

京都府奥丹後地域におけるラドンを用いた断層の地化学探査 —特に, その適用性及び問題点について—

杉山雄一* 吉川清志* 加藤 完* 佃 栄吉*

SUGIYAMA, Y., YOSHIKAWA, K., KATO, K. and TSUKUDA, E. (1986) Geochemical exploration of faults by radon concentration of ground air in the Oku-Tango area, Kyōto Prefecture with special reference to the applicability and problems of this method. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 37(3), p. 101-115.

Abstract: For the purpose of appraising the applicability of geochemical explorations to the fault investigation, the radon exploration by α -track (track etch) and scintillator methods was carried out with subsidiary measurements of CO_2 and O_2 concentration in the Oku-Tango area of Kyōto Prefecture.

Through this exploration and summarization of former reports on radon exploration, the following problems and points requiring special attention in practical investigations were made clear.

- 1) The radon exploration is not always effective for the fault investigations; as Gōmura and Chūzenji active faults in the Oku-Tango area, some active faults show no anomalous radon concentration in the ground air.
- 2) It is problematic to directly regard the high radon concentration as an indicator of active faults because some of these anomalies are caused by the high emanation rate of radon and thoron from the soil materials and blockaded ground-air circulation system around the measuring holes.
- 3) In conducting radon exploration, not one but both α -track and scintillator methods should be employed in order to ensure the existence of the radon anomalies. Also other gases such as CO_2 and O_2 should be measured whose behavior would assist in concluding the existence of faults.

1. はじめに

土壌や地層中のラドン濃度を用いて地下深部の構造を探查する方法(ラドン探査)は, 古くから試みられてきた(例えば, HATUDA, 1953; 岡部・西尾, 1953). この方法は最近, 地震予知と関連して活断層の位置や活動度を調べる手法の一つとして注目されている。ラドン探査は, トレンチ調査・地震探査・ボーリング調査などに比べて簡便・安価なため, 活断層調査における利用範囲は広いと思われる。しかしながら, 探査対象であるラドンの起源及び挙動に関する基礎的な研究はあまり進められていない。また, 活断層探査手法としての問題点, 限界なども明確にされていない。

著者らはラドン探査のこのような現状を踏まえ, 京都府奥丹後地域の郷村及び仲禅寺断層を対象として同探査を実施した。

本稿ではこれらの探査結果をもとに, 測定されたラドンの起源及びラドン濃度を決定している各種の要因につ

いて考察し, ラドン探査の適用性及び問題点について指摘した。

2. 探査地域の概要

探査地域の京都府奥丹後地域には, Fig. 1に示したように花崗岩類及び新第三系が広く分布する。同地域に分布する花崗岩類は宮津花崗岩と呼ばれ, 大部分が粗粒な黒雲母花崗岩からなる。同花崗岩は白亜紀末—古第三紀初期に相当する放射年代を示す(Nozawa, 1975)。また, 新第三系は北但層群または与謝層群と呼ばれ, 安山岩類・凝灰岩・砂岩・泥岩などからなる(弘原海・松本, 1958; 広川・黒田, 1960; 弘原海ほか, 1966)。

奥丹後地域には, 昭和2年3月7日に発生した北丹後地震(M 7.3)の際に活動した郷村断層及び山田断層が存在する。郷村断層はFig. 1に示したように北北西—南南東の一般走向を有し, 雁行配列した4つの断層セグメントからなる。北丹後地震時の同断層の変位量は, 最大左水平ずれ2.8 m, 最大西側隆起79 cmに達した(YAMASAKI and TADA, 1928)。郷村断層の露頭は網野町

* 環境地質部

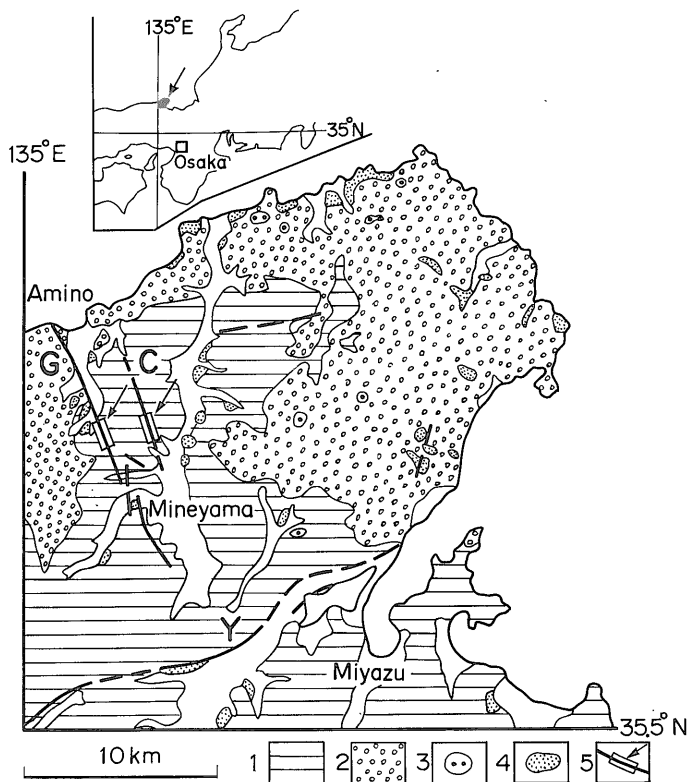


Fig. 1 Geological outline of the Oku-Tango area. Mainly after KURODA (1968) and KATO & SUGIYAMA (1985).
 Legend 1: Miyazu granite, 2: Neogene system (Hokutan Group), 3: higher terrace deposits (gravels), 4: lower terrace deposits (gravels & sands), 5: active and earthquake fault; arrow and rectangle indicate the portion explored geochemically. C: Chūzenji fault, G: Gōmura fault, Y: Yamada fault.

郷及び生野内の断層保存小屋で観察される。また、郷一
 生野内間の尾根には、昭和2年の地震の際に生じたと推
 定される地割れや崖が現在でも残っている。郷村断層の
 東約2 kmには、同断層とほぼ並走する仲禅寺断層(活
 断層研究会, 1980)が存在する(Fig. 1)。仲禅寺断層は
 有史以来活動した記録を持たないが、Fig. 2に示したよ
 うに明瞭な左横ずれ変位地形を伴う。今回の調査では仲
 禅寺断層の露頭及び破砕帯は観察されなかった。

今回のラドン探査は、Figs. 1, 2に示したように網野
 町郷一生活内間の郷村断層、及び峰山町橋木一矢田間の
 仲禅寺断層を対象として実施した。探査測線は総て宮津
 花崗岩の分布域に含まれる。このため、地表下数 m 以
 下の基盤地質条件は探査地域全域に亘ってほぼ同様と考
 えられる。

3. 測定方法

土壌や地層中の間隙に存在する地下ガスには、 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 Ar 、 H_2 、 CH_4 、 He 、 Rn などが含まれる。これら

のうち、ラドン(Rn)は放射性を持ち、 α 線を放出する。
 従って、土壌や地層の実質に含まれる放射性核種から放
 出される α 線の影響を除去して地下ガス中の α 線強度
 を測定できれば、同ガス中のラドン濃度を知ることがで
 きる。このような測定方法には、 α トラック法、シンチ
 レーション法、及び気体電離型検出器(電離箱・GM計
 数管・比例計数管など)を用いる方法などがある(例えば、
 HATUDA, 1954; ISRAËL and BJÖRNSSON, 1967; FLEISCHER
et al., 1972; 野口・脇田, 1977; 加藤, 1981)。これらの
 方法のうち、数多くの測点での測定が比較的簡単にで
 き、活断層探査によく用いられているものは、 α トラック
 法及び携帯型のシンチレータを用いたシンチレーション
 法である。そこで、本研究では α トラック法及びシン
 チレーション法によるラドン探査を実施した。

3.1 α トラック法

α トラック法は、 α 線用のディテクターフィルムを地
 中に掘った測定孔内に数日-数ヶ月程度放置し、フィル
 ムに衝突した α 線の飛跡(トラック)を計数する方法で

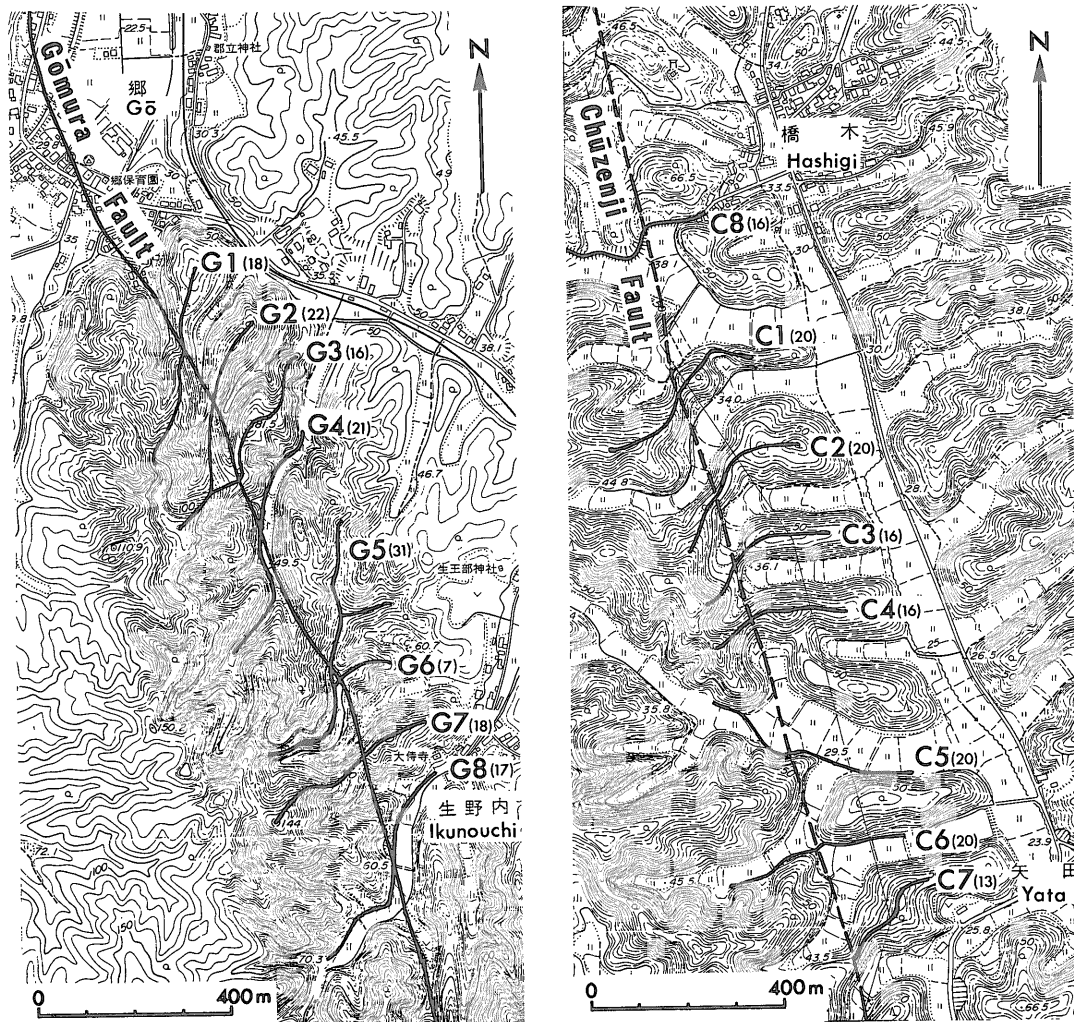


Fig. 2 Disposition of survey lines across the Gōmura fault (left) and the Chūzenji fault (right). Numerals in parentheses added to the line numbers show the number of measuring points along each line.

ある。この方法では、フィルムの単位面積・単位期間当たりのトラック数により、フィルムの放置期間における測定孔内の平均的ラドン濃度(相対値)が示される。

(1) 測線及び測点

今回の α トラック法によるラドン探査は、Fig. 2に示したように郷村断層を横切る8測線(G1-8)・150測点、及び仲禅寺断層を横切る8測線(C1-8)・141測点で実施した。このうち、G4、G8、C5、C6、C8の5測線は谷沿いに位置し、その他の11測線は尾根沿いに位置している。各測線はC7測線を除いて、断層またはその推定位置が測線のほぼ中央に位置するように設定された。

各測線上には、断層(推定位置)近傍では10-20 m 間隔

に、また、そこから50-60 m 以上離れた部分では25-30 m 間隔に測点を設置した。

(2) 測定孔

各測点にはFig. 3(a)に示したような測定孔を設けた。測定孔は、直径5.5 cmのドリルで地中に深さ80 cmの孔をあけ、外径6 cm、長さ80 cmのポリ塩化ビニル管を管頭が5 cm だけ地上に出るように埋設して設置した。この際、スライムの観察により、各測定孔底の土質を調査した。

測定孔の設置は、C1-C8 測線上の141孔については昭和59年9月14日から18日にかけて、また、G1-G8 測線上の150孔については同年9月19日から22日にかけて行

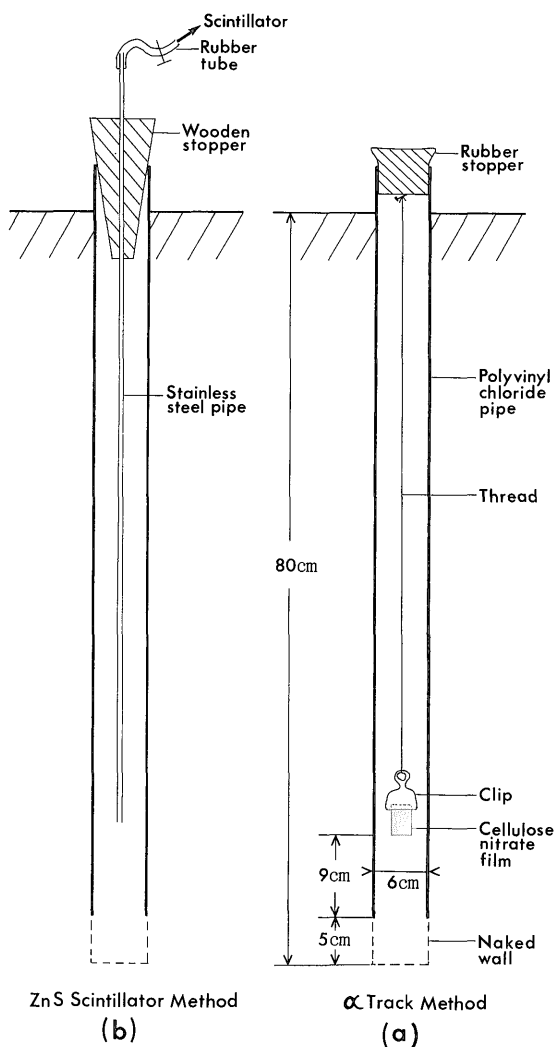


Fig. 3 Installation of the measuring holes and implements for radon exploration.

った。設置された測定孔の孔口は測定を開始するまでゴム栓で塞いでおいた。

(3) 測定

今回の探査では全測線についてフィルムの放置日数7日の測定を2回実施した。フィルムの放置期間は、G1-G8 測線では昭和59年9月25日-10月2日及び10月2日-10月9日、C1-C8 測線では9月24日-10月1日及び10月1日-10月8日である。また、G1、G7、G8、C2、C5、C8の6測線については、上記の第2回目の測定終了後ただちにフィルムの放置日数49ないし52日の第3回目の測定を実施した。

各測定孔におけるフィルムの放置は、Fig. 3(a)に示

したように糸とクリップを用いてフィルムを吊り下げる方法をとった。この際、土壌や地層の実質から放出されるα線の影響を除去するため、フィルムの下端が塩ビ管下端よりも9cm以上高い位置にくるよう留意した(α線飛程の最大値は²¹²Poから放出されるα線の約8.5cm)。

また、ディテクターフィルムとしては、硝酸セルロースフィルム(コダック社製 LR115 Type II)を用いた。

(4) フィルムの処理及びαトラックの計数

所定の期間測定孔内に放置したディテクターフィルムは、回収後60°Cの10%水酸化ナトリウム水溶液で100分間エッチングした。エッチングしたフィルムは、30分間流水で洗浄した後、プレパラートにして光学顕微鏡で観察し、αトラックを計数した。αトラック数はトラック密度(tracks/cm²・day)に換算して表わした。

3.2 シンチレーション法

シンチレーション法は、地中に掘った測定孔から採取した地下ガスをα線用シンチレーションセルに封入し、地下ガス中のラドン及びその娘核種のα崩壊により放出されるα線を計数する方法である。この方法では、一定時間内に計数されたα線数により、採取された地下ガス中のラドン濃度が示される。また、後述するように、計数方法を工夫することによりラドンの同位体 [²²⁰Rn 及び ²²⁰Rn(Tn)]の濃度を知ることができる。

(1) 使用機器

今回のシンチレーション法探査には、カナダ EDA 社製の RD200 携帯型ラドン計を使用した。同ラドン計は各種の地化学探査に広く用いられており、ZnS(Ag)シンチレーションセルと光電子増倍管の組合せからなる。

(2) 測線及び測点

今回の探査は、αトラック法に用いた G1(18測点)、G7(13測点)、G8(16測点)、C2(20測点)、C6(20測点)の5測線・87測点について実施した。また、G1、C2、C6の各測線では、断層(推定位置)近傍に3測点(G1及びC2)ないし4測点(C6)を新設し、併せて測定を行った。

(3) 測定孔

G1、G8、C2の各測線上の既存測点(αトラック法に用いた測点)では、G8測線の3測点を除いて、αトラック法に用いた測定孔をそのままシンチレーション法の測定孔として使用した。一方、G7及びC6測線の既存測点では、C6測線の2測点を除いて、αトラック法に用いた測定孔から塩ビ管を引き抜き、ケーシングの無い裸孔を測定孔として用いた。塩ビ管の抜去は、G7測線では測定の1日前、C6測線では48日前に実施した。また、

断層(推定位置)近傍に新設した10測点, 並びに α トラック法に用いた測定孔を亡失したG8測線の3測点及びC6測線の2測点では, 直径5.5cmのドリルを用いて深さ80cmの孔を掘り, 測定孔とした。

(4) 測定

シンチレーション法によるラドン探査は各測点において次の手順によって行った。

(i) ラドン計のバックグラウンド値(1分間の α 線計測数)を測定する。

(ii) 測定孔に, Fig. 3(b)に示したように地下ガス採取用のステンレスパイプを差し込み, ハンドポンプを用いて手早く(5-7秒間に)地下ガス約300cm³をラドン計のシンチレーションセルに送り込む。

(iii) (ii)の操作終了後ただちに, シンチレーションセルを閉鎖系にして, その時点から1分間, 1-2分間, 2-3分間の各1分間に放出される α 線を計数する。

なお, 今回の探査では, 地下ガス中のCO₂及びO₂濃度(分圧)の測定を上記の手順(ii)に先立って行った。

これらの測定作業は, G8測線については11月27日, G1及びC6測線については11月28日, C2及びG7測線については11月29日に実施した。

(5) ラドン及びトロン濃度の計算

ラドンには, ウラン系列のラドン²²²Rn, トリウム系列のトロン²²⁰Rn(Tn), アクチニウム系列のアクチノン²¹⁹Rn(An)の3つの同位体が存在する。これらの同位体はFig. 4に示すような崩壊系列を有する。このうち, アクチノンとその娘核種に由来する α 線数は, 地殻における上記3系列の核種存在量(例えば理科年表)から見て, ラドン及びトロンに由来する α 線数(ほぼ同じオーダー)の数%程度と推定される。また, アクチノンは半減期が3.9秒と短いため, 土壌や地層中の間隙から測定孔内に移動する間にその大部分は娘核種に崩壊してしまうと考えられる。そこで, 今回のシンチレーション法探査により計数された α 線は, ラドン, トロン及びこれらの娘核種である²¹⁸Poと²¹⁶Poの崩壊により放出されたものとみなした。

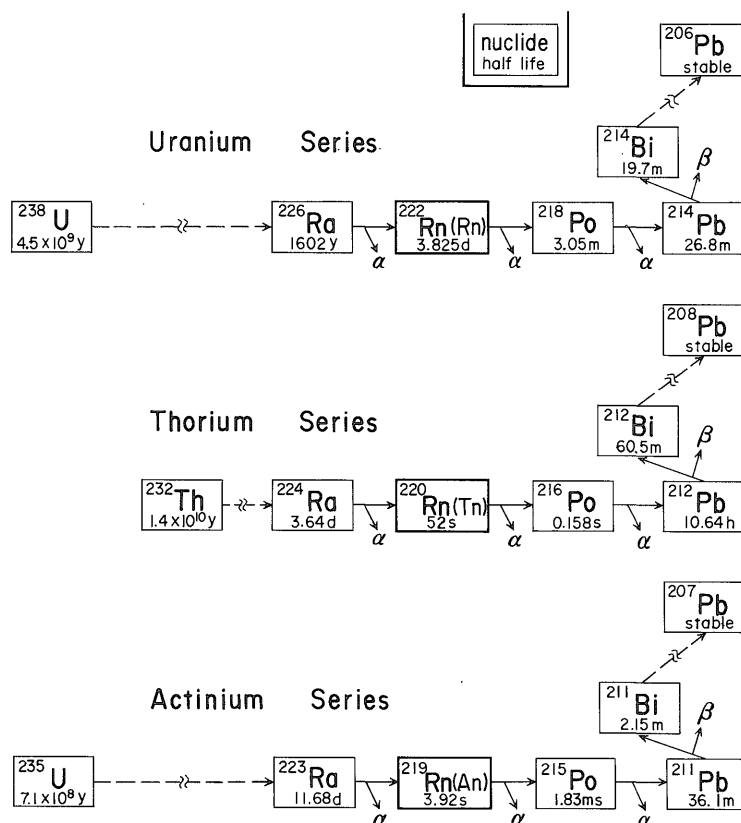


Fig. 4 Simplified three decay series producing the three isotopes of radon. After *Rika nenpyo* 1985 (Chronological Scientific Tables 1985).

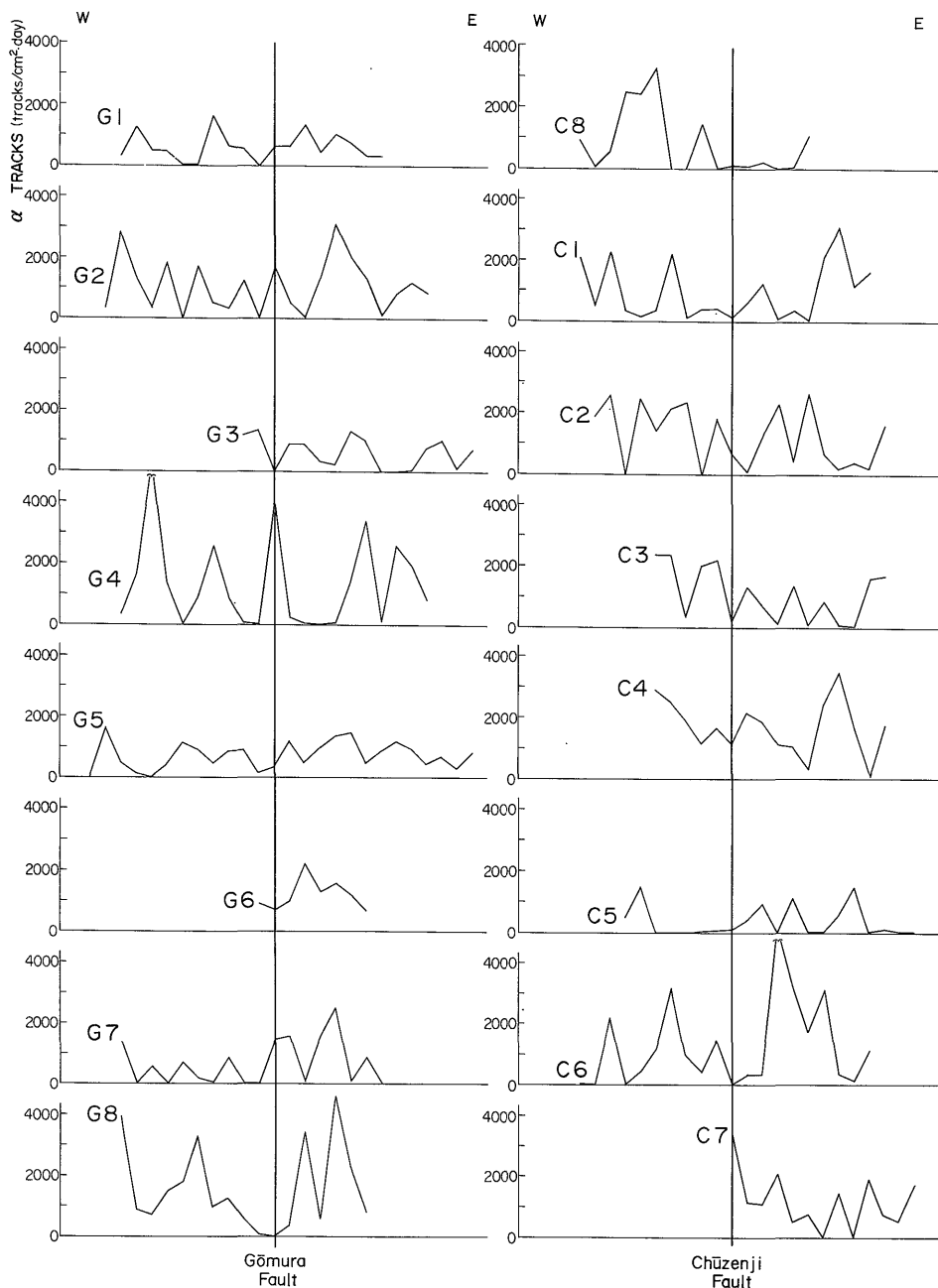


Fig. 5 Track density changes along the survey lines across the Gōmura and Chūzenji faults.

This figure shows the results of the second measurement.

シンチレーションセルを閉鎖系にして計数を始めた瞬間のラドン及びトロン原子数を $Rn(0)$ 及び $Tn(0)$, 0-1分間, 1-2分間及び2-3分間の α 線計測数からバックグラウンド値を差し引いた値を各々 C_1, C_2, C_3 とすると,

$$C_1/\gamma \approx 1.40 \times 10^{-4} \cdot Rn(0) + 1.10 \cdot Tn(0) \quad (1)$$

$$C_2/\gamma \approx 1.62 \times 10^{-4} \cdot Rn(0) + 0.50 \cdot Tn(0) \quad (2)$$

$$C_3/\gamma \approx 1.79 \times 10^{-4} \cdot Rn(0) + 0.22 \cdot Tn(0) \quad (3)$$

の関係が成り立つ。ただし、 γ はラドン計の α 線計数効率である。同効率は厳密には各核種から放出される α 線のもつエネルギーにより幾分異なると考えられるが、

ここでは一定とみなした。また、計数を始めた瞬間のラドン及びトリオンの α 線放出強度は、両者の崩壊定数を λ_{Rn} , λ_{Tn} とすると、各々 $\lambda_{Rn} \cdot Rn(0)$, $\lambda_{Tn} \cdot Tn(0)$ で与えられる。この値は近似的に地下ガス中のラドン及びトリオン濃度を α 線強度で示していると考えられる。ただし、(ii)の操作に5-7秒程度要するため、トリオンの濃度は実際にはこれよりも数%程度高いと推定される。

今回は上記の(1)及び(3)式の連立により $\lambda_{Rn} \cdot Rn(0)$ 及び $\lambda_{Tn} \cdot Tn(0)$ (cpm単位)を求め、これらの値を地下ガス中のラドン及びトリオン濃度とみなした。すなわち、

$$\text{ラドン濃度: } \lambda_{Rn} \cdot Rn(0) \approx (0.83C_3 - 0.17C_1) / \gamma \quad (4)$$

$$\text{トリオン濃度: } \lambda_{Tn} \cdot Tn(0) \approx (0.86C_1 - 0.67C_3) / \gamma \quad (5)$$

とした。なお、計数効率は明らかでないので今回は(4)及び(5)式右辺の分子の値をもってラドン及びトリオン濃度(相対値)とした。

また、以上のような計算上の仮定の妥当性を検討するため、実測された C_2 と(1)及び(3)式から求めた $Rn(0)$ 及び $Tn(0)$ を(2)式に代入して得られる $C_2(C_2 \text{ cal.})$ との比($C_2 \text{ cal.} / C_2$)を求めた。

4. 測定結果

4.1 α トラック法

(1) トラック密度と断層との関係

Fig. 5に第2回目のフィルム放置日数7日の測定結果を各測線ごとに折線グラフで示す。グラフの縦軸はトラック密度を示す。横軸は測定の相対的位置を示し、実際の測定間隔とは関係なく等間隔に目盛ってある。この図から明らかなように、郷村断層及び仲禅寺断層(推定位置)の直上あるいはその近傍でトラック密度が特別に高

い測線は認められない。また、図には示していないが、第1回目(フィルムの放置日数7日)及び第3回目(同49-52日)の測定についても同様の結果を得ている。なお、C7測線では第1回目及び第2回目とも断層推定位置直上でトラック密度が最大となったが、断層推定位置の西側についてはデータがない。一方、G8測線では3回の測定とも断層推定位置直上でトラック密度が最小となり、Fig. 5では同位置直上に明瞭な折線の谷が見られる。

(2) 測定回によるトラック密度の変化

今回実施した2回のフィルム放置期間7日の測定では、全測定点の60%で第2回目の測定値(トラック密度)が第1回目のそれを上回った。また、放置期間49-52日の第3回目の測定を実施した99測点では、その60%に当たる59測点で3回目の測定値が1回目及び2回目の測定値を上回った。一例としてC2測線の測定結果をFig. 6に示す。同測線では大部分の測点で回を追ってトラック密度が高くなっていく。また、Fig. 7に各測線、測定回ごとの測定値の平均を示す。この図から明らかなように、各測線の平均トラック密度も回を追うごとに高くなる傾向が明瞭に認められる。

(3) トラック密度と測定孔底の土質との関係

トラック密度と測定孔底の土質との関係を明らかにするため、Fig. 8に示したように、第1回目と第2回目の測定値(トラック密度)の大小及び再現性の良否により測点を8タイプに区分した。また、測定孔底の土質は、ボーリングスライムの検討により風化花崗岩、マサ、黒土及び盛土、の3種に区分した。風化花崗岩及びマサは、各々ほぼ木宮(1975)の風化花崗岩A・B及びマサA・Bに相当し、後者は前者より風化が進んでいる。Fig. 9に

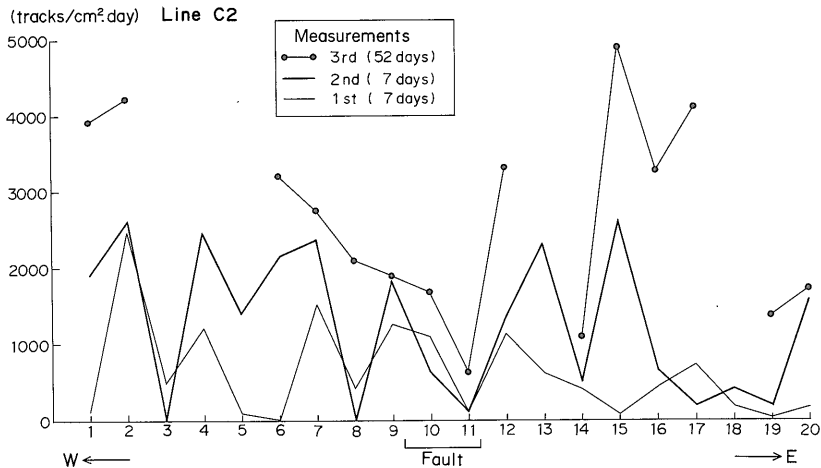


Fig. 6 Track densities measured in the successive three times along the line C2.

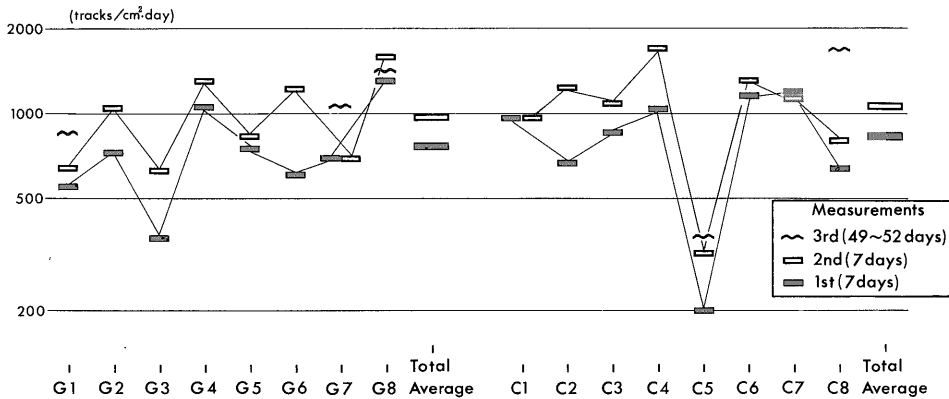


Fig. 7 Average track densities of each survey line measured in the successive three times. Average track densities are plotted in logarithmic scale.

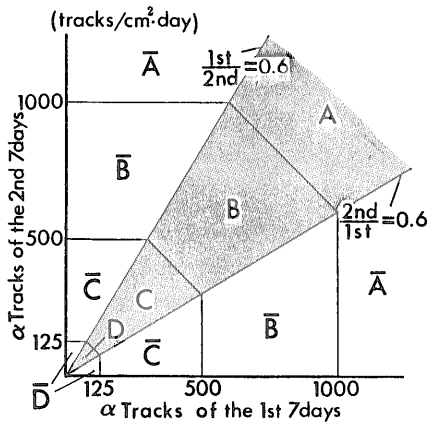


Fig. 8 Classification of measuring points based on the track densities of the first and second measurements.

探査断層別、測定孔底の土質別に上述した各 8 タイプに属する測点の割合 (%) を示した。この図から明らかなように、両断層の測定群とも風化花崗岩及びマサを孔底とする測点のタイプ別頻度分布はよく似ている。一方、仲禪寺断層測点群の黒土及び盛土を孔底とする測点のタイプ別頻度分布は、これらとは大きく異なり \bar{D} タイプが多い。また、孔底土質別の 2 回の測定値の平均では、Table 1 に示したように、風化花崗岩を孔底とする測点の平均値が最も大きい。マサを孔底とする測点の平均値はこれとほぼ等しい(仲禪寺断層)か、約 65%(郷村断層)である。また、黒土及び盛土を孔底とする測点の平均値は、風化花崗岩の場合の約 30%(郷村断層)及び約 20%(仲禪寺断層)に過ぎない。以上のように、測定孔底の土質のうち風化花崗岩とマサの間には、測定値の大

Table 1 Number and average track density of the boreholes with each bottom material.

Materials of borehole bottoms	Gōmura Fault		Chūzenji Fault	
	Number of holes	Average track density (tracks/cm ² ·day)	Number of holes	Average track density (tracks/cm ² ·day)
Weathered granite	50	1140	38	1055
masa	89	735	81	1030
black soil & exotic soil laid on roadbed	3	364	15	225

小及び再現性の良否の点で大きな差異は認められない。これに対して、黒土及び盛土を孔底とする測点のトラック密度は、上記 2 種の孔底土質をもつ測点のそれに比べて著しく小さいものが多い。

4.2 シンチレーション法

(1) C_2 cal./ C_2 値

探査結果の一例として C2 測線の結果を Table 2 に示す。この表から明らかなように、 C_2 cal./ C_2 の値は全 23 測点中 14 測点で 0.95-1.05 の範囲に、また、これらを含め 18 測点で 0.91-1.12 の範囲に入る。 C_2 cal./ C_2 値が 1.0 から大きく離れた値を示した 5 測点(10*, 11, 14, 18, 19)では、いずれも測定値(C_1 , C_2 及び C_3 値)がバックグラウンド値よりも小さいかこれと同程度であり、測定値そのものに大きな誤差が含まれていると考えられる。表には示していないが、他の 4 測線についてもほぼ同様の測定結果を得た。これらの結果から、前章の 3.2(5) で述べたラドン及びトロン濃度の計算方法は妥当なものと判断される。

京都府奥丹後地域におけるラドンを用いた断層の地化学探査 (杉山雄一ほか3名)

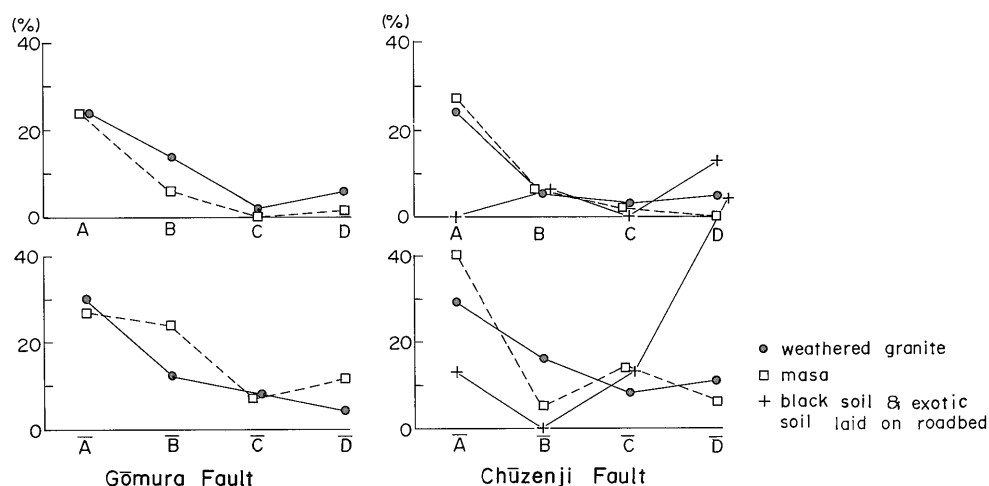


Fig. 9 Percentage of each type of measuring points of the respective bottom materials and faults.
See fig. 8 for classification of measuring points.

Table 2 Radon and thoron concentration measured by the scintillator method and CO₂ & O₂ concentration along the line C2.
Asterisked points were newly installed at the measurement by the scintillator method.

meas. points	back-ground	C ₁	C ₂	C ₃	Rn	Tn	C ₂ cal.	C ₂ cal./C ₂	CO ₂	O ₂
1	6	629	469	392	218	278	462	0.99	0.40	20.2
2	62	1486	964	766	383	765	988	1.02	0.65	20.1
3	78	234	144	101	44	134	143	0.99	0.61	20.3
4	71	861	472	323	122	524	494	1.05	0.41	20.6
5	58	533	394	282	143	269	359	0.91	0.54	20.5
6	89	1222	731	562	259	674	769	1.05	0.89	20.1
7	83	899	617	534	290	415	644	1.04	2.05	19.3
8	102	377	298	246	140	159	284	0.95	0.86	20.2
8*	111	155	85	53	18	98	86	1.01	0.37	20.6
9	96	241	249	278	190	21	260	1.04	1.00	20.0
9*	88	813	576	528	300	345	611	1.06	1.30	19.7
10	130	655	473	369	195	316	456	0.96	1.80	19.5
10*	132	67	2	17	3	46	33	16.5	0.58	20.6
11	99	103	137	115	78	12	109	0.80	0.66	20.6
12	115	180	146	115	65	78	134	0.92	0.65	20.4
13	115	593	480	426	253	225	473	0.99	0.83	20.2
14	130	83	89	62	37	30	68	0.76	0.65	20.4
15	107	1132	817	708	395	499	834	1.02	1.33	19.5
16	159	256	176	155	85	116	185	1.05	0.64	20.6
17	121	216	166	176	109	68	186	1.12	0.83	20.4
18	129	82	39	6	-9	67	31	0.79	0.19	20.8
19	98	11	26	15	11	-1	13	0.50	0.13	20.8
20	110	487	338	287	155	227	347 (cpm)	1.03	0.78	20.3 (vol%)

(2) ラドン濃度とトリオン濃度との関係

各測線の測定結果を Figs. 10, 11 に示す。両図から明らかなように、多くの測点ではトリオン濃度がラドン濃度を上回っている。また、図の上で、顕著なラドン濃度のピークとトリオン濃度のピークとは一致するものが多い(例えば、G1/5, G7/15, G8/3, C6/14, C2/2 及び15の各測線/測点)。

(3) ラドン・トリオン濃度と断層との関係

Figs. 10, 11 から明らかなように、今回実施した5測線の測定では断層(推定位置)とラドン及びトリオン濃度との間には明瞭な関係は認められない。わずかに C2 測線

で、断層推定位置西端に当たる測点9*にラドン及びトリオン濃度の比較的小さなピークが認められるに過ぎない。

(4) ラドン・トリオン濃度と測線位置及びケーシングの有無との関係

今回シンチレーション法探査を実施した5測線のうち、G1, G7 及び C2 測線は尾根沿いに位置し、G8 及び C6 測線は谷沿いに位置する。各測線のラドン及びトリオン濃度の平均値¹⁾(Table 3)を比べると、ケーシングのある場合及びない場合とも尾根沿い測線の平均値が谷沿い測線の平均値を上回った。なお、 α トラック密度の平均値²⁾では、尾根沿い測線の方がより低い値を示した(Table 3)。

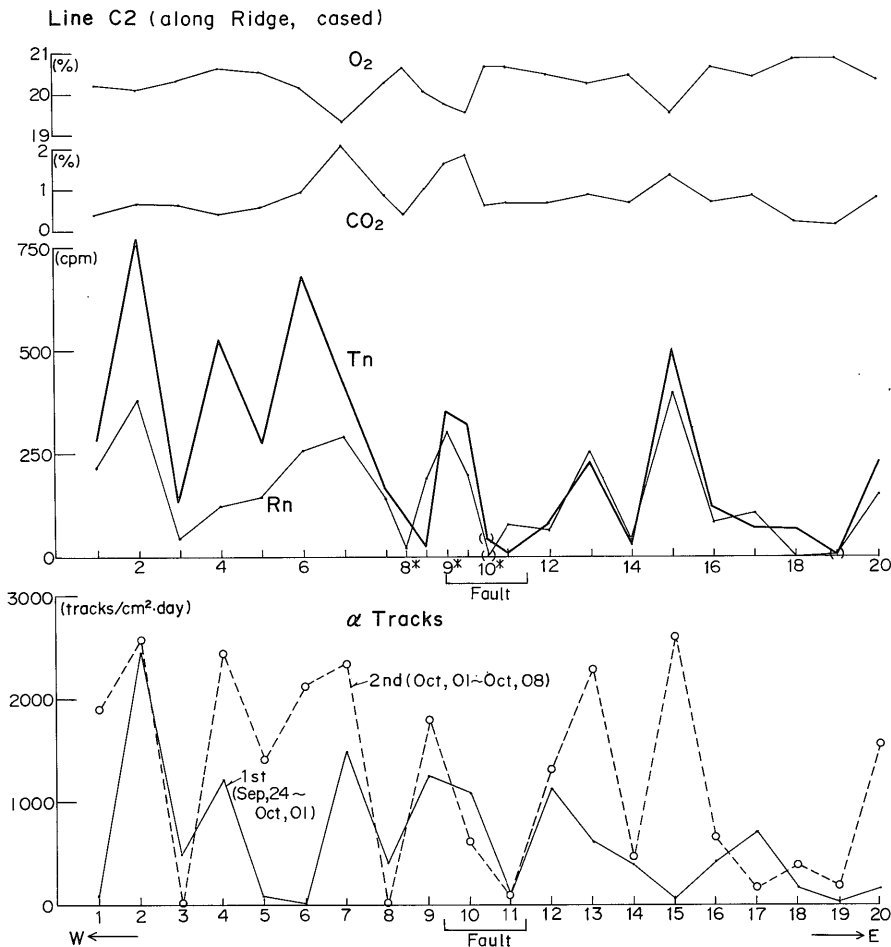


Fig. 10 Correlograms of track densities, radon & thoron concentration measured by the scintillator method, and CO₂ & O₂ concentration along the line C2. Asterisk points were newly installed at the measurement by the scintillator method and consist of naked measuring holes. At the points whose value of C_{2cal}/C_2 is either less than 0.70 or more than 1.30, radon and thoron data are parenthesized.

1) C_{2cal}/C_2 値が 0.70-1.30 の範囲にある測点のラドン及びトリオン濃度を平均した値。Figs. 10, 11 では、 C_{2cal}/C_2 値がこの範囲外にある測点のラドン及びトリオン濃度には括弧を付してある。

2) C_{2cal}/C_2 値が 0.70-1.30 の範囲にある測点の第 2 回目の測定結果(トラック密度)を平均した値。なお、シンチレーション法探査の際に新設した測点(*印を付した測点)ではトラック密度のデータがないため、平均値の算出に当ってはこれらの測点を除外した。

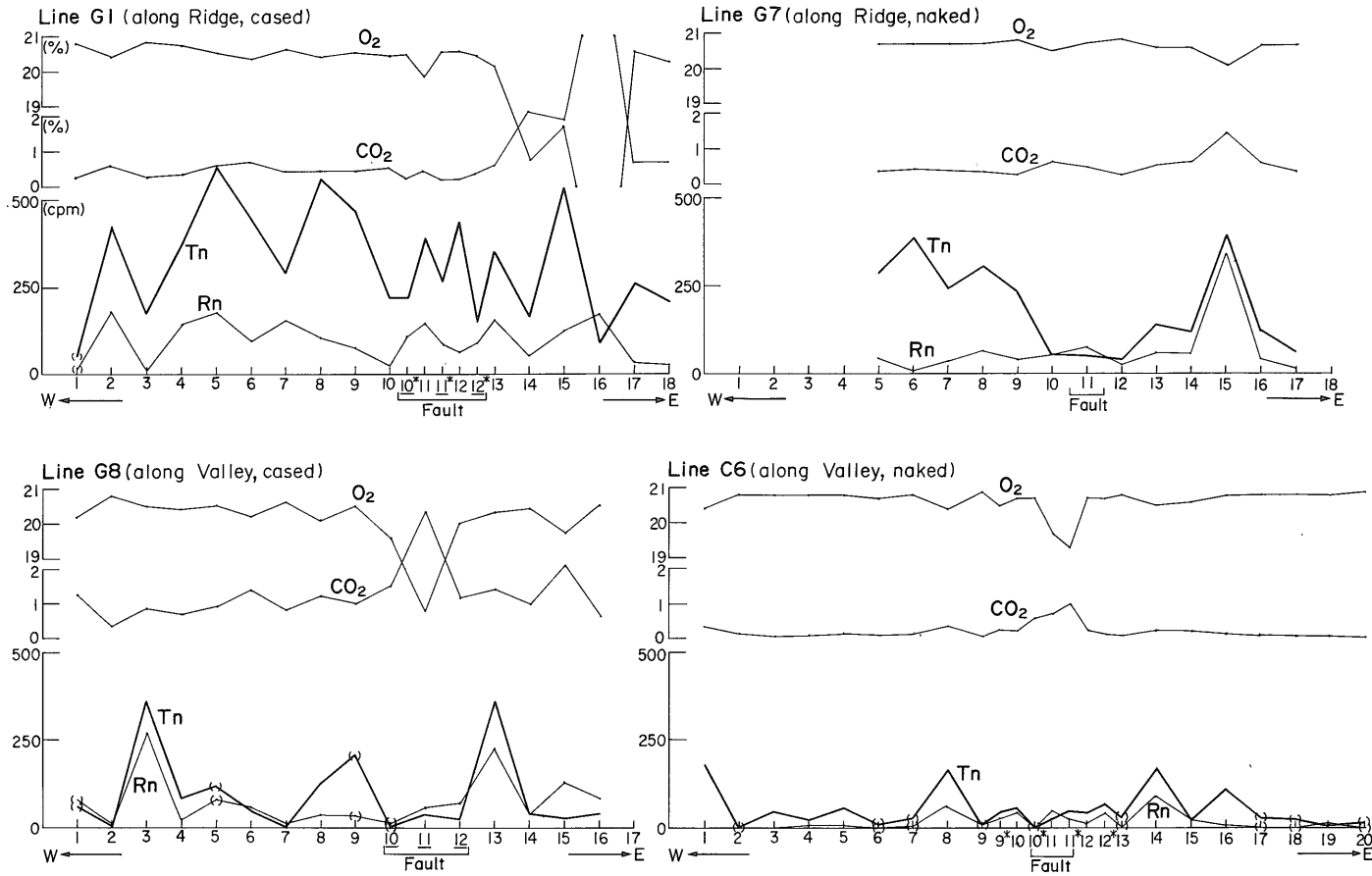


Fig. 11 Radon and thoron concentration measured by the scintillator method and CO₂ & O₂ concentration along the lines G1, G7, G8 and C6. Underlined points of the lines G1 and G8 consist of naked holes. Asterisk points and parenthesized radon and thoron data are the same in the meaning as those in Fig. 10.

Table 3 Average radon and thoron concentration (cpm) and average track density (tracks/cm²·day) of the lines G1, G7, G8, C2 and C6.

〈along ridge〉	Line G1 & C2	Line G7
	Av. Rn: 138	Av. Rn: 64
	Av. Tn: 296	Av. Tn: 190
	Av. α tracks: 1006 (γt=0.43)	Av. α tracks: 760 (γt=0.33)
〈along valley〉	Line G8	Line C6
	Av. Rn: 84	Av. Rn: 28
	Av. Tn: 96	Av. Tn: 72
	Av. α tracks: 1640 (γt=0.11)	Av. α tracks: 1360 (γt=0.07)
	〈cased〉	〈naked〉

$$\gamma t = \frac{Av. Rn + Av. Tn}{Av. \alpha \text{ tracks}}$$

(cpm·tracks⁻¹·cm²·day)

また、測定孔壁のケーシングの有無と各測線の平均値との関係に注目すると、根尾沿いの場合及び谷沿いの場合ともケーシングのある測線の平均値が裸孔からなる測線の平均値を上回った。このようなケーシングの有無によるラドン及びトロン濃度の違いは、各測線のトラック密度の違いを考慮に入れても有意な差があると考えられる(Table 3のγtを参照)。

4.3 CO₂ 及び O₂ 濃度

(1) CO₂ 濃度と O₂ 濃度との関係

Table 2 及び Figs. 10, 11 に示したように、CO₂ 濃度と O₂ 濃度(体積%)の間には相補的な(逆相関の)関係が認められ、CO₂ 濃度が高いところでは O₂ 濃度が低く、CO₂ 濃度が低いところでは O₂ 濃度が高くなっている。CO₂ 濃度と O₂ 濃度との和は空気中の O₂ 濃度と等しい 21%前後になる測点が多い。なお、G1 測線の測点 14-16 には顕著な CO₂ 及び O₂ 濃度の異常が認められるが、これら 3 測点は基地に位置している。

(2) CO₂ · O₂ 濃度と断層との関係

G8, C2 及び C6 の 3 測線では、断層(推定位置)直上またはその近傍に CO₂ 濃度のピーク及び O₂ 濃度の谷が認められる。このうち、G8 及び C6 測線では、断層推定位置に見られる CO₂ 及び O₂ の濃度異常が両測線中の濃度変化のうち最も顕著なものである。一方、G1 及び G7 測線では、CO₂ · O₂ 濃度と断層との間に明瞭な関係は認められない。

4.4 トラック密度、ラドン・トロン濃度及び CO₂ · O₂ 濃度の相互関係

C2 測線では Fig. 10 に示したように、トラック密度

が高い測点とシンチレーション法により測定されたラドン・トロン濃度が高い測点とが比較的良好に一致する。しかし、他の 4 測線では両者は一致しないことが多い。

ラドン・トロン濃度と CO₂ · O₂ 濃度との関係については、両者とも濃度異常を示す場合(例えば G7/15, C2/15, C6/8), 前者だけが異常を示す場合(例えば, G1/5, G7/6, G8/13, C2/2, C6/14), 及び後者だけが異常を示す場合(例えば, G1/14, G8/11, C6/11*)がある。

5. 考察

5.1 ラドン及びトロンの起源

地下ガス中のラドン及びトロンの起源としては、次の 3 つが主なものと考えられる。

a : 測定孔の比較的近傍の地層・岩石及び土壌物質中に含まれる親核種の崩壊(Fig. 12 の a)。

b : 断層や裂かを通しての拡散及び地下流体(ガスや地下水)の流れによる“地下深部”からの運び上げ(Fig. 12 の b)。

c : 地下流体の流れに乗って“地下深部”から運び上げられ、断層や裂かに沈積・濃集した親核種の崩壊(Fig. 12 の c)。

なお、トロンは半減期が 52 秒と短いため、上記 b の起源をもつものは極めて少ないと考えられる(ISAEL and BJÖRNSSON, 1967)。今回のシンチレーション法探査の結果では、4-2(2)で述べたようにトロン濃度が高い測点でラドン濃度も高くなっており、ラドンが単独で著しい濃度異常を示した測点はない。この事実は今回測定されたラドン及びトロンの多くが b 以外の同一の起源をもつことを強く示唆する。また、今回の α トラック法及びシンチレーション法探査では、4.1(1)及び 4.2(3)で述べたように、郷村断層及び仲禅寺断層の直上またはその近傍にラドン及びトロン濃度異常は検出されなかった。さらに、4.1(3)で述べたように、測定されたトラック密度の平均値とばらつき方は、測定孔底が風化花崗岩及びマサの場合と黒土及び盛土の場合とで大きく異なる。これらの事実から、今回測定されたラドン及びトロンの大部分は上記 a の起源をもつものと推定される。

5.2 ラドン・トロン濃度及び CO₂ · O₂ 濃度を規制する要因

今回のラドン探査によって測定されたラドン及びトロン濃度を規制している主な要因としては、上述した a の過程により地下ガス中に放出されるラドン・トロン量のほかに次の 2 つが挙げられる。1) 地下ガスと大気との循環・混合(Fig. 12 の d)の度合、及び 2) 地下ガスと測定孔内のガスとの循環・混合(Fig. 12 の e)の度合。d 及び

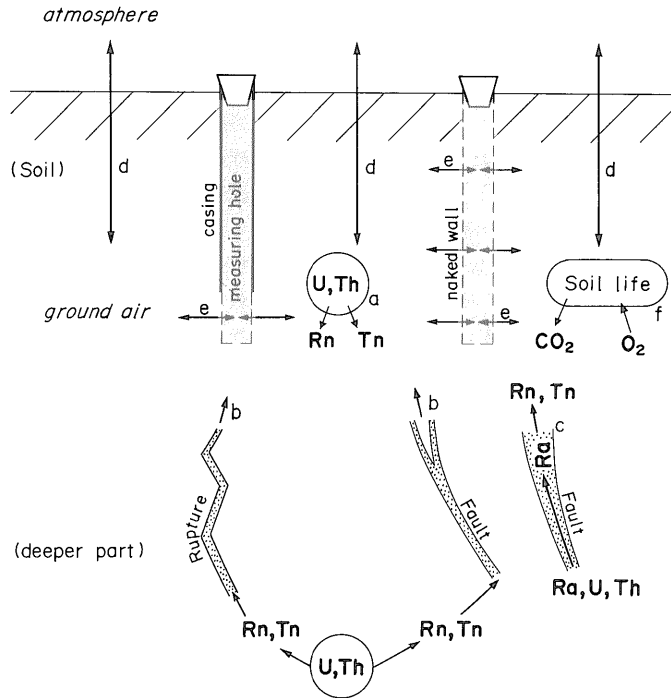


Fig. 12 Conceptual scheme of regulating factors of radon, thoron, CO₂ and O₂ concentrations in the ground air. a: release of radon and thoron by the decay of parent nuclides in the soil materials, b: supply of radon and thoron through faults and ruptures from the depths, c: release of radon and thoron by the decay of parent nuclides concentrated in the fault gouge, d: circulation of atmosphere and ground air, e: circulation of ground air and air in the measuring holes, f: living activities of soil life.

eのフラックスは、降水、気温・地温・気圧及び地下水位の変化などにより影響を受けると考えられる。αトラック法ではフィルムの放置期間をある程度(通常1週間)以上長くとることにより、台風などの特別な場合を除いて、降水、気圧変化及び気温・地温の日変化の影響は平準化されると考えられる。

今回のαトラック法探査では、4.1(2)で述べたように、多くの測点のトラック密度及び大部分の測線の平均トラック密度が測定回を追って増大した。今回の探査では、測定孔の設置時及びフィルムの設置・交換時に測定孔内のガスの排気は行っていない。また、フィルムの設置・交換は孔内の状態を乱さないように手早く行った。測定期間中には日量50mmを超える降水はなく、特に第1回目及び第2回目の測定期間中には日量20mmを超える降水はなかった。以上の測定及び気象条件から、上述の測定結果は測定孔内のガスと同孔周辺の地下ガスとの混合・置換が日数の経過とともに進んだことを示している可能性が高い。なお、このような測定回によるトラック密度の変化は、年周期的な地温・気温の変化、あるいは

は地下水位の変化と関連している可能性もある。地下ガス中及び地下坑内のラドン濃度の年周期的変化としては、国内では夏期に高くなり、冬期に低くなる例が報告されている(山内・下, 1982; 宇井・林, 1983)。また、加藤・高橋(1985)は、ディテクターフィルムのα線に対する感度は温度の上昇により高まることを指摘している。秋に実施した今回の測定では、平均気温がより低い、後の測定回ほどトラック密度が高くなっており、報告されているラドン濃度の年周期的変化及びフィルムの温度特性とは調和的でない。

シンチレーション法探査では、4.2(4)で述べたように、谷沿いの測線よりも尾根沿いの測線の方が、また、ケーシングを抜去した測線よりもケーシングをつけたままの測線の方が高いラドン・トリロン濃度を示した。ケーシングの有無によるラドン・トリロン濃度の違いは、Fig. 12に模式的に示したように、ケーシングの無い測定孔ではより地表に近い部分の地下ガスが測定孔内のガスと混合・循環するためと考えられる。地表付近のラドン・トリロン濃度(トラック密度)は、深度が大きくなるにつれて増

加することが知られている(高橋ほか, 1984)。しかし, 測線の敷設位置(尾根沿い及び谷沿い)によるラドン・トロン濃度及びトラック密度の違いについては, どのような理由によるのか明らかでない。

今回シンチレーション法探査と同時に測定されたCO₂濃度とO₂濃度との和は, 大部分の測点で大気中のO₂濃度とほぼ等しくなった(4.3(1))。この事実から, 今回測定された地下ガス中のO₂の大部分は大気に由来し, CO₂の多くは地中生物の活動(主に呼吸)によりO₂の消費とひきかえに放出されたものと考えられる。CO₂濃度が高く, O₂濃度が低い測点では, 地中生物の活動が活発か, 大気と地下ガスとの循環・混合の度合いが小さい, あるいはこれら2つの現象が重なりあっていると考えられる。

4.4で述べたCO₂・O₂濃度とラドン・トロン濃度との関係については, 1つの可能性として次のようなモデルが考えられよう。

1) CO₂が高濃度, O₂が低濃度の異常を示すと共に, ラドン・トロン濃度も高い場合: 地下ガスと大気との循環・混合(Fig. 12のd)の度合いが小さい。

2) CO₂濃度が高く, O₂濃度は低いが, ラドン・トロン濃度は特に高くない場合: 地中生物の活動(Fig. 12のf)が活発。

3) ラドン・トロン濃度は高いが, CO₂・O₂濃度には異常が認められない場合: 地層や土壌に含まれる親核種の崩壊(Fig. 12のa)によるラドン・トロンの放出量が多い。

CO₂・O₂濃度は, 4.3(2)で述べたように, 測定を行った5測線中3測線で断層の直上または近傍の測点で濃度異常を示した。このうち, C2測線の測点9*及び10ではラドン・トロン濃度も高くなっており, 上述の1)の場合に当たる。また, G8測線の測点11及びC6測線の測点10*-11*では, ラドン・トロン濃度は高くなく, 2)の場合に当たる。これらの測点は各々段畑の石垣直下及び水田内の農道に位置し, 測定孔底の土質は黒土及び盛土からなる。従って, これらの測点におけるCO₂・O₂濃度の異常は, 断層とは無関係に, 畑及び水田下における活発な生物活動を反映している可能性が高い。

6. ラドン探査の適用性及び問題点

以上に述べた奥丹後地域におけるラドン探査及びこれまでに報告されている探査例(例えば, 加藤ほか, 1979; 千木良ほか, 1983; 加藤, 1984)を総合すると, ラドン探査の問題点及び適用上の留意点として次のことが指摘できる。

1) ラドン探査は, すべての活断層・地震断層及び大規模な地質断層の探査に有効なわけではない。ここで報告した郷村断層及び仲禅寺断層の場合や千木良ほか(1983)の報告例のように, 断層の直上及びその近傍にラドン濃度の異常が認められない場合もある。

2) αトラック法探査の結果, 測線中にトラック密度が著しく高い測点が存在しても, これを直ちに断層の存在と結びつけることには問題がある。今回の例のようにこれらの濃度異常は, 測定孔底周辺の地層や土壌(特に花崗岩など)の大きなラドン・トロン放出率及び閉塞的な地下ガス循環系により生起されている場合もある。

3) ラドン探査は, αトラック法あるいはシンチレーション法を単独で行うよりも, 両手法をCO₂・O₂などの濃度測定と併せて実施し, ラドン濃度の異常が真に断層の存在と関連するものか慎重に検討することが望ましい。また, 探査地域の地質・地形及び水文学的環境, 測定孔底及び孔壁の土質, 気象条件なども併せて調査することが望ましい。

4) ラドン探査の結果は, 測定孔の設置条件, フィルムの設置方法や設置位置(αトラック法), 試料ガスの採取方法や吸引速度(シンチレーション法)によって変化する(高橋ほか, 1984)。従って, 探査を実施する際には, 各測点におけるこれらの条件を一定にする必要がある。また, 今回使用した測定孔及び測定方法の場合, 測定孔設置直後には測定孔内のガスが地下ガスと十分混合・置換していないことがあるので注意を要する。

5) 地下ガス中のラドンやCO₂濃度は, 年周期的な変化を示すとともに, 降水, 気圧変化及び気温・地温の日変化により短周期的な変化を示すことがある(山内・下, 1982; 宇井・林, 1983; 吉川・高橋, 1984; 杉崎ほか, 1984)。従って, 異なる時期の測定結果を比較する場合には, この点に十分留意する必要がある。

謝 辞

本探査を行うに当たり, 網野町役場の梅田保久・梅田虎一郎の両氏, 峰山町役場の山本尚男氏, 郷区長の井上由安氏, 生野内区長の坪倉和行氏, 橋木区長の門中源武氏及び矢田区長の金森龍夫氏の各位には大変お世話になった。また, パリノ・サーヴェイ株式会社の丸腎一氏には, 請け負いの範囲を越えているりと御協力戴いた。ここに記して, これらの方々から感謝の意を表する。

文 献

- 千木良雅弘・金折裕司・木方建造(1983) 河成段丘下の断層の地化学調査(その2)—河成段丘中のラドン濃度およびγ線線量率, 電力中

- 央研究所報告, 382054, 24p.
- FLEISCHER, R. L., ALTER, H. W., FURMAN, S. C., PRICE, P. B. and WALKER, R. M. (1972) Particle Track Etching. *Science*, vol. 178, p. 255-263.
- HATUDA, Z. (1953) Radon Content and its Change in Soil Ari near the Ground Surface. *Mem. Coll. Sci., Kyoto Univ., B*, vol. XX, no. 4, p. 285-306.
- (1954) Radioactive Method for Geological Exploration. *Mem. Coll. Sci., Kyoto Univ., B*, vol. XXI, no. 2, p. 231-271.
- 広川 治・黒田和男(1960) 5万分の1地質図幅「宮津」説明書. 地質調査所, 23p.
- ISRAËL, H. and BJÖRNSSON, S. (1967) Radon (R_n^{222}) and Thoron (R_n^{220}) in soil air over Faults. *Z. F. Geophysik*, vol. 33, p. 48-64.
- 活断層研究会(1980) 日本の活断層—分布図と資料. 東大出版会, 363p.
- 加藤 碩一・杉山雄一(1985) 50万分の1活構造図「金沢」. 地質調査所.
- 加藤 完・伊藤吉助・永田松三(1979) 伊豆半島及び富士川周辺における α トラック法による活断層調査. *地震2*, vol. 32, p. 435-449.
- (1981) α トラック法による活断層探査とその連続観測による地震予知. *地質ニュース*, no. 325, p. 30-45.
- (1984) α トラック法による丹那断層系調査. *月刊地球*, vol. 6, p. 194-199.
- ・高橋 誠(1985) CNフィルム(Kodak LR 115 Type II)の温度および酸素濃度特性. *放射線*, vol. 12, p. 113-121.
- 木宮一邦(1975) 花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度—花こう岩の風化・第一報. *地質学雑誌*, vol. 81, p. 349-364.
- 黒田和男(1968) 20万分の1地質図「宮津」. 地質調査所.
- 野口正安・脇田 宏(1977) 地震予知のための測定—ラドンによる地球化学的方法. 計測と制御, vol. 16, p. 700-706.
- NOZAWA, T. (1975) Radiometric Age Map of Japan, Granitic Rocks. *Geol. Surv. Japan*.
- 岡部 茂・西尾準二(1953) G-M計数管により測定された地表放射能強度と温泉源との関連について(I). 鳥取大学学芸学部研究報告(自然科学), vol. 4, p. 4-7.
- 杉崎隆一・井戸正彦・武田 浩・磯部由美子・佐竹洋・林 美光・中村則明・水谷義彦(1984) 活断層より放出されるガス(I)炭酸ガスについて—断層ガスの化学的特徴と断層活動. *地震2*, vol. 37, p. 45-54.
- 高橋 誠・吉川清志・加藤 完・池田喜代治(1984) 地下ガス観測上の問題点について. *地殻化学実験施設集報*, no. 3, p. 27-35.
- 宇井啓高・林 美光(1983) 断層ガスの継続観測. *月刊地球*, vol. 5, p. 346-351.
- 弘原海清・松本 隆(1958) 北但馬地域の新生界層序—近畿西北部の新生界の研究(その1). *地質学雑誌*, vol. 64, p. 625-637.
- ・池辺辰生・松本 隆(1966) 近畿北部の新第三系の対比—近畿北部の新生界の研究(その3). 松下進教授記念論文集, p. 105-116.
- YAMASAKI, N. and TADA, T. (1928) The Oku-Tango Earthquake of 1927. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 4, p. 159-177.
- 山内常生・下 道国(1982) 通気式電離箱による横坑内のラドン濃度の測定, およびその濃度変化と地震発生の関係. *地震2*, vol. 35, p. 435-446.
- 吉川清志・高橋 誠(1983) 丹那断層周辺における地下ガス観測. *月刊地球*, vol. 6, p. 204-208.
- 理科年表 昭和60年(東京天文台編纂). 丸善, 968p.

(受付: 1985年8月12日; 受理: 1985年12月6日)