

報 文

539.16 : 550.835

空 中 放 射 能 探 査 の 研 究

佐 野 凌 一*

A Study on Airborne Radioactivity Surveying

by

Shun-ichi Sano

Abstract

The airborne radioactivity surveys by the Geological Survey of Japan have already covered the area of about 90,000 sq. km. In the course of the surveys, the writer encountered several technical problems. He carried on several calculations concerning the distributions of gamma ray intensity in the air, based on a semi-empirical theory containing the effect of scattering. The paper on results of these calculations written in English will be published. (Rept. Geol. Surv. J., No. 188) However, the results are also described in this paper with several applications to practical problems.

The effect of terrain topography, atmospheric radioactive substance and thin surface layer to the altitude correction of gamma ray intensity are mainly discussed. The analysis of anomalous gamma ray intensity and the selection of the interval of flight lines are briefly discussed.

The experimental airborne surveys concerning the surveying over very rough terrain and the local survey by using twin-engine aircraft were carried out and the procedures and results are also referred.

要 旨

散乱を考慮した半経験的な γ 線の減衰の理論に基づいて、幾つかの理想的な形の線源による空中における γ 線強度の分布を計算した。理論に含まれている基本的な常数は実験によって求められた γ 線強度と高度との関係に適合するように定められた。計算の結果に基づいて広い範囲に亘つた一様な線源の上空における γ 線強度と高度との関係について議論し、高度補正について検討した。地形の変化、ごく薄い表層の存在および空気中の放射性物質の量の変化が高度補正に影響を与えると考えられた。また空中探査における γ 線強度の異常の解析や測線間隔のとり方などについても簡単に述べた。

秋田県および新潟県において行なわれた急峻な山岳地帯における探査、および大型飛行機による精査に関する試験的な空中探査について附記した。

1. 緒 言

核原料資源探査のために地質調査所が空中放射能探査

を開始して以来、昭和34年度までに約90,000 km²の地域を探査した。昭和30年度における試験的な調査に基づいて一応決定された探査の方法や、その基礎となる考え方についてはすでに発表されているが⁹⁾¹⁶⁾、探査の進行に伴なつてなおいろいな問題に遭遇した。筆者はこれらの問題を解決する一助として、また探査結果の解析を確実にするために、地表に分布する放射性物質による空中の γ 線強度分布に関する簡単な理論的計算を行なつた。この結果については別に英文で発表する予定であるが、本稿にも幾らかの具体的な議論を附加して記載してある。

また、昭和33年8月に実施された新潟県および山形県における空中放射能探査に当つて、実験的な調査を行なつた。この調査は本稿の主体をなす理論的計算に対する実験というよりも、むしろ特殊な探査飛行に関する実験であるが理論的計算とも関連があるので、その経過および結果を附記した。もし多くの数値計算を実行する機会があれば、理論と実験とを充分比較することができるであろう。

* 物理探査部

2. γ 線の減衰

2.1 γ 線の減衰の法則

γ 線が媒質中を通過するとき吸収・散乱されて減衰する。 γ 線の吸収や散乱に関する法則はよく知られているから、媒質中の γ 線の行動をしらべて減衰を計算することができる。したがって、いろいろな形の γ 線源による γ 線強度の分布を求めることができる。しかし、計算を簡単にするために、微小な線源からの距離だけの函数だけで表わされる減衰の法則を与え、 γ 線源の形について積分することによって任意の線源による γ 線強度を求めることが広く行なわれている。

このような法則のうちで、基本的でありまた広く用いられてきたものが、逆自乗一指数法則である。ところが、散乱される γ 線の影響によつてこの法則からの偏差があることが指摘され、これを補正するために build up factor が附加される。

空中放射能探査に関する理論的研究において、最初に散乱の影響を含んだ減衰の法則を採用した研究は、おそらく J. C. Cook⁹⁾によるものであろう。その減衰の法則は、点源を広い媒質中に浸した場合の γ 線強度の減衰の実験値を天然放射性元素からの γ 線の実効エネルギーに対する減衰に引直したものに適合するようにした実験式である。一方、J. F. Steljes⁷⁾は逆自乗一指数法則において、高度によつて吸収係数の値を変えらることによつて散乱の影響を含めることができると考え、Ra の点源からの γ 線の空気中における減衰を測定して、幾つかの高度範囲について吸収係数の値を求めた。

ところが、A. Y. Sakakura¹⁵⁾は、このように、点源を用いて1つの媒質中での実験によつて定められた減衰の法則が、地中に分布している実際に測定の対象となる線源に対して成り立つという保証がないことを指摘し、実際的な線源に対する実験によつて減衰の法則を求めた。Cook や Steljes の法則は実際に地中に分布している放射線源によつて求められた法則より著しい γ 線強度の減衰を与えるようである。

Sakakura は、媒質の境界面において生ずるいろいろな理論的な困難を避けるという意味で、地中の深さの方向に一樣に分布している無限に厚い線源だけを考えた。基本的な型の線源として、“広い線源”，すなわち半無限体と“微小な線源”，すなわち地中に鉛直に埋められた半無限の直線とを採用し、このような線源による空気中の γ 線強度の実験値によつて減衰の法則を決定した。その法則の型式は“微小な線源”に対して U. Fano⁶⁾が提唱した多項式近似に従つて与えられ、そのなかの常数の

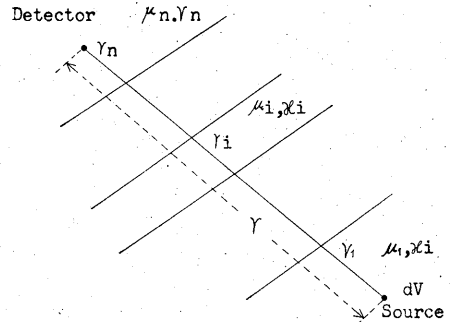
値が実験によつて決定される。

Sakakura の基本式は形式的に点源に対する式に還元することができるが、その結果は逆自乗一指数法則に距離の二次式である build up factor を結合した場合にほかならない。ところが、その一次項の係数があらかじめ与えられているので、実験によつて決められる常数の数は build up factor が一次式の場合と同じである。また天然 γ 線の測定に関する問題で取り扱われる γ 線の透過距離は、實際上平均距離(線数係数の逆数)の数倍程度までであるから、build up factor として距離の一次式を用いれば充分であると思われる²⁾。

したがって、本論文では、逆自乗一指数法則に距離の一次式である build up factor を結合した点源に対する減衰の法則を採用し、地中に分布する γ 線源による空中における γ 線強度と高度との関係について議論する。線源が無限に厚い場合ばかりでなく、有限の厚さの場合も取り扱う。

2.2 法則の記述と基本式

前節の考察に従つて次のような減衰の法則が与えられる。



第1図 微小な体積に含まれている γ 線源 Source in an elementary volume

記号の意味を、第1図にみられるように、

- I : 検出器によつて測定される γ 線強度
- I_0 : 検出器の感度と放射線源の物質の性質に関する常数
- σ : γ 線源中の放射性物質の含有量
- r : 検出器と線源との間の距離
- r_i : 検出器と線源とを結ぶ線分がある媒質を通過する長さ
- μ : その媒質の線吸収係数
- κ : その媒質の散乱の常数
- n : 検出器と線源とを結ぶ線分が通過する媒質の数
- dV : 体積要素

とする。点状検出器によつて測定される体積要素に含まれている γ 線源による γ 線強度は

$$I = I_0 \sigma \left(e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i r_i} + \sum_{i=1}^n \kappa_i \mu_i r_i e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i r_i} \right) dV$$

$$= I_0 \sigma \left(1 + \sum_{i=1}^n \kappa_i \mu_i r_i \right) e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i r_i} dV \quad (1)$$

である。こゝで、build up factor は $1 + \sum_{i=1}^n \kappa_i \mu_i r_i$ で、

$\left(I_0 \sigma e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i r_i} \right) / 4\pi r^2$ は吸収項、 $I_0 \sigma \sum_{i=1}^n (\kappa_i \mu_i r_i) e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i r_i} / 4\pi r^2$ は散乱項と呼ぶことができる。

最も重要な天然放射性元素であるU系列およびTh系列からの γ 線はいろいろのエネルギーをもっているが、吸収係数や散乱の常数はたゞ1つの値で代表されるものとする。Fanoの多項式近似の考え方に従えば、吸収係数として最も透過力の強い γ 線に対する値を採るべきであつて、この場合に散乱項は透過力の弱い γ 線の影響をも含んでいる。

U系列やTh系列の場合にはその最大エネルギー、すなわちそれぞれ約2.4 MeV および約2.6 MeV の γ 線に対する吸収係数の値を用いることになる。この2つの γ 線のエネルギーに対する吸収係数の値はあまり違わないから、両系列に対して同じ吸収係数を用いてさしつかえない。U系列は放射平衡にない場合もあるが、その γ 線の大部分は ^{222}Rn の崩壊生成物から放出されるので、エネルギースペクトルが非平衡によつて著しく変化する場合も少ないと考えてよい。また、U系列とTh系列とのエネルギースペクトルは、人工放射性核種からの γ 線のそれと較べると、むしろ互いに類似しているといふことができる。したがつて、U系列が平衡にない場合や、U系列とTh系列とが共存している場合にも、吸収係数および散乱の常数は同じ値を使うことができると考えられる。

放射性物質の含有量、あるいは品位 σ はウラン当量、すなわち% eU で表わされることが多い。このような σ の単位を用いると、検出器の感度と放射線源の物質の性質とによる常数 I_0 は、U系列の非平衡の程度やU系列とTh系列とが共存する割合などによつて、変化する。

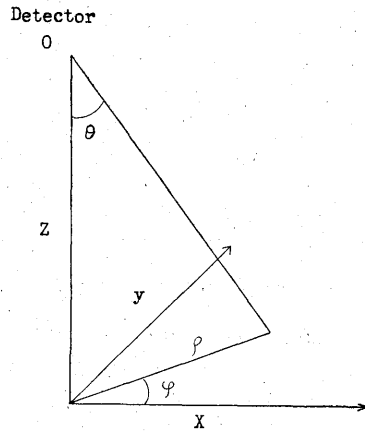
散乱の常数 κ_i は媒質の種類ばかりでなく検出器の性質、おもにエネルギー感度に関係し、 γ 線強度が線量率で表わされる場合以外には、検出器によつて変化する。

検出器は線源に近接していない限り点状と考えられる。検出器がそれを頂点とする角の函数で表わされる指向性をもつ場合には、指向性を示す函数が常数 I_0 に含まれるものとする。検出器の形や大きさによる指向性

は、検出器のエネルギー感度の方向依存性を無視すれば、検出器の大きさが無視できる距離では、實際上消失する。したがつて、実際上問題となる指向性は検出器容器の吸収の差異によるものとか、とくに遮蔽を施すことによつて生ずるものとかである。

2.3 座標系と積分函数

任意の体積に分布する γ 線源による γ 線強度を計算するために、基本式(1)を線源の体積について積分する。線源の表面が平面である場合に、第2図に示すような円錐座標系と呼ぶことができる1種の曲線座標系(Z, θ, φ)



第2図 座標系
Co-ordinate systems

を用いると便利なことが多い。円錐座標系(Z, θ, φ)と原点およびZ軸を共有する直角座標系(x, y, z)との関係は

$$x = Z \tan \theta \cos \varphi, \quad y = Z \tan \theta \sin \varphi, \quad z = Z \quad (2)$$

で表わされ、したがつて体積要素については

$$dV = dx dy dz = Z^2 \tan^2 \theta \sec^2 \theta dZ d\theta d\varphi$$

$$= Z^2 \sec \theta dZ d(\sec \theta) d\varphi \quad (3)$$

である。

座標系(Z, θ, φ)の原点を検出器に置き、Z軸を線源の表面に垂直にとる。媒質の境界がすべてZ軸に垂直であれば、基本式(1)は

$$I = \frac{I_0 \sigma}{4\pi} \left(1 + \sum_{i=1}^n \kappa_i \mu_i Z_i \sec \theta \right) e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i Z_i \sec \theta} \frac{dZ d(\sec \theta) d\varphi}{\sec \theta}$$

となる。こゝで、

$$r_i = Z_i \sec \theta$$

である。Zに関する積分は簡単に求められる。 θ および φ がZに無関係で、検出器が無指向性か、 $\cos^2 \theta$ で表わされる指向性ないし φ のみの函数で表わされる指向性をもつ場合には、積分の結果はよく知られた積分函数である指数積分

$$E_n(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-\zeta}}{\zeta^n} d\zeta \quad (4)$$

で表わされる。

検出器が $\sin^m \theta$ で表わされる指向性をもつ場合には、積分函数

$$E'_{m,n}(x) = \int_{\zeta=x}^{\zeta=\infty} \sqrt{(a^2 \zeta^2 - a^2)^m / (a \zeta)^n} \cdot e^{-a \zeta} d(a \zeta) \quad (5)$$

を使うと前の場合と同じような形で積分結果を表わすことができる。 $\sin^m \theta$ 型の指向性は前記のような座標の配置で $\cos^m \theta$ 型に較べて感度が悪いから、実用的でない。したがって、この積分函数の数値計算は行なわなかった。しかし $\sin^m \theta$ 型と $\cos^m \theta$ 型とは本質的に同じであつて、線源の形と検出器の位置との関係によつて $\cos^m \theta$ 型が $\sin^m \theta$ 型に変わるから、この函数の数値は必ずしも不必要ではない。

数値計算の便宜のために指数積分の数値表を附録として加えた。

3. 基本式中の常数の決定

3.1 広い線源による常数の決定

最初に“広い線源”，すなわち半無限体に一樣に放射性物質が分布している場合を考える。附加され、また変更される記号は次のとおりである。

- I^B : 広い線源による γ 線強度
 - μ_a : 空気の線吸収係数
 - μ_1 : 線源(地層)の線吸収係数, すなわち自己吸収係数
 - α_a : 空気の散乱の常数
 - α_1 : 線源(地層)の散乱の常数
 - Z_0 : 検出器の高度
- 無指向性の場合

$$I^B = (1 + \kappa_1) \frac{I_0 \sigma}{2 \mu_1} (\mu_a Z_0) E_2(\mu_a Z_0) + \kappa_a \frac{I_0 \sigma}{2 \mu_1} (\mu_a Z_0) E_1(\mu_a Z_0) \quad (6)$$

である。指向性をもつ場合は英文報告註1)の(6), (8)および(9)式に示されている。

ここで地層の吸収係数 μ_1 は常数係数の分母だけに含まれている。したがつて、吸収係数 μ_1 が変化しても γ 線強度が変化し、あたかも品位 σ が変化したようにみえる。線吸収係数は物質を構成する元素の原子量と物質の密度によつて変化する。原子量が非常に大きいか、とくに小さい時以外は線吸収係数は原子量によつてほとんど変化せず、密度に比例して変化する。ところが、密度

註1) “On the Distribution of Gamma Ray Intensity due to Natural Radioactivity near the Earth's Surface”, 地質調査所報告, No. 188

の変化、したがつて線吸収係数 μ_1 の変化は問題となるような品位 σ の変化に比較して小さく、普通には γ 線強度によつて直ちに品位 σ の比較ができると考えるのである。

また散乱項の積分のうちで地層の散乱の常数を含む項は吸収項とは同じ形になる。こうして地層に関する常数はすべて常数係数中に含まれ、広い線源上の γ 線強度と高度との関係には直接関係しない。このことは後に述べるように無限に厚い線源について一般に成立する。

広い線源上の γ 線強度と高度との関係は、一樣な地層の平地の上空で測定することができる。このような測定の精度をよくするためには、 γ 線強度が強い、したがつて地層の品位が高いことが必要であり、また、地層以外からの測定値に対する影響を同時に測定できることが望ましい。

したがつて、わが国でこのような測定に適した場所として日本海岸の砂浜があげられる。実際に測定を行なつたのは新潟県新潟飛行場の東北に当る阿賀野川河口北岸の砂浜の上空である。海岸線に直角に、それから陸上および海上におのおの約4 km にわたる測線を取り、高度65~500 m で測定を繰り返した。検出器の配置については、正常の位置のほかに横に倒した場合も測定したが、 γ 線強度の変化は認められなかつた。したがつて、検出器の指向性はないと考えられる。

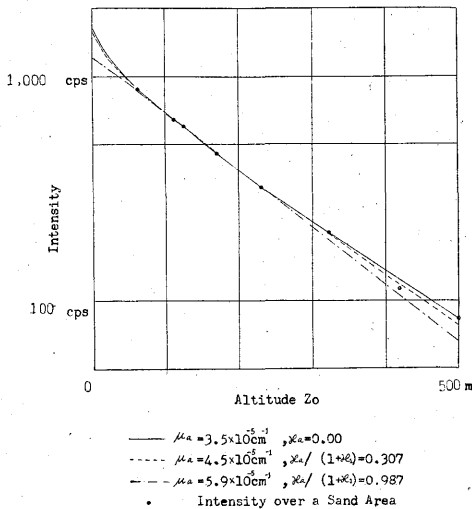
測定された計数率から砂浜による γ 線強度を求めるために海上の計数率をさしひいた。海上の計数率は海上における飛行高度や海岸からの距離によらないで一定であり、また約1週間の調査期間中変化しなかつた。海上の計数率はゼロ・バックグラウンドと呼ばれ、測定装置に関する常数として取り扱われている。

この砂浜にはU系列ばかりでなく Th 系列も含まれていると考えられる。United States Atomic Energy Commission および United States Geological Survey で行なわれた実験では広い線源としてほとんどU系列だけを含む頁岩が選ばれ、高度100~1,000 feet にわたつて測定が行なわれた¹⁰⁾¹⁵⁾。その結果と日本海岸の砂浜の上空における実験の結果とはよく一致している。U. S. Geological Survey で用いられている検出器(シンチレーション・カウンタ)の螢光体は4'φ×2'のNaI(Tl)であつて、地質調査所で使用されているものとはほぼ同じであるから、エネルギー感度もほぼ同様であると考えられる。したがつて、両者の結果が一致することはU系列に対しても、Th 系列に対しても、同じ基本式の常数が用いられることを示していると考えられる。

実際に使用されている検出器は無指向性であるから、

広い線源上の γ 線強度 I^B は(6)で表わされる。空気の吸収係数 μ_a を与えると $(\mu_a z_0) E_2(\mu_a Z_0)$ および $(\mu_a Z_0) E_1(\mu_a Z_0)$ が計算されるから、 $I_0 \sigma (1 + \kappa_1) / (2\mu_1)$ および $I_0 \sigma \kappa_a / (2\mu_1)$ を実測値に合うように、例えば最小自乗法によつて、定めることができる。したがつて、 $(1 + \kappa_1) / \kappa_a$ が求められる。 κ_a を決めるには別の種類の実験から κ_1 を求める必要があるが、無限に厚い線源を扱う限り、 κ_a と κ_1 とを独立に求める必要はない。

U系列の最大エネルギーの γ 線に対する空気の線吸収係数の値として、Sakakura は $4.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ ($=1.46 \times 10^{-5} \text{feet}^{-1}$) という値を採用した。Cook はU系列の γ 線の実効エネルギーを 1.8 MeV と考え、 $5.9 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ という値を用いた。また、空気の“true”吸収係数^{註2)}として計算されている値¹⁾はエネルギーによつてあまり変化せず、1 MeV の付近で $3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ である。 μ_a の値としてこれらの3つの値を取つて $\kappa_a / (1 + \kappa_1)$ の値を求め



第3図 広い線源上の強度と高度との関係
Relationships between intensity and altitude for a broad source

註2) 混合物または化合物の質量の吸収係数 μ_m は、そのなかの i 番目の元素についての吸収係数を $\mu_m^{(i)}$ 、 i 番目の元素が含まれている割合を $a^{(i)}$ とすると、

$$\mu_m = \sum_i \mu_m^{(i)} a^{(i)}$$

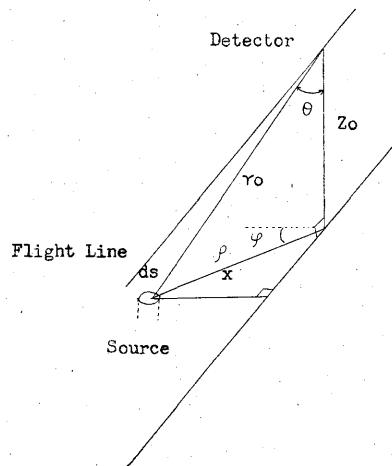
によつて計算される。“true”吸収係数 μ^* は $\mu^* = (N/A_i) (Z_i a \sigma_e + \tau_a + \kappa_a)$ で計算されたものであつて、 N はアボガドロの数、 A_i および Z_i はそれぞれ i 番目の元素の原子量および原子番号、 $a \sigma_e$ はコンプトン電子吸収係数、 τ_a および κ_a はそれぞれ光電効果および電子対生成による原子吸収係数である。

ると、第1表のようになる。求められた常数の値から強度と高度との関係を計算すると、第3図に示すように、 $\mu_a = 4.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ および $\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ の場合は互いにほとんど一致しているが、 $\mu_a = 5.9 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ の場合はほかの2つの場合と幾分異なつている。また、最後の場合には約300m以上で実験値との差異がやゝ大きいことが認められる。

測定された高度で $\mu_a Z_0$ は1のオーダーであるから、 κ_a が1のオーダーであれば $(1 + \kappa_a \mu_a Z_0)$ という形の build up factor は妥当である。 $\mu_a = 4.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ の場合に $\kappa_1 = 1$ とすると $\kappa_a = 0.614$ であつて、物理的にもつともらしい結果を与える。一方、 $\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ の場合には $\kappa_a = 0$ となり、散乱項が無視される。したがつて、適当な吸収係数の値を用いることによつて、逆自乗指数法則を近似法則として採用することができる。こゝで取り扱う理論は現象論であるから、計算を簡単にするために散乱項を無視できるような常数を採用する方が得策であると考えられる。たゞし、こゝではまだ地層の散乱の常数 $\kappa_1 = 0$ とすることができるという保証は得られていない。

3.2 厚い線源に対する基本式

第4図のように広い線源の表面に標座標系 (ρ, φ) をとり、その原点を検出器から表面に下した垂線の足に置



第4図 微小な表面積の無限に厚い線源(小さな厚い線源)
Small thick source

く。検出器から表面上の点までの距離を r_0 とする。広い線源に対する式(6)を求める途中で、 Z について積分をしたところで変数を変換すると、

$$I^B = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left\{ (1 + \kappa_1) \frac{I_0 \sigma}{4\pi \mu_1} \cos \theta \frac{e^{-\mu_a r_0}}{r_0^2} \right.$$

$$+ \kappa_a \frac{I_0 \sigma}{4\pi \mu_1} (\mu_a r_0) \frac{e^{-\mu_a r_0}}{r_0^2} \} \rho d\rho d\varphi$$

となる。ここで $\rho d\rho d\varphi$ に表面上の面積要素 dS にほかならない。そこで、無限に厚い線源の場合に、線源中の放射性物質が表面に濃縮されたかのように考え、微小な表面積 dS をもつ線源に対する基本式として、

$$I_T = \frac{I_0 \sigma}{\mu_1} (1 + \kappa_1 + \kappa_a \mu_a r_0) \cos\theta \frac{e^{-\mu_a r_0}}{4\pi r_0^2} dS \quad (7)$$

を用いることができる。この線源は検出器と微小面積 dS の周囲とを含む錐面と表面とで囲まれる部分を代表しているが、地層の自己吸収によつて地層中の表面に近いごく浅い部分だけが空中の γ 線強度に影響を与える。したがつて、地表面より下の線源の形を問題にする必要はほとんど無いし、実際上たいていの線源を無限に厚い線源として取り扱うことができると考えられる。すなわち、ここで導かれた基本式は空中における γ 線強度の計算の多くの場合に用いることができる。

build up factor として距離の二次式を考え、媒質が空気と地層との2つである場合に点源に対する基本式を

$$I = I_0 \sigma \{ 1 + \kappa_1 \mu_1 r_1 + \kappa_a \mu_a r_a + \lambda_1 (\mu_1 r_1)^2 + \lambda_a (\mu_a r_a)^2 \} \frac{e^{-(\mu_1 r_1 + \mu_a r_a)}}{4\pi r^2} dV$$

とする。ここで、 λ_1 および λ_a は build up factor の二次項に対する常数である。前と同様にして無限に厚い線源に対する基本式を導くと、

$$I_T = \frac{I_0 \sigma}{\mu_1} \{ 1 + \kappa_1 + \lambda_1 + \kappa_a \mu_a r_0 + \lambda_a (\mu_a r_0)^2 \} \frac{e^{-\mu_1 r_0}}{4\pi r^2} \cos\theta dS$$

となる。これは Sakakura¹⁵⁾ の用いた基本式と同じ形である。ただし彼は

$$(1 + \kappa_1 + \lambda_1) / \mu_1 = 1 \quad \text{および} \quad \kappa_a / \mu_1 = 1$$

と置いている。

さて、無限に厚い線源を簡単のために厚い線源と呼ぶことにしよう。厚い線源に対する基本式 (7) を円柱座標系で表わすと、

$$I_T = \frac{I_0 \sigma}{4\pi \mu_1} \left\{ (1 + \kappa_1) \frac{e^{-\mu_a Z_0 \sec\theta}}{\sec^2\theta} + \kappa_a \mu_a Z_0 \frac{e^{-\mu_a Z_0 \sec\theta}}{\sec\theta} \right\} d(\sec\theta) d\varphi \quad (8)$$

となる。ここで Z_0 は前に述べたように検出器の空中での高さである。厚い線源は表面に濃縮されたように考えることができるから、厚い線源を表面の形によつて代表させることができる。

また、厚い線源の場合には2つの常数 $I_0(1 + \kappa_1) / 2\mu_1$ および $I_0 \kappa_a / 2\mu_1$ の値がわかつていれば、空中の γ 線強度を計算することができる。これらの常数の値は品位 σ

のわかっている広い線源による実験から求めることができる。前節で述べた実験が行なわれた日本海岸の砂浜の品位を $8 \times 10^{-4} \% \text{eU}$ とすれば、現在地質調査所で使われている検出器について、 $\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ のとき、 $I_0(1 + \kappa_1) / 2\mu_1 = 2.0 \times 10^6 \text{cps} / (\% \text{eU})$ および $I_0 \kappa_a / 2\mu_1 = 0$ であり、 $\mu_a = 4.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ のとき、 $I_0(1 + \kappa_1) / 2\mu_1 = 1.9 \times 10^6 \text{cps} / (\% \text{eU})$ および $I_0 \kappa_a / 2\mu_1 = 5.9 \times 10^5 \text{cps} / (\% \text{eU})$ である。

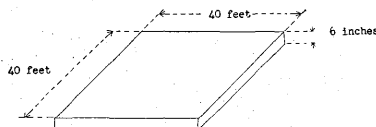
厚い線源は地表面の分布で代表されるから、地表面が平面で検出器の高さが Z_0 であるとき品位 σ が

$$\sigma = \sum_{m, n} \sigma_{m, n} \frac{\cos^m \theta}{\sin^m \theta} \frac{\cos^n \varphi}{\sin^n \varphi}$$

で表わされるとすれば、 γ 線強度は広い線源上の指向性をもつ検出器によるそれと同様な形で表わすことができる。

3.3 小さな厚い線源による常数の決定

前節の考察によれば、任意の厚い線源の上空での実験によつて基本式の常数を決定することができる。United States Atomic Energy Commission および United States Geological Survey では 0.35% U_3O_8 を含む鉱石(カルノ石)を用いて第5図のような1辺40'厚さ6"の正方形板状の線源を人工的に作り、 γ 線強度の測定を行なつ



第5図 U. S. Atomic Energy Commission によつて人工的に作られた板状線源
Actual elementary slab source (U. S. Atomic Energy Commission)

た。Sakakura はこの線源が微小な表面積をもつ厚い線源であると考え、広い線源によつて求めた散乱に関する常数を使つて実験値から品位を求めるための常数を決定した。

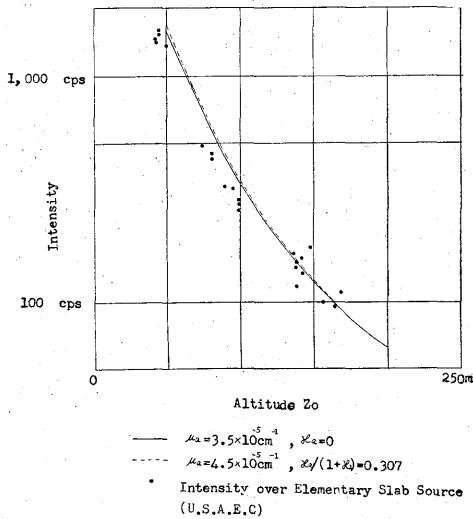
矩形板状線源による γ 線強度を計算するために、検出器を頂点とし頂点と矩形板の上の表面の周囲とを通る直線を母線とする角錐を矩形板の2つの表面で切り取つた角錐台によつて矩形板を置き換える。検出器の高度が充分高い場合にはこの置換はよい近似であると考えられ、また、厚い線源に対する基本式 (10) を導いた時の考え方に対応している。このような考え方で矩形板状線源による γ 線強度を計算できる。線源の厚さが無限大とすると計算式は簡単になる。

正方形板状源の大きさが高度に比較して小さければ、厚い線源の基本式をそのまま使つてもよい。これらの考え方による計算式は英文報告の (11), (12) および (21) に示されている。

前に述べた人工の板状線源について計算してみると、

これらの3つの式による計算結果はほとんど一致する。したがって、この人工の線源は実際上厚い微小な線源とみなされる。

$\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ で $\kappa_a = 0$ および $\mu_a = 4.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ で $\kappa_a / (1 + \kappa_1) = 0.307$ とした場合について、人工正方形板状線源の中心上における γ 線強度と高度との関係を実験の結果と比較すると、第6図のように高度 150 m 付近の実験値に合うような常数を用いた時、高度 100 m 以下の実験値と幾分ずれてくる。しかし、高度 100 m 程度以下の実験値にはレートメータの動特性の影響が認



第6図 人工板状線源の中心上の強度と高度との関係
Relationships between intensity and altitude
for the actual elementary slab source

められるということであるから、むしろ実験と計算とはよく合っていると考えられる。したがって、品位 σ の値がわかっているから高度 150 m 付近の実験値によって United States Geological Survey で使っている検出器について $I_0(1 + \kappa_1) / 2\mu_1$ および $I_0\kappa_a / 2\mu_1$ の値を決めることができる。それらの値を用いて広い線源として用いられた頁岩の品位を求めることができ、その結果は第1表に示すように試料の化学分析による品位 0.0017 %U およびウラン当量 0.0013 %eU とかなりよく合っている。

第 1 表

μ_a (cm^{-1})	$\kappa_a / (1 + \kappa_1)$	σ (%eU) of Mancos shale
3.5×10^{-5}	0.000	0.0015
4.5×10^{-5}	0.307	0.0015
5.9×10^{-5}	0.987	0.0014

4. 拡がった線源に対する γ 線強度と高度との関係

4.1 強度—高度曲線

空中放射能探査において、岩石のように拡がった線源の放射能強度を比較することは鉱床の露出のように狭い線源による γ 線強度の異常をみいだすことと同様に重要であると考えられる。とくに大型飛行機を使つた高高度探査では狭い線源による異常強度を測定することは困難であつて、岩石の放射能強度分布を調査して鉱床が賦存する可能性がある地域を選出することがおもな目的となる。

したがって、探査を行なつた地域の測定結果全部について高度補正を行なう必要がある。対地高度を一定にして飛行することは望ましいが、わが国のように地形の変化の著しい所ではこのような飛行は困難である。

高度補正は γ 線強度と高度との関係が、広い線源の上空における関係に従っているものとして行なわれる。現在地質調査所で実施している高度補正に使われている強度と高度との関係は、日本海岸の砂浜で実験的に求められたものと一致している。ところが、実際の線源は必ずしも広い線源と同等であるとは限らないから、強度と高度との関係も広い線源の上空の関係と異なる場合があり、したがって高度補正をすることによって誤つた結果を得ることになる。

狭い範囲に局限された線源や2つの実質的に広い線源の境界付近の上空では、当然広い線源の上空での強度と高度との関係は成立しない。小さい線源による γ 線強度の変化に対しては別の解析法を採用すべきであり、このような解析法については幾つかの研究がある。高度補正の誤差として問題になるのは広い範囲に拡がった線源が広い線源と異なつた性質をもつ場合であつて、もつと具体的にいえば、無限に厚い線源と考えられない場合とか、表面が平面でなく地形の変化がある場合とかである。

γ 線強度と高度との関係は強度の対数を縦軸に、高度を横軸にとつた片対数グラフ上の曲線として示される。これを強度—高度曲線と呼ぶことにする。強度—高度曲線の形は $I_0\sigma$ に無関係で、強度と高度との関係の特徴を表わしているといふことができる。広い線源の上空の γ 線強度は近似的に高度の指数関数で表わされ、強度—高度曲線はほぼ直線になる。例えばこの近似的な直線の勾配が変化すると、高度補正の誤差を生ずる。

強度—高度曲線の変化は、空気の密度の変化による線吸収係数 μ_0 および散乱の常数 κ_0 の変化や、地層の散乱の常数 κ_1 の変化によつても生ずる。しかし、これらの影響は無視できるものと考えられる。したがって、拡

がった線源が広い線源の条件に適合しないために起きる強度-高度曲線の変化をおもに考えることにする。

アメリカやソビエトでは簡単な Analog computer を使って飛行中に自動的に高度補正が行なわれている。地質調査所でも連続的に高度補正を行なう装置を具体的に計画したことがあつた註3)。このような装置は強度-高度曲線が一定であることを前提としている。アメリカやソビエトのように広大なかつ平坦な地域で行なわれる空中探査では飛行高度はほとんど一定に保たれるので、僅かな高度の偏差による強度の変化を補正すればよい。しかし、わが国では1測線中の高度変化が数100mの範囲にわたることがまれでないから、一定の強度-高度曲線による自動的な計算は望ましいことではないという考えによつて中止された。

4.2 広い線源の境界における強度-高度曲線

強度-高度曲線の形が明らかに変化する場合として、2つの实际的に広い線源が直線状の境界で相接している場合の境界線付近での γ 線強度の変化を求める。次のような記号を附加し、または意味を変更する。

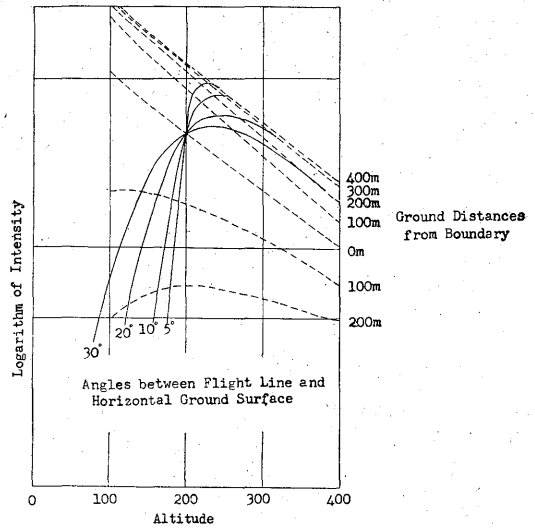
- σ_1 および σ_2 : 2つの实际的に広い線源の品位
- μ_1 および μ_2 : 2つの实际的に広い線源の物質の吸収係数
- κ_1 および κ_2 : 2つの实际的に広い線源の物質の散乱の常数
- x : 検出器の境界源からの水平距離

γ 線強度 $I^{B'}$ は英文報告の(20)で与えられる。 $\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$, $\kappa_a = 0$ および $\sigma_2 = 0$ の場合について Z_0 の幾つかの値に対して $I^{B'}$ の x による変化が計算され、英文報告の第14図に示されている。これらの強度変化は、例えば、一定高度の測線が海岸線を垂直に横断している場合に測定される。

この場合に、添字1で表わされる線源の上空では境界内の近くでも強度-高度曲線の形はあまり変わらないが、添字2で表わされる品位 $\sigma_2 = 0$ の線源の上空では強度-高度曲線の形は著しく変化し、高度が増加すると強度が逆に増加するところがある。1つの測線に沿つての測定値から作られる強度-高度曲線は、測線の高度が一定のとき強度軸(縦軸)に平行な直線となり、測線の高度が $\sigma_2 = 0$ の線源の方向へ一定の割合で減少するとき1つの極大をもつ曲線となる(第7図)。

註3) U. S. Geological Survey で使用されている装置と同様な、特殊な抵抗変化を与える可変抵抗器による入力回路をもつ差動増幅器である。

強度の対数と高度とがほぼ比例するから、計算尺の片側の目盛を改造することによつて高度補正用計算尺を作ることでもできる。



第7図 2つの实际的に広い線源の境界付近での強度-高度曲線
Intensity-altitude curves over the boundary of two effectively broad sources

4.3 表層の影響

半無限体が品位の異なる表層で覆われている場合の計算式は英文報告の(13)および(14)に示されている。そこでは次のような記号が用いられている。

- $I^{B'}$: 層別された半無限体による γ 線強度
- σ_r : r 番目の層の品位
- μ_r : r 番目の層の線吸収係数
- κ_r : r 番目の層の散乱の常数
- Z_r : r 番目の層の下の境界からの検出器の高さ
- m : 層の数

ここで、 m 番目の層の厚さは無限体である。これらの場合には地層に関する常数と空気に関する常数とを独立に与えなければならない。ここでは $\mu_1 = \mu_2 = 0.2 \text{cm}^{-1}$ および $\kappa_1 = \kappa_2 = 1.0$ とした。この吸収係数の値はやゝ大きすぎると思われる。人工放射性層を含む模型坑井で幾つかの検層用検出器によつて実験した結果から求めた吸収係数の値が 0.2cm^{-1} であつたので、この値を採用した。また空気の常数としては、 $\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ および $\kappa_a = 0$ と $\mu_a = 4.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ および $\kappa_a = 0.614$ との2組の値を用いた。

表層の厚さを1cm および10cm とし、 $\sigma_1 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_2/2$, $\sigma_1 = 2\sigma_2$ および $\sigma_2 = 0$ の4つの場合について強度-高度曲線を計算すると英文報告の第8図のようになる。厚さ $d = 1 \text{cm}$ で $\sigma_2 = 0$ の場合と $d = 10 \text{cm}$ で $\sigma_1 = 0$ の場合とを除いて、強度-高度曲線の形はあまり変化しない。 $d = 1 \text{cm}$ で $\sigma_2 = 0$ および $d = 10 \text{cm}$ で $\sigma_1 = 0$ の場合は他の場合と異なつて、強度が相対的に著しく

減少し、曲線の形が空気の常数によつて変化する。これらの結果によれば、厚さが 10 cm 程度の表層は広い線源とほとんど同等で無限に厚いと考へてよい。したがつて実際の線源はたいへい無限に厚いとして取り扱つてよいと考へられる。

表層として最も普通に考へられるものは風化層である。例えば、花崗岩質岩では風化によつて放射能強度が減少することが知られている。しかし風化によつて品位 σ が地表面から数 cm の厚さのところでは数分の 1 になるというようなことはないと思へるので、一般に風化層は σ の一様な無限に厚い線源として取り扱ふことができるであらう。また、水を引いた水田は $\sigma_1=0$ のかなり厚い層で覆われているとみなされる可能性があるが、原則としてこのような地域は探査の対象とはならない。

ところが、最近バックグラウンド放射線研究班などによつて、放射性降下物 (fall-out) が地表面から厚さ 1 cm 位の間に吸着されてきわめて薄い層をなしていることが発見された⁹⁾。このような表層の影響によつて強度-高度曲線が変化することは充分予想される。しかしこのような人工放射性元素の γ 線エネルギースペクトルは天然放射性元素のそれと非常に異なるので、天然放射性元素の場合と同じ常数を使つて計算することはできない。したがつて、放射性降下物の薄い表層による強度-高度曲線の変化を論ずるためには、このような表層の状態がよくわかっているところで実験を行なう必要がある。

4.4 地形の影響

次に、理想的な地形による γ 線強度を求める。まず二次元的な尾根あるいは谷を考へ、次のような記号を附加する。

I^R あるいは I^V : それぞれ理想的な尾根あるいは谷による γ 線強度

Z_0' : 検出器を含む平面の尾根の稜線または谷の底からの高さ

α および β : 尾根または谷を形成する平面と水平面とのなす角

ξ_1 および ξ_2 : 検出器と 2 つの表面の交線とを含む平面が検出器と表面への垂線とを含む平面となす角
 x : 検出器から 2 つの表面の交線までの水平距離
 計算式は英文報告の (24) ないし (35) に示されている。

地形の影響は検出器が尾根の稜線あるいは谷の底の直上にある場合に最も著しい。したがつて、このような場合について $\mu_a=3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ および $\kappa_a=0$ で $\alpha=\beta$ として、いくつかの α の値について強度-高度曲線が求められた。

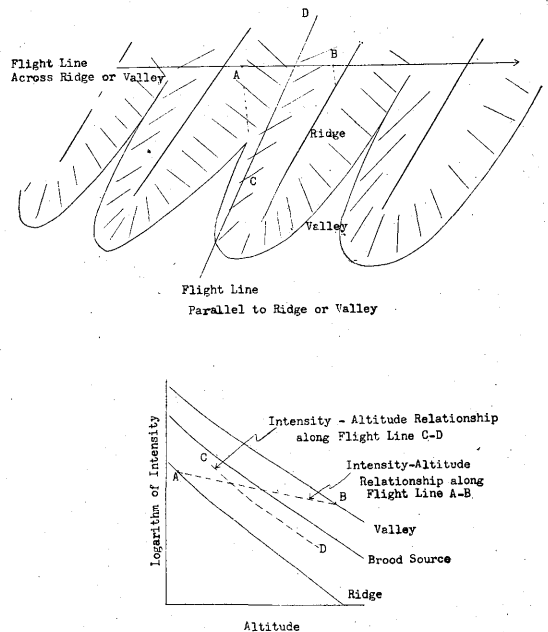
次に、理想的な山の場合として円錐の頂点の上空に検

出器があるときの γ 線強度を考へる。検出器の円錐の頂点からの高さを Z_0 、水平面と円錐面とのなす角を α とすれば、円錐による γ 線強度 I^M は英文報告の (36) のようになる。

$\mu_a=3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ および $\kappa_a=0$ として α のいくつかの値について強度-高度曲線が求められた。

これらの高度-強度曲線は英文報告の第 22 図に示されているように、低空を除いていずれも広い線源に対する高度-強度曲線にほとんど並行している。したがつて理想的な地形の影響を受けている γ 線強度と、広い線源による強度との比は高度にほとんど無関係で、地形表面の傾斜面に依存する。この比は地形補正係数ともみなされ、尾根や山の場合の方が谷の場合よりも地形の影響が著しい。

さて、ほぼ水平な測線が尾根や谷を垂直に横切つている場合を考へると、尾根の上空では高度は低く、 γ 線強度は同じ高度における広い線源による強度より小さく、谷の上空では高度は高く γ 線強度は同じ高度における広い線源による強度より大きい。したがつて、実際に測線に沿つて測定した資料から強度-高度曲線を求めると、広い線源に対する強度-高度曲線より緩やかな傾斜を示す(第 8 図)。また、尾根や谷の方向に平行で高度が変化するような測線に沿つて測定した資料から、強度-高度



第 8 図 測線と地形との方向による強度-高度曲線の傾斜の変化の説明

Interpretation of variation in the intensity-altitude relationships with topography

曲線を求めると、広い線源に対する強度—高度曲線と同じ傾斜を示すはずである。すなわち、測線および地形の方向の関係によつて観測値から求められた強度—高度曲線の形は見掛け上変化する。また孤立した山の上空を飛行する場合にも強度—高度曲線が見掛け上緩やかな傾斜を示すはずである。

このような強度—高度曲線の形の見掛け上の変化は実際に認められた。ただし、谷の上空ではこのような地形の影響が強度—高度曲線の上で明瞭に認められる場合はほとんどないようである。これは、谷による地形の影響は尾根や山の場合に較べて小さく、実際には理想的な連続した谷がないこと、谷は一般に風化物で埋められ品位 σ が減少している傾向があることなどによると考えられる。

現在地質調査所で使用しているような双発飛行機で安全に探査飛行ができる地域は、高度 500 m 程度の山が散在している程度の中岳地帯で、地形図から読み取られる傾斜は 10~30° ぐらいである。この程度の山岳地帯では地形の影響はあまり著しくなく、全面的に地形補正を行なう必要はないと考えられる。もちろん、測定結果を解釈するにあたって地形の影響があることを忘れてはならない。

4.5 空気中の放射性物質

実測値に高度補正を施したり、実測値から強度—高度曲線を求める場合においては、まず測定された計数率のうちから地層からの γ 線による部分だけを取り出さなければならない。海水にはごく微量の放射性物質しか含まれていないので、海上における計数率は航空機の機体や空气中に含まれる放射性物質の影響や宇宙線の影響によるものであると考えられる。同一の測定器と航空機とを用いた場合には、海上における計数率は一般に空間的にも時間的にも変化しない。したがつて、測定された計数率からあらかじめ実測によつて定められた海上の計数率を差引くことによつて地層の放射能による計数率を求めらる。

もし空気中の放射性物質の量が探査地域において空間的・時間的に変化したにもかかわらずその付近の海上の計数率が変化しないか、またはその変化に気付かないで高度補正を行なつたり、強度—高度曲線を求めたりすると、誤つた結果を得るわけである。

さて、空气中に放射性物質が一様に分布している場合に、その物質による γ 線強度は水平面である地表面からの検出器の高さを Z_0 、空气中の放射性物質の濃度を σ_a とすれば、空气中の放射性物質による γ 線強度 I^A は

$$I^A = (1 + \kappa_a) \frac{I_0 \sigma_a}{2\mu_a} \{2 - (\mu_a Z_0) E_2(\mu_a Z_0)\} - \kappa_a \frac{I_0 \sigma_a}{2\mu_a} (\mu_a Z_0) E_1(\mu_a Z_0) \quad (9)$$

である。

3.3 で求めた常数 $(1 + \kappa_1) I_0 / (2\mu_1)$ の値がこの場合にも適用できるものとし、 $\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{cm}$ および $\kappa_a = 0$ 、さらに $\kappa_1 = 1.0$ および $\mu_1 = 0.2 \text{cm}^{-1}$ とする。放射平衡にあるU系列の1%は約 $3 \times 10^{-3} \mu\text{C/g}$ に相当するから、 $I_0 = 6 \times 10^6 \text{cps} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot (\mu\text{C/g})^{-1}$ である。U系列からのほとんどすべての γ 線は ^{222}Rn の崩壊生成物から放出されるから、上記の数値は ^{222}Rn の祖先が存在しない場合にも適用できる。地表付近の空気中の ^{222}Rn 含有量は多くの研究者によつて測定されているが、最近川野が東京都下の田無で注意深い測定^{註4)}を行なつた¹¹⁾。その結果を平均して地表付近の空気中の ^{222}Rn 含有量を $2.4 \times 10^{-13} \mu\text{C/g}$ とし、これを σ_a に等しいとして(38)から I^A を求めると、高度 0 m, 200 m および無限大においてそれぞれ 1.7×10^2 , 3.0×10^2 および $3.4 \times 10^2 \text{cps}$ となる。

海上の計数率は高度によつて変化しないが、計算結果は高度とともに増加する。 σ_a が高度とともに減少するとすれば、 I^A を一定にすることができる。 ^{222}Rn の含有量に関する限りこのような仮定の方がむしろ自然であろう。さて、地質調査所で実施されてきた空中探査において海上の計数率は $2 \times 10^2 \text{cps}$ でほぼ一定であつた。上記の計算結果と較べると、海上の計数率は空气中の ^{222}Rn 崩壊生成物の寄与によるものと思われる。ところが空気中の ^{222}Rn 含有量は大きな変化を示すことが知られていて、空中における放射能強度が時間的に変化した例も発表されている¹²⁾。また空中に浮游する人工放射性物質の影響も見逃すわけにはゆかないであろう。

したがつて、空气中の放射性物質の量の変化によつて強度—高度曲線の見掛け上の変化が起こることを否定することはできない。しかし、空气中の放射性物質の影響については、高度数 100 m 程度の上空における γ 線強度と直接比較できるような資料が充分でないで、詳しい議論を進めることは現在のところ不可能であると思われる。

4.6 指向性の影響

ついでに、検出器に指向性のある場合について広い線源に対する強度—高度曲線を調べてみよう。最も興味の

註4) ^{222}Rn を電離箱へ導いて放射能を測定するさいに水分や崩壊生成物を取除くために吸着剤を使用する。ところが、吸着剤によつて ^{222}Rn も吸着されることが指摘された。川野は吸着剤の影響を検討して吸着剤を用いない標準電離箱を作製した。

ある指向性は遮蔽型であつて、有効部分の開きの角 θ° が 60° , 45° および 30° の場合について(9)によつて計算した。 $\cos^2\theta$ 型で $n=1$ の場合も計算した。これらの計算において $\mu_a=3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ および $\kappa_a=0$ とした。計算結果は英文報告の第9図に示されている。

このように検出器が鉛直方向に感度が高くなるような指向性をもつ場合には、強度—高度曲線の傾斜は無指向性の場合より緩やかになる。とくに遮蔽型の場合には低空においてこの傾向が著しい。この結果は、小型の飛行機やヘリコプターを使つて低空で測定する場合に、検出器を遮蔽して指向性をつけると高度測定の誤差が大きくてもその影響を受けないことを示している。ただし、地表から高度 50 m 程度のところまでの強度と高度との関係についてはまだ実験が行なわれていないので、実際に応用する場合にはまず強度—高度曲線を実測する必要がある。

5. 空中における γ 線強度の分布

5.1 小さな厚い線源

放射性鉱物の露出のように狭い線源による γ 線強度の異常について調べるために、まず小さな厚い線源、すなわち無限に厚く表面積の小さい線源による γ 線強度の分布を求めよう。小さな厚い線源による γ 線強度は厚い線源に対する基本式(7)あるいは(8)から計算できる。

検出器が一定高度 Z_0 で直線に沿つて動く場合を考え次の記号を追加する(第4図)。

I^T : 小さな厚い線源による γ 線強度

x : 水平な地表面に鉛直に投影された検出器の経路、すなわち測線の投影に線源の中心から下した垂線の長さ

y : 測線の投影に線源の中心から下した垂線の足と、検出器から下した垂線の足との間の長さ

dS : 小さな厚い線源の表面積

これらの記号によつて厚い線源に対する基本式を書直して、

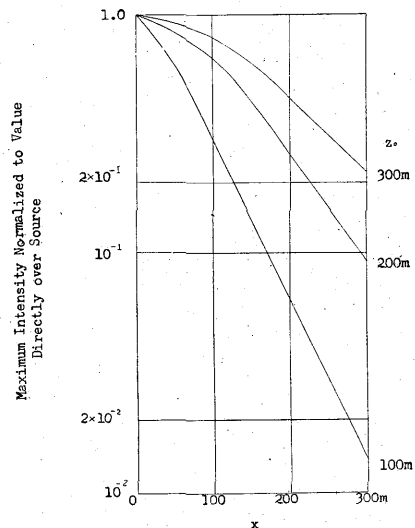
$$I^T = \frac{I_0 \sigma}{4\pi \mu_1} \left\{ (1 + \kappa_1) + \kappa_a \mu_a \sqrt{x^2 + y^2 + Z_0^2} \right\} \frac{Z_0 e^{-\mu_a \sqrt{x^2 + y^2 + Z_0^2}}}{\sqrt{(x^2 + y^2 + Z_0^2)^3}} dS \quad (10)$$

となる。この式によつて $\mu_a=3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ および $\kappa_a=0$ として高度が一定の場合の γ 線強度分布が $Z_0=50 \sim 300 \text{m}$ および $x=0 \sim 300 \text{m}$ の範囲で計算された。 γ 線強度分布の特性を表わす量として、例えば、半値幅および最大強度と同じ品位の広い線源による強度との比をと、英文報告の第16図および第17図に示すように、こ

れらの量と x および Z_0 との関係を求めておけば、実際の γ 線強度の記録と比較して異常強度の解析をすることができ(註5)。しかし、この場合には品位 σ と線源の表面積 dS との積が推定され、この両者を独立に求めることはできない。

ところで、(39)が適用できるような線源の表面積の限界は一定高度について検出器が線源の直上にある時に最小であるはずである。いま線源の表面が円形であるとき、すなわち円状線源の場合に、円状線源に対する式(20)と小さな厚い線源に対する式(39)とによつて計算した結果の差が5%以下であれば、(39)が使用できるとすれば、面積の限界は約 $0.2 Z_0^2$ であつて、円状線源の直径で表わせば約 $0.5 Z_0$ となる。

空中探査において測線間隔を決めるにはいろいろな考え方ができるのであつて、例えば英文報告の第12図に示したような広い線源と同等な円状線源の直径を測線間隔とすることができる。また、小さな厚い線源による γ 線強度の最大値が、線源が測線の鉛直下にある場合の例えば $1/10$ あるいは $1/5$ となるような線源の位置の測線からの最小水平距離の2倍を測線間隔とすることもできる。高度を 200 m とすると、最大値が $1/10$ となるような測線からの距離は約 300 m、最大値が $1/5$ となるような測線からの距離は約 230 m である(第9図)。したがつて高度を 200 m とすると測線間隔は 500 m 程度にと



第9図 小さな厚い線源による最大強度の測線と線源との地上距離による変化
Variations of the maximum intensities from the small thick source with the ground distance between the source and flight lines

註5) 線源が斜面の上にあつても、線源の表面を $Z=0$ の面として x および Z_0 を決めればこれらの図を適用することができる。

ればよいことになる。

鉱床の露出のような狭い線源による異常をよく検出することが望ましいので、上記の2つの測線間隔の決め方のうち後者の考え方を採用した方がよいと考えられる。そうすると測線間隔が狭くなり、探査飛行のさいの目標に乏しくまた見通しの悪い山岳地帯では理論的に導かれる測線間隔を保つことが困難になる。したがって、測定間隔の決定は飛行技術によつて影響され、また探査の能率や経済的な考慮に支配されることが多い。

さて、小さな厚い線源の例として鉱床の露出のようなものをあげたが、空中において検出されるためには地表でかなり広い範囲に拡がっている必要がある。また、ウラン鉱床が露出している場合には風化によつて地下深くに潜在している部分より品位が低く、その代りに放射線強度の異常を示す部分が、露出の周囲に拡がっている場合が多いと思われる。そしてそのような鉱床の露出の品位 σ は 0.01% eU 程度であろうと考えられる。周囲の岩石の品位が 0.001% eU であつて、鉱床の露出すなわち小さな厚い線源がちやうど測線の真下にあるとき、それによる 200 m の高度における γ 線強度の最大値が周囲の岩石による γ 線強度いわゆるバックグラウンドの10倍であるためには、線源の面積は約 11,000 m² でなければならない。また、バックグラウンドの2倍であるためには約 1,200 m² の拡がりをもたなければならない。したがつて鉱床の露出を 200 m の高度から探知することは非常に困難であろうと考えられる。

5.2 無限板状線源

次に、狭い線源の特殊な場合、あるいは拡がつた線源と狭い線源との中間的な場合として、無限板状線源を考えよう(第10図)。

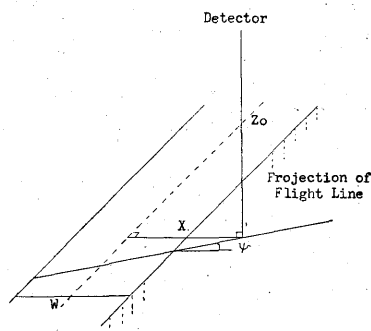
線源の幅を W 、検出器の高度を Z_0 、検出器と線源の中心線との間の最小水平距離を x とし、検出器の経路と線源の中心線とのなす水平面上の角を Ψ とすると、無限板状線源による γ 線強度 I は、

$2x \geq W$ のとき、

$$I = (1 + \kappa_1) \frac{I_0 \sigma}{2\pi \mu_1} (\mu_a Z_0) \int_0^{\pi/2} \{ E_2(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x - W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) - E_2(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x + W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) \} d\varphi \\ + \kappa_a \frac{I_0 \sigma}{2\pi \mu_1} (\mu_a Z_0) \int_0^{\pi/2} \{ E_1(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x - W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) - E_1(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x + W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) \} d\varphi \quad (11)$$

であつて、 $2x \leq W$ のとき

$$I = (1 + \kappa_1) \frac{I_0 \sigma}{2\pi \mu_1} (\mu_a Z_0) [E_2(\mu_a Z_0) \\ - \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \{ E_2(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x - W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) + E_2(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x + W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) \} d\varphi \\ + \kappa_a \frac{I_0 \sigma}{2\pi \mu_1} (\mu_a Z_0) [E_1(\mu_a Z_0) \\ - \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \{ E_1(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x - W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) + E_1(\mu_a \sqrt{Z_0^2 + (2x + W)^2 \sec^2 \Psi \sec^2 \varphi/4}) \} d\varphi \quad (12)$$



第10図 無限板状線源
Infinite slab source

である。この式によつて $\mu_a = 3.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ および $\kappa_a = 0$ とし、高度が一定の場合の γ 線強度分布が $Z_0 = 50 \sim 300 \text{ m}$ および $W = 25 \sim 300 \text{ m}$ の範囲で計算された。

γ 線強度分布の特性を表す量として半値幅および最大強度と同じ品位の広い線源による強度との比をとり、英文報告の第19図および第20図のようにこれらの量と W および Z_0 との関係をもとめておけば実際の γ 線強度の分布と比較して異常強度の解析をなすことができる(註6)。測線と線源の中心線とのなす角 Ψ は相隣る測線における異常強度の位置から求められる。測線と線源とが垂直に交わるときに、高度に対して線源の幅が広ければ、半値幅は線源の幅に等しい。

無限板状線源による γ 線強度分布は測線と線源とが垂直に交わる時には小さな厚い線源によるそれに比較してむしろ急激な変化を示す。小さな厚い線源の場合に線源の位置が測線から外れるとともに γ 線強度の変化は急激に緩やかになるが、無限板状線源の場合には測線は必

註6) これらの図は $\Psi = \pi/2$ の場合を示す。 Ψ が任意の値をとる場合には、英文報告の第20図において x および W をそれぞれ $x \sec \Psi$ および $W \sec \Psi$ で置きかえる。

ず線源の上空を通過するからである。現在までに発見された空中探査による γ 線強度の異常の大部分が、ある方向に長く続いた周囲より幾分品位の高い部分によるものであることは、上記のように無限板状線源やそれに近い線源による γ 線強度の変化が比較的急激で、いわゆる強度の異常として認められやすいということにもよつていふと考えられる。

さて、ここでは小さな厚い線源と無限板状線源とを扱つたが、空中探査の記録を定性的に取り扱うためにはこの2種類の線源による γ 線強度分布を調べておけば充分であろう。5.1で述べたように、1測線に沿つての測定結果だけでは一般に線源の品位と面積とを独立に求めることは不可能である。したがつて、A. Y. Sakakura¹⁵⁾は次のような方法を呈出した。2つの相隣る測線に1つの線源による異常が認められた時、それらの異常の最大値と γ 線強度変化を示す曲線の下面積との4つの量を使つて、線源の型、面積および品位を求めるのである。彼は半値幅や γ 線強度変化曲線の傾斜などは定量的な解析に適合していないことを示した。 γ 線強度変化を示す曲線の下面積は、測定に用いられる計数率計の時定数の影響によつて曲線の形が変化しても、一定であるという特徴をもつていふ。Sakakuraの計算においては基本的な考え方も基本的な常数を決めるための実験結果もほとんど同じであるから、その計算結果は地質調査所における空中探査にも応用できるはずであるが、U. S. Geological Surveyにおける探査の基準に従つて高度が500 feetの場合だけについて計算してあるので、実際にはほとんど利用できない。

空中探査の異常の解析に関する計算の方法には、このほかにもいろいろ考へられている。例えば、G. Cowper¹⁶⁾は小さな厚い線源による γ 線強度の分布をガウス分布曲線によつて置換えることによつて、レーダーの応答の研究に用いられている計算法を応用できるであろうということを目指した。このような方法による研究はソビエトにおいても行なわれている¹⁹⁾。また、重力探査の地形補正の場合のように、地層を多くの細かい部分に分割して計算する方法が瀬谷¹⁷⁾によつて検討されている。ソビエトにおいてはこのような方法の研究も行なわれているようである。

6. 秋田県および新潟県における 空中放射能探査

6.1 目的・位置・地形および地質

秋田市東北方の太平山およびその西方の山岳地帯、秋田市およびその南方の油田地帯および新潟県西山油田付

近において、昭和33年8月に空中放射能探査の実験を行なつた。

太平山およびその隣接地区においては、従来空中探査が実施されていない急峻な山岳地帯における探査の可能性を検討し、併せてその地域に露出する岩石の放射能強度の測定を行なうことを目的とした。この地域には最高1,000 m程度の山岳が連続し、南部の丘陵地帯に向かつて急激に傾斜している。山岳地帯には先第三紀の花崗岩質岩が、それに接して丘陵地帯には新第三紀の堆積岩が分布している¹⁴⁾。ほど東北に走る2つの主要な谷に沿つて2つの測線を設け、また、太平山を中心とする円周状の尾根に囲まれた部分において1つの測線を設けた(第11図)。

秋田市およびその南部の地域においては、現在使用している比較的大型の飛行機による局所的な探査に関する検討を行なうとともに、その地域に露出する岩石の放射能強度の測定を行なうことを目的とした。この地域の北部は水田を主とする平地で、南部は新第三紀の堆積岩で覆われている緩やかな丘陵地帯である¹⁴⁾。東北および西北の方向の互いにほぼ直角な測線群によつてこの地域を覆つた。平行な測線の間隔は約1 kmである。また、一部で間隔500 mの東西に走る測線を設けた(第11、15図)。

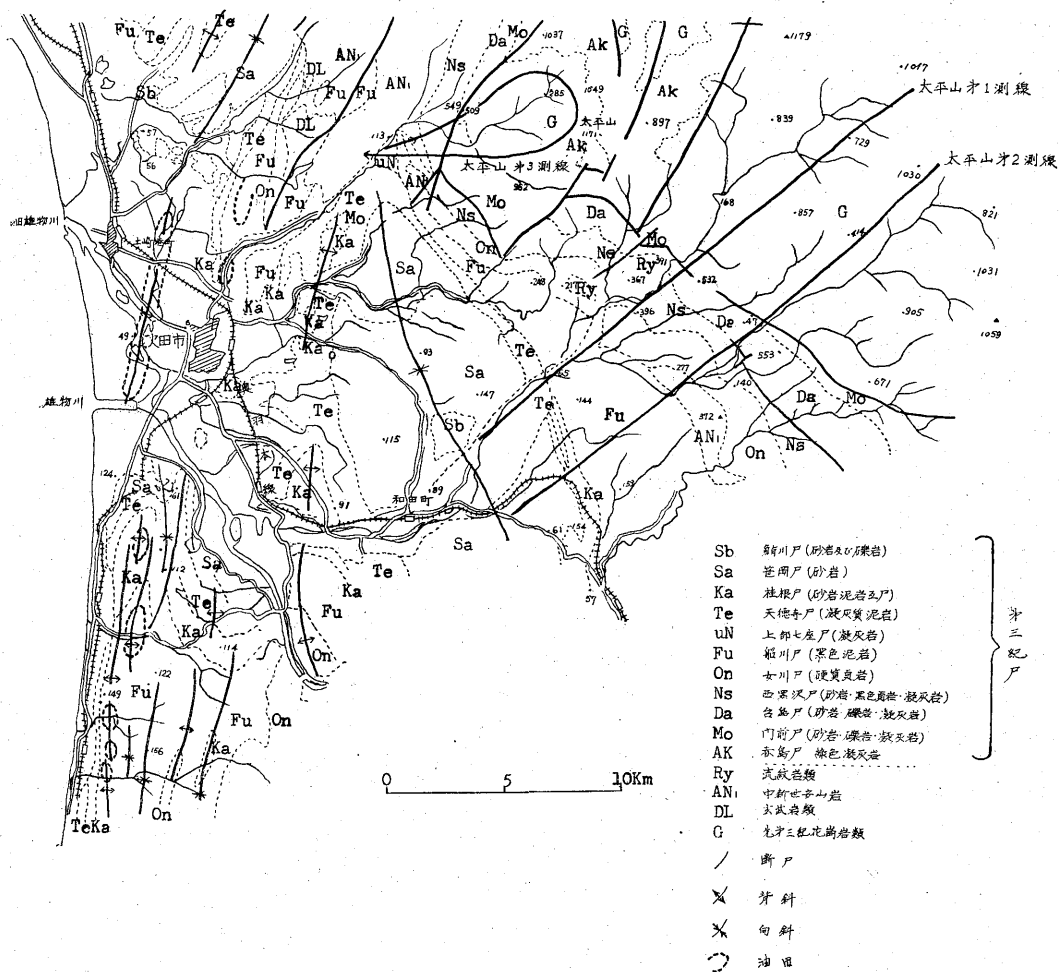
新潟県西山油田付近においても、秋田市およびその南部の地域と同様な目的で探査を実施した。この地域はおもに新第三紀の堆積岩が露出している緩やかな丘陵地帯で¹⁴⁾、その東部は水田を主とする平地に接している。東北および東北東の方向の測線間隔約1 kmの測線群によつてこの地域を覆つた(第12、16図)。

調査に使用した飛行機・測定器などは従来と同様である⁹⁾。

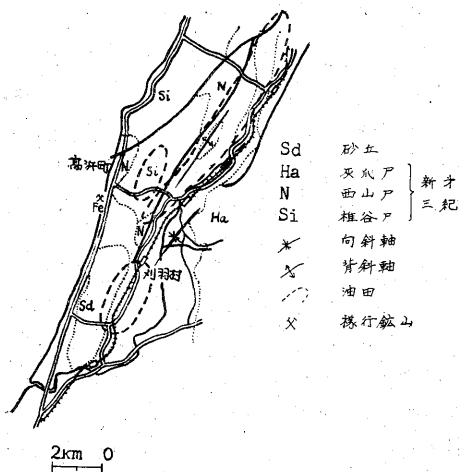
6.2 秋田県太平山地区における飛行方法と測定結果

この地域は急峻な山岳地帯であつて、固定翼航空機で低空飛行を行なうことは非常に危険である。したがつて未明に基地を出発し、払暁に調査地域に達するようにした。東北方向の谷に沿つた2つの測線では、高い尾根の上空から低い丘陵地帯に向かつて着陸する場合のように降下した。太平山を中心とする尾根に囲まれた地域においては、尾根とほぼ同じ高度でその内側を施回した。

このような山岳地域においては測線を確定するための目標がほとんどない。飛行中の目標として顕著な峰を選んだが、このような目標は飛行機の鉛直下にはないので、航空写真によつて撮影することはできない。したがつて、目視によつて定めた飛行経路を、航空写真に表われた尾根の時間的間隔によつて補正した。航空写真によ



第 11 図 秋田県太平山地区および秋田地区付近の地質
Taiheizan and Akita districts, Akita prefecture (The areas limited by broken lines are oil fields.)

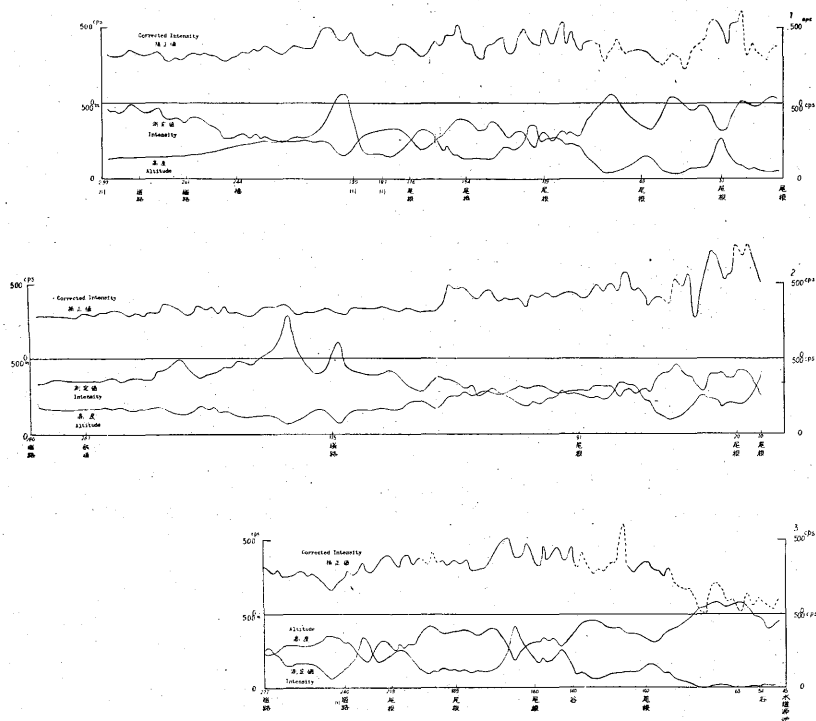


第 12 図 新潟県西山地区の地質
Nishiyama district, Niigata prefecture (The areas limited by broken lines are oil fields.)

ると尾根は一般に明瞭に認められるが、飛行機の対地高度が一定でないので尾根の高さや大きさを知ることができない。したがって直ちに地形図と比較することができず、航跡の判定は非常に困難となる。山岳地域における探査はこのような点においても実施困難である。

測定結果を広い線源に対する強度—高度曲線によつて高度 200 m に補正する、すなわち地質調査所で行なわれている通常の高度補正⁹⁾を実施すると、第 13 図のように丘陵地帯では補正結果の変動が少ないのに対して、急峻な山岳地帯ではそれが非常に大きい。そしてこれらの変動の多くが両地帯を通じて対地高度の低い尾根や山の上空で強度が減少するような傾向を示す (第 14 図)。したがって、このような変動はおもに地形の影響によるものと考えられる。4.4 に示した理論的計算によれば、地形の影響によつて対地高度が低くなると強度が減少

(L-1228 B R G 4)

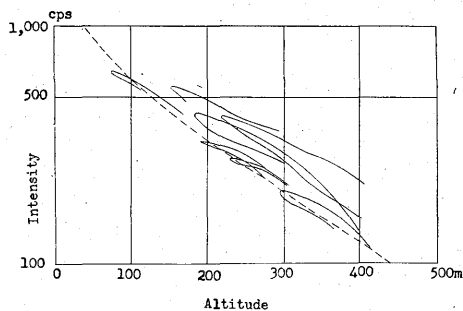


第 13 図 秋田県太平山地区空中放射能探査結果
Results of airborne radioactivity survey at Taiheizan district, Akita prefecture

し、対地高度が高くなるとき強度が増加する。補正結果は必ずしもそのような傾向を示さない部分もあるが、飛行機の垂直下の測線に沿った断面の地形が主要な地形の影響を与えないとは限らない。重力探査で地形補正をする場合のように、地形を細かな部分に分割して地形の影響を計算することは可能であるが、5.2 の考察によると分割する部分の表面積は飛行機の直下の付近では数 10 m 平方以下にしなければならないので、少なくとも 1/10,000 程度の地形図を使う必要がある。したがって、ルーティンとして地形補正を行なうことは実際上不可能に近い。飛行機の航跡の決定が困難なこともまた地形補正の実施を困難にする。

高度補正を行なつた γ 線強度の細かい変動がおもに地形の影響によるものであるとすれば、この地域では先第三紀の花崗岩と新第三紀の硬質頁岩の一部で放射能強度がやゝ高いことが認められる。この硬質頁岩を横切る 2 つの測線のうち、1 つの測線で強度の増加が認められないのは、測線がちょうど川の上を通過しているからであろうと考えられる。

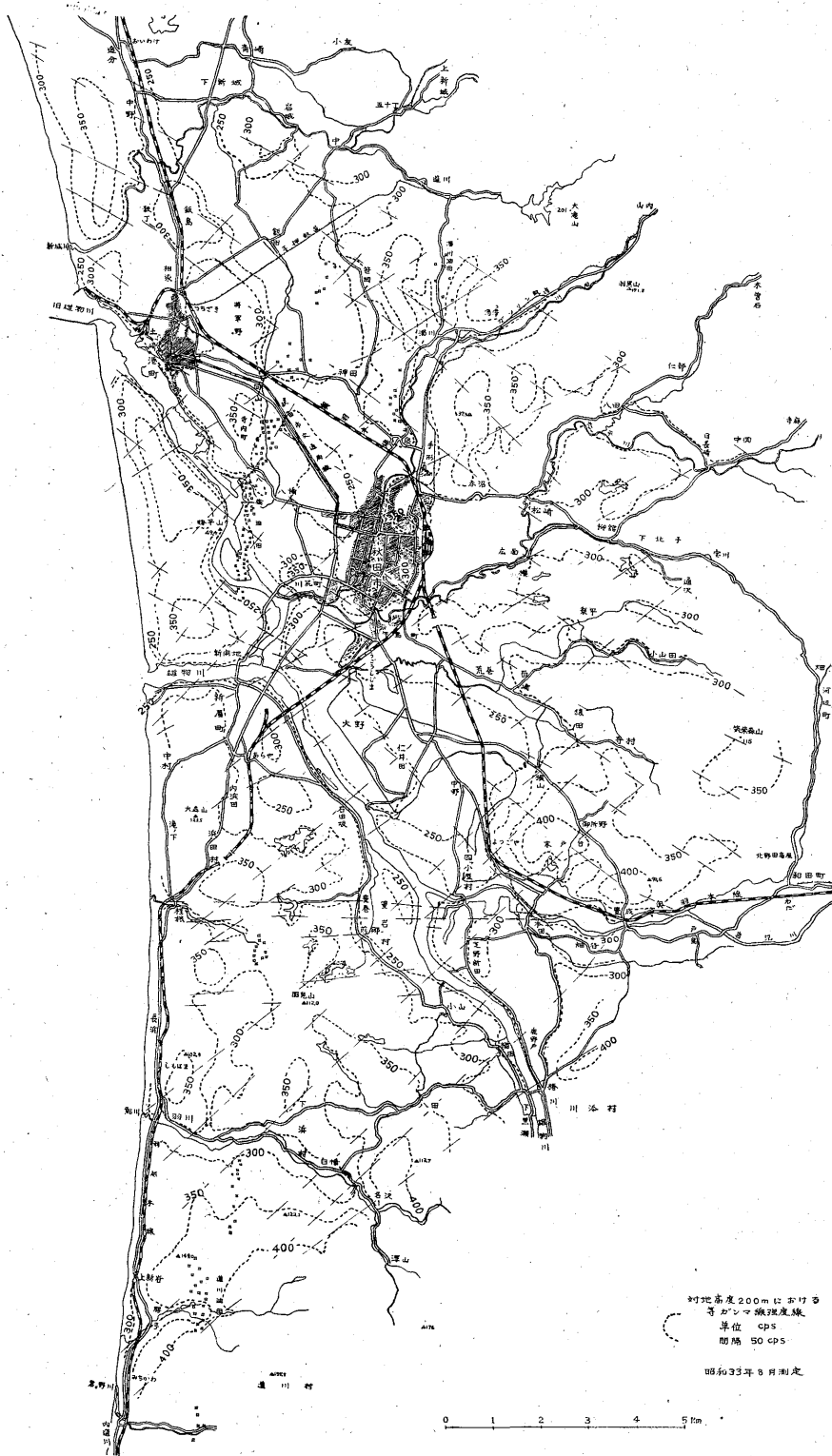
6.3 秋田県秋田地区 および 新潟県西山油田地区における飛行方法と測定結果



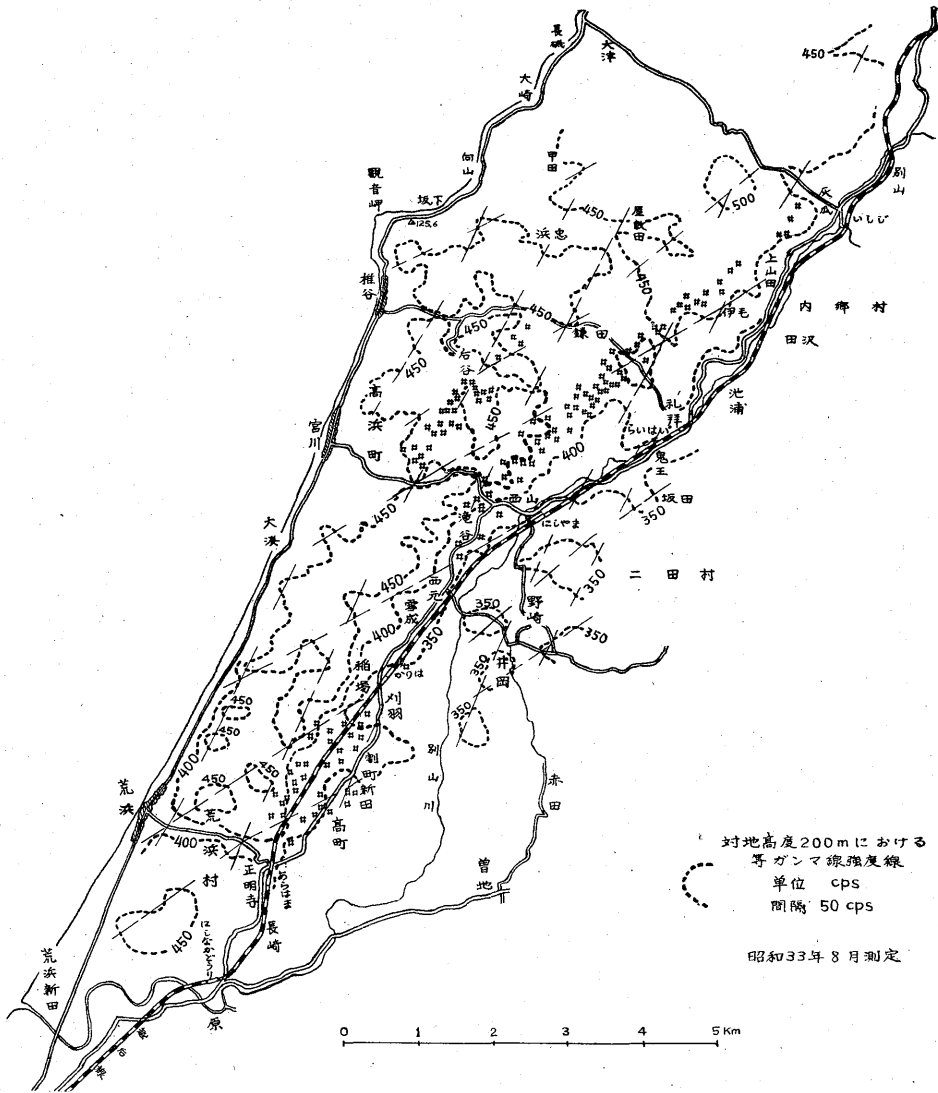
— Actual intensity-Altitude Curves
- - - A Standard intensity-Altitude Curve for a Broad Source

第 14 図 秋田県太平山地区の測定値の一部から求めた強度-高度曲線
Actual intensity-altitude curves drawn by the data at Taiheizan district, Akita prefecture

局所的探査を行なうために測線間隔を狭くすると予定した測線に沿って飛行することが困難になり、測線間隔が一定に保たれなくなつて、ある限度以上測線間隔を狭くすることが無意味になる。また高度を低下すると、目標の発見が困難になり、予定した測線を飛行することが不可能になる。秋田市およびその南方の地区および新潟県西山油田付近の地区では、このような制限から測線間



第15图 秋田県秋田地区空中 γ 線強度分布图
 Distribution of gamma ray intensity at an altitude of 200 m in Akita district, Akita prefecture



第16図 新潟県西山地区空中γ線強度分布図
Distribution of gamma ray intensity at an altitude of 200 m in Nishiyama district, Niigata prefecture

隔を約1 km, 高度を平地では約150 m, 丘陵地帯の上空では150~200 mとした。これらの飛行条件は特別な訓練を受けない操縦者によって達成できる限界であると考えられる。

予定した測線に沿ってなるべく忠実に飛行できるようにするために、測線群に平行な鉄道線路や海岸線の上空を飛行して気流の影響を測定し、コンパスだけによって飛行方向が保たれるようにして、地上の目標による飛行方向の修正をできるだけ少なくなるようにした。

測定結果は従来から行なわれている方法で高度200 mへ高度補正を行い、その結果を1/50,000の地図上の等

強度線によって表現した(第15図および第16図)。等強度線を引くにあたって、地形の影響を考慮した。測線が山や尾根を越す場合にみられる強度の減少は地形の影響による見掛け上のものと考えた。また測線が谷を越す場合には理論的には見掛け上強度が増加するはずであるが、実際にはほとんどすべて強度が減少する。これは自動車探査の場合についてもよく知られているように風化の影響であると考えられる。したがって、谷に沿うように等強度線を引いたところが多い。また平地では水田や沼地は強度が低く部落の上空では強度が比較的高い。さらに大きな川や池あるいは海上では強度が急激に減少す

る。このようなことから考慮して等強度線を引いた。

秋田県秋田地区ではその南部に、新潟県西山地区ではその北部にやゝ放射能強度の高い部分が認められるが、地層区分とは関係がないようである。また両地区を比較すると新潟県西山地区の方が全体として放射能強度が高い。

両地区とも日本で有数の産油地域である。アメリカおよびカナダで、油田の周辺において表土の放射能強度が増加することが指摘され、空中放射能探査によつて石油の探鉱が可能であるといわれたことがあつた¹³⁾。今回の測定結果においてもそのような傾向がみられる部分があるけれども、いずれも風化と地形との関係による見掛け上の変化として説明できる。油田における表土の放射能強度の変化については地球化学的にも説明が可能であつてそれを否定することはできないが⁹⁾、地表における放射能強度分布に影響する因子が多いので、石油の探鉱に放射能探査を適用することは非常に困難であろう。

7. 結 語

空中における γ 線強度の分布を理論的に取り扱うために、Linear build up factor を伴つた逆自乗—指数法則を採用し、基本式に含まれる常数を新潟市付近の砂浜の上空で得られた強度と高度との関係から求めた。天然放射性物質からの最も透過力の強い γ 線に対する吸収係数を $4.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ とすると散乱の常数としてもつとらしい値が得られる。しかし空気の吸収係数を $3.5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ とすると、見掛け上散乱の影響が無視され、逆自乗—指数法則が摘要されることになるので実際の計算が簡単になる。

点状放射線源に対する基本式は無限に厚く微小な表面積を有する線源に対する基本式に変換することができる。実際に問題となる多くの線源は無限に厚いと考えてさしつかえない。

空中放射能探査における高度補正は、放射性物質が一樣に分布している半無限体上での強度と高度との関係を使つて行なわれている。放射性物質が一樣に広く分布している場合であつても、このような方法で行なつた高度補正によつて誤つた結果が得られることがある。その最も重要な原因は地形の影響であつて、地形断面の一定の位置の上空での強度と高度との関係は、標準の関係とほとんど同じであるが、地形の型や検出器の相対的な位置によつて強度が変化するので、高度補正の誤差となるのである。

最近人工放射性降下物の吸着によつて地表面にごく薄い放射性的層が存在することが指摘されているが、この

ような表層の影響によつて強度と高度との関係が変化することが理論的に期待される。また地中の天然放射性物質に無関係な γ 線強度のバックグラウンドはおもに空気中の放射性物質によると考えられるが、このようなバックグラウンドが変化しているにもかかわらず、それを一定として高度補正を行なえば当然誤差を生ずる。

固定翼航空機によつて急峻な山岳地帯で安全に探査飛行を行なうことは困難であつて、現在探査が実施されている地域では地形の影響はあまり著しくない。ごく薄い表層の影響やバックグラウンドの変化の影響が実際にはまれであるとすれば、従来行なわれている高度補正によつて大きな誤差を生ずることはほとんどないであろうと考えられる。

比較的狭い範囲に分布する線源の例として表面が円状、点状および無限板状で無限に厚い線源を考え、その上空での γ 線強度分布について議論した。また γ 線強度の異常の解析法や測線間隔のとり方について言及した。

秋田県太平山地区において急峻な山岳地帯における探査飛行について、秋田県秋田地区および新潟県西山油田地区において大型飛行機による精査について、それぞれ試験的な調査を行なつた。急峻な山岳地帯においては地形の影響が大きくまた航跡の判定が困難なので、現在の方法で空中放射能探査を実施することはほとんど不可能である。緩やかな山岳地帯において容易に達成できる精査飛行の限界は高度 200~150 m, 測線間隔 1 km 程度であつた。したがつて今後はヘリコプターの使用を考慮する必要があると思われる。

(昭和 33 年 8 月調査)

文 献

- 1) 秋田県鉱務課：20 万分の 1 秋田県地質産図，1957
- 2) Blizard, E. P.: Geometry, Reactor Handbook Physics, McGraw-Hill, New York, 1955
- 3) Cook, J. C.: An Analysis of Airborne Surveying for Surface Radioactivity, Geophysics, Vol. 17, No. 3, p. 607~706, 1952
- 4) Cowper, G.: Aerial Prospecting with Scintillation Counters, Nucleonics, Vol. 12, No. 3, 1954
- 5) 道家忠義, 服部学, 佐々木確, 中本淳, 高見保清: 地表からの Back ground 放射線の測定, 日本原子力学会誌, Vol. 1, No. 1, 1959
- 6) Fano, U.: Gamma Ray Attenuation, Reactor Handbook Physics, McGraw-Hill, New York, 1955

- 7) Godby, E. A., S. H. G. Connock, J. F. Steljes, G. Cowper & H. Carmichael: Aerial Prospecting for Radioactive Materials, Joint Report AECL-13 (MR-17, CRR-495), National Research Council Laboratories, Ottawa, Canada, 1952
- 8) Gregory, A. F.: Radioactive Sources in Aeroradiometric Surveys Over Oil Fields, Amer. Assoc. Petrol., Geol. Vol. 40, No. 10, 1956
- 9) 岩崎章二・小島整志・金谷弘・駒井二郎: 北上南部地域空中放射能探査報告, 地質調査所月報, Vol. 10, No. 1, 1959
- 10) Johnson, D. H.: Geophysical Exploration by Nuclear Methods, Nuclear Geology, John Wiles and Sons, New York, 1954
- 11) 川野実・中谷茂: 標準ラドン計とそれによる大気中のラドン量測定結果, 第3回原子力シンポジウム報文集, 1959
- 12) McFadyen, D. A. Silvio & V. Goedes: Air Survey Applied to the Search for Radioactive Materials in Brazil, Proceeding of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 6, Geology of Uranium and Thorium, 1955
- 13) Merrit, J. W.: Radioactive Oil Survey Technique, World Oil, Vol. 138, Jan., 1952
- 14) 新潟県: 20万分の1新潟県地質図, 1955
- 15) Sakakura, A. Y.: Scattered Gamma Rays from Thick Uranium Source, U. S. Geological Survey Bulletin, 1052-A, 1957
- 16) 佐藤光之助・岩崎章二・佐野浚一: 岡山県南部地域および鳥取県中部地域空中放射能探査報告, 地質調査所月報, Vol. 7, No. 10, 1956
- 17) 瀬谷 清: 空中放射能強度に関する理論的考察, 物理探査技術協会秋季講演会講演, 1959
- 18) Siegbahn, K.: Beta and Gamma Spectroscopy, North-Holland, 1955
- 14) Yakovlev, A. F.: On the Form of True and Recorded Anomalies in Airborne Gamma Surveying, Akad. Nauk. SSSR, Izv. ser. Geofiz., No. 5, 1958

附 録 指 数 積 分 の 表

本表の精度は必ずしも充分ではないが本稿および英文報告(地質調査所報告 No. 188)中の諸式を使用して計算を行なおうとされる方々の参考のために付け加えた。

x	$E_1(x)$	$E_2(x)$	x	$E_1(x)$	$E_2(x)$	x	$E_1(x)$	$E_2(x)$	x	$E_1(x)$	$E_2(x)$
0.001	6.3315	992.67	0.30	0.9057	1.5636	0.61	0.4454	0.4453	0.92	0.2513	0.1819
0.005	4.7251	194.275	0.31	0.8815	1.4845	0.62	0.4366	0.4310	0.93	0.2470	0.1773
0.01	4.0379	94.962	0.32	0.8583	1.4109	0.63	0.4280	0.4174	0.94	0.2429	0.1727
0.02	3.3547	45.655	0.33	0.8361	1.3424	0.64	0.4197	0.4042	0.95	0.2387	0.1684
0.03	2.9591	29.388	0.34	0.8147	1.2787	0.65	0.4115	0.3917	0.96	0.2347	0.1642
0.04	2.6813	21.349	0.35	0.7942	1.2192	0.66	0.4036	0.3795	0.97	0.2308	0.1600
0.05	2.4679	16.556	0.36	0.7745	1.1635	0.67	0.3959	0.3678	0.98	0.2269	0.1560
0.06	2.2953	13.402	0.37	0.7554	1.1114	0.68	0.3883	0.3567	0.99	0.2231	0.1523
0.07	2.1508	11.169	0.38	0.7371	1.0625	0.69	0.3810	0.3459	1.00	0.2194	0.1485
0.08	2.0269	9.521	0.39	0.7194	1.0167	0.70	0.3738	0.3356	1.1	0.1860	0.1166
0.03	1.9187	8.235	0.40	0.7024	0.9734	0.71	0.3668	0.3257	1.2	0.1584	0.0926
0.10	1.8229	7.225	0.41	0.6859	0.9328	0.72	0.3599	0.3161	1.3	0.1355	0.0741
0.11	1.7371	6.4068	0.42	0.6700	0.8944	0.73	0.3532	0.3070	1.4	0.1162	0.0599
0.12	1.6595	5.7405	0.43	0.6546	0.8582	0.74	0.3467	0.2980	1.5	0.1000	0.0487
0.13	1.5889	5.1696	0.44	0.6397	0.8240	0.75	0.3403	0.2894	1.6	0.0863	0.0399
0.14	1.5241	4.6856	0.45	0.6253	0.7917	0.76	0.3341	0.2813	1.7	0.0747	0.0328
0.15	1.4645	4.2736	0.46	0.6114	0.7609	0.77	0.3280	0.2733	1.8	0.0647	0.0271
0.16	1.4092	3.9167	0.47	0.5979	0.7319	0.78	0.3221	0.2656	1.9	0.0562	0.0225
0.17	1.3578	3.6047	0.48	0.5848	0.7043	0.79	0.3163	0.2582	2.0	0.0498	0.01877
0.18	1.3098	3.3306	0.49	0.5721	0.6782	0.80	0.3106	0.2510	2.1	0.0426	0.0157
0.19	1.2649	3.0875	0.50	0.5598	0.6532	0.81	0.3050	0.2442	2.2	0.0372	0.01317
0.20	1.2227	2.8710	0.51	0.5478	0.6297	0.82	0.2996	0.2375	2.3	0.0325	0.0111
0.21	1.1829	2.6770	0.52	0.5362	0.6072	0.83	0.2943	0.2311	2.4	0.0284	0.00936
0.22	1.1454	2.5024	0.53	0.5250	0.5857	0.84	0.2891	0.2248	2.5	0.0249	0.0079
0.23	1.1099	2.3446	0.54	0.5140	0.5652	0.85	0.2840	0.2188	2.6	0.0219	0.00672
0.24	1.0762	2.2014	0.55	0.5034	0.5457	0.86	0.2790	0.2130	2.7	0.0192	0.0057
0.25	1.0443	2.0709	0.56	0.4930	0.5271	0.87	0.2742	0.2074	2.8	0.0169	0.00486
0.26	1.0139	1.9517	0.57	0.4830	0.5093	0.88	0.2694	0.2019	2.9	0.0148	0.0042
0.27	0.9848	1.8425	0.58	0.4732	0.4923	0.89	0.2647	0.1967	3.0	0.01305	0.00355
0.28	0.9573	1.7419	0.59	0.4636	0.4760	0.90	0.2602	0.1915			
0.29	0.9303	1.6499	0.60	0.4544	0.4603	0.91	0.2557	0.1866			