

環境放射線測定*

—大気中における宇宙線成分の高度変化—

岡野真治**・出雲光一**
熊谷秀和**・小玉正弘**

1. はじめに

環境放射線の重要な成分である宇宙線の測定に気球を用いることは宇宙線の発見当時から行われている。しかしながら、気球による測定は実験機材が限られている点と、放球気球においては気球のコントロールが自由でない点が欠点とされ、高い精度の測定を行うにはいくつかの問題が残されていた。しかしながら最近、研究ならびに技術の進歩によって大気球による宇宙線観測は次第に精度が高まり、多くの情報を得ることができるようになってきた。

一方、環境放射線の測定に際し、宇宙線、自然放射能、人工放射能にもとづく寄与を互いに分離して情報を得る要求が高まっており、宇宙線に関する情報はその成分である荷電粒子、中性子などについて高い精度の情報を必要としている。

気球による宇宙線の測定は、従来、主として電離箱や多くの種類の計数管を用い、特定(電離イオン)成分について主として高度変化の測定が行われている[1~5]。しかし、シンチレーション検出体などと固体検出体、特にその吸収エネルギー・スペクトルを含めた測定例は少ない。一方これらの測定結果は、すでに知られている宇宙線に関する情報を必ずしもお互い矛盾なく説明することができるわけではなく、いくつかの問題が残されている。

これらの問題を解決するには宇宙線成分に関する正確な情報および環境、特に大気空間における複雑なこれらの成分の行動を究明する必要がある。そのいくつかの例をあげると、宇宙線による気体の電離効果、主として、荷電粒子ならびに光子のそれぞれの成分に関し、特に低エネルギー(100 MeV 以下)についての内容はいくつかの計算が行われている[6]が実測値と比較されていない。また電離量は平均として1気圧中60~100 ionpairs/cmの値がとられ、荷電粒子束との関係が明確ではない。これらの値は主として荷電粒子のエネルギー、鉛直強度ならびに方向分布特性に関連し、これらの考慮からお互いの数値のちがいを説明することができる。また宇宙線成分の全量、特に絶対量を考えるときは環境における地形、構築物の影響の大きい100 MeV 以下、特に10 MeV 程度のエネルギーをもつ荷電粒子(電子)、光子の内容が必要で、現在これらエネルギー領域の性質はあまり明らかにされていない。

われわれは、従来主として環境放射能の影響の少ない湖上、雪上、航空機などによって宇宙線の絶対測定の研究を行ってきたが[7]、[8]—昨年より多重情報を持つデジタル信号の送受信によって検出体からの情報を気球の飛翔の間、連続して観測することを行ってきた

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 理化学研究所

[9], [10]. この報告は, 1976年9月4日 (B5-75), 1977年8月25日 (B5-83) に
行われた2回の飛翔観測から得られた内容を示す.

2. 観測の目的

観測の目的は, G-M計数管, シンチレータのそれぞれについて得られる宇宙線の検出像
ならびにこれらの高度変化を解析し, お互いの比較検討を行う一方, 比較を行うに必要な情
報を得るものである. また, BF_3 計数管による高度変化も測定した. 特に宇宙線の鉛直強
度と全方向強度と比較検討するために必要な情報として荷電粒子成分の方向分布特性に関する内
容を得るための観測を行った. すなわち, 1976年において, 直交する細長いG-M計数管,
球型 NaI (T1) シンチレータによる高度変化の測定を行い [11], 1977年は NaI (T1) に
変わってプラスチック・シンチレータを用いる一方, G-M計数管を6本配置し, それぞ
れの計数から荷電粒子の方向分布ならびに傾斜に関する情報を求めた [12].

3. 観測装置

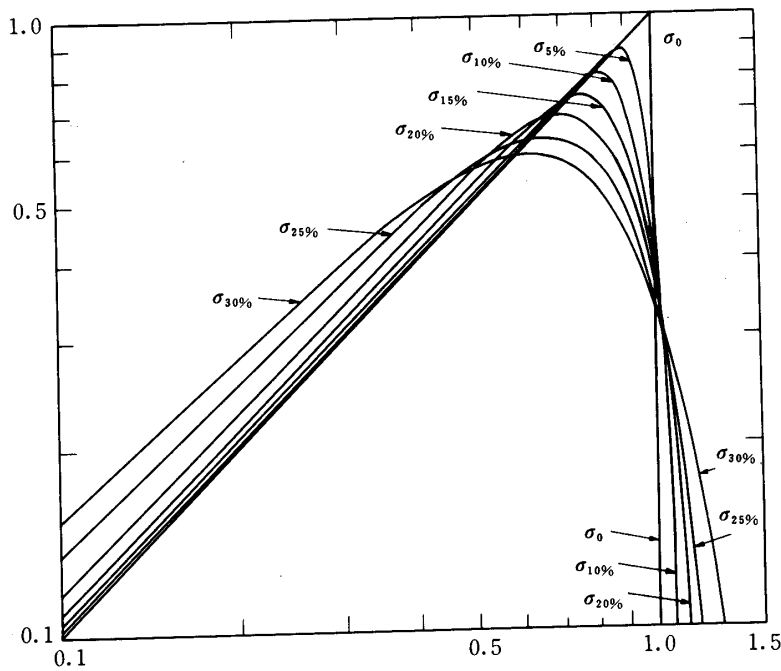
観測装置は検出体と信号処理回路からなり, 検出体には外径25.4 mm内径22.4 mm 有効
長さ650 mmのG-M計数管, 3"φ球型 NaI (T1) シンチレータ, 95 mmφ球型プラ
スチック・シンチレータが主として用いられ, このほか BF_3 計数管, α 線を利用した密度計,
湿度計を用いた. これらの測定器からの情報の信号の処理はすべてデジタル信号とし, 出力
情報は8×256チャンネルのマルチパラメータのマルチスケール, シンチレータの波高出
力信号は2048チャンネル (NaI (T1)), または4×512チャンネルに分割 (プラスチック)
した. この場合4分割信号のうち3つは3個のG-M計数管と同時計数したスペクトルを送
受信して情報を収集した [9], [10], [12].

ゴンドラ内の配置は1976年は直径3"球型 NaI (T1) シンチレータを中心に配置し, G
-M計数管を水平垂直に各1個, さらに BF_3 計数管, α 線密度計, 湿度計ならびに関
連した電子測定装置をまわりに配置した. 1977年はゴンドラの傾斜を知る目的でG
-M計数管をふやし, 垂直1本, 水平2本, 垂直に対し約22°の角度に配置したもの3本とし,
寸法は1976年同様内径22.4 mm 長さ650 mmである. またシンチレータは, NaI (T1)に
変わって直径95 mmの球型プラスチック・シンチレータを用いた. 気圧計は Am-241の
 α 線源より放出される α 線による電離イオン量を MOSFET を用いた電位計ならびにデジ
タルパルス電流計を用い, 計数率として測定を行う密度測定器 [13] を両年とも用いた.
シンチレーション・カウンタの測定は光子成分, 低エネルギー荷電粒子成分の寄与を得る目
的でスペクトル測定を行った. 1977年に行われた測定器の役割を第1図に示した.

NaI (T1) シンチレータは主として陽電子消滅に際して放出される annihilation γ 線
(0.51 MeV)の検出ならびに光子成分の寄与を得る目的で測定が行われたのに対し, プラ
スチック・シンチレータは荷電粒子成分, 特に10 MeV程度の低エネルギー電子に関する情報
を得る目的に合せてスペクトル領域を選定した. これらの検出体ならびに測定系によって得
られる内容は, 1) 荷電粒子の鉛直強度に対して全方向強度の算出を行う. 2) ゴンドラ
の上昇中の傾斜の状況を把握する. 3) シンチレーション・スペクトルから低エネルギー成分

GM X	水平位置		方向分布と鉛直強度の測定
GM Y	水平位置		
GM Z	垂直位置	ゴンドラの傾斜	
GM (1)	23度		
GM (2)	23度		
GM (3)	25度		
Plastic	球形		スペクトル全方向強度
NaI (Tl)	球形		光子成分の寄与

第1図 検出体とその役割



THE PATH LENGTH DISTRIBUTIONS IN A SPHERICAL DETECTOR FOR VARIOUS DEGREES OF BROADENING.

第2図

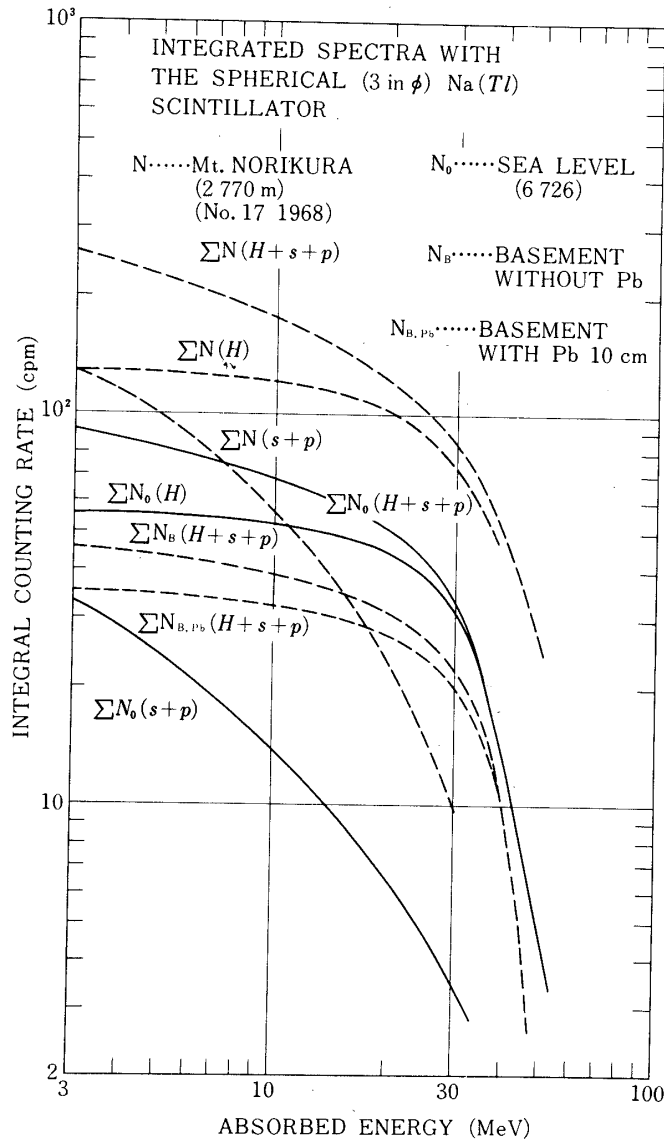
の寄与ならびに光子成分の寄与を知るものである。

4. データ解析

解析はシンチレーション・スペクトルの解析と、配置軸の異なる細長い計数管の計数率の比率から荷電粒子について方向分布を得る目的の解析を行った。

(a) シンチレーション・スペクトルの解析

シンチレーション・スペクトルは大別するとシンチレータを通過する荷電粒子によるスペクトル、シンチレータ内で停止する荷電粒子のスペクトル、光子によるスペクトルに大別さ



第3図

れる。シンチレータを通過する荷電粒子のスペクトルは通過粒子の通過距離と単位長さ当り失うエネルギーにもとづく発光の分布となる。このため単位長さ当り失うエネルギーが一定で、エネルギー吸収量と発光量が比例するならばシンチレータを通過する長さの分布がスペクトルの形となる。球型シンチレータにおいては、直径長さで失うエネルギー量に相当する直角三角形の分布となり、これにシンチレータの広がり加わる。第2図は広がりをガウス分布と仮定した基本スペクトルを両対数で示した。一方、シンチレータ内で停止する荷電粒子のスペクトルは、入射粒子のエネルギーとこの吸収による発光によって得られ、ほぼ入射粒子のエネルギーがそのままスペクトルとして示される。このため停止する荷電粒子のスペクトルは通過スペクトルとして見積もられる分布(第2図)を高エネルギー領域(極大の半分程度)から外挿し差引くことによって得る。一方、光子成分についてはその寄与を分離することが困難で、NaI(Tl)シンチレータとプラスチック・シンチレータのスペクトルの比較によって求めるか検出体のまわりに他の検出体をかこみ、同時、逆同時計数によって分離することが必要となる。今回はNaI(Tl)シンチレータ、プラスチックシンチレータの測定結果の比較によって光子成分の寄与を推定した。第3図は海面高度、乗鞍ならびに地下室や鉛中における3"φ球型NaI(Tl)スペクトルの積分曲線で、第2図の通過荷電粒子寄与 N_H を除いた光子 N_P ならびにシンチレータ内で停止した荷電粒子成分 N_S の寄与を示したものである。また光子成分についてはNaI(Tl)シンチレータによって得られるannihilation γ 線(0.511 MeV)の強度の測定から情報が得られる。

第1表 直径22.4mm長さ650mmの計数管を天頂角 ϕ においたとき得られる計数値, counts/sr.cm²

n POWER DEGREE	ϕ (度)		
	0.00 (N_V)	22.0	90.0 (N_H)
2.5	152	165	237
2.0	186	199	273
1.8	203	217	290
1.6	224	237	310
1.4	248	261	334
1.2	278	290	361
1.0	313	325	394
0.8	357	369	432
0.6	413	423	480
0.4	485	494	540
0.2	580	587	616
0.1	645	650	666
0.0	755	757	747

(b) G-M 計数管による計数結果の解析

宇宙線の主成分である荷電粒子は方向分布特性をもつ。G-M計数管は光子に対する検出効率が低く、主として荷電粒子成分による計数が得られる。すなわち、荷電粒子がG-M計数管を通過することによって計数が得られ、このため荷電粒子の方向分布特性と計数管の形状、配置によって得られる計数値が異なる。このため細長いG-M計数管を水平、垂直に配置し、その計数値の差から鉛直強度 J_V と全方向強度 J_T の関係が得られる。すなわち θ 方向の宇宙線強度特性を $J_\theta = J_V \cos^n \theta$ とすると、計数管の直径 d 、長さ ℓ 、軸方向の角度を φ とすると

$$N = \int J_V \cos^n \theta \cdot S(\varphi) dw$$

式を積分することによって計数が得られる。第1表は直径22.4mm長さ650mmの円柱を軸方向を水平、垂直とした場合の計数値 N_H 、 N_V について代表的な n について示した。これらの解析によりG-M計数管については、垂直、水平の計数比と高度の相関から n を求め、またシンチレーション・カウンタについては特定のエネルギー領域についての計数と高度の相関から全方向強度を得た。NaI (Tl) シンチレータについては3 MeV 以上ならびに10 MeV 以上の吸収エネルギーに相当する計数値を解析の対象とした。プラスチック・シンチレータについては3.5 MeV 毎の計数率微分スペクトルならびに14 MeV 以上のエネルギー吸収に相当する計数値を解析の際に使用した。プラスチックの場合、14 MeV がすべて通過による分布とすると全スペクトルの59%がこの領域に含まれることとなる。したがって、この計数を0.59で割った結果は光子成分を無視すると、プラスチック・シンチレータを通過した荷電粒子成分の全方向強度となる。この全方向強度から鉛直強度の変換は n ならびに検出体の形状を考慮して求めることができ、球の場合は、

$$I_{TOTAL} = I_V \pi^2 d^2 / 2(n+1)$$

となる。

5. 測定結果

測定結果の記録例 [12] は第2表の如くで、4096チャンネルの多重分析器のそれぞれのチャンネルに結果を配分した。一方、シンチレーション・スペクトルはインタフェースを用い、別に接給された2トラックのステレオテープレコーダによって刻々変化するスペクトル内容を同時記録し、必要な時間間隔で後日、再生した。第4図は1977年の記録内容の例で、1976年は8分22秒 (2×256 秒) [10]、1977年は21分20秒 (5×256 秒) [12] 間のデータである。マルチスケーラの計数結果は気球の上昇速度、計数結果の統計誤差を考慮して必要な時間の計数加算を行った。スペクトルは1分間隔で再収録し、解析した。

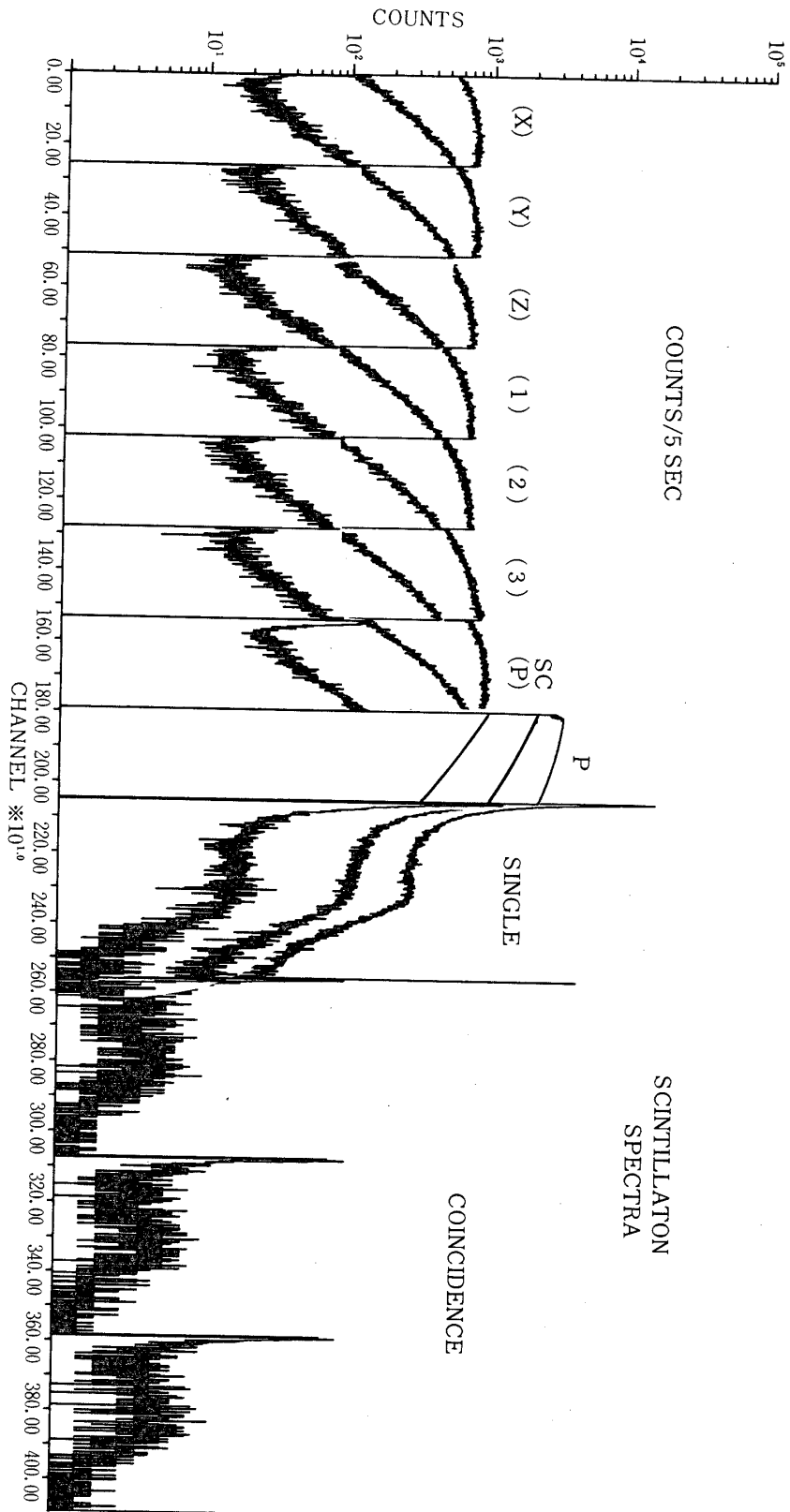
G-M 計数管の結果

今回の測定結果は、主として荷電粒子成分の方向分布に関する内容を得るもので、このため直交するG-M計数管の計数比の高度変化を求め、この比から方向分布を得る係数 n を決定した。第5図はその結果で上昇中気球の傾斜を考慮し、実線 (上記) の値を採用した。黒

丸および2重黒丸は航空機，ならびに雪上（乗鞍），氷上（白樺湖），湖（池田湖）の結果で，大気球の値と異なる．この原因は環境物質による散乱で水平方向成分が増加したものとされる．

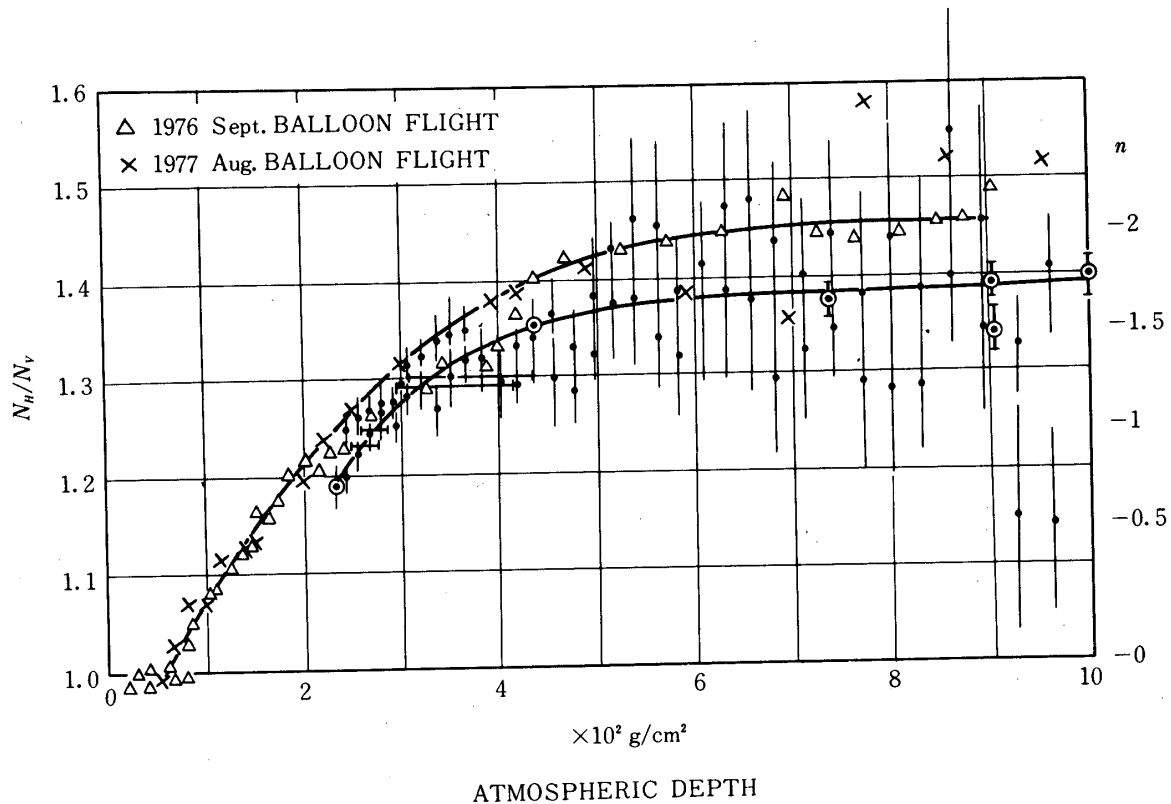
第2表 上昇の際の測定値250秒（50チャンネル）をまとめた計数値

	X	Y	Z	(1)	(2)	(3)	SC(P)	P	mb
	(units counts/250 sec.)								
No. 18	1139	1065	726 (1.518)	889	802	653	2999	176248	950
	1277	1276	839 (1.521)	902	943	926	1639	160453	850
	1849	1839	1167 (1.520)	1309	1375	1356	2299	160453	780
	2636	2655	1948 (1.580)	2028	2059	2049	3526	146236	690
	4264	4054	3012 (1.358)	2998	3192	3074	5453	130695	580
No. 19	6493	6333	4512 (1.421)	4937	4846	4903	8688	115381	480
	9575	9622	6987 (1.374)	7448	7392	7529	13191	10037	380
	13716	13762	10491 (1.310)	10836	10998	11238	19290	85613	300
	18491	18661	14699 (1.264)	15148	15182	15479	26097	72075	255
	24372	24109	19573 (1.238)	20100	20482	20955	33282	60157	230
No. 20	29411	29436	24700 (1.191)	25178	25494	27214	40187	49426	200
	33683	33516	29222 (1.150)	30152	29988	31944	45666	40009	150
	36318	36073	32918 (1.100)	33095	33378	36717	48022	32368	120
	37642	37427	35194 (1.067)	35627	35448	39754	49168	26181	100
	36999	37270	36208 (1.026)	35924	36383	43242	48289	21051	85
No. 21	36088	35375	35799 (0.998)	35971	36043	44471	46056	16769	
	33933	33901	34521 (0.985)	34192	34702	50336	43148	13476	
	31614	30968	32652 (0.958)	32278	32808	65594	39204	10740	
	28947	28916	30614 (0.945)	30686	29204	54225	35870	8646	
	26884	26714	28849 (0.929)	28849	28641	0	33234	7155	
No. 22	25194	25259	27154 (0.929)	26557	27056	1	30893	6072	
	24261	24333	26555 (0.915)	26294	26428	0	29584	5598	
	24183	24354	25943 (0.935)	26140	25735	0	29151	5558	
	24747	24306	26236	26160	26305	0	29408	5547	
	24264	24546	26225	25969	25927	0	29594	5527	



第4図 上昇の際のスペクトル図

※ 放球から Pfozter Max. までの3データを重ねてある.



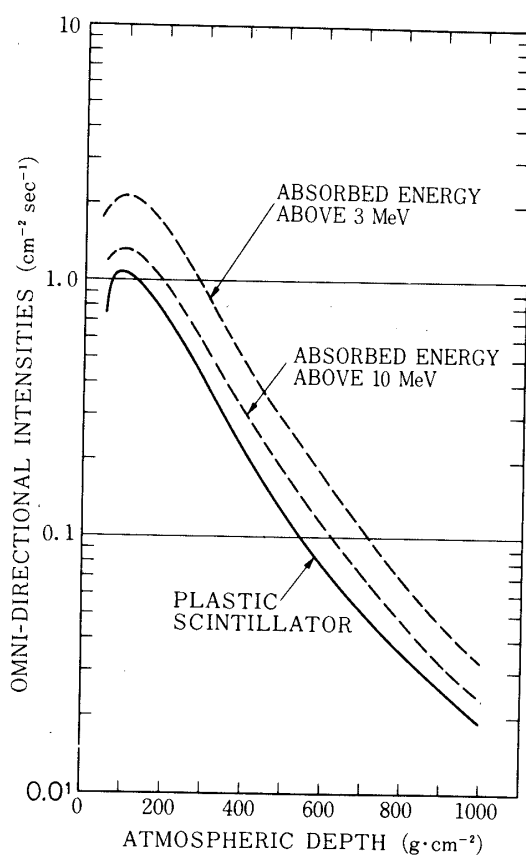
第5図

第3表 上昇 (No18~No22) レベル飛行 (No23, No26) ならびに下降 (No35, No36) のスペクトルデータ

Channel Data No.	A 0~3.5 MeV	B 3.5~7 MeV	C 7~10.5 MeV	D 10.5~14 MeV	E 14~17.5 MeV	F 17.5~21 MeV	G 21~24.5 MeV	H 24.5~28 MeV	I 28~31.5 MeV	J 31.5~35 MeV	14 MeV (21.3 min) 以上の計数
18	3.493	0.450	0.314	0.310	0.310	0.287	0.196	0.089	0.045	0.027	2854
19	3.087	0.560	0.396	0.343	0.319	0.280	0.182	0.093	0.050	0.030	18454
20	2.524	0.495	0.359	0.322	0.313	0.298	0.177	0.087	0.048	0.034	47988
21	2.003	0.413	0.318	0.299	0.312	0.311	0.167	0.083	0.049	0.032	45408
22	1.778	0.383	0.200	0.295	0.323	0.307	0.162	0.081	0.049	0.034	36692
23	1.737	0.367	0.294	0.284	0.318	0.312	0.161	0.079	0.050	0.034	38696
26	1.723	0.345	0.269	0.262	0.277	0.310	0.184	0.193	0.055	0.034	40339
35	2.076	0.409	0.300	0.275	0.282	0.298	0.070	0.095	0.055	0.037	42507
36	28.870	0.476	0.336	0.308	0.285	0.275	0.203	0.101	0.060	0.032	8527

球型シンチレータの測定結果

球型シンチレータはスペクトル領域の選択によって得られる内容が異なる。NaI (Tl) シンチレータにおいては 3 MeV, 10 MeV 以上のエネルギー吸収で得られた計数の高度変化

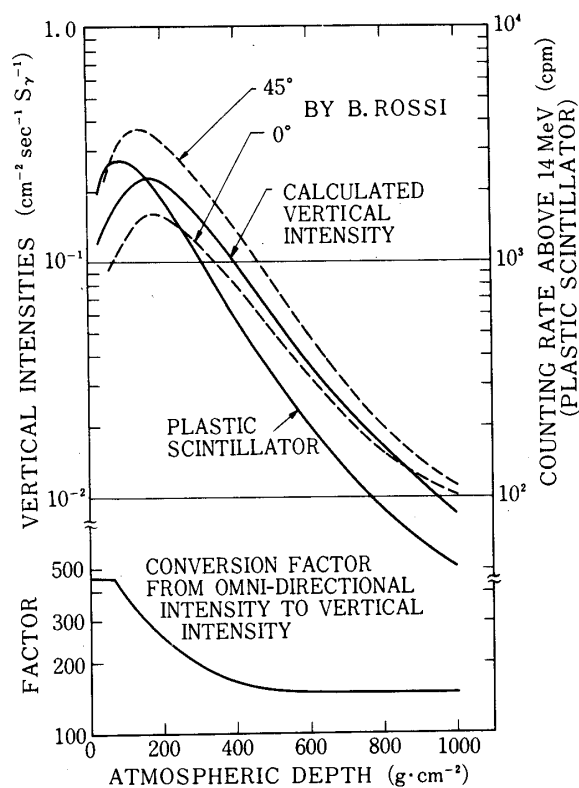


第6図

を求めた。シンチレータを通過する荷電粒子については両者の差は数%以下であるので、この差はシンチレータ内に停止する荷電粒子または光子によるものと考えられる、プラスチック・シンチレータによって得られるスペクトルは、14 MeV 以上の吸収エネルギーの計数を採用した。この計数は球型検出体を通過する粒子のスペクトルを仮定すると全通過粒子の59%となる。14 MeV 以下について通過粒子の寄与を上回る計数はシンチレータ内に停止した粒子によるものである。第3表は飛行中のいくつかのこのエネルギー領域の割合を14 MeV 以上のすべて荷電粒子として求めた計数を1として示したものである。この値は飛行高度によって差があり、200 ~ 800 g/cm² で低エネルギー粒子の増加がみられる。

全方向強度の高度変化は第6図に示した。第6図はプラスチック・シンチレータについては14 MeV 以上のエネルギー吸収をすべて通過荷電粒子として、計算により通過荷電粒子の全方向強度を示した。NaI (T1) シンチレータは3 MeV, 10 MeV 以上の吸収エネルギーについての全方向強度を示した。

第7図はプラスチック・シンチレータの計数結果とこれから算出した鉛直強度の高度変化である。この曲線は B. Rossi [14] の結果とかなりよい一致が得られている。



第7図

検 討

この報告は1976年および1977年に行われた大気球観測の際得られた結果で、主として荷電粒子の方向分布特性、シンチレータによるスペクトル情報である。

荷電粒子の方向分布特性は、地表ならびに航空機の測定結果と一致しないのは環境の構築物による散乱によるものと思われる。シンチレーション・スペクトルで得られた内容は中高度において低エネルギー（10 MeV程度）荷電粒子成分がみとめられた。これはBeck [6]の指摘と一致した傾向を示す。今後はこれらについて量的なうらづけを行うことが必要である。またゴンドラの上昇中、ゴンドラの傾斜がみとめられ、その内容は細長いG-M計数管の配置によって知ることが可能であった。

1978年5月27日

参 考 文 献

- [1] Wayne M. Lowder and Harold L. Beck: J. Geophys. Res. 71, (1966), 4661-4668.
- [2] H. V. Neher: J. Geophys. Res. 72, (1967), 1527-1539.
- [3] Michael J. George: J. Geophys. Res. 75, (1970), 3693-3705.
- [4] Hugh R. Anderson: J. Geophys. Res. 78, (1972), 3958-3960.
- [5] Takao Iida, Yukimasa Ikebe, Yoshiyuki Nakashima and Minoru Kawano: Institute

- of Space and Aeronautical Sci., Univ. of Tokyo, Report No. 507, (1974), 79-86.
- [6] Harloid L. Beck: Nuclear Instr. Methods **91**, (1971), 525-531
 - [7] 岡野真治: 理研シンポジウム(航空機による宇宙線観測Ⅱ) 3, (1976)
 - [8] 岡野真治, 小玉正弘: S. 50年度大気球シンポジウム報告(1976) 167
 - [9] 熊谷秀和, 岡野真治, 小玉正弘: 理研報告, **52**, 216 (1976)
 - [10] 熊谷秀和, 岡野真治, 小玉正弘: S. 51年度大気球シンポジウム報告(1977) 13
 - [11] 岡野真治, 熊谷秀和, 小玉正弘: S. 51年度大気球シンポジウム報告(1977) 19
 - [12] 岡野真治, 熊谷秀和, 小玉正弘: S. 52年度大気球シンポジウム報告(1978) 141
 - [13] 小玉正弘, 阿部利秋: 理研報告 **52**, 43 (1976)
 - [14] B. Rossi: Rev. Mod. Phys., **20** (1948) 537