

一次電子シャワー検出用スクリーン・タイプ X 線フィルムの特性

小林 正*・藤井 正美**・西村 純**・平良 俊雄***・
会津 英子#・古森良志子#

Characteristics of Screen Type X-ray Films
to Detect Primary Electron Showers

By

Tadashi KOBAYASHI, Masami FUJII, Jun NISHIMURA, Tosio TAIRA,
Hideko AIZU, Yoshiko KOMORI

Abstract: Non-screen type X-ray films have been used in emulsion chamber experiments to detect high energy showers in cosmic rays. If we use Sakura type-N X-ray films, the detection threshold is about 1 TeV as depending on the exposure conditions. In order to improve detection threshold, we have tested new screen type X-ray films such as Fuji G12-RXO and G. S-RXO stacked in the emulsion chamber exposed at balloon altitude. The detection threshold of G. S-RXO is improved to be about 150 GeV, and the use of these films will be quite effective to the study of showers above 150 GeV.

1. はじめに

一次電子は銀河の中でシンクロトン輻射や逆コンプトン効果でエネルギーを失う。そ

* 青山学院大学
** 宇宙科学研究所
*** 神奈川大学
神奈川衛生短期大学

のエネルギー損失は電子のエネルギーの2乗に比例している。このため高エネルギーほどエネルギー損失が著しく、電子のスペクトルを観測することにより宇宙線の銀河内伝播について重要な手がかりが得られるとされ、多くの観測が行われてきた。

我々は1968年以来、エマルジョンチェンバーを用い一次電子の観測を行ってきた。エマルジョンチェンバーは写真感光材（原子核乾板、X線フィルム）と金属板（鉛）を交互に重ねたもので、電子や γ 線がチェンバーに入射すると電子シャワーをおこす。このシャワーの大きさからエネルギーを推定できると同時に、各層の原子核乾板中の飛跡をシャワーの出発点まで追跡し顕微鏡で詳しく飛跡を調べることにより親の粒子を分類することができる。また、比較的軽量で大面積且つ大きな立体角を取れるなどの特徴がある。

高エネルギーの電子シャワーはチェンバー中に挿入されたX線フィルムに黒化スポットを作る。この黒化スポットは顕微鏡を用いなくとも肉眼で見出すことができ、大面積のチェンバーを短時間でスキャンができる優れた検出器である。従来、ノン・スクリーン・タイプX線フィルム（サクラ・Nタイプ）がこの目的のために使われてきた。1970年にはNタイプを用い450 GeV以上のシャワーを肉眼で検出できた[1]、しかし、最近のNタイプフィルムは感度が著しく低下し、1 TeV以下のシャワーを検出することが難しくなっている。

我々がエマルジョンチェンバーを用いて観測した30~2000 GeV領域の一次電子の観測値とモデル計算の比較を図1に示した[2]。宇宙線の銀河内伝播のモデルによる計算との適合性を調べるのには、観測値の統計精度が充分でなく、更に精度の良い観測が必要である。特に100~500 GeV領域では、チェンバー中に充分な数の一次電子が記録されているが、シャワー検出の困難さが原因で詳しく調べることができず、観測値の精度が悪くなっている。このため、シャワー検出にむいた色々な市販のX線フィルムが調べてきたが、この領域のシャワーを検出できる感度の高いものは見いだされなかった。

最近、医療用に開発されたスクリーン・タイプX線フィルムのX線に対する感度が向上してきた。我々は数種類のスクリーン・タイプX線フィルムを飛行機や気球に搭載し、こ

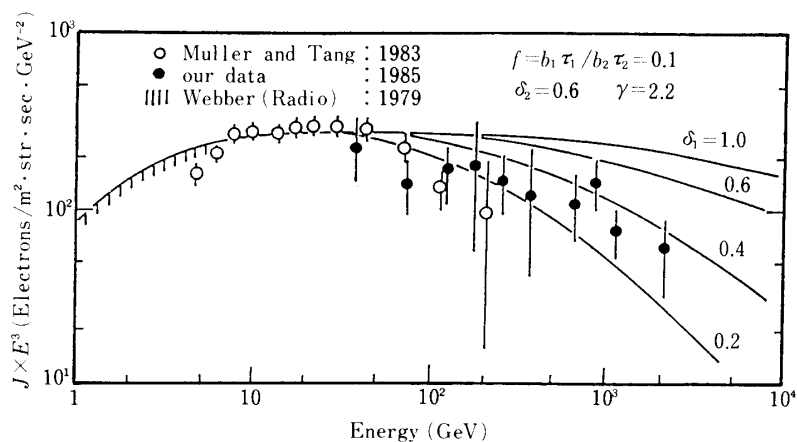


図1 一次電子の観測値と Nested Leaky Box Model の比較

これらのフィルムが実際に宇宙線重粒子や電子シャワーに対し高い検出感度を有することを確かめた[3][4][5]。1985年にはG8-RXOを挿入したエマルジョンチェンバーによる気球実験と東京大学原子核研究所の電子線照射実験[6]により、G8-RXOの感度は電子シャワーに対して高く、検出限界をN-タイプの数分の一と著しく下げることができ、250 GeV程度のシャワーでも検出できることが判った。

1988年の気球実験では蛍光体層の厚さと蛍光体粒子の大きさを変えた新しい増感紙(G12およびこれを改良したG・S)の使用とRXOフィルムの現像条件の改良により、検出限界を更に下げることができ、150 GeV程度のシャワーを検出できることが見いだされた[7]。このフィルムを使用することにより、一次電子の大気中でのエネルギー損失を補正し、200 GeV以上の一次電子の観測が可能となったので報告する。

2. スクリーン・タイプX線フィルム

スクリーン・タイプX線フィルムは2枚の増感紙の間に光に感度を持つ両面フィルムをはさんで使用する。増感紙は反射層を設けた合成樹脂シート支持体上に、蛍光体層を140~500 μm の厚さに塗布したものである。平均5~10 μm の大きさの蛍光体粒子が用いられ、X線、 γ 線、荷電粒子が増感紙を通過する際、電離損失に応じて生成される発光を利用し、高い感度でX線を検出することができる。

増感紙用蛍光体としては CaWO_4 が長い間使われてきた。ここ10年の間に発光強度が高く、X線被ばくの低減が図れる材料として希土類元素を含んだ新しい蛍光体が開発され、使用されるようになった。代表的な蛍光体の特徴を表1に示す[8]。現在、発光効率が高く、X線吸収が大きく、化学的安定性の良い増感紙用蛍光体として使用されているものは $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$ である。この蛍光体の発光は549 nmの波長に主ピークがあり、この波長域に感度の高いオルソタイプX線フィルムと組み合わせて使用されている。我々はこの蛍光体を用いた富士写真フィルムK.KのG8増感紙とRXOフィルムを組合せ、電子線による照射と気球実験により電子シャワーに対する感度を調べた。

表1 増感紙用蛍光体

蛍光体	特徴
1) $\text{BaFCl}:\text{Eu}^{2+}$	感度は CaWO_4 の2~5倍であり、鮮鋭度は非常に良い、しかし粒状性が著しく劣る。
2) $\text{BaSO}_4:\text{Eu}^{2+}$	総合的に CaWO_4 と同程度の品質。
3) $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$	X線吸収、発光効率、X線残光、化学的安定性の点から優れ、最もよく使用されている。
4) $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$	材料中に含まれる ^{138}La 、 ^{227}Ac 、 ^{227}Th などの放射線の影響が問題になる。
5) $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$	X線吸収が低く、粒状性が劣る。
6) $\text{LaOBr}:\text{Tb}^{3+}$ $\text{LaOBr}:\text{Tm}^{3+}$	発光効率は高いが、耐湿性に劣る。

3. 実 験

3-1 電子線による照射実験

G8-RXO フィルムの粒子線に対する感度特性を調べるために、N-タイプ、#200等のX線フィルムと原子核乾板を組み合わせたチェンバーを作り、1985年東京大学原子核研究所の電子シンクロトン加速器を用い、760 MeVの電子線の照射実験を行った。RXOは20°Cのコニドールで10分、N-タイプと#200は25分の現像を行った。

フィルムの黒化濃度はマイクロフォトメーターで測定した。黒化スポットの真の黒化濃度 D は

$$D = D_{ob} - D_{B.G} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 D_{ob} は照射部について測定した黒化濃度、 $D_{B.G}$ は非照射部のバックグラウンド濃度である。 $D_{B.G}$ はカブリ濃度 (D_{fog})、フィルムの下塗りとベースの濃度、宇宙線や環境放射線による感光を加えたものである。

D に対応する電子数は原子核乾板中の飛跡を計数し、電子数密度 ρ と黒化濃度 D の関係を図2に示した。破線は太田[9]らのN-タイプと#200に対する関係式

$$D = D_0 [1 - 1/(1 + \alpha\rho)] \quad (2)$$

で測定値に合わせ、実線はのちに議論するRXOの光学特性曲線を測定値に合わせたものである。

人が肉眼で識別できる最小黒化濃度を0.1程度とすると、図2より、検出限界はG8-RXOで $1.5 \times 10^5 / \text{cm}^2$ 、#200で $1.6 \times 10^5 / \text{cm}^2$ 、N-タイプで $4 \times 10^5 / \text{cm}^2$ となり、これは各々約250, 250, 700 GeVのシャワーエネルギーに相当している。

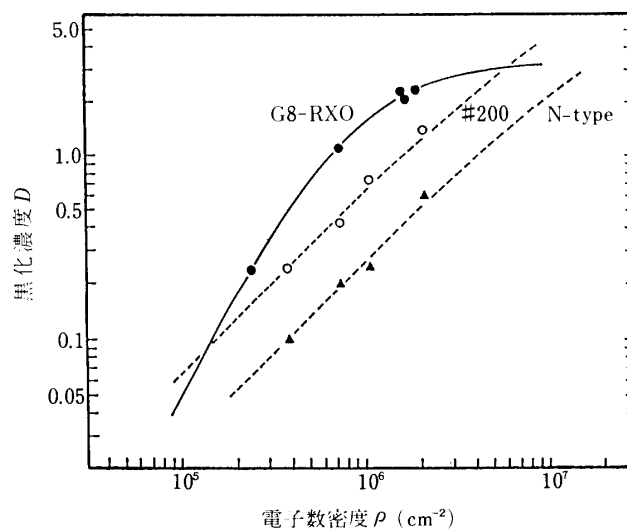


図2 G8-RXO, #200, N-タイプ X線フィルムの特性曲線

3-2 気球実験

G 8-RXO を挿入したエマルジョンチェンバーは 1984 年と 1985 年に三陸大気球観測所より放球された。1984 年チェンバーには 4.9~7.6 C. U の間に 4 層挿入し、平均高度 9.0 mb で 9 時間 36 分の観測を行った。1985 年チェンバーには 2.7~5.8 C. U の間に 6 層挿入し、平均高度 9.2 mb で 15 時間 40 分の観測を行った。RXO フィルムは 20°C のレンドールで 10 分現像を行った。

1985 年チェンバーの解析から得られた γ 線スペクトルを使い電子シャワーに対する G 8-RXO の検出限界を調べた。図 3 に大気 9.2 mb で観測された γ 線の微分スペクトルを示した。図中の実線は宇宙線と空気核との核相互作用により作られた π^0 中間子の崩壊に起因するものとして計算された村上[10]らの理論値、点線は西村[11]らのエマルジョンチェンバーによる観測値をこの観測高度に規格化したものである。期待値と解析結果は 250 GeV 以上のエネルギーで良く一致している。このことより、G 8-RXO の使用でシャワーの検出限界を 250 GeV まで下げられることが確認された。この結果は電子線照射実験の予測値とも良く一致する。一次電子に対する検出限界は、電子の大気中でのエネルギー損失を

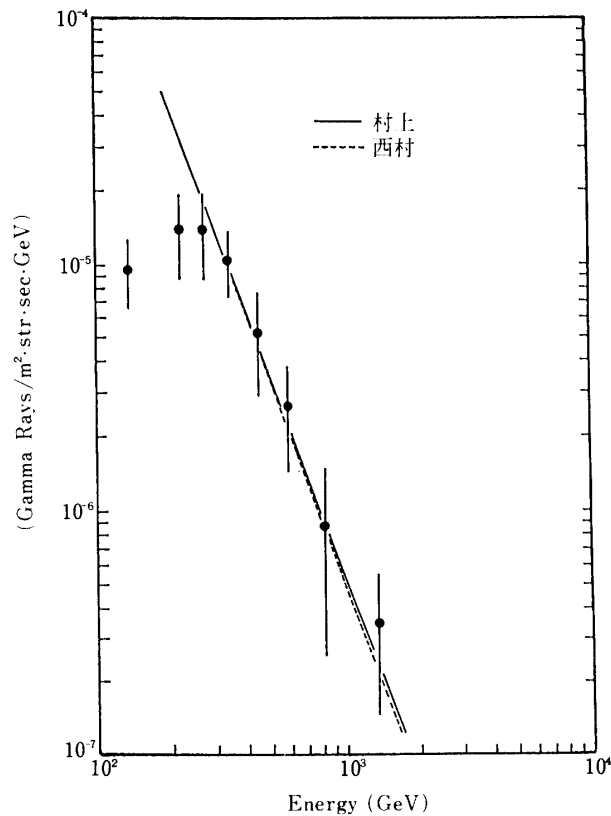


図 3 観測高度 9.2 mb での γ 線の微分エネルギースペクトル。
 $(S\Omega T = 1.14 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str})$
 実線と点線は村上と西村の値をこの高度に規格化してある。

補正する必要があるために 300 GeV である。

4. 検出限界の改良

4-1 新しい増感紙

最近、G8よりもX線に対し1.5倍感度の高いG12が富士写真フィルムK.K.で作られた。G12はG8蛍光体粒子の大きさ平均 $5\mu\text{m}$ よりも大きい平均 $10\mu\text{m}$ の粒子を使い、蛍光体層を約1.3倍厚く塗布し発光量を高めるようにした増感紙である。表2に示すようにG8の蛍光体層の厚さは片面 $165\mu\text{m}$ であり、G12は前面で $140\mu\text{m}$ 裏面で $280\mu\text{m}$ となっている。我々は更に発光量を高めるために化成オプトニクスK.K.に依頼し $10\mu\text{m}$ の蛍光体粒子で片面 $500\mu\text{m}$ の増感紙(G・S)を作った。これは蛍光体層の厚さがG8の約3倍になっている。この新しい増感紙G12とG・Sを使うことにより、シャワーの検出限界を下げることを試みた。これらの増感紙の仕様を表2にまとめた。一般に蛍光体層を厚くすると光の拡散によって像のコントラストが悪くなる。また蛍光体層の厚さが $160\mu\text{m}$ をこえると光の透明度は10%以下になってしまう[12]。ただし発光量は入射粒子の通過した距離に比例するので蛍光体層を厚くすることによってシャワーの検出感度をある程度まで上げることができると期待される。

4-2 RXO フィルムの光学特性

スクリーン・タイプ用X線フィルムはX線や荷電粒子で蛍光体を刺激したときの発光

表2 スクリーン・タイプX線フィルムの仕様

蛍光体 ; $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$		
フィルム ; RXO-H		
G8		
	支持体の厚み (μm)	スクリーンの厚み (μm)
前面側	230	165
裏面側	230	165
総厚み	460	330
G12		
前面側	190	140
裏面側	190	280
総厚み	380	420
G・S		
前面側	350	500
裏面側	350	500
総厚み	700	1000

により感光する。このため、感度特性は光学特性を反映したものとなり、光学特性と同じ形になる。また、スクリーン・タイプ X 線フィルムによるシャワーの検出限界は宇宙線や環境放射線によるフィルムのバックグラウンド濃度の増加によっても影響を受けることが知られている[13]。これはフィルムの光学特性が関係しているためであり、ここでは現像条件による光学特性の変化、フィルムのカブリによる感度の変化などを詳しく調べることにする。

a) 黒化濃度 D -露光量 E 特性

感光材料の応答は特性曲線で評価する。露光量 E ($E = \text{露光強度} \times \text{露光時間}$) に対する黒化濃度 D をプロットし、 D - E 曲線を求める。RXO フィルムの現像条件(現像温度, 現像時間)に対する光学特性を調べるために、 $506 \pm 0.7 \text{ nm}$ の単色光を、照度を一定にし、露光時間を変え照射した。照射したサンプルは表 3 の条件で現像を行った。図 4, 図 5 に現像

表 3 RXO フィルムの現像条件

現像液：レンドール、

定着液：レンフィックス、10分

現像液の温度 (°C)	現像時間 (分)
22.0 ± 0.2	5, 10, 15, 20, 30
20.0 ± 0.2	5, 10, 15, 20, 30, 40
18.0 ± 0.2	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60
15.0 ± 0.2	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60
10.0 ± 0.2	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 80, 100, 120

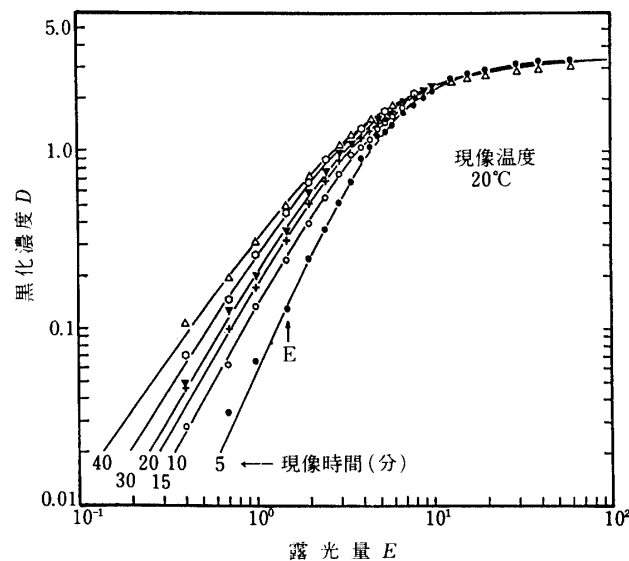


図 4 現像温度 20°C での RXO フィルムの光学特性曲線。現像と定着は表 3 の条件で行った。

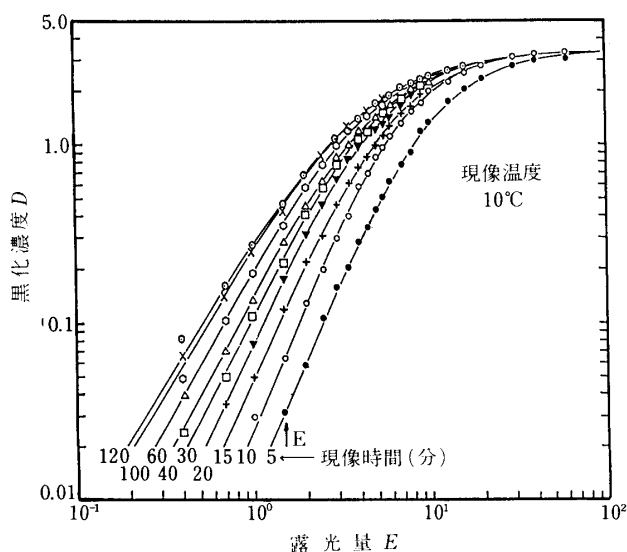


図5 現像温度 10°Cでの RXO フィルムの光学特性曲線。現像と定着は表3の条件で行った。

温度が 20°C と 10°C で、各々の現像時間に対する光学特性曲線を示した。E と D の関係は次の式で測定値に合わせた。

$$D = D_0 \{1 - \ln[1 + (E/E_0)^n] / (E/E_0)^n\} \quad (3)$$

ここで

D_0 ；飽和状態での黒化濃度， $D_0 = 3.4$

E_0 ；飽和が始まる露光量

n ；E-D 曲線の傾き，現像温度 20°C では現像時間 5～40 分で $n = 2.20 \sim 1.42$ まで変わる。図4中に矢印で示した露光量 E のところでは現像時間 5 分と 40 分で黒化濃度を比べると約 3.8 倍に増加している。

b) 現像速度

現像条件が一定なとき，現像速度を表わす最も簡単な実験式は，ある黒化濃度 D のときの濃度増加率が，そのときまでに現像されないで残っている乳剂量に比例すると考え，次式で与えられる [14]。

$$dD/dt = M(D_0 - D) \quad (4)$$

ここで D_0 は，現像時間が無限大のときの黒化濃度，D は現像時間 t のときの黒化濃度，M は現像液の性質や温度等によってきまる定数である。(4)式を積分し次式が導かれる。

$$D = D_0 \{1 - \exp[-M(t - t_0)]\} \quad (5)$$

現像速度の温度による変化は，Arrhenius の反応速度式で表わされる。

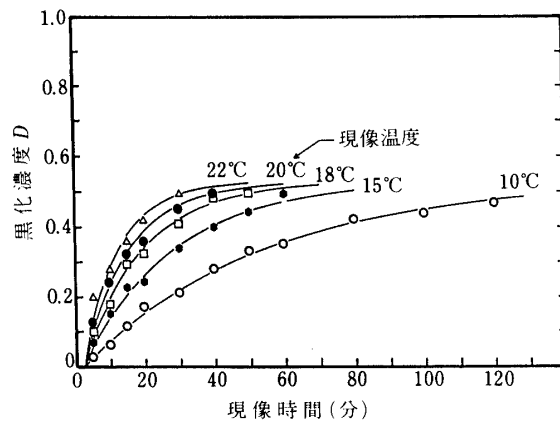


図6 露光量 $E=1.5$ での現像時間に対する黒化濃度. 実線は(7)式を用い計算した値.

$$M = PZ \cdot \exp(-E_{\text{act}}/kT) \quad (6)$$

ここで E_{act} は潜像核による現像の活性化エネルギー (eV), k は Boltzmann 定数 (eV/°K), T は絶対温度 (°K), P は確率因子, Z は衝突頻度である. (6)式を使い, (5)式を書き直すと次式が得られる.

$$D = D_0 \{1 - \exp[-A(t - t_0) \cdot \exp(-E_{\text{act}}/kT)]\} \quad (7)$$

ここで $A = PZ$ は定数である.

c) 現像時間に対する黒化濃度の変化

露光量 $E=1.5$ (図4, 5中の矢印の位置)での黒化濃度と現像時間の関係を図6に示した. 実線は(7)式に $E_{\text{act}}=0.965$ eV, $A=3.00 \times 10^{15}$ /分, $D_0=0.53$, $t_0=2$ 分の値を用い測定値に合わせた. 測定値と計算値は現像温度 10°C から 22°C の範囲で一致している. $E=1.5$ でフィルムの銀粒子数を顕微鏡で測ると, 粒子数は現像時間と共に増加し, 銀粒子の面積を $5 \mu\text{m}^2$ と仮定し黒化濃度を計算すると図6と同じ傾向を示した.

d) カブリ濃度 D_{fog}

図7に現像時間に対するカブリ濃度の変化を示した. D_{fog} の変化は次式で測定値に合わせた.

$$D_{\text{fog}} = B(t - t_0) \cdot \exp(-E_{\text{act.fog}}/kT) + C \quad (8)$$

ここで $E_{\text{act.fog}}$ はカブリ現像の活性化エネルギー, B は定数, C は $t=0$ での濃度である. $E_{\text{act.fog}}=1.27$ eV, $B=1.11 \times 10^{20}$ /分, $C=0.11$, $t_0=3$ 分の値を用い計算した値を図中に実線で示した.

図6と図7から現像温度 10°C と 20°C での D と D_{fog} の関係を図8に示した. ここで実線は計算値である. $D_{\text{fog}}=0.2$ で 10°C と 20°C を比較すると S/N が25%程度良くなっている.

この原因は、カブリ現像の活性化エネルギー (1.27 eV) が潜像核による現像の活性化エネルギー (0.965 eV) より大きいことによる。

e) 電子線に対するフィルムの直接感光

RXO の電子線に対する直接感光は $E_{\max}=2.26$ MeV の $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}\beta$ 線源を用い #200, #

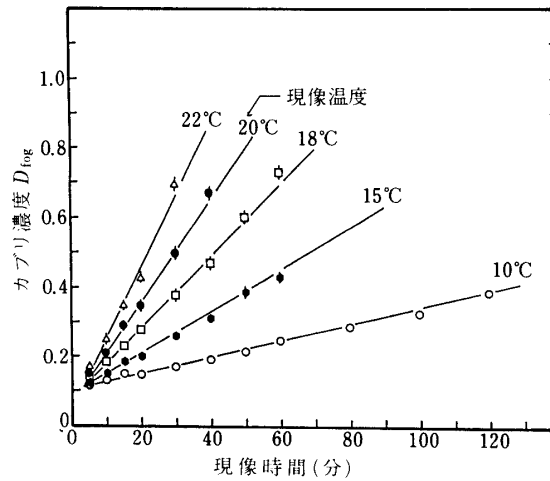


図7 現像時間に対するカブリ濃度。実線は(8)式を用い計算した値。

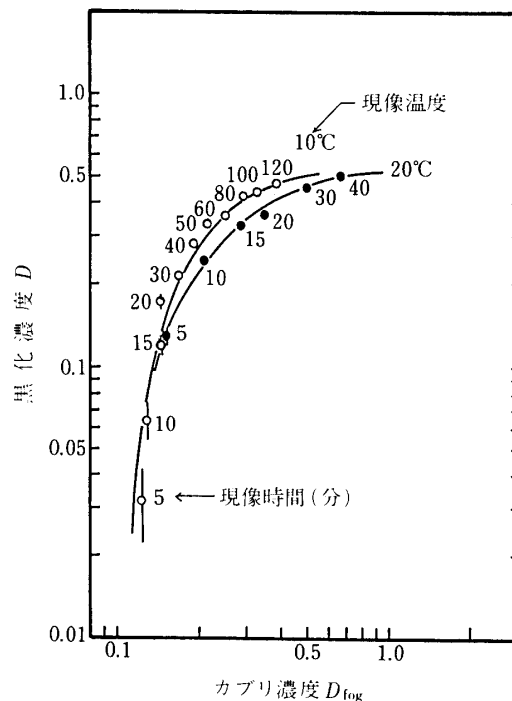


図8 露光量 $E=1.5$ で、現像時間を増加させた場合の黒化濃度に対するカブリ濃度。実線は(7)式と(8)式を用い現像温度 10°C と 20°C に対して計算した値。

150 と相対比較し決めた。D=0.1 で感度を比べると、RXO は# 200 の約 5 分の 1 である。この結果と太田[15]らの 20°C、10 分現像での# 200 の特性曲線を使うと、RXO 粒子線による直接感光は G 8 スクリーンからでる光の感度の 4~5 % 程度で非常に低感度である。

5. 新しいスクリーン・タイプ X 線フィルムを用いた気球実験

G 8 の他に新しい G 12 と G・S を加えたエマルジョンチェンバーは 1988 年 8 月 20 日之内浦より放球され、平均高度 6.9 mb で 10 時間 47 分の観測を行い、中国の漂陽市西北 10 km の地点で回収された。図 9 にチェンバーの構造を示した。深さは 8.3 C. U で、スクリーン・タイプ X 線フィルムは 1.5~8.3 C. U の間に 12 層入れている。高感度の G 12 と G・S は低エネルギーのシャワーまで効率良く検出するために 2.2~3.6 C. U の間に 2 層ずつ 4 層挿入した。露出した RXO フィルムは感度を高め、カブリ濃度を押さえるために 10°C のレンドールで 45 分現像を行った。

肉眼で検出したシャワーを使いスクリーン・タイプ X 線フィルムの感度特性を調べた。シャワーの黒化濃度は 100 μm 角のスリットのマイクロフォトメーターで測定し、それに対応する原子核乾板中で電子数密度を測り、図 10 に D-ρ 特性曲線を示した。図中の実線は 10°C 現像での光学特性曲線を測定点に合わせた。D=0.1 で感度を比較すると、G・S は 2 倍、G 12 は 1.3 倍 G 8 よりも高感度で、G・S の検出限界は $9.5 \times 10^4 / \text{cm}^2$ となり、これは 150 GeV のシャワーエネルギーに相当している。

このチェンバーの解析で得られた 6.9 mb での γ 線スペクトルとこの観測高度に規格化した村上と西村の値を合わせて図 11 に示した。期待値と解析結果は 150 GeV 以上のエネ

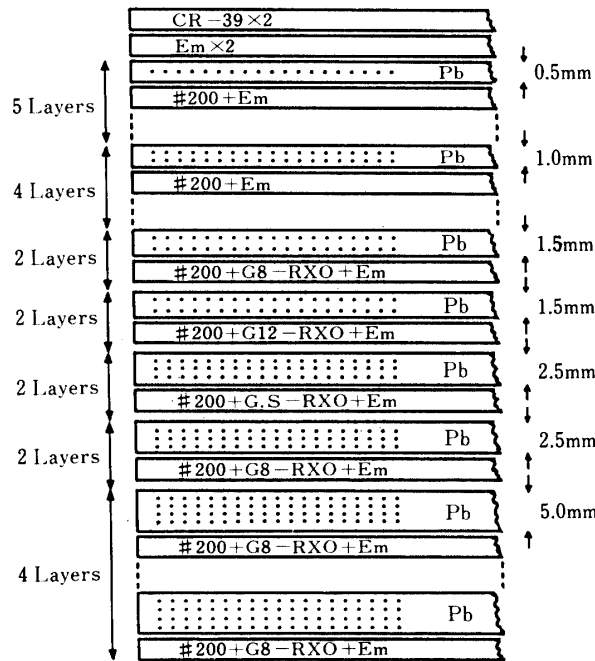


図 9 1988 年チェンバーの構造

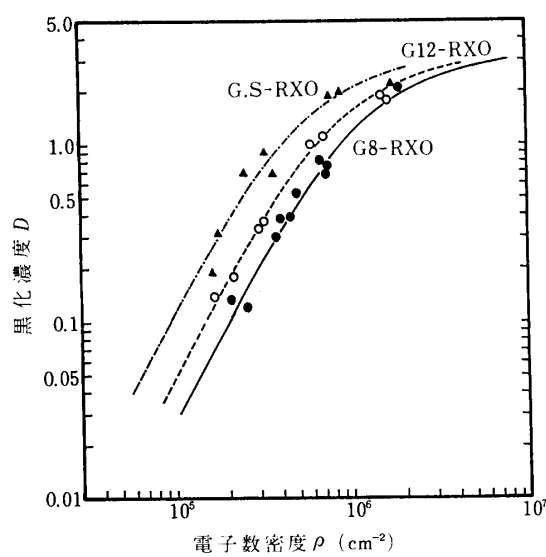


図10 G8-RXO, G12-RXO, G・S-RXO の特性曲線

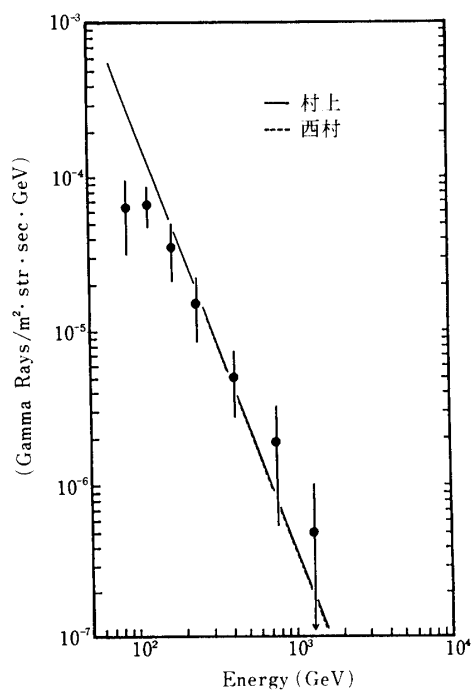


図11 観測高度 6.9 mb での γ 線の微分エネルギースペクトル
 $(S\Omega T = 3929 \text{ m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str})$
 実線と点線は村上と西村の値をこの高度に規格化してある。

ルギーで一致している。このことより、G・S-RXOの使用でシャワーの検出限界を150 GeVまで下げられることが確認された。

6. ま と め

一次電子観測のために新しいスクリーン・タイプX線フィルムを用いたエマルジョンチェンバーを設計した。このチェンバーを気球に搭載しシャワーの検出限界を150 GeVまで下げられることを確かめた。シャワーの検出限界は増感紙とX線フィルムの感度に依存していると同時に、宇宙線や環境放射線によるフィルムのバックグラウンド濃度の増加によっても影響を受ける。

$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$ 蛍光体の粒子の大きさと蛍光体層の厚さを増すことにより、G8よりも明るく発光量の高い、高感度の増感紙が得られた。

RXOフィルムの光学特性曲線は現像条件(現像時間、現像温度)により変化する。現像温度と露光量が一定のとき、現像時間の増加に対する黒化濃度の増加は現像速度の式を用いることで測定値に良く合わせられる。また温度による現像速度の変化はArrheniusの式を用いることで測定値に合わせられる。

現像温度による黒化濃度-カブリ濃度特性の変化は潜像核による現像の活性化エネルギーよりも、カブリ現像の活性化エネルギーが大きいことによる。このことから、カブリ濃度の増加を押しえられる低温で長時間RXOフィルムを現像することによりS/Nが良くなり、シャワーの検出限界が下げられる。

一次電子シャワーに対する検出限界は、電子の大気中でのエネルギー損失の補正を行うため、1988年チェンバーでは200 GeVである。この新しいスクリーン・タイプX線フィルムを挿入したエマルジョンチェンバーで、高度3~4 mb, 20~30時間観測すると、150~500 GeV領域の一次電子のスペクトルが精度よくおさえられ、宇宙線の銀河内伝播について有力な情報が得られると思われる。

謝 辞

気球実験に関して、宇宙科学研究所気球工学のスタッフの方々には観測器の製作から回収に到るまで、並々ならぬご協力をいただき、厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Nishimura, J., et al. 1969, Proc. 11th Internat. Cosmic Ray Conf., OG-43
- [2] Nishimura, J., et al. 1985, Proc. 19th Internat. Cosmic Ray Conf., 9, 539
- [3] 藤井正美. 1985, エマルジョン・シンポジウム報告., 114
- [4] 吉田篤正. 1986, 測定器, 測定技術研究会報告., 29
- [5] 小林 正. 1986, 測定器, 測定技術研究会報告., 32
- [6] Taira, T., et al. 1985, Proc. 19th Internat. Cosmic Ray Conf., 6, 239
- [7] 小林 正. 1989, 一次電子研究会報告., 23
- [8] 蛍光体同学会編. 蛍光体ハンドブック, オーム社., 284
- [9] Ohta, I., et al. 1979, Nucl. Inst. Methods, 161, 35

- [10] Murakami, K., et al. 1979, Proc. 16th Internat. Cosmic Ray Conf., 1, 484
- [11] Nisimura, J., et al. 1980, Ap. J., 238, 394
- [12] 寺岡克哉他. 1987, 大気球シンポジウム報告., 115
- [13] 吉田篤正他. 1985, 宇宙科学研究所報告., 特集第13, 55
- [14] James, T. H. The theory of phtographic process (4th ed, MacMillan, New york, 1977)., 407
- [15] Ohta, I., et al. 1974, Proc. Internat. Cosmic Ray Sympo. High Energy Phenomena., 96