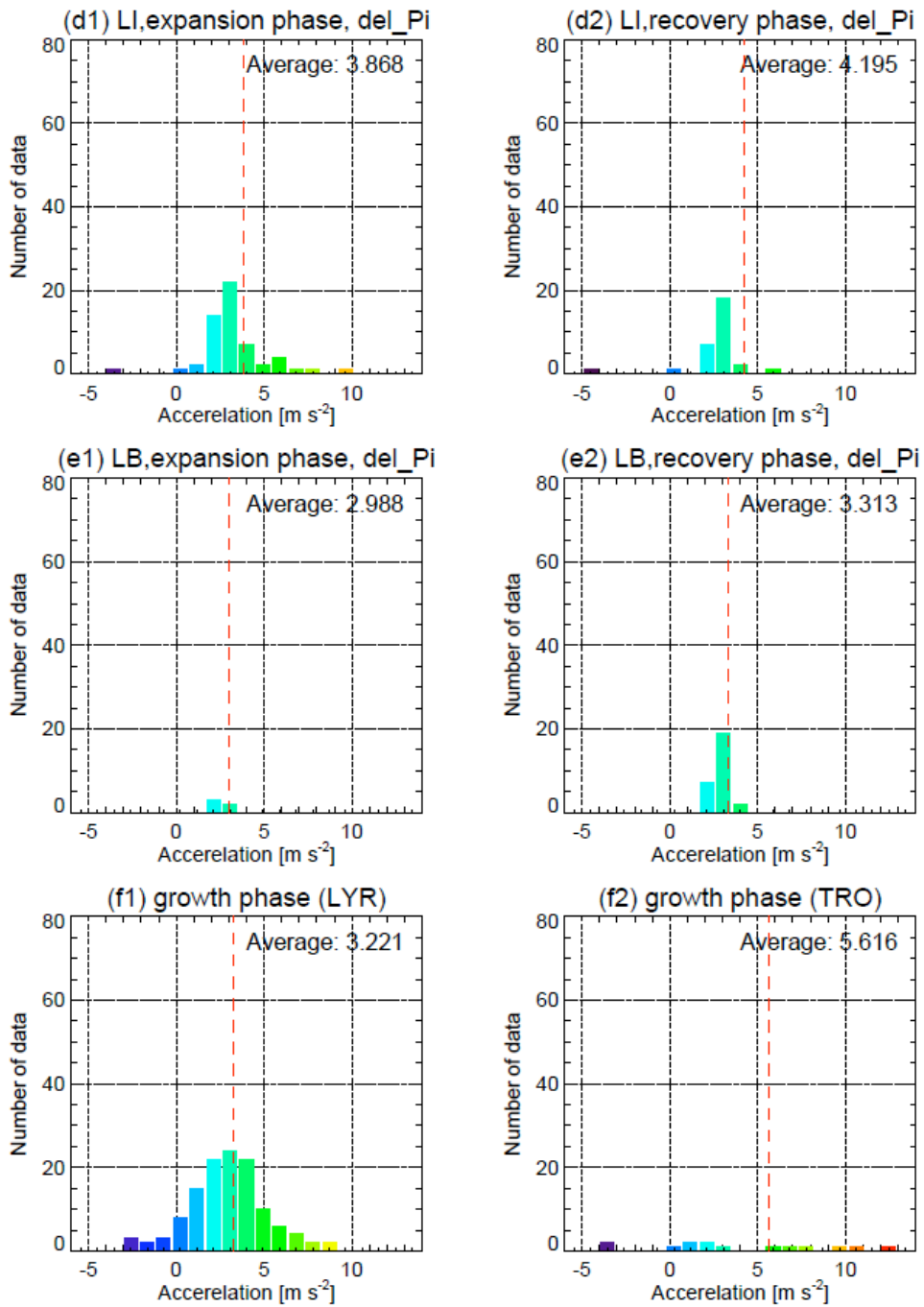


図 5.24: イオンの圧力勾配力のフェーズごとの分布を示す。図 5.21 と同様の形式で示している。

第6章 まとめと今後の課題

本論文では、2000年5月から2002年12月までのEISCATレーダーとIMAGE衛星WICデータから得られた13例のサブストーム同時観測イベントを用いることにより、オーロラサブストームに伴って発生する極域電離圏イオン上昇流が

- ・ サブストームのフェーズ
- ・ オーロラバルジとの位置関係
- ・ サブストームの規模

によって、発生要因も含めてどのように変化するかを詳細に調べた。

その結果、特に(1)サブストームのバルジに対する領域の違い、(2)サブストームのフェーズの違いについて、以下に挙げるイオン上昇流の特徴が得られた。

1 オーロラサブストーム中のバルジの高緯度側内部及びその高緯度側境界では、低緯度側内部やその低緯度側境界に比べて、イオン上昇流のイオン速度及びフラックスの大きいことが明らかになった。特にバルジの高緯度側境界領域ではイオンの上向き速度の平均値が約 180 m s^{-1} 、上向きイオンフラックスの平均値が $3.7 \times 10^{13} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と最も大きい。このバルジの高緯度側境界領域で平均電子温度が高い事に加え、イオン温度及びイオンの沿磁力線上向き圧力勾配力が、バルジの中外で最も大きな値を示していた。このイオン温度の上昇は、電離圏電場の増大による摩擦加熱に起因する。そのため、この速度の大きいイオン上昇流は、バルジの高緯度側境界に特有な南北成分の強い電場領域で発生していた可能性を指摘した。

2 サブストームのバルジに対する領域の違いによって、サブストームのフェーズによるイオン上昇流の特徴に違いが見られた。その結果のまとめを、図6.1に示す。バルジの高緯度側外部以外の領域ではエクспанションフェーズからリカバリーフェーズにかけて平均イオン速度が小さくなるのに対し、バルジの高緯度側外部ではエクспанションフェーズからリカバリーフェーズにかけて上向きイオン速度の平均値が 100 m s^{-1} と大きくなっていった。これらの解析結果から、リカバリーフェーズには極冠域でもイオン上昇流を引き起こす加熱・加速源が供給されるようになることが考えられる。

今後の課題として、

- (1) サブストーム発生時に極域全体でどのようなイオン上昇流の特徴の違い

が見られるかについては、未だ十分に理解されていない。そこで、極域に設置されている Sondrestrom IS レーダーや AMISR (Advanced Modular Incoherent Scatter Radar) などの非干渉レーダーによる観測を EISCAT レーダーと連携して実施することにより、イオン上昇流のグローバルな時間・空間変動を理解すること、

- (2) 今回の解析で得られた EISCAT レーダーと IMAGE 衛星のサブストーム同時観測イベント時に、磁気圏を飛翔していた人工衛星の粒子データ（例えば IMAGE 衛星 LENA 等）を組み合わせることで解析することにより、極域電離圏イオン上昇流が、磁気圏で観測される電離圏起源イオンとどのように関連しているかについての理解を深めること、
- の 2 点が挙げられる。

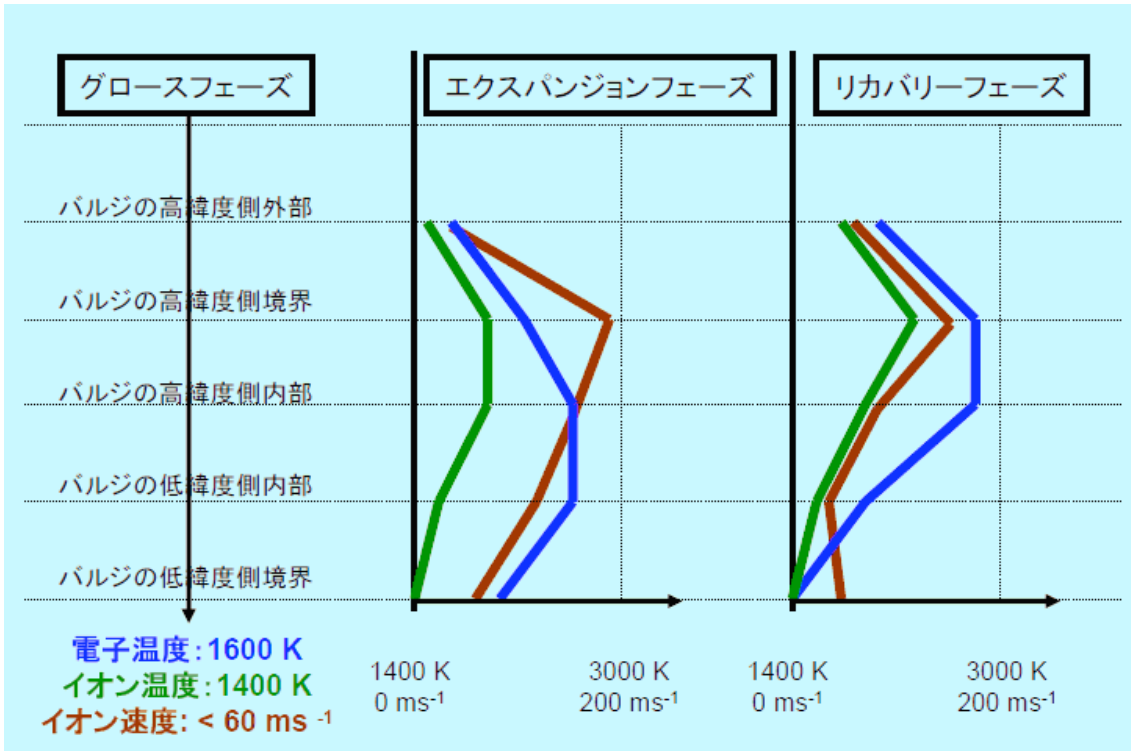
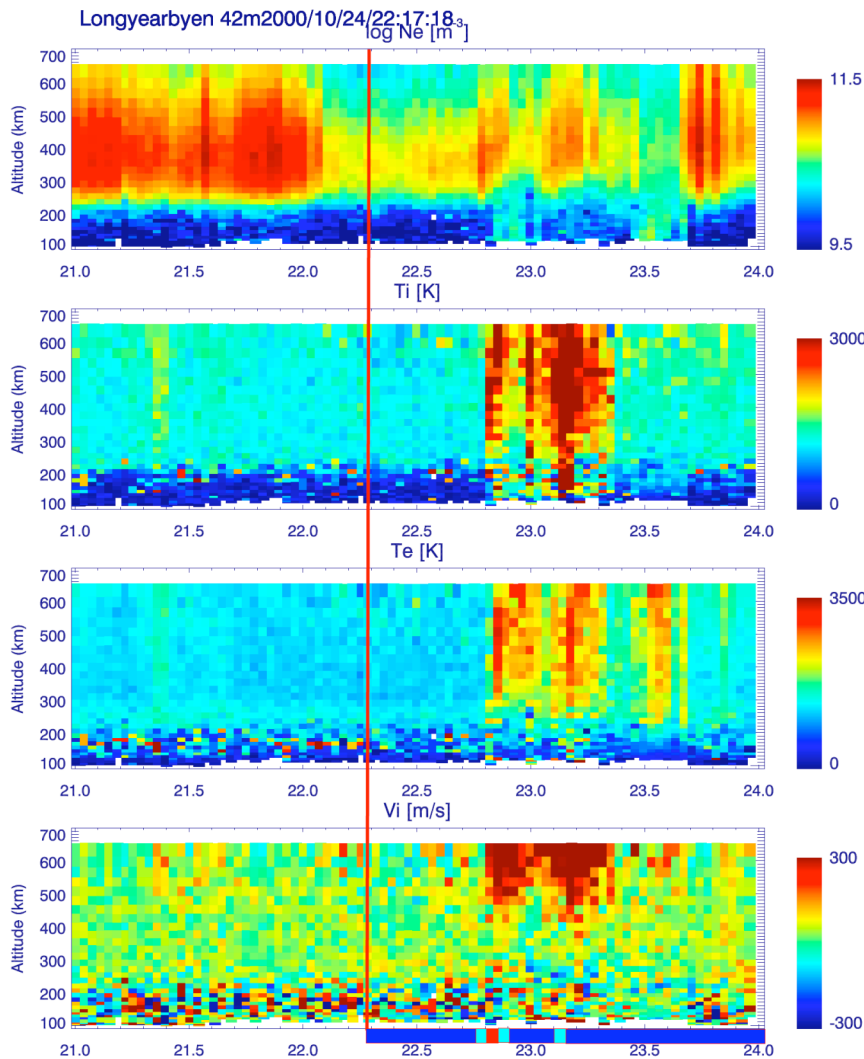


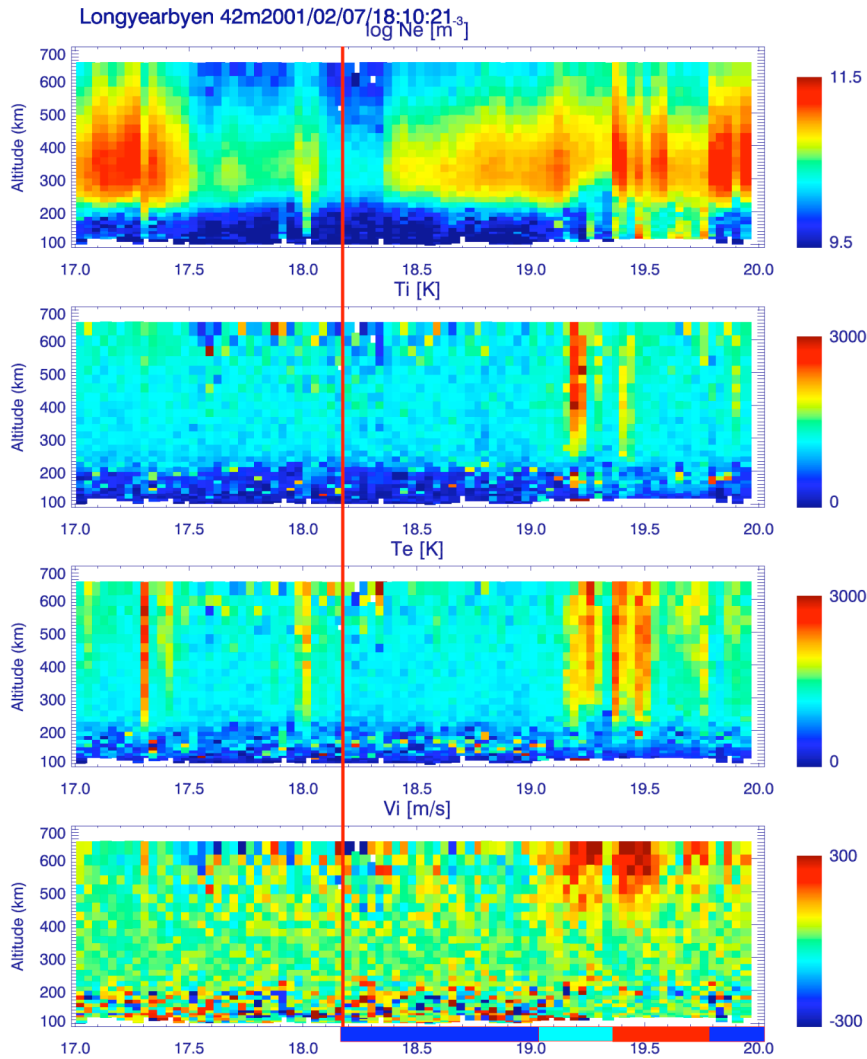
図 6.1 サブストームにフェーズ毎に得られた電離圏イオン上昇流の特徴と関係するプラズマ加熱の特徴。

Appendix A

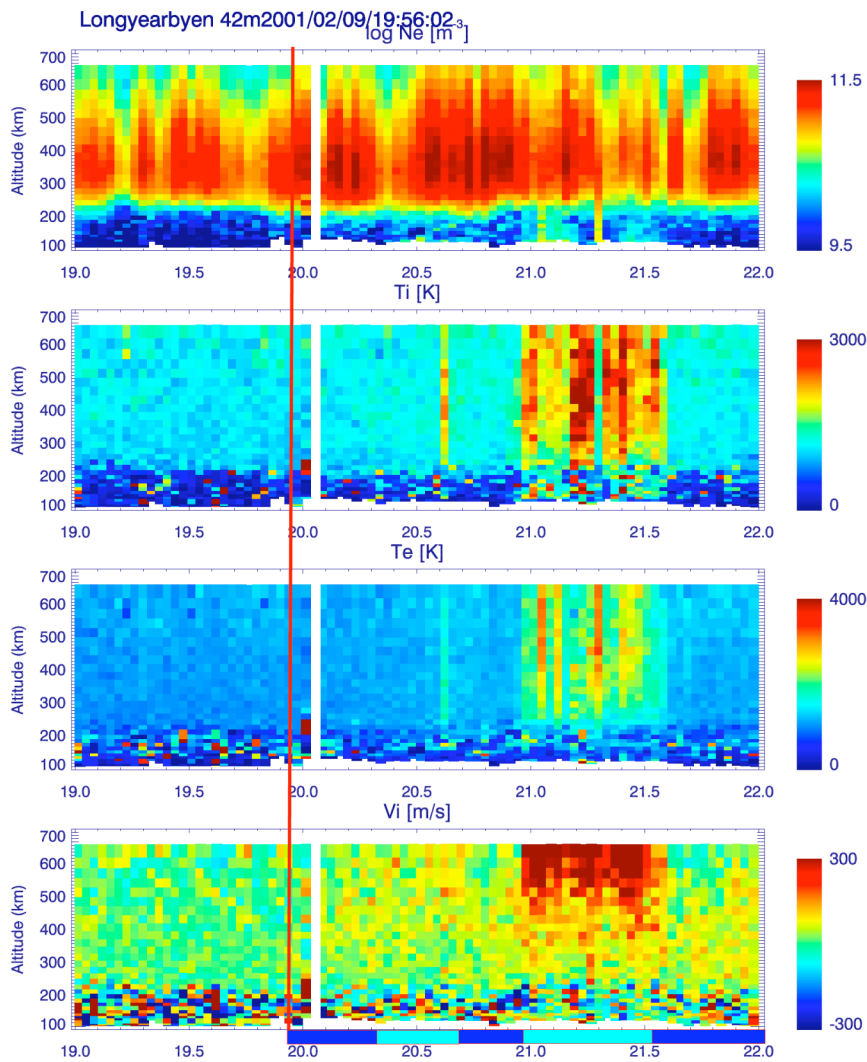
本研究で抽出した EISCAT レーダーと IMAGE 衛星の同時観測イベントの 11 イベント (4 章で示した 2001 年 9 月 25 日 2030 UT サブストームイベントは除く) について掲載する。



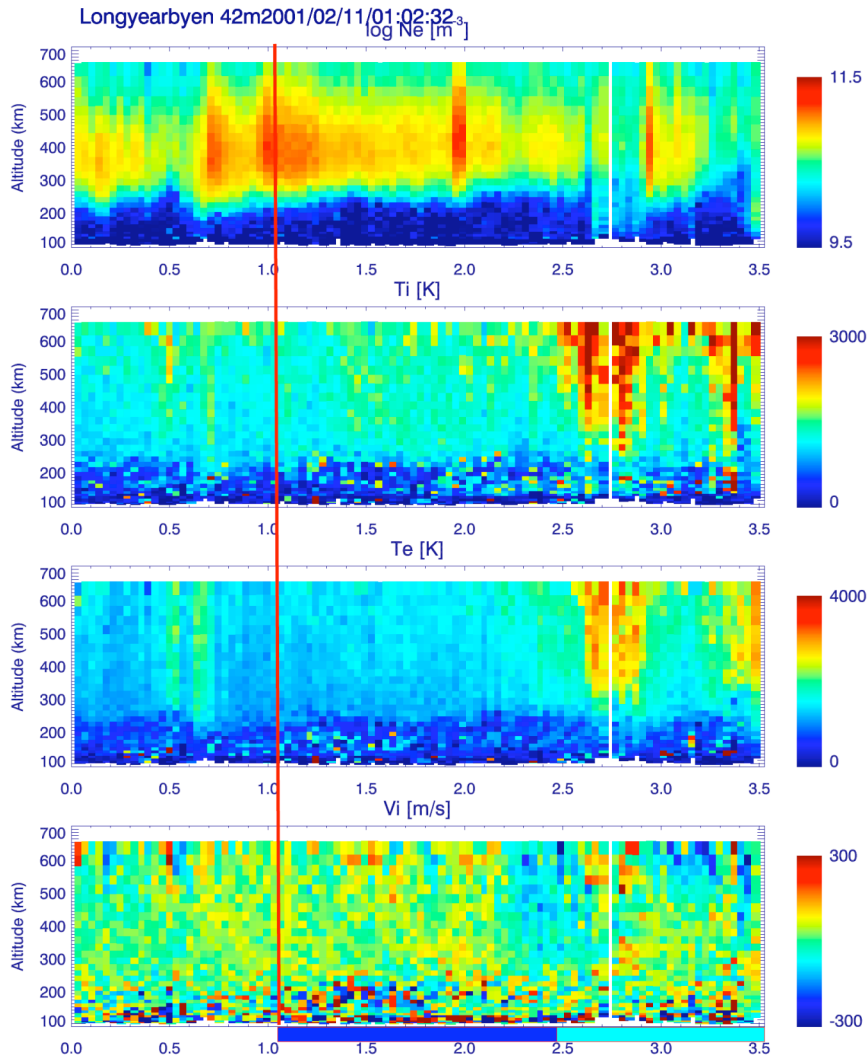
A1: 2000 年 10 月 24 日のイベント。ESR で得られた、高度 80 から 650 km までの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。青色: 高緯度側外部、水色: 高緯度側境界、赤色: 高緯度側内部を示している。



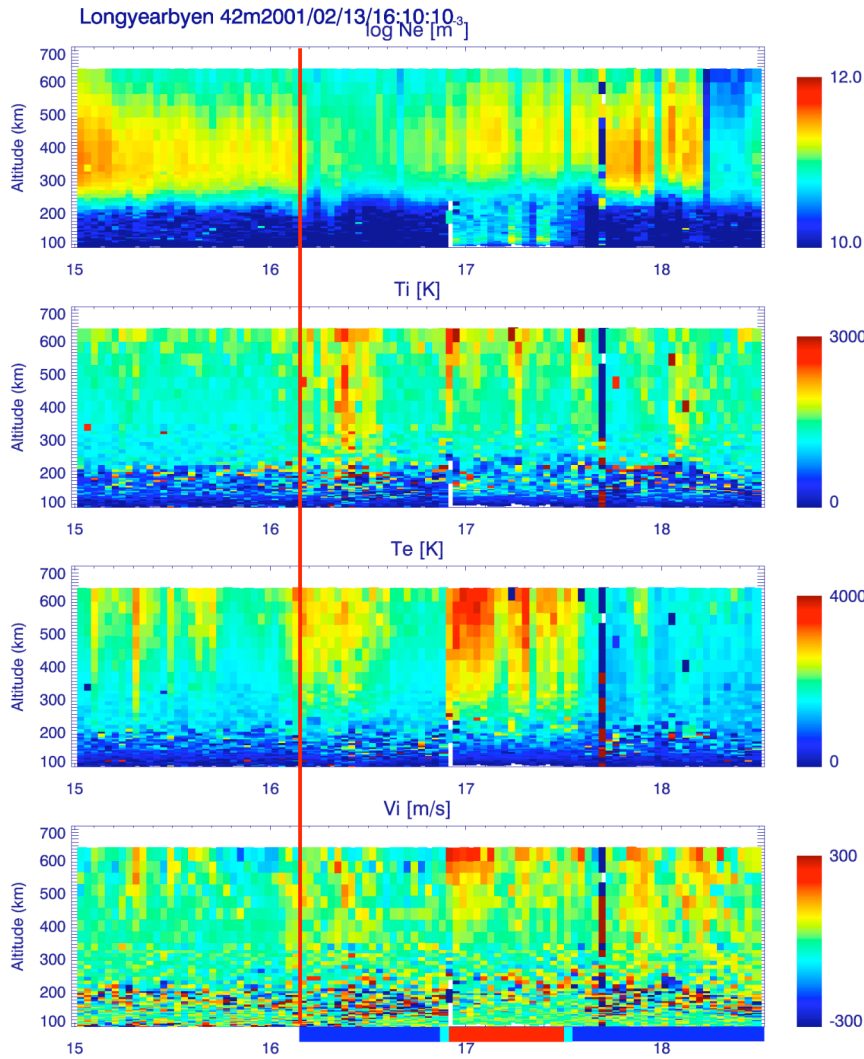
A3: 2001年2月7日のイベント。ESRで得られた、高度80から650 kmまでの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。青色: 高緯度側外部、水色: 高緯度側境界、赤色: 高緯度側内部を示している。



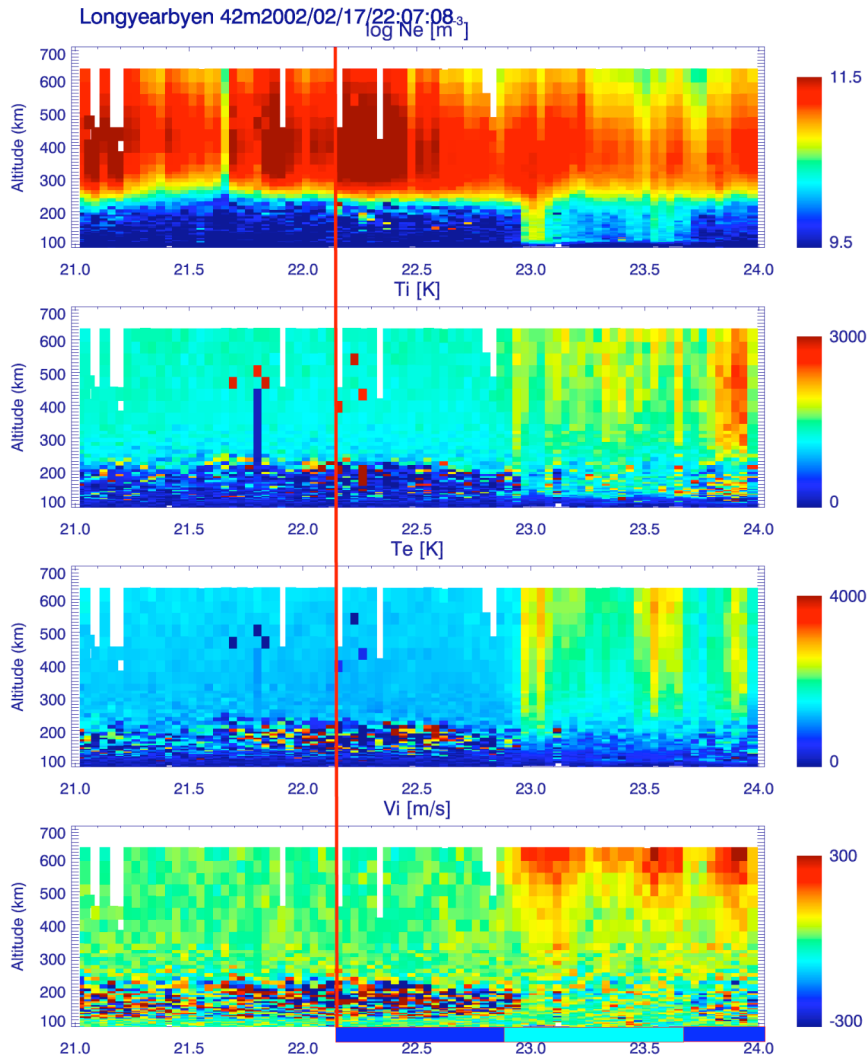
A4: 2001年2月9日のイベント。ESRで得られた、高度80から650 kmまでの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。青色: 高緯度側外部、水色: 高緯度側境界を示している。



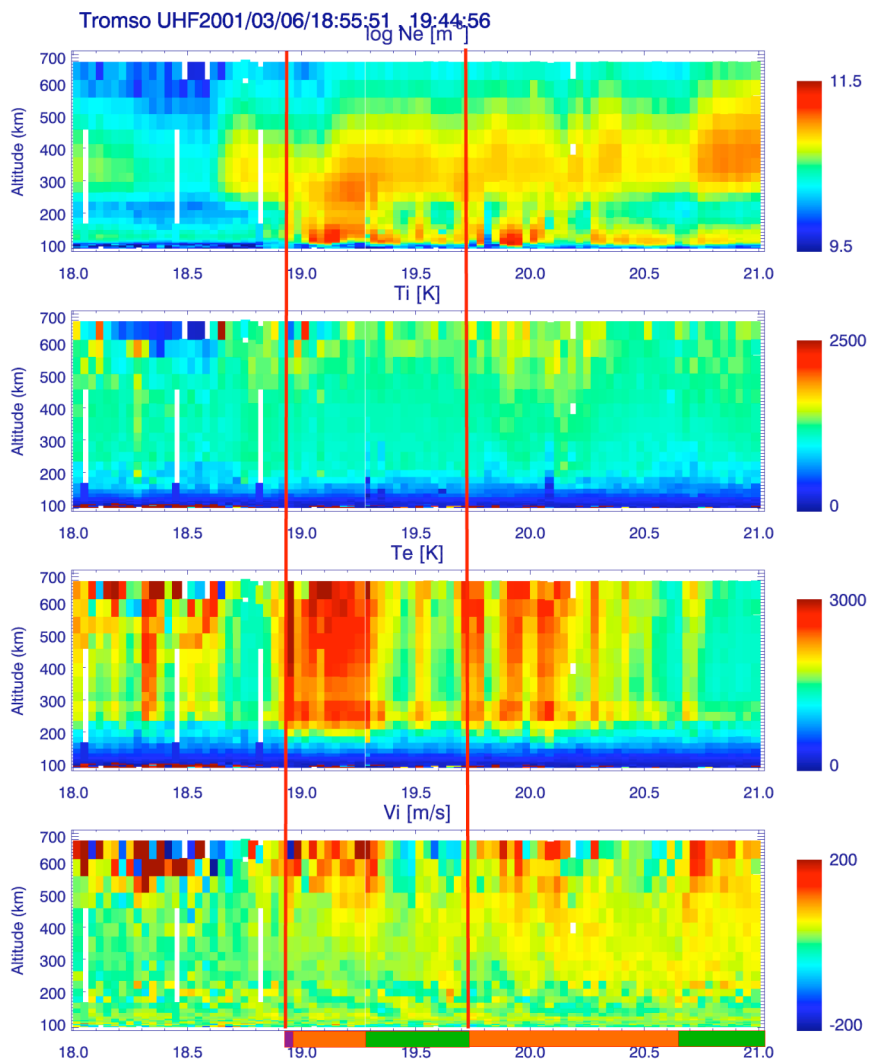
A5: 2001年2月11日のイベント。ESRで得られた、高度80から650 kmまでの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。青色: 高緯度側外部、水色: 高緯度側境界を示している。



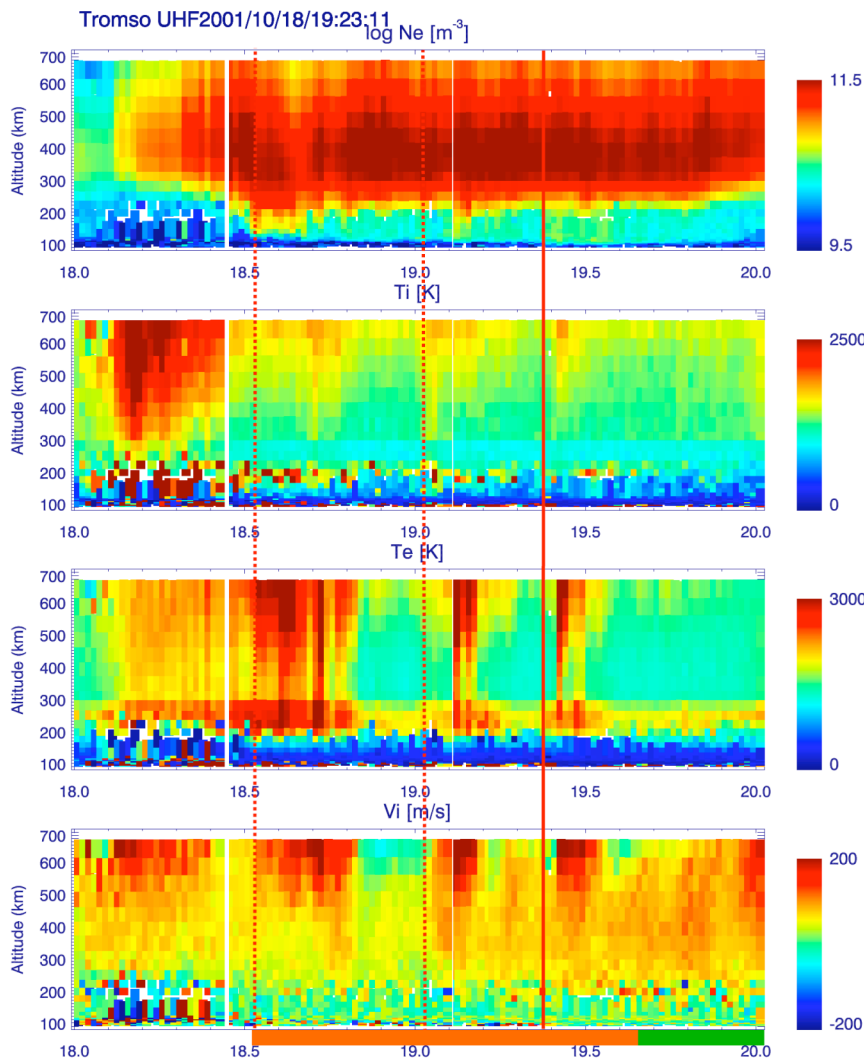
A6: 2001年2月13日のイベント。ESRで得られた、高度80から650 kmまでの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。青色: 高緯度側外部、水色: 高緯度側境界、赤色: 高緯度側内部を示している。



A8: 2002年2月17日のイベント。ESRで得られた、高度80から650 kmまでの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。青色: 高緯度側外部、水色: 高緯度側境界を示している。



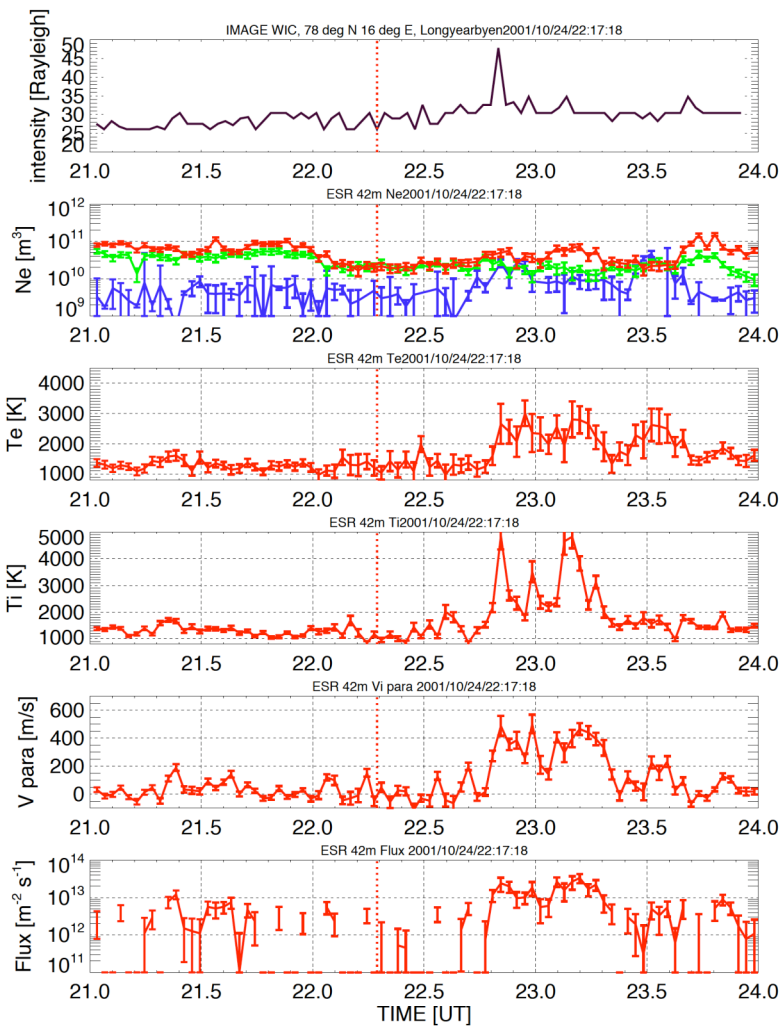
A9: 2001年3月6日のシュードブレイクアップイベント。トロムソ UHF レーダーで得られた、高度 80 から 650 km までの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。紫色: 低緯度側外部、橙色: 低緯度側内部、緑色: 低緯度側境界を示している。



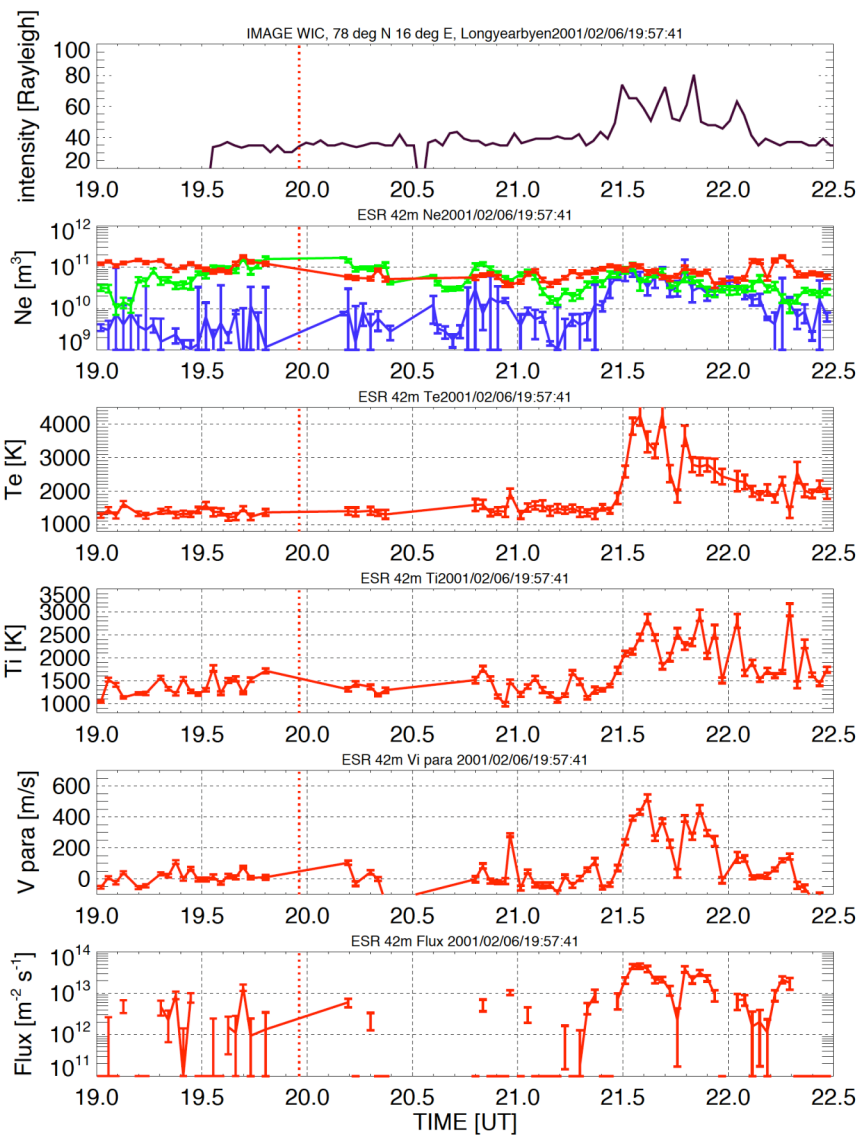
A10: 2001年10月18日のシュードブレイクアップイベント。トロムソUHFレーダーで得られた、高度80から650 kmまでの電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度の時間変化を示す。一番下段に各時刻でのバルジとレーダーの相対的な位置関係について示している。橙色: 低緯度側内部、緑色: 低緯度側境界を示している。

Appendix B

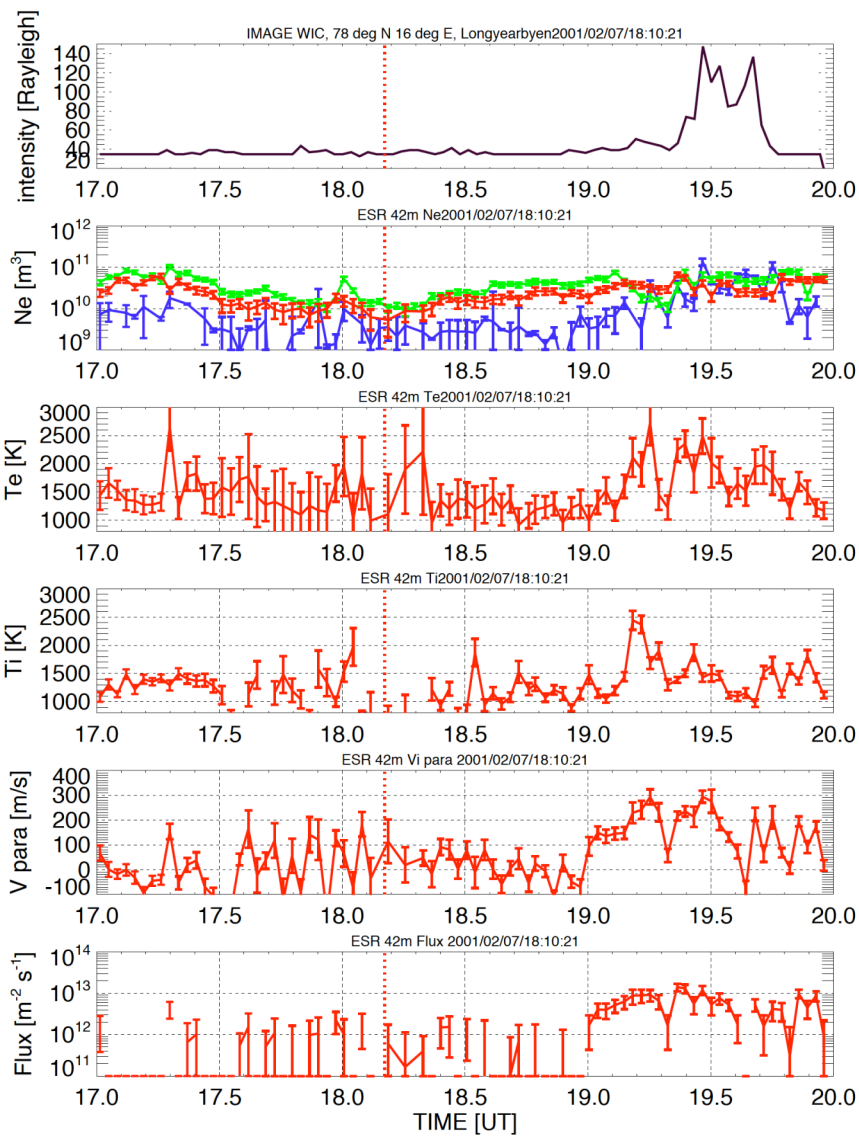
本研究で抽出した EISCAT レーダーと IMAGE 衛星の同時観測イベントの 11 イベント (4 章で示した 2001 年 9 月 25 日 2030 UT サブストームイベントは除く) について発光強度と各物理量の時間変化を示す。



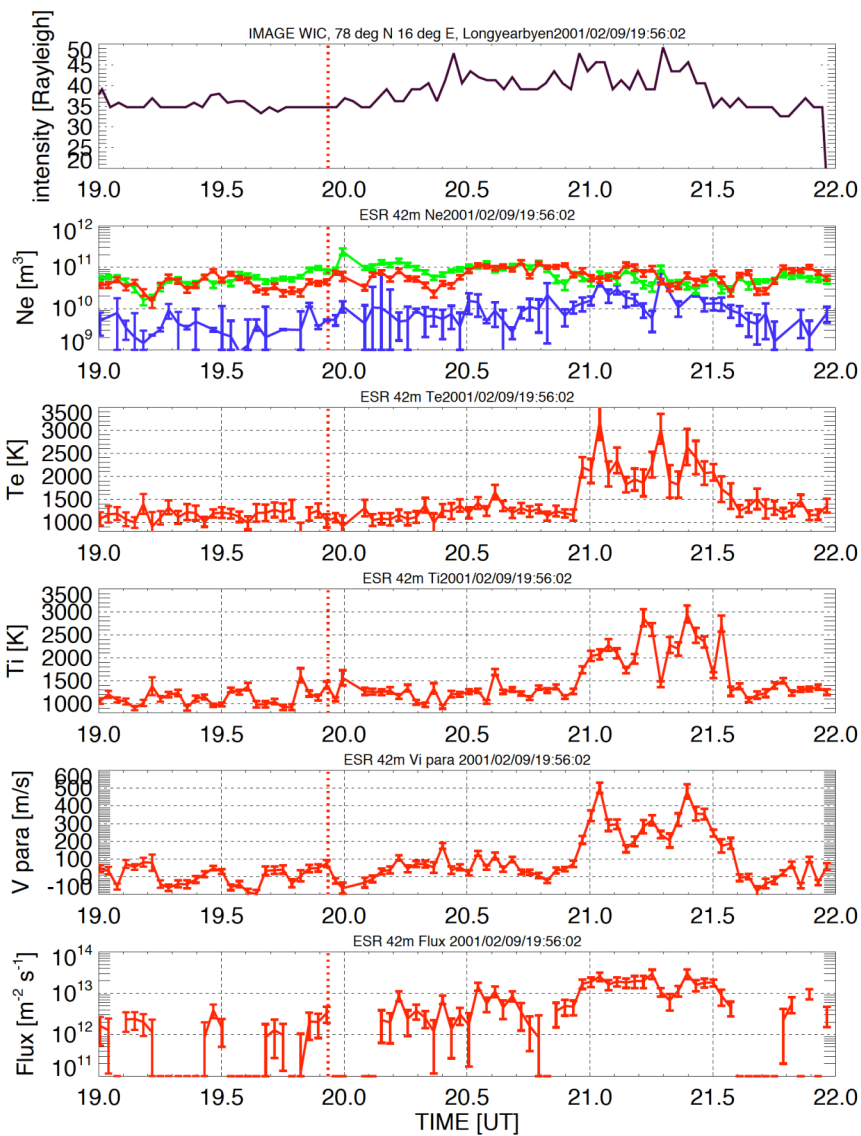
B1: 2000 年 10 月 24 日のイベント。上段から順に、ESR 上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約 600 km、青線は高度約 110 km、緑線は高度約 240 km を示している。赤の縦線はイニシャルブライティングの時刻を示している。



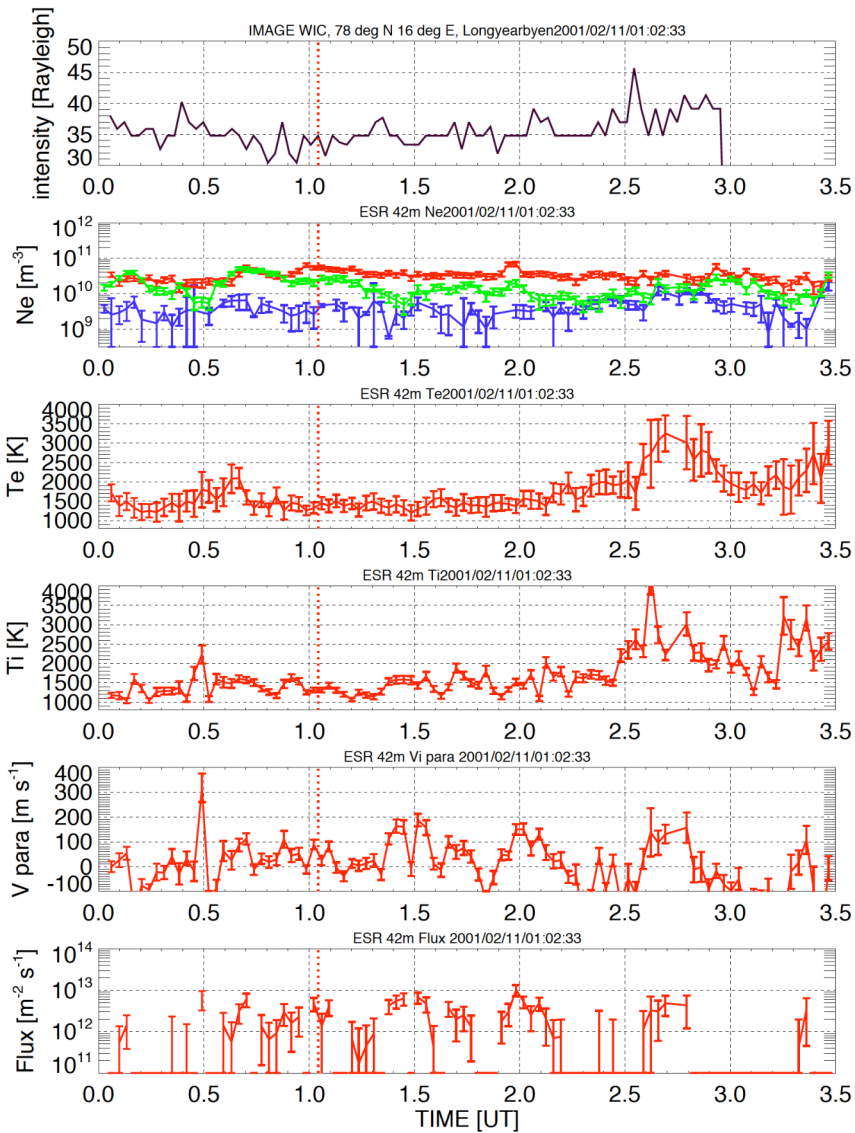
B2: 2001年2月6日のイベント。上段から順に、ESR上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約600 km、青線は高度約110 km、緑線は高度約240 kmを示している。赤の縦線はインシャルブライティングの時刻を示している。



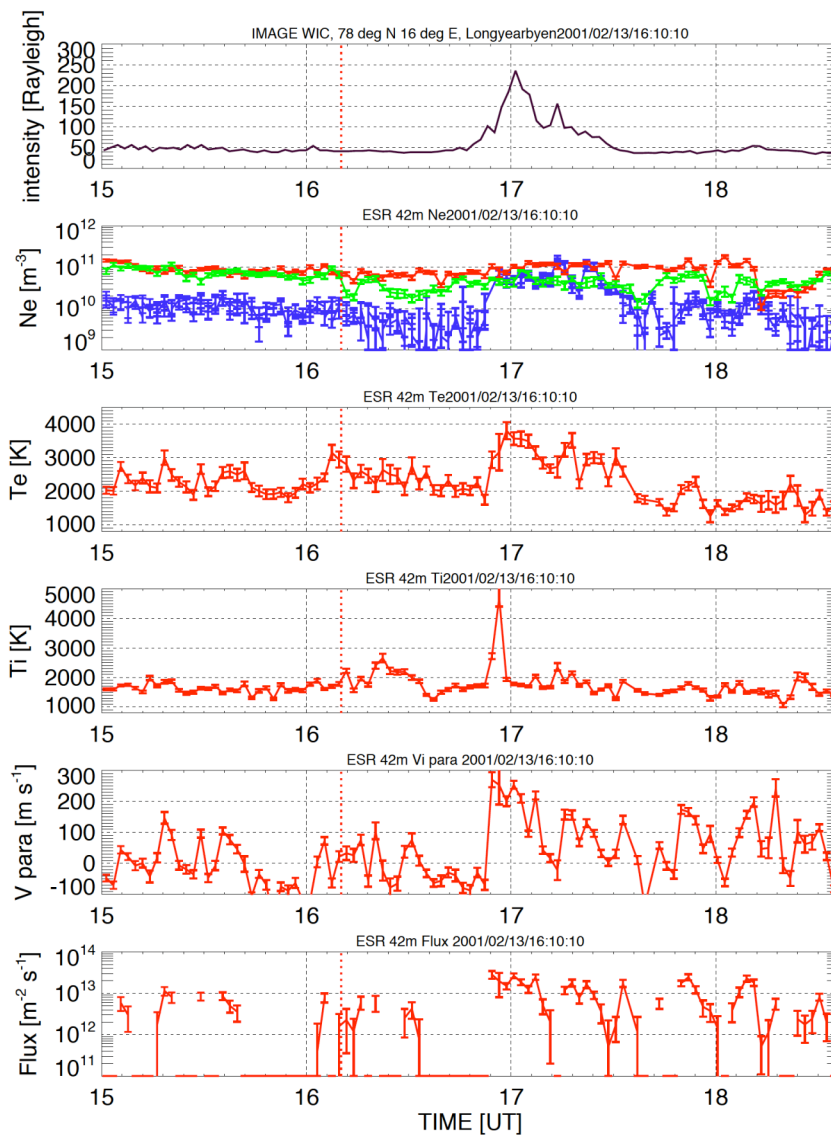
B3: 2001年2月7日のイベント。上段から順に、ESR上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約600 km、青線は高度約110 km、緑線は高度約240 kmを示している。赤の縦線はイニシャルブライティングの時刻を示している。



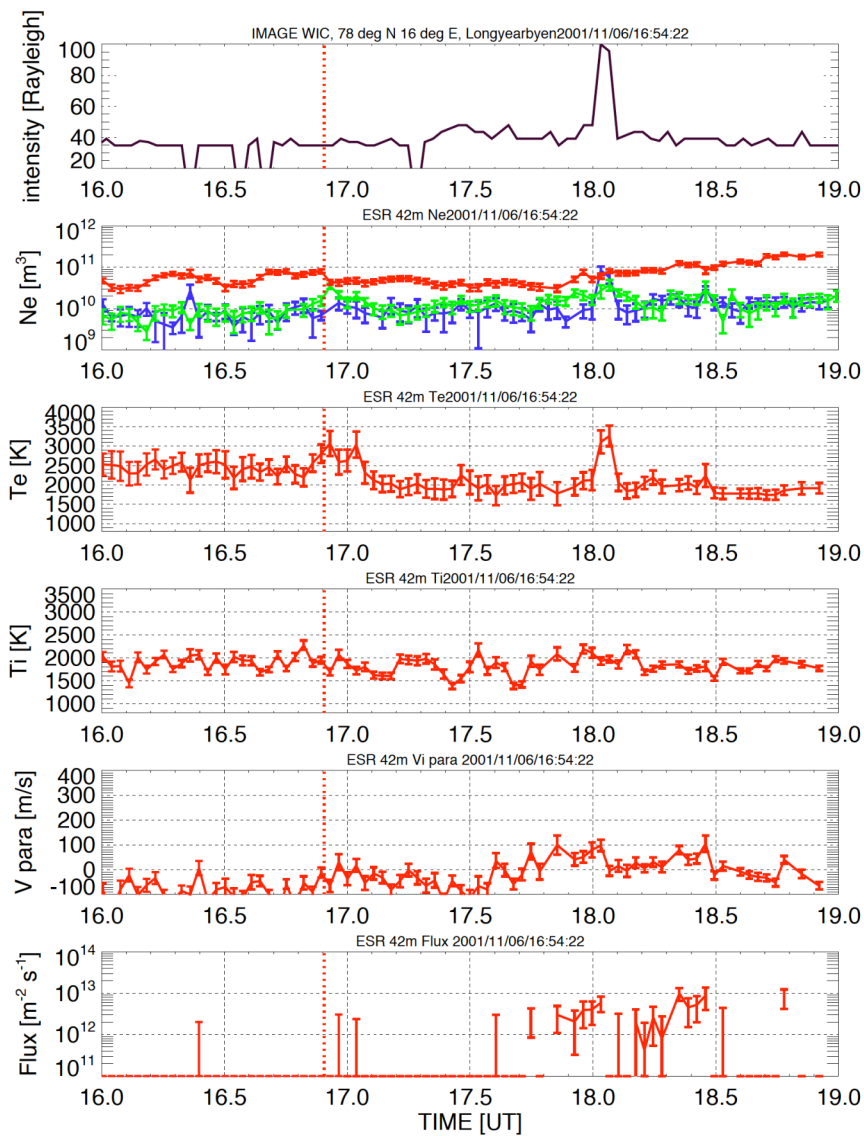
B4: 2001年2月9日のイベント。上段から順に、ESR上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約600 km、青線は高度約110 km、緑線は高度約240 kmを示している。赤の縦線はイニシャルブライティングの時刻を示している。



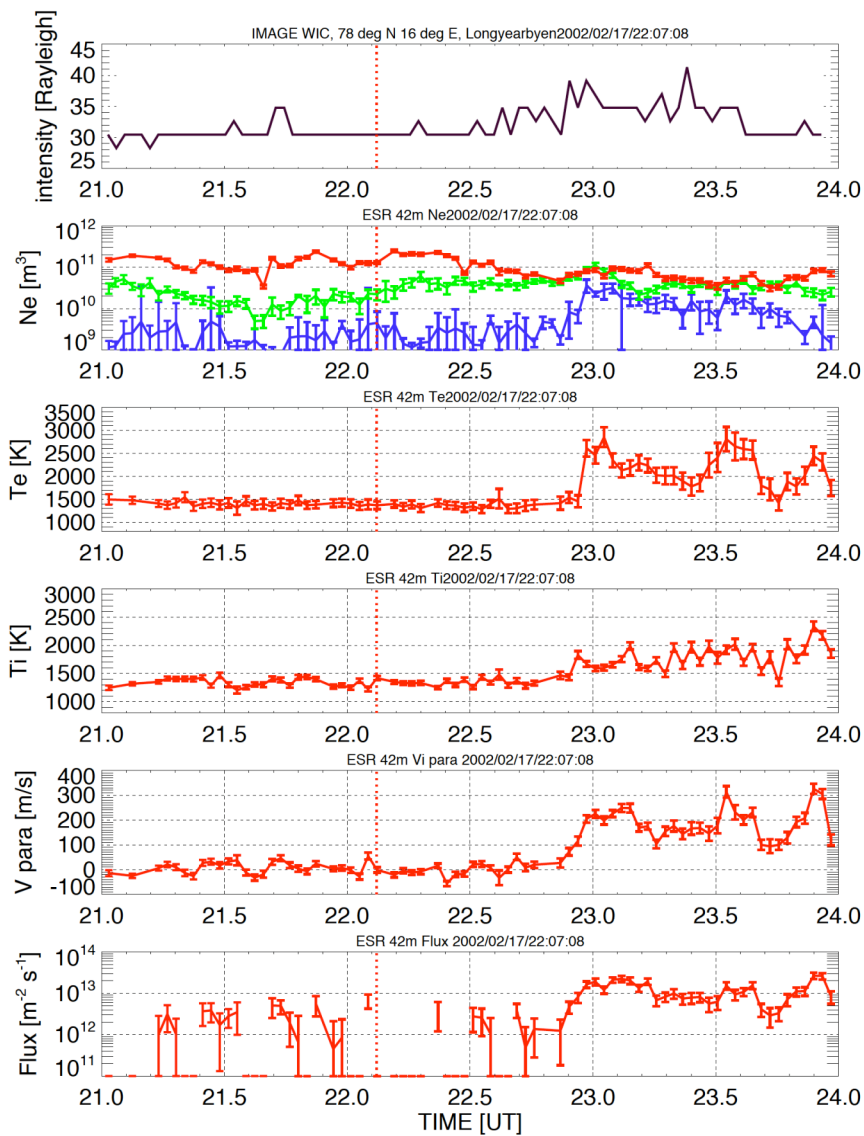
B5: 2001年2月11日のイベント。上段から順に、ESR上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約600 km、青線は高度約110 km、緑線は高度約240 kmを示している。赤の縦線はイニシャルブライティングの時刻を示している。



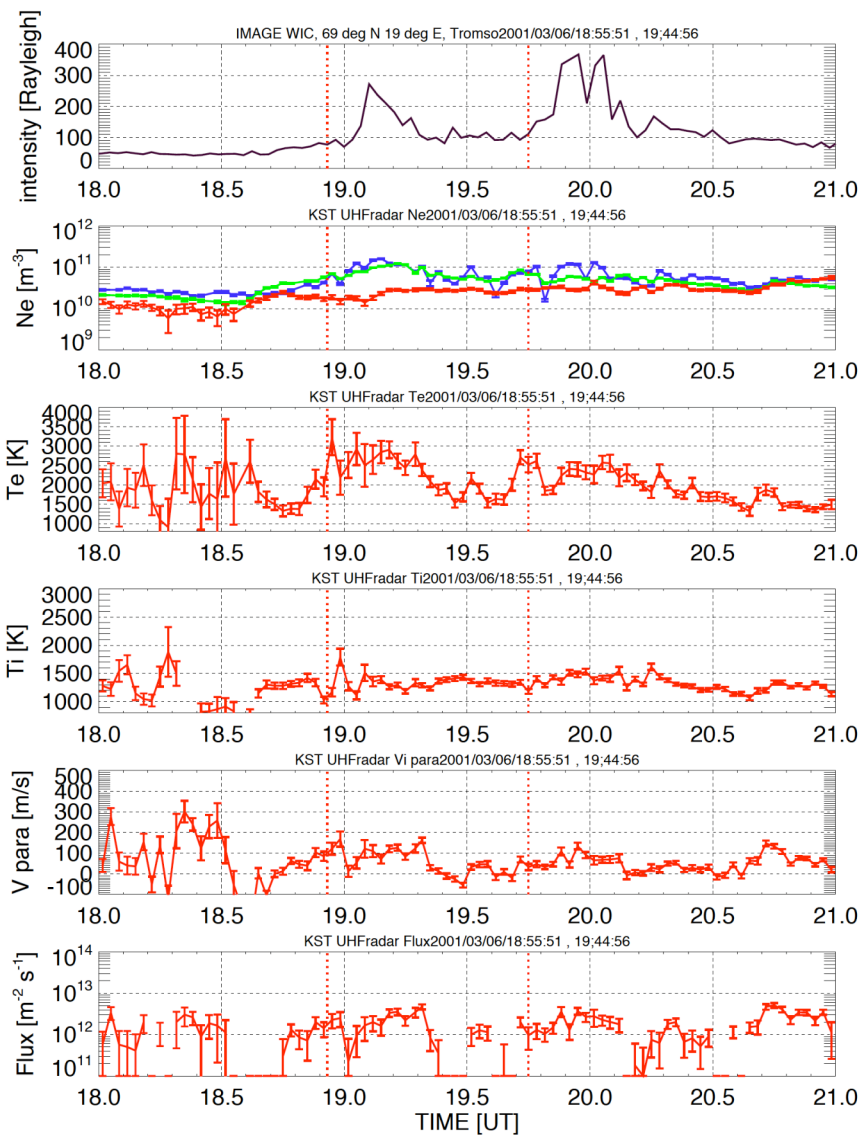
B6: 2001年2月13日のイベント。上段から順に、ESR 上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約 600 km、青線は高度約 110 km、緑線は高度約 240 km を示している。赤の縦線はイニシャルブライティングの時刻を示している。



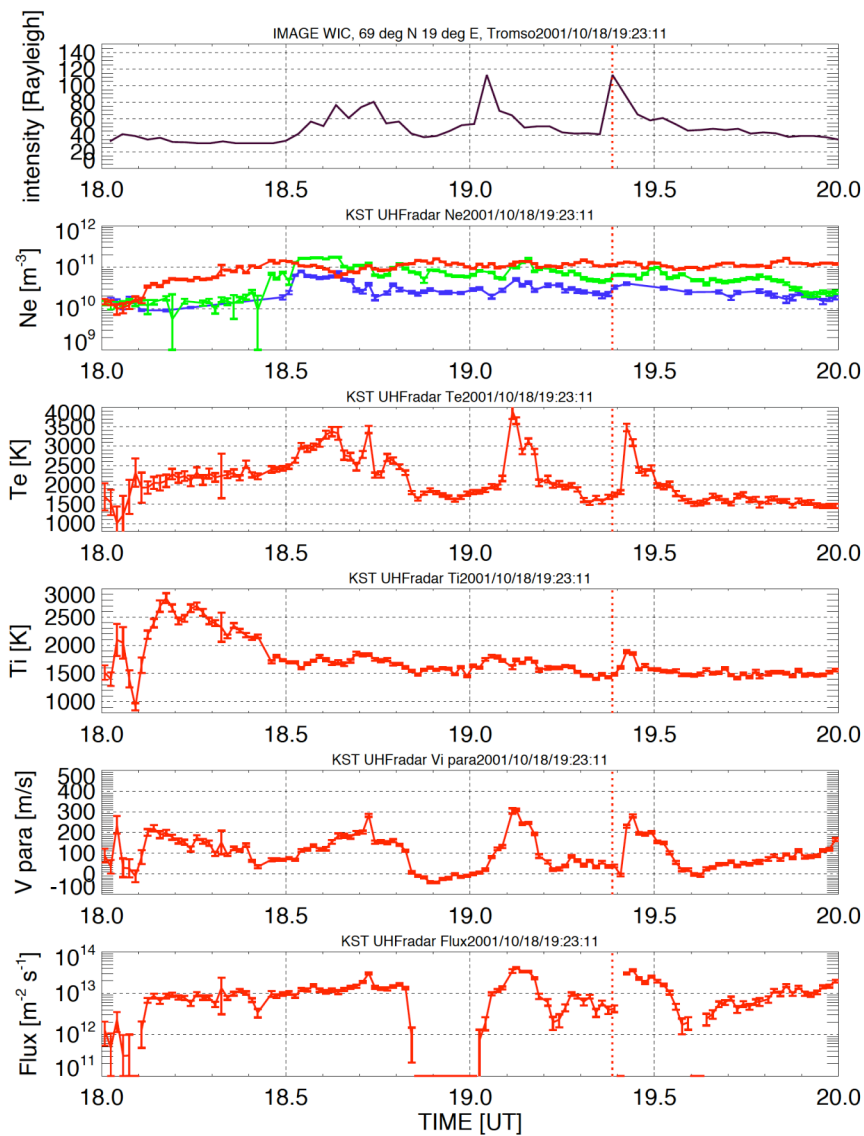
B7: 2001年11月6日のイベント。上段から順に、ESR上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約600 km、青線は高度約110 km、緑線は高度約240 kmを示している。赤の縦線はインシャルブライティングの時刻を示している。



B8: 2002年2月17日のイベント。上段から順に、ESR 上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約 600 km、青線は高度約 110 km、緑線は高度約 240 km を示している。赤の縦線はイニシャルブライティングの時刻を示している。



B9: 2001年3月6日のシュードブレイクアップイベント。上段から順に、 Tromsø UHF レーダー上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約 600 km、青線は高度約 110 km、緑線は高度約 240 km を示している。赤の縦線はインシャルブライティングの時刻を示している。



B10: 2001年10月18日のシュードブレイクアップイベント。上段から順に、トロムソ UHF レーダー上空の発光強度、電子密度、電子温度、イオン温度、沿磁力線イオン速度、イオンフラックスを示している。縦軸は各物理量の値、横軸は時間を示している。赤線は高度約 600 km、青線は高度約 110 km、緑線は高度約 240 km を示している。赤の縦線はインシャルブライティングの時刻を示している。

謝辞

本研究で使用したEISCATレーダーのデータEISCAT科学協会によって取得されたものであり、EISCAT科学協会および関連する方々すべてに感謝致します。また、CDWebに公開されているIMAGE衛星のデータおよびプログラムを使用させていただきました。関連する方々すべてに感謝致します。

本論文の作成にあたり、多くの方々の助けをいただきました。国立極地研究所の小川泰信講師には、プログラムやデータの取り扱い方から研究者としての姿勢まで、大変多くの時間を割いていただき、本研究にあたり多大な知識を与えていただきました。小川先生が名古屋大学から国立極地研究所に異動されるに当たり、多くのご配慮をいただきました。また、幾度かの国立極地研究所への出張の際、とても丁寧にご指導いただきました。いつも温かい言葉でご指導していただいた事、心から深く感謝致します。当研究室の野澤悟徳助教授には、大学院生としての日々の研究生活や本研究に対し、多くのご助言いただきました。また、Longyearbyenへの出張の際、海外での生活において大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。当研究室の大山伸一郎助手には、本論文執筆にあたり丁寧なご助言と日々の研究生活の中で温かいお言葉を多くいただきました。厚く感謝致します。当研究室のCOE研究員の元場哲郎さんには、本研究にあたり様々なご指導と丁寧なご助言をいただきました。ここに感謝の意を示します。本研究室の研究員の小泉宣子さんには、ゼミ等で優しくご指導いただきました。ここに感謝致します。当研究室の先輩である津田卓雄さんには、研究内容に対する質問や日々の生活まで大変お世話になりました。様々なお気遣いに変に感謝致します。当研究室の同輩である半田弘司さんには、研究を進める上で多くの刺激と助言をいただきました。大変感謝致します。当研究室の後輩の渡邊太基さんには、一生懸命研究に取り組む姿勢に大変刺激されました。感謝致します。

指導教官の藤井良一教授には、常に温かいお言葉をかけていただき、研究に対する姿勢など様々な面で多大なご指導いただきました。厚く御礼申し上げます。

また、優しい言葉や厳しい言葉で私を支えてくれた友人にも感謝致します。最後に、2年間大学院に通わせてくれて、どんな時も私を支えてくれていた家族に感謝致します。

参考文献

恩藤忠典、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

福西浩、国分征、松浦延夫 (国立極地研究所編)、オーロラと超高層大気、南極の科学2、古今書院、1983

Akasofu, S. -I., The development of the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, *12*, 273-282, 1964

Aikio, A. T., T. Pitkanen, A. Kozlovsky, O. Amm, Method to locate the polar cap boundary in the nightside ionosphere and application to a substorm event, *Ann. Geophysicae*, *24*, 7, 1905-1917, 2006

Andersson, L., Peterson, W. K. and McBryde, K. M., Dynamic coordinates for auroral ion outflow, *J. Geophys. Res.*, *109*, 1029/2004JA010414, 2004

Carton, R., Horwitz, L., Richards, P. G., and Liu, C., Modeling of F-region ionospheric upflows observed by EISCAT, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. *23*, No. *12*, 1537-1540, 1996

Dessler, A. J., and F.C. Michel, Plasma in the geomagnetic tail, *J. Geophys. Res.*, *71*, 1421, 1966

Dungey, J. W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, *6*, 47-48, 1961

Endo, M., R. Fujii, Y. Ogawa, S.C. Buhert, S. Nozawa, S. Watanabe, N. Yoshida, Ion upflow and down flow at the topside ionosphere observed by the EISCAT VHF radar, *Ann. Geophysicae*, *18*, 170, 2000

Foster, C., M. Lester and J. A. Davies, A statistical study of diurnal, seasonal and solar cycle variations of F-region and topside auroral upflows observed by EISCAT between 1984 and 1966, *Ann. Geophysicae*, *16*, 1144-1158, 1998

Fox, N. J., Cowley, S. W. H., Davies, J. A., Greenwald, R. A., Lester, M., Lockwood,

M. and Lühr., Ionospheric ion and electron heating at the poleward boundary of a poleward expanding substorm-disturbed region, *J. Geophys. Res.*, 106, A7, 12,845-12,862, 2001

Fox, N. J., S. W. H. Cowley, J. A. Davies., R. A. Greenwald, M. Lester, M. Lockwood, H. Luhr, Ionospheric ion and electron heating at the poleward boundary of a poleward expanding substorm-disturbed region, *J. Geophys. Res.*, 106, A7, 12,845-12,862, 2006.

Fujii, R., Hoffman, R.A., Anderson, P. C., Craven, J. D., Sugiura, M., Frank, L.A., and Maynard, N. C., Electrodynamics parameters in the nighttime sector during auroral substorms, *J. Geophys. Res.*, 99, A4, 6093 - 6112, 1994

Frey, H. U., Mende, S. B., Angelopoulos, V. and Donovan, E. F., Substorm onset observations by IMAGE-FUV, *J. Geophys. Res.*, 109, 10, 1029/2004JA010607, 2004

Killeen, T. L., Y.-I. Won, R. J. Niciejewski, A. G. Burns, Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic field dependencies, *J. Geophys. Res.*, 100, A11, 21,327-21,342, 1995

Mende, S. B., Heeterks, H., Frey, H. U., Lampton, M., Geller, S. P., Abiad, R., Siegmund, O. H. W., Trensins, A. S., Spann, J., Dougnani, H., Fuselier, S. A., Magoncelli, A. L., Bumala. M. B., Murphree, S., Trondsen, T., Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 2. Wideband FUV imaging, *Space Science Review*, 91, 271-285, 2000

Newell, P. T., Lyons, K. M., Meng, C., A large survey of electron acceleration events, *J. Geophys. Res.*, 101, A2, 2,599-2,614, 1996

Newell, P. T., Feldstein, Y., Galperin, Y., Meng, C., Morphology of nightside precipitation, *J. Geophys. Res.*, 101, A5, 10,737-10,748, 1996

Nose, M., Kunori, Y., Ono, Y., Taguchi, S., hosokawa, K., Moore, T. E., Collier, M. R., Criston, S. P., McEntire, R. W., Simuktaneous observations of ions of ionospheric origin over the ionosphere and in the plasma sheet at storm – time substorms, Int. Conf. Substorms-8 XX: 1-6, 2006

Ogawa, Y., R. Fujii, S. C. Buchert, S. Nozawa, and S. Ohtani, Simultaneous EISCAT Svalbard radar and DMSP observations of ion upflow in the dayside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, 10.1029/2002JA009590, 2003

Olsson, A., person, M. A. L., and Opgenoorth, H. J., Particle precipitation in auroral breakups and westward traveling surges, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, 11, 24,661 - 24673, 1996

Rostoker, G., Akasofu, S. -I., Foster, J., Greenwald, R. A., Kamide, Y., Kawasaki, K., Lui, A. T. Y., Mcpherron, R. L., and Russell, C. T., Magnetospheric Substorms – Definition and Signatures, *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, A4, 1663 - 1668, 1980

Wahlund, J. -E., Opgenoorth, H. J., Haggstrom, I., Winsor, K. J., and Jones, G. O. L., EISCAT Observation of Topside Ionosphere Ion Outflows During Auroral Activity: Revisted, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, A3, 3019 - 3037, 1992

Wild, J., Milan, S., Owen, C., Bosqued, J., Lester, M., Wright, D., Frey, H., Carlson, C., Fazakerley, A., Re`me, H., The location of the open - closed magnetic field line boundary in the dawn sector auroral ionosphere, *Ann. Geophysicae*, 22, 10, 3625-3639, 2004

Wilson, G. R., Ober, D. M., Germany, G. A. and Lund, E. J., The relationship between suprathermal heavy ion outflow and auroral electron energy deposition: Polar/Ultraviolet Imager and Fast Auroral Snapshot/Time-of-Flight Energy Angle Mass Spectrometer observations, *J. Geophys. Res.*, Vol. 106, A9, 18,981-18,993, 2001

Wilson, G. R., Ober, D. M., Germany, G. A. and Lund, E. J., Nightside auroral zone and polar cap ion outflow as a function of substorm size and phase, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, 10. 1029/2003JA009835, 2004

Yau, A. W. and Andre, M., Sources of ion outflow in the high latitude ionosphere, *Space Science reviews*, 80, 1-25, 1997

Yoshida, N., Watanabe, S., Fukunishi, H., Sakanoi, T., Mukai, T., Hayakawa, H., Matsuoka, A., Kasahara, Y., Fujii, R., Nozawa, S. and Ogawa, Y., Coordinated

Akebono and EISCAT observations of suprathermal ion outflows in the nightside inverted-V, *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 449-465, 2000