

高エネルギー・一次宇宙線重粒子の観測
—HECRO 81 テレスコープによる測定—

深田 豊**・葉田野義和**・小林 行泰***
近藤 一郎*・宮島 光弘†・野間 元作**
尾田 汎史#・斉藤 威**・桜井 敬久**

(1985 年 6 月 20 日受理)

Observation of High Energy Cosmic Ray Heavy Particles.
—Results of Observation by HECRO 81 System onboard B 50-17—

By

Y. FUKADA, Y. HATANO, Y. KOBAYASHI, I. KONDO
M. MIYAJIMA,
M. NOMA, H. ODA T. SAITO, and T. SAKURAI

Abstract: Observation of high energy (>8 Gv) cosmic ray heavy particles has been made by HECRO-81 system onboard B 50-17 balloon on Sept. 30-Oct. 1, 1981. The detector system consists of two Cerenkov detectors, one plastic scintillation detector and 2 pairs of crossed MPPC (multi pipe proportional counters). It has a geometric factor of $6000 \text{ cm}^2 \text{ str.}$ for triggering coincidence between solid Cerenkov and plastic scintillation detector. Information on the position of particles passing through the telescope was obtained from the output of MPPC's with an accuracy of about 1 cm, for a part of the solid angle with the geometric factor of $3300 \text{ cm}^2 \text{ str.}$ About 126,000 events were

* 東京大学宇宙線研究所, 宇宙研宇宙圏研究系客員教授

** 東京大学宇宙線研究所

*** 東京天文台

† 高エネルギー物理学研究所

** 山形大学理学部

神戸大学理学部

recorded by this system during 28 hours while the atmospheric depth of the balloon was between 9 to 10 g cm⁻².

The design and performance of the detector system onboard the balloon and data recording system at ground are described. The observed pulse heights and track position information are organized into 14-30 words of 21 bits each, and sent to ground via 1.68 GHz transmitter with 16 Kbps PM/PCM subcarrier. Once every seconds, monitor information including the attitude of gondola, atmospheric pressure, temperature, high voltage monitor and counting rates of each detector was sent to ground through same telemeter channel with 21 words of 21 bits each. Received signal was recorded in digital cassette magnetic tapes after demodulation and decoding by a micro computer. Also operating conditions of the onboard system was monitored by CRT displays using another micro computer.

The chemical abundance of the primary cosmic ray particles heavier than Boron was derived from the observed pulse height distribution in the plastic Cerenkov detector. The results from all events taking account of the path length distribution are compared with that derived from selected events in which the path length in the detector was determined from MPPC data. Both results were found to be in good agreement with other results previously obtained. The dependence of the chemical abundance on the particle energy was also studied. The information on the particle path from MPPC is used to determine the incoming direction of the particle in geographic coordinate. This in turn can be used to fix the lowest rigidity for a particular particle from the knowledge of the geomagnetic cut off rigidity for this direction above Sanriku Balloon Center. There appears some indication of higher flux of even charged nuclei relative to the odd charged nuclei at higher cut off rigidity.

は じ め に

一次宇宙線粒子の化学組成、エネルギー分布等の測定結果は、宇宙線の起源、加速機構、伝播機構等の解明に必要な多くの情報を与えるものである。一次宇宙線を構成する各種の原子核の大部分は、天体の熱核反応によって合成が可能で、宇宙線の起源に存在し得るものが起源の近傍乃至はその周辺で宇宙線エネルギー（通常 $>10^7$ eV/核子）に加速されたもの（一次成分と呼ぶ）である。これに対して加速された原子核が宇宙空間を伝播して地球近傍に到達する間に、宇宙空間の物質との衝突を起しこれから生じたものが二次成分と呼ばれる。この一次成分、二次成分が宇宙線の持つ広いエネルギー範囲（ $10^6 \sim 10^{20}$ eV）でその存在比をどの様に変化させるかを調べることによって宇宙線が生成されてから地球周

辺へ到達する迄に通過した物質質量が推定出来る。又特定の元素や、同位元素（例えば Be^{10} の様な長寿命放射性核種）の存在比の測定結果から宇宙線がその起源から地球へ到達する迄の時間を推定出来る。この両者を総合することにより宇宙線の起源、加速機構、伝播機構の夫々についての手掛りが得られる。

以上述べた目的の為に、一次宇宙線特にその重い原子核について、化学組成や同位体比の測定が数多く行なわれて来た。この研究の為に宇宙線が大気圏に入ってきて、大気中の原子核と衝突する以前の状態で測定が必要で、大気球もしくは科学衛星等の飛翔体に搭載した機器が使用される。初期には原子核乾板が主として用いられたが、その後各種の検出器の組合せによる Counter Telescope 方式が用いられている。最近の主として科学衛星、空間探測器等に搭載された検出器によって、特に低いエネルギー領域 ($10^6 \sim 10^9 \text{ eV}$) では、同位元素比を含め精密な結果が得られている [1]。

しかし 10^9 eV 以上では、統計精度の高いデータが少なく、HEAO-3 による測定結果が得られているが、更に高いエネルギー領域での加速・伝播機構を議論するにはまだ十分とはいえない。

我々はこの様な背景の下でより高いエネルギー領域での宇宙線の化学組成、エネルギー分布等の精密測定を計画した。先ず 1978, 80 年に 2 回にわたって MICS (Multi Ionization and Cerenkov System) のプロトタイプを用いた実験を行なった。この結果については既に報告 [2] を行なっているが、液体・固体チェレンコフ検出器によって 10^{10} GV 以上の粒子の化学組成を求める事に成功した。この結果に基いて次のステップとして更にエネルギー領域を高め、又測定精度の高い検出器システムの設計と開発が始められた。

この検出器システムとしては、最終的には 100 GV 以上の領域を目標としているが、その為には大型の検出器を必要とするので第 1 歩としてトリガー用のテレスコープを開発しその性能試験を兼ねて $>10^{10} \text{ Gv}$ 領域の化学組成の測定を行なう事とした。このシステムは HECRO (High Energy Cosmic Ray Observation) と呼ばれ今回の実験は 1981 年 9 月 30 日-10 月 1 日に B 50-19 の気球に搭載して行なったもので HECRO 81 と呼んでいる。以下にこの実験の経過と観測結果について報告する。

1. 検出器システム

(a) 概 要

HECRO-81 検出器システムは図 1 に示す構造で、フライト時にはこの外周を 10 cm 厚のスタイロフォームで囲み、又底部には高さ 20 cm の足をつけたので全体の大きさは約 $1.7 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ となり、バラストを除いたシステムの重量は 291 kg であった。この検出器システムは次の 4 種類の検出器を組合せて構成している。

(1) 液体チェレンコフ光検出器 (LIQ)

LIQ は直径 80 cm 、厚さ 1.5 cm の容器に液体輻射体（フロロカーボン E-2）を入れ、上部に $50 \mu\text{m}$ 厚のマイラー窓を貼ったものを直径 90 cm 高さ 46 cm の気密容器の底部に固定してある。気密容器の内面は BaSO_4 を主体とする高い反射率を持つ塗料が塗られ側面には 12 本の光電子増倍管（浜松フォトニクス・R 877）が取り付けられている。

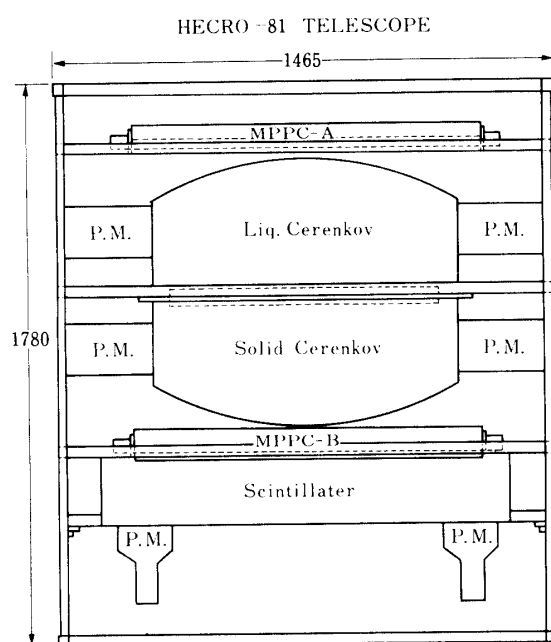
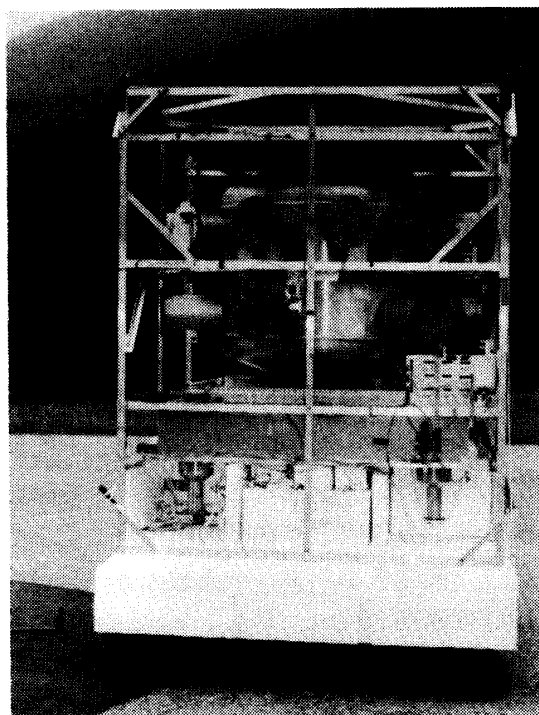
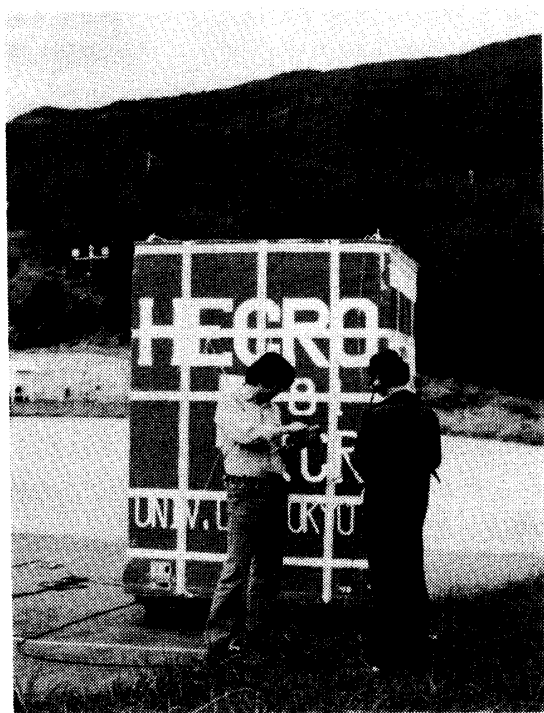


図1 HECRO-81 検出器システムの配置図 (寸法は mm)



(2) 固体チェレンコフ光検出器 (PLS)

PLS は直径 80 cm, 厚さ 1.15 cm の波長変換剤 (Bis MSB 重量比 10^{-4}) 入りのアクリル板を輻射体として LIQ と同様の気密容器に入れてある。こちらは側面に 8 ケの光電子増倍管を取付けて輻射光を電気信号として取出す。

(3) シンチレータ検出器 (SCI)

SCI は直径 100 cm, 厚さ 0.7 cm のプラスチック・シンチレータを 120 cm × 120 cm 高さ 20 cm の軽量の暗箱に入れたものである。暗箱の内部は矢張り反射剤が塗られその 4 隅には検出器を直接視野に入れない形で光電子増倍管が取付けられている。

(4) 多重管型位置検出用比例計数箱 (MPPC)

粒子の通過位置を検出する為に MICS では他の検出器システムと同じ気密容器に入れた多重線比例計数管を用いた。しかしこの方式では面積を大きくすると同時にその重量は格段と重くなり実用的でない。そこでより軽量の検出器として 0.4 mm 厚 1 cm 角のアルミパイプを使用した多重管型比例計数箱を開発して使用した。MPPC は 1 cm の精度で粒子の通過した位置を検出出来るもので上下に夫々 2 層 (X, Y 夫々 1 ケ) 計 4 層を設置した。

これらの検出器は図 2 に示す配置となっており、このうち PLS と SCI とによって定まる面積・立体角 ($6049 \text{ cm}^2 \cdot \text{str}$) を通過する粒子をデータ取得のトリガーに用いている。LIQ 及び MPPC のデータはこのトリガーパルスに同期して取得する方法となっている。LIQ

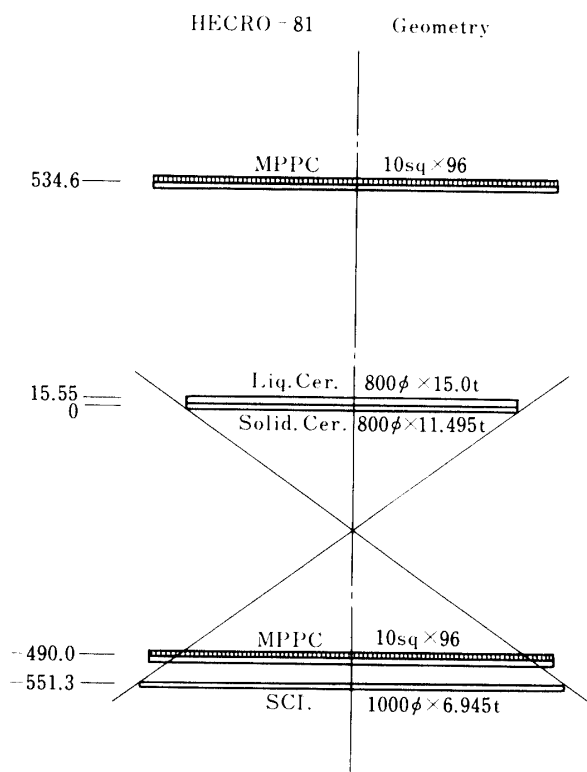


図 2 HECRO—81 検出器システム・各検出器の諸元と相対位置

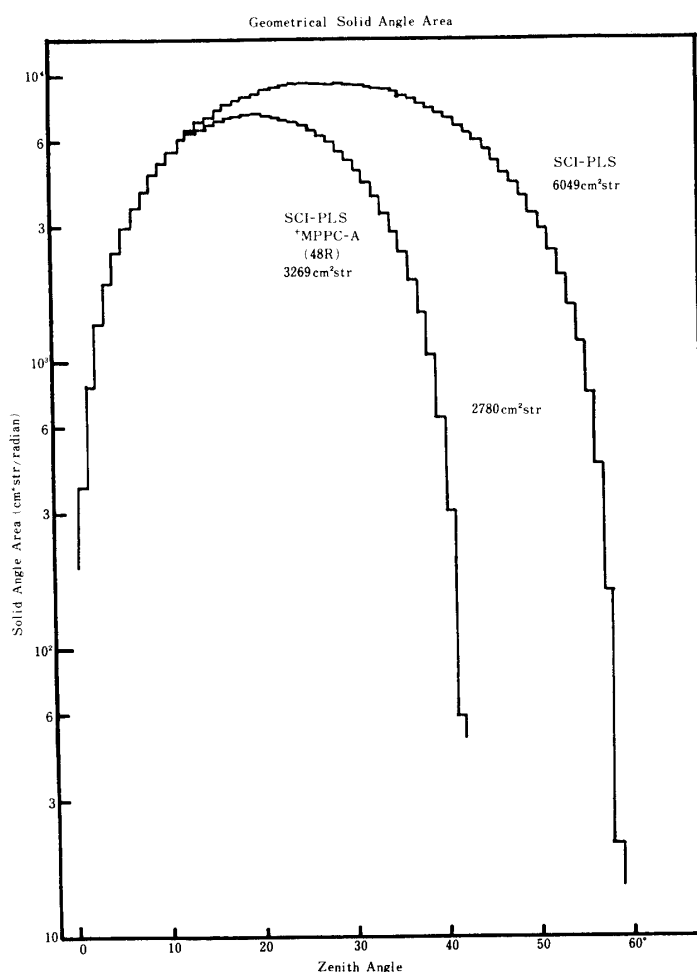


図3 HECRO—81 検出器の立体角・面積 (SQ) の天頂角分布 (計算値)

と PLS を気密容器に収容した (主として LIQ 輻射体の密封の困難さによる) ので上部の MPPC と PLS との間隔が広くなり従って MPPC 迄含めると面積・立体角は 3269 cm²str となり, 全体のイベントの約 55 % しか飛跡が定まらない。(図 3)

気球に搭載した検出器からの信号は, 機上データ処理装置によって収録され, 地上へは 1680 MHz のテレメータを通じて送信された。送信に当っては 16,384 Hz の PCM 位相変調方式を使用し, 1 つのデータは 1 語 21 ビットで 13~37 語の可変長形式である。データには 3 種類あり, 1 秒に 1 回送られる PC データ, テレスコープを通過した粒子のトリガーによる PH データ, 更に地上からのコマンドにより行なわれる波高校正用の CAL データである。

(b) 検出器の性能, 特長

LIQ, PLS のチェレンコフ光検出器については, MICS で既に実績のあったものを大型化したものである。粒子の通過位置による受光量の非均一性を出来るだけ減少するため, 容器の周囲に 120° おきに置かれた光電子増倍管 (PM) 3 箇の出力を 1 組として 1 ケの電荷量増幅器 (CSA) に入力する。従って LIQ は 4 ケ, PLS は 2 ケの波高情報を与える事となる。SCI についても四角形の容器の対角線上の 2 ケの PM を 1 組として 1 ケの CSA に入力し従って 2 ケの波高情報を得る。PM 1 組の出力を PM の陰極からの光電子数に換算すると LIQ, SCI で単荷電の高速粒子 ($n\beta \gg 1$) について夫々 3 ケ, 20 ケと推定される。 n (屈折率) は LIQ で 1.26, PLS で 1.49 で, チェレンコフ光を出す臨界ガンマ係数は夫々 1.9, 1.5 となる。 $n\beta \gg 1$ の粒子の出す光量の $1/2$ になる荷電当り運動量は夫々 4, 2.5 GV となるが三陸上空の地磁気切断運動量は 8 GV 以上であるので一次宇宙線粒子についてはほぼ荷電 (z) の 2 乗に比例した光量が得られる。

SCI は今回始めて使用したが, チェレンコフ検出器に比して 1 桁以上大きい発光量を有するので, トリガーに使用する事が極めて容易である。チェレンコフ検出器と異なり臨界エネルギーがないので, 低エネルギー粒子による大きな信号が混入する恐れがあるが, 一次宇宙線についてはほぼ z^2 に比例した光量が得られる。従って PLS と組合せてトリガーに使用すると共に, 波高の情報から z を決定する事に役立つ事が立証された。

MPPC については, テレスコープを通過する粒子の飛跡を決定し, 各検出器内の飛跡長による波高の変化を補正するのに不可欠なものである。しかし今回の様に大きな面積のものを限られた重量 (一層 10 kg 位) で実現する方法として多重管型のものを開発した。1 本の比例計数管は 1 cm 角のアルミパイプで, その中心に径 50 μm の金メッキ・タングステン線を約 210 g の張力で張ってある。この芯線の一端は 500 M Ω の抵抗を通じて高圧電源 (1600 V) に接続し, 他方は 470 pf の高耐圧コンデンサを通じて波高弁別回路に接続されている (図 4)。波高弁別回路は $z \geq 3.6$ の粒子が管を垂直に通過した時に幅約 20 μsec のデジタル・パルスを出力するものである。従って粒子の飛跡は ± 0.5 cm の精度で定める事が出来る。特に z の大きな粒子については, 検出器, 検出器容器等を通過する際に 2 次電子に比較的大きなエネルギーを与えて δ -ray を発生し, これが真の飛跡以外に信号を出す確率が高くなる。しかし実測結果によると $z \geq 20$ の粒子でも最大の広がり は 4 cm 程度で, MPPC データの統計的処理により飛跡の決定精度は $z \geq 20$ に対しても ± 1.5 cm 程度となった。(詳細は文献[3]に発表)。

(c) 機上データ処理の詳細

各検出器からの信号は図 5 に示す電子回路によってデータにまとめられる。波高信号については図 6 に示す様に 2 段階の増幅度 ($X40$, $X10$) の増幅器の出力を信号の大きさによって切りかえて 12 ビットの波高分析器 (ADC) に入力し出力の上位 10 ビットを取出した。従って全体では 4096 チャネルの波高分析に相当した情報が LIQ (4), PLS 及び SCI (各 2) 計 8 チャネル得られる。この波高情報はトリガー信号 (宇宙線イベント又は校正信号) によって取得されるが, これと同時に MPPC の中で信号のあった WIRE の位置情報が 8 本を 1 組として 1 層 4 組迄得られる。この他にゴンドラの方角を知る GA (X , Y 2 組)

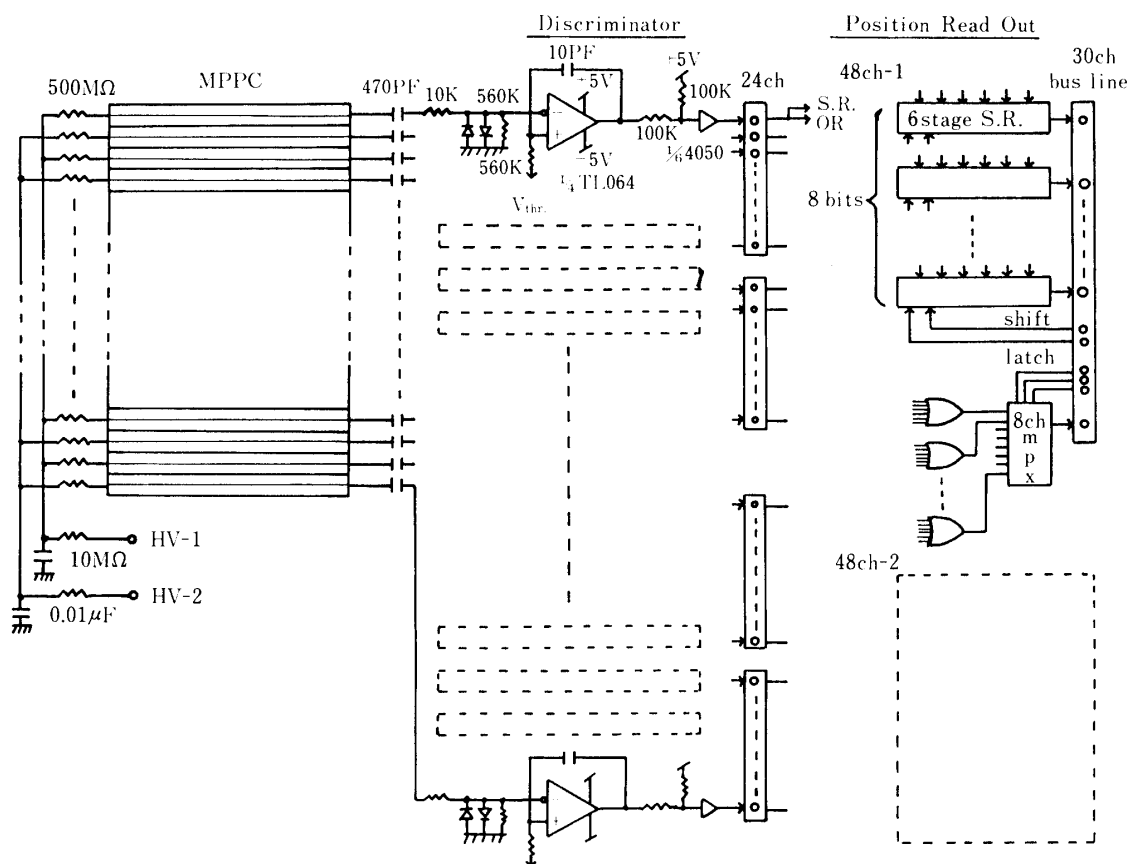
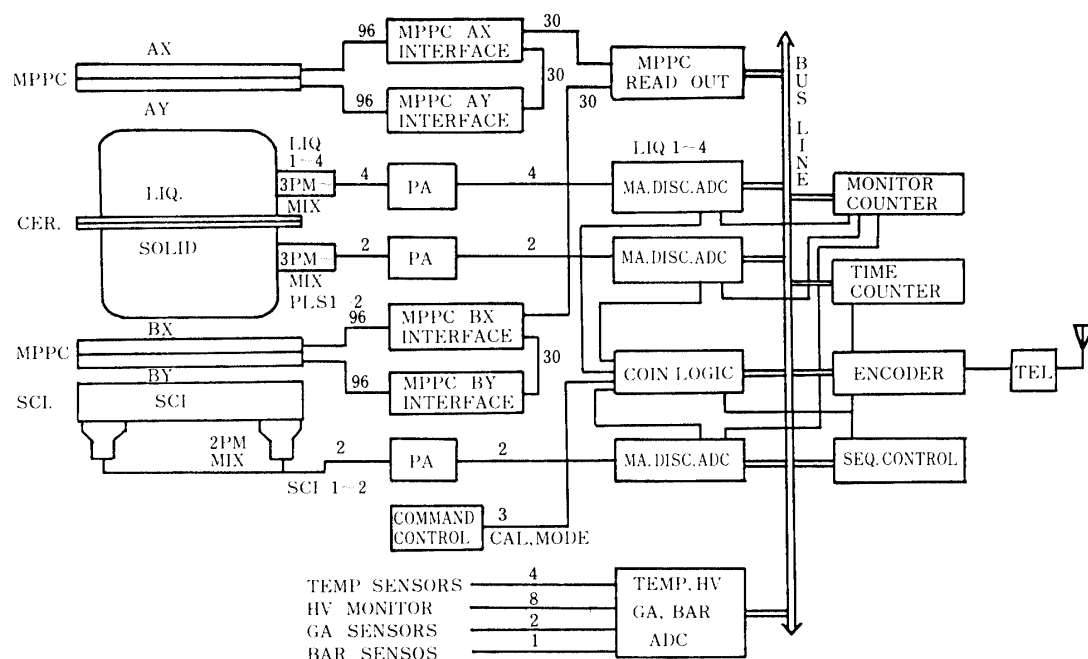


図4 MPPC システムの詳細図。左側が高圧の供給端，中央が波高弁別回路でMPPCの中に装着されている。右側が位置信号の読出し，カウントのモニターの為のインターフェース回路である。

のデータ，機上時刻データ並びに各検出器の信号がディスクリを越えたかどうかの COIN ID を含めたものを PH データとして図7に示すフォーマットに編集して地上へ送信した。各語には5ビットの WORD・ID がついており地上でデータのシーケンスがチェック出来た。

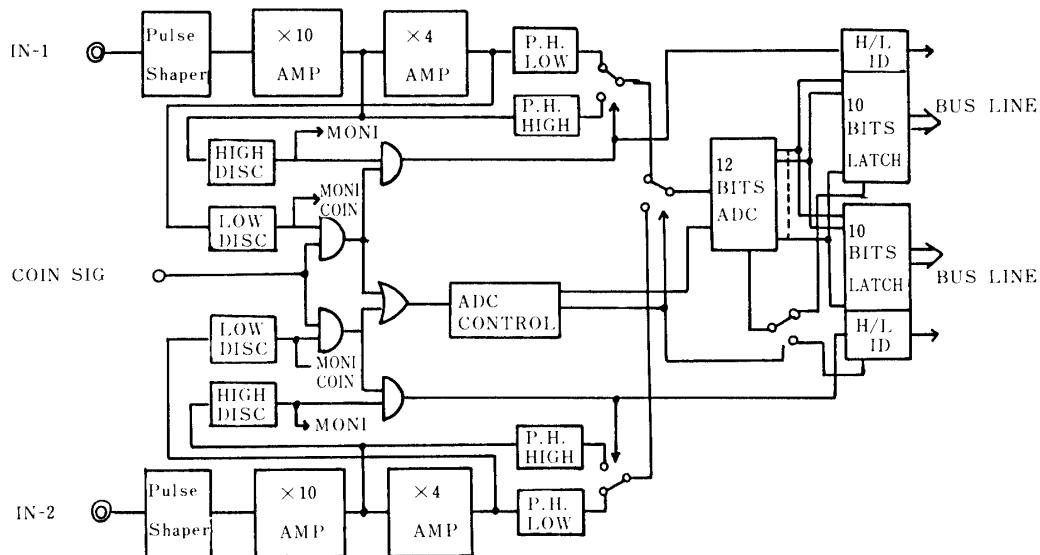
検出器の感度等の変化をモニターする為，光ダイオードを用いた較正信号発生器を LIQ, PLS, SCI の容器の中央に取り付け，地上からのコマンドで1/8秒間隔で8段階の信号を発生させる様にした。MPPCについては夫々の中心に微量の α 線源をつけてCAL時にはこの信号の有無をチェックする方式を使用した。データの取得は通常のPHデータと同じ形式となる。

気球搭載機器全体の状態をモニターする為に，毎秒1回図8に示すフォーマットに従って21語のPCデータを地上へ送信した。この中に含まれるものは各検出器の計数値(LowとHigh夫々のディスクリを越えた信号)，検出器間の同時計数，MPPC(6本を1グルー



HECRO-81 BLOCK DIAGRAM

図 5 電子回路ブロックダイアグラム



MA-DISC-ADC CIRCUIT BLOCK DIAGRAM

図 6 波高分析用の増幅器、波高弁別、AD 変換回路の構成

HECRO-81 TELEMETER FORMAT

1. PH (EVENT/CAL) DATA

ITEM	% _H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15									
START ID	1	1	1	1	0	0	1	E/C	PSD MODE	COIN ID								L1	L2	L3	L4	P1	P2	S1	S2	
TIME, GA	1	1	1	1	0	1	TIME 1 (0-2047sec)																			
	1	1	1	1	1	0	TIME 2			GA-X																
	1	1	1	1	1	1	TIME 3			GA-Y																
Liquid Cerenkov	1	0	0	0	0	0	L/H	Liq. Cer-1 (PH)																		
	1	0	0	0	0	1	L/H	Liq. Cer-2 (PH)																		
	1	0	0	0	1	0	L/H	Liq. Cer-3 (PH)																		
	1	0	0	0	1	1	L/H	Liq. Cer-4 (PH)																		
Plastic Cerenkov	1	0	0	1	0	0	L/H	Pls. Cer-1 (PH)																		
	1	0	0	1	0	1	L/H	Pls. Cer-2 (PH)																		
Scinti Detector	1	0	0	1	1	0	L/H	Sci. Det-1 (PH)																		
	1	0	0	1	1	1	L/H	Sci. Det-2 (PH)																		
MPPC Wire Position	1	0	1	0	0	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	PSD-AX		≤4W PSD MODE=0 ≤12W PSD MODE=1														
	1	0	1	0	1	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	PSD-AY		〃														
	1	0	1	1	0	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	PSD BX		〃														
	1	0	1	1	1	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	PSD-BY		〃														
END ID	1	1	1	0	0	0	1	E/C	PSD MODE	S/L	0	E/C	0	S/L	0	E/C	0									

E/C : EVENT : 0 CAL : 1 CAL時8 data/sec

TIME 1 : in units of sec

TIME 2 : in units of 2,048sec

TIME 3 : in units of 16,384sec

L/H : Low PH (High gain) : 0

High PH (Low gain) : 1

図7 PH, CAL データのテレメータ形式. MPPC のデータの語数は信号のあるグループの数によって変化する.

HECRO-81 TELEMETER FORMAT

2. PC (MONITOR) DATA

ITEM	C/H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
START ID	0	1	1	1	0	0	0	E/C	PSD MODE	TEMP/BARO (8MPX)							
TIME, GA	0	1	1	1	0	1	TIME1 (0-2047 SEC)										
	0	1	1	1	1	0	TIME 2			GA-X							
	0	1	1	1	1	1	TIME 3			GA-Y							
Liquid Cerenkov	0	0	0	0	0	0	COIN-1 (Pls-Sci) ALL 1			Liq. Cer-1 (PC)							
	0	0	0	0	0	1				Liq. Cer-2 (PC)							
	0	0	0	0	1	0	COIN-2 (Pls-Liq)			Liq. Cer-3 (PC)							
	0	0	0	0	1	1				Liq. Cer-4 (PC)							
Plastic Cerenkov	0	0	0	1	0	0	COIN-3 (Sci-Liq)			Pls. Cer-1 (PC)							
	0	0	0	1	0	1				Pls. Cer-2 (PC)							
Scinti Detector	0	0	0	1	1	0	COIN-4 (Pls- Sci) OR			Sci. Det-1 (PC)							
	0	0	0	1	1	1				Sci. Det-2 (PC)							
MPPC-A	0	0	1	0	0	0	Li-1HD(PC)			PSD-AX-1 (PC) (8MPX)							
	0	0	1	0	0	1	Li-2HD(PC)			PSD-AX-2 (PC) (♀)							
	0	0	1	0	1	0	Li-3HD(PC)			PSD-AY-1 (PC) (♀)							
	0	0	1	0	1	1	Li-4HD(PC)			PSD-AY-2 (PC) (♀)							
MPPC-B	0	0	1	1	0	0	PI-1 HD(PC)			PSD-BX-1 (PC) (♀)							
	0	0	1	1	0	1	PI-2 HD(PC)			PSD-BX-2 (PC) (♀)							
	0	0	1	1	1	0	Sc-1 HD(PC)			PSD-BY-1 (PC) (♀)							
	0	0	1	1	1	1	Sc-2 HD(PC)			PSD-BY-2 (PC) (♀)							
END ID	0	1	1	0	0	0	0	E/C	PSD MODE	VOLT (8MPX)							

WORD FORMAT 21BITS/WORD 16,384 BITS/SEC 1.282 msec/word

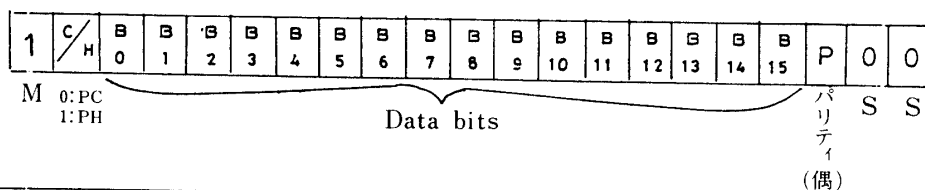


図 8 PC データのテレメータ形式

下部に示したのはテレメータのビット構成

ブとする)の計数, 高圧電源電圧, 各部の温度及び気圧計データを含んでいる。このうち一部のデータは8秒の周期で Multiplex してデータの語数を減らしてある。

機上データ処理回路のうち AMP-ADC-DISCR1 は2チャンネルの入力に対して1つの ADC を用いる方式を用い, 2枚のプリント板を1組として使用する設計でパターン化した。又 MPPC の信号処理も1層96本を2枚のパターン化したプリント板で行ない, これとメイン回路とは30本の平行線ケーブルでバス方式で接続した。メイン回路はすべて22ピン両面のプリント板16枚で構成され, テレメータへ出す信号は16ビットのバス・ラインによって順次読出された後並直列変換され, 位相変調信号としてテレメータ送信器に送られた。PH, PC 又は CAL データの送られていない間は一定の位相(0)の変調信号が出力される。

テレメータ信号は, 地上からの測距が行なわれている時間(上昇時1分間隔, 水平飛翔時10分間隔で約1秒間)は測距信号に切替えられるのでこの間のデータは取得出来ないがこれ以外の時間には観測データの送信に専有し, 最大780語(約30イベント分)/秒のデータが取得可能であった。飛翔前の見積りでは毎秒2~3ケの PH データがある見積りであったが実際は平均10ケ/秒のデータが送られて来た。この変化は一部検出器のゲインの設定や波高弁別器レベルの設定が設計通りでなかった事による。従ってデータ取得に対しては20%程度の dead time が生じ, 最終結果に対しては補正を必要とする。

(d) コマンド信号による制御

MPPC はその構造上芯線が加速度により振動して管壁に接触する恐れがあったので, 放球時には高圧電源を切り適当な時間に4ケの電源を1ケ宛 ON する為に4系統のコマンドを使用した。又信号処理の方式として(i) COIN を取る検出器の組合せを PLS-SCI から PLS-LIQ に変更する。(ii) MPPC の1層当りの最大データ数を4ケか12ケにする。(iii) CAL モードに移行して較正データを取るの3種類のコマンドを用意した。実際には(iii)のコマンドのみを使用し(i)(ii)はテスト的に使用したに過ぎない。

(e) 電源装置

回路系の電源はリシウム電池(単電池換算108ケ)の出力を6系統の定電圧回路を通して供給しており, 平均の消費電力は約5Wである。高圧電源は LIQ 2ケ, PLS, SCI 各1ケ, MPPC 4ケの DC-DC 変換型の安定化電源を用い, 夫々リシウム電池6直列×2並列計96ケを使用し1ケの電源当り約40mAの消費電流を必要とした。GA センサーは宇宙研から供給された Flux-gate 型のもので, X, Y の2軸に取付け夫々リシウム電池5ケ並列で計10箇所を使用した。

2. 飛揚実験とデータ取得

HECRO-81 の観測機器を搭載した B50-19 は, 1981年9月30日午前6時53分に三陸大気球実験場より放球された。気球は午前8時40分頃, 約32km(~9mb)の高度に到達して水平浮遊に移り, その後日没時の下降と翌朝日出時の上昇とで±2kmの高度変化はあったが, この高度を保ち徐々に東方へ流された。10月1日午後1時25分 SBC の東北東約700kmに達し, 電波の受信状況が悪化したのと, コマンド電波の到達距離の限界に近

くなったので、コマンドにより機器を切離して観測を終了した。この間約 30 時間の水平浮遊中すべての機器は故障なく動作し、地上へデータを送り続けた。

気球から送信されたテレメータ電波は SBC で 2 台の受信機により受信され、復調された PCM 位相変調信号はビット同期装置で同期検波した後地上データ処理装置のテレメータ・インターフェースへ入力された。このインターフェース装置では語同期を取って 21 ビット/語の信号から図 7, 8 に示した 17 ビットのデータを取り出し 2 台の計算機 (6800 を CPU に使用) に並列信号として送り出す。又 PC データに関しては特定の語を選択してその内容を DAC によりアナログ信号電圧に変換、ペンレコーダによってモニターした。これらの回路は 1980 年 MICS の実験で用いたものを若干改良したもので順調に作動した。

計算機システムはほぼ同様のものを 2 台用いた。1 台はデータ取得用として受信データをディジタル・カセット磁気テープに記録すると共に、主として PC データの内容のモニターに使用した。他の 1 台はバックアップとして用意し、必要に応じて PH データ等の集積と解析並びに簡易グラフィック表示に用いた。これらのシステムも 1980 年に使用したシス

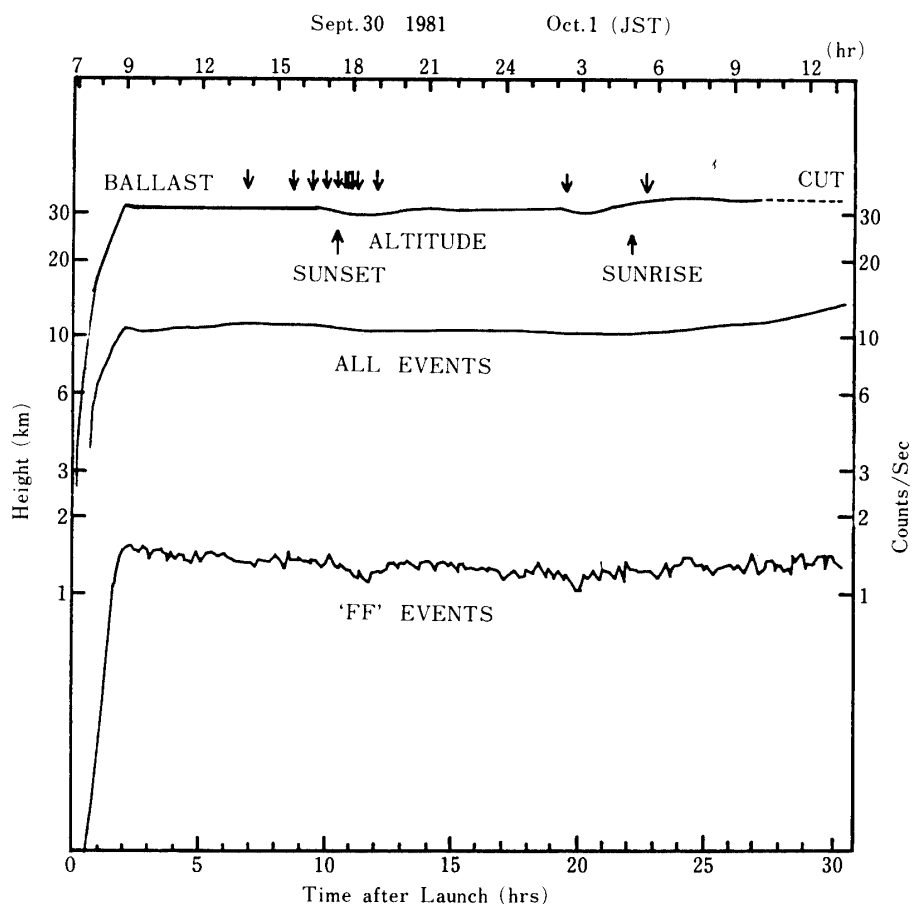


図 9 B 50-19 の飛行高度の変化と、カウント数の変化、'FF' イベントが重粒子 ($z \geq 5$) の通過によるものである。

テムを改良し、ソフトウェアの効率化を計ったもので順調に動いた。取得したデータ量が当初の予想より3～4倍と多く、約10分毎にカセットテープ1巻(片面で約250キロバイト)が終了するので30時間で約90巻(両面)の大量データを取得した。その後カセットテープから1600 Rpiのデジタル磁気テープへの変換を、宇宙線研・乗鞍観測所のU-200を用いて行ない以後はこのMTを用いて解析を行った。

図9にB50-19の飛行中の高度とPHイベント数の変化を示してある。高度はPCデータ中の気圧計データ(<50 mbで有効)に雑音が混入し解読に問題を生じたので測距結果を主体として定めた。PHイベントの中で、LIQ, PLS, SCIの8チャンネルの波高がすべてLOW DISCRIをトリガーした'FF'イベントは当初予想した($z \geq 5$)のイベント数とほぼ一致しており、これ以外のデータはこれより軽い粒子や小数のPMを通過した粒子によるイベントと考えられる。'FF'イベントのうち、約55%はMPPCを通過している筈であるが、実際に4層のMPPCで飛跡が決定出来るデータが取得されたのは約36%である。しかしこれらの飛跡決定イベントの天頂角分布は予想されるSQの天頂角分布と良い一致を示している。(図10)

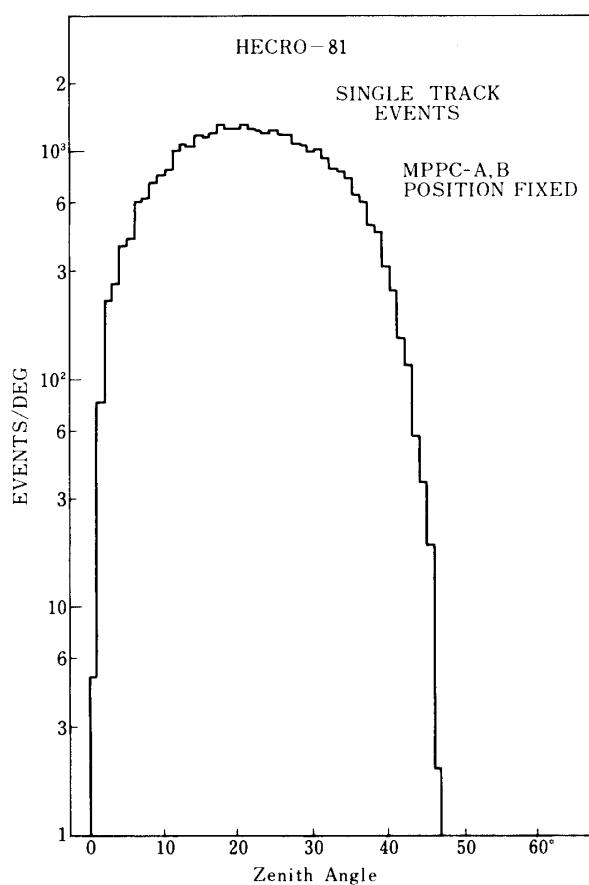


図10 MPPCによって飛跡の決定したイベントの天頂角分布。図3の計算値と良い一致を示す。

PC データからは飛揚実験中の高圧電源電圧，温度の時間的变化が図 11 に示す如く求められた。高圧電源電圧が温度の減少に伴って 3～8 % の増加を示し，特に MPPC 用の電源の変化が大きかったが位置決定に誤差をもたらす様な偽放電の発生は見られなかった。

今回の実験では X, Y 2 軸の GA センサーを搭載し，又モーターによって 1 分 1 回転程度の一方方向回転をゴンドラに与えた。この結果すべての PH イベントに対してその時のゴンドラ方向が決定され，飛跡決定結果と組合せると粒子の到来方向が天頂角，方位角として求められた。三陸上空では方向によって地球磁場による切断運動量が 8～16 Gv の範囲で変化する。(文献[4]) そこで入射方向の決定したイベントについて，その数の方位角分布(図 12)と切断運動量に対する変化(図 13)を求めた。この結果は宇宙線の Rigidity Spectrum から予想されるものとほぼ一致し測定したイベントが一次宇宙線によるものである事を示している。

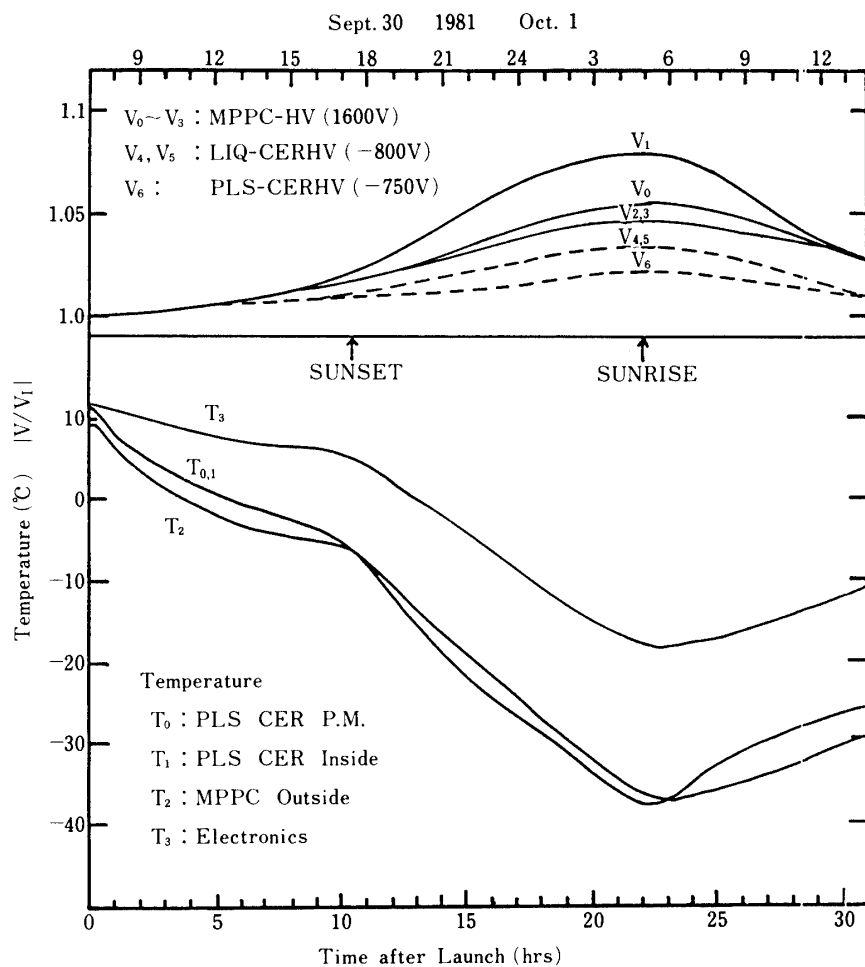


図 11 フライト中の高圧電源電圧 ($V_0 - V_6$) の変化と各部の温度の変化

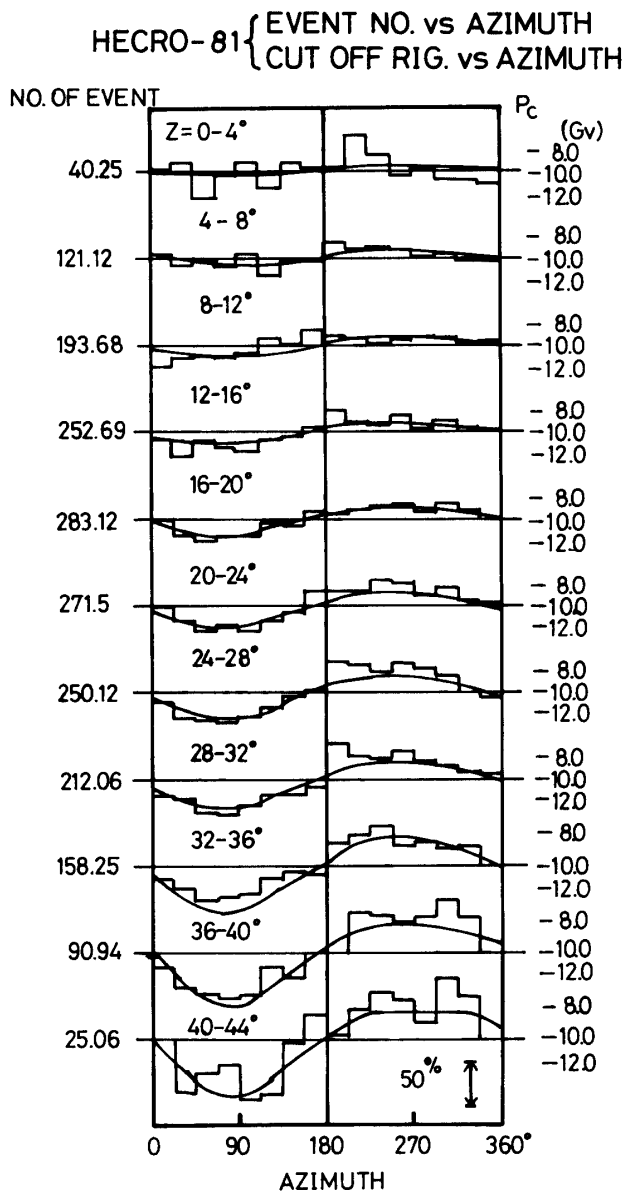


図12 飛跡決定イベント数の方位角分布を
天頂角毎に求めたもの(度数分布)
とそこでの P_c の方位角分布(曲線)

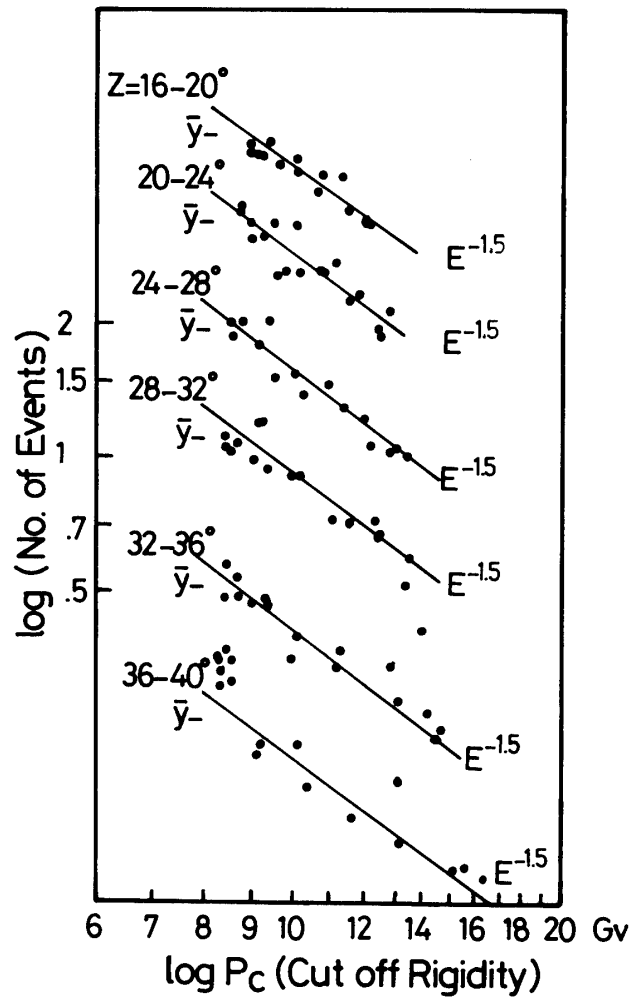


図13 各天頂角毎の度数の P_c に対する分布

3. 観測結果の解析

飛翔実験中に得られたデータは、前章で述べた様にデジタル・カセット MT (CMT) に記録された後 1200 ft, 1600 Rpi 4 巻の標準デジタル・MT に変換され、以後の解析はこの MT をもとに東大原子核研究所の M-180 AD-II (後に M-380) を使用して行なわれた。

原データの中には PLS と SCI との同時信号によるイベントについての波高データ (PH データ)、光較正信号による波高較正データ (CAL データ) 並びに各種モニターの情報を毎秒 1 回送るモニターデータ (PC データ) の 3 種類が混在している。又テレメータデータ内に含まれる機上クロックは 4096 秒で 1 サイクルとなっているので、全体を通しての時刻付けが必要である。更に特に上昇中には毎分 1 回測距の為に観測データの送信が止まるのでこの部分は欠測するので、有効観測時間の計算が必要である。そこで先ず全体のデータから PH, CAL, PC データを分離すると共にフライト全体を通した時刻付け、生データの CMT の巻 No. とその中のデータ通し番号等を付加したデータ MT を作成した。PH, CAL データについては MPPC データの量がイベント毎に違うので可変長レコード・固定長ブロックとし、PC データについてはブロック化固定長レコードの形式を取った。

PH データについてはその後 MPPC データによって飛跡位置が確定したものについて、上下の MPPC の位置での飛跡の座標と粒子の到来方向並びにその方向での地磁気切断運動量 (Pc) を計算して波高値のデータと組合せたデータ MT を作りこれを使用した解析を行なった。

(a) 較正 (CAL) データによる結果

今回の実験では LED を用いた波高較正用光信号を利用して飛翔中に感度の相対的な変化についての較正を行なった。この較正は 8 段階の信号を 1/8 秒毎に切替えて発生して行ない、地上からのコマンドにより水平浮遊中 6 回実施した。その結果は図 14 に示す如く PLS, SCI と LIQ とで若干差があるが時間の経過と共に波高が大きくなっている。この原

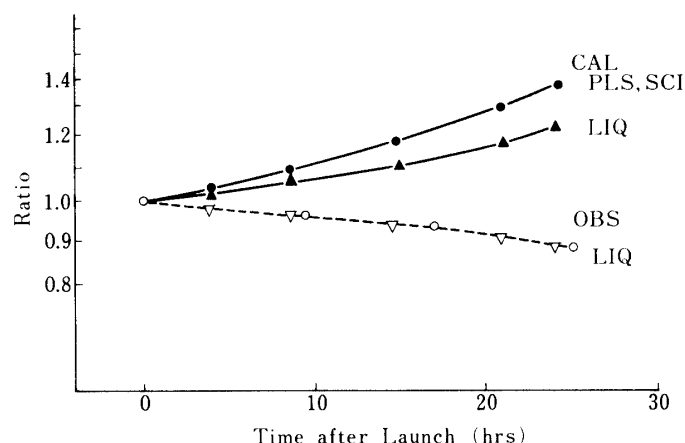


図 14 CAL データ波高の時間変化 (● PLS と SCI, ▲ LIQ) V は両者の差で、○は宇宙線データから求めた LIQ のゲイン変化。

因は LED の温度特性によるものが大部分だが PM の Gain 変化 (時間と共に下る) も含まれている事が PH イベントの解析から判明した. しかし較正データの平均の波高 (\bar{H}) とその標準偏差 (σ) との間には図 15 に示す様に $\sigma \propto \sqrt{\bar{H}}$ の関係が見られる. PLS-1 と 2 とでは増幅器の Gain が約 1 : 2 の比になっていた為同じ光信号に対して異った波高が対応しているが夫々の σ/\bar{H} は同じ値となり変動の原因が主として光電子数の統計的変動による事を示している. PH データと比較すると酸素核に相当する信号で σ/\bar{H} が約 4.5 % となり, 光電子数のゆらぎとすると約 700 ケとなり 1. で述べた見積りの約 60 % となっている.

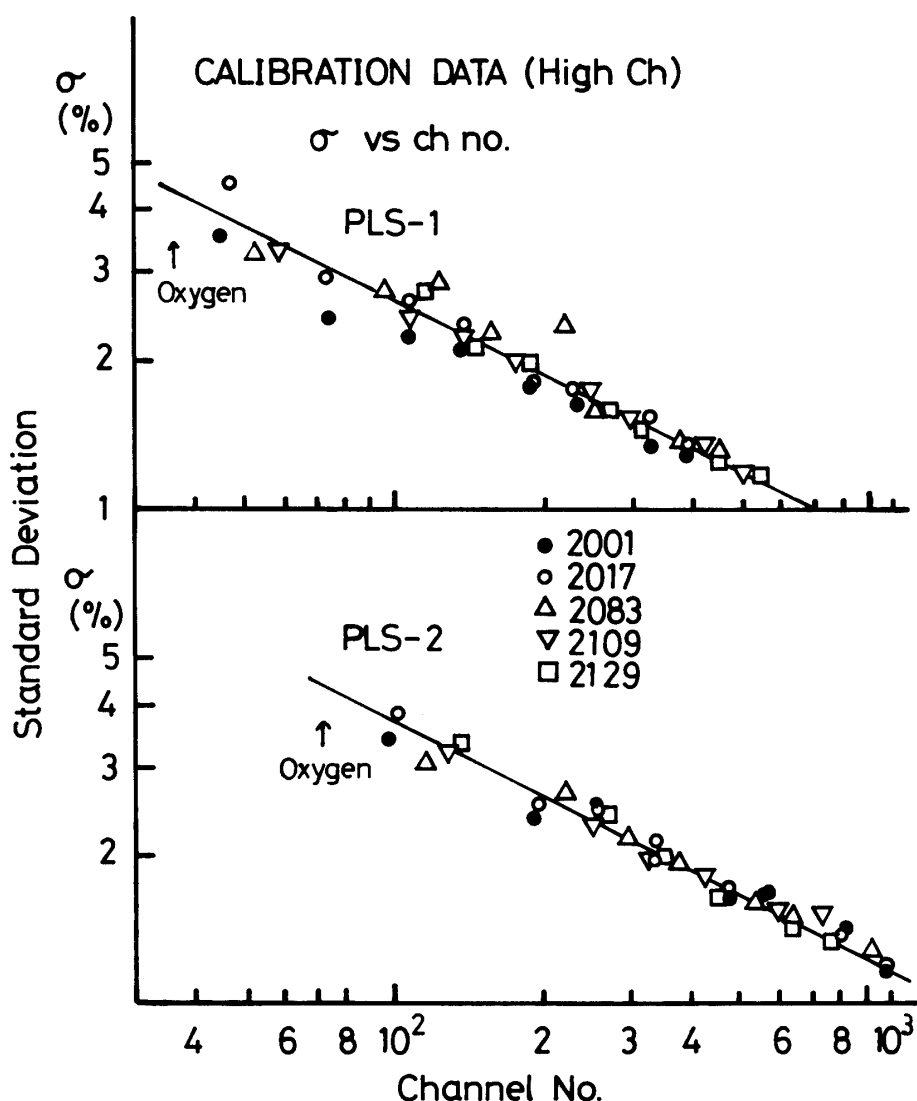


図 15 光ダイオードによる較正による平均波高 (\bar{H}) とその標準偏差 (σ) との関係

(b) 波高 (PH) データによる結果

飛行中に取得された PH データの総数は約 100 万ケになり、有効観測時間(PC データの数から推定)97,000 秒に対して毎秒 11 ケ程度となる。このデータの中から LIQ, PLS, SCI の 8 チャンネルすべての波高が Low Discr Level を越えている 'FF' イベントを選び出すと全体で 12.7 万ケとなり毎秒 1.3 ケとなりほぼ予想される宇宙線重粒子 ($z \geq 5$) のイベント数と一致する。このうち後で述べる MPPC データの解析から飛行位置を決定出来たものが 4.6 万ケで毎秒 0.47 ケとなり、'FF' イベントの 36 % については検出器中の飛跡の長さについての補正が可能となった。

PH データの解析に当ってはまず PLS の波高値について、粒子の荷電 (z) との関係、検出器感度の時間的变化、粒子の通過位置による変動、2 つのチャンネルのゲイン補正並びに 2 段階 PHA (L と H レベル) 間のゲイン比の決定等が必要である。飛行前の地上試験で一応定められた値を出発点として飛行中のデータを解析し、その結果を見て更に補正を施すという繰返しを行なった結果次の点が求められた。

(イ) PLS-1, 2 共に時間と共に感度がほぼ直接的に減少し、又 PLS-2 は PLS-1 に対して約 2 倍の Amp Gain を持つ。この 2 点を補正する為に次の補正係数を原データに乗

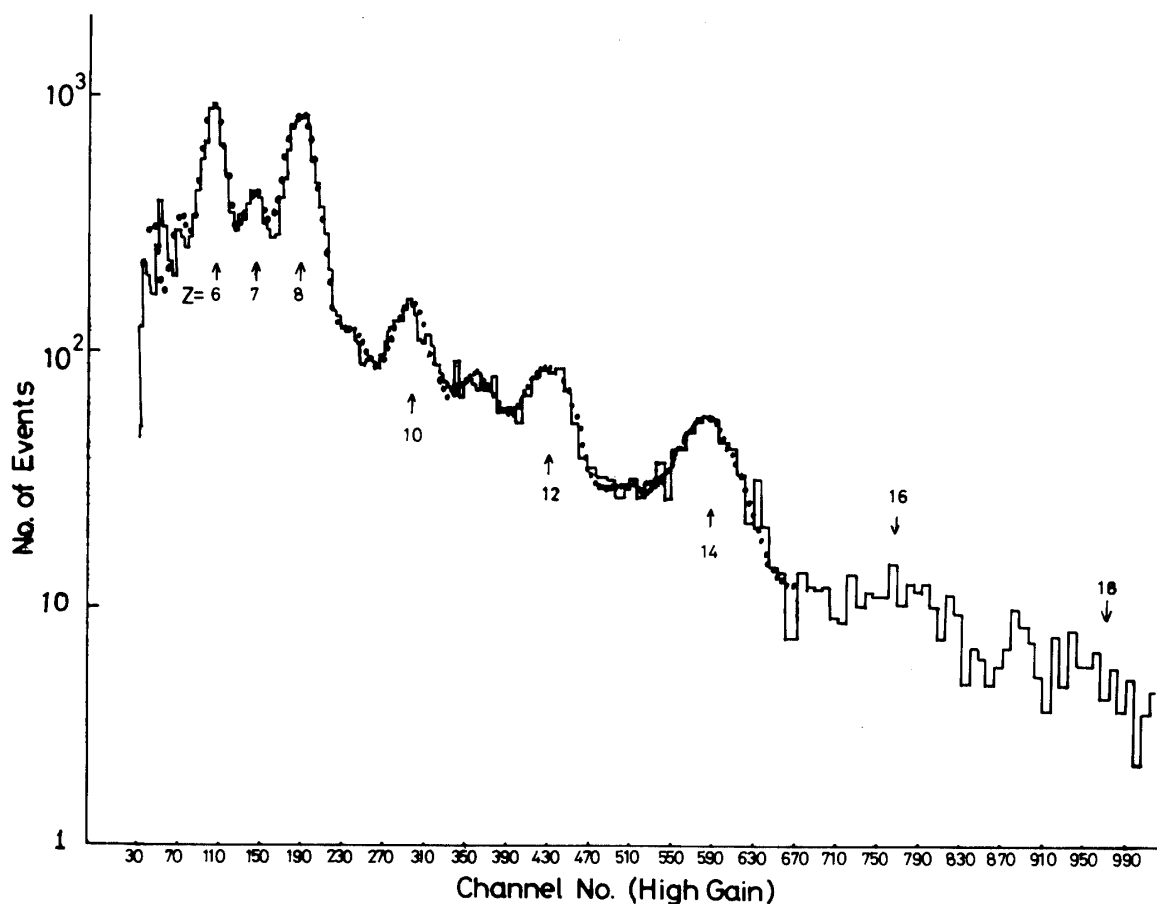


図 16 PLS の波高分布 (High gain) と実験式のあてはめの例

じたものを使用する。又これと同時に L と H レベル間のゲイン比の違いも補正する為の係数を求め両者をまとめて波高分布 (H レベル (Low Gain) のチャンネルに合せる) が求まる。

L レベル

$$\text{PLS-1 } 0.350 + 0.053(T/10^5)$$

$$\text{PLS-2 } 0.1715 + 0.0255(T/10^5)$$

H レベル

$$\text{PLS-1 } 1.384 + 0.312(T/10^5)$$

$$\text{PLS-2 } 0.655 + 0.0924(T/10^5)$$

但し T は Launch からの経過時間(秒)

(ロ) 以上の結果をもとに検出器中の飛跡の長さの修正を施した波高 (h) 分布が宇宙線粒子の z^2 に比例するとし、但し個々のデータには次の様な誤差を伴うとした。

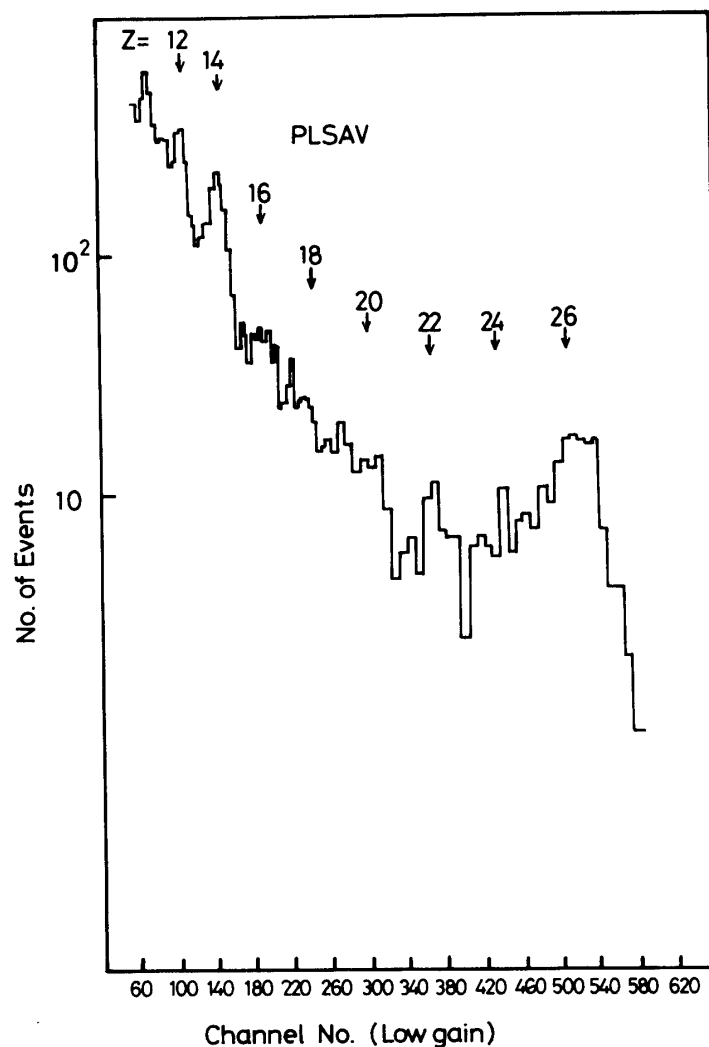


図 17 PLS の波高分布 (Low gain)

$$\sigma_h = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{z}\right)^2 + \delta^2} * h$$

この式の第 1 項は (a) で述べたチェレンコフ光から生じる光電子数のゆらぎに起因するもの、第 2 項は粒子の通過位置や光の反射・集光の不均一性による変動を示す。実際のデータについて fitting を行なった結果は $\alpha=0.6$ 、 $\delta=0.03$ という値を得た。 $z=8$ にすると $\alpha/z=7.5\%$ となり (a) の光ダイオードによる値 (4.5 %) より大きくなった。この原因としては粒子の入射角や Gain 補正等がまだ十分でない為かと考えられる。又粒子の荷電と上で求めた波高との関係も fitting から求められ PLS-1 と PLS-2 との平均 ((イ) の修正後) 波高 (Low Gain チャネル No.) $=0.75z^2$ によく合致する。(図 16, 17)

(ハ) (ロ) で求めた平均波高と z との関係、その誤差の値を基礎として、更にデータ量を増す為すべての 'FF' イベントのデータの解析を進めた。この場合には飛跡の長さの補正は出来ないので、 $S\Omega$ の天頂角分布 (図 3) を用い、これに波高の誤差を加えた波高の理論的な分布を実験値にあてはめた。これらのあてはめの結果求めた各 z に対応するイベント数を表 1 に示す。

表 1 実測された主な重粒子イベント数

Z	核種	FF' イベント (天頂角分布を考慮したもの)		飛跡確定イベント			
				(a) 新しい撰択法による		(b) 5 cm 以内に限定	
		数	O に対する比	数	O に対する比	数	O に対する比
6	C	21,292	0.944	8,456	0.780	7,300	0.815
7	N	15,124	0.706	4,884	0.450	3,829	0.427
8	O	21,411	1.000	10,843	1.000	8,962	1.000
10	Ne	6,722	0.314	3,625	0.334	2,196	0.245
12	Mg	3,998	0.187	2,210	0.196	1,510	0.168
14	Si	3,891	0.182	1,702	0.157	1,153	0.129
26	Fe	1,419	0.066	736	0.068	253	0.028
24-28	Fe グループ	3,453	0.161	1,510	0.139	450	0.050
全イベント数		126,891		44,332		34,450	

(c) 粒子の通過位置の決定

MPPC のデータから粒子の通過位置を求めるに当って、検出器内や管壁から生じる δ -ray が偽の信号を出す事が問題となる。当初は単純に MPPC の各層について信号がすべて 4 cm 以内におさまるもの (5 本以内) のみを選別してその平均の位置から飛跡位置を求めた。しかしこの方法で選んだイベントでは 'FF' イベント全部と比較して重い ($z \geq 20$) 粒子の比率ははるかに低くなっている。そこで MPPC の信号の拡がりについて通過粒子の z

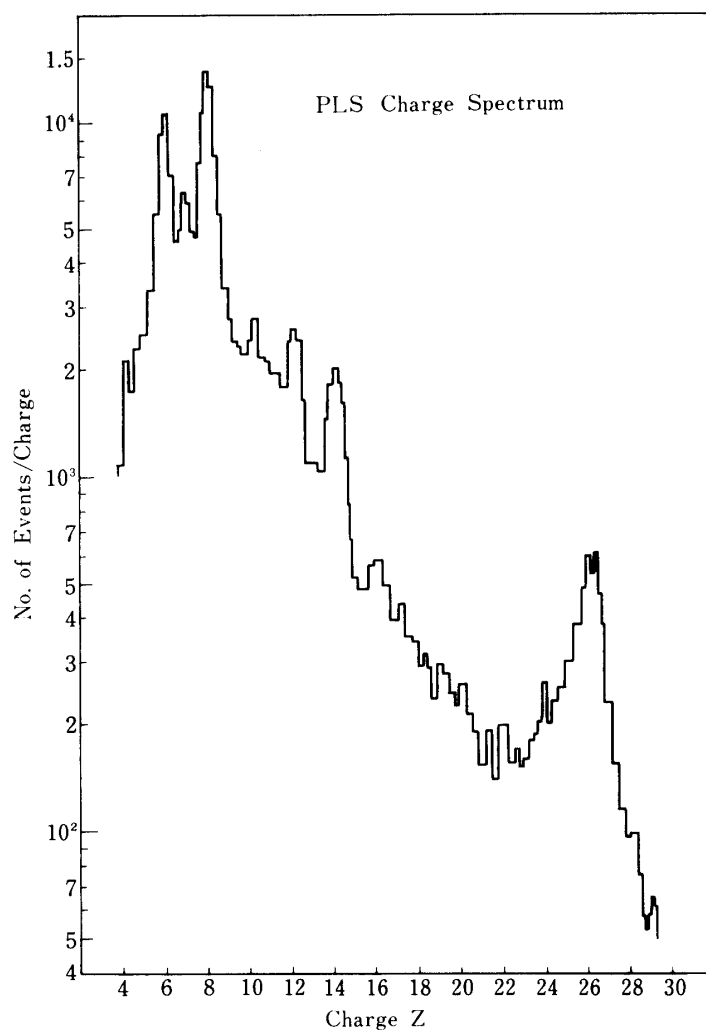


図 18 飛跡の長さについて補正した PLS の波高分布を荷電分布に変換したもの。

との関連を調べた結果（文献[3]） z の大きな粒子についてはその拡がり が 4 cm を越える可能性が大きく，又離れた場所に信号を出す確率も大きい事が判明した。この解析の際のシュミレーションの結果を参照して一層の MPPC 内の信号で最も良く固った群を抽出する事で飛跡の位置を確定出来る事が可能である事を見出した。この論理をとり入れたデータ処理を行なった結果 $z \geq 20$ の粒子の比率についても正しい値が得られる様になった。この結果を図 18 と表 1 (a) に示すが z の偶数核に際立ったピークが見える。

(d) SCI の波高分布

SCI の波高分布についても PLS の波高分布と同様な解析を行なった結果, 次の点が判明した。(図 19)

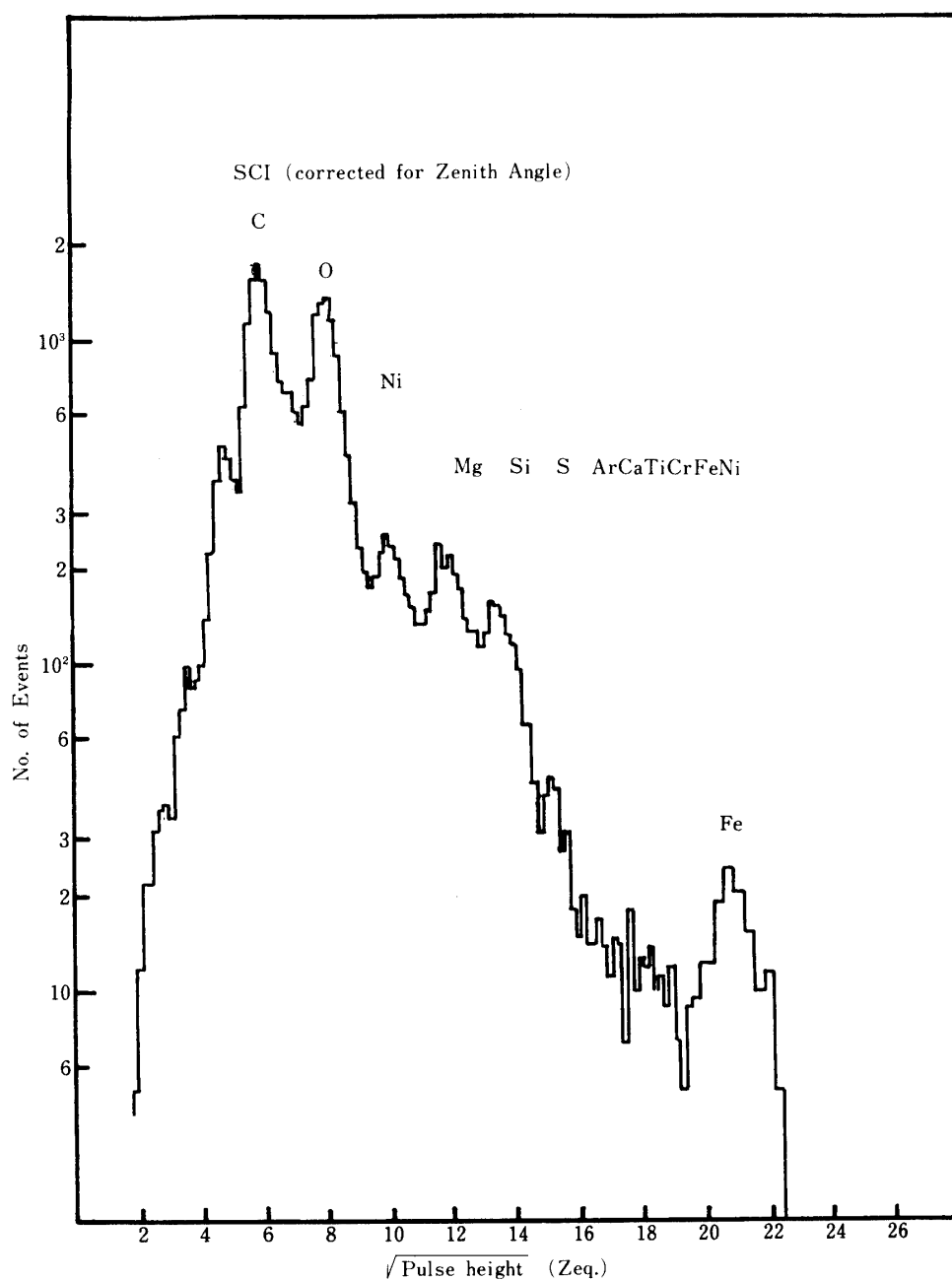


図 19 SCI の波高分布 横軸は波高の平方根に比例して目盛っており, 波高が z^2 よりゆるやかな関数に比例している様に見える

(イ) 波高分布が重い粒子に対しては z^2 の分布から外れてより緩やかな関数 ($\propto z^{1.75}$) に従う様に見える。

(ロ) PLS と SCI 間にある物質の中で可成りの粒子が spallation を起して数個の軽い粒子に分解するイベントがある。

(ニ) SCI の波高についても $-(6\sim 7)\%/10^5$ 秒のゲインの変化がある。

(ハ) これらの条件を考慮に入れて、PLS の波高分布を求める際に SCI の波高を参照して、偽のイベントを除く事が可能である。

SCI 自体の性能の詳細については更に解析中である。

(e) LIQ の波高分布

LIQ については PLS, SCI に比してチェレンコフ光の光量が小さいので 12 本の P. M を 4 組に分けて使用した。その波高分布について各チャンネルのゲイン差や、感度の時間変化等の補正を行なって平均の波高を求める作業を行なった。しかしその結果求めた波高分布は PLS や SCI の様に鋭い z^2 分布を持たず、より大きな誤差を持っている。この原因は粒子の入射角や通過位置によって液体から出されたチェレンコフ光が容器の底面での反射や、マイラー膜の透過等に差がある為かと思われる。今後 PLS, SCI のデータとの比較等更に詳しい解析をする予定である。又 LIQ については PLS や SCI に比して大きなゲインの時間変化が認められこの点も今後検討を要する点である。

4. 解析結果のまとめ

前章に述べた様に主として PLS の波高分布に基いて、観測された粒子の荷電分布が求められた。この分布から一次宇宙線重粒子の荷電分布を求めるにはいくつかの補正を必要とする。

第 1 には今回のデータ処理方式では 1 つのイベントのデータの送信中は次のイベントの処理を行なわないので不感時間を生じる事である。特に今回は取得データが約 11 個/秒と多く 1 イベントのデータ送信には平均 21 語 $\times 1.282$ ミリ秒を要するので不感時間は可成り大きい。結果的には全観測時間(水平浮遊中) 96.600 秒に対して不感時間が 28,500 秒となり有効観測時間は 68,100 秒となった。

第 2 には一次宇宙線が気球高度に到達する迄に空気中の原子核と衝突して吸収又は spallation を起す事である。吸収の平均行程を λ_a g/cm² とするとテレスコープの立体角を考慮に入れ、'FF' イベントに対しては $\exp -1.17 \bar{x}_1/\lambda_a$, 飛跡確定イベントに対しては $\exp -1.07 \bar{x}_1/\lambda_a$ の係数だけ強度が減少している事となる。 \bar{x}_2 は気球の平均高度 (10 g/cm²) にテレスコープの平均物質質量 (7.5 g/cm²) を加えたものである。 λ_a については前回の解析と同じ値を使用した。

以上の 2 点を考慮して求めた大気頂上での宇宙線強度を表 2 に示す。強度につけた誤差は主として統計的な誤差であるが spallation についての誤差も含んでいる。

今回の実験では粒子の入射方向の定ったイベントについてはその方向の地磁気による切断運動量 (Pc) が定まる。表の値は Pc の平均として約 11 Gv の値であるがこれを Pc について 5 つの区分に分け相対的に表示すると図 20 になる。奇数核と偶数核とで Pc に対する

表 2 大気頂上の一次宇宙線強度

Z:核	全イベント数	吸収補正係数			大気頂上強度 /m ² str sec
		大気中	検出器内	計	
6:C	21292	1,509	1,203	1,543	0.802±0.012
7:N	15124	1,532	1,023	1,567	0.393±0.010
8:O	21411	1,560	1,024	1,597	0.835±0.012
10:Ne	6722	1,621	1,025	1,662	0.272±0.006
12:Mg	3998	1,655	1,028	1,701	0.167±0.005
14:Si	3891	1,697	1,030	1,748	0.167±0.005
26:Fe	1419	1,958	1,040	2,036	0.070±0.004
24-28:Fe 群	3453	1,958	1,040	2,036	0.171±0.006

$S\Omega = 6050 \text{ cm}^2 \text{ str}$ 有効観測時間 68,107 秒として計算した

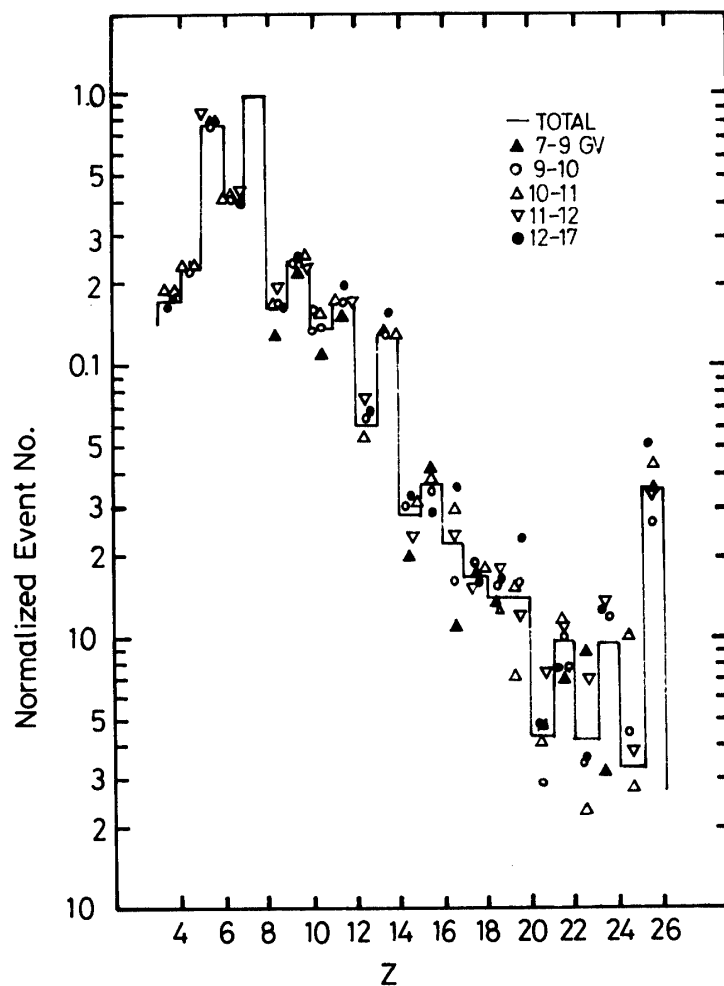


図 20 PLS から推定した重粒子荷電の相対的比率(炭素核を 1 とする)を Pc の 5 つのグループについて示す。

変化が逆になる傾向は見えるが統計的にはまだ有意とはいえず更に例数を増す必要がある。

以上簡単にまとめたが今回の実験で十分大きな $S\Omega$ を持ったテレスコープに飛跡決定の為の軽量の MPPC を加える事により高い統計精度で一次宇宙線の荷電分布並びにそのエネルギー依存性が求められる事が確認された。今後この方式を更に大型にし、他の検出器と組合せる事により更に詳しくエネルギー依存性等を得る事が可能である。

最後に気球実験に当り装置の製作に従事した、東大宇宙線研の山本邦夫氏に謝意を表する。気球実験については宇宙科学研究所の西村研究室並びに三陸大気球実験場の諸氏に種々の点について助力を賜り厚く感謝する次第である。

又データ解析に当っては東京大学原子核研究所・電子計算機室の M 180-II AD 並びに M-380 システムを使用した。

参 考 文 献

- [1] 例えば E. Juliusson: Composition of Cosmic Rays; 18 ICRC Conf Paper Vol. 12 p. 117 (1983)
- [2] 近藤一郎, 齊藤威, 桜井敬久, 葉田野義和, 深田豊, 宮島光弘, 尾田汎史, 野間元作: 高エネルギー・一次宇宙線重粒子の観測—MICS プロトタイプによる測定結果—宇宙科学研究所報告, 特集第1号 p 97-116 (1981)
- [3] H. Sakurai, H. Oda, Y. Fukada, Y. Hatano, I. Kondo and T. Saito: Large Area Proportional Counter Hodoscope. N. I. M. に投稿中
- [4] 井上葵・和田雅美・近藤一郎: 三陸上空の地球磁場による宇宙線切断運動量, 宇宙科学研究所報告, 特集第1号 p 79-96 (1981)