

南極点基地で見られる昼間側オーロラの特徴

鮎川 勝¹・巻田和男²

The Characteristics of Daytime Aurora at South Pole Station

Masaru AYUKAWA¹ and Kazuo MAKITA²

Abstract: The characteristics of daytime auroras are examined by using all-sky camera photographs taken at South Pole Station in Antarctica. Several remarkable results were found from our analysis. (1) The auroral structure near the noon sector (10–14 MLT) mostly shows coronal forms with ray structure. (2) The luminosity of coronal form auroras is generally weaker than that of the midnight discrete auroras. However, their dynamical motion and their luminosity increase during the geomagnetic disturbed period. (3) Activity of daytime coronal auroras is dependent on the North-South component of Interplanetary Magnetic Field (IMF-*B_z*) variations. (4) The characteristics of morning sector auroras (06–10 MLT) are quite different from afternoon sector auroras (14–18 MLT). This tendency strongly suggests that there are asymmetrical auroral phenomena between the morning and the afternoon regions.

要旨: 南極点基地 (South Pole Station; SPS) の全天カメラ写真データを用いて、昼間側オーロラの特徴を調べた。SPS は、平均的なオーロラオーヴェル近傍を地球の自転に伴って移動し、しかも冬期にオーロラ発光高度 (~100 km) が太陽光の影響を一日中受けないというオーロラの光学観測に有利な地理的条件下にある。従って、SPS は昼間側オーロラの情報得られる地球上でも稀有なオーロラ観測点として知られている。本論では、SPS の全天カメラ写真データから見た昼間側オーロラの特徴について述べる。すなわち、(1) 真昼近傍 (10–14 MLT) のオーロラ形態は、レイ構造を伴ったコロナ型オーロラが卓越する、(2) 昼間側のコロナ型オーロラの発光輝度は、真夜中側 (22–02 MLT) のディスプレイオーロラの輝度よりも一般に微弱である、(3) 昼間側のコロナ型オーロラの活動は、惑星空間磁場の南北成分変動に依存性がある、(4) 真昼近傍に出現する特徴的なコロナ型オーロラを挟んで、朝側 (06–10 MLT) のオーロラ形態と午後側 (14–18 MLT) のオーロラ形態の様相は異なる。昼間側オーロラに関するこの朝側-午後側非対称性は、オーロラ降り込み粒子源に違いがあることを示唆しているものと思われる。

1. はじめに

オーロラ画像データを体系的な視点からまとめたオーロラ研究の走りは、FRITZ の「Das Polarlicht (1881)」であろうとの見方が一般に知られている。画像データを用いてのオーロラ研究が本格化したのは、IGY (International Geophysical Year, 1957–58) 期間の静止画像デー

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9–10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

² 拓殖大学工学部. Faculty of Engineering, Takushoku University, 815–1, Tate-machi, Hachioji-shi, Tokyo 193.

タ（全天カメラ写真）を解析した FELDSTEIN (1963, 1964), FELDSTEIN and STARKOV (1968), AKASOFU (1965, 1968) 等の極を中心としたオーロラの全体像やオーロラ嵐の発達過程の解明であると考えられる。これらの研究が静止画像の解析であったのに対し、DAVIS (1966, 1978), ROYRVIK and DAVIS (1977), OGUTI (1975, 1978, 1981) 及び YAMAMOTO and OGUTI (1982) 等は、低照度テレビカメラによるオーロラの動画像データを用いてオーロラの運動形態を分類し、オーロラ運動の微細構造とその出現領域を明らかにしている。また、LUI *et al.* (1973, 1975), AKASOFU (1974, 1976) 等は、人工衛星によるオーロラ画像データにより、オーロラが極地域のほぼ全域に帯状に広がっている出現状況を浮き彫りにし、同時にこの帯状オーロラをディスクリートオーロラベルトとデフューズオーロラベルトに二大別して両者の出現領域を磁気圏サブストームと関連づけて明らかにしている。しかし、これらの静止画像・TV 動画像・衛星画像データを用いたオーロラ研究では、太陽光の影響により昼間側オーロラのデータが欠落することから、いずれも主として夜側のオーロラ現象を対象にしている。これに対して、昼間側で観測されるオーロラ現象は、太陽風と地球磁場によって形成される地球磁気圏構造の開磁場と閉磁場の境界領域のうち、昼間側に特有なカスプ領域の近辺に出現していると考えられるので、太陽風が磁気圏に直接的に入り込む結果を反映していることや真昼を挟んだ朝側—午後側の磁気圏非対称性に関する情報を含んでいる可能性がある。従って、昼間側オーロラの様相と振る舞いを明らかにすることは、太陽風の磁気圏への流入とエネルギー消費過程に関する昼間側の機構を知るために重要である。近年のオーロラ研究では、人工衛星観測の充実、光学観測技術の進歩等とともに地上観測場所の意識的な選点などにより、昼間側オーロラ及び極冠域オーロラの情報が急速且つ大量に収集される状況が産まれてきている。

南極点基地 (South Pole Station; SPS) は、地磁気緯度 74° であり、平均的なオーロラオーヴァ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 (~ 100 km 以上) が太陽光の影響を受けない地理的条件下にある (AKASOFU, 1978)。そのため、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オーロラ現象の地磁気地方時 (Magnetic Local Time; 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、オーロラオーヴァルの下を周回する 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。筆者等は、10 数年前に 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 の違いによるオーロラ形態を調べ、昼間側に見られるオーロラが特徴的な形態を示すこと、また、昼間側のオーロラ動態やその出現領域が惑星間磁場変動に依存している傾向が見られること等を日本地球電磁気学会 (現在、地球電磁気・地球

惑星学会)等の講演を通じて議論し、同時に、昼間側磁気圏の特異領域をオーロラ活動から推論する試みの紹介などを行ってきたが、当時その議論過程を収れんさせる作業及び系統的な整理を必ずしも十分に果たし得なかった。ここでは、昨今のオーロラ研究課題の一つとして昼間側オーロラや極冠域オーロラが注目されていることから1980年代の前半に筆者等が調べた資料を掘り起こしてSPSで見られる昼間側オーロラの形態学的特性と二・三の関連現象について述べる。

2. 南極点基地 (SPS) で見られる昼間側オーロラの形態学的特性

2.1. 地磁気地方時 (Magnetic Local Time: MLT) 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。特に、オーロラオーヴァル近傍の下を周回するSPSにおいて、全天カメラによるオーロラ観測ではMLTの違いによるオーロラの形態的な変化が顕著に現れることが期待できる。1977年(5月~8月:106日間)及び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容姿を変えて見えるのかを形態学的視点から調べた。SPS全天カメラ写真データは、F=2.8の35mm魚眼レンズとASA感度1000のフィルムで1分ごとに撮影され、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のセクターごとに羅列したものである。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、筆者等の解析によると、おおむね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 10 h-14 h MLT (Dayside)

図1の一番上のパネルで示した例のように線条構造(ray structure)が顕著なコロナ型オーロラが卓越し、その発光位置、輝度や形態の変化の度合いは小さい。コロナ型オーロラは全天カメラ視野内で比較的長時間活動を持続する(2-3時間)。夜側で見られる激しい動きを伴う爆発的なオーロラに匹敵する活発な現象が観測されるのは極めてまれである

② 14 h-17 h MLT (Afternoon side)

図1の二番目のパネルで示した例のように帯状構造(band like structure)が顕著なオーロラが卓越する。このオーロラに対応するオーロラ粒子の源が磁気圏の昼側にあるのか夜側にあるのか、はっきりしないが帯状構造が低緯度側から高緯度側へ移動する傾向が見られ、周期的な変動(2分前後)がしばしば見られる

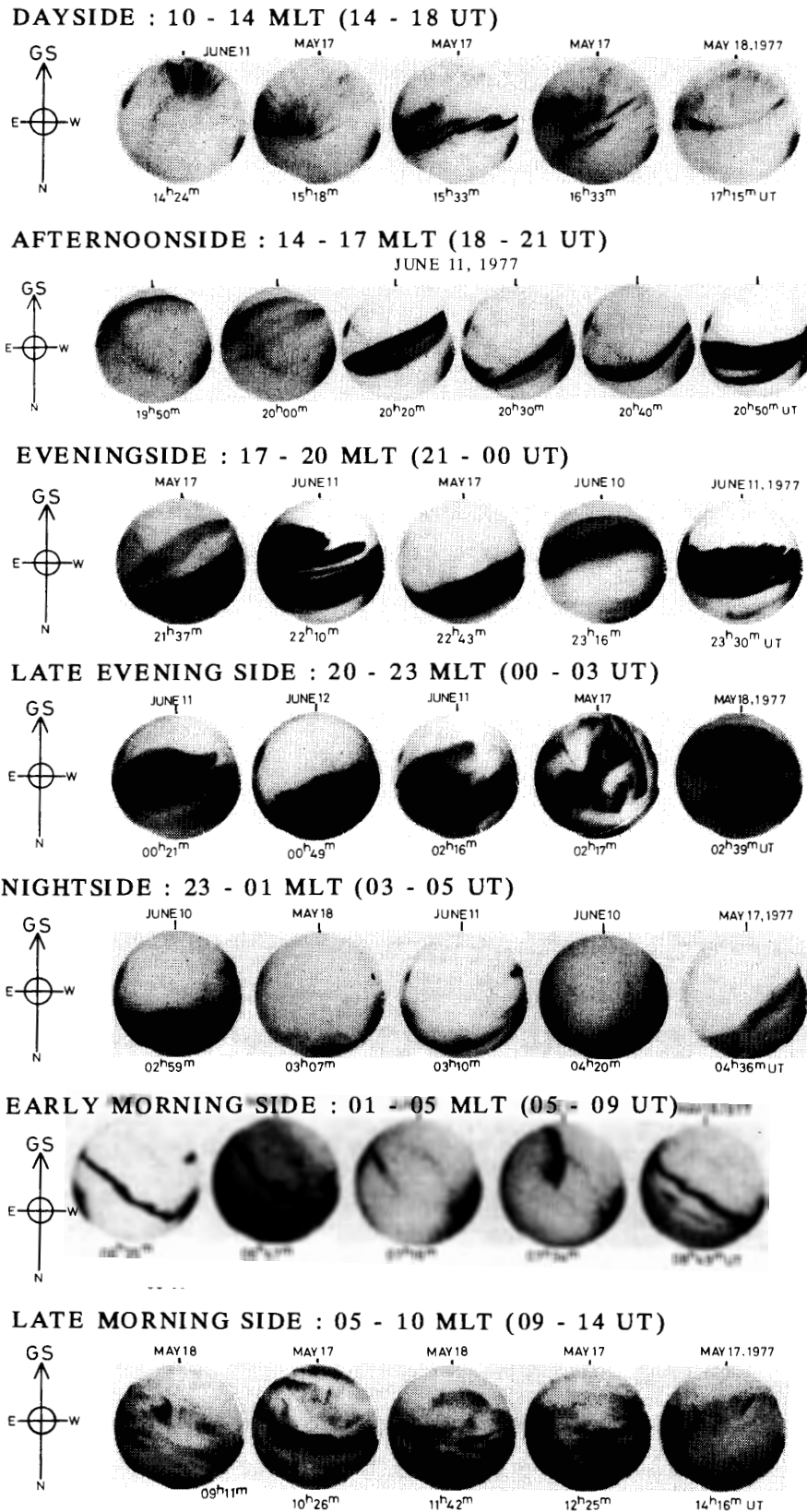


図1 全天カメラで観測した南極点基地のオーロラ画像
 Fig. 1. Auroral image at South Pole Station using an all sky camera.

③ 17 h–20 h MLT (Evening side)

このセクターで見られるオーロラは、afternoon side (14 h–17 h MLT) で見られるオーロラ現象に比べ、発光領域がやや高緯度側に広がる傾向が見られ、多重性に富んだ帯状構造の形態が顕著となる。また、オーロラ活動域が夜側から伝搬して来ている傾向が見られる

④ 20 h–23 h MLT (Late evening side)

爆発的なオーロラ現象 (auroral break-up) が観測されることが頻繁で、活発なオーロラ現象が全天に存在する例が多い

⑤ 23 h–01 h MLT (Nightside)

Quiet arc と呼ばれるオーロラが低緯度側に観測されることが多い。SPS においては天頂付近にこのオーロラが見られるのはまれである

⑥ 01 h–05 h MLT (Early morning side)

Late evening side (20–23 h MLT) で見られるオーロラ現象とは対照的に、子午線方向の発光幅が狭い帯状オーロラ (narrow band-like) が観測されることが多い

⑦ 05 h–10 h MLT (Late morning side)

コロナ型オーロラが卓越して観測されるが、daytime (10–14 h MLT) で観測されるコロナ型オーロラに比べ、輝度変化及び移動速度ともにやや活発な傾向がある。この時間帯は、全天カメラ視野内にはほぼ確実にオーロラが現れることから、SPS がオーロラオーヴァルを高緯度側から低緯度側へ横切る時間帯であると推察できる

2.2. 昼間側オーロラの形態学的特性

オーロラの MLT に伴う形態変化の調査から、SPS の昼間側の特定な時間帯 “10–14 h MLT” にコロナ型オーロラの出現が顕著であることが判ったが、更に、このコロナ型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 10–14 h 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、 $MLT = UT - 4 \text{ hrs}$ である。表 1 は、1977 年及び 1978 年の 2 年間の SPS 全天カメラ写真の 10–14 h MLT 間に関するデータ有

表 1 1977 年と 1978 年に南極点基地で得られた昼間側 (10–14 h MLT) の全天カメラデータ
Table 1. South Pole all-sky camera data during the period from 10–14 h MLT obtained in 1977 and 1978.

	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

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の上空で昼間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、昼間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。この昼間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、イベントごとの磁気圏状況を吟味する必要がある。図2にSPSで観測された昼間側オーロラ現象の典型例を示す。データは5分ごと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、コロナ型が卓越していることがわ

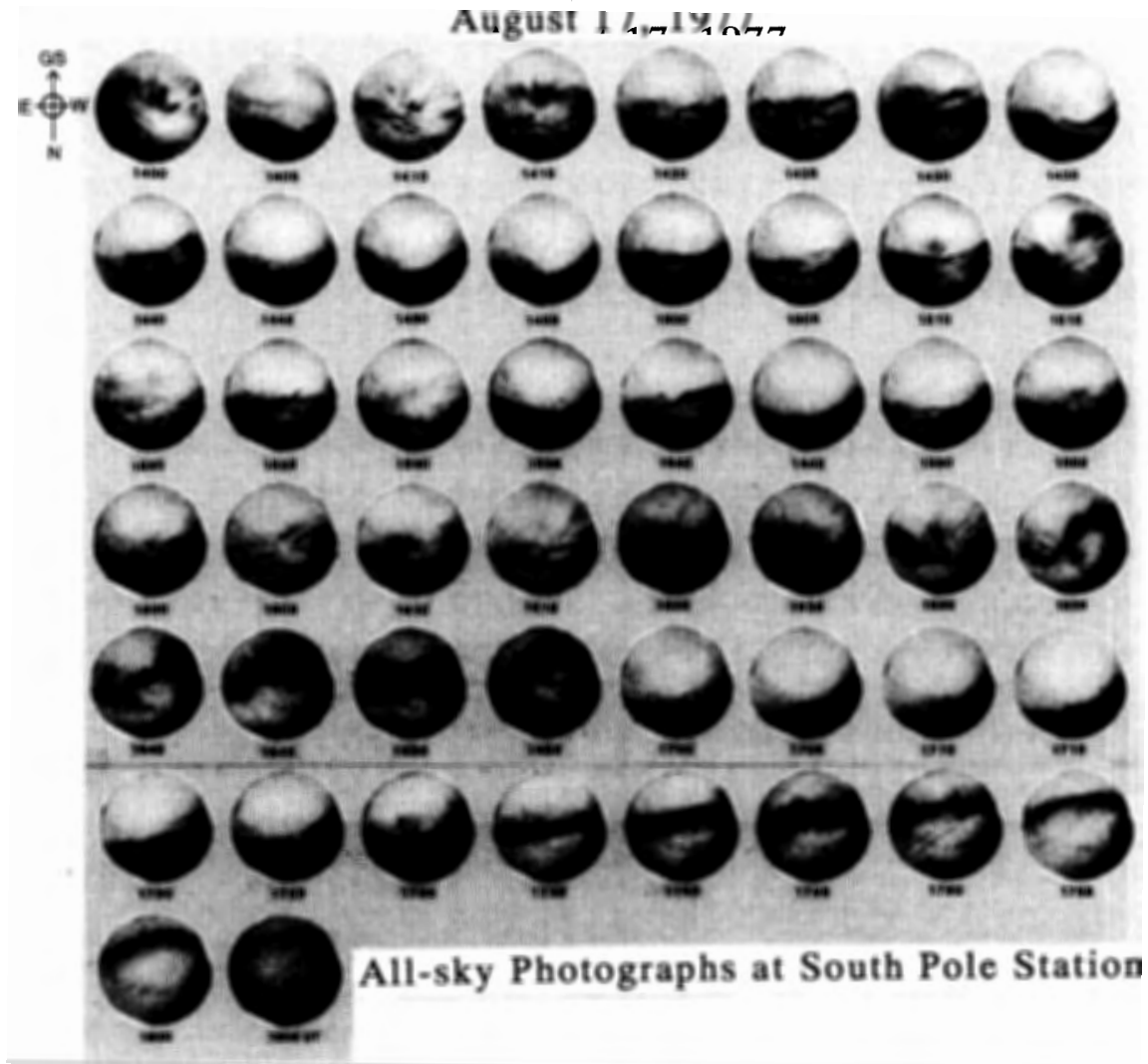


図2 昼間側オーロラ現象の典型的な例

Fig. 2. A typical example of a daytime auroral phenomenon.

かる。オーロラ現象の形態は、STORMERの1930年代からオーロラと観測者の相対的な位置関係によって一義的に決まるとの解釈が一般的になされているが、SPSの昼間側で卓越するコロナ型オーロラの形態が単にオーロラの発光場所と観測者の相対的な位置関係を反映しているものばかりであるとは言えないように思われる。図2で代表されるSPSの昼間側に見られるコロナ型オーロラは、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(2-3時間)ことに特徴がある。これらの特徴は、筆者等が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帯で観測されるコロナ型オーロラの“移動速度”や“継続時間”に類似せず、また、全天カメラ写真データ上で見る昼間側セクターのコロナ型オーロラの発光強度は、他のMLT帯のそれよりも微弱である傾向が見られた(図1及び付図1)。一方、昼間側には磁気圏構造のカusp(cusp)やクレフト(cleft)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で見られる昼間側のコロナ型オーロラがカusp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の視野内に昼間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—低緯度側と三分区に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

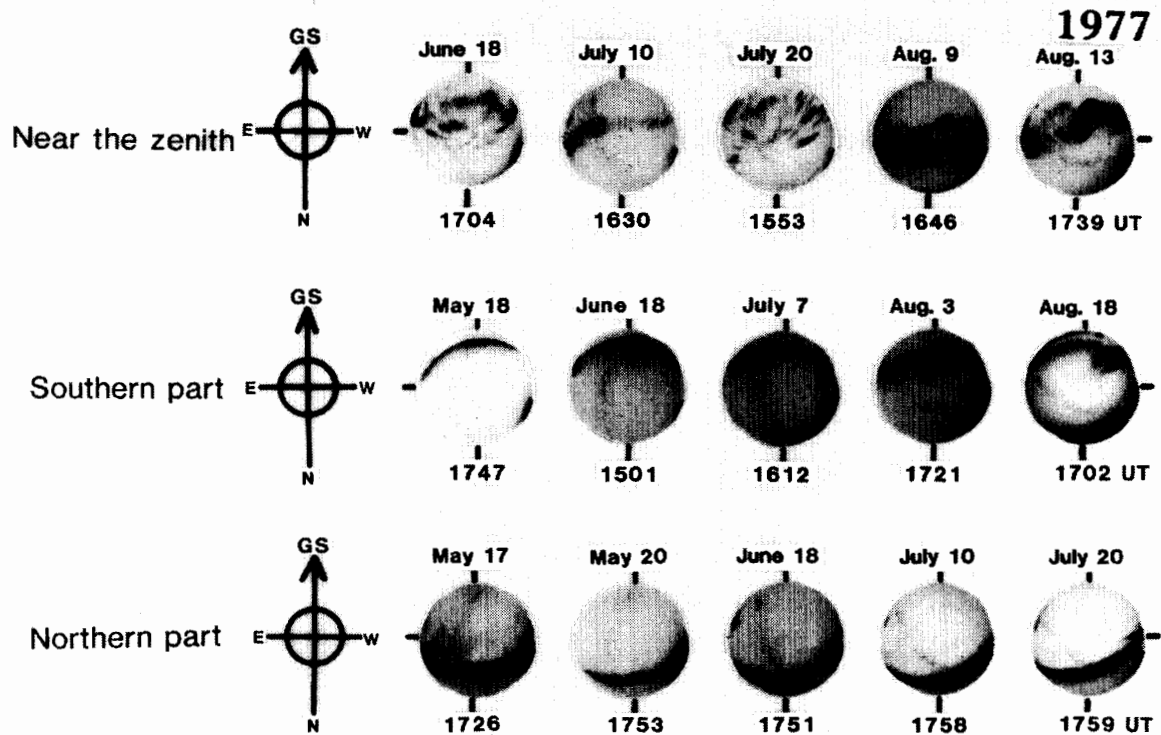


図3 昼間側オーロラの出現領域による特徴
 Fig. 3. Characteristics of daytime auroras.

ント例を図3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型 (corona type) が卓越する傾向が見られる。我々の解析によると、線条構造が特徴的なオーロラは、昼間側 (Dayside) と区分した時間帯 (10-14 MLT) の比較的早い時刻から真昼過ぎ1時間程度の間 (10-13 MLT) を中心に観測されることが多く、午後の時間帯 (13-14 MLT) で観測されることは少ない。これに対して、低緯度側で見られる帯状構造のオーロラ現象は、午前 (10 MLT) から真昼過ぎ (~13 MLT) にかけて観測されることは皆無で、14 MLT 近くに集中して観測される傾向があった。このようなことから、この発光領域別のオーロラの形態の違いは、単に観測地点とオーロラの相対的位置関係にのみ原因があるものとは思われない。図4は、出現領域別の昼間側オーロラの形態学的な特徴を模式的にまとめたものであるが、低緯度側で顕著となる帯状オーロラは、図1で特徴づけた昼過ぎ側 (Afternoon side: 14-17 MLT) に見られるオーロラの特徴と極めて類

All-sky pictures of dayside aurora (1000 - 1400 MLT)

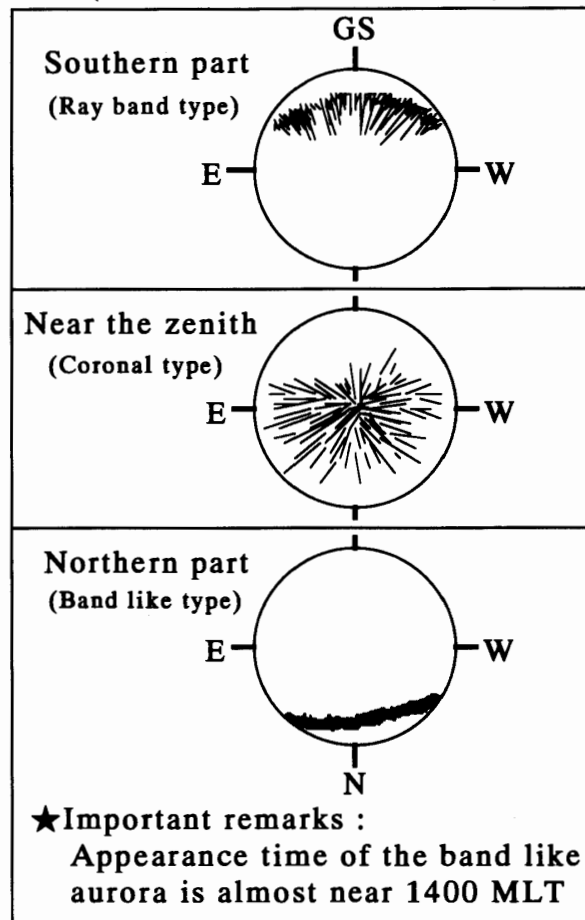


図4 昼間側オーロラの形態学的な特徴

Fig. 4. All sky images of daytime auroras.

似しており、Dayside aurora の一つの形態と区分するよりも Afternoon side の領域に関連するオーロラ現象であるように思える。以上の結果、①昼間側オーロラ現象には幾つかの形態的特徴が見られるが特にコロナ型オーロラが顕著である、②このコロナ型オーロラ (10–13 MLT) には他の MLT 帯で見られるコロナ型オーロラに比べ、発光強度が微弱で発光位置の変動と形態の変化が緩慢、出現している持続時間が長い等の特性がある、③この特性の原因は、観測者とオーロラ発光域の位置関係のみに依存しているものではなく、オーロラ粒子の起源によっている可能性がある。但し、④オーロラの形態的な特徴だけから、昼間側磁気圏との対応関係を明らかにすることはむずかしい。

ここでは、昼間側オーロラの形態学的な特徴を他の関連現象にとらわれずに調べることに焦点をあてたが、昼間側のオーロラ現象を理解するには、降り込み粒子の特性とオーロラ形態の対応づけを明確化すること、オーロラ動態と惑星間磁場の変動 (IMF-variation) 及び磁気圏擾乱の発達過程 (AE-variation, Kp-index) 等との関連を明らかにしていくことが重要である。

3. 惑星間磁場・鉛直成分 (IMF- B_z) 変動と昼間側オーロラの活動

昼間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、昼間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、IMF- B_z 成分が南向き ($B_z < 0$) の時、昼間側で惑星間磁場 (Interplanetary Magnetic Field; 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。昼間側オーロラの形態学的な特徴は、筆者等の SPS で見られるオーロラ現象の調査によればコロナ型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はっきりしない。昼間側オーロラの活動が、IMF- B_z 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、STARKOV and FELDSTEIN (1967) は、昼間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、昼間側のオーロラオーヴァルの動態は IMF- B_z 成分がステップライクに南向きに変化 ($B_z < 0$) または北向きに変化 ($B_z > 0$) 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、昼間側オーロラの低緯度側 (赤道側) への移動は IMF- B_z 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 Ny Ålesund のデータ (Longyearbyen の子午面-掃天光度計: Meridian-

scanning photometer) を用いて、カस्प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、これらのいずれの研究も、夜側から昼間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स्प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に終始しているように思える。昼間側オーロラの降り込み粒子源やその発生機構の研究のためには、昼間側オーロラの活動が、IMF- B_z 成分の変動に敏感なのか夜側の AE-index (オーロラ帯の地磁気活動度指数) に対応が良いのかを調べるのが重要である。

3.1. IMF- B_z 成分の変動と昼間側オーロラの動態

IMF- B_z 成分の変動に伴う昼間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स्प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。我々は、SPS の視野内に昼間側オーロラが観測された 1977 年の 52 日分 (表 1 参照) すべてのオーロラ現象について、IMF- B_z 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型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- B_z 成分の変動との比較を試みる。但し、解析した IMF データは、IMP-J 衛星の公開データ (5 分ごとの変動値) であるため、IMF- B_z 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 の昼間側で見られたオーロラの活動 (図 5) は、1400–1730 UT 頃までおおむね天頂より高緯度側に見られ、1730 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 6 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 (のぞき窓) 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 7 は、上部パネルに IMP-J 衛星で得られた IMF- B_z 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- B_z の変動は、1400–1800 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、1630 UT までが比較的緩やかで、1630 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- B_z 変動の最低値 ($B_z = -5$ nT) が 1700 UT 頃にあり、オーロラの低緯度側への移動が 1730 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- B_z 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ように見える (オーロラオーヴァルの拡大)。一方、オーロラの発光強度は図 5 の全天カメラ写真データによれば、それより以前の 1710 UT 頃に輝度上昇が既に認められる。これは IMF- B_z 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 1650 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 1640 UT

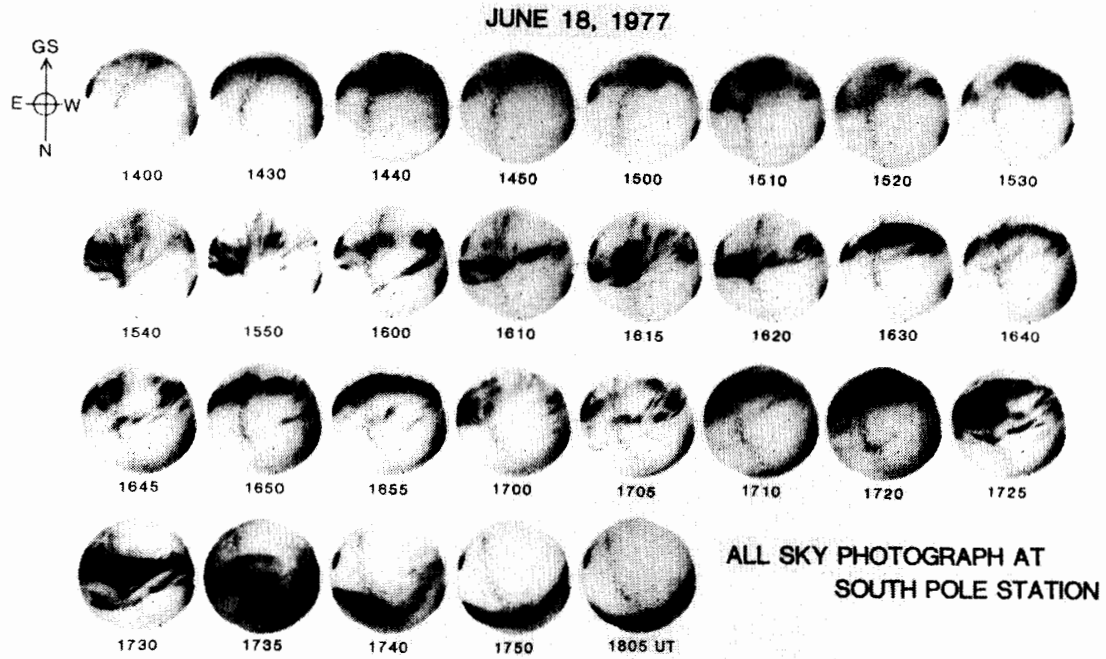


図5 昼間側オーロラの活動の例, 1977年6月18日
 Fig. 5. An example of daytime auroral activity, June 18, 1977.

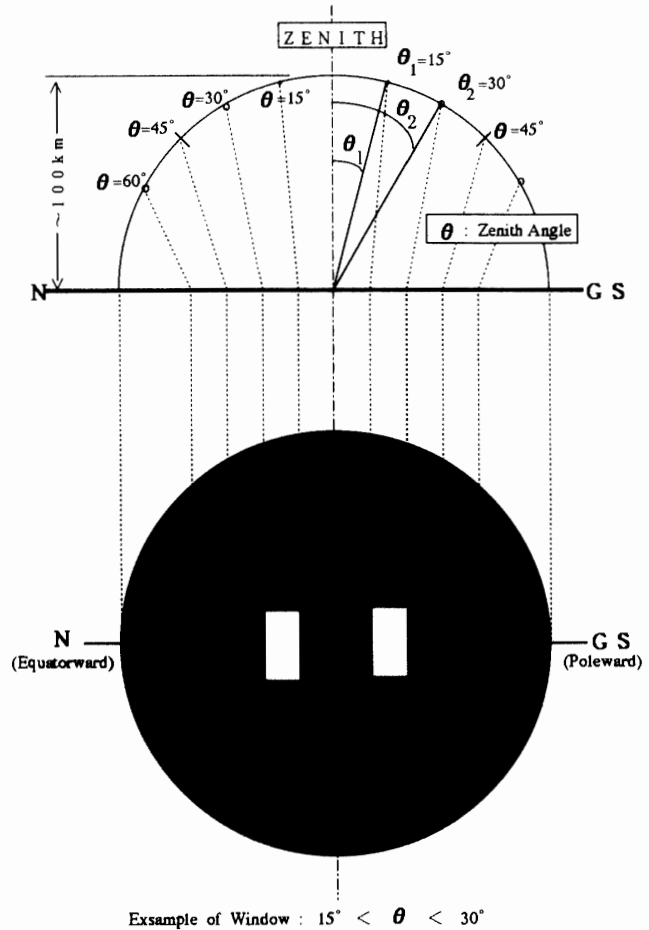


図6 全天カメラデータ内に見られるオーロラ活動追跡用スリット盤
 Fig. 6. A slit window for examining auroral movement in the all sky image data.

Example of Window : $15^\circ < \theta < 30^\circ$

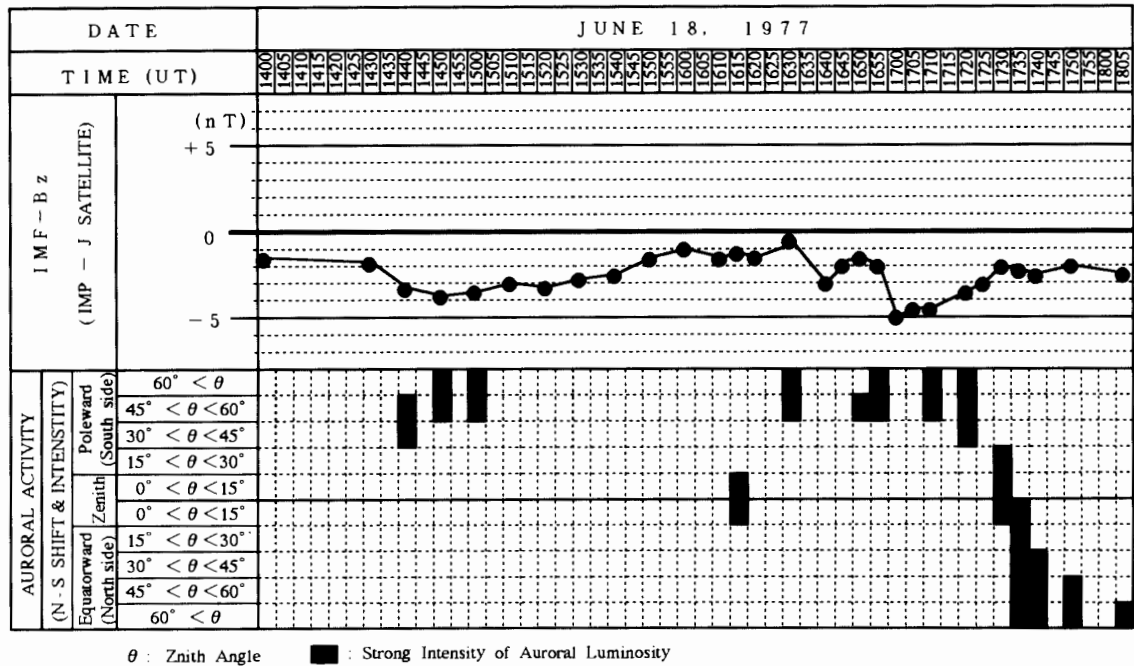


図7 オーロラ活動と惑星間磁場-Bz成分変動との比較図, 1977年6月18日

Fig. 7. Comparison between auroral phenomenon and variations of the Interplanetary Magnetic Field Bz component observed on June 18, 1977.

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 $33.5 Re$ 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 ($\sim 33.5 Re$) から約 20 分程度の回り道 ($\sim 75 Re$ 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るように思える (エネルギー蓄積過程とも考えられる)。

昼間側のコロナ型オーロラが、夜側のプラズマシート起源に伴う擾乱に対して独立しているか否かの問題は重要である。図8は、IMF-Bz 変動と Tixie Bay (I-Lat: 65.37° , M-Long: 197.19°) 及び Dixon Island (I-Lat: 68.15° , M-Long: 155.87°) の地磁気変動データを比較した

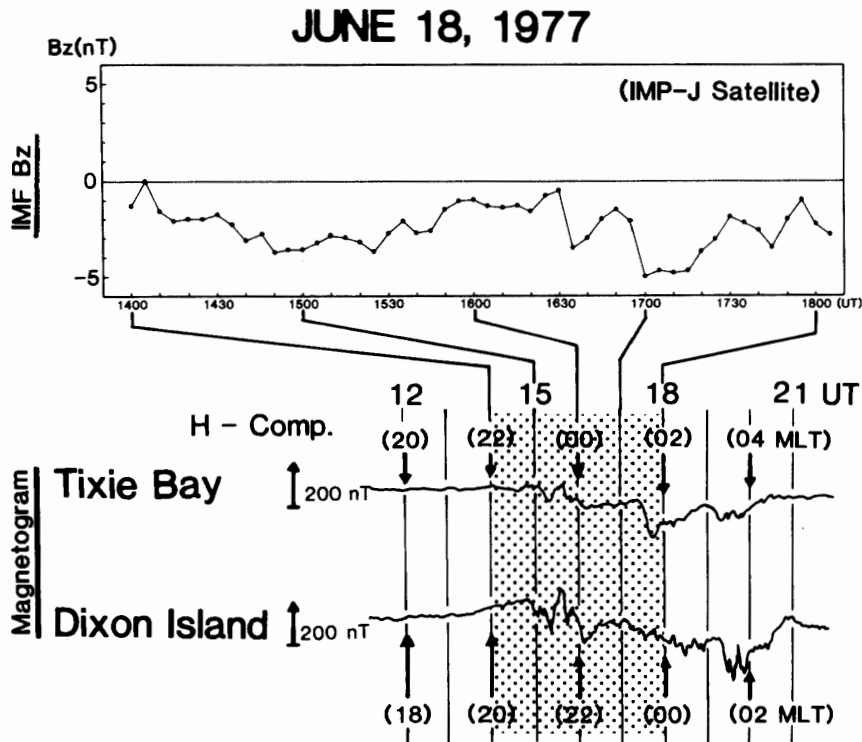


図8 IMF-Bz成分の変動と地上の地磁気H成分の変動との比較, 1977年6月18日
 Fig. 8. Comparison between the fluctuation of the IMF-Bz component and groundbased magnetic H-component on June 18, 1977.

ものである。Tixie Bayは北半球の観測点ではあるが、地磁気地方時で比べれば、SPSが真昼間(12 MLT)に位置する時、Tixie Bayは2400 MLT、Dixonは2200 MLTの位置にある。南半球にはSPSとの位置関係が、TixieやDixonと同じになる観測点が存在しないので、ここでは夜側の情報としてTixie Bayの地磁気データに注目する。これによると、昼間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(1730 UT)に、約-180 nTの湾型負変動(Negative bay)が見られる。

IMF-Bz成分が1400-1800 UTの間、南向き($B_z < 0$)に終始したこのイベントでは、昼間側オーロラの活発化(動きを伴う輝度上昇)が、IMF-Bzのステップライクな変動よりも夜側の地磁気擾乱(夜側サブストーム)の発生タイミングの方に同期している傾向が見られた。

②イベント-2 —July 10, 1977—

7月10日のイベントは、図9の全天カメラ写真が示すように1440 UT以前と1600 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、1440-1600 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10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1540 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

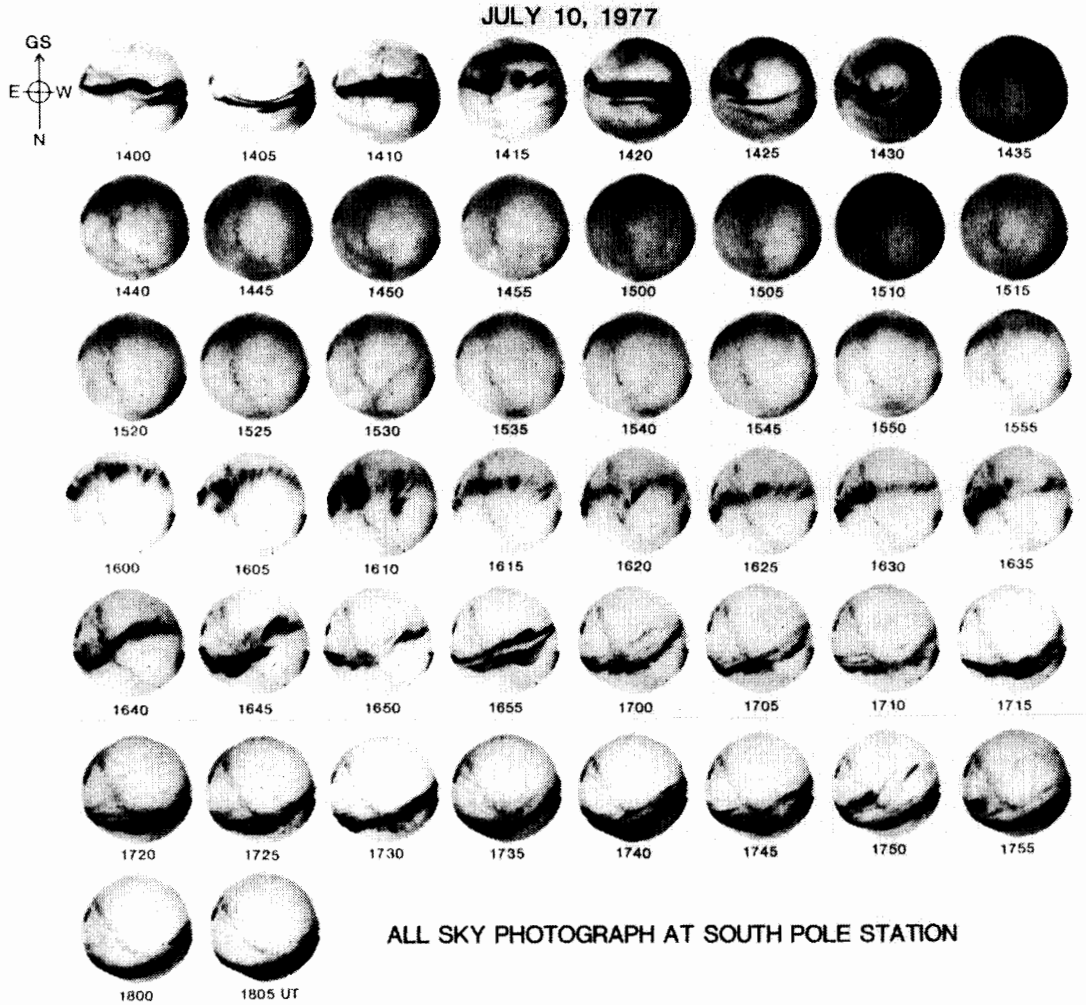


図9 昼間側オーロラの活動の例, 1977年7月10日
 Fig. 9. An example of daytime auroral activity observed on July 10, 1977.

上昇や低緯度方向へ移動しているのが見られる(オーロラオーヴァルの拡大)。オーロラ現象は、図9と図10の両図を見比べると、1600 UT頃、まず最初に輝度上昇が見られ、その後1615-1645 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、1650-1800 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ように見える。このことは、IMF- B_z 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、 B_z 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10の1440 UT以前におけるオーロラ活動度の上昇に対するIMF- B_z 変動への依存性は、IMF- B_z 観測値にデータ欠損がある(1400-1410間)ことから不鮮明であるが、 B_z 値の前後関係からデータ欠落時にIMF- B_z に符号の変化が推測されること、図10中の1350-1355 UTに記載したIMF- B_z に符号の変化が確認できること等から、IMF- B_z 成分の符号の変化が昼間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、

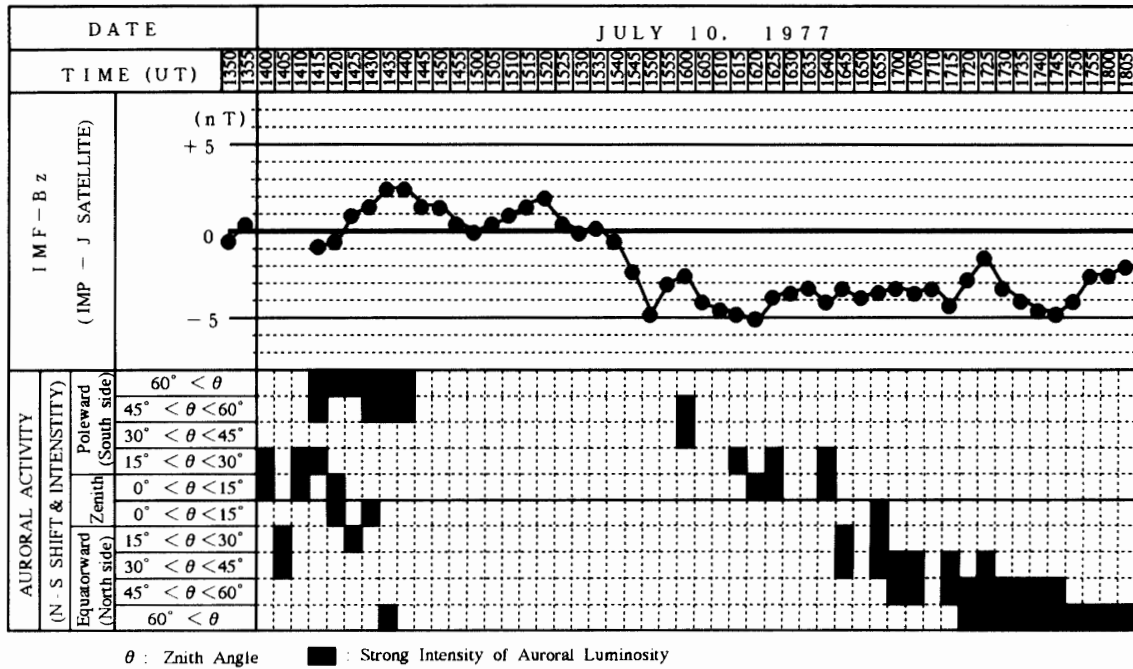


図10 オーロラ活動と惑星間磁場-Bz成分変動との比較図, 1977年7月10日
 Fig. 10. Same as Fig. 7 but for July 10, 1977.

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 $26.5 Re$ の位置にいた。太陽風の速度を約 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1550 UTに極小値($B_z = -5 \text{ nT}$)が見られ、その約10分後にあたる1600 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1615 UT以降1640 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(1550 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、1640 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、1625-1710 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1640 UTに $B_z = -4 \text{ nT}$)で顕著な変動は見らない。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ように思える。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ように見える(エネルギー蓄積過程の存在を想像させる)。

ところで、このイベント-2に対する夜側の現象を調べると、図11に示すようにTixie Bay及びDixon Islandともに磁気嵐擾乱の最中にあり、昼間側オーロラ活動との現象論的な対応

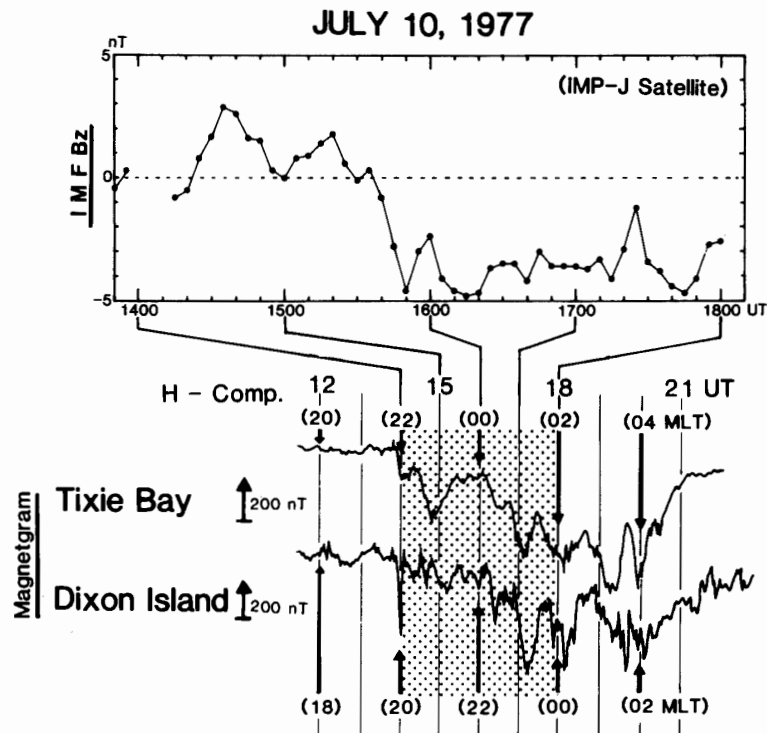


図 11 IMF- B_z 成分の変動と地上の地磁気 H 成分の変動との比較, 1977 年 7 月 10 日
 Fig. 11. Same as Fig. 8 but for July 10, 1977.

づけが困難である。ここで取り扱ったデータには時間分解能に制約があるが、Tixie Bay の地磁気データでは 1610 UT 頃開始する約 -140 nT の、また、1650 UT 頃開始する約 -260 nT のスパイク状の Negative bay が存在するが、これが図 10 に見られる第一過程のオーロラ活動と第二過程のオーロラ活動の活発化に夫れ夫れ対応しているように思われる。なお、地磁気地方時で Tixie と -2 hrs の時間差がある Dixon Island においても、Tixie とほぼ同様なスパイク状の Negative bay が同時的に観測されており、地球的規模でオーロラ活動が活発化したイベントであったことが推察される。

以上をまとめると、イベント-2 の昼間側オーロラは、IMF- B_z 成分が南向き ($B_z < 0$) の最低値を示した時刻から 20-30 分経過した後に低緯度方向への移動を開始し、その発光強度は $B_z < 0$ の条件下で B_z 値がある値以下 (例えば $B_z < -3$) を持続した時、夜側に発生する地磁気擾乱のスパイク状変化のオンセットとほぼ同時に強まる傾向が見られる。これに対し、移動を伴わないオーロラの輝度上昇は、IMF- B_z 変動が直接的に電離層レベルに反映しているように見える。

③イベント-3 —August 17, 1977—

8 月 17 日のイベントは、図 2 に示す全天カメラ写真に見られる通り 1400-1800 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型オーロラの活動が繰り返されている。図 12 の上部パネルに示した IMF- B_z 成分の変動は、1400-1450 UT の間南向きのまま徐々に

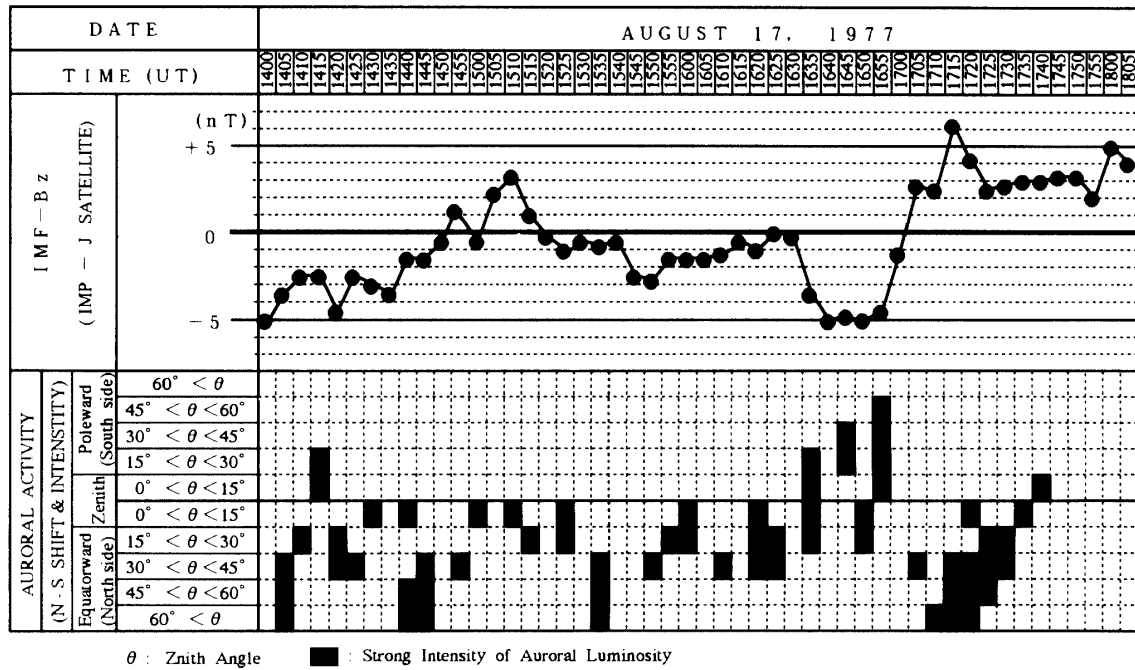


図 12 オーロラ活動と惑星間磁場-Bz 成分変動との比較図, 1977年8月17日
 Fig. 12. Same as Fig. 7 but for August 17, 1977.

|Bz|値が減少し、1500-1520 UT の間に北向きへ一時的に変化している。その後、1700 UT まで南向きの状態を維持するが、1700-1705 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 12 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、1700 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、大局的にはほとんど天頂付近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、1700 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 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ように見える。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 1715 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、1800 UT には SPS の高緯度側へ移る。このことは、昼間側オーロラの高緯度側への移動（オーロラオーヴァルの縮小）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。一方、夜側の Tixie 及び Dixon は、図 13 の地磁気データに示すように擾乱の最中にありイベント-2 と同様に昼間側オーロラとの現象論的な細かな対応づけはデータの時間分解能を考え合わすと困難のようであるが、図 2 の全天カメラ写真のオーロラ活動の様相とよく比較してみると、Tixie Bay の地磁気データに見られる幾つかのスパイク的な急激な負変動の内、1535 及び 1645-1655 UT 頃の約 -200 nT のスパイク状の負変動と同時的にオーロラの輝度が上昇していることが判る。図 2 に示されるオーロラ活動では、1440-45、1600、1620 及び 1715 UT 以降などにも輝度上昇の傾向がみられ、図 13 の Tixie Bay

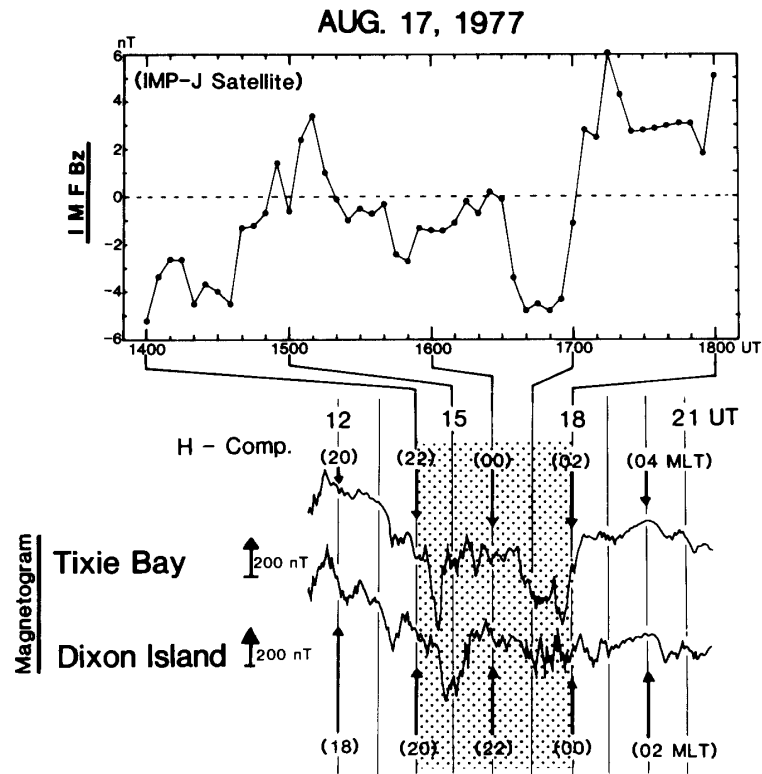


図 13 IMF-Bz 成分の変動と地上の地磁気 H 成分の変動との比較, 1977 年 8 月 17 日
 Fig. 13. Same as Fig. 8 but for August 17, 1977.

の地磁気変動をよく見ると, これらのオーロラ活動の変動に対応するかのよう, 輝度上昇の見られた時刻に対応して約 -50 nT 程度の負変動が認められる. このことは, 使用データの時間分解能に問題は残るが, 昼間側オーロラの輝度上昇が夜側の地磁気変動のスパイク的なネガティブ変化と密接な関係にあることを示唆していると思われる. 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 $36.4 Re$ 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 14-18 h 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, 1535, 1600, 1650 あるいは 1655 UT 頃に見られる移動を伴わないオーロラの輝度上昇は, いずれも Bz 値の極小値が約 10 分前近辺に見られ, $Bz < 0$ 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 ($Bz > 0$) の条件下では, 1715 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かつ高緯度側への移動も始まるように見える. 同様に, 1510 UT 頃の北向き Bz 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 1520 UT に IMF-Bz 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間側オーロラは、 $IMF-B_z$ 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 $B_z < 0$ にあつ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、 $B_z > 0$ にあつては 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。

3.2. 昼間側オーロラオーヴァルの $IMF-B_z$ 依存性

3.1 節では、昼間側で特徴的に見られるコロナ型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ごとに比較して述べた。オーロラと $IMF-B_z$ の比較をイベントごとに行うだけでは、使用したデータの時間分解能の制約から 3.1 節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 7、図 10 及び図 12 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すべ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 14 は、52 日分のオーロラデータ（データ総数は 2496 駒：14-18 h UT 間の全天カメラ写真の 5 分ごととサンプリング）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ごと（天頂角 " θ " 別）に集計し、更なるその集計数を $IMF-B_z$ 値の区分による出現頻度分布として表現し

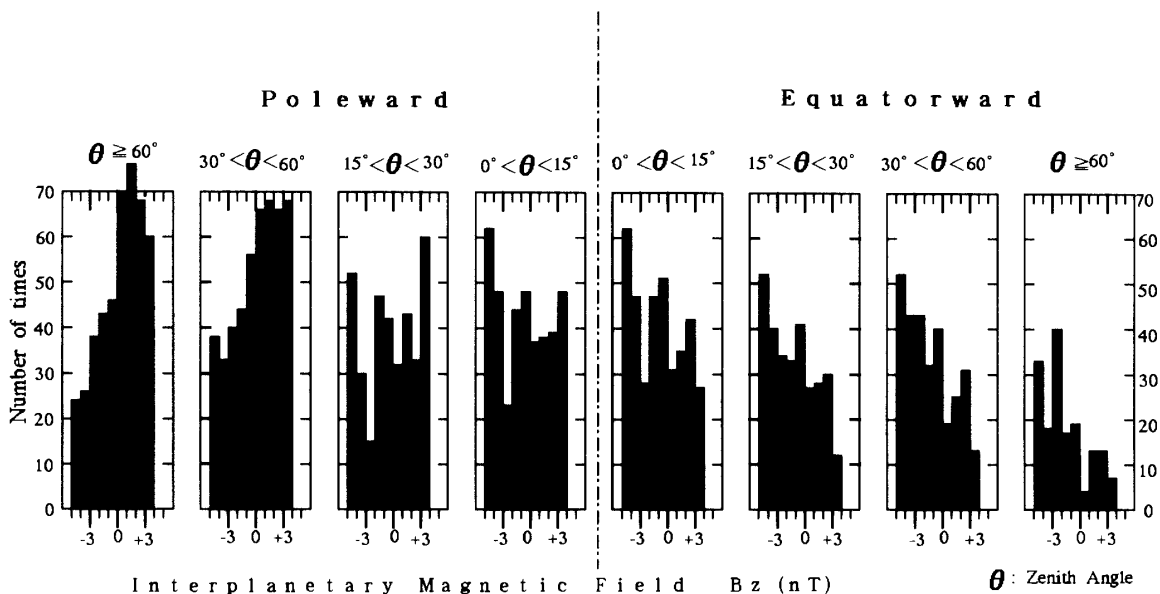


図 14 惑星間磁場- B_z 成分値と昼間側オーロラの出現場所の頻度分布

Fig. 14. Occurrence frequency of the dayside auroral appearance region due to the $IMF-B_z$ magnitude.

たものである。図 14 によれば、地磁気緯度 $74^{\circ}00'S$ (INV) の SPS で見られる昼間側オーロラは、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 14 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 15 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、昼間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。すなわち、 $B_z > 0$ では SPS の高緯度側に、また $B_z < 0$ では SPS の低緯度側において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（オーロラオーヴァルの拡大）、 B_z 値の増大に伴って高緯度方向へ（オーロラオーヴァルの縮小）移動する傾向があることを示している。なお、図 15 の表現では必ずしも明瞭ではないが、SPS の天頂を通過して更に低緯度方向へ急激な輝度上昇を伴って移動するオーロラ活動は、 $B_z > 0$ から $B_z < 0$ への変化が見られた後に発生頻度が高まり、また、その発生タイミングは 3.1 節のイベント例で述べた通り夜側の地磁気変動のスパイク状変化の発生タイミングと同時あるいは近接していることが多い。

3.1 及び 3.2 節の解析により、 74° MLAT 付近で見られる昼間側オーロラの特徴が図 16 のように要約され、以下のような知見を得た。

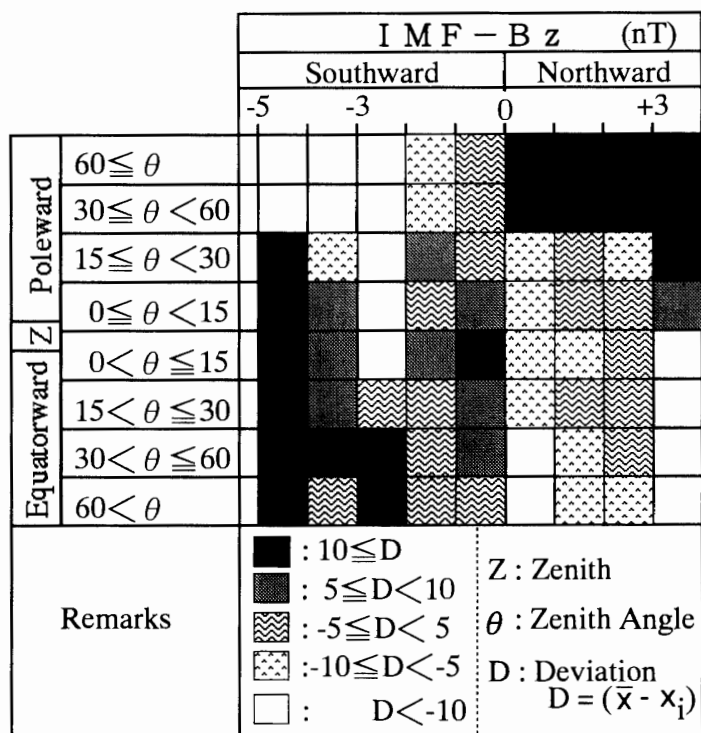


図 15 惑星間磁場- B_z 変動と昼間側オーロラが出現する領域の関係

Fig. 15. Relationship between fluctuations of the IMF- B_z and dayside auroral appearance region.

形態学的には、①総じてコロナ型オーロラが卓越することが特徴的である、②高緯度側にあってはレイ構造が顕著、③低緯度側に存在する時は一般に帯状構造が明確となる。また、動態学的には、①オーロラが見られる位置は IMF- B_z の方向に依存する傾向が強い、② $B_z > 0$ で、 74° MLAT の高緯度側に在り、 $B_z < 0$ で低緯度側に在ることが多い、③ $B_z > 0$ から $B_z < 0$ への変化で低緯度側へ移動する特性があり、逆に、 B_z が“負”から“正”へ変化すると、オーロラ発光位置は高緯度側へ移動する傾向を示す、④ B_z 値の減少によるオーロラの緯度方向の移動速度は ~ 300 m/s 程度で比較的緩慢である、⑤急激な輝度上昇を伴うオーロラの活発化（昼間側オーロラの爆発的活動； $T=0$ ）は、 $B_z < 0$ の条件下で夜側の地磁気変動のスパイク的な変化の発生タイミング ($T=0$) と密接な関連性がある、⑥⑤項のオーロラ活動の急激な低緯度方向への移動速度は ~ 3 km/s である。これらの知見は、オーロラオーヴァル起源のオーロラ活動の一般的な特性と似ている。従って、 74° MLAT (SPS) 付近で見られる昼間側のオーロラは、カस्पやクレフト/LLBL（磁気圏低緯度境界領域）付近の粒子群あるい

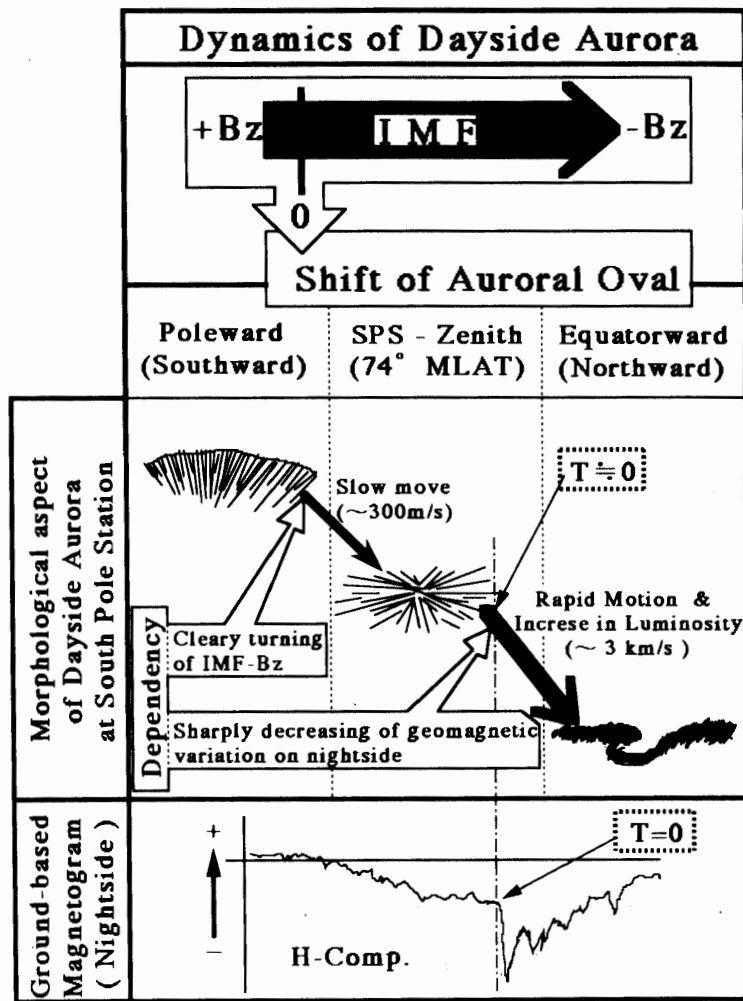


図 16 昼間側オーロラの形態学的動態学的な特徴のまとめ
 Fig. 16. Summary of morphological and dynamical characteristics of dayside aurora.

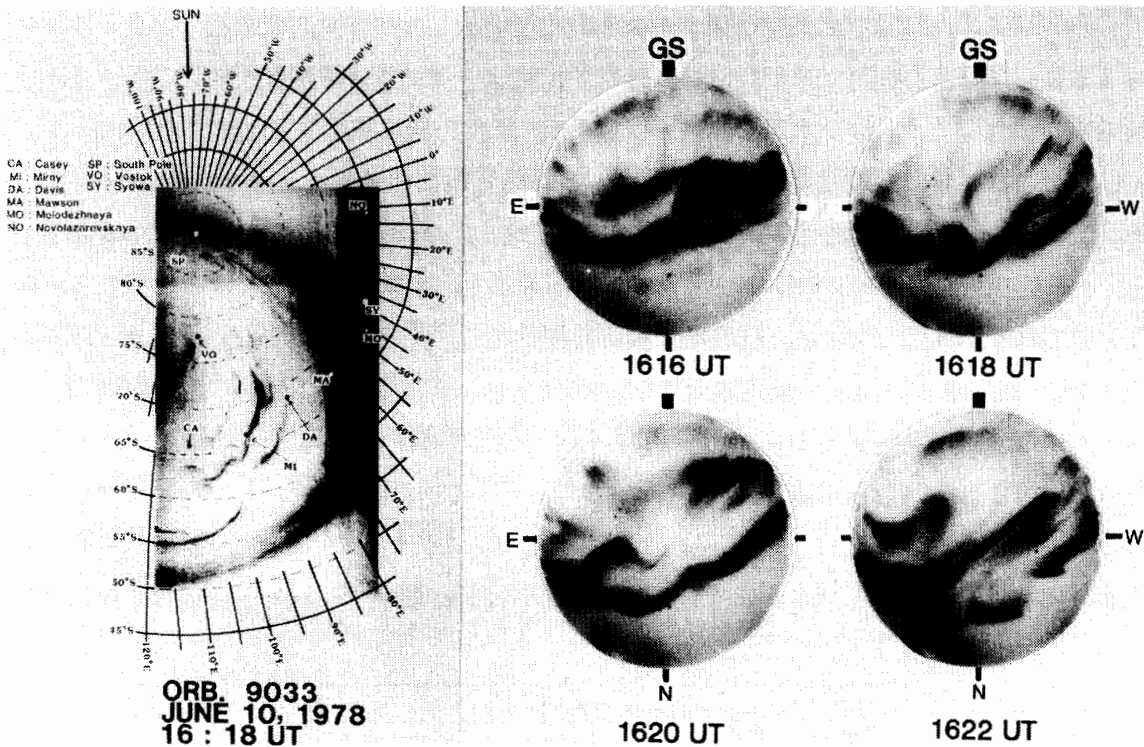


図 17 人工衛星 (DMSP) と地上全天カメラによる昼間側オーロラ画像の同時観測例

Fig. 17. An example of a dayside auroral image obtained by satellite (DMSP) and the simultaneous all sky camera data at South Pole Station.

はプラズマシート領域起源の粒子群の両方を反映している可能性があり、このことを明確にするためにはグローバルなオーロラ画像と比較する必要がある。図 17 は、高度約 800 km を飛行する DMSP 衛星がとらえたオーロラオーヴァル像と SPS の全天カメラ写真観測の同時観測例で、SPS では昼間側オーロラの特徴的な形態としてコロナ型オーロラが見られている。衛星写真データによれば昼間側オーロラの午後側の端は、14 MLT 付近で途切れているように見え、また、このオーロラの低緯度側に夕方側からオーロラオーヴァルに沿って真昼まで伸びているオーロラが見られる。それ故、図 17 で示した SPS で観測されたコロナ型オーロラはカस्पやクレフト/LLBL 領域の粒子群に関係していると推定される。今後、磁気圏の昼間側の特異領域 (カस्पやクレフト/LLBL) を地上観測で追求していくためには、SPS の立地条件の優位性を活用しつつ SPS を中心とした多点観測網による地上オーロラ観測の実施が決定的に重要である。

3.3. IMF-Bz 変動の違いによる昼間側オーロラ出現特性

SPS 全天カメラ写真による有効な観測データの中には、オーロラ現象が全く見られないという場合も少なくない。このことは、昼間側オーロラの活動が静穏・微弱である場合もあるが、SPS 全天カメラの視野外でオーロラが活発に活動している可能性も含まれている。前節

表2 1979年の南極点基地における全天カメラ観測の実施状況表
 Table 2. South Pole all-sky camera data during the period from 14–18 h UT obtained in 1979.

Total number of all-sky camera operate days (Period: April 1–July 31, 1979)		122 Days (1400–1800 UT)	
Available data	Auroral activity in sight of SPS*	67 days	91 days
	Auroral luminosity out of sight of SPS	24 days	
Unavailable data	Bright sky due to sunlight or moonlight	17 days	31 days
	Cloud	10 days	
	Instrumental malfunction or miss film-developments	4 days	

* SPS: South Pole Station

までの解析では SPS の全天カメラ写真にオーロラ現象が映っていることを条件としてデータを選出しているが、本節では SPS でオーロラ現象が見られないことも有効な情報として取り入れ、IMF-Bz 変動と 74° MLAT 付近におけるオーロラの出現特性を対比させて調べる。筆者等が入手可能である IMF-Bz 成分のデータには、IMP-J 衛星による 5 分ごとの数値データ (1977 年及び 1978 年) と IMF-Bz 成分の微細変動が連続的に調べられる ISEE-3 衛星の 10 秒値記録 (1979 年) とがある。本節の IMF とオーロラとの比較解析では、IMF-Bz 成分の細かな変動と 74° MLAT 付近における昼間側オーロラの出現に注目することから、ISEE-3 衛星 (1979 年) の IMF データとの比較を行った。表 2 は、SPS-全天カメラ写真観測の 1979 年の実施状況の一覧である。表 2 によれば 4 月 1 日から 7 月 31 日までの 122 日間のオーロラ観測期間の内、全観測日数の約 75% を占める 91 日分のデータが有効であり悪天候等により使用不能なデータは 31 日分である。有効データ・91 日分の約 74% に当たる 67 日間のデータにはオーロラ活動が観測されており、残りの 24 日間 (有効データの 26%) には SPS 全天カメラ写真の視野内にオーロラ活動は見られない。但し、ここではオーロラ輝度がパングロ全天カメラ写真の感度以下であるような現象は議論しない。74° MLAT 付近で昼間側オーロラが見られる時と見られない時について、1979 年の 14–18 h UT (10–14 h MLT) 間の全天カメラ観測期間における特徴的な IMF-Bz 変動のパターンを図 18 に示すように分類した。これらは、① Quiet Type, ② Bz > 0 Type, ③ Bz < 0 Type, ④ Clear Turning Type-A, ⑤ Clear Turning Type-B, ⑥ Double Turning Type, ⑦ Multiple Turning Type, ⑧ Fluctuation Type, ⑨ Slow Turning Type, ⑩ Others の 10-形態に類別され、それに対する昼間側オーロラの出現状況を調べた。全天カメラ観測データと IMF-Bz の変動パターンとの関係を付表 1 にまとめている。この表の I 欄によれば、全天カメラ観測期間中の最も多い IMF-Bz の変動形態は“Multiple Turning Type”の 35-イベントであり、二番目に多い変動形態は“Bz < 0 Type”のイベントで 24 日を数えている。逆に“Quiet Type”のような IMF-Bz の変動は、1979 年の観測期間中には見られない。付表 1 の II 欄では、IMF-Bz の変動形態が、“Bz < 0 Type”, “Multiple Turning Type” 及び “Fluctuation Type” の時には、昼間側オーロラが 74° MLAT 付近ではほぼ

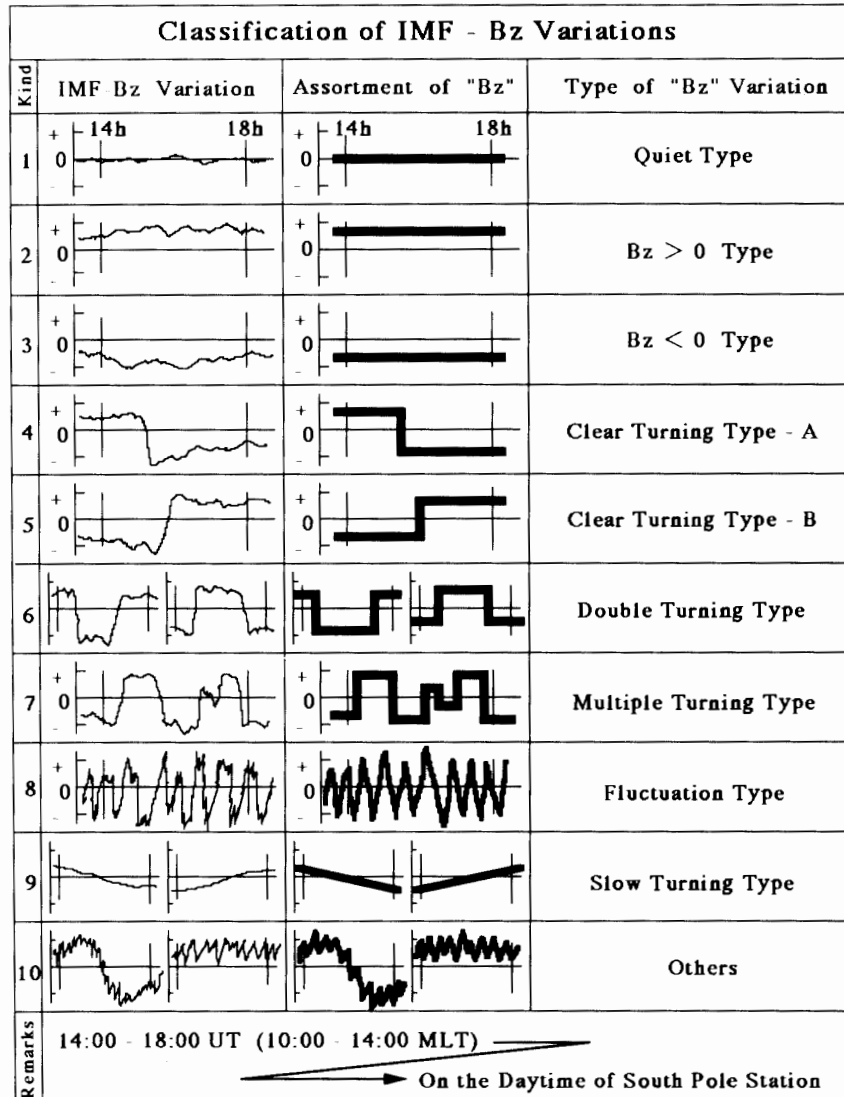


図 18 惑星間空間磁場-Bz 成分の変動の形態類別

Fig. 18. Classification of IMF-Bz variations during the period from 14 h to 18 h UT.

確実に見られることが示される。また、“Clear Turning Type-A”の IMF-変動形態では、SPS にオーロラが出現する比率が「In sight: 7, Out of sight: 1」であるのに対し、“Clear Turning Type-B”では「In sight: 1, Out of sight: 4」の比率が示され、“Double Turning Type”ではオーロラの見られる比率は高い。すなわち、“Clear Turning Type”変動形態の時に、SPS でオーロラが見られるのは、 B_z が南向き ($B_z < 0$) へ変化する場合であること、あるいは、この変化の前に北向き ($B_z > 0$) 状態の継続時間が短い時であることがわかる。“Double Turning Type”でオーロラの見られる比率が高いのは、IMF の方向変化が 14-18 h UT 間に複数回あり、 $B_z > 0$ 条件の継続時間が比較的短い状況が起きることを反映しているものと考えられる。これらのことから、“Clear Turning Type”時に、 74° MLAT 付近で昼間側オーロラが出現するのは、IMF の南向き ($B_z < 0$) 条件が少なくとも 1 時間を越えて継続するような変動形態を示す場

合であり、北向き ($B_z > 0$) が長時間継続した後に B_z が変化するパターンでは必ずしもオーロラが観測されない。一方、IMF- B_z 変動形態が “ $B_z > 0$ Type”, “Slow Turning Type” 及び “Quiet Type” である時、 74° MLAT 近辺ではオーロラ活動はほとんど見られない。

以上をまとめると、 74° MLAT 付近の昼間側オーロラの出現特性と IMF- B_z 変動には次のような傾向が見られる。SPS における昼間側のオーロラは、IMF- B_z 変動が図 18 で分類した a) $B_z < 0$ Type, b) Multiple Turning Type, c) Fluctuation Type, d) Clear Turning Type-A, e) Double Turning Type の 5 形態である時には、ほぼ確実に出現する。一方、a) Quiet Type, b) $B_z > 0$ Type, c) Slow Turning Type, d) Clear Turning Type-B の四つの変動形態に区分される場合には、ほとんど見られない。また、IMF 変動形態が Others と区分されるイベントでは、個々のイベント事情により 74° MLAT 付近のオーロラ活動の様相は異なる。

4. 昼間側オーロラの経度方向への伝搬と性質

昼間側のオーロラ現象が太陽風の影響を直接反映しているものか、それとも夜側のサブストームの影響を直接受けているかの問題は、太陽風から磁気圏内へ流入したプラズマエネルギーがオーロラ現象へ転換される物理過程を理解する上で重要である。昼間側オーロラの経度方向の活動を調べることで、プラズマエネルギーが磁気圏から直接的に昼間側の電離圏に輸送されオーロラ現象へ転換されたものなのか、磁気圏尾部を通してプラズマシートに蓄積されたものが放出されたものなのかを判断する手掛かりが得られる。ここでは、昼間側オーロラの経度方向の伝搬に注目して解析を行う。

4.1. 昼間側オーロラの経度方向の動特性

SPS で観測された 14–18 h UT (10–14 h MLT) の時間帯のオーロラ活動について、1979 年の SPS 全天カメラ写真データの内の昼間側・4 時間を通して途絶えることなくオーロラが出現していた 15 例のイベントを解析データとして選んだ (1 日分のデータ量は、240 コマ (60 ex/hr \times 4 hrs) として与えられる)。選出した 15 例のデータは、オーロラ動態の様子を明らかにするためにビデオテープデータに変換する工夫を行った。ビデオデータへの変換は、全天カメラ写真を白壁に投影し、それをビデオカメラで撮影する手法で行った。この VTR 映像データは、本来静止画像であった全天カメラ写真データがオーロラの動きを視覚的に抽出できる模擬動画データとなり、オーロラの動きに関する情報を与える。特に、オーロラ発光の内部構造に見られる輝きの強い領域の伝搬していく様相が顕在化して見える。図 19 は、VTR 映像データからオーロラの輝きの伝搬する様相を読みとりその卓越する伝搬方向を示したものである。これによると、SPS で見られる昼間側オーロラは経度的な動きに極めて特徴的な方向特性があることが示されている。例えば、15 例中の約半数を占める 7-イベント (April 27, May 21, May 22, June 16, June 27, July 26, July 27) では、オーロラの動きは西向き

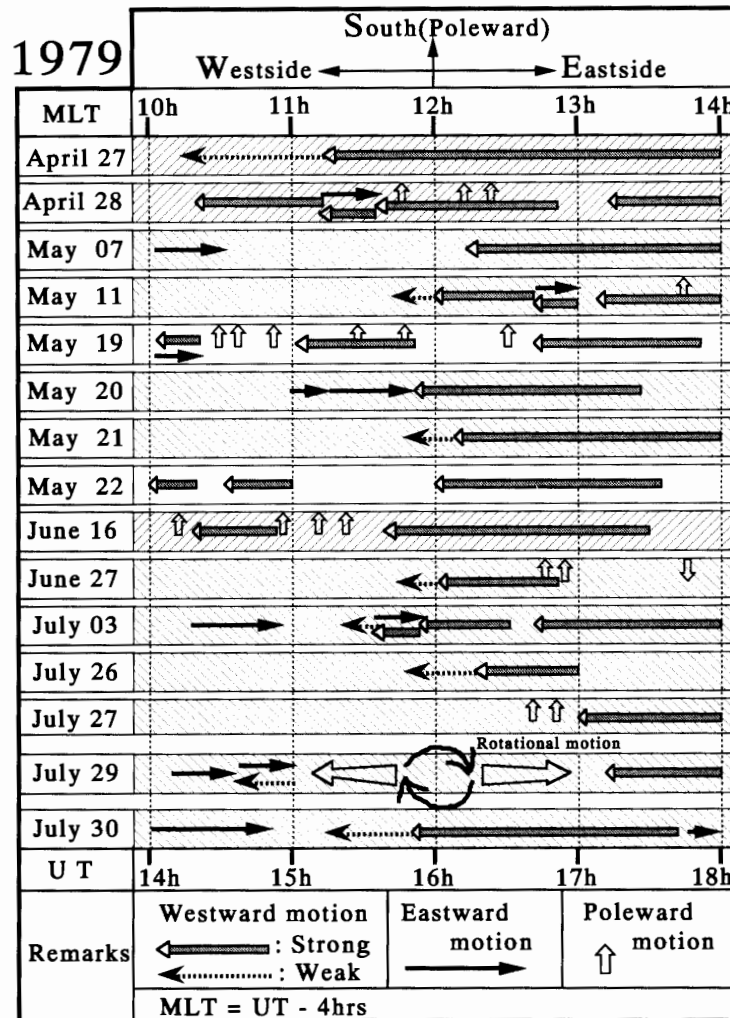


図 19 昼間側オーロラの経度的な動特性

Fig. 19. Dynamical motion for longitudinal direction of dayside aurora.

のみが卓越している。また、オーロラの西向き運動と東向き運動が全天カメラ視野内で同時に見られるイベントが 5 例 (April 28, May 11, May 19, July 03, July 29) 見出されるが、May 19-イベントを除けば東向き運動のオーロラは西向き運動のオーロラより高緯度側に観測されている。図 19 が示唆したオーロラ動態の経度方向の特徴は以下のようにまとめることができる。

①一般的に西向き運動が卓越する、②西向きの動きは“post-noon”でよく観測されることが多い、③東向きの動きは主として“pre-noon”で見られるが、その例は少ない、④西向きと東向きの運動が同時に観測される時は、東向きの運動をするオーロラが西向きの運動をするオーロラの高緯度側に観測されることが多い。

4.2. 地磁気地方時 (MLT) の違いとオーロラ伝搬方向の性質

4.1 節では、昼間側オーロラの経度的な動きに見られる一般的な特徴を報告したが、ここで

はオーロラの伝搬する方向がもつ性質について考察する. 図 20 に MLT の違いによる SPS の太陽に対する位置関係を模式的に示した. この模式図は, SPS が午前側にある時に見られるオーロラの東向き運動と, SPS が午後側に位置する時に見られるオーロラの西向き運動が反太陽方向からの伝搬であることを示している. これに対して, 太陽側から朝方側 (dawn side) 又は夕方側 (dusk side) へ伝搬するオーロラ現象は, 太陽風の直接的な入射を反映していると思われる. この模式図を利用すれば, 15-イベントはオーロラの経度的な動きがもつ性質により図 19 で表示した三つのグループに識別することができる.

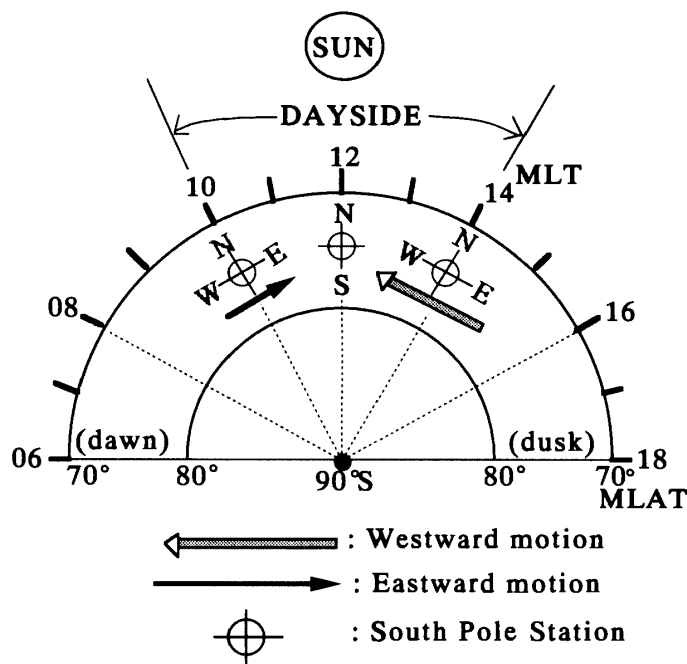

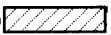


図 20 午前側及び午後側におけるオーロラの経度的な動きの模式図

Fig. 20. The longitudinal movements of pre- and post-noon auroras are schematically illustrated.

① : この模様で区分されるオーロラ現象は, 午後側で西向き運動が卓越し, ほぼ mid-noon 近辺でその動きが消滅する傾向が見られる. また, 東向き運動は, あるとすればほとんど午前側に見られる. 解析に用いた 15-イベントのうち 10-イベント (May 07, May 11, May 20, May 21, June 27, July 03, July 26, July 27, July 29, July 30) がこの区分に属した. 10-イベントに見られる昼間側オーロラの動きは, 図 20 の模式図により, 夕方あるいは朝方から太陽方向へ向かう方向である. 図 21 にこのマークで区分されるイベントの例を示した. ここで示した July 30-イベントでは, 11 MLT (15 UT) 頃までのオーロラの様相と 12 MLT (16 UT) 以後のオーロラの様相が異なっているように見える. 図 19 によれば, オーロラの様相が変わったと思われる時間帯付近で, オーロラの運動が東向きから西向き (午後側で顕著) に変化していることが示される.

② : この模様で区分されるオーロラ現象は, オーロラの西向き運動が午前側と午

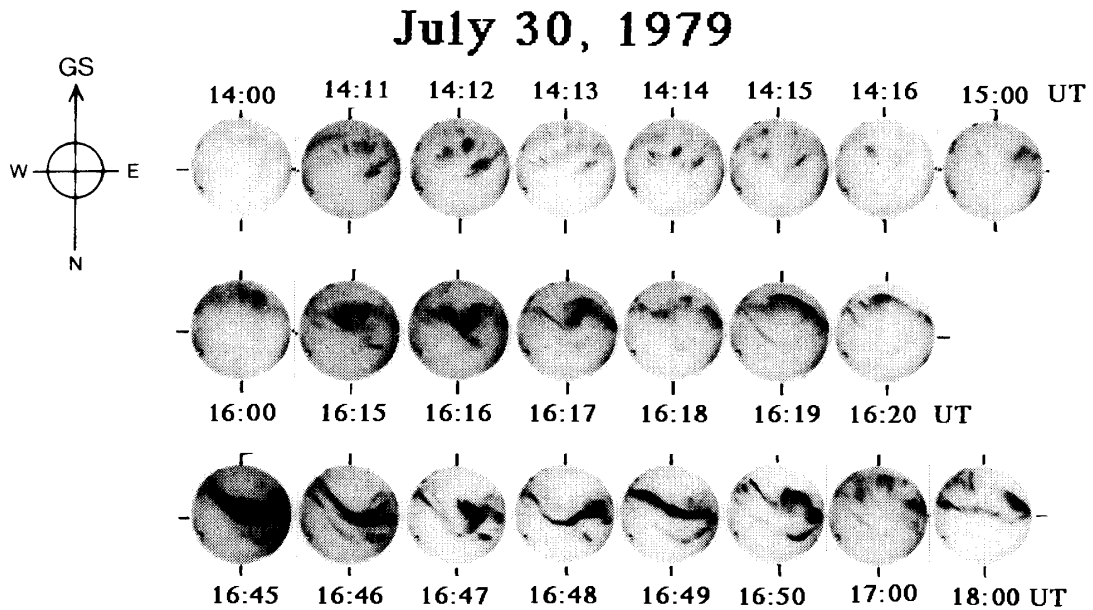


図 21 反太陽側から伝搬する昼間側オーロラの例, 1979年7月30日

Fig. 21. An example of a dayside auroral motion from propagated from the direction opposite to the sun, July 30, 1979.

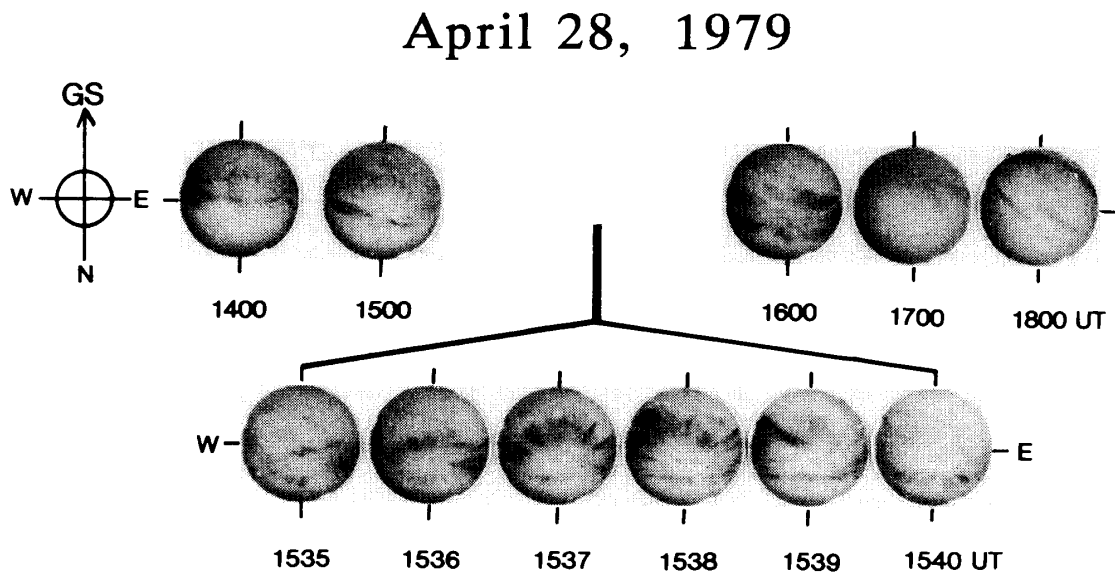


図 22 午前側と午後側で継続的な昼間側オーロラの例, 1979年4月28日

Fig. 22. An example of a dayside aurora without gap between post-noon and pre-noon sectors on April 28, 1979.

後側の両方に存在し、しかも、mid-noon の近辺でオーロラ現象が連続的に見えるイベントである。従って、午前側で見られる西向き運動は、午後側からの回り込み現象と考える。図 22 の全天カメラ写真データは、オーロラ現象が午前-午後で連続的に見えるイベント例である。ここで示した April 28-イベントでは、10 MLT (14 UT) から 12 MLT (16 UT) までに見られるオーロラがレイ構造を伴ってほぼ東-西に発光領域が延び、午前と午後側のオーロラ現象

が連続的であることが確かめられる (13 MLT (17 UT) 以降のオーロラ様相は不鮮明である)。このタイプに区分けされるイベントは、April 27, April 28 及び June 16 の3例であった

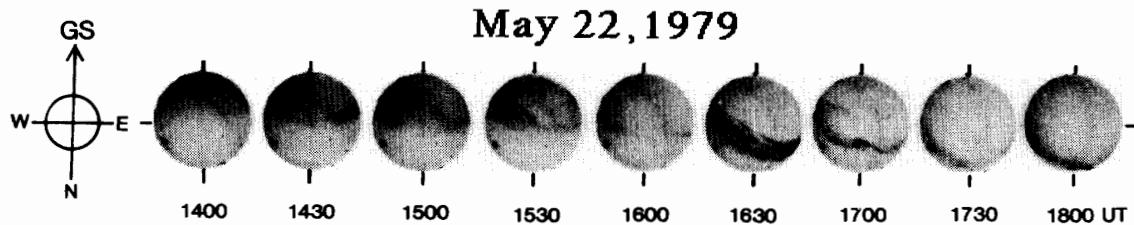


図 23 午前側と午後側で断続的な昼間側オーロラの例, 1979年5月22日

Fig. 23. An example of a dayside auroral phenomenon gap between post-noon and pre-noon sectors on May 22, 1979.

③ : ②と同様に卓越する西向き運動が午前側と午後側に存在するイベントであるが、mid-noon 近辺でオーロラが断続的に見える現象がこのマークに区分される (May 19 と May 22-イベントが該当した)。図 23 に May 22-イベントの全天カメラ写真データが示されているが、午前側には形態のはっきりしない微弱なオーロラ現象があり、mid-noon 過ぎ以後で夜側のオーロラサブストーム現象によく似かよった輝度上昇を伴う活動的なオーロラ現象が見られる。午前側に見られる形態の不明確なオーロラ現象は、ほぼ東—西に発光領域が伸びているように見えるが、午後側のそれは北東—南西方向に伸び発光領域の方向が mid-noon 近辺で変化している。従って、May 22-イベントでは mid-noon 近辺を境として、午前側で西向きへ伝搬するオーロラの輝度変動と午後側に見られるオーロラの西向きへの伝搬活動は異質であると考えられる。

4.3. カスパやクレフト領域のオーロラ現象の推定

全天カメラ写真内でオーロラの西向き運動と東向き運動が同時に観測されている 5-イベント (April 28, May 11, May 19, July 03 及び July 29) を用い、太陽側から反太陽側へ輝度が伝搬するオーロラの動特性に着目して、昼間側磁気圏の特異領域 (カスパやクレフト領域) のオーロラ現象を推論する。以下に個々の例について説明する。

—April 28-イベント—

このイベントは、4.2 節で全天カメラ写真データの映像により午前側と午後側のオーロラが連続的な現象であると見なした現象である。それ故、図 19 の 1030–1400 MLT (1430–1800 UT) 頃に示されるオーロラの西向き運動は、夕方側 (dusk side) からの現象が午前側まで回り込み延びているものと推論する。この推論が正しいとすれば、1120–1140 MLT (1520–1540 UT) 頃に見られる東向き運動をするオーロラは、太陽側から夕方側 (dusk side) への伝搬を意味する。そして、西向きへ伝搬するオーロラの高緯度側に存在している。このオーロラ現象の様相を確かめるために、西向き運動と東向き運動が同時に見られた時刻付近のオーロラ

を図 22 により再吟味する。図 22 の 1135–1140 MLT (1535–1540 UT) に見られるオーロラの様相は、低緯度側に存在するオーロラ（西向きに伝搬）が、全天カメラ写真の西側の端近辺で渦巻き状となり、逆流する形で高緯度側へ回り込んでいるように見える（東向きへの伝搬）。従って、ここで見ているオーロラ現象は、西向き伝搬も東向き伝搬も粒子源が同一であるものと思われる。

—May 11-イベント—

このイベントは、西向きと東向きのオーロラ運動が午後側の領域で同時に見られた唯一の例である。図 19 の 1250–1300 MLT に示される東向き運動は、午後側の現象であることから太陽側から夕方側 (dusk side) へ伝搬するオーロラ活動と見なせる。この東向きに伝搬するオーロラは、夕方側 (dusk side) から伝搬してくるオーロラ現象（西向きへの動き）の高緯度側に位置しており、昼間側磁気圏に起源をもつ現象との対応を想像させる。このイベントのオーロラ活動の様相を示す全天カメラ写真データは、月光の影響と薄い絹雲が全天をヴェール状に覆い、写真データとしてオーロラの様相を表示するのは難しいのでここでは省略した。しかし、1250–1300 MLT 頃の全天カメラフィルムデータのイメージには weak aurora の存在を確認することができる。

—May 19-イベント—

このイベントは、4.2 節でオーロラが午前側と午後側で不連続的な現象であると分けした。従って、図 19 で示す西向き運動は午前側と午後側で性質が異なり、午前側の西向き運動は太陽側から朝方側 (dawn side) への伝搬と考えられる。それ故、1010–1030 MLT 頃に見られる東向き運動は反太陽側からのオーロラ伝搬であり、このオーロラの高緯度側に存在し西向きへ伝搬する現象は、昼間側磁気圏に起源をもつオーロラと推定される。このイベントのオーロラ活動の様相を付図 2 に示す。

—July 03-イベント—

このイベントは、4.2 節で継続的な現象であると分けした。従って、図 19 の 1140–1150 MLT 頃に見られる西向きのオーロラ伝搬は夕方側 (dusk side) からの回り込みを意味し、同時に観測されている東向きに動くオーロラは太陽側から夕方側 (dusk side) へ伝搬しているものと思われる。西向きに伝搬するオーロラの高緯度側で東向きに伝搬するオーロラ現象は、昼間側磁気圏に起源をもつオーロラと考えられる。このイベントのオーロラ活動の様相を付図 3 に示す。

—July 29-イベント—

このイベントのオーロラ活動は、模擬動画像データにより 1200 MLT 前後の天頂付近で渦巻き状の回転運動の様相を認めた。渦巻き状に回転するオーロラは、midnoon 頃を中心に活動し午前側にも午後側にも広がっている様に見えるので、このイベントは継続的な現象であると区分された。従って、図 19 の 1040–1100 MLT (1440–1500 UT) 頃に見られる西向きの

オーロラの動きは夕方側 (dusk side) からの伝搬を意味している。この時、同時に観測されている東向きに動くオーロラは、太陽側から夕方側 (dusk side) へ伝搬しているものと考え、西向きに伝搬するオーロラの高緯度側で東向きに伝搬するオーロラ現象は、昼間側磁気圏に起源をもつオーロラを想像させる。このイベントのオーロラ活動の様相を付図4に示す。

全天カメラ写真内でオーロラの西向き運動と東向き運動が同時に観測されている5-イベントの解析から、April 28-イベントを除く4-イベントに見られる高緯度側の発光現象が昼間側磁気圏 (カスプやクレフト領域) に起源をもつオーロラ現象と推定され、これらのオーロラ現象が、いずれも形態のはっきりしない weak aurora に対応していることが確かめられた。このオーロラは、図1で分類した昼間側オーロラの特徴的な形態に属さない。筆者等は、この weak aurora がカスプ域に特徴的なオーロラであり、図1で分類した dayside aurora (10–14 MLT) は、クレフト (LLBL) 領域に起源をもつオーロラではないかと考えている。それ故、クレフト (LLBL) 起源と思われる dayside aurora の経度方向の動きは、必ずしも昼間側から夕方あるいは朝方側へ向かうとは限らないのではないかと考える。このことに関する議論は5章で行う。

5. まとめ

本論では、南極点基地 (South Pole Station; SPS, 74° M-LAT) で得られた全天カメラ写真を解析データの中心にして、10–14 MLT (14–18 UT) の昼間側に見られるオーロラの形態学的及び動態学的特性をまとめて報告した。また、経度的な伝搬特性から昼間側磁気圏の特異領域 (カスプやクレフト領域) のオーロラ現象を推論した。SPS の昼間側で見られたオーロラについて、現象論的な視点から解析した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 昼間側オーロラの形態学的な特徴

- ① 昼間側オーロラの形態は、総じてコロナ型オーロラが卓越することが特徴的である。
- ② 高緯度側にあつては、レイ構造 (ray structure) が顕著である。
- ③ 低緯度側に存在する時は、一般に帯状構造 (band like structure) が明確となり、コロナ型オーロラに比べ輝度が強く運動も活動的である。
- ④ レイ構造及びコロナ型オーロラの出現は 10–13 MLT に卓越し、帯状構造のオーロラは 13 MLT 以降に低緯度側で見られる傾向がある。
- ⑤ 低緯度側で顕著となる帯状型オーロラは、屋過ぎ側 (Afternoonside: 14–17 MLT) と区分けた時間帯で見られるオーロラ形態の特徴に極めて類似している。
- ⑥ 真昼近傍 (10–14 MLT) に出現する特徴的なコロナ型オーロラを挟む朝側 (06–10 MLT) のオーロラ形態と午後側 (14–18 MLT) のオーロラ形態の様相は異なる。
- ⑦ コロナ型オーロラは、真夜中側 (22–02 MLT) のディスクリートオーロラに比べ発光位置の変動や形態の変化が緩慢で、出現している時間が長い (持続時間が約 3–4 時間) などの

特性をもつ。

(2) 昼間側オーロラの動態学的な特徴

- ①昼間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。
- ②出現頻度は、 **$B_z > 0$** で 74° MLAT (SPS) より高緯度側に、 **$B_z < 0$** で SPS の低緯度側において高くなる。
- ③ 74° MLAT (SPS) で見たオーロラの発光位置は、**IMF- B_z** 値の減少に伴って低緯度方向へ（オーロラオーヴァルの拡大）、 **B_z** 値の増大に伴って高緯度方向へ（オーロラオーヴァルの縮小）移動する傾向が一般的である。
- ④ **B_z** 値の減少によるオーロラの緯度方向の移動速度は ~ 300 m/s 程度で比較的緩慢である。
- ⑤ SPS の天頂を通過して更に低緯度側へ急激な輝度上昇を伴って移動するオーロラ活動は、 **$B_z > 0$** から **$B_z < 0$** への変化が見られた後に発生頻度が高まる。
その発生タイミングは、夜側の地上で観測される地磁気変動のスパイク的な変化の発生タイミングと同時あるいは近接していることが多い。また、**IMF- B_z** 変動との比較によれば **B_z** が極小値を示した時刻から約 25–30 分経過した後に発生する傾向がある。
- ⑥ ⑤項のオーロラ活動の急激な低緯度方向への移動速度は ~ 3 km/s である。
- ⑦ 移動を伴わないオーロラの輝度上昇の場合は、太陽風速度を約 400 km/s と仮定すれば、衛星高度で観測される **IMF- B_z** 変動の極小値が電離層レベルのオーロラ励起に直接的に関連している可能性がある（但し、**IMF- B_z** の方向は南向きが条件）。

(3) IMF- B_z 変動形態の違いと 74° MLAT 付近の昼間側オーロラ出現特性

- ① **IMF- B_z** 変動が次の 5 形態である時、 74° MLAT 付近に昼間側オーロラはほぼ確実に出現する。
 1. **$B_z < 0$ Type**, 2. **Multiple Turning Type**, 3. **Fluctuation Type**, 4. **Clear Turning Type-A**, 5. **Double Turning Type**.
- ② **IMF- B_z** 変動が次の 4 形態である時、 74° MLAT 付近に昼間側オーロラは見られない。
 1. **Quiet Type**, 2. **$B_z > 0$ Type**, 3. **Slow Turning Type**, 4. **Clear Turning Type-B**.
- ③ その他
 1. **Others**: 74° MLAT 付近のオーロラ活動の様相は、個々のイベント事情により異なる。
 2. ここで示した **IMF- B_z** 変動形態の類別パターンは図 20 に示した。

(4) 昼間側オーロラの経度的な動態の特徴

- ①昼間側オーロラの経度的な動きは一般に西向き運動が卓越する。
- ②西向きの動きは“post-noon”で観測されることが多い。
- ③東向きの動きは主として“pre-noon”で見られるが、その頻度は少ない。
- ④西向きと東向きの運動が全天カメラ視野内で同時に見られる時は、東向き運動をするオーロラが西向き運動をするオーロラの高緯度側に観測されることが多い。

(5) 昼間側磁気圏の特異領域（カスプやクレフト領域）に見られるオーロラ現象の推定

① 観測点の MLT による位置の違いとオーロラの経度的な動きを調べ、太陽側から伝搬するオーロラ現象が以下の 5-イベントであることを確かめ、これが昼間側磁気圏の特異領域のうちのカスプ領域に見られるオーロラ現象と推定した。

- 1) May 11 '79 1250–1300 MLT (1450–1500 UT) の東向き伝搬特性を示すオーロラ現象
- 2) May 19 '79 1010–1030 MLT (1410–1430 UT) の西向き伝搬特性を示すオーロラ現象
- 3) May 22 '79 1000–1100 MLT (1400–1500 UT) の西向き伝搬特性を示すオーロラ現象
- 4) July 03 '79 1140–1150 MLT (1540–1550 UT) の東向き伝搬特性を示すオーロラ現象
- 5) July 29 '79 1040–1100 MLT (1440–1500 UT) の東向き伝搬特性を示すオーロラ現象

② カスプ領域のオーロラ現象と推定した 5-イベントのオーロラの様相は、全天カメラ写真データによればいずれも輝度が貧弱な形態の不鮮明な発光現象に対応している。

③ 昼間側で見られるオーロラ現象の内、太陽側からの伝搬特性を示すオーロラ現象はいずれも輝度が貧弱な形態の不鮮明な発光現象に対応し、昼間側の特徴的な形態であるコロナ型オーロラの多くは反太陽方向からの伝搬特性を示している。

(6) 昼間側オーロラと磁気圏の関係

① 5 章 (2) 項でまとめた①～⑤及び⑦の動特性は、 74° MLAT (SPS) 付近で見られる昼間側オーロラが、磁気圏の低緯度境界領域 (LLBL: Low Latitude Boundary Layer) 付近もしくはプラズマシート領域 (PS: Plasma sheet) 起源のオーロラ降下粒子を反映している可能性が高いことを示唆する。

② 昼間側オーロラの急激な輝度上昇を伴った低緯度側への爆発的な移動の発生タイミングは、IMF- B_z 成分の南向き変動の極小値から約 25–30 分後に見られることが多い。もし、IMF- B_z 変動の極小値が昼間側オーロラの爆発的な現象を演出している要因であると仮定すると、衛星位置と太陽風の伝搬速度とオーロラ活動の爆発的な現象の発生の関係は磁気圏におけるエネルギー蓄積過程の存在を想像させる。

南極点基地で得られた初期の全天カメラ写真データから、昼間側に見られるオーロラ現象の特性を調べ昼間側磁気圏の特異領域（カスプやクレフト領域）のオーロラ現象の特定を試みた。オーロラの経度的な動きから推定した特異領域のオーロラ現象は、カスプ領域とクレフト領域で様相が異なるのではないかとの示唆を与えている。筆者等の解析からカスプ領域のオーロラと推定された現象は、観測される頻度が少ないことから南極点基地 (74° MLAT) 付近よりも更に高緯度側のある限られた範囲に位置していることが推察される。磁気圏の昼間側の特異領域（カスプやクレフト領域）を地上観測で追求していくためには、南極点基地の立地条件の優位性を活用しつつ南極点基地を中心とした多点観測網による地上観測の実施が決定的に必要である。

昼間側オーロラの研究に関しては、これまで SANDHOLT *et al.* (1986) が Ny Ålesund, Sval-

bard (75° MLAT) のオーロラデータを用いて精力的に解析を行ってきている。彼等の解析結果によると、惑星間磁場 (IMF) が南向きの時にはオーロラの出現域は低緯度側にあり、北向きになると高緯度側に移ることが示されている。これは筆者等がここで解析した結果と一致している。また、彼等は、SANDHOLT *et al.* (1994) の論文で昼間側オーロラの出現域が太陽風の風圧 ($p=n\text{mv}^2$) や密度 (n) によってもコントロールされることを指摘している。ところで、最近の彼等の研究 (SANDHOLT *et al.*, 1996) によると、IMF が北から南へあるいは南から北へ顕著に変化する場合には、昼間側オーロラの出現域に飛びが見られることを報告し、これがテイルロブの reconnection に起因するのではないかと結論づけている。フォトメータのデータのみ解析から、このように結論づけるのはやや強引であるようにも思えるが新しい指摘であり興味深い報告である。このように昼間側オーロラの振る舞いは、惑星間磁場変動や太陽風粒子の変化に強く依存しているとともに磁気圏との reconnection とも複合的に絡み合っている可能性もあり単純ではないように思える。筆者等は、本論文で示した解析結果を基に STEP 期間中に得られたグリーンランド、スピッツベルゲンにおける昼間側オーロラのデータ解析を現在行っており、これらの研究によりその全体像を明らかにしていきたいと考えている。

一方、昼間側磁気圏の特異領域であるカスプとクレフトの相違については、HEIKKILA (1985) が次のように述べている。クレフト領域は、12 MLT 付近に 100 eV 程度の電子が入射し、630 nm の発光が見られる。この入射には high energy 粒子の入射も認められる。これに対して、カスプ領域の入射粒子はそれより低いエネルギーの電子で、入射域も 12 MLT 付近に限定され、discrete auroral arc のようなものは見られない。また、NEWELL and MENG (1988) の DMSP 衛星の粒子データ解析によると、昼間側磁気圏の粒子源としてカスプと LLBL があり、電離層レベルでは、それぞれ“cusp proper”と“クレフト”に分類されることが示されている。彼等の結果によれば、カスプは、150 eV 程度の電子が 12 MLT 付近の狭い領域に入射しており、平均的なエネルギーフラックスは $2.5 \text{ erg/cm}^2\cdot\text{s}$ である。これに対して、クレフト (LLBL) 域に入射する電子の平均エネルギーは 250 eV であり、平均的なエネルギーフラックスは $1.5 \text{ erg/cm}^2\cdot\text{s}$ である。また、SMITH (1994) はカスプ域で観測されるオーロラの特徴として 6300 Å と 5577 Å の比 (6300/5577) が 2 以上で 6300 Å の明るさが 2 kR 程度であることを SANDHOLT *et al.* (1986) の結果を引用して述べている。

これらの結果と筆者等が得た結果とを比較すると、昼間側オーロラの特異領域 (カスプやクレフト) に観測されたコロナ型オーロラやバンド状オーロラの大部分は LLBL を起源とするクレフト域のオーロラに対応しているものと思われる。これに対して、オーロラの経度方向の動きより特徴づけられた weak aurora は、discrete arc 的な特徴もなく、カスプ域のオーロラではないかと推定される。いずれにしても、筆者等が示したいいくつかの昼間側オーロラ

の起源について、最終的な結論を下すためには人工衛星の粒子データとの同時比較が重要であり、今後更に解析を続けていきたい。

謝 辞

国際学術連合会議 (ICUS: International Council of Scientific Unions) に常設する ICSU パネルは、1980年10月、国立極地研究所 (NIPR) に世界オーロラデータセンター (WDC-C2 for Aurora) の設立を認可した。本論で使用した南極点基地の全天カメラ写真データは、WDC-C2 for Aurora, NIPR が収集した資料である。データを提供した赤祖父俊一教授 (現在、アラスカ大学地球物理研究所長) とデータを収集し統一的な整理を実施した WDC-C2 for Aurora, NIPR に感謝致します。

筆者等の解析作業は、WDC-C2 for Aurora の業務の一環として収集された資料について、その有用性を確認することとデータの国際的、国内的な有効利用の促進をも視野にいれていたことから、故永田 武東京大学名誉教授 (元、国立極地研究所長)、國分 征教授 (現在、名古屋大学太陽地球環境研究所長) 及び平澤威男教授 (現在、国立極地研究所長) の三先生に大所高所からの惜しみないご指導と叱咤激励をいただきました。藤井良一博士 (現在、名古屋大学太陽地球環境研究所教授) には有益な議論をしていただきました。また、1980年代に国立極地研究所の超高層物理学研究室に在籍された福西 浩博士 (現在、東北大学教授) を始めとした当時の超高層物理研究グループスタッフの皆様には数多くの議論と激励を頂戴しました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

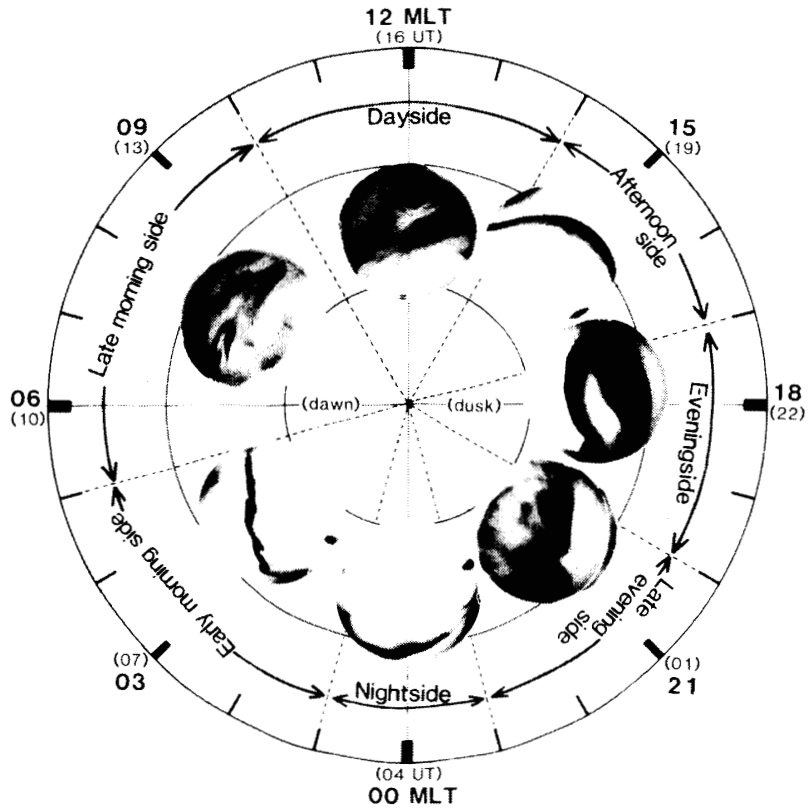
- AKASOFU, S.-I. (1965): Dynamic morphology of auroras. *Space Sci. Rev.*, **4**, 498–540.
- AKASOFU, S.-I. (1968): *Polar and Magnetospheric Substorms*. Dordrecht, D. Reidel, 280 p.
- AKASOFU, S.-I. (1974): A study of auroral displays photographed from the DMSP-2 satellite and from the Alaska meridian of stations. *Space Sci. Rev.*, **16**, 617–725.
- AKASOFU, S.-I. (1976): Recent progress in studies of DMSP auroral photographs. *Space Sci. Rev.*, **19**, 169–215.
- AKASOFU, S.-I. (1978): Recent progress in antarctic auroral studies. *Upper Atmosphere Research in Antarctica*, ed. by L. J. LANZEROTTI and C. G. PARK. Washington, D. C., Am. Geophys. Union, 157–199 (Antarctic Research Series, Vol. 29).
- DAVIS, T. N. (1966): The application of image orthicon techniques to auroral observation. *Space Sci. Rev.*, **6**, 222–247.
- DAVIS, T. N. (1978): Observed characteristics of auroral forms. *Space Sci. Rev.*, **22**, 77–106.
- 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.
- FELDSTEIN, Y. I. (1963): Some problems concerning the morphology of auroras and magnetic disturbances at high latitudes. *Geomagn. Aeron.*, **3**, 183–192.
- FELDSTEIN, Y. I. (1964a): Auroral morphology, I. The location of the auroral zone. *Tellus*, **16**, 252–257.
- FELDSTEIN, Y. I. (1964b): Auroral morphology, II. Auroral and geomagnetic disturbances. *Tellus*, **16**, 258–267.
- FELDSTEIN, Y. I. and STARKOV, G. V. (1968): Auroral oval in the IGY and IQSY period and ring current

- in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.*, **16**, 129–133.
- HEIKKILA, W. J. (1985): Definition of the cusp. *The Polar Cusp*, ed. by J. A. HOLTET and A. EGELAND. Dordrecht, D. Reidel, 387–395.
- HORWITZ, J. H. and AKASOFU, S.-I. (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.
- LUI, A. T. Y., PERREAULT, P., AKASOFU, S.-I. and ANGER, C. D. (1973): The diffuse aurora. *Planet. Space Sci.*, **21**, 857–861.
- LUI, A. T. Y., ANGER, C. D., VENKATESAN, D., SAWCHUK, W. and AKASOFU, S.-I. (1975): The topology of the auroral oval as seen by the ISIS 2 scanning photometer. *J. Geophys. Res.*, **80**, 1795–1804.
- NEWELL, P. T. and MENG, C.-I. (1988): The cusp and the cleft/boundary layer: Low-altitude identification and statistical local time variation. *J. Geophys. Res.*, **93**, 14549–14556.
- OGUTI, T. (1975): Metamorphoses of aurora. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser. A*, **12**, 101 p.
- OGUTI, T. (1978): Observations of rapid auroral fluctuations. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **30**, 299–314.
- OGUTI, T. (1981): TV observations of auroral arcs. *Physics of Auroral Arc Formation*, ed. by S.-I. AKASOFU and J. R. KAN. Washington, D. C., Am. Geophys. Union, 31–41 (Geophysical Monograph 25).
- ROYRVIK, O. and DAVIS, T. N. (1977): Pulsating aurora: Local and global morphology. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4720–4740.
- SANDHOLT, P. E., HENRIKSEN, K., DEEHR, C. S., SIVJEE, G. G., ROMICK, G. J. and EGELAND, A. (1980): Dayside cusp auroral morphology related to nightside magnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **85**, 4132–4138.
- SANDHOLT, P. E., DEEHR, C. S., EGELAND, A. and LYBEKK, B. (1986): Signatures in the dayside aurora of plasma transfer from the magnetosheath. *J. Geophys. Res.*, **91**, 10063–10079.
- SANDHOLT, P. E., FARRUGIA, C. J., BURLAGA, L. F., HOLTET, J. A., MOEN, J., LYBEKK, B., JACOBSEN, B., OPSVIK, D., EGELAND, A., LEPPING, R., LAZARUS, A. J., HANSEN, T., BREKKE, A. and FRIIS-CHRISTENSEN, E. (1994): Cusp/cleft auroral activity in relation to solar wind dynamic pressure, IMF Bz and By. *Physical Signatures of Magnetospheric Boundary Layer Processes*, ed. by J. A. HOLTET and A. EGELAND. Dordrecht, Kluwer Academic, 173–188.
- SANDHOLT, P. E., FARRUGIA, C. J., ØIEROSET, M., STAUNING, P. and COWLEY, S. W. H. (1996): Auroral signature of lobe reconnection. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1725–1728.
- SMITH, R. W. (1994): Dayside aurora and magnetopause processes. *Physical Signatures of Magnetospheric Boundary Layer Processes*, ed. by J. A. HOLTET and A. EGELAND. Dordrecht, Kluwer Academic, 141–155.
- 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.
- YAMAMOTO, T. and OGUTI, T. (1982): Recurrent fast motions of pulsating auroral patches 1. A case study on optical and quantitative characteristics during a slightly active period. *J. Geophys. Res.*, **87**, 7603–7614.

(1996年7月3日受付; 1996年8月22日改訂稿受理)

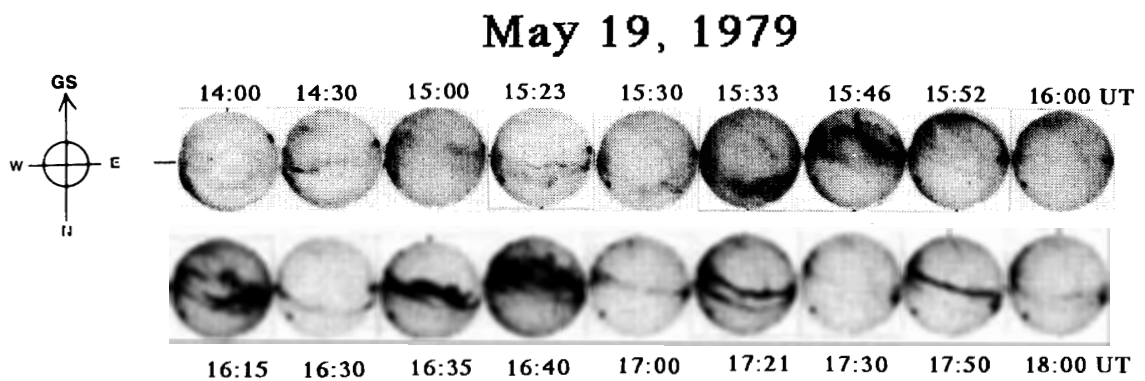
付表1 惑星間空間磁場-Bzの変動パターンと昼間側オーロラの活動との関係
 Table A1. The relationship between IMF-Bz variations and daytime auroral activity.

	Type of "Bz" variation	I Number of cases (1979)	II Auroral activity			III Remarks (The column shows aurora appearance)
			Available data		Unavailable data	
			In sight	Out of sight		
1	Quiet Type	0	—	—	—	Auroral phenomenon may perhaps no active anywhere
2	Bz>0 Type	8	0	5	3	Auroral activity almost out of sight on the sky at SPS
3	Bz<0 Type	24	16	1	7	Auroral phenomenon almost in sight upon the SPS ★Proviso : ①active aurora ← Bz-variation ; steplike, fluctuating and/or large Bz-value ②weak aurora ← Bz-variation ; constant or smallness
4	Clear Turning Type - A	12	7	1	4	Important condition for auroral active are seen at SPS ①Southward turning of IMF-Bz component ②Duration times of northward condition before turning
5	Clear Turning Type - B	9	1	4	4	
6	Double Turning Type	19	14	2	3	
7	Multiple Turning Type	35	23	6	6	Auroral phenomenon almost in sight upon the SPS ★Proviso : ①active aurora ← Bz-variation ; steplike, fluctuating and/or large Bz-value ②weak aurora ← Bz-variation ; constant or smallness
8	Fluctuation Type	5	4	0	1	Auroral phenomenon almost in sight upon the SPS ★Strong aurora luminosity compared with other "Bz" variation type
9	Slow Turning Type	6	1	4	1	Auroral phenomenon almost out of sight on the sky at SPS
10	Others	4	1	1	2	? (case by case)
Number of total days		122 days	67	24	31 days	※ SPS : South Pole Station
			91 days			



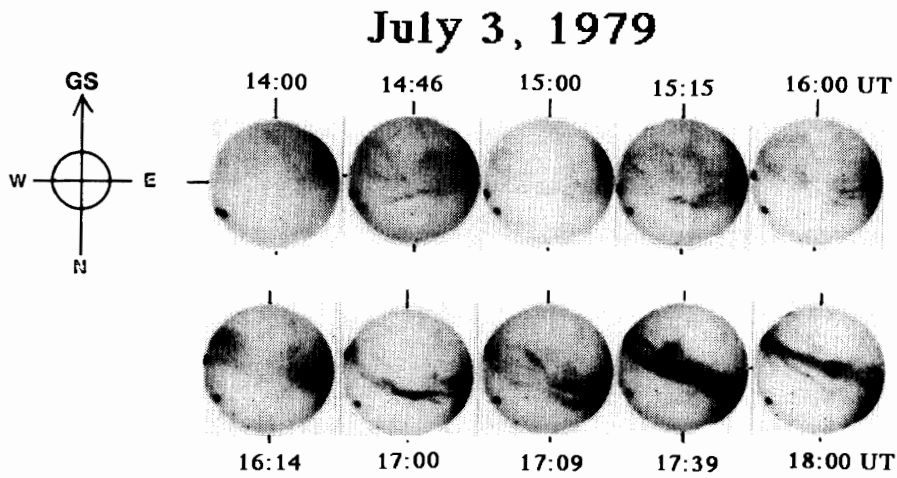
付図1 南極点基地で見られるオーロラ現象の形態学的な特徴（オーロラオーヴァル近傍の下で見られるオーロラ現象はMLTの違いでおおむね7区分で特徴づけられる）

Fig. A1. Morphology of auroral phenomenon at South Pole Station.



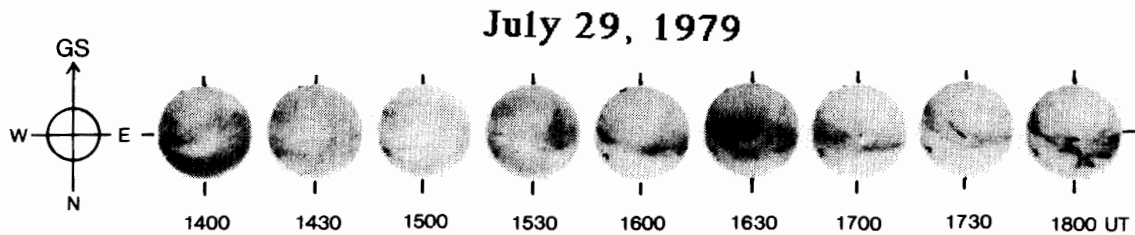
付図2 全天カメラ写真データに西向き運動と東向き運動が同時に見られるオーロラ活動の例、1979年5月19日(1240 MLT (1640 UT) 以前のオーロラ現象がレイ構造が目立つのに対して、13 h MLT (17 h UT) 以後の現象はシャープなバンド状構造に様相が変わり、性質の違うオーロラ現象であることが示される。1430 UT頃に見られるオーロラ現象はオーロラ輝度の西向き伝搬と東向き伝搬とが全天カメラ写真内で同時に見られる観測例である。)

Fig. A2. Examples of auroral westward and eastward propagation observed in the same all sky image data on May 19, 1979.



付図3 全天カメラ写真データに西向き運動と東向き運動が同時に見られるオーロラ活動の例, 1979年7月3日 (1515 UT 及び 1600 UT 頃に見られるオーロラ現象は, オーロラ輝度の西向き伝搬と東向き伝搬とが全天カメラ写真内で同時に見られる観測例である.)

Fig. A3. Examples of auroral westward and eastward propagation observed in the same all sky image data on July 3, 1979.



付図4 全天カメラ写真データに西向き運動と東向き運動が同時に見られるオーロラ活動の例, 1979年7月29日 (1230 MLT (1630 UT) 頃に天空の一点を中心に渦巻き状の回転運動らしい様相が認められる. カズプ領域が起源と思われるオーロラの様相は, 10 h MLT (14 h UT) 又は 11 h MLT (15 h UT) に示される.)

Fig. A4. Examples of auroral westward and eastward propagation observed in the same all sky image data on July 29, 1979.