

# カ ッ パ 8 型 11 号 機 の 宇 宙 線 測 定

(宇 宙 線 観 測 班)

宮 崎 友 喜 雄 ・ 竹 内 一 ・ 今 井 喬  
吉 沢 忠 良 ・ 大 塚 好 造 ・ 大 矢 幸 司

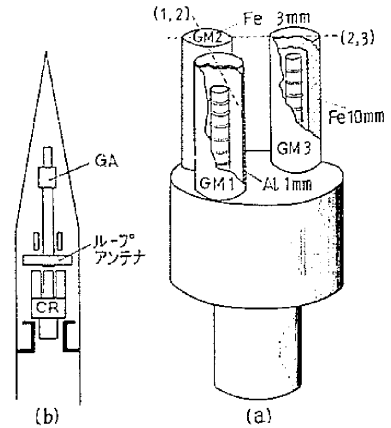
## 1. はし が き

現在筆者らの興味を中心は端的にいえば、内部放射線帯よりも下にもう一つ高エネルギー粒子の捕えられている領域があるかどうか、観測事実から確かめることである (K-8-3, 4 号機の報告参照)。問題の領域における放射線強度をガイガーカウンタで測定した人工衛星のデータを解析してみると、約 200~500 km の間で、一次宇宙線が予想される高度変化よりもはるかに急激に増大しているのではないかということが暗示される。この放射線は太陽活動が盛んな時期には激しい時間変化を示し平均強度も大きい、太陽活動が弱くなるに従って時間変化が少なくなり、平均強度も減少するように見えることが Explorer 1 と Explorer 7 のデータの比較から分かった<sup>2)</sup>。これらは日本付近通過中のデータで必ずしも世界的なものかどうか分からない。東経 140° の中ないし低緯度は地磁気が比較的強いので同高度でくれば空気密度は同じでも、磁場は外より強い空間があるという特殊事情がきいているかもしれない。そこで問題は 1) このような放射線が本当に存在するのか、それとも検出器周囲の物質の二次効果で生じた放射線に起因する誤解であるか? 2) 実在するとすれば起源は何か? との二つになる。もちろん直接的な解決法は周囲物質を極力へらした検出器を問題の空間にもちこみ低高度から高々度まで一貫して測定することであるが、間接的には人工衛星のデータ(だいたい >300 km 以上のもの)と低高度の観測ロケットのデータとを比較することによってもある程度推定することができる。この場合検出器に同じものを使ってもロケットの機体などから生ずる二次放射線の影響が個々の乗物によってかなり変化することが予想されるので、これがどの程度のものか知っていないと結論をまちがえることがあり得る。筆者らは 1960 年 9 月に K-8-4 号機によってシールドが Al の場合と、これに Pb を追加したものとを同時測定し、Pb を追加した方が計数率が約 20% 大きいという結果を得て、この増加分は Pb 中での二次線発生または Pb の存在による  $\gamma$  線の検出能率の上昇によって説明できると考えた。ただしこれらの計数率から出した放射線強度は、20~30% の範囲内で他の研究者の測定値から内挿して推定した値 (single counter の実験) とよく合っている。そこで今回は 200 km までの高度における放射線強度測定値の周囲物質による影響を調べる実験を計画した。これによって、たとえば 350 km 以上で実際得られているような放射線強度が宇宙線の二次効果から説明されるかどうかを検討することができる。

## 2. 装置および実験経過

K-8-11 の測定器は原理的にいえば同寸法のガイガーカウンタに、それぞれ異なる厚さの物質をかぶせ、それらの計数率を比較して周囲物質の直接効果を判定しようとするものである。使用した装置の略図ならびに他の装置との関係を第 1 図(a),(b)に示す。今回は個々のカウンタの計数 (single count と呼ぶ)

以外に、2本または3本のカウンタの同時放電 (coincidence) を測定し、制限された方向から入射する荷電粒子を測るカウンタテレスコープおよび高速粒子の多重発生 (シャワー) 検出器を構成した。テレスコープの計数率を大きくすること、カウンタ相互間に干渉がないようにすることは矛盾する要求であるから、テレスコープの方は統計精度の点では多くを期待することはできなかった。つぎに各部の概要を記す。



第 1 図

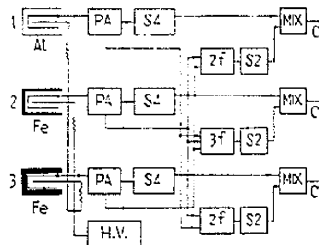
- a) K-8-11 の宇宙線計のスケッチ (1,2), (2,3) の点線はカウンタテレスコープの軸方向を示す。
- b) K-8-11 の開頭部における宇宙線計の位置および他の実験の検出器との関係を示す。

(1) 検出器 ガイガーカウンタ Anton 112, 3本。側壁の厚さ 30 mg/cm<sup>2</sup>—81%, 232 mg/cm<sup>2</sup>—19%, ステンレス。K-8-3, 4,  $\Sigma$ -4-2, Explorer 7 等に使用されているものと同じ。これにそれぞれ Al 1 mm (0.27 gcm<sup>-2</sup>), Fe 3 mm (2.37 gcm<sup>-2</sup>), Fe 10 mm (7.9 gcm<sup>-2</sup>) のシールド (円筒外径 45 mm) を施して用いる。このシールドは高エネルギー宇宙線に対しては、吸収層としてよりはむしろ二次線発生層として作用し、二次線が角分布をもつために見掛上カウンタの有効検出容積を増加させるように働く (実際には低エネルギー放射線も存在するから効果はおのおのの効果の代数和になるはずである)。この効果がはっきりであるよう、シールド以外の物質はなるべく近くにないよう共同実験者のご協力を得て前出の図のような配置となった。おもなところは single counter の計数率の比較であるから、有効容積、計数能率はなるべく揃ったものを使うと後の整理が楽なので、一定の放射

線源をカウンタから定距離に保って計数率を測定し、これを目安として使用するべきカウンタを選び出した。実際に使用したカウンタ3本では差は1%以内である。

同時放電は第1図で(1,2), (2,3)および(1,2,3)のような組合せを用いた。

(2) 回路のブロックダイアグラムを第2図に示す。前回とちがうところは、NPNシリコントランジスタを採用したため信号をカウンタの壁側からとるようにした



第2図 回路のブロックダイアグラム

S4=Scale of 4, S2=Scale of 2, 2f=2重同時放電回路, 3f=3重同時放電回路, MIX=mixer.



第3図 宇宙線の出力電波形

細かい階段は single count の情報で二つの count ごとに転移する。上の2段と下の2段との間の転移は coincidence の発生を示す。

さらに二つあり、No. 8-10 の都合3チャンネルによって6種の情報を送り出す。電源はマンガン乾電池(単3型8本)を用い、ツェナーダイオードによって約6Vの安定化した電源を得ている。リモートコントロールSWにはトランジスタSWを使い、全装置は上記の電源で約4時間確実に動作する。

(3) 高圧の放電を防ぐためO-リングを用いて気密とし高圧部分の要所はシリコンゴムで被覆した。シリコンゴムは他の回路部分の耐震、耐衝撃用にも使用されている。全装置の総重量は3.66kg。

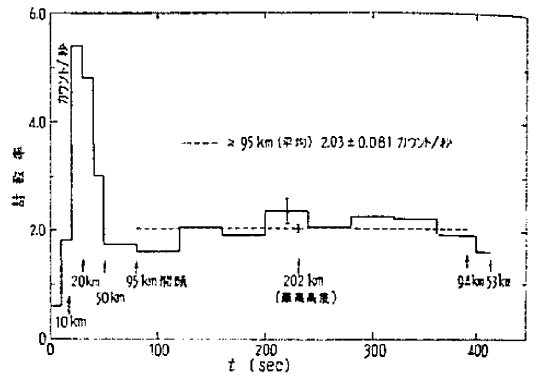
(4) 試験 振動および衝撃試験は定められた様式で森研究室でやっていただいた。振動試験のときに、使用トランジスタに特に弱いもの一半永久的変形をおこすもの一が二三見つかったので交換した。今回実験準備中における唯一のトラブルであった。温度試験は生研の正規の試験の代わりに、回路設計のチェックを兼ねて約-23°から+70°の間、数点平衡に達した後 coincidence の分解時間、一定距離に線源をおいた時の計数率等を測定して適当な動作であることを確かめた。

(5) 実験の経過 K-8-11は1962年12月18日、14時3分、鹿児島の大東宇宙空間観測所(λ=131°04'45"E, φ=31°15'0"N)において、北から東まわりに150°の

方向に高度角79°で発射され、発射後79.6秒(高度~95km)に頭部をひらき、レーダの測定によれば231秒で最高点202kmに達し(地表距離120km)443秒着水した(距離248km)。宇宙線計は順調に動作し大気への再突入によって破損するまで(415秒-高度53km)予定したすべてのデータをとることができた。

### 3. 測定結果

(1) single count いずれのカウンタも時間対計数率の関係はK-8-3,4の場合とほとんど同じ形をしているが、1例として第4図にAl 1mmの場合(GM-1)を示す。50秒(~50km)から231秒(202km)を経て415秒(53km)まで、ほぼ平坦な計数率を示している。解析に必要な数値として、各カウンタについて80-390秒(95km以上)の平均計数率を求め第1表に示す。



第4図 single counter の時間対計数率の関係の1例 Al 1mm の場合。~20 km での Pfozter mex, 50 km 以上の平坦部等は K-8-4 の場合とほぼ同じ。中央部の誤差は40秒の計数に対する  $\sqrt{N}$  誤差および95 km 以上の平均値に対する  $\sqrt{N}$  誤差を示す。

第1表 95 km 以上の高度における平均計数率

GM-1 (Al 1)	2.03 ± 0.081	カウント/sec (カウント総数 639)
GM-2 (Fe 3)	1.83 ± 0.077	( " " 568)
GM-3 (Fe 10)	1.94 ± 0.079	( " " 600)

(2) coincidence count >50 km 以上ではほぼ random な分布を示し、80-415 秒間での総数は

(1,2)=17 coinc., (2,3)=28 coinc., (1,2,3)=4 coinc. であった。二重同時放電テレスコープの計数率は、

$$c_{1,2} = 17/335 \text{ 秒} = 0.0507 \pm 0.0123 \text{ coinc./sec}$$

$$c_{2,3} = 28/335 \text{ 秒} = 0.0836 \pm 0.0158 \text{ coinc./sec}$$

ただし、± は  $\sqrt{N}/\Delta t$  を示す。また計数値から三重同時放電の分は差し引いてある。

(3) 放射線強度 (1) および (2) の計数率から高さでの方向分布を等方向的と考えた時の平均一方向強度  $j$  を出すとつぎようになる。以下、 $S, C_i$  は single およびテレスコープの計数率、 $\epsilon$  は計数能率、 $G, G_i$  は single およびテレスコープの geometric factor とする。

± は  $\sqrt{N}/\Delta t$  からくる誤差を示す、

#### a) single count

$$S = \epsilon_j^2 G, \quad \epsilon = 0.81, \quad G = 52.4 \text{ cm}^2 \text{sr}.$$

GM-1 (Al 1)

$$\bar{j} = 0.048 \pm 0.0019 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

GM-2 (Fe 3) 0.043 ± 0.0019 "

GM-3 (Fe 10) 0.046 ± 0.0019 "

b) coincidence telescope

$$C_t = \epsilon^2 \bar{j}^2 G_t, \quad \epsilon = 0.81, \quad G_t = 1.98 \text{ cm}^2 \text{sr}.$$

(平面近似, counter の丸味補正).

(1,2)  $\bar{j} = 0.039 \pm 0.010 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{sr}^{-1}$

(2,3) 0.064 ± 0.012 "

4. 物質の存在が計数率に及ぼす影響の考察

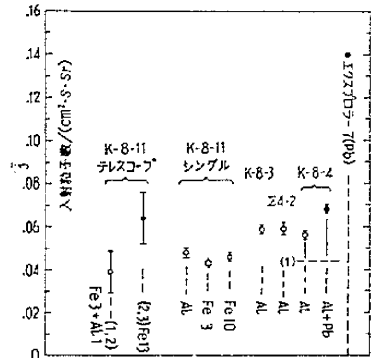
(1) single count に対する影響 第 1 表および 3 の a) で見られるように, 11 号機の実験結果では Fe 10mm, Fe 3 mm, Al 1 mm のシールドの計数率におよぼす効果は有意にでなかった. 統計誤差からくる比較のあいまいさはだいたい 5% である. 核衝突, knock-on 電子の発生を計算で当たってみると Fe 10mm の場合に single count の 5% 程度となる. この実験では各検出器相互間の干渉はできるだけ小さくなるよう配慮したが, まったくないというわけにはいかない. 3 の厚いシールドで発生した二次線が 1, 2 の薄いシールドのカウントにかぶり, それ自身の効果より大きくなっているのではないかという疑問がある. たとえば 2 のカウントから 3 のシールドを見込む立体角の半球面に対する割合とか, テレスコープ (2,3) と (1,2) との計数率の差から推定すると single count の 2~5% となる. この程度であれば各カウントの計数率が 5% 程度以上の差がないことから, Fe 10mm の効果は single の計数率に 10% 以上の差を生じていないと結論される.

(2) 三重同時放電 (1,2,3) は約 300 秒間に 4 回の記録があった. 同時放電の分解時間から偶然の同時放電を計算すると無視できる程度にしかならないから, 実際に二次粒子の発生があったと考えられる. 一つのテレスコープ, たとえば (2,3) を通った粒子が 3 のシールドで knock-on 電子を叩き出し, それが 1 を放電させれば (1,2,3) coinc. となるわけだが, 略算で当たってみると, 1300 秒に比べれば無視できる程度にしかならないか

ら, これは核衝突による多重発生を示すものと考えべきだろう. 二重同時放電のデータを処理する時には, 三重同時放電の分は差し引いてあるが, 多重発生がおこっても三重同時放電とならず二重同時放電 (1,2), (2,3) だけ, あるいは single にだけかかっている場合があるから (1,2), (2,3) からはさらにその分を差し引かねば本当の強度は出ないわけである. したがって二重同時放電から出した平均強度は上限を示すものと考えねばなるまい. ただし発生率はかなり小さいので single count の差に及ぼす効果は小さいであろう.

(3) 平均一方向強度 結果は 3 の (3) に記した通り single, テレスコープのどちらから出した数値も大きな差がない. (2,3) から出した値が若干大きめに出ているのは, 3 のシールドの効果と考えられ, テレスコープのデータを比較する時には注意が必要なることを示唆する. 薄いシールドをもつ (1,2) からの値が single count から出した数値とほぼ合うことから, たとえば 7 線の寄与分は割に少ないといえよう. ただし (2) で述べたようにテレスコープのデータには幾分二次線の効果が入っていることは注意すべきだろう.

(4) K-8-4 その他のデータとの比較 現在までに得られている 200 km 程度までの宇宙線強度の測定値を図示すると第 5 図のようになり, この分析から一応結論



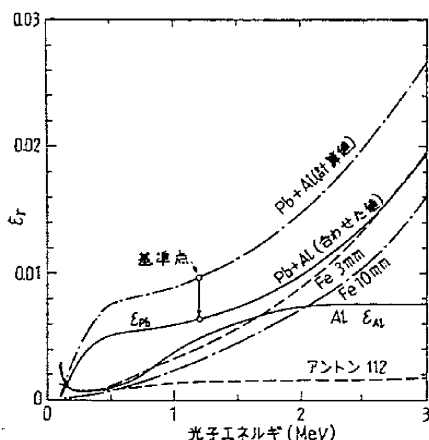
第 5 図 K-8 型, 3, 4, 11 号機および Σ-4 の 2 号機の高空における計数平坦部の計数率から出した平均一方向強度 誤差は  $\sqrt{N}$  誤差. 参考のために Explorer 7 測定値の一例を示す. 誤差 6.3% 程度の測定点が多数あり, 割によくまとまっていて時間変化が少ない. 高度は約 560 km から 1000 km 辺りまで, この間ほぼ平坦な計数率を示していた (1960 年 4~5 月).

第 2 表 放射線と物質との相互作用に関する定数

物質 (mm)	厚さ $x$ (gcm <sup>-2</sup> )	核 衝 突			電磁的相互作用			γ-ray efficiency (calc) at 500 KeV
		原子核あたりの幾何学的断面積 $\sigma$ (cm <sup>2</sup> )	$N_0/A$	$x \cdot \frac{N}{A} \cdot \sigma$	$X_0$ (gcm <sup>-2</sup> )	$\epsilon_0$ (MeV)	$t$	
Al 1	0.27	$450 \times 10^{-27}$	$10.02 \times 10^{-3}$	$2.71 \times 10^{-2}$	24.4	48.8	0.011	0.00089
Fe 3	2.38	$680 \times 10^{-27}$	$7.30 \times 10^{-3}$	$17.3 \times 10^{-3}$	13.8	23.9	0.17	0.0011
Fe 10	7.9	$1590 \times 10^{-27}$	$4.63 \times 10^{-3}$	$57.6 \times 10^{-3}$	5.83	6.9	0.57	0.0007
Pb 1	1.13	$1590 \times 10^{-27}$	$4.63 \times 10^{-3}$	$5.23 \times 10^{-3}$			0.19	0.0052

Geometrical cross section の計算の時に核半径は  $1.2 \times 10^{-13}$  cm を用いた.  $X_0$  は radiation length,  $\epsilon_0$  は臨界エネルギー,  $t$  は radiation length で測った物質の厚さを示す (すなわち  $x/X_0$ ).  $\tau$  線計数能率は実験に用いられた特定の配置について略算した結果である. 詳細は第 6 図および本文参照.

を出すことができる。前項までの整理によって、single counter では Fe 10 mm 程度が検出器の周囲のごく近くにあっても、たとえば Al 1 mm の場合と相互に比較しても 10% 以下の効果にとどまることが分かった。一方 K-8-4 の測定では Pb 1 mm で計数率が約 20% 増加するという結果を得た。また K-8-4 で得た強度の値は 11 号機に比べて 20% 程度大きい (Al 同志で)。これらの実験相互の間では、高圧電源、有効容積のあいまいさの程度は約 5% である。測定した時が 1~2 年離れており、緯度も 10 度程ちがっていることも一応念頭に入れておかねばならないが、まず他の可能性を当たってみよう。第 2 表は放射線と物質との相互作用の程度を示す定数を各測定器について示したものである。この表をみると ①核衝突に関しては 5 列目の数字から Fe 10 mm の方が Pb 1 mm より一桁大きくなる。②Pb, Fe の臨界エネルギーのどちらよりも、非常に高いエネルギーの電子、光子によるカスケード過程に関しては (8 列目の  $\epsilon$ )、Pb 1 mm は Fe 10 mm の 1/3 くらい、③次第にエネルギーが低くなっていくと臨界エネルギーが低いことがきいて Pb の方が大きくなっていく。④さらに低いエネルギーでは電子は直接入射できなくなり  $\gamma$  線がおもにきいてくる。最後の列の低エネルギー  $\gamma$  線に対する計数能率の点では Pb の存在が顕著にきくことが予想される。したがって実験で得られた結果を解釈するには低エネルギー  $\gamma$  線の寄与を考えるのがもっとも自然である。そこで Price<sup>3)</sup> の教科書にある方法を拡張して 0.1~3 MeV の間で efficiency を略算すると第 6 図のようになる。ここで Pb+Al のカーブは、二次電子の散乱が他のものにくらべて大きくなり、有効に検出部に入る割合が小さくなると考え Co<sup>60</sup> を使って実際のセットについて実験して Pb+Al と Al の比を求め、この値に合うように計算値を約 40% へらして作った。他は計算そのままである。



第 6 図 各検出器に対する  $\gamma$  線計数能率の計算値

Pb+Al のもの ( $\epsilon_{pb}$ ) だけは Co<sup>60</sup> を用いた実験で、 $\epsilon_{Al}/\epsilon_{pb}$  を求め、Al だけの場合の値を基準として normalize した。

を約 40% へらして作った。他は計算そのままである。

(第 2 表はこのカーブからとった)。このデータから 0.1~3 MeV の間の  $\gamma$  線のスペクトルを  $dE/E$  として平均計数能率を求めてみる

と  $\bar{\epsilon}_{pb}=0.00785$ ,  $\bar{\epsilon}_{Al}=0.0041$  となる。K-8-4 の計数率の比 (Pb あり)/(Pb なし)=1.2 になるための  $\gamma$  の線強度を求めてみると 1.2 photons·cm<sup>-2</sup>·sec<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup> となる。第 6 図から明らかのように Fe 10, 3 mm と Al 1 mm とは大差はなく、11 号機の実験でも差がみられていないので、こちらは同様の試みをすることができない。K-8-4 について  $\gamma$  線の寄与の分を差し引いて荷電粒子の分を出したのが第 5 図の点線 (1) である。

低緯度の Albedo  $\gamma$  線の実測値は現在利用できるものがないので K. A. Anderson<sup>9)</sup> の高緯度 (~70°) の測定値、Vette<sup>9)</sup> の 41° における値などから推測すると 0.1~0.5 photons·cm<sup>-2</sup>·sec<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup> (>100 keV) 程度にしかならないから K-8-4 の場合は Albedo  $\gamma$  線以外の分が大きい部分をしめていると思われる。多分ロケット機体その他で発生した  $\gamma$  線と推定される。K-8-4 では検出器のまわり相当広い範囲に厚い鉄の部分がある。Σ-4-2 の場合は Al シールドのカウンタ 1 個だけなので上記のような推論ができない。周囲物質の点からいっても、頭部はプラスチック、胴体下部もほとんど軽金属で、重量が一桁軽いロケットなので  $\gamma$  線発生量も格段に小さいはずだから、Σ-4-2 の計数率がやや大きいことは一寸説明しにくく、今まで無視してきた比較的低エネルギー粒子の吸収を考慮に入れるか緯度が僅かに高いこと、または時間変化などで逃げるほか解釈のしようがない。

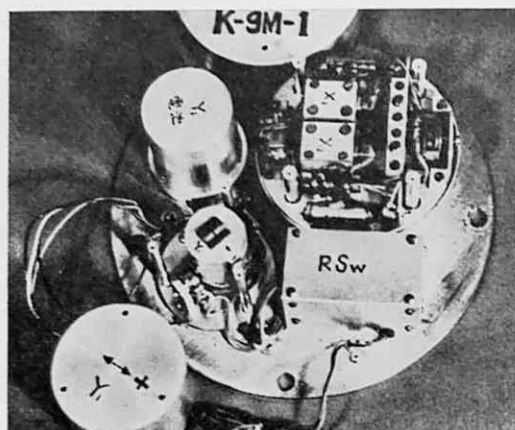
## 5. 結 論

前節の考察をまとめてみると、検出器近傍ではほぼ全立体的角をおおうようなシールドの効果は Fe 程度の原子番号の材料であれば 10 gcm<sup>-2</sup> 程度でも single count に及ぼす効果は 10% 以下。しかし  $\gamma$  線が顕著に発生していると、20~30% 計数率がふえる (K-8-4 の場合程度では)。しかも Pb のように原子番号の大きい物質を用いると、Al, Fe などに較べ、さらに 20% (1 mm 厚の場合) 程度の計数率の増加が見られ、 $\gamma$  線発生量の少ない環境での実験にくらべ 50~60% の計数増となりうる。さらに Pb シールドの配置によっては  $\gamma$  線計数能率が K-8-4 のものより大きくなりうるので、良い環境にくらべると 100% 程度計数率が上がることも考えられよう。しかし数回の測定結果を総合してみると、時間、緯度の変化も含め種々の効果をひっくるめて、第 5 図程度のちりばりだから、特に  $\gamma$  線の検出能率が高い場合またはその発生量が多い実験でなければ、だいたいこの程度の範囲におさまると思われる。この点から考えると Explorer 7 等の計数率 (第 5 図右端) は宇宙線の二次効果では説明しきれそうもなく、かなり高エネルギー粒子が捕われているか、あるいはやや透過性の  $\gamma$  線を検出器近傍で発生させるような粒子 (電子が最も可能性あり) の存在を考えさせると結論することができよう。

謝辞 共同研究として実験の全般にわたり、ご協力いただき、測定を可能ならしめた実験主任 斎藤教授、副主任 玉木教授初め実験班各位に深甚の謝意を表する。

(1963 年 4 月 23 日受理)

—文献は 94 ページへのつづき—



第 9 図

第 2 表

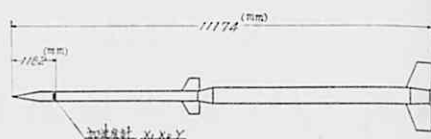
		計測値	計算値および計画値
ブースタ	最大加速度 (g)	28.0	27.0
	最大減速度 (g)	-13.0	-12.6
	燃焼秒時 (sec)	4.7	4.6
	切断秒時 (sec)	5.45	5.0
メイン	最大速度 (m/s)	995.0	1,040.0
	点火秒時 (sec)	6.1	6.0
	最大加速度 (g)	32.0	33.3
	最大減速度 (g)	-19.3	-19.0
	燃焼秒時 (sec)	3.8	3.7
	点火時速度 (m/s)	820.0	835.0
	最大速度 (m/s)	1,580.0	1,590.0
	全飛しょう秒時 (sec)	141.0	142.0

第 3 表

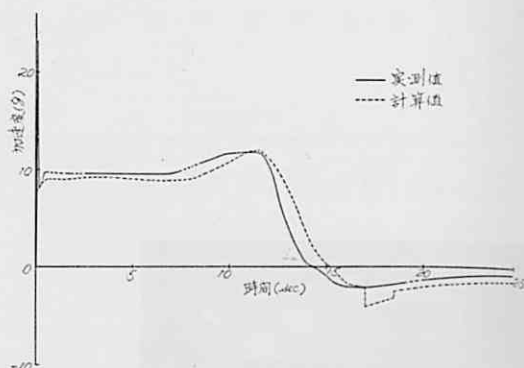
		計測値	計算値および計画値
ブースタ	最大加速度 (g)	23.6	26
	最大減速度 (g)	-9.3	-12
	燃焼秒時 (sec)	7.3	7.3
	切断秒時 (sec)	8.23	7.5
メイン	最大速度 (m/s)	1,222.0	1,240.0
	点火秒時 (sec)	18.32	18.0
	最大加速度 (g)	41.2	43.0
	最大減速度 (g)	-7.1	-8.8
	燃焼秒時 (sec)	5.17	5.17
	点火時速度 (m/s)	824.2	730.0
	最大速度 (m/s)	2,260.6	2,210.0
	全飛しょう秒時 (sec)	413.2	441.0

第 4 表

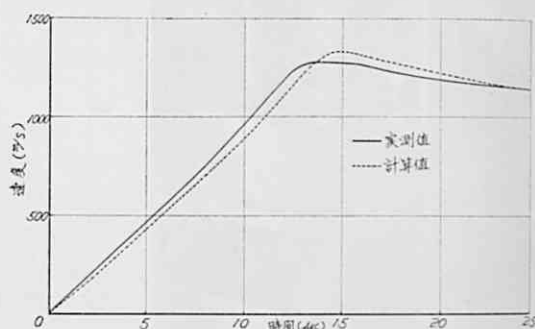
		計測値	計算値および計画値
ブースタ	最大加速度 (g)	11.7	11.9
	最大減速度 (g)	-2.1	-4.2
	燃焼秒時 (sec)	16.2	17.0
	切断秒時 (sec)	19.36	18.5
	最大速度 (m/s)	1,275.0	1,330.0
	開頭秒時 (sec)	45.66	46.0
	全飛しょう秒時 (sec)	229.22	



第 10 図 K-9M-1 加速度計搭載位置



第 11 図



第 12 図

加速度計は従来のロケットのように最先端部に組み付けたものではなく、第 10 図に示すように平行部に取り付け、第 9 図のように配置した。

#### 推進軸加速度計

ブースタの燃焼および切断は計画通り異常なく行なわれた。計測された加速度曲線を第 11 図、第 11 図より求めた速度曲線を第 12 図に示す。計測結果より得られた主要数値を第 4 表に示す。 (1963 年 4 月 9 日受理)

(126 ページよりつづく)

#### 文 献

- 1) 宮崎・竹内・今井・大塚・大矢 生産研究 13 411 (1961)
- 2) H. Takeuchi, Rep. Ionos. Space Res. Japan 16 64 short note (1962)
- 3) G.H. Ludwig and W.A. Whelpley, J. Geophys. Res. 65 1119 (1960)
- 4) W.J. Price, Nuclear Radiation Detection p. 136, McGraw-Hill (1958)
- 5) K.A. Anderson, Phys. Rev. 123 1435 (1961)
- 6) J.I. Vette, J. Geophys. Res. 67 1731 (1962)