

極域昼間側に見られるオーロラ
の
動形態と粒子源に関する研究

鮎川 勝

博士 (理学)

総合研究大学院大学
数物科学研究科
極域科学専攻

平成 11 年度
(1999)

概 要

太陽風と磁気圏の相互作用により発生するオーロラは、夜側だけに起こる現象ではなく昼側にも発生している。本論では、太陽エネルギーが電離層レベルに直接的に進入することにより発生する昼側のオーロラ現象を南北両半球の地上観測データにより解析した。

太陽風(プラズマ粒子)と地球磁場の相互作用で形成される地球磁気圏の昼側高緯度領域には、カスプ/クレフト領域など太陽風が直接的に電離層まで降下してくる領域が存在する。この特殊領域で見られるオーロラ活動は、夜側のオーロラ帯で見られる現象と異なっている。昼側オーロラの研究は、これまで人工衛星粒子観測データや地上ホトメータ観測データなどによるカスプ/クレフト領域の議論がなされているが、昼側に特徴的なオーロラの動形態と入射粒子を対応させての解析と議論は必ずしも十分に行われていない。本論では、南極点基地(74.0°)・グリーンランド(ゴッドハブン:76.6°、ウペルナピーク:80.2°)・スバルバール(ニーオルソン:75.9°)・中山基地(74.5°)等で得られた昼側のオーロラ画像データを調べ、これまでの地上または人工衛星観測データに基づく研究成果との比較検討から昼側オーロラの全体像の解明を試みる。

昼側オーロラの動形態の解析では、形態的な特徴について信頼性の高いオーロラ写真データでオーロラ形態を同定しての定量的な解析を行った。その結果、昼側のオーロラ現象はコロナ状オーロラとバンド/アーク状オーロラの二つの特徴的なオーロラタイプに大別されることが判った。特に、コロナ状オーロラは午前側で顕著に見られる現象で、午後側でも観測されるが静穏時の真昼過ぎの午後側にこのオーロラが見られることは少ない。バンド/アーク状オーロラは、コロナ状オーロラが出現する以前の朝側領域と、それが消滅した後の午後側で観測される。このオーロラの様相は擾乱度などにも関連しさらに細かな特徴をもつ。本論では、昼側で特徴的な二つのオーロラ形態を実際のオーロラ画像データで明示して、その出現領域の特性を磁気擾乱度や出現時間などの違いとして明らかにしている。動的な特性は、惑星間磁場(interplanetary magnetic field: IMF)の北向きから南向きへの変化に対応して低緯度に移動し、IMFが南向きのときには磁気緯度(MLAT: magnetic latitude) 74~75°より低緯度側に、北向きのときには74~75° MLATより高緯度側に見られる。このことは南極域のデータでも北極域のデータでも同様な傾向を示した。夜中側のオーロラもこの北向きから南向きへの変化に対応して低緯度に移動し、昼側オーロラの変動パターンと同様な傾向が見られ、オーロラオーバルは昼側でも夜側でもIMF-Bzが南向きで拡大し、北向きで縮小することが観測事実として確かめられた。これらの結果は、これまでの多くの報告と定性的な傾向はほぼ一致している。

昼側のオーロラ現象を地上で観測すると、観測点の緯度が数度異なるだけでその様相がかなり異なることを著者は経験している。このことは昼側では狭い領域の磁力線が

プラズマシート(plasma sheet: PS)、カusp(cusp)、低緯度境界領域(low latitude boundary layer: LLBL)、プラズママントル(plasma mantle: PM)、テイル ロブ(tail lobe) など磁気圏の異なる領域と結びつき狭い領域に集中して多彩な入射粒子現象が起きることを反映しているものと考えられる。 昼側領域への入射粒子の分布や特徴は、人工衛星データを用いた多くの報告があるが、これらを地上で観測される実際のオーロラ現象と対応づけて議論した報告は少ない。 本論では、昼側で特徴的なオーロラタイプの形態を同定しその入射粒子の特性を調べている。 静穏時の弱いアーク状オーロラ(weak arc)の入射電子エネルギーは100 eV以下を示し、プラズママントルを粒子源としている可能性が高いことが示唆された。 またコロナ状オーロラは数100 eV程度の最大エネルギースペクトルをもちLLBLを粒子源としている可能性が示唆された。 地磁気活動の活発時に、コロナ状オーロラは午後側の地磁気地方時(magnetic local time: MLT)13-14h頃で完全に消滅し、変りに明るいバンド状オーロラが出現して高緯度または低緯度方向に周期的に移動しては消える運動を繰り返す。 擾乱時の午後側に特徴的なこの明るいバンド状オーロラに対応する入射粒子のピークエネルギーは1 keV程度、フラックスは $10^7/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{sr}$ 程度であり、このバンド状オーロラがLLBL粒子よりややエネルギーの高い粒子群で励起されていることが示される。 これらのオーロラの粒子源を確定するためには、今後さらに人工衛星の粒子データとの比較検討が必要である。

本論では、IMF-By(惑星間磁場東西成分)の符号に対する昼側オーロラの出現頻度との関係についても調べている。 午前側で主として見られるコロナ状オーロラの出現率はIMF-Byの符号により顕著な偏りは見られないが、午後側で観測されるバンド/アーク状オーロラの出現率はBy<0のときに高くなり、低緯度方向への運動もBy<0の時に発生する傾向が見られる。 この結果は、グローバルなオーロラ画像データを調べたElphinstone et al.(1993)の報告、「By<0のとき、南半球では昼から夕方オーロラが卓越する」結果と一致している。 IMF-Byと昼側オーロラの関係は今後定量的な解析を行う必要がある。

第I章では、本研究が取り扱う極域超高層現象が見られる物理過程の背景と研究の歴史を概観する。 併せて、本論の主たる解析データとその研究目的を述べる。 第II章では、昼側オーロラ現象の形態的な特性について述べる。 第III章では、昼側オーロラの動的な特性について、惑星間磁場変動や地磁気擾乱度の違いによる解析結果を述べる。 特に、地磁気擾乱度の違いによる真昼(12MLT)を挟む朝側領域と午後側領域に見られるオーロラ現象の相違を調べ、昼側領域のオーロラ現象の全体像を明らかにする。 第IV章では、昼側オーロラ現象に特徴的なコロナ状オーロラと弱いアーク状オーロラの発生時間の違いとその粒子源について解析する。 第V章では、結論を述べる。

目 次

概 要	i
[I] 序 論	
1.1. 太陽風と磁気圏嵐	1
1.2. オーロラの分類	2
1.3. 昼側オーロラの研究	3
1.4. 主たる解析データ	9
1.5. 本論文の目的	9
[II] 昼側オーロラの形態的な特性	
2.1. 地磁気地方時とオーロラの形態	19
2.2. 昼側オーロラの形態的な特性	20
2.3. 結果のまとめ	22
[III] 昼側オーロラの動的な特性	
3.1. 惑星間磁場変動と昼側オーロラの動的な特性	27
3.1.1. IMF-Bz 変動と昼側オーロラの応答性	27
3.1.2. 昼側オーロラオーバルの IMF-Bz 依存性	31
3.1.3. 結果のまとめ	32
3.2. IMF 変動と午前側/午後側で見られるオーロラの応答性	32
3.2.1. 午前側と午後側のオーロラ同時観測データの比較	32
3.2.2. IMF-By 変動と昼側オーロラの関係	34
3.2.3. 結果のまとめ	35
3.3. 地磁気活動と昼側オーロラ現象	36
3.3.1. 静穏時の昼側オーロラ現象	36
3.3.2. 擾乱時の昼側オーロラ現象	37
3.3.3. 昼側オーロラの全体像	38
3.3.4. 結果のまとめ	40
[IV] 昼側オーロラと入射粒子	
4.1. 地上オーロラ画像データと人工衛星粒子データの比較	59
4.2. 結果のまとめ	62
[V] 結 論	67

謝 辞

参考文献

[I] 序 論

1.1. 太陽風と極域嵐

太陽は、さまざまな物理量のエネルギーを宇宙空間に放出しているが、そのひとつに太陽風と呼ばれるプラズマ流(荷電粒子エネルギー群)がある。地球には、重力などと同じようにその主要部分を地球内部に起因する地球磁場が存在し、これは周辺空間にまで大きな拡がりをもつ地球の基本的な「場」のひとつを形成している。地球の外圏は、太陽風にさらされ、地球磁場は太陽風によってある空間内に閉じ込められている。太陽風が地球磁場を閉じ込めている空間を磁気圏と呼び、図 1-1 が基本的な概念として知られる。磁気圏と地表との間には、電離圏と呼ばれる電気伝導度の高い領域が存在し、高度約 100~500 km 付近の電離気体の高密度な領域は特に電離層と呼ばれ、高さ 110 km 付近に最大値をもつような電子密度分布が知られる。そして、太陽風領域から粒子や電磁エネルギーが磁気圏内へ流入し、磁気圏や電離圏領域で、粒子の加速、大気中への入射、オーロラ現象ほかのさまざまな現象が引き起こされると考えられている。

太陽エネルギーが宇宙空間へ大量に放出される現象のひとつに太陽フレアが知られる(大林辰蔵, 1970)。太陽フレアの発生により、速さ約 1000 km/sec 程度のプラズマ雲が太陽から放出され、これが地球周辺の外圏大気場で磁気圏嵐(magnetospheric substorm)をはじめとする種々の擾乱現象を引き起こす原因になっている。磁気圏嵐のひとつに、極域に発生する超高層擾乱現象として極域嵐(Polar substorm)がある。S.-I. Akasofu (1968)によれば、極域嵐は aurora substorm, polar magnetic substorm, ionospheric substorm, atomospheric substorm, X-ray substorm, proton aurora substorm, VLF emission substorm および micropulsation substorm などの極域超高層擾乱現象としてまとめられている。これらの極域超高層擾乱現象の研究は、磁気圏嵐の発生機構の解明という太陽-地球空間物理学の命題に関する重要な役割を分担している。磁気圏嵐の発生機構の解明には、磁気圏嵐の伝搬過程における物理状態の情報を取得しつつ、その結果の現れである極域嵐の諸現象を精密に観測することが必要であり、①太陽エネルギーの供給領域としての、惑星間空間と磁気圏境界領域および磁気圏内における物理的状態の観測 ②太陽エネルギーの消費領域としての、極域電離圏における諸物理量の直接観測 ③極域嵐の諸現象の南北両域にわたる広範囲かつ密な地上からの観測が重要である。特に、これらの観測を総合的に、立体的に、同時に実施しうる観測体制の整備が、磁気圏嵐の発生機構の解明に最も効果的な情報を与えるものと考えられる。本論の解析で使うデータは、太陽風と地球磁気圏の相互作用および磁気圏内に蓄積されたエネルギーの放射(サブストーム)過程で生ずる夜側のオーロラ現象に対して、太陽エネルギーが電離層レベルに直接的に進入することに伴って発生する磁気圏の昼側領域の地上オーロラ観測データを解析する。

1.2. オーロラの種類

極域で見られるオーロラにはさまざまな形態があることが知られる。地上からみたオーロラの形や動きなどによるオーロラ形態の分類は、観測者とオーロラの相対位置によりオーロラの形状が変化するのでその物理機構を考えるうえでそれ自体はあまり意味がないものとされている。しかし、太陽風と常に相互作用を行っている昼側磁気圏領域と密接に関連する地上の地磁気緯度 75° 付近に見られる昼側オーロラの現象では、オーロラ入射粒子の起源の違いがその形態的な特徴に現れているように思われる。本論では極域昼間側のオーロラ現象の振る舞いを明確化することが解析上の重要な視点となるので、地上からみたオーロラ形態の分類について概観する。オーロラの科学的な分類は、1930年にノルウェーのステルマー(C. Störmer)が *Photographic Atlas of Auroral Forms* でオーロラの形状を、①内部構造が一様な弧状のオーロラ(homogeneous arc)、②内部構造が一様な帯状オーロラ(homogeneous band)、③明滅する弧状オーロラ(pulsating arc)、④薄く広がった平面状オーロラ(diffuse surface)、⑤明滅する平面状オーロラ(pulsating surface)、⑥地平線付近でぼんやりと輝くオーロラ(feeble glow)、⑦線状構造をもつ弧状オーロラ(rayed arc)、⑧線状構造をもつ帯状オーロラ(rayed band)、⑨長い線状構造でひだのあるカーテン状オーロラ(drapery)、⑩線状オーロラ(ray)、⑪冠状オーロラ(corona)、⑫炎状オーロラ(flaming)の12の基本形として表したのが最初である。その後、オーロラ観測の隆盛と研究の進展に伴って研究者の間にステルマーのオーロラ分類の見直しの必要性が高まり、1963年に国際オーロラアトラス(International Auroral Atlas)が国際地球電磁気学・超高層大気物理学協会(International Association of Geomagnetism and Aeronomy: IAGA)の主導で出版された。このオーロラアトラスでは、オーロラの形状を①帯状(band-like)、②薄く広がった(diffuse)、③線状(ray)と三大別して分類した。そして、その空間的な広がりを①多重(multiple)、②破片状(fragmentary)、③冠状(coronal)の三つの修飾語で補足分類し、また内部構造を①均質な(homogeneous)、②筋のある(striated)、③線構造のある(rayed)と表現している。さらに時間変化の様子を①静穏な(quiet)、②活動的な(active)、③脈打つ(pulsing)などとして分類に付加している。オーロラの明るさに関する分類は、波長 557.7nm のオーロラ光の輝度を基準とした IBC 階級(international brightness coefficient)で4区分している。さらにオーロラの色に関しても6分類を決めている。この国際オーロラアトラスの形態学的な分類にしたがって、Kaneda et al. (1968)は昭和基地で観測されたデータを用いて実際のオーロラ形態を写真アトラスとして示している。本論の解析データにおける昼側オーロラの形態的な特徴の記述は、国際オーロラアトラスの分類の定義や Kaneda et al. (1968)が示したアトラスのイメージに基づいている。しかし、以下の1.3節で述べる昼側オーロラの研究では、それぞれの文献に記載されるオーロラ現象の表現をそのまま記述することを基本にしている。

1.3. 昼側オーロラの研究

昼側オーロラの研究は、地上観測データの解析を中心に1957-58年の国際地球観測年(International Geophysical Year; IGY)を契機に開始された。最近では人工衛星による遠紫外波長域での観測も行われ、昼側オーロラのグローバルな画像データが得られるようになりその全体像が解明されつつある。一般に昼側オーロラは夜側のオーロラに比べて輝度が弱く、動きも激しくない。また、昼側オーロラの発生する緯度は夜側に比べて高く主に 75° MLAT以上である。この領域はいわゆるカスプ/クレフト領域に対応している。ここでは、これまでの昼側オーロラの研究と今後に残されている問題点を述べる。

(1) 地上観測による昼側のオーロラ研究

昼側オーロラは観測場所や期間が限られており、多量のデータ収集が難しいため、夜側のオーロラ研究に比べると十分進んでいない。初期の頃の研究は、主にスバルバル島やグリーンランドでの観測データを用いて行われた。Akasofu(1972)はスバルバル島のピラミダ(Pyramida; $\phi \sim 75^\circ$)での全天カメラデータをもとにサブストーム時における昼側オーロラの動きについて調べた。そして夜側の地磁気擾乱に伴いオーロラが低緯度側に移動することを示した。さらに、南極点(South Pole Station; $\phi \sim 75^\circ$)のデータにおいても同様な傾向が見られることも明らかにした。Vorobjev et al. (1975)は、昼側と夜側のオーロラの比較をピラミダ(Pyramida)とワランゲル島(Wrangell Island)のデータを用いて行った。彼等の研究結果の要約を図1-2に示してあるが、サブストームが始まる2時間前頃から高緯度にdiffuse red luminescenceが見られ、ゆっくり低緯度に移動する。また夜側でもこの時高緯度側にdiffuse luminescenceが観測され、同様に低緯度側に移動する。サブストームの開始30分前頃より昼側では天頂付近($\phi \sim 75^\circ$)にray arcが出現し、ゆっくり低緯度側に移動し始める。また、サブストームの開始5-10分前にオーロラが弱まり、開始後はray arcを含む発光域は低緯度にシフトするが、その中のdiscrete auroral formは高緯度側に動くとして述べている。このサブストームの拡張期(expansion phase)以前に昼・夜のオーロラは共に低緯度側に移動し始め、サブストーム開始後に夜側オーロラが高緯度に広がるという指摘は、その後の研究で明らかになった事実と一致している。すなわち、IMF-Bzが南向きに変化すると、ポーラキャップ(polar cap)が広がりオーロラ帯が低緯度に移動を始め、それから数十分後にサブストームの開始とともに夜側オーロラが高緯度に拡張する。その後、サブストームや惑星間磁場変動と昼側オーロラのダイナミクスを詳しく調べることが行われた。Eather et al. (1979,1984)は、昼側オーロラの動きとIMF-Bz変動および地磁気擾乱(AE index: auroral electrojet magnetic activity index)との関係について南極点のオーロラデータをもとに調べた。これまでIMF-Bz変動と昼側オーロラとの関係については、Sandholt et al.(1983)やMeng(1983)等により研究が行われ、IMF-Bzが南向きになるとオーロラは低緯度側に移動する傾向

が見られると報告されてきた。しかし、Eather et al.(1979,1984)の統計結果によると、オーロラの位置と IMF-Bz の負の値との相関係数は 0.13 程度と低いのに対し AE index との相関係数は 0.89 であった。このことは昼側オーロラの位置が夜側の地磁気擾乱に強くコントロールされていることを示唆している。しかし、昼側のオーロラの同定をいかに行ったのかという問題点があり、この結果について明確な結論が得られたと言いが、データを先入観なしに様々な観点から検討する必要性を指摘している点は評価できる。他方、Lassen and Danielsen(1978)は IMF の変動によりオーロラの発生率がどのように異なるかをグリーンランド 9 カ所の全天カメラデータをもとに研究を行った。彼等は図 1-3 に示しているようにオーロラオーバルに沿うアーク(oval pattern arc)と太陽・地球方向アーク(sun-aligned arc)の 2 つのタイプに分けて、IMF-Bz および-By の値との関係について調べている。それによると、 $B_z < 0$ の時には oval pattern arc が卓越し、 $B_z > 0$ の時には oval pattern arc が弱まり、sun-aligned arc が高緯度($78^\circ - 80^\circ$)に多く出現することを示した。一般に $B_z < 0$ のときの oval pattern arc についてみると、北半球では $B_y > 0$ のときは朝側の oval arc が顕著なのに対し、夕方側の oval arc 領域は狭い。これに対し $B_y < 0$ のときは朝側の oval arc 領域はやや縮小し、夕方側の oval arc が顕著になる。また、 $B_z > 0$ のときの sun-aligned arc については、 B_y の符号にあまり依存せず、朝側によく卓越する傾向が見られる。

その後、高感度 TV カメラや掃天フォトメータによる昼側オーロラの高時間分解能観測や単一波長(630.0nm や 557.7nm 等)による観測が行われるようになり、オーロラの微細な動き等についても調べられるようになった。Sandholt et al.(1986)は、昼側オーロラについて 2 つの酸素原子放射の波長の強度比($R_{rg} = 630.0\text{nm} / 557.7\text{nm}$)を調べ、カस्प領域のオーロラは $R_{rg} = 2$ 以上で、LLBL に関係するオーロラは $R_{rg} = 2$ 以下であると報告している。一般に R_{rg} の値が大きい程入射粒子エネルギーが低いことが知られているため(Rees and Luckey, 1974)、カस्पオーロラを励起する粒子エネルギーは LLBL に関係するオーロラを励起する粒子エネルギーより低いといえる。Troshichev et al.(1988)は、ポストーク(Vostok)の全天カメラとフォトメータによるデータから惑星間磁場 $B_z > 0$, $-1 < B_y < 1$ の条件で昼側オーロラの発生頻度を調べ図 1-4 を示している。この図に示されるように、緯度方向に沿うアーク(latitude-aligned arc)の発生頻度は午前側で高く、最大で 50% 程度である。また、sun-aligned arc の発生率は、正午・午前・午後が同程度で 30% 程度であると報告している。他方、Fasel et al.(1992,1995)は、超高感度 TV カメラによる全天画像のビデオデータから高緯度側に明るいオーロラが繰り返し移動する現象(poleward moving auroral forms)について詳しく調べている。図 1-5 の 557.7nm と 630.0nm 波長による南北方向の掃天データによると、数分から 10 分程度の間隔で何回もアークオーロラが明るくなり高緯度側に移動し消えることがわかる。このアークオーロラは主に昼前後に見られ、繰り返しの時間間隔は平均 6 分程度である。彼等の解析したイベントのうち、IMF-Bz が南向き

の 때가 117 例、北向きの 때가 41 例あった。したがって、IMF-Bz が南向きの時に発生しやすい傾向があるが、いつも南向きの時に起こるというわけでもない。

また、昼側のオーロラの粒子源を明らかにするため、何人かの研究者が地上で観測されたオーロラと衛星の粒子データとの比較を行っている。Sandholt et al.(1989)は、午前側のオーロラについて比較を行っているが、それによるとクレフト(cleft)領域のオーロラでは数百 eV の電子が対応し、多重アークには keV の電子が対応していると報告している。Ayukawa et al.(1996)は午前側に見られるレイ構造のコロナオーロラ(polar corona)は平均して Kp(planetary magnetic three-hour-range indices)が 3 + の擾乱時によく出現し、ピークエネルギーが 100 eV 以上の入射電子に対応している。これに対して、アーク状オーロラ(polar arc)は Kp = 1 + の静穏時に見られ、ピークエネルギーは 100 eV 以下の入射電子が対応していることを示し、表 1-1 のようにまとめている。彼等は、表 1-1 の結果から polar corona の粒子源は LLBL、また polar arc はプラズママンツルに関係していると推定している。最近 Oieroset et al.(1997)、Sandholt et al.(1998)は、カスプ域のオーロラには高緯度域に出現する north aurora (type 2)と低緯度側に出現する south aurora (type 1) が存在することを示し、それぞれの特性の違いについて調べている。Sandholt et al.(1998)が示した図 1-6 によると、north aurora(図 1-6 の②)は IMF-Bz が北向きの時に卓越しプラズママンツル領域に見られ、south aurora(図 1-6 の①)は IMF-Bz が南向きの時に卓越し LLBL 領域に見られるという。このうち south aurora は IMF-By の符号によりその動きが異なり、By > 0 の時には昼から朝側の高緯度方向へ、また By < 0 の時には昼から夕方側の高緯度方向へ動くことが示されている。彼等が分類した south aurora は Fasel et al.(1992,1995)の報告している準周期的なオーロラの動きをする poleward moving auroral forms (PMAFs)に対応しているように思われる。

(2) 衛星観測による昼側のオーロラ研究

1970 年代より人工衛星によるオーロラ観測が行われるようになり、極全域のオーロラ画像が得られるようになった。当初は可視光波長域での撮像観測が行われたが、次第に遠紫外波長域での観測が行われるようになり、最近では昼側オーロラの画像データが鮮明に得られるようになった。人工衛星による最初のオーロラ画像は ISIS2(Anger et al.,1973)により得られた。この衛星は 1400km の高度から 557.7nm と 630.0nm の 2 波長のフォトメーターを用いて、飛行軌道上でセンサーをスキャンさせながらオーロラを撮像した。従って、1 軌道で 1 枚のオーロラ画像しか得られなかったが、地磁気擾乱時や静穏時のグローバルなオーロラ帯の形状やオーロラの形態学的研究に有効であった。Ismail et al.(1977)はこの ISIS 2 データを解析し、polar arc の発生率が朝側と夕方側では 2 : 1 の違いがあることを示した。その後、同様なシステムによる観測が DMSP 衛星でも行われた(Rogers et al.,1974)。この衛星は高度が 800km と低い高度を飛行するため、撮像対象の空間分解能が良くなり鮮明なオーロラ

画像が得られるようになった。また観測波長域を 4000nm-7000nm と広帯域幅(wide band)にしたため微弱なオーロラを観測することができた。この画像データはマイクロフィルムに編集され NOAA のデータセンター(world data center)から世界の研究者に配布されたため、多くの研究者によりこのデータを用いた研究が行われた(Ismail and Meng,1982; Gussenhoven,1982; Meng and Lundin,1986)。また、この衛星には電子・陽子の粒子計測器も搭載されており、このデータも公開されたため粒子データの解析も盛んに行われた(Meng,1981;Hardy et al.,1981; Makita et al,1983; Newell and Meng,1992)。これらの研究からオーロラの分類や粒子の統計的入射分布などが明らかになってきた。Ismail and Meng(1982)は DMSP 画像データからオーロラを、① sun-aligned arc, ② evening/morning arc, ③ hook shaped arc の3つに分類して地磁気活動との関係を調べた。それによると、type 1 のオーロラは静穏時に見られ $IMF-B_z > 0$, $IMF-B_x > 0$ のときには北半球で卓越し、 $IMF-B_z > 0$, $IMF-B_x < 0$ のときには南半球で卓越する。type 2 と type 3 のオーロラはオーロラオーバルの一部で、type 2 はサブストームの回復期に高緯度に広がるが、type 3 はサブストームとあまり関係ないとしている。また、Gussenhoven(1982)は同様の DMSP 画像データからオーロラを① morning sector arc, ② evening sector arc, ③ single sun-aligned arc, ④ midnight sector arc の4つに分類している。彼はここでアークの発生頻度が $IMF-B_y$ の符号により午前と午後で異なることを報告している(北半球では $B_y < 0$ のとき朝側で、 $B_y > 0$ では夕方側で卓越する)。しかし、この B_y 効果については、Lassen and Danielso(1978)が地上観測データの解析に基づいてアークの発生頻度は $IMF-B_y$ の符号に関係なく朝側で高い傾向が見られると指摘している報告もあり、まだ結論が出ているとは言えない。

その後、遠紫外波長域で昼側オーロラを撮像する観測が始まった。これらの計測器を搭載した衛星には KYOKKO, Dynamics Explorer 1, HILAT, VIKING, POLAR BEAR, EXOS-C, POLAR 等がある。いくつかの衛星で観測された画像データを Troshichev (1991)が図 1-7 のようにまとめて示している。これによると朝方では ω -shaped bands と低緯度側に diffuse aurora が見られる。また、正午前後のカスプ付近では $IMF-B_z$ が南向きのとき、small bright patch や multiple discrete arc が出現するとともに midday gap(Meng,1981)も見られる。夕方側では波動構造を示す特徴的な diffuse aurora が見られる。夜側には westward traveling surge や aurora buldge が卓越する。これらの衛星観測のうちで、DE 1衛星は高度 3.65 R_e の地点から極全域を連続的(6-12 min time resolution)に観測し、オーロラオーバルの動きを鮮明に撮影した。DE 1衛星の画像データから Frank and Craven(1988)は、極冠域を昼から夜に貫く θ -オーロラ(theta aurora) の存在を明らかにした。この theta aurora は、北半球で $IMF B_y < 0$ のとき朝側方向に、南半球では逆方向に移動すると報告されている。theta aurora の発生原因はまだよくわかっていないが、プラズマシートが複雑な構造をもつことを反映していると考えられる。しかしながら、DE 1衛

星は衛星高度が高かったためオーロラ高度での空間分解能が100 km程度と粗かったことや太陽光線の影響を十分除去できなかったことから昼側オーロラの研究には不十分であった。

Elphinstone et al.(1993)は、VIKING衛星の観測データをもとに昼側オーロラについて図 1-8 のように詳細なまとめを報告している。図 1-8 の上左端のパネルは、 $IMF \cdot B_y < 0$ のとき、継続時間 5 分程度でオーロラが高緯度側に移動する現象で、彼等はこれを FTE-like event (flux transfer event) が見られると報告している。彼等の解析では FTE-like event としたものが 26 例あったが、このうち 12 例が $IMF \cdot B_z$ の符号が正の時の現象で、負の時は 14 例であった。彼等の指摘した FTE-like event は Sandholt et al.(1990)が報告している midday auroral breakup 現象と同一の可能性もあるが、ここで示した FTE-like event は主に午後側で見られるのに対し、midday auroral breakup は正午付近で見られるという違いがある。次に、上中央のパネルのうち朝方・夕方からのびてくる低緯度側のオーロラについては、 $IMF \cdot B_y$ の符号により午前・午後の非対称を示すことがわかる。すなわち、北半球で $B_y > 0$ のときは、朝方から明るいオーロラは正午過ぎまでのびているが、夕方からのオーロラは輝度が弱く 14 時頃までしか見られない。これに対し、 $B_y < 0$ に変化すると朝方のオーロラの輝度が下がり、夕方からのオーロラが明るくなり正午付近までのびてくる。このことは、Saflekos and Potemura (1980)が示した $IMF \cdot B_y$ と convection / field-aligned current の解析結果(図 1-9)において、 $IMF \cdot B_y$ の符号により convection の発達域が異なることと、そして upward field-aligned current region がオーロラの発光域であると考えるとほぼ一致した結果となる。また、高緯度側に見られる dayside form aurora は、Bythrow et al.(1988)が示した cusp field-aligned currents に対応しており、mantle と polar rain の境界域で見られ、1keV 程度のエネルギーの入射電子と関係している。また、この dayside form aurora の部分から polar arc がのびていく例が見られる。図 1-8 の上右端のパネルは周期的なオーロラ変動が見られる例を示している。朝側に見られる fan arcs の存在は Akasofu(1981)が報告しているが、Elphinstone et al.(1992)はこの fan arcs が赤道付近の磁気圏境界域より電離層にアルフベン波が伝搬する際に粒子が加速されて起こると推定している。さらに、午後側で見られる impulsive auroral form は昼側オーロラの低緯度境界域で明るくなり次第に高緯度側に移動する。このオーロラの発生は太陽風の粒子密度の変動に対応している。彼等の解析によると太陽風の電子密度の変動周期は 3.4mHz から 6.9mHz 程度であり、観測されたオーロラ現象の変動とほぼ一致していたという。また、このとき地上で観測された地磁気脈動 Y 成分にも 3 分前後の周期変動が見られた。以上の結果をまとめると、午前側の fan arcs は周波数一定の surface wave が磁気圏境界の赤道域から電離層に伝搬する際、粒子加速を引き起こし発光するのに対し、午後側の impulsive auroral form は compressional wave が特定の磁力線と共鳴し粒子加速を引き起こすと述べている。

図 1-8 の下左端および中央パネルは、夕方側で auroral spirals が観測された例である。このスパイラルオーロラは $B_y < 0$ のときよく出現し、昼から夕方に向かって 5-10km/s の速さで伝搬していく。そして 17h MLT 頃に夜側から延びてきたオーロラと重なるが、夜側オーロラは昼側のスパイラルオーロラより高緯度側に位置する。このスパイラルオーロラは磁気圏境界域を流れる粒子のシアー(flow shear)と上向き沿磁力線電流による KH 不安定性で形成されると思われる。図下の右端のパネルは、朝側で omega-like forms と double oval のオーロラが観測された例を示している。ここで double oval は高緯度側に南北方向に並んで出現する multiple arcs を指し、omega-like forms は低緯度側に見られる omega band(Ω)オーロラを指している。これらのオーロラはサブストームの回復時に出現する。

最近 POLAR 衛星による紫外線波長域でのオーロラ画像データより図 1-10 のような結果が Liou et al.(1997)により報告された。彼等は 17,372 枚のオーロラ画像データを用いて統計的にオーロラ発光域の分布を調べた。それによると、極域での顕著な発光域は 3 つの領域に大別される。最も明るい領域は、22h30m MLT、 68° MLAT を中心に経度方向に 3h MLT の広がりをもつ部分である。この領域は夜側のサブストーム発生領域に対応している。次に、やや弱い発光領域が 15h00m MLT、 75° MLAT を中心に見られる。この領域はこれまで bright spot などが観測される領域として知られている(Evans, 1985; Lui et al., 1989)。そして、10h00m MLT、 75° MLAT 付近を中心に更に弱い発光領域が見られる。この弱い発光領域は 6 月・7 月の夏季期間が顕著である。彼等の解析結果によると、昼側の発光が顕著なのは夏期間の地磁気活動の静穏時であるが、これは Newell et al.(1996a) が示した図 1-11 の入射粒子データの解析結果と一致している。図 1-11 の上のパネルは、IMF- B_z が南向きの時の入射粒子分布であり、下のパネルは北向きの時の分布である。これによると、北向きの時に昼側で顕著な入射粒子領域が午前と午後に見られることがわかる。

ところで、図 1-10 の結果は夜側のオーロラ現象は dark hemisphere(winter)の 4 月・5 月が sunlight hemisphere(summer) の 6 月・7 月よりも顕著であることを示しているのに対し、昼側のオーロラ現象は sunlight hemisphere(summer) の 6 月・7 月の方が顕著であることを示している。この説明として、Newell et al.(1996b)は夜側オーロラは電離層の電気伝導度が低い dark hemisphere において粒子加速が効率良く起きるのに対し、昼側では region 1 の上向きの沿磁力線電流が夏に強く、それに伴い粒子加速が起きていると説明している。これらの結果は、まだ定量的な検討が十分行われていないが、オーロラを発光させる粒子の入射量が IMF 変動やサブストーム現象のみに支配されるだけでなく、電離層の電気伝導度すなわち太陽光の光電離に深く関係していることを示唆している点で大変興味深い。

(3) 昼側のオーロラ研究についての今後の課題

これまで述べてきたように、地上・衛星観測により昼側のオーロラ現象の

解明は様々な角度から多くの人々により行われてきた。地上での昼側オーロラの観測は天候や太陽高度角の条件に制約されるため、長期間、良質のデータを収集することが難しく、その全貌が明らかになっているとは言い難い。スバルバル・グリーンランド・南極点(アムゼンスコット基地)・中山基地等で観測された昼側オーロラのデータによると、観測点の緯度が数度異なるだけでオーロラ現象がかなり異なっている。これは、昼側ではプラズマシート、カスプ、LLBL、プラズママントル、テイルロブなど磁気圏の異なる領域が狭い領域に集中して多彩な入射粒子現象が起きているためと思われる。一方、これまでに報告されているいくつかの衛星データによる解析結果と、地上で観測されるオーロラ現象との対応関係はまだ必ずしも明らかではない。それは衛星データと地上データではその空間スケールが異なっている、すなわち衛星の画像データの空間分解能は数 10 km 程度であるのに対し、地上で見られる細かいオーロラ構造は数 100 m であり対応がつきにくいと思われる。

現在のところ、昼側オーロラについてまだ形態学的な特徴さえも明確でなく、研究者間での共通認識が得られていない状況である。本論では、地上のスバルバル・グリーンランド・南極点(アムゼンスコット基地)・中山基地等で観測されたデータをもとに昼側オーロラ現象についての解析を行い、これまでの地上あるいは人工衛星による研究成果との比較検討を行うことによりオーロラ全体像の解明を試みた。

1.4. 主たる解析データ

本論の主たる解析データは、国立極地研究所が所轄する共同利用研究事業に直接的に関連したデータを利用している。著者は、文部省国立共同利用研究機関としての国立極地研究所が担う研究観測事業に関して、過去三十年にわたり直接的に関与して研究活動に従事してきた。本論は、国際学術連合会議の常設パネル(ICSU panel)が国立極地研究所に設立させた世界オーロラデータセンター C2 (WDC-C2 for Aurora)が収集した南極のアムゼンスコット基地(South Pole Station; 以後 SPS と称す)の全天カメラ写真データの統一的な整理作業の中から「昼側オーロラの形態と出現領域に関する研究」が発展している。SPS の写真データ解析から出発した昼側オーロラの特性研究は、国立極地研究所が拓殖大学、名古屋大学太陽地球環境研究所および中国極地研究所などの機関と推進している共同研究で取得された北極域のグリーンランド、ニーオルスンおよび中山基地(南極)などの全天 TV カメラ画像データを用いた解析により議論を深める。

1.5. 本論文の目的

太陽風(プラズマ粒子)と地球磁場の相互作用で形成される地球磁気圏の昼側高緯度領域には、カスプ/クレフト領域など太陽風が直接的に電離圏まで降下してくる領域が存在する。この特殊領域で見られるオーロラ活動は、夜側のオーロラ帯で見ら

れるオーロラ現象と異なっている。 昼側のオーロラ現象は、人工衛星粒子観測データや地上ホトメータ観測データなどによるカस्प/クレフト領域の議論が様々な角度から行われ理解が深まりつつあるが、その全貌が明らかにされているとは言い難い。 昼側磁気圏は太陽風と常に相互作用を行っている領域であり、磁気緯度 75 度付近では狭い領域にカस्प、LLBL、プラズママントル域が時空間的に混在している。 一般に昼側オーロラの出現領域は、磁気緯度で 10 度程度の広がりをもっていることが人工衛星データなどから推察され、地上 1 点の観測データから昼側オーロラの全体像を捉えることはむづかしいと思われる。 しかしながら、これまでの昼側オーロラの研究の多くは、ある 1 点の観測データを用いて惑星間磁場や地磁気擾乱あるいは粒子や電場・磁場データとの比較解析が行われてきた。 また人工衛星によるグローバルな画像データでは、空間分解能に限界があるためにオーロラ現象の周期的な動きやその特徴(例えばレイ構造の有無)を明らかにすることが困難であるという問題点も存在する。

本論では、従来の研究に欠落している広域な多点観測データを用いた解析により昼側オーロラの全貌を明らかにする。 すなわち、南半球の SPS・中山基地、北半球のグリーンランド 3 点(ウペルナビーク、ゴッドハブン、ソンドレストロームフィヨルド)とスバルパールのニーオルソンなどのデータを用いて昼側に特徴的なオーロラの形態と入射粒子とを比較解析し、昼側のオーロラ現象の全体像の解明を試み、同時にその粒子源を考察することを目的とする。 表 1-2 に観測点の地理座標、不変地磁気座標および固有磁場強度を示す。

昼側に出現するオーロラ現象の全般的な特徴を明らかにするために、先ず最初に実際のオーロラ画像を形態的な視点から解析した。 これにより昼側オーロラの形態についての定性的な概念を定量的に明示した。 具体的には、昼側にコロナ状オーロラとバンド/アーク状オーロラの二つの特徴的なオーロラタイプがあることを明らかにした。 次に、昼側オーロラの動態的な特性の認識を明確化させるために、惑星間磁場変動(IMF-Bz)とオーロラ活動の関連性を調べ、 昼側オーロラの低緯度あるいは高緯度への移動が、IMF-Bz の向きに依存することを明らかにした。 この傾向は南極域のデータでも北極域のデータでも同様であり、また夜中側のオーロラの動態も昼側オーロラの変動パターンと同様であり、オーロラオーバルが昼側でも夜側でも IMF-Bz が南向きで拡大し、北向きで縮小することが観測事実として確かめられた。 ここで調べた結果は、これまで報告されている研究者等の成果と定性的な傾向がほぼ一致していることから、昼側オーロラの動態的な特性の概念がより明確化した。

本論で明らかにした新たな成果は、昼側オーロラに午前側と午後側で明確な形態学的な相違点があることを指摘していることである。 この形態学的なオーロラの相違は、地上の多点同時観測データの解析に基づくもので、単にある観測点の特異性やオーロラと観測点の相対的な位置関係を反映しているものではない。 この相違点の物理的な意味を明確にするために、地上から観測される実際のオーロラ現象と同時に観測され

た人工衛星の粒子データとを比較解析し、昼側に特徴的なオーロラ現象に対応した入射粒子の性質を調べた。その結果、午前側と午後側に出現する特徴的なオーロラ現象の入射エネルギーやフラックスに違いがあることが明らかになった。

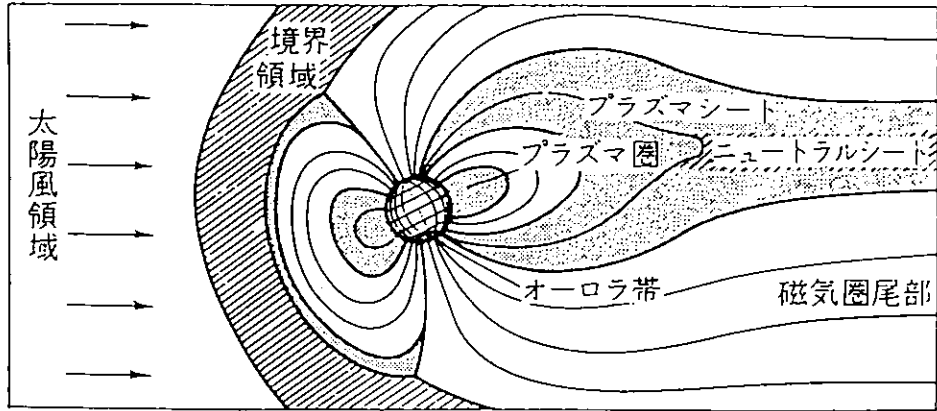


図 1-1. 地球磁気圏

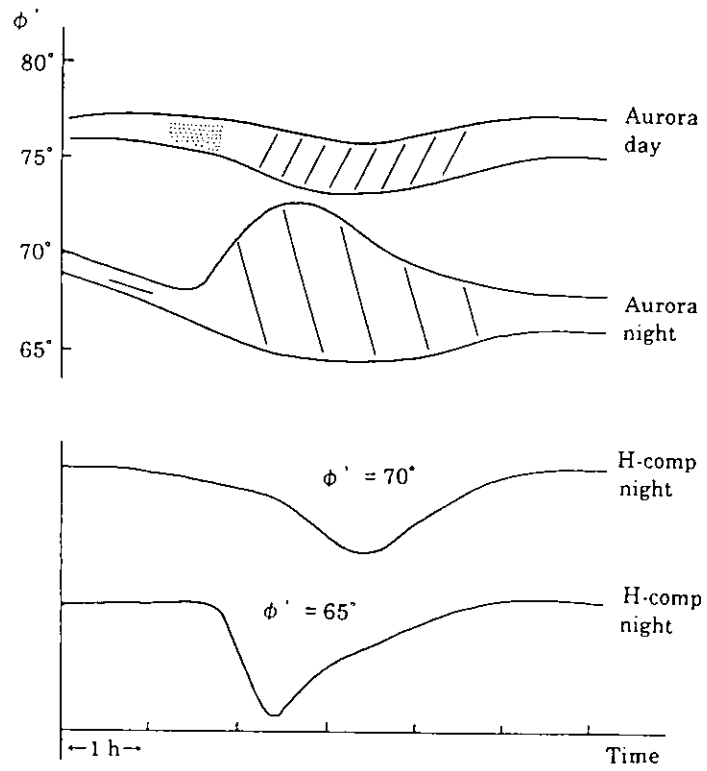


図 1-2. サブストーム時の昼側と夜側のオーロラの動き (Vorobjev et al., 1975 による)

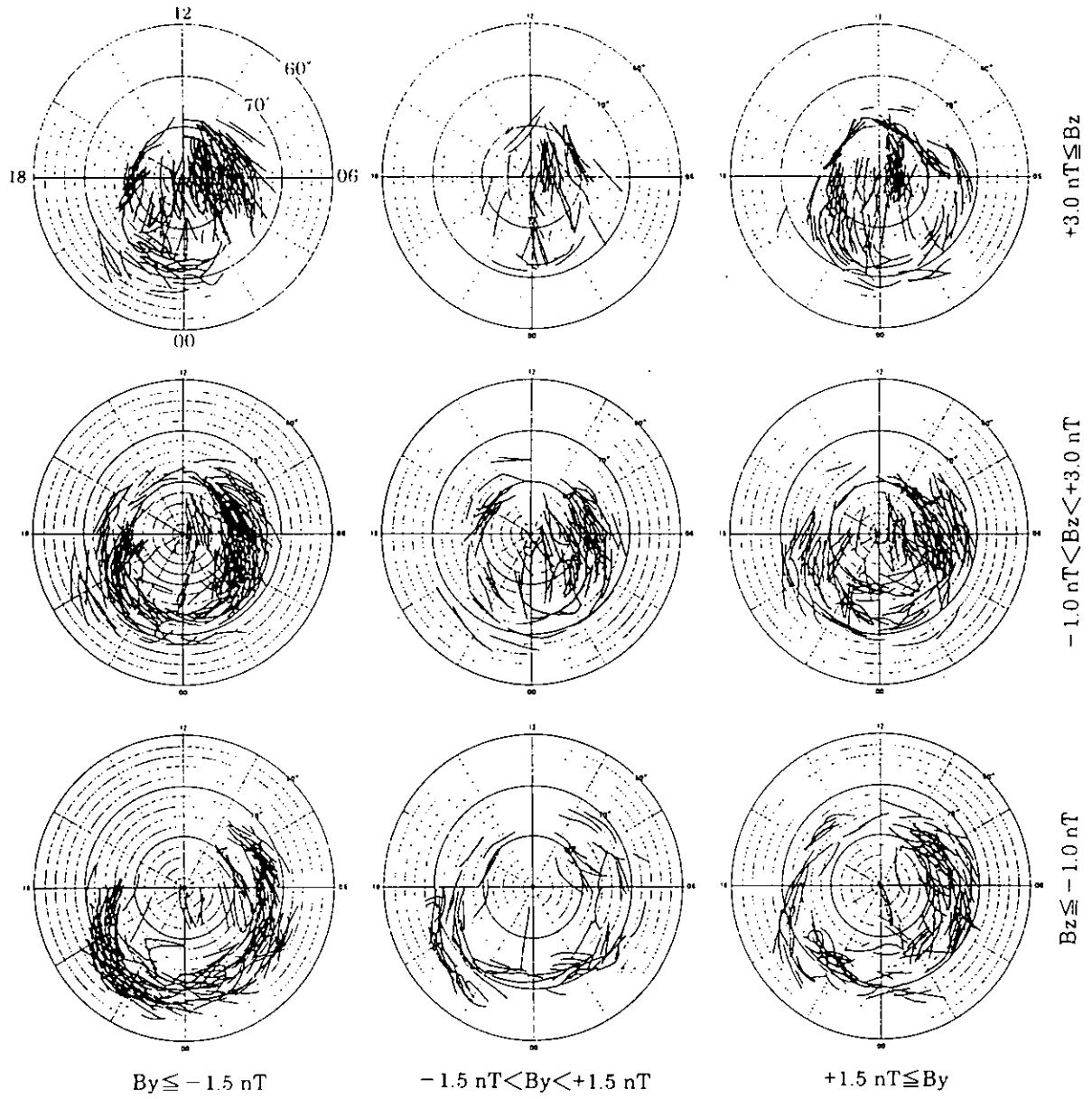
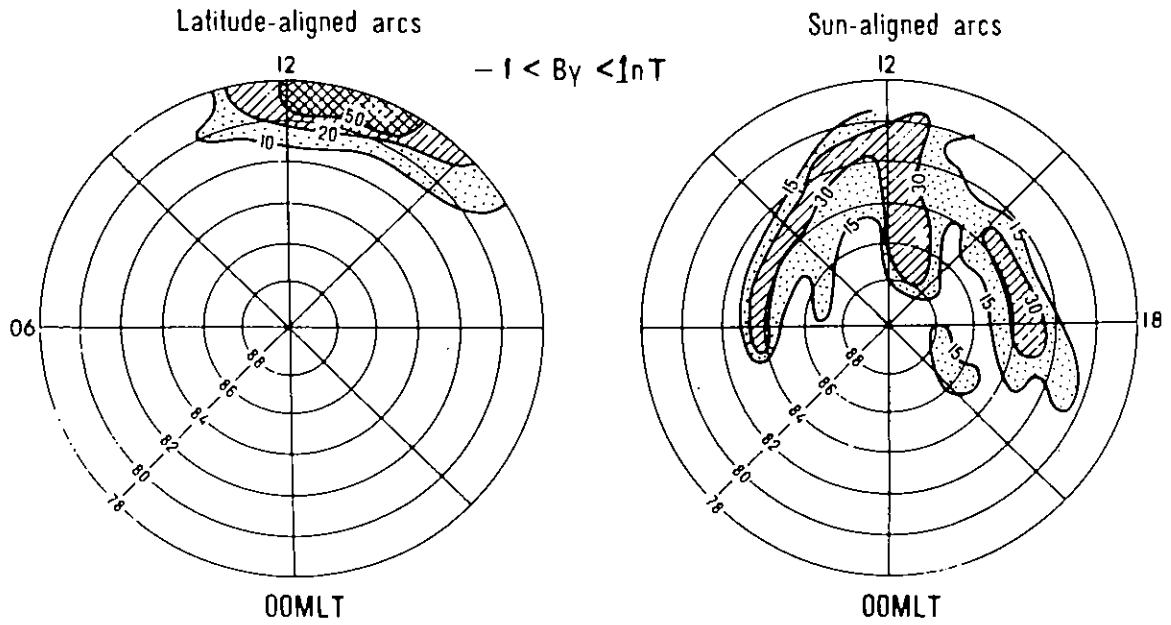


図 1-3. 惑星間磁場(Bz と By)の変動とオーロラ出現の関係 (Lassen and Danielsen, 1978 による)



distribution of latitude-aligned arcs when $-1 < B_y < 1$ nT (left),
and distribution of polar cap arcs when $-1 < B_y < 1$ nT (right)

図 1-4. 惑星間磁場 B_y の $-1 < B_y < 1$ の条件における昼側オーロラの発生頻度分布 (Troshichev et al., 1988 による)

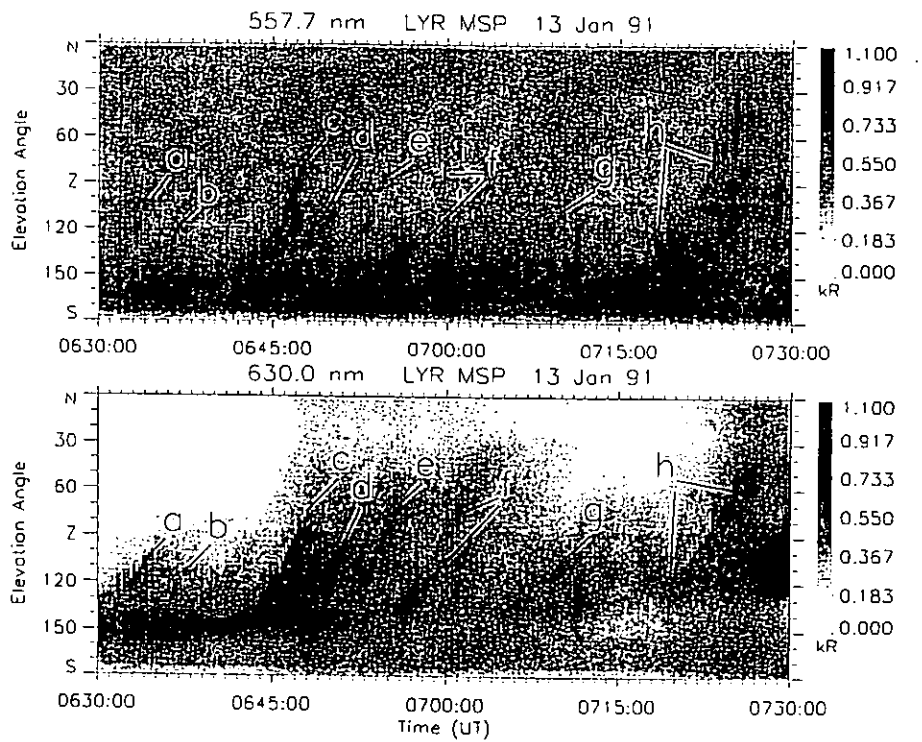


図 1-5. 昼側オーロラの高緯度側への移動特性。
上部パネルの波長は 557.5 nm、
下部パネルの波長は 630.0 nm
(Fasel et al., 1995 による)

Auroral type	Precipitation Particles			
	Electron			Ion Peak energy
	Peak energy	Temperature	Density	
Corona	>100 eV	> 100 eV	$10^5 - 10^6$ (electrons/cm ² · s · sr · eV)	> 1 keV
Weak arc	< 100 eV	< 100 eV	$10^6 - 10^7$ (electrons/cm ² · s · sr · eV)	< 1 keV

表 1-1. 昼側オーロラのタイプ別入射粒子エネルギー
(Ayukawa et al., 1996 による)

Station		Upernavik	Godhavn	Sondrestrom fjord	NyAlesund	South Pole	Zhongshan
Geographic coordinates	Latitude	72.8 deg.	69.2 deg.	67.0 deg.	78.9 deg.	-90.0 deg.	-69.4 deg.
	Longitude	304.0 deg.	306.0 deg.	309.0 deg.	12.0 deg.	0.0 deg.	79.4 deg.
Geomag. coordinates	Invariant latitude	80.2 deg.	76.6 deg.	73.5 deg.	75.9 deg.	-74.0 deg.	-74.5 deg.
Geomagnetic parameters	Horizontal comp.	6267.5 nT	7701.5 nT	8881.8 nT	6899.8 nT	15362.8 nT	15542.5 nT
	Declination	-49.5 deg.	-43.1 deg.	-38.9 deg.	- 2.1 deg.	-28.3 deg.	-79.5 deg.
	Inclination	83.3 deg.	81.7 deg.	80.4 deg.	82.4 deg.	-73.3 deg.	-72.8 deg.
	Total intensity	53619.7 nT	53545.0 nT	53213.6 nT	52103.3 nT	53543.6 nT	52543.8 nT
MLT = UT - □ hrs.		-2 hrs	-2 hrs	-2 hrs	+ 3 hrs	+ 4 hrs	+ 1.3 hrs

表1-2 観測点の地理座標、不変地磁気座標および固有磁場強度

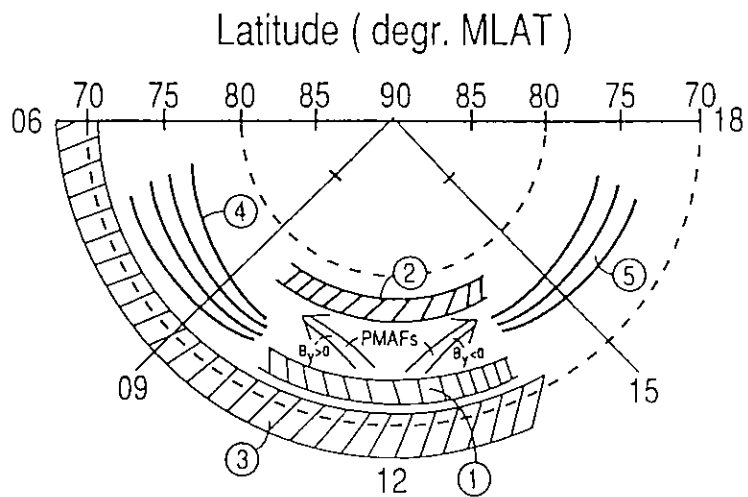


図 1-6. 昼側オーロラのタイプと磁気圏粒子源との対応 (Sandholt et al., 1998 による)

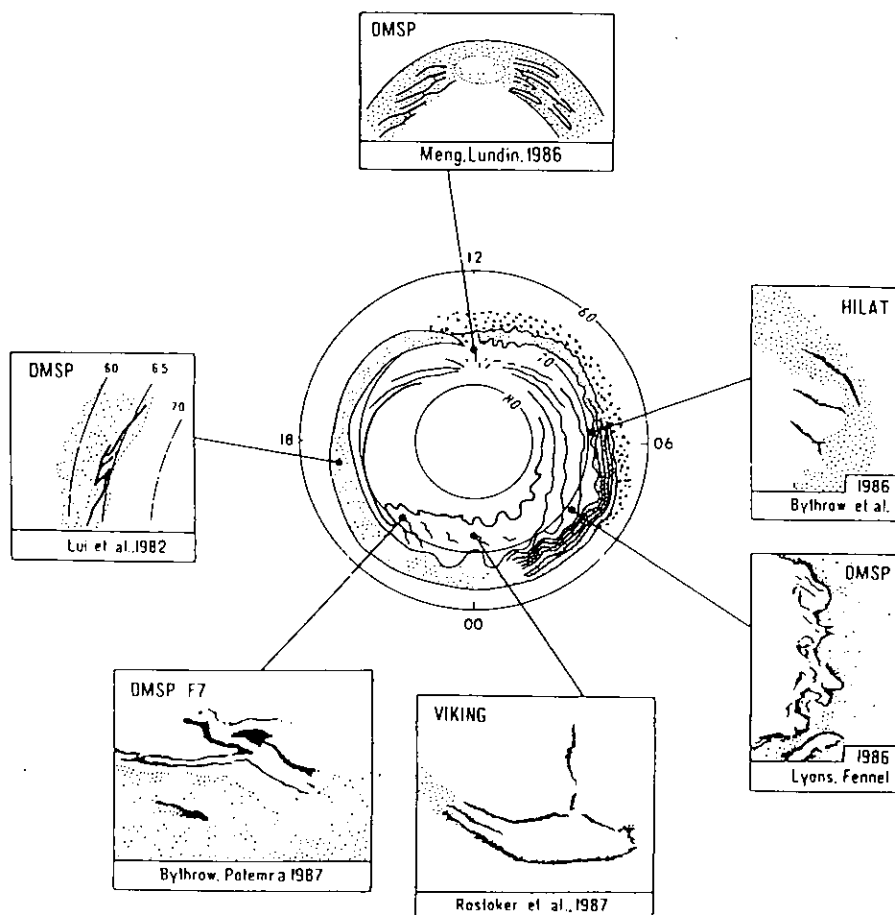


図 1-7. 人工衛星オーロラ画像データによるタイプ別オーロラの出現領域 (Troshichev, 1991 による)

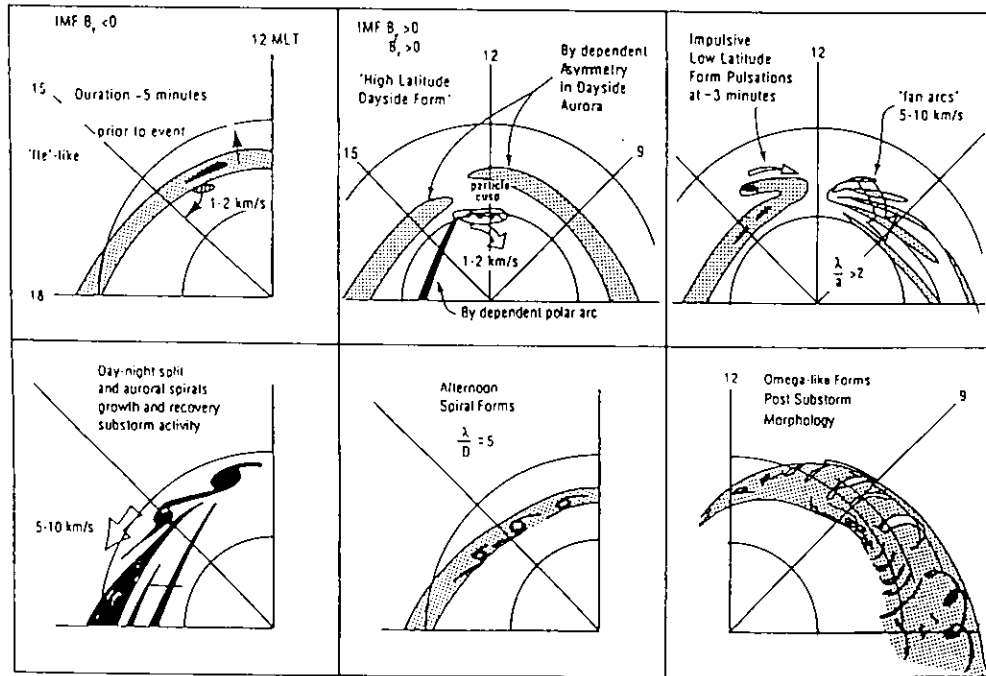


図 1-8. VIKING 衛星による昼側オーロラの形態と出現領域 (Elphinstone et al., 1992 による)

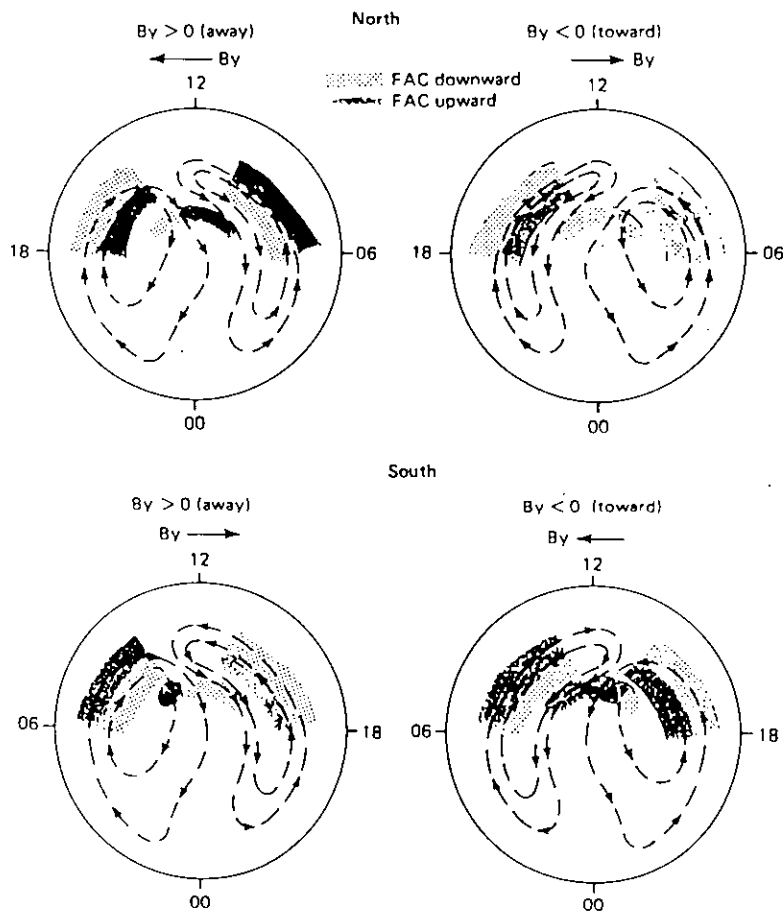


図 1-9. IMF-By 変動と沿磁力線電流および電離層の対流パターンとの関係 (Saflekos and Potemra, 1980 による)

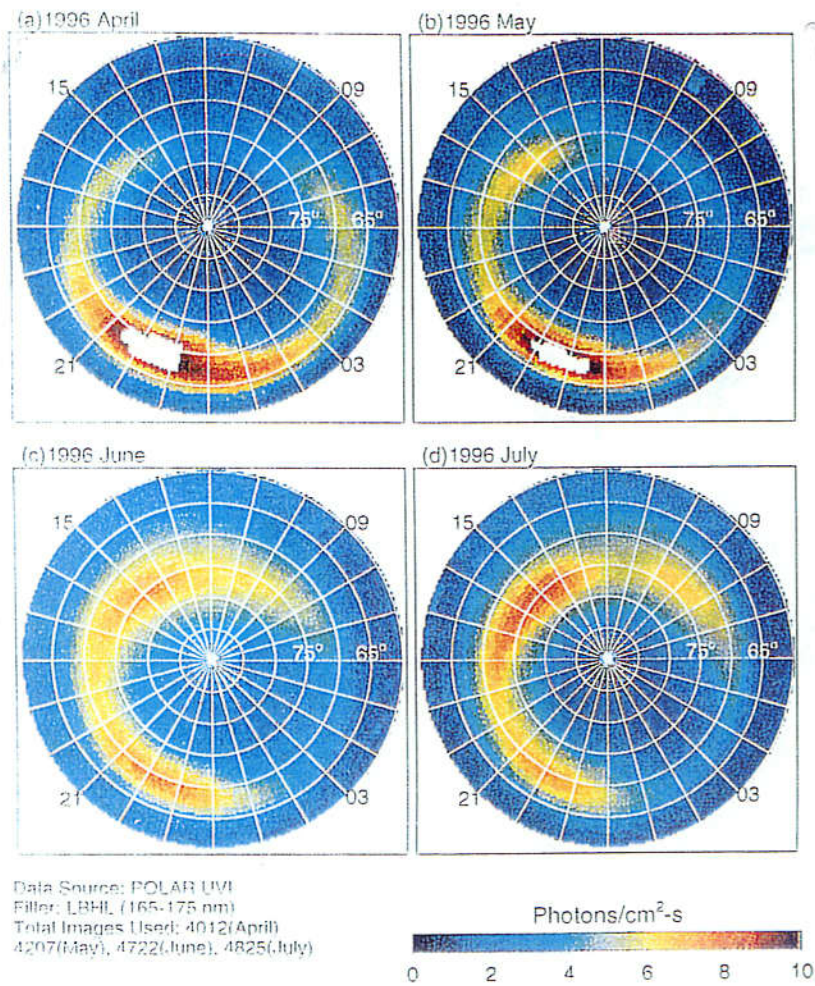


図 1-10. オーロラ発光領域の統計的分布図 (Liou et al., 1997 による)

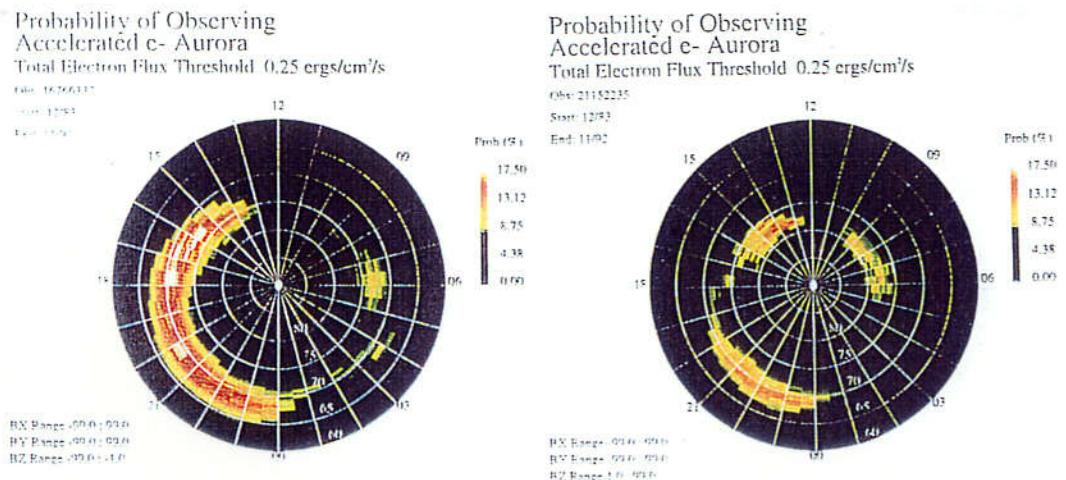


図 1-11. 惑星間磁場 Bz の方向の違いと入射粒子分布
 左パネルは IMF-Bz < 0、右パネル IMF-Bz > 0 における分布図
 (Newell et al., 1996a による)

[II] 昼側オーロラの形態的な特性

南極のSPSは、地磁気緯度 74° であり、平均的なオーロラオーバルの高緯度側を地球の自転に伴って周回し冬季の数ヶ月間は真昼間でもオーロラ発光高度($\sim 100\text{km}$ 以上)が太陽光の影響を受けない地理的条件下にある(S.-I. Akasofu, 1978)。その為、SPSにおけるオーロラ観測は、①昼間側オーロラの観測が長期間可能である ②オーロラ現象のMLT依存性の終日情報が得られる ③晴天日が比較的多い(極冠高気圧帯に位置する)などオーロラ活動を地上からモニターするのに都合が良い条件が揃っている。オーロラ活動の様相は、磁気圏の擾乱度によって大きく左右されることは一般に良く知られるが、オーロラオーバルの下を周回するSPSのような地点での観測により、全MLTセクターにわたってオーロラ形態の特徴が区別できる可能性がある。ここでは、WDC-C2 for Aurora (NIPR)を経由して入手したSPS全天カメラ写真データを用いてMLTの違いとオーロラの形態を調べ、昼側オーロラの形態的な特徴と昼側オーロラの動態および出現特性などについてまとめる。

2.1. 地磁気地方時とオーロラの形態

オーロラ現象は、磁気圏の擾乱度によって大きく変化することが知られるが、観測地点と太陽の位置関係が変わるMLTの違いによっても、オーロラ活動の様相が変わることが知られている。ここでは1977年(5月~8月:106日間)および1978年(4月~9月:155日間)のSPS全天カメラデータを用いて、オーロラ現象がMLTの違いに伴ってどのように変化するかを形態学的視点から調べた。SPS全天カメラデータ写真データは、 $F=2.8$ の35mm魚眼レンズとASA感度1000のフィルムで1分毎に撮影され、露出時間は5~7秒程度と推定される。それ故、動きの早いオーロラ現象に対しては見かけ上オーロラ発光の加算効果もある。図2-1は、地磁気活動度と無関係にオーロラ現象の形態のみに注視して1977年のSPS全天カメラデータをMLTのセクター毎に羅列したものである。図の画像データ中の黒い部分がオーロラ発光領域を表している(以後の画像データでも、南極点基地のデータについては黒い部分がオーロラ発光領域である)。オーロラの形態がMLTによってその様相を変えていることがわかるが、著者の解析によると概ね7区分に特徴づけられる。7区分されたオーロラ様相の特徴は、以下のようにまとめられる(但し、ここではオーロラの存在や形態的な特徴の様相を磁気圏の擾乱度と無関係に取り扱っている)。

① 10h~14h MLT (dayside)

図2-1の一番上のパネルで示した例のように線条構造(ray structure)が顕著なコロナ状オーロラが卓越し、その発光位置、輝度や形態の変化の度合いは小さい。オーロラの継続時間は比較的長く2~3時間である。夜側で見られるような激しい動きを伴う爆発的なオーロラが観測されることは少ない。

② 14h~17h MLT (afternoon side)

図2-1の二番目のパネルに示したように帯状構造(band like structure)のオーロラが顕著に卓越する。このオーロラは午前側のコロナ状オーロラに比べて発光輝度が強い傾向にあり、低緯度から高緯度に移動することがよく見られる。また、繰り返しこのオーロラが出現することがあるが、その繰り返しの周期は数分程度である。

③ 17h~20h MLT (evening side)

この時間帯に見られるオーロラの発光領域はやや高緯度に広がる傾向がある。また、多重性に富んだ帯状構造が夜側から伝播してくるのがよく見られる。

④ 20h~23h MLT (late evening side)

爆発的なオーロラ現象が観測されることが多い。輝度が高く活発なオーロラが全天に見られる。

⑤ 23h~01h MLT (nightside)

quiet arcと言われる弱いアーク状オーロラがよく観測される。ただし、南極点基地では、このオーロラが天頂付近に見られることは少ない。

⑥ 01h~05h MLT (early morning side)

子午線方向に狭い幅の帯状オーロラが観測される。

⑦ 05h~10h MLT (late morning side)

コロナ状オーロラが卓越して観測される。輝度変化や移動速度は10h-14h MLT セクターのオーロラに比べやや活発である。このようなタイプのオーロラ現象が、この時間帯で観測される確率が高い。

図 2-2 は、上に述べた①~⑦の結果をまとめたものである。この図で昼側(10h-14h MLT)として区別した MLT セクターのオーロラ形態について 2.2.節でより詳細に述べる。

2.2. 昼側オーロラの形態的な特性

オーロラの MLT セクター別の形態変化の調査から、SPS の昼側の特定な時間帯"10h-14h MLT"にコロナ状オーロラの出現が顕著であることが判ったが、更に、このコロナ状オーロラの出現頻度や振る舞いに関する知見を得るために 10h-14h MLT のデータを詳しく調べた。SPS の MLT と世界標準時(Universal Time; UT)の関係は、 $MLT=UT-4h$ である。表 2-1 は、1977 年及び 1978 年の 2 年間の SPS 全天カメラ写真の 10h-14h MLT 間に関するデータ有用性とオーロラ現象が視野内に現れた頻度状況等を示している。表 2-1 によれば、2 年間の全観測日数 261 日の内、曇天又は降雪等の悪天候関連によるデータ欠落は 9 日分で SPS がオーロラ光学観測に適した場所であることがわかる。データ欠落の要因は、機器故障又は現像処理の失敗等のトラブル関連が 47 日分あり、悪天候(9 日分)による欠落より多い。有効データは 205 日分で全観測日

数の87%にあたり、このうちSPSの上空で昼側オーロラの活動が見られた日数は138日であり、有効データの約2/3を占めた。また、昼側オーロラ現象が見られなかった日数は約1/3の67日であった。この昼側オーロラが観測された日とされなかった日の日数比は、地磁気擾乱度の影響で変わりうるものと思われるので、イベント毎の磁気圏状況に注意しての吟味が必要である。図2-3にSPSで観測された昼側オーロラ現象の典型例を示す。データは5分毎の全天カメラ写真であるが、オーロラの発光している場所、形態、強度等の変動が何れも緩慢であることが特徴的でコロナ状オーロラが卓越していることがわかる。図2-3で代表されるSPSの昼側に見られるコロナ状オーロラは、発光位置の変動(移動)と形態の変化が緩慢で出現時間が長い(2~3hrs)ことに特徴がある。これらの特徴は、著者がSPS全天カメラ写真データを調べた限りにおいては他のMLTセクターで観測されるコロナ状オーロラの"移動速度"や"継続時間"に類似していない。また全天カメラ写真データ上で見る昼側セクターのコロナ状オーロラの発光強度は、他のMLTセクターのそれよりも微弱である傾向が見られた。一方、昼側には磁気圏構造のカスポやクレフトと呼ばれる特異な領域が存在し、この領域特有の降り込み粒子を反映するオーロラ現象が予想されるが、SPSで見られる昼側のコロナ状オーロラがカスポあるいはクレフトに対応しているのか否かが今のところはっきりしない。ところで、SPSの視野内に昼側オーロラが見えた1977年の52日分のデータについて、全天カメラの視野を子午線面に対して高緯度側-天頂-低緯度側と三分に分けて細分化してオーロラの振る舞いを調べると、低緯度側(赤道側)にオーロラが見える頻度は少なく(~20%)、天頂もしくは高緯度側(極側)に見られる頻度が多かった(~80%)。この解析に用いた特徴的なイベント例を図2-4に示してあるが、低緯度側に出現するオーロラが帯状(band-like)であるのに対して、天頂及び高緯度側領域で見られるオーロラは線条構造(ray structure)が顕著で、特に天頂付近に出現するオーロラはコロナ状(corona type)が卓越する傾向が見られる。一方、これらのオーロラが見られる時間帯は、線条構造が特徴的なオーロラが昼側(dayside)と区分した時間帯(10h-14h MLT)の比較的早い時刻から真昼過ぎ1時間程度の間(10h-13h MLT)を中心に観測されることが多く、午後の時間帯(13h-14h MLT)で観測されることは少ない。低緯度側で見られる帯状構造のオーロラ現象は、午前(10h MLT)から真昼過ぎ(~13h MLT)にかけて観測されることは皆無で、14h MLT近くに集中して観測される傾向がある。以上をまとめると、昼側オーロラは、一般にレイ構造のコロナ状オーロラが6h-14h MLTにかけてよく卓越し、これに対して帯状構造のバンド状オーロラは14h MLT以降に出現し17h MLT頃までに見られる。注目すべき点は、17h MLT以降では夜中側から伝播してくるオーロラが見られるようになり、午後側に出現していたバンド状オーロラが観測されなくなることで、これはオーロラオーバルが夜側から昼側まで単純に連続してはいないことを示唆している。

このオーロラオーバルの夜側と昼側の不連続性に関して、南極の中山基地(74.5°

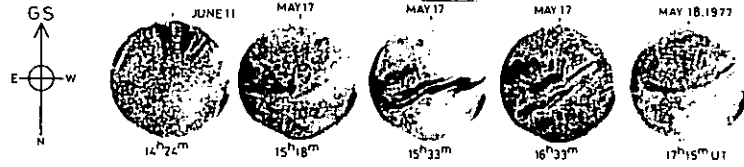
MLAT)のオーロラ観測データで調べた。図2-5は、磁気圏状態と無関係に1997年3月から9月までの期間に中山基地で観測されたオーロラの出現状況を調べた結果で、午後側の時間帯にオーロラが出現する回数および出現頻度を統計したものである。中山基地のMLTはUTに1時間30分を加えたものである($MLT=UT+1.5h$)から、ここで統計している地磁気の時間帯は13hから19h MLTである。図2-5の斜線で示す棒グラフはオーロラが観測された回数、白ぬきの棒グラフはオーロラが観測されなかった回数を示している。これによると、オーロラ出現回数は13h MLT頃には低く、時間の経過とともに次第に増加し17h MLT頃にピークが見られ、それ以後次第に減少している。また、図中の星印で示される折れ線グラフはオーロラの発生頻度を表している。発生頻度は、オーロラの出現回数が多い時間(17h MLT)には0.7程度であるが、19h MLTには0.3程度に減少していることが見てとれる。このことは、SPSのデータ解析によるオーロラオーバルが昼側と夜側で単純に連続してはいない傾向と一致している。中山基地の観測データから見た午後側オーロラの発生頻度分布は、人工衛星により観測された統計的なオーロラ発生頻度分布の結果ともほぼ一致する。図2-6はPOLARにより観測された4ヶ月間のオーロラの発生頻度の分布を示しているが、これによると15h MLT付近にオーロラの発生頻度が高いところが見られ、それは22h MLT過ぎ頃に見られるオーロラ発生最大のピーク領域と連続的につながっていない。この15h MLT付近の発生頻度のピークが、中山基地で観測されたオーロラの発生頻度のピークと対応しているものと考えられる。中山基地で観測される午後側のオーロラ形態は、昼から午後の14h MLT頃までの時間帯に限定してコロナ状オーロラが見られる。また、バンド状のオーロラは、午後側(14h-17h MLT)で見られるが、一般に静穏時には午後から夕方に伝播する弱いバンド状オーロラ(アーク状オーロラと称する)が見られるのに対し、擾乱時には夕方から午後側に伝播する明るいバンド状オーロラが見られる。このことは、同じ時間帯でも惑星間空間磁場や地磁気変動により異なる起源のバンド状オーロラが観測されている可能性があることを意味している。このため午前側と午後側のオーロラについて、その形態の違いや伝播方向などから異なる粒子源のオーロラを区別することが重要である。本章では、昼側オーロラの存在や形態的な特徴の様相を磁気圏の擾乱度などと無関係に解析してまとめた。

2.3. 結果のまとめ

昼側オーロラの形態的な特徴は、コロナ状オーロラとバンド／アーク状オーロラに二大別できる。バンド状オーロラは粒子起源の異なるものを形態学的に同一視してしまう可能性がありさらに細分化した特徴づけを必要とする。

- ①レイ構造が顕著なコロナ状オーロラは朝側から真昼近傍に卓越する
- ②バンド／アーク状オーロラは真昼近傍から午後側に卓越する
- ③バンド／アーク状オーロラはさらに細分化して特徴づける必要がある

DAYSIDE : 10 - 14 MLT (14 - 18 UT)



AFTERNOON SIDE : 14 - 17 MLT (18 - 21 UT)



EVENING SIDE : 17 - 20 MLT (21 - 00 UT)



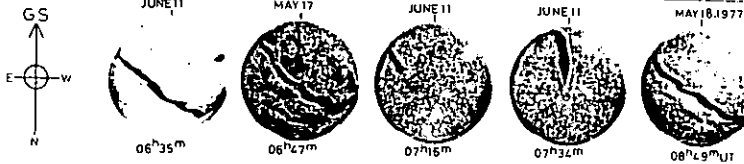
LATE EVENING SIDE : 20 - 23 MLT (00 - 03 UT)



NIGHTSIDE : 23 - 01 MLT (03 - 05 UT)



EARLY MORNING SIDE : 01 - 05 MLT (05 - 09 UT)



LATE MORNING SIDE : 05 - 10 MLT (09 - 14 UT)

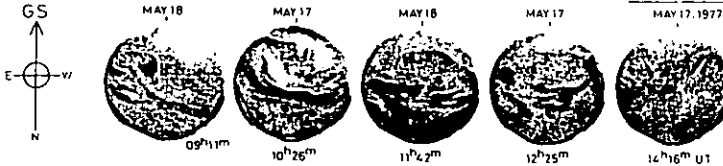


図 2-1. 全天カメラで観測した南極点基地のオーロラ画像
(画像データの黒い部分がオーロラ発光領域を示す)

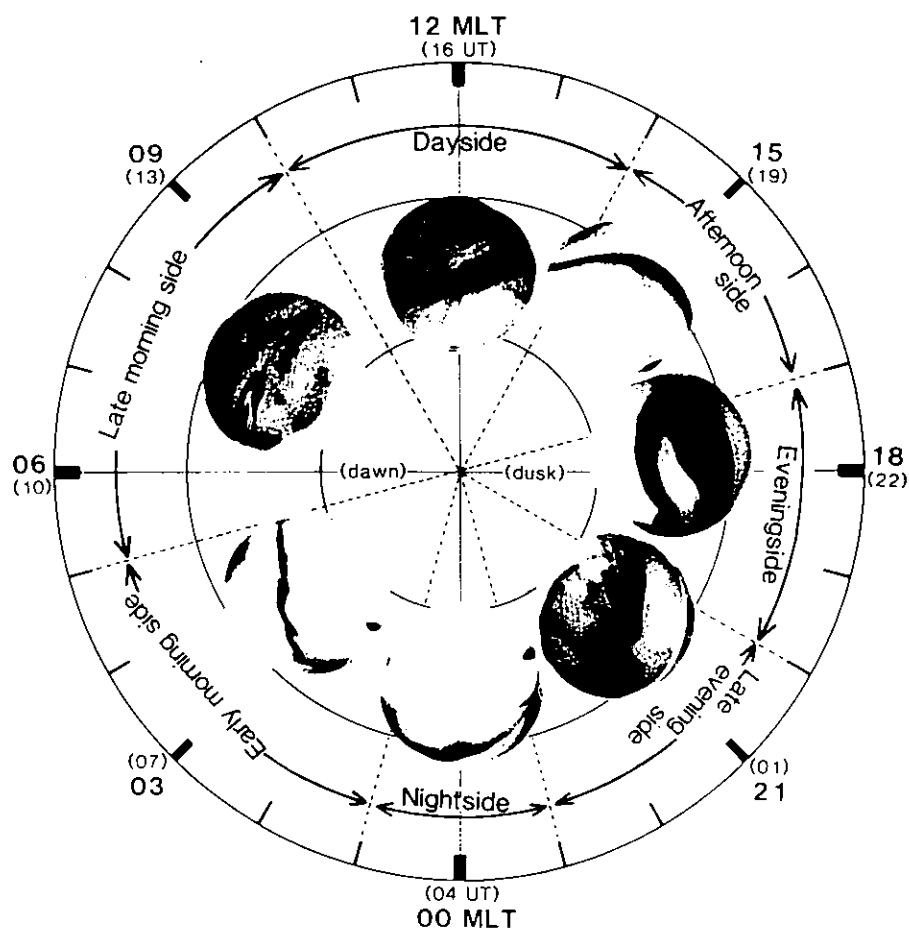


図 2-2. 南極点基地で見られるオーロラ現象の形態学的な特徴 (MLT の違いでおおむね 7 区分で特徴づけられる)

	May 4 - August 19, 1977	April 4 - September 9, 1978	Total days
Auroral activity are seen	52 days	86 days	138 days
No auroral activity	29 days	38 days	67 days
Bad weather	5 days	4 days	9 days
Instrumental malfunction and / or miss film's developing	20 days	27 days	47 days
Number of days	106 days	155 days	261 days

表2-1 1977年と1978年に南極点基地で得られた昼側(10h-14h MLT)の全天カメラ写真データ

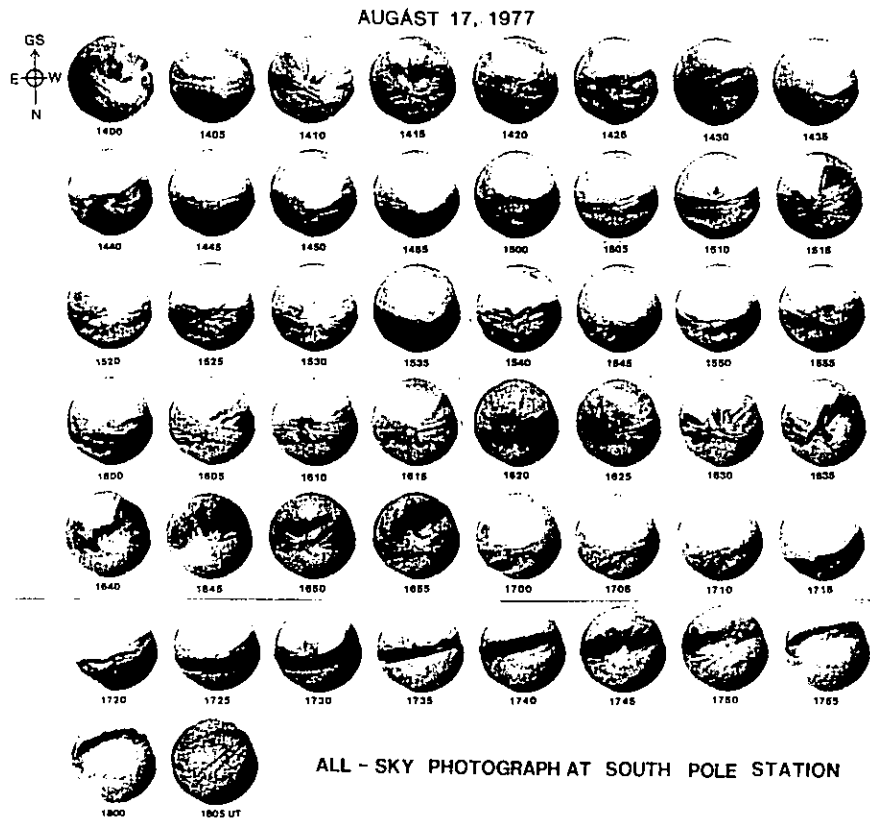


図 2-3. 昼側オーロラ現象の典型的な例

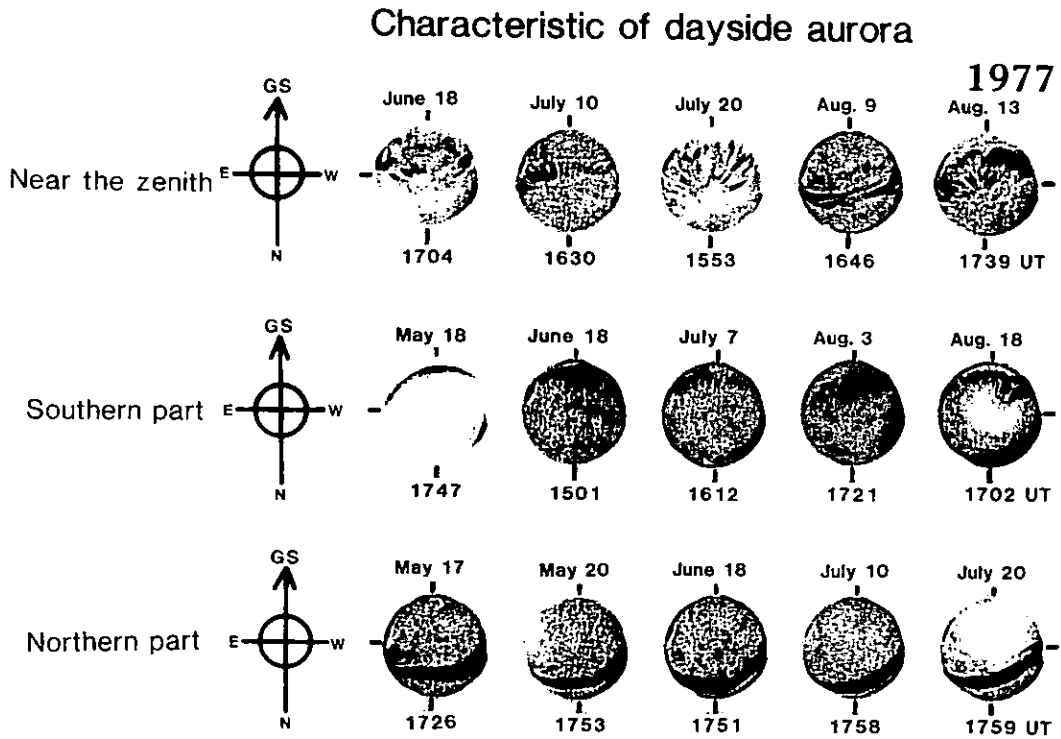


図 2-4. 昼側オーロラの出現領域による特徴

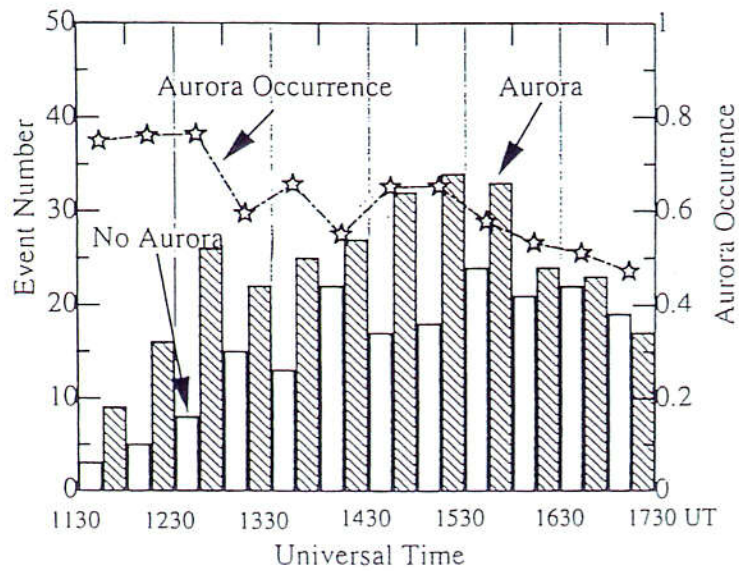


図 2-5. 中山基地で観測された昼側オーロラの出現領域(1997年3月-9月, 13-19h MLT)

Data Source: POLAR UVI
 Period: 4/1 - 7/28
 Total Images: 17372
 Filter: LBHL (165-175 nm)

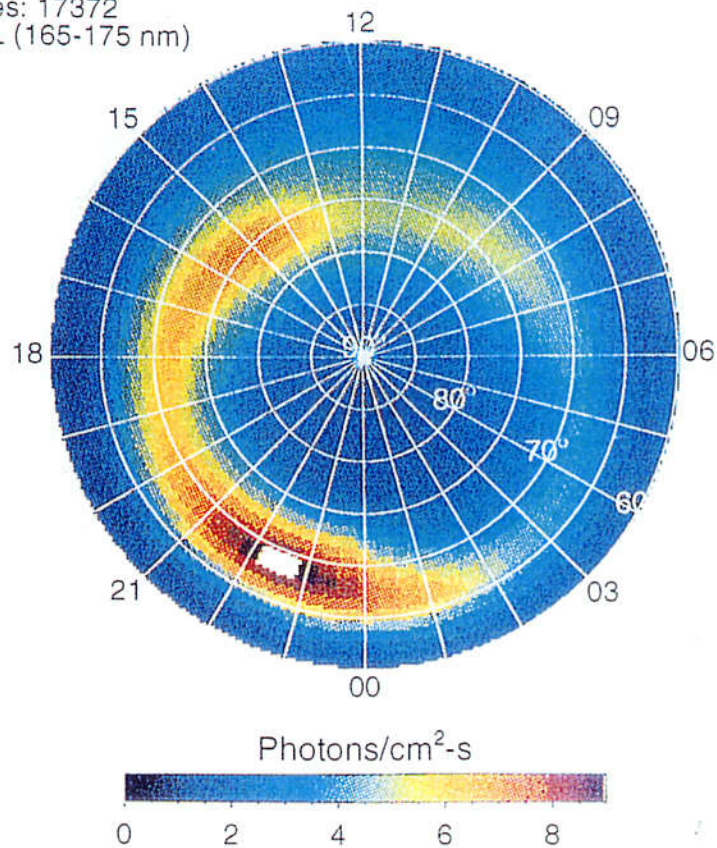


図 2-6. 人工衛星 POLAR で観測されたオーロラの出現頻度分布(4ヶ月間の統計結果)

[Ⅲ] 昼側オーロラの動態的な特性

昼側オーロラの形態や動態は何によって制御されているのか興味深い。特に、昼側には磁気圏の開磁場と閉磁場の境界領域にカスプやクレフトと呼ばれる特異領域の存在が知られている。IMF-Bz成分が南向きの時、昼間側でIMFと地球磁場の結合が起こるというDungey(1961)のモデルによると、この特異領域で太陽風が電離層レベルに直接的に入り込む可能性があり、それを反映するオーロラ現象が観測されると予想される。昼側オーロラの形態学的な特徴は、鮎川・巻田(1996)のSPSで見られるオーロラ現象の解析によればコロナ状オーロラが特徴的であるが、この形態がカスプやクレフトと呼ばれる特異領域に特有なオーロラ現象であるのかはっきりしない。昼側オーロラの活動が、IMF-Bz成分の変動に良い対応があるのか、夜側の地磁気擾乱の発生タイミングの方により良い対応が認められるのか、これまで議論がなされてきた。例えば、Sterkov and Feldstein (1967)は、昼側オーロラは地磁気活動の高まりに伴って赤道側へ移動すると報告し、Horwitz and Akasofu (1977)は、昼側のオーロラオーバルの動態はIMF-Bz成分がステップライクに南向きに変化または北向きに変化した後、約10~15分後に低緯度側(赤道側)または高緯度側(極側)へ移動を開始し、その輝度上昇は夜側サブストームの発生時(~2分以内)に観測されると報告している。また、南半球の観測データ(SPSのケオグラム; Keogram)を用いたEather et al. (1979)は、昼側オーロラの低緯度側(赤道側)への移動はIMF-Bz成分の南向きへの変化よりも夜側のAE-fluctuation(サブストーム発生及びその強度変化)の方に良い対応があると報告している。Sandholt et al.(1980)は、北半球のニーオルソン(Ny Alesund)のデータを用いて、カスプ域オーロラが夜側の地磁気擾乱開始とほぼ同時に活発化すると報告している。しかし、これらの何れの研究も、夜側から昼側へ頻繁に波及伝搬してくるとみられるオーロラ現象と昼間側領域に特有なオーロラ現象を混在して議論している可能性があり、カスプやクレフト領域のオーロラと夜側オーロラとの区別が不鮮明である。ここでは、全天カメラ画像データで昼側に見られる実際のオーロラ現象の形と動きを確認しながら、IMFの変動と昼側オーロラ動態の応答性、地磁気活動とその出現領域の特性について調べる。

3.1. 惑星間磁場変動と昼側オーロラの動態特性

3.1.1. IMF-Bz変動と昼側オーロラの応答性

IMF-Bz成分の変動に伴う昼側オーロラの応答特性を知ることは、昼間側領域で混在していると考えられるカスプやクレフト起源のオーロラとプラズマシート起源のオーロラを判別する上で重要である。著者は、SPSの視野内に昼側オーロラが観測された1977年の52日分(表2-1参照)全てのオーロラ現象について、IMF-Bz成分の変動を対比させてみた。ここでは、特に、長時間にわたってSPSの天頂付近で典型的

なコロナ状オーロラが見られたイベント-3例を選び、オーロラ活動とIMP-J衛星で得られたIMF-Bz成分の変動との比較解析を示す。但し、解析したIMFデータは、IMP-J衛星の公開データ(5分毎の変動値)であるため、IMF-Bz変動とオーロラ活動との5分以下の対応関係については言及できない。

(1) イベント-1 -June 18, 1977-

1977年6月18日にSPSの昼側で見られたオーロラの活動(図3-1)は、14h00m~17h30m UT頃まで概ね天頂より高緯度側に見られ、17h30m UT以降、急激に低緯度側へ移動している。オーロラ活動とIMF変動の比較をより客観的な視点でとらえるために、オーロラ現象の子午線方向の動きについて図3-2に示す全天写真カメラ用スリット盤を作成した。全天カメラ写真用スリット盤は、天頂角(θ)に比例して設けられたスリット(覗き窓)を通して、オーロラ輝度の強い位置を追跡することができる。

図3-3は、上部パネルにIMP-J衛星で得られたIMF-Bz成分の変動値を示し、下部パネルにスリット盤を通して見たオーロラの強く輝いている場所を表示した。IMF-Bzの変動は、14h00m~18h00m UTの間南向きに終始し $-5 < B_z < 0$ の範囲で変動している。その変動は、16h30m UTまでが比較的緩やかで、16h30m UT以後にステップライクな大きな変化が見られる。また、IMF-Bz変動の最低値($B_z = -5$ nT)が17h00m UT頃があり、オーロラの低緯度側への移動が17h30m UT頃に開始していることが示されている。即ち、オーロラはIMF-Bz成分の最低値から約30分後に低緯度方向へ急激な移動を開始している(オーロラ オーバルの拡大)。一方、オーロラの発光強度は図3-1の全天カメラ写真データによれば、それより以前の17h10m UT頃に輝度上昇が既に認められる。これはIMF-Bz変動が最低値($B_z = -5$ nT)を示した10分後である。全天カメラ写真データでは16h50m UT頃にもオーロラの輝度上昇が見られるが、ここでもまた、その10分前の16h40m UT頃にIMF-Bz成分が極小値($B_z = -3$ nT)を示している。人工衛星の軌道情報によれば、この時IMP-Jは太陽の東側 30° 方向に地球からの直距離が約 $33.5R_e$ の位置にいた。太陽風の速度を約 400 km/sと仮定すれば、IMP-J衛星の位置で観測される現象は約9分後には電離圏に到達する可能性があり、 $B_z < 0$ の条件下でのIMF-Bz変動の極小値が電離層レベルにおけるオーロラ現象の輝度上昇に直接的に関与しているように思える。また、急激なオーロラの緯度的な移動については、もしも、この移動がIMF-Bz変動の最低値に関連した現象であるならば、最低値の約30分後に見られるオーロラの低緯度方向への移動は、太陽風が電離層レベルまで直接的に進入したのではなく、衛星の位置($\sim 33.5R_e$)から約20分程度の回り道($\sim 75R_e$ に相当する)経路を辿って電離圏に到来したか、あるいは磁気圏の適当な場所でのエネルギー蓄積過程を経た後の現象と考えなくてはならない。衛星位置を考慮した結果によれば、 $B_z < 0$ の条件下では移動を伴わないオーロラの輝度上昇にはIMF-Bz変動の極小値が直接的に関与するよう見え、これに対して急激な緯度的移動を伴うオーロラの輝度上昇は、IMF-Bz変動が極小値(このイベントでは最低値 $B_z = -5$ nT)を示した時刻から少なくとも20

分以上を経た後に爆発的に発生する現象であろう(エネルギー蓄積過程とも考えられる)。

この時、夜側ではどんな現象が見られたかを調べてみたが、SPSが真昼間(16h UT=12h MLT)にあるとき夜中側に位置する適当な観測点は南半球には無いので、北半球のテキシーベイ(Tixie Bay)の地磁気データを調べた。Tixie BayはSPSが真昼側にあるとき24h MLTの位置にある。Tixie Bayの地磁気データには16h UT近辺でネガティブ・ベイ(negative bay)現象が見られ、このイベントで昼側でオーロラ活動が活発化(輝度上昇と急激な低緯度側への移動)したほぼ同時刻の17h30m UT頃には約-180 nTのパルス的な負の変動が観測されている。IMFの南向き変化に対応して昼側でも夜側でもほぼ同時的な擾乱現象が見られる。

(2) イベント-2 -July 10, 1977-

7月10日のイベントは、図3-4の全天カメラ写真が示すように14h40m UT以前と16h00m UT以後の二回にわたって輝度上昇を伴いながら移動するオーロラの活動が見られる。また、14h40m~16h00m UTの時間帯では、高緯度領域にレイ構造が顕著で動きの少ないオーロラの存在が確認できる。図3-5の上部パネルと下部パネルには、IMF-Bz成分の変動とスリット盤を通して調べたオーロラの動きをそれぞれ示したが、IMF-Bz成分は15h40m UT頃に北向き($B_z > 0$)から南向き($B_z < 0$)に方向が変わり、オーロラ現象はIMF-Bzが南向きに変わった後に輝度上昇や低緯度方向へ移動しているのが見られる(オーロラ オバールの拡大)。オーロラ現象は、図3-4と図3-5の両図を見比べると、16h00m UT頃、先ず最初に輝度上昇が見られ、その後16h15m~16h45m UTの間で高緯度側から天頂付近まで移動する第一過程のオーロラ活動と、16h50m~18h00m UTに見られる天頂を通過してさらに低緯度方向へと発達していく第二過程とに分かれている。このことは、IMF-Bz成分の南向き変化に対応して第一過程のオーロラ活動が発生し、その後、Bz値がある値(例えば $B_z < -3$)を越えて比較的長く南向きである場合にオーロラの主活動が発生することを示唆する。また、図3-5の14h40m UT以前におけるオーロラ活動度の上昇に対するIMF-Bz変動への依存性は、IMF-Bz観測値にデータ欠損がある(14h00m-14h10m間)ことから不鮮明であるが、Bz値の前後関係からデータ欠落時にIMF-Bzに符号の変化が推測されること、図3-5中の13h50m~13h55m UTに記載したIMF-Bzに符号の変化が確認できること等から、IMF-Bz成分の符号の変化が昼側オーロラの活動を引き起こす要因の一つである可能性が示唆される。ところで、この時の衛星軌道情報によれば、IMP-Jは地球から見て太陽の東約 80° 方向(ほぼ "dawn side")に直距離約26.5Reの位置にいた。太陽風を約400 km/sと考え衛星位置での現象が地球電離圏に直達できるものと仮定すれば、衛星高度と電離圏の現象には少なくとも約7分の時間差を見込まなければならない。この時間差を考慮してIMF-Bz成分の変動とオーロラ活動を比較してみると、IMF-Bz変動には15h50m UTに極小値($B_z = -5$ nT)が見られ、その約10分後にあたる16h00m UTの全天カメラ写

真にオーロラ現象の輝度が上昇していることが確認できる。オーロラは 16h15m UT 以降 16h40m UT 頃までに天頂付近へ移動するが、これは IMF-Bz が極小値を示した時刻 (15h50m UT) より 25 分~30 分経過した後に移動を開始しているように見える。また、16h40m UT 以後のオーロラは、天頂を通過して更に低緯度方向に移動しているが、16h25m~17h10m UT 頃にかけての IMF-Bz はほぼ -3.5 nT でコンスタント (低値は 16h40m UT に $B_z = -4$ nT) で顕著な変動は見られない。オーロラの活動の様相は、 $B_z < 0$ の条件が比較的長く続いた後に爆発的な現象が見られるので、夜側のオーロラ活動に類似している。すなわち、衛星位置を考慮した結果は、イベント-1 と同様に移動を伴わないオーロラの輝度上昇には IMF-Bz 変動の極小値 ($B_z < 0$) が直接的に関与しているのに対し、緯度的な移動を伴ったオーロラの輝度上昇は IMF-Bz 変動が極小値 (このイベントでも最低値は -5 nT) を示した時刻から 25 分~30 分経た後に発生する (エネルギー蓄積過程の存在を想像させる)。この時の夜側についてもイベント-1 と同様に北半球の Tixie Bay のデータには negative bay が観測されている。

(3) イベント-3 - August 17, 1977 -

8月17日のイベントは、図 2-3 に示す全天カメラ写真に見られる通り 14h00m~18h00m UT のほぼ4時間にわたって、天頂付近を中心に顕著なコロナ状オーロラの活動が繰り返されている。図 3-6 の上部パネルに示した IMF-Bz 成分の変動は、14h00m~14h50m UT の間南向きのまま徐々に $|B_z|$ 値が減少し、15h00m~15h20m UT の間に北向きへ一時的に変化している。その後、17h00m UT まで南向きの状態を維持するが、17h00m~17h05m UT に IMF-Bz の南向きから北向きへのシャープな変化が見られる。オーロラの活動については、図 3-6 の下部パネルに輝度の強い場所を子午面に沿って強調して示してあるが、この図をよく見ると、17h00m UT 頃までのオーロラ発光位置は小さく変動しているものの、大局的には殆ど天頂近辺を中心にオーロラが活動している。このオーロラ活動で更に注目すべきは、17h00m UT 以後の一瞬時に天頂付近から突然オーロラ光が消失している (図 2-3 の全天カメラ写真をも参照) が、これが丁度 IMF-Bz の北向きへ変化した時刻と一致している。天頂付近のオーロラが消失した時、低緯度側に残存していたオーロラは 17h15m UT 頃から輝度を高めるとともに徐々に高緯度側へ移動し、18h00m UT には SPS の高緯度側へ移る。このことは、昼側オーロラの高緯度側への移動 (オーロラオバールの縮小) が、IMF-Bz 成分の北向きへの変化に連動して発生していることを示唆している。ところで、この日 IMP-J 衛星は地球から見て太陽の東約 40° 方向に直距離が約 36.4Re の位置にあったので、太陽風の速度を 400 km/s と仮定すると衛星高度と電離層レベルの現象には少なくとも 10 分程度の時間差を見込む必要がある。このイベントでは IMF-Bz の符号変化が 14-18h UT 間に 4~5 回ありオーロラ活動と IMF-Bz 変動の関連はより複雑であるが、15h35m、16h00m、16h50m もしくは 16h55m UT 頃に見られる移動を伴わないオーロラの輝度上昇は、何れも B_z 値の極小値が約 10 分前近辺に見られ、 $B_z < 0$ の条件下でのイベント-1 &

-2の結果と同じ傾向を示している。一方、IMFが北向き($B_z > 0$)の条件下では、17h15m UT 頃の最大値 ~ 6 nT と同期してオーロラの輝度上昇があり且つ高緯度側への移動も始まる。同様に、15h10m UT 頃の北向き B_z 成分のピーク値(~ 3 nT)でも全天カメラ写真ではオーロラ活動に輝度上昇が観察できる。この時のオーロラ動態は、発光領域がやや高緯度側へ広がる様相を示すものの特徴的な移動傾向は見られない。これは10分後の15h20m UTにIMF- B_z が再び南向きへ変わることが影響しているものと推察する。このイベントで見られた昼側オーロラは、IMF- B_z 成分が南向き($B_z < 0$)から北向き($B_z > 0$)へ変化することに伴い高緯度方向への移動を開始すること及びその発光輝度が $B_z < 0$ にあっては夜側に発生する地磁気擾乱のスパイク状変化と密接な関係にあること、 $B_z > 0$ にあっては B_z 変動の最大値またはピーク値と同時的に強度を増す傾向があることが特徴としてあげられる。

3.1.2. 昼側オーロラオーバルの IMF- B_z 依存性

3.1.1.項では、昼側で特徴的に見られるコロナ状オーロラの典型的なイベント-3例をピックアップして、IMF- B_z 成分の変動とオーロラ活動の関連性をイベント毎に比較して述べた。オーロラとIMF- B_z の比較をイベント毎に行うだけでは、使用したデータの時間分解能の制約から3.1.1.項の議論を脱皮することはできない。ここでは、個々のオーロライベントとIMF- B_z 成分の変動との関係を明らかにする目的で、SPS 全天カメラ写真の視野内に昼間側オーロラが見えた1977年の52日分の全データについて、オーロラの振る舞いとIMF- B_z 成分の関係を統計的な視点から解析する。子午線沿いに設けたスリット盤を通してオーロラ活動を見ると、オーロラの活動位置がより客観視できることは既に図3-3、図3-5及び図3-6等で示したが、ここでは1977年の52日分の全天カメラ写真データ全てについて同様の作業を行い、オーロラ発光位置とIMF- B_z 成分の変動の統計的な結果について述べる。図3-7は、52日分のオーロラデータ(データ総数は2496駒:14h \sim 18hUT間の全天カメラ写真の5分毎サンプリング)をスリット盤を通して、見えたオーロラ活動の回数をスリット毎(天頂角" θ "別)に集計し、更にその集計数をIMF- B_z 値の区分による出現頻度分布として表現したものである。図3-7によれば、 74° MLATのSPSで見られる昼側オーロラは、SPSの低緯度側よりも高緯度側に多く出現する傾向が見られる。また、高緯度側で観測されるオーロラ活動は、IMFが北向きで B_z 成分の絶対値が大きい条件であればあるほど出現する頻度が多くなる傾向があり、低緯度側ではこれとは逆に南向きに B_z 値が大きい程出現頻度数は多くなる傾向が見られる。図3-7に示す8パターンのオーロラ出現頻度分布は、統計的な頻度分布で表現すれば図3-8のように統合することができ、オーロラ発光位置のIMF- B_z 依存性が浮き彫りになる。以上のことから、昼側オーロラの出現場所は、IMF- B_z 値の違いによりその出現頻度が片寄る。即ち、 $B_z > 0$ ではSPSの高緯度側に、また $B_z < 0$ ではSPSの低緯度側にオーロラの出現頻度が高くなる。このことはオーロラの発光位置が、IMF- B_z 値の減少に伴って低緯度方向へ(オーロラオーバルの拡大)、 B_z 値の増

大に伴って高緯度方向へ(オーロラオーバルの縮小)移動する傾向があることを示している。

3.1.3. 結果のまとめ

- ①昼側オーロラは、IMF-Bzが北向きの時はSPS位置より高緯度側に、IMF-Bzが南向きの時はSPS位置より低緯度側に出現頻度が高くなる。
- ②昼側オーロラの発光領域は、IMF-Bzの $B_z > 0$ から $B_z < 0$ への変化で低緯度側へ移動する動態特性があり、逆に $B_z < 0$ から $B_z > 0$ への変化で高緯度側へ移動する。
- ③②項は、昼側のオーロラオーバルが、IMF-Bz値の減少に伴って拡大し(低緯度方向への移動)、 B_z 値の増大に伴って縮小する(高緯度方向へ移動)傾向があることを示している。
- ④急激な輝度上昇を伴うオーロラの活発化(昼側オーロラの爆発的な活動)は、IMF-Bzの $B_z < 0$ の条件下で、夜側のnegative bayの発生タイミングと同時あるいは近接している。この急激な低緯度方向へのオーロラの移動速度は $\sim 3\text{km/s}$ である。

3.2. IMF変動と午前側／午後側で見られるオーロラの応答性

昼側オーロラ現象の特性についてⅡ章とⅢ章の3.1.節までは、主としてSPSで得られたデータに基づいた解析を述べた。ここでは、昼側のオーロラ現象を真昼を挟んだ午前側と午後側で同時観測が可能な観測上の利点のある北極域のデータで、IMF変動と昼側オーロラとの対応性を調べる。尚、本節以降で取り扱う北半球のオーロラ画像データでは、図中の白い部分がオーロラ発光領域を表す。

3.2.1. 午前側と午後側のオーロラ同時観測データの比較

図3-9は、1994年12月27日の1000-1200 UT間のWIND衛星のIMFデータとニーオルソン(NyAlesund)で得られたオーロラデータの比較図である。図の上部パネルはIMFデータで、下部パネルはニーオルソンで観測されたオーロラ画像データを南北方向のオーロラの動きに着目して解析したものを示してある。図3-10は全天カメラ画像データで実際のオーロラ現象の様相が示される。ニーオルソンのMLTはUT+3hであるから、このオーロラ画像データは、ニーオルソンが午後側に位置した時の観測例である。さて、図3-9の上部パネルに示したIMFデータによると、 B_x 成分と B_y 成分は10h UTから12h UTの間ほぼ正である。これに対して B_z 成分は10h42m UT頃を境に正から負に変化している。図3-9の下部パネルに示すオーロラデータでは、最初に10h30mから36m UTに高緯度側に弱いオーロラが見られる(図3-10-Aに対応)。そして10h40m UT過ぎに低緯度側から天頂付近に薄いオーロラが出現し(図3-10-Bに対応)、10h45m UT頃には高緯度側に明るいバンド状オーロラが出現する(図3-10-Cに対応)。このバンド状オーロラは、数分間強く輝いて10h48m UT頃からは

輝度を弱める(3-10-D, E, Fに対応)。その後、11h08m UT頃にはオーロラは再び天頂付近に出現し、11h20m UT頃から低緯度側に移動している。この時、WIND衛星は地球から太陽方向に20Re離れた地点に位置していたので、太陽風の速度を400 km/sを仮定すると、WIND衛星の位置での現象が電離圏まで伝搬する時間は5分程度と推定される。この時間差を考慮すると、10h42m UT頃に見られるBz成分の南向き変化と10h45m UT頃に高緯度側のバンド状オーロラが輝き出すことがほぼ対応しているように思われる。ここで述べた時間差は、Bz成分が南向き変化した時刻からオーロラが活動を始める時間が1-2分早いようにも見えるが、これは、太陽風の速度や伝搬距離の見積り誤差によるものかもしれない。ところで、図3-9に示されるニーオルソンの午後側のオーロラ活動は、11h20m UT以降に低緯度側に移動しているが、これはIMF-Bzの南向き成分によりポーラーキャップ域が低緯度に広がったためと考えられる。

この時、午前側に位置するグリーンランドのゴッドハフン(Godhavn)では図3-11に示すようなオーロラ活動が観測されている。図3-11はゴッドハフンの全天カメラ画像データで、画面の上が高緯度(北)側、右が真昼側(西)を示している。ゴッドハフンのMLTはUT-2hである。ゴッドハフンのオーロラ画像データによれば、10h30mから35m UTにかけて天頂付近にコロナ型オーロラが出現しはじめて(図3-11-A)、10h40m UT頃にはコロナ状オーロラが全天を覆い(図3-11-B)、その後も活動的なコロナ状オーロラが出現し続けている(図3-11-C, D, E, F)。図3-12に磁気的な真昼を挟んで、午前側に位置するゴッドハフン(08h30m-09h00m MLT)と午後側に位置するニーオルソン(13h30m-14h00m MLT)の同時観測データを示した。この図の上部はゴッドハフン、下部はニーオルソンのオーロラ画像データである。これによると、ゴッドハフンでは10h35m UT頃よりコロナ状オーロラが活発に出現し、10h45m UT前後には天頂付近で活動的なオーロラが見られる。このゴッドハフンのオーロラ活動と図3-9で示すIMF変動には特に顕著な関係があるようには見えない。これに対して、ニーオルソンでは10h42m UTにIMF-Bz成分が南向きに变化するのに伴いオーロラが活発化しているのが見てとれる。

ここで解析したイベントと同じ時間帯の夜側の状態を図3-13に示した。図3-13は10h UT頃に夜中近辺に位置するカナダ領域の地磁気データで、上から下へ順にレゾルート・ベイ(RES: Resolute Bay)、フォート・チャーチル(FCC: Fort Churchill)、ミヌーク(MEA: Meanook)、イエローナイフ(YKC: Yellowknife)で観測された地磁気H成分の変動データである。このうちオーロラ帯のFCCとYKCでは10h UT頃に数十nTの弱い変動が見られ、その後11h UT頃より300 nT以上の顕著なnegative bayが始まり、14h UT過ぎまで続いている。このnegative bayは、IMF-Bzの南向き変化が夜側の地磁気擾乱に関係することが定性的に知られることから、IMF-Bzの南向きに対応して引き起こされたものと思われる。ここで示した北極域のオーロラデータと夜側

の地磁気変動との比較解析でも、南極域の観測結果と基本的な傾向は一致している。すなわち、昼側オーロラは、IMF-Bzの南向き変化に伴い一時的に活発化し、その後次第に天頂から低緯度側に移動することが指摘できる。夜側ではIMF-Bzの南向き変化とほぼ同時的に僅かな磁場変動が見られ、その約20分後にnegative bayが起きている。

また、75° MLAT付近における夜中側のオーロラ現象をIMF-Bz成分の変動に対比させて調べると、昼側オーロラの変動の様相と同じような傾向が見られることが注目される。図3-14は、グリーンランドのゴッドハブンで得られた夜側のオーロラがIMF-Bz成分の変化に対応して南北方向(磁気緯度方向)にどのように移動したかを調べた一例である。これによると、1990年1月26日01h37mUTにIMFは急激に北向きから南向きに変化している。このIMFデータはIMP-8衛星により得られたもので、このとき衛星は地球から太陽方向に18Reのところを位置していた。従って、太陽風の速度を400 km/sとすれば、太陽風が磁気圏まで到達する時間は5分程度となる。図の下のパネルでゴッドハブンのオーロラの南北方向の動きを見ると、01h40mから45m UT頃にかけてオーロラは急速に低緯度に移動している。太陽風の伝搬時間差を考慮すれば、この時刻はちょうどIMF-Bzが南向きに変化した時刻にほぼ対応している。

3.2.2. IMF-By 変動と昼側オーロラの関係

IMF変動と昼側オーロラに関して、本節以前までIMF-Bzとの関係について調べてきた。ここではIMF-Byとの関連について調べておく。これまで多くの研究者(Friis-Christensen and Wihhelm,1975; McDiarmid et al.,1979; Saflekos and Potemura,1980; Heppner and Maynard,1987; Cowley et al.,1991 and others)により、昼側の沿磁力線電流の位置や電離層の対流パターンとその方向がIMF-Byの符号により異なることが報告されている。それらの結果を整理すると、北半球において、IMF-By>0の時には①昼付近のオーロラ帯で朝側から昼方向に向かう対流運動が強く、②低緯度側の沿磁力線電流領域(Region 1 and 2)も朝側から昼近くまで延びている、③昼付近の高緯度側カスプ域の沿磁力線電流は上向きが顕著である。他方、IMF By<0の時には①夕方から昼に向かう対流運動が強く、②低緯度側の沿磁力線電流領域(Region 1 and 2)は夕方から昼近くまで延びている、③昼付近の高緯度側カスプ域の沿磁力線電流は下向きが顕著となるなどとまとめられる。南半球でのIMF-Byの影響は上述したことと反対になっていると推定されるが、南北半球のデータを同時に比較した研究はあまりない。また、高緯度側カスプ域の沿磁力線電流はマントル領域につながり、低緯度側のRegion 1とRegion 2はLLBLにつながっていると考えられている。

ところで、オーロラ現象や入射粒子領域とIMF-Byの符号との関係については、沿磁力線電流や電離層の対流運動のパターンほど明確な依存性は報告されてはいない。その中で、Sandholt et al.(1993)は北半球の昼側オーロラデータの解析を行い、Cowley et al.(1991)が示した沿磁力線電流や対流運動の結果と比較しながら、IMF-By>0の時にはカスプ/クレフト域の上向き沿磁力線電流域にアーク状オーロラが出現し、昼側か

ら朝側に向かう対流運動に沿ってオーロラの動きが見られ、また IMF-By<0 の時には上向き沿磁力線電流域に出現したオーロラは昼側から夕方側に向かって運動すると報告している。他方、VIKING 衛星によるグローバルなオーロラ画像データを Elphinstone et al. (1993)が解析している。それによると昼側オーロラの出現頻度は北半球において、IMF-By>0 の時には昼側から夕方側にかけてオーロラが卓越し、IMF-By<0 の時には昼側から朝側にオーロラが卓越することを報告している。南半球ではこれと反対に IMF-By>0 で昼から朝側でオーロラが卓越し、IMF-By <0 で昼から夕方側でオーロラが卓越する。

ここでは、南極の中山基地で観測されたオーロラデータと IMF-By との関係について解析した結果を述べる。昼側オーロラは本論で明らかにしてきたように、午前側では主にコロナ状オーロラが、午後側ではバンド／アーク状オーロラが卓越する。中山基地では、太陽光との関係から午後側のオーロラ現象しか観測できない。したがって、中山基地でコロナ状オーロラが観測されるのは昼過ぎ 1-2 時間の時間帯に限られる。また、バンド／アーク状オーロラは 15h MLT 付近を中心に観測される。図 3-15 はコロナ状オーロラ(13 例)が出現した時の IMF-Bx, -By の分布を示したものである。これによるとコロナ状オーロラが卓越する時は IMF- Bx>0, By<0(toward sector) または IMF- Bx<0, By>0(away sector) であることがわかる。すなわち IMF-By の符号により、コロナ状オーロラの出現率に偏りは見られない。これに対して、午後側で特徴的に出現するバンド状オーロラについて、IMF-Bx, By との関係を調べた結果が図 3-16 に示してある。バンド状オーロラが出現した 17 例について、IMF-By の符号調べたところ By<0 のときが 13 例、By>0 のときが 4 例であった。すなわち、IMF-By<0 のときのバンド状オーロラの出現率は 76%である。更に、この 17 例のうち低緯度方向に運動するバンド状オーロラは 8 例あったが、このときの IMF-By の値は全て負であった。この結果は、VIKING 衛星によるグローバルなオーロラ画像データを調べた Elphinstone et al.(1993)の解析結果「By<0 のとき、南半球では昼から夕方側でオーロラが卓越する」と一致している。なお、今後午前側のコロナ状オーロラの出現と IMF-By との関係を他の観測点のデータを用いて明らかにしていく必要がある。

3.2.3. 結果のまとめ

- ①昼側オーロラ現象は、午前側でコロナ状オーロラが卓越し、午後側でバンド／アーク状オーロラが顕著となる特徴がある。
- ②IMF-Bz 成分の南向き変化への応答性は、午後側のバンド／アーク状オーロラには発光領域に顕著な変化がある(低緯度側へ移動)。これに対して、午前側のコロナ状オーロラには出現領域そのものの変化は少ないが、輝き強度の変動などの活発化が認められる。
- ③夜中側のオーロラの IMF-Bz 変動に対する応答性は、昼側の特に午後側に見られるオーロラの変動パターンと同様で IMF-Bz の北向きから南向

きへの変化に伴って低緯度方向へ移動する。

- ④中山基地(74.5° MLAT)で観測される午後側領域のコロナ状オーロラは IMF-By の符号と顕著な関連性はない。しかし、バンド/アーク状オーロラは IMF-By<0 のときの出現率が76%で By 効果が認められる。

3.3. 地磁気活動と昼側オーロラ現象

昼側のオーロラ現象と地磁気活動との関係を調べるため、図3-17で示したグリーンランドのゴッドハブン(Godhavn: 76.6°)とウペルナビーク(Upernavik: 80.2°)およびスバルバルのニーオルソン(Ny-Alesund:75.9°)で観測したオーロラテレビ画像データの解析を行った。グリーンランドのMLTはUT-2h, スバルバルはMLT=UT+3hであるから、両地点の間の時間差は5時間である。このことは、グリーンランドとスバルバルの二点で同時に観測されたオーロラデータを調べることにより、昼側オーロラの全体像を理解することが可能であることを意味する。オーロラ同時観測データは、異なる地磁気活動のイベントを選び、昼側オーロラの特徴的な形態についてその出現領域の全体像を明らかにすることを試みる。ここでは、地磁気活動の静穏時(January 10, 1994)と擾乱時(January 12, 1994)の2例を選び解析を行う。

3.3.1. 静穏時の昼側オーロラ現象

--- January 10, 1994 event ---

図3-18に1月9日と10日の汎世界的な地磁気データが示されている(京大, データセンター, 1994)。これによると、1月10日はオーロラ帯から中低緯度にわたり、地磁気の変動は数十 nT 以下であり、Kp インデックの値も 0+, 1-, 1, 0+, 1-, 0+, 0, 0 と大変小さい。また、IMF を調べると、昼側オーロラを解析した時間帯(9-12h UT)において北向き磁場であった。図3-19は、このような地磁気活動の静穏時に記録された全天テレビカメラのオーロラ画像データで、上のパネルはウペルナビーク、下のパネルはゴッドハブンで観測されたオーロラ現象である。図の09h19m UT頃には、ウペルナビークでコロナ状オーロラが天頂付近に、ゴッドハブンでは高緯度側にコロナ、天頂付近にバンド状オーロラが見られる。また、10h40m UT頃では、コロナ状オーロラがゴッドハブンの天頂付近に、ウペルナビークでは低緯度側に見られる。図3-20は、全天テレビカメラのオーロラ画像データを用いてオーロラの南北方向の動きを調べたもので、上のパネルがウペルナビーク、下のパネルがゴッドハブンのオーロラの動きを示している。これによると、ウペルナビークにおいては、コロナ状オーロラが08h-10h MLTにかけて、何回か低緯度から高緯度方向に動いていくことがわかる。この現象では300-400秒前後でオーロラが繰り返し発生し、高緯度に移動しているように見える。この時、ゴッドハブンのデータでは、天頂付近に出現している現象(図3-19のバンド状オーロラに対応)と、高緯度に移動していく現象(コロナ状オーロラに対応)とが見られるが、天頂付近に見られるオーロラには顕著な南北方向の動きがないことが

わかる。

この結果をまとめると、午前側 06h-08h MLT においては、コロナ状オーロラがウペルナピークの天頂付近に見られ、そのオーロラは周期的に高緯度へ移動する。 08h MLT 以降になるとコロナ状オーロラの出現領域はやや低緯度に移り、ゴッドハブンの天頂付近に出現するようになる。 いずれにしても、このような静穏時の午前側ではコロナ状オーロラが卓越し、その出現領域は 76° MLAT 以上であることが特徴的であると言える。

図 3-21 は、午前側のウペルナピークやゴッドハブンに対して、この時、午後側に位置しているニーオルソンで得られたオーロラデータの南北方向の時間空間解析図である。 図の上側が高緯度(北)、下側が低緯度(南)で、05h から 17h UT までのオーロラ活動が示される。 時刻 11h UT 付近が明るいのは太陽光でありオーロラ光ではない。 また、ニーオルソンでは 09h UT がほぼ真昼(12h MLT)に相当している。 この図を見る限り、ニーオルソンではこの期間中に顕著なオーロラ現象はほとんど認められず、オーロラがニーオルソンの 74.9° MLAT よりも高緯度側にシフトしている可能性があることが示唆される。 実際、この時の DMSP 衛星の入射粒子データを調べると、顕著な粒子の降下域は 76° MLAT 以上であることがわかった。 このことは午前側のオーロラがゴッドハブンよりも高緯度側で観測された結果と一致している。

3.3.2. 擾乱時の昼側オーロラ現象

--- January 12, 1994 event ---

図 3-22 に 1 月 11 日と 12 日の汎世界的な地磁気データが示されている(京大, データセンター, 1994)。 これによると、1 月 12 日はオーロラ帯の地磁気変動は数百 nT 以上であり、中低緯度でも 50 nT 程度の変化が見られる。 Kp インデックの値も 5-, 4+, 4-, 4-, 5-, 5-, 3, 4 と大きい。 また、このイベントにおける IMF は、12h から 15 h UT の時間帯で IMF-Bz が -5 nT から +5 nT の間を変動していたことを確認することができた、その他の時間帯はデータ ギャップのため IMF 変動はよくわからない。 図 3-23 は、このような地磁気活動の擾乱時に記録された全天テレビカメラのオーロラ画像データで、上のパネルはウペルナピーク、下のパネルはゴッドハブンで観測されたオーロラ現象を示している。 図の 09h19m UT 頃には、ウペルナピークではコロナあるいはバンド状オーロラが低緯度側の地平線付近に、またゴッドハブンでは天頂付近にコロナ状オーロラ、低緯度域にバンド状オーロラが見られる。 ゴッドハブンに出現しているこのバンド状オーロラは夜側(西側)から発達してきている。 また、10h40m UT 頃では、ウペルナピークで低緯度側にコロナ状オーロラが、ゴッドハブンでは天頂付近にコロナ状オーロラが見られる。 ゴッドハブンで観測されているこのコロナ状オーロラは昼側(東側)から伝搬してきている。 図 3-24 は、全天テレビカメラのオーロラ画像データを用いてオーロラの南北方向の動きを調べたもので、上のパネルがウペルナピーク、下のパネルがゴッドハブンのオーロラの動きを示している。 これに

よると、高緯度側のウベルナピークでは08 h - 09 h MLT 頃には天頂から低緯度域にかけてバンド状と思われるオーロラの出現も見られるが、全期間を通じてほとんど地平線付近でのオーロラ活動が顕著である。これに対して、ゴッドハブンのデータを見ると高緯度から低緯度までの全天にバンド状またはコロナ状オーロラが繰り返し出現している。静穏時の場合と比べると、オーロラの出現領域が低緯度に移動していることがわかる。

これらの結果をまとめると、地磁気擾乱時にはゴッドハブンの天頂から高緯度域にはコロナ状オーロラが見られ、このオーロラは昼側から出現する。これに対し、低緯度域にはバンド状のオーロラが見られるが、それは夜側から出現する。このことから、低緯度域に見られるバンド状オーロラはサブストームに伴って、夜側から午前側に伝搬してきた粒子により励起されている可能性が高いものと思える。

図 3-25 は、午前側のウベルナピークやゴッドハブンに対して、この時、午後側に位置しているニーオルソンで得られたオーロラデータの南北方向の時間空間解析図である。図の上側が高緯度(北)、下側が低緯度(南)で、05h から 17h UT までの時間帯のオーロラ活動が示される。時刻 11h から 15h UT 付近が明るいのは太陽光でありオーロラ光ではない。この図によると、06h UT 頃からオーロラが出現し 16h UT 頃まで断続的に天頂から低緯度域にかけてオーロラ現象が観測されていることがわかる。特に、ニーオルソンが昼前後にあたる 07h から 11h UT (10h-14h MLT) のオーロラ現象を詳しく見るためにテレビ画像データを調べた。図 3-26 は全天テレビカメラにより観測されたニーオルソンにおけるオーロラ画像データである。図の左側に示した正午(磁氣的昼)過ぎの 08h19m UT と 08h30m UT のデータでは天頂付近にコロナ状オーロラが見られる。また、図の右パネルに示したようにニーオルソンが午後側に位置する時間帯の 11h09m UT と 11h10m UT では、バンド状オーロラの強く輝く部分が夕方側(西側)から昼側(東側)に伝搬し、それらは低緯度側に顕著に見られる。この明るいバンド状オーロラは夜側から伝搬してきている可能性を示唆している。

3.3.3. 昼側オーロラの全体像

地磁気の静穏時と擾乱時の昼側オーロラの出現領域は、ここでの解析結果より図 2-27 のようにまとめることができ、昼側オーロラの全体像を知ることができる。図 2-27 の上のパネルは静穏時、下のパネルは擾乱時の昼側オーロラのタイプとその出現領域が示してある。図の静穏時に見られる朝側と夕方側の弱いアーク状オーロラは、sun-aligned arc と呼ばれているものに対応し、出現領域はオーロラオーバルの高緯度境界域に出現する。このオーロラは、著者等のオーロラ地上観測によると、グリーンランドの 74.0° MLAT 付近に位置するソンドレストローム フィヨルド (Sondrestrom fjord) でよく見られる。また、朝方側から昼側(08h-11h MLT)にかけてはコロナ状オーロラが卓越し、このオーロラの出現領域は 80° MLAT 付近を中心とする高緯度領域に見られる。正午(磁氣的な昼)に近づくにつれやや低緯度側にも見られるようになる。

コロナ状オーロラは午後側まで出現しているようであるが、グリーンランドでは太陽光の関係で午後側のオーロラが観測ができないためによくわからない。午後側のオーロラが観測が可能なニーオルソンのデータを調べて見たが、グリーンランドの観測点より地磁気緯度が低いいためか静穏時の昼前後の時間帯にはコロナ状オーロラはほとんど観測されない。地磁気緯度 74.5° の南極の中山基地のデータについて、静穏時の午後側のオーロラを調べたところ、その高緯度側に弱いコロナ状オーロラが見られることがわかった。ただし、このコロナ状オーロラが出現するのはせいぜい 14h MLT 頃までである。このオーロラの粒子源については、boundary plasma sheet 粒子である可能性が考えられるが、夜側の boundary plasma sheet 粒子に比べるとかなりエネルギーが低いため、粒子源を決定するには更に解析を進める必要がある。午後側の観測が可能なニーオルソンや中山基地のデータには、静穏時に弱いバンド状オーロラが見られるが、このオーロラも 16h MLT 以降になると殆ど見られなくなる。静穏時のオーロラ出現特性に、このような午後側のオーロラと夜側からのオーロラの出現までの間にオーロラがほとんど見られない時間帯が存在する。このオーロラがほとんど見られない時間帯の存在は、昼側と夜側とのオーバル帯が不連続である可能性を示唆しているものと考えられる。

一方、擾乱時における昼側オーロラについてみると、朝方と夕方には明るく活動的なディスクリートオーロラが観測されるが、このオーロラはサブストームの回復期に夜側から伝播してきたオーロラと思われる。このオーロラが観測される緯度は 75° MLAT 付近である。また、昼に近づくにつれ活発なコロナ状オーロラが見られるようになる。出現緯度は 75° MLAT 付近でニーオルソンの天頂付近でよく観測される。擾乱時のコロナ状オーロラは 13h-14h MLT 頃に消滅し、それ以後明るいバンド状オーロラが出現する。この明るいバンド状オーロラは、高緯度または低緯度方向に周期的(100-200 sec)に移動しては消える運動を繰り返す場合がある。このような周期運動は磁気圏境界域での波動現象が関係しているのではないかと考えて、現在磁気圏境界域での MHD(magnetohydrodynamics)波動とオーロラとの比較を試みているが、まだ典型的な同時観測データを得るまでに至っていない。このバンド状オーロラは 16h MLT 頃に消え、以後夜側からの明るいオーロラが出現する。このように擾乱時には、午後側と夜側のオーバル帯の不連続性は静穏時に比べると顕著に見られなくなることがある。なお、これまで述べてきたオーロラ形態とは別に、地磁気緯度 80.2° MLAT のウペルナビークでは、真昼近辺で出現時間の短い、輝度の非常に弱い、バンド状オーロラとは呼べないような糸状またはフィラメント状のオーロラが見られることがある。

以上のことから、昼側領域にはコロナ状オーロラとバンド/アーク状オーロラの二つの特徴的なオーロラ形態が見られるが、バンド/アーク状オーロラはさらに細かく見ると、出現時間やその形態および輝度などの相違から三種類に分離できる。すなわち、朝方または夕方側の $70-75^{\circ}$ MLAT 付近に卓越するアーク状オーロラ、午後側に卓越し

周期的な出現を繰り返す明るいバンド状オーロラ、そして真昼近傍からやや午後側へかけて 80° MLAT 以上の高緯度で見られる形や明るさの希薄な出現時間の短い糸状の様相をしたオーロラ形態である。これらのオーロラ形態の違いはその粒子源の相違を反映しているのではないと思われる。オーロラ形態と出現領域に対応する粒子源の推定を、Newell and Meng(1992)が示した昼側領域の平均的な入射粒子パターンの模倣図(図3-28)などに対応づけて推論したが、あまり良く判らない。さらに詳細な議論をするためにオーロラ形態と粒子源の対応関係について第IV章で調べる。

3.3.4. 結果のまとめ

- ①昼側オーロラの形態は、四つのタイプに分けられる。
 - ・ dayside corona: 狭い領域に ray 構造のオーロラが活動的に出現する。
出現領域は 75° MLAT 前後の午前側に卓越する。
 - ・ weak arc: これまで多くの研究者により報告されてきた sun-aligned arc に対応し、朝方および夕方側の $70-75^\circ$ MLAT 付近に見られる。
 - ・ bright band: 午後側に卓越する明るいバンド状オーロラ。
周期的($100-200$ sec)な出現が見られる。
 - ・ other arc: 昼側の高緯度領域に見られる糸状のオーロラ。
weak arc よりも、形や明るさが希薄で出現時間の短いオーロラ。
- ②四つのオーロラの形態は、粒子源の違いを反映しているものと考えられるが、ここではまだ明確化できない。粒子源を確定するためにオーロラの形態と対応する人工衛星の粒子データとの比較解析が重要である。

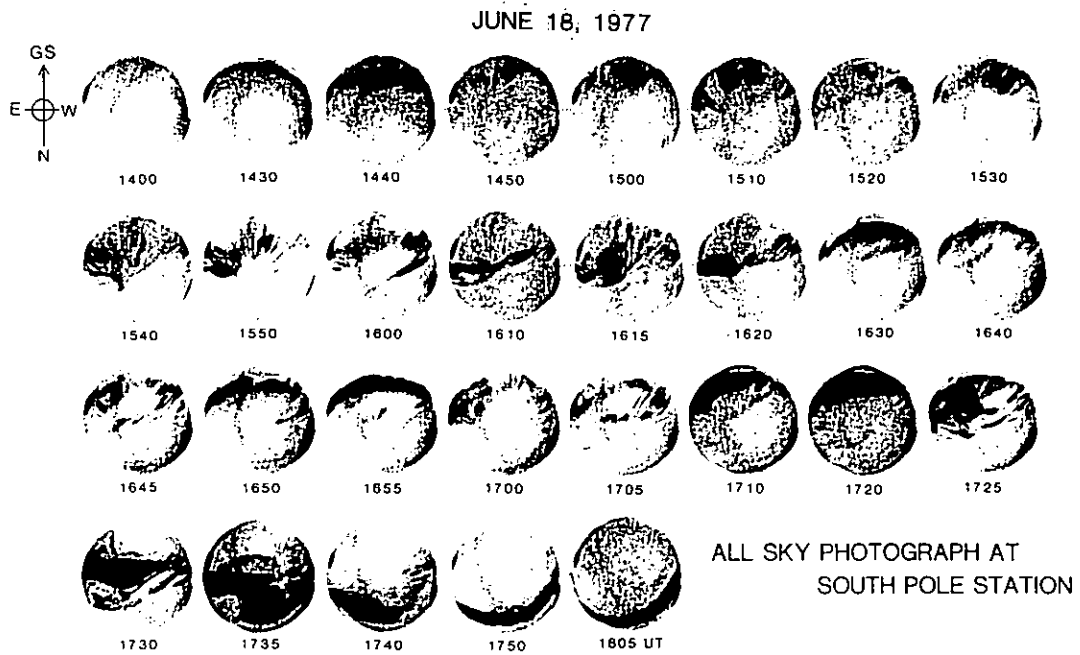


図 3-1. 昼側オーロラの活動例、1977年6月18日

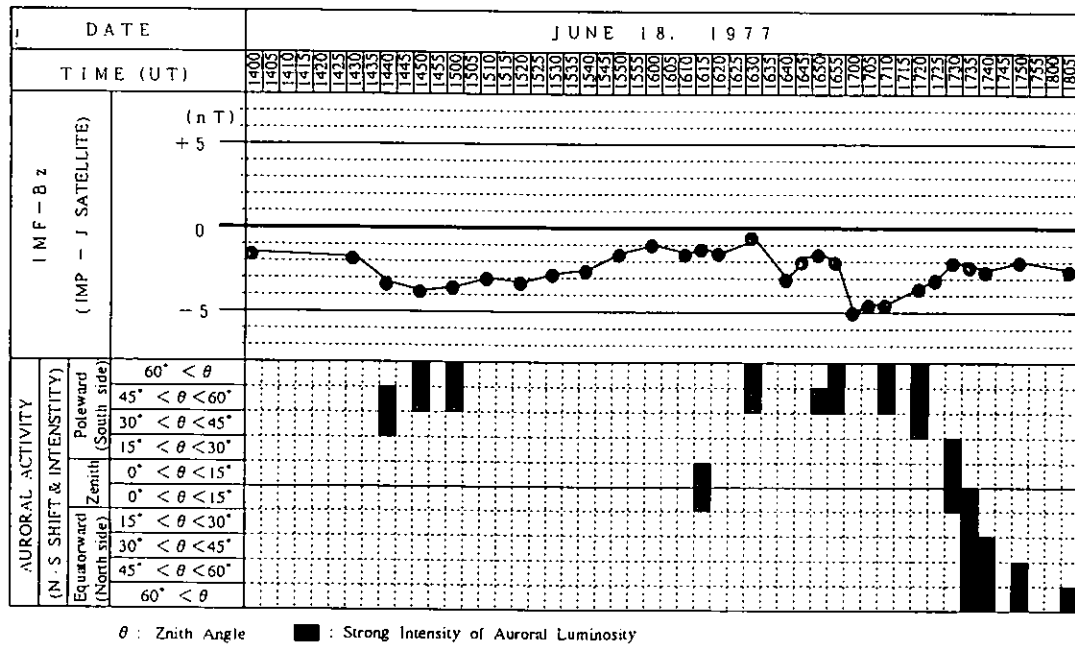


図 3-3. オーロラ活動と惑星間磁場-Bz成分との比較図、1977年6月18日

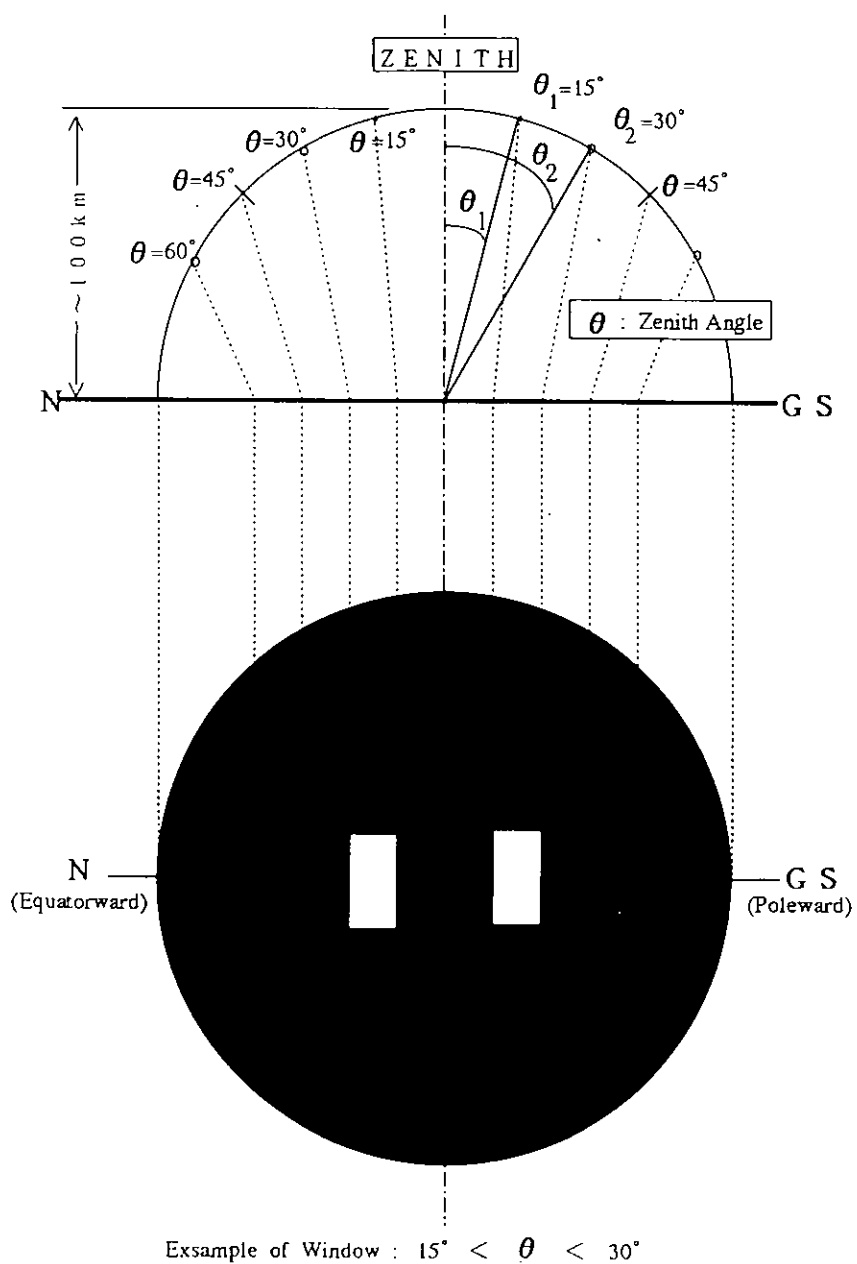


図 3-2. 全天カメラデータ内に見られるオーロラ活動の追跡用スリット盤

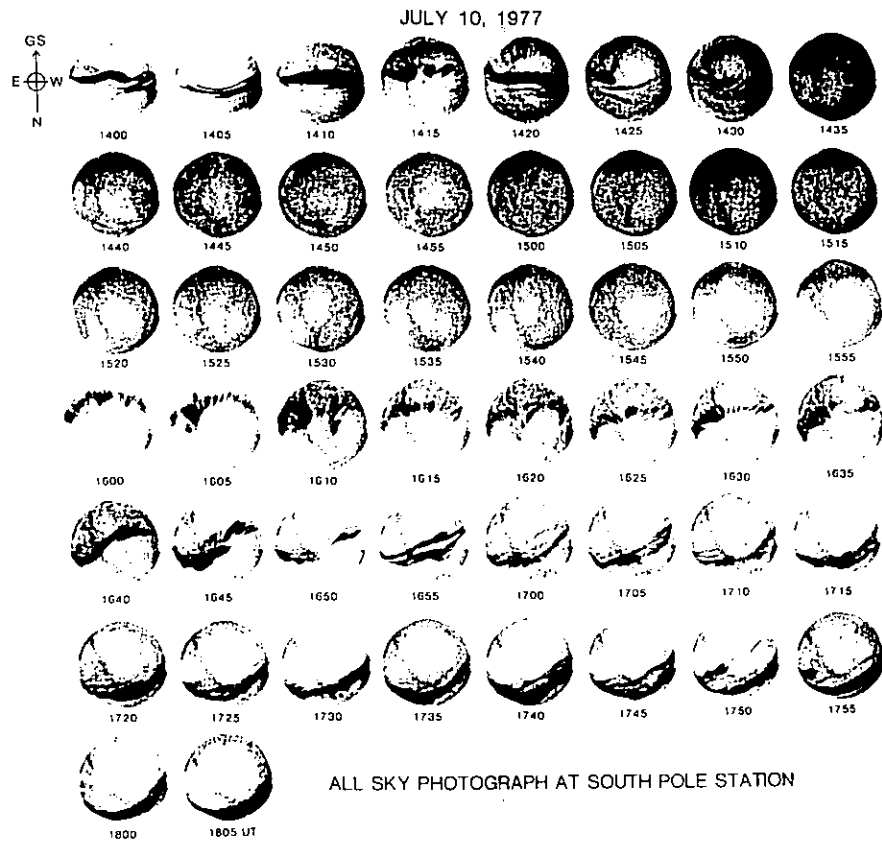


図 3-4. 昼側オーロラの活動例、1977年7月10日

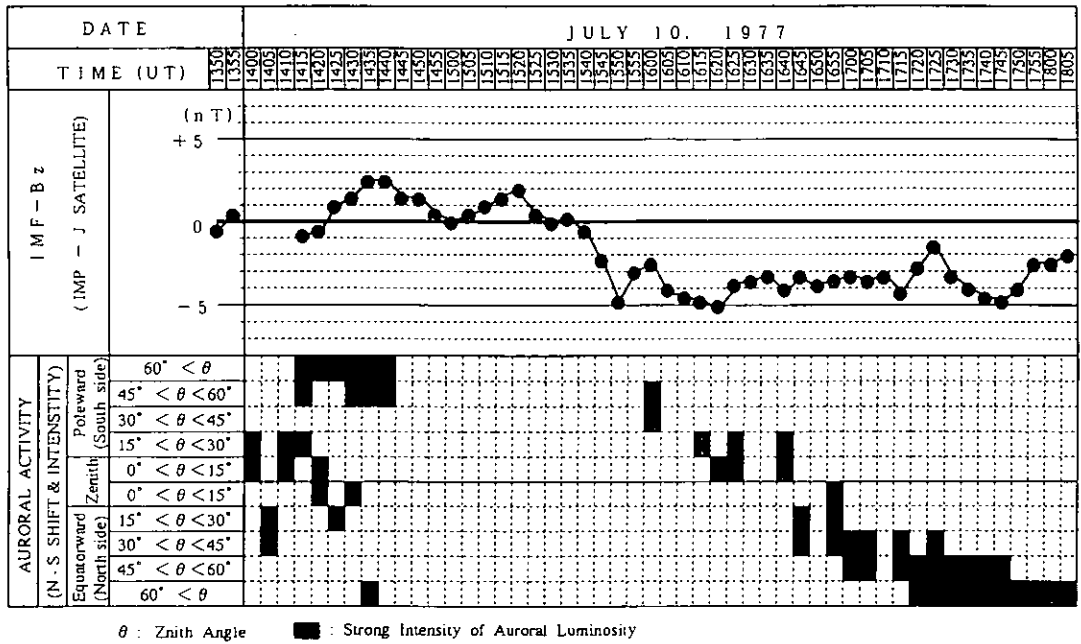


図 3-5. オーロラ活動と惑星間磁場-Bz成分との比較図、1977年7月10日

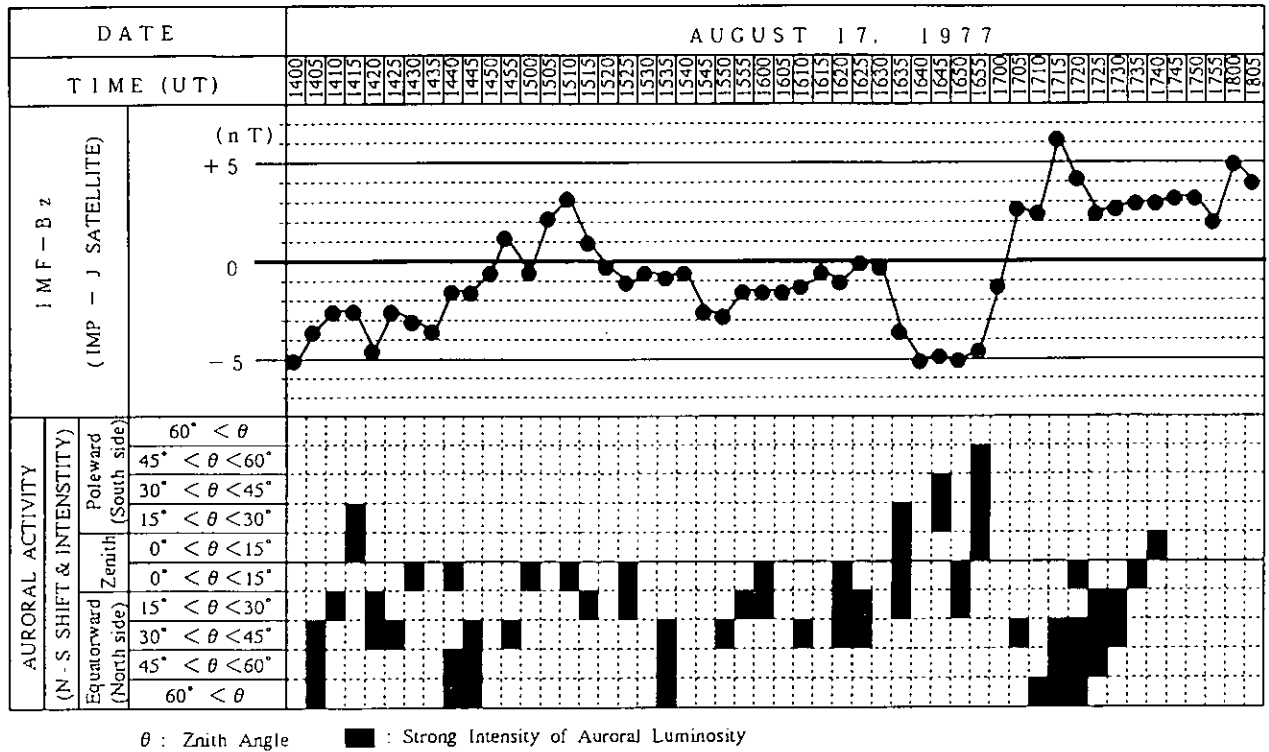


図 3-6. オーロラ活動と惑星間磁場-B_z成分との比較図、1977年8月17日

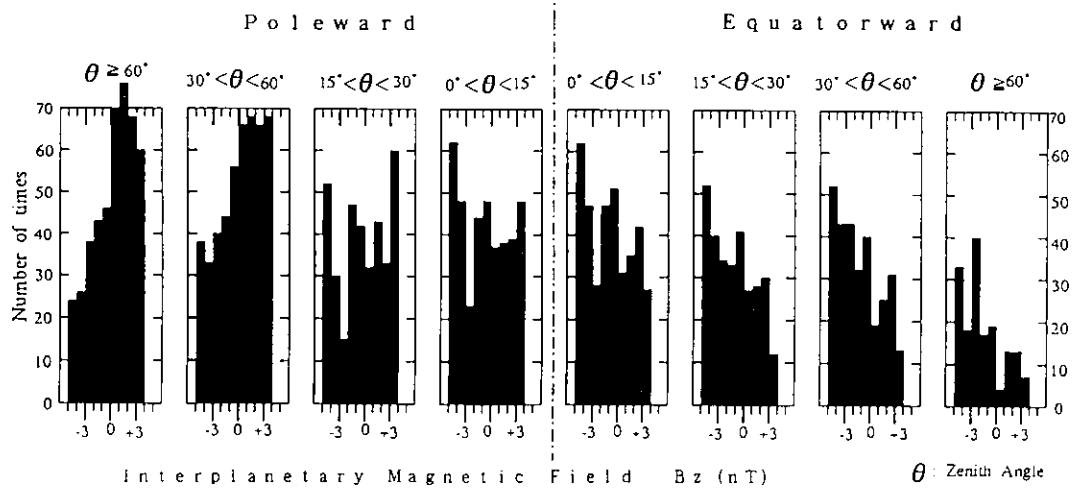


図 3-7. 惑星間磁場-Bz 成分値と昼側オーロラの出現場所の頻度分布

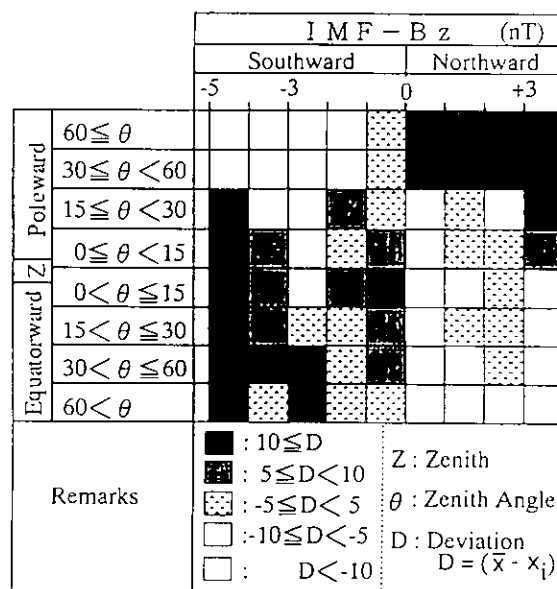


図 3-8. 惑星間磁場-Bz 変動と昼側オーロラが出現する領域の関係

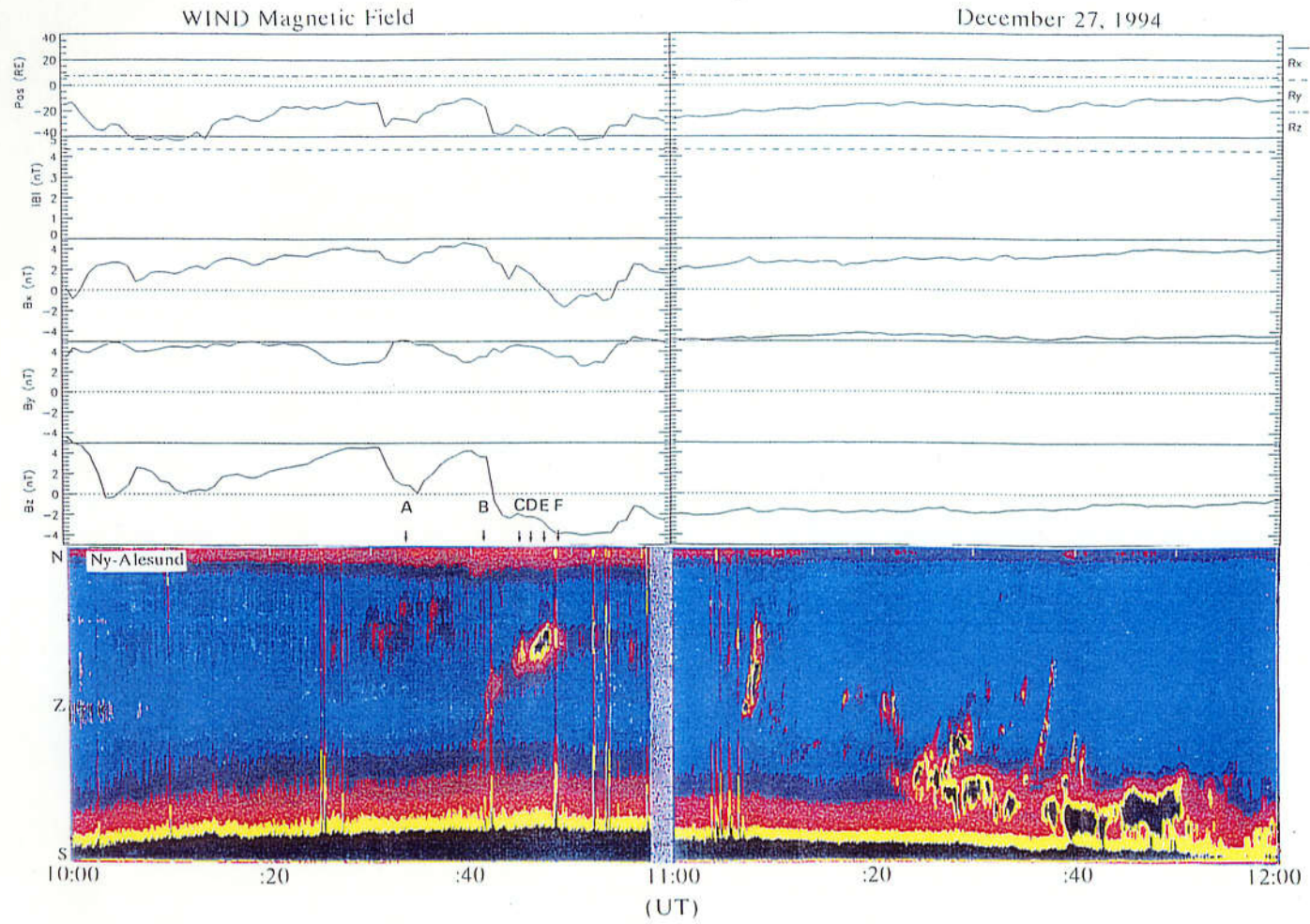
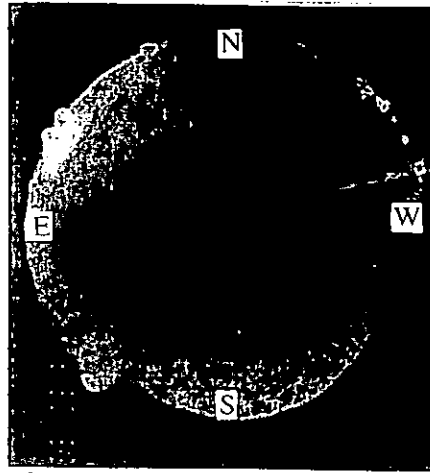
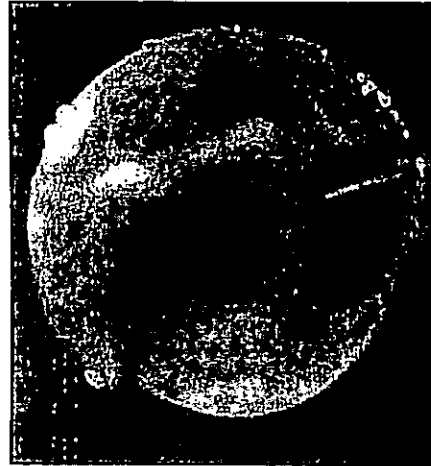


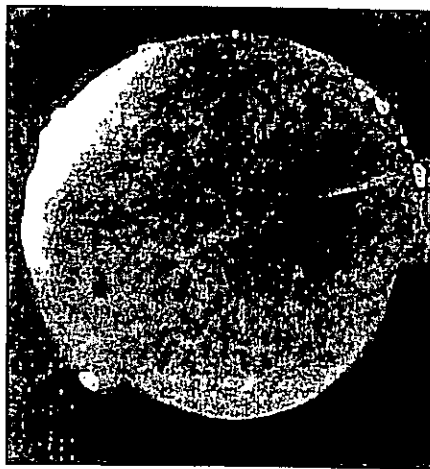
図 3-9. 惑星間磁場変動とニーオルソンの昼側オーロラ現象の比較図



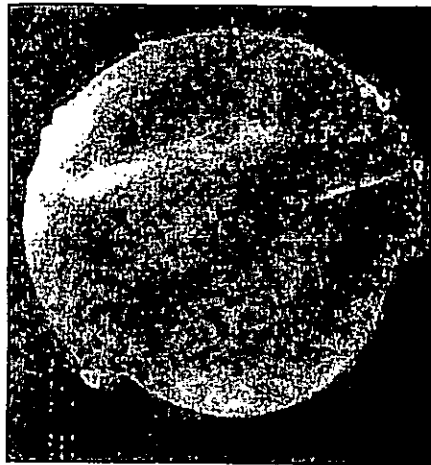
A 10h33m30s



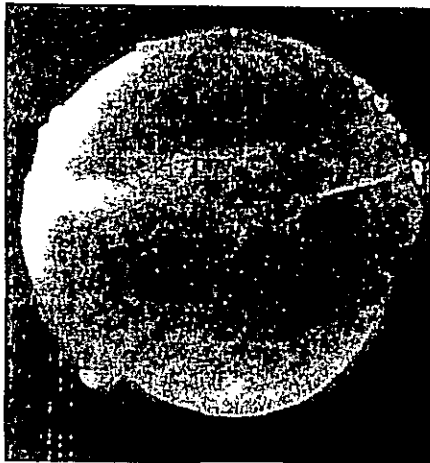
D 10h46m10s



B 10h41m30s



E 10h47m01s

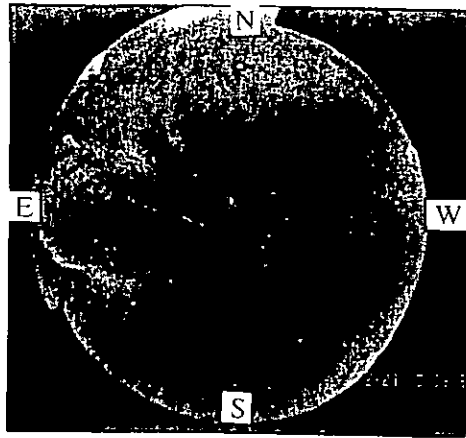


C 10h44m50s

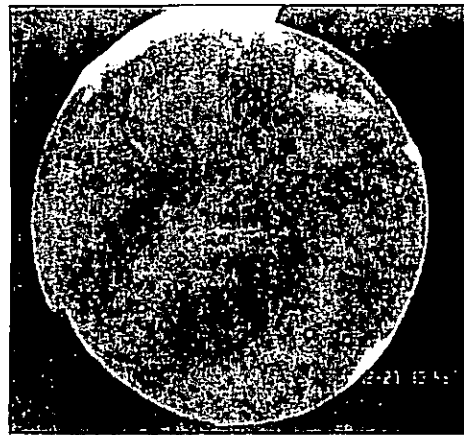


F 10h48m33s

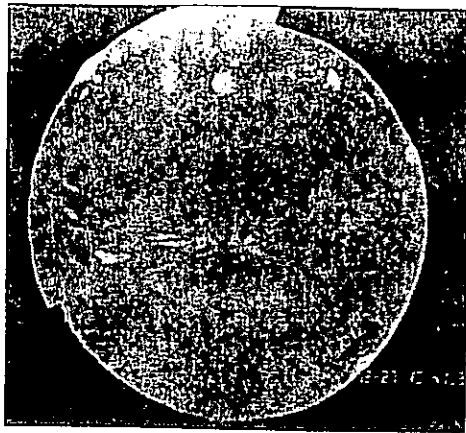
図 3-10. ニーオルソンで観測された午後側のオーロラ現象
(1994年12月27日, 1330-1350 MLT)



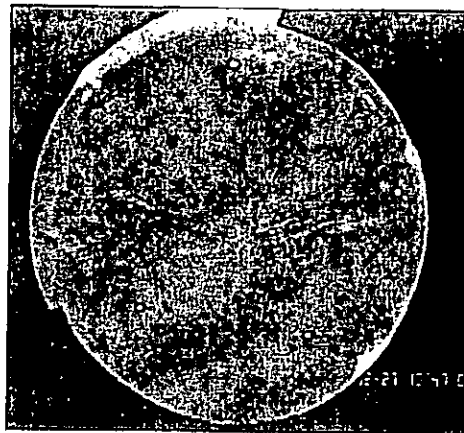
10h33m30s



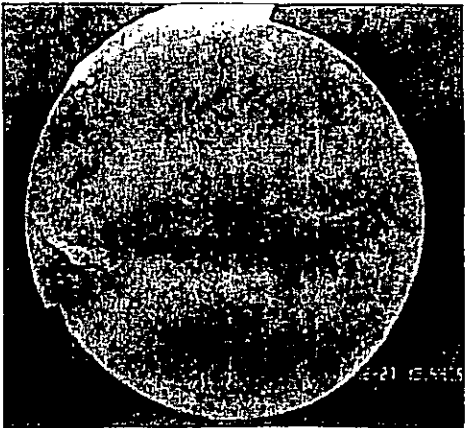
10h46m10s



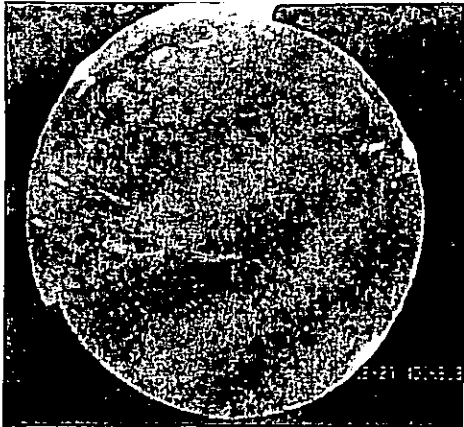
10h41m30s



10h47m01s



10h44m50s



10h48m33s

図 3-11. ゴッドハフンで観測された午前側のオーロラ現象
(1994年12月27日, 0830-0850 MLT)

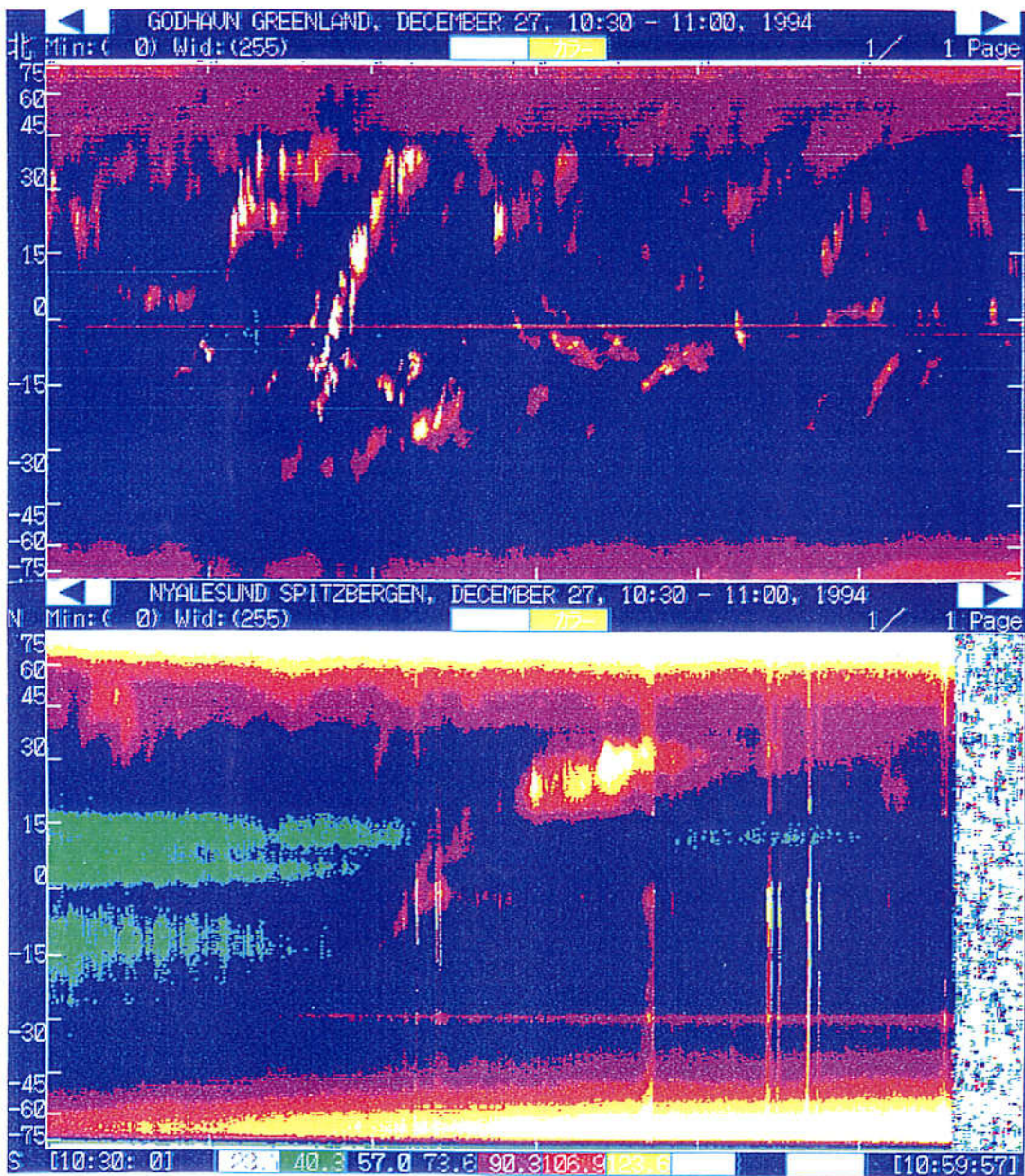


図 3-12. 真昼を挟んだ午前側オーロラ(ゴッドハフン/上部パネル)と午後側オーロラ(ニーオルソン/下部パネル)の比較図

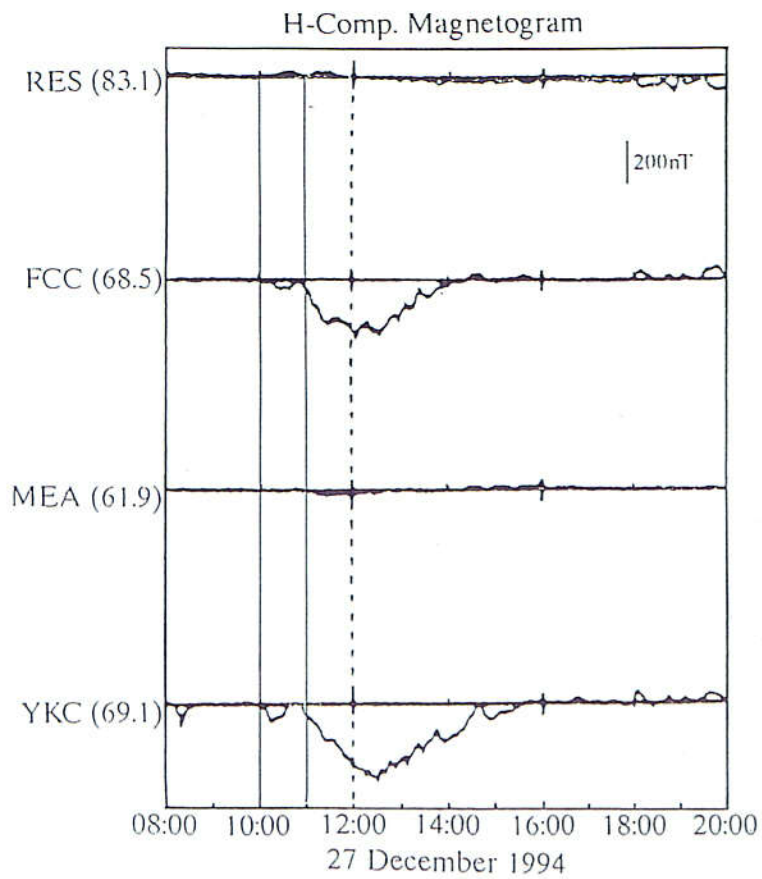


図 3-13. 1994 年 12 月 27 日の夜中側で観測された地上地磁気 H 成分の変動データ

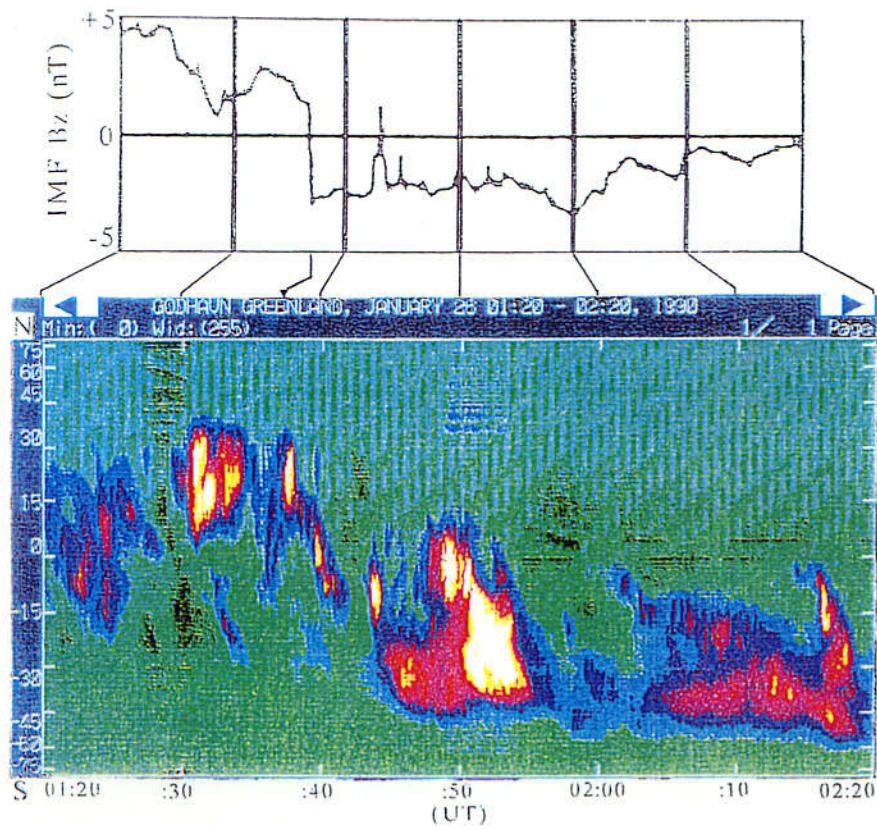


図 3-14. IMF Bz 成分の変動とゴッドハフンで見たオーロラの南北方向の動き (1990 年 1 月 26 日 0120-0220 UT)

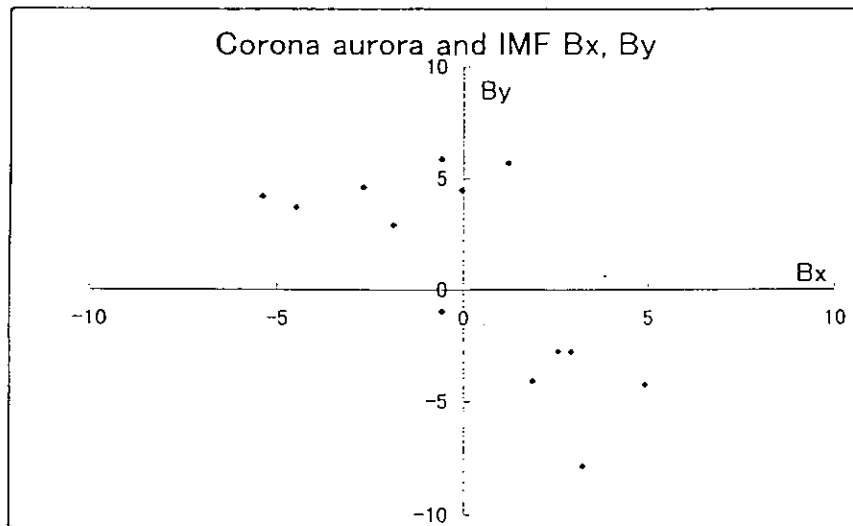


図 3-15. コロナ状オーロラの出現と IMF-Bx, By の関係

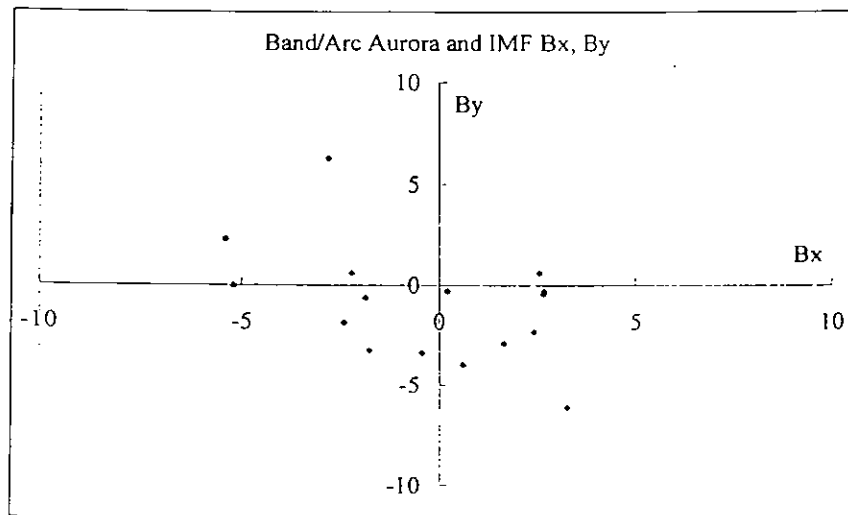


図 3-16. バンド/アーク状オーロラの出現と IMF-Bx, By の関係

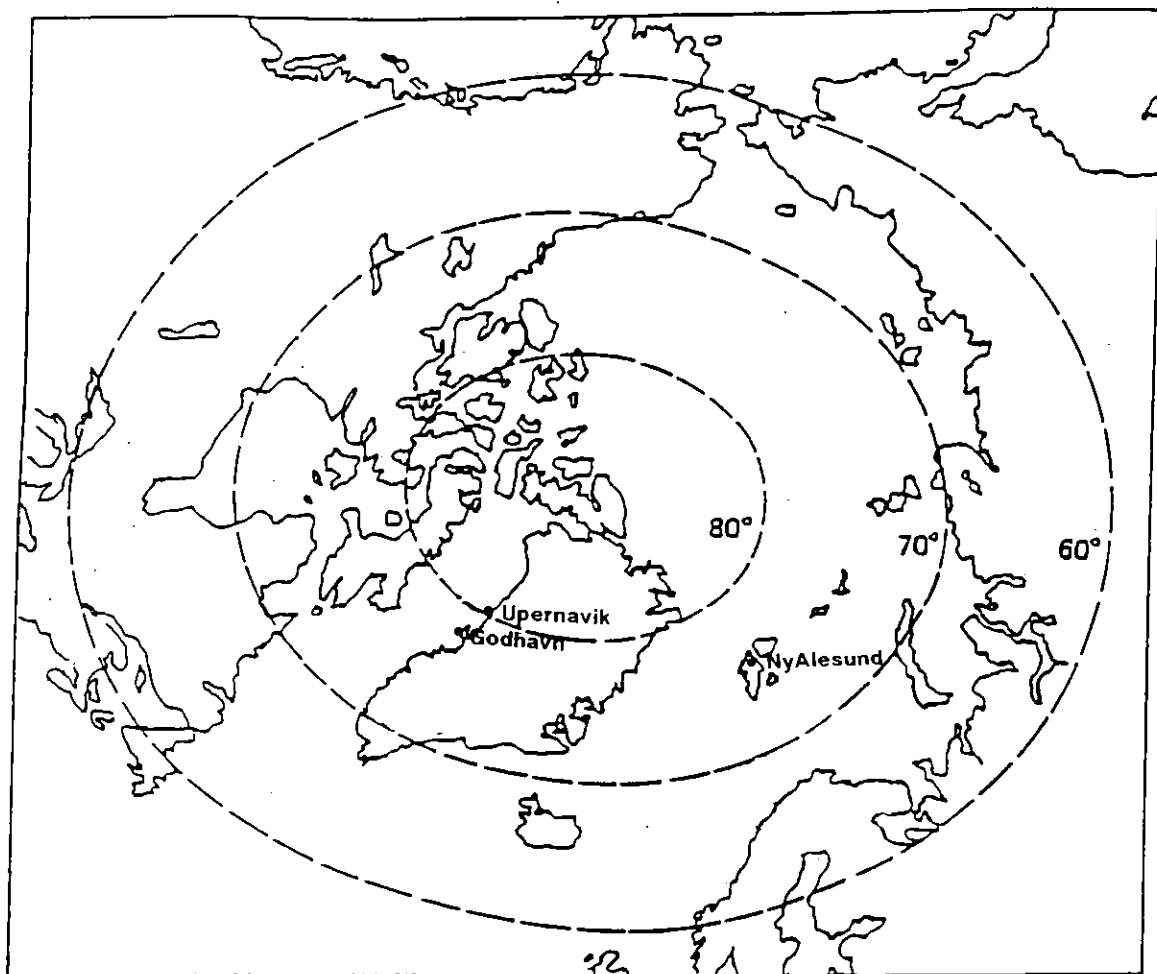


図 3-17. 北極域の観測場所の位置関係

January 10, 1994, Quiet Period

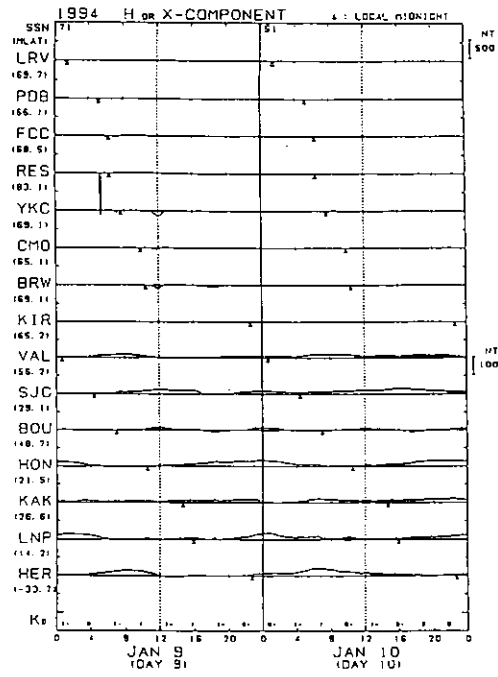


図 3-18. 地磁気活動の静穏時イベント例 (1994 年 1 月 10 日)

Quiet Period (January 10, 1994)

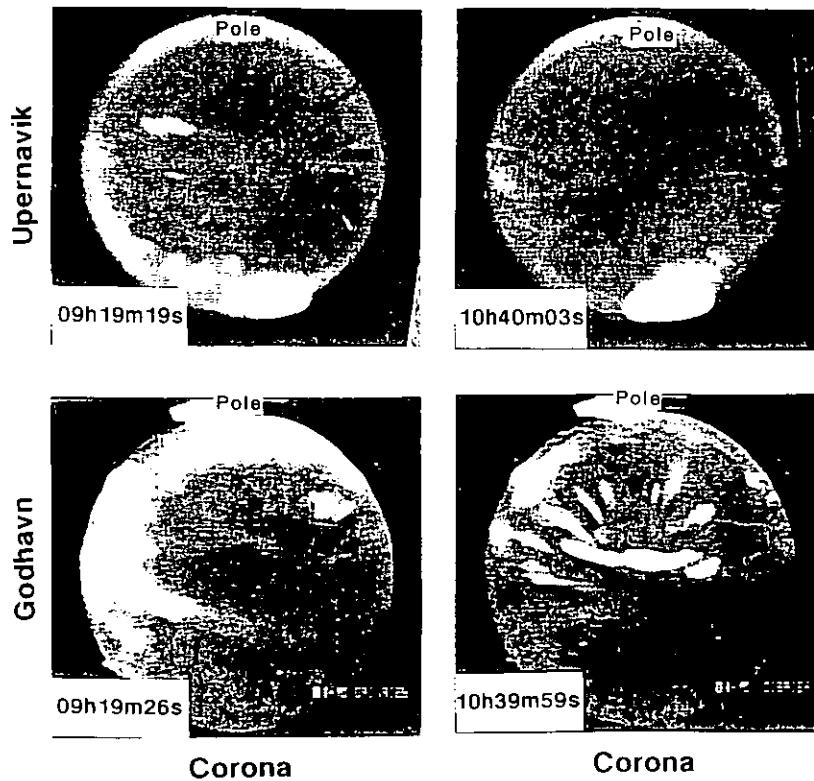


図 3-19. 静穏時の昼側オーロラの現象例 (上部パネルはウペルナビーク、下部パネルはゴッドハフンの全天 TV 画像データ)

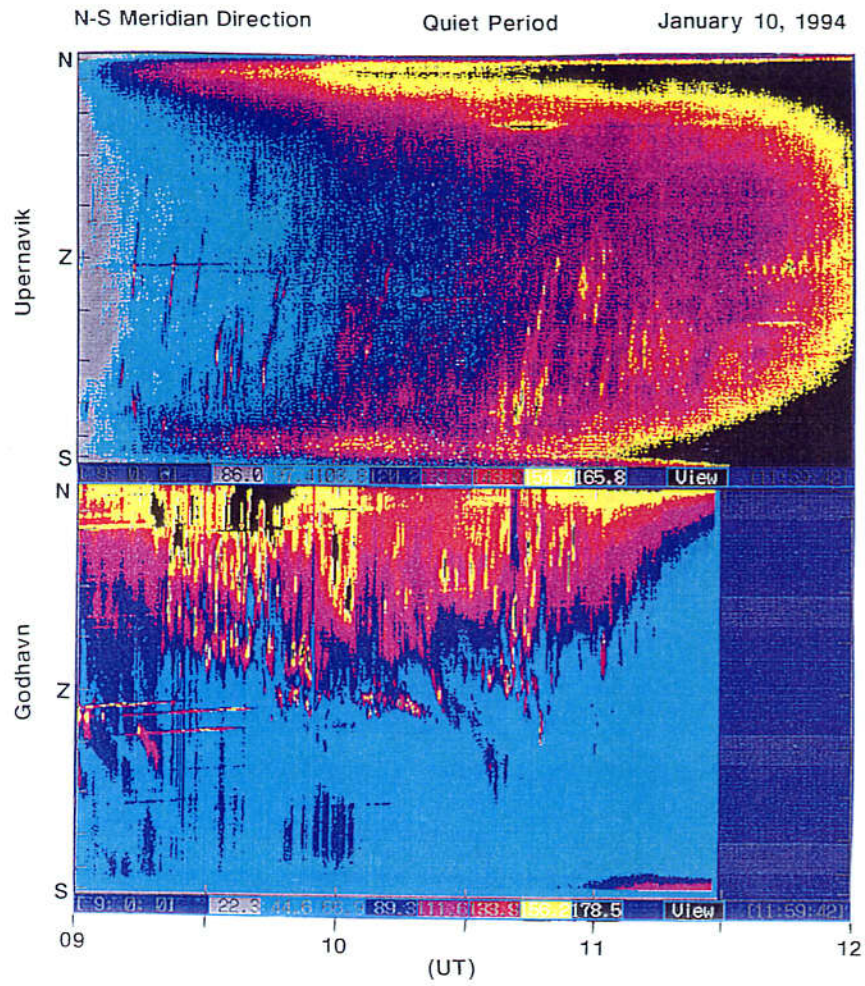


図 3-20. 静穏時の昼側オーロラの南北方向の時間空間解析図
 (1994年1月10日, 09-12 UT(07-10 MLT);
 上部パネルはウペルナビーク、
 下部パネルはゴッドハフン/グリーンランド)

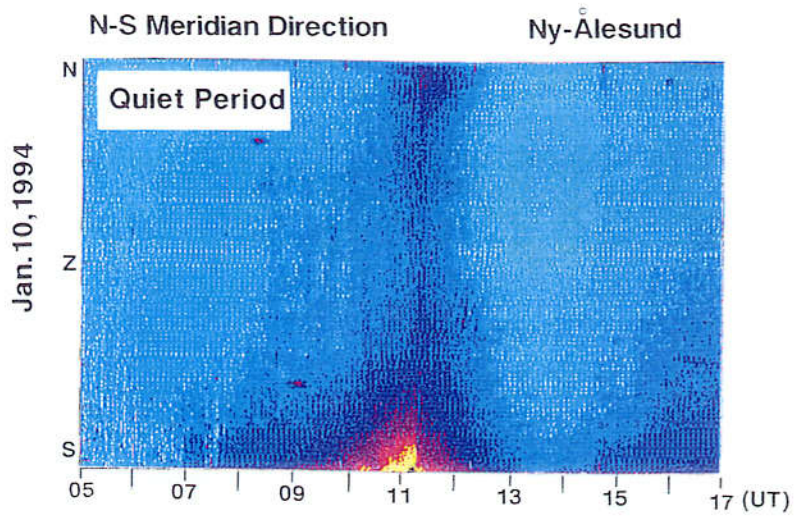


図 3-21. 静穏時の昼側オーロラの南北方向の時間空間解析図
 (1994年1月10日, 05-17 UT(08-20 MLT);
 ニーオルソン/スピッツベルゲン)

January 12, 1994, Disturbed Period

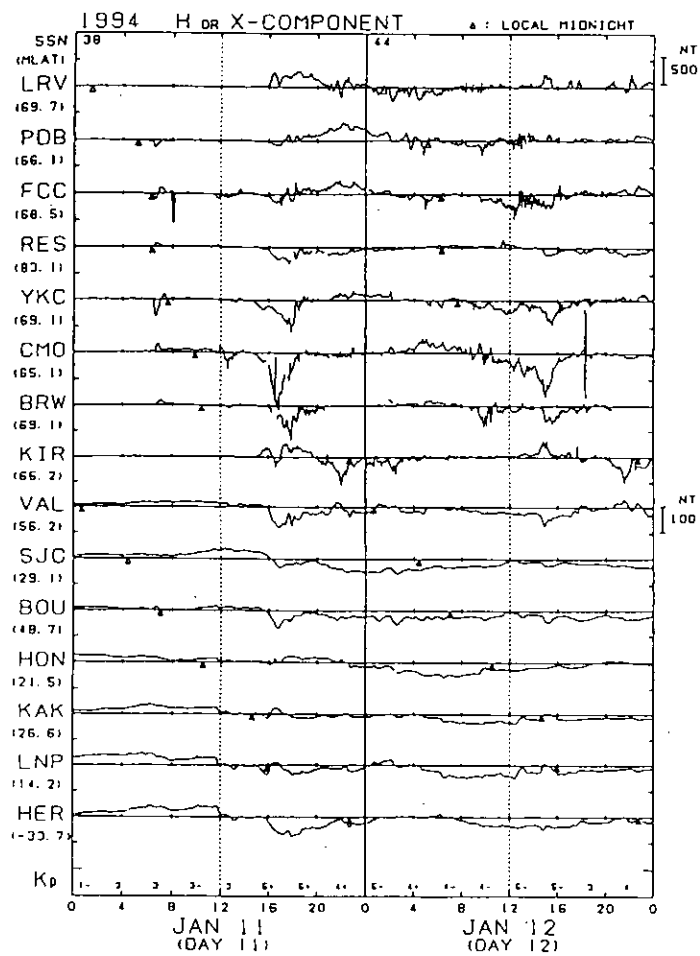


図 3-22. 地磁気活動の擾乱時イベント例 (1994 年 1 月 12 日)

Disturbed Period (January 12, 1994)

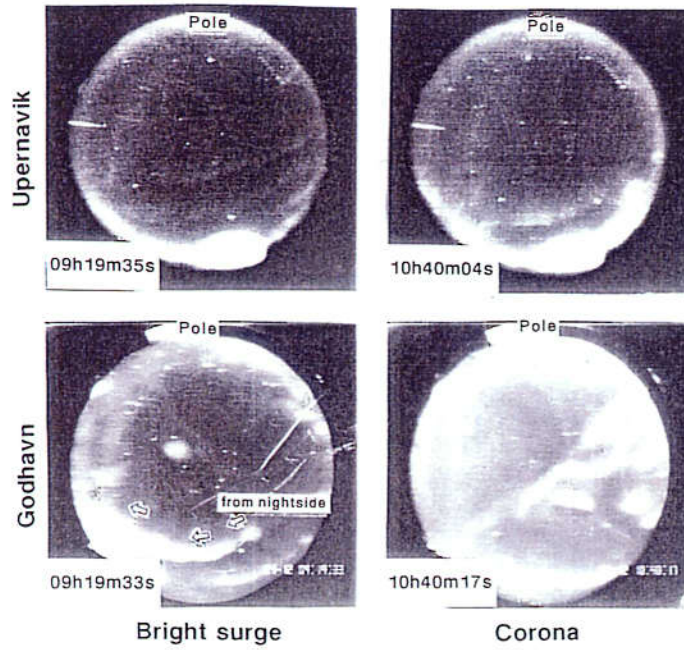


図 3-23. 擾乱時の昼側オーロラの現象例 (上部パネルはウベルナビーク、下部パネルはゴッドハフンの全天 TV 画像データ)

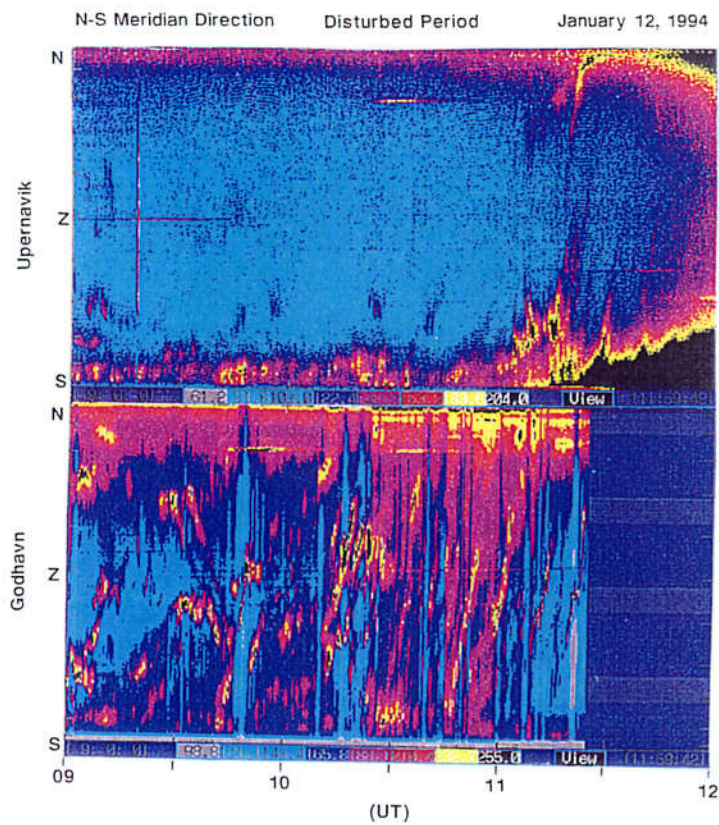


図 3-24. 擾乱時の昼側オーロラの南北方向の時間空間解析図 (1994 年 1 月 12 日, 09-12 UT(07-10 MLT); 上部パネルはウベルナビーク、下部パネルはゴッドハフン/グリーンランド)

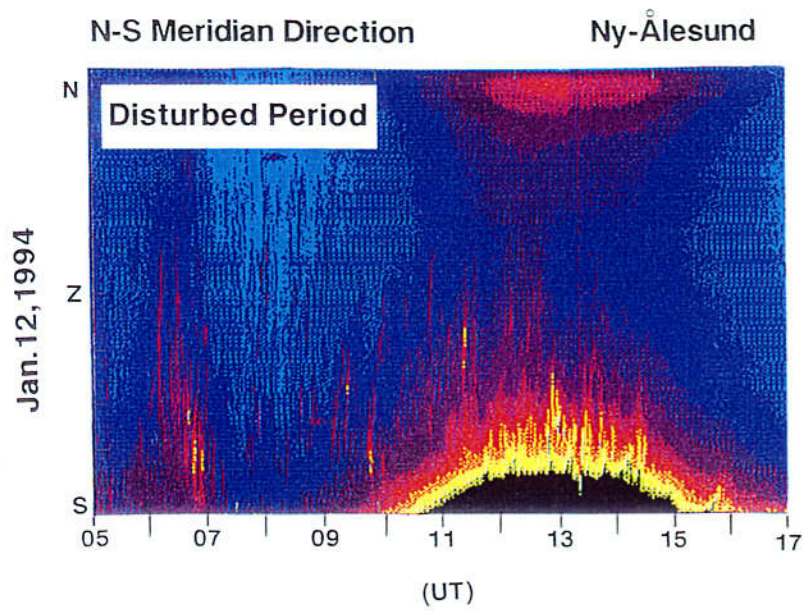


図 3-25. 擾乱時の昼側オーロラの南北方向の時間空間解析図
(1994年1月12日, 05-17 UT(08-20 MLT);
ニーオルソン/スピッツベルゲン)

Disturbed Period (January 12, 1994)

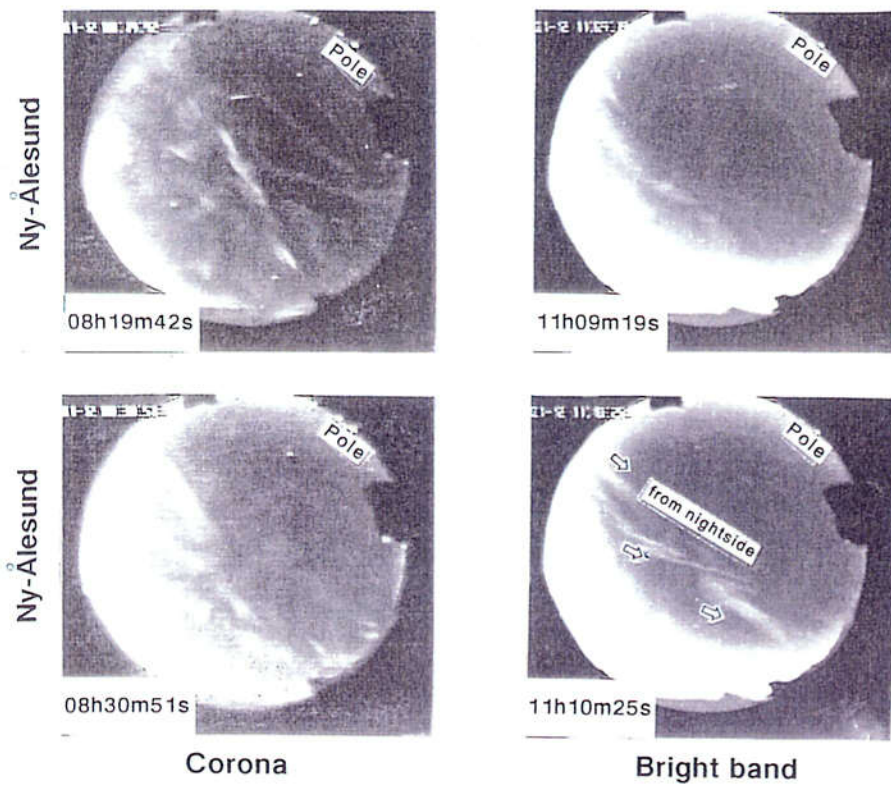


図 3-26. ニーオルソンで観測された擾乱時の昼側オーロラ
(全天TVカメラ画像データ)

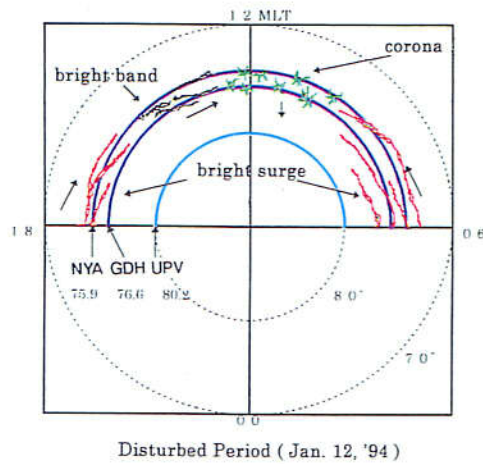
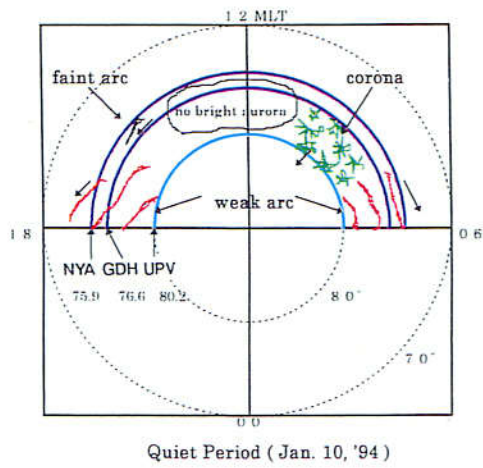


図 3-27. 昼側オーロラの形態別の出現領域の全体像 (上部パネルは静穏時、下部パネルは擾乱時を示す)

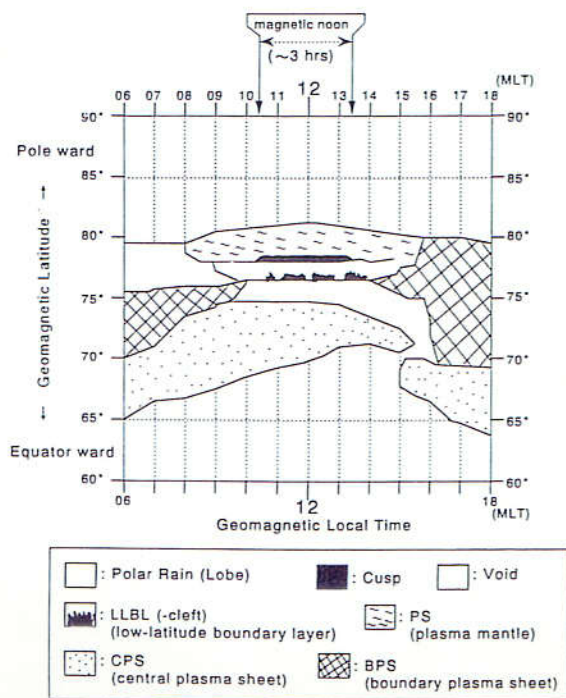


図 3-28. 昼側領域の平均的な入射粒子パターン (Newell and Meng, 1992 の模倣図)

[IV] 昼側オーロラと入射粒子

昼側に入射する粒子について、これまで人工衛星データを用いて何人かの研究者が解析を行っている(Crasnier et al., 1983; Murphree et al., 1990; Newell and Meng, 1992; Elphinstone et al., 1992; Burke et al., 1993; Maynard et al., 1998)。Newell and Meng(1992)は、DMSP衛星の長期間の粒子データをもとに昼側領域の平均的な入射粒子パターンを示している。それによると、09h-15h MLT 付近の 76° - 78° MLAT には電子温度が 70 eV から 100 eV 程度の LLBL 粒子が入射している。また、11h-15h MLT の 79° - 80° MLAT の狭い領域にはカスプ粒子が降下しており、さらに、09h-15h MLT の 78° - 81° MLAT にかけてはマグネトシース中の粒子よりややエネルギーの低いマントル粒子が観測されている。これに対して、夜側プラズマシートに粒子源をもつ BPS 粒子(boundary plasma sheet)は 11h-14h MLT 付近には観測されず、朝方(70° - 75° MLAT)および夕方側(70° - 80° MLAT)の領域に見られる。彼等の結果によると午前と午後の入射粒子パターンは対称的で、真昼を挟んだ午前側と午後側に特に差異は見られない。他方、Maynard et al. (1998)の結果によると、LLBL 粒子が朝側と夕方側の限られた領域にほぼ対称的に観測されるのに対して、BPS 粒子は午前側では 83° MLAT 付近まで、午後側では 80° MLAT 付近まで非対称的に観測される。すなわち、Maynard et al. (1998)のこの結果は、BPS 粒子が午前側の高緯度領域に良く観測されることを示している。また、入射粒子と午前側のオーロラ現象との関係について、Burke et al. (1993)はノーオルソンの高緯度側に 08h30m MLT 頃に出現するバンド状の red-line auroral emission が BPS 粒子に関係していることを報告している。著者は、III 章までに午前側と午後側で異なるオーロラが見られることの指摘や、昼側オーロラの全体像を示してきたが、それらに対する粒子源の検討が不十分である。

本節では、それらに対応するオーロラ粒子の起源がどこにあるのかを明らかにするために、地上から観測されたオーロラと同時に観測された人工衛星の粒子データとを比較解析する。

4.1. 地上オーロラ画像データと人工衛星粒子データとの比較

午前側の静穏時によく出現するオーロラは、弱いアーク状オーロラ(weak arc)とコロナ状オーロラ(corona)であることは既に示した。図 4-1 は、DMSP 衛星による粒子データの解析結果とゴットハブンで観測されたオーロラ画像を比較して示してある。図の左上パネルはコロナ状オーロラの入射電子スペクトル、左下はその時のオーロラ画像である。オーロラ画像上に DMSP 衛星の軌道を図示してあるが、ゴットハブンの昼側の低緯度側より高緯度側に向かって衛星が飛行したことを示している。

衛星軌道上に印した・点は、解析した入射粒子データの観測時刻の衛星位置である。入射粒子の観測データには、コロナ状オーロラに対応してスパイク的な降り込み現象が

見られる。ここではこのスパイク的な入射粒子群の中の顕著なスペクトルを選んで解析した。コロナ状オーロラの入射電子スペクトルは、11h27m33s UT に得られたもので、入射電子の最大エネルギーは 646 eV 付近に見られ、その時のフラックスは $10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ である。入射粒子をマックスウェル分布と仮定すると、この時の電子温度は 150 eV となる。他方、右上パネルは弱いアーク状オーロラの入射電子スペクトル、右下はその時のオーロラ画像である。10h56m25s UT に得られた入射電子スペクトルを見ると、最大エネルギーは数 10 eV 付近に見られ、その時のフラックスは $10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ 程度で、この時の電子温度は 80 eV である。このことは、弱いアーク状オーロラとコロナ状オーロラで、入射電子の分布やフラックスが顕著に異なっていることを示唆する。図 4-1 に示したイベント以外の数例について調べた結果を表 4-1 にまとめた。これによると、コロナ状オーロラは、ピークエネルギーは数 100 eV~1 keV で、フラックスは $10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ 程度である。これに対して弱いアーク状オーロラはピークエネルギーは 100 eV 以下で、フラックスは $10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ 程度であることがわかる。

ここでの解析結果から、弱いアーク状オーロラとコロナ状オーロラの粒子起源を推定するために、最近の人工衛星による粒子観測の結果との比較を行った。例えば、HEOS 衛星により観測された粒子データについて、Formisano(1980)は 100 eV 以下の magnetosheath-like(MS)の電子が plasma mantle(PM)の中でよく観測されるのに対して、170 eV から 270 eV の電子は LLBL 中で観測されることを報告している。また、Newell and Meng(1992)の人工衛星データを用いた統計結果では、09h-15h MLT 付近の 76° - 78° MLAT に電子温度が 70 eV から 100 eV 程度の LLBL 粒子が入射していることが報告されている。他方、Maynard et al.(1998)は、夜側のプラズマシート起源の 1keV 以上の BPS 粒子が昼側の 80° MLAT 以上に回り込んでいることを報告している。このような結果を踏まえて、弱いアーク状オーロラとコロナ状オーロラの粒子起源を推定する。

弱いアーク状オーロラの粒子起源は、入射電子エネルギーおよびフラックスの特性から PM あるいは LLBL の可能性が考えられる。著者のグリーンランドにおける観測によると、弱いアーク状オーロラは朝方および夕方の 75° MLAT のゴッドハブン付近でよく見られ、 80° MLAT のウベルナピークではあまり見られなかった。すなわち、弱いアーク状オーロラの出現領域が 75° MLAT 付近であることおよびピークエネルギーが数 10 eV などの観測事実より、その起源は PM にあると考える方が適当であると思われる。

これに対して、コロナ状オーロラの粒子起源は、LLBL あるいは BPS のどちらかに起源があると考えられる。前述の Maynard et al.(1998)の報告によれば、1keV 以上の BPS 粒子が高緯度領域によく観測されることが示され、これが事実ならばコロナ状オーロラは夜側から午前側に回り込んだ BPS 粒子が励起している可能性もある。し

かし、本論で解析したコロナ状オーロラの入射粒子のピークエネルギーが数 100 eV である観測事実や Formisano(1980)が報告する~270 eV 程度の入射粒子が LLBL 中で観測されることなどから、ここではコロナ状オーロラの粒子起源は LLBL にあると考える方が適当であると思われる。

午後側の入射粒子の特徴を調べるために、スバルバル島のニーオルソンで観測したオーロラと DMSP 衛星により測定された粒子データとの比較を行った。ニーオルソンは、75.9° MLAT で、MLT は UT + 3h である。図 4-2 は、1994 年 12 月 25 日、11h11m から 11h16m UT (14h11m-14h16m MLT) にニーオルソンで観測されたオーロラ画像で、この時ニーオルソンは午後側に位置している。汎世界的な地磁気活動データを見ると $K_p = 3-$ (09h-12h UT) で、この時、夜側に位置するイエローナイフ (Yellowknife) では、11h-12h UT にかけて 200nT 程度の顕著な地磁気変動が観測されており、夜側のオーロラ帯でやや強い擾乱が起きていることが示唆される。午後側のオーロラは、図 4-2 の例のように明るいバンド状オーロラで地磁気活動の活発な時によく観測される。このデータによると 11h11m UT に明るいバンド状オーロラが東側(夜側)に出現し、次第に西側へ発達していく。そして、11h13m UT には、新たに明るいオーロラが東側に出現して天頂付近に向かって延びてくる。さらに、11h15m UT 頃に再びバンド状オーロラが東側に出現し、西に向かって発達していく。このイベントでは、バンド状オーロラがいずれも夕方側(東側)から昼側(西側)に向かって発達している。

この時、DMSP/F11 衛星がニーオルソン上空付近を通過していたので、オーロラと入射粒子との比較を行った。図 4-3 は 11h13m03s UT にニーオルソンで得られたオーロラ画像データであるが、この画像データ上に DMSP/F11 衛星の軌跡を実線で重ねて示してある。これによると、衛星は 11h13n05s UT の少し前にバンド状オーロラの上を通過して高緯度側へ移動している。このとき衛星で観測された粒子データを図 4-4 に示す。図の上のパネルに、人工衛星の軌跡と通過時間を示すが、11h12m から 11h14m UT にかけてニーオルソンの近傍を衛星が通過している。下のパネルは、観測された電子とイオンの粒子データを示してある。これによると 11h12m から 11h13m UT にスパイク的な電子の入射が見られ、そのピークエネルギーは 1 keV 程度、フラックスは $10^7/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{sr}$ に達している。他方、イオンの入射量はあまり顕著でなく、1 keV 以下に僅かなフラックス ($\text{number flux} < 10^5 \text{ ion}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{sr}$) が見られる程度である。この例の他にも数例の地上と衛星の同時観測データについて調べたが、いずれも午後側のバンド状オーロラに対応して 1 keV 前後の入射電子が見られることがわかった。

バンド状オーロラを励起している電子エネルギーが 1 keV 前後というこの結果は、これまで報告されている LLBL 粒子より、ややエネルギーの高い粒子群であるように思える。著者の観測結果によると、昼側のバンド状オーロラは夜側のオーロラオバールと連続的につながっていないことが多い。この昼側のバンド状オーロラが夜側のオー

オーロラオーバーと連続的につながっていない観測例を図4-5に示す。図4-5には、ニールソンで1994年12月25日に長時間にわたり観測されたオーロラデータが示される。図の上パネルは、00hから19h UTまでのオーロラデータの南北方向の時間空間解析図である。この解析図によると、00h-06h UT (03h-09h MLT)にかけては、朝方のオーロラオーバーが低緯度側(S)から天頂付近に観測されている。その後、06h UTから磁気地方時の真昼近くの09h UTまでオーロラは見えなくなる。真昼過ぎと同時的に再びオーロラが出現し、09h-14h UT (12h-17h MLT)にかけて午後側のバンド状オーロラが卓越してくる。さらに、14h UT以降はほとんどオーロラが観測されなくなるが、18h UT (21h MLT)頃より夜側の明るいサージ状オーロラ(サブストーム時に典型的に見られる伝搬型ディスクリートオーロラ)が観測されるようになる。図の下パネルには、朝・昼・夜の特徴的なオーロラ画像データを示しているが、最も右側に示した18h05m UTに観測された明るいオーロラは、動きが激しく複雑な構造で、パネルの左側に示したバンド状オーロラのゆっくりとした動きと明らかに異なっている。このことより、ここで解析したバンド状オーロラは夜側のオーロラオーバーの西方伝搬型のディスクリートオーロラ(westward traveling surge)が単純に伝播してきたものであるとは考えにくい。もちろん、磁気擾乱が激しい場合には夜側のオーロラが午後側まで伝播してくることはあり得るが、少なくともこのイベントに関しては昼側の特徴的なバンド状オーロラであると考えられる。そこで、このイベントで示したバンド状オーロラの粒子源は、夜側のBPSとは思えないので、本論ではLLBL粒子が何らかの加速を受けて、エネルギーが高くなった結果であると推定する。

4.2. 結果のまとめ

- ①地上のオーロラ画像データでオーロラ形態の違いを同定し、その異なるオーロラ形態に対応する人工衛星の粒子データを調べた。オーロラ形態の違いは入射電子スペクトルに顕著な相異がある。
- ②午前側に出現する弱いアーク状オーロラの入射電子の最大エネルギーは100 eV以下、フラックスは $\sim 10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ である。コロナ状オーロラのそれは数100 eV \sim 1 keV、 $\sim 10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ である。また午後側に見られる明るいバンド状オーロラの入射電子は、コロナ状オーロラを励起している入射エネルギーよりも高く、時には1 keVを越えるピークエネルギー特性をもち、フラックスは $\sim 10^7/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ に達する。
- ③それぞれのオーロラ形態の粒子起源について、最近の人工衛星データを用いた研究結果および形態別のオーロラ出現領域の観測事実などを比較検討した。その結果、ここで示したイベントのうち、弱いアーク状オーロラの起源はmantle粒子、コロナ状オーロラの起源はLLBL粒子、バンド状オーロラはLLBL粒子を起源として何らかの加速を受けた可能性が示唆される。

DMSP/F9 SSJ/4 DATA (ELECTRON)

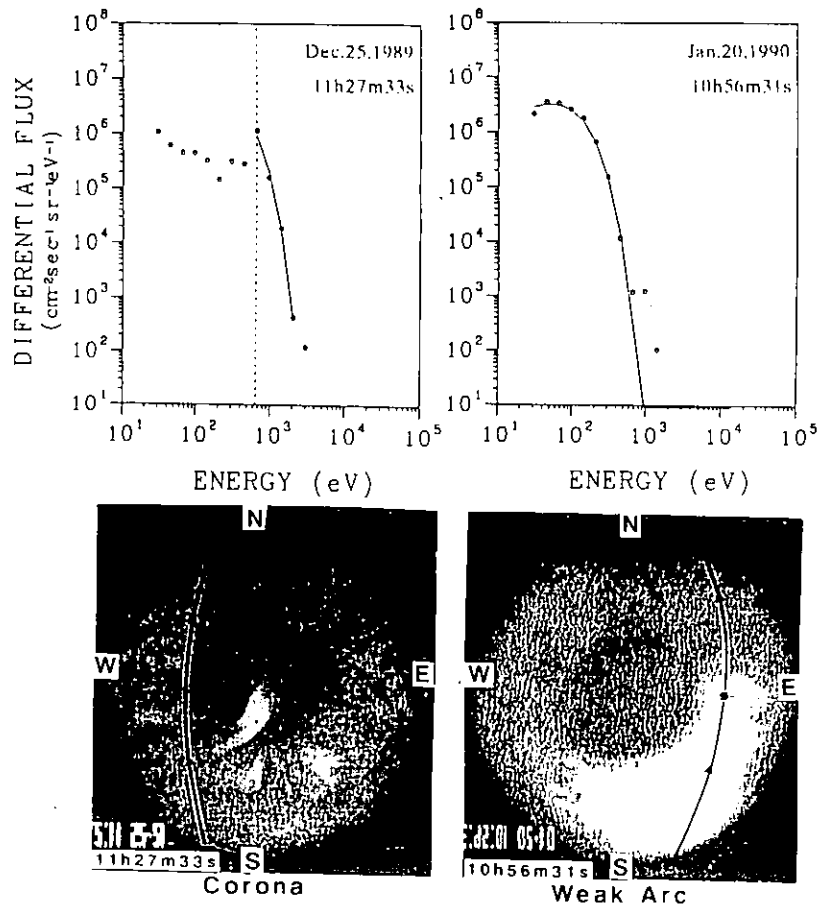


図 4-1. オーロラ画像データと粒子データの比較

Auroral type	Precipitation particles : electron	
	Peak energy	Density
Corona	few hundred eV < E_{peak} < 1 keV	$\sim 10^6$ (electron/cm ² · s · sr · eV)
Weak arc	$E_{\text{peak}} < 100$ eV	$\sim 10^6$ (electron/cm ² · s · sr · eV)

表4-1 昼側オーロラの形態と入射粒子の比較

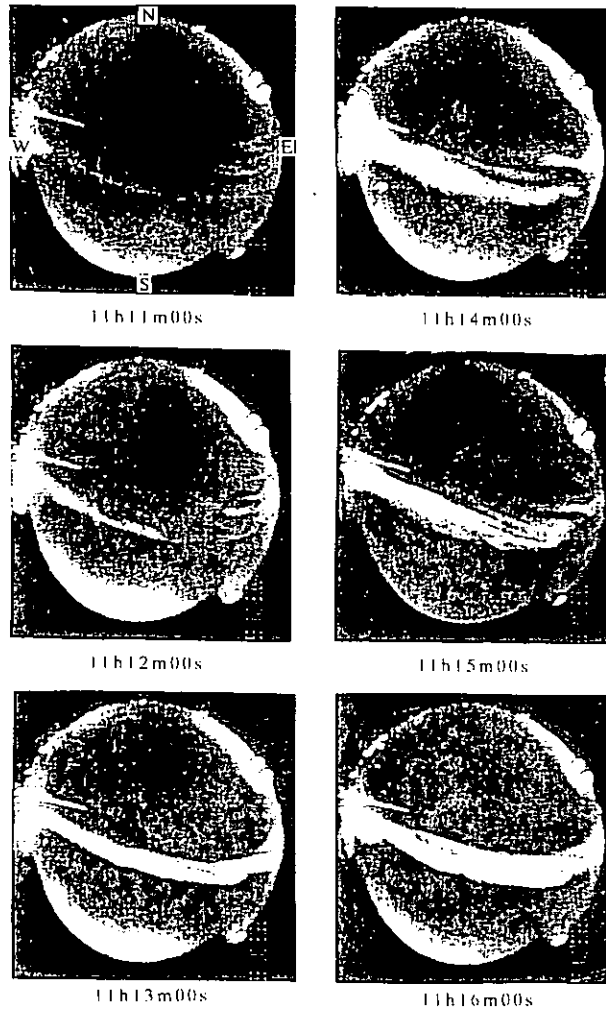


図 4-2. ニーオルソンで観測された午後側のオーロラ現象 (1411-1416 MLT)

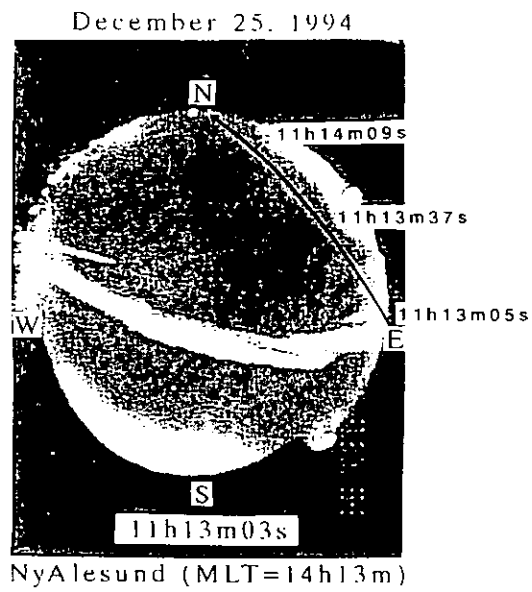


図 4-3. DMSP/F11 衛星の軌道と
ニーオルソンのオーロラ画像データ

December 25, 1994

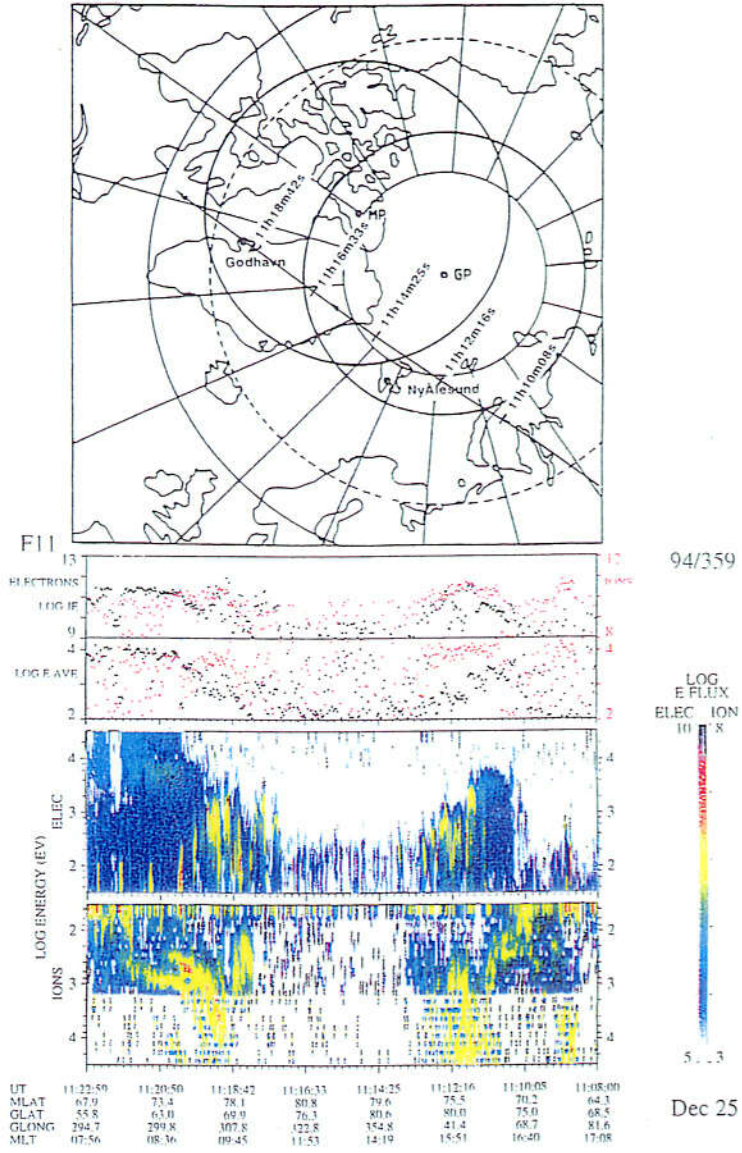


図 4-4. DMSP/F11 衛星で観測された粒子データ

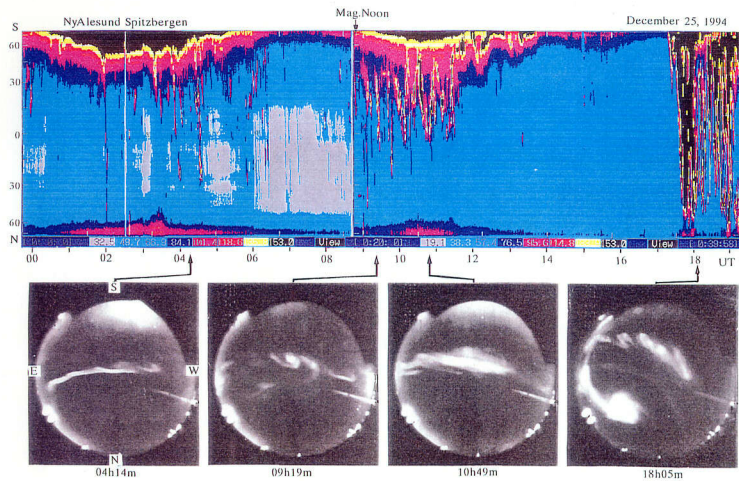


図 4-5. オーロラ画像データの長時間観測例 (03-21h MLT)

[V] 結論

昼側高緯度地域には、磁気圏に特徴的なカスプ/クレフト領域等が存在し、昼側オーロラがこれらの領域と深く関係していると考えられる。このため研究者の関心が近年高まっているが、その全体像が明らかになっていないとは言えない。この理由のひとつとして、昼側オーロラの地上での観測は天候や太陽高度角の条件に制約されるため、長期間、良質のデータを収集することが難しい点があげられる。他方、夜側のオーロラ現象の全体像は、Akasofu(1964), Fukunishi(1975), Oguti(1981)ほか多くの研究者により既にある程度の共通認識が確立している。本論文では、地上の南極点、グリーンランド、スバルパールおよび中山基地で観測されたデータをもとに昼側オーロラ現象について解析を行い、これまでの地上または人工衛星観測データに基づく研究成果との比較検討から昼側オーロラの全体像の解明を試みた。以下、得られた結果と今後の展望を述べる。

(1) 成果

- (a) 昼側オーロラの動形態の特性研究では、形態的な特徴について信頼性の高いオーロラ写真データでオーロラ形態を同定しての定量的な解析を行った。

この点は従来の報告にみられない新しい試みであり、昼側オーロラの形態についての定性的な概念を定量的に明示した。特に、昼側にコロナ状オーロラとバンド/アーク状オーロラの二つの特徴的なオーロラタイプがあることを明らかにした。

IMF-Bz 変動に伴う動的な特性については、オーロラオーバルが昼側でも夜側でも IMF が南向きで拡大し、北向きで縮小することを観測事実として確かめた。昼側オーロラは、IMF が南向きのときには $74\sim 75^\circ$ MLAT より低緯度側に、北向きのときには $74\sim 75^\circ$ MLAT より高緯度側に出現頻度が高く、この傾向は南極域のデータでも北極域のデータでも同傾向である。

- (b) 二つに大別されるオーロラ形態のうち、バンド/アーク状オーロラは擾乱度や出現領域・時間帯などからさらに細分別される。コロナ状オーロラの形態を含めて、昼側オーロラには少なくとも四つのタイプがある。

それらは、

- ① dayside corona: 狭い領域に ray 構造のオーロラが活動的に出現する。
出現領域は 75° MLAT 前後の午前側に卓越する。
- ② weak arc: これまで多くの研究者により報告されてきた sun-aligned arc に対応し、朝方および夕方側の $70\text{-}75^\circ$ MLAT 付近に見られる。
- ③ bright band: 午後側に卓越する明るいバンド状オーロラ。周期的(100

- 200 sec)な出現が見られる。

- ④ other arc: 昼側の高緯度領域に見られる糸状のオーロラ。 weak arc よりも、形や明るさが希薄で出現時間の短いオーロラ。

この細分化は、昼側の磁力線が磁気圏の異なる領域(plasma sheet, cusp, LLBL, mantle, tail lobe など)と狭い緯度範囲で結びつき多彩な入射粒子パターンを反映していると考えられる。

- (c) 昼側オーロラの出現頻度と惑星間磁場 B_y の符号との関係は、午前側で主として見られるコロナ状オーロラの出現率は B_y の符号による偏りは見られない。これに対して、午後側で観測されるバンド/アーク状オーロラの出現率は、 $B_y < 0$ のときに高くなり低緯度方向への運動も $B_y < 0$ の時に発生することが判った。この結果は、グローバルなオーロラ画像データを調べた Elphinstone et al.(1993)の $B_y < 0$ のとき、南半球では昼から夕方オーロラが卓越するとの報告と傾向が一致している。

- (d) 昼側オーロラの形態の違いには入射電子スペクトルに顕著な相異がある。

- ①午前側に出現する弱いアーク状オーロラの入射電子の最大エネルギーは 100eV 以下、フラックスは $\sim 10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ である。
②コロナ状オーロラのそれは数 100 eV \sim 1keV、 $\sim 10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ である。
③午後側に見られる明るいバンド状オーロラの入射電子は、コロナ状オーロラを励起している入射粒子エネルギーよりも高く、時には 1keV を越えるピークエネルギー特性があり、フラックスは $\sim 10^7/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$ に達する。

それぞれのオーロラ形態の粒子起源を推定した。本論で解析したイベントでは、弱いアーク状オーロラの起源は mantle 粒子、コロナ状オーロラの起源は LLBL 粒子、バンド状オーロラは LLBL 粒子を起源として何らかの加速を受けた可能性が示唆される。

(2) 今後の展望

本研究は地上のオーロラ画像データをもとに、昼側オーロラ現象の動形態について解析を行い、地磁気や惑星間磁場変動との関連を明らかにした。また、昼側オーロラの特徴的なタイプとそのときの入射粒子について解析し、各々に対応する入射粒子特性から、コロナ状オーロラは LLBL 粒子、アーク状オーロラは mantle 粒子に起源があることを推定した。本研究の成果をもとに、今後昼側オーロラ現象の解明のために、以下のような研究を行っていくことが重要であると思われる。

- (a) 形態学的研究

- ①本研究で示した、午前側でコロナ状オーロラ、午後側でバンド状オーロラ

が卓越するという分類またはその結果に関して、研究者間で必ずしも共通な認識に至っていない。今後、オーロラのパターン認識が可能な解析システムを開発し、昼側オーロラの分類をより客観的に行っていくことが重要であろう。

- ②午前側のコロナ状オーロラと午後側のバンド状オーロラとの出現領域の境界が12hから14h頃の時間帯によく見られるが、この境界のローカルタイムがどのような条件でコントロールされているのか調べることは、その発生条件を明らかにするために重要であろう。
- ③コロナ状オーロラの発生域が午前側に集中していることについて、これに関係する他の関連現象との比較を行っていく必要がある。例えば、地磁気脈動(ULF波動)のPc3現象が昼間側を中心に見られることが人工衛星や地上観測で知られているが、それとどのような関係にあるのかを研究することにより、その発生メカニズムを理解できる可能性がある。

(b) 動態学的研究

- ①コロナ状オーロラやバンドオーロラの発生・消滅が惑星間磁場の変動とどの程度の時間差で起きているのかをより細かく調べることが重要である。例えば、惑星間磁場がシャープに南向きに変化した時間から何分以内にコロナ状オーロラやバンド状オーロラの発生が見られるのかを明確にすることは、その粒子源を推定する上で決定的に重要であろう。
- ②最近、HFレーダーによるグローバルな電場データが得られるようになってきたが、このようなデータとの比較から大規模な対流領域のどこにコロナ状オーロラやバンド状オーロラが対応しているのかを明らかにすること。更に、人工衛星によるグローバルなオーロラ画像データとの対応を調べ、グローバルなオーロラ活動と地上観測結果との関係を明確にする必要がある。それはまた、狭い領域しかカバー出来ない地上観測の短所を補い、その特性を生かす上で重要である。
- ③昼側オーロラの観測はこれまで地磁気緯度75度付近を中心に観測が行われてきたが、地磁気擾乱度により昼側オーロラの出現域は5度前後変動すると思われる。本研究では地磁気緯度80度でオーロラ観測を行い、そのデータの解析を行ったが、磁気緯度70度前後の昼側オーロラの低緯度側で観測を行うことも重要であろう。例えば、Cape Chelyuskin(地理緯度:77.72度、地磁気緯度:71.68度)やBear Island(地理緯度:74.50度、地磁気緯度:71.25度)は昼側オーロラを観測出来る地理的緯度に位置しているため、これらの観測点で昼側の低緯度側領域を調べることにより、プラズマシート起源で夜側からドリフトしてくる粒子とマグネトシース起源で昼側領域から直接入射してくる粒子による発光現象を識別するこ

とが出来ると思われる。

(c) 入射粒子特性の研究

- ①オーロラ発光に関係する粒子エネルギーを推定するためには、モノクロフィルターによりオーロラ画像データを収集することが不可欠である。また、多色フォトメーターによる観測から、絶対強度を推定することも重要である。本研究で分類した、コロナ状オーロラとバンド状オーロラ等について、異なる波長(例えば、427.8 nm, 557.7 nm, 630.0 nm)で観測したオーロラ画像データからオーロラの分類を行うような研究が必要である。
- ②本研究はパンクロのオーロラ画像データを用いて解析を行ったために、昼側のカスプオーロラを同定することは出来なかった。今後モノクロ画像データの解析を行ううとともに、人工衛星との粒子データとの比較を行い、典型的なカスプ粒子の降り込みに対応し、地上でいかなるオーロラが発光しているのかを明らかにする必要がある。
- ③昼側オーロラの発光高度の下限は200 km から 300 km 程度と推定されているが定かでない。タイプの異なるオーロラでは発光高度も異なると予想される。この点を明らかにするためには、オーロラのモノクロ画像データを地上の数点で同時に収集する必要がある。これらの観測によりオーロラの形態、発光高度、入射粒子エネルギー等の関係について総合的な理解が得られるものと思われる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、研究全般にわたって多大なご指導をいただきました国立極地研究所の佐藤夏雄教授(紹介教官)、岡野章一教授(審査主査)、江尻全機教授、拓殖大学の巻田和男教授に心から感謝申し上げます。本研究の出発点は、国立極地研究所資料系オーロラ資料部門が担うオーロラ世界データセンター C2(WDC-C2 for Aurora)の業務を通じて発展しました。この作業の機会を与えご指導と便宜を図って下さいました国立極地研究所の歴代の資料主幹、松田達郎元国立極地研究所所長、星合孝男前国立極地研究所所長、川口貞男名誉教授、吉田栄夫名誉教授、平澤威男教授(現国立極地研究所所長)に衷心よりお礼申し上げます。名古屋大学太陽地球環境研究所の國分 征前所長には、本研究の基本的な部分とその発展性のご指導を賜りました、ここに厚く感謝申し上げます。

現象の解釈をめぐる議論、論文のまとめ方等については、東北大学の森岡 昭教授、国立極地研究所の麻生武彦教授 等にご指導いただきました。心より感謝申し上げます。また、名古屋大学太陽地球環境研究所の藤井良一教授および国立極地研究所超高層研究グループの山岸久雄助教授、宮岡 宏助教授、田口 真助教授、門倉 昭助手、行松 彰助手、岡田雅樹助手、菊地雅行助手、堤 雅基助手の皆様には多数の議論と援助をいただき感謝いたします。国立極地研究所 WDC-C2 for Aurora のデータ収集と統一的な整理、検索システムなどの開発業務などは、小野高幸助教授(現東北大学)および門倉 昭助手により充実化が図られ、本研究の基盤となりました、心から感謝申し上げます。

本論文で使用した南極点、アムンゼン・スコット基地の全天オーロラ写真データは、アラスカ大学地球物理研究所によって取得されました。グリーンランドおよびスピッツベルゲンなどの北極域のオーロラ画像データは、国立極地研究所・拓殖大学・名古屋大学地球環境研究所などによって取得されました。また、南極中山基地のオーロラ画像データは、国立極地研究所と中国極地研究所の共同研究として、中国の南極観測隊が取得しました。これらのデータ取得にあたられた派遣研究者や関係者の皆様に感謝致します。DMSP衛星で観測された粒子データはジョーンズ・ホプキンス大学の P. T. Newell 博士の協力を得ました。人工衛星観測の粒子データと地上地磁気観測データはインターネット上で公開されています。有用なデータを公開されている超高層研究関連のデータベース関連の作業を推進させている関係者に感謝し、心から敬意を表します。特に、地磁気観測データは WDC-C2 for magnetism (京都大学地磁気データ解析センター)からデータを提供していただきました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Akasofu, S.-I.(1964): The development of the auroral substorm, *Planet Space Sci.*, 12, 273-282.
- Akasofu, S.-I.(1968): Polar and magnetospheric substorms, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 280p.
- Akasofu, S.-I.(1972): Mid-day aurorals and polar cap auroras, *Geofysike Publ.*, 29, 73.
- Akasofu, S.-I.(1978):Recent progress in antarctic auroral studies. *Upper Atmosphere Research in Antarctica*, ed. by Lanzerotti, L.J. and Park, C.G., Antarctic Research Series, 29, AGU, Washigton, D.C., 157-199.
- Akasofu, S.-I.(1981): Auroral arcs and auroral potential structure. in *Physics of Auroral Arc Formation*, Mono. 26, p1- 14, edited by S.-I. Akasofu and J.R. Kan, American Geophysical Union, Washington DC, *Geophys.*
- Anger, C.D., Fancott, T., McNally, J. and Kerr, H.S.(1973): ISIS- II Scanning Auroral Photometer, *Appl. Opt.*, 12, 1753-1766.
- Ayukawa, M., Makita, K., Yamagishi, H., Ejiri, M. and Sakanoi, T.(1996): Characteristics of polar cap aurora, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 1885-1894.
- Ayukawa, M., Makita, K., Nishino, M. and Yamagishi, H.(1997): Comparison between prenoon and postnoon auroras during quiet and disturbed conditions, *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, 10, 142-146.
- Burke, W.J., Jacobsen, B., Sandholt, P.E., Dening, W.F., Maynard, N.C. and Newell P.T. (1993): Optical signitures and sources of prenoon auroral precipitation, *J. Geophys. Res.*, 98, 11521-11529.
- Bythrow, P.F, Potemura, T.A., Erlandson, R.E., Zanetti, L.J. and Klumpar, D.M. (1988): Birkeland currents and charged particles in the high-latitude prenoon region, A new interpretation, *J. Geophys. Res.*, 93, 9791-9803.
- Cowley S.W.H., Morelli, J.P., Lockwood, M.(1991): Dependence of convective flows and particle precipitation in the high latitude dayside ionosphere on the X and Y components of the inetrplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 96, 5557-5564.
- Crasnier, J., Sauvaud, J.A., Cambou, F., Gladyshev, V.A., Kovranzhkin, R.A. and Galperin, YU. I. (1983): Global pattern of auroral ion precipitation: A review of the results from the AUREOLE-1 and AUREOLE-2 satellites, *J. Geophys.*, 52, 150-157.

- Dungey, J.W.(1961): Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47-48.
- Eather, R.H., Mende, S.B. and Weber, E.J.(1979): Dayside aurora and relevance to substorm current systems and dayside merging. *J.Geophys.Res.*84, 3339-3359.
- Eather, R.H.(1984): Dayside auroral dynamics. *J.Geophys Res.*89,1695-1700.
- Egeland, A., Carlson, H.C., Dening, W.F., Fukui, K. and Weber, E.(1992): Day-side auroral signatures based on simultaneous coordinated observations at Svalbard and Greenland, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 20, 726-739.
- Elphinstone, R.D., Murphree, J.S., Hearn, D.J., Cogger, L.L., Newell, P.T. and VO, H.B. (1992): Viking observations of the UV dayside aurora and their relationship to DMSP particle boundary definitions, *Ann. Geophys.*, 10, 815-826.
- Elphinstone, R.D., Hearn, D.J., Murphree, J.S., Cogger, L.L., Johnson, M.L. and Vo, H.B. (1993): Some UV dayside auroral morphologies. *Auroral Plasma Dynamics*, ed. by R.L. Lysak. Washington, D.C., *Am.Geophys Union.*, 31-45 (Geophys. Monogr. 80).
- Evans, D.S.(1985): Characteristics of a persistent auroral arc at high latitude in the 1400 MLT sector, in *The Polar Cusp*, edited by J. S. Holtet and A.Egeland, p.99, D.Reidel, Norwell, Mass.
- Fasel, G.J., Minow, J.I., W.Smith, R., Deehr, C.S. and Lee, L.C.(1992): Multiple brightnings of transient dayside auroral forms during oval expansions. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 2429-2432.
- Fasel, G.J., Minow, J.I., Lee, L.C., Smith, R.W. and Deehr, C.S.(1994): Poleward-moving auroral forms: What do we really know about them?, *Phys. Sign. Magnetospheric Boundary Layer Process*, ed by Holtet, J. A. and A. Egeland., Dordrecht, Kluwer Academic, 211-226.
- Fasel, G.J.(1995): Dayside poleward moving auroral forms: A statistical study. *J. Geophys. Res.*, 100, 11891-11905.
- Formisano, V.(1980): HEOS-2 observations of the boundary layer from the magnetopause to the ionosphere. *Planet. Space Sci.*, 28, 245-257.
- Frank L.A. and Craven, J.(1988): Imaging results from dynamic explorer, *Rev. Geophys.*, 26, 249-283.

- Friis-Christensen, E. and Wihhelm, J.(1975): Polar cap currents for different directions of the interplanetary magnetic field in the Y-Z plane. *J. Geophys. Res.*, 80, 1248.
- Fukunishi, H.(1975): Dynamic relationship between proton and electron auroral substorms, *J. Geophys. Res.*, 80, 553-574.
- Gussenhoven, M.S.(1982): Extremely high latitude auroras. *J. Geophys. Res.*, 87, 2401.
- Hardy, D.A. Burke, W.J., Gussenhoven, M.S., Heinemann, N.H. and Holemann, E.(1981): DMSP / F2 electron observations of equatorward auroral boundaries and their relationships to the solar wind velocity field. *J. Geophys. Res.*, 86, 9961.
- Heppner, J.P. and Maynard, N.C.(1987): Empirical high-latitude electric field. *J. Geophys. Res.*, 92, 4467-4489.
- Horwitz, J.H., and S.-I. Akasofu (1977): The response of the dayside aurora to sharp northward and southward transitions of the interplanetary magnetic field and to magnetospheric substorms, *J. Geophys. Res.*, 82, 2723-2734.
- Ismail, S., Wallis, D.D. and Cogger, L.L.(1977): Characteristics of polar cap sun-aligned arcs, *J. Geophys. Res.*, 82, 4741-4749.
- Ismail, S. and Meng, C.-I.(1982): A classification of polar cap auroral arcs. *Planet. Space. Sci.*, 30, 319-330.
- Kaneda, E., Oguti, T. and Nagata, T.(1968): Photographic atlas of auroral forms observed at Syowa Station, *JARE Sci. Rep., Series A*, 4, 1-13.
- Lassen, K. and Danielsen, C.(1978): Quiet-time pattern of auroral arcs for different directions of interplanetary magnetic field in the Y-Z plane. *J. Geophys. Res.*, 83, 5277-5284.
- Liou, K., Newell, P.T. and Meng, C.-I.(1997): Synoptic auroral distribution: A survey using Polar ultraviolet imagery. *J. geophys. Res.*, 102, 27197-27205.
- Lui, A.T.Y., Venkatesan, D. and Murphree, J.S.(1989): Auroral bright spots on the dayside oval. *J. Geophys. Res.*, 94, 5515.
- Makita, K., Meng, C.-I. and Akasofu, S.-I.(1983): The shift of the auroral electron precipitation boundaries in the dawn-dusk sector in association with geomagnetic activity and interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 88, 7967-7981.

- Maynard, N.C., Burke, W.J., Weimer, D.R., Mozer, F.S., Scudder, J. D., Peterson, W.K., Lepping, R.P. and Russell, C.T.(1998): Polar observations of cusp electrodynamics: Evolution from 2- to 4-cell convection patterns, Polar cap boundary phenomena, edit J. Moen, Kluwer Academic Publishers, 157-172.
- McDiarmid, B., Burrows, J.R. and Wilson, M.D.(1979): Large scale field perturbations and particle measurements at 1400km on the dayside. *J. Geophys. Res.*, 84, 1431.
- Meng, C.-I.(1981): Electron precipitation in the midday auroral oval, *J. Geophys. Res.*, 86, 2149.
- Meng, C.-I.(1983): Case studies of the storm time variation of the polar cusp, *J. Geophys. Res.*, 88,137.
- Meng, C.-I. and Lundin, R.(1986): Auroral morphology of the midday oval. *J. Geophys. Res.*, 91, 1572.
- Meng C.I.(1994): Space borne optical remote sensing of midday auroral oval and different participation region, *Phys Sig. Magnetosph. Bound. Layer Proc.*, edit. Holtet and Egeland., 157-172.
- Murphree, J.S., Elphinstone, R.D., Hearn, D. and Cogger, L.L.(1990): Large-scale high-latitude auroral emissions, *J. Geophys. Res.*, 95, 2345-2354.
- Newell P.T. and Meng, C.-I.(1992): Mapping the dayside ionosphere to the magnetosphere according to particle precipitation characteristics. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 609-612.
- Newell, P.T., Lyons, K.M. and Meng, C.-I.(1996a): A large survey of electron acceleration events, *J. Geophys. Res.*, 101, 2599-2614.
- Newell. P.T., Meng, C.-I. and Lyons, K.M.(1996b): Suppression of discrete aurorae by sunlight, *Nature* 381, 766.
- Oguti, T.(1981): TV observations of auroral arcs. *Physics of auroral arc formation*, ed. by Akasofu, S.-I. and Kan, J.R., AGU monograph, 25, AGU, Washington, D.C., 31-41.
- Oieroset, M., Sandholt, P.E., Luhr, H., Dening, W. and Moretto, T.(1997): Auroral and geomagnetic events at cusp/mantle latitudes in the prenoon sector during positive IMF By conditions: Signature of pulsed magnetopause reconnection. *J. Geophys. Res.*, 102, 11349.
- Rees, M.H., and Luckey, D. (1974): Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions, 1 Model computations, *J. Geophys. Res.*, 79, 5181-5186.

- Rogers, E.H., Nelson, D.F. and Sarage, R.C.(1974): Auroral photography from a satellite, *Science*, 183, 951.
- Saflekos, N.A. and Potemura, T.A.(1980): The orientation of Birkeland current sheets in the dayside polar region and its relationship to the IMF. *J. Geophys. Res.*, 85, 1987-1994.
- Sandholt, P.E., K. Henriksen, C.S. Deehr, G.G. Sivjee, G.J. Romick and A. Egeland, (1980): Dayside cusp auroral morphology related to nightside magnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 85, 4132-4138.
- Sandholt, P.E., Egeland, A., Lybekk, B., Deehr, C.S., Sivjee G.G. and Romick, G.J. (1983): Effects of interplanetary magnetic field and magnetospheric sustorm variations on the dayside aurora, *Planet. Space. Sci.*, 31, 1345-1362.
- Sandholt, P.E, Deehr, C.S., Egeland, A., Lybekk, B., Viereck, R. and Romick, G.J.(1986): Signatures in the dayside aurora of plasma transfer from the magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, 91, 10063-10079.
- Sandholt, P.E., Lybekk, B., Egeland, A., Nakamura, R. and Oguti, T.(1989): Midday auroral breakup. *J. Geomag. Geoelectr.*, 41, 371-387.
- Sandholt, P.E., Lockwood, M., Oguti, T., Cowley, S.W.H., Freeman, K.S.C., Lybekk, B., Egeland, A. and Willis, D.M.(1990): Midday auroral breakup events and related energy and momentum transfer from the magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, 95, 1039-1060.
- Sandholt, P.E., Moen, J. and Opsvik, D.(1992): Periodic auroral events at the midday polar cap boundary: Implications for solar wind-magnetosphere coupling, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1223-1226.
- Sandholt, P.E., Moen, J., Rudland, A., Opsvik, D., Denig, W.F. and Hansen, T.(1993a): Auroral event sequences at the dayside polar cap boundary for positive and negative interplanetary magnetic field B_y. *J. Geophys. Res.*, 98, 7737-7755.
- Sandholt, P.E., Moen, J., Opsvik, D., Denig, W.F. and Burke, W.J.(1993b): Auroral expansion into the dayside polar cap: Ground and satellite observations in the prenoon sector, in *Auroral Plasma Dynamics*, *Geophys. Mono.*, 80, American Geophysical Union, Washington, D.C., 47-53.
- Sandholt, P. E., Farrugia, C. J., Moen, J., Noraberg, O., Lybekk, B., Sten, T. and Hansen, T. (1998): A classification of dayside auroral forms and activities as a function of interplanetary magnetic field orientation, *J. Geophys. Res.*, 103, 23325-23345.

- Starkov, G. V. and Feldstein, Y. I. (1967): Scheme of an elementary disturbance in auroras on the day side of the earth, *Geomagn. Aeron.*, 7, 294-296.
- Troshichev, O.A.(1991): Mesoscale structures in auroral phenomena, *Auroral Physics*, 335-348, edit by C.-I. Meng et al., Cambridge UP.
- Troshichev, O.A., Gusev, M.G., Nickolashkin S.V. and Samsonov, V.P.(1988): Features of the polar cap aurorae in the southern polar region, *Planet. Space. Sci.*, 36, 5.
- Vorobjev, V.G., Gustafsson, G.V., Starkov, G.V., Feldstein, Y.I. and Shevnina, N.F.(1975): Dynamics of day and night aurora during substorms. *Planet. Space Sci.*, 23, 269-278.
- Yang, H.G., Sato, N., Makita, K., Kikuchi, M., Kadokura, A., Ayukawa, M., Hu, H.Q. and Liu, R.Y.(1999): Outstanding quasi-periodical auroral phenomena in the '15 MLT hot spot': A survey with all-sky aurora observation at Zhongshan, Antarctica (in press).
- 鮎川 勝・巻田和男(1996): 南極点基地で見られる昼間側オーロラの特徴、*南極資料*, 40, 267-305.
- 大林辰蔵(1970): *宇宙空間物理学、物理科学選書*(5)、484p.