

JAERI - M

84-101

環境パラメータによるガンマ線場変動の考察

1984年6月

高田和正*・斎藤公明・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。
入手の問合わせは、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、お申しこしてください。なお、このほかに財団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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 棚高野高速印刷

環境パラメータによるガンマ線場変動の考察

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

高田 和正^{*}・斎藤 公明・森内 茂

(1984年5月10日受理)

環境パラメータ（気圧，気温，湿度，土壤の組成及び密度）の変化が線束，線量，エネルギースペクトルなどのガンマ線諸量に及ぼす影響をモンテカルロ法によるガンマ線輸送計算プログラム（YURI）を用いて調べた。自然環境中の大気及び土壤はともに半無限媒質であると考え，(a)空中点線源，(b)地表面一様分布線源，(c)土壤中一様分布線源の3種類の線源に対してガンマ線諸量を計算した。(b)及び(c)の線源については地表面付近ばかりでなく，高度500m以下の範囲でガンマ線諸量を求めた。計算結果の検討から，上記3種類の線源については気圧及び気温による空気密度の変化の影響が非常に大きく，加えて(c)の線源では土壤中の水分量も大きく影響することがわかった。

*日本電子計算株式会社

Parametric Study on Environmental Gamma Radiation Field

Kazumasa TAKADA*, Kimiaki SAITO and Shigeru MORIUCHI

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 10, 1984)

It was examined how the change of environmental parameters affected the gamma radiation quantity such as flux, exposure and energy spectrum. As the environmental parameters, atmospheric pressure, atmospheric temperature, humidity, soil composition by weight, water content and soil density were considered. The gamma radiation quantity was calculated using an environmental gamma-ray transport code (YURI) with a Monte Carlo method. The calculation was carried out for the sources, (1) a point source in air (2) uniformly distributed sources on the ground surface, (3) uniformly distributed sources in the soil.

As a result of this calculation, the effect of the air density due to change in atmospheric temperature and atmospheric pressure has been proved to be quite large, and for the sources (3), the water content by wet soil has also been proved to effect largely on the gamma radiation quantity.

Keywords : Gamma Radiation Quantity, Environmental Parameters, Flux, Exposure, Energy Spectrum, Monte Carlo Method, Point Source

* Japan Information Processing Service Co., Inc (JIP)

目 次

1. 緒 言	1
2. 計算方法	1
2.1 大気と組成と光子の輸送	1
2.2 土壌の組成	5
2.3 物理過程	6
2.4 線源と検出器	6
2.5 計算条件	8
2.5.1 入力条件	8
2.5.2 環境パラメーターの標準値	9
3. 計算結果と考察	10
3.1 乾燥土壌密度の変化による影響	10
3.2 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 重量組成比の変化による影響	10
3.3 $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 重量組成比の変化による影響	13
3.4 水の重量比の変化による影響	24
3.4.1 線減衰係数の変化による影響	24
3.4.2 ラドンとその娘核種による影響	30
3.5 気圧の変化による影響	30
3.6 気温の変化による影響	36
3.7 湿度の変化による影響	41
4. 結 論	44
謝 辞	44
参考文献	45

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Calculation method	1
2.1 Composition of atmosphere and transport of photon	1
2.2 Composition of soil	5
2.3 Physical process	6
2.4 Sources and detectors	6
2.5 Calculation condition	8
2.5.1 Input condition	8
2.5.2 Standard values of environmental parameters	9
3. Calculated result and discussion	10
3.1 Effect of change in density of dry soil	10
3.2 Effect of change in soil composition by weight of SiO_2 and Al_2O_3 ..	10
3.3 Effect of change in soil composition by weight of SiO_2 and Fe_2O_3 ..	13
3.4 Effect of change in water content by wet soil	24
3.4.1 Effect of change in linear attenuation coefficient	24
3.4.2 Effect of radon and its daughters	30
3.5 Effect of change in atmospheric pressure	30
3.6 Effect of change in atmospheric temperature	36
3.7 Effect of change in humidity	41
4. Conclusion	44
Acknowledgement	44
References	45

1. 緒 言

現在までに環境ガンマ線に関する測定及び計算は数多く行なわれてきたが、自然環境中の種々のパラメータ（例えば、気圧、気温、湿度、土壌組成など）の変化が環境ガンマ線の挙動に及ぼす影響について調べた研究は少ない。⁽¹⁻⁶⁾ この影響の程度を調べることは環境ガンマ線の基本的特性を理解する上で重要である。また、原子力施設から環境中に放出された放射性物質によるガンマ線の挙動及び被曝線量を評価する上でもこの基本的特性に関する知識は役に立つ。

本研究では環境パラメータとして気圧、気温、湿度、土壌中の SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 の重量組成比、水の重量比、乾燥土壌の密度を考え、これらの変化によって環境ガンマ線の線束、線量、エネルギースペクトルがどの程度変化するかを調べた。計算にはモンテカルロ法によるガンマ線輸送計算コード (YURI)⁽⁷⁾ を用い、線源としては、(1)大気中に放出された放射性物質を考慮した空中点線源、(2)放射性物質の地表面沈着をシミュレートした地表面一様分布線源、(3)土壌中に存在する ^{238}U 、 ^{232}Th 系列及び ^{40}K をシミュレートした土壌中一様分布線源の3種類を考えた。輸送計算コード YURI は日本原子力研究所及び ORNL (Oak Ridge National Laboratory) で行なわれた野外線源実験の結果^(8,9) を用いて既に検証済みであり、良い結果が得られている。^(10,11)

2. 計 算 方 法

大気と土壌から成る実際の自然環境のモデル化及び大気中での光子輸送の考え方を簡単に説明する。

2.1 大気の組成と光子の輸送

(a) 大気の組成

大気は窒素、酸素、アルゴンの3種類の気体から成る混合物と考え、その組成はモル比でそれぞれ、78.36%、21.08%、0.56%とし、これに任意の湿度で水蒸気が加わると仮定した。また、気圧及び気温は鉛直方向にのみ変化し、水平方向には一定であると考えた。さらに、湿度については空間変化を無視し、大気中で一定の値をもつものとした。気圧、気温はそれぞれ mb、 $^{\circ}\text{C}$ で与えられ、湿度は水蒸気圧 (mb)、露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)、比湿の3種類の量のうちのいずれか1つで入力できる。

気圧及び気温が高度の増加と共に減少するので、空気の密度も高度と共に変化する。この空気密度の変化は以下の様に仮定した。

湿潤空気の状態方程式は次式で与えられる。⁽³¹⁾

$$P = \rho R T_v \quad , \quad (1)$$

ここで

- P : 気圧 (dyn/cm²)
- ρ : 湿潤空気の密度 (g/cm³)
- R : 気体定数

1. 緒 言

現在までに環境ガンマ線に関する測定及び計算は数多く行なわれてきたが、自然環境中の種々のパラメータ（例えば、気圧、気温、湿度、土壌組成など）の変化が環境ガンマ線の挙動に及ぼす影響について調べた研究は少ない。⁽¹⁻⁶⁾ この影響の程度を調べることは環境ガンマ線の基本的特性を理解する上で重要である。また、原子力施設から環境中に放出された放射性物質によるガンマ線の挙動及び被曝線量を評価する上でもこの基本的特性に関する知識は役に立つ。

本研究では環境パラメータとして気圧、気温、湿度、土壌中の SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 の重量組成比、水の重量比、乾燥土壌の密度を考え、これらの変化によって環境ガンマ線の線束、線量、エネルギースペクトルがどの程度変化するかを調べた。計算にはモンテカルロ法によるガンマ線輸送計算コード (YURI)⁽⁷⁾ を用い、線源としては、(1)大気中に放出された放射性物質を考慮した空中点線源、(2)放射性物質の地表面沈着をシミュレートした地表面一様分布線源、(3)土壌中に存在する ^{238}U 、 ^{232}Th 系列及び ^{40}K をシミュレートした土壌中一様分布線源の3種類を考えた。輸送計算コード YURI は日本原子力研究所及び ORNL (Oak Ridge National Laboratory) で行なわれた野外線源実験の結果^(8,9) を用いて既に検証済みであり、良い結果が得られている。^(10,11)

2. 計 算 方 法

大気と土壌から成る実際の自然環境のモデル化及び大気中での光子輸送の考え方を簡単に説明する。

2.1 大気組成と光子の輸送

(a) 大気組成

大気は窒素、酸素、アルゴンの3種類の気体から成る混合物と考え、その組成はモル比でそれぞれ、78.36%、21.08%、0.56%とし、これに任意の湿度で水蒸気が加わると仮定した。また、気圧及び気温は鉛直方向にのみ変化し、水平方向には一定であると考えた。さらに、湿度については空間変化を無視し、大気中で一定の値をもつものとした。気圧、気温はそれぞれ mb、 $^{\circ}\text{C}$ で与えられ、湿度は水蒸気圧 (mb)、露点温度 ($^{\circ}\text{C}$)、比湿の3種類の量のうちのいずれか1つで入力できる。

気圧及び気温が高度の増加と共に減少するので、空気の密度も高度と共に変化する。この空気密度の変化は以下の様に仮定した。

湿潤空気の状態方程式は次式で与えられる。⁽³¹⁾

$$P = \rho R T_v \quad , \quad (1)$$

ここで

- P : 気圧 (dyn/cm²)
- ρ : 湿潤空気の密度 (g/cm³)
- R : 気体定数

$$2.8704 \times 10^6 \text{ dyn}\cdot\text{cm}/(\text{g}\cdot^\circ\text{K})$$

T_v : 仮温度 ($^\circ\text{K}$)

$$T_v = \frac{T}{1 - C \cdot (e/P)} \quad (2)$$

T : 気温 ($^\circ\text{K}$)

e : 水蒸気圧 (dyn/cm^2)

C : 定数 (0.378)

また静力学の公式より、気圧の変化 dP は次式で与えられる。

$$dP = -\rho g dZ, \quad (3)$$

ここで

g : 重力加速度 $980.67 \text{ cm}/\text{sec}^2$

Z : 地表面からの高さ (cm)

(1), (3)より,

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g}{R} \cdot \frac{dZ}{T_v} \quad (4)$$

気温減率 β ($^\circ\text{K}/\text{cm}$) を考えると高さ Z での気温は

$$T(Z) = T_0 - \beta Z, \quad (5)$$

T_0 : 地表面での気温 ($^\circ\text{K}$)

(2), (4), (5)を用いて

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g}{R} \cdot \frac{1 - C \cdot (e/P)}{T_0 - \beta Z} dZ$$

e/P の値は 1 に比較して非常に小さいから密度に対する寄与も小さいと考えられる。これを地表面での値 e_0/P_0 でおきかえると,

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g}{R} \cdot \frac{1 - C \cdot (e_0/P_0)}{T_0 - \beta Z} dZ,$$

e_0 : 入力された水蒸気圧 (dyn/cm^2)

P_0 : 地表面上での気圧 (dyn/cm^2)

これを積分して

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = -\frac{g}{R} \left(1 - C \cdot \frac{e_0}{P_0} \right) \int_0^Z \frac{dZ}{T_0 - \beta Z},$$

$$\therefore P = P_0 \left(\frac{T_0 - \beta Z}{T_0} \right)^{\frac{g}{\beta R} \left(1 - C \cdot \frac{e_0}{P_0} \right)} \quad (6)$$

(1), (2)を用いると

$$\rho(Z) = \frac{P_o - Ce_o}{RT_o} \left(\frac{T_o - \beta Z}{T_o} \right)^{k-1}$$

$$\therefore \rho(Z) = \rho_o \left(\frac{T_o - \beta Z}{T_o} \right)^{k-1} \quad (7)$$

ここで

ρ_o : 地表面での空気密度 (g/cm³)

$$k = \frac{g}{\beta R} \left(1 - C \cdot \frac{e_o}{P_o} \right) \quad (8)$$

(7)式の値を地表面気圧 1013 mb, 地表面気温 15°C, 気温減率 6°C/km の乾燥空気について計算した結果を Fig. 1 に示す。500 m 上空では 4~5%, 1000 m 上空では 10% 程度, 空気の密度が減少するのがわかる。

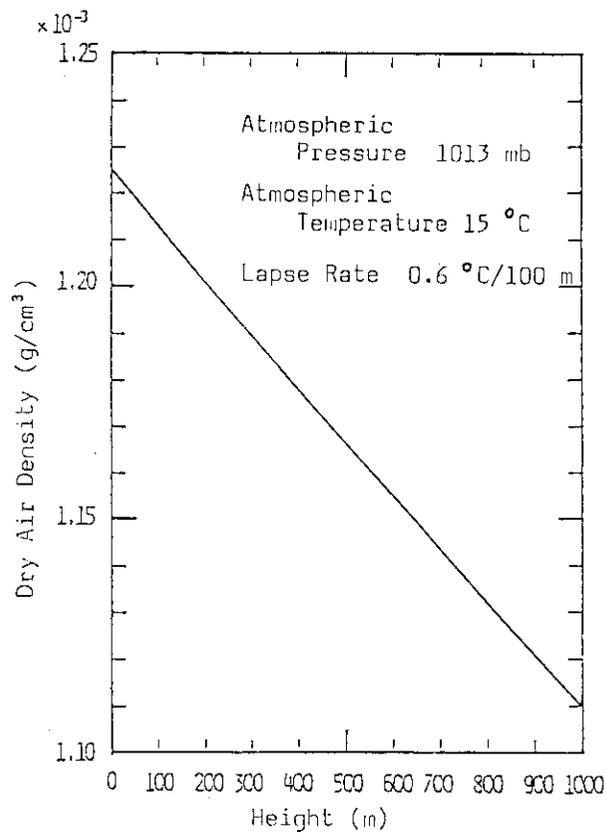


Fig.1 Variation of dry air density as a function of height

(b) 光子の輸送

大気中での光子の移動距離 ℓ (cm) は以下の様にして求められる。

光子が大気中を移動するときを通過する空気の面密度 W (g/cm²) を考える。空気の質量減衰係数を μ_m (cm²/g) とすれば面密度 W は次式で与えられる。

$$W = - \frac{1}{\mu_m} \ell \ln r \quad (\text{g/cm}^2) \quad (9)$$

ただし、 r は $[0, 1]$ の一様乱数である。

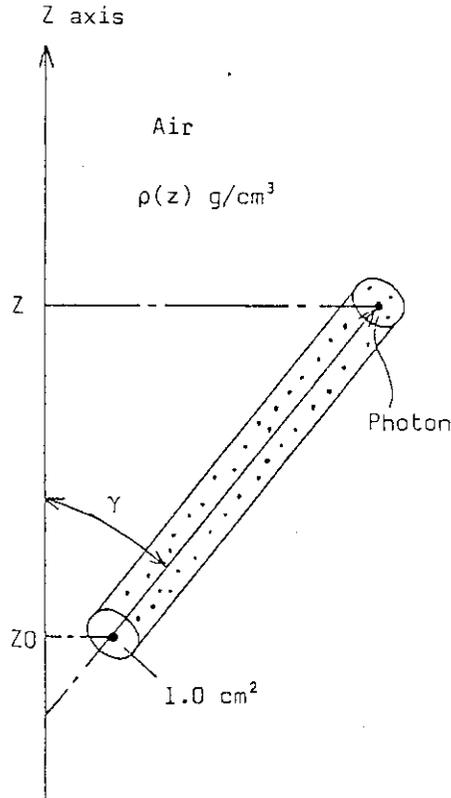


Fig.2 Surface density of air through which a photon passes

次に光子の進行方向の方向余弦を $\cos \gamma$ とする。Fig.2 を参考にすると図中の円筒形部分の空気の質量が光子の通過する空気の面密度であって次式で表わされる。

$$W = \int_{Z_0}^Z \frac{\rho(Z)}{\cos \gamma} dZ \quad (10)$$

ここで

Z_0 : 前回の反応位置の Z 座標 (cm)

$\cos \gamma$: Z 軸に対する方向余弦

(7)式を用いて

$$W = \frac{\rho_0}{\cos \gamma} \int_{Z_0}^Z \left(\frac{T_0 - \beta Z}{T_0} \right)^{k-1} dZ$$

$$= \frac{-\rho_0 T_0}{k\beta \cos \gamma} \left[\left(\frac{T_0 - \beta Z}{T_0} \right)^k - \left(\frac{T_0 - \beta Z_0}{T_0} \right)^k \right] \quad (11)$$

(9), (11)より

$$-\frac{1}{\mu_m} \ell_n r = \frac{-\rho_0 T_0}{k\beta \cos \gamma} \left[\left(\frac{T_0 - \beta Z}{T_0} \right)^k - \left(\frac{T_0 - \beta Z_0}{T_0} \right)^k \right]$$

$$Z = \frac{T_0}{\beta} \left\{ 1 - \left[\frac{k\beta \cos \gamma \ell_n r}{\rho_0 \mu_m T_0} + \left(\frac{T_0 - \beta Z_0}{T_0} \right)^k \right]^{\frac{1}{k}} \right\} \quad (12)$$

(12)式によって大気中の光子の次の反応位置のZ座標が求められる。したがって移動距離rは

$$r = \frac{Z - Z_0}{\cos \gamma} \quad (13)$$

により求まるから、次の反応位置のx, y座標はそれぞれ

$$x = x_0 + r \cos \alpha, \quad (14)$$

$$y = y_0 + r \cos \beta, \quad (15)$$

ここで

x_0 : 前回の反応位置のx座標 (cm)

y_0 : 前回の反応位置のy座標 (cm)

$\cos \alpha$: x軸に対する方向余弦

$\cos \beta$: y軸に対する方向余弦

となり、(12)~(15)式から光子の挙動が追跡できる。

2.2 土壌の組成

土壌の構成物質の組成及び水の重量比は地域によって異なるが、大部分の土壌では水を除いてSiO₂が最も多く、次にAl₂O₃, Fe₂O₃などが多く含まれる。

本計算では乾燥土壌の構成物質としてSiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃の3つの化合物を考え、土壌はこれらの化合物と水から成る混合物と考えた。乾燥土壌に対してこれらの化合物の重量組成比及び水の重量比が与えられると次式で湿潤土壌の密度が求まる。

$$\rho_w = \frac{\rho_d}{1-w},$$

ここで

w : 水の重量比

ρ_d : 乾燥土壌の密度 (g/cm³)

ρ_w : 湿潤土壌の密度 (g/cm^3)

上式からわかるように水の重量比 w は湿潤土壌 1 g あたりの水の重量と考えられる。

2.3 物理過程

光子の反応過程としてコンプトン散乱, 光電吸収, 電子対生成の3種類を考えた。この3種類の反応の断面積は Storm と Israel⁽¹²⁾ の数値を対数補間することによって求めた。

反応によって生じる電子の挙動は一切追跡を行なわないものとした。ただし, 電子対生成が起こった場合は反応位置で 0.51 MeV の光子が2個, 互いに反対方向に放出されるものとした。

2.4 線源と検出器

この計算で用いられた3種類の線源及び検出器について簡単に説明する。

(a) 空中点線源

Fig. 3(a)に示すように地上100mの高度に点線源を考える。この線源から単一の初期エネルギーをもった光子が等方的に放出される。光子は大気中あるいは土壌中を移動して地表面上1mにある無限平面で検出され, 線源からの直線距離 (slant range) に対してガンマ線諸量が計算される。実際には無限平面は点P (線源から地面に下した垂線と無限平面との交点) を中心としたいくつかのリング状の検出器に分割されている。各検出器について, 線源位置に対する立体角で平均された slant range が求められ, 検出器を通過する光子の入射角を考慮して, ガンマ線諸量が計算される。

(b) 地表面一様分布線源

放射性物質の地表面沈着を考える場合, 核種が地中に十分移行しない場合は地表面に一様に分布していると考えてさしつかえない。ここでは地表面を無限平面と考えて, そこに放射性物質が一様に分布するものとした。地表面から放出された光子は大気中あるいは土壌中を移動して指定された高度にある検出器で検出されることになるが, 計算では無限平面線源のかわりにFig. 3(b)のように地表面上に単位面積 (m^2) の分布線源が考えられ, 光子はすべて大気中にある単位面積 (m^2) の検出器で検出されガンマ線諸量が求められるものとした。

実際の環境では地面はなめらかではないので粗度 (roughness) を考慮しなくてはならない。粗度の影響については Eisenhauer⁽¹³⁾, Hill⁽¹⁴⁾が行なった研究があり, なめらかな地表面の場合と比較して地上約1mにおける線量率は20%から50%まで減少することが報告されている。しかし, ほとんどの地形に対して地上10~20m以上の高度では地面粗度の影響は無視できるほど小さい⁽²⁾ のでここでは地表面はなめらかであると仮定した。

(c) 土壌中一様分布線源

土壌中からの自然放射線による照射線量を考えると ^{238}U , ^{232}Th 系列及び ^{40}K による寄与がほとんどである。上記の核種は土壌中でだいたい一様に分布しているのでこれを土壌中一様分布線源と考えた。計算に際しては単位断面積 (m^2) で地表面からの深さが有限である線源を仮定した (Fig. (c))。この柱状の線源から放出された光子は土壌中及び大気中を移動して, 地表面一様分布線源の場合と同様に単位面積の検出器で検出されるとした。

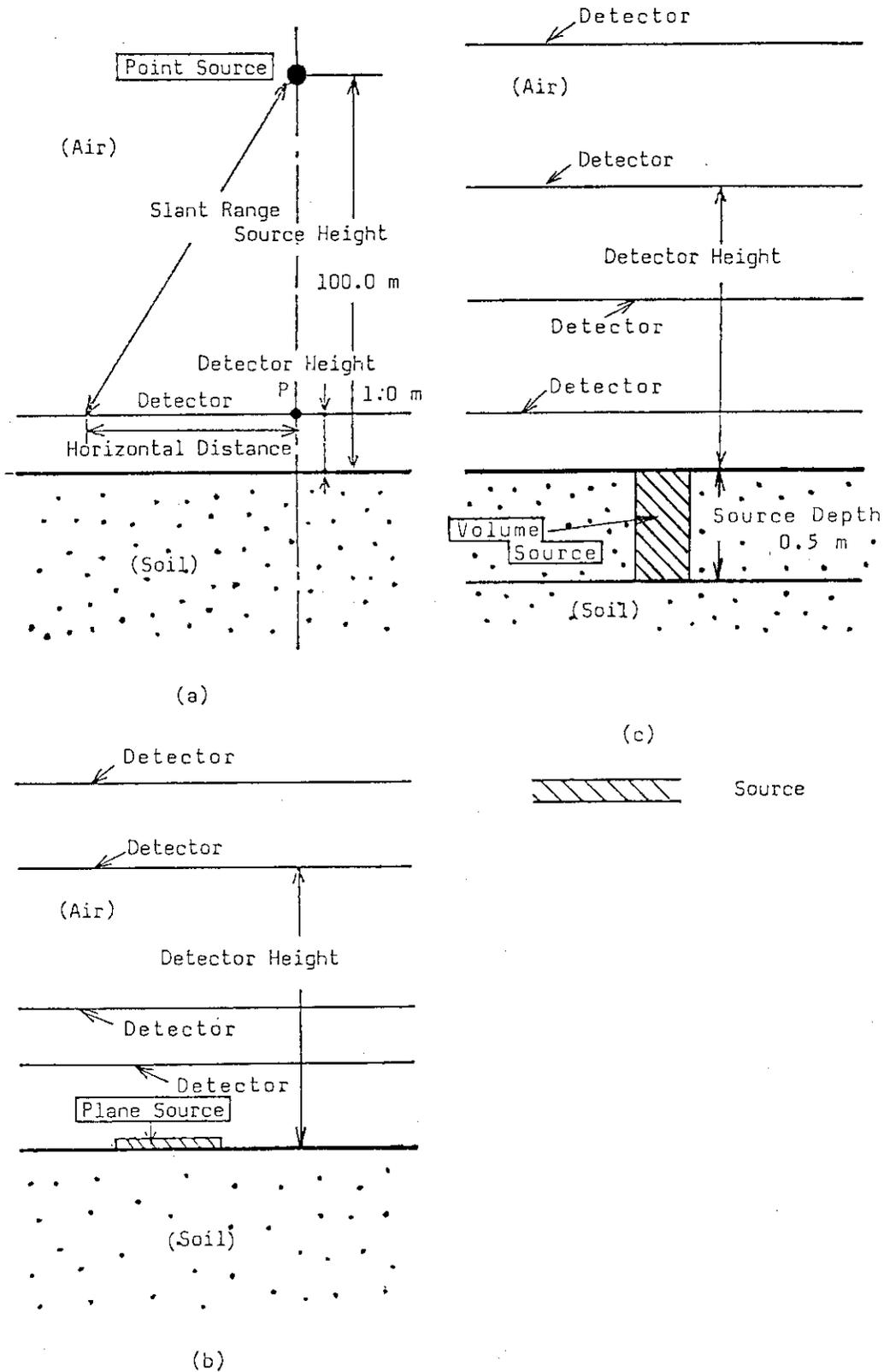


Fig.3 Source and detector geometry

- (a) A point source in air
- (b) Uniformly distributed sources on the ground surface
- (c) Uniformly distributed sources in the soil

2.5 計算条件

2.5.1 入力条件

(a) 線源エネルギー

i) 空中点線源の場合

0.1, 1.0, 3.0 MeV の3種類とした。

ii) 地表面一様分布線源

1.60 MeV ($^{140}\text{Ba} - ^{140}\text{La}$), 0.82 MeV ($^{140}\text{Ba} - ^{140}\text{La}$), 0.36 MeV (^{131}I), 0.10 MeV (Puの K_{α_1} 線) の4種類の線源エネルギーを考えた。

(b) 追跡の打ち切り条件

i) 空中点線源の場合

大気中での高度が1000mを越えた場合あるいは地表面からの深さが0.8mを越えた場合は光子の追跡を打切ることとした。また、大気中でエネルギーが0.01 MeV以下になった場合あるいは土壌中で0.02 MeV以下になった場合も光子の追跡を打切るものとした。

ii) 地表面一様分布線源の場合

大気中でエネルギーが0.02 MeV以下になった場合に追跡を打切ること除いて i) の場合と同様である。

iii) 土壌中一様分布線源の場合

ii) の場合と同様である。

(c) ヒストリー数

i) 空中点線源の場合

5×10^5 とした。

ii) 地表面一様分布線源の場合

線源エネルギーが低いほどヒストリー数を増加させて統計誤差を小さくするようにした。すなわち、1.60 MeV, 0.82 MeV, 0.36 MeV, 0.10 MeV の各エネルギーに対するヒストリーをそれぞれ 1×10^4 , 2×10^4 , 2×10^4 , 1×10^5 とした。

iii) 土壌中一様分布線源の場合

土壌中に存在する ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K の濃度は地質によって変化する。UNSCEAR 1982年報告⁽¹⁵⁾では上記3つの核種濃度の典型的な値としてそれぞれ10-50, 7-50, 100-700 Bq/kg の値が記載されており、その平均値はそれぞれ25, 25, 370 Bq/kg となっている。また日本では笠井らの報告⁽¹⁶⁾あるいは山県らの報告⁽¹⁷⁾などがある。笠井らは1963, 1964年に茨城県東海村周辺で ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K の核種濃度の測定を行ない、1964年の平均濃度としてそれぞれ0.41, 0.35, 7.82 pCi/g の値を得た。また、山県らは日本全国の各地域の土壌中の ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K の核種濃度を求め全国平均として、それぞれ0.43 pCi/g (1.3 p.p.m.), 0.61 pCi/g (5.6 p.p.m.), 12 pCi/g (1.4%) の値を示している。

ここでは上記の平均値を参考にして ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K の核種濃度の比を1:1:20と仮定し、それぞれの土壌単位体積 (m^3) あたりの崩壊数を 1×10^4 , 1×10^4 , 2×10^5 と仮定した。

UNSCEAR 1977年報告⁽¹⁹⁾あるいは Beck の報告⁽²⁾によると土壌中の ^{238}U , ^{232}Th 系列及

び⁴⁰Kからの線量率を考えた場合にそのほとんどが地表面から約30 cm までに分布する核種からの寄与である。例えば深さ20 cm 以内に存在する²³⁸U, ²³²Th 系列及び⁴⁰Kによる線量率は全線量率の80%以上を占める。これらの結果を参考にして線源の厚さは50 cm とした。

2.5.2 環境パラメータの標準値

自然環境中の平均的な大気及び土壌の状態から特定の環境パラメータのみを変化させて計算を行った。平均的な大気及び土壌の状態は環境パラメータの標準値として Table 1 に示した。ここで大気に関するパラメータの値は国際標準大気⁽³²⁾を参考にした。

Table 1 Standard values of environmental parameters

(AIR)	
Atmospheric Pressure at the Surface	1013 mb
Atmospheric Temperature at the Surface	15 °C
Relative Humidity (Vapor Pressure)	70.4 % (12 mb)
Lapse Rate	0.6 °C/100 m
(SOIL)	
Soil Composition by Weight of SiO ₂	60 %
Soil Composition by Weight of Al ₂ O ₃	30 %
Soil Composition by Weight of Fe ₂ O ₃	10 %
Water Content by Wet Soil	0 %
Density of Dry Soil	1.5 g/cm ³

3. 計算結果と考察

3.1 乾燥土壌密度の変化による影響

土壌中一様分布線源について、乾燥土壌密度を(1) 1.0 g/cm^3 , (2) 2.0 g/cm^3 として計算を行なった。線束及び線量計算結果の一例を Fig. 4 に示す。但し、この結果は SiO_2 100%, 水の重量比20%の土壌に対する結果であり、線源の厚さは1.0 m, 計算打ち切り深さは2.0 mである。図より線束及び線量ともにほとんど変化がみられないことがわかる。他の土壌組成の場合も密度変化による影響を調べたが同様に線束及び線量の変化はほとんどみられなかった。また、0.1 MeV, 1.0 MeVの単一エネルギー土壌中一様分布線源についても土壌密度変化の影響を調べたがやはり線束及び線量に変化はみられず、線源エネルギーが変化しても土壌密度変化の影響はほとんど現われないことがわかった。

以上の結果は次の様に説明できる。乾燥土壌の密度がk倍になると光子の土壌中での平均自由行程は $1/k$ 倍になる。しかし、土壌中の単位深さあたりの発生光子数はk倍になるので線減衰係数増加の効果と線源強度増加の効果が互いに打ち消し合い、乾燥土壌密度の変化がほとんどみられなくなると考えられる。また、土壌からの非散乱線による線束は解析的に表現され⁽²⁾、線源の深さが無限大であれば非散乱線は密度変化の影響を全く受けないこともわかっている。

以上は土壌中一様分布線源についての結果であるが、空中点線源及び地表面一様分布線源に対しても同様に乾燥土壌の密度変化の影響はほとんどみられなかった。

3.2 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 重量組成比の変化による影響

$\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 重量組成比のガンマ線諸量に対する影響を調べるために (1) SiO_2 のみで構成される乾燥土壌及び (2) Al_2O_3 のみで構成される乾燥土壌の2種類の土壌を考えてガンマ線諸量の計算を行なった。土壌中一様分布線源に対する線束及び線量の計算結果を Fig. 5 に示す。約100 m以下の高度では線束及び線量ともに2~3%程度の変化を示すが、それ以上の高度になると $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 重量組成比の影響はみられなくなってくる。次に線源エネルギーが異なる場合に $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 重量組成比の影響がどのように変わるかを調べるために Fig. 6, 7 に1.0 MeV, 0.1 MeVの単一エネルギー土壌中一様分布線源に対する結果を示す。Fig. 6, 7を参照すると $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 重量組成比による変化は地表面付近のみで生じ、エネルギーが低い方が線束及び線量の変化が大きいことがわかる。これは SiO_2 と Al_2O_3 とでは全体的に質量減衰係数の差は小さく、異なるのは主に低エネルギーの光電吸収部分であることから理解される。

Beckら⁽¹⁾は、重量組成比が(i) SiO_2 67.5%, Al_2O_3 13.5%, Fe_2O_3 4.5%, CO_2 4.5%, H_2O 10.0%で与えられる土壌と(ii) Al のみで構成される土壌を仮定して計算を行ない、線量率の差は相対的に小さく、ガンマ線場は土壌の組成変化にあまり影響されないと報告している。具体的には1 MeVの土壌中一様分布線源について非散乱線による線量率を比較して、(ii)の場合の方が(i)の場合と比べて地上1 mで約4%, 地上100 mで約3.5%大きいと述べている。散乱線

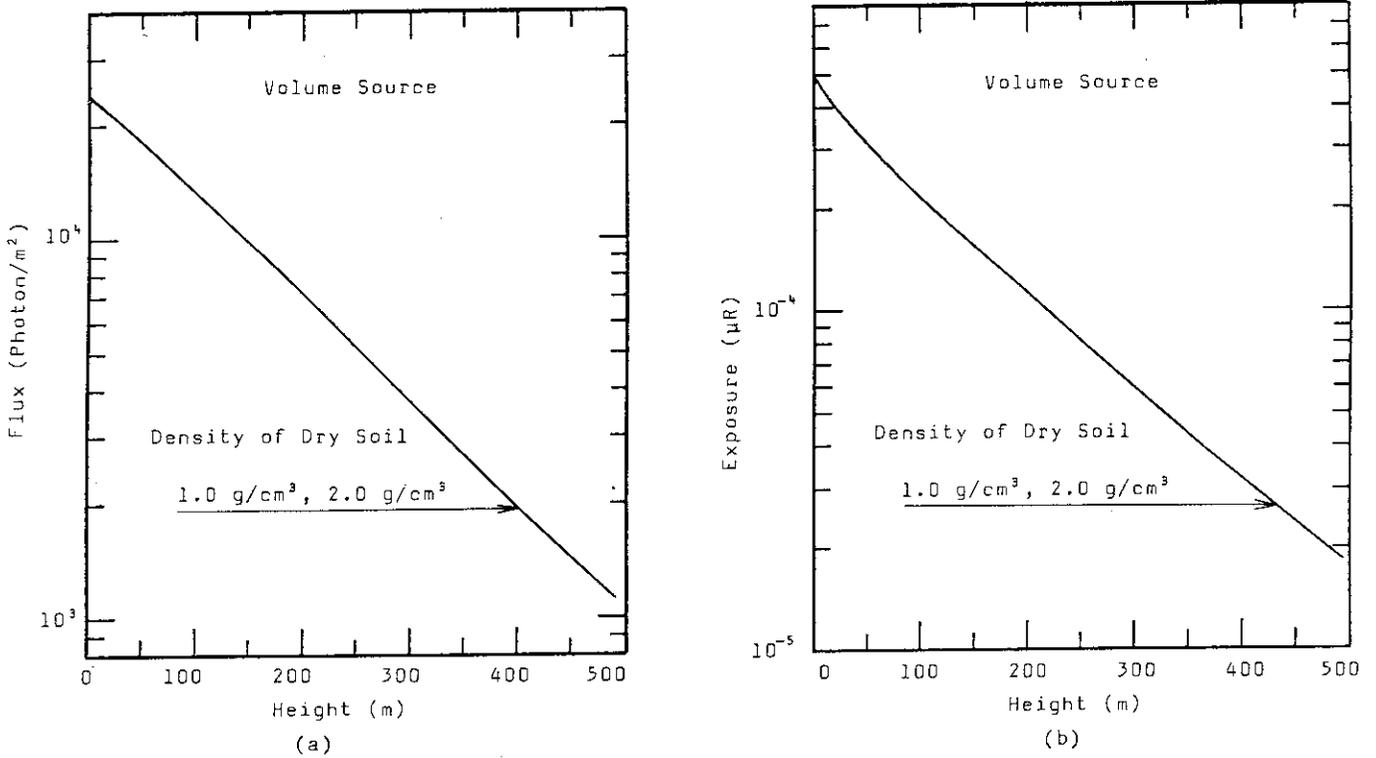


Fig.4 Effect of change in soil density on (a) flux and (b) exposure. Two values are assumed for dry soil density, one is 1.0 g/cm³, another 2.0 g/cm³. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

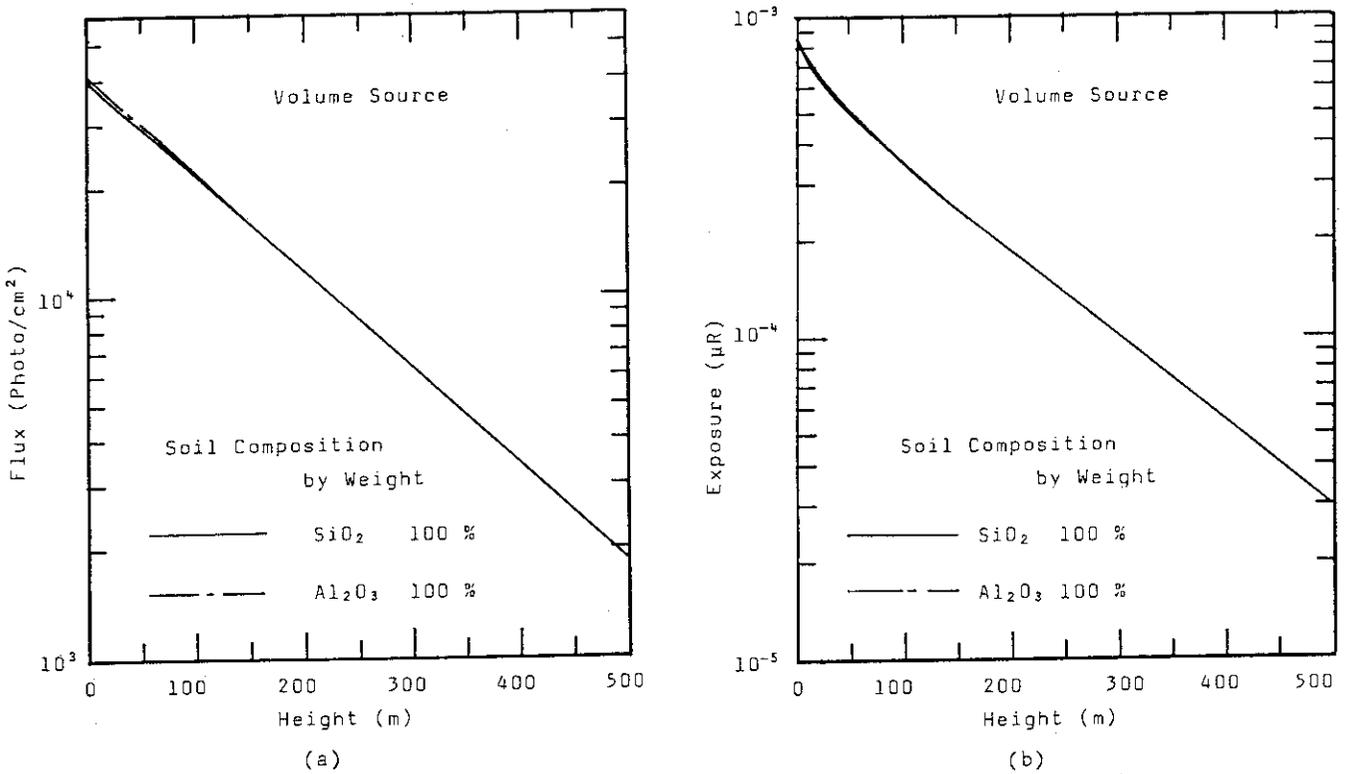


Fig.5 Effect of change in soil composition on (a) flux and (b) exposure. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO₂, another Al₂O₃. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

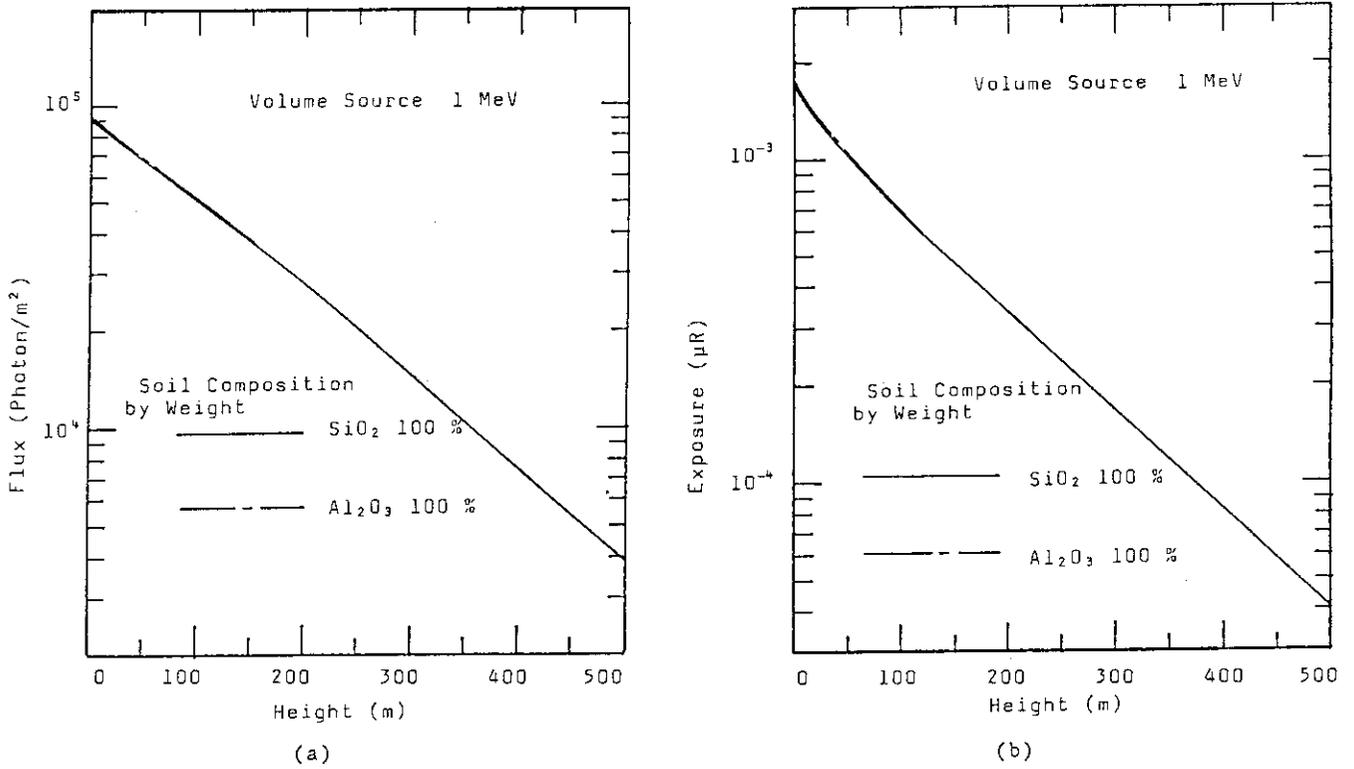


Fig.6 Effect of change in soil composition on (a) flux and (b) exposure. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO₂, another Al₂O₃. 1.0-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

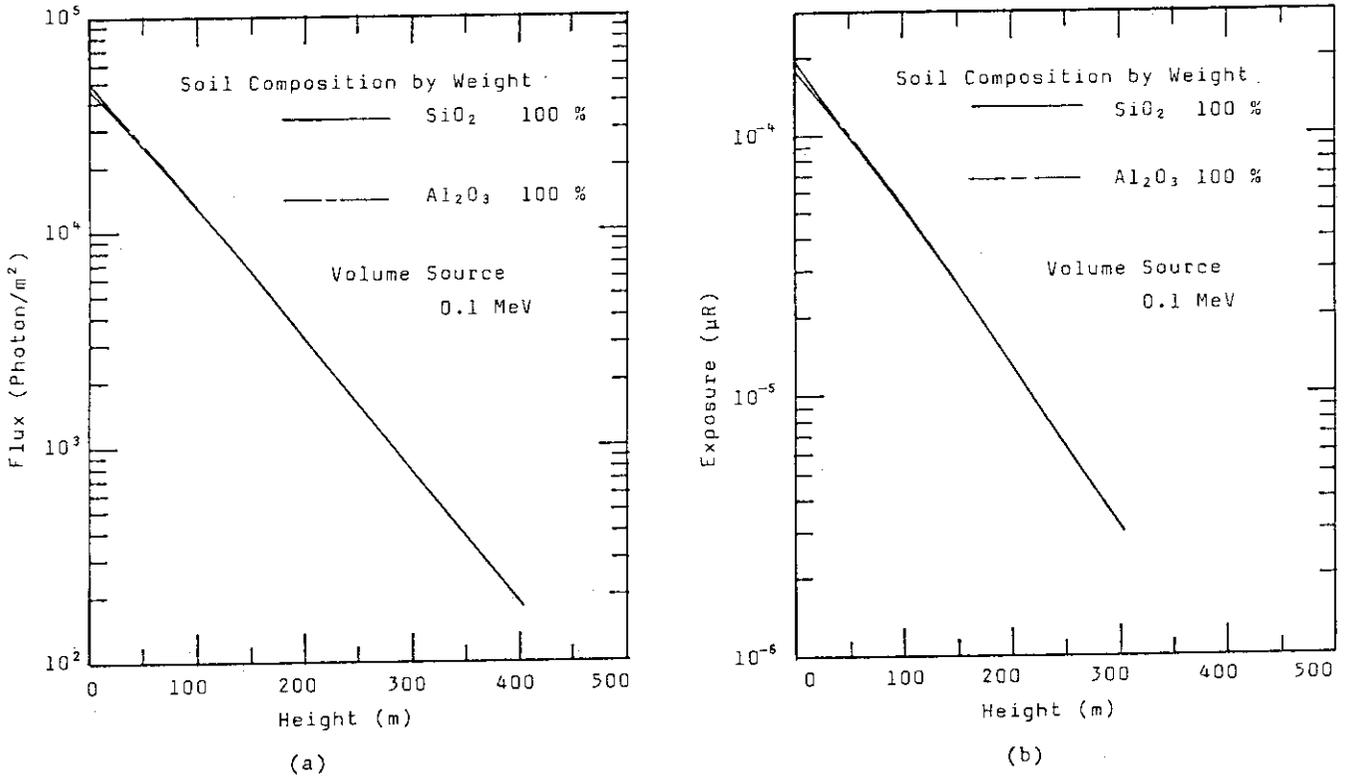


Fig.7 Effect of change in soil composition on (a) flux and (b) exposure. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO₂, another Al₂O₃. 0.1-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

も含んだ全体の線量率についても (iii) の場合の方が大きく、地上 1 m 及び 100 m ともに約 3.5 % 大きくなるようである。土壤の組成が変化しても質量減衰係数の変動幅が小さいことが原因で線束、線量の土壤組成に対する依存度が小さくなっているわけであり、Beck は土壤 (iii) と水の重量比が 25 % の土壤を比較した場合に質量減衰係数の差はせいぜい 6 ~ 7 % であることを示している⁽³⁾。

空中点線源についても同様の計算を行なったが $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 重量比組成変化による影響は上述の土壤中一様分布線源の場合ほど大きくはなく無視できる程度の変化であった。地表面一様分布については、土壤組成の変化によるガンマ線諸量の変動は土壤中一様分布線源の場合よりも小さいと予想されるので計算は行なわなかった。ちなみに、Beck は 0.662 MeV (^{137}Cs) の地表面一様分布線源について (i) と (ii) の場合に対する計算より、非散乱線及び全体の線量率の差は地上 1 m で 1 % 以下、地上 100 m で 0.5 % であると報告している⁽¹⁾。

3.3 $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 重量組成比の変化による影響

SiO_2 と Fe_2O_3 とで構成される乾燥土壤を考へて、ガンマ線諸量の計算を行なった。 SiO_2 と Fe_2O_3 の重量組成比は (1) SiO_2 100 %, (2) SiO_2 85 %, Fe_2O_3 15 %, (3) Fe_2O_3 100 % の 3 種類を考へた。結果の代表例として土壤中一様分布線源及び空中点線源 (0.1, 1.0 MeV) に対するガンマ線諸量の計算結果を図示し、上記 2 種類の線源に対する $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 重量組成比の影響を以下に記す。

(a) 土壤中一様分布線源

Fig. 8 からわかるように (1) と (3) の場合を比較すると地表面上約 300 m 程度までは Fe_2O_3 重量比増加による線束の減少がみられる。しかし、線量では Fe_2O_3 重量組成比増加の影響はほとんどみられない。Fig. 9 に (2) を基準とした場合の (1) 及び (3) の線束、線量の比を示す。Fig. 9 の誤差棒は線束比、線量比の標準誤差の範囲を示している。この図をみると (2) の場合から (1) の場合に Fe_2O_3 重量組成比が 15 % 減少すると地表面上 300 m 程度の高度範囲内で線束が 0 ~ 10 % 増加するが、線量については高度が異なっても Fe_2O_3 重量組成比の変化による影響はほとんどみられない。

次にエネルギースペクトルを (1) 及び (3) の場合について Fig. 10, 11 に示す。ここで破線は土壤からの散乱成分を、1 点鎖線は大気中での散乱成分と土壤からの散乱成分の合計を、また実線は散乱成分と非散乱成分の合計、すなわち全成分を示す。図より地表面から 10 m 及び 80 m の高度では 0.1 MeV 以下の光子数が Fe_2O_3 重量組成比の増加によって減少していることがわかる。0.1 MeV 以上の光子数は Fe_2O_3 重量組成比が増加してもあまり変化せず、スペクトル形状もほとんど変わらない。さらに地表面上約 250 m の高度では Fe_2O_3 重量組成比の変化の影響はほとんどみられなくなり、全体の光子数及びスペクトル形状もほとんど変化しなくなる。線量に対するエネルギースペクトルも光子数に対するエネルギースペクトルと同様の傾向を示す。しかし、地表面付近で 0.1 MeV 以上のエネルギー範囲ではエネルギーが高くなるほど光子数が減少するが (Fig. 10-1(a), Fig. 10-2(a) 参照)、線量に対するスペクトル強度はエネルギーが高くなってもあまり減少しない。(Fig. 11-1(a), Fig. 11-2(a) 参照)

以上のガンマ線諸量の変化は光子のエネルギーによって線量への寄与が異なるためであり、Fig. 12 を参照すると理解されよう。Fig. 12 は標準状態の空気 (密度 0.001293 g) 中で光子がエネルギーの吸収を受ける際、単位長さあたりに吸収される平均のエネルギーの値を示したものである。吸収エネルギーは線量に比例するから約 0.1 MeV 以上ではエネルギーが高いほど線量への寄与

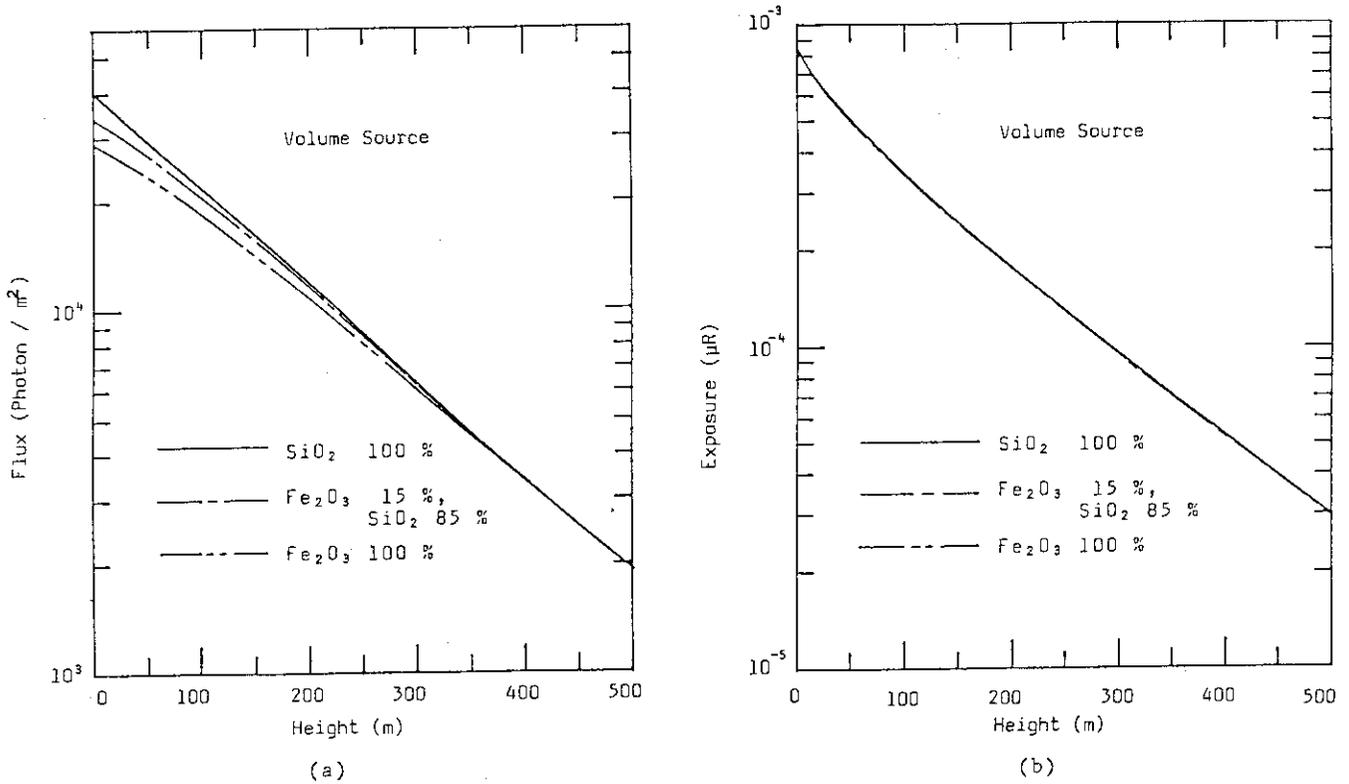


Fig.8 Effect of change in soil composition on (a) flux and (b) exposure. Contents of Fe_2O_3 are taken to be (1) 0 %, (2) 15 % and (3) 100 % by weight. Naturally occurring gamma-ray source are considered to be uniformly distributed in the soil.

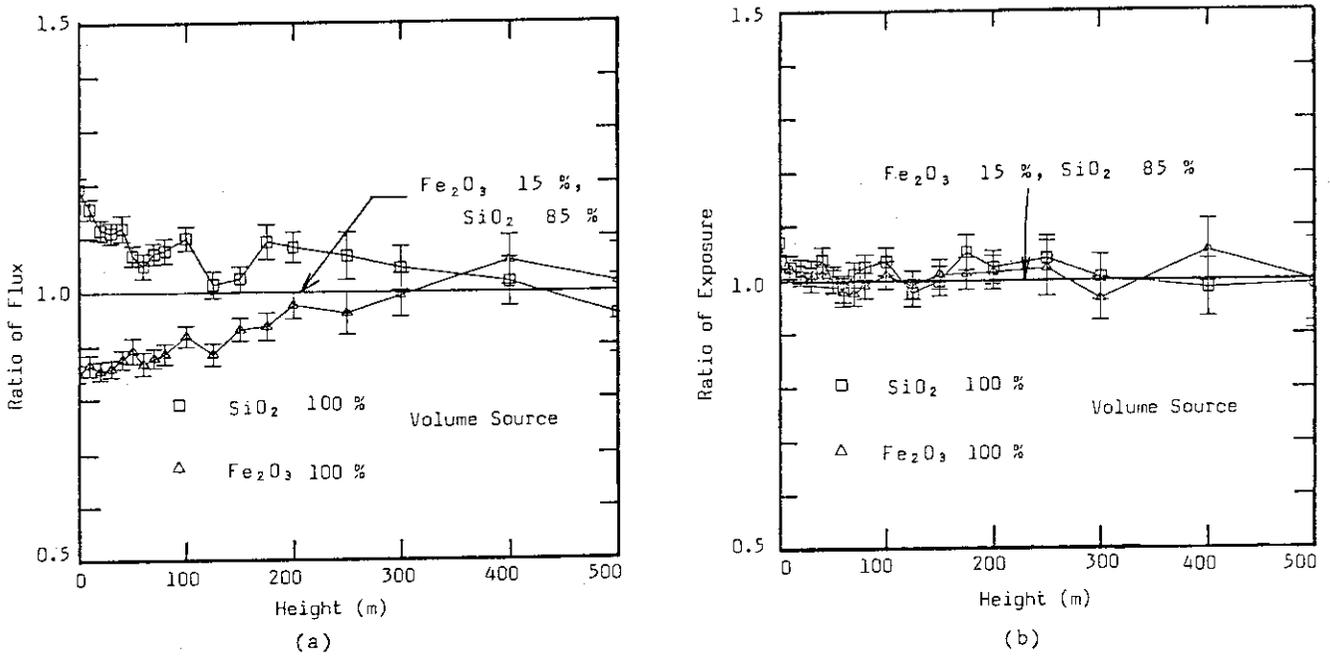


Fig.9 Relative gamma-ray intensity of case (1) and (3) to case (2) in Fig.8. Bars in these figures mean standard error.

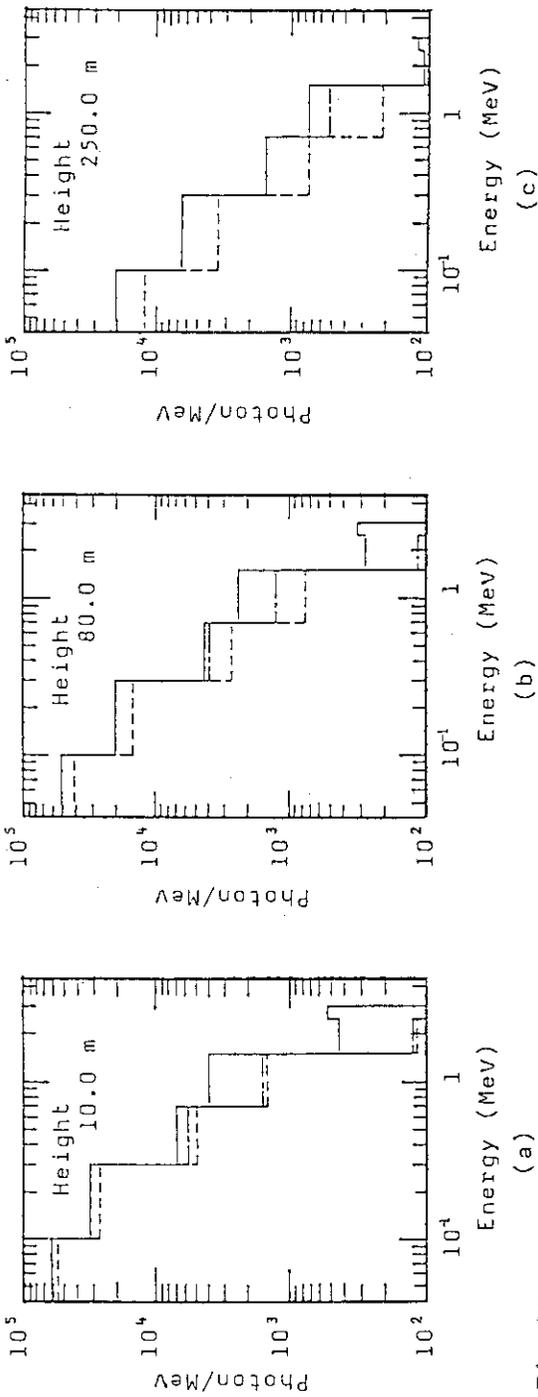


Fig. 10-1

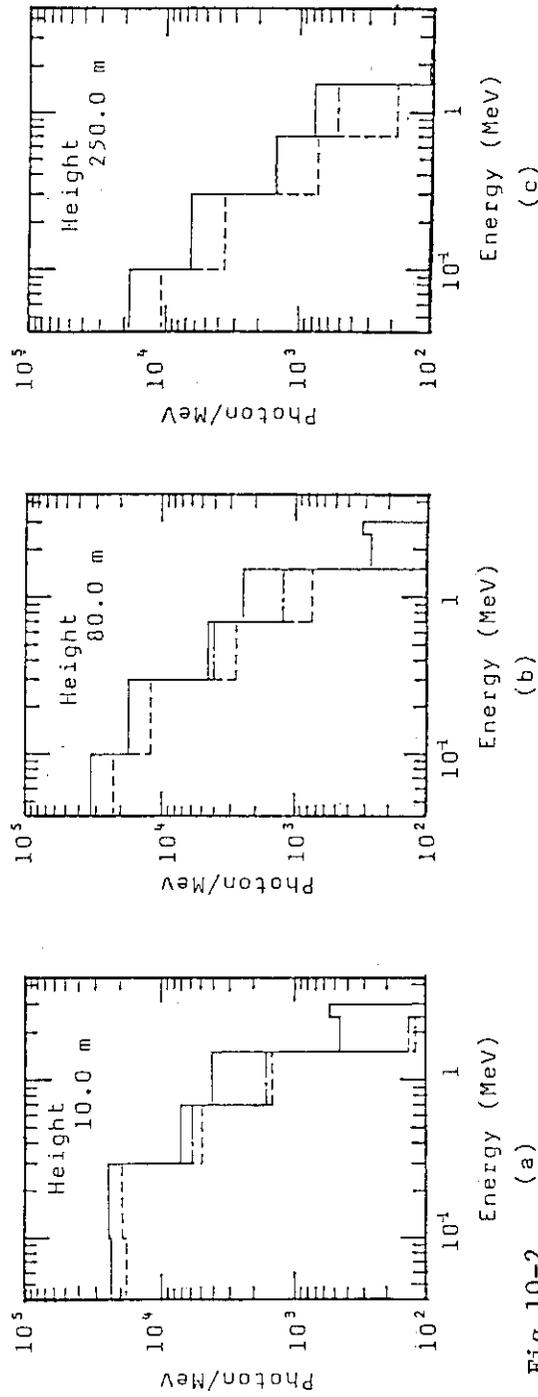


Fig. 10-2

— Total Component - - - - - Soil-Scattered Component

Fig. 10 Energy distribution of number of photons. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO_2 (Fig. 10-1), another Fe_2O_3 (Fig. 10-2). Detector heights are taken to be (a) 10 m, (b) 80 m and (c) 250 m. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

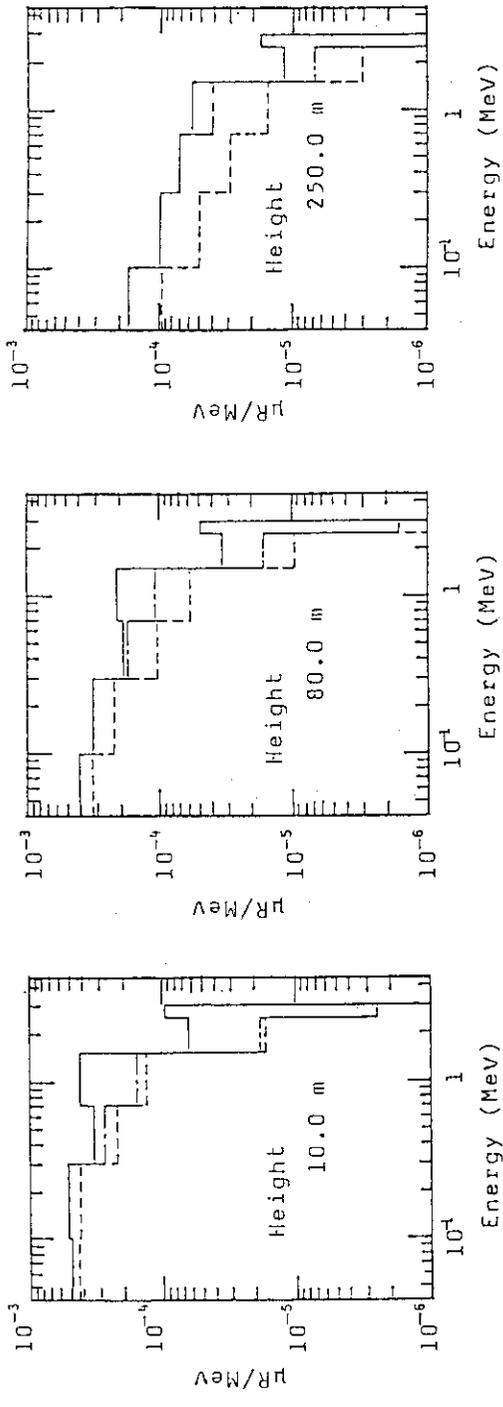


Fig. 11-1

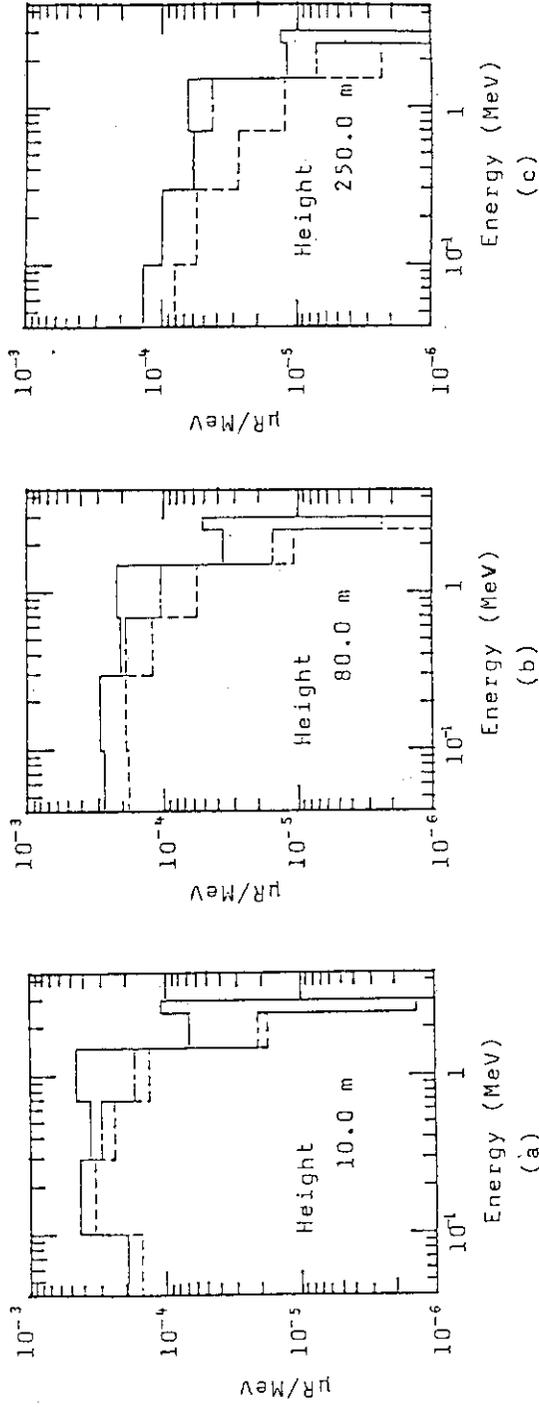


Fig. 11-2

———— Total Component - - - - - Soil-Scattered Component

Fig. 11 Energy distribution of exposure. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO₂ (Fig. 11-1), another Fe₂O₃ (Fig. 11-2). Detector heights are taken to be (a) 10 m, (b) 80 m and (c) 250 m. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

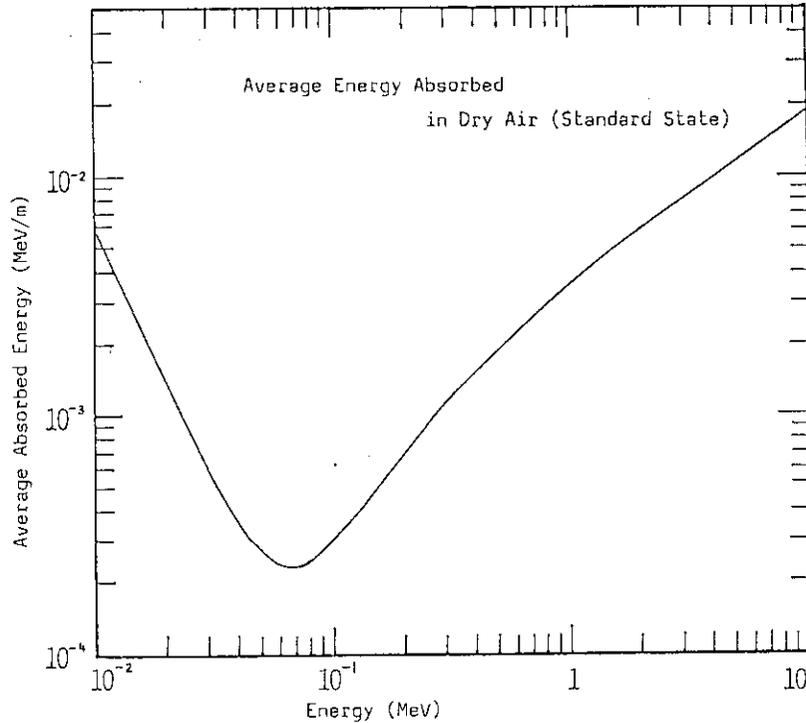


Fig.12 Average energy absorbed through a photon passage in dry air

が大きくなる。したがって Fe_2O_3 の重量組成比が変化し光電吸収断面積が変化すると低エネルギーの光子の数が増減して線束を変化させるがそのエネルギースペクトルは低エネルギー成分が主に変化する。この低エネルギー成分は線量に対する寄与が小さく線量にわずかな変化しか与えないので線束にみられた影響も線量ではほとんどみられなくなってしまうのである。

(b) 空中点線源

1.0 MeV, 0.1 MeV のガンマ点線源に対する線束及び線量の計算結果を Fig. 13, 14 に示す。1 MeV のガンマ線では土壌中一様分布線源の場合と同様に Fe_2O_3 重量組成比の変化によって線束が変化しても線量はほとんど変化しない。また, Fig. 15, 16 を参照すればわかるようにエネルギースペクトルも土壌中一様分布線源の場合と同様な変化の傾向を示している。このエネルギースペクトルの破線は土壌で散乱された成分を, 実線は全成分を示している。また黒い部分は非散乱成分を示している。1.0 MeV のガンマ線では(2)の場合から(1)の場合に Fe_2O_3 重量組成比が 15% 減少すると線束が 0~8% 程度増加するのがわかる (Fig. 17)。0.1 MeV のガンマ線では 1.0 MeV のガンマ線の場合と異なり, 線束及び線量ともに変化をみせている。この変化の割合は(2)から(1)の場合に Fe_2O_3 重量組成比が 15% 減少したとすると線束及び線量ともに 0~10% 程度増加しているのがわかる。この様に 0.1 MeV のガンマ線が 1.0 MeV のガンマ線と線量の変化の傾向が異なるのは 0.1 MeV のガンマ線に対しては光電吸収が優勢な反応となり, Fe_2O_3 重量組成比の増加による光電吸収断面積の増加が 0.1 MeV 以下の全エネルギー範囲にわたって, 光子数を減少させ, 同様に線量に対してもそのスペクトル強度を減少させるからである (Fig. 18, 19)。

実際の土壌では Fe_2O_3 重量組成比は 10% 以下であることが多く, その変化の割合も小さいの

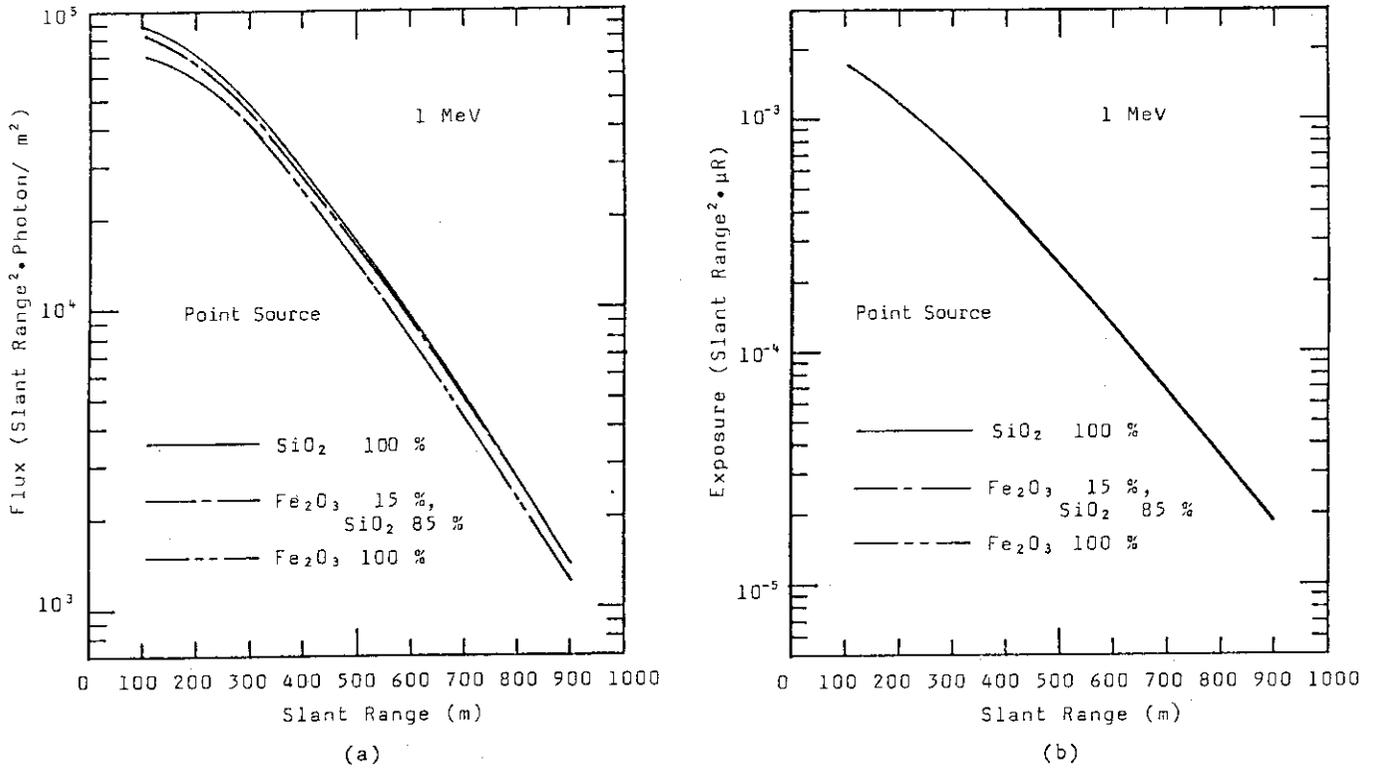


Fig.13 Effect of change in soil composition on (a) flux and (b) exposure. Contents of Fe_2O_3 are taken to be (1) 0 %, (2) 15 % and (3) 100 % by weight. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

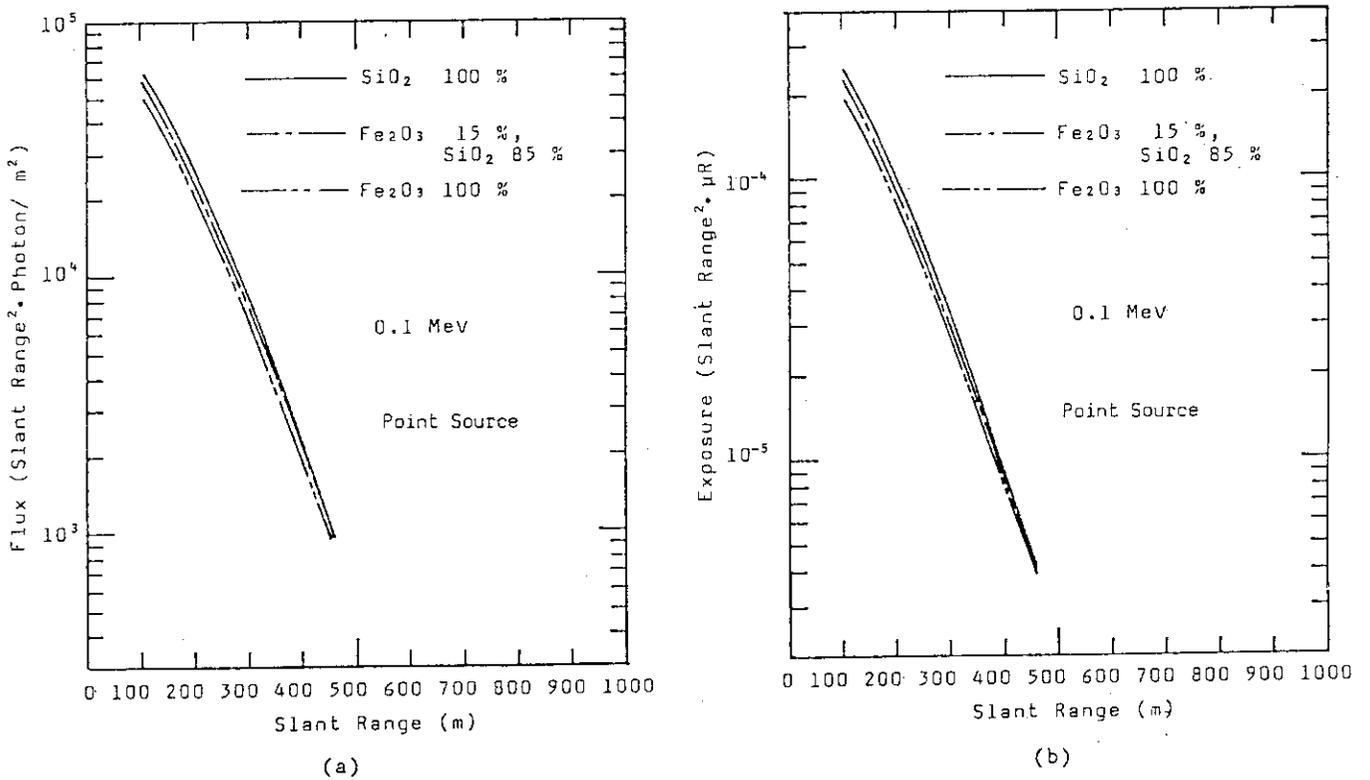


Fig.14 Effect of change in soil composition on (a) flux and (b) exposure. Contents of Fe_2O_3 are taken to be (1) 0 %, (2) 15 % and (3) 100 % by weight. A 0.1-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

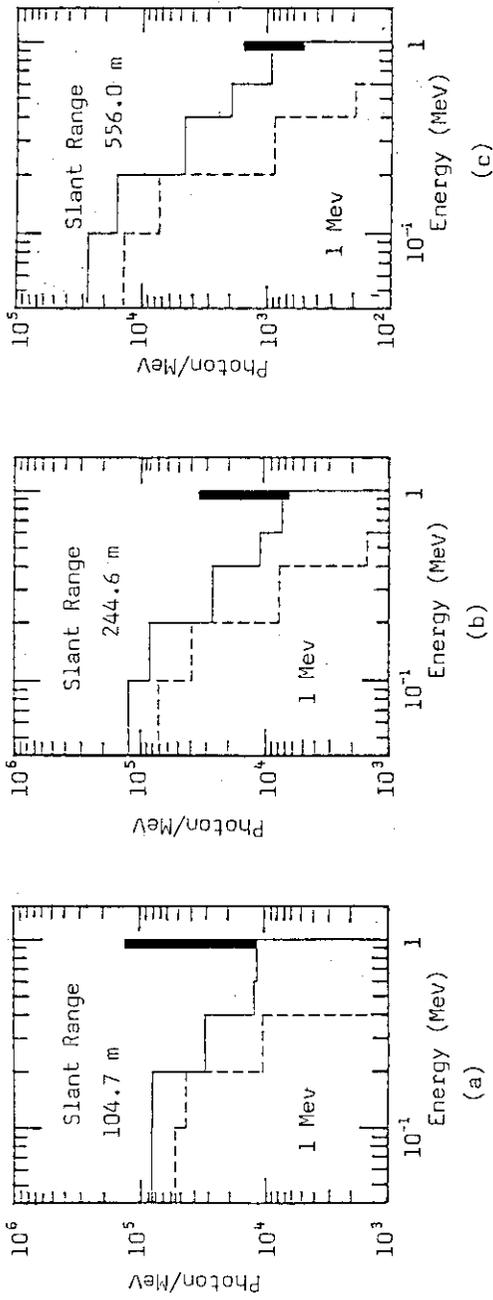


Fig.15-1

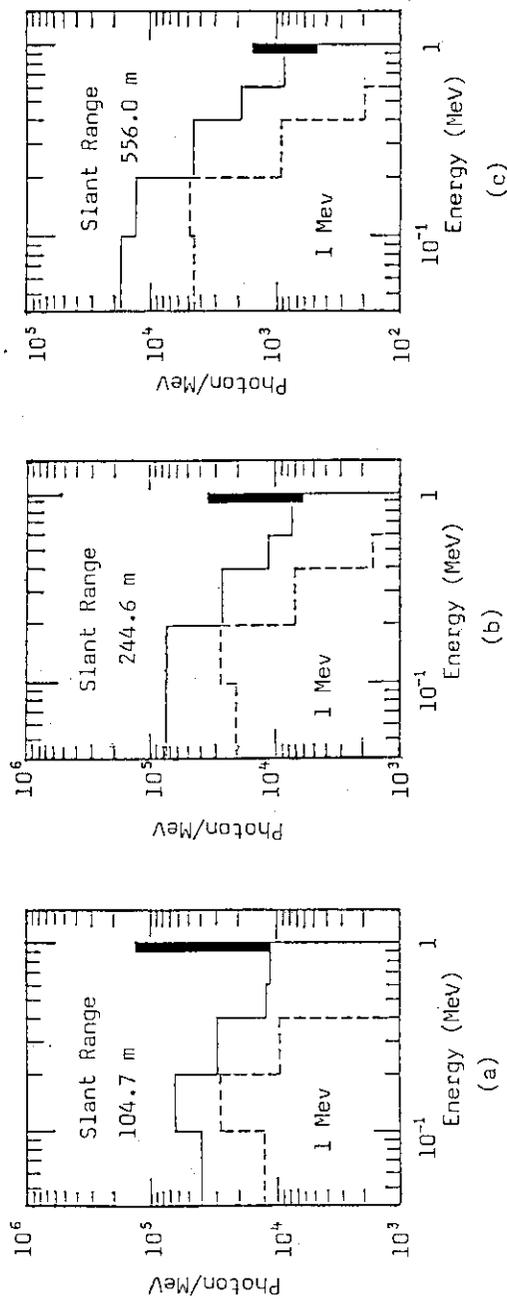


Fig.15-2

— Total Component ——— Soil-Scattered Component

Fig.15 Energy distribution of number of photons. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO₂ (Fig.15-1), another Fe₂O₃ (Fig.15-2). Slant ranges are taken to be (a) 104.7 m, (b) 244.6 m and (c) 556.0 m. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

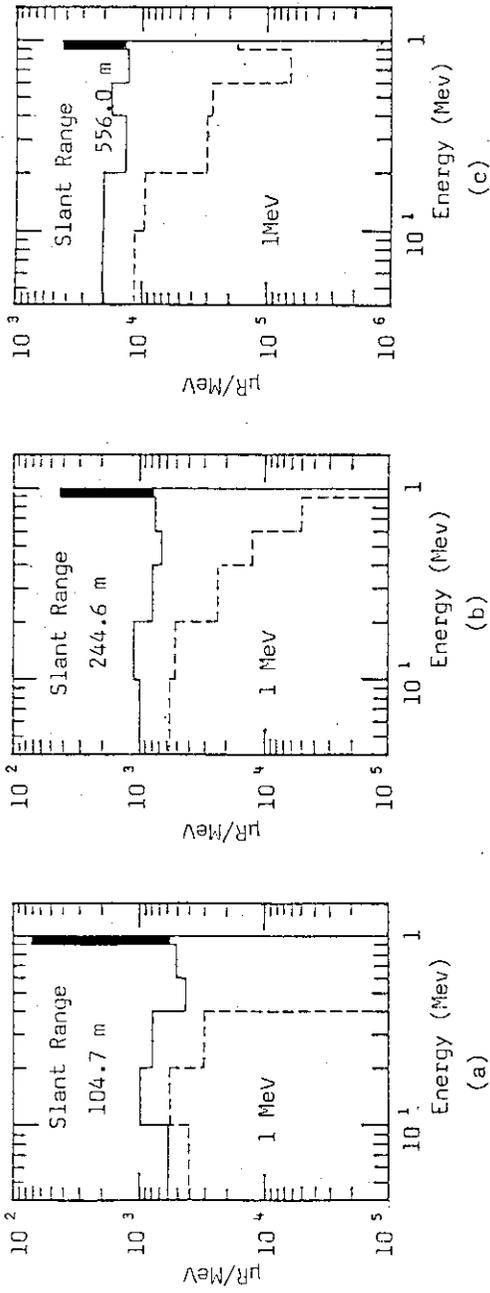


Fig. 16-1

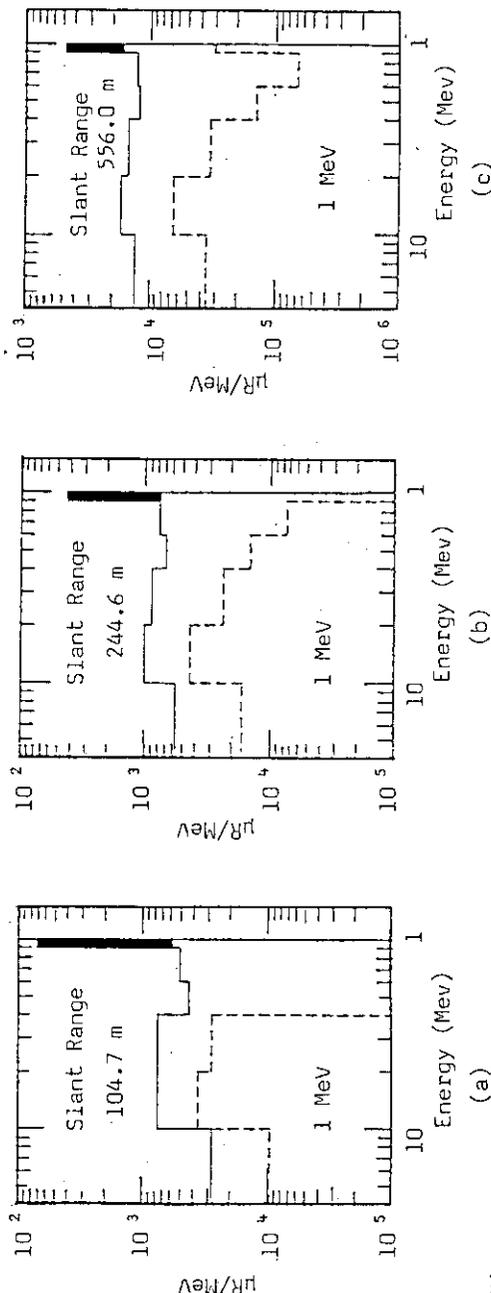


Fig. 16-2

— Total Component - - - - - Soil-Scattered Component

Fig. 16 Energy distribution of exposure. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO₂ (Fig. 16-1), another Fe₂O₃ (Fig. 16-2). Slant ranges are taken to be (a) 104.7 m, (b) 244.6 m and (c) 556.0 m. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

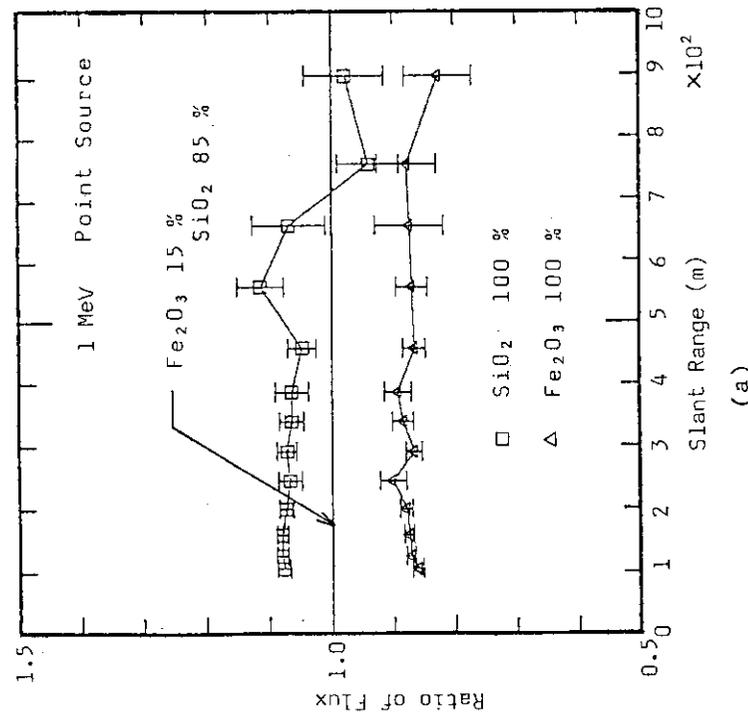
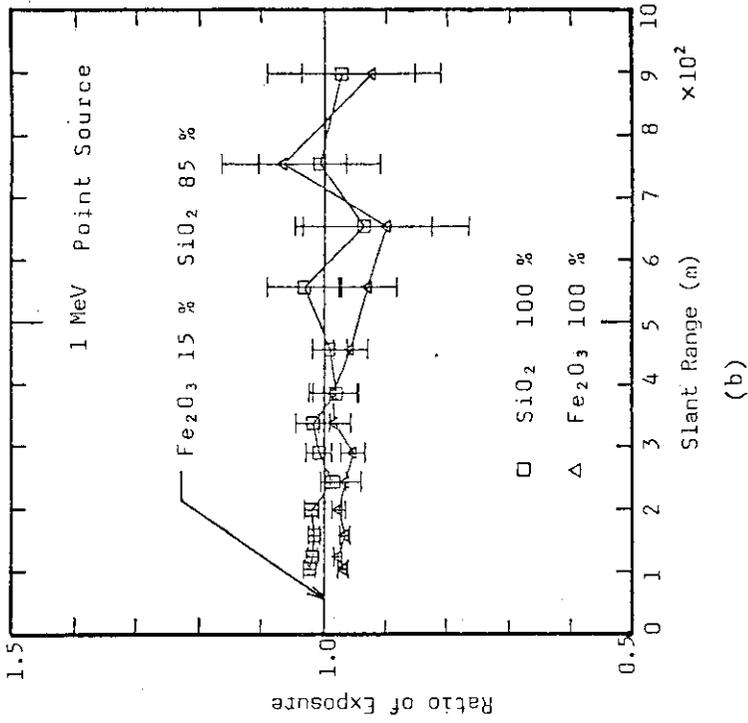


Fig.17 Relative gamma-ray intensity of case (1) and (3) to case (2) in Fig.13.
Bars in these figures mean standard error.

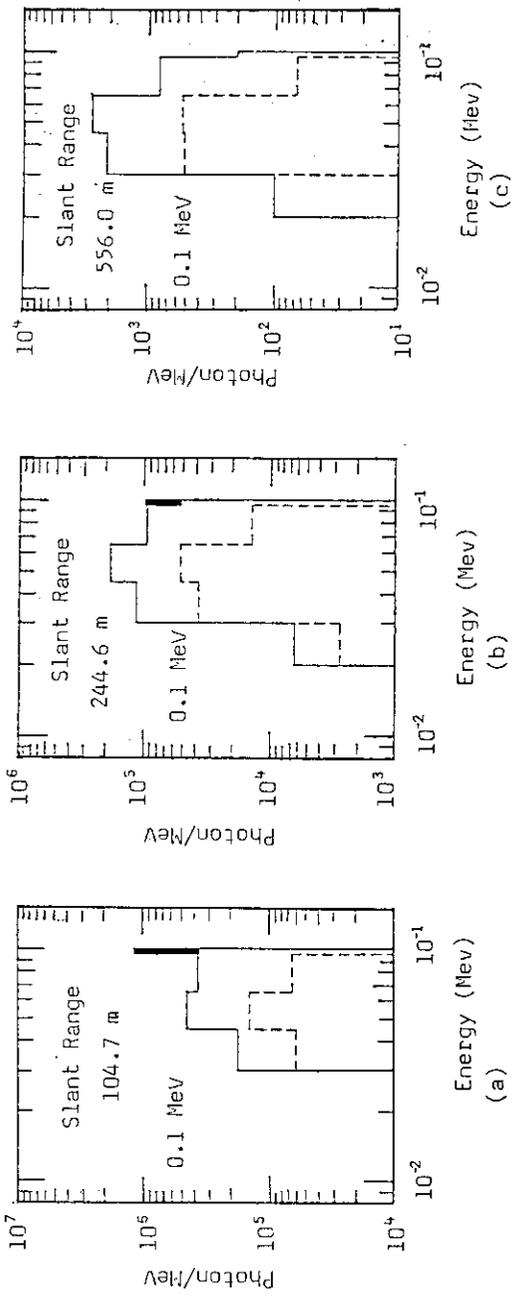


Fig.18-1

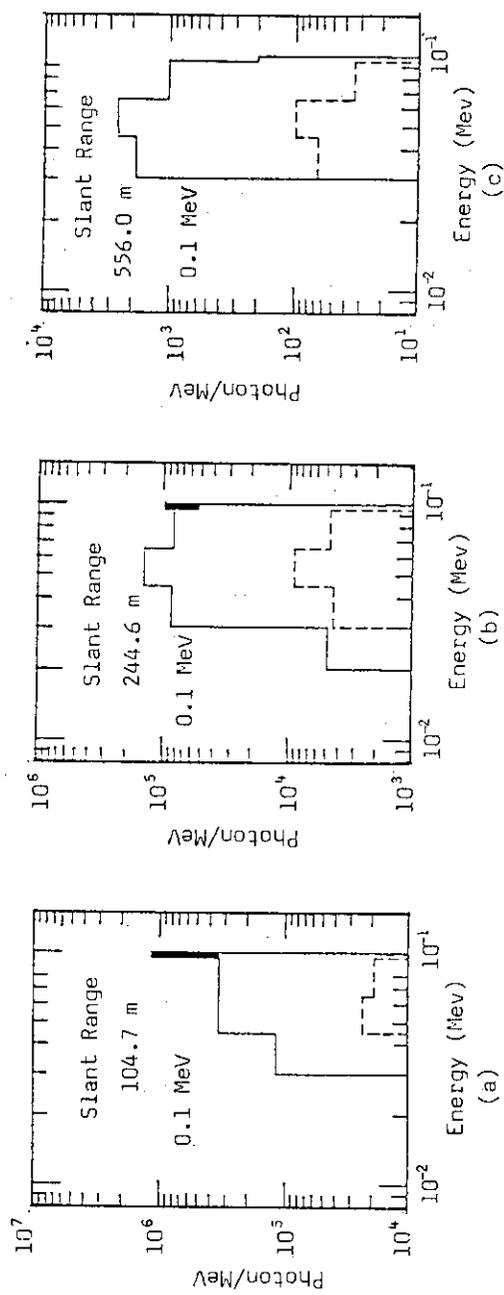


Fig.18-2

— Total Component — Direct Component - - - - - Soil-Scattered Component

Fig.18 Energy distribution of number of photons. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO₂ (Fig.18-1), another Fe₂O₃ (Fig.18-2). Slant ranges are taken to be (a) 104.7 m, (b) 244.6 m and (c) 556.0 m. A 0.1-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

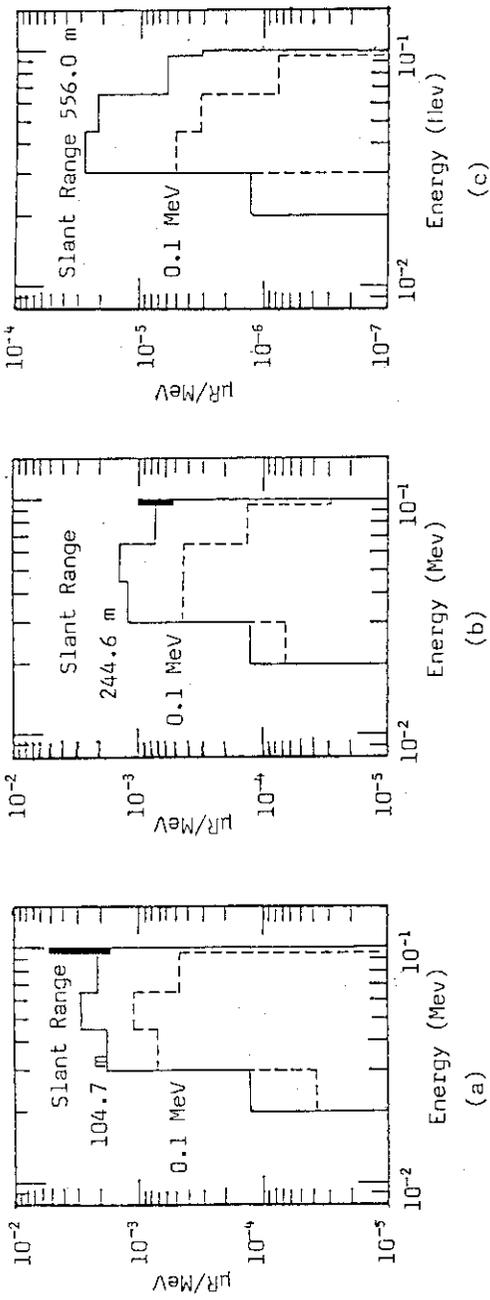


Fig. 19-1

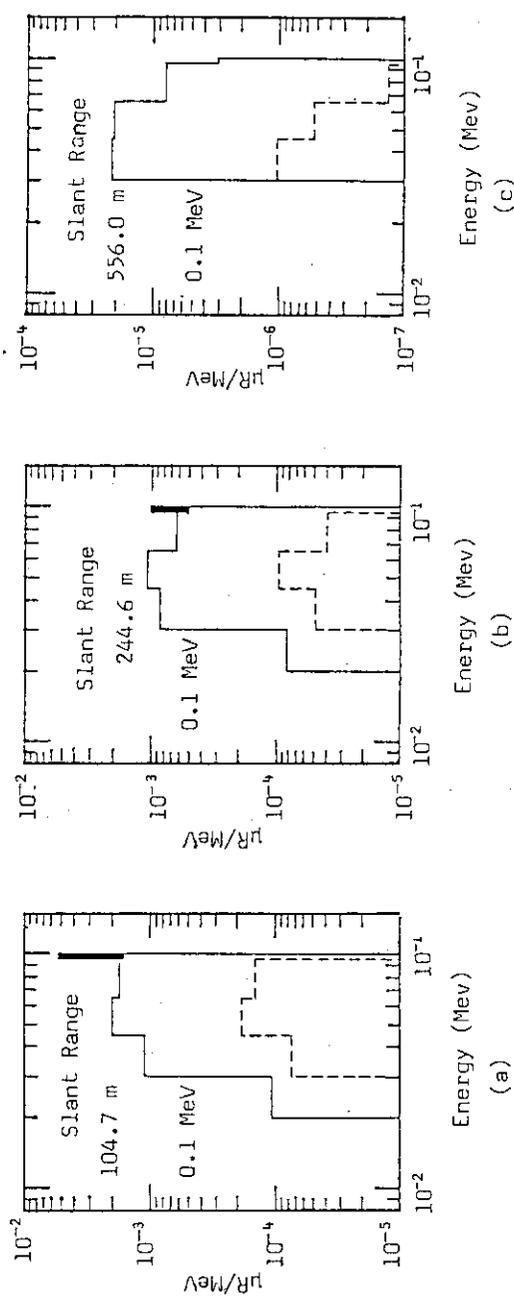


Fig. 19-2

— Total Component ——— Direct Component - - - - - Soil-Scattered Component

Fig. 19 Energy distribution of exposure. Two cases are assumed for soil composition, one is only of SiO_2 (Fig. 19-1), another Fe_2O_3 (Fig. 19-2). Slant ranges are taken to be (a) 104.7 m, (b) 244.6 m and (c) 556.0 m. A 0.1-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

でガンマ線諸量の変動は小さい。したがって、 Fe_2O_3 重量組成比変化の影響は考慮する必要がないと考えられる。しかし、地域が異なれば、 Fe_2O_3 重量組成比の変化によるガンマ線諸量の変動を考慮しなければならない場合もあろう。

3.4 水の重量比の変化による影響

3.4.1 線減衰係数の変化による影響

(1)乾燥土壌, (2)水の重量比が20%の土壌, (3)水の重量比が50%の土壌の3種類の土壌についてガンマ線諸量の計算を行なった。但し、乾燥土壌の密度は3つのケースについて一定であり、核種濃度、すなわち土壌単位体積 (m^3) あたりの崩壊数も一定とした。

土壌中一様分布線源に対する結果を Fig. 20~24 に、1.0 MeV, 0.1 MeV の空中点線源に対する結果をそれぞれ Fig. 25, Fig. 26 に示す。これら3種類の線源に対する結果を以下に記述する。

(a) 土壌中一様分布線源

Fig. 20 を参照するとわかるように水の重量比による変化の割合は高度にあまり関係なくだいたい一定である。この変化の割合は Fig. 21 より(2)の場合を基準にすると線束及び線量とともに(1)の場合で25%前後増加し、(3)の場合は35%前後の減少を示す。Beck らも同様な計算を行っており、1.46 MeV (^{40}K)の土壌中一様分布線源について水の重量比を0%から30%に増加させると線量率は約30%減少すると報告している⁽⁴⁾。これは水の重量比の増加により土壌密度が増加するので線減衰係数も増加し、実質的に単位重量あたりの線源強度を減少させるためである。Fig. 22 に水の重量比の増加による土壌の線減衰係数の増加の様子を示す。この図より水の重量比が増加すると相対的にコンプトン散乱断面積が増加するのがわかる。水の重量比が増加すると土壌中でコンプトン散乱によりエネルギーが減少し、光電吸収される光子数が増加するので Fig. 20 のような著しい変化が現われると考えられる。このように水の重量比の増加によって土壌の線減衰係数のコンプトン散乱部分は増加し、光電吸収部分はほとんど変化しないが、実質的には土壌中の吸収体が増加したとも考えられる。Fig. 23, 24 のエネルギースペクトルを参照すると光子数及び線量ともに水の重量比の増加によって全体的にスペクトル強度が減少しているが、スペクトル形状はほとんど変化せず、これらの傾向は高度が変化してもほとんど変わらないことがわかる。なお、Fig. 23, 24 における実線、破線、一点鎖線の意味は3.3(a)で説明したとおりである。

以上は水の重量比によって土壌密度も増加した場合のガンマ線諸量の変化であるが、Beck は土壌の密度を一定にして水の重量比のみ変化させた場合の計算も行なっている⁽¹⁾。3.2で述べた土壌(i)の水以外の成分の相対的な重量比は一定として水の重量比のみを0%, 25%と変化させた。この場合の土壌密度は 1.6 g/cm^3 で一定とした。その結果は、1.0 MeV の土壌中一様分布線源について0%と10%の場合には線量率はほとんど同一の値であり、10%から25%に水の重量比が増加しても地上1m及び100mで線量率は1.7%しか減少しなかった。これは3.2で述べたように水の重量比が増加して、土壌の組成が変化しても質量減衰係数の変化は小さいためである。

(b) 空中点線源

Fig. 25, 26 を参照するとわかるように1 MeV のガンマ線では水の重量比が変化しても線束及び線量はほとんど変化しないが0.1 MeV のガンマ線では(1)と(3)の場合を比較すると少し変化がみ

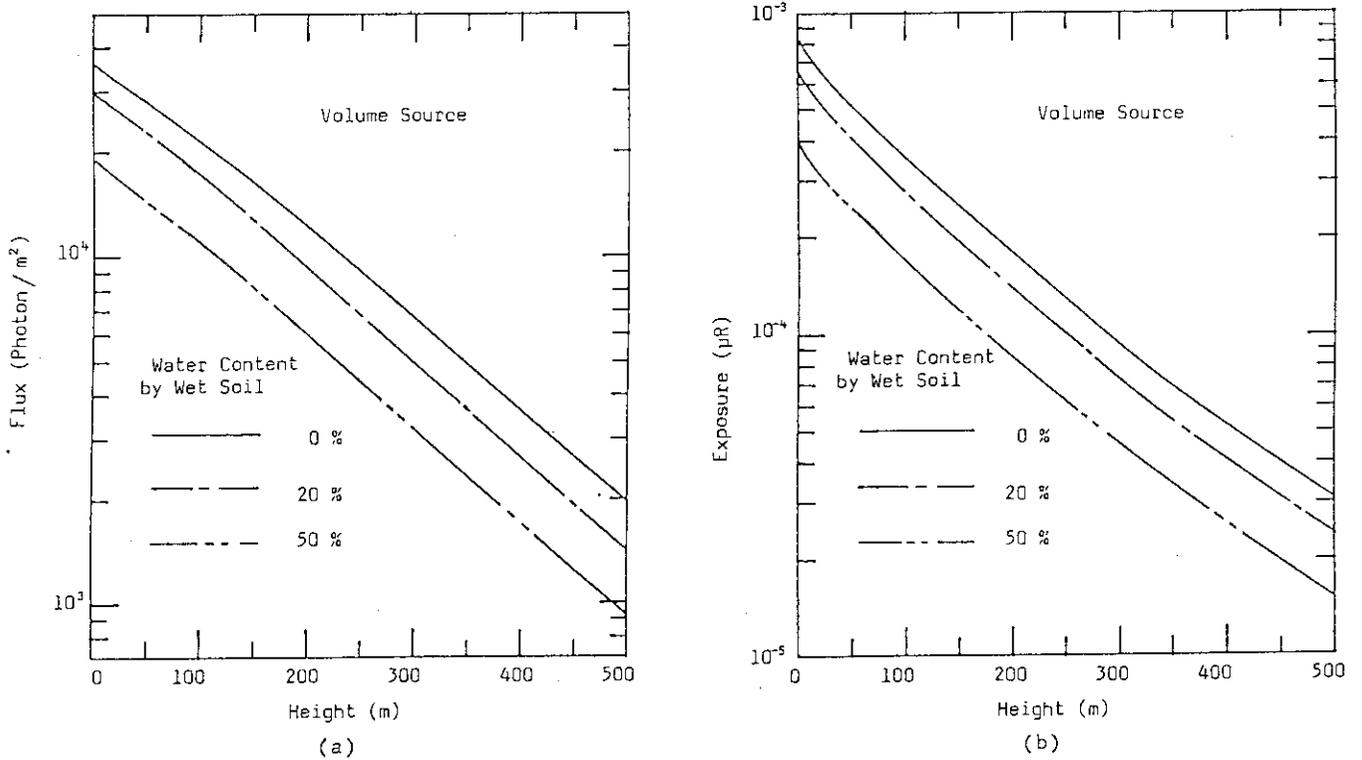


Fig.20 Effect of change in water content by wet soil, on (a) flux and (b) exposure. Contents of water are taken to be (1) 0 %, (2) 20 % and (3) 50 % by weight. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

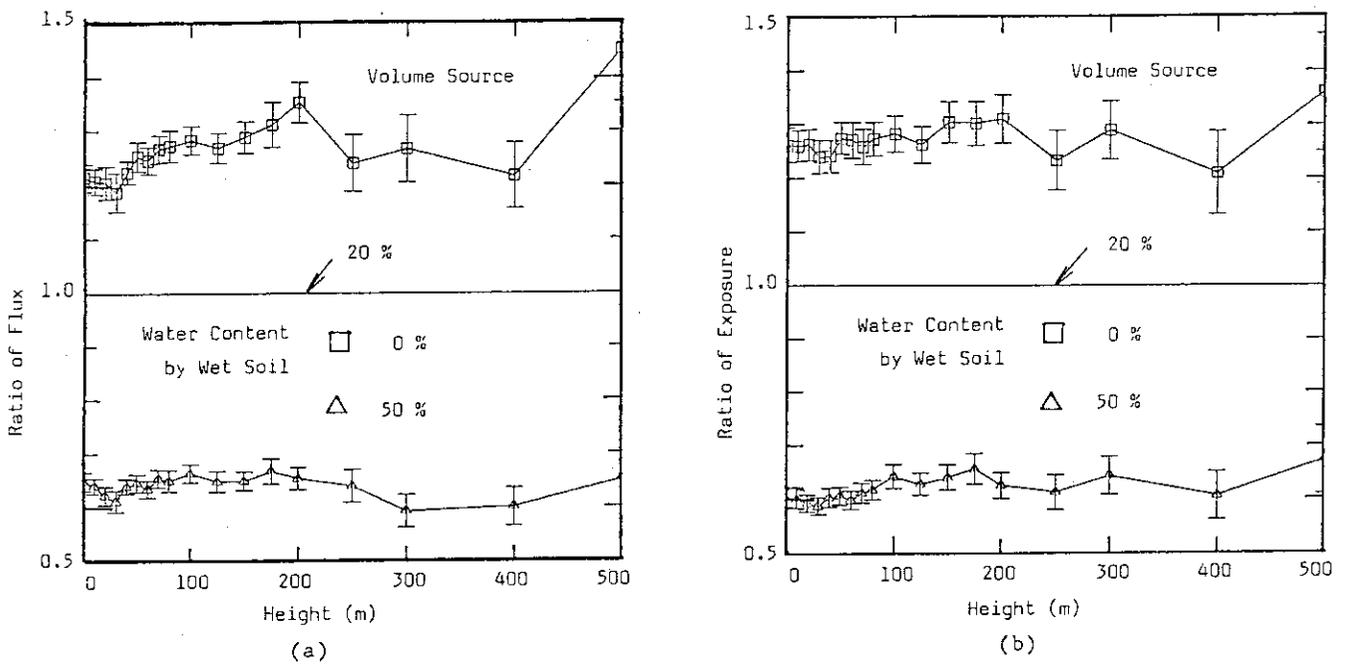


Fig.21 Relative gamma-ray intensity of case (1) and (3) to case (2) in Fig.20. Bars in these figures mean standard error.

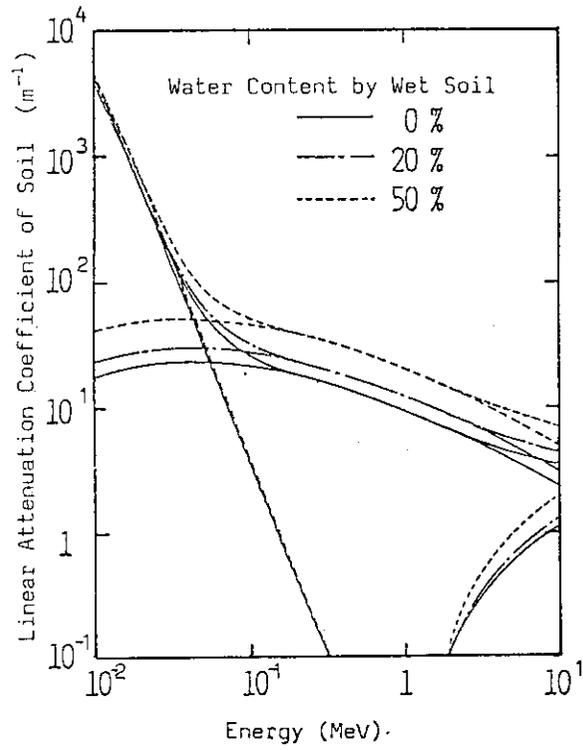


Fig.22 Variation of linear attenuation coefficient as a function of water content by wet soil

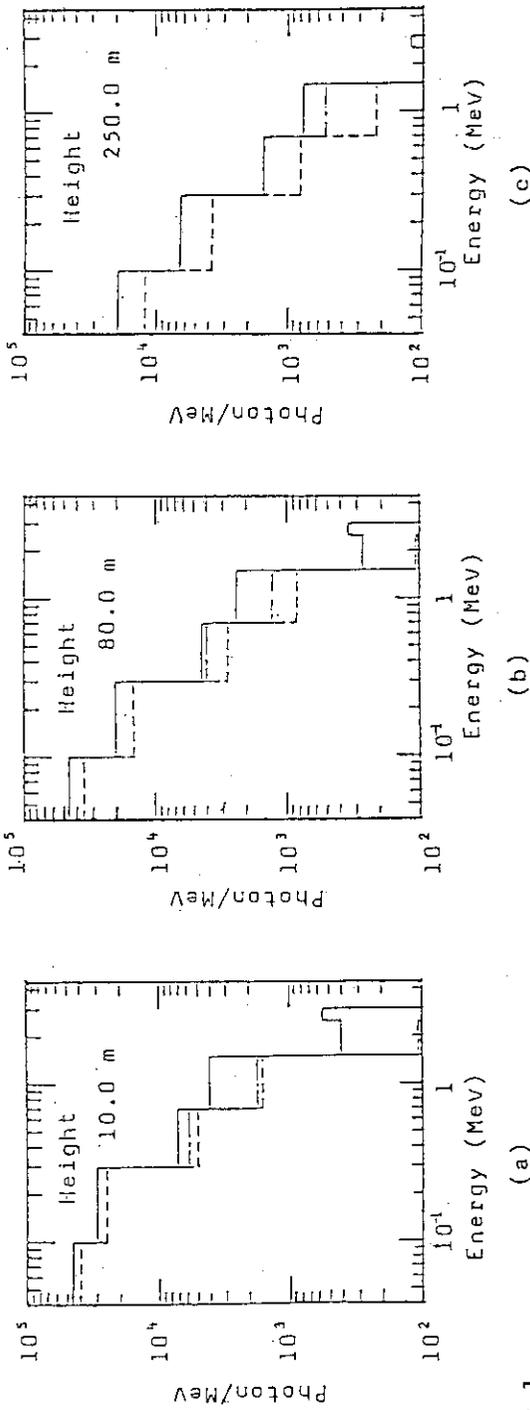


Fig. 23-1

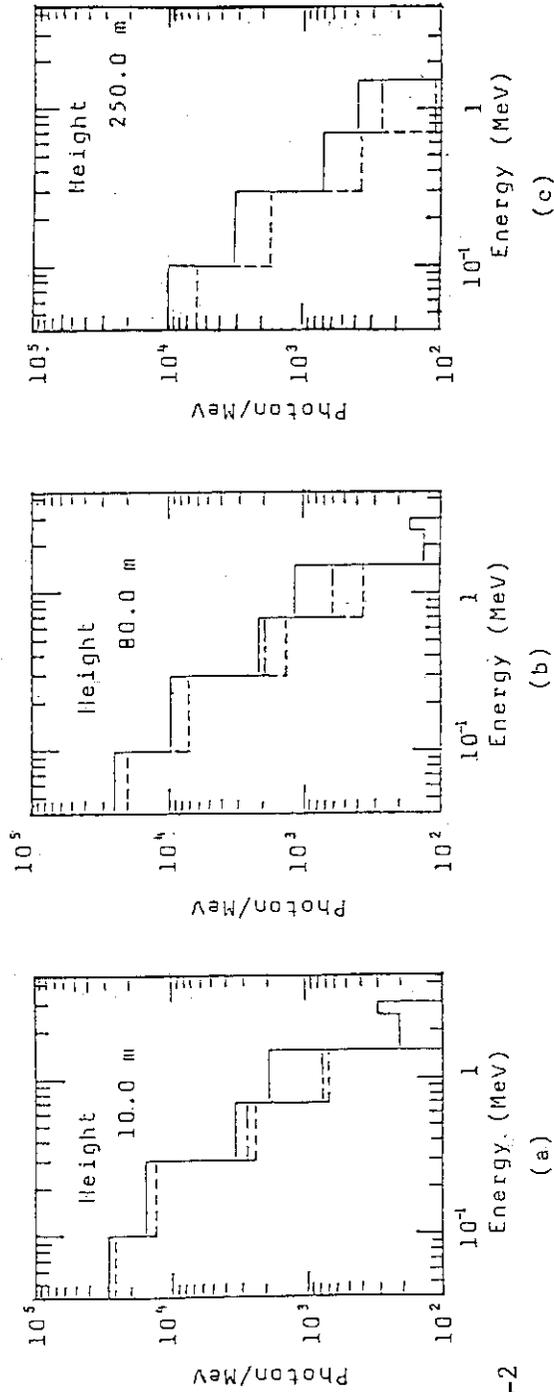


Fig. 23-2

— Total Component - - - Soil-Scattered Component

Fig. 23 Energy distribution of number of photons. Two cases are assumed for water content, one is only of 0% (Fig. 23-1), another 50% (Fig. 23-2) by weight. Detector heights are taken to be (a) 10 m, (b) 80 m and (c) 250 m. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

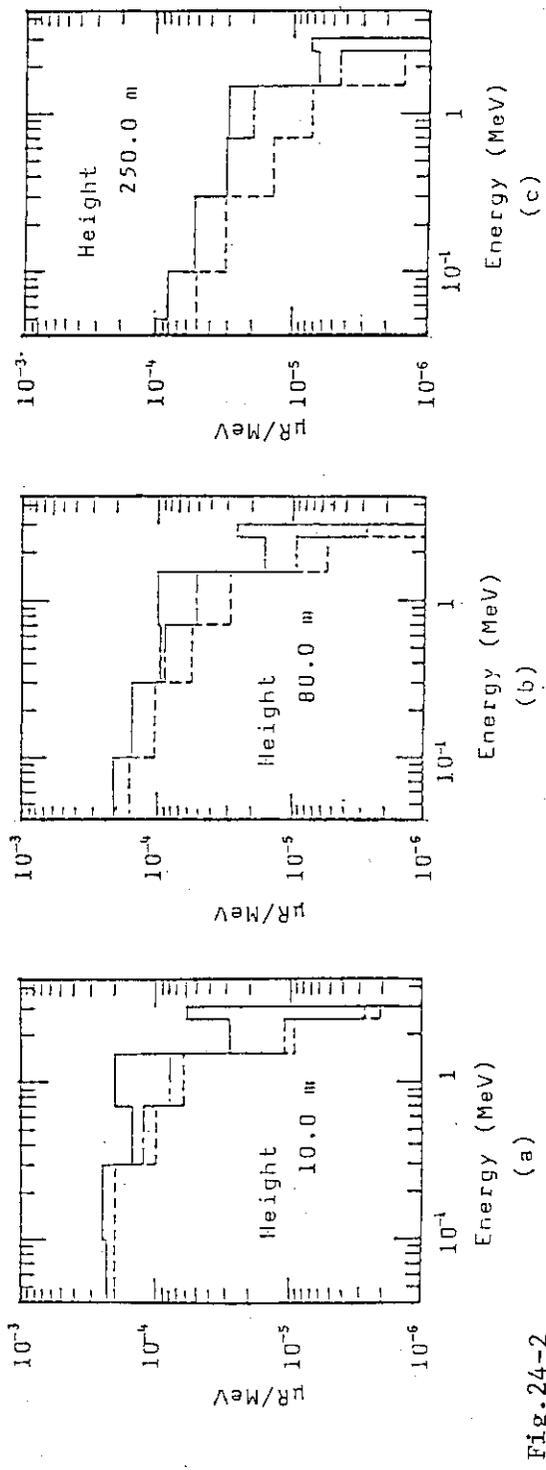
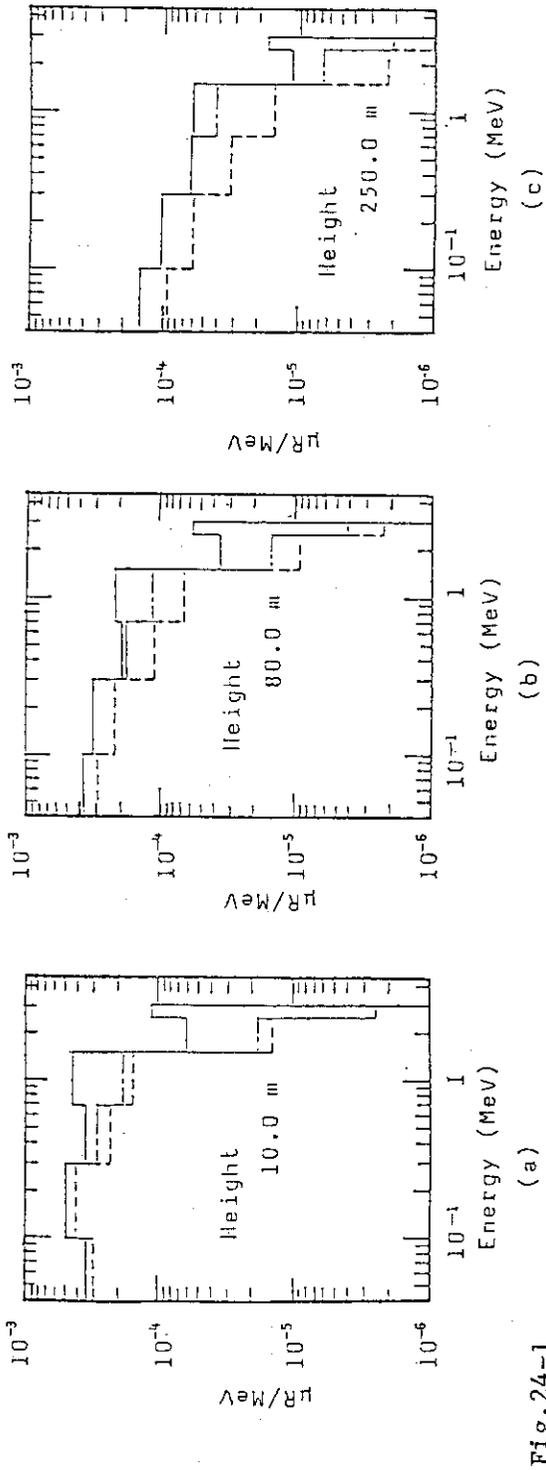


Fig. 24 Energy distribution of exposure. Two cases are assumed for water content, one is only of 0% (Fig. 24-1), another 50% (Fig. 24-2) by weight. Detector heights are taken to be (a) 10 m, (b) 80 m and (c) 250 m. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

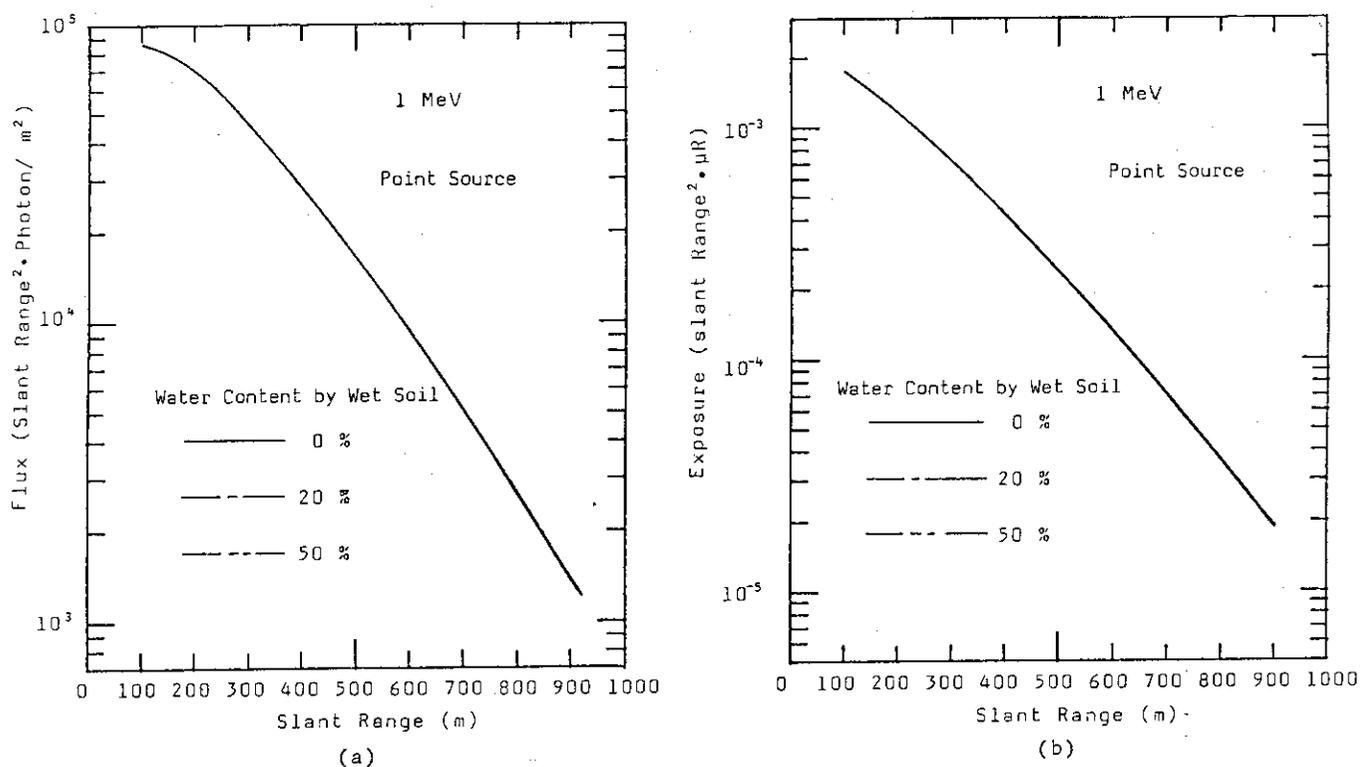


Fig.25 Effect of change in water content by wet soil, on (a) flux and (b) exposure. Contents of water are taken to be (1) 0 % , (2) 20 % and (3) 50 % by weight. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

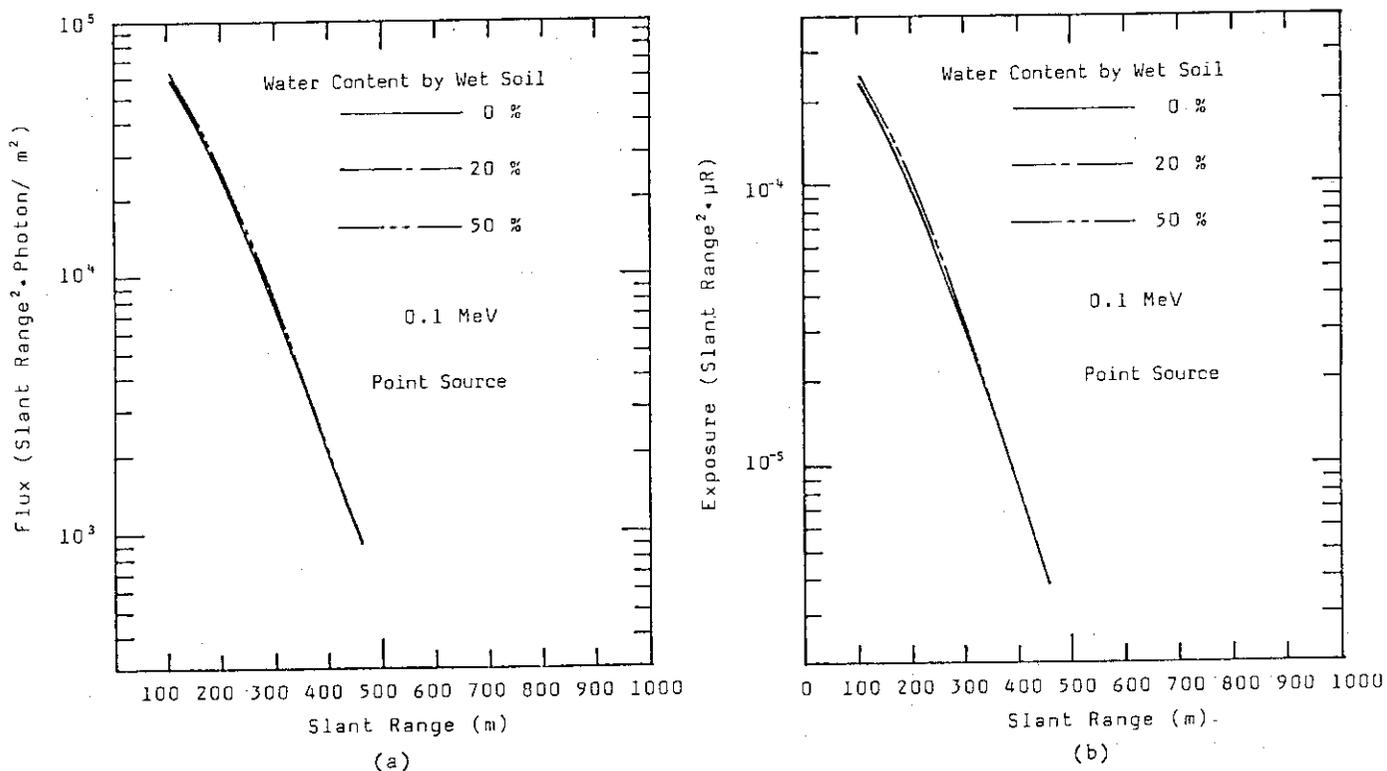


Fig.26 Effect of change in water content by wet soil, on (a) flux and (b) exposure. Contents of water are taken to be (1) 0 % , (2) 20 % and (3) 50 % by weight. A 0.1-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

られる。これは0.1 MeVよりも1 MeVのガンマ線の場合の方が光子が土壌中に入射したのちの前方散乱の反応確率が大きく土壌中に入射した光子は再び大気中に出ることが少ないので水の重量比が増加して線減衰係数のコンプトン散乱部分が増加しても線束及び線量はほとんど変化しないと考えられる。これに対して0.1 MeVのガンマ線では1 MeVのガンマ線の場合に比べて後方散乱の反応確率が増加するので土壌中に入射した光子でエネルギーの高いものは光電吸収を受ける前に大気中に再び入射する確率が増加する。

線源の付近ではあまり光子のエネルギーが減少していないので、水の重量比の増加によりコンプトン散乱断面積が増加すると、土壌中から後方散乱により大気中に再び入射する光子の数が増加するから線束及び線量が少し増加すると考えられる。しかし、水の重量比は20～30%程度の場合が多く50%も変化することはあまりないので、実際には空中点線源については水の重量比による影響は考慮する必要がないと思われる。

地表面一様分布線についての計算結果には水の重量比の変化の影響がほとんどみられなかったのでここでは地表面一様分布線に関する記述は省略する。

土壌中の水分量の影響についての研究は湊^(5, 27), Planque⁽¹⁹⁾らによっても行なわれている。湊は土壌の乾燥度 ρ_0/ρ (ρ_0 : 湿潤土壌の密度, ρ : 乾燥させた土壌の密度) を定義し、統計解析及び時系列解析を行なった結果、土壌の乾燥度は自然のバックグラウンドガンマ線束の長期的変化に大きく寄与すると結論している⁽⁵⁾。また、Planque は土壌と水分の収支変化に基づいた簡単なモデルが土壌中からのガンマ線による線量率の月別の変化をよく説明できると報告している⁽¹⁹⁾。

他に降水による環境ガンマ線の時間変動についても研究が行なわれている^(6, 18, 21)。積雪の影響に関しては UNSCEAR 1977年報告書⁽¹⁸⁾に次の様な報告がある。積雪は土壌中の線源からのガンマ線を有効に遮蔽する。典型的な雪が20 cm 積ると、照射線量率を約50%減少させる。したがって、多雪地方においては屋外の照射線量率は強い季節変動を見せることになる。注意すべきことは、同じ積雪量でも、雪が降りつつある時と融けつつある時では空気の照射線量率が異なる点である。その理由は雪が融けつつある時の方が降りつつある時よりも土壌の水分含量が高いからである。

3.4.2 ラドンとその娘核種の影響

計算に用いたプログラムではラドンとその娘核種は土壌中に固定されたままであり、土壌あるいは大気中での拡散は考慮していない。ラドン及びその娘核種の影響は参考文献^(2, 4, 15)に記述されているが、要約すると以下のとおりである。

すなわち、水の重量比が増加すると土壌中の細孔が水分によってふさがれて土壌中から大気中へと移動・拡散する ^{222}Rn の数が減少する。この状態が数日続くと土壌中での ^{222}Rn の放射能は平衡 ($^{226}\text{Ra} - ^{222}\text{Rn}$ の平衡状態) に達し、 ^{222}Rn の娘核種からの線量率が増加する。したがって、水の重量比が増加して ^{232}Th 系列及び ^{40}K からの線量率が減少しても ^{238}U 系列からの線量率は変化しないかまたは増加する場合もある⁽⁴⁾。

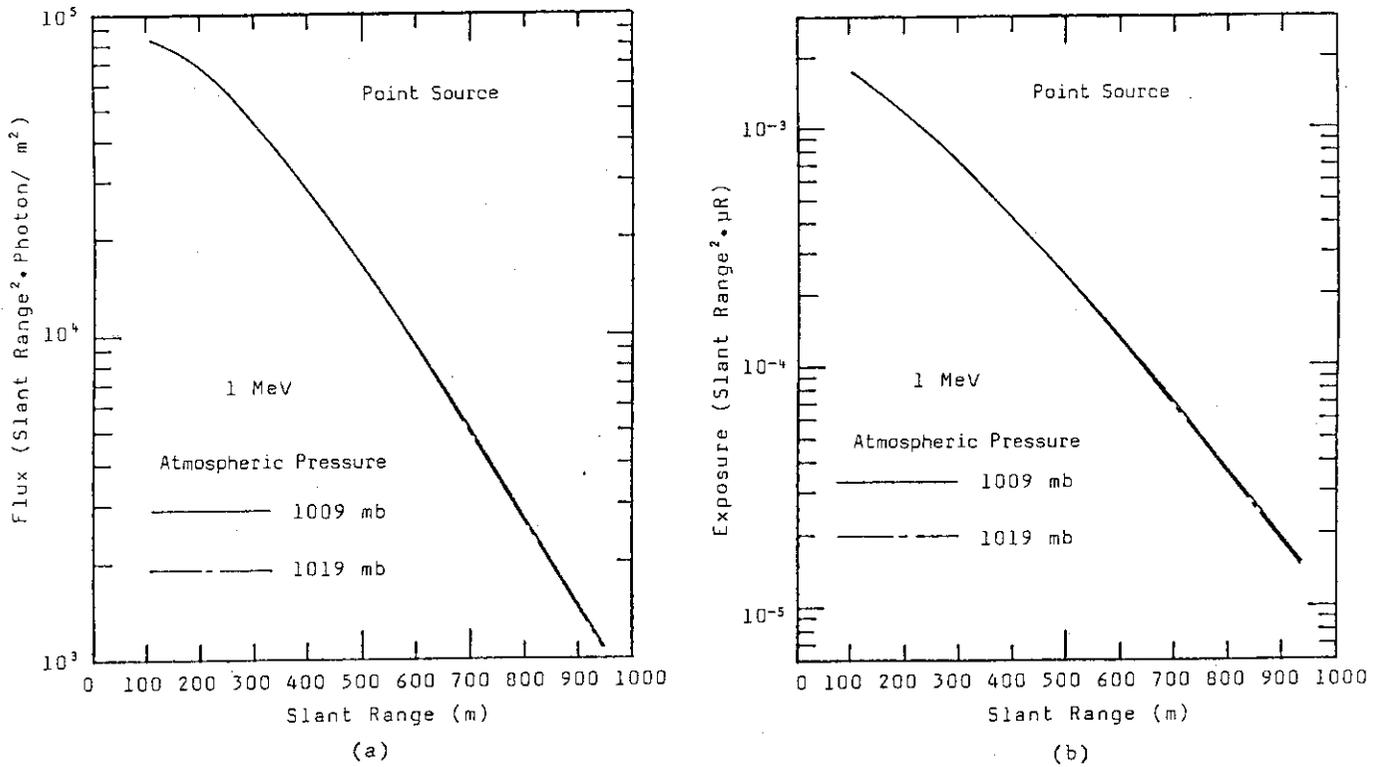


Fig.27 Effect of change in atmospheric pressure on (a) flux and (b) exposure. Values of pressure are taken to be (1) 1009 mb and (2) 1019 mb. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

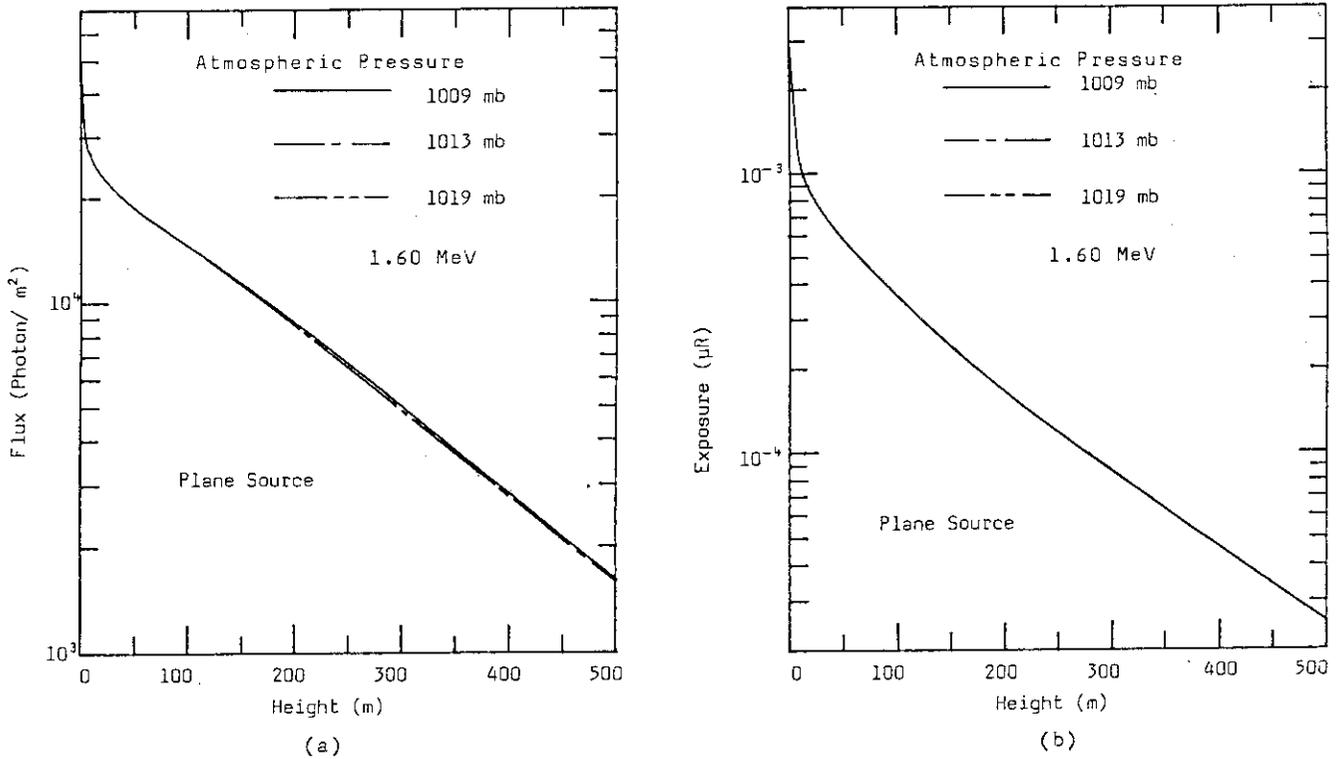


Fig.28 Effect of change in atmospheric pressure on (a) flux and (b) exposure. Values of pressure are taken to be (1) 1009 mb, (2) 1013 mb and (3) 1019 mb. 1.60-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed on the ground surface.

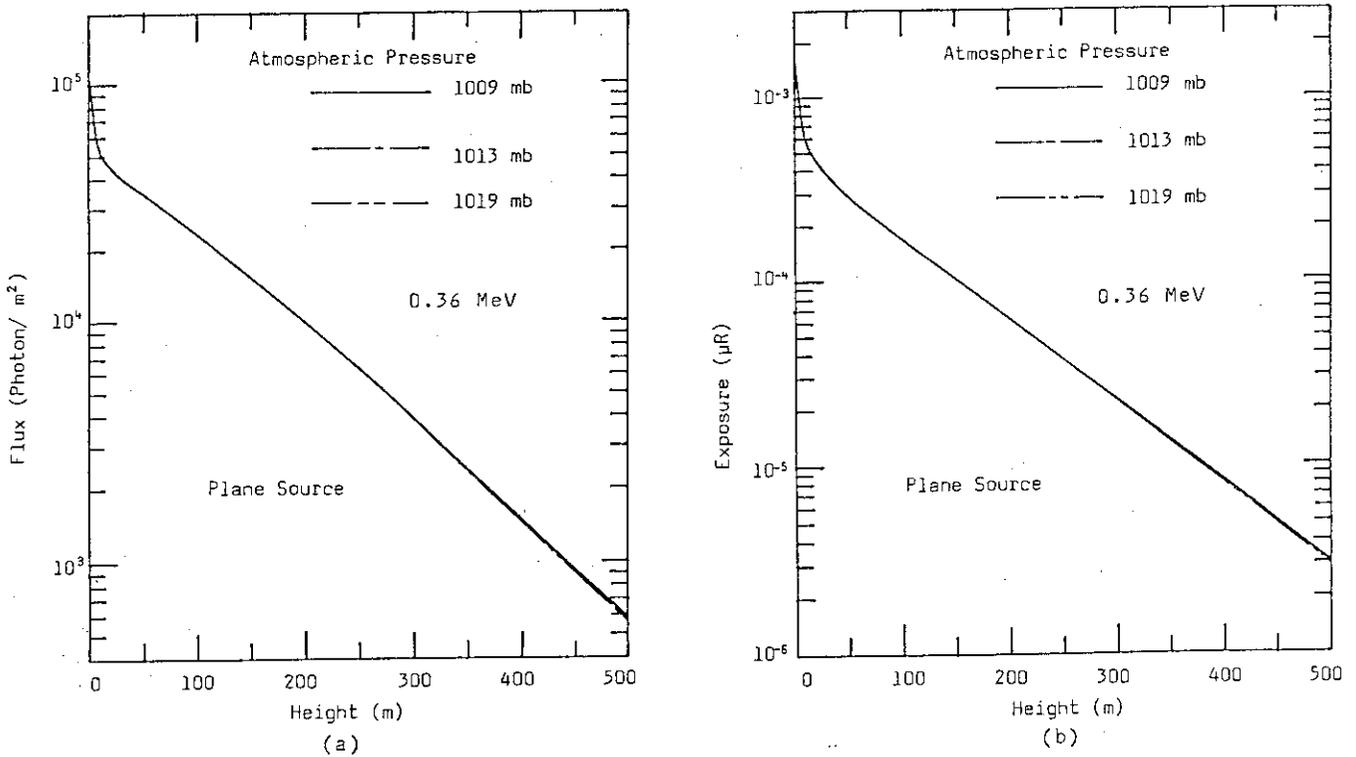


Fig.29 Effect of change in atmospheric pressure on (a) flux and (b) exposure. Values of pressure are taken to be (1) 1009 mb, (2) 1013 mb and (3) 1019 mb. 0.36-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed on the ground surface.

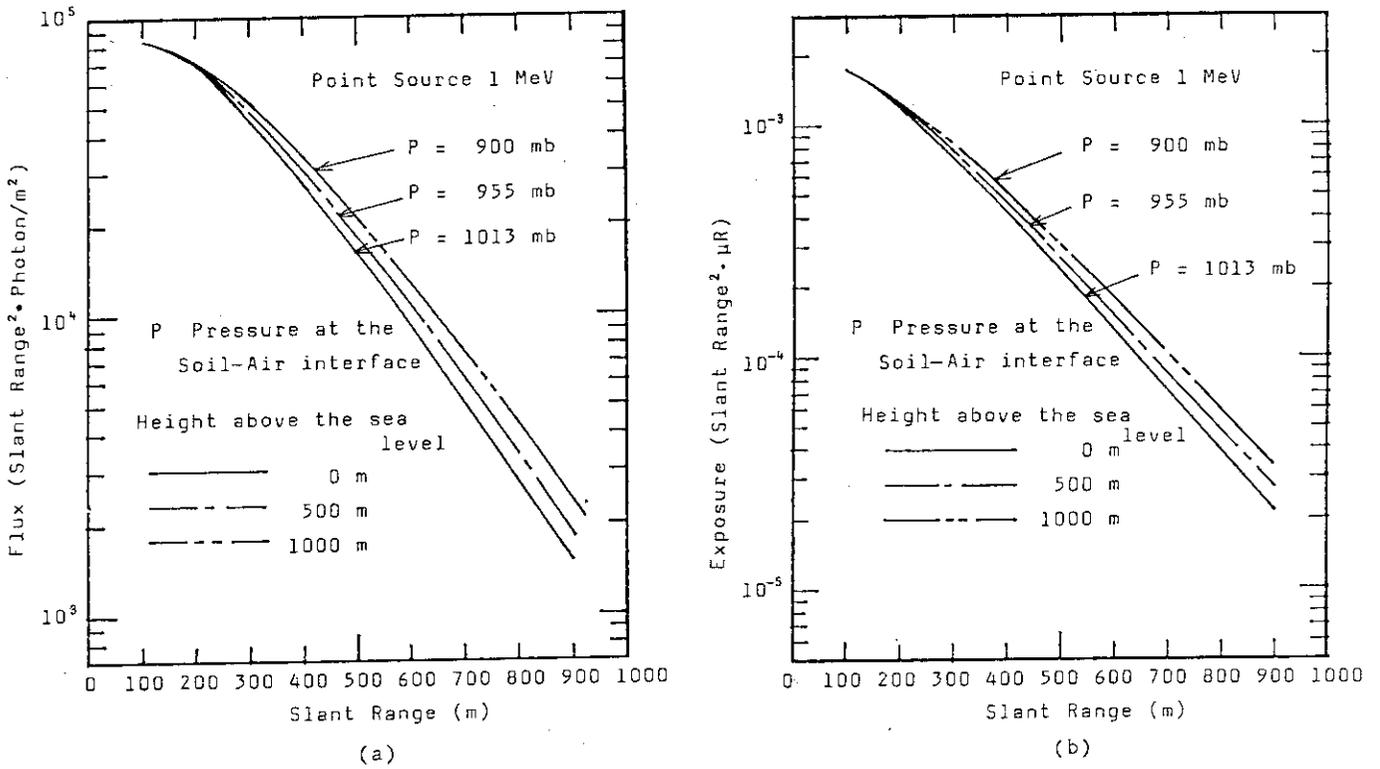


Fig.30 Effect of change in height above the sea level, on (a) flux and (b) exposure. Values of height are taken to be (1) 0 m, (2) 500 m and (3) 1000 m. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

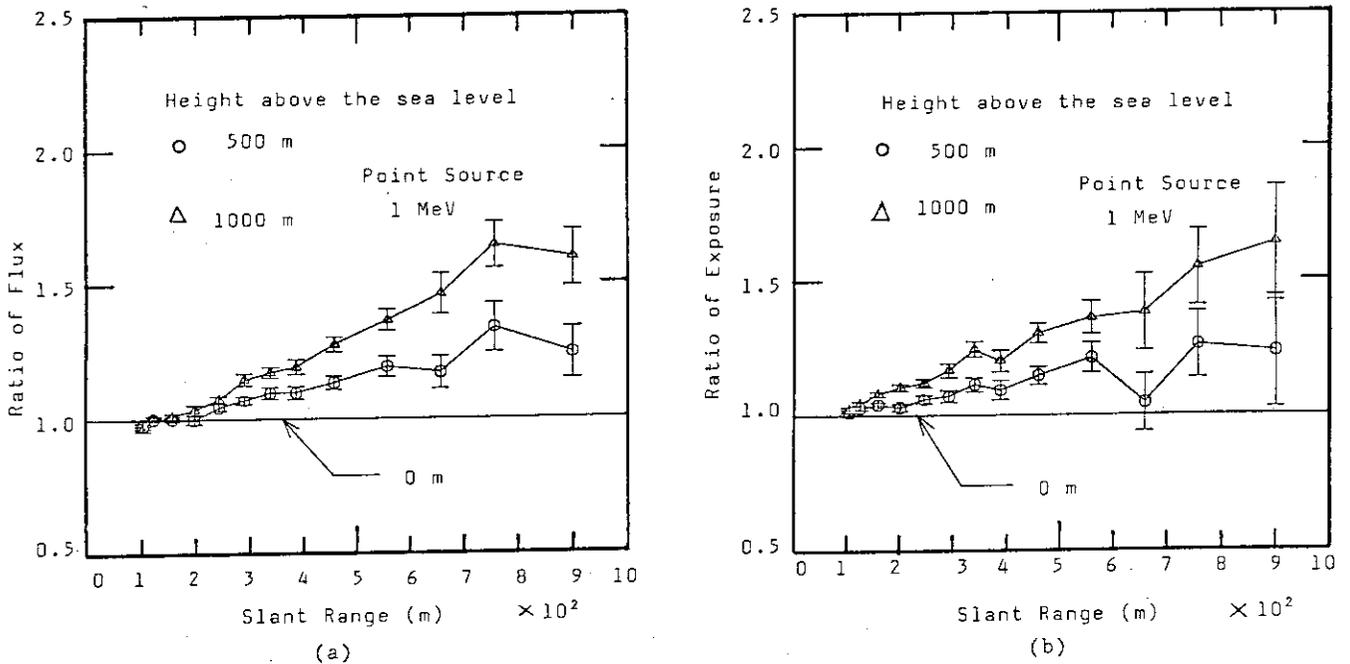


Fig.31 Relative gamma-ray intensity of case (1) and (3) to case (2) in Fig.30. Bars in these figures mean standard error.

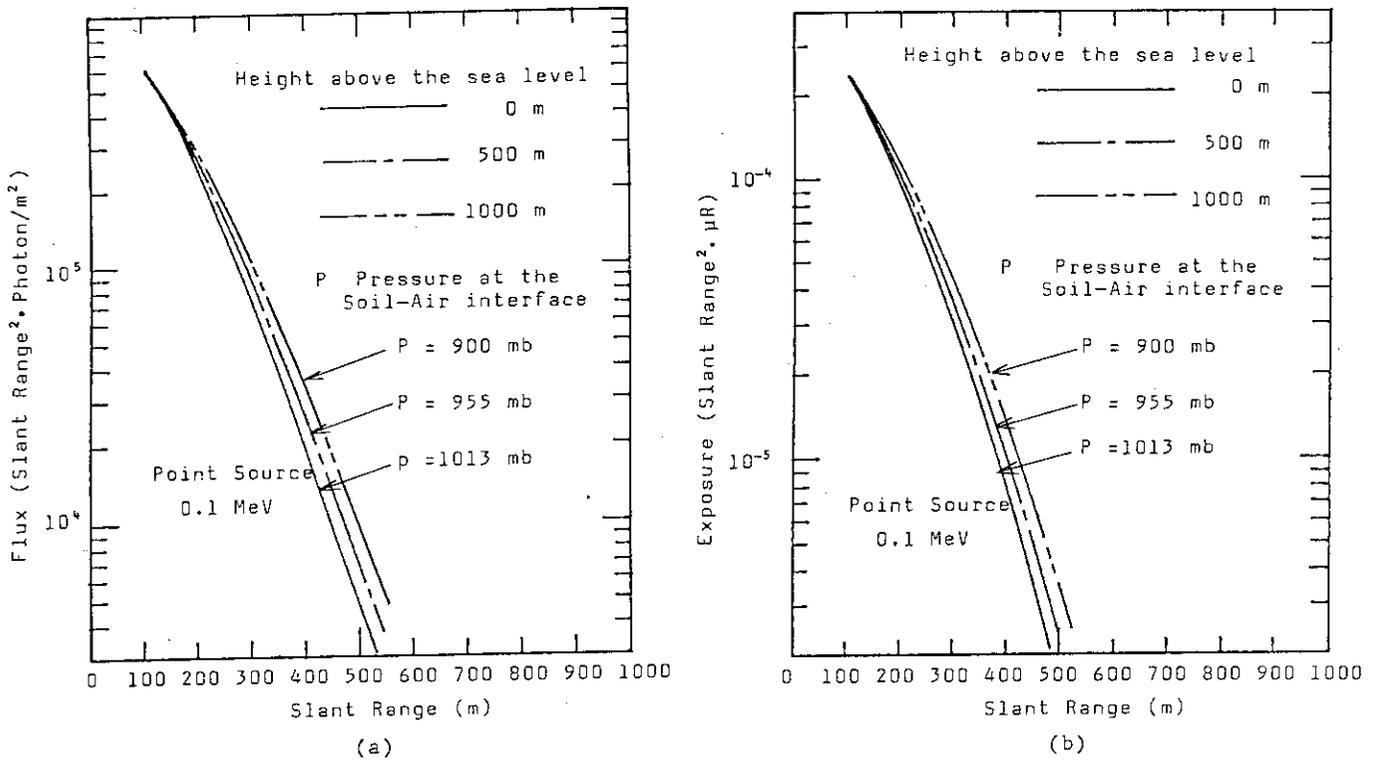


Fig.32 Effect of change in height above the sea level, on (a) flux and (b) exposure. Values of height are taken to be (1) 0 m, (2) 500 m and (3) 1000 m. A 0.1-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

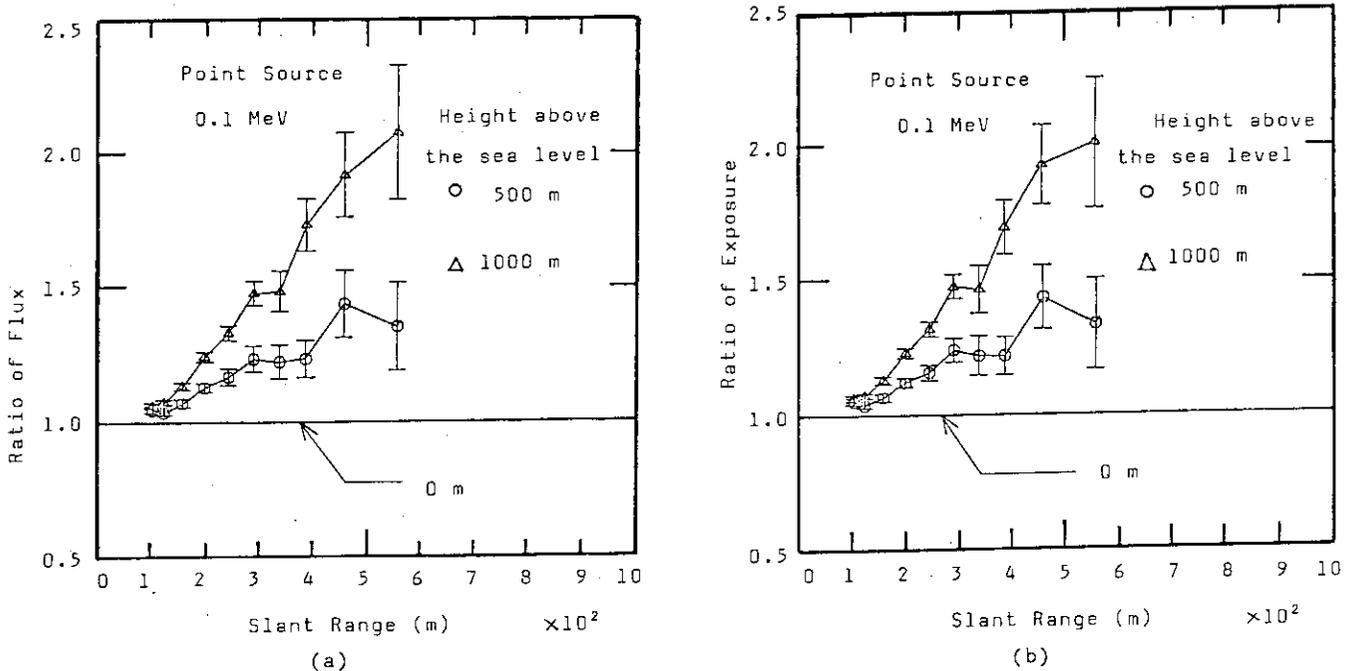


Fig.33 Relative gamma-ray intensity of case (1) and (3) to case (2) in Fig.32. Bars in these figures mean standard error.

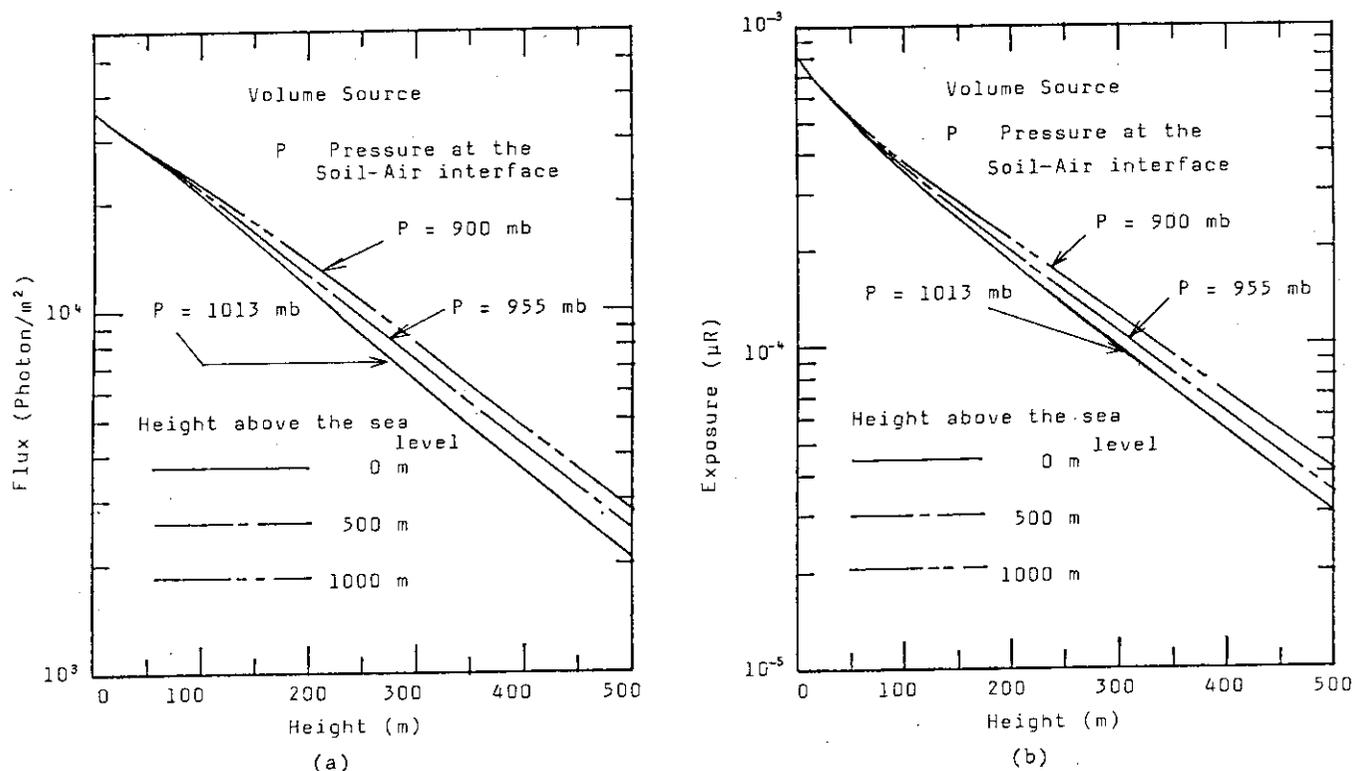


Fig.34 Effect of change in height above the sea level, on (a) flux and (b) exposure. Values of height are taken to be (1) 0 m, (2) 500 m and (3) 1000 m. Naturally occurring gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed in the soil.

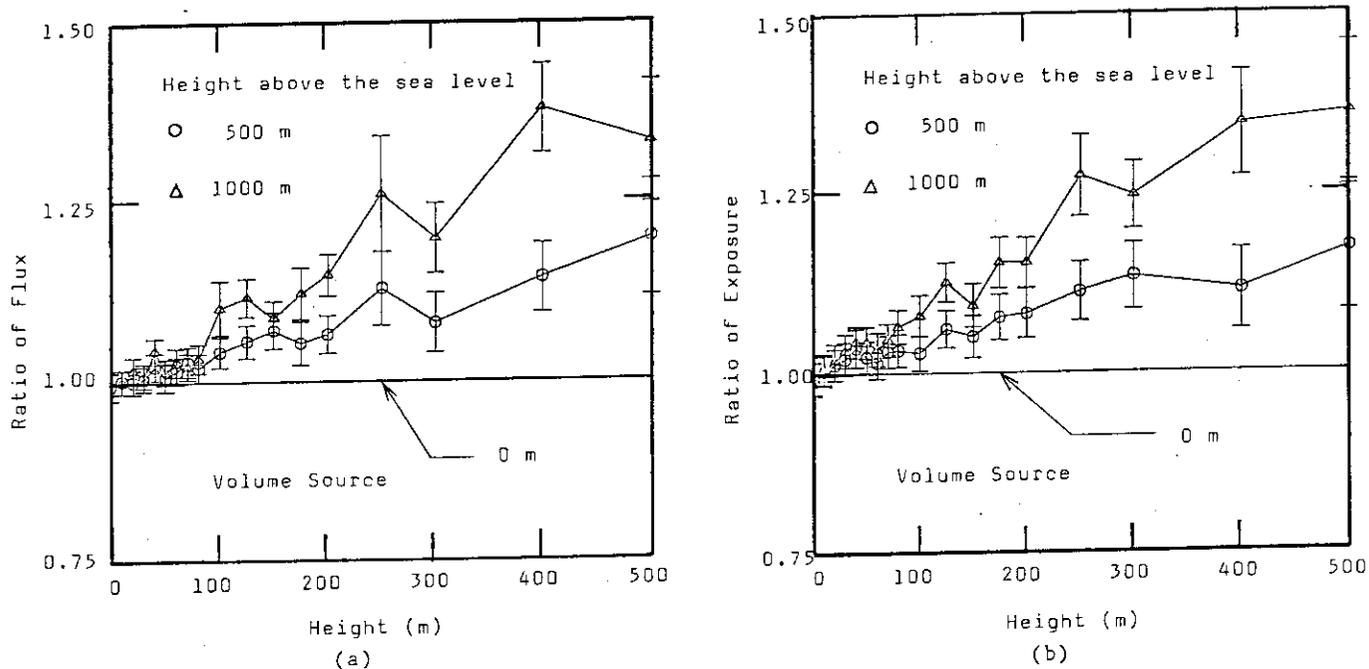


Fig.35 Relative gamma-ray intensity of case (1) and (3) to case (2) in Fig.34. Bars in these figures mean standard error.

3.5 気圧の変化による影響

地表面上での気圧を(1)1009 mb, (2)1013 mb, (3)1019 mb と変化させてガンマ線諸量の計算を行なった。台風などの異常気象時を除けば気圧の変化はあまり大きくないので1013 mb を基準の大気圧とし最小気圧と最大気圧の差を10 mb として前者を1009 mb, 後者を1019 mb とした。1 MeV の空中点線源に対する線束及び線量の計算結果を Fig. 27 に, 1.60 MeV, 0.36 MeV の地表面一様分布線源に対する線束及び線量の計算結果を Fig. 28, 29 に示す。これらの図を参照すると空中点線源及び地表面一様分布線源の両者に対して気圧変化の影響はほとんどみられず, 線束及び線量はほぼ一定であることがわかる。気圧が1009 mb から1019 mb に10 mb 変化しても気圧の増加は1%未満であり, 空気の密度増加も1%程度である。したがって気圧変化の影響は計算誤差あるいは測定誤差内に収まるので日常的な気象変化では気圧の影響は無視できる。

以上の説明は海拔0 m の平地において日常的な気圧変化を考えた場合であるが海拔差による気圧差の影響も考察するために500 m, 1000 m の2種類の海拔高度の平地を考えて計算を行なった。海拔500 m, 1000 m での気圧は(6)式において $P_0 = 1013 \text{ mb}$, $T_0 = 15^\circ\text{C}$, (288°K) $e_0 = 0.0 \text{ mb}$, $\beta = 6^\circ\text{C}/\text{km}$ を代入してそれぞれ955 mb, 900 mb と仮定した。但し, 海拔500 m 及び1000 m でも地表面での気温は15°C とした。また, この場合でも気圧及び気温は地表面からの高度が大きくなるに従って減少すると仮定した。

空中点線源に対する結果を Fig. 30-33 に示す。これらを参照すると低エネルギーガンマ線ほど海拔差による気圧差の影響が顕著に現われることがわかる。例えば, 海拔高度1000 m に対して0.1 MeV ガンマ線では線源から300 m 程度離れると線束及び線量ともに50%程度も増加する。次に土壤中一様分布線源に対する結果を Fig. 34-35 に示す。これを参照すると地表面付近では海拔差の影響はほとんどみられないが, 高度が大きくなると変化が増大し, 海拔1000 m では地上500 m で30~35%程度, 線束及び線量が増加することがわかる。上述の2種類の線源に対する結果により海拔差による気圧差は線束及び線量を大きく変化させることがわかる。

3.6 気温の変化による影響

地表面上での気温を(1)5°C, (2)15°C, (3)27°C と変化させてガンマ線の諸量を計算した。空中点線源に対する結果を Fig. 36~39 に, 地表面一様分布線源に対する結果を Fig. 40, 41 に示す。

(a) 空中点線源

Fig. 36 は1 MeV のガンマ線に対する線束及び線量の計算結果である。線源から直線距離で100~150 m 程度までは1 MeV の光子の大気中の平均自由行程が130 m 程度の値なので空気と反応する光子の数は少なく, 気温変化による影響はほとんど現われてこない。しかし, 100~150 m を過ぎると気温の変化が現われ, 直線距離の増加とともに線束及び線量の変化が増大する。この変化の割合は距離とともに増加しており, (2)の場合を基準として(1)及び(3)の場合の線束及び線量の比を標準誤差とともに図示すると Fig. 37 のようになる。これを参照すると600 m 程度以上の直線距離では誤差が大きくなるが, 600 m 以内では(2)の場合を基準として線束及び線量ともに(1)の場合で0~20%程度減少し, (3)の場合で0~20%程度増加することがわかる。この変化の割合はガンマ線のエネルギーが高いほど小さくなる。Fig. 38, 39 のエネルギースペクトルを参照する

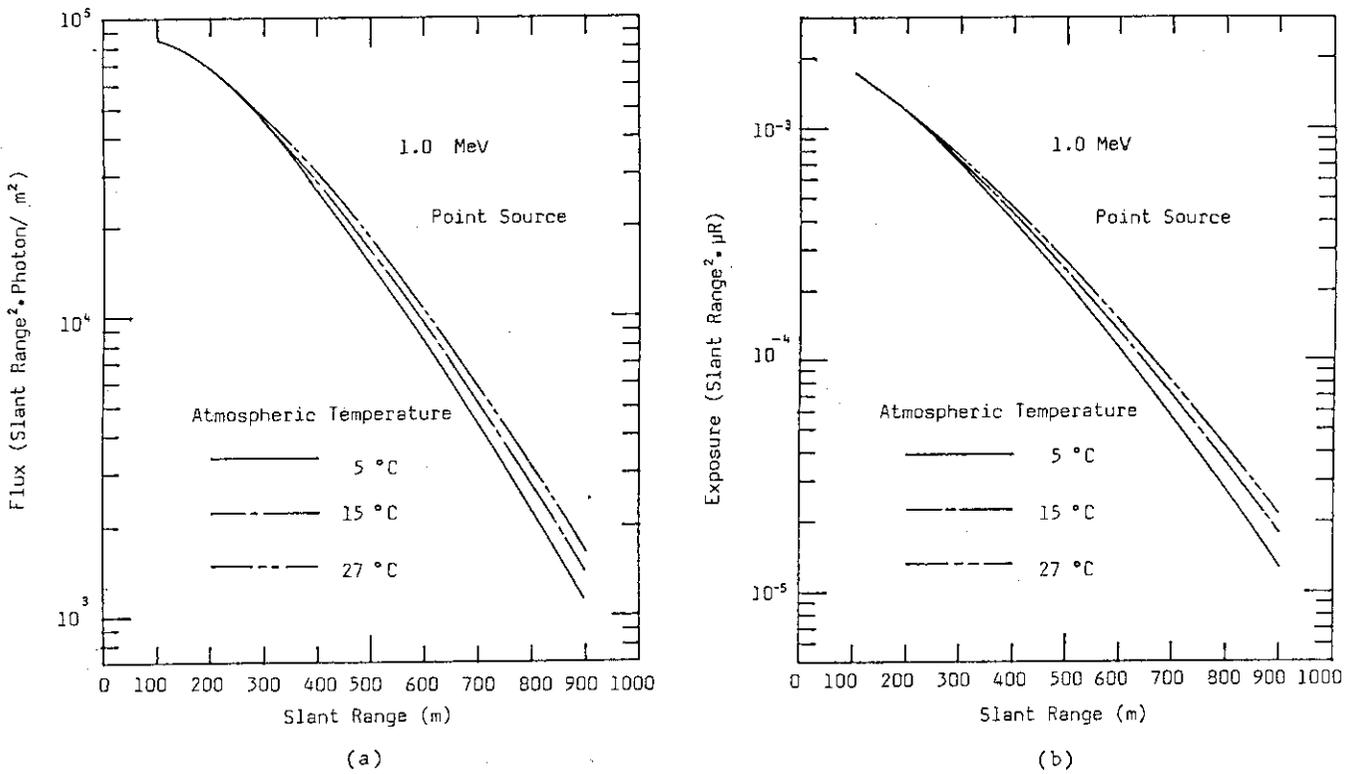


Fig.36 Effect of change in atmospheric temperature on (a) flux and (b) exposure. Values of temperature are taken to be (1) 5 °C, (2) 15 °C and (3) 27 °C. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

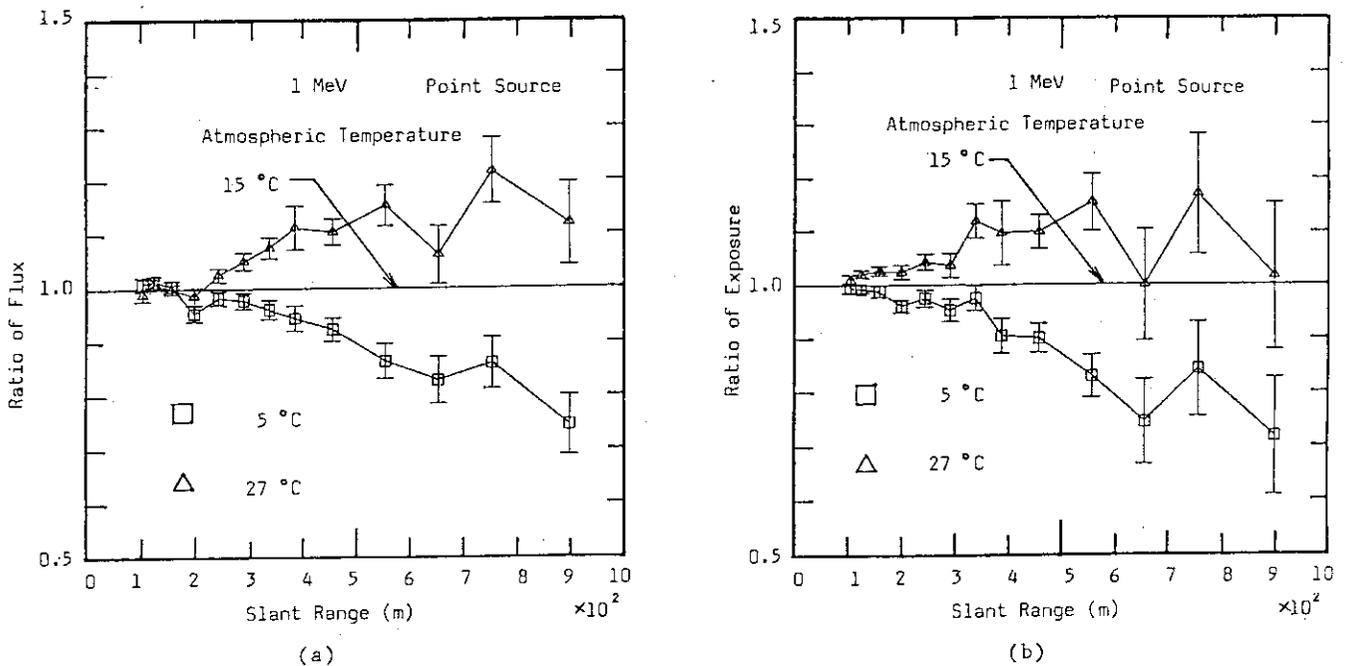


Fig.37 Relative gamma-ray intensity of case (1) and (3) to case (2) in Fig.36. Bars in these figures mean standard error.

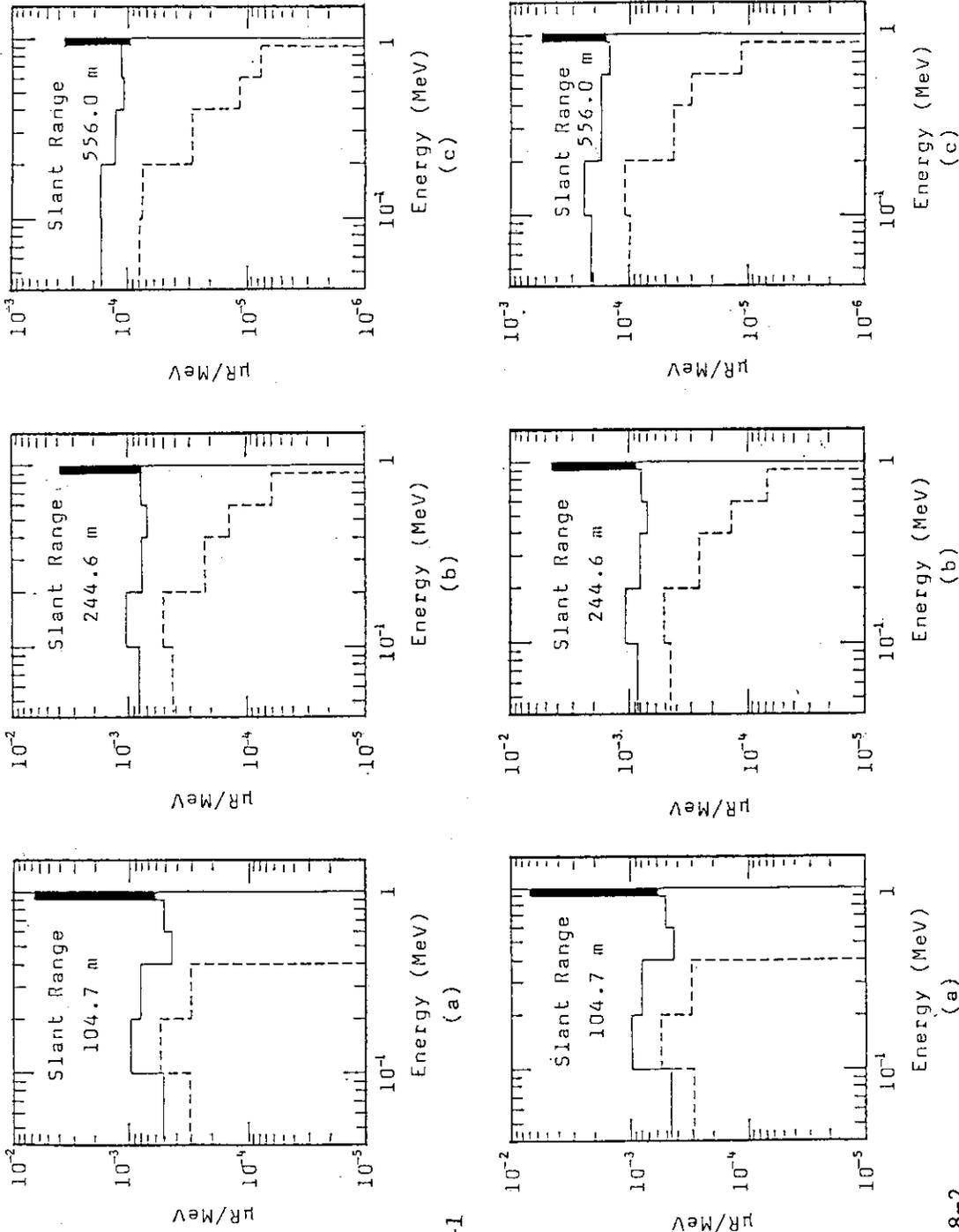


Fig. 38-1

Fig. 38-2

— Total Component - - - - - Direct Component - - - - - Soil-Scattered Component

Fig. 38 Energy distribution of number of photons. Two cases are considered for atmospheric temperature, one is 5 °C (Fig. 38-1), another 25 °C (Fig. 38-2). Slant ranges are taken to be (a) 104.7 m, (b) 244.6 m and (c) 556.0 m. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

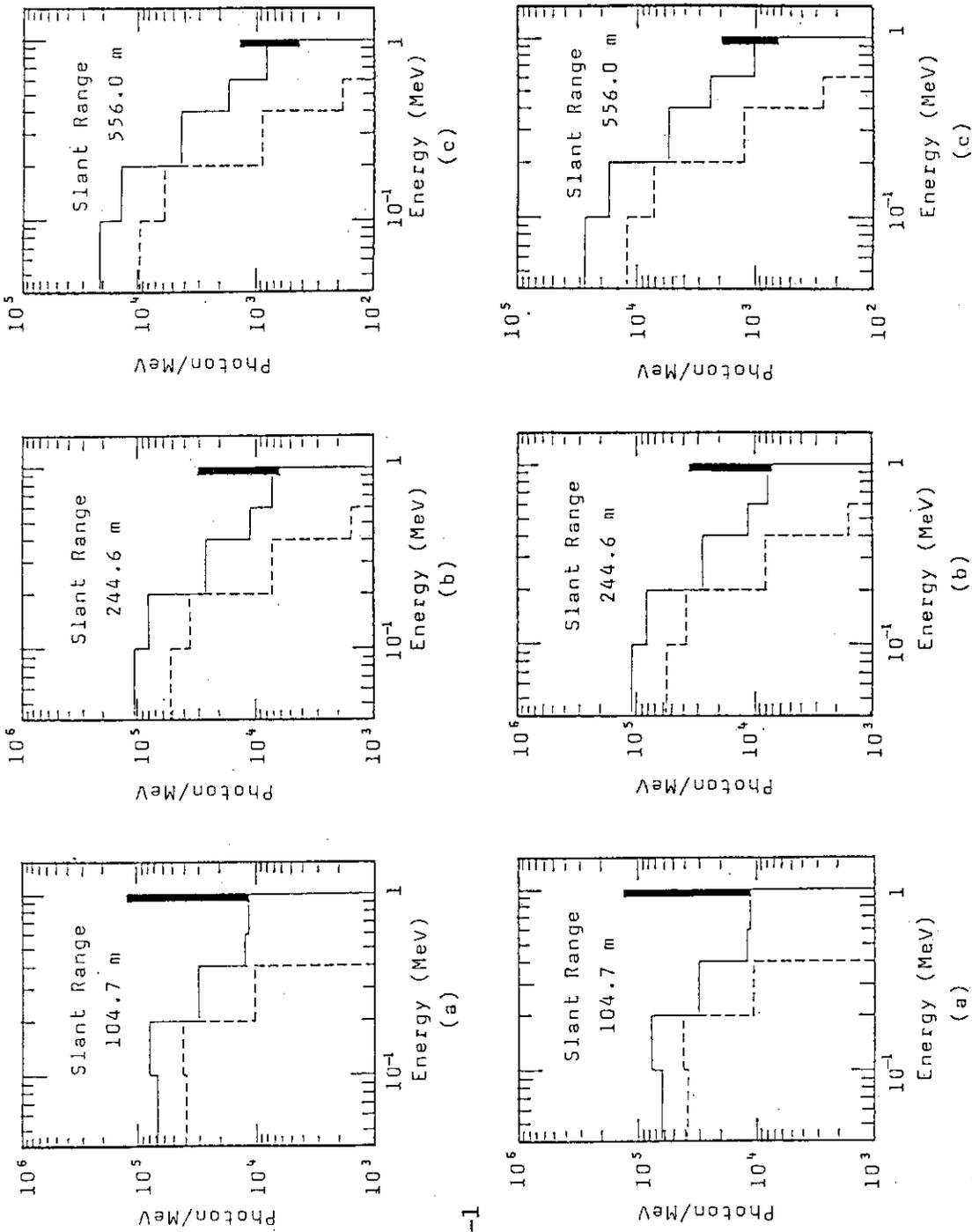


Fig. 39-1

Fig. 39-2

Fig. 39 Energy distribution of exposure. Two cases are considered for atmospheric temperature, one is 5 °C (Fig. 39-1), another 25 °C (Fig. 39-2). Slant ranges are taken to be (a) 104.7 m, (b) 244.6 m and (c) 556.0 m. A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

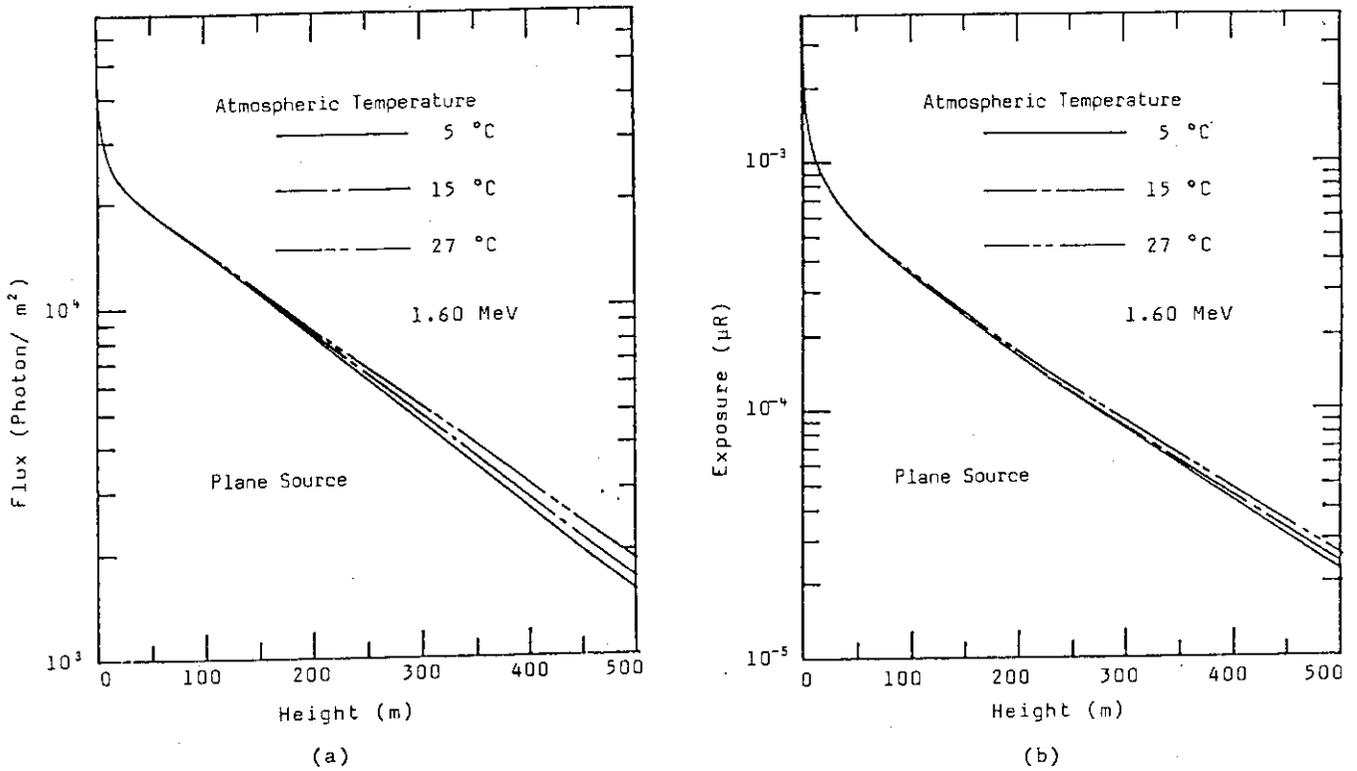


Fig.40 Effect of change in atmospheric temperature on (a) flux and (b) exposure. Values of temperature are taken to be (1) 5 °C, (2) 15 °C and (3) 27 °C. 1.60-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed on the ground surface.

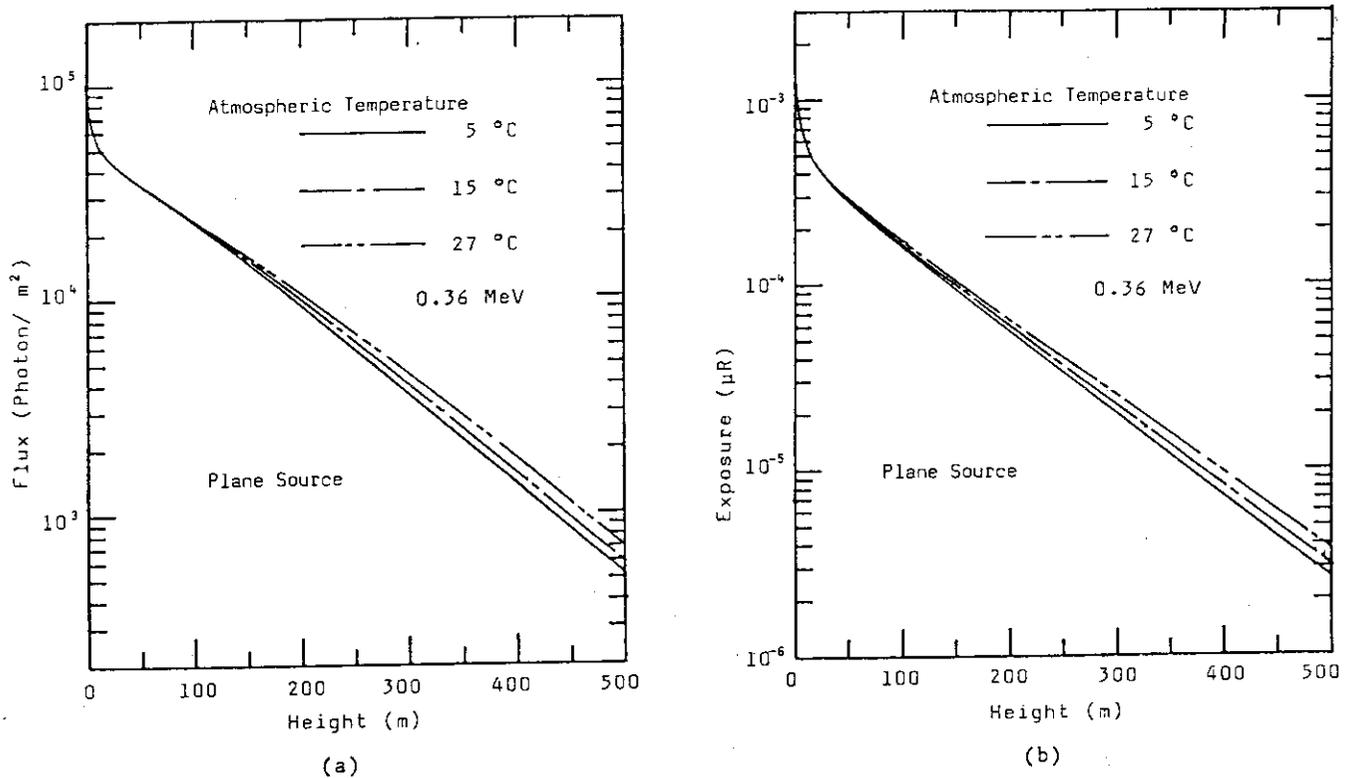


Fig.41 Effect of change in atmospheric temperature on (a) flux and (b) exposure. Values of temperature are taken to be (1) 5 °C, (2) 15 °C and (3) 27 °C. 0.36-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed on the ground surface.

と線源の真下（直線距離 104.7 m）では空気と一度も反応を起こさなかった光子が多く、スペクトル強度及びスペクトル形状もほとんど変化しない。しかし、距離が増加するにしたがって気温上昇の影響が現われ全体的にスペクトル強度が増加するがスペクトル形状は気温が上昇してもほとんど変化しない。

(b) 地表面一様分布線源

Fig. 40, 41 は 1.60 MeV, 0.36 MeV の地表面一様分布線源に対する線束及び線量の結果である。地表面から高度 100 m 程度の範囲では線束及び線量はほとんど変化しないが、それ以上の高度では線束及び線量とも気温により変化し、変化の割合は高度上昇にしたがって増加していく。この気温による線束及び線量の変化の割合は空中点線源の場合と同様にガンマ線のエネルギーが高いほど小さい。例えば(2)の場合を基準にする高度 500 m の範囲内では線束及び線量ともに 1.60 MeV のガンマ線に対して(1)の場合が 0～7% 程度の減少を、(3)の場合が 0～10% 程度の増加を示す。これに対して 0.36 MeV のガンマ線では線束及び線量ともに(1)の場合で 0～10% 数% 程度の減少を、(3)の場合では 0～25% 程度の増加を示している。気温によるエネルギースペクトルの変化の傾向は空中点線源の場合と同様であり、変化するのは全体的なスペクトル強度でスペクトル形状にはほとんど変化がみられない。

気温の日較差は普通 10℃ 未満であるが地域によっては 10℃ を越えることもあるので上記で述べたガンマ線諸量の変化は日常的な気象変化によっても容易に生じると考えられる。したがって環境ガンマ線の測定及び計算時には気温変化に注意し必要に応じて結果の補正もしなければならない。

また気温変化は海拔差によっても生じるので、海拔の高い地域のガンマ線諸量を問題とする場合も注意しなければならない。

3.7 湿度の変化による影響

大気中の水蒸気圧（相対湿度）を変化させて、ガンマ線諸量の計算を行なった。水蒸気圧は 15℃ の飽和水蒸気圧 17.04 mb に対して(1)7 mb, (2)10 mb, (3)13 mb の 3 ケースを考えた。相対湿度ではそれぞれ(1)41.1%, (2)58.7%, (3)76.3% の場合に対応する。1 MeV の空中点線源及び 1.60 MeV, 0.36 MeV の地表面一様分布線源に対する線束及び線量の計算結果を Fig. 42～44 に示す。図を参照すると湿度が 41.1% から 76.3% に 35% 程度変化しても線束及び線量はほとんど変化しない。

湿度の変化によって水蒸気の質量がどの程度変化するかを考えてみる。気圧 1013 mb, 水蒸気圧 10 mb の場合の比湿は計算により 6.16×10^{-3} であり、これは空気 1 g あたり得水蒸気の質量に等しい。水蒸気圧が 13 mb になったとすると比湿は 8.02×10^{-3} に増加する。しかし、このように相対湿度が 58.7% から 76.3% に約 18% 増加して比湿が約 30% 増加しても空気密度は約 0.1% しか減少しない。したがって空気の質量はほとんど変化しないと考えてよい。この例からわかるように空気の質量は湿度の変化によってほとんど変化せず、空気と水蒸気の質量減衰係数も光電吸収部分を除いてあまり変わらないので湿度が変化してもガンマ線諸量はほとんど変化しないと考えられる。この結果は土壌中一様分布線源についてもみられ、湿度変化によるガンマ線諸量の変動はほとんどみられない。

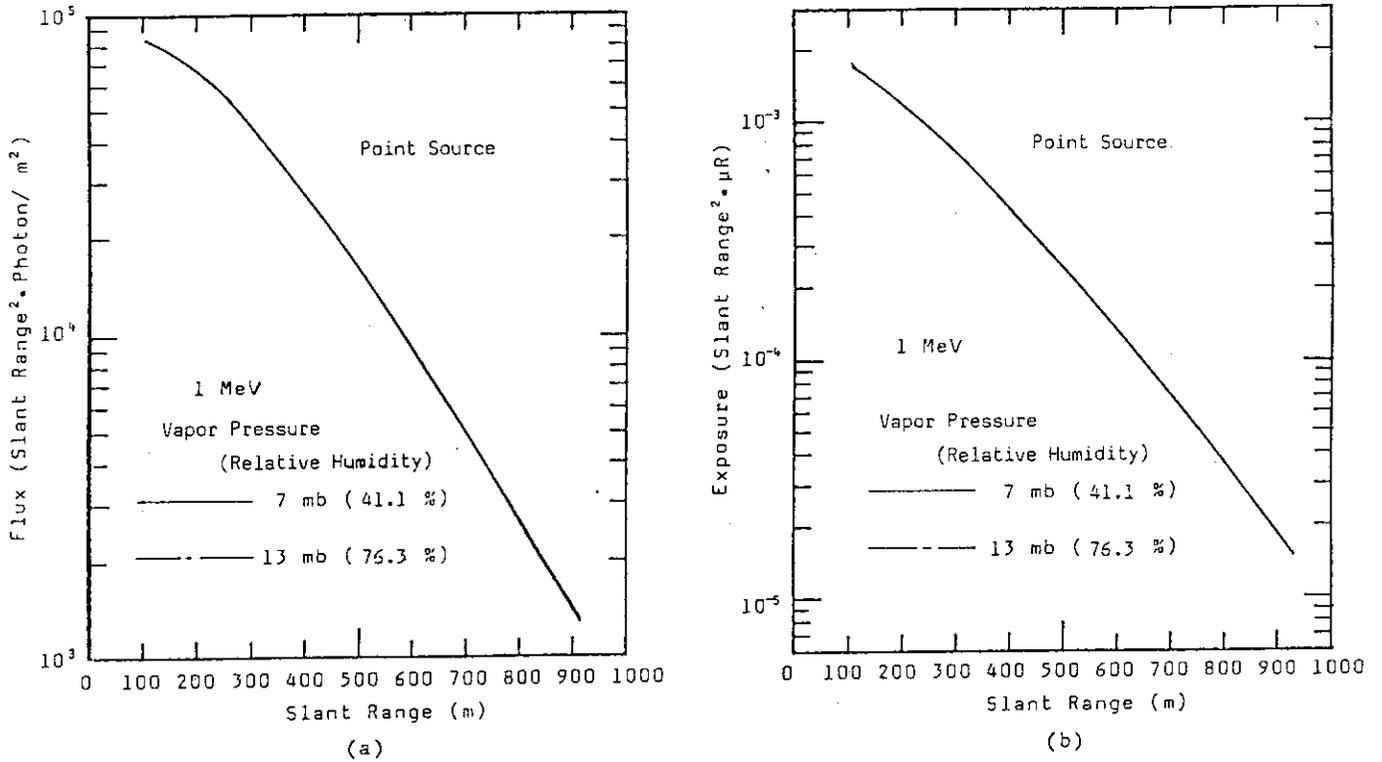


Fig.42 Effect of change in vapor pressure (relative humidity) on (a) flux and (b) exposure. Values of vapor pressure (relative humidity) are taken to be (1) 7 mb (41.1 %) and (2) 13 mb (76.3 %). A 1.0-MeV gamma-ray point source and detectors are considered to be located at 100 m and 1 m above the ground surface respectively.

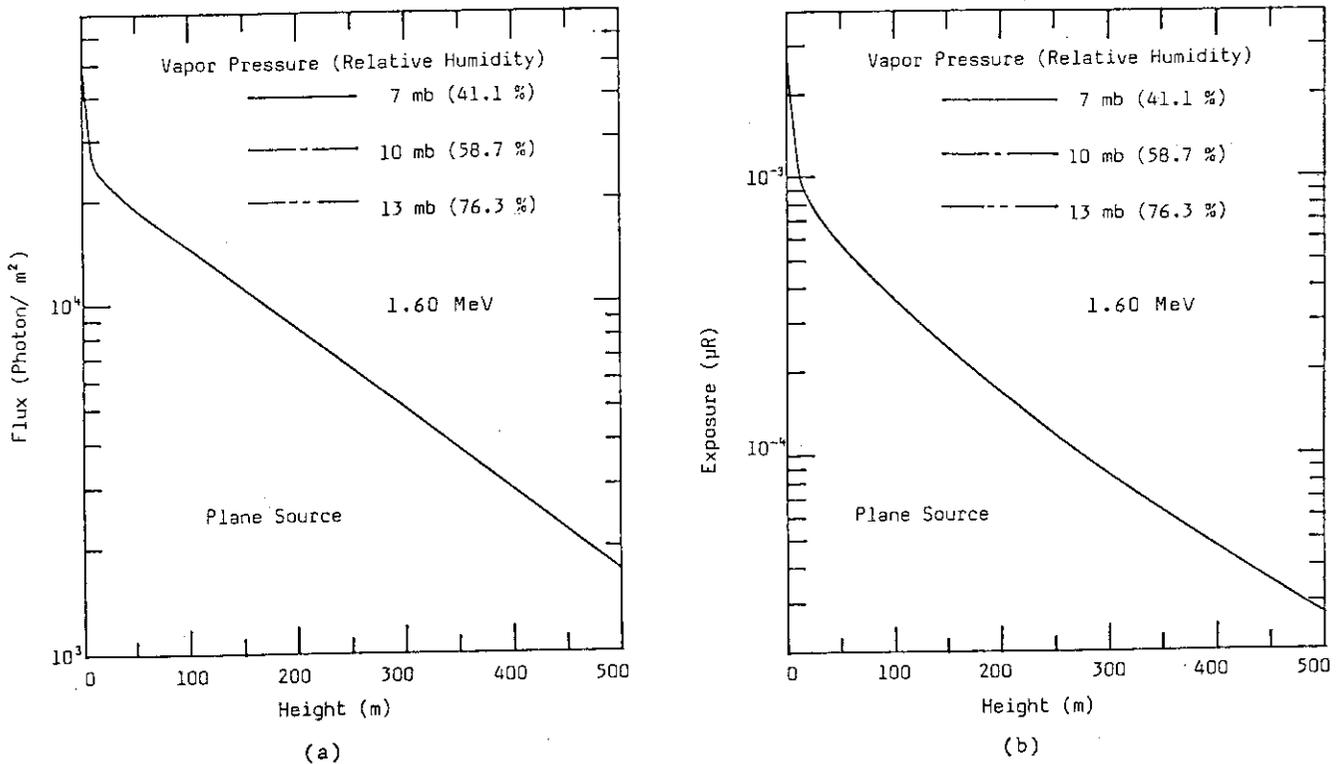


Fig.43 Effect of change in vapor pressure (relative humidity) on (a) flux and (b) exposure. Values of vapor pressure (relative humidity) are taken to be (1) 7 mb (41.1 %), (2) 10 mb (58.7 %) and (3) 13 mb (76.3 %). 1.60-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed on the ground surface.

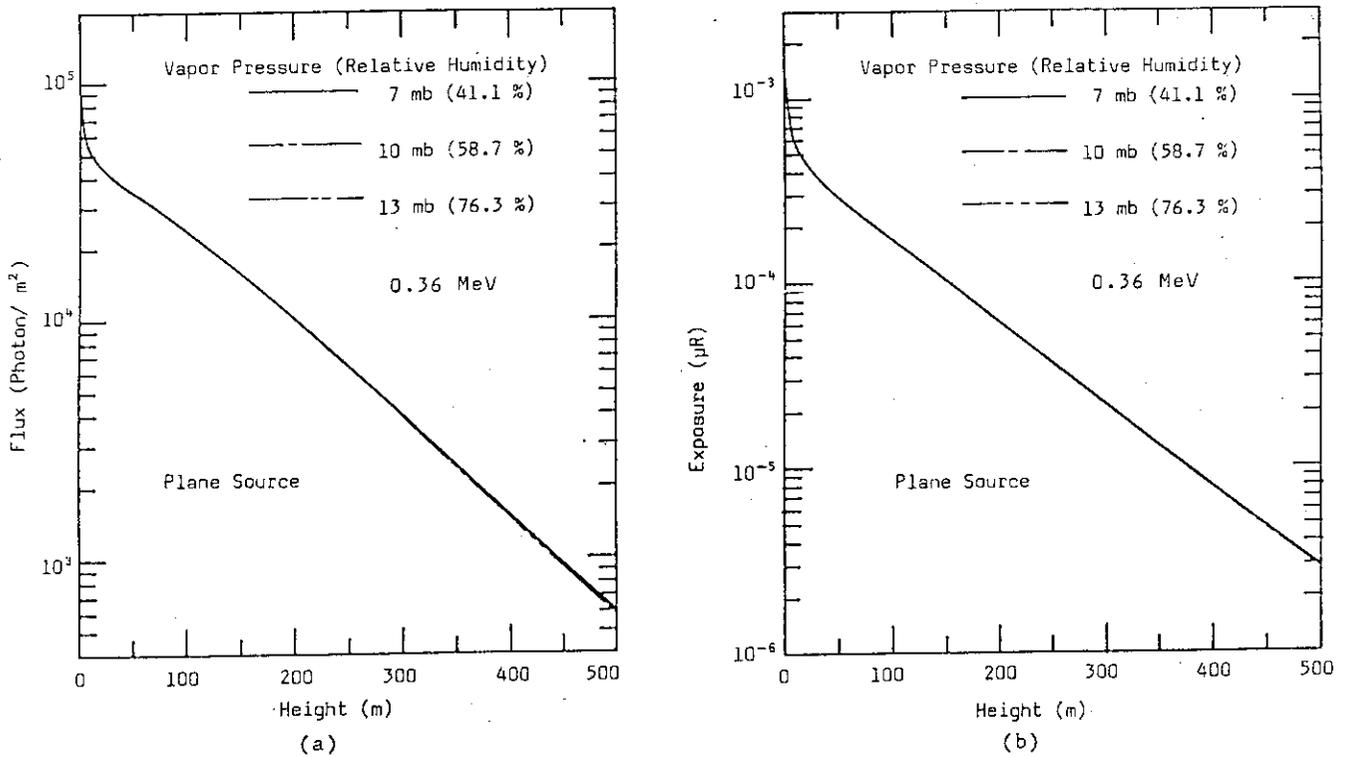


Fig.44 Effect of change in vapor pressure (relative humidity) on (a) flux and (b) exposure. Values of vapor pressure (relative humidity) are taken to be (1) 7 mb (41.1%), (2) 10 mb (58.7%) and (3) 13 mb (76.3%). 0.36-MeV gamma-ray sources are considered to be uniformly distributed on the ground surface.

4. 結 論

計算結果の考察により以下の事がわかった。

(1) 自然環境中でガンマ線の諸量を変動させる環境パラメータの変化として

- a. 気温による空気密度の変化
- b. 土壌中の水の重量比の変化
(土壌中一様分布線源の場合)
- c. 気圧変化(海拔高度差に起因する)による空気密度の変化

の3つが重要であり、他のパラメータの影響は通常、無視できることがわかった。

(2) 気温による変化では1 MeVの空中点線源に対して気温が10度上昇すると線源から600m前後の距離内では線束及び線量とも0~20%程度増加する。気温が高いほど、線源エネルギーが低いほど線束及び線量の変化は増加する。地表面一様分布線源及び土壌中一様分布線源についても同様の変化が高度に対して現われた。

土壌中一様分布線源について水の重量比を20%程度増加させると線束及び線量ともに20%あまり減少し、この変化の割合は高度についてはほぼ一定である。

海拔差による気圧変化の影響は大きく海拔1000mでは線源からの距離が300mの範囲内で線束及び線量ともに1.0 MeV空中点線源で0~20%程度0.1 MeV空中点線源で0~50%程度増加する。

(3) 光子数、線量に対するエネルギースペクトルでは気温及び水の重量比の変化は全体のスペクトル強度を変化させるが、相対的なスペクトル形状にはほとんど影響を与えない。またこのスペクトル強度の変化は線源からの距離あるいは高度とともに増加する。これに対して Fe_2O_3 重量組成比の変化は低エネルギー領域の光子数を大きく変動させ、地表面付近の線束を変化させる。しかし、低エネルギー領域を除いて線量についてのエネルギースペクトルはほとんど変化しない

謝 辞

本報告書の作成に際し、御指導を頂いた環境安全研究部今井和彦部長に深く感謝します。また、環境第1研究室の長岡 鋭、坂本隆一、堤 正博各氏からは終始、有益な助言を頂きましたのでここで感謝の意を表します。

4. 結 論

計算結果の考察により以下の事がわかった。

(1) 自然環境中でガンマ線の諸量を変動させる環境パラメータの変化として

- a. 気温による空気密度の変化
- b. 土壌中の水の重量比の変化
(土壌中一様分布線源の場合)
- c. 気圧変化(海拔高度差に起因する)による空気密度の変化

の3つが重要であり、他のパラメータの影響は通常、無視できることがわかった。

(2) 気温による変化では1 MeVの空中点線源に対して気温が10度上昇すると線源から600m前後の距離内では線束及び線量とも0~20%程度増加する。気温が高いほど、線源エネルギーが低いほど線束及び線量の変化は増加する。地表面一様分布線源及び土壌中一様分布線源についても同様の変化が高度に対して現われた。

土壌中一様分布線源について水の重量比を20%程度増加させると線束及び線量ともに20%あまり減少し、この変化の割合は高度についてはほぼ一定である。

海拔差による気圧変化の影響は大きく海拔1000mでは線源からの距離が300mの範囲内で線束及び線量ともに1.0 MeV空中点線源で0~20%程度0.1 MeV空中点線源で0~50%程度増加する。

(3) 光子数、線量に対するエネルギースペクトルでは気温及び水の重量比の変化は全体のスペクトル強度を変化させるが、相対的なスペクトル形状にはほとんど影響を与えない。またこのスペクトル強度の変化は線源からの距離あるいは高度とともに増加する。これに対して Fe_2O_3 重量組成比の変化は低エネルギー領域の光子数を大きく変動させ、地表面付近の線束を変化させる。しかし、低エネルギー領域を除いて線量についてのエネルギースペクトルはほとんど変化しない

謝 辞

本報告書の作成に際し、御指導を頂いた環境安全研究部今井和彦部長に深く感謝します。また、環境第1研究室の長岡 鋭、坂本隆一、堤 正博各氏からは終始、有益な助言を頂きましたのでここで感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) H. L. Beck and G. de Planque : The Radiation Field in Air due to distributed Gamma-Ray Sources in the Ground , HASL-195 (1968)
- (2) H. L. Beck : The Physics of Environmental Gamma Radiation Fields, "The Natural Radiation Environment" (II) , CONF-720805, P101 (1974)
- (3) H. L. Beck , J. Decampo and C. Gogolak : In Site Ge (Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry , HASL-258 (1972)
- (4) H. L. Beck et al. : Further Studies of External Environmental Radiation , HASL-170 (1966)
- (5) S. Minato : Analysis of Time Variations in Natural Background Gamma Radiation Flux Density , J. Nucl. Sci. Technol. , Vol. 17, No. 6, 461 (1980)
- (6) S. Minato : Some Observations of the Variations in Natural Gamma Radiation Due to Rainfall, "The Natural Radiation Environment" (III) , CONF-780422, P370 (1978)
- (7) K. Saito and S. Moriuchi , to be published
- (8) F. F. Haywood, J. A. Auxier and E. T. Loy : An Experimental Investigation of the Spatial Distribution of Dose in Air-over-Ground Geometry, CEX-6214, USAEC (1964)
- (9) 長岡 鋭他 : 昭和58年日本原子力学会要旨集, E19 (1983)
- (10) 斎藤公明, 森内 茂 : 日本保健物理学会第17回研究発表会要旨集, B27 (1982)
- (11) 斎藤公明他 : 昭和58年日本原子力学会要旨集, E20 (1983)
- (12) E. Storm and H. I. Israel , LA-3753 (1967)
- (13) C. Eisenhauer : Proposed Experiment to Measure Effect of Ground Roughness on the Dose Rate from Fallout Radiation , Health Phys. , Vol. 19, 503 (1963)
- (14) J. E. Hill : Effect of Environment in Reducing Dose Rate Produced by Radioactive Fallout from Nuclear Explosion , The Rand Corporation Research Memorandum RM-1285-1
- (15) Ionizing radiation : sources and biological effects, UNSCEAR 1982 Rep. , (1982)
- (16) 笠井 篤, 森内 茂, 松下紘三 : 東海村周辺のバックグラウンド放射線量の調査, 保健物理の活動, JAERI-5014, P96, (1964)
- (17) N. Yamagata and K. Iwashima : Terrestrial Background Radiation in Japan, Health Phys. , Vol. 13, 1145 (1967)
- (18) Ionizing radiation : sources and biological effects , UNSCEAR 1977 Rep. , (1977)

- (19) G. de. Planque : TLD Measurement and Model Calculations of Environmental Radiation Exposure Rates , " The Natural Radiation Environment " (Ⅲ) , CONF-780422, P987 (1980)
- (20) D. T. Oakley : Natural Radiation Exposure in the United States , ORP/SID 72-1, P18 (1972)
- (21) Environmental Radiation Measurements : NCRP Rept. No.50, (1976), National Council on Radiation Protection and Measurements.
- (22) S. Minato : Monte Carlo Calculation of Gamma Radiation Field Due to Precipitation Washout of Radon Daughters from the Atmosphere to the Ground Surface , Hoken Butsuri , Vol. 15, P19 (1980)
- (23) A. L. Frank : Gamma-Radiation Characteristics-Angular Distribution over a Desert Terrain Fallout Field , Health Phys. Vol. 12, P1715(1966)
- (24) R. L. French : Gamma-Ray Energy and Angular Distributions above Fallout, Health Phys. Vol. 11, P369 (1965)
- (25) 桂山幸典：原子力施設周辺環境放射線の基準化，日本原子力学会誌，Vol. 18, No.6, P346 (1976)
- (26) 早川博信：福井県における原子力発電所周辺の環境放射線連続モニタリング，日本原子力学会誌，Vol. 25, No.9, P709 (1983)
- (27) 湊 進：環境 γ 線制御因子の季節変動図，日本原子力学会誌，Vol. 25, No.8, P637 (1983)
- (28) 藤波直人，江波 忍：空間 γ 線量率の変動原因について，京都府衛公研年報，第23号 (1978)
- (29) 藤波直人，江波 忍：空間 γ 線量率の変動原因について(Ⅱ)，京都府衛公研年報，第24号 (1979)
- (30) 原子力工業データ・シート，原子力工業，Vol. 23, No.8, P102 (1977)
- (31) 山本義一：“気象学概論”，朝倉書店 (1974)
- (32) 東京天文台：昭和58年理科年表 (1983)