



平成20年度

修士論文

多波長光学観測機器-EISCATレーダー同時観測による
電離圏下向きFAC領域におけるプロトンオーロラの研究

名古屋大学 大学院理学研究科

素粒子宇宙物理学専攻 宇宙地球物理系

太陽地球環境研究所

岩田陽介

2009年01月29日

要旨

オーロラアークに伴う3次元電流系の構造、沿磁力線電流 (FAC : Field-Aligned Current) を担う電子の運動、粒子の加速過程の研究は、磁気圏-電離圏結合を理解する上で重要である。特に、上向きFACを伴うオーロラアークの近傍に存在する下向きFAC領域では、しばしば強い電離圏電場や電子密度の減少、ブラックオーロラなどの生起が指摘されているが、それらの性質と相互の関係は観測的に明らかではない。ひとつの電流系モデルとして、上向き及び下向き2方向のFACが電離圏ペダーセン電流により閉じる電流系における、下向きFAC領域では、電離圏電子はFACのキャリアとして磁気圏に運び去られてしまう為、その場の電子密度が著しく減少する可能性がある。この時、電子の減少によりFACのキャリアは不足するので、絶対条件である電流の連続性を保つためには、沿磁力線電場が生成されて電子を上向きに加速し、必要とされる電流量を作り出すことが要求される。実際衛星観測から、日陰の下向きFAC領域における電子の上向きの沿磁力線加速が確認されている。電子を上向きに加速する沿磁力線電場は、同時に磁気圏起源のプロトンを下向きに加速するので、下向きFAC領域の電離圏ではプロトンオーロラ発光が期待される。さらに、電離圏電子の減少は電離圏電気伝導度を低下させるので、上向きと下向きのFACを閉じる電離圏水平電流の連続性から、電気伝導度が相対的に低い下向きFAC領域では、電気伝導度が高い上向きFAC領域に比べて、より強い磁場に垂直方向の電場が生起されることも予想されている。このように3次元電流系、特に下向きFAC領域で、電離圏は能動的な役割を果たす事が示唆されているが、磁気圏内の沿磁力線電場と電離圏の状態との関係は分かっていない重要な課題である。

本研究では全天プロトンイメージャ(透過波長 486.1 nm)、4波長フォトメータ(427.8 nm, 557.7 nm, 630.0 nm, 844.6 nm)、全天デジタルカメラをノルウェー・トロムソ(北緯69.6度, 東経19.2度)で運用し、これらの光学観測機器とEISCATレーダー、IMAGE地上磁力計ネットワークを用いて同時観測を行い、下向きFAC領域における、プロトンオーロラ発光(磁気圏内の沿磁力線電場と関連)、電子密度の減少、電離圏電場などの物理量の相互関係を明らかにすることを目的としている。使用したデータセットは2006年10月20日の光学機器-EISCATレーダー同時観測で得られたもので、プロトンオーロラの発光と電離圏電子の著しい減少(背景密度の1/10にも及ぶ)、磁場に垂直の強い電離圏電場が同時におきるイベントを捉えることに成功した。解析の結果、以下の特徴が得られた。

[1] 1/10 以下になる電子密度減少は 1 ~ 2 分という短時間で生じた。また、この電子密度減少はペダーセン電流が最も強く流れる高度 120 kmより高い高度で顕著であった。さらに電子密度減少の開始時間は高度が高くなるにつれて遅くなる特徴が見られた。これはDoe et al. [1993, 1995]が示したいくつかの消失原理のうち、沿磁力線電流に伴う電子流出効果を支持するもので、観測的に初めての結果である。

[2] 赤道方向に移動する東西方向に延びるオーロラアーク（南北方向の幅 約 10 km）の極側近傍で見られたE領域とF領域の電子数密度の急激な減少は、磁力線に垂直な水平電場の増大（ ~ 80 mV/m）を伴い、下向きFACに関連していると推定されたが、従来考えられていたプロトンオーロラ発光は同じ場所では見られなかった。この点についての解釈は以下の通りである。太陽光による電離がない夜間電離圏で、電子密度の著しい減少を伴う下向きFACは、その場所に留まる限り電流キャリアが不足して電流の連続性を保てなくなる。上向きFACに見合う下向きFACを維持するためには、主として二つのケースが考えられる。一つはプロトンオーロラにより電離圏電子密度を増やす物理過程が発動する場合であり、もう一つは、電流系自体が、豊富な電子を求めて、新たな領域に移動する場合である。赤道側へ移動する幅の狭いオーロラアークに伴う上向き電流は、同じ程度の幅の下向き電流を伴うと考えられるので、後者の電流系自体が移動することにより十分な電子密度を得ることができたと考えられる（この場合プロトンオーロラによる電離は必要なくなるために出現していない）。電子密度減少に伴った、上記のオーロラアークの移動によって、下向きFACのキャリアとなる電子の不足分を補って、電流の連続性を保持していたと考えられる。

[3] 電子オーロラよりも高緯度側に出現したプロトンオーロラは、磁力線に垂直な電離圏電場の強い増大（ ~ 90 mV/m）を伴っていた。等価電流系からの推定で、この領域には下向きFACが流れ、低緯度側のディスクリートオーロラに伴う上向きFACとペアーになっていたと考えられる。このプロトンオーロラ領域では、フォトメータ観測から電子の降込みがほとんど認められないにも関わらず、電子密度が増大し、強い電離圏電流が見られることから、降下プロトンが電離に重要な貢献をしていることが判明した。前述した移動するアークに伴う下向き電流領域とは異なり、プロトンオーロラを伴う下向きFAC流入領域はその範囲が広く、移動によっては十分な新たな電子が得られないために、プロトン降下（下向き沿磁力線電場の生成）を引き起こすことによりE領域の電子密度を増大させて、必要な電子を確保するという、一連の物理過程が生じていたことが示唆される。

これらの結果は世界的にみても新たな知見で、磁気圏電離圏結合、特に下向き沿磁力線電流系のより深い理解に貢献するものである。

目次

要旨

第1章 序章

1.1 磁気圏-電離圏間のエネルギー交換・粒子交換による相互作用	1
1.1.1 沿磁力線電流	1
1.1.2 極域電離圏電流	2
1.1.3 沿磁力線電場による荷電粒子の加速機構	4
1.2 電子オーロラとプロトンオーロラ	6
1.3 3次元電流系における下向きFAC領域での研究の現状	8
1.4 研究目的	10

第2章 観測機器

2.1 EISCAT UHF レーダー	11
2.2 4波長分光型フォトメータ	14
2.3 全天プロトンイメージャ	16
2.4 全天デジタルカメラ	18
2.5 IMAGE地上磁力計ネットワーク	19
2.6 観測データリスト	20

第3章 解析方法

3.1 プロトン降り込み領域の特定	22
3.2 星を用いた全天イメージ画像の座標変換	23
3.3 電場強度の推定	29
3.4 等価電流系の推定	31
3.5 電気伝導度導出	32

第4章 解析結果

4.1 オーロラ発光と電離圏物理量の変化	34
4.2 プロトンオーロラとエレクトロンオーロラ空間分布	38
4.3 電子数密度変化	43
4.4 イオン・電子温度上昇と電場強度変化	46
4.5 磁場変動と等価電流系	50
4.6 結果のまとめ	53

第5章 考察

5.1 電子数密度減少機構	55
-------------------------	----

5.2 FACを繋ぐ電離圏水平電場方向の考察	58
5.3 下向きFAC領域での電子密度減少・電場増大・降り込みプロトンの考察	60
5.4 FACの電流密度の推定	64
第6章 まとめと結論	65
付録	67
参考文献	72
謝辞	75

第1章 序章

本章では最初に、本研究テーマの背景知識として、磁気圏-電離圏結合 (M-I結合) 領域におけるエネルギー交換や粒子交換による相互作用とオーロラ発光現象の機構と特徴について述べる。そして、この領域における研究の現状と未解決問題を紹介した後、本論文の研究目的について述べる。

1.1 磁気圏-電離圏間のエネルギー交換・粒子交換による相互作用

1.1.1 沿磁力線電流

磁気圏と電離圏を結ぶ沿磁力線電流 (FAC : Field-Aligned Current) の存在が、ロケットや人工衛星による磁場観測によって確認されたのは1960年代末である。Zmuda *et al.* [1966] は、FACの直接的証拠として、1100 kmの上空を飛行する極軌道衛星の磁力計が観測した主磁場と直角な方向の大きな磁場変化の例を報告した。その後、Iijima and Potemura [1976] は、高度800kmの極軌道に打ち上げられたTRIAD衛星の磁場データを解析する事により、図1.1に示されたFACの極域全体にわたる分布を明らかにした。衛星で観測されたFACは沿磁力線電流を最初に考えたビルケランドの3次元電流系モデルよりも複雑で、極をとりまく環状の二重シート電流からなっている。高緯度側では午前側で磁気圏から電離圏に電流が流れ込み、午後側で電離圏から磁気圏に向かって電流が流れ出しているのに対し、低緯度側では電流の向きは逆になっている。

磁気圏と電離圏の間を流れる沿磁力線電流の電流密度は、人工衛星による磁場観測から $1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 程度と推定されている。沿磁力線電流を担う粒子 (キャリア) は電子と考えられている。例えば、Evans [1974] が行った人工衛星による観測結果から、電離圏から磁気圏に向かう上向きFACは、磁気圏から電離圏に降り込む数 keV程度のエネルギーの電子がキャリアとなっていると考えられている。一方、磁気圏から電離圏に向かう下向きFACでは、磁気圏から電離圏に降り込むプロトンの流量では一般に不足していることと、電子がプロトンに比べて質量が1836分の1と小さいことによってプロトンよりも動きやすいので、電離圏から磁気圏へ上向きに流出する電離圏起源の数 eV 以下の電子が主なキャリアとなっている可能性が指摘されている。この磁気圏から電離圏に流れ込む下向きFACと、電離圏から磁気圏へ流れ出す上向きFACが、次節に記述する水平方向に流れる極域電離圏電流を介して互いに結合し、閉じた3次元電流系を形成すると考えられている。

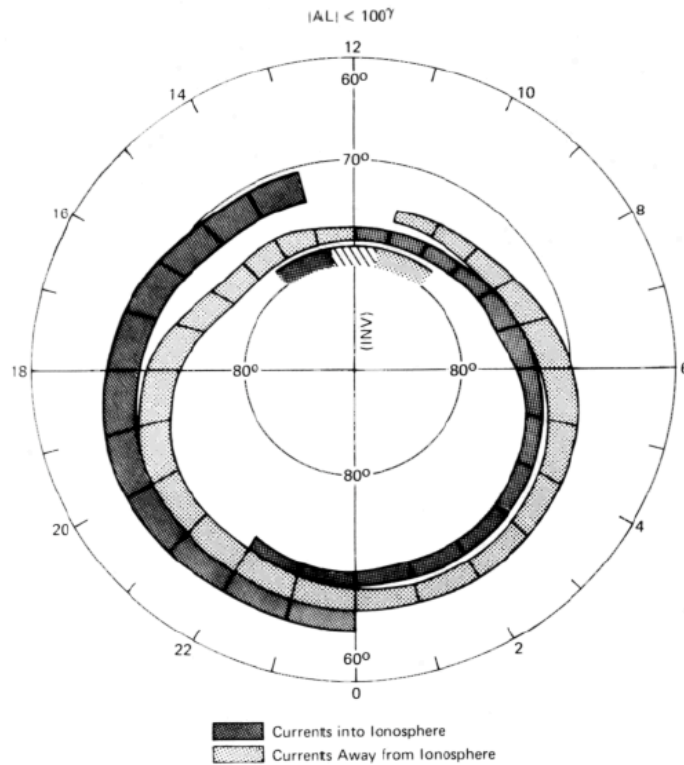


図1.1：地磁気活動度が静かな時の沿磁力線電流の統計的分布。

[Iijima and Potemra, 1976]

1.1.2 極域電離圏電流

電離圏とは中性大気が極端紫外線やX線等の短波長電磁波を吸収して部分的に電離し、磁気圏と電磁氣的に結合している領域である。とりわけ磁力線を介して磁気圏と相互作用を及ぼす極域においては、磁気圏から電離圏へ降り込んでくる高エネルギーの電子やプロトンが、重要な電離源として働いている。高度約 90 - 130 km 付近の領域は電離圏E領域と呼ばれ、前述した沿磁力線電流と電離圏電流を結ぶ三次元電流系において、水平方向の電流が流れる領域である。このE領域で水平電流が流れる原因は、イオンが中性大気と衝突し、電子と異なる運動をすることによって引き起こされるためである。図1.2はイオンと電子についてのジャイロ周波数と、中性大気間衝突周波数の高度分布である。この領域ではイオン-中性大気衝突周波数がイオンジャイロ周波数より高い為、イオンの運動は中性大気の運動方向に大きく影響を受ける。しかし一方で、電子-中性大気衝突周波数は電子ジャイロ周波数より低い為、中性大気との衝突の効果は極めて小さく、電子は電場ドリフトによる運動を行っている。この結果、イオンと電子の間に速度差が生じ、電流が流れる。

電離圏を流れる電流は、Brekke [1997]が示した例では、磁力線方向と磁力線に垂直な方向のベクトル和で表され、電流(\mathbf{j})の式は、

$$\mathbf{j} = \sigma_p \mathbf{E}_\perp - \sigma_H \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B} + \sigma_\parallel \mathbf{E}_\parallel \quad (1.1)$$

となる。ここで \mathbf{E}_\perp は磁力線に対して垂直方向の電場、 \mathbf{E}_\parallel は磁力線に平行方向の電場、 σ_p はペダーセン (Pedersen) 電気伝導度、 σ_H はホール (Hall) 電気伝導度、 σ_\parallel は磁力線方向の電気伝導度である。式1.1の右辺第一項がペダーセン電流、第二項がホール電流、第三項が沿磁力線電流である。ホール電流は電場ドリフト方向のイオンと電子の速度差によって流れ、電流のキャリアは主として電子が担っている。ペダーセン電流は電場方向に運動するイオンと電子の速度差によって流れ、キャリアは主にイオンが担っている。磁気圏と電離圏を結ぶ3次元電流系では、下方向の沿磁力線電流と、そのカウンターパートである上向き沿磁力線電流を結ぶ水平方向の電流は、主にこのペダーセン電流により担われている。電気伝導度の高度分布は図1.3に示す特徴を持つ。 σ_p は高度120km付近に最大値を、 σ_H は降り込み粒子のエネルギーによるが高度110km付近に最大値をもち、一般的に σ_H の最大値は、 σ_p の最大値よりも平均して1.5倍程大きい。

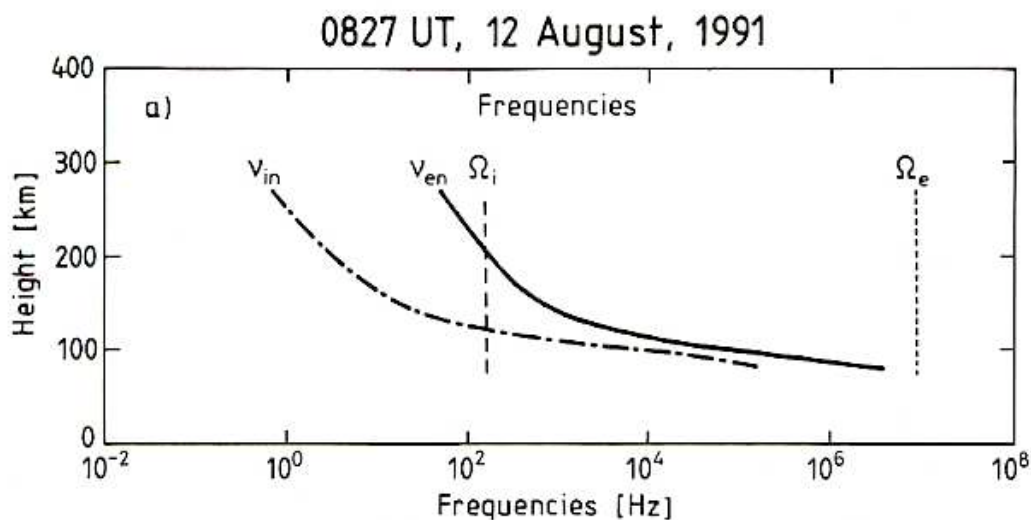


図1.2: 夏期静穏時のトロムソにおける、イオンジャイロ周波数 (Ω_i) 電子ジャイロ周波数 (Ω_e) イオン-中性大気衝突周波数 (v_{in}) 電子-中性大気衝突周波数 (v_{en}) の高度分布モデル。[Brekke, 1997]

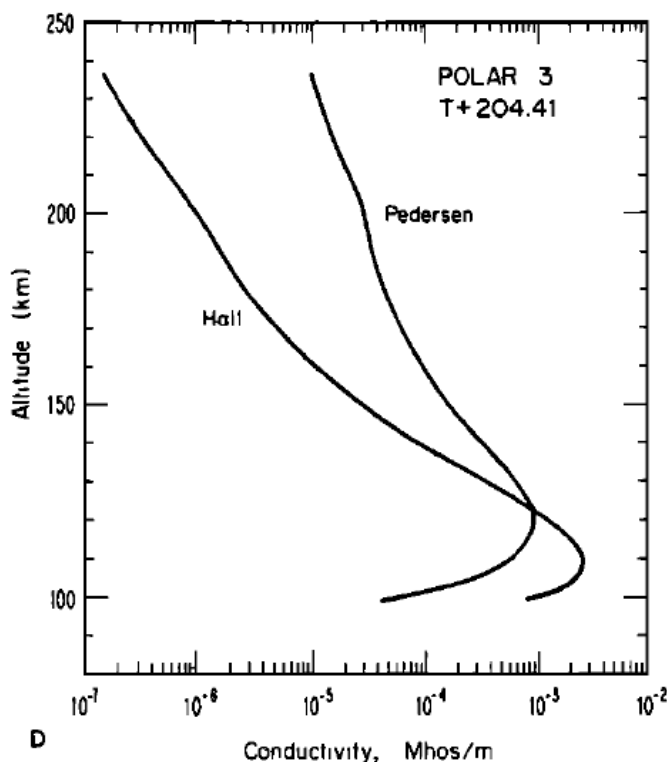


図1.3：ノルウェー・Andøyaでのロケット観測で求められた電子密度から導出したペダーセン電気伝導度とホール電気伝導度高度プロファイル。[Evans et al., 1977]

1.1.3 沿磁力線電場による荷電粒子の加速機構

電流は移動する荷電粒子によって運ばれているため、沿磁力線電流の存在は磁気圏と電離圏の間に荷電粒子のやりとりがある事を意味している。この磁力線に沿って移動する荷電粒子は、電流のキャリアとして働くと同時に、上層大気と衝突しオーロラを発光させる。ロケットや衛星による観測から、オーロラを発光させる降り込み電子のエネルギーは、1-10 keVの範囲にピークを持つことが確認された。しかし、この値は荷電粒子の起源とされるプラズマシートでのエネルギー値と比較して高い。又、荷電粒子の大部分は電離圏に到達する前にミラーポイントで反射し、バウンシングを行うため電流を作らない。これらから、磁気圏と電離圏の間に磁力線に沿った電位差が存在し、それが加速機構として働いていると考えられている。オーロラ発光を生起するような高エネルギー降り込み粒子の加速機構は、磁力線に沿った電位差から生じる電場によってなされると考えられており、これを裏付けるような電位の分布が衛星観測によって明らかにされた。図1.4のV型の電位分布が現在考えられている粒子の加速機構で、このような電位分布によって上向きFACを担う降り込み電子が加速される。電場は中心部分では磁力線に平行の向き、周辺部では磁力

線に垂直方向になっており、プラズマシート起源の電子は、V型ポテンシャル領域の中心部分で磁力線下向きに加速され、強い電子ビームとして上層大気に入射し、オーロラ発光を引き起こすと考えられる。実際にFAST衛星やFREJA衛星の観測結果からも、磁力線に沿った上下方向の電場の存在が確認されており、電場の観測と共に、加速された高エネルギー電子を観測している。但し、磁気圏において、磁力線に沿う電気伝導度は垂直方向のペダーセン電気伝導度とホール電気伝導度より十分大きいため、一般的には磁力線に沿って電位差は生じないと考えられており、電位差を生じるためには波動などによる粒子の散乱（衝突）が必要である。

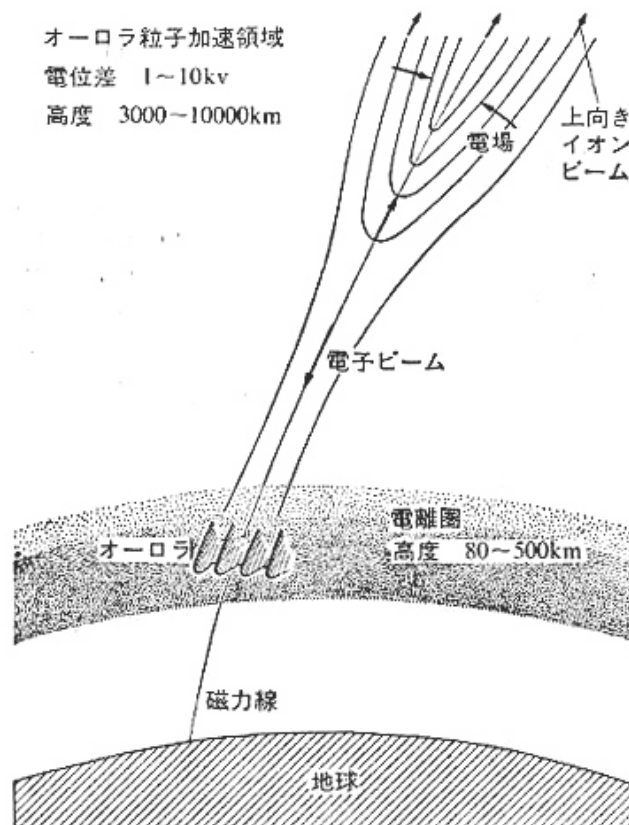


図1.4：V型電位分布をもった沿磁力線加速領域の模式図。
 (inverted-V構造) この電位分布により電子は下向きに、イオンは上向きに加速される。 [福西ほか、1983]

1.2 電子オーロラとプロトンオーロラの発光機構

一般に電子が入射し上層大気を発光させた場合を電子オーロラ、プロトンが入射して発光した場合をプロトンオーロラと呼んでいる。電子はプロトンと比べて質量が小さいため、プロトンよりも遥かに速いスピードで運動をすることができ、同じエネルギーを持つ電子とプロトンでは、電子の方が上層大気を能率よく励起し、数 kR を超える明るいオーロラ発光を放射させることができる。ここではまず、電子オーロラの特徴について述べ、次にプロトンオーロラの特徴について述べていく。

電子オーロラ発光領域では、前述した沿磁力線電場により加速された降り込み電子が、上層大気の原子や分子とそれらのイオンに衝突することで、上層大気粒子を励起状態にする。この高いエネルギー準位へ励起させられた粒子が、低いエネルギー準位へと遷移する際に、その余剰エネルギーを電磁放射することでオーロラが生起される。そのためオーロラ発光のスペクトルは、衝突粒子の種類や、遷移状態によって対応付けされる発光輝線が放射され、オーロラ全体の色はそれら個々の輝線やバンドの重ね合わせの結果である。代表的な電子オーロラの発光輝線の場合、O 原子 (557.7 nm, 630.0 nm) や N_2^+ 分子 (427.8 nm) からの放射が挙げられる。電子オーロラを発光させるような高エネルギー電子の降り込みは、上向き沿磁力線電場によって加速されるため、電子オーロラ発光領域は磁気圏から電離圏への下向き FAC 領域と考えられている。

プロトンオーロラの発光スペクトルの特徴は、電子オーロラでは見られない $H\alpha$ (656.3 nm) と $H\beta$ (486.1 nm) の水素の発光輝線が観測されることである。電子オーロラが高速の電子と高層大気との衝突による中性大気発光であるのに対して、プロトンオーロラでは降り込みプロトンが高層大気との電荷交換反応を経て、プロトン自身が励起・遷移することで $H\alpha$ と $H\beta$ の輝線を発光する。プロトンの発光過程で重要な特徴として以下の2点が挙げられる。

ひとつは、降り込み粒子が電子の場合は、電子は磁力線に巻き付いてジャイロ運動をするので、磁力線方向にしか運動ができない。これに対して入射粒子がプロトンの場合、中性大気との電荷交換反応過程で電子を取り込んだ結果、降り込みプロトンは図 1.5 に示すように中性水素に変わるので磁力線を横切って移動することができる。このプロトン降り込み領域の見積もりは Davidson [1965]、Fang et al. [2004] によってなされ、モンテカルロ法を用いたシミュレーション解析の結果、プロトンオーロラ発光領域は水平方向に ~ 100 km の範囲におよぶこと、プロトンオーロラの発光強度の最大はプロトンの降り込み領域と一致することが示唆された (図 1.6)。

もうひとつは、中性大気との電荷交換反応によって励起状態になった中性水素は、磁力線にトラップされずに高速で動いているため、遷移による水素発光輝線はドップラーシフトおよびドップラーブロードニングをしている。Eather and Jacka [1966] は $H\alpha$

と $H\beta$ の中心発光輝線のドップラーシフト幅を $0.6 \pm 0.1 \text{ nm}$ 、ドップラーブロードニングによる半値幅を $1.5 - 2.0 \text{ nm}$ と見積もっている。

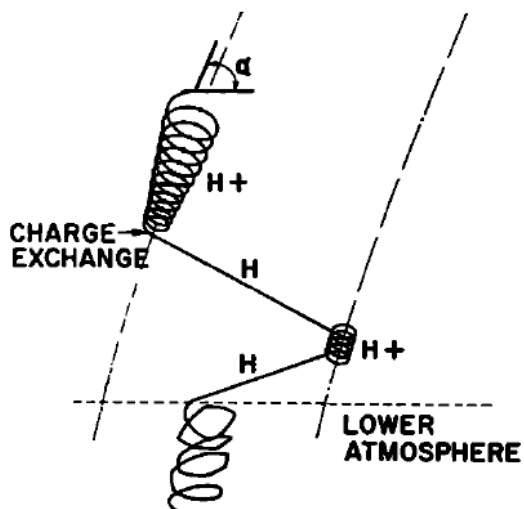


図 1.5: 上層大気に入射したプロトンの軌跡。電荷交換反応によりプロトンが中性の水素 (H) になると、磁力線を横切って自由に運動できるようになる。[Davidson, 1965]

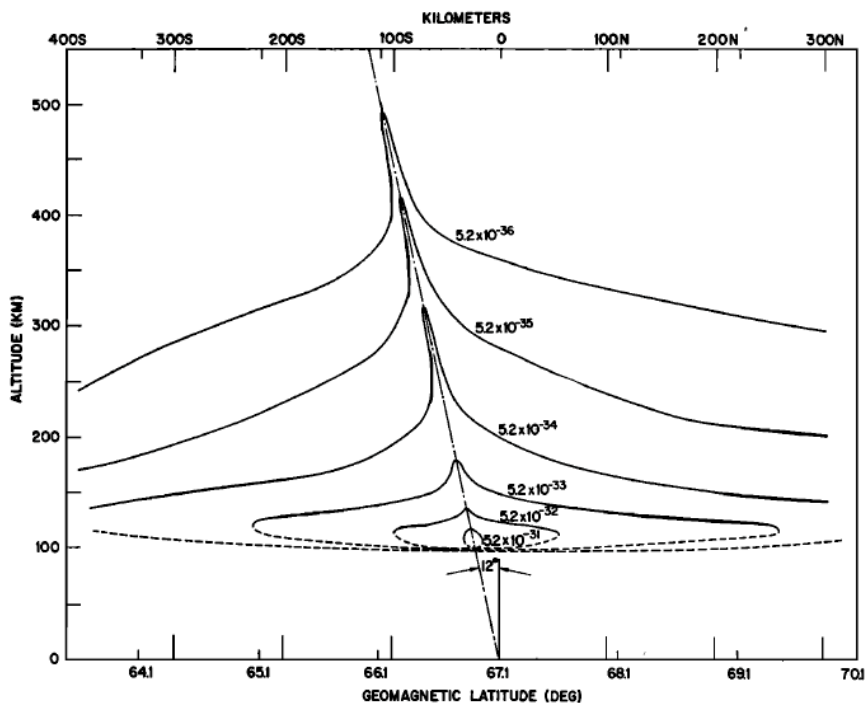


図 1.6: 等方的なピッチ角をもつ 10 keV プロトンが緯度 67.1° の磁力線に入射したとき、プロトンによって励起される $H\beta$ 放射強度の空間分布図。強度の単位は $\text{erg/proton} \cdot \text{cm}^3$ 。[Davidson, 1965]

1.3 3次元電流系における下向き FAC 領域での研究の現状

磁気圏-電離圏結合を理解する為、オーロラアーク近傍の電場分布、沿磁力線電流に伴う電子移動、プラズマ粒子の加速機構など、様々な観点から研究が行われてきた。これらの研究は電波観測、ロケット観測、人工衛星観測の発達によって急速に進歩してきた。

M-I 結合領域での研究の歴史は、上向き沿磁力線電流を伴う降り込み電子領域の観測が主で、この領域では数多くの観測結果やシミュレーション結果が報告されてきた。それは、オーロラ粒子降り込み領域での沿磁力線加速は従来知られていたが、電離圏起源の冷たい電子によって担われる下向き FAC は、単なるリターン電流と考えられており、特別な沿磁力線加速は働いていないと考えられていたからである。そのため、上向き電流のカウンターパートとなる下向き沿磁力線電流領域に関する研究は比較的少なく、下向き FAC とオーロラアーク近傍の暗い領域（ブラックオーロラ領域）の相互関係など未解決部分も多い。特に磁気圏内の下向き沿磁力線電場に対応する電離圏内の水平電場や電離圏電子密度変動との関係は未解決で、今後の研究による進歩が期待されている。

下向き FAC 領域で生じられる、沿磁力線電場や上向き電子加速機構は *Marklund and Karlsson* [1997] などの研究によって明らかにされ、人工衛星によって観測された電場から図 1.7 に示す 3次元電流系の存在を示唆した。*Marklund et al.* [2001, 2008] は飛翔高度の異なるいくつかの人工衛星を用いて、下向き FAC 領域を詳しく観測した。この領域では数 eV ~ 数 keV の上向き電子ビームと共に、沿磁力線電場と発散電場構造、下向きに加速されたプロトンの降り込み、狭い範囲でのプラズマ密度減少、イオン温度加熱などを観測した。これらは磁気圏と電離圏を結ぶ 3次元電流系構造の一部を観測したものであり、これまで考えられてきた以上に、下向き FAC が 3次元電流系や M-I 結合に能動的な役割を果たしていることを示唆した。しかし、ここで明らかにされた観測事実は高度 500 km 以上を飛翔する人工衛星による直接観測のため、人工衛星の飛翔高度付近の機構を明らかにするものであり、オーロラ空間分布など光学観測による、3次元電流が閉じる電離圏の電場や電流などの電磁氣的性質、電子密度分布などのプラズマの状態に対応する変動については明らかになっていない。

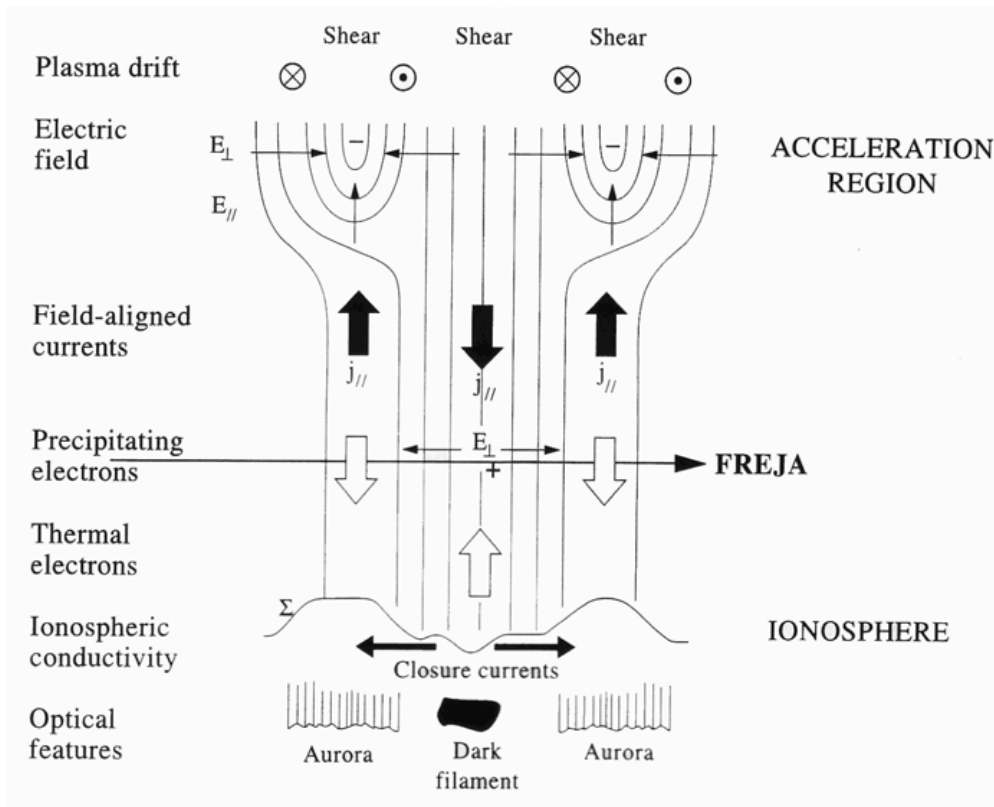


図 1.7: 衛星で観測された電場分布から示唆される 3 次元電流系とオーロラの対応を示した概念図。 [Marklund and Karlsson, 1997]

Opgenoorth et al. [1990] は EISCAT (European Incoherent SCATter) レーダーやロケットを用いて、電離圏のオーロラアーク近傍の FAC 降り込み領域で極めて強い電場を観測すると同時に、下向き FAC に関連していると思われる電離圏 E 領域と F 領域での局所的な電子数密度の減少を観測した。*Doe et al.* [1993, 1995] はオーロラ電離圏 F 領域で電子密度減少の詳しい観測と共にシミュレーション研究を行い、そのメカニズムとして、いくつかの機構を示している。その中で、観測によって確認されている極めて短い時間での電子密度変化を担う有力な機構として、化学反応（解離再結合）による電子消失と、沿磁力線電流に伴う電子流失効果を示唆した。この電流系に伴う電子数密度変化は *Dreher* [1997] によってさらにシミュレーション研究が進められ、磁気圏と電離圏を結ぶ 3 次元電流系の上向き FAC と下向き FAC 領域で、それぞれ電子密度上昇と電子密度減少機構が生起されることを明らかにした。この密度変化の時間経過や空間分布については *Karlsson et al.* [2007] や *Cran-McGreehin et al.* [2007] によってシミュレーション解析が進められ、下向き FAC（上向き電離圏電子の流出）に伴い、分単位の短い時

間スケールで電子密度変化が起きることが示されている。

強い電場はイオン温度と電子温度双方を増大させることが理論計算・観測事実から知られている。イオンについてはE領域ではジュール加熱によって、F領域では摩擦加熱によって、電離圏のほぼ全高度で加熱される。電子については高度110 km付近の高度領域のみで2流体不安定性 (Farley-Buneman 不安定性) により温度が増大する。後者の電子加熱は背景電場が閾値 (~ 30 mV/m) を超えた時のみに起こる事が *Schlegel and St.-Maurice* [1981]、*Davis and Robinson* [1997]によって示されている。イオン加熱、電子加熱は、電場と正の相関があることが知られており、その温度上昇から逆に電場強度を推定する事が可能である。

1.4 研究目的

下向きの沿磁力線電流に伴って生起されるとみられる電離圏電子の減少は、主に磁気圏からの粒子の降り込み以外に電離源を持たない夜側 M-I 結合領域の電磁力学構造に少なくとも2つの影響を与えると考えられる。ひとつは、減少した電子密度は、同時にE領域のペダーセン電気伝導度 ($\sum_p \propto Ne$) の減少を引き起こす。この下向き FAC 領域では、磁力線に垂直な電離圏電場を増大することによって、上向き FAC と繋がるペダーセン電流の電流量 ($Ne \cdot e \cdot v$) の連続性を保持していると考えられる。もうひとつは、下向き FAC において、電子密度減少によって不足するキャリア (電子) の分を、下向き沿磁力線電場の増大によって電子を加速して保持していると考えられる。この下向き沿磁力線電場による上向きの電離圏電子の加速や、下向きの磁気圏プロトンの加速は、Freja 衛星などによって観測されているが、下向き沿磁力線電場と磁気圏の発散電場の生起メカニズムをより詳しく研究するためには電離圏 E 領域における研究が必要であり、特に電離圏 E 領域高度の発散電場と沿磁力線電場の相互関係の理解が重要である。しかし、電離圏高度の下向き FAC 領域は観測的にほとんど明らかになっていない。

本研究では、磁気圏-電離圏を結ぶ3次元電流系のうち特に下向き FAC 領域において、電離圏物理量変化とオーロラ発光現象などを光学機器、非干渉散乱レーダー、地上磁力計の同時観測によって捉え、E領域・F領域の電磁力学的視点から「電子密度減少」「プロトンオーロラ発光 (沿磁力線電場増大によるプロトンの降り込み)」「磁力線垂直電場の増大」「電流分布」などの空間分布や生起機構を定量的に明らかにすることを目的とする。

第2章 観測装置

本研究では、下向き FAC 領域で生起される諸現象の因果関係を観測的に説明する為、以下に記述する複数の機器を用いて同時観測を行った。カッコ内の記述は、各機器の観測対象である。

- ・ EISCAT UHF レーダー (電子密度・イオン温度・電子温度・イオン温度)
- ・ 4波長分光型フォトメータ (電子オーロラ発光強度)
- ・ 全天プロトンイメージャ (プロトンオーロラ発光強度と空間分布)
- ・ 全天デジタルカメラ (電子オーロラ空間分布)
- ・ IMAGE 地上磁力計ネットワーク (等価電流系の推定)

本章では各観測機器の詳細と特性を述べる。

2.1 EISCAT UHF レーダー

EISCAT (European Incoherent SCATter) レーダーは、イギリス、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、中国、日本が加盟する EISCAT 科学協会によって運営されている非干渉散乱 (IS) レーダーシステムの総称である。EISCAT レーダーは、UHF (Ultra High Frequency) レーダー、VHF (Very High Frequency) レーダー、ESR (Eiscat Svalbard Rader) の3つのシステムから構成されており、EISCAT レーダー最大の長所のひとつとして、電離圏物理量 (電子密度・電子温度・イオン温度・視線方向のイオン速度) を高時間空間分解能で測定できることが挙げられる。各レーダーシステムの設置場所を図 2.1 に示す。本研究では EISCAT UHF レーダーを用いて、下向き FAC 領域の電離圏物理量の観測をおこなった。ここでは UHF レーダーの詳細について紹介する。

UHF レーダー (図 2.2) はノルウェー・トロムソ (69.6° N, 19.2° E) に設置された送受信機と、スウェーデン・キルナ (67.9° N, 20.4° E) と、フィンランド・ソダンキラ (67.4° N, 26.6° E) に設置された受信機の計3カ所の基地局で構成されるレーダーシステムである。このレーダーシステムの特徴は3つの受信機が送信された電波の散乱波を受け取る3局1点方式によって、3次元方向のイオン速度を世界で唯一観測できることである。表 2.1 に EISCAT UHF レーダーの諸元をまとめる。

本研究ではこのUHFレーダーを用いることで、高度90 - 300 kmの電離圏下向きFAC降り込み領域での「電子密度」「電子温度」「イオン温度」に着目した。観測はUHFレーダーのビームを磁力線方向に固定するCP1 (Common Program 1) モードで行った。観測データの解析では任意の時間積分をすることでSNR (Signal to Noise Ratio) と時間分解能を調節することができるが、データの質と時間分解能はトレードオフの関係にある。本研究では積分時間を60秒とし、電離圏物理量のデータ解析を行った。本研究のイベント解析に用いた2006年10月20日の電子密度、イオン温度、電子温度の測定誤差はそれぞれ10%、14%、16%である。

散乱波を利用した電離圏物理量の導出原理については巻末付録に記述する。

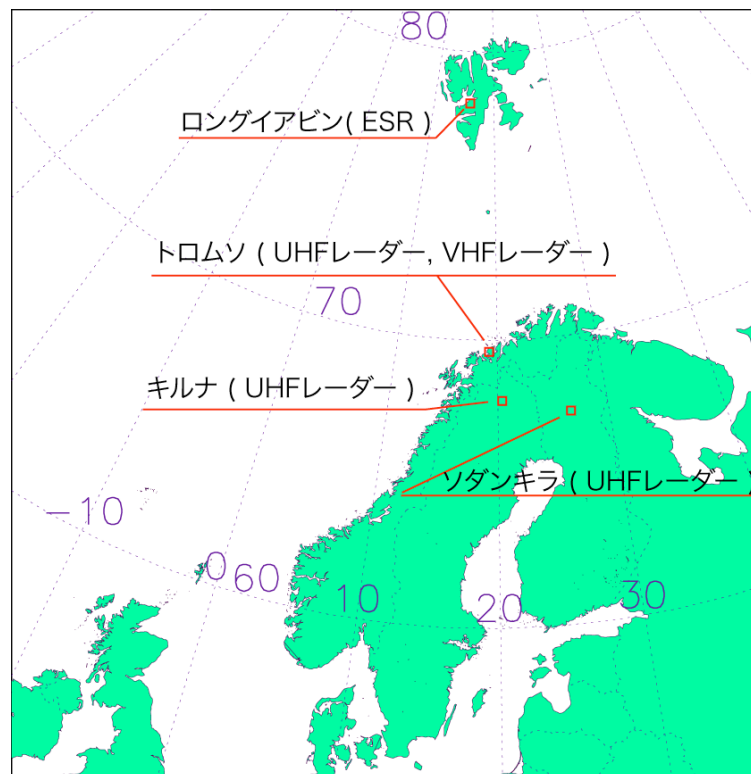


図 2.1 : EISCAT レーダーシステムの設置場所。



図 2.2: ノルウェー・トロムソに設置されている EISCAT UHF レーダー（左）とコントロール建物（右手前）。送信ビームを磁力線方向に固定して電離圏物理量の観測をする様子。

表 2.1 : EISCAT UHF レーダー送受信機の諸元。

基地局位置	トロムソ	キルナ	ソダンキラ
形態	送信機・受信機	受信機	受信機
地理座標	69.6° N 19.2° E	67.9° N 20.4° E	67.4° N 26.6° E
地磁気緯度	67.1° N	65.4° N	64.0° N
不変緯度	66.2° N	64.5° N	63.6° N
送信周波数	926.6 ~ 930.5 MHz (UHF 周波数帯)		
最大/平均出力	2.6 / 0.25 MW		
パルス継続時間	0.001-2.0 msec.		
出力半値角	0.6 度		
導出物理量	電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度		

2.2 4波長分光型フォトメータ

本研究で用いた4波長分光型フォトメータ(図2.3。以下フォトメータ)は電子オーロラ発光強度を観測することを目的としている。観測対象となるオーロラ発光波長は427.8 nm、557.7 nm、630.0 nm、844.6 nmの4波長で、いずれもエレクトロンオーロラで観測される酸素原子(557.7 nm, 630.0 nm)と窒素分子(427.8 nm, 844.6 nm)による代表的な発光輝線である。フォトメータはEISCATレーダーと同じトロムソ(69.6° N, 19.2° E)に設置しており、視野角は1.2度、データサンプリング周波数は20 Hzである。フォトメータの視野は磁力線方向に固定しており、沿磁力線降り込み粒子によるオーロラ発光強度を観測している。フォトメータ内部は図2.4に示す構造となっており、受光部から入射したオーロラ光は、内部のハーフミラー(HM)と2枚のダイクロックミラー(DM1、DM2)が反射又は透過することによって、おおまかに分光されたのち、対応する4つの各チャンネルに光が入射される仕組みになっている。4つの各チャンネルには、観測対象の波長以外の混入を防ぐ透過フィルタと、光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電効果を利用した光電子増倍管が装着してある。最終的にオーロラ発光輝線以外をフィルタリングした入射光を、光電子増倍管が測定をすることで、上記4波長発光輝線の光強度を観測する。フォトメータの諸元を表2.2にまとめる。

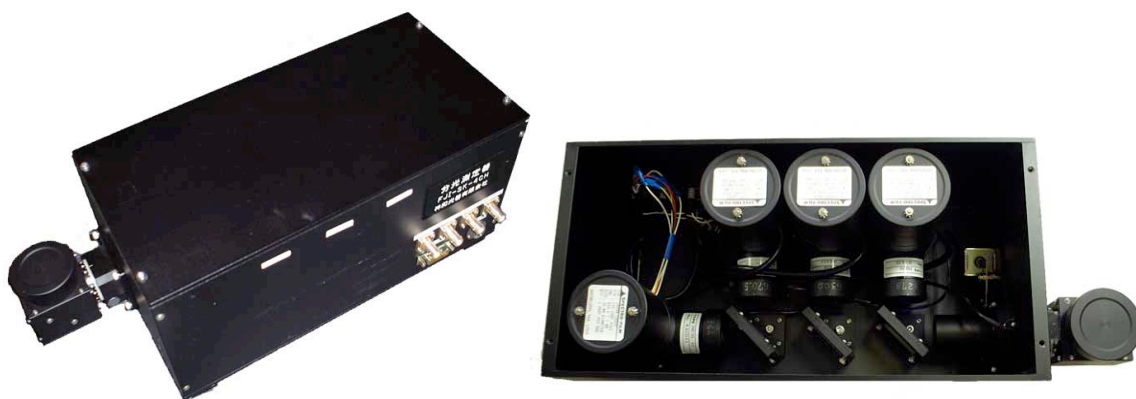


図2.3：4波長フォトメータの外観(左)と内部の様子(右)。

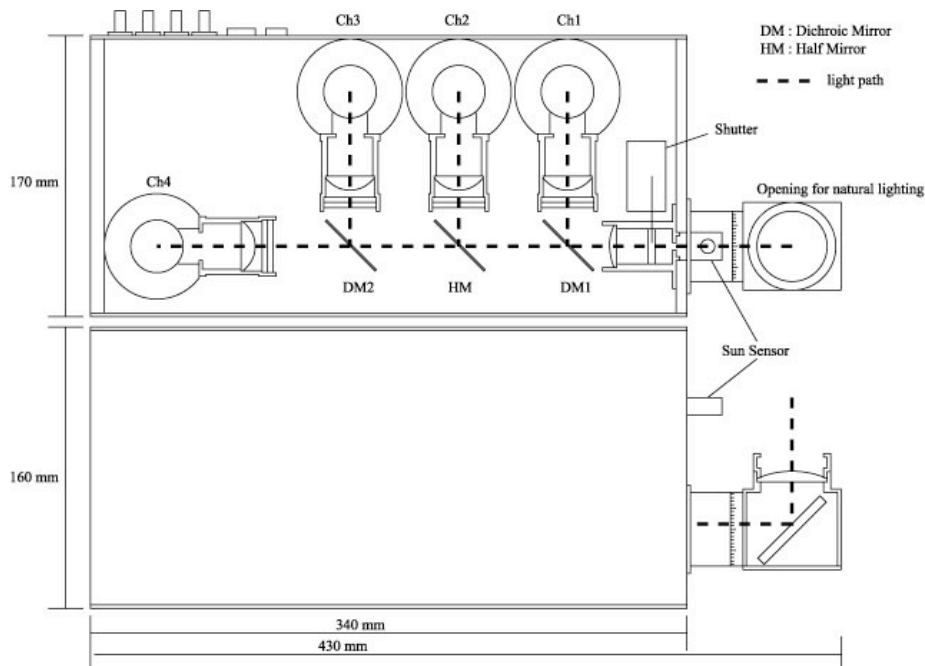


図 2.4: 4 波長分光型フォトメータを上面と側面から見た内部構造設計図。破線で示された部分が入射光路で、入射光は 1 枚の HM と 2 枚の DM によって各チャンネルへと分光される。

表 2.2: 4 波長分光型フォトメータの諸元。

名称	4 波長分光型フォトメータ
設置場所	トロムソ (69.6° N, 19.2° E)
受光部	浜松ホトニクス製 光電子増倍管 R928 (チャンネル 1-3) R636-10 (チャンネル 4)
透過フィルタ	427.8 nm, 557.7 nm, 630.0 nm, 844.6 nm
サンプリング	20 Hz
視野角	1.2 度
観測対象	沿磁力線方向のエレクトロンオーロラ発光強度

2.3 全天プロトンイメージャ

全天プロトンイメージャ（図 2.5。以下イメージャ）は全天撮影用魚眼レンズ、 $H\beta$ 発光輝線（486.1 nm）透過フィルタ、冷却式 CCD を備え、FAC 降り込み領域で生起されるプロトンオーロラの発光強度と空間分布を捉えることを目的としており、トロムソのフォトメータと同じ小屋に設置され、2006 年度の観測シーズンから無人観測を行っている。表 2.3 にイメージャの諸元を記述する。

1 章の研究背景知識に記述したようにプロトンオーロラの発光強度はとても小さく、*Takahashi and Fukunishi* [2001]が行った光学観測では、プロトンオーロラの発光強度は約 160 R であることが示され、最大でも 300 R 程であることを明らかにした。本研究で用いたイメージャの CCD カメラは、これら過去の実験から明らかにされたプロトンオーロラ発光強度を検出できるように露光時間を 50 秒として設定してある。さらにハードディスクへの書込み時間として 10 秒の待機時間を挟んで、60 秒間隔でトロムソ上空のオーロラ分布イメージ画像を取得・保存している。また、降り込みプロトンの $H\beta$ 発光輝線の中心波長は場合によって約 1 nm ほどドップラーシフトすることが報告されているため、イメージャに装着する透過フィルタは 485.7 nm を中心波長とした半値幅 1.7 nm のフィルタを使用している。図 2.6 は 2008 年 4 月に国立極地研究所の光学実験室で行った、イメージャ透過フィルタ特性の測定結果である。

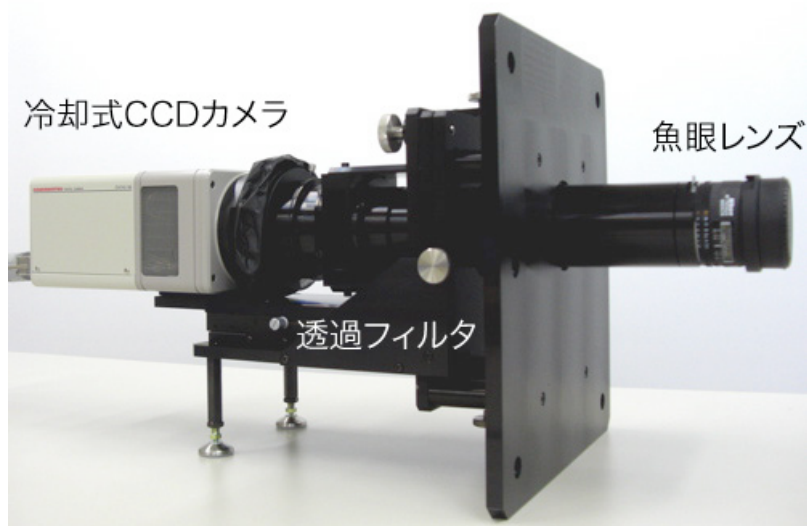


図 2.5：全天プロトンイメージャの外観。観測に使用する際は、レンズ部分を上空に向けるので、黒い四角い部分を観測小屋の天窓近くに固定して、天井から吊り下げられるような形になる。

表 2.3 : 全天プロトンイメージャの諸元。

名称	全天プロトンイメージャ
設置場所	トロムソ (69.6° N, 19.2° E)
レンズ	ニコン製 Nikon Ai AF Fish-eye-Nikkor 16mm F2.8D
受光部	浜松ホトニクス製 Degital CCD camera C4742-98 K/L G シリーズ
フィルタ特性 2008年4月	透過中心波長 : 485.7 nm 透過光半値幅 : 1.70 nm
撮影間隔	60 秒 (50 秒露光 + 10 秒待機)
撮影解像度	512×512 ピクセル (0.4 度の空間分解能に相当)
観測対象	プロトンオーロラ発光強度及び空間分布

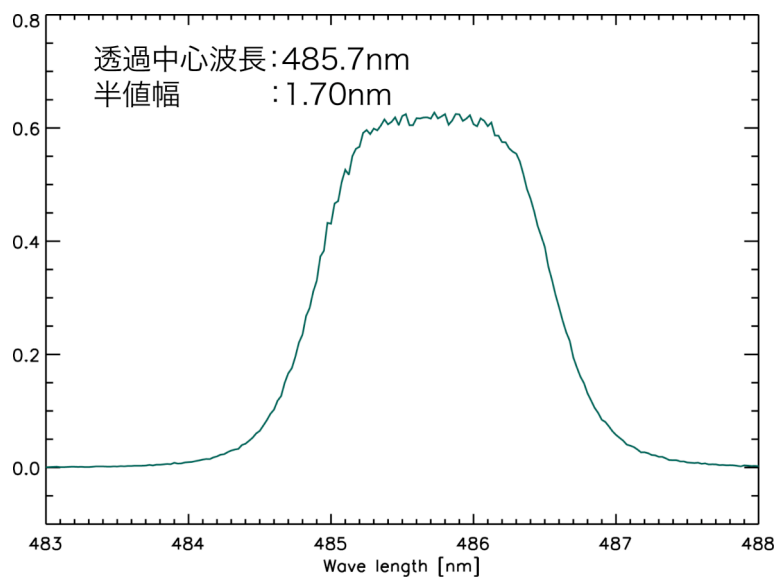


図 2.6 : プロトンイメージャに装着される、 $H\beta$ 発光輝線透過フィルタの波長特性。縦軸の単位は入射光強度に対する透過光強度比である。2008年4月に測定。

2.4 全天デジタルカメラ

全天デジタルカメラ（以下ASC：All Sky Camera）はノルウェー・トロムソで国立極地研究所（NIPR）が有人観測で運用している光学観測機器で、市販のハイエンド一眼レフカメラに全天撮影用の魚眼レンズを備えている。そのため非常に高い解像度で上空のオーロラの空間分布や雲など障害物の様子を知ることができる。透過フィルタは装備しておらず、発光輝線によるフィルタリングは行っていない。そのため明るい電子オーロラが主な観測対象である。ASCは露光時間15秒・撮影間隔30秒で運用している。表2.4にASCの諸元を記述する。

表 2.4：全天デジタルカメラの諸元。

名称	全天デジタルカメラ (All Sky Camera)
設置場所	トロムソ (69.6° N, 19.2° E)
レンズ	ニコン製 Nikon Fish-eye-Nikkor 8mm F2.8
受光部	キヤノン製 EOS-1Ds Mark II
フィルタ特性	透過フィルタなし
撮影間隔	30 秒 (15 秒露光 + 15 秒待機)
撮影解像度	4992×3328 ピクセル (0.05 度空間分解能相当)
観測対象	電子オーロラなどの空間分布

2.5 IMAGE 地上磁力計ネットワーク

IMAGE (Internationally Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) 地上磁力計ネットワーク (以下 IMAGE 磁力計) は、地理緯度 58 ~ 79 度の広範囲に設置された地上磁力計によって磁場変動を観測している磁力計観測網である。30 カ所におよぶ IMAGE 磁力計の基地局はオーロラ帯の広い領域に分散して位置している (図 2.7 参照)。そのため、IMAGE によって取得された磁場変動データは、電流と磁場の等価性からオーロラジェット電流や二次元水平電流分布 (等価電流系) の推定などに役立っている。本研究では IMAGE 磁力計のデータにより、プロトンオーロラ発光領域での等価電流系の推定を試みた。レーダー及び光学機器の同時観測を行うトロムソの基地局 (TRO) と、トロムソの南北に位置しているロングイヤビン (LYR)、ベアアイランド (BJN)、キルナ (KIR) の 4 つの基地局の磁場変動データを用いて解析をおこなった。

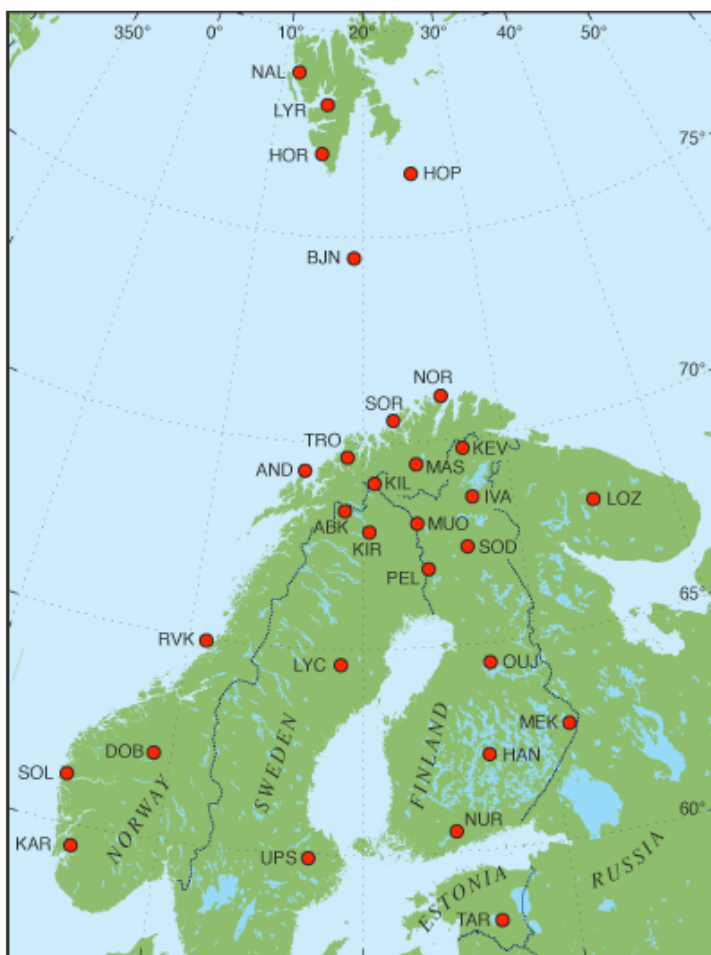


図 2.7 : IMAGE 地上磁力計ネットワークの観測位置 (赤丸)。オーロラ帯の広い緯度にわたって基地局が設置されている。

[IMAGE Magnetometer Network ウェブサイトより]

2.6 観測データリスト

本研究では、上記に示した複数の観測機器を用いて、FAC 降り込み領域に伴うプロトンオーロラ発光イベントの観測を行った。イベント選定に用いた観測データセットは2006年10月1日から2007年2月21日までの2006年度観測シーズンである。ここでは2006年度に観測されたデータセットの概況について記述する。

条件を満たすイベントを選定するにあたり、まず初めに2006年度シーズンの全ての日の各観測機器の稼働状況のリスト化を行った。高感度の光学機器に月照の入り込みを防ぐなどの理由によって稼働を止めていた日を除くと、2006年度シーズン中に全天プロトンイメージャは83晩のデータを取得しており、観測時間は49843分におよぶ。そこから更に EISCAT UHF レーダー、4波長分光型フォトメータ、全天デジタルカメラなどの稼働状況、および全天プロトンイメージャと全天デジタルカメラの画像データから、オーロラの発生状況を加味して選定を行うと、解析対象となりそうなイベントは全部で10晩あった(表2.5)。UHF と記述のある列は EISCAT UHF レーダーの観測プログラムを示していて、CP1: 磁力線方向観測、CP2: 4方向スキャン観測、でそれぞれ観測されたことを意味する。その他の各機器名の列の○×は稼働状況を表し、○は稼働していたことを、×は稼働していなかったことを意味する。Aurora の列の○◎は、○:Moderate, ◎:Active としてオーロラの活動度を分類している。

表2.5の10晩のデータセットの中から、さらに本研究目的のターゲットとなる、

- (1) 下向き FAC に伴うと思われる電子密度の減少が起きていた。
- (2) 強い水平電場の発生を示すイオン温度加熱や電子温度加熱が起きていた。
- (3) 降り込みプロトンによるプロトンオーロラ発光を捉えていた。

の条件を満たすイベントの選定を行ったところ、表2.5の青色で網かけしたデータセットだけが上記条件を満たしていた。そのため本研究では2006年10月20日のデータセットを用いてイベント解析を行った。

表 2.5 : 各観測機器の稼働状況と、オーロラ活動のリスト。

No.	年/月/日	UHF	Imager	Photometer	ASC	Arurora
1	2006/10/20	CP1	○	○	○	◎
2	2006/10/22	CP1	○	○	×	◎
3	2006/11/15	CP1	○	○	○	○
4	2006/11/23	CP1	○	○	○	◎
5	2006/11/24	CP1	○	○	○	○
6	2006/11/25	CP1	○	○	○	◎
7	2006/12/12	CP1	○	○	○	◎
8	2006/12/14	CP1	○	○	×	◎
9	2007/01/19	CP1	○	○	×	○
10	2007/02/07	CP2	○	○	×	◎

第3章 解析方法

3.1 プロトン降り込み領域の特定

本研究でターゲットとしている下向き FAC 領域で生起していると考えられる機構は、電離圏電子が磁気圏へ流出することに伴って電気伝導度の減少が起きており、その結果、電流系の連続性を保つために沿磁力線電場強度が増大されることで電流量を維持していると考えられる。このような機構が生起される領域では、電流量を維持するために増大した下向き磁力線電場によって加速された磁気圏起源プロトンの降り込みが起これ、プロトンオーロラの発光現象が観測されることが期待される。このプロトンオーロラ発光を光学観測することで、下向き FAC 流入領域の特定を行った。

領域を特定するにあたり、プロトンオーロラ発光の特性を考慮して、全天プロトンイメージャによるプロトンオーロラ発光強度と、4波長フォトメータによる電子オーロラ発光強度の比較を行った。解析方法を以下に示す。

プロトンオーロラ H β 輝線 (486.1 nm) 発光強度を観測する際に注意すべきことは、プロトンオーロラ以外の光源からの入り込みの影響である。H β 輝線への主な影響は以下の3つが挙げられる。

- (1) 電子オーロラ発光の H β 輝線に近い発光輝線からの影響
- (2) 電子により励起された窒素分子の Vegard-Kaplan 帯 (483.6 nm に中心発光輝線をもつ極端紫外線から可視光域までの広いバンド幅) 発光による影響
- (3) プロトン自身の加速降り込みによる励起ではなく、加速電子との衝突によって励起されたプロトンの H β 発光。通常の高速に加速された降り込みプロトンと異なり、発光輝線のドップラーシフトが見られない特徴をもつ。

Takahashi and Fukunishi [2001]は論文の中で、これらの H β 輝線への影響の程度について報告をしている。それぞれの H β 輝線に対する影響の度合いは、

- (1) 入り込み効果は大きく無視できない。影響分を差引く必要がある。
- (2) 入り込み効果はプロトン発光強度に対して極めて小さい。
- (3) プロトン発光強度の 10 % 程度。

としている。本研究は上記の影響はいずれも降り込み電子が起因していることに着目し、

- ・ 全天プロトンイメージャが沿磁力線方向に H β 輝線の発光を感知している。
- ・ 4波長フォトメータが磁力線方向に電子オーロラ発光を感知していない。

この2つの条件を満たすオーロラ発光をプロトンオーロラと定義し、その空間分布をプロトン降り込み領域として解析を行った。プロトンイメージャなどの全天画像データから、沿磁力線方向や地理座標を決定する方法は次節で述べる。

3.2 星を用いた全天イメージ画像の座標変換

イベント中のオーロラ空間分布を調べるため、星を用いて座標の較正を行い、全天イメージ画像の地理座標上への投影を行った。この座標変換計算は *Sakaguchi* [2006] で示された球面三角法による方法を基にしている。この節では本研究で行った座標変換方法を記述する。はじめに座標変換の演算手順についての概要を示す。

- (1) いくつかの星を選出し、全天画像での位置 $[x(\text{pixel}), y(\text{pixel})]$ と、地平座標系 [方位角(度), 天頂角(度)] の値を求める。座標系の定義は図 3.1 に示す。
- (2) 天頂距離と天頂角の関係を近似した 1 次関数式を最小二乗法により決定。
- (3) 画像全ての画素について、導出した関数を用いて画素位置 $[x(\text{pixel}), y(\text{pixel})]$ から地平座標系 [方位角 (度), 天頂角 (度)] に変換。
- (4) 地平座標系を球面三角法によって地理座標系 [地理緯度 (度), 地理経度 (度)] に変換。
- (5) 画像データを地理座標上に投影して完成。

以上のような手順を踏んでいる。以下に各手順の詳細をまとめる。

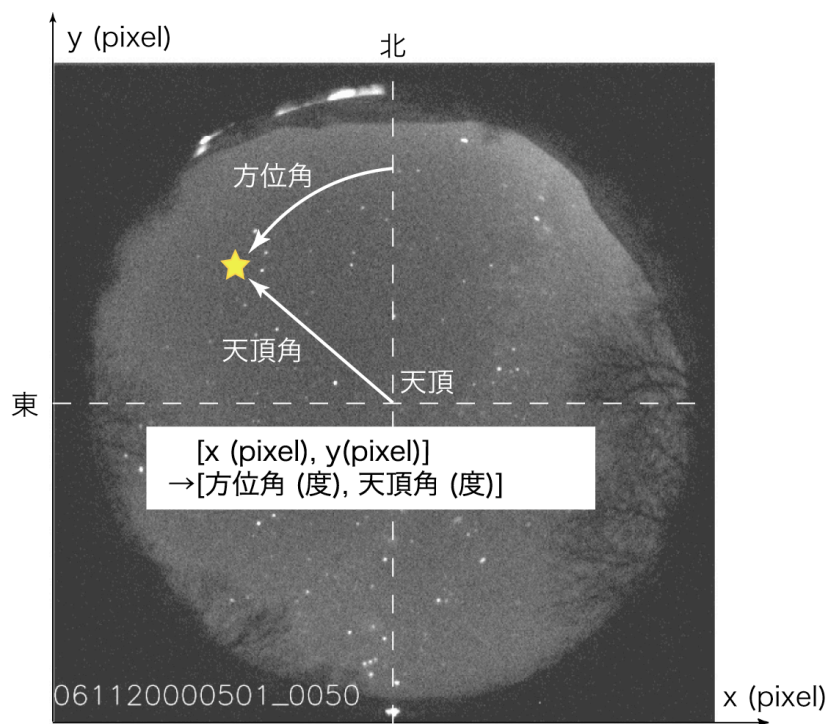


図 3.1: 全天カメラによって得られたデータと地平座標系の定義。

手順（１）：全天画像の座標較正を行う為、全天から偏りの無いように約 50 個の星を選出した。較正画像は星がしっかりと見えている晴天時の複数の画像を用いて行い、主に観測地点であるトロムソでよく見える北斗七星とカシオペア座を使用した。選出した星の位置から地平座標を求める際に使用したプラネタリウムソフトは「Stellarium」というフリーソフトである。このソフトは星の地平座標計算にヒッパルコス星表を使用していて、2-4 ミリ秒角の精度をもっている。

手順（２）：星が位置する座標ではプラネタリウムソフトを使って直接天頂角を求めることができるが、星の写っていない部分を含めた全天を較正するためには、天頂からの距離[pixel]と天頂角[度]の関係式を求める必要がある。ここでは魚眼レンズの天頂距離(Zenith Distance)-天頂角(Zenith Angle)特性は線形型になると仮定して、これにフィットする近似 1 次関数、式(3.1)を最小二乗法により導出した。この時、観測機器の設置状況により必ずしも全天画像の中心に天頂が位置するとは限らないので、天頂距離を求める際に正確な天頂を知る必要がある。天頂の決定方法は、50 個の星から近似一次関数を求める際に、画像中心付近の画素全てについて天頂を仮定して最小二乗計算を繰り返し行い、全方位角の星との残差が最小となる画素を天頂とした。

$$\text{Zenith Angle} = \alpha \cdot [\text{Zenith Distance}] + \beta \quad (3.1)$$

手順（３）：手順（２）で求めた天頂から全画像画素の天頂距離を求め、天頂距離-天頂角近似式に代入することで画像全画素について天頂角を求めた。各画素の方位角は、天頂との三平方の定理により求める。この際、観測機器が必ず真北を向いているとは限らないので、天頂と北極星を結ぶ直線を方位角 0 度の基準線として、求めた方位角はこのズレの差分を修正する必要がある(図 3.2)。

天頂距離(Zenith Distance)と方位角(Azimuth)を求める式は、

$$\text{Zenith Distance} = \sqrt{(X_{zenith} - x)^2 + (Y_{zenith} - y)^2} \quad (3.2)$$

$$\text{Azimuth} = \arctan\left(\frac{X_{zenith} - x}{y - Y_{zenith}}\right) \quad (3.2)$$

となり、変数はそれぞれ較正画素座標 = (x, y)、天頂座標 = (Xzenith, Yzenith)である。

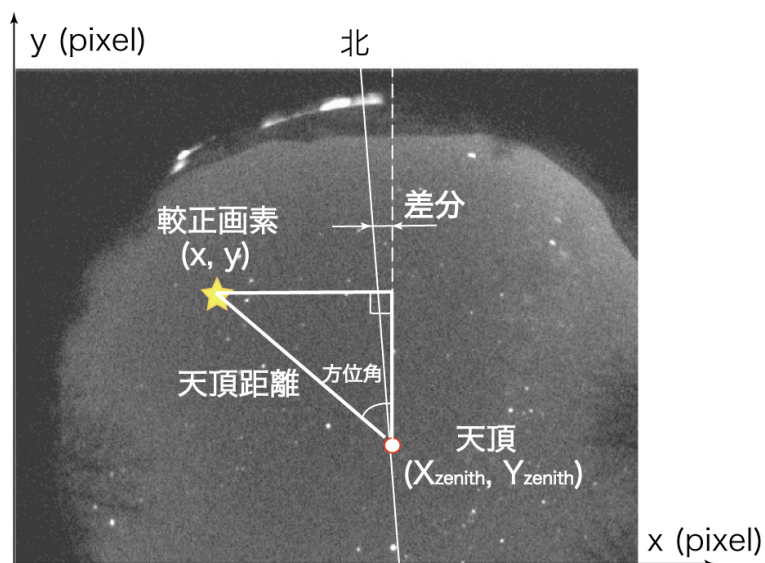


図 3.2 : 天頂座標、較正画素座標、天頂距離、方位角、観測機器の真北からのズレの位置関係。

手順 (4) : 最終的に地図上へ画像を投影させる為には地理座標系へ変換をしなければならない。地平座標系(方位角, 天頂角) と、地理座標系(緯度, 経度) の位置関係を表すと図 3.3 のようになる。

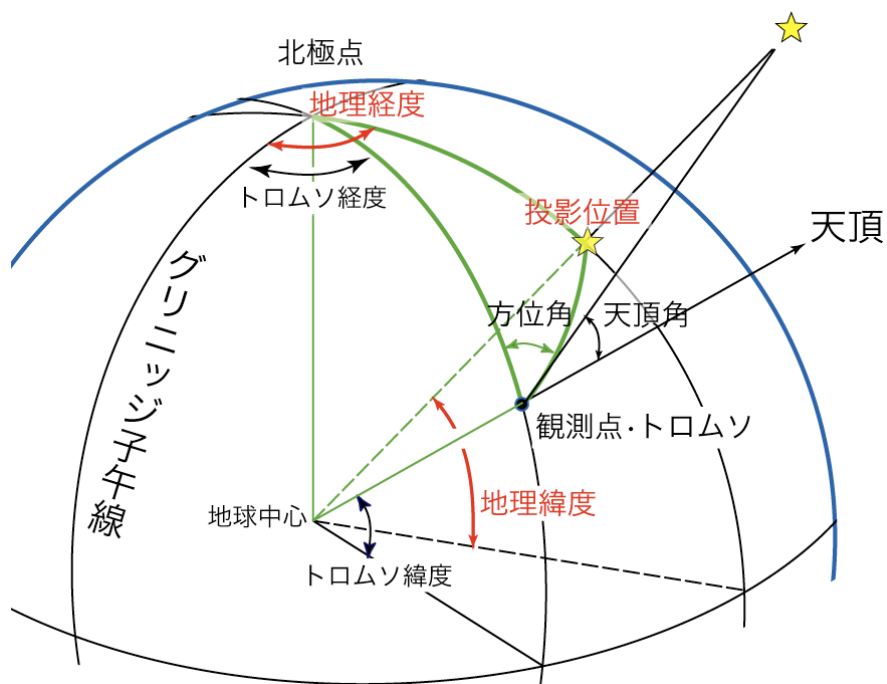


図 3.3 : 地平座標系と地理座標系の幾何学的空間配置。

更に、図 3.3 において「地球中心・観測点・投影位置」の 3 点を結ぶ平面で断面図を描くと図 3.4 になる。ここで示した星マークは実際にその位置にあるという訳ではなく、見かけ上の位置である。実際の星は破線の延長線上の遥か遠方にあるが、ここで知りたいのはオーロラ発光の空間分布であるので、星の高度をオーロラの発光高度と仮定し、見かけ上の位置から鉛直下向きの地表面に画像を投影させることで、地球上のどの地点の上空でオーロラ発光が起きているのかを調べた。実際の座標変換の演算について以下に示す。

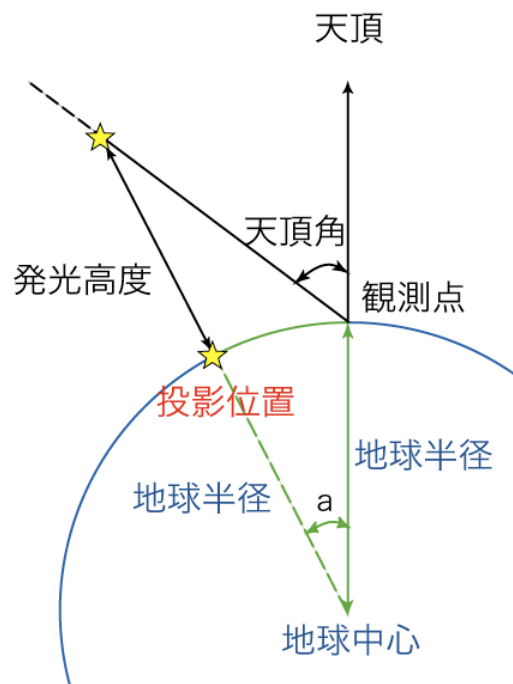


図 3.4 : 地球中心・観測地点・投影位置の 3 点を結んだ断面図。

まず、球面三角法の計算に入る前に、天頂角から地球中心角 a を導出しておく。図 3.4 の三角形に対して平面三角法正弦定理を適用すると、

$$\angle a = \text{Zenith} - \sin^{-1} \left(\frac{Re \cdot \sin(\text{Zenith})}{\text{Height} + Re} \right) \quad (3.3)$$

となる。ここでは天頂角 (*Zenith*)、地球半径 (*Re*)、発光高度 (*Height*) を表していて、地球半径 6378 km、発光高度はプロトンオーロラの発光ピークである 120 km [Vallance, 1979] として計算を行った。なお厳密には、観測点の海拔高度を考慮する必要があるが、トロムソの海拔はせいぜい 200 ~ 300 m であり、地球半径やオーロラ発光高度に比べて極めて小さいのでここでは無視している。

次に図 3.3 の緑色で表された球の部分について球面三角法を適用して地平座標を地理座標へと変換する。用いる式は以下の球面三角法の正弦定理と余弦定理の式である。式(3.4) (3.5) で用いた変数は、図 3.5 に示す変数に対応する。

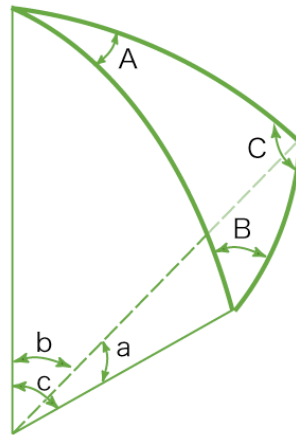


図 3.5 : 球面三角法で用いる各変数と図形の対応。

$$\frac{\sin(a)}{\sin(A)} = \frac{\sin(b)}{\sin(B)} = \frac{\sin(c)}{\sin(C)} \quad (3.4)$$

$$\cos(b) = \cos(c)\cos(a) + \sin(c)\sin(a)\cos(B) \quad (3.5)$$

式 (3.4) の左辺と中辺より $\angle A$ について、式 (3.5) より $\angle b$ について解くと、計算結果はそれぞれ式(3.6)、式(3.7)となる。

$$\angle A = \sin^{-1}\left(\frac{\sin(a)\sin(Azimuth)}{\sin(b)}\right) \quad (3.6)$$

$$\angle b = \cos^{-1}(\sin(LAT_{Tromso})\cos(a) + \cos(LAT_{Tromso})\sin(a)\cos(Azimuth)) \quad (3.7)$$

ここで LAT_{Tromso} は観測地トロムソの地理緯度 (69.6 度) である。以上で導いた $\angle b$ と $\angle A$ は図 3.3 に戻って見ると、

$$\text{地理緯度} = 90^\circ - \angle b \quad (3.8)$$

$$\text{地理経度} = \text{LNG}_{Tromso} + \angle A \quad (3.9)$$

となる。 LNG_{Tromso} は観測地トロムソの地理経度（19.2 度）である。

手順（5）：以上に示した計算を全ての画像画素に対して行い、各画素で得られた地理座標を使って地図上へ全天画像のマッピングを行った。ここではプロトンイメージャの画像を例にとって手順を説明したが、全天デジタルカメラも同様の座標変換を経て、画像データを地図上へ投影させている。

3.3 電場強度の推定

電離圏電場強度と向きは、EISCAT UHF レーダーの3局1点観測によって得られたF領域の3次元イオン速度(\mathbf{v}_i)と、磁束密度(\mathbf{B})を用いて電場ドリフトの式 (3.10) から導出する。

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \quad (3.10)$$

しかし、本研究のターゲットとしている下向きFAC流入領域は、電流を担う電子キャリアの流出によって電子密度が極めて低くなっている為、送信機のあるトロムソから離れているキルナ、ソダンキラ両受信機基地で十分な散乱波の強度が得られず、電場の導出にUHFレーダーのイオン速度データを使用できなかった。

本研究では、電場強度の推定に *Davis and Robinson* [1997]がEISCAT UHF レーダーによる観測によって報告した、電場強度と電子温度関係の統計的關係を応用した。*Davis and Robinson* [1997]は電場増大に伴って生起される高度110 km付近の電子温度の加熱について、900時間を超えるEISCAT観測から電場増大との關係を定量的に明らかにした(図3.6)。この高度110 km付近での電子加熱は、電場強度の増大に伴って加速されるプラズマ粒子のジャイロ周波数と中性大気衝突周波数の違いから生じる速度シア構造によって生起される。この一連の不安定現象は2流体不安定(Farley-Buneman不安定)として知られているものである。

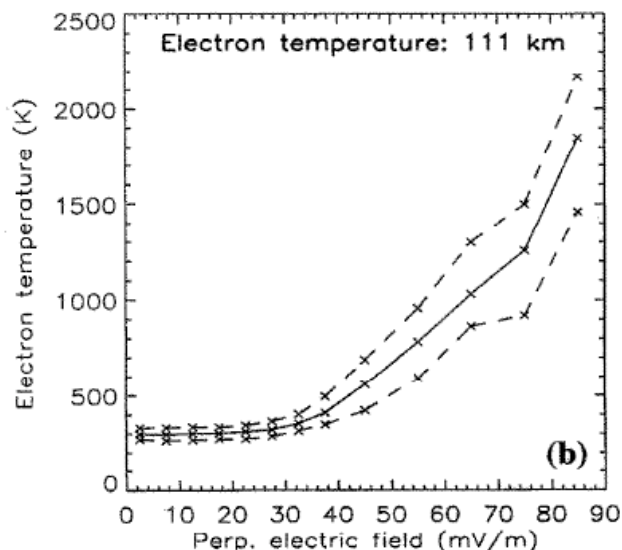


図 3.6: 高度 111 km の電子温度と電場強度の關係を表す。[*Davis and Robinson*, 1997]

報告によると、電場による電子温度上昇は電場強度 30 mV/m を閾値として、それ以下の電場強度で電子温度上昇は起こらないとしている。これを踏まえ、図 3.6 のグラフから電場強度と電子温度の関係を示す式を決定した。傾きの異なる領域をふたつに分けて、電場強度 E が [30 ~ 75 mV/m] の時と、[75 mV/m ~] の時の領域で電場強度 E (mV/m) - 電子温度 T_e (K) を近似する式を導出した。

$$\begin{aligned} T_e &= 21 \cdot E - 330 & (30 < E < 75 \text{ mV/m}) \\ T_e &= 60 \cdot E - 3250 & (E > 75 \text{ mV/m}) \end{aligned} \tag{3.11}$$

この式に EISCAT UHF レーダーから得られた高度 110 km での電子温度を代入することにより、電場強度の推定を行った。

3.3 等価電流系の推定

図 (1.3) に示したホール電気伝導度 (σ_H)、ペダーセン電気伝導度 (σ_p) の高度分布から、極域電離圏を流れる電流は比較的薄い層状電流とみなすことができる。地上の磁場変動は、高度 h を水平に流れる電流強度 I (A/m) の面電流によって起こされると仮定し、電流の回りに出来る磁場の位置関係を示したビオ・サバルの法則 (式 3.12) を用いて、IMAGE 地上磁力計の磁場変動データから電離圏電流の推定を行った。

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu I}{4\pi r^3} d\mathbf{l} \times \mathbf{r} \quad (3.12)$$

ただし、ここではあくまでも電流が高度 h で水平方向にシート状で流れているという仮定のもとづいて算出したものである。計算で求められた電流量が実際に電離圏を流れている保証は無い。この仮定の下で磁場変動から求めた電流系を「等価電流系」と呼ぶ。ここでは、計算から求める対象を等価電流系の電流方向と相対的な電流量の導出だけにとどめて、電流強度の絶対値は 3.2 節と 3.4 節に示す電場と電気伝導度を用いた別の方法により導出を行った。以下に磁場変動から等価電流系を求める方法を述べる。

4つの地上基地局で観測された磁場変動は、各基地局の上空に流れる水平シート電流によって生起される。すなわち、上空を流れる電流要素 $d\mathbf{l}$ が真下の地上 (\mathbf{r}) に誘導する磁場は水平面内で 90° 位相を変化させる。ここでは、等価電流系方向の推定が目的のため、係数を省いてベクトル演算を行うと、磁場変動 $d\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$ と電流 ($d\mathbf{l}$) の位置関係は式 (3.13) となる。電流と磁場の空間配置は図 3.7 となる。

$$d\mathbf{l} = -B_y \hat{\mathbf{x}} + B_x \hat{\mathbf{y}} \quad (3.13)$$

$\hat{\mathbf{x}}$ と $\hat{\mathbf{y}}$ は地理座標北 (X-component) と東 (Y-component) の単位ベクトルである。

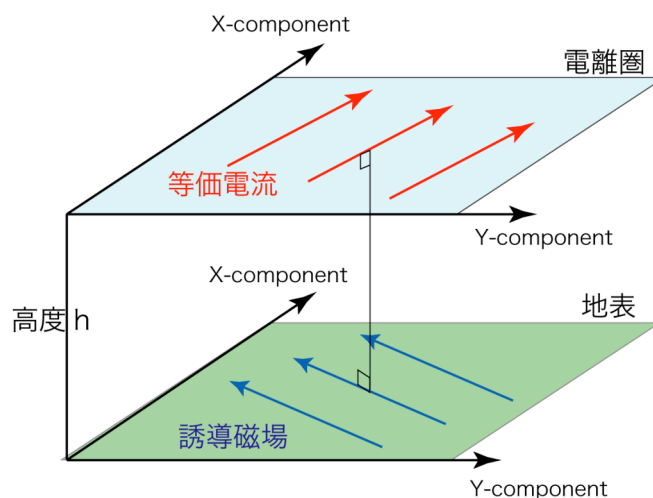


図 3.7 : 等価電流と誘導磁場の空間配置。

3.4 電気伝導度の導出

式 (1.1) の電離圏電流と電場の内積で表されるエネルギー散逸はペダーセン電流が担っている。本研究ではペダーセン電流を推定するため、ペダーセン電気伝導度 σ_P (S/m) を導出した。導出には *Brekke and Hall* [1988] が示した式 (3.12) を用いた。

$$\sigma_P = \frac{N_e \cdot e}{B} \left[\frac{\nu_{en} \omega_e}{\nu_{en}^2 + \omega_e^2} + Q_{Light} \frac{\nu_{inL} \omega_{iL}}{\nu_{inL}^2 + \omega_{iL}^2} + Q_{Heavy} \frac{\nu_{inH} \omega_{iH}}{\nu_{inH}^2 + \omega_{iH}^2} \right] \quad (3.12)$$

- N_e : 電子数密度 [m^{-3}]
- e : 電気素量 [C]
- B : 磁束密度 [T]
- ν_{en} : 電子と中性大気の衝突周波数 [s^{-1}]
- ν_{inL} : 軽いイオンと中性大気の衝突周波数 [s^{-1}]
- ν_{inH} : 重いイオンと中性大気の衝突周波数 [s^{-1}]
- ω_{en} : 電子のジャイロ周波数 [s^{-1}]
- ω_{iL} : 軽いイオンのジャイロ周波数 [s^{-1}]
- ω_{iH} : 重いイオンのジャイロ周波数 [s^{-1}]
- Q_{Light} : 全イオンに対する軽いイオンの割合
- Q_{Heavy} : 全イオンに対する重いイオンの割合

ここでは、プラズマは巨視的にみると電氣的に中性であるので、電子数密度とイオン数密度は等しいとしている。磁束密度の値は *IGRF2000* モデルを使用した。又、軽いイオンと重いイオンの定義はそれぞれ、

軽いイオン : 酸素原子イオン (O^+)

重いイオン : イオン組成比 3:1 の一酸化窒素イオン (NO^+) と酸素分子イオン (O_2^+) としている。式 (3.12) に用いる各粒子のジャイロ周波数、および衝突周波数は以下に示す。ここで電子と中性大気の衝突周波数は *Schunk and Walker* [1973] を、イオンと中性大気の衝突周波数は *Schunk and Nagy* [1978] の式を用いて計算を行った。

$$\omega_j = \frac{eB}{M_j} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned}
v_{en} = & 2.33 \times 10^{-17} \times n(N_2) \times (1 - 1.21 \times 10^{-4} \times T_e) \times T_e \\
& + 1.82 \times 10^{-16} \times n(O_2) \times (1 + 3.6 \times 10^{-2} \times \sqrt{T_e}) \times \sqrt{T_e} \\
& + 8.9 \times 10^{-17} \times n(O) \times (1 + 5.7 \times 10^{-4} \times T_e) \times \sqrt{T_e}
\end{aligned} \tag{3.14}$$

$$v_{inL} = [4.29 \times n(N_2) + 4.23 \times n(O_2) \times 2.41 \times n(O)] \times 10^{-16} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
v_{inH} = & [6.82 \times n(N_2) + 6.66 \times n(O_2) \times 0.342 \times n(O) \times \sqrt{T_i} \\
& \times (1.08 - 0.139 \times \log_{10} T_i + 4.51 \times 10^{-3} \times (\log_{10} T_i)^2)] \times 10^{-16}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

M_e : 電子の質量 [kg]

M_{iL} : 軽いイオンの質量 [kg] (分子量 16.00)

M_{iH} : 重いイオンの質量 [kg] (分子量 30.51)

$n(N_2)$: 窒素分子数密度 [m^{-3}]

$n(O_2)$: 酸素分子数密度 [m^{-3}]

$n(O)$: 酸素原子数密度 [m^{-3}]

T_i : イオン温度 [K]

T_e : 電子温度 [K]

このとき高度積分をしたペダーセン電気伝導度 Σ_p (S) の式は、

$$\Sigma_P = \int_{h_1}^{h_2} \sigma_P dh \tag{3.17}$$

となる。積分高度範囲は $h_1 = 90$ km、 $h_2 = 330$ km として計算を行った。

第4章 解析結果

本章では、2006年10月20日に得られたデータを用いてイベント解析を行った結果を示す。

4.1 オーロラ発光と電離圏物理量の変化

図(4.1)は2020 - 2220 UTまでの光学観測データとEISCAT UHFデータをまとめて時系列プロットした図である。各データの物理量は上から順番に、

- (a) プロトンイメージャから求めた沿磁力線方向の $H\beta$ 発光輝線強度
- (b) フォトメータから求めた沿磁力線方向の427.8 nmと557.7 nm輝線の発光強度
- (c) UHFレーダーから求めた電子数密度の沿磁力線方向高度プロファイル
- (d) UHFレーダーから求めたイオン温度の沿磁力線方向高度プロファイル
- (e) UHFレーダーから求めた電子温度の沿磁力線方向高度プロファイル

である。本研究で行うイベント解析は、赤色破線で囲んだ2130 UT前後に見られる $H\beta$ 発光強度の増大や電子密度減少が生起された領域を対象としている。(a)-(e)各グラフの詳細は以下に述べていく。

4.1.1 オーロラ発光強度の比較

図(4.1)(a)のプロトンオーロラ発光強度と、図(4.1)(b)の電子オーロラ発光強度を比較することでプロトンオーロラ発光(下向きFACに伴うプロトンの降り込み)が生起された時間を決定した。図(4.1)(b)には、4波長分光型フォトメータで観測された電子オーロラの4波長のうち、プロトンオーロラの $H\beta$ 発光輝線(486.1 nm)と比較的近い高度領域に発光層を持つ427.8 nmと557.7 nmのふたつの発光輝線強度を示し、電子オーロラからの干渉効果を比較した。(a)と(b)のオーロラ発光強度を時系列で見ると、大きく2カ所にわけて発光強度増大がみられた。

- (1) 最初の $H\beta$ 発光強度増加は2040 UTから約30分にわたってダブルピークの形を持った発光が見られた。この $H\beta$ 発光強度は最大で150 - 160 R (Rayleigh)を観測している。(a)(b)両方のグラフでオーロラ発光の無かった2020 UTや2130 UTを夜空のバックグラウンドと仮定すると、 $H\beta$ 発光のバックグラウンド(~ 40 R)からの増大分は110 - 120 Rとなる。 $H\beta$ 発光増大と同時に起きている電子オーロラの発光強度は427.8 nm, 557.7 nmでそれぞれ5.0 kRと0.9 kRの値を観測している。

バックグラウンドを 0.2 kR, 0.1 kR として見積もると、電子オーロラの増大分は 4.8 kR と 0.8 kR である。

- (2) 2 回目の H β 発光強度増加は 2135 UT 頃に見られるピークである。H β 発光強度は 140 R を観測していて、バックグラウンドからの増大分は約 100 R となっている。これは一回目の発光の増大分 (110 - 120 R) とほぼ同じ値である。一方で、同時刻の電子オーロラ発光強度は 427.8 nm, 557.7 nm でそれぞれ 0.7 kR, 0.2 kR であり、バックグラウンドからの増大分は 0.5 kR と 0.1 kR となっている。

プロトンの降り込みによるプロトンオーロラ発光領域を特定するには、電子オーロラの H β 輝線への影響を考慮する必要がある。3.1 節で示した方法により、電子オーロラとプロトンオーロラの発光強度を比較する事で、降り込みプロトン領域を特定した。1 回目と 2 回目のオーロラの発光強度を比較すると、2 回目の電子オーロラの発光強度は 1 回目の発光強度の 1/8 ~ 1/10 の大きさ (0.1 kR / 0.8 kR ~ 0.5 kR / 4.8 kR) であった。そのため、電子オーロラの発光強度 (427.8 nm) が約 4.8 kR あった 1 回目のプロトンオーロラ発光強度 (110 - 120 R) には、電子オーロラからいくらかの影響があったと考えられる。しかし、2 回目のプロトンオーロラ発光時は、1 回目とほぼ同じ約 100 R の強度を示していたが、同時刻に見られた電子オーロラの発光は 1 回目の約 1/10 ほどであり、1 回目と比較して電子オーロラからの入り込みの影響はほとんどないと言える。従って 2 回目のプロトンオーロラの発光は、下向き FAC に伴う電場によって加速された降り込みプロトンによって生起されたものと考えられ、本研究では、この発光領域をプロトン降り込み域と特定してイベント解析をおこなった。このイベント中の地磁気活動度を示す各指数は、21 - 24 UT の K_p index はが 3⁺、AE index が 100 nT である。

4.1.2 電子数密度高度プロファイル

図 (4.1) (c) から読み取れる 2130 UT 付近のイベント中の電子数密度の変化は、局所的な電子数密度の減少を観測している。(a) のプロトンオーロラ発光と比べると、それよりも少し早い時刻 2120 UT 頃から電子密度減少が始まり、2126 UT に減少のピークを観測している。2127 UT 以降は電子密度が回復する様子が見られ、2140 UT 前にはほぼ元の密度レベル ($10^{11} \sim 10^{11.5} \text{ m}^{-3}$) に戻っている。また、高度によって電子密度減少が始まる時刻に違いがみえるが (減少領域の左端を結ぶと右上に向かう斜線になる)、高度毎の減少速度などの詳細については 4.3 節で解析結果を報告する。特に電子密度が変化する過程は極めて短時間に起きており、E 領域と F 領域の広い高度範囲で電子数密度の減少が見られた。

4.1.3 イオン温度高度プロファイル

図(4.1)(d)で示したイオン温度で見られる特徴は、2125 UT から高度 120 km 以上の広い範囲で温度上昇が見られ、これは 2150 UT まで続いた後、元の温度レベルに戻っている。(a)のプロトンオーロラの発光と見比べると、プロトンオーロラ発光(2130 UT-)よりも早い時間から温度上昇は始まり、オーロラ発光が終わる 2145 UT 頃よりも遅い時間まで温度上昇は続いている。この E 領域・F 領域で見られる温度上昇はジュール加熱と摩擦加熱とみられ、この時に磁力線水平電場の増大が起きていた事を示唆している。この時のイオン温度変化は高度により異なるが、おおむね全ての高度でバックグラウンド値から約 1000 - 1500 K の温度上昇が生起されていた。

4.1.4 電子温度高度プロファイル

図(4.1)(e)で示した電子温度で見られる特徴は、イオン温度と同じ 2125 - 2150 UT の時間帯で高度 110 km 付近で電子温度の上昇が見られた。これも水平電場の増大によって生起される 2 流体不安定による加熱と見られ、高度 110 km の電子温度は 1700 - 2000 K の値となっている。

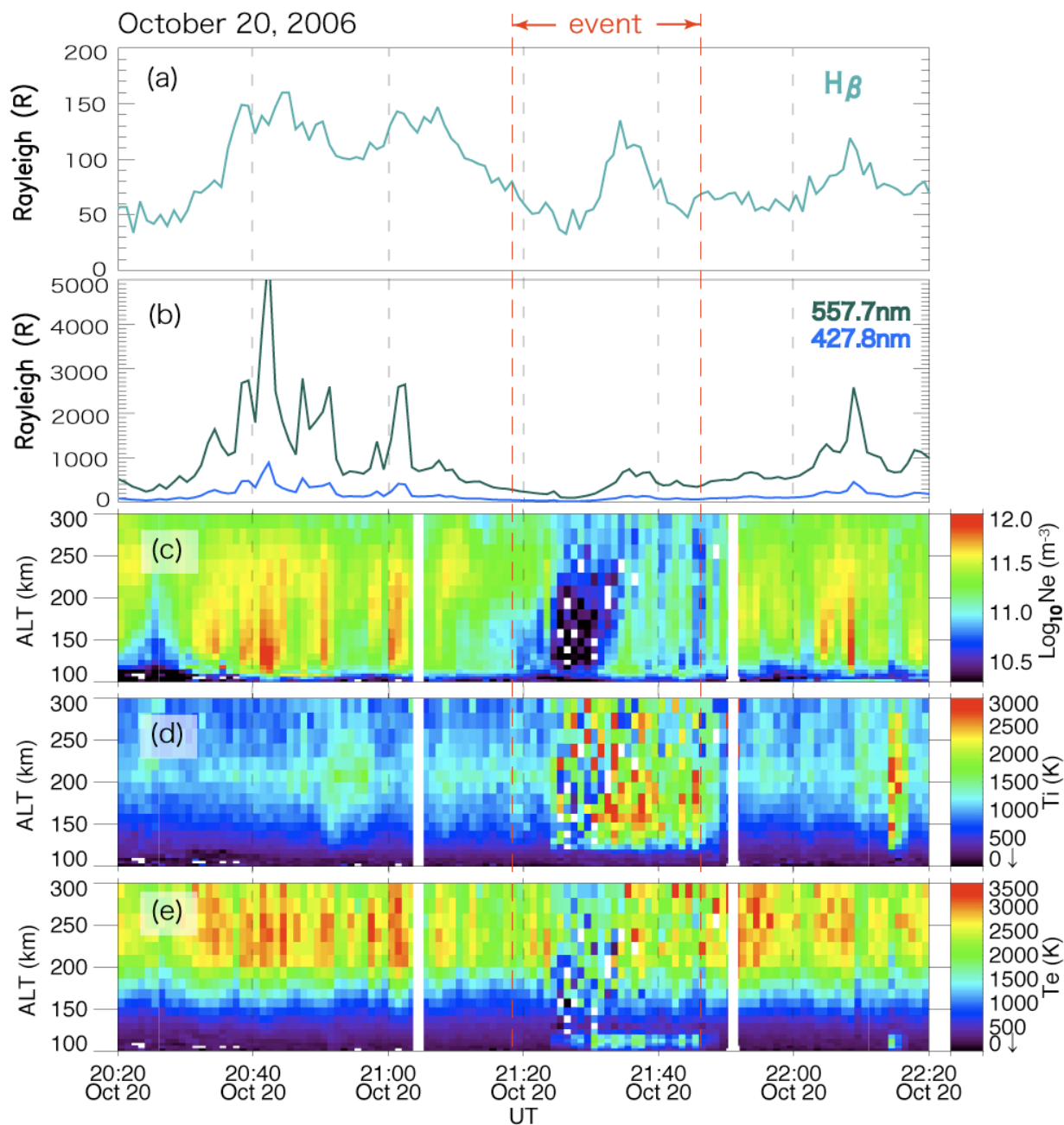


図 4.1 : オーロラ発光強度と電離圏物理量の 2020 - 2220 UT までの時系列プロット。各物理量は上から (a) プロトンオーロラ ($H\beta$) 発光強度、(b) 電子オーロラ発光強度、(c) 電子数密度、(d) イオン温度、(e) 電子温度。観測方向はいずれもトロムソでの沿磁力線方向であり、(c) (d) (e) の縦軸の高度は磁力線方向を示している。

4.2 プロトンオーロラと電子オーロラ空間分布

図 (4.2) (4.3) (4.4) が示すのは 2122 - 2127 UT (図 4.2) 、2128 - 2133 UT (図 4.3) 、2134 - 2139 UT (図 4.4) の1分毎のオーロラの空間分布の変化である。上段は全天プロトンイメージャ (イメージャ) によって得られたプロトンオーロラのマッピング図、下段は全天デジタルカメラ (ASC) によって得られた電子オーロラのマッピング図である。いずれもオーロラの発光高度を 120 km として 3.1 節で示した座標変換を行った。ここで透過フィルタを装備していない ASC の画像に写るオーロラを電子オーロラとしたのは、ASC は電子オーロラを撮影用に露出・感度設定をしてあり為、電子オーロラ発光 (~ 5 kR) と比べて極めて小さいプロトンオーロラの発光 (~ 150 R) は感知することができないためである。ここでは、イメージャと ASC を併用することで、プロトンオーロラと電子オーロラの空間配置を明らかにする。

図 (4.2) (4.3) (4.4) で示した赤い印はトロムソの位置である。図 (4.2) の ASC (下段) で 2122 UT に見られた東西方向に伸びた南北方向の幅 10 km ほどの電子オーロラアークは、2123 UT にトロムソの沿磁力線方向 (UHF レーダービーム方向、フォトメータ視野方向) を横切ってトロムソを北から南に横断していった後、トロムソの南に停滞する。2128 UT 以降、このトロムソの南に停滞する電子オーロラアークは、急激に発光強度を増しながら、電子の降り込みによるものと考えられる東西方向のディスクリートオーロラとして発達する。この電子オーロラは本イベント中、形を変えながら常にトロムソの南で活発な活動をしていた。2122-2127 UT のオーロラアークが南北方向に移動している間に、イメージャ (上段) 観測ではプロトンオーロラの発光は見られなかったが、2128 UT 以降のディスクリートオーロラの発達と共にトロムソの東のイメージャ視野端からプロトンオーロラ発光が見られ、西向きへ移動をしながら、2131 - 2142 UT にかけてトロムソ上空を覆うように発達をしていった。このプロトンオーロラの空間スケールは南北方向に約 200 km、東西方向に約 150 km であった。なお、図中の白い破線は、雲や視野に入り込んだ木などの障害物があった部分を示している。以上のトロムソ上空のオーロラ発達の様子の時間経過をまとめる。

- | | |
|-----------|---|
| 2123 UT | : 東西方向の電子オーロラアークがトロムソを北から南に通過 |
| 2124 - | : アーク通過後、トロムソのレーダー視線方向にオーロラは無し |
| 2128 UT - | : 通過したオーロラアークがトロムソの南に停滞後、活発化 |
| 2128 UT - | : イメージャの東端から現れたプロトンオーロラがトロムソを覆うように移動していく。 |

2131 UT などで見られる、トロムソの南に停滞する電子オーロラアーク（下段）と同じ場所にあるプロトンオーロラ発光は、電子オーロラからの入り込みによる影響のものと考えられる。しかし 2123 UT にオーロラアークが通過した後、電子オーロラがトロムソのレーダー視線方向を覆うことは無かった為、トロムソの東から移動してくるプロトンオーロラの発光は、電子オーロラからの入り込みの影響ではなく、降り込みプロトンによって生起された発光であると考えられる。これは、図 (4.1) (a) (b) のオーロラ発光のグラフと一致する結果である。

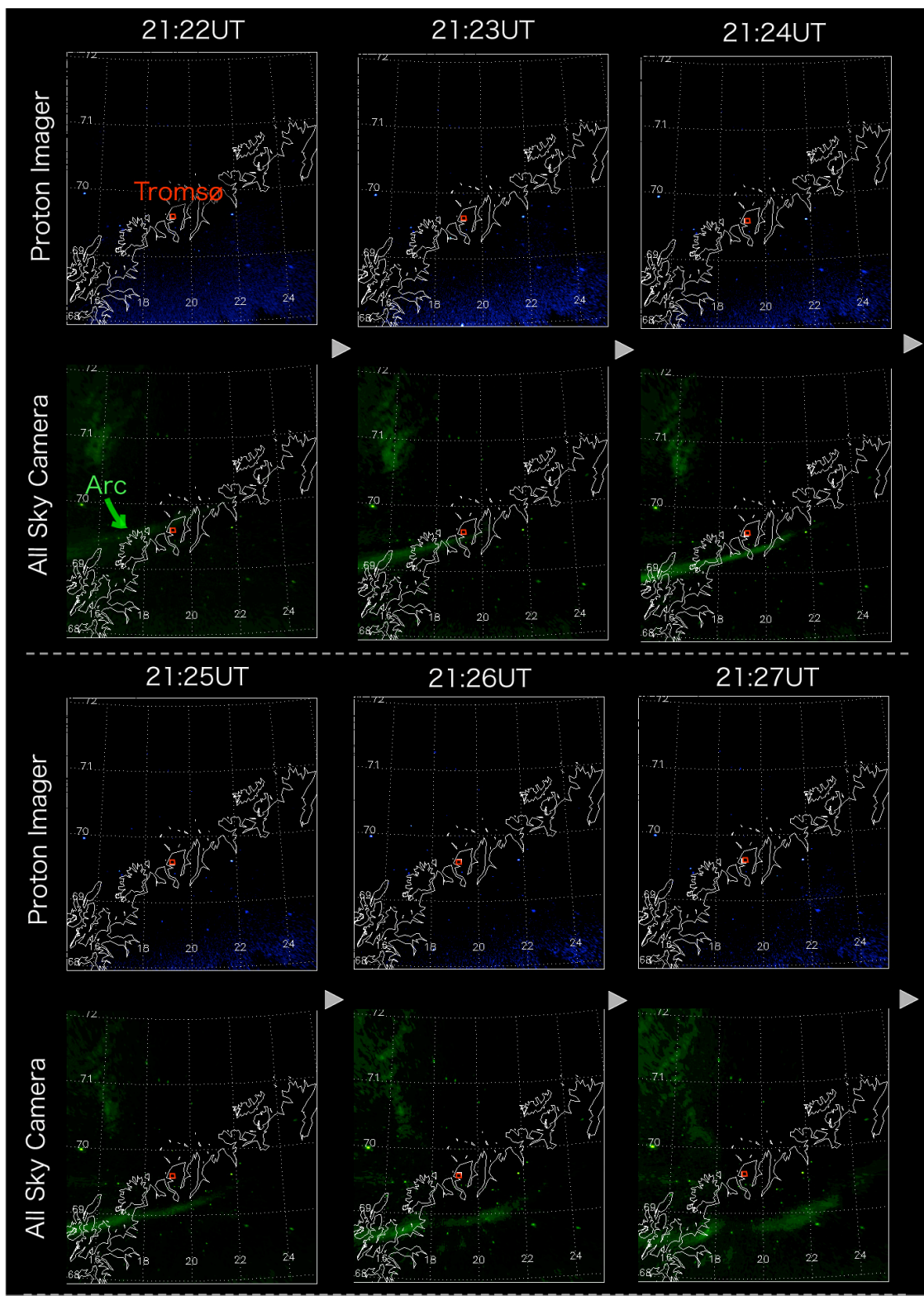


図 4.2 : 2122 - 2127 UT までのプロトンイメージャ (上段) と、
全天デジタルカメラ (下段) のオーロラ空間分布比較。

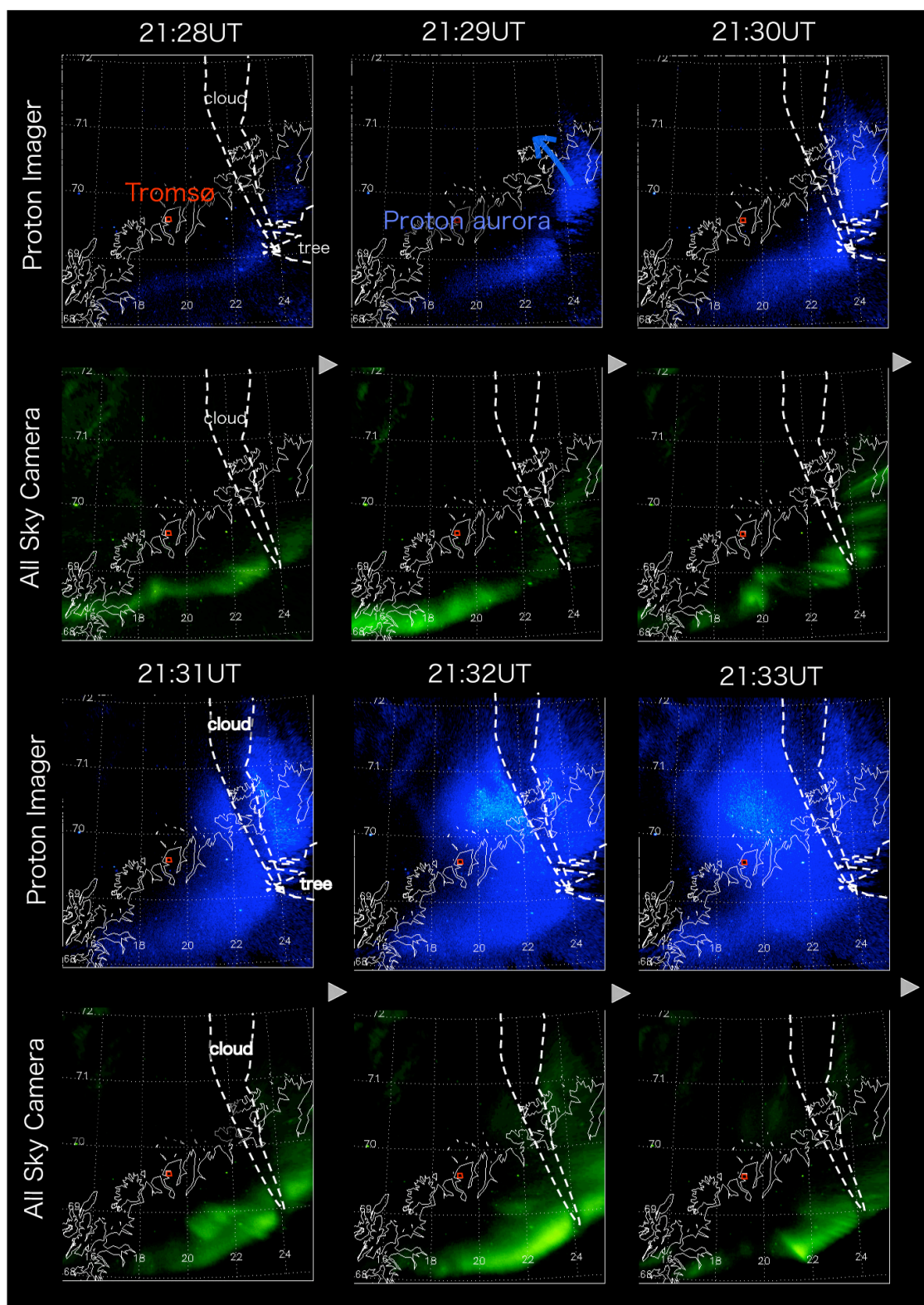


図 4.3 : 2128 - 2133 UT までのプロトンイメージャ (上段) と、
 全天デジタルカメラ (下段) のオーロラ空間分布比較。

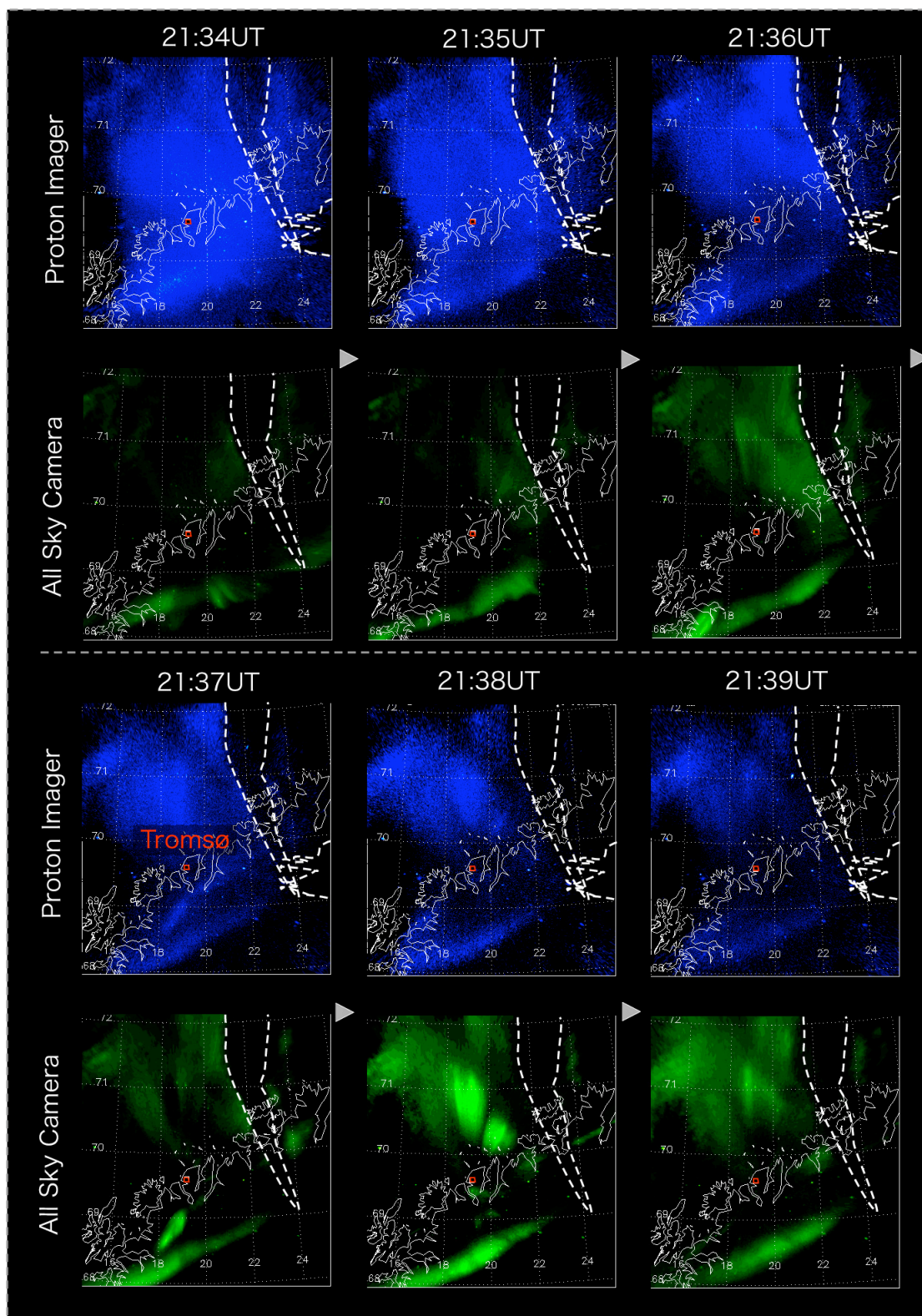


図 4.4 : 2134 - 2139 UT までのプロトンイメージャ (上段) と、全天デジタルカメラ (下段) のオーロラ空間分布比較。

4.3 電子数密度変化

図(4.1)(c)の電子数密度高度プロファイルより、2123 UT 頃から始まる電子数密度減少が見て取れる。この密度減少は 2126 UT に $\sim 10^{10} \text{ m}^{-3}$ まで落ち込んで減少のピークを観測した後、2127 UT には電子密度の回復に転じ、2140 UT 前には減少前のレベル ($> 10^{11} \text{ m}^{-3}$) に戻っている。この電子数密度の変化を高度毎に詳しく見てみると、2123 UT に東西方向に伸びるエレクトロンオーロラアークがトロムソ上空を通過した直後に E 領域・F 領域の広い高度で減少が始まっていた。つまり、アークの高緯度側で電子数密度の減少が起きていたことを示している。しかし、その後の減少変化は高度によって異なった様相を示していた。

図(4.5)はトロムソのレーダー視線方向(沿磁力線方向)の各時刻における電子数密度高度プロファイルである。広い高度範囲で電子密度の減少効果が見られるが、この変化は高度 120 km 以上で顕著に見られた。例えば、高度 150 km 付近で 2124 - 2126 UT の約 2 分間に起こる密度減少量は、減少前と比べて 1/10 以下の値になるような変化がおきていた。一方で、高度 120 km よりも低いところの電子数密度は、その他の高度と比べて減少量が少なく、例えば高度 115 km の減少量は 1/4 ほどである。図(4.5)の赤色破線で示されたものは 2110 UT におけるペダーセン電気伝導度の高度プロファイルである。ここで見られる極めて急激な電子数密度の減少は、ペダーセン電気伝導度のピークである高度 120 km を境に、それ以上の高度で顕著に見られる結果となった。

図(4.6)は 110 km, 120 km, 130 km, 150 km, 200 km の各高度の電子数密度の時間変化をプロットしたものである。図(4.6)からも高度 120 km 以上で減少が顕著に起きていることを見て取れる。例えば黒色で示された高度 110 km と、青色で示された高度 120 km の電子数密度変化を見てみると、電子数密度の減少が始まる前の 2120 UT 頃はほぼ同じ数密度を示しているのに対して、電子数密度の減少ピークである 2126 UT では、高度 110 km での減少量は比較的小さい値となっている。2122 UT での電子数密度を基準(100%)として、最も電子数密度が少なくなった 2126 UT での値を求めると、高度 110 km で 86%、高度 120 km で 8%、高度 130 km で 24%、高度 150 km で 13%、高度 200 km で 20%の減少が起きていた。灰色の破線で示したのは、プロトンオーロラ発光強度変化である。ここで見られた、電子数密度減少とプロトンオーロラ発光(プロトンの降り込み)が起きていた時間にはズレがある事を示しており、時系列で見ると、電子数密度減少が 2120 - 2126 UT に起こった後の、電子数密度が元の状態に戻る時にプロトンオーロラ発光が生起されていた。

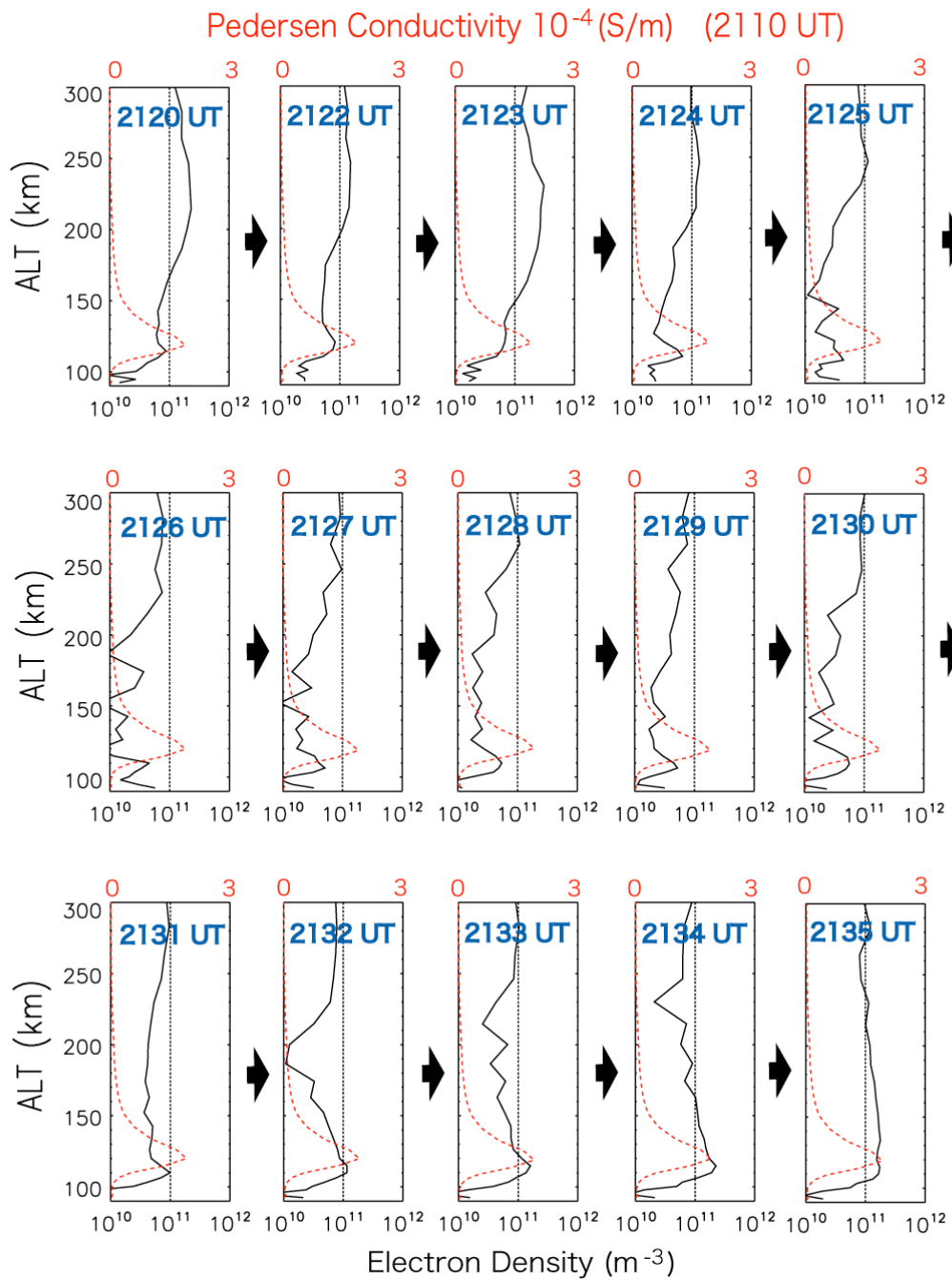


図 4.5: イベント中の各時刻における電子密度高度プロファイル (黒線) と 2110 UT でのペダーセン電気伝導度 (赤線) の高度プロファイル。ペダーセン電気伝導度のピークである高度 120 km より上では電子密度の減少が激しい。

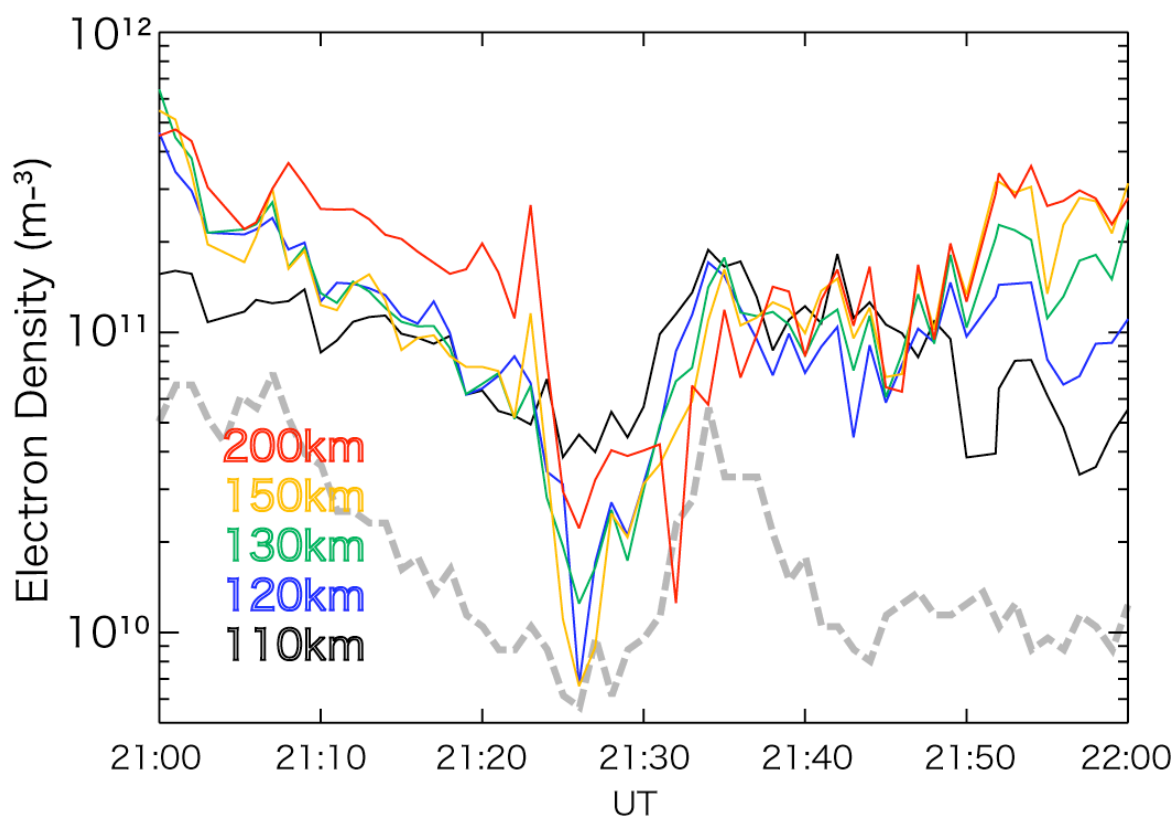


図 4.6 : 高度毎の電子数密度変化の時系列プロット。2124 UT から 2126 UT にかけて極めて短時間のうちに電子数密度の減少が起きている。灰色の破線はプロトンオーロラ発光強度の変化を示しているが、減少した電子数密度が回復する時にプロトンオーロラ発光の発生がみられた。

4.4 イオン・電子温度上昇と電場強度変化

図(4.1)(d)(e)で見られた2130 UT前後のイオン温度と電子温度の上昇は、電離圏電場の増大による摩擦加熱やジュール加熱があったことを示唆している。1.3節で述べたように、電場増大によって生じるイオンと電子の加熱には、それぞれ異なった機構によって加熱される特徴がみられた。図4.7は110 km, 120 km, 130 km, 150 km, 200 kmの高度でのイオン温度の時間変化を示している。強い水平電場によって駆動されるプラズマ粒子の摩擦加熱効果が大きくなる高度120 km以上でイオンの温度の上昇が顕著にみられた。一方、図4.8は110 km, 120 km, 130 km, 150 kmの高度での電子温度の時間変化を示している。強い水平電場が生じた領域では、加速されたイオンと電子の中性大気衝突周波数の違いから生じる速度差によって電流が駆動される。高度110 km付近の電子だけが加熱されているのは、E領域で生じる不安定構造の造波抗力による加熱が発生している事を示していた。

ここでは3.3節で述べた、*Davis and Robinson* [1997]によって明らかにされた、電子温度と電場強度の関係の見積もりを用いて、このときに生起された電場強度の推定を行った。*Davis and Robinson* [1997]が示したグラフから読み取った関係式3.11にEISCAT UHFレーダーから得られた高度110 kmでの電子温度を代入して求めた。このときの電場強度の変化は図4.9である。電子数密度の減少が起きていた2123 - 2127 UTには70 - 80 mV/mにおよぶ電場の増大が見られ、プロトンオーロラがトロムソのレーダー視線方向に入り込んできた2130 UT以降には80 - 90 mV/mまで電場の増大が起きている事を示している。

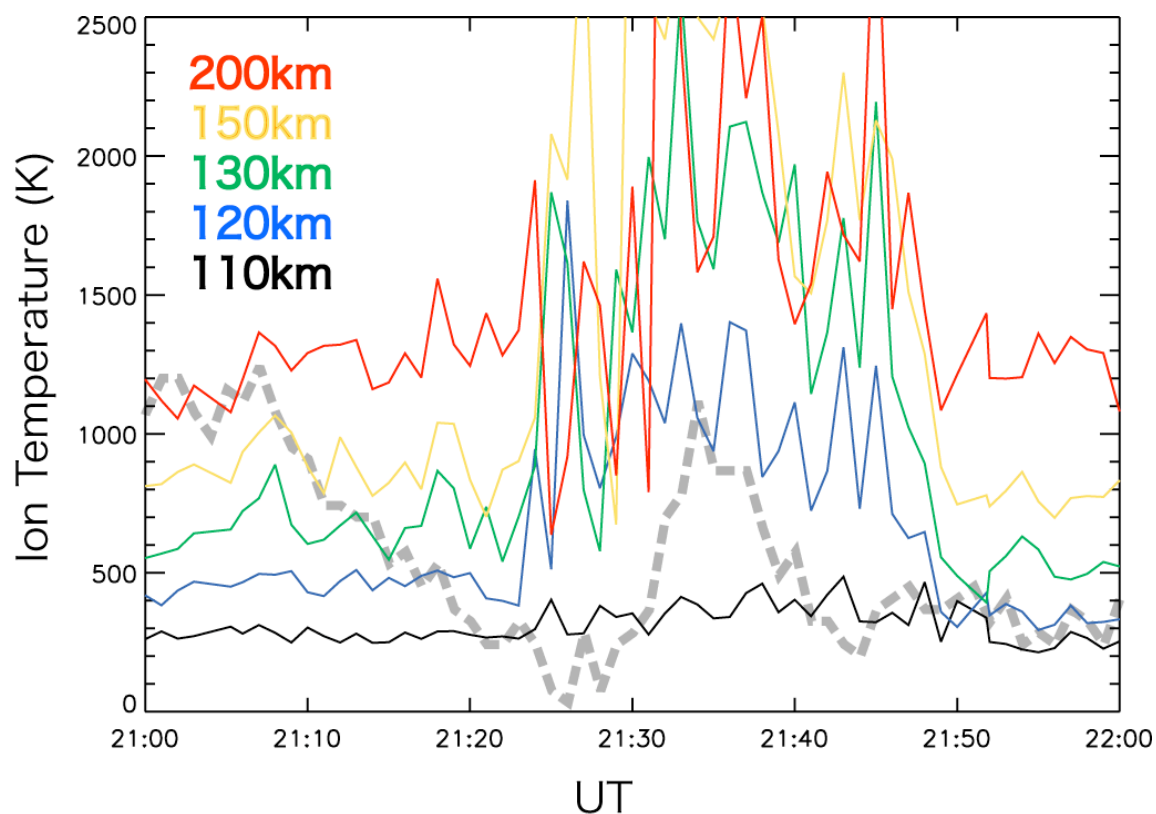


図 4.7 : 様々な高度のイオン温度の時間変化。高度 120 km 以上で顕著に見られるイオン温度上昇は、電場の増大によって加速されたプラズマによる摩擦加熱が起きていたことを示している。破線はプロトンオーロラの発光を示しており、電場増大とプロトンの降り込みは同時刻に起きていたことがわかる。

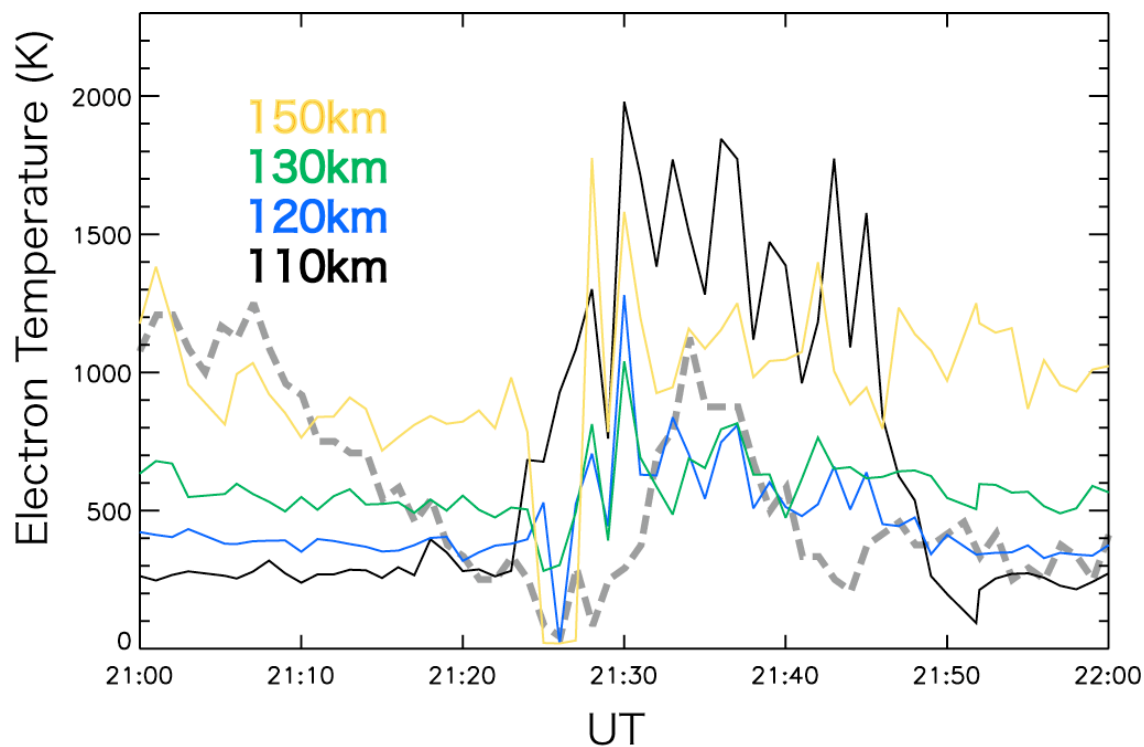


図 4.8 : 様々な高度の電子温度の時間変化。高度 110 km で顕著に見られる電子温度上昇は、電場増大によって起こる 2 流体不安定 (Farley-Buneman 不安定) による電子加熱の発生を観測した。破線はプロトンオーロラの発光があった時間を示している。

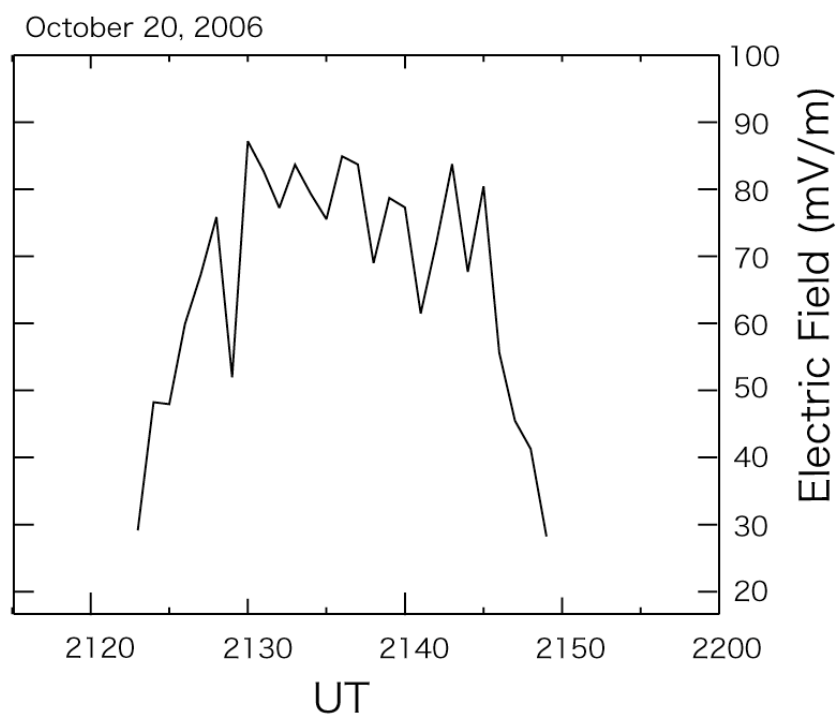


図 4.9 : *Davis and Robinson* [1997]の電子温度-電場強度の見積もりから求めた電子温度上昇領域での電場強度変化。

4.5 磁場変動と等価電流系

ここでは IMAGE 地上磁力計ネットワークの磁場データを用いて、イベント中における磁場変動を示し、磁場変動から等価電流系の推定を行った。

図 4.10 に示すのは IMAGE 磁力計ネットワークのうち、極冠域に位置するロングイヤビン (LYB: 磁気緯度 = 75.3°)、ベアアイランド (BJN: 磁気緯度 = 71.5°) の2つの基地局と、オーロラ帯に位置するトロムソ (TRO: 磁気緯度 = 66.6°)、キルナ (KIR: 磁気緯度 = 64.7°) の2つの、計4つの基地局の2000 - 2300 UTまでの磁場変動データである。X, Y, Z-component は地理座標系の北向き、東向き、鉛直下向きをそれぞれ定義している。ここでは、磁場変動の基準線を2006年10月のうち最も静穏だった10月19日の2 ~ 6時間 (基地局によって異なる) の平均値から決定した。

・ X-component

極冠域に位置する LYB、BJN 両基地の磁場変動は2000 UTから常にプラス (北向き) であったが、プロトンオーロラ発光のイベントがあった2135 UTを境にマイナス (南向き) に転じている。オーロラ帯に位置する TRO、KIR 両基地の磁場変動は、プロトンオーロラ発光のあった2135 UT前後で磁場変動はマイナス (南向き) であった。極冠域とオーロラ帯の基地局の X 成分の変動には常に負の相関が見られる。

・ Y-component

2135 UT以前はマイナス (西向き) であったが、2135 UTを境に以降は急激にプラス (東向き) に転じている。全ての基地局でこの傾向が見られるが、TROの基地局で最も顕著に見られ、BJNとKIRにおいても大きな正の変動が見られるが、TROから離れた基地ほど変動は緩やかになる傾向にある。

・ Z-component

2135 UT以前は若干のプラス (鉛直下) であったが、2135 UTを境にさらにプラス (鉛直下) 方向に増大している。変動幅は極めて大きく、Y-componentと同様にTROの基地局で最も顕著に見られ、BJNとLYRの基地においても正方向への変動が見られる。

次に3.4節で示した方法を用いて、4つの基地局の磁場変動データから等価電流系の推定を行い、その結果は図4.11となった。プロトンオーロラ発光があった2130 UT以降に、広い緯度範囲に南南西方向の強い電流が生起されていた事を示している。

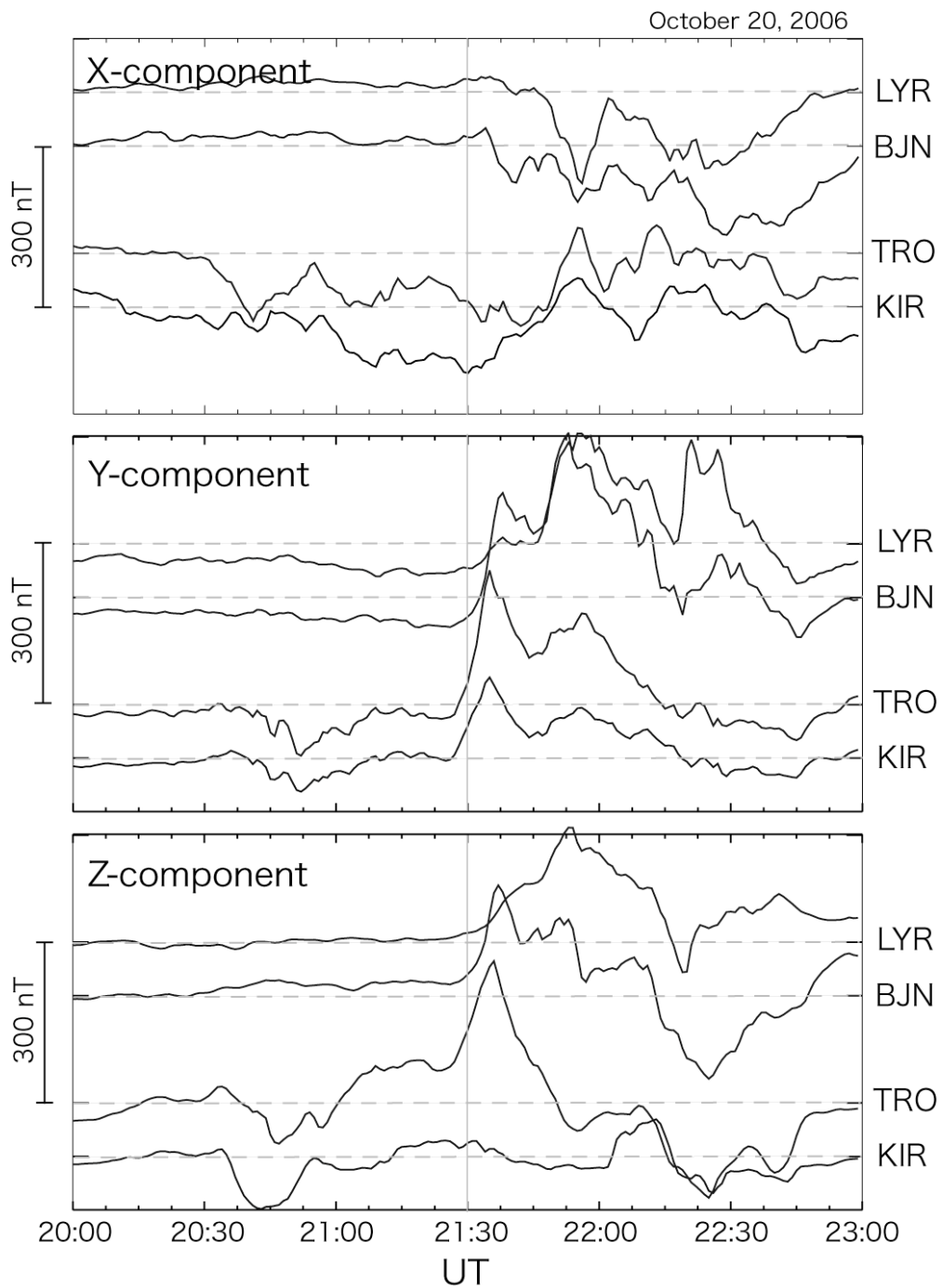


図 4.10 : ロングイヤビン(LYR)、ベアアイランド(BJN)、トロムソ(TRO)、キルナ(KIR)の各基地局での IMAGE 磁力計磁場変動データ。XYZ の各成分は地理座標系の北向き(X)、東向き(Y)、鉛直下向き(Z)を示している。

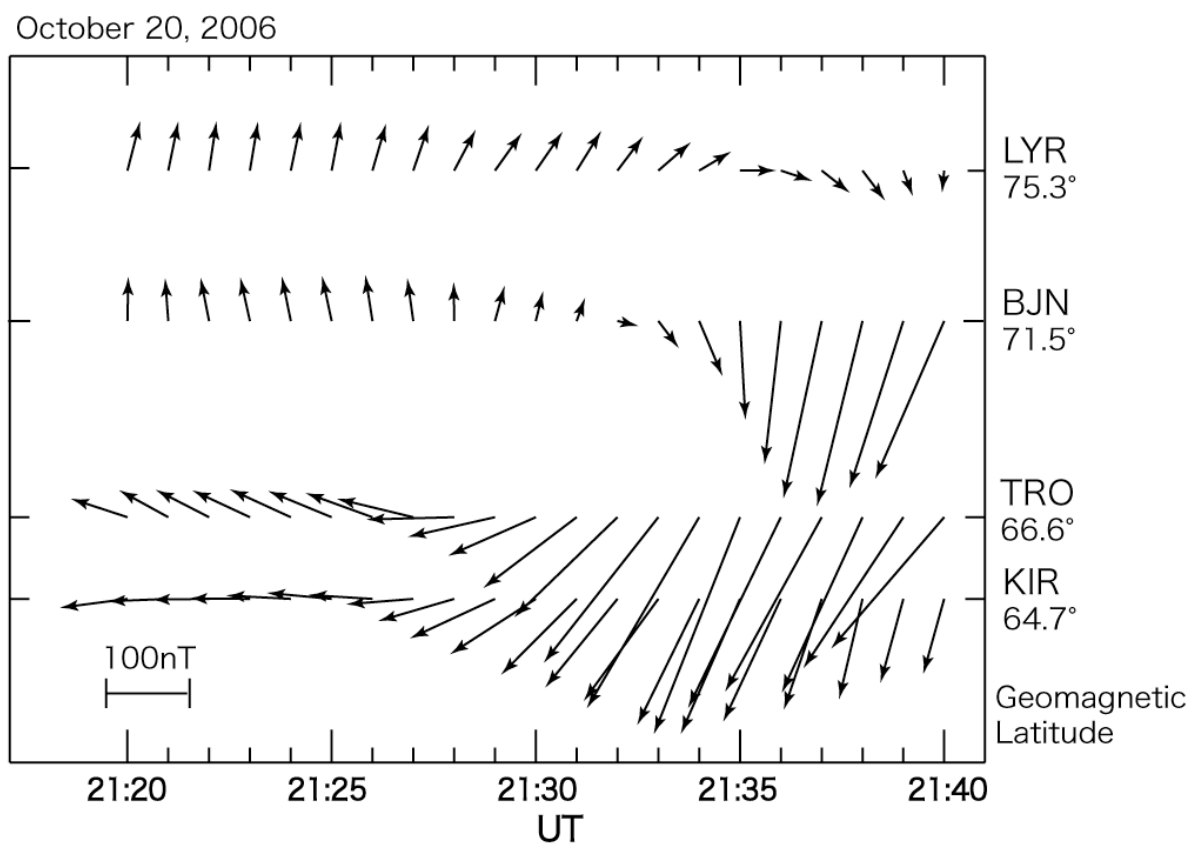


図 4.11 : LYR, BJN, TRO, KIR の 4 つの基地局の磁場変動成分を用いて推定した等価電流系分布。電子密度減少・プロトンの降り込みがあった 2130 UT 前後の分布の変化の様子。電子密度減少のピークから回復に向かい始める 2127 UT 頃から徐々に電流の向きに変化が見られた。プロトンオーロラ発光のあった 2130 UT 以降、強い南南西方向の電流が生起されている。

4.6 結果のまとめ

4.1 節 から 4.5 節で述べた結果を、以下にまとめる。

(1) プロトン降り込み領域の特定とプロトンオーロラ発光強度

2135 UT 頃にピークを持つ、約 100 R のプロトンオーロラ発光を観測した。これは電子オーロラの発光強度との比較により、電子オーロラからの入り込みによる発光強度への影響が無いことを確認し、下向き FAC に伴うプロトンの降り込み領域と特定した。

(2) オーロラの空間分布

2122 - 2127 UT にかけて、東西方向に伸びる幅 10 km 程の電子オーロラアークがトロムソ上空を通過していった。このオーロラアークは 2128 UT 以降、トロムソ南の空に停滞しながら、急激に明るさを増してディスクリートオーロラとして活発な活動をしていた。一方、プロトンオーロラは 2130 UT 頃からトロムソの東から発生し、トロムソに覆い被さるように発達しながら西方向へ移動をしていった。プロトンオーロラの空間分布は南北方向で 200 km、東西方向で 150 km におよんだ。

(3) 電子数密度の変化

トロムソの上空を薄い電子オーロラアークが北から南へ通過した直後の 2123 UT 頃から電子数密度変化が E 領域・F 領域の広い高度で見られた。つまりアークの高緯度側で電子密度が減少していた。この密度変化は極めて短時間のうちに起きており、約 2 分の間に 10 倍以上の密度変化が起きている高度もあった。この変化は高度 120 km 以上で顕著になる傾向が見られた。

(4) イオン・電子温度からの電場強度の推定

イオン温度は高度 120 km 以上で加熱が起きており、電場増大によって駆動されるプラズマ粒子のジュール加熱と摩擦加熱が起きている事を示していた。電子温度も同様に電場の増大を示す高度 110 km 付近の加熱が見られた。電場強度の推定は高度 110 km の電子温度を用いて、過去に行われた電子温度と電場強度の関係を見積もった統計解析結果から行った。2123 - 2127 UT には 70 ~ 80 mV/m の電場増大を、2130 UT- には 80 ~ 90 mV/m の電場増大が起きていた。

(5) 磁場変動と等価電流系の推定

各地上磁力計基地でプロトンオーロラ発光イベント (2130 UT) 以降に激しい磁場変動が見られた。この時の磁場変動を構成する等価電流系を推定すると、プロトンオーロラ発光があった 2130 UT 以降にトロムソの上空を横切るように強い南南西向きの電流が生起されていたことを示していた。

以上に示した、電子オーロラ、プロトンオーロラ、電子数密度、電子温度のトロムソのレーダー視線方向 (磁力線方向) の時間変化の様子を表 (4.1) にまとめた。

表 4.1: トロムソのレーダー視線方向で起きた諸現象の時間変化。

時刻 UT	電子オーロラ	プロトンオーロラ	電子密度	電子温度 (電場増大)	等価電流の方向
- 2122	なし	なし	増減なし	なし	西北西
2122 - 2123	薄いアークが北→南へ通過	なし	増減なし	なし	西北西
2124	なし	なし	減少開始	加熱開始	西北西
2130	なし	発光開始	密度回復	更に加熱	強い南西
2134	なし	発光	減少終了	加熱継続	強い南南西
2143	なし	発光終了	増減なし	加熱継続	強い南西
2147	なし	なし	増減なし	加熱終了	-
2150-	不明 (曇り)	不明 (曇り)	増大	なし	-

観測結果からは、極めて短時間に起こる電子数密度の変化や、電流方向の変化がみられた。これらの結果に対する、考察・解釈を次章で行う。

第5章 考察

5.1 電子数密度減少機構

本イベントでは、トロムソのレーダービーム視線方向を薄いアークが横切った直後の2123 UTから電子密度が急激に減少し、1～2分という時間でE領域からF領域までの広い高度領域で電子密度が1/10になる電子密度減少を観測した。電離圏電子の急激な減少の原因となる過程については、序章1.3で述べたように、*Doe et al.* [1993, 1995]により、正イオンと電子の解離再結合過程と、下向きFACのキャリアとして上向きに運動する電子の磁気圏への流出による減少過程の2つがあることが示されている。ここでは、このどちらがより有力な過程かについて考察を行う。

解離再結合の理論式は、今回の場合のように電子降り込みや、日照による電離がない夜間では、E領域に主な電離源が無いため、式(5.1)となる。

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = P - \alpha_{\text{effect}} N_e^2 = -\alpha_{\text{effect}} N_e^2 \quad (5.1)$$

ここで P は電離生成率、 α_{effect} (m^3/s)は再結合係数である。再結合係数は高度 h が85 km以上150 km以下では、

$$\alpha_{\text{effect}} = 2.5 \times 10^{-12} \exp\left(-\frac{h}{51.2}\right) \quad (5.2)$$

として表される(*Vickrey et al.* 1982)。時刻 $= t_0$ での電子数密度を N_{e0} 、時刻 $= t_0 + \Delta t$ での電子数密度を $N_e(t)$ とすると、式(5.1)の解は、

$$N_e(t) = \frac{N_{e0}}{1 + N_{e0} \alpha_{\text{effect}} \Delta t} \quad (5.3)$$

となる。式(5.3)を用いて高度115 kmと高度150 kmにおける解離再結合の時間経過による効果について見積もりを行う。解離再結合が起こる前(時刻 $= t_0$)の状態を、本イベントで観測された電子密度と、式(5.2)から得られる値を用いて、

$$\begin{aligned} 115 \text{ km} : N_{e0} &= 8 \times 10^{10} [\text{m}^{-3}], \alpha_{\text{effect}} = 2.6 \times 10^{-13} [\text{m}^3/\text{s}] \\ 150 \text{ km} : N_{e0} &= 1 \times 10^{11} [\text{m}^{-3}], \alpha_{\text{effect}} = 1.3 \times 10^{-13} [\text{m}^3/\text{s}] \end{aligned}$$

とした時の解離再結合による時間経過の電子密度変化を表(5.1)にまとめる。

表 5.1 : 高度 115 km と高度 150 km の時刻 0 秒における電子数密度を 100 % として、式(5.3)に基づいて行った計算結果。解離再結合による電子密度減少の時間経過を示す。

経過時間	10sec.	30sec.	60sec.	120sec.	240sec.	300sec.	500sec.
115km	82%	61%	45%	28%	17%	14%	9%
150km	88%	72%	56%	39%	24%	20%	13%

図 4.5 で示した、本イベント中に観測された実際の電子数密度減少は、高度 150 km で 2124 UT から 2126 UT の 120 秒の間に 13 % の値まで減少している。表 (5.1) の計算結果によると、電子密度が解離再結合によって 13 % の値になるには、高度 150 km で 500 秒の時間経過が必要となる。しかし実際には、これよりも遥かに短い 120 秒で減少は起こっており、解離再結合効果だけでは不十分で、下向き沿磁力線電流による電子の流出効果が重要であることを示唆している。解離再結合と流出による効果の割合を見ると、高度 150 km で解離再結合効果が 120 秒の間に起こす密度減少量は、減少前の電子密度の 39 % になるので、実際に観測された 13 % の値と比較して不足分を考えると、少なくとも 26 % (= 39 % - 13 %) の減少分を電子の流出効果が担っていると考えられる。

4.3 節で示した結果から、ペダーセン電流が最も強く流れる高度 120 km よりも低い高度では、電子数密度減少効果は小さくなる傾向がみられた。例えば高度 115 km では、電子密度減少のピークであった 2126 UT では、減少前の 2124 UT の値から 23 % 程になっていた。これは表 (5.1) で示した解離再結合による効果 (28 %) とほぼ同じ値で、この過程だけで十分説明できる減少量であることから、この高度の減少には電子の流出効果はほとんど働いていなかったと考えられる。この高度による電子数密度減少率の違い (ペダーセン電流が流れる高度約 120 km 以上で、解離再結合による減少量を超えた著しい電子密度減少がみられること) は、下向き FAC に伴うキャリアとしての電子の流出が電離圏電子を減少させる重要な役割を果たしていることを裏付ける新たな発見である。

更に、下向き FAC による電子流出効果が重要であることを裏付けるものとして、図 4.1 にみられる密度減少の高度による遅延効果が挙げられる。イベント中に観測された電子数密度減少は、全ての高度で同時に起きているのではなく、高度が高くなるにつれて減少開始時刻に遅延が見られた。例えば、高度 120 km と高度 200 km での電子数密度減少の開始時刻を比べると、減少開始時刻の遅延は約 5 分であった。これは FAC に伴う沿磁力線電場によって電子が流出していたことを示唆している。更に、式 (5.2) から明らかなように解離再結合の効果は高度が高くなるにつれて小さくなる。従って、高度 150 km を超える高度では解離再結合による減少効果は極めて小さいにも関わらず顕著な電子密度減少

が見られるのは、下向きFACに伴う電子の流出が主要な役割を担っている為と考えられる。また、FAC密度にもよるが、 $j_{\parallel} = N_e \cdot e \cdot v_{\parallel}$ で $j_{\parallel} = 1, 10 [\mu\text{A}/\text{m}^2]$ 、 $N_e = 10^{11} [\text{m}^{-3}]$ と仮定した場合、 $v_{\parallel} = 60, 600 [\text{m}/\text{s}]$ となる。この場合、80kmを移動するには、1300, 130 [s]の時間を要し、密度減少は高度が高くなるに連れて遅く起きることになる。今回観測された電子密度変化の高度依存性は、*Karlsson and Marklund [1998]*が示したFACに伴う電子流出のシミュレーション結果と一致しており、下向きFAC領域での電子数密度減少には、解離再結合の効果と、高度によっては電流による電子の流出効果が主要な役割を果たしていることを観測的に明らかにしたものである。

5.2 FAC を繋ぐ電離圏水平電場の考察

下向き FAC と上向き FAC は、イオンをキャリアとする電離圏ペダーセン電流により閉じて3次元電流系を構成する。この電流系の分布・構造を理解するためには、電場強度だけでなく、電場方向も理解する事が必要である。ここでは、図 4.10 と図 4.11 に示した IMAGE 磁力計の磁場変動から電場方向についての考察を行い、電離圏に流れる FAC 間を繋ぐ閉電流の推定を行う。

地上磁力計の磁場変動は電離圏に流れる水平電流、特にホール電流によって起こされる。この理由の一つは、*Fukushima* [1976] が明らかにした「Fukushima 定理」によるもので、FAC とペダーセン電流によって作られる電流系の磁場変動は、電流層より低い高度では、互いに打ち消し合う傾向がある。この等価電流系 (FAC と結びつかないホール電流系) から電場の方向を推定し、電場方向に流れるペダーセン電流の方向を推定する。

図 4.11 に示した等価電流系の分布によると、2124 - 2126 UT にトロムソ上空の電流の向きは西北西方向を指していたが、2127 - 2130 UT に見られた電離圏電子密度の回復期に伴って電流の向きは南西へと変化をしていた。プロトンオーロラ発光のあった 2130 UT 以降は、その強度を大きくしながら南西から南南西の方向を指していた。ホール電流 ($-\Sigma_H \mathbf{E} \times \mathbf{B}$) は磁場と電場に対して垂直方向に駆動される為、この西北西から南西へと向きを変える等価電流に対応する電場の向きを考えると、2126 UT 以前に存在していた南西向きの電場は、それ以降の電子密度の回復とプロトンオーロラの発光に伴って、電場方向を南東から東南東へと変化させながら、電場強度を増大させていたことを示していた。このとき図 4.2、図 4.3、図 4.4 で見られたオーロラの空間分布は、トロムソの東から発生したプロトンオーロラが徐々に西向きに移動しながらトロムソ上空に覆い被さるように移動をしてくる。このオーロラの空間配置と、推定された電場の方向 (南西から南東へ) の変化から考察すると、プロトンオーロラ (下向き FAC 領域) からトロムソ南に停滞する電子オーロラ (上向き FAC 領域) へ向かう電離圏ペダーセン電流を閉電流とする3次元電流系が形成されていたと考えられる。(図 5.1 参照)。

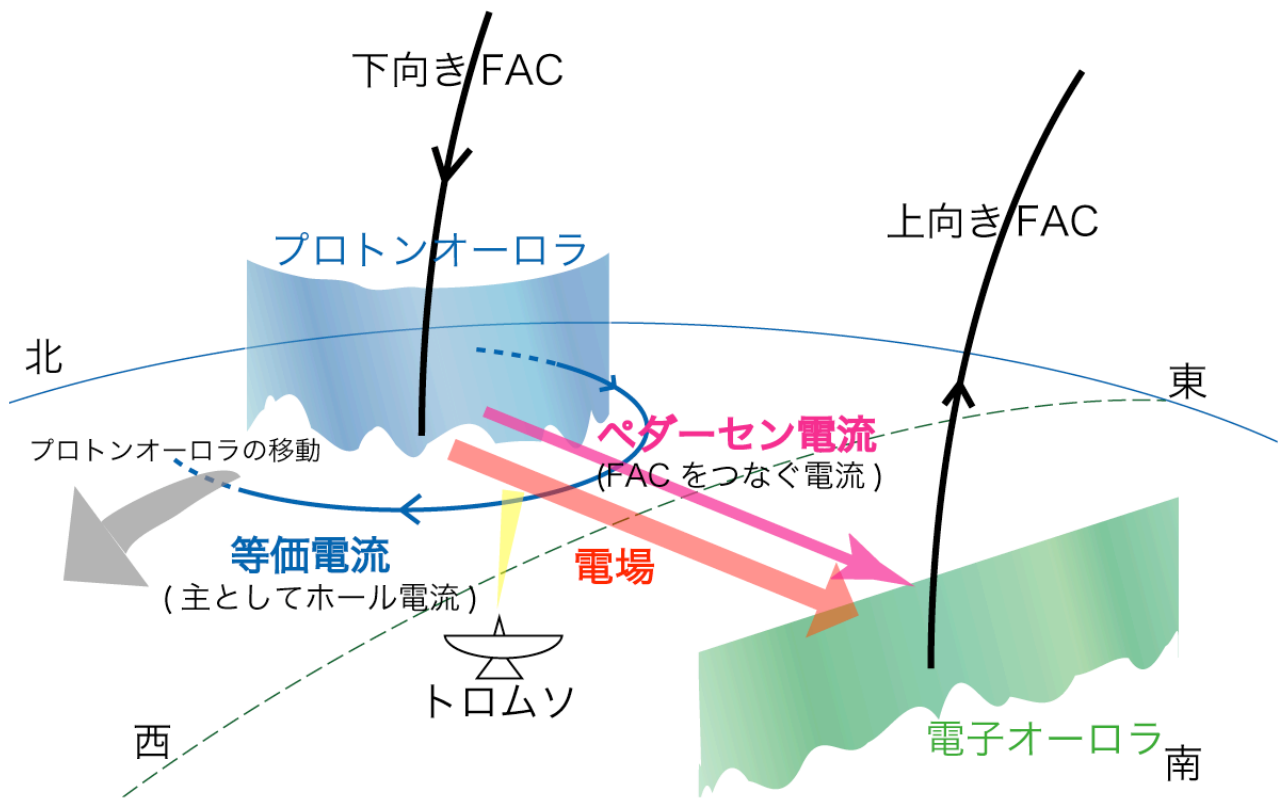


図 5.1 : 全天カメラによって確認されたオーロラの空間配置と、磁場変動から推定される等価電流系の空間配置の概念図。西へのプロトンオーロラの移動とともに、トロムソで観測される等価電流の向きは西北西→南西へ変化し、このような等価電流を担う電場の向きは南南西→南東へと変化する。この電場の方向に流れるペダーセン電流が、下向き及び上向き FAC を結ぶ閉電流である。

5.3 下向き FAC 領域での電子数密度・電場強度・降り込みプロトンの考察

本研究で取り上げたイベントでは、トロムソ上空を通過するオーロラアークの外部近傍に電子数密度減少と電場強度が増大する特徴が見られた。これは *Opgenoorth et al.* [1990] によって報告されたオーロラアークの近傍で見られた電子密度減少域の特徴と同じである。本研究で捉えた電場強度の変動は、図 4.9 に示したようにアークがトロムソを通過した 2123 UT 頃に 30 mV/m を超える電場が観測され、電子密度減少のピークがあった時刻に近い 2128 UT に 76 mV/m まで電場強度は上昇した。その後、プロトンオーロラの出現と電子密度の回復とともに 86 mV/m まで電場は増大していた。しかし、本研究では EISCAT レーダーの積分時間を 1 分としているため、これよりも短い時間のうちに電場の増大があった場合も平均されてしまうため、実際には観測された電場よりもさらに大きい電場の増大があった可能性も考えられる。

過去の人工衛星観測によって、磁気圏内の下向き FAC 領域では沿磁力線下向きの電場が生成され、電子数密度減少、電子の上向きの加速が生起されることが明らかにされている。この領域と磁力線を介して繋がる電離圏では、下向き FAC による電離圏電子の磁気圏への流出と、それに伴う電離圏電子密度減少、下向き沿磁力線電場によって加速された磁気圏起源のプロトンの降り込みによるプロトンオーロラ発光は同時刻に同じ場所で観測されると考えられていた。しかし、本研究がこの対応関係を明らかにすることを目的にしていることから分かるように、この対応関係は観測的には明らかになっていない。しかし、本研究の観測事実からは、移動するオーロラアークの高緯度側に出現した電子密度減少現象については、下向き FAC が流れてはいたが、プロトンオーロラ発光は同時刻・同じ場所に出現しておらず、電子密度減少とプロトンの降り込みは一致しない結果が示された。即ち、この電子密度減少現象では、強い電場は生成されたが、プロトンオーロラを作ることができる強度の下向き沿磁力線電場の生成はなかったと考えられる。一方、プロトンの降り込み（プロトンオーロラ発光）は、下向き FAC 領域で、その後の ~ 90 mV/m の電場強度増大と一致していた。この ~ 90 mV/m におよぶ電場増大とプロトンオーロラを観測した期間には、電子密度はほぼ元のレベルまで回復していた。図 5.2 にはイベント中の電子数密度、電場強度、プロトン降り込みの3つの物理量変化の時系列を概念図としてまとめた。

一般的に、電子の降り込みのない(本研究のように電子オーロラの出現がみられない)下向き FAC 領域では、電離圏電子はキャリアとして磁気圏に運び去られてしまうため、そのままでは、下向き FAC のキャリア及び FAC 間を結ぶ電離圏電流を流すための電気伝導度の双方が不足し、上向き FAC で規定される電流の連続性を保つ事ができなくなる。これを解消する方法として、次節に示す「電流系の移動」「プロトン降下による電離」の二つの物理過程が考えられる。

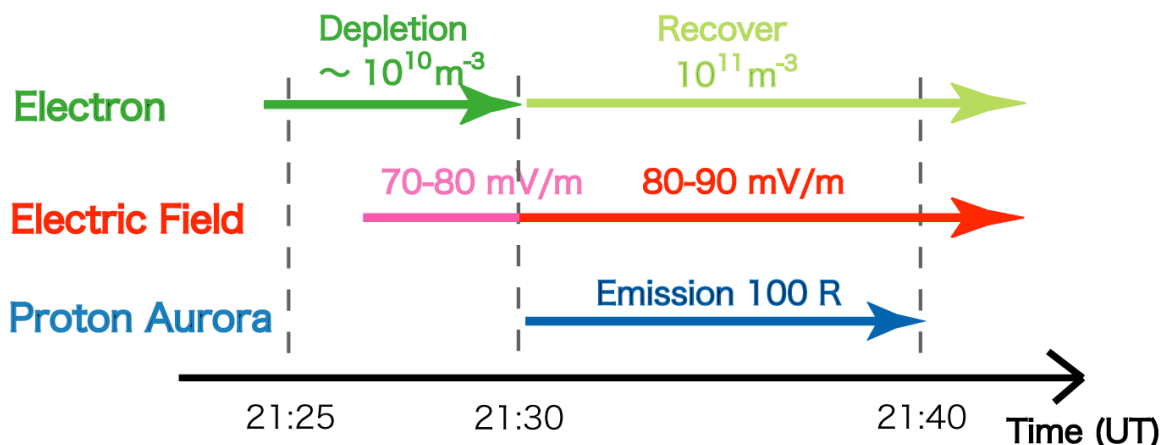


図 5.2: 電子数密度変化、電場強度変化、プロトンオーロラ発光の時間変化。

5.3.1 電流系の移動

下向き FAC に伴い、沿磁力線電場によって電流のキャリアとなる電子が減少した下向き FAC 流入領域では、電子の消失による電気的偏重によって周囲と電位差を生じ、水平電場が生成される。この時、電気的中性を保つためには、この電場によって水平方向へイオン又は電子が移動しなくてはならないが、ジャイロ周波数と衝突周波数の違いにより、それぞれ異なった挙動をする。その場所に電子とほぼ同数ある (quasi-neutral な) イオンは中性大気との衝突によってジャイロ運動ができず、電場方向に移動 (ペダーセン電流) して電気的中性を保とうとするが、わずかな余剰電荷が残るため (大きさは変化するが) 電場は保持される。一方、電子は電離圏内で無衝突 ($\Omega_e \gg \nu_{en}$) なので、ホール運動を行う。そのため、周辺の電子は電子密度減少領域のまわりを取り巻く運動をするのみで、この電場の方向に動いて減少分を補うことは出来ない。即ち、電流系が同じ場所に留まる限り、密度減少の度合いは深くなるばかりとなる。

電子密度の減少が起きていた 2122 - 2126 UT の間では、電子オーロラ及びプロトンオーロラがレーダー視線方向に観測されていないことから、粒子の降り込み等による電離源はなかったと考えられる。この時のオーロラの空間分布は、東西方向に延びた幅の狭い電子オーロラアークがトロムソ上空を北から南へと移動し、このオーロラアークが通過した直後から電子密度の減少が観測されていた。前述したように、同じ場所に留まっていたのはキャリアに必要な電子は得られないので、オーロラアークが通過した直後の電子密度減少に伴う下向き FAC は、オーロラの動きからも推測されるように電流系自体が新たな領域に移動することで、その新たな領域で電流のキャリアとなる十分な電子を得ていたと考えられる。一般的に、上向き電流は同じ程度の幅の下向き電流を伴って

ると考えられているので、この時間帯に見られた移動するオーロラアークの極側近傍には、同じスケール（幅 10 km）を持っていたと推測される。このような幅の狭いオーロラアークに伴う下向き FAC では、オーロラアークの近傍に存在していたと思われる電流系全体が移動することで、短時間のうちに周囲の領域へ侵入し、その新たな領域から電子を得ていたと考えられる。比較的狭い FAC 流入領域であれば、これにより容易に電子の不足分を補うことが可能であり、この機構によって電流の連続性を保持していたと考えられる。

5.3.2 プロトン降下による電離

2127 UT 以降、電離圏電子密度の回復が見られると共に、トロムソの上空でプロトンオーロラが観測された。この時、電子オーロラはトロムソのレーダー視線方向に存在しておらず、電離源となる電子の降り込みはなかった。2123 UT 頃にトロムソを北から南へ移動していったオーロラアークは、トロムソの低緯度側に停滞しディスクリートオーロラへと発達したことが光学観測によって確認されている。更に 5.2 節での等価電流系の考察からは、プロトンオーロラ発光域と低緯度側の電子オーロラ発光域に、それぞれ下向き FAC と上向き FAC が存在して、これらがペアとなって繋がる電流系が形成されたことが推測された。（図 5.1 参照）

この一対の FAC を結ぶ電離圏ペダーセン電流を駆動し、なおかつ電流の連続性を担保するには、電子密度と電気伝導度を増大する必要がある。しかし、プロトンオーロラ（南北の幅：約 200 km）を伴う下向き FAC 領域はその流入範囲と共に電子密度減少域も広く、電流系の移動や水平電場による粒子移動によって周囲から必要な電子密度と電気伝導度を確保することが出来なかったと考えられる。この時、下向き電流により電離圏電子が減少していく中で、必要な電子などを確保する唯一の方法はプロトンオーロラによる電離である。因果関係は明らかではないが、加速されたプロトンの電離圏への降り込みは、結果的に電気伝導度を増大し、キャリアとなる電子密度を増やすため、下向きにプロトンを加速させる沿磁力線電場が生起されたと考えられる。

プロトンの降り込みによる上記の電離効果の考察を行う。図 4.1 から本イベントでのプロトンオーロラ発光強度は約 100 R であった。Kozelov [1995] は Ono et al. [1987] が行った夕方側半球でのプロトンオーロラ観測の結果を用いてシミュレーション計算を行い、 $0.1 [\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$ のエネルギーフラックスを持つプロトンの降り込みによる H β 発光輝線強度を約 100 R と見積もっている。一方、Galand et al. [1999] は 1, 5, 15 keV のエネルギーを持ったプロトンの降り込みを考えて、各エネルギーでの電子生成率の計算を行っている。フラックスを $1 [\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ とした場合、それぞれのエネルギーを持つプロトンの降り込みでは $6 \sim 8 \times 10^9 [\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$ のあいだで電子生成率の値を

とることを明らかにした。電子数密度は、電離による電子生成と解離再結合による電子消滅の効果によって決定されるが、ここでふたつの効果が釣り合った平衡状態を仮定すると、電離による生成率(P)と解離再結合の関係式は式 (5.4) として表される。

$$P = \alpha_{effect} N_e^2 \quad (5.4)$$

プロトンオーロラの出現高度を 120 km とすると、再結合係数(式 5.2)は、 $\alpha_{effect} = 2.5 \times 10^{-13} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ となる。これらを総合すると、100 R の発光強度を持つ降り込みプロトンによって生成される電子数は $2 \times 10^{11} [\text{m}^{-3}]$ となる。これは図 4.1 の電子数密度回復後 ($10^{11} \sim 10^{11.5}$) とほぼ同じ値である。これは、流入領域の範囲が大きい下向き FAC 領域では、電流系の移動や電子オーロラに伴う電子の降り込みが無くても、下向き沿磁力線電場により加速されたプロトンの降下による電子生成によって、必要となる電子キャリアを供給できることを示唆しており、本プロトンオーロラのケースでは、この生成された電子が下向き FAC 領域における電流キャリアと、電離圏閉電流に必要な電気伝導度を維持していると考えられる。

5.4 FACの電流密度の推定

図 5.3 は、図 4.9 に示した電場強度と、高度積分をしたペダーセン電気伝導度(S)との積を求めて、ペダーセン電流強度 (mA/m)を求めたものである。電子数密度の減少が起きていた 2123 - 2130 UT の時間のペダーセン電気伝導度は 0.6 - 1.0 S 、電流強度は 100 mA/m ほどである。一方、プロトンの降り込みによる電子の供給があった 2131 - 2145 UT の時間での電気伝導度は 7.0 S、電流強度の最大値は 550 mA/m となった。5.2 節で行ったイベント中の 3次元電流系構造の考察により、このペダーセン電流はプロトンオーロラに伴う下向き FAC と、電子オーロラに伴う上向き FAC を繋いでいたと考えられる。電子数密度減少が起きた時刻の前後に、トロムソの上空を通過した電子オーロラのアークと同じスケールを持つ構造 (幅 10 km) が、FAC 領域を担っていたとした場合、 $100 \text{ [mA/m]} / 10 \text{ [km]} = 10 \text{ [\mu A/m}^2\text{]}$ の電流密度が生じていたと見積もられる。一方、光学観測によって確認されたプロトンオーロラの分布範囲は南北方向で幅 200 km であった。下向き FAC 分布が一様で、このプロトンオーロラと同じスケール範囲であった場合、FAC の電流密度は $550 \text{ [mA/m]} / 200 \text{ [km]} = 2.5 \text{ [\mu A/m}^2\text{]}$ であったと見積もられる。これら、いずれの値も *Iijima and Potemura [1976]*によって示された、 K_p 指数が 3^+ の時の FAC の電流密度 $1.5 \text{ }\mu\text{A/m}^2$ よりも大きい値であり、これらの下向き FAC は量的にも無視できるものではなかったことを示唆している。

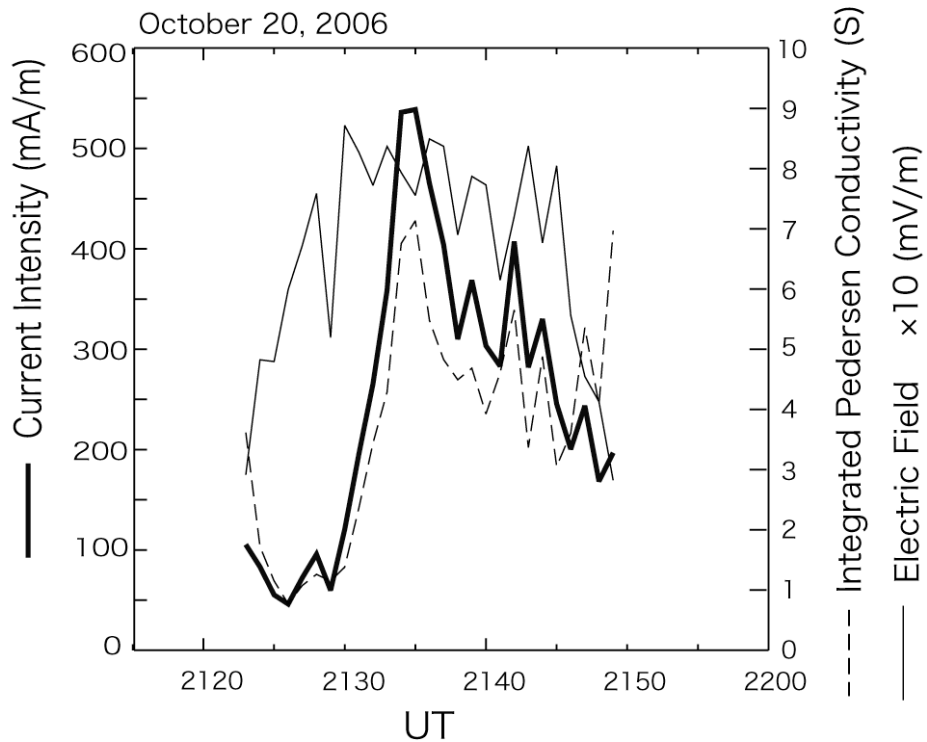


図 5.3: 電場強度、ペダーセン電気伝導度、ペダーセン電流強度のプロット。

第6章 まとめと結論

本研究では、光学機器、EISCAT レーダー、地上磁力計の同時観測によって 2006 年 10 月 20 日に得られたデータセットから、下向き FAC 領域の電離圏高度で発生したオーロラ発光や電離圏物理量の変化を調べた。本研究で明らかになった観測事実を以下にまとめる。

- ・ 赤道方向に移動するオーロラアーク近傍の下向き FAC 領域では過去にも報告されている局所的な電子数密度の減少が見られた。電子の減少効果は解離再結合の効果だけでなく、下向き FAC に伴う電子の流出効果の寄与が重要になることがわかった。流出によって電子密度が 1/10 以下になる減少は 1 ~ 2 分という短時間で生じ、これはペダーセン電流が最も強く流れる高度 120 km より高い高度で顕著であった。さらに電子密度減少の開始時間は高度が高くなるにつれて遅くなる特徴が見られた。これは *Doe et al.* [1993, 1995] が示したいくつかの消失原理のうち、沿磁力線電流に伴う電子流出効果を支持するもので、観測的に初めての結果である。
- ・ 赤道方向に移動する東西方向に延びるオーロラアーク（南北方向の幅 約 10 km）の極側近傍では、E 領域と F 領域の電子数密度の急激な減少、磁力線に垂直な水平電場の増大（~80 mV/m）、下向き FAC の流入は同時刻に発生していた事が示された。しかし、下向き FAC に伴って生起されることが期待されていたプロトンオーロラの発光は同時刻、同じ場所で観測されなかった。太陽光による電離がない夜間電離圏で、電子密度の著しい減少を伴う下向き FAC は、その場所に留まる限り電流キャリアが不足して電流の連続性を保つことができなくなる。上向き FAC に見合う下向き FAC を維持するために、電流系自体が豊富な電子を求めて、新たな領域に移動していたと考えられる。幅の狭い（アークに伴う）上向き電流は同じ程度の幅の下向き電流を伴うと考えられるので、下向き FAC によって不足する電離圏電子は、この機構によって十分な電子密度を得ることができていたと考えられる。
- ・ 電子オーロラよりも高緯度側に出現したプロトンオーロラは、磁力線に垂直な電離圏電場の強い増大（~90 mV/m）を伴っていた。等価電流系の推定から、プロトンオーロラの発光領域に下向き FAC が流れ、低緯度側のディスクリートオーロラに伴う上向き FAC とペアになっていたと考えられる。このプロトンオーロラ領域では、フォトメータ観測から電子の降込みがほとんど認められないにも関わらず、電子密度が増大し、強い電離圏電流が見られることから、降下プロトンが電離に重要な貢献をしていることが明らかになった。移

動するオーロラアークに伴う下向き FAC 流入領域と異なり、このプロトンオーロラに伴う下向き FAC 流入領域はその範囲が広く、移動によって十分な電子が得られないために、プロトン降下(下向き沿磁力線電場の生成)を生起することでE領域の電子密度を増大させ、必要な電子を確保するという一連の物理過程が生じていたことが示唆された。加速された降り込みプロトンが中性大気を電離することで生成される電子の定量的な見積もりからも、FACのキャリアを担う電離圏電子の主要な供給源となっていることを明らかにした。

- ・ オーロラの空間分布から FAC の流入域のスケールを仮定して、電流密度の推定を行ったところ、過去に報告された FAC の電流密度と比べて大きい値となった。本研究で報告したプロトンオーロライベントにおいて、下向き FAC は量的にも無視できるものではなかったことを示唆している。

本研究はプロトンオーロラ、磁力線垂直電場、電子数密度減少などを同時観測することによって、これまで直接的な観測結果が得られていなかった3次元電流系における、特に電離圏高度の下向き FAC 領域を明らかにした。これらの結果は世界的にみても新たな知見で、磁気圏電離圏結合、特に下向き沿磁力線電流系のより深い理解に貢献するものである。観測事実は一晩のデータセットを用いたイベント解析によるものである。今後は複数のデータセットを用いた統計的な考察が期待される。

付録

(A) EISCAT レーダーから得られる物理量の導出原理

非干渉散乱レーダーは、電離圏の自由電子によるトムソン散乱を利用して、電子密度、レーダーの視線方向のイオン速度、イオン温度、電子温度を観測する。EISCAT UHF レーダーの送信電波波長は約 0.32 m であるのに対して、電離圏のデバイ長は、電子密度 $N_e = 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 $T_e = 10^3 \text{ K}$ とすると、

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{N_e e^2}} \sim 6.9 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{a-1})$$

ϵ_0 : 真空の誘電率 [$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$]

k_B : ボルツマン定数 [$1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$]

e : 電荷素量 [$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$]

となり、送信電波の波長は電離圏のデバイ長より長い事がわかる。従って、電離圏電子がトムソン散乱によって散乱波を生んでいるが、デバイ長よりも大きなスケールで見た場合、イオンに補足されている電子の塊を見ており、結果的にはイオンの運動を捉えている事になる。送信した電波はイオン音波と電子音波の2種類の静電波により散乱され、IS レーダーはイオン音波の散乱波を用いて物理量を導出する。イオン音波の位相速度 V は式(a-2)によって表される。

$$V = \sqrt{\frac{k_B T_i}{m_i} \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right)} \quad (\text{a-2})$$

m_i : イオン質量 [kg]

T_i : イオン温度 [K]

T_e : 電子温度 [K]

ドップラーシフトにより、散乱波の周波数は送信周波数からずれる事から、観測される速度はレーダーの視線方向のイオン速度を示している。送信波の波長を λ_0 とすると、散乱波は送信周波数から $\pm 2V / \lambda_0$ だけずれている。

IS レーダーが受信する散乱波の模式図を図(a-1)に示した。図の様にイオンの熱運動によってスペクトル幅は広がり、イオンのバルクな運動により中心波長がシフトする。この受信スペクトルに対して、イオン組成を仮定する事により、受信強度から電子密度

を、イオンラインの幅からイオン温度を、イオンラインのダブルピークの頂点のへこみからイオン温度と電子温度の比を、ドップラーシフトから視線方向のイオン速度の電離圏物理量を直接もとめる事が可能となる。

さらに、中性大気モデル、地球磁場モデルなどを組み合わせる事によって、電離圏電場、中性風速度、電流、電気伝導度などを間接的に求める事が可能である。

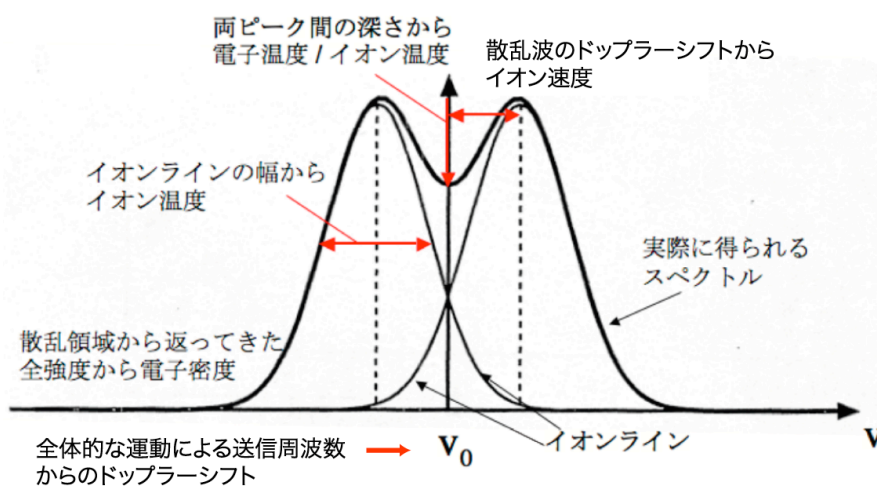


図 a-1: IS レーダーが受け取る散乱波の模式図。[Introduction to incoherent scatter measurements より]

(B) 光学観測機器による発光強度の導出

本研究で用いた4波長分光型フォトメータと全天プロトンイメージャのふたつの光学観測機器は、少なくとも観測シーズン前後の年2回、国立極地研究所にある校正装置を用いて観測機器の絶対値感度特性や経年変化の測定を行っている。この節では、全天プロトンイメージャの校正実験を例にとり、校正実験の目的・概要を説明する。

・ 絶対値感度校正

プロトンイメージャの受光部は512×512ピクセルの解像度をもつ冷却式CCDであり、観測対象が放つ光量は、CCDの各画素で0～65535のカウント値として観測される。そのため、観測対象の光量を知るには、入射光量とCCDカウント値の対応関係を知る必要がある。この感度校正は、国立極地研究所に設置されている2m積分球を用いて行っている。校正は、イメージャの露光時間を50秒に設定し、積分球のコントローラー表示で $1\text{E}-7 \sim 2.5\text{E}-6$ [$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{nm}$] の間で輝度を変化させながら、入射輝度とCCDカウント値の感度特性を測定することで行う。この時の輝度に対応する光量は0～5kR程であり、一般的なオーロラを観測するのに十分な観測レンジを測定している。積分球光源が発する光の輝度[$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{nm}$] と光量[R] の関係は図(b-1)のようになっている。ここで、積分球が発する光は輝線ではなく広い波長範囲に発光域を持つ為、プロトンオーロラのドップラーシフトに対応した広い半値幅をもつ透過フィルタ(図2.1)を装備したプロトンイメージャが観測する光量 I は、各波長からの入射を受けて式(b-1)となる。

$$I = \int F(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (\text{b-1})$$

ここで、 $F(\lambda)$ は図2.1で示された透過フィルターの透過率、 $R(\lambda)$ は積分球の光量スペクトルである。

同じ入射光量であっても、512×512ピクセル全てで同じカウント値が出力される訳ではない。CCDカウント値を採用する画素の決定には以下の方法を経ている。

- (1) 宇宙線などの入り込みによる異常カウント値をフィルタリングするため、平均値から $\pm 2\sigma$ 内のカウント値の画素を用いる。
- (2) 周りの画素との移動平均を求め、最大になる画素のカウント値を用いる。

上記の条件の元で、積分球の光量を変化させた時のCCDカウント値の変化は図b-2となる。図b-2を測定した際の露出設定は50秒であるが、将来の観測設定の変更にも対応できるよう、他にも30秒露出、110秒露出など、露光時間を変化させた時の感度校正も同時に測定・記録している。

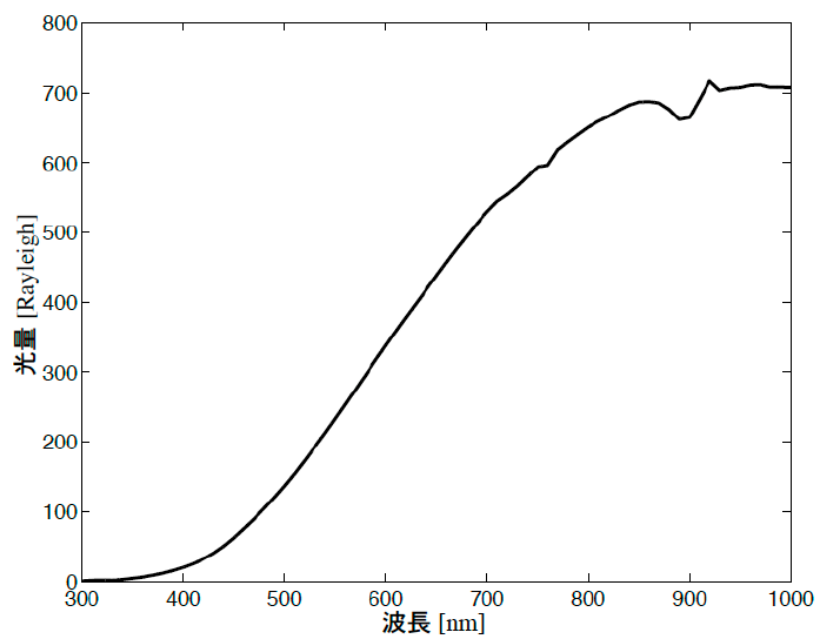


図 b-1 : 積分球光源の発光スペクトル図。これはコントローラー（波長 630.0 nm 発光輝度）が $1\text{E-}7$ [$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{nm}$] 時の、各波長での光量を示しており、輝度の変化に伴って図の特性関数は比例する。

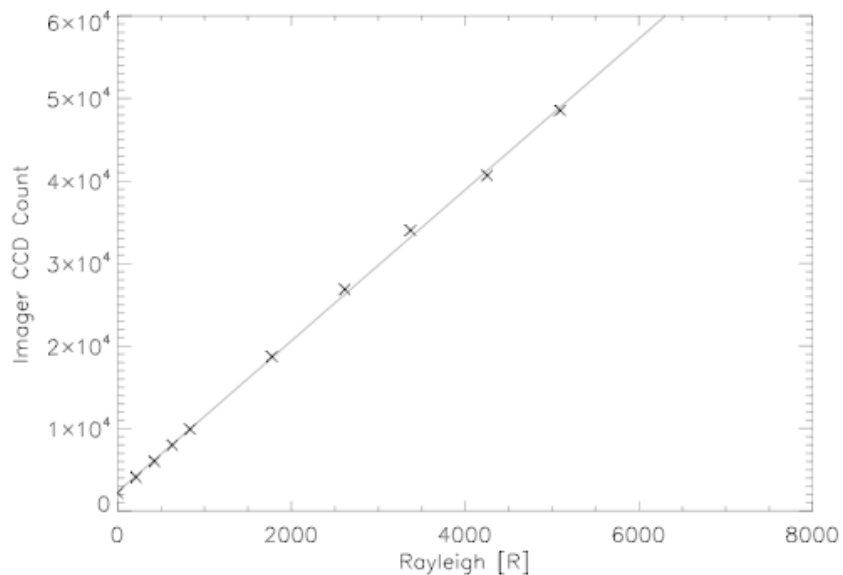


図 b-2 : 露光時間 50 秒における、プロトンイメージャの入射光量と CCD カウント値の変化。

・ 経年変化

観測対象の物理量をより正確に観測するためには、感度校正の他に経年変化を調べる必要がある。特に観測機器に装備している透過フィルターは劣化し易く、保管の際の温度・湿度管理に注意を払っていても、透過中心波長や半値幅は時間とともに変化する。図 b-3 は、プロトンイメージャに装備している透過フィルターの透過中心波長の経年変化を示す図である。

通常、経年変化（劣化）における測定値は、時間とともに単調減少、又は単調増加をする筈である。従って、校正実験によって得られた値を一次関数近似することで、観測データが得られた日付における観測機器の状態の推定を行い、データを解析した。より正確な経年変化の校正を行うために、校正手順の詳細をまとめ、再現性の高い校正実験を行うことを心がけている。

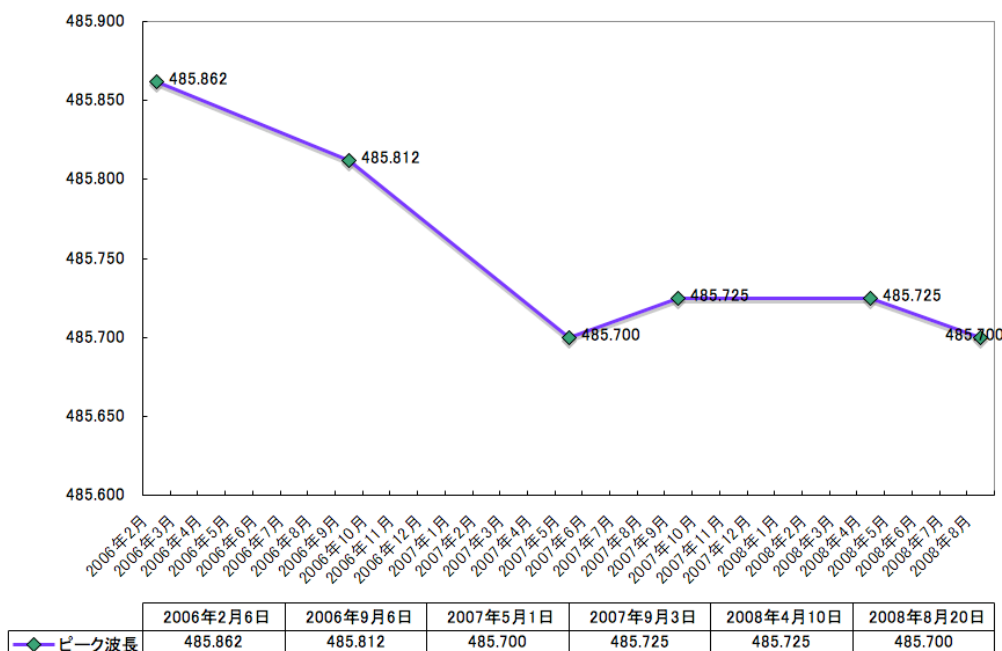


図 b-3: プロトンイメージャに装備された透過フィルターの透過中心波長の経年変化。

参考文献

- 恩藤忠典、丸橋克英、ウェーブサミット講座 宇宙環境科学、オーム社、2000.
- 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.
- Boehm, M. H., J. Clemmons, J.-E. Wahlund, A. Eriksson, L. Eliasson, L. Blomberg, P. Kinter, and H. Höfner, Observations of an upward-directed electron beam with the perpendicular temperature of the cold ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, *22*, 2103-2106, 1995.
- Brekke, A., and C. Hall, Auroral ionospheric quiet summer time conductances, *Ann. Geophys.*, *6*, 361-376, 1988.
- Brekke, A., PHYSICS OF THE UPPER POLAR ATMOSPHERE, *Praxis Publishing*, 1997.
- Cran-McGreehin, A. P., A. N. Wright, and A. W. Hood, Ionospheric depletion in auroral downward currents, *J. Geophys. Res.*, *112*, A10309, doi:10.1029/2007JA012350, 2007.
- Davidson, G. T., Expected spatial distribution of low energy protons precipitated in the auroral zones, *J. Geophys. Res.*, *70*, 1061-1068, 1965.
- Davies, J. A., and T. R. Robinson, Heating of the high-latitude ionospheric plasma by electric fields, *Adv. Space Res.*, *20*, 1125-1128, 1997.
- Degen, V., Synthetic spectra for auroral studies - The N₂ Vegard-Kaplan band system, *J. Geophys. Res.*, *87*, 10541-10547, 1982.
- Doe, R. A., M. Mendillo, J. F. Vickrey, L. J. Zanetti, and R. W. Eastes, Observations of nightside auroral cavities, *J. Geophys. Res.*, *98*, 293-310, 1993.
- Doe, R. A., J. F. Vickrey, and M. Mendillo, Electrodynamic model for the formation of auroral ionospheric cavities, *J. Geophys. Res.*, *100*, 9683-9696, 1995.
- Dreher, J., On the self-consistent description of dynamic magnetosphere-ionosphere coupling phenomena with resolved ionosphere, *J. Geophys. Res.*, *102*, 85-94, 1997.
- Elphic, R. C., J. Bonnell, R. J. Strangeway, C. W. Carlson, M. Temerin, J. P. McFadden, R. E. Ergun, and W. Peria, FAST observations of upward accelerated electron beams and the downward field-aligned current region, *Magnetospheric Current Systems, Geophysical Monograph 118*, 173-180, 2000.
- Fang, Xiaohua, M. W. Liemohn, J. U. Kozyra, S. C. Solomon, Quantification of the

- spreading effect of auroral proton precipitation, *J. Geophys. Res.*, *109*, A04309, doi: 10.1029/2003JA010119, 2004.
- Fang, Xiaohua, M. W. Liemohn, J. U. Kozyra, Study of the proton arc spreading effect on primary ionization rates, *J. Geophys. Res.*, *109*, A07302, doi: 10.1029/2004JA010915, 2005.
- Fukushima, N., Generalized theorem for no ground magnetic effect of vertical currents connected with Pedersen currents in the uniform-conductivity ionosphere, *Report of Ionosphere and Space Research in Japan*, vol. 30, no. 1-2, 35-40, 1976.
- Galand, M., R. G. Roble, and D. Lummerzheim, Ionization by energetic protons in Thermosphere-Ionosphere electrodynamics General Circulation Model, *J. Geophys. Res.*, *104*, 27,973-27,989, 1999.
- Iijima, T., and T. A. Potemra, The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad, *J. Geophys. Res.*, *81*, 2165-2174, 1976.
- Karlsson, T., and G. Marklund, Simulations of effects of small-scale auroral current closure in the return current region, *Physics of Space plasmas*, *15*, 401-406, 1998.
- Karlsson, T., N. Brenning, O. Marghitsu, G. Marklund, and S. Buchert, Height-altitude signatures of ionospheric density depletions caused by field-aligned currents, reprint arXiv:0704.1610, 2007.
- Kozelov, B. V., Calculation of H_b emission in aurora: Comparison with observations, *Geomagnetism and Aeronomy (English translation)*, *34*, 647-649, 1995.
- Marklund, G. T., N. Ivchenko, T. Karlsson, A. Fazakerley, M. Dunlop, P.-A. Lindqvist, S. Buchert, C. Owen, M. Taylor, A. Vaivalds, P. Carter, M. André, and A. Balogh, Temporal evolution of the electric field accelerating electrons away from the auroral ionosphere, *Nature*, *414*, 724-727 (13 December 2001) doi:10.1038/414724a, 2001
- Marklund, G. T., Electric fields and plasma processes in the auroral downward current region, below, within, and above the acceleration region, *Space Sci. Rev.*, doi: 10.1007/s11214-008-9373-9, 2008.
- McWhirter, I., I. Furniss, A. D. Aylward, B. S. Lanchester, M. H. Rees, S. C. Robertson, J. Baumgardner, and M. Mendillo, A New Spectrograph Platform for Auroral Studies in Svalbard, *Sodankylä Geophysical Observatory Publications*,

- 92, 73–76, 2003.
- Ono, T., T. Hirasawa, and C.-I. Meng, Proton auroras observed at the equatorward edge of the duskside auroral oval, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 660–663, 1987.
- Opgenoorth, H. J., I Häggström, P. J. S. Williams, and G. O. L. Jones, Regions of strongly enhanced perpendicular electric fields adjacent to auroral arcs, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52, 449–458, 1990.
- Robertson, S. C., B. S. Lanchester, M. Galand, D. Lummerzheim, A. B. Stockton-Chalk, A. D. Aylward, I. Furniss, and J. Baumgardner, First ground-based optical analysis of H_β Doppler profiles close to local noon in the cusp, *Ann. Geophys.*, 24, 2543–2552, 2006.
- Sakaguchi, K., Ground and satellite observations of isolated auroral arcs and Pc 1 pulsations at subauroral latitudes, *Master's thesis*. 2006
- Schlegel, K., J.-P. St.-Maurice, Anomalous heating of the polar E region by unstable plasma waves, 1. Observations. *J. Geophys. Res.*, 86, 1447–1452, 1981.
- Shunk, W. R., and A. F. Nagy, Ionospheres, *The Press Syndicate of the University of Cambridge*, 2000
- Semeter, J., D. Lummerzheim and G. Haerendel, Simultaneous multispectral imaging of the discrete aurora, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 63, 1981–1992, 2001.
- Sigernes, F., D. A. Lorentzen, C. S. Deehr, and K. Henriksen, Calculation of auroral Balmer volume emission height profiles in the upper atmosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 503–508, 1994.
- Takahashi, Y., and H. Fukunishi, The dynamics of the proton aurora in the auroral breakup events, *J. Geophys. Res.*, 106, 45–63, 2001.
- Vallance Jones, A., Measurements of the optical emission height profiles of medium intensity aurora, *Planetary and Space Science*, 27, 307–312, 1979.
- Vickrey, J. F., R. R. Vondrak, and S. J. Matthews, Energy deposition by precipitating particles and Joule dissipation in the auroral ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 87, 5184–5196, 1992.

謝辞

修士論文提出締め切り日まで残り一週間となりました。ここに研究成果を論文にまとめ、謝辞を書くまでに至ったのは、研究室の先生方はもちろん、学生生活を通じて知りあった多くの方々の助けがあったからです。ここでは皆様への感謝の気持ちを述べさせていただきます。

当研究室のボスである藤井良一先生には、研究生生活・論文執筆の全てにおいて、始めから最後までたくさんのご指導を頂きました。物理に関する様々な知識を教えて頂き、また私の間違った理解を丁寧に直して頂きました。特に学会前には、深夜まで発表資料の手直しにつき合ってもらいました。背景知識や考え方へのきめ細かいご指導は、研究を進めるにあたり随所で大切な道標となりました。常日頃から、研究の進捗状況だけにとどまらず、体調などの生活面においても気にかけて頂き、いつもジョークと共に「最近、調子はどう？」と、気さくに声をかけて下さります。溢れんばかりのホスピタリティ精神を持ち、ときどき軽快なおやじギャグを飛ばす藤井先生のもとで学生生活を送る事ができたことに感謝致します。

野澤悟徳先生には、授業・セミナー・学会発表などを通して研究生としての心構えなどの基本部分を特にご教授頂きました。常に教育者としての立場から、私の言動を注意して下さっていたと感じています。輪読形式のセミナーを通じて物理的理解に対して数々のコメントを頂きました。一対一で論文の読み合わせなどもして頂きました。2年間のご指導により、研究生として、大人としていくらか成長できたと感じています。いまだにメールや書類を提出する際に感じる妙な緊張感、厳しいながらも的確な指摘を頂いた野澤先生のご指導の賜物です。勝手な思い込みで突っ走りがち私の研究生生活を、常に正しい方向へ導いて下さった事に感謝致します。

大山伸一郎先生には、観測データの取得方法、データの解析方法など、様々なことをご指導を仰ぎました。観測機器の校正実験、トロムソ出張では多くの時間を共に過ごさせて頂きました。その中で大小様々な仕事を、ひとりの研究者として全面的に任せて下さり、自主性を重んじながらも、困ったことがあれば常にフォローして頂きました。観測機器の校正実験では、日付が替わっても作業を続ける日は珍しくありませんでしたが、納得のいく結論に達するまで妥協しない姿勢を見せて頂きました。研究を行う上でのイロハをご教授頂いた事に感謝致します。

秘書の岸田ジュディさんにも大変お世話になりました。私は2年間に数えきれない程の歓迎・送別会の幹事を任せて頂きましたが、その度にジュディさんにはご協力頂きました。私とジュディさんのご子息が年が近いという事もあり、生活面で色々な意見を尋ねられたこともあります。私の稚拙な意見が岸田家の一助になっていれば幸いです。

研究室のPDである、栗原純一さんと栗原宜子さんには、セミナー、学会発表資料作成、論文作成において貴重なアドバイスを頂きました。現在、栗原純一さんは北欧で行われている DELTA II キャンペーンのため出張中です。今頃、夜空を眺めながらロケットの打ち上げチャンスを待っているのかもしれませんが。セミナーでも、ロケット観測の経験からのコメントを述べられることが多くあり、大変興味深いものでした。栗原宜子さんは、いつも私のつたない発表資料や論文をご覧になって、「まだ時間あるから大丈夫！」など、多くの優しい言葉をかけて下さりました。この励ましのお陰で、これまでの学会発表やこれからの修論発表に向けて頑張っておられました。お二方に感謝致します。

研究室の先輩の津田卓雄さんには、公私に渡り大変お世話になりました。近頃は共に論文執筆の最中にあり、外に繰り出す機会はほとんど無くなりました。皮肉なことに忙しくなったお陰で、これまで過剰気味だったアルコールの摂取量が減り、ようやく健康とお金を保持することができてきたと思います。今年度は津田さんと私の2人しかいない学生部屋でしたが、少ないながらも楽しく過ごすことができました。上はアレな話題から、下は研究の真面目な議論まで、色々なお話をさせて頂いた事に感謝致します。メリハリのついた学生生活を送ることができたのは、真面目な一面も併せ持つ津田さんのお陰だと信じています。

同じ2部門の先輩である中島章光さん、坂口歌織さんにもお世話になりました。いつも部屋へ伺うと、おふたりはなぜか警戒されますが、「研究について相談したいことがあるのですが」と切り出すと快く話を聞いて下さります。研究やセミナーなどについて真摯に相談に乗って頂きありがとうございました。

太陽研2部門藤井研究室に来てからの2年間に、さまざまな経験を積ませて頂きました。私の運がよかった点は、運用を始めたばかりのプロトンイメージャの初期解析に携われたことだと思っています。取得データから動画を作成したり、データ公開用ホームページを作成したりするのは、まささらな雪原に足跡をつける感覚に似た楽しさがありました。当研究室の先輩によって書かれた過去の修士論文の謝辞に、研究生活の思いを山登りに例えて書かれた方がいらっしゃいます。私が修士1年の時に受講していた授業でも、これと同様に、研究を山登りに例えて述べられた先生がいらっしゃいました。目指す頂上は同じなので、とにかくどれでもいいから登山道を登ってみる事が重要という意味だったと思います。私にとって初めての登山道は、プロトンイメージャの初期解析でした。その道の途中には、美しいオーロラ現象を対象とした研究に関われる喜びの他に、電離圏物理の理解や、観測機器の運用がありました。そしてなによりトロムソ出張では実際にオーロラを見る事も出来ました。このような素晴らしい経験を積む機会を与えて下さった研究室の皆様方に改めてお礼を申し上げます。

本研究で使用した EISCAT レーダーのデータは EISCAT 科学協会によって取得されたものです。EISCAT 科学協会をはじめ、観測に携わった方々に感謝致します。エンジニアの皆様のご好意によって EISCAT VHF レーダー内部を見学する貴重な機会を頂いたことは、良い思い出です。

使用した全天デジタルカメラのデータは国立極地研究所の方々によって取得されたものです。その他の光学機器の感度校正には、国立極地研究所が所有する装置を使用させて頂きました。2008 年 8 月には極地研シンポジウムで研究発表もさせて頂きました。国立極地研究所の方々に感謝致します。とりわけ、国立極地研究所の小川泰信先生には大変お世話になりました。トロムソ出張の際には、買い出しのために街まで車で連れて行って下さいました。また研究に関しても、学会発表の際には必ずコメントを下さり、議論を通じて様々な知見を与えて頂きました。感謝を申し上げます。

本研究で用いた磁場データは IMAGE 地上磁力計ネットワークより取得されたものです。30 もの基地局のメンテナンスを行い、観測を行う方々全てに感謝致します。

最後に、大学院まで進学をさせて頂き、学費や生活の一切の面倒を見て下さった、家族に厚く御礼申し上げます。

2009 年 1 月 22 日

岩田 陽介