

平成 15 年度
修士論文

EISCAT レーダーと光学同時観測による
ディスクリートオーロラ境界領域
およびブラックオーロラの電磁気的特性の研究

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

富田 修平

2004 年 1 月 30 日

要旨

本研究では、オーロラの微細構造とその周辺領域における電磁気的およびプラズマの運動特性を定量的に調べ、沿磁力線電場や磁場に直交する電場の生成を伴う磁気圏-電離圏結合を理解することを最終的な目標としている。そのため、研究の第一段階として、本修士論文で行ったのは、次の3点である。1) 極地研究所、トロムソ大学と共同でトロムソレーダーサイトへ光学観測機器を設置し、2003年3月にEISCATレーダーと光学観測機器とのオーロラの同時観測を行った点。2) 微細構造の研究に必須の高時間分解能レーダーデータの推定・解析手法の開発を新たに行った点。3) 光学観測データと、開発した解析方法により、いくつかのディスクリートオーロラの境界領域およびブラックオーロラについて電子密度と電場強度を反映するイオン温度の導出を行いその関連を調べた点、である。

2003年3月に行ったレーダーと光学観測機との同時観測では、その観測期間中に、ブラックオーロラが観測されている。レーダーと光学観測機器を用いたブラックオーロラの同時観測は、前例がない。一般にブラックオーロラの幅は、数km程度であり、EISCATレーダー視野の数倍である。また、その移動速度は、 ~ 1 km/s程度であることから、レーダー視野がブラックオーロラを捉える時間は、数秒間にすぎない。また、ディスクリートオーロラの境界の電子密度の減少も非常に急峻である。そのため、短いタイムスケールで電離圏における物理量の変動を推定できるように、EISCATレーダーの新しい解析方式を開発導入した。この方法は、ブラックオーロラに限らず、オーロラの微細構造と、それに伴う3次元電流系の研究をする上で非常に有効である。新しい解析方法とレーダーと光学観測機の同時観測から本修士論文では、2003年3月2日の5イベントを選び出し、次のような結果を得た。

2003年3月2日 1949 UT 付近のイベントにおける、イオン温度の変動は、ディスクリートオーロラに相当する電子密度の高い領域を挟むようにその両側で、イオン温度が上昇していた。イオン温度が上昇している時間は、ディフューズオーロラの中でオーロラアークまでの 12 ± 4 秒間でその温度変動幅は 500 K、オーロラアークから出たところから 8 ± 4 秒間の領域で、変動幅は 700 K であった。オーロラの移動速度を考えると、これらのイオン温度の増加した(電場が強まった)領域の幅は 8.4 ± 2.8 km、 5.6 ± 2.8 km と見積もられた。なお、ディスクリートオーロラの幅は 19.6 ± 2.8 km であった。

ブラックオーロラ領域に関して、ブラックオーロラ領域での電子密度に比べて 40-50 % 程度の電子密度の減少はあるが、元々オーロラが存在していない、バックグラウンド領域の電子密度よりは高い。ブラックオーロラ領域では、特段のイオン温度の上昇は見られない、という新たな結果を得た。

今後、本研究で用いた解析方法を使い、更に同時観測データを増やすことにより、オーロラの微細構造の研究が、特に電離圏におけるプラズマの動きと小スケールの 3 次元電流系について発展することが期待できる。

目次

要旨	i
第 1 章 序章	1
1.1 電離圏	1
1.2 磁気圏	2
1.3 オーロラ	2
1.3.1 オーロラ帯とオーロラオーバル	2
1.3.2 オーロラの発光	3
1.3.3 オーロラの分類	3
1.3.4 3次元電流系と沿磁力線電場	4
第 2 章 研究の背景と目的	11
2.1 はじめに	11
2.2 微細構造を持つオーロラ	12
2.3 ブラックオーロラ	14
2.4 研究の特徴と目的	15
第 3 章 観測機器と観測、解析方法について	19
3.1 光学観測機	19
3.2 EISCAT レーダー	20
3.2.1 EISCAT レーダーの概要	20
3.2.2 EISCAT レーダーから得られる物理量	21
3.2.3 EISCAT レーダー観測と観測モード	23
3.3 観測	24
3.4 解析方法	25
3.4.1 デジタルカメラ画像の位置較正	25
3.4.2 高時間分解能レーダーデータの 推定・解析手法の開発	25
第 4 章 2003 年 3 月の観測結果	41
4.1 1949 UT 付近のイベント	41

4.1.1	光学機器によるオーロラ観測結果	41
4.1.2	EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果	42
4.1.3	1949 UT 付近のイベントのまとめ	44
4.2	2220 UT 付近のイベント	45
4.2.1	光学機器によるオーロラ観測結果	45
4.2.2	EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果	46
4.2.3	2220 UT 付近のイベントのまとめ	47
4.3	2056 UT 付近のイベント	47
4.3.1	光学機器によるオーロラ観測結果	47
4.3.2	EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果	48
4.3.3	2056 UT 付近のイベントのまとめ	49
4.4	2035 UT 付近のイベント	49
4.4.1	光学機器によるオーロラ観測結果	49
4.4.2	EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果	50
4.4.3	2035 UT 付近のイベントのまとめ	51
4.5	2210 UT 付近のイベント	52
4.5.1	光学機器によるオーロラ観測結果	52
4.5.2	EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果	52
4.5.3	2210 UT 付近のイベントのまとめ	54
第5章	考察とまとめ	81
5.1	まとめ	81
5.2	考察	82
5.2.1	ブラックオーロライベントについて	82
5.2.2	西向きトラベリングサージについて	83
5.2.3	ディスクリートオーロラの前後	84
5.3	今後の課題	84
	参考文献	87
	謝辞	89

第 1 章 序章

本研究では、微細構造をもつオーロラやオーロラの境界周辺における電離圏内の電磁気的特徴を理解することを目標としている。具体的には EISCAT レーダーと光学機器を用いた同時観測を基に、オーロラやブラックオーロラの内外部の電子密度分布や電場強度分布を定量的に同定する。以下序章では、本研究に関連する電離圏、オーロラ、電磁気的特徴としての 3 次元電流系と沿磁力線電場について概観する。

1.1 電離圏

地球大気圏は、様々な物理量や状態において高度方向に特徴的な構造・領域がある。その構造・領域の分類は、温度分布、力学的な状態、組成の均一性・不均一性などにより幾つかの特徴的な領域に分けることができる (図 1.1 参照)。大気の温度勾配を基に分類すると、地表近くから対流圏 (高度とともに温度減少)、成層圏 (増加)、中間圏 (減少)、熱圏 (増加)、そして外圏と分類されるのは良く知られている。

電離圏は地球大気を電離度により分類した時の領域の一つで、中間圏上部から熱圏までの領域 (高度 70 km から約 1000 km) に対応し、大気が弱電離した領域を指す。電子密度の高度方向の構造から、電離圏を D 領域 (約 70 ~ 90 km)、E 領域 (約 90 ~ 140 km)、F₁ 領域 (約 140 ~ 200 km)、F₂ 領域 (約 200 ~ 1000 km) に分類される。これらの領域が形成されるのは、主に太陽紫外線による大気の電離による電子とイオンの生成と、電子とイオンの再結合による消滅のバランスに起因する。この太陽紫外線による電離の他に、X 線による電離や粒子による電離が挙げられる。しかし、これらの電離は太陽紫外線による電離に比べると一般的に小さい。ただし極域では、高いエネルギーを持ったオーロラ粒子の降り込みによる電離が太陽紫外線による電離に加えて重要になる。

1.2 磁気圏

磁気圏は、地球のダイポール磁場が太陽風(太陽から吹き出しているプラズマの流れ)によって閉じ込められている領域を言う。磁気圏内部は主として陽子と電子からなるプラズマによって満たされており、磁気圏の構造は、そのプラズマの性質の違いから、いくつかの領域に分けられている。その概念図を図 1.2 に示す。オーロラを発光させるオーロラ粒子の供給源は主にプラズマシートにあると考えられており、この部分には 1 keV 程度の高温のプラズマが存在している。この領域の地球磁場は夜側に引き延ばされて反平行に近くなっているため磁場が弱くなり、そのため磁気圧が小さくなっている。その外部のポーラーローブは粒子密度が小さいのでガス圧は小さいが、磁場が強く、そのため磁気圧が大きい。プラズマシートの熱いプラズマによるガス圧はポーラーローブの磁気圧とほぼつりあい、平衡に近い状態をつくりだしている。磁気圏の大きさは、地球中心から太陽方向までの距離は地球半径の約 11 倍で、地球から太陽と反対側の尾部の距離は少なくとも地球半径の約 6000 倍まで伸びていると考えられている。

1.3 オーロラ

1.3.1 オーロラ帯とオーロラオーバル

オーロラとは、磁気圏のプラズマシートから降下してくる高エネルギーの荷電粒子が超高層大気中で中性大気と衝突し、大気原子や分子の電子にエネルギーを与えて励起し、その励起状態から低いエネルギー状態に落ちる際に余剰のエネルギーを光で放出する現象である。オーロラは、オーロラオーバルと呼ばれる、磁極を中心として環状に現れる。オーロラオーバルは、太陽・地球系の座標系に固定したもので、これを地球上に

投影したオーロラオーバルの位置は、地球の自転とともに変化する。オーロラオーバルの特にオーロラの発光が激しい夜側の部分を地球上に投影した部分をオーロラ帯と呼んでいる。オーロラ帯は、磁気緯度 67°付近の双極子磁極を取り巻くドーナツ状になっている。

1.3.2 オーロラの発光

オーロラ光の波長と強度は、磁気圏から電離圏に降下した粒子の種類とエネルギーとフラックス、衝突する中性大気の種類と、その高度での大気密度によって決まる。電離圏に存在する中性大気は、主に窒素分子(N₂)、酸素分子(O₂)、窒素原子(N)、酸素原子(O)とそれらのイオンである。このため、オーロラ光の波長は、主にこれら粒子の輝線とバンドによって成り立っている。代表的なオーロラの発光輝線は、酸素原子の 557.7 nm と 630.0 nm である。バンドとしては、窒素分子イオンの 391.4 nm、427.8 nm 等が挙げられる。

酸素原子の 557.7 nm の緑の発光は、もっとも有名なオーロラの発光輝線であり、粒子が衝突してから光を出すまでの時間は約 0.7 秒である。この 557.7 nm の発光は 427.8nm の発光とともに、高度 90 km から 130 km のオーロラの発光として重要である。

1.3.3 オーロラの種類

オーロラの形状を分類するとき、地上からの観測では、水平方向に 1000 km 程度の範囲しか観測できず、一様に広がったベール状オーロラの特徴をつかむことは難しい。しかし、衛星観測をすることによりその特徴がつかめ、このような領域がアークや帯状オーロラとは異なる領域に出現していることが明らかになった。この領域のオーロラをディフューズオーロラと呼ぶ。ディフューズオーロラは、午後側領域では一般にオーロラオーバルの低緯度側に位置している。またこれに対して、アークや帯状オーロラは、ディスクリートオーロラと呼ばれている。

ディスクリートオーロラは磁気圏のプラズマシートからの主として電子によるオーロラである。一般的にプラズマシートのプラズマは磁力線に沿ってバウンシングを行っており、プラズマの多くは中性大気が豊富な電離圏低高度にまで侵入できない。しかしディスクリートオーロラでは磁気圏下部で磁力線に沿った数 kV の上向き電場が作られ、その電場により電離圏電子が下向きに加速され、電離圏まで到達してオーロラをつくり出す。即ちディスクリートオーロラをつくり出す降下電子のエネルギースペクトルは数 keV のあたりにフラックスのピークを持ち、それより高いエネルギーではフラックスが急激に減少する特徴を持つ。

一方、構造を持たないディフューズオーロラをつくり出す降下電子には、沿磁力線方向の電場加速の徴候は見られないが、ディスクリートオーロラをつくり出す降下電子に比べて、高エネルギー側にフラックスが伸びているのが特徴である。また電子に加えプロトンによる発光も考慮する必要がある場合がある。

ディスクリートオーロラは水平方向に限られた領域に出現するとともに、磁力線方向にも高エネルギーの荷電粒子が磁力線に沿って超高層大気に入射するため、磁力線に沿って発光する。そのため地上から見た場合、観測者とオーロラとの相対位置によりオーロラの形が変化する。1963 年に出版された国際オーロラアトラス(表 1.1 参照)では、オーロラの形と色、そして代表光である酸素原子の 557.7 nm の輝度を基準として地上から観測されたオーロラの分類をしている。この分類では、形状として、帯状、薄く広がった、綿状の 3 つに分類し、そこに空間的な広がり、内部構造、時間変化、明るさや色を加えて分類できるように分けてある。

1.3.4 3次元電流系と沿磁力線電場

磁気圏と電離圏を結ぶ沿磁力線電流は、K. Birkland によって提唱され、人工衛星による観測により、その存在が明らかになった。図 1.3 は極域における沿磁力線電流の分布を示している。統計的には、大規模な沿磁力線電流の分布は極を取り巻いて 2 重になっており、これらシート電流は、

電離圏内では、磁力線に直交して流れる電離圏電流と、磁気圏では磁力線に直交する磁気圏電流と結合して3次元電流回路を作っている。

電流が荷電粒子により担われていることから、沿磁力線電流の存在は、磁気圏と電離圏との間で荷電粒子のやりとりがあることを意味している。電荷の担い手としては、イオンと電子が考えられるが、イオンは電子より重く(1836倍)、沿磁力線電流は主に電子によって担われていると考えられる。磁気圏の主にプラズマシート起源の電子は、電流を担うと同時に、その一部は電離圏においてオーロラを発光させている。一般にプラズマシートでは1 keV程度のエネルギーを持つプラズマが存在している。しかし、ディスクリットオーロラを光らせる電子は、前述のように沿磁力線方向の加速を受け1 keVから10 keVにエネルギーのピークをもっている。これは、高度10,000 km付近に存在するV型の電位分布(図1.4参照)により磁力線方向下向きに電子が加速を受け、より高いエネルギーを持って電離圏に降り込んでいるためである。

このオーロラ降下粒子に伴う沿磁力線電場加速に加えて、上向き沿磁力線電流を伴うオーロラ粒子降下領域の外側の、下向き沿磁力線電流領域上空の磁気圏下部において下向き沿磁力線電場が作られ、電離圏電子が上向きに加速されていることが明らかにされた[Marklund and Karlsson, 1997]。オーロラ降下粒子領域での沿磁力線加速は従来知られていたが、冷たい電離圏電子により担われる下向き沿磁力線電流は、従来単に帰還電流と考えられてきており、特段の沿磁力線加速はない(必要ない)と考えられていたので、この現象は大きな驚きであった。この現象は冬半球側の磁気圏下部に選別的に現れるので、その電場生成は電離圏の状態に深く関係すると考えられているが、物理機構は未解明である。電離圏は下向き沿磁力線電流のキャリアーとなる電子の供給とともに、この下向き電流とオーロラ粒子降下に伴う上向き電流との間を電離圏電流で繋ぐという2つの役割を果たしている。最近の研究では前者はブラックオーロラと関連し、後者は電離圏内の磁場に直交する電場強度の増大に関連すると考えられているが、その物理機構は未解明である(図1.5参照)。

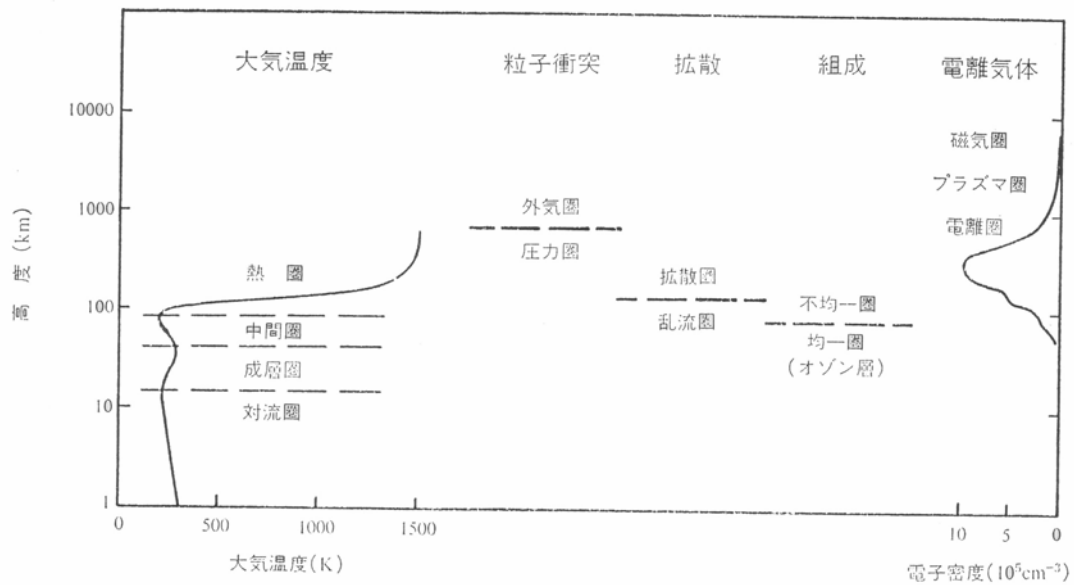


図 1.1 地球上層大気の諸特性に基づいた高度領域の分類と名称。
 [福西他, 1983].左から大気の温度勾配、衝突、拡散、組成、電離度により分類している。

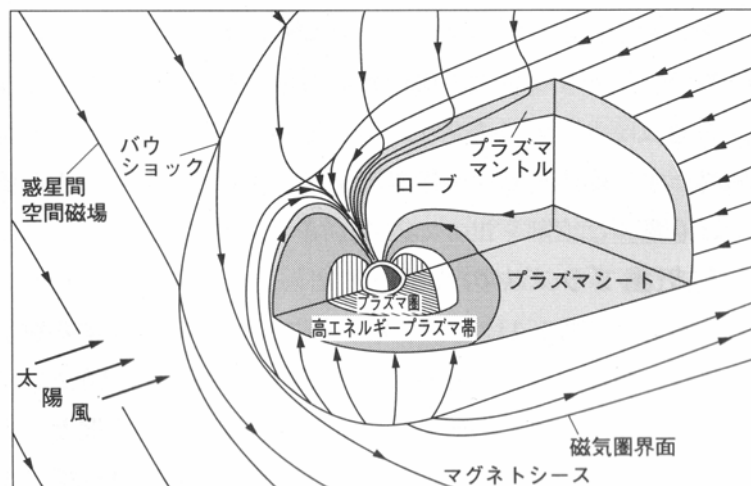


図 1.2 磁気圏の構造の概略図。プラズマの性質の違いからいくつかの領域に分けられ、その概略図を磁気圏の夕方側から見た図で示している。[恩藤・丸橋, 2000]

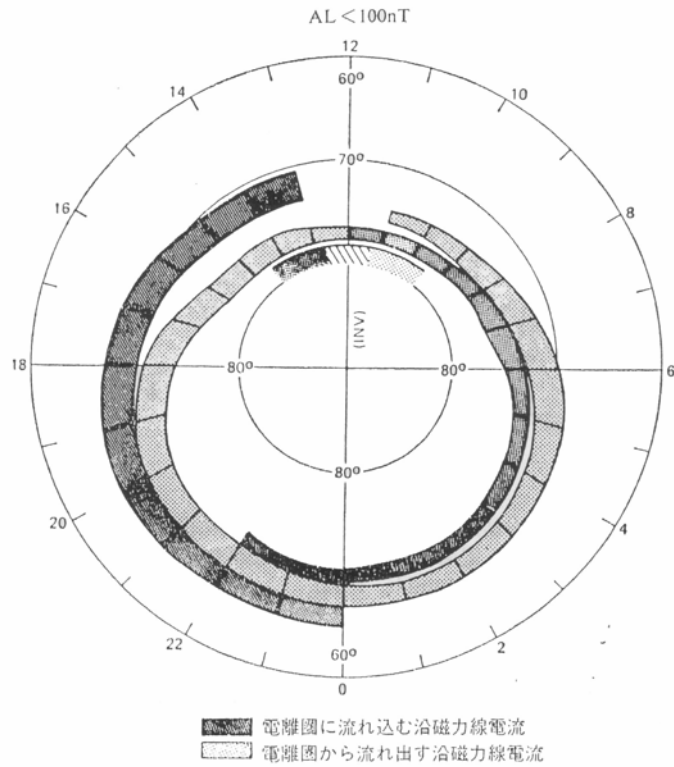


図 1.3 衛星から求められた極域電離圏における沿磁力線電流の分布

[Iijima and Potemra, 1976]

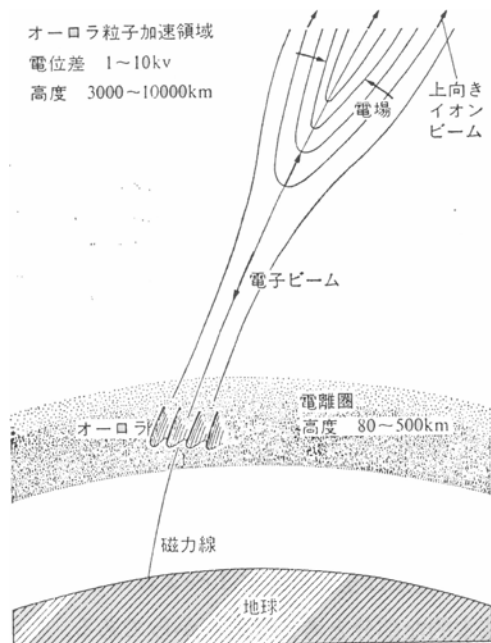


図 1.4 V型ポテンシャルの模式図。

磁力線方向に上向きの電場が形成される。[福西他, 1983]

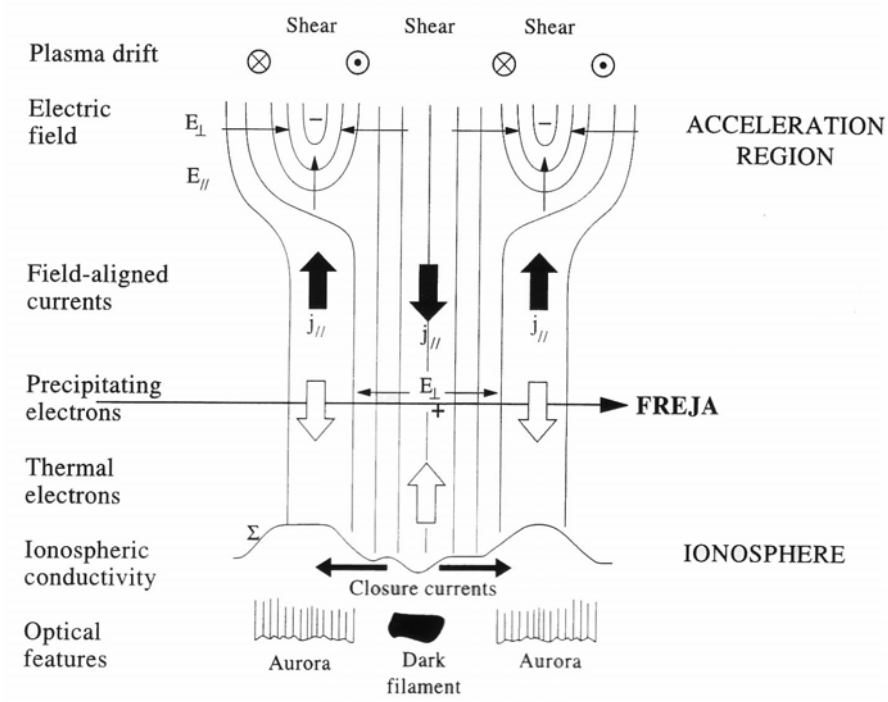


図 1.5 衛星で観測された電場から考えられる沿磁力線電場とオーロラとの対応 [Marklund and Karlsson, 1997]。

表 1.1 国際オーロラアトラスによるオーロラの分類[福西他, 1983]

分類区分	主分類名	副分類名		略号	説明	
		日本語	英語			
形状	帯状 (band-like)	弧 (アーク)	arc	A	一般に東西に弧状にのびており、はっきりとした下辺をもつ。	
		帯 (バンド)	band	B	帯状をしており、帯の一部がU字型やJ字型、渦巻き状に折れ曲る場合が多い。	
	薄く広がった (diffuse)	斑点 (パッチ)	patch	P	斑点状のぼんやりしたオーロラで斑点の大きさは視野で10° くらいが多い。	
		ベール	veil	V	空のかなりの部分が一様にベール状に光る場合	
	線状 (ray)	線	ray	R	磁力線方向の光の筋。一本の場合と何本かの光の筋の束から成る場合がある。	
空間的広がり	分類名		略号	説明		
	日本語	英語				
	多重	multiple	m	アークやバンド、パッチなどが二つ以上同時に出現する場合を表わす。		
	破片状	fragmentary	f	アークやバンドがオーロラのブレイクアップの後、切れ切れになった場合		
冠(コロナ)状	coronal	c	オーロラが磁力線方向に位置した時天の一点を中心に扇状または冠状に判いてみえる場合			
内部構造	均質な	homogeneous	H	内部構造がなく明るさがほぼ一様な場合		
	筋のある	striated	S	アークやバンド、パッチの中に見える黒い筋		
	線構造のある	rayed	R	磁力線方向の光の筋をもつ場合		
分類区分	主分類または副分類の日本語と英語名			略号	説明	
時間変化のようす	静穏な	quiet		q	形や位置が非常にゆっくりと変化する場合	
	活動的な	active		a	形や位置が激しく変化する場合	
	脈打つ (pulsing)	点滅する	pulsating		P ₁	明るさが数秒〜数10秒の周期で変化する場合
		炎のような	flaming		P ₂	明るい部分が炎のように磁力線の上方向って急速に広がる場合
		ちらつく	flickering		P ₃	早い繰り返し周期で明るさがちかちか変化する場合
流れるような		streaming		P ₄	バンドまたはアークに沿って明るい部分が流れるように移動する場合	
明るさ	IBC階級	5577の輝度	エネルギー erg cm ⁻² sec ⁻¹	自然現象との対比		
	I	1kR	3	天の川の明るさ		
	II	10	30	月に照らされた薄い巻雲の明るさ		
	III	100	300	月に照らされた積雲の明るさ		
IV	1000	3000	満月の明るさ			
色	分類	色の構造		備考		
	a	上部が赤		タイプ A オーロラともよばれる。		
	b	下辺が赤		タイプ B オーロラともよばれ、下辺の高さは80~150km		
	c	緑または白		明るさが IBC I 以下の場合には白く見える。		
	d	全体が赤		発光高度は 250km くらいと高い。		
	e	赤と緑		線状構造がアークに沿って激しく動くときにみられる。		
	f	青またはパープル		上部が太陽光に照らされたときによくみられる。		

第 2 章 研究の背景と目的

2.1 はじめに

オーロラに伴う磁気圏と電離圏のプラズマの運動、3次元電流系の理解は磁気圏—電離圏結合の中心的な課題の一つである。弱電離の電離圏と完全電離の磁気圏は沿磁力線電流や磁場に直交する電場の形での電磁気エネルギーの交換と、降下粒子や沿磁力線粒子の担い手としての電子の移動などの物質の交換、波動によるエネルギー交換等を通して強く結びついている。磁気圏と電離圏それぞれに存在する荷電粒子は一般的には等電位の磁力線を通して結びつき、同じ挙動をしようとするが、慣性の違いや衝突（特に電離圏内の中性大気と荷電粒子の衝突）、有限の情報伝達速度による時間差により、完全に同じ挙動をすることができない。この運動の違いは、沿磁力線方向の電位差をつくり出し、磁気圏—電離圏「非」結合の原因をつくり出す可能性がある。これに加え、沿磁力線電流を担う電子が充分供給されない時は、沿磁力線方向の粒子加速や電流系自体の移動が生じる可能性がある。上記エネルギーや物質の交換過程とともに、これらの沿磁力線電場の生成過程やオーロラの運きの駆動過程は磁気圏—電離圏物理の最も基本的な物理過程であるが、未だ十分な解明が行われていない。

オーロラとそれに伴う降下粒子の関係について以下に概観する。最初に、日本の「あけぼの」衛星、米国の DE-1 (Dynamics Explorer-1) や Polar 衛星等で撮像される地球規模の大きなスケールのオーロラについて述べる。この大規模なオーロラは地磁気の極を取り囲む様に出現し、オーロラオーバルと呼ばれるオーロラ分布をつくり出す。オーロラオーバルは極を取り囲むドーナツ状の構造は保ちながら、その拡がりや緯度方向の幅は、太陽風の変動や磁気圏の擾乱に応じて時間的、空間的に変化する。午後側のオーロラオーバルの高緯度側領域では、Inverted-V 構造と呼ばれる沿磁力線方向に数 kV の加速を受けた粒子によるディスクリートオーロラが観測される [Heikkila, 1970; Frank and Ackerson, 1971]。一つの Inverted-V の緯度方向の幅は数 10 km から数 100 km である。このディスクリートオーロラ (Inverted-V) には上向きの Region 1 沿磁力線電流が伴っており、磁気圏側では BPS (Boundary Plasma Sheet) 領域に磁力線を介して繋がっている。一方、朝側オーロラオーバルの高緯度領域では高いエネルギーの電子の降込みは一般にはみられず sun-aligned arc が時折出

現する領域である。沿磁力線電流は下向きで、電離圏の冷たい電子により担われている。夕方側と朝側のオーロラオーバルの低緯度側はディフューズオーロラが主として出現する。降下粒子は序章で述べたように特段の沿磁力線加速は受けていない。また、夜側から朝側にかけてディフューズオーロラの中にパルセーティングオーロラと呼ばれるオーロラが頻繁に出現する。沿磁力線電流は午後側では下向き [Robinson *et al.*, 1982]、午前側では上向きの Region 2 電流と言われる電流 [Senior *et al.*, 1982] で、磁気圏側では CPS (Central Plasma Sheet) 領域に繋がっている。

一方地上からの観測は、100 km 程度の距離から空間および時間分解能よく撮像できるため、上記高高度の人工衛星からの撮像に比べて、観測されるオーロラは、厚さ(幅)が狭く細かい構造を持つ場合が多い。図 2.1 (極地研究所、佐藤夏雄教授提供) はディスクリットオーロラの例であるが、図 2.1 での横方向の拡がりに対して幅は極端に薄いことが見て取れる。前節の大きなスケールのオーロラは、この薄いオーロラの集合をみている場合が多いと考えられる(但し、幅が広いオーロラもある)。また大規模な Region 1 や Region 2 電流も、実際にはこれら小さな空間スケールのオーロラに伴う電流系が集まって作り出していると考えられる。

以上に述べたように、オーロラに伴う電磁気的特性やプラズマ運動の特性を理解するためには、オーロラ群の構成要素である「地上から見える小さな空間スケールの」オーロラ(ここでは微細構造を持つオーロラと呼ぶ)に伴う電磁気的、プラズマ運動的特性を解明する必要がある。以下にこの微細なオーロラ構造における問題点、また最近新たに注目を集めている微細なオーロラの一種類であるブラックオーロラについての解決すべき問題点を概観し、本研究の目指す所を述べる。

2.2 微細構造を持つオーロラ

CCD 素子などの光学観測技術の発達により、オーロラ撮像機器の飛躍的な高感度化がはかられてきた。この高感度化はより短い露出時間による観測を可能にし、観測の時間分解能をあげると共に、F 値の高い(暗い)望遠レンズの使用を可能にし、より高い空間分解能での観測を可能にしている。現在は望遠レンズを用いた、電離圏 100 km 高度で 10 m 程度の空間分解能を持った動画観測も可能になっている [Trondsen, D 論, 1998]。[Trondsen, 1997]によると、オーロラの微細構造のうち最も薄いアーキは平均で 70 m 程度の厚さを持っていることが明らかになった。これ

は、理論的限界の数倍、という非常に薄い構造である。オーロラがなぜこのような非常に薄い構造を持つことができ、それを維持できるかについては、アークがオーロラの基本的な構造であるにもかかわらず、その物理機構は分かっていない。物理機構が分かるためには、撮像による形状や運動の特性だけでなく、プラズマの運動や電流系などの分布を知る必要があるが、このような小さい空間スケールでの観測が困難であることが一因である。例えば、地球周りを周回する人工衛星で観測する場合を考えてみると、人工衛星が数 10 m の構造を通過する時間は、数ミリ秒であり極めて高い時間分解能が必要となる。更により大きな厚みを持つオーロラの場合にも共通して言える困難な点は、着目するオーロラ現象が起った時に、その現象上空を人工衛星が観測しながら通過しなければならないこと、また一般に衛星観測だけではオーロラの形態は同定できないので、その領域で地上からの光学観測が同時に行われている必要があることが挙げられる。これらの条件を満足する確率は極めて低い。なお、Polar 等の人工衛星によるオーロラ撮像の空間分解能は撮像高度にもよるが、数 10 km から 100 km であり、ディスクリットオーロラの構造を同定することは困難である。その他の飛翔体としてロケット観測がある。これは電離圏内で、降下粒子や沿磁力線電流などを直接観測する手段で、恣意的にオーロラ内に打ち込むことが可能な点、人工衛星より速度が遅い点および地上観測との連携が容易という点で有用な手段である。過去にアークに伴う物理過程解明を目指して実験が行われてきた [e.g., Casserly and Cloutier, 1975; Casserly, 1977; Bryant *et al.*, 1978]。欠点としては費用の面から多くの回数を行うことができない点、また時間変動と空間変動を区別できないことがあげられる。

オーロラの物理的特性を捉えるための有力な手段の一つとして地上からのレーダーによる電離圏観測がある。北欧に設置されている EISCAT (European Incoherent SCATter: 欧州非干渉散乱) レーダーは、次章で詳しく述べるように、電離圏内の種々のプラズマパラメータの変動をレーダービーム方向に空間分解能良く、かつ時間分解能良く観測できる優れた観測手段である。レーダービーム自体の大きさは高度 100 km において直径 1 km 程度であるので、最も厚さの薄いオーロラアークの構造を識別する能力は現在無いが、数 km 以上の厚さを持つディスクリットオーロラの研究には充分使用することができる。特に、地上観測であることから連続的な観測が可能なので、光学観測を併用することにより、対象とする種類のオーロラの種類と形状、位置を特定し、オーロラ及びその周辺のどの物理量を測定しているかを知ることが可能なのが大きな利点である。

また後述するように、オーロラに伴う電磁気的特性を知るためには、電離圏内で沿磁力線方向の物理量の分布を知ることが重要であるが、唯一 IS レーダーのみで可能である。なお、水平方向に 1 km 以下の構造を識別して測定をするために、スヴァールバルレーダー (ESR) では現在 2 機のアンテナを用いて干渉法観測の実験が開始されている。この手法が完成すれば数 100 m の水平分解能での観測も可能となる。

2.3 ブラックオーロラ

オーロラの微細構造の中で近年注目されているのは、ブラックオーロラと呼ばれる現象である。ブラックオーロラとは、一様なディフューズオーロラ領域中やシアー運動をしているオーロラ領域中、またはディフューズオーロラとアークオーロラとの領域において、境界がはっきりしたエミッションの無い小さな領域として定義されている [Davis, 1978a]。

このブラックオーロラで特に注目され、本研究で取り上げるのは次の 2 つの種類である。

一つは上向きの強い沿磁力線電流を伴うディスクリートオーロラの、外側近傍に隣り合わせで現れるものである。この種類のブラックオーロラは、FAST 衛星等で観測される、磁気圏下部で下向き沿磁力線電流中に生成される沿磁力線電場 E_{\parallel} と関連する可能性が指摘されている。この E_{\parallel} は、冬半球日陰領域にのみ観測されることから、その生成過程は電離圏の状態に強く依存することが予想される。そのため電離圏-磁気圏結合または E_{\parallel} による非結合過程を理解する上で重要な現象と考えられているが、未だ生成過程の解明はされていない。一方、電離圏では、夜側のオーロラアーク等のディスクリートオーロラ (上向き電流が支配的) に近接した領域で、磁場に直交する方向の電場 E_{\perp} が増大し、電離圏電子密度 N_e の急激な低下が見られることがある。この領域の電離圏の状態、特に沿磁力線電流を担う電子の枯渇が E_{\parallel} の形成と関係する可能性が指摘されているが、この領域が下向き沿磁力線電流領域に相当しているのかどうかも分かっていない。

以上のように今迄の研究で不足している点は：

1) 衛星観測では冬半球の下向き沿磁力線電流領域に下向きの強い E_{\parallel} が生成されること、そこで電離圏電子が keV にまで加速されることがあることが分かってきたが、光学観測やレーダー観測との同時観測は乏しいために、この加速がオーロラとどういう関係にあるか、電離圏の状態とど

ういう関係があるかについては、未解明である。

2) IS レーダー観測では強い電子降込み(電子密度の増大)領域の周辺近傍で極端に電子密度が低下した領域の観測はあるが、光学同時観測が少なく、オーロラとの関連については分かっていない。レーダーで観測している場合、時間が経過して降込み(電子増大)が突然無くなった場合、そのオーロラがレーダーの視野から外れたのか、オーロラ自体の強度が急激に弱くなったのかは、同時の光学観測が無い限り分からない。

二つ目の種類のブラックオーロラは、ディフューズオーロラ中に出現するしばしばシアーを伴うブラックオーロラである。時として渦構造を持ち、通常のオーロラの渦構造と極めて良く似た動態を示すことが知られている [Davis, 1978a, 1978b, Trondsen and Cogger, 1997]。その渦は通常のオーロラとは逆の回転をしているため、プラスの空間電荷がこの運動を駆動していると予想されている。しかし衛星データを用いた研究はある [Marklund *et al.*, 1994]ものの、ブラックオーロラとの比較観測はないため、上記物理過程の実証はされていない。このようなオーロラの持つ基本的な構造の一つであるシアーや渦構造を持つブラックオーロラの生成機構の解明は、ブラックオーロラの解明のみならず、オーロラの基本的物理を理解する上で重要であり注目されている。しかし、ブラックオーロラ内部や周辺における電子密度分布やプラズマの運動(電場)分布、電流系などの電磁気的特性は分かっていないのが現状である。この種類のブラックオーロラについても、光学観測との組織的な同時観測が可能な IS レーダー観測は大変有効な手段である。

2.4 研究の特徴と目的

本研究では、オーロラの微細構造とその周辺領域における電磁気的及びプラズマ運動特性を定量的に調べ、沿磁力線電場や磁場に直交する電場の生成を伴う磁気圏-電離圏結合を理解することを最終的な目的としている。オーロラとしては特に前節 2.3 で述べた、ディスクリートオーロラの周辺近傍領域およびディフューズオーロラ中にあらわれるブラックオーロラの二つを対象にして、これらの領域の電磁気的およびプラズマ運動特性を明らかにし、磁気圏-電離圏結合または非結合過程の理解を進めることを目的とする。

本研究の特徴は、2.3 にも述べたように、今迄の研究に欠けていたオーロラの形態や挙動を光学観測で捉えながら、EISCAT レーダーを用いてほ

とんど解明されていない物理的な性質や生成機構の理解に不可欠な物理量の測定を行う点にある。もう一つの特徴は、今迄よりも格段に時間分解能の良い EISCAT レーダー観測モードを用い、さらにオーロラ光学観測と併用することにより、ディスクリットオーロラやブラックオーロラの境界周辺をより良い空間分解能で観測できる点にある。

具体的には、ディフューズオーロラの周辺近傍においては、下向き沿磁力線電流に伴う電子密度の極端な減少があるか、ある場合にどのような空間分布を持つのかを定量的に評価する。沿磁力線電流のキャリアーの補給の観点からレーダーで観測される電子密度の高度分布は磁気圏下部で沿磁力線電場 $E_{//}$ を作り得るかを評価する。また沿磁力線電流同士をつなぐ磁場に直交して流れる電離圏電流の観点から見た時、電子密度の減少は電気伝導度の減少を意味するが、電流の連続性を保つために磁場に直交方向の電場 E_{\perp} の増大（イオン温度の増大）があるのかどうかを定量的に評価する。

ディフューズオーロラ中に出現するブラックオーロラについては、電子密度分布の特性、電場 E_{\perp} （イオン温度）と電気伝導度から特有の電流系の有無の特定を行う。特にブラックオーロラの内部で電子密度の極端な減少があるのか、即ち全くオーロラが出現していない領域に比べ、電子密度は更に低下しているのかは興味深い点である。

上記の研究目的の達成のための第1歩として本修士論文の研究としては以下の点を行った。

1) 光学観測機器の設置とレーダーとの同時観測

次章3に述べるように極地研究所やトロムソ大学と共同で光学観測機器の準備とトロムソレーダーサイトに設置し、2003年3月に光学観測機器とEISCATレーダーを用いた同時観測を行った。その観測期間内で、ブラックオーロラが観測された。ブラックオーロラの研究において、これは光学観測とレーダーのはじめての組織的な同時観測である。

2) 高時間分解能レーダーデータの推定・解析手法の開発

本研究で対象とするディスクリットオーロラの外側近傍やブラックオーロラは、オーロラ粒子の降下がない領域で電子密度が低い。ISレーダーは電離圏内の自由電子からの散乱を利用しているが、散乱強度は電子密度に比例するため、これらの領域では受信する散乱波がオーロラ領域よりも低いことが予想される。レーダーは近年開発された高時間分解能モードを用いて0.44秒という早いサンプリングでデータを得ることがで

きるが、データの S/N は大変低く意味あるデータを得ることはできないためこれらのデータを時間積分する必要がある。一方次章以下で示すようにブラックオーロラの幅はレーダービームの数倍程度でしかも動きがあるため、長い時間積分すると、ブラックオーロラの内部と外部双方を含むデータとなってしまいブラックオーロラの特徴を抽出することができなくなる。今回観測したオーロラ例では空間スケールと移動速度から 4 秒の時間積分データでの解析が必要であるが、電場強度を表すイオン温度変動は 4 秒積分では有意なデータを得ることができない。そのため第 3 章で示すような 4 秒の時間スケールでイオン温度の変動を推定できる新たな解析方式を開発導入して解析を行った。

3) 上記 2 種類のオーロラ現象のレーダーと光学同時観測データの解析による電磁気的な特徴の導出

オーロラの微細構造の解析としては、光学観測により得られたデータを基に、EISCAT のビームの視野を(1)ディスクリットオーロラおよび(2)ディフューズオーロラ中に出現するブラックオーロラが、通過した時間帯において、その時間帯(内部)と前後の時間帯(周辺近傍)における電子密度の変化とイオン温度の変化を議論した。イオン温度は、垂直電場によるフリクショナルヒーティング(摩擦過熱)に対応しているため、イオン温度を見ることでその領域における垂直電場の見積もりが行える。3 局方式による電場観測も同時に行っているが、データの S/N から数分の時間分解能しかないので、大規模な場の電場の特定にのみ利用した。



図 2.1 ディスクリートオーロラの例。[極地研究所，佐藤夏雄教授提供]

第 3 章 観測機器と観測について

本研究においては、EISCAT レーダーデータ、デジタルカメラデータ、および、超高感度オーロラ TV カメラデータを解析した。この章では、これら観測機器の説明、観測方法および解析方法について述べる。

3.1 光学観測機

オーロラの光学観測のため、2機のデジタルカメラ、および超高感度オーロラ TV カメラを用いた。EISCAT レーダーと同じ敷地内にすべて設置した。デジタルカメラは Fujifilm 製 FinePix S2pro と Canon 製 EOS-1D を用いた。図 3.1 と図 3.2 に、それぞれ FinePix S2pro と EOS-1D の写真を示した。2機のデジタルカメラは、ともに PC 制御で観測に用いられ、撮影した画像データは PC に転送後、JPEG 形式にて保存した。1つのデジタルカメラは広範囲の撮影に、他をより狭い領域の撮影に用いた。

FinePix S2pro には Nikon Fisheye Lenz 8 mm/F2.8 レンズを使用し、オーロラの全体画像をとらえるために用いた。このカメラにより、広範囲(画角は $180 \times 120^\circ$)におけるオーロラの変動とその構造を知ることができる。特に、雲の存在とその動きを知ることが可能であり、狭視野で撮影された画像における、ディフューズオーロラと雲との区別において重要な情報となる。Fujifilm 製 FinePix S2pro の仕様を表 3.1 に、使用したレンズの仕様を表 3.2 にまとめた。画像例として、2003 年 3 月 2 日に撮影されたオーロラ画像を図 3.3 に示した。

Canon 製 EOS-1D は、EISCAT レーダーの視野を含む領域におけるオーロラの出現と空間時間分布の同定に用いられた。レンズには、Canon Lenz 50 mm/F1.0 と Canon Lenz 85 mm/F1.2 の 2 種類を用いた。各々のレンズを使用したときの画角は、それぞれ $32.0 \times 21.6^\circ$ 、 $19.2 \times 12.8^\circ$ である。これらは高度 115 km において、 66×44 km、 34×26 km に対応する。図 3.4 に Canon 製 Lenz 50 mm/F1.0 を用いて、2003 年 3 月 2 日に撮影した画像を示した。併せて図中心付近に EISCAT UHF レーダーの視野を(円にて)示した。この画像から、雲(右上)とオーロラ(左下)が確認できる。また、図 3.5 に Canon 製 Lenz 85 mm/F1.2 を用いたときの画像例を示す。図 3.5 の画像は、2003 年 3 月 5 日に撮影されたもので、図 3.4 と同様に EISCAT UHF レーダーの視野円を示してある。Canon 製 EOS-1D の仕様を表 3.3 に、使用レ

ンズを表 3.4 にまとめた。なお、最短の撮影間隔は 5 秒(露光時間 0.8 秒)である。

これら 2 機のデジタルカメラデータの解析に加えて、ノルウェーの共同研究者が同じ場所にて撮影した超高感度オーロラ TV カメラデータも併せ用いた。超高感度オーロラ TV カメラの概要を表 3.5 にまとめた。記録方式は PAL(Phase Alternation by Line)、1 秒間に 25 フレームを取得、水平走査線の本数は 525 本である。50 mm/F0.95 のレンズを用い、 $14.3 \times 10.9^\circ$ の画角による撮影を行った。本研究においては、超高感度オーロラ TV カメラデータは、デジタルカメラで撮影された画像と、その次の画像の間(最短で 5 秒間)の時間帯のオーロラの位置情報を知るために用いた。カメラの概観を図 3.6 に示す。

3.2 EISCAT レーダー

3.2.1 EISCAT レーダーの概要

EISCAT(European Incoherent Scatter)レーダーは北欧において、EISCAT 科学協会(イギリス、ドイツ、フランス、ノルウェー、スウェーデン、フィンランドの欧州 6 ヶ国および日本)によって運営されている非干渉散乱(Incoherent Scatter : IS)レーダーシステムである。EISCAT レーダーシステムは、UHF(Ultra High Frequency)レーダー、VHF(Very High Frequency)レーダー、ESR(EISCAT Svalbard Rader)の独立した 3 つのレーダーシステムから構成されている。レーダーの仕様を表 3.6 にまとめた。

スカンジナビア北部に設置されている UHF レーダーシステムは、送信周波数 931 MHz の 3 局方式のレーダーシステムであり、口径 32 m のパラボラアンテナ 3 機により構成されている。送受信局はノルウェーのトロムソ(69.58°N , 19.22°E)にあり、これ以外に 2 つの受信局が、スウェーデンのキルナ(67.86°N , 20.44°E)とフィンランドのソダンキラ(67.36°N , 26.63°E)に設置されている。このレーダーシステムの大きな特徴は、トロムソ局から送信した電波の散乱波を、3 地点にて同時受信することができ、3 次元的な物理量の測定が可能なことである。これは 3 次元速度ベクトル

の導出や温度の異方性の研究などに非常に有効である。

VHF レーダーは、送信周波数 224 MHz を用いており、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型のアンテナ 4 枚から構成されている。最大 4 方向を同時に観測することができる。この VHF アンテナは仰角方向には自由に可動できるが、方位角方向には機械的に可動できない。ただし、電磁波の伝送ケーブル内における伝搬遅延を用いることにより、方位角方向 20 度程度は東西にビームを変動させることができる。ポーラキャップ内の電場の変動測定やトップサイド電離圏の観測に活躍している。

ESR はスバルパール諸島のロングイヤビン(78.15°N, 16.03°E)に設置されており、送信周波数は 500 MHz である。口径が 32 m の可動式と 42 m の沿磁力線方向固定式のパラボラ型アンテナが設置されている。最短 3.2 秒で両アンテナを切り替えて用いることができる。このレーダーは、太陽風のプラズマ粒子が直接地球に降り込むことができるカスプ領域に設置されており、「昼間側」カスプ領域において、オーロラ光学観測との同時観測が可能な世界唯一の IS レーダーである。

図 3.7 は、トロムソ、キルナ、ソダンキラ、ロングイヤビンの位置を地図上に示した。これら 3 つのレーダーシステムにより幅広い領域の電離圏の観測が可能となっている。本研究においてはトロムソにおいて光学観測を行い、UHF レーダーシステムとの同時観測を行っている。

3.2.2 EISCAT レーダーから得られる物理量

IS レーダーである EISCAT レーダーは、基本的には自由電子によるトムソン散乱を利用している(より正確にはイオン音波による散乱)。この場合、散乱波の強度から電子密度を、また散乱スペクトルから電子温度を知ることができる。電離圏におけるデバイ長は、電子密度 $n_e \sim 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 $T_e \sim 10^3 \text{ K}$ として、

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \sim 6.9 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3.1)$$

ただし、 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (真空の誘電率)

$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/k}$ (ボルツマン定数)

$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ (電荷素量)

となる。EISCAT レーダーで用いている送信波長は、UHF レーダーシステムで約 0.32 m であり、電離圏における電子のデバイ長よりも長い。このため、電子の自由運動による散乱波でなく、イオンにコントロールされた電子による散乱波を受信することになる。すなわち、観測する速度および温度は、イオンによるものであると言える。

図 3.8 に受信スペクトルの例を示した。イオンの熱運動によってスペクトル線が広がり、イオンのバルクな運動によるドップラーシフトの効果で中心周波数が（送信周波数に対し）シフトする。この IS スペクトルに対し最小自乗法によるフィッティングをおこない（イオン組成は仮定）、イオン温度、電子温度、イオン速度、電子密度を求めている。すなわち、イオンラインの幅からイオン温度を、中央のイオンラインとイオンラインの凹みからイオン温度と電子温度の比を、中心周波数のシフトからビーム視線方向のイオン速度を求めている。また、受信強度から、電子とイオン温度の比を考慮することにより、電子密度を求めている。これら 4 つの物理量（電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度）が EISCAT レーダーで直接的に導出される物理量である。

EISCAT UHF レーダーシステムは、3 局方式を用いているため 3 次元的なイオン速度の導出が（仮定なく）できる。F 領域におけるイオンの 3 次元速度より、磁場に直行した方向の電場ベクトルの導出が可能である。今回の観測において、3 地点のレーダーの視野が合わさる点を約 290 km にし、そこでの 3 次元イオン速度を導出した。磁場モデルを用いることにより、磁力線に直行した電場ベクトルを導出することができ、

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \quad (3.2)$$

となる。ここで \mathbf{E} は電場ベクトル、 \mathbf{v}_i は 3 次元イオン速度、 \mathbf{B} は磁束密度ベクトルである。

このように、(適切な)モデルを組み合わせることによって EISCAT レーダーの観測量から、間接的ではあるが、電流、電気伝導度、ジュール加熱率、中性風速度などの物理量の導出が可能である。

3.2.3 EISCAT レーダーの観測モード

EISCAT レーダーの観測は、年間約 2500 時間行われている。そのうち半分の観測時間はコモンプログラム(CP:共通実験)と呼ばれる観測に当てられる。これにより EISCAT レーダーは、超高層大気の基本物理量を決まった方式で長期間に渡って観測している。例えば、トロムソ UHF レーダーはほぼ 20 年に亘るデータを蓄積してきている。CP で得られたデータは、加盟国の研究者のみだけでなく、全世界の研究者に開放されている。残りの半分の時間は、スペシャルプログラム(SP:特別実験)と呼ばれる観測に使われる。これにより、観測時間が、加盟各国の分担割合に応じて分配され、各研究者が独自の目的の特別観測を行っている。

CP には、CP-1 から CP-7 までの 7 種類の観測モードがある。観測モードは、CP-1 (磁力線方向観測)、CP-2 (4 方向スキャン観測)、CP-3 (磁気子午線方向スキャン観測)、CP-5 (CP1 と CP3 を組み合わせた観測)が、UHF レーダーシステムを用いた観測モードであり、CP-4 (ポーラーキャップ観測)、CP-6 (中間圏観測)、CP-7 (トップサイド電離圏観測)が、VHF レーダーを用いた観測モードである。本研究では、SP として UHF レーダーシステムを使用し、観測モードは沿磁力線方向に固定した CP-1 モードを使用した。

3.3 観測

2003年3月1日から3月9日にトロムソ EISCAT レーダーサイトに光学観測機を設置してオーロラの光学観測を行った。光学観測機として2機のデジタルカメラ(Fujifilm 製 FinePix S2pro、Canon 製 EOS-1D)を用いた。この観測期間のうち3月1日から3月5日の5日間に、EISCAT UHF レーダーシステムによる電離圏観測を併せ行い、光学観測機との同時観測を行った。EISCAT UHF レーダーシステムは、この5日間、毎日、19時(UT)から翌日1時(UT)までの6時間、沿磁力線方向に固定した観測モードにて観測を行った。トロムソの地方時(LT)と世界時(UT)との差は+1時間である。

今回の実験において、EISCAT UHF レーダーシステムのパルススキームは(当時)開発されたばかりの arc1 と呼ばれるものを用いた。arc1 は、高時間分解能(0.44 秒)と、高高度分解能(0.9 km)の観測を目的として開発された。arc1 の観測レンジは、96 km から 422 km である。今回の観測では4秒ごとにデータを取得している。

FinePix S2pro は、観測小屋のドーム内に設置した(EISCAT レーダーから 200 m 程度離れている)。水準器を用いてカメラを水平に設置し、地磁気の北をカメラの上側にして鉛直上向きで観測を行った。撮影間隔は30秒、露出時間は15秒(3月4日、5日は10秒)で撮影を行い、USB2.0 インターフェイスで PC に転送して JPEG 形式に圧縮して保存した。撮影時刻は、デジタルカメラ本体の時刻が刻まれるため、観測を開始する前に時刻の較正をおこなっている。

Canon 製 EOS-1D は、観測小屋の隣にある観測用の台上に設置した。EISCAT レーダーと同方向を測定するため、方位磁石を用いて位置を決め、地磁気南向きにセットし、沿磁力線方向(仰角 77 度)に向けた。画像の転送と PC の処理の問題で転送エラーが時折発生するため、露出時間、撮影間隔は観測状況により変更した。露出時間は、0.5 秒から 2 秒、撮影間隔は 30 秒から 5 秒に一枚の間隔で撮影を行った。撮影時刻として、PC の時刻が刻まれる。PC の時刻較正は、ネットワークタイムプロトコル

(NTP)を用いて、NTP サーバーと同期させた。画像は、IEEE1394 インターフェイスでカメラから PC に転送して、JPEG 形式に圧縮して保存した。

3.4 解析方法

3.4.1 デジタルカメラ画像の位置較正

本研究では、光学観測から得られた画像をもとにオーロラの空間時間分布を同定するため、カメラがどちらの方向を向いていたかが重要になる。EOS-1D を沿磁力線方向に向けているため、EISCAT UHF レーダーの視野が、その画像のほぼ真ん中に位置するはずであるが、十分に精度であるとは言えない。そこで、より高精度に位置決めをするため、画像に写っている星を用いて視野の位置較正を行った。その後、EISCAT UHF レーダーの観測範囲を画像上に照らし合せ、高度 115 km において直径 0.6° の視野円を示した (図 3.4、図 3.5)。一方で EISCAT UHF レーダーの位置精度はかなり正確である。例えば 3 局方式においてリモートサイトから信号の受信が可能なことにより確認できる。

3.4.2 高時間分解能レーダーデータの推定・解析手法の開発

本研究では、光学観測によって得られた画像をもとに、オーロラの空間時間分布を同定し、対応する領域における EISCAT UHF レーダーにより導出された電子密度の変動とイオン温度の変動を調べている。今回の EISCAT レーダー観測では、取得した IS スペクトルの最小時間分解能は 4 秒である。2 章の 2) で述べたように、本研究で対象とするディスクリートオーロラの外側近傍やブラックオーロラ領域の特性を知るためには、空間スケールや移動速度、レーダービームの空間的拡がりの関係から 4 秒程度の高時間分解能のデータが必要である。しかしこれらの領域の電子密度はオーロラアーク領域に比べて低いため、電離圏からの散乱波強度は弱く、4 秒値 IS スペクトルデータからは有意な物理量を導出するこ

とは難しい。そのため、有意な高時間分解能データを得るために、新たなデータ処理の方法が必要とある。この点が今迄、IS レーダーを用いた微細構造を持つオーロラの研究が行えなかった最大の理由である。本研究では以下に示すように、IS スペクトルを用いて、4 秒の時間スケールでイオン温度をはじめとする物理パラメータの変動を推定できる新たな推定方式を開発導入して解析を行った。

1) 4 秒サンプリングの電子密度データの取得

4 秒値の IS スペクトルデータから、電子密度についても有意な値を得ることは困難である。そのため本研究では受信散乱波強度（受信パワー）を用いて、電子密度を推定する。電子密度 N_e と受信パワー P との間には次のような関係がある。

$$P \propto N_e / \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right)$$

ここで、電子温度 T_e とイオン温度 T_i の比を一定と仮定すると、受信パワーと電子密度との間には比例関係が成り立つ。但し、受信パワーのみから電子密度以外のイオン温度等のパラメータは導出できない。

1) 4 秒サンプリングのイオン温度推定方法の開発

4 秒値 IS スペクトルデータの Signal-to-Noise ratio（以下 S/N 比）は低く、有意な値を得るためには、イオン温度であれば数十秒から数分のデータ積分が必要となる。そのため 4 秒サンプリングでデータを取得しても、それらを複数個積分する必要がある。積分した時の信号強度は時間（またはデータ数）に比例するが、ノイズ強度は時間（またはデータ数）の $1/2$ 乗に比例して大きくなる。すなわち S/N 比は積分時間の $1/2$ 乗で改善される。今回の実験データでいえば、最低 20 秒の積分が必要であった。これは、基本となる 4 秒値データを連続 5 つ積分する必要があることを意味する。この様子を図 3.9 に表す。一つ一つのデータの質は有意なデータのレベル（横線）よりも低いため信頼できないが、それらを足しあわせて 20 秒値データとすると、有意なデータレベルを上回る。そのため、

1) 20 秒データは信頼できる有意なデータとなり、

2) 20 秒データ間の変動、即ちデータ間の差も、ある誤差範囲で、有意となる

一方、前述のように本研究で用いる arc モードデータは 4 秒データが大本の基本データであり、それを連続 5 個積分する方法はソフトウェア的に様々なパターンが可能である。4 秒データの時系列を取得されるデータを $f(n)$ ($n=1,2,3,\dots$) と表すことにすると、一般的に用いられている積分方式は図 3.10(a)に示すように、

$$\begin{aligned} & f(1)+f(2)+f(3)+f(4)+f(5) \\ & f(6)+f(7)+f(8)+f(9)+f(10) \\ & f(11)+f(12)+f(13)+f(14)+f(15) \\ & \cdot \\ & \cdot \end{aligned}$$

観測時間の重なりがない方式で 20 秒毎のデータが得られる。

今回新たに、4 秒の基本データを図 3.10(b)に示すように、4 個は前のデータと重なるようにずらしながら 5 個積分する、という方式を導入する。積分した和を S と表すとすると、具体的には

$$\begin{aligned} S(3) &= f(1)+f(2)+f(3)+f(4)+f(5) \\ S(4) &= f(2)+f(3)+f(4)+f(5)+f(6) \\ S(5) &= f(3)+f(4)+f(5)+f(6)+f(7) \\ S(6) &= f(4)+f(5)+f(6)+f(7)+f(8) \\ & \cdot \\ & \cdot \end{aligned}$$

のように積分を行う（和のデータの時刻は中央のデータの時刻としている）。この場合も上記 1) から個々の積分データは有意であると言えるが、従来の方式と異なるのは、20 秒データでなく 4 秒毎のデータが得られる点である。勿論個々のデータは 20 秒間を平均した、いわば 5 個ずつのデータの移動平均を取ったデータであるが、上記 2) からこの 20 秒値データ間の変動（差）も有意であることから、以下に示すように 4 秒毎の物理量 f の変動を推定することが可能となる。

5 個の連続したデータの和 $S(n)$ 間の差分を

$$g(n) = S(n+1) - S(n)$$

とすると、差分 $g(n)$ は、

$$g(3) = S(4) - S(3) = f(6) - f(1)$$

$$g(4) = S(5) - S(4) = f(7) - f(2)$$

$$g(5) = S(6) - S(5) = f(8) - f(3)$$

$$g(6) = S(7) - S(6) = f(9) - f(4)$$

$$g(7) = S(8) - S(7) = f(10) - f(5)$$

$$g(8) = S(9) - S(8) = f(11) - f(6)$$

となる。

即ち、積分されたデータ列 $S(n)$ から、初期値 $f(1)$ から $f(5)$ の値が与えられれば、すべての $f(n)$ についての解を求めることができる。この方式を図 3.11 に表す。簡単のため、4 秒値データの最初の 5 つは同じ値、6 つ目のデータのみ値が変わる場合について説明する。この場合隣あう 20 秒値データの差は 6 つ目のデータの値になる。4 秒データそのものは有意でないが、この方式で得られた差に対応する 4 秒データは有意である。実際のデータでは個々の 4 秒値データは変化するので、20 秒積分データの差から 4 秒データを推定する本方式は初期値問題となる。



図 3.1 Fujifilm FinePix S2pro の概観。
Nikon Fisheye Lenz 8 mm/F2.8 が付いている状態。

表 3.1 Fujifilm FinePix S2pro の仕様

ISO 感度	617 万画素
記録方式	23.0 mm×15.5 mm スーパー CCD ハニカム、原色フィルター採用 4256×2848 /3024×2016 /2304×1536 /1440×960 ピクセル
レンズマウント	最大記録画素数：4256×2848(1212 万画素)
シャッタースピード	ISO100/160/200/400/800/1600 相当
入出力端子	TIFF-RGB、JPEG、DPOF、CCD-RAW
寸法	ニコン F マウント
質量	30 秒 ~ 1/4000 秒(バルブ撮影可能)
	USB(専用ジャック)、IEEE1394(4 ピン)
	(幅)141.5 mm×(高さ)131.0 mm×(奥行き)79.5 mm (レンズ、突起部含まず)
	約 760 g(レンズ、電池、記録メディア含まず)

表 3.2 Fujifilm FinePix S2pro 使用レンズ

Lenz	FOV ^注
Nikon Fisheye Lenz 8 mm/F2.8	180×120 °

注：FOV: Field of View



図 3.2 Canon EOS-1D の概観
Canon Lenz 85 mm/F1.2 が付いている状態。

表 3.3 Canon EOS-1D の仕様

ISO 感度	約 415 万画素
記録方式	高感度・高解像度大型単板 CCD センサー、原色フィルター採用
レンズマウント	2496×1662 / 2464×1648 / 1232×824 ピクセル
シャッタースピード	100 / 200 ~ 1600 (1/3 段ステップ) / 3200 相当
入出力端子	JPEG、RAW
寸法	キヤノン EF マウント
質量	1/16000 ~ 30 秒 (1/3 段ステップ) (パルプ撮影可能)
	IEEE1394 (専用ケーブル使用)
	(幅) 156 mm × (高さ) 157.6 mm × (奥行) 79.9 mm
	1250 g (本体のみ。電池 335 g)

表 3.4 Canon EOS-1D 使用レンズ

Lenz	FOV
Canon Lenz 50 mm/F1.0	32.0×21.6 °
Canon Lenz 85 mm/F1.2	19.2×12.8 °



図 3.3 2003 年 3 月 2 日に撮影された Fujifilm FinePix S2pro(Nikon Fisheye Lenz 8 mm/F2.8 使用)の画像。画角は、 $180 \times 120^\circ$ である。画像の方向は、上が地磁気北で、右が地磁気西である。



図 3.4 Canon EOS-1D(Canon Lenz 50 mm/F1.0 使用) で撮影された画像。FOV は $32.0 \times 21.6^\circ$ 。115 km における視野は、 66×44 km である。中心付近の円は、EISCAT UHF レーダーの視野($\sim 0.6^\circ = \sim 1.2$ km)を示している。画像左下にオーロラが確認できる。画像右上には雲が確認できる。



図 3.5 Canon EOS-1D(Canon Lenz 85 mm/F1.2 使用)で撮影された画像。FOV は $19.2 \times 12.8^\circ$ 。115 km における視野は、 34×26 km である。中心付近の円は、EISCAT UHF レーダーの視野(0.6°)を示している。

表 3.5 超高感度オーロラ TV カメラ(XYBION ISS750)の概要

レンズ	50 mm/F0.95
FOV	14.3 × 10.9 °
レンズマウント	C マウント
Exposure	25 images per second
解像度	720 × 576 ピクセル
フォーマット	PAL
寸法	(幅)79 × (高さ)102 × (奥行き)226 mm
質量	1.9 kg



図 3.6 超高感度オーロラ TV カメラの概観



図 3.7 EISCAT レーダーサイトのあるtromsø、キルナ、ソダンキラ、ロングイヤビンの位置を地図上に示す。tromsøに UHF レーダーと VHF レーダーが設置されており、キルナ、ソダンキラに受信用の UHF レーダーが設置されている。ロングイヤビンに UHF レーダー 2 基が設置されている。

表 3.6 EISCAT レーダーシステムの概要

Location	Tromsø		Kiruna	Sodankylä	Longyearbyen
Geographic Latitude	69°35' N		67°52' N	67°22' N	78°09' N
Geographical Longitude	19°14' E		20°26' E	26°38' E	16°03' E
Inclination	77°30' N		76°48' N	76°43' N	75°18' N
Invariant Latitude ground	66°12' N		64°27' N	63°34' N	75°18' N
Band	VHF	UHF	UHF	UHF	UHF
Frequency	224 MHz	931 MHz	931 MHz	931 MHz	500 MHz
Bandwidth	3 MHz	8 MHz	8 MHz	8 MHz	10 MHz
Transmitter	2 klystr	2 klystr			8 klystr
Channels	8	8	8	8	6
Peak Power	2×1.5 MW	1.5 MW			500 kW
Average Power	2×150 kW	150 kW			125 kW
Pulse Duration	1 μs-2.0 ms	1 μs-1.0 ms			1 μs-2.0 ms
Phase coding					Binary
Min interpulse	1.0 ms	1.0 ms			0.1 ms
Receiver	analog-digital				
Digital Processing	14-bit 15MHz ADC lag profiles 32-bit complex				12-bit 10MHz ADC lag profiles 32-bit complex
Antenna	4 30×40m parabolic cylinders	32 m parabolic dish	32 m parabolic dish	32 m parabolic dish	42 m and 32 m parabolic dishes
Feed system	line feed	Cassegrain	Cassegrain	Cassegrain	Cassegrain
Gain	46 dBi	48.1 dBi	48.1 dBi	48.1 dBi	42.5 dBi or 44.8 dBi
Polarization	circular	circular	any	any	circular
System merit figure	$30 \text{ MWm}^2/\text{K}$	$8 \text{ MWm}^2/\text{K}$			$3 \text{ MWm}^2/\text{K}$

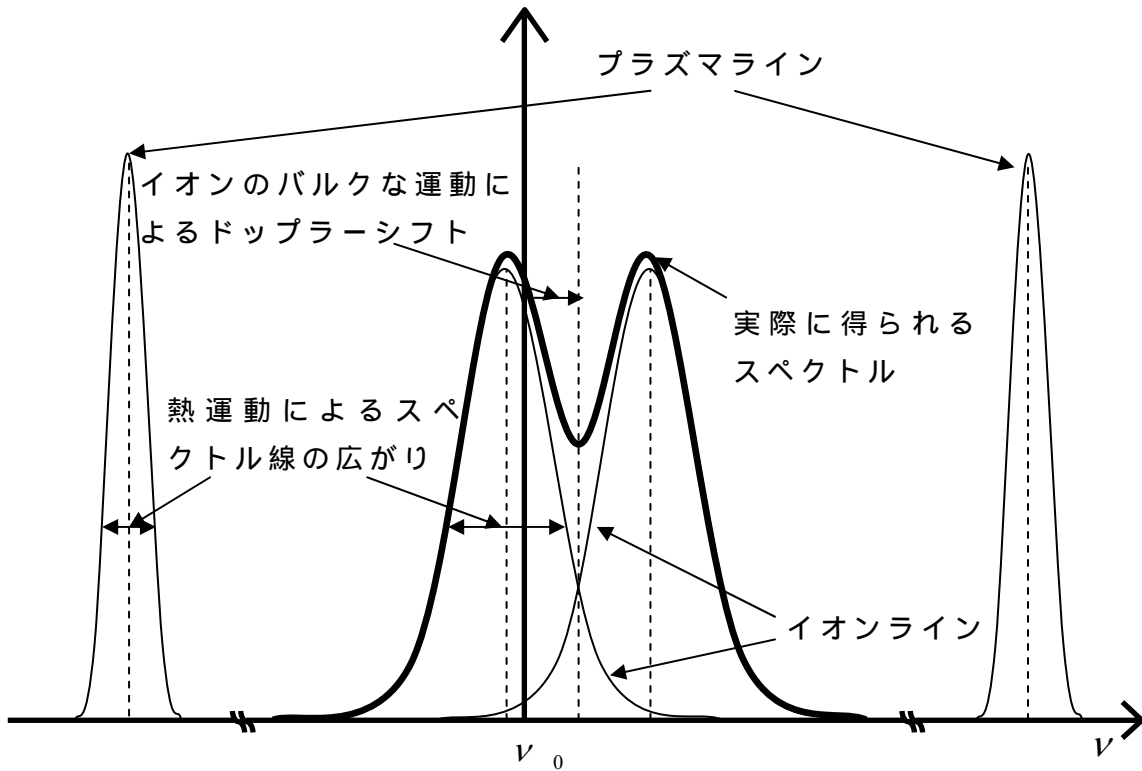


図 3.8 受信するスペクトルの模式図。

プラズマラインは、電子音波による散乱を示し、イオンラインは、イオン音波による散乱を示している。プラズマラインは、電子の熱運動によって、イオンラインは、イオンの熱運動によって周波数に広がりが出る。イオンのバルクな運動によるドップラーシフトの影響から、送信波の振動数(ν_0)がシフトするため、全体として周波数がシフトする。

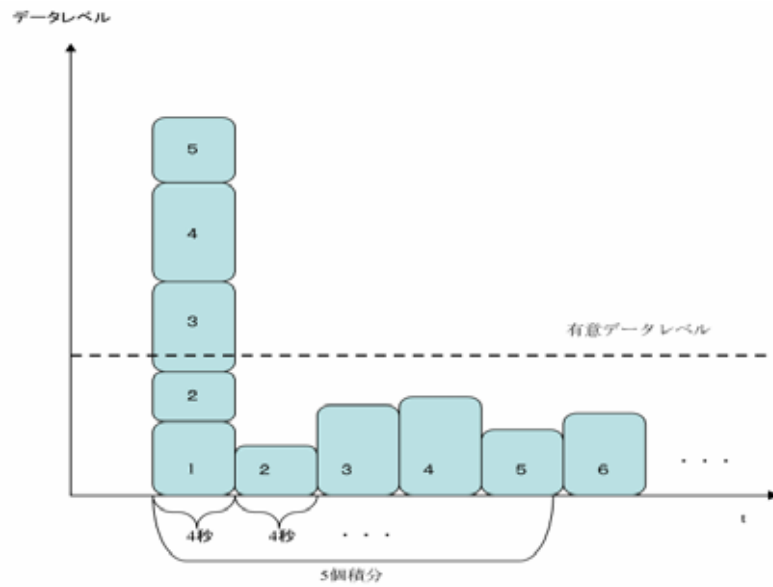


図 3.9 一つ一つのデータの質は有意なデータのレベル（横線）よりも低いため信頼できないが、それらを足しあわせて 20 秒データとすると、有意なデータレベルよりも充分上になる。

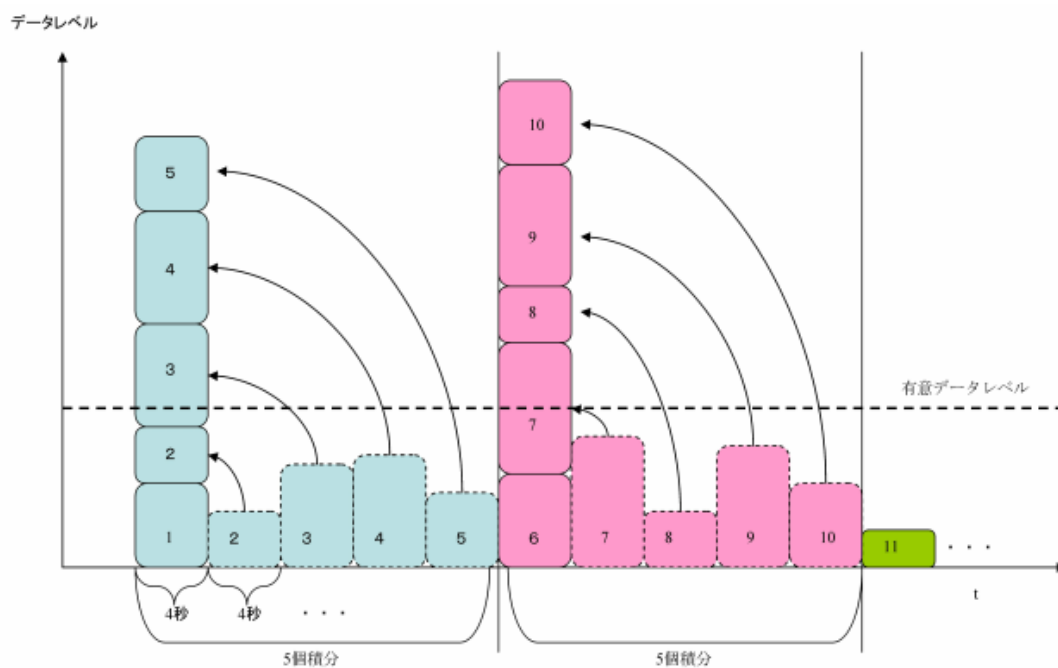


図 3.10(a) これまでのやり方。駅分時間がオーバーラップしないように積分範囲を決めている。

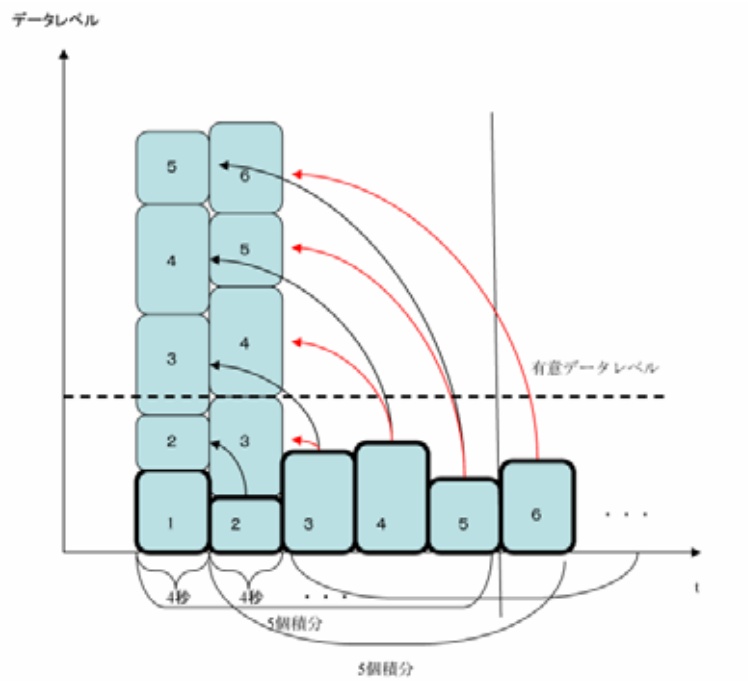


図 3.10(b) 本研究で用いた方法。4 秒値のデータをひとつひとつずらして 20 秒値を得ている。

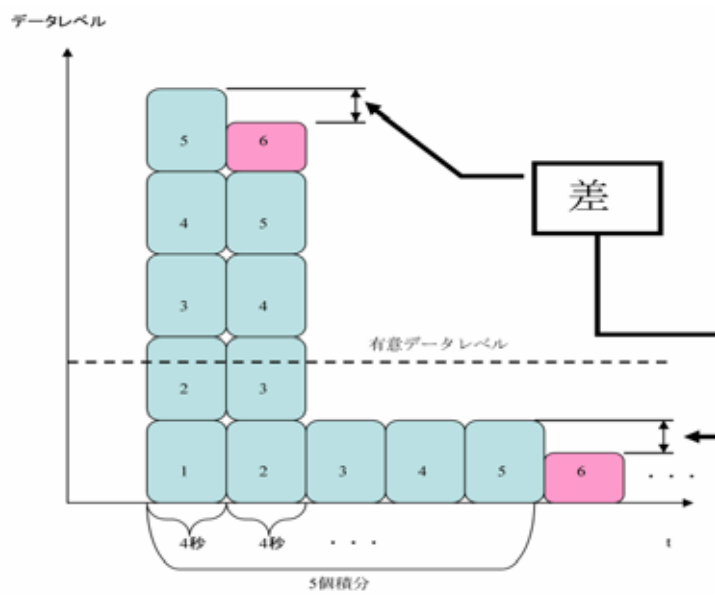


図 3.11 4 秒のデータは有意データレベルまで達していないので、データとしては使えないが、20 秒積分したものからは、その差について議論できる。

第 4 章 2003 年 3 月の観測結果

2003 年 3 月 2 日の EISCAT-光学同時観測データから次の 5 イベントについて観測結果を示す。

- (1) 1949 UT 付近のイベント：EISCAT UHF レーダーの視野（送信ビーム）がディフューズオーロラ中からディスクリートオーロラを経てオーロラの外に出たイベント
- (2) 2220 UT 付近のイベント：レーダーの視野がクリアな境界を持つオーロラのエッジ領域を捉えたイベント。
- (3) 2056 UT 付近のイベント：レーダーの視野が西向きオーロラサージのフロント部分を捉えたイベント。
- (4) 2035 UT 付近のイベント：レーダーの視野がオーロラアークの横に出現したブラックオーロライベントを横切ったイベント。南北に伸びるオーロラアークは南北に伸びた構造で、構造を保ちながら西に移動した。
- (5) 2210 UT 付近のイベント：フィラメント状のブラックオーロラがその微細構造を保ちながら南に移動しレーダーの視野を横切ったイベント。

これらの 5 イベントは、(1)から(3)のイベントが、ディスクリートオーロラの境界領域が EISCAT UHF レーダーの視野を横切るイベントである。(4)と(5)のイベントは EISCAT UHF レーダーの視野が、ブラックオーロラ領域を捉えたイベントである。

(1)から(5)のイベントについて、光学観測と EISCAT UHF レーダーから得られた結果を以下で述べる。

4.1 1949 UT 付近のイベント

4.1.1 光学機器によるオーロラ観測結果

図 4.1 は、FinePix S2pro で撮影された 1946 UT から 1953 UT までの全天カメラの画像である。30 秒毎に露出時間 15 秒で取得された。この時間

帯において、オーロラアークが高緯度から低緯度へ移動して行く様子が見てとれる。画像の各時間帯において見られる右上(北西)から中央付近までの感光した(黄色の)部分は、街明かりが雲により散乱された光である。

図 4.2 は、EOS-1D で 1941 UT から 1954 UT 撮影された画像で、に図 4.1 を撮影した FinePix S2pro より更に狭視野である。中央の白い丸は 3 章で説明したように EISCAT UHF レーダーの視野(送信ビーム)である。画像には、雲が写っているが、オーロラは雲を通して観測されており、その形態と動きは十分に同定可能である。図 4.2 において、1941:31 UT から 1948:30 UT まで、撮影時間に約 7 分間のデータ欠損があるのは、EOS-1D の設定変更をしていた為である。1949:00 UT から 1949:30 UT において、オーロラアークが EISCAT UHF レーダーの視野を北西から南東に横切り、オーロラの中から外へ出たことが見て取れる。

EISCAT UHF レーダーの視野を横切った時間帯(1949:00 UT から 1949:30 UT)におけるオーロラの移動速度はオーロラ画像から計算でき、約 0.7 km/s で南東向きであった。尚、この間のオーロラの形態と動き(動態)は超高感度 TV カメラ観測の画像を用いて連続的に動いていることを確認した。

4.1.2 EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果

(a) 電子密度とイオン温度の比較(20 秒値)

図 4.3 は、EISCAT UHF レーダーが観測した電子密度(上段)及びイオン温度(下段)の観測結果をカラープロットで示している。データの積分時間は 20 秒である。横軸は世界時(UT)をあらわし、縦軸は高度 90 km から 200 km をあらわしている。プロットのカラーと物理量の対応はそれぞれ右側に示してある。

図 4.3 の上段に示される 19:49 UT 付近の電子密度の増減の様相は、以下のように区分される。

1946:20–1948:20 UT

1946:20 UT あたりから電離圏の電子密度は増えはじめ、1947:20–1947:40 UT で極大となり、その後に減少。1948:00–1948:20 UT で極小。図 4.3 の下段のイオン温度との対応は、電子密度極大でイオン温度は周辺より低下し、電子密度の減少とともに温度が増大する傾向が見られる。

1948:20–1949:20 UT

電子密度が急激に増大。イオン温度は大きく低下している。

1949:20 UT-1949:20 UT を境界に電子密度が急激に減少。イオン温度は急激な増大を示す。

ここで注意すべきことは、図 4.3 のデータは IS スペクトルから導出した積分時間 20 秒の物理量であるため、のオーロラ境界付近のデータはオーロラの部分とその外側のオーロラの無い部分双方の情報を含んでしまっている。そのため、オーロラ内外部を分離してイオン温度の増減を見ることができない。前述のように IS スペクトルから有意な物理量を導出するためには最低 20 秒程度必要であることを考えると、4 秒程度の時間分解能で現象を見るためには、次ぎに示す電子密度についてはパワープロファイルのデータが、イオン温度については新たに開発した 20 秒データ相互の差分を利用した方法を用いる必要である。

(b) パワープロファイル(電子密度 4 秒値)

図 4.4 は、EISCAT UHF レーダーのパワープロファイルをカラープロットで示したものである。3 章で示したように、パワープロファイルからイオンと電子の温度比を仮定することで、電子密度を導出することができる。データの時間幅は 4 秒である。横軸は世界時(UT)を表わし、縦軸は 90 km から 200 km までの高度を表している。プロットのカラーと物理量の対応はそれぞれ右側に示してある。

まず、図 4.4 の電子密度の高度-時間分布を見ると、図 4.3 上段の IS スペクトルから導出した電子密度と、時間分解能は異なるが、(a)の から示した電子密度分布の変動の様子が同じであることが分かる。

更に上記 の電子密度の急激な増加が 1948:32-1948:36UT の間に起きたこと(20 秒サンプルのデータでは、1948:20-1948:40UT の間に起きたと同定された)、 と の間の電子密度の急激な減少が 1949:08- 1949:12UT に起きたことも分かる。

電子密度分布は降込み粒子のエネルギーの情報を与える。で見られる電子密度の急激な増加は、回りの領域に比べて広い高度範囲を持っている。これは降込み粒子が、高度 190 km 付近を電離する数 100 eV から下限高度 100 km に stopping height を持つ約 20 keV までの広いエネルギー範囲を持っていたことを表している。

尚、1949:44 UT から 1949:52 UT に見られる電子密度が異常に高い時間帯のデータについては、IS スペクトルからオーロラに伴う電離ではなく、ノイズであることが分かっているので、解析から除外する。

(c) パワープロファイルとイオン温度の比較

図 4.5 は、高度 135 km 付近におけるパワープロファイルの時間変動をあらわしている。縦軸は強度、横軸は時間である。図 4.6 は、同じく高度 135 km 付近におけるイオン温度の時間変動である。縦軸は温度、横軸は時間である。イオン温度は 3 章の「4 秒サンプリングのイオン温度推定方法の開発」で示した方法で得られたデータで、4 秒データ連続 5 ユニットの積分を 1 ユニットづつずらしながら行ったもので、4 秒毎のデータであるが、隣り合うデータはオーバーラップしたデータを含んでおり、お互いに独立ではない。図 4.6 の各プロット点における横軸方向のエラーバーは、20 秒の積分時間の幅を示している。なお、(b)で述べたように 1949:44 UT から 1949:52 UT 1949 UT 付近の電子密度とイオン温度は意味がない。

図 4.5 と図 4.6 の 2 つの図を比較すると、 の期間の最後 1948:20 UT 付近にみられる電子密度の減少に伴いイオン温度の上昇が、 と の間の 1949:08–1949:12 UT 当たりの電子密度の急激な減少に伴い、イオン温度の上昇が認められる。しかし、このイオン温度は 20 秒間の移動平均データなので、パワープロファイルの 4 秒データと正確に比較することはできない。そのため、次に述べるように、3 章の「4 秒サンプリングのイオン温度推定方法の開発」で述べた 20 秒積分データ間の差分を用いてイオン温度を推定する。

(d) 差分法によるイオン温度推定（4 秒値）

イオン温度が上昇し始める時間は、差分法によってより高い時間分解能で求めることができる。図 4.6 からイオン温度が安定してほぼ一定であった 1947:30 UT 付近のイオン温度データを初期値として用いて、差分法を用いて 4 秒毎のイオン温度の推定を行った。

図 4.7 にその結果をあらわす。図 4.4 と図 4.5 に見られる の期間の最後 1948:20 UT 付近にみられる電子密度の減少に伴い、1948:20-24 UT にイオン温度が約 400 度 K 上昇し、1948:32-36 UT で減少している。また、 と の間の 1949:08–1949:12 UT にみられる電子密度の急激な減少に伴い、イオン温度が約 700 度 K 上昇し、1949:16-20 UT に減少していることが分かる。この温度の差 (700 K) は、エラー値を考慮しても有意な差であった。

4.1.3 1949 UT 付近のイベントのまとめ

の期間に見られたオーロラの移動速度は南東向きに 0.7 m/s であった。このオーロラが EISCAT UHF レーダーの視野から出た時間は、1949:12 UT であった。

イオン温度は、レーダー視野がこのオーロラに入る直前で 400 度 K、オーロラから離れた直後で約 700 度 K 上昇した。イオン温度が上昇している時間は、ディフューズオーロラの中でオーロラアークまでの 12 ± 4 秒間で、オーロラアークから出たところから 8 ± 4 秒間であった。オーロラの移動速度を考えると、その移動方向の幅は 8.4 ± 2.8 km、 5.6 ± 2.8 km であった。なお、この期間のオーロラの移動方向の幅は 19.6 ± 2.8 km と見積もられた。もし、この期間のオーロラの境界の外側（1949:12 UT 以降）に下向きの沿磁力線電流（リターン電流）があったとすると、その幅は 3-8 km（ 5.6 ± 2.8 km）であったと推定される。

4.2 2220 UT 付近のイベント

4.2.1 光学機器によるオーロラ観測結果

図 4.8 は 2218 UT から 2223 UT に FinePix S2pro で撮影された全天カメラの画像である。低緯度側にディフューズオーロラを伴ったオーロラアークが低緯度側に移動している。低緯度側への移動速度は、約 0.6 km/s である。オーロラアークの境界域は、2220 UT 付近で天頂付近まで達し、その後、高緯度側へ戻るのが見てとれる。高緯度側への移動速度は約 1 km/s である。

図 4.9 は、2219 UT から 2220 UT における EOS-1D の画像を示している。2220 UT 付近で EISCAT UHF レーダーの視野が、境界のはっきりしたオーロラアークの縁が捉えている。2220:23 UT の画像では、EISCAT UHF レーダーの視野（磁気天頂方向）がオーロラアークの境界からオーロラの外に出ている。この境界のはっきりした領域の外側（高緯度側）には、薄いディフューズオーロラが出現しており、2220:23 UT 付近でその領域内にレーダーの視野が入っている。さらに、超高感度 TV カメラの動画データより、このオーロラアークは、東向きの流れを持っていること、2220:20 UT から 2220:28 UT に EISCAT UHF レーダーの視野がオーロラアークの外側のディフューズオーロラ中に入ったことが確認された。その時 EISCAT UHF レーダーの視野とオーロラアークとの距離は 3 km 程であった。

4.2.2 EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果

(a) 電子密度とイオン温度の比較(20 秒値)

図 4.10 上段の電子密度データから、2215 UT から 100 km から 140 km 当たりに電離の増加がみられ、2220:00-:40 UT に電子密度がさらに上昇しているのが分かる。この期間の後半 2220:20-:40 UT、電離増加の高度も高度 100 km から 200 km まで広がっている。4.2.1 で示したように、2220:20 から 2220:28 UT にはレーダーの視野はアークの外側に出て、ディフューズオーロラ中に入った。図 4.10 下段はイオン温度を示すが、20 秒データからでは電子密度に関連する変動ははっきりとは見られない。

(b) パワープロファイル(電子密度 4 秒値)

図 4.11 のパワープロファイルのカラープロットから、アークに対応した 2220:04 から 2220:20 UT まで、100 km-140 km で電離の増加がみられ、レーダー視野がアークの縁からその周辺のディフューズオーロラに入った 2020:24 UT から 2024:32 UT までは高度 100 km から高度 140 km での電子密度の減少があり、高度 130 km より高高度で同時刻に電子密度の増加があったことが見てとれる。2024:36 UT 以降はまた 100-140 km の電子密度が増加している。

(c) パワープロファイルとイオン温度の比較

(b)より電離高度の変動が見られるため、図 4.12 は、高度 120 km、130 km、150 km 付近の 3 高度におけるパワープロファイルの強度を横軸時間でプロットした。高度 120 km、130 km、150 km に stopping height を持つ降下電子のエネルギーは各々、約 5 keV、2 keV、1 keV である。この図より、高度 120 km と高度 130 km では、2020:24 UT から 2020:32 UT にかけて電子密度が減少し、逆に高度 150 km では電子密度が増加したことが見てとれる。即ちアーク状のオーロラは主として数 keV から数 10 keV の降下電子により作られ、その外縁に出現したディフューズオーロラは数 keV から数 100 eV の降下電子により作られていたことが分る。

図 4.13 は、高度 120 km、130 km、150 km 付近の 3 高度におけるイオン温度を示している。レーダーの視野がオーロラアークの縁からディフューズオーロラ領域に入った時間帯付近において、これらの高度、特に高度 120 km 付近に顕著に、イオン温度の上昇が見られる。

(d) 差分法によるイオン温度推定(4 秒値)

図 4.14 は、2220 UT 付近のイオン温度を一定として、解析方法 2 を用いて導いた高度 120 km でのイオン温度の差分をあらわしている。オーロラアークの境界領域における時間帯で外側にあるとき(2220:24 UT から 2220:32 UT)でのイオン温度の上昇が見られる。イオン温度の上がり幅は 130 K 程である。一方、EISCAT UHF レーダーの視野がオーロラアークに入った 2220:32 UT からはイオン温度が 180 K 程下がっている。

4.2.3 2220 UT 付近のイベントのまとめ

低緯度側への移動速度は、0.6 km/s、高緯度側への移動速度は 1 km/s であった。電子密度は、2020:24 UT から 2024:32 UT に高度 100 km から高度 130 km で減少があり、高度 130 km より高高度で同時刻に電子密度の上昇があった。イオン温度は、オーロラアークを抜け、ディフューズオーロラに入っていた時間(2220:24 UT)に 130 度 K 程上昇した。このときオーロラアークと EISCAT UHF レーダーの視野との距離は 3 km 程のところまでである。その後 EISCAT UHF レーダーの視野がオーロラアークに入った 2220:32 UT からイオン温度が 180 K 程下がっている。

4.3 2056 UT 付近のイベント

4.3.1 光学機器によるオーロラ観測結果

図 4.15 は、FinePix S2pro で 2053 UT から 2105 UT に撮影された全天カメラの画像である。明るく輝くアーク状(もしくはバンド状)のオーロラが、低緯度から高緯度方向へ急速に拡大していくのが見てとれる。また、高緯度側のオーロラのフロントの東側からは、明るく輝くオーロラが渦構造を持ちながら西側に移動していくのが確認できる。トロムソの磁気地方時 MLT は、UT+3.25 hour であることから、真夜中付近で観測されたことが分かる。以上のことより、この現象は、西向きオーロラサージ(westward traveling surge)を捉えていたと言える(トロムソの磁場でも H 成分に大きな負の変動が見られた)。

図 4.16 は、EOS-1D で撮影された 2055 UT から 2101 UT の画像である。

2056:20 UT において全天カメラで確認されたバンド状オーロラのフロント部分が南東側から EISCAT レーダーの視野に近づいてきている(オーロラの動きは超高感度オーロラ TV カメラで確認)。2056:20 UT から 2056:30 UT において、フロント部分の高緯度側への移動は一度止まり停

滞する。この時間におけるオーロラは、レーダーの視野との距離が 5 km 程で停滞していた。

その後、低緯度側に数 km 程後退した後、西の低緯度側から巻き込むようにレーダーの視野にオーロラが入った(図 4.16 の 2056:40 UT、2056:50 UT 参照、オーロラの動きは超高感度オーロラ TV カメラより)。その後、2058 UT 付近でレーダーの視野は、明るいオーロラの領域から弱いディフューズオーロラ領域を捉え、2059 UT 付近でもう一度明るいオーロラの領域に入ったことが確認できる。

2059:30 UT 付近では、カールが形成されていくのが見てとれる。この時間帯において EISCAT UHF レーダーの視野は、ディフューズオーロラとディスクリートオーロラには含まれた、ほとんどオーロラのない領域を観測していたことが、図 4.15 と図 4.16 双方から分る。

4.3.2 EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果

(a) 電子密度とイオン温度の比較(20 秒値)

図 4.17 は、レーダーから得られた、電子密度をカラープロットで示している。2056:20 UT から 2056:40 UT において、100km 以下にまでのびる低い高度での電子密度の増加が確認できる。2056:40 UT からは高度 150 km 以下において、電子密度が急激に増加したことが見てとれる。また、2058:20 UT から 2058:40 UT に電子密度の減少が見られる。その前後の時間にイオン温度が上昇している。2059:50 付近におけるカールの横の領域を捉えていた時間帯では、オーロラアークを捉えていたその前の時間に比べ電子密度は減少している。

(b) パワープロファイル(電子密度 4 秒値)

パワープロファイルをカラープロットであらわした図 4.18 より、電子密度の増加は、2056:32 UT から始まっていることが分かる。この 2056:32 UT から 2056:40 UT における電子密度の増加は、高度 100 km から 120 km の間で起こっている変化であり、オーロラに対応付けると、図 4.16 の 2056:30 UT または 2056:40 UT の画像に写し出されている、強い発光領域の周辺にあるディフューズオーロラの部分に対応している。また、2057:32 UT から 2057:40 UT の間と、2058:20 UT から 2058:32 UT の間に電子密度の減少があることが見て取れる。

(c) パワープロファイルとイオン温度の比較

図 4.19 は高度 135 km 付近におけるパワープロファイルを、図 4.20 には、高度 135 km 付近におけるイオン温度を示している。図 4.19 と図 4.20 を比べると、電子密度の上がる直前でイオン温度が上昇している(2055:30 UT、2056:30 UT、2059:00 UT)ことが見てとれる。また、電子密度が減少するときにもイオン温度が上昇している(2059:40 UT、2100 UT)ことが分かる。2055:30 UT のイオン温度の増加については、オーロラとの対応関係が見られない。

(d) 差分法によるイオン温度推定(4秒値)

西向きトラベリングサージのフロント部分におけるイオン温度を差分法を用いて調べる。このイベントにおいては、オーロラに入る直前のイオン温度のバラつきが大きいので、その直後のイオン温度が安定している時間帯(2057:30 UT 付近)を一定として差分法を用いる。図 4.20 より、高度 135 km 付近のデータはバラつきが多かったため、高度 120 km 付近での評価を行った。図 4.22 は、比較のために高度 120 km 付近でのパワープロファイルを示している。図 4.21 よりレーダーの視野がサージに入る直前の 2056:20 UT から 2056:48 UT でイオン温度の上昇が見られ、サージに入ると温度は減少するのが分る。

4.3.3 2056 UT 付近のイベントのまとめ

オーロラサージに入る直前(サージの外縁の隣接した外側)でのイオン温度の上昇が見られた。その幅は 5 km 程であることが超高感度 TV カメラから求められたオーロラの動きから確認された。イオンの温度が上昇した時間は 2056:20 UT から 2056:48 UT の間であり、その温度幅は 200 度 K 程度である。

4.4 2035 UT 付近のイベント

4.4.1 光学機器によるオーロラ観測結果

図 4.23 は FinePix S2pro で 2031 UT から 2039 UT に撮影された全天カメラの画像である。この時間帯において、ほぼ南北に伸びたオーロラアーチが、北東から南西へと移動して行く様子が見てとれる。各時間帯の画像の北西部分の明かりは、雲による街明かりの散乱光である。天頂付近に雲はない。

図 4.24 は EOS-1D で 2033 UT から 2038 UT において撮影された 10 秒間隔の画像であり、薄いディフューズオーロラ中を南北に伸びたオーロラアークが、西側に移動し、レーダーの視野を横切って行く様子が見てとれる。オーロラアークの西側には、細長いアークの形状をしたブラックオーロラが構造を保ちながらオーロラアークと同じく西側に移動して行く。ブラックオーロラを伴ったオーロラアークの移動速度は、0.3 km/s であった。また、ブラックオーロラの東西方向の幅は 4 km 程（ビームの幅 3 倍程度）であった。

4.4.2 EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果

(a) 電子密度とイオン温度の比較(20 秒値)

図 4.25 は、2033 UT から 2038 UT の EISCAT UHF レーダーの観測から得られた電子密度とイオン温度をカラープロットで示している。2035:20 UT から 2036:20 UT (もしくは 2036:40 UT) において電子密度の上昇が見られた。この時間帯は、(ブラックオーロラ領域を含む)オーロラアークが通過した時間帯に相当する。ブラックオーロラの厚さと移動速度を考慮すると、20 秒データではブラックオーロラの徴候を見ることはできない。

(b) パワープロファイル(電子密度 4 秒値)

図 4.26 のパワープロファイルの変化を見ると、2035:28 UT からオーロラ領域に入り、電子密度は上昇して $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ に達した。レーダーの視野がブラックオーロラ領域に入った 2035:44 UT から 2035:56 UT においては、オーロラ領域の電子密度に比べると電子密度が減少し $2.2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 程度になった。図中ブラックオーロラ内のデータは太い線の丸で表してある。しかし、その変化は、ディフューズオーロラ領域と同等、もしくはそれより高い電子密度の値を示しており、オーロラが存在しなかった 2034 UT 付近の電子密度 $8 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ に比べると充分高いことが分る。即ち本例で示されたブラックオーロラではその回りのオーロラ領域に比べると電子密度は低い、降込み自体はあったと考えられる。

(c) パワープロファイルとイオン温度の比較

図 4.27 は、高度 130 km 付近におけるパワープロファイルを示している。2036 UT の前で電子密度の減少した時間帯が見られる。この時間帯は、ブラックオーロラ領域に相当することが、図 2.24 の 2035:50 UT の画像よりわかる。図 4.28 におけるイオン温度の変化を見てみると、2035 UT のオーロラアークに入る前にイオン温度が上がり、オーロラアークを出た後

にイオン温度の上昇が見られる。しかし、ブラックオーロラ領域においてイオン温度の上昇は見られない。

(d) 差分法によるイオン温度推定 (4 秒値)

図 4.29 は、差分法から求めた高度 135 km 付近におけるイオン温度の変動を示している。2035:20 UT 付近のイオン温度を一定と仮定した。このとき、ブラックオーロラ領域に入った時間帯(2035:44 UT から 2035:56 UT)でのイオン温度の上昇は見られない。むしろ、その時間帯では、イオン温度は数 10 度 K 減少している。

(e) 各高度別のパワープロファイル

図 4.30 は、高度 121 km から、高度 150 km までのパワープロファイルを示している。120 km、130 km および 150 km 付近を最も効率良く電離する降下電子のエネルギーは前述のようにそれぞれ 5 keV、2 keV、1 keV である。横軸は、2035 UT から 2037 UT であらわしている。

図の右下、高度 121 km 付近においては、2035:30 UT 付近のオーロラアーク(最初に遭遇したオーロラアーク)による電子密度の上昇は見られない。高度 123 km 付近になると、このオーロラアークによる電子密度の上昇が見えはじめ、ブラックオーロラに対応する電子密度の減少も現れて来る。てくる。ブラックオーロラ領域とアークとの差は、高度 134 km 付近で最も顕著になり、高度 150 km ではブラックオーロラ領域とオーロラアーク領域との電子密度の顕著な差がなくなる。これはアークの中では降込んでいた 2-5 keV 程度の降下粒子が、降込まなくなり、ブラックオーロラを形成したと考えられる。

4.4.3 2035 UT 付近のイベントのまとめ

ブラックオーロラを伴ったオーロラアークの移動速度は、0.3 km/s であり、ブラックオーロラの東西方向の幅は 4 km 程であった。ブラックオーロラ領域を捉えている時間帯においては、周りのアーク内の電子密度に比べて電子密度が減少している。しかし、その変化は、ディフューズオーロラ領域と同等、もしくはそれより高い電子密度の値を示しており、オーロラの認められない領域の電子密度に比べて 3 倍程度の電子密度であった。また、ブラックオーロラ領域でのイオン温度の上昇は見られなかった。

4.5 2210 UT 付近のイベント

4.5.1 光学機器によるオーロラ観測結果

図 4.31 は、FinePix S2pro で 2206 UT から 2213 UT において撮影された全天カメラの画像である。一様に広がったベール状のオーロラが確認できる。2210 UT 付近で高緯度側からオーロラが後退し、バンド状の構造を持ち始めるが、2213 UT 付近からバンド状の構造は崩れ、はっきりした形のないベール状の構造に戻る。

図 4.32 は、EOS-1D で撮影された 2207 UT から 2212 UT における画像である。全天カメラの画像では、一様に広がっているベール状のオーロラのように見えたが、その中に東西方向の筋状の微細構造があるのがはっきりと写し出されている。この筋状のオーロラは、構造を保ちながら低緯度側に移動している。画像より、南方向へのオーロラの移動速度は、0.26 km/s である。高感度 TV カメラの画像から、2208:13 UT から 2208:20 UT の時間帯に、レーダーの視野はこれらのオーロラの外にあることが確認された。その後、2208:21 UT にレーダー視野はオーロラ領域に入り、2210:10-14 UT の時間帯でブラックオーロラ領域に入った。発光強度の低いアークがレーダーの視野に含まれるが、2210:26 UT から 2210:28 UT の時間帯で、ブラックオーロラ領域を捉えている。2210:35 UT から 2211:10 UT までは、高感度 TV カメラのテープ交換のためデータがない。そのため、この時間については、デジタルカメラの画像から判断すると、2210:41 UT から 2210:51 UT の時間帯において、一部の時間帯でオーロラアークの領域を含んでいるものの、この時間帯は、レーダー視野がブラックオーロラを含む領域を捉えていたと判断できる。

2207 UT から 2212 UT の時間帯におけるオーロラの厚さは、レーダー視野(高度 115 km で約 1.2 km)に比べ半分以下(~ 0.5 km)であると見積もられる。

4.5.2 EISCAT UHF レーダーデータによる観測結果

(a) 電子密度とイオン温度の比較(20 秒値)

図 4.33 は、レーダーから得られた電子密度とイオン温度の変動を示す。レーダー視野がオーロラの外にあったと判断された時間を含む、2208:00 UT から 2208:20 UT で電子密度の減少が見られる。EISCAT UHF レーダーの視野が、ブラックオーロラの領域を捉えた時間を含んでいる、2210:00

UT から 2210:20 UT の時間帯では、電子密度の減少は見られない。ブラックオーロラの領域を捉えていた時間帯の 2210:40 UT から 2211:00 UT の時間帯では、高度 120 km 以上での電子密度の減少が見られる。下段のイオン温度のカラープロットを見るかぎり、イオン温度に有意な増減は認められない。

(b) パワープロファイル(電子密度 4 秒値)

図 4.34 のパワープロファイルとイオン温度の高度別の変化を見てみると、オーロラの外に出ていた時間帯の 2208:13 UT から 2208:21 UT での電子密度の減少が見てとれる。ブラックオーロラ領域にあたる 2210:00 UT から 2210:20 UT の時間帯で高度 120 km において電子密度の減少が見られる。図中ブラックオーロラ内のデータは太い線の丸で表してある。この時間帯ではイオン温度の上昇は見られない。ブラックオーロラ領域を含む 2210:40 UT から 2211:00 UT の時間帯において、電子密度の減少が見られる。またこの時間帯においては、イオン温度の上昇も見られる。図 4.34 の 2210:08 UT から 2210:12 UT のデータは、図 4.4 と同様 IS スペクトルから自然現象ではなく雑音と認められるため、データとしての評価は行わない。

(c) パワープロファイルとイオン温度の比較

図 4.35 は、高度 130 km 付近におけるパワープロファイルであり、図 4.36 は、高度 130 km 付近におけるイオン温度を示している。ブラックオーロラ領域に入った 2210:10 UT から 2210:14 UT の時間帯は、2210:08 UT から 2210:12 UT のデータの信頼性がなく、物理量の評価ができないため、ここでは議論を行わない。

その他のブラックオーロラ内にレーダー視野が入った 2210:26 UT から 2210:28 UT の時間帯、2210:41 UT から 2210:51 UT の時間帯においては電子密度の減少し、 $1.1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 程度になった。

図 4.36 のイオン温度データより、2210:26 UT から 2210:28 UT の時間帯におけるイオン温度の変化は見られない。また、2210:41 UT から 2210:51 UT におけるイオン温度は、この方法から解釈するのは難しい。

(d) 差分法によるイオン温度推定(4 秒値)

高度 120 km 付近におけるイオン温度の変動を図 4.37 に示す。2211:20 UT 付近を一定とし、時間的に逆から差分をとった。その結果、2210:34 UT から 2210:42 UT の間でのイオン温度の上昇が認められた。これは、ブラ

ックオーロラの領域 2210:41 UT から 2210:51 UT の前の時間に当たる。ブラックオーロラのなかでのイオン温度の上昇は見られなかった。

4.5.3 2210 UT 付近のイベントのまとめ

南方向へのオーロラの移動速度は、0.26 km/s である。

ブラックオーロラ領域での電子密度の減少はあるが、バックグラウンド領域の電子密度よりは高い。具体的にはオーロラの中では電子密度は上昇し $2.7 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ に達した。一方、ブラックオーロラ領域では減少し $1.1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 程度になった。しかしオーロラが存在しなかった時間帯での電子密度 $6 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ に比べると充分高い。即ち本例で示されたブラックオーロラも、一つ前の例と同様に、その回りのオーロラ領域に比べると電子密度は低いが、降込み自体はあったと考えられる。ブラックオーロラ領域でのイオン温度の有意な上昇は見られなかった。

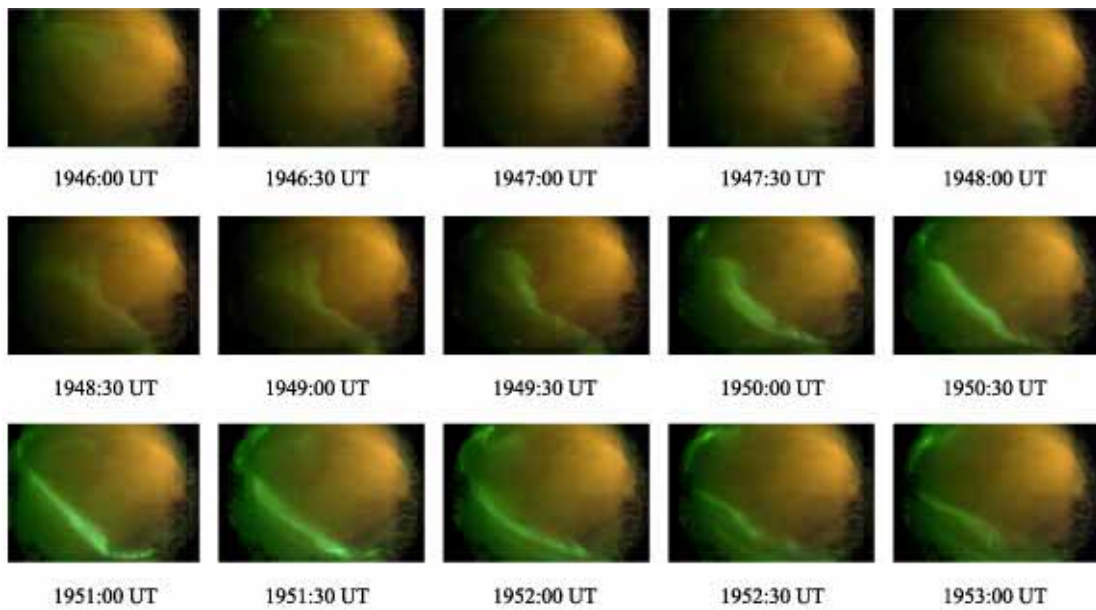


図 4.1 FinePix S2pro で 1946 UT から 1953 UT に撮影された全天カメラの画像。オーロラアークが高緯度から低緯度へ移動して行く様子がみてとれる。画像の各時間において、右上(北西)から中央付近までの感光した(黄色の)部分は、街明かりが雲により散乱された光である

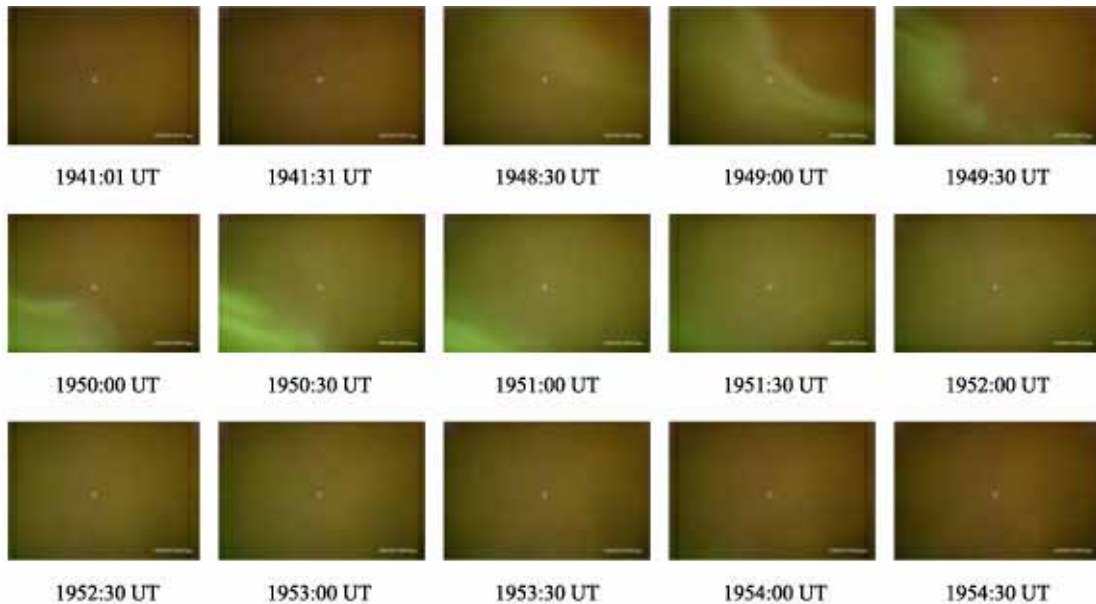


図 4.2 EOS-1D で 1949:00 UT から 1954:30 UT において撮影された画像。中央の丸は EISCAT UHF レーダーの視野を表している。オーロラアークが EISCAT UHF レーダーの視野を北西から南東に横切り、オーロラの中から外へ出たことが確認できる。

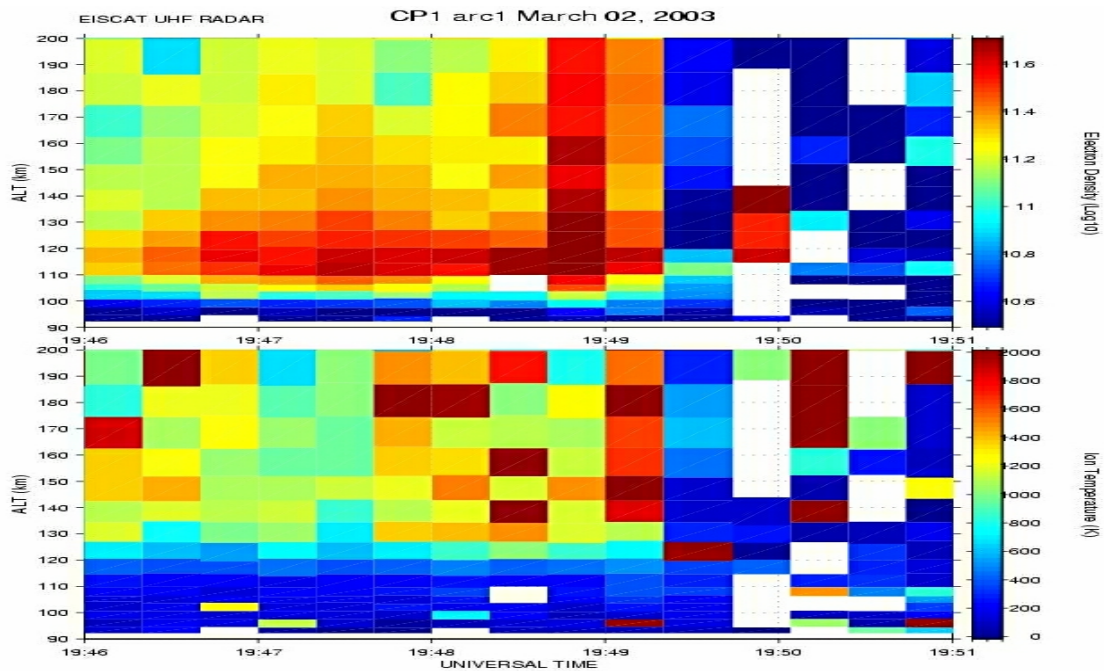


図 4.3 EISCAT UHF レーダーが観測した 1946 UT から 1951 UT の電子密度(上段)及びイオン温度(下段)の観測結果を示している。横軸は世界時(UT)を、縦軸は高度で 90 km から 200 km をあらわしている。プロットのカラーは、それぞれのパラメーターの大小を示している。

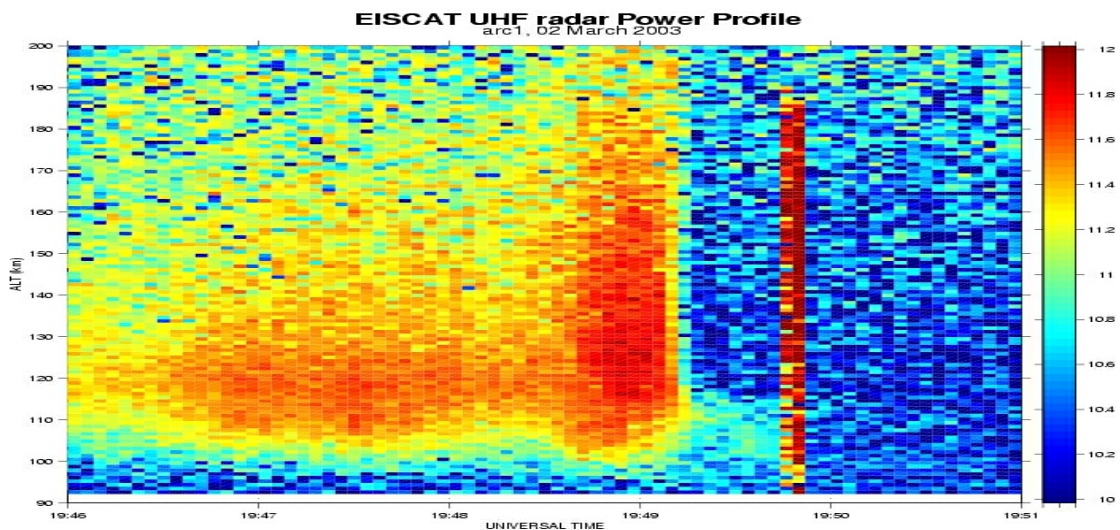


図 4.4 EISCAT UHF レーダーの 1946 UT から 1951 UT のパワープロファイル。1949:12 UT に、はっきりした電子密度の境界があることが見てとれる。1949:46 UT から 1949:50 UT に見られる電子密度が高い時間帯のデータは、データとしての信頼性は低いと考えている。詳しくは本文の 4.5.2 (b) 参照。

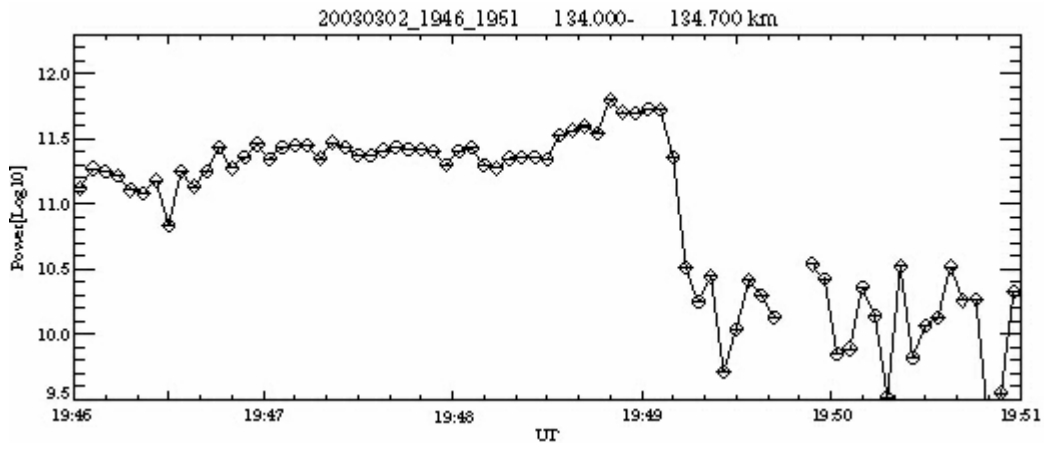


図 4.5 高度 135 km 付近における EISCAT UHF レーダーのパワープロファイル。縦軸に強度、横軸に時間(UT)をとって示したものである。1949:46 UT から 1949:50 UT のデータの信頼性はないので、削除してある。

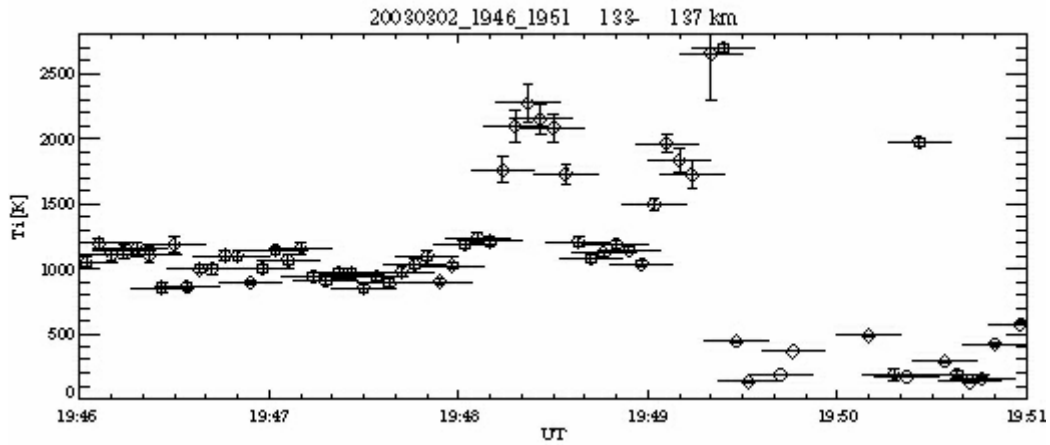


図 4.6 高度 135 km 付近における EISCAT UHF レーダーデータから得られたイオン温度。縦軸に強度、横軸に時間(UT)をとってある。図 4.5 と比較すると電子密度の高い時間帯にイオン温度が下がり、その前後の時間帯でイオン温度が上がっていることが分かる。

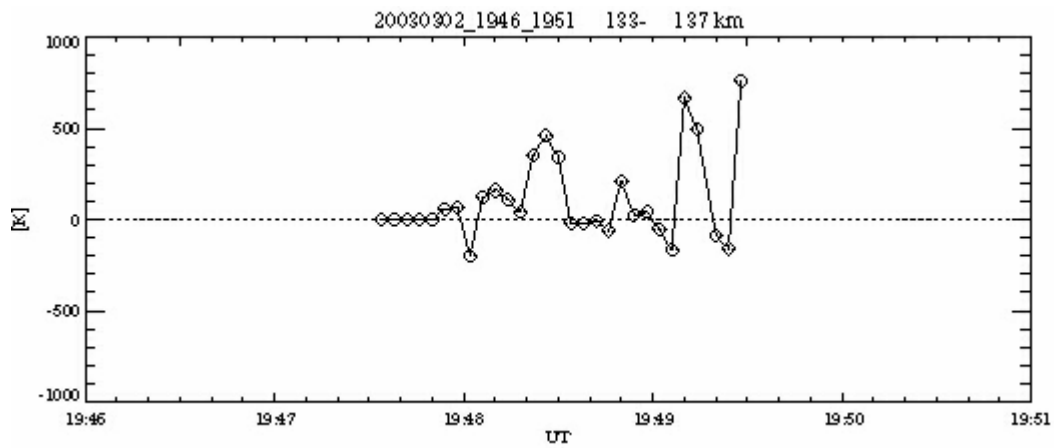


図 4.7 高度 135 km 付近におけるイオン温度の変動。1947:30 UT 付近のイオン温度が一定だったと仮定している。1948:20 UT から 1948:24 UT の時間にイオン温度が上がり、1948:34 UT で下がっている。1949:10 UT の時間にイオン温度が上がり、1949:18 UT に下がった。



図 4.8 2216 UT から 2225 UT に FinePix S2pro で撮影された全天カメラの画像。低緯度側にディフューズオーロラを伴ったオーロラアークの境界域が低緯度側に移動し、2220 UT 付近で天頂付近まで達した後、高緯度側へ戻るのが見てとれる。

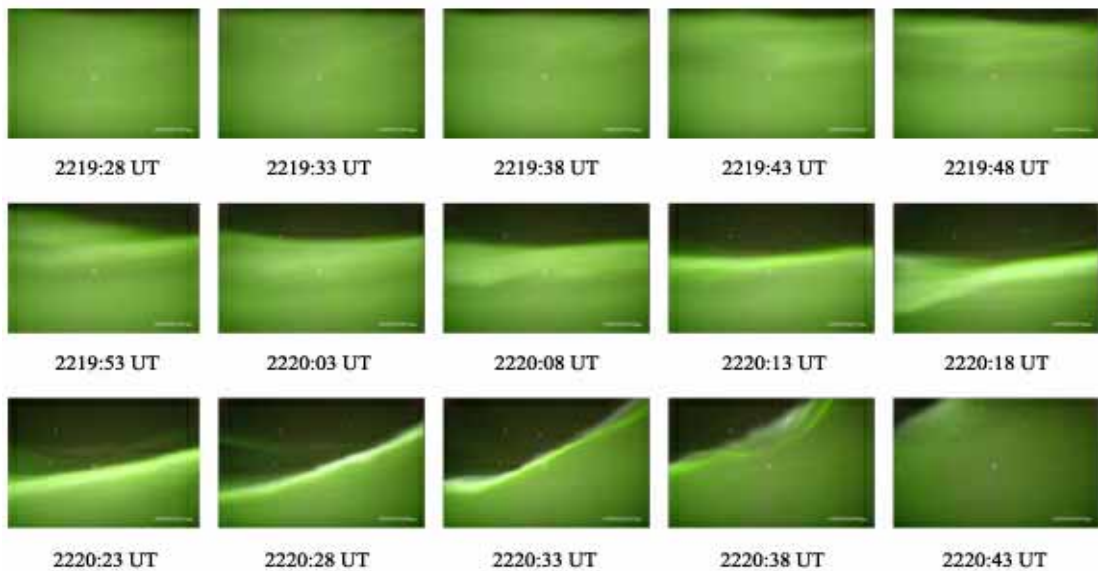


図 4.9 EOS-1D で 2219 UT から 2220 UT において撮影された画像。2220 UT 付近でオーロラアークの縁がレーダー視野に捉えられている。

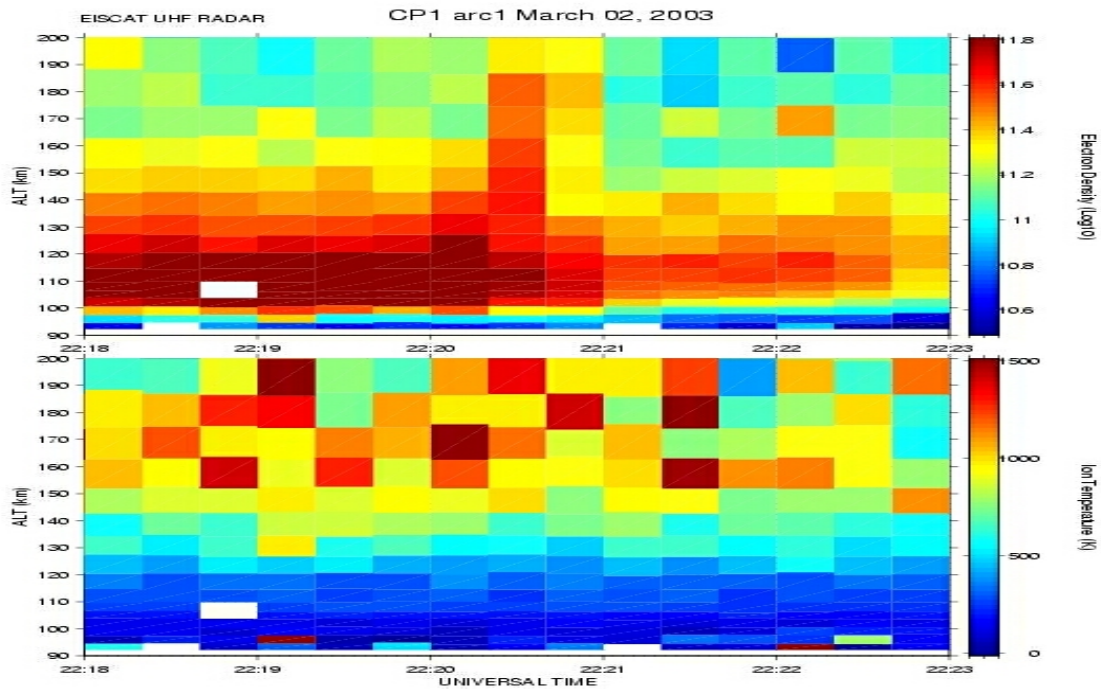


図 4. 10 2218 UT から 2223 UT の EISCAT UHF レーダーの観測から得られた電子密度(上段)とイオン温度(下段)のカラープロット。2220:30 UT において高度 100 km から 200 km の電子密度の上昇が見られる。これは、ディフューズオーロラの縁を捉えた時間に対応する。

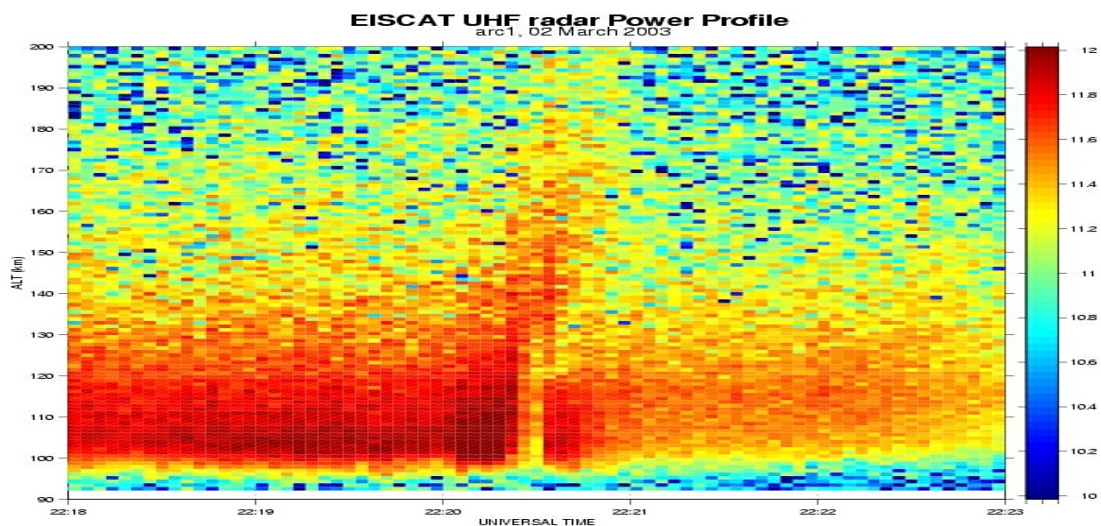


図 4. 11 EISCAT UHF レーダーの 2218 UT から 2223 UT におけるパワープロファイルを示す。2020:26 UT に高度 100 km から 130 km での電子密度の減少があり、130 km より高高度で電子密度の上昇があったことが分かる。

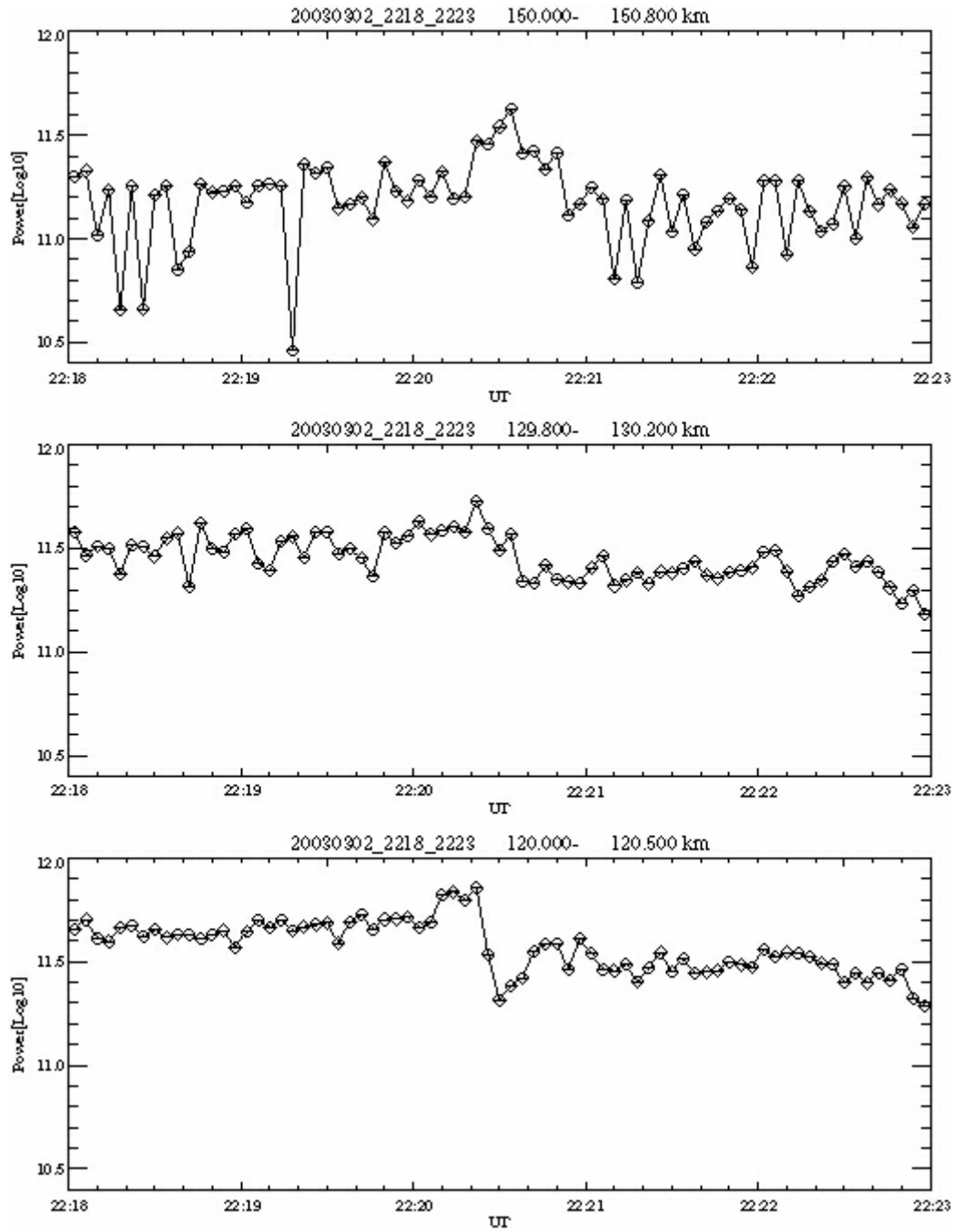


図 4.12 高度 120 km、130 km、150 km 付近の 3 高度におけるパワープロファイル。高度 120 km と高度 130 km 付近では、2020:22 UT から 2020:30 UT にかけて電子密度が減少し、高度 150 km 付近では、2020:22 UT から 2020:30 UT にかけて電子密度が増加していることが見てとれる。

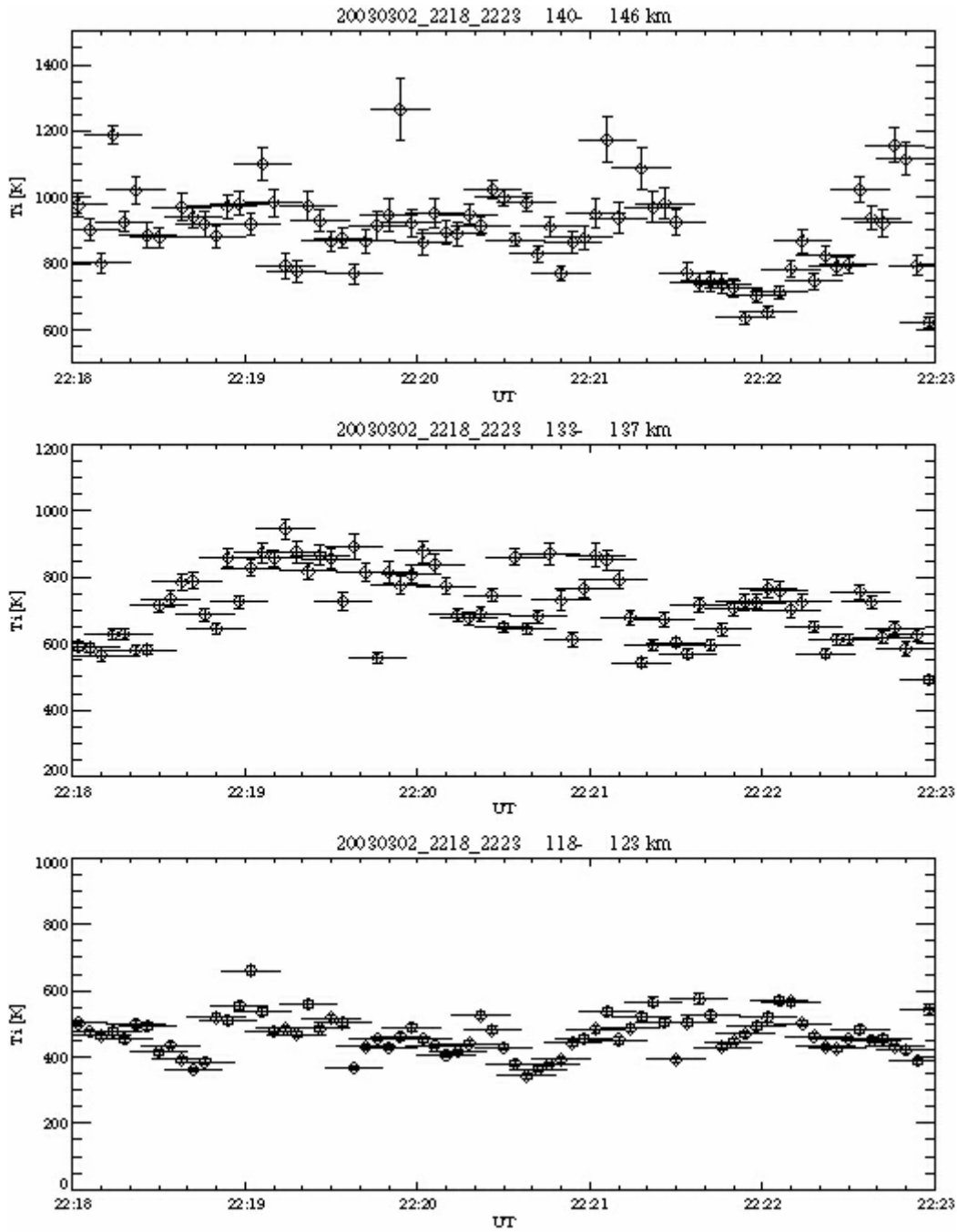


図 4.13 高度 120 km、130 km、150 km 付近の 3 高度におけるイオン温度。高度 120 km 付近において、ディフューズオーロラの縁から出た時間帯において、イオン温度の上昇が見られる。

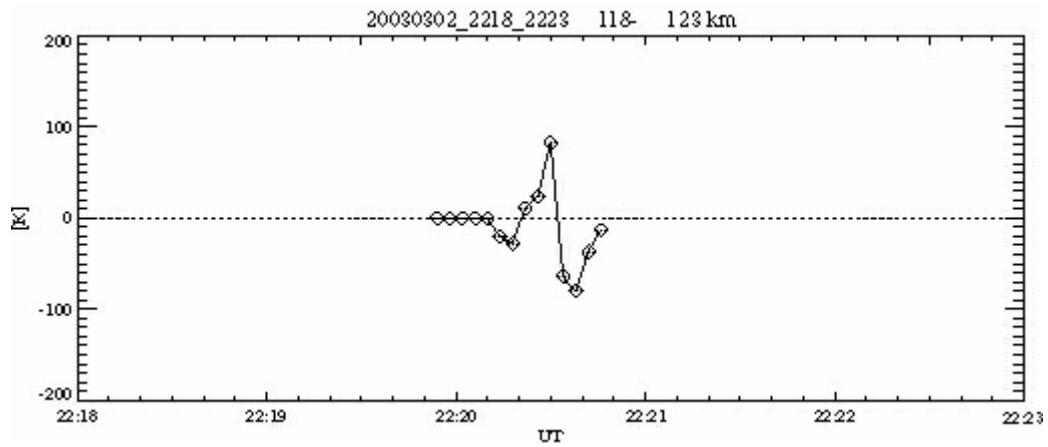


図 4.14 高度 120 km 付近におけるイオン温度の変動。2220 UT 付近のイオン温度を一定としてその後の変動を見る。2220:22 UT から 2220:30 UT でのイオン温度の上昇が見られる。

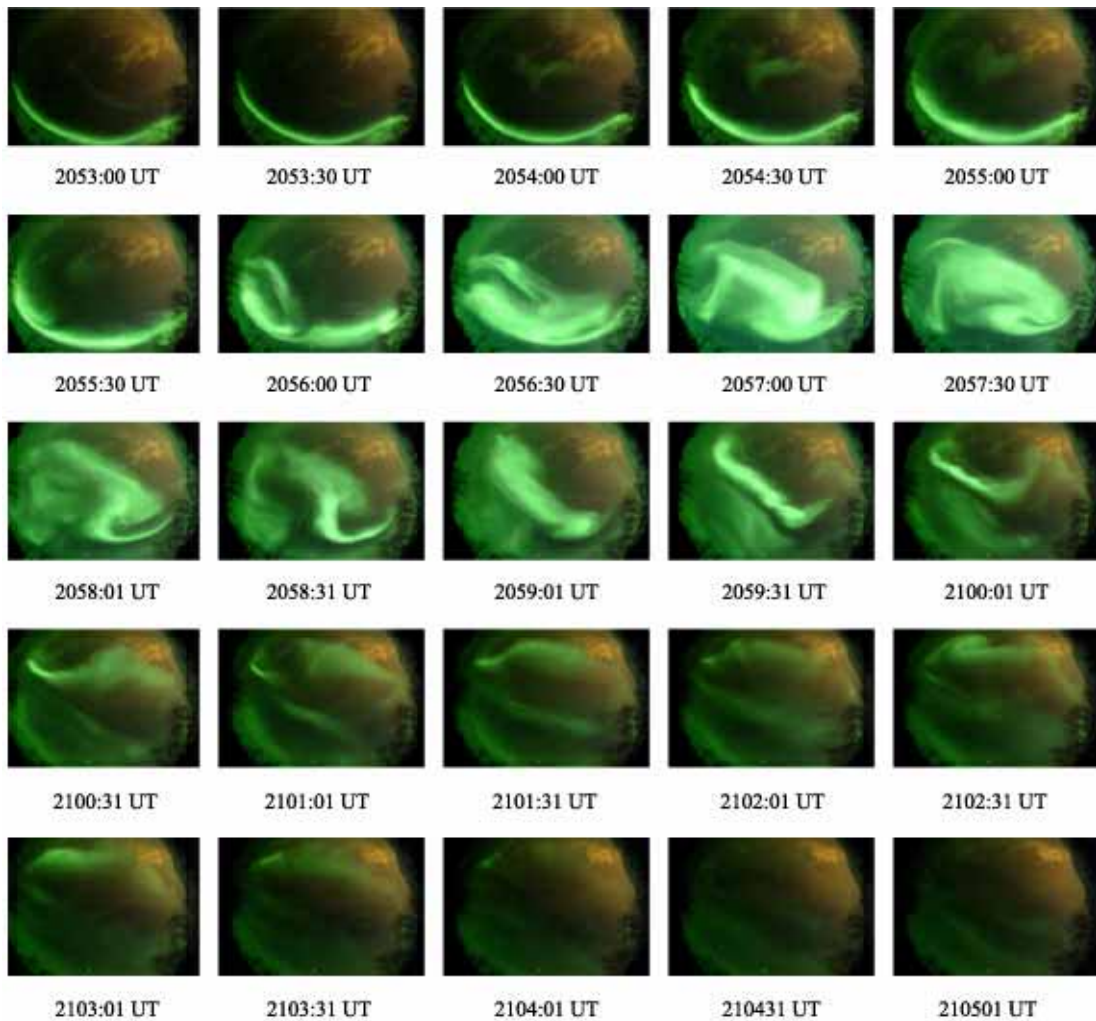


図 4.15 2053 UT から 2105 UT に撮影された全天カメラの画像。西向きオーロラサージ(westward traveling surge)を捉えている。明るく輝くアーク状(もしくはバンド状)のオーロラが、低緯度から高緯度方向へ急速に拡大していくのが見てとれる。また、高緯度側のオーロラのフロントの東側からは、明るく輝くオーロラが渦構造を持ちながら西側に移動していくのが確認できる。



図 4.16 EOS-1D で撮影された 2055 UT から 2101 UT の画像。オーロラが南東側から EISCAT UHF レーダーの視野に近づいてくるのが確認できる (オーロラの動きは超高感度オーロラ TV カメラで確認)。その後の動きは本文参照。

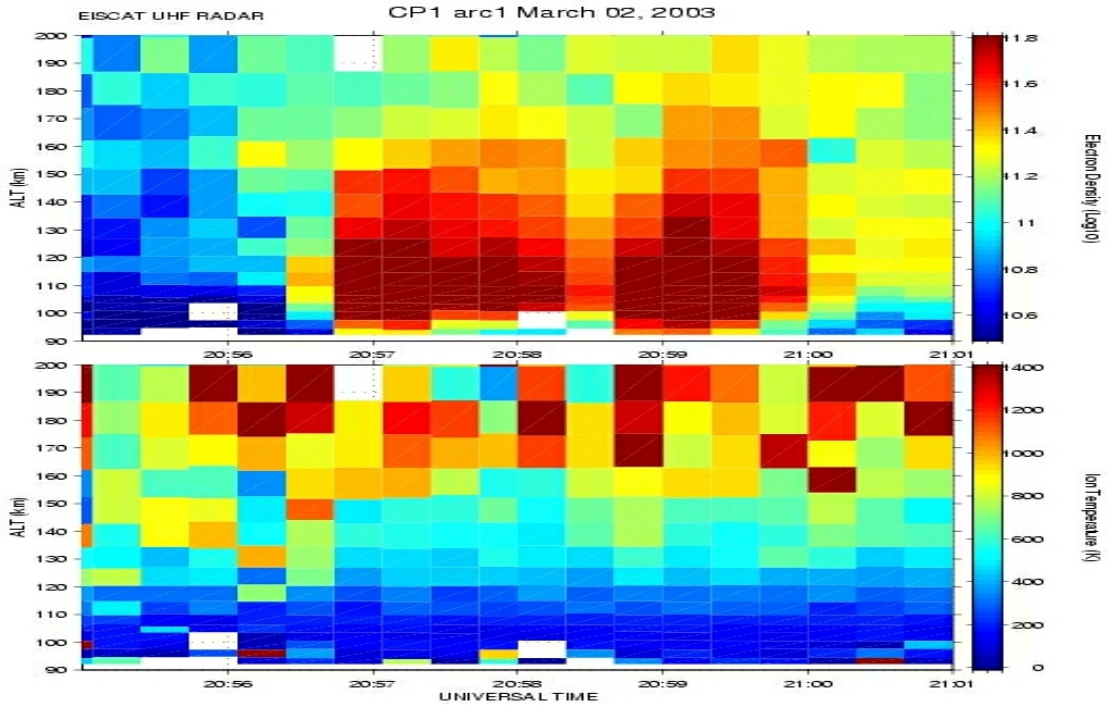


図 4.17 2055 UT から 2101 UT の EISCAT UHF レーダーの観測から得られた電子密度(上段)とイオン温度(下段)のカラープロット。2056:30 UT において、低い高度での電子密度の増加が確認できる。2056:50 UT からは高度 150 km 以下において、電子密度が急激に増加したことが見てとれる。

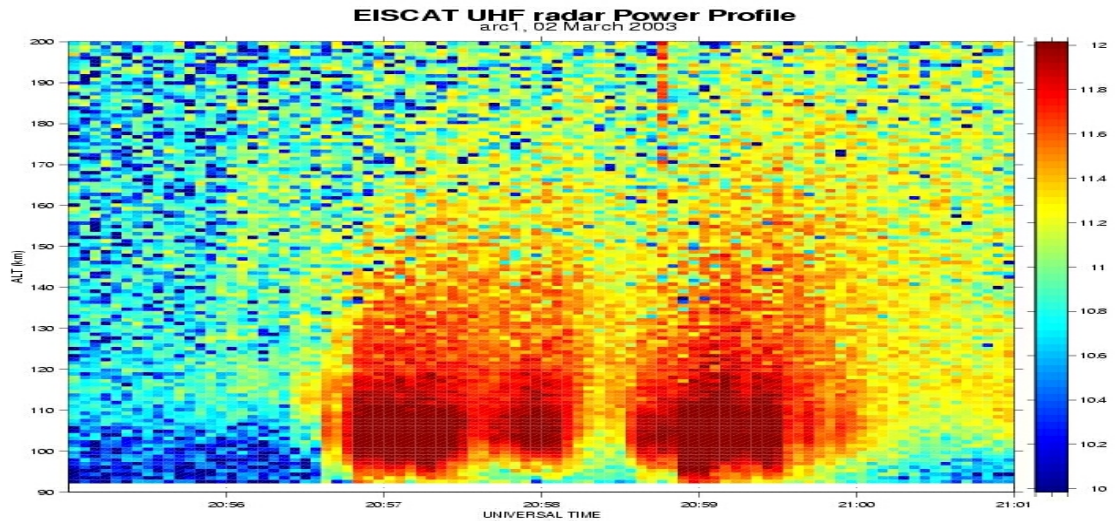


図 4.18 EISCAT UHF レーダーから得られた 2055 UT から 2101 UT におけるパワープロファイル。電子密度の増加は、2056:34 UT から始まっていることが見てとれる。2058:18 UT に電子密度の減少が見られる。

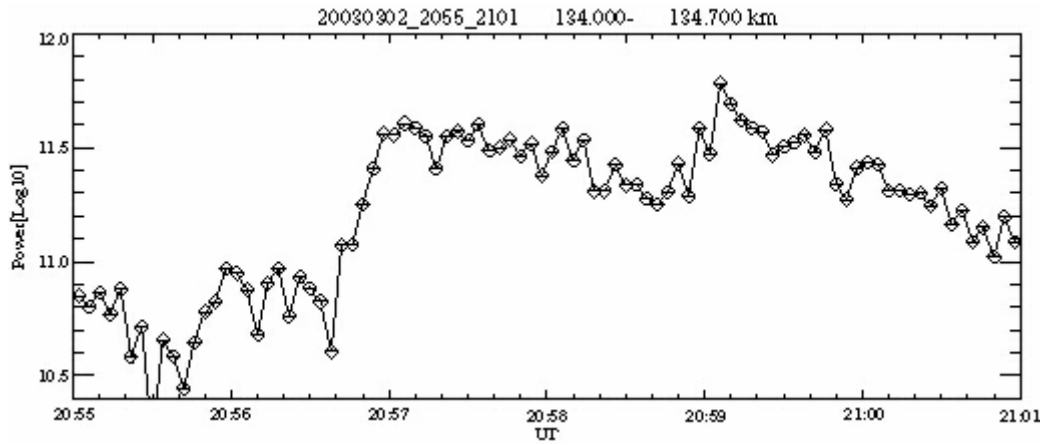


図 4.19 高度 135 km 付近におけるパワープロファイル。2056:42 UT で西向きオーロラサージのフロント部分を捉えて、電子密度の上昇が見られる。詳しくは本文参照。

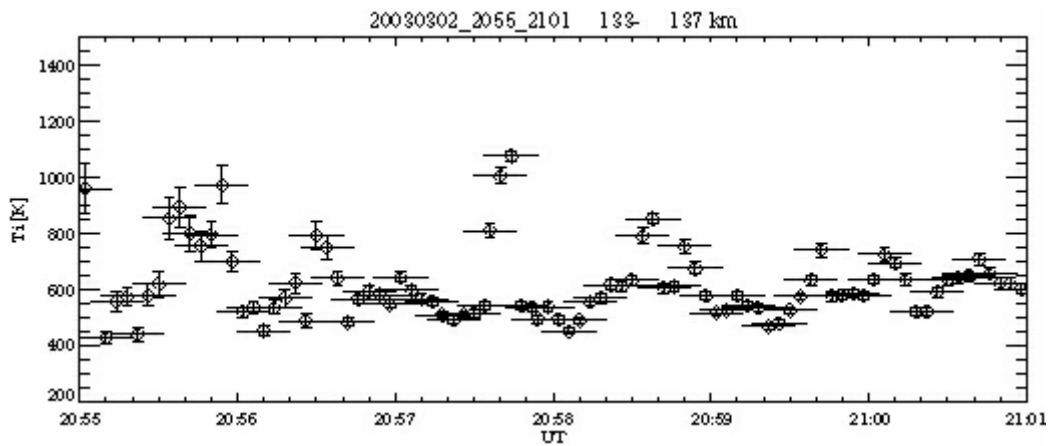


図 4.20 高度 135 km 付近におけるイオン温度。西向きオーロラサージのフロント部分を捉えた 2056:42 UT の直前においてイオン温度が上昇していることが分かる。

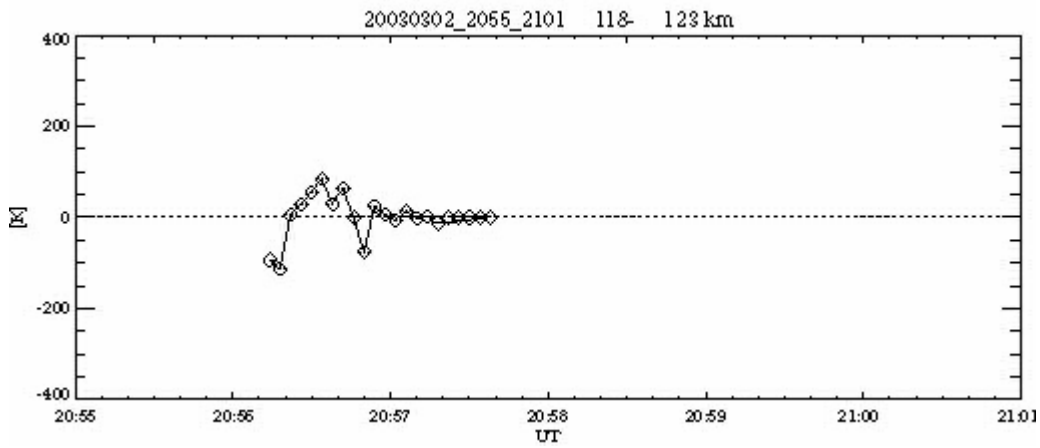


図 4.21 高度 120 km 付近におけるイオン温度の変動。オーロラに入る直前のイオン温度のバラつきが大きいので、その直後のイオン温度が安定している時間帯(2057:30 UT 付近)を一定としている。2056:22 UT から 2056:50 UT でイオン温度の上昇が見られた。

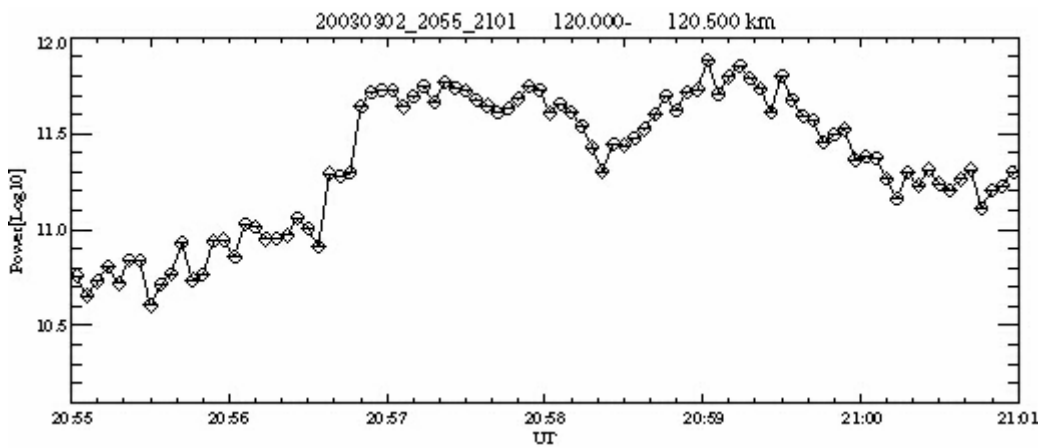


図 4.22 高度 120 km 付近でのパワープロファイル。図 4.21 との比較用。

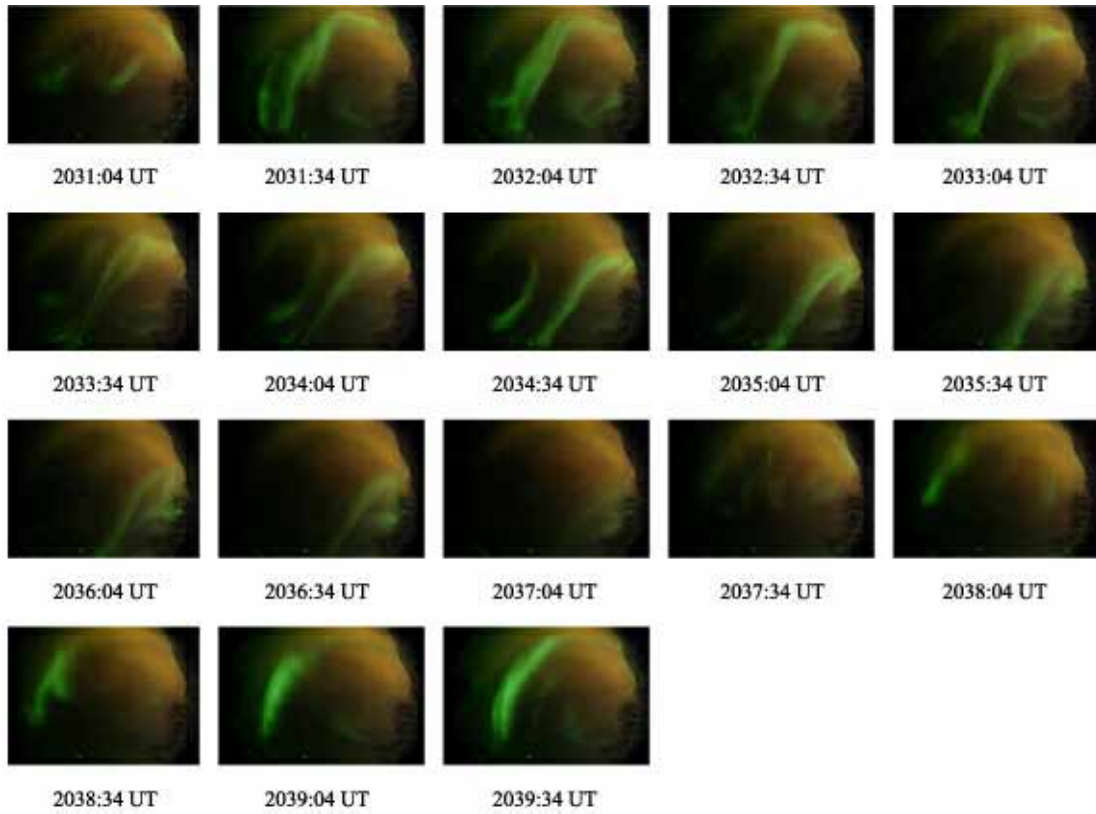


図 4. 23 FinePix S2pro で 2031 UT から 2039 UT に撮影された全天カメラの画像。南北に伸びたオーロラアークが、北東から南西へと移動して行く様子が見てとれる。



図 4.24 EOS-1D で 2033 UT から 2038 UT において撮影された画像であり、薄いディフューズオーロラ中を南北に伸びたオーロラアークが、西側に移動していく様子が見てとれる。オーロラアークの西側には、ブラックオーロラのアーク領域が構造を保ちながらオーロラアークと同じく西側に移動して行く様子が見てとれる。

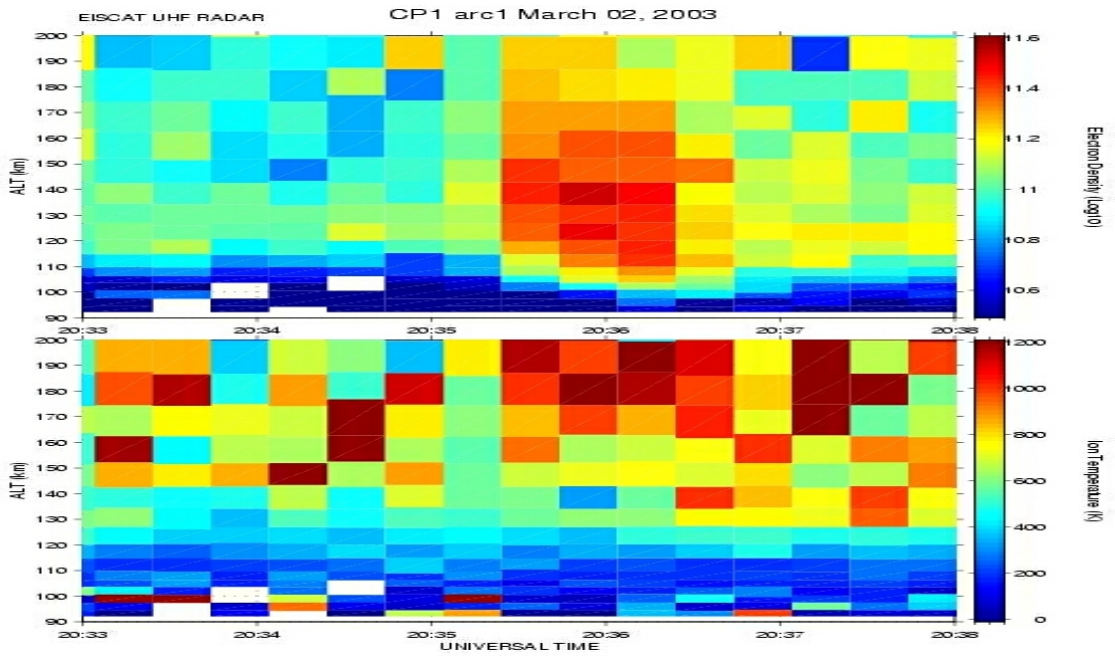


図 4. 25 2033 UT から 2038 UT の EISCAT UHF レーダーの観測から得られた電子密度(上段)とイオン温度(下段)のカラープロット。2035:30 UT から 2036:10 UT(もしくは 2036:30 UT)において電子密度の上昇が見られる。

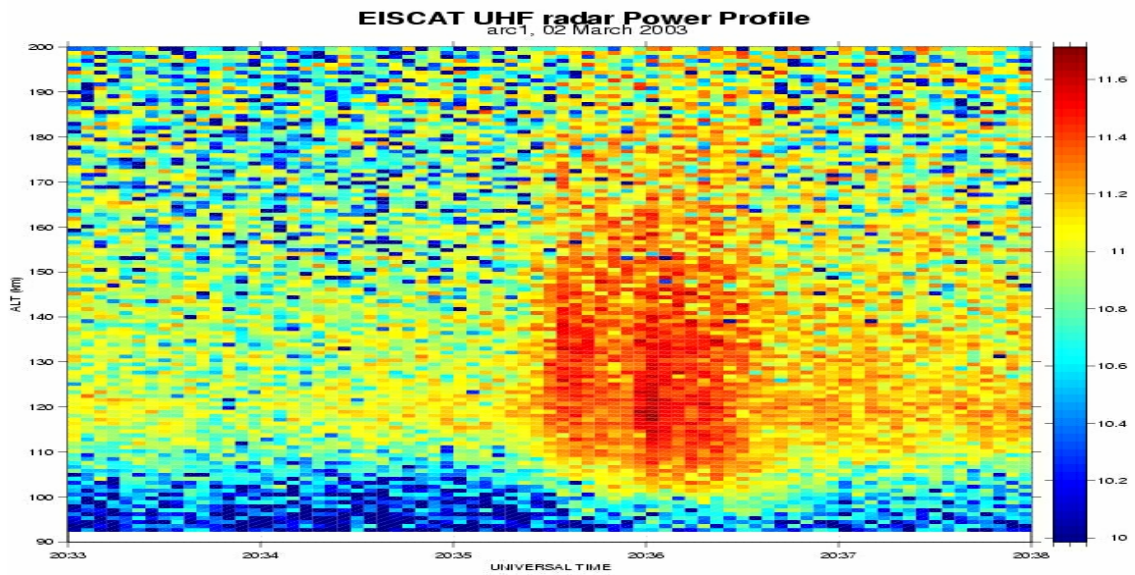


図 4. 26 EISCAT UHF レーダーの 2033 UT から 2038 UT におけるパワープロファイルを示している。図 4. 1 に見られる 2035:20 UT からの電子密度の上昇が、2035:28 UT から始まっていたことが分かる。

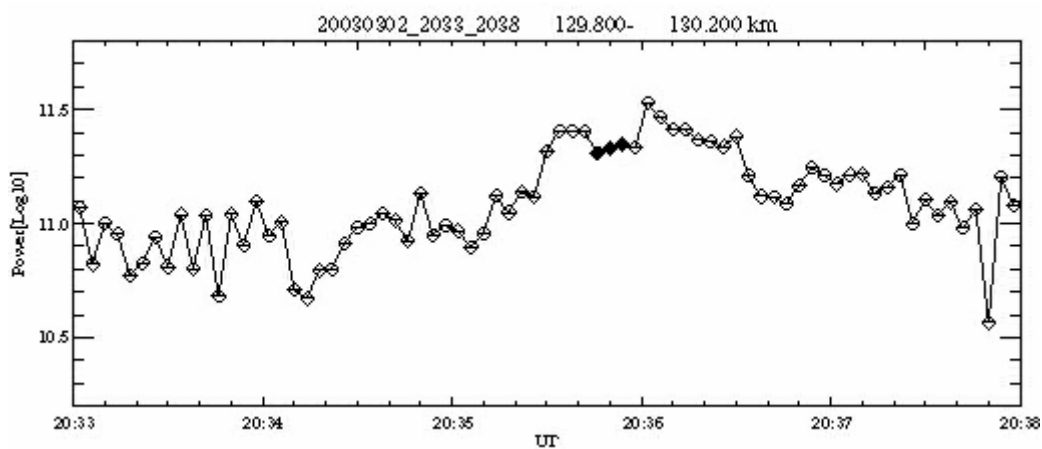


図 4.27 高度 130 km 付近におけるパワープロファイル。ブラックオーロラ領域に相当する 2236 UT の前(黒く塗りつぶしてある時間)で電子密度の減少していることが分かる。

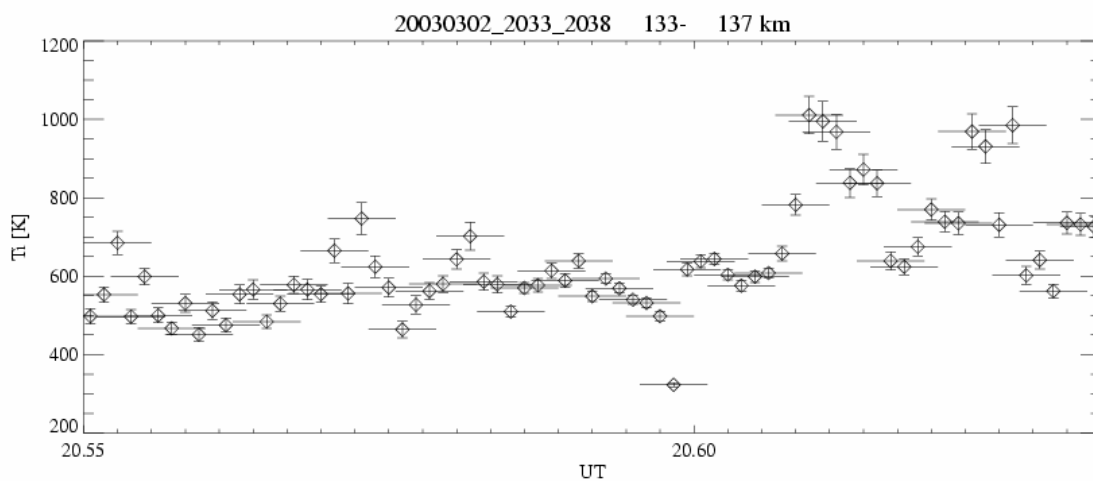


図 4.28 高度 135 km 付近におけるイオン温度。2035 UT のオーロラアークに入る前にイオン温度が上がり、オーロラアークを出た後にイオン温度の上昇が見られる。しかし、ブラックオーロラ領域においてイオン温度の上昇は見られない。

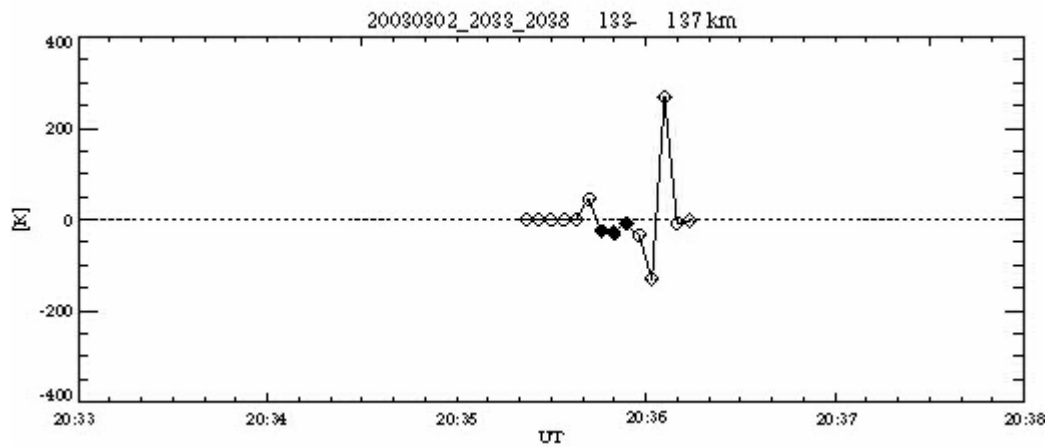


図 4.29 高度 135 km 付近におけるイオン温度の変動。2035:20 UT 付近のイオン温度を一定と仮定した。このとき、ブラックオーロラ領域に入った時間帯(2035:44 UT から 2035:56 UT)でのイオン温度の変動は 50 K 以下である。むしろ、2035:42 UT から 2035:50 UT ではイオン温度の減少が見られる。ブラックオーロラを含む領域を黒く塗りつぶした。

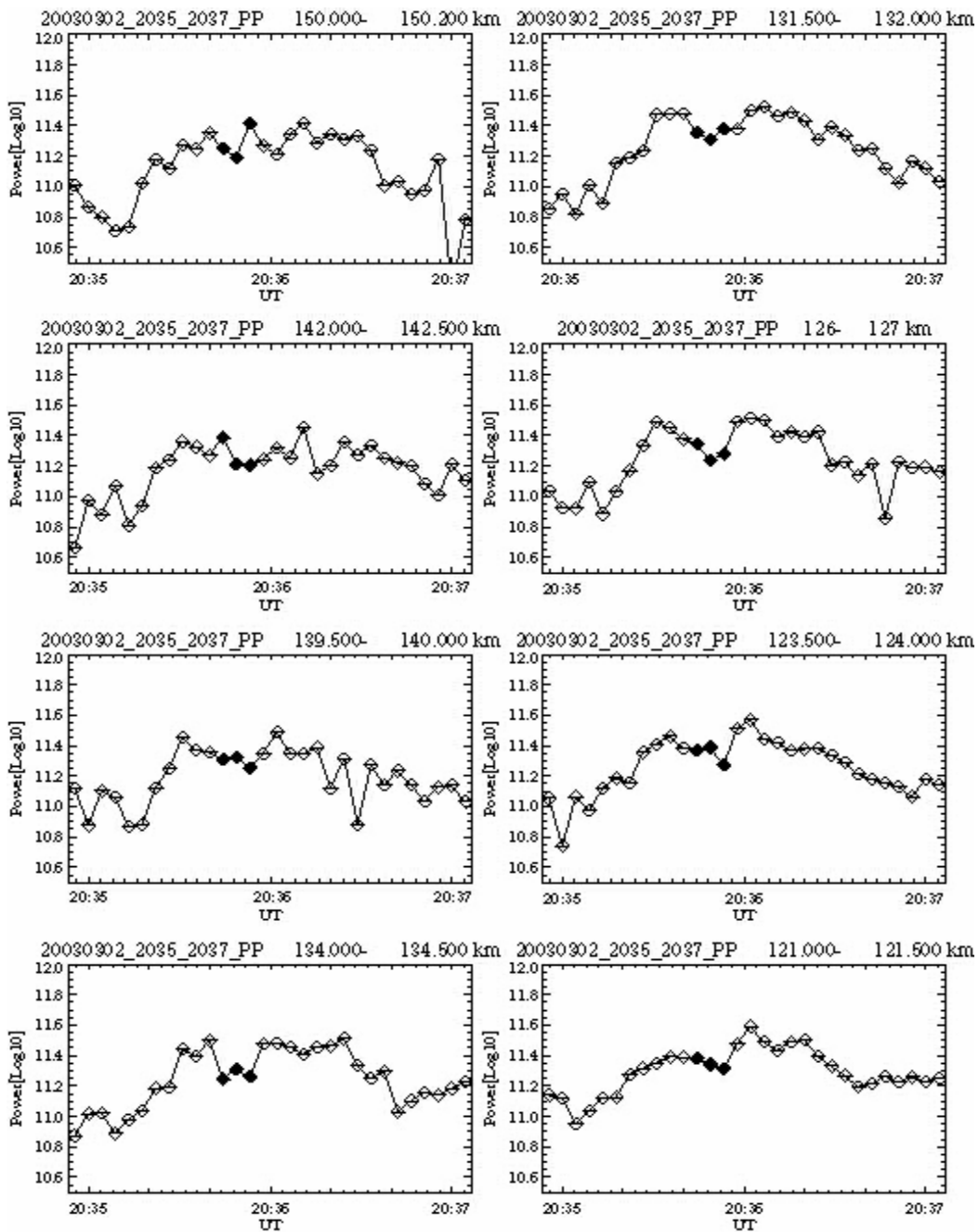


図 4.30 高度 121 km から、高度 150 km までのパワープロファイル。横軸は、2035 UT から 2037 UT であらわしている。図の右下、高度 121 km 付近においては、2035:30 UT 付近の第一オーロラアークによる電子密度の上昇は見られない。高度 123 km 付近になると、第一オーロラアークによる電子密度の上昇が見えてくる。ブラックオーロラとの差は、高度 134 km 付近でピークになり、高度 150 km ではブラックオーロラ領域とオーロラアーク領域との電子密度の顕著な差がなくなる。

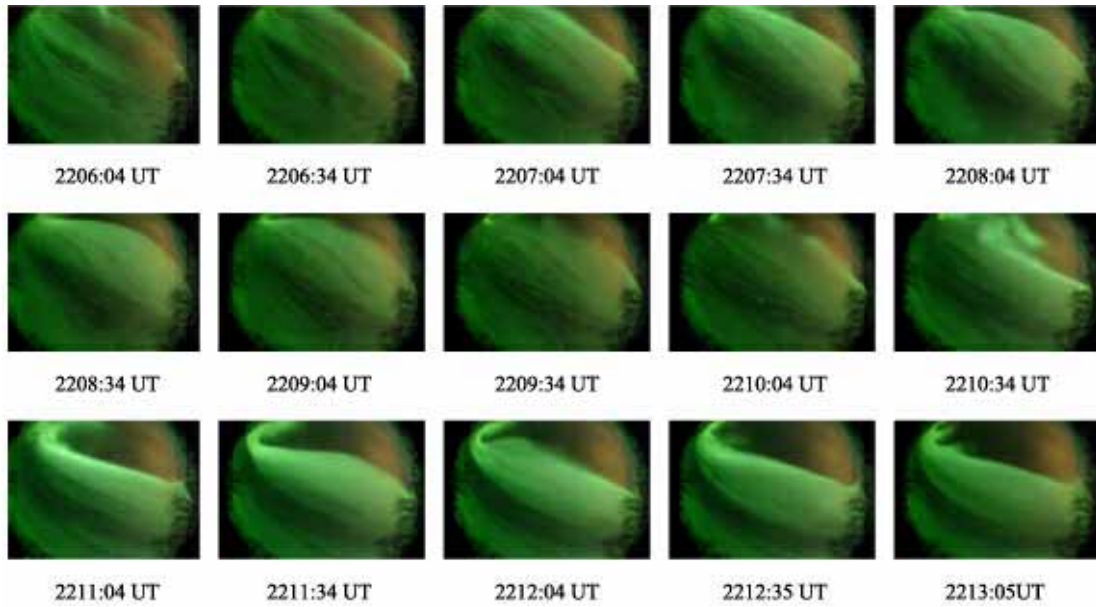


図 4. 31 FinePix S2pro で 2206 UT から 2213 UT に撮影された全天カメラの画像。ベール状のオーロラが確認できる。





図 4.32 EOS-1D で 2207 UT から 2212 UT において撮影された画像。ディフューズオーロラ中に見られる微細なフィラメント構造が南に移動している様子が見てとれる。

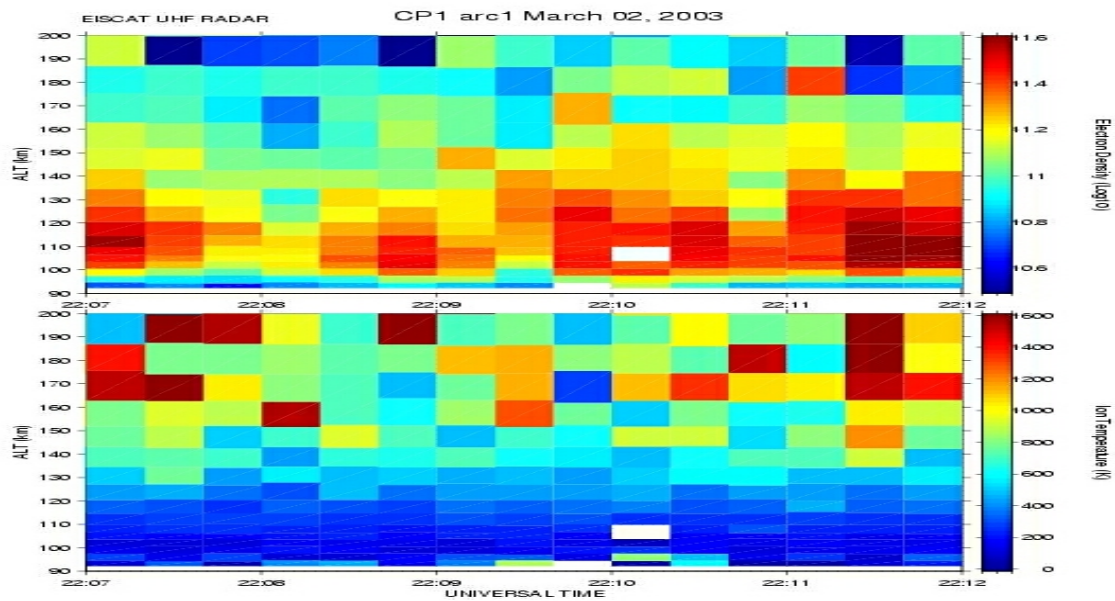


図 4. 33 2207 UT から 2212 UT の EISCAT UHF レーダーの観測から得られた電子密度(上段)とイオン温度(下段)のカラープロット。2208:00 UT から 2208:20 UT で電子密度の減少が見られる。ブラックオーロラの時間を含んでいる、2210:00 UT から 2210:20 UT の時間帯では、電子密度の減少は見られない。2210:40 UT から 2211:00 UT の時間帯では、高度 120 km 以上での電子密度の減少が見られる。イオン温度の変動を見る限り、この時間帯においてイオン温度の優位な増減は見られない。

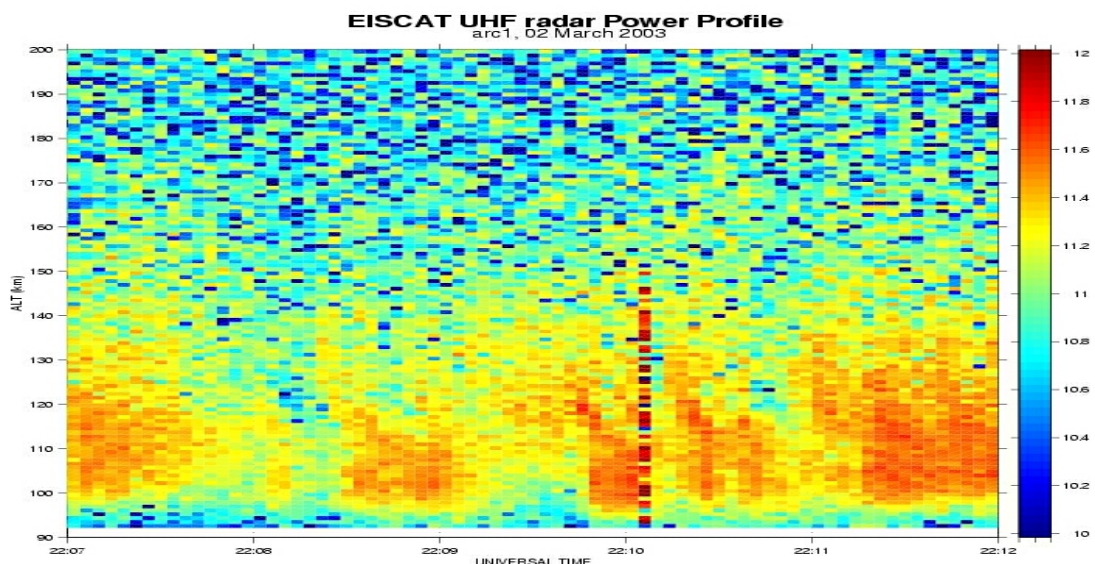


図 4. 34 EISCAT UHF レーダーの 2207 UT から 2212 UT におけるパワープロファイル。2210:08 UT から 2210:12 UT のデータは、図 4.8 と同じ理由でデータとしての評価は行わない。詳細は本文 4.5.2 (b)参照。

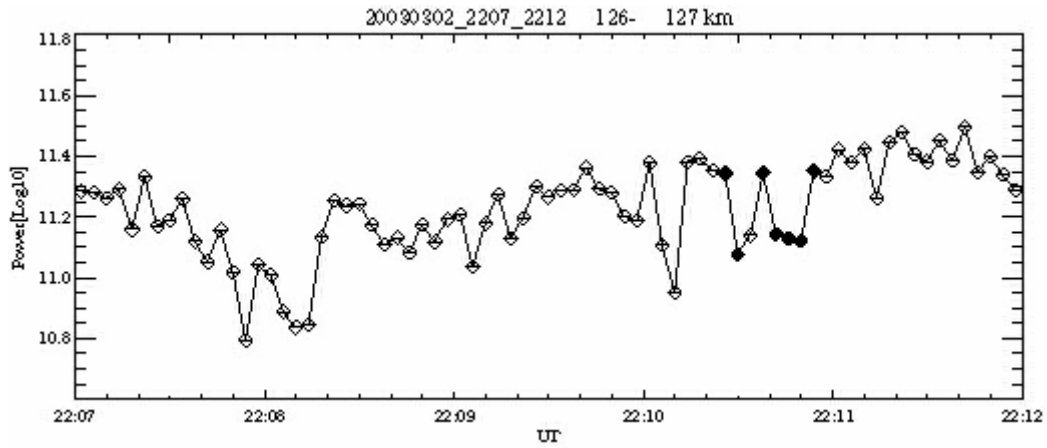


図 4.35 高度 127 km 付近におけるパワープロファイル。ブラックオーロラ領域を含む 2210:26 UT から 2210:28 UT の時間帯と、2210:41 UT から 2210:51 UT の時間帯において、電子密度の減少が見られる。

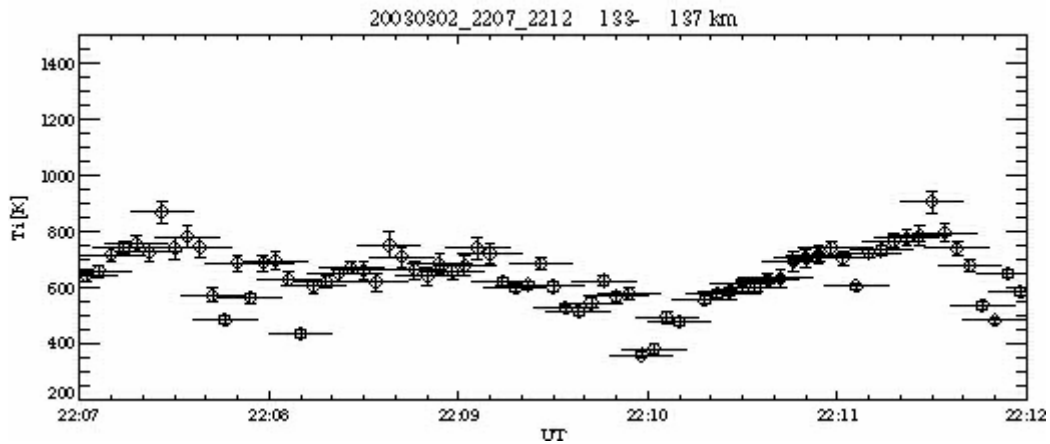


図 4.36 高度 135 km 付近におけるイオン温度。ブラックオーロラ領域を含んでいる 2210:26 UT から 2210:28 UT の時間帯におけるイオン温度の変動は見られない。2210:41 UT から 2210:51 UT におけるイオン温度の変動は、差をとる方法を用いないと議論できない。

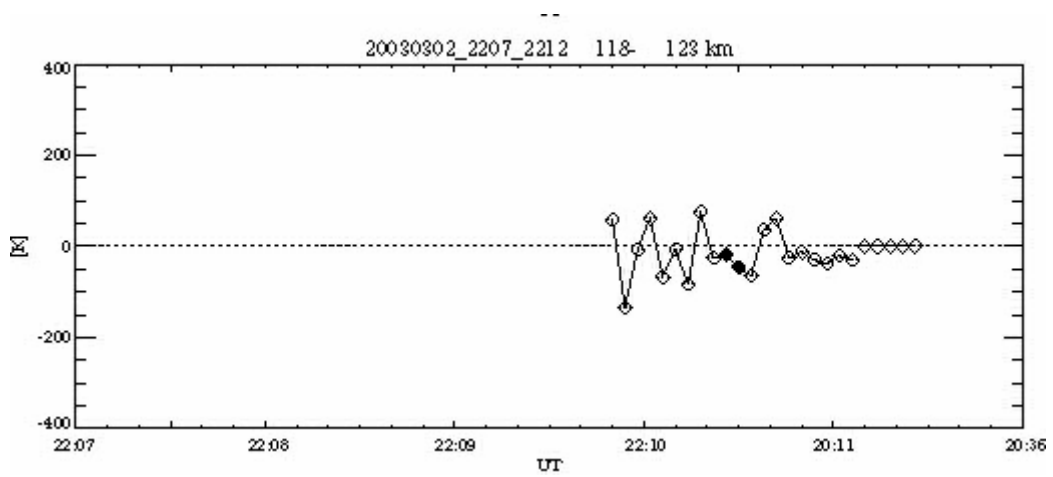


図 4.37 高度 120 km 付近におけるイオン温度の変動。2211:20 UT 付近を一定とした。2210: 34 UT から 2210:42 UT でのイオン温度の上昇が見られる。これは、ブラックオーロラの前の時間帯に当たる。

第 5 章 まとめと考察

5.1 まとめ

本研究では、オーロラの微細構造とその周辺領域における電磁気的およびプラズマの運動特性を定量的に調べ、沿磁力線電場や磁場に直交する電場の生成を伴う磁気圏-電離圏結合を理解することを最終的な目標としている。そのための研究の第一段階として、次の 3 点のことを行った。

1) 極地研究所、トロムソ大学と共同でトロムソレーダーサイトへ光学観測機器を設置し、2003 年 3 月に EISCAT レーダーと光学観測機器とのオーロラの同時観測を行った。

2) オーロラの微細構造を調べるためには、最低今までの数倍の高時間分解能のレーダーデータが必要であるので、既存のレーダーの生データから高時間分解能データを推定・解析する新たな手法の開発を行った。

3) 光学観測データと EISCAT レーダーとの同時観測を行い、新たに開発したデータ処理・解析方法を用いて、アーク等のディスクリートオーロラの周辺やブラックオーロラの内外部の電磁気的特徴（電子密度分布と電場強度を表すイオン温度の挙動）を調べた。

2003 年 3 月に行ったレーダーと光学観測との同時観測では、その観測期間中に、ディスクリートオーロラやブラックオーロラが観測されている。特に、レーダーと光学観測機器を用いたブラックオーロラの同時観測は、前例がない。一般にブラックオーロラの大きさは、数 km 程度であり、EISCAT レーダー視野の数倍である。また、その移動速度は、 $\sim 1\text{km/s}$ 程度であることから、レーダー視野がブラックオーロラを捉える時間は、ほんの数秒間である。そのため、短いタイムスケールで電離圏における物理量の変動を推定できるように、EISCAT レーダーの新しい解析方式を開発導入した。この方法は、ブラックオーロラに限らず、オーロラの微細構造と、それに伴う 3 次元電流系の研究をする上で有力な方法である。新しい解析方法とレーダーと光学観測機の同時観測から本修士論文では、2003 年 3 月 2 日の 5 イベントを選び出し、次のような結果を得た。

2003 年 3 月 2 日 1949 UT 付近のイベントにおける、イオン温度の変動は、オーロラのアークに相当する電子密度の高い領域を挟むようにその両側で、イオン温度が上昇していた。イオン温度が上昇している時間は、ディフューズオーロラの中でオーロラアークまでの 12 ± 4 秒間でその変動

幅は 500 度 K、オーロラアークから出たところから 8 ± 4 秒間で、変動幅は 700 K であった。オーロラの移動速度を考えると、その幅は 8.4 ± 2.8 km、 5.6 ± 2.8 km であることが分かった。また、オーロラそのものの幅は 19.6 ± 2.8 km と見積もられた。

ブラックオーロラ領域に関して、ブラックオーロラ領域での電子密度の減少はあるが、その電子密度はオーロラのある領域の電子密度の $1/2$ から $1/3$ に減少する程度で、オーロラの無いバックグラウンド領域の電子密度よりは倍ほど高い。ブラックオーロラ領域でのイオン温度の上昇は見られない。という新たな結果を得た。

以上が、本修士論文の要旨であり、今後、本研究で用いた解析方法を使うことにより、従来のレーダーデータでは行えなかったオーロラの微細構造の研究が、特に電離圏におけるプラズマの動きと小スケールの 3 次元電流系の研究が発展することが期待できる。

5.2 考察

本研究では、電子密度の変わりにより短い時間分解能で有意のデータが得られる EISCAT UHF レーダーの受信強度（パワープロファイル）を用いた。より長い積分時間の従来の IS スペクトルから導出した電子密度との対応は良く、電子密度として充分信頼性を持って使用できる。この短い時間分解能のデータを用いることにより、光学観測によるオーロラアークを捉えた時間での値の上昇、オーロラアークから抜けた時間での値の降下を良く表しており、高度 150 km 以下の高度では、電子密度の良い指標になると考える。EISCAT UHF レーダーデータの 20 秒積分値から得られた電子密度と、パワープロファイルから得られた電子密度を高度 130 km 付近で比較すると、その差は、電子密度の 10 パーセント程度である。

また、隣り合う 4 秒づつ時間的にシフトした 20 秒積分データ間の差を用いることで、短い時間スケールの変動を得ることができた。信頼できる初期値が与えられる場合、その初期値に時間的に近い場所では、信頼性のある 4 秒毎のイオン温度等が導出・推定できる道が開かれた。

5.2.1 ブラックオーロライベントについて

ブラックオーロラ領域における電子密度は、周りのオーロラ領域に比

べ減少している。しかし、電子密度の減少は、オーロラの認められない領域の電子密度と比べると 3 倍程度の電子密度があり、ディフューズオーロラ領域と同等または、それより高い値を示していた。

本論文で扱ったブラックオーロラの内最初の例では、2 本のオーロラアークのうち最初(西向きに動くオーロラの西側)のオーロラアークによる降り込みは、高度 120 km では見えていない。その後、高度が上がるにつれて、オーロラアークの中とブラックオーロラの中の電子密度(パワープロファイルの強度)の差が大きくなり、ブラックオーロラが形成されるのが分かる。

ここで、電子の降込みエネルギーと高度との関係を考える。図 5.1 は、横軸に単位入射電子フラックス当たりの 557.7 nm の放射率 ($\text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1}$) を示し縦軸に高度 (km) をとって示した図である。オーロラアークのピーク高度と思われる 135 km を考えると、図 5.1 より、およそ 2 keV の電子が降込んできていたことが示唆される。つまり、オーロラアークを光らせていたのは、およそ 2 keV のエネルギーを持った電子ということになる。

高度 150 km では、ブラックオーロラ領域とオーロラアーク領域との電子密度の差がなくなっている。これは、ブラックオーロラ領域では、 $2\text{-}5 \text{ keV}$ 程度の降下電子が降込まなくなり、そのため光のエミッション量がアークに比べて小さくなったと考えられる。

この原因は分らないが、一つの可能性は、オーロラアークの上空(磁気圏下部)に存在していたと考えられる上向きの沿磁力線電場(数 kV) が、何らかの原因で消失又は弱まり、そのため数 keV の粒子が降込まなくなったことによりブラックオーロラ領域が生成された可能性がある。即ちオーロラとブラックオーロラがつくり出す多層の構造は沿磁力線電場の分布が空間的に細かい構造を持っていることを表している可能性がある。

5.2.2 西向きトラベリングサージについて

2056 UT のイベントは、西向きに進むサージであった。この場合、電離圏に西向きの電流が流れているので、地上の磁場変動を計測すると南向きになっているはずである。図 5.2 は、トロムソを含む 4 ステーションで計測された地上磁場変動の X(南北)成分(左)と Z(鉛直)成分(右)である。4 章に示した時間を赤で囲んである。TRO(トロムソ)の X(南北)成分を見ると、南に振れており、地上の磁場変動が電離圏電流によるものだとすると、西向きの電離圏電流が作られていたことになり、西向きトラベ

リングサージと対応している。

また Z(垂直)成分を見てみると、TRO と KIL で南に振れており、ABK での変動は小さくなっている。つまり、西向きトラベリングサージは、ABK の上空または ABK の南にあったことが示唆される。

5.2.3 ディスクリートオーロラの前後

EISCAT UHF レーダーの視野がディスクリートオーロラを横切ったイベントから得られた結果について考察を行う。たとえば、1949 UT のイベントについて、レーダーの視野がディフューズオーロラ中からディスクリートオーロラを経てオーロラの外に出たとき、第 4 章の 4.1 より、イオン温度は、レーダー視野がオーロラに入る直前と直後に上がっているイオン温度が上がっている距離は直前と直後で、おおよそ 10 km であるこれは、オーロラの幅とオーダー的に同程度である。

イオン温度が上がっているのは、強い電場が存在し、ジュール熱によりプラズマの温度が上がっていることを表している。即ちディスクリートオーロラの外側（隣接した近傍）には強い電場が存在していたことを示唆される。この領域は電子密度が急激に減少していることから分るように、電気伝導度が周辺に比べて減少している。そのため、電離圏電流を流すためには大きな電場が必要となる。実際にこの領域でディスクリートオーロラ内部に比べて十分強い電場があったことを考えると、ディスクリートオーロラに伴う上向きの沿磁力線電流（下向きの電子がキャリアー）のリターン電流がこの電子密度が急激に減少した領域にあったと推測される。その場合、リターン電流の幅は 10 km 程度の領域に集中していたことになり、小さなスケールの沿磁力線電流の駆動機構を考える上で重要な特徴である。

5.3 今後の課題

本研究では、高時間分解能レーダーデータの解析方法の開発導入を行った。この解析方法を用いることで、4 秒の時間スケールでイオン温度の変動が推定できた。初期値の決め方、データ欠損に対する対応等、ソフトウェア的に改良すべき点もまだ多い。しかし、本研究で推定・開発した解析手法は、汎用性が広く、現在までに取得されている EISCAT レーダーのデータに対して幅広い使用が期待される。応用性も広く、たとえば、

衛星データの取得されている時間についての解析を行えば、電離圏と磁気圏の双方からの観測データが、これまでよりも高い時間分解能で推定できることが期待できる。

さらに、スヴァールバルレーダー（ESR）では現在 2 機のアンテナを用いて干渉法観測の実験が開始されている。この手法が完成すれば数 100 m の水平分解能での観測も可能となる。このようなハードウェアの改良は、オーロラの微細構造の研究をする上で飛躍的に進歩が期待される。

今後、本研究で用いた解析方法を使い、更に同時観測データを増やすことにより、オーロラの微細構造の研究が、特に電離圏におけるプラズマの動きと小スケールの 3 次元電流系について発展することが期待できる。

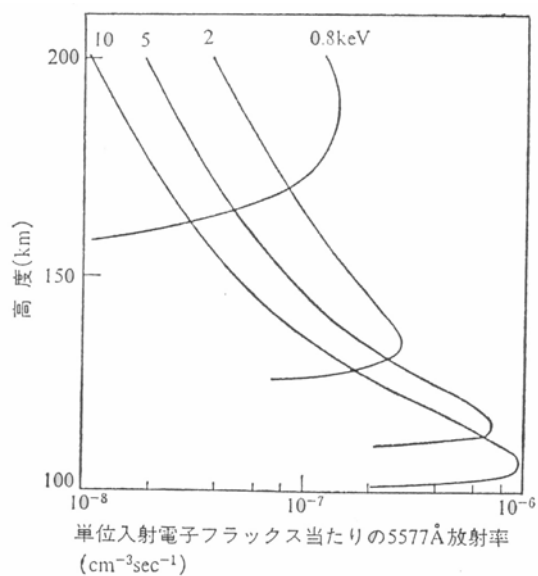


図 5.1 単位入射電子フラックス当たりの 557.7 nm の放射率 ($cm^{-3}sec^{-1}$)。

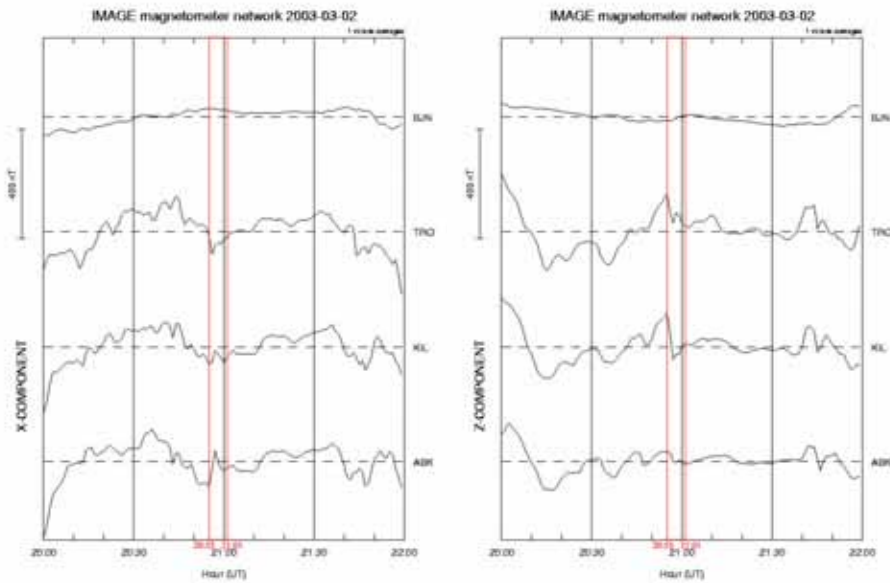


図 5.2 地上磁場計測ステーション、International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects(IMAGE)ネットワークのステーションを4ステーションの緯度は、BJN(地理緯度 74.5°N)、TRO(地理緯度 69.66°N)、KIL(地理緯度 69.02°N)、ABK(地理緯度 68.35°N)である。これら4ステーションで計測された地上磁場変動の X(南北)成分(左)と Z(鉛直)成分(右)。2003年3月2日の20時(UT)から22時(UT)を示してあり、イベントに対応する時間帯を赤の枠で示した。

参考文献

Bryant, D. A., D. S. Hall, and D. R. Lepine, Electron acceleration in an array of auroral arcs, *Planet. Space Sci.*, 26, 81, 1978.

Casserly, R. T., Observation of a structured auroral field-aligned current system, *J. Geophys. Res.*, 82, 155, 1977.

Casserly, R. T., and P. A. Cloutier, Rocket-based magnetic observations of aurora Birkeland currents in association with a structured auroral arc, *J. Geophys. Res.*, 80, 2165, 1975.

Davis, T., Observed Microstructure of Auroral Forms, *J. Geomag. Geoelectr.*, 30, 317-380, 1978a.

Davis, T., Observed Characteristics of Auroral Forms, *Space Sci. Rev.*, 22, 77-113, 1978b.

Frank, L. A., and K. L. Ackerson, Local time survey of plasma at low altitudes near the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, 77, 4116, 1972.

Gotz Paschmann, Stein Haaland, and Rudolf Treumann, *Space Science Series of ISSI Volume 15 Auroral Plasma Physics*, Kluwer Academic Publishers, 2003.

Hallinan, T., and T. Neil Davis, Small-Scale Auroral Arc Distortions, *Planet. Space Sci.*, 18, 1735-1744, 1970.

Heikkila, W. J., Satellite observations of soft particle fluxes in the auroral zone, *Nature*, 225, 369, 1970.

Marklund, G., Lars Blomberg, Carl-Gunne Falthammer, and Per-Arne Lindqvist, On intense diverging electric fields associated with black aurora, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1859-1862, 1994.

Marklund, G., and Tomas Karlsson, On low-altitude particle acceleration and intense electric fields and their relationship to black aurora, *J. Geophys. Res.*, 102, 17509-17522, 1997.

Peticolas, L. M., T. J. Hallian, H. C. Stenbaek-Nielsen, J. W. Bonnell and C. W. Carlson, A study of black aurora from aircraft-based optical observations and plasma measurements on FAST, *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JA900157, 2002.

Robinson, R., R. Vondrak, and T. A. Potemra, Electrodynamic properties of the evening sector ionosphere within the region 2 field-aligned current sheet, *J. Geophys. Res.*, 87, 731, 1982.

Senior, C., R. Robinson, and T. A. Potemra, Relationship between field-aligned currents, diffuse auroral precipitation and the westward electrojet in the early morning sector, *J. Geophys. Res.*, 87, 10,469, 1982.

Trondsen, T. S., and L. L. Cogger, High-resolution television observations of black aurora, *J. Geophys. Res.*, 102, j 362-378, 1997.

Tuomo Nygren, *INTRODUCTION TO INCOHERENT SCATTER MEASUREMENTS, Vol. 1 of INVERS PUBLICATIONS, Invers Oy*, 1996.

恩藤忠典, 丸橋克英, ウェーブサミット講座 宇宙環境科学, オーム社, 2000.

福西浩, 国分征, 松浦延夫, オーロラと超高層大気, 南極の科学 2, 古今書院, 1983.

謝辞

本研究に使用している EISCAT レーダーのデータは、EISCAT 科学協会より提供していただきました。感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、国立極地研究所の宮岡宏助教授より貴重な光学機器をお貸しいただき、かつ得られたデータを自由に使用することをお許しいただきました。深く感謝いたします。観測地トロムソにおいては、装置の取り扱い等、未熟者の私に、とても丁寧に教えていただきました。数日の間でしたが数多くの貴重なアドバイスをしていただき、誠にありがとうございます。トロムソ大学のモーテン・ブリックスさんには、光学観測のデータの提供、そして多くの助言をいただきました。トロムソに行った際には、私のつたない英語力にもかかわらず、公私にわたり多くのお話をしていただき、とても良い経験が出来ました。ありがとうございます。

当研究室の先輩方には、数々のアドバイスをいただきました。後輩達には、忙しい中、協力していただき、本当にありがとうございました。

本研究内容について、データの取り扱い等、数多くの知識と助言を与えてくださり、惜しみなく協力してくださいました小川泰信助手に心より感謝いたします。

野澤悟徳助教授からは、学生生活も含め、厳しくも温かいご指導をいただきました。御礼申し上げます。

最後に、藤井良一教授には、お忙しい中、研究に関しても、進路に関しても貴重なアドバイスをいただきました。本当に学ぶべきところが多かったです。心より感謝し、篤く御礼申し上げます。

みなさま、本当にありがとうございました。

