総 説

|||||

地表 γ 線による表層地質等の探査[†]

木村重彦

(株)日さく技術研究所

329-14 栃木県塩谷郡喜連川町鷺宿 4480

Key Words: radiogeological survey, terrestrial gamma ray, air-borne, car-borne, man-borne, bottom sediment, subsurface geochemistry, buried fault, buried open fissure, buried fracture zone, oil deposit, natural gas deposit

1. はじめに

γ 線量の地表分布を指標とした実用研究を測定方法で三つに分けると、第1は電離箱とG-M管の利用に始まる地表放射能の強度分布と実用諸条件との相関の検討であり、1900年代から始まった。第2はNaI検出器の利用で得た全 γ 線量の地表分布と実用諸条件との相関の検討であり、1940年代末から始まった。そして第3はNaI検出器の γ 線スペクトル分析で得た3種のRIそれぞれの高エネルギー部で放出される一次 γ 線量の地表分布と実用諸条件との相関の検討であり、1950年代末から始まった。

各測定方法では測定器の運搬方法で四つに分けた。人が運ぶ精査用のマンボーン、自動車に積む概査用のカーボーン、飛行機やヘリコプターに積む巨視的概査用のエアボーン、そして海・湖底の概査と精査用の仮称シーボーンである。

実用の主対象は構成する岩種や元素を指標とする一般の地質区分ではなく、放射能または γ 線量を指標にした表層地質の区分、そして表土等で埋まった上に、いずれの物理探査法でもそ

の検出がむずかしい埋没断層の存在状態の把握という2項目になった。前者は主にウラン鉱探査のほか、人工RIによる地表や海底の汚染調査、表層の積雪深調査等に用いられた。後者は石油・天然ガスの貯溜層の検出や山地等での地下水または温泉水の開発適地の選定等に用いられた。

現在の解析水準は表層地質の解析に対し、主指標となる3種のRIそれぞれからの一次 γ 線量が、長さ250mを単位とする対象地区ごとに、代表的な1核種またはいずれか2核種の混合比で示されることを指標に、広域の状態を1枚のカラー図で表現する段階に至った。また、1000種以上の地質試料と3種のRIの一次 γ 線量との相関を基礎に、表層地質に含まれた15種の金属元素の鉱床が指摘できるほどになった。

一方、埋没断層の検出では、海・湖底も含めた埋没断層の破砕部や開口部の詳しい存在状態の検出はもちろん、それぞれの破砕度や開口度が数値評価できるようになった。それらの分布状態から、対象地域の構造運動状態や地震で生じた地層の歪みをその後打ち消す動きである断層開口部の発生やその位置の移行の状態が把握され始めた。今後はトンネル・切土等の土木工事で断層に起因した出水や崩壊の事前予測、地すべり・地震等の機構解析、それらの予知等、幅広い利用への進展が期待される段階に

[†]Development of Subsurface Geochemistic Indications Exhibited by Ground and Seabottom Gamma-rays. Shigehiko KIMURA: Technical Research Laboratory of Nissaku Co. Ltd., 4480, Washijuku, Kitsuregawa-cho, Tochigi-Pref. 329-14, Japan.

なった。

2. 地表の放射能強度による解析

2.1 断層との相関

海・湖や諸地層上の放射能強度の固有性、地質間の放射能強度の変動範囲、下層からの Rn 上昇状態、以上の諸測定値が種々の気象条件で変化する状態等の基本的現象は、1900 - 1910 年代に数多くの報文をみた¹⁾。中でも強く着目された現象は、断層上の地表土壌ならびにトンネル壁に現れた岩石露頭の断層部で、 α 線量が急増する現象であった²⁾。それは天然ガス・石油の貯溜層の検出や山地地下水の開発適地の選定に重要な指標とされたからである。

断層上で放射能が急増する現象は、地層内の Rn が断層に移行する現象とその娘核種が断層に付着する現象に基づく。わが国では1942年に初田らが、表土に設けた孔の深さ 70 cm での気体の放射能強度を、シュミット型泉効計で測定する方法で、断層上の急増現象を確認した³⁾。そのような条件では β 線量でも急増現象が起こることは、1951年に落合が G-M 管で野外立証した⁴⁾。そして埋没断層の上では地表の γ 線量でも急増することは、1961年に Lorenz らが 81 の電離箱を背中に負う方法で 70% もの急増として立証した⁵⁾。

表層にあけた小口径の孔にある気体の放射能測定から埋没断層の位置を求める方法は、その後、気体の α 線測定用の ZnS 計数管法（エマノメータ法）、 α 粒子トラック法、オープンバイアル法⁶⁾、ROAC 法等に進展し、今日も広く用いられている⁷⁾。 α 粒子トラック法の野外測定では、断層上で一般に 1 桁以上の計数増が認められている。さらに断層周辺でのトラック数増加の分布状態から、断層の傾斜方向を解析した例がある⁸⁾。

しかし、これらの方法がもつ短所に、孔をあける手間、そのことによる表層内気体と大気との混合、測定に長時間（約 7 日間）を要する、この間の降水で測定値が乱される、孔内への地下水浸出で測定が不能になる、等があげられる。

そこで実用では、広い地域をより短時間に測

定できる方法の開発が望まれ、それを満足する地表の γ 線を指標とする方法が発展した。

2.2 石油・天然ガス鉱床との相関

地表放射能の広域分布と石油・天然ガス鉱床との相関は、ロシアと米国を中心に数多く検討された。今日、これらの鉱床探査では、表層気体の油性ガス成分をガスクロマトグラフィで簡単・詳細に求め、その結果から有効な解析をしている。しかし、当時はこの分析に手間がかかる上、解析精度も低かったので、地表放射能の強度分布を指標とする解析方法は、鉱床探査に高い実用性をもち、広く利用された。

その 113 現場での調査例をまとめた報文では⁹⁾、全 γ 線量の異常が解析を妨げた例はなく、実に 85% の例で γ 線量の異常な地区に石油・天然ガスの鉱床が指摘できた。全 γ 線量の異常現象は鉱床上でそれが増加する場合と減少する場合があります、ロシアの例では両者ともに放射能強度の BG 値に対する変化率が約 50% の増または減になった。両者の発生確率は約 1 : 2 となり、一つの鉱区内に両条件が存在する場合もあった。また、鉱床周辺のドーナツ状地域で、全 γ 線量が BG 値より 40 - 60% 高まる例もあった。

以上の諸現象の発生理由に種々の説が提示され⁸⁾、それらの統一的理解はむずかしい。それは放射能の主因となる U 系列、Th 系列、そして ⁴⁰K 等の放射性核種の地層含有量と地層からの Rn の移行量とが、地質ごとに大幅に異なっていて、解析を複雑にさせるからである。

しかし、新潟県中条町の天然ガス噴出現象の解析例¹⁰⁾ からみた基本的現象は、天然ガスに Rn をほとんど含まないので、ガスの漏出量が少なく、その上昇速度が遅い場合、上昇中のガスは深層で接触する地下水に含まれる比較的高濃度の Rn を大量に取り込み、比較的低濃度の浅層地下水や表層土の気体を通過するときに Rn を放出してその Rn 濃度を高め、地表の γ 線量を増やす。一方、ガスの漏出量が多く、その上昇速度が速い場合、ガスは接触する地下水や表層気体を含む Rn を地表上に大量を追い

出すので、表層気体中の Rn 濃度を逆に著しく低め、地表の γ 線量を減らす。

そこで、ガス漏出量が多い場合は地表放射能の減少に、ガス漏出量が少ない場合は地表放射能の増加となり、その中間の漏出量では鉱床が検出しにくくなる。また、ガス漏出量が多い鉱床では鉱床の周辺に漏出量が少ない条件が生じ、そのドーナツ状の地域に高い放射能が発生すると思われる。

この石油・天然ガスの調査では、解析に当たって各地層がもつ全 γ 線量の差を十分に配慮する必要性が指摘された⁹⁾。また、全 γ 線量の異常を指標に、リーフ・背斜・断層等の詳しい地質条件も指摘できた⁹⁾。

2・3 カーボンとエアボン

諸外国では、カーボンが数例試みられ、実用的成果が得られなかった。わが国でも、農林省農業土木試験場が1950年代末から1960年代の初めまでに、G-M 管のサーベイメータで数か所を野外検討したが、測定値の統計的変動は大きく、断層上の計数変動は認められなかった。

エアボンは大型の電離箱を検出器とする方法が1947年に米国で試験された¹¹⁾後、大型 G-M 管を数多く用いる方法が1948年からカナダ、英国、米国でそれぞれ始められた¹¹⁾。その結果、ウラン鉱を探査する可能性は認められたが、実用にはほど遠かった。

シーボンは試みられなかった。

3. NaI 検出器の全 γ 線量による解析

3・1 マンボン

1950年代に携帯用の NaI 検出器が開発され、地表の全 γ 線量を高い計数効率で短時間に測定できるようになると、この方法による埋没断層の検出は数多く試みられた¹²⁾。その結果、埋没断層上で計数増を認めたものの他に、計数増を認めないもの¹³⁾、逆に計数減を認めたもの¹⁴⁾、さらには断層以外の場所で部分的な急増や急減を認めたもの^{13),14)}等が現れ、この方法による埋没断層の調査方法は確実性が低いとされるに至った。

これらの多岐な現象を今日の技術的水準からみると、この測定方法では取り除けない条件を含む、以下に述べる数々の妨害要因があり、それらの認識と対処の不十分さに基づいたと思われる。

① 計数量の少なさで測定値がもつ統計的変動が大きくなり、そのことが断層地点で生じる変化を見いだしにくくした。

② 山、崖、地表の凹凸等、地表の水平さに対する乱れで生じる大幅な計数変化を、この測定方法では補正できなかった。

③ 道路舗装、建物、壁、石垣、敷石、置石等の人為条件で生じる大幅な計数変化も、この測定方法では補正できなかった。

④ 河、水路、湖沼、海等の存在で生じる計数の減少を、理論的に補正しなかった。

⑤ 日照、気温、風速等による表層気体と大気中の Rn 濃度の大幅な日周期変化、そして大気圧や降水も含めた諸気象条件の経時変化等による大幅な計数変化、さらに宇宙線シャワーの乱れ等を、補正しなかった。

⑥ 全 γ 線量に主指標となる3種の RI の地層含有率が、表層の各地質間で生じる大幅な差に基づく計数変化を、解析で配慮しない傾向が強かった。

⑦ 同じ表層地質でも、断層の上盤と下盤での含水率は一般に数十%もの変化が起こりやすい。その変化で生じる大幅な計数変化を配慮しなかった。

⑧ 断層には密着部、破碎部、開口部があり、存在確率が最も高い密着部では断層上での計数変化がなく、破碎部では計数が減少し、開口部では計数が増加するという認識がなかった。また、一般に破碎部や開口部は断層のごく一部にしか存在しないという認識をもたない場合が多かった。

以上の数多い問題点をもつが、わが国ではこの方法で断層上に計数増を得た報文が数多い。これは、谷沿いの断層を横切る測線で全 γ 線量の分布を求めると、地形条件から谷の中央部が最大になりやすく、かつそこに断層が存在しやすいこと、また、花崗岩のようなウラン含有率

の著しく高い地層が上流にあると、その風化堆積物の巨れきは断層が走る谷部に集中しやすいこと等の理由が存在したためと思われる。

近年、既知である断層上の計数減少を強く指摘する報文も認められるが、そこが断層の破碎部とする認識は認めにくく、また減少量のうちで上述した⑦の含水率による変動と⑧の破碎部による変動それぞれが、計数にどの程度を占めるかの解析は、なされていない。

全 γ 線量で断層を検出する試みは、上述した補正のむずかしい妨害要因を数多く含むので、この方法の実用中止が強く望まれる。

3・2 カーボン

道路網がその解析に必要なほどに発達しない諸外国では、カーボンをほとんど利用しなかったが、道路網の発達がその解析を満足する条件が多いわが国では、カーボンが地下水脈の探査やウラン鉱床の一次概査法として重点的に使われた。

地下水脈の探査は1945年以降に急増した山地や丘陵地での農地開発に必要となる水源開発に対し、それまでの電気探査による解析結果を背景に、割れ目系地下水脈の位置指摘の確率をより高める手段として、農林省農業土木試験場がとりあげた。1960年代の中期には検出器を直径と高さが5 cm の NaI 結晶をもつ検出器 2 本（結晶体積 206 cm³）とし、それらを自動車前面の両端に取り付け、時速約 4 km で測定した。この検出器では計数量の不足で統計的変動が大きい上、3・1 に述べた諸要因による変動が加わって、測定値に数多くのピークが出現し、その中でどれが断層かの判定は非常にむずかしかった。しかし、表層地質、地形、電気探査結果、それに露頭調査を加えた判断から、約 10 地区で辛うじて成功的結果を得た¹⁵⁾。

ウラン鉱床の探査は通産省地質調査所がわが国での重要な概査手段として、1956年から1968年までの13年間に47地区を1560日かけて、約15万km²について測定した¹⁶⁾。検出器は当初直径と高さが4.8 cm の NaI 結晶をもつ2本（結晶体積 87 cm³）であったが、その後直径が

12.7 cm、高さ 5 cm の大結晶（結晶体積 644 cm³）に変え、時速 20 km で 0.5 秒あたりに計測した¹⁷⁾。その結果、ウラン鉱がもつ高い γ 線量を指標に、全 γ 線量が異常増となる10数地域を見だし、そのうちで人形峠、宮津・奥丹後、東濃等で、精査後に有望なウラン鉱床を見いだした。

3・3 エアボーン

野外利用の結果、測定値の少なさで同じ表層でも測定値に大幅な変動を生じることが最大の問題点となり、対処に NaI 検出器の結晶体積の大型化が強力に進められ、結晶体積の約1桁増加で漸く実用的成果を生み始めた。

わが国では通産省地質調査所で、直径 12.7 cm、高さ 5 cm の NaI 結晶をもつ検出器 2 本（結晶体積 1 287 cm³）を用い、1956年から1960年までの5年間に、790 時間、6.5 万 km²を測定した。しかし、検出器の検出能の低さからウラン鉱床は検出できなかった¹⁸⁾。

カナダのエアボーン地質研究組織（AGRS）は1949年6月に4本の NaI 検出器で、高度 100 m から点状地点の固有性の指摘に成功し、1950年6月に直径と高さが5 cm の NaI 結晶をもつ検出器 5 本（結晶体積 515 cm³）で安定な連続測定に成功した。この年に米国の地質調査所とフランスの原子力委員会、それぞれエアボーン装置を開発した。

その後1955年にカナダの地質調査所は直径 5 cm、高さ 10 cm の NaI 結晶をもつ検出器 2 本（結晶体積 162 cm³）の装置で1.4 万 km を測定し、鉄鉱床を検出したが、ウラン鉱床の探査は計数量の不足で不満足となった¹¹⁾。

米国地質調査所を主体とするエアボーン組織（ARMS）は、1952年に直径 10 cm、高さ 5 cm の NaI 結晶をもつ検出器 6 本（結晶体積 2 470 cm³）を使うエアボーン装置を、1962年には直径 28 cm、高さ 8 cm の NaI 結晶をもつ検出器 1 本（結晶体積 3 130 cm³）を使うエアボーン装置をそれぞれ開発した。検出器の上面と側面を遮蔽し、また宇宙線と測定装置の上方向からの γ 線量の変化を求める検出器を備えた。その

野外測定は高度 100 m と 300 m で延長 160 km を検討した後、1958年から1962年までには高度 150 m で 31 地域、36 万 km^2 を測定し、全 γ 線量と表層地質の間に良い相関を見いだした¹¹⁾。地表の幾何学的条件は解析を妨げたが、それを無視できる地域では表層地質の解析に成功し始めた。サウジアラビアの測定では1971-72年に延長 1 万 km を測定し、得られた 2 000-17 000 cpm 間の測定値を約 2 000 cpm ごとに区分する方法で、苦鉄質岩、變成火成岩と變成堆積岩、花崗閃緑岩と片麻岩、そして花崗岩という 4 種類の表層地質と良い相関を得た¹⁹⁾。モロッコでは花崗岩、流紋岩、響岩、不整合等が検出できた²⁰⁾。さらに同じ地域で時期をずらした反復測定から積雪深を解析した例も生まれた²¹⁾。

3・4 シーボーン

海・湖底の全 γ 線量分布は、海棚のような平坦な条件で、1 本の NaI 検出器を用い、長い綱で海・湖底を引きずる方法が使われた。地上の測定に比較した利点は、宇宙線や大気圏の Rn の影響がなくなり、検出器の測定範囲が半径 0.7 m 以内に狭まるので、地表の幾何学的条件をほぼ平面にみなせる場合が増え、一般の人為条件による乱れがない。さらに 1 測定単位の長さが数百 m 台でよいと、結晶の小さい NaI 検出器で測定できる等があげられる。全 γ 線量は地質ごとに固有な γ 線放出 RI の含有率に従い、また地質条件が一定な場所では、原子炉廃棄物等からの放射能汚染をよく反映する。

そこで英国ではまず1956年に直径 12 cm、高さ 2.5 cm の NaI 結晶をもつ検出器 3 本（結晶体積 851 cm^3 ）の装置で原子炉事故の汚染分布を測定し¹¹⁾、引き続いて Templeton らが1959年から1965年までに英国の Irish 海東部で¹⁰⁶Ru の汚染解析に用いた²²⁾。これらの概査で得た問題地点の精査には、表層試料を採取し、その室内実験から種々の放射性核種の存在量を定量する方法がとられた。また、海底地質の解析では、後述する 3 核種の一次 γ 線量を指標にする方法も加えた全 γ 線量の測定を、Miller らが 5 年間にわたって延長 1 万 km 以上を実施し、

表層地質解析の可能性を得た²³⁾。全 γ 線量は地形条件と表層地質の変化という解析がむずかしい大幅な変動を受けるが、それは海底の詳細な状態を知る手段とし、その後も広く用いている。

4. 3 核種の一次 γ 線量による解析

1950年代末に NaI 検出器で γ 線のスペクトル分析が可能になると、各核種からの固有な放出 γ 線エネルギーごとの光電ピーク計数率を指標に、表層内のその核種の含有率が定量できるようになった。1962年に Adams らは、その分析が容易な高エネルギーの自然 γ 線である 2.61 MeV の ²⁰⁸Tl、1.76 MeV の ²¹⁴Bi、そして 1.46 MeV の ⁴⁰K という 3 核種を指標に表層地質の解析を試み、その携帯用装置を開発した²⁴⁾。

この測定値は 3・1 に示した全 γ 線量の測定値がもつ妨害条件を同様にもつが、測定するチャンネル数の増設や、解析方法の工夫で、それらを大幅に除去できる。そして、表層地質の解析に、以下に述べる数多い利点をもつ。

²¹⁴Bi の光電ピーク計数率はウラン系列の各核種が放射平衡にあるとみたときの地層の U 含有率を反映し、²⁰⁸Tl の光電ピーク計数率はトリウム系列の各核種が放射平衡にあるとみたときの地層の Th 含有率を反映し、⁴⁰K の光電ピーク計数率は地層の K 含有率を反映する。そして地層の K 含有率は岩の生成条件を反映する基本的構成元素であり、地層の U と Th の含有率は地層の Si と Al の合計量を反映する¹¹⁾。加えて、岩や地層のこれら 3 元素の含有率は地質ごとに固有値をもち、かつそれらは約 1-2 桁の幅で分布するので、これら 3 核種それぞれの一次 γ 線量を指標に、表層地質をかなり詳しく区分できる²⁵⁾。

また、岩や地層の一次 γ 線量が母岩がもつ固有値から漸減する現象は、主に岩や地層の風化度を反映する。そこで、3 核種の光電ピーク計数率で表層の風化度を評価することができ、またそれらの風化物が下流域に移行する状態をこれらの光電ピーク計数率の分布で追跡でき

る²⁶⁾。局所的な著しい風化となる断層の破碎部では、これらの一次 γ 線量の急減現象でその存在を知り、かつその急減度は基本的に破碎度を数値評価する²⁶⁾。

さらに、構造運動で地層ブロックの間に生じやすい、断層の一部に生じる垂直的な深い開口部では、深層から Rn が上昇して最上部の薄い被覆層に蓄えられる。その現象は、 ^{222}Rn の娘核種である ^{214}Bi の一次 γ 線量が地表で急増する現象として知ることができ、かつその急増度は基本的に深層からの ^{222}Rn の上昇量を反映する²⁵⁾。

以上の諸利点をもつので、3 核種の一次 γ 線量による表層地質の解析は急速に広い研究をみるに至り、数多くの成果を生んだ。

4・1 エアボーン

3 核種の光電ピーク計数率は全 γ 線量の計数率よりも 1 桁以上減少する。そこでまず NaI 検出器の結晶体積の増加が図られた。米国海軍では 1963 年に放射能汚染調査の目的で、直径 29 cm、高さ 20 cm の NaI 結晶をもつ検出器 6 本（結晶体積約 4.1 万 cm^3 ）の装置を作製した²³⁾。カナダの地質調査所は 1968 年に、直径 23 cm、高さ 10 cm の NaI 結晶をもつ検出器 12 本（結晶体積 5.0 万 cm^3 ）の装置を、さらに 1978 年には、直径と高さが 10 cm で長さが 41 cm という矩形状の NaI 結晶をもつ検出器 12 本（結晶体積約 4.9 万 cm^3 ）の装置を作製した²⁷⁾。これらの結晶体積は全 γ 線量のエアボーンで用いた装置の最大の結晶体積より約 20 倍多い。

カナダの地質調査所では BG 計数に飛行機やヘリコプター内の RI からの γ 線、宇宙線、大気中の ^{222}Rn の娘核種である ^{214}Bi からの γ 線をあげた。大気中の ^{222}Rn 濃度は、朝 8 時より午後 3 時が約 4 倍も多くなる。それに加えて場所による変化と宇宙線量の経時変化とは、上方からの γ 線量測定で知るほかにないとした²⁸⁾。装置のエネルギー増幅率の変動は、 ^{40}K の光電ピーク計数率を 2 分割し、その少ない量の方向に増幅率を移動させる方法で対処した²⁹⁾。また、3

核種それぞれの光電ピーク計数率の測定チャンネルに含まれる他の放出エネルギーをもつ γ 線のコンプトン散乱計数率が、特定核種の γ 線量の急増で変動する現象を実測した。さらに対地高度や地表の幾何学的条件の変化、そして海・湖上の変化等による光電ピーク計数率の変化も実測した。また、断層地点では計数変化が認められず、ウラン鉱床の存在は U/Th 値が最もよく反映する現象を見いだした³⁰⁾。以上の諸検討項目での諸状態に応じた計数変化の関係は、実測値からの係数で補正する方法を用いた³¹⁾。また、室内実験値を解析基準に変える方法、人為条件の修正方法、一般の U, Th, K の条件からはずれた含有率をもつ表層の対処方法等も検討した。

以上を背景として、長さ 250 m の地域を単位に、地域の γ 線量が 3 核種のいずれか、または 2 核種の混合比になることを基準とするカラー γ 線量図を作製した。その方法は IAEA で 1976 年に公刊され³²⁾、その後の成果は 1991 年に Grasty らが発表した³³⁾。

カナダでは 1/5 万 - 1/100 万のカラー地質図を年々 20 件台で発表している。表層地質調査とウラン探鉱以外の利用例には、積雪深測定³⁴⁾、環境放射線量のモニター³⁵⁾、核施設からの大気放出核種の分散状態のモニター³⁶⁾、COSMOS 954 衛星からの放射性破片の探査³⁷⁾、チェルノブイリからの Cs のモニター³⁸⁾、土壌の Rn 濃度レベルのモニター³⁹⁾、そして Ag, Au, Be, Bi, Co, Cu, Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, Sn, W, Zn, Zr 等の鉱床探査⁴⁰⁾があげられる。

細分された表層地質の状態がかなり詳しく調査されているわが国では、エアボーンによる表層地質の解析は試みられず、2 業者がエアボーンによる断層調査を進めている。しかし、米国やカナダで用いられている大結晶 NaI の数分の 1 という小体積の検出器で、米国やカナダで検出ができないとされた断層を指摘している。恐らく計数率の不足、大気圏の Rn 濃度の位置変化、宇宙線の経時変化、そして地形や人為条件等による測定値の複雑な乱れ等で生じた数多くのピークから、適当に都合良いものを引き出

して判断していると思われる。

4・2 マンボーンとカーボン

山地・丘陵地での農業水源の開発に必要な割れ目系地下水脈の位置探査法として、地表 γ 線法の研究を続ける農林省農業土木試験場は、1960年代末から3核種による方法を採用した。当初はNaI結晶の体積の少なさが研究を妨げたが、結晶体積の増加で1975年頃から成果が認められ始め⁴¹⁾、1980年代に入ってNaI結晶が直径と高さ10.2 cmの検出器12本（結晶体積9 884 cm³）になって、諸現象の詳しい定量解析が可能となり、その野外測定結果から3・1に述べたような諸妨害現象が明らかとなり、それらに対処する解析方法を大幅に進展できた。現在、(株)日さくでは直径と高さが12.7 cmのNaI結晶をもつ検出器を15本（結晶体積約2.4万 cm³）で測定し、かつ3核種中で一次 γ 線量が最小になる²¹⁴Biに対し、1.12 MeVの γ 線量を加え、約2倍の計数率にした。さらにRnの経時変化を補正するTlのコンプトン散乱計数率用のチャンネルを加えた。エネルギー増幅率の補正は¹³⁷Cs線源の光電ピークを2分割する方法を用いた。

わが国の各地層のU、Th、Kの含有率の傾向は金谷ら⁴²⁾と三宅ら⁴³⁾が取りまとめた。その相関を背景に一次 γ 線量を²¹⁴Bi/²⁰⁸Tl、²¹⁴Bi/⁴⁰Kという二つの比の値にすることで表層の幾何学的条件と人為条件を大幅に取り除き、加えて同じ表層でこの値が変化する比率が正のときは断層の開き口部を、負のときは断層の破碎帯をそれぞれ指摘する。その解析能を高めるため、母集団を対象地点の前5地点ならびに後5地点での平均値とし、それらに対する対象地点の変化率を求め、その最小値を解析指標にした。測定時速は4 kmで30秒単位（延長約33 m）とした。これはヘリコプター測定の単位距離を1桁縮めたものとなる。また、重要地点では距離数十cmごとの値を知ることができる。この方法で、同じ表層における各測点の変化率は平均 $\pm 1\%$ 、最大で3%以内に納まり、断層を含む地質境界は5%付近に集中し、10%以上で

30%以内の地点のうち、正の値は開口割れ目、負の値は破碎帯という区分で、これらの断層がもつ開口度と破碎度を定量解析した²⁶⁾。また、地熱が高温で表層に近いほど正の変化率は30%以上120%までに増え、地熱や温泉の開発適地探査に良い検出法となった²⁵⁾。また、地震で生じた地層ブロックの歪みが断層のずれで打ち消されていく状態を、この測定方法の反復で得た開口部の発生・拡大・転移等から知ることができた⁴⁴⁾。今後は地震・地すべりの発生時期や被害地域の予測に進展できる可能性がある。

自動車が入れない地域やカーボン実施後の精査には、直径と高さが12.7 cmのNaI結晶（結晶体積1 609 m³）をもち、カーボンと同じ解析能をもつマンボーン装置を1地点5分測定する方法を用い、道路から離れた断層の状態を数十cm間隔に詳しく求め、断層の走向や開口部・破碎部の発生状態を詳しくわかるようにした⁴⁵⁾。

4・3 シーボーン

この分野の研究は英国がNaI検出器を海底に引きずる方法を主体に進められ、1980年代には、海底地質と人工のRI汚染調査に広く用いられた。わが国では汚染調査が研究段階にあり、野外測定には至っていない。しかし一方で、海底断層の詳しい状態の解析というわが国独自の方法が実用的成果をあげた。

海底のNaI検出器による γ 線スペクトル分析は、陸上の測定に較べて3・4の冒頭に述べた利点をもつ。海底からの3核種の一次 γ 線量と全 γ 線量をNaI検出器で測定する方法は、Bowieら（1972）が直径と高さ7.6 cmのNaI結晶（体積348 cm³）をもつ検出器を水深200 mの海底に長さ850 mの綱で時速4.8 - 6.4 kmで引く方法で始まった⁴⁶⁾。

海底地質の解析は、Millerら（1977）が同じ大きさのNaI結晶をもつ検出器または直径12.7 cm、高さ7.6 cmのNaI結晶（体積965 cm³）の検出器を用い、エネルギー増幅率の補正線源に0.5 μ Ciの²⁴¹Amを使い、単位測定時

間を10分とし、入力を4096チャンネルに区分したものから目的の範囲を集める方法で、5年間に1万km以上を測定した⁴⁷⁾。3核種間の γ 線量比による地質の同定には、地上での測定値と既往の海底地質とを基準にした。

その後、Jonesら(1988)は花崗岩地域を測定し、生成年代の差、熱変成、その他の詳しい地質条件の解析に成功した⁴⁸⁾。

人工RIによる海底汚染の解析は、Millerら(1973)が¹⁰⁶Ruを512 keVで、¹³⁷Csを662 keVで、そして750–860 keVをBGとし、全計数を加えた30チャンネルの解析法で調査し、成果を収めた⁴⁹⁾。その後Millerら(1982)は対象地域を長さ6.4–13 km単位に区切り、1地点10分が単位のスเปクトル分析から¹³⁷Cs量を求める方法で、延長約1730 kmを時速6.4 kmで14日間連続測定した。その検出限界は海底で0.14 pCi/lとなった⁵⁰⁾。

わが国では球形のNaI結晶による人工RI汚染解析の研究が、1991年から日本原子力研究所で始められたが、実用的成果は得ていない⁵¹⁾。

太平洋プレートとフィリピン海プレートのもぐり込みで、地震が発生し、地形が変わるわが国では、海底での地層の変形と断層の発生、そして地層ブロックの移動状態等が重要な検討課題になる。その調査方法に深部は地震探査法、浅層部は音波探査法が用いられている。後者の場合、垂直方向の段差が大きな断層は検出確率が高いが、段差が少ないときや、実用に重要な地層ブロックの水平ずれ、回転の状態、断層の確実な位置、断層の密着・破碎・開口等の状態は解析できない。このことは海底トンネルの計画や施工、海中の地下水や温泉の湧出機構、地震で発生した海中断層の機構解析等に支障を来す。それらへの対処に、海底の3核種の一次 γ 線量を指標とする方法が開発・利用された²⁶⁾。

検出器は直径と高さが12.7 cmのNaI結晶をもつ検出器12本(結晶体積1.93万cm³)で、それを直径0.9 m、高さ約0.7 mの円筒状容器に納め、任意測線上を2 m間隔に、1地点500秒の測定をしていく。水深10 mの測定

値をBG計数として取り除いた。調査地点は海流が最高時速3–5 kmにあったが、GPSと光波3点測定の併用で誤差10 cm以内に位置を決めた。音波探査による想定断層を横切る3本の測線を各200 m長さに設けて調査した結果、各核種の一次 γ 線量の分布状態から、母岩とその風化堆積物が海深の深まる方向に漸移し、それが特定の海流で乱される状態等が詳しく示された。そして4・2で述べた解析法による検討から、想定断層上盤の角と、下盤側の表層部2か所に全測線をつなぐ破碎帯が検出され、また両端部の測線に発生した約10か所の開口割れ目の分布状態から、この地層ブロックの回転運動の方向を知ることができた。

文 献

- 1) Ambronn, R.: "Elements of Geophysics", pp. 127–133 (1926)
- 2) たとえば Borne, G.: Untersuchungen über die Abhängigkeit der Radioaktivität der Bodenluft von geologischen Faktoren, Habilitationsschrift (Breslaw, 1905); Ambronn, R.: Die Erderforschung vermittelt elektrischer und elastischer Wellen und mittels radioaktiver Untersuchungen, Umschau, **34**, (49), pp. 55–59 (1922)
- 3) 初田甚一郎, 松沢 明, 亀井 清: 京都大学理学部地質学鉱物学教室学術報告, **1**, 1 (1942)
- 4) 落合敏郎: 物理探鉱, **4**, (2), 78–79 (1951)
- 5) Lorenz, P. J., Rodenberg, O. C., Shadle, L. G., Antes, A. C., and Hess, W. D.: *Proc. Iowa Acad. Sci.*, **68**, 397–403 (1961)
- 6) 飯島南海夫, 堀内公子, 村上悠紀雄: 温泉科学, **32**, 42–51 (1981)
- 7) 環境庁: "地熱発電の自然生態系に与える影響に関する研究", pp. 13–16, 27 (1978)
- 8) 石井武政, 加藤 完, 寒川 旭: 地調月報, **36**, (3), 111–118 (1985)
- 9) Armstrong, F. E. and Heemstra, R. J.: *Oil and Gas, J.*, June 5, 88–97; and June 12, 152–161 (1972)
- 10) 木村重彦, 大平成人, 小前隆美: 農土試報, **13**, 1–34 (1975)
- 11) Darnley, A. G.: *Nucl. Geophys.*, **5**, (4), 377–402 (1991)
- 12) Tanner, A. B.: *Natural Radiat. Environ.*, 227–

- 237 (1964)
- 13) Clark, R. W. and Botset, H. G. : *Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol.*, **16**, (12), 1349-1356 (1932)
- 14) Howell, L. G. : *ibid.*, **18**, (1), 63-68 (1934)
- 15) 落合俊郎：「放射能式地下水探査法」，昭晃堂，(1965)
- 16) 堀川義夫：地質調査所報告，**232**，365-395 (1969)
- 17) 小尾中丸，氏家 明：同上，**232**，359-364 (1969)
- 18) 岩崎章二：同上，**232**，353-358 (1969)
- 19) Flanigan, V. J. : *Natural Radiat. Environ.*, **II**, Part II, 667-679 (1972)
- 20) Damnati, A. and Naudy, H. : *Geophysics*, **40**, 331-343 (1975)
- 21) Loijens, H. S. and Grasty, R. L. : Airborne measurement of snow-water equivalent using natural gamma radiation over southern Ontario, 1972-1973, Sci. Ser. 34, Inland Waters Direct. Dept. Environ. Ottawa, p. 31 (1973)
- 22) Templeton, W. L. and Preston, A. : Transport and distribution of radioactive effluents in coastal and estuarine waters of the United Kingdom, Disposal of Radioactive Waste into Seas, Ocean and Surface Water, IAEA, Vienna, SM/72/16, pp. 267-289 (1966)
- 23) Miller, J. M. et al. : A towed sea-bed gamma-ray spectrometer for continental shelf surveys, Intr. Symp. Nucl. Tech. Expl. Extr. Proc. Mineral Res., IAEA SM/216/62 (1977)
- 24) Adams, J. A. S. and Fryer, G. E. : *Natural Radiat. Environ.*, Part II, 577-596 (1963)
- 25) 木村重彦：温泉科学，**137**，(1)，1-20 (1986)；Kimura, S. : *Radiat. Prot. Dosim.*, **24**, (1/4), 59-62 (1988)
- 26) 俣日さく：本淡，友ヶ島南海域断層調査報告書，鉄建公団大阪支社 (1994)
- 27) Bristow, Q. : A gamma ray spectrometry system for air-borne geological research, Cur. Res. Part c, Geol. Surv. Canada, Paper 79-1C, 55-61 (1979)
- 28) Grasty, R. L. : Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration-theory and operational procedures, Geophys. Geochem. Search Metal. Ores, Geol. Surv. Canada, Econ. Geol. Rep. 31, 147-161 (1979)
- 29) Bristow, Q. : *ibid.*, 135-146 (1979)
- 30) Killeen, P. G. : *ibid.*, 163-229 (1979)
- 31) Roberts, A. and Liedtke, J. : Airborne definition of suspended surface sediment and intertidal environments in the Fraser River plume, British Columbia, Cur. Res. Part A, Geol. Surv. Canada, Paper 86-1A, 571-582 (1986)
- 32) IAEA : Radiometric reporting methods and calibration in uranium exploration, Tech. Rep. Ser. 174, Vienna, p. 57 (1976)
- 33) Grasty, R. L., Melander, H. and Parker, M. : Airborne gamma ray spectrometer surveying, Tech. Rep. Ser. 323, STI/DOC/10/323, IAEA, Vienna, p. 97 (1991)
- 34) Grasty, R. L. : *Water Resour. Res.*, **55**, 213-235 (1980)
- 35) Grasty, R. L. et al. : *Geol. Surv. Canada Bull.*, **360**, 39 (1984)
- 36) Grasty, R. L. : *Radiat. Sources Geos.*, **12**, (2), 1-5 (1983)
- 37) Bristow, Q. : The application of airborne gamma-ray spectrometry in the search for radioactive debris from the Russian satellite, Cosmos 954, Geol. Surv. Canada Paper 78-1B, 151-162 (1978)
- 38) Mellander, H. : Airborne gamma spectrometric measurements of the fall-out over Sweden after the nuclear reactor accident at Chernobyl, USSR, IAEA/NENF/NM-89-1, Vienna, p. 41 (1989)
- 39) Duval, J. S. and Otton, J. K. : *Geophys. Res. Lett.*, **17**, (6), 801-804 (1990)
- 40) Darnley, A. G. and Ford, K. L. : Regional airborne gamma-ray surveys ; a review, Proc. Explor. '87, 3rd Intr. Conf. Geophys. Geochem. Eaxplor. Min. Groumdwater, 229-240 (1989)
- 41) 木村重彦，小前隆美，西嶋輝之，石黒 進：第12回理工学における同位元素研究発表会要旨集，p.26 (1975)
- 42) Kanaya, H. and Ishihara, S. : *Natural Radiat. Environ.*, **II**, part 2, 517-533 (1972)
- 43) Miyake, Y., Sugimura, Y. and Hirao, Y. : *ibid.*, 535-558 (1972)
- 44) 木村重彦：科学朝日，1988年7月号，122-128 (1988)
- 45) 木村重彦，高野 彬，五十嵐生男：応用地質，**31**，(4)，15-24 (1990)
- 46) Bowie, S. H. U. and Clayton, C. G. : *Trans. Inst. Min. Metal.*, **81**, B215-6 (1972)

- 47) Miller, J. M., Roberts, P. D., Symons, G. D., Merrill, N. H. and Wrmald, M. R. : A towed sea-bed gamma-ray spectrometer for continental shelf surveys, *Intr. Symp. Nucl. Tech. Explor. Extrac. Proces. Min. Res., IAEA SM/216/62*, p. 30 (1977)
- 48) Jones, D. G., Miller, J. M. and Roberts, P. D. : *Proc. Geol. Ass.*, **99**, (3), 193-203 (1988)
- 49) Jones, D. G., Roberts, P. D. and Miller, J. M. : *Estuarine, Coast. Shelf Sci.*, **27**, 143-161 (1988)
- 50) Miller, J. M., Thomas, B. W., Roberts, P. D. and Creamer, S. C. : *Marine Pollut. Bull.*, **13**, (9), 315-319 (1982)
- 51) 日本原子力研究所：平成3年度海洋モニタリングシステム整備調査成果報告書, p. 84 (1992) ; 平成4年度同上, p. 81 (1993)
-