

JAERI-M  
85-058

NaI(Tl) シンチレーション検出器の  
宇宙線に対する応答特性の解析

1985年5月

長岡 錠・森内 茂

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

NaI(Tl)シンチレーション検出器の  
宇宙線に対する応答特性の解析

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

長岡 錠・森内 茂

(1985年4月15日受理)

高度 16000 ft, 23000 ft, 31000 ft 及び 37000 ft での水平飛行を含む飛行中の航空機内において NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた宇宙線観測を行った。飛行範囲の緯度はほぼ一定で 34°N から 35°30' であった。測定は  $3''\phi \times 3''$  の NaI(Tl)シンチレーション検出器を備えた D B M 線量測定器 (D B M 系) 及び  $3''\phi$  球形,  $3''\phi \times 3''$ ,  $2''\phi$  球形,  $2''\phi \times 2''$ , 及び  $1''\phi \times 1''$  の NaI(Tl)シンチレーション検出器と多重波高分析器を組み合せた測定系 (スペクトル系) の 2 系統を用いて行った。

本測定は、環境  $\gamma$  線の精密測定の上で必要となる各検出器の宇宙線感度等の情報を入手することが最大の目的であり、宇宙線強度の高度分布、種々のエネルギー帯域情報間の相関、検出器の重量による宇宙線応答特性などを明らかにした。また、 $\gamma$  線線量測定の際に問題となる 3 MeV 以下のエネルギー領域における地上での宇宙線寄与分を各検出器について推定し、3 MeV 以上の全計数率を指標とした場合、照射線量率相当値換算でそれぞれ  $0.23 \mu\text{R}/\text{h}$  ( $3''\phi$  球形 NaI(Tl)シンチレーション検出器),  $0.22 \mu\text{R}/\text{h}$  ( $3''\phi \times 3''$  NaI(Tl)シンチレーション検出器),  $0.23 \mu\text{R}/\text{h}$  ( $2''\phi$  球形 NaI(Tl)シンチレーション検出器),  $0.26 \mu\text{R}/\text{h}$  ( $2''\phi \times 2''$  NaI(Tl)シンチレーション検出器),  $0.29 \mu\text{R}/\text{h}$  ( $1''\phi \times 1''$  NaI(Tl)シンチレーション検出器) の値を得た。

これらの結果は、環境  $\gamma$  線測定における宇宙線寄与分の評価に際して有用な情報を与えるものである。

Analysis of Response Characteristics of NaI(Tl) Scintillation Detectors  
to Cosmic Ray.

Toshi NAGAOKA and Shigeru MORIUCHI

Department of Environmental Safety Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

( Received April 15, 1985 )

Observation of cosmic ray were made using several kinds of NaI(Tl) scintillation detector on board an airplane (DC-8) upto altitude 37000 ft, including level flights at 16000, 23000, 31000 and 37000 ft within latitude 34°00'N - 35°30'N.

Two sets of instrument were used for the cosmic ray observation; one consists of DBM exposure rate meter equipped with 3" dia.x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector for evaluation of exposure rate equivalent due to cosmic ray, the other consists of multi-channel pulse height analyzer. In latter set, five kinds of NaI(Tl) scintillation detector were exchanged one after another, and deposited energy spectra due to cosmic ray were measured.

Our principal objectives of this flight measurement are to obtain useful information on the response characteristics of NaI(Tl) scintillation detectors to cosmic ray in high altitude and to estimate the ground surface value of cosmic ray contribution. In this experiment, vertical profile of cosmic ray intensity, variation of energy loss spectrum with altitude, and response characteristics of these detectors to cosmic ray in terms of their weight were clarified. The ground surface values of cosmic ray contribution into energy region below 3 MeV for each detector were estimated as follows; 0.23(  $\mu\text{R}/\text{h}$  eq.) for 3" dia. spherical, 0.22(  $\mu\text{R}/\text{h}$  eq.) for 3" dia.x 3" cylindrical, 0.23(  $\mu\text{R}/\text{h}$  eq.) for 2" dia. spherical, 0.26(  $\mu\text{R}/\text{h}$  eq.) for 2" dia.x 2" cylindrical, and 0.29(  $\mu\text{R}/\text{h}$  eq.) for 1" dia.x 1" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector.

These data are expected to be very useful for evaluation of cosmic ray contribution in measurement of environmental gamma ray using NaI(Tl) scintillation detectors.

Key words: NaI(Tl) Scintillation Detector, Cosmic Ray, Exposure Rate Equivalent, Cosmic Ray Contribution, Environmental Radiation, Vertical Profile, Deposited Energy Spectrum

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 測定の方法 .....	2
2.1 飛行条件 .....	2
2.2 D B M系 .....	3
2.3 スペクトル系 .....	3
3. 測定データの処理 .....	7
3.1 チャネルーエネルギー校正 .....	7
3.2 バンド情報の計算 .....	7
3.3 照射線量率相当値の計算 .....	8
4. 測定結果及び考察 .....	10
4.1 D B M系 .....	10
4.1.1 高度分布 .....	10
4.1.2 照射線量率相当値と宇宙線強度との相関 .....	10
4.1.3 地上における照射線量率相当値の推定 .....	11
4.2 スペクトル系 .....	11
4.2.1 地上におけるバンド情報の推定 .....	12
4.2.2 高度分布 .....	13
4.2.3 各バンド間の相関 .....	13
4.2.4 地上における照射線量率相当値の推定 .....	14
4.2.5 検出器の重量による応答特性 .....	14
5. 結 言 .....	39
謝 辞 .....	39
参考文献 .....	39

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Measurement .....	2
2.1 Flight conditions .....	2
2.2 Measurement of exposure rate equivalent using DBM exposure rate meter	3
2.3 Measurement of deposited energy spectra using multi-channel pulse height analyzer.....	3
3. Processing of measured data .....	7
3.1 Channel-energy calibration .....	7
3.2 Calculation of energy band information .....	7
3.3 Calculation of exposure rate equivalent .....	8
4. Results and discussion .....	10
4.1 Measurement using DBM exposure rate meter .....	10
4.1.1 Vertical profile .....	10
4.1.2 Co-relation between exposure rate equivalent and cosmic ray intensity	10
4.1.3 Estimation of exposure rate equivalent (< 3 MeV) on the ground surface due to cosmic ray .....	11
4.2 Measurement using multi-channel pulse height analyzer.....	11
4.2.1 Estimation of energy band information on the ground surface .....	12
4.2.2 Vertical profile .....	13
4.2.3 Co-relation among energy band informations .....	13
4.2.4 Estimation of exposure rate equivalent (< 3 MeV) on the ground surface due to cosmic ray .....	14
4.2.5 Response characteristics in terms of weight of detector .....	14
5. Conclusion .....	39
Acknowledgement .....	39
References .....	39

List of Tables

Table 2.1 Outline of flight conditions.

Table 4.1 Estimated value of cosmic ray contribution in ( $\mu R/h$  eq.) on the ground surface, which is involved in deposited energy spectrum below 3 MeV.

List of Figures

Fig.2.1 Course of the flight.

Fig.2.2 Block diagram of DBM exposure rate meter equipped with 3" dia.x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector and single channel pulse height analyzer (SCA).

Fig.2.3 Block diagram of spectrum measurement system. Five kinds of NaI(Tl) scintillator, that is 3" dia. spherical, 3" dia.x 3" cylindrical, 2" dia. spherical, 2" dia.x 2" cylindrical and 1"dia.x 1" cylindrical were used one after another as the detector.

Fig.4.1 Time serial data obtained by DBM exposure rate meter and single channel pulse height analyzer (SCA). Thick line stands for DBM counting rate (< 3 MeV). Thin line stands for SCA counting rate (> 3 MeV).

Fig.4.2 Vertical profile of DBM counting rate (< 3 MeV) and SCA counting rate (> 3 MeV). 3" dia.x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector was used.

Fig.4.3 Co-relation between exposure rate equivalent (< 3 MeV) and cosmic ray intensity. Exposure rate eq. (< 3 MeV) is represented by DBM counting rate (< 3 MeV), and cosmic ray intensity by SCA counting rate (> 3 MeV). Exposure rate eq. ( $\mu\text{R}/\text{h}$ ) is given by multiplying DBM counting rate (< 3 MeV) (cpm) by conversion factor  $2.93 \times 10^{-3}$  ( $\mu\text{R}/\text{h}/\text{cpm}$ ).

Fig.4.4 Deposited energy spectra due to cosmic ray. Energy was calibrated using photo-peak of  $^{40}\text{K}$  (1.46 MeV) or annihilation gamma ray (0.511 MeV).

Fig.4.5 Co-relation of energy band information of 3" dia. x 3" cylindrical and 2" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detectors with that of 3" dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector.

Fig.4.6 Vertical profile of energy band information. Solid lines stand for interpolation between actual measured points. Dashed lines stand for interpolation between actual measured point and estimated point. Lines which stand for band information including the component below 3 MeV rise up steeply near the ground surface owing to the terrestrial gamma ray. It is shown by dashed line with a dot.

Fig.4.7 Co-relation between energy band information (in counting rate or deposited energy) of energy band of >3 MeV and those of other bands.

Fig.4.8 Co-relation between counting rate and deposited energy of energy band of >3 MeV.

Fig.4.9 Counting rate and deposited energy per unit weight (in gram) of detector.

Fig.4.10 Deposited energy in detector per unit counting rate.

## 1. 序

環境 $\gamma$ 線のような低レベル $\gamma$ 線の検出器として、NaI(Tl)シンチレーション検出器が広く利用されている。NaI(Tl)シンチレーション検出器は、検出効率、 $\gamma$ 線エネルギー情報取得の点で有利であるとともに、その形状も球形、円筒形など目的に応じた形状を選択することができる。一方、NaI(Tl)シンチレータによる $\gamma$ 線検出の原理は、 $\gamma$ 線とNaI(Tl)結晶との相互作用の結果生じた電子によるNaI(Tl)結晶の発光現象を利用するものであるため、 $\beta$ 線や宇宙線などの荷電粒子成分に対しても感度を有する。そのため、高精度で低レベル $\gamma$ 線の計測を行う場合には、これらの寄与についても評価しておかねばならない。 $\beta$ 線については、自然環境を対象とした測定の際に問題となるものに、NaI(Tl)結晶に直接接触する窓部ガラスに含まれる $^{40}\text{K}$ に起因する検出器自身の自己汚染と、地殻中放射性物質から放出されるものがあるが、自己汚染分は通常それ程大きくなない<sup>(1)</sup>。また地殻 $\beta$ 線についても、その飛程が $1\text{ g/cm}^2$ に満たないことから寄与は大きくなない。一方宇宙線は非常に高いエネルギーを持っているため、NaI(Tl)シンチレーション検出器による測定では環境の $\gamma$ 線に比べて非常に高いパルス波高を示し、通常の環境 $\gamma$ 線測定のエネルギー領域（普通は3MeV以下）に入る成分は少ない。また、その領域での $\gamma$ 線線量測定における宇宙線の寄与分は照射線量率換算で0.数 $\mu\text{R/h}$ 相当程度であるが、正確な線量評価においては、3MeV以下の領域に含まれる宇宙線寄与分も評価しておく必要がある。

ここで、NaI(Tl)シンチレーション検出器による環境 $\gamma$ 線測定に関わる宇宙線の一般的な性質に触れておく<sup>(2)(3)(4)</sup>。宇宙線は普通大別して、外界から地球にぶつかってくる1次宇宙線と、1次宇宙線と空気の原子核との相互作用によって発生する2次宇宙線とに分けられる。1次宇宙線は主に陽子（約90%）とヘリウムイオン（約9%）とから成り、そのエネルギーは $10^9 \sim 10^{13}$ eVである。1次宇宙線は空気の原子核と衝突して陽子、中性子、中性 $\pi$ 中間子( $\pi^0$ )、荷電 $\pi$ 中間子( $\pi^\pm$ )を生成する。 $\pi^0$ は崩壊して（平均寿命 $9 \times 10^{-15}$ sec） $\gamma$ 線になり、この $\gamma$ 線は電子対創生により電子に変り、さらにこの電子は制動輻射によって $\gamma$ 線を産む。 $\pi^\pm$ は $\mu$ 中間子とニュートリノとに崩壊する（平均寿命 $2.6 \times 10^{-8}$ sec）。 $\mu$ 中間子は原子核とは極めて弱い相互作用しか起さないので空気中を空気を電離しながら走り電子とニュートリノに崩壊する（平均寿命 $2.2 \times 10^{-6}$ sec）。NaI(Tl)シンチレーション検出器による測定では、この電子成分を検出することになる。核子と $\pi$ 中間子（N-粒子と総称される）は原子核との衝突によりさらにN-粒子を作り出す。この他、電子成分が $\gamma$ 線に変る過程をくり返し数を増殖させるシャワー現象も生ずる。一方大気による吸収も受けるため、これらの複雑な過程に起因する高度分布が見られる。地上においては、 $\mu$ 中間子成分が最も多く（電離量換算で約80%），他に電子（同15%），陽子（同1%）成分が存在するが、高度10000m付近では電子（同70%），陽子（同20%）， $\mu$ 中間子（同10%）となる。宇宙線の強度は太陽活動に依る11年周期、太陽の自転に基づく27日周期、日周期で変動するが、周期変動幅の最も大きい11年周期では、地表面線量として全体の10~20%程度である。この他宇宙線の多くは荷電粒子であるため地磁気の影響を受け、高緯

度ほど強度が高くなる。

我々が環境 $\gamma$ 線を高精度で測定しようとするときには、上述のような性質を持った宇宙線成分と、本来の対象である $\gamma$ 線成分を同時に測定し、その値の中に宇宙線寄与分がどの程度含まれているかを評価するのであるが、含まれる宇宙線寄与分は、使用する検出器の動作原理、形状、大きさ、対象とするエネルギー範囲、線量評価法等により異なる。従って測定条件や線量評価方法に即した宇宙線寄与分の評価を予め行っておくことが必要となる。とくに地表面レベルでの宇宙線寄与分を評価することは、我々の生活空間内での $\gamma$ 線被曝線量を正確に評価する上で重要である。地表面における宇宙線強度は低く、また地殻 $\gamma$ 線と混在し容易に分離できないが、一定緯度、一定高度の地域内では宇宙線強度は場所により異らず、高高度ほど宇宙線強度が高いので、地殻 $\gamma$ 線の到達しないような上空で測定を行えば、検出器の宇宙線感度に関する有用な情報を入手することができる。さらに、宇宙線強度の時間変動幅は小さく、一度宇宙線寄与分を評価しておけば、以後もその値を汎用的に利用することができる。

本報告は、以上のような観点から航空機に5種類のNaI(Tl)シンチレーション検出器と測定器を搭載して測定した結果を用いて、検出器の宇宙線感度特性に関する検討を行ったものである。

## 2. 測定の方法

測定は1979年3月19日、日本航空DC-8-50により行われた。この飛行は理化学研究所の航空機実験<sup>(5)</sup>として実施されたものである。

原研からは2名搭乗し、測定器として3"φ×3"円筒形NaI(Tl)シンチレーション検出器にDBM回路<sup>(6)</sup>とシングルチャネル波高分析器を組み合せたもの（以下「DBM系」という）及び5種類のNaI(Tl)シンチレーション検出器（3"φ球形、3"φ×3"円筒形、2"φ球形、2"φ×2"円筒形、1"φ×1"円筒形）に多重波高分析器を組み合せたもの（以下「スペクトル系」という）の2系統を搭載した。測定は、航空機始動前の7時25分から着陸停止後の14時5分まで両系統を併行して行った。以下に飛行条件、DBM系、スペクトル系についてその概要を述べる。

### 2.1 飛行条件

飛行経過をTable 2.1に、飛行経路をFig. 2.1に示す。表に示すように、羽田空港を9時43分に離陸後横須賀上空で高度16000 ft（約4880 m）の水平飛行に入り岩国上空まで飛行した。そこで上昇しながらUターンした後、大島上空まで高度23000 ft（約7010 m）の水平飛行を行った。再度上昇しながらUターンした後、岩国上空まで高度31000 ft（約9450 m）での水平飛行を行い、Uターン、上昇の後浜松上空まで高度37000 ft（約11280 m）での水平飛行を行い、浜松上空から下降して14時0分に羽田空港へ着陸した。この間の緯度はほぼ一定で34°Nから35°30'Nの間であった。経度は132°Eから140°Eまで変化したが、宇宙線強度は経度に依らないため、データ解析上の影響はない。

測定器等の積込み及び航空機内での固定は前夜（3月18日）に行い、実験準備は3月19日早

度ほど強度が高くなる。

我々が環境 $\gamma$ 線を高精度で測定しようとするときには、上述のような性質を持った宇宙線成分と、本来の対象である $\gamma$ 線成分を同時に測定し、その値の中に宇宙線寄与分がどの程度含まれているかを評価するのであるが、含まれる宇宙線寄与分は、使用する検出器の動作原理、形状、大きさ、対象とするエネルギー範囲、線量評価法等により異なる。従って測定条件や線量評価方法に即した宇宙線寄与分の評価を予め行っておくことが必要となる。とくに地表面レベルでの宇宙線寄与分を評価することは、我々の生活空間内での $\gamma$ 線被曝線量を正確に評価する上で重要である。地表面における宇宙線強度は低く、また地殻 $\gamma$ 線と混在し容易に分離できないが、一定緯度、一定高度の地域内では宇宙線強度は場所により異らず、高高度ほど宇宙線強度が高いので、地殻 $\gamma$ 線の到達しないような上空で測定を行えば、検出器の宇宙線感度に関する有用な情報を入手することができる。さらに、宇宙線強度の時間変動幅は小さく、一度宇宙線寄与分を評価しておけば、以後もその値を汎用的に利用することができる。

本報告は、以上のような観点から航空機に5種類のNaI(Tl)シンチレーション検出器と測定器を搭載して測定した結果を用いて、検出器の宇宙線感度特性に関する検討を行ったものである。

## 2. 測定の方法

測定は1979年3月19日、日本航空DC-8-50により行われた。この飛行は理化学研究所の航空機実験<sup>(5)</sup>として実施されたものである。

原研からは2名搭乗し、測定器として3"φ×3"円筒形NaI(Tl)シンチレーション検出器にDBM回路<sup>(6)</sup>とシングルチャネル波高分析器を組み合せたもの（以下「DBM系」という）及び5種類のNaI(Tl)シンチレーション検出器（3"φ球形、3"φ×3"円筒形、2"φ球形、2"φ×2"円筒形、1"φ×1"円筒形）に多重波高分析器を組み合せたもの（以下「スペクトル系」という）の2系統を搭載した。測定は、航空機始動前の7時25分から着陸停止後の14時5分まで両系統を併行して行った。以下に飛行条件、DBM系、スペクトル系についてその概要を述べる。

### 2.1 飛行条件

飛行経過をTable 2.1に、飛行経路をFig. 2.1に示す。表に示すように、羽田空港を9時43分に離陸後横須賀上空で高度16000 ft（約4880 m）の水平飛行に入り岩国上空まで飛行した。そこで上昇しながらUターンした後、大島上空まで高度23000 ft（約7010 m）の水平飛行を行った。再度上昇しながらUターンした後、岩国上空まで高度31000 ft（約9450 m）での水平飛行を行い、Uターン、上昇の後浜松上空まで高度37000 ft（約11280 m）での水平飛行を行い、浜松上空から下降して14時0分に羽田空港へ着陸した。この間の緯度はほぼ一定で34°Nから35°30'Nの間であった。経度は132°Eから140°Eまで変化したが、宇宙線強度は経度に依らないため、データ解析上の影響はない。

測定器等の積込み及び航空機内での固定は前夜（3月18日）に行い、実験準備は3月19日早

朝から開始した。測定は 7 時 25 分から行い、航空機電源切替のため 9 時 29 分から 9 時 34 分までの一旦中止を除いて、着陸後の 14 時 5 分まで連続測定を行った。

航空機内における測定器の位置は、進行方向に向って左側後部で、木製ラックに測定器を固定し、三脚に検出器を固定した。検出器の軸は鉛直方向とした。

## 2.2 DBM系

使用した DBM 系のブロック図を Fig. 2.2 に示す。

検出器系の信号は直線増幅器を通過した後に 2 系統に分けられ、1 つは DBM 回路を通ってタイマ／スケーラへ入る。もう 1 つはシングルチャネル波高分析器 (SCA) を通ってタイマ／スケーラへ入る。タイマ／スケーラに入った 2 つの出力は、6 秒毎にプリンタへ打ち出される。ここで、プリンタの打ち出しに要する時間は 1 回当たり 0.3 秒であり、その間データ収集は行われないので、実質的に 5.7 秒間の測定と 0.3 秒間の中止をくり返したこととなる。DBM 回路の出力は、3 MeV 以下のパルスに対しては照射線量率換算のための荷重関数を作用させ、3 MeV 以上のパルスに対しては荷重していない（即ち計数と等価）。一方、シングルチャネル波高分析器は、3 MeV 以上のパルスのみを計数するように設定してあるので、3 MeV 以下の照射線量率を求める場合には、DBM 回路の出力 (DBM 計数率) からシングルチャネル波高分析器の出力 (SCA 計数率) を差し引いた値に換算係数を乗すればよい。ここで、DBM 計数率 (3 MeV 以下) 一線量率換算係数は、 $2.93 \times 10^{-3} (\mu\text{R}/\text{h})/\text{cpm}$  に設定した。

DBM 系の測定は、前述の電源切替時を除き 7 時 25 分から 14 時 5 分まで連続して行われた。

## 2.3 スペクトル系

宇宙線による NaI (Tl) シンチレータ内への吸収エネルギースペクトルを測定するために用いた測定器 (スペクトル系) のブロック図を Fig. 2.3 に示す。測定エネルギー範囲は、 $3''\phi \times 3''$  NaI (Tl) シンチレーション検出器については 0~5 MeV、 $1''\phi \times 1''$  のものについては 0~20 MeV、 $3''\phi$  球形、 $2''\phi$  球形及び $2''\phi \times 2''$  のものについては 0~10 MeV 及び 0~80 MeV を目安とした。適用電圧、ゲイン等は各検出器毎に事前に定めておき、測定と検出器交換をくり返した。 $3''\phi$  球形、 $2''\phi$  球形及び $2''\phi \times 2''$  の NaI (Tl) シンチレーション検出器については、測定エネルギー範囲を 2 種類設けたので、線形増幅器のコースゲインを ×1 と ×8 とで切り替えることにより測定エネルギー範囲を変えた。測定時間は長い程望ましいことは言うまでもないが、1 高度当りの水平飛行時間が約 1 時間であったので、1 スペクトル当りの測定時間は 400 秒を目安とした。多重波高分析器は 1024 チャネルのものを用い、測定データはカセットテープに記録した。

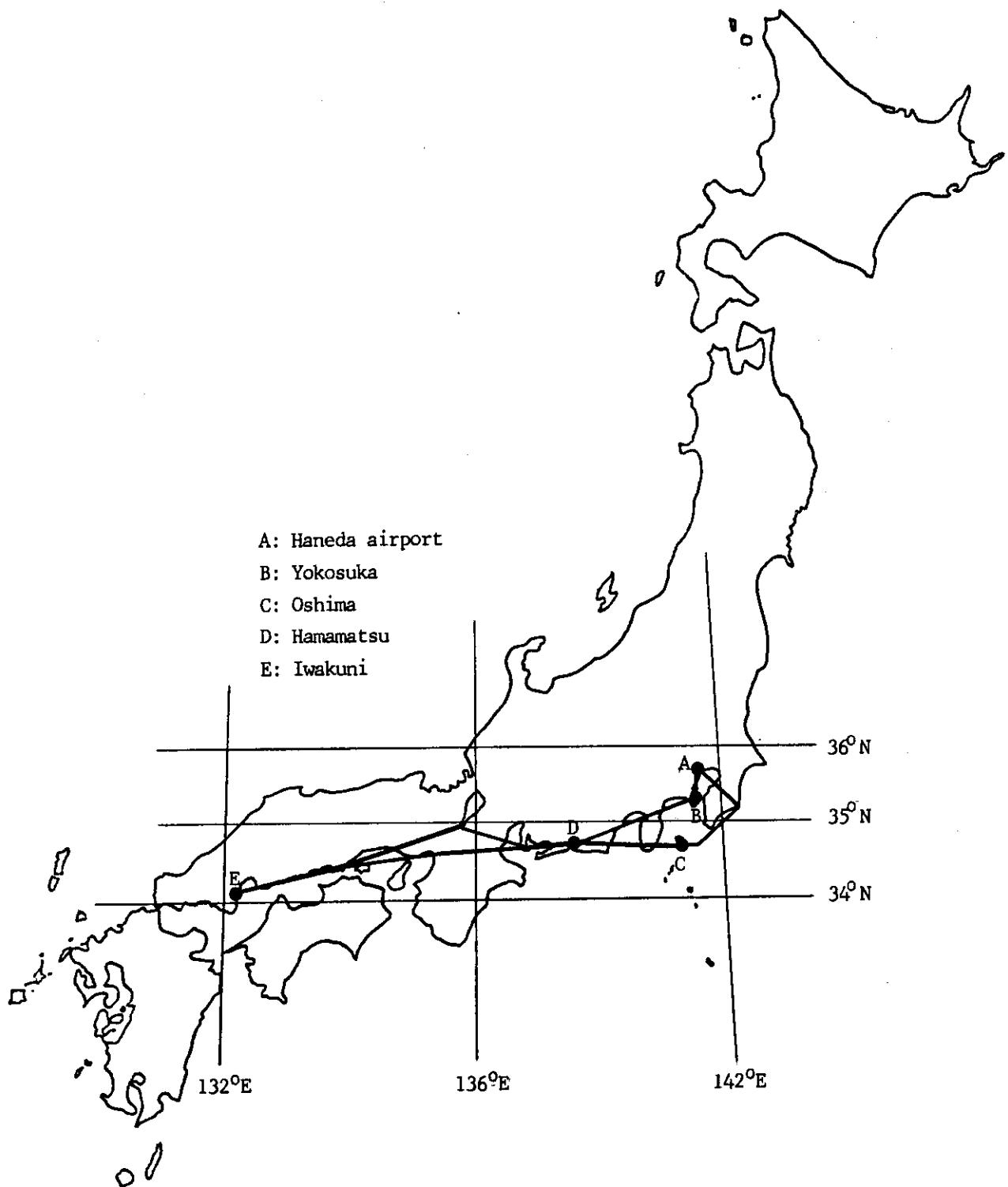
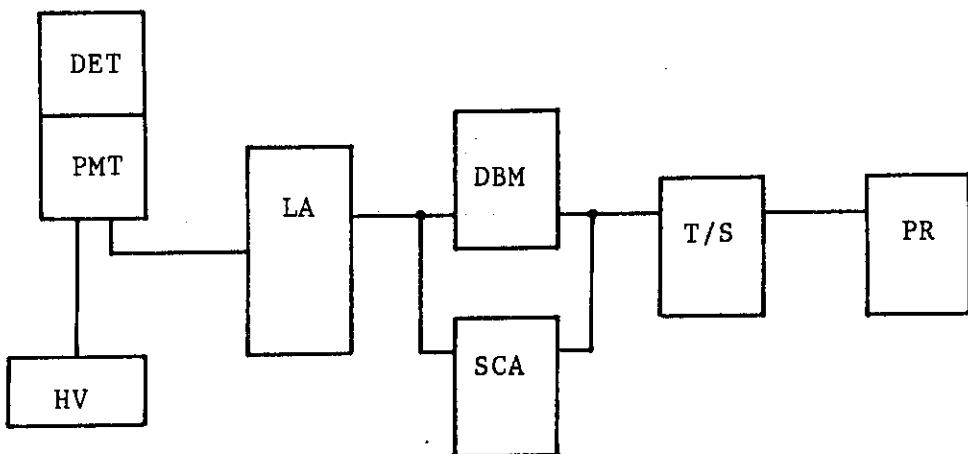
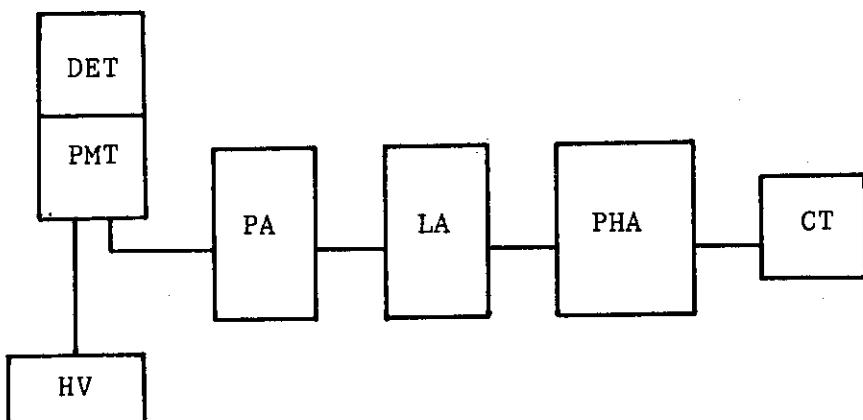


Fig.2.1 Course of the flight.



**DET:** 3"φx3" NaI(Tl) scintillation detector  
**PMT:** Photo-multiplier tube  
**HV :** High voltage power supply  
**LA :** Linear amplifier  
**DBM:** DBM circuit module  
**SCA:** Single chnnel pulse height analyzer  
**T/S:** Timer & scaler  
**PR :** Printer

Fig.2.2 Block diagram of DBM exposure rate meter equipped with 3" dia.x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector and single channel pulse height analyzer (SCA).



**DET:** NaI(Tl) scintillation detector  
**PMT:** Photo-multiplier tube  
**HV :** High voltage power supply  
**PA :** Pre-amplifier  
**LA :** Linear amplifier  
**PHA:** Multi-channel pulse height analyzer  
**CT :** Cassette tape recorder

Fig.2.3 Block diagram of spectrum measurement system. Five kinds of NaI(Tl) scintillator, that is 3" dia. spherical, 3" dia.x 3" cylindrical, 2" dia. spherical, 2" dia.x 2" cylindrical and 1"dia.x 1" cylindrical were used one after another as the detector.

Table 2.1 Outline of flight conditions.

Time	Altitude (ft) (m)	Atmospheric pressure (g/cm <sup>2</sup> )	Location	Latitude (N)	Longitude (E)	Note
9:43	0	0	1034	35°30'	139°46'	take off
9:52	16000	4877	561	35°12'	139°37'	} level flight
11:00	16000	4877	561	34°08'	132°13'	
						U-turn, ascend
11:05	23000	7010	419	34°41'	139°24'	} level flight
11:51	23000	7010	419	34°41'	139°24'	
						U-turn, ascend
11:57	31000	9449	294	34°08'	132°13'	} level flight
12:59	31000	9449	294	34°08'	132°13'	
						U-turn, ascend
13:05	37000	11280	221	34°45'	137°42'	} level flight
13:35	37000	11280	221	34°45'	137°42'	
						descend
14:00	0	0	1034	35°30'	139°46'	land on

### 3. 測定データの処理

#### 3.1 チャネルーエネルギー校正

スペクトル系により測定された吸収エネルギースペクトルからエネルギー情報を得るために、チャネル番号とエネルギーとの関係を正確に把握する必要がある。地上における $\gamma$ 線測定の場合には、測定の前後に $^{226}\text{Ra}$ や $^{137}\text{Cs}$ などの適当なチェックングソースを用いて校正することができるが、今回の飛行測定では宇宙線観測上の妨害となるためチェックング用といえども $\gamma$ 線源の持ち込みは禁止された。そこで測定された波高分布上に現われたピークを用いて、2次式最小二乗フィットによりピークチャネルを決めた後、そのエネルギーを確認した上でエネルギー校正した。現われたピークは地上付近では $^{40}\text{K}$ (1.46 MeV)、上空では消滅 $\gamma$ 線(0.511 MeV)が主なものであった。計数不足のためにピークの形が不明確なものやバラツキの大きいものは、2チャネルずつまとめたり、スムージングにより改善した。また、ピークを有しないスペクトルについては、他の同一条件による測定におけるピーク位置を参考にした。この場合には測定系のゲイン変動の程度が問題となるが、飛行測定の間、ゲインは十分安定していたため問題はなかった。なお、3"φ球、2"φ球、2"φ×2"の3種類の検出器については、前述のように線形増幅器のコースゲインを×1または×8とすることによってエネルギー範囲を変えて測定したが、×1の場合には殆どピークが現われなかった。そこで線形増幅器のコースゲインによる出力パルス波高の変化を見たところ、両者の間に直線関係があることが確認されたので、×1の場合は、×8のチャネルーエネルギー関係を用いて校正した。ここで今回使用した線形増幅器(原研モデルJ-163)におけるコースゲイン×8と×1と増幅度の比は8.784であった。チャネルーエネルギー校正の際、低エネルギー部での発光効率の変化を考慮に入れて実効的0チャネルを-17 keVとした。また多重波高分析器の電気的0点は、パルサを用いて測定し、4.5チャネルとした。

次にチャネル番号とエネルギーとの関係、即ちチャネル幅が $E_w$ (keV)のとき第nチャネルに計数されるエネルギー範囲の考え方について述べる。一般には、第nチャネルの中央を $n \times E_w$ (keV)とする場合と、第nチャネルの右端(高エネルギー側)を $n \times E_w$ (keV)とする場合がある。これはどちらを採用しても考え方が統一されなければ構わないが、今回はデータ整理の簡便性の点から後者を採用することとした。

#### 3.2 バンド情報の計算

宇宙線強度の指標として、検出器内における吸収エネルギーが $E_1$ から $E_2$ までのバンド(以下「エネルギーバンド( $E_1, E_2$ )」と書く)内に含まれる成分の計数率 $C(E_1, E_2)$ 及び検出器内への吸収エネルギー $A(E_1, E_2)$ を用いる。これらを「バンド情報」と呼ぶ。 $C(E_1, E_2)$ と $A(E_1, E_2)$ は次のように定義される。

$$C(E_1, E_2) = \int_{E_1}^{E_2} N(E) dE \quad (3.1)$$

$$A(E_1, E_2) = \int_{E_1}^{E_2} N(E) \cdot E dE \quad (3.2)$$

$N(E)$  : 吸収エネルギースペクトル

一般に  $N(E)$  は多重波高分析器を用いて測定されるため不連続であるから (3.1), (3.2) は次のように書き換えられる。

$$C(E_1, E_2) = \sum_{I=I_1}^{I_2} N(I) \quad (3.3)$$

$$C(E_1, E_2) = \sum_{I=I_1}^{I_2} N(I) E(I) \quad (3.4)$$

ここで、

$I_1, I_2$  : 吸収エネルギースペクトル  $N(I)$  の上で、エネルギー  $E_1, E_2$  に対応するチャネル番号

$E(I)$  : 第  $I$  チャネルに対応するエネルギー

なお、線形増幅器の特性上ある一定の高さ以上のパルスが入力した場合に出力パルス高が飽和してしまい、それ以上のスペクトルを入手できない。現象としては、多重波高分析器により測定した波高分布上で、限度以上の波高パルスの計数が、右端（高波高側）のチャネルに蓄積され擬似ピークを呈する。このような場合には、限度波高以下の波高分布の傾斜を高エネルギー側へ外挿し、擬似ピーク部分の計数と外挿部分の計数とが等しくなるよう波高分布を修正した。この修正方法の妥当性を検討するため、修正前と修正後の波高分布に対して全吸収エネルギーを計算し比較したところ、約 80 MeVまでのエネルギー範囲を有する  $3''$  の球形、 $2''$  の球形及び  $2'' \times 2''$  に対しては数%以内、約 20 MeVまでのエネルギー範囲の  $1'' \times 1''$  に対しても 20% 以内であり、また、外挿直線の傾斜を変えても吸収エネルギーの変化は大きくなかったので、この方法は妥当と考えられる。

### 3.3 照射線量率相当値の計算

3 MeV 以下の成分の照射線量率相当値を求めるには 2 通りの方法を用いた。1 つは DBM 系の出力として得られる 3 MeV 以下の成分の DBM 計数率に前述の換算係数  $2.93 \times 10^{-3} (\mu R/h)/cpm$  を乗じて照射線量率相当値を得る方法である。もう 1 つは、スペクトル系で得た吸収エネルギースペクトル  $N(I)$  に荷重関数  $G(I)$  を作用させて照射線量率相当値に換算する方法 ( $G(E)$  関数法)<sup>(7)</sup> である。即ち、次式によって計算する。

$$X(\leq 3 \text{ MeV}) = \sum_{I=I_1}^{I_2} N(I) \cdot G(I)$$

ここで、

X ( $\leq 3 \text{ MeV}$ ) : 3 MeV 以下の成分による照射線量率相当値 ( $\mu\text{R}/\text{h eq.}$ )

N(I) : 吸収エネルギースペクトル (cpm/ch)

G(I) : 第 I チャネルのエネルギー E に対応するスペクトラー線量変換演算子 G(E) の値 ( $\mu\text{R}/\text{h}/\text{cpm}$ )

I<sub>1</sub> : 下限ディスクリに対応するチャネル番号

I<sub>2</sub> : 3 MeV に相当するチャネル番号

## 4. 測定結果及び考察

### 4.1 DBM系

DBM系による連続測定データの時系列図をFig. 4.1に示す。電源切替による測定中断部分は、その前後10データ（1分間分）を用いて内挿した。x軸はデータ番号で、1データが6秒間に相当する。y軸はSCAによる3MeV以上の全計数率（SCA計数率）またはDBM計数率(<3 MeV)（cpm）である。図中太線は3MeV以下のDBM計数率を示し、細線は3MeV以上のSCA計数率を示す。前述のように3MeV以下の照射線量率相当値は、3MeV以下のDBM計数率に換算係数 $2.93 \times 10^{-3}$  ( $\mu\text{R}/\text{h}$ ) / cpmを乗ずることによって求まる。

地上及び低空においては地殻 $\gamma$ 線の影響が含まれているが、高度16000 ft以上の上空では3 MeV以下のDBM計数率と3 MeV以上のSCA計数率はほぼ同じ傾向で変化した。以下DBM系の測定結果を用いた解析について述べる。

#### 4.1.1 高度分布

Fig. 4.2に3MeV以下のDBM計数率と3MeV以上のSCA計数率の高度分布を示す。高度(x軸)は大気の深さ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )で表わした。3MeV以下のDBM計数率は $220 \text{ g}/\text{cm}^2$ (約37000 ft)から $625 \text{ g}/\text{cm}^2$ (約13000 ft)の間で、3MeV以上のSCA計数率は $220 \text{ g}/\text{cm}^2$ (約37000 ft)から $810 \text{ g}/\text{cm}^2$ (約6000 ft)の間でほぼ直線的な傾向を示した。これより低高度では高度変化が小さくなる。この理由は、3MeV以下の成分については、検出器周辺に存在する宇宙線以外の $\gamma$ 線成分(検出器の自己汚染、機体中の天然放射性物質、Rn娘核等に起因する)による上積み分が宇宙線強度の低下に伴って目立ってくること及びとくに地上付近では地殻 $\gamma$ 線の影響が現われることによる。また3MeV以上の成分については、地上に近づくほど透過力の強い $\mu$ 中間子成分が優勢となるので、全体として減衰傾向が鈍るためと考えられる。

#### 4.1.2 照射線量率相当値と宇宙線強度との相関

Fig. 4.3に3MeV以下の照射線量率相当値と宇宙線強度との相関を示す。ここで照射線量率相当値としては3MeV以下のDBM計数率を、宇宙線強度としてはSCA計数率(>3 MeV)をとった。宇宙線成分は3MeV以下にも含まれているが、地殻 $\gamma$ 線(3MeV以下のものしか存在しない)の影響を避けるため3MeV以上とした。

両者の相関は、宇宙線強度の低い部分、即ち地上付近で地殻 $\gamma$ 線成分の入ってくる部分を除いて直線的であった。このことは、3MeV以上の計数率を指標として、3MeV以下の領域での線量率寄与分を評価できることを示している<sup>(1)</sup>。この点については4.1.3において述べる。図中の直線は、16000 ft以上におけるデータを用いて両者の相関を最小二乗近似によって表わしたもので、この関係は次式のようになる。

$$y = 0.6528x + 183.3 \quad (4.1)$$

ここで、

$y$  : 3 MeV 以下の DBM 計数率 ( cpm )

$x$  : 3 MeV 以上の SCA 計数率 ( cpm )

上式の  $y$  切片 183.3 ( cpm ) は、検出器や機体、大気中の Rn 娘核など検出器周辺の物質中に含まれる天然放射性物質に起因するバックグラウンド成分で、地殻  $\gamma$  線の存在しない高々度においても存在する。この値は検出器周辺の状況が大きく変化しない限りほぼ一定である。ここで、183.3 cpm は  $0.54 \mu\text{R}/\text{h}$  に相当する。なお、飛行中、宇宙線の中の中性子成分により検出器や機体自身が放射化されるため離陸時と着陸時とで照射線量率レベルが変ることがある。これは Fig. 4.2 において低高度での 3 MeV 以下の DBM 計数率が 2 本に分れるところに現われている。但し、地上における 3 MeV 以下照射線量率相当値を推定する際には、前述のように相関直線の傾きを利用するため、中性子成分による放射化の影響は無視できる。

#### 4.1.3 地上における照射線量率相当値の推定

前述したように、天然放射性物質から放出される  $\gamma$  線のエネルギーは 3 MeV 以下で、地上において照射線量率の測定を行う場合には 3 MeV 以下の宇宙線成分による寄与分を照射線量率相当値として評価しておく必要がある。( 4.1 ) 式を用いてこれを評価することができる。即ち、前述のように 3 MeV 以下の照射線量率相当値と 3 MeV 以上の SCA 計数率との間には広い範囲にわたって直線性が存在するから、この相関直線の傾きと地上における SCA 計数率 ( $> 3 \text{ MeV}$ ) とから地上における 3 MeV 以下の照射線量率相当値が求まる。緯度 35°N 付近の地上における SCA 計数率 ( $> 3 \text{ MeV}$ ) は  $3'' \phi \times 3'' \text{NaI}(\text{Tl})$  シンチレーション検出器の場合約 127 cpm であるから、この値を ( 4.1 ) 式の傾きに乗じて DBM 計数率にして 83 cpm、照射線量率に換算して  $0.24 \mu\text{R}/\text{h eq.}$  を得た。この値は参考文献(1)の値と一致した。緯度が変ればこの値も変るので、緯度に応じた値を用いねばならないこと付記する。また、検出器によってもこの値は変化する。これについては 4.2 において述べる。

## 4.2 スペクトル系

スペクトル系による測定では、5 種類の  $\text{NaI}(\text{Tl})$  シンチレーション検出器を用いて地上及び水平飛行時に 33、上昇又は下降時に 10 の計 42 の吸収エネルギースペクトルを取得した。Fig. 4.4 に地上及び水平飛行時のスペクトルを検出器別に示す。ここで、 $3'' \phi$  球形、 $2'' \phi$  球形及び  $2'' \phi \times 2''$  の  $\text{NaI}(\text{Tl})$  シンチレーション検出器についてはゲイン即ち測定対象とするエネルギー範囲を 2 通り設定したのでそれぞれ別の図に示す。ここに示した図は、1024 チャネルの多重波高分析器で測定した吸収エネルギースペクトルを前述 ( 3.1 ) の方法でエネルギー校正した上で 20 チャネルずつまとめたものである。各スペクトルの右端のチャネルがピークとなっているのは、線形増幅器の特性上ある一定の高さ以上の入力パルスに対しても出力パルス高が飽和してしまい一定の波高となるため、それらが同じチャネルに計数されることによる。またそのピークの位置が若干ずれているのは測定中のゲインシフトのために最大出力パルス高に相当するエネルギーが変動することに依る。

16000 ft 以上の上空における吸収エネルギースペクトルは各検出器毎にはほぼ同様の形を示し、低エネルギー側から高エネルギー側に向けて漸減してゆく傾向をもっている。一方 3" の球形 NaI(Tl) シンチレーション検出器による地上での吸収エネルギースペクトルの形は少し異り、20~40 MeV に膨みが現れている。この膨みは上空におけるスペクトル上にもわずかに見られるが、最高高度の 37000 ft におけるスペクトル上には殆ど見られない。これは次のような理由による。

前述のように地上付近では  $\mu$  中間子成分が優勢である。 $\mu$  中間子または  $\mu$  中間子の崩壊により生じた高エネルギー電子が NaI(Tl) シンチレータに入射すると、その透過力が強いこと、検出器の大きさが  $\mu$  中間子または高エネルギー電子の飛程に比べて小さいこと、50~1000 MeV の  $\mu$  中間子または高エネルギー電子の単位長さ当たりのエネルギー損失 ( $-dE/dx$ ) がほぼ一定（いずれも約 0.002 MeV/cm air）であることにより、NaI(Tl) シンチレータ内で全てのエネルギーを失わず、シンチレータを通過した距離にほぼ比例したエネルギーを失った後シンチレータを通過する。ここで失ったエネルギーが検出器の吸収エネルギーに相当する。従って検出器が吸収し得るエネルギーは検出器の大きさに応じてある所で飽和し、それが 3" の球形 NaI(Tl) シンチレーション検出器の場合には 20~40 MeV に相当する。そのため  $\mu$  中間子の優勢な地上付近では 20~40 MeV に膨みが生ずる。一方高度 7000m 以上の上空では、 $\mu$  中間子成分より陽子成分の方が優勢となる。陽子の透過力は  $\mu$  中間子より弱く、NaI(Tl) シンチレーション検出器内に入射するとそのエネルギーを検出器内で失う割合は  $\mu$  中間子より高いため検出器の吸収エネルギーは飽和せず  $\mu$  中間子のような膨みが生じない。上空にも  $\mu$  中間子は存在するが、陽子に比べ少いため、吸収エネルギースペクトルの上では膨みが顕著でなくなる。

以下スペクトル系の測定結果を用いた解析について述べる。

#### 4.2.1 地上におけるバンド情報の推定

今回の飛行実験では、時間的な制約のために地上における 80 MeV 程度までの波高分布測定は 3" の球形 NaI(Tl) シンチレーション検出器のみについて行った。そのため他の検出器の地上におけるバンド情報は次のように推定した。

先ず注目するバンド情報について 3" の球形の NaI(Tl) シンチレーション検出器の同じバンド情報との相関をとる。Fig. 4.5 にその一例を示す。計数率についても吸収エネルギーについても良い相関が得られた。これはバンド情報の変化傾向が各検出器とも類似したものであることを示す。次にこの相関と 3" の球形 NaI(Tl) シンチレーション検出器の地上値を用いて各検出器の地上値を評価する。ここで、両者のバンド情報が比例している場合 ( $y = ax$  の形) には問題ないが、一般には  $y = ax + b$  の形となる。定数項  $b$  の生ずる原因としては、統計精度の問題、測定場所などの条件が完全に一致してはいないこと、検出器の大きさや形状により宇宙線に対する感度特性が異なることなどが考えられるが、ここでは相関直線の傾きが両者の相関を表わしているとみなして、3" の球形 NaI(Tl) シンチレーション検出器の地上におけるバンド情報にこの傾きを乗ずることによって各検出器の対応するバンド情報を評価した。

#### 4.2.2 高度分布

検出器毎の各バンド情報の高度分布を Fig. 4.6 に示す。ここで  $3'' \phi$  球形 NaI(Tl) シンチレーション検出器の地上値は実測値であるが、それ以外の検出器の地上値は 4.2.1 で述べた方法により推定した値である。各バンドとも 37000 ft (約  $220 \text{ g/cm}^2$ ) から 16000 ft (約  $560 \text{ g/cm}^2$ ) の間では類似した減衰傾向を示している。地上値は、上空での傾向をそのまま外挿した値よりやや高い値となる。また、高エネルギー成分の比率が高いバンドほど地上付近での減衰率が低い。これらのこととは、大気深度（高度）により宇宙線の構成、エネルギー分布が変化すること、高エネルギー成分ほど減衰しにくいくこと、地上に近いほど透過力の強い  $\mu$  中間子成分が優勢となるため減衰傾向が小さくなることなどを示唆しており、高度分布はこれらの現象の総合された結果である。なお前述のように、宇宙線は非常に高エネルギーであるため、必ずしもその全エネルギーを入射した NaI(Tl) 結晶中で失うわけではないため、Fig. 4.6 は、NaI(Tl) の宇宙線による吸収エネルギースペクトル成分の高度分布であって、実際にこれらのエネルギーを有する粒子の高度分布ではないことに注意する必要がある。今回用いた 5 種類の NaI(Tl) シンチレーション検出器のうち、最も小さい  $1'' \phi \times 1''$  のものによる高度分布が高々度において他の検出器より変化が小さくなる傾向を示しているが、これは検出器の大きさ、即ち入射粒子の検出器内通過長さが他の検出器よりも短いために 1 入射陽子当りのエネルギーを吸収する割合が低く、高エネルギーの陽子成分の比率の高い高々度でその影響が現われることがあると考えられる。

#### 4.2.3 各バンド間の相関

宇宙線寄与分を評価する際にどのような物理量を用いるか、どのエネルギー範囲を採用するかを検討するため、各バンド間の相関を検討した。基準を 3 MeV 以上の計数率又は検出器への吸収エネルギーとし、いくつかのバンド情報との相関をとったものの一例を Fig. 4.7 に示す。どのバンド情報についても基準とした 3 MeV 以上の計数率又は検出器への吸収エネルギーとの間に良い比例関係が確認された。また、3 MeV 以上の計数率と検出器への吸収エネルギーとの相関を Fig. 4.8 に示す。これについても両者間には良い比例関係を見出すことができる。これは宇宙線による吸収エネルギースペクトルが高度により大きく変化しなかったことを意味している。以上のことより、今回測定を行った場、或はそれに近い場においては、計数率又は吸収エネルギーのいずれを用いても、また全体に対する比が予め分っていればどのエネルギーバンドを用いても全計数率、全吸収エネルギーを評価することが可能である。但し、採用するエネルギー bandwidth の計数率は直接統計精度を左右する量であるから、できるだけ計数率の高いバンドを選ぶべきである。また、エネルギー情報の確実なバンドを選ぶことも言うまでもない。一方、今回の測定は航空機内で行われたものであるが、その胴体は約 2mm の Al 合金製であり、これによるスペクトルの大きな変化は無いと考えられるので、実質的には屋根の無い屋外とみなすことができる。従って、宇宙線スペクトルの形に大きな変化が無い場合には上述の相関が成り立つが、コンクリートなどの厚い重量物によって構成された建物等の内部においては、宇宙線スペクトルの形が大きく変化することが予想されるため、必ずしも上述の相関は成り立たないと考えられる。この点については他の実験結果からも裏付けられている。

#### 4.2.4 地上における照射線量率相当値の推定

4.1.3で述べたものと同様の方法を用いて、各検出器毎に、地上における3MeV以下の宇宙線寄与分を線量率相当値として推定した。4.1.3で述べたDBM系については3MeV以上のSCA計数率と3MeV以下のDBM計数率(線量率に比例)との相関から推定したが、スペクトル系については3MeV以上の計数率又は3MeV以上のあるエネルギー帯内における吸収エネルギーと、3.3で述べたG(E)関数法を3MeV以下の吸収エネルギースペクトルに適用して求めた照射線量率相当値との相関から推定した。吸収エネルギー用のエネルギー帯は取得した吸収エネルギースペクトルの統計精度や測定エネルギー範囲から決め、3"φ球形、2"φ球形及び2"φ×2"のNaI(Tl)シンチレーション検出器については3MeV以上、3"φ×3"のものについては3~4MeV、1"φ×1"のものについては3~10MeVとした。3MeV以上の計数率及びエネルギー帯内での吸収エネルギーの地上値は4.2.1の結果を用いた。推定結果をTable 4.1に示す。3MeV以上の計数率から推定した値とエネルギー帯内での吸収エネルギーから推定した値とはほぼ一致しており妥当な結果と考えられる。3"φ×3"及び1"φ×1"のNaI(Tl)シンチレーション検出器においては、計数率から求めた値と吸収エネルギーから求めた値との差が他の3種の検出器に比べて大きいが、これは用いたエネルギー帯の幅(3"φ×3" NaI(Tl)シンチレーション検出器が3~4MeV、1"φ×1" NaI(Tl)シンチレーション検出器が3~10MeV)が他の検出器に用いたエネルギー帯(>3MeV)より狭いため、統計精度上の問題が含まれているからと考えられる。計数率については何れの検出器も3MeV以上としたためこのような問題はない。従って3"φ×3"及び1"φ×1"のNaI(Tl)シンチレーション検出器については、吸収エネルギーから推定した値よりも計数率から推定した値の方が信頼性が高い。なお、機体や検出器内に含まれる<sup>40</sup>Kなど検出器周辺の天然放射性物質に起因するγ線による照射線量率分は、上述の計数率又は吸収エネルギーと3MeV以下の照射線量率相当値との相関図における照射線量率相当値軸切片として現われる。この値は、計数率、吸収エネルギーから求めたものは、それぞれ3"φ球形 NaI(Tl)シンチレーション検出器が0.15、0.12μR/h、3"φ×3"のものが0.57、0.69μR/h、2"φ球形のものが0.30、0.29μR/h、2"φ×2"のものが0.42、0.45μR/h、1"φ×1"のものが0.33、0.18μR/hであった。

#### 4.2.5 検出器の重量による応答特性

各検出器毎の特性を比較するため、検出器の重量当りの計数率及び吸収エネルギーを検討した。NaI(Tl)の比重は3.67とした。各検出器の重量は次のようになる。

3"φ球形	… 850g
3"φ×3"	… 1275g
2"φ球形	… 252g
2"φ×2"	… 378g
1"φ×1"	… 47g

Fig. 4.9にエネルギー帯0~3MeV及び3MeV以上の単位重量当りの計数率及び吸収エネルギーを各水平飛行高度毎に示す。ここで、吸収エネルギースペクトルの3MeV以下の成分を含むバンド情報には前述した検出器周辺の天然放射性物質からのγ線による寄与分が含まれており、宇宙線に対する検出器感度を考察するにはこの寄与分を除かねばならない。これについ

では、3 MeV 以下の吸収エネルギー分布から求めた照射線量率相当値と各バンド情報との相関を用いて評価した。まず、3 MeV 以下成分による照射線量率相当値と 0~3 MeV のバンド情報との比をとったところ、計数率、吸収エネルギーとも高度に関係なく各検出器毎にはほぼ同じ値であった。即ちバンド情報と照射線量率相当値とは比例し、検出器周辺の天然放射性物質に起因する照射線量率分（4.2.4で評価されている）に相当するバンド情報寄与分をこの関係から推定できる。こうして推定したバンド情報寄与分を当初のバンド情報値から差し引けば宇宙線のみによるバンド情報が得られる。Fig. 4.9 はこの補正を行った値で示してある。

エネルギー bandwidth 0~3 MeV の検出器重量当りの計数率、吸収エネルギーは両者とも検出器が重くなる程下る傾向を示している。また、高度が高いほどその傾きは大きくなる。低い方の 16000 ft での値は殆ど傾きがない。一方、3 MeV 以上のバンド情報については、高々度ほど傾斜が大きくなる点、検出器重量当りの計数率が重量が重いほど下る傾向を示す点は 0~3 MeV と同じであるが、重量当りの吸収エネルギーについては逆に検出器重量が増すほど高くなる。これは、検出器の大きさにより宇宙線感度のエネルギー特性が変るためであると考えられる。即ち、低エネルギー領域（3 MeV 以下）では入射宇宙線に対する検出器全体の感度はほぼ検出器断面積に比例し重量で割ると小型検出器ほど高くなる。一方高エネルギーの粒子は前述のように検出器に入射すると検出器内通過長さにはほぼ比例したエネルギーを検出器内で失った後透過するので、平均通過長さの短い小型検出器ほど入射粒子のエネルギーを吸収する率が下る。従って、計数率としてはエネルギーに関係ないので 0~3 MeV のバンドでも 3 MeV 以上のバンドでも同様の傾向を示すが、吸収エネルギーについては、検出器が小型になるほど入射粒子当りのエネルギーを吸収する割合が下るため、相対的に重量当りの吸収エネルギーが下ってくる。つまり単位計数率当りの吸収エネルギーが小さくなる。この様子を Fig. 4.10 に示す。このことは、4.2.2 で述べたように、Fig. 4.6 で  $1'' \phi \times 1''$  のものの高度分布が高々度で平坦になるところにも現われている。

Fig. 4.1-1

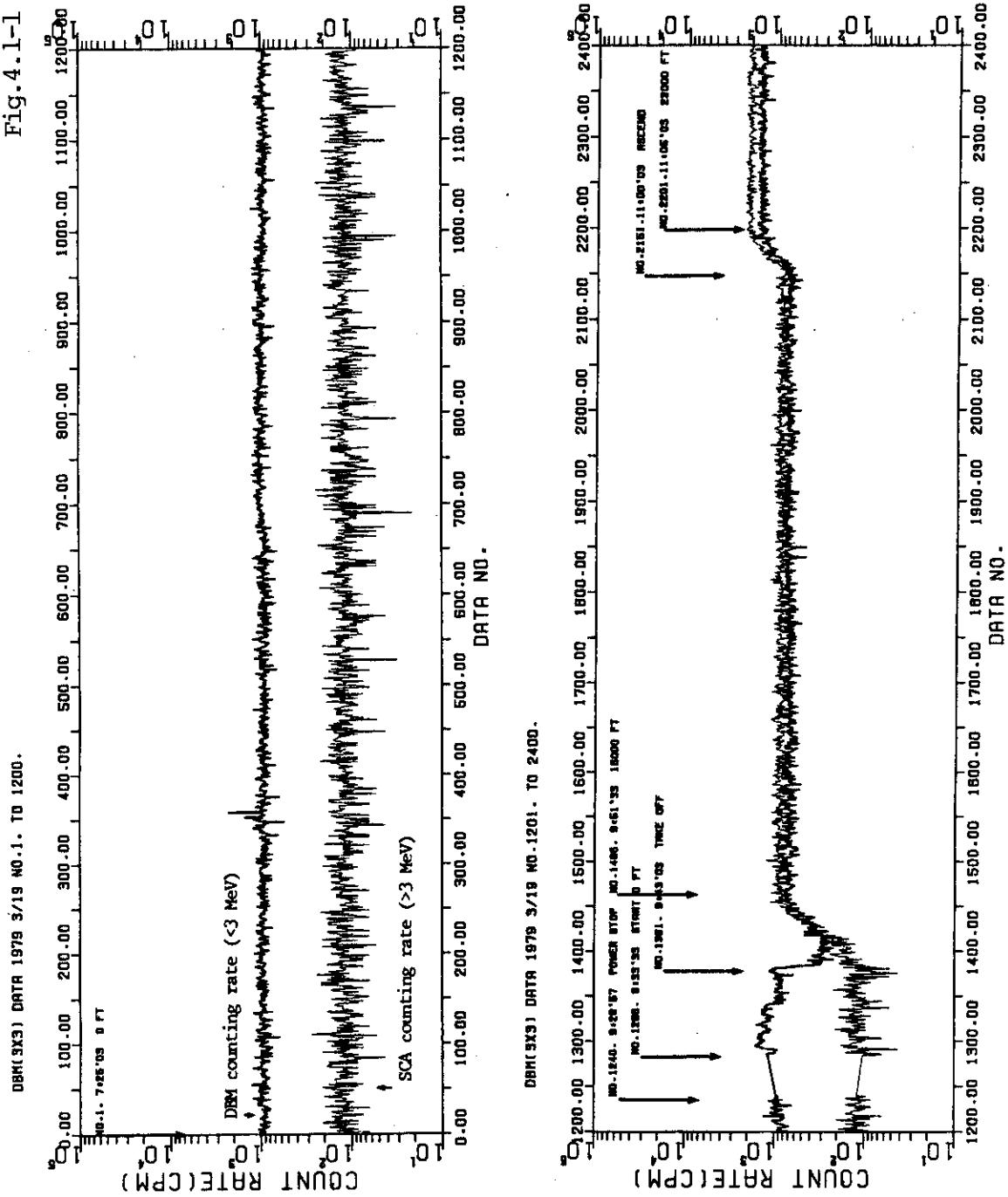


Fig. 4.1 Time serial data obtained by DBM exposure rate meter and single channel pulse height analyzer (SCA). Thick line stands for DBM counting rate (< 3 MeV). Thin line stands for SCA counting rate (> 3 MeV).

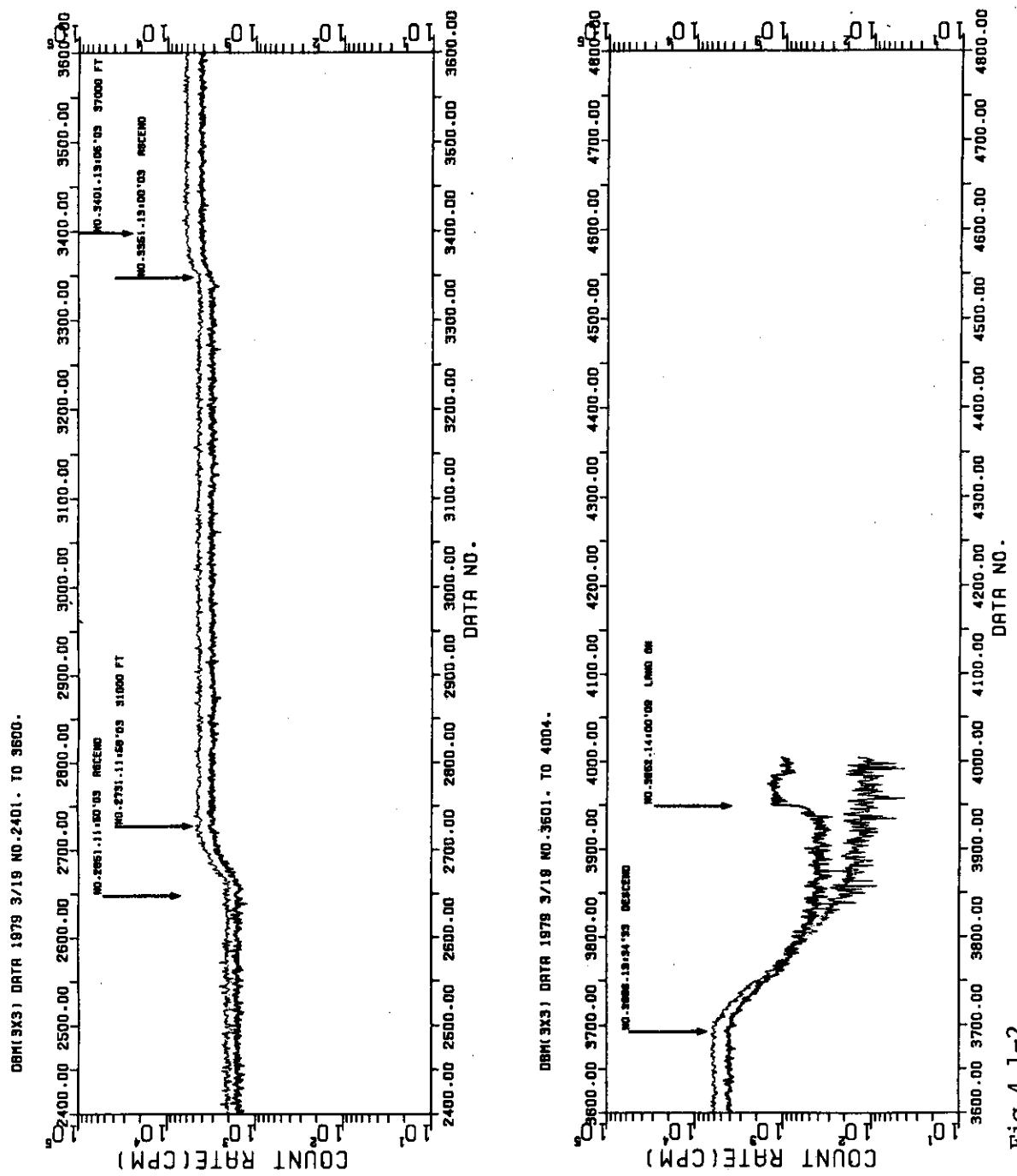


Fig. 4.1-2

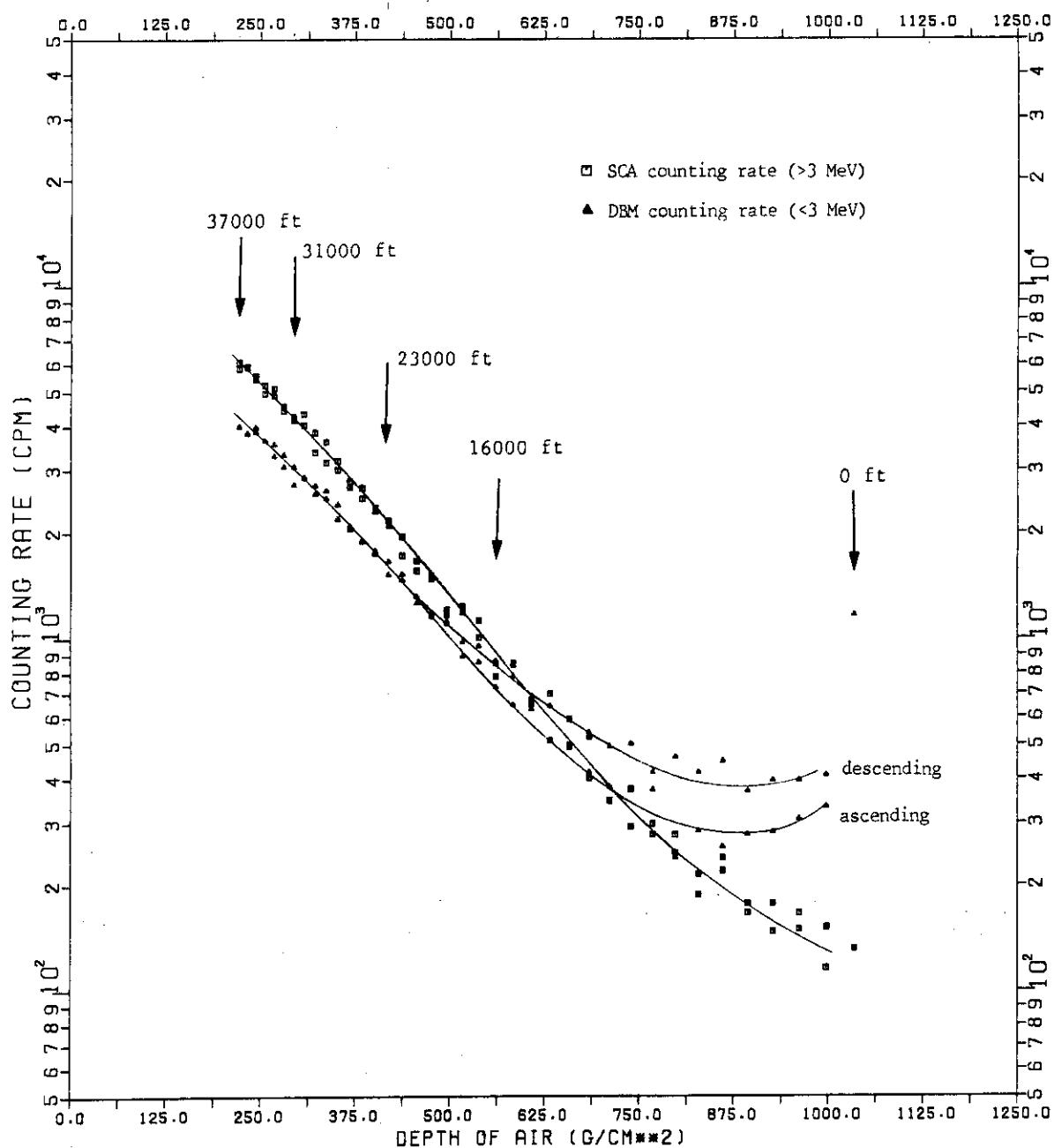


Fig.4.2 Vertical profile of DBM counting rate ( $< 3 \text{ MeV}$ ) and SCA counting rate ( $> 3 \text{ MeV}$ ). 3" dia.x 3" cylindrical NaI(Tl) scintillation detector was used.

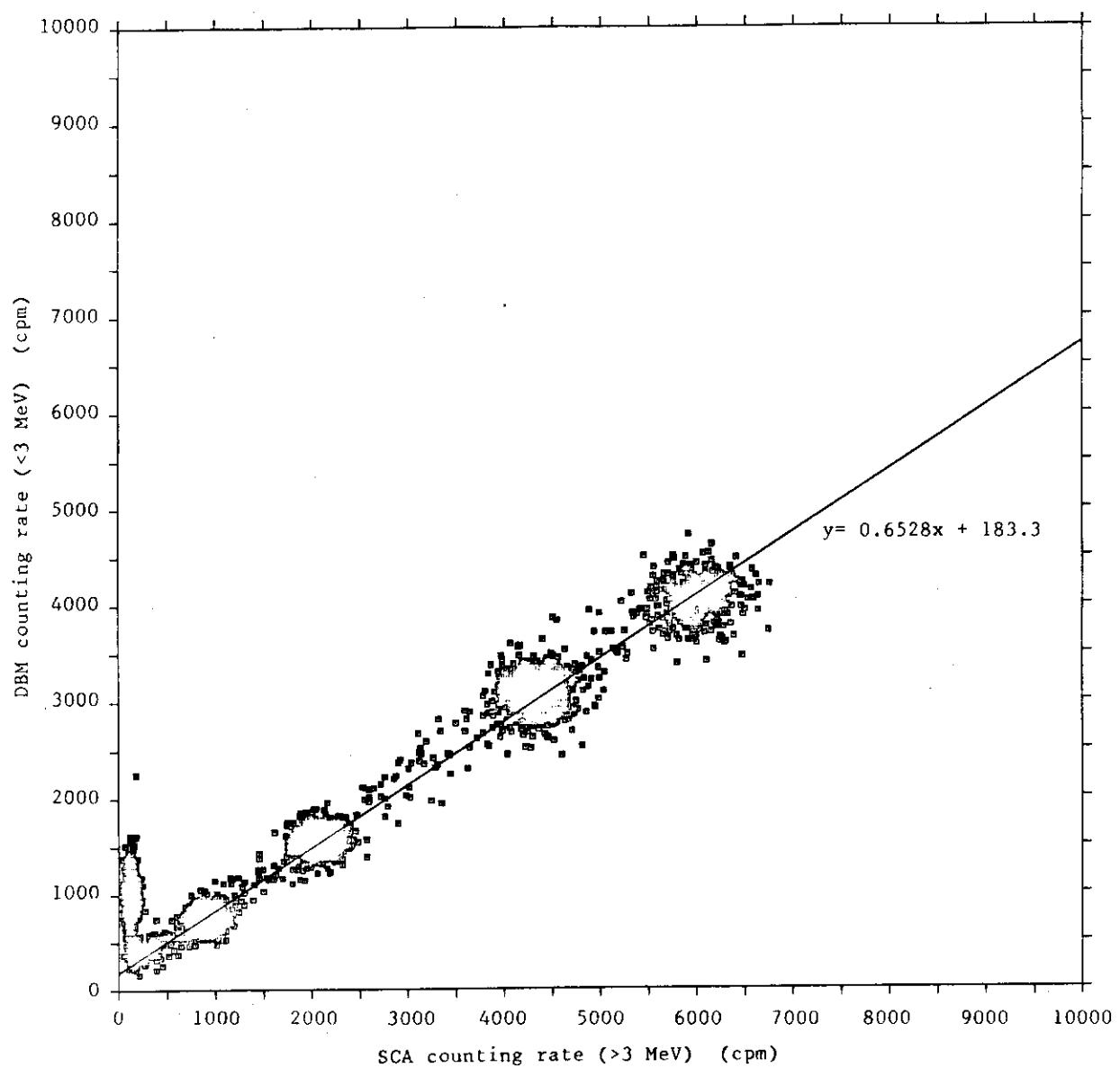


Fig.4.3 Co-relation between exposure rate equivalent ( $< 3$  MeV) and cosmic ray intensity. Exposure rate eq. ( $< 3$  MeV) is represented by DBM counting rate ( $< 3$  MeV), and cosmic ray intensity by SCA counting rate ( $> 3$  MeV). Exposure rate eq. ( $\mu R/h$ ) is given by multiplying DBM counting rate ( $< 3$  MeV) (cpm) by conversion factor  $2.93 \times 10^{-3}$  ( $\mu R/h/cpm$ ).

Fig.4.4-1

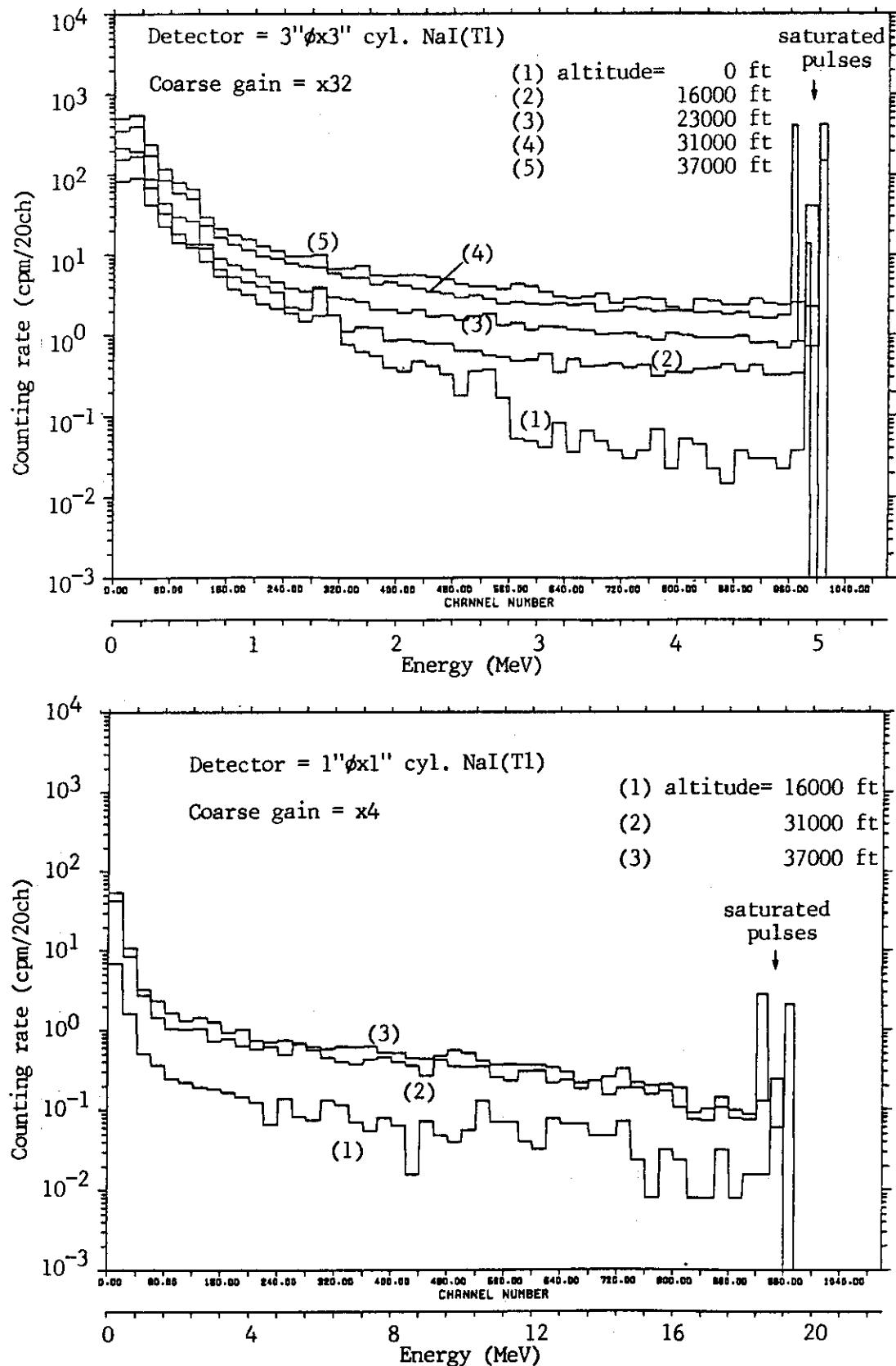


Fig.4.4 Deposited energy spectra due to cosmic ray. Energy was calibrated using photo-peak of  $^{40}K$  (1.46 MeV) or annihilation gamma ray (0.511 MeV).

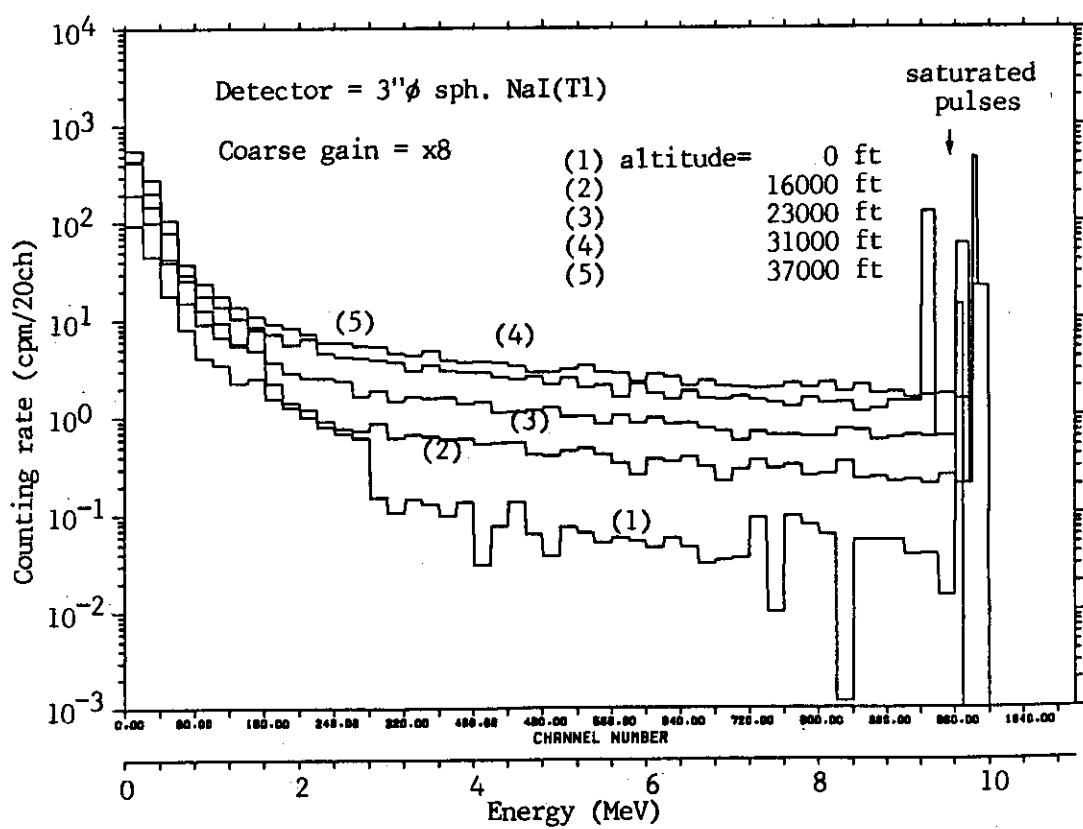
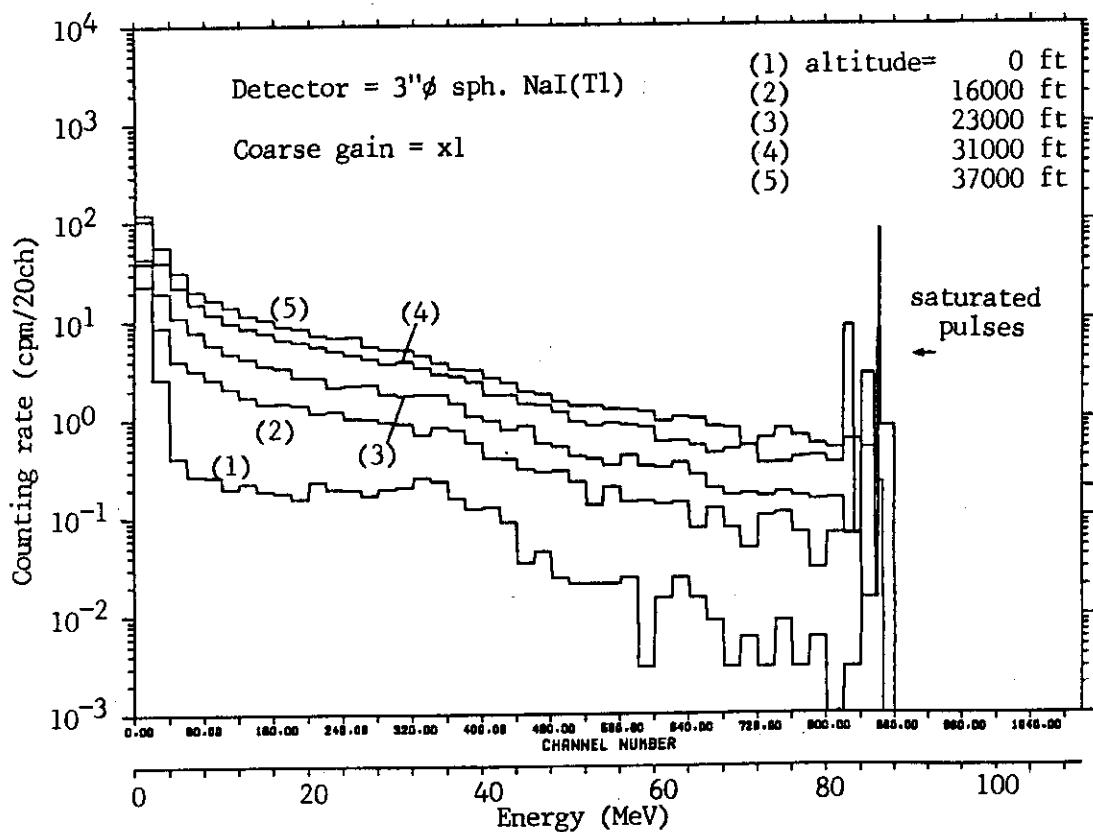


Fig.4.4-2

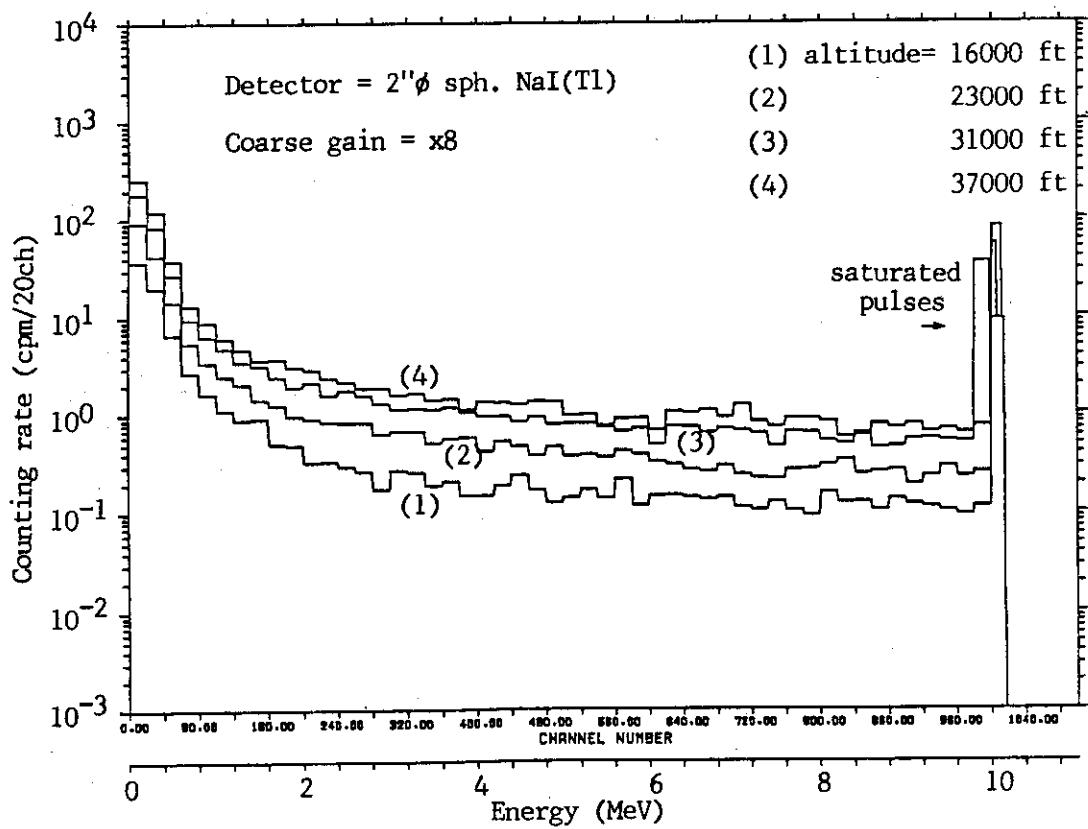
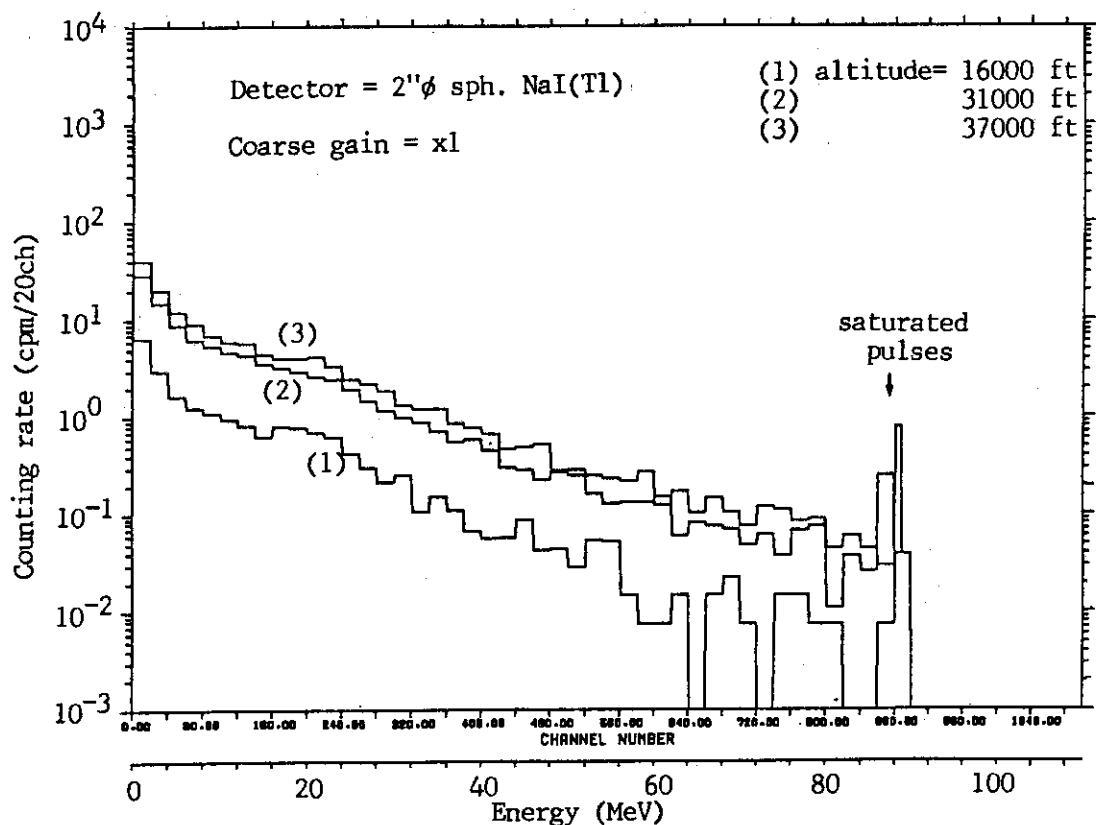


Fig.4.4-3

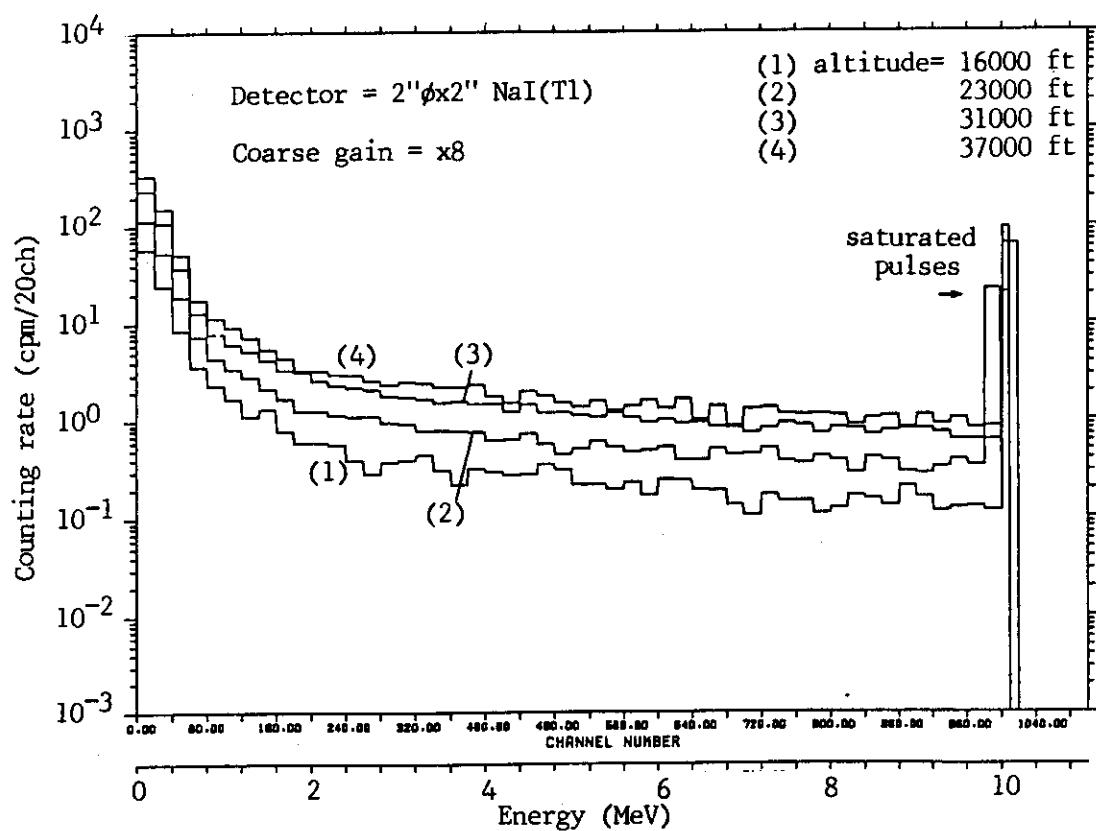
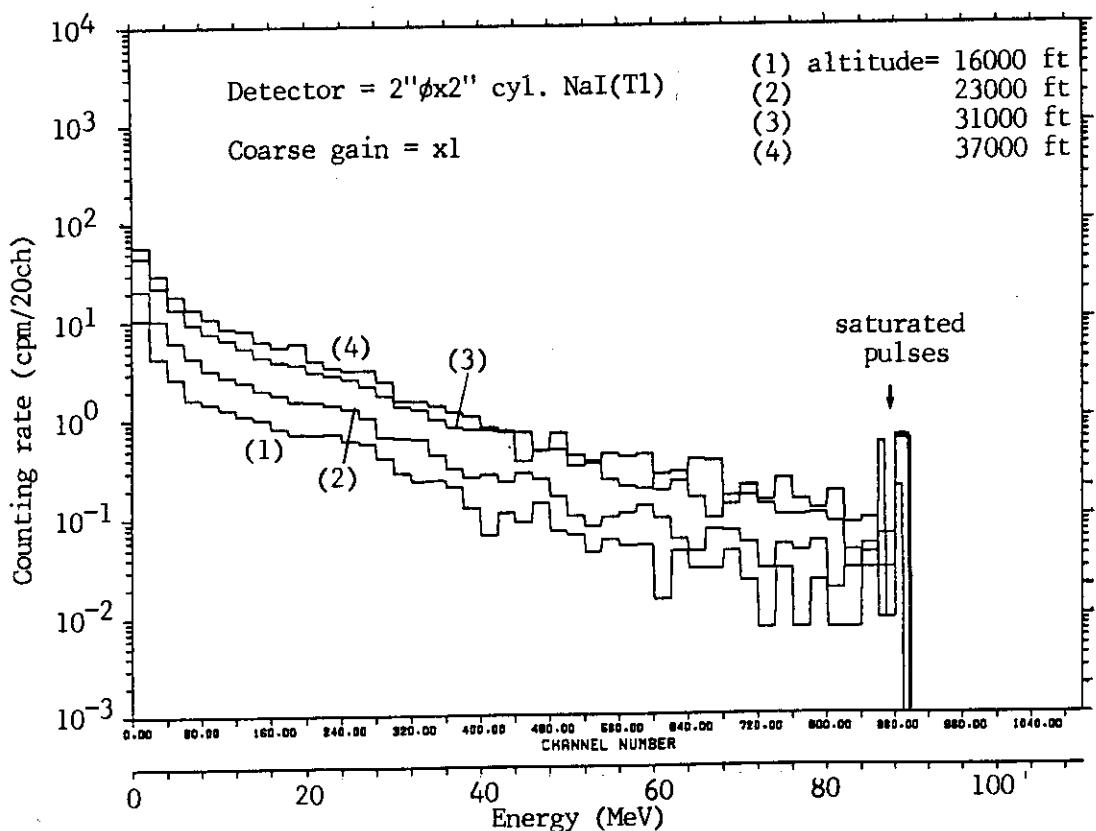


Fig.4.4-4

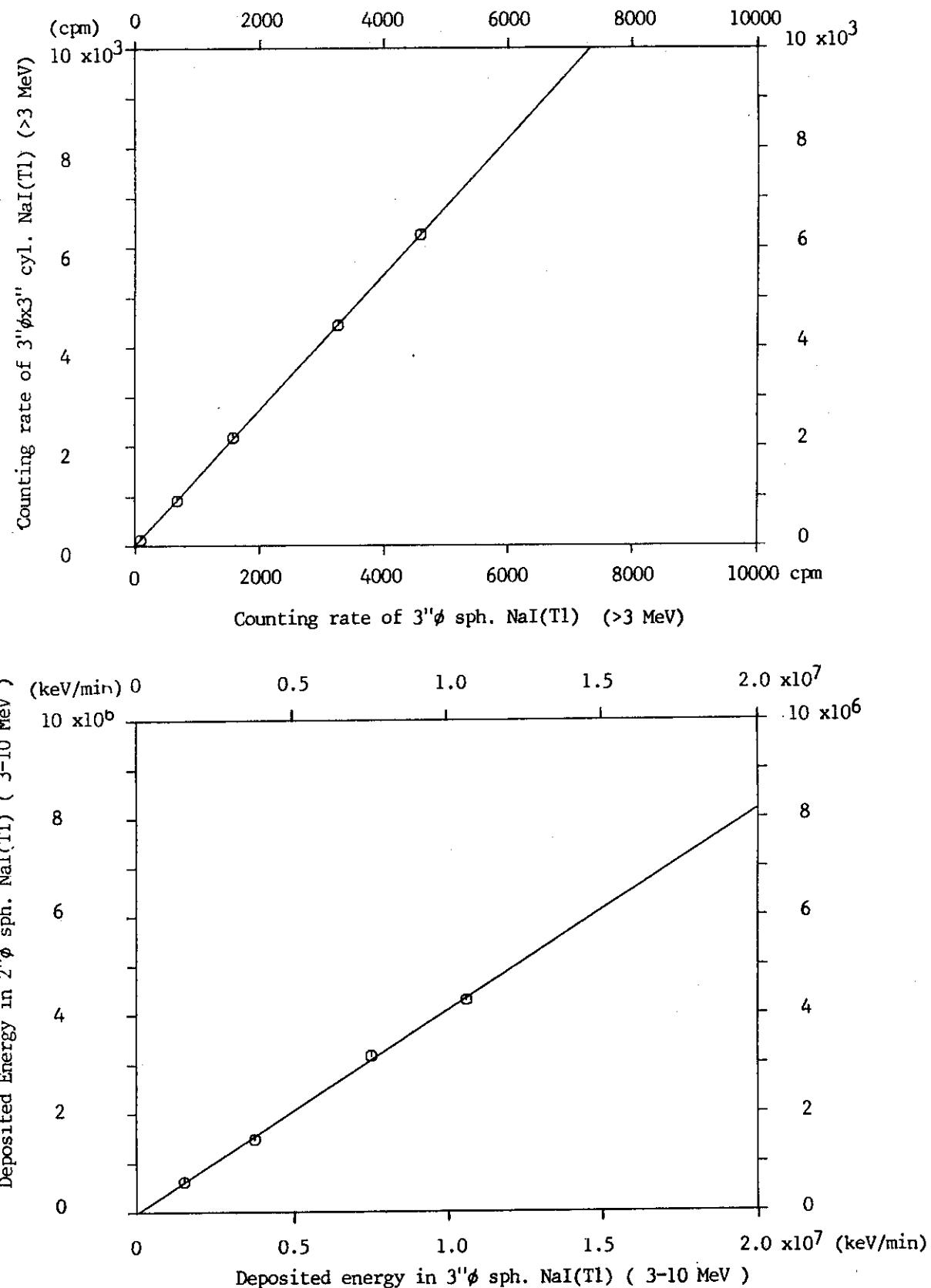


Fig.4.5 Co-relation of energy band information of 3' dia.x 3' cylindrical and 2' dia. spherical NaI(Tl) scintillation detectors with that of 3' dia. spherical NaI(Tl) scintillation detector.

Fig.4.6-1

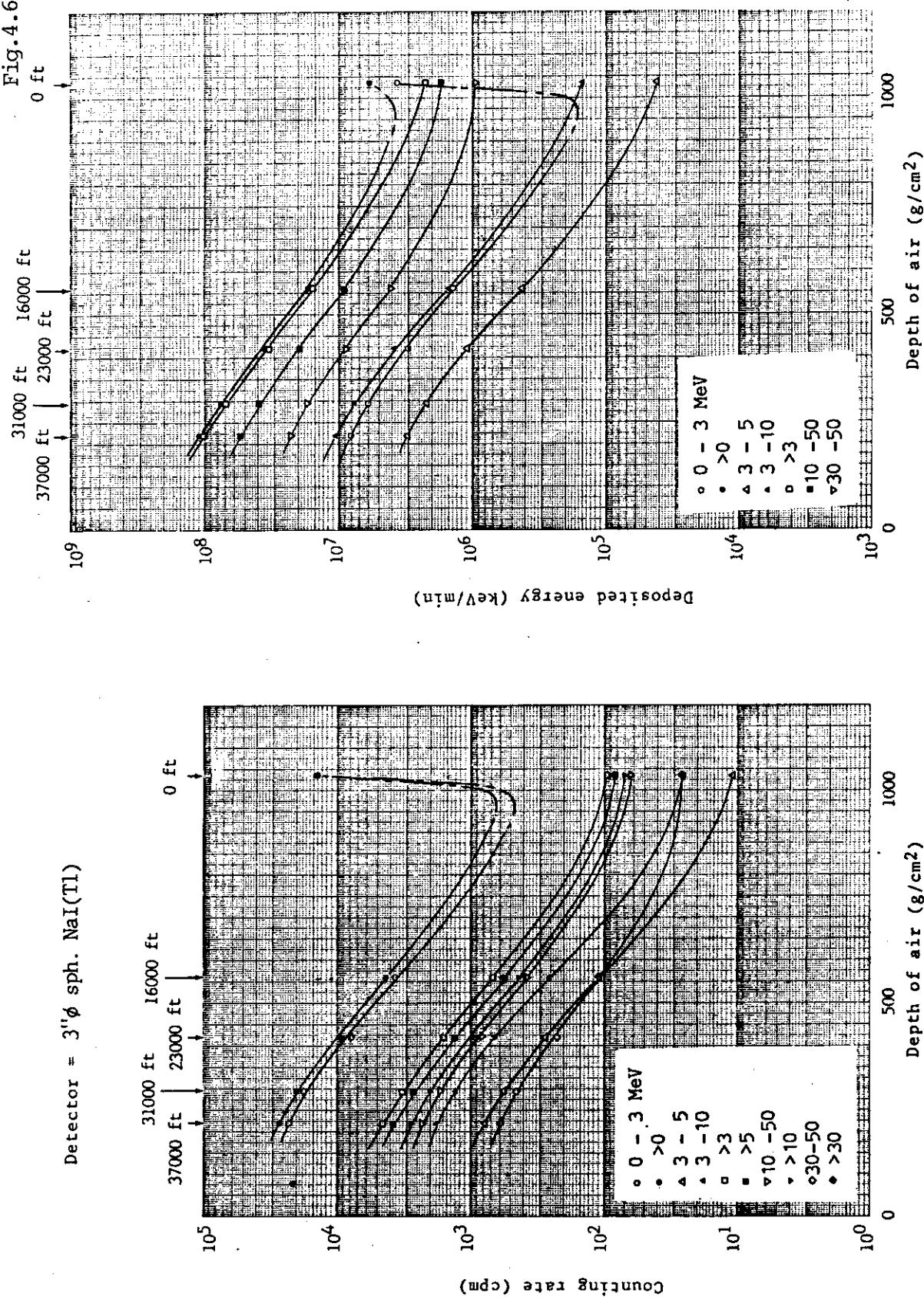


Fig.4.6 Vertical profile of energy band information. Solid lines stand for interpolation between actual measured points. Dashed lines stand for interpolation between actual measured point and estimated point. Lines which stand for band information including the component below 3 MeV rise up steeply near the ground surface owing to the terrestrial gamma ray. It is shown by dashed line with a dot.

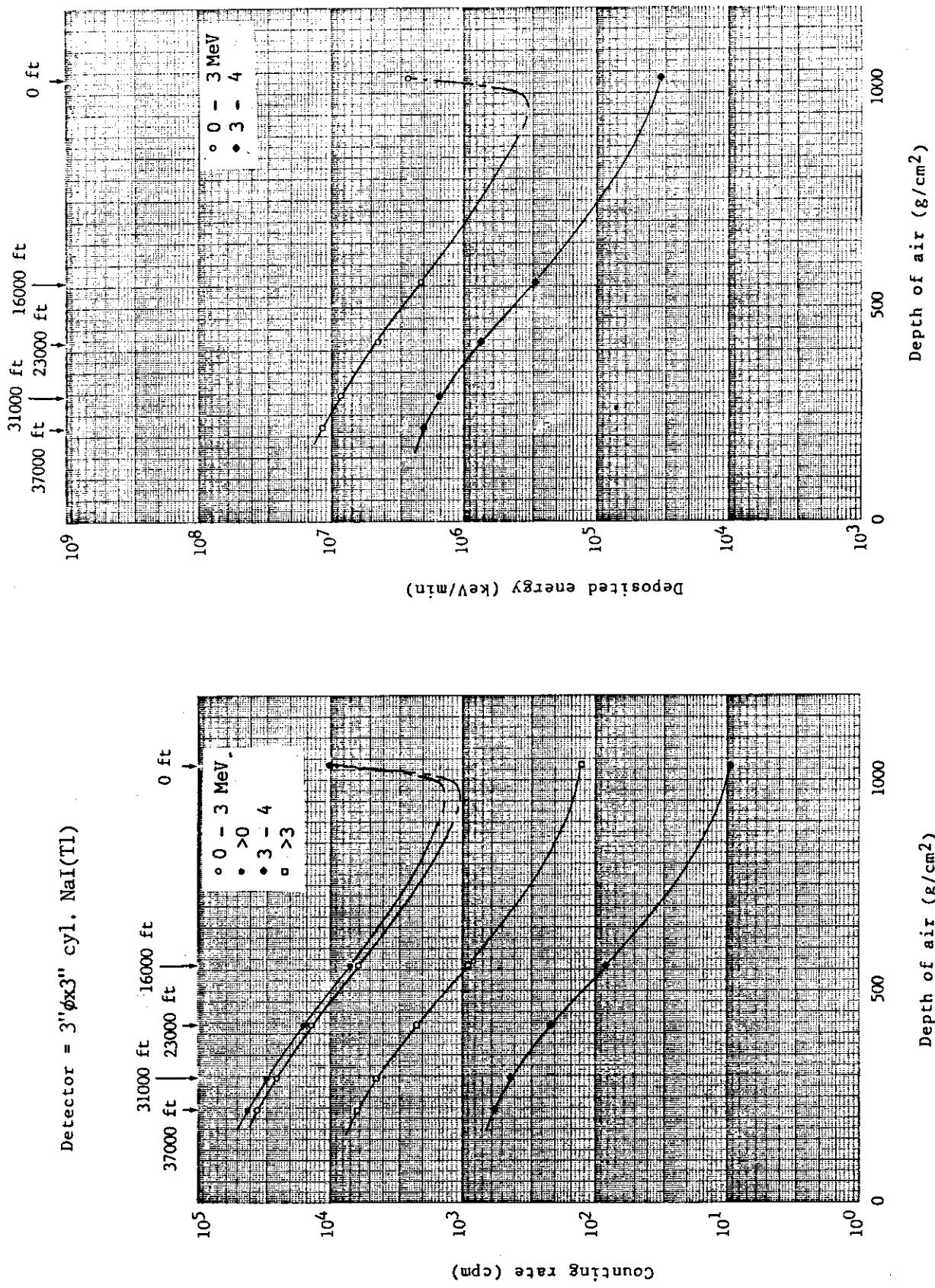
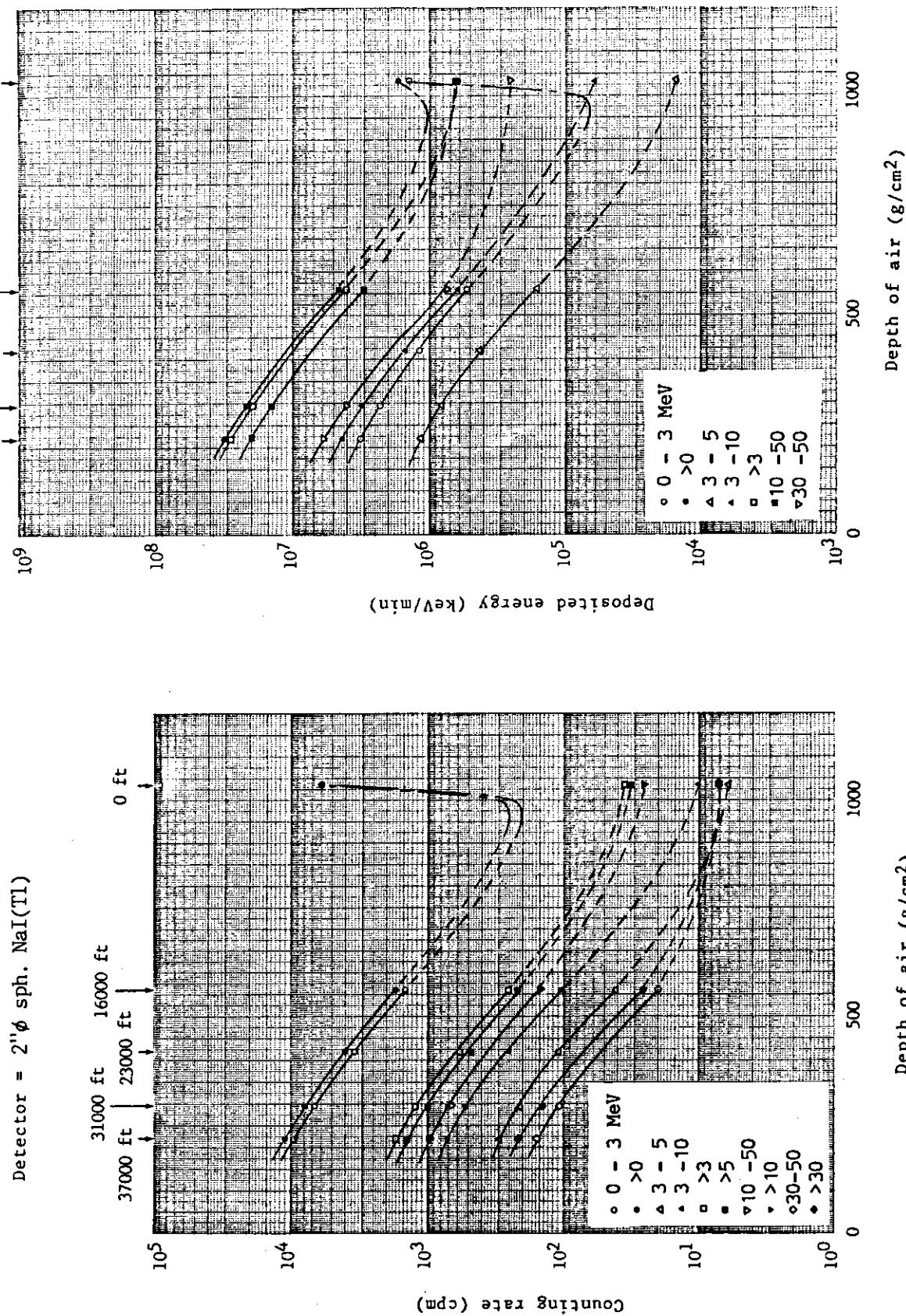


Fig. 4.6-2



Depth of air (g/cm<sup>2</sup>)

Depth of air (g/cm<sup>2</sup>)

Fig. 4.6-3

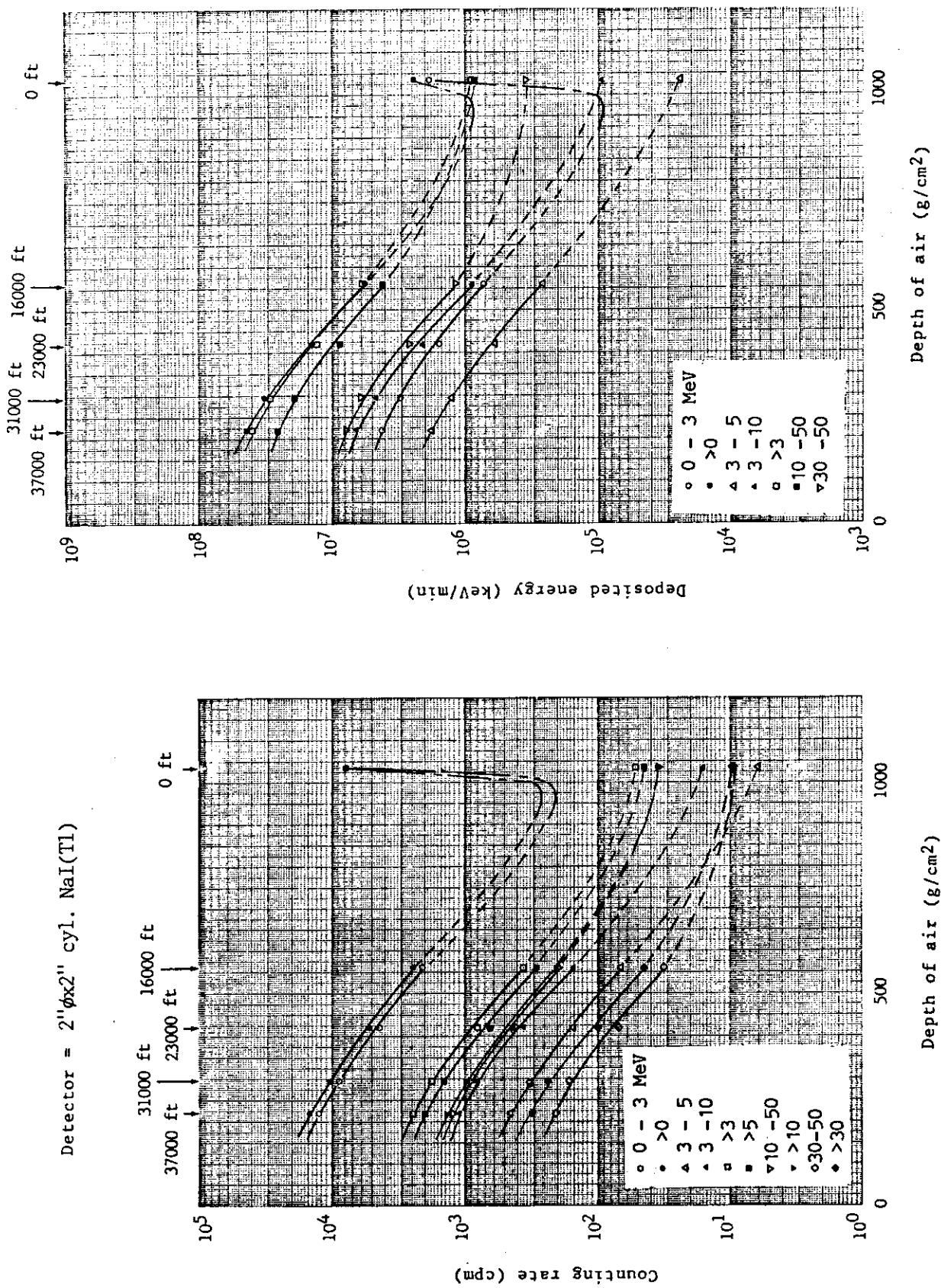
Detector = 2" $\phi$ x2" cyl. NaI(Tl)

Fig. 4.6-4

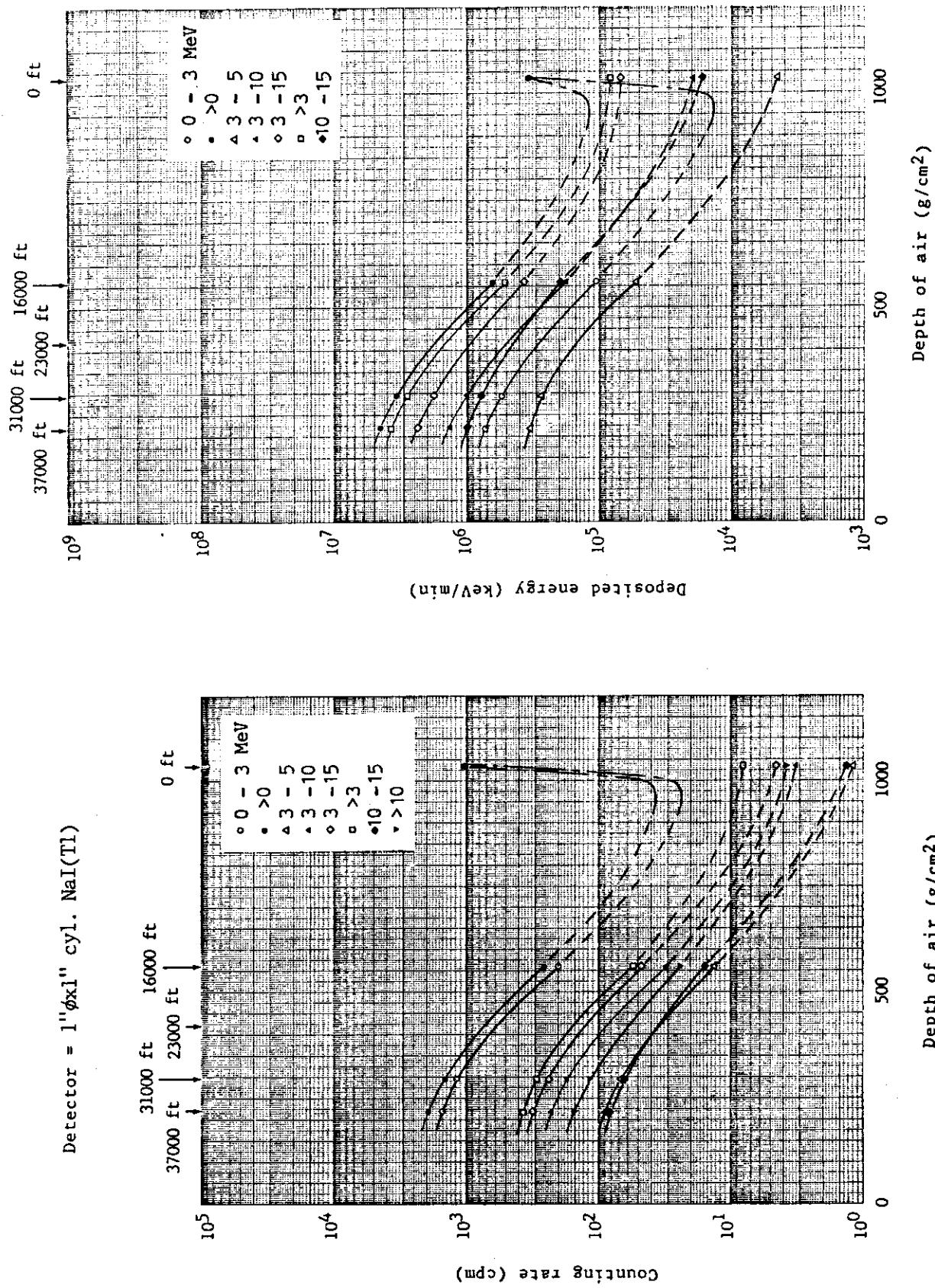


Fig.4.6-5

Detector = 3"φ sph. NaI(Tl)

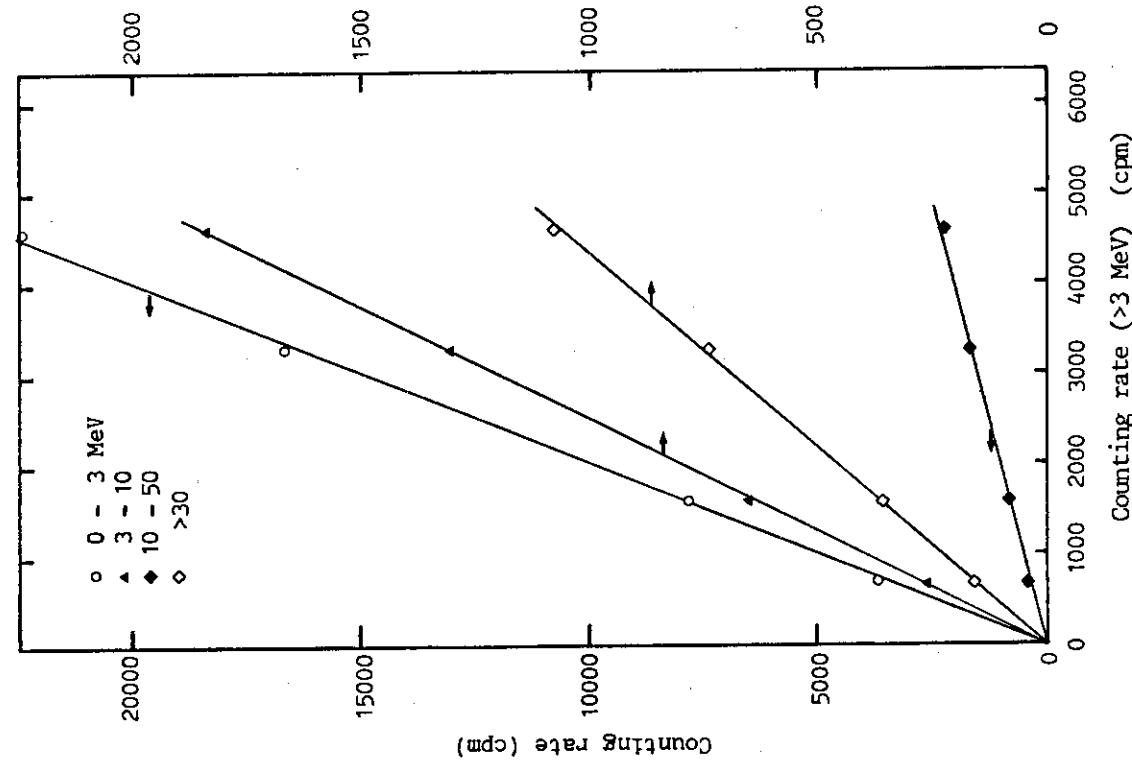


Fig.4.7-1

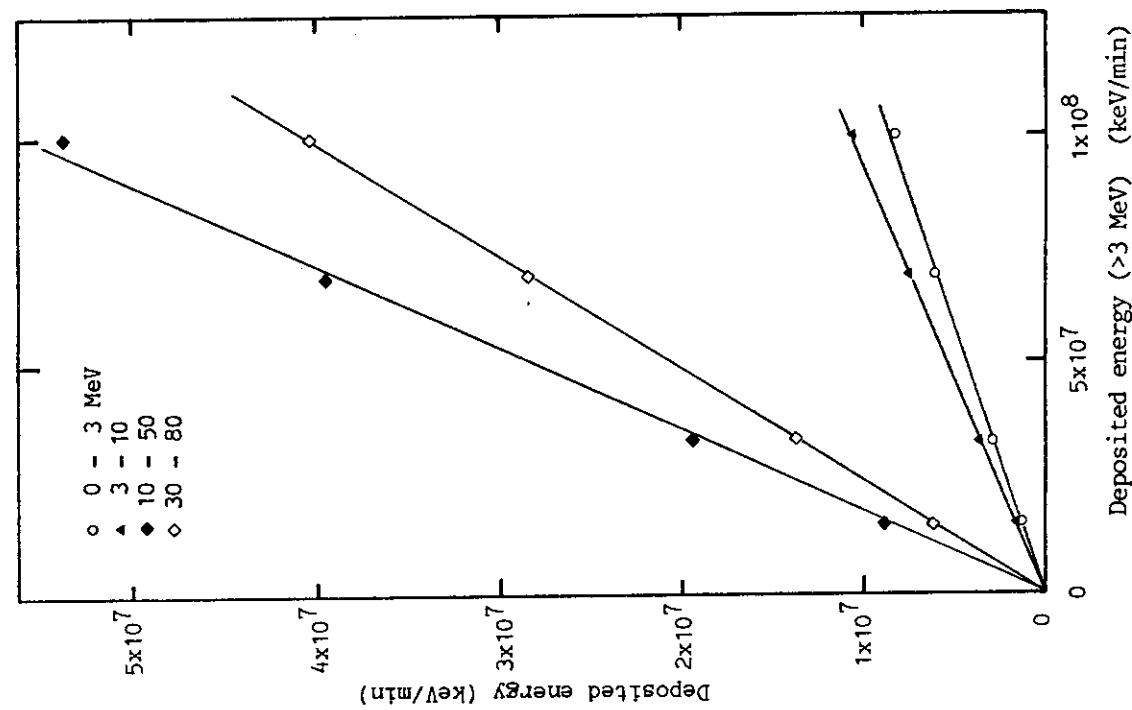


Fig.4.7 Co-relation between energy band information (in counting rate or deposited energy) of energy band of >3 MeV and those of other bands.

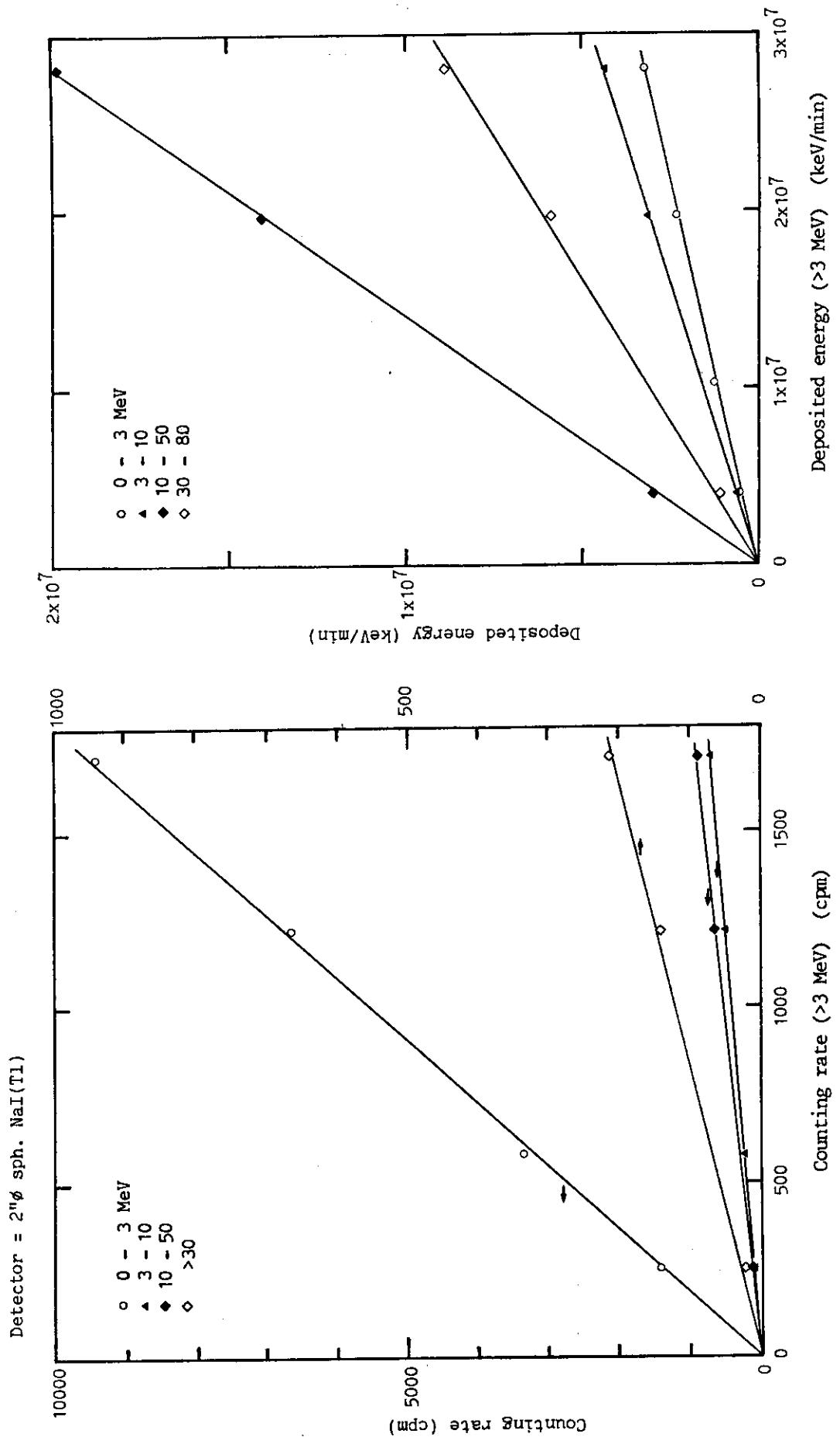


Fig.4.7-2

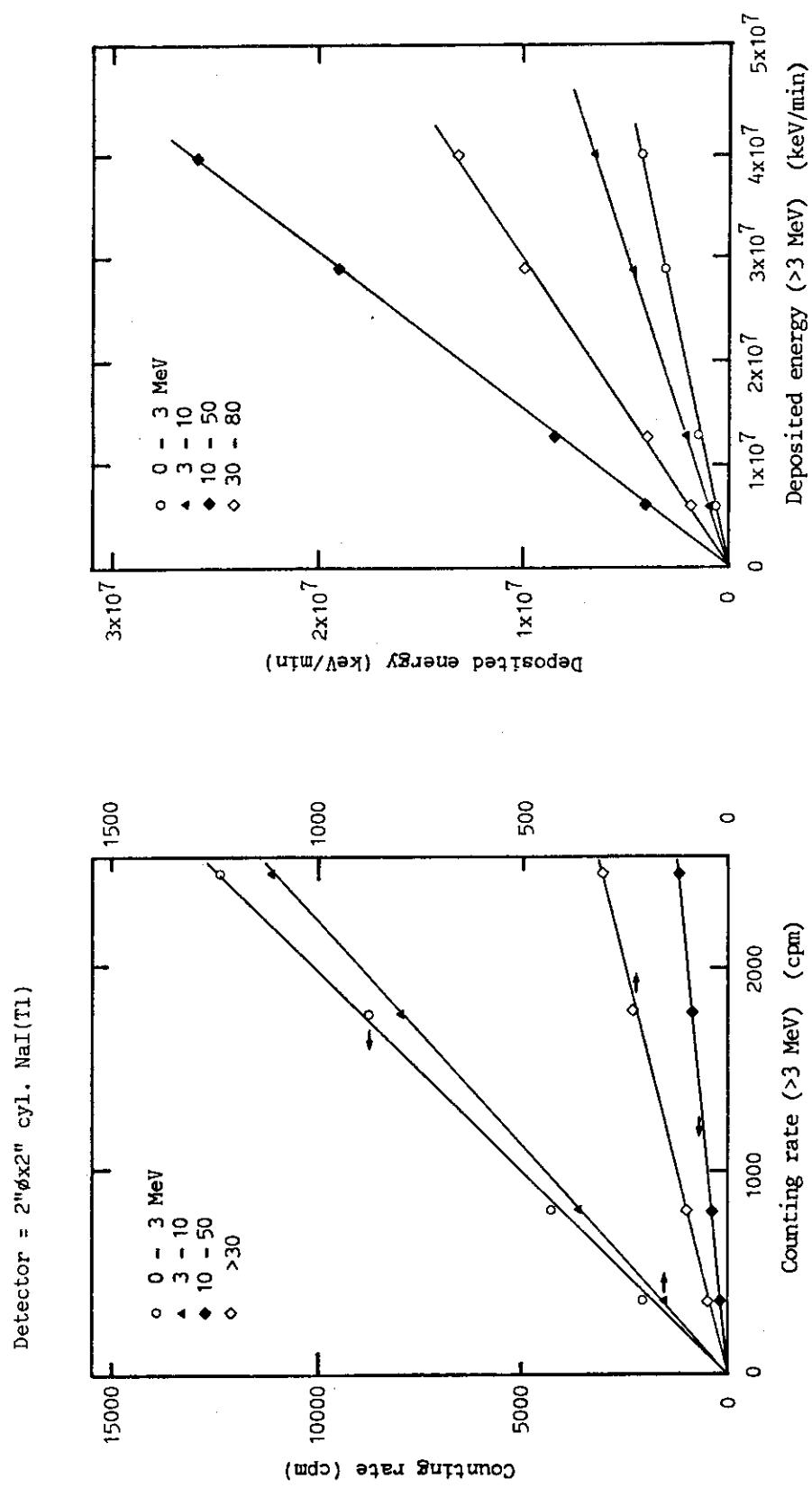


Fig.4.7-3

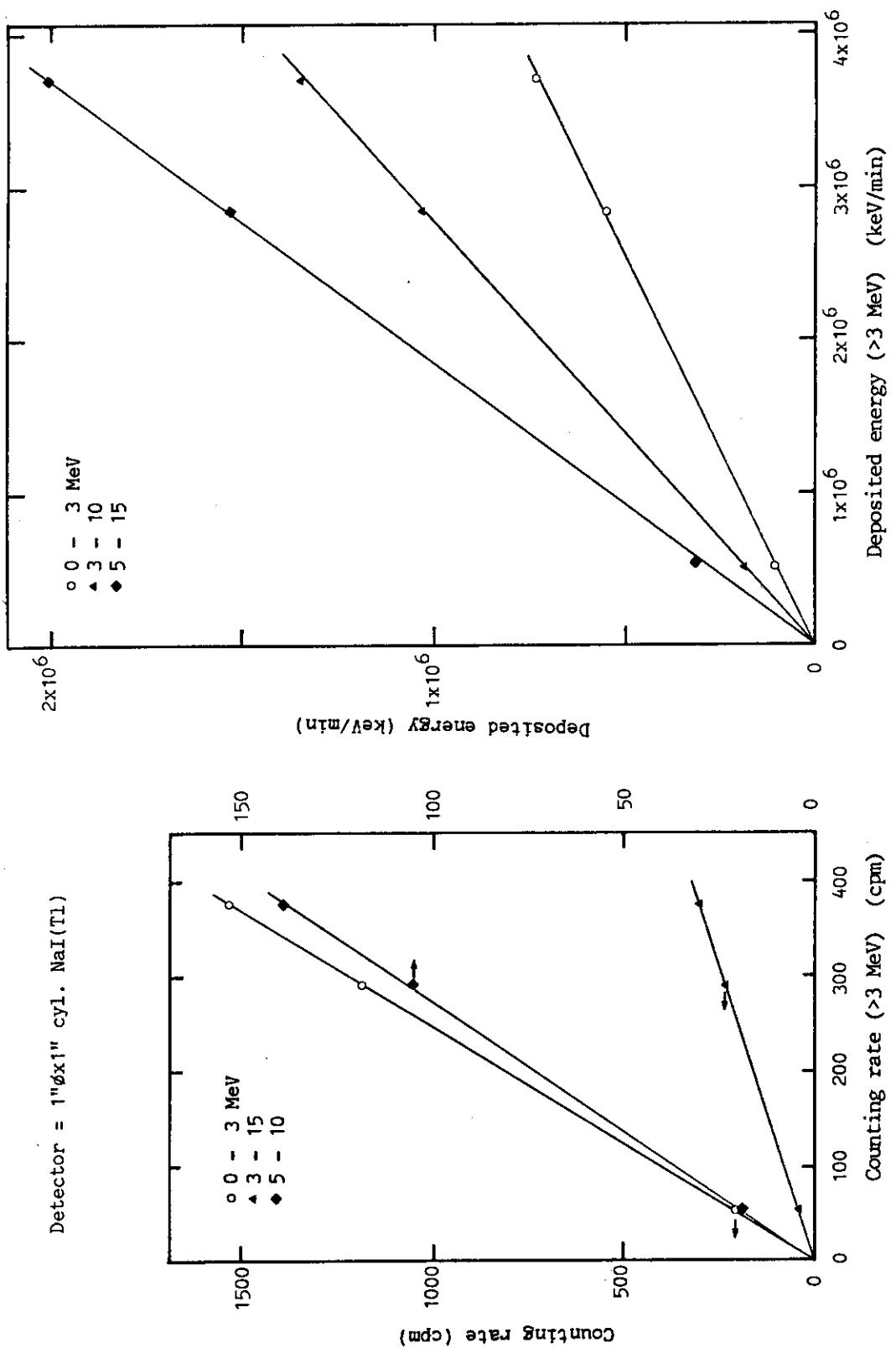


Fig. 4.7-4

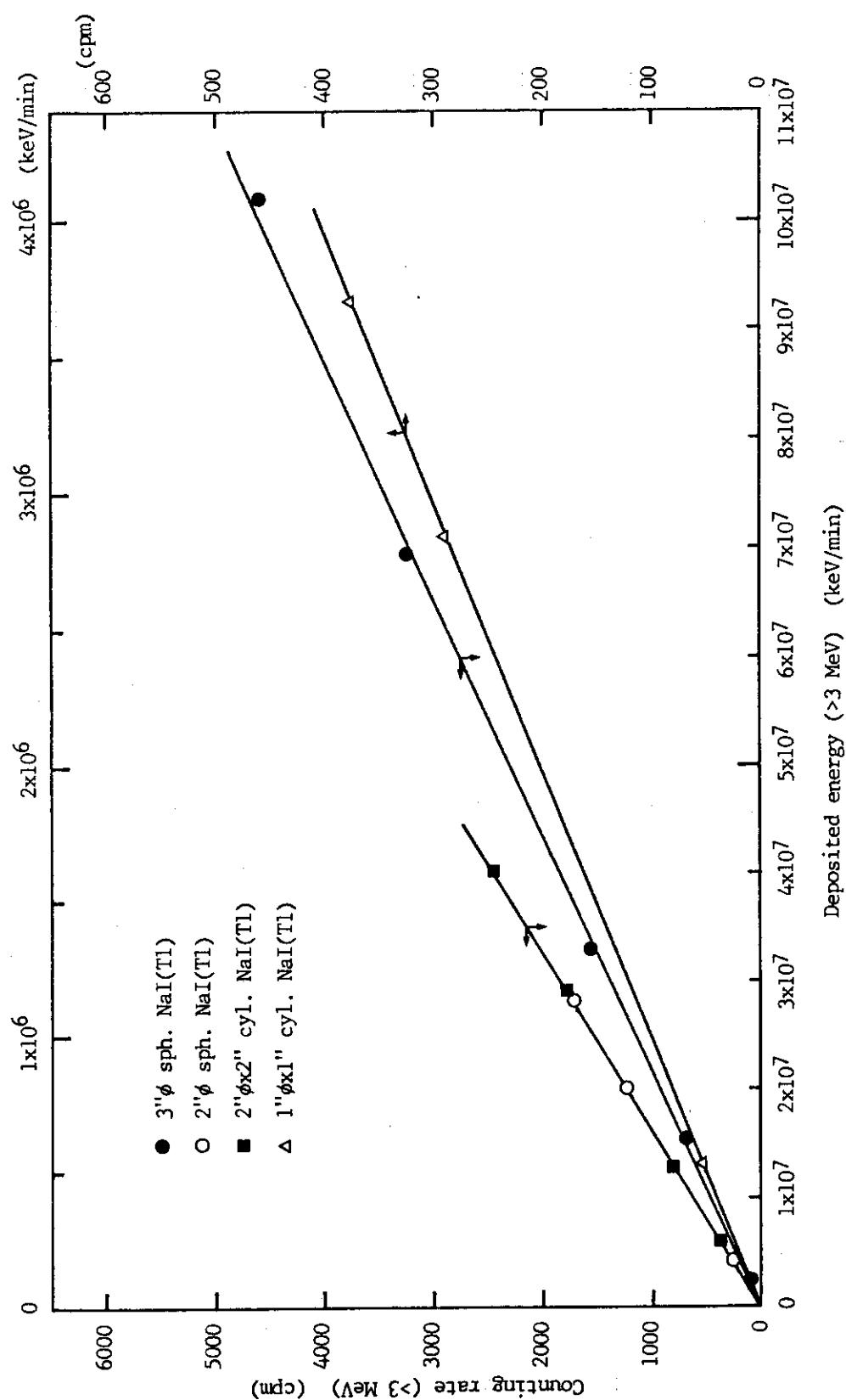


Fig.4.8 Co-relation between counting rate and deposited energy of energy band of >3 MeV.

Table 4.1 Estimated value of cosmic ray contribution in ( $\mu R/h$  eq.) on the ground surface, which is involved in deposited energy spectrum below 3 MeV.

Counting rate (cpm)

Items \ Detector	3"φ sph.	3"φx3" cyl.	2"φ sph.	2"φx2" cyl.	1"φx1" cyl.
Energy band	>3 MeV	>3 MeV	>3 MeV	>3 MeV	>3 MeV
Coefficient* a	$2.38 \times 10^{-3}$	$1.74 \times 10^{-3}$	$6.50 \times 10^{-3}$	$4.92 \times 10^{-3}$	0.0361
b	0.15	0.57	0.30	0.42	0.33
Ground surface value	95.4	127	35.8	51.9	7.93
$\mu R/h$ eq.	0.227	0.221	0.233	0.255	0.286

Deposited energy in detector (keV/min)

Items \ Detector	3"φ sph.	3"φx3" cyl.	2"φ sph.	2"φx2" cyl.	1"φx1" cyl.
Energy band	>3 MeV	3 - 4 MeV	>3 MeV	>3 MeV	3 - 10 MeV
Coefficient* a	$1.09 \times 10^{-7}$	$4.97 \times 10^{-6}$	$4.07 \times 10^{-7}$	$2.77 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-5}$
b	0.12	0.69	0.29	0.45	0.18
Ground surface value	$2.25 \times 10^6$	$5.89 \times 10^4$	$6.29 \times 10^5$	$9.03 \times 10^5$	$1.95 \times 10^4$
$\mu R/h$ eq.	0.245	0.293	0.256	0.250	0.197

\*; Co-relation between exposure rate and an energy band information is represented by the form  $y=ax+b$ , where  $y$  stands for exposure rate ( $\mu R/h$ ), and  $x$  stands for competent energy band information ( cpm or keV/min).

Fig.4.9-1

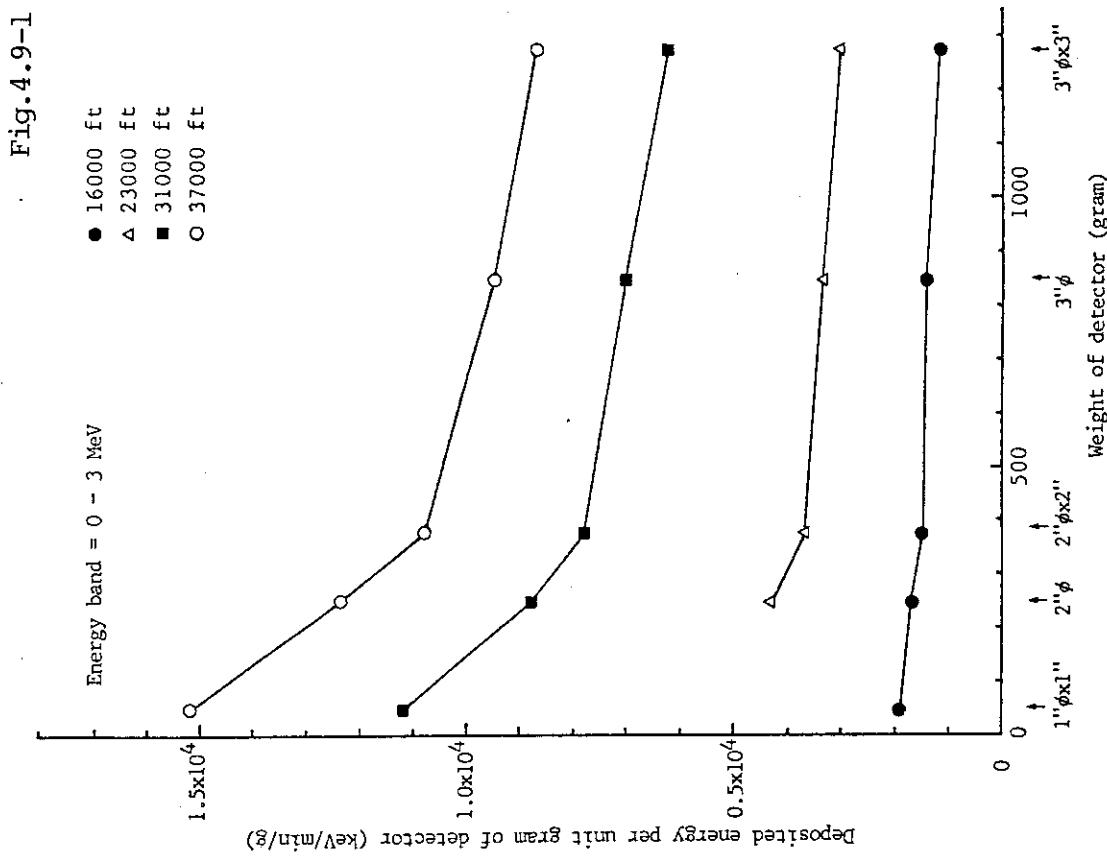
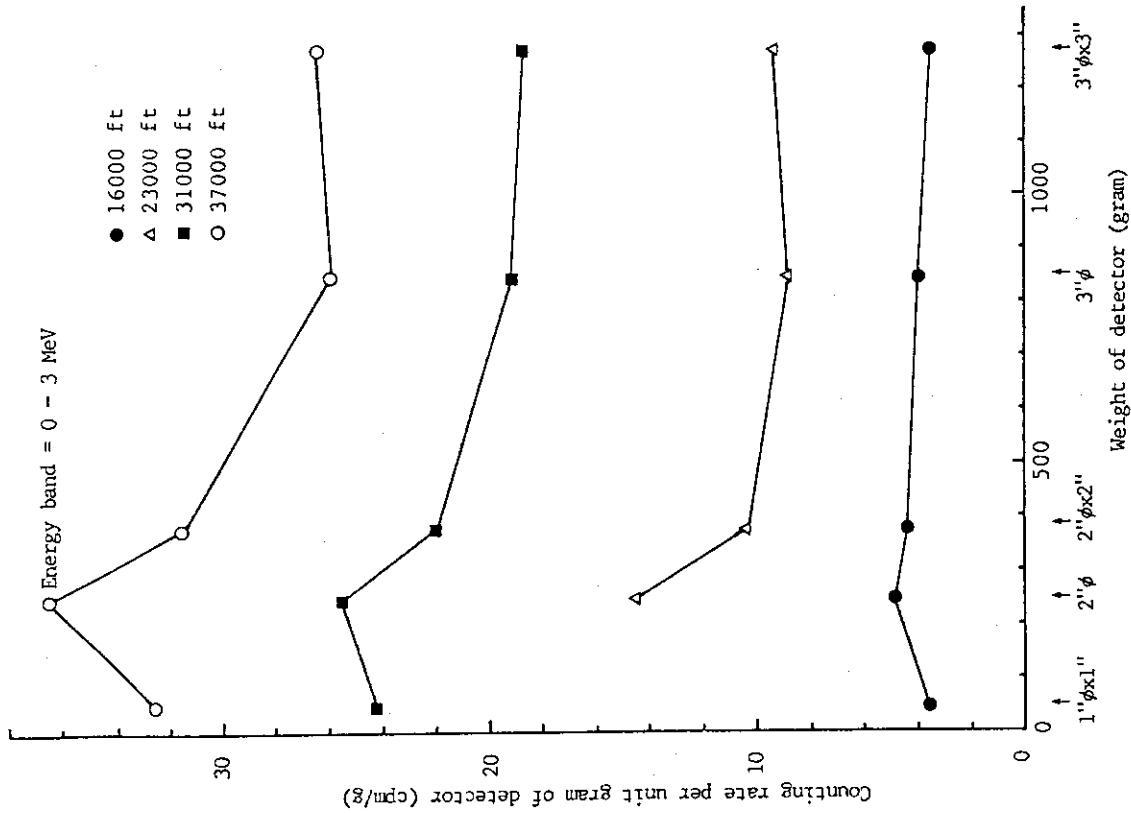


Fig.4.9 Counting rate and deposited energy per unit weight (in gram) of detector.

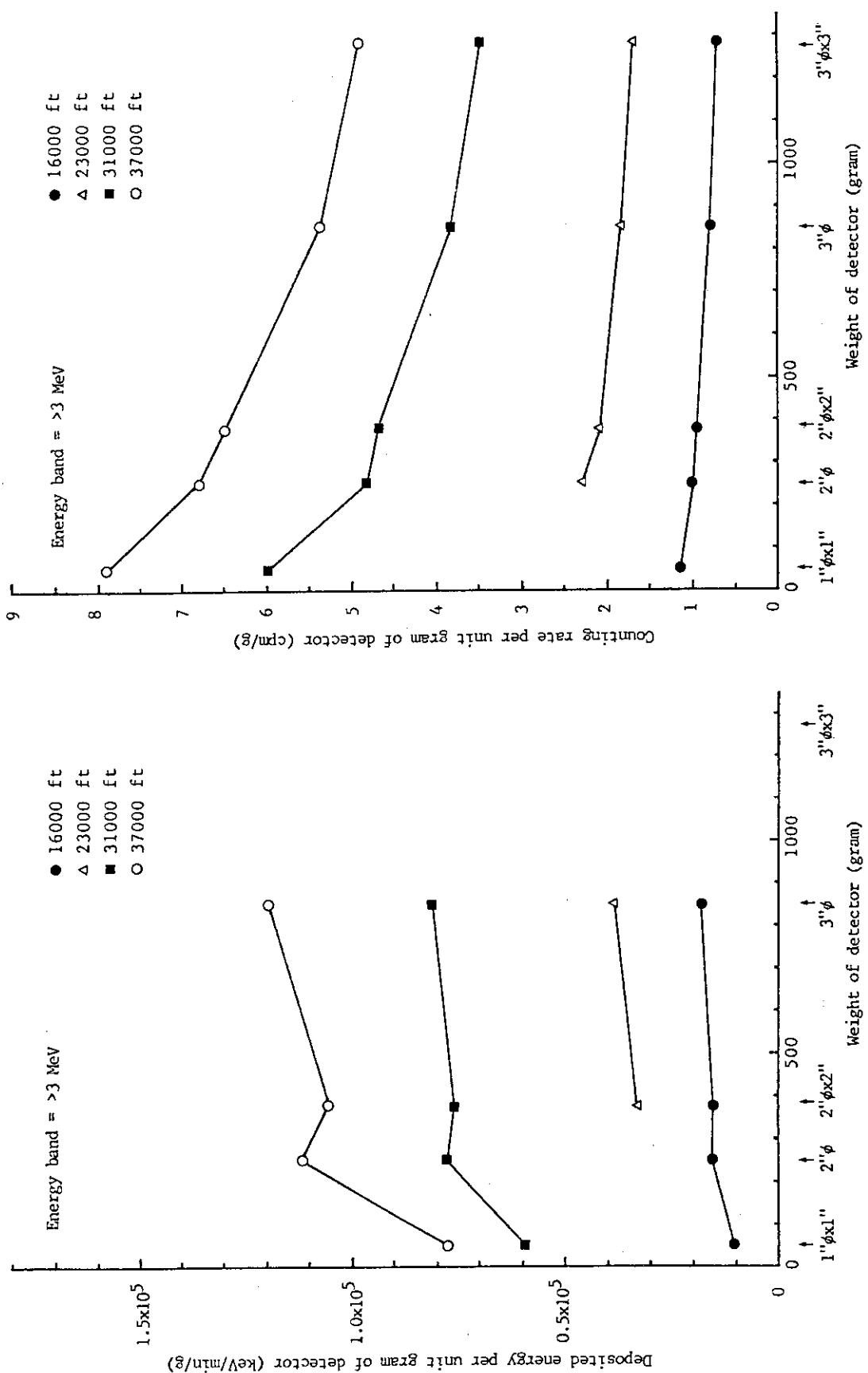


Fig. 4.9-2

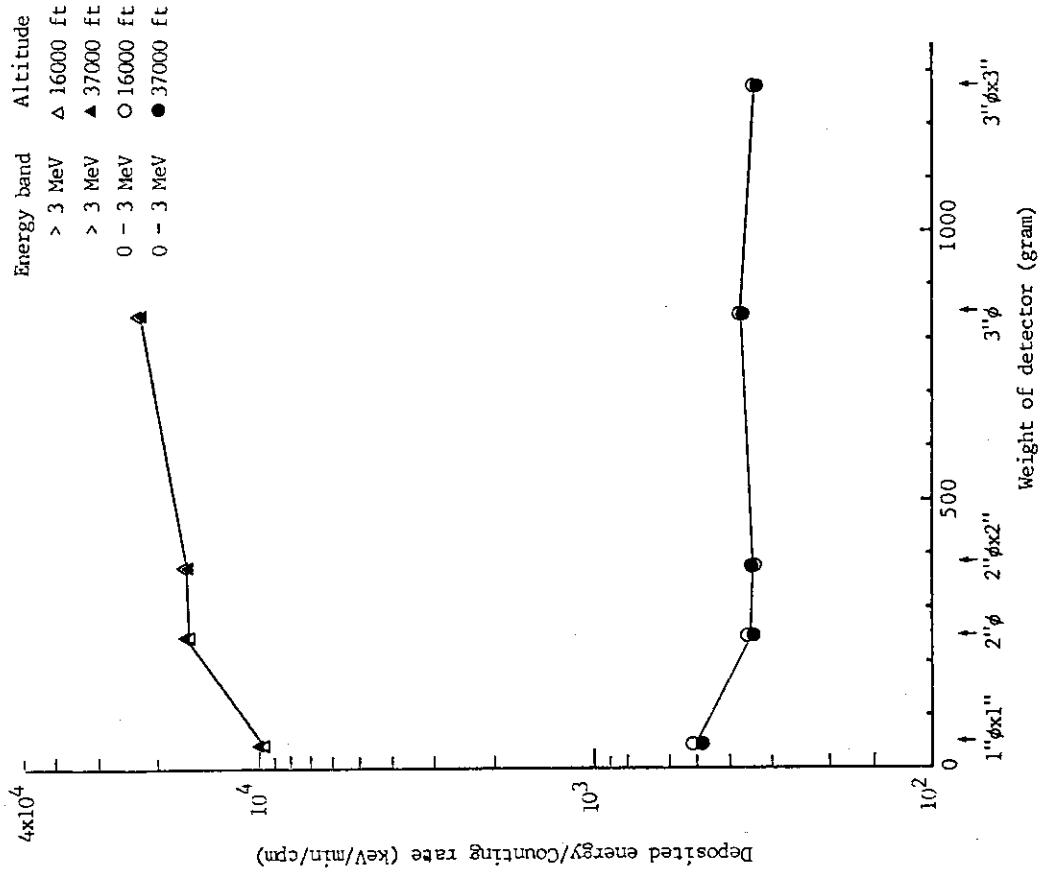


Fig. 4.10 Deposited energy in detector per unit counting rate.

## 5. 結 言

高度 16000 ft, 23000 ft, 31000 ft, 37000 ft の水平飛行を含む飛行中の航空機内において各種 NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて宇宙線測定を行った (Fig. 2.1, Table 2.1)。DBM 系においては  $3'' \phi \times 3''$  NaI(Tl) シンチレーション検出器を備えた DBM 式線量測定器により飛行中の照射線量率相当値の変化を測定した (Fig. 2.2, 4.1, 4.2, 4.3)。一方スペクトル系においては  $3'' \phi$  球形,  $3'' \phi \times 3''$ ,  $2'' \phi$  球形,  $2'' \phi \times 2''$  及び  $1'' \phi \times 1''$  の 5 種類の NaI(Tl) シンチレーション検出器及び多重波高分析器により各高度における宇宙線による吸収エネルギースペクトルを測定した (Fig. 2.3, 4.4)。

これらの測定結果は、予め設定されたいくつかのエネルギー バンド毎に計数率、検出器への吸収エネルギー及び照射線量率に換算され、これらの値の高度分布を示した (Fig. 4.6)。また、これらのバンド情報相互間の相関を検討し、互いに直線関係で結ばれることを示した (Fig. 4.5, 4.7, 4.8)。また、自然環境中における  $\gamma$  線線量率の高精度測定において問題となる 3 MeV 以下のエネルギー領域における宇宙線寄与分の地上値 (緯度 35°N 付近) を評価し、使用した上記の 5 種類の NaI(Tl) シンチレーション検出器いずれについても  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{R}/\text{h}$  相当となることを示した (Table 4.1)。さらに、検出器の重量当たりの宇宙線感度について検討し、重量当たりの計数率は小型検出器ほど高く、重量当たりの吸収エネルギーは 3 MeV 以下では小型検出器ほど高く、3 MeV 以上では大型検出器ほど高くなる傾向であることを示し、これについて、高エネルギー粒子の検出器内通過長さと吸収エネルギーとがほぼ比例することに基づいて考察を行った (Fig. 4.9, 4.10)。

これらの結果は、環境  $\gamma$  線測定における宇宙線寄与分の評価のために有用な資料となることが期待される。

### 謝 辞

本飛行測定は理化学研究所の昭和 54 年度飛行機実験の際、それに同乗して実施されたものである。このような機会を与えていただいた理化学研究所宇宙線研究室、放射線研究室、企画部等の関係者諸氏に感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 森内 茂：“スペクトル荷重関数方式による環境  $\gamma$  線線量測定器に関する研究”，JAERI-M 7066(1977)
- (2) 小田 稔：“宇宙線”，裳華房、東京(1960)
- (3) 岡野真治：“環境放射線の基礎(1)”，原子力工業第 21 卷第 1 号(1975)
- (4) J.A.S. Adams, et al：“The Natural Radiation Environment II, Proceedings of the Second International Symposium on Natural Radiation Environment”，CONF-720805(1972)

## 5. 結 言

高度 16000 ft, 23000 ft, 31000 ft, 37000 ft での水平飛行を含む飛行中の航空機内において各種 NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて宇宙線測定を行った (Fig. 2.1, Table 2.1)。DBM 系においては  $3'' \phi \times 3''$  NaI(Tl) シンチレーション検出器を備えた DBM 式線量測定器により飛行中の照射線量率相当値の変化を測定した (Fig. 2.2, 4.1, 4.2, 4.3)。一方スペクトル系においては  $3'' \phi$  球形,  $3'' \phi \times 3''$ ,  $2'' \phi$  球形,  $2'' \phi \times 2''$  及び  $1'' \phi \times 1''$  の 5 種類の NaI(Tl) シンチレーション検出器及び多重波高分析器により各高度における宇宙線による吸収エネルギースペクトルを測定した (Fig. 2.3, 4.4)。

これらの測定結果は、予め設定されたいくつかのエネルギー バンド毎に計数率、検出器への吸収エネルギー及び照射線量率に換算され、これらの値の高度分布を示した (Fig. 4.6)。また、これらのバンド情報相互間の相関を検討し、互いに直線関係で結ばれることを示した (Fig. 4.5, 4.7, 4.8)。また、自然環境中における  $\gamma$  線線量率の高精度測定において問題となる 3 MeV 以下のエネルギー領域における宇宙線寄与分の地上値 (緯度 35°N 付近) を評価し、使用した上記の 5 種類の NaI(Tl) シンチレーション検出器いずれについても  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{R}/\text{h}$  相当となることを示した (Table 4.1)。さらに、検出器の重量当たりの宇宙線感度について検討し、重量当たりの計数率は小型検出器ほど高く、重量当たりの吸収エネルギーは 3 MeV 以下では小型検出器ほど高く、3 MeV 以上では大型検出器ほど高くなる傾向であることを示し、これについて、高エネルギー粒子の検出器内通過長さと吸収エネルギーとがほぼ比例することに基づいて考察を行った (Fig. 4.9, 4.10)。

これらの結果は、環境  $\gamma$  線測定における宇宙線寄与分の評価のために有用な資料となることが期待される。

### 謝 辞

本飛行測定は理化学研究所の昭和 54 年度飛行機実験の際、それに同乗して実施されたものである。このような機会を与えていただいた理化学研究所宇宙線研究室、放射線研究室、企画部等の関係者諸氏に感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 森内 茂：“スペクトル荷重関数方式による環境  $\gamma$  線線量測定器に関する研究”，JAERI-M 7066(1977)
- (2) 小田 稔：“宇宙線”，裳華房、東京(1960)
- (3) 岡野真治：“環境放射線の基礎(1)”，原子力工業第 21 卷第 1 号(1975)
- (4) J.A.S. Adams, et al：“The Natural Radiation Environment II, Proceedings of the Second International Symposium on Natural Radiation Environment”，CONF-720805(1972)

## 5. 結 言

高度 16000 ft, 23000 ft, 31000 ft, 37000 ft の水平飛行を含む飛行中の航空機内において各種 NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いて宇宙線測定を行った (Fig. 2.1, Table 2.1)。DBM 系においては  $3'' \phi \times 3''$  NaI(Tl) シンチレーション検出器を備えた DBM 式線量測定器により飛行中の照射線量率相当値の変化を測定した (Fig. 2.2, 4.1, 4.2, 4.3)。一方スペクトル系においては  $3'' \phi$  球形,  $3'' \phi \times 3''$ ,  $2'' \phi$  球形,  $2'' \phi \times 2''$  及び  $1'' \phi \times 1''$  の 5 種類の NaI(Tl) シンチレーション検出器及び多重波高分析器により各高度における宇宙線による吸収エネルギースペクトルを測定した (Fig. 2.3, 4.4)。

これらの測定結果は、予め設定されたいくつかのエネルギー バンド毎に計数率、検出器への吸収エネルギー及び照射線量率に換算され、これらの値の高度分布を示した (Fig. 4.6)。また、これらのバンド情報相互間の相関を検討し、互いに直線関係で結ばれることを示した (Fig. 4.5, 4.7, 4.8)。また、自然環境中における  $\gamma$  線線量率の高精度測定において問題となる 3 MeV 以下のエネルギー領域における宇宙線寄与分の地上値 (緯度 35°N 付近) を評価し、使用した上記の 5 種類の NaI(Tl) シンチレーション検出器いずれについても  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{R}/\text{h}$  相当となることを示した (Table 4.1)。さらに、検出器の重量当たりの宇宙線感度について検討し、重量当たりの計数率は小型検出器ほど高く、重量当たりの吸収エネルギーは 3 MeV 以下では小型検出器ほど高く、3 MeV 以上では大型検出器ほど高くなる傾向であることを示し、これについて、高エネルギー粒子の検出器内通過長さと吸収エネルギーとがほぼ比例することに基づいて考察を行った (Fig. 4.9, 4.10)。

これらの結果は、環境  $\gamma$  線測定における宇宙線寄与分の評価のために有用な資料となることが期待される。

### 謝 辞

本飛行測定は理化学研究所の昭和 54 年度飛行機実験の際、それに同乗して実施されたものである。このような機会を与えていただいた理化学研究所宇宙線研究室、放射線研究室、企画部等の関係者諸氏に感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 森内 茂：“スペクトル荷重関数方式による環境  $\gamma$  線線量測定器に関する研究”，JAERI-M 7066(1977)
- (2) 小田 稔：“宇宙線”，裳華房、東京(1960)
- (3) 岡野真治：“環境放射線の基礎(1)”，原子力工業第 21 卷第 1 号(1975)
- (4) J.A.S. Adams, et al：“The Natural Radiation Environment II, Proceedings of the Second International Symposium on Natural Radiation Environment”，CONF-720805(1972)

- (5) 和田雅美他：“1979年理研航空機実験”，理化学研究所報告第56巻第2号
- (6) 森内 茂，宮永一郎：“スペクトル－線量変換演算子とその応用，(II)スペクトル－線量変換演算の自動化”，日本原子力学会誌第9巻第9号(1967)
- (7) 森内 茂：“スペクトル－線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定”，  
JAERI-1209(1971)