

平成 16 年度

修士論文

**オーロラ輝度と電離圏電子密度分布との関連の研究**

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）

岡田 慶吾

2005年1月28日

## 要旨

本研究では、周期的な点滅運動を繰り返すパルセイティングオーロラ、及び比較的一様なオーロラの発光がある領域で局所的にオーロラの発光がかけるといふ空間構造をもつブラックオーロラに伴う降り込み粒子について調べた。

パルセイティングオーロラの発生と電子密度変動の高度分布を比較した結果、パルセイティングオーロラが発生した際、パルセイティングに伴い電子密度が増加する高度がある一方で、電子密度が減少する高度もあった。パルセイティングの光の立ち上がりと電子密度増加のタイミングが一致する高度は、100 km から 194 km と広い高度にわたっており、降り込み粒子のエネルギー帯も 0.5 keV から 10 keV であることが示唆された。観測結果は、過去のロケット観測による結果と同様でパルセイティングオーロラを光らせる降り込み電子のスペクトルと同程度であるが、高度 80-100 km において高度方向に薄いとされた推定 [Brown *et al.*, 1976]とは異なるものであった。今回得られた結果はパルセイティングオーロラを担う降下電子のエネルギーが短い時間で大きく変動していることを強く示唆する新たな知見である。ブラックオーロラにおいては高度 140 km 以下で周辺ディフューズ領域に比べ有意な電子密度の減少が起こっていた。このことはブラックオーロラが一様な電子の降り込みがある領域中の、比較的小さな領域で高いエネルギー (2 keV より大きい) 降り込みを減少させる一方で、2 keV より低い粒子は影響を受けず降り込むことができる機構であることが分かった。

# 目次

## 1. 序論

- 1.1 本研究の目的 . . . . . 1
- 1.2 磁気圏 . . . . . 2
- 1.3 電離圏 . . . . . 3
- 1.4 磁気圏・電離圏結合 . . . . . 5
- 1.5 オーロラ . . . . . 6

## 2. 観測機器

- 2.1 EISCAT レーダーの概要 . . . . . 13
- 2.2 EISCAT UHF レーダーが観測する物理量とその仕組み . . . . . 14
- 2.3 光学観測器の概要 . . . . . 15
  - 2.3.1 デジタルカメラ . . . . . 15
  - 2.3.2 ビデオカメラ . . . . . 16
  - 2.3.3 4波長フォトメータ . . . . . 16

## 3. 観測、データ解析

- 3.1 観測 . . . . . 23
- 3.2 データ解析 . . . . . 24
  - 3.2.1 画像データの解析 . . . . . 24
  - 3.2.2 EISCAT レーダーデータ解析 . . . . . 24

## 4. 結果

- 4.1 イベント概観 . . . . . 26
- 4.2 パルセイティングオーロラ . . . . . 28
- 4.3 ブラックオーロラ . . . . . 31

## 5. まとめと考察

- 5.1 パルセイティングオーロラの発生原因となる降り込み電子とその降り込み機構 . . . . . 53

5.2	ブラックオーロラ領域における降り込み電子の特徴	54
5.3	ブラックオーロラ領域の光強度の変動	54
5.4	パルセイティングオーロラ及びブラックオーロラの動きと電場との対応	55

## 謝辞

## 参考文献

# 1. 序論

## 1.1 本研究の目的

本論文は、極域超高層大気中に出現するオーロラによる、電離圏のレスポンスと変動を、電離圏の重要な物理量（電子密度、電子/イオン温度、イオン速度等）を高度方向に分解能良く観測できる地上からの唯一の方法である非干渉散乱（Incoherent Scatter (IS)）レーダーと光学機器との同時観測を実施して研究し、オーロラ過程と電離圏の性質をより良く理解することを目的としている。

オーロラは磁気圏から磁力線に沿って降下してくる荷電粒子（電子およびプロトン）により中性大気が発光する現象である。オーロラ過程は、磁気圏の粒子分布、降下粒子の沿磁力線加速、それにとまなう沿磁力線電流と電離圏内のクロージャー電流、電場に関連する磁気圏及び電離圏プラズマの磁場に直交方向の運動などが、相互に強く影響を及ぼし合う過程、即ち磁気圏・電離圏結合の典型的な現象である。

後述するようにオーロラには形態や運動、発光・消滅の仕方などの点で異なる様々な種類のオーロラがある。現在まで、カーテン状オーロラとして知られるディスクリットオーロラについては、人工衛星等の観測やシミュレーションから、その降下粒子の性質や生成について、比較的研究が進んでいる。しかし、基本的なオーロラの種類であるパルセイティングオーロラや最近注目を集めているブラックオーロラなどについては、形状や動態は光学観測等から現象論的に分かってきてはいるが、その生成の機構、特にどのように降下粒子が伴うのか/欠けているのか、電離圏のどの高度領域で生じているのか、それに伴うエレクトロダイナミクス（プラズマの運動、電流、電場、電気伝導度分布）について未だ未解明である。

本研究は、二つの特徴のあるオーロラに注目する。一つは時間的に点滅やある領域内での運動を繰り返すパルセイティングオーロラであり、もう一つは比較的定常的に発光しているオーロラのある領域でオーロラ発光の無い空間的構造を持つブラックオーロラである。これらのオーロラにより電離圏がどのように変動をするのか、即ち、どの高度領域がパルセイティングオーロラでは点滅をしているのか、ブラックオーロラではどの高度領域で降下粒子による発光がなくなっているのか、を調べる。高度情報は降下粒子のエネルギーの情報を与

えるので、これらのオーロラを作り出している降下粒子のエネルギースペクトルの情報を得る事ができる。一般的に同種の研究を人工衛星による直接観測で行う場合は、オーロラの種類や空間・時間分布の同定ができず極めて困難である。本研究が用いる EISCAT レーダーに代表される IS レーダーは、オーロラ現象を支配する物理量を電離圏の高度方向に精度良く観測できる唯一の観測手法であり、地上からの光学観測を組み合わせる事により、他の観測では得られない知見を得ることができる。

以下に本研究に関連する事項について概説する。まず、オーロラが起きる磁気圏、電離圏等について述べ、最後に本研究が注目するパルセイティングオーロラとブラックオーロラの研究の現状について述べる。

## 1.2 磁気圏

太陽は従来思われていた静穏な星ではなく、激しく変動している。その最も代表例の1つとして、太陽表面から短時間に大量のプラズマが放出される Coronal Mass Ejection (CME) が挙げられる。太陽は太陽風と呼ばれる高温のプラズマ流を吹き出し続けている。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を表わす。荷電粒子からなる太陽風は地球固有磁場と相互作用し(太陽風の動圧と地球磁場圧力との平衡により)、地球磁場の昼間側を圧縮する。一方、地球磁場の夜側部分を引き延ばす。この地球磁場が閉じ込められた空洞領域を磁気圏と呼び、その内部は電離圏起源及び太陽風起源のプラズマによって満たされている。地球はこの磁気圏によって太陽風から保護されている。磁気圏は構成粒子のエネルギーや密度、磁場の強度や形状により様々な領域に分けられる。太陽風が直接入り込むことのできるカusp、開いた磁力線領域であるローブ、比較的高いエネルギー粒子の存在するプラズマシート、電離圏起源の低エネルギー粒子の存在する高密度のプラズマ圏等である。さらに地球の近傍には電離圏(次節)が存在している。これらの各領域については、図 1.1 に示す。一方磁気圏から外側に向かっては、磁気圏の外側境界(太陽側)には磁気圏界面(マグネットポーズ)と呼ばれる境界面が存在し、地球からマグネットポーズまでの距離は、昼間側が約  $10 Re$  ( $Re = 6370 \text{ km}$ ) であるのに対し、夜側はその十倍以上にもなる。更にマグネットポーズの昼間側(太陽側)には、超音速の太陽風によりバウショックと呼ばれる、衝撃波境界面が形成さ

れている。バウショックとマグネットポーズの間の領域はマグネットシースと呼ばれている。

太陽風は太陽活動に対応して変化するため、その結果として地球磁場の歪み具合やマグネットポーズの位置、磁気圏の大きさも変化する。宇宙空間及び磁気圏中のエネルギーを持った粒子の運動や分布は、磁場に強く影響を受けるため、磁気圏や磁気圏境界周辺の磁場構造とその変化が、太陽風粒子の地球への侵入に対して重大な役割を担う。特に、高緯度磁力線は太陽風の粒子が地球超高層大気へと侵入するルートとなっており、そこから侵入した粒子は、高緯度昼間側領域の中性大気と相互作用することで、高緯度超高層大気中でオーロラを光らせたり、その電離を促進したりする。磁気圏内の太陽風起源のエネルギーは、地磁気活動や地磁気脈動にも影響を及ぼしている。

### 1.3 電離圏

電離圏は、大気圏上部で、電磁波の伝播に大きな影響を与えられるだけの自由電子が存在している領域で、正イオン及び電子の密度は高度とともに増加し、高度 300 km 付近で最大となる。電離圏というのは荷電粒子の特徴と分布から定義された領域で、中性大気の性質から定義された中間圏上部と熱圏に領域としては対応している。そこから更に上部には磁気圏（外圏）に繋がっている。電離圏の電子密度分布は高度方向にいくつかの特徴的な構造をもち、高度によって低い高度から *D* 領域、*E* 領域、*F* 領域に分けられる。主たる電離源は太陽から放射される極端紫外線や X 線である。電離圏の電子密度は時間（季節、昼夜）や長短期の太陽活動度や磁気圏擾乱度、地理的な場所（極冠域、オーロラ帯、中低緯度、赤道域）によって大きく変わる。その中でも地球の自転と太陽との関係の影響が最も大きく、太陽側の日照領域では電子密度が増加し、日陰側では電子密度が減少する。これに加えて、極域ではオーロラ粒子による電離の影響も大きく重要である。その時、電子温度はオーロラ粒子の降り込みによる粒子加熱の指標となり、イオン温度は主に電場による摩擦加熱の指標となる。

*D* 領域：

高度約 60-90 km 付近に存在する弱電離状態（電子密度  $10^8$ - $10^{10} \text{ m}^{-3}$ ）の領域であり、負電荷の粒子として負イオンと電子が共存している。大気や電離の条

件によってイオン組成は複雑に変化する。一般に電子密度が低く、またイオンは完全に中性大気との摩擦で一緒に動くため、磁気圏からの電場は存在するが、電離圏電流はほとんど流れていない。しかし、強いオーロラの出現時や SC などの時には、高エネルギー電子により強く電離されることもある。

#### *E* 領域 :

高度約 90-130 km 付近の領域で、電子密度は  $10^{11} \text{ m}^{-3}$  程度の最大値をもつ。極域の電子密度は日照とともにオーロラ粒子の影響を強く受け、中・低緯度における日中の *E* 層と同程度あるいはそれ以上になることもある。この領域の特徴として、イオンと電子のジャイレーション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、このイオンと電子の相対速度から Hall 電流が流れることができる。一方、上部ではイオンのジャイレーション周波数と中性大気との衝突周波数が接近するため、イオンの運動は偏向され、Pederson 電流と呼ばれる電流が流れる。Hall 電流は Joule 熱を発しない（非散逸）であるのに対して、Pederson 電流は Joule 熱を発し、磁気圏から持ち込まれるエネルギー散逸に重要な役割を果たしている。この領域内には *E2* 層や密度の高度方向の変動が大きいスポラディック *E* 層がある。スポラディック *E* 層は赤道域から極域までの広い緯度範囲で見られる現象であるが、その特性は赤道域、中低緯度、高緯度で異なることが知られている。赤道域のものは磁気赤道 *E* 領域に現れる赤道ジェット電流に伴って発生し、中低緯度では *E* 層の中性大気風の方向がある高さで逆転するシアーに伴い発生する。高緯度のものはほとんどがオーロラ性のものである。*E* 領域では、 $\text{O}_2^+$ 、 $\text{N}_2^+$  及び、 $\text{O}^+$  が 1 次イオンとして電離生成されるが、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  $\text{NO}^+$ 、約 25% が  $\text{O}_2^+$  である。

#### *F* 領域 :

高度 150 km 以上の領域で、*F2* 層や半成層である *F1* 層、*F1.5* 層が存在する。*F* 領域の電子密度分布にはしばしば密度揺らぎが発生し、その密度の細かい濃淡によって電波の伝播経路が多重に分岐する散乱現象が起こる。この現象はスプレッド *F* と呼ばれ、赤道域から極域までの広い緯度範囲で見られる現象だが、



赤道域と極域では特性が異なる。極域のスプレッド  $F$  は低エネルギー粒子の降り込みに関連して発生する。 $F$  層ピークのイオンの主成分は  $O^+$  である。更に、 $F2$  層ピークの上側にはトップサイドと呼ばれる  $O^+$  が  $H^+$  や  $He^+$  よりも減少していく遷移領域 (高度 1100 km) が存在している。この領域では、イオンと電子双方とも中性大気と無衝突として扱えるため、両者とも同じ速度で電場ドリフトするため、電離圏電流は一般的には無視することができる。

## 1.4 磁気圏—電離圏結合

磁気圏と電離圏は磁力線を通して (太陽風から与えられた) エネルギーや物質を交換し合い、お互いに強く作用をしあっている。これを磁気圏—電離圏結合と呼んでいる。

磁力線はそれに沿った粒子加速が無い場合、即ち沿磁力線加速が無い場合には、等電位と考える事ができる (磁力線方向の電気伝導度がそれに直交方向の電気伝導度にたいして空間スケールも考慮して十分大きい)。そのため、磁気圏の電場は電離圏に投影される。冷たいプラズマは、中性大気との衝突が無視できるとき、電場ドリフトをするので、この電場の投影は磁気圏内のプラズマの運動 (特に大規模な対流運動) が電離圏のプラズマの運動に投影されることを意味している。磁気圏プラズマの様々なドリフト運動は磁場に直交方向の電流を作り出し、磁気圏内で閉じる事ができない電流は電気伝導度を持つ電離圏に沿磁力線電流として流れ込む。一般的にこれらに伴う電磁エネルギーの流れ (ポインティングフラックス) は磁気圏から電離圏で、基本的には磁気圏側にエネルギー源がある。電流や電場を介して持ち込まれたエネルギーは電離圏電流を (主として  $E$  領域で) 駆動し、特に Pederson 電流は Joule 熱としてそのエネルギーを消費する役割を担っている。これら磁気圏側の電流、沿磁力線電流、電離圏電流は 3 次元の電流回路を構成している。大規模で比較的常時存在する沿磁力線電流分布としては、*Iijima and Potemra [1976]* により提唱された Region 1 (オーロラ帯高緯度側の午前側に下向き沿磁力線電流、午後側に上向き沿磁力線電流) 及び Region 2 (オーロラ帯低緯度側に存在し、高緯度側の Region 1 と逆向きの電流) 電流系が知られている。

一般的に磁力線は等電位として良く近似できるが、沿磁力線電場がある場合は磁力線で結ばれた磁気圏側と電離圏側で電位が異なる。一つの代表的な例と

して、磁気圏電子を磁力線下向きに加速する上向き沿磁力線電場加速があり、その緯度方向の構造を inverted-V 構造とよぶ。また、近年の衛星観測から、電離圏起源の冷たい電子が磁気圏側に移動する下向き沿磁力線電流の流れる磁気圏下部で、電離圏電子を上方に加速する沿磁力線電場が観測されている [Carlson *et al.*, 1998]。これの発生の原因は未だ不明であるが、電離圏の状態に強く依存すること、電離圏が従来の受動的な役割だけでなく、能動的な役割も果たしている事を表すものとして注目されている。本研究が対象とするブラックオーロラにおいてもこの下向き沿磁力線電場との関連が興味ある課題となっている。

一方荷電粒子も磁力線にまとわりついて運動し、降下電子/イオンや電離圏起源の電子/イオンという形で磁気圏と電離圏間で物質交換されている。

## 1.5 オーロラ

磁気圏やマグネットシースを起源とする数 10 eV から数 100 keV の高エネルギー電子やプロトンが、磁力線に沿って地球大気圏に降り込んでいる。それらの供給源は、プラズマシートの境界領域 (BPS: boundary plasma sheet)、プラズマシートの中心部 (CPS: central plasma sheet)、放射線帯 (VA: van Allen belt) の 3 つの領域である [Winningham *et al.*, 1975]。その降り込み粒子の中には前節に述べたオーロラ加速領域で沿磁力線方向に加速されているものも存在する。降り込み粒子は、電離圏高度で中性粒子との衝突や中性粒子を電離させることでエネルギーを失うが、その際、地球上層大気原子や分子を励起させる。そして、励起状態となった原子や分子が基底状態に戻るため時に、余分なエネルギーを光として放射する。それがオーロラの光である。そのため、オーロラ光の輝線やバンドの大部分は、上層大気的主要構成成分である  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $O$ 、 $N$ 、 $N_2^+$ 、 $O_2^+$ 、 $O^+$ 、 $N^+$  の輝線である。

こうしたオーロラの発光のほとんどはオーロラオーバルと呼ばれる地磁気極を取り囲むドーナツ状の領域内で起こり、形態的にはカーテン状または帯状のディスクリットオーロラと全天に広がるベール状またはパッチ状のディフューズオーロラの 2 つに大別されている。

明瞭な境界を持つディスクリットオーロラに加えて、ディフューズオーロラ中にも様々な境界や構造を持つオーロラが存在する。これは、オーロラに伴う磁気圏・電離圏間に形成されている 3 次元電流系及びプラズマ運動も、同じよう

に小さな空間スケールのものであることを意味する。そのようなオーロラの代表的な種類の一つとして、本研究で対象とするパルセイティングオーロラ（オーロラ脈動）がある。この種類のオーロラは、明るさが周期的に変化したり、同じパターンの移動を周期的に繰り返すという特徴を持つ。この他に、近年特に注目を集めているオーロラの種類として、やはり本論文で注目するブラックオーロラがある。これらの2種類のオーロラについては、以下に更に説明を行う。表 1.1 にオーロラの分類を示す。

パルセイティングオーロラは、運動や形態から更にいくつかのサブパターンに分類される [福西浩他,南極の科学, 1983]。

非伝搬性パルセイション：パッチ状のオーロラが余り動くことなく全体として点滅を繰り返す。

ストリーミング：フィラメント状のオーロラに沿って明るい部分が繰り返し流れるように移動する。

極向き伝搬：パッチ状の明るい領域が高緯度側へ繰り返し伝搬する。

赤道向き伝搬：切れ切れになった弱いアークが低緯度側へ周期的に伝搬する。

拡大・収縮：パッチ状オーロラの大きさが急激に広がり、また元の状態に戻る運動を繰り返す。

フレーミング：炎が燃え上がるように磁力線に沿って明るい部分が上方に運動を繰り返す。

実際に観測されるオーロラはこれらのパターンが組み合わさったものである場合も多く、分類は簡単ではない。これらのパルセイティングオーロラはストリーミングの場合のように午後側に出現する場合もあるが、多くの場合、真夜中付近で発生するサブストームの後に午前側に出現することが多い [Oguti, 1981]。

このパルセイティングオーロラの背景に存在するディフューズオーロラを光らせる降下電子のスペクトルは、数 keV から 10 keV 程度の平均エネルギーを持つ熱平衡状態を表すマックスウェル分布に近いことが分かっている。しかし、オーロラが空間及び時間的に変動するパルセイティングオーロラを作る降下粒子のエネルギースペクトルについては、衛星観測では困難である。ロケット観測等も過去に行われている [McEwen et al., 1981] が、そのスペクトルはよく分かっていない。但し、10 keV 以上の降下電子がパルセイティングオーロラに伴って観測されたという報告はない。過去に行われた光学観測によるパルセイティ

ングオーロラの下限高度(80-100 km と推定)からのエネルギー推定では、30-60 keV の降下電子がパルセイティングオーロラを作り出しているという報告 [Brown *et al.*, 1976] があるが、これはロケット観測の結果とは相容れない。即ち、パルセイティングオーロラを作り出す降下電子のエネルギースペクトについては、未解明の問題である。また、パルセイティングオーロラの高度方向の厚さは大変薄いという報告もあるが、これについても電離圏内での同時観測はなく、未解明のままである。

これらの問題に対して、実際の電離圏内の電子密度等の変動とパルセイティングオーロラの変動の同時観測とその比較による検証は、パルセイティングオーロラの機構解明のために必要である。

また、パルセイティングオーロラは時間とともにある方向に、比較的一様に運動する場合が多い。過去の研究ではこれは電場ドリフトの方向に一致するという結果があるが、これについても未だ十分な検証が行われていない。これらのパルセイティングオーロラの基本的性質に関わる問題について本研究では IS レーダーによる電離圏直接観測と光学観測の同時観測からパルセイティングオーロラの性質の一端を明らかにすることを試みる。

本研究が注目するもう一つの種類のオーロラは、特に最近観測機器の性能の向上により、その形態が詳細に観測できるようになったブラックオーロラである。ブラックオーロラは「一様なディフューズオーロラ中にある光の欠けた小さな領域」もしくは、「ディフューズオーロラとディスクリートオーロラの間である程度のシア運動をしている光の欠けた小さな領域」と定義されている [e.g., Royrvik, 1976; Davis, 1978a]。ブラックオーロラはオーロラサブストームの末期のリカバリーフェイズの一般的な特性と理解されている。そして、電離圏の電子の流出による局所的な電子密度の減少がブラックオーロラを発生させると考えられている。しかし、ブラックオーロラの観測研究は以下に記すような限られたもので、未だ不明な点が数多く残されている。

ブラックオーロラの形態としては、ブラックパッチ、ブラックリング、弓形ブラックアーク、細いブラックアーク、ブラック渦(ブラックカール)などを挙げる事ができる [Oguti, 1975; Royrvik, 1976; Davis, 1978; Schoute-Vanneck *et al.*, 1990; Trondsen and Cogger, 1997; Kimball and Hallinan, 1998a, 1998b]。特徴としては、次のことが挙げられる。(1) ブラックオーロラは 100 m から 5 km 程度の幅

をもつ小スケールの機構である [Trondsen and Cogger, 1997; Kimball and Hallinan, 1998a, 1998b]。 (2) ブラックパッチ、ブラックリングは 2 km から 14 km 程度の広がりがあり、弓形ブラックアークは 20 km から 30 km の大きさをもつ。 (3) ブラックアークや渦機構は定義されるような大きさではない [Trondsen and Cogger, 1997; Kimball and Hallinan, 1998a, 1998b]。 (4) 全てのタイプのブラックオーロラは標準的に 1 km/s のドリフト速度をもっている [Kimball and Hallinan, 1998a, 1998b]。

近年の研究では、主にブラックオーロラの形態的研究とブラックオーロラに伴う下向き沿磁力線電流の研究が行われており、次のような結果が示されている。 Marklund et al. [1997] は、Freja 衛星によって観測された降り込み電子の減少に伴う電場の拡大の統計結果や伝導度依存性などを調べ、ブラックオーロラとの観測的な対応は確かではないが、ブラックアークやブラック渦機構と狭発散電場領域の下向き沿磁力線電流との関連の可能性を示した。

Trondsen and Cogger [1997] は高感度オーロライメージャーにより、ディフューズオーロラオーバルの夜側及び真夜中側でブラックオーロラの渦機構やアーク、パッチの観測を行った。その観測結果より、パルセーティングオーロラパッチの周りを動く場合を除いてブラックアークやブラックパッチは一般的なオーロラと逆で、常に東向きのドリフト速度をもつことを示した。また、ブラックカールはディフューズオーロラ中で東向きにも西向きにもドリフトすることも示した。 Kimball and Hallinan [1998a] は、1972-1976 年と 1994-1997 年に Alaska 周辺のサイトで撮影された全天画像、及び狭視野画像の解析により、ブラックオーロラとパルセイションの関係を以下のように示した。 (1) ブラックパッチとパルセイションがオーバーラップすることはあるが、ブラックアークとパルセイションがオーバーラップすることはない。 (2) ブラックパッチとパルセイションが同じフラックスチューブ上で発生したがドリフト方向が逆であることから、 $E \times B$  ドリフトとそれらの速度には関連がない。 (3) ブラックパッチとブラックリングはブラックカールとは異なる現象で、ブラックカールよりも長いライフタイムを持ち、東向きにのみドリフトする特徴を持つ。 (4) ブラックパッチはオーロラサブストームの早期リカバリーフェイズで発生し、統計的に磁気真夜中前に現れる。更に、Kimball and Hallinan [1998b] はブラックカール周囲のディフューズオーロラ領域にはプロトン、電子の両方の降り込みがあり、そのプロトンのエミッションが十分ブラック領域のバックグラウンドとなりうると示唆し、

ブラックカールと電場構造との関連についても述べた。

その後、1998年にFAST衛星により、2 keVより大きなエネルギーの電子の降り込みが欠けた狭い領域が観測され、ブラックパッチとの関連が指摘された。*Peticolas et al.* [2002] は、この観測結果から loss cone 内の chorus waves の抑圧により散乱が局所的に妨げられることによってブラックオーロラが発生すると示唆した。これは、ブラックオーロラ領域はただ単に降り込み電子が欠けているだけで、上記 *Marklund et al.* [1997] の結果とは異なり、下向き沿磁力線電流とは関連がないことを意味した。*Blixt and Kosch* [2004]は、Tromsø で EISCAT レーダーと光学観測機器の同時観測を行い、2002年3月5日にシアー運動をしないブラックアークを観測した。そして、そのブラックアーク領域では電子密度の有意な減少が見られないことから、シアー運動をしていないブラックアークは下向き沿磁力線電流と関連がない可能性があるとした。

本研究では光学観測から得られたブラックオーロラがその周囲のディフューズオーロラとどのように異なるのか、特に電離圏内の電子密度の高度分布（降下電子のエネルギーに関連）にどのような特徴を持つのか、を EISCAT レーダーを用いて定性的に調べる。

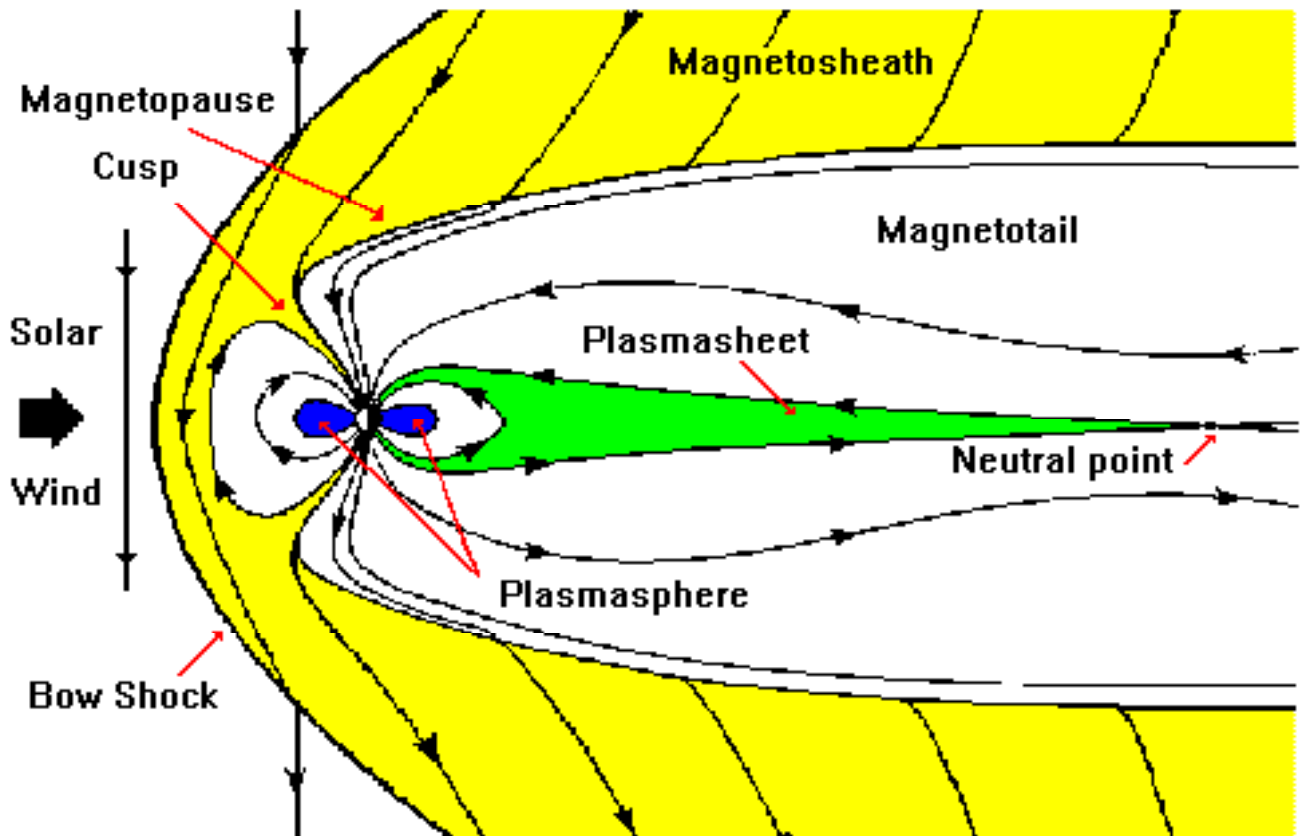


図 1.1. 磁気圏 [Oulu Space Physics Textbook より]

磁気圏尾部は、テイルローブとプラズマシート（磁力線はポーラーキャップで開き、夜側で閉じている）によって形成されている。磁気圏内部には中低緯度に位置するプラズマ圏がある。プラズマ圏と内部プラズマシートが重なると、ラディエーションベルトやリングカレントとなる。この周囲は地球静止軌道である。マグネットポーズに最も近い領域は境界層と呼ばれている。ここではカuspを示している。

表 1.1. オーロラの分類（形状と時間変化）

	分類		説明
	主分類	副分類	
形状	帯状 (Band-like)	アーク (Arc)	一般に東西に弧状に伸びており、はっきりした下辺をもつ場合
		バンド (Band)	帯状をしており、帯の一部がU字型やJ字型、渦巻き状に折れ曲がる場合が多い
	薄く広がった (Diffuse)	パッチ (Patch)	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)	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)	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
時間 変化	静穏な (Quiet)		形や位置が非常にゆっくりと変化する場合
	活動的な (Active)		形や位置が激しく変化する場合
	脈打つ (Pulsing)	点滅する (Pulsating)	明るさが数秒から数10秒の周期で変化する場合
		炎のような (Flaming)	明るい部分が炎のように磁力線の上方に向かって急速に広がる場合
		ちらつく (Flickering)	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)		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	



## 2. 観測機器

### 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、欧州 IS レーダー (EISCAT) 科学協会 (イギリス、ドイツ、フランス、日本、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド) 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。以下に 3 つのレーダーの特徴を説明する。レーダーの仕様の詳細は、表 2.1 にまとめた。

UHF レーダーシステムは口径 32 m のパラボラアンテナ 3 機より構成される、中心送信周波数 931 MHz の 3 局方式のレーダーシステムである。送受信局としてノルウェーの Tromsø (69.58°N, 19.22°E) に 1 機、受信局としてスウェーデンの Kiruna (67.86°N, 20.44°E) とフィンランドの Sodankylä (67.36°N, 26.63°E) に各々 1 機ずつ設置されている。これら 3 つのサイト位置を図 2.1 に示した。図 2.2 に本研究で使用した Tromsø に設置されている UHF レーダーの写真を示す。このレーダーシステムでは、Tromsø 局から送信した電波の散乱波の 3 地点同時受信が可能で、3 次元的な物理量の測定をすることができる。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。このレーダーシステムは、1981 年から稼働しており、20 年以上に及ぶデータ蓄積がある。また 2000 年にシステムの更新を行い、より短時間分解能 (1 秒以下) での観測が可能になった。

VHF レーダーは 30 × 40 m のパラボリックシリンダー型のアンテナ 4 枚から構成される、中心送信周波数 224 MHz のレーダーであり、Tromsø に設置されている。最大 2 方向の同時観測が可能だが、アンテナは機械的に方位角方向に可動することはできず、仰角方向の可動のみとなっている。ただし、電磁波の伝送ケーブル内の伝搬遅延を用いることにより、ビームを方位角方向にも 20 度程度変動させることはできる。ポラーキャップ内の電場の変動測定やトップサイド電離圏、及び D 領域の観測に有効である。

ESR は口径 32 m の可動式と口径 42 m の沿磁力線方向固定式のパラボラ型アンテナ 2 機により構成される、中心送信周波数 500 MHz のレーダーであり、Svalbard 諸島の Longyearbyen (78.15°N, 16.03°E) に設置されている。このレーダーは、太陽風と地球磁気圏が直接エネルギー等のやりとりを行う (太陽風のプラズマ粒子が直接地球に降り込む) 昼間側カスプ域において、オーロラの光学観測との同時観測が可能な唯一の IS レーダーである。

EISCAT レーダーの観測は、CP (Common Program) と SP (Special Program) の 2 つに大きく分けられる。CP は共通実験で、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 4 (ポーラキャップ観測)、CP 5 (CP 1 と CP 3 を組み合わせた観測)、CP 6 (中間圏観測)、CP 7 (トップサイド電離圏観測) の 7 種の観測モードがある。CP は EISCAT 科学協会自身が行う観測であり、長期間に亘る同種のデータを蓄積することが 1 つの大きな特徴である。一方、SP の観測時間は各加盟国に分配され、各研究者が独自の目的に合わせた観測を実施する。本研究では、UHF レーダーにより磁力線方向に固定するモードで SP を実施した。

## 2.2 EISCAT UHF レーダー観測原理

IS レーダー観測により、電子密度、視線方向のイオンのドリフト速度、イオン温度、電子温度の計 4 つの物理量を同時に得ることができる。IS レーダーは電子のトムソン (Thomson) 散乱を利用しており、散乱波の強度から電子密度、散乱スペクトルの形からイオン温度、電子温度が分かる。電子密度を  $N_e=10^{11} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度を  $T_e=10^3 \text{ K}$  と仮定すると、電離圏のデバイ (Debye) 長は

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{N_e e^2}} \sim 6.9 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (2.1)$$

となる。ここで、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $k_B$  はボルツマン定数、 $e$  は電荷素量を表す。EISCAT UHF レーダーの送信電波の波長は約 0.32 m であり、その長さは電離圏のデバイ長に比べ十分長い。そのため、EISCAT レーダーは自由運動をしている電子からの散乱波ではなく、イオンによりコントロールされた電子からの散乱波を受信する。つまり、イオンの運動をレーダーは観測している。受信スペクトルの例を図 2.3 に示す。また、EISCAT レーダーは多くの電子から送信周波数に近いバンドの非干渉散乱エコーを受信するが、それはイオンが熱運動状態に

あるからである。更に、イオンのバルクな運動の影響を受けて中心周波数は Doppler シフトする。イオン組成を仮定し、観測により得られた IS スペクトルをフィッティングすると、電子密度、イオン速度、イオン温度、電子温度を導出できる。具体的には、イオンラインの幅からイオン温度、2つのイオンラインの間のへこみからイオン温度と電子温度の比、中心周波数のずれから視線方向のイオン速度が求まる。また、受信強度から、イオン温度と電子温度の比を考慮すると電子密度が求まる。

3局方式では、3次元イオン速度が高い時間分解能で求まる。 $F$ 層では、イオンも  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト運動をしているため、測定したイオン速度を用いて、磁場に直交方向の電場が導出できる。磁束密度は、IGRF 磁場モデル[*IAGA Division I working Group 1, 1987*]を用いて与えている。

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \quad (2.2)$$

$\mathbf{E}$  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。EISCAT レーダーの観測結果と適切なモデルを組み合わせることにより、電気伝導度、Joule 加熱率、中性風の速度も導出可能である。

## 2.3 光学観測機器の概要

EISCAT レーダー視野でのオーロラの挙動や形態、降り込み電子のエネルギー、及び観測時の天候等の情報を得るため、光学観測機器としてデジタルカメラ 2機、TV カメラ、4波長フォトメータを用いた。以下に4つの光学観測器について説明する。

### 2.3.1 デジタルカメラ

観測に用いたデジタルカメラ2機は Fujifilm FinePix S2Pro と Canon EOS-ID である。各々のカメラの写真をそれぞれ図 2.4、図 2.5 に示した。Fujifilm FinePix S2Pro には、ニコンフィッシュアイレンズ (Nikon Fisheye Lenz) 8 mm / F 2.8 (FOV:  $180^\circ \times 120^\circ$ ) を装備させ、全天画像撮影を行った。この画像データは、全天におけるオーロラの分布およびその挙動と構造を捉えるため、さらに観測時の雲の存在と動きの確認に用いた。カメラの仕様の詳細を表 2.2 にまとめた。Canon EOS-ID は、狭視野カメラとして用いている。レンズには Canon Lenz 50

mm / F 1.0 (FOV:  $31^\circ \times 21^\circ$ ) または Canon Lenz 85 mm / F 1.2 (FOV:  $19^\circ \times 12^\circ$ ) を使用した。EISCAT レーダー視野領域を含む領域 (FOV:  $66 \times 44$  km、 $34 \times 26$  km (高度 115 km を仮定)) を撮影している。この画像は、EISCAT レーダーを通過するブラックオーロラの選定に主に用いた。カメラの仕様の詳細を表 2.3 にまとめた。

### 2.3.2 ビデオカメラ

オーロラの動きを見るために、XYBION ISS750 (図 2.6) により取得されたデータを用いた。このビデオカメラのレンズには 50 mm / F 0.95 (FOV:  $14.3^\circ \times 10.9^\circ$ ) を用いた。感度特性は約 500 nm から 850 nm で EISCAT レーダー視野領域を含む領域 (FOV:  $29$  km  $\times$   $22$  km (高度 115 km)) を動画データとして記録している。この動画データは、EISCAT レーダー視野がどの程度の時間ブラックオーロラを捉えていたか、及びブラックオーロラの挙動を見るために用いた。ビデオカメラの仕様の詳細は、表 2.4 に示す。

### 2.3.3 4 波長フォトメータ

観測に用いたフォトメータの分光システムは 2 色性ミラー、ハーフミラー、4 波長バンド透過フィルターにより構成されており、同時 4 波長バンド ( $N_2^+$  ファーストネガティブバンドの 427.8 nm、O 原子赤線の 630.0 nm、 $N_2$  ファーストポジティブバンドの 670.5 nm、O 原子の 844.6 nm) の発光強度を測定できる。視野角は  $1.2^\circ$ 、時間分解能は 0.1 秒である。写真を図 2.7 に示した。フォトメータデータを用いることで、427.8 nm バンドの発光強度から降り込み電子の全エネルギーフラックス、630.0 nm と 427.8 nm バンドの発光強度比から降り込み電子の平均エネルギーフラックスを算出できる。本研究ではブラックオーロラ領域での発光強度を調べるために用いた。

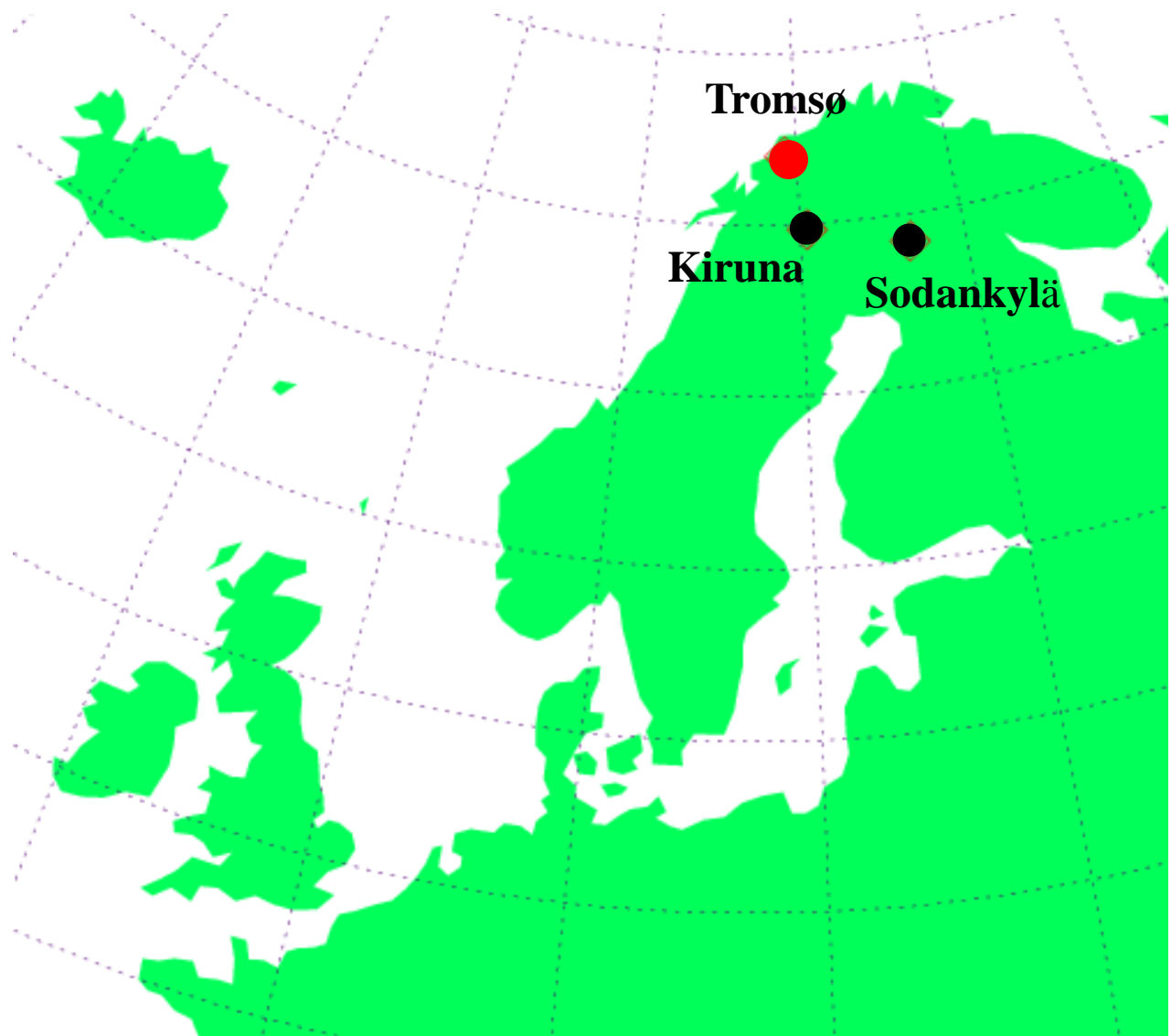


図 2.1. EISCAT サイトの位置。Tromsø は UHF レーダーの送受信局、Kiruna と Sodankylä は受信局である。



図 2.2. Tromsø の EISCAT UHF レーダー

表 2.1. EISCAT レーダーシステムの仕様

Location	Tromsø		Kiruna	Sodankylä	Longyearbyen
<b>Geographic Latitude</b>	69 ° 35 N		67 ° 52 N	67 ° 22 N	78 ° 09 N
<b>Geophysical Longitude</b>	19 ° 14 N		20 ° 26 N	26 ° 38 N	16 ° 03 N
<b>Inclination</b>	77 ° 30 N		76 ° 48 N	76 ° 43 N	75 ° 18 N
<b>Invariant Latitude ground</b>	66 ° 12 N		64 ° 27 N	63 ° 34 N	75 ° 18 N
<b>Band</b>	VHF	UHF	UHF	UHF	UHF
<b>Frequency</b>	224MHz	931MHz	931MHz	931MHz	500MHz
<b>Bandwidth</b>	3 MHz	8 MHz	8 MHz	8 MHz	10 MHz
<b>Transmitter</b>	2klystr	2klystr			10klystr
<b>Channels</b>	8	8	8	8	8
<b>Peak Power</b>	2 × 1.5MW	3.0MW			1MW
<b>Average Power</b>	2 × 150kW	300kW			250kW
<b>Pulse Duration</b>	1 μ s-2.0ms	1 μ s-1.0ms			1 μ s-2.0ms
<b>Phase coding</b>	Binary				
<b>Min interpulse</b>	1.0ms	1.0ms			0.1ms
<b>Receiver</b>	Analog-digital				
<b>Digital Processing</b>	14-bit 15MHz ADC lag profiles 32-bit complex				12-bit 10MHz ADC lag profiles 32-bit complex
<b>Antenna</b>	4×(30 × 40m) parabolic cylinders	32m parabolic dish	32m parabolic dish	32m parabolic dish	42m and 32m parabolic dishes
<b>Feed system</b>	Line feed	Cassegrain	Cassegrain	Cassegrain	Cassegrain
<b>Gain</b>	46 dBi	48.1dBi	48.1dBi	48.1dBi	42.5dBi or 44.8dBi
<b>Polarization</b>	circular	Circular	any	any	Circular
<b>System merit figure</b>	30MWm <sup>2</sup> /K	8MWm <sup>2</sup> /K			3MWm <sup>2</sup> /K

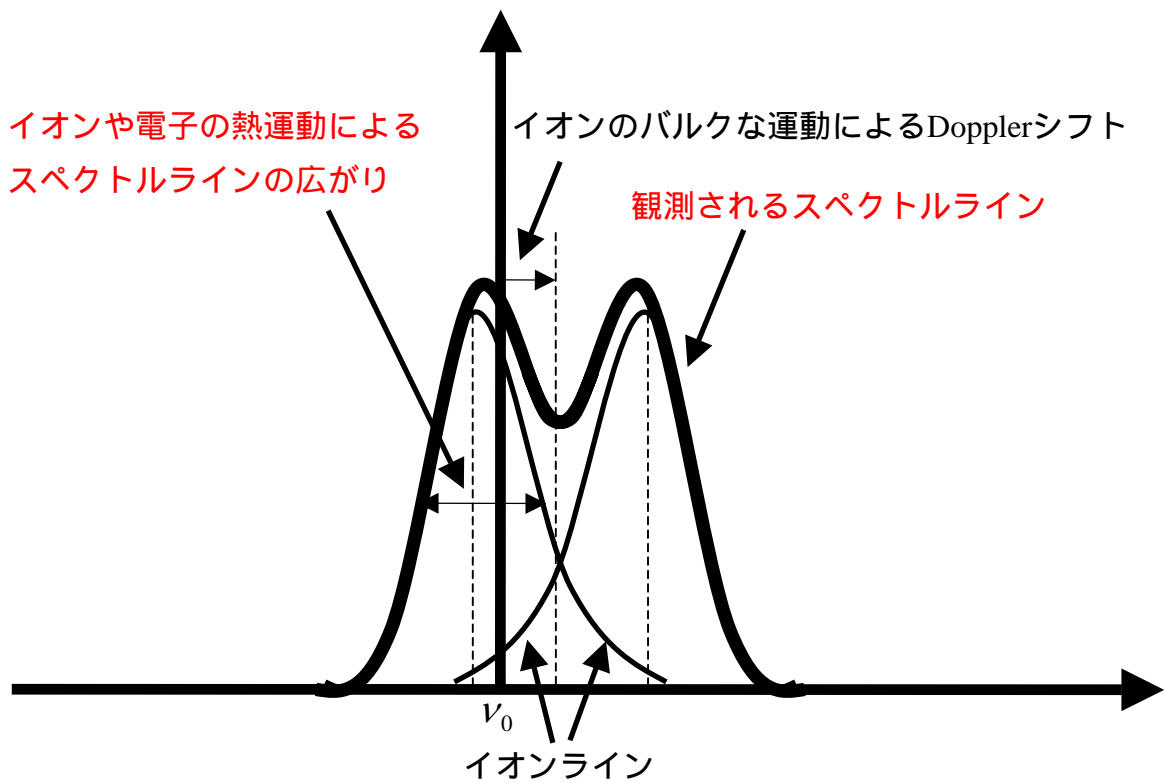


図 2.3. 受信スペクトルの模式図

プラズマラインは電子音波による電波の散乱を、イオンラインはイオン音波による電波の散乱を示す。プラズマライン、イオンライン各々の広がりには電子とイオンの熱運動の効果による。イオンのバルクな運動によって起こるDopplerシフトによって送信波の振動数  $\nu_0$  がシフトし、結果として周波数全体もシフトする。



図 2.4 Fujifilm FinePix S2 Pro

表 2.2 Fujifilm FinePix S2 Pro の仕様

型番	FinePix S2 Pro	
有効画素数	617 万画素	
撮像素子	大型 ( 23.0mm × 15.5mm ) スーパーCCD ハニカム	
カラーフィルター方式	原色フィルター採用	
記録方式	圧縮 : JPEG 非圧縮 : TIFF、CCD-RAW	
記録画素数	4256 × 2848 pixel / 3024 × 2016 pixel / 2304 × 1536 pixel / 1440 × 960 pixel	
レンズマウント	Nikon F mount 対応 ( AF カップリング、AF 接点付き )	
撮影感度	ISO100 / 160 / 200 / 400 / 800 / 1600	
シャッタースピード	30 秒 ~ 1/4000 秒 ( バルブ撮影可能 )	
入出力端子	デジタル入出力	USB、IEEE1394
寸法・質量	本体外形寸法	( 幅 )141.5 mm × ( 高さ )131.0 mm × ( 奥行き )79.5 mm ( レンズ突起含まず )
	本体質量	約 760g ( レンズ、電池、記録メディア含まず )
動作環境	温度	0 ~ 40 ( マイクロドライブ使用時は 5 ~ 40 )
	湿度	80% 以下 ( 結露しないこと )





図 2.5 Canon EOS-1D

表 2.3 Canon EOS-1D の仕様

型番	Canon EOS-1D	
有効画素数	約 415 万画素	
撮像素子	高感度・高解像度大型単板 CCD センサー	
カラーフィルター方式	RGB 原色フィルター	
記録方式	圧縮：JPEG 非圧縮：RAW	
記録画素数	2496 × 1662 pixel / 2464 × 1648 pixel / 1232 × 824 pixel	
レンズマウント	Canon EF mount	
撮影感度	ISO100 / 200 ~ 1600 (1/3 段ステップ) / 3200 相当	
シャッタースピード	30 秒 ~ 1/16000 秒 (1/3 段ステップ)(バルブ撮影可能)	
入出力端子	デジタル入出力	IEEE1394
寸法・質量	本体外形寸法	(幅)156 mm × (高さ)157.6 mm × (奥行き)79.9 mm
	本体質量	約 1250 g (本体のみ。電池 335 g)
動作環境	温度	0 ~ 45
	湿度	85%以下



図 2.6 XYBION ISS750

表 2.4 XYBION ISS750 の仕様

型番	XYBION ISS750	
記録方式	PAL	
記録画素数	720 × 576 pixel	
レンズ	50 mm/F0.95	
FOV	14.3 × 10.9°	
レンズマウント	C mount	
Exposure	25 images per second	
撮影感度	約 500 ~ 850 nm	
寸法・質量	本体外形寸法	(幅) 79 mm × (高さ) 102 mm × (奥行き) 226 mm
	本体質量	1900 g

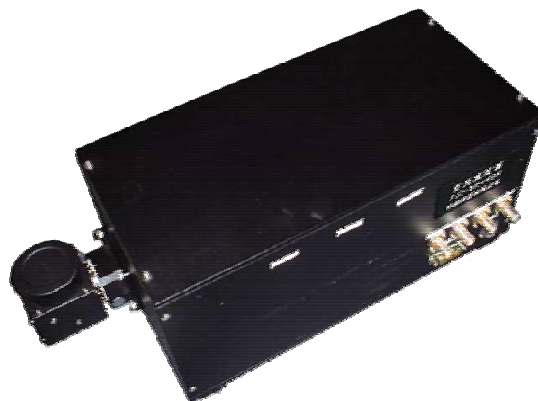


図 2.7.4 波長フォトメータの受光部

## 3. 観測、データ解析

### 3.1 観測

観測は、トロムソの EISCAT 観測所（磁気緯度経度（ $66.1^{\circ}$ ,  $103.4^{\circ}$ ）において行った。EISCAT UHF レーダーを用いた特別実験を、2003 年 3 月 1 から 3 月 5 日の 5 日間、毎夜 19:01 UT に行った。EISCAT UHF レーダーの観測モードは、沿磁力線方向固定の CP1 モードを用い、arc1 とよばれるパルススキームを用いた。このパルススキームによる時間分解能は最短で 0.44 秒、最大高度分解能は 0.9 km である。

FinePix S2Pro は、観測小屋のドーム内にカメラの上側を地磁気北として、水平、鉛直上向きに設置されている。視野角  $180^{\circ} \times 120^{\circ}$  の魚眼レンズを用い、露光時間 15 秒ないし 10 秒（3 月 4 日、5 日のみ）で、30 秒毎に 1 枚全天画像の撮影を行った。撮影された画像は、PC に転送し、JPEG 形式で保存している。撮影時刻はデジタルカメラ本体の時刻となるため、観測前に時刻較正を行っている。

Canon EOS-ID は、観測小屋の隣の観測用の台上に地磁気南向き、沿磁力線方向（仰角  $77^{\circ}$ ）に向けて設置した。視野角  $31^{\circ} \times 21^{\circ}$  又は  $19^{\circ} \times 12^{\circ}$  のレンズを用い、露光時間 0.5 秒から 2 秒で、5 秒から 30 秒毎に 1 枚の間隔で EISCAT レーダー視野領域を含む領域の撮影を行った。撮影された画像は、PC に転送し、JPEG 形式にて保存している。撮影時刻は PC の時刻となるため、ネットワークプロトコル（NTP）を用いて、PC の時刻を NTP サーバと同期させている。露光時間と撮影間隔（5 秒から 30 秒）は観測状況によりマニュアルで変更した。

XYBION ISS750 も磁力線方向に向けて設置した。このムービーの時刻は GPS 衛星と同期させて較正している。

4 波長フォトメータは、観測小屋のドーム内に視野を磁力線方向に向けて、設置されている。フォトメータは時間分解能 0.1 秒のデータを取得し、基本的に自動観測により稼働されている。

## 3.2 データ解析

### 3.2.1 画像データの解析

対象とするオーロラのイベント抽出は、以下の手順で行った。

- (1) 狭視野デジタルカメラ画像における EISCAT レーダー視野の位置は、画面上に撮影されている複数の星を用いて、画面上の各絵素の位置を較正し、決定した。本研究では EISCAT レーダーの視野 ( $\sim 0.6^\circ$ ) の大きさはオーロラの発光高度を 115 km と仮定し、直径約 1.2 km の円として扱っている。
- (2) 全天デジタルカメラ画像を用いて、観測時の雲の存在及び動きを確認。
- (3) 狭視野デジタルカメラ画像を用いて、パルセイティングオーロラ又はブラックオーロラが EISCAT レーダー視野を通過するイベントを抽出。
- (4) (3)の結果をふまえ、ムービーデータを用いてパルセイティングオーロラ又はブラックオーロラの挙動、及びレーダー視野がこれらのオーロラを捉えていた時間情報を正確に決定。

イベント抽出に際しては EISCAT 解析データの時間分解能を考慮し、EISCAT レーダー視野全体がパルセイティングオーロラ又はブラックオーロラを 1.33 秒以上連続して捉えているものに限っている。

ムービーデータの解析は以下のように行った。上記のようにパルセイティングオーロラ及びブラックオーロラの挙動及び、レーダー視野がこれらのオーロラを捉えていた時間情報を正確に決定するために、ムービーデータの対応部分を以下の手順で抜き出した。

- (A)ムービーデータ (DV\_PAL 形式) を静止画像 (TIFF 形式 (非圧縮形式)) へ変換。画像の階調は 256 グレイ階調としている。
- (B)(A)の全静止画像から対応する部分を抜き出し、データファイルを作成する。
- (C)(B)のデータファイルを用い、各イベントにおける EISCAT 視野内の光の強度変化を調べた。

### 3.2.2 EISCAT レーダーデータ解析

本研究では、EISCAT データの電子密度、電子温度、イオン温度の変動を用いて、パルセイティングオーロラ及びブラックオーロラ領域と周辺ディフューズ領域との違いを調べるために下記の解析データを用いた。

- ( )ブラックオーロラ領域：それぞれのイベントの継続時間に合わせて積分時間

を変更した EISCAT 解析データ。積分時間は 1 秒から 5 秒程度である。

( ) 周辺ディフューズオーロラ領域：EISCAT レーダーの視野がパルセイティングオーロラ及びブラックオーロラ領域を捉える前後で一様なディフューズオーロラを捉えていた時間で、8 秒積分で解析したデータ。

( ) パルセイティングオーロラの時間帯のデータ：EISCAT 0.44 秒データを用いてランニングアベレージをとったデータ

上記のように、本研究ではディフューズオーロラ領域に 8 秒積分データを用いているが、ムービーデータ及び EISCAT レーダー視野内の光の強度変化データを基に、ブラックオーロラ周辺でできるだけ安定した状態のものを選んでいる。

## 4. 結果

本論文ではパルセイティングオーロラ及びブラックオーロラの研究を進めるのに最適なイベントを7つに絞り、解析を行った。まず、その7つのイベントの外観を以下に述べる。

### 4.1 イベント概観

#### (1) イベント 1

イベント 1 は 3 月 2 日 23:52:20-23:53:20 UT のイベントである。図 4.1 (a)、(b)、(c)にイベント前後の全天画像、狭視野画像、ムービー画像を示す。

ブラックアークを挟むようにパルセイティングオーロラが起きている。南側のパルセイティングが 23:52:30 UT 付近に強まり、ブラックアークを一時的に覆った。その後パルセイティングは弱まり、ブラックアークが 5 本程通過していった。23:52:58 UT から約 2 秒間パルセイティングによってブラックアークは隠されることもあった。

#### (2) イベント 2

イベント 2 は 3 月 4 日 23:10:20-23:11:20 UT のイベントである。図 4.2 (a)、(b)、(c)にイベント前後の全天画像、狭視野画像、ムービー画像を示す。

東西に伸びる 2 本のパルセイティングアークが南方向にドリフトしている。その 2 本の間にははっきりとした境界がある。境界にはうっすらとしたディフューズオーロラが広がっている。

#### (3) イベント 3

イベント 3 は 3 月 4 日 23:20:35-23:21:35 UT のイベントである。図 4.3 (a)、(b)、(c)にイベント前後の全天画像、狭視野画像、ムービー画像を示す。

2 つのパルセイティングオーロラに挟まれるように東西に伸びるブラックアークがそのアーク構造を保ったまま南向きに移動している。23:20:49.4 UT に EISCAT 視野全体がそのブラックアークに入り、23:20:53.2 UT まで捉え続けた。その間もブラックアークはゆっくりと南向きにドリフトし続けた。23:20:56 UT にブラックアークがパルセイションで一度隠され、その後北側のパルセイションに入った。

#### (4) イベント 4

イベント 4 は 3 月 2 日 22:03:44.8-22:03:46.8 UT のイベントである。図 4.4 (a)、(b)、(c)にイベント前後の全天画像、狭視野画像、ムービー画像を示す。

多くの暗い領域がディフューズオーロラ中を北東方向に移動している。比較的大きめで形状も刻々と変化している。形を大きく変化させながらブラックオーロラがうねるようにドリフトしている。その中からうねりの一部がはがれ、南向きから南西向きへとドリフトの向きを変化させた。その後、南西から流れてきたブラックアークと結合し、再び北東方向にドリフトしていった。22:03:44.8 UT からの 2 秒間、EISCAT レーダーの視野内をそのブラックオーロラは通過した。

#### (5) イベント 5

イベント 5 は 3 月 2 日 22:03:57.4-22:03:59.2 UT のイベントである。図 4.5 (a)、(b)、(c)にイベント前後の全天画像、狭視野画像、ムービー画像を示す。

イベント 4 の後、アークのようなブラックオーロラが南東から北東方向へドリフトしてきた。EISCAT レーダーは 22:03:57.4 UT から 22:03:59.2 UT の 1.8 秒間そのブラックオーロラを捉えた。

#### (6) イベント 6

イベント 6 は 3 月 2 日 22:04:39.6-22:04:46.0 UT のイベントである。図 4.6 (a)、(b)、(c)にイベント前後の全天画像、狭視野画像、ムービー画像を示す。

一様なディフューズオーロラ中に 2 本のはっきりとしたブラックアークがドリフトしてきた。EISCAT レーダーの視野がその南東方向にドリフトするブラックアークを 22:04:39.6 UT から 22:04:46.0 UT の間捉えた。

#### (7) イベント 7

イベント 7 は 3 月 2 日 22:05:17.0-22:05:19.2 UT のイベントである。図 4.7 (a)、(b)、(c)にイベント前後の全天画像、狭視野画像、ムービー画像を示す。

北東方向へドリフトする小さなブラックパッチを EISCAT レーダーの視野が捉えた。時間は 22:05:17 UT から 22:05:19 UT までの 2.2 秒間であった。

尚、イベント 4 からイベント 7 までの各ブラックオーロライベントにおいて EISCAT レーダーがブラックオーロラを捉えていた時間、及びブラックオーロラの移動方向などの詳細は表 4.1 に示す。

## 4.2 パルセイティングオーロラ

4.1 で述べた 7 つのイベントには、パルセイティングオーロラが 3 イベント含まれる。そのパルセイティングオーロラと、EISCAT レーダーから得られた電子密度や電離圏電場との関係を、それぞれのイベントについて調べた。3 イベントについてパルセイティングが起こっていた時の EISCAT レーダーの視野内の光強度変化を図 4.8 (a)、(b)、(c)に示す。

イベント 1 (3月2日 23:52:20-23:53:20 UT)

イベント 1 の時間帯について、高度 100 km から 200 km までの各高度の電子密度の時間変動を図 4.9 に示す。イベント 1 の時間帯に変化の大きいパルセイティングが 4 回発生しており、それぞれを A、B、C、D とする。

イベント A の時刻には、高度 108 km、118 km でパルセイティングの発光強度が大きくなるのに合わせ、電子密度の増加が見られる。一方、高度 131、168、194 km では同時刻に電子密度が減少する、つまり逆相関の関係が見られる。

イベント B の時刻には、高度 131 km でパルセイティングと同様の電子密度の立ち上がりが見られるが、その他の高度では同様の立ち上がりが見られない。高度 194、168 km においては電子密度が減少する様子が見られる。

イベント C では、高度 108 km において、電子密度の増加とパルセイティングの強度の立ち上がりとの間に良い相関関係が見られる。高度 118-168 km においては電子密度が減少している。

イベント D では高度 100、131 km で変化は小さいが電子密度の増加があり、瞬間的な強いパルセイションとの良い対応が見られる。高度 150 km では同時刻に電子密度の減少が見られる。

イベント 1 においてはパルセイティングと電子密度の増加との対応が高度 131 km 以下でのみ見られる。逆に高度 168 km 以上ではパルセイティング時に電子密度の減少が起こることが多かった。イベント 1 における時間帯の背景電場は北西向きであるため、構造が  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトで移動しているとすると南西向きであるが、パルセイティングオーロラは東向きに 0.29 km/s でドリフトをしていた。

イベント 2 (3月4日 23:10:20-23:11:20 UT)



イベント 2 の時間帯には、急激な光強度の立ち上がりをもつパルセイティングが 10 回発生した。イベント 2 の電子密度の高度別時間変動を図 4.10 に示す。パルセイティングをそれぞれ、E、F、G、H、I、J、K、L、M、N とする。

イベント E では高度 108、118、168 km で電子密度の増加とパルセイティングの光の立ち上がりには良い関係が見られる。高度 103、131 km では逆相関であった。

イベント F では高度 103、118、131、150 km での電子密度の変動がパルセイティングと良い対応をしている。高度 100 km では逆に減少していた。

イベント G では、高度 150、168、194 km での電子密度の増加がパルセイティングの立ち上がりと良い関係にある。しかし、高度 103、108、118 km では電子密度の減少が見られる。

イベント H では、高度 131、150、168 km で相関が見られるが、高度 118 km では逆相関を示している。

イベント I では、高度 103-118 km、168 km でパルセイティングに対応していると考えられる電子密度の増加が見られるが、高度 131、150 km では減少している。

イベント J では高度 131、168、194 km にパルセイティングとの良い対応が見られるが、高度 108、118、150 km には逆相関が見える。

イベント K では高度 100、103、168 km で相関が見られるが、高度 108-150 km では逆相関となっている。

イベント L では高度 108、118、150、194 km にパルセイティングとの相関が見える。

イベント M では高度 100、150 km にパルセイティングに対応する電子密度の増加があるが、高度 108、118 km では減少が起こっている。

イベント N では高度 100、108、118、131、194 km に電子密度の増加が起こっている。

各パルセイティングの間にはパルセイティングがオフの時間があるが、パルセイティングと電子密度の関係と同様に、オフと電子密度減少の相関が見られる高度もあるが、電子密度が増加している高度もある。イベント 2 では、低高度から高高度まで広域でパルセイティングと電子密度増加との対応が見られた。そして、低高度 (103 km) 及び高高度 (168 km) 両方で電子密度が増加する時には、その中間の高度で電子密度が減少していることがあった。イベント 2 に

おける時間帯の背景電場はほぼ南向きであるため、構造が  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトで移動しているとすると東向きであるが、パルセイティングオーロラは南向きに 0.20 km/s でドリフトをしていた。

イベント 3 (3月4日 23:20:35-23:21:35 UT)

イベント 3 の時間帯には、急激な光強度の立ち上がりをもつパルセイティングが 6 回発生した。イベント 3 の電子密度の高度別時間変動を図 4.11 に示す。パルセイティングはそれぞれを O、P、Q、R、S、T とする。

イベント O では高度 118、150、194 km でパルセイティングの立ち上がりと良い対応をもつ電子密度の増加が見られる。高度 108、131 km では逆に電子密度が減少している。

イベント P では高度 118、150 km に相関が見られる。

イベント Q では高度 108 km と 131 km に相関関係が見られるが、高度 118、168、194 km で逆相関が見られる。

イベント R では高度 108、118、131 km に相関が見え、高度 100、168 km では逆相関が見られる。

イベント S では高度 118、131、194 km でパルセイティングの光強度の立ち上がりと電子密度の増加が良い対応をしている。逆に高度 108、150、168 km では電子密度が減少し、逆相関となっている。

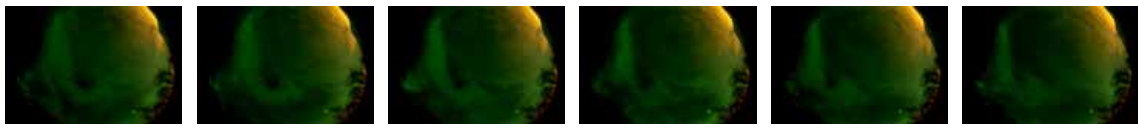
イベント T では高度 118、131、194 km でパルセイティングの立ち上がりと電子密度に相関が見られる。また、高度 103、108、150 km では立ち上がりのタイミングに良い対応が見られるが、パルセイティングの途中で電子密度が減少している。

O と P の間にはブラックアークが通過しているが、電子密度の減少が見られるのは高度 103、108、131 km で、100、118 km では増加している。

イベント 3 では、高度 118 km での電子密度の変動がパルセイティングと良い対応をしている。一方で、高度 168 km でははっきりとした逆相関が見える。イベント 3 における時間帯の背景電場は南東向きであるため、構造が  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトで移動しているとすると北東向きであるが、パルセイティングオーロラは南西向きに 0.14 km/s でドリフトをしていた。

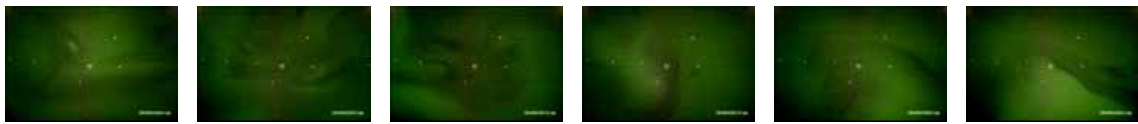
## 4.3 ブラックオーロラ

本研究ではケーススタディとして、一様なディフューズオーロラ中のブラックオーロラをとりあげている。4つのブラックオーロライベント全てにおけるEISCATレーダー視野内の光強度の変動を図4.12に示した。4つのイベントに関して、それぞれブラックオーロラとディフューズオーロラ領域の電子密度の高度分布の比較を行った。結果を図4.13に示す。ディフューズオーロラ領域には22:03:12 UTから22:03:20 UTまでの安定した領域を選び、その時間のEISCAT 8秒間積分データを用いている。ブラックオーロラ領域にはそれぞれのイベントに適した時間積分データを用いている。4つ全てのイベントにおいて、高度140 km以下でブラックオーロラ領域の電子密度がディフューズオーロラ領域に比べて2/3程度小さかった。また、高度150 km以上では、3イベントでブラックオーロラとディフューズオーロラの電子密度は同程度であった。フォトメータとEISCATレーダーの視野に若干のずれがあるため、イベント4、5のみの結果になるが、427.8 nmの波長の発光強度は、ブラックオーロラ領域では約1500から1700レイリーであった。比較対象としたディフューズオーロラは約2700レイリーであり、ブラックオーロラ領域はそのディフューズオーロラ領域に比べ約1000から1200レイリー小さくなっていた。また、ブラックオーロラ領域はフォトメータがブラックオーロラを捉える直前直後のディフューズオーロラ領域に比べ約200から300レイリー小さくなっていた。降り込み粒子のエネルギーの推定に用いるオーロラの発光輝線である、630.0 nmと427.8 nmの発光強度比(6300/4278)を見ると、ブラックオーロラが発生した領域では発光強度比が減少していた。尚、フォトメータとEISCATレーダーの視野に若干のずれがあるが、イベント4、5については1秒程度の時間のずれはあるものの、フォトメータとEISCATレーダーは同じ現象を見ていると考えられる。220200 UTから220600 UTまでは背景の電場はほぼ南西向きで、イオンは $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトにて南東方向に移動していたが、4イベント中2つは北東方向にドリフトしていた。残りの2つもドリフト方向は南西方向で、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトとの関連性は見られなかった。

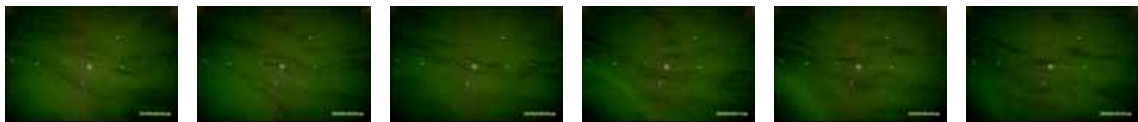


235130      235200      235230      235300      235330      235400

図 4.1(a): 3 月 2 日 23:52:45 UT に撮影された全天画像。端に見える黄色の光は街灯りが反射したものであり、オーロラとは関係ない。以下の全天画像全て同様である。



235001      235031      235101      235131      235201      235231

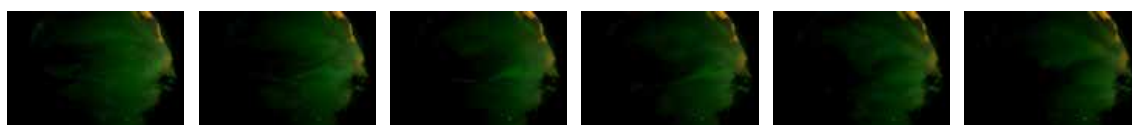


235340      235350      235400      235410      235420      235430

図 4.1(b): 3 月 2 日 23:52:45 UT に撮影された狭視野画像 (66 × 44 km)。中心に見える白い円は EISCAT レーダー視野のおよその位置を表している。以下の狭視野画像も全て同様である。

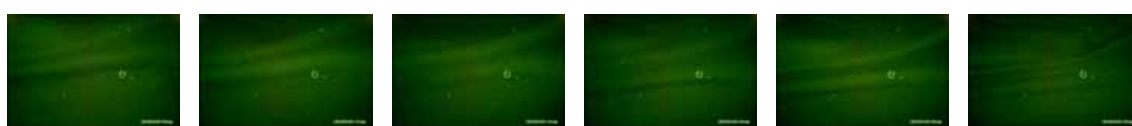


図 4.1(c): 3 月 2 日 23:52:45 UT の 0.2 秒毎のムービー画像。画像内に白い明るい点が見えるが、それらは星である。以下のムービー画像全て同様である。

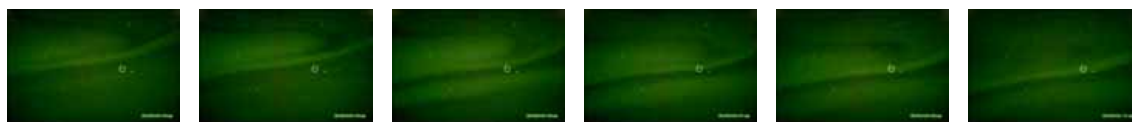


230931      231001      231031      231101      231131      231201

図 4.2(a): 3 月 4 日 23:10:45 UT に撮影された全天画像。



231005      231010      231015      231020      231025      231030



231035      231040      231045      231051      231056      231101



231106      231111      231116      231121      231126      231131

図 4.2(b): 3 月 4 日 23:10:45 UT に撮影された狭視野画像(34 × 26 km)。



図 4.2(c): 3 月 4 日 23:10:45 UT のムービー画像。

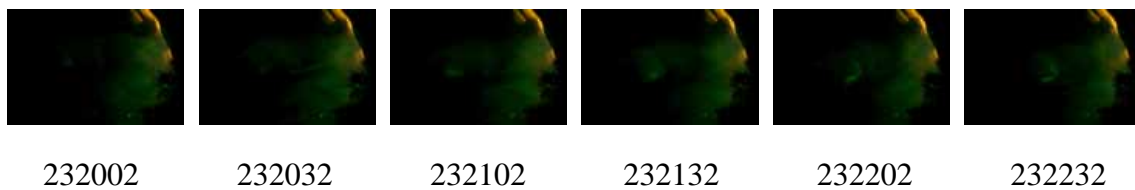


図 4.3(a): 3 月 4 日 23:21:00 UT に撮影された全天画像。

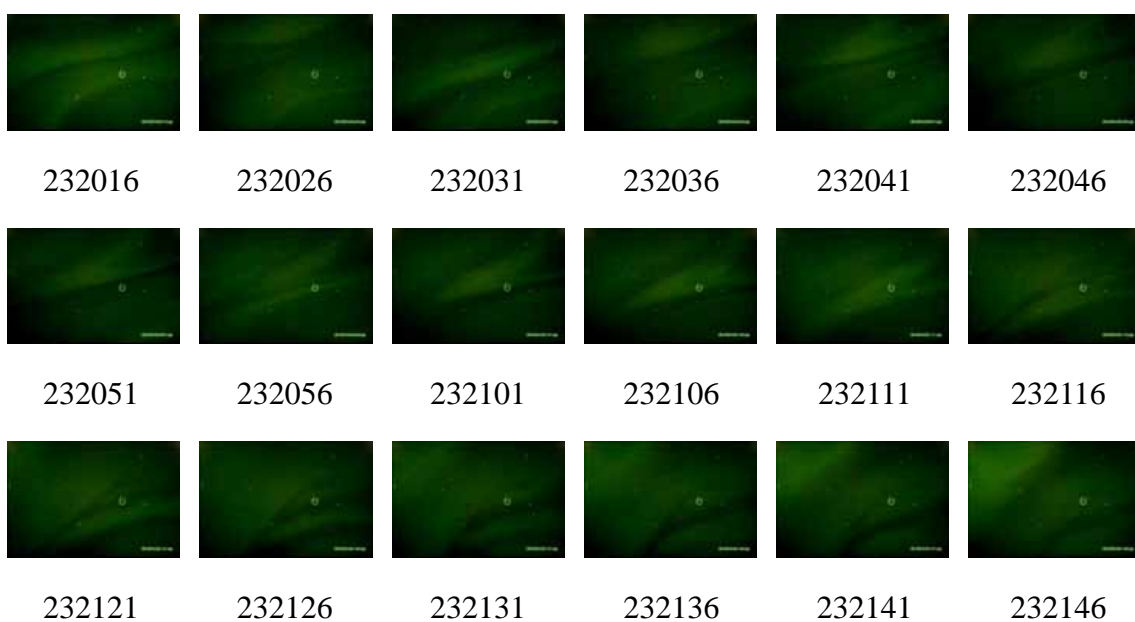
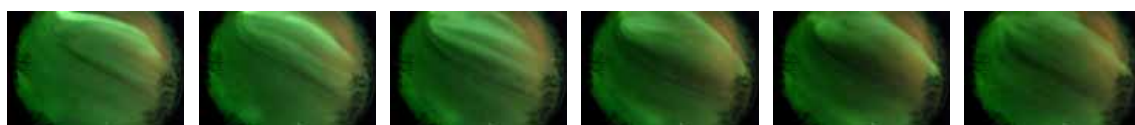


図 4.3(b): 3 月 4 日 23:21:00 UT 前後に撮影された狭視野画像(34 × 26 km)。



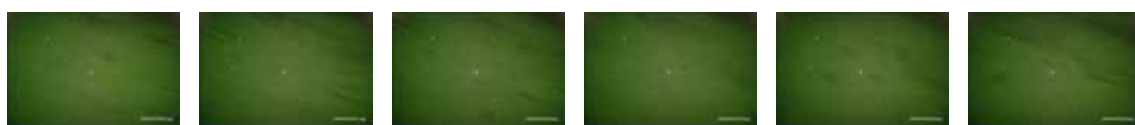


図 4.3(c): 3 月 4 日 23:21:00 UT のムービー画像。

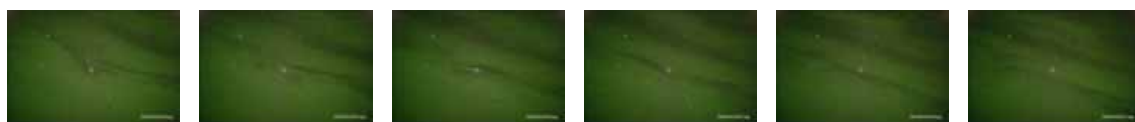


220234      220304      220334      220404      220434      220504

図 4.4(a): 3 月 2 日 22:03:44 UT に撮影された全天画像。



220251      220301      220306      220316      220326      220336

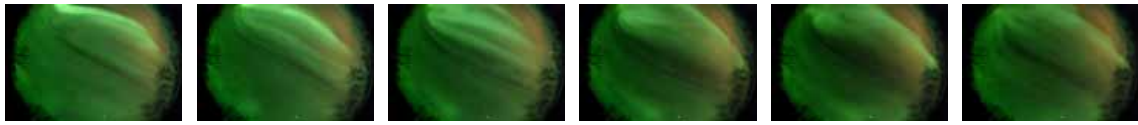


220346      220351      220356      220401      220406      220411

図 4.4(b): 3 月 2 日 22:03:44 UT に撮影された狭視野画像 (66 × 44 km) 。

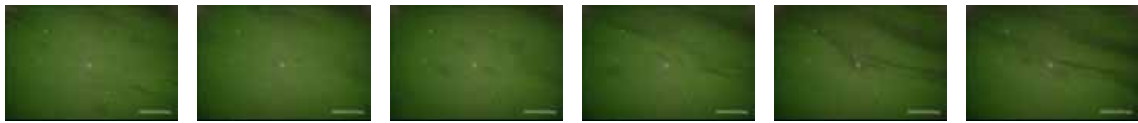


図 4.4(c): 3 月 2 日 22:03:44 UT の 0.2 秒毎のムービー画像。



220234      220304      220334      220404      220434      220504

図 4.5(a): 3 月 2 日 22:03:57 UT に撮影された全天画像。



220306      220316      220326      220336      220346      220351

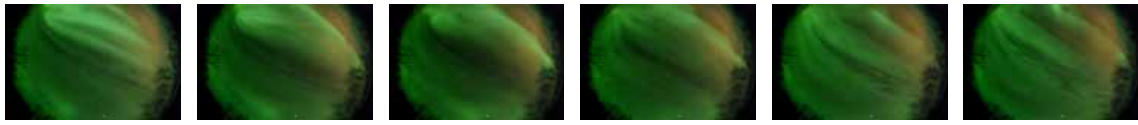


220356      220401      220406      220411      220416      220421

図 4.5(b): 3 月 2 日 22:03:57 UT に撮影された狭視野画像 (66 × 44 km)。

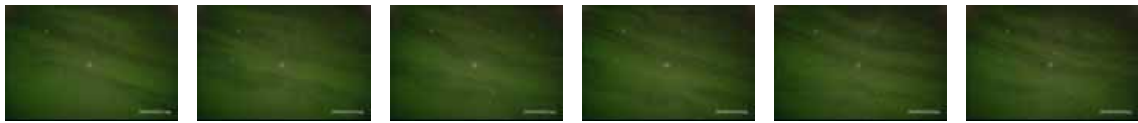


図 4.5(c): 3 月 2 日 22:03:57 UT の 0.2 秒毎のムービー画像。



220334      220404      220434      220504      220534      220604

図 4.6(a): 3 月 2 日 22:04:39 UT に撮影された全天画像。



220411      220416      220421      220426      220432      220436

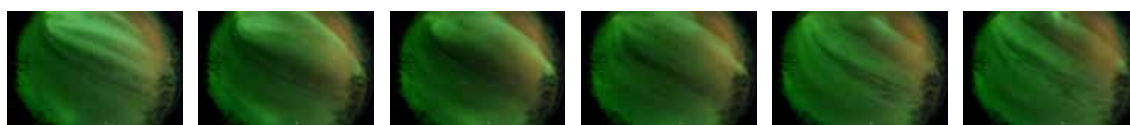


220441      220446      220451      220456      220501      220507

図 4.6(b): 3 月 2 日 22:04:39 UT に撮影された狭視野画像 (66 × 44 km) 。

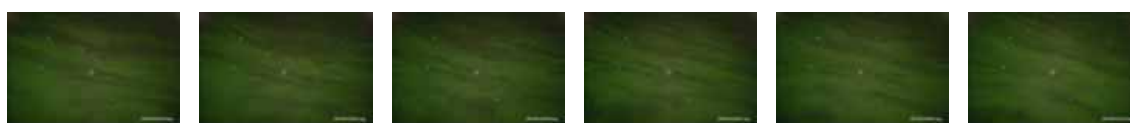


図 4.6(c): 3 月 2 日 22:04:39 UT の 0.2 秒毎のムービー画像。

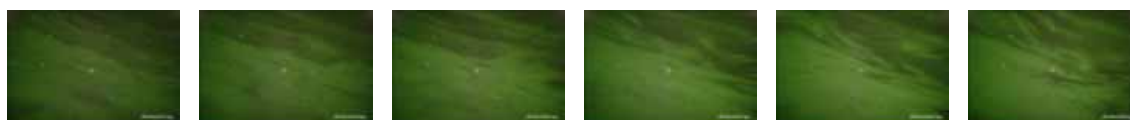


220334      220404      220434      220504      220534      220604

図 4.7(a): 3 月 2 日 22:05:17 UT に撮影された全天画像。



220446      220451      220456      220501      220507      220512



220517      220526      220537      220547      220557      220616

図 4.7(b): 3 月 2 日 22:05:17 UT に撮影された狭視野画像 (66 × 44 km) 。





図 4.7(c): 3 月 2 日 22:05:17 UT の 0.2 秒毎のムービー画像。

表 4.1. 観測されたブラックオーロラ

イベント名	時間	ドリフト 方向	ドリフト速度 (km/s)	形状
イベント 4	220344.8-220346.8 (2.0)	S SW	1.3	アークから分離 したパッチ
イベント 5	220357.4-220359.2 (1.8)	NE	4.6	アーク
イベント 6	220439.6-220446.0 (2.6)	SW		アーク
イベント 7	220517.0-220519.2 (2.0)	SW NE	0.99	アークから分離 したパッチ

表は左からイベント名、EISCAT レーダーがブラックオーロラを捉えていた時間、ブラックオーロラのドリフト方向、ブラックオーロラのドリフト速度、ブラックオーロラの形態を示している。尚、ドリフト速度は高度 115 km を仮定して求めている。

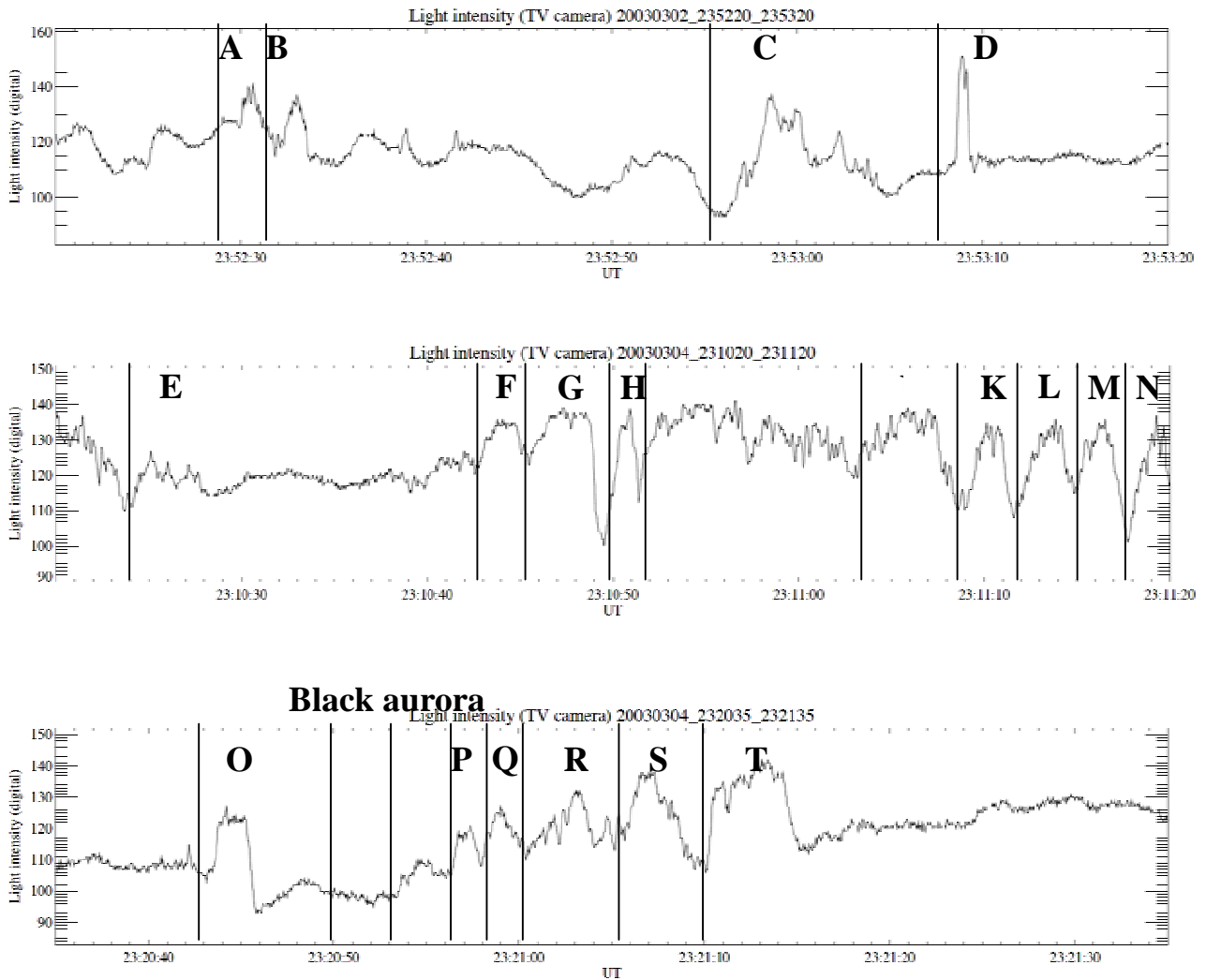


図 4.8 (a)、(b)、(c) 上から 3 月 2 日 235220-235320 UT のパルセイティングオーロラ、3 月 4 日 231020-231120 UT のパルセイティングオーロラ、3 月 4 日 232035-232135 UT のパルセイティングオーロライベントにおける EISCAT レーダー視野内の光強度変化を表している。上図には英字が書かれているが、各々がパルセイティングと対応している。詳しくは図 4.9-11 を参照。

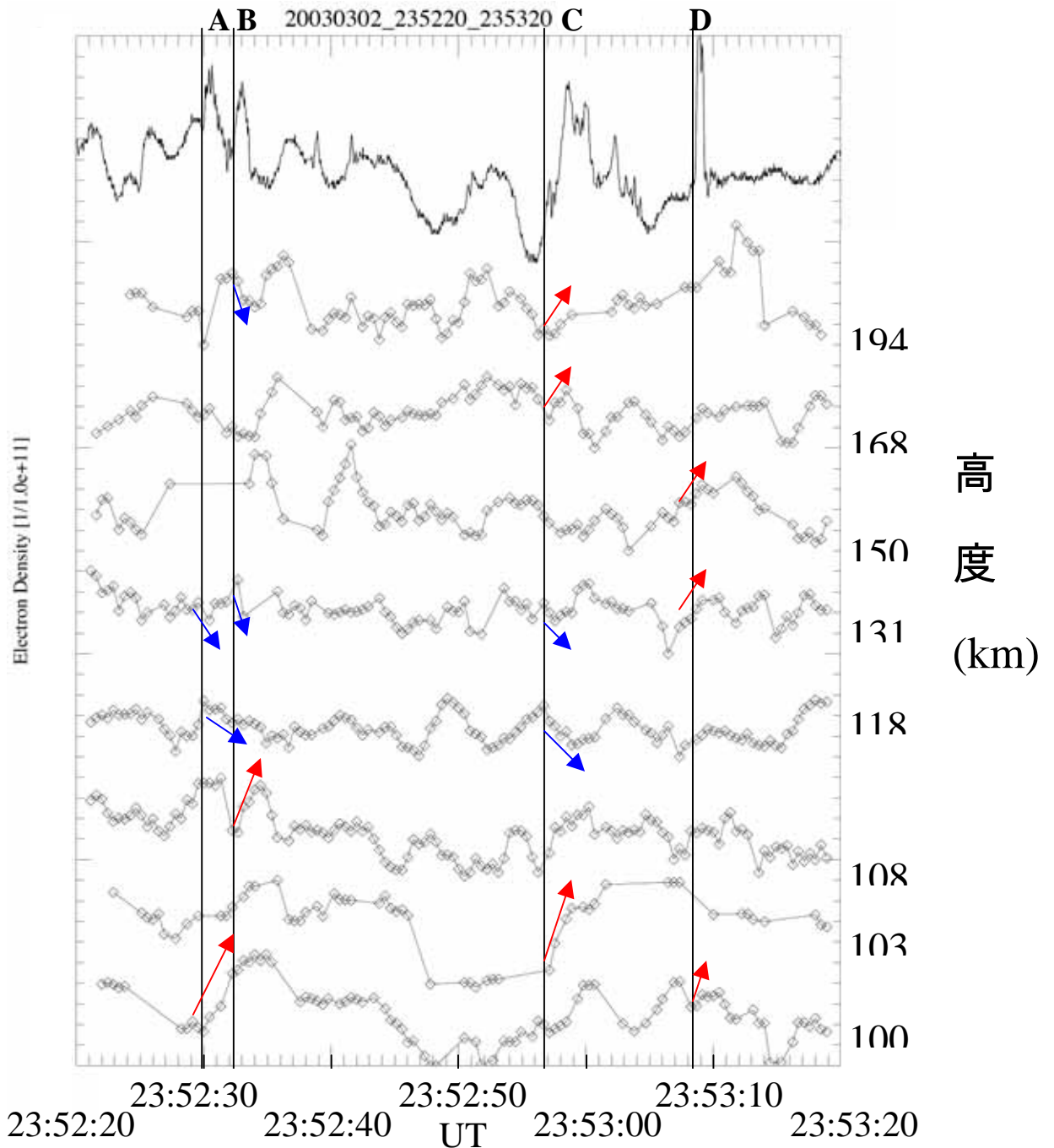


図 4.9 (イベント 1) 一番上がムービーデータ中の EISCAT レーダー視野内の光強度変化である。下部は同時刻の電子密度の高度毎の時間変化でランニングアベレージをとっている。縦軸が高度、横軸は時間、図中の英字はイベント名。赤線がパルセイティングの光の立ち上がり、電子密度増加のタイミングとの相関関係がよいもの、青線はパルセイティングの光の立ち上がりに対して、電子密度が減少するという逆相関関係にあるものを表す。

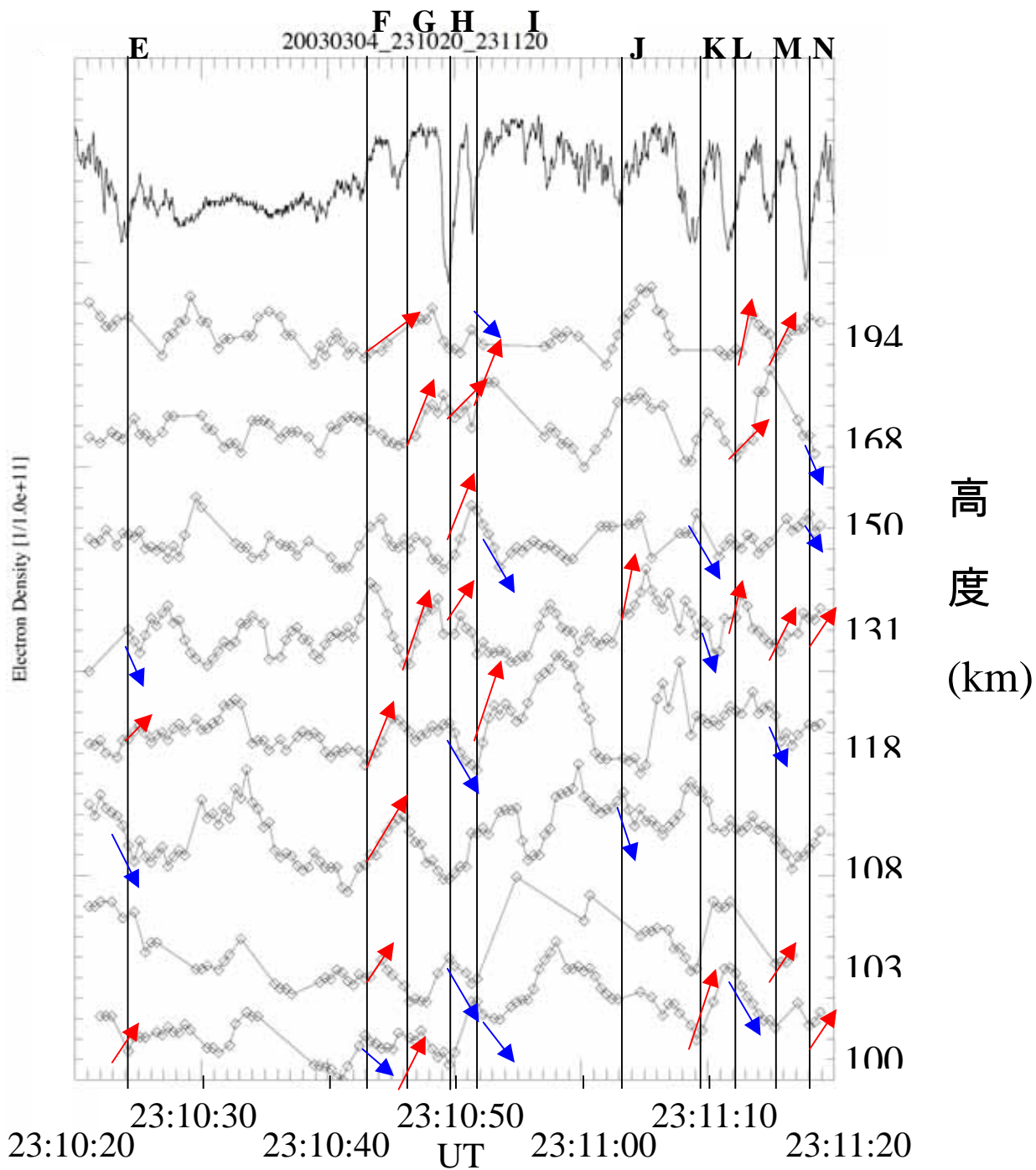


図 4.10 (イベント 2) 一番上がムービーデータ中の EISCAT レーダー視野内の光強度変化である。下部は同時刻の電子密度の高度毎の時間変化でランニングアベレージをとっている。縦軸が高度、横軸は時間、図中の英字はイベント名。赤線がパルセイティングの光の立ち上がり、電子密度増加のタイミングとの相関関係がよいもの、青線はパルセイティングの光の立ち上がりに対して、電子密度が減少するという逆相関関係にあるものを表す。

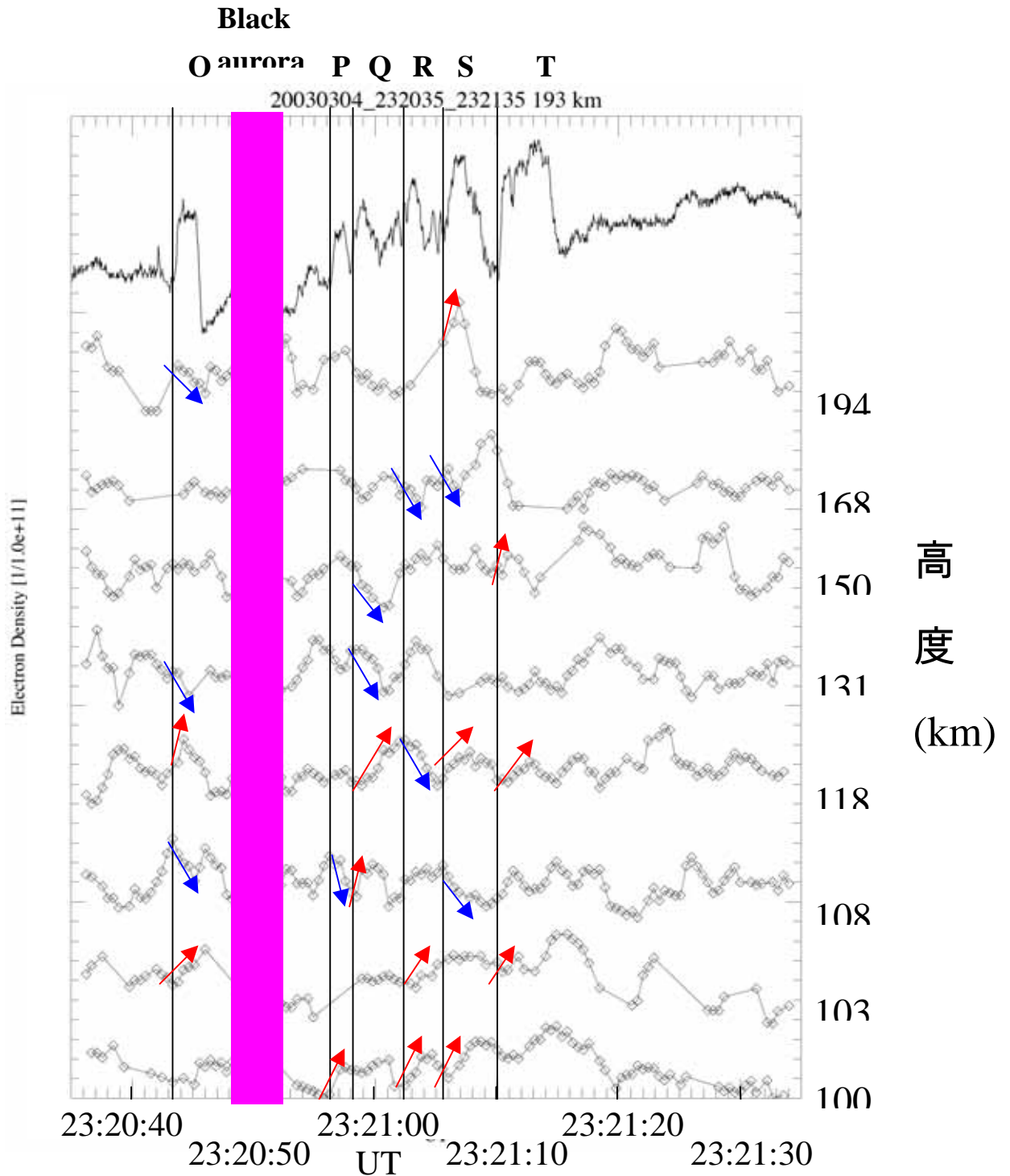


図 4.11 (イベント 3) 一番上がムービーデータ中の EISCAT レーダー視野内の光強度変化である。下部は同時刻の電子密度の高度毎の時間変化でランニングアベレージをとっている。縦軸が高度、横軸は時間、図中の英字はイベント名。赤線がパルセイティングの光の立ち上がり、電子密度増加のタイミングとの相関関係がよいもの、青線はパルセイティングの光の立ち上がりに対して、電子密度が減少するという逆相関関係にあるものを表す。ピンクの帯の時間には EISCAT レーダーの視野全体がブラックオーロラを捉えている。

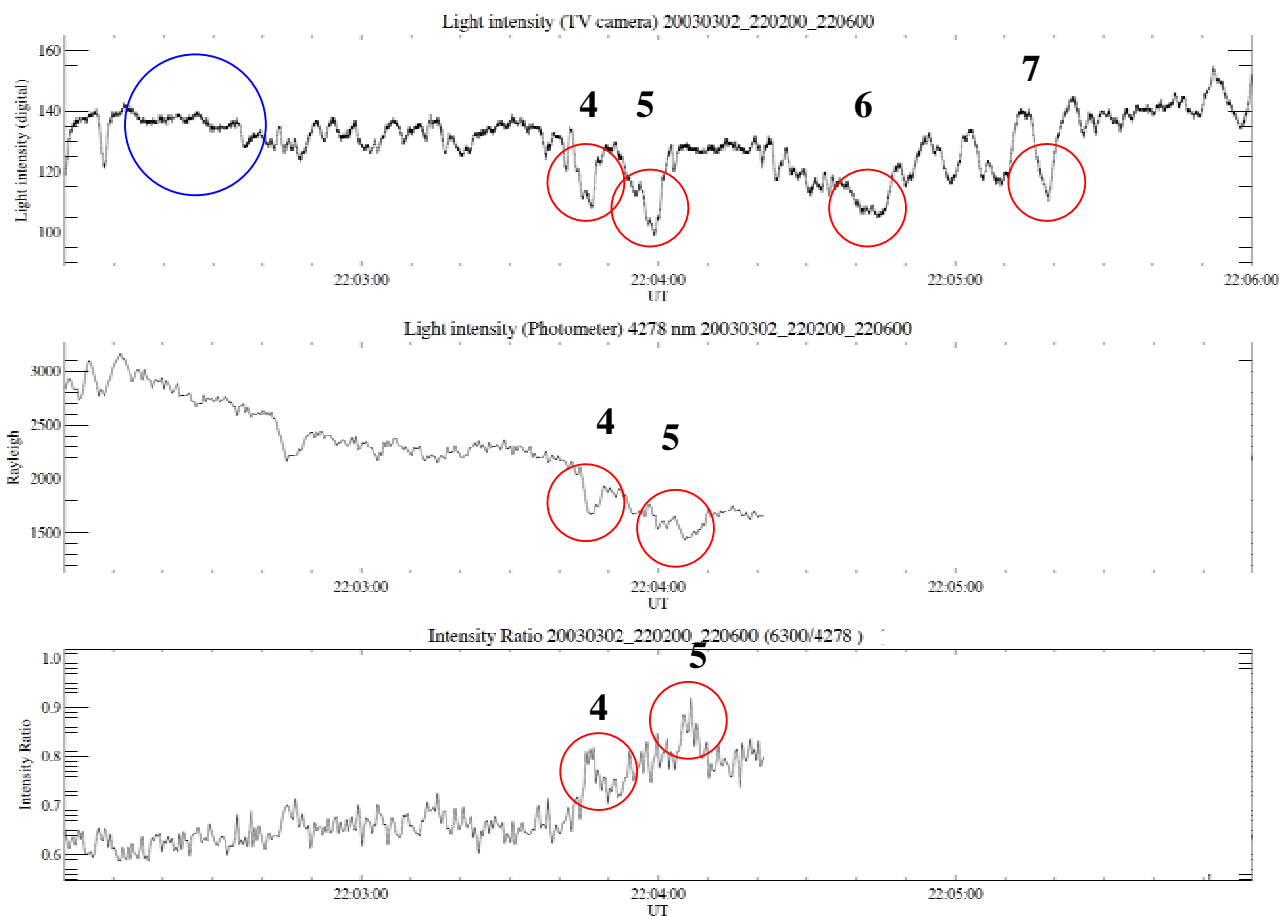


図 4.12 上図は 3 月 2 日の 220200 UT から 220600 UT の間のムービーデータの EISCAT レーダー視野内の光の強度変化を表す。赤丸の部分ブラックオーロライベントの時間を示し、数字はイベント番号を表す。青丸はブラックオーロラとの比較対象である、安定したディフューズオーロラの時間である。中央の図はフォトメータデータのプロット図である。2204 UT の途中からデータがないが、これは EISCAT レーダーとフォトメータの視野のずれにより、同じ現象を捉えていないと考えられるため省いている。下図はオーロラの発光輝線 630.0 nm と 4427.8 nm の強度比 (6300/4278) を表す。

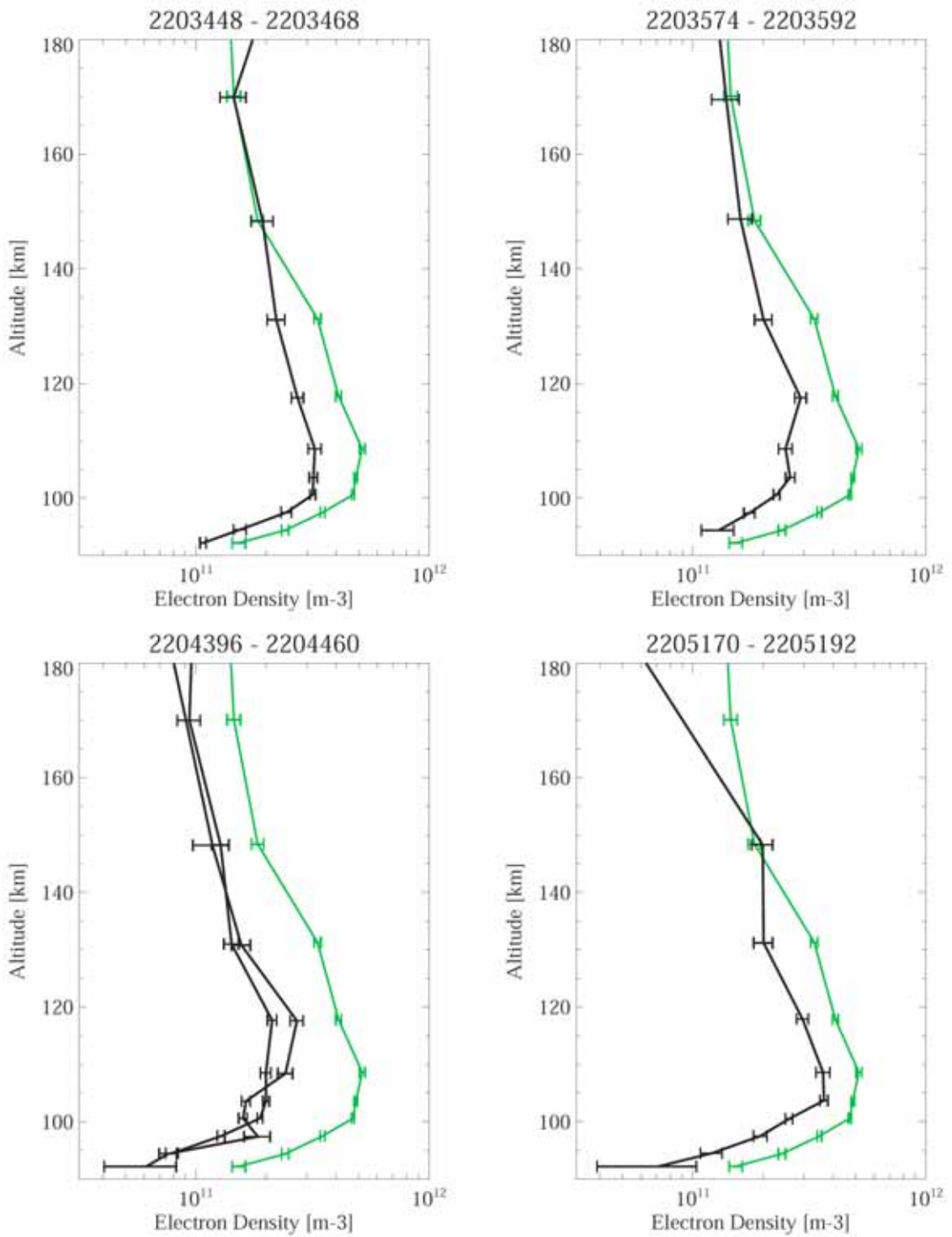


図 4.13 ブラックオーロラ 4 イベント全ての電子密度の高度プロファイル。緑線が一様なディフューズオーロラ中のデータ、黒線がブラックオーロラ中のデータを示す。高度 140 km 以下でディフューズ領域に比べ、ブラックオーロラ領域の電子密度に有意な減少が見られる。



## 5. まとめと考察

### 5.1 パルセイティングオーロラの発生原因となる降り込み

#### 電子とその降り込み機構

パルセイティングオーロラに伴う降下電子は、中性大気を光らせてパルセイティングオーロラを発光させるとともに、その高度周辺の中性大気を電離する。本研究で様々な高度での電子密度変動とパルセイティングオーロラの発生との比較を行ったのは、この理由からで、パルセイティングオーロラが発光と電子密度が良い相関を持つ高度で、パルセイティングオーロラは主として発光をしており、その高度からその発光に関与する電子のエネルギーが推定できる。

解析結果は、パルセイティングオーロラが発生した際、パルセイティングに伴い電子密度が増加する高度がある一方で、電子密度が減少する高度もあった。結果の中には高度 131 km 以下の電子密度増加のみで、高度 168 km 以上では減少している場合や、高度 150 km 以上で電子密度の増加があるのみで、高度 118 km では減少している場合があるというように広い高度範囲において同様の変化をしていないことがわかる。これは、パルセイティングオーロラが高度方向に比較的薄い構造を持った現象であることを示す結果であると言える。また、薄い構造を持つことは、パルセイティングオーロラを発生させる電子のエネルギーは比較的狭い範囲内にあり、その降下フラックスがパルセイティングオーロラに同期して時間的に変化すると解釈できる。しかしこの狭いエネルギー範囲は、パルセイティングオーロラ毎に変化しており、今回扱った事例からすると、パルセイティングの光強度の立ち上がりと一致する電子密度の増加があった高度が 100 km 高度から 194 km 高度程度までその範囲が変化することから、降下粒子のエネルギーとして 0.5 keV から 10 keV 程度変化することを示唆している。これは、これまでにロケット観測等から分かっているパルセイティングオーロラの背景に存在するディフューズオーロラを光らせる降下電子のスペクトルと同程度であるが、80-100 km 高度に高度方向に薄い発光層であるという過去の光学観測からの推定 [Brown et al., 1976] とは異なり、パルセイティングオーロラを担う降下電子のエネルギーが短い時間で大きく変動していることを強く示唆

する新たな知見である。パルセイティングオーロラを作り出す準周期的に電子を降下させる物理機構およびその電子のエネルギーを短時間で変化させる物理機構が磁気圏高度に存在することが示唆される。

## 5.2 ブラックオーロラ領域における降り込み電子の特徴

ブラックオーロラ領域とディフューズオーロラ領域との電子密度の高度分布を比較すると、ブラックオーロラ領域の高度 140 km 以下で電子密度の有意な減少が見られた。発光強度比による降り込み粒子のエネルギーの推定でも、ブラックオーロラ領域での降り込み粒子のエネルギーの減少が見られた。実際に推定されるエネルギーは 2 keV 程度である。2 keV のエネルギーをもった電子のストッピングハイトは高度 150 km 程度であり、本研究の結果と良い対応が見られる。この結果はブラックオーロラの狭い領域で突如として 2 keV より高いエネルギーを持つ電子の降り込みが減少したことを意味する。即ちブラックオーロラの生成機構が持つべき性質は、比較的一様なディフューズオーロラ、即ち比較的一様な電子の降り込み領域で、比較的小さな領域のみで高いエネルギーの降り込みを減少させ、一方、2 keV より低い粒子は影響を受けずに降り込める機構である。

## 5.3 ブラックオーロラ領域の光強度の変動

本研究で解析したブラックオーロラ領域での光強度の変動について述べる。フォトメータとの対応がとれる 2 つのイベント（イベント 4、5）においては、各々中心部のレイリー値は 1700 と 1500 程度であった。この結果は完全にオーロラのない領域や非常に弱いオーロラの領域に比べて大きい。これは、ブラックオーロラ領域は光が欠けているのではなく、周辺に比べて相対的に暗いため、発光が欠けているように見える領域であることを意味する。この結果はこれまでブラックオーロラの定義とされていた「一様なディフューズオーロラ中にある光の欠けた小さな領域 [e.g., Royrvik, 1976; Davis, 1978a]」とは異なるものである。

## 5.4 パルセイティングオーロラ及びブラックオーロラの動

### きと電場との対応

本研究で用いたパルセイティングオーロライベントでは 3 イベント全てにおいて、その動きの方向と背景電場から推定される電場ドリフトとの対応が見られなかった。この結果は、パルセイティングオーロラの運動方向と電場ドリフトの方向が一致するという過去の研究結果とは異なる結果である。また、ブラックオーロラの 4 イベントにおいても、その運動と背景電場と対応が見られなかった。しかしながら、背景電場で用いたものは 1 分値であり、個々のブラックオーロラと対応しているかどうかを明言することはできない。

## 参考文献

福西浩、國分征、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.

Blixt, E.M. and M.J. Kosch, Coordinated optical and EISCAT observations of black aurora, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06813, doi:10.1029/2003GL019244, 2004.

Brown, N. B., T. N. Davis, T. J. Hallinan, and H. C. Stenbaek-Nielsen, Altitude of pulsating aurora determined by a new instrumental technique, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 403, 1976.

Carlson, C. W., J. P. McFadden et al., FAST observations in the downward auroral current region: Energetic upgoing electron beams, parallel potential drops, and ion heating, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2017, 1998.

Davis, T.N., Observed microstructure of auroral forms, *J. Geomag. Geoelectr.*, 30, 371-380, 1978.

Folkestad, K., T. Hagfors, and S. Westerlund, EISCAT: An updated description of technical characteristics and operational capabilities, *Radio Sci.*, 18, 867-879, 1983.

IAGA Division I Working Group 1, International geomagnetic reference field revision 1987, *J. Geomag. Geoelectr.*, 39, 773-779, 1987.

Iijima, T. and T. A. Potemra, The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad, *J. Geophys. Res.*, 81, 2165, 1976.

Kimball, J., and T.J. Hallinan, A morphological study of black vortex streets, *J. Geophys. Res.*, 103(A7), 14,683-14,695, 1998a.

- Kimball, J., and T.J. Hallinan, Observations of black auroral patches and of their relationship to other types of aurora, *J. Geophys. Res.*, *103*(A7), 14,671-14,682, 1998b.
- Marklund, G., L. Blomberg, C.-G. Falthammar, and P.-A. Lindqvist, On intense diverging electric fields associated with black aurora, *Geophys. Res. Lett.*, *21*(17), 1859-1862, 1994.
- Marklund, G., T. Karlsson and J. Clemmons, On low-altitude particle acceleration and intense electric fields and their relationship to black aurora, *J. Geophys. Res.*, *102*(A8), 17,509-17,522, 1997.
- McEwen, D. J., C. N. Duncan, and R. Montalbetti, Auroral electron energies: comparisons of in situ measurements with spectroscopically inferred energies, *Can. J. Phys.*, *59*, 1116, 1981.
- Nemzek, R. J., R. Nakamura, D. N. Baker, R. D. Belian, D. J. McComas, M. R. Thomsen, and T. Yamamoto, The relationship between pulsating auroras observed from the ground and energetic electrons and plasma density measured at geosynchronous orbit, *J. Geophys. Res.*, *100*, 23,935-23,944, 1995.
- Oguti, T., Metamorphoses of aurora, *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue Jpn.*, *12*, 101, 1975
- Oguti, T., TV observations of auroral arcs. Physics of Auroral Arc Formation, ed. by S. -I. Akasofu and J. R. Kan, AGU monograph, 25, AGU, Washington, D. C., 31, 1981.
- Peticolas, L.M., T.J. Hallinan, 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*(A8), 10.1029/2001JA900157, 2002.

Royrvik, O., *Pulsating aurora: Local and global morphology*, Ph.D. thesis, Univ. of Alaska, Fairbanks, 1976

Trondsen, T.S. and L.L. Cogger, High-resolution television observations of black aurora, *J. Geophys. Res.*, 102(A1), 363-378, 1997.

## 謝辞

本研究における物理的な解釈に対し多大な知識を与えて下さいました藤井良一教授に大変感謝致します。

オーロラの画像データを提供して下さいました宮岡宏先生に大変感謝致します。

オーロラのムービーデータを提供して下さいましたボストン大の Mårten Blixt 氏に大変感謝致します。

なかなか進展しない研究の度に打ち合わせの時間を割いて下さいました、指導教官の野澤悟徳助教授に大変感謝致します。

本研究に使用するデータ作成など数多くの面から研究をサポートして頂いた小川泰信助手に大変感謝致します。

本研究で使用した EISCAT レーダーのデータは、EISCAT 科学協会から提供されたものです。ここに EISCAT 科学協会に感謝の意を表します。

21 世紀 COE 研究員の元場哲郎さんには研究を進める上で様々な面から補助して頂き大変感謝致します。

当研究所の足立和寛さん、岩橋弘幸さん、櫻井彰宏さん、津田卓雄さん、藤村昌樹さんには 2 年間の研究生生活において数多くの協力を頂き感謝致します。

最後にいろいろな面から常に支えてくれた両親に感謝致します。