

科学衛星 JIKIKEN (EXOS-B) による荷電粒子の観測

久保治也・向井利典・河島信樹

Observation of Charged Particles
on Board the Scientific Satellite "JIKIKEN"

By

Haruya KUBO, Toshifumi MUKAI and Nobuki KAWASHIMA

Abstract: Charged particle detectors (ESP) on board the Japanese sixth scientific satellite "JIKIKEN" have measured electron fluxes in the energy range between a few eV and 10 keV and ion fluxes in the energy between 10 eV and 30 keV in the magnetosphere of L-shells from $L \cong 2.5$ to $L \cong 8$. In this paper, instrumentation, data processing and hitherto obtained results are described.

The main results are as follows:

- (1) On quiet days, significant electron and ion fluxes were hardly observed. On disturbed days, intense fluxes of keV-electrons were observed at $L \geq 4$, suggesting plasma injection from the plasma sheet. Injected keV-electrons often have non-monotonic energy spectra and have a good correlation with VLF emission activities. Ring current ions in the energy range above 1 keV were also observed on disturbed days after magnetic storm.
- (2) Energy dispersion of electrons which were injected from the plasma sheet due to magnetospheric substorm which occurred after magnetic storm was observed.

概 要

第6号科学衛星「磁気圏」に搭載された粒子観測装置 (ESP) は数 eV ～約10 keV の電子と10 eV ～約30 keV のイオンを磁気圏のL-値約2.5～約8迄の間で観測した。ここでは観測装置、データ処理、今までに得られた結果について述べる。主な結果は下記の通りである。

- (1) 地磁気活動度が静かな日には、高エネルギー粒子の有意のフラックスは観測されない。地磁気が荒れた日には、keV - 電子の大量のフラックスが $L \geq 4$ で観測され、プラズマシートからの注入を示唆している。注入された keV - 電子は屢々単調減少でないエネルギースペクトルを有している。1 keV 以上の環電流イオンも磁気嵐の後の荒れた日に観測されている。
- (2) 磁気嵐後のサブストームでプラズマシートから注入される電子のエネルギー分散性が観測された。

1. 諸 言

第6号科学衛星 J I K I K E N に搭載された荷電粒子観測装置 (E S P) の観測目的は、磁気圏の電子およびイオンのエネルギー分布、L - M L T 座標上での荷電粒子の分布を調べ、magnetospheric substorm 時の電子およびイオンの運動を調べることで、波動計測と呼応して磁気圏における波動-粒子相互作用を解明することおよび SPW (大電力電波放射) や C B E (電子ビーム放射) の能動的実験に対する磁気圏プラズマの応答を計測することである。

磁気圏粒子の観測は過去種々の衛星によってなされているが、J I K I K E N と傾斜角は異なるが軌道が似ているのは Explorer 45 (S^3) である (Longanecker and Hoffman [1])。

S^3 は遠地点 5.24 Re, 近地点 222 km, 傾斜角 3.6° で赤道近傍の 5 Re 以内を調べることができる。また G E O S - 1 は遠地点 7 Re, 近地点 2050 km で傾斜角 26.5° である。これは静止衛星 A T S - 6 の 6.6 Re の外側迄調べることができる。

E X O S - B は、1978年9月16日に M - 3 H - 3 号機によって、傾斜角 30° , 遠地点 30,055 km, 近地点 227 km の楕円軌道に投入されて J I K I K E N と命名され国際標識 1978-87 A が与えられた。

J I K I K E N は傾斜角が 31° なので S^3 よりも磁気緯度の高い所を調べることができる。1978年10月9日の ReV. 65 で E S P の高電圧が印加されて、ここに磁気圏の粒子観測が開始された。この論文で報告するのは、主として観測装置と、データ処理および 1979年4月25日の ReV. 628 迄の初期的な磁気圏粒子の様相である。

2. 観 測 装 置

E S P は、電子観測用センサー部イオン観測用センサー部およびデータ処理部より成る。衛星に取付けた場合のセンサー部を図1に示す。図1からわかる様に、センサー部は粒子エネルギー分析器の他に分析器用掃引電源、チャンネルトロンおよびその高圧電源、プリアンプから成る。なお、電子センサーの概念は図1からはよくわからないが、これは K Y O K K O に搭載されたものと同じなので (但し、high- μ metal は J I K I K E N のセンサーには付いていない) 向井, 平尾 [2] を参照。

電子センサーは同心半球型エネルギー分析器と、その前のコリメータ、後の検出器としてのチャンネルトロンで構成されている。イオンセンサーは、中心角 60° の同軸円筒型静電エネルギー分析器とコリメータおよびチャンネルトロンで構成されている。

電子およびイオン両センサーの光軸は平行で、衛星主軸に直角になる様に取付けられ、両

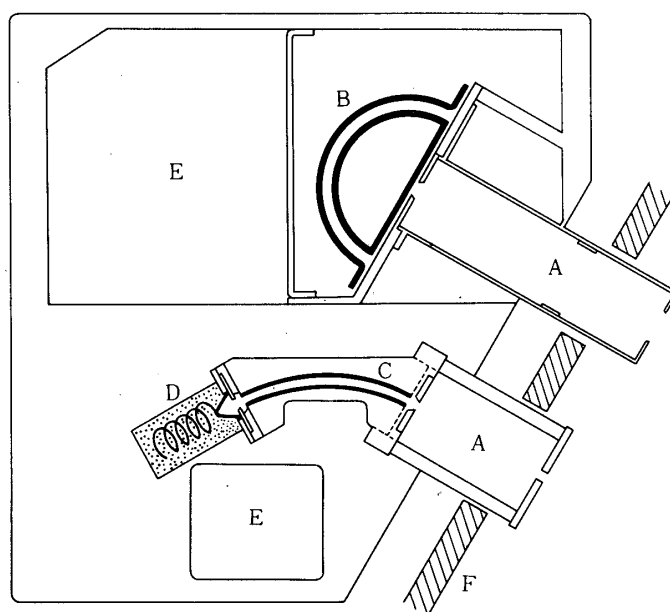


図1 荷電粒子観測装置センサ部の概念図

A : コリメータ B : 円心半球形静電エネルギー分析器 (電子用)

C : 同軸円筒型静電エネルギー分析器 (イオン用)

D : チャンネルトロンおよびそのサポート

(電子センサにもこれ等があるがこの図には描かれていない. 参考文献〔2〕参照)

E : 分析器用掃引電源, チャンネルトロン用高圧電源, チャージアンプ, パルス弁別および整形回路.

F : 衛星側壁

コリメータの先端は衛星の外側に15 mm程突き出ている. 太陽電池は絶縁体なので charge up が起こり, その電場のために測定する粒子のエネルギーやフラックスが影響を受けるので, コリメータ近傍は太陽電池を張らずに衛星側面のハネカム板が表面に出してある. センサの諸元を表1に示す.

エネルギー掃引は図2に示す正負の指数函数的減少波形の電圧を印加 (電子センサーでは内球に正の電圧, 外球に負の電圧, イオンセンサーでは外側円筒に正の電圧, 内側円筒に負の電圧) することにより行う. コリメータを通過して分析器に入射した粒子は, 分析器内の電場 (電子の場合 $\propto \frac{1}{r^2}$, イオンの場合 $\propto \ln \frac{1}{r}$) 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粒子のみが分析器を通過して, チャンネルトロンに入射する. 電子用チャンネルトロンの出力側には +3.0 ~ +4.0 kV の高電圧が, 又入力側には出力側の約 $\frac{1}{10}$ 程度の電圧が印加されている. イオン用チャンネルトロンは入力側に -2.8 ~ -4.0 kV の高電圧が印加され出力側は零電位になっている. これ等の高電圧はコマンドにより 3

表1 センサの諸元

	セ ン サ	
	電 子	イ オ ン
形 式	半 球 型	60°セクタ型
コリメータの方向	衛星のスピン軸に垂直	同 左
視 野 角	4° × 13°	3° × 3°
エネルギー分散能 $\frac{\Delta E}{E}$	≅ 3%	5% ※
geometrical factor	$1.27 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ str}$ (実 験)	$1.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ str}$ (計 算)
感 度 (効 率)	~0.5	~1.0

※ このエネルギー分解能は分析器だけのものである。
データのエネルギー幅に関しては表2参照。

段階変えることができる。最初の高圧印加 (ReV. 65) の後、電子およびイオンの高電圧は最低のレベル (電子: +2.98 kV イオン: -2.78 kV) に設定された。その後、ReV. 378 でイオンの高圧電源は中間のレベル (-3.34 kV) に再設定された。チャンネルトロン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る。データ処理部では、データの機上処理、エネルギー掃引の制御、およびコマンド、HK、DPU、テレメータとの信号

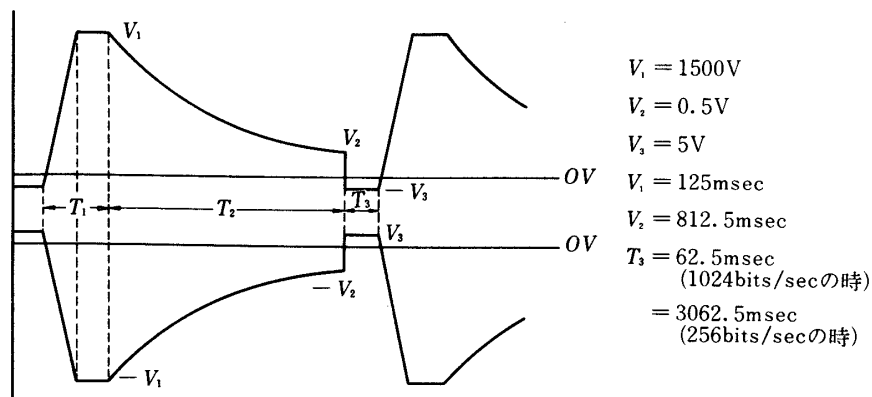


図2 掃引電圧波形

の受け渡しが行われる。エネルギー掃引は電子、イオン同時に行われ、その繰り返し周期は1秒(1024bits/secの時)又は4秒(256bits/secの時)である。カウントデータは15ビットのカウンターで62.5 m sec 毎に連続的に計数され、机上処理により8ビットに圧縮されて一旦メモリに貯えられた後、serial データとしてDPUに送り出され、指定されたテレメータワードで地上に伝送される。一掃引で電子およびイオンの各々16点のデータが得られる。各々最初の2点のデータは掃引波形の立上がり時に対応し、最後の1点はバックグラウンドの情報を得るために使われている。従って、電子およびイオンの有意義なデータは16点中13点である。ESPのセンサとカウントデータ処理部のブロック図を図3に、ESPに割り当てられたテレメータのワードを図4に示す。

カウントデータの境界エネルギー、平均エネルギー、フラックスに変換するための係数を表2に示す。これ等の値は分析器電圧のモニターから得られたもので、温度変化は3%以内である。カウント数である8ビットワードは

$$C = 2^{15-S} (D + 16)$$

で計数率 (counts/sec) に変換される。ここでCは計数率、DおよびSは各々8ビットワードの上位4ビット、下位4ビットを10進数で表わしたものである。計数率に表2の変換係数を乗じることによりフラックス (particles/cm²sec str eV) が得られる。

電子分析器の飛翔前テストは2×10⁻⁶Torrの真空装置でトリウムタングステンのフィラメントを用いて行い、エネルギースケールの較正、エネルギー通過幅、広い方の視野方向での角度特性を調べた。その結果を列記する。

(i) 分析エネルギーEと分析器印加電圧の関係

$$E(eV) = (3.763 |V_0| + 2.763 |V_i|) \quad \text{ここに } V_0 \text{ および } V_i \text{ は外球および内球に印加した電圧である。}$$

(ii) エネルギー通過幅 ΔE

$$\Delta E = 0.027 E \quad (\text{実測値の平均})$$

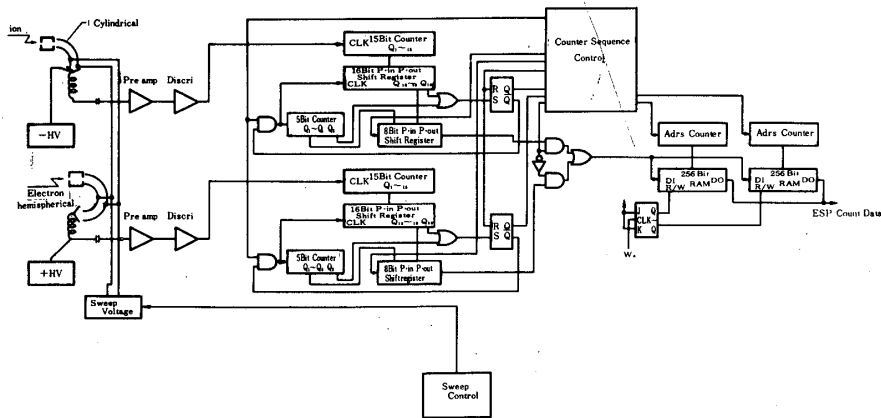


図3 ESPのブロック図(センサ部およびカウントデータ処理部)

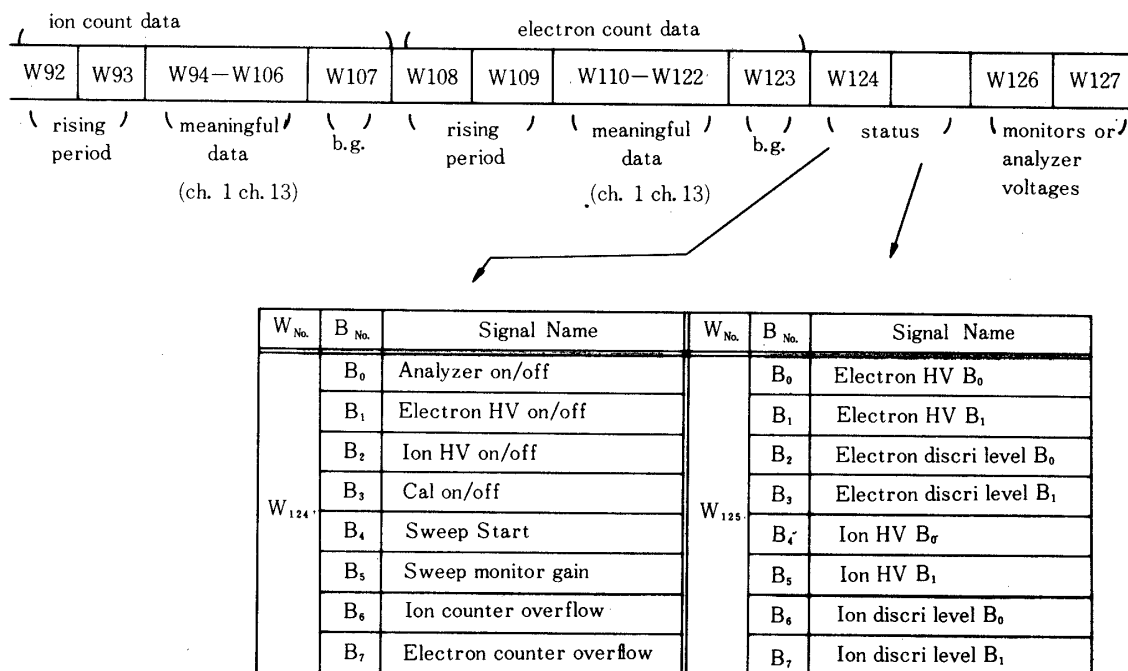


図4 ESPデータのPCM Format

(iii) 広い方の視野角はほぼ計算値に一致して13°であった。

イオン分析器の飛翔前テストは二通り行った。低エネルギー側のテストは $Al_2O_3 + KCl$ をタングステンフィラメントに塗って、そのフィラメントを熱することによって出て来る K^+ イオンで行った。イオン源としては時間的に不安定なので、詳しいテストはできなかったが、分析器はほぼ計算値に一致した特性を示した。高エネルギー側のテストは、RFイオン源、質量分析器、加速器を通して作られた H^+ ビームで行った。ここでも計算値に一致する特性を示した。従って、イオン分析器の分析エネルギーと分析器印加電圧の関係、エネルギー通過幅等は全て計算値を使うことにした。

3. データ処理

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う。今迄に行ってきた処理は、

i) 各フレーム毎のカウント数、1サブフレームでの平均のカウント数およびフラックスを求めること。この平均処理を行う時に配慮したことは、太陽光の影響を受けたデータを排除することである。即ち、フレーム毎のカウント数を見ると電子のch.12とch.13(表2参照)、イオンチャンネルにspin modulation がけんちょに現われている。この周期は衛星

表2 チャンネルNoと測定エネルギーとの関係および変換係数

B. ENERGY	I O N		No	E L E C T R O N		
	M. ENERGY	C. FACTOR		B. ENERGY	M. ENERGY	C. FACTOR
0.289 E+ 05	0.211 E+ 05	0.947 E+ 00	1	0.947 E+ 04	0.691 E+ 04	0.848 E+ 01
0.154 E+ 05	0.113 E+ 05	0.177 E+ 01	2	0.504 E+ 04	0.368 E+ 04	0.159 E+ 02
0.826 E+ 04				0.268 E+ 04	0.196 E+ 04	0.299 E+ 02
0.442 E+ 04	0.604 E+ 04	0.331 E+ 01	3	0.143 E+ 04	0.104 E+ 04	0.561 E+ 02
0.237 E+ 04	0.324 E+ 04	0.618 E+ 01	4			
0.127 E+ 04	0.174 E+ 04	0.115 E+ 02	5	0.762 E+ 03	0.557 E+ 03	0.105 E+ 03
0.683 E+ 03	0.932 E+ 03	0.215 E+ 02	6	0.407 E+ 03	0.297 E+ 03	0.197 E+ 03
0.367 E+ 03	0.501 E+ 03	0.400 E+ 02	7	0.217 E+ 03	0.159 E+ 03	0.368 E+ 03
	0.269 E+ 03	0.743 E+ 02	8	0.116 E+ 03	0.851 E+ 02	0.688 E+ 03
0.198 E+ 03	0.145 E+ 03	0.138 E+ 03	9	0.623 E+ 02	0.456 E+ 02	0.128 E+ 04
0.106 E+ 03				0.334 E+ 02	0.245 E+ 02	0.239 E+ 04
0.574 E+ 02	0.781 E+ 02	0.256 E+ 03	10	0.179 E+ 02	0.131 E+ 02	0.446 E+ 04
0.310 E+ 02	0.421 E+ 02	0.475 E+ 03	11	0.963 E+ 01		
0.167 E+ 02	0.227 E+ 02	0.879 E+ 03	12	0.518 E+ 01	0.706 E+ 01	0.830 E+ 04
0.904 E+ 01	0.123 E+ 02	0.163 E+ 04	13		0.279 E+ 01	0.380 E+ 01

B.ENERGY=boundary energy (eV) M.ENERGY=mean energy (eV)

C. FACTOR=conversion factor (cm² streV)⁻¹

のスピンの周期と同じなので、これは太陽光の影響によって現われたものである。即ち、電子センサは、センサの内表面、衛星表面からの光電子を数え、イオンセンサはチャンネルトロンの入口に乱反射で入射する太陽紫外線を数えるからである。この spin modulation の度合いは、ESPのコリメータが太陽方向を向く様な衛星の姿勢の時に最も大きい。modulation を取除くために、センサが太陽方向を向いた前後の時刻のデータを捨てる必要がある。そのために、電子の ch. 13のカウント数が極大の時刻（極大から極大迄が大殆衛星のスピン周期）をセンサが太陽方向を向いた時刻としこれをSTとする。ST±20secのイオンの全チャンネルのデータ、ST±10secの電子のch 1からch 9までのデータおよびST±32secの電子のch 10からch 13までのデータを捨てて平均を取った。

ii) 電子およびイオンの各チャンネルのカウント数のサブフレーム毎の平均。

iii) L-MLT座標上に衛星の軌道をプロットし、その軌道の上に、粒子分布の変化を記入。

iv) 粒子のエネルギースペクトルをE-t図で表示。

以上の4つであるがiv)はやっと始まった所である。

4. データ及び議論

図5は1978年10月18日 Rev. 90のデータに(i)の処理をして、平均のフラックスを出して、その高エネルギー側を示したものである。

図中の点線は高エネルギー側7点から最小2乗法で近似した巾分布の直線で、又図中の・と+印は高エネルギー側6点を Maxwell 分布で近似したものである。フラックスは巾分布と Maxwell 分布の和で近似できる。イオンフラックスが1803 UT近傍で一桁程度増大した。これは放射線外帯の低エネルギー陽子のピークの位置が、磁場擾乱のため、静穏時の $L \cong 5 \sim 8$ から $L \cong 3 \sim 4$ へ移動したためである。又、これは磁気嵐の後の荒れた日にプラズマシートから注入される環電流イオンとも考えられる。前日の0430 UTに S. S. C. があり、この日にはサブストームが5つ生起し、 $\Sigma Kp = 33^+$ であった。

1978年11月8日はサブストームが無く $\Sigma Kp = 4^+$ という非常に静かな日であったが1551 UT近傍で電子スペクトルが硬くなり、高エネルギー電子フラックスが2桁程度増大した。又、イオンスペクトルは数 keVの所にピークを示した。1549 UTに強い VLF 放射が観測され、非常に静かな日でも磁気圏で波動-粒子相互作用が生起し得ることがわかった。

図6は、1978年12月26日の Rev. 284のデータに(ii)の処理を行ったものの一部をプロットしたものである。地磁気の状態は前日に磁気嵐があり、この日0730 UTにサブストームがあり $\Sigma Kp = 17$ であった。又、この日は高エネルギー電子フラックスと VLF 放射が良い相関を示した (Matsumoto et al. [3])。

サブストームに伴いプラズマシートからプラズマが注入される。高エネルギー電子に関してはエネルギーの低いものが先に注入され、後まで残る。最も高いエネルギーの電子が、最後に注入され最初になくなる。即ち、高エネルギー電子の注入にエネルギー分散性がある。

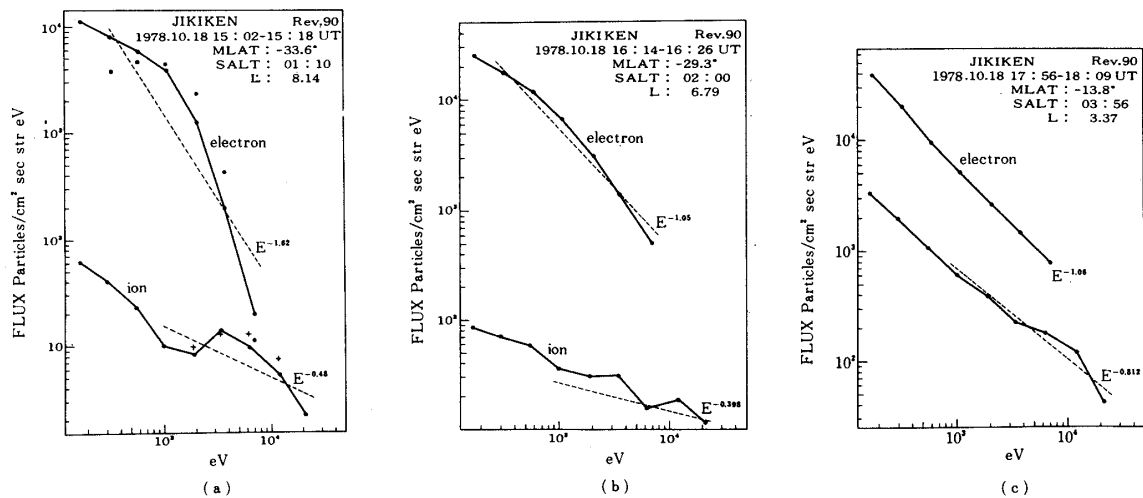


図5 1978年10月18日 Rev. 90での粒子のエネルギースペクトル

高エネルギーイオンも高エネルギー電子と一緒に注入されている。図中のB. G.と書いてあるのはバックグラウンドデータの筈であった (W_{107} および W_{123})。即ち、分析器印加電圧の極性が逆転しているので、電子分析器を低エネルギーイオンが通過し、イオン分析器を低エネルギー電子が通過するがどちらもチャンネルトロンへの入口に高い電位障壁があるので追い返えされる筈である。しかし、実際には、このバックグラウンドのカウント数が、正規の電子およびイオンのカウント数よりも多いことが屢々あった(特に $L=4\sim 5$ の放射線外帯)。従って、信号から単純にバックグラウンドのカウント数を差引く訳にはいかないので、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。

図7は、図6をエネルギースペクトルの形で見ただけのものである。数100 eVの電子が増大した時にVLF hissが受信された。

大部分の他の周回では、図6の様な特徴的な変化は起っていない。

図8はE-t図の一例である。イオンおよび低エネルギー電子に spin modulation が顕著に現われている。太陽角およびピッチ角も一緒に書いてある。

次に(ii)の処理で得られた結果をL-MLT座標上で整理する。即ち軌道上にESPがonであった場所を示し、電子の高エネルギー側4チャンネル、即ち、760 eV以上のチャンネルの0.0625秒間のカウント数が5以上あった場所とイオンの高エネルギー側4チャンネル(2.4 keV以上)のカウント数が4以上(高圧が低レベルの時)又は10以上(高圧が中間レベルの時)あった場所に印をつける。更に、低エネルギー側の電子3チャンネル(ch 11, 12,

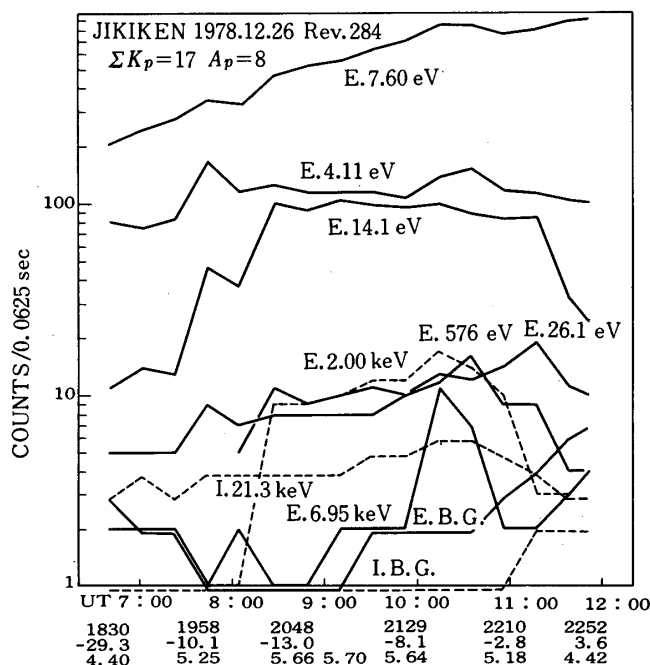


図6 1978年12月26日 Rev. 284でのカウント数の変化。

高エネルギー側の電子のカウント数の変化の仕方にエネルギー依存性が見られる。これはプラズマシートから注入された電子のエネルギー分散性である。

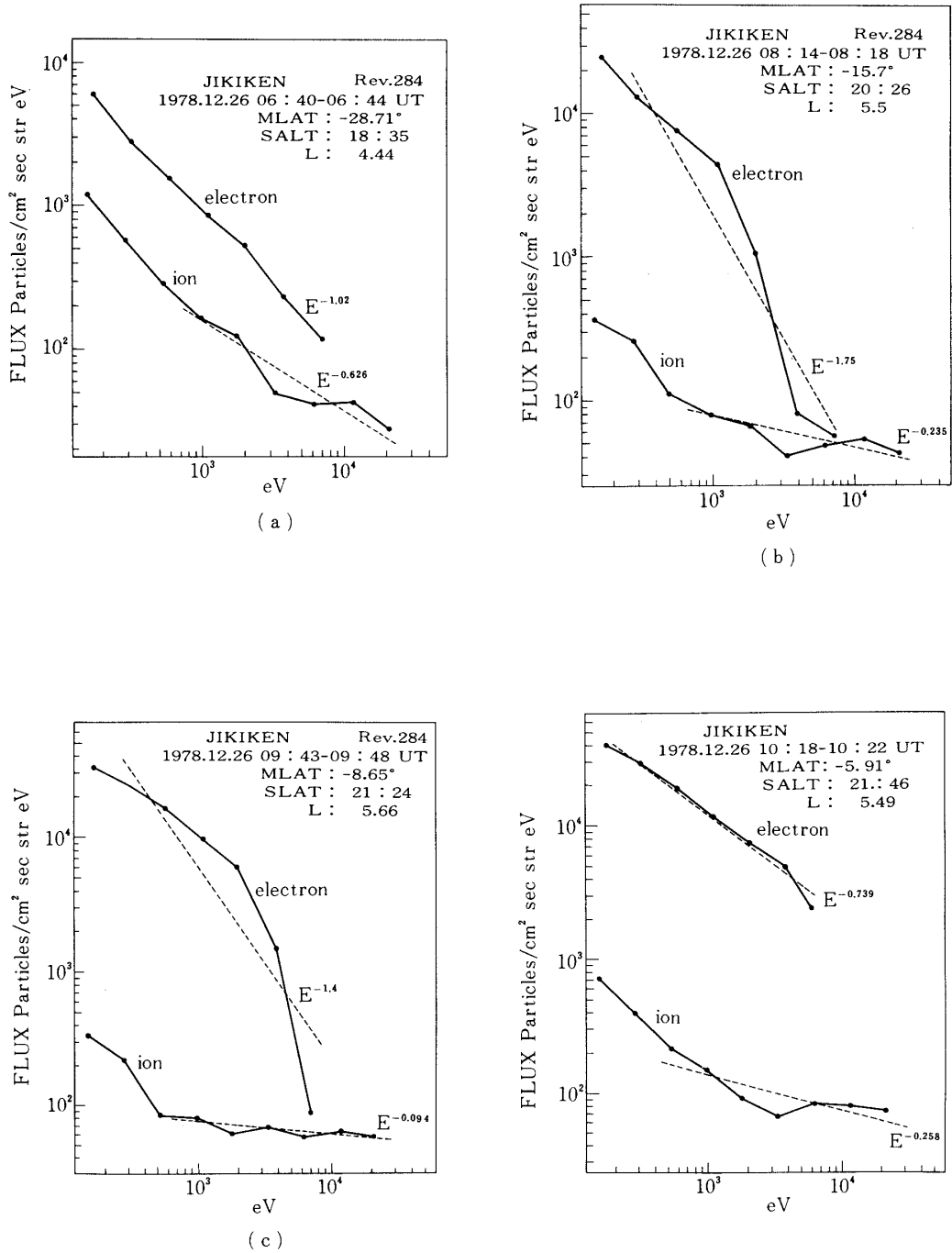


図7 Rev. 284での粒子のエネルギースペクトル

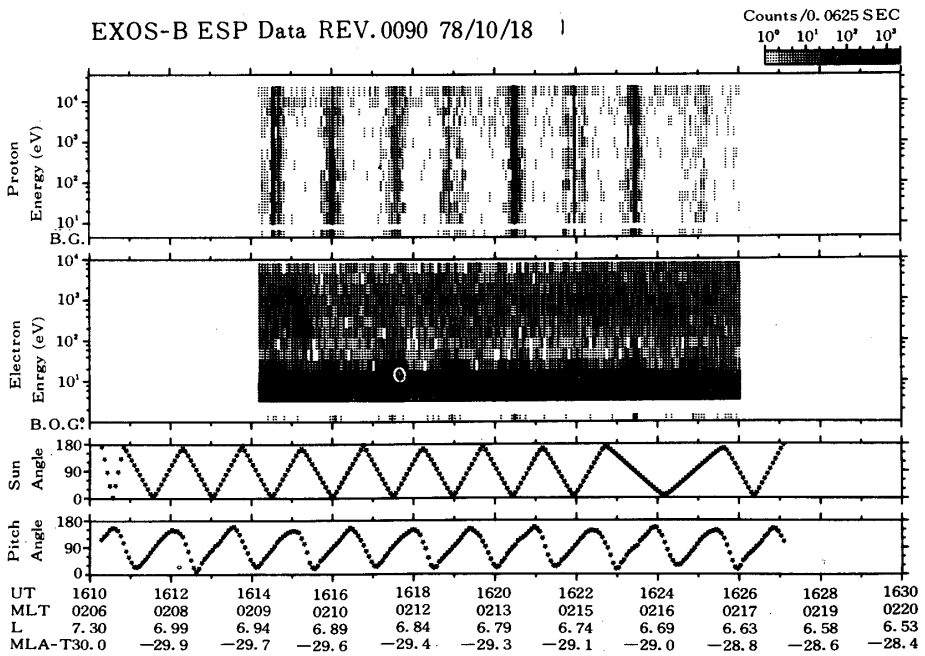
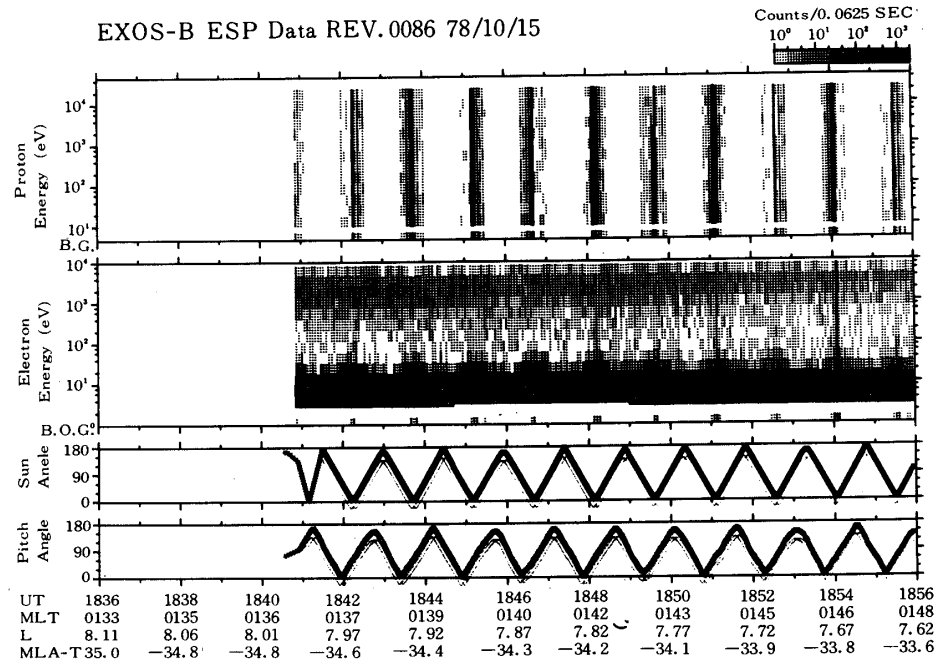


図8 E-t図の一例. 太陽角およびピッチ角も示してある.
カウント数の spin modulation が見られる.

13) でどのチャンネルのカウント数が多いか、又、B. G.が多いか少ないかを記入してみる。その様にしてまとめたものを図9と図10に示す。図9は静かな日、図10は荒れた日の例である。

未だデータ量が少ないので、正確なことははっきりしないが、図9と図10およびここには示していない他のデータを見て結論を出すと、

- i) 静かな日 (ReV. 86, ReV. 146, ReV. 276, ReV. 410) にはプラズマシートが衛星の軌道よりもはるか彼方にあるので、keV 領域の電子およびイオンの有意なフラックスは観測されない。例外はReV. 284である。
- ii) 荒れた日 (ReV. 90, ReV. 250, ReV. 253, ReV. 273, ReV. 384, ReV. 628) には大量の keV - 電子フラックスが $L \geq 4$ で観測され、プラズマシートからの注入を示している。又、1 keV 以上の環電流イオンも観測されている。

大勢は上記の結論であるが、データをよく見ると種々矛盾がある。

- (1) ReV. 619 は非常に荒れた日にも不拘、keV - 電子のフラックスはない。LT 依存性とすれば ReV. 628 と相入れない。前日、あるいは前々日の地磁気の状態が影響するのかも知れない。前日の $\Sigma Kp = 25$ で前々日の $\Sigma Kp = 4$ であった。
- (2) ReV. 284 は割合静かな日だが、高エネルギー粒子が可成り存在している。これは、前日に S. S. C. が起った故だと考えられるが、当日の 0730 UT に S. S. がありその影響で粒子が注入されたと考える方が都合が良い。しかし、S. S. があるだけで前日の S. S. C. なしで粒子が注入されるかどうかは問題である。S. S. の後の粒子の分布を詳細に調べる必要がある。

これ等の問題点を明らかにするためにも、又、LT 依存性や Kp 依存性を明らかにするためにも、更にデータを蓄積し解明する必要がある。又、低エネルギー電子に関してはほとんど議論しなかったが、カウント数の最大値が ch 11, 12, 13 のいずれかにあるが、この変化が何に依存するのかを解明するのが第一の課題である。

5. 結 言

JIKIKEN-ESP のデータ処理は開始されてまだ間がない。ここで報告されたデータは 1979 年 4 月 25 日のデータまでである。得られた結果をまとめると、

- i) 静かな日にはプラズマシートが衛星の彼方にあるので、高エネルギー粒子の有意のフラックスは観測されない。
- ii) 荒れた日にはプラズマシートからプラズマが注入されて大量の keV - 粒子が $L \geq 4$ で観測される。この keV - 電子は VLF 放射と良い相関を示し、磁気圏における波動-粒子相互作用を具現している。

今後は、磁気圏における粒子の描像をはっきりさせるためになお一層のデータ取得が望まれる。又、低エネルギー電子の振舞も解明しなければならない。更に、波動のデータとの付き合い合わせ、能動実験との協同実験を行う必要がある。

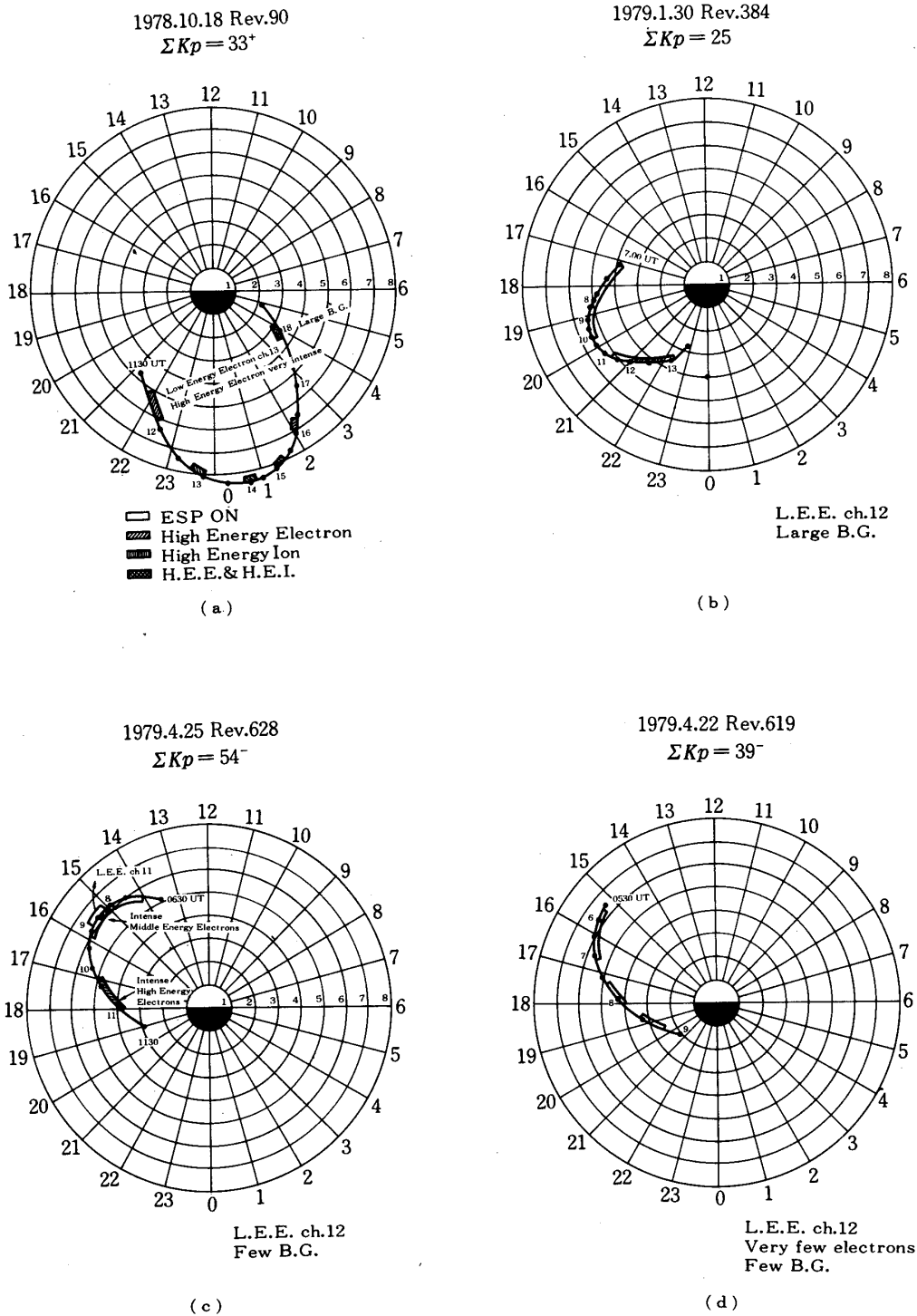


図9 L-LMT座標上に衛星の軌道を描き, ESP on の場所, 高エネルギー電子の多かった場所 ▨, 高エネルギーイオンの多かった場所 ▩ を付け加えたもの. 静かな日の例.

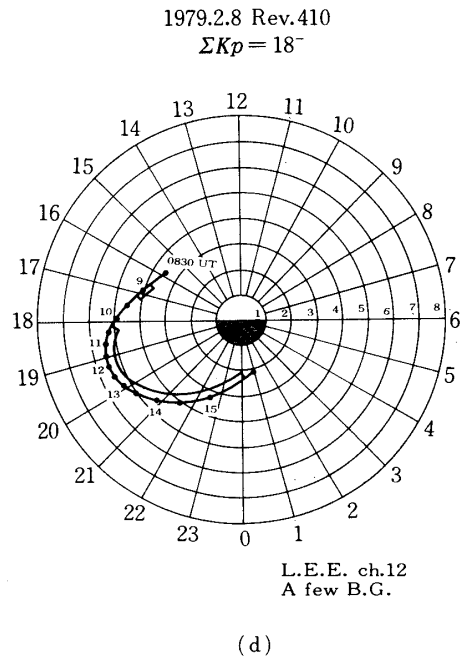
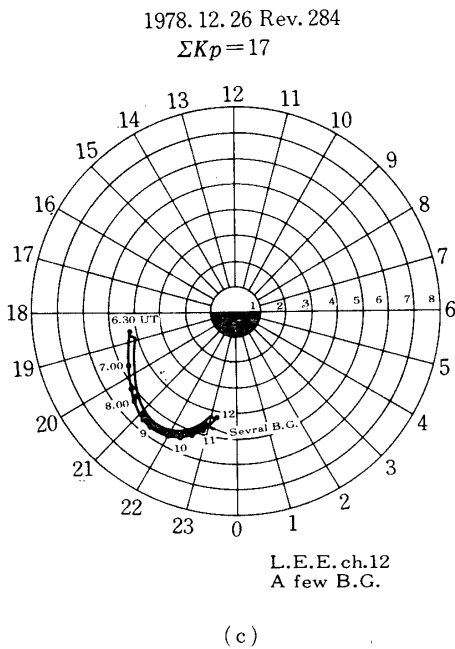
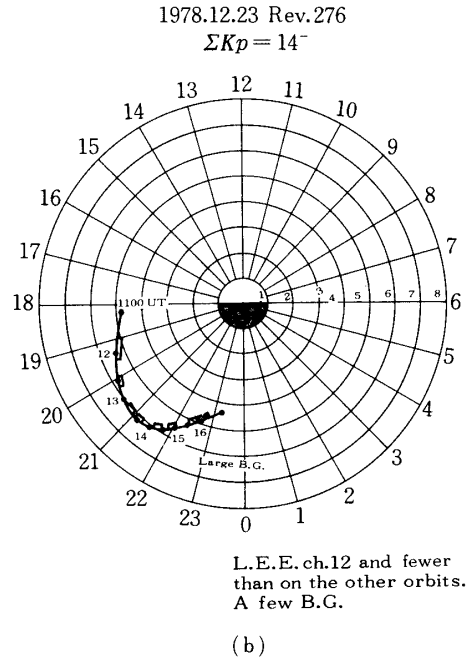
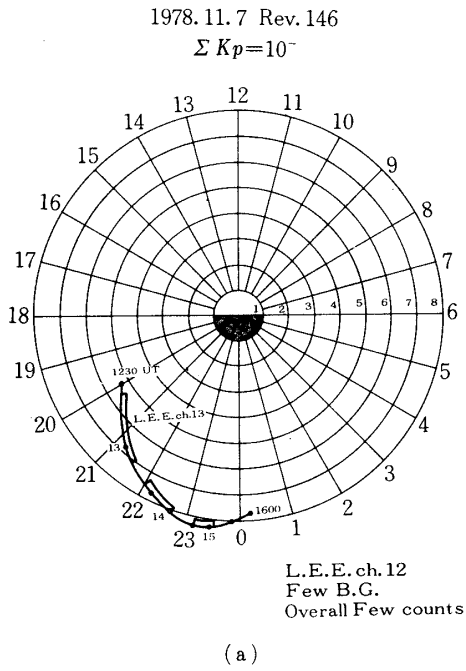


図10 荒れた日の例

謝 辞

大林辰蔵教授，森大吉郎教授をはじめ J I K I K E N の打上げ，運用，データベースの作成にたづさわった多くの方々に感謝の意を表する。又，データ取得系作成に多大の尽力をなされた岩倉博，齊藤梅朗，宮武貞夫，橋本弘蔵の諸氏にも深甚の感謝の意を表する。

1979年8月30日 新設部（科学）

参 考 文 献

- [1] Longanecker, G.W., and R.A. Hoffman, S³-A spacecraft and experimental description, *J. Geophys. Res.*, **78**, 4711-4717, 1973.
- [2] 向井利典，平尾邦雄，「極光」によるオーロラ電子の観測一朝方における特徴一，
東京大学宇宙航空研究所報告，**14**，1179-1194，1978.
- [3] Matusmoto, H., S. Miyatake, K. Tsuruda, A. Morioka, J. Ohtsu, H. Oya and I. Kimura, VLF wave observation by EXOS-B (JIKIKEN) satellite, *Magnetospheric Study 1979, Proceeding of the International Workshop on Selected Topics of Magnetospheric Physics*, pp. 219-213, Tokyo, March 1979, Jananese IMS Comittee.