

# EXOS-C ESP による Inverted-V 型電子降下の観測

北山 正信・小原 隆博・向井 利典  
西田 篤弘・賀谷 信幸\*

(1987年12月25日受理)

## Observation of Inverted-V electron precipitation by ESP onboard EXOS-C (OHZORA)

By

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

**Abstract:** Correlated changes of energy spectra of precipitating ions and electron in the inverted-V region have frequently been observed by the low-altitude satellite, the EXOS-C. It is shown that these changes can be explained by assuming that magnetospheric ions have been decelerated by the parallel potential drop by which electrons have been accelerated. It has also been found that frequencies of "no ion observation events" in the inverted-V regions are statistically correlated with the electron acceleration energy.

These results support the theory that the inverted-V electron acceleration is caused by the parallel potential drop. Comparison of the auroral electron precipitation patterns observed on several consecutive orbits has revealed that an inverted-V event becomes splitted into many discrete bands which expand both equatorward (into the diffuse precipitation region) and poleward (into the polar cap). These phenomena are observed mostly during geomagnetically quiet periods immediately following the recovery phase of substorms.

---

\* 神戸大学工学部

## 概 要

Inverted-V の領域において降下イオンのエネルギースペクトルが電子のスペクトルに対応して変化する現象が、低高度衛星 EXOS-C によってよく観測されている。このことは、磁気圏起源のイオンが電子を加速する沿磁力線方向の電位差によって減速されて降下してくると考えることで説明できることが示された。また、Inverted-V の領域でイオンが観測されない頻度は、統計的に電子の加速エネルギーと正の相関があることがわかった。これらの結果は、Inverted-V の電子加速が沿磁力線方向の電位差によっておこされるとする説を支持するものである。EXOS-C の連続パスのデータを解析することで、Inverted-V がたくさんの細かい構造に分かれ、その領域は極側では極冠域に向かって、赤道側ではディフューズな電子の降下領域へと広がっていく現象が見いだされた。この現象は、磁気的にはサブストームの回復期後の静穏時に観測されている。

### 1. 序

極域のオーロラの物理において、Inverted-V Event はその最初の観測[1]以来一つの重要な問題であった。それは沿磁力線方向に電位差が存在し、そのまてに電子が加速されて降下してできる、と解釈されている[2]。しかし、この沿磁力線方向の電位差の存在についての直接的検証はほとんどなされていない。

このようななかで、低高度での降下イオンについての観測は、そのフラックスとエネルギーの減少が Inverted-V の領域で見られたという報告がある[2],[3]が、あまり詳しい報告はされていない。また、Inverted-V 中において沿磁力線方向下向きの keV エネルギーの強いイオンのフラックスが観測されたという、単純な電場によって説明できない現象も報告されている[3],[4]。本論文では、Inverted-V 領域での EXOS-C のイオンの観測が沿磁力線電場の存在と矛盾しないかを調べるのが一つの目的である。

極域での電子の降下パターンの時間的な変化については、今まで特にサブストームとの関係において、静穏時、サブストームの拡大期、回復期、そして回復期末期の4つのパターンに大きく分けられている[2],[5]。EXOS-C の連続パスのデータを解析することで、さらに詳細なパターンの変化が得られている。本論文では、この解析より見いだされた Inverted-V Event が時間が経つと分裂するという特異な現象についても報告する。

### 2. 計測器について

本論文で報告するデータは、EXOS-C(大空)に搭載された低エネルギー粒子計測器 ESP で1984年3月から1985年12月にかけて得られたものである。EXOS-Cは、1984年2月14日に打ち上げられ、遠地点高度865 km、近地点高度353 kmで軌道傾斜角約75°をもつ極軌道に投入された。ESPは、0.2~16.0 keVの電子の計測器5つ(HE1~5, 5方向のピ

ッチ角の分布がえられる)とイオンの計測器1つ(HI), 6~300 eVの電子の計測器1つ(LE)をもっている。それぞれのエネルギー・スペクトルの時間分解能は基本的に2秒である。本論文ではHE 1~5及びHIの観測に基づいた結果について報告する。測定器の詳細については、参考文献[6]を参照されたい。

### 3. 観測の結果とその解釈

#### 3.1 Inverted-V 領域におけるイオンの観測

図1は、Inverted-V Eventの領域で観測されるイオンの典型的な例である。一番上に、データの始まりの日時(UT), および Revolution number が示されている。その下のカラーの6つのパネルは、横軸に時間、縦軸にエネルギーをとり、色で粒子のカウントをあらわしたE-t (Energy-time) ダイアグラムになっている。上から5つ(HE 1~5)が電子、一番下(HI)がイオンのデータである。その下に、各々のデータに対応するピッチ角が示されている。電子の観測は同時に5つのピッチ角のデータをカバーするが、イオンの観測は1つのピッチ角のデータしかないことに注意する必要がある。一番下に示されたのが、上から順に、UT, 不変磁気緯度, 磁気緯度, Local Time, 高度の軌道データである。磁気緯度がマイナスであるのでこのパスは南半球のデータである。したがって、電子はピッチ角が $180^\circ$ に近いHE 1が最も降下方向を向いた粒子を観測しており、イオンのHIは

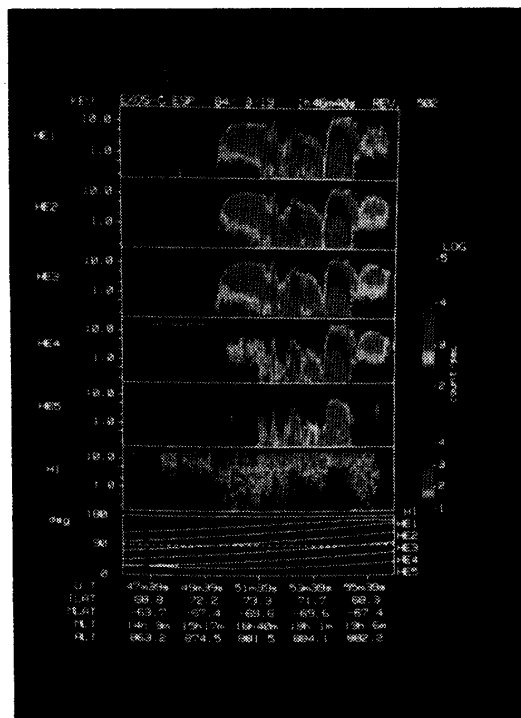


図1 EXOS-C ESPで1984年3月19日に観測されたRev. 502の極域での降下電子・イオンのE-tダイアグラム。Inverted-V領域で降下イオンが観測される典型例。

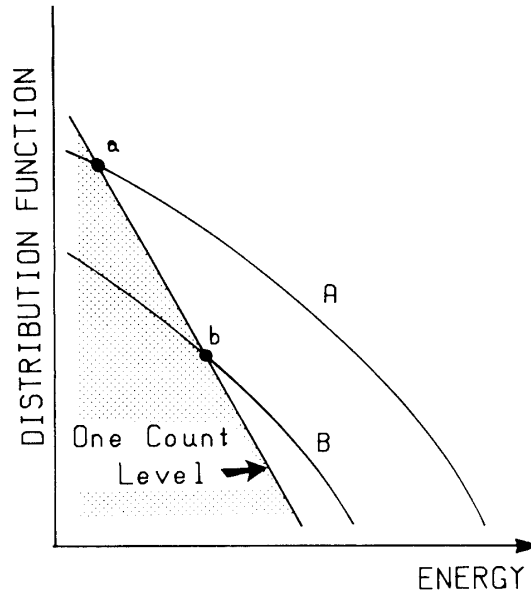


図2 イオンが減速されたときのエネルギー・スペクトルの概念図。

HE 1 よりさらに降下方向のものを観測している。この Rev. 502 は、午後から夕方側に向けて、低緯度側から一度緯度  $78^\circ$  まで達してから再び低緯度側に抜けるパスである。Inverted-V は、この図では例えば UT01h 54 m 00 s ~ 01 h 55 m 00 s にかけてみられる。1~10 keV に現れる強いカウントのピークのエネルギーが、軌道に沿っていったん上がって最大エネルギーに達し、その後また下がる現象である。このときの電子のカウントのピッチ角分布は、上向きのロスコーン内を観測している HE 5 を除いて、いずれのピッチ角に対してもほぼ一様である。このことは、磁気モーメントの保存を考えると定性的には電子の下向きの加速の起こっている領域が十分高いことを反映しているものと考えられるが、ピッチ角散乱の効果の可能性もある。この領域において、イオンはある限界エネルギー ( $E_L$ ) より高いエネルギーで観測され、しかもその限界のエネルギーは電子のカウントのピークのエネルギーの変化に対応するように推移するといった特徴を持っている。このような変化は、電子が沿磁力線電場によって加速されているのに伴って、イオンが減速されていると考えることで理解できる。図 2 に示すように、沿磁力線電場の存在する領域に入る以前のイオンのエネルギー・スペクトルを (A) とすると、電場によって減速されたスペクトルは (B) のようになる。測定器の観測限界である one count level はエネルギーの自乗に反比例するため、減速されればされるほど観測されるイオンの  $E_L$  は逆に図中の点 (a → b) のように高くなる。ここでみられるイオンのスペクトルの特徴的な変化は以上のように沿磁力線電場の存在をイオンの観測の方からも裏付けるものである。

上に示したように Inverted-V の領域では、イオンは減速されていると考えられる。降下粒子の起源であるプラズマシートではイオンのエネルギーは数 keV と高いので、沿磁力線電場によって減速されたとしても十分観測されるはずである。事実、EXOS-C で観測されるイオンのエネルギー・スペクトルはかなりソフトであり 2~5 keV 程度の温度をもつ

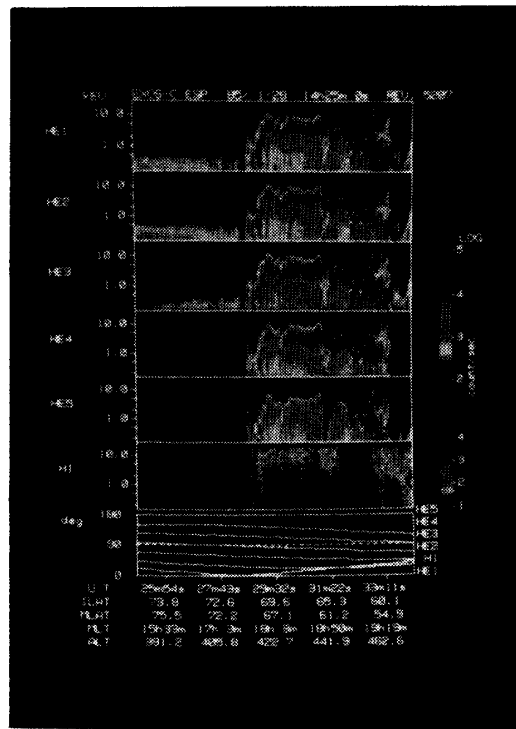


図3 1985年1月28日 Rev. 5207 にえられた Inverted-V 領域でイオンが観測されない例。

て観測されている。しかしまた、EXOS-C の観測では、図3に示すように同じ様に電子が加速されていても、イオンが観測されている場合 (UT 14 h 29 m 30 s ~ 14 h 31 m 30 s) とともに観測されない場合 (UT 14 h 31 m 30 s ~ 14 h 31 m 50 s) とがある。この場合の両者の違いは降下イオンのフラックスが後者の方が小さいことによるのだろうが、イオンの減速が働いているのならば、沿磁力線電場によって減速されればされるほど観測されにくくなるはずであるから、減速によってイオンが観測されないことも有り得る。そこで、Inverted-V Event に関しイオンのあるなしに場合分けし、電子のエネルギースペクトルの monoenergetic なピークから得られる加速エネルギーとの相関を統計的に調べたものが図4である。この図は、電子の加速エネルギーが 0.5 keV 以上の Inverted-V 692 events について、イオンの観測の有無の頻度を4つ段階の加速エネルギーに分けて示したものである。ここで、イオンが観測されたという基準は、イオンのカウントが観測される3つ以上の連続するエネルギー・レンジでのカウントの平均が3.0カウント以上であることとした。Event の選び方については Local Time, 活動度などまったく任意である。電子の加速エネルギーが 0.5-1.0 keV では、イオンが観測されないのは 16.5% にすぎないのに対し、エネルギーが上がるにつれその頻度は高くなり、4.0 keV 以上になると 59.3% に達する。このように、図3で見られるように、イオンが観測されないことが統計的に電子の加速エネルギーと強い正の相関があることから沿磁力線方向の電位差によってイオンは減速されていると考えて矛盾はない。

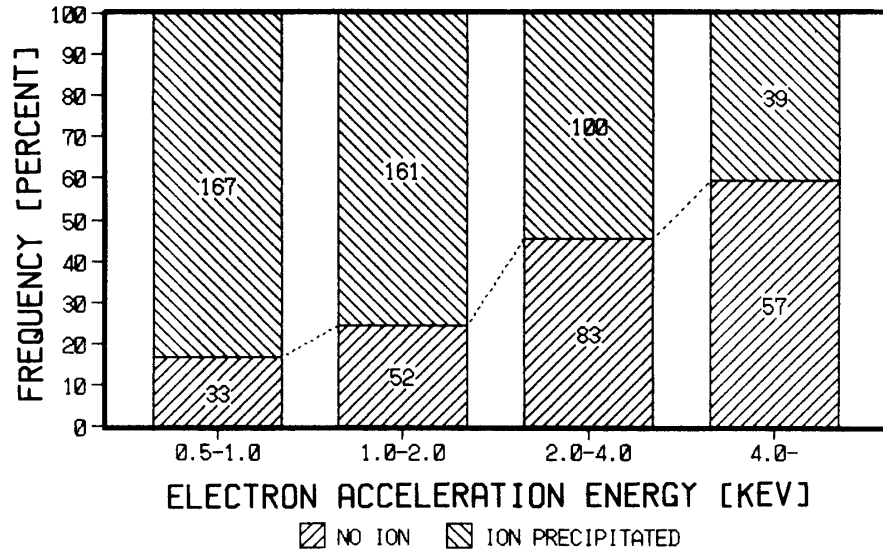


図4 Inverted-V 領域で降下イオンが観測されない頻度と電子の加速エネルギーとの関係図。

### 3.2 Inverted-V Event の分裂現象

極域での降下電子のパターンは、簡単にはオーバルの低緯度側にディフューズな領域が広がりその高緯度側に Inverted-V などのディスクリートな領域が存在すると考えられており、特に静穏時にはその区別が明瞭である[5]。図5の Rev. 7421 はその典型的な例であり、UT 13 h 14 m 50 s~13 h 17 m 00 s にかけてがディスクリートな領域、UT 13 h 17 m 00 s~13 h 21 m 15 s にかけてがディフューズな領域である。それが、次のパスでほぼ同じ Local Time を観測する Rev. 7422 (図6) になると、上で述べた単純なパターンとは程遠いようすとなる。図5の例のようなディスクリートな領域とディフューズな領域とのはっきりした境界はみられず、ディフューズな領域にディスクリートな構造が入り込んでいる。さらに特徴的なのは、Rev. 7421 では一つ一つの Inverted-V の構造は大きい Inverted-V の存在する領域は緯度にして  $5^\circ$  と狭く集まっているのに対し、Rev. 7422 では細かい多くの Inverted-V を持つ構造に変化し、領域的には緯度にして  $13^\circ$  と極方向及び赤道方向両側に広がっていることである(図7, 8a 参照)。このように時間が経つと Inverted-V Event が構造的に細かく領域としては広がっていく現象が EXOS-C で他にも 2~3 例みられ、何れも地磁気的な状態としてはサブストームがあって乱れたときより 1~2 時間以上あとの静かなとき(図5, 6の例では  $K_p=2-$ )に起こっている。2つのデータの間には約1時間半の間隔があいているが、磁気的に静かで外的に乱される要因が小さいことから、あたかも Rev. 7421 でみられた Inverted-V が時間を追って分裂しているようである。図8 a・8 b・8 c に Rev. 7421, 7422 の電子の加速エネルギー、密度、及び Inverted-Event での磁気圏起源の電子の温度各々の緯度分布を示す。電子の加速エネルギーは、沿磁力線方向の電位差に対応すると考えられるが、エネルギースペクトル中の monoenergetic なピークのエネル

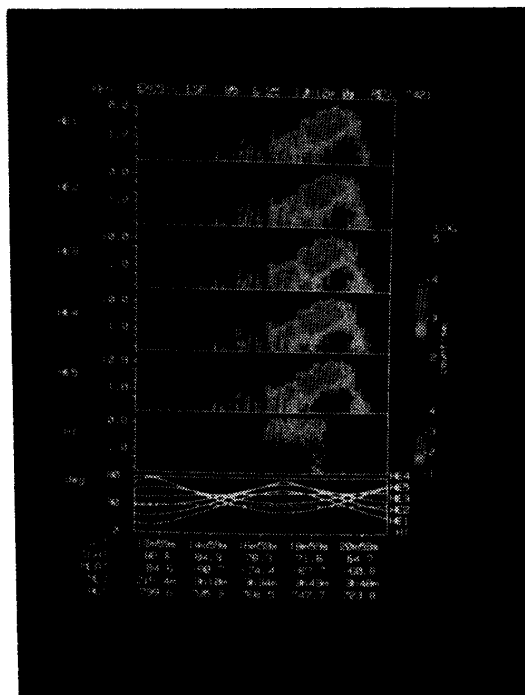


図5 1985年6月25日に得られた Rev. 7421 の E-t ダイアグラム.

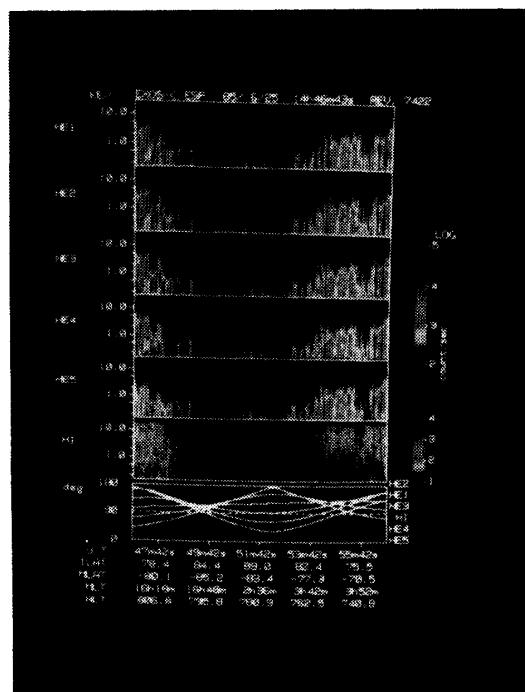


図6 図5の次のパス Rev. 7422 の E-t ダイアグラム.

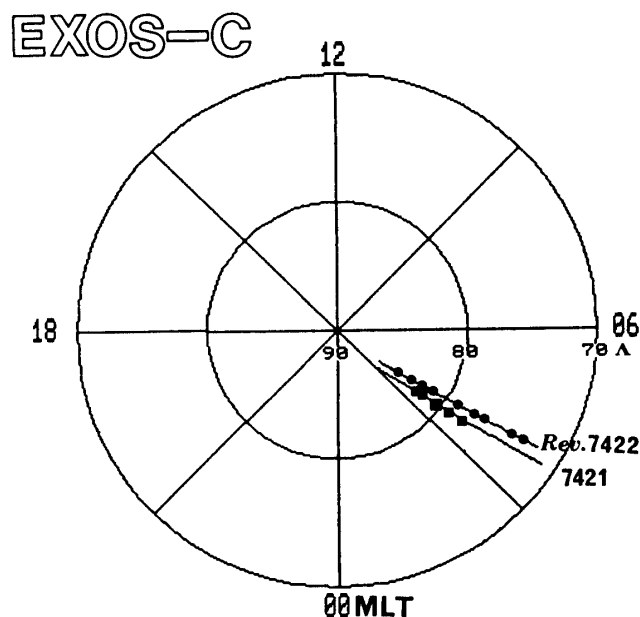


図7 連続パス Rev. 7421 と Rev. 7422 の polar plot. 軌道上のマークは Inverted-V が観測された位置を示す。

ギーとした。密度は、加速エネルギー以上のモーメントをとって算出した。温度は、Inverted-V Event のエネルギースペクトルにおいて、加速エネルギー以上の分布を Maxwellian fit して求めた。この二つのデータの間で特徴的なことは、次のことである。

(1) Rev. 7422 で観測される加速エネルギーは、Rev. 7421 で加速された顕著な Inverted-V Event の加速エネルギーの最大値よりより小さくなっている。

(2) Rev. 7422 では、Inverted-V Event の有無にかかわらず密度の変動が小さいのに対し、Rev. 7421 は非常に変動が激しく、Inverted-V Event の所で高くその周囲では著しく低い。

(3) 温度については、Rev. 7421 にくらべ Rev. 7422 の温度が全体的に上がっている。

これから察するに、このような変化の前後では、活動度は低いにもかかわらず、磁気圏での電子の状態は大きく変化していると言える。このことが一般性を持つかどうかは現在解析中であり、この現象との関係も検討を要する。

今までの観測からは、この現象は特定の Local Time, 高度などにかたよったものではない。さらに、オーロラ・オーバルに限らず、極冠域においてもやはり磁氣的に同じ様な phase で観測されている(図9の polar plot 参照)。このことは、この現象を引き起こす物理機構が、あまり場所的な特殊性を必要としない一般的なものであることを示唆している。



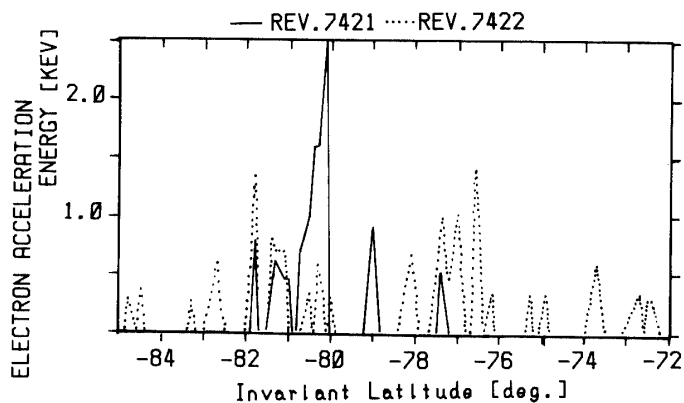


図 8 a Rev. 7421 と Rev. 7422 の降下電子の加速エネルギーの緯度分布.

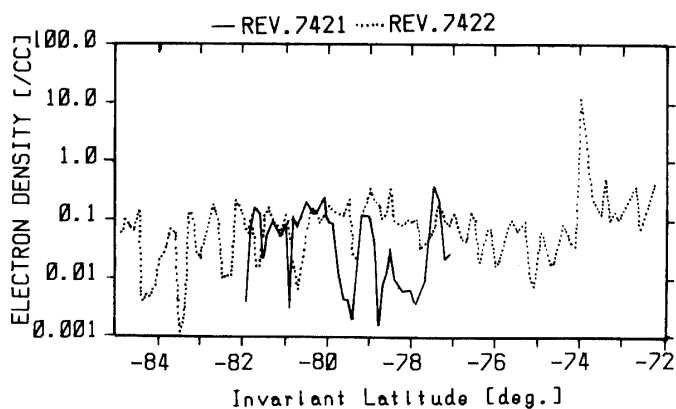


図 8 b 同じく降下電子の密度の緯度分布.

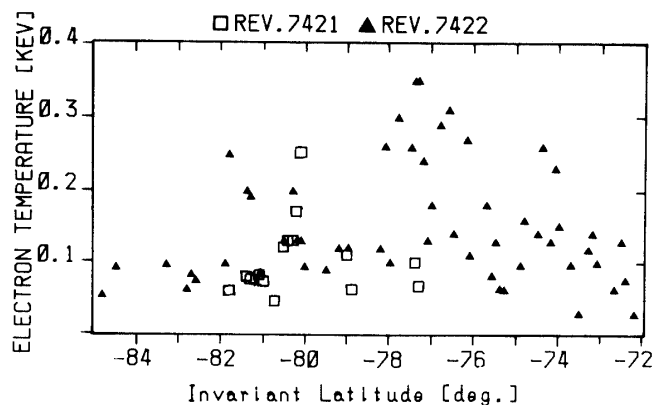


図 8 c 同じく Inverted-V 領域での降下電子の温度の緯度分布

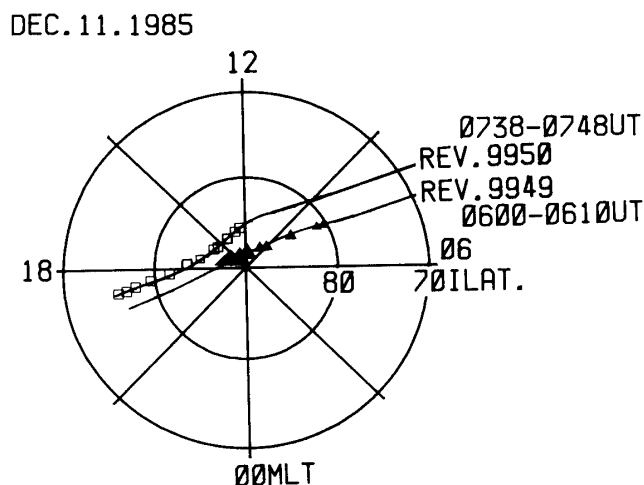


図9 1985年12月11日 Rev. 9949, 9950の連続パスの polar plot.  
マークについては図7と同じ。

#### 4. 結 言

以上 EXOS-C によって観測された Inverted-V Event に関する2つの観測について述べた。一つは、イオンの観測を電場による減速で説明することで Inverted-V Event をつくるような沿磁力線方向の電位差の存在をイオンの観測から強く支持するものである。ここで示したのはイオンの減速についての全体的な結果であり、序文で述べたような簡単な沿磁力線方向の電位差と矛盾する細かい現象についてはまだ問題は残っている。もう一つは、Inverted-V が、活動度が低いときにもかかわらず時間が経つと緯度方向に細かく広がり、前の状態と著しく変化してしまうという特徴的な観測結果であり、今までに示されているような電子の降下パターン[5]の変化の一部をさらに詳細に示したものである。この現象については理論的には勿論のことを観測的にもさらなる研究が必要である。

EXOS-C の運用及びデータの取得に関しては、EXOS-C 運用チーム全体の協力によるものであり、プロジェクトマネージャーの伊藤富造教授を始め EXOS-C の運用チームに感謝する。

#### 参 考 文 献

- [1] Frank, L. A., and K. L. Ackerson, Observations of charged-particle precipitation into the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **76**, 3621, 1971.
- [2] Lin, C. S., and R. A. Hoffman, Observations of inverted-V electron precipitation, *Space Sci. Rev.*, **33**, 415, 1982.
- [3] Bryant, D. A., D. S. Hall, D. R. Lepine, and R. W. N. Mason, Electrons and positive ions in an auroral arc, *Nature*, **266**, 148, 1977.
- [4] Hultqvist, B., The hot ion component of the magnetospheric plasma and some relations

- to the electron component-observations and physical implications, *Space Sci. Rev.*, **23**, 581, 1979.
- [ 5 ] Winningham, J. D., F. Yasuhara, S. -I. Akasosu, and W. J. Heikkila, The latitudinal morphology of 10-eV to 10-keV electron fluxes during magnetically quiet and disturbed times in the 2100-0300 MLT sector, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3148, 1975.
- [ 6 ] Mukai, T., N. Kaya, H. Kubo, H. Matsumoto, T. Itoh, and K. Hirao, Initial Observation of low-energy charged particles by satellite OHZORA (EXOS-C), *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 365, 1985.