

修士論文

Polar 衛星/CUTLASS レーダー/EISCAT レーダーを用いた
極方向へ移動するオーロラ現象の研究

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

隅山智子

2003年1月30日

要旨

昼間側磁気境界面で生起する磁気リコネクションに関連すると考えられている、オーロラークが昼間側カusp領域周辺から極方向へ移動する現象、Poleward Moving Auroral Form (PMAF) は、全天カメラなどで観測されているが、PMAFの電磁気的特性(内部及び外部におけるプラズマの運動や電流系の分布等)について、観測面からの十分な研究はなされていない。本研究では2000年12月4日に北極域電離圏カusp周辺領域において発生したPMAFに着目し、人工衛星やレーダー等、複数の同時観測データを比較した。その結果、次のことが明らかとなった。(1) アーク状のPMAFが昼側オーロラオーバルから剥がれて高緯度側に運動していた。(2) プラズマは極方向に、オーバルを横切って運動しており、IMF_z成分も負であったので、昼間側磁気リコネクション発生の条件を満たしていることが示唆された。(3) 地上磁場データからも、PMAFは開いた磁力線領域であるカusp、あるいは極冠帯に存在していた可能性が示唆された。(4) IMF_y成分が正であり、極冠帯で朝側に卓越して流れる電離圏対流が存在していたことが予想され、実際にPMAFが朝側方向に移動したこともコンシステントであった。これらの観測結果から、本研究でとりあげるPMAFは、IMFと地球磁場が結合した磁束管が太陽風とともに地球夜側へと運ばれる現象の電離圏への投影を観測していたと考えられる。さらに、CUTLASS Finlandレーダーの、ある特定のビーム視線方向において、PMAF速度とその領域におけるプラズマ速度を比較を行った。レーダーエコーはPMAFそのものの領域からは、ほとんどが返ってきておらず、その高緯度側および低緯度側から、エコーが返ってきていた。このPMAF近傍のプラズマ速度とPMAFの速度は、方向は一致するが、速さはプラズマ速度の方が有意に小さいという結果が出た。電離圏プラズマの非圧縮性から、PMAF領域およびそのごく近傍のプラズマは、ほぼ同じ速度で動くことが期待されることを考慮すると、降りこみ粒子を伴った磁束管の極方向移動と、その内部のプラズマ速度は一致していないということが示唆される。この速度の不一致の原因として考えられるのは、PMAFが降下粒子を引き起こす加速源そのものの移動の効果も含んでいたこと、もしくは沿磁力線方向の電場の大きさが無視できないほど大きかったため、電離圏に磁気圏電場がそのまま伝わら

ず、電離圏のプラズマ運動にズレを引きおこし、PMAF とプラズマ速度の差を生み出したことが考えられる。

目次

要旨	i
第1章 序章	1
1.1 磁気圏	1
1.1.1 マグネットシース	1
1.1.2 ローブ	1
1.1.3 プラズマシート	2
1.1.4 カスプ	2
1.1.5 Low Latitude Boundary Layer(LLBL)	2
1.1.6 マントル	2
1.2 電離圏	3
1.3 太陽風と磁気圏、電離圏の相互作用	3
1.4 オーロラ光のスペクトル	4
第2章 研究の背景および目的	11
2.1 Flux Transfer Event(FTE) と Poleward Moving Auroral Form (PMAF)	11
2.2 本研究の特徴および目的	13
第3章 観測機器	17
3.1 Polar VIS Earth Camera	17
3.2 SuperDARN	18
3.2.1 HF レーダーの観測方法	18
3.2.2 HF レーダーから得られる物理量	18
3.3 EISCAT VHF レーダー	19
3.3.1 IS レーダーによって得られる物理量	19
3.4 本観測の特徴	20

第4章	2000年12月4日の観測結果	25
4.1	Polar VIS Earth Camera によるオーロラ観測結果	25
4.2	ACE による IMF 観測結果	28
4.3	IMAGE ネットワークによる地上磁場観測	29
4.4	VHF レーダーによるイオン速度、電子温度観測結果	30
4.5	CUTLASS Finland レーダーによるプラズマ速度観測結果	34
第5章	プラズマ速度とオーロラ移動速度の比較	39
5.1	CUTLASS ビーム視線方向成分の、PMAF 移動速度の導出	39
第6章	考察	47
6.1	オーロラ移動方向とビーム視線方向が平行でないことによる、プラズマ速度の過小評価	47
6.2	PMAF 速度 > PMAF 内のプラズマ速度の可能性と物理的解釈	48
第7章	まとめと今後の課題	53
7.1	まとめ	53
7.2	今後の課題	54
	参考文献	55
	謝辞	59

第1章 序章

1.1 磁気圏

地球は双極子磁場を持っており、この磁場は太陽から流出する高速度 (約 200-900 km/s) のプラズマ流 (太陽風) によって閉じ込められている。この地球磁場が閉じ込められた空間を地球磁気圏と呼んでいる。磁気圏が形成されるのはプラズマが磁場を横切って動くことができないためであり、太陽風プラズマの動圧と、地球の固有磁場がプラズマの動きを抑える力 (磁気圧という) のバランスによって磁気圏の大きさが決まる。地球磁気圏の構造はこれまでに、数多くの人工衛星によって測定され、明らかになってきた。図 1.1 は磁気圏の北半分と手前側の一部を切り取って内部を示した磁気圏構造の概略図である。以下に、磁気圏の主な名称とその特徴を述べる。

1.1.1 マグネトシース

太陽風プラズマは、磁気圏前方に存在する衝撃波面 (ショックフロント) で熱化される。この衝撃波面と磁気圏界面の間はマグネトシースと呼ばれる。典型的なプラズマ密度は 15 個/cm^3 程度である。

1.1.2 ローブ

太陽風磁場と磁気圏と境界を磁気圏境界といい、この内側が磁気圏である。磁気圏赤道面の南北両側の広い空間には、低温のプラズマ (約 $1 \sim 10 \text{ eV}$ 程度) が存在し、ローブと呼ばれている。ここでは地球の極域から伸びている磁力線が、夜側に長く引き伸ばされている。一般的に、ローブの磁力線は開いており、惑星間空間磁場 (IMF) と結合していると考えられる。また、ローブの磁力線を地球磁気圏に投影した領域はポーラーキャップ (極冠) と呼ばれている。

1.1.3 プラズマシート

南北のロープに取り囲まれるように、磁気赤道面付近では磁場が反平行のため、磁気圧が弱く、プラズマ圧が卓越する場所がある。このプラズマ圧とロープの磁気圧がほぼつりあい、平衡状態に近い状態を作り出している場所は、プラズマがシート状にたまっていることから、プラズマシートと呼ばれている。プラズマシートは、オーロラを発生させる高エネルギー粒子の重要な供給源である。

1.1.4 カスプ

昼間側の磁気圏境界に、特徴的な磁場の配位が見られる。磁気圏の前面の閉じた磁力線と、太陽風の磁場と再結合して尾部のほうに流されている磁力線の境界にみられるこの構造は「カスプ」と呼ばれている。(図 1.3)。カスプ領域では、太陽風プラズマが直接地球に降下している。この領域を磁力線に沿ってたどると、平均としては昼側の磁気緯度 75 度付近に対応する。ただし、後述の惑星間磁場などにより、その緯度は変動する。

1.1.5 Low Latitude Boundary Layer(LLBL)

磁気圏界面のすぐ内側の境界層のうち、昼側から磁気圏尾部両側(フランクサイド)にかけての境界層は、低緯度境界層(LLBL)とよばれる。マグネトシースプラズマの侵入とみられる密度数個/cm³、平均速度 100-300 km/s のプラズマがしばしば観測される。

1.1.6 マントル

カスプ領域を通過して電離圏まで流入するプラズマは、太陽風から磁気圏内に流入したプラズマのほんの一部であり、残りの大部分は磁気圏尾部に流れていく。そしてその一部はプラズマシートに流入し、また一部は、磁気圏境界面に沿って後方に流れていく。そこで夜側の磁気圏境界面には、高温のプラズマ流の存在する層ができています。これをマントルとよんでいる。マントルの厚さは地球半径の 1 ~ 2 倍であり、そこを流れるプラズマの速度は、300 km/s 前後と太陽風の速度に近い。

1.2 電離圏

地球の超高層大気領域において、不完全電離し、磁気圏と電磁氣的に結合している領域は電離圏とよばれており、磁気圏環境を決めるうえで重要な働きをしている。電離圏は、高度ごとに、D領域（約70～90 km）、E領域（約90～140 km）、F₁領域（約140～200 km）、F₂領域（約200～1000 km）と区分され、1.3で述べるように高度ごとに各々電磁氣的な性質が異なっている。極域以外の、D領域からF₁領域までは、大気が太陽紫外線を吸収して電離することによる電子とイオンの生成と、電子とイオンが再結合することによる消滅との間でおおよそ化学平衡が成り立っている。極域では、太陽紫外線に加えて、磁気圏から降下してくる高エネルギー電子やプロトンによる電離が重要となる。図1.4に電子密度の高度分布を示す。高度（縦軸）及び密度（横軸）を対数で表している。電離圏のプラズマが磁気圏に広がっている領域をプラズマ圏と呼び、プラズマ圏とその外側の電子密度が低い領域との境界をプラズマポーズと呼ぶ。

1.3 太陽風と磁気圏、電離圏の相互作用

太陽風と地球磁気圏との相互作用の結果、外部磁気圏には朝方から夕方に向かう大規模な電場が発生している。この大規模電場によって、磁気圏のプラズマは図1.5(a)に示されるような対流運動を行う。プラズマシート内では、磁力線が閉じているために磁場の北向き成分が存在し、地球に向かうプラズマの流れが起こる。プラズマシートから地球に向かって流れてきたプラズマは、地球に近づくと、夕方側と朝方側に流れが二分され地球を回って昼側に向かう。図1.5(b)は赤道面でのプラズマの流れである。

磁力線に沿う方向の電気伝導度は、磁力線に垂直な方向の電気伝導度比べて非常に大きいので、1本の磁力線は、磁気圏から電離圏までほぼ等電位となっている。そのため、磁気圏に存在する大規模電場は磁力線に沿って極域電離圏に投影される。この大規模電場によって、極域電離圏のF領域では、イオン、電子ともに磁場にも電場にも垂直な方向の、 $E \times B$ ドリフトを行う。図1.5(c)は、この磁気圏対流に対応した、電離圏でのプラズマの電場ドリフトを示したもので、極冠付近では磁気圏の場合と同様に昼側から夜側に向かう運動が生じる。その低緯度側では逆に夜側から昼側に向かう運動を行う。

低高度では、荷電粒子が磁力線の周りを旋回するジャイロ角周波数 ($\omega = eB/m$) と荷電粒子の中性大気との衝突周波数 ν の大小関係が、電子とイオンの運動の性質を決

める重要なパラメータとなる。中性大気との衝突周波数がジャイロ角周波数に比べて非常に大きい場合、中性大気との衝突によりジャイロ運動ができなくなり、中性大気に引きつられ、プラズマとしての性質を失うからである。

ここでそれぞれの と の高さによる変化を図 1.6 に示した。電子については高度 70 km 以上においては、ジャイロ角周波数が中性大気との衝突周波数よりも大きく、無衝突として扱ってよい。一方、イオンについては、高度約 130 km 以上のところでジャイロ角周波数は衝突周波数よりも大きくなる。即ち、電子は 70 km 以上より高高度で、イオンは 130 km より高高度で、各々 $E \times B$ ドリフト運動をする。イオンは、105 km から 130 km では、中性大気との衝突により $E \times B$ の方向から外れた運動をし、105 km 以下では中性大気に捕獲されて一緒に運動をする。従って、105 km より以下の領域では電子のみが $E \times B$ ドリフト運動を行うことができる。この電子の運動によってつくられる電流（電子の運動方向とは正反対方向）を ホール電流と呼ぶ（図 1.5-(c)）。一方、105 km から 130 km の領域は、イオンも運動できるので、 $E \times B$ 運動から外れたイオンの運動によって担われるペダーソン電流と電子の運動によって担われる ホール電流双方が共存する。高度 130 km 以上では、イオン、電子共に $E \times B$ ドリフトで動き、速度差は無いので電流は流れない。電離圏における電気伝導度には、磁場による異方性が有るため、ホール、ピダーソン電流の他にも、磁場に平行方向の沿磁力線電流が存在する。図 1.7 に、典型的な、電離圏電気伝導度の高度分布を示す。 σ_0 は磁力線方向の伝導度、 σ_p はペダーソン伝導度、 σ_H はホール伝導度である。昼間の場合、電離圏 E 領域ではホール伝導度が卓越し、F 領域ではペダーソン伝導度が卓越していることがわかる。また電離圏全高度において、沿磁力線方向の伝導度が最も大きいことが、図 1.7 から見てとれる（ σ_0 と σ_p 、 σ_H のスケールの違いに注意。）

1.4 オーロラ光のスペクトル

オーロラ光は磁力線にそって、入射してきた高速の電子や陽子が上層大気の原子や分子と衝突し、それらを励起させることによって放射される。したがって、オーロラ光の輝線やバンドの大部分は上層大気を形成する主要な成分である窒素分子 (N_2)、酸素分子 (O_2)、窒素原子 (N)、酸素原子 (O)、またはそれらのイオンの輝線である。図 1.8 に見られるように、630.0 nm の発光は高度 150 km 以上の高高度で、427.8 nm は 100-150 km の比較的 low 高度で顕著である。大気の高高度分布モデルによると、上層大気では酸素原子が、下層では窒素分子が多数を占める為、低高度での発光は窒素分子、高高度での発光は酸素原子によるものが多い。

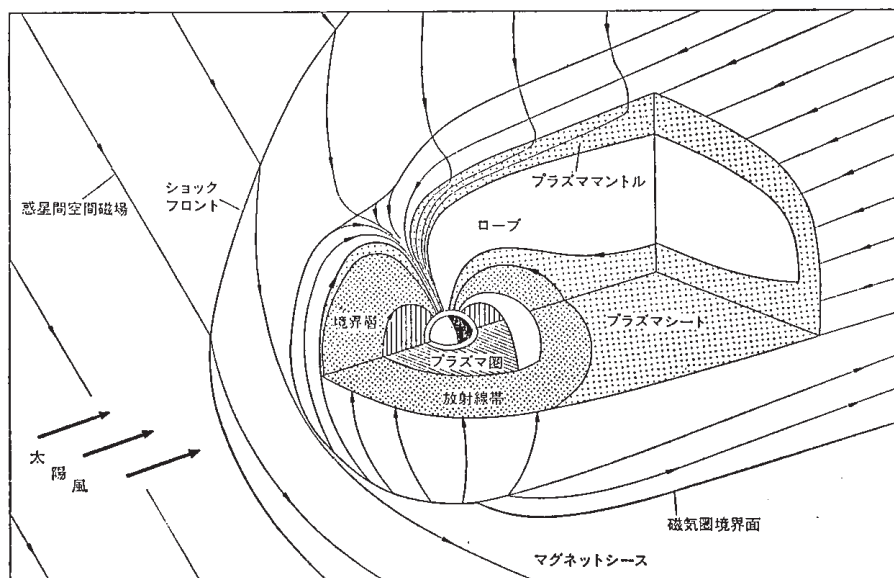


図 1.1: 地球磁気圏の構造図 [福西他, 1983]. 磁気圏の北半分と手前側の一部を切り取って内部を示した磁気圏構造の概略図である。磁気圏の主な名称とその特徴については本文参照。

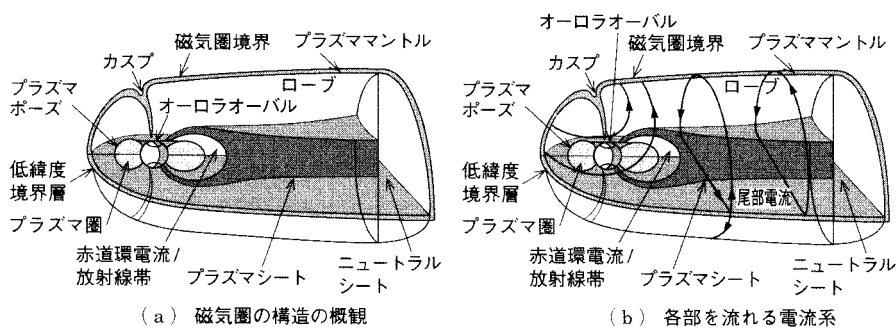


図 1.2: 磁気圏の構造と電流系。[Cravens, 1997] (a) 各部名称については本文参照。(b) 矢印で、磁気圏各部を流れる電流を示してある。プラズマシートを朝側から夕方側に水平に流れ出た後、南北に分岐し、境界表面をぐるりと回るようにして流れているのが尾部電流である。地球前面の磁気圏境界を流れているのが磁気圏界面電流で、磁気圏のカスプ領域を中心にして閉じるように流れている。

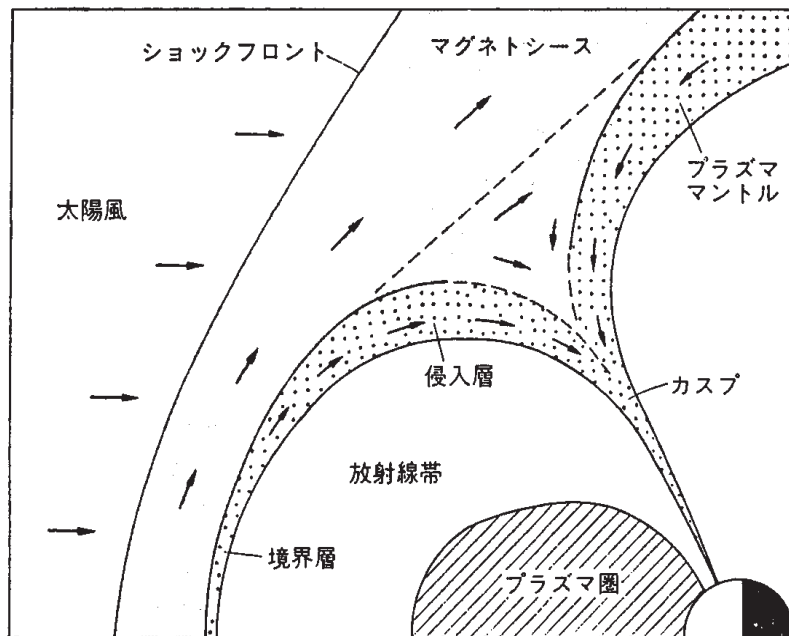


図 1.3: 昼間側磁気圏境界の構造 [福西他, 1983]. カスプ領域では、太陽風プラズマが直接地球に降下している。

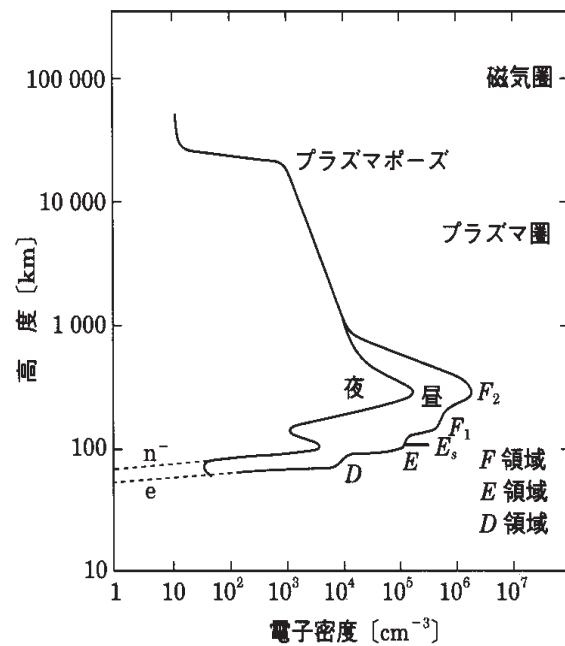


図 1.4: 地球上層大気における電子密度の標準的な高度分布 [福西他, 1983]. 電離圏は高度ごとに、D 領域 (70 ~ 90 km)、E 領域 (90 ~ 140 km)、F₁ 領域 (140 ~ 200 km)、F₂ 領域 (200 ~ 1000 km) と区別されている。電離圏のプラズマが磁気圏に広がっている領域をプラズマ圏と呼び、プラズマ圏とその外側の電子密度が低い領域との境界をプラズマポーズと呼ぶ。

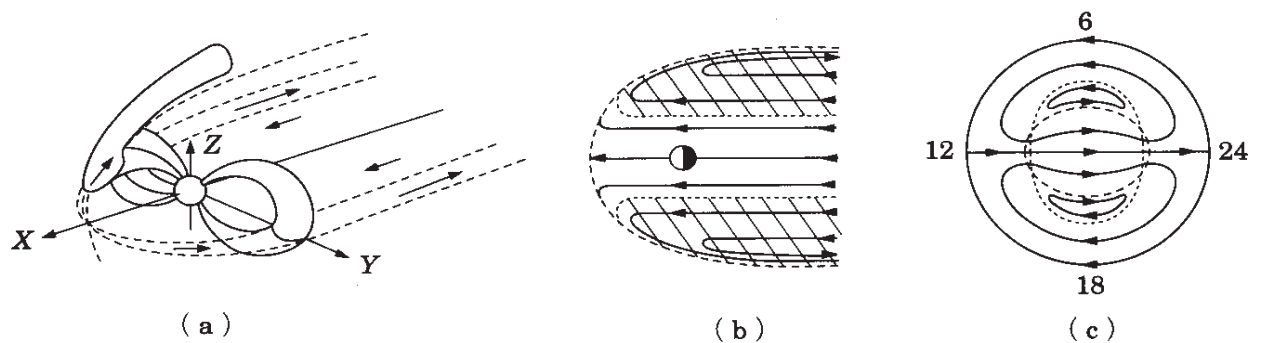


図 1.5: 磁気圏対流を表す概念図 [Cowley, 1982]。(a) 太陽風と地球磁気圏との相互作用の結果、外部磁気圏には朝方から夕方に向かう大規模な電場が発生している。(b) は赤道面でのプラズマの流れである。(c) は (a) で示した磁気圏対流が電離圏に投影された場合の電離圏プラズマ対流を示したものである。(詳しくは本文参照)

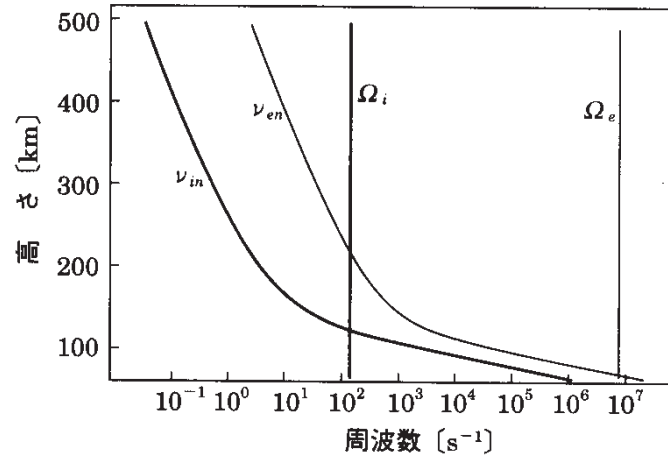


図 1.6: イオンと電子についての中性大気粒子との衝突周波数およびジャイロ角周波数。イオンは O_2^+ を仮定している。[恩藤 他, 2000]

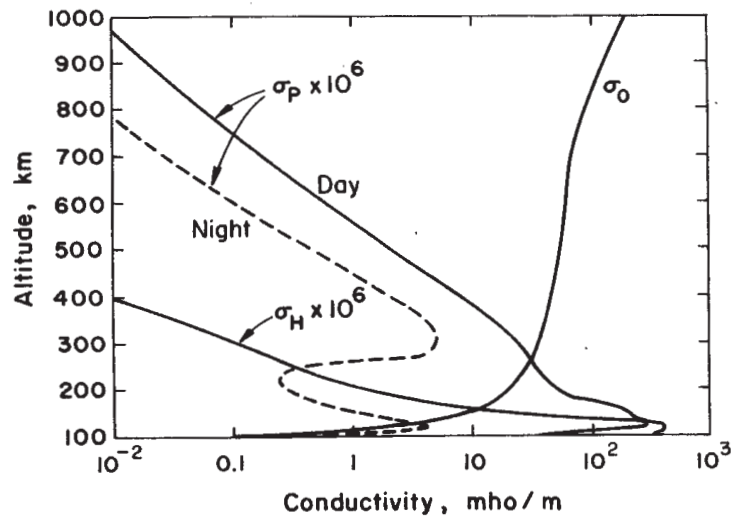


図 1.7: 電離圏における電気伝導度の高度分布 [F. Johnson, 1961]。昼間の場合、電離圏 E 領域ではホール伝導度が卓越し、F 領域ではペダーソン伝導度が卓越していることがわかる。電離圏全高度において、沿磁力線方向の伝導度が最も大きいことが分かる。(σ_0 と σ_p 、 σ_H のスケールの違いに注意。)

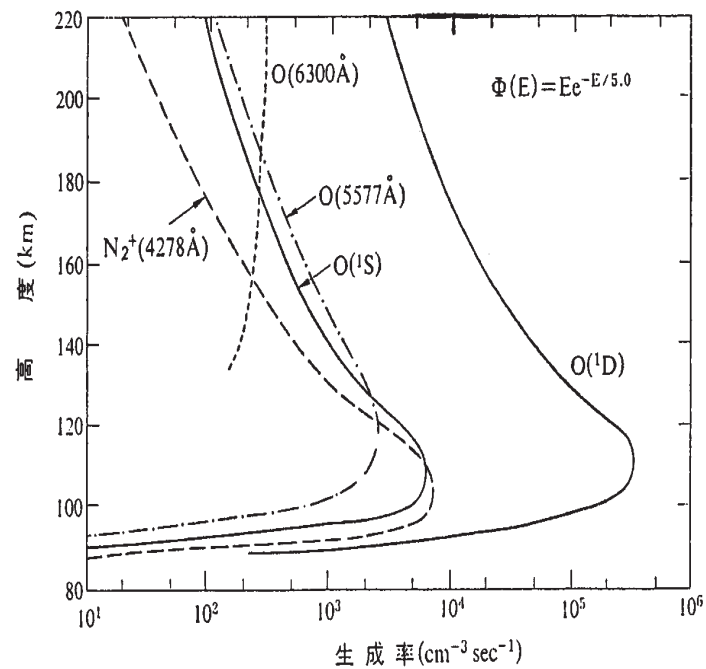


図 1.8: オーロラ発光の高度依存性 [Vallance Jones, 1974]. オーロラ光の輝線やバンドの大部分は上層大気を形成する主要な成分である窒素分子 (N_2), 酸素分子 (O_2), 窒素原子 (N), 酸素原子 (O), またはそれらのイオンの輝線である。630.0 nm の発光は高度 150 km 以上の高高度で、427.8 nm は 100-150 km の比較的低高度で顕著である。

第2章 研究の背景および目的

2.1 Flux Transfer Event(FTE) と Poleward Moving Auroral Form (PMAF)

太陽のコロナからは高速度のプラズマが噴きだしており、このプラズマとともに、太陽の磁場も同時に宇宙空間に放出され、絶えず地球にも運ばれてきている。この磁場は惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field : IMF) と呼ばれている。IMF の座標系としては、地球から太陽方向を x 、地球双極子軸に垂直に y 、双極子軸を z とする GSM 系が多くの場合に用いられる。IMF が昼間側磁気圏境界面の地球磁場と反平行の成分を持つときに、地球磁場との磁力線のつなぎ変えがおこる [Dungey, 1961]。この過程は昼間側磁気リコネクションと呼ばれている。図 2.1 は、最も効率よく磁気リコネクションが起こっている場合、すなわち IMF が完全に南を向き、地球から発する北向きの磁力線が非常に薄い境界面を境にして接し、融合している様子が描かれている。[Russell and Elphic, 1978] は、昼間側磁気リコネクション発生するとき、IMF とつなぎかわり開いた磁束管が地球夜側へ移動する、Flux Transfer Event(FTE) という現象が磁気圏境界面で発生していることを観測的に明らかにした。さらに、FTE は、IMF が南向きのときに主に発生し、およそ 8 分間の時間間隔で発生することが発見された [Berchem and Russell, 1984; Rijnbeek *et al.*, 1984]。

FTE は、間欠的な磁気リコネクションによって発生し、太陽風磁場の磁力線と結合した地球磁場の磁力線が作る、有限の大きさを持つ磁束管が、3次元電流系を伴いながら地球夜側磁気圏へ移動すると考えられている。またその際、磁束管内で、粒子加速が起き、加速された電子や陽子が磁力線に沿って地球電離圏に降り込み、極方向へ移動するオーロラを発生させると考えられている。このオーロラ現象は、Poleward Moving Auroral Form(PMAF) といい、[Sandholt *et al.*, 1986] により提唱された。

FTE の電離圏投影現象として、カスプ帯から極冠帯内へ間欠的に生じる、プラズマ流が観測されている。IMF が y 成分を持つとき、開いた磁束管のねじれの向きは、 y 成分の正負によって逆向きとなる (図 2.3)。そのため電離圏対流は朝夕対称とはならず、

どちらかに強調した形で発生する(図 2.4)。この IMF y 成分と対流の向きの特徴はオーロラ観測によって、光学的にも確認されている [Sandholt *et al.*, 1986, 1992; Moen *et al.*, 1995; Fasel, 1995]。これらの研究は、PMAF が、移動する FTE の磁束管の電離圏側の根元に対応していることを強く示唆している。

FTE をに伴う、電流系のモデルとして有力なものとして、Southwood モデル [Southwood, 1987] が挙げられる。これは、FTE (および PMAF) の磁束管領域の移動速度と、磁束管内のプラズマ速度は等しいというものである。[Thorolfsson *et al.*, 2000] は、MSP (Meridian Scanning Photometer) を用いて PMAF の移動速度を求めるとともに、SuperDARN レーダーを用いることで、その周辺のプラズマ速度を割り出した。その結果、PMAF の極方向への移動速度はおよそ 1.0 km/s であり、そこでのプラズマ速度もほぼ一致するという結果を出した。彼はこの結果は、FTE にともなう電流系モデルの一つである Southwood モデルを支持する結果だと結論している。

しかし、[Thorolfsson *et al.*, 2000] の研究では、PMAF の位置とプラズマ速度を判定した位置が正確には一致していない。さらに、FTE に関して、Southwood モデルでは説明できない観測結果も過去にいくつか示されている。[松尾, 2001] は、EISCAT Svalbard レーダー (ESR) を用いて、カスプ付近に対応する昼間側地球電離圏の F 領域において、高電子密度領域が極方向へと間欠的に移動する現象について、その領域の内部及び外部でのイオン速度(電場)とその領域の移動との関係を定量的に調べた。その結果、高電子密度領域内外でのイオン速度は空間構造が一様でなく、高電子密度領域中心部と周辺部とでは異なる速度を持つことが分かった。

さらに、[河野, 2001] はこれに続き、高電子密度領域の内外のプラズマの運動の様相を知るために、緯度毎の電子密度、ほぼ南北方向のイオンの速さ(ほぼ東西方向の電場の強さを表す)の変動を調べた。その結果、東西方向の電場の強いところで、電子密度が小さく、東西方向の電場の弱いところで電子密度が大きい傾向がみられた。高電子密度領域全体としては高緯度側に運動しているが、その領域内部のプラズマは、むしろ領域の外側のプラズマより遅いことを表しているというものである。高電子密度領域の内部でイオンの速度が小さく、外部でイオンの速度が大きいという帰結は、Southwood モデルとは必ずしも一致せず、[河野, 2001] の研究において観測した現象が FTE であるとすれば、Southwood モデルでは説明しきれないということになる。以上の様に、高電子密度領域移動速度とプラズマ速度との比較は、過去の観測面からも、HF レーダーや EISCAT レーダーなどを用いて行われてきているが、PMAF(FTE) 内外部での電場分布等については不明な点も多く、Southwood モデルが正しいか否かについては

明確になっていない。また、彼らの研究ではオーロラの光学データが用いられておらず、PMAF と FTE の関係についても、明らかにされていない。

2.2 本研究の特徴および目的

本研究の目的は、2000 年 12 月 4 日に観測された PMAF について、その電磁気的な特性を定量的に調べ、磁気リコネクションの物理過程を理解することにある。本研究の特徴として、[松尾, 2000] や [河野, 2001] では用いられていなかった、オーロラの光学データを導入した点が挙げられる。

PMAF に関する研究は、これまで主に全天カメラなどの地上観測データを用いて行われていた。しかし本研究では、PMAF が発生し、オーロラオーバルから極冠内へ移動していく現象を Polar 衛星の連続画像から見出し使用した。人工衛星で PMAF が撮像されたケースは非常に稀であり、さらに同時刻に複数の観測装置が稼動していたことにより、より詳細に PMAF の物理特性を知ることが可能となった。今回の人工衛星による PMAF の観測の利点として、(1) 地上の全天カメラに比べ視野が広く、地上観測が不可能な領域でも PMAF の観測が可能であること (2) 地上の天候に左右されないことが挙げられる。本研究では、PMAF 観測時における、昼間側磁気リコネクションの可能性の有無を調べるとともに、オーロラ移動速度と周辺の電離圏プラズマ運動の比較を行い、これらの結果から、PMAF 発生の物理過程を明らかにすることを目的としている。

具体的に述べると、PMAF の運動を説明できる過程はいくつかある。一つは、図 2.5-(a) の様に、降り込み粒子を起こす加速源の位置が変わり発光位置そのものが移動しているように見えるというものである。この機構は、ブラウン管に衝突するビームの位置変化により、テレビ画面の画像が動いて見えることに似ている。もう一つは、Southwood モデルに代表される過程で、図 2.5-(b) の様に、昼間側磁気リコネクションにより開いた磁束管が、エネルギー粒子の降りこみを伴いながら移動していたという場合である。前者の場合は、磁束管そのものの移動ではないため、PMAF の磁束管の中のプラズマは、PMAF 同じ速度で動く必要はない。しかし、後者の場合、磁束管そのものが移動するため、磁束管の速度が V であった場合、磁束管の中のプラズマも速度 V で移動し、Southwood モデルのように、PMAF と等しい速度のプラズマの流れがみられるはずである。

解析方法の特徴としては、SuperDARN レーダーの視線方向に合わせて、オーロラの

移動速度をより厳密に導出したことも特徴点として挙げられる。上述のように、PMAFの移動速度とその領域および周辺部のプラズマ対流を比較することは、この現象が、降りこみを伴った磁束管の運動を投影しているのか、すなわち Southwood モデルを支持する形になっているのかについて知る手がかりとなり、磁気リコネクションに伴う太陽風のエネルギー流入のメカニズムを知るうえで、重要な結果となる。

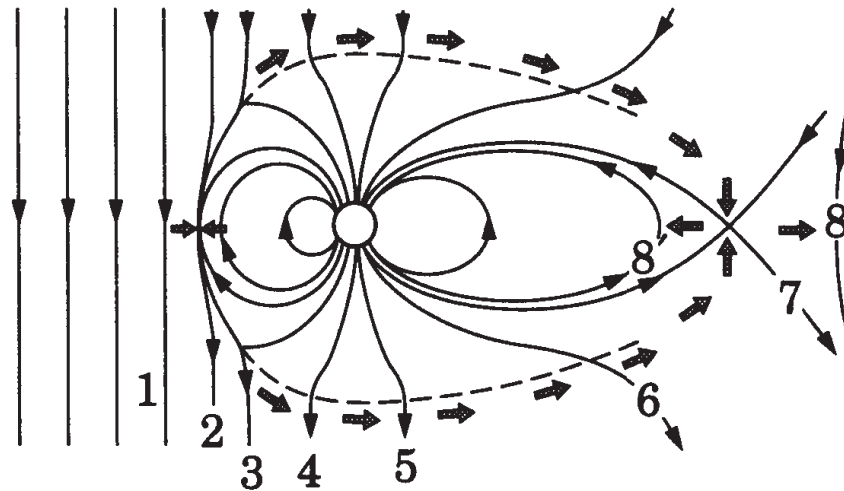


図 2.1: 昼間側磁気リコネクションの模式図 [Dungey, 1961]。最も効率よく磁気リコネクションが起こっている場合、すなわち IMF が完全に南を向き、地球から発する北向きの磁力線が融合している様子が描かれている。磁気圏の昼間側境界（太陽側）で磁力線は切断され、IMF とつながり、太陽風により夜側に運ばれて磁気圏尾部が形成される。下に示す数字 (1~8) に従って、磁力線が運動する。

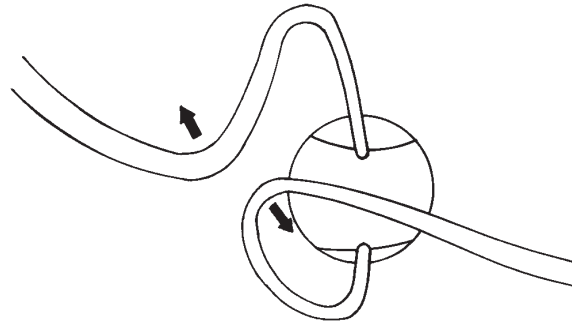


図 2.2: リコネクションによって開いた磁束管の模式図 [Southwood, 1987]

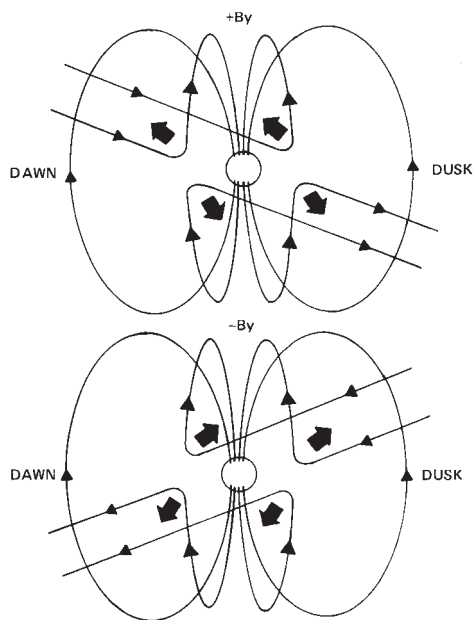


図 2.3: IMF B_y 成分と磁束管の振る舞い [Gosling *et al.*, 1990]。新たに開いた磁束管は IMF B_y 成分の正負により、異なる方向にねじれが起こる。

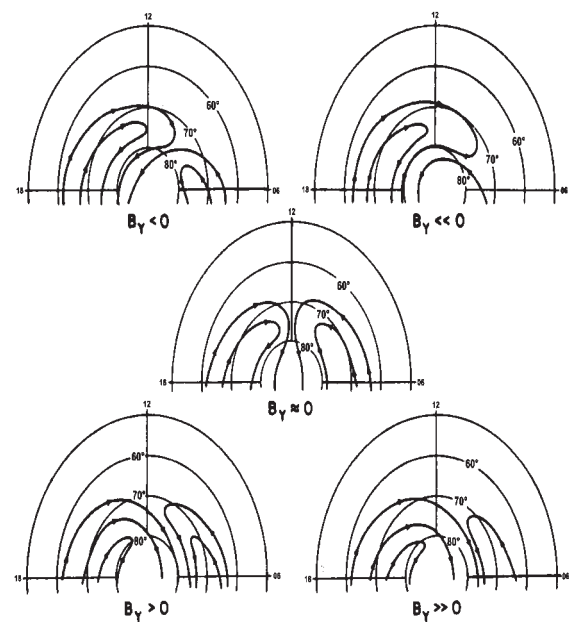
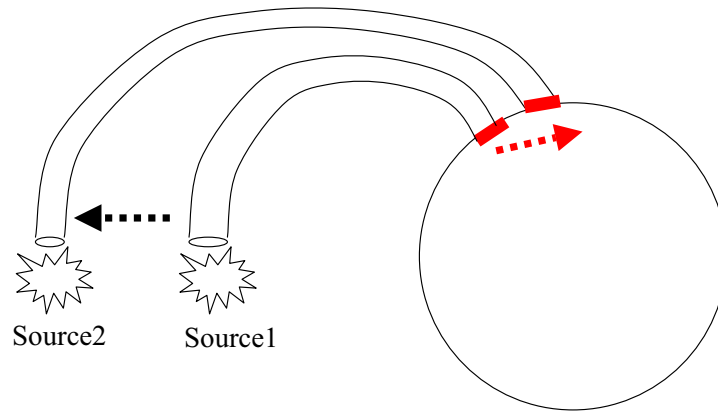
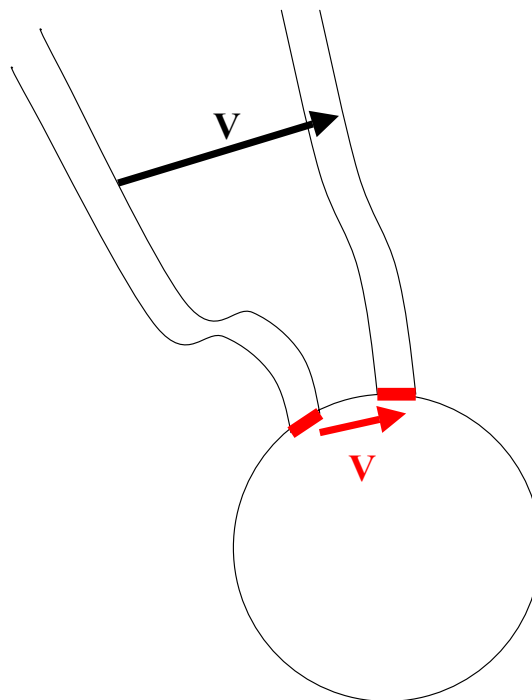


図 2.4: IMF B_y 成分と電離圏プラズマ対流の関係 [Heelis, R.A. *et al.*, 1984]。 B_y 成分が正の時は、極冠内において朝側への流れが卓越する。



(a) 粒子加速源の移動



(b) 磁束管そのものの移動

図 2.5: (a) 磁気圏の赤道面上にある「源」が外側へ動く場合。電離層のオーロラに北向きの動きを生じさせるが、磁束管の中のプラズマは同じ速度で動く必要はない。(b) 磁束管そのものが移動する場合。(a)とは異なり、磁束管そのものが移動するため、磁束管の速度が V であった場合、磁束管の中のプラズマも速度 V で動く。

第3章 観測機器

本研究では、昼間側磁気リコネクションに伴って発生すると考えられている、カスプから極方向へ間欠的に移動するオーロラ現象 (PMAF) について、複数の観測機器による同時観測データを用いて、その特性を研究する。PMAF の全体イメージを Polar 衛星データ、PMAF 領域およびその周辺のプラズマ速度を SuperDARN データ、オーロラオーバル領域およびその周辺のプラズマ速度、カスプ領域を特定するのに適したパラメータである電子温度を VHF レーダーデータからそれぞれ得る事ができる。この章では、これらの観測機器の特性を簡単に紹介し、またそれらを用いることでどのような利点があるかについて述べる。

3.1 Polar VIS Earth Camera

Polar 衛星はオーロラなどの極域電磁気圏における物理現象を広範囲に観測することを目的として、1996年2月に打ち上げられた。周期は17.6時間、軌道傾斜角は86°の極軌道衛星であるため、北極域で発生したオーロラについて、より広範囲の現象を空間分解能よく撮像することができる [L.A.Frank and J. B. Sigwarth *et al.*, 1997]。

Visible Imageing System (VIS) は、Polar 衛星に搭載されたイメージャの一つで、Medium-Resolution-Camera, Low-Resolution Camera, Earth Camera の3種類のカメラで構成されている。前者2機は可視光によるオーロラ撮像を行うカメラである。さらに、オーロラの光と太陽光を区別し、センサーに2重の光が入らないようにするために Earth Camera が補助的に取り付けられている。本研究で扱うオーロラ画像は Earth Camera によって撮像されたものである。表 3.1 に Earth Camera の概要を示す。Earth Camera の撮像波長は、124-149nm であり、高度約 200 km の酸素原子による発光がとらえられている。

3.2 SuperDARN

Super Dual Auroral Radar Network(SuperDARN)は広範囲における電離圏プラズマ対流を観測するために設立された、HF レーダーの国際共同プロジェクトである。レーダーの運用は、アメリカ、イギリス、カナダ、フランス、日本、南アフリカ、オーストラリアの七カ国で行われ、各国が所有する HF レーダーの規格およびオペレーションの形態が統一されている。北半球のレーダーロケーションを図 3.1 に示す。一つの HF レーダーは、Beam0 から Beam15 までの 16 方向へ、時計まわりに、約 7 秒間隔で順に電波を出力し、約 2 分間で扇形の視野全体の観測を行う(図 3.2)。各ビームの間隔は 3.24° 、観測レンジ(電波の航続距離の座標)は 180 km ~ 3500 km であり、レンジ方向の分解能(45 km)ごとに 0 から 75 までのレンジナンバーが割り当てられており、ナンバーが大きくなる方向が、レーダーから遠ざかる方向となる。

本研究で用いているのは CUTLASS Finland レーダーで、図 3.1 において、ID が 'F' で示されている視野を持つ。本研究で扱う PMAF およびカस्प域のオーロラオーバルはこの視野内にあったため、これら光学現象周辺のプラズマ速度を広範囲に捉えることができた。

3.2.1 HF レーダーの観測方法

図 3.3 に、HF 電波の伝播模式図を示す。電離圏プラズマ密度は高度方向に大きく変化し、電波が密度の異なる媒質の境界を通過する際、スネルの法則に従い屈折を受ける。HF レーダーから送信された電波は周波数が低いため、図において、 $k_l(\text{HF})$ の様に電離圏 E 層、F 層の両方で屈折し、その結果地面に対し水平に航行することができる。その高度は約 300km であり、電波の道程にプラズマイレギュラリティーが存在すれば、そこから出た $k_s(\text{HF})$ のような後方散乱波をレーダーが受信する。VHF 電波は周波数が高いため、電離圏でほとんど屈折されず、 $k_l(\text{VHF})$ のように突き抜けるか、反射されても、 $k_s(\text{VHF})$ のようにレーダーに返ってこない。

3.2.2 HF レーダーから得られる物理量

プラズマイレギュラリティーは電離圏プラズマ対流にそって動くため、電波はドップラーシフトを受ける。これにより、出力した電波と受信した電波ではその周波数スペクトルが変化している。この受信波の形状から、Power(受信波の強度)、Width(受信波のスペクトル幅)、Velocity(電離圏プラズマの対流速度)の3つのパラメータが得られ

る。また、カスプ領域では観測で得られるスペクトルの幅が広い(250 m/s以上)という傾向がある[Baker et al., 1994]。注意すべき点は、得られる物理量はすべてレーダーの視線方向成分のみということである。しかし、2つのレーダーを用いて2方向から1つの領域の観測ができれば、電離圏対流パターンのベクトルを得ることができる。その理由もあり、図 3.1 に示したように、互いに観測領域がオーバーラップするようにレーダー群が配置されている。

3.3 EISCAT VHF レーダー

European Incoherent SCATter (EISCAT) レーダーは、イギリス、フィンランド、フランス、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン及び日本からなる EISCAT 科学協会により運営される非干渉散乱 (Incoherent Scatter: IS) レーダーシステムである。EISCAT レーダーシステムは、スカンジナビア半島北部に設置された UHF レーダーシステムと、VHF レーダーシステム、スヴァールバルレーダー (ESR) の3つによって構成される。UHF レーダーは、トロムソ (69.59 °N, 19.23 °E)、キルナ (67.86 °N, 19.23 °E)

ソダンキラ (67.36 °N, 26.63 °E) の3ヶ所に設置されており、トロムソには送信機と受信機が、キルナ、ソダンキラには受信機がそれぞれ設置されている、世界で唯一の3局方式の IS レーダーである。

VHF レーダーは、トロムソのみに設置されている送受信可能レーダーである。40m × 30m のパラボリックアンテナを4枚組み合わせて構成されており、アンテナを電氣的に2方向に向けて観測することが可能である。

3.3.1 IS レーダーによって得られる物理量

IS レーダーは電離圏の電子からの非干渉散乱波を利用している。しかし IS レーダーで用いている電波の波長は電離圏におけるデバイ長と比較して大きいこと、また非干渉散乱波を生じる電子はイオンに捕獲されていることから、実際 IS レーダーではイオンの運動を測定することになる。

その受信スペクトルをもとにして、イオンの組成を仮定することにより、イオン温度、イオン温度と電子温度の比、イオンと中性大気の衝突周波数を直接決定することができる。また、レーダーの受信パワーが、散乱する体積中の電子の数に比例することから、電子密度を求めることができる。さらにドップラーシフトにより、送信波の振動数からずれて散乱波がみられることになるので、これからレーダー視線方向のイ

オン速度を求めることができる。さらに、中性大気モデル、地球磁場モデルなどを利用することにより、電場、電流、中性風速度、電気伝導度などの他のパラメータも間接的に導出できる。

EISCAT VHF レーダー観測視野の広さや、広い領域全体の観測にかかる時間は、先述の SuperDARN には及ばないが、電子密度、イオン温度、電子温度、イオン速度を高度分解能よく測定できるため、物理過程を理解する上で重要な役割を果たす。本研究で扱う PMAF 現象においては、VHF レーダーは主にカスプ付近のオーロラオーバルを観測していた。電子温度情報から、降下電子の有無及びカスプ域の推定、イオン速度からオーバル付近におけるプラズマの流れを同定することができた。電子密度は温度にくらべて、大きい高度依存性を持ち、降下電子による増加と、バックグラウンドの電子密度の高度変動との区別が難しいため、本研究では、カスプの同定には使用しなかった。

3.4 本観測の特徴

本研究では 2000 年 11 月 25 日より 2000 年 12 月 4 日に行われた、宇宙科学研究所ロケットキャンペーン中のデータを用いている。このキャンペーンは、IS レーダー、ロケットによる直接観測ならびに、SuperDARN、単色テレビカメラ、フォトメーター、地磁気計などの同時観測を行い、昼間側カスプ領域電離圏のイオン流出の物理を探るために実施された [河野, 2000]。

PMAF 発生時、VHF レーダーは CP-4 モードとよばれるモードで、特別実験の観測をしていた。このモードでは VHF レーダーのアンテナ 2 枚を地理北極方向に、他の 2 枚を地磁気極方向に電氣的にむけ、ともに仰角を 30° でビームを放出して観測を行う。またこの 2 つのビーム間のなす角は、 14.8° である。注意点は、観測緯度が高くなるほど、観測高度も高くなる点である (図 3.4)。図 3.2 は、VHF レーダーと CUTLASS Finland レーダーの視野を表したものであり、後述するように、PMAF の出現した領域を表した図 5.1 と比較すると、PMAF が CUTLASS Finland レーダーの視野に入っており、VHF レーダーはオーロラオーバルを横切る視野を持っていたことが分かる。広範囲のプラズマ速度を観測できる CUTLASS と、高度分解能よく種々の電離圏物理量を得られる VHF レーダー、また、Polar 衛星によるオーロラ画像を用いることで、より定量的に、PMAF の周辺のプラズマ運動を調べることができ、2.2 で述べたように、PMAF の発生メカニズムを追求することができる。

表 3.1: Polar VIS Earth camera の概要. (R_e は地球半径の大きさを表す。)

サイズ	61 × 66 × 25 cm
重量	28.65 kg
出力	30W
画素数	256 × 256 pixels
視野角	20 ° × 20 °
透過バンド幅	~ 25 nm
波長帯	124 - 149 nm
感度	7.2 counts /kR · pixel
時間分解能	12 秒
角度分解能	0.08 °
空間分解能 (近地点, $8R_e$ において)	70 km

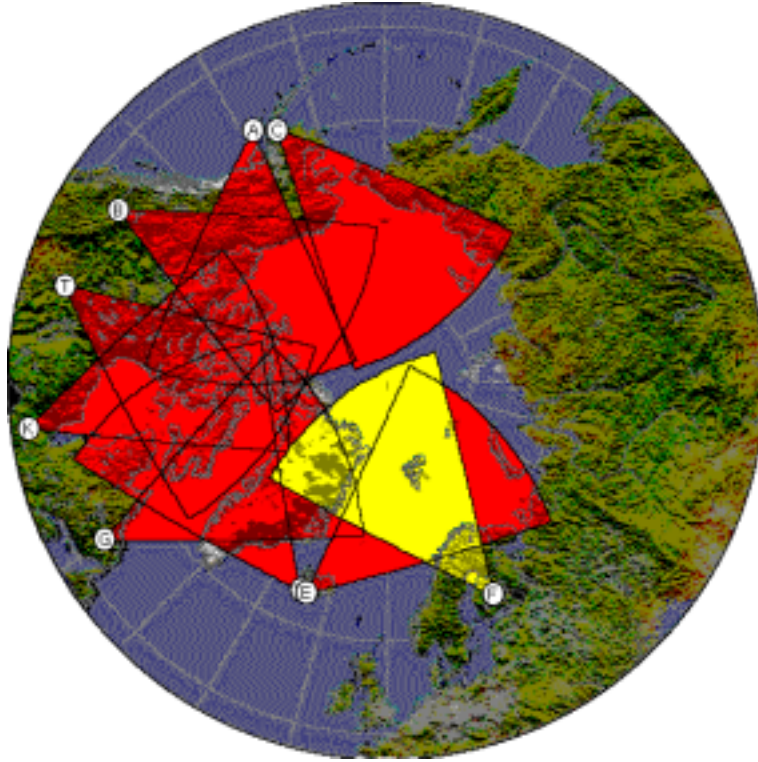


図 3.1: 北半球における SuperDARN レーダー配置図。各 HF レーダーの形態は統一されている。本研究で用いているのは CUTLASS Finland レーダーであり、黄色で示された視野を持つ。(http://superdarn.jhuapl.edu/sites/index.html より引用)

表 3.2: 北半球の SuperDARN 概要

レーダー名	ID	運用国
King Salmon	C	日本
Kodiak	A	アメリカ合衆国
Prince George	B	カナダ
Saskatoon	T	カナダ
Kapusksing	K	アメリカ合衆国
Goose Bay	G	アメリカ合衆国
Stokkseyri	W	フランス
tykkvibar(Cutlass/Iceland)	E	イギリス
Hankasalmi(Cutlass/Finland)	F	イギリス

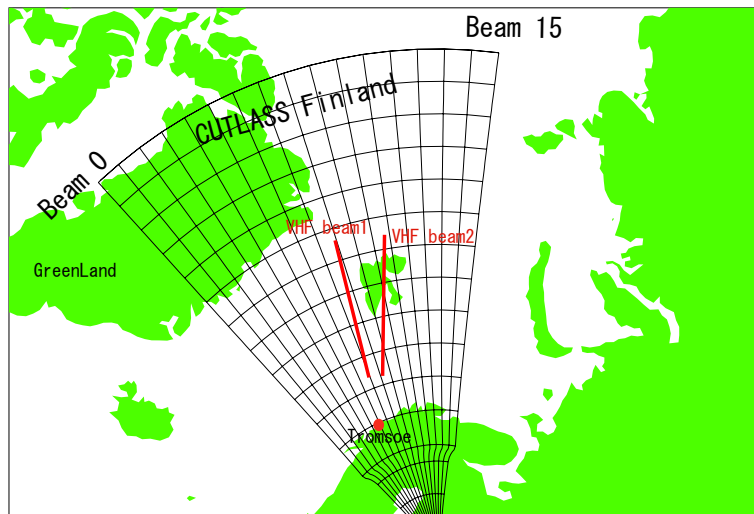


図 3.2: VHF レーダーおよび CUTLASS Finland の視野。CUTLASS Finland レーダーは、扇形で広範囲の視野をもつ。図 5.1 の Polar 画像との比較より、本研究で扱う PMAF の動きは CUTLASS Finland の視野内であることが分かる。また、赤い線は EISCAT VHF レーダーのビーム方向であり、地磁気北極方向に beam1、地理北極方向に beam2 が電氣的に向けられている。VHF レーダーは、今回 PMAF を視野に含まないが、オーロラオーバルの低緯度側から高緯度側を貫く視野を持っており、オーバル周囲のイオン速度の特定が可能となった。

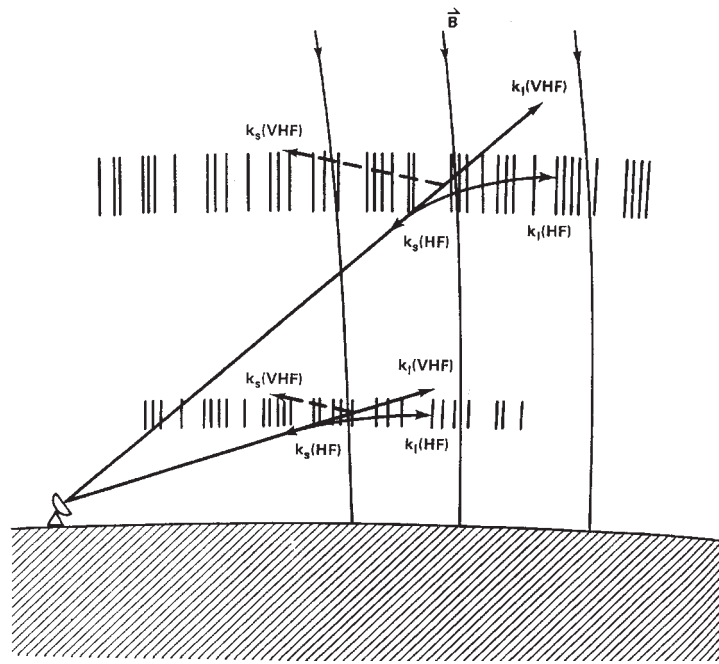


図 3.3: HF、VHF 電波の伝播 [Greenwald *et al.*, 1995]。HF レーダーから送信された電波は周波数が低いため、 $k_l(\text{HF})$ の様に電離圏 E 層、F 層の両方で屈折し、その結果地面に対し水平に進行する。電波の道程にプラズマイレギュラリティーが存在すれば、そこから出た $k_s(\text{HF})$ のような後方散乱波をレーダーが受信する

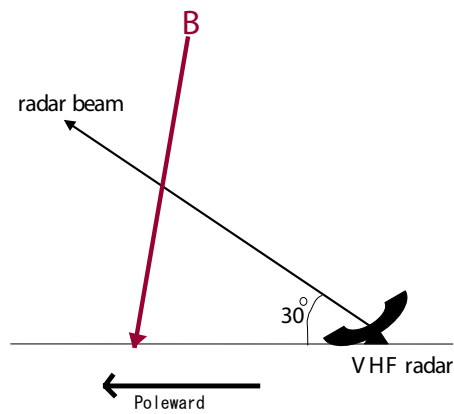


図 3.4: EISCAT VHF レーダーの CP-4 モードのビーム方向。B で示された矢印は磁力線である。ビームの仰角は 30° で、観測緯度が高くなると観測高度は上昇する。

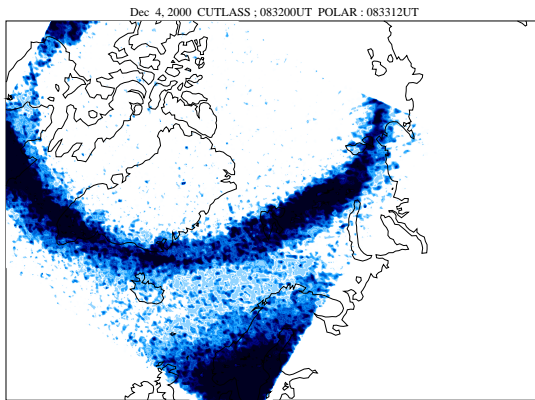
第4章 2000年12月4日の観測結果

PMAFが発生した2000年12月4日、0833UTから0844UTの間では、ロケットキャンペーンによる電離圏の観測が行われていた。ここではその時間帯における、各観測装置の観測結果をしめす。

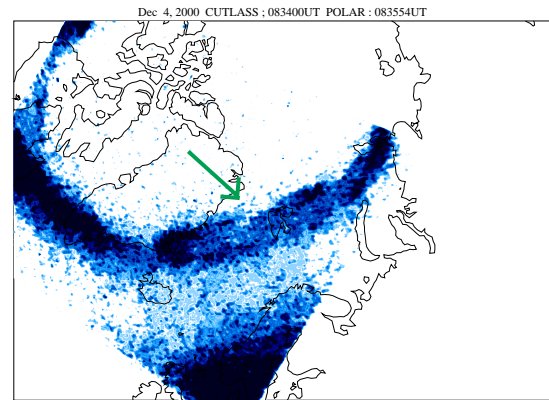
4.1 Polar VIS Earth Cameraによるオーロラ観測結果

図4.1はVIS Earth Cameraによって得られた光学データを地図上にプロットしたものであり、極域をとりまく楕円形はオーロラオーバルである。また、画像下部中央における、スカンジナビア半島北部の光は昼間側の太陽光によるものである。

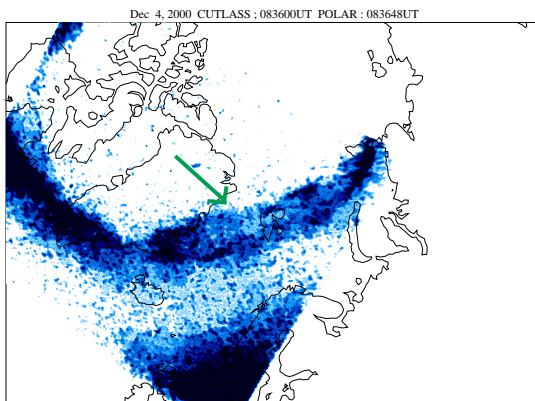
0833UTに昼間側オーロラオーバルでアークのはがれが見え始め、やがて高緯度の極冠帯にアークが移動して行く様子がみてとれる。移動方向はやや朝側(西側)に偏っており、高緯度に向かうほど輝度値は下がっている。0842UTにアークは弱くなり始め、その後消滅した。PMAFのスケールは、緯度幅 約 1° (約111 km)、経度幅 約 82° (約1600 km)であった。



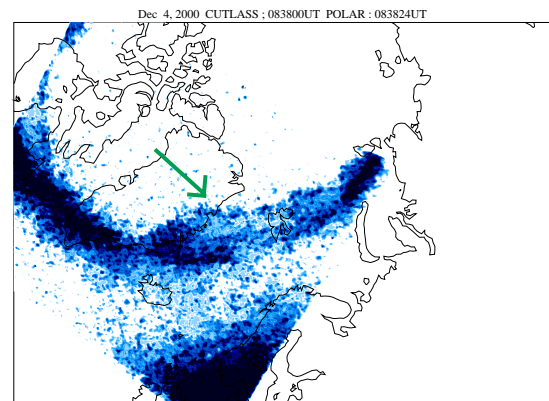
(a) 08:33:12 UT



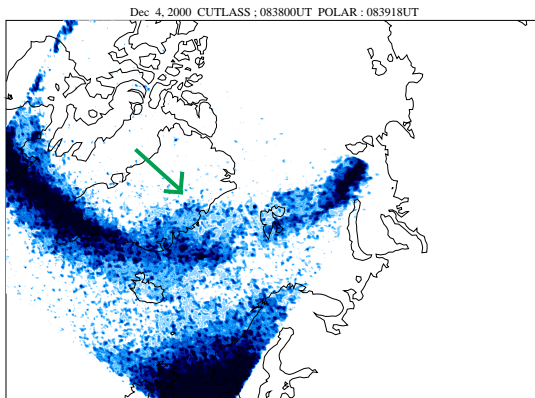
(b) 08:35:54 UT



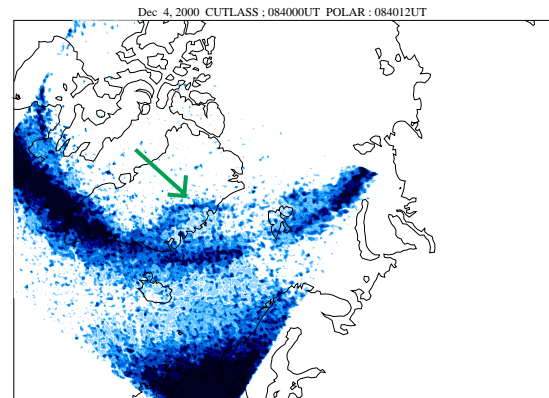
(c) 08:36:48 UT



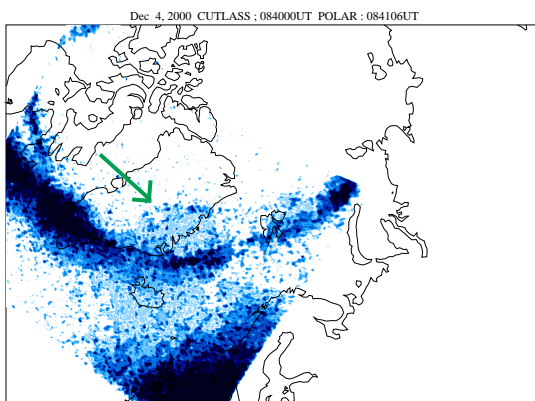
(d) 08:38:24 UT



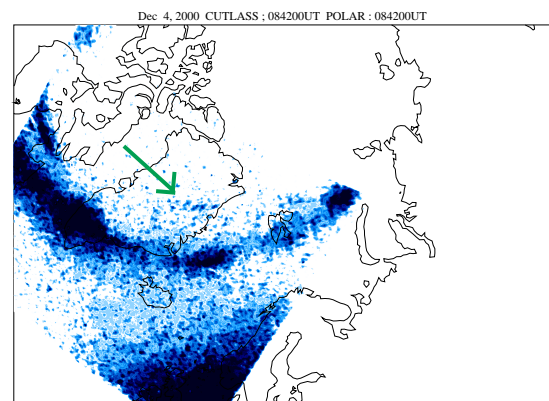
(e) 08:39:18 UT



(f) 08:40:12 UT



(g) 08:41:06 UT



(h) 08:42:00 UT

図 4.1: Polar VIS Earth Camera による PMAF の観測結果。画面下側が太陽方向となる。昼間側オーロラオーバルから剥がれたアークが、やや朝側に広がりながら極方向へ移動する現象がとらえられる。

4.2 ACEによるIMF観測結果

次に、人工衛星ACEによって得られた、PMAF発生時刻付近のIMFを図4.2に示す。図は上から縦軸がIMF Bx, By, Bz成分、横軸は国際標準時間 (Universal Time : UT) となっており、磁場がゼロのレベルを赤線で示した。ACEの飛翔する場所とPMAF発生前後の時刻の太陽風速度情報から算出すると、ACEで観測されたIMFが、昼間側磁気圏境界面に到着するのに50分前後かかることが分かった。そのため、PMAF発生時間帯のIMF情報は、ACEにおいては50分前の情報、つまり0743UT~0753UT付近のIMF情報に着目すればよい(図4.2において枠で囲った時間帯である)。

IMFのBz成分は0600UTから0840UT(磁気圏では0650UT~0930UT)において負の状態であり、昼間側磁気リコネクションの必要条件を満たしていたことが分かる。また、By成分は正の値を示しており、極冠帯において朝方側へ卓越した対流を発生させていたと考えられる(図2.4参照)。すなわち、朝側へ向かって極方向へ移動したPMAFが、磁束管の移動を投影していた可能性があることが分かる。

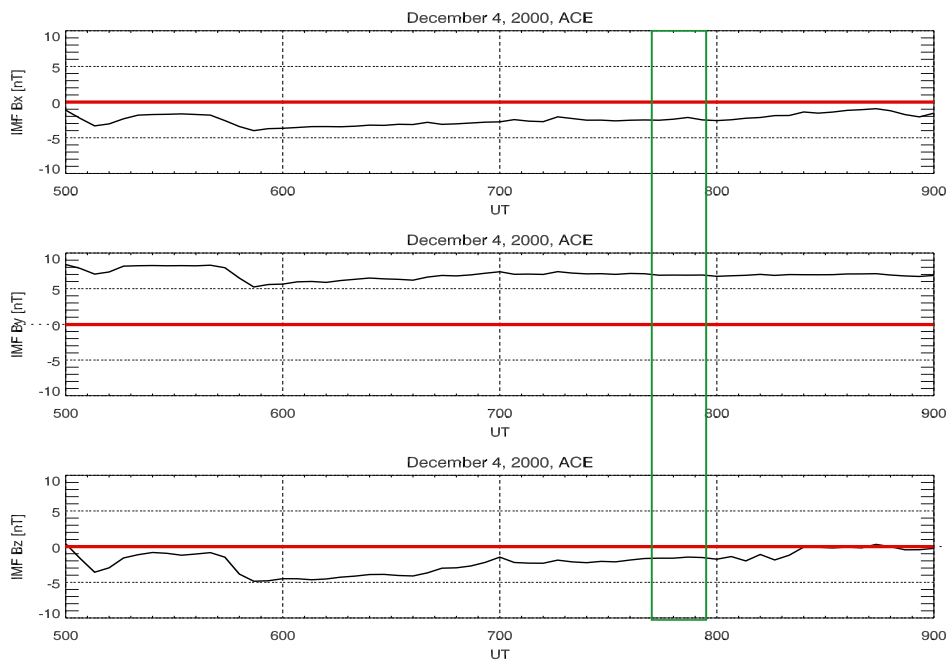


図4.2: ACEによるIMF観測結果。緑色の枠で囲まれている時間帯(0743UT~0753UT)は、PolarでPMAFが観測された時間帯のIMFに相当する。

4.3 IMAGE ネットワークによる地上磁場観測

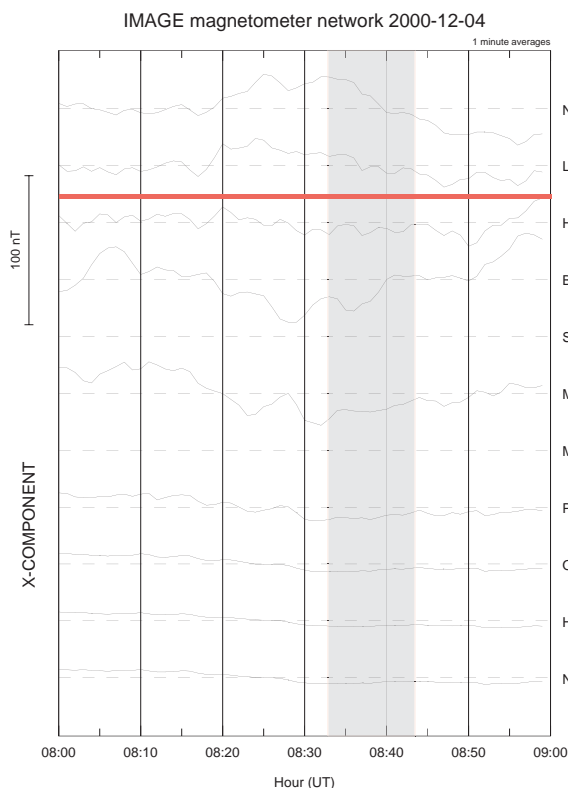


図 4.3: 地上磁場の時間変動

IMAGE Magnetometer Network

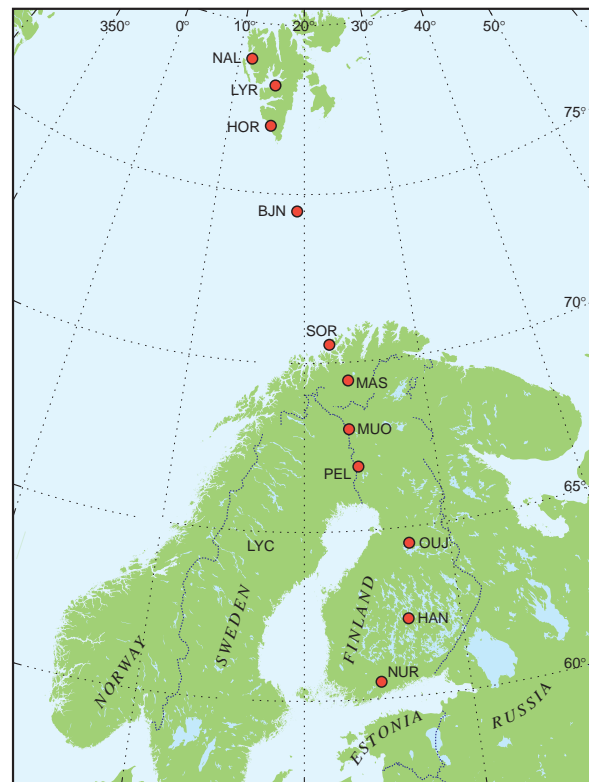


図 4.4: 磁場計測ステーション

図 4.3 は、(International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects(IMAGE) ネットワークの、11 のステーション (図 4.4) で計測された地上磁場変動の X(南北) 成分変動のグラフであり、PMAF が観測された時間帯 (0833UT - 0844UT 付近) に影をつけた。地上磁場の変化は主に、電離圏に電流が流れるために発生するものである。南北成分変動は、電離圏電流の東西成分変動と深くかかわっており、北向きの地上磁場変動は東向きの電離圏電流、南向きの磁場変動は西向きの電流を示唆している。図 4.3 より、PMAF 観測時間帯において、NAL-LYR(地理緯度 78.92°N - 78.2°N) までは北向きの磁場変動 (東向き電流)、HOR(地理緯度 77.0°N) 以南では、南向きの磁場変動 (西向き電流) があることが見てとれる。すなわち、LYR と HOR の間あたりに、開いた磁力線領域と閉じた磁力線領域の境である、極冠帯の低緯度境界が存在することが示唆される。

図 4.1 から、オーロラオーバルもこの境界付近に位置していたことがわかり、PMAF がカस्प付近のオーロラオーバルから開いた磁力線の領域である、極冠内へ移動して

いたことが分かる。

4.4 VHF レーダーによるイオン速度、電子温度観測結果

観測時、VHF レーダーの観測領域は主に、カスプ付近のオーロラオーバルに位置していた。すなわち、PMAF 発生時の VHF レーダーデータを見ることにより、オーロラオーバル付近の、オーロラ粒子の降りこみや、磁束管の流れの様子を同定することが可能である。また、オーバルの移動と周辺のプラズマとの相対速度を知ることが出来れば、より明確に、昼間側磁気リコネクションが生じていたか否かを議論することができる。

ここで注意すべき点は、降りこみ粒子が傾いた磁力線に沿って入射することを考慮しなければならないことである。オーロラ発光と同じ緯度を VHF レーダーで観測しても、磁力線が垂直でないため、降りこみ粒子を伴った磁力線をレーダーがとらえるためには、さらに低緯度側を観測しなければならないことになる。すなわち VHF レーダーで注目する緯度は、磁力線にそってオーロラを発光させた磁力線にそって、レーダー観測高度までトレースした緯度である。図 4.5 では、オーロラの緯度が $\text{lat } A^\circ$ で観測されているが、磁力線に沿って、レーダー観測高度まで移動すると、レーダー観測緯度は $\text{lat } A'^\circ$ となる。

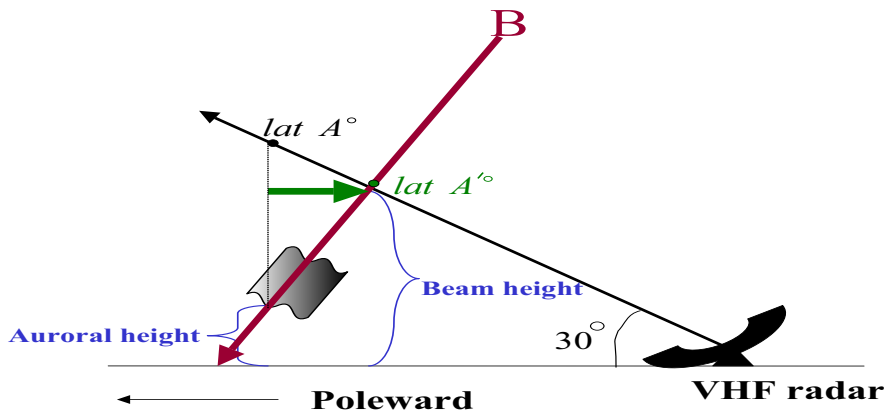


図 4.5: VHF レーダー観測高度の磁力線トレース

VHF レーダーのビーム 1、ビーム 2 が観測した、電子温度及びイオン速度の観測結果を図 4.6 および、図 4.7 に示した。横軸は国際標準時間 (UT)、縦軸はレーダービームが位置する高度 (地理緯度) である。プロットに使われたカラーは、それぞれのパラメーターの大小を示している。またイオン速度は、レーダーから遠ざかる方向に正の値をとっている。

図 4.6 の電子温度プロットを見ると 0820 UT に緯度 74.5 °付近で突然、高電子温度領域が発生し、10 分間で高緯度側へ移動し、その後高度約 500 km の位置で、高電子温度と低電子温度の境界が保たれている。同じく図 4.7 の、ビーム 2 の電子温度情報からも、PMAF 発生時において、75.5 °付近まで高度約 500 km を境に高温域、低温域が分かれていることがみてとれる。降りこみ粒子により、電子温度の上昇があったとすると、降りこみ粒子の低緯度境界は、VHF レーダーの視線方向が高度 500 km に位置していたと考えられる。その緯度、経度は、beam1(地磁気北方向)で (75.9 °N,10.7 °E),beam2(地理北方向)で (76.2 °N,18.9 °E) である。これを、2000 年の地磁気モデルにより、同じ磁力線にそって、オーロラ発光高度 200km にトレースすると、beam1 で (76.3 °N,10.5 °E),beam2 で (76.5 °N,18.8 °E) となる。この位置は、図 4.1、及び、図 5.2 の、オーロラオーバルの低緯度境界にほぼ位置する。つまり、この電子温度の境界は、そのままオーロラオーバルの低緯度境界とみることができるので、増大した電子温度の低緯度境界の動きは、オーロラオーバルの低緯度境界の動きを見ていると考えられる。図 4.1 及び、図 5.2 より、PMAF 発生時、オーロラオーバルは、緯度方向にほとんど動いていないことが分かる。なお、地磁気モデルには、国際標準地球磁場 (International Geomagnetic Reference Field :IGRF) を用いた。これは地球磁場を全地球的スケールでの分布を球関数で表現したモデルである。[C.E.Barton, 1997]

EISCAT VHF レーダーのイオン速度の情報より、地理北極方向、地磁気北極方向へ 500 m/s を超える過渡的かつ、間欠的な極方向の流れが見られた。この特徴あるイオン運動は、FTE の発生を示唆するものである。また、オーバルの低緯度側境界が位置する高度 500km より低高度側から、即ち低緯度側 (図 4.6, 図 4.7 参照) からの高速の流れがみられることから、オーロラオーバルを突き抜けて、高速度のプラズマの流れが起こっていたことが示唆される。カスプ領域を通過して、開いた磁力線領域である極冠内にプラズマが流入していることから、リコネクションが生起していたことが示唆される。

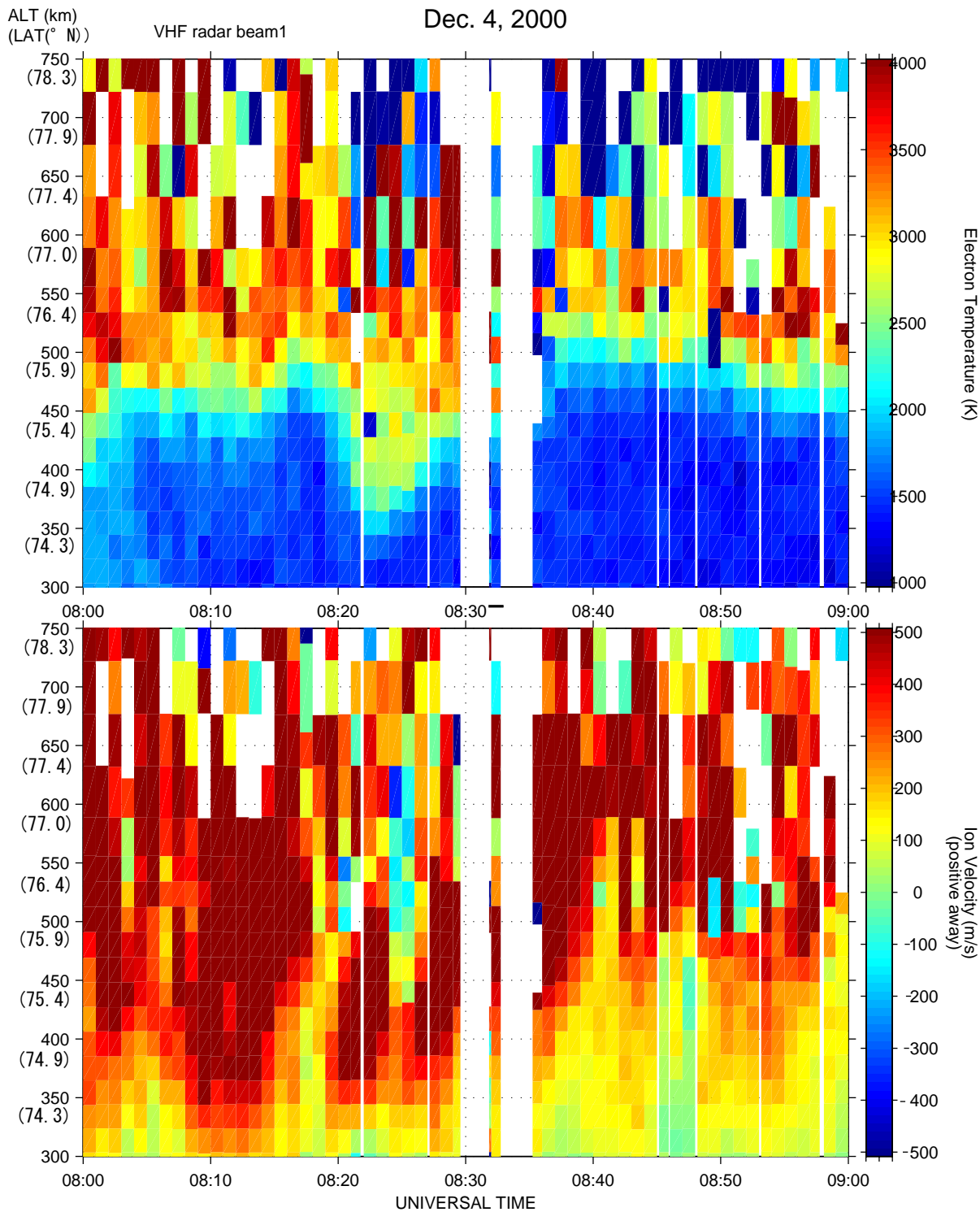


図 4.6: 地磁気北極方向の電子温度 (上)、イオン速度 (下) 観測結果。横軸は標準時間、縦軸はレーダービームが位置する高度 (地理緯度) である。カラープロットは、それぞれのパラメーターの大小を示し、またイオン速度は、レーダーから遠ざかる方向に正の値をとっている。0820UT 付近に、高電子温度領域が低高度に突如広がった。その後、温度の境界は安定して観測高度 500 km 付近にとどまっている。イオン速度は常に極方向であり、メインオーロラオーバルを突き抜けてプラズマが流れている描像が得られた。(詳細は本文参照)

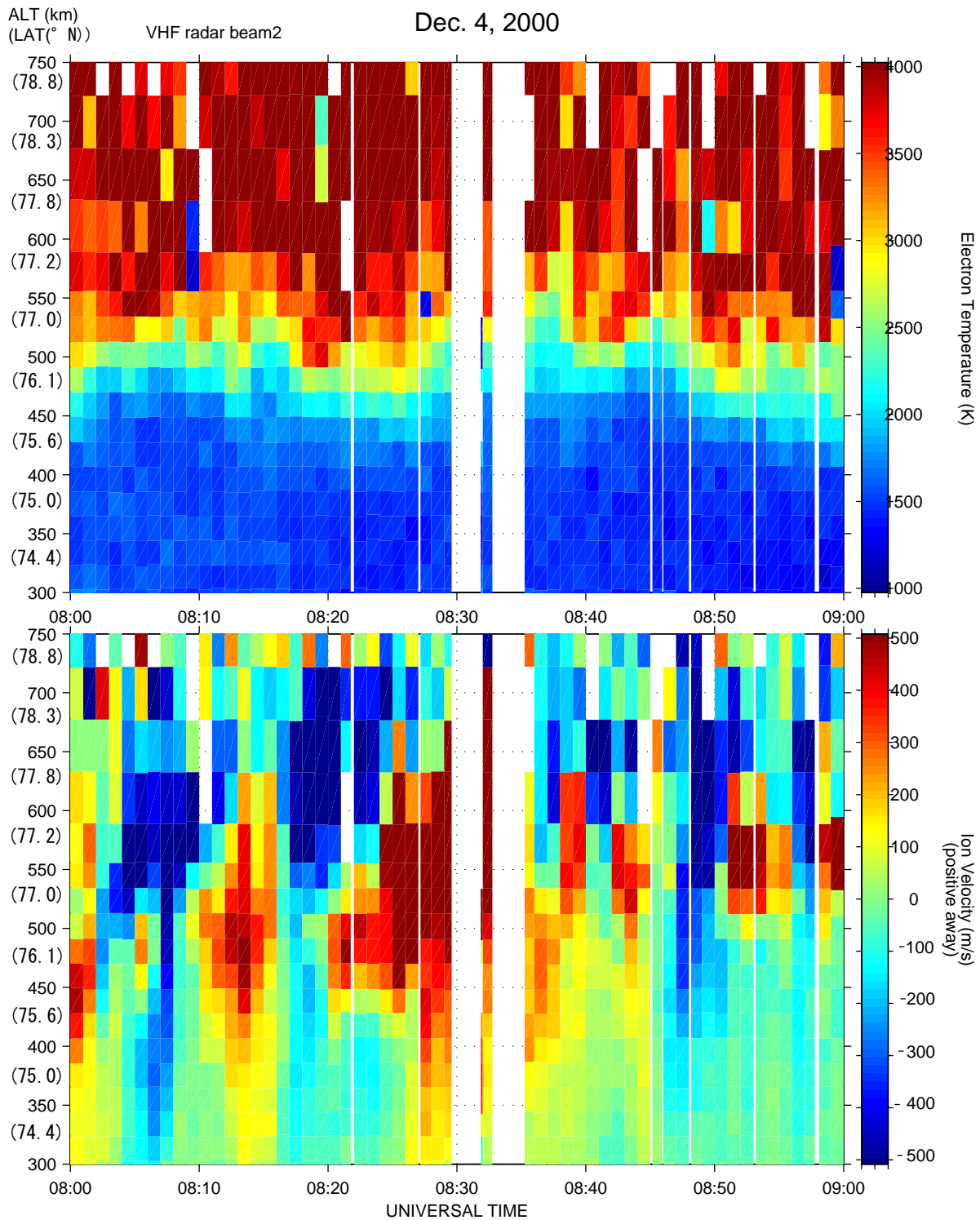


図 4.7: 地理北極方向の電子温度 (上)、イオン速度 (下) 観測結果。温度の境界は安定して観測高度 500 km 付近にとどまっている。イオン速度の観測結果から、PMAF 発生前より、間欠的かつ過渡的な極方向の流れが、約 10 分間の周期で見られたことが分かる。

4.5 CUTLASS Finland レーダーによるプラズマ速度観測結果

図 4.8 は、CUTLASS Finland 観測結果による、プラズマ速度のカラープロットである。視線方向から遠ざかる方向に負、近づく方向に正の値がとられている。グレーで表示される Ground Scatter は、電離圏以外の海面や地面などで散乱されたエコーが返ってきた領域であり、電離圏のプラズマの動きを表していないので、速度データには含めない。

また、Polar の画像に CUTLASS が観測した速度データをオーバープロットしたものを、図 4.9 に示す。赤色の矢印は極方向の流れ、黄色の矢印は赤道方向の流れであり、矢印の長さは速度の大きさに比例している。PMAF より高緯度側でも極方向の流れが見られることが分かる。さらに、オーロラオーバル付近では、高緯度側では極方向の流れ、低緯度側では赤道方向の流れが存在しているように見える。これは恐らく、カーブを描くプラズマ対流を、レーダー視線が貫いている可能性がある。しかし、1次元の情報のみで確定的な議論できない。東西方向を観測する、CUTLASS Iceland データを参照すれば2次元の流れが分かるが、本イベントでは CUTLASS Iceland データでは、エコーがほとんど返っておらず、データの比較が不可能であった。

レーダーエコーは主に、PMAF の付近から多く返ってきていることから、この領域のプラズマイレギュラリティが大きいようにみえる。しかし、電子密度の上昇により、イレギュラリティの消失が起こるケースも考えられるため、エコーが返ってきていない場合にプラズマ速度が小さいと考えることはできない。このことを考慮して、解析を進めてゆく。PMAF が位置するレーダー視野の西側部分では、極方向の流れが多く見られる。さらにスバル諸島とグリーンランドの間において、0832 UT に極方向に、1000 m/s を超える強い流れがみられる。高速プラズマの領域は時間とともに極方向へ移動し、0838 UT にはグリーンランドの中央部でも 1000 m/s を超える強い流れがみられた。PMAF 領域の周囲で高速のプラズマ対流が存在していたが、2.2 の目的の項でも述べたように、PMAF の内側の速度と PMAF の動きの速度との比較が重要である。そのためには、次章で述べるように、CUTLASS, Polar の数値データより、定量的に位置、および速度の比較を行う必要がある。

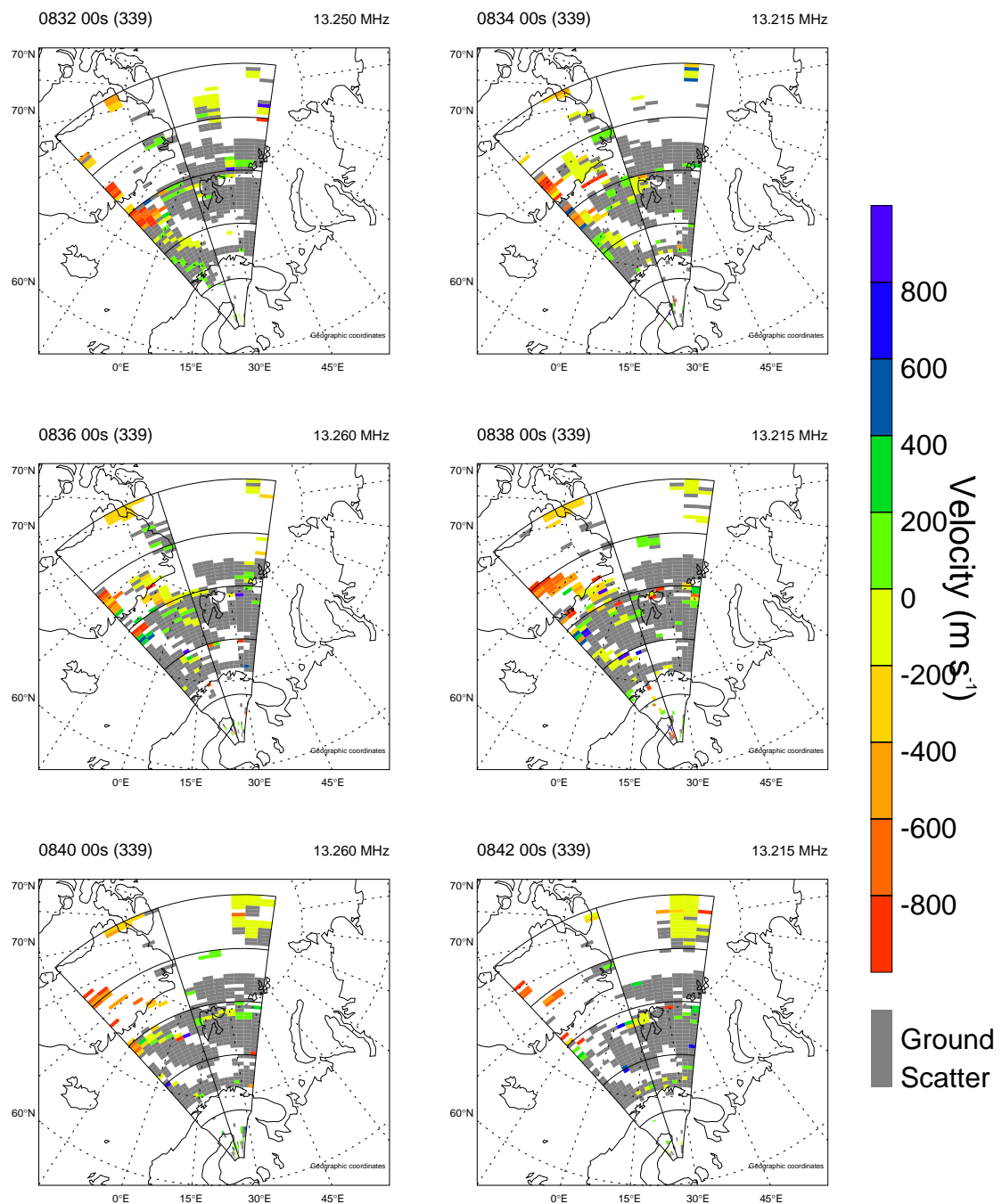
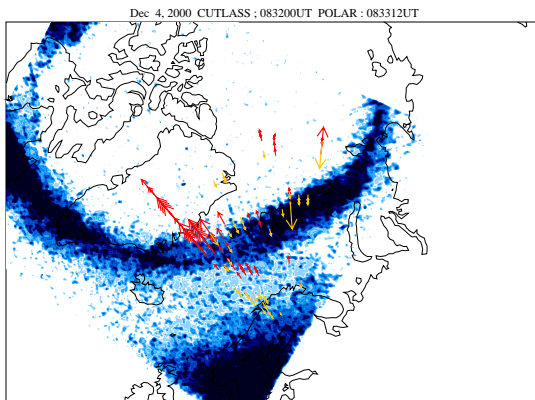
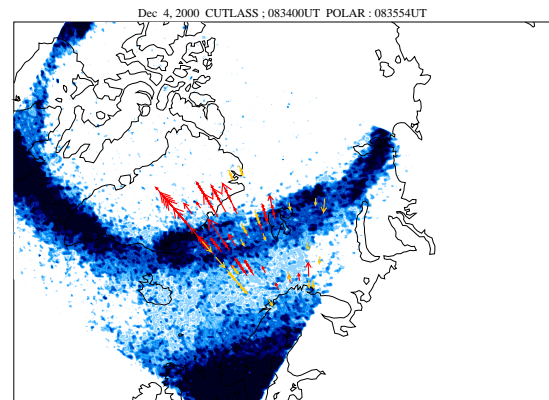


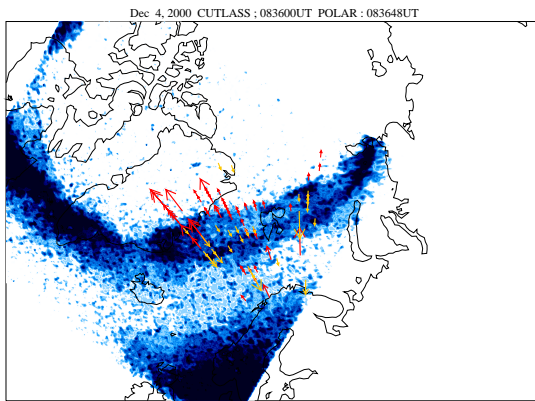
図 4.8: CUTLASS Finland レーダーによるプラズマ速度の観測結果。データは2分おきに得られ、PMAF が Polar で観測された時間帯のうち、0832 UT から 0842 UT までを示した。レーダーから遠ざかる方向に負の値がとられている。グレーでプロットされた領域は Ground Scatter であり、地面や海面から返って来たエコーであるため、解析には用いない。



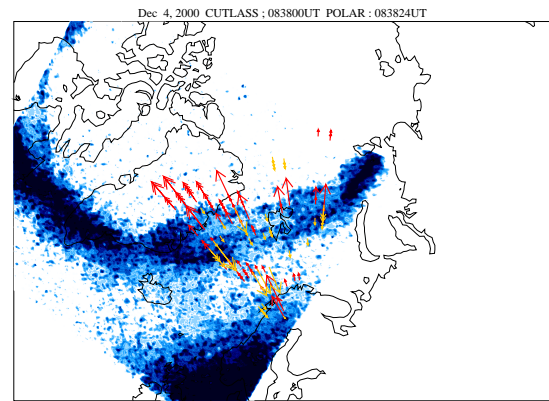
(a) 08:33:12 UT



(b) 08:35:54 UT



(c) 08:36:48 UT



(d) 08:38:24 UT

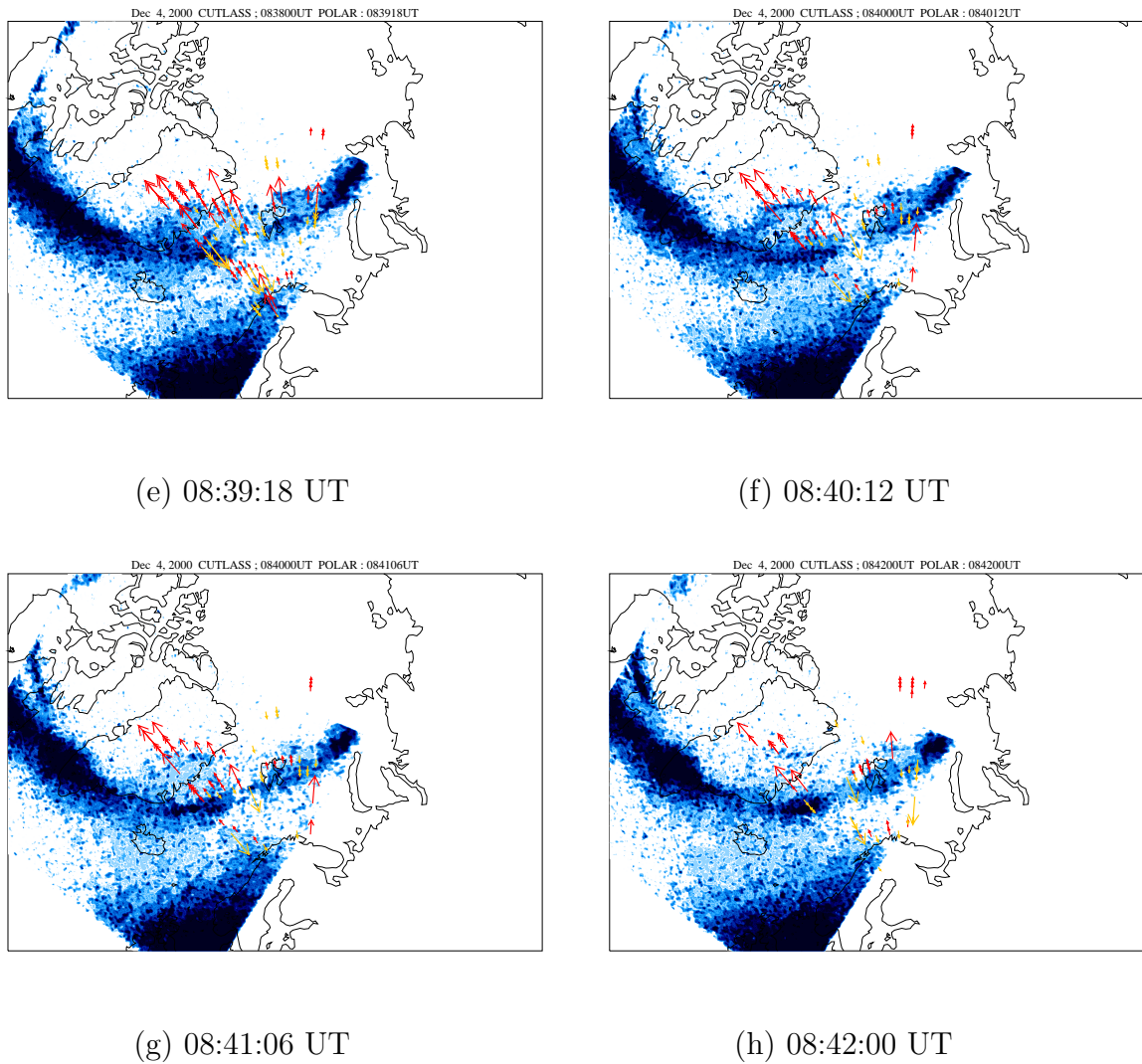


図 4.9: PMAF 画像に、CUTLASS によるプラズマ速度をプロットしたもの。矢印の長さは速度の大きさを表す。西側のビームで主にエコーが返ってきている。また、PMAF の高緯度側で極方向の流れが観測されている。

第5章 プラズマ速度とオーロラ移動速度の比較

第4章において、PMAF発生時のIMF、地上磁場変動、オーロラオーバル周辺のプラズマ速度の観測結果を述べ、昼間側磁気リコネクションが発生していた可能性があったことを示唆した。本章ではさらに、アーク状のPMAFの移動速度とその領域におけるプラズマ速度の比較を試みる。第2章で述べたように、オーロラが移動する現象には、降りこみ粒子の加速源そのものが移動する場合や、磁気リコネクションによって開いた磁束管が移動する際に、電離圏にオーロラ粒子を降下させる場合などの原因が考えられる。PMAFの移動速度とPMAF内のプラズマ速度の相関を調べることにより、本研究でとりあげたPMAFが、磁束管の移動を投影していたか否かについて明らかにすることが出来る。PMAFの移動速度とプラズマ速度は、CUTLASSの各ビームの視線方向の速度で比較した。この方法の利点は、視線方向にそろえることにより、2次元情報をもつPMAFの画像と1次元情報であるCUTLASSのビーム方向のプラズマ速度を定量的に比較することが可能となる点である。

5.1 CUTLASS ビーム視線方向成分の、PMAF 移動速度の導出

CUTLASS ビーム視線方向成分の、PMAF 移動速度は以下の手順で求めた。ビーム方向を一つ定め、Polar VIS Earth camera の画像データ(各ピクセルの強度及びそのピクセルの高度 200 km での緯度、経度)を用いて、図 5.1 の様に、その 1 本のビーム視線範囲に位置するピクセルを抽出し、経度-発光輝度のプロットを作る。図 5.2 は、Beam2 視線方向における経度-発光輝度のプロットであり、矢印はその時間帯の、PMAF およびメインオーバルに対応する発光領域である。横軸のマイナス値は西経を意味する。PMAF と思われる輝度値ピークが、西向きに、レーダーから遠ざかる方向に移動していることがわかる。

次に、プロット図を用いて、各時間において、PMAF に相当する発光輝度ピークの経

度および緯度を求める。オーロラの発光高度が 200 km である事を利用して、アークの緯度、経度情報からビーム視線方向に対する PMAF 移動距離を求める。この移動距離を経過時間で割り算すれば、PMAF の移動速度のビーム方向成分が得られる (図 5.3)。

図 5.3 のような手法で、比較的回数が多く返って来ていた、最も西側のビームである Beam0、さらにそこから時計周りに位置する、Beam1、Beam2 視線方向について、PMAF の移動速度とプラズマ速度の比較を行った。Polar の画像はそれぞれ 08:36:48 UT から 08:38:24 UT まで、および 08:38:24 UT から 08:40:12 UT までの 2 つの時間帯を選び、PMAF 移動速度を算出した。また、これら各時間の PMAF 移動速度を CUTLASS の 08:36:00 UT から 08:38:00 UT まで、および 08:38:00 UT から 08:42:00 UT までの速度データと比較した。結果を、表 5.1~表 5.3 に示す。表には、PMAF が移動したレンジ間のプラズマ速度、プラズマ速度エラー値、PMAF 速度をそれぞれ示している。図 5.4~図 5.6 は、CUTLASS のレンジ-時間-速度プロットに、PMAF のが移動したレンジ間を矢印で示したものである。図および表から、矢印が位置する PMAF 発生領域そのものからは、ほとんどエコーが返って来ていないことが分かる。また、PMAF 近傍の高緯度側及び低緯度側双方で、極方向の流れが観測されたが、アーク状の PMAF 移動速度に比べて、プラズマ速度の方が低かった。

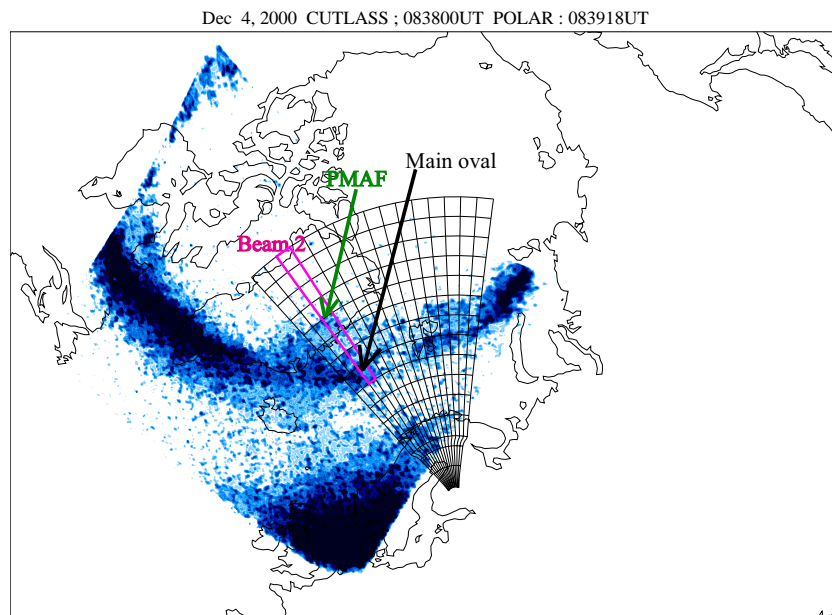
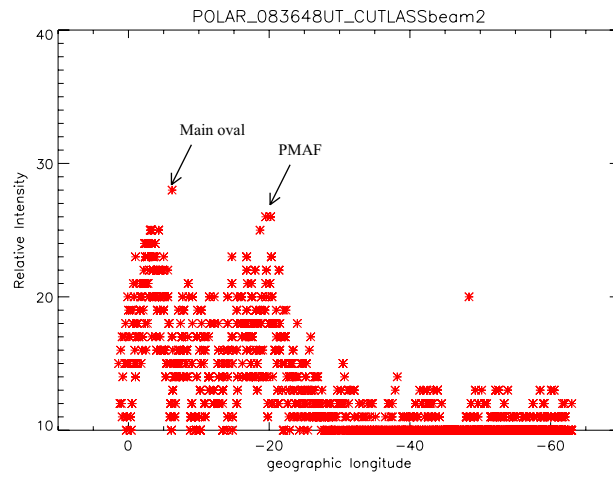
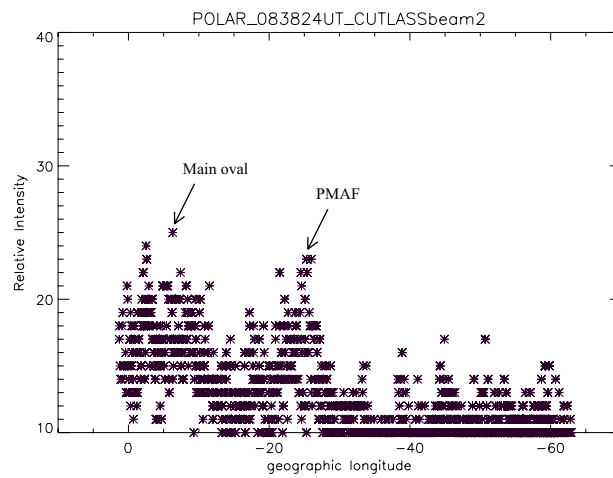


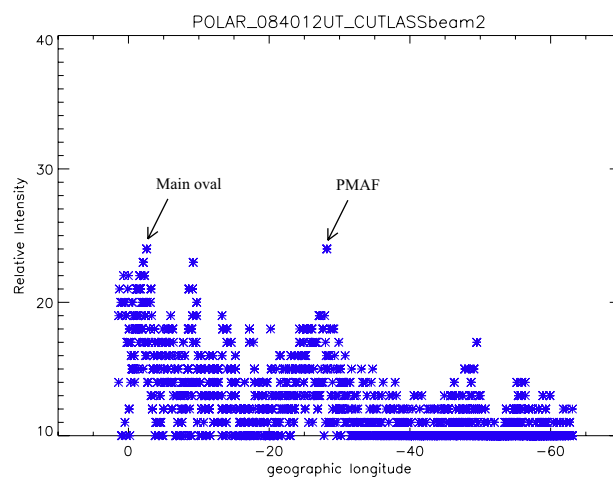
図 5.1: CUTLASS Finland Beam2 視線方向と PMAF, メインオーバルの位置関係。Beam2 の視線方向の range 35 から range75 までの範囲に枠をつけており、この範囲に位置する Polar 画像のピクセル情報を抽出する。



(a) 08:36:48 UT



(b) 08:38:24 UT



(c) 08:40:12 UT

図 5.2: CUTLASS Beam2 視線方向における、オーロラの経度-輝度値プロット。

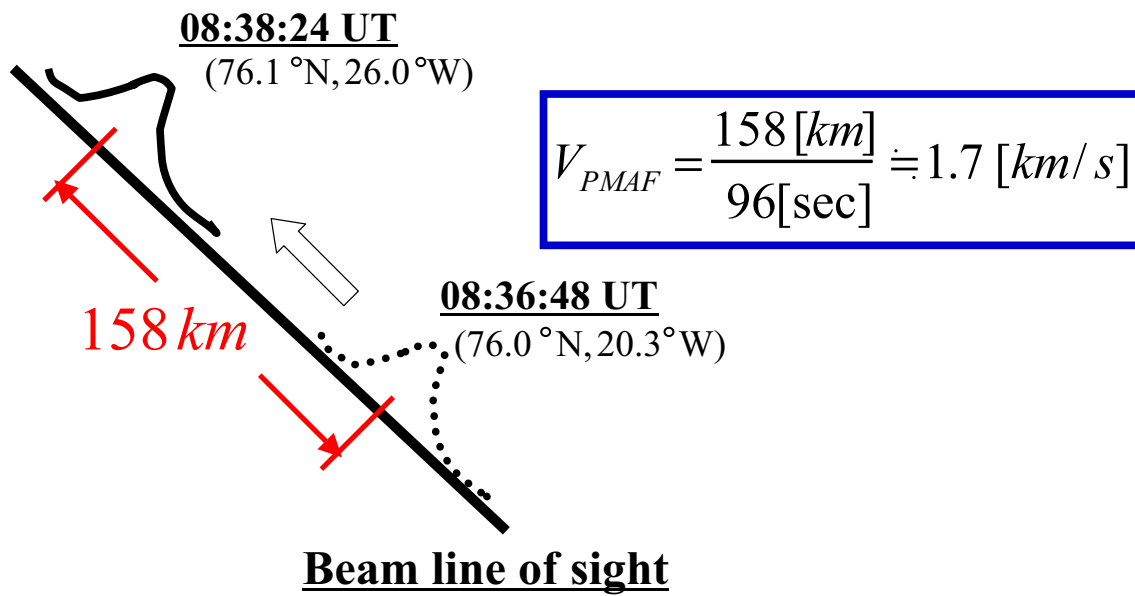


図 5.3: PMAF 移動速度の計算方法。視線方向に対して移動した輝度ピークの距離を、経過時間で割る。

表 5.1: Beam0 視線方向における PMAF とプラズマ速度の比較結果

Beam0				
時間帯	レンジ	プラズマ速度	プラズマ速度エラー値	PMAF 移動速度
0836-0838UT	48	エコーなし	なし	2.6 [km/s]
	49	エコーなし	なし	
	50	-0.27 [km/s]	0.18 [km/s]	
	51	0.49 [km/s]	0.075 [km/s]	
	52	0.60 [km/s]	0.11 [km/s]	
	53	0.65 [km/s]	0.55 [km/s]	
0838-0840UT	53	エコーなし	なし	2.0 [km/s]
	54	エコーなし	なし	
	55	エコーなし	なし	
	56	エコーなし	なし	
	57	0.62 [km/s]	0.15 [km/s]	

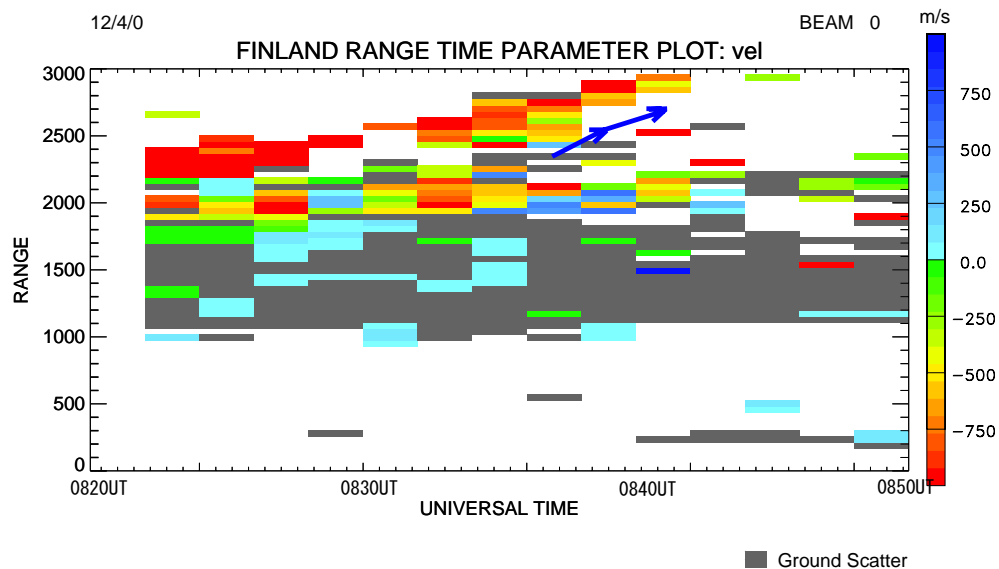


図 5.4: Beam0 におけるプラズマ速度と PMAF 移動速度の比較。矢印は、PMAF の速度を導出した 0836UT から 0838UT、0838UT から 0840UT までの範囲に打っている。矢印の始点から終点までのレンジ範囲を PMAF は移動したことになる。

表 5.2: Beam1 視線方向における PMAF とプラズマ速度の比較結果

Beam1				
時間帯	レンジ	プラズマ速度	プラズマ速度エラー値	PMAF 移動速度
0836-0838UT	48	エコーなし	なし	2.0 [km/s]
	49	エコーなし	なし	
	50	エコーなし	なし	
	51	エコーなし	なし	
0838-0840UT	51	エコーなし	なし	1.4 [km/s]
	52	エコーなし	なし	
	53	エコーなし	なし	
	54	エコーなし	なし	

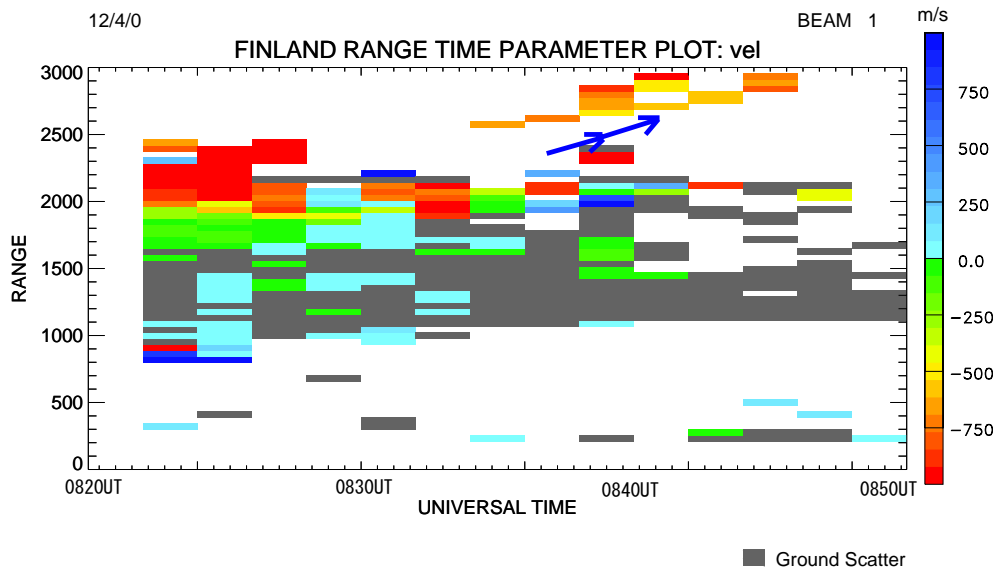


図 5.5: Beam1 におけるプラズマ速度と PMAF 移動速度の比較。矢印は、PMAF の速度を導出した 0836UT から 0838UT、0838UT から 0840UT までの範囲に打っている。矢印の始点から終点までのレンジ範囲を PMAF は移動したことになる。

表 5.3: Beam2 視線方向における PMAF とプラズマ速度の比較結果

Beam2				
時間帯	レンジ	プラズマ速度	プラズマ速度エラー値	PMAF 移動速度
0836-0838UT	50	エコーなし	なし	1.6 [km/s]
	51	エコーなし	なし	
	52	エコーなし	なし	
	53	エコーなし	なし	
0838-0840UT	53	-0.24 [km/s]	0.12 [km/s]	0.6 [km/s]
	54	エコーなし	なし	

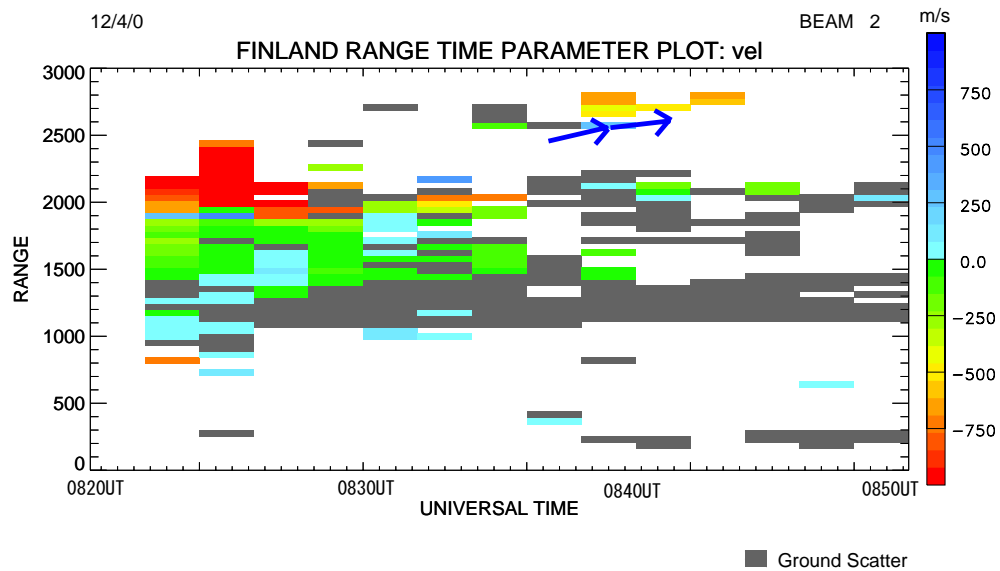


図 5.6: Beam2 におけるプラズマ速度と PMAF 移動速度の比較。矢印は、PMAF の速度を導出した 0836UT から 0838UT、0838UT から 0840UT までの範囲に打っている。矢印の始点から終点までのレンジ範囲を PMAF は移動したことになる。

第6章 考察

第4章までの観測結果では、PMAF 発生領域付近で高速のプラズマ対流がみられたことから、この現象がオーロラ発光の粒子加速源の移動ではなく、開いた磁束管そのものが降下粒子を伴いながら移動していた可能性が強いことを明らかにした(図 2.5 参照)。しかし、第5章において、PMAF とその内外部におけるプラズマ速度を PMAF の位置を正確に定めて比較した結果、PMAF の領域でエコーがほとんど返ってきていないこと、また、その高緯度側、低緯度側双方からエコーが返ってきていても、PMAF の移動速度に比べて、プラズマ速度が小さいという結果が得られた。

電離圏は圧力による体積変化が少ない非圧縮性の特徴をもつ。この電離圏プラズマの非圧縮性を考慮すると、PMAF のごく近傍では、高緯度側、低緯度側とも、プラズマの運動は PMAF 内のプラズマ運動とほぼ同じ速度で動くと期待される。このことを考慮すると、上記の結果は、PMAF の磁束管の速度とその周辺部のプラズマ速度の、方向は一致するが、速さは一致しておらず、PMAF 内のイオン速度が外部の速度に比べて小さい可能性を示唆している。これは、序章内に述べた [河野, 2001] の結果(オーロラ光の情報は無かったが、高電子密度領域内の方が、その外部近傍に比べてイオン速度が小さい)ともコンシステントである。本章では、この速度の不一致が発生していた可能性が高いことから、その理由について考察する。

6.1 オーロラ移動方向とビーム視線方向が平行でないことによる、プラズマ速度の過小評価

最初に、本解析方法に起因して生じる可能性のあるプラズマ速度や、オーロラ移動速度の過大、過小評価の可能性について論ずる。オーロラの移動方向とビームの視線方向が同じである Beam B、視線方向が斜めである Beam A が存在すると仮定する。Beam A の視線方向がオーロラの移動方向に対して角度 a を持つとする。もし、実際のオーロラ移動速度と、プラズマの移動速度が同じで、大きさが V_B であったとき、Beam A において実際に観測されるプラズマ速度は、 $V_A = V_B \times \cos(a)$ の大きさになるため、そ

のプラズマ速度 V_A は、アークの移動速度 V_B より小さくなる (図 6.1)。さらに、Beam A において、オーロラアークの移動は一定時間に長い距離を進んだように見え、その移動速度 V_A は大きく見積もられる (図 6.2)。

このように実際のイオン速度と、オーロラアークの移動速度が同じであったとしても、Beam A のようにオーロラやプラズマ移動速度に対しビーム視線方向が傾いている場合、視線方向のプラズマ速度は、アーク移動速度の $\cos^2(a)$ 倍となり、プラズマ速度が小さく見積もられる。

しかし、実際に PMAF 移動方向と、ビーム視線のなす角度 a を測ったところ、Beam0、Beam1、Beam2 方向ではそれぞれおよそ、 32° 、 35° 、 38° であり、 $\cos^2(a)$ はそれぞれ、0.75、0.67、0.61 となった。表 5.1～表 5.3 より、プラズマ速度と PMAF 移動速度の差は、これよりも大きいことが分かる。即ち、ビーム視線方向とオーロラ移動方向の角度差だけでは、速度差を説明することは難しい。

6.2 PMAF 速度 > PMAF 内のプラズマ速度の可能性と物理的解釈

6.1 で述べたように、プラズマ速度の過小評価、PMAF 速度の過大評価の可能性があるが、それだけで、実際観測された違いを説明することは難しいと思われる。以下に PMAF の移動速度とその中のプラズマ速度が一致しない場合の物理的解釈を議論する。

CUTLASS および、Polar の画像データより、アーク状の PMAF は、経度方向に幅をもち、プラズマはそれにほぼ垂直な方向に運動していると予想される。プラズマの運動は、 $E \times B$ ドリフトであるから、CUTLASS レーダーで観測された視線方向でほぼ PMAF に垂直なプラズマの運動は、PMAF に沿う方向の電場を見ていることになる。磁場は下向きであるため、朝側から夕方側へ向かう電場に対応している。即ち予想される 3 次元電流は、この電場により駆動される電場に平行なペダーソン電流で閉じているとすると、図 6.3-(a) の様な、アークに沿った方向に流れる電流と、それに伴う沿磁力線電流がなす、3 次元電流系をなしていたと考えられる。

この状況で、PMAF の移動速度とプラズマ速度が異なるということは、PMAF の形状が時間発展とともに、変形していくことを意味している。即ち PMAF の磁束管の中のプラズマの一部は PMAF の動きについて行けず、取り残される可能性があることを意味している。また、この速度の不一致は、PMAF が主として、磁気リコネクションした磁束管の根元領域の運動を表しているとしても、それに加えて粒子を沿磁力線方

向に加速する源領域が、磁気圏内で移動する効果も考慮しなければならないと考えられる。

また、磁気圏におけるプラズマ運動は、図 6.4 のように、沿磁力線電流を通じて電離圏に投影されるが、強い沿磁力線加速を引き起こす沿磁力線電場が無視できない程大きい時には、磁力線は等電位にはならず、磁気圏側のプラズマの運動と電離圏のプラズマの運動には、ズレが生じる。PMAF は、加速された電子が引き起こしているのので、実際上記の運動のズレは生じている可能性が強い。このズレが PMAF とプラズマの運動の違いの原因となっている可能性もある。

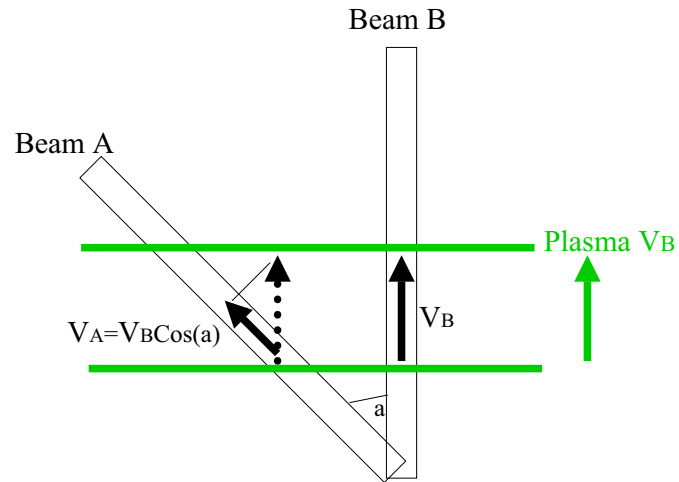


図 6.1: ビーム視線方向の違いによる、プラズマ速度差。同じ時間内では、Beam A 方向成分の速度は小さくなるため、 $V_A < V_B$ と見積もられる。

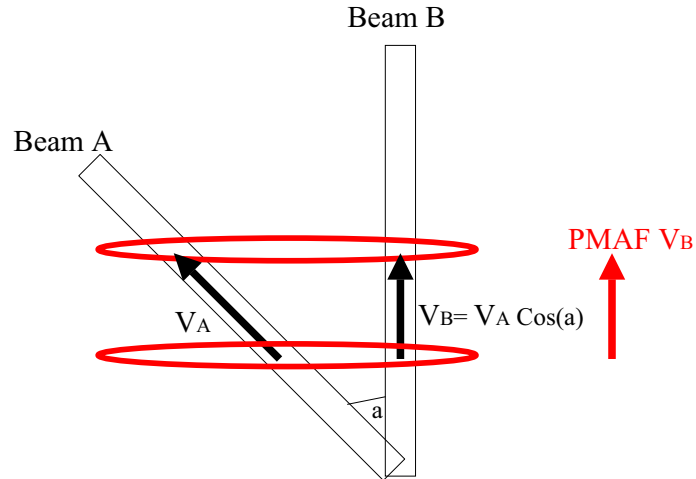
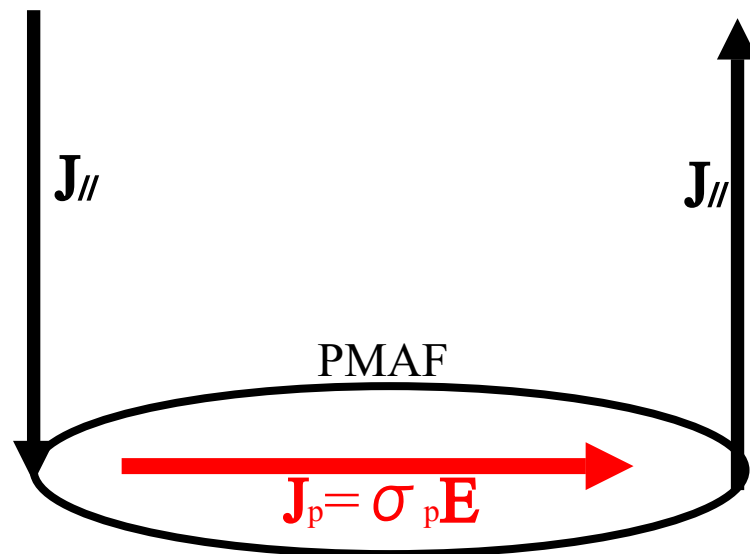
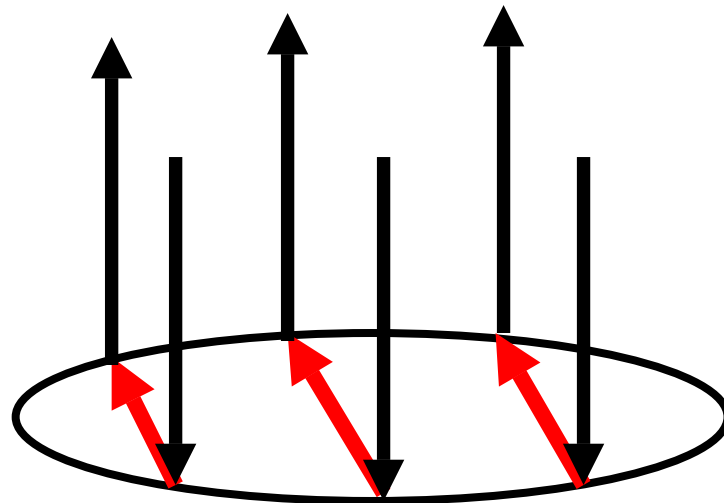


図 6.2: ビーム視線方向の違いによる、PMAF 速度差の発生。同じ時間内では、Beam A 方向による移動レンジが大きくなるため、 $V_B < V_A$ と見積もられる。



- (a) アークに対し平行な方向に流れる電流。本研究で得られた PMAF は、電場がアークの広がりに対し平行に発生していると考えられるため、アークに平行な方向のペダーソン電流および沿磁力線電流による、3次元電流をなしている可能性が高い。



- (b) アークに対し垂直な方向に流れる電流。この電流系であった可能性は低い。

図 6.3: アーク内で発生する 3次元電流系

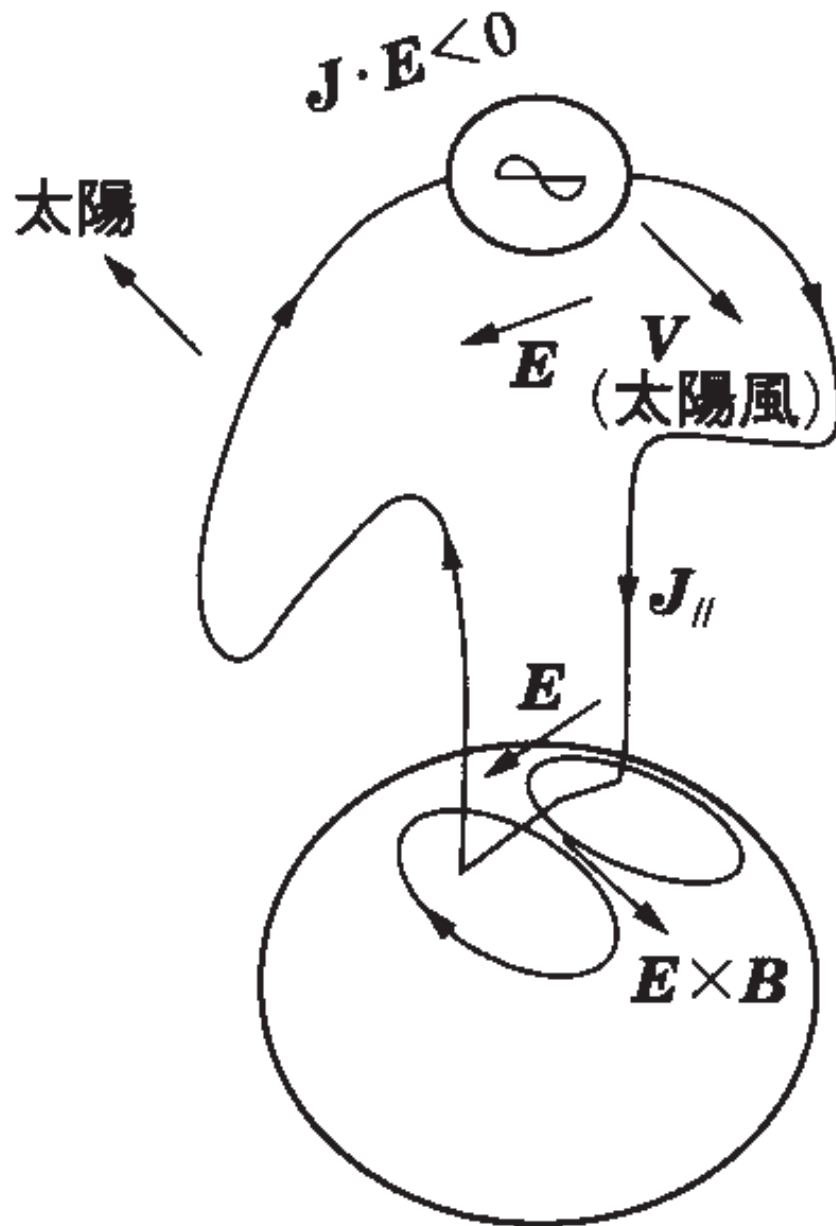


図 6.4: 磁気圏ダイナモとプラズマ対流 [恩藤 他, 2000]。沿磁力線電流によって、磁気圏対流と等価な電場が電離圏にマッピングされる。しかし沿磁力線方向の電場が無視できないくらい大きい場合、磁気圏と電離圏のプラズマ運動にズレが生じる可能性がある。

第7章 まとめと今後の課題

7.1 まとめ

昼間側磁気圏境界面で生起する、磁気リコネクションに伴って発生すると考えられている、オーロラが昼間側カusp領域周辺から極方向へ移動する現象、Poleward Moving Auroral Form (PMAF) が、人工衛星や全天カメラなどで観測されている。しかしPMAFの電磁気的特性（内部及び外部におけるプラズマの運動や電流系の分布等）について、観測面からの十分な研究はなされていない。

本研究では、2000年12月4日に北極域電離圏カusp周辺領域において発生したPMAFに着目した。アーク状のPMAFが昼側オーロラオーバルから剥がれて、高緯度側に運動しており、Polar VIS Earth Cameraによってその連続画像が得られた。また、EISCAT VHFレーダーシステムは、PMAF発生時、オーロラオーバルに対し垂直なビーム方向で観測を行っており、オーロラオーバル付近の電子温度、イオン速度を高度分解能よく観測することができた。また、CUTLASS Finlandレーダーは、PMAFを視野におさめており、PMAF内部と外部を区別してプラズマの運動の分布を定量的に求めることが可能となった。これら複数の機器による同時観測によって得られたデータを比較した結果、以下の観測事実及び結論が得られた。

(1)PMAF発生時に、プラズマはオーロラオーバルを横切って極方向に運動しており、またIMF B_z 成分も負であったので、昼間側磁気リコネクション発生の条件を満たしていることが示唆された。(2)地上磁場観測データからも、PMAFは開いた磁力線領域である極冠帯に存在していた可能性が示唆された。(3)IMF B_y 成分が正であり、極冠帯で朝側に卓越して流れる電離圏対流が存在していたことが予想され、実際にPMAFが朝方方向に移動したこともコンシステントであった。

すなわち、観測からは、本研究でとりあげるPMAFは昼側磁気境界面で起こる惑星間空間磁場と地球磁場との磁気再結合に伴って、結合した磁束管が太陽風とともに地球夜側へと運ばれる現象 Flux Transfer Event (FTE) の電離圏への投影を観測していたと考えられる。また、プラズマは $E \times B$ ドリフトで運動しているので、PMAFは、アークに沿ったペダーソン電流および沿磁力線電流による、3次元電流系を形成してい

たと考えられる。

次に、CUTLASS Finland レーダーの、ある特定のビーム視線方向に揃えて、PMAF 速度と、その領域におけるプラズマ速度を比較した。その結果、PMAF そのものの領域からは、ほとんどエコーが返ってきておらず、その近傍の高緯度側および低緯度側で、エコーが得られていることが分かった。また、プラズマ速度と PMAF の速度は、方向は一致するが、速さはプラズマ速度の方が有意に小さいという結果が出た。ビーム方向と PMAF の移動方向との角度差によるプラズマ速度の過小評価を考慮に入れても、この速度差は説明しきれない。電離圏プラズマの非圧縮性から、PMAF 領域およびそのごく近傍のプラズマは、ほぼ同じ速度で動くことを期待されることを考慮すると、降りこみ粒子をともなった磁束管の極方向移動と、その内部のプラズマ速度は完全には一致していないということが示唆される。

この速度の不一致の原因として考えられるのは、PMAF が磁気リコネクションした磁束管の移動のみならず、降下粒子を引き起こす加速源そのものの移動をも含んでいた可能性と、沿磁力線方向の電場の大きさが無視できないほど大きかったため、電離圏に磁気圏電場がそのまま伝わらず、電離圏のプラズマ運動にズレを引きおこし、PMAF とプラズマ速度の差を生み出したという可能性などが考えられる。

7.2 今後の課題

本研究では、EISCAT レーダーの視野に PMAF が入っていなかったため不可能であったが、もし EISCAT レーダーの視野内で PMAF が観測された例があれば、PMAF 付近の電子温度やイオン速度、電子密度変動などの物理量を詳細に調べることができると考えられる。また、PMAF 発生時に、CUTLASS レーダーのエコーが、Iceland, Finland とともに効率よく返っている例があれば、プラズマの運動と、オーロラ連続画像を 2 次元的に比較することができ、PMAF にともなう 3 次元電流系の同定も、より詳細に行うことができると期待される。さらに、本研究で用いた地上観測機器による電離圏電場の観測に加え、高高度を飛翔する人工衛星を用いて磁気圏電場を同時に観測することにより、PMAF に伴う、内外部でのプラズマの運動の特徴について理解が深まると考えられる。

参考文献

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

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

河野 政樹, 電離圏カusp領域における極方向へ移動する高電子密度領域の研究 (2001年度修士論文), 2000

松尾 俊一, 極方向へ移動する高電子密度領域に関する研究 (2000年度修士論文), 2000

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

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

Cowley, S.W.H., The cause of convection in the Earth's magnetosphere: A review of developments during the IMS, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 531-565, 1982

Cravens, T.E., Physics of Solar System Plasma, Atmospheric and Space Science Series, p.477, Cambridge University Press, 1997

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

Fasel, G. J., Dayside poleward moving auroral forms: A statistical study, *J. Geophys. Res.*,

100,11,891-11,905, 1995

Frank, L. A., J. B. Sigwarth, J. D. Craven, J. P. Cravens, J. S. Dolan, M. R. Dvorsky, P. K. Hardebeck, J. D. Harvey and D. Muller, The Visible Imaging System (VIS) for the Polar Spacecraft, *Space Science Reviews*, 71, 297-328, 1995

Frank L.A. and J. B. Sigwarth, Transient decreases of Earth's far-ultraviolet dayglow, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2423-2426, 1997

Gosling, J.T., M.F. Thomsen, S.J. Bame, T.C. Elphic, and C.T. Russell, Plasma flow reversals at the dayside magnetopause and the origin of asymmetric polar cap convection, *J. Geophys. Res.*, 95, 8073, 1990

Greenwald, R.A. *et al.*, DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection, *Space Science Reviews*, 761-796, 1995

Heelis, R.A. The effects of interplanetary magnetic field orientation on dayside high-latitude ionospheric convection, *J. Geophys. Res.* 89, 2873-2880, 1984

Johnson, F. ed., Satellite Environment Handbook, *Stanford Univ. Press*, Stanford, California, 1961

Moen, J., P.E. Sandholt, M. Lockwood, W.F. Denig, U.P. Løhaug, B. Lybekk, A. Egeland, D. Opsvik, and E. Friis-Cristensen, Events of enhanced convection and related auroral activity, *J. Geophys. Res.*, 100, 23, 23,917-23,934, 1995

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

Russell, C.T., and R.C. Elphic, Initial ISEE magnetometer results: Magnetopause observations, *Space Sci. Rev.*, 22, 681-715, 1978

Russell, C.T., and R.C.Elphic, ISEE observations of flux transfer events at the dayside magnetopause, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 33-36, 1979

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

Sandholt, P.E., M. Lockwood, W.F.Denig, R.C Elphic, and S.Leontjev, Dynamical auroral structure in the vicinity of the polar cusp: Multipoint observations during southward and northward IMF, *Ann. Geophysicae*, 10, 483-497, 1992

S.E.Milan, M.Lester, and S.W.H. Cowly, Convection and auroral response to a southward turning of the IMF: Polar UVI, CUTLASS, and IMAGE signatures of transient magnetic flux transfer at the magnetopause, *J. Geophys. Res.*, 105, 15,741-15,755, 2000

Torr, M.R., *et al.*, A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission, *Space Science Reviews*, 71, 329-383, 1995

Vallance Jones, A. *Aurora*, D.Reidel Publ.Co.Dordrecht, Holland, 1974

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方のご協力を頂きました。

指導教官である藤井良一教授には、研究の進め方や基礎的な物理に関して、丁寧に指導いただきました。質問におうかがいしたときは、お忙しいにも関わらず多くの時間をとってくださり、とても丁寧に教えてくださいました。理解の遅い私でしたが、それでも根気強く、そして楽しい冗談を交えて、優しく教えていただけたことは、忘れる事ができません。

野澤悟徳助教授には、厳しくも暖かいご助言をいつもいただきました。論文作成の基礎から外国の方へのメールの書き方まで、研究生活に必要なノウハウも沢山教えていただきました。また、トロムソでの観測に同行させていただくという、素晴らしい機会を与えてくださったことは、御礼の申し上げようがありません。初めてオーロラに出会えた時の興奮、海外の熱心な研究者たちとの交流… 数え切れないくらいの思い出が、今も胸によみがえってきます。

本研究では、多くの観測データを使用させていただきました。Polar VIS Earth Cameraのオーロラ連続画像は、研究代表者であるL. Frank教授が、快く使用を許可してくださいました。また、CUTLASS Finlandの数値データは、M. Lester教授のご恩により、いただくことができました。EISCATレーダーのデータは、EISCAT科学協会から提供されたものです。皆様のご親切なしでは、この研究はありませんでした。心より御礼申し上げます。

西谷望助手には、SuperDARNデータの読み方、プロット図の作成の仕方について、手取り足取り、詳しく教えていただきました。そして学会ではいつも、適切なアドバイスをくださいました。ここに深く感謝いたします。

来年度より等研究室の助手に就任される、小川泰信さんは、本論文の校正を何度もしてくださいました。ギリギリの状況にも関わらず、丁寧に見てくださり、より深く掘り下げたアイデアを提示していただきました。また、EISCATレーダープロットの作成方法やその読み取り方についてもご指導いただきました。数えきれないほどのご助力をいただけたことに、心より感謝いたします。

博士1年生の足立和寛さんには、プロット図作成に関して、多くのご協力を頂きました。また、常に的確な指摘と、新たな解析方法について提案、アドバイスをしていただきました。ここに感謝の意を表します。

修士2年生の岩橋弘幸さんは、IDLのプログラミングについてアドバイスを下さいました。同じく修士2年生の玉川貴文さんは、セミナーなどにおいて常に質疑していただき、内容をより膨らませることが出来ました。同期のお2人には、勉強面だけでなく、困ったときにはいつもよき相談相手になっていただいたりと、本当にお世話になりました。心から御礼申し上げます。

修士1年生の田中雄一郎さんは、LATEXによる文書作成について、たくさんの技を教えてくださいました。同じく修士1年生の富田修平さんには、論文作成に関わる多くの作業を手伝っていただきました。頼もしい後輩のお2人にも、心から感謝致します。この研究室で、楽しく充実した生活を送ることができたのも、同室の学生のみなさまあってのことです。本当にありがとうございました！

最後になりましたが、研究生活を暖かくサポートしてくれた家族、励ましをくれた、愛すべき友人達に、心より感謝いたします。