福岡県二日市温泉地域における γ 線スペクトル探査

—— 探査データの信頼性評価 ——

茂木 透*, 岡田真一郎*

Gamma-ray Spectra Survey in Futsukaichi Hot Springs, Fukuoka Prefecture.

—— The Reliability of Spectre Data ——

Tohru MOGI* and Shin'ichirou OKADA*

Abstract

We carried out a gamma-ray spectra survey to discuss the relation between geological structures associated with discharge of hot springs and gamma-ray intensities for three radioactive elements, ^{40}K , ^{214}Bi and ^{208}Tl , using a portable multi-channel gamma-ray spectrometer, in the Futsukaichi Hot spring area, Fukuoka Prefecture, Southwest Japan. A data analysis method, based on Covell's method (1959), including the error estimation of observed data was used in this study. Detection limits of gamma-ray from each element based on Currie's method (1966) was also applied.

Results of the field survey showed high gamma-ray intensity areas for Bi well correspond to inferred faults which are associated with discharge of hot springs. This means that ^{222}Rn , the parent element of Bi, comes up to the surface together with circulating hot water. High intensity areas for Tl correspond to places of hot spring wells. This fact was interpreted that Tl is accumulated at the place where the hot water comes up to the surface rapidly, because ^{220}Rn , the parent element of Tl, has very short half-life time. We concluded that the high gamma-ray intensities of Bi and Tl are an indicators for existence of upward-moving hot water flow.

1. はじめに

放射能探査は、初田¹⁾が1940年代に土中空気中の放射能測定による地質調査法を研究して以来、多くの地域で温泉探査法として用いられてきた。従来の探査では、 α 線検出器により土中空気中のラドン濃度を測定する方法に加えて、小型のガイガーカウンターやシンチレーションカウンターを用いて γ 線の強度を測定する計数管法が、断層調査あるいは温泉調査等に多用されている。この計数管法は地表にセンサーを設置するだけで容易に測定できるが、ラドンによる γ 線だけでなく、全成分の γ 線強度を測定することになる。特に地表付近の岩石にはカリウムが多く含まれており、その影響は大きいと考えられる。

近年、小型で可搬性のある γ 線スペクトルメータが開発され、地質調査に用いることが可能となった。それに

よれば、エネルギーの異なる成分毎の γ 線強度が得られる。 γ 線スペクトルメータを用いた探査(γ 線スペクトル探査)は、ウラン探査にエアボーンやカーボーンとして多用されてきた²⁾。また、温泉調査³⁾や活断層調査⁴⁾に応用した例も報告されている。温泉水中や泉源周辺の土中に、 ^{222}Rn や ^{220}Rn (トロン (Tn) と呼ぶこともある) が濃集していることが報告されており⁵⁾、その地下における挙動も検討されている。このことは、放射能探査が温泉調査に有効であることの根拠となるであろう。

本論文では、放射能探査では従来議論が少なかった計数値の統計的誤差の算出法や各元素の検出限界の判定法を用いることを提案した。その上で、福岡県二日市温泉地域での γ 線スペクトル探査により、種々の成分の挙動と泉源分布、それに係わる断層との関係について検討し、この探査の温泉調査へ適用する際の指標についても述べた。

* 九州大学工学部資源工学科 (Department of Mining, Faculty of Engineering, Kyushu University)

2. 地表で観測される γ 線

地殻浅部における放射性元素の挙動については、これまでも多くの研究がなされている⁶⁾。これらの結果を基に考えると、地表において観測される γ 線の地下からの原因としては、次のような過程が考えられる。地殻中に存在する放射性元素の多くは、壊変系列中において移動しやすい不活性気体であるラドン (Rn) になる。ラドンを生じる自然放射能元素の壊変系列は3系列あるが、元素の存在比、同位体の半減期から見ると、自然界に存在するラドンの大部分は、ウラン系列の ^{222}Rn とトリウム系列の ^{220}Rn であろう。これらのラドンは断層破砕帯の地殻中の割れ目を通して地表付近に達し、土壤等に吸着される。吸着されたラドンは、さらに安定な ^{206}Pb や ^{208}Pb になるまで壊変するが、その娘元素の中に γ 線を発生させるものがある。 ^{222}Rn の娘元素では、半減期により決まる放射平衡の条件や放射エネルギーの強度から、 ^{214}Bi や ^{214}Pb による γ 線が観測され、 ^{220}Rn の娘元素では、 ^{208}Tl 、 ^{212}Pb 、 ^{228}Ac 等によるものが観測される。したがって、地下に断層等の割れ目のある所では、それに沿ってラドンが上昇してくれば、地表でのこれらに対応する γ 線強度は大きくなるであろう。

ところで、 ^{222}Rn の半減期は3,825日であり、 ^{220}Rn の半減期は54.5秒であるから、その地下での移動距離には違いがあると考えられ、 ^{222}Rn の方が比較的深部から運ばれるのに対して、 ^{220}Rn の方は、放射能源が浅い所に多くある場合や、浅部でラドンを運ぶ速度が速い時に地表近く達すると考えられる。

これらの他に、自然に多く存在する放射性元素としては ^{40}K がある。この元素は、地表付近に分布する岩石にUやThよりも桁違いに多量に含まれている。それによる γ 線強度は、地下の割れ目の存在以外に、岩体の ^{40}K の含有量や岩体の深度等に依存する。また、水にも溶けやすいので、地表水により濃集されている所でも強度が大きくなることがあると考えられる。このように元素によって、もたらす地下の情報に特徴があるので、元素毎の γ 線強度を測定することにより地下の物質移動に関する知見が得られる。

3. 探査方法

元素により放射する γ 線のエネルギーが異なるので、そのスペクトルをとることにより、元素毎の γ 線強度を知ることができる。今回の探査には、日本原子力事業(株)製 E-560A マルチチャンネルアナライザーを使用した。エネルギーの測定は、およそ3 MeV までの範囲を1024

チャンネルで記録した。センサーは、直径および高さが4 in.のNaI結晶を持ったシンチレーション検出器である。この検出器は、 γ 線がNaI結晶に入射すると適当な波長の光が放出されるので、それを光電子増倍管で電気信号に変換するものである。それから送られる電気パルスは、その波高が γ 線の検出器に与えたエネルギーに比例する。そこで、波高値毎に頻度分布をとることにより γ 線のエネルギースペクトルが得られる⁷⁾。

Bi, Tl から放出される γ 線は、多くのエネルギー値を持つが、放射能探査では、Biは1.76MeV、Tlは2.61MeVといった各元素の最も大きいエネルギー値を観測するのが有利であろう⁸⁾。Kは1.46MeVのエネルギー値のみである。

4. 探査データの解析および評価法

自然計数のような多成分系の場合、スペクトルメータで得られる各エネルギーレベルでの全カウント数 (T) は、そのままでは元素の含有量と比例しない。 T は、対象とする元素による寄与 (N) と他のバックグラウンドノイズによるもの (B) との和と考えられる (図-1)。したがって、対象とする元素の正味のカウント数 (N) は次式で与えられる⁹⁾。

Fig. 1 Net count area and back ground area. These area are divided by the line between both ends of the range of interest.

$$\begin{aligned}
 T &= \sum_{i=p-n}^{p+n} C_i \\
 B &= (C_{p-n} + C_{p+n})(2n+1)/2 \\
 N &= T - B = \sum_{i=p-n}^{p+n} C_i \\
 &\quad - (C_{p-n} + C_{p+n})(2n+1)/2
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 C_i は i チャンネルでのカウント数、 $2n+1$ は関心領域のチャンネル数（正味の計数値を得る時のピークの幅）を表す。このような計数値には誤差が含まれているので、その範囲を求めるために次式でそれぞれの分散を計算する。

$$\sigma_B^2 = \{(2n-1)/2\}^2 \times (C_{p-n} + C_{p+n}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_N^2 &= \sigma_T^2 + \sigma_B^2 \\
 &= T - (C_{p-n} + C_{p+n}) + \sigma_B^2 \\
 &= N + (2n-1)B/2
 \end{aligned} \quad (3)$$

放射能壊変がポアソン分布に従う確率過程であることを前提にすれば、 N に対する標準誤差は σ_N で与えられる。したがって、測定結果は $N \pm \sigma_N$ で表示することになる。 $N \leq 0$ の場合は、その成分は検出されなかったことを意味する。また、 $N > 0$ であっても、元素が有意に検出されたことを統計的に判定する基準を以下のように定める方法が提案されている¹⁰⁾。

判定限界： $2.33\sigma_B$

検出限界： $2.71 + 4.65\sigma_B$

定量限界： $50 \{1 + (1 + \sigma_B^2/12.5)^{1/2}\}$

これらの限界値を用いて、測定値の信頼性を次のようにランク付けできる。

$D < \text{判定限界} < C < \text{検出限界} < B < \text{定量限界} < A$

この基準は、5%を危険率とした t 分布による仮説検定を基にして導かれている。すなわち、計数値が判定限界以下であれば対象元素が存在する確率は5%以下であると言え、検出限界以上であれば元素が存在しない確率は5%以下であると言える。また、定量限界以上は、正味の計数値（ T ）が標準偏差の10倍以上という条件を満たす範囲である。データの信頼性はこの順で上がって行くことになるが、判定限界以下では統計的には検出されていないことになるので、 D の記号のついた測定値は $N > 0$ でも検出されていないとみなすことにした。また、 $N \leq 0$ の場合は記号Eをつけることにした。

γ 線スペクトル探査は、微弱な γ 線を限られた時間内に測定する必要があるため、以上のような統計的処理に

Fig. 2 Location of measuring sites, hot spring wells and faults inferred from lineaments.

より、データの信頼性を評価することが定量的解釈には重要であろう。

5. 二日市温泉地域での探査

二日市温泉は、福岡市の南郊にあり、十数本の泉源が分布し、最高泉温約46°Cである。図-2に主要泉源および推定断層の位置¹¹⁾を示した。温泉水は、pH8.1~8.8のNa/Cl/HCO₃型で、ラドンの含有量は数~30マッヘで南部の泉源で高い¹²⁾。この地域には、中世代白亜期の花崗岩類が分布しており、温泉はそこから湧出している。付近には第四紀の火山活動の痕跡は見られず、この温泉の熱源は明らかではないが、深部の熱水が破碎部に沿って上昇してきて温泉となっていると推定される。

今回の測定では、各測点において、地表の γ 線強度を300秒間測定し、それぞれのエネルギーに対する値を得た。計数値は、cpm(1分間当りのカウント数)に換算し、その結果を付表に示した。測定時間を長くすれば、標準誤差は小さくなり、精度のよい測定が可能となるが、その分探査能率は低下する。したがって、測定時間は、測定に高い精度が要求される場合や、 γ 線強度が弱い場合に長くするのがよいであろう。また、関心領域はピークを中心に前後20チャンネル（約60keVのエネルギー幅に相当する）とした。この幅も広くとれば、計数値が多く

なり精度は向上するが、ピークの裾付近はバックグラウンドの影響で値の変動が大きく、短時間の測定ではこの部分を含めるとかえって誤差を生じるので、必要以上に広いピーク幅をとらない方がよい。

各元素毎の計数値を測点上にプロットしたものを図-3～5に示した。ここで、測定値がDランク以下の地点(TIについて4地点ある)は元素が検出されていないと考え、プロットしていない。特定の地域の元素毎の平均的な γ 線強度は、岩石の分布、地形、地表状況等の地域固有の条件により決まっていると考えられる。これらの条件の計数値への影響は、個々に定量的に評価することは難しく、したがって、計数値それ自体から直接泉源やそれに関連する地質構造との関係を議論することは、現状では困難である。そこで、元素が検出されないとは判定できないと考えられるCランク以上(判定限界以上)の全測点についての計数値の平均値をとり、それとの相対的な大小関係により議論することにした。調査地域内の異常地域を明らかにするためには、このようなデータ整理法が勝っている。測定結果は、各元素毎に全測点に対する平均値(m)および標準偏差(σ)を計算し、次のように大小関係を1～4にランク分けした。

$$1 > m + \sigma > 2 > m > 3 > m - \sigma > 4$$

各図ではこのランクに従って記号を変えて示した。図の説明中に示した各元素の標準偏差は、測定値の誤差範囲より大きく、このようなランク分けは今回の測定において有意であると考えられる。

付表には、測定値の右の欄に信頼性のランク(A～E)と大小関係のランク(1～4)を示した。Kの測定値では信頼性はすべてAランクであり、BiやTIでもA、Bランクのものが多く、これらの測定値は検討に値するものと判断される。BiやTIでは一部Cランクも見られるが、Cランクの測定値では標準偏差がほぼそれと同じ大きくなり、その測定値は重要視しない方がよいと考えられる。一般には大きい値ほどAランクになりやすく、小さい値はC以下のランクになりやすい。

図-3のKによる γ 線強度分布では、強度の大きい所は泉源周辺地域にも見られるが、全体的に値の変動は少なく、変動係数(標準偏差/平均値)はBiやTIの半分以下である。この地域には花崗岩類が分布しており、そのKの含有量も比較的多いので、それによる γ 線強度は他の地質に比べて全体的に大きいと考えられる。図-4のBiの γ 線強度分布では、泉源地域とその北西方に強度の

Fig. 3 Net count (cpm) of K. Mean = 837, St. Dev. = 145.

● : >982, ○ : 982~837, ▽ : 837~692, ▼ : <692.

Fig. 4 Net count (cpm) of Bi. Mean = 45, St. Dev. = 15.

● : >60, ○ : 60~45, ▽ : 45~30, ▼ : <30.

Fig. 5 Net count (cpm) of Tl. Mean = 33, St. Dev. = 13.

● : >46, ○ : 46~33, ▽ : 33~20, ▼ : <20.

Fig. 6 Bi / K ratio. Mean = 0.053, St. Dev. = 0.016.

● : >0.069, ○ : 0.069~0.053, ▽ : 0.053~0.037, ▼ : <0.037.

大きい所が見られる。強度の大きい所は、図-2に示した泉源近傍を通る推定断層とほぼ一致している。このことから、この断層に沿って温泉水が上昇しており、それに伴ってラドンガスが上昇しているものと解釈することができる。図-5のTlの γ 線強度の分布では、泉源近傍やその北西および南東に強度の大きい地点が見られるが、局在している。この場合も強度の大きい所は泉源を通る断層上にあると言える。Tlによる γ 線は、その母元素である ^{220}Rn の半減期が短いために、地表近傍まで上昇流が達しているような所で、特に大きな強度を示すと考えられる。

以上述べたような計数値は、地表条件や気象条件等の影響を受けることがある⁶⁾。そこで、同時に観測された各元素の計数値の比を用いることによりこの影響を軽減する方法がある。図-6, 7にBi/K, Bi/Tlの分布をそれぞれ示した。図-6のBi/K値はKの値が全体的に変動が少ないので、その分布はBiの分布とほぼ一致し、Bi/K値が大きい地点は泉源付近を中心にその北および南にある。しかし、一部その範囲が南西側の周辺部に広がっている所も見られる。南西側周辺部には泉源とは対応しない所が見られるが、このような地点の中には、Kによる γ 線強度が相対的に小さいために、Biの強度も小さいのかかわらずBi/K値が大きくなった所もある。図

Fig. 7 Bi / Tl ratio. Mean = 1.46, St. Dev. = 0.66.

● : >2.12, ○ : 2.12~1.46, ▽ : 1.46~0.8, ▼ : <0.8.

-7に示した Bi/Tl 値の分布では、値の大きい地域は主として泉源の周辺に多く分布し、泉源ではむしろその値は小さい。このことは、泉源近傍では地表近くまで上昇流があり、そのため Tl の強度が大きくなり、Bi/Tl 値を小さくしていると考えられる。泉源周辺では、Bi, Tl ともに強度が大きく、かつ Bi/Tl 値も大きい、調査地域の南部に見られる Bi/Tl 値のやや大きい地域では両方とも小さい。

以上のような調査結果は、Bi や Tl による γ 線の強度が、熱水の上昇地域を示すデータとして有用であることを示している。また、Bi, Tl ともに大きく、かつ Bi/Tl 値の大きい地点が泉源周辺に見られるが、泉源近傍ではその値はむしろ平均値以下の地域になっている。このような結果は、 γ 線スペクトル探査による温泉源調査の指標となろう。

6. 議 論

γ 線スペクトル探査は、これまで主としてウラン鉱床の探査に、エアボーンやカーボーンにより用いられてきた。また、孔内検層法としても応用されている¹³⁾。これらの探査では、岩石中に含まれる U や Th の量の違いを基にした岩相の判定法として使われることが多かった。一方、 γ 線スペクトル検層では、破碎部において U の濃集が測定された例もあり、その検出にも有用と考えられている¹⁴⁾。また、温泉水の中に Rn や Tn が多く含まれている例も多く報告されている¹⁵⁾。古賀、野中¹²⁾は、二日市温泉地域において地中ラドン濃度 (Rn+Tn) を測定している。この結果によると、土中空気中のラドン濃度の大きい場所は、本研究で得られた地表での Bi と Tl の γ 線強度の大きい所と一致することが多い。その値は、二酸化炭素の濃度分布と相似しており、地下の破碎帯の分布に規定されると考えられ、水銀の分布と異なることから地下温度とはあまり相関がないとしている。以上のような、地球化学的のデータによると、破碎帯に沿ってラドンが上昇して来る場合、地表付近にそれが濃集し、その崩壊による Bi や Tl の γ 線がそこで観測されるのであろう。逆に断層であっても、活動時代が古く粘土等で破碎部がシールされ地下からの上昇流を伴わないものは、Bi や Tl の γ 線強度の増加は見られないであろう。

ところで、地下からラドンガスの供給があったとしても、 γ 線強度として観測されるためには、地表付近にそれをトラップする物質が存在する必要がある。前にも指摘したように、ラドン自体は α 崩壊であり、それと対応する γ 線が観測されるためには、Bi や Tl との間に放射平衡が生じる時間とどまる条件が必要である。したがって、

ラドンガスが吸着できるような安定した地表の土壌が存在している必要がある。

γ 線スペクトル探査は、このように地下流体の挙動を計測できるという特徴を持ち、測定も容易である。非常に微弱な γ 線を観測することになるので、十分大きなセンサーを利用することや、本論文で述べたようなデータ処理によりそのデータの適用範囲を把握して用いれば、温泉源の探査法として役立つと考えられる。

7. ま と め

本研究では、 γ 線スペクトル探査のデータ処理法について検討し、その測定誤差も評価できる方法や γ 線の検出限界を用いることを提案した。このような方法を用いることは、自然の微弱な γ 線強度を限られた時間で測定する探査では、その信頼限界を明確にするうえで重要であろう。二日市温泉地域での探査結果は、ほとんどの測点で信頼性の高い測定値が得られ、Bi や Tl の γ 線強度が泉源が存在するような熱水上昇域を判定するデータとなりうることを示した。

温泉探査において、重力や弾性波、電気、電磁法等の探査により、地質構造は推定することができるが、その

Appendix figure. Location of measuring sites and site numbers

Appendix table. Net count and detection level. Symbols define detection rank (A-E)
and relative intensity rank (1-4). unit : cpm

NO	K 1.46		Bi 1.76		Tl 2.61		Bi/K	Bi/Tl
1	859 $\pm$ 46	A2	60 $\pm$ 14	A1	23 $\pm$ 20	B3	0.070	2.61
2	1160 $\pm$ 55	A1	56 $\pm$ 15	A2	60 $\pm$ 20	B1	0.048	0.93
3	752 $\pm$ 45	A3	35 $\pm$ 16	B3	27 $\pm$ 16	B3	0.047	1.30
4	759 $\pm$ 44	A3	58 $\pm$ 14	A2	42 $\pm$ 14	B2	0.076	1.38
5	927 $\pm$ 49	A2	43 $\pm$ 11	B3	19 $\pm$ 17	B4	0.046	2.26
6	953 $\pm$ 50	A2	71 $\pm$ 18	A1	52 $\pm$ 17	B1	0.075	1.37
7	791 $\pm$ 47	A3	39 $\pm$ 14	B3	35 $\pm$ 14	B2	0.049	1.11
8	825 $\pm$ 48	A3	49 $\pm$ 14	B2	50 $\pm$ 17	B1	0.059	0.98
9	669 $\pm$ 39	A4	42 $\pm$ 14	B3	20 $\pm$ 14	B4	0.063	2.10
10	1013 $\pm$ 53	A1	59 $\pm$ 15	A2	34 $\pm$ 19	B2	0.058	1.74
11	974 $\pm$ 51	A2	52 $\pm$ 14	B2	42 $\pm$ 17	B2	0.053	1.24
12	1219 $\pm$ 57	A1	97 $\pm$ 17	A1	61 $\pm$ 24	B1	0.080	1.59
13	850 $\pm$ 50	A2	22 $\pm$ 15	B4	34 $\pm$ 16	B2	0.026	0.65
14	1195 $\pm$ 55	A1	68 $\pm$ 14	A1	33 $\pm$ 22	B3	0.057	2.06
15	1148 $\pm$ 55	A1	71 $\pm$ 14	A1	47 $\pm$ 16	B1	0.062	1.51
17	907 $\pm$ 48	A2	56 $\pm$ 15	B2	32 $\pm$ 17	B3	0.062	1.75
18	890 $\pm$ 46	A2	62 $\pm$ 14	A1	50 $\pm$ 15	B1	0.070	1.24
19	1007 $\pm$ 50	A1	58 $\pm$ 17	B2	58 $\pm$ 17	B1	0.058	1.00
20	934 $\pm$ 54	A2	46 $\pm$ 18	B2	19 $\pm$ 17	B4	0.049	2.42
22	700 $\pm$ 43	A3	38 $\pm$ 15	B3	28 $\pm$ 15	B3	0.054	1.36
23	977 $\pm$ 52	A2	37 $\pm$ 18	B3	26 $\pm$ 20	B3	0.038	1.42
24	797 $\pm$ 47	A3	38 $\pm$ 16	B3	30 $\pm$ 17	B3	0.048	1.27
25	1099 $\pm$ 54	A1	60 $\pm$ 16	A1	26 $\pm$ 18	B3	0.055	2.31
26	611 $\pm$ 42	A4	40 $\pm$ 11	B3	11 $\pm$ 16	C4	0.065	3.64
27	954 $\pm$ 48	A2	33 $\pm$ 15	B3	45 $\pm$ 16	B2	0.035	0.73
28	937 $\pm$ 50	A2	43 $\pm$ 14	B3	26 $\pm$ 18	B3	0.046	1.65
29	626 $\pm$ 45	A4	36 $\pm$ 14	B3	17 $\pm$ 15	B4	0.058	2.12
31	955 $\pm$ 51	A2	57 $\pm$ 14	A2	40 $\pm$ 18	B2	0.060	1.43
33	995 $\pm$ 55	A1	27 $\pm$ 16	B4	45 $\pm$ 16	B2	0.027	0.60
34	813 $\pm$ 41	A3	67 $\pm$ 16	A1	52 $\pm$ 21	B1	0.082	1.29
36	1029 $\pm$ 50	A1	61 $\pm$ 17	B1	32 $\pm$ 20	B3	0.059	1.91
37	1092 $\pm$ 54	A1	74 $\pm$ 17	A1	55 $\pm$ 18	B1	0.068	1.35
38	1056 $\pm$ 50	A1	55 $\pm$ 14	A2	23 $\pm$ 21	B3	0.052	2.39
40	646 $\pm$ 45	A4	48 $\pm$ 11	A2	14 $\pm$ 15	C4	0.074	3.43
41	1015 $\pm$ 51	A1	60 $\pm$ 14	A1	34 $\pm$ 18	B2	0.059	1.76
42	834 $\pm$ 42	A3	39 $\pm$ 17	B3	44 $\pm$ 15	B2	0.047	0.89
43	875 $\pm$ 48	A2	59 $\pm$ 11	A2	31 $\pm$ 19	B3	0.047	1.26
44	615 $\pm$ 43	A4	33 $\pm$ 11	B3	23 $\pm$ 14	B3	0.054	1.43
45	771 $\pm$ 44	A3	35 $\pm$ 12	B3	31 $\pm$ 14	B3	0.045	1.13
46	721 $\pm$ 43	A3	48 $\pm$ 12	B2	47 $\pm$ 18	B1	0.067	1.02
47	700 $\pm$ 45	A3	42 $\pm$ 11	B3	20 $\pm$ 15	B4	0.060	2.10
48	733 $\pm$ 43	A3	24 $\pm$ 14	B4	20 $\pm$ 16	B4	0.033	1.20
49	736 $\pm$ 45	A3	41 $\pm$ 10	B3	27 $\pm$ 15	B3	0.056	1.52
50	833 $\pm$ 48	A3	33 $\pm$ 15	B3	24 $\pm$ 18	B3	0.040	1.38
51	838 $\pm$ 45	A2	48 $\pm$ 12	A2	27 $\pm$ 16	B3	0.057	1.78
52	919 $\pm$ 52	A2	18 $\pm$ 17	B4	18 $\pm$ 19	C4	0.020	1.00
53	826 $\pm$ 53	A3	16 $\pm$ 17	C4	33 $\pm$ 17	B3	0.019	0.48
54	656 $\pm$ 46	A4	22 $\pm$ 12	B4	34 $\pm$ 14	B2	0.034	0.65
55	966 $\pm$ 58	A2	53 $\pm$ 20	B2	47 $\pm$ 16	B1	0.055	1.13
56	738 $\pm$ 53	A3	31 $\pm$ 14	B3	25 $\pm$ 17	B3	0.042	1.24
57	810 $\pm$ 51	A3	51 $\pm$ 13	B2	31 $\pm$ 18	B3	0.063	1.65
58	799 $\pm$ 48	A3	43 $\pm$ 15	B3	37 $\pm$ 17	B2	0.054	1.16
59	723 $\pm$ 47	A3	40 $\pm$ 15	B3	44 $\pm$ 14	B2	0.055	0.91
60	758 $\pm$ 47	A3	52 $\pm$ 14	B2	28 $\pm$ 17	B3	0.069	1.86

NO	K 1.46 A	Bi 1.76	Tl 2.61	Bi/K	Bi/Tl
6 1	851±52 A2	40±13 B3	29±16 B3	0.047	0.38
6 2	633±42 A4	21±14 B4	36±13 B2	0.033	0.58
6 3	738±43 A3	49±14 B2	36±18 B2	0.066	1.36
6 4	788±50 A3	53±14 B2	30±19 B3	0.067	1.77
6 5	905±45 A2	37±14 B3	18±17 B4	0.041	2.06
6 6	849±50 A2	57±13 A2	18±17 B4	0.067	3.17
6 8	752±42 A3	65±13 A1	40±14 B2	0.086	1.63
7 0	901±50 A2	50±15 B2	36±17 B2	0.055	1.39
7 1	1059±54 A1	52±16 B2	40±19 B2	0.049	1.30
7 2	965±48 A2	49±16 B2	33±18 B3	0.051	1.48
7 3	827±47 A3	25±17 B4	40±16 B2	0.030	0.63
7 4	957±50 A2	53±16 B2	46±14 B1	0.055	1.15
7 5	799±47 A3	23±15 B4	3±18 D4	0.029	-
7 6	781±46 A3	50±12 A2	42±16 B2	0.064	1.19
7 7	815±48 A3	39±16 B3	7±19 D4	0.048	-
7 9	947±50 A2	54±13 A2	43±18 B2	0.057	1.26
8 0	685±44 A4	22±14 B4	10±15 C4	0.032	2.20
8 1	694±44 A3	43±12 B3	41±15 B2	0.062	1.05
8 2	713±45 A3	21±17 B4	30±18 B3	0.029	0.70
8 3	746±43 A3	34±16 B3	38±19 B2	0.046	0.89
8 4	718±42 A3	42±11 B3	- E4	0.058	-
8 5	653±44 A4	50±12 A2	38±16 B2	0.077	1.32
8 6	909±50 A2	30±14 B3	32±15 B3	0.033	0.94
8 7	569±46 A4	32±13 B3	18±15 B4	0.056	1.78
8 8	720±39 A3	27±14 B4	33±13 B3	0.038	0.82
8 9	703±46 A3	28±12 B4	3±16 D4	0.040	-
9 0	684±38 A3	75±15 A1	21±18 B3	0.110	3.57
9 1	634±43 A4	25±16 B4	41±14 B2	0.039	0.61
9 2	1081±50 A1	58±18 B2	32±19 B3	0.054	1.81
9 3	817±47 A3	46±14 B2	51±14 B1	0.056	0.90
9 4	729±40 A3	52±10 A2	34±14 B2	0.071	1.53
9 5	838±47 A2	54±16 B2	31±19 B3	0.064	1.74
9 6	847±47 A2	42±15 B3	40±19 B2	0.050	1.05
9 7	763±42 A3	32±11 B3	29±11 B3	0.042	1.10
9 9	810±45 A3	46±13 B2	36±17 B2	0.057	1.28
1 0 1	687±40 A4	44±12 B3	16±17 C4	0.064	2.75
1 0 2	998±51 A1	26±16 B4	52±16 B1	0.026	0.50
1 0 4	624±41 A4	43±13 B3	29±16 B3	0.069	1.48
1 0 5	781±45 A3	21±15 B4	32±16 B3	0.027	0.66
1 0 6	915±48 A2	38±14 B3	70±14 A1	0.042	0.54
1 0 7	655±40 A4	42±12 B3	33±14 B3	0.064	1.27
N	837	44.6	33.2	0.053	1.46
σ	145	14.8	12.8	0.016	0.66

中での熱水の動きは捕らえることは困難であった。γ線スペクトル探査を併用することにより、熱水挙動に関する情報も得られると考えられる。

参 考 文 献

- 1) HATSUDA, Z., MATSUZAWA, A. and KAMEI, K. (1942): The reflection of underground structure on

the radio-activity of soil air. Sci. Rep. Geol. Mineral. Inst. Kyoto Univ., Vol. 1, pp. 1-10.

- 2) GRASTY, R. L., GLYNN, J. E. and GRANT, J. A. (1985): The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra, Geophysics, Vol. 50, pp. 2611-2620.
- 3) 木村重彦 (1987): 地表の自然ガンマ線による温泉開発位置の探査法について, 温泉科学, Vol. 37, pp. 73-92
- 4) 桂 郁夫, 西村 進, 貞広太郎, 見野和夫, 茂木 透, 西田潤一 (1986): 宇治市黄蘗断層のγ線強度測定, 地震, Vol. 39, pp. 267-275.

- 5) 古賀昭人(1983): 地熱系のラドンの起源と行動, 大分県温泉調査研究会報告, No. 34, pp. 1-9.
- 6) ASWATHANARAYANA, A. (1985): Principles of nuclear geology, Balkema/Rotterdam, pp. 186-202.
- 7) 河田 燕(1978): 放射線計測技術, 東京大学出版会, pp. 58-62.
- 8) 中井順二(1985): 放射能探査法, 月刊地球, 号外 No. 1, pp. 30-36.
- 9) COVELL, D. F. (1959): Determination of gamma-ray abundance directly from the total absorption peak, Anal. Chemi, Vol. 31, pp. 1785-1790.
- 10) CURRIE, L. A. (1968): Limits for qualitative detection and quantitative determination, Anal. Chemi., Vol. 40, pp. 586-593.
- 11) 福岡地盤図作製グループ(1981): 福岡地盤図
- 12) 古賀昭人, 野中美次郎(1983): 福岡市郊外二日市温泉地区の浅層土壌ガス, 日本地球化学会講演集, p.266.
- 13) EDWARDS, L. M., CHILINGAR, G. V., REIKE, H. H. and FERTL, W. H. Ed. (1982): Handbook of Geothermal Energy, Gulf Pub., pp. 336-337.
- 14) 藤原忠一, 橋本憲和(1987): 地熱貯留層評価の検層と解釈, 地熱, Vol. 24, pp. 75-92.
- 15) 鎌田政明, 小沢竹二郎, 村上悠紀雄, 吉田 稔 編(1985): 地熱流体の化学, 東大出版会, pp. 66-73.

(1990年3月16日受付, 1990年5月24日受理)

文献紹介

地震と地盤 (地質ニュース 8月号特集)

地質調査所編集: 84頁 (グラビア4頁), ¥700 (税込) (送料¥90) 1990年8月発行

サンフランシスコ (ロムブリータ) 地震 衣笠善博 (地質調査所)

関東平野の地震と地盤

I 関東-東海地域の地震活動とプレート構造 ... 石田 瑞穂 (科学技術庁防災科学技術研究所)

II 首都圏直下の大地震活動の消長と東海・関東巨大地震

..... 石橋 克彦 (建設省建築研究所)

III 関東平野の地殻水平変動 多田 堯 (国土地理院)

IV 関東平野の基盤構造 長谷川 功・駒澤 正夫 (地質調査所)

V 首都圏の第四系 遠藤 秀典 (地質調査所)

VI 東京湾周辺の埋立地 大嶋 和雄 (地質調査所)

地盤と防災のエンジニアリング

I 地盤と地震災害 片山 恒雄 (東京大学生産技術研究所)

II 地震工学における地盤の扱い 山崎 文雄 (東京大学生産技術研究所)

III 地中構造物の耐震設計 小長井一男 (東京大学生産技術研究所)

地震の予知と防災—今後の問題— 小出 仁 (地質調査所)

購読申し込み先: 実業公報社 (TEL. 03-265-0951) 〒102 千代田区九段南 4-2-12

問い合わせ先: 地質ニュース編集委員会 TEL. 0298-54-3520 (事務局)