

田老における超高エネルギー宇宙線の観測

I. 観測装置

佐久山博史¹⁾ 鈴木昇²⁾ 倉持浩司³⁾ 佐久本功達⁴⁾ 中野秀典⁵⁾

1. はじめに

人類は宇宙の探索と共に、物質の基本構成要素の究明にも力を注いできた。物質を究極的な最小単位にまで分割するという原始論はギリシャのデモクリトスの時代にまでさかのぼる。そして今日、アトムの探求は素粒子物理学に受けつがれ、基本粒子の探索、素粒子基本法則の追求が行われている。これらの研究には巨大粒子加速器や、大型素粒子検出器が使われている。

宇宙という超マクロの世界と、素粒子という超ミクロの世界は相反する疎遠なものではなく、実は密接に関わり合いを持っていることが今までの研究から明らかになってきた。ビッグバンにより宇宙は光のエネルギーで満ちた火の玉状態に始まり、物質の最小単位である素粒子（クォーク、ニュートリノ、電子等）が生まれた。そして宇宙膨張によって温度が下がるにつれて素粒子が結合して、陽子、中性子、原子が順々に作られ、これらを種にして銀河が形成されたと考えられている。宇宙初期の素粒子が飛び交っている時期に頻繁に起こった素粒子反応は素粒子基本法則によって特徴づけられ、その後の宇宙形成に重要な役割を果たしたことが容易に想像される。このように素粒子は宇宙創成及び現在の宇宙大構造の謎を解く鍵であるといっても過言でない。

宇宙線は宇宙から絶えず地球に降り注ぐ超高速の素粒子または原子核である。その大部分は陽子（水素の原子核）を始め各種の原子核で、そのほかに、電子、ガンマ線、ニュートリノなど色々な物がある。これらを一次宇宙線と呼ぶ。星が爆発して生まれる超新星、そしてその後に残されるパルサーや、周辺のガスを強い重力で吸い込んでいるブラックホールなど、激しく活動する天体で生まれたと考えられる非常に高いエネルギーの宇宙線は宇宙で最もエネルギーの高い天体現象からの情報をもたらすメッセンジャーである。

2. 序論

宇宙線が地球大気に到達すると空気原子核と衝突し、各種の相互作用の結果、原子の電子をはねとばし、原子核と核反応を起こす。パイ中間子を始め多数の二次粒子ができ、ある物はさらに空気の原子核と衝突しミュオン、ニュートリノやガンマ線に崩壊する。このようにして宇宙線は衝突、発生、崩壊、吸収を繰り返しながら大気中を進む。これらの

1) 理工学部物理学科教授 宇宙線物理

2) 理工学部物理学科助手 宇宙線物理

3) 国際短期大学情報通信科助手

4) 情報センター実習指導員

5) 日本データコム (株)

宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。二次宇宙線のうち電子、ガンマ線やミュオンは地上広く降り注ぐ。この現象を空気シャワーと呼ぶ。ミュオンやニュートリノのように貫通力の強いものは、さらに地下深くまで到達する。

宇宙線の観測は大気の色々な高度から地下深くまで行われている。人工衛星、気球さらに飛行機を使った一次宇宙線の観測、高山、地上そして地下や深海を使った二次宇宙線の観測が行われている。

宇宙線実験は素粒子或いは原子核実験と同じく高エネルギー実験であり共通するところが多い。加速器実験において人工的に作られた粒子は広がることなく短時間の間に特定の反応が行われる。しかし宇宙線実験は宇宙から降ってくる粒子を待ち、降ってくる頻度はエネルギーが10倍になると約100分の1に減ってしまう。このため検出器の面積を大きくすることで補い、又現象はエネルギーが非常に高くなると検出される粒子数もそれにつれ多くなり、小さい空気シャワーでも数千個、大きいものは数億個以上の粒子群になる。これらの粒子は空気中で散乱され、横方向に数百メートルの広がりとなる。空気シャワー現象を観測するには、多数の検出器を広く編み目のように並べ、広がってくる粒子を同時に検出することである。又研究内容により空気シャワーを各種の装置、方法で観測する。

この観測による基本データとしては

1. シャワーの全粒子数 (サイズ N_0)
2. シャワーの中心位置 (X_0 , Y_0)
3. シャワーの到来方向 (天頂角 θ 、及び方位角 ϕ)
4. 特定粒子の種類、エネルギー、角運動量等

などである。

3. 観測装置

空気シャワー粒子の総数をはかるには、空気シャワーの全ての粒子が降ってくる領域を

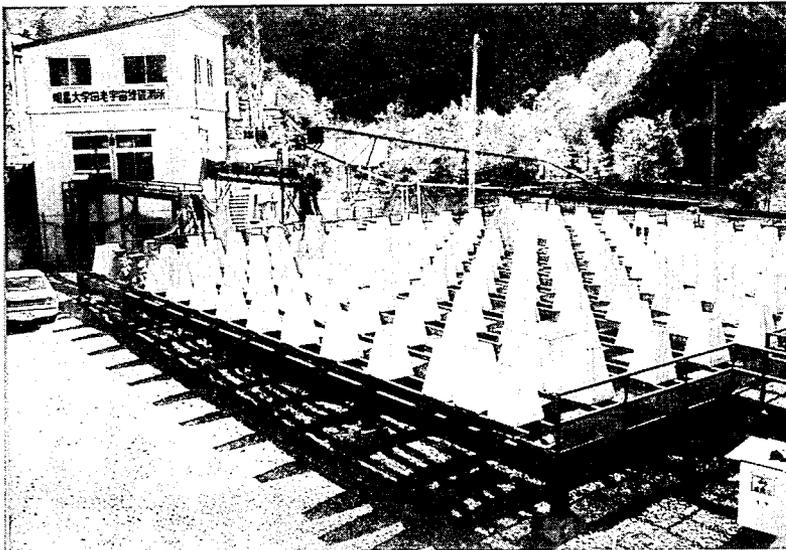


写真1 シンチション検出器群とデータ収集及びコントロール室

覆うだけの検出器を隙間無く敷き詰めることが理想的ではあるが、実際には困難であるため、通常多数の検出器を広い面積に目の粗いざらのように展開し、情報を集め総粒子数を推定する。このとき使われる検出器は荷電粒子が通過することで電気信号を出すシンチレーション検出器、チェレンコフ検出器、比例計数管などがある。

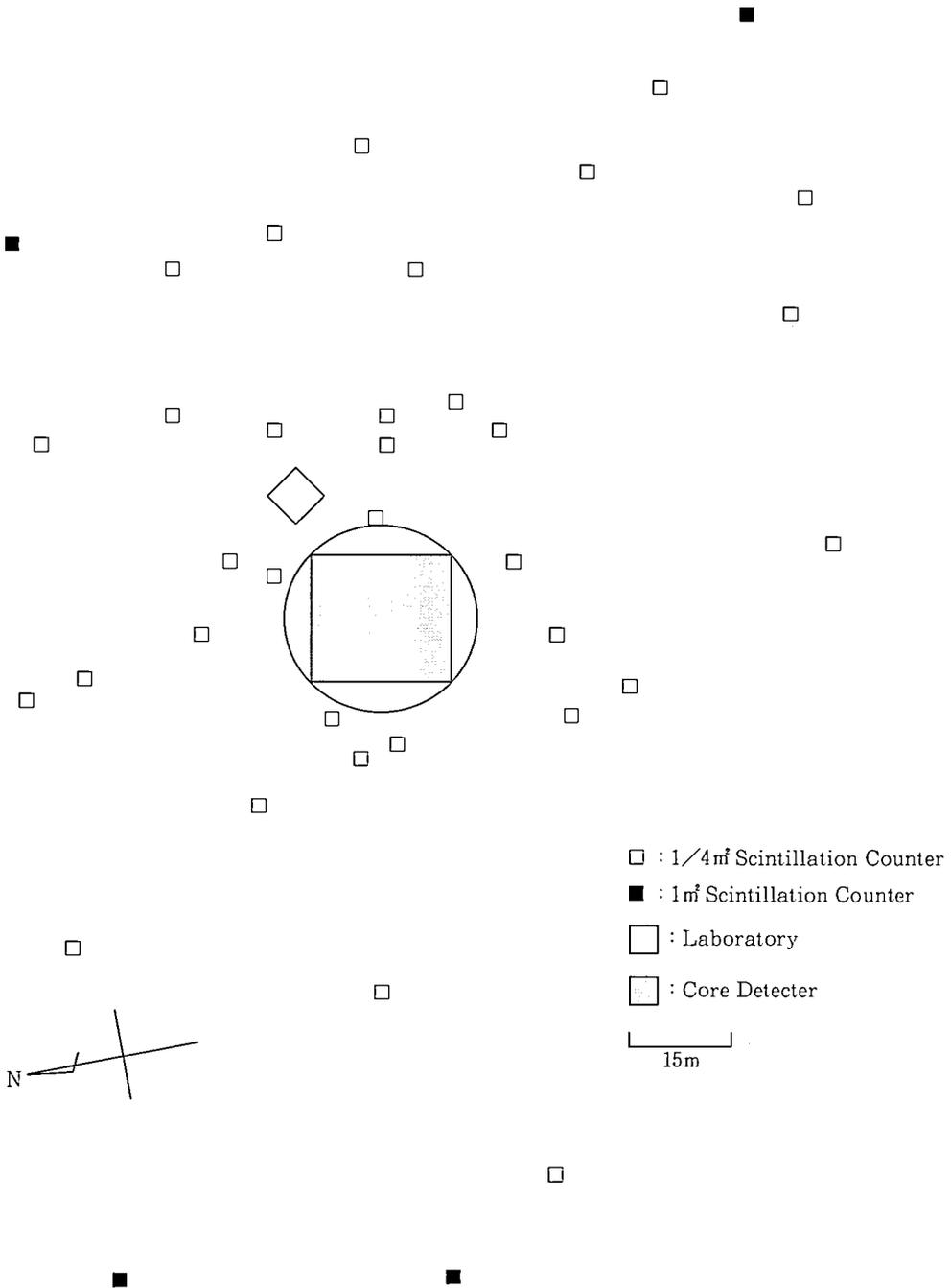


図1 明星大学田老宇宙線空気シャワー観測装置全体図

明星大学田老宇宙線観測所の空気シャワー観測装置を写真1に、配置図を図1に示す。シャワー粒子の総数を推定するにはプラスチックシンチレーション検出器を使い、シンチレータの大きさは面積 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ と $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ の二種類、それぞれ厚さ 5 cm の検出器を22台、空気シャワー中心コア付近の構造を調べる検出器には面積 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 、厚さ 2.5 cm のものを169台設置している。また空気シャワーの到来方向を調べる角度検出器を4台、空気シャワー付近の電子成分の時間構造を調べるチェレンコフ検出器3台、それに水槽内にシャワー粒子数の増減から遷移曲線を調べる比例計数管を半径 80 m 四方に設置している。

全体のシステムは検出器、前置増幅器 (Pre. amp)、主増幅器 (Main. amp)、自動デジタル記録計 (ADR)、ハードディスク (H・D)、フロッピーディスク (F・D)、コンピュータにより構成されている。宇宙線が特定の条件を満たしたときにシステム全体を稼働させるためのトリガーシステムは Discr (discriminator)、Coin (coincidence)、OR、Veto (anti-coincidence)、E.F. (emitter follower) などから構成されている。このトリガー信号によりシンチレーション検出器、角度検出器、コア検出器、比例計数管、そしてチェレンコフ検出器などが作動し始める。又これらの装置の各動作が正常であることをモニターし、修理そして調整するために水銀パルサー、光パルサー、オシロスコープ、光電子増倍管用高電圧電源、NIM/BIN電源、波高分析器が必要不可欠である。

3-1. シンチレーション検出器

シンチレーション検出器 (図2) はプラスチックシンチレータと光電子増倍管を組み合わせたもので、検出器に入った電子の粒子数を測定すると共に、時間分解能が非常に良く、1億分の1秒の精度で時間差を検出できるので、電子の到着時間差からシャワーの到来方向も測定できる。

電子のような荷電粒子がプラスチックシンチレータを通過すると、シンチレーション光 (減衰時間 $=3.0\sim 3.2\text{ ns}$) を出す。その光を効率よく光電子増倍管に集光するため内面に特殊高反射塗料 (VHエナメル) を塗布し、集光率を高めた四角錐台形型容器 ($53\text{ cm} \times 53$

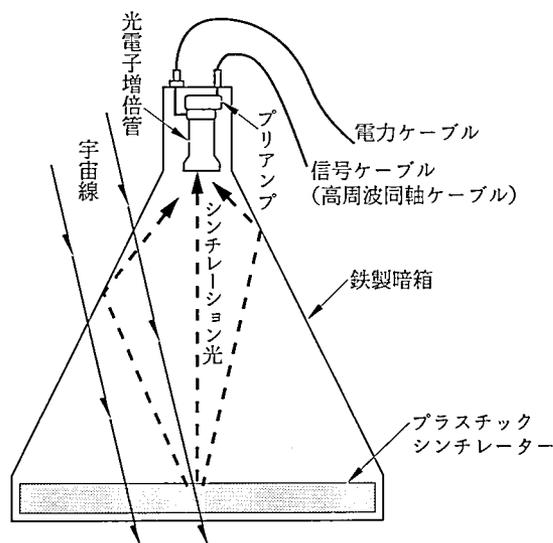


図2 シンチレーション検出器

cm高さ42cm)を用いている。光電子増倍管は光電面に入った弱い光を電気信号に変え、前置増幅器でインピーダンス変換と50倍の増幅をする。大きくなった信号は長い高周波同軸ケーブル(最大120m)を経て、観測室にある主増幅器へと送られさらに50倍増幅される。宇宙線粒子は1個の時もあれば 10^5 個も同時に入ってくる場合もある。このような $1 \sim 10^5$ の範囲のパルス波高を忠実に、しかも直線的に増幅しなければならない。このために対数増幅器というものを使用している。

今、図3のようなパルス V_0 、時定数 τ 、あるレベル V_1 を越す時間幅 T を持った指数関数波形があると次の等式が成り立つ。

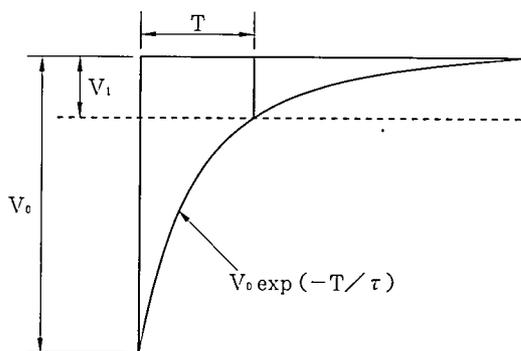
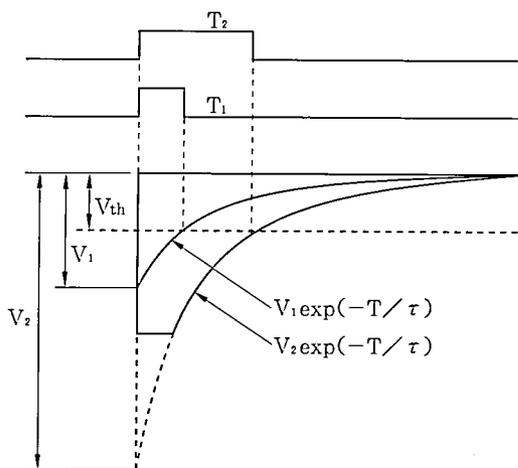


図3 対数増幅器によるパルス波高と粒子数の関係



$$\log(V_2/V_1) = (T_2 - T_1) / \tau$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

V_1 : 粒子数1個(N_1)に対するパルス波高値

V_2 : 粒子数 N_2 個に対するパルス波高値

τ : 時定数

T_1, T_2 : シュミットレベル(V_{th})を切るまでの時間

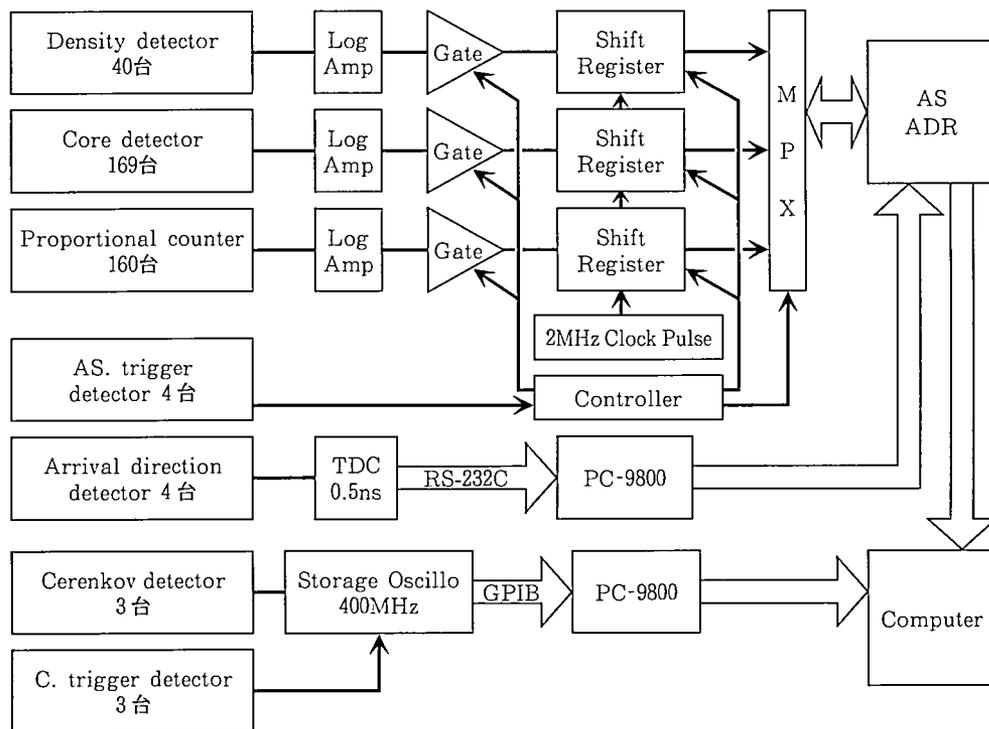
図4 波高値と時間の関係

ころに非常に多くの粒子が降ってくるため光電子増倍管の飽和や long tail、増幅器の飽和等検出器の dynamic range の限界が問題になる。そのため芯付近の密度を正確に測定する解決策として

1. 電磁成分の数を測定する場合、厚いシンチレータを使うと異常な粒子数を示すことがあるので薄いシンチレータ（厚さ2.5cm）を用いる。
2. 光電子増倍管に印加する高電圧は電流増幅率が直線内で最も低い-420Vから使っている。

このようにして大粒子数も直線的に検出できるようになる。

空気シャワー芯部付近の構造を精密に調べるため、0.25 m² シンチレーション検出器を1.53m間隔で縦横各13台ずつ合計169台を格子状に配置した（図5）。総面積は337 m²である。芯部用シンチレータは面積50cm×50cm、厚さ2.5cmのサイズであり最高波長感度は420 nm、シンチレーション効率率は50~60%である。光電子増倍管は浜松ホトニクス製R878型2インチヘッドオンタイプ、最高波長感度は420nm、印加電圧は直流電流増幅率の直線内で決定し-420V以上である。各検出器の調整は波高分析器を使い宇宙線1粒子を主増幅器の gain で調整する。宇宙線観測システムを図6に示す。



トリガー信号により全検出器が同時に作動し始め、各検出器からのパルス波高値を対数に比例したパルス幅（時間）へ変換する。そのパルス幅を2MHzのクロックパルスで計数し記録する。

図6 宇宙線空気シャワー観測システム・ブロック・ダイヤグラム

3-3. 角度検出器

空気シャワーの到来方向を正確に決めることで、超高エネルギーの粒子がどこで創られ、地球にやって来るかという宇宙物理の手がかりとなる。又その粒子の核反応を調べる際、天頂角分けにすることにより、空気シャワーの各段階での発達過程を空気層の厚さの変化を利用して行うことができる。大角度になるほど空気層は電磁成分の吸収層としての役割をはたし垂直方向の空気シャワーとは異なった観測が可能になる。このように空気シャワーの到来方向を決定することは、空気シャワー研究に不可欠である。

空気シャワーの角度検出方法はシャワーフロントが平面であることを利用し、3台以上の検出器をある間隔に置き検出器に粒子が到達する時間差を検出する。2台の検出器に粒子が入射する場合について考える。時間差測定に伴う各種の誤差は誤差の分布をガウス分布と仮定し、ゆらぎの幅を標準偏差で表すと、総合的な時間差誤差 σ_t は

$$\sigma_t^2 = 2\sigma_i^2 + 2\sigma_p^2 + 2\sigma_r^2 + \sigma_r^2$$

σ_i : シャワー面の厚さ

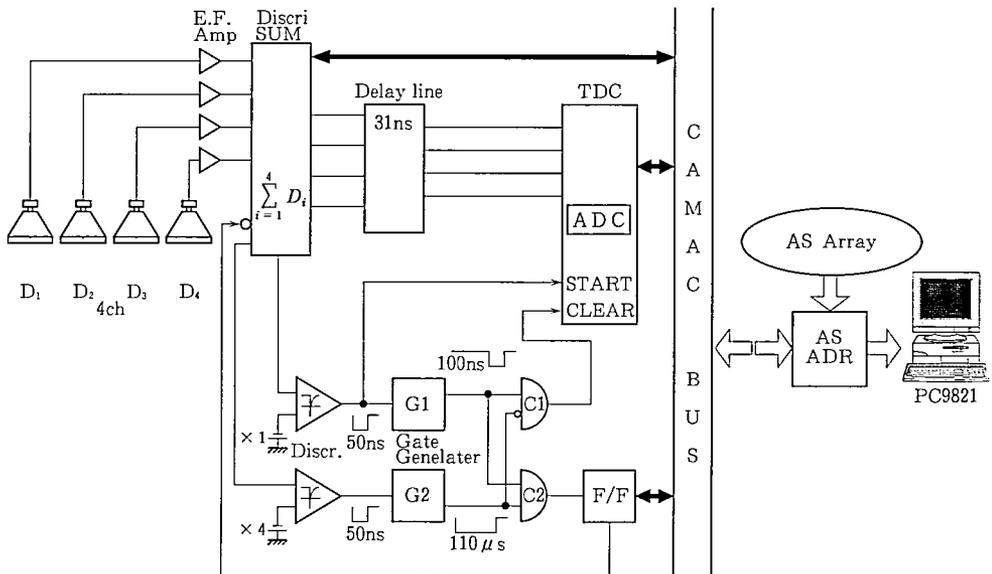
σ_p : 光電子増倍管中での電子の走行時間のゆらぎ

σ_r : トリガー回路のゆらぎ

σ_r : 記録方式によるゆらぎ

と表される。又、 σ_i 、 σ_p 、 σ_r は2台の検出器にそれぞれ独立に起こる。 σ_r により到来方向の決定精度が決まる。

角度検出器のブロック・ダイアグラムを図7に示す。角度検出器には応答時間の早い光



1. 最初の信号から50ns内に残りの3台から信号がない場合。150ns後にclear信号を出し、次のトリガー信号を待つ。
2. 50ns内に残りの3台から信号がある場合。各検出器からの時間差を13bitに変換し、1シャワー当たり100 μ sで処理が完了する。測定部の精度は0.1ns、時間差変換精度は0.5nsである。データ通信はRS-232C、9600bpsである。
3. 検出器間の距離10m、天頂角30°で角度精度は1°以内が得られた。

図7 角度検出ブロック・ダイアグラム

電子増倍管（浜松ホトニクス製R1828-01($Tr=1.3ns$)）を使用している。システム構成は標準規格のNIM/CAMAC モジュールを用い、CAMAC バスにパーソナルコンピュータ(PC-9801FA)を接続しデータコントロールをする。角度検出器からの信号はインピーダンス変換と増幅された後、デバイダーで二分され discricri 及び ADC へそれぞれ送られる。4 台の検出器のうちどれか 1 台から信号があったとき、TDC をスタートさせ、ADC のゲートを開くと同時に Gate & Delay 1 もスタートさせる。その後、150ns 以内に残りの 3 台から信号が来ないとき、即ち 4 台の検出器からの信号が coincidence しない場合、delay・パルスを出し作動中の TDC および ADC を直ちにクリアする。coincidence 信号がきた場合 discricri からカレント・サム出力が、ある一定のレベルを超えたとき出され、もう 1 台の Gate & Delay 2 をスタートさせる。すなわち Gate & Delay 2 は 4 台の検出器からの信号が coincidence したときのみスタートする。coincidence 信号によりスタートした Gate & Delay 2 は、幅110ns のブランキング・パルスを出し、すでにスタートしている delay・パルスをマスクし、TDC 及び ADC のクリア信号を出さないようにする。この間に、TDC の各チャンネルは Delay 回路を通過してきた信号によってストップが掛けられ数値（時間）に変換される。Gate & Delay 2 は TDC と ADC の動作が完了するまで110 μs のブランキング・パルスを出し続ける。全ての動作が完了すると取り込み用 discricri・ゲートを開け信号入力待ちとなる。

3-4. 比例計数管^{1),2)}

空気シャワーは空気の厚さと共にその粒子数を増やし、最大となりそして減衰していくと考えられる。このように遷移曲線を求めるには色々な高度で粒子数を観測しなければならない。しかし現実には問題が多く不可能にちかい。そこで空気の代わりに空気とほぼ相互作用の似た物質として水を使えば遷移曲線がそのまま空気の延長として観測できる^{3),4)}。例えば水の深さ 1 m は空気 1 km に相当する。

宇宙線の観測はますます大規模化しつつある。これに伴って大面積の検出器の必要性が増してきた。シンチレーション検出器より安価で大面積化が容易である検出器として、断面10cm×10cm長さ 2 m の建材用鉄製角型パイプにPRガス 1 気圧を封じ込めた比例計数管を大水槽の水中内深さ 2 m に設置してある。

3-5. チェレンコフ検出器

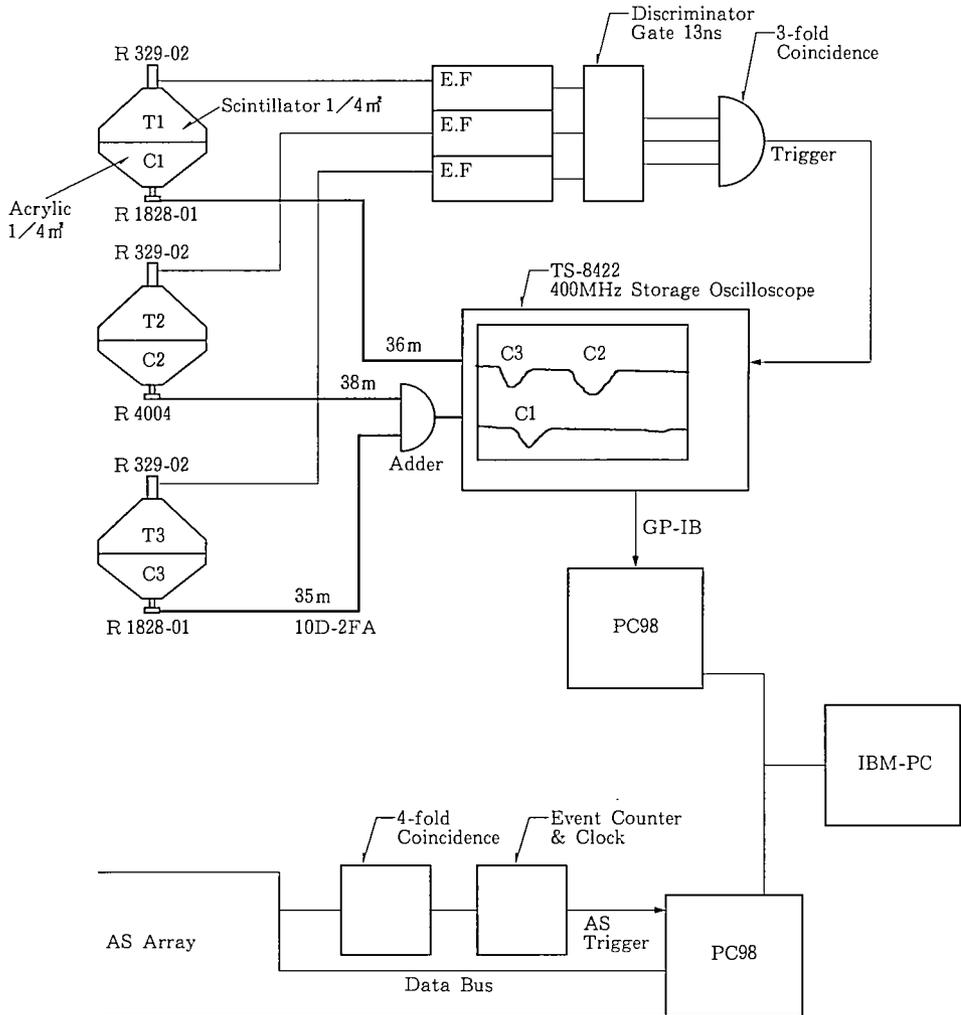
最近の速いエレクトロニクス技術を使うことで空気シャワー粒子の十数nsの到着時間分布の測定ができるようになった。コア付近 ($r < 10m$) に着目して、その時間構造を詳しく調べるには、さらに数倍速い検出器や回路系を使うことによりシャワー・フロントの厚みやその中の粒子数の分布状態を精度よく測定できる。

検出器としては乱反射による光のばらつきを無くするため容器内壁に黒色のラシヤ紙にサンドペーパーをかけ貼っている。UVアクリル板を使ったチェレンコフ検出器と高速タイプの光電子増倍管 (R1828-01、 $tr=1.3ns$)、減衰の少ない高周波同軸ケーブル (10D-SFA) を使用している。そして送られてきた電気信号をそのままの形で記録するスーパーストレージ・オシロスコープ (TS-8422、400Mz) を使用して得られたデータは GPIB インターフェースを介しパソコンに取り込まれる。

トリガー検出器は、チェレンコフ検出器に重ねて乗せ、三角形の形状で一辺が 8

m間隔で設置した。各トリガー検出器からの信号はE.F Amp、Discriminator、そして3-Hold Coincidence 回路を通った後トリガー信号となり、TS-8422型オシロコップのトリガーとなる。

チェレンコフ検出器光検出システムのブロックダイアグラムを図8に示す。



光電子増倍管から出ている暗電流パルスを用いたシステムレスポンス時間
 $Tr=1.35ns$ 、 $FWHM=2.15ns$ 。

図8 チェレンコフ光検出器ブロック・ダイアグラム

4. データのチェック及び換算

空気シャワー観測は長時間にわたって連続的に行われるため、各検出器が安定に作動しているかを調べることはデータの信頼性を保つために重要である。このためシンチレーション検出器の粒子数に対する直線性をきめ細かくチェックしている。観測データはコンピュータのメモリ上に記録され図9の形式で1例1例出力される。

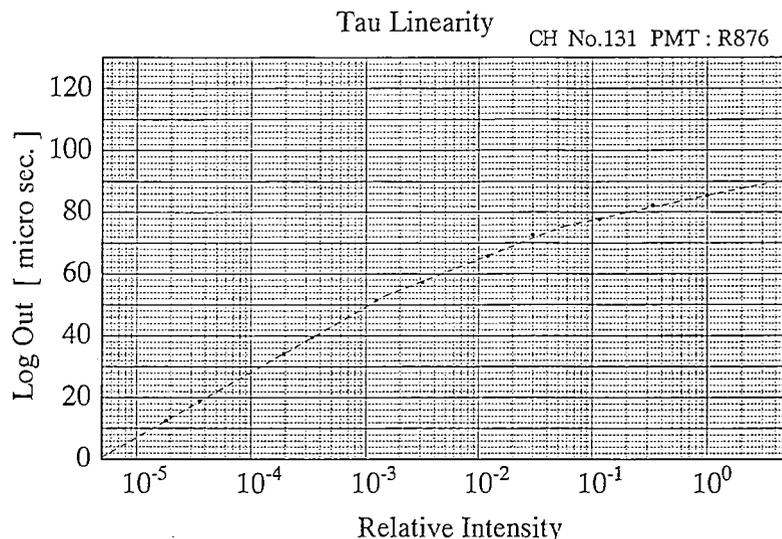
1. 1週間に一度田老観測所から送られてくるデータを使い全検出器の粒子密度スペクトラムから検出器の状態（時定数、シングルピーク、増幅率、ノイズ等の変動）をチェックしている。
2. 1ヶ月に一度シングルピーク以上のカウント数をスケーラでカウントし調整する。
3. 2ヶ月に一度オシロスコープによる時定数、波形の形、ノイズレベル等のチェックをする。
4. 1年に一度主増幅器のリニアリティー・チェック、波高分析によるシングルピーク・チェック、光パルサーによるリニアリティー・チェック等を行っている。

空気シャワー観測に用いられる増幅器は、その dynamic range を大きく ($1 \sim 10^6$) 取る必要があるため、対数特性を持った増幅器が主として用いられる。この場合、その対数特性がどの程度の精度で求まっているか常時監視しなければならないが簡単ではない。一つの方法は各検出器の粒子密度スペクトラム (図10) を調べることにより、その直線性をチェックする方法がある。これは宇宙線が等方的に一定の頻度で降ってくることを利用した方法であるが、大きい粒子密度までこの方法でチェックすることは頻度が少ないため期待できない。対数特性を持った増幅器 (Log Amp) のリニアリティー・チェックは光パルサーを使い $1 \sim 10^6$ の範囲まで測定する。

4-1. 粒子数換算の方法

リニアリティー特性の測定

発光ダイオードの光源を用いて、ニュートラルデンシティー・フィルタ (ND-filter) によりワイドレンジの光量に対する光電子増倍管の出力を測定している。減光比32 (Log = 0.5)、10 (Log = 1.0) の ND-filter を使い、ダイナミックレンジ6桁の光量に対する出力 (Log out) を調べる。図11にその例を示す。この直線の傾きを τ とする。



プラスチック・シンチレータの代わりに発光ダイオードを使った疑似光 ($tr=3ns$, パルス幅10ns) によるチェック。

図11 ライトパルサーによるリニアリティー・チェック

1 粒子の波高値測定

波高分析器 (PHA) を用いて、全方向入射粒子による各検出器の波高分布を測定している。これは図12に示すようなピークを持つ。1 粒子の波高値としてこのピーク電圧値を用いる。この電圧値に対する Log out はこのピーク電圧付近での Pulse の減衰時定数を測定し、これとディスクリレベルから算出する。

以上の2つのパラメータを用い、次式を用い ADR 値より粒子数に換算する。

$$D = \exp((ADR - T_s) / 2\tau) \quad (\text{detector}^{-1})$$

T_s : 1 粒子が入射したときの Log out

τ : リニアリティー直線の傾き

VFS = 64

2/ 1

6:44:25

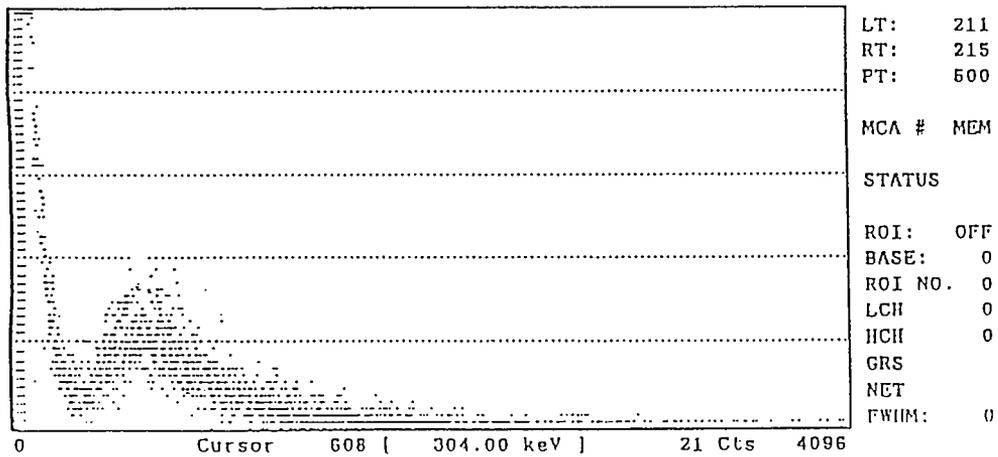


図12 波高分析器による宇宙線シングルピーク波形

4-2. コア位置の決定

169台のシンチレーション検出器上にコアが入った場合。一番粒子数が高く打った検出器を囲む数台の検出器の重心をもってコア位置を算出する。但し、コア付近の粒子数の fluctuation の影響を避けるために、各検出器の粒子数をその周辺の4台の平均値に置き換えて計算する。

最大粒子数を打った検出器が169台の外側にあった場合、周辺部に設置してある他の40台の検出器を使い重心計算によりコア位置を決定する。

4-3. 角度の決定

シャワーフロントを平面近似し、最小二乗法を用いて到来方向を決定する。

4-4. サイズ、エイジの決定

コア位置と角度より、そのイベントの横方向分布 (ラテラル分布) が描ける。これに NKG 関数を適合する事によりサイズ、エイジを求める。この方法は最小二乗法を用いる。重みには各検出器に入った粒子数に対するポアソン誤差と検出器の計測誤差20%を用い

ている。

5. 解析方法

観測された EAS から基本量として (1) 宇宙線到来方向 (天頂角 θ 、方位角 ϕ)、(2) サイズ N_e 、コアの座標 (X_0 、 Y_0)、エイジパラメータ S 、(3) 横分布 等がある。

解析手法として各種あるが我々が行っている一部を述べると次のようになる。

(1) 宇宙線到来方向 (天頂角 θ 、方位角 ϕ) の決定

到来方向は 4 台の角度検出器に到達した時間情報 (各検出器間の時間差) から検出器間の距離 d_i 、時間差を t_i とすると

$$t_i = d_i / c \quad c: \text{光速}$$

で表され、方向余弦を使うと

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1$$

という条件を持って

$$\sum d_i = (l \cdot x_i + m \cdot y_i + n \cdot z_i + c \cdot t_i)^2$$

が最小になるような最小 2 乗法の計算によって求める。

(2) サイズ N_e 、コアの座標 (X_0 、 Y_0)、エイジパラメータ S の決定

電子による電磁カスケードシャワーは電子の多重クーロン散乱のために横方向に広がる。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表わす量をモリエールユニット (R_m) と呼ぶ。田老 (北緯 39 度 45 分、東経 141 度 56 分、標高 200 m、平均気圧 988.25 hpa、平均気温 15°C) では 80.5 m である。カスケードシャワー中の電子の横方向分布は、西村、鎌田により理論化された N-K 関数を Greisen が使い易い形にしたものであり、NKG 関数と呼ばれ一般によく使われる。編み目のように設置された検出器からのデータと NKG 関数を比較することで総電子成分の数 N_e とシャワー軸の位置 (X_0 、 Y_0) が決定される。 N_e は空気シャワーの大きさを表し EAS サイズと呼ばれる基本的な量である。

全粒子が N_e であるシャワーの横方向の広がり分布、即ち軸から距離が R_i だけ離れたところの粒子密度を ρ_e とすると、NKG 関数⁶⁾ は次のように表せる。

$$\rho_e(R) = N_e / R_m^2 \cdot f(R/R_m)$$

$$f(r) = C(s) \cdot r^{(s-2.0)} \cdot (1+r)^{(s-4.5)}$$

$C(s)$ は規格化定数で、

$$C(s) = 0.366 \cdot s^2 (2.07 - s)^{1.25}$$

s はエイジと呼ばれシャワーの発達の度合いを表すパラメータである。 $s \sim 3t / (t + 2t_{\max})$ で与えられる。 t はカスケードシャワーの出発点からの距離であり、 t_{\max} はカスケードシャワーが最も発達する深さである。 $s < 1$ 、 $s = 1$ 、 $s > 1$ は、それぞれシャワーの発達段階、最も発達した段階、減衰していく段階を表している。

6. 予備実験の結果

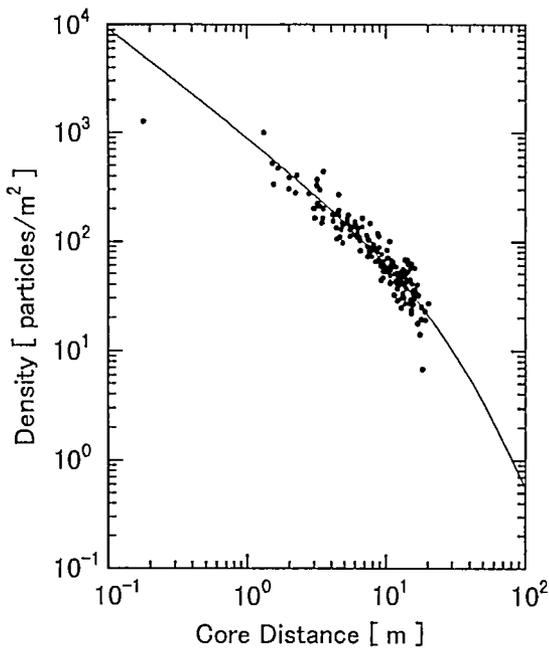
観測期間 1996年8月12日～9月7日 25日間

有効観測時間 578 時間

空気シャワー・トリガー・イベント数 5968例

コア・イベント数 1156例

シャワー粒子の横分布は空気シャワー現象を特徴付ける基本パラメータであり、その性質を知る上で非常に重要となる。この実験で得られた空気シャワーの横分布の1例を図13に示す。図中の●印は各検出器により得られた粒子数密度を示す。又、曲線はこの横分布をNKG関数で適合したとき、最も良く適合するNKG関数を示したものである。



Event No. 0057-0162 96/08/12 12:32:06

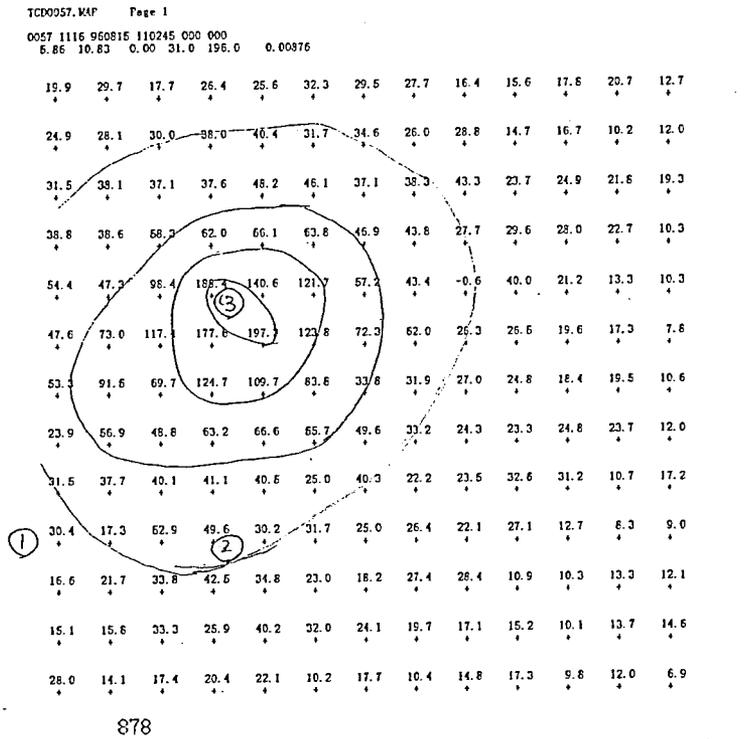
$N_e = 1.881 \times 10^5$, $s = 1.00$, $k_{ai} = 0.01374$

$\Theta = 12.5^\circ$, $\Phi = 168^\circ$, $k_{ai(\text{direction})} = 0.00472$

$G_x = 4.77 \text{ m}$, $G_y = 3.08 \text{ m}$

図13 横方向分布とNKG関数の適合最小二乗法によるフィッティング

空気シャワー中心コア付近の構造⁶⁾及び時間構造を知る上で粒子数分布と波形情報は重要となる。図14、図15は、コア検出器郡の中に空気シャワーが入った現象の例でありサイズがそれぞれ10°代と10°代であり、コア構造が良く現れている。また角度検出器より得られたデジタル情報から求めた角度(θ 、 ϕ)とチェレンコフ検出器からの波形時間情報から算出した値が精度良く一致している。このことはシャワーの到来方向決定精度が非常に上がったことを示している。さらにチェレンコフ検出器からのパルス信号はシンチレーション検出器に比べ分解能が数倍良いことが分かった。



Ne = 1.85×10^5
 $s = 0.85$
 X, Y (5.86, 10.8)
 AS ($\theta = 31^\circ$, $\phi = 195^\circ$)
 Cherenkov ($\theta = 31^\circ$, $\phi = 195^\circ$)

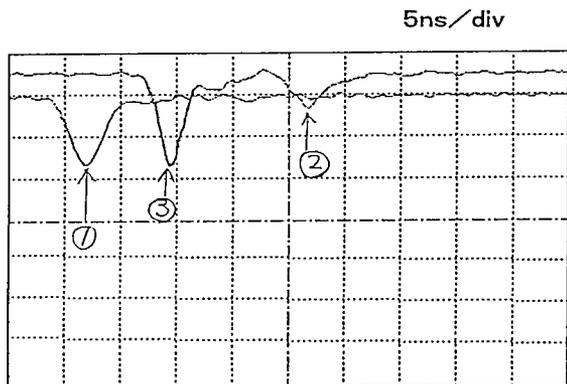
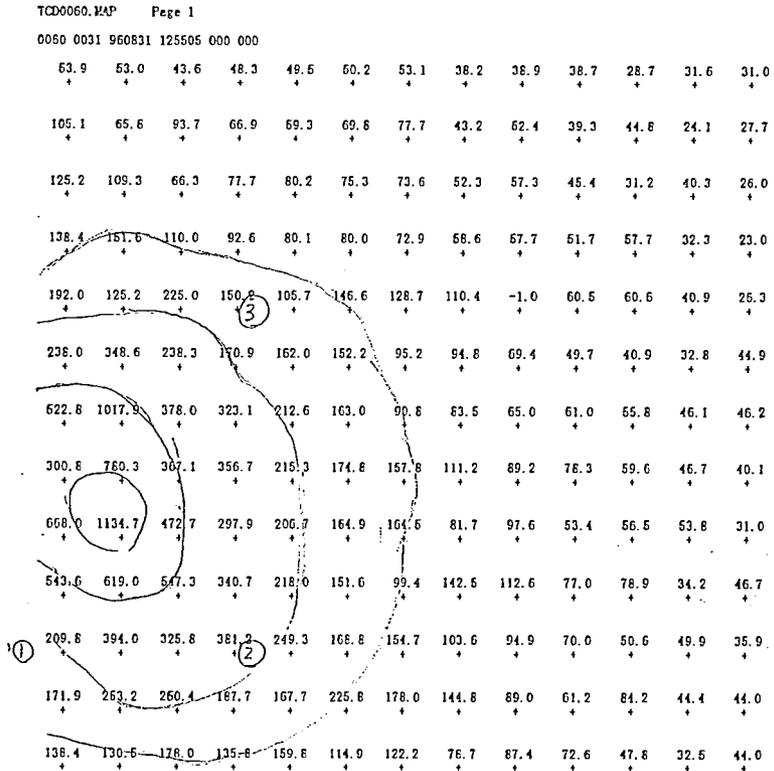


図14 検出器の中心部にシャワーの中心が落ちた時の粒子数分布とチェレンコフ検出器による到着時間波形



28

Ne = 1.04×10^6
 s = 0.9
 X, Y (1.49, 6.03)
 AS ($\theta = 15^\circ$, $\phi = 131^\circ$)
 Cherenkov ($\theta = 14^\circ$, $\phi = 128^\circ$)

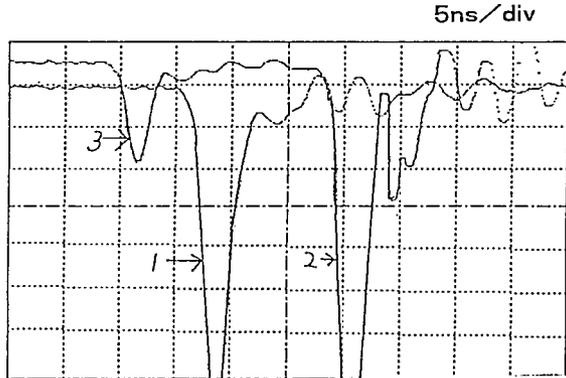


図15

謝辞

本研究に当たり宇宙線観測所の建設、維持、運転及びデータの郵送などの業務に多大な協力をしていただいた田老セミナーハウスの管理人である松館忠一氏、佐々木市武氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 佐久山博史：大面積用検出器：明星大学研究紀要 No.10, p.33, 1974
- 2) 佐久山博史 他：大面積用比例計数管の性質：明星大学研究紀要 No.12, p.23, 1976
- 3) 佐久山博史 他：田老宇宙線観測所における空気シャワー観測：明星大学研究紀要No.24, p.19, 1988
- 4) H.Sakuyama et al.,Proc. of the 20th ICRC, Moscow, Vol.9(1987) 218.
- 5) K.Greisen : Progress in Cosmic Ray PhysicsⅢ (ed. by J.G. Wilson, 1956) 27.
- 6) H.Sakuyama et al.,Proc. of the 24th ICRC, Roma, Vol.1(1995) 325.