

# 複数衛星による極冠域アークの同時観測

小原隆博・向井利典・西田篤弘・賀谷信幸\*

(1988 年 12 月 26 日受理)

## Multi-satellite observations of the polar cap arcs

By

T. OBARA, T. MUKAI, A. NISHIDA and N. KAYA

**Abstract:** Using the multi-satellite (EXOS-C, Viking, DMSP) data, we have investigated the conjugacy and the acceleration region in the polar cap region. Observations indicated that the polar cap arcs were conjugate in both hemispheres, which suggests that they occur on closed field lines. Particle measurements on the polar cap arc were simultaneously made on the same field line by EXOS-C (500km) and Viking (10,000km). Comparing these data it can be concluded that the acceleration region exists in the altitude range between both satellites.

### 概 要

複数衛星による極冠域アークの同時観測データを観測する事によって以下の諸点が明らかになった。

- (1) シータ型オーロラは南北両半球で同時に、しかも共役的に現れる。
- (2) 極冠域アークの電子群は南北両半球で同程度に、沿磁力線電場により加速されている。
- (3) 極冠域アークの加速域は比較的地球に近い領域に（高度数千 Km 以下に）形成される。

又、これらの観測結果に基づいて極冠域アークを説明するモデルを考察した。

---

\* 神戸大学工学部

## 1. 序

極冠域のオーロラ現象は地上の観測により初めて見いだされ[1]その後飛行機による移動観測も加わり[2]遂には衛星搭載のカメラで全貌が捕らえられた[3]。当初はオーロラ帯のオーロラ現象に比べて余り注目されてはいなかった極冠域のオーロラ現象は、米国の DE 衛星による  $\theta$  (シータ) 型オーロラの発見を契機に精力的な研究へと発展している。樹冠域のオーロラはオーロラ帯のオーロラと対照的に磁氣的に静かな時に出現し[4]しかも IMF が北向きの時に多く見られる[5]。又、極冠域にはこの時総体として太陽方向への対流が見られ[6]アーク域は上向きの沿磁力線電流に対応すると報告されている[7]。

この様な極冠域アークを起こすプラズマはプラズマシート起源であると考えられている[8]。しかし、生成の理論的な説明についてはまだ無いといった現状である。幾つかの基本的な情報が不足している事がモデルの立案を困難にしていると思われる。つまり今までの研究は単一の衛星の観測で行われて来たが、One Point である以上は確認が不可能な事柄もある。この点を克服する目的で幾つかの衛星のデータを収集し総合的に解析した。EXOS-C (大空) の粒子データを主に、スウェーデンの打ち上げた Viking 衛星のオーロラ画像と粒子のデータ、そして米国の DMSP のオーロラ画像と粒子のデータを用いた。

解析は主として(i)極冠域アークの南北共役性の有無、および(ii)粒子加速の起きる高度の同定という観点から行われ、結果として(i)共役性が確認されると共に(ii)粒子加速域が比較的地球に近い領域に形成される事が判明した。又、プラズマの解析からその起源はプラズマシートにある事が示されシータ型オーロラのモデルを提示した。

## 2. 共 役 性

### 2.1 観測結果

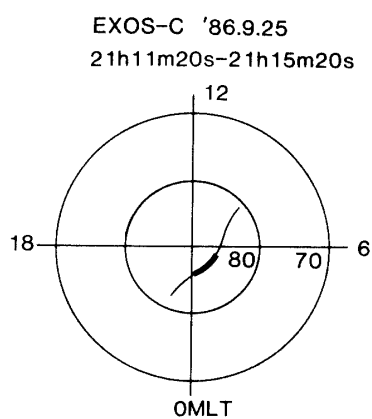
EXOS-C と Viking の観測結果からシータ型オーロラが同時に観測された例が見つかった。第1図に Viking が捕らえたシータ型オーロラを示すが一本の棒状のアークが、真夜中から真昼に向かって伸びている典型的なシータ型オーロラである。EXOS-C はこの時反対半球(南半球)の極冠域を飛しようとしていた。第2図に EXOS-C の軌道を示すが図中太線で示した領域で強い粒子降下現象を観測した。丁度共役点にオーロラが存在することが Viking のイメージのデータから確認され[9]シータ型オーロラの南北共役的な出現が示された。

この時の電子の加速の様子を調べる目的でスペクトルを調べた。EXOS-C には異なった5つのピッチ角を同時に見れるように5つのセンサーを搭載している[10]。第2図の太線で示した領域で得られる電子のエネルギー分布関数を第3図に示す。左から順にピッチ角が151.4度、125.0度、96.6度、68.0度、40.3度である。観測が南半球であるので定義により180度が磁力線下向き、0度が上向きである。約3kVの所にピークが見られ磁力線下向き程このピークは顕著である。衛星のスピンを利用して全センサーのデータから連続的に分布関数のピッチ角依存性を求めた(第4図参照)が、第3図で見られた傾向が確認されており極冠域アークに対しても磁力線に平行な加速が起こっていることが示された。

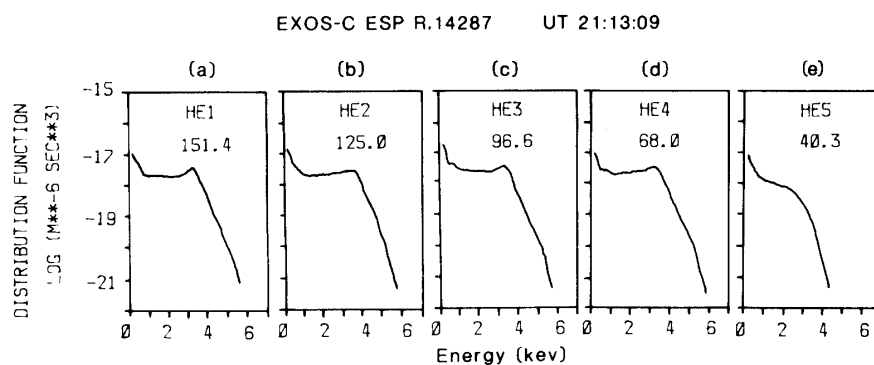


1188/0 860925 205437 21.047

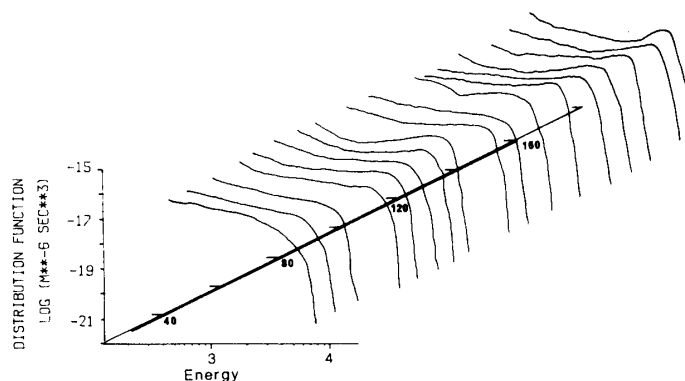
第1図 Viking衛星が高度約1万Kmから捕らえたシートオーロラ。図中 post-midnight のオーロラオーバルから昼側のカスプ域に向い一本のアーキが走っている。補助的に入っている線は磁気的な真夜中を示す経線である。



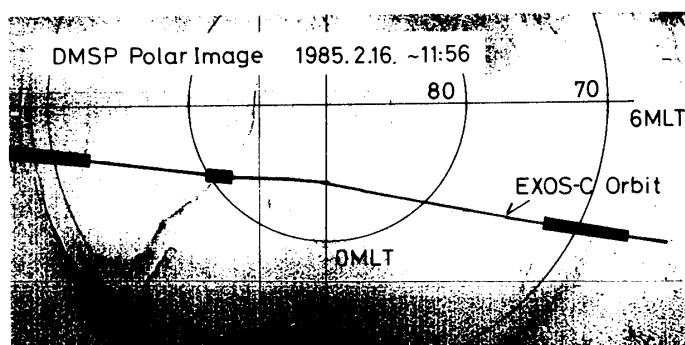
第2図 EXOS-Cの軌道と降下粒子を観測した領域(太線で示している)。EXOS-Cが降下粒子を観測した領域と共役的な場所にシートオーロラがある(第1図参照)。



第3図 ESPにより得られた電子の分布関数。5つの異なったピッチ角のデータが同時に得られる。約3 keVの所にピークが見られる。

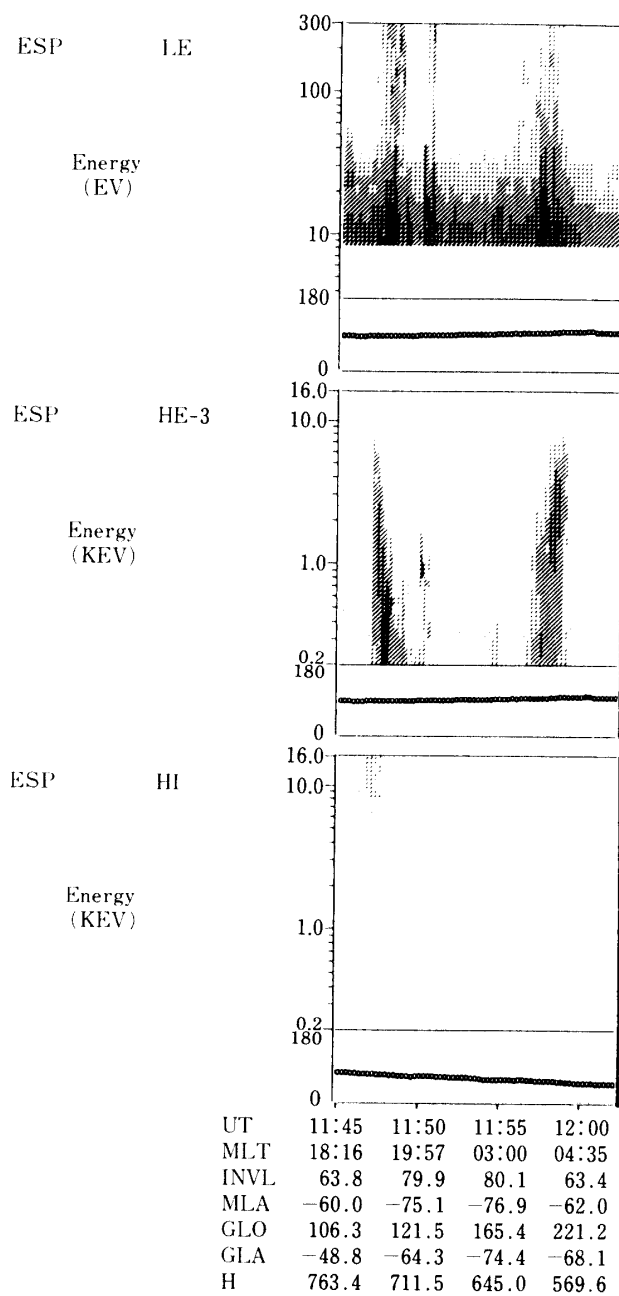


第4図 分布関数をピッチ角毎に連続的に示している。ピークはピッチ角が上向きになるにつれて連続的に消失していく。



第5図 DMSP衛星が捕えた極冠域アークのイメージ。Pre-midnight セクターに極冠域アークが見られる。EXOS-Cはこの時反対半球（南半球）を飛しょうとしており、pre-midnightで降下粒子現象を検出した。軌道を Local time を合わせて DMSP のイメージ上に描いてあるが、EXOS-Cはアークの共役点で降下粒子を観測している。

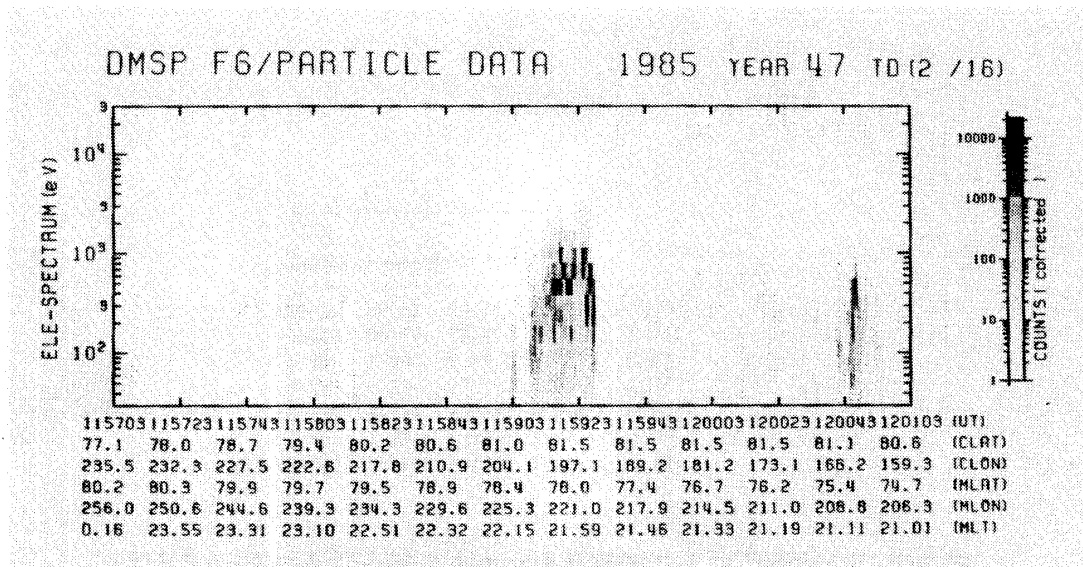
REV. 5490 85/02/16



第6図 EXOS-Cにより観測されたエネルギー粒子のE-tダイアグラム.

次に EXOS-C と DMSP の観測結果の中から極冠域オーロラが同時に観測された例が 2 例見つかった。DMSP はスピンを利用しながら極域のイメージを撮る方法を用いているので 1 パスで 1 枚の画像が得られる事になる。第 5 図に示す例は 1985.2.16. UT 11:55 頃を中心に得られたもので、地方時が 21 時ごろのオーバル域から極冠の中へアークが伸びている様子が見られる。EXOS-C はこの時反対半球で観測を行っていた。第 6 図に、EXOS-C が観測した粒子の E-t ダイアグラムを示す。一番上のパネルは低エネルギー (8 eV から 300 eV) の電子のフラックスを示すもので中段が高いエネルギー (0.2 keV から 16 keV) の電子、下段が同じエネルギー (0.2 keV から 16 keV) のイオンについてのフラックスを示したものである。両側に見られるのがオーロラオーバル帯での降下粒子であるが其の中には含まれた領域すなわち極冠域で、スパイク状のイベントを見ている (UT~11 時 50 分)。第 5 図に EXOS-C の軌道を重ねて示しているが、粒子降下現象が見られた領域 (太線で示している) がアークと一致している。この事から極冠域アークの共役性が結論される。

ここで更に注目したいのは DMSP により得られた粒子観測の結果である。DMSP の軌道は大体画像データの中心部分を通る事になるが丁度 EXOS-C が降下粒子を観測したその共役点で強い粒子のイベントを観測している。第 7 図には DMSP により得られた降下電子の E-t ダイアグラムを示しているが、UT 11 時 59 分に約 1 keV のエネルギーで降下してくる電子群を捕らえている。この共役点で EXOS-C が観測した電子も 1 keV のエネルギーを持っていた (第 6 図参照)。以上から南北共に同程度の加速が起こっている事が明らかになった。



第 7 図 DMSP が観測した降下電子の E-t ダイアグラム。  
UT 11:59 の所に降下電子のフラックスを捕らえている  
が中心エネルギーは約 1 keV である。この値は EXOS-C  
が共役点で観測した値と良い一致を示している。

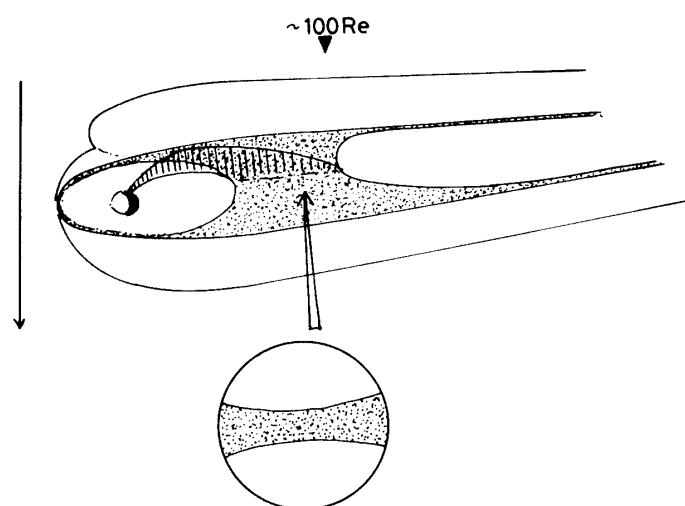
DMSP との同時観測は他にもう 1 例あるが、基本的な内容としては同一である。

## 2.2 モデルとその検討

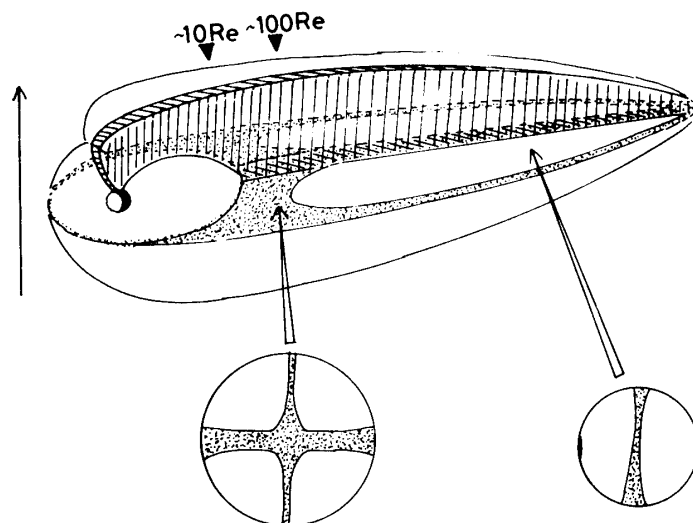
シート型オーロラに代表される極冠域のアーキ現象はその生成メカニズムさらにプラズマの起源をめぐって、現時点では確立した説明はない。一般に極冠域の磁力線は宇宙空間に対して開いた状態にあるとされており、この事はポーラーレインと呼ばれる太陽風起源の粒子群が IMF のポーラリティーにより南北で見えかたが大きく異なる点からも支持されている [11]。しかし、今回示した様な南北共役性の存在は磁力線が閉じている事を示唆する。また、EXOS-C と DMSP で見られたような加速電圧までも一致するようなケースにたいしては、南北のアーキは磁気圏尾部の同一のソースに対してアクセスしていることを示唆する。

極冠域に降下する電子はオーロラとしてイメージ的に観測される比較的強度の強いケースから、もはやオーロラとしてイメージャーに検出されない程の弱いケースまで存在する。Hardy [12]によるとこれら全てのケースを含めた極冠域の粒子降下現象は全観測の 5 割に達しており、そのほとんどが IMF が北向きの時に起こっていた。

この IMF に非常に依存するという解析結果を基に、以下ではモデルを考察する。第 9 図にモデルとして IMF が北向きになった時、磁気圏尾部がどのように構造変化を起こすかを模式的に示した。IMF が南を向いているときは第 8 図のようになっていると一般に考えられているが、北を向くと第 9 図のようになると想像される。即ち、磁気圏全体が閉じた状態に近くなり、それまでプラズマが存在する最も遠方の位置として定義された distant neutral line 上のある部分からホットなプラズマが外側に向かって流出する。其の結果ローブにはフィラメント状の構造が生成されこれがシート型オーロラのソースになる。実際にロ



第 8 図 一般に支持されている磁気圏尾部の構造。ドットでハッチした領域がプラズマシートであり約 100 Re の所に distant neutral line が存在しそれより高緯度の領域 (ローブ) は磁力線が開いている。



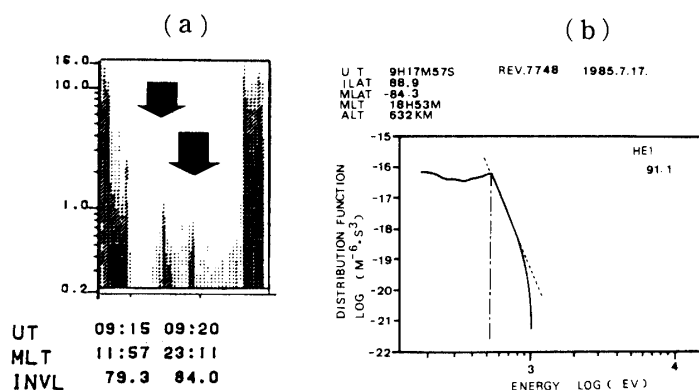
第9図 IMFが北向きになった時の磁気圏尾部の構造を示す想像図。磁気圏全体が閉じた状態に近くなる一方で distant neutral line 上のある部分からホットなプラズマが外側に向かって流出する。ローブには、フィラメント状の構造が生成され、これがシート型オーロラを輝かせるソースになる。

ープの中でこのフィラメント構造は ISEE により発見されている [13]。ISEE がフィラメント構造を観測した時にシート型オーロラが出現していたかについては、同時観測が無いので確定出来ないが、可能性として充分上のモデルを支持すると思われる。第9図に示す構造変化には、かなり大がかりなプラズマの不安定現象が介在していると思われる。詳しくは今後更に究明していく必要があるが、いわゆる ballooning 不安定によるものと思われる。

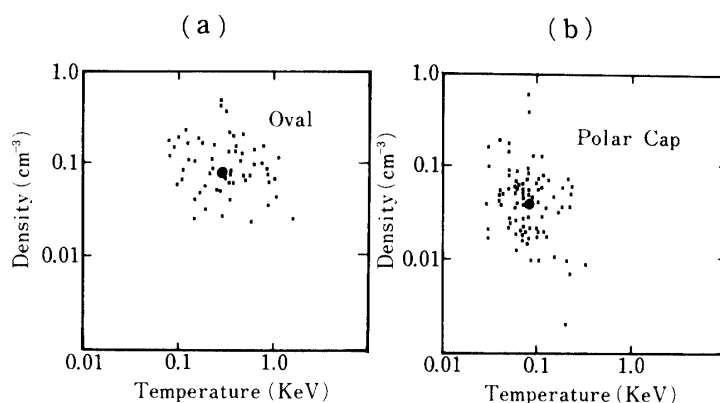
さて、第9図に示した様な構造変化が実際起こっていたとすると、プラズマシートの磁力管はローブに張り出すためにその体積を増大させる。この時、断熱的な過程で冷却が起こるものと予想されるが、実際に極冠域で観測されたデータを基に検証した。第10図(a)に矢印で極冠域アークを示しているが、このうち左側の例に対応する電子の分布関数を同図(b)に示す。分布関数の 0.5 keV の所にピークが見られ、0.5 kV の加速があったことが判明するが、それより高エネルギー側ではゆるやかに分布関数が減少していく。加速されたマックスエル分布を仮定して高エネルギー側の傾きから温度が求められ、又この分布関数を積分することにより降下してくるビーム成分の電子密度が求められる。(同図に於て 0.5 keV 以下のエネルギーに有意なフラックスが存在するが、これは電離層で生成された2次電子およびエネルギーを失った電子がポテンシャルのバリエーにはさまれているものと解釈している。)この例では電子温度が 60 eV、密度が 0.03/cc と求められた。

第11図には、この様にして求められた電子密度と電子温度の値を、オーロラオーバル域((a)に示す)と極冠域((b)に示す)に分けてそれぞれ示してある。図中大きな黒丸は代表

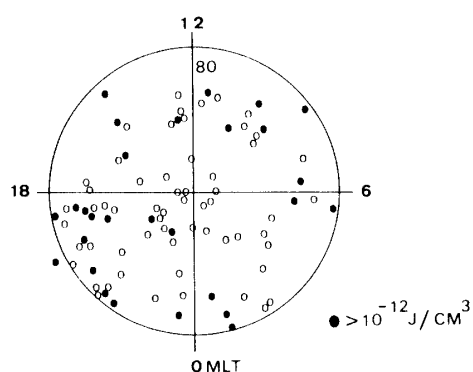




第10図 (a)極冠域をクロスした時に観測された極冠域アークの例(矢印で示している)。  
(b)(a)図の左側の矢印に対応する電子の分布関数。



第11図 降下電子の密度と温度のプロット. 極冠域((b)に示す)の温度, 密度は, オーロラオーバル域((a)に示す)のそれらに比べ約1/3になっている。



第12図 極冠域アークの  $NkT$  の値が  $10^{-12}$  J/cc を越えるものを黒丸で, それ以下のものを白丸で示した. 結果は多少ばらつくが, 系統的に圧力の大きいものが低い緯度に乗っている。

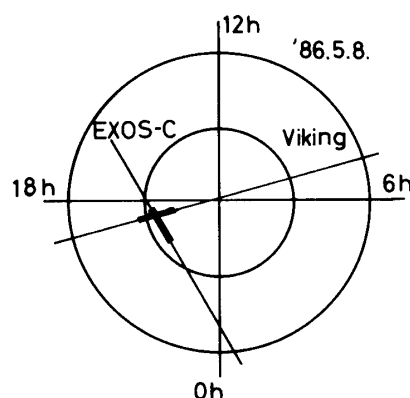
値であるが、極冠域の方がオーバル域のそれに比べて密度及び温度共に  $1/3$  ほど小さな値を示している。密度と温度の積つまり圧力の空間分布を求める目的で、 $NkT$  の値が  $10^{-12}$  J/cc. を越えるものを黒丸で、それ以下のものを白丸で示した（第12図参照）。結果は多少ばらつくが、系統的に圧力の大きいものが低い緯度に集まっている。以上の結果から断熱的な冷却が起きていることが判明し先のモデルの妥当性がしめされる。

### 3. 加速域

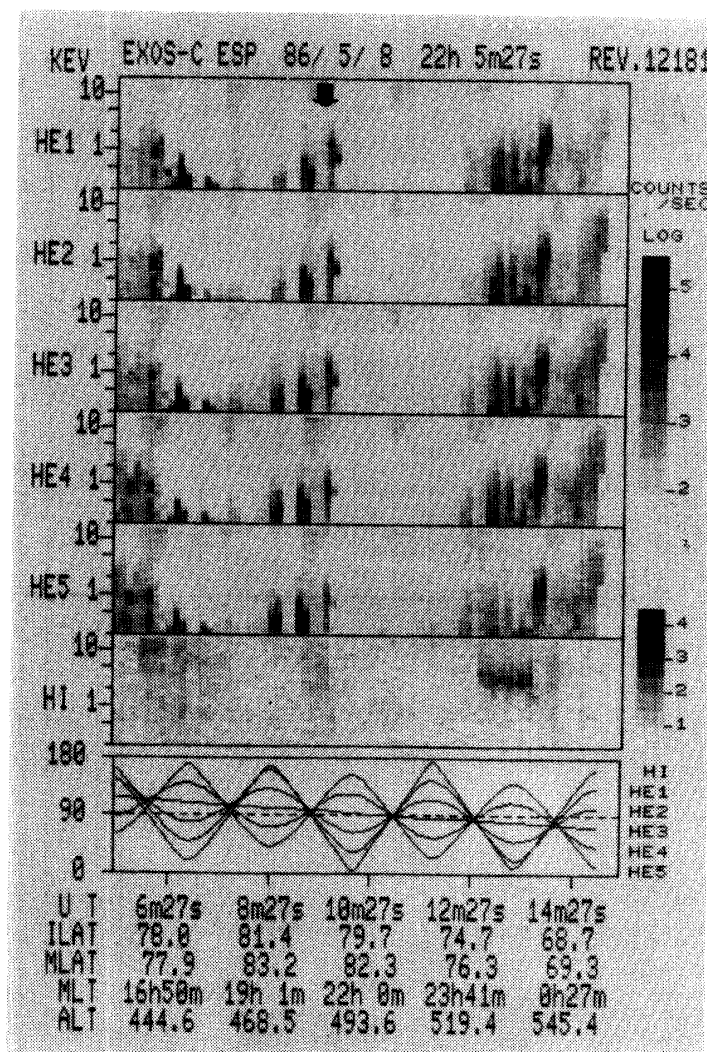
従来の研究の中で Peterson and Shelly [14] 及び Hoffman et al. [6] は極冠域アークのスペクトルはピークを持っていないのがむしろ普通であるという報告をしている。これによれば極冠域アークに対応する電子群は沿磁力線加速ではなく尾部で起きる加速過程で作られるということになる。しかし、本報告でも示したように極冠域アークの電子群は電圧こそ場合により異なるが一様に磁力線方向に加速されていた。この結果は Hardy [12] と同じであり Gorney et al. [15] も其の結果を支持している。オーロラオーバル帯での加速現象と同様に極冠域アークの加速現象に対しても加速域の存在が示唆されるが一体どのようなにして出来るのか？又それは果して局在するのか？といった謎が残る事になる。

加速域の空間的構造を探る目的で同一の磁力線の異なる高度での観測結果を比較した。EXOS-C と Viking の観測結果の中で極冠域アークの現象を同一磁力線上で捕らえた例が2例あった。導かれた結論は両者とも同じであるのでここでは其の1例について詳述する。

第13図に EXOS-C と Viking が同時に極冠域アークを捕らえた時の軌道を示している。EXOS-C は UT 22:10 頃に極冠域アークをクロスしたが、Viking は約13分遅れてこの領域を観測した。この時間差は、極冠域アークの時間スケールに比べて短いので [16]、同一構造を捕らえていると判断される。EXOS-C はこの時高度 480 km を Viking は高度 9,600 km を飛しょうとしていた。EXOS-C が観測した E-t ダイアグラムを第14図に示す。



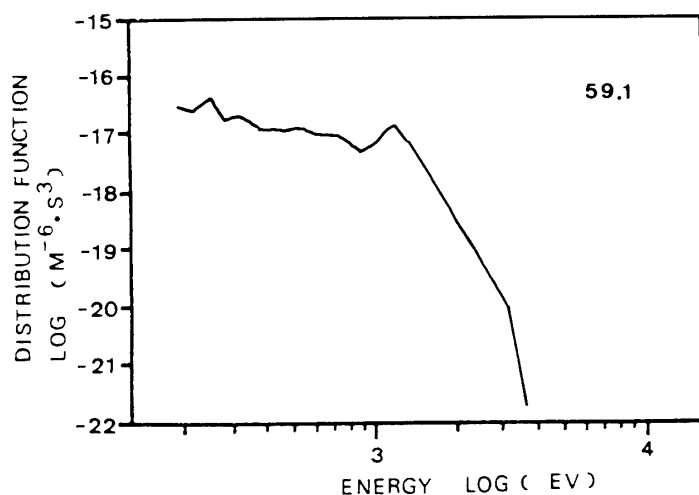
第13図 EXOS-C と Viking の軌道。両者が交わった所（磁気地方時～19時、不変地磁気緯度～82度）で極冠域アークを観測している。EXOS-C は高度 480 km, Viking は高度 9,600 km を飛しょうしていた。



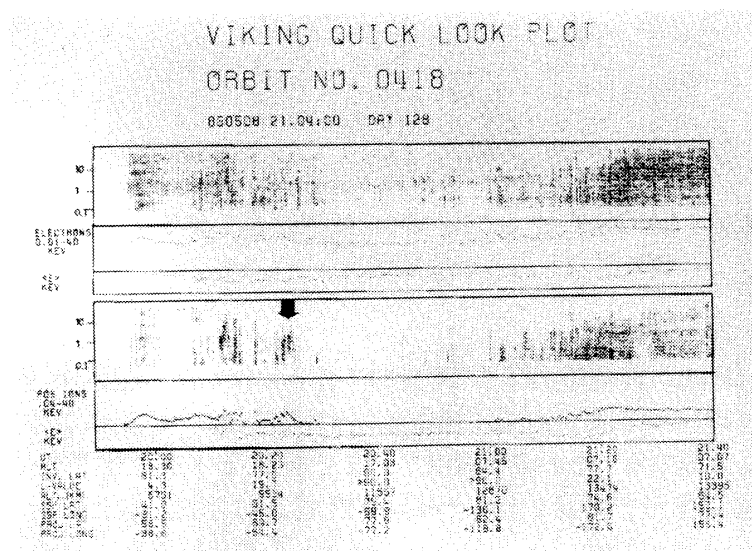
第14図 EXOS-Cにより得られた粒子のE-tダイアグラム。図中の矢印のところが極冠域アークに対応する。

観測は22:05:27から22:15:27の10分間に渡り行われた。同図の両サイドがそれぞれ午後側と真夜中のオーロラオーバルに対応し、その間の22:07から22:12辺りまでが極冠域に相当する。矢印で示したのが極冠域アークである。E-tダイアグラムに示されたフラックスの値を基に電子分布関数を求めた結果を第15図に示す。約1.1kVの加速を受けて電子が降下している事が判明する。Vikingが観測した粒子のE-tダイアグラムを第16図に示す。観測は19:55頃から21:40に渡り行われているが観測の比較的始めの20:05から20:15までと比較的終わりの21:15から21:30までが夕方側と朝方側のオーロラオーバルに対応する。これらには含まれた領域が極冠域である。上段と下段のパネルはそれぞれ電子、イオンの観測を示しているが注目したいことは矢印で示した領域にビーム状のイオンを観測していることである。詳細な解析によれば約1keVのエネルギーを持ち上昇し

U T 22H 9M 35S REV 12181 1986.5.8.  
 ILAT 81.0  
 MLAT 83.7  
 MLT 20 H 47M  
 ALT 482KM



第15図 粒子計測データから得られた極冠域アーク（前の図の矢印）での電子分布関数。約1.1kVの加速を受けている。



第16図 Viking衛星により得られた粒子のE-tダイアグラム。上段と下段はそれぞれ電子とイオンに対応する。下段のイオンのパネルで矢印を付けた部分が極冠域のアークに対応する。約1kVのエネルギーを得て上昇するイオンが見いだされた。

てくるイオンである。これは丁度 EXOS-C が観測したとほとんど同一の磁力線上であり、上（高度 9600 km）と下（高度 480 km）で加速されたイオンと電子をそれぞれ観測したことになる。この事から、電子を加速させてオーロラ現象を起こすような加速域が極冠域アークの場合も確かに存在し、しかもかなり地球に近い所（少なくとも 2 つの衛星の間の高度）にあることが判明した。

極冠域アークの場合はオーロラ帯のオーロラと異なり適当な電圧源に見いだすことが難しい。オーロラ帯のオーロラの加速電圧は磁気圏の尾部に朝方から夕方側に向かって存在するいわゆる dawn-to-dusk 電場の一部分を消費していると理解されているが、前述の Hardy [12] の報告が正しいとすれば極冠域アークが見られるのは IMF が北向きの時であり、一般にこの時は dawn-to-dusk の電場が殆ど無いもしくは若干存在するとされている。従って、dawn-to-dusk の電場を消費しているとは考えにくく、別のメカニズムで起電力が生成されると思われるが、現在の所不明である。このことは IMF が北向き時の沿磁力線電流のサーキットとともに、総合的に考察されなければならない問題である。

#### 4. 結 語

極冠域アークの南北同時性、加速の南北での現れ方、及び加速域の高度分布を調べる目的で EXOS-C を中心に Viking 及び DMSP のデータを比較解析した。其の結果比較可能なデータセットの全ての例で、南北同時に出現することが判明した。極冠域アークのソースとしてプラズマシートまたはプラズマシート境界層のプラズマが磁力線を閉じた状態に保ちながらローブの中に張り出してくるモデルを考えたが、このモデルは断熱的な冷却が確かに起こっていると言う観点から支持された。

南北の共役点での極冠域アーク電子の観測から、ほとんど南北同じ電圧に電子が加速されて降り込んで来ている事が見いだされたが、その加速域の高さ分布を調べる目的で、同一半球の極冠域、同一磁力線上の異なった高度での粒子のデータを比較した。この結果、高度 460 km と 9600 km の間の高度に、磁力線に平行な電場の存在が見いだされた。この事からも極冠域アークの電子群は、尾部で加速されるよりむしろ地球に近い所で加速され、其の結果エネルギーを得て極冠域にオーロラを起こすことが判明した。

#### 謝 辞

科学衛星 EXOS-C（大空）搭載の低エネルギー粒子観測装置（ESP）の成功にあたり、プロジェクトマネージャーの伊藤富造教授、プロジェクトサイエンティストの大家寛教授に感謝いたします。Viking との共同研究はカナダのカルガリー大学の C. Anger 教授 J. S. Murphree 博士、スウェーデンの宇宙物理研究所の R. Lunding 博士のご好意により進められました。本論文に掲載の Viking の資料（第 1 図、第 16 図）は QL プロットからのコピーです。また、DMSP データの利用に際しまして国立極地研究所オーロラデータセンターにお世話になりました。本論文第 7 図は東北大学理学部福西研究室に作って戴きました。以上の皆様に感謝致します。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Davis, T. N., The morphology of the polar auroras, *J. Geophys. Res.*, **65**, 3497, 1960.
- [ 2 ] Eather, R. H., and S. -I. Akasofu, Characteristics of polar cap auroras, *J. Geophys. Res.*, **74**, 4794, 1969.
- [ 3 ] Berkey, F. T., L. L. Cogger, and S. Ismail, Evidence for a correlation between sun-aligned arcs and the interplanetary magnetic field direction, *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 145, 1976.
- [ 4 ] Akasofu, S. -I., and B. Tsurutani, Unusual auroral features observed on January 10-11, 1983 and their possible relations to the interplanetary magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 1086, 1984.
- [ 5 ] Lassen, K., and C. Danielsen, The quiet time pattern of aurora arcs for different directions of the interplanetary magnetic field in the Y-Z plane, *J. Geophys. Res.*, **83**, 5277, 1978.
- [ 6 ] Hoffman, R. A., R. A. Heelis, and J. S. Prasad, A sun-aligned arc observed by DMSP and AE-C, *J. Geophys. Res.*, **90**, 9697, 1985.
- [ 7 ] Iijima, T., T. A. Potemra, L. J. Zanetti, and P. F. Bythrow, Large-scale Birkland currents in the dayside polar region during strongly northward IMF: a new Birkland current system, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7441, 1984.
- [ 8 ] Menietti, J. D., and J. L. Burch, DE 1 observations of the theta aurora plasma source region and Birkland current charge carrier, *J. Geophys. Res.*, **92**, 7503, 1987.
- [ 9 ] Obara, T., M. Kitayama, T. Mukai, N. Kaya, J. S. Murphree, and L. L. Cogger, Simultaneous observations of sun-aligned polar cap arcs in both hemispheres by EXOS-C and Viking, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 713, 1988.
- [10] Mukai, T., N. Kaya, H. Kubo, H. -A. Matsumoto, T. Itoh, and K. Hirao, Initial observation of low-energy charged particles by satellite OHZORA (EXOS-C), *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 365, 1985.
- [11] Riehl, K. B., and D. A. Hardy, Average characteristics of the polar rain and their relationship to the solar wind and the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **91**, 1557, 1986.
- [12] Hardy, D. A., Intense fluxes of low-energy electrons at geomagnetic latitudes above 85°, *J. Geophys. Res.*, **89**, 3883, 1984.
- [13] Huang, C. Y., L. A. Frank, W. K. Peterson, D. J. Williams, W. Lennartsson, D. G. Michell, R. C. Elphic, and C. T. Russell, Filamentary structures in the magnetotail lobes, *J. Geophys. Res.*, **92**, 32349, 1987.
- [14] Peterson, W. K., and E. G. Shelley, Origin of the plasma in a crosspolar cap aurora feature (theta aurora), *J. Geophys. Res.*, **89**, 6729, 1984.
- [15] Gorney, D. J., D. S. Evans, M. S. Gussenhoven, and P. F. Mizera, A multiple satellite observation of the high-latitude auroral activity on January 11, 1983, *J. Geophys. Res.*, **91**, 339, 1986.
- [16] Frank, L. A., J. D. Craven, and R. L. Rairden, Images of the earth's aurora and geocorona from Dynamic Explorer mission, *Adv. Space Res.*, **5(4)**, 53, 1985.