

γ線測定で観る断層破碎帯—本質的問題と今後の課題—

Basic Problems and Future Issues of Observation of Fault Zones by Gamma-Ray Survey

吉 村 辰 朗 (よしむら たつろう)
復建調査設計㈱大阪支社地質調査課 課長補佐

松 木 宏 彰 (まつぎ ひろあき)
復建調査設計㈱地質調査部

1. はじめに

土木地質分野において、断層破碎帯は土木施工上問題となることが多い。断層破碎帯の位置・幅を調査する間接的手法としては、物理探査（弾性波探査・電気探査・放射能探査等）が用いられている。γ線測定（放射能探査）は、潜在断層の位置や地質の境界を調べる目的で活用されている。γ線による断層探査の根拠は、①ラドン（ ^{222}Rn ）の親元素であるラジウム（ ^{226}Ra ）が断層粘土に吸着・濃縮されやすいことや、②断層付近では岩盤中のクラック密度が高いために、不活性気体で移動性の大きいラドン（ ^{222}Rn ）の放出率が高く、その結果娘元素である鉛（ ^{214}Pb ）やビスマス（ ^{214}Bi ）の崩壊によって生ずるγ線の放出率も相対的に高くなるという考え方に基いている¹⁾。この岩石中に含まれている放射性物質が断層破碎帯の割れ目を通して集積するという解釈²⁾により、従来のγ線測定による断層調査ではバックグラウンドのγ線強度より高い値を示す箇所のみに対して異常点と解釈し、断層の位置を推定している場合が多い。しかし、実際に断層露頭、ボーリング・弾性波探査等で確認した断層破碎帯においてγ線測定を行った結果、半数はバックグラウンドのγ線強度より低い値を示し、破碎帯の形態（粘土化・開口亀裂等）には必ずしも依存するものでないことが判明した³⁾。この事実は、測定結果を解釈するうえで重要な問題点と思われる。

本報告では具体的な測定例から、従来の解釈における問題点を挙げ、まだ多くの問題を残している現状について指摘する。また、経験的に認められる断層破碎帯におけるγ線強度分布の規則性および断層破碎帯（断層場幅）の累積現象⁴⁾を説明し、今後の課題について提案する。

2. 測定方法

岩石や鉱物中にはわずかではあるが天然放射性同位元素がふくまれており、ウラン系列元素（ ^{238}U ）、トリウム系列元素（ ^{232}Th ）が主要なものである。これらの放射性元素は崩壊過程で、ウラン系列では ^{226}Ra 、 ^{214}Bi 、 ^{214}Pb から、トリウム系列ではタリウム（ ^{208}Tl ）からγ線が放出される。カリウム（ ^{40}K ）は崩壊系列を作らず、電子捕獲によりアルゴン（ ^{40}Ar ）に壊変する過程でγ線を放出する。γ線測定は、これらの元素が放出するγ線をシンチレーションカウンタで検出し、その強度（放射線の数）を測定する方法である。今回は、測定器としてγ線シンチレーションサーベイメーター（SSMと記す）とγ線マルチチャンネルアナライザー（MCAと記す）を用いた。SSMでは10秒ごとに10回～30回読みとり、その平均を測定の値とした。SSMでのγ線強度は、照射線量率（ $\mu\text{R/h}$ ）で記した。MCAでは計測時間を600秒とし、γ線強度はKCPMで記した。

本文では破碎されていない区域（正常場と称す）の全測定値の平均値を $\overline{R}_0$ 、断層破碎帯（断層場と称す）の全測定値の平均値を $\overline{R}_f$ 、断層破碎帯幅（断層場幅と称す）を FW と記した。

γ線測定結果図では縦軸にγ線強度、横軸に距離を記し、白丸で正常場の測定値、黒丸で断層場の測定値を示した。また、正常場・断層場のγ線強度分布範囲を破線、各場の平均値を一点破線で示した。

3. 断層破碎帯におけるγ線強度分布の規則性

これまでの測定結果から、同一地質・測定条件のもとでγ線測定を行った場合、下記のγ線強度分布の規則性が認められる⁴⁾。

報文—2320

① γ 線強度は、測定対象層固有の強度を呈する。

② 断層場の γ 線強度は、目視による破碎帯の形態（粘土化・開口亀裂等）には必ずしも依存せず、バックグラウンドの γ 線強度より相対的に高い場合と低い場合がある。

③ 正常場および断層場の γ 線強度は、各々固有の γ 線強度分布を呈する。同一地質・測定条件においては各場ごとに計算した標準偏差 (R_s と記す) は同様である。よって断層場の平均値 ($\bar{R}_f$) と正常場の平均値 ($\bar{R}_o$) の差は、 R_s の約4倍となる (今までの測定結果では 4.5 ± 0.4)。この関係を下式で示す。

$$|\bar{R}_f - \bar{R}_o| = AR_s$$

$\bar{R}_o$: 正常場の平均値 R_s : 標準偏差

$\bar{R}_f$: 断層場の平均値 $A: 4.5 \pm 0.4$

④ 活断層分布地域の基盤岩を測定対象層とした場合、断層場の平均値 ($\bar{R}_f$) と正常場の平均値 ($\bar{R}_o$) の差が $2AR_s$, $3AR_s$ となる断層場の γ 線強度分布が認められる。この関係を下式で示す。

$$|\bar{R}_f - \bar{R}_o| = n \cdot AR_s \quad (n=2, 3, \dots)$$

この現象は、活断層では断層運動の反復性が認められることから、③で示した初生断層場 ($n=1$) 内で繰返し破壊が生じると、次の γ 線強度分布範囲 ($n=2, 3, \dots$) へと順次移行していく過程と推定される。

4. 測定例

4.1 γ 線強度の比較測定および時間的再現性の検討例

4.1.1 全計数法とスペクトル法による測定

測定地に分布する地質は、粗粒花崗岩である。断層の走向はEW, 86° N 落ちである。断層破碎帯の幅は約10mで断層面から約20cmまで断層粘土が認められ、破碎帯は砂質土状となる。測定孔は断層とほぼ直交するように設け、 $\phi 10$ cm, 深さ40cmの孔を掘削した (図-1)。測定孔の①~④は正常場、⑤~⑧は断層場である。測定手法は、全計数法 (SSMで測定) とスペクトル法 (MCAで測定) である。MCAによる分析元素と測定核種の対応を表-1に示す。測定結果を図-2に示す。MCAでは各測定核種のピークチャンネル値をプロットした。全計数法による γ 線強度とスペクトル法によるウラン・トリウム・カリウムの各カウント数は調和的であり、

表-1 チャンネルとエネルギー領域²⁾

分析元素	測定核種	測定 γ 線 (MeV)	チャンネル (MeV)
Th	^{208}Tl	2.62	2.41~2.81
U	^{214}Bi	1.76	1.66~1.86
K	^{40}K	1.46	1.37~1.57

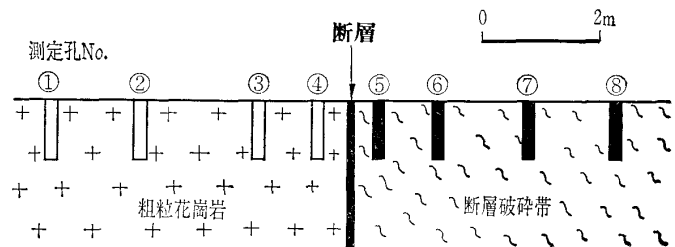


図-1 測定孔配置図

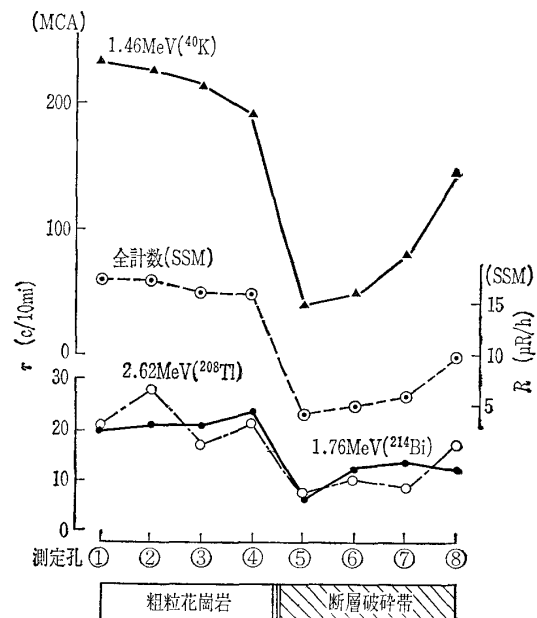


図-2 γ 線測定結果図

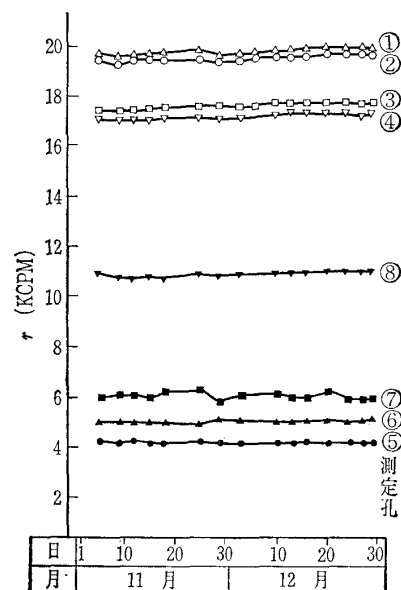
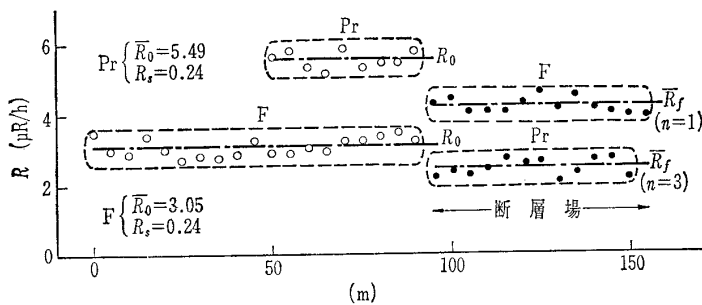


図-3 γ 線強度の経時変化

図-4 γ 線測定結果(朝見川断層)

断層場でのカウント数は正常場より相対的に低い。

4.1.2 γ 線強度の再現性

断層付近に分布する岩石の γ 線強度の再現性を調べる目的で、前述の測定孔を用いて定時・定期測定を実施した。測定は午前10時～12時、約3日ごとに行った。測定器はMCAを用い、全計数を図-3にプロットした。時間変化による測定値の誤差は3%以内であり、同一地点における測定値の再現性はあると判断される。

4.2 同一断層における異なった測定対象層での γ 線強度の相違

別府市の西方に分布する朝見川断層は、第四紀扇状地堆積層を変位させ断層崖を形成している。朝見川断層は、确实度I・走向NW・活動度A～Bの活断層として記載されている⁵⁾。

測定は同一断層上で、基盤岩である第三紀変朽安山岩(Pr)とその上位に堆積する第四紀扇状地堆積層(F)で行った。測定結果は、以下のとおりである(図-4)。

- ・第四紀扇状地 堆積層(F) $\bar{R}_0=3.05 \mu R/h$ $R_s=0.24 \mu R/h$ $\bar{R}_f=4.14 \mu R/h$ $n=1$
- ・第三紀変朽安山岩(Pr) $\bar{R}_0=5.49 \mu R/h$ $R_s=0.24 \mu R/h$ $\bar{R}_f=2.36 \mu R/h$ $n=3$

断層場において、基盤岩である第三紀変朽安山岩(Pr)では3章の④の規則性で記した $n=3$ の γ 線強度分布を呈し、 γ 線強度は相対的に低くなる。その上位に堆積する第四紀扇状地堆積層(F)の断層場では、 γ 線強度は相対的に高くなる。

4.3 異なった測定対象層での断層場幅の分布

和泉山脈南麓域に分布する根来断層は、四国における中央構造線の東方延長部に位置する。根来断層は、狭義の中央構造線の北側を並走し、基盤岩の和泉層群中を通過している。また、根来断層は段丘面

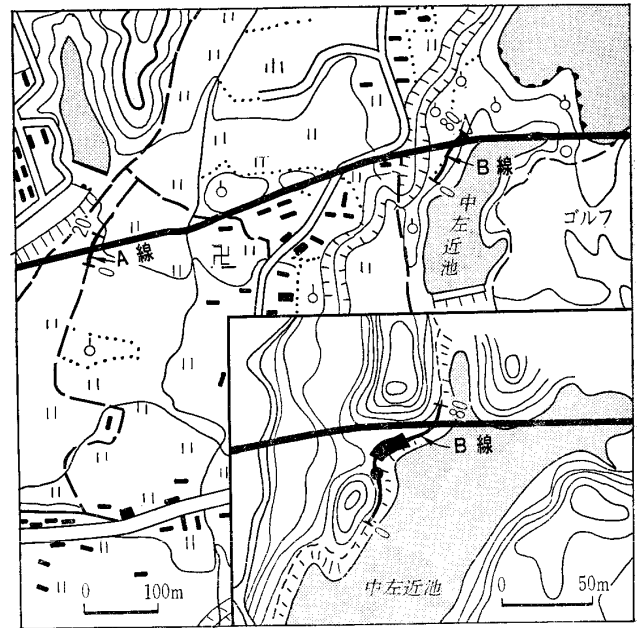


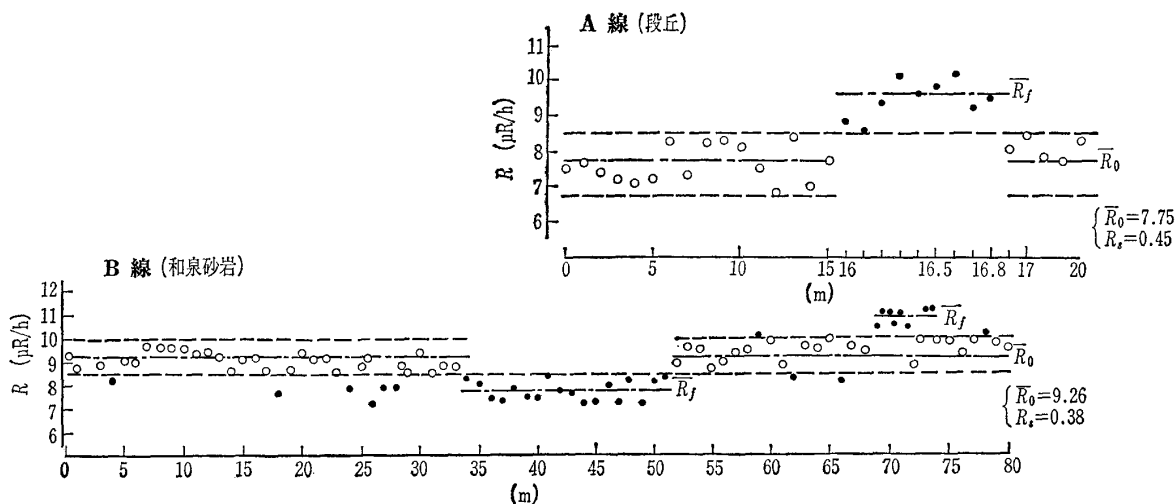
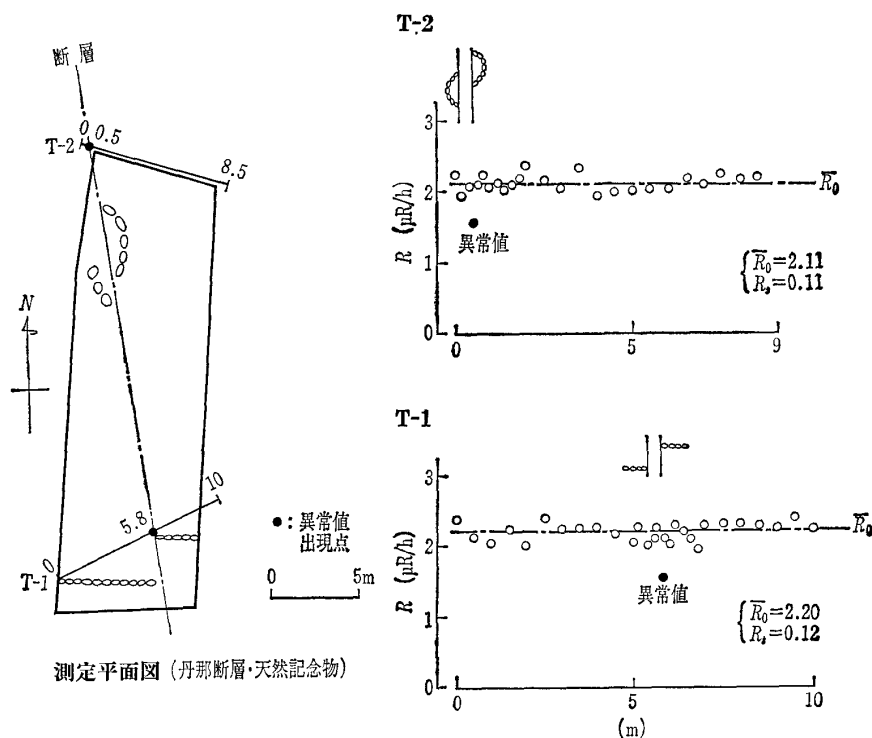
図-5 測線位置図(A線, B線, 根来断層)
右下図(B線)の黒色部は断層場分布域
太実線: リニアメント(根来断層)

群を連続的に切断し、段丘崖・丘陵を開析する河谷・丘陵の尾根筋などを右ずれ方向に屈曲させている⁶⁾。測定地を図-5に示す。図-5に記したリニアメントの東方延長上の根来寺付近において(切土法面)、根来断層の断層露頭は確認される。

測定対象層は、和泉層群(砂岩主体層)とその上位に堆積する扇状地性段丘堆積物である。リニアメント付近において、段丘堆積物での断層場幅(FW)は、 $FW=1.5\sim 2m$ で、断層場の値は相対的に高い(図-6, A線)。リニアメント延長上の和泉層群の砂岩を測定した場合、段丘堆積物と同じ断層場幅 $FW=2m$ となり、断層場の値は相対的に高い。また、和泉砂岩分布域では、リニアメント南側の鞍部に $FW=10m, 2m$ の断層場が認められ、断層場の値は相対的に低い(図-6, B線)。この断層場は、段丘堆積物上では認められない。

4.4 地震断層における断層場幅

1930年11月26日、伊豆半島北部に北伊豆地震(マグニチュード7.3)が発生した。この地震に伴って北伊豆断層系の一部が活動し、顕著な地震断層系が発達した。測定は丹那盆地の南方に位置する「国指定天然記念物 丹那断層」で実施した。この丹那断層では、最大2.5m～3.5mの左横ずれが記録されており、石積みの横ずれによって、その変位の状態が現在も残されている。測線は変位面を横断する方向に

図—6 γ 線測定結果 (根来断層)図—7 「国指定天然記念物 丹那断層」における γ 線測定結果

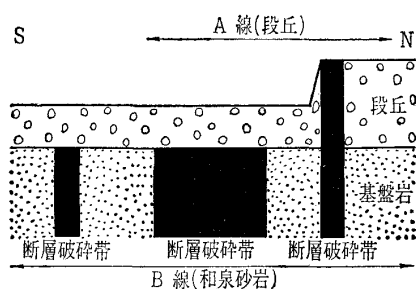
2 測線(T-1, T-2)設け, 測点間隔は 10 cm~50 cm である。

測定結果を図—7 に示す。地表部に変位がない区域 (正常場) での γ 線強度は 1.9~2.4 $\mu\text{R/h}$ の範囲で分布し, $\bar{R}_0=2.11\sim2.20 \mu\text{R/h}$, $R_s=0.11\sim0.12 \mu\text{R/h}$ である。異常値は, 変位が生じた区域 (断層場) で検出され, その値は正常場より相対的に低い 1.52~1.56 $\mu\text{R/h}$ であり, 断層場幅は 10 cm 未満である。

5. 考 察

従来の γ 線測定による断層破碎帯検出の考え方は,

「活断層周辺に形成されている大小の破碎面から遊離し, 岩石中の空隙, 割れ目を通じて拡散して地表に達したラドンの娘核種 (崩壊によりつくられた核種) の出す, 周辺より相対的に高い γ 線を測定することによって, 断層の位置や方向などを求める」(この解釈を“ガスの解釈”と記す) とされている²⁾。このガスの解釈により, 現在は核種別に測定できるスペクトル法によってビスマス (^{214}Bi)・タリウム (^{208}Tl) 等の γ 線のみに注目する報告がなされている^{7)~9)}。しかしながら, 4.1 の測定例に示したように, 断層破碎部は砂質土状で周囲の岩盤より空隙率が大きいにもかかわらず, 全計数法およびスペクト



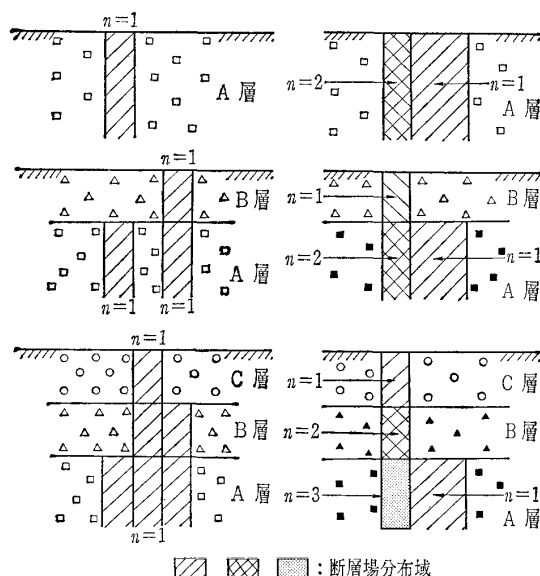
図—8 根来断層における断層場分布想定図 (NS 断面)

ル法による ^{214}Bi ・ ^{208}Tl ・ ^{40}K の各カウント数は相対的に低く、 γ 線強度の再現性は保たれている。また、4.2の測定例のように基盤岩の破碎部での γ 線強度が低く、その上位の堆積層では高いという現象も認められる。このような現象を説明するには従来のガスの解釈では困難と思われる。

河成段丘下に断層が実在している地点において、段丘上で、従来からの放射能探査である Rn 濃度測定と γ 線測定を行い、これらの測定値と地質との関連を検討した千木良ほか(1983)¹⁰⁾では、地表部で測定される γ 線は主として浅い部分に存在する核種から放射されたものであり、地下から移動して来た Rn の娘核種からの寄与は少ないものとしている。また γ 線測定方法の再検討を行った遠山ほか(1984)¹¹⁾では、①センサーを直接当てる表層の地質が測定値に強く影響してくること、②高 γ 線強度の地層があっても、およそ1 m以上の深さにあると、表層での測定値にはほとんど影響がないことが認められている。以上の測定上の制限を考慮すると、4.3の測定例において基盤岩で認められる断層場がその上位の段丘では認められないといった現象も理解され、根来断層では図—8に示す断層場分布が想定される。

断層場の異常値は、4.4の地震断層の測定例(丹那断層)から地震によって表層部の地層が破壊された箇所のみに出現すると考えられる。また、丹那断層における測定結果を基に、マグニチュード7～8クラスの1回の地震によって5～10 cmの断層場幅が生ずると仮定すると、基盤岩での幅広い断層場幅は基盤岩が生成した以降の地震跡の累積結果と解釈され、図—9に示す断層場幅の累積現象が想定される⁴⁾。

4測定例により、構成地層によって γ 線強度が異



図—9 断層場幅の累積現象概念図 地層がA層、B層、C層の順に形成され、各時代に断層運動が生じた場合のモデル

なることから、測定結果の解釈を行う場合には、地質・測定条件が同じであるかどうかの吟味が重要である。

6. 今後の課題

断層場における γ 線測定値の本質的問題点は、固有値を示すことと、負の異常値(正常場の γ 線強度より低い値)の出現である。この問題の解決には、地震断層の例で示したように、断層場を(地震に伴う)破壊による物質構造の異常帯として認識するのが妥当と考えられる。この破壊によって異常値が出現するという観点から考えると、今後は断層付近の地層を構成する物質の ESR 分析や、岩石模型の破壊による変位部の γ 線強度変化を調べる実験等を実施し、断層場における γ 線の物理化学的な挙動を知ることが問題解決の糸口になると考えられる。

断層場幅の累積現象の確認はデータの蓄積を要するが、前述した測定上の制限と地層破壊部のみに異常値が生じることを考慮すると、今後は測定対象層の地質時代を把握することによって、測定対象層生成後の断層活動履歴を知る手掛かりとなるであろう。この現象が存在するとすれば、測定対象層の地質時代と断層場幅を考慮することによって大まかな断層活動史が推定され、断層の活動評価も定量化できるのではないだろうか。

謝辞：地質調査所 近畿・中部地域地質センター

報文—2320

の寒川旭博士には根来断層に関して空中写真判読によるリニアメントについて御教示していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 阿部勝征・笠原 稔・岡田篤正・山崎晴雄・垣見俊弘：地震と活断層，アイ・エス・ユー，pp. 644～648，1985.
- 2) 岩の調査と試験編集委員会：岩の調査と試験，土質工学会，pp. 192～195，1989.
- 3) 吉村辰朗・松木宏彰：放射能探査の土木地質への適用例，全地連技術フォーラム'91講演集，pp. 189～192，1991.
- 4) 吉村辰朗：活断層調査のための γ 線測定方法，活断層研究，Vol. 10，pp. 72～82，1992.
- 5) 活断層研究会：新編日本の活断層—分布図と資料—，東京大学出版会，437p.，1991.
- 6) 岡田篤正・寒川 旭：和泉山脈南麓域における中央構造線の断層変位地形と断層運動，地理学評論，51

-5，pp. 385～405，1978.

- 7) 茂木 透・岡田真一郎：福岡県二日市温泉地域における γ 線スペクトル探査，応用地質，Vol. 31，No. 3，pp. 115～123，1990.
- 8) 木村重彦・高野 彬・五十嵐生男：携帯用自然ガンマ線測定装置による割れ目の解析，応用地質，Vol. 31，No. 4，pp. 185～194，1990.
- 9) 今泉真之・小前隆美・浜田浩正： γ 線スペクトロメトリーによる断層調査，応用地質，Vol. 33，No. 2，pp. 91～103，1992.
- 10) 千木良雅弘・金折祐司・木方建造：河成段丘下の断層の地化学調査(その1)—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，382054，1983.
- 11) 遠山忠昭・壇原 毅・里村幹夫：活断層調査のための γ 線測定方法の再検討，地震，Vol. 36，No. 2，pp. 539～547，1984.

(原稿受理 1993. 3. 16)