

# 「大空」による低エネルギー荷電粒子の観測

向井 利典・賀谷 信幸\*・久保 治也  
松本 治弥\*・伊藤 富造・平尾 邦雄

(1984年12月28日受理)

## Observation of Low-Energy Charged Particles by OHZORA

By

T. MUKAI, N. KAYA, H. KUBO  
H. MATSUMOTO, T. ITO and K. HIRAO

**Abstract:** The low-energy particle experiment (ESP) on the EXOS-C satellite was designed to measure energy and pitch-angle distribution of electrons over the energy range from 6 eV up to 16 keV and positive ions from 200 eV up to 16 keV, respectively. The experiment has provided us with global characteristics of ionospheric photoelectrons and also of energetic particles over a wide range of latitude, longitude, altitude (350-850 km) and local time.

The precipitation of auroral particles are observed at latitudes higher than the trapping boundary of higher-energy particles. The electron precipitation pattern is diffuse in the dayside auroral region, whereas it is quite discrete in the nightside. The ion energy distribution is found to be generally harder than the corresponding electrons.

Energetic electrons with energies of 10-100 keV are also found out at dusk hours near the equator.

The photoelectron energy distribution is shown to have a peak at 20-30 eV and also a sharp cutoff near 60 eV. However, the shape of structure at 20-30 eV is found to have a significant variation depending on latitude, longitude and local time. A large peak at 20-30 eV is observed occasionally over the South-Atlantic anomaly region.

### 概 要

1984年2月14日に軌道投入された「大空」に搭載された低エネルギー粒子観測器は6 eV~16 keVの電子および200 eV~16 keVの

---

\* 神戸大学工学部

イオンのエネルギー分布とピッチ角分布を測定するように設計された。本論文は、初期観測期間に得られた興味ある現象をまとめたものである。

オーロラ電子降下域は高エネルギー粒子域よりも高緯度側に存在する。そのパターンは昼間側で diffuse、夜側で discrete という特徴で代表される。また、降下イオンのエネルギーは対応する電子エネルギーよりも一般に高いことがわかった。降下電子のピッチ角分布は等方的に近い。

赤道地帯で 10~100 keV の電子を観測した。地方時は夕方であるが、詳細は今後の研究課題である。

電離層光電子のエネルギー分布は 20~30 eV にピークを有し、60 eV でフラックスが急減する。しかし、20~30 eV の形は意外に変化に富んでいて、ピークがないときや平坦な肩になっているときもある。南大西洋地磁気異常地帯では、20~30 eV に非常に顕著なピークが観測されることもある。

## 1. 緒 言

科学衛星 EXOS-C は 1984 年 2 月 14 日に M-3 S-4 号機によって傾斜角 75° の準極軌道 (近地点 353 km, 遠地点 865 km) に成攻裡に投入されて、「大空」(OHZORA) と命名された。この衛星に搭載された低エネルギー粒子観測器 ESP は、6 eV~16 keV の電子および 200 eV~16 keV のイオンのエネルギー分布とピッチ角分布を測定するように設計されていて、その主たる目的は極域および中・低緯度 (特に南大西洋地磁気異常地帯) における粒子降下現象の研究であった。第二の目的は粒子降下で生成される二次電子や電離層光電子の研究であった。

ESP の観測開始は、打上後約 4 週間で全ての高圧電源に無事スイッチが入れられてからで、その後、上記の目的に沿ったデータが順調に得られている。本論文は、観測開始後約 1 ヶ月間に得られた興味ある現象をまとめたものである。

## 2. 測定器

測定器 ESP の詳細は別に述べられている [1] ので、ここではその概要のみを述べる。ESP は、図 1 に示すように、3 々のセンサ (LE, HE, HI) と機上データ処理・制御のための電子回路部より構成される。LE は 6 eV~300 eV の電子を測定し、HE と HI はそれぞれ 200 eV~16 keV の電子およびイオンを測定する。LE と HE はデータの相互比較のためにエネルギー範囲をオーバーラップさせた。

3 々のセンサは原理的に同様の構成をとっている。即ち、各センサはコリメータ、球形静電エネルギー分析器、チャンネルトロン (Galileo 4039 型) から構成されている。但し、LE と HI が半球形静電分析器を用いているのに対して、HE は 1/4 球形静電分析器と 5 々のチャンネルトロンを用いてエネルギー分布とピッチ角分布を同時に得ることができる。また、

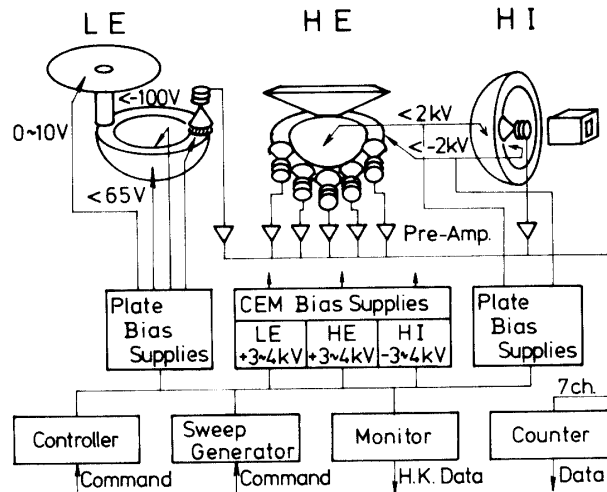


図1 低エネルギー粒子観測器 ESP のブロック図

LE では低エネルギー電子測定のために特別の配慮が払われている。即ち、センサは磁気遮蔽のために  $\mu$ -metal で囲まれ、コリメータ電位は衛星電位補正のために  $0 \sim 10V$  に制御できる。また、センサ内で生成される二次電子除去のためにチャンネル入口の前にサブレッサ・グリットを設けている。各センサの計測仕様を表1に示す。

### 3. 観測結果とその検討

ESP の観測開始は、打上後約4週間で全ての高圧電源の投入が無事行われてからで、その後の機器動作は現在に至るまで全く正常である。ここでは1984年4月の全日照期間に得られたグローバルな観測データに見られる興味ある特徴について報告する。

図2, 3および4はそれぞれ Rev. 835, Rev. 944, Rev. 953 で得られた約一周回分のデータで、いずれも適度の地磁気活動の状況 ( $K_p$ 指標は順に 2-, 3-, 2) のときに得られたものである。参考のために HEP (高エネルギー粒子観測器) の S 1 のデータも一緒に表示している。各図は上から順に LE, HE-3, HE-5, HE-1, HI, HEP-S 1 電子, HEP-S 1 プロトンのデータである。ESP の5チャンネルのデータはいわゆる E-t diagram で表示され、HEP のデータは積分フラックスで表示されている。また、各データに対応するピッチ角も一緒に示されているが、ピッチ角  $0^\circ$  の定義は北半球では磁力線方向に降下、南半球では上向きとされている。なお、LE, HE-3 と HEP-S 1 の視野中心方向は同じである。衛星位置の情報は下の欄に時刻 (UT) と共に書かれている。これらの図は代表例として示すもので、同様な特徴を示すデータは他の周回データでも数多く見られる。それらの特徴を以下に述べる。

#### (3-1) オーロラ粒子

HE のデータで最も特徴的なのは高緯度における降下粒子、即ち、オーロラ電子データである。ピッチ角を見ればわかるように、南・北いずれでも、HE-1 が降下電子を、HE-5 が上向きの成分を示している。オーロラ粒子のデータの解釈には不変量緯度の情報

表1. ESP・各センサの計測仕様

	LE	HE	HI
Analyzer	Hemispherical	Quadrispherical	Hemispherical
Energy range	6 – 300 eV electron	0.2 – 16 keV electron	0.2 – 16 keV ion
Energy resolution $\Delta E/E$	5 %	13%	5 %
Geometric factor(*) $\text{cm}^2\text{str eV/eV}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-4}$
Field of view	6.2°	10° × 10°	10° × 30°

(\*) per each channeltron.

が重要であるが、各図における最高到達不変量緯度はそれぞれ (72.5°, 73.7°), (70, 0°, 71.3°), (72.5°, 78.2°) である。なおカッコ内の最初の値は南半球、後の値は北半球の緯度を示す。また、いずれの図でも、南半球では昼間側、北半球では夜側である。これらの軌道で観測されたオーロラ粒子の特徴を以下に列挙する。

- ① 電子降下域は、高エネルギー粒子 (HEP データ) の高緯度側急減域より高緯度で観測されている。夜側では、まさにその急減域の所のみで観測されているのに対して、昼間側の領域ではずっと広い領域で観測されている。
- ② 昼間側の降下電子パターンはいわゆる diffuse であるのに対して、夜側では逆 V 字形の discrete な特徴を示している。夜側のオーロラ電子降下域の高緯度側の静かな領域は極冠域と思われる。即ち、夜側のデータは真夜中をはさんでその前後のデータを示しているが、大きな差異は見られない。
- ③ HE-1 ~ HE-5 のデータの相互比較によりピッチ角分布が得られる (HE-2 と HE-4 は図に示されていない)。降下電子フラックス (HE-1 データ) が上向きフラックス (HE-5) よりはるかに多いのは当然としても、HE-1 と HE-3 を比較するとわかるように降下電子のピッチ角は意外と等方的である。これは、diffuse/discrete の如何によらない。逆 V 字形の電子降下パターンでは、エネルギー分布にピークがあるが、それはピッチ角 90° のデータにも同様に見られる。
- ④ HI のデータは降下イオン・フラックスを示しているが、特徴的な事はそのエネルギーが対応する電子よりも高いということである。これは特に逆 V 字形電子降下域でよく見られる。

上記特徴は、衛星軌道の情報を考慮に入れると、従来の他の衛星観測で得られた結果 (例えば, [2]~[5]) とおおむね一致する。例えば、オーロラ電子降下域は低緯度側で diffuse、高緯度側で discrete になっており、また、夜側の方が昼間側より緯度が低くなることは一般に知られているが、これは上記①と②の特徴と矛盾しない。しかし、夜側の diffuse な電子降下域は図 2~4 で見る限り顕著ではなく、昼間側では顕著である。また、逆 V 字形を起こす電子加速機構として例えば沿磁力線電場加速が考えられているが、上記③と④の特徴はそれと矛盾する。別の機構が同時に働いているのか、全く新しい機構が必要である。

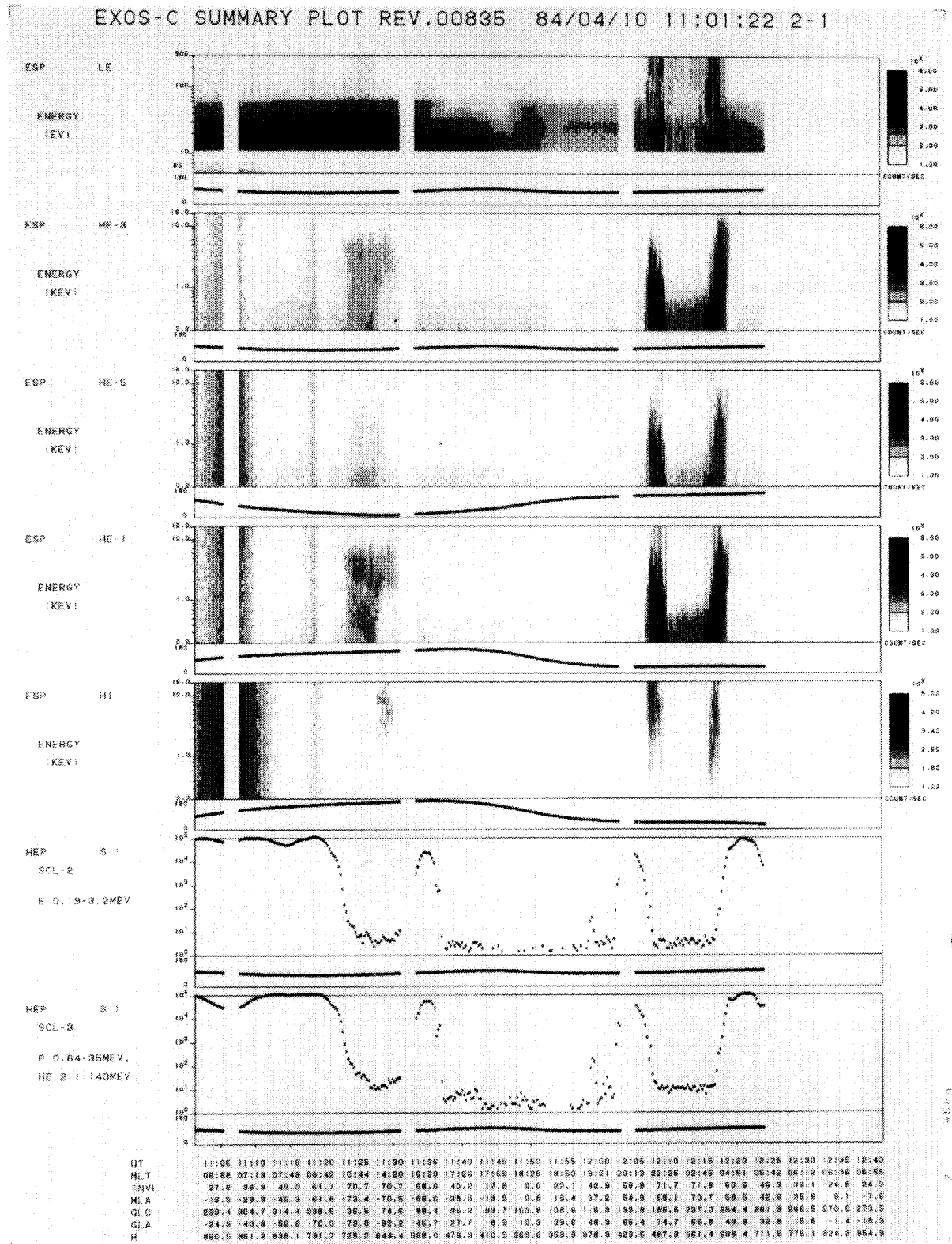


図 2 Rev. 835 で観測された荷電粒子分布の全地球的变化

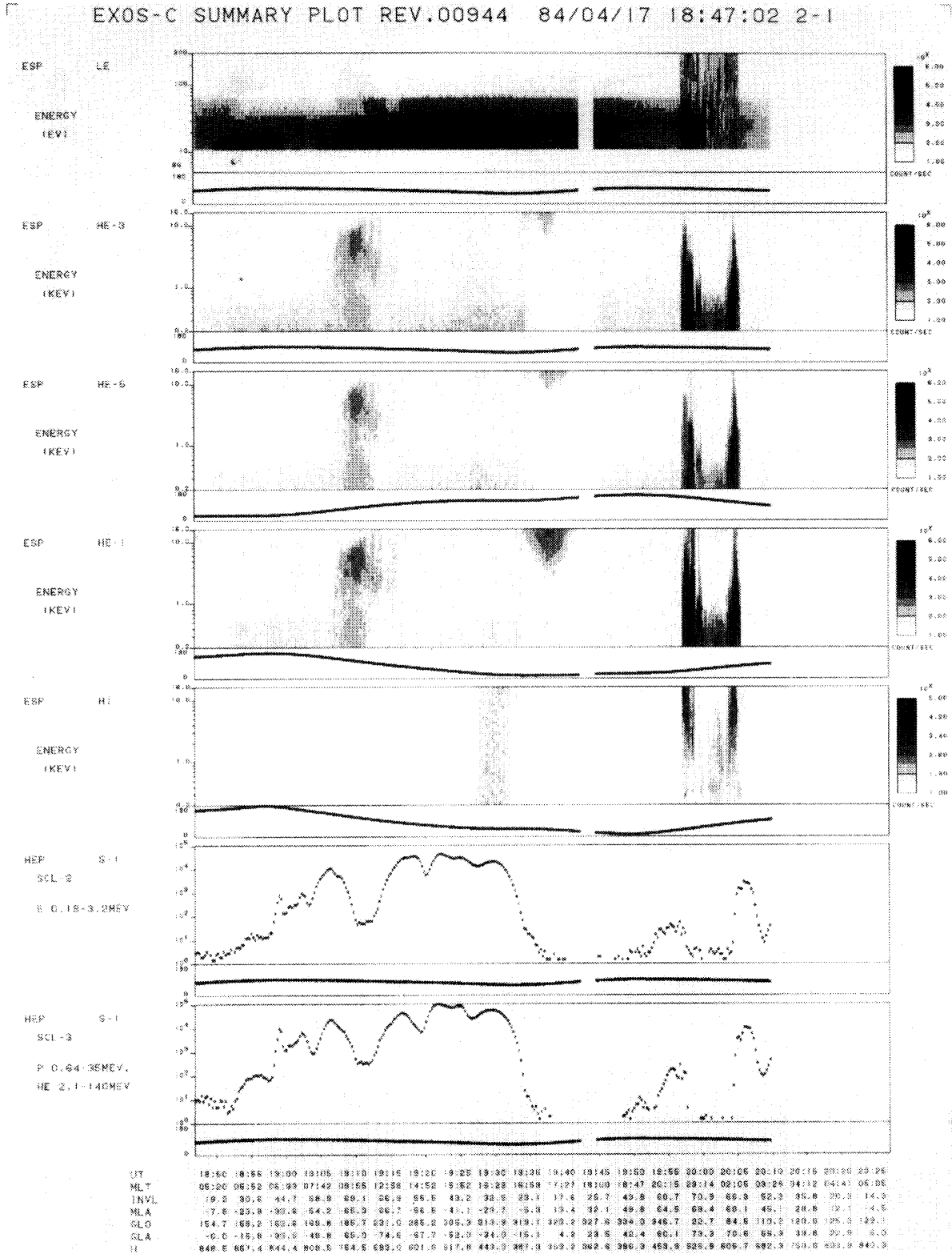


図 3 Rev. 944 で観測された荷電粒子分布の全地球的变化

EXOS-C SUMMARY PLOT REV.00953 84/04/18 08:56:00 2-1

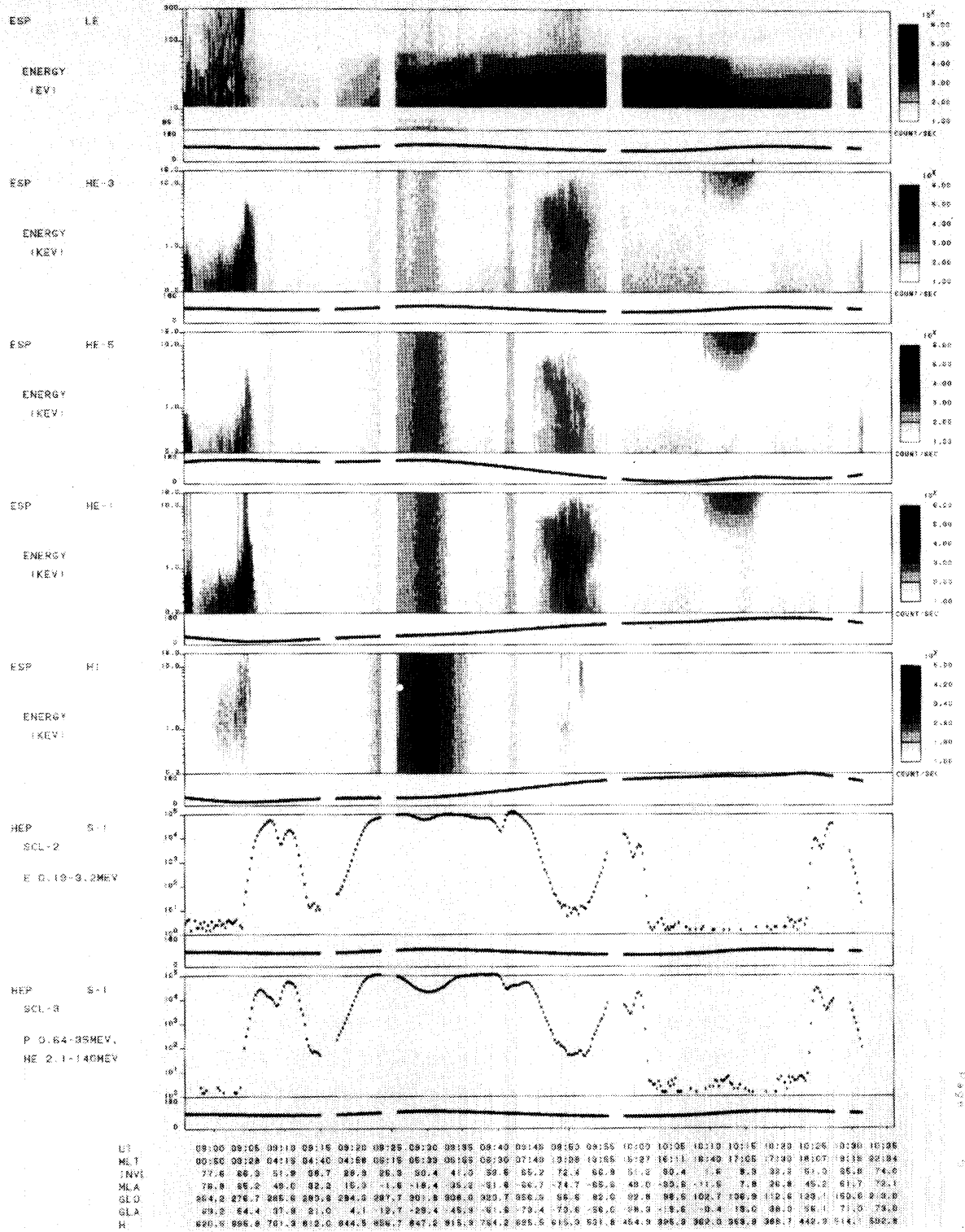


図 4 Rev. 953 で観測された荷電粒子分布の全地球的变化

### (3-2)南太西洋地磁気異常地帯

この領域の中心は HE と HI のデータで一目瞭然である。即ち、両方のデータともエネルギー依存性がほとんどないカウント数を示している。しかし、これは高エネルギー粒子によるバックグラウンドと考えられるので、真のフラックスを算出するのは現状では難しい。LE はバックグラウンド算出が可能なように設計されているので、表示されているデータは有用と考えられる。LE のデータは後で議論するように中・低緯度では電離層光電子を示しているが、Rev. 953 (図4) では幾分特異なデータが得られている。即ち、南太西洋地磁気異常地帯上空で得られたエネルギー分布が 20~30 eV に非常に顕著なピークをもっているのがわかる。この事をもっとわかり易く示したのが、図5である。図5は 09:17 UT ~09:47 UT のエネルギー分布を 56 秒毎に抽出してプロットしたものである。09:17 UT の太陽天頂角は 105° で、時間と共に小さくなって 09:47 UT では 86° であった。09:40 分では 93° で、これ以降のデータは電離層光電子の特徴を示している。顕著なピークは 09:23 UT~09:34 UT で見られるが、太陽天頂角は 104°~98° であって、電離層光電子と同定するにはフラックスも多いし、ピークがあまりにも顕著すぎる。これらの電子は高エネルギー粒子降下によって生成されたものと思われるが、その詳細については今後の検討課題である。

### (3-3)赤道域における高エネルギー電子

図3と4に見られるように、赤道付近で夕方の地方時に高エネルギー電子が、時々、観測されている。HE データでは約 10 keV 以上で有意なカウントを示しているが、HEP データにはそのような徴候が見られない。従って、これらのエネルギーは 10~100 keV と考えられる。Voss and Smith[6]によれば、同程度のエネルギーのイオンおよび中性粒子の観測の報告は幾つかあるが、電子については報告がない。「大空」で観測された高エネルギー電子の詳細は、今後のデータの蓄積を待たねばならない。

### (3-4)電離層光電子の全地球的特徴

LE のデータは電離層上方から逃げ出してきた光電子のスペクトラムと高緯度でのオーロラ粒子によって生成される二次電子のデータから成っている。なお、LE は 6~300 eV の電子を測定しているが、約 10 eV 以下では、第2節で述べたサプレッサ・グリッド電位の影響があるので、誤解を避けるために図では表示していない。電離層光電子スペクトラムの特徴は、60 eV 付近でフラックスが急減することと 20~30 eV にピーク又は肩があることである。図6は、Rev. 835 の 11:01 UT~12:03 UT の間の 100 eV 以下のエネルギー分布を示す。太陽天頂角は 11:01 UT~11:09 UT で約 80° であり、その後次第に大きくなって 11:57 UT で最大値 101° になった。11:40 UT では 94° に達し、これ以降フラックスが減少している。また、11:25 UT 付近では、diffuse なオーロラ粒子降下によって生成された二次電子も含んでいて、100 eV 以上まで裾が伸びている。

20~30 eV のピークの存在については、筆者らがロケット実験で発見した[7][8]。これは太陽紫外線の中で強度の大きい He II 304 Å によって上層大気酸素原子および窒素分子が電離されるときに生成される一次光電子のスペクトルを反映していて、低高度では数個のピークに分れているが、高い高度では熱的電子とのクーロン衝突によりぼやかされる。



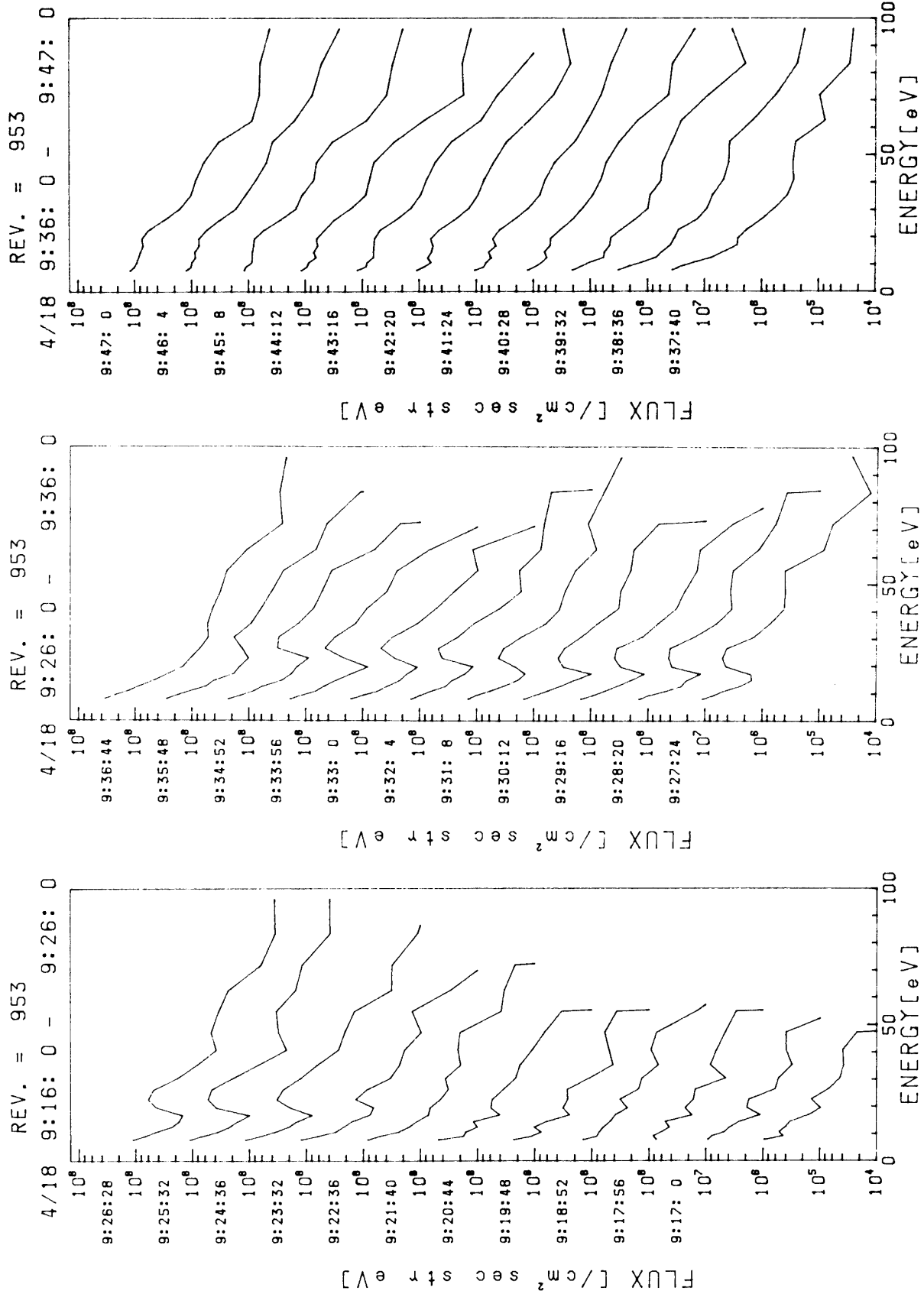


図5 Rev. 953 南太平洋地磁異常帯上空で観測された低エネルギー電子のエネルギー分布

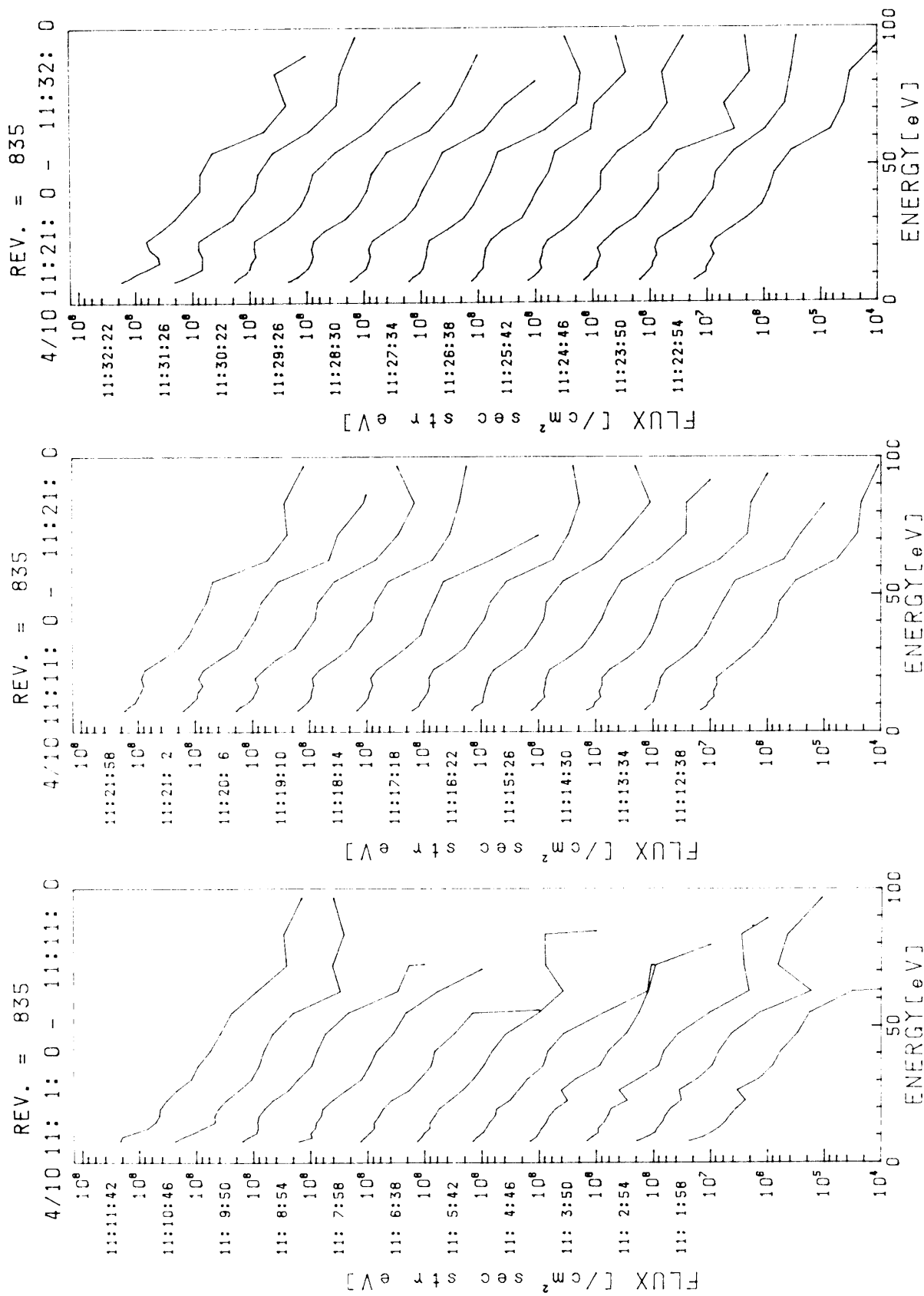
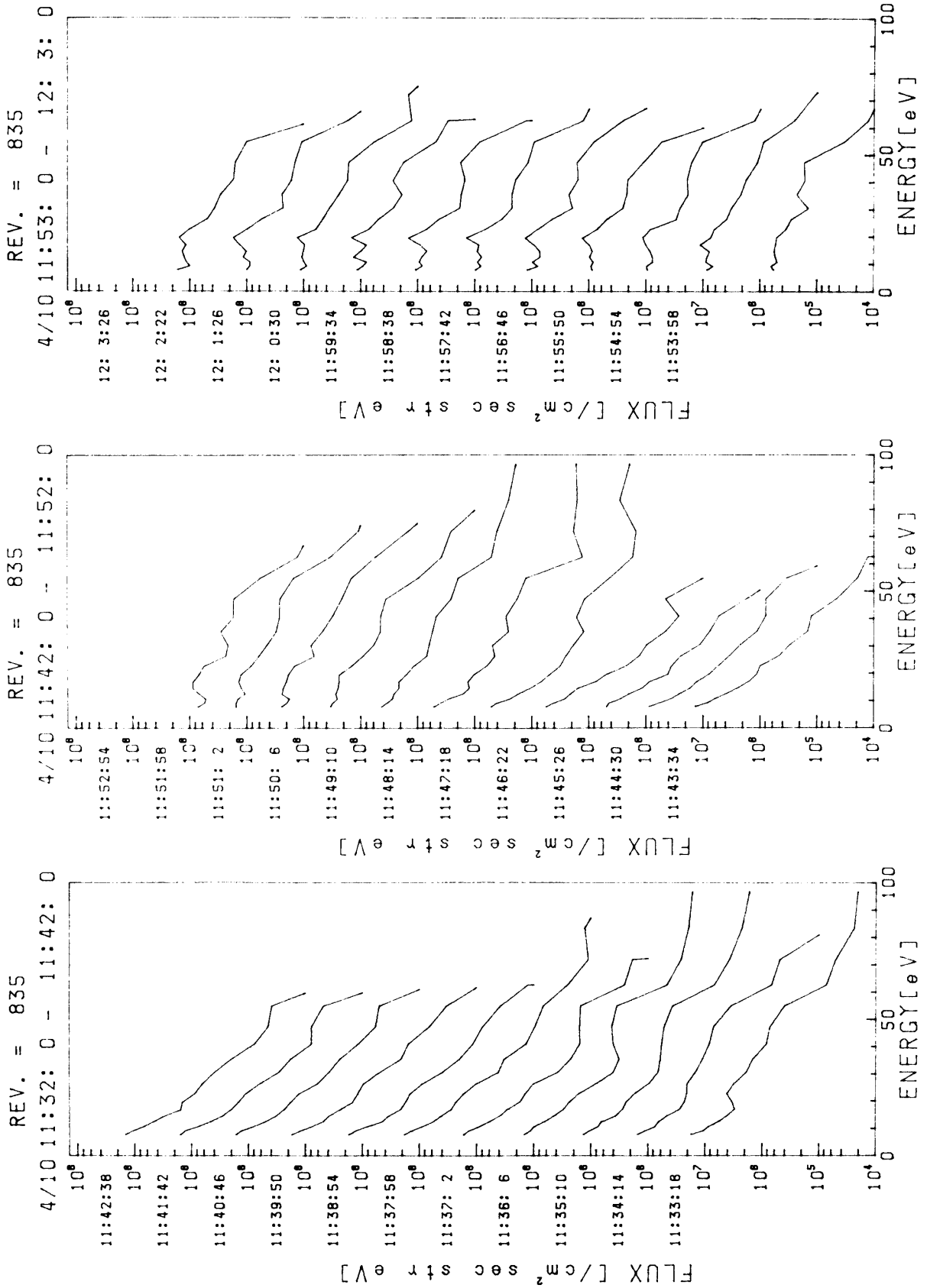


図 6 Rev. 835 で観測された電離層光電子のエネルギー分布



これらの特徴的なエネルギー分布の構造は他の衛星観測でも見られた[9][10]. 図2~4および図6で見られる20~30 eVのピーク又は肩も同種のものと考えられる. しかしながら, 図6に見られるように, その形は意外と大きく変化することがわかった. Lee et. al[11]によると, その変化は熱的電子とのクーロン衝突でぼやかされることによるもので, 電子密度との相関がある. 残念ながら, Rev. 835では電子密度データがないが, 図3のRev. 944の09:35 UTでピークが見えなくなっているのは確かに電子密度の増加(EXOS-C Summary Plotより)と対応している.

60 eV付近のフラックスの急減についても上記のロケットおよび衛星観測で見い出されているが, これは太陽紫外線が70-80 eVで急減することに起因するものである.

#### 4. 結 言

「大空」が軌道投入されてからまもなく一年になるが, ESPはその観測目的に沿ったデータを順調に送り続けている. 本論文は観測開始後約1ヶ月間に得られた興味ある現象をまとめたものである.

HEとHIは, 特定の領域, 即ちオーロラ帯, 南太平洋地磁気異常地帯, 赤道地帯でそれぞれ特有のデータを示している. オーロラ電子降下の様子は昼間側ではdiffuse, 夜側ではdiscreteな特徴で代表される. いずれも高エネルギー粒子(多分, 放射線帯)の高緯度側で観測される. 意外であったのは, 逆V字形の電子降下域ではイオンのエネルギーが対応する電子エネルギーより高いことである. また, 降下電子のピッチ角分布も等方的に近いことである. このことは電子加速機構として従来考えられていた沿磁力線電場以外の機構が存在することを意味している. また, 赤道地帯で10~100 keVの電子が観測されたが, これは今まで報告されていない.

LEは電離層光電子とオーロラ粒子による二次電子を観測している. 電離層光電子のエネルギー分布は従来のロケットおよび衛星観測で得られた結果を再現するものであるが, 20~30 eVのエネルギー分布の形は意外と変化に富んでいることがわかった. また, 南太平洋地磁気異常地帯では, 大きなピークが観測された.

いずれの現象も詳細な検討については今後の研究課題であり, データの蓄積をもとにいかなる条件で観測されるかをまず調べる必要がある.

最後に, EXOS-C(大空)の設計・打上げ・データ取得に対して, 宇宙工学の方々および「大空」チームの方々に感謝の意を表します. HEPのデータ表示の許可に対しては玉川大学の永田助教授はじめHEPグループに感謝します. サマリー・プロット作成に対しては小山(孝)助手および谷本君のお世話になった. ESPセンサ部は三鷹光器(株), 電子回路部は松栄電子(株)で製作された.

#### 参 考 文 献

- [1] 向井利典, 他: 低エネルギー粒子の観測 (ESP), 科学衛星 EXOS-C 中間報告書, 48-59, 1982.
- [2] Frank, L. A., and K. L. Ackerson, Observations by Charged particle precipitation into

- the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **76**, 3612-3643, 1971.
- [ 3 ] Frank, L. A., and D. A. Gurnett, Distribution of plasmas and electric fields over the auroral zones and polar caps, *J. Geophys. Res.*, **76**, 6829-6846, 1972.
- [ 4 ] Meng, C. I. Electron precipitation and polar aurora, *Space Sci. Rev.*, **22**, 223-300, 1978.
- [ 5 ] Mukai, T., and K. Hirao, Characteristics of the inverted-V events observed by the KYOKKO satellite, *Mem. Nat. Inst. Polar Special Issue* **22**, 116-124, 1982.
- [ 6 ] Voss, H. D., and L. G. Smith, Global zones of energetic particle precipitation, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **42**, 227-239, 1980.
- [ 7 ] Mukai, T., and K. Hirao, Rocket measurement of the differential energy spectrum of the photoelectrons, *J. Geophys. Res.*, **78**, 8395-8398, 1973.
- [ 8 ] 向井利典, 平尾邦雄: K-9 M-47号機による電離層光電子の観測, 東大宇航研報告, **11**, 563-603, 1975.
- [ 9 ] Doering, J. P., W. K. Peterson, C. O. Bostrom, and J. C. A. Armstrong, Measurement of low-energy electrons in the day airglow and dayside auroral zone from Atmosphere Explorer-C, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3934-3944, 1975.
- [10] Lee, J. S., J. P. Doering, T. A. Potemra, and L. H. Brace, Measurements of the ambient photoelectron spectrum from Atmosphere Explorer: I. AE-E measurements below 300 km during solar minimum conditions, *Planet. Space Sci.*, **28**, 947-971, 1980.
- [11] Lee, J. S., J. P. Doering, T. A. Potemra, and L. H. Brace, Measurements of the ambient photoelectron spectrum from Atmosphere Explorer: II. AE-E measurements from 300 to 1000 km during solar minimum conditions, *Planet. Space Sci.*, **28**, 973-996, 1980.