

# 「おおぞら」による MeV 陽子・電子の強度分布

河野 毅\*・宗像一起\*・永田勝明\*\*・村上浩之\*\*\*  
中本 淳\*\*\*・長谷信行†・菊池 順††・道家忠義††

(1988 年 12 月 26 日受理)

## Intensity Distributions of MeV Electrons and Protons observed by OHZORA By

T. KOHNO, K. MUNAKATA, K. NAGATA, H. MURAKAMI, A. NAKAMOTO, N.  
HASEBE, J. KIKUCHI and T. DOKE

**Abstract:** The global distributions of energetic electrons (0.19-3.2 MeV) and protons (0.64-35 MeV) are presented in the form of contour maps. The data were obtained with two sets of energetic particle telescopes on board the satellite OHZORA. The observed altitude range is 350-850 km. Ten-degree meshes in longitude and latitude were used to obtain the intensity contours. A pitch angle distribution of  $J(\alpha) = J(90) \cdot \sin^n \alpha$  with  $n=5$  is assumed in order to get the intensity whose pitch angle is perpendicular to the geomagnetic line of force.

### 1. はじめに

放射線帯下部における放射線強度の分布については、多くの人がそれぞれの研究分野から興味を持ってきた。磁気圏物理学者は無論のこと[1], [2], [3], 観測の雑音源として関心を持つ X 線天文学の研究者[4]や、降下粒子による高層大気への影響[5], さらに搭載機器や生物にとっての宇宙における放射線環境といった、実用的な立場からの興味もある[6] [7] [8]. 今後は、従来の科学観測という立場に加え、宇宙空間環境を構成する、最も基本的なパラメータとしての放射線強度の把握という点で重要な意味を持ってく

---

\* 理化学研究所・宇宙放射線研究室  
\*\* 玉川大工学部  
\*\*\* 立教大理学部  
† 愛媛大教養部  
†† 早稲田大理工研

と思われる。将来、ますます人類の宇宙活動が広がって行くことを考えると、このような「宇宙の気象観測」が不可欠となろう。

ロケットや衛星による粒子観測は歴史が長く、多くのデータがあるはずだが一般的な分布について出版されたものは意外と少ない[4], [9]。その理由は、上述のように多くの異なった分野の研究者がそれぞれの立場からデータを見ていることにもよるが、粒子強度の分布が複雑で多くのパラメータに依存していることによる。ここでいうパラメータとは、エネルギー・スペクトル、高度、地磁気活動度、地方時、太陽活動度、短期・長期の時間変動、ピッチ角分布、等等である。とくに時間変動については、秒から年に至るスケールを持つ変動成分があり、きわめて複雑である。さらに、対象となる粒子のエネルギー範囲、強度範囲のダイナミックレンジの広さ(エネルギーで $10^3-10^9$  eV, 強度で $10^{-1}-10^6$   $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{MeV}^{-1}$ )も、「平均像」の表現を困難にしている。個々の観測は、以上のきわめて多岐にわたる諸条件の内の、ごく限られた条件の元で行われるからである。

我々は、MAP 観測衛星「おおぞら」に搭載された HEP による、MeV 領域の陽子・電子の観測結果を、エネルギー・高度など限られた領域内で、長期間にわたる平均的強度の分布を求めた。「おおぞら」の HEP は半導体検出器を用いた本格的なテレスコープであること、かなり長時間(3年間)のデータがあること、ピッチ角についての情報があることなど、粒子強度の定常的な分布を求めるには有効な測定器である。

高度 350-850 km を3つの高度帯に分け、互いに垂直方向を向いた、2つのセンサーにより、ピッチ角分布を推定して、磁力線に垂直な方向の強度を求めた。時間変動については太陽フレアによる粒子の極冠域への進入など、特別の現象を除いただけで、地磁気活動度などは考慮していない。使用したデータは1984年2月から1987年1月までの約3年間である。

## 2. 観測装置と使用データ

HEP の測定器については詳しい報告がある[10]ので、ここでは簡単に述べる。センサーはシリコン半導体検出器を組み合わせた  $\Delta E$ - $E$  法によるテレスコープで、 $\Delta E$  検出器には厚さが 0.1 mm の表面障害型、 $E$  検出器には厚さが 0.5 mm の  $E1$ 、および各 3 mm の厚さを2枚重ねた  $E2$ 、および厚さ 0.5 mm のアンチ用検出器の  $Ea$  から成り立っている。 $E1$  から  $Ea$  はリチウムドリフト型検出器で、開口角は視野中心の周りに  $\pm 20$  度である。幾何学的要素は  $0.14 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$  である。これを2台搭載し、1台は反太陽方向(センサー1)を、もう1台はこれに直角方向に(センサー2)セットしてある。

衛星は観測モードにより、太陽方向を軸としてスピンすることもあるが、全体の観測時間でみると、スピンをしないモードが大部分であった。スピンした場合、スピン軸と磁力線のなす角度できめられる範囲内のピーチ角をセンサー2がスキャンすることになる。

観測データの種類として、陽子・電子の他に、1枚目の  $\Delta E$  検出器で止まってしまった低エネルギー粒子(陽子・電子の区別ができない)のチャンネルもあるが、粉らわしいので今回の報告には含めない。

陽子・電子の公称エネルギー範囲はそれぞれ 0.64-35 MeV, 0.19-3.2 MeV であるが、

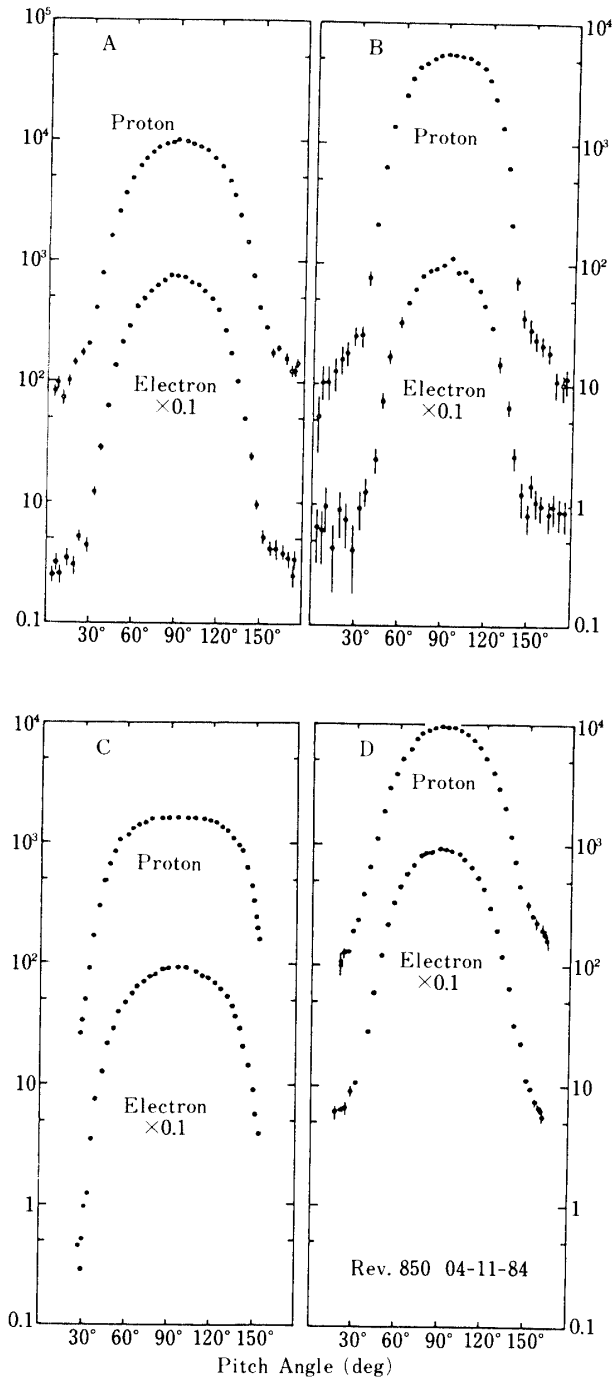


図 1 衛星がスピニングしているときにセンサー 2 により得られた、粒子のピッチ角分布の例。α=90 度、つまり磁力線に垂直方向にピークがある。この全ピッチ角を観測中の、全体の強度変化はスピニング軸に平行方向のセンサー 1 のデータで補正してある。A, B, C, D は軌道上の異なった地点におけるピッチ角分布である。

エネルギースペクトルは非常に急な場合が多いので両者とも実質的には1 MeV 近傍と考  
えてよい。

### 3. データ処理

#### 3-1. ピッチ角分布

衛星がスピニングしているときにはセンサー2により、磁力線に対する粒子の運動方向、つ  
まりピッチ角への依存性を見ることができる。スピニング軸と磁力線のなす角が90度に近い時  
を選んで測定したピッチ角分布の例を図1に示す。何れの場合も磁力線に垂直方向にピー  
クを持つ、補捉型のピッチ角分布をしていることが分かる。一般には衛星はスピニングせず、  
各センサーは磁力線に対し任意の方向を持って観測するので、観測結果はそのときのピッ  
チ角に大きく依存する。

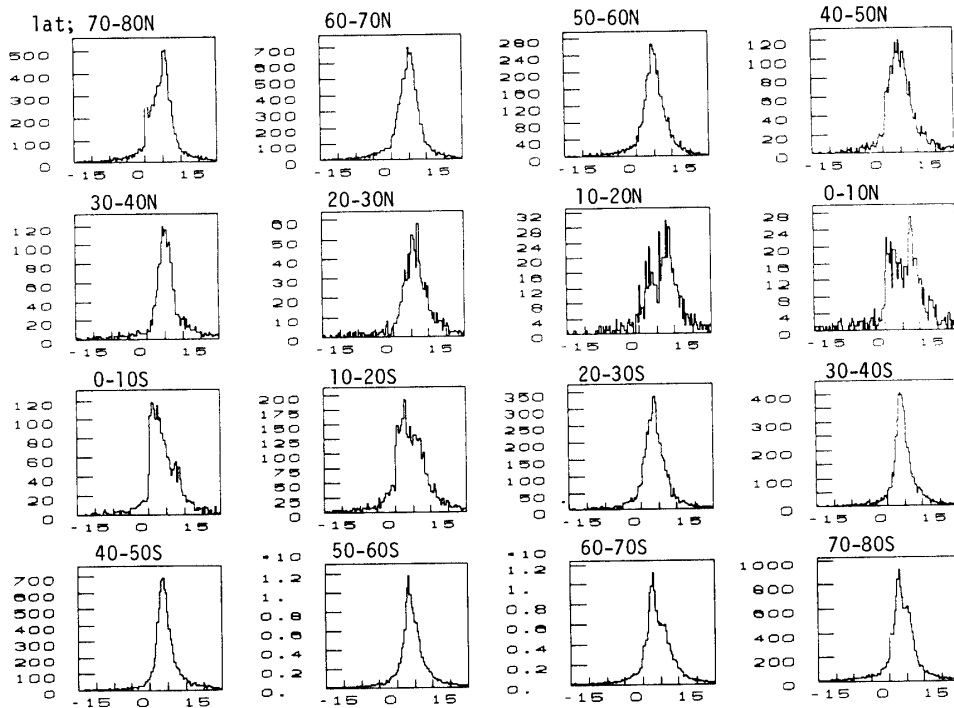


図2 粒子のピッチ角分布として $J(\alpha) = J(90)\sin^n \alpha$ を仮定し、セン  
サー1, 2のデータから全観測期間について $n$ を求めたとき  
の、 $n$ の分布。

$$n = \log\{J(\alpha_1)/J(\alpha_2)\} / \log(\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2)$$

高度500-700 kmの陽子について緯度帯を10度毎に分け、全  
経度について集計したもの。上の2列が北半球に、下の2列  
が南半球にそれぞれ相当する。センサー1, 2のピッチ角が偶  
然似た値の時や、カウント数が小さすぎるときなどは除いて  
いる。1データの単位としては、4秒(ハイビットレート)  
または16秒(ロービットレート)毎の計数率を採用している。

一般に、ピッチ角を  $\alpha$  とし、その方向の強度を  $J(\alpha)$  とすると、

$$J(\alpha) = J_0(90) \cdot \sin^n \alpha$$

と表されることが多い[11]。仮にこの関係が常に成立つとすると、我々は2個のセンサーを持っているので、両者のピッチ角が偶然よく似た値であるような特殊な場合を除いて  $n$  を求めることができる。このようにして求めた  $n$  を陽子について、緯度帯で分けた分布図が図2である。これは、4秒(ハイビット)または16秒(ロービット)毎の計数率から算出したもので、北半球の低緯度帯では低い計数率によるバラツキがみられる。この図から、一般に  $n$  は -10 から +15 辺りまで分布しているが、ほぼ5の周りにピークを持つことが分かる。 $n$  の値が全空間で一定という保証は特にはないが、平均的に  $n=5$  とおいて、そのときのピッチ角から  $J(90)$  を求めることとする。各データ毎に求めた  $n$  を用いて  $J(90)$  を出すことも考えられるが、 $n$  が10とか15等の大きな値は、低い計数率による統計的ゆらぎによる可能性があり、この大きな  $n$  を用いて得た  $J(90)$  は非現実的な値となることも考えられるので、上述のように  $n$  を固定する方法をとった。

### 3-2. メッシュデータの作製

粒子強度の等高線を得るルーチンを使用するため、緯度・経度共に10度のメッシュに合わせる。各メッシュ内の強度データは算術平均をとる。全観測時間内の軌道をプロットした例として図3を示す。ほとんどの10度メッシュはスキャンされているが、なお欠測部分があることが分かる。この欠測メッシュについては周囲のデータを用いて内挿する。さらに、

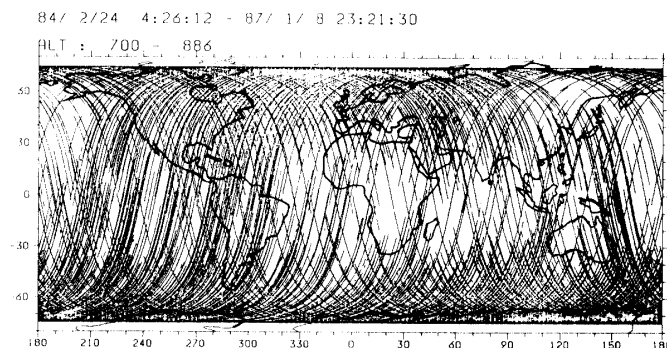


図3 全観測期間のうち、1番高い高度帯(700 km 以上)についての軌道データ。サブ・サテライト・ポイントを世界地図上にプロットしたもの。この軌道の全観測時間は約400時間で、他の2つの高度帯の滞在時間もほぼ似た値である。

スムーズに等高線を得るため、メッシュ単位で移動平均をとる。この移動平均の操作のため、得られた強度分布図は等高線が実際より緩やかなものとなっていることに注意しなければならない。

## 4. 結果と検討

前節で述べたデータ処理により得られた陽子・電子の強度分布図を、3つの高度帯に分

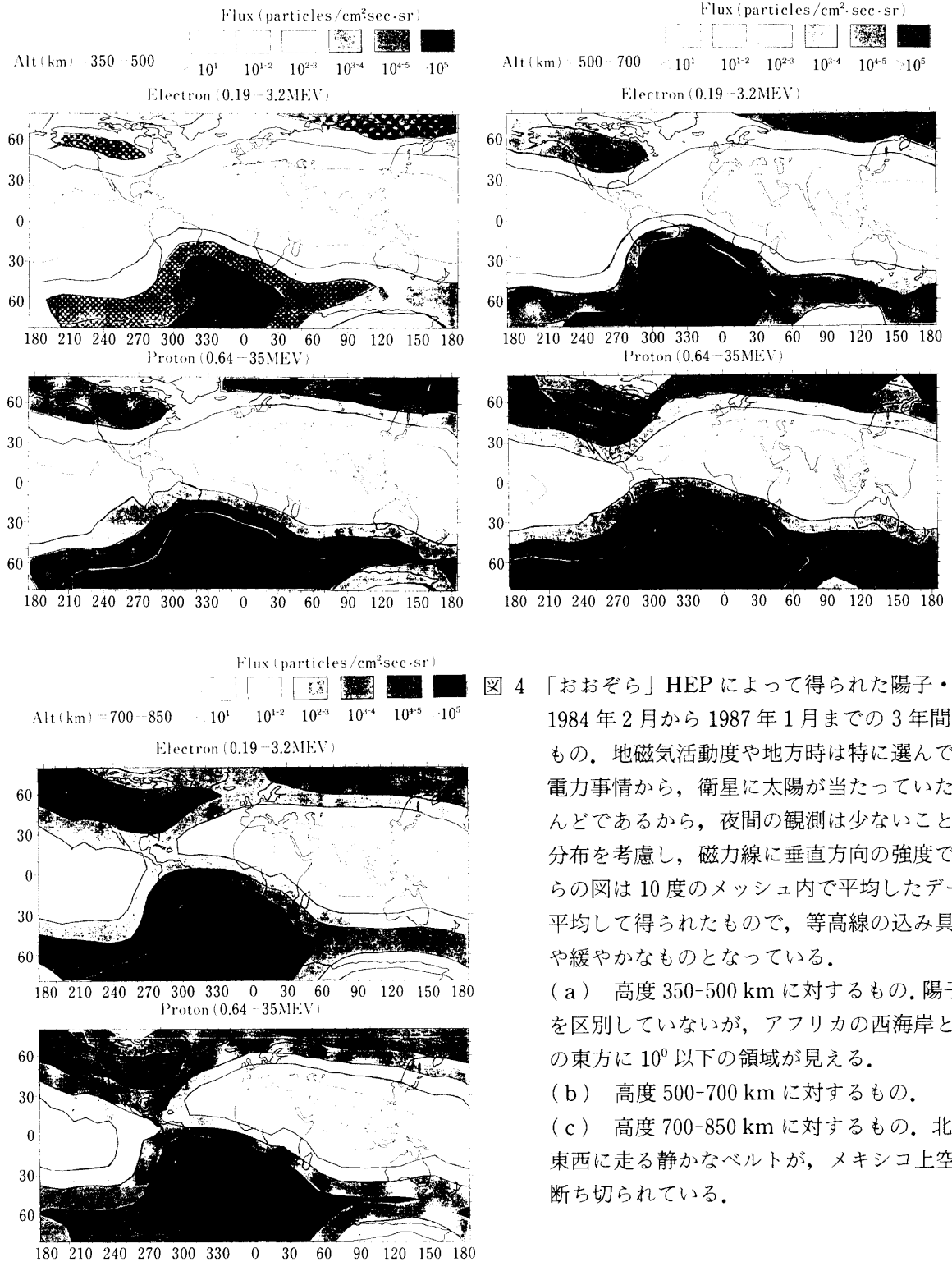


図4 「おおぞら」HEPによって得られた陽子・電子の強度の分布。1984年2月から1987年1月までの3年間のデータから得られたものである。地磁気活動度や地方時は特に選んでいないが、電力事情から、衛星に太陽が当たっていたときの観測がほとんどであるから、夜間の観測は少ないことになる。ピーク分布を考慮し、磁力線に垂直方向の強度で表している。これらの図は10度のメッシュ内で平均したデータを、さらに平均して得られたもので、等高線の込み具合は実際よりやや緩やかなものとなっている。

(a) 高度350-500 kmに対するもの。陽子の場合、特に南緯を区別していないが、アフリカの西海岸と、オーストラリアの東方に10<sup>0</sup>以下の領域が見える。

(b) 高度500-700 kmに対するもの。

(c) 高度700-850 kmに対するもの。北半球の低緯度帯に東西に走る静かなベルトが、メキシコ上空を走る「尾根」が断ち切られている。

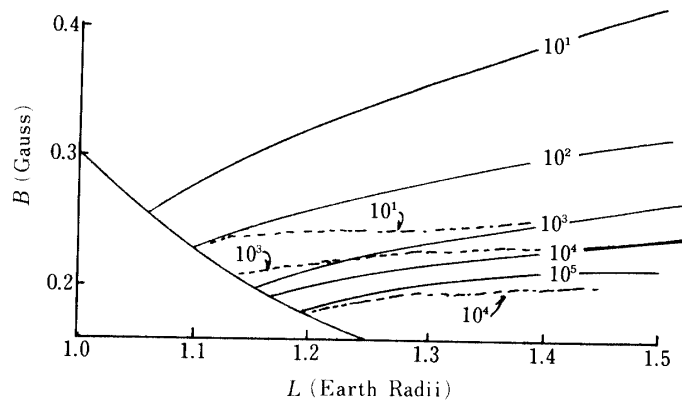


図5 B・Lダイアグラム上でみた、強度分布(陽子の場合)。点線はNASAのモデル(AP-8)から、この図のB・L領域の値をプロットしたもの。

けて1桁毎の等高線図で表したのが、図4のa-cである。全高度にわたりいわゆる南大西洋異常(SAA)と呼ばれる強い放射線場の存在が目につく。このような全地球的な放射線強度分布についての出版結果は意外と少ないが、Voss and Smith[8]によるkeV電子の図と比べてみると、かれらのいうequatorial auroral zoneは図4にはみられない。彼らが比較的地磁気擾乱度の高い時期を選んだに対し、我々は全期間を対象としたことにもよるが、keVとMeVというエネルギーの違いも大きな原因だろう。また、彼らの図では、北半球の低緯度帯における静かなzoneが、全経度にわたってつながっているのに対し、我々の結果には、南半球から北半球にわたる、メキシコ上空の「尾根」の存在が注目される。

放射線帯の強度分布を2次元上で表現するために、よく使われるのは、よく知られているように、B・L座標である。B・L座標を使って図4の強度分布を模式的に表したものが図5である。点線は、NASAの放射線帯のモデル[12]からとった陽子のB・Lダイアグラム上での等高線図上に我々の結果をプロットしたものである。我々の観測は、Lの小さい領域を主としており、NASAのモデルが意図した領域とは異なるが、L=1-1.5の領域ではモデルをやや書き直す必要があるようである。もっともここで我々は磁力線に垂直方向のピークフラックスを採用したが、NASAのモデルでは全方向フラックスで表していることのちがいを考慮しなければならない。(sin<sup>5</sup>αのピッチ角分布を仮定すると、このちがいは約ファクタ3となる)

### 参考文献

- [1] Paulikas, G. A., Precipitation of particles at low and middle latitudes, Rev. Geophys. Space Phys., **13**, 709-734, 1975.
- [2] 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.
- [3] Vampola, A. L., and G. A. Kuck (1978) Induced precipitation of inner zone electrons 1.

- Observations, *J. Geophys. Res.*, **83**, 2543.
- [ 4 ] Seward, F. D. (1973) The geographical distribution of 100 keV electrons above the earth's atmosphere, Rep. UCRB-51456, Univ. of Calif., Lawrence Livermore Lab. (unpublished).
  - [ 5 ] Gledhill, J. A., Non-solar ionization in the South Atlantic Anomaly: A review, IAGA, Canberra, December, paper No. 23.06, 1979.
  - [ 6 ] K. Eguchi-Kasai, T. Kosaka, I. Kaneko, T. Takahashi, A. Maruhashi and K. Nakano, *J. Radiat. Res.*, **28**, 213(1987).
  - [ 7 ] T. Takahashi, F. Yatagai and S. Kitayama, *Adv. Space Res.* 3, No. 8, 95(1983).
  - [ 8 ] 宇宙環境モデルの検討その1, その2宇宙開発事業団(1987).
  - [ 9 ] Voss, H. D. and L. G. Smith, Global zones of energetic particle precipitation, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **42**, 227-239, 1980.
  - [10] 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.
  - [11] Fritz, T. A. and W. N. Spjeldvik, Pitch angle distributions of Geomagnetically trapped MeV helium ions during quiet times, *J. Geophys. Res.*, **87**, 5095-5101, 1982.
  - [12] AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum, NSSDC/WDC-A-R & S, 76-06,(1976).