

# 田老宇宙線観測所における空気シャワー観測

## Observation of Extensive Air Showers at Taro Cosmic Ray Laboratory

佐久山 博 史\*・鈴木 昇\*\*

Using a large water tank (30 m in diameter), direct measurement of attenuation length has been done at Taro cosmic ray laboratory of Meisei University. The lateral density distribution of charged particles in EAS is one of the essential parameters for the analysis of individual EAS. The conventional EAS array of 27 plastic scintillation detectors was used to obtain densities up to about several tens meters from the center. 150  $0.4 \text{ m}^2$  proportional counters have been set in the bottom of the water tank. Attenuation length for individual EAS passing through a 3 m layer of water have been measured by means of two layers of detectors. The lateral distribution under water seems to have a steep slope compared with that of the atmosphere.

### 序 論

地球大気中に入射した高エネルギーの一次宇宙線（陽子または裸の原子核）が大気の子核と衝突し、多くの二次粒子  $\pi^\pm, K^0, K^\pm$  等を創る。それらの粒子は更に大気の子核と衝突することにより粒子が細分化し核カスケードシャワーを起こす。

核カスケードで発生したパイオンの内  $\pi^0$  は、寿命が  $8.3 \times 10^{-17} \text{ sec}$  と短いため  $E\pi^0 < 3 \times 10^{21} \text{ eV}$  では核反応をせずに  $2\gamma$  に崩壊し、この  $\gamma$  が電磁カスケードを引き起こす。また  $\pi^\pm, K^\pm$  は核衝突と崩壊が競合するが、エネルギーが critical な値よりも低くなると、核衝突するより前に  $\mu$  に崩壊するものが多くなる。

電磁カスケードにおいてエネルギーが十分に高い発達段階で主に効くプロセスは制動輻射と電子対創生である。 $e$  は制動輻射により  $e+\gamma$  となり、 $\gamma$  は電子対創生により  $e^+ + e^-$  になる。このようなプロセスが次々と繰り返されることにより発達する、このように大気中で核カスケードシャワーと電磁カスケードシャワーが重なりあっているものを空気シャワー (EAS) と呼んでいる。

制動輻射によって電子のエネルギーが  $1/e$  になる物質の厚さを radiation length  $X_0$  と定義する。

$$dE/dx = -(1/X_0)E$$

$$E = E_0 \exp(-x/X_0)$$

$$X_0 = CA/Z^2 \cdot N$$

ここで  $C$  は定数、 $A$  は質量数、 $Z$  は陽子数、 $N$  はボゴドロ数である。空気の場合  $X_0 =$

---

\* 理工学部物理学科教授 宇宙線    \*\* 理工学部物理学科 助手

$37.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  であり、電子対創生の平均自由行程は  $9/7 X_0$  である。

制動輻射も電子対創生も断面積が物質の  $Z$  に対し、 $Z^2$  依存性をもっているが、定義により  $X_0$  も  $Z^2$  依存性をもつために、物質の原さを  $X_0$  で測ることにより、シャワー発達を物質によらず取り扱うことができる。1 radiation length の物質層を電子が走る間に、電離損失により失うエネルギーは臨界エネルギー  $\epsilon_0$  と呼ばれ、空気の場合には  $\epsilon_0=81 \text{ MeV}$  である。

カスケードシャワー中で  $\epsilon_0$  以下のエネルギーの粒子はカスケードの増殖には効かない。 $E_T$  を入射  $T$  のエネルギーとすると、 $E_T/\epsilon_0$  によって電磁カスケードの形はほぼ決まる。制動輻射、電子対創生、及び電子の電離損失を考慮した計算の結果、カスケードが最も発達する深さ  $t_{\max}$  は

$$t_{\max} \sim \text{Log}(E_T/\epsilon_0) - 0.5(\text{radiation length})$$

である。またその時の総粒子数  $N_{\max}$  は

$$N_{\max} = CE_T/\epsilon_0 \quad (C \sim 0.1)$$

である。図1に電磁カスケードの縦方向の発達 (B近似) を示す。

親が光子、電子による場合制動輻射と電子対創生により電磁カスケードシャワーを発達させる。その電子は多重クーロン散乱のために横方向に拡がる。その平均散乱角は電子のエネルギーを  $E$  としたとき、

$$\langle \theta^2 \rangle \sim \left( \frac{E_s}{E} \right)^2$$

ただし、 $E_s$  は定数で

$$E_s = \sqrt{\frac{4\pi}{\alpha}} mc^2 = 21 \text{ MeV}$$

ここで  $mc^2$  は電子の質量エネルギー、 $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$  である。

電磁カスケードの横拡がり分布は臨界エネルギーの電子が 1 Radiation Length 物質を通過したときの横方向へのずれを示し、モリエールユニット  $R_0$  と呼ばれ次式で表わされる。

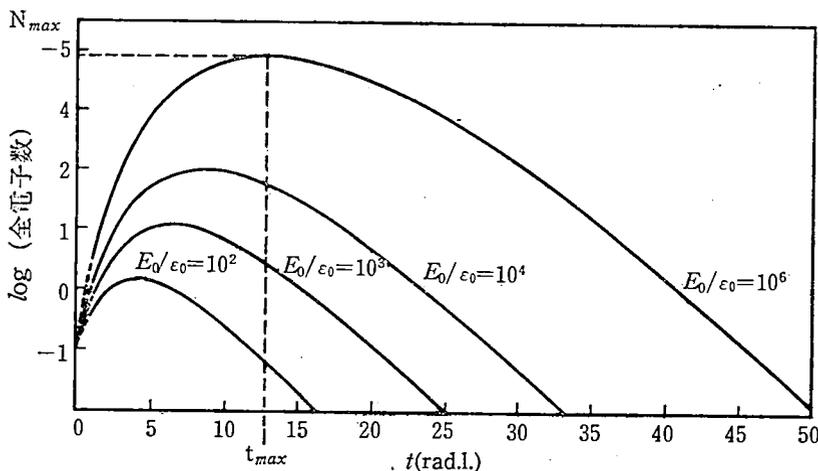


図1 電磁カスケードの縦方向の発達 (B近似)

$$R_0 = \frac{E_c}{\epsilon_0} \cdot X_0$$

ここで  $\epsilon_0$  は臨界エネルギー、 $X_0$  は物質の厚さである。

田老宇宙線観測所（平均高度 200 m, 平均気圧 988.25 mb, 平均気温 15°C）では  $R_0$  は約 80.5 m である。

電磁カスケードシャワー中の電子の横方向分布は西村, 鎌田<sup>1)</sup>, Greisen<sup>2)</sup> により導かれ (NKG 関数といい) 次式で表わされる。

$$\rho_e(r_t/R_0) = N_e \cdot c(s) \cdot (R_t/R_0)^{(s-2.0)} \cdot (1+r_t/R_0)^{(s-4.5)}$$

$$c(s) = \frac{0.443 \cdot s^2 (1.9-s)}{R_0^2}$$

$s$  はエイジと呼ばれ, 電磁カスケードシャワーの発達の場合を表すパラメーターで ( $s=0, 1, 2$ ) シャワーの発生点  $x=0$  における  $s$  の値を  $s=0$  と取る。 $s=1$  をシャワーの最も発達した点とし,  $s=2$  をシャワーの最終点とする。NKG 関数と地上に配列された空気シャワーアレーンチレーション検出器による電子密度の横方向分布と比較することにより観測点でのエイジを決めることができる。

空気シャワーの総電子成分の数  $N$  (EAS サイズ) とシャワー軸 (コア) の位置は普通多数のシンチレーション検出器を基盤の目の様に配置し電子密度の横方向分布を測定し, NKG 関数と比較することで基本的な量サイズとエイジが決定される。

田老宇宙線観測所では超高エネルギー宇宙線空気シャワーの中心構造及び縦方向の発達を観測し, 超高エネルギー核相互作用並びに一次宇宙線の組成の研究を行なう。任意の高度  $x$  でのサイズは  $N \propto \exp(-x/A)$  で近似される。大気の頂上 (すなわち, 大気の無くなる点) を  $x=0$  とすると, 地上ではほぼ  $x \approx 1000 \text{ g/cm}^2$  で表わされる。

現在の実験は減衰長さの測定及びコア構造の研究に対して, 水を使っている。一次元で考えると水は密度の違いを除いて空気シャワー発達に対して空気とほぼ同様<sup>3)</sup> である。水は空気よりも密度1000が倍大きいので, 散乱しにくいので粒子の横への拡がり方は大気に比べて非常に小さい。水中部分に検出器を隙間なく一面に並べ, 地上と水深  $d$  でのそれぞれのサイズ  $N_a, N_w$  を求めることにより空気シャワーの減衰長  $A$  は次式で決まる,

$$A = \frac{d \cdot \sec \theta}{\ln(N_a/N_w)} \quad (\text{g/cm}^2)$$

ここで  $\theta$  は空気シャワーの天頂角である。

個々の空気シャワーに対しての減衰長さの直接測定を行なうことにより縦方向の発達を EAS のモデル計算やシミュレーションによる結果と比較することで空気シャワーの色々なパラメーターが調べられる。また減衰長さ (非弾性度, 横方向運動量等) の測定を通して, 超高エネルギー核相互作用の姿も明らかとなる。

## 実験装置

明星大学田老宇宙線観測所アレーは (a) シャワー中の電子密度を測定するためのシンチレーション検出器 (b) 水中の粒子数を測定するための比例計数管 (c) 天頂角, 方位角を測定するための角度検出器 (d) 空気シャワーを測定するための 4 台のトリガー検出器 (e) 全データを記録する自動デジタル記録装置で構成されている。

(a) 27 台のプラスチックシンチレーション検出器 ( $1 \text{ m}^2 \times 2$  台,  $0.25 \text{ m}^2 \times 25$  台) よ

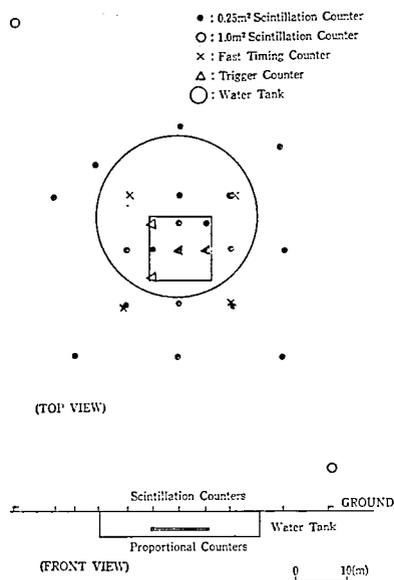


図 2 MEISEI COSMIC RAY LABORATORY COUNTER ARRAY

りなる空気シャワーアレーが直径 30 m の水槽を中心に半径 50 m 同心円上に配置され、空気シャワーの全粒子数（サイズ）が決められる。

(b) 水を使った遷移曲線がそのまま空気の延長と見られるように大気と水中での空気シャワーの発達は密度効果により粒子の横への拡がり方は非常に小さい為、比例計数管 (150 台, 0.4 m<sup>2</sup>) は密に配置されている。

(c) 空気シャワーの天頂角と方位角はコア検出器上に一辺 20 m 離れた 4 台のファーストタイミングシンチレーション検出器により決定される。

(d) 全検出器のデータは中心の 4 台のトリガー検出器がそれぞれ 1 m<sup>2</sup> 当り 40 粒子より大きいパルスの同時放電を持った時記録される。

### 1. プラスチックシンチレーション検出器

高速高分解能プラスチックシンチレーター（分解能 3 ns 以下）、面積 0.25 m<sup>2</sup> (50 cm × 50 cm × 5 cm) を用いた。

シンチレーターからの信号を光電子増倍管で受け出力は対数増幅器に接続され、パルスハイトが時間幅に変換され、2MHz のクロックパルスでデジタル化される。対数増幅器は 1~10<sup>4</sup> 粒子数/検出器の広範囲をカバーしている。この検出器は全システムをトリガーすること、そして大気中での空気シャワーの電子サイズを見積ることに用いられる。

### 2. 比例計数管（コア検出器）

水槽内に配置した比例計数管は単一線、ガス封入タイプ、角型鉄パイプ (10 cm × 10 cm × 200 cm) である。比例計数管の構造は図 3 に示す。直径 100 μm のタングステン線が陽極として用いられ、ハーメチックシールを介しパイプの両端で固定された。管内は 90% アルゴン、10% メタンの混合ガス、760 mmHg に調整し封入されている。

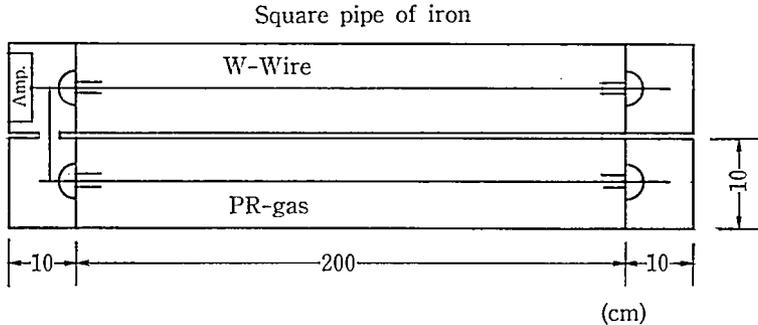


図 3 Structure of proportional counter

陽極には高電圧 2.4 kV が印加され、出力信号は耐電圧コンデンサーを介し 2 チャンネルに分けられ 1 つは 100 倍 (高ゲイン) を持つ演算増幅器, 他方はエミッターホロー (1 倍低ゲイン) に接続され, 両ゲインを加えることによりカウンター当り  $1 \sim \text{数} \times 10^4$  粒子のダイナミックレンジを得ることができた。これらの信号は 100 mV のレベルでディスクリミネートされパルスハイトが対数に一致した幅に変換され, 2MHz のクロックパルスで計数される。

### 3. 角度検出器

4 台の超高速型プラスチックシンチレーション検出器からそれぞれの到着時間差データを超高速ロジック回路を通し, シャワーの到来方向を決める。

図 4 は空気シャワーが検出器に到達したときの様子を示す。シャワー粒子群はシャワーディスクを形成し, 親の粒子の到来方向軸を保ちながらほぼ光速で進む。各検出器に粒子が入った時間を記録し, シャワーは検出器相互の時間差から到来方向を知ることができる。しかし, シャワーディスクは図の様に厚みと曲率を持っており, コア付近では平面として扱う事ができるが, 遠方においては補正が必要となる。

旧老空気シャワーアレーのデータはコンピュータ化されたデータ自動記録装置図, 5 により処理された上, 磁気テープ (約 6000 例) に記録される。空気シャワー event を Back Ground から取り出すためにはある時間幅 (ゲート幅) の間に 4 台のシンチレーション検出器から規定数以上の信号が認められた場合にかぎりコントローラにトリガー信号を送り順次データを取り込み, 同時にコインシデンスの発生した時刻情報を記録する。記録が

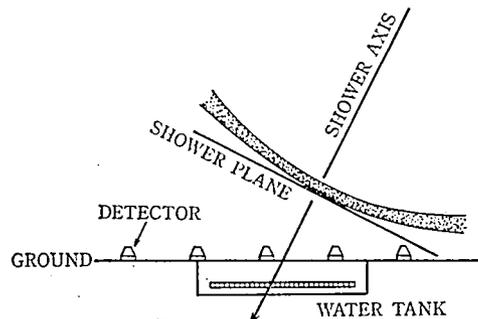


図 4

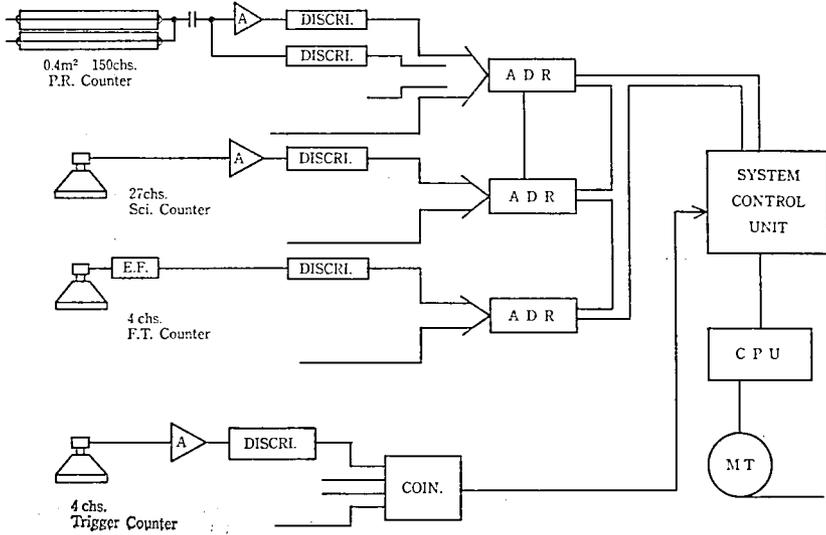


図 5 Circuit Block Diagram

終ると記録装置のゲートを開け次の現象を待つ。

結果及び議論

観測されたそれぞれのサイズの分布を図 6 に示す。サイズの小さい方 ( $4.8 \times 10^5$  以下)

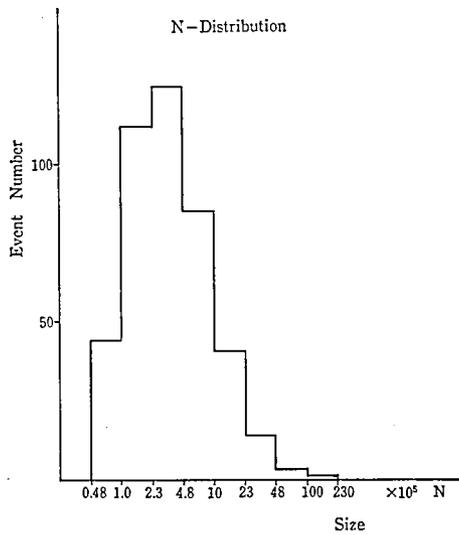


図 6

はトリガー条件により例数が少なくなっている。今回の解析はサイズで  $2.3 \times 10^7$  以下425例であった。

エイジ ( $s$ ) 分布を図7に示す。

サイズと平均エイジの関係を図8に示す。トリガー条件と、小さい空気シャワーによる粒子数のふらつきが有るためサイズ  $4.8 \times 10^5$  以下での平均エイジは小さくなっている。

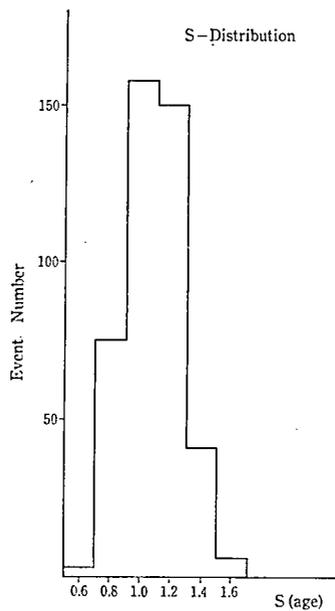


図 7

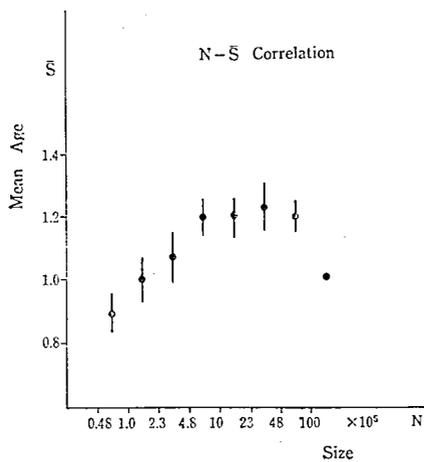


図 8

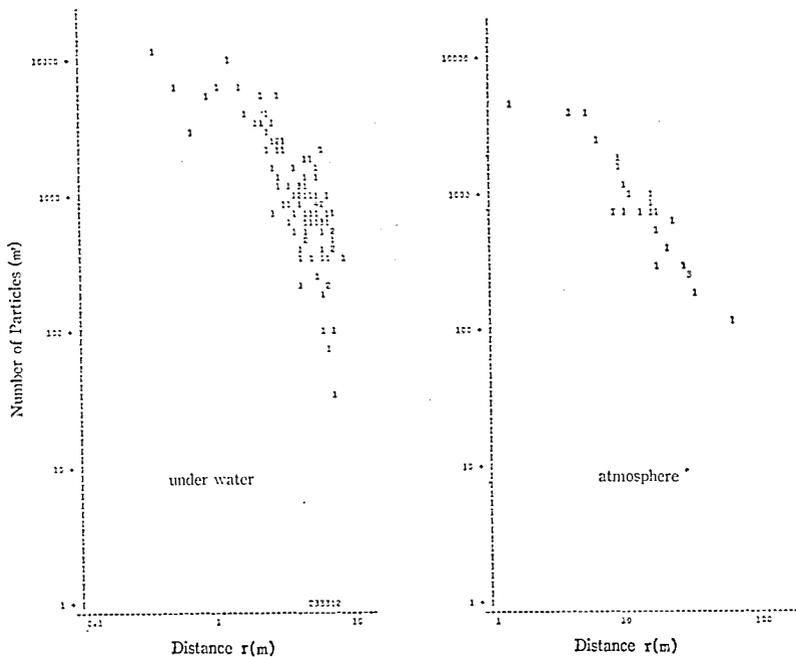


図9 Example of lateral distribution of EAS  
 1986.9.16. Event No.186,  $\theta=26.21^\circ$ ,  $\phi=242.2^\circ$   
 $S=1.0$ ,  $N=4.57 \times 10^6$

トリガー条件を変更し例数を増すことによりさらに明確になると思われる。

空気シャワーの横方向の密度分布（地上，水中）の例を図9に示す。

図10以後は横方向の密度分布（横軸をコアからの距離  $r(m)$ ，縦軸を  $1m^2$  当たりの粒子数を各パラメーターでまとめ，加え合わせた図である。エイジ ( $S$ ) を  $S \leq 0.8$ ,  $S = 1.0$ ,  $S = 1.2$ ,  $S \geq 1.4$  の4分割し，サイズ ( $N$ ) は  $4.8 \times 10^4 \sim 2.3 \times 10^7$  までを8分割した。

水の下での横分布は水の上に比べて大変急勾配になっているのがわかる。

図10以後の上段は地上におけるサイズとエイジをパラメーターとした横分布であり，実

図表示	エイジ		$S \leq 0.8$	$S = 1.0$	$S = 1.2$	$S \geq 1.4$
	サイズ					
(a)	$4.8 \times 10^4 \leq N < 1.0 \times 10^5$		図10-1	図11-1	図12-1	
(b)	$1.0 \times 10^5 \leq N < 2.3 \times 10^5$		図10-2	図11-2	図12-2	
(c)	$2.3 \times 10^5 \leq N < 4.8 \times 10^5$		図10-3	図11-3	図12-3	図13-1
(d)	$4.8 \times 10^5 \leq N < 1.0 \times 10^6$		図10-4	図11-4	図12-4	図13-2
(e)	$1.0 \times 10^6 \leq N < 2.3 \times 10^6$			図11-5	図12-5	図13-3
(f)	$2.3 \times 10^6 \leq N < 4.8 \times 10^6$			図11-6	図12-6	図13-4
(g)	$4.8 \times 10^6 \leq N < 1.0 \times 10^7$				図12-7	図13-5
(h)	$1.4 \times 10^7 \leq N < 2.3 \times 10^7$			図11-7		

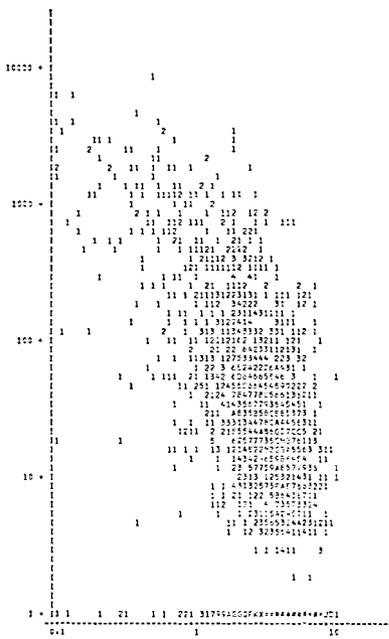


图10-1

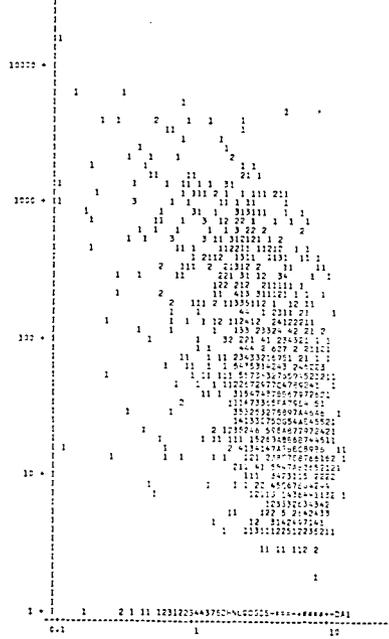


图10-2

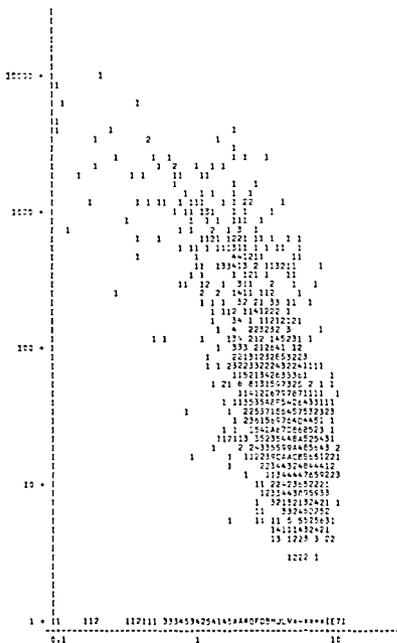


图10-3

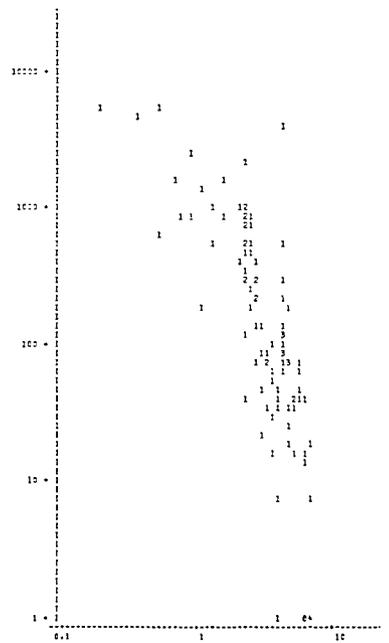


图10-4









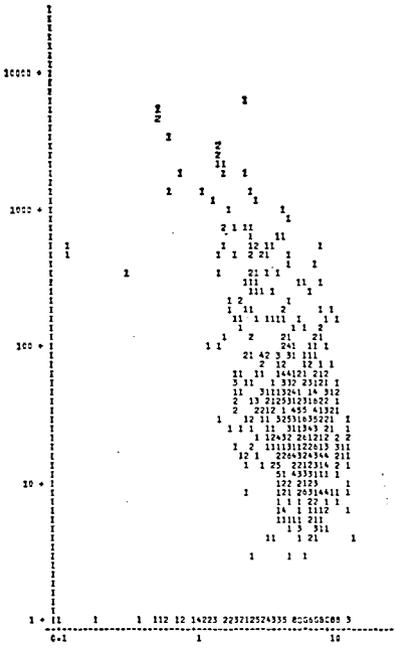


图13-3

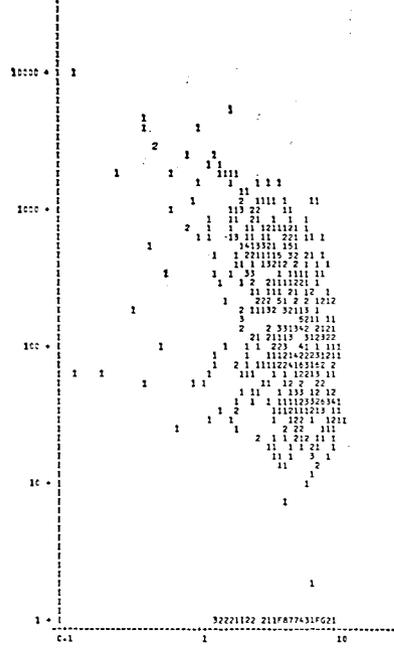


图13-4

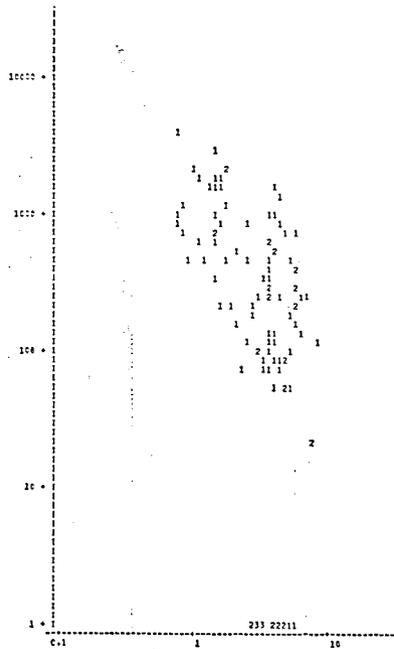


图13-5

線は測定値と NKG 関数によるベストヒットカーブである。下段は上段に対する水中での横分布であり、実線は測定値の平均値を結んだカーブである。

以上の結果から、空気シャワーのコア近傍では水の下でのサイズから判断すると現在考えられている標準模型からの予想されるシャワーよりも減衰が激しいように見える。さらにコアから遠い距離の所でのデータも加えればより詳細なものになるであろう。

#### 謝 辞

本研究に当たり御指導を頂いた木原太郎主任教授及び宇宙線観測所の方々に深く感謝致します。

田老宇宙線観測所の実験に御協力いただきました、総務課、用度課の皆さま方に感謝いたします。

データ解析に際し情報科学研究センターの皆さまに感謝いたします。大学院生及び卒業研究生の方々に、実験・データ解析において御協力いただきました。

#### 参考文献

- 1) Kamata, K. and Mishimura, J. 1958. Suppl. Prog. Theor. Theor. Phys. 6, 93.
- 2) Greisen, K. 1956. Progress in Cosmic Ray Physics III (ed. by J.G. Wilson, 1956), 27.
- 3) 佐久山博史, 鈴木 昇, 明星大学理工学部研究紀要, 第20号, p.23 (1984).