

修士論文

電離圏カスプ領域における
移動性高電子密度領域の生成と輸送過程に関する研究

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
(太陽地球環境研究所 東山第二部門)

藤村昌樹

平成 17 年度

要旨

極域電離圏カスプ周辺では高電子密度領域が極方向へ移動する現象が観測されている。この現象は、太陽風から地球磁気圏へのエネルギー流入過程として最も基本的でかつ重要な磁力線再結合過程と関係していると考えられており、太陽風-磁気圏-電離圏結合を理解する上で重要である。しかしながら、その物理過程を解明する上で重要となる高電子密度領域の生成機構や時間発展、即ち高電子密度領域の内部およびその周辺における粒子の降り込みや、高電子密度領域の電磁気的特性については明らかになっていない。

そこで本研究では、カスプ領域周辺を観測するのに適した EISCAT VHF レーダー(VHF)と極冠域内部を観測するのに適した EISCAT Svalbard レーダー(ESR)が、一つの高電子密度領域を生成から移動までの広い領域で捉えている現象を基に、さらに VHF が単独で高電子密度領域が生成され移動を始めるところを捉えている現象や、ESR が単独で高電子密度領域が極冠域を移動しているところを捉えている現象を加え研究を行った。特に、高電子密度領域内外におけるソフトな電子の降り込み及びプラズマ速度の時間空間分布について、ソフトな電子の降り込みの指標である電子温度、プラズマ速度(電場)の指標であるイオン温度に注目し、これらの物理量と高電子密度領域との関連を調べた。その結果、高電子密度領域が生成された時とそれが極冠域内を移動していく時では異なる性質を示す事が今回新たに分かった。

結果は以下にまとめられる。

(1)高電子密度領域が発生した領域やその領域が動きはじめるカスプ付近では、高電子密度領域内部で、電子温度の上昇が見られた。しかしながら極冠域の内部に移動した後は、逆に電子温度はその領域の外部の温度より低くなっていた。この観測事実は、カスプ付近ではソフトな電子の降り込みが存在するが、高電子密度領域が極冠域へ移動するにつれて、電子の降り込みが減少、もしくは無くなることを示唆している。

(2)高電子密度領域の生成時および直後は、高電子密度領域内部でイオン温度の上昇が見られるが、高電子密度領域が極冠域に移動するにつれ、高電子密度領域内部のイオン温度は高電子密度領域外部のイオン温度に近づく傾向が見られた。この観測事実は、高電子密度の生成とその直後の段階では、局所的に強い電場が磁気圏より侵入するが、極方向への移動に伴い、侵入した電場は高電子密度領域の周辺領域へと広がり、高電子密度領域内外の電場は一樣になる事を示唆している。

目次

第 1 章 序論	1
1-1 太陽風	1
1-2 磁気圏	1
1-3 カスプ	2
1-4 電離圏	3
1-5 太陽風—磁気圏—電離圏結合	4
1-6 電離圏F領域における電子とイオンの再結合過程	5
1-7 電子とイオンの衝突による電子温度の低下	5
第 2 章 本研究の背景及び目的	9
2-1 本研究の背景	9
2-2 本研究の目的	11
第 3 章 観測機器	13
3-1 European Incoherent SCATter (EISCAT)レーダーの概要	13
3-2 EISCAT レーダーによって得られる物理量	14
3-3 本研究で用いる EISCAT の観測モードとデータ選択	14
第 4 章 観測及び解析結果	19
4-1 EISCAT VHF レーダーと EISCAT Svalbard レーダーによる 高電子密度領域の生成及び移動過程	20
4-1-1 2004 年 2 月 11 日のイベントの解析結果	20
4-1-2 2004 年 3 月 13 日のイベントの解析結果	24
4-1-3 2003 年 3 月 27 日のイベントの解析結果	26
4-1-4 4-1 節のまとめ	27
4-2 極冠域内での電子密度、電子温度、イオン温度の定量的比較	28

4-2-1	タイプ 1:極冠域内で電子密度と電子温度、電子密度とイオン温度が共に逆相関を示すもの	28
4-2-2	タイプ 2:極冠域内で電子密度と電子温度が逆相関で電子密度とイオン温度が無関係なもの	29
4-2-3	タイプ 3:極冠域内で電子密度と電子温度が逆相関で、イオン温度が高電子密度領域内で上昇しているもの	30
4-2-4	タイプ 4:電子密度と電子温度の相関が弱く、電子密度がイオン温度の高いところで減少しているもの	30
4-2-5	4-2 節のまとめ	31
4-3	カusp付近での電子密度、電子温度、イオン温度の定量的比較	32
4-3-1	2000 年 11 月 27 日のイベントの解析結果	32
4-3-2	2003 年 5 月 28 日のイベントの解析結果	33
4-3-3	4-3 節のまとめ	33
第 5 章 まとめと考察		67
5-1	まとめ	67
5-2	考察	68
5-2-1	カusp付近及び極冠域における高電子密度領域とソフトな電子の降り込みの時間空間関係	68
5-2-2	カusp付近及び極冠域での高電子密度領域と電場(イオン温度)の時間空間関係	70
第 6 章 今後の課題		75
参考文献		77
謝辞		79

第1章 序論

1-1 太陽風

太陽からは、光・電磁波の放射と共に磁場を伴う高速プラズマ流(太陽風)が惑星間空間に向けて絶えず放出されている。プラズマとは原子や分子がイオンと電子とに分離したガス状の状態であり、電気的には中性を示す。太陽風は、太陽表面における爆発現象(太陽フレア)などによって時々刻々変動しながら、数日かけて地球近傍に到達する。地球近傍における太陽風の典型的な値は、プラズマ密度が数個/cc、反太陽方向の速度が約400 km/s、温度が約10,000 K程度である。また、一般的に電気伝導度が高いプラズマの中の磁場は、プラズマの運動とともに動く性質がある。そのため太陽からのプラズマは磁場を含んで移動している。この太陽からのプラズマに含まれる磁場は惑星空間磁場 (IMF: Interplanetary Magnetic Field) と呼ばれている。太陽風プラズマは地球磁気圏を経て電離圏へと流入し、様々な影響を与える。

1-2 磁気圏

地球は固有の双極子磁場を持つ。この地球の双極子磁場には、常時太陽風が衝突しており、その影響を受け圧縮されている。この圧縮された地球の磁場の影響を受ける領域は、磁気圏と呼ばれている。この地球磁気圏の内部はプラズマにより満たされており、この満たされたプラズマの性質により、様々な領域に分類される。これらの領域の分布を図1-1に示す。地球磁気圏の形状は、太陽風の動圧によって昼間側は圧縮されており、夜側では逆に太陽風によって引き伸ばされている。この太陽風によって引き伸ばされた磁気圏の夜側領域を「磁気圏尾部」と呼ぶ。太陽風の動圧と地球磁場の磁気圧がつり合う一番外側の境界を「磁気圏境界面」と呼び、昼間側の磁気圏境界面は地球中心から地球半径(R_e =約6370 km)の約11倍に離れた場所に通常位置している。磁気圏尾部の赤道面を挟んで南北両側に広がる空間を「ローブ」と呼び、この領域の磁場は地球の極冠域から伸びてくる磁力線に繋がっている。従って、ローブ領域の磁力線の向きは、北半球で地球向き、南半球で反地球向きとなる。また、ローブ領域のプラズマ密度は、非常に希薄である。ローブ領域から侵入する太陽風プラズマ粒子は、磁力線に拘束されながら南北ローブが接する赤道面付近まで運搬され、熱いプラズマとして蓄積される。この領域をプラズマシートと呼ぶ。この領域

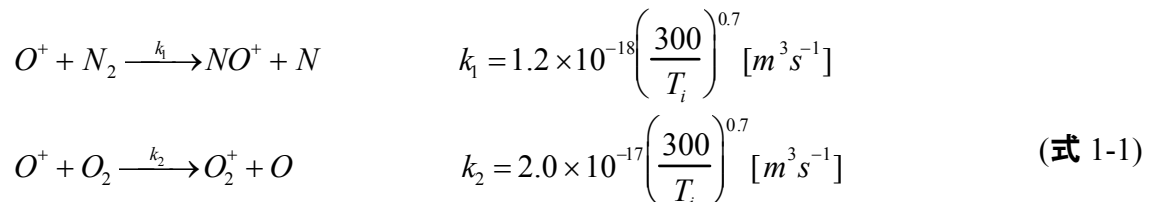
は、ローブ領域と異なり磁力線が閉じているため、いったん侵入したプラズマは磁場に捕捉され、その結果としてプラズマ密度が周りに比べて高くなる。プラズマシートの圧力は赤道面に近づくに連れて高くなり、この圧力勾配によってプラズマシート内に電流が流れる。南北におけるローブの磁力線の向きが逆であることから、プラズマシートには朝側から夕方側へ向かう電流が流れる。プラズマシートのプラズマよりもエネルギーの高いプラズマが静止衛星軌道 (6.6 Re) よりも内側の地球近傍をドーナツ状に取り囲むように存在し、その領域をバンアレン帯(放射線帯)と呼ぶ。この磁気圏の全体の大きさや形状は、太陽風の大きさや IMF の向きによって変化する。なぜなら磁気圏は、太陽風の動圧と地球の双極子磁場が持つプラズマの動きを押さえようとする力(磁気圧)との相互作用により形成されているからである。また、太陽風中のプラズマは、磁力線方向に非常に高い伝導度を持つため、磁気圏は太陽から電離圏へのエネルギーの流入経路として重要である。

1-3 カスプ

磁気圏の前面、高緯度の領域に特徴的な磁場の配位が見られる。磁気圏前面の閉じた磁力線と、磁気圏後方に引き延ばされる磁力線との境界に見られる構造は「カスプ」と呼ばれている。磁場は反平行に近い形になっており、磁場の弱い領域といえる。昼間側の磁気圏境界面を形成している境界層や侵入層と呼ばれる高温のプラズマの存在する層の中では、IMFと地球磁場の再結合が起きていると考えられている。太陽風のプラズマは、磁気圏前面に存在する衝撃波面(ショックフロント)で熱化された後、磁気再結合の過程によって磁気圏境界面を横切り磁気圏へと流入する。そのほとんどは磁気圏の尾部へと流れていくが、一部はカスプ領域やプラズマシートへと流入する。このようにカスプ領域は、太陽風プラズマが磁気圏および電離圏に直接入る事ができる領域となっている。そのため、太陽風のプラズマ粒子の侵入とエネルギーの流入の観点から大変重要な領域といえる。カスプ領域およびその周辺領域の模式図を図1-2に示す。平均的に、カスプ領域は、昼側電離圏の磁気緯度75度付近に対応する。ただし、地球磁気圏の形状が太陽風より変動するため、それに伴いカスプの緯度も変動する。

1-4 電離圏

電離圏は、日照や磁気圏からの降下粒子などにより、地球大気中の中性粒子が電離され電子やイオンになることにより形成される領域である。電離圏は電子密度の大きさを基準に、高さ方向に、D領域(約60 kmから90 km)、E領域(約90 kmから130 km)、F領域(約130 kmから700 km)、と区分され、その構成イオンはそれぞれの領域で異なる。これらの領域の電子密度の高度分布を図1-4に示す。D領域では、負電荷の粒子として負イオンと電子が共存している。E領域では、太陽光により O_2^+ 、 N_2^+ 及び、 O^+ が1次イオンとして電離生成される。しかし、生成と消滅の光化学平衡によって、最終的なイオン組成は約75 %が NO^+ 、約25 %が O_2^+ になる。極域のE領域では、磁気圏からのオーロラ粒子の降り込みにより電子密度が増加することがある。またE領域の特徴として、イオンと電子のジャイロ周波数とこれらと中性大気の衝突頻度との相対的な関係から、電離圏電流が流れ、その一部は沿磁力線電流とつながっていることが挙げられる。E領域下部ではイオンは中性大気に補足されるが、電子は無衝突と考える事ができ、この電子によって運ばれるHall電流が流れる。F領域では酸素原子(O)の電離により生成される O^+ が通常最も多い。電離圏電場が強い場合には、 O^+ と中性大気(N_2 や O_2)との再結合反応が促進され、 NO^+ や O_2^+ の割合も多くなる。その化学反応式を式1-1に示す。



T_i はイオン温度を、 k_1 、 k_2 は反応係数を表す [Schunk and Nagy, 2000]。

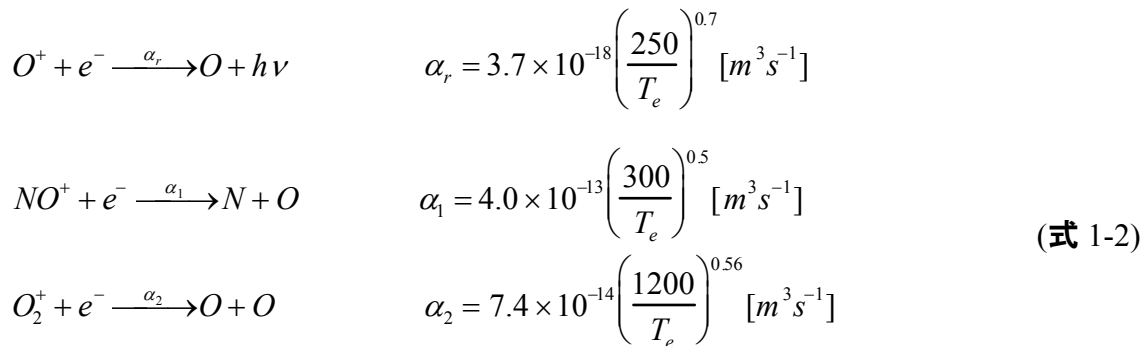
1-5 太陽風—磁気圏—電離圏結合

通常、地球磁気圏は太陽風の直接的な侵入を防ぐ“遮蔽壁”の役割を果たしているが、太陽風から湧き出てくる惑星間空間磁場 (IMF) の向きと地球磁場の関係によっては、太陽風のプラズマとエネルギーの一部が地球磁気圏内に流入し、地磁気擾乱

が起こる。特に、IMFの南向き成分が卓越している時には、地球磁気圏前面の北向き地球磁場と相互作用し、磁気再結合(magnetic reconnection)が起こる[Dungey, 1961]。その時の磁力線の動きを図1-5に示す。南向きIMFが地球に近づくと、地球磁気圏の最前面の北向き磁場と磁力線のつなぎ変えをし、双極子磁場として閉じていた磁力線が、一方が地球の極域電離圏ともう一方がIMFとつながるような開いた磁力線となる。その後、この開いた磁力線は太陽風と共に磁気圏尾部方向へ輸送される。更に磁気圏尾部では、北半球で太陽方向、南半球で反太陽方向となる反並行の磁力線が再びつなぎ変えをし、開いた磁力線から閉じた磁力線が作られる。また、この閉じた磁力線は昼間側に供給される。この一連の磁力線の輸送(磁気圏対流)に伴って、太陽風プラズマが磁力線にトラップされながら磁気圏中、更には磁気圏の磁力線を通り電離圏へと流入し極域電離圏(カスプやさらにその極側にある極冠域)に流入する。一方、磁力線の根元である極域電離圏(主にF層)では、磁力線に沿った加速機構がある場合を除き、1本の磁力線は電離圏から磁気圏まで等電位であるため、磁気圏の電場は磁力線を伝わって電離圏へと投影される。その結果、磁気圏対流に調和するように、高緯度側で半太陽方向、低緯度側で太陽方向となる2つ渦の極域電離圏プラズマ対流が駆動する。この極域電離圏対流は、磁気圏電場 E と周囲の磁場 B による $E \times B$ が主な駆動源となっている。結果として、磁気圏対流と極域電離圏対流とが磁力線を介して結びついた大規模な対流運動が起こる。対流は、磁気圏—電離圏系における擾乱現象の自由エネルギーを与える過程として、最も基本的な運動である。対流運動は同時に、電磁流体の法則に従って電流を発生させることから、沿磁力線電流 (field-aligned currents: FACs)、電離圏電流、磁気圏電流から成る3次元大規模電流系が形成される。磁気圏—電離圏結合系において、沿磁力線電流は電流の連続性を満たすだけでなく、磁気圏対流の運動量を電離圏に伝える上で重要な役割を果たすことが知られている。

1-6 電離圏F領域における電子とイオンの再結合過程

太陽紫外線や電子の降り込みにより電離したイオンと電子は、再結合することにより中性粒子に戻る。電離圏F領域で電子とイオンが再結合する主な過程を式1-2に示す。



T_e は電子温度、 α_r 、 α_1 、 α_2 は反応係数を表す[Schunk and Nagy, 2000]。

高度200 kmより上のF領域では、主要なイオンは O^+ である。そのため式1-2の一番目の反応が最も重要な再結合反応である。しかし、2つの粒子が結びついて1つの粒子と光子を出す反応は、運動量保存の法則を満たすのが難しくおこりにくい。そのため式1-2の、2番目や3番目の反応が主な電子とイオンの再結合過程となる。 NO^+ や O_2^+ の生成式である式1-1より、反応係数である k_1 や k_2 は T_i (イオン温度)が高い程大きくなる。つまり T_i が高い程 NO^+ や O_2^+ が多く生成され、 NO^+ や O_2^+ の再結合反応が進む[Schunk and Nagy, 2000]。このように T_i が上昇すると電子とイオンの再結合が進む。このため電子の降り込みや日照などの影響を除いて考えると、電離圏F層においてはイオン温度が高い領域ではイオン温度が低い領域よりも大気中の電子密度が減少する。

1-7 電子とイオンの衝突による電子温度の低下(クーリング)

電離圏のE領域及びF領域では、電子密度が高い領域で電子温度が低下する現象が起る。イオン温度が電子温度より低い時、電子の熱エネルギーがクーロン衝突を介し、イオンへと輸送される。この時電子は熱エネルギーを失い冷却される。この冷却過程は電子とイオンのクーロン衝突の頻度が電子密度(電離圏は電氣的に中性なので同じ量のイオンがある)に比例して増加するので、電子密度が高いところで増大することになる。

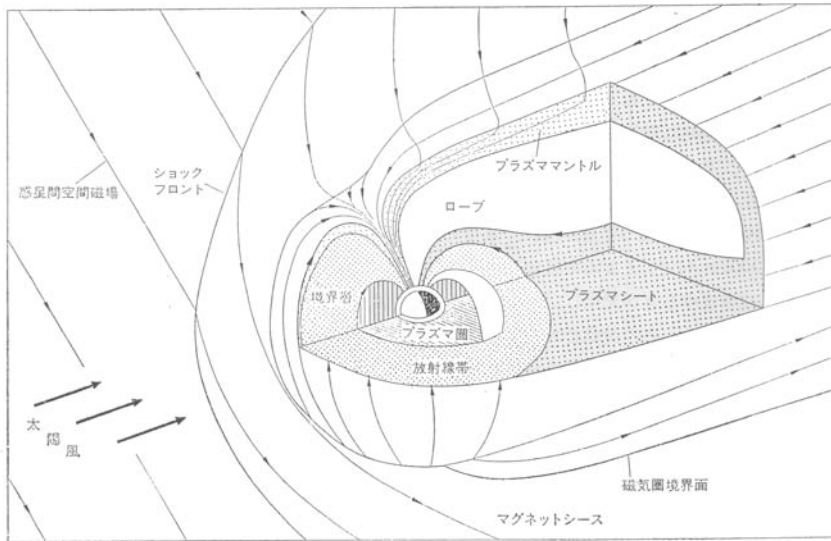


図1-1 地球磁気圏。地球磁気圏の形状は、太陽風の動圧によって昼間側は圧縮されており、夜側では逆に太陽風によって引き伸ばされている[福西他, 1983]。

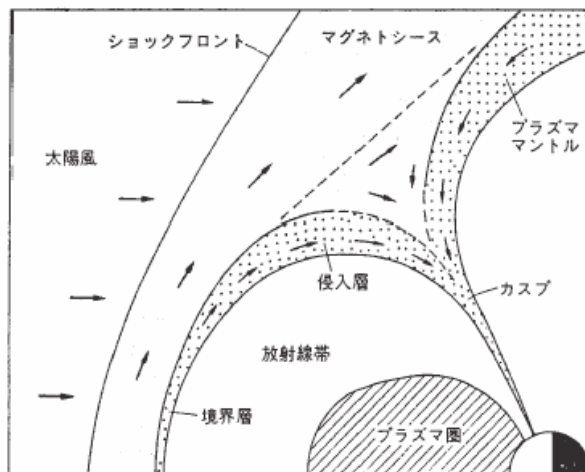


図1-2 昼間側磁気圏境界の構造。太陽風のプラズマ粒子は、ショックフロントで加熱され、その一部は境界層、侵入層を経て、カスプ領域へと流入する。矢印はプラズマ粒子の流れを表す[福西他, 1983]。

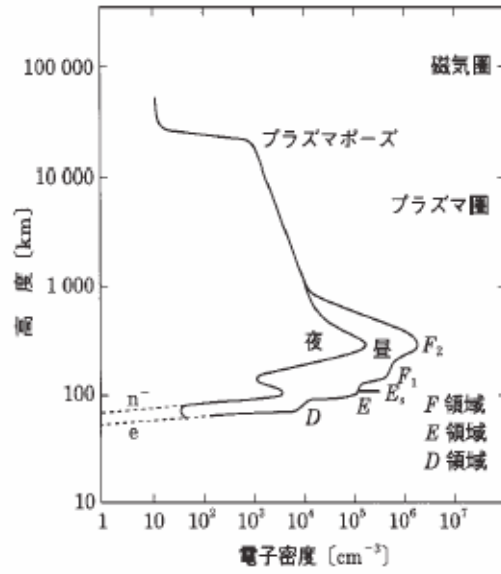


図1-3 地球上層大気における電子密度の標準的な高度分布[福西他, 1983]。

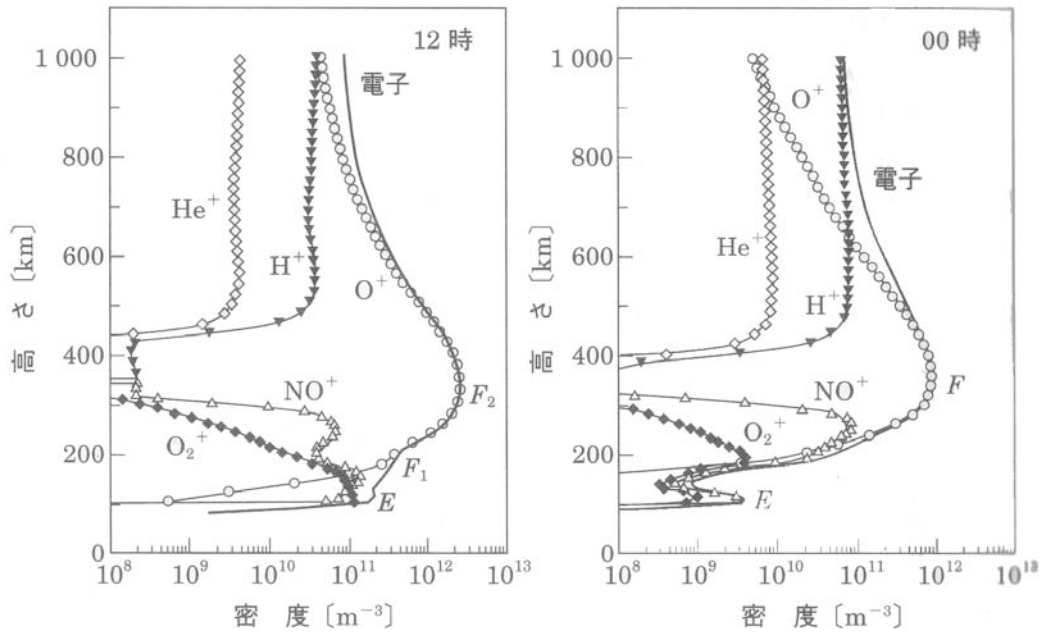


図1-4 電離圏におけるイオンの高度分布 [恩藤他, 2000]。

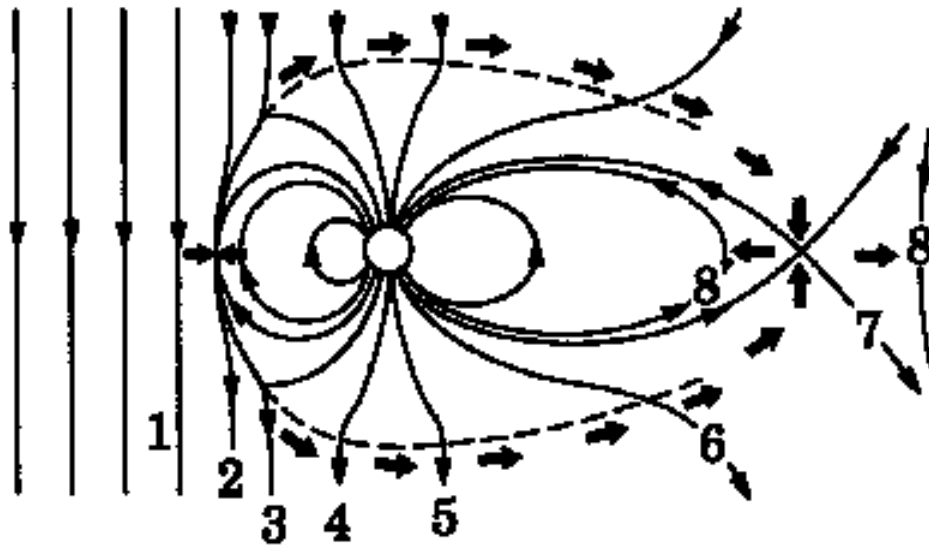


図1-5 昼間側磁気リコネクションの模式図。南向きIMFが地球に近づくと(1)、地球磁気圏の最前面の北向き磁場と磁力線のつなぎ変えをし(2)、双極子磁場として閉じていた磁力線が、一方が地球の極域電離圏ともう一方がIMFとつながるような開いた磁力線となる(3)。その後、この開いた磁力線は太陽風と共に磁気圏尾部方向へ輸送される(3-4-5-6)。更に磁気圏尾部では、北半球で太陽方向、南半球で反太陽方向となる反並行の磁力線が再びつなぎ変えをし(7)、開いた磁力線から閉じた磁力線が作られる(8)[Dungey, 1961]。

第2章 本研究の背景及び目的

2-1 本研究の背景

IMFの南北成分 B_z 成分が負(南向き)の値を持ち、地球磁場と反平行に交わる時、IMFと地球磁場が繋ぎ変わる磁気リコネクションと呼ばれる現象が起こる。リコネクションの様子については図 1-5 [Dungey, 1961]に示したように、太陽風の中の南向きの磁場(1)は昼間側磁気境界面で地球の北向き固有磁場と結合し、結合した磁力線は太陽風の流れにより、(2)→(3)→(4)→(5)→(6)と磁気圏後部に運ばれ、再度北半球側の磁力線と南半球側の磁力線が再結合して(7)、再度地球磁場(左側の8)と太陽風磁場(右側の8部分)に分かれる。また、Russell and Elphic [1981]によりIMFの B_z 成分が正と負に入れ代わる時は、リコネクションが間欠的におこり、IMFとつながり開いた磁束管 (Flux Tube) が夜側へと流されていく現象であるFlux Transfer Event (FTE) と呼ばれる現象がおこることが観測的に明らかにされている。一方 Berchem and Russell [1984]とRijnbeek et al. [1984]はIMFが南向きの時にFTEはおよそ8分おきに発生することを発見した。このFTE現象は、太陽風磁場とつながりかわった有限の大きさを持つ磁束管が、3次元電流系を伴いながら、夜側磁気圏へ移動していく現象であると考えられている。またFTEが夜側へと移動していく途中、磁束管の中の電子やイオンは磁力線に沿って電離圏へと降り込み、中性大気を励起させ発光させ、オーロラを発生させることがある。この様子を地上から眺めると、オーロラは昼間側カusp領域周辺から極方向に移動していくように見える。この極方向に移動していくオーロラのことをPoleward Moving Auroral Form (PMAF) といい、Sandholt et al. [1986]により提唱された。FTEに伴う電流系の有力なモデルとして、Southwoodモデル [Southwood, 1987]が挙げられる。FTEに伴う電離圏の電流については図 2-1 に示す。このモデルではFTE(及びPMAF)の磁束管の移動速度とプラズマの速度は等しくなる。Thorolfsson et al. [2000]は掃天フォトメータを用い、PMAFの移動速度を求め、SuperDARNで求めたプラズマの速度と比較した結果、これらの2つの速度はほぼ一致し、Southwood モデルが正しいことを示唆した。しかしこの研究ではPMAFの移動速度とプラズマの速度を判定した位置は完全には一致していなかった。

これらの研究を踏まえ東山電磁気圏環境部門では、松尾 [2000]がEISCAT Svalbard レーダーを用い、昼間側で発生した極方向へ移動する高電子密度領域内外でのイオン速度とその領域の移動速度の関係を定量的に調べた。その結果、高電

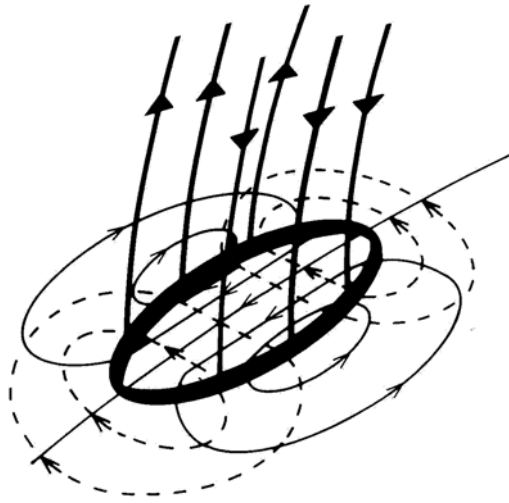
子密度領域内外でのイオン速度は一樣では無く、高電子密度領域の内部と外部では異なる速度を持つことがわかった。また松尾 [2000]は、高電子密度領域の内部の電子密度はその中心に近づくにつれて高くなっていることも示した。河野 [2001]はこれに続き、カスプ領域から極冠域へかけての広い領域で、緯度ごとに高電子密度領域内外の電子密度、レーダー視線方向のイオン速度を調べた。その結果、(1)高電子密度領域の移動はカスプ低緯度境界付近から始まるが、弱いイオンの動きは、その低緯度境界よりさらに低い緯度から始まっていること、(2)視線方向(おおよそ極方向)のプラズマ速度の比較的遅いところで電子密度が大きい傾向が見られる、つまり高電子密度領域全体としては、極方向に動いているが、その領域内部でのプラズマの速度は遅いことを示した。隅山 [2002]は、PMAF を人工衛星 POLAR の光学カメラと Super DARN を用いて解析し、PMAF の移動速度とその周りでのプラズマの速度の比較を行った。その結果、PMAF の速度とプラズマの速度は、方向は一致するがプラズマ速度のほうが小さいことがわかった。松尾 [2000]、河野 [2001]、隅山 [2002]により求められたプラズマの流れと PMAF の速度の不一致は、プラズマの速度と PMAF の速度とは一致することが必要な Southwood モデルとは整合しない。

領域が極方向に移動していく現象である FTE や PMAF は、太陽風から地球磁気圏へのエネルギー流入過程として最も基本的かつ重要な、磁力線再結合(磁気リコネクション)過程と関係していると考えられており、太陽風-磁気圏-電離圏結合を理解する上で重要である。しかしながら、PMAF や極方向へ移動する高電子密度領域の物理過程を解明する上で重要となる内部及びその周辺の電磁気的特性は、上述のように今まで提案されてきたモデルと整合していない。その一つの原因として、高電子密度領域の極方向への移動現象が、生成から極冠域内部に移動するまでの全過程について観測的に明らかにされていないことが挙げられる。この点は本修士論文の主題と深く関係するが、高電子密度領域の運動の特性(電磁気的特性)は全過程で同じではない可能性がある。則ちカスプ周辺で生成された時の高電子密度領域の内部及び周辺部の運動及び電磁気的特性と、その高電子密度領域が極冠域中央に移動していく時の運動及び電磁気的特性は、著しく異なる可能性がある。具体的に述べると、全過程の様々な領域における粒子の降り込み、高電子密度領域の生成と消滅、プラズマの運動、沿磁力線電流と電離圏クロージャー電流からなる3次元電流系の分布と挙動は明らかになっていない。

2-2 本研究の目的

本研究では、以上の論点から広い空間領域を高時間分解能で観測できる EISCAT Svalbard レーダー及び EISCAT VHF レーダーが、高電子密度領域の移動を同時に捉えているイベントを用い、高電子密度領域の生成時及び極冠域深部へ移動時の、運動及び電磁気的特性の研究を行った。特に、高電子密度領域内外における磁気再結合過程で生成されると考えられるソフト(< 500 eV)な電子の降り込みの時間空間分布、高電子密度領域内外におけるプラズマ速度の時間空間分布を、ソフトな電子の降り込みの指標である電子温度、プラズマ速度 ($E \times B$ ドリフト) 則ち電場の指標であるイオン温度に注目し、これらの物理量と高電子密度領域との関連を調べた。それらの関係を高電子密度領域のカスプ周辺での生成から移動していく極冠域までの全過程について調べ、どのような物理機構で高電子密度領域が生成、維持、移動していくか理解することが目的である。本研究の具体的な特徴として、まず高電子密度領域の生成及び維持過程に注目したことが挙げられる。太陽風磁場が南向きの時には、昼間側磁気リコネクションが起り、太陽風の磁力線と結合した地球側の磁力線で構成される磁束管は、極方向に移動していくと考えられる。その場合、(1)磁気リコネクションに伴いどのように(どの時点、どの場所で)降下粒子が生じるのか、(2)磁束管が極冠域内部に移動する時、粒子降下は起きるのか、起きないのか、(3)起きない場合は高電子密度領域がどのようにつくられ、維持されるのか、(4)これらの生成時と移動時で、プラズマは高電子密度領域内部及び周辺でどのような挙動を示すか(電磁気的特性)、を観測的に明らかにすることを目指した。

以上に述べたように、EISCAT Svalbard レーダー及び EISCAT VHF レーダーを用いることにより、カスプ付近から極冠域までの広い範囲で、高電子密度領域の内部及び外部のプラズマの動きや時間空間発展を調べ、その領域での物理を明らかにすることを目的として研究を行った。



- BIRKELAND CURRENT
- IONOSPHERIC FLOW
- >- PEDERSEN CURRENT

図2-1 FTEに伴う電離圏電流 [Southwood, 1985]。

BIRKELANDCURRENTはFiled Aligned Currents (FACs) を表す。

第3章 観測機器

3-1 European Incoherent SCATter (EISCAT) レーダーの概要

EISCAT レーダーは、イギリス、フィンランド、フランス、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン及び日本からなる EISCAT 科学協会により運営されている、非干渉散乱 (Incoherent Scatter: IS) レーダーである。EISCAT レーダーシステムは UHF レーダー、VHF レーダー(以下 VHF と呼ぶ)、Svalbard レーダー(以下 ESR と呼ぶ)の 3 つにより構成される。

UHF レーダーは、トロムソ(北緯 69.59 度、東経 19.23 度)に送信機と受信機を、キルナ(北緯 67.86 度、東経 20.04 度)、ソダンキラ(北緯 67.36 度、東経 26.63 度)に受信機を持つ世界で唯一の三局 (tristatic) 方式のレーダーシステムである。送信周波数は、約 930 MHz、送信出力は最大 2.6 MW である。

VHF はトロムソに設置されている。30×40 m のパラボリックシリンダー形のアンテナ 4 枚を用いたレーダー装置である。送信周波数は 225 MHz で出力は最大 3.0 MW である。VHF のアンテナは機械的に方位角方向には可動することができず、基本的には仰角方向の可動のみとなっている。しかし、電磁波の伝送ケーブル内の伝播遅延を利用することにより、ビームを 20 度程度方位角方向に向けることができる。現システムでは東側 2 枚のアンテナと、西側の 2 枚アンテナの、ビーム方向を別の方向に向けて観測することが可能である。

ESR は口径 32 m の可動式(以下 ESR と呼ぶ)と口径 42 m の固定式のパラボラ形アンテナの 2 基により構成される。出力周波数 500 MHz で最大出力は 1.0 MW である。設置場所はノルウェーのスヴァールバル諸島ロングイアビン(北緯 78.15 度、東経 16.08 度)である。これらの 2 機のレーダーは共通のトランスミッターで駆動されるが、両レーダーへのエネルギー供給は高速(最短 3.2 秒)でスイッチングが可能のため、両レーダーをほぼ同時に稼動することが可能である。

3-2 EISCAT レーダーによって得られる物理量

IS レーダーでは電子密度、電子温度、イオン温度、ビーム方向のイオン速度の物理量をビーム視線方向に高い空間分解能(E 領域では 3 km 程度の分解能、F 領域では 3 km から 20 km 程度の分解能)で同時に測定することができる。EISCAT で用いられている波長は、VHF で約 0.75 m である。ここで電離圏の F 層の電子密度を $N_e = 10^{11} m^{-3}$ 、電子温度を $T_e = 10^3 K$ と仮定すると電子のデバイ長は、

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 K_B T_e}{N_e e^2}} \approx 6.9 \times 10^{-3} m$$

(K_B はボルツマン定数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 e は電荷) 素

である。従って、IS レーダーでは電子のデバイ長より長い波長で観測していることが分かる。そのため、IS レーダーでは、自由運動をしている電子ではなく、イオンに補足されている電子群からの散乱波を受信する。すなわち、散乱波のドップラーシフトは電子の運動そのものではなく、イオンの周りを取り囲む(イオンと一緒に運動する)電子の運動、すなわちイオンの運動をあらわす。これに加えて受信スペクトルを基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、イオンと中性粒子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。更に、中性大気モデル、地球磁場モデル等のモデルを併せ用いることにより、電場、電流、中性風速度、電気伝導度等の物理量も高い空間時間分解能で間接的に導出できる。

3-3 本研究で用いる EISCAT の観測モードとデータ選択

本研究では、高電子密度領域内外の、降下電子、電場などの物理量の時間空間分布を、高電子密度領域が発生するカスプ付近から極冠域に入るまでの領域で調べたい。そのため、それぞれの物理量を広い緯度範囲に渡って高い時間空間分解能で知る必要がある。そこで本研究では VHF と ESR が同時に CP-4 モードで観測しているデータを基本データとして使用する。CP-4 モードとは、VHF や ESR32m のビームを仰角 30 度、方位角を北向き(この修士論文で用いたイベントでは、-30 度から 0 度の間

に向けていた)に向けて観測するモードである。ビームの方向を低い仰角で、北向きに向けているため、高度の情報を緯度に直すことができる。このことにより、南北方向に広い領域を観測することができる。詳しくは図 3-1 に表す。この観測方法を用いることにより、カスプから極冠域の間まで高電子密度領域が移動する様子をとらえることができる。また ESR と VHF が同時に高電子密度領域を観測している CP-4 データは 3 イベントと数が少ないため、これらの同時データを用いて全過程の特性を求めると共に、その特性を ESR のみが CP-4 で高電子密度領域の移動をとらえているものや、VHF のみが CP-4 で観測しているデータも使用して検証する。本研究で使用した観測データの方位角、仰角については表 3-1 に示す。また、レーダーのビームを低い仰角で北向きに向けているため各々のレーダーで観測する高度が高くなると、対応して緯度も高くなる。それぞれのデータごとの緯度の情報は表 3-2 に示す。

ESR と VHF が同時にあるデータについては、2000 年 11 月から 2004 年 4 月の期間で、VHF と ESR が同じ高電子密度領域を昼側で捉えているイベントを選択した。ESR のみのデータについても、2000 年 3 月から 2004 年 6 月の期間の昼側で、高電子密度領域の移動を捉えているイベントを選択した。複数の高電子密度領域の移動が見られる場合は、それぞれの高電子密度の山を区別でき、さらに緯度方向で、方位角が 0 度の時は 2 度以上(水平距離で約 35 km)、方位角が -24 度の時は 1.4 度以上(水平距離で約 35 km 以上)連続で続いているイベントのみを選択している。VHF のみのデータについては、1997 年 5 月から 2004 年 6 月の期間の昼側で、高電子密度領域の移動が始まっている緯度を同定でき、なおかつ、高電子密度領域の移動を明確に(複数の高電子密度領域の移動がある時はそれぞれの高電子密度の山の境目を区別でき、さらに緯度方向で 2 度以上(水平距離で約 35 km 以上)連続で続いている現象)捉えているイベントを選択した。

夕の視

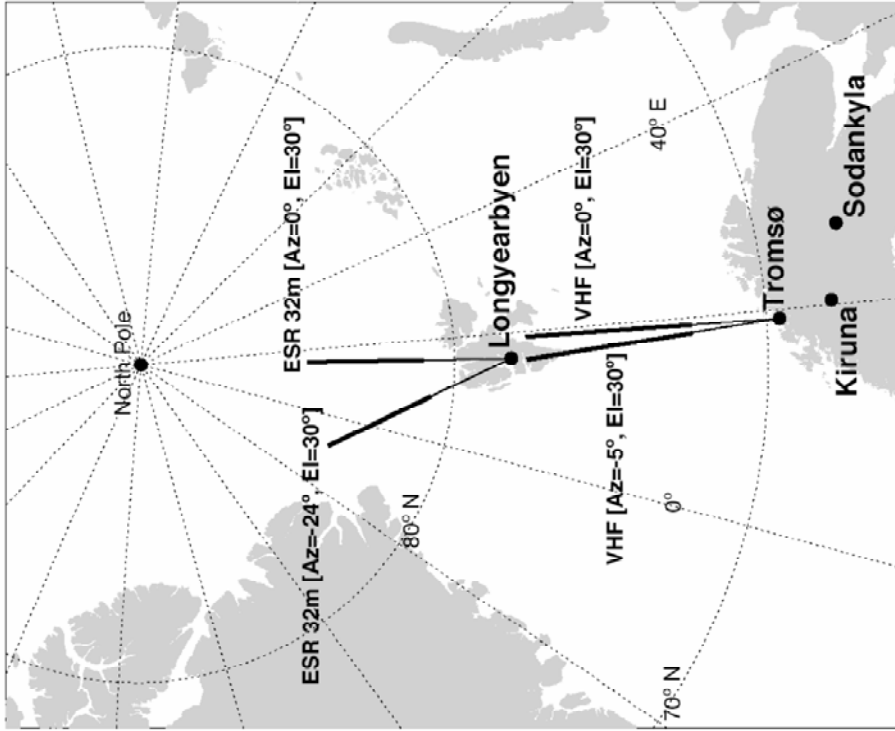
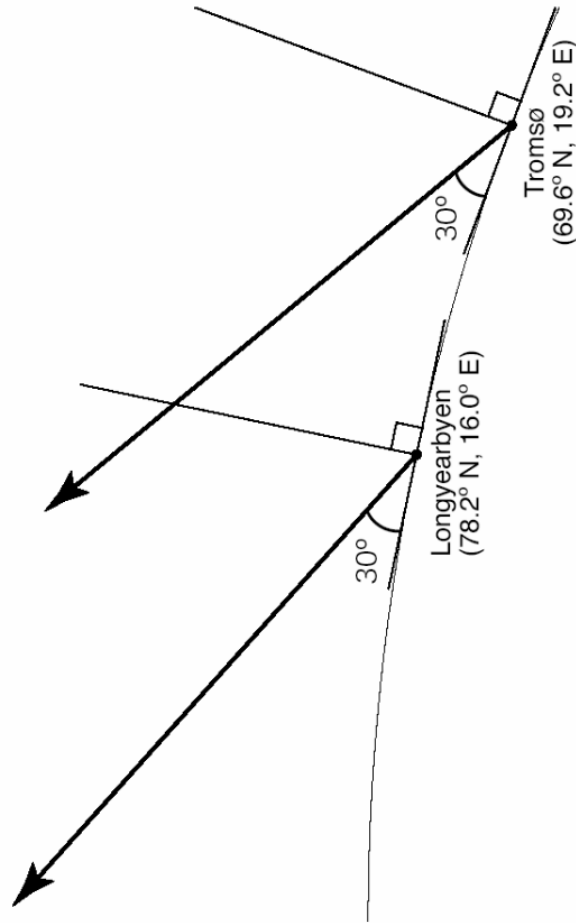


図 3-1 レーダーの位置と視線方向

左側の図は地理極方向を含む一つの子午面を表す。右側の図は VHF と ESR のビームの視線を地図上に示した図である。黒い太線はレーダーの観測領域を表す。

ESR

日付け	観測時間(UT)	方位角(度)	仰角(度)
2000年7月15日	0400-1200	-30	31
2000年7月24日	0400-1212	-30	31
2000年11月25日	0400-1015	0	30
2000年11月27日	0400-1100	0	30
2000年11月30日	0400-1100	0	30
2000年12月1日	0400-1100	0	30
2000年12月4日	0400-0621	0	30
2001年2月11日	0600-1200	-24	30
2001年2月13日	0600-1200	-24	30
2001年2月15日	0600-1200	-24	30
2001年2月21日	0600-1200	-24	30
2001年2月23日	0600-1200	-24	30
2001年2月26日	0900-1500	-24	30
2001年3月29日	0000-1000	-24	30
2001年9月22日	0000-2400	-24	30
2001年9月23日	0000-2158	-24	30
2001年11月11日	0903-1458	-24	30
2001年11月13日	1004-0000	-24	30
2002年2月21日	8000-1258	-24	30
2003年3月27日	0500-1100☆	-24	30
2003年11月4日	1031-1559	-24	30
2004年2月11日	0702-1300☆	-24	30
2004年3月13日	0701-1258	-24	30
2004年4月13日	0505-1100	-24	30

VHF

日付け	観測時間(UT)	方位角(度)	仰角(度)
2000年11月27日	0400-1400	0	30
2003年5月28日	0000-2400	-0.6	30
2003年3月27日	0500-1100☆	-5	30
2004年2月11日	0700-1300☆	-0.6	30
2004年3月13日	0700-1209☆	-0.6	30

表 3-1 本研究で用いた EISCAT レーダーのデータの視線方向。

表の中の☆印は VHF と ESR が同じ高電子密度領域の移動を捉えたイベントを示す。

ESR

方位角(°)	仰角(°)	高度(°)	緯度(°)	経度(°)
0	30	200	81.031	16.029
		250	81.692	16.029
		300	82.332	16.029
		350	82.952	16.029
		400	83.554	16.029
		450	84.138	16.029
		500	84.706	16.029
-24	30	200	80.709	8.764
		250	81.268	6.513
		300	81.795	4.046
		350	82.29	1.341
		400	82.751	-1.628
		450	83.178	-4.885
		500	83.57	-8.452
-30	31	200	80.455	7.64
		250	80.949	5.126
		300	81.409	2.419
		350	81.835	-0.489
		400	82.227	-3.61
		450	82.584	-6.948
		500	82.905	-10.503

VHF

方位角(°)	仰角(°)	高度(°)	緯度(°)	経度(°)
0	30	200	72.471	19.227
		250	73.132	19.227
		300	73.772	19.227
		350	74.393	19.227
		400	74.995	19.227
		450	75.579	19.227
		500	76.147	19.227
		550	76.7	19.227
		600	77.238	19.227
		650	77.761	19.227
-5	30	200	72.458	18.394
		250	73.116	18.165
		300	73.752	17.926
		350	74.369	17.675
		400	74.967	17.414
		450	75.547	17.139
		500	76.111	16.851
		550	76.659	16.548
-0.6	30	200	72.471	19.127
		250	73.132	19.1
		300	73.772	19.071
		350	74.392	19.041
		400	74.994	19.009
		450	75.579	18.976
		500	76.147	18.941
		550	76.699	18.905
		600	77.237	18.866
		650	77.761	18.825

表 3-2 EISCAT レーダーの高度情報から地理緯度情報への変換

第4章 観測結果及び解析結果

4章では、EISCAT レーダーが極方向へ移動する高電子密度領域を捉えたイベントについて、その物理的特徴、物理量間の関係を述べる。4-1節では ESR と VHF が高電子密度領域の極方向への移動を捉えているもの、則ち高電子密度領域の高緯度への移動現象の、カスプ周辺における生成から極冠域深部までの現象の全容をとらえている例を示し、その性質を明らかにする。これは後述するように、高電子密度領域内外における電子密度や電子温度、イオン温度などの物理関係が現象の発生場所付近とそこから離れた極冠域内では異なる可能性があるため、まず VHF と ESR による同時広域観測により同一現象の全過程をとらえその概要を押さえることが必要なためである。また、電子温度、イオン温度の大きさ及び、時間空間分布は緯度による変化があるため、FTE に伴う物理現象の指標としては不向きである。そのため、この研究では電子密度を FTE に伴う物理現象の指標とする。4-2節では、ESR が極冠域の中で高電子密度領域の移動を捉えているイベントを用い4-1節で解析したイベントの極冠域の中での解析結果と比較する。4-3節では、カスプの位置が同定でき、なおかつ、その周辺で生成された高電子密度領域の初期移動を捕らえることが出来たイベントを用いて4-1節で解析したイベントのカスプ付近での結果と比較する。本来は高電子密度領域の高緯度移動現象の生成から移動の全過程を観測できる VHF と ESR の同時観測データを用いた研究が最も相応しいが、同時観測で、高緯度への移動現象をとらえた幸運な例は多くは無いのでこのような手法を用いた。

4-1 EISCAT VHF レーダーと EISCAT Svalbard レーダーによる高電子密度領域の生成及び移動過程

4-1 節では VHF 及び、EISCAT Svalbard レーダーの 32m アンテナの同時観測が高電子密度領域の全容を捉えた、2004 年 2 月 11 日、2004 年 3 月 13 日、2003 年 3 月 27 日のイベントについて解析結果を示す。

4-1-1 2004 年 2 月 11 日のイベントの解析結果

カスプの低位緯度側境界の緯度と高電子密度領域の発生緯度の関係

2004 年 2 月 11 日、VHF および ESR は、それぞれレーダービームの方向を北方向に、仰角を 30 度で観測を実施した。レーダーで観測された電子密度を図 4-1-a に、電子温度を図 4-1-b に、イオン温度を図 4-1-c に、イオン速度を図 4-1-d に示す。それぞれ、上図に ESR、下図が VHF の観測結果を示している。図 4-1-a から図 4-1-d では、横軸は時間 (UT)、縦軸は高度(km)を表す。また、レーダーのビームを低い仰角で北向きに向けているため各々のレーダーで観測する高度が高くなるにつれて緯度も高くなる。高度と緯度の対応については表 3-2 を参照。同じ日の ACE 衛星による、惑星空間磁場の観測結果を図 4-2 に示す。

図 4-1-a の ESR と VHF の電子密度分布より、1140 UT 付近から 1300 UT 付近にかけて、時間とともに高電子密度領域の緯度が高くなる現象が見て取れる。(黒色の四角で示した領域)。これは高電子密度領域が極方向に移動していることを意味している。VHF の観測により複数の高電子密度領域が観測されているが、各々の高電子密度領域が観測された一番低い緯度(高度)則ち高電子密度領域が発生したと考えられる緯度は、時間とともに低緯度側に移動していることが見て取れる。以上の結果から分かるように、高電子密度領域はカスプの低緯度境界付近で発生し、高緯度(極)方向に移動していくことが分かる。

この高電子密度領域の発生場所の変遷を、電子温度の変動の観点から見てみる。図 4-1-b の下段の VHF で観測された電子温度では、1200 UT の高度 300 km 付近(緯度 73.8 度)から、1230 UT の高度 200 km(緯度 72.5 度)付近の 2 点を結んだ直線上より高い緯度で急激に電子温度が上昇している。この温度上昇は、カスプに特有な、比較的ソフトな粒子の降り込みによるものであると考えられる。時間の経過とともに境

界は低緯度側(より低い高度)へ移動している。直線より高い緯度領域はカスプ及びその高緯度側に、低い緯度はカスプの低緯度側領域に対応していると推測される。この境界の低緯度側への移動はカスプの緯度が時間とともに変化していることに対応していると考えられる。以上の結果から分かるように、高電子密度領域はカスプの低緯度付近で発生し、高緯度(極)方向に移動していくことが分かる。

図 4-1-c は両レーダーで観測されたイオン温度を示す。下段の VHF で測定された高電子密度領域が発生した時間帯のイオン温度に注目すると、図 2に見られた、カスプの境界付近の領域で、イオン温度がその低緯度側領域に比べて 1000 K 以上、上昇していることがわかる。この図 3 のイオン温度が上昇している部分を図 4-1-c のイオン速度と比較する。イオンと中性大気との摩擦による加熱の効果 ($T_i \propto V_i^2$) によりイオン温度が高い領域とイオン速度が速い領域は一致すると予想される。実際、カスプの境界線付近以外の領域では、おおむねイオン温度が高いところでは、イオン速度が速くなっている。しかし、カスプの境界線付近のイオン温度が急激に上昇しているところで比較するとイオン温度は上がっているが、イオン速度は上昇していない。これは EISCAT レーダーではイオン速度ベクトルのうち視線方向成分しかえられないためであると考えられる。ESR および VHF のレーダーの視線の方位角は CP-4 モードでは極向きである。カスプ付近のイオン温度のみ上昇している領域では、レーダーが測定することができる南北方向では無く、東西方向へのイオンの動きも顕著であることが予想され、そのためイオン温度上昇とイオン速度の増加が 1 対 1 に対応しないと考えられる。以上の理由により本解析では電場の強さの指標としてイオン速度ではなくイオン温度を用いることとする。

本研究の主課題である高電子密度領域(電子密度)と降下電子(電子温度)及びイオン温度の関連について、電子温度の上昇がおこり始めた緯度と、イオン温度の上昇がおこった緯度、それと高電子密度領域が移動しはじめた緯度は、関連はあるが完全には一致しない。イオン温度と電子温度の上昇している緯度、及び、高電子密度領域が生成、移動をはじめめる緯度の関係を、低い緯度から順に示す。(図 4-1-d の中で電子温度が上昇する境界線を赤い線で、イオン温度が上昇している領域を黄緑の線で表す。高電子密度領域の場所は黒い四角で表す)。まずイオン温度が上昇している帯状の領域が一番低い緯度にある。イオン温度の上昇がおこっている領域より高緯度に電子温度増加の境界線がある。高電子密度領域が生成され移動し始める緯度が電子温度の境界よりさらに北にあることが分かる。これらの物理量の間関係のより定量的な評価を次節に示す。

2004年2月11日の電子密度、電子温度、イオン温度の緯度ごとでの定量的比較

EISCAT のデータより得られた電子密度、電子温度、イオン温度を緯度(高度)ごとに切り出した図を、図 4-3 と図 4-4 に示す。比較の基準としたのは電子密度の変動であり、図 4-3 で電子密度を基準に一つ一つの高電子密度領域を定義する。複数の高電子密度領域が観測されているが、代表例として、1157 UT から 1228 UT にかけて(図 4-3 や図 4-4 中で、四角 A で示した領域)観測された高電子密度領域を切り出した図を図 4-5 にそれぞれ示す。なお図 4-3 の A で囲まれた高電子密度領域は図 4-4 の四角 A で示した高電子密度領域に対応している。図 4-3 から図 4-5 では、時間と高度双方で移動平均をとっている。すなわち時間方向には VHF では 1 分ごとのデータ 3 つで、ESR では 2 分ごとのデータ 3 つで移動平均をとっている。高度方向も 3 つのデータで移動平均をとっている。EISCAT レーダーの積分高度は高度によって高度 200 km では約 15 km、高度 300 km では約 20 km、高度 400 km では約 30 km ごとにデータがありこれらを、それぞれ 3 つずつ移動平均をとり使用している。図 4-3、図 4-5 の高度 400 km 以下のカスプに近い領域の高電子密度領域内を調べてみると電子密度の上昇と電子温度、イオン温度の上昇は正の相関を持っている。則ち電子温度の上昇している時間領域と電子(イオン)温度の上昇している時間領域がほぼ同相で一致している。電子温度と電子密度の上昇は、電子の降り込みによると考えられる。なお電子の降り込みが原因と思われる理由は 4-5 の考察で述べる。カスプより少し離れた緯度、つまり図 4-3、図 4-5 高度 400 km から 600 km の間の高電子密度領域内でのそれぞれのパラメーターを調べる。電子密度(黒線)と電子温度(赤線)、イオン温度(青線)は最初、正の相関を持っているが、緯度が上昇するにつれて電子温度とイオン温度の上昇の度合いは電子密度の増加と比べて相対的に小さくなっていく。そしてさらに極方向に進んだ緯度(VHF の高度 600 km 以上の観測領域と、ESR の観測領域)では逆相関の関係を持つように見える。図 4-3 で示した領域よりも高緯度側の観測結果である図 4-4 を調べると、切り替わった緯度より北では、逆相関が続いていることが分かる。

本研究で用いた、EISCAT より得られた物理量は、一定の時間、及び空間について積分して導出している。そのため、積分した高度より狭い部分についての変化は分からない。しかし積分高度より大きい部分の変化だけを見ても、いきなり正の相関から逆相関に切り替わったり、正逆の切り替わりが何度もくり返しているわけではない。徐々に電子温度、イオン温度が相対的に低くなりながら連続的に切り替わっている。

図 4-5 から分かるように高電子密度の増加と電子温度の減少はほぼ同時に同じ時間領域で発生しているが(位相が 180 度異なっている)、高電子密度とイオン温度では変動が同じ時間領域では生じず位相がずれる(0 度または 180 度ではない)場合が見られる。図 4-5 の高度 400 km 付近を調べると、イオン温度の上昇は電子密度の上昇よりも早い時間で発生している。(緯度が高くなるにつれて徐々にイオン温度上昇の山が電子密度上昇の山に対して位相が遅くなっているように見える。)

電子密度と電子温度の変動が逆相関になった高度での高電子密度領域内の温度は、ESR の高度 365 km で約 1300 K、高度 450 km で約 1400 K であった。高緯度へ移動する高電子密度領域が存在せず、同じ季節、同じ観測モードである、2004 年 2 月 4 日の 1100 UT から 1200 UT の間を平均した電子温度は、ESR の高度 350 km で約 1600 K、高度 450 km で約 1800 K であった。このことから高電子密度領域内部での温度は、電離圏電子が持っているバックグラウンドの温度(電子の降り込みによる加熱が無い時の温度)より下がっているものと考えられる。則ちこの領域では電子は冷却されていると考えられる。

図 4-5 の A で示している時間帯の付近の時間を切り出し、その時間帯に含まれるデータについて、電子密度と電子温度の関係、電子密度とイオン温度の関係を 1156 UT から 1228 UT について、図 4-6、図 4-7 にそれぞれ示す。図 4-8、図 4-9 には、図 4-7 の A で示している時間帯をすべて含むようにして ESR のデータの一部の時間を切り出し、その時間帯に含まれるデータについて、電子密度と電子温度の関係、電子密度とイオン温度の関係を示す。電子密度と電子温度の関係を示す図 4-6、図 4-8 を調べてみると、緯度(高度)が低いところでは電子密度と電子温度の関係は右上がり、つまり正の相関になっているが、高度が進むにつれて、その傾きは徐々に小さくなっていく。途中、逆「への字形」、右下がりと右上がりの二つの関係が重なった様な形になる。逆「への字形」になるのは、電子温度が上昇しているところが時間方向に狭くなり、高電子密度領域の中心近くでは正の相関に、高電子密度領域内の中心から外れた場所、及びその外側では逆相関になっているためである。緯度(高度)が高いところでは、最終的に右下がり、つまり逆相関になる。電子温度の短時間での上昇は、ソフトな電子の降り込みによるものと考えられる。そのため、高電子密度領域がカस्प付近と同じ量の電子の降り込みにより生成、維持されるのならば、電子温度と電子密度は正の相関になると考えられる。

一方電子密度とイオン温度の関係を示す図 4-7、図 4-9 を調べると、イオン温度でも電子温度と同じように低い緯度で正の相関、高い緯度で逆相関になっていることがわ

かる。図 4-4 を調べると、高電子密度領域の内部やその周辺で、イオン温度は約 1000 K、増減が occurring。しかし ESR で観測している緯度の高電子密度領域の内部やその周辺では、変動はそれほど大きくない。

4-1-2 2004 年 3 月 13 日のイベントの解析結果

2004 年 3 月 13 日の VHF および ESR は、レーダービーム方向を北方向、仰角を 30 度で観測を実施した。両レーダーより観測された電子密度を図 4-10-a に、電子温度を図 4-10-b に、イオン温度を図 4-10-c に示す。図 4-10-a から図 4-10-c は 2 月 11 日の例と同様に、上段に ESR のそれぞれのパラメーターを、下段に VHF のそれぞれのパラメーターを示している。横軸は時間(UT)、縦軸は高度(km)である。また図 4-11 に同じ日に ACE 衛星が観測した IMF を示す。

図 4-10-a の ESR と VHF での電子密度分布を調べると、700 UT 付近から 800 UT 付近にかけて、複数の高電子密度領域が極方向に移動していることがわかる。図から明らかなように VHF はこれらの高電子密度領域が生成された領域をとらえている(図 4-10-a の四角内)。

図 4-10-b、図 4-10-c、図 4-10-d の VHF の電子温度、イオン温度、イオン速度を高電子密度領域が存在する時間帯に注目して調べると、前例と同様に高電子密度領域の移動とともに、電子温度、イオン温度、イオン速度の構造が附随して移動しているように見える。

VHF 及び ESR で観測した電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を緯度(高度)ごとに切り出した図を、図 4-12、図 4-13 に示す。また、図 4-12、図 4-13 の VHF と ESR のデータについて、例として四角 B で示した、高電子密度領域の周辺を示した図を、図 4-14 に示す。図 4-12 から 4-14 では、時間と高度で移動平均をとっている。移動平均の取り方は 2004 年 2 月 11 日のデータと同じである。

図 4-12、図 4-13、図 4-14 での VHF の高度 490 km より低緯度(VHF の 490 km より低い高度)の領域、つまり高電子密度領域が生成されはじめた緯度に近い領域を調べてみると、電子密度の上昇と電子温度の上昇は時間領域が(同相の)正の相関である。電子温度と電子密度の上昇は、電子の降り込みによるためと考えられる。高電子密度領域が生成された領域より少し極冠域に入った領域について、図 4-12、図 4-13、図 4-14 の VHF の高度 490 km 以上から ESR の高度 280 km より低緯度の領域(ESR の高度 280 km 以下と VHF 全体の領域)における高電子密度領域内でのそ

それぞれのパラメーターを調べる。高電子密度領域が生成された領域での電子密度と電子温度は正の相関を持っていたが、緯度が高くなるにつれて電子温度の上昇は電子密度の上昇と比べて相対的に小さくなっていく。そしてさらに高緯度では逆相関の関係を持つようになる。これらの電子密度と電子温度の関係は2004年2月11日のイベントと同じ振舞いである。

相関関係の切り替わりについても、2004年2月11日のデータと同様で、いきなり正の相関から逆相関に切り替わるわけではなく、徐々に電子温度が相対的に低くなりながら切り替わっている。

電子密度と電子温度が逆相関になった高度で高電子密度領域内の一番低い温度は、ESRの高度365 kmで約2100 K、高度400 kmで約2000 Kであった。高電子密度領域が存在せず、同じ季節、同じ観測モードである、2004年3月6日の700 UTから800 UTの間を平均した電子温度は、ESRの高度350 kmで約2200 K、高度400 kmで約2400 Kであった。このデータについても、2004年2月11日と同様、高電子密度領域内部での温度は、電離圏電子が持っているバックグラウンドの温度(電子の降り込みが無い時の温度)より下がっているものと推測される。

図4-15に図4-14で示した時間帯を切り出し、その時間帯に含まれるデータについて、電子密度と電子温度の関係、電子密度とイオン温度の関係を示す。図4-15を調べると、イオン温度と電子密度の関係については比較的低い緯度、つまりVHFの高度490 kmより低緯度の領域(高度が490 km以下の領域)では、高電子密度領域の外側で高く、内側で低くなっている。その領域より高い緯度では、イオン温度は高電子密度領域の内部で上昇しているか、もしくは、高電子密度領域とは関わり無く変化している。

またイオン温度の変化は、高電子密度領域が生成されはじめた緯度に近い領域では、イオン温度が一番低い時間帯より1000 K以上上昇していたが、極冠域の中であるESRの高度200 kmから500 kmでは、約300 Kしか上昇していない。2004年2月11日のイベントのカस्प付近では、1000 K以上の変化がみられたが、極冠域の中では、約400 Kの変化しか無かった。低緯度で電場の変化が強く、高緯度については電場の変化が弱くなるのは2004年2月11日のイベントと同じである。

4-1-3 2003年3月27日のイベントの解析結果

2003年3月27日のVHFおよびESRは、レーダービーム方向を北方向、仰角を30度で観測を実施した。両レーダーより観測された電子密度を図4-16-aに、電子温度を図4-16-bに、イオン温度を図4-16-cに、に示す。図4-16-aから図4-16-cは2月11日の例と同様に、上段にESRのそれぞれのパラメーターを、下段にVHFのそれぞれのパラメーターを示している。横軸は時間(UT)、縦軸は高度(km)である。また図4-17に同じ日にACE衛星が観測したIMFを示す。なお、このイベントでは2004年2月11日や2004年3月13日のイベントと違いVHFで高電子密度領域の移動が観測された時間帯(4-16-aの黒い四角で示した時間帯)に日照がある。

VHF及びESRで観測した電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を緯度(高度)ごとに切り出した図を、図4-18、図4-19に示す。また、図4-18、図4-19のESRとVHFのデータについて、例として四角Cで囲んだ、高電子密度領域の周辺を示した図を、図4-20に示す。図4-18から4-20では、時間と高度で移動平均をとっている。移動平均の取り方は2004年2月11日のデータと同じである。

このイベントで観測された高電子密度領域については、4-1-3で紹介した、2004年3月13日のイベントとよく似た振舞いをする。電子密度とイオン温度の関係については、図4-18、図4-19のVHFで観測された領域では高電子密度領域の外で、イオン温度が高く、高電子密度領域の内で低くなっている。図4-19、4-20の高緯度に移動してからの観測結果では、高電子密度領域の内部で温度が高くなる。イオン温度の変化については、極冠域の中に完全に入っていると思われるESRの観測領域の中では、約1000Kの変化であるが、カस्पにより近いと考えられるVHFの観測領域では2000Kほどの変化がある。高電子密度領域と電場の関係については、図4-18、図4-20から分かるように、2004年3月13日と同じである。また、低緯度で電場の変化が強く、高緯度については電場の変化が弱くなるのは2004年2月11日及び2004年3月13日のイベントと同じである。

図4-21に図4-21で示した時間帯を切り出し、その時間帯に含まれるデータについて、電子密度と電子温度の関係、電子密度とイオン温度の関係を示す。

図4-21を見ると電子密度と電子温度の関係については、一部の例外の緯度(ESRの240kmでの観測)を除けば逆相関になっている。電子温度が電子密度とともに上昇している緯度(高度)がほとんど見られなかった。

極冠域内での電子温度についてさらに調べてみる。同じ年、同じ季節、同じ時間帯で高電子密度領域が発生していない観測が無いので、2003年3月27日のESRの観測データの中で、高電子密度領域が発生していない時間帯である500UTから600

UTの電子温度と、図4-20に示した高電子密度領域内で一番電子温度が低い領域での温度を比較する。500 UT から 600 UT では電子温度の平均は 350 km で約 2800 K、高電子密度領域内では、高度 350 km で約 2500 K であった。電離圏の温度は 500 UT から 600 UT より、1000 UT のほうが電離圏の温度が高いことを加えて推測すれば、このイベントについても電子温度は通常の電離圏の温度よりも下がっているものと推測される。

4-1-4 4-1 節のまとめ

4-1 節では、2004 年 2 月 11 日、2004 年 3 月 13 日、2003 年 3 月 27 日のデータをもとに、高電子密度領域の内外の降り込みや電場の強さについて、生成されはじめたカスプ近傍から、極冠域の内部までの様子を示した。この 3 つのイベントについてまとめる、

- (1) 電子温度の変動から推定される電子の降り込みについては、カスプ近傍の高電子密度領域が生成されはじめた場所では強いが、極冠域の中に移動していくにつれ弱くなるか、無くなる。(2003 年 3 月 27 日のイベントでは電子の降り込みの変化はみられなかった。)
- (2) 極冠域内の高電子密度領域内で電子温度が低下している領域では、高電子密度領域が発生していない場合よりも電子温度が下がる。電子温度は降り込みのない時の規定的な温度になっているのではなく、それよりさらに低い温度となっている。則ち電子は冷却されている。
- (3) 電場の強さについては、カスプ近傍で高電子密度領域の内部と外部で大きな差があったが、極冠域に入ると差が小さくなった。
- (4) 高電子密度領域と電場が上昇する位置の関係については、発生するカスプ周辺及び極冠域の低緯度領域では、2004 年 2 月 11 日では高電子密度領域の内部で、2003 年 3 月 27 日と 2004 年 3 月 13 日のデータでは電子密度が上昇している領域のすぐ外部で上昇していた。電場が強い領域では再結合過程のため電子降下があっても電子密度の上昇が見られないことも考えられる。
この点については考察で議論する。

4-2 極冠域内での、電子密度、電子温度、イオン温度の定量的比較

極冠域内で ESR が極方向へ移動する高電子密度領域を捉えた例について述べる。使用したデータ数は 21 イベントである。電子密度と電子温度の関係、電子密度とイオン温度の関係について、それらの関係に着目して 4 つのパターンに分類した。この章では典型的な例について述べる。イベントごとの分類については表 4-1 に示す。なおこの章で示すグラフで、電子密度、電子温度、イオン温度を高度ごとに切り出した図については、2004 年 2 月 11 日と同じ方法で、移動平均をとっている。

4-2-1 タイプ 1: 極冠域内で電子密度と電子温度、電子密度とイオン温度が共に逆相関を示すもの。(ESR だけの観測で計 8 イベント。)

2001 年 11 月 13 日のイベントの解析結果

図 4-22 に 2001 年 11 月 13 日に EISCAT レーダーで観測された電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を示す。図 4-23 に ACE 衛星が観測した IMF を示す。図 4-24 に 2001 年 11 月 13 日の EISCAT データより得られた、電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を高度ごとに切り出した図を示す。

図 4-23 の D の付近の領域について調べると、電子密度と電子温度の関係が、逆相関になっている。これは、4-1 節で紹介したイベントの極冠域内での関係と同様の振舞いであり、極冠域内では電子の振り込みが弱いものと推測される。また、電子密度と電子温度が逆相関になった高度で高電子密度領域内の一番低い温度は、ESR の高度 365 km で約 1300 K であった。高電子密度領域が存在せず、同じ季節、同じ観測モードである、2001 年 11 月 20 日の 1000 UT から 1100 UT の間を平均した電子温度は、ESR の高度 350 km で約 1700 K、であった。このデータについても、2004 年 2 月 11 日と同様、高電子密度領域内部での温度は、電離圏が持っている本来の温度より下がっているものと考えられる。これは 4-1 節のまとめの(2)、(3)と整合している。

電子密度とイオン温度の関係は図 4-23 の四角 D で示した領域を調べると、高電子密度領域内側で温度が低下し、外側で温度が上昇している。2004 年 2 月 11 日のイベントの極冠域の様相と一致している。またイオン温度の大きさや変化もおおよそ、2004 年 2 月 11 日のデータと同じである。

4-2-2 タイプ 2: 極冠域内で電子密度と電子温度が逆相関で電子密度と

イオン温度が無関係なもの。(ESR だけの観測で計 10 イベント。)

2001 年 2 月 15 日のイベントの解析結果

図 4-25 に、2001 年 2 月 15 日 に EISCAT レーダーで観測された電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を示す。図 4-26 に ACE 衛星が観測した IMF を示す。図 4-27 に 2001 年 2 月 15 日の EISCAT データより得られた、電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を高度ごとに切り出した図を示す。図 4-27 を調べると電子温度と電子密度については、4-1 節で示したイベントの極冠域内や 4-2-1 節で紹介したイベントと同様に、電子密度と電子温度は逆相関になっている。また高電子密度領域内での電子温度については、高電子密度領域が存在せず、同じ季節、同じ観測モードである、2001 年 2 月 13 日の 900 UT から 1000 UT(違う時間帯では高電子密度領域の移動が見られるためイベントとして使用しているが、この時間帯では高電子密度領域の移動は見られない)の高度 350 km の温度 2600 K と比較すると明らかに低くなっている。

タイプ 2 では、四角 E で示した部分のように、イオン温度は電子密度や電子温度とは関連が見られず、高電子密度領域が存在する領域や、降り込みがある領域とは無関係に変化している。(2001 年 2 月 15 日の他の高度の一部の時間帯では、タイプ 1 のようにイオン温度がふるまっている緯度もある。)

4-2-3 タイプ 3: 極冠域内で電子密度と電子温度が逆相関で、イオン温

度が高電子密度領域内で上昇しているもの。(ESR だけの観測で計 0 イベント。)

このタイプについては、4-1 節で述べた、2003 年 3 月 27 日と 2004 年 3 月 13 日の 2 イベントで見られた。図 4-13、図 4-14、図 4-19、図 4-20 の ESR の観測領域を調べると、電子密度と電子温度の関係は、タイプ 1 やタイプ 2 と同様に、逆相関になっている。4-1-2 節、4-1-3 節でも述べたが、高電子密度領域内の電子温度は、高電子密度領域外の温度より下がっていた。このこともタイプ 1 やタイプ 2 と同じである。電子密度とイオン温度の関係については、図 4-13、図 4-14、図 4-19、図 4-20 の ESR の観測領域を調べると、高電子密度領域内ではイオン温度が上昇していることがわかる。

4-2-4 タイプ 4: 電子密度と電子温度の相関が弱く、電子密度がイオン温度の高いところで減少しているもの。(ESR だけの観測で計 3 イベント。)

2000 年 7 月 15 日のイベントの解析結果

このタイプは、電子密度とイオン温度の関係が他の 3 つのタイプより顕著であるが、電子密度と電子温度の関係が弱いことがあげられる。

図 4-28 に、2000 年 7 月 15 日に EISCAT レーダーで観測された電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を示す。図 4-29 に ACE 衛星が観測した同日の IMF を示す。図 4-30 に 2000 年 7 月 15 日の EISCAT データより得られた、電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を高度ごとに切り出した図を示す。図 4-31 と図 4-32 に図 4-30 で見られる高電子密度領域のほとんどを含むように切り出し、その時間帯に含まれるデータについて、電子密度と電子温度の関係、電子密度とイオン温度の関係をそれぞれ示す。図 4-30、図 4-31、図 4-32 を調べると、高度 300 km より低緯度(低高度)では電子密度が電子温度とともに上昇しており高電子密度領域は、電子の降り込みにより生成されたものと思われる。しかし、高度 300 km より高緯度(高高度)では、電子密度と電子温度は無関係に変化している。かわりに、電子密度と無関係であったイオン温度が、電子密度の低いところで急激に上昇している。高度 300 km より上では、降り込みの効果により、イオン温度の上昇による、電子の再結合の効果が強くなっていると思われる。

高電子密度領域内部とその付近の電子温度の大きさを高電子密度領域が無いところと比べる。高度 400 km より上の領域の、電子温度よりもイオン温度の方が電子密度との関係が強い領域では、高電子密度領域内及びその付近の電子温度は、高電子密度領域が無い領域より高い。高電子密度領域が無い領域の温度として、2000 年 7 月 15 日の 900 UT から 1000 UT の間の平均した電子温度、400 km で 3200 K をあげる。極方向へ移動する高電子密度領域がある 430 UT から 600 UT 付近では 3200 K か、それ以上の電子温度である。高度 400 km 以下の電子密度と電子温度の関係がイオン温度との関係よりも強い領域においても、高電子密度領域がある領域の方が無い領域よりも電子温度が上昇している。この例の電離圏は他のタイプの例と異なり日照による電離が行われている状態であることに注意して慎重に解釈することが必要である。電子の降り込みにより電離圏が過熱されたためと思われる。

4-2-5 4-2 節のまとめ

4-2 節では、極冠域の中にある、高電子密度領域について、降り込みや、電場に注目して述べた。

- (1) タイプ 1、タイプ 2、タイプ 3 では極冠域の中では、電子密度と電子温度が逆相関になる。
- (2) タイプ 1、タイプ 2、タイプ 3 ではイオン温度はそれぞれタイプで振舞いが違った(電子温度と電子密度は 3 タイプとも逆相関であった)。これらのイベントではイオン温度の上昇・下降は電子密度や電子温度に大きな影響を与えていない可能性がある。
- (3) タイプ 4 では、電子密度とイオン温度の逆相関が見えたが電子温度との関係が見られなかった。これはイオン温度の上昇により、イオンと電子の再結合する過程の方が、電子の降り込みにより電子密度が上昇する過程よりも強く見えたためと思われる。

4-3 カスプ付近での電子密度、電子温度、イオン温度の定量的比較

4-3 節では高電子密度領域をカスプ付近で観測できた 2000 年 11 月 27 日のイベントと高電子密度領域が移動を始めた最初の時間帯を捉えられた 2003 年 5 月 28 日のイベントについて述べる。なおこの章で示すグラフで、電子密度、電子温度、イオン温度を高度ごとに切り出した図については、2004 年 2 月 11 日と同じ方法で移動平均をとったデータを用いている

4-3-1 2000 年 11 月 27 日のイベントの解析結果

図 4-33 に、2000 年 11 月 27 日に EISCAT レーダーで観測された電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を示す。図 4-34 に ACE 衛星が観測した同日の IMF を示す。図 4-35 に 2000 年 11 月 27 日の EISCAT データより得られた、電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を高度ごとに切り出した図を示す。図 4-30 を見ると、電子密度の上昇は、電子温度の上昇とともに起こっていることが見て取れる。これは 4-1 節で述べた、2004 年 2 月 11 日や 2004 年 3 月 13 日と同じ特性である。高電子密度領域が移動しはじめた位置とカスプについて比較する。2000 年 11 月 27 日のイ

イベントについては、[河野\[2001\]](#) で DMSP 衛星の降下粒子からカスプの位置を特定している。その結果を引用すると、カスプの低緯度境界の位置は 925 UT で緯度 75.6 度(VHF の高度で約 450 km)であった。図 4-35 を調べると、900 UT 付近の高電子密度領域は、高度 260 km より緯度の低い領域で生成されている。[河野\[2001\]](#)が導出したカスプの低緯度境界の位置の時間変動を考慮しても、高電子密度領域は、カスプの低緯度側境界より低緯度で生成されはじめている。2004 年 2 月 11 日のイベントでは、カスプの低緯度側境界の位置と高電子密度領域が生成されはじめる位置が、ほぼ一致していたこととは、異なる結果である。

4-3-2 2003年5月28日のイベントの解析結果

図 4-36 に、2003 年 5 月 28 日 に EISCAT レーダーで観測された電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を示す。図 4-37 に ACE 衛星が観測した同日の IMF を示す。図 4-38 に 2003 年 5 月 28 日の EISCAT データより得られた、電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を高度ごとに切り出した図を示す。図 4-36 のイオン温度を調べると、1000 UT の高度 400 km 付近から、1030 UT の高度 200 km 付近の 2 点を結んだ直線上より高い緯度でイオン温度が上昇している。イオン温度が上昇している領域の電子温度を調べると、電子温度も上昇している。また同じ領域で電子密度を調べるとイオン温度が上昇した領域付近で高電子密度領域の移動が見て取れる。

図 4-38 の中の G や H で示した高電子密度領域の内外を調べてみると、電子密度は電子温度とともに上昇している。G や H で示した高電子密度領域のイオン温度の内外について調べてみると、高電子密度領域の内部でイオン温度が上昇している。イオン温度の上昇は、G で示した高電子密度領域で約 600 K、H で示した高電子密度領域で約 1000 K の上昇であった。これらの電子温度やイオン温度の時間空間分布は、2004 年 2 月 11 日のイベントと同様である。

4-3-3 4-3 節のまとめ

- (1) カスプ付近や高電子密度領域が生成されはじめた緯度では、電子密度は電子温度と共に上昇していた。
- (2) イオン温度の時間空間分布は、2003 年 5 月 28 日イベントでは、高電子密度領域の内部で上昇していた。
- (3) 高電子密度領域が生成されはじめた緯度は、2000 年 11 月 27 日のイベントでは、カスプより低緯度側にあった。2003 年 5 月 28 日のイベントでは、イオン温度が上昇している領域付近にあった。

4-3-2 2003 年 5 月 28 日のイベントの解析結果

図 4-36 に、2003 年 5 月 28 日に EISCAT レーダーで観測された電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を示す。図 4-37 に ACE 衛星が観測した同じ日の IMF を示す。図 4-38 に 2003 年 5 月 28 日の EISCAT データより得られた、電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度を高度ごとに切り出した図を示す。図 4-36 のイオン温度を調べると、1000 UT の高度 400 km 付近から、1030 UT の高度 200 km 付近の 2 点を結んだ直線上より高い緯度でイオン温度が上昇している。イオン温度が上昇している領域の電子温度を調べると、電子温度も上昇している。また同じ領域で電子密度を調べるとイオン温度が上昇した領域付近で高電子密度領域の移動が見て取れる。

図 4-38 の中の G や H で示した高電子密度領域の内外を調べてみると、電子密度は電子温度とともに上昇している。G や H で示した高電子密度領域のイオン温度の内外について調べてみると、高電子密度領域の内部でイオン温度が上昇している。イオン温度の上昇は、G で示した高電子密度領域で約 600 K、H で示した高電子密度領域で約 1000 K の上昇であった。これらの電子温度やイオン温度の時間空間分布は、2004 年 2 月 11 日のイベントと同様である。

4-3-3 4-3 節のまとめ

- (1) カस्प付近や高電子密度領域が生成されはじめた緯度では、電子密度は電子温度と共に上昇していた。
- (2) イオン温度の時間空間分布は、2003 年 5 月 28 日イベントでは、高電子密度領域の内部で上昇していた。
- (3) 高電子密度領域が生成されはじめた緯度は、2000 年 11 月 27 日のイベントでは、カस्पより低緯度側にあった。2003 年 5 月 28 日のイベントでは、イオン温度が上昇している領域付近にあった。

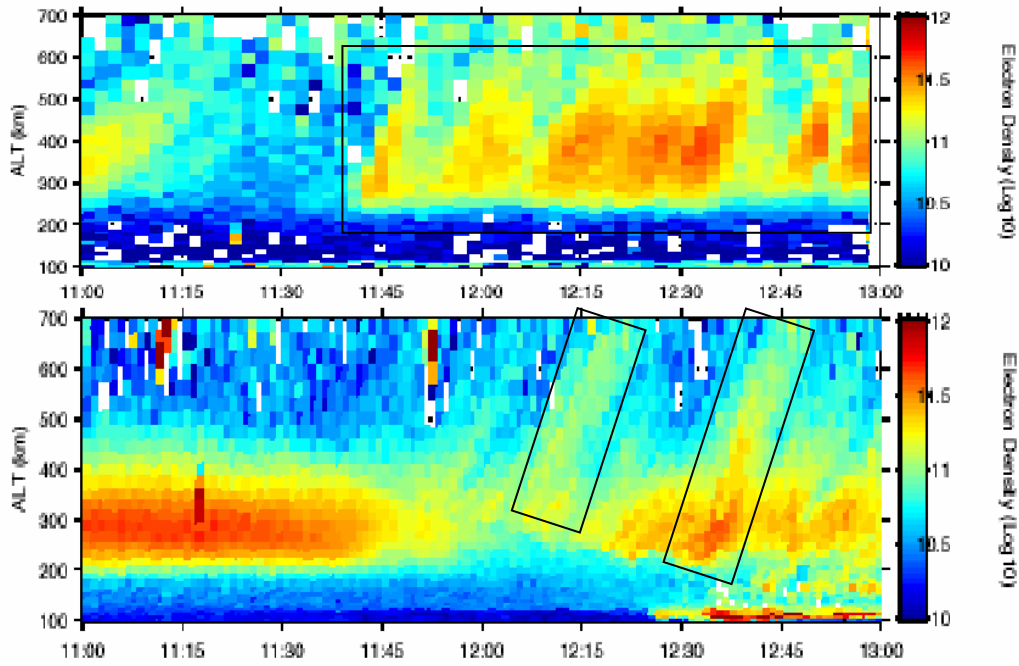


図 4-1-a 2004 年 2 月 11 日に EISCAT レーダーで観測された電子密度の時間変動。縦軸が高度、横軸が時間(UT)を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF の電子密度を示す。右横に電子密度のスケールを示す。黒色の四角で示した時間帯に移動性高電子密度領域が観測されている。

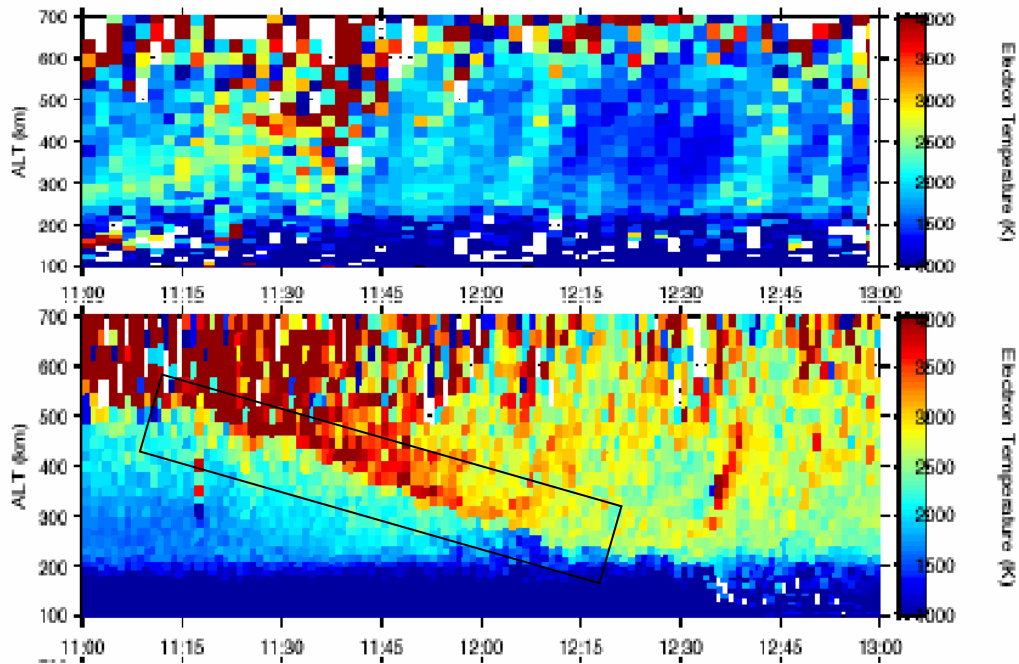


図 4-1-b 2004 年 2 月 11 日に EISCAT レーダーで観測された電子温度の時間変動。縦軸が高度、横軸が時間(UT)を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF の電子密度を示す。右横に電子温度のスケールを示す。黒色の四角で示した領域より高緯度で電子温度が急激に上昇している。

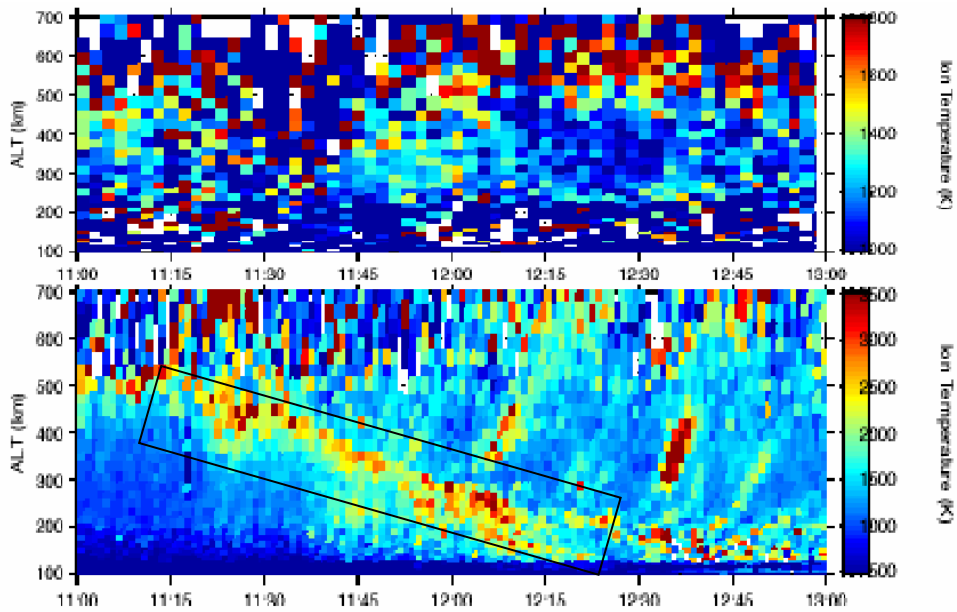


図 4-1-c 2004 年 2 月 11 日に EISCAT レーダーで観測されたイオン温度の時間変動。
 縦軸が高度、横軸が時間(UT)を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF のイオン温度を示す。右横
 にイオン温度のスケールを示す。黒色の四角で示した領域でイオン温度が急激に上昇している。

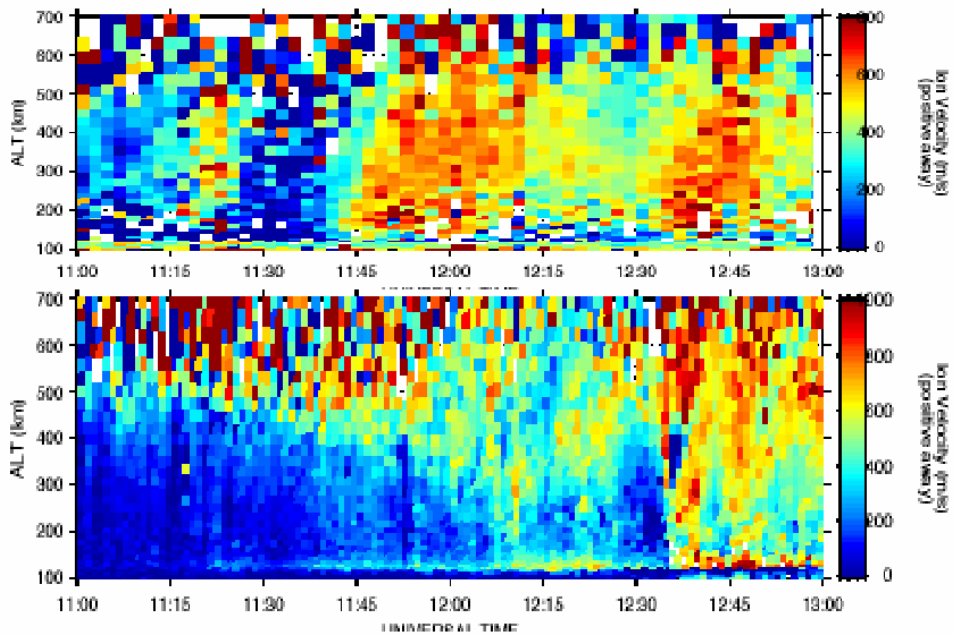


図 4-1-d 2004 年 2 月 11 日に EISCAT レーダーで観測されたイオン速度の時間変動。
 縦軸が高度、横軸が時間(UT)を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF のイオン速度を示す。右横
 にイオン温度のスケールを示す。

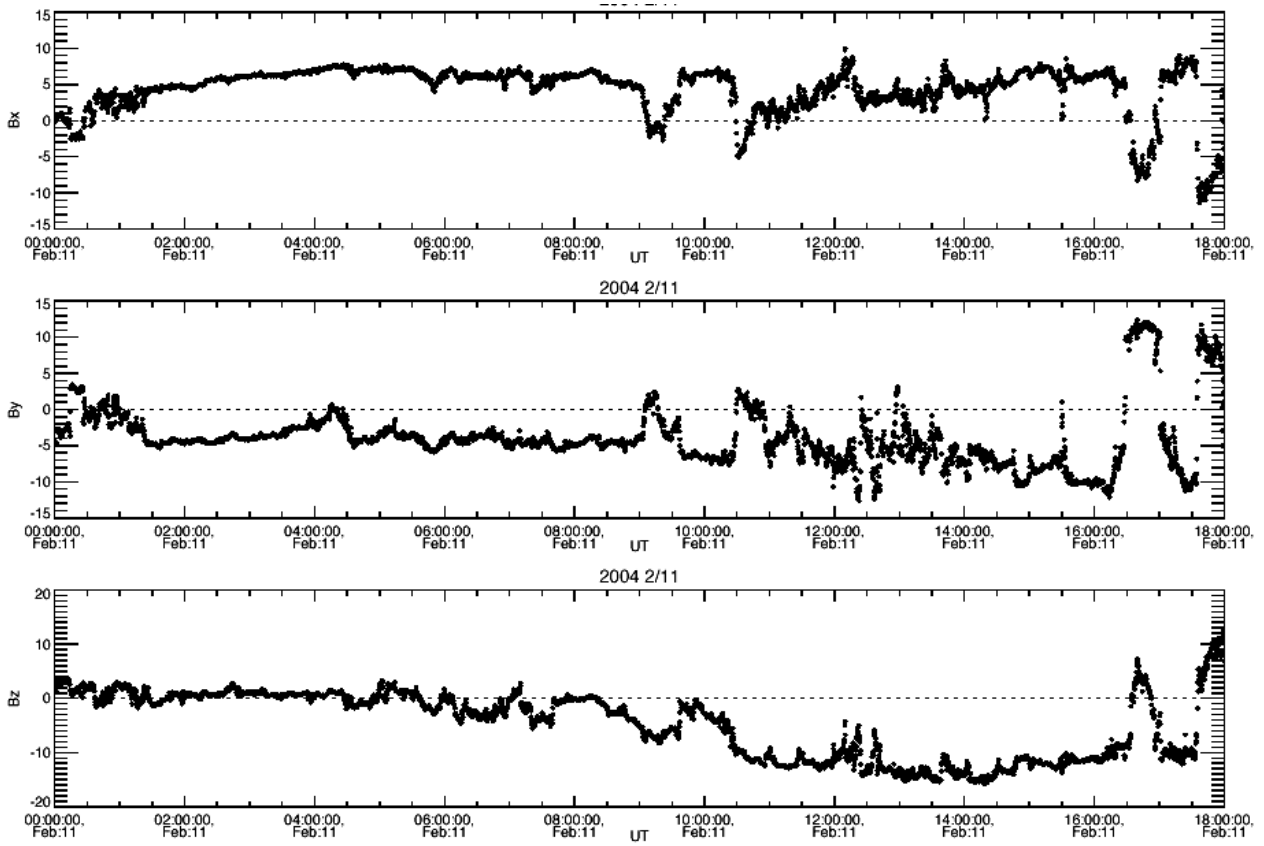


図4-2 ACE衛星の観測による2004年2月11日0000 UTから1800 UTまでの太陽風磁場(nT)。上から順に Bx、By、Bz を表す。

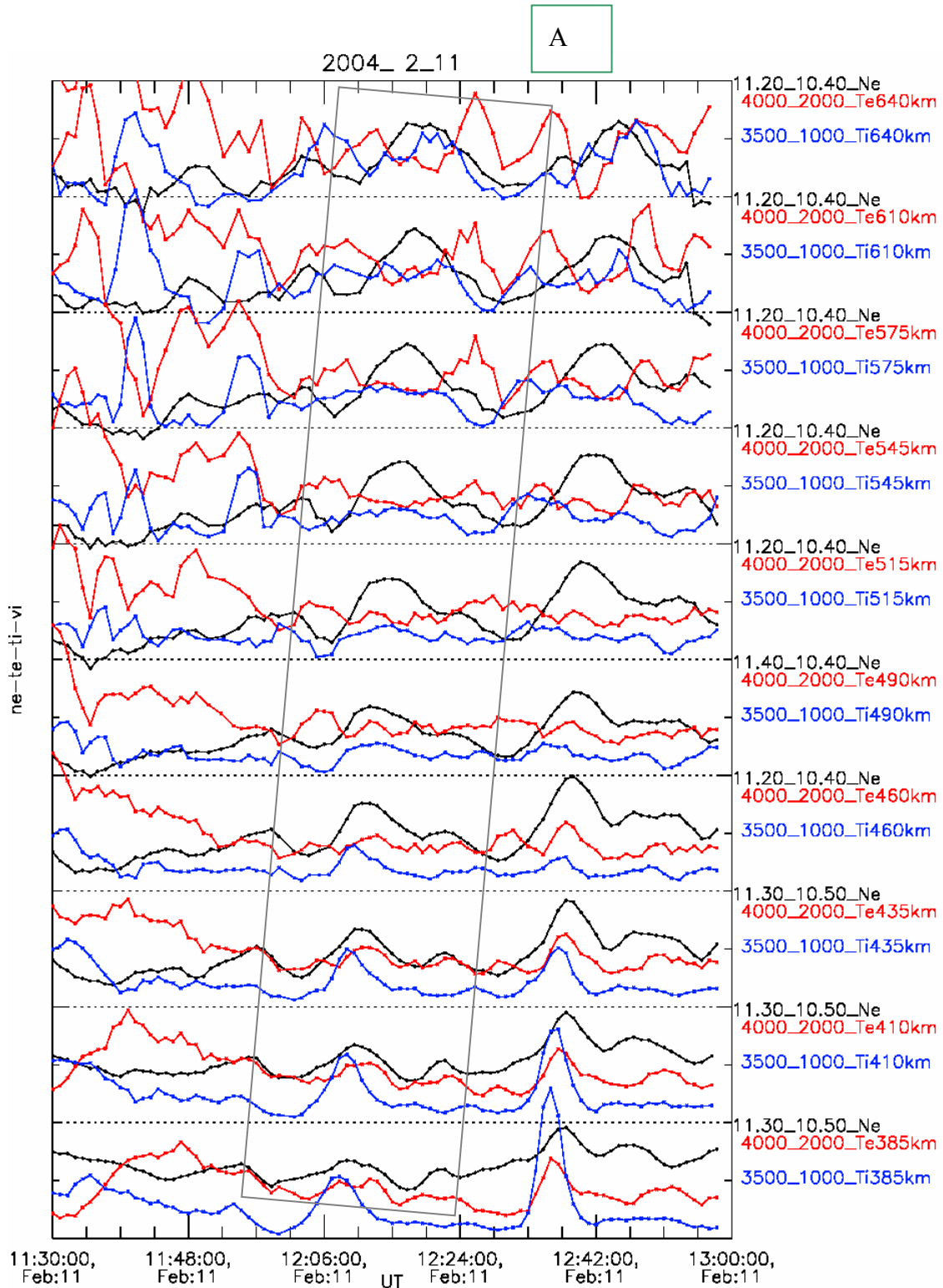


図 4-3 2004 年 2 月 11 日 1130 UT から 1300 UT に VHF で 385 km から 640 km において観測した、各高度における物理パラメーター。

横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000_410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000K から 2000K の範囲で点線と点線の間に示している)A で示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

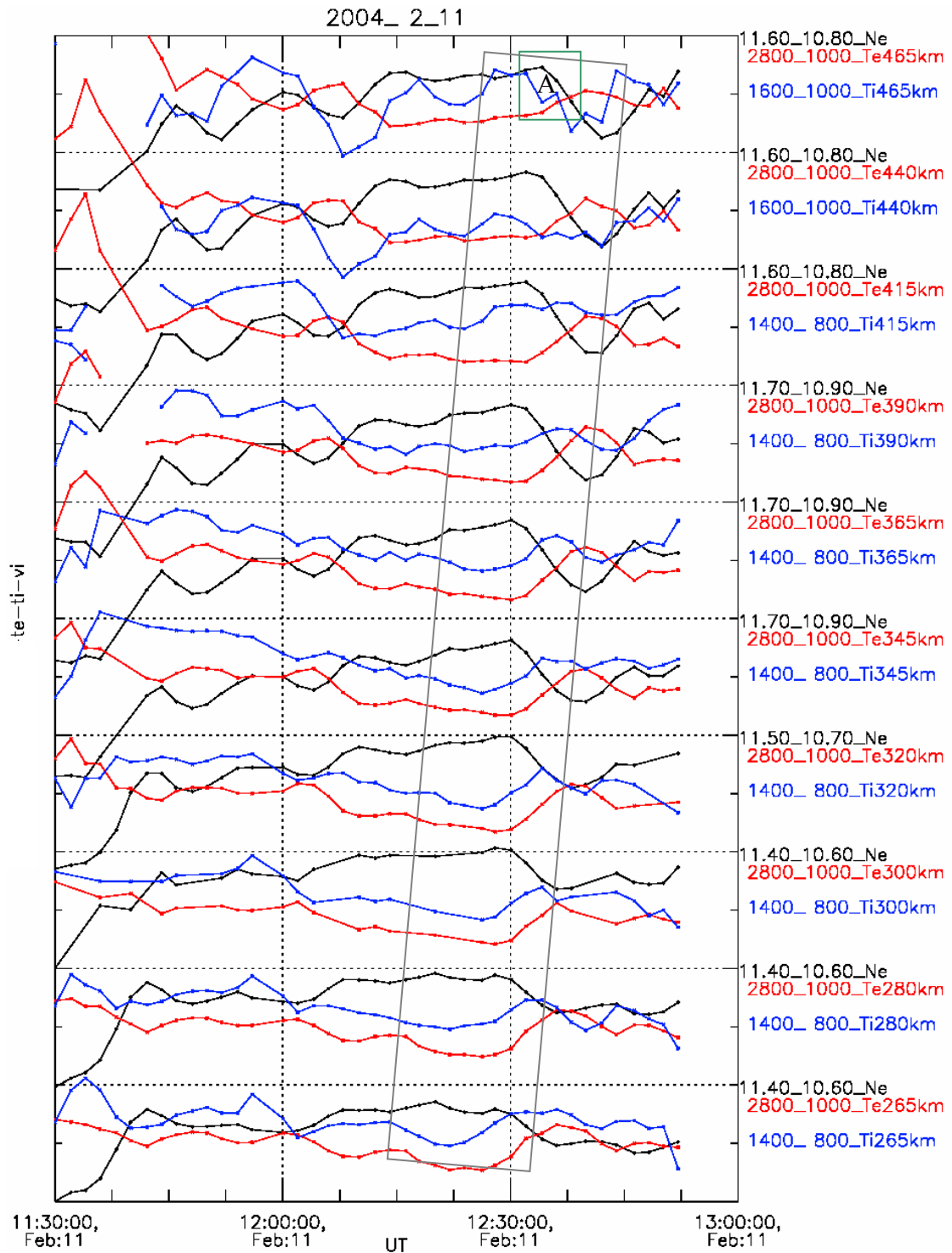


図 4-4 2004 年 2 月 11 日に ESR で 265 km から 465 km において観測した、各高度における物理パラメーター。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000 410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000K から 2000K の範囲で点線と点線の間で示している)A で示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

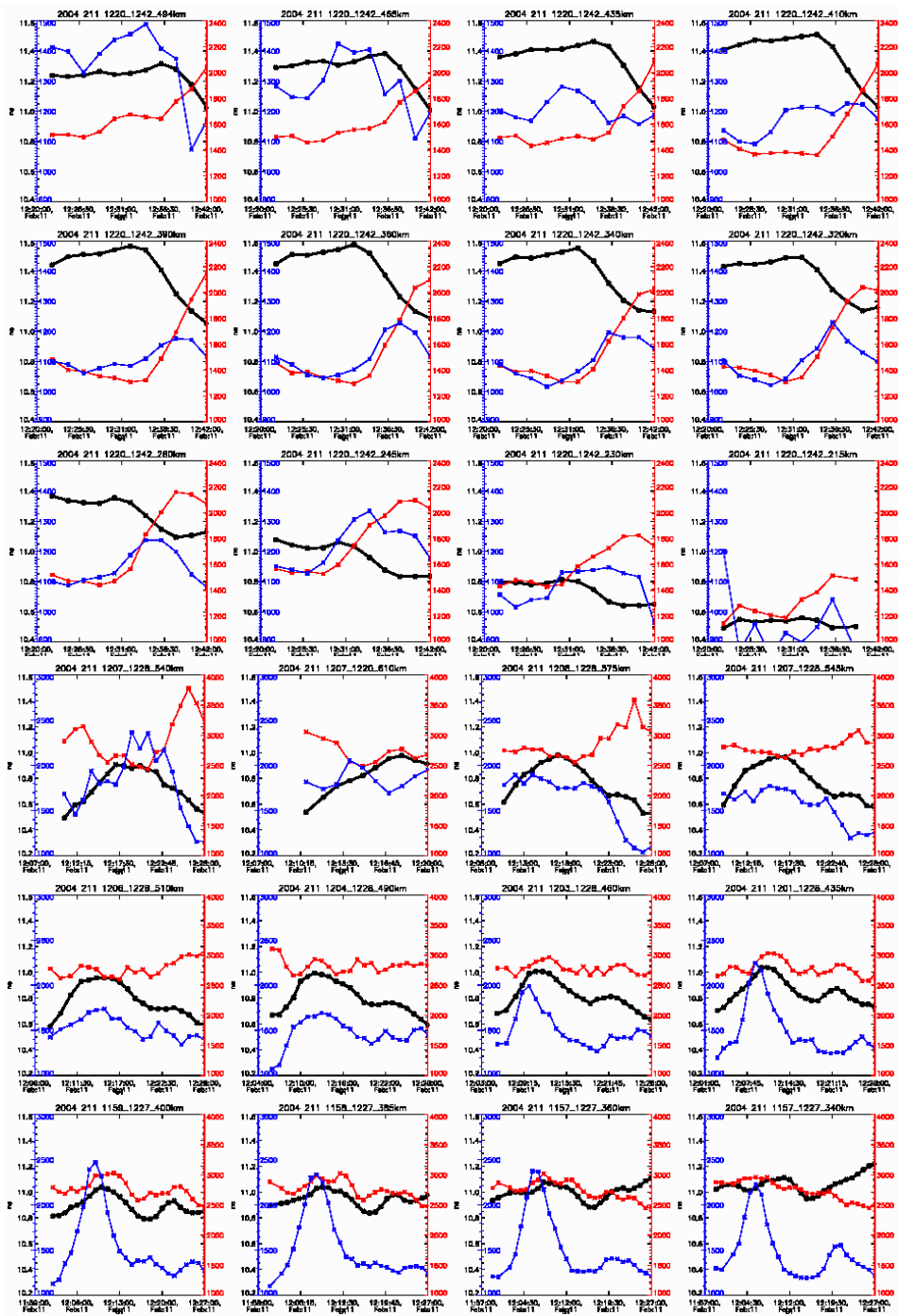


図 4-5 2004 年 2 月 11 日の 1157 UT から 1228 UT において ESR と VHF で観測された高電子密度領域での高度ごとの電子密度(黒)、電子温度(赤)、イオン温度(青)の時間変動。

各図の横軸は UT、縦軸は電子密度、電子温度、イオン温度に対応する。上側 12 個が ESR の下側 12 個が VHF の観測結果を示す。イオン温度は VHF では 1000 K から 3000 K、ESR では 800 K から 1500 K。電子温度は VHF では 1000 K から 4000 K、ESR では 1000 K から 2400 K 電子密度は VHF では $10^{10.2}$ から $10^{11.6} \text{ m}^{-3}$ 、ESR では $10^{10.4}$ から $10^{11.6} \text{ m}^{-3}$ の範囲を示す。図 4-3、図 4-4 中に A で示した時間帯の移動性高電子密度領域を示す。

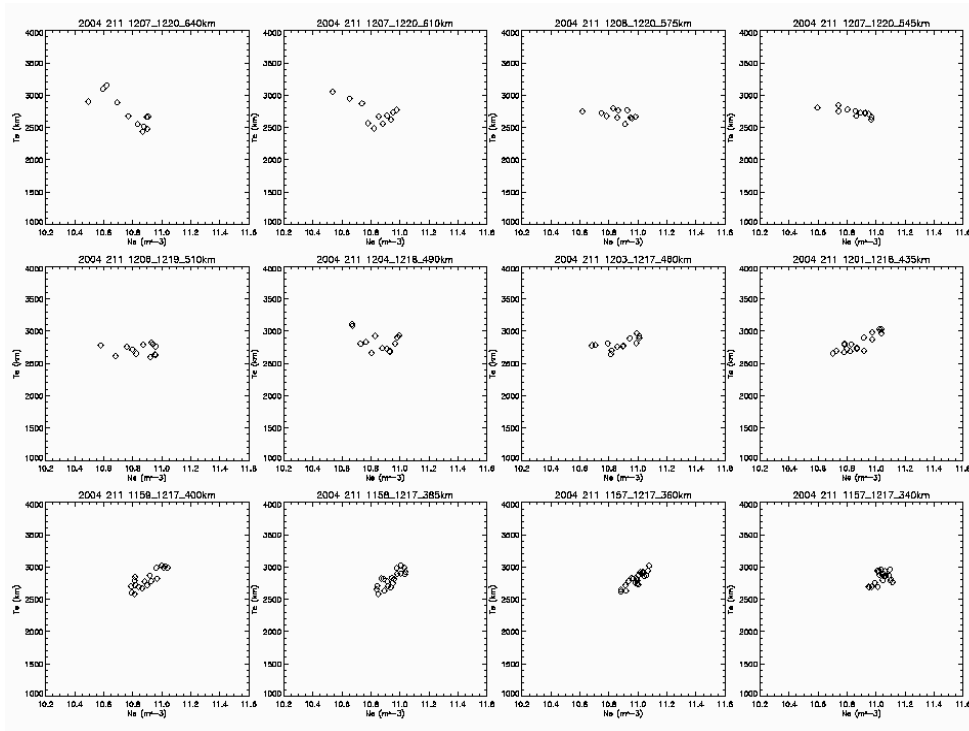


図4-6 2004年2月11日の1157 UTから1220 UTにおいてVHFで観測された高電子密度領域内の高度ごとの電子密度と電子温度の関係。横軸を電子密度(10.2 m^{-3} から 11.6 m^{-3} の範囲)、縦軸を電子温度(1000 Kから 4000 Kの範囲)にとる。

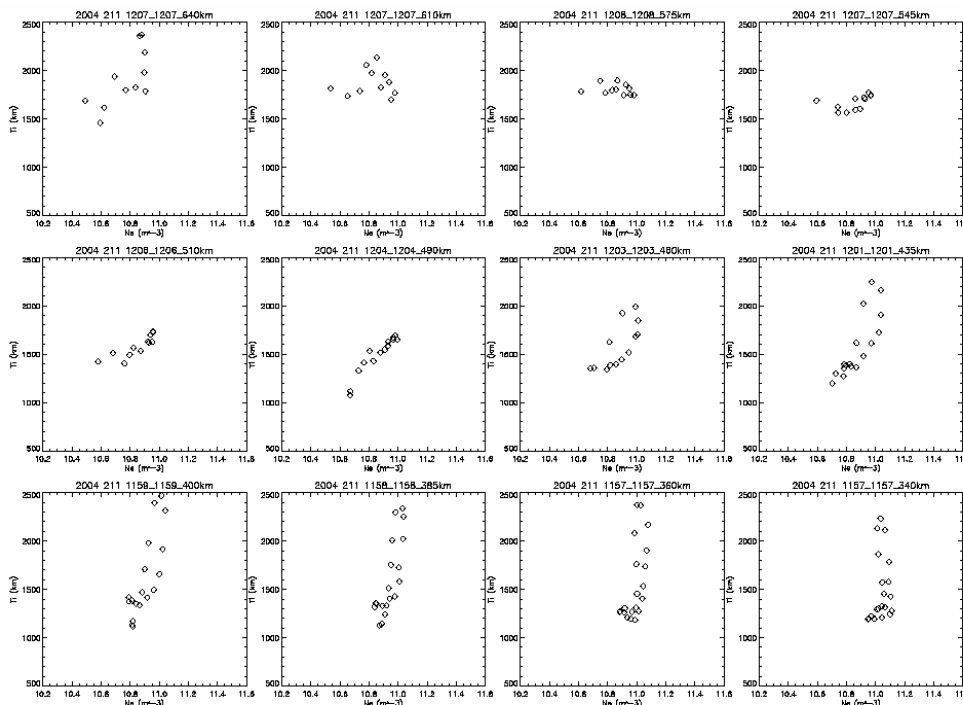


図4-7 2004年2月11日の1157 UTから1220 UTにおいてVHFで観測された高電子密度領域内の高度ごとの電子密度とイオン温度の関係。横軸を電子密度(10.2 m^{-3} から 11.6 m^{-3} の範囲)、縦軸をイオン温度(500 Kから 2500 Kの範囲)にとる。

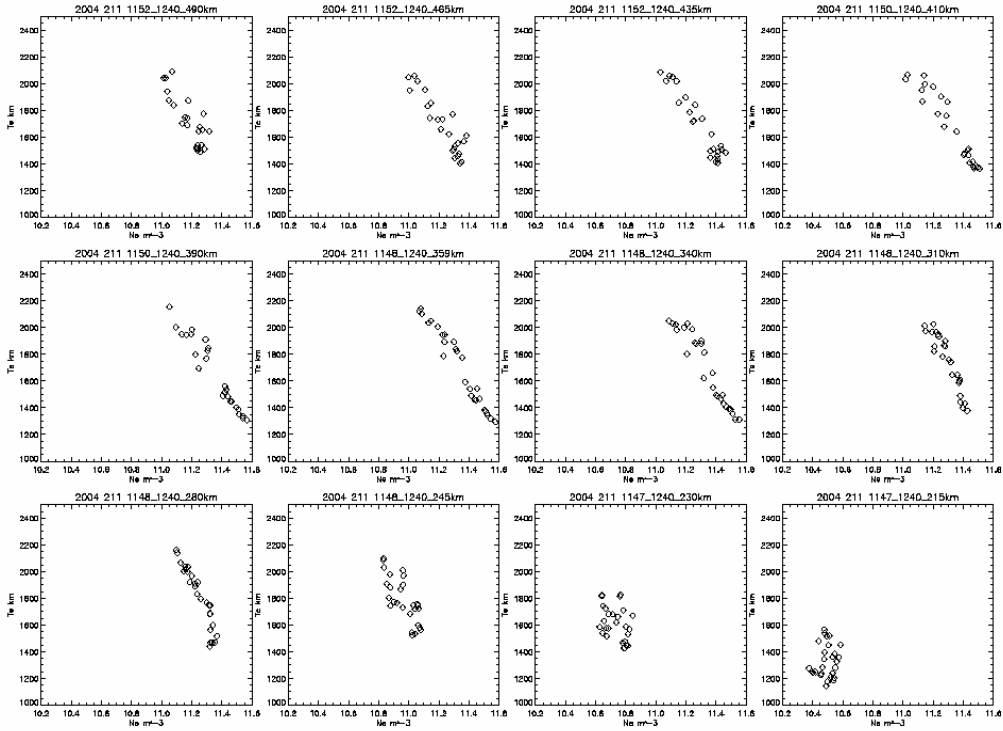
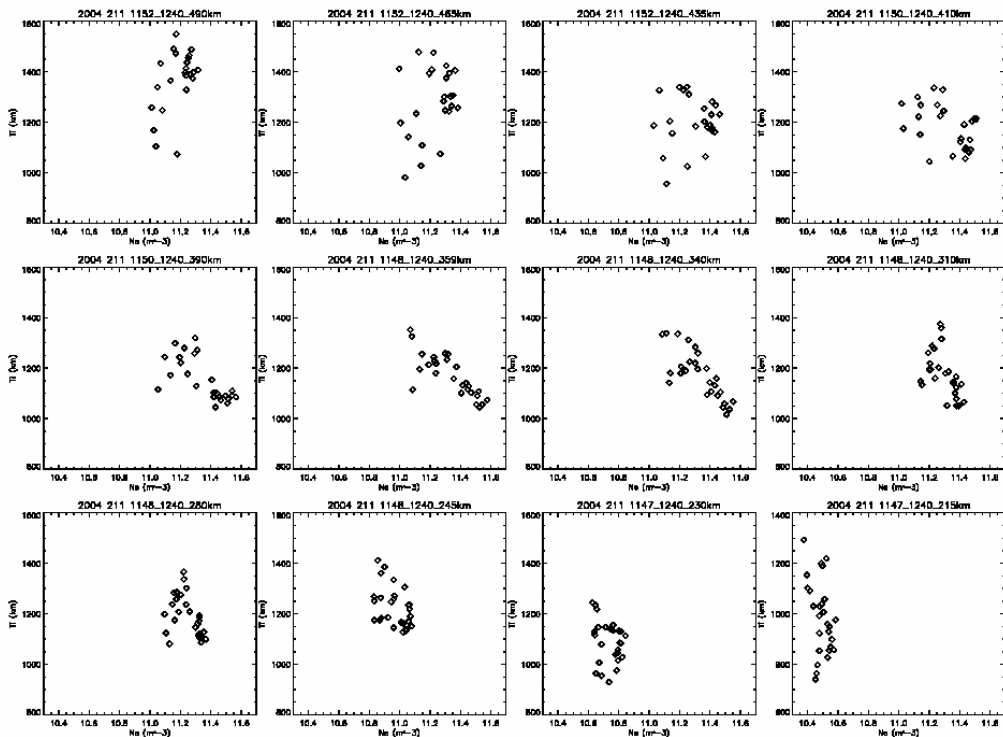


図 4-8 2004 年 2 月 11 日の ESR で観測された高度ごとの電子密度と電子温度の関係。横軸を電子密度(10.2 m^{-3} から 11.6 m^{-3} の範囲)、縦軸を電子温度(1000 Kから 4000 Kの範囲)にとる。

図 4-9 2004 年 2 月 11 日の ESR で観測された高度ごとの電子密度とイオン温度の関係。横軸を電



子密度(m^{-3})、縦軸をイオン温度(K)にとる。横軸を電子密度(10.2 m^{-3} から 11.6 m^{-3} の範囲)、縦軸を電子温度(800 Kから 1600 Kの範囲)にとる。

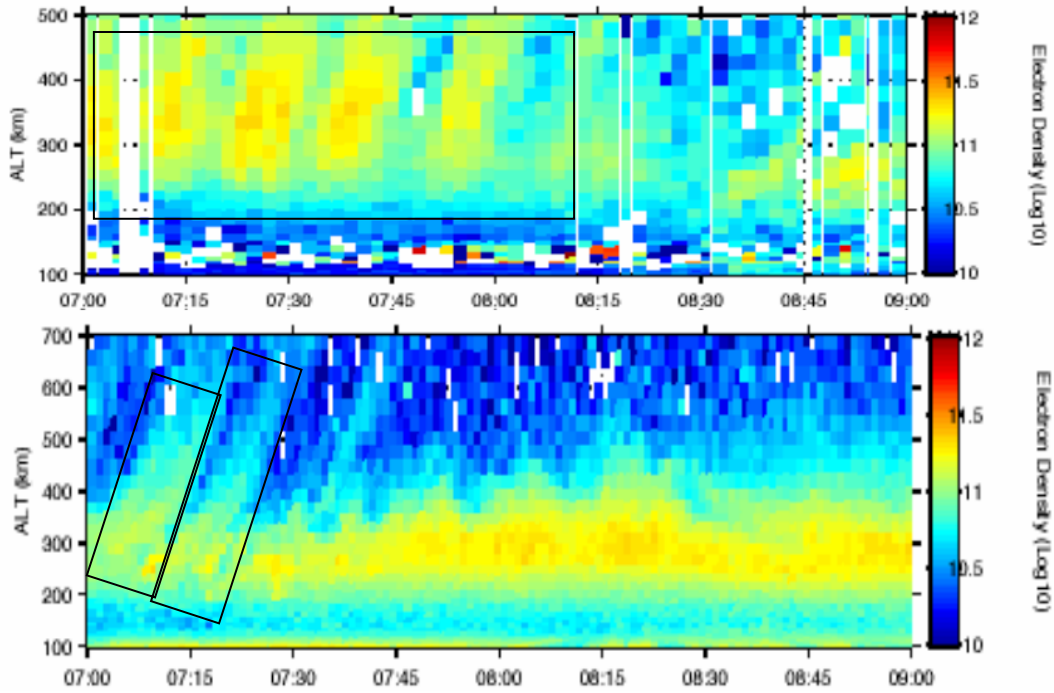


図 4-10-a 2004 年 3 月 13 日に EISCAT レーダーで観測された電子密度の時間変動。縦軸が高度、横軸が時間を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF の電子密度を示す。右横に電子密度のスケールを示す。黒色の四角で示した時間帯に移動性高電子密度領域が観測されている。

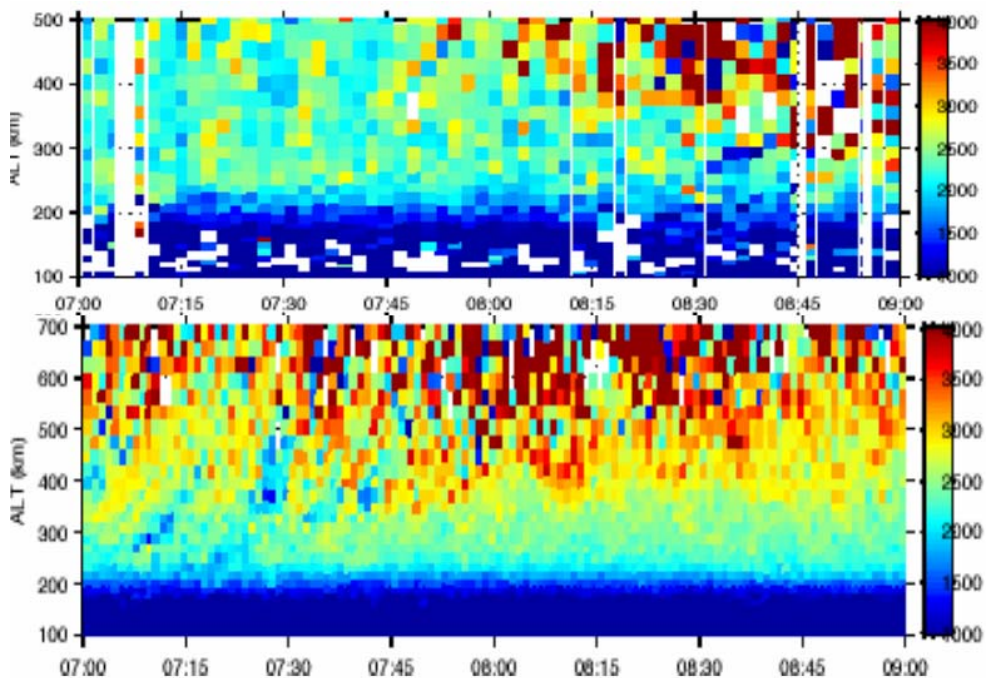


図 4-10-b 2004 年 3 月 13 日に EISCAT レーダーで観測された電子温度の時間変動。縦軸が高度、横軸が時間を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF の電子密度を示す。右横に電子温度のスケールを示す。

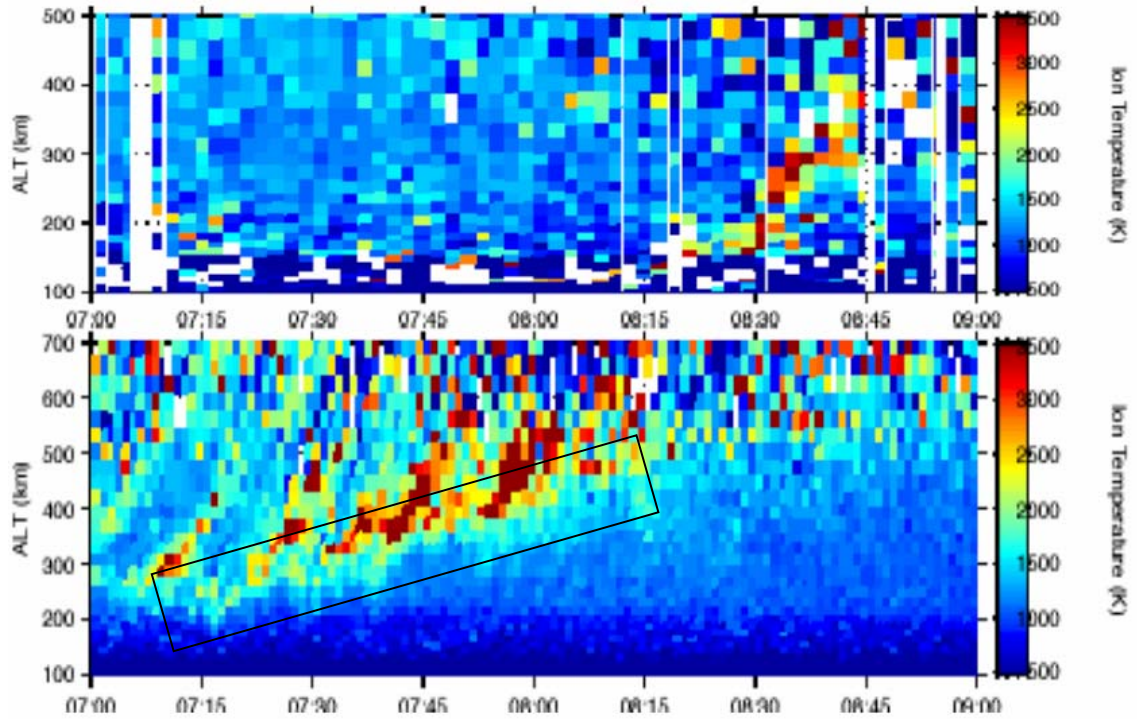


図 4-10-c 2004 年 3 月 13 日に EISCAT レーダーで観測されたイオン温度の時間変動。

縦軸が高度、横軸が時間を示す。上側の図は ESR 下側の図は VHF のイオン温度を示す。右横にイオン温度のスケールを示す。黒色の四角で示した緯度より高緯度でイオン温度が周辺より高い領域が観測された。

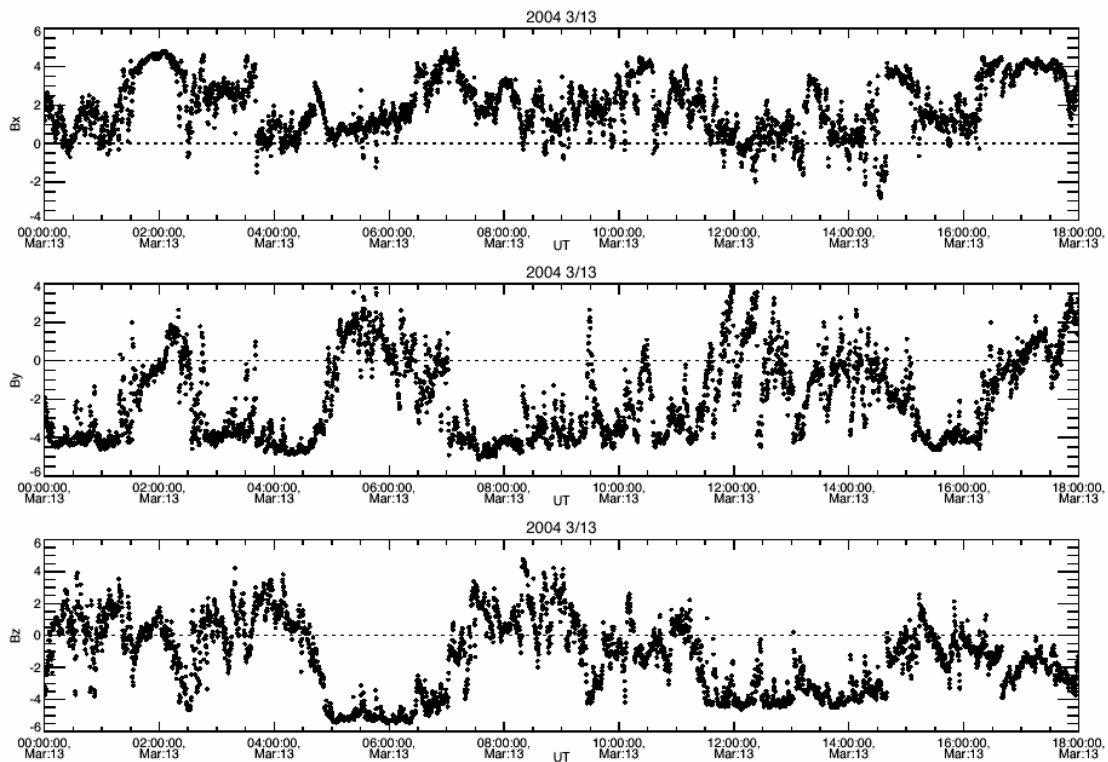


図 4-11 ACE 衛星の観測による 2004 年 3 月 13 日 0000 UT から 1800 UT の太陽風磁場 (nT)。上から順に Bx、By、Bz を表す。

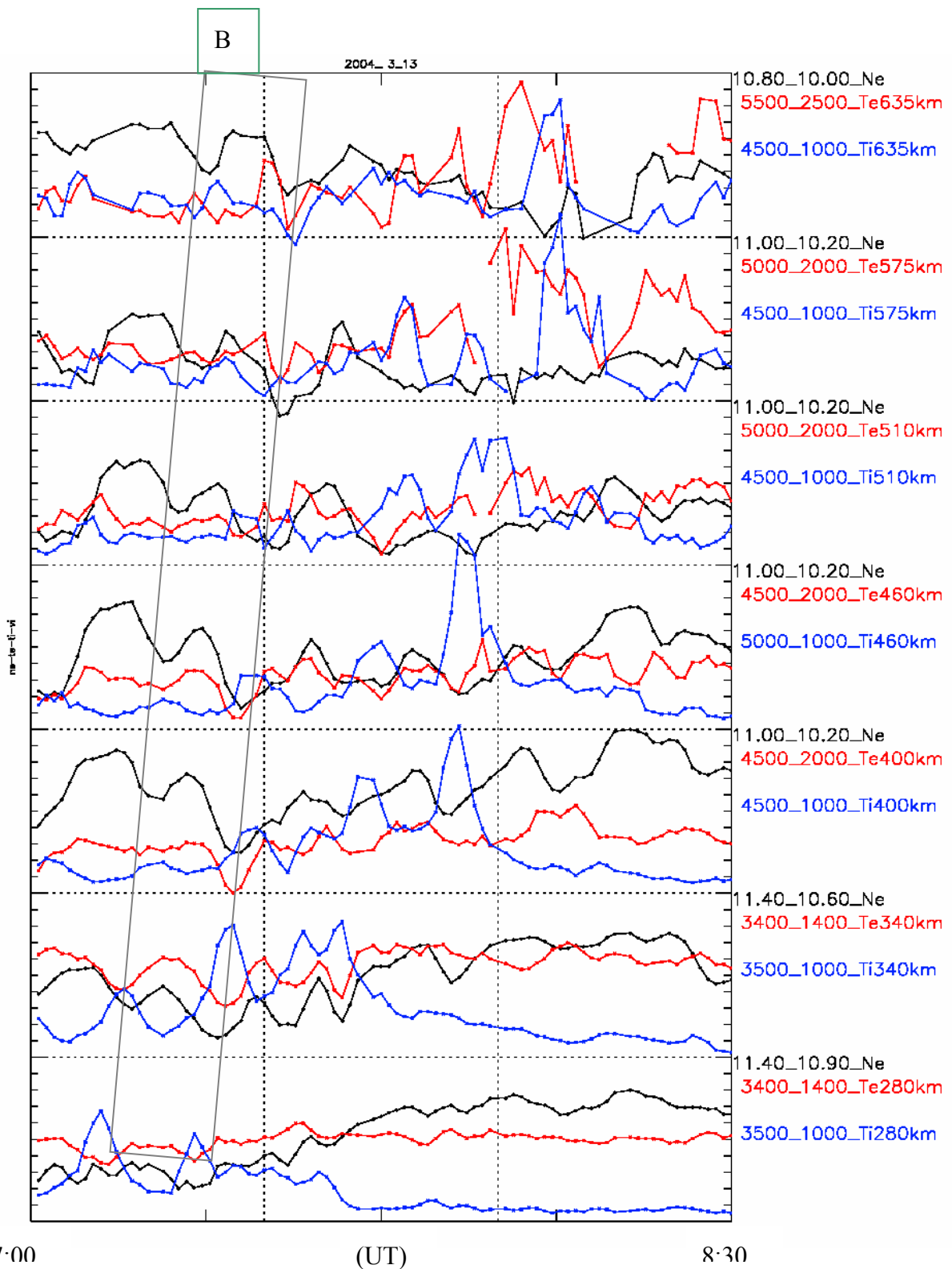


図 4-12 2004 年 3 月 13 日の VHF で 280 km から 635 km において観測した、各高度における物理パラメーター。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000 410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000K から 2000K の範囲で点線と点線の間に表示している)。B で示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

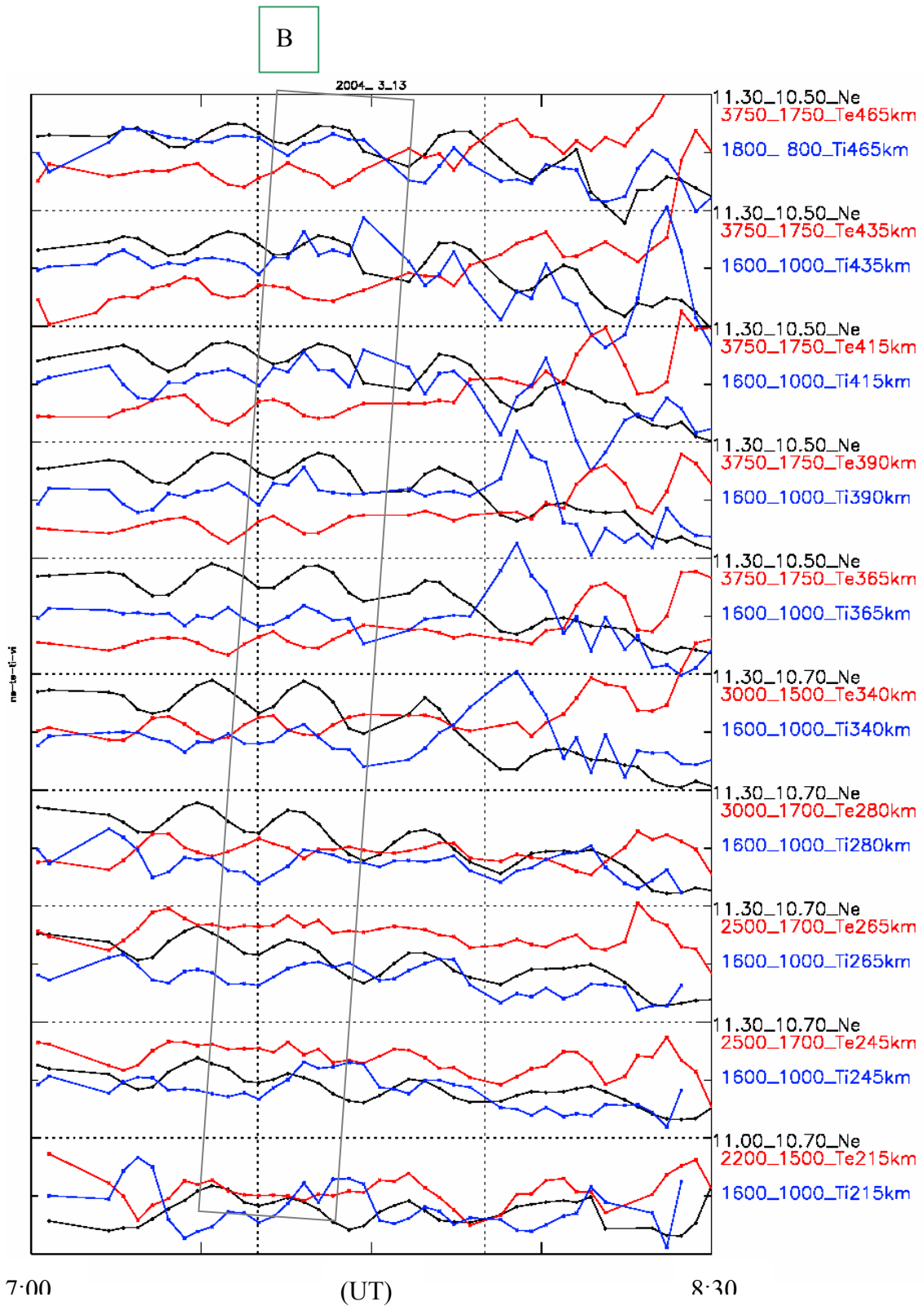


図 4-13 2004 年 3 月 13 日の ESR で 210 km から 465 km において観測した、各高度における物理パラメーター。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000 410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000 K から 2000 K の範囲で点線と点線の間に示している)。B で示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

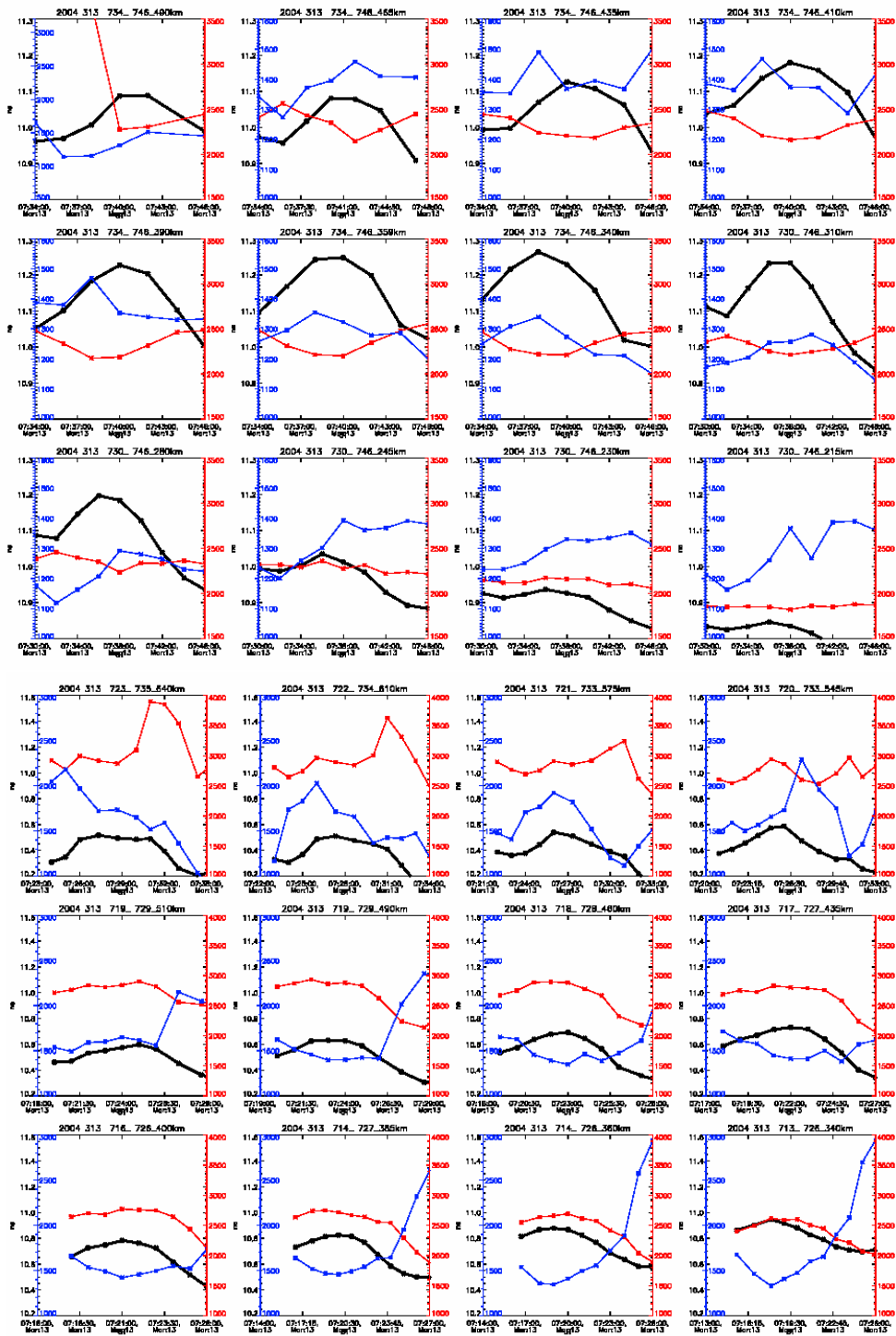


図 4-14 2003 年 3 月 13 日に 713UT から 746 UT において、ESR と VHF で観測された、高電子密度領域での高度ごとの電子密度(黒)、電子温度(赤)、イオン温度(青)の時間変動。各図の横軸はUT、縦軸は電子密度、電子温度、イオン温度に対応する。上側 12 個がESRの下側 12 個がVHFの観測結果を示す。イオン温度はVHFでは 1000 Kから 3000 K、ESRでは 1000Kから 1800K。電子温度はVHFでは 1000 Kから 4000 K、ESRでは 1500Kから 3500K電子密度はVHFでは $10^{10.2}$ から $10^{11.6} \text{ m}^{-3}$ ESRでは $10^{10.8}$ から $10^{11.3} \text{ m}^{-3}$ の範囲で示す。図 4-12、図 4-13 中にBで示した時間帯の移動性高電子密度領域を示す。

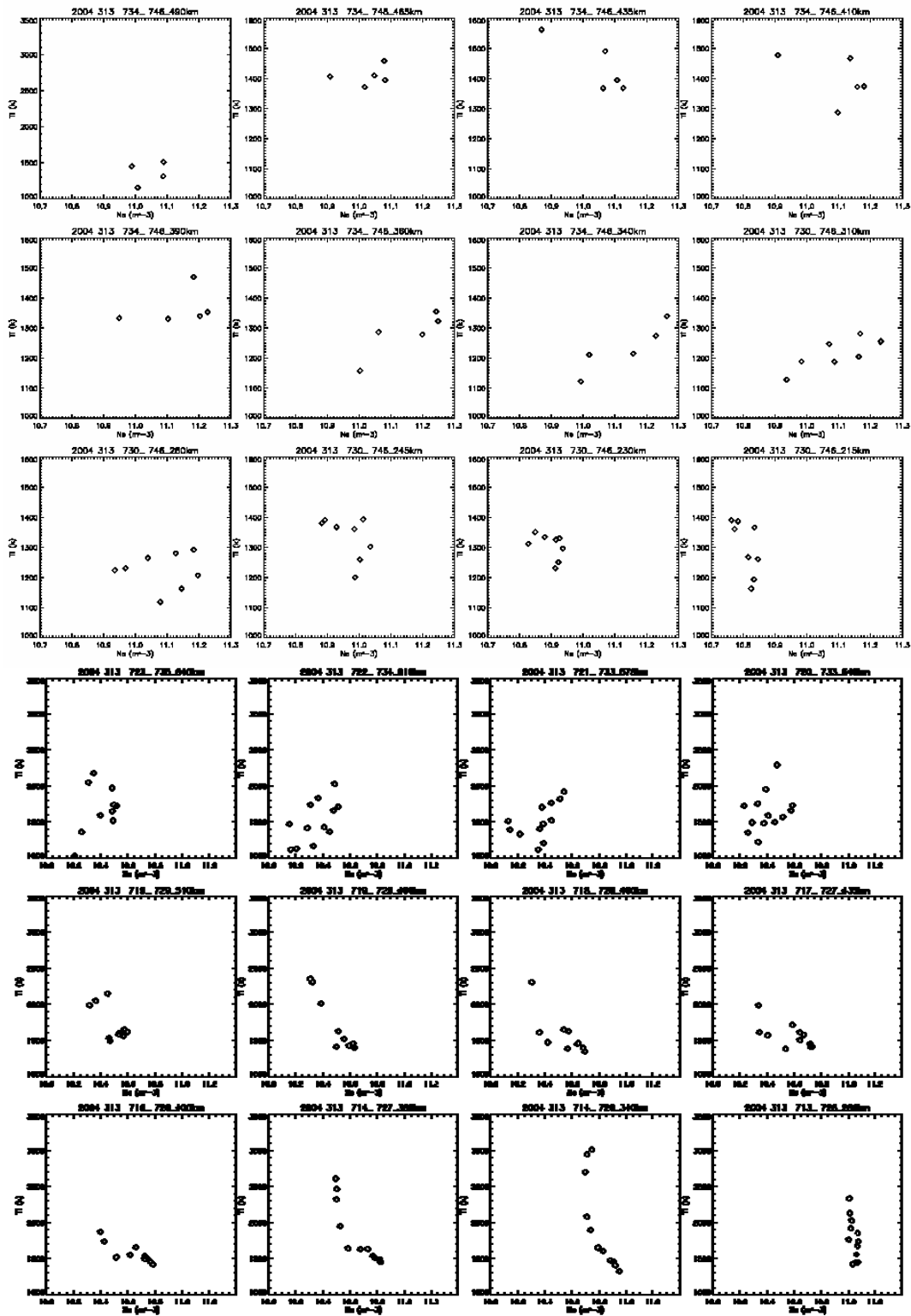


図 4-15 2004 年 3 月 13 日の 713 UT から 746 UT において ESR と VHF で観測された高電子密度領域内での高度ごとの電子密度とイオン温度の関係。

上側 12 個は ESR で、下側 4 個は VHF で観測されたものである。横軸を電子密度 (VHF では 10.0 m^{-3} から 11.3 m^{-3} では、ESR では 10.7 m^{-3} から 11.3 m^{-3})、縦軸をイオン温度 (VHF では 1000 K から 1600 K の範囲、ESR では 1000 K から 3500 K) にとる。

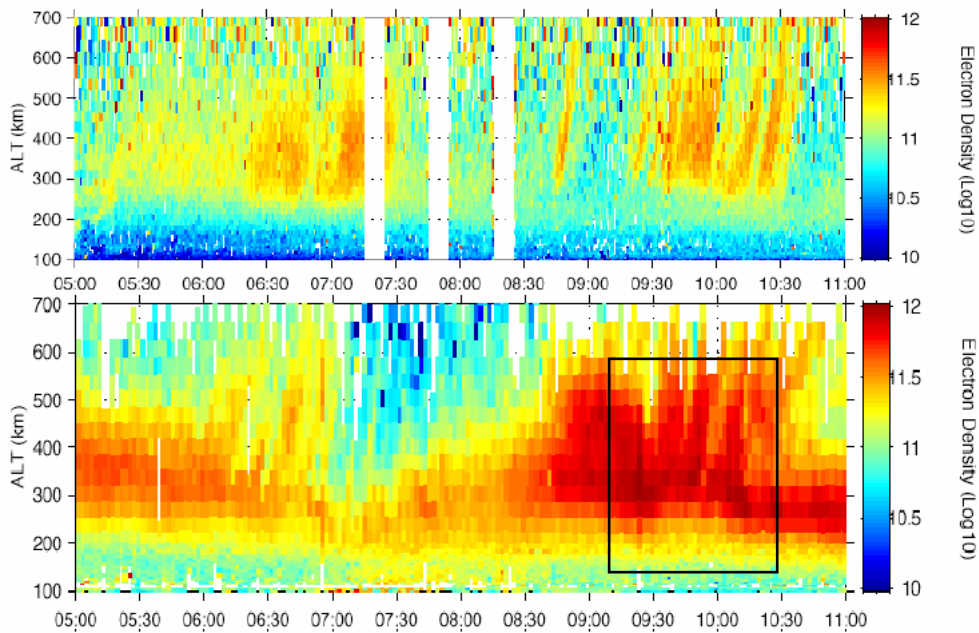


図 4-16-a 2003 年 3 年 27 日に EISCAT レーダーで観測された電子密度の時間変動。
 縦軸が高度、横軸が時間を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF の電子密度を示す。
 右横に電子密度のスケールを示す。黒色の四角で示した時間帯に移動性高電子密度領域が観測されている。

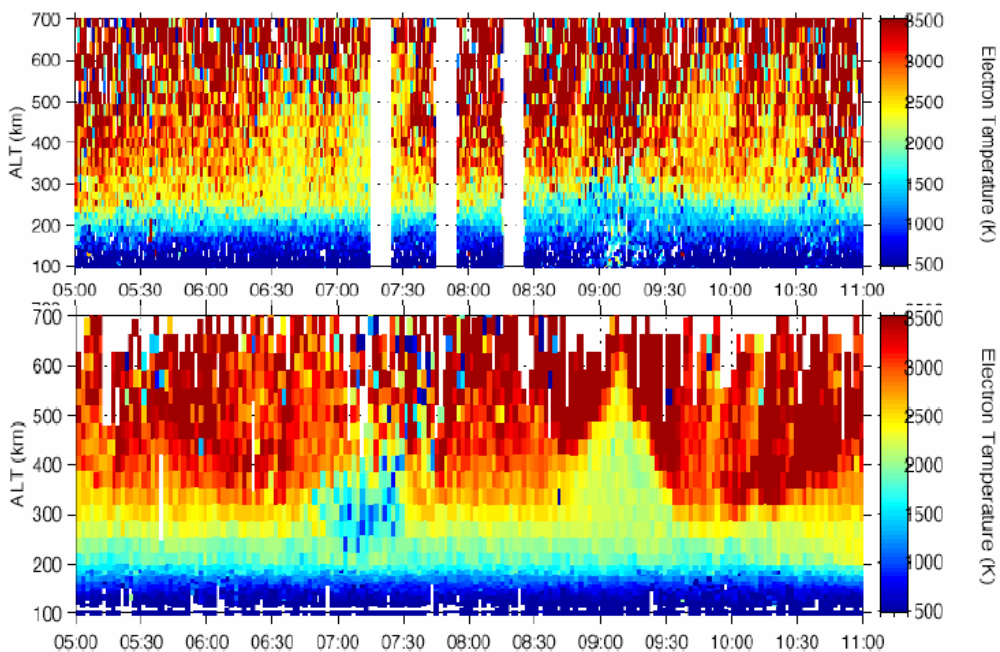


図 4-16-b 2003 年 3 年 27 日に EISCAT レーダーで観測された電子温度の時間変動。
 縦軸が高度、横軸が時間を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF の電子密度を示す。右横に電子温度のスケールを示す。

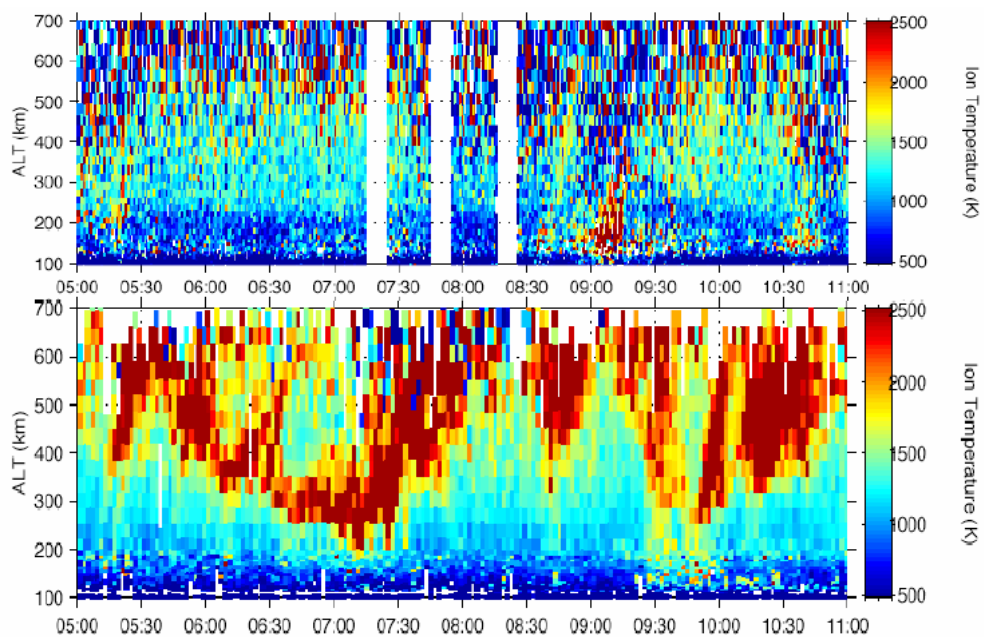


図 4-16-c 2003 年 3 月 27 日に EISCAT レーダーで観測されたイオン温度の時間変動。

縦軸が高度、横軸が時間を示す。上側の図は ESR、下側の図は VHF の電子密度を示す。右横に電子温度のスケールを示す。

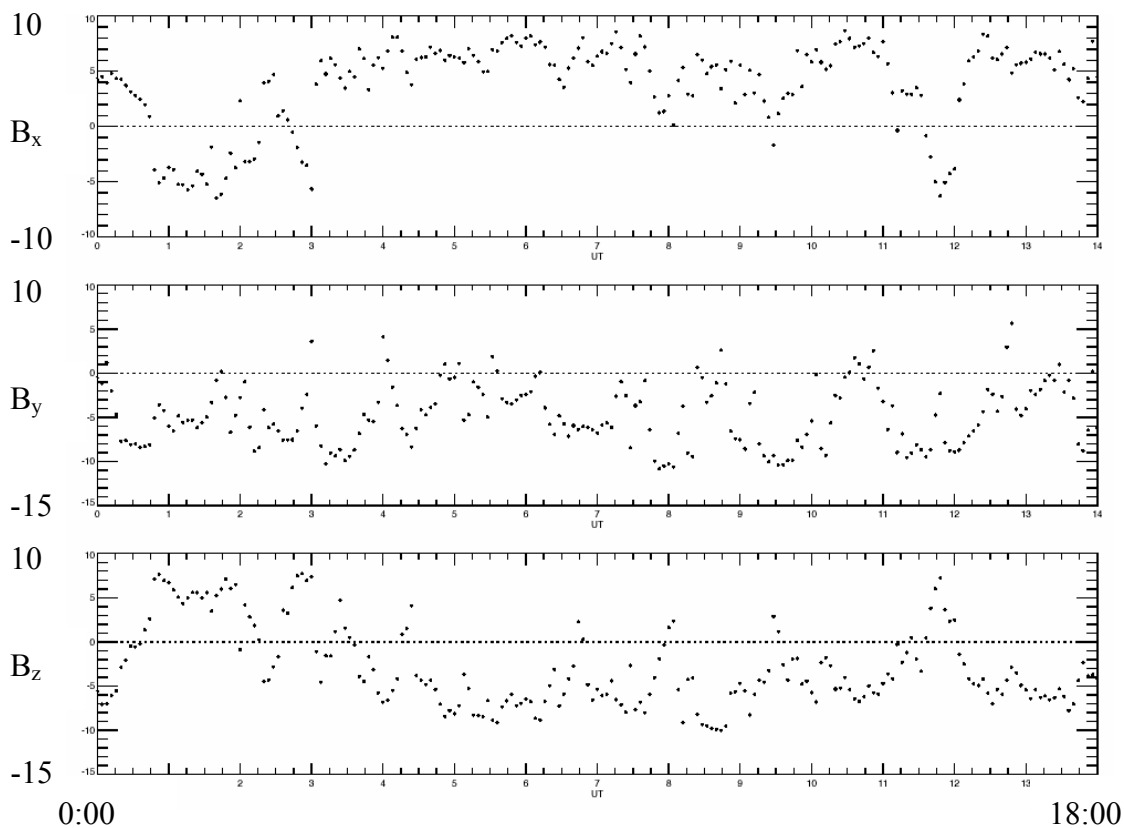


図 4-17 ACE 衛星の観測による 2003 年 3 月 27 日の 0000 UT から 1800 UT の太陽風磁場(nT)。

上から順に B_x 、 B_y 、 B_z を表す。

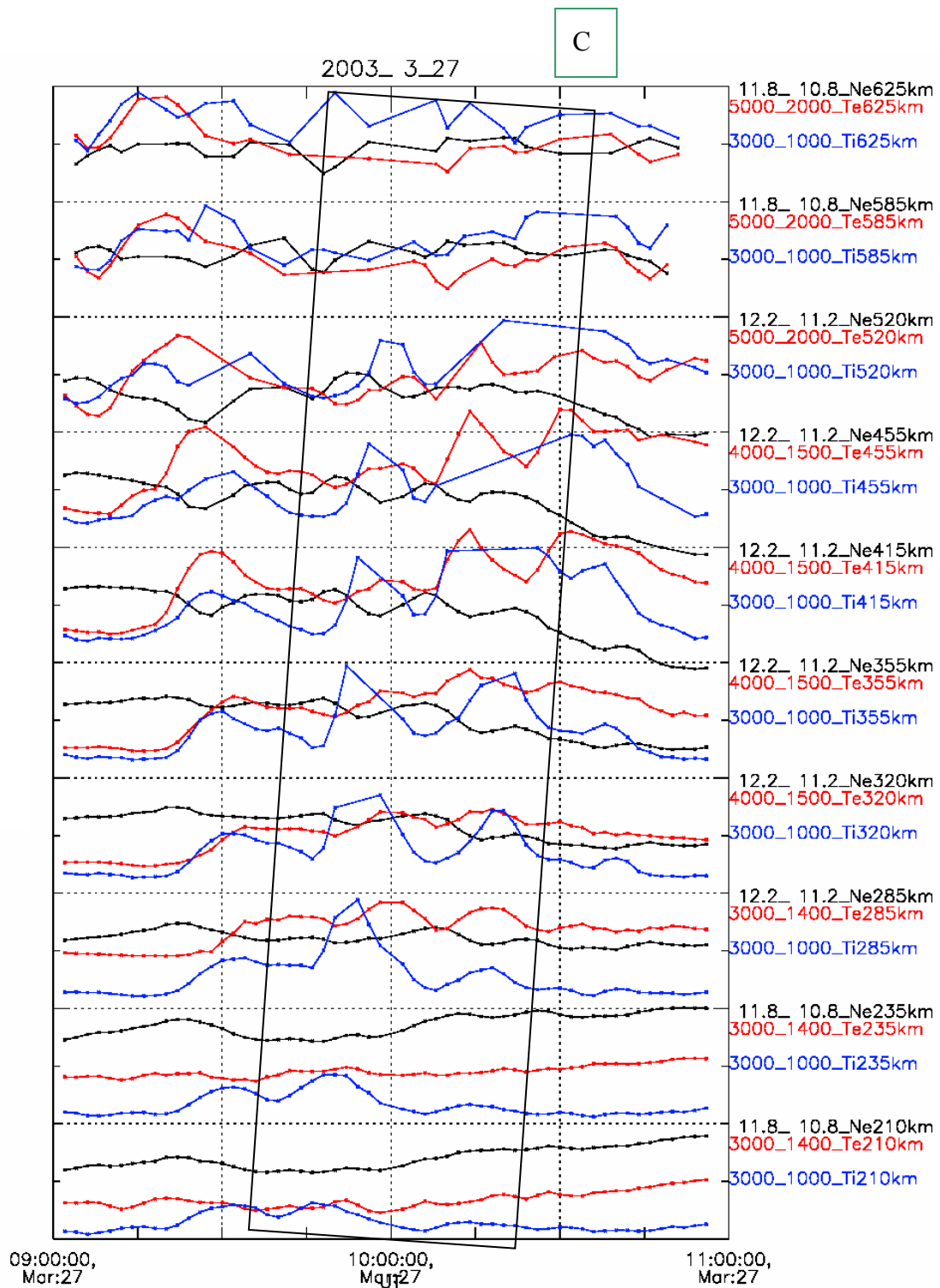


図 4-18 2003 年 3 月 27 日の VHF で 210 km から 625 km において観測した、各高度における物理パラメータ。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメータのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000 410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000K から 2000K の範囲で点線と点線の間に示している)。B で示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

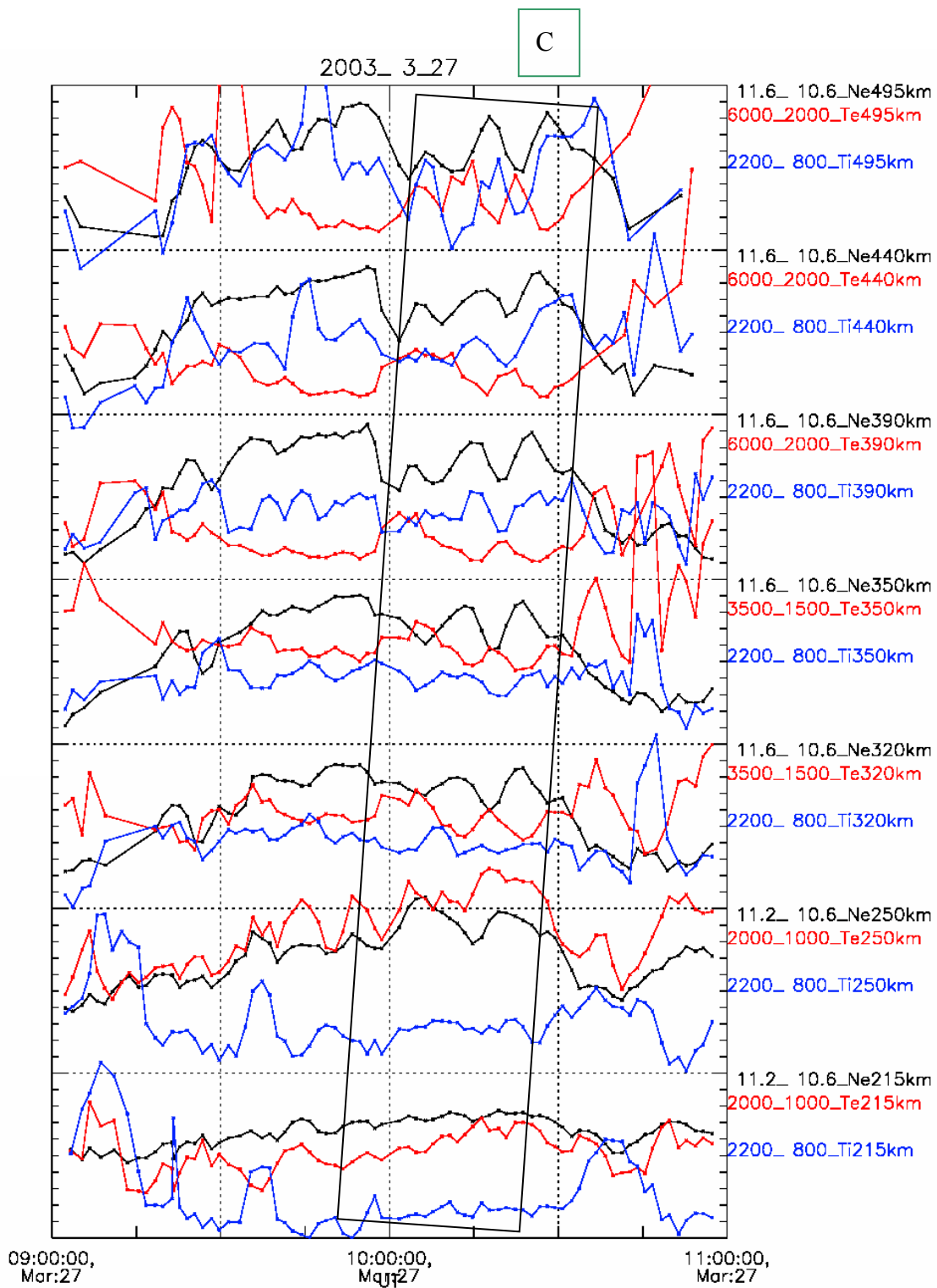


図 4-19 2004 年 3 月 13 日の ESR で 215 km から 495 km において観測した、各高度における物理パラメータ。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメータのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000 410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000K から 2000K の範囲で点線と点線の間に示している)。C で示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

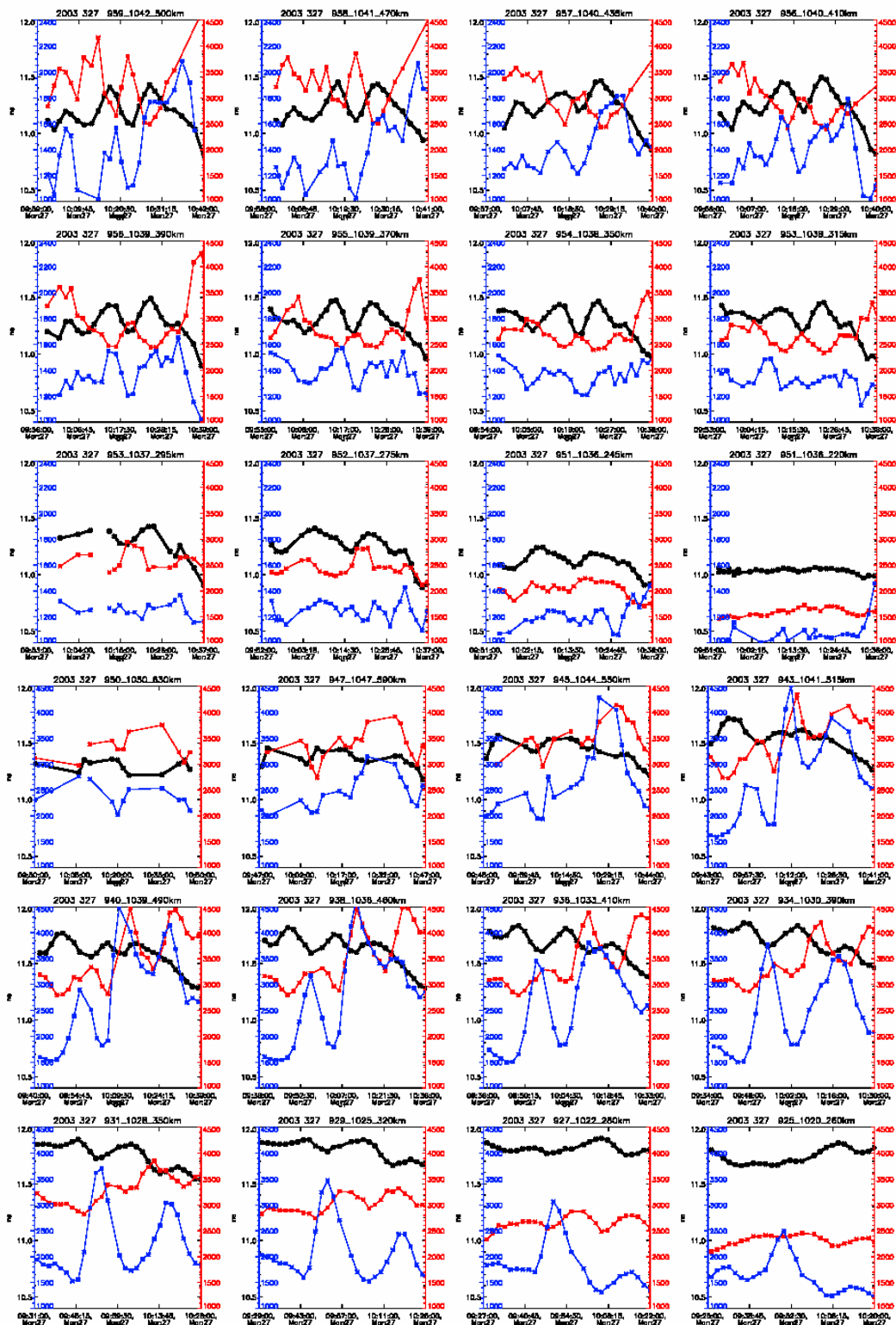


図 4-20 2003 年 3 月 27 日の 920UT から 1042 UT において、ESR と VHF で観測された、高電子密度領域の高度ごとの電子密度、電子温度、イオン温度の時間変動。各図の横軸は UT 縦軸は電子密度、電子温度、イオン温度に対応する。上側 12 個が ESR の下側 12 個が VHF の観測結果を示す。イオン温度は VHF では 1000 K から 4500 K、ESR では 1000 K から 2500 K。電子温度は VHF、ESR 共に 1000 K から 4500 K、電子密度は VHF、ESR 共に $10^{10.4}$ から $10^{12.0} \text{ m}^{-3}$ の範囲を示す。図 4-18、図 4-19 中に C で示した時間帯の移動性高電子密度領域を示す。

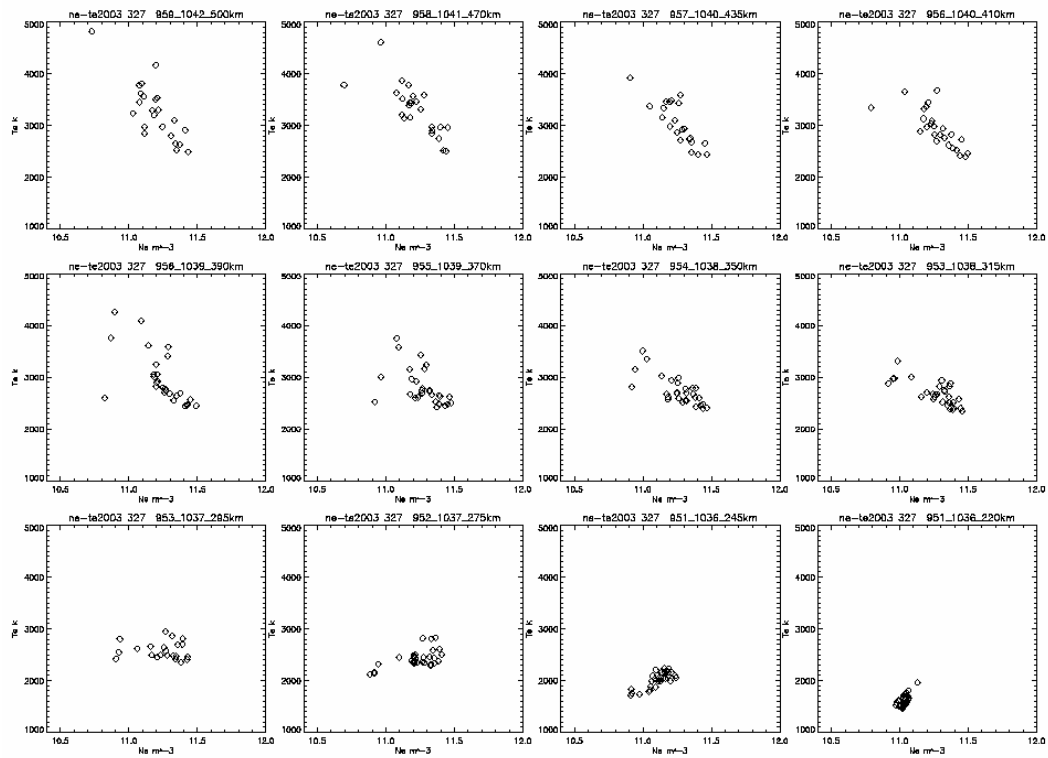


図 4-21 2003 年 3 月 27 日の 920UT から 1042 UT に
 高度ごとの電子密度と電子温度の関係。上側 12 個は
 軸を電子密度(10.4 m^{-3} から 12.0 m^{-3} の範囲)、縦軸を電
 子温度(1000 K から 5000 K の範囲)
 にとる

日付け	タイプ
2000年7月15日	タイプ4
2000年7月24日	タイプ4
2000年11月25日	タイプ1
2000年11月27日	タイプ1
2000年11月30日	タイプ1
2000年12月1日	タイプ1
2000年12月4日	タイプ1
2001年2月11日	タイプ2
2001年2月13日	タイプ2
2001年2月15日	タイプ2
2001年2月21日	タイプ1
2001年2月23日	タイプ2
2001年2月26日	タイプ2
2001年3月29日	タイプ2
2001年9月22日	タイプ2
2001年9月23日	タイプ2
2001年11月11日	タイプ2
2001年11月13日	タイプ1
2002年2月21日	タイプ2
2003年3月27日	タイプ3☆
2003年11月4日	タイプ1
2004年2月11日	タイプ1☆
2004年3月13日	タイプ3☆
2004年4月13日	タイプ4

表 4-1 ESR で観測された極方向へ移動する高電子密度領域のタイプ分け。

☆ 印は ESR と VHF で同一の高電子密度領域の移動を観測できたもの(3 例と)を示す。

ESR の領域のみで捉えられたイベント(21 例)を示す。

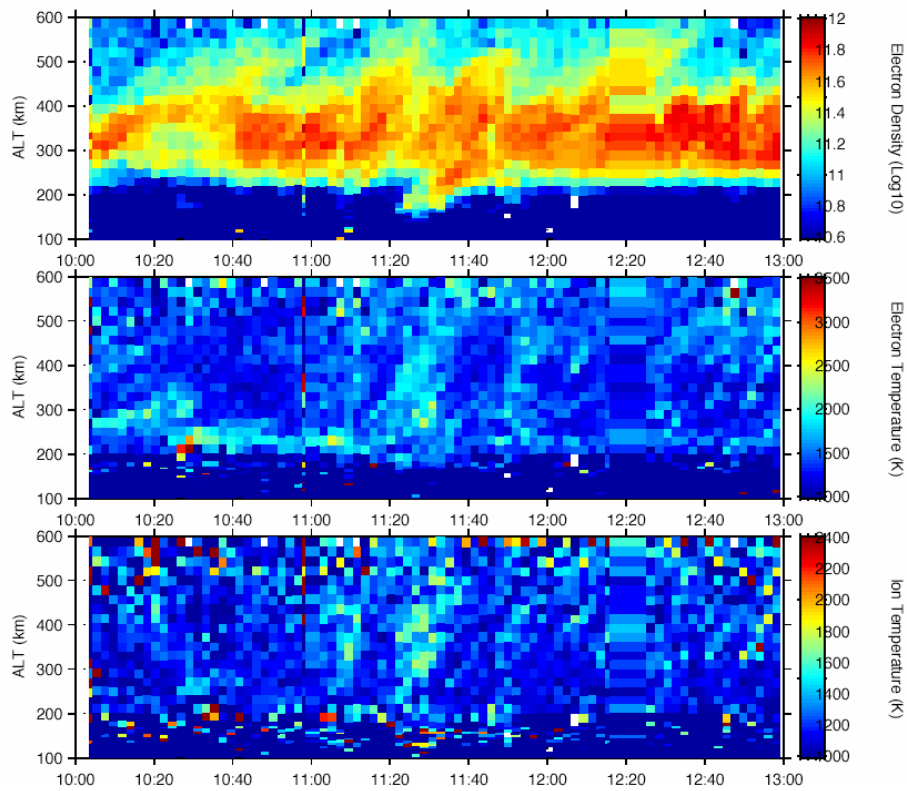


図 4-22 2001 年 11 月 13 日に EISCAT ESR レーダーで観測された電子密度の時間変動。上から順に電子密度、電子温度、イオン温度を示す。

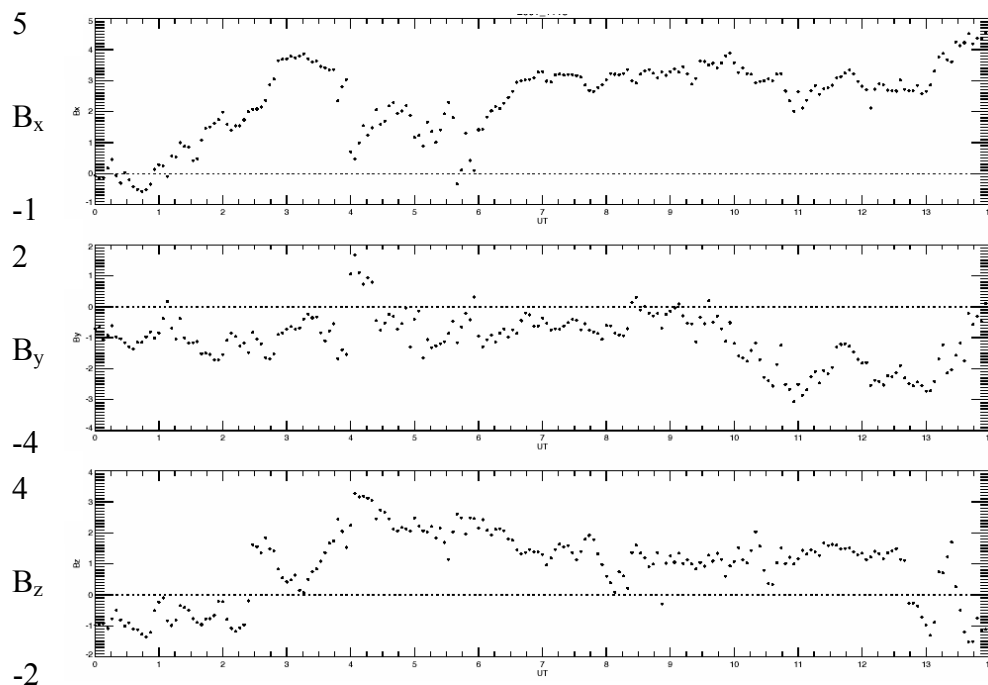


図 4-23 ACE 衛星の観測による 2001 年 11 月 13 日の太陽風磁場 (nT)。上から順に B_x 、 B_y 、 B_z を表す。

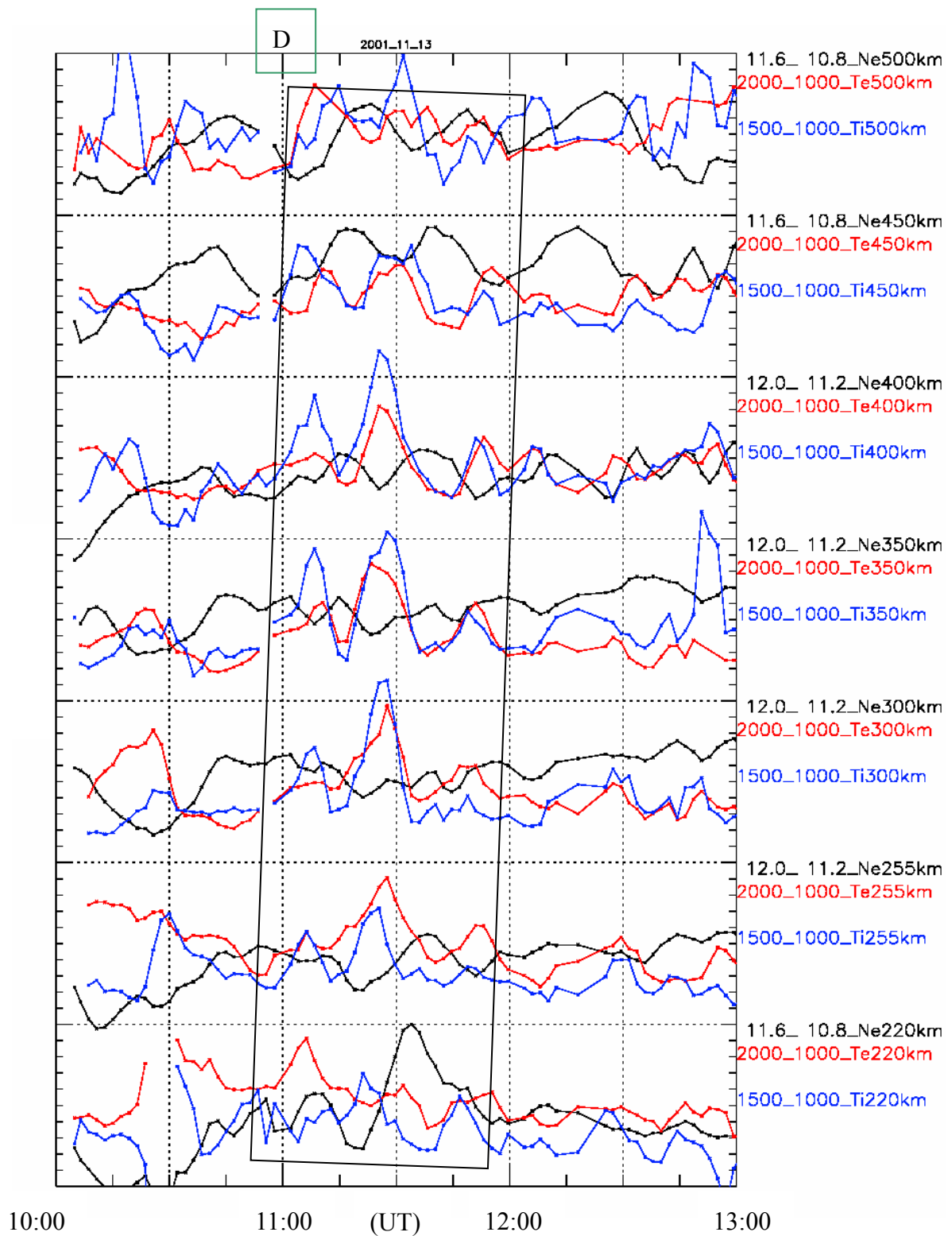


図4-24 2001年11月13日にESRで220 kmから500 kmにおいて観測した、各高度における物理パラメーター。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で4000_2000 410 kmとあれば、高度410kmにおける電子温度を4000Kから2000Kの範囲で点線と点線の間に示している)。Dで示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

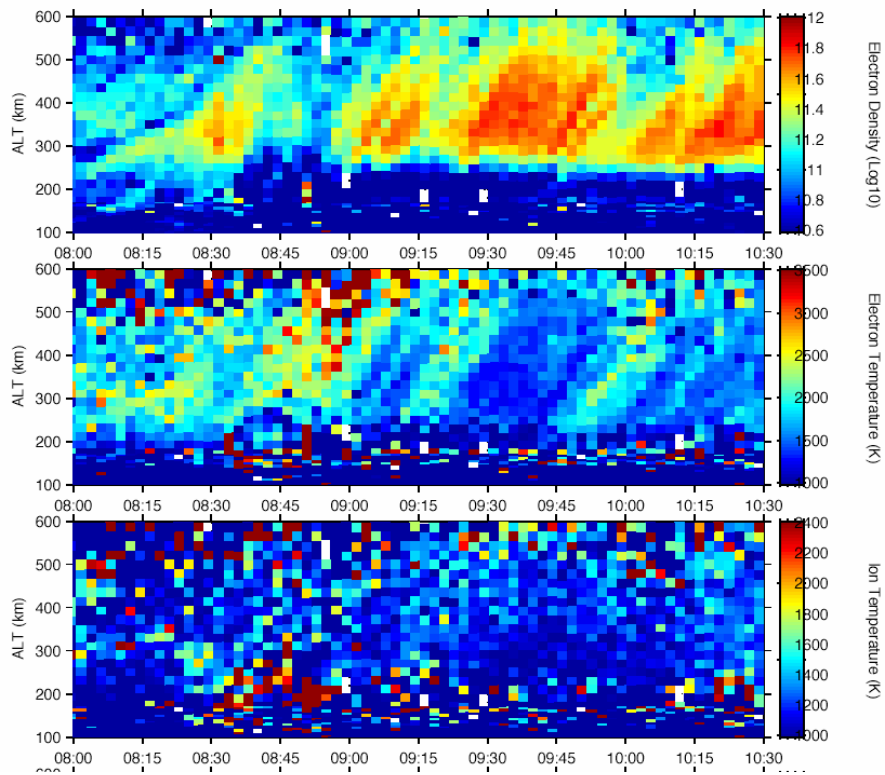


図 4-25 2001 年 2 月 15 日に EISCAT ESR レーダーで観測された電子密度の時間変動。
上から順に電子密度、電子温度、イオン温度を示す。

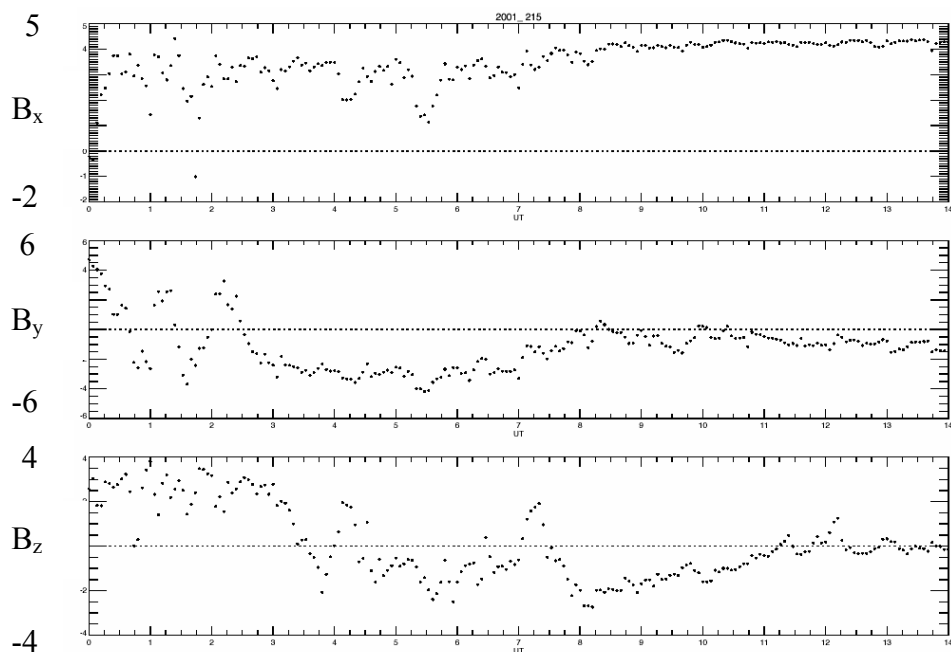


図 4-26 ACE 衛星の観測による 2001 年 2 月 15 日の太陽風磁場 (nT)。
上から順に B_x 、 B_y 、 B_z を表す。

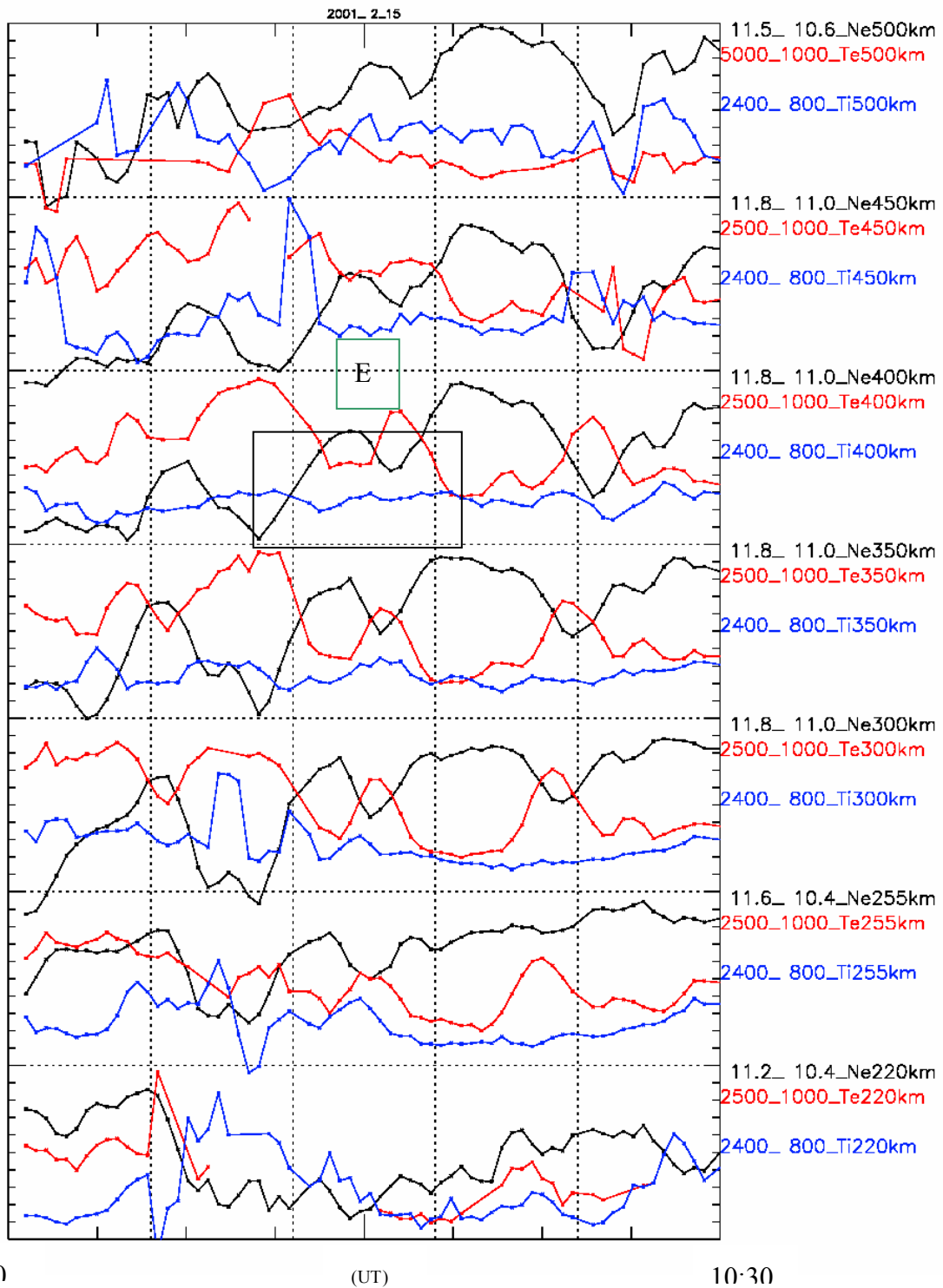


図 4-27 2001 年 2 月 15 日に ESR で 220 km から 500km において観測した、各高度における物理パラメーター。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000 410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000K から 2000K の範囲で点線と点線の間に表示している)。

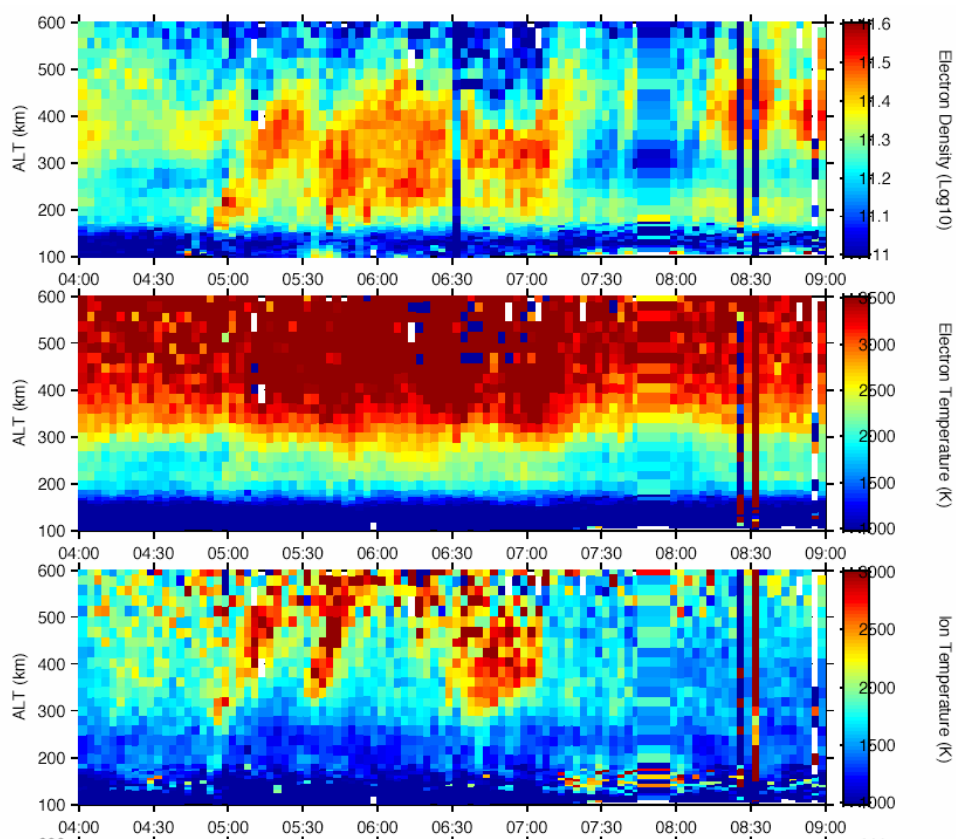


図 4-28 2000 年 7 月 15 日に EISCAT ESR レーダーで観測された電子密度の時間変動。上から順に電子密度、電子温度、イオン温度を示す。

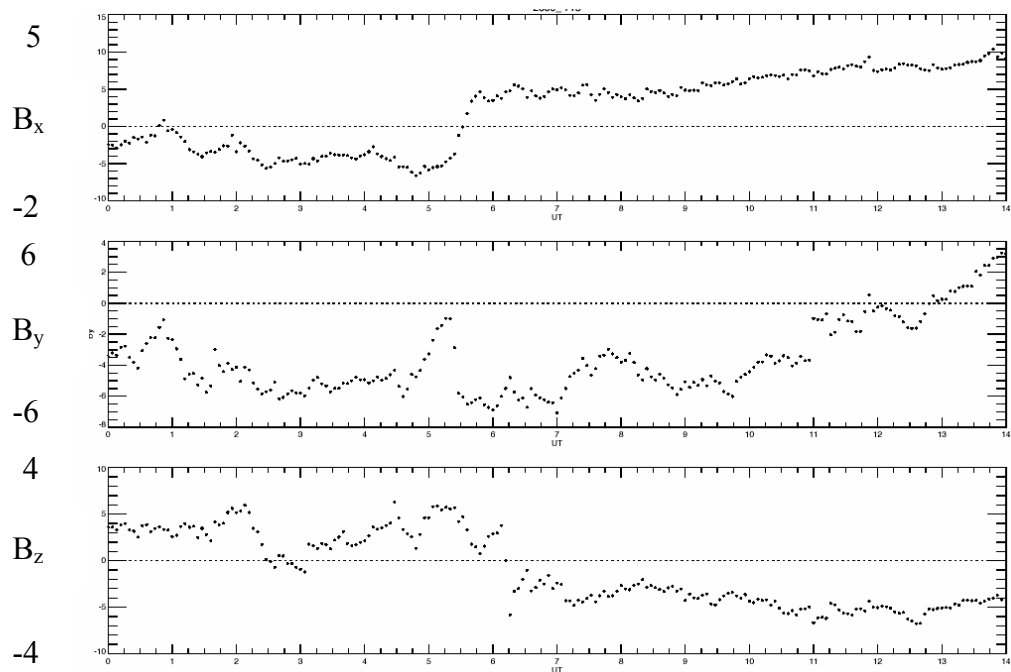


図 4-29 ACE 衛星の観測による 2000 年 7 月 15 日の太陽風磁場 (nT)。上から順に B_x 、 B_y 、 B_z を表す。

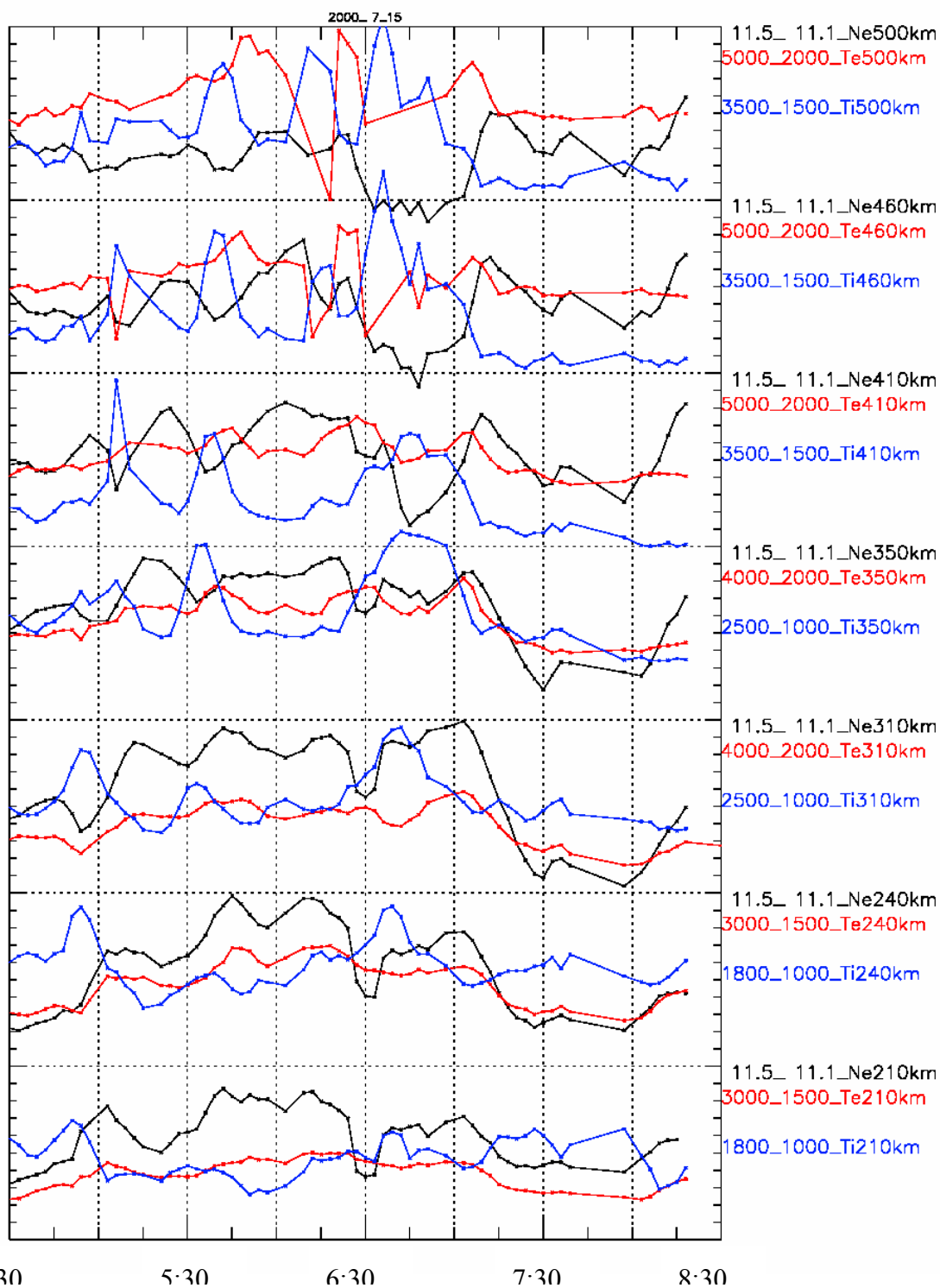


図 4-30 2000 年 7 月 15 日に ESR で 210 km から 500 km において観測した、各高度における物理パラメーター。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で 4000_2000 410 km とあれば、高度 410km における電子温度を 4000K から 2000K の範囲で点線と点線の間に示している)。

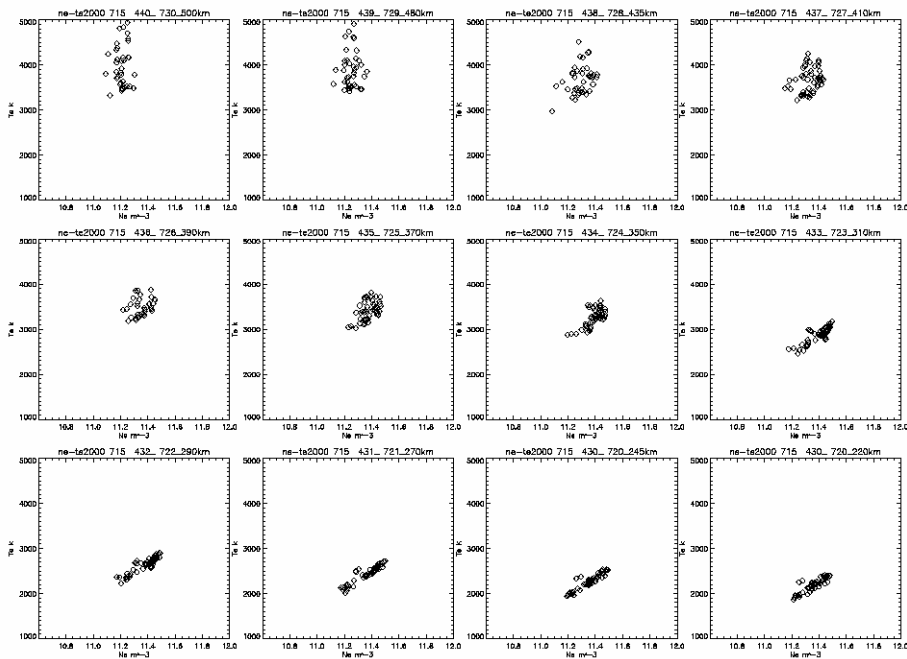


図 4-31 2000 年 7 月 15 日においてESRで観測された高電子密度領域内での高度ごとの電子密度と電子温度の関係。横軸を電子密度 (m^{-3})、縦軸を電子温度 (K) にとる。横軸を電子密度(10.6 m^{-3} から 12.0 m^{-3} の範囲)、縦軸を電子温度(1000 Kから 5000 Kの範囲)にとる。

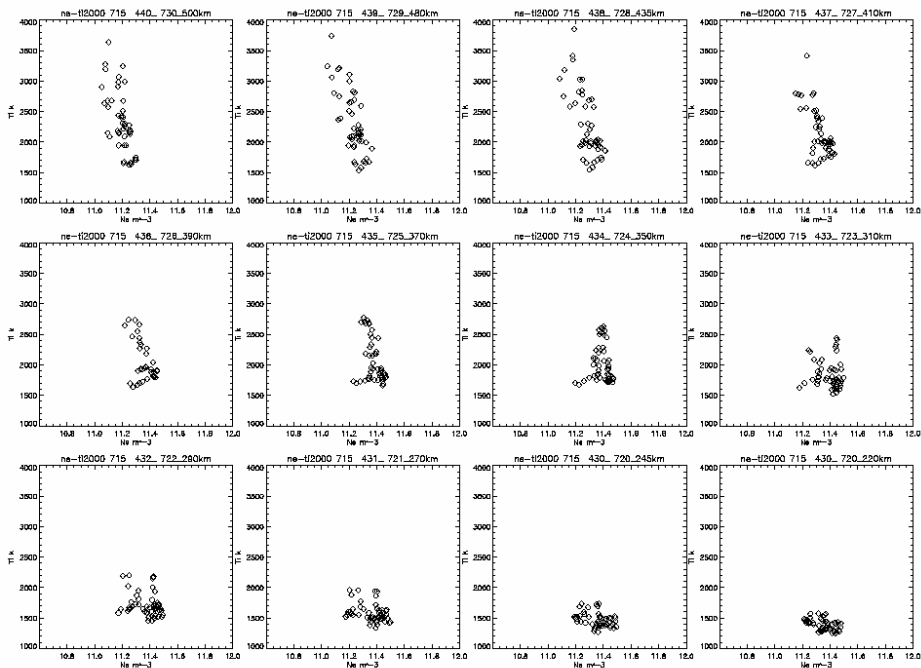


図 4-32 2000 年 7 月 15 日においてESRで観測された高電子密度領域内での高度ごとの電子密度とイオン温度の関係。電子密度領域内での高度ごとの電子密度と電子温度の関係。横軸を電子密度 (m^{-3})、縦軸をイオン温度 (K) にとる。横軸を電子密度(10.6 m^{-3} から 12.0 m^{-3} の範囲)、縦軸を電子温度(1000 Kから 4000 Kの範囲)にとる。

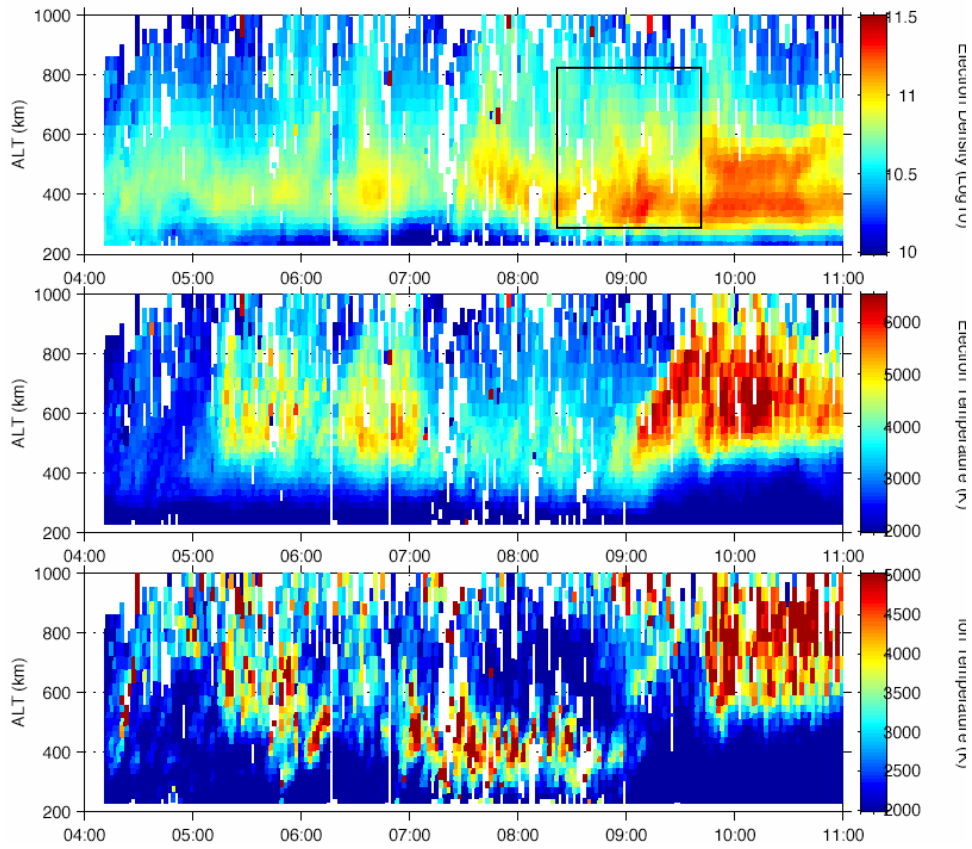


図 4-33 2000 年 11 月 27 日に EISCAT ESR レーダーで観測された電子密度の時間変動。上から順に電子密度、電子温度、イオン温度を示す。

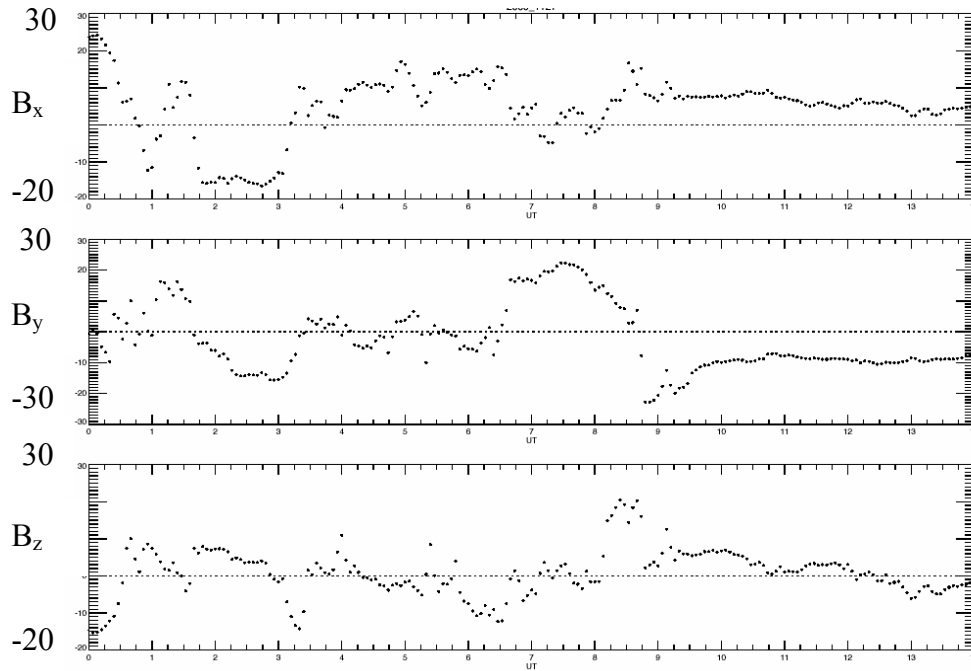


図 4-34 ACE 衛星の観測による 2000 年 11 月 27 日の太陽風磁場。

上から順に B_x 、 B_y 、 B_z を表す。

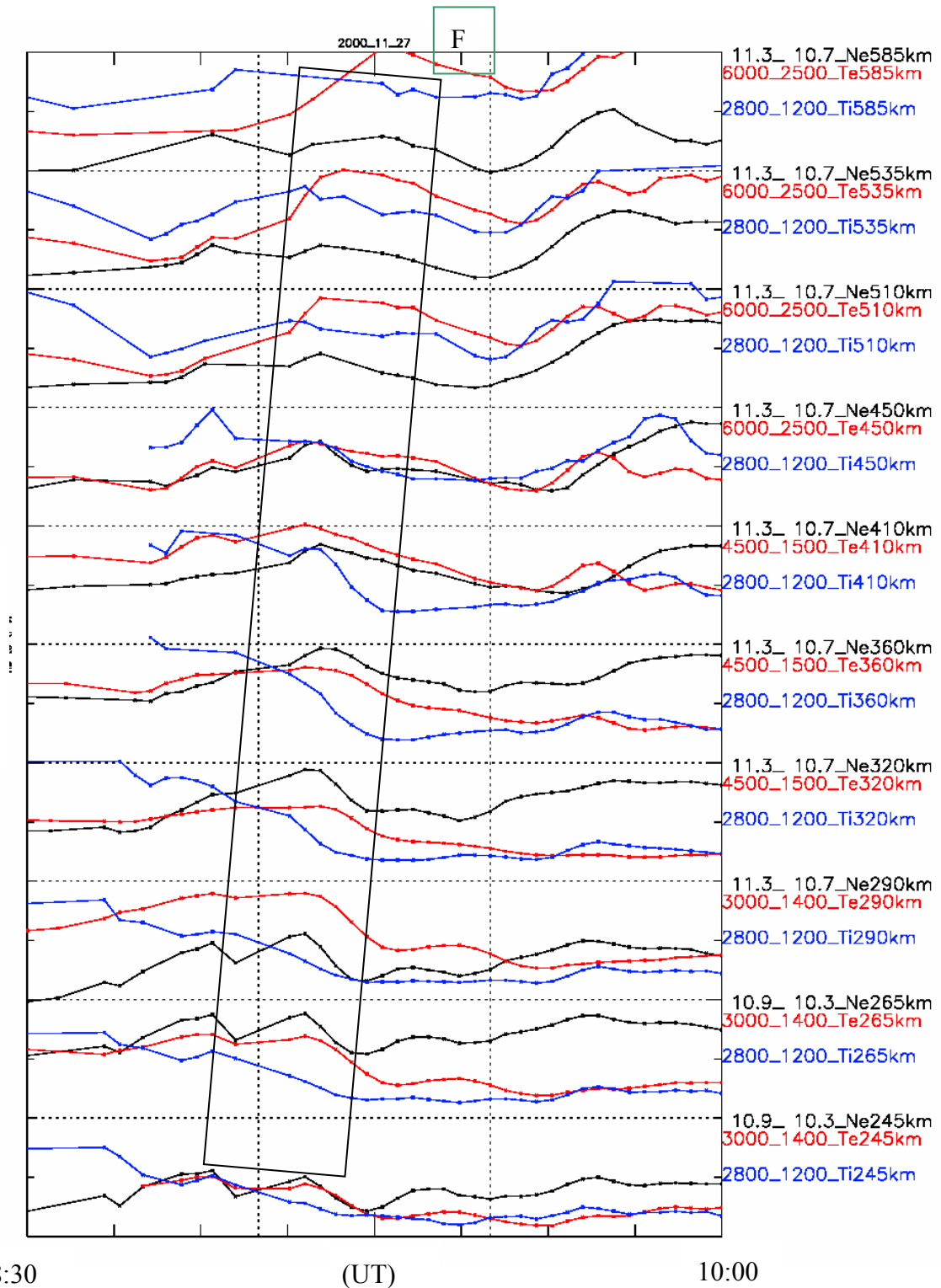


図4-35 2000年 11月 27日にVHFで245 kmから585 kmにおいて観測した、各高度における物理パラメーター。横軸 UT。縦軸に電子密度を黒線で、電子温度を赤線で、イオン温度を青線で示している。右側にある数字はそれぞれのパラメーターのプロットした範囲を示している(赤色で4000_2000 410 kmとあれば、高度410 kmにおける電子温度を4000Kから2000Kの範囲で点線と点線の間に示している)。Fで示した時間帯に注目する移動性高電子密度領域がある。

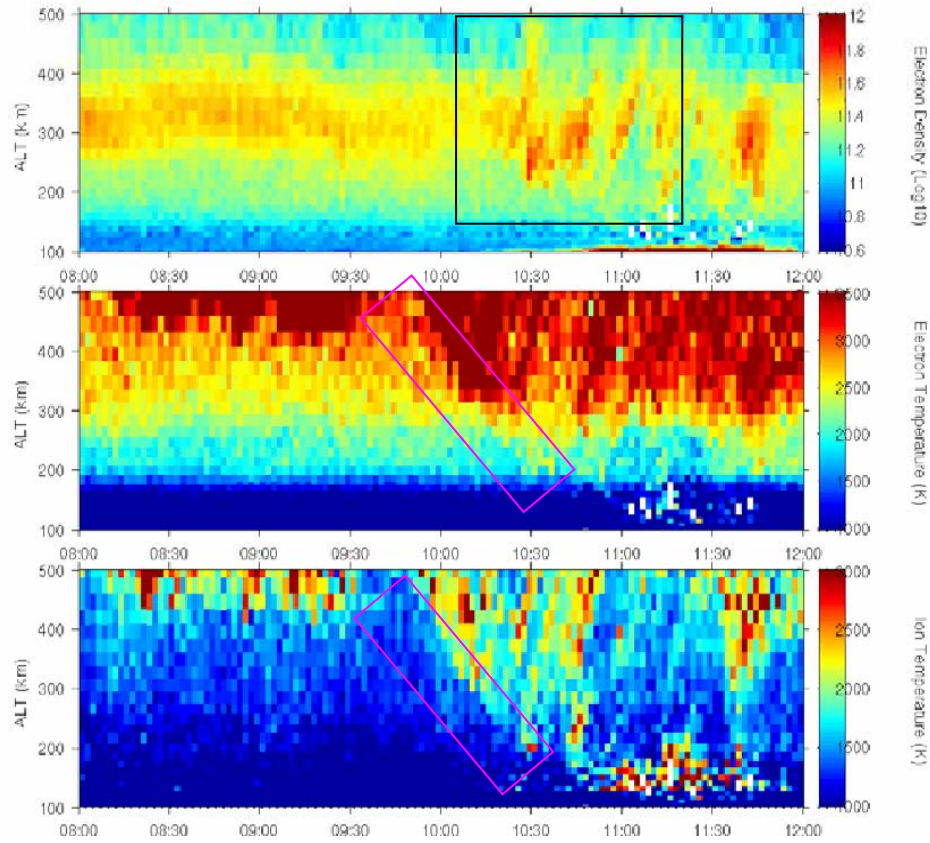


図 4-36 2003 年 5 月 28 日に EISCAT ESR レーダーで観測された電子密度の時間変動。上から順に電子密度、電子温度、イオン温度を示す。黒色の四角で示した時間帯に移動性高電子密度領域がみとれる。ピンクで示した緯度より高緯度で電子温度、及びイオン温度が上昇している。

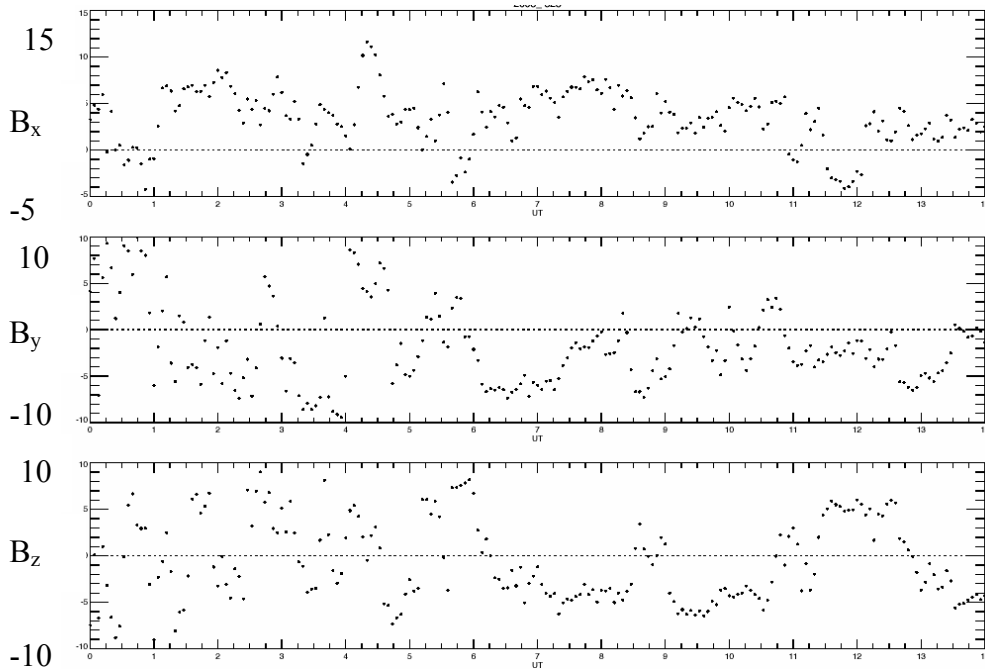


図 4-37 ACE 衛星の観測による 2003 年 5 月 28 日の太陽風磁場 (nT)。

上から順に B_x 、 B_y 、 B_z を表す。

第5章 まとめと考察

5-1 まとめ

昼間側磁気圏境界面で生じる磁気再結合に伴い、Flux Transfer Event (FTE)や Poleward Moving Auroral Form (PMAF) と呼ばれる現象が起こっていると考えられている。しかしながら PMAF の物理過程を解明する上で重要となる PMAF の生成機構即ち PMAF の内部およびその周辺における粒子の降り込みやその維持機構、PMAF の電磁気的特性即ちプラズマの運動、沿磁力線電流と電離圏クローザー電流からなる3次元電流系の分布と挙動等は明らかになっていない。本研究では、カスプ領域周辺を観測するのに適した EISCAT VHF レーダーと極冠域内部を観測するのに適した EISCAT Svalbard レーダーが、一つの高電子密度領域 (PMAF と同じ現象であると考えられている)を生成から移動までの広い領域で捉えている現象を基に、さらに VHF が単独で高電子密度領域が生成され移動を始めるところを捉えている現象や、ESR が単独で高電子密度領域が極冠域を移動しているところを捉えている現象を加え研究を行った。特に高電子密度領域内部及び周辺におけるソフトな電子の指標である電子温度とプラズマ速度則ち電場の指標になるイオン温度($E \times B$ ドリフト)の時間空間分布に注目し研究を行なった。その結果、高電子密度領域が生成された時とそれが極冠域内を移動していく時では異なる性質を示す事が今回新たに分かった。

- (1) VHF のデータから、高電子密度領域が発生した領域やその領域が動きはじめるカスプ付近では、大部分の例で高電子密度領域内部でソフトな電子の降り込みを示す電子温度の上昇が見られた。しかし ESR のデータから、極冠域の内部に移動した後は、高電子密度領域内部にソフトな電子の降り込みの徴候は見られず、逆に電子温度はその領域の外部の温度より低くなるというクーリング効果が見られた。これは高電子密度領域が移動するにつれて、(高電子密度領域は維持されているが)電子の降り込みが減少、もしくは無くなることを示唆している。
- (2) 高電子密度領域内部・近傍のイオンの運動については、運動の基となる電場の強度と深く関連するイオン温度を用いて調べた結果、高電子密度領域が発生した段階及びその直後においては、高電子密度領域またはその近傍の限られた領域で、イオン温度(等価的にイオン速度、電場強度)はそれ以外の領域に比べて有意に上昇していた。一方、高電子密度領域が極冠域内に移動してくると、イオン温度の上昇の度合いは(生成時に比べて)小さくなり、高電子密度領域・近傍とそれ以

外の領域におけるイオン温度との差は小さくなり、より一様なイオン温度(等価的にイオン速度、電場強度)が観測された。即ち高電子密度領域の生成時および直後は、局所的なリコネクションが起きている領域のみでイオン温度(イオン速度、電場)の上昇が見られるが、高電子密度領域が極冠域に移動していくに従い、イオン温度は一様(電場が極冠内で一様)になる傾向が見られた。

- (3) 上記のように、高電子密度領域の生成・維持機構と電磁気特性双方とも、カスプ付近で生成された直後と移動してきた極冠域の内部では大きく異なることが観測から明らかになった。

5-2 考察

5-2-1 カスプ付近及び極冠域における高電子密度領域とソフトな電子の降り込みの時間空間関係

カスプ領域周辺において生成され極方向に移動を開始した高電子密度領域の内部の電子温度は、高電子密度領域の外部の電子温度に比べて有意な上昇を示した。F領域における電子温度の局所的な上昇が、以下に述べるように比較的低いエネルギーを持つ電子の降下により生じることから、この観測事実は、周辺よりも高い高電子密度領域の電子密度は、カスプ周辺に磁力線を通してつながる昼間側磁気圏境界面、太陽風、ないしローブ高緯度(マントル等)からの電子の降込みにより作られ維持されていることを示している。

電子温度と粒子の降込みとの関係は以下のようなものである。磁気圏から電離圏へ降り込んできた電子は、中性粒子と弾性・非弾性衝突するだけでなく、電離圏を構成する電子およびイオンとクーロン衝突を行ないエネルギーを失う。このクーロン衝突は、特に F 領域以高の電離圏で重要となる。クーロン衝突の特性として、衝突しあう2つの荷電粒子の質量差が大きい場合は相互作用は小さく、同じ質量の時に最も相互作用が大きくなる。即ち電離圏電子に対しては、質量の大きく異なるイオンではなく同じ質量をもつ降下電子とより強く運動量およびエネルギーを交換しあうことになる。またクーロン衝突のもう一つの特性として、通常の中性粒子間の衝突とは異なり、相対速度が小さいほど、荷電粒子間の相互作用が大きくなる。すなわちよりソフトな電子ほど電離圏の電子にエネルギーを与えやすくなる。以上のように、電子温度の上昇は、磁気圏からの比較的低いエネルギーをもつ電子降下量に比例することになり、本研

究で用いたように電子温度は降下電子の良い指標となる。

一方、極冠域の内部に移動した高電子密度領域では、電子密度の増大に逆比例して電子温度は減少し、周囲のプラズマ中の電子温度より低くなっており(約200 Kから600 K)、高電子密度領域内で電子の冷却が起きている。この観測事実は、高電子密度領域が、生成された場所を離れて極冠域内部に移動してきた段階では、高電子密度領域の内部では降下電子による電子温度の上昇は見られない、即ち内部には電子の有意な降込みは見られない、少なくとも高電子密度領域の外側と同等な降込みしかない、ということの意味している。このように積極的な電離源のない高電子密度領域は、再結合過程により徐々に消滅していくが、日陰等の条件が有る場合は再結合過程の進行は十分に遅くなり、領域は高電子密度を保ちながら極冠域を電場ドリフトにより移動することが可能になる。

この物理過程を磁気リコネクション過程と関連づけた解釈の一つは以下のものである。図 5-1 はLockwood *et al.* [1993]のFTEのモデルの図である。昼間側境界面で太陽風の南向き磁場と北向き地球磁場が結合し、強くねじれた磁力線により囲まれる領域(FTEを記された領域で北半球側と南半球側双方に移動する)が生じている。磁力線は垂直の方向に $B^2/2\mu_0$ の圧力を受けると同時にその長さの方向に $B^2/2\mu_0$ の張力を持つので、磁力線をねじれさせるためには張力に対抗して曲げる力とそれを保つエネルギーが必要となる。このねじれに伴うエネルギーはリコネクションが生じた場所とそれが太陽風に引きずられて極側に移動する限られた領域で開放され、粒子の熱エネルギーや運動エネルギーに変換される。これらの粒子のうち沿磁力線方向に加速された粒子は電離圏高度にまで降下することができ、中性大気と衝突して電子密度を上昇させる。この過程が、高電子密度領域が生成された時とその直後に領域内部に電子の降込みがあること(電子の降込みにより高電子密度領域が生成されること)に対応すると考えられる。それ以後の磁力線(例えば図中で○と記された磁力線)はねじれが解消されるため、磁気エネルギーから粒子エネルギーへの変換は無くなる。その場合も、磁力線上にはプラズマ粒子があり磁力線に沿ってバウンスングを行なうが、その多くはミラーポイントで反射され太陽風の中に戻ってってしまうため、電離圏の電離はほとんど行なわれない。この過程は高電子密度領域が極冠域内部を移動している時には領域内部に有意な電子降下がみられないことに対応すると考えられる。

極冠域内部における高電子密度領域内の電子温度の冷却の物理機構としては、電子密度と電子温度が逆相関を示していた領域での電子温度が、同じ季節、同じ緯度、同じ高度の電子温度より低いこと等から、1-7 節で解説した、電子とイオンのクーロン

衝突による電子のクーリングの効果のため電子温度が減少していると考えられる。

第4章で取り上げたイベントの中で、2003年3月27日VHFの観測例(VHFとESRが同時に観測しているイベント)は唯一、高電子密度領域発生時に、上記の説明とは異なり、電子密度の増加に対して電子温度が上昇せず逆に低下した。この逆相関の理由として、可能性の一つは、高電子密度領域の移動が始まった緯度がVHFで観測できる領域より低緯度にある発生時が見えていないという可能性である。それに伴い電子密度と電子温度の関係が相関から逆相関に切り替わる領域も、VHFで観測できる領域よりも低緯度にあった可能性があげられる。もう一つの説明として以下のような可能性がある。2003年3月27日のイベントは、他の例と異なり高電子密度領域の極方向への移動現象が日照中に起きている。日照があると背景の電子密度は上昇するが、電子とイオンのクーロン衝突周波数は $\nu_{ei} = [34 + 4.18 \ln(T_e^3/n_e)] n_e T_e^{-3/2}$ (s^{-1}) [page 463 of Kelley, 1989]であることから分かるように、電子とイオンの衝突による電子のクーリングは電子密度が大きくなるとより顕著になる。そのため、クーリングによる温度の低下が、ソフトな電子の降り込みによる電子温度の上昇の効果を上回り、トータルとして電子温度の低下を招いた可能性がある。

5-2-2 カスプ付近及び極冠域での高電子密度領域と電場(イオン温度)の時間空間関係

本修士論文で用いた VHF と ESR の CP4 モード実験(CP4 については3章を参照)では、視線方向のイオン速度は測定できるが電場は観測できない。そのため、磁場に直交方向のイオン運動($E \times B$ 運動)を作る電場ベクトルの強度を表す指標としてイオン温度を用いている。その妥当性を示すために、イオン温度と電場強度との関係を図 5-2 に示す。EISCAT の 3 局方式の UHF レーダーを用いた CP1 モード実験(レーダービームは磁力線方向)から得られた電場とイオン温度の時系列データの比較を図 5-2a に示す。両パラメータが時間遅れなく一対一に対応して変動するのが見て取れる。図 5-2b にこれらのデータを用いた両者の定量的関係を表す図を示す。イオン温度は電場の 2 乗に比例して正の相関を持ち、電場強度の指標としてイオン温度を用いて良い事が分かる。

高電子密度領域が生成されるカスプ付近とそれが移動していった極冠域内でのイオン温度(電場強度)を比較すると、ほぼ全てのイベント(4-1 節、及び 4-2 節のタイプ 4を除くすべてのイベント)について、極冠域内ではカスプ付近に比べイオン温度の大

きさ及び増減量は小さくなり、空間的により一様に近い分布となっていた。即ち、高電子密度領域が生成されるカスプ付近では、領域内またはその近傍のイオンの流れがその外部の領域に比べて速く、その領域が移動していった高い緯度では、高電子密度領域の内と外のイオンの速度はほぼ一樣になる。リコネクションにより太陽風磁場と地球磁場が再結合した磁束管は太陽風に引っ張られて夜側(極方向)に移動し、その磁束管の根元の電離圏の高電子密度領域のプラズマも夜側(極方向)に動く。この結果は、この章の最初の部分で述べた高電子密度領域と電子降下の関係と同様に、高電子密度領域の生成とその直後の段階では、局所的なリコネクション領域である高電子密度領域の中に、周囲に比べて強い電場(イオン速度およびイオン温度)が生じる。しかし、太陽風と繋がった磁束管が夜側に移動するに従って、太陽風から磁力線に沿って侵入した電場は極冠全体に広がり、高電子密度領域に繋がる磁束管内とその外部の電場は一樣になることを示唆している。

本章前半部分と同様に、*Lockwood et al.* [1993]のFTEのモデル(図 5-1)に基づいて解釈すると以下になるであろう。リコネクションが生じている、磁力線が強くねじれている領域付近では、その磁力線に繋がる領域(高電子密度領域につながる磁束管)にのみ太陽風電場が入り込み、その周辺領域よりもプラズマは早く動く(リコネクションレートが高い)。一方、リコネクションした磁束管が極冠内に移動してくると、高電子密度領域もそれ以外の領域でもプラズマは同じ速度で動くように、即ち電場はほぼ一樣になるように再分配される。この物理過程は不明であるが、極冠域内の電離圏の電気伝導度の分布や電離圏電流、それにより作られる偏極電場の生成等が関係している可能性がある。カスプ付近の領域での電子密度とイオン温度の関連は上述のように、高電子密度領域またはその近傍でイオン温度が上昇しているが、より詳細にみると2種類のパターンがある。1つ目のパターンとして、2004年2月11日や2003年5月28日のイベントのように、高電子密度領域の内部でイオン温度が上昇しているパターンがあげられる。2つ目のパターンとして、2004年3月13日や2003年3月27日のイベントのようにイオン温度が高電子密度領域のすぐ外側近傍で上昇しており、内部では電子密度とイオン温度が逆相関の関係になっているパターンをあげられる。しかし、イオン温度と電子密度を比べる時には、イオン温度が高くなると、たとえ電子の降下による電離があっても、作られた電子と NO^+ や O_2^+ の再結合がおこりやすくなり電子密度そのものは減少する可能性がある(化学反応式は 1-4 節、1-6 節に記載)ので、注意が必要である。即ち2つ目のパターンで、イオン温度の高く電子密度が低い領域には、電子降下がある可能性がある。その場合にはクーリング

の効果も考慮した電子温度がより良い指標になる。

3次元電流系の観点からは、高電子密度領域周辺には図 2・1 で表されるように、上向きに沿磁力線電流と下向きに沿磁力線電流電流のペアーおよびそれを結ぶ電離圏電流からなる電流系が存在すると考えられる。この上向き電流は降下電子により運ばれ、下向き電流は電離圏の冷たい電子により運ばれる。高電子密度領域内では生成時に降下電子が認められ、更にその領域または近傍で電場が強まっているので、電離圏電流は発散を持ち、そのため3次元電流系が伴っている事が強く示唆される。一方、高電子密度領域が極冠域内部に移動した場合には、局所的に強い電場は認められずむしろ一様な電場が見られる事、降下粒子が認められないなどのことから電気伝導度の局所的な増加も期待されない。則ち、電離圏電流は連続に流れていると期待される。そのため、高電子密度領域は顕著な沿磁力線電流を伴っていないと考えられる。この電流系の違いも重要である。

また高電子密度領域生成時の3次元電流系においては、上向き沿磁力線電流は降下電子を伴うので、一般的に E 領域の電気伝導度を増加させるが、下向き沿磁力線電流領域では電気伝導度は増加しないかむしろ減少する。そのため電流の連続の観点から、下向き電流領域の電場強度は上向き電流領域の電場強度よりも強い必要がある。今回用いたデータにおいても、高電子密度領域生成時付近で電子密度のピークとイオン温度のピークに位相差がみられることがあったのはこの点に起因する可能性もある。

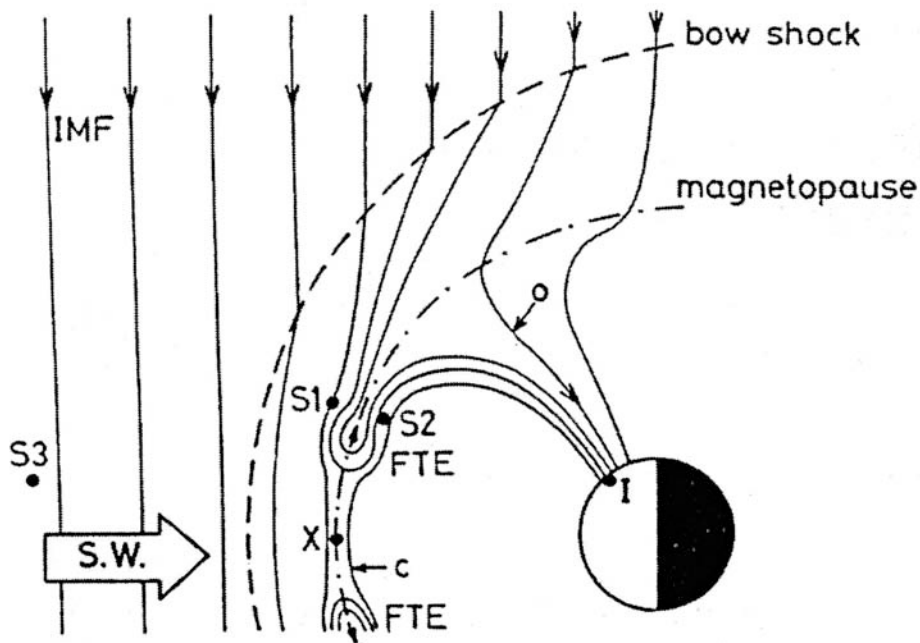


図 5-1 FTE のモデル図 [Lockwood et al. 1993]。

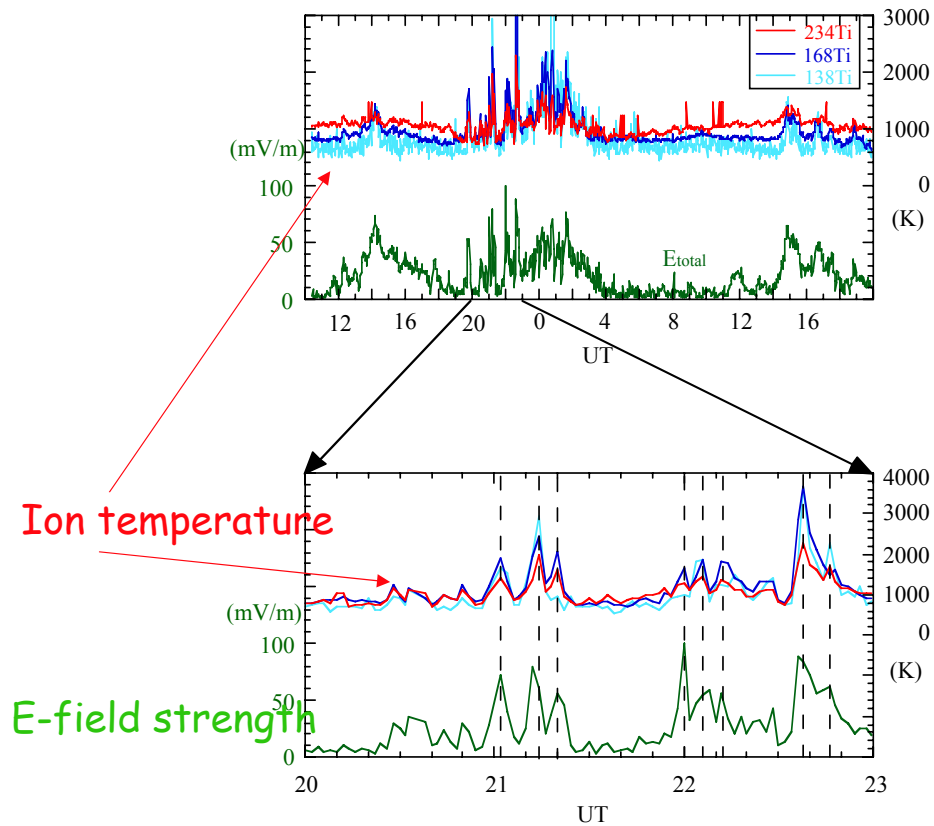


図 5-2(a) EISCAT の観測より導出されたイオン温度と電場強度の時間変動。

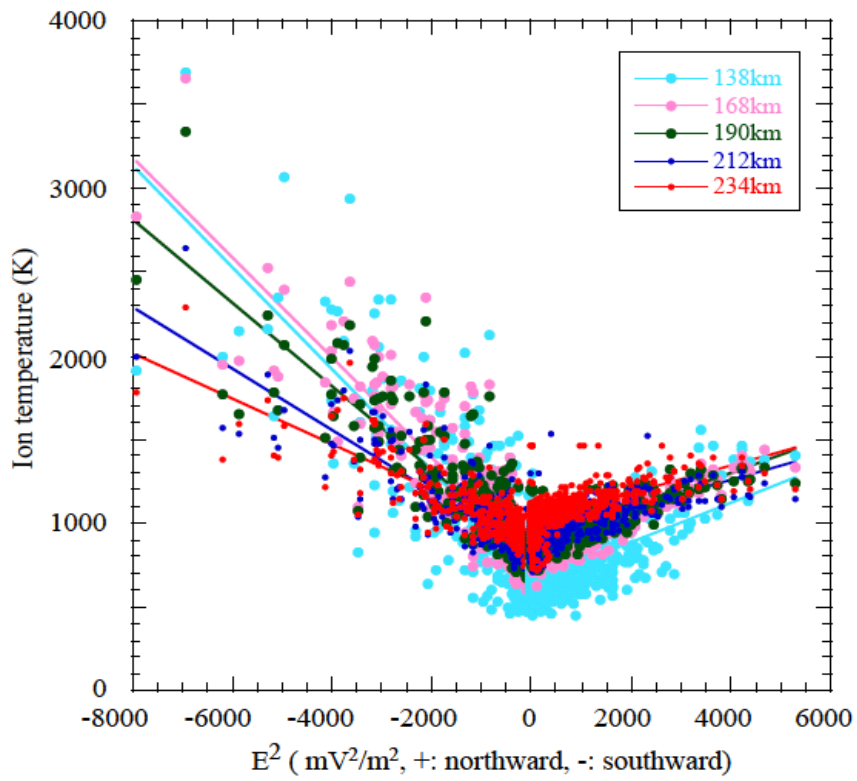


図 5-2(b) EISCAT の観測より導出されたイオン温度と電場強度の定量的関係

第6章 今後の課題

(1) カスプ周辺における高電子密度領域の生成時または移動開始直後では、ソフトな電子の降り込みがあるが、極冠域深部に移動した後では、カスプ周辺と比較して降り込みが弱い、もしくは無くなっている事が電子温度の観測結果から考えられる。この降り込み粒子に関する特性の変化に際して、実際にどの程度のエネルギーの粒子が降り込んでいるのか、あるいは降り込んでいないのかについては電子温度データのみから判断する事はできない。これについて理解するためには、DMSP 衛星などによる降下粒子エネルギーの観測データと EISCAT の観測データを併用し、高電子密度領域の電子密度や電子密度と降り込み粒子のエネルギーについて定量的な評価を行う必要がある。

(2) 極冠域の内部に移動した後の高電子密度領域の内部では、カスプ周辺の生成されたばかりの高電子密度領域と比較して、降り込みが弱いもしくは完全に無くなると推測された。しかしながら電子の降り込みが減少した後の高電子密度領域の維持機構については十分に理解することができなかつた。一つの仮説としては、日照が無いことにより、電子とイオンの再結合過程が進まないことが挙げられる。F 領域におけるプラズマの大規模循環も取り入れたシミュレーションを行ない、生成された高電子密度領域が日陰状態でどのような消滅過程をたどるか定量的に考察する必要がある。

(3) カスプ付近での高電子密度領域の電場の分布については、高電子密度領域内部で電場が上昇しているイベントと、高電子密度領域の外部で電場が上昇しているイベントの2種類のパターンがあった。このパターンの違いは、高電子密度領域に伴う3次元電流系が異なっているためと考えられる。3次元電流系を解明するには、今回用いた CP4 モードによる観測に、磁力線方向を測定できる ESR 42m による観測や、2次元方向に広い領域でイオン速度を求めることができる Super DARN による観測を加えて研究する必要がある。

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.

河野 政樹, 電離圏カusp領域における極方向へ移動する高電子密度領域の研究 (2001年度修士論文), 2001.

隅山 智子, Polar衛星/CUTLASSレーダー/EISCATレーダーを用いた極方向へ移動するオーロラ現象の研究 (2002年度修士論文), 2002.

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 (2000年度修士論文), 2000.

福西 浩, 国分 征, 松浦 延夫, 南極の科学2, オーロラと超高層大気 (国立極地研究所編), 古今書院, 1983.

Barton, C.E., International Geomagnetic Reference Field: The Seventh Generation, *J. Geomag. and Geoelectricity*, 49, 123-148, 1997.

Berchem, J., and C. T. Russel, Flux transfer events on the magnetopause: Spatial distribution and controlling factors, *J. Geophys. Res.*, 89, 6689-6703, 1984.

Brekke, A., PHYSICS OF THE UPPER POLAR ATMOSPHERE, *Praxis Publishing*, 191-220, 1997.

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

Kelley, M. C., The Earth's Ionosphere, *Academic Pr*, 463, 1989.

Lockwood, M., and M. N. Wild, On the quasi-periodic nature of magnetopause flux transfer events, *J. Geophys. Res.*, 98, 5,935-5,940, 1993.

Rijnbeek, R.P., S.W.H. Cowly, D.J.Southwood, and C.T.Russell, A survey of dayside flux transfer events observed by the ISEE 1 and 2 magnetometers, *J. Geophys. Res.*, 89,786-800, 1984.

Sandholt, P.E., C.S.Deehr, A. Egeland, B. Lybekk, R. Viereck, and G. J. Romick, Signatures in the dayside aurora of plasma transfer from the magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, 91, 10,063-10,079, 1986.

Schunk, R. W., and A. F. Nagy, *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, Cambridge University Press, 2000.

Southwood, D.J., Theoretical aspects of ionosphere-magnetosphere-solar wind coupling, in *Physics of the ionosphere-Magentosphere*, *Adv. Space Res.*, 5, 4, 1985

Southwood, D.J., The ionospheric signature of flux transfer events, *J. Geophys. Res.*, 92, 3,207-3,213, 1987.

謝辞

論文の作成及び、研究に関する様々な面で、指導教官の藤井教授には大変お世話になりました。野澤悟徳助教授、小川泰信助手には研究に関する様々な御助言をいただき有り難うございました。人一倍手間をかけさせることになりましたが、なんとか論文の提出出来ました。心よりお礼申し上げます。

元場哲朗博士には修士論文の序論の作成やその他の場面でも大変お世話になりました。本研究室の先輩の足立さん、岩橋さんには、研究に関する様々なツール(IDL、matlab)などの使い方についての御助言や、研究に関する様々な御助言をいただきました。有り難うございます。同じ学年の津田さんには、研究だけでなく、研究生活の面でも様々な助けを受けました。有り難うございます。本研究室の後輩の半田さん、沢津橋さんには、修論を印刷するさいにお世話になりました。