

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

佐藤 光之助* 岩崎 章二* 佐野 俊一*

**The Airborne Radiometric Surveying in the Southern Parts of Okayama
Prefecture and in the Central Parts of Tottori Prefecture**

By

Mitsunosuke Sato, Syōji Iwasaki & Shun'ichi Sano

Abstract

The first formal flights of airborne radiometric surveying in Japan were carried out early in September, 1955, in the southern parts of Okayama Prefecture, and the second flights were done about one month later in the central parts of Tottori Prefecture. There is Miyoshi mine in this region, where the first flight was carried out. This ore deposit is occurred in biotite granit and consisted of warflamite-quartz-veins. Zeunerite was discovered in the abandoned ore as well as the adits of this mine. There is Ogamo mine in the region where the second flight was carried out. This ore deposit is occurred in biotite granite and consisted of gold-bearing clayey quartz veins. The several outcrops of veins contained radioactive components were discovered in the adit as well as the ground surface around this mine.

A special transportable scintillation counter system developed in the Scientific Research Institute, Ltd., Tokyo, was used throughout these prospecting. This system is a sort of recording rate meter. The output current of ordinary rate meter circuit as well as the output pulses of a scaler, which are arranged as scales of 100 (or 1,000) by two (or three) EIT decade counter tubes are recorded on the chart of a recording millimeter. The counting rates are indicated by the length of intervals of successive pulses which is easily converted into the time intervals of each 100 (or 1,000) counts. This system is a rate meter of variable time constant, so that the equal probable error and the counting rate are not influenced by the effect of gravity due to circular movement of car or two aeroplanes.

Scintillation head used in these surveys is consisted of a NaI (TI) crystal 1.5" in diameter and 1.5" in thickness, a Du Mon't 6292 Photomultiplier and a cathode follower circuit. The background counting rate, which is measured in the back cargo of planes above the sea, is the order of several hundred counts per minute. This background varies with each plane because radiation intensity of luminous paint of meters varies with each plane and the heads covered by the lead shield was not used in this surveys. At the first survey, single head was used and at the second, dual head was used through mixing circuit.

Aeroplane used in these surveys was De Haviland "Dove." This plane is using as a passenger plane by Japan Helicopter Airplane Transportation Cooperation, Ltd. (J. H. A. T.). Details of flight plan and determination of flight paths are charged by members of J. H. A. T.

The first survey was carried out along the lines through Miyoshi mine and the lines through islands in Seto-Naikai and the second survey was carried out along the lines of intervals of about 2 km, as so called "grid survey."

The positions of plane were checked by navigators and the times flown over at ridges, rivers, roads or railway stations were recorded on the chart of recorder. Altitudes above sea level are observed occasionally and altitudes above terrain are determined by topography along observed path and observed altitudes.

A method of flights is very difficult in Japan, because undulation of topography is complicated. Therefore, the plane flew without regards to minute changes of topography

* 物理探査部

and so, the correction of observed radioactive intensity for altitude is necessary.

A procedure of altitude correction based on a geological conception, is introduced. The conception is as follows; anomalous increase of radioactive intensity extends to area over one square-kilometer around the deposit bearing uranium minerals and this conception is supported by the results of car-borne radiometric surveys in this region, in which the mines of vein type such as Miyoshi or Ogamo mine are developed. Based this conception, the actual relation between radiation intensity in the air and altitude above terrain may be expressed by the semi-infinite body, in which the distribution of radioactive component is assumed to be homogeneous. The mathematical formula in this case was approximately given by C. A. Godby et. al. of Geological Survey of Canada. The relation between intensity and altitude calculated by this formula is consistent with some experimental data obtained at altitudes between fifty meters and three hundred meters, if the reasonable value of effective absorption coefficient of air for the natural radioactive components is adopted between 3×10^{-5} cm and 4×10^{-5} cm.

Thus, radioactive intensity measured in the air is classified into one of five grades and boundaries of these grades consist of four curves representing the relation between intensity and altitude. Consequently, the distribution of radiation intensity at a fixed altitude can be obtained. The intensities measured above the areas around Miyoshi and Ogamo mines are classified as the highest grade.

Because the difference of intensities measured at the altitude higher than 400 m is insignificant, the observed value at such altitude cannot be classified, although the difference of intensities is remarkable on the ground. In the southern parts of the region carried out the second survey, the mountains are so steep and high, that the plane was obliged occasionally to fly at altitude more than four hundred meters above ground surface.

By such procedure, several anomalous areas were discovered. The anomalies which is considered to be due to the outcrops of deposits did not discovered. Writers think that the direct discovery of deposits is not one of the aims of the above procedure and the sensitivity of the present scintillation heads is not sufficient for this aim. It is necessary that the existence of deposits in the anomalous areas discovered by air surveys are confirmed by ground surveys. These ground surveys will be carried out.

1. 緒言

空中放射能探査が諸外国において、ウラン鉱床の探査に相当な成果を挙げつつあることは周知の事実である。空中放射能探査いわゆるエア・ボーン放射能探査には、広範囲にわたる放射能強度分布を迅速に測定して、爾後の探査の指針を得ることを目的とする比較的大形の航空機による概査と、ウラン鉱床を直接発見することを目的とする小形の航空機による精査とがある。地質調査所においては、ウラン資源探査に関する基礎資料の1つとして、日本全国の放射能強度分布の概略を短期間に蒐集する必要があることを認め、物理探査部においては昭和30年度に、広地域にわたって迅速に放射能測定を行う方法に関する研究調査を実施した。その一環として、岡山県三吉鉱山および鳥取県小鴨鉱山を中心とする地域において、中型輸送機を使用して概査を目的とする空中探査を試験的に行つた。

航空機上で測定される放射能強度は、(1)地表の物体すなわち岩石・鉱床・表土・樹木または人工物等に含ま

れる放射性物質による部分、(2)空気中の放射性成分による部分、(3)航空機および航空機上の物体に含まれる放射能性質による部分、(4)宇宙線による部分、などから構成されていると考えられる。これらの部分のうちで、地表における放射能強度分布を知ることが空中探査の1つの目的であつて、空中において測定された放射能強度分布を、地表における強度ないしそれに対応する量の分布にひきなおすことができれば、ウラン鉱床が賦存する地域の地質鉱床学的条件や、鉱床および母岩の放射能強度の変化などに基づいて、鉱床賦存地域を判定することが可能であり、また場合によっては鉱床自身を直接発見することも可能であると考えられる。

航空機上で測定される放射能強度は、飛行高度・地形・飛行速度・測定器の時定数・放射能検出器の感度および配置などによつても異なる。

本報告では、昭和30年度における試験飛行の経過および結果を記述し、空中探査の諸問題について論ずる。

岡山県および鳥取県における研究調査には下記の本所職員および日本ヘリコプター輸送株式会社社員が参加

し、飛行時間は両地域とも約10時間弱であった。

岡山県南部地域

物理探査部 佐藤光之助・岩崎章二・佐野浚一・小島整志

鉦床部 浜地忠男

機長 神田好武・清水仙波・岡嘉吉

副操縦士 後藤竹白

航空士 松田功

鳥取県中部地域

物理探査部 佐藤光之助・岩崎章二・佐野浚一・小島整志・小尾中丸

鉦床部 木村正

機長 岡嘉吉

副操縦士 山下憲一

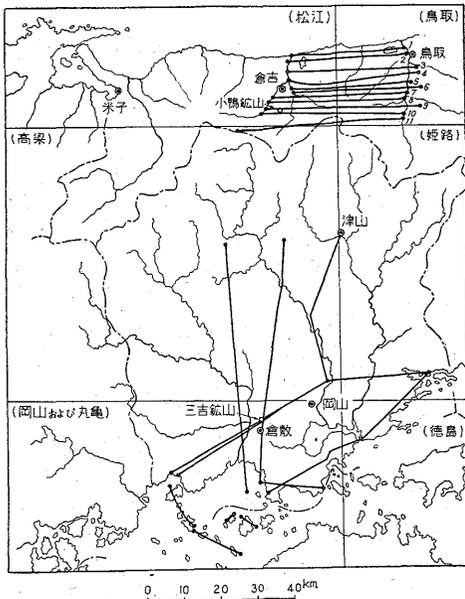
航空士 松田功

なお、探鉦器の製作、研究調査の実施にあたって、科学研究所山崎文男博士・岡野真治氏に助言・助力を仰いだ点が多い。また、運輸省伊丹航空保安事務所伊東所長および同所職員、ならびに同美保航空保安事務所湯原所長および同所職員各位には実施にあたって多大の便宜を受けた。こゝに感謝の意を表わす次第である。

2. 位置および交通

2.1 岡山県南部地域

昭和30年9月上旬、第1図に示すように、倉敷市三吉鉦山を中心とする放射線状の測線および瀬戸内海の諸島を通る測線について、第1回の空中放射能探査を実施



第1図 昭和30年度空中放射能探査測線図

した。この地域に最も近い G.C.A. (Ground Control Approach) を有する飛行場は伊丹 (大阪) であつて、羽田 (東京) から直行約 1.5 時間を要する。伊丹から現地上空までは 15~30 分を要する。

2.2 鳥取県中部地域

昭和30年10月下旬、倉吉市小鴨鉦山を含み天神川および千代川に挟まれる東西約40 km、南北約20 km の地域において、ふたたび空中放射能探査を実施した。この地域では第1図に示すように約2 km 間隔で11本の東西方向の測線を設けた。この地域に最も近い G.C.A. を有する飛行場は美保 (米子) であつて、伊丹から定期航空路によつて、1時間10分、美保から現地上空までは 5~10 分を要する。

3. 地形・地質および鉦床

3.1 岡山県南部地域

当地域は広い平野はないが、山岳の標高は低く、測線附近は最高 600 m、平均 200~300 m で低空低速飛行に比較的適当している。

この地域の北部には古生層が、中部および南部には花崗岩が広く分布し、等三紀層・流紋岩・石英斑岩・石英閃緑岩および花崗閃緑岩等も処々に分布している。

倉敷市北部にある三吉鉦山の鉦床は、黒雲母花崗岩中のタングステン石英脈であつて、昭和29年8月、岡山大学助教授逸見吉之助によつて砒銅ウラン雲母が発見された。

3.2 鳥取県中部地域

この地域の南部は中国脊梁山脈に及び、標高1,000 m に達するが、北半部は緩やかな丘陵地帯で、平均標高は岡山南部地域とほぼ同様である。したがつて、南半部では北半部と同様な低空飛行はやゝ困難である。

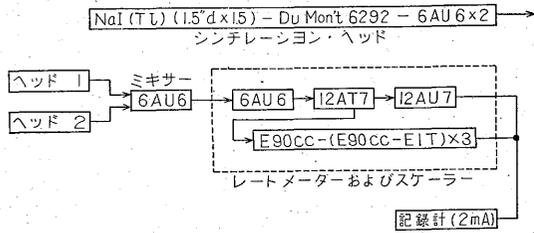
花崗岩および安山岩がこの地域に広く分布し、第三紀層・石英粗面岩・玄武岩等もみられる。

倉吉市南部にある小鴨鉦山の鉦床は、黒雲母花崗岩中の含金・鉛・亜鉛・粘土石英脈からなり、本所中沢技官によつて放射性鉦物を含むことが発見された。自動車探査および地表調査によつて放射性鉦物を含む鉦脈が南西方へ1 km 以上延びていることが確認されている。

4. 測定器

4.1 放射線測定器

今回の調査に使用した放射線測定器は、科学研究所山崎研究室の岡野真治および大塚巖によつて設計された特殊な自記記録式レートメーターであつて、検出器としてシンチレーション・カウンタを使用する。その構成図を第2図に示した。



第2図 空中探査および自動車探査用シンチレーション・カウンターの構成図

シンチレーション・ヘッドは直径 1.5吋, 厚さ 1.5吋の NaI (TI) 結晶 および Du Mon't 6292 増倍型光電管を使用し, 出力はカソード・フォロアーによつてケーブルに整合する。このケーブルは航空無線の影響を避けるため, 出力信号を伝送する電線に対して, 2重のシールドが行われている。数個の結晶および増倍型光電管を選択して, 電圧特性・エネルギー分布特性およびバックグランドが充分等しい2個のヘッドを作製した。したがつて, 2個のヘッドの出力を合成して使用すれば, 直径2吋, 厚さ1.5吋の結晶をもつ単一のヘッドを使用する場合とほぼ同等になる。

これらのヘッドないしミキサーの出力は, レートメーター回路および10進法計数管E1T (Philips) による scales of 1,000 (ないし 100) の計数回路を含む測定回路に結合される。

自記記録計として手捲時計送り式の 2 mA 記録用電流計 (横河 KR-1 型) が使用され, レートメーターの出力ならびにスケーラーによる 1,000 ~ 100 counts ほどのパルスがこれに加えられる。自記記録による計数率の読取りはスケーラーによるパルスの記録紙上の間隔によつて行われ, レートメーターによる記録は単に監視用として使用される。すなわち, 記録紙の送り速度を V_{mm}/min とし, パルスの幅を D_{mm} とすれば, 初めのパルスが記録されてから次のパルスが記録されるまでの間の平均計数率は, スケーラーが

$$\begin{aligned} \text{scales of } 100 \text{ の時} & \quad 100 \text{ V/D cpm} \\ \text{scales of } 1,000 \text{ の時} & \quad 1,000 \text{ V/D cpm} \end{aligned}$$

で与えられる。したがつて, 読取られた結果は非連続的である。

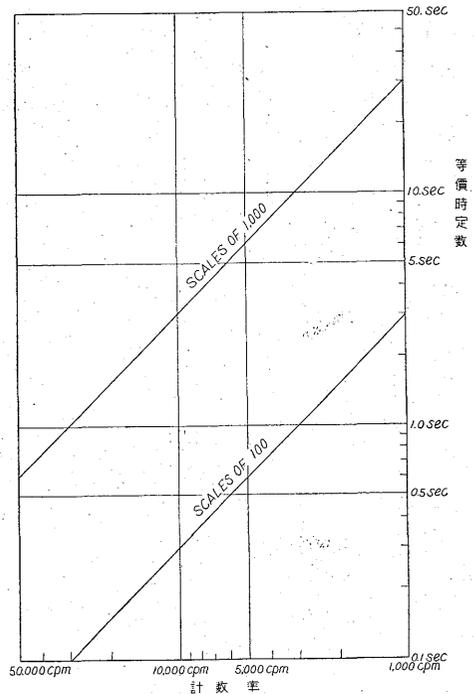
A, B 電源には 2 次電池を使用し, A 電源は 2 次電池 (6 V) から直接供給される。B 電源は 280 V—80 mA のコンバーターによつて供給され, グリッド・バイアスの一部は乾電池によつてかけられる。増倍型光電管の 2 次電子電極に供給する高電圧電源には乾電池を使用する。B 電圧に対する安定装置は附属していないが, シンチレーション・ヘッドの水平域の上部 (電圧の高い部分) を使用すれば, 230 ~ 280 V で充分安定に動作し,

E1T の特性の良いものを使用すれば 200 V 附近まで使用できる。2 次電池の消費電流は約 10 A (6 V) である。

この測定方式の特色として, 下記の事項が指摘される。

(1) 記録用電流計を使用すると, 航空機や自動車の運動によつて重力の影響を受けて指針が変動する。通常のレートメーター方式において, このような偽の計数値を記録することを避けるためには, 電子管式自動平衡記録計のように, 測定器の出力以外に電力を消費する形式の記録計を使用する必要がある。この方式を使用すれば, 簡単な記録計で重力の影響を逃れることができる。

(2) この特殊なレートメーターの時定数は, スケーラーの次々の出力パルス間の時間 (ないしこの時間の $1/2$) によつて表わされる。したがつてこのレートメーターは等確率誤差・可変時定数型であつて, スケーラーが scales of 100 の時, 確率誤差 6.75% (危険率 5% の誤



第3図 スケーラーによる特殊自記レートメーター時定数

差 19.6%), scales of 1,000 の時, 確率誤差 2.13% (危険率 5% の誤差 6.20%) である。

時定数は, 第3図に示したように, 計数率が大きくなるとともに自動的に小さくなり, 計数率の急激な変化に対して速やかに追従する記録を得ることができる。また通常のレートメーターと異なり, 指示の遅れがない。第3図に示した時定数は, 通常のレートメーターに対応させるために, 2つのパルス間の時間の $1/2$ を採用した。

(3) 2つのスケーラーの出力パルス間の時間を真の計数率を N_0 , 初めのパルスから測つた時間を t , 測定された計数率を N とすれば,

$$N = \int_0^{\tau} N_0(t) dt / \tau, \quad 100 \text{あるいは} 1,000$$

$$= \int_0^{\tau} N_0(t) dt$$

で表わされる。通常のレートメーターでは指針が平衡に達する時間はレートメーター回路の時定数や計数率の複雑な函数になるので、測定された計数率と真の計数率との関係は上式ほど簡単な形では表わされない。

(4) 計数率を指示するパルスの間隔は計数率に逆比例するから、この指示方式は一種の logarithmic scale になっている。したがって、指針が振り切る (scale off) ことがなく、指示範囲を幾段にもとる必要がない。

(5) 計数回路に E 1 T を使用しているので、電源電圧の変動に対して安定で、故障率が比較的少ない。

しかし、次のような欠点が考えられる。

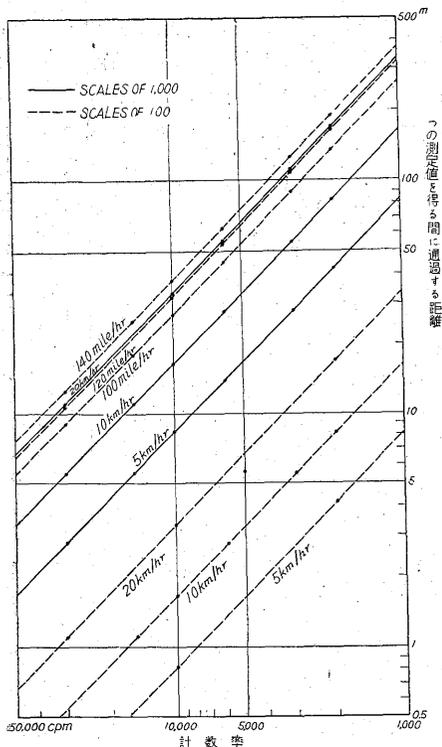
(1) 記録された計数率の読取りに手数を要する。

(2) 計数率が低い時は、時定数がやゝ長すぎると考えられる。計数率と1つの測定を完了する間に移動する距離との関係を第4図に示した。

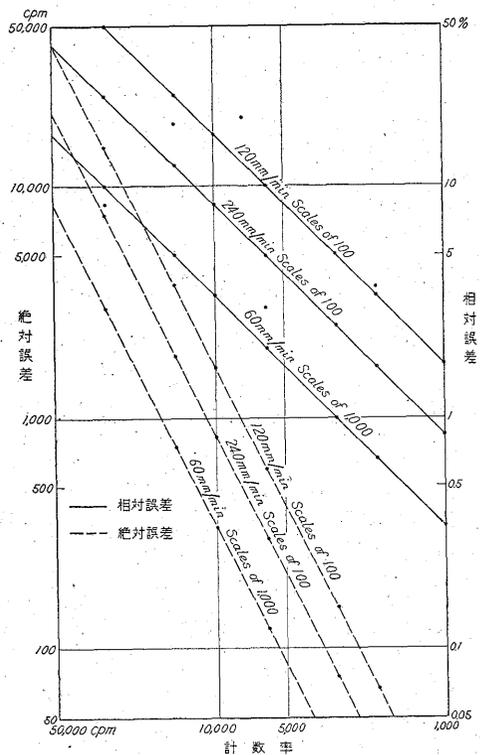
(3) Logarithmic scale であるから、計数率が大きい

とき読取りの誤差が大きくなる。記録用ペンが描く線の幅が 0.2mm 以上になるので、パルス幅の読取りの誤差を $\pm 0.2\text{mm}$ と仮定すると、読取りの際の計数率の誤差と計数率および記録紙の送り速度との関係は第5図に示すようになる。したがって、現在よりも大形のヘッドを用いて計数率が増加すると、記録紙の送りを速くしなければならない。

記録計の送り速度の誤差は $\pm 2\%$ を超えない。



第4図 1つの測定値を得る間に通過する距離と計数率との関係



第5図 読取りによる誤差

4.2 航空機

概査を目的とする空中探査では、飛行速度が増加しても、搭載量が大きく、航続距離が長いことが望ましい。また、山岳の多い地域で低空飛行を安全に遂行することが必要である。これらの条件を考慮して、日本ヘリコプター航空輸送株式会社 (日ペリ航空) から De Havilland "Dove" 型輸送機を備い上げ使用した。この飛行機の諸元性能は下記の通りである。

- 発動機 340馬力、2基
- 最大速度 195mph
- 巡航速度 146mph
- 実用上昇限度 20,000 ft
- 航続時間 7hr
- 航続距離 1,010 mile

失速速度 フラップ上げ 89mph
 フラップ下げ 72mph
 積載量 2,788 lbs (燃料を含む)

5. 空中探査の実施方法ならびに測定結果

5.1 岡山県南部地域

第1回の空中放射能探査ではシンチレーション・ヘッドは1個のみを使用し、機体後部の荷物室に置いた。航空計器に使用されている蛍光塗料の影響は著しくないので、ヘッドに対する遮蔽は行われなかった。スケーラーは scales of 100 で使用し、記録紙の送り速度は 120 mm/min とした。

1つの測線内では水平直線飛行を原則とし、安全な範囲でできるだけ低く飛行するようにした。飛行速度は 110~120 mile/hr を保つようにしたが、風や気流の影響でかなりの変動があった。また、飛行方向の修正を時々行っているため飛行経路の変動もあった。測線の起点・終点およびその途中の1, 2の顕著な目標上において地点を標定し、これらの地点を通過する時に、記録計回路を短絡することによって、記録紙上に目印しを入れた。高度については、飛行機に附属する空盆高度計によって海面からの高度を時々読み取り記録した。飛行計画の細部および地点の標定は日毎に航空が担当した。飛行のため使用した地図は20万分の1地形図および約50万分の1航空用地図(米軍発行)であった。

第1図に示した測線のうち、塩飽諸島の広島において同一測線上で 500, 700, 1,000 ft の3種類の高度で飛行して、空中における放射能強度の比較測定を行った。しかし、地上に顕著な目標がなかったため3回の飛行経路は一致しているとは認められない。

1日の飛行時間は約3時間で、気流の安定な早朝を選んだ。飛行機の運行の都合によって、隔日3回の飛行を行ったが、そのうち1回は雲のため、海上および海岸附近以外は調査のための飛行は不可能であった。

5.2 鳥取県中部地域

この地域における調査では、シンチレーション・ヘッド2個を機体後部に置き、2個の出力を混合して使用した。ヘッドに対する遮蔽は施さなかった。

実施方法は前回と同様であったが、地点の標定が前は不十分であったので、5~15km 間隔で目標とする地点を予じめ設定し、飛行前に5万分の1地形図によって附近の地形の特徴を調べておくようにした。これらの地点としては、発見されやすいように橋・駅・三又路・峠・川・屋根・道路などが選ばれた。したがって測線は等間隔の直線でなく、間隔の揃っていない折線になった。

第1図に示した測線のほか、湖山池(鳥取市西北部)と

日本海との間の砂丘(標高約 100 ft)の上空で200~1,200 ft の間で 200ft ごとに高度を変えて海岸線にほぼ直角に飛行し、空中における放射能強度の比較測定を行った。この付近は平坦で地質的にも一様であると考えられまた地上の目標も明瞭であったから、所期の目的を果たしたと考えられる。

前回同様、気流の安定した早朝を選んで飛行した。ほぼ隔日に3回飛行したが、うち1回は雲のため南南部の調査飛行は不可能な状況にあった。飛行計画の細部および地点の標定は日毎に航空において担当したが、裏日本は低空飛行に適さない季節にはいつていたため、飛行計画にはかなり苦心が払われた。

5.3 測定結果

岡山県南部地域および鳥取県中部地域における測定結果を、それぞれ第6図および第7図に纏めて示した。横軸は記録計による時間である。したがって約25万分の1の縮尺となる。地形断面は、20万分の1地形図によって、標定地点間で飛行機が等速であったとして求めた。地質分類は20万分の1岡山県地質図²⁾、同兵庫県地質図³⁾および17.5万分の1鳥取県地質図⁴⁾に従った。

第7図および第8図に示した測定結果から、次の事柄が認められる。

(1) 海上では高度に無関係に一定の最低の放射能強度が測定される。海水は一般に放射性元素の含有量が少ないので、海上での測定値の大部分が飛行機の計器の蛍光塗料や、その他の飛行機の構成材料、シンチレーション・カウンター自身の材料に含まれる放射性成分および宇宙線によるものであると考えられる。

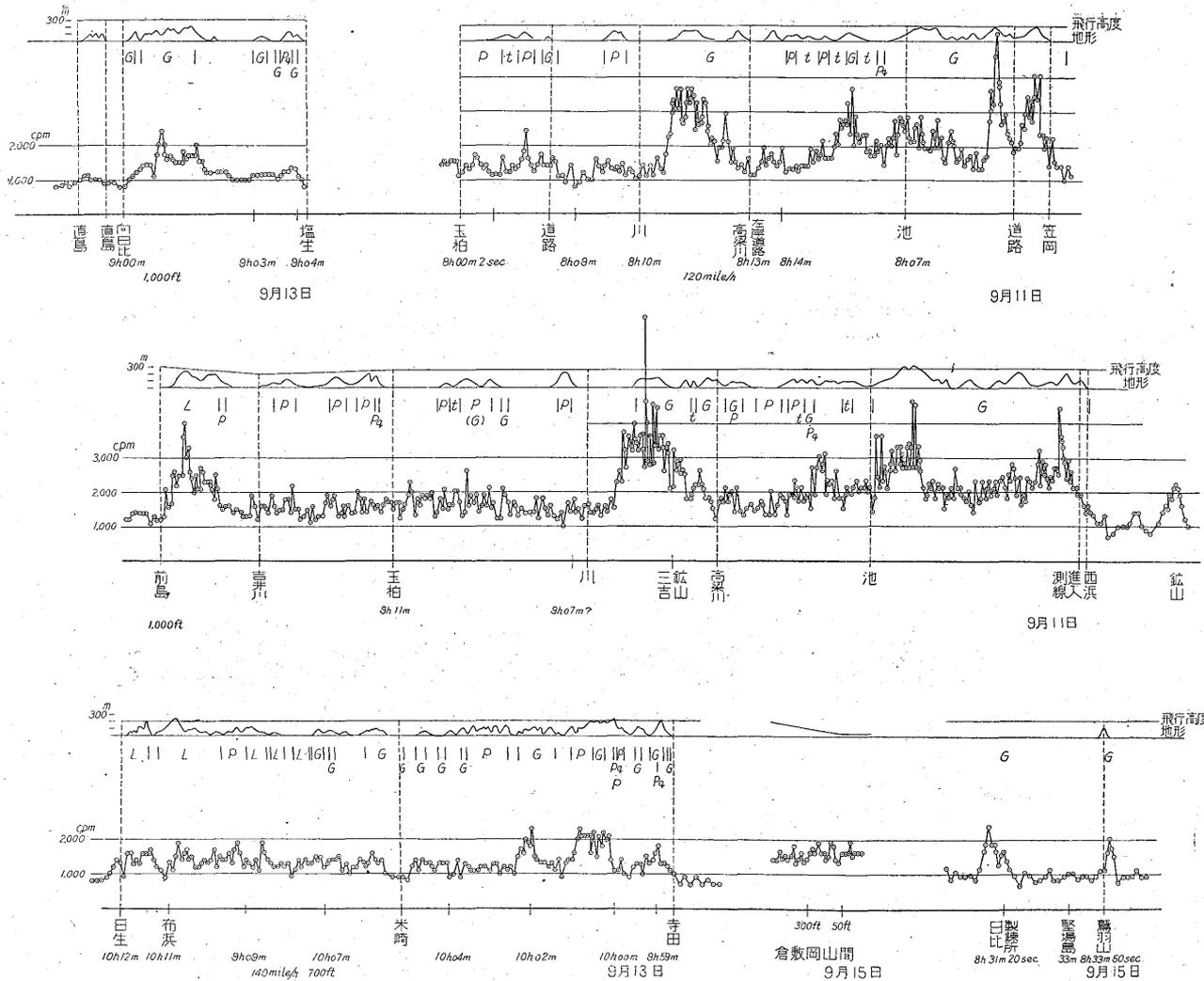
海上での測定値が測定日によって差異があるのは、飛行機によって計器の蛍光塗料による影響が異なるためであるとみられる。したがって、海上における測定値を差引いた値を空中における放射能強度として表現する方が望ましいと考えられる。

(2) 第7図には示されていないが、鳥取県中部地域調査にあたって、伊丹から出発して美保へ向かう途中、瀬戸内海上と日本海上とで同じ日に同じ航空機上で測定したが、両海上での測定値は同一であった。

(3) 三吉鉾山・小鴨鉾山附近およびその他の2, 3の箇所において、放射能強度の増加が認められる。

花崗岩区域の一部ないしその周辺部、あるいは流紋岩区域の一部は、他の区域よりも放射能強度が高いように思われる。

(4) 空中における放射能強度と対地高度とは明らかに相関があると認められる場合が多いので、高度補正を行って地表ないし一定高度における放射能強度分布に直す必要がある。



無記号、第四紀層、砂礫および粘土層
海

t 第三紀層、砂岩・礫岩・頁岩
L 流紋岩} 中生代末あるいはその後
Pq 石英斑岩} の噴出岩

Dq 石英閃緑岩} 中生代貫入岩類
G 花崗岩}

P 砂岩・礫岩・粘板岩} 上部古生層
・塩基性岩類

探査器 シンチレーション・カウンター
Na I (TL) 1'/.5d x 1'/.5
Du Mon't 6292

位置 目視

飛行高度 空盆高度計

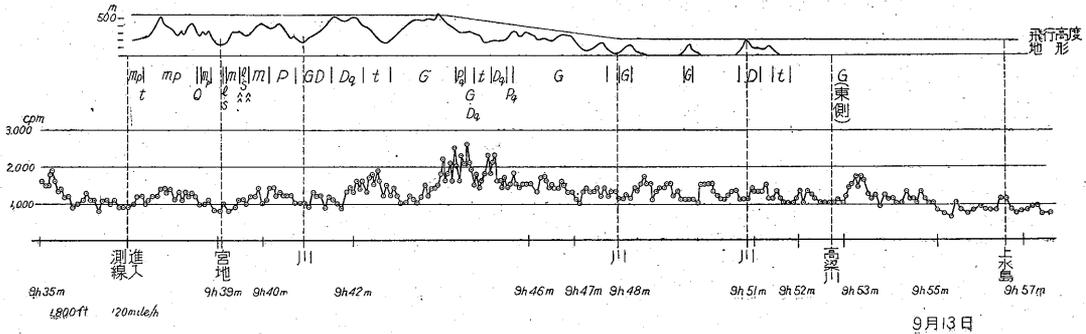
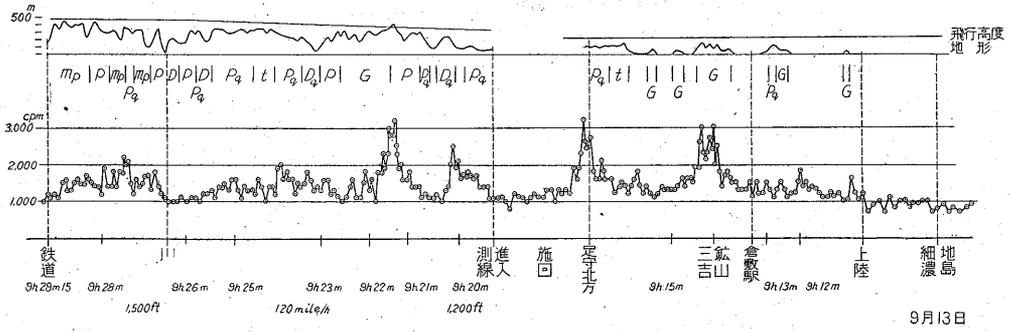
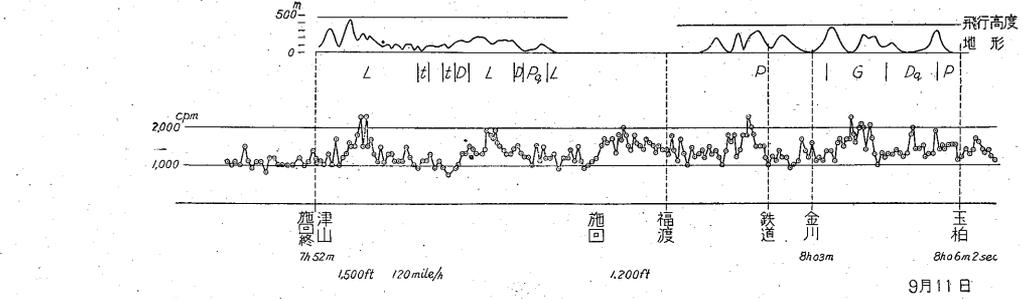
飛行機 デ・ハビランド・ダブ JA 5006

21—(455)

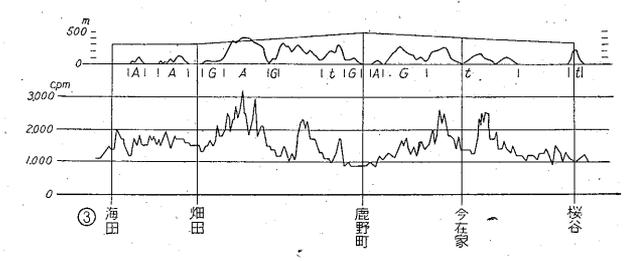
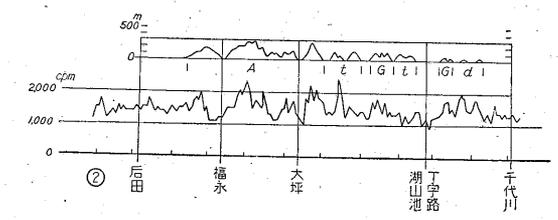
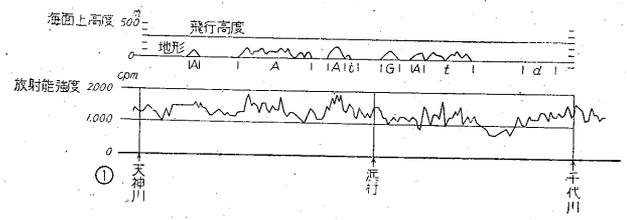
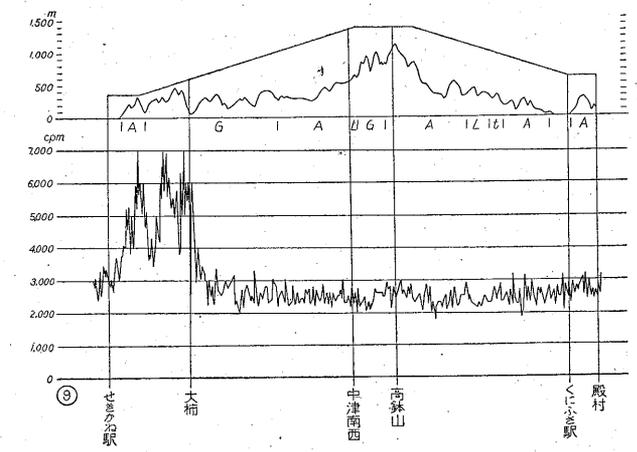
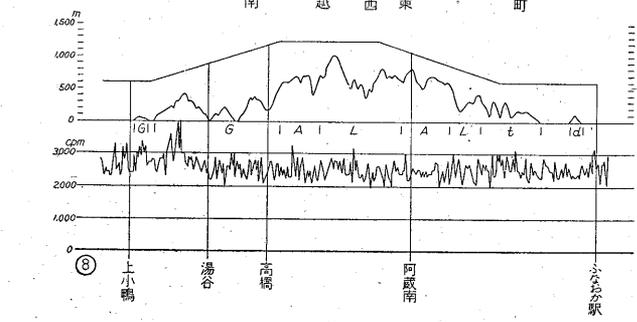
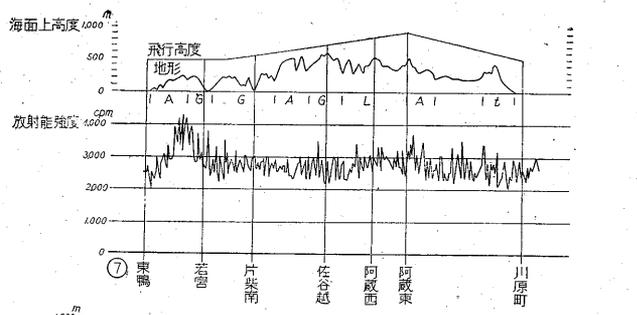
第6図a 岡山県南部空中放射能探査東西測線 (20万分の1岡山縣地質図による)

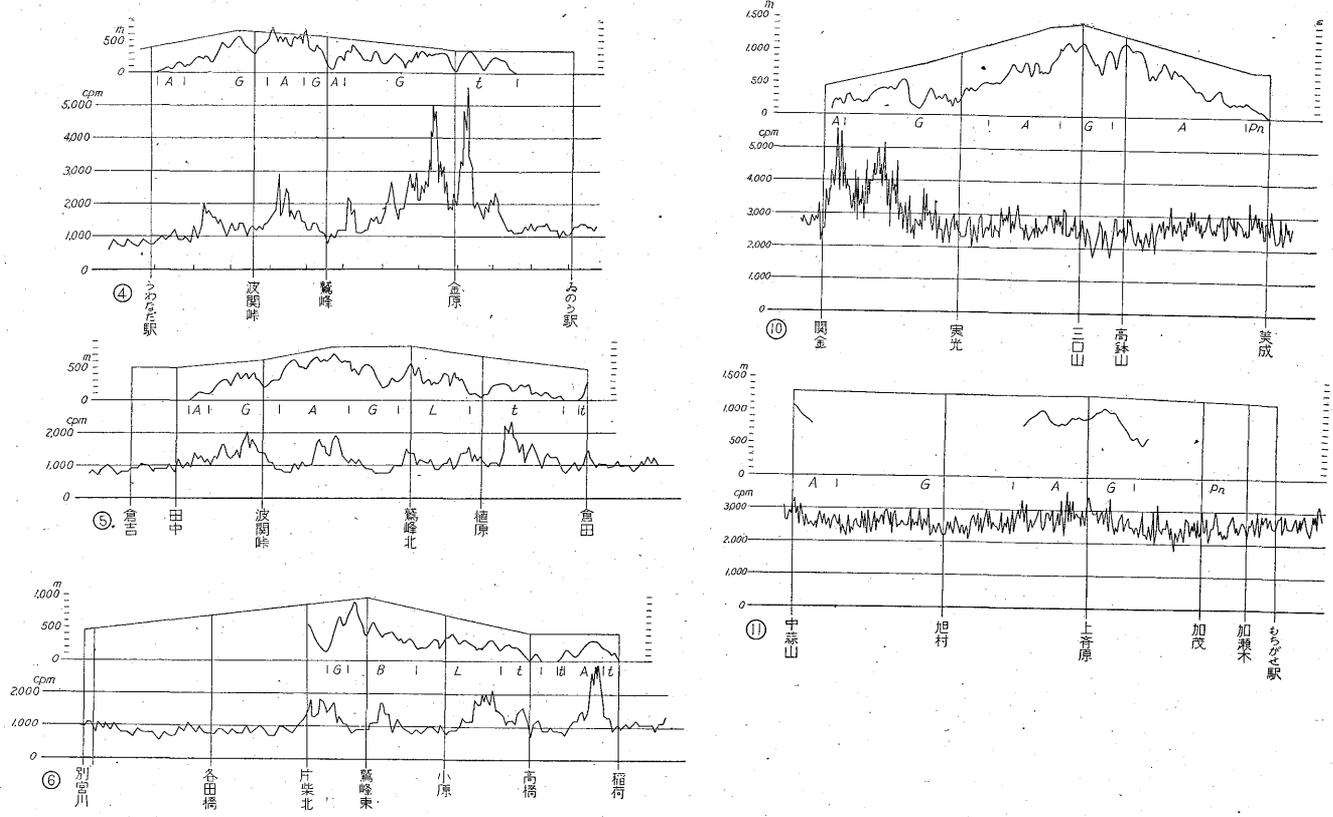
無記号 第四紀層, 砂礫および粘土層
海

- t 第三紀層・砂岩・礫岩・頁岩
- L 流紋岩 } 中生代末あるいは
- Pq 石英斑岩 } その後の噴出岩
- Dq 石英閃綠岩 } 中生代貫入岩類
- Gq 花崗閃綠岩 }
- G 花崗岩 }
- m 中生層, 砂岩・礫岩・頁岩
- b 閃綠岩, 古生代末貫入岩類
- l.s. 石灰岩
- P 堆積岩化した石灰岩・砂岩・
- mp 礫岩・粘板岩・塩基性岩類 } 上部
- 准片岩および結晶片岩 } 古生層
- (三群変生岩類)
- △ 断層

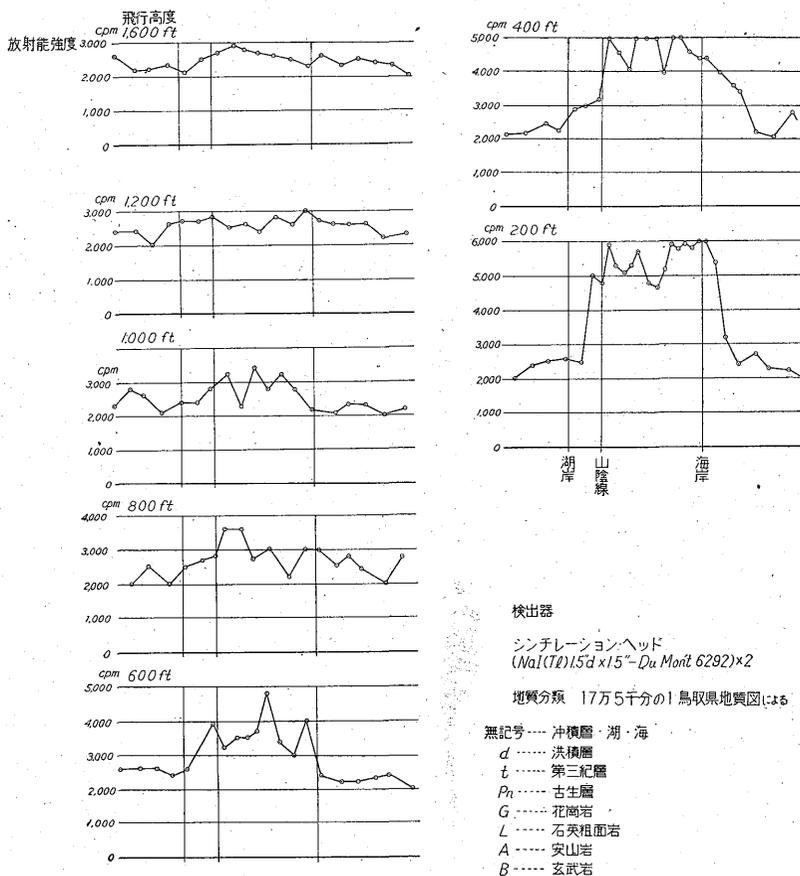


第6図b 空中放射能探査南北測線





第7図 a 鳥取縣中部地域空中放射能探査測定結果



第7図b 空中放射能探査測定結果

多くの研究が行われているが、高度補正の定まった方式は確立されていないようである。こゝでは比較的簡単な考え方に基づく1つの補正法を提出し、この問題に関する詳細な議論は別の機会に譲る。

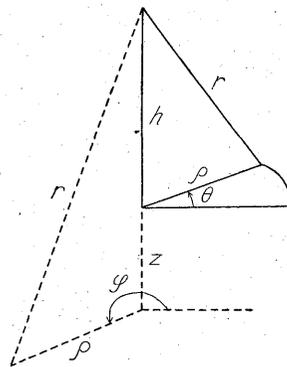
一般に、ウラン鉱物鉱床の付近においては径数 km 程度のかかなり広い範囲にわたって放射能強度の異常増加が認められると仮定する。この大きな仮定は三吉鉱山および小鴨鉱山附近において実施された自動車探査の結果によって支持されている⁹⁾。福島県石川郡およびその附近のペグマタイト鉱床地域で実施された自動車探査の結果によれば、この仮定は成立しないが、ペグマタイト鉱床に密接な関係を有すると考えられている斑状花崗岩は、この地域で最も放射能強度の高い岩石である。

上述の地質学的に重大な仮定を承認すると、空中における放射能強度と高度との関係は、平面で境され、内部における放射能元素の分布が一様である半無限体の上を水平に飛行する場合の強度と高度との関係によって、充近近似されると考えられる。したがって、この場合の強

度と高度との関係は飛行速度に無関係で鉛直対地高度および吸収係数だけの函数になる。

6.2 放射能強度と高度との関係

前述の仮定に基づいて、一般に用いられている点状 γ 線源からの距離と放射能強度との関係¹⁾に従って、強度と高度との関係式を求める。



第8図 座標

第8図のように、航空機の高度を h 、航空機の位置から半無限体の表面に下した垂線の足を原点として円柱座標 (ρ, φ, z) をとり、 (ρ, θ) 面が半無限体の表面と一致するようにする。

さて、半無限体の表面にだけ放射能成分が一様に分布しているとする。航空機と半無限体の表面上の任意の点との距離を r 、空気による γ 線の吸収係数を μ 、航空機から (ρ, θ) 面に下した垂線と航空機と (ρ, θ) 面上の任意の点とを結ぶ直線とのなす角を θ とすると、

$$\begin{aligned} I &= I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp(-\mu r) \cdot r^2 d\varphi d\rho \\ &= I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \tan\theta \cdot \exp(-\mu h \sec\theta) d\varphi d\theta \\ &= 2\pi I_0 \int_{\mu h}^{\infty} e^{-\omega} / \omega d\omega \quad (\omega = \mu h \sec\theta) \\ &= 2\pi I_0 E_1(\mu h) \end{aligned} \quad (1)$$

すなわち、指数積分となる。この積分は $h=0$ で発散する。

半無限体内に一様に放射性成分が分布している場合には、半無限体内の吸収係数を μ' とすると

$$I = I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp[-\mu h(h+z)^{-1} - \mu' z(h+z)^{-1}] \cdot r^2 d\varphi d\rho dz$$

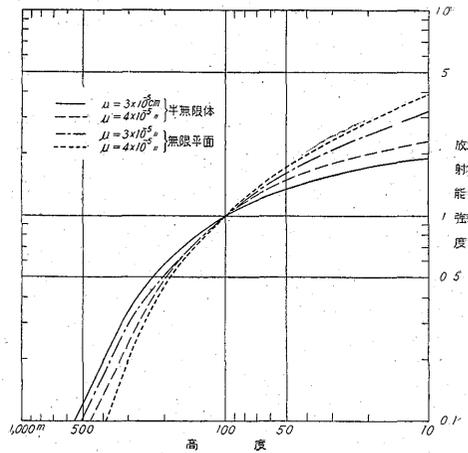
である。この積分は (1) と異なり、 $h=0$ で一定値に収斂する。そこで、C. A. Godby その他⁹⁾ に従って、もつと簡単な形に書直すと、

$$\begin{aligned} I &= I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp(-\mu r) \cdot r^2 \cdot \cos\theta^{-1} d\varphi d\rho \\ &= I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cdot \exp(-\mu h \sec\theta) d\varphi d\theta \\ &= 2\pi I_0 \int_{\mu h}^{\infty} e^{-\omega} / \omega^2 \cdot d\omega \quad (\omega = \mu h \sec\theta) \\ &= 2\pi \cdot I_0 \cdot E_2(\mu h) \end{aligned} \quad (2)$$

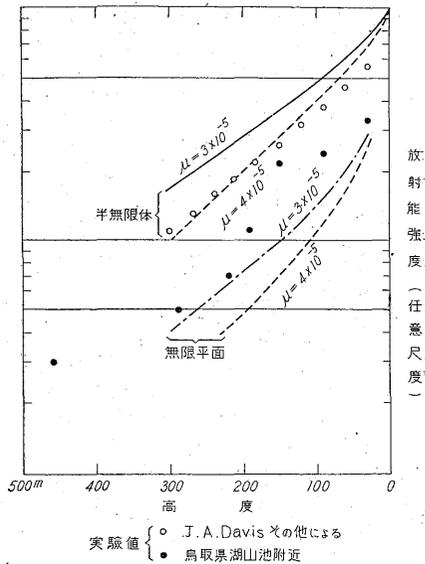
となる。函数 $E_n(x)$ の値はすでに計算されているので、(2)式の数値計算は容易である。この式では半無限体内での γ 線の吸収は考慮されているが、吸収係数 μ' は含まれていない。また、自然放射性元素の場合には γ 線のエネルギー分布は複雑であるから、空気吸収係数 μ は一種の平均値を示しているとみなされる。

2~1 MeV の γ 線に対する μ のもつともらしい値として $\mu = 3.0 \times 10^{-5} \text{cm}$ および $4.0 \times 10^{-5} \text{cm}$ を用いて、(1)および(2)による強度と高度との関係を求めると第9図に示すようになる。第9図では高度100mにおける強度を1とした。高度50m以上では(1)および(2)による曲線は著しい差異を示さない。

鳥取県湖山池附近で高度を変えて測定した結果では、各高度における極大値と対地高度との関係はこれらの曲線と一致する。また、これらの曲線は無限平面とみなさ



第9図 空中放射能強度と高度(I)



第10図 空中放射能強度と高度(II)

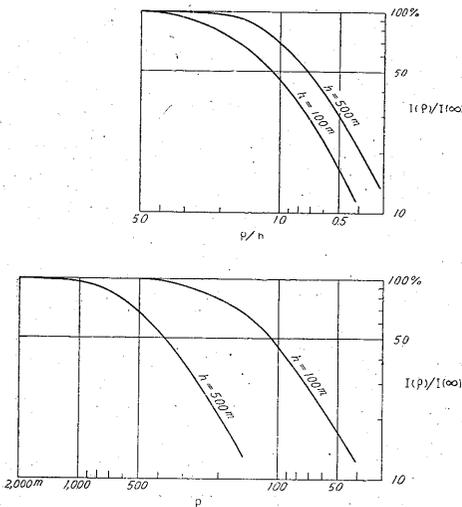
れる放射線源上でアメリカ原子力委員会によって行われた実験⁹⁾の結果とも一致する。特に(2)において μ を $3.0 \times 10^{-5} \text{cm}$ と $4.0 \times 10^{-5} \text{cm}$ との中間に採った場合によく一致し、片対数グラフ上でほぼ直線になる。高度数10m以下では実験結果がないので、強度と高度との関係は明らかにされていない(第10図)。(2)式を導くにあたって、最終の式がすでに計算されている函数で表わされるように半無限体内の吸収係数について特別な仮定を用いている。したがって、(2)式には半無限体の自己吸収係数 μ' があらわにははいつていない。そのため、半無限体に近い処では(2)式は良い近似式であるといえないから、(2)式に従って空中における放射能強度から地表における放射能強度を求めることは困難であるが、一定高

度における放射能強度の分布を求めることは可能であつて、これは地表における放射能強度の分布に対応するものであると考えられる。

さて、第9図に示された曲線によると、対地高度 200 ~ 300mまでは空中における放射能強度は高度の増加に伴なつて緩やかに減少するが、対地高度 200 ~ 300 m 以上では高度の逆自乗ないしそれ以上の幅の函数に比例して急激に減少する。諸外国において空中探査による精査のみならず、概査においても、せいぜい 150 ~ 200 m という低高度が採用されていることは、高度の変化に対して放射能強度の変化が緩やかである部分のみを採用することが望ましいからであると考えられる。また、放射能測定に感度および精度を上げるためには、大形の結晶および増倍型光電管を使用する大形のシンチレーション・ヘッドを使用することが必要であるけれども、大形のヘッドを使用することによつて測定のための飛行対地高度を高くすることは困難であると考えられる。

さて、空中で放射能強度を測定する時、地上のどの程度の範囲の強度を測定しているかということを知るために、

$$I(\rho)/I(\infty) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} \exp(-\mu d) \cdot r^{-2} \cdot \cos^{-1} \theta d\phi d\rho}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp(-\mu h) \cdot r^{-2} \cos^{-1} \theta d\phi d\rho} \quad (3)$$



第11図 I(ρ)/I(∞)と ρ/h および ρ との関係

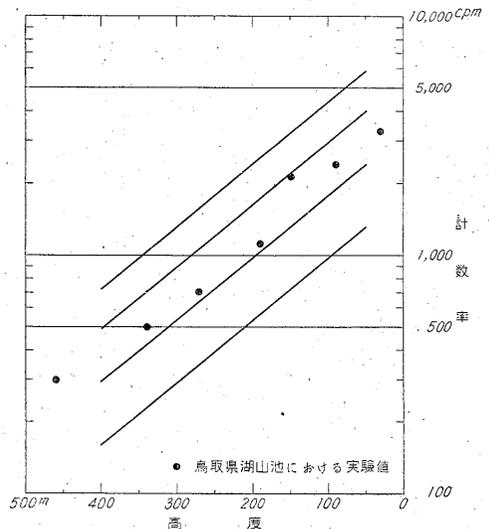
を計算してみよう。μ = 3.0 × 10⁻⁵ cm, h = 100m および 500m とすると、第11図のようになる。ρ = h のところで I(ρ) の I(∞) に対する寄与はほぼ 50% 以上に、ρ = 2h のところで I(ρ) の I(∞) に対する寄与はほぼ 80% 以上に達する。したがつて、航空機の直下から飛行高度に等しい距離以上のところに大きな異常があつて

も、直下にある場合に較べてそれによる放射能強度はずつと小さくなる。放射能強度の分布をできるだけ忠実に測定するためには、測線間隔は飛行高度と同程度ないしそれ以下であることが望ましい。

6.3 高度補正の方法とその検討

前節で述べたように、空中における放射能強度と高度との関係は、数10mから数 100mの間で片対数グラフ上の直線で表わされる。実際に測定される値は高度に関係する部分と高度に関係しないバックグラウンドとからなり、海上における強度がバックグラウンドに相当すると考えられる。すなわち、高度補正を必要とする部分は実際の測定値から海上の測定値を差引いたものである。このような測定値の誤差を考慮すると、400 ~ 500m以上の測定値は高度補正を行つても意味がないと考えられる。

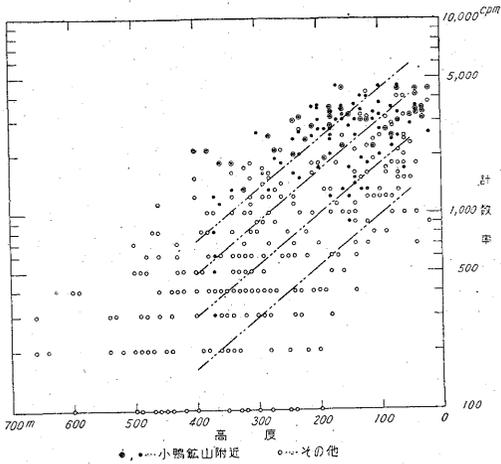
そこで、実際の作業を簡単にするために、第12図に示すような片対数グラフ上の4本の直線によつて空中における放射能強度を5つの段階に分類して示すことにした。4本の直線の間隔は測定誤差が危険率5%で約20%であることおよび読取りを 100 cpm の桁まで行つていふことを考慮して決定された。また、岡山県三吉鉱山附近および鳥取県小鴨鉱山附近における測定値が5つの



第12図 高度補正用図表

段階のうち最高およびその次の段階にはいるようにした。対地高度50 ~ 400m以外の場合は補正が不可能な場合として取り扱う。

第13図は、鳥取県中部地域の第4, 7, 8および9測線における測定値を第12図と同じグラフ上にプロットしたものである。第13図上の点の分布は補正に用いる直線群にはほぼ並行している。



第13図 鳥取県中部地域における放射能強度と高度との関係

鳥取県中部地域の測定結果に対して、高度補正を実施した結果が第14図である。この図では5段階に分類された放射能強度が測線（飛行経路）に垂直な線分の長さで表示されている。小鴨鉱山附近は数 km にわたって放射能強度が高く、異常区域であることを示している。その他、湖山池南部の花崗岩地域（17.5万分の1鳥取県地質図では一部が第三紀層となっている）の一部において強度が高いが、小鴨附近ほど著しくない。鳥取県における空中探査後に実施された自動車探査によると、この地域では特に高い強度は観測されなかった。

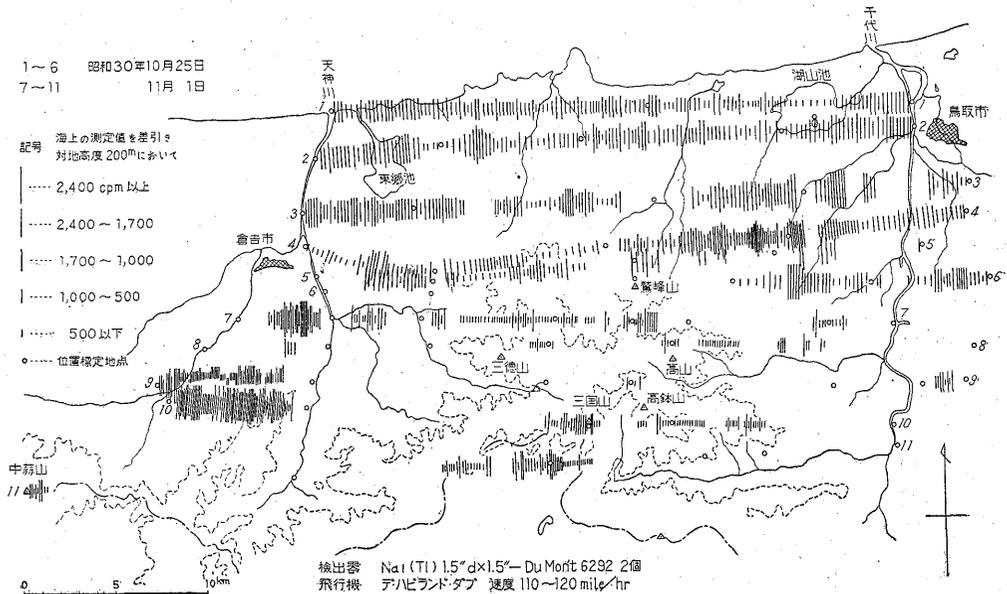
第6線以南では対地高度400m以上になった部分がかなりあつて、高度補正を行った結果が空白になっている

ところが多い。南半部では中央に標高1,000 m前後の山があつて、その麓の谷で対地高度400~500mないしそれ以下の低空を飛ぶことは不可能であつた。

岡山県南部地域については、鳥取県における場合よりも地点標定の誤差が大きく、したがつて、対地高度の誤差が大きいと考えられ、またヘッド1個のみを使用しているために計数率が低いので、高度補正の結果を省略する。放射能強度分布と高度との関係を考慮に入れて、この地域で放射能強度の異常が認められる区域としては、三吉鉱山附近のほか笠岡市附近および吉備郡大井村・福谷村附近が挙げられる。

対地高度の誤差が大きく、したがつて、高度補正を行った結果は誤差が累積するためはつきりした結論を述べるまでには至っていないけれども、両地域における調査結果を概観すると、両地域に広く分布する花崗岩（特に黒雲母花崗岩）のうちの一部に強い放射性を示すものがあること、および花崗岩が他の岩石と接触する部分において強い放射性を示す場合があることが認められる。

今回の調査では鉱床の露出と思われるものは認められなかった。鉱床を直接発見することは概査の目的ではないけれども、直接的探査まで可能であることは望ましい。しかし、現在使用しているシンチレーション・ヘッドは比較的小形の結晶を使用しているので測定器の時定数を小さくすることが不可能で、1つの測定値を得る間に少なくとも数10mの距離を通過する（第4図参照）。このような点からみても現在の装置で鉱床の露出のように狭い形のヘッドを使用することが望ましい。



第14図 鳥取県中部地域空中探査放射能強度分布図

また、第1回の研究調査において高度を変えて飛行を行った瀬戸内海の広島における場合のように、高い山の山腹の近くを飛ぶ場合や、前述の狭い範囲の鉱床の露出を取り扱う場合には、今回採用した高度補正法は明らかに成り立たない。したがって、空中における放射能強度から地表における放射能強度の分布をできるだけ忠実に求めるためには、地形および地質に関する条件に応じて適当と思われる高度補正の方法を採用し、また鉛直対地高度のみによる高度補正ばかりでなく、附近の地形を考慮した地形補正をも行う必要がある。そしてこのような場合には当然飛行速度による計数率の変化も考慮しなければならない。

さらに今回の調査では空気中の放射性成分、ことに Rn の影響を明瞭に認めることができなかつたけれども、空気中の放射性成分による空中における放射能強度の変化を否定することはできない。

これらの諸問題の解決は、今後の実験的ならびに理論的研究に俟たなければならない。そのうえ、位置および高度を正確に把握するために航空写真装置および電波高度計を早急に整備する必要がある。

7. 結 語

昭和30年9月および10月、それぞれ岡山県下および鳥取県下において空中放射能探査に関する試験飛行を実施し、既知鉱床附近およびその他の区域で放射能強度の異常増加を認めた。

今回の調査結果は組織的探査の一部とみならずには不十分であつて、特に岡山県南部地域については、測線の配置もきわめて粗いので、再調査を実施することが望ましい。

今後、組織的探査を実施するためには多くの面で技術の研究改善が必要である。

(1) 現在より大形のシンチレーション・ヘッドを使用することによつて感度を向上させることが必要であ

る。

(2) 電波高度計・航空写真装置を使用して対地高度および位置を確実に把握することが必要である。

(3) 飛行高度と空中における放射能強度との関係は地形的ないし地質的条件によつて変化すると考えられるので、実験的ないし理論的にこれらの関係を明らかにする必要がある。また、空中における放射能強度と地表における放射能強度との関係を確立するようにならなければならない。

(4) 空気中の放射性成分、とくに Rn の影響、およびそれらの時間的変化を把握する必要がある。

(5) 低空を安全に飛行するための技術の研究改善が必要である。

(昭和30年9~10月調査)

文 献

- 1) 逸見吉之助：岡山県三吉鉱山産砒銅ウラン雲母，
鉱物学雑誌，Vol. 2, No. 3, 1955
- 2) 岡山県：20万分の1岡山県地質図
- 3) 兵庫県：20万分の1兵庫県地質図
- 4) 鳥取県：17万5千分の1鳥取県地質図
- 5) 岩崎章二：カー・ボーン放射能探査報告（未刊）
- 6) 佐野俊一：野外におけるガンマー線用ガイガー計
数管による測定について（I），地質
調査所月報，Vol. 6, No. 11, 1955
- 7) Godby, C. A., Connack, S. H. G., Steljer,
J. F., Cowper, G. and Carmichael,
H.: Aerial Prospecting for Ra-
dioactive materials, National Re-
search Council of Canada, Report
No. CRR-495, 1952
- 8) Faul, H. et al.: Nuclear Geology, John
Wiley & Sons, Inc. New York,