

平成 13 年度

修士論文

電離圏カスプ領域における
極方向へ移動する過渡的現象の研究

名古屋大学大学院理学研究科

素粒子宇宙物理学専攻／宇宙地球物理系

名古屋大学太陽地球環境研究所

河野 政樹

要旨

北極域電離圏カスプ周辺領域において、高電子密度領域が極方向へ移動する現象が、欧州非干渉散乱レーダー (European Incoherent SCATter レーダー : 以下 EISCAT レーダー) システムを用いた観測によりとらえられている。昼側磁気境界面で起こる惑星間空間磁場と地球磁場との磁気再結合に伴って、地球磁場の磁力管が太陽風とともに地球夜側へと運ばれる現象 Flux Transfer Event (FTE) や、その電離圏への投影である Poleward Moving Aurora Form (PMAF) との関連が考えられるこの現象のエレクトロダイナミクスを定量的に理解することは、局所的にみられる太陽風から磁気圏への物質とエネルギー流入現象の電磁氣的性質や空間分布、時間変動及びそれに伴う電流系を理解するうえで重要である。本研究では、オーロラ帯からカスプ、極冠帯までに相当する広い緯度範囲 (約 73° N から 86° N) を同時に観測して高電子密度領域が極方向への移動を開始するところから観察し、この現象の全容を理解する。EISCAT レーダーの解析データ及びスヴァールバル上空を飛翔した Defence Meteorological Satellite Program 衛星 (以下 DMSP 衛星) の粒子データを総合したところ、(1) DMSP 衛星によって得られたカスプの低緯度側境界と、EISCAT VHF レーダーによってとらえられた降下粒子に起因すると予測される電子温度上昇領域の低緯度側境界とに、良い一致をみる事ができた。それを基に、カスプ領域と高電子密度領域との関係を調べた結果、(2) 極向きの局所的な強いプラズマの流れはカスプの低緯度側境界付近から始まっており、より低緯度側では極向きの比較的弱いプラズマの流れが既に存在することも明確にとらえた。次に、高電子密度領域の内外でのプラズマの挙動を明らかにするために、レーダーによって観測された南北方向のイオンの速さ (東西方向の電場の強さに対応する) と、電子密度の観測高度 (緯度) ごとの時間変動をみたところ、電子密度が低い点では南北方向のイオンの速さが大きいことがわかった。しかし一般的に、電場の強い領域 (電子密度が小さくとらえられている領域) ではフリクショナルヒーティングによって化学反応が進み電子密度が減少しているようにみえるだけであるという説明がなされる。この説明が実際にこの電子密度減少の例に該当するか否かを、同時に稼動していた固定式 ESR 42m アンテナ (カスプ領域の直下地点における沿磁力線方向を観測) によるデータから検証したところ、(3) 電場の強い領域における電子密度の減少は全高度に渡っておきている例を見出した。この観測結果は、高度に依存しておこる上記の化学過程による密度の減少では、東西方向の電場が強い領域での電子密度の減少を説明できないことを示唆する。これより、高電子密度領域について、EISCAT レーダーで観測されたとおりの、(4) 高電子密度領域の内部でイオン速度が遅く、外部でイオン速度が速いという描像を描くことができる。この描像は、今までの磁力管の運動のモデルとは異なっているものである。

目次

第1章 太陽-地球間空間の概観	1
1.1 太陽風	1
1.2 地球磁気圏	2
1.3 太陽風-磁気圏相互作用	2
1.4 電離圏	3
1.5 磁気圏-電離圏相互作用	4
1.6 <i>F</i> 領域での荷電粒子の運動	5
1.7 地球磁場と地磁気座標	6
第2章 序論	7
2.1 太陽風-地球磁気圏のプラズマの流れ	7
2.2 地球磁気圏から極域電離圏へのプラズマの流れ	7
2.3 極域電離圏において極方向へ移動する過渡的な現象	7
2.4 本研究の目的	9
第3章 観測装置	11
3.1 非干渉散乱レーダー (Incoherent Scatter レーダー) の特色	11
3.2 EISCAT レーダーの全体像	11
3.3 IS レーダーによって得られる物理量	12
3.4 本観測の特徴	13
3.4.1 ロケットキャンペーン期間中の VHF レーダーの観測	13
3.4.2 ロケットキャンペーン期間中の ESR の観測	13
3.4.3 着目する時間帯の特徴とその観測ロケーション	13
第4章 VHF レーダーと ESR (32m/42m) アンテナによる同時観測	17
4.1 2000年11月26日の VHF レーダーと ESR32m アンテナによる同時観測	17
4.1.1 VHF レーダーと ESR32m アンテナによる電子密度の観測	17
4.1.2 VHF レーダーと ESR32m アンテナによる電子温度の観測	18
4.1.3 DMSP 衛星から得られる粒子データとの照合	21
4.1.4 IMF データ	24
4.1.5 VHF レーダーと ESR32m アンテナによるイオン速度の観測	25

4.2	2000年11月27日のVHFレーダーと ESR32mアンテナによる同時観測	28
4.2.1	VHFレーダーとESR32mアンテナによる電子密度の観測	28
4.2.2	VHFレーダーとESR32mアンテナによる電子温度の観測	28
4.2.3	D MSP 衛星から得られる粒子データとの照合	31
4.2.4	IMFデータ	32
4.2.5	VHFレーダーとESR32mアンテナによるイオン速度の観測	33
4.3	高電子密度領域の緯度毎のイオンの速さと 電子密度の時間変動	35
4.3.1	2000年11月26日における緯度毎のパラメーター	35
4.3.2	2000年11月27日における緯度毎のパラメーター	35
4.3.3	議論	36
4.4	ESR42mアンテナによる観測	42
4.4.1	2000年11月26日におけるESR42mアンテナによる観測	42
4.4.2	2000年11月27日におけるESR42mアンテナによる観測	45
4.4.3	議論	48
第5章	まとめと今後の課題	49
5.1	まとめ	49
5.2	今後の課題	51
<補遺>	HFレーダー観測との照合	52
(1)	HFレーダーの概要	52
(2)	HFレーダーから得られるプラズマ速度	54
(2)-1	HFレーダーで得られるエコーについて	54
(2)-2	EISCAT VHF 及び ESR と CUTLASS レーダーが観測するプラズマ速度について	54
(2)-3	2000年11月26日、27日において HFレーダーから得られるプラズマ速度のデータ	55
(2)-4	議論	56
参考文献		59
謝辞		61

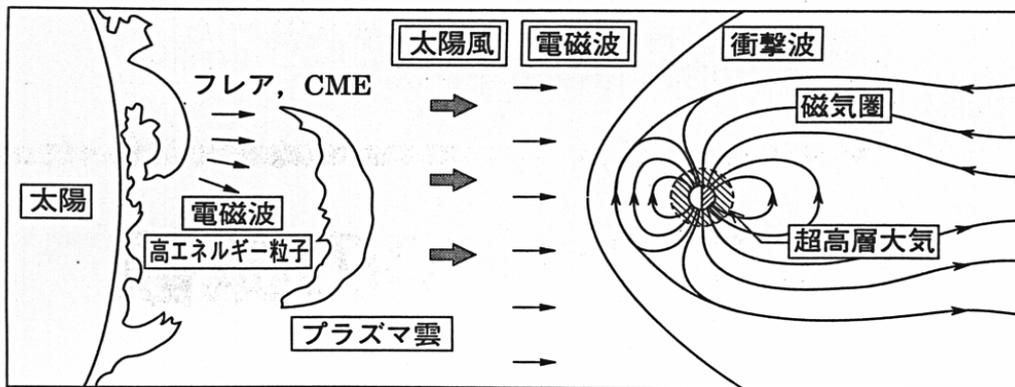
第1章 太陽-地球間空間の概観

太陽は、膨大なエネルギーを光や紫外線、赤外線などの電磁波として、絶えず宇宙空間に放射している。この電磁波のエネルギーが地球の大気の構造を決定する。また、高温の太陽の大気は、イオンと電子から構成されるプラズマの流れ（太陽風）となって吹き出し、周囲の宇宙空間を満たしている。

この章では、太陽から放出されるエネルギーが地球の超高層大気と電離圏、磁気圏の宇宙環境をどのように決めているのかという、太陽と地球間の様々な領域や空間について概観する。

1.1 太陽風

太陽風は、太陽のコロナから絶えず吹き出す高温のプラズマの流れである。一般に、電気伝導度が非常に高いプラズマ中の磁場はプラズマの運動と共に動くという性質のため、プラズマと共に太陽の磁場をも惑星間空間へ運び出している。これを、惑星間空間磁場（Interplanetary Magnetic Field：IMF）という。また太陽風は、地球の磁場を有限の領域に閉じ込め、地球磁気圏を形成する。太陽は他にも、ときおりエネルギーを爆発的に放出し、宇宙環境に大きな変化を引き起こす。

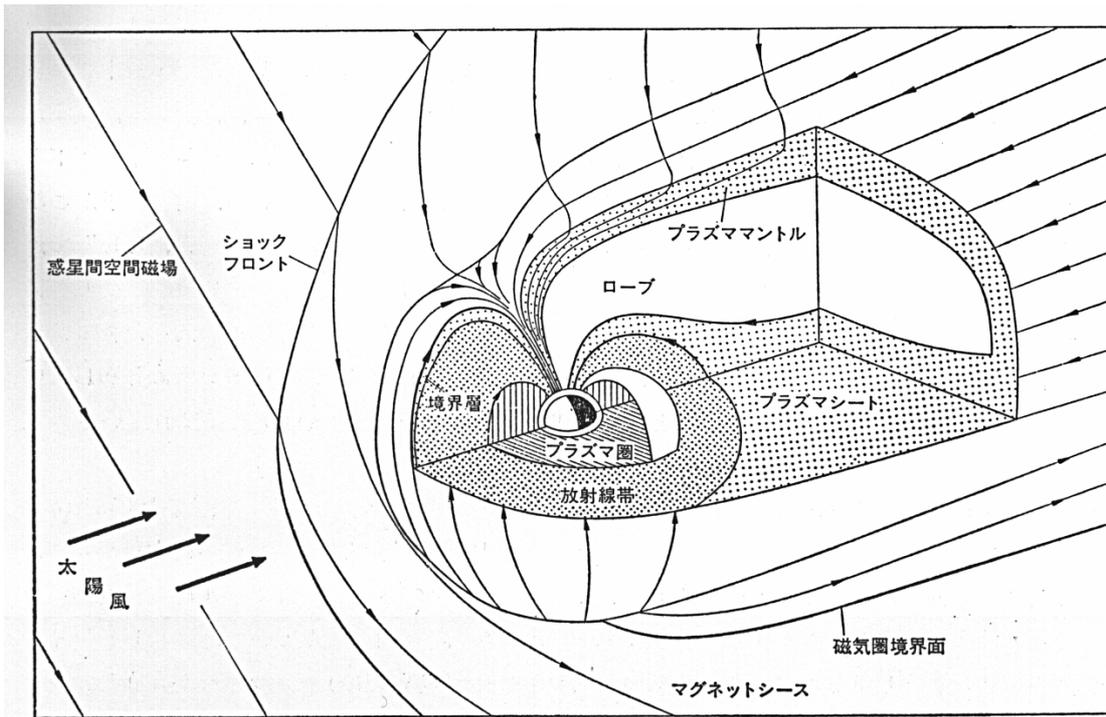


<図 1.1> 太陽から放出されるエネルギーのいろいろな形態と宇宙環境の概観 [宇宙環境科学より] 地球周辺の宇宙環境が、太陽から放出されるエネルギーにさらされていることを示している。

1.2 地球磁気圏

地球がもつ固有の双極子磁場のために、地球は宇宙空間の中で独自の磁気圏という領域を形づくっている。磁気圏が形成されるのは、太陽側から太陽風が流れて来るにもかかわらず、地球磁場がつくり出す磁力線をプラズマが横切って動くことができないためである。図 1.2

に、地球磁気圏の構造を表した図を示す。



<図 1.2> 地球磁気圏の構造を模式的に表した図 [南極の科学 2 より] 地球から出た磁力線でおおわれている磁気圏の表面境界を、磁気圏境界面 (magnetopause) という。太陽と反対側のローブ (lobe) は彗星の尾のように、地球半径の数百倍より遠くまで長くのびていると考えられている。

1.3 太陽風-磁気圏相互作用

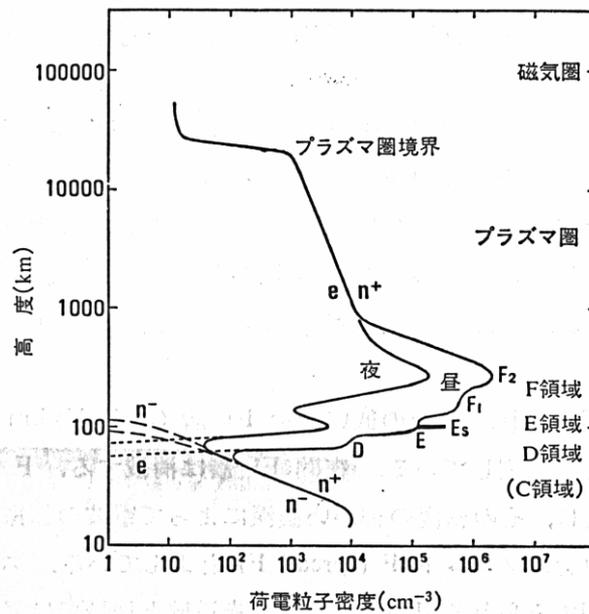
太陽風は超音速のプラズマの流れになっており、超音速の太陽風プラズマの流れが磁気圏にさえぎられる結果、磁気圏の上流側に衝撃波面 (shock front) が形成される。衝撃波面と磁気圏境界面との間の領域をマグネットシース (magnetosheath) とよび、太陽風のプラズマは衝撃波面を通過するときに加熱される。マグネットシースを流れるプラズマは、そのエネルギーと運動量の一部を磁気圏に伝え、磁気圏の様々な現象の原動力になる。これが太陽風と磁気圏の相互作用である。

1.4 電離圏

古くは1901年、マルコーニ (G. Marconi) が通信における大西洋の横断に成功したが、これはまさに地球大気が電離した層 (電離圏) による影響であった。このころからすでに、地上の磁場の変化の様子から、大気の上層には電流の流れる領域が存在することが推論されていた。

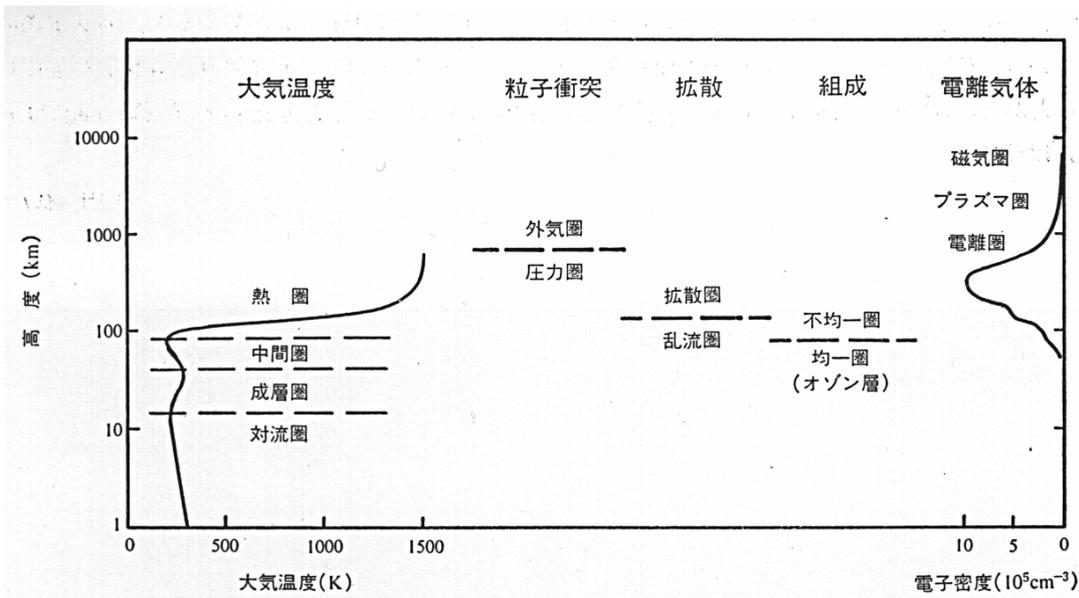
電離圏は、大気が短波長の紫外線を吸収し、部分的に電離している弱電離の領域である。例えば電離圏のプラズマの密度は、最も濃くなる高度でも中性大気の密度の1000分の1程度である。この電離圏領域は、磁気圏と電磁氣的に結合して強い電流が流れる領域になるなど、宇宙環境のなかでも非常に重要な役割を果たしている。

電離圏は高さ領域によって、*D* 領域 (70km から 100km 付近)、*E* 領域 (100km から 150km 付近)、*F1* 領域 (150km から 200km 付近)、*F2* 領域 (200km 以上) に分けられる。それぞれの高さ領域で、大気組成及び到達する紫外線のスペクトルが異なるために、*D* 層、*E* 層、*F1* 層 という特徴的な構造ができる。また、電離圏のイオンや電子の分布が化学平衡から拡散平衡に移り変わる高度は 300km 付近であり、この高度に *F2* 領域の電子密度のピークが現れる。*F2* 領域の電子密度のピークより上の領域を上側電離圏 (topside ionosphere) とよぶ。図 1.3 では、高度を対数で表し、電離圏から上空へ向って電子密度が変化の様子が示されている。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 (plasmasphere) とよび、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ポーズ (plasmopause) という。



<図 1.3> 電離圏からプラズマ圏に至る電子密度の昼間と夜間の標準的な高度分布と各領域の名称 [南極の科学2 より]

また、地球の大気圏の物理状態は高度に対する変化が著しいことから、温度分布、力学的状態、組成分布などの高度変化に従って大気圏をいくつかの領域に分類する見方もある。その分類をまとめたのが図 1.4 である。中性大気の温度分布による分類では、電離圏は熱圏、中間圏上部に対応する。



<図 1.4> 地球上層大気の諸特性に基づいた高度領域の分類と名称 [南極の科学 2 より]

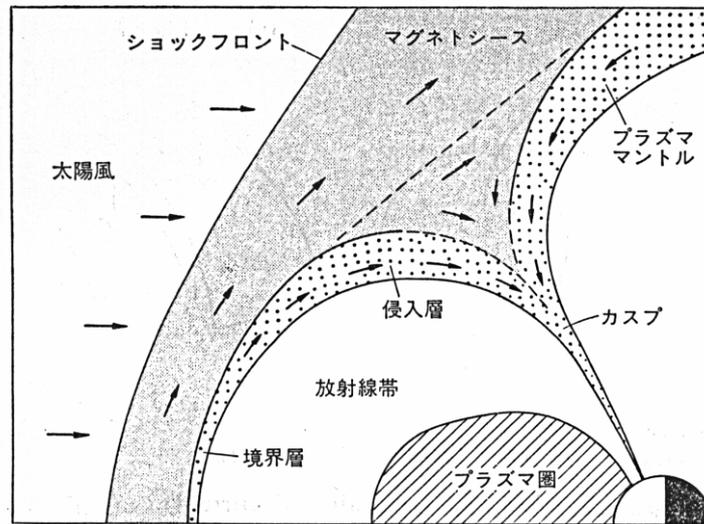
1.5 磁気圏-電離圏相互作用

磁気圏と電離圏は、様々な観点から相互作用しているといえる。例えば明るいオーロラが発生した時に観測される地球上での磁場の変動から、電離圏に強い電流が流れていることがわかるが、これらの電流が磁力線を介して地球の磁気圏とつながっているという観測事実は磁気圏と電離圏が相互作用していることを示す一例である。

また、衛星の観測より、図 1.5 に示されるような磁気圏境界面の構造が明らかになっている。昼間側の磁気圏境界で、太陽風の中に存在する磁場と地球磁場との相互作用により再結合が起きるが、太陽風のプラズマはこの磁気再結合のプロセスによって磁気圏の中に流入することができると考えられている。

流入したプラズマの一部はカスプ領域を通過して磁力線にそって昼間側の高緯度電離圏に降下し、大気と衝突してこの領域にオーロラを光らせる。カスプ領域は、夜側の尾部に向う開いた磁力線領域（ポーラーローブ：極冠帯）と昼間側に向う閉じた磁力線の境界領域である。

注意すべき点は、先に述べたカスプ領域を通過して電離圏まで流入するプラズマは、太陽風から磁気圏内に流入したプラズマのほんの一部であり、残りの大部分は磁気圏の尾部に流れていくという点である。



<図 1.5> 地球磁気圏境界の構造 [南極の科学2 より]

1.6 F 領域での荷電粒子の運動

電離圏における中性大気の流れは、中性粒子とイオンの衝突を介して電離大気に作用し、電離圏の構造そのものを変化させる。またその変化を考える際、太陽の極端紫外領域の放射による熱圏大気の加熱は、太陽の天頂角によって大きく変化することにも注意が必要である。

本研究で扱う F 領域は、生成と消滅の化学反応効果が相対的に弱く、力学的効果が顕著な領域である。電離圏のイオンあるいは、電子が受ける力には、重力、圧力勾配力、ローレンツ力、他種粒子との衝突で受ける力がある。しかし、特に F 領域を考える場合において、

- (1) 電子質量がイオン質量に比べて十分に小さく、電子の衝突による運動量交換は小さいこと。
- (2) 荷電粒子が磁力線の周りを旋回するジャイロ角周波数と荷電粒子の中性大気との衝突周波数との大小関係（後者のほうが、非常に小さい）。
- (3) 存在するイオンは、1 価の単一組成（電子密度とイオン密度が等しい）であるとする。
- (4) 電子の温度とイオンの温度が等しいとする。
- (5) 中性大気風は考えない。

などの近似、仮定のもとに、粒子の運動方程式から磁力線に直交する成分の運動を考えると、プラズマは磁場及び電場ベクトルと直角の方向にドリフトすることがわかる。（ $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト）

これは、プラズマが磁力線の仮想的な管（磁力管）の中に閉じ込められていて、管と一緒に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトすることを表している。この仮想的な管のなかでプラズマが生成され、拡散、消滅し、管の連続帯として電離圏が生成される。

1.7 地球磁場と地磁気座標

電離圏、及び磁気圏など、地球上空の宇宙空間ではプラズマの運動が多くの現象に関係している。これら荷電粒子の運動には電磁気的な作用が強く働くので地球の固有磁場の影響を考慮する必要がある。荷電粒子の運動を考える場合、地球の回転軸（地軸）を基準にした地理座標よりも地球磁場を基準にした座標系で考えた方が理解しやすいことが多い。それが地磁気座標である。

様々な地磁気座標系が考えられている中、最も簡単なものは、地球磁場を地球の中心に置いた双極子で近似し、南北の磁極の位置を基準にして地磁気緯度、地磁気経度を定めるものである。

また、あるポイントを通る磁力線が赤道面を通過する点と地球中心までの距離（地球半径を基準にした距離値：L 値）を用いることにより、不変地磁気緯度を利用する場合もある。不変地磁気緯度は、各々の磁力線に固有の値を与えるという利点がある。

第2章 序論

ここでは、本研究で扱う現象と深い関連があると思われる、電離圏カusp領域において極方向へ移動する過渡的な諸現象に関しての歴史的事実、背景、これまでの研究及び現在の問題点などについて述べる。

2.1 太陽風-地球磁気圏のプラズマの流れ

太陽風から地球磁気圏には、物質、運動量、エネルギーが流入してくるが、太陽風-地球磁気圏相互作用の観点から、地球磁気圏前面で起こる磁気リコネクションのモデルを最初に提案したのが、Dungey [1961] である。彼はここで、惑星間空間磁場 (IMF) が南を向くと、互いに反平行の地球磁場と IMF とが結合して、太陽風の電場、運動エネルギー、プラズマが磁気圏に注入されることを指摘した。またこの場合、磁気圏前面の境界層で再結合した磁力線は太陽風の運動に伴い磁気圏の昼側から夜側へ輸送されるというモデルを提唱した。

2.2 地球磁気圏から極域電離圏へのプラズマの流れ

地球磁気圏の各領域で起こるプラズマの輸送や粒子の加速、加熱について知るには、磁気圏の各々の領域でのイオンや電子の速度分布や温度などの性質を詳細に、また定量的にみる必要があるになってくる。

磁気圏前面、高緯度領域において特徴的な磁場の配位としてみられるカusp領域は、先述の通り、磁気圏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方に流されている磁力線の境界領域である。この領域の粒子環境の特徴は、太陽風プラズマが直接地球電離圏に降下しているということである。カusp領域は IMF や地磁気活動度によりその緯度及び経度、または両方向の広がりに変化をみせるが、その磁力線の電離圏での根元は、統計的に昼側磁気緯度 75° 付近に位置することがわかっている [Newell et al., 1992]。

2.3 極域電離圏において極方向へ移動する過渡的な現象

極域の電離圏では、オーロラをはじめとする多種多様な現象が生じている。これらの現象は、古くから地磁気観測、光学観測、レーダー観測、衛星観測などを通して探られてきた。なかでも、本研究で中心に扱う極方向へ移動する過渡的な現象を考える場合、高電子密度の領域の移動という観点から、まずパッチ (patch) という現象があげられる。もともとこの現象は、時折起こる電波障害の原因を探るべく研究されてきた。パッチとは、電離圏 F 領域において、プラズマ密度が背景に比べて2倍から10倍まで増加する現象で、Pedersen et al. [1998] は、グリーンランドのソンドレストームフィヨルドにある IS レーダーを用い、その現象の空間的広がりが典型的には水平方向で 200km から 300km であるとし、Walker et al.

[1999] は、緯度方向に 2.5° 程度の広がりをもちうるとした。McEwen et al. [1996] は統計的解析から、パッチは IMF の Bz 成分が負のときに主に発生しやすいことを示している。

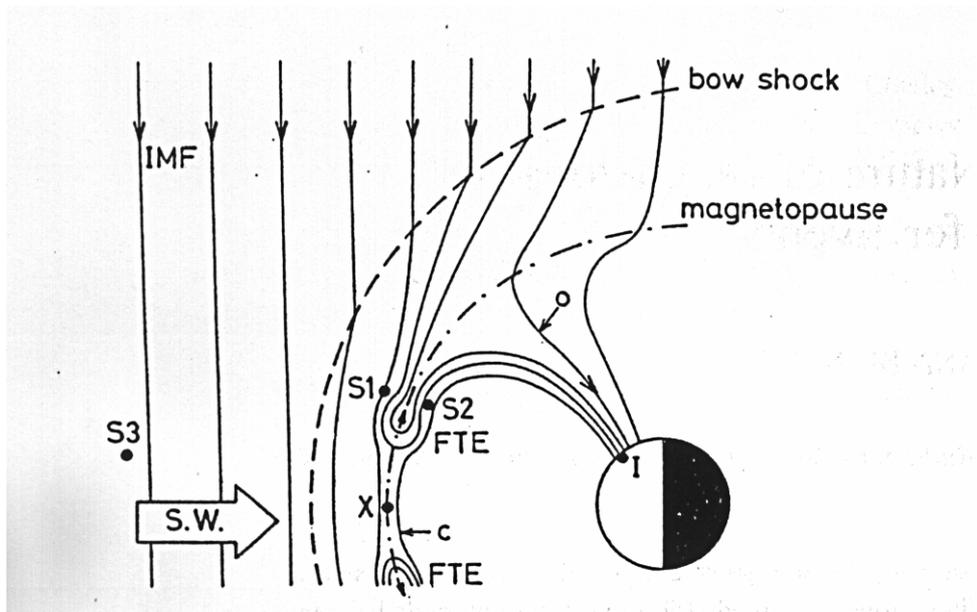
パッチができる要因として異なったメカニズムが提案されているが、大まかには低緯度昼間側の太陽光によってイオン化されたプラズマが、コンベクションによって、ポーラーキャップに輸送されて起こると考えられている [Smith et al., 2000]。また、Valladares et al. [1996] は、プラズマの流れの速い領域（プラズマジェット）がポーラーキャップパッチの密度構造にどのように影響するかを、シミュレーションで示した。Lockwood et al. [1992] は、以下に述べる Flux Transfer Event が起きている時のコンベクションに、イオン化された領域が取り込まれた時にパッチが発生すると考えてもいる。

以上のようにパッチについて様々な研究及びモデル提案がなされているが、現段階ではパッチが生成されるメカニズムは一つに絞られていない。

磁気圏から電離圏へは物質やエネルギーが流入していることを先に述べたが、これと深い関係があるとされる現象のひとつに、Flux Transfer Event (以下 FTE) がある。FTE とは、地球磁気圏の前面で起こる磁気リコネクションによって始まると考えられる、磁力線の束が反太陽側へ流されていく現象である。

この現象は、Russell et al. [1978] が、昼側マグネトポーズ近くを飛翔していた衛星による磁場中データの特徴としてとらえられたのが始まりであり、今までにも、ケーススタディー及び統計的な研究が数多くなされてきた。中でも、Berchem et al. [1984] は統計的な解析により、FTE はもっぱら IMF の Bz 成分が負の時に起きることを示した。また、Rijnbeek et al. [1984] は、ISEE 衛星のデータから、FTE が 7 分から 9 分おきにくり返されることを見出し、ここから FTE は周期約 8 分の準周期的な現象であると結論づけている。

FTE を説明するために様々なモデルが提唱されている中で、一般的なものを図 2.1 に示す。IMF の Bz 成分が負の時に、図中の、磁気中性点である X 点で、磁気リコネクションが起こる。このリコネクションによって、閉じた磁力線 (図中 c) が、開いた磁力線 (図中 o) に変わり、地球の夜側に流されてゆく。図中 I は、新しく開いた磁力線の、地球電離圏へのフットプリントである。



<図 2.1> FTE のモデル図 [Lockwood et al., 1993] マグネトポーズの近くのプラズマを観測するための衛星 S1 (マグネトシース側) と衛星 S2 (磁気圏側)、IMF を観測するための衛星 S3 が示されている。

FTE の、電離圏で対応する現象として、カusp領域での限られた領域内への粒子の降り込みとその領域の極側 (反太陽方向) への移動がある。この降り込みの領域は、IMF と地球磁場がリコネクションして開いた磁力線が、反太陽側へ流れるにつれて北に広がってゆくと考えられる。

また、FTE の電離圏への投影現象と考えられる、オーロラが断続的に極側へ動いてゆく現象 (Poleward Moving Auroral Form : PMAF) は、FTE に伴って粒子の降下があるという根拠として解釈される [Sandholt et al., 1986, 1990]。

このように、電離圏カusp領域でみられる過渡的な諸現象は、パッチ、FTE、PMAF それぞれが互に関係性をもっていると考えられ、それぞれの現象を理解するには、さらなる研究が望まれる。

2.4 本研究の目的

前節で述べた通り、極域では様々な過渡的な現象が生じている。中でも、極域電離圏カusp周辺領域において、高電子密度領域が極方向へ移動する現象が EISCAT レーダーシステム (詳細は次章参照) を用いた観測により、とらえられている。本研究ではこの、極域電離圏での高電子密度領域の極域への移動に注目する。

この現象の一つの解釈として、昼側磁気圏境界で惑星間空間磁場と磁気再結合した地球磁場の磁力管が太陽風とともに、地球夜側へと運ばれる現象 (FTE) と対応づけられ、またその地球電離圏への投影 (PMAF) をレーダーが観測していると考えらる。

この FTE や PMAF に関わると予測される現象のエレクトロダイナミクスを定量的に理解することは、昼側磁気境界面における惑星間空間磁場と地球磁場とのリコネクション過程、及び局所的にみられる太陽風から磁気圏への物質とエネルギー流入現象の電磁氣的性質や空

間分布、時間変動を理解するうえで重要である。これまで非干渉散乱レーダー、短波レーダーなどを用いて種々の観測研究がなされているにもかかわらず、これらの現象の基本的な性質、定量的な性質、現象領域内部や外部のプラズマの運動の様相と領域自体の運動との関係、3次元電流系の特徴などについて、いまだ十分な理解には至っていない。

ロングイヤービン (78° N、16° E) において稼働している EISCAT スヴァールバルレーダー (EISCAT Svalbard Radar : ESR) は、この種の研究には最適の装置であり、松尾 [2000年度名古屋大学修士論文] は ESR による 2000 年 7 月に行われた観測データを用いてこの課題に取り組み、以下のことを明らかにした。

- (1) 極方向へ移動する高電子密度領域は、中心ほど電子密度が高くなる密度勾配をもつ。
- (2) 高電子密度領域とその外部とでは、イオン速度が異なる。
- (3) 高電子密度領域そのものの移動速度と、高電子密度領域のイオン速度とは異なる。

高電子密度を伴う磁力管と、磁力管中のプラズマとが地球夜側に流されることがこの観測から確認できるが、上記の結果は、磁力管と高密度領域は、必ずしも一緒には移動していないことを示唆する。しかし、この研究では ESR のみを用いているために、高電子密度の領域がつくられ、運動を開始すると考えられるカusp領域を必ずしも観測できず、これらの領域がつくられたあとに極側へ運動する部分を見ていたため、太陽風と地球磁気圏が相互作用してエネルギーやプラズマが入り組む現象そのものをみることができていなかった。そのため、現象全体のより深い理解の妨げとなっている。

そこで本研究では ESR と、更に低緯度側に位置するトロムソ (70° N、19° E) の VHF レーダーの双方を同時に用いて、オーロラ帯からカusp、極冠帯まで広い領域を、ほぼ同じ経度領域で同時に観測して現象の全容をとらえることを試みた。IS レーダーを用いてこのような広い緯度範囲 (約 73° N から約 86° N) をカバーする観測を実施したのは、今回が初めてのことである。本研究では、2000 年冬期に昼間側カusp領域の電離圏イオン流出の物理を探るために行われた宇宙科学研究所ロケットキャンペーンでのデータのうち、11 月 26 日、27 日に特に着目して、上記の現象の性質を探る。この観測により、電子密度の高い領域が極方向への運動を開始すると考えられている電離圏カusp領域の物理量を知ることができ、また同時に沿磁力線方向を観測していた ESR42m アンテナからは、カusp領域の直下地点での沿磁力線方向の物理量を知ることができる。ESR42m アンテナの視線方向にカusp領域が入っていると考えられる時間帯での物理パラメーター、またその時間帯での物理パラメーターの高度的変化、及び時間的变化にも着目して、高電子密度領域、及びプラズマが極方向へ移動する現象を詳細に解析し、高電子密度の領域の空間分布、時間発展を追い、その領域で起きている物理を明らかにすることが本研究の目的である。

第3章 観測装置

本研究では、フィンランド、フランス、ドイツ、日本、ノルウェー、スウェーデン、イギリスの7ヶ国によって組織されているヨーロッパ非干渉散乱レーダー (European Incoherent SCATter [通称 EISCAT] レーダー) 科学協会のレーダーを用いて実験を行い、そこから得られたデータを用いた。なお、日本は1996年にEISCAT科学協会の正式加盟国となった。この章では、EISCATレーダーについて詳しく述べる。

3.1 非干渉散乱レーダー (Incoherent Scatter レーダー) の特色

ISレーダーは、地上より電離圏を観測できる、有力な観測機器の一つである。1950年代の終わり頃、送信電波によって起こる非干渉的な個々の電子の散乱であるトムソン散乱を電離圏でとらえることにより、イオンの速度を知ることができる可能性が指摘され、このことからISレーダーの歴史が始まった。当時も行われていたロケットによる局所的な観測に比べて、ISレーダーで散乱波を検出するためには強大な電力の送受信施設や、広大な土地が必要であるが、一点から連続的な観測ができるという利点を兼ね備えている。初期は主に中緯度帯にて建設、観測が行われた。

これに引き続き、1971年にはアラスカのチャタニカにISレーダーが建設され活躍の後、更にこのレーダーはグリーンランドに移動された。その後1981年に、EISCATレーダーが観測を始めた。

EISCATレーダーシステムは、サブオーロラ帯、オーロラ帯、カस्प領域の直下に位置し、極域の電離圏の電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度の各パラメータを、時間分解能、高度分解能よく観測でき、極域電離圏で起こる数々の現象の物理過程を理解するのに最適なツールである。極域では現象のタイムスケールが中低緯度に比べて短いため困難ではあるが、イオン種の同定も原理的には行うことができる。

3.2 EISCATレーダーの全体像

EISCATレーダーシステムは、スカンジナビア半島の北部にあるUHFレーダー(1981年より観測開始)、VHFレーダー(1987年より観測開始)、スヴァールバル諸島スピッツベルゲン島ロングイヤービンにあるEISCAT Svalbard Radar (32mアンテナは1996年より観測開始、42mアンテナは1999年より観測開始) によって構成される。

UHFレーダーは、トロムソ (ノルウェー) にある送信機と、トロムソ、キルナ (スウェーデン)、サダンキラ (フィンランド) にあるそれぞれの受信機で構成されている。UHFレーダーは、これら地名の頭文字をとり、KSTレーダーとも総称される。3点の受信機で散乱信号を同時に観測することによって、イオンのドリフト速度を3次元的に導出することができ

る、世界で唯一の観測システムである。

VHF レーダーは、トロムソを送信元、受信先とする 1 局のシステムである。4 枚のパラボリックアンテナが組み合わさって構成されており、それぞれのアンテナを独立な方向に向けて観測することができる。

EISCAT Svalbard Radar (ESR) は、2 つのレーダーが併設されている。口径 32m のアンテナは可動式であり、これに並んで建設された口径 42m のアンテナは固定式で沿磁力線方向を観測している。42m アンテナが完成する以前は、32m アンテナが沿磁力線方向の観測も担っていたが、完成した後は 32m アンテナの観測方向の自由度が増した。これらの 2 つのレーダーは現在、一式のトランスミッターの出力を切り替えることにより、同時に稼動することができる。

以上のレーダー群を組み合わせることにより、極域電離圏を探るためのバラエティーに富んだ観測が可能となる。それぞれのレーダーの詳細については、表 3.1 に示す通りである。

<表 3.1> EISCAT レーダーシステムの詳細

設置場所	トロムソ		キルナ	サダンキラ	ロング イヤービン
地理緯度	69.6° N		67.9° N	67.4° N	78.2° N
地理経度	19.2° E		20.4° E	26.6° E	16.1° E
不変 磁気緯度	66.2° N		64.5° N	63.6° N	75.3° N
周波数帯	VHF	UHF	UHF	UHF	UHF
周波数(MHz)	224	931	931	931	500
最大送信出力(MW)	2×1.5	1.5	受信専用	受信専用	1.0
アンテナの 形状	シリンダ ×4	ドイツシュ 32m	ドイツシュ 32m	ドイツシュ 32m	ドイツシュ 32m、42m

3.3 IS レーダーによって得られる物理量

IS レーダーは、Incoherent Scatter Radar という名の通り、電離層の電子からの非干渉散乱波を利用している。しかし、IS レーダーで用いている電波の波長は電離圏 F 層における電子のデバイ長と比較して大きいこと、また非干渉散乱波を生じる電子はイオンに捕獲されていることから、実際 IS レーダーでは、イオンの速度や温度を測定することになる。

その受信スペクトルをもとにして、イオンの組成を仮定することにより、イオン温度、イオン温度と電子温度の比、イオンと中性大気の衝突周波数を決定することができる。また、レーダーの受信パワーが、散乱する体積中の電子の数に比例することから電子密度を求めることができる。ドップラーシフトのため、送信波の振動数からずれて散乱波がみられることになるが、それよりレーダー視線方向のイオン速度を求めることができる。

更に、適切な仮定や、中性大気モデル、地球磁場モデルなどのモデルを利用することにより、電場、電流、中性風速度、電気伝導度等の他のパラメータも間接的に導出できる。

3.4 本観測の特徴

EISCAT レーダーの観測は、各加盟国の研究者による独自の観測である Special Program (SP 特別実験) と EISCAT 科学協会によって行われそのデータを加盟国が自由に使用できる観測である Common Program (CP 共通実験) の2種類からなる。本研究で用いるデータセットは、イギリスによる特別実験 (VHF レーダー) と日本による特別実験 (ESR) を組み合わせたものとなっている。

本研究は、2000年11月25日より2000年12月4日に行われた、宇宙科学研究所ロケットキャンペーン中のデータを用いている。このキャンペーンは、IS レーダーのみならず、ロケットによる直接観測ならびに、短波レーダー網 (SuperDARN HF レーダー)、単色全天テレビカメラ、フォトメーター、地磁気計等の同時観測により、昼間側カusp領域電離圏のイオン流出の物理を探るために実施された。

3.4.1 ロケットキャンペーン期間中の VHF レーダーの観測

ロケットキャンペーン中、トロムソにある VHF レーダーは主に、CP-4 モードとよばれるモードで、特別実験の観測をしていた。このモードでは VHF レーダーのアンテナ2枚を地理極方向に、他の2枚を地磁気極方向に電氣的に向け、共に仰角を 30° で観測を行う。また、この2つのビーム間のなす角度は、 14.8° である。

3.4.2 ロケットキャンペーン期間中の ESR の観測

ロケットキャンペーン中、ロングイヤービンにある ESR は日本の特別実験にあてられており、42m アンテナと 32m アンテナを同時に稼働させていた。6.4秒毎に、42m アンテナと 32m アンテナを切り替えて観測するモードを用いた。先述の通り、42m アンテナは沿磁力線方向を観測しており、一方 32m アンテナは、研究目的に最適な観測結果を得るために、時間帯に応じて視線方向を変化させている。その視線方向の変化の詳細を表 3.2 に示す。32m アンテナビームがアジマス -125° 付近にむけられているのは、ロケット実験がスタンバイ状態に入っており、レーダーを、予想されるロケットのアペックス方向に向けて待機させたためである。

3.4.3 着目する時間帯の特徴とその観測ロケーション

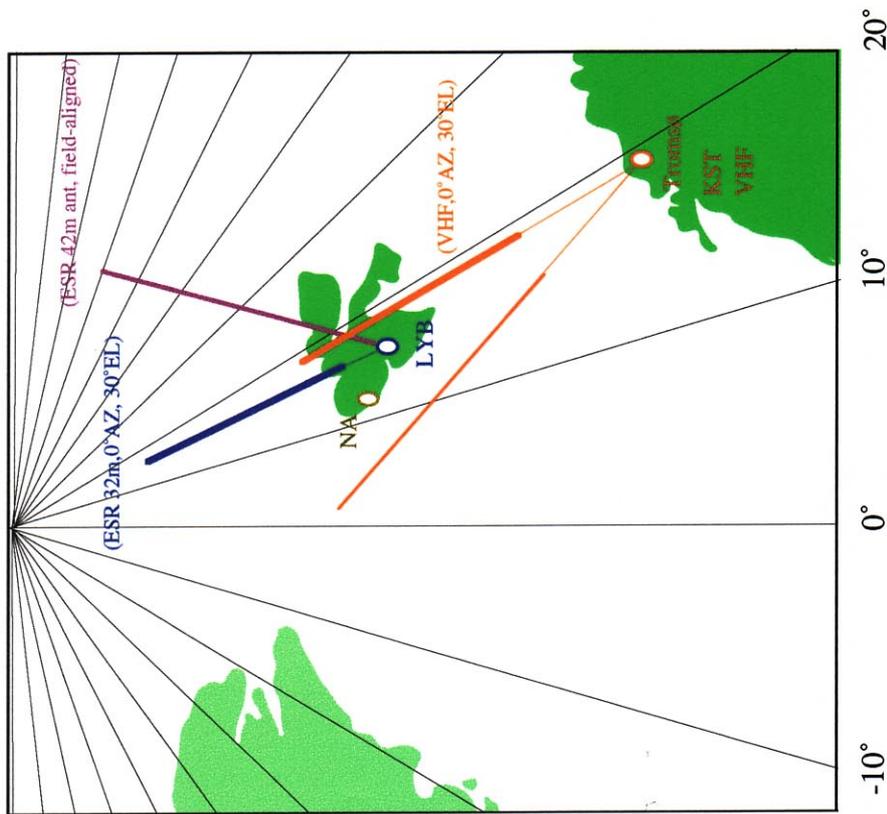
本研究で使用したデータの観測日は、表 3.2 で、ESR32m アンテナが地理極方向、仰角 30° で観測している時間帯 (*印を付記した時間帯) のうち、11月26日、11月27日である。*印を付記した時間帯の観測におけるレーダービームのロケーションは図 3.1 に示す通りである。

注目する時間帯の観測の特徴は、昼間側極域で起こる物理現象を広い緯度範囲でカバーすることである。できる限り広い緯度範囲をカバーするために、VHF レーダーと ESR32m アンテナを、共に低い仰角（ 30° ）に向けて観測している。

過去の観測において、ESR で高電子密度領域が極側へ向う現象がとらえられていたが、高電子密度の領域の運動が始まっていると考えられるカスプ領域が統計的にロングイヤーストームの上空に位置する [Newell et al., 1992] ことから、高電子密度領域が極側へ向う現象の開始点からレーダーで追うことができていなかった。今回の特別実験では、ESR より低緯度側に位置する VHF レーダーからも同時観測することにより、広い緯度範囲でこの現象をとらえることが可能となった。

<表 3.2> ロケットキャンペーン期間中の ESR32m アンテナの視線方向 日付、世界標準時(UT)、ロングイヤービン-地理北極を通る子午面とレーダー視線がなす角度(アジマス)、仰角の順で示してある。

日付	世界標準時(UT)	アジマス(°)	仰角(°)
11.25	0500-1015 *	0	30
11.26	0500-0930 *	0	30
11.27	0500-1100 *	0	30
11.28	0500-0530 *	0	30
	0532-0632	-45	30
	0634-0805	-123.2	36.4
	0806-1004	-125.2	34.3
	1004-1100	-45	30
11.29	0500-0507	-45	30
	0507-0601 *	0	30
	0604-1100	-125.2	34.3
11.30	0400-1100 *	0	30
12.1	0400-0923 *	0	30
	0924-1012	-125.2	34.3
	1013-1100 *	0	30
12.2	0400-0500	-24	30
	0500-1100 *	0	30
12.3	0400-0621 *	0	30
	0622-0802	-125.2	34.3
	0802-1100	-123.2	36.4
12.4	0400-0612 *	0	30
	0613-0725	-123.2	36.4
	0726-0828	-204	30
	0830-1100	-125.2	34.3



ESR(42m)
沿磁力線方向

30°

VHF(beam2)
70° N, 19° E
トロムソ

30°

ESR(32m)
78° N, 16° E
ロングイヤービン

地理北極側

<図3.1> レーダーのロケーションとその視線方向

左側の図は、トロムソ、ロングイヤービンの場所及びそれらの場所から出されているビームの方向を示した図である。また右側の図は、地理極を含む、一つの子午面を、左側を地理北極として表している。ロングイヤービンの、磁力線の伏角は82.1°である。

第4章 VHF レーダーと ESR (32m/42m) アンテナによる同時観測

EISCAT レーダーによる観測のなかでも、極域での過渡的な現象を、VHF レーダー及び、ESR (32m/42m) の同時観測でとらえようとしたのは新しい試みである。

この章では、先述の着目する時間帯の観測のうち、カスプの領域が明確にとらえられ、かつ高電子密度領域が極方向へ向って移動してゆく様子が明確にとらえられている 2000 年 11 月 26 日、27 日について、詳細に議論する。

4.1 2000 年 11 月 26 日の VHF レーダーと ESR32m アンテナによる同時観測

4.1.1 VHF レーダーと ESR32m アンテナによる電子密度の観測

図 4.1 は、電子密度のカラープロットである。図下側は、VHF レーダーのカラープロットを、図上側は ESR のカラープロットを示している。VHF は 120 秒積分値、ESR は 128 秒積分値である。横軸は時刻であり、世界標準時 (UT) で 0500-0930UT の観測である。磁気地方時 (MLT) では、およそ 0800-1230MLT となる。縦軸は、観測ポイントの高度、及びその地理緯度を表している。この観測では、低い仰角 (30°) のビームを用いて観測しているため、観測高度があがるにしたがって、その地理緯度も高くなることになる。また、電子密度が高い領域を赤で、電子密度の低い領域を青で示しており、底を 10 とする指数で (VHF、ESR とも、最下限を 10、最上限を 12 として) プロットしている。

電子密度のカラープロットの中に、右上がりの形状で電子密度の高い部分がプロットされている (例えば ESR にて 0550-0600UT、0640-0700UT、0800-0820UT、及び 0900UT 以降)。この見え方を、レーダーの位置及び、レーダー視線方向から総合的に考察すると、高電子密度領域は時間の経過とともに高緯度側に位置を移動していることになり、第 2 章で示した、降下粒子を伴った磁力線の束が、極方向に向って過渡的に移動している描像を想定することができる。特にこの日は ESR の方で、時刻経過に伴って高電子密度領域が高緯度側に移動している様子が全時間帯でとらえられている。

また、図 4.1 において、遅い時間帯 (VHF の 0900UT 以前の高緯度のあたり、また ESR の 0900UT 以降の低緯度あたり) に着目すると、高電子密度の高緯度側境界が、緯度の低い側 (VHF) から緯度の高い側 (ESR) へ連続している様子がかすかにみえる。しかし、カラープロットの色のみから判断すると、2つのレーダーから得られた電子密度データ間ではっきりとした高電子密度領域の連続の様子がとらえられていないようにみえる。この高密度領域は低緯度から高緯度まで連続して移動しているにも関わらず、VHF と ESR の間で、電子密度が連続して見えていない理由は、この境界で異なるビームになるため、観測高度が高高度から

低高度へ不連続に変化すること、また、一般的にFピーク以高では高度が上がるにつれて電子密度が単調に減少するためであると考えられる。

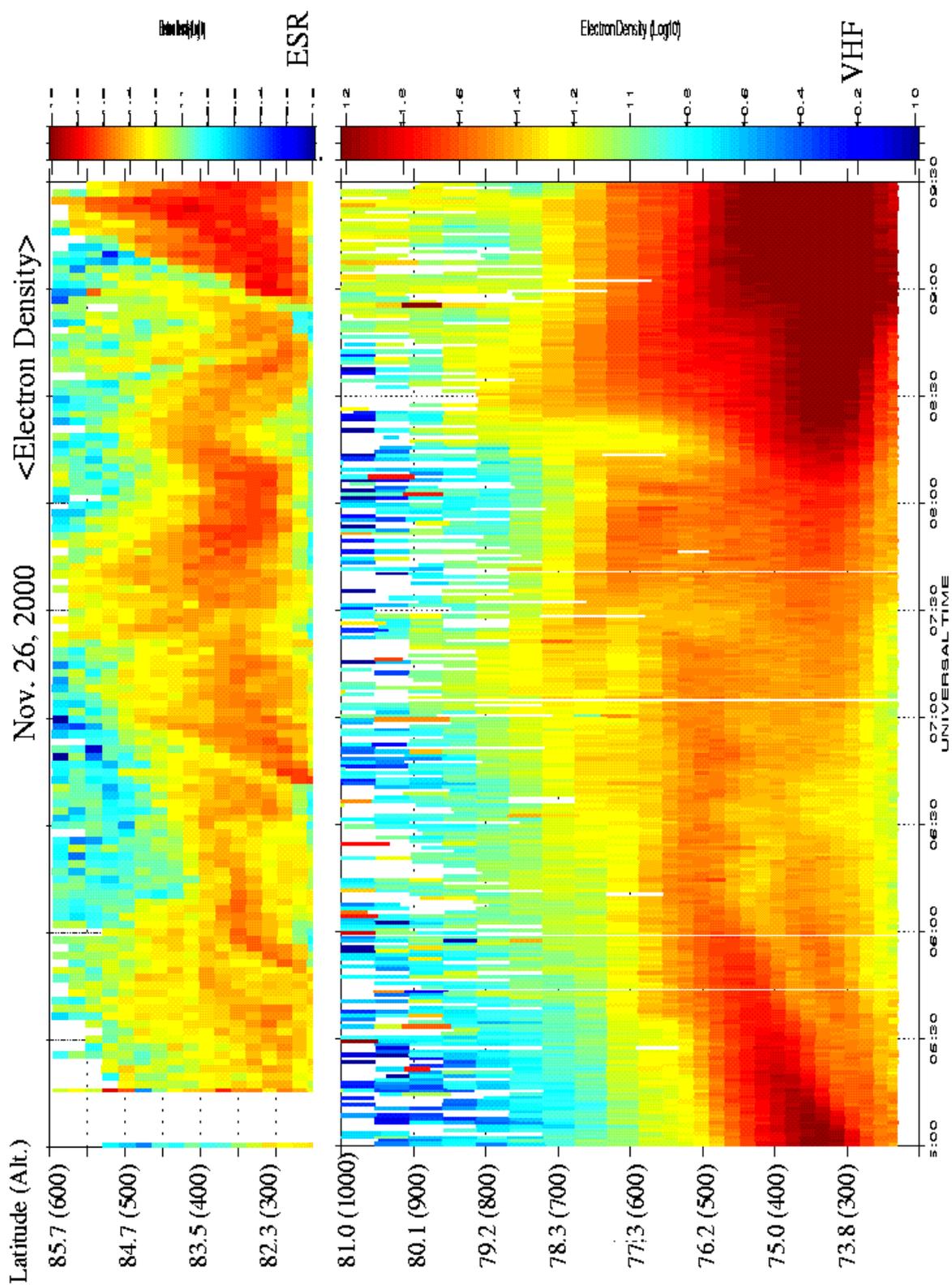
4.1.2 VHF レーダーと ESR32m アンテナによる電子温度の観測

図 4.2 は、電子温度のカラープロットである。図のフォーマットは、電子密度の図（図 4.1）と同じであり、温度の高い領域を赤で、低い領域を青で示している。VHF は最下限を 0K（ケルビン）、最上限を 4000 K、ESR は最下限を 0 K、最上限を 2500 K でプロットしている。

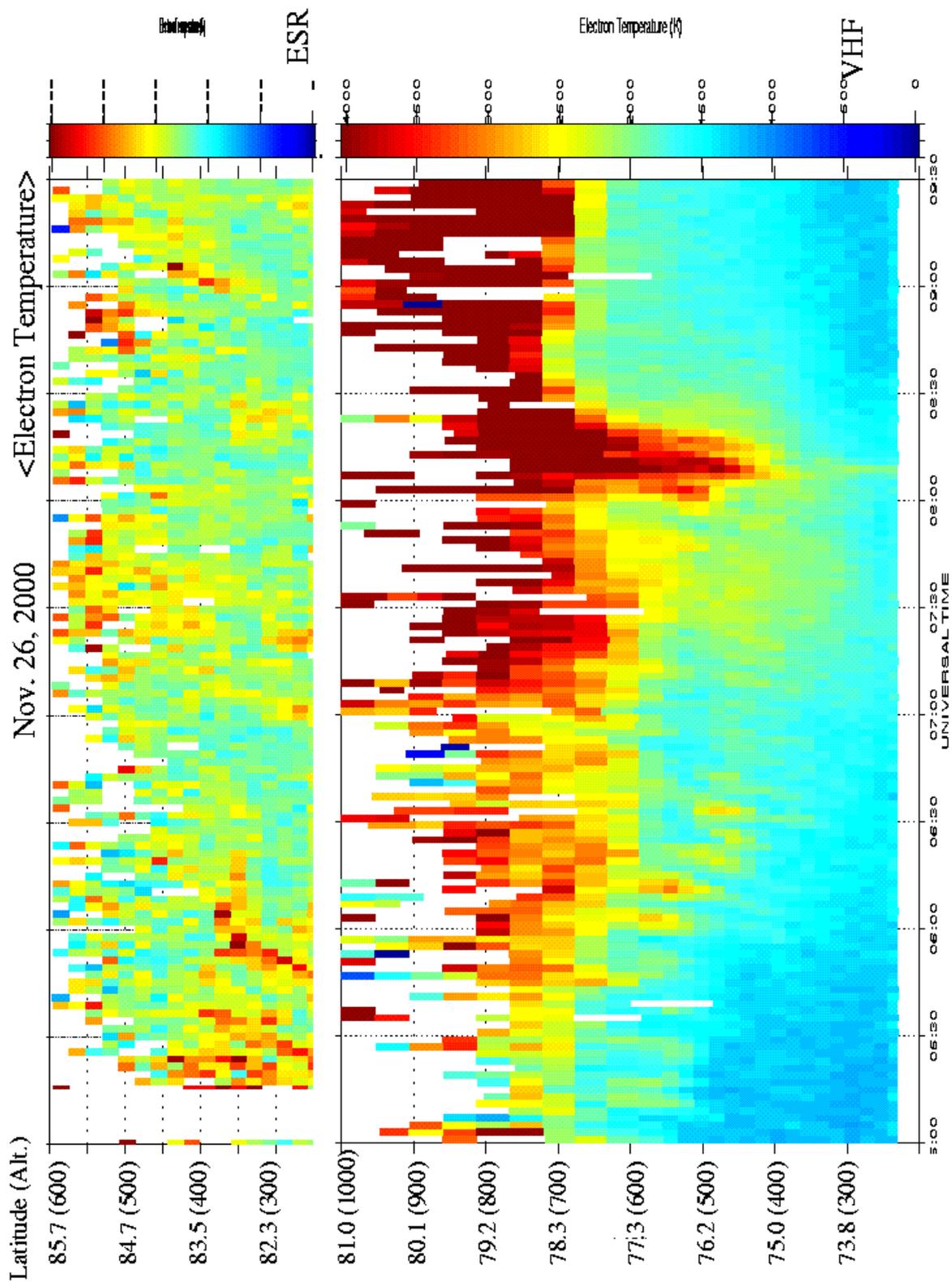
IS レーダーでは、カスプ領域を特徴的にとらえることができる。電子温度の上昇がそれである。電子温度や電子密度の上昇は荷電粒子の降り込みを示し、もしその高度プロファイルを得ることができるならば降り込み粒子のエネルギーを見積もることもできる [Nilsson et al., 1996]。

電子密度の高度分布と同様に、電子温度も高度依存性があるので、一つの時刻で、異なる高度間の電子温度の大小を議論することは意味がないが、ある一定高度の電子温度の時間変動をみて、カスプなどに伴う電子温度の増加した時間帯や領域を特定することには意味がある。

例えば VHF レーダーのカラープロットで、時間を追いながら同じ高度領域に目を移して行くと、前後の時間帯に比べて、電子温度の高い領域がみられる時間帯がある。0800-0830UT では特に、カスプに関連する可能性がある電子温度の上昇が低緯度領域までみられる。これらの電子温度の上昇は、先述のとおり粒子の降り込みに起因していると予測することができる。



<図 4.1> 電子密度のカラープロット (26 日)



<図 4.2> 電子温度のカラープロット (26 日)

4.1.3 DMSP 衛星から得られる粒子データとの照合

ESR や VHF レーダーで観測した極方向に移動する高電子密度領域、VHF レーダーで観測した高電子温度領域が、磁気圏のどの領域で作られたものであり、どの領域に移動していくのかを知ることは、この現象の発生機構を理解する上で大変重要である。しかし、ESR のデータだけからでは、高電子密度領域、高電子温度領域がカusp領域に対応するのかどうかを断定的には判別できない。よって、人工衛星による降下粒子スペクトルの同時観測データを用いて、この点を確認する。一般的に、カusp、マントル、低緯度境界層、プラズマシートなどは、電離圏に降下してくる粒子について、各領域に特徴的なスペクトルを用いて定義されている。本研究では人工衛星として太陽-地球系に固定した軌道をもつ Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 衛星からのデータを用いた。

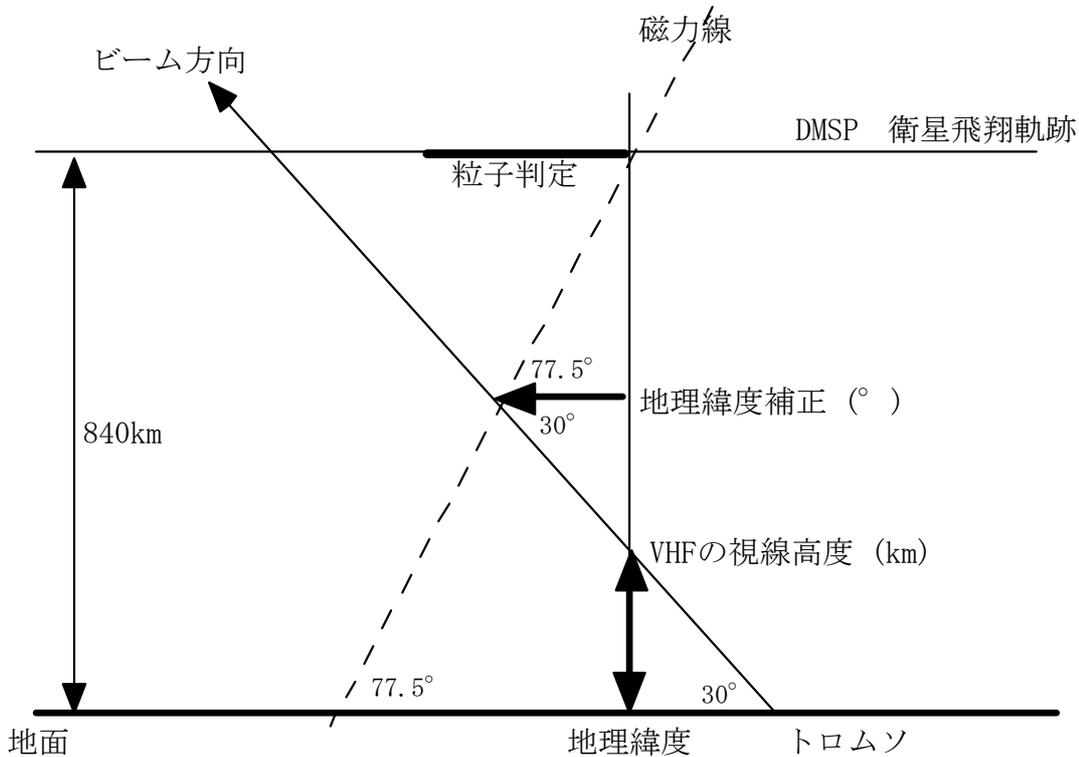
DMSP 衛星は、高度約 840km を飛行する、米国により打ち上げられている衛星である。DMSP 衛星は複数機同時に飛行しており、11-23LT の軌道面と 01-13LT の軌道面を持ち、各々約 100 分で地球を一周する。

この衛星の飛行軌道が、EISCAT レーダーの視野近くに入った時間帯を探し、その時間帯について EISCAT レーダーのデータと比べると、EISCAT レーダーが、どの領域の粒子を観測しているのかを知ることができる。26 日の 0500-0930UT の間で、DMSP 衛星が、レーダー観測領域近くの上空を飛行した時間帯が 2 例存在した。その詳細を、表 4.1 に示す。

<表 4.1> DMSP 衛星が、レーダー観測領域の上空を飛行した時間帯の DMSP データの粒子判別結果 (26 日) 常時数台の DMSP 衛星が飛行しているので、それらの DMSP 衛星を区別するために割り当てられた記号をはじめ、DMSP 衛星の判定結果、判定結果の低緯度側の境界通過の時刻(UT)、その地理緯度、地理経度、その場所がトロムソから地理経度にしてどれくらい離れているか、を示した。判定結果の略号は、それぞれ地球磁気圏の領域のうち、以下の領域を表す。(llbl:低緯度境界層、bps:バウンダリープラズマシート、mant:マントル、uncl:判定不能領域、cusp:カスプ)

DMSP 衛星 の記号	判定結果	世界標準時 (UT)	地理緯度 (°)	地理経度 (°)	トロムソ (19.2° E) からの経度 方向のずれ (°)
F13	llbl *	072520 付近	76.5	20.3	1.1
	bps	072524 付近	76.2	19.4	0.2
F13	mant	090528 付近	80.2	20.0	0.8
	llbl	090630 付近	78.3	3.7	15.5
	uncl	090634	78.2	2.0	17.2
	cusp *	090638	78.0	1.1	18.1
	mant	090646	77.7	0	19.2
	cusp	090726	76.0	352.4	26.8

電子温度が高い領域が DMSP の粒子データから同定されたどの領域に相当するのかを知る目的で、VHF レーダーの視線内 (カラープロット上) に、DMSP 衛星からの粒子情報を重ね入れることを試みる。その際、DMSP 衛星から得られた地理緯度を用いて VHF のカラープロットの上に重ねるには注意が必要である。その注意とは、DMSP 衛星が高度 840km を飛行しているという点である。ある地上の点から鉛直上方向の直線考えた時、その直線上の点で、地理緯度は変化しないが、地磁気緯度は変化する。粒子の降り込みは磁力線に沿って起こるので、粒子は磁力線に平行な角度で降り込んでくる。高度 840km の情報を、VHF レーダーの視線上におろすには、これら 2 つの線の傾き具合を考慮する必要がある。(図 4.3 参照)



＜図 4.3＞ 等しい地理緯度の点を結んだ線と磁力線、及び VHF レーダーの視線方向の傾き具合を模式的に表した図。高度 840km において判定された領域の低緯度側境界の場所を、粒子の動きをたどることによって（磁力線をたどることによって）、VHF レーダーの視線におろす必要がある。

表 4.1 のうちの、*印を付した 2 点に関して、磁力線に沿って地理緯度を換算した。その結果を示したのが表 4.2 である。ここでは低緯度境界層（Low Latitude Boundary Layer : 11b1）の低緯度側境界（0725UT）とカスプの低緯度側境界（0907UT）を選んだ。なお、11b1 は、地球磁気圏を極域電離層に投影した時に、カスプの低緯度側の領域に相当し、真昼を中心に朝夕方向数時間にわたり広がっている磁気圏の一領域である [Newell et al., 1992]。

<表 4.2> カラープロットへ投影する際の補正值（いずれも領域の低緯度側を示している。）

世界標準時 (UT)	判定結果	地理緯度 (°)	VHF の視点高度 (km)	地理緯度補正 (°)	プロットする緯度 (°)
0725	11b1	76.5	527	0.6	77.1
0907	cusp	78.0	670	0.3	78.3

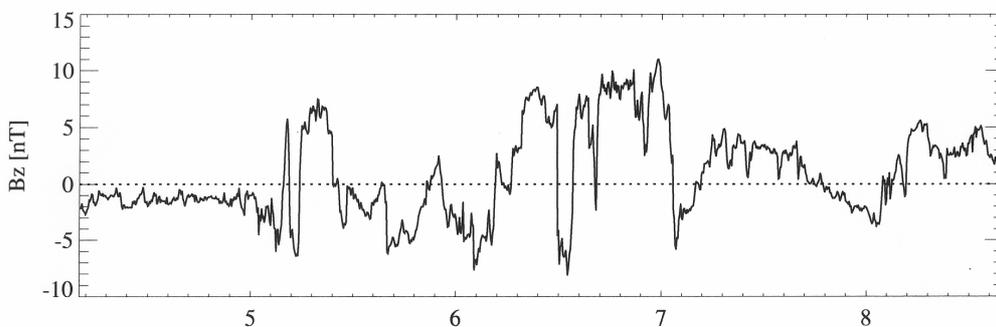
表 4.2 に算出した値を図 4.2 のカラープロット上に×印でプロットした。この結果より、特に電子温度の上昇領域の低緯度側境界とカスプの低緯度側境界に良い一致がみられることがわかる。

以上のように数点ではあるが、VHF レーダーで観測された高電子温度領域の低緯度側境界が、人工衛星の粒子スペクトルとの比較から、カスプの低緯度側境界にほぼ一致することが確かめられたので、高電子温度領域の低緯度側境界がカスプの低緯度側境界に対応するという作業仮説のもとで、これらのプロットした点を含む時間帯で電子温度の増加の低緯度側境界に線を引いた。これが図 4.2 の VHF レーダーのカラープロット上（0700-0930UT）に描いた黒の曲線である。

4.1.4 IMF データ

ここで、この時間帯の IMF の Bz 成分を図 4.4 に示す。これは人工衛星 ACE によって得られたデータである。この衛星の飛翔する場所から、マグネトポーズまで太陽風の IMF の情報が到着するのに 50 分前後かかる事を太陽風速度と衛星-磁気圏昼間側境界間の距離から算出し、ここでは 50 分ずらしてプロットをしている。

この時間帯の特徴として、図 4.4 の 0510UT 頃（この太陽風情報がマグネトポーズまで到着するのは 0600UT 頃）から Bz の正負の符号が頻繁に転じていることが挙げられる。また、先に注目した、図 4.2 における 0800-0830UT における電子温度の低緯度側への上昇が始まる時刻は、図 4.4 の 0700UT 過ぎ（この太陽風情報がマグネトポーズに到着するのが 0750UT 過ぎ）にある、Bz 成分が負に転じる時に同期していると推定される。



<図 4.4> 26 日における観測時間帯に合わせた IMF の Bz 成分の様子 横軸は UT、縦軸は IMF の Bz 成分の変動 (nT) である。

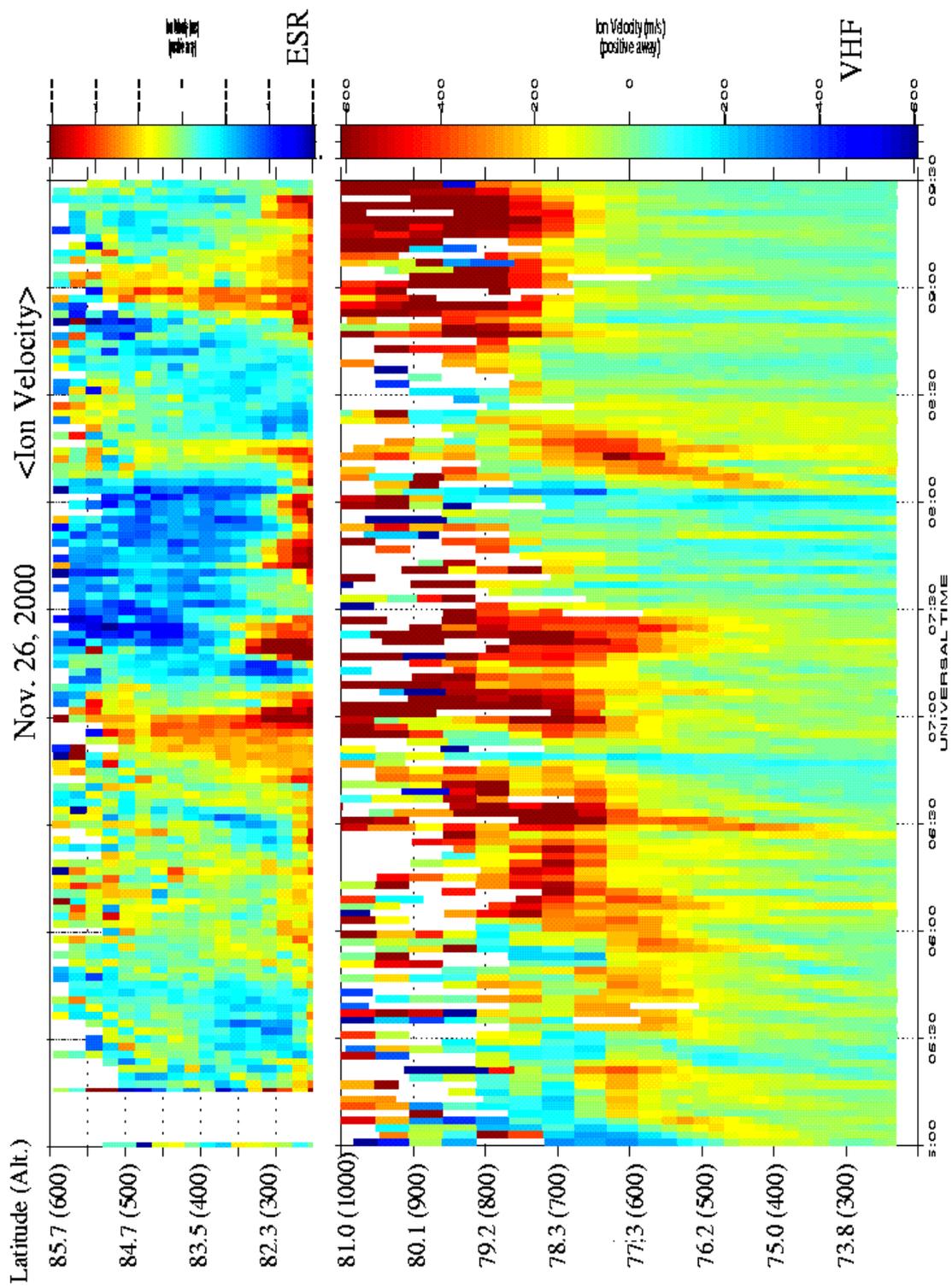
4.1.5 VHF レーダーと ESR32m アンテナによるイオン速度の観測

図 4.5 は、イオン速度のカラープロットである。このプロットは、レーダーの視線方向のイオン速度の緯度-時間変化を示している。図のフォーマットは電子密度の図（図 4.1）と同じであり、レーダーに近づく方向を青で、レーダーから遠ざかる方向を赤で示している。最も速く近づく速度を -600m/s 、最も速く遠ざかる速度を 600m/s でプロットしている。

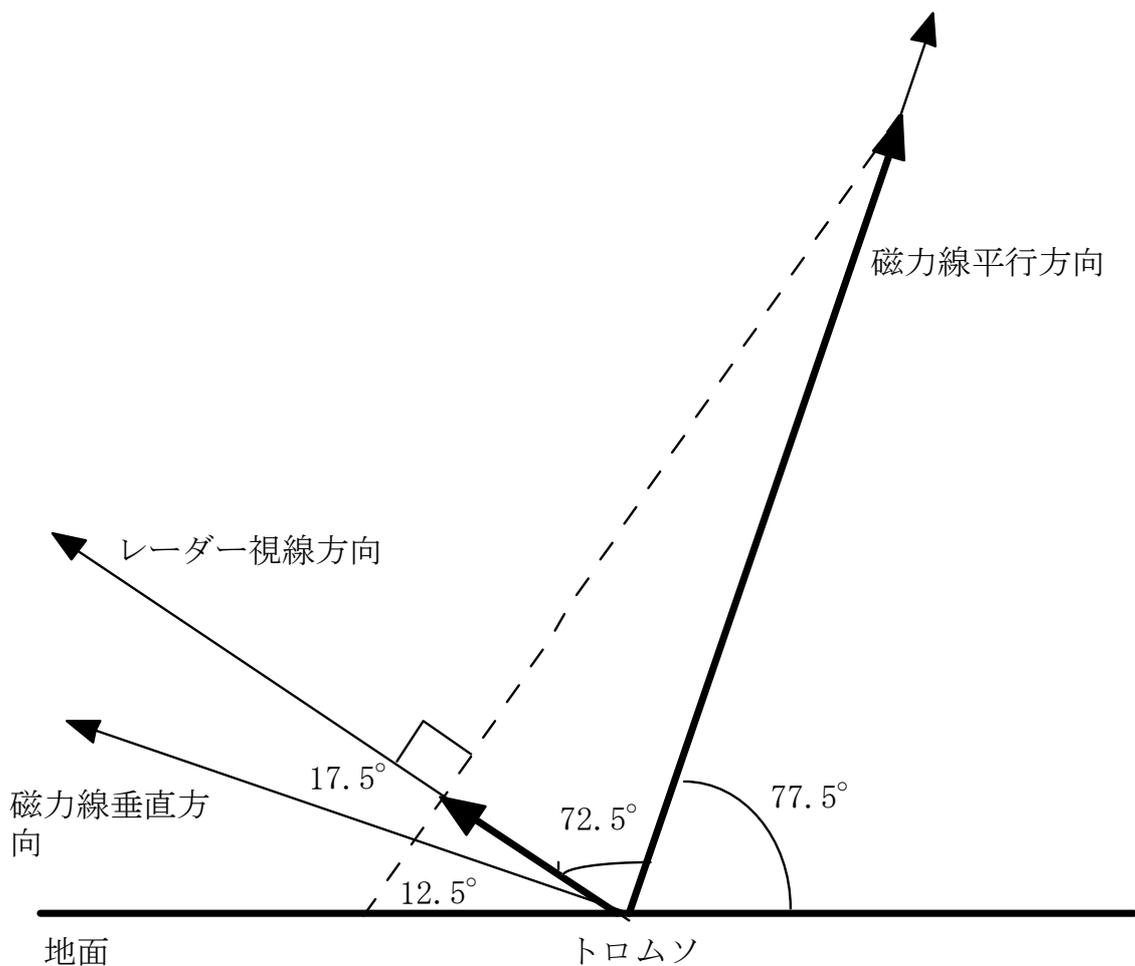
この、レーダーの視線方向の速度は、プラズマの、磁力線に対して垂直方向のドリフト速度 ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト速度) のレーダー視線方向成分を観測していると考えられる（図 4.6 参照）。

また、イオン速度の上昇はその東西方向の電場が強いことを示し、イオンのドリフト速度からは磁力線のコンヴェクションパターンの一部を観測することができる [Nilsson et al., 1996]。

図中の 0700-0930UT に引かれた実線及び×印は、図 4.2 にて引いた線と同じものである。この結果より、 400m/s から 600m/s に及ぶ強いプラズマの流れはカスプの低緯度側境界から発生していることが明確にとらえられている。また、強い流れの直前の時間帯にも、更に低緯度から、 0 から 200m/s の比較的弱いプラズマの流れが既に始まっており、弱いプラズマの流れと強いプラズマの流れは連続している様子がみえている。すなわち、極側へ移動する速度の速い高電子密度領域の運動はカスプ低緯度境界から開始しているが、その前に、前兆現象的に低緯度側（磁気圏では昼間側の、磁場が閉じている領域）でプラズマが既に動き出していることがわかる。



<図 4.5> イオン速度のカラープロット



<図 4.6> レーダーの視線方向のイオン速度を模式的に表した図

レーダーから得られるイオン速度は、実際のイオン速度のレーダー視線方向の速度成分である。実際のイオン速度を、磁力線に平行なベクトルと、磁力線に直交する面内のベクトルに分けて考えると、磁力線に平行な速度成分がレーダー視線方向の速度に反映される度合いが小さい（即ちレーダーから得られたイオン速度は、おおよそ磁力線に対して垂直方向の速度成分を観測している）と考えて良い。念のため、磁力線に平行な成分がレーダー視線方向の速度に影響をおよぼす様々な場合の中で最大の影響を与える例として、磁力線に垂直方向の速度成分がゼロであり磁力線に平行方向の速度成分のみが存在する場合を考える。この場合、磁力線に平行なイオン速度は、レーダーで観測される、レーダー視線方向の速度の約 3.3 倍の大きさをもたねばならない。この数値の算出には

$$1 / \cos 72.5^\circ = 3.3$$

を用いた。過去の観測及び研究より、磁力線に平行な方向のイオン速度はイオンの流出現象が起きている時でも、大きくとも 500m/s であると考えられる [Ogawa et al., 2000] ので、レーダー視線方向への影響は最大でも約 150m/s 程度であることが解る。

以上より、レーダーによって観測された速度には磁力線に平行な速度成分からの影響が少ないとみる見方は妥当なものであるといえる。

さらに正確にプラズマの運動を考えるには、磁力線に垂直な平面内で、どの方向にプラズマが動いているかを議論する必要があるが、これに関しては補遺に譲ることとする。

4.2 2000年11月27日のVHFレーダーとESR32mアンテナによる同時観測

4.1と同様に、2000年11月27日に関しても同じ方法で解析データをみる。

4.2.1 VHFレーダーとESR32mアンテナによる電子密度の観測

図4.7は、電子密度のカラープロットである。図下側は、VHFレーダーのカラープロットを、図上側はESRのカラープロットを示している。VHFは120秒積分値、ESRは128秒積分値である。横軸は時刻であり、世界標準時(UT)で0500-1100UTの観測である。磁気地方時(MLT)では、およそ0800-1400MLTとなる。縦軸は、観測ポイントの高度、及びその地理緯度を表している。この観測では、低い仰角(30°)のビームを用いて観測しているため、観測高度があがるにしたがって、その地理緯度も高くなることになる。また、電子密度が高い領域を赤で、電子密度の低い領域を青で示しており、底を10とする指数で(VHF、ESRとも、最下限を10、最上限を12として)プロットしている。

この日の特徴は、0700-0900UTの間で、ESR、VHFレーダーの両方で、はっきりと高電子密度の領域がとらえられ、時刻経過に従って、この高電子密度領域が高緯度側に移動している様子が明確にとらえられていることである。

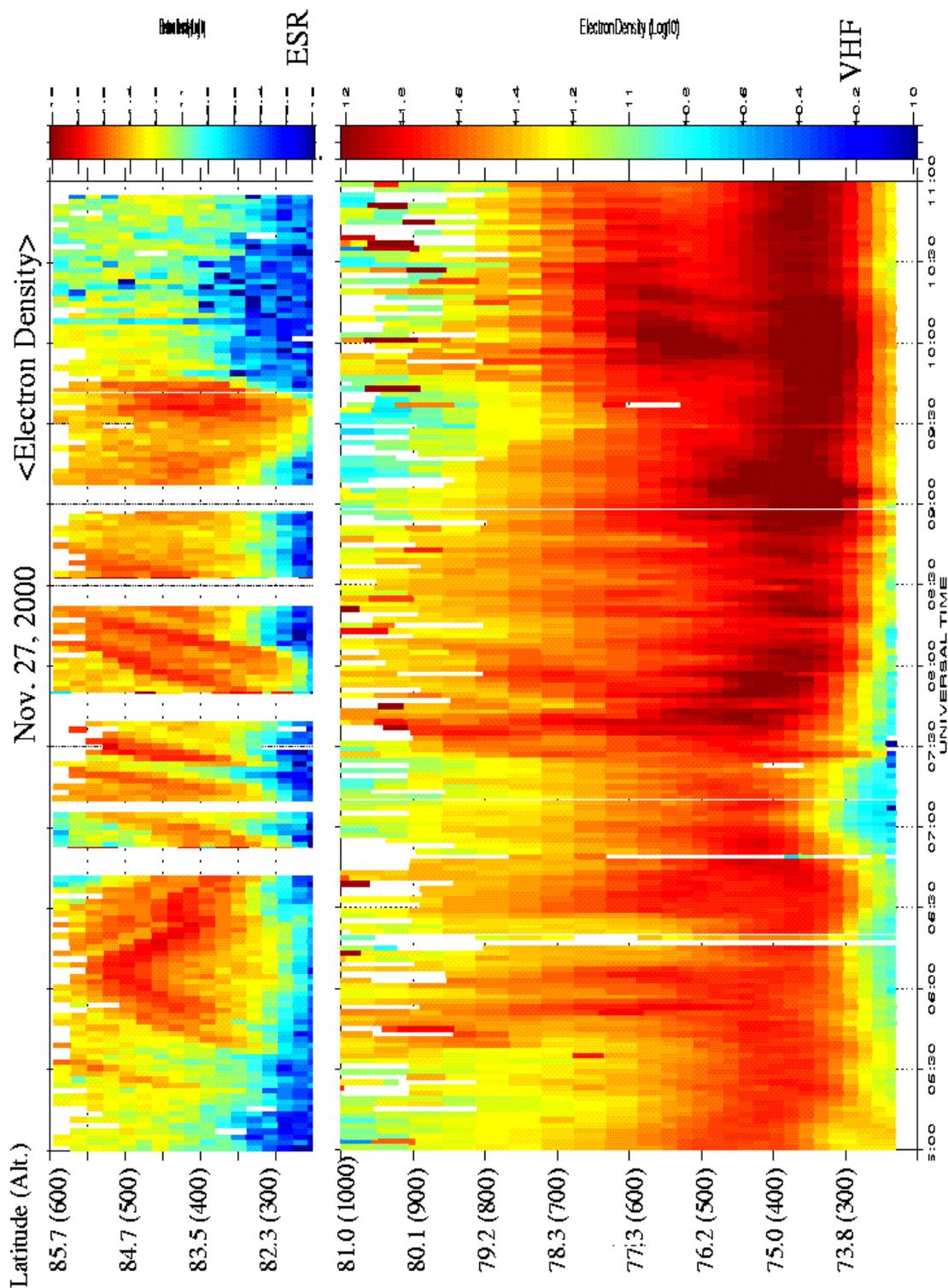
しかし、0700-0900UTの間、2つのレーダーから得られた電子密度データ間ではっきりとした高電子密度領域の連続の様子がとらえられていないように見える。(特にESRでは、低高度では電子密度が低く観測されている。)両レーダーで観測されている高電子密度領域は、低緯度から高緯度まで連続して移動しているにも関わらず、VHFとESRの間で、電子密度が連続していない理由として、26日の例でも言及したとおりこの境界で異なるビームになるため、観測高度が高高度から低高度へ不連続に変化するので、ESRの高度が低い観測点では、電子密度の上昇の領域が視野に入っていない可能性があるということ、また一般的にFピーク以高では高度が上がるにつれて電子密度が単調に減少するということが考えられる。なお、ESRの観測に、データが抜け落ちた時間帯があるが、これらはレーダー上空に飛行機が侵入してきたため、観測が一時中断しているものである。

4.2.2 VHFレーダーとESR32mアンテナによる電子温度の観測

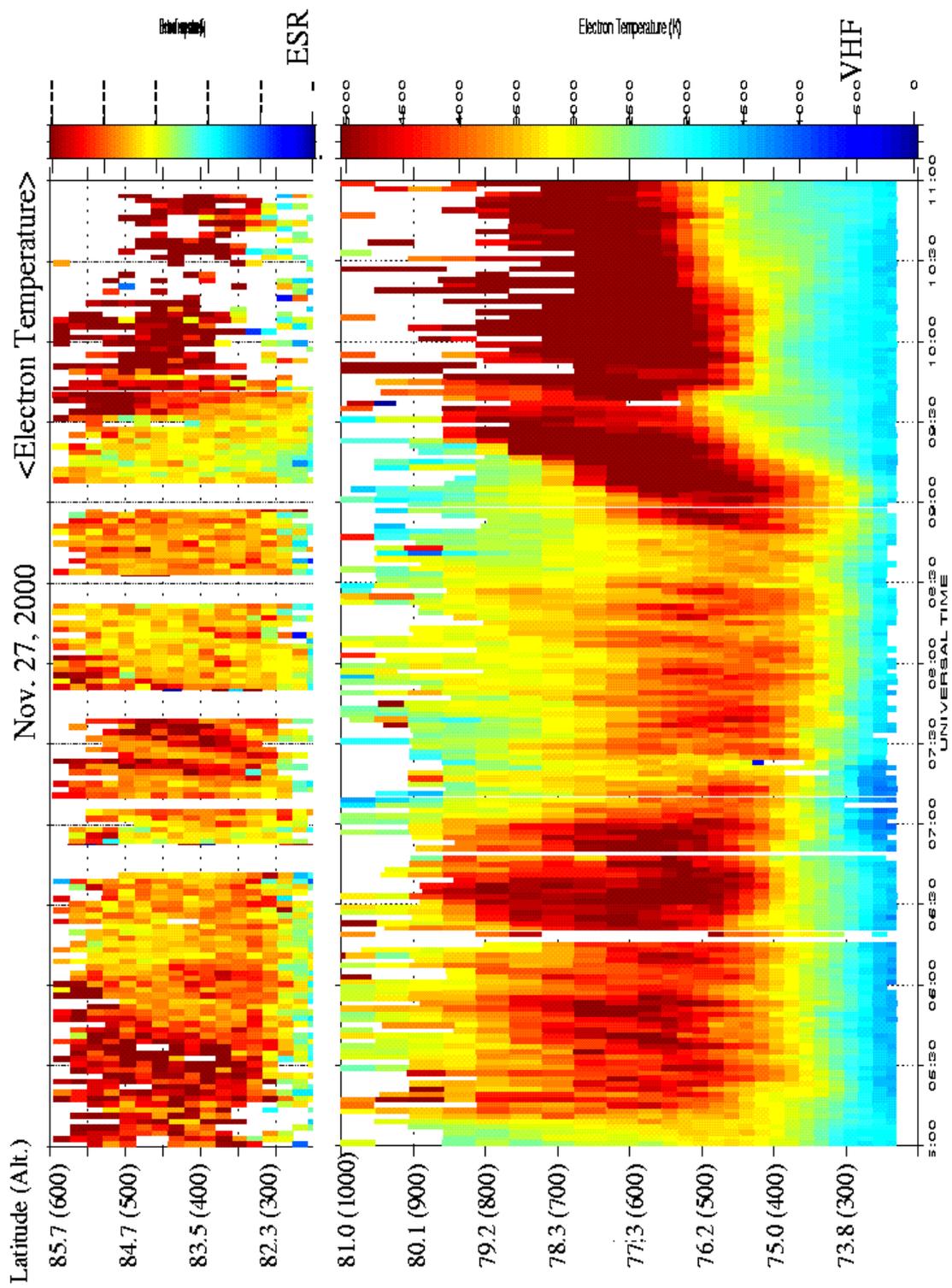
図4.8は、電子温度のカラープロットである。図のフォーマットは、電子密度の図(図4.7)と同じであり、温度の高い領域を赤で、低い領域を青で示している。VHFは最下限を0K、最上限を5000K、ESRは最下限を0K、最上限を2500Kでプロットしている。

26日の例と比べると、この日は、電子温度の高い領域が、低緯度側に下がっているよう

にみえる。この電子温度の上昇の領域の低緯度側への広がりから、粒子の降り込み領域も低緯度側に下がっていることが予測される。



<図 4.7> 電子密度のカラープロット (27 日)



<図 4.8> 電子温度のカラープロット (27 日)

4.2.3 DMSP 衛星から得られる粒子データとの照合

4.1.3 で行った方法と同じ方法で、高電子温度領域、高電子密度領域が磁気圏のどの領域でつくられどの領域に移動して行くのかを知るために、DMSP 衛星からのデータを用いた。27 日の 0500-1100UT の間で、DMSP 衛星がレーダー観測領域近くの上空を飛翔した時間帯が 2 例存在した。その詳細を、表 4.3 に示す。

<表 4.3> DMSP 衛星が、レーダー観測領域の上空を飛翔した時間帯の DMSP データの粒子判別結果 (27 日) 常時数台の DMSP 衛星が飛翔しているので、それらの DMSP 衛星を区別するために割り当てられた記号をはじめ、DMSP 衛星の判定結果、判定結果の低緯度側の境界通過の時刻 (UT)、その地理緯度、地理経度、その場所がトロムソから地理経度にしてどれくらい離れているか、を示した。判定結果の略号は、それぞれ地球磁気圏の領域のうち、以下の領域を表す。(llbl:低緯度境界層、bps:バウンダリープラズマシート、mant:マントル、cusp:カスプ)

DMSP 衛星の 記号	判定結果	世界標準時 (UT)	地理緯度 (°)	地理経度 (°)	トロムソ (19.2° E) からの経度 方向のずれ (°)
F13	mant	071315	73.8	14.6	4.6
	cusp *	071322	73.4	13.8	5.4
	bps	071502	68.2	5.0	14.2
F12	llbl	092325	79.6	35.9	16.7
	bps	092333	79.3	33.8	14.6
	cusp	092347	78.8	30.3	11.1
	bps	092419	77.5	23.7	4.5
	cusp	092437	76.7	20.4	1.2
	bps	092504	75.5	16.3	2.9
	cusp *	092520	74.7	14.1	5.1

表 4.3 のうち、*印を付した 2 点に関して、磁力線に沿って地理緯度を換算した。その結果を示したのが表 4.4 である。ここではカスプの低緯度側境界 (UT0713、UT0925) を選んだ。

<表 4.4> カラープロットへ投影する際の補正值 (いずれも領域の低緯度側を示している。)

世界標準時 (UT)	判定結果	地理緯度 (°)	VHF の視点 高度 (km)	地理緯度 補正 (°)	プロットす る緯度 (°)
0713	cusps	73.4	267	1.1	74.5
0925	cusps	74.7	375	0.9	75.6

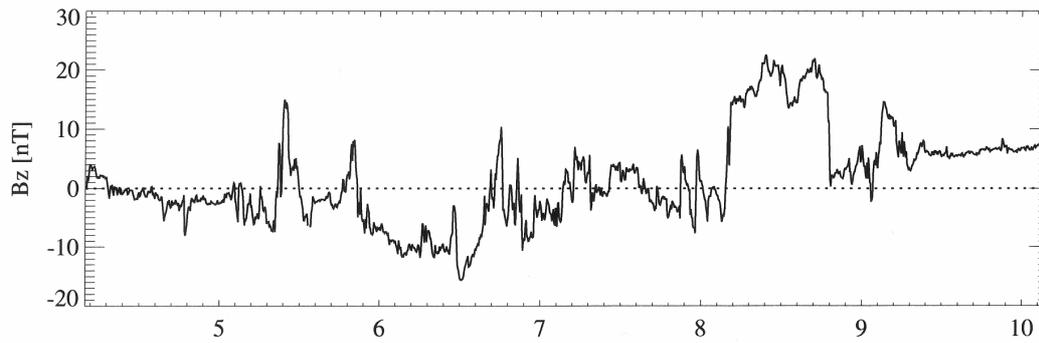
表 4.4 に算出した値を図 4.8 のカラープロット上に×印でプロットした。この結果より、特に電子温度の上昇領域の低緯度側境界とカスプの低緯度側境界に、極めて良い一致がみられることがわかる。

以上のように数点ではあるが、VHF レーダーで観測された高電子温度領域の低緯度側境界が、人工衛星の粒子スペクトルとの比較から、カスプの低緯度側境界にほぼ一致することが確かめられたので、高電子温度領域の低緯度側境界がカスプの低緯度側境界に対応するという作業仮説のもとで、これらのプロットした点を含む時間帯で電子温度の上昇の低緯度側境界に線を引いた。これが図 4.8 の VHF レーダーのカラープロット上 (0700-1100UT) に描いた黒の曲線である。27 日は、26 日に比べてカスプが低緯度側に下りてきている様子が見受けられる。

4.2.4 IMF データ

ここで、この時間帯の IMF の Bz 成分を図 4.9 に示す。これは人工衛星 ACE によって得られたデータである。この衛星の飛翔する場所から、マグネトポーズまで太陽風の IMF の情報が到着するのに 50 分前後かかる事を太陽風速度と衛星-磁気圏昼間側境界間の距離から算出し、ここでは 50 分ずらしてプロットをしている。

この時間帯の全体的な特徴として、図 4.9 の 0400UT から 0800UT まで (この太陽風情報がマグネトポーズに到着するのが 0450UT から 0850UT まで) は、多くの時間で Bz 成分が負であり、0800UT 以降 (この太陽風情報がマグネトポーズまで到着するのが 0850UT 以降) ではほとんどの時間帯で Bz が正であるという点があげられる。また、図 4.7 において 0720UT ごろに開始したとみられる、VHF レーダーの視野内から ESR の視野内への明確な高電子密度領域の高緯度側への移動は、IMF の Bz 成分が負の時間帯に発生していることが推測できる。

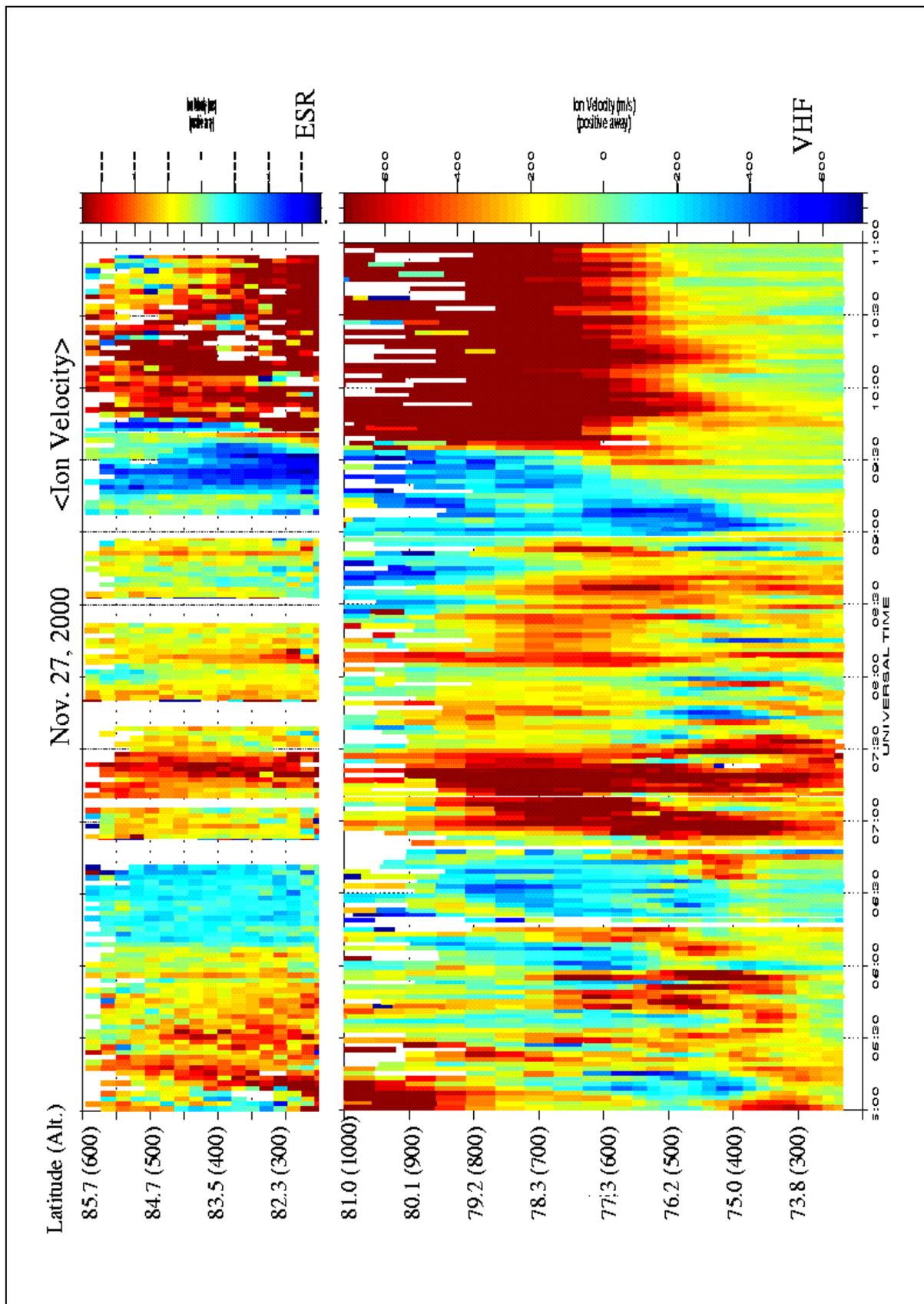


<図 4.9> 27 日における観測時間帯に合わせた IMF の Bz 成分の様子 横軸は UT、縦軸は IMF の Bz 成分の変動 (nT) である。

4.2.5 VHF レーダーと ESR32m アンテナによるイオン速度の観測

図 4.10 は、イオン速度のカラープロットである。このプロットは、レーダーの視線方向のイオン速度の緯度-時間変化を表している。図のフォーマットは電子密度の図 (図 4.7) と同じであり、レーダーに近づく方向を青で、レーダーから遠ざかる方向を赤で示している。最も速く近づく速度を -700m/s 、最も速く遠ざかる速度を 700m/s でプロットしている。

図中の 0700-1100UT に引かれた実線及び×印は、図 4.8 にて引いた線と同じものである。この結果より、0900UT 以降では 400m/s から 600m/s に及ぶ強いプラズマの流れはカスプの低緯度側から発生していることが確認できる。また、強い流れの直前の時間帯にも、比較的弱い 0 から 400m/s のプラズマの流れが既に存在している。それに対し、0725UT 前後の時間帯では、必ずしもカスプの低緯度側から強いプラズマの流れがみえているとは考えられず、カスプより更に低緯度の領域から強い (700m/s を超える) プラズマの流れが始まっていることがとらえられている。



<図 4.10> イオン速度のカラープロット (27 日)

4.3 高電子密度領域の緯度毎のイオンの速さと電子密度の時間変動

今までみてきた中で、カスプの位置と、プラズマの流れがみられる領域の全体像をとらえることができた。次にこの節では、高電子密度領域の基本的な性質、現象の内部や外部のプラズマの運動の様相を詳しく知るために、緯度ごと（高度ごと）の時間変化から高電子密度領域を探る。具体的には、高電子密度領域内部と領域外部における電子密度やレーダービーム方向（地理北極方向）のプラズマ速度の関係を定量的に比較する。なお、南北方向のプラズマ速度は、電場の東西成分に対応している。

4.3.1 2000年11月26日における緯度毎のパラメーター

図 4.11(a)は、2000年11月26日における VHF レーダーによって観測された電子密度とイオンの速さの、緯度毎のプロット図である。横軸は世界標準時 (UT) であり、縦軸は左側に電子密度（底を 10 とする指数）を赤のラインで、右側にイオンの速さ (m/s) を青のラインでとっている。それぞれのグラフは、最下段から、300km、400km、500km、600km、700km 高度でのプロットを表しており、その地点での地理緯度も同時に示している。図 4.11(b)は、26日における ESR によって観測された電子密度とイオンの速さを、図 4.11(a)と同じフォーマットで表している。但し、それぞれのグラフは、最下段から、300km、350km、400km、450km、500km 高度でのプロットである。

図 4.11 から、電子密度の高い領域（グラフでは山となってみえる）と、電子密度の高い領域には含まれた、電子密度の低い領域（グラフでは谷となってみえる）を視覚的にとらえることができる。

ここで、DMSP 衛星から得られたデータとの照合によりカスプの低緯度側の境界が推定できた時間帯で、かつ低緯度側 (VHF) から高緯度側 (ESR) で、連続的に電子密度が高い領域がとらえられていることが電子密度のカラープロットからも確認できるイベント(例えば図 4.11(a)の VHF レーダーの高度 500km、600km 付近の、0810UT 頃)に着目すると、電子密度が高い領域の間に見られる電子密度が低い領域では、イオンの速さが大きくなっている傾向、つまり東西方向の電場が強い傾向が明確に見られている。VHF レーダーでの 0810UT 前後、500km、600km 高度の観測は、先述の DMSP 衛星のデータの評価からもカスプ領域より高緯度側をとらえていると考えられる。図 4.11(b)では、このイベントの更に高緯度の様子を順次追うことができるが、高緯度でも総じて電子密度の低い領域で電場の東西成分が強い傾向がみえている。

4.3.2 2000年11月27日における緯度毎のパラメーター

図 4.12(a)は、2000年11月27日における VHF レーダーによって観測された電子密度とイオンの速さの、緯度毎のプロット図である。横軸は世界標準時 (UT) であり、縦軸は左側に

電子密度（底を 10 とする指数）を赤のラインで、右側にイオンの速さ（m/s）を青のラインでとっている。それぞれのグラフは、最下段から 300km、400km、500km、600km、700km 高度でのプロットを表しており、その地点での地理緯度も同時に示している。図 4. 12 (b) は、27 日における ESR によって観測された電子密度とイオンの速さを、図 4. 12 (a) と同じフォーマットで表している。但し、それぞれのグラフは、最下段から 300km、350km、400km、450km、500km 高度でのプロットである。

ここで、DMSP 衛星から得られたデータとの照合によりカスプの低緯度側の境界が推定できた時間帯で、かつ低緯度側（VHF）から高緯度側（ESR）で、連続的に電子密度が高い領域がとらえられていることが電子密度のカラープロットからも確認できるイベント（例えば図 4. 12 (a) の VHF レーダーの高度 400km から 700km 付近の、0720-0800UT 頃）に着目すると、電子密度が高い領域の間に見られる電子密度が低い領域では、イオンの速さが大きくなっている傾向、つまり東西方向の電場が強い傾向が、ここでも明確に見られている。VHF レーダーでの 0720-0800UT 頃、400km から 700km の観測は、先述の DMSP 衛星のデータの評価からもカスプ領域より高緯度側をとらえていると考えられる。図 4. 12 (b) では、このイベントの更に高緯度の様子を順次追うことができるが、高緯度でも総じて電子密度の低い領域で電場の東西成分が強い傾向がみえている。

図 4. 12 から、電子密度が下がっている領域で電場の東西成分が大きくなっている傾向は、26 日に比べてより低緯度から見られている。また、図 4. 12 (b) にはデータの空白の部分があるためその時間帯はデータを吟味するのが困難であるが、この傾向は全時間帯にわたってみられる。

4. 3. 3 議論

本研究で研究対象としてみている電子密度が高い領域については、第 2 章で述べたような、磁気リコネクションに伴った磁力線の束が、粒子の降り込みを伴って反太陽側へ流されていくものを想定している。以上の解析結果から、その高電子密度領域の中で、南北方向のイオンの速さ（東西方向の電場とよみかえることができる）が大きいところで電子密度が小さくなっていること、電子密度の高い領域ではその周りの領域に比べて南北方向のイオン速度は小さくなる傾向が見られることが確認できたが、その意味するところを以下で考察する。

南北方向のイオン速度が高密度領域の内部で外部より小さく、その周辺の領域の方が大きくなる観測事実から二つの可能性が考えられる。

一つはこの観測事実の通り、FTE や磁気リコネクションによりつくられた高密度領域内のプラズマはその周辺領域のプラズマよりも遅い運動をする（つまり電場がより小さい）という描像である。

もう一つの可能性は、この周辺のイオン速度の速い領域は、磁気圏側では高密度領域の中に含まれているが、電離圏では以下に述べるような化学過程で電子密度が減少してしまうために、電離圏高度でみていると、（本来は高密度領域にあるにも関わらず）電子密度が低い領域にあるように見える、という可能性である。

後者についてその可能性を検討する。電場が強いところではイオンと中性粒子とが速度差を生じる。速度差があると、衝突を介してイオン温度が上昇（frictional heating：フリクショナルヒーティング）し、これに伴い、イオンと電子のリコンビネーションレートが上

昇し、電子密度が減少する可能性がある [Schunk, 1975]。この説明を、ここで議論している高電子密度領域の中に見られる電子密度の低い領域に対して適用すると、電子密度の低い領域は、粒子の降り込みがあるにもかかわらず、その降り込み領域の一部分において電子密度が減っているようにみえる領域であるという解釈が可能となる。

このようなことが実際に起きていたかどうかを調べるためには、高電子密度領域のあいだにみられる電子密度の低い領域について、高度による電子密度の減少の様子を確認する必要がでてくる。その理由は、フリクショナルヒーティングによるイオン温度の上昇にともなってリコンビネーションレートが上昇すると考えられる領域は、高度に大きく依存するからである。

電場が強く、かつ電子密度の減少している領域での電子密度の減少のしかたを、時刻を追った高度プロファイルをみることによって確認する。これによって、電子密度の減少が、上記の説明にあてはまるものか否かを判定することができる。

電子密度 (log10)

イオンの速さ (m/s)

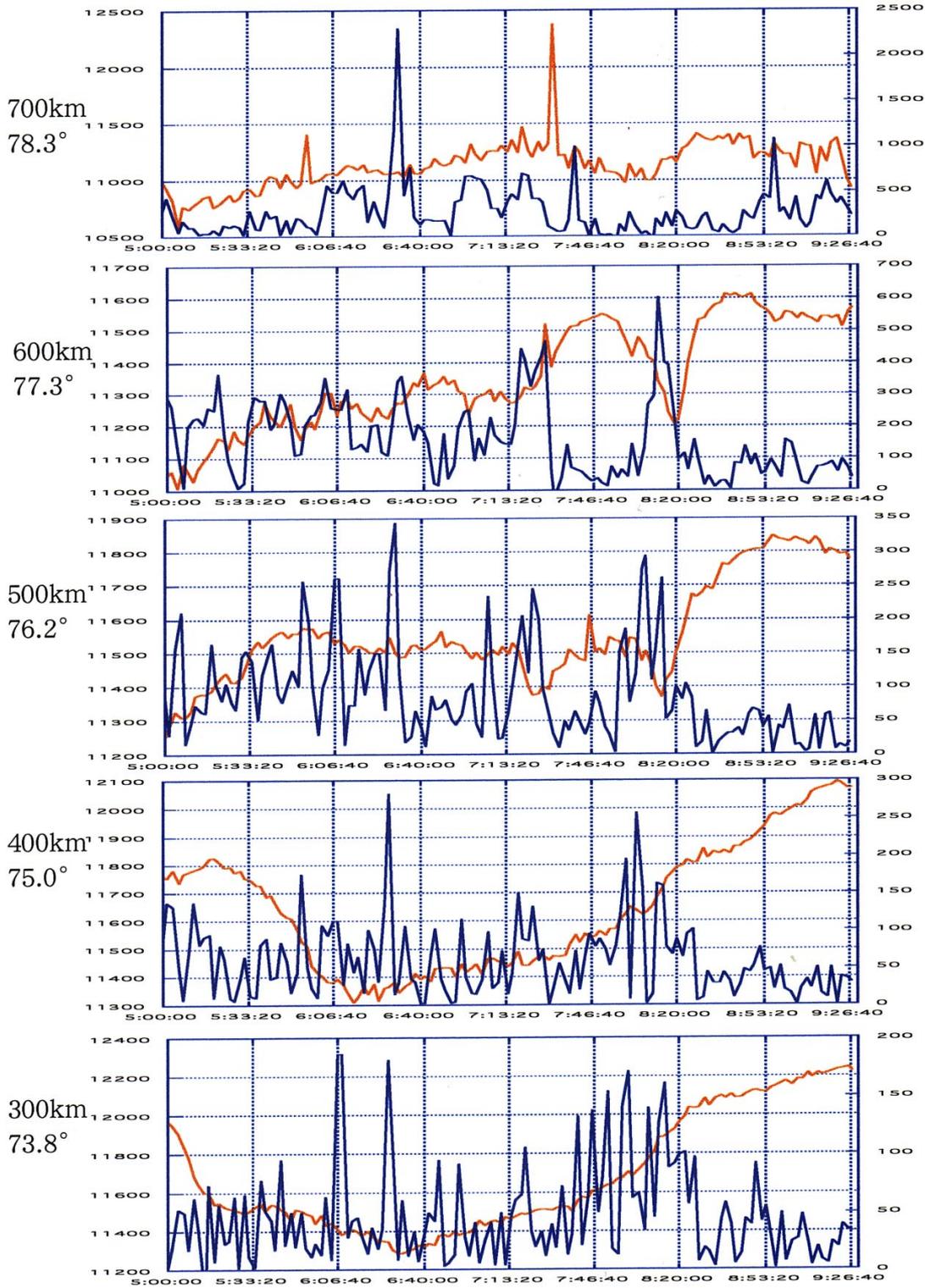


図4. 11(a) 26日におけるVHFレーダーによって観測された電子密度とイオンの速さの、高度毎のプロット図。赤のラインが電子密度を、青のラインがイオンの速さを表している。

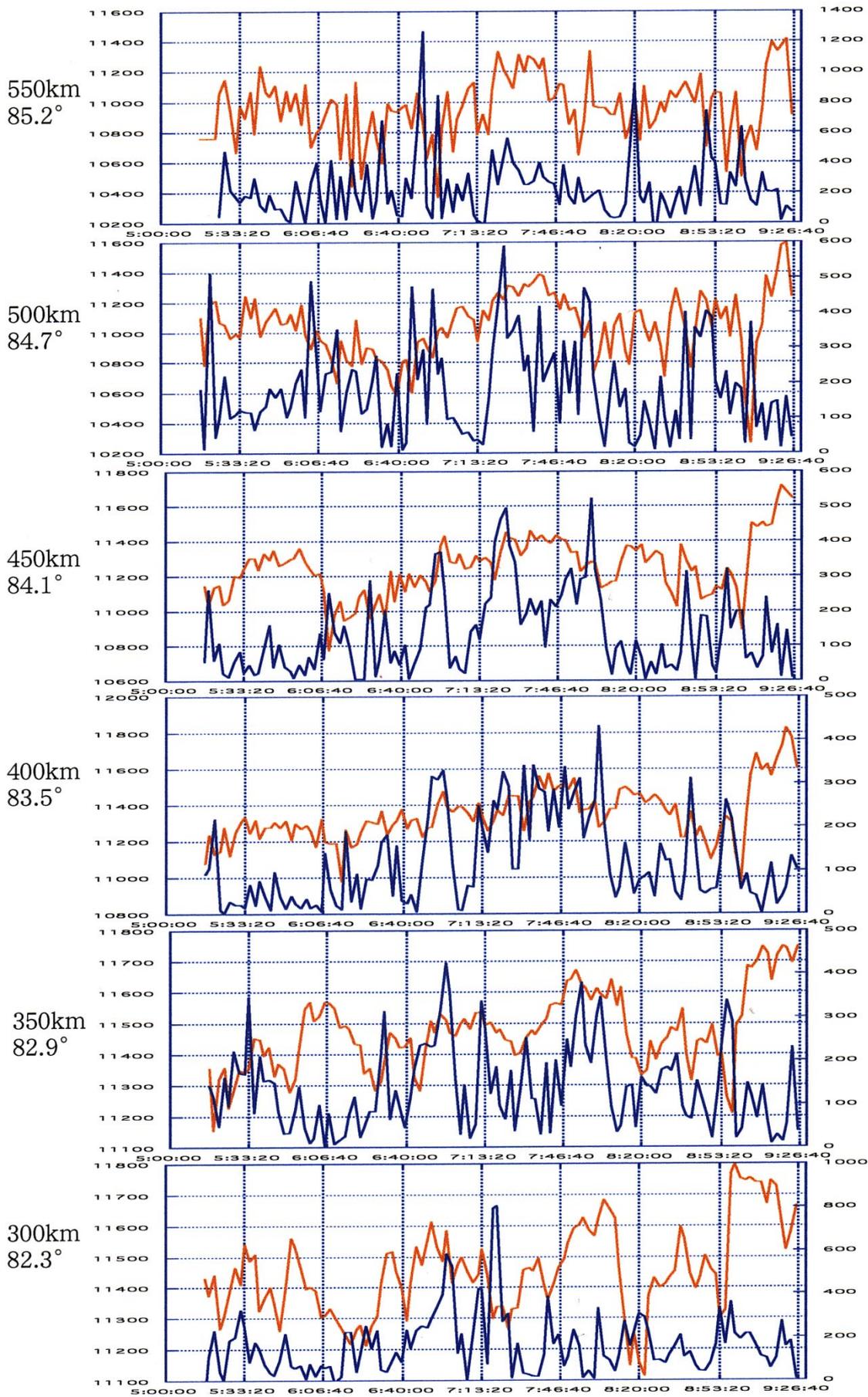


図4.11(b) 26日におけるESRによって観測された電子密度とイオンの速さの、高度毎のプロット図。赤のラインが電子密度を、青のラインがイオンの速さを表している。

電子密度 (log10)

イオンの速さ (m/s)

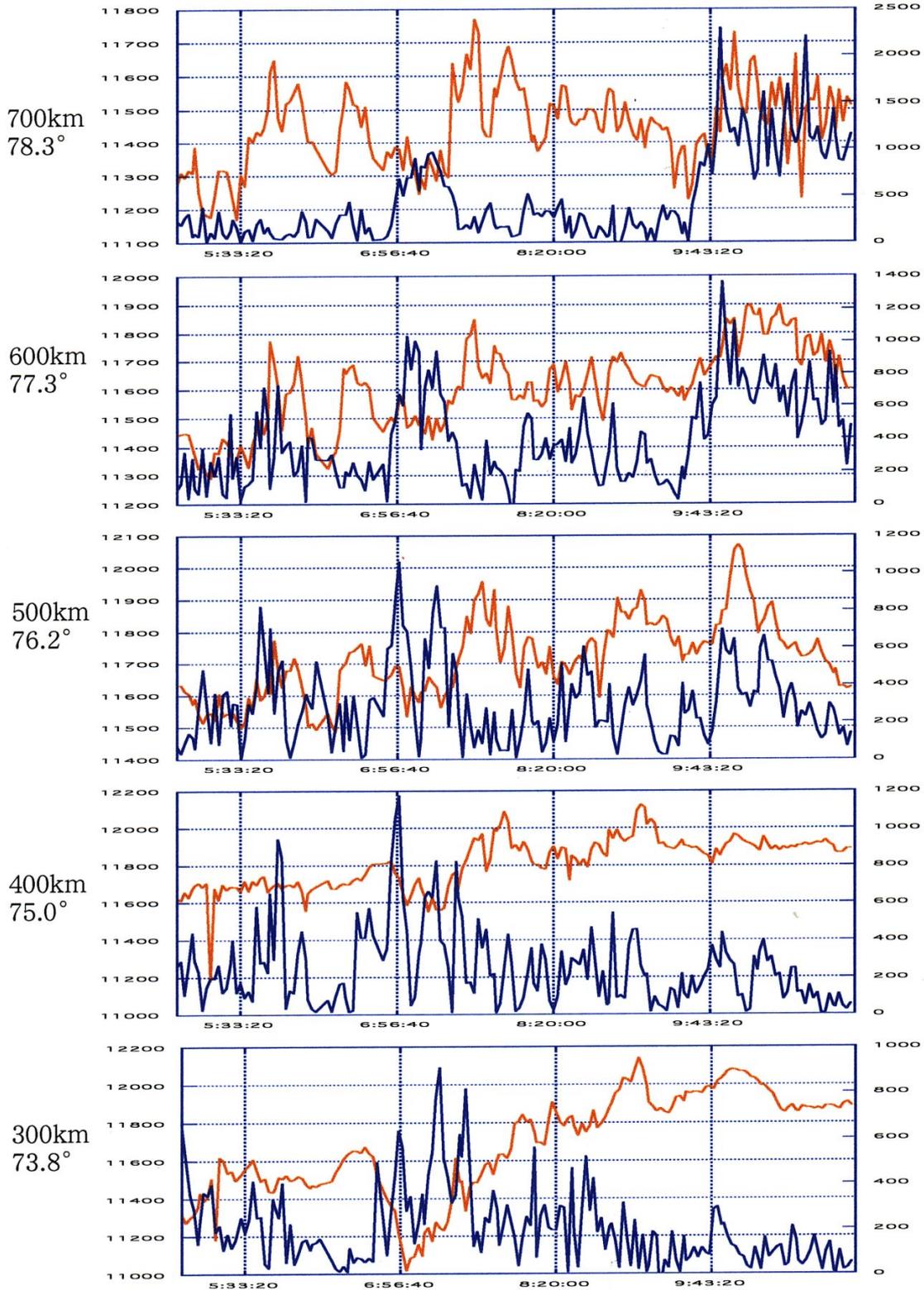


図4. 12(a) 27日におけるVHFレーダーによって観測された電子密度とイオンの速さの、高度毎のプロット図。赤のラインが電子密度を、青のラインがイオンの速さを表している。

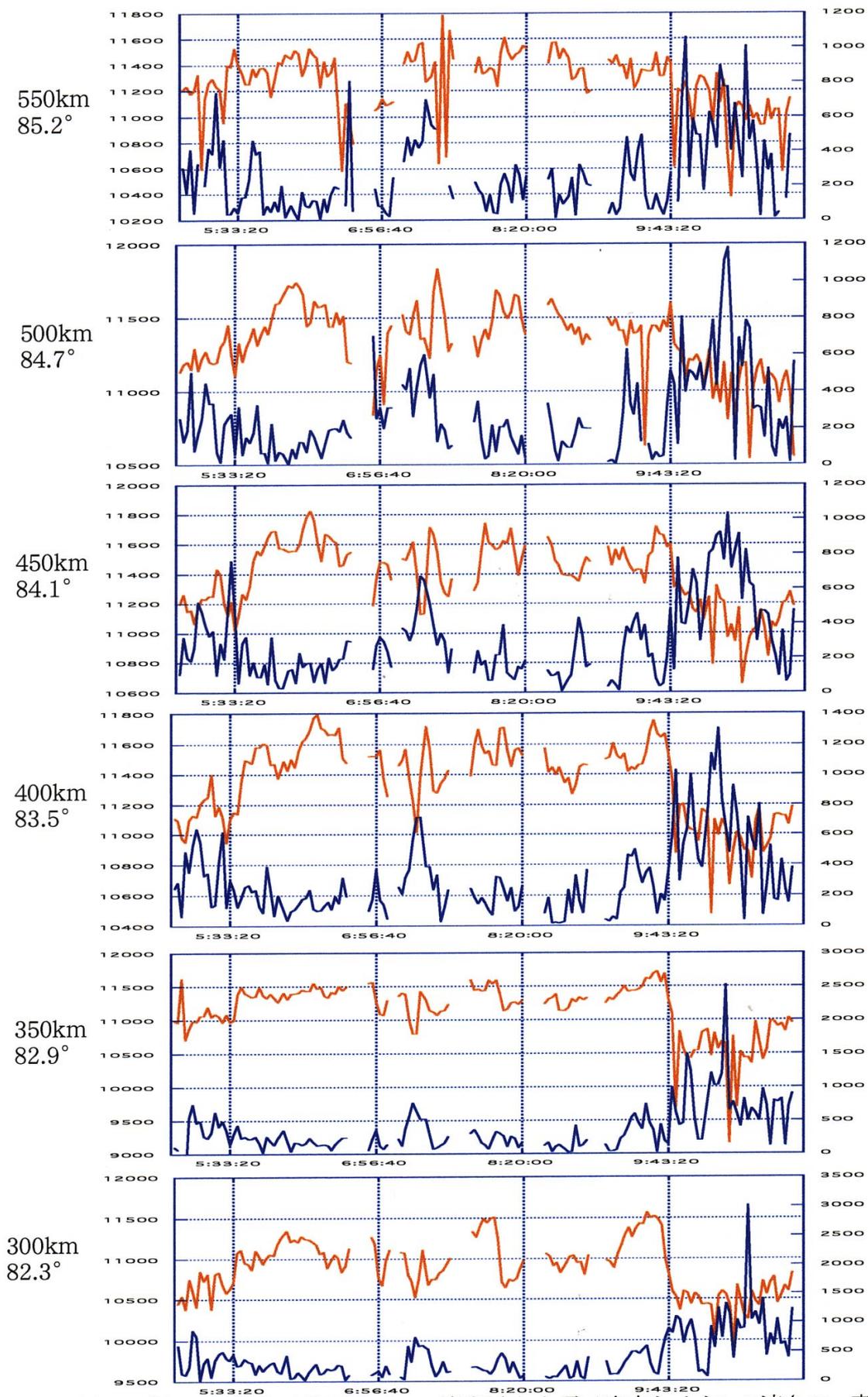


図4.12(b) 27日におけるESRによって観測された電子密度とイオンの速さの、高度毎のプロット図。赤のラインが電子密度を、青のラインがイオンの速さを表している。

4.4 ESR42m アンテナによる観測

前節までは高電子密度領域を、磁力線にほぼ垂直な方向の観測ビームをもちいて解析することにより、議論してきた。それに対し、本節では ESR42m アンテナから得られるデータから、高電子密度領域と高電子密度領域のあいだにみられる電子密度の低い領域の、沿磁力線方向の情報に着目する。先述した後者の可能性、つまり電子密度が低い領域は磁気圏から粒子が降り込んできているにもかかわらず強い電場によってリコンビネーションレートが大きくなるために電子密度が低くみえているだけである、という解釈の可能性についてここで検証する。

注意すべき点は、ESR42m アンテナの視線を電子密度の高い領域および電子密度が低い領域が通過するかどうか、つまり VHF や ESR で追っている高電子密度領域が、まさに ESR42m アンテナの観測領域を通過しているか否かを検証することは、実際には困難であることである。この不確かさを考慮に入れたうえで議論を進めて行かねばならない。

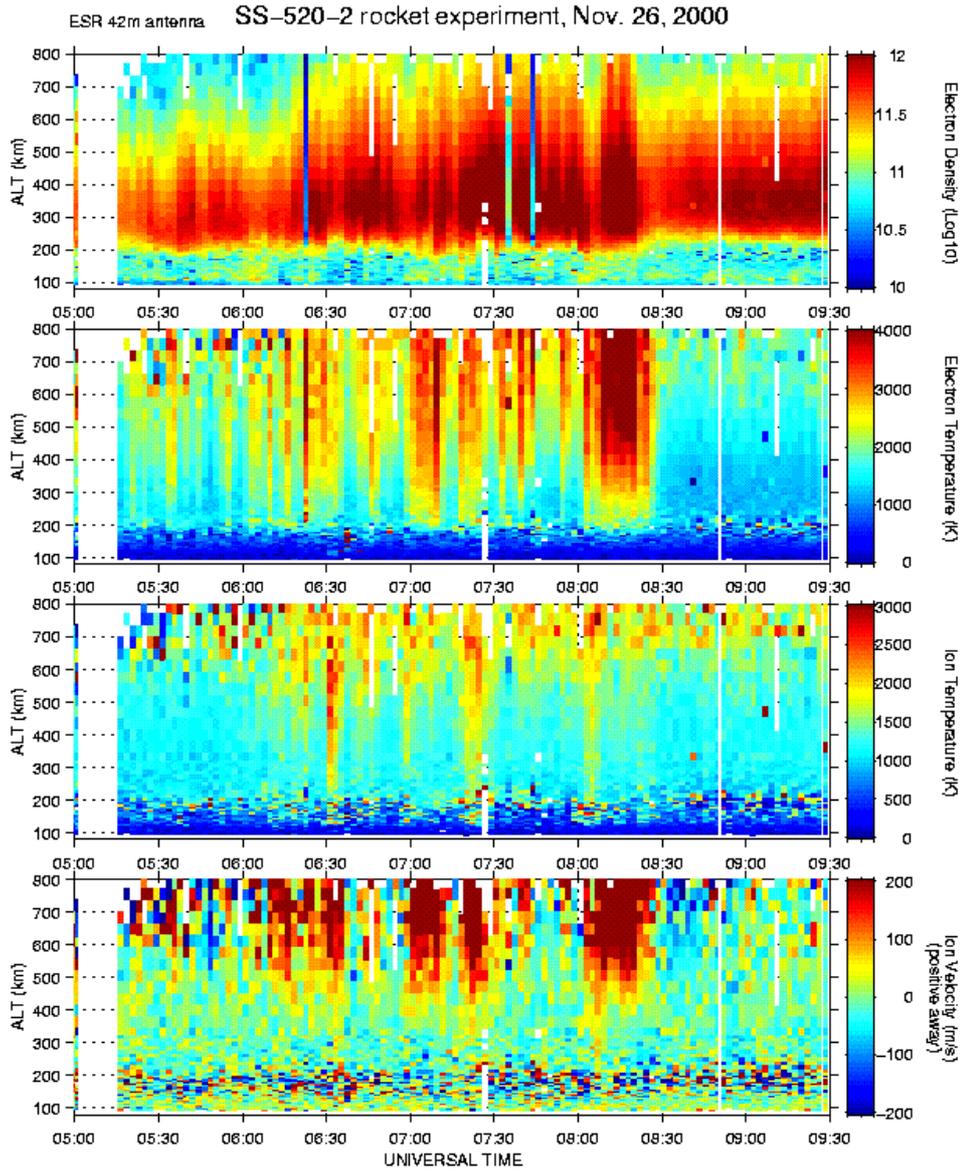
4.4.1 2000 年 11 月 26 日における ESR42m アンテナによる観測

図 4.13 に、2000 年 11 月 26 日における ESR42m アンテナによる沿磁力線方向のカラープロットを示す。横軸は世界標準時 (UT) であり、0500-0930UT をとり、最上段から順に電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を、その右側に示したカラーバーのスケールで表している。すべてのパラメーターは、128 秒積分値である。

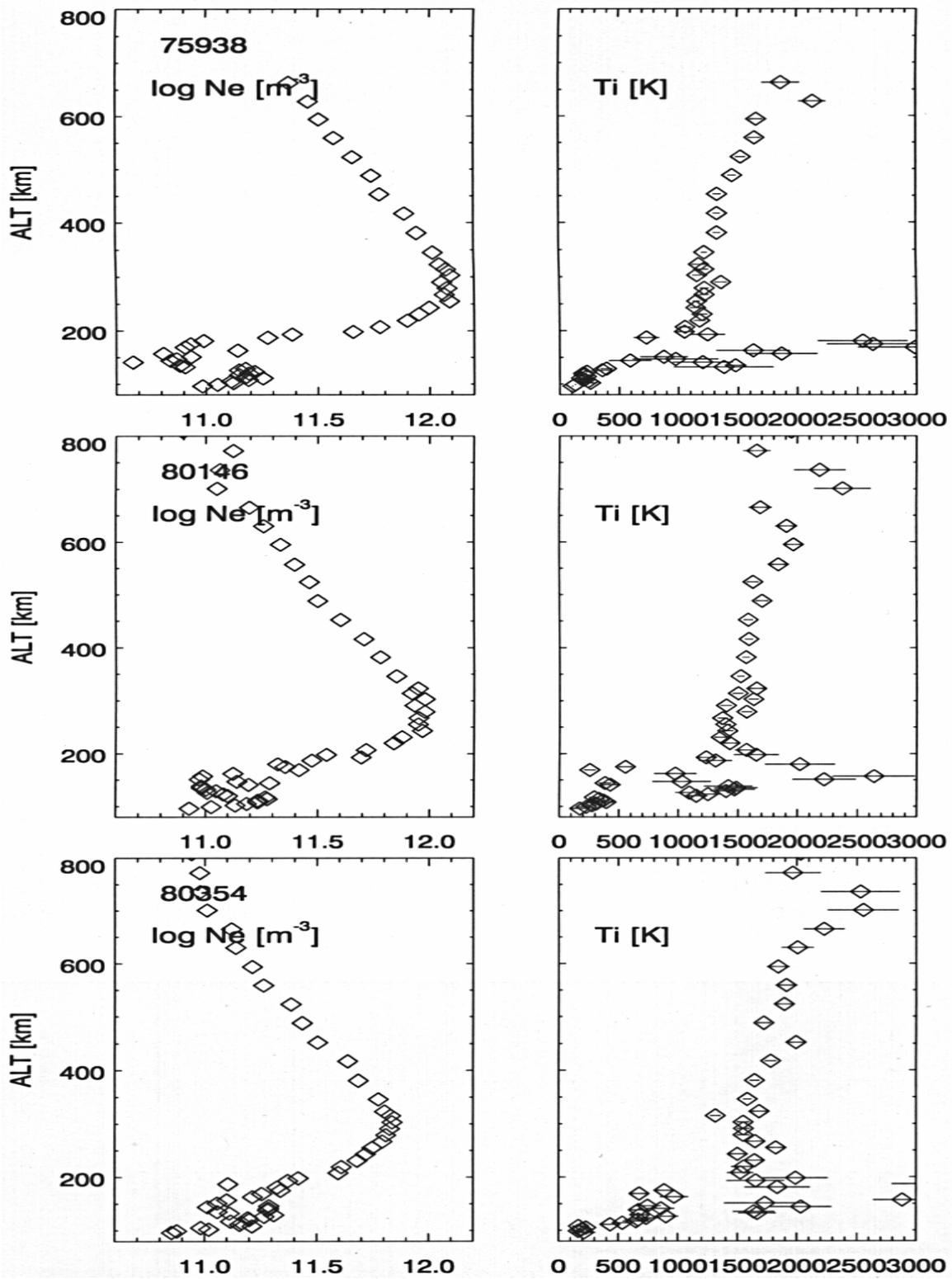
前節で、東西方向の電場が強い領域で電子密度が低くなっている傾向がみられることを述べた。ESR42m アンテナのデータにおいて、イオン温度 (電場の強さを表す指標となる) が高い時間帯について、電子密度の減少の様子をしらべる。注意点として、ESR42m アンテナの観測でのイオン速度は、沿磁力線方向のイオン速度なので、ここでは電場の強さを表す指標としては用いられないことをあげておく。

ここで、0800UT 前後の現象に着目する。この時間帯に着目する理由は、DMSP 衛星から得られたデータとの照合によりカスプの低緯度側の境界が推定できた時間帯内であること、かつこの時刻付近から、電子密度が高い領域が低緯度側 (VHF) から高緯度側 (ESR) にむかって連続的にとらえられている様子が電子密度のカラープロットからも確認できること、かつ ESR42m アンテナによる観測でイオン温度が低い高度まで上昇しており電場が強い様子が確認できること、があげられる。この時間帯では、イオン温度が高い時間帯で、同時に電子密度が減少していることが図 4.13 から明らかに見取ることができる。この電子密度の減少の様子を高度プロファイルにした結果が図 4.14 である。図 4.14 は、075938UT から 080602UT までの電子密度及びイオン温度を最上段から最下段まで時刻にそって並べている。それぞれのグラフの縦軸に高度をとってプロットしており、電子密度のグラフの左上に印されている数字は、128 秒積分値の、はじめの時刻 (UT) である。

075938UT から 080146UT の時間帯へは、イオン温度が 200km 高度以上すべての領域で上昇し、それに対して電子密度が 200km 高度以上すべての領域で減少しており、また 080146UT から 080354UT の時間帯へは、イオン温度が全高度にわたって更に上昇し、電子密度が、特に 200km 高度以上すべての領域で減少していることがわかる。



<図 4.13> 沿磁力線方向のカラープロット (26 日)



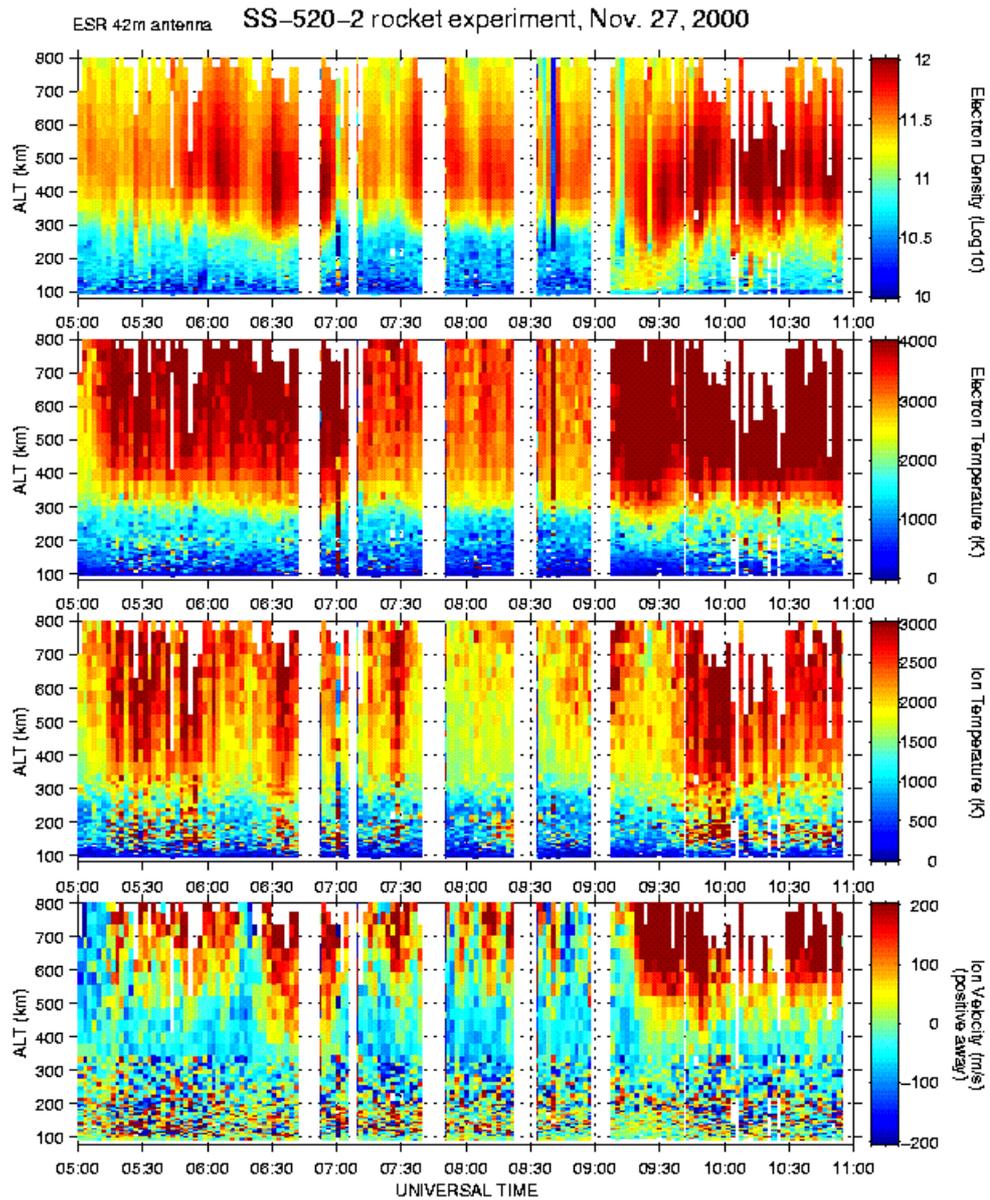
<図 4.14> ESR42m アンテナから得られた 075938UT から 080602UT までのイオン温度と電子密度の高度プロファイル (26 日)

4.4.2 2000年11月27日におけるESR42mアンテナによる観測

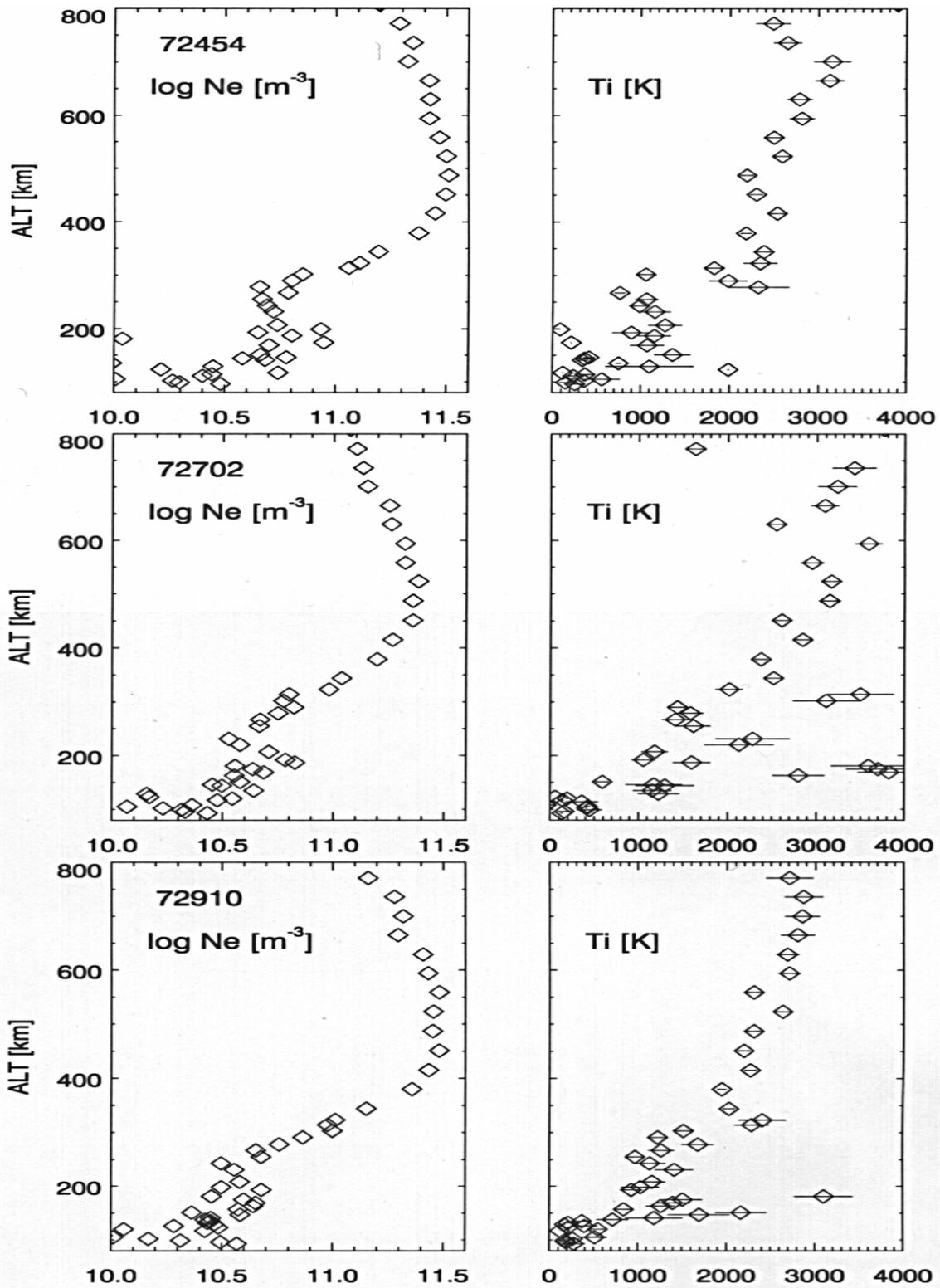
図 4.15 に、2000 年 11 月 27 日における ESR42m アンテナによる沿磁力線方向のカラープロットを示す。図 4.15 は、横軸は世界標準時 (UT) であり 0500-1100UT をとり、図のフォーマットは図 4.13 と同じである。

ここで、0727UT 前後の現象に着目する。この時間帯に着目する理由は、DMSP 衛星から得られたデータとの照合によりカスプの低緯度側の境界が推定できた時間帯内であること、かつこの時刻周辺から開始するとみられる高電子密度領域の極方向への移動が、低緯度側 (VHF) から高緯度側 (ESR) へ連続的にとらえられている様子が確認できること、かつ 42m アンテナによる観測でイオン温度が低い高度まで上昇していること、があげられる。またこの時間帯では、イオン温度が高い時間帯で、同時に電子密度が減少していることが図 4.15 から明らかに見取することができる。この電子密度の減少の様子を高度プロファイルにした結果が図 4.16 である。図 4.16 は、072454UT から 073118UT までの電子密度及びイオン温度を最上段から最下段まで時刻にそって並べている。それぞれのグラフの縦軸に高度をとってプロットしており、電子密度のグラフの左上に印されている数字は、128 秒積分値のうち、はじめの時刻 (UT) である。

072454UT から 072702UT の時間帯へは、イオン温度がすべての高度領域で上昇し、それに対して電子密度がすべての高度領域で減少している。次の 072702UT から 072910UT の時間帯へは、イオン温度が全高度にわたって下降し、電子密度が、全高度にわたった領域で増加している様子を見ることができる。



<図 4.15> 沿磁力線方向のカラープロット (27 日)



<図 4.16> ESR42m アンテナから得られた 072454UT から 073118UT までのイオン温度と電子密度の高度プロファイル (27 日)

4.4.3 議論

4.3.3において、東西方向の電場が強いところで電子密度が低い領域が観測される結果に関し、その領域にも粒子の降り込みがあるにも関わらず、降り込み領域の一部分において電子密度が減っているようにみえるだけであるという解釈の可能性を提示した。ここで、4.4.1で例にあげた26日、075938UTから始まる高度プロファイルの結果(図4.14)を参照すると、イオン温度の上昇(電場の上昇)に伴って、電子密度が全高度に渡って減少している様子が明確にとらえられた。また、27日、072454UTから始まる高度プロファイル(図4.16)においても、中段のグラフから下段のグラフへの変化は、イオン温度上昇(電場の上昇)に伴って、電子密度が全高度に渡って減少している様子が明確にとらえられている。

これらにより、少なくともここであげた2例の電子密度の減少に関しては、フリクショナルヒーティングによるイオン温度の上昇にともなってリコンビネーションレートが上昇することにより電子密度が減少するというシナリオで、全高度の電子密度の減少を説明することはできないと結論づけられる。その理由は先述のとおり、この化学過程が高度に大きく依存するからである。

以上より、この節でみた2例の電子密度の低い領域に関しては、本来高電子密度領域であるにも関わらず化学過程によって電子密度が減少してしまうために、電子密度が低い領域であるかのようにみえる、という可能性はあてはまらず、観測が表すように、高電子密度領域の内部で南北方向のイオン速度が外部に比べて小さく、つまり高電子密度領域内のプラズマは、その周辺領域のプラズマよりも遅い運動をしていたという描像を得ることができる。

第5章 まとめと今後の課題

ここでは、本研究でいままで述べてきた現象についての観測結果及び議論を総合してまとめると共に、ここから帰結できる事柄を述べる。また、高電子密度領域の極方向への運動及びこれに関連があると考えられる現象をより深く理解するためにはどういった観測が必要か、今後の課題について述べる。

5.1 まとめ

宇宙空間に太陽風が吹くなかで、地球が固有磁場をもっていることから形成される地球磁気圏の昼間側の前面で、ある条件下で太陽風の中に存在する磁場と地球磁場との再結合が起きる。この磁気再結合のプロセスによって太陽風のプラズマ及びエネルギーが磁気圏の中に流入することができると考えられている。本研究では特に、EISCAT レーダーの観測結果をもちいて、局所的に見られる太陽風から磁気圏への物質及びエネルギーの流入現象の、電磁氣的性質や空間分布、時間変動を明らかにすることを目的に掲げた。様々な現象のなかでも特に極域電離圏カusp領域から高電子密度領域が極方向へ移動して行く現象に着目した。このEISCATで観測される現象について、太陽風に存在する磁場と地球磁場との再結合によって開いた、地球に根元をもつ磁力線が太陽風の運動に伴って地球の夜側に流れていく過程の、地球電離圏へのフットプリント部分をレーダーがみていると考えることができる。これにより、高電子密度領域について、降下粒子を伴った磁力線の束が極方向へ移動している描像を想定することができる。この現象の物理機構を解明するためには、高電子密度領域がつくられて運動を開始する場所から極方向へ移動する極冠域両方で、現象の時間空間変動を調べる必要がある。そのため、極方向への運動が始まると考えられるカuspの位置する緯度領域から極冠域全域を同時に観測するために、オーロラ帯に位置するスカンジナビア北部に設置されたVHFレーダーとさらに高緯度のスヴァールバルに設置されたESR32mアンテナをどちらも同時に低仰角で地理極側にむけて観測を実施した。これにより、

(1) 高電子密度領域がつくられ、極方向への運動を開始すると考えられる場所から高電子密度領域を追うことができた。

ISレーダーの観測では、降り込み粒子により電子密度と電子温度が周りに比べて高くなる領域がカuspと考えられているが、VHFレーダー及びESRのデータのみからではカusp領域を断定することはできない。そこでDMSP衛星を用いて、粒子スペクトルによる判別データからカuspの位置を確認したところ、その結果から、

(2) VHFレーダーでとらえられた電子温度上昇の低緯度側境界が、人工衛星でとらえられたカuspの低緯度側境界とほぼ対応していることがわかった。

この情報は、人工衛星との同時観測がない時間帯においてVHFレーダーで得られるプラズマの運動を解析する際にも、非常に有益なものである。電子温度の低緯度境界とカuspの低緯度境界とによい一致をみられたことから、レーダーの視野内でのカuspの位置に目安をつけることができる。カuspの低緯度境界線とイオンの速度のカラープロットデータを比較すると、

(3) 極方向へ向う強いプラズマの流れはカスプの低緯度側領域から始まっていることが判明した。更に、より低緯度側ではそれ以前に既に、極方向の弱い流れが始まっていることが解った。

なかには、カスプの低緯度境界より更に低緯度側から既に強いプラズマの流れがある例もみられた。

以上(1)から(3)の3点から、カスプの位置と、極側に移動する局所的な高電子密度領域のつくられる領域との位置関係、前兆現象的に生起しているプラズマ運動の位置及び時間の前後関係についての全体像を捕らえることができたことになる。

これに続き、高電子密度領域の内外のプラズマの運動の様相を知るために、緯度毎にこの電子密度、ほぼ南北方向のイオンの速さ(ほぼ東西方向の電場の強さを表す)の変動を調べた。その結果、東西方向の電場の強いところで、電子密度が小さく、東西方向の電場の弱いところで電子密度が大きい傾向がみられた。この観測結果からは、二つの可能性を考えることができる。一つの可能性は、この観測結果のとおり高電子密度領域全体としては高緯度側に運動しているが、その領域内部のプラズマは、むしろ領域の外側のプラズマより遅いことを表しているというものである。昼間側磁気境界面の単純なマーキング過程では、高密度領域の内部のプラズマは領域の運動と同じ速度で高緯度側に移動することが期待されるので、この結果は、この種の現象が従来の理論では必ずしも説明できないことを示唆することになる。もう一つの可能性は、昼間側磁気境界面におけるマーキングの領域からは太陽風内のプラズマが電離圏の方に降下してきているが、その領域の中でも特に電場の強い領域に対応する電離圏領域では強電場であることからフリクショナルヒーティングによって電子とイオンのリコンビネーションレートが増し、電子密度が減少するというものである。この、化学過程を考えた解釈の可能性を検証するために、電場が強い領域で何が起きているのかを探る必要がある。そこで、低高度から高高度に渡って電場が高い時間帯で、電子密度がどのように減少しているのかを沿磁力線方向の観測データから調べた。高度による電子密度の減少の様子を沿磁力線方向のデータから探る理由は、先述した化学過程は、高度によって依存すると考えられるからである。則ち、もし磁気圏から粒子が降り込んできているにも関わらず、上記の化学過程で電離圏高度の電子密度が減少していた場合は、その減少が電離圏内の全部の高度で見られるのではなく、主としてある高度以下でのみ見られるはずである。

電子密度の減少のしかたを高度プロファイルでみた結果、電子密度の減少は全高度に渡っていることを確認した。このことから、電子密度が高くみえる領域の間に見られる、電子密度が低い領域は実際に降り込みがなく、それぞれの高電子密度領域は独立した磁力管を観測したものであると考えられる。これより、

(4) 高電子密度領域の内部でイオンの速度が小さく、外部でイオンの速度が大きいという観測結果のままの見方ができることになる。少なくとも今回着目した例において、上記(1)から(4)までの結論を導くことができる。

第2章で、FTE現象のモデル [Lockwood et al., 1993] の例をあげ、それ以降の章では、FTE現象のような現象を想定しながら高電子密度領域の極方向への移動の様子を解析してきた。このモデルおよび、古くからのFTE現象のモデル [Southwood, 1987] では、磁気リコネクションに伴って開いた磁力線が太陽風の動きと共に夜側へ流される現象は、磁力管内部を粒子の降下を伴いながら極方向へ移動する、と考えるものである。つまり、電子密度が高く観測されている磁力管とその内部のプラズマは共に移動していると考えられる。しかし、先述(4)の、高電子密度領域の内部でイオンの速度が小さく、外部でイオンの速度が大きいと

いう帰結は、これらのモデルとは必ずしも一致しない。

つまり本研究で明らかになったことは、本研究で観測した現象が FTE であるとするれば、これまでのモデルでは説明しきれないということになる。

5.2 今後の課題

前節で述べたとおり、これまで提案されてきたモデルでは、間欠的にカスプ周辺から高緯度に移動する局所化した高電子密度領域の特性を、必ずしも説明できないことがあきらかになった。本研究でみた現象が、FTE であることを確定すると共に、更にこの高電子密度領域の極方向への移動現象に対する理解を深めるための今後の課題として、以下のものがあげられる。

(1) 本研究で用いたロケットキャンペーン期間中の EISCAT データのうち、他の日、他の時間帯に関しても同様の方法で観測結果を検討する。さらに、高密度領域全体の運動、高密度領域内のプラズマの運動と外部のプラズマの運動について、現在は視線方向についてのみ比較を行っているが、これらの運動は視線に直交方向にも運動しているので、補遺でふれる HF レーダ群を用いることによりプラズマの 2 次元運動が、まとめ(1)から(3)でふれた領域でどうなっているのかを定量的に比較して、本現象の電磁氣的な特性を明らかにする。

(2) 極方向への高電子密度領域の移動と共に発生すると予測されるオーロラ現象の極側への移動（例えば 2 章でふれた、極方向へ移動するオーロラ現象である PMAF は、FTE の電離圏への投影現象であると考えられている）との対応をみることによって、プラズマの動きを空間的、定性的に検討することができるので、光学データの利用が望まれる。

(3) 高電子密度領域の極方向への移動が生じている時間帯及び、その強いプラズマの流れに先駆けて発生しているプラズマの流れが、何によって生じているのかについて、太陽風の条件、夜側磁気圏の活動などに着目して調べる。特に、極域電離圏に流れる電流の様相や磁気圏境界面、内部磁気圏のプラズマや磁場の振動に関連すると考えられる地磁気脈動との関連を調べるのが望まれる。

<補遺> HF レーダー観測との照合

EISCAT レーダーでは、高度分解能、時間分解能よく電離圏の物理現象をとらえることができるが、その空間的な広がりをとらえることは難しい。4.1で、本観測におけるVHFレーダーとESR32mアンテナによって観測されたイオン速度は磁力線に平行な速度成分からの影響が少なく、主に磁力線に垂直な視線方向の速度成分を観測していることを述べた。しかし、さらに正確にプラズマの運動を考えるには、磁力線に垂直な平面内で、どの方向にプラズマが動いているかを議論する必要がある。また、電離圏カusp領域でみられる高電子密度領域の移動が、電離圏全体の、どのようなプラズマの流れの中で観測されたものなのかを確認することは高電子密度領域の運動を知るうえで非常に重要である。

そこで、プラズマ速度の空間分布をとらえるためには、他の観測ツールを用いる必要がある。ここでは、フィンランド及びアイスランドに設置されている短波 (High Frequency : HF) レーダーのデータから、2000年11月26日、27日の電離圏のプラズマの速度を2次元的な情報でとらえることを試みた。

(1) HF レーダーの概要

ここで参考にするHFレーダーは、10ヶ国13研究機関を含むHFレーダーの国際共同観測プロジェクトによる、全14基 (北半球8基、南半球6基) のレーダー群 Super Dual Auroral Radar Network (通称 SuperDARN) のうちの2基である。1基はフィンランドにあるFinland (Hankasalmi) レーダー (地理緯度 62.32° N、地理経度 26.61° E) であり、もう1基はアイスランドからその東側の領域を観測するIceland-East (Pykkvibear) レーダー (地理緯度 63.86° N、地理経度 19.20° W) である。これらの2基のレーダーは、イギリスによって運営されており、Cooperative UK Twin Located Auroral Sounding System (CUTLASS) とよばれている。

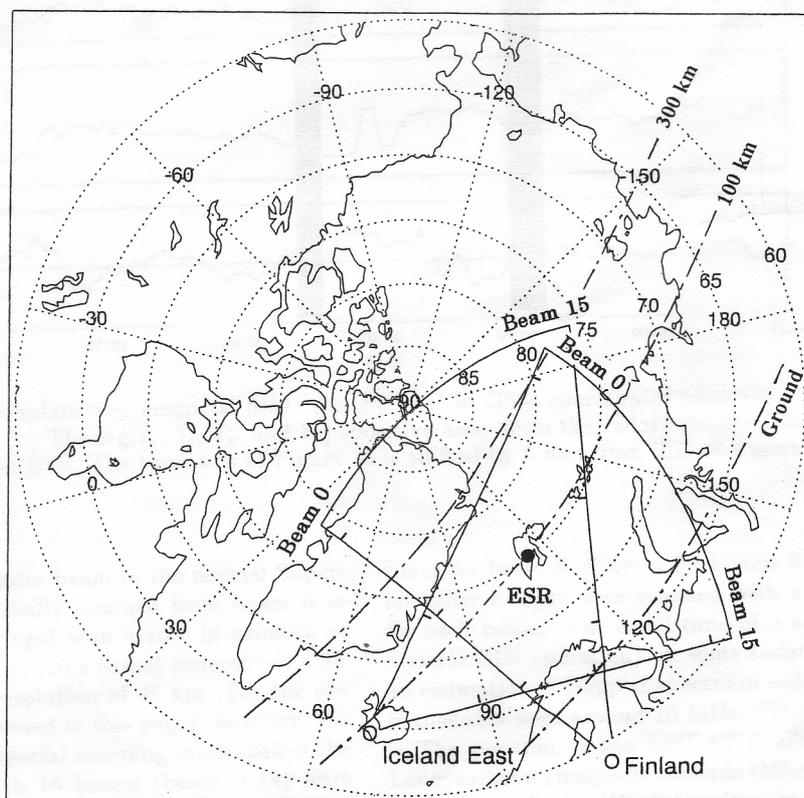
SuperDARNは、オーロラ帯領域、カusp領域を中心に、連続観測を行っている。レーダー設置地点より、ビーム0からビーム15までの16の方向へ順に電波を出力し、約2分間で扇形の視野全体の観測を行う。また、視線方向のレンジは75分割されており、空間分解能は通常、レンジ方向に45kmである。図aは、ESRのロケーション及び、CUTLASSのロケーションと視野をAltitude Adjusted corrected geomagnetic coordinates (AACGM) とよばれる座標系であらわしたものである。HFレーダーは図中に示されるような、扇形の領域を観測することができ、EISCATのESR42mアンテナの視線方向は、Finlandレーダーのビーム9、Iceland-Eastレーダーのビーム6の視線方向を含んでいる。

これらのHFレーダーは、電離圏のプラズマ密度不規則構造 (プラズマイレギュラリティー) によって散乱された電波を観測している。発信電波の道程にプラズマイレギュラリティーが存在し、電波がプラズマイレギュラリティーの構造に対して垂直に入射した時に、そこからの散乱波をレーダーが受信することができる。しかし、観測時の電離圏の状態によって、地面や海面からの反射もある。プラズマイレギュラリティーからの受信波のスペクトルから、

- (1) イレギュラリティー構造がどの程度はつきりしているかの指標 (Power)
 - (2) 観測セルの中のドリフト速度の非均一さの指標 (Spectral width)
 - (3) プラズマのドリフト速度の視線方向の成分を知るパラメーター (Doppler velocity)
- が導出される。

電離圏のプラズマ密度は高度方向に大きく変化する。それによって、地上から発信する電波はスネルの法則に従い、密度の異なる媒質の境界を通過する際に屈折をする。この屈折の結果、レーダーから発信した電波は、レーダーの近くでは電離圏 *D* 領域及び *E* 領域を観測するが、その先では電離圏 *F* 層を観測することになる。さらに *F* 層では電波は地面に対して水平に進むことができ、その高度は約 300km である。

前章までみてきた EISCAT レーダーシステムと比較して、SuperDARN では電子密度、イオン温度、電子温度を得ることはできない。しかし、プラズマ速度は得ることができることから、平面的に広い範囲でのプラズマ速度をとらえることができる。Ruohoniemi et al. [1998] はこのプラズマ速度が電離圏におけるプラズマの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトを測定していることを利用し、複数の HF レーダーを用いることにより高緯度での巨視的なプラズマの対流パターンを計算した。また、EISCAT 及び SuperDARN のそれぞれの弱点を互いに補完するという意味で、EISCAT と SuperDARN との共同研究がなされている。Davies et al. [1999] は、SuperDARN の観測領域が EISCAT レーダーの観測領域をカバーすることを利用し、EISCAT レーダーから得られるイオン速度と、SuperDARN から得られるプラズマの速度を比較し、相関が良いことを示した。また、Ogawa et al. [2001] は、ESR42m アンテナでとらえられたプラズマ密度の急激な減少について、Finland レーダー及び Iceland- East レーダーとの同時観測から考察している。



<図 a> CUTLASS のロケーションと視野を Altitude Adjusted corrected geomagnetic coordinates (AACGM) とよばれる座標系であらわした図 [Ogawa et al., 2001]

(2) HF レーダーから得られるプラズマ速度

4.1.5 で、仰角 30° で観測した VHF レーダーによって観測されるイオン速度は、おおよそ磁力線に垂直な面内の、視線方向成分を観測していることを述べた。また前節で、HF レーダーはおおよそ電離圏 F 領域（高度 300km）を地面に平行に観測していることを述べた。ここでは、EISCAT レーダーで観測されたイオンの実際の速度が、磁力線に垂直な面内で、どの方向に向いているのかを確認するために、HF レーダーのデータを参照する。

(2)-1 HF レーダーで得られるエコーについて

HF レーダーでは、電離圏 F 領域のプラズマイレギュラリティーから電波エコーを受けとる他に、電波エコーを受け取ることができない場合や、地面、海面からの反射を受け取る場合がある。Milan et al. [1999] は、EISCAT の KST によって得られる、3 点観測から導出したイオン速度（CUTLASS 視線方向の速度）と、CUTLASS によって得られたプラズマ速度が良く一致することを示したうえで、EISCAT レーダーの観測緯度領域で HF レーダーから反射が得られない時間帯に注目し、その領域では 3 点観測で得られたイオン速度が 100m/s 以下という小さい速度となっており、電場が弱いということを指摘している。また他に、サブストームと関連して電離圏 E 領域で起こる電子密度の上昇が原因で、レーダービームが地面へ向って反射してしまい、 F 領域までビームが到達することができない例をあげている。またこの地面からの反射はレーダーの近くで見られることを指摘している。

(2)-2 EISCAT VHF 及び ESR と CUTLASS レーダーが観測するプラズマ速度について

EISCAT の測定しているイオン速度は、本研究の観測の場合、南北方向の狭い領域の、しかも南北成分のみである。この観測では、もしイオンが南向き成分の観測値を出しても、実際にはイオンがこの南向きの運動にくわえ、東向きもしくは西向きに大きな速度をもっている可能性が考えられる。その不確定性を解消するために、SuperDARN を用いる。SuperDARN で、EISCAT がみている極向きに動く高電子領域の運動が、どういう 2 次元的なプラズマ運動の南北投影を見ているのかを確認する。

また、VHF のレーダービームと、ESR のビームは仰角 30° の角度をもっているため観測緯度が高くなるにつれて、観測高度も高くなってゆくのにに対して、SuperDARN レーダーは、おおよそ電離圏 300km 高度を地面に平行に観測していると考えられることは先に述べた。これらの観測高度では、反太陽側へ流される磁力線と共に移動するイオンのドリフト速度を観測していると考えられ、このイオン速度（プラズマ速度）は、電子密度及び電子温度と異なり高度による依存性がないと考えられるので、EISCAT レーダーと SuperDARN で観測高度が異なるにもかかわらず、高度の変化を考えずにプラズマ速度を検討することが可能である。

(2)-3 2000年11月26日、27日においてHFレーダーから得られるプラズマ速度のデータ

これまでの章でも特に注目してきた2000年11月26日0800-0930UT及び、27日0650-0900UT頃に関して、

SuperDARN ホームページ <http://superdarn.jhuapl.edu>

から得ることができる扇形のプラズマ速度のカラープロットを参考にする。なお、カラープロットを参照する際、ロングイヤービンからのESR(42mアンテナ)の視線とトロムソからのVHFレーダーの視線が高度約700km(つまり、VHFレーダーのカラープロットの、地理緯度78.3°高度700kmのライン)で交叉する事実も参考になる。

付録1は、26日の着目時間帯におけるFinlandレーダーから得られたプラズマ速度を表すカラープロットのうちの一部分である。プロット背景の座標は地理座標を表し、プラズマがレーダーから遠ざかる方向を負、レーダーに近づく方向を正にとって、図右上に示したカラープロットのスケールで表示している。また、それぞれのブロックに印された時刻は観測の時間帯である。付録1の時間帯の中で、ロングイヤービンの上空領域に着目すると、0802-0804UTのブロックではこれ以前の時間帯から引き続いてレーダーに向かう方向にプラズマが流れてきているが、0804-0806UTのブロック以降はレーダーから離れていく方向にプラズマが流れている様子がとらえられている。また、このプラズマ速度の方向の転換は、VHFレーダーより得られた結果と良く合っている。(VHFレーダーの、地理緯度78.3°N、高度700kmのライン、時刻0804UT辺りに速度の反転が見られる。)なお、Iceland-Eastレーダーは、0800-0930UTの間でほとんどの領域でレーダーエコーが返ってきていないか、地面からの反射(カラープロットでは、灰色で表されている)をとらえていた。

付録2は、27日の着目時間帯におけるFinlandレーダーから得られたプラズマ速度を表すカラープロットの一部分である。図のフォーマットは付録1と同じである。付録2の時間帯の中で、VHFレーダーのカラープロットの時間変化とFinlandレーダーのうちESRの視線方向を含むビームの時間変化を比べると、互いのデータに大きな矛盾がないことが確認できる。この時間帯でのスヴァールバル上空でのVHF及びFinlandレーダーそれぞれの観測速度に関して、VHFでは約200m/sから約700m/sの間でイオンの速度変動(レーダーから離れる方向)を観測しており、Finlandレーダーでも約200m/sから約800m/sの間でプラズマ速度変動の様子をとらえている。なお、Iceland-Eastレーダーは、0650-0900UTの間でほとんどの領域でレーダーエコーが返ってきていなかった。

(2)-4 議論

HF レーダーの広い視野のうち、VHF レーダー及び ESR の視線方向のみに着目すれば、VHF レーダーと、Finland レーダーから得られたプラズマ速度のデータは互いに、大きな矛盾のない速度を観測している様子が確認できた。

26 日における付録 1 に掲載した時間帯に関して、Finland レーダーの視野全体でプラズマの流れを考えると、0800-0802UT ではエコーが返ってきている領域のほとんどでレーダーに向う方向へプラズマが流れているのに対し、次の 0802-0804UT では、視野の南側と視野の北側の領域でレーダーから遠ざかる向きでプラズマが流れている様子がとらえられ、その後の時間帯では視野全体でレーダーから遠ざかる向きにプラズマが流れている。

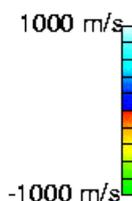
27 日における付録 2 に掲載した時間帯に関して、Finland レーダーの視野全体でプラズマの流れを考えると、0720UT 頃から VHF レーダーの視野内から発生しているクリアな高電子密度領域の極方向の流れは、レーダーから遠ざかる方向の流れ（この流れは広い領域にわたっていることがわかる）の中で起きているということが確認できる。

しかし、先にも述べたように、26 日、27 日に関して Finland レーダーではエコー返ってきているが Iceland-East レーダーではエコー返ってきていない。（もしくは地面からの反射をとらえている。）レーダーにエコーがもどらないということが、その領域での視線方向の速度が遅いということを意味しているとするれば、特にこの時間帯で VHF レーダーでとらえたイオンの主な運動方向は、およそ VHF レーダー、ESR32m アンテナの視線方向であると考えることができる。

しかし、26 日、27 日の高電子密度領域が極方向へ移動する現象が起きている時間帯で、プラズマ速度が磁力線に垂直な平面内でどの方向に向いているのか、またどのようなプラズマの流れの中で高電子密度領域の極方向への流れが起きるのかを詳細に探る本来の目的について、これら両日の SuperDARN のエコーの取得状況から詳細に評価することは大変困難であり、より深く高電子密度領域の極方向への移動の現象を理解するには、エコーが返ってきている他の日時を選んで解析する必要性がある。

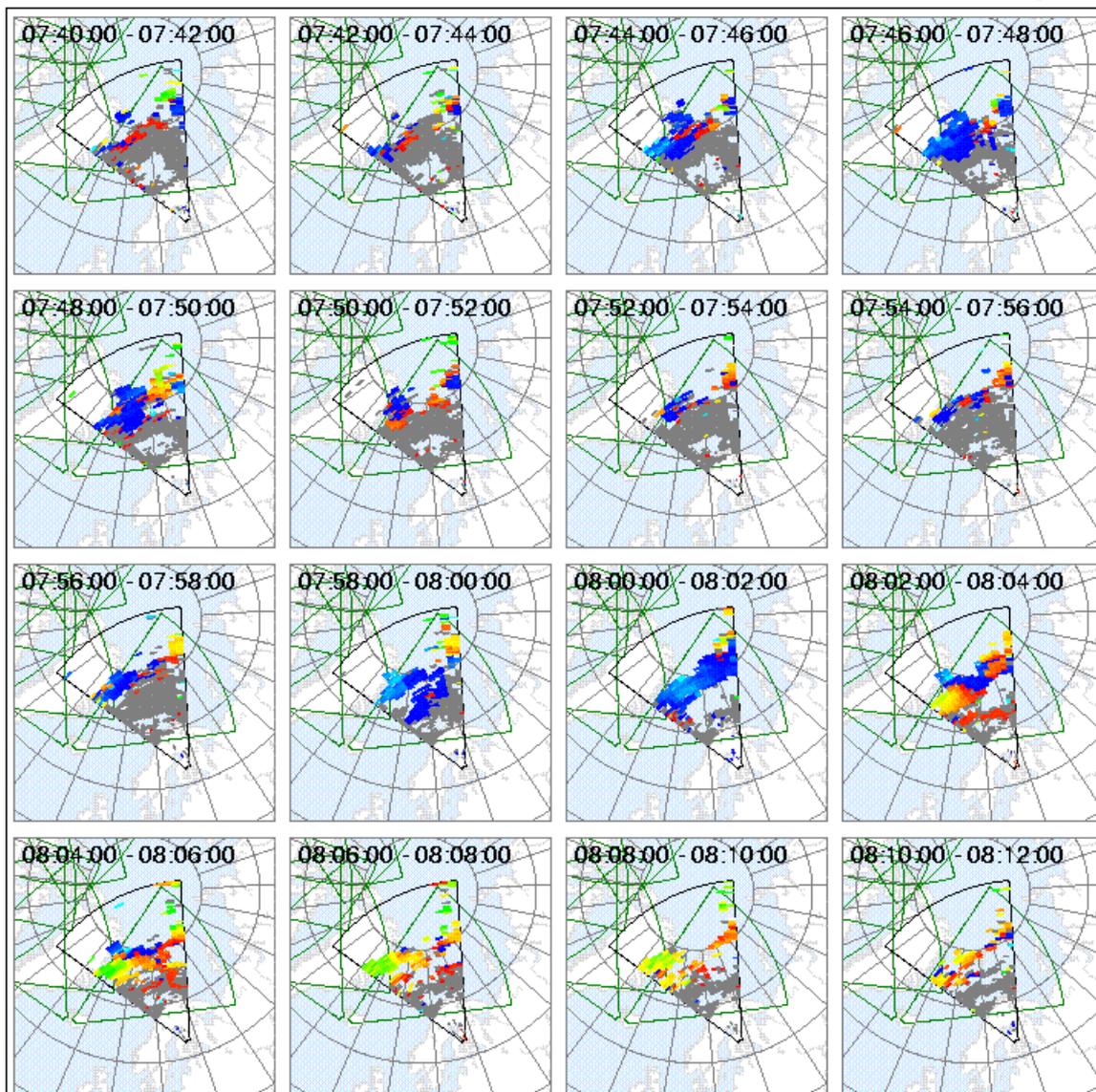
SuperDARN
Station:Hankasalmi
Operated by:University of Leicester
Parameter:Velocity
26, November, 2000
Geographic
07:40:00 - 08:14:00

<http://superdarn.jhuapl.edu>



Revision 0.90

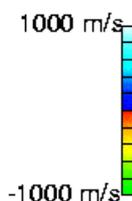
JHU/APL Software by R.J.Barnes



<付録1> Finland レーダーから得られたプラズマ速度のカラープロット (26日)

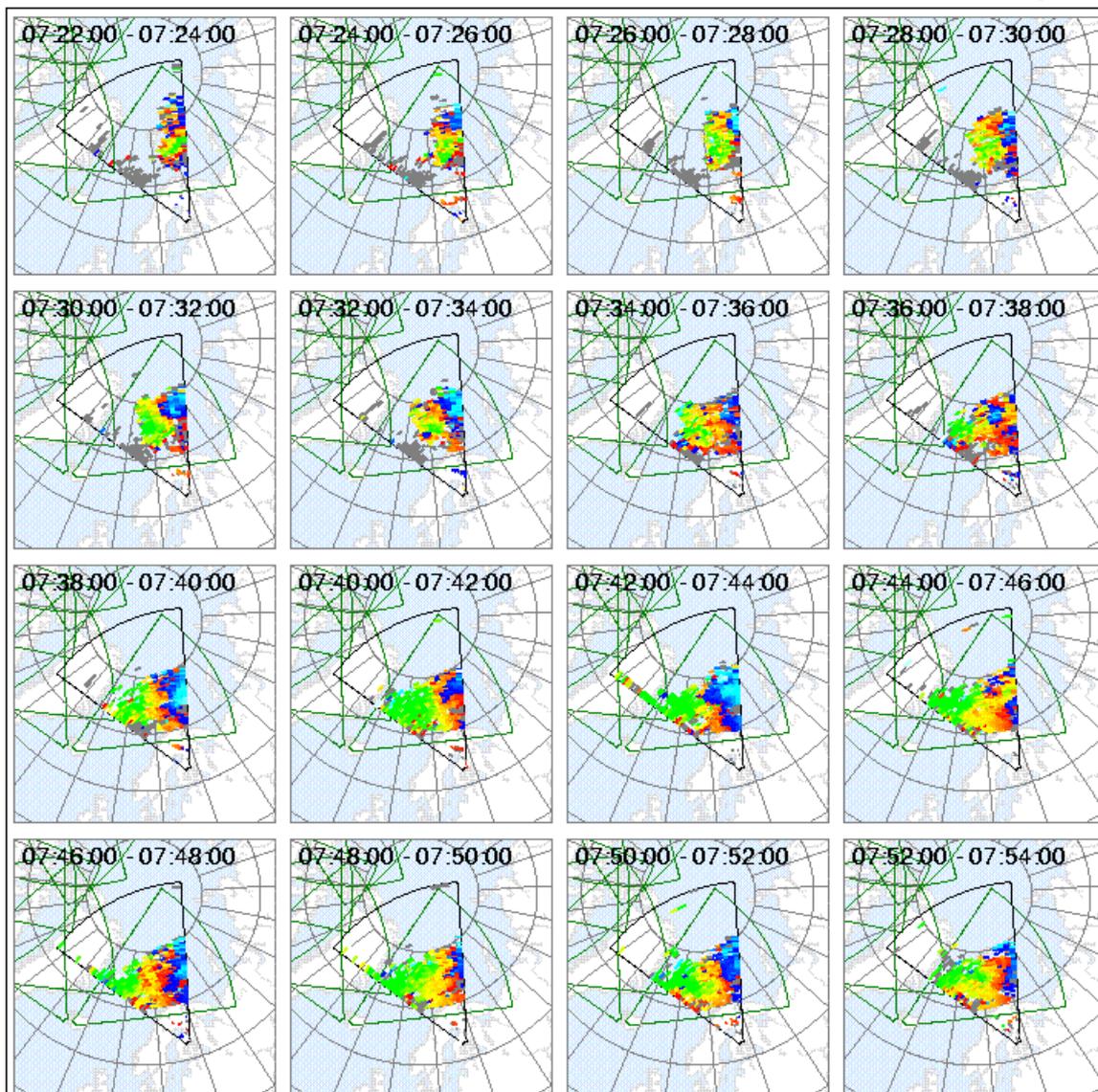
SuperDARN
Station: Hankasalmi
Operated by: University of Leicester
Parameter: Velocity
27, November, 2000
Geographic
07:22:00 - 07:56:00

<http://superdarn.jhuapl.edu>



Revision 0.90

JHU/APL Software by R.J. Barnes



<付録2> Finland レーダーから得られたプラズマ速度のカラープロット (27日)

参考文献

- 恩藤忠典、丸橋克英 編著 ウェーブサミット講座 宇宙環境科学 オーム社
上出洋介 著 オーロラと磁気嵐 東京大学出版会
福西 浩、国分 征、松浦延夫 著 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
松尾俊一、極方向へ移動する高電子密度領域に関する研究 名古屋大学 2000 年度修士論文
- Jean Berchem and C. T. Russell, Flux transfer events on the magnetopause: Spatial distribution and controlling factors, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. A8, Pages 6, 689-6, 703, August 1, 1984
- J. A. Davies, M. Lester, S. E. Milan, T. K. Yeoman, A comparison of velocity measurements from the CUTLASS Finland radar and the EISCAT UHF system, *Ann. Geophysicae* 17, 892-902, 1999
- J. W. Dungey, Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Physical Review Letters*, Vol. 6, No. 2, Pages 47-48, January 15, 1961
- M. Lockwood and H. C. Carlson Jr., Production of polar cap electron density patches by transient magnetopause reconnection, *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, No. 17, Pages 1, 731-1, 734, September 4, 1992
- M. Lockwood and M. N. Wild, On the quasi-periodic nature of magnetopause flux transfer events, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. A4, Pages 5, 935-5, 940, April 1, 1993
- D. J. McEwen and D. P. Harris, Occurrence patterns of *F* layer patches over the north magnetic pole, *Radio Science*, Vol. 31, No. 3, Pages 619-628, May-June, 1996
- S. E. Milan, J. A. Davies, and M. Lester, Coherent HF radar backscatter characteristics associated with auroral forms identified by incoherent radar techniques : A comparison of CUTLASS and EISCAT observations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. A10, Pages 22, 591-22, 604, October 1, 1999
- Patrick T. Newell and Ching-I. Meng, Mapping the dayside ionosphere to the magnetosphere according to particle precipitation characteristics, *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, No. 6, Pages 609-612, March 20, 1992
- H. Nilsson, M. Yamauchi, L. Eliasson, O. Norberg, and J. Clemmons, Ionospheric signature of the cusp as seen by incoherent scatter radar, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. A5, Pages 10, 947-10, 963, May 1, 1996
- T. Ogawa, S. C. Buchert, N. Nishitani, N. Sato, and M. Lester, Plasma density suppression process around the cusp revealed by simultaneous CUTLASS and EISCAT Svalbard radar observations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. A4, Pages 5, 551-5, 564, April 1, 2001
- Y. Ogawa, R. Fujii, S. C. Buchert, S. Nozawa, S. Watanabe, and A. P. van Eyken, Simultaneous EISCAT Svalbard and VHF radar observations of ion upflows at

- different aspect angles, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 1, Pages 81–84, January 1, 2000
- T. R. Pedersen, B. G. Fejer, R. A. Doe, and E. J. Weber, Incoherent scatter radar observations of horizontal *F* region plasma structure over Sondrestrom, Greenland, during polar cap patch events, *Radio Science*, Vol. 33, No. 6, Pages 1, 847–1, 866, November–December 1998
- R. P. Rijnbeek, S. W. H. Cowley, D. J. Southwood, and C. T. Russell, A survey of dayside flux transfer events observed by ISEE 1 and 2 magnetometers, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. A2, Pages 786–800, February 1, 1984
- J. M. Ruohoniemi and K. B. Baker, Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. A9, Pages 20, 797–20, 811, September 1, 1998
- C. T. Russell and R. C. Elphic, Initial ISEE magnetometer results: magnetopause observations, *Space Science Reviews* 22 (1978) 681–715
- P. E. Sandholt, C. S. Deehr, A. Egeland, B. Lybakk, R. Viereck and G. J. Romick, Signatures in the dayside aurora of plasma transfer from the magnetosheath, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. A9, Pages 10, 063–10, 079, September 1, 1986
- P. E. Sandholt, M. Lockwood, T. Oguti, S. W. H. Cowley, K. S. C. Freeman, B. Lybakk, A. Egeland, and D. M. Willis, Midday auroral breakup events and related energy and momentum transfer from the magnetosheath, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. A2, Pages 1, 039–1, 060, February 1, 1990
- R. W. Schunk, W. J. Raitt, and P. M. Banks, Effect of electric fields on the daytime high-latitude *E* and *F* regions, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, No. 22, Pages 3, 121–3, 130, August 1, 1975
- A. M. Smith, S. E. Pryse, and L. Kersley, Polar patches observed by ESR and their possible origin in the cusp region, *Ann. Geophysicae* 18, 1, 043–1, 053, 2000
- D. J. Southwood, The ionospheric signature of flux transfer events, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. A4, Pages 3, 207–3, 213, April 1, 1987
- C. E. Valladares, D. T. Decker, R. Sheehan, and D. N. Anderson, Modeling the formation of polar cap patches using large plasma flows, *Radio Science*, Vol. 31, No. 3, Pages 573–593, May–June 1996
- I. K. Walker, J. Moen, L. Kersley and D. A. Lorentzen, On the possible role of cusp/cleft precipitation in the formation of polar-cap patches, *Ann. Geophysicae* 17, 1, 298–1, 305, 1999

謝辞

本研究を進展し論文を仕上げるにあたって、私の指導教官である藤井良一教授には大変お世話になりました。人一倍手のかかる私に、いつでも的確な御指導をくださり、研究全般に関して多大な配慮をもって見守って頂きました。この特色ある研究室で研究生生活を送る機会を私に与えていただけたことにも心よりお礼を申し上げます。ありがとうございました。

また、本研究室の野澤悟徳助手には、研究に向う態度、厳しさを教えていただきました。さらに私の人生において大きな転回となる、世界に目を向けるチャンスを提供していただいたことも忘れることができません。

また、学会での私の発表に対し、いつでも的確なコメントを与えてくださった小川忠彦教授に、お礼申し上げます。

また、当研究室博士課程の小川泰信氏は、いつなげども私の愚問に丁寧に答えてくださり、また熱い励ましと共に、最後まで私の研究のサポートをしてくださいました。同じく当研究室博士課程の杉野正彦さんは、学会や研究集会の前に必ず私の研究について議論する時間をとっていただけるなど、いつでも細やかな御配慮を頂きました。当研究室修士課程の岩橋弘幸さん、隅山智子さん、玉川貴文さんには本論文の校正をはじめ、貴重な時間を私のために割いて頂きました。本研究室にて同じ2年間を過ごした足立和寛さん、今井田星子さんには、共に研究生生活を送った仲間として、たくさんの刺激を頂いたことは言うまでもありません。この場をお借りし、感謝の意を述べさせていただきます。

また、本研究で利用した ESR データ、VHF レーダーデータを快く提供していただいた、EISCAT 科学協会の皆様及び英国の Ian McCrea 先生に、心よりお礼申し上げます。学会の研究発表の際に共著者となっただき、たくさんの貴重な情報を頂いた東北大学の吉田直文さんに、心より感謝の意を申し上げます。

最後になりましたが、決して容易くない大学での研究生生活を、なにより精神的な面で大きく支えてくださった名古屋でのお友達に、心よりお礼を申しあげます。ありがとうございました。