

南大西洋地磁気異常帯の高エネルギー電子，陽子  
のエネルギー分布\*

永田 勝明\*\*・近藤 博章\*\*

(1986年2月25日受理)

Observation of the Spectrum of High Energy Electron and  
Proton in the South Atlantic Anomaly

By

Katsuaki NAGATA and Hiroaki KONDO

**Abstract:** Observations of fluxes and energy spectra of high energy electron (0.19-3.2 MeV) and proton (0.64-35 MeV) by Ohzora satellite are reported. Proton energy spectra in the South Atlantic Anomaly region consist of two components, steep low energy component ( $< 1$ . MeV) as  $E^{-8.6}$ , and high energy component ( $> 1$ . MeV) which is proportional to  $E^{-1.9}$ . The intensity at altitude 856 km is ten times higher than that at altitude 406 km. The pitch angle distributions show the maximum intensity at  $\alpha = 90^\circ$ , this means the high energy electron and proton are trapped in the geomagnetic field.

概 要

「大空」衛星によって観測された高エネルギー電子 (0.19-3.2 MeV) と陽子 (0.64-35 MeV) の計数率とエネルギー分布を地球周囲および南大西洋地磁気異常帯について示す。オーロラ帯の電子、陽子はエネルギーが1 MeV 以下の比較的エネルギーの低い粒子が多い。南大西洋上空では陽子のエネルギーが20 MeV まで、電子は3 MeV まで観測され高エネルギーの成分が増加してくる。南大西洋上

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 玉川大学工学部

空での陽子はオーロラ粒子のベキと同じ  $E^{-8.6}$  の成分の他に  $E^{-1.9}$  のベキをもつ成分があるように見える。高度 856 km の粒子数は高度 406 km の粒子数よりエネルギーの高い成分は 1 桁多い。ピッチ角分布の測定から電子、陽子いずれも  $\alpha=90^\circ$  近くにピークがあり、磁力線に平行な成分は垂直成分の 1000 分の 1 程である。

## 1. 序 論

「大空」衛星打ち上げ(1984年2月14日)以来、高エネルギー粒子(High Energy Particle = HEP)の観測は順調に行なわれている。打ち上げ当初のデータ解析についてはすでに他に報告がある[1, 2]。ここでは、地球周回のデータと南大西洋地磁気異常帯における降下粒子の計数率、エネルギー分布、ピッチ角分布特性について述べる。

南大西洋上空における粒子の降下現象の解明については1970年前半までソビエトの人工衛星による観測によりいくつか行なわれている[3, 4, 5]。これらの観測はGM計数管[3]、シンチレーションカウンター[4]、比例計数管[5]によるものでエネルギー分解能はそれ程良いものでなかった。米国の人工衛星によるデータが Imhoff et al.[6, 7]や Gledhill et al.[8, 9]により発表されている。Imhoff et al.の観測はシンチレーションカウンターによる電子の測定であり、Gledhill et al.の観測は低エネルギー(0.2-26 keV)をねらったものであった。初期のデータについては Paulikas[10]、や Voss と Smith[11]がまとめているが、エネルギー分布、高度分布、時間変動等についての詳しい測定はいまだなされていない。

これまでの観測はオーロラ粒子の測定を目的とした測定器によるものでエネルギーの低い(<40 keV)領域を主としたものであった。この報告では、エネルギー分解能の良いSi検出器を用いた  $\Delta E$ - $E$  テレスコープによる電子(0.19-3.2 MeV)および陽子(0.64-35 MeV)の測定について述べる。地球周回および南大西洋地磁気異常帯におけるエネルギー分布について検討を加え、オーロラ帯のエネルギー分布との比較を試みる。

## 2. 観 測 方 法

電子、陽子の観測は2台の  $\Delta E$ - $E$  テレスコープで行なった。各テレスコープは5枚のSi検出器から成り、 $\Delta E$  検出器は厚さ 100  $\mu\text{m}$  の表面障壁型、 $E$  検出器は 500  $\mu\text{m}$  の表面障壁型と厚さ 3 mm の Si(Li) 型検出器2枚から構成されている。以上の4枚の検出器を通り抜ける高いエネルギーの粒子を除く非同時計数用の検出器は厚さ 3 mm の Si(Li) 型である。テレスコープの粒子の入射窓には厚さ 6  $\mu\text{m}$  の Al 箔が張ってある。Al 箔のエネルギー吸収とディスクリミネーターによる低エネルギースレッシュホールドで決まる陽子の測定エネルギーの下限は 0.64 MeV である。電子は厚さ 100  $\mu\text{m}$  の  $\Delta E$  検出器を通り抜けるエネルギーで決まる 0.19 MeV が測定の下限となる。エネルギーの上限は  $E$  検出器の厚さで決まり、陽子は 35 MeV、電子は 3.2 MeV である。

データは粒子の計数率とエネルギー分布の両方を取得している。ビットレート high の

時は1/8秒ごとに計数率を取る。エネルギー分布の測定には電子、陽子および $\Delta E$ 検出器の出力について16チャンネルの波高分析器を3台使用した。エネルギー分布を観測する波高分析器16チャンネルのサンプリング時間は4秒である。ビットレート low の時には粒子の計数率は1/2秒ごとに、エネルギー分布は32秒ごとに取得する。

搭載してある2台のテレスコープの、1台を太陽と反対方向を向くように置き、これをセンサー1(S-1)と呼び、他の1台をセンサー1と直角方向を向くように置き、これをセンサー2(S-2)と呼ぶ。データはスイッチング回路によりS-1とS-2を交互にオンボードで処理しているので、観測時間は1台のセンサーにつき実時間の50%になる。観測方法の詳細は先の報告[1, 2]に述べてある。

### 3. 観測結果

ここに示すのは地球一周の観測と南大西洋上空における粒子の計数率とエネルギー分布である。エネルギー分布については衛星の遠地点と近地点近傍の観測結果の比較を試みる。今回検討対象にしたデータは太陽活動が静かな時のものである。

#### 3-1 電子、陽子の観測

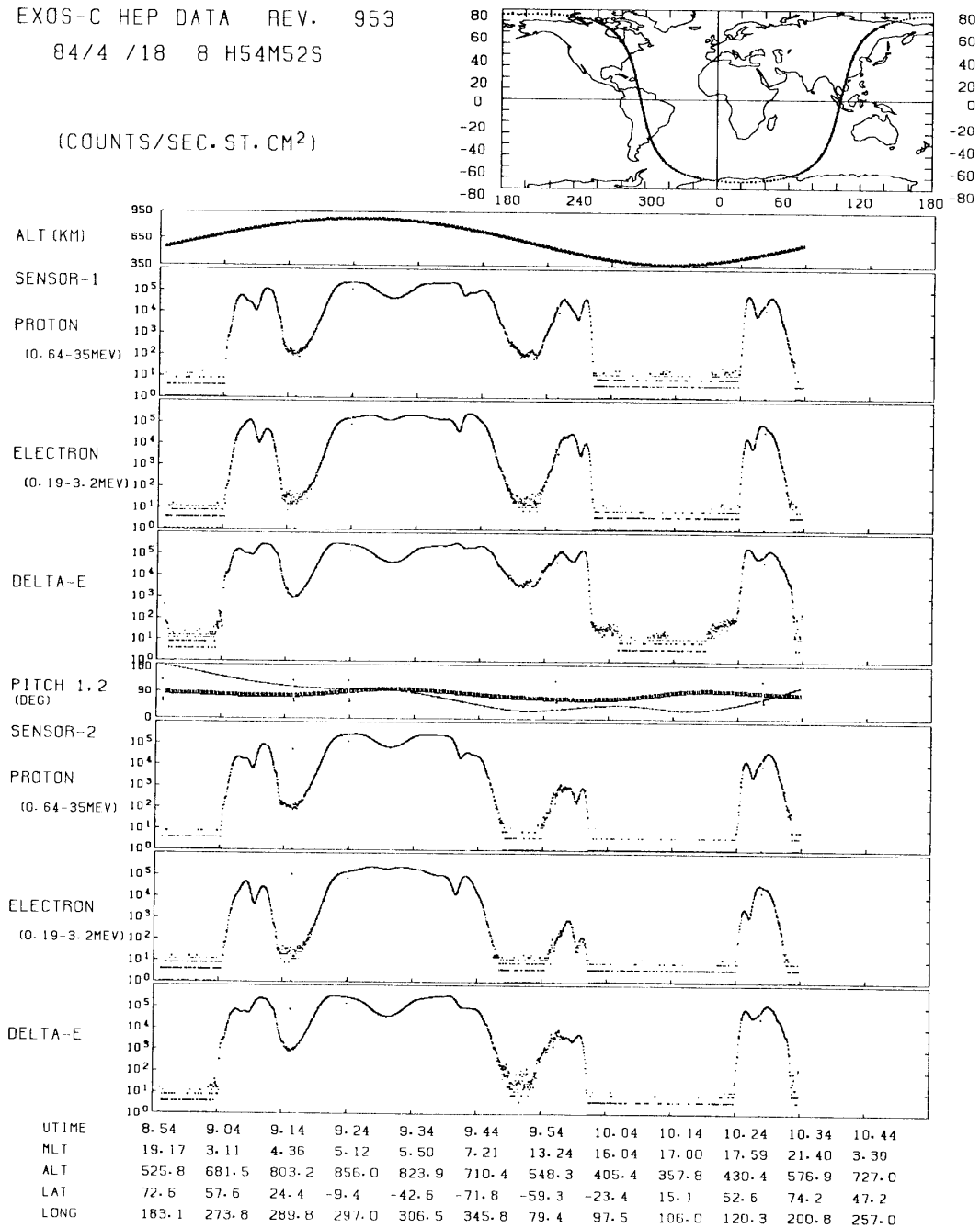
第1図に1984年4月18日8時54分(UT)から100分間の粒子の計数率(counts/s $\cdot$ sr $\cdot$ cm<sup>2</sup>)のデータ(Rev. 953)を示す。世界地図上に衛星の航跡を点線で、高度ALT(KM)を変化を上段に、センサー1と2が磁力線となすピッチ角の変化を中段のPITCH(DEG)と記してある枠に示す。太線がセンサー1についてのピッチ角、細線がセンサー2のピッチ角である。この周回ではセンサー1のピッチ角は約90°近くに常時向き、センサー2のピッチ角は変化が大きいことがわかる。

粒子のデータは2段目から4段目の枠内にセンサー1の陽子、電子および $\Delta E$ 検出器の計数率を、6段目から8段目の枠内にセンサー2の電子、陽子および $\Delta E$ 検出器の計数率を対数スケールで示す。0854(UT)から0904(UT)まで粒子の少ない地域は北極冠である。0904-0914(UT)と1024-1034(UT)のピークは北極のオーロラ帯の粒子を示している。0920-0940(UT)の粒子の多い地域が南大西洋地磁気異常帯であるが、南極のオーロラ地域との境界が高度約600kmでははっきり区別できない。0954-1000(UT)のピークは南極のオーロラ領域である。この周回では南大西洋上空で衛星の遠地点856kmを通過する。この間に計数率の変化が少ないのは検出器の電子回路システムが飽和状態になり数え落しがあるためである。特に、0930(UT)に計数率が減少しているように見えるが実際にはその前後の時間よりも粒子数が多いと我々は推察している。南北アメリカの反対側にあたるインド洋、中国の上空(1000-1024 UT)においては粒子が1~2ヶあるかないかの状態である。オーロラ領域(0954-1000 UT)においてセンサー1の計数率がセンサー2の計数率の10~100倍程多いのはセンサーのピッチ角 $\alpha$ のちがいによる。この間にセンサー1は $\alpha=63^\circ-60^\circ$ 方向を向いているのに対して、センサー2は $\alpha \approx 30-36^\circ$ の方向を向き磁力線に平行に近いからである。

第1図に示したのは粒子の計数率の変化なので、エネルギーについての情報はわからない。図に示したRev. 935のデータについて、センサー2で観測したエネルギー分布につい

EXOS-C HEP DATA REV. 953  
84/4 /18 8 H54M52S

(COUNTS/SEC. ST. CM<sup>2</sup>)



第1図 高エネルギー電子(0.19-3.2 MeV)と陽子(0.64-35 MeV)の計数率の地球周回の観測結果(1984年4月18日, Rev. 953). 世界地図上の線は「大空」の航跡, ALT (KM)は衛星の高度を表わしている. PITCH 1, 2 (DEG)は2台のセンサーの磁力線となす角を表わし, 太線がセンサー1のピッチ角を, 細線がセンサー2のピッチ角を示す. 粒子の計数率(counts/s·sr·cm<sup>2</sup>)を対数表示したものを点線で示してある.  $\Delta E$ というのは $\Delta E$ 検出器内で止まる粒子の個数を表わし電子と陽子の両方を含んでいる. 横軸の数値はUTIMEが世界時, MLTが磁気地方時, ALTが高度(km), LAT, LONGが衛星の位置を緯度, 経度で表わしたものである.

て場所による変化を示したのが第2図(a), (b), (c)である。第2図(a)は $\Delta E$ 検出器の出力で、0.19 MeV以上のエネルギーをもつ電子は $\Delta E$ 検出器を通り抜けるので、これはディスクリミネーターレベル0.2 MeV以上の粒子を図示したものである。0.2 MeVのディスクリミネーターを越える粒子はAl箔の吸収等を補正すると0.64 MeVの陽子に相等する。第2図(b)にはエネルギーの高い領域の陽子を含めて図に示したもので、第2図(a)に示した陽子は、第2図(b)の左端の幅の広いチャンネルに入るようにエネルギー分割をしてある。図に表示したエネルギーの上限は23 MeVまでである。第2図(c)は電子のエネルギー分布である。エネルギーの上限4.5 MeVというのはチャンネル分割の上限で測定領域(<3.2 MeV)を示すものではない。また、地図上の曲線は第1図と同様に衛星の航跡を示し、下の枠内の曲線は太線が衛星の高度(km)、細線がセンサー2のピッチ角 $\alpha$ を示す。

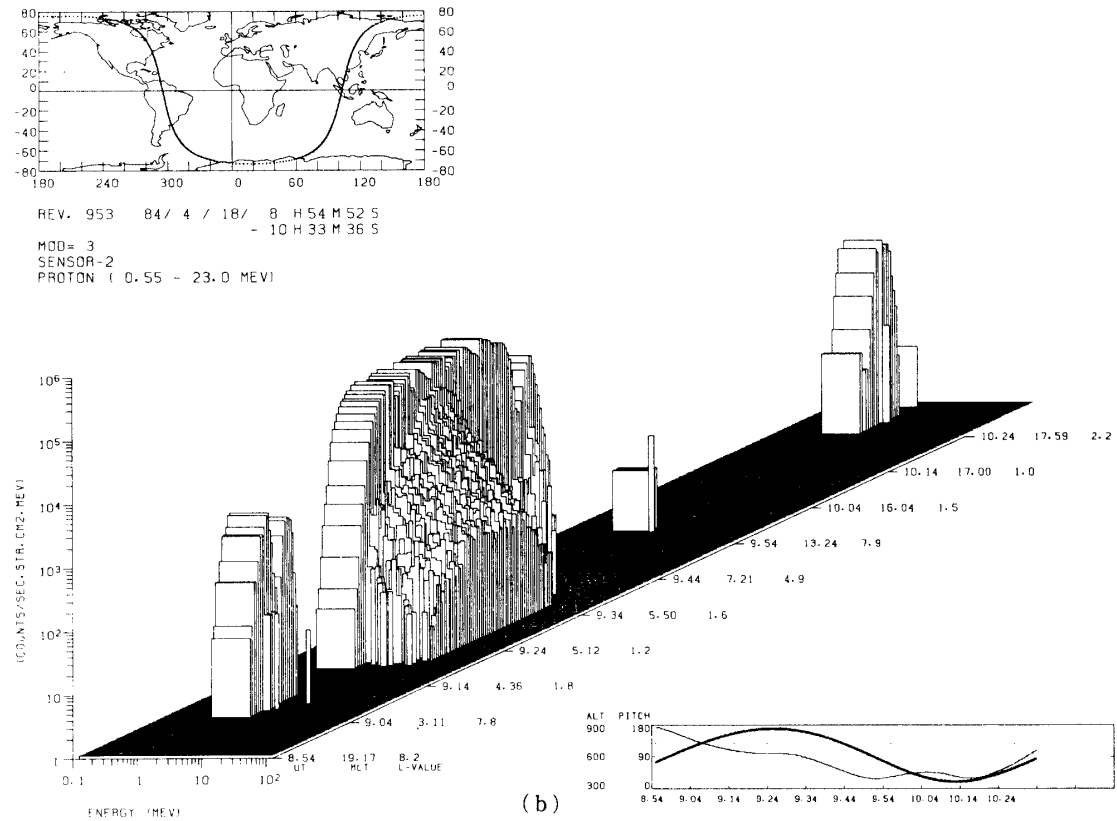
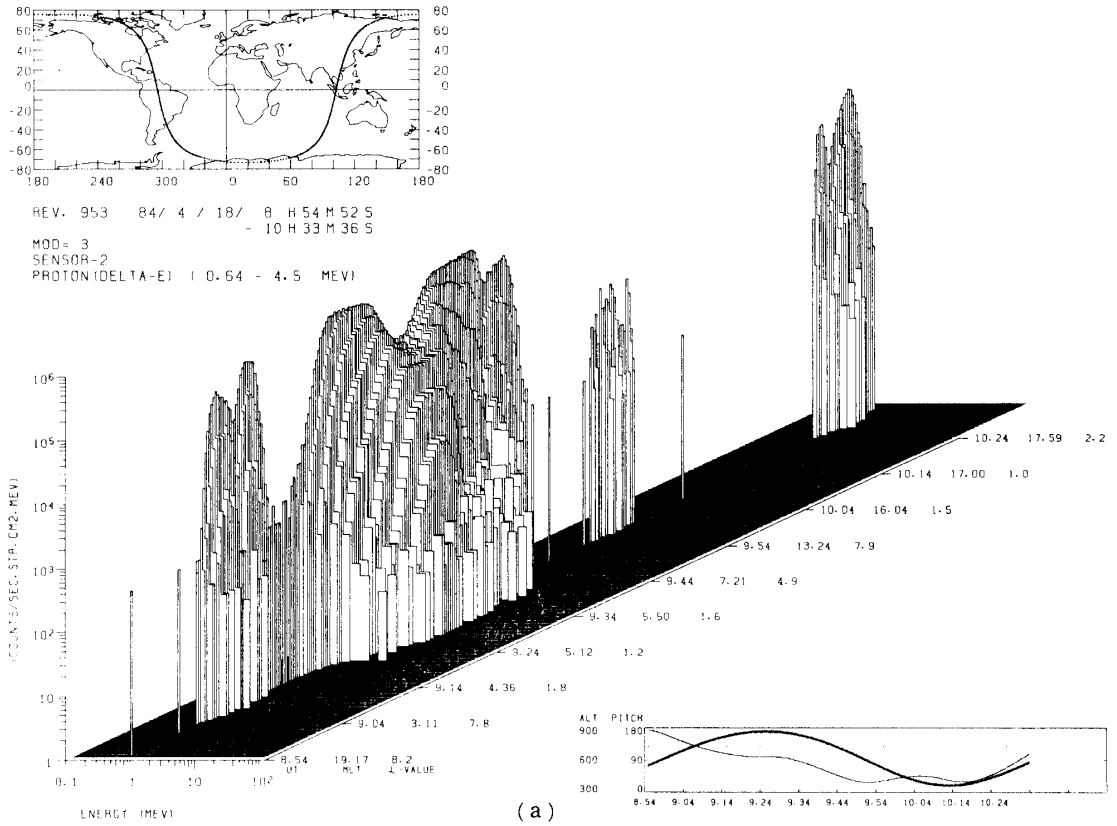
南大西洋上空の観測が0920-0940(UT)のデータである。陽子に関するエネルギー分布を表示した第2図(a), (b)から判断できるように、南大西洋上空において他の領域とは異なる顕著な特徴がある。それは、オーロラ領域では陽子はエネルギーの低い(<1 MeV)ものしか存在しないのに比較して、エネルギーの高い陽子の存在が見られることである。0930(UT)頃に低エネルギー部分の計数率が減少している。これは、先に述べたように、電子回路システムの飽和による粒子の数え落しで、実際には $10^6(\text{counts}/\text{s}\cdot\text{sr}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{MeV})$ 以上のフラックスがあると考えてよい。

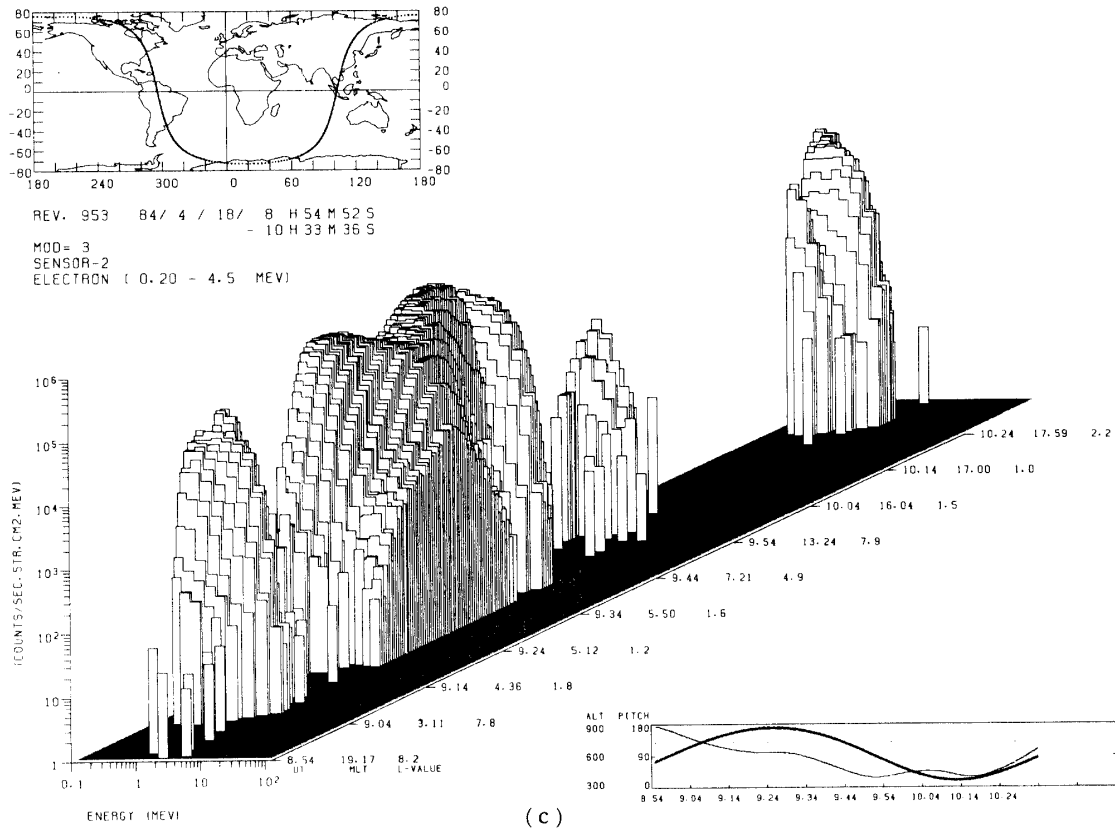
電子のエネルギー分布を示す第2図(c)からわかるのはオーロラ領域でも、南大西洋地磁気異常帯でもMeV領域の電子が存在することである。衛星の高度が南大西洋地磁気異常帯の中心部で $\sim 850$  kmの高度を飛揚している。この時のMeV電子の数は検出器システムが飽和しているので正確な数値を示しているわけではないが他の地域に比較して多いと判断できる。高度800 km位では、北極のオーロラ領域と南大西洋地磁気異常帯の境界にもエネルギーの低い粒子がわずかに存在し、衛星が放射線帯の下部を通過していることがわかる。

北極のオーロラ領域から南大西洋上空で衛星が遠地点から近地点へと変化した時のデータを第3図(a), (b), (c)に示す。これは第2図と同様のエネルギー分布をRev. 3998(1984年11月8日15時6分UT)について示すものである。この時には、北極とオーロラ領域の間に粒子の存在しない領域があるので、大西洋上空では高度7~800 kmに放射線帯の下部が存在していると見てよい。南極のオーロラ領域と南大西洋上空の降下粒子との間には高度350 km近くでも連続した粒子分布が得られている。

### 3-2 エネルギー分布

南大西洋上空の降下粒子についてエネルギー分布を高度856 kmと406 kmにおいて観測した結果を第4図(a), (b)にそれぞれ示す。図のエネルギー分布はセンサー2の観測で、いずれもピッチ角が $90^\circ$ に近いので、その高度における粒子数を表わしている。1 MeV以上のエネルギーの高い領域に着目すると電子、陽子ともに高度856 km近辺の方が高度406 km近辺より約1桁粒子数が多い。また、エネルギー1 MeV以下の陽子と1 MeV以上の陽子のエネルギースペクトルの傾きが異なっていることから、2つのエネルギー成分

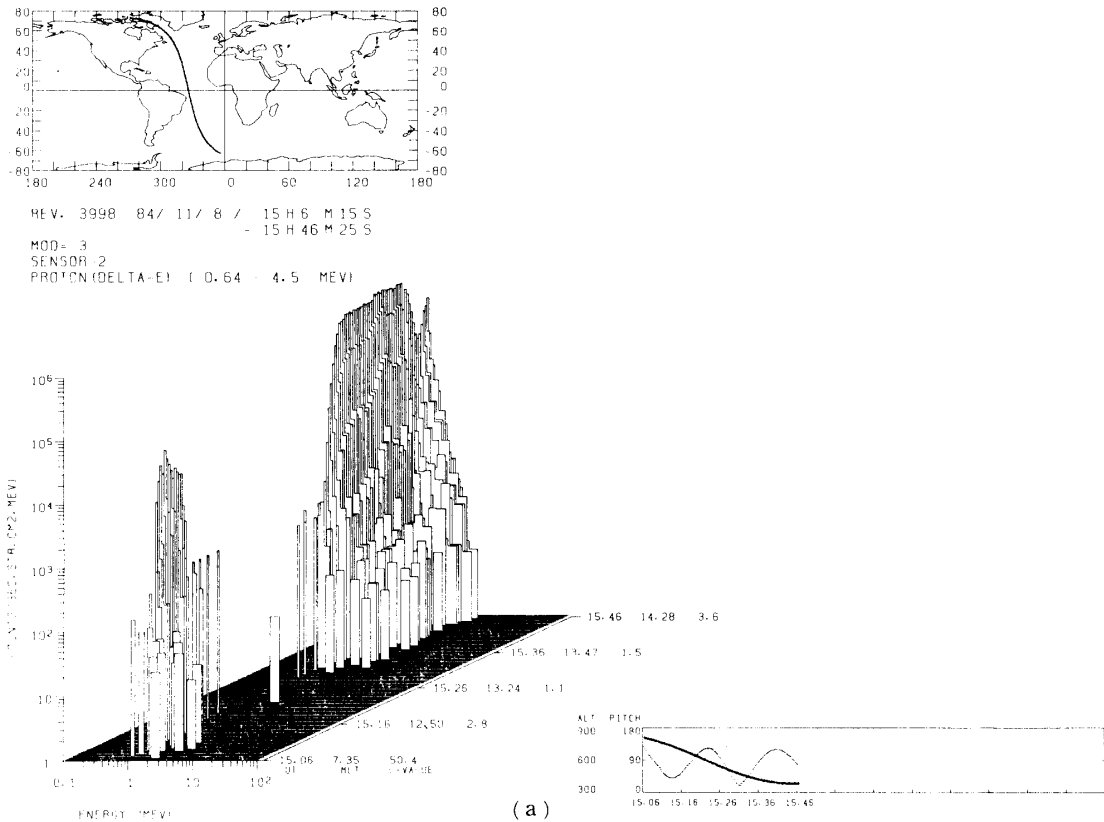




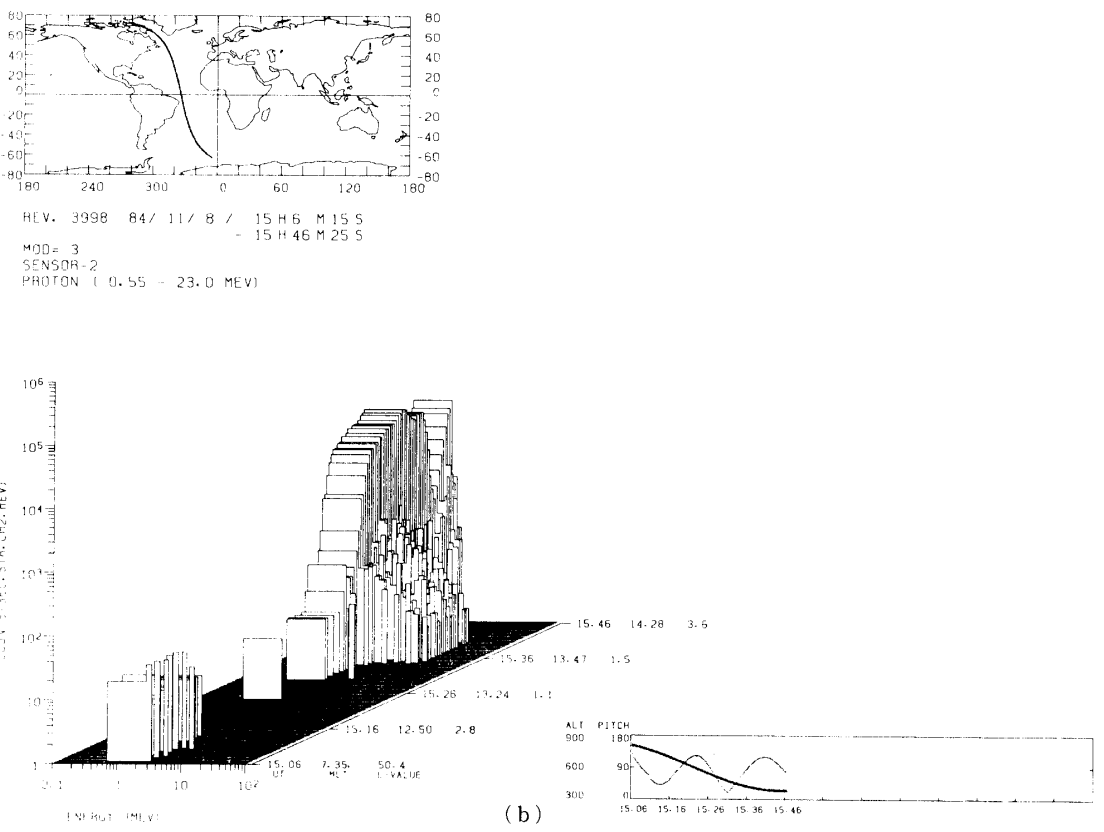
第2図 第1図に示した Rev. 953における陽子と電子のエネルギー分布. (a)  $\Delta E$  検出器内に止まる陽子 (0.64-4.5 MeV), (b) 陽子 (0.55-23 MeV), (c) 電子 (0.2-4.5 MeV).

の混合したものが南大西洋上空にあると考えて良いだろう。エネルギー 1 MeV 以下では陽子は  $E^{-8.6}$ , 1 MeV 以上では  $E^{-1.9}$  と近似できる。3.2 MeV 以下のエネルギーについて  $E^{-3.6}$  となる。陽子についての 1 MeV 近くにおけるエネルギー分布の折れ曲がりには Paulikas[10]が過去のデータを集めて図示した結果〔文献 10 の Fig. 32〕によく一致している。

第5図に 1984年4月22日にセンサー2で観測した南極オーロラ粒子のエネルギー分布 (Rev. 1017)を示す。オーロラ領域ではエネルギーが 1 MeV を越える粒子の存在はわずかで我々の測定器では観測できない。図のように陽子は  $\sim E^{-8}$ , 電子は  $\sim E^{-4}$  とエネルギー分布は非常に急な傾きをなしている。この傾向は北極のオーロラ粒子についても同じである。第5図と第4図(a), (b)を比較すると 1 MeV 以下の粒子の分布が両地域についてきわめて似ている。したがって、南大西洋上空の降下粒子はオーロラ領域と同じ起源の粒子が 1 MeV 以下に含まれており、それにエネルギー分布の傾斜のゆるやかな 1 MeV 以上の粒子成分を重ね合わせたものと考えている。

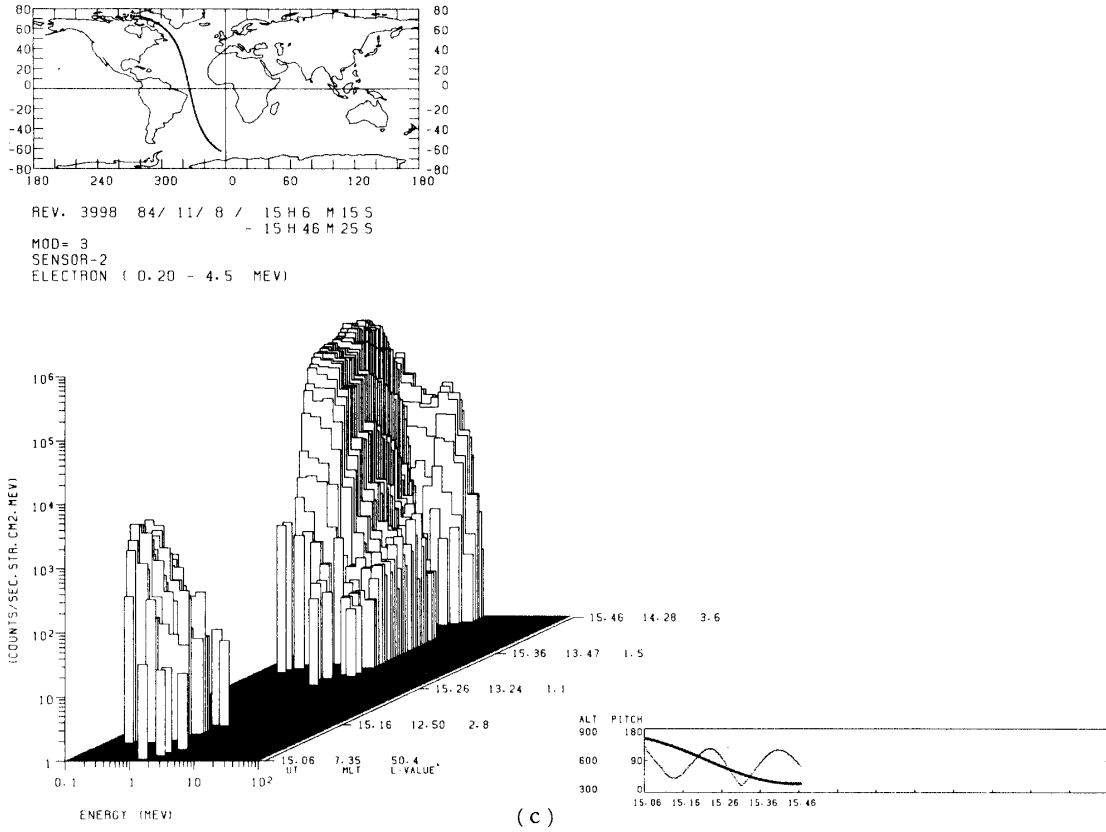


(a)

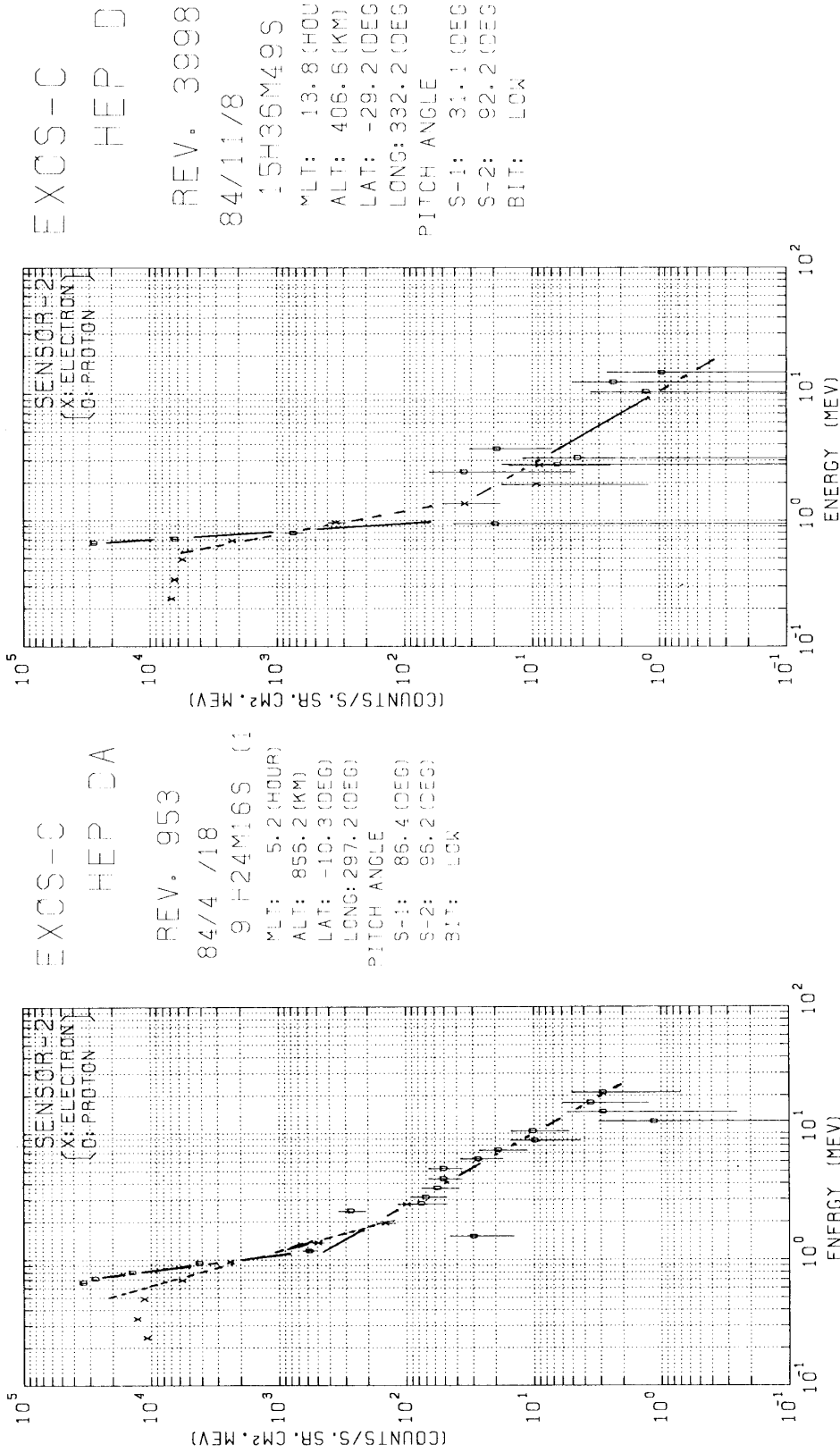


(b)





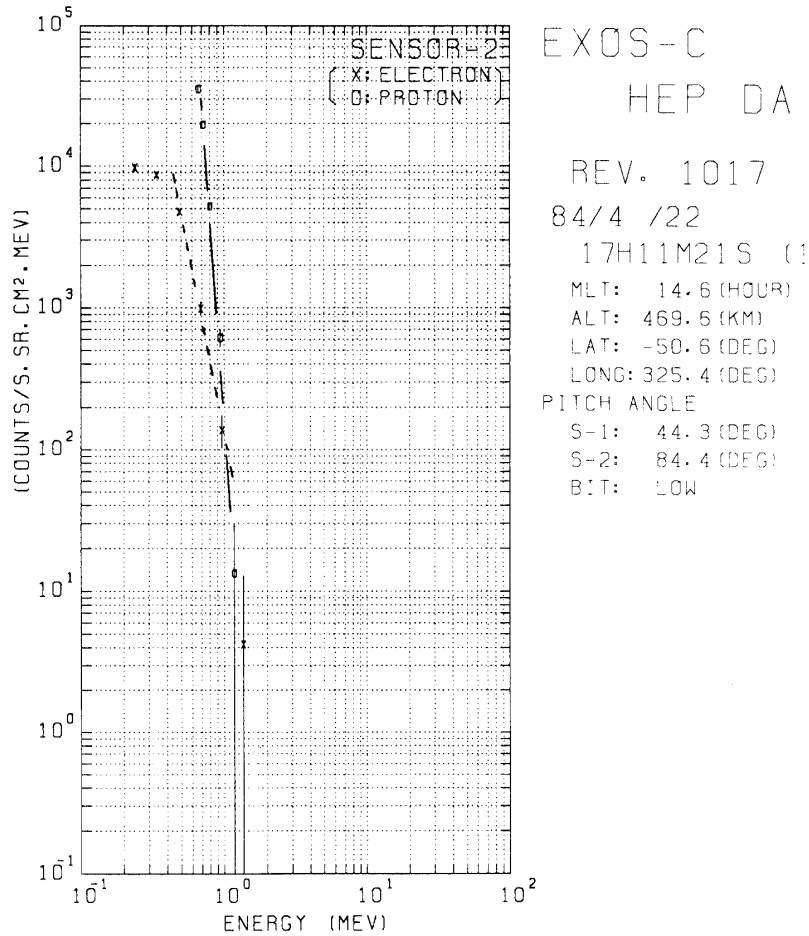
第3図 Rev. 3998 における陽子と電子のエネルギー分布。第2図では南大西洋上空で遠地点であったが、この図では近地点の測定結果を示す。(a)  $\Delta E$  検出器内に止まる陽子(0.64-4.5 MeV), (b) 陽子(0.55-23 MeV), (c) 電子(0.2-4.5 MeV).



(a)

(b)

第4図 南大西洋上空における電子と陽子のエネルギー分布, (a) 遠地点(Rev. 993, 856 km), (b) 近地点(Rev. 3998, 406 km).



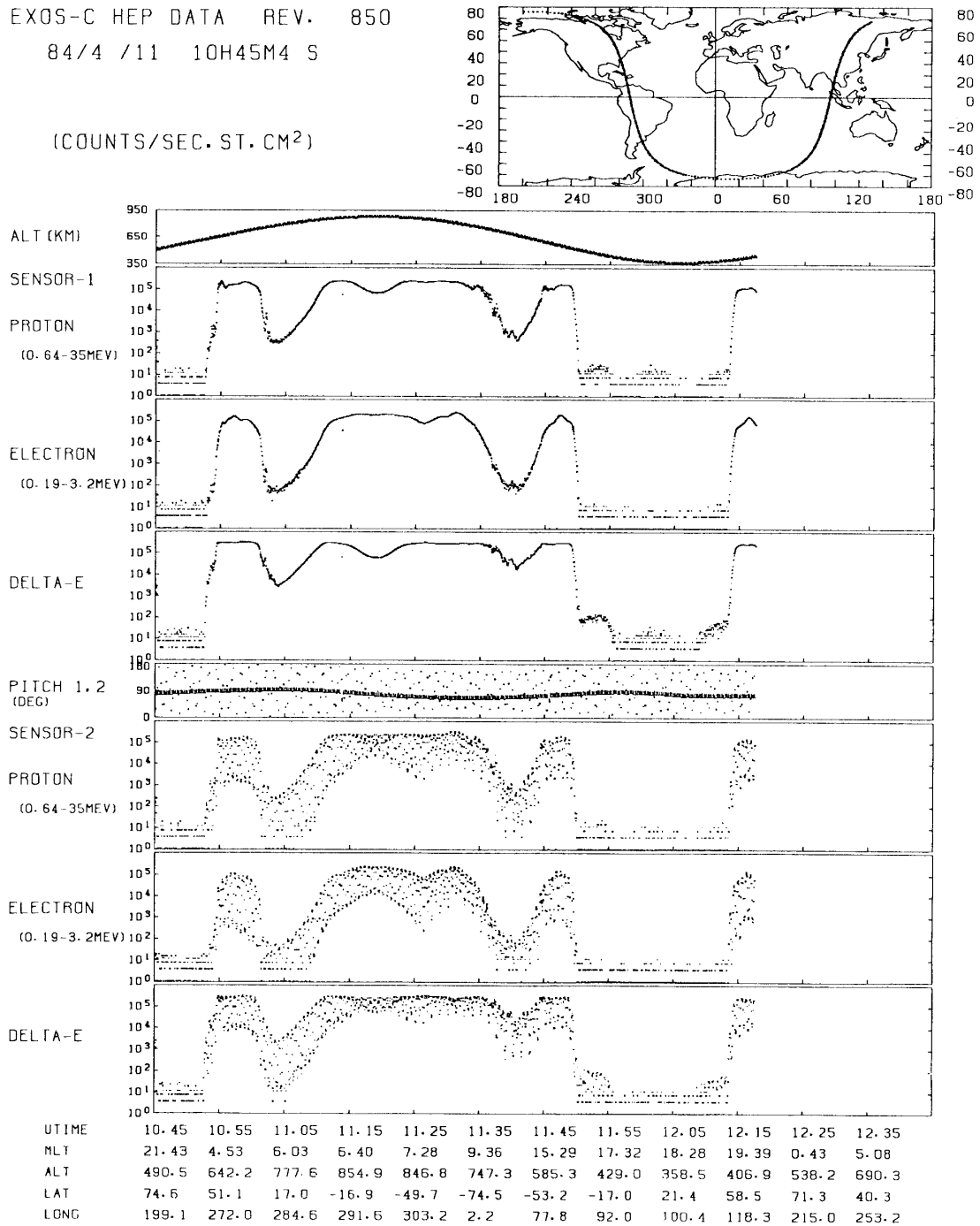
第5図 南極オーロラ地域においてセンサー2 ( $\alpha=84.4^\circ$ )で観測した陽子、電子のエネルギー分布。

### 3-3 ピッチ角分布

「大空」衛星は通常の運用においては太陽指向でスピンをしていないが、1984年4月の全日照期間の数日間毎分0.7回転のスピンを与えた。この間の観測結果の例(1984年4月11日 Rev. 850)を第6図に示す。センサー1は磁力線に対して $\alpha \approx 90^\circ$ を保ち、センサー2が $\alpha \approx 0^\circ \sim 180^\circ$ の間を回転するという条件で観測できたのでピッチ角分布の様子が図のように良くわかる。粒子の計数率の最小値が磁力線に平行 $\alpha = 0^\circ$ または反平行 $\alpha = 180^\circ$ を向いた時に対応し、計数率の最大値が $\alpha \approx 90^\circ$ に対応している。 $\alpha \approx 90^\circ$ の時、測定器が飽和しているので正確な計数率を示していない。したがって、ピッチ角分布を見るには南大西洋地磁気異常帯の中心部でなく南端または北端が良い。ピッチ角 $\alpha$ と粒子の分布の関係を表わす式として $\sin^n \alpha$ を用いている。 $n$ が大きい程 $\alpha \approx 90^\circ$ 近くに粒子が多く分布し、 $n \approx 0$ に近くなると一様なピッチ角分布をなす。我々の観測では $n=5 \sim 10$ の範囲にあり、粒子は磁力線に捕捉されていることがわかった[2]。

EXOS-C HEP DATA REV. 850

84/4 /11 10H45M4 S

(COUNTS/SEC. ST. CM<sup>2</sup>)

第6図 衛星がスピンをしている時の計数率 (1984年4月11日, Rev. 850). 図の内容は第1図と同様である. センサー1は磁力線に対して $\sim 90^\circ$ を保ち, センサー2は $0^\circ \sim 180^\circ$ の間で回転していた.

センサーの入射窓の開口角が $40^\circ$ と広いにもかかわらず磁力線に平行な方向と垂直な方向で粒子の計数率の比が1対1000にもなり、十分にピッチ角の測定を行なえることがわかった。計数率が $\alpha \approx 90^\circ$ で飽和していても

$$J(\alpha) = J_{\perp} \sin^n \alpha$$

の関係より、 $n$ の値を求めることで垂直方向から外れた時の粒子数 $J(\alpha)$ より $90^\circ$ 方向の粒子数 $J_{\perp}$ を推測できる。ピッチ角分布から粒子密度の正確な値、捕捉粒子か否かを知ることができるので、衛星は毎分1回転位スピンさせることはデータの解析にとって重要である。

#### 4. 今後の課題

観測データが蓄積されつつあり、南大西洋地磁気異常帯、オーロラ地域だけでなく太陽フレア時に極冠に注入する太陽粒子など一時的な現象も観測されている。今後は、衛星の航跡に沿う線のデータ解析だけでなく、面や空間への拡がりへと進めて行く必要がある。特に、低エネルギー (ESP)、電子温度 (TEL)、波動 (PPS) 等との同時観測が衛星の目的でもあるので、これらに関するデータとの比較が今後重要になってくる。

衛星の電力事情により夜間の観測が行なわれていないが、夜側のデータを少しでも取得できると粒子分布の全体像を捕えることに役立つ。また、衛星スピン時のデータから得られるピッチ角分布が粒子と磁力線との関係を知る上できわめて役立つことがわかったので、近い将来再びスピンを毎分1回転くらい衛星に与えることを希望している。

この研究は、河野 (理研)、村上、中本 (立教大理)、長谷部 (愛媛大)、竹中、菊池、道家 (早大理工研) との共同によるものである。

#### 参考文献

- [1] 永田, 河野, 村上, 中本, 長谷部, 竹中, 菊池, 道家, 「大空による高エネルギー粒子観測」宇宙科研究所報告, 特集第12号, 49-64, 1985.
- [2] Nagata, K., T. Kohno, H. Murakami, A. Nakamoto, N. Hasebe, T. Takenaka, J. Kikuchi, and T. Doke, OHZORA high energy particle observations. *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 329-345, 1985.
- [3] Bano, M., P. V. Vakulov, L. Vanichek, S. N. Vernov, T. Gomboshi, N. L. Grigorov, Yu. Dubinski, A. V. Zakharov, S. N. Kuzunetsov, V. A. Kuzunetsova, V. N. Lutsenko, S. Pinter, N. F. Pisarenko, I. A. Savenko, A. Shomodi, A. Kohlba, and S. Fisher, Measurements of charged-particle current distributions below the radiation belts by the satellite Interkosmos 3, *Cosmic Res.*, **12**, 518-522, 1974.
- [4] Basilova, R. N., I. A. Savenko, L. F. Kalinkin, and G. I. Pugacheva, Flux density of electrons with  $E > 80$  MeV at heights of 250-300 km above the Brazil Anomaly, *Cosmic Res.*, **12**, 576-577, 1974.
- [5] Butenko, V. D., O. R. Grigoryan, S. N. Kuzunetsov, G. S. Malkiel, and V. G. Stolpovskii, Proton currents with  $E_p > 70$  keV at low altitudes in the equatorial region, *Cosmic*

- Res.*, **13**, 457-460, 1975.
- [6] Imhoff, W. L., E. E. Gaines, and J. B. Reagan, Local time dependence of the loss of energetic electrons from the slot region of the radiation belts, *J. Geophys. Res.*, **81**, 291-293, 1976.
- [7] Imhoff, W. L., J. B. Reagan, and E. E. Gaines, The energy selective precipitation of inner zone electrons, *J. Geophys. Res.*, **83**, 4245-4254, 1978.
- [8] Gledhill, J. A. and R. A. Hoffman, Nighttime observations of 0.2-26 keV electrons in the South Atlantic Anomaly made by Atmosphere Explorer C. *J. Geophys. Res.*, **86**, 6739-6744, 1981.
- [9] Gledhill, J. A., Non-solar ionization in the South Atlantic Anomaly: A review, IAGA, Canberra, December, paper No. 23.06, 1979.
- [10] Paulikas, G. A., Precipitation of particles at low and middle latitudes, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 709-734, 1975.
- [11] Voss, H. D. and L. G. Smith, Global zones of energetic particle precipitation, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **42**, 227-239, 1980.