

# 「極光」によるオーロラ電子の観測 —朝方における特徴—

向井利典・平尾邦雄

## Characteristics of Auroral Electrons Observed in the Morning-Side from "KYOKKO"

By

Toshifumi MUKAI and Kunio HIRAO

**Abstract:** The fifth scientific satellite "KYOKKO" observed both upward and downward fluxes of electrons along the geomagnetic line of force in the energy range between several eV and 10 KeV. In the present paper, these data over the high latitude regions of northern hemisphere have been analysed. They were obtained during March 1978 and local time of observation is limited in early morning.

The main results are as follows:

- 1) The precipitations of auroral particles are classified in two types of stationary and fluctuated. The fluctuated precipitation region exists in higher latitude than the stationary precipitation region.
- 2) The precipitation region moves southwards with the increase of geomagnetic  $K_p$  index.
- 3) The energy flux of stationary precipitation is less than several  $\text{erg/cm}^2 \text{ sec str.}$  and has good correlation with the type of energy distribution in KeV-range.

### 概 要

第5号科学衛星「極光」に搭載された電子分析器(ESP)は数 eV—約 10 keV の磁力線方向 upward flux と downward flux を同時計測した。ここでは、今年3月に内之浦で取得したデータのうち北半球高緯度地域のデータについて報告する。データは、主として衛星搭載のデータレコーダを再生して得られたもの(50パス)であって、地方時が午前(朝方)のデータである。主な結果は以下の通りである。

- Ⓐ オーロラ電子の降下領域は安定領域と変動領域に大別され、その空間分布は auroral oval に対応している。変動領域は安定領域の高緯度側に存在している。
- Ⓑ この降下領域は  $K_p$  依存性があり、 $K_p$  が大きくなるに従って低緯度側に移動する傾向がある。
- Ⓒ 安定領域のエネルギーフラックスのレベルは  $0.1 \sim \geq$  数  $\text{erg/cm}^2 \text{ sec str.}$  であって、このレベルは keV-range のエネルギー分布の形と密接な関係にある。

## 1. 緒 言

電離圏および磁気圏において低エネルギー電子の果たす役割は非常に大きい。「極光」(EXOS-A)に搭載された電子分析器(ESP)は数 eV~約 10 keV の電子フラックスの磁力線に沿った2成分(互に逆向きの成分, 即ち upward flux と downward flux)を同時計測するように設計された。その主たる目的はオーロラ電子および二次電子の観測であり, もう一つの目的は電離層起源の光電子および南大西洋地磁気異常地域における低エネルギー電子の観測であった。

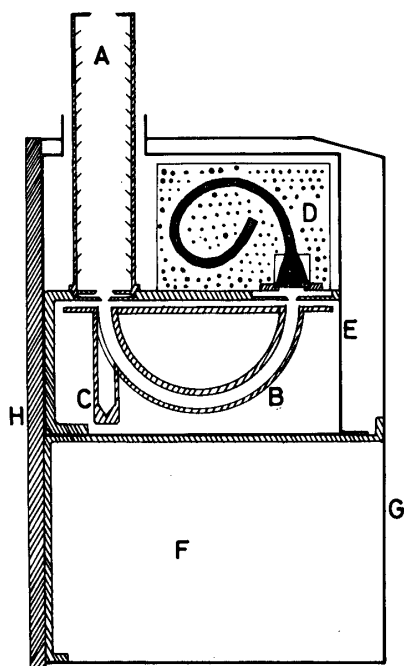
オーロラ電子の観測は, 過去10年程の間にロケット或は極軌道衛星により数多く行われてきた(Evans [1], Frank [2] のレビューおよびその中の参考文献)。よく言われるように, ロケット観測は特定の場所および時間における現象に限定される。また, 従来の衛星観測の多くは或る地方時における緯度変化の現象を調べることが主題であった。Atmosphere Explorer C (AE-C) は傾斜角  $68^\circ$  の準極軌道の衛星であって, 或る緯度における地方時変化を調べることができる [3] が, 主たるデータは低高度 (<1000 km) のものである。「極光」も AE-C と同様な準極軌道であるが, 北半球高緯度地域における高度は 2000~4000 km である。

EXOS-A は, 1978年2月4日に M-3H-2号機によって, 傾斜角  $65.3^\circ$  度, 遠地点 3978 km, 近地点 641 km の軌道に成功裡に投入されて「極光」(KYOKKO)と命名された。ESPの観測開始は2月25日であって, Rev 223で高圧電源が投入された。この論文で報告するのは, 3月に内之浦で取得したもののうちで北半球高緯度地域のデータ(オーロラ電子)についてである。データは主として衛星搭載のデータレコーダを再生して受信して得られたもの(50パス)であって, 地方時が午前のデータである。真夜中から朝方にかけてのデータは従来の衛星のデータの中で比較的少ないので, 貴重なデータとなるであろう。

## 2. 測定器

電子計測器は, 2個の同一設計のセンサ部およびデータ処理部から構成された。センサ部は, 第1図に示すように電子分析器の他に高圧電源等の電子回路の一部から成っている。電子分析器は, 同心半球形静電偏向板をエネルギー分析器として, その前にコリメータ, 後に検出器としてのチャンネルマルチプライアを配置して構成されており, 磁気遮蔽のために  $\text{high-}\mu$  metal でおおわれている。コリメータの視野角は大略  $4^\circ \times 14^\circ$  であって, その中心方向が衛星主軸方向を向くように, 衛星主軸に平行に取り付けられた。なお, 2個のセンサの視野の向きは互に逆向きに取り付けられた。衛星は, 沿磁力線制御をされている(ライブラーション  $\leq 10^\circ$ ) ので, ESP は沿磁力線方向の互いに逆向きの2成分(upward flux と downward flux)を測定していることになる。

エネルギー分析は, 同心半球形静電偏向板に第2図に示すような正負の指数関数的減少波形の電圧を印加(内球に正の電圧, 外球に負の電圧)することによって行われた。コリメータを通して分析器に入射した電子は, 分析器内の電場 ( $\propto 1/r^2$ ) によって偏向されエネルギー分散されて, 適当なエネルギーを有する電子のみが分析器を通り抜けてチャンネルマルチプライアに入射する。チャンネルマルチプライアの出力には 2.5~4.0 kV, 入力にはこの電圧

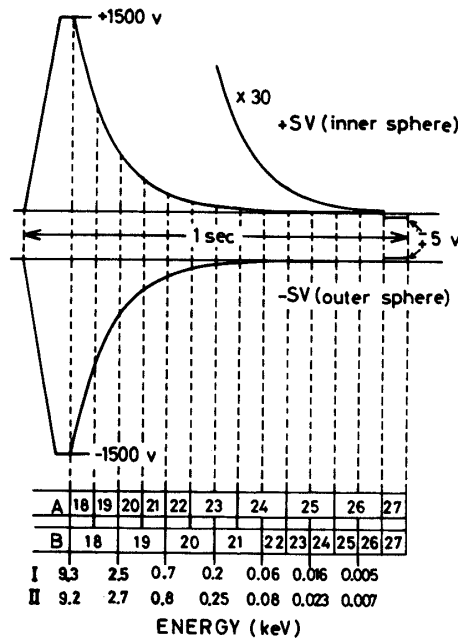


第1図 電子計測器センサ部の概念図

- A : コリメータ                      B : 同心半球形静電偏向板  
 C : 高エネルギー粒子トラップ  
 D : チャンネルマルチプライアおよびそのサポート  
 E : 高透磁率金属  
 F : 分析器用掃引電源, マルティプライア用高圧電源,  
     チャージセンシティブアンプ, パルス弁別および整形回路  
 G : 収納ケース                      H : 衛星への取付板

の約1/10が印加された。この電圧の制御はコマンドにより4段階に切換え可能で、実際には、最初の高圧印加 (Rev 223) の後センサ1および2共に2番目のレベル (3.1 kV) に設定された。マルチプライアの出力電荷パルスは増幅、弁別、整形されてデータ処理部に送られた。

データ処理部ではエネルギー掃引の制御、データの機上処理およびコマンド、HK、テレメータとのインターフェースが行われた。エネルギー掃引はセンサ1と2で同時に行われ、その繰り返し周期は1秒 (high bit rate の時) 又は4秒 (low bit rate の時) である。カ



第2図 分析器印加掃引電圧波形とカウントデータ送のテレメータワードの関係

分析器印加電圧のピーク値は公称値であって、実際の値は数%低く又センサ1と2でも異なる。カウントデータは Ward 18~27 に送出される。AおよびBはESPの観測モードである。各ワードのカウントデータに対応した境界エネルギーの例(IとIIはセンサの別)も書いている。各点線間の時間間隔は62.5 msecである。

カウントデータは15ビットのカウントで62.5 msec又は125 msecごとに計数され、機上処理により8ビットに圧縮されて一旦メモリに貯められた後、指定のテレメータワード(第2図参照;センサ1は偶数フレーム,センサ2は奇数フレーム)で地上に伝送された。ESPの観測モードは2種類(AとB)あり、第2図に示すようにモードAでは高エネルギー側、モードBでは低エネルギー側のデータに比重を置いている。なお、ESP割当のテレメータワードは第2図のWard 18~27の他にWard 16と17があり、各カウントデータの境界における掃引電圧のモニタ(Ward 18の最初のタイミングからWard 25と26の境界までの9点)をサブコミューションで送出した。

電子分析器の特性の飛翔前テストは  $2 \times 10^{-6}$  Torr の真空装置で電子銃を用いて行われた。チェックした項目は時間と装置の都合によりエネルギースケールの校正, エネルギー通過幅, 広い方の視野方向での角度特性, センサ1と2の相対感度のチェックであった。以下にその結果のみ列記する。

(a) 分析エネルギー  $E$  と分析器印加電圧の関係

$$\left. \begin{aligned} E &= e \cdot (3.82 \cdot V_0 - 2.82 \cdot V_s) && : \text{センサ1} \\ E &= e \cdot (3.76 \cdot V_0 - 2.76 \cdot V_s) && : \text{センサ2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(b) エネルギー通過幅  $\Delta E$

$$\left. \begin{aligned} \Delta E &= 0.039 \cdot E && : \text{センサ1} \\ \Delta E &= 0.047 \cdot E && : \text{センサ2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(c) 広い方の視野角はほぼ計算値に一致して 14.1 であった。

(d) センサ2の感度がセンサ1に比べて低エネルギー側で予想外に悪く, その比を  $R$  とすると

$$R = 0.14 \cdot \exp(0.021\sqrt{E}) \quad (3)$$

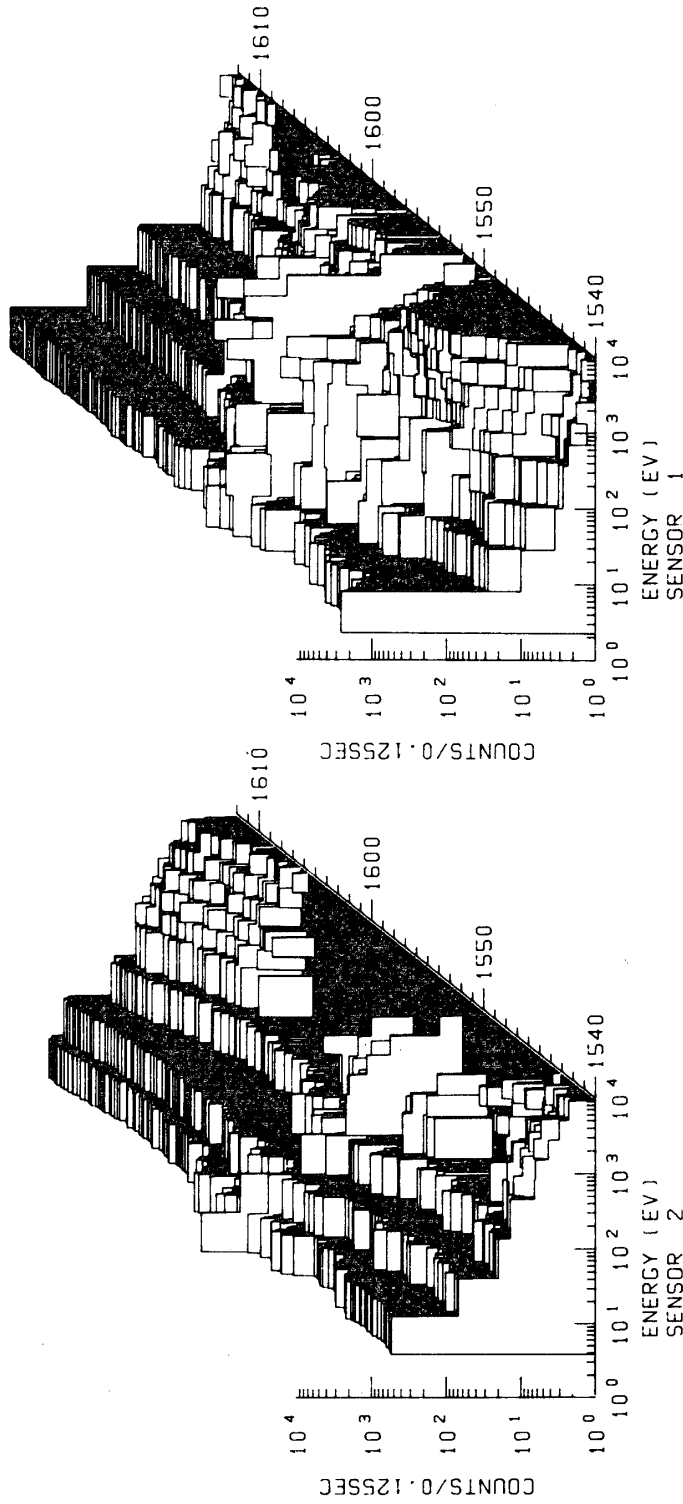
のエネルギー依存性があった。

### 3. データ

3月に KSC で取得したデータのうち, 北半球高緯度地域 (invariant latitude  $\geq 60^\circ$ ) のデータは 50 パスであった。衛星データベースには, 時間 (UT) の付けられた生データのみが入っているので, 別に計算された衛星の軌道位置と対応させて処理を行った。なお, ここで示す北半球の場合, センサ1は downward flux (precipitation), センサ2は upward flux を測定している。

(a) パターン表示

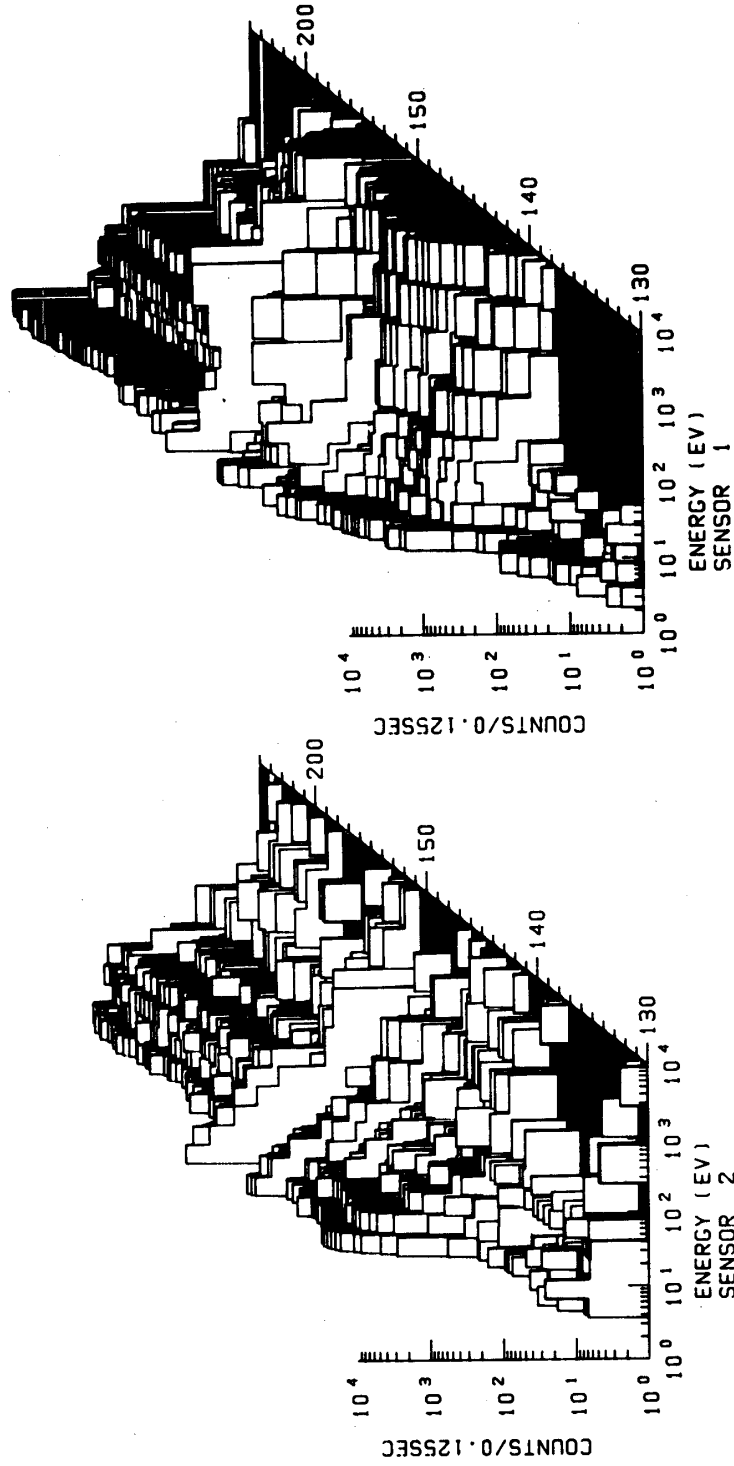
第3図は, Rev 326 および Rev 427 で得られたデータを3次的に表示したものであって, 或る時刻におけるエネルギー分布を時刻を斜め上方にずらして描いたものである。図を見やすくするために, いわゆる隠れた部分は描かれていない。横軸はエネルギー (Log-scale で 1 eV ~ 10 keV), 縦軸は 125 msec 当りのカウント数 (Log-scale で  $1 \sim 10^4$ ) で, センサ2のデータは式 (3) の補正がされている。斜め軸は UT であって, 各エネルギー分布は 8 秒ごとにその間の平均をとって描かれていて, 各階段はそれぞれテレメータワード (高エネルギー側より順次 Ward 18, 19, ..., 26) に対応している (第2図参照)。Ward 27 のデータは, いわゆるバックグラウンドデータのはずであった。すなわち, 分析器印加電圧が逆転しているために通過し得る低エネルギーイオンは, チャンネルマルチプライアの入口の電位障壁 (250 ~ 400 volt) で追い返されるはずである。しかし, 実際には Ward 27 のカウント数が信号 (Ward 18 ~ 26) よりも大きいことがしばしばあった (特に  $L \leq 2.0$  の内域放射線帯)。従って, 信号から単純に Ward 27 のカウントを差し引く訳にいかないため, この論文で報告するデータはバックグラウンドの補正を行っていない。しかし, この論文で報告する北半球高緯度地域のデータの場合, Ward 27 のカウント数は通常数カウント以下であって大きな影響は無い。



REV-326

① Rev 326 (1978年3月6日)——モードA

第3図 オーロラ電子のパターン



REV-427

⑤ Rev 427 (1978年3月16日) —モードB

第3図 オローラ電子のパターン

第3図は、モードA (Rev 326) およびB (Rev 427) のオーロラ電子のデータの典型的な例であって、或る領域に precipitation があることが一見して判る。Rev 326 の場合、15:42~15:49 に keV 領域のピークを有する precipitation zone がある。invariant latitude および MLT は、それぞれの時刻で  $62^{\circ}\sim 70^{\circ}$  および 3時~6時に対応している。15:49~15:52 の間はカウント数の変動が激しく、次いで 16:02 頃まで再び比較的安定した領域がある。15:52 および 16:02 の場所は  $72^{\circ}$ 、6時および  $68^{\circ}$  9時過ぎである。なお、16:10 頃に upward flux (センサ2) が見られるが、このときの Ward 27 のカウントも増加していたので事実かどうか不明である。Rev 427 の場合は 01:40~01:58 に穏やかな precipitation が見られる。このときの invariant latitude は  $62^{\circ}\sim 66^{\circ}$  (01:45~50) -  $64^{\circ}$  とほとんど変化せず、MLT が 2時~7時と変わっている。このデータは穏やかな precipitation であるが 01:50 頃 ( $66^{\circ}$ , 5時) 不連続が見られる。

(b) エネルギーフラックスとエネルギー分布

第3図のような表示は直観的には判り易いけれども、他の地球物理的データとの対応が付け難い。電子フラックス  $f(E)$  はカウント数から次式によって得られる。

$$f(E) = N / (\Delta E \cdot G \cdot \varepsilon) \quad (4)$$

但し、 $f(E)$ : el/cm<sup>2</sup>sec str keV

$N$ : counts/sec

$\Delta E$ : エネルギー通過幅 (keV)

$G$ : geometrical factor (cm<sup>2</sup> str)

$\varepsilon$ : チャネルマルチプライアの検出効率

今の場合、 $\Delta E$  は較正実験データ (式 (2)) を用い、そのときの  $E$  としてはエネルギー掃引区間の中心エネルギーの値、例えば第2図においてセンサ1モードAの Ward 18 の場合 4.8~9.3 keV の中心エネルギーとして約 6.7 keV の値、を用いた。 $G$  は計算値  $1.5 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup> str、 $\varepsilon$  は 0.3 と仮定した。エネルギーフラックス  $EF$  は電子フラックスから次式で求められた。

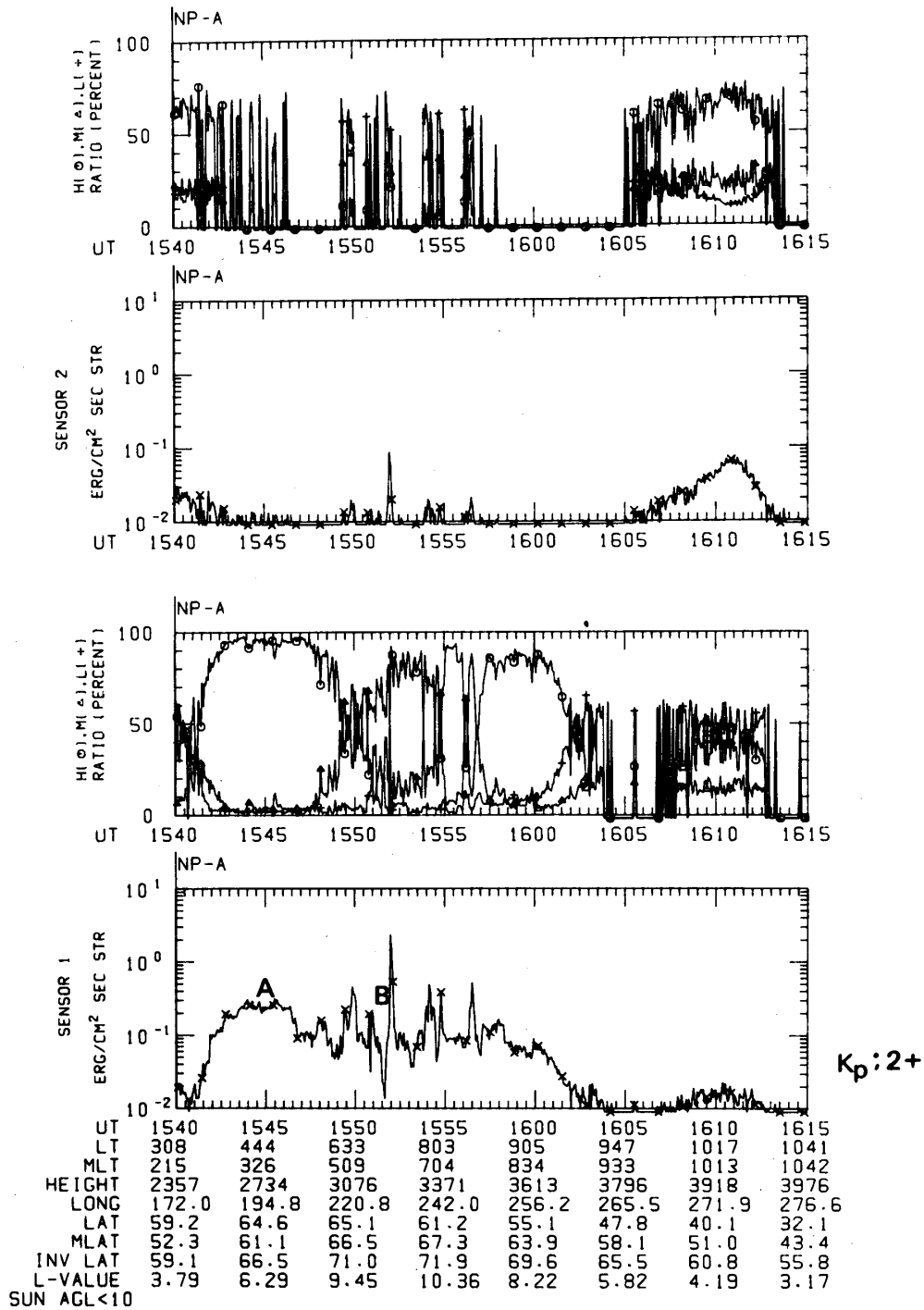
$$\begin{aligned} EF &= \int_0^{E_m} E \cdot f(E) dE \\ &= \sum_{i=1}^9 E_i \cdot f(E_i) \cdot \Delta E_i \end{aligned} \quad (5)$$

但し、 $E_i$  は各カウントデータに対応したエネルギー掃引区間  $\Delta E_i$  の中心エネルギーである。

$E_m$  は測定の上限エネルギーであって、第3図のように  $E_m$  におけるフラックスが可成り大きい時は式 (5) で求めた値は過少評価になる。このようにして求められた電子フラックスおよびエネルギーフラックスの精度は評価し難いが、第4図および第5図に示すようにおおむね妥当な値が得られているものと思われる。もちろん、相対的变化を議論するときは全く問題がない。

第4図は、エネルギーフラックスおよび3つのエネルギー領域に分けたときの寄与の割合を UT に対して表示したものであって、4パス分の典型的な例である。この図のデータは4

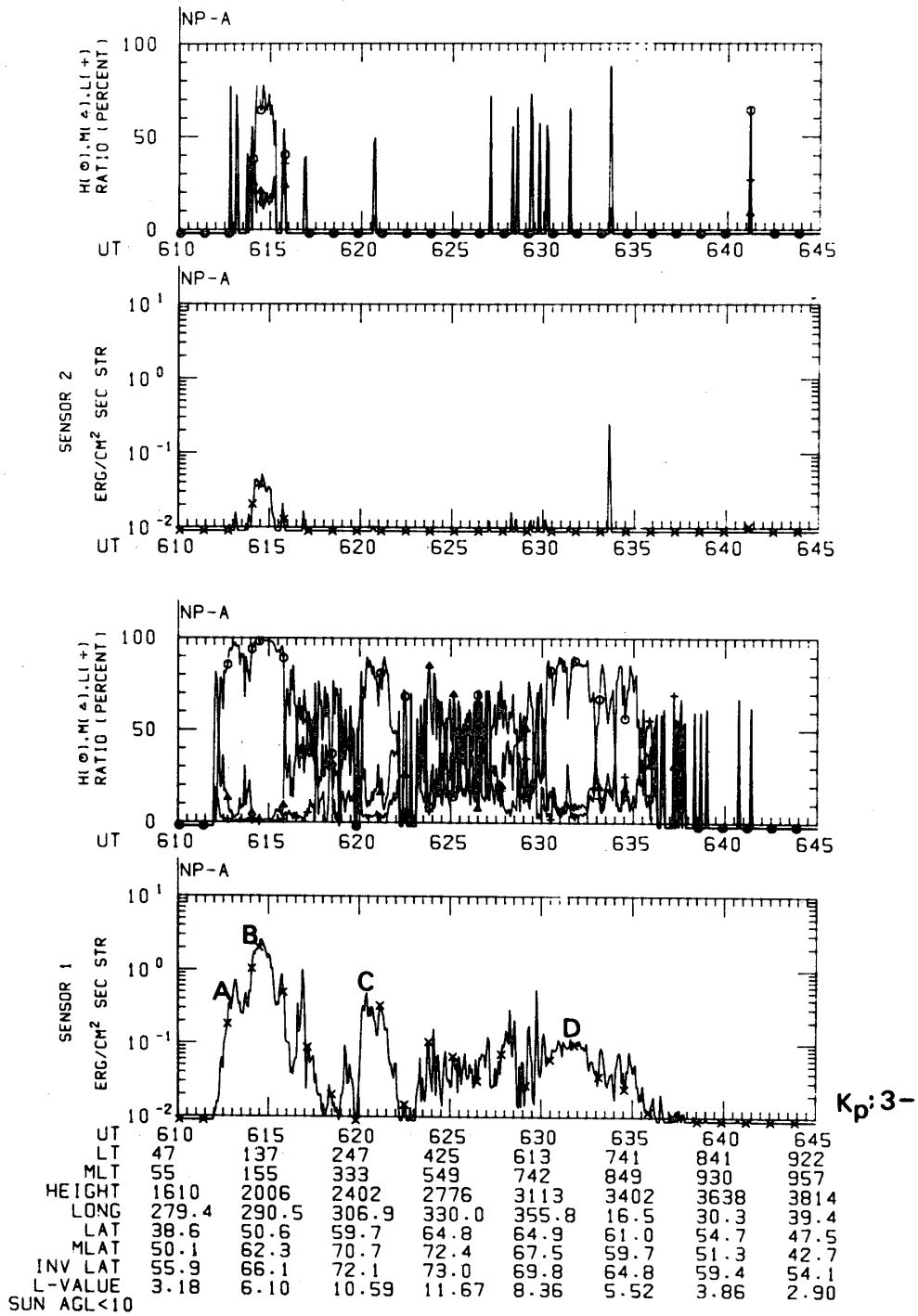




第4図 エネルギーフラックスおよび三つのエネルギーレンジの寄与の割合。Hは700~800 eV以上、Lは30~40 eV以下、Mはその中間のエネルギーレンジの寄与を示す。

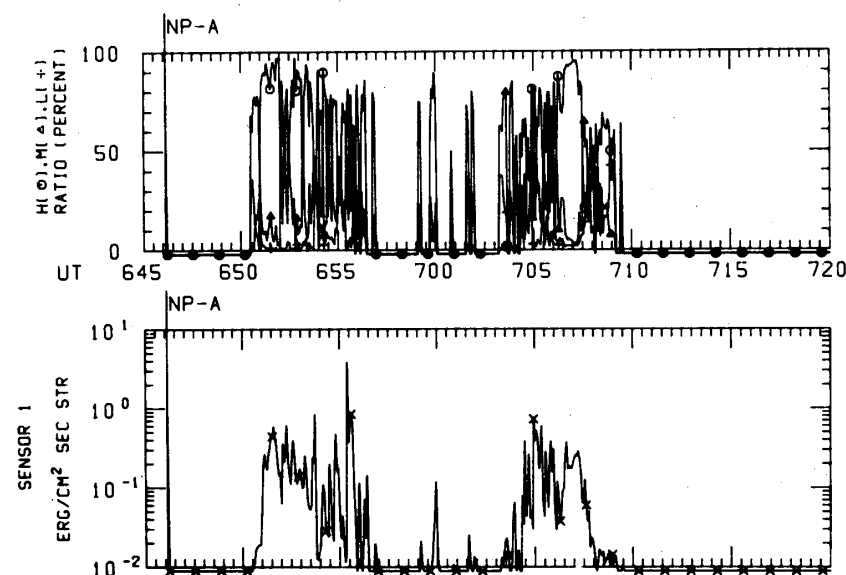
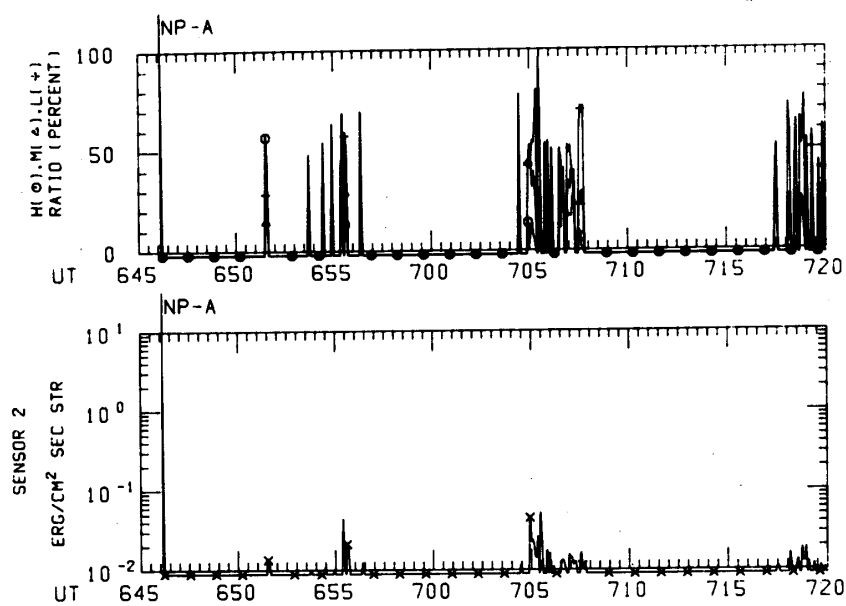
Ⓐ Rev 326

REV-326 19780306



REV-354 19780309

第4図 (b) ReV 354

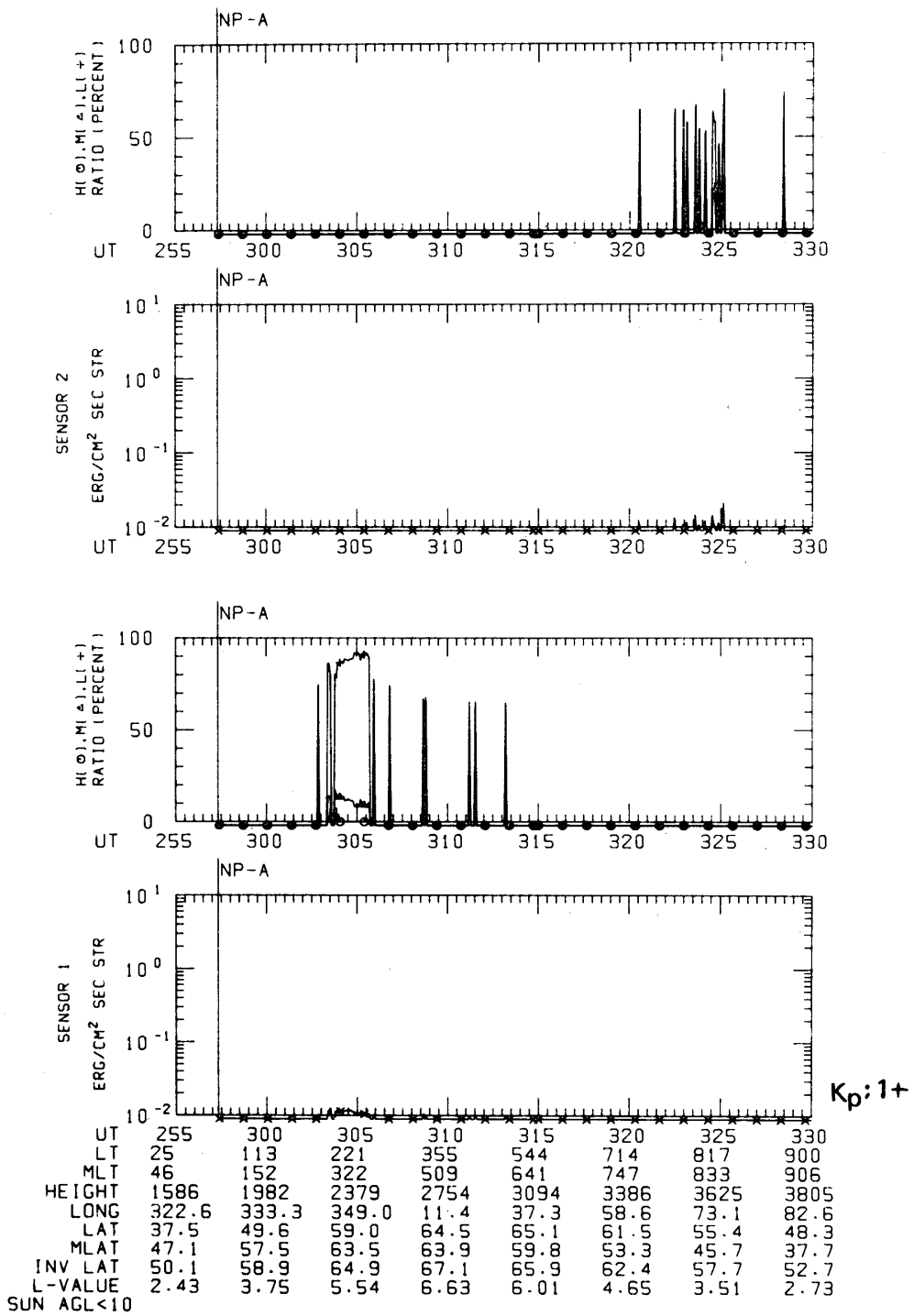


Kp:4+

UT	645	650	655	700	705	710	715	720
LT	21	105	205	332	520	658	809	857
MLT	23	108	223	430	650	821	911	943
HEIGHT	1463	1853	2252	2636	2989	3297	3554	3753
LONG	264.1	273.8	287.7	308.1	333.8	357.1	13.6	24.3
LAT	33.2	46.1	56.5	63.3	65.5	62.9	57.4	50.5
MLAT	43.4	57.2	68.1	74.1	72.3	65.4	57.1	48.4
INV LAT	49.5	62.2	71.2	75.0	73.2	68.3	62.7	57.0
L-VALUE	2.37	4.59	9.58	14.87	11.91	7.32	4.74	3.38
SUN AGL<10								

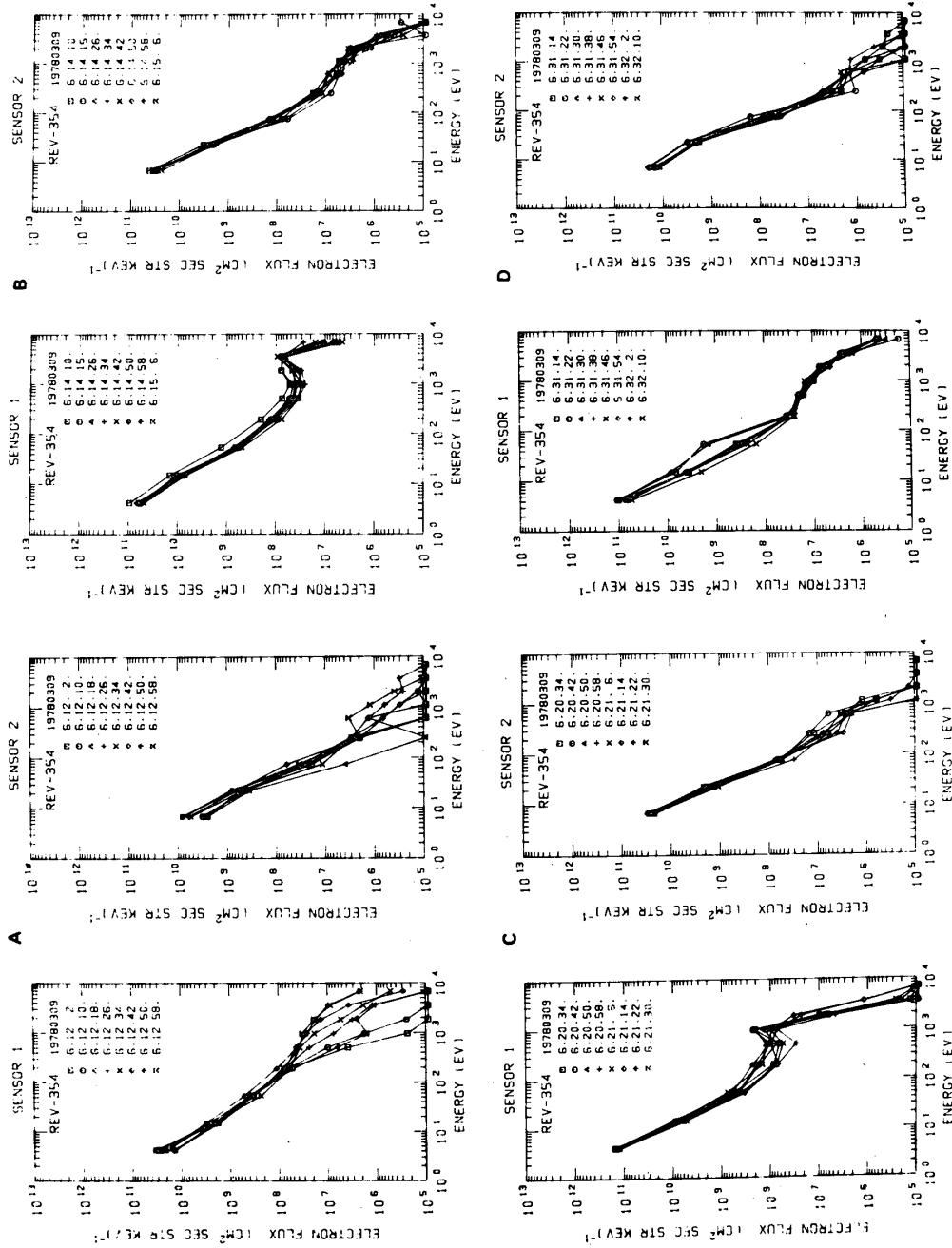
REV-365 19780310

第4图 © ReV 365



REV-374 19780311

第4図 ④ Rev 374

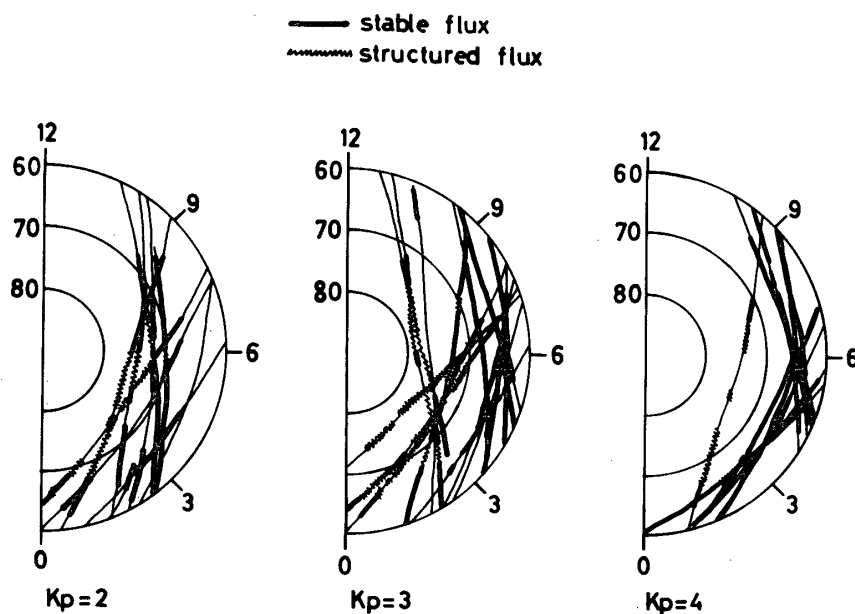


第5図 Rev 354 のエネルギー分布のデータ例 (安定領域)

A, B, C, D は第4図⑥参照.

秒ごとに表示され、各マークは20点ごとに付けられている。又、UTの下には5分ごとの軌道情報も書かれている。Rev 326は第3図③と同一のものである。Rev 326 Aの領域は安定した precipitation zone であって、すぐ上の図から明らかなようにHのエネルギー領域の電子がそのエネルギーを運んでいる。Bの領域は大きく変動していてエネルギーフラックスの荷い手も低エネルギー側にシフトしている。

Precipitationのパターンは一般に、比較的安定した領域と大きく変動している領域に大別されるようである。もちろん、安定した領域でも変動はあるし、その変動がだんだん大きくなっていく場合が多い。安定した領域は大体において、keV-rangeの電子がエネルギーフラックスの担い手である。そのエネルギーのレベルは0.1~数 erg/cm<sup>2</sup> sec strである。第5図はRev 354の4つの安定領域におけるエネルギー分布の例を示す。第5図のA, B, C, Dはそれぞれ第4図④の同記号に対応している。第5図の各図は、8秒ごとのエネルギー分布を8本(合計64秒)描いてある。Aはエネルギーフラックスの小さい所から安定領域への途中であって、keV-rangeが持ち上がって1 keV付近に平坦部ができていく様子がよくわかる。Bは顕著な例で3.5 keV付近にピークが現われていて、最高エネルギーにおいてもかなり大きなフラックスがある。第4図④のBのエネルギーフラックスは過少評価であるだろう。Cの分布はやはりピークが存在するが1 keV前後であって、3.5 keV以上に有意なフラックスは無い。Dの分布はAの分布の安定領域のものと似ている。安定領域におけるエネルギーフラックスの低い所ではエネルギー分布は穏やかであるが、高い所ではkeV-rangeの平坦部が持ち上がってピークを生ずるようになるようである。しかし、顕著なピー



第6図 オーロラ電子の午前における空間分布の  $K_p$  依存性  
座標は invariant latitude-MLT で極座標表示である。

クを生ずるデータ例は非常に少なかった。これが朝方の特徴であるのか、或いは測定器に依るものであるのかは今のところ断定できない。測定上は、1個のカウントデータは広いエネルギー範囲のデータ（例えば3.5 keVのデータは2.5~4.8 keVの平均）を含んでいるので、小さいピークは隠れてしまうことは事実である。

変動領域は当然ながらそのエネルギー分布も多種多様であるが、概して高エネルギー側の電子フラックスが少なく、数100 eV領域のフラックス変動が顕著である。Rev 365のように、変動幅がだんだん大きくなって遂に突発的な precipitation zone に分かれることがある。なお、Rev 365の真中付近の drop-out は polar cap の中に入ったものと思われる。又、Rev 374のようにほとんど有意なフラックスの無い場合もある。この時は  $K_p=1_+$  であって  $\sum K_p$  も  $13_+$  という静穏日であった。

#### (c) 空間分布

前項で述べたエネルギーフラックスの空間分布を第6図に示す。細い実線は軌道上で有意のフラックスの無い場合、太い実線は安定したフラックスのあった所、波線は変動領域で factor of 5 以上の変動を目安とした。50パスのデータのうち  $K_p$  による内分は  $K_p$  が1~5に対してそれぞれ11, 10, 15, 10, 4パスであった。 $K_p$  が1のときは Rev 374 (第5図④) のようなデータが大半であって、低いフラックスのレベルの安定領域があるのみである。第6図には  $K_p$  が2~4の場合を示している。precipitation zone は大体において auroral oval [4] と一致しており、 $K_p$  依存性、すなわち  $K_p$  が大きくなるに従って緯度が下がっていることが明らかである。また、変動領域は概して安定領域より高緯度側にある。

## 4. 結 言

KYOKKO-ESP のデータ処理はまだ始まったところである。ここで報告されたデータは、KSC で3月に取得されたデータのうち北半球高緯度のデータ（オーロラ電子）についてである。得られたデータの地方時は真夜中から朝方にかけてであって、主な結果をまとめると次の通りである。

- ① Precipitation zone はフラックスが比較的落ち着いた安定領域と大きく変動している領域に大別される。
- ② その領域の空間分布は auroral oval に対応していて変動領域は安定領域の高緯度側に存在している。
- ③ その領域は  $K_p$  依存性がある。すなわち、 $K_p$  が1以下の場合では precipitation は非常に小さく、 $K_p$  が大きくなるに従って precipitation zone は低緯度側に移っていく。
- ④ 安定領域のエネルギーフラックスのレベルは  $0.1 \sim \geq$  数  $\text{erg/cm}^2 \text{ sec str}$  であって、このレベルは keV-range のエネルギー分布と関係がある。高いレベルの場合 ( $\geq 1 \text{ erg/cm}^2 \text{ sec str}$ ) は keV-range にピークがある。
- ⑤ 変動領域では当然エネルギー分布が大きく変動するが、keV-range よりも低いエネ

ルギーでの変動が顕著である。

北半球高緯度地域のデータは、KSC で衛星搭載のデータレコーダより再生して得られたもののほか、カナダのチャーチルで real-time 受信されたものがある。今後のデータ処理には当然このデータも対象となる。また、KYOKKO には UV オーロラテレビ (ATV)、静電波観測器 (ESW) も搭載されているので、それらのデータとの突き合わせも今後の課題である。

#### 謝 辞

KYOKKO の打上げ、運用、データベース作成に関して多くの人々、特に宇宙工学の方々の御努力に負うところが大きかった。又、チャンネルマルチプライアの用意およびゲイン等の特性試験は林友直教授および橋本正之助手が行って下さった。謝意を表する次第である。データ処理は、DPC の F 230-75 および SA12 班管理の F 230-38 を用いて行われた。

1978年10月31日新設部 (科学)

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] D. S. Evans; Auroval particles and fields, *Ann. Geophys.*, **28**, 639, 1972.
- [ 2 ] L. A. Frank; Magnetospheric and auroral plasmas: a short survey of progress, 1971-1975, *Rept. U. Iowa*, **75-2**, 1975.
- [ 3 ] J. P. Doering, T. A. Potemra, W. K. Peterson, and C. O. Bstrom; Characteristic energy spectra of 1 - to 500 - eV electrons observed in the high-latitude ionosphere from Atmosphere Explorer C, *J. Geophys. Res.*, **81**, 5507, 1976.
- [ 4 ] Y. I. Feldstein, Peculiarities in the auroral distribution and magnetic disturbance distribution in high latitudes caused by the asymmetrical form of the magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, **14**, 121, 1966.