

修士論文

EISCAT レーダーと多波長フォトメーター  
同時観測による降下電子エネルギーの研究

名古屋大学理学研究科  
素粒子宇宙物理学専攻宇宙地球物理系  
足立 和寛

平成 13 年度

## 要旨

磁気圏から電離圏へ降下する電子やイオンは、磁気圏内のプラズマの分布・運動や加熱過程、沿磁力線加速過程、電離圏におけるオーロラの発光・運動や電離圏電流駆動に中心的な役割を果たしている。そのため、降下電子・イオンのエネルギーやフラックスの空間・時間変動分布を定量的に知ることは磁気圏電離圏物理をより良く理解する上で重要である。降下粒子は、ロケットや人工衛星により直接観測が行われている。しかし、これらの観測は基本的に1点観測であり、オーロラの動きに伴うようなエネルギーやフラックスの空間的・時間的変動を観測することは難しい。

一方で、リモートではあるが、地上からの観測からも降下粒子の平均エネルギーやフラックスを求めることができる。非干渉散乱 (Incoherent Scatter : IS) レーダーを用いた電離圏の観測は、その一つである。IS レーダー観測から得られた電子密度の高度分布と降下電子による大気電離度を計算したモデル、中性大気モデルなどを組み合わせることで降下電子のエネルギースペクトルを得ることができる (Brekke *et al.*, 1989, Fujii *et al.*, 1995)。しかし、IS レーダーは本質的には1点観測であるため、広い空間を観測するためには長い時間がかかり、また非常に大規模な観測機器であり、極域の多数の地点に配置し広域の観測を行うことは難しい。

オーロラ発光を用いた降下電子の物理量の観測は、以前から行われてきた方法で、オーロラ発光輝線間の強度比から理論に基づいて降下電子の平均エネルギーとフラックスの推定ができる。他の観測に比べ2次元的な観測が可能であり、観測機器も小規模なため多地点での観測を行いやすい。しかし、そこから得られた物理量の正当性について観測面から定量的には実証されてきていない。

本研究では、光学観測から得られた降下電子の平均エネルギーとフラックスの妥当性を EISCAT の電離圏観測と同時観測することにより定量的に検証するため、EISCAT レーダーサイトであるノルウェートルムソ (69.6 °N) に4波長分光型フォトメーターを設置し観測を開始した。観測を行う波長は、427.8 nm ( $N_2^+$  1NG (0,1) Band) と 630.0 nm (OI)、670.5 nm ( $N_2$  1PG (5,2) Band)、844.6 nm (OI) である。EISCAT UHF レーダーとの同時観測は、天候や EISCAT レーダーの稼働時間、オーロラの発生頻度から考えて非常に困難であるため、自動定常観測が行える観測システムを構築し用いた。同時にデジタルカメラを用いた画像撮像システムを構築し一分間に一枚の画像を取得している。

2001年10月16日に EISCAT レーダーとフォトメーターの同時観測を行った。その結果、下部電離圏における電子密度の変動は、フォトメーター観測から得られた発光強度比 (844.6 nm/427.8 nm と 844.6 nm/670.5 nm) により推定された平均エネルギーの変動とよく一致していた。このことからこれらの発光強度比は平均エネルギーの良い指標になることが確認された。今後、同時観測例を増やし導出される物理量の定量的な検証を行い、電離圏の2次元的な観測へと応用、発展させる予定である。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	降下電子	1
1.2	オーロラ	1
1.3	目的	4
第2章	観測機器と観測システム	5
2.1	4波長分光型フォトメーター	5
2.1.1	構成	5
2.1.2	フォトメーターの感度較正	7
2.2	オーロラ撮影用デジタルカメラ	17
2.3	観測プログラム	18
2.4	安全対策	21
2.4.1	サンセンサー	21
2.4.2	無停電電源装置	21
2.4.3	ソフトウェア	21
2.5	EISCAT レーダー	23
2.5.1	概要	23
2.5.2	観測モード	23
2.5.3	CARD 法	23
第3章	オーロラ発光モデル	25
3.1	モデルの概要	25
3.2	発光モデルから得られたオーロラの発光強度及び発光強度比と降下電子の平均エネルギーとフラックスの関係	30
第4章	観測と解析	35
4.1	観測	35
4.1.1	2001年2月	35
4.1.2	2001年10月	36
4.2	EISCAT レーダー特別実験	42
4.3	解析方法	43
4.4	結果	44

第 5 章 考察とまとめ	51
5.1 発光強度の組み合わせによる違いから生じた平均エネルギーの相違 . . . . .	51
5.2 EISCAT レーダー観測と導出された平均エネルギーの比較 . . . . .	51
5.3 まとめと今後の計画 . . . . .	52
謝辞	56
付 録 A プログラム	57
A.1 パラレルポート . . . . .	57
参考文献	59

# 目次

1.1	オーロラオーバル	2
1.2	降下電子による電離生成率の高度分布	3
2.1	観測システム	9
2.2	フォトメーター光学部	10
2.3	光電子増倍管 HAMAMATSU R928	11
2.4	光電子増倍管 HAMAMATSU R636-10	11
2.5	フォトメーター制御部	12
2.6	リレー回路の外観と内部	13
2.7	リレー駆動回路図	13
2.8	フォトメーターの波長感度特性	14
2.9	フォトメーターの絶対感度	14
2.10	分光面光源	15
2.11	積分球光源	15
2.12	積分球光源の波長特性	15
2.13	標準光源	16
2.14	デジタルカメラの外観	17
2.15	観測プログラムの流れ	20
2.16	電源供給	22
2.17	EISCAT レーダーの配置図	24
3.1	$N_2$ の衝突断面積	27
3.2	$O_2$ の衝突断面積	27
3.3	O の衝突断面積	28
3.4	弾性衝突による電子の後方散乱確率	28
3.5	MSIS86 大気モデルによる中性大気密度	31
3.6	平均エネルギーに対する発光強度の変化	32
3.7	エネルギーフラックスに対する発光強度の変化	32
3.8	平均エネルギーに対する 427.8 nm と 630.0 nm、844.6 nm の発光強度比	33
3.9	平均エネルギーに対する 670.5 nm と 630.0 nm、844.6 nm の発光強度比	33
3.10	エネルギーフラックスに対する 427.8 nm と 630.0 nm、844.6 nm の強度比	34
3.11	エネルギーフラックスに対する 670.5 nm と 630.0 nm、844.6 nm の強度比	34
4.1	電離圏加熱実験中の観測データ	36
4.2	2001 年 10 月 10 日の観測データ	37

4.3	2001年10月10日 スキャッタープロット	37
4.4	2001年10月16日の観測データ	38
4.5	2001年10月16日 スキャッタープロット	38
4.6	2001年10月28日の観測データ	39
4.7	2001年10月28日 スキャッタープロット	39
4.8	2001年10月31日の観測データ	40
4.9	2001年10月31日 スキャッタープロット	40
4.10	デジタルカメラ画像	41
4.11	EISCAT とフォトメーターの同時観測データ	42
4.12	2001年10月10日の解析結果 1	45
4.13	2001年10月10日の解析結果 2	45
4.14	2001年10月16日の解析結果 1	46
4.15	2001年10月16日の解析結果 2	46
4.16	2001年10月28日の解析結果 1	47
4.17	2001年10月28日の解析結果 2	47
4.18	2001年10月31日の解析結果 1	48
4.19	2001年10月31日の解析結果 1	48
4.20	2001年10月10日 $E_0$ と $E_t$ の関係	49
4.21	2001年10月16日 $E_0$ と $E_t$ の関係	49
4.22	2001年10月28日 $E_0$ と $E_t$ の関係	50
4.23	2001年10月31日 $E_0$ と $E_t$ の関係	50
5.1	導出された平均エネルギーの 427.8 nm と 670.5 nm による違い	54
5.2	導出された平均エネルギーの 427.8 nm と 670.5 nm による違い	54
5.3	844.6 nm と 427.8 nm、670.5 nm により導出された平均エネルギーのス キャッタープロット	55
5.4	電子密度の変化と平均エネルギー	55
A.1	パラレルポートのピン配置	58

# 表 目 次

2.1	光電子増倍管 R928 の仕様 . . . . .	8
2.2	光電子増倍管 R636-10 の仕様 . . . . .	8
2.3	フォトメーター制御部の仕様 . . . . .	8
2.4	デジタルカメラの仕様 . . . . .	18
2.5	データファイルの書式 . . . . .	19
3.1	オーロラ発光を引き起こす物理化学過程 . . . . .	29
4.1	フォトメーターの観測結果 . . . . .	36

# 第1章 序論

## 1.1 降下電子

磁気圏と電離圏は、電離度やプラズマの密度、温度などからみてお互いに異なった性質を持った領域である。この二つの領域は、両者を結ぶ磁力線を介して電磁エネルギーや粒子エネルギーの交換を通じた相互作用を行っている。磁気圏から電離圏へ降下する電子とイオンは、磁気圏-電離圏結合において重要な役割を持つ。

オーロラオーバルにおけるエネルギーを持った電子の降り込みは、オーロラの発生原因となるばかりでなく、電離圏での中性大気との衝突による電子生成、電離圏や熱圏における加熱、磁気圏から電離圏へのエネルギーの流入の担い手となる。電子の降り込む領域は、オーロラオーバルを中心いくつかの領域に分かれている。惑星間空間磁場が南向きの時の電子の降り込む領域を図 1.1 に示す。ディフューズオーロラ (Diffuse Aurora) の領域がオーバル状に広がっているのに加え、夜側の領域にディスクリットオーロラのアーク (Discrete Aurora Arcs) が存在し、オーバルの朝側にはディフューズオーロラパッチなどが存在する。さらに、極冠域ではエネルギーの低い (数百 eV) ポーラーレイン (Polar Rain) とよばれる降りこみがあり、カusp領域には低エネルギー粒子 ( $\sim 0.5$  keV) の降りこみがある事が知られている。

降下電子の観測は、人工衛星やロケットを用いて行われてきた。オーロラアークの上部ではエネルギー領域の幅が狭く (Monoenergetic)、数 keV のエネルギーを持った電子が、ディフューズオーロラの上部では幅広いエネルギーを持った電子がよく観測される。これらのことから、オーロラアークの発光は、沿磁力線電場により加速された電子の降りこみであり、ディフューズオーロラは地球磁場にとらわれた電子のバウンスモーションによる降下が原因であると考えられている (Lyons [1992])。降下電子は沿磁力線電流を担っていると考えられ、オーロラアークの上部では上向きに沿磁力線電流が観測されている。また、オーロラアークの周辺では下向きの電流が観測されている。これらの観測から、オーロラアークに伴って局所的に磁気圏と電離圏を結ぶ3次元電流系が存在すると考えられている。

## 1.2 オーロラ

オーロラの発光は、複数の輝線やバンドから形成されている。これらの輝線やバンドは、磁気圏から電離圏へ降下してくる粒子と電離圏の中性大気の相互作用により作り出される。電離圏の中性大気 (主に  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $O$ ) は、磁気圏から降下してくる粒子により電離あるいは励起される。励起状態にある分子や原子、及びそれらのイオンは、光としてエネルギーを放出し基底状態に戻る。この光がオーロラとして観測される。有名な発光輝線は、

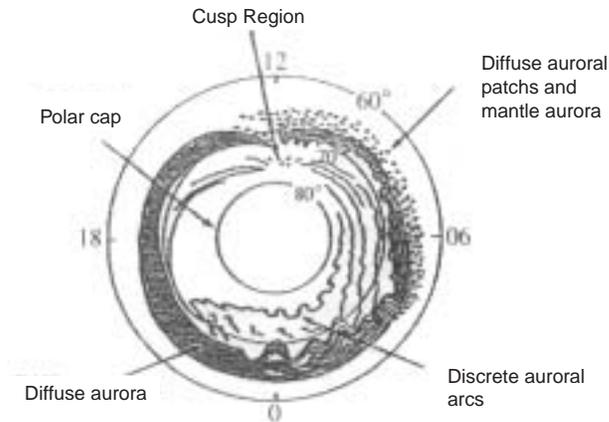


図 1.1. 惑星間空間磁場が南向き時における電子の降りこみ領域の違いを示す。(Shunk and Nagy [2000])

O の 557.7 nm や 630.0 nm、バンドとしては、 $N_2$  のファーストポジティブバンド (First Positive Group Band: 1PG Band) や  $N_2^+$  のファーストネガティブバンド (First Negative Group Band: 1NG Band) などが挙げられる。

降下粒子の中で主にオーロラ発光を引き起こすのは数百 eV から数 keV のエネルギーを持った電子である。オーロラの発光を議論する時、降下電子と中性大気との衝突過程は重要な要素である。降下電子の電離圏への侵入は、これまで観測やモデルにより議論されてきた。よく知られたシンプルなモデルとして Rees のモデルがある (Rees [1989])。Rees [1989] は、室内実験から予測される中性大気の電離確率をもとに、中性大気の密度分布から電離確率の高度分布を求めた。近年よく用いられている方法は、ボルツマン方程式から得られる電子の輸送方程式を解き、降下電子フラックスの高度分布を求め、励起、電離確率を計算する手法である。電子の輸送方程式の解法には、モンテカルロ法を用いたもの、磁力線に沿った輸送のみを考える Two-Stream 法、ピッチ角分布を考慮に入れた Multi-Stream 法などがある。モンテカルロ法は、Berger *et al.* [1970] や Solomon [1993]、Onda *et al.* [1999] など用いられている。中性大気との衝突過程をよく再現することができるが、計算時間が非常に長くなる。Two-Stream 法は、始めに光電子の輸送方程式を解くために用いられ (Banks and Nagy [1970], Nagy and Banks [1970])、その後多くのオーロラ発光モデルに用いられている (例としては、Banke *et al.* [1974], Ono [1993], Solomon [1988], Stammnes [1981, 1983] など)。Strickland *et al.* [1976, 1983, 1989] は、Multi-Stream 法を用い輸送方程式を解き、オーロラ発光を計算している。こうしたモデル計算の正当性は、人工衛星観測やロケット観測などによって確かめられている。輸送方程式から得られるのは、中性大気との衝突によりエネルギーを失った 1 次電子と、非弾性衝突による電離により生成された 2 次電子のフラックスの高度分布である。このフラックスと中性大気密度から、ある高度における分子、原子の励起および電離生成率が求まる。

図 1.2 に示すように、降下電子のエネルギーが高ければ高いほど侵入高度は低くなり、より低高度で効果的に中性大気の励起および電離を行う。一方、中性大気の密度と組成比

は高度によって変化する。高度が低くなると大気密度が高くなるため、励起状態にある原子や分子から光が出る前に他の粒子に衝突しエネルギーを失う消光 (Quenching) の効果が大きくなる。許容線である  $N_2$ 、 $N_2^+$  などの発光は影響が少ないが、禁制線である 557.7 nm(OI) や 630.0 nm(OI) は、低高度での発光確率は小さくなる。また、オーロラが発光する領域では O の密度が上部で高く、下部では  $N_2$  の密度が高い。そのため、427.8 nm( $N_2^+$  1NG) と 557.7 nm(OI) や 630.0 nm(OI) との発光強度比は、降下電子のエネルギーによって変化する。

オーロラ発光輝線間の強度比から降下電子のエネルギーを推定する方法は以前から行われてきた。Rees and Luckey [1974] は、630.0 nm(OI) と 427.8 nm( $N_2^+$  1NG) の発光強度比から降下電子のエネルギーを推定した。しかし、630.0 nm は禁制線であり発光を起こすまで時間がかかる (およそ 110 秒)。そのため、630.0 nm と 427.8 nm との発光強度比からは正しい平均エネルギーを導出することは難しい (Ono and Hirasawa [1992])。Strickland *et al.* [1989] は、O の許容線である 844.6 nm(OI) を用い、844.6 nm と 427.8 nm との発光強度比が平均エネルギーに対して敏感に反応することを示した。また、平均エネルギーが決定されれば、844.6 nm と 630.0 nm と 427.8 nm の発光を用い、O と  $O_2$  の  $N_2$  に対する密度を求めることができる (Hecht *et al.* [1989, 1991])。Ono [1993, 1995] では、大気の散乱を受けやすい 427.8 nm の代わりに 670.5 nm( $N_2$  1PG) を用いた。

衛星やロケット、IS レーダーとの同時観測により、発光輝線の強度比は降下電子の平均エネルギーやフラックスの良い指標であることが確認されている。(Gattinger *et al.* [1991], Hecht *et al.* [1991], Rees *et al.* [1977], Rees and Lummerzheim [1989], Solomon *et al.* [1988], Vallance Jones *et al.* [1987] など)。しかし、観測精度の問題や大気モデルによる発光モデルの変動、大気散乱など不確定な要素が多く存在するため、光学観測のみから導出されたこれらの物理量が定量的に正しいかどうかという議論は未だ行われていない。

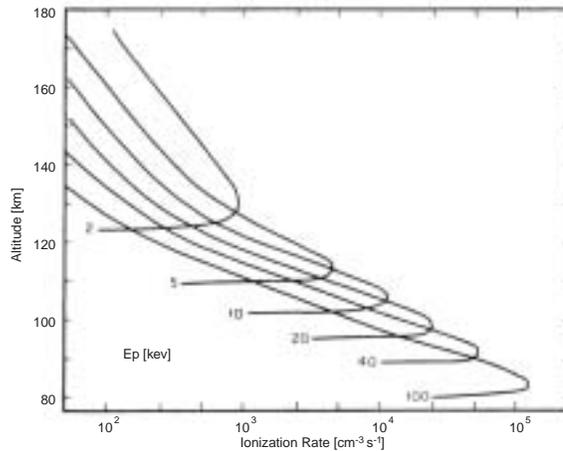


図 1.2. 降下電子の平均エネルギーによる電離生成率の高度分布の変化を表す。Rees [1989] より抜粋。

### 1.3 目的

磁気圏-電離圏結合の物理過程の解明は太陽地球系物理の重要な課題の一つであり、オーロラを発生させる降下電子は磁気圏-電離圏結合における3次元電流の担い手でもある。3次元電流系は電離圏を通して閉じていると考えられており、電離圏における2次元電離圏電流の空間時間分布を観測することは、3次元電流系の物理メカニズムの解明に繋がる。

オーロラ光学観測は、他の降下電子の観測機器(衛星、ロケット、ISレーダー)に比べ小規模であり、多地点での観測が可能である。また、1点観測である衛星やロケット、ビームを振ることで2次元的な様相を観測することも可能ではあるが本質的に1点観測であるISレーダーに比べ、光学観測は同時に2次元的にデータを取得できる。電離圏における3次元電流系の情報(特にオーロラ形態と電気伝導度)の時間空間分布をグローバルに観測するためには光学観測は最も適した方法であると言える。

本研究では、その第一段階としてEISCATレーダーとフォトメーターの磁力線方向の同時観測から光学観測を用いた降下電子のエネルギーとフラックス導出方法の検証を行う。電子は基本的に磁力線方向に沿って運動しているため、沿磁力線電場などで加速され特徴的なエネルギー分布をもった電子はある磁力線に固定されて降下してくる。異なる磁力線をまたいだ観測を行った場合、異なるエネルギー分布をもった降下電子による発光を同時に観測する可能性があり比較がきわめて複雑となる。多点観測からトモグラフィー手法を用いることで磁力線に沿わない観測からでも導出は行えるが、本研究では不確定さが少なく最も直接的な比較が行える磁力線方向の観測から正しい物理量が得られることを確認する。この導出方法にはオーロラの形態や運動、時間帯などによっても異なることが予想されるため、様々な条件下(磁気圏や電離圏の状態、降下電子の状態、オーロラの種類)で同時観測を行う必要がある。しかし、自然現象であるオーロラの同時観測の機会は、トロムソの天候やEISCATレーダーの稼働時間を考えると非常に少ない。光学観測の自動定常化を行い、同時観測の機会を増やすことが大変重要である。そのため、本研究では自動定常観測システムの構築を重要な題目として行った。

## 第2章 観測機器と観測システム

本研究では、オーロラ発光の多波長分光観測により磁気圏から電離圏へと降下してくる電子のエネルギースペクトルを推定する方法を確立することを目的としている。そのために4波長分光型フォトメーターとEISCAT UHFレーダーの沿磁力線方向の同時観測をオーロラ帯に位置するトロムソ(69.6°N)で行っている。オーロラは自然現象であり常に発生しているわけではなく、光学観測は天候に左右される。EISCATレーダーの運用時間は年間約2500時間であり、EISCAT UHFレーダーで磁力線方向の観測を行っているのは年間200時間程度である。また、我々の観測機器は、操作員がいなければ観測を実地する事が出来なかった。そこで、同時観測の機会を増やすため、フォトメーター観測システムの自動化を行い、研究者の不在時でも観測可能な時間帯は常時連続観測でき、データやプログラムをネットワークを通してコントロールできるシステムを構築した。具体的には、太陽天頂角が $-10^\circ$ 以下となる時間帯は常時観測を行う。本章では、光学観測機器と観測システム、及びEISCATレーダーについて述べる。

### 2.1 4波長分光型フォトメーター

#### 2.1.1 構成

4波長( $\lambda=427.8, 630.0, 670.5, 844.6$  nm)の発光強度を同時に観測するためのフォトメーターシステムは、光学部と制御部、リモートコントロールのためのリレー回路、観測の制御やデータ取得を行うパーソナルコンピュータ(PC Plat' Home Factory V-Trus2i)からなる(図2.1参照)。

図2.2に光学部を示す。採光部には、40 mm、 $f = 100$  mmのレンズを用いており、視野絞りにより視野は $1.2^\circ$ となっている。視野角 $1.2^\circ$ は、同時観測を行うEISCAT UHFレーダーの視野とほぼ等しい。ダイクロックミラー(DM1)により、波長500 nm以下の入射光はチャンネル1(Ch1;  $\lambda=427.8$  nm)に入る。500 nm以上の波長の光はハーフミラー(HM)により等分され、反射光はチャンネル2(Ch2;  $\lambda=630.0$  nm)に入る。ハーフミラーを透過した光は、2つ目のダイクロックミラー(DM2)により820 nm以下の波長の光はチャンネル3(Ch3;  $\lambda=670.5$  nm)にそれ以上はチャンネル4(Ch4;  $\lambda=844.6$  nm)に分光される。各チャンネルの光電子増倍管の前には半値幅が数nmの干渉フィルターがあり観測波長を決定している。光電子増倍管はチャンネル1からチャンネル3までは、HAMAMATU R928を用い、チャンネル4はR636-10を用いている。R928とR636-10の仕様を、表2.1、2.2、及び図2.3、2.4に示す。R636-10は、R928よりも近赤外領域に感度をもち、暗電流は少ない。光電子増倍管の出力は、ノイズの混入を防ぐため光電子増倍管の真上にあるプリアンプにより増幅され制御部へ出力される。

図 2.5 は制御部の外観と内部である。制御部は、シャッター制御回路、光電子増倍管用の高圧電源、入力されたアナログ信号により高電圧の出力制御する回路、サンセンサーの出力によりシャッター制御回路と高電圧電源への電力供給を止める回路、光学部のプリアンプから出力される信号のアナログ処理(フィルター、アンプ)を行う回路から構成されている。アナログ処理部の仕様を表 2.3 に示す。光電子増倍管の感度の違いから、チャンネル 1 からチャンネル 3 まではアンプ/ゲインを 100 倍、チャンネル 4 は 1000 倍として観測を行っている。また、データサンプリングは 10 Hz で行っているため、フィルターのカットオフ周波数は 20 Hz に設定している。

図 2.6 にリレー回路 (1) の外観を、図 2.7 にパラレルポートからの信号でリレーを駆動させるための回路を示してある。リレー回路内には、シングルスティプル型リレー (Matsushita HC4-H-DC12) が 2 つと 2 巻線ラッチング型リレー (Matsushita HC2K-DC12) が 2 つ入っている。シングルスティプル型リレーは、コイル励磁で入り、無励磁で切りとなるリレーであり、2 巻線ラッチング型リレーは、動作と復帰の 2 信号でオン/オフの切換えを機械的に行うリレーである。フォトメーター制御部の主電源とシャッターの制御はラッチング型リレーを用い、高電圧電源の制御は 2 つのシングルスティプル型リレーを用いている。主電源とシャッターは、制御部において手動スイッチで操作していたが、自動定常観測を行うためスイッチをリレー回路で置き換えた。ラッチング型リレーを用いたため、電力供給は動作時のみであるが、停電などの原因で電力が供給されなくなっても非観測状態とはならない。高電圧電源の制御は制御部内で行っているため、リレー回路からは動作と復帰信号に対応したオンとなるための接点とオフとなるための接点を出力している。

PC の役割は観測の制御とデータ処理である。観測の制御とは、観測のスケジューリング、リレー回路を用いた観測器の制御、D/A 変換ボードを用いた高電圧の調整である。データの処理は、データの取得、保存、ネットワークを介したデータの転送である。これらを実行するためには、ポート入出力の制御が行え、PC 自体がリモートで操作でき、なおかつ安定していることが重要である。そのため、オペレーティングシステムは Redhat Linux 6.2 を用いている。

PC は、スケジューリングのプログラムにより光電子増倍管へ高電圧を加える時間やシャッターを開く時間の制御を行う。またデータのタイムコードは PC の時刻を用いており、EISCAT レーダーと同時観測を行うこと考えると PC の内部時計の時刻は正確 (~1 分以内) でなければならない。PC の時刻較正は、ネットワークタイムプロトコル (NTP) を用いている。NTP デモンによりトロムソ大学の NTP サーバと同期させてある。観測器の制御は、パラレルポートより信号を送ることで行っている。パラレルポートは、12 個の出力ビットと 5 個の入力ビットにアクセスができる。詳しくは付録 A で述べる。この制御では、出力は、主電源の On、Off、シャッターの開閉、高電圧電源のオン、オフの 6 個、入力サンセンサーの情報の 1 個を使用した。スケジューリングプログラムについて詳しくは 2.3 章で述べる。

高電圧の出力電圧の調整は、制御部にアナログ信号を送ることで行える。PC からアナログ信号を出力するため、D/A 変換ボード (CONTEC 製 DAI16-4C) を用いている。D/A 変換ボードは、0 から 10 V までを 16 ビットの分解能で出力できるように設定してある。

制御部から出力されるアナログの観測データは、A/D 変換ボード (Interface 製 PCI-3166) によりデジタル化され、PC のハードディスクに保存される。A/D 変換ボードは、

0 から 10 V までを 12 ビットの分解能でサンプリングするように設定した。サンプリング周波数は 10 Hz である。

### 2.1.2 フォトメーターの感度較正

本研究では、観測に用いる波長の光の絶対強度を求めることが必須である。そのため、個々の光電子増倍管、フィルター、及びシステム全体としての波長特性が絶対強度較正のため必要である。光電子増倍管を長時間動作させるとその感度は徐々に変化する。また、観測を行う場所の温度や湿度によって光電子増倍管の感度やフィルターの特性は変化する。そのため、このような較正作業は、なるべく観測を実地するのに近い状況下で行う必要があり、感度較正を頻繁に行う必要がある。そのため、トロムソにおける観測開始前に下記のように絶対強度較正を行うとともに、感度の経年変化などを測るため観測場所で較正を行うための標準光源の較正を行った。

我々は、2001 年 8 月に国立極地研究所にて較正を行った。光学較正機器室には、分光感度測定用の分光面光源と強度較正用の積分球較正光源、フィルターの透過率測定を行う分光光度計が設置されている。使用したのは、分光面光源と積分球光源である。分光面光源は、キセノンランプを光源とし、モノクロメータにより半値幅が 0.5 nm 以下の単色光を作っている。較正を行う観測器は、拡散反射板により一様となった光を測定する (図 2.10 参照)。積分球光源は、中空の球の内壁に硫酸バリウムを塗布して拡散反射板とし、内部で点灯させたランプの光を完全拡散光にして、開口部より出射するものである。較正は、図 2.11 に示すように、積分球の中心にフォトメーターの視野を向けて行った。各チャンネルの波長特性を図 2.8 に、出力電圧と観測された光のレイリー値の関係を図 2.9 に示す。標準光源 (図 2.13) の較正は、積分球光源により較正されたフォトメーターで標準光源の発光強度を測定することで行った。標準光源の発光強度は、電圧を一定にすることでほぼ同じ明るさが得られる。

表 2.1. 光電子増倍管 R928 の仕様。

パラメータ	詳細
感度波長域	185 ~ 900 nm
最大感度波長	400 nm
光電面の材質	マルチアルカリ
ダイノードの構造	サーキュラケージ型
ダイノードのステージ数	9
陽極-陰極間電圧	1250 Vdc (最大値)
平均陽極電流	0.1 mA (最大値)
陰極感度 (光 2856 K)	250 $\mu$ A/lm (一般値)
陽極感度 (光 2856 K)	2500 A/lm (一般値)
電流増幅率	$1.0 \times 10^7$
陽極暗電流	50 nA (最大値)

表 2.2. 光電子増倍管 R636-10 の仕様。

パラメータ	詳細
感度波長域	185 ~ 930 nm
最大感度波長	300 ~ 800 nm
光電面の材質	GaAs(Cs)
ダイノードの構造	サーキュラケージ型
ダイノードのステージ数	9
陽極-陰極間電圧	1500 Vdc (最大値)
平均陽極電流	0.001 mA (最大値)
陰極感度 (光 2856 K)	550 $\mu$ A/lm (一般値)
陽極感度 (光 2856 K)	250 A/lm (一般値)
電流増幅率	$4.5 \times 10^5$
陽極暗電流	2 nA (最大値)

表 2.3. フォトメーター制御部の仕様。

パラメータ	詳細
チャンネル数	4
アンプゲイン	1,10,100,1000 倍の 4 段階切換え
バーニヤ	各レンジの 0 から 100 % 可変
0 調整	各レンジにて $\pm 5$ V 可変
ローパスフィルター	カットオフ 5 Hz と 20 Hz の 2 段切換え
出力	BNC 端子
高電圧	各チャンネル独立 400 ~ 1200 V

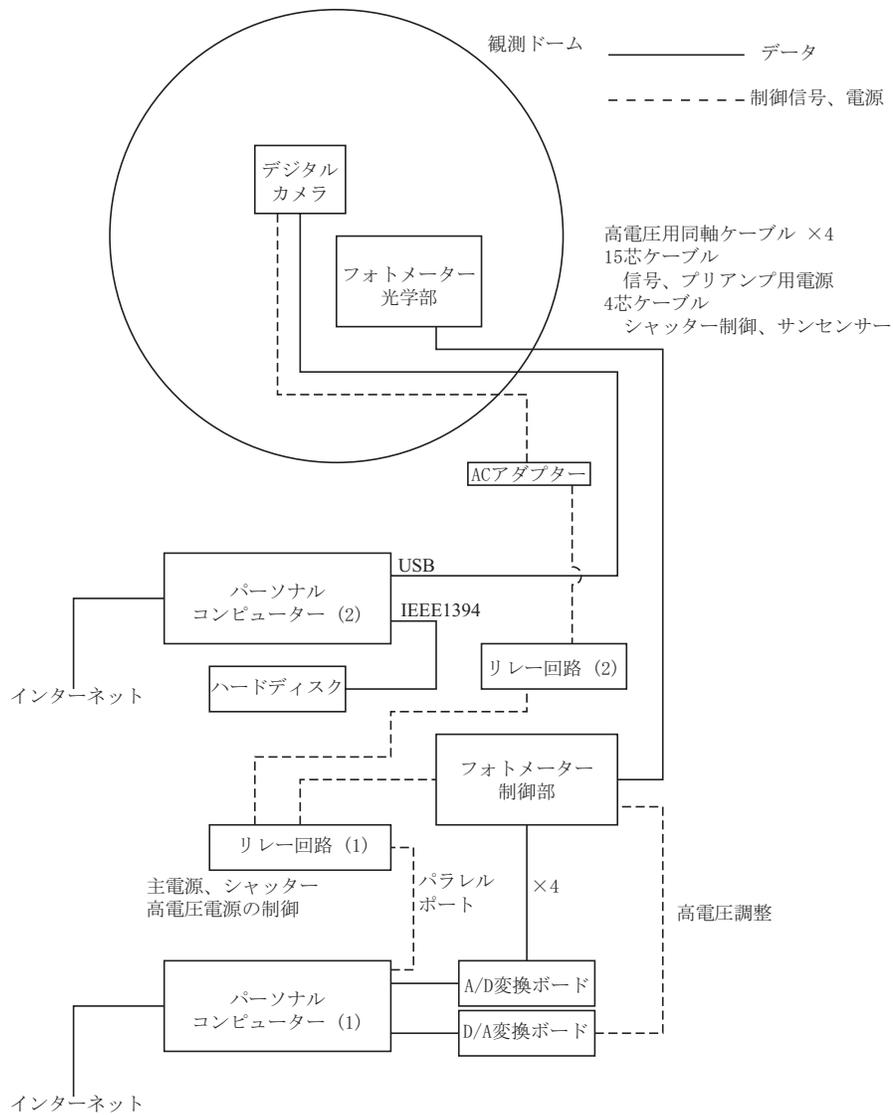


図 2.1. フォトメーター観測システム全体図。



DM : Dichoic Mirror  
 HM : Hafe Mirror

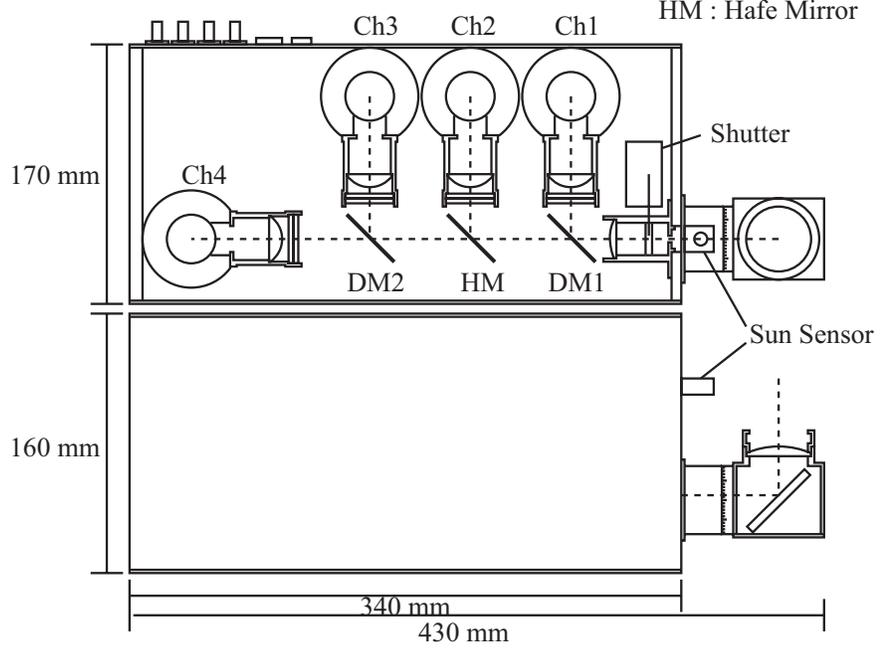


図 2.2. フォトメーター光学部の外観と内部、内部の構成。

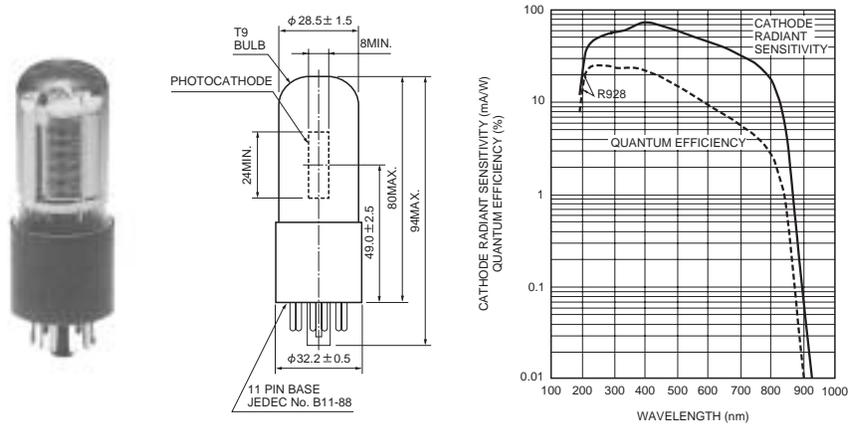


図 2.3. 光電子増倍管 (HAMAMATSU R928) の外観と波長特性。

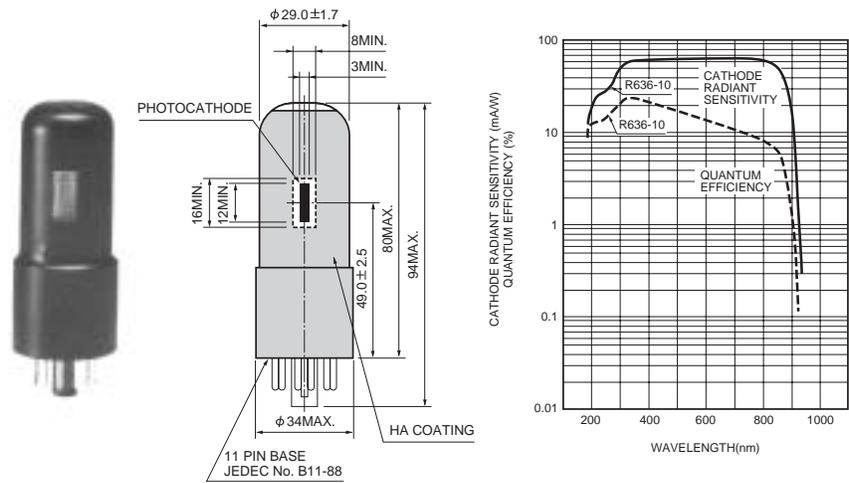


図 2.4. 光電子増倍管 (HAMAMATSU R636-10) の外観と波長特性。

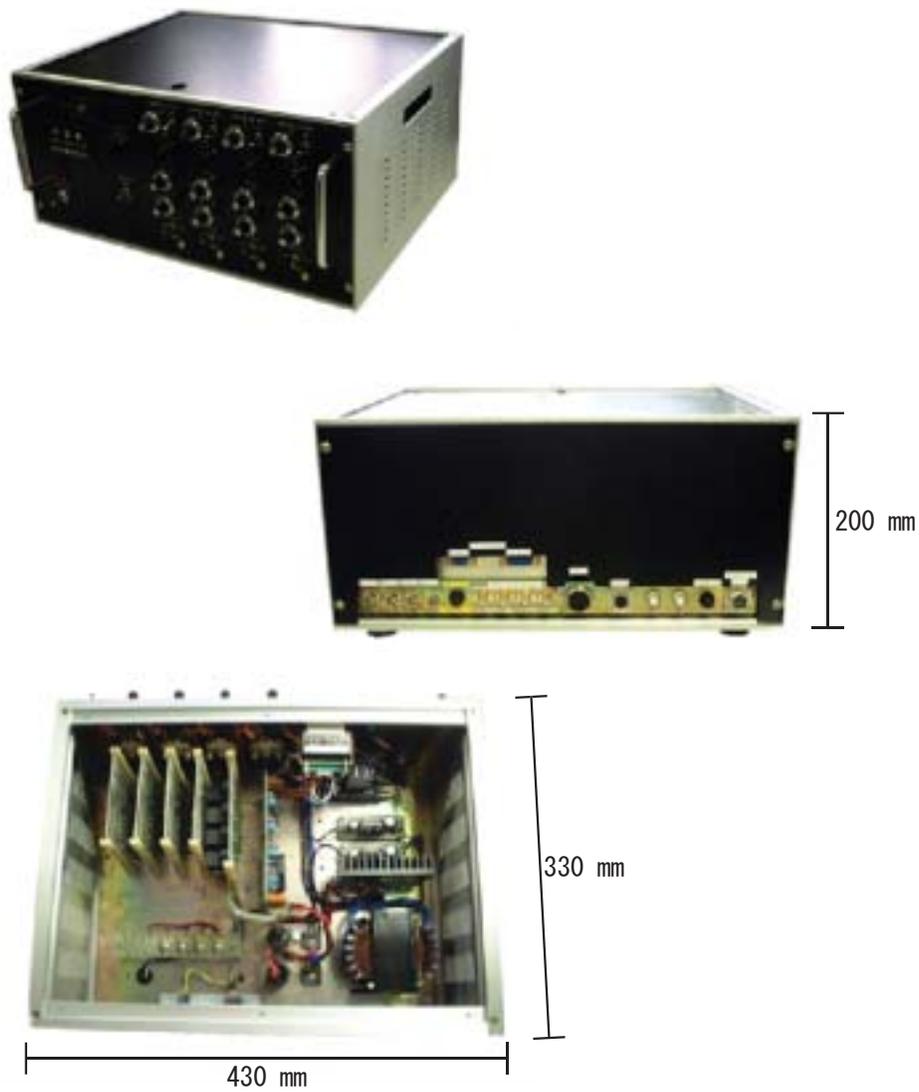


図 2.5. フォトメーター制御部の外観と内部。

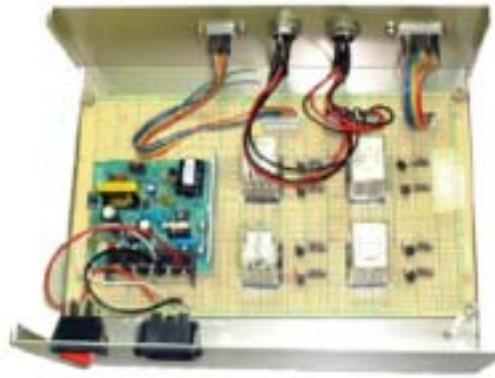


図 2.6. リレー回路の外観と内部。

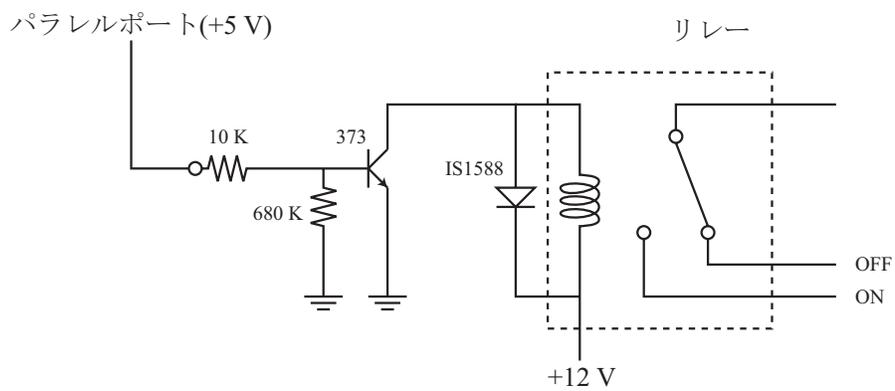


図 2.7. パラレルポートの信号によりリレーを駆動させる回路図を示す。

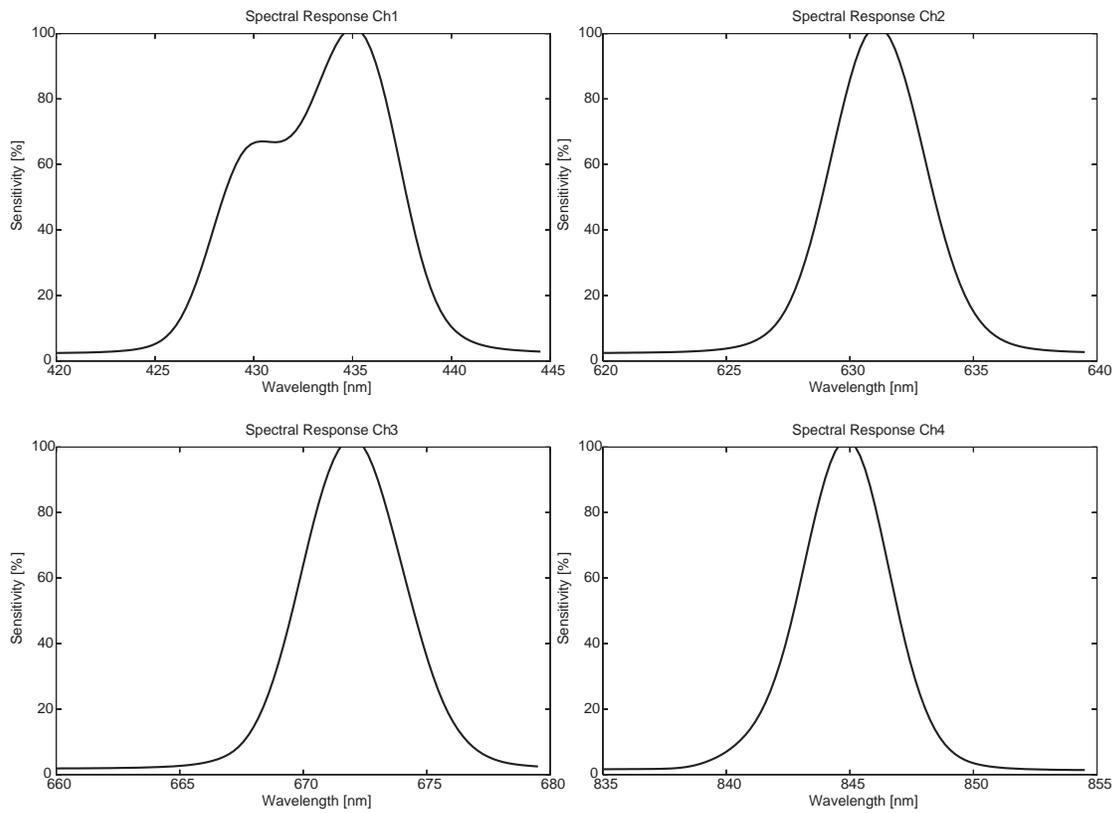


図 2.8. フォトメーターの波長感度特性。横軸に波長 (nm)、縦軸に最大感度波長における強度を 100%とした強度比を取っている。

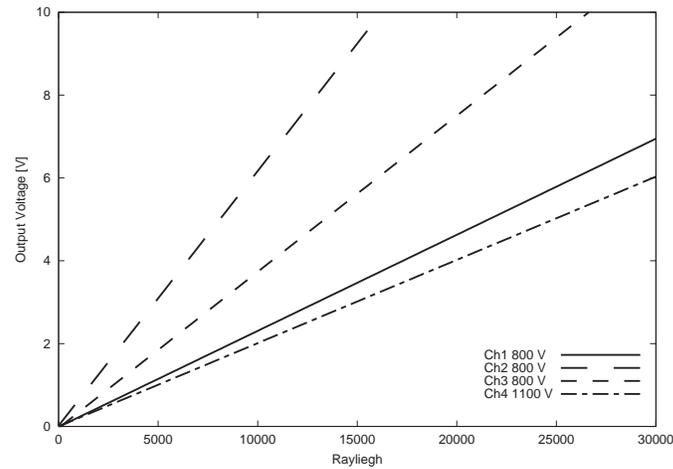


図 2.9. フォトメーターの発光強度に対する出力電圧。横軸に発光強度、縦軸に出力電圧を取っている。高電圧の値は、チャンネル 1 からチャンネル 3 が 800 V、チャンネル 4 が 1100 V に設定した値を表示してある。

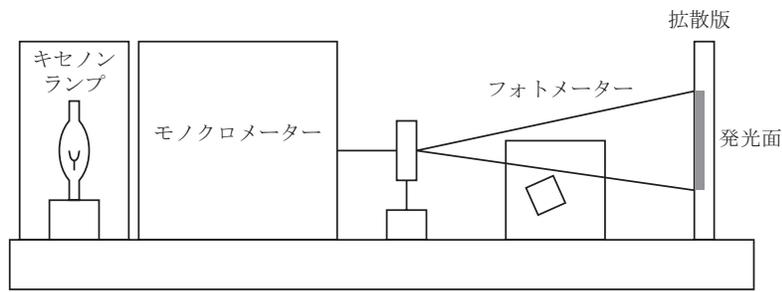


図 2.10. 極地研究所における波長特性計測。分光面光源とフォトメーターの位置関係を示す。

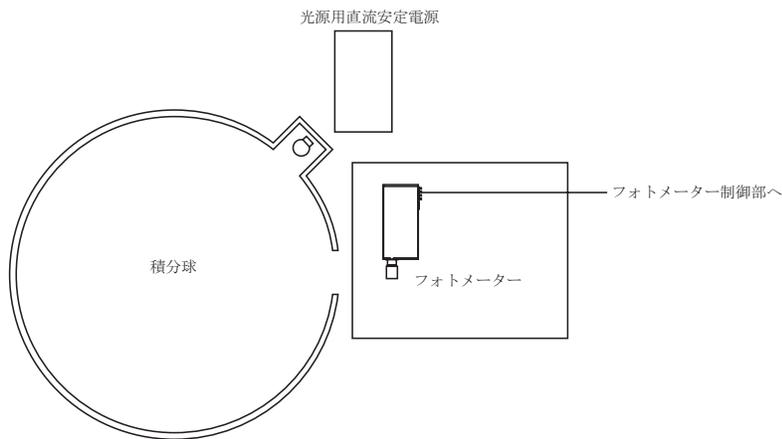


図 2.11. 極地研究所における強度較正。積分球光源とフォトメーターの位置関係を示す。

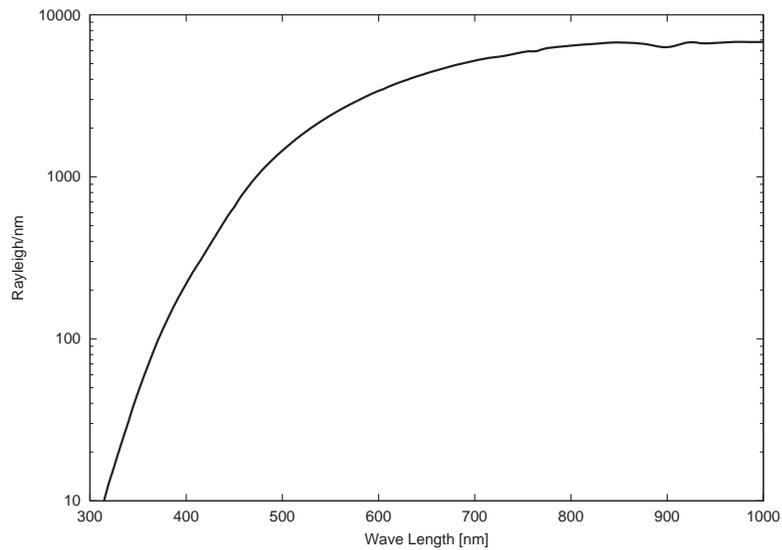


図 2.12. 極地研究所の積分球光源の波長特性。



図 2.13. 観測サイトにてフォトメーターの強度較正を行う標準光源。フォトメーター採光部に取り付けられる。

## 2.2 オーロラ撮影用デジタルカメラ

フォトメーターの観測からは、発光強度の測定はできるが、天候はどうか、発光強度の増大はオーロラなのか雲の散乱反射光なのか、オーロラならばどのような形状かなどの情報を得ることは出来ない。我々は、無人定常観測を行っているため、画像による現象の確認は必要不可欠である。そのため、デジタルカメラ (Fujifilm FinePix S1Pro) を用いたオーロラ撮像システムを作成した。その仕様を表 2.4 に示す。レンズは、Nikkor Fisheye ( $f = 16 \text{ mm}$ , F2.8) を用いている。画像の取得間隔や露出時間、解像度、出力ファイル形式などはプログラム可能で PC を用いて制御が行える。PC は、Windows2000 をオペレーティングシステムとし、リモート制御のためシマンテック社の pcAnywhere を用いている。しかし、デジタルカメラの主電源は、ダイヤル式であり USB を介して制御が行えない。そこで、図 2.1 に示すように、リレー回路 (2) を用いて AC アダプターへの電力供給を制御することで主電源の操作を可能にした。このリレーの動作は、フォトメーター制御部の主電源と同期している。本観測では、一分間に 1 枚、露出時間 6 秒、画素数を  $1440 \times 960$  ピクセルで撮影を行い、JPEG 形式に圧縮して保存している。図 4.10 はこのデジタルカメラで撮影されたオーロラである。オーロラ発光輝線の 1 つである酸素の緑線がはっきりと撮影されており、月に照らされた雲などとはっきり区別できる。



図 2.14. オーロラ観測用デジタルカメラ (Fujifilm FinePix S1pro) の外観。

表 2.4. オーロラ観測用デジタルカメラ (Fujifilm FinePix S1pro) の仕様。

パラメータ	詳細
撮像素子	23.5 mm×15.6 mm スーパーハニカム CCD
総画素数	ハニカム配列の 340 万画素
撮影感度	ISO 320,400,800,1600 相当
記録方式	JPEG, TIFF-RGB
記録画素数	3400 × 2016 / 2304 × 1536 / 1440 × 960 ピクセル ハニカム信号処理により最大 613 万画素
レンズマウント	ニコン F マウント
シャッター	電子制御上下走行方式フォーカルプレーンシャッター
シャッタースピード	30 秒 ~ 1/2000 秒

## 2.3 観測プログラム

観測は、データのサンプリングを行うサンプリングプログラムと観測器の制御を行う制御プログラム、デジタルカメラで撮像を行うプログラムの 3 つを用いて行っている。

サンプリングプログラムは、A/D 変換ボードでデータを取得するプログラムである。太陽天頂角がフォトメーター観測に適す  $-10^\circ$  以下となるのは冬至の時でも 1400UT 以降であるため、サンプリングプログラムは毎日 1200UT に実行かつ開始される。トロムソの地方時 (LT) と UT の差は +1 時間である。プログラムは、まず日付と観測開始時間、観測時間を記述したファイルを読み込む。この記述ファイルに従ってサンプリングは行われる。観測開始時間は太陽天頂角が  $-10^\circ$  となる時刻を 2001 年の 1 年間分計算し与えてある。データサンプリングは、観測開始時間の 1 時間前に開始される。データファイルは、サンプリングを開始した年月日時刻 (YYMMDDHHMM) をファイル名とし、1 時間ごとのファイルとなっている。ファイルの記述は、ある時刻のチャンネル 1 からチャンネル 4 のデータが一行に並び、1 分ごとに時刻が入る。例として表 2.5 に 2001 年 12 月 21 日 00 時のファイルの一部を示す。一つのファイルの容量は 721,320 バイトである。観測したデータは、2 週間に 1 度ぐらいの割合で圧縮し、太陽地球環境研究所へ転送している。A/D 変換ボードからは 10 秒ごとにデータを取り出している。その際安全性のためデータのチェックを行っている。その詳細については次節で述べる。このプログラムは、その日のデータサンプリングが終了した時点で電子メールによりその日のログファイルを管理者 (多くの場合日本国内) に配信し終了する。ログファイルには、データファイル名やフォトメーターの主電源が入った時間、シャッターが開閉した時間などが記述されている。

制御プログラムは、定められた時間にパラレルポート、あるいは D/A 変換ボードから信号を出し、フォトメーターの制御を行っている。毎日 1205UT に実行され、日付と観測開始時間、観測時間を記述したファイルと高電圧のレベルを記述したファイルを読み込む。フォトメーター制御部の主電源は観測開始 2 時間前に入る。高電圧は観測開始 30 分前に入り、記述ファイルから読み込んだレベルに設定される。本観測までの 30 分は、高電圧を含むシステムの安定化をはかるとともに暗電流の測定を行う。本観測開始時にシャッターを開き、その後暗電流の測定のため 1 時間おきにシャッターを 10 秒間閉じる。観測終了時

(読み込んだ観測時間が経過した時)には、シャッターを閉じ、10分後に高電圧と主電源が切れる。それぞれの動作を行うごとにその日のログファイルに動作内容と動作した時刻を書き出す。

デジタルカメラ撮影プログラムは、デジタルカメラの設定と撮影、データ保存を行うプログラムである。上記の2プログラム同様、日付と観測開始時間、観測時間を記述したファイルを読み込む。さらに、撮影条件である撮影間隔(1分)と露出時間(6秒)を記述したファイルを読み込む。画像は、ファイル名を月日時刻(MMDDHHMMSS)をして外付けのハードディスクに保存される。画像データも転送は可能であるが容量が大きい(1枚約300 kByte)ため定期的に転送は行っていない。1年に1度ハードディスクごと持ち帰る予定である。3つのプログラムの流れを、図2.15に示す。

表 2.5. データファイルの書式。例として2001年12月21日00時のデータファイルを示す。このファイルの開始時間は0039:25UTである。データはチャンネル1からチャンネル4が横一列に並び、値は0から10Vを12ビットで表した値である。

ファイル名:0112210039.dat				
Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	
以下データファイルの一部				
TIMECODE 011221003925				
0097	0134	0047	0055	
0096	0141	0040	0058	
0093	0139	0042	0054	
		.		
		.		
		.		
0084	0128	0040	0059	
0089	0129	0040	0054	
0083	0125	0042	0053	
0091	0126	0042	0052	
TIMECODE 011221005026				
0084	0128	0042	0051	
0084	0129	0039	0052	
0088	0133	0041	0050	
0092	0124	0041	0054	
0088	0130	0041	0053	
		.		
		.		
		.		



## 2.4 安全対策

無人定常観測を行うためには、何らかのトラブルがあった場合でも観測機器を保護し、観測を続行できるようにする必要がある。トラブルとして考えられるのは、停電やサージ等の電源トラブル、ネットワーク障害によるPC時刻のズレ、PCやその他の機器の誤作動など様々である。観測には、高電圧を加えた光電子増倍管を用いているため、トラブルによる光過入力による破損を防ぐ必要がある。そのため、いくつかの安全対策を施した。

### 2.4.1 サンセンサー

図 2.2 に示すように、採光部の横にサンセンサーを取り付けてある。サンセンサーは、可視光導電素子 (HAMATSU P722-10R) であり、光が照射すると抵抗値が減少する光導電効果を利用した半導体センサである。センサに照射される光が強くなり、抵抗値がある値まで下がるとフォトメーター制御部内のリレーが働く。このリレーが働くことにより、シャッターと高電圧電源への電力供給が止まる。この装置があれば、光電子増倍管に高電圧を加えた状態で光が照射されることは無い。また、センサが働いている時は、制御プログラムは高電圧電源とシャッターの動作を行わないように設定されている。

### 2.4.2 無停電電源装置

観測機器への電力供給は、図 2.16 に示すように行っている。フォトメーターの制御を行う PC とリレー回路には、無停電電源装置 (Uninterruptible Power Supply; UPS, MITSUBISI FW-F10-0.5K) から電力を供給している。観測中に停電が起こった場合、UPS が無ければ観測制御プログラムは正常終了されず、フォトメーター制御部の主電源はオンのまま、シャッターは開いたままとなる。長時間停電が続き日中に復帰した場合は、高電圧が加わったままで過入力光が入る可能性があり、システムにとって大変危険である。サンセンサーにより、光電子増倍管が破損することは無いとは思えるが、プログラムが中途終了するのは他のトラブルの原因となりえる。そのため、UPS により PC は停電後も動きつづけ、5 分以上停電が続いた場合、リレー回路を非観測状態に戻し、シャットダウンする。電源が復帰すれば PC は起動し、次の日からスケジュールに従い観測を行う。また、PC は瞬間的な停電でも再起動される場合がある。UPS は、瞬停やサージなどの交流電源のノイズに対しても有効であると考えられる。

### 2.4.3 ソフトウェア

上記の 2 つに加え、ソフトウェア的にも安全対策を行っている。2.3 章でも述べたが、サンプリングプログラムは A/D 変換ボードから 10 秒に一度観測値を読み出す。読み出した観測値がメモリへ貯えられる際に観測値のチェックを行っている。具体的には、10 V を超え、サチレーションを起こしている観測値をカウントし、そのカウント数が一定値を超えている場合は、何らかの原因で不適当な過入力光が入っていると考え、観測を終了するようプログラミングされている。現在の設定では、全チャンネルが 4 秒以上サチレーション

を起こしている場合は観測を終了する。この場合、観測終了したことを知らせる電子メールの送信も行う。さらに、PCの起動、終了時には必ず非観測状態になるように設定してある。

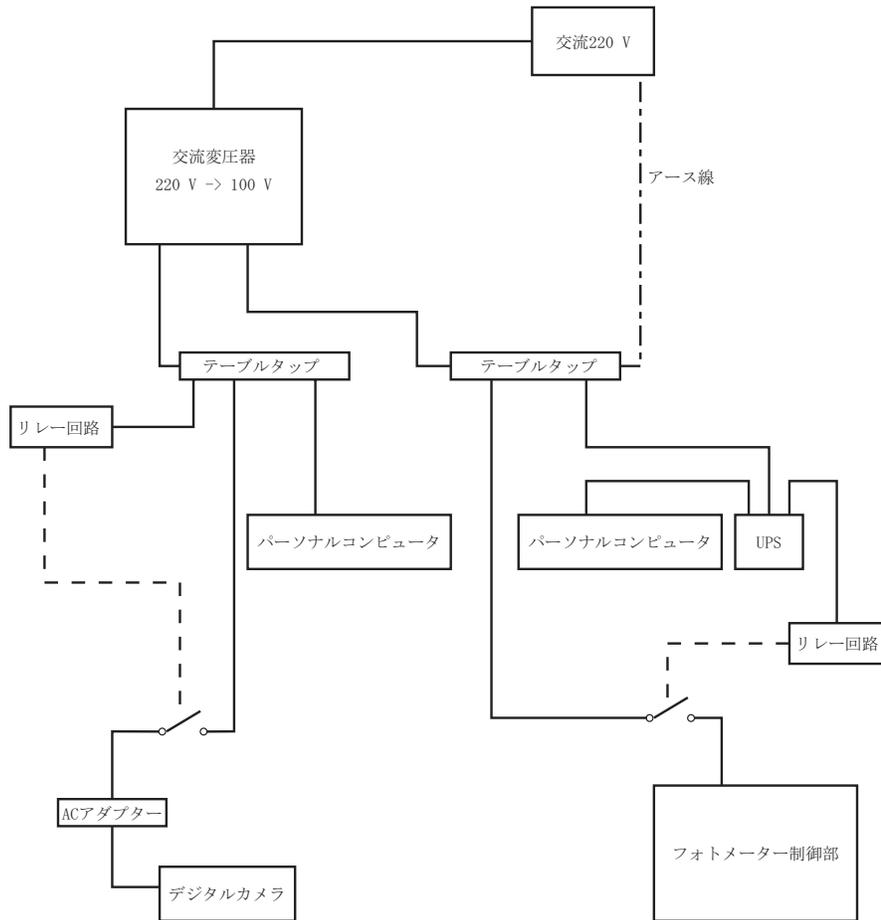


図 2.16. 観測機器やパーソナルコンピュータ、リレー回路への電源供給の構成。

## 2.5 EISCAT レーダー

### 2.5.1 概要

非干渉散乱 ( Incoherent Scatter : IS ) レーダーは地上から電離圏を観測できる有力な観測機器である。EISCAT レーダーは、オーロラ帯及びカスプ領域に位置しており、極域電離圏の研究に多大な貢献をしている。レーダーは、トロムソ ( ノルウェー )、キルナ ( スウェーデン )、ソダンキラ ( フィンランド )、及びスヴァールバル諸島ロングヤービンに配置されている ( 図 2.17 参照 )。IS レーダーの観測により直接得られる物理量は、イオン温度 ( $T_i$ ) と電子温度 ( $T_e$ )、電子密度 ( $N_e$ )、ビーム視線方向のイオン速度 ( $V_i$ ) である。これらの物理量とモデルを組み合わせることにより、電場や電気伝導度、電流、中性風速度なども求めることができる。

### 2.5.2 観測モード

EISCAT レーダーの観測は、年間約 2,500 時間行われている。この観測時間は、スペシャルプログラム (SP) とコモンプログラム (CP) と呼ばれる 2 種類の観測に分けられる。SP の観測時間は、EISCAT 科学協会に加盟している各国に分配され、独自の観測を行うのに使われる。CP は、長時間の観測を目的としており、CP-1 から CP-7 の 7 種類の観測モードがある。フォトメーターとの同時観測で使用する観測モードは CP-1 モードである。CP-1 モードは、トロムソとキルナ、ソダンキラの UHF レーダーを用いて行う。トロムソの UHF レーダーから磁力線方向に 933 MHz の電磁波の送信を行い、トロムソ、キルナ、ソダンキラの 3 基のレーダーで受信する。この観測から、磁力線方向の物理量を高時間分解能で取得することができ、また、3 次元プラズマ速度 (電場に相当) を得ることができる。

### 2.5.3 CARD 法

CARD 法とは、IS レーダーにより観測された電子密度の高度分布から降下電子のエネルギースペクトルを計算する方法である。実際の大気の電離生成率 ( $q(z)$ ) は、すべてのエネルギーの降下電子による電離生成率の和であり、

$$q(z) = \int_E Q(E, z) \phi(E) dE \quad (2.1)$$

と書ける。 $E$ 、 $z$  は、それぞれ降下電子のエネルギーと高度である。 $Q(E, z)$  は、エネルギー  $E$  を持った降下電子による高度  $z$  での電離生成率であり、 $\phi(E)$  は、エネルギー  $E$  を持った電子のフラックスである。式 (2.1) を  $N$  個のエネルギーステップを考えて書き直すと、

$$q(z_j) = \sum_{i=1}^N Q(E_i, z_j) \phi(E_i) \Delta E_i \quad (2.2)$$

となる。 $\Delta E_i$  は、エネルギーステップの幅である。電離大気の輸送効果を無視すると全電離生成率は、電子密度の連続の式から、

$$q'(z) = L(z) - \frac{\partial n(z)}{\partial t} \quad (2.3)$$

と書き表される。 $n$  は電子密度、 $L$  は消失率である。電子とイオンの密度は等しいと仮定し、消失にはイオンの解離再結合が主であると仮定すると、

$$L(z) = \alpha(z)\{n(z)\}^2 \quad (2.4)$$

となる。 $\alpha$  は、再結合係数である。電離反応が輸送の時定数などに比べて十分に早く、そのため平衡状態 ( $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$ ) に入ると仮定すると、最終的に

$$q'(z) = \alpha(z)\{n(z)\}^2 \quad (2.5)$$

となる。式 2.2 と式 2.5 から最小 2 乗法を用いて解を求めることにより、観測された電子密度の高度分布から降下電子のフラックス  $\phi(E)$  を求めることができる。CARD 法の妥当性については、Fujii *et al.* [1995] によって確かめられている。彼らは、CARD 法から得られた降下電子のエネルギースペクトルと Defense Meteorological Satellite Program(DMSP) により直接観測された電子のエネルギースペクトルを比較し、両者が良い一致していることを示した。鈴木 [1997] においても、Akebono 衛星との同時観測で良い一致を示している。このことから、CARD 法は降下電子のエネルギースペクトルの推定に有効であると言える。

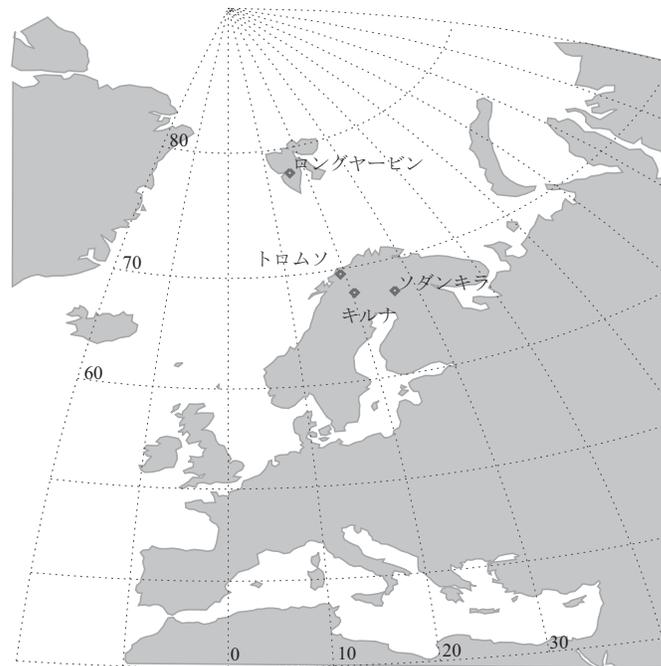


図 2.17. EISCAT レーダーの設置場所。トロムソに UHF と VHF レーダーがあり、キルナ、ソダンキラに受信専用の UHF レーダー、ロングヤービンに UHF レーダーが 2 基設置されている。

## 第3章 オーロラ発光モデル

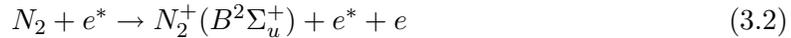
### 3.1 モデルの概要

フォトメーター観測より得たオーロラの発光強度から降下電子の平均エネルギーとフラックスを求めるためには、これらの物理量とオーロラの発光強度及び波長間の強度比の関係をモデルから定量的に求める必要がある。計算には、Ono [1993] と同様の方法を用いた。電子の輸送方程式は、Stamnes [1981] や Stamnes and Rees [1983] を基に、Two-Stream の仮定を用いて解いた。弾性 (Elastic)、非弾性 (Inelastic) 衝突の衝突断面積 (Cross Section) と弾性衝突による後方散乱の確率 (Backscatter Ratio) を図 3.1-3.4 に示す。弾性衝突断面積は、Stamnes and Rees [1983] で用いられた値である。非弾性衝突断面積は、Green and Stolarski [1972] と Banks *et al.* [1974] において計算された値を用いている。弾性衝突による後方散乱確率は、Stamnes [1981] において議論されている。 $N_2$  と  $O_2$  の非弾性励起衝突による後方散乱は、Shyn *et al.* [1972] で計測された  $N_2$  の弾性衝突による後方散乱確率を用い、 $O$  の非弾性励起衝突による後方散乱確率は Fink and Yates [1970] によって計算された確率を、非弾性電離衝突による後方散乱確率は 1 次電子が衝突により方向を変えないと仮定し与えた。上部境界 (500 km) に与える降下電子の強度分布 ( $I(E)$ ) は、ガウス分布を仮定している。即ち、平均エネルギーを  $E_0$  (eV) とし、全エネルギーフラックスを  $E_t$  (erg/cm<sup>2</sup>/sec) とすると、

$$I(E)dE = \{E_t/\pi^{1/2}W \cdot E_0\} \cdot \exp\{-(E - E_0)^2/W^2\} \quad (3.1)$$

と書ける。 $W$  は、ガウス分布の形状を決めるパラメータであり、Ono and Hirasawa [1992] に準拠して  $W = 0.25E_0$  とした。大気モデルは MSIS-86(Hedin, 1987) を用いた。

計算された降下電子の強度分布から、表 3.1 に示す物理化学過程を考慮し、427.8 nm( $N_2^+$  1NG (0.1) band) と 630 nm(OI)、670.5 nm( $N_2$  1PG (5,2) band)、844.6 nm(OI) の光子生成率 (Volum Emission Rate) の高度分布を求める。427.8 nm は、 $N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + h\nu$  の過程で放出される光であり、この励起状態は電子の直接衝突による電離から生成される。



\* は、エネルギーが通常より高いことを示す。このモデルでは、427.8 nm の発光は、Gerdjikova and Shepherd [1987] より、 $N_2$  のすべての電離衝突による励起の 2.5% であると計算している。 $O(3p^3P)$  は、844.6 nm の発光を放出する励起状態であり、酸素原子と電子の直接衝突からのみ生成されると考えられる (Hecht *et al.*, 1985)。



670.5 nm は、 $N_2(B^3\Pi_g) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + h\nu$  の過程から放出される発光であり、この励起状態は、電子の衝突による励起と  $N_2(C^3\Pi_u)$  のエネルギー放射、



により生成される。630.0 nm を放出する  $O(^1D)$  については、以下の3つの生成過程と2つの消失過程を考えている。

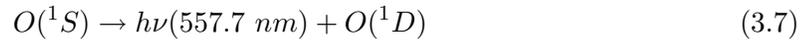
1) Direct Process



2) Dissociative Recombination Process



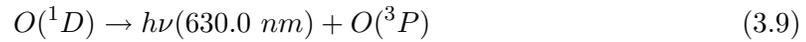
3) Cascading Process



4) Quenching Process



5) Radiative Decay



化学過程に関しては、Torr and Torr [1982] や Solomon *et al.* [1988] を参考にした。

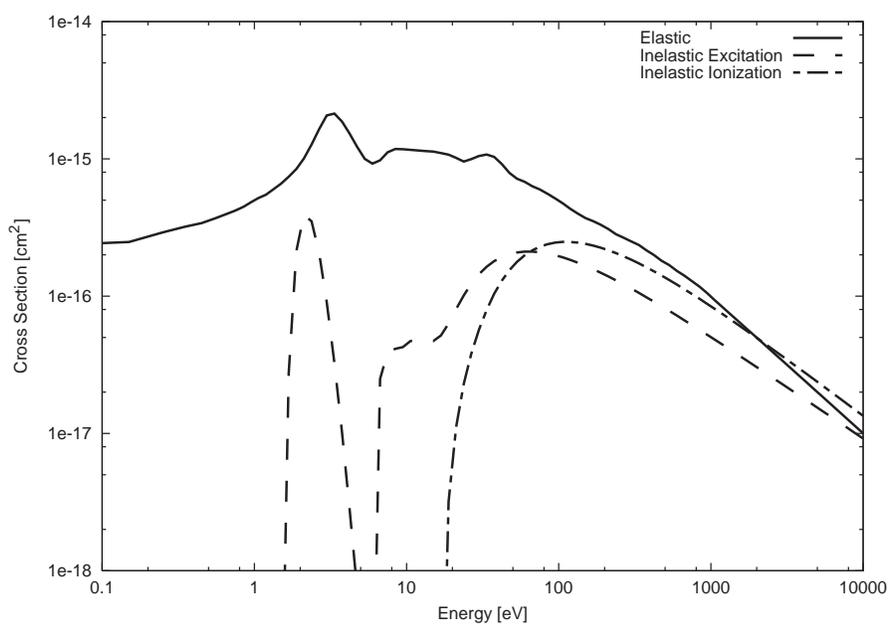


図 3.1. 窒素分子  $N_2$  の電子衝突に対する衝突断面積。弾性衝突と非弾性衝突による励起、電離断面積を示す。

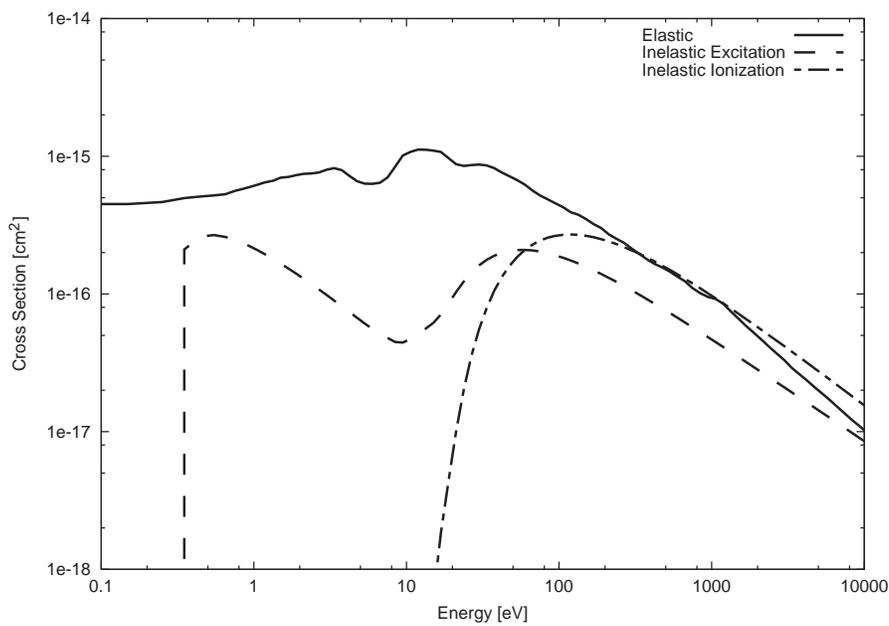


図 3.2. 酸素分子  $O_2$  の電子衝突に対する衝突断面積。

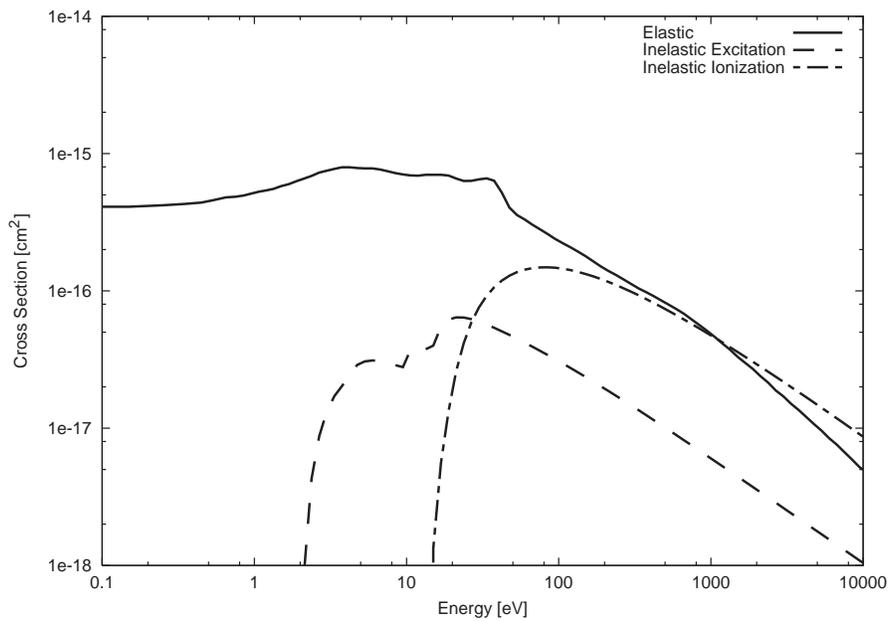


図 3.3. 酸素原子 O の電子衝突に対する衝突断面積。

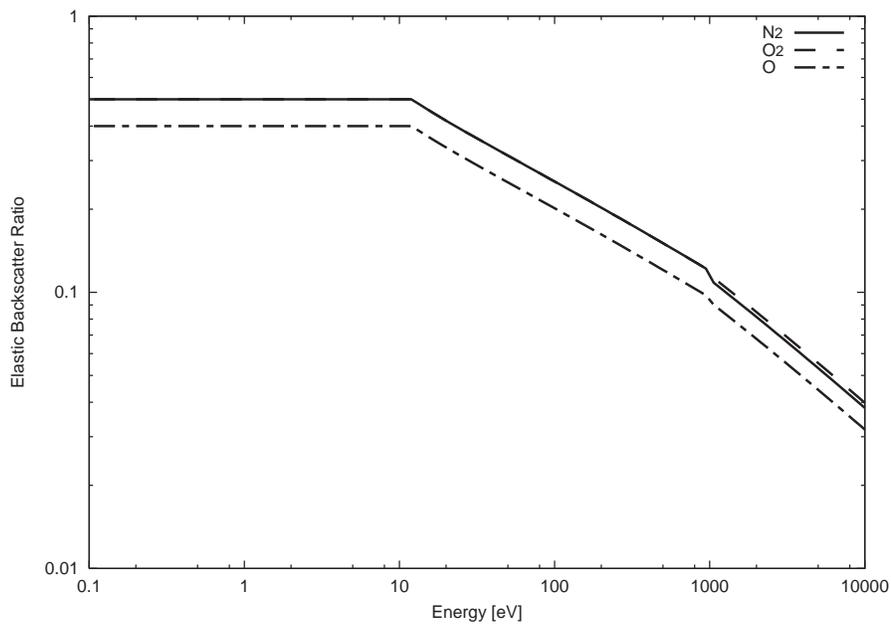


図 3.4.  $N_2$  と  $O_2$ 、O との弾性衝突による電子の後方散乱確率。

表 3.1. オーロラの発光を引き起こす物理化学過程。

Physical and Chemical Processes in Auroral Ionosphere	
1. Ionization	$N_2 + e^* \rightarrow N_2^{+*} + 2e^*$ $N_2 + e^* \rightarrow N^+ + N + 2e^*$ $O_2 + e^* \rightarrow O_2^{+*} + 2e^*$ $O_2 + e^* \rightarrow O^+ + O + 2e^*$ $O + e^* \rightarrow O^{+*} + 2e^*$
2. Direct-Impact Excitation	$N_2 + e^* \rightarrow N_2^* + e^*$ $O_2 + e^* \rightarrow O_2^* + e^*$ $O + e^* \rightarrow O^* + e^*$
3. Dissociative Recombination	$N_2^+ + e \rightarrow N + N$ $O_2^+ + e \rightarrow O + O$ $NO^+ + e \rightarrow N + O$
4. Ion-Neutral Interaction	$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$ $O^+ + O_2 \rightarrow O + O_2^+$ $N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$ $N_2^+ + O_2 \rightarrow N_2 + O_2^+$
5. Quenching of Meta-Stable Species	$N_2(A_3\Sigma_u^+) + N_2 \rightarrow N_2 + N_2$ $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O_2 \rightarrow N_2 + O_2$ $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O \rightarrow N_2 + O^*$ $O(^1S) + O \rightarrow O + O$ $O(^1D) + N_2 \rightarrow O + N_2$ $O(^1D) + O_2 \rightarrow O + O_2$ $O(^1D) + O \rightarrow O + O$ $O(^1D) + e \rightarrow O + e$
6. Photon Emission	$N_2(B^3\Pi_g) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + h\nu \text{ (} N_2 \text{ 1PG)}$ $N_2(A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+) + h\nu \text{ (} N_2 \text{ VK)}$ $N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + h\nu \text{ (} N_2^+ \text{ 1NG)}$ $O(3p^3P) \rightarrow O(3s^3S^0) + h\nu \text{ (844.6 nm)}$ $O(^1S_0) \rightarrow O(^1D_2) + h\nu \text{ (557.7 nm)}$ $O(^1D_2) \rightarrow O(^3P_{2,1,0}) + h\nu \text{ (630.0, 6.4, 9.2 nm)}$

### 3.2 発光モデルから得られたオーロラの発光強度及び発光強度比と降下電子の平均エネルギーとフラックスの関係

磁力線方向を観測し得られる発光強度は、計算された光子生成率を高度方向に積分した値である。上部境界で与える全エネルギーフラックスを  $1.0 \text{ erg/cm}^2/\text{sec}$  とし、平均エネルギーに対する発光強度の変化を図 3.6 に示す。MSIS86 モデルによる中性大気へのデータは、トロムソにおける 2001 年 10 月 16 日 2000UT のものを用いている。427.8 nm と 670.5 nm は、平均エネルギーが上昇するにつれ緩やかに増加している。630.0 nm と 844.6 nm は平均エネルギーが上昇するにつれ大きく減少していることが分かる。これは、降下電子が持つエネルギーにより電離圏へ侵入できる高度が変化するため起こる。降下電子の平均エネルギーが高ければより低高度まで電子が侵入し中性大気と衝突する。中性大気の密度分布から (図 3.5 参照)、200 km 以上の高度においては酸素原子が窒素分子よりも多く存在している。そのため、電子のエネルギーが比較的低い場合は酸素原子の発光である 630.0 nm と 844.6 nm の発光が強くなり、エネルギーが比較的高い場合には窒素分子の発光である 427.8 nm と 670.5 nm が強くなる。また、禁制線である 630.0 nm は、中性大気の密度の高い低高度の領域では  $\text{N}_2$  との衝突による消光が効果的に働くためその減少はより大きい。図 3.7 には、平均エネルギーを 1 keV とした時の、発光強度のエネルギーフラックスに対する変化を示す。4 波長すべてがエネルギーフラックスが増加するにつれ増大していくのが分かる。これは、4 波長の発光強度が平均エネルギーとエネルギーフラックスの関数になっていることを表している。

単一波長の発光強度からでは降下電子の情報は、平均エネルギーとエネルギーフラックスに何らかの関係がなければ、求めることは出来ない。427.8 nm に対する 630.0 nm と 844.6 nm の発光強度比は、図 3.8 で示されるように平均エネルギーに対して大きく変化する。670.5 nm に対しても同様である (図 3.9 参照)。これらの発光強度比は、図 3.10、3.11 に示されるように全エネルギーフラックスに対してあまり大きく変化しない。つまり、これらの発光強度比は平均エネルギーのみに依存するパラメータと考えられる。このことから、降下電子の平均エネルギーは、発光強度比から求めることができる。平均エネルギーが求めれば、一つの波長の発光強度からエネルギーフラックスを求めることができる。

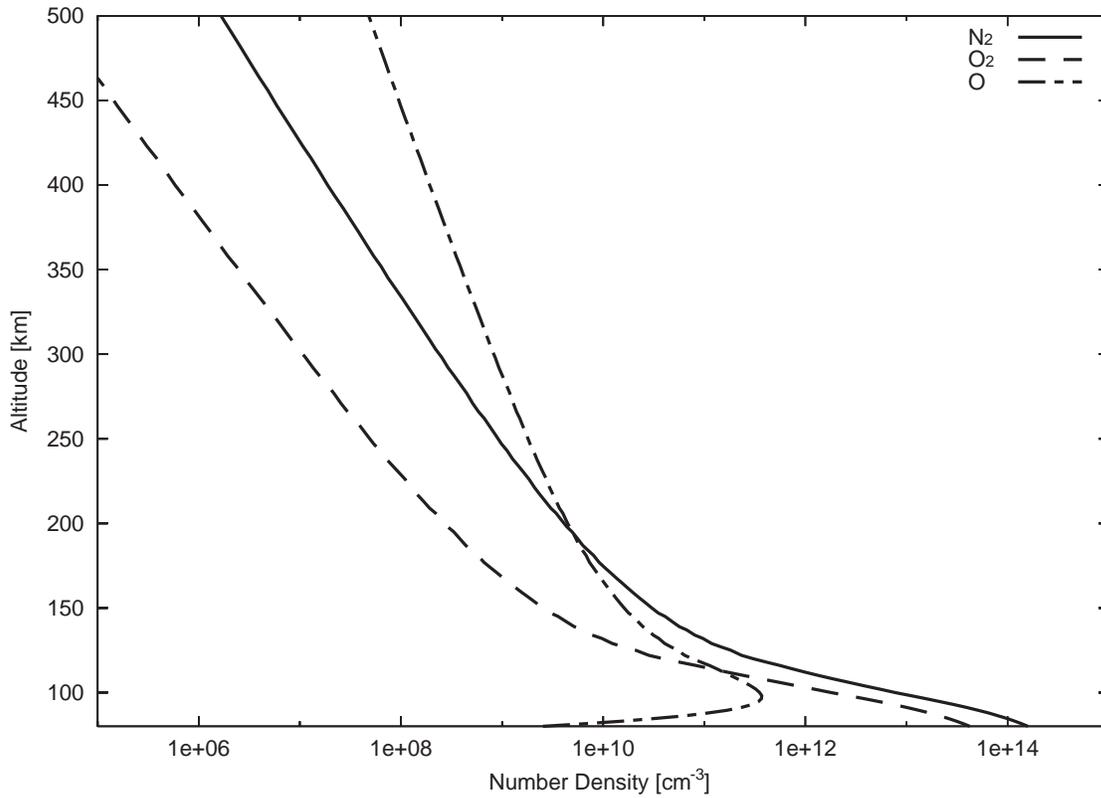


図 3.5. MSIS86 モデルにより計算された窒素分子  $N_2$  と酸素分子  $O_2$ 、酸素原子  $O$  の密度の高度分布。トロムソにおける 2001 年 10 月 16 日 2000 UT のデータを用いて計算した。

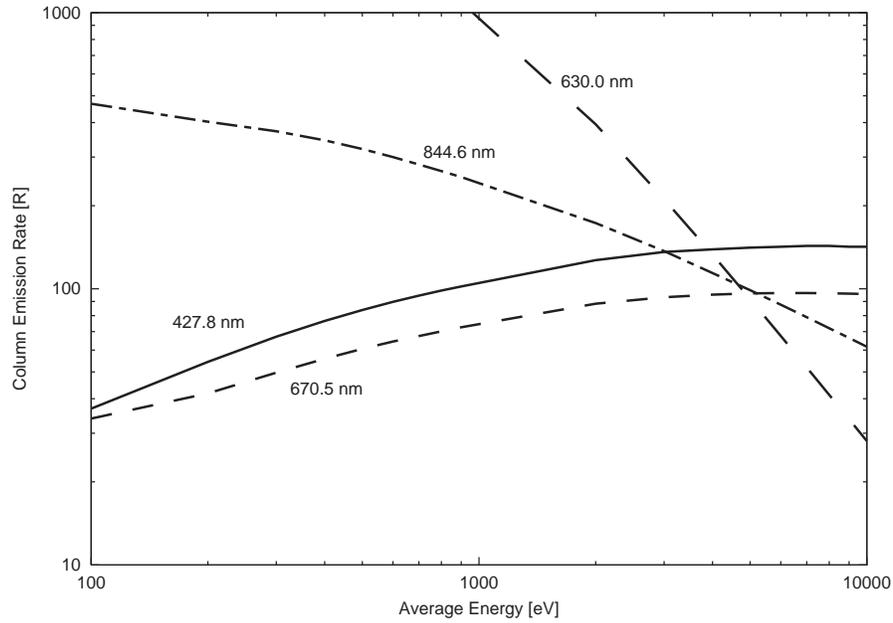


図 3.6. 降下電子の平均エネルギーに対する 427.8 nm、630 nm、670.5 nm、844.6 nm の発光強度の変化。全エネルギーフラックスを  $1 \text{ erg/cm}^2/\text{sec}$  とし計算を行った。

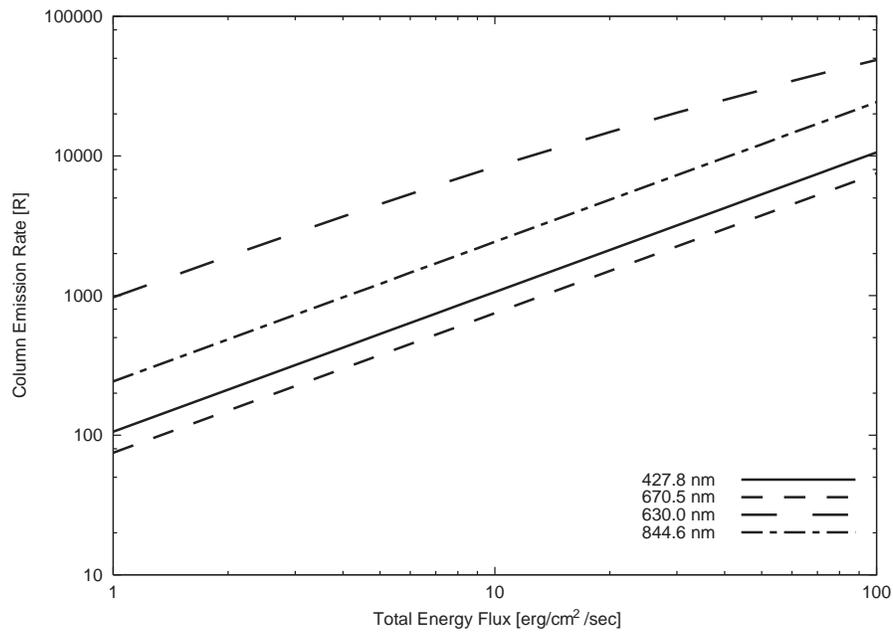


図 3.7. 降下電子の全エネルギーフラックスに対する 427.8 nm、630 nm、670.5 nm、844.6 nm の発光強度の変化。平均エネルギーを 1.0 keV とし計算を行った。

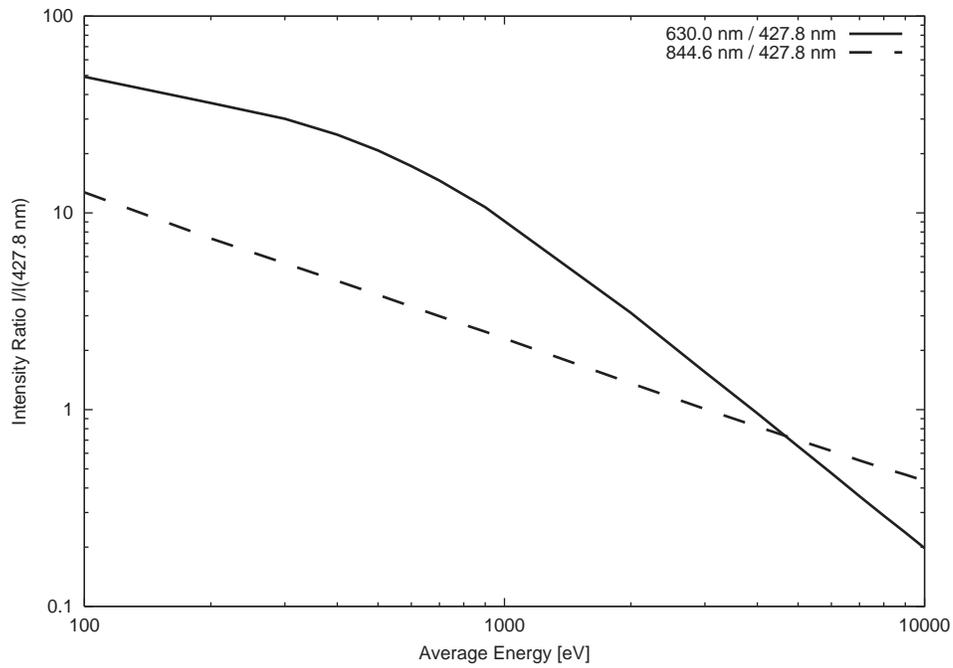


図 3.8. 降下電子の平均エネルギーに対する 427.8 nm と 630.0 nm、427.8 nm と 844.6 nm の発光強度比の変化。

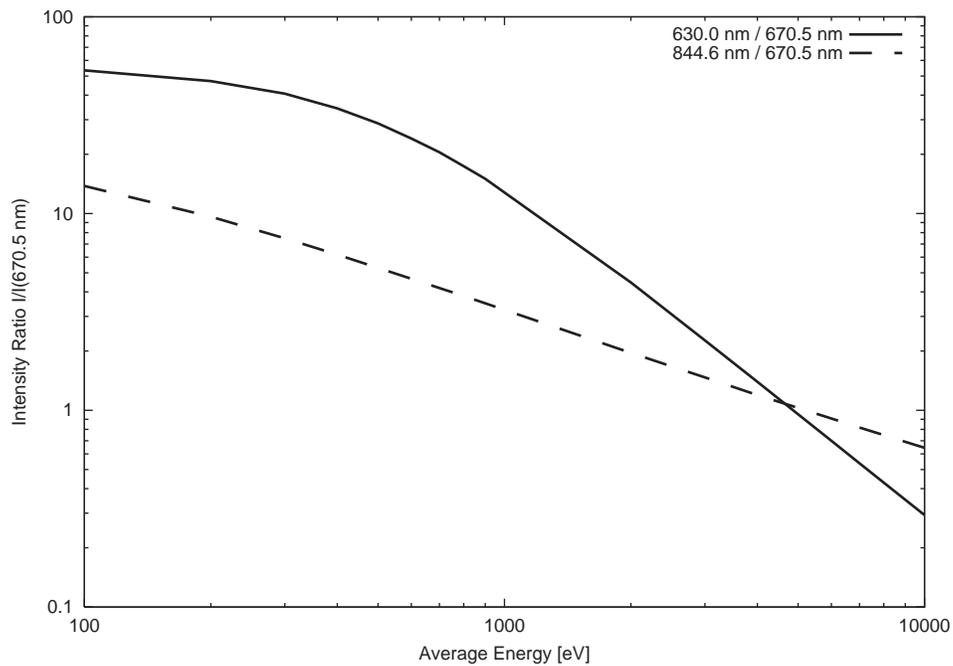


図 3.9. 降下電子の平均エネルギーに対する 4670.5 nm と 630.0 nm、670.5 nm と 844.6 nm の発光強度比の変化。

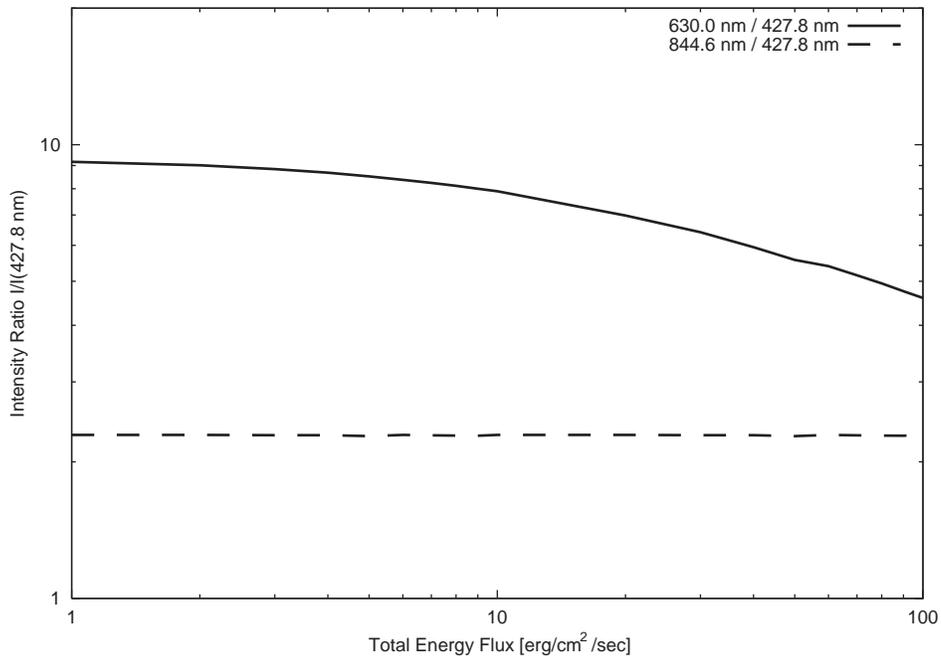


図 3.10. 降下電子のエネルギーフラックスに対する 427.8 nm と 630.0 nm、427.8 nm と 844.6 nm の強度比の変化。

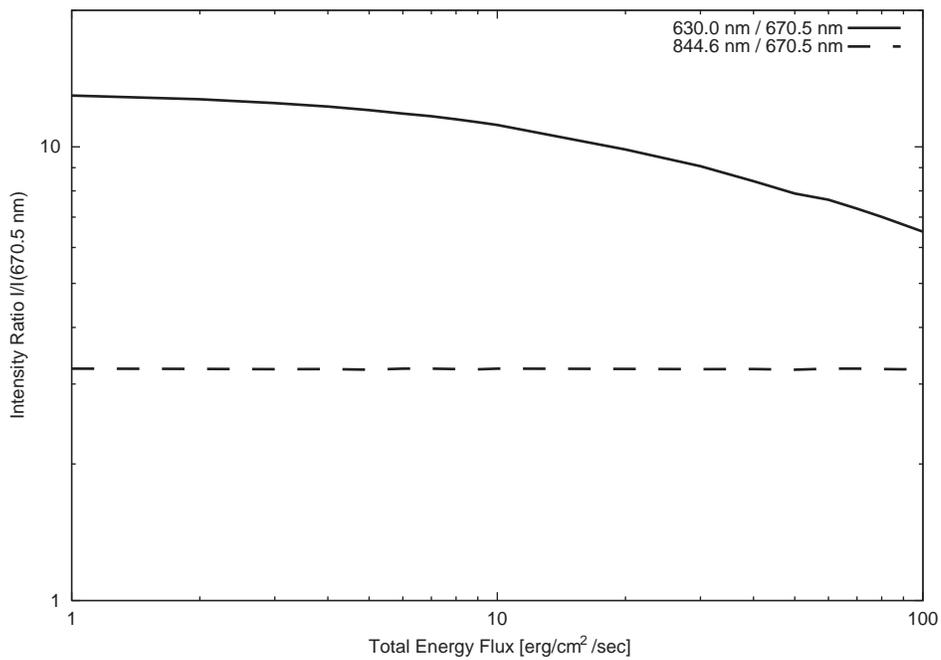


図 3.11. 降下電子のエネルギーフラックスに対する 4670.5 nm と 630.0 nm、670.5 nm と 844.6 nm の強度比の変化。

## 第4章 観測と解析

EISCAT レーダーと同時観測を行うため、我々はトロムソ (北緯 69.6 度 東経 19.2 度、磁気緯度 66.3 度、図 2.17 参照) にフォトメーターを設置した。観測を行ったのは、2001 年 2 月と 2001 年 10 月である。2001 年 10 月以降もフォトメーター観測は定常的に続けているが、本研究では 10 月の観測データのみを使用して物理量の導出を行った。本章では観測及び初期解析結果について述べる。

### 4.1 観測

#### 4.1.1 2001 年 2 月

2001 年 2 月 13 日、EISCAT レーダーサイトにフォトメーターを設置した。降下電子は、磁力線に沿って運動すること、フォトメーターが観測する発光強度は視線方向の積分量となることから、観測方向は沿磁力線方向 (方位 182.8 度、仰角 77.6 度) に固定して行う。水準器を用いてフォトメーターの水平を取り、方位磁針と星を用いて方角を決め、コリメーターで仰角を合わせた。観測小屋は、観測ドームのある部屋と PC などを設置する部屋に分かれており、AC220 V の電源と LAN が配線されている。観測機器は AC100 V 対応なので 220 V から 100 V の交流変圧器を用いている。また観測機器のアースは 220 V のアースから取っている。観測ドームの室温はヒーターにより 15 前後になっている。この観測では、デジタルカメラは無く、高電圧の電源は主電源と連動して切替わり、高電圧のレベル調整は手動で行った。オーロラは、2 月 22 日から 23 日に観測されたが、EISCAT レーダーは動いておらず、オーロラも非常に暗かった。

観測には、センサーに伴うノイズが常時混入しているのに加えて、外的要因のノイズも時として発生している。2001 年 2 月の観測中にオフセットのレベルが大きく階段状に変動するデータが取得された。このノイズは、2001 年 10 月 11 日 12 日 14 日にも発生した。11 月の観測においても同様のノイズが見られる。図 4.1 は、11 月 8 日の観測データである。このノイズの原因を調査したところ、Heating Facility の電離圏加熱実験が行われている時間帯に発生している事がわかった。電磁波を放射する周期とノイズの周期も一致する。加熱実験により大量の電力が消費されるため交流電源の電圧自体がゆれているためであると考えられる。しかし、加熱実験中は、オーロラなどの自然現象の観測は行えないため、このノイズによるフォトメーター観測への影響は少ない。2001 年 2 月の観測は、2 月 23 日に電源のトラブルから終了した。

#### 4.1.2 2001年10月

2001年10月4日、再び観測機器を2月と同じ観測小屋に設置した。前回との変更点は、電源や時刻管理に問題が生じた時のシステム保全のためサンセンサーが取り付けられたことと高電圧の制御が行えるようになったことである。また現象の確認及びオーロラ形態監視のためデジタルカメラによる画像撮像システムを加えた。PCの設定や観測プログラムの調整を行い、9日から定常観測に入った。10月中にオーロラは7晩観測されたが、本研究では表4.1に示した4例の時間帯に関して解析を行う。図4.2-4.8に各チャンネルの発光強度の時間変化とその同じ時間帯の発光強度のスキッタープロットを示す。発光強度は10月10日、28日、31日は0から30 kRの範囲で、10月16日は0から5 kRで表示してある。スキッタープロット内の直線は、発光強度比から求められる平均エネルギーの平均値と上限値を目安として表示してある。10月10日は、2024UT付近に非常に明るい発光が観測されている。10月16日は1900UT付近と1940UT-2100UTに大きく分けて3イベント見られる。16日はEISCATレーダーも稼動していた。10月28日は9イベント、10月30日は大きく3イベント観測されている。デジタルカメラの画像(図4.10)からオーロラの発光であることが分かる。フォトメーターの視野は画像のほぼ中央に位置している。630.0 nmの発光の遅れは、観測データからはっきりと見て取れる。10月31日の観測では特に顕著に見られる(図4.8)。スキッタープロット(図4.9)では、844.6 nmと427.8 nmはある傾きの範囲内に広がっているのに対して、630.0 nmと427.8 nmはy軸方向に伸びた複雑な分布となっている。

表 4.1. 2001年10月の観測結果。

日付	時刻 (UT)
2001年10月10日	2020-2120
16日	1800-2100
28日	1730-1930
31日	2020-2120

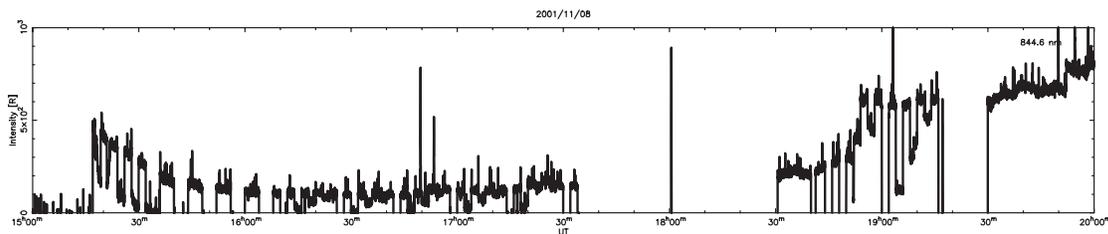


図 4.1. Heating Facility による電離圏加熱実験中のフォトメーターチャンネル4の観測データ。実験は、1400-2000 UTの間に行われていた。

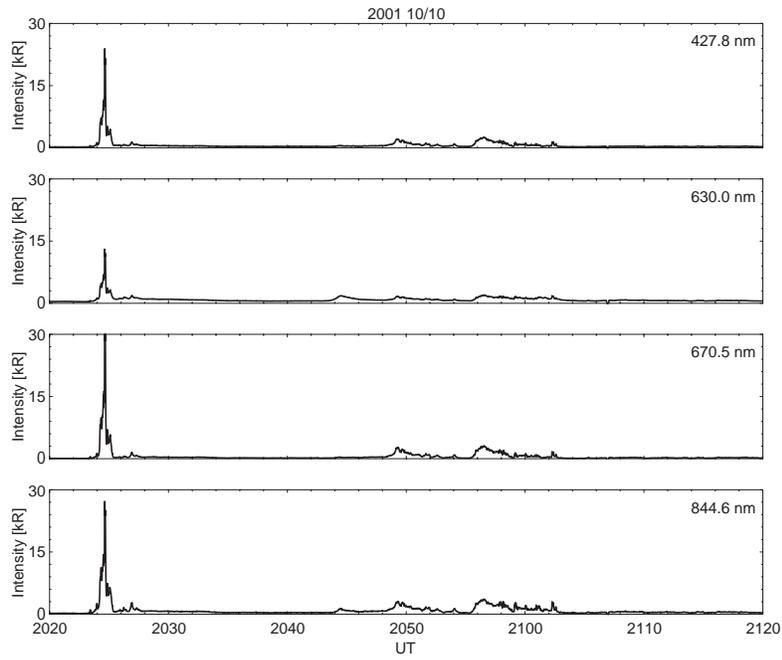


図 4.2. 2001 年 10 月 10 日 2030-2130 UT の観測結果。上からチャンネル 1(427.8 nm)、チャンネル 2(630.0 nm)、チャンネル 3(670.5 nm)、チャンネル 4(844.6 nm) を表示してある。

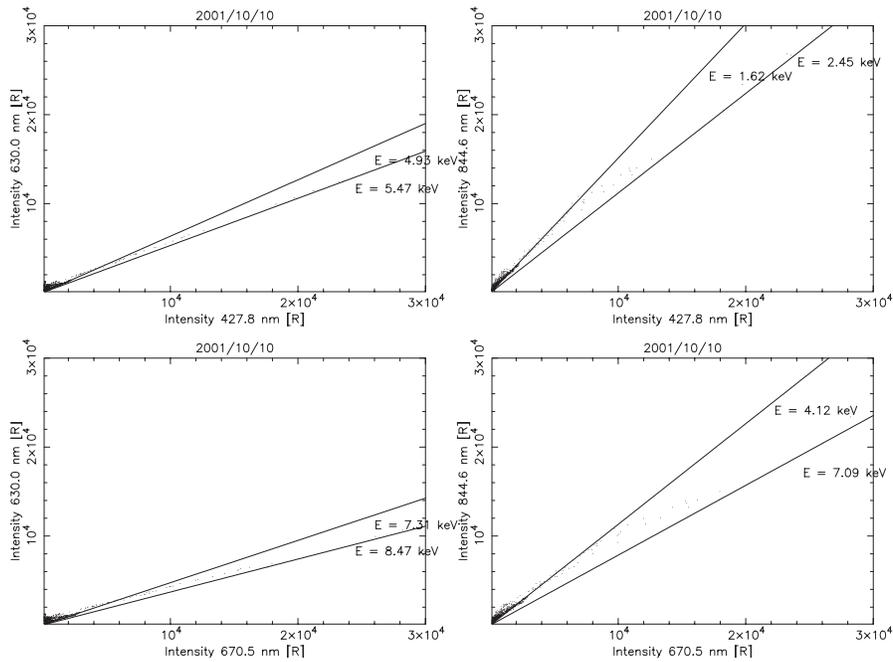


図 4.3. 2001 年 10 月 10 日に観測されたオーロラの発光強度のスクアットプロット。縦軸に 630.0 nm か 844.6 nm、横軸に 427.8 nm か 670.5 nm を取り表示してある。直線は平均エネルギーを表している。

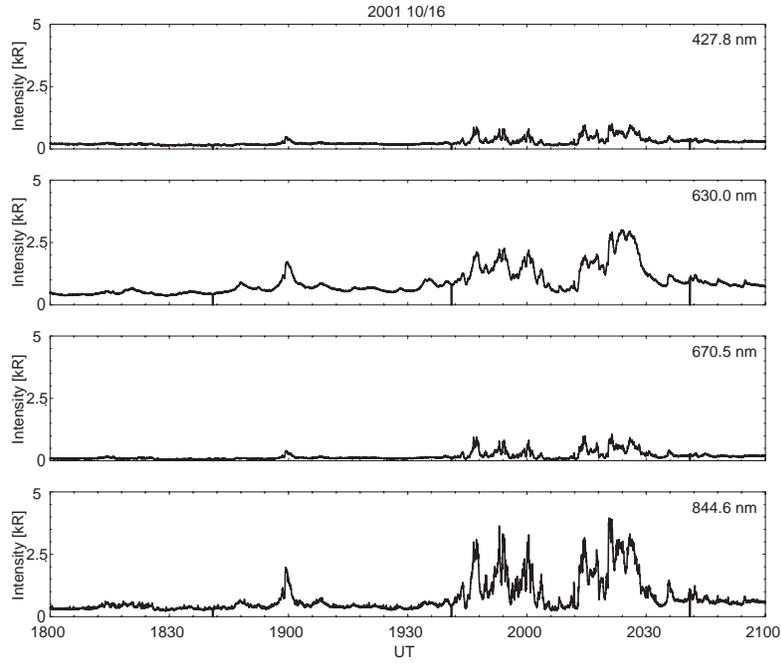


図 4.4. 2001 年 10 月 16 日 1800-2100 UT の観測結果。

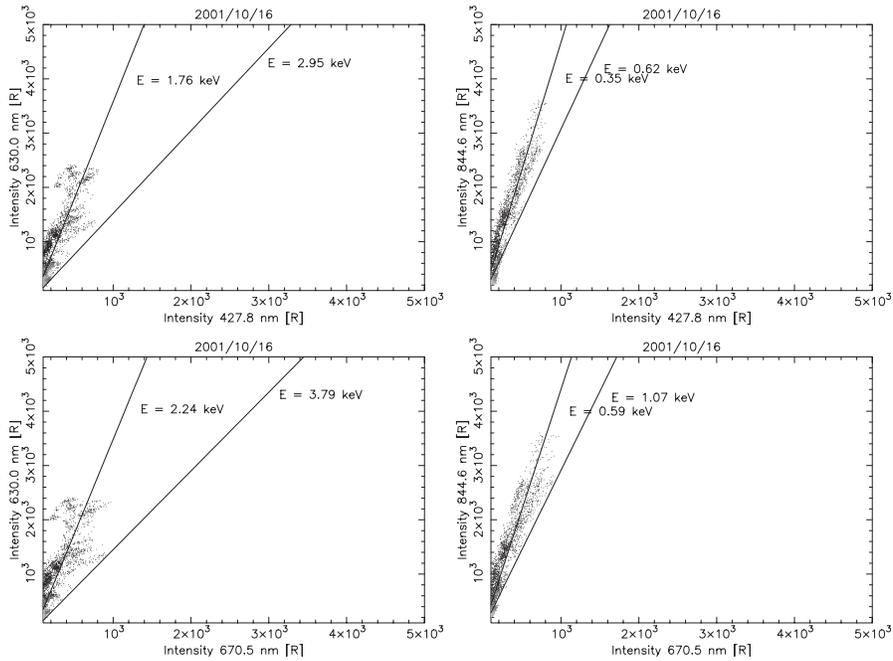


図 4.5. 2001 年 10 月 16 日に観測されたオーロラの発光強度のスカッタープロット。縦軸に 630.0 nm が 844.6 nm、横軸に 427.8 nm が 670.5 nm を取り表示してある。

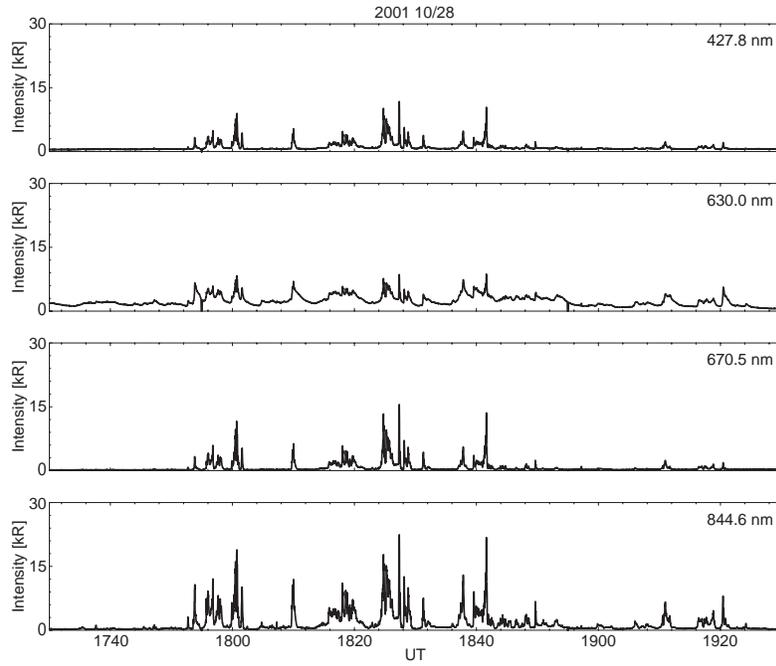


図 4.6. 2001 年 10 月 28 日 1730-1930 UT の観測結果。

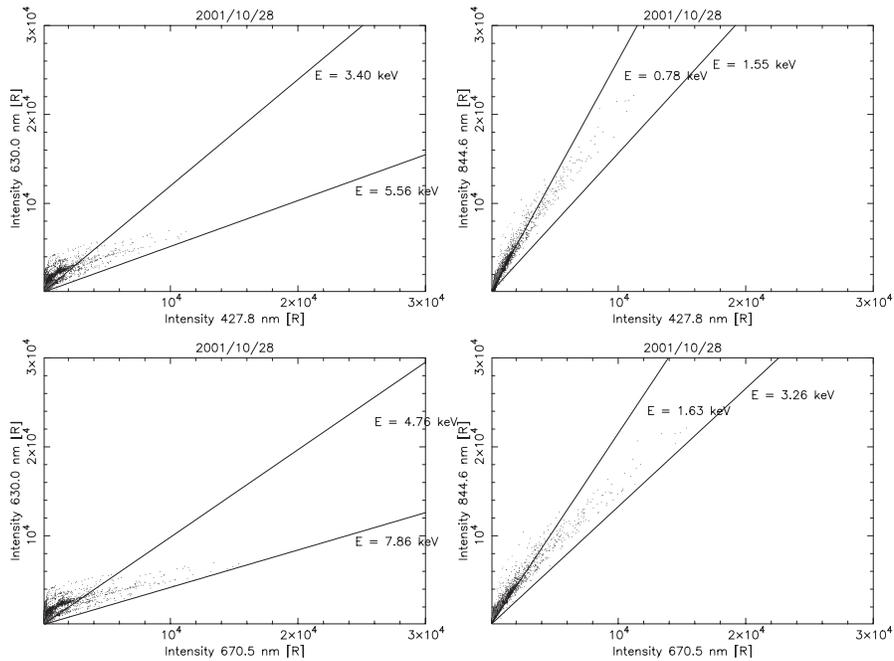


図 4.7. 2001 年 10 月 28 日に観測されたオーロラの発光強度のスキッタープロット。縦軸に 630.0 nm が 844.6 nm、横軸に 427.8 nm が 670.5 nm を取り表示してある。

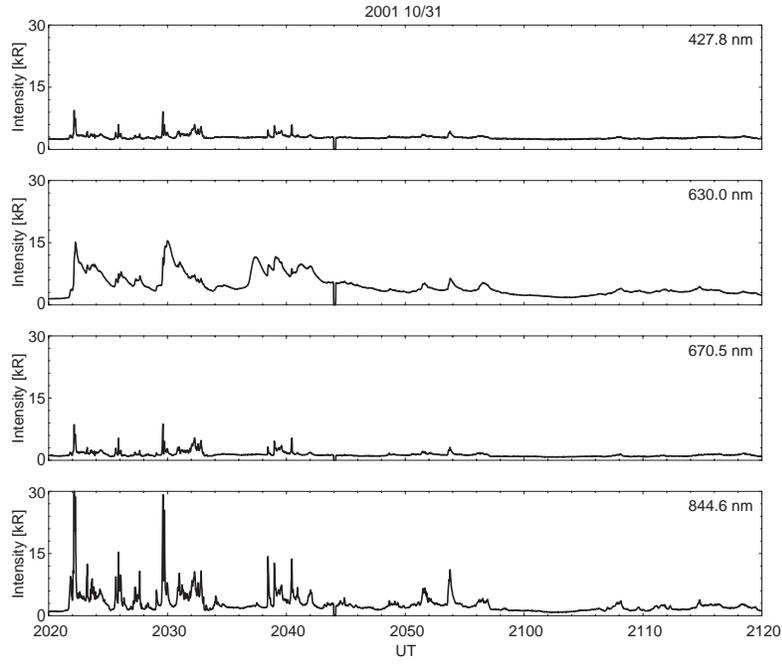


図 4.8. 2001 年 10 月 31 日 2030-2130 UT の観測結果。

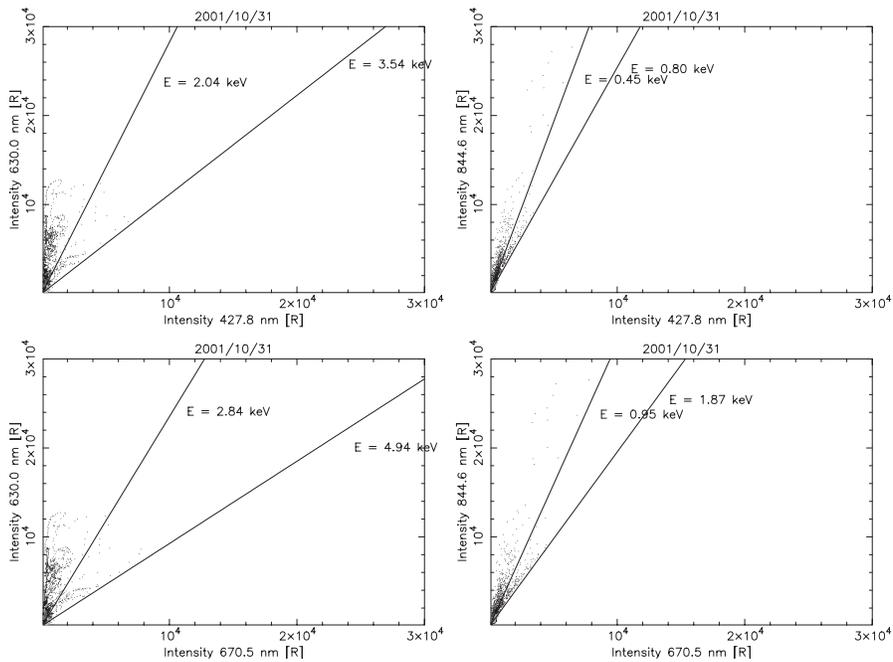
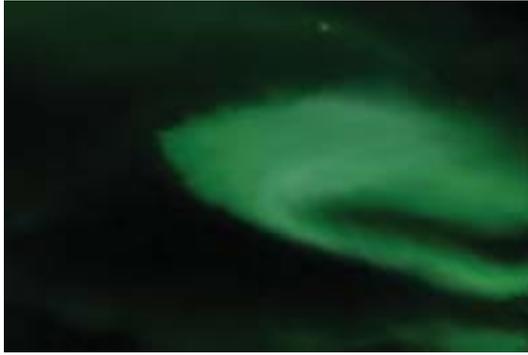
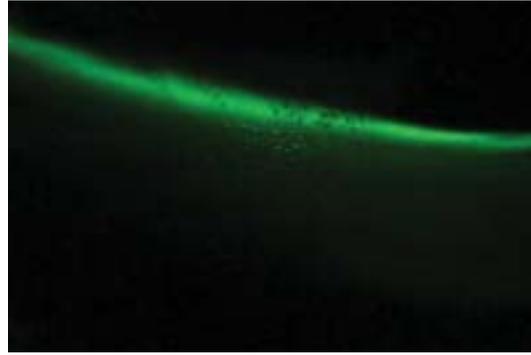


図 4.9. 2001 年 10 月 31 日に観測されたオーロラの発光強度のスカッタープロット。縦軸に 630.0 nm が 844.6 nm、横軸に 427.8 nm が 670.5 nm を取り表示してある。



2001 10/10 2024 UT



2001 10/16 2028 UT



2001 10/28 1825 UT



2001 10/31 2039 UT

図 4.10. デジタルカメラで撮影されたオーロラ。2001年10月10日2024 UTと16日2028 UT、28日1825 UT、31日2039 UTに観測された。露出時間は6秒である。16日の画像は、他に比べ暗かったため明るさ、コントラストを調整してある。フォトメーターの視野は画像のほぼ中央に位置している。

## 4.2 EISCAT レーダー特別実験

2001年10月16-19日にEISCATレーダーの特別実験を行った。観測モードは磁力線方向観測のCP1モード(2.5章参照)である。送信パルスは、およそ700 MWのパワーでCP1Lコードを用いた。また、キルナ、ソダンキラのUHFレーダーは高度292.9 kmの位置を観測していた。観測は、10月16日1600 UTから10月17日0150 UT、10月17日1600 UTから10月18日0300 UT、10月18日1600 UTから10月19日0300 UTの計約32時間行った。フォトメーターとの同時観測に成功したのは、天候の関係から10月16日1800-2100 UTのみであった。この時間帯のデジタルカメラの画像からアーク状のオーロラが発生している事がわかり、肉眼でも確認することが出来た。図4.11の上図は、横軸に世界時で1800UTから2100UTをとり、高度90 kmから400 kmにおける電子密度を $10^{10}$ から $10^{12} \text{ m}^{-3}$ の範囲のカラーコンターで表示してある。下図は、同じ時刻におけるフォトメーターの4チャンネル(844.6 nm)の発光強度(kR)を表示してある。1900UT付近と1940-2010UT、2010-2030UTに発光強度が増加し、それに伴い下部電離圏での電子密度の増大が見られる。電子密度増加は、それぞれの時間帯で異なった様相を見せている。2010UT - 2030UTではより低高度まで電子密度が増加していることからよりエネルギーの高い電子が降り込んで来たことが予測される。

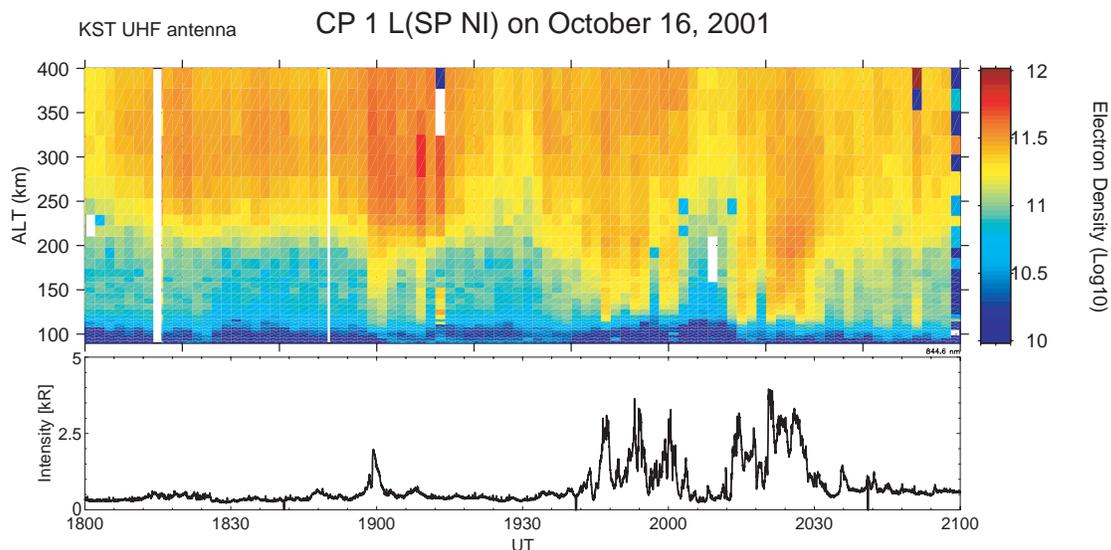


図 4.11. EISCAT レーダーにより観測された電子密度とフォトメーターチャンネル4の観測データ。

### 4.3 解析方法

フォトメーターの観測データは、表 2.5 のように保存されている。この観測値を  $x$  とすると、それぞれの発光強度  $I$  は、

$$I_n = \frac{((x * 4096/10.0) - a_n)}{b_n} \quad (4.1)$$

と書ける。 $n$  はチャンネルを表す。 $a$  と  $b$  は、光電子増倍管に加える高電圧により決まる定数で、図 2.9 の切片 (オフセットに対応) と傾き (感度の逆数に比例) に対応する。

これらの定数は、較正作業から得られる。しかし、較正に用いる積分球光源は図 2.12 に示すように白色光である。干渉フィルターによりオーロラの発光のみを取り出せばよいのだが、その半値幅はオーロラの発光よりも広がっている (図 2.8 参照)。そのため、エネルギー較正作業から得られた光度と出力電圧の關係に補正が必要となる。フォトメーターの感度波長域内には過去の観測から他の明るい輝線は無いので、観測するオーロラ発光の幅の全感度幅に対する割合を求め、観測値に掛け合わせることで補正を行った。図 2.9 は補正された値である。

光電子増倍管は、高電圧を加えると光が照射されなくてもある程度の電流を出力する。これを暗電流 ( $x_{dark}$ ) と呼ぶ。観測値にはこの暗電流が含まれている。観測では、1 時間に 1 度シャッターを閉じ暗電流を測定している。解析では 1 時間ごとに測定した暗電流をその値が含まれるファイルの観測値から差し引くことで補正を行った。

観測値には、オーロラ発光以外の光 (月の散乱光や人工光) も含まれている。これらの光とオーロラ発光を分けることは難しい。本研究では、フォトメーター観測データとデジタルカメラの画像からオーロラが発生していないと考えられる時間帯を選び出し、その時間帯の発光強度の平均値を背景光 ( $I_{other}$ ) と考え、差し引くことで補正を行った。これらの補正を考慮すると発光強度は、

$$I_n - I_{other} = \frac{(((x * 4096/10.0) - x_{dark}) - a_n)}{b_n} \quad (4.2)$$

となる。

## 4.4 結果

本研究では、844.6 nm と 427.8 nm、844.6 nm と 670.5 nm の発光強度比を用いて平均エネルギーを計算し、427.8 nm と 670.5 nm の発光強度の絶対値から全エネルギーフラックスを求めた。フォトメーターの観測精度は較正作業から数レイリー以下であると見積もられるが、背景光の影響などを考え、解析には100レイリーを超える発光のみを使用した。図4.12から図4.19にその解析結果を示す。それぞれの図において、横軸に世界標準時(UT)をとり、上から順に平均エネルギー(keV)、全エネルギーフラックス(erg/cm<sup>2</sup>/sec)、導出に用いた2つの波長の発光強度(kR)を対数目盛りで表示してある。10月10日の2020UTから2035UTでは、1から2 keVのエネルギーを持った電子が約10分間にわたり降り込んで来ていることが分かる。また平均エネルギーには大きな変動は無いがエネルギーフラックスと発光強度には大きな変動があることが分かる。10月16日は、発光自体も暗く、平均エネルギーが1 keV弱、エネルギーフラックスが10 erg/cm<sup>2</sup>/secと他の日より小さい。しかし、10月10日と比べ比較的 average エネルギーとフラックスが同期して変動している。10月28日については10月10日と同様のことが言え、およそ1 keVの電子が1時間に渡って降り続いていたことが分かる。10月31日は、平均エネルギーが10月10日、28日よりも若干少ない。また、エネルギーフラックスと同期はしていないが平均エネルギーが大きく変動している様子が見られる。図4.20から図4.23に、導出された平均エネルギーと全エネルギーフラックスの関係を示した。10月10日、28日のスキッタープロットからは、これまでのオーロラークの研究からも示されている  $E_t = kE_0^\gamma$  ( $\gamma \sim 2.0$ ) の関係があるが、10月16日、31日にはあまりよい相関が見られない。また、427.8 nm を用いた時に比べ670.5 nm を使用した時に平均エネルギーが高く計算されていることが分かった。

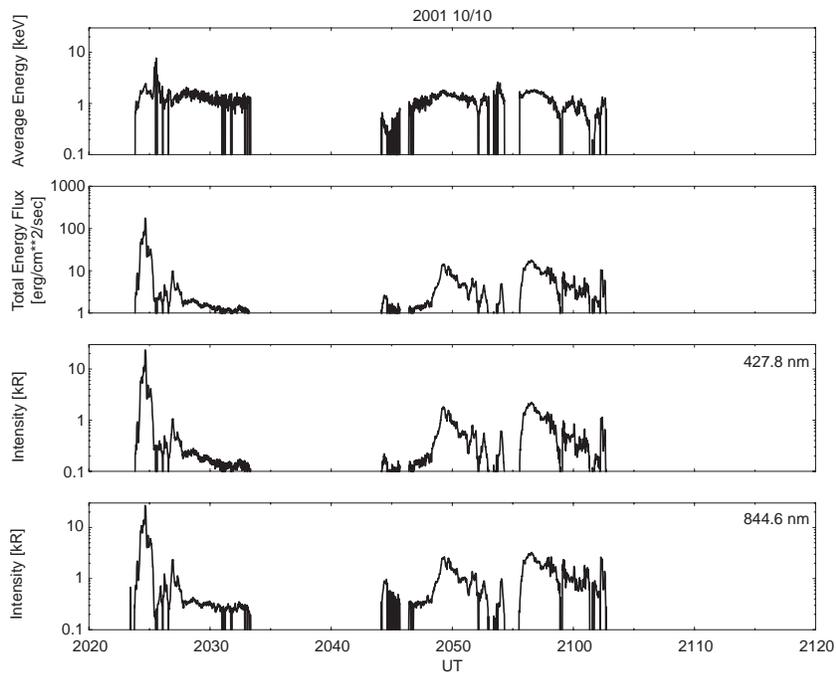


図 4.12. 2001 年 10 月 10 日に観測された 427.8 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

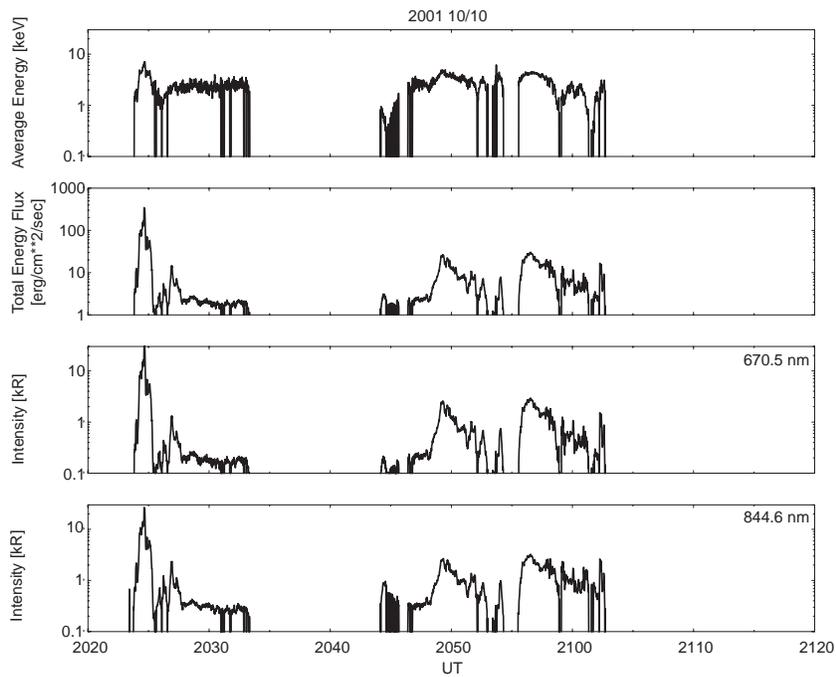


図 4.13. 2001 年 10 月 10 日に観測された 670.5 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

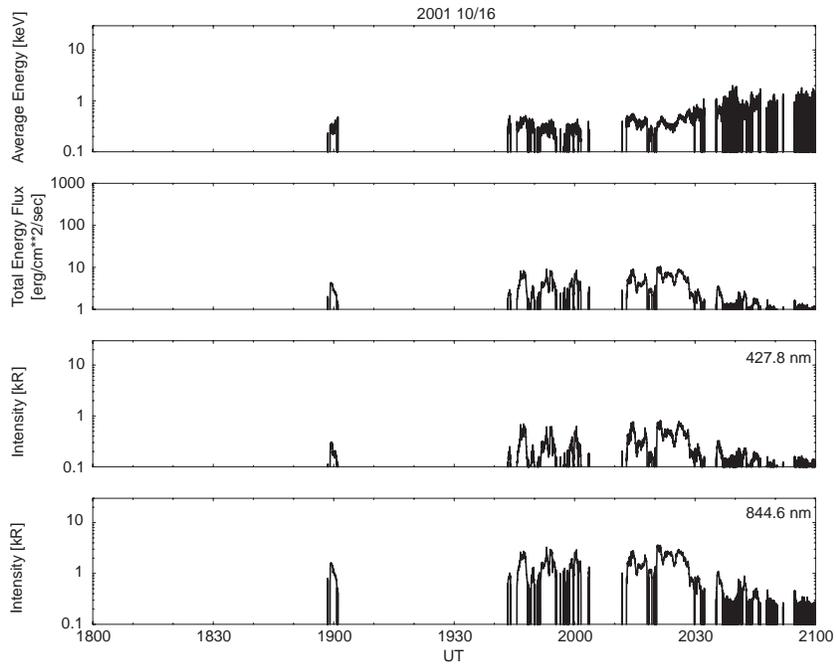


図 4.14. 2001 年 10 月 16 日に観測された 427.8 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

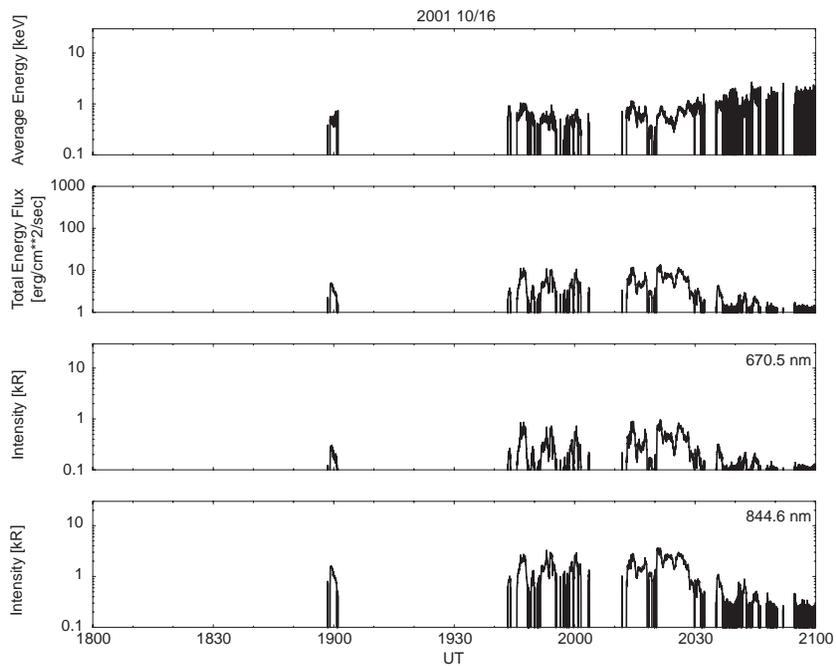


図 4.15. 2001 年 10 月 16 日に観測された 670.5 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

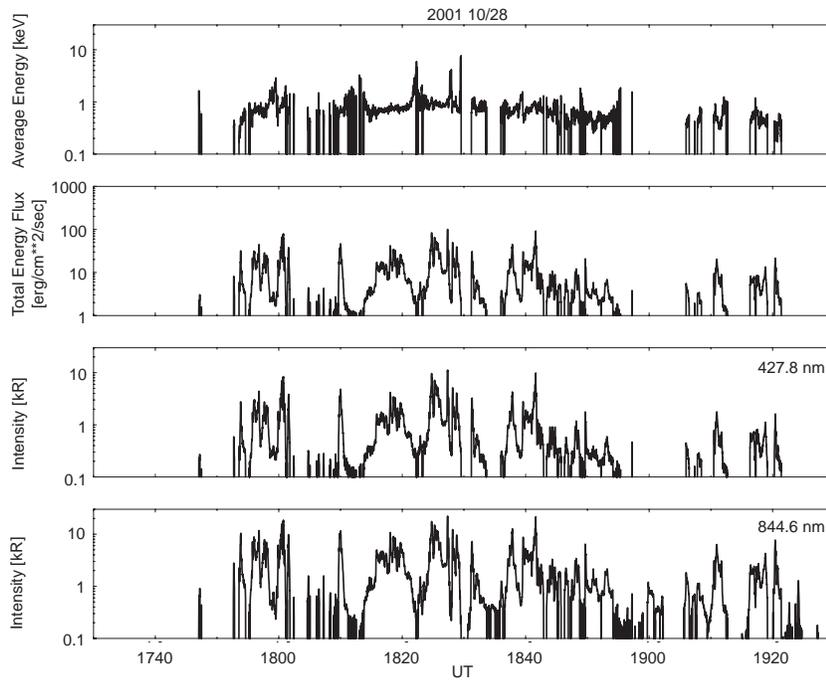


図 4.16. 2001 年 10 月 28 日に観測された 427.8 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

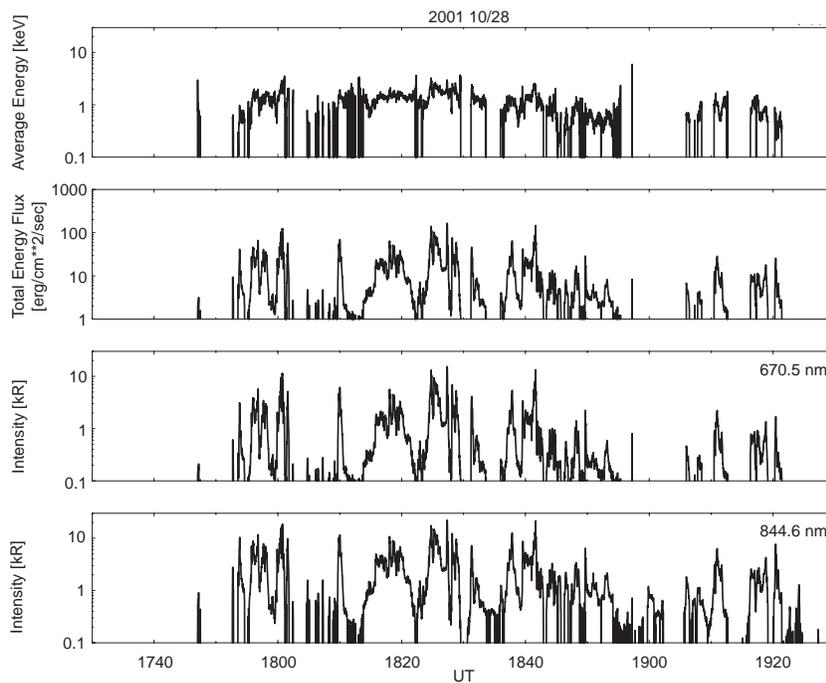


図 4.17. 2001 年 10 月 28 日に観測された 670.5 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

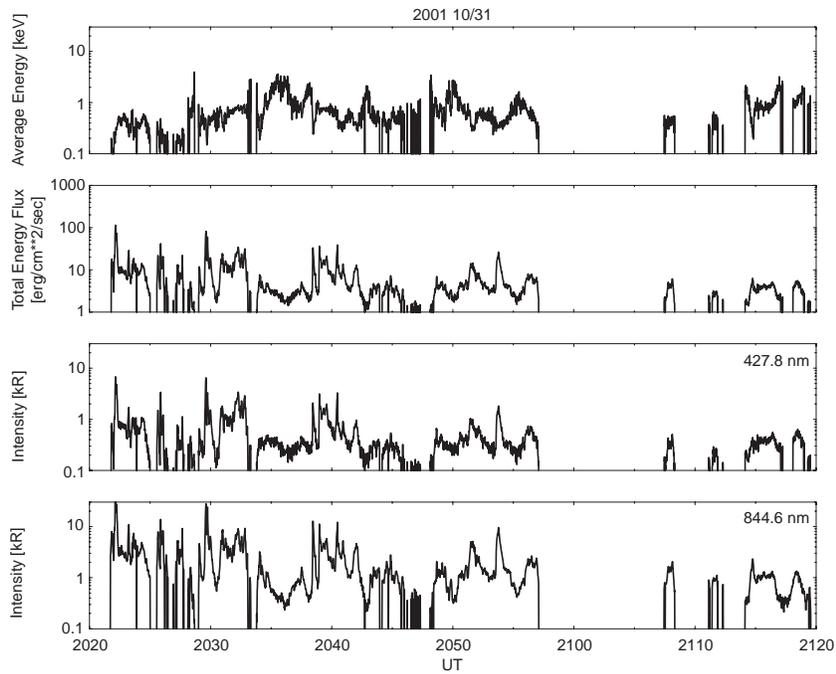


図 4.18. 2001 年 10 月 31 日に観測された 427.8 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

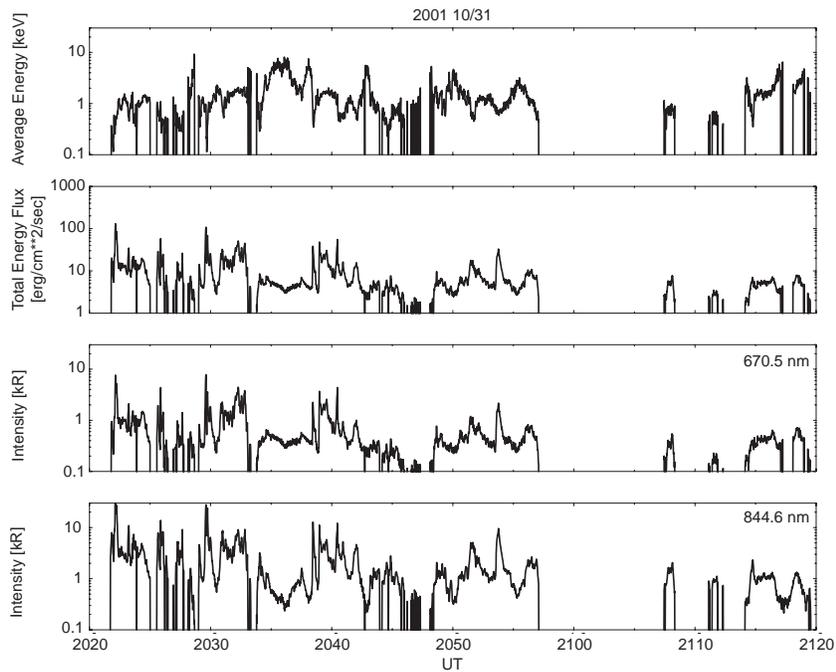


図 4.19. 2001 年 10 月 31 日に観測された 670.5 nm と 844.6 nm の発光強度から求められた降下電子の平均エネルギーと全エネルギーフラックス。

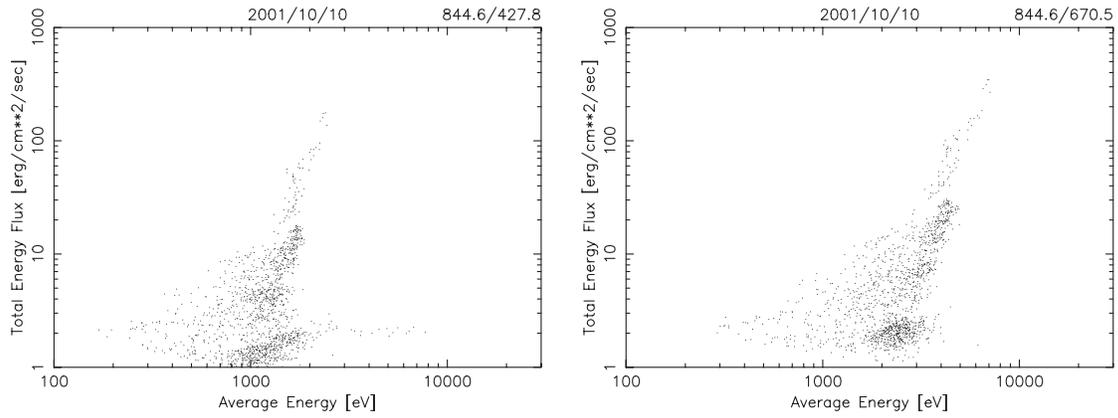


図 4.20. 2001 年 10 月 10 日に観測されたオーロラの発光強度から求めた平均エネルギーと全エネルギーフラックスの関係。

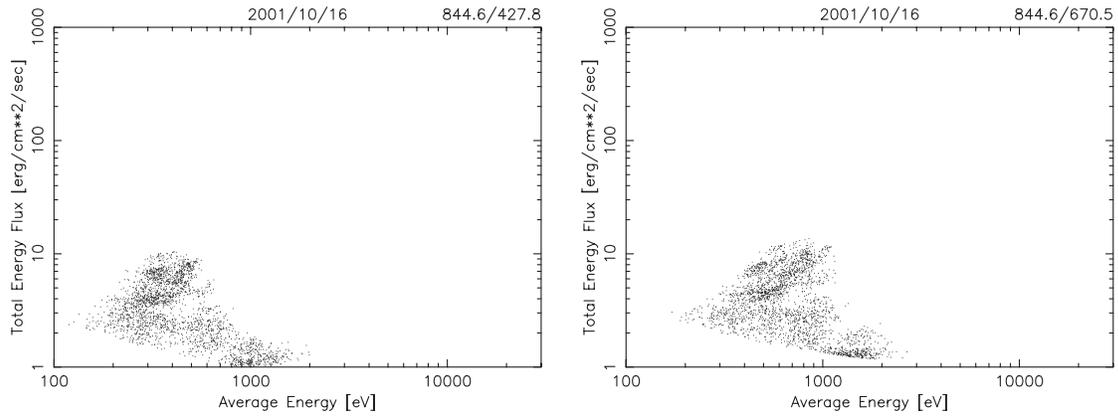


図 4.21. 2001 年 10 月 16 日に観測されたオーロラの発光強度から求めた平均エネルギーと全エネルギーフラックスの関係。

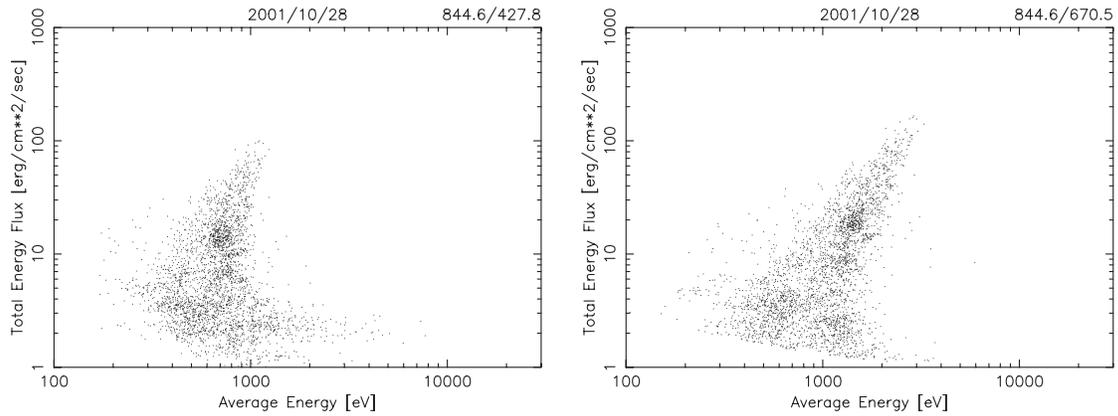


図 4.22. 2001 年 10 月 28 日に観測されたオーロラの発光強度から求めた平均エネルギーと全エネルギーフラックスの関係。

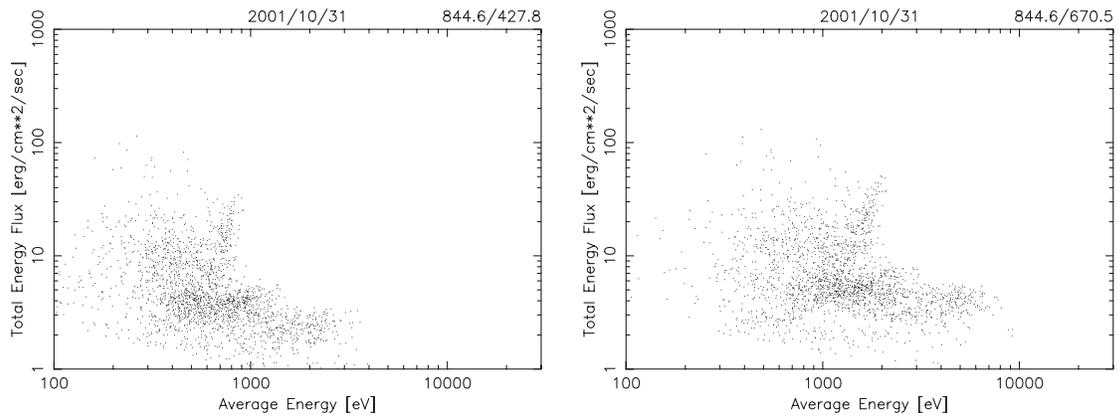


図 4.23. 2001 年 10 月 31 日に観測されたオーロラの発光強度から求めた平均エネルギーと全エネルギーフラックスの関係。

## 第5章 考察とまとめ

### 5.1 発光強度の組み合わせによる違いから生じた平均エネルギーの相違

図 5.1、5.2 に示すように 844.6 nm と 427.8 nm の発光強度比から導出された平均エネルギーと 844.6 nm と 670.5 nm の発光強度比から導出した平均エネルギーに相違が生じた原因としては、主に大気吸収散乱の効果と干渉フィルターの半値幅に対するオーロラ発光の幅の見積もりの問題が考えられる。

可視領域の散乱としてはレイリー散乱とミー散乱がある。レイリー散乱はまわりの空気分子による散乱で光学的厚さは  $\lambda^{-4}$  に比例する。ミー散乱は大気中のエアロゾルや雲粒による散乱でありその効果を見積もるのは簡単ではない。波長が短い 427.8 nm はこれらの散乱を 670.5 nm よりも受けやすい。そのため観測された発光強度は、実際電離圏で放射された発光強度よりも弱くなり、発光強度比が大きくなるため平均エネルギーは小さく見積もられると考えられる。

各チャンネルの干渉フィルターの半値幅は、図 2.8 に示されている。本研究における解析では、この半値幅に対してオーロラ発光の波長幅を仮定し補正を行っている。輝線である 630.0 nm や 844.6 nm は、中性大気の運動によるドップラーシフトが考えられるが発光波長幅は狭い (3 nm 以下) のものである。これに対しバンド発光である 427.8 nm や 670.5 nm は数 nm の幅を持って発光している。特に 670.5 nm は、周囲の大気温度により変化する回転温度により波長幅が変化する。正確に言えば、回転温度によりバンド内に含まれる回転線の発光強度比が変化する。オーロラの発光が起こっているような周囲の大気温度が著しく変動する場合その波長幅の決定は難しい。現在はその波長幅を 665.5-670.5 と仮定して補正を行ったが不確定さは大きい。また、427.8 nm については干渉フィルターの中心波長が大きすぎていたためこの補正から十分正確な値が得られているかは疑問が残る。

図 5.3 に両者から導出された平均エネルギーのスカッタープロットを示した。この図から両者から導出した平均エネルギーには正の相関があり傾きもほぼ 1 となるが全体的に上方向にシフトした分布になっていることが分かる。全体的なばらつきは、自然現象による誤差であると考えられるが、上方向へのシフトは観測システムもしくは解析における系統的な誤差であると考えられる。

### 5.2 EISCAT レーダー観測と導出された平均エネルギーの比較

発光強度比から求められた平均エネルギーと下部電離圏における電子密度の変動の相関を調べた。図 5.4 に、1856UT と 1858UT、1946UT、2026UT における EISCAT レーダーで観測された電子密度の高度プロファイルと、1856-1902UT と、1940-2010UT、2010-2030UT

における 670.5 nm と 844.6 nm の発光強度のスカッタープロットを示した。1856UT は、オーロラの発光も無く降下電子の効果がほとんど無い状態である。発光強度比から求められた平均エネルギーの上限値が 0.74、1.05、1.16 keV と上昇するにつれ、電子密度が高度 130 km 付近で増加している事がわかる。このことは、平均エネルギーが高い電子が降下してきた場合、より低高度での電離を促進させるという理論的予測と合っている。また、図 5.4 下図でスカッタープロットの分布が右上に伸びているのはフラックスが多いことと対応している。電子密度の変動は 2026UT が最も大きく、フラックスの変動とも良い一致を示す。これらのことは、844.6 nm と 427.8 nm、670.5 nm の発光強度比は、第 3 章で示したように降下電子の平均エネルギーやフラックスの良い指標となっていることを示している。

### 5.3 まとめと今後の計画

我々は、オーロラの発光輝線間の強度比から得られる降下電子の平均エネルギーとエネルギーフラックスの検証を EISCAT レーダーとの同時観測から行っている。トロムソの冬の天候と EISCAT レーダーの稼働時間から考えて同時観測の機会は多くはない。同時観測の機会を逃さないため、本研究ではフォトメーター観測システムの自動定常化を行った。フォトメーター観測システムは、PC から自動定常的に、また必要ならば遠隔地からネットワークを介して主電源やシャッター、光電子増倍管に印加する高電圧電源、高電圧レベルの調整を行うことができる。また、画像撮像システムを構築しフォトメーター観測と共に 1 分間に 1 枚の画像の取得を行っている。この画像撮像システムはデジタルカメラを用いたシンプルなもので、フォトメーター観測システム同様 PC から制御が行える。画像から現象の確認が行えることは解析を行う上で有益な情報であり、オーロラの形状の情報も得ることができる。フォトメーター及び画像撮像用デジタルカメラ観測システムは、2001 年 10 月 9 日より自動定常観測を行っている。

2001 年 10 月の観測では 7 日間にオーロラが観測された。そのうち 4 日分のデータを解析した結果、明るいディスクリートオーロラの発光強度比から得られた平均エネルギーとフラックスには相関が見られた。10 月 16 日の観測では、EISCAT レーダーと同時観測を行った。発光強度比から求めた平均エネルギーとフラックスは電子密度の変動と良い相関が見られた。

本研究では、我々の観測に発光強度の絶対値の問題、オーロラ発光モデルの問題などがある事がわかった。発光強度の絶対値が初期解析を行っている現段階で正確に求められていない点については、干渉フィルターの透過波長に対するオーロラ発光の波長幅の問題が大きいと考えられ、この較正及び補正作業を行う必要がある。発光モデルについては本研究ではあまり議論しなかったが検討の余地がある。初期条件として上部境界 (500 km) に与える降下電子のエネルギー Spektrum はガウス分布を仮定しているが、ディフューズオーロラなどには不適切であり、ディスクリートオーロラに対しても完全であるとは言えない。発光モデルは中性大気密度に依存しており、MSIS86 モデルから得られた O や O<sub>2</sub> の密度は、オーロラ発光が起こっているような局所的な場所では数分の 1 から数倍になる可能性を持っている。また、オーロラ発光には、電子のみではなくイオン (主に H<sup>+</sup>) の降り込みによるプロトンオーロラが存在する。発光強度はエレクトロンオーロラに比べ小さ

いが、 $N_2^+$  の 1NG バンド (391.4 nm、427.8 nm など) や O の輝線 (557.7 nm、630.0 nm など) の発光があるため完全に無視することはできない。これらのことを踏まえモデルの改良を行っていく必要がある。

光学観測から求められる物理量の正当性が確認されれば様々な研究への応用が期待される。降下電子は、磁気圏や電離圏のみでなく極域の熱圏のダイナミクスにも大きく関わっている。さらに、磁力線方向のみではなく 2 次元的な観測からも降下電子の物理量を推定することができればその応用範囲はさらに広がる。我々のグループでは、オーロラに伴う 3 次元電流系を電離圏における 2 次元電離圏電流の空間時間分布を観測的に決定することにより導出し、磁気圏-電離圏結合のエレクトロダイナミクスの解明を目指している。しかし、衛星や IS レーダーを用いて降下電子の情報を空間的に高分解能で観測することは難しい。2 次元的な観測を行える光学観測ならば、TV カメラ方式を用いた全天観測を多地点で行いトモグラフィー手法を併せ用いることによりオーロラ光の 3 次元分布を求めることが可能となり、降下電子の空間分布を得ることができる。そのため今後は、EISCAT レーダーとの同時観測をさらに増やし、最も単純で不確定さの少ない磁力線方向において導出方法の確立を行い、それをさらに 2 次元的なオーロラ分布へと応用発展していく計画である。

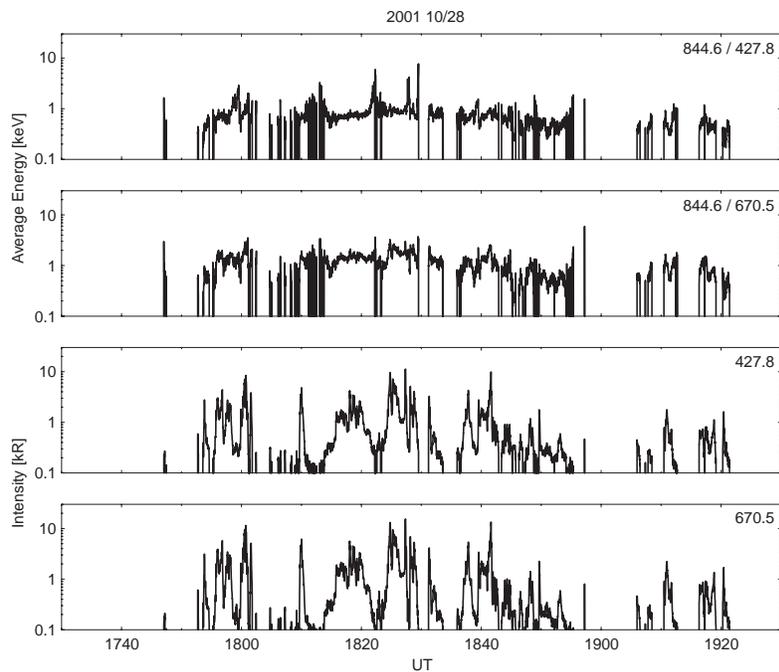


図 5.1. 導出された平均エネルギーの 427.8 nm と 670.5 nm による違い。10 月 28 日の解析結果。

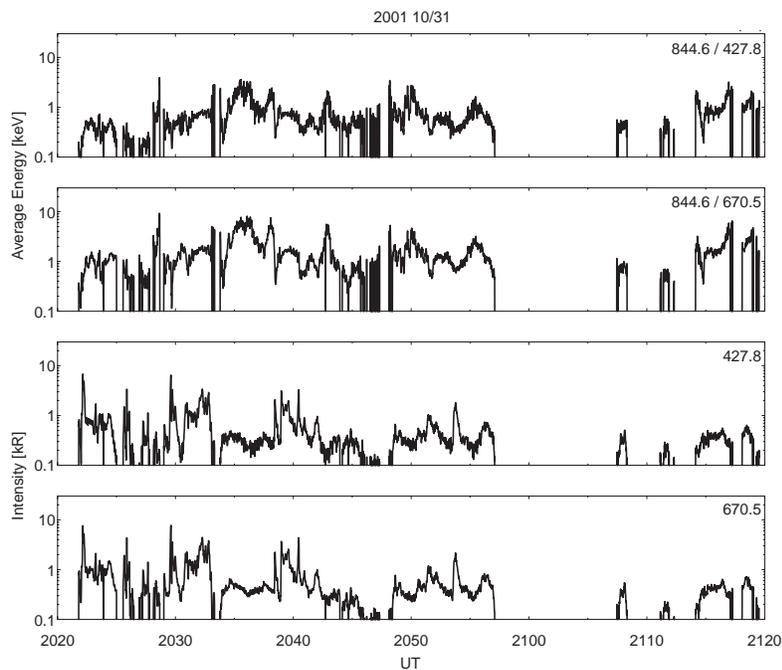


図 5.2. 導出された平均エネルギーの 427.8 nm と 670.5 nm による違い。10 月 31 日の解析結果。

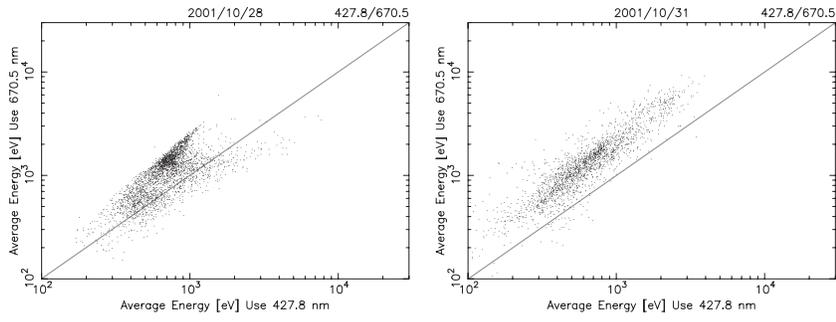


図 5.3. 844.6 nm と 427.8 nm、670.5 nm により導出された平均エネルギーのスキッタープロット。

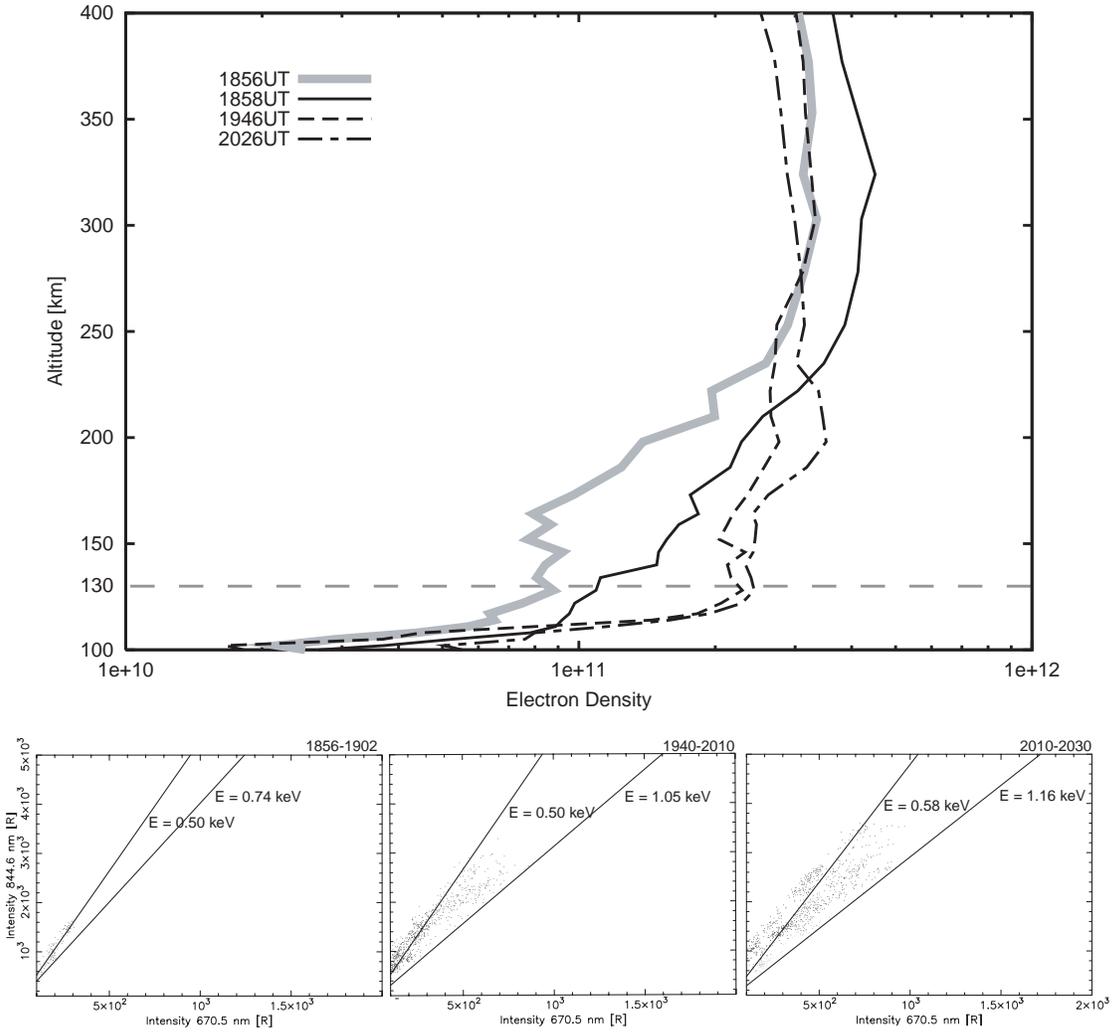


図 5.4. EISCAT レーダーにより観測された電子密度の高度分布 (上) と 844.6 nm、670.5 nm の発光強度のスキッタープロット (下) の変化。

## 謝辞

本研究に関し幅広い視野からご指導いただき、トロムソでの観測の機会を与えて下さった藤井良一教授に深く感謝いたします。日々の研究生生活からトロムソにおける観測、EISCATデータ解析など様々な面でご指導、ご助力いただいた野澤悟徳博士に深く感謝いたします。オーロラ発光モデルを提供していただき、また様々な助言を与えていただいた東北大学の小野高幸教授に深く感謝いたします。観測機器や解析に至るまで様々な助言を頂いた通信総合研究所の大山伸一郎氏に感謝の意を表します。観測装置の改良において電子回路作成などご助言、ご作業いただいた山口敏明氏に感謝の意を表します。観測機器やモデルにおいてご指導いただいた塩川和夫助教授に深く感謝いたします。

フォトメーターの較正作業を行うにあたり国立極地研究所の皆様には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

トロムソにおける研究活動や観測活動において様々なサポートを頂いたトロムソ大学のAsgeir Brekke 教授、Chris Hall 教授に深く感謝いたします。

研究生生活において様々な助言を頂いた小川泰信氏、杉野正彦氏に感謝の意を表します。日々の研究生生活において切磋琢磨し共に研究活動を行った今井田星子氏、日々の研究やトロムソでの観測作業においてお世話になった河野正樹氏に心から感謝いたします。フォトメーター観測システムの構築や較正作業を手伝っていただいた岩橋弘幸氏、隅山智子氏、玉川貴文氏に感謝の意を表します。

最後に、研究および学生生活においてお世話になりました友人、家族に心から感謝いたします。

# 付録A プログラム

## A.1 パラレルポート

パラレルポートは、数個の8ビットポートから構成されている。出力ポートに書き込まれたデータは、信号として25ピンコネクタの出力ピンに出力される。また、入力ピンから読み出すデータは、入力ピンにおける現在の論理レベルを表す。パラレル信号に使用されるのは標準的なTTLレベル(0Vと5V)である。図A.1にビット仕様を示す。12個の出力ビットと5個の入力ビットにアクセスすることが可能であるが1、11、14、17ピンは論理反転されている。パラレルポートからデータを出力するためのプログラムを以下に示す。

```
void output()
{
    int port = 0x378;          //パラレルポートのベースアドレス
    int size = 8;
    int output_data = 0x01;

    /* アドレス 0x378 に対して 8 バイト分の I/O ポート空間の使用許可を得る*/
    if(ioperm( port, size, 1)){
        perror("ioperm");
        exit(1);
    }

    /* パラレルポートから 1 秒間データを出力
       データが 0x01 なので 2 番ピンにパルスを発生させる。*/
    outb(output_data, port);
    sleep(1);
    outb(0x00,port);

    if(ioperm( port,size, 0)){
        perror("ioperm");
        exit(1);
    }
}
```

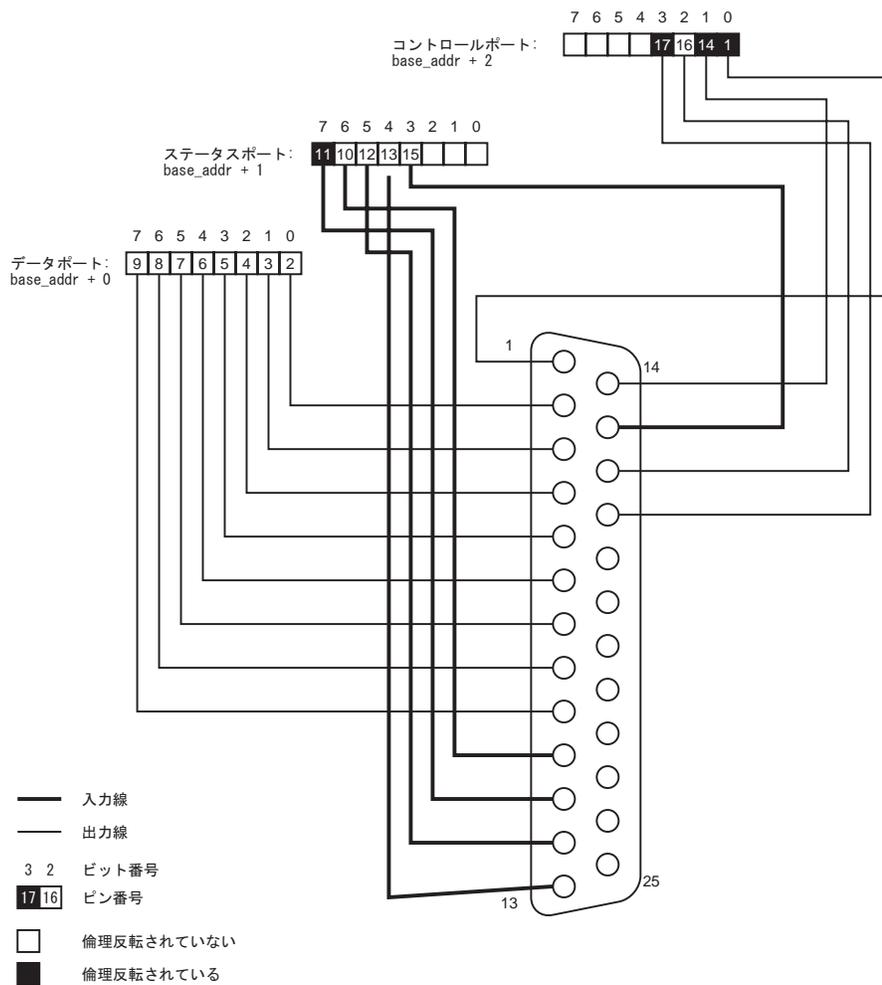


図 A.1. パラレルポートのピン配置。

## 参考文献

- [1] Banks, P. M., and A. F. Nagy, Concerning the influence of elastic scattering upon photoelectron transport and escape, *J. Geophys. Res.*, 75, 1902, 1970.
- [2] Banks, P. M., C. R. Chappell, and A. F. Nagy, A new model for the interaction of auroral electrons with the atmosphere: Spectral degradation, backscatter, and ionization, *J. Geophys. Res.*, 79, 1459, 1974.
- [3] Basu, B., J. R. Jasperse, D. J. Strickland, and R. E. Daniell, Transport-theoretic model for the electron-proton-hydrogen atom aurora, 1, Theory, *J. Geophys. Res.*, 98, 21517, 1993.
- [4] Berger, M. J., S. M. Seltzer, and K. Maeda, Energy deposition by auroral electrons in the atmosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 32, 1015, 1970.
- [5] Brekke, A., C. Hall, T. L. Hansen, Auroral ionospheric conductances during disturbed conditions, *Ann. Geophys.*, 7, 269, 1989.
- [6] Christensen, A. B., L. R. Lyons, J. H. Hecht, G. G. Sivjee, R. R. Meier, and D. G. Strickland, Magnetic field-aligned electric field acceleration and the characteristics of the optical aurora, *J. Geophys. Res.*, 92, 6163, 1987.
- [7] Christensen, A. B., J. H. Hecht, R. L. Walterscheid, M. F. Larsen, and W. E. Sharp, Depletion of oxygen in aurora: Evidence for a local mechanism, *J. Geophys. Res.*, 102, 22273, 1997
- [8] Fujii, R., S. Nozawa, M. Sato, N. Matuura, T. Ono, A. Brekke, C. Hall, and T. L. Hansen, Comparison between electron spectra calculated from EISCAT electron density profiles and those observed by the DMSP satellites, *J. Geomag. Geoelectr.*, 47, 771, 1995
- [9] Gattinger, R. L., A. Vallance Jones, J. H. Hecht, D. J. Strickland, and J. Kelly, Comparison of ground-based optical observations of  $N_2$  second positive to  $N_2^+$  first negative emission ratios with electron precipitation energies inferred from the Sondre Stromfjord radar, *J. Geophys. Res.*, 96, 11341, 1991.
- [10] Gerdjikova, M. G., and G. G. Shepherd, Evaluation of auroral 5577-Å excitation process using Intecosmos Bulgaria 1300 satellite measurements, *J. Geophys. Res.*, 92, 3367, 1987.

- [11] Green, A. E. S., and R. S. Stolarski, Analytic models of electron impact excitation cross sections, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34, 1703, 1972.
- [12] Hecht, J. H., A. B. Christensen, D. J. Strickland, and R. R. Meier, Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: Variations in oxygen density, *J. Geophys. Res.*, 94, 13553, 1989.
- [13] Hecht, J. H., D. J. Strickland, A. B. Christensen, D. C. Kayser, and R. L. Walterscheid, Lower thermospheric composition changes derived from optical and radar data taken at Sondre Stromfjord during the great magnetic storm of February 1986, *J. Geophys. Res.*, 96, 5757, 1991.
- [14] Hecht, J. H., A. B. Christensen, D. J. Gutierrez, D. C. Kayser, W. E. Sharp, J. R. Sharber, J. D. Winningham, R. A. Frahm, D. J. Strickland, and D. J. McEwen, Observations of the neutral atmosphere between 100 and 200 km using ARIA rocket-borne and ground-based instruments, *J. Geophys. Res.*, 100, 17285, 1995.
- [15] Hecht, J. H., A. B. Christensen, D. J. Strickland, T. Majeed, R. L. Gattinger, and A. Vallance Jones, A comparison between auroral particle characteristics and atmospheric composition inferred from analyzing optical emission measurements alone and in combination with incoherent scatter radar measurements, *J. Geophys. Res.*, 104, 33, 1999.
- [16] Hedin, A. E., MSIS-86 thermospheric model, *J. Geophys. Res.*, 92, 4649, 1987.
- [17] Link, R., Feautrier solution of the electron transport equation, *J. Geophys. Res.*, 97, 159, 1992.
- [18] Lummerzheim, D., M. H. Rees., and H. R. Anderson, Angular dependent transport of auroral electrons in the upper atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 37, 109, 1989.
- [19] Lummerzheim, D., M. H. Rees., and G. J. Romick, The application of spectroscopic studies of the aurora to thermosphere neutral composition, *Planet. Space Sci.*, 38, 67, 1990.
- [20] Lummerzheim, D., and J. Lilensten, Electron transport and energy degradation in the ionosphere: evaluation of the numerical solution, comparison with laboratory experiments and auroral observations, *Ann. Geophys.*, 12, 1039, 1994.
- [21] Lyons, L. R., Formation of auroral arcs via magnetosphere-ionosphere coupling, *Rev. Geophys.*, 30, 93, 1992.
- [22] Meier, R. R., D. J. Strickland, J. H. Hecht, and A. B. Christensen, Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: A study of auroral red line processes, *J. Geophys. Res.*, 94, 13541, 1989.

- [23] Nagy, A. F., and P. M. Banks, Photoelectron fluxes in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 75, 6260, 1970.
- [24] Onda, K., M. Ejiri, and Y. Itikawa, Analysis of electron auroras based on the Monte Carlo method: Application to active electron arc auroras observed by the sounding rocket at Syowa Station, *J. Geophys. Res.*, 104, 27991, 1999.
- [25] Ono, T., and T. Hirasawa, An apparent lifetime of auroral 630.0 nm (OI) emissions, *J. Geomag. Geoelectr.*, 44, 91, 1992.
- [26] Ono, T., Derivation of energy parameters of precipitating auroral electrons by using the intensity ratios of auroral emissions, *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 455, 1993.
- [27] Ono, T., and K. Morishima, Energy parameters of precipitating auroral electrons obtained by using photometric observations, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 261, 1994.
- [28] Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, Numerical recipes in C, The art of scientific computing: Second Edition, *Cambridge univ.*, 1992.
- [29] Rees, M. H., and R. A. Jones, Time dependent studies of the aurora, 2, Spectroscopic morphology, *Planet. Space Sci.*, 21, 1213, 1973.
- [30] Rees, M. H., and D. Luckey, Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions, 1, Model computations, *J. Geophys. Res.*, 79, 5181, 1974.
- [31] Rees, M. H. and R. G. Roble, Observations and Theory of the formation of stable auroral red arcs, *Rev. Geophys.*, 13, 201, 1975.
- [32] Rees, M. H., A. I. Stewart, W. E. Sharp, P. B. Hays, R. A. Hoffman, L. H. Brace, J. P. Doering, and W. K. Peterson, Coordinated rocket and satellite measurements of an auroral event, 1, Statellite observations and analysis, *J. Geophys. Res.*, 82, 2250, 1977.
- [33] Rees., M.H., Physics and chemistry of the upper atmosphere, Cambridge atmospheric and space science series, *Cambridge univ.*, 1989.
- [34] Rees., M. H., and D. Lummerzheim, Charracteristics of auroral electron precipitation derived optical spectroscopy, *J. Geophys. Res.*, 94, 6799, 1989.
- [35] Richards P. G., and D. G. Torr, Auroral modeling of the 3371 Å emission rate: Dependence on characteristic electron energy, *J. Geophys. Res.*, 95, 10337, 1990.
- [36] Schunk, R. W., and A. F. Nagy, Ionospherers: Physics, plasma physics, and chemistry, Cambridge atmospheric and space science series, *Cambridge univ.*, 2000.
- [37] Shiokawa, K., Magnetsphere-ionosphere coupling processes observed by the antarctic rockets and DMSP satellites, Master Thesis, Tohoku Univ., 1990.

- [38] Solomon, S. C., P. B. Hays, and V.J. Abreu, The auroral 6300 Å emission: Observation and modeling, *J. Geophys. Res.*, 93, 9867, 1988.
- [39] Solomon, S. C., Auroral excitation of the  $N_2$  2P(0,0) and VK(0,9) Bands, *J. Geophys. Res.*, 94, 17215, 1989.
- [40] Solomon, S. C., Auroral electron transport using the Monte Carlo method, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 185 1993.
- [41] Stamnes, K., Analytic approach to auroral electron transport and energy degradation, *Planet. SpaceSci.*, 28, 427, 1980.
- [42] Stamnes, K., On the two-stream approach to electron transport and thermalization, *J. Geophys. Res.*, 86, 2405, 1981.
- [43] Stamnes, K., and M. H. Rees, Inelastic scattering effects on photoelectron spectra and ionospheric electron temperature, *J. Geophys. Res.*, 88, 6301, 1983.
- [44] Strickland, D. J., D. L. Book, T. P. Coffey, and J. A. Fedder, Transport equation techniques for the deposition of auroral electrons, *J. Geophys. Res.*, 81, 2755, 1976.
- [45] Strickland, D. J., J. R. Jasperse, and J. A. Whalen, Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 88, 8051, 1983.
- [46] Strickland, D. J., R. R. Meier, J. H. Hecht, and A. B. Christensen, Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: Theory and model results, *J. Geophys. Res.*, 94, 13527, 1989.
- [47] Strickland, D. J., R. E. Daniell, J. R. Jasperse, and B. Basu, Transport-theoretic model for the electron-proton-hydrogen atom aurora, 2, Model results, *J. Geophys. Res.*, 98, 21533, 1993.
- [48] Swartz, W. E., Optimization of energetic electron energy degradation calculations, *J. Geophys. Res.*, 90, 6587, 1985.
- [49] Torr, M. R., and D. G. Torr, The role of metastable species in the thermosphere, *Rev. Geophys.*, 20, 91, 1982.
- [50] Vallance Jones, A., R. L. Gattinger, P. Shih, J. W. Meriwether, V. B. Wickwar, and J. Kelly, Optical and Radar Characterization of a short-lived auroral event at high latitude, *J. Geophys. Res.*, 92, 4575, 1987.
- [51] Rubini A.(著), 山崎 康宏, 山崎 邦子 (共訳), *Linux デバイスドライバ*, O'reilly, 1998.
- [52] 鈴木 克恵, Akebono 衛星-EISCAT レーダーの同時観測に基づく極域電離圏のエレクトロダイナミクスの研究, 修士論文, 名古屋大学, 1997.
- [53] 国立極地研究 (編), *オーロラと超高層大気*, 南極の科学 2, 古今書院, 1983.