

活断層の TL 年代評価

—— 細粒試料がより若い TL 年代を示すとは限らない ——

森 本 晃*・平 賀 章 三

(奈良教育大学地学教室)

(平成9年4月17日受理)

TL Dating of Active Fault

—— All fine grains do not always give the younger TL age ——

Akira MORIMOTO and Shozo HIRAGA

(Department of Earth Sciences, Nara University of Education, Nara 630, Japan)

(Received April 17, 1997)

Abstract

We tried TL dating for the quartz inclusion from the fracture zone of the Tsuruga Fault. As the growth curves showed a tendency of saturation, we evaluated the equivalent doses by a curve fitting to an exponential function. Although the natural TL intensity of the fine grains is lower than that of the coarse ones, the equivalent doses, and so the TL ages have no dependency on grain size. The differences of TL characteristics of samples show the circumstances well. ① The finer grains have the lower saturation level. ② All fine grains do not always give the younger TL age. The fact that the decrease of effective trap number has extensively occurred to fine grains after faulting is responsible for the former. The latter infers the existence of a certain limited grain size, for the sample of which, the paleodose is zeroed most effectively. TL age of the Tsuruga Fault is 33 ± 3 ka. It gives only the upper age limit of the latest faulting, for complete zeroing is not confirmed.

はじめに

断層の活動年代を、破砕帯内物質を直接の試料として評価する試みは、最初 ESR 法を用いて (Ikeya *et al.*, 1982) 始められた。その後、TL 法によって (Nishimura & Horinouchi, 1989)、また両手法を用いて (林, 1989)、断層の活動年代評価が試みられた。断層の活動年代評価において、両手法が基本とするところは、断層活動時に破砕帯内物質の蓄積線量が、剪断応力による破断あるいは摩擦熱等の影響によってゼロイングを被る、という前提である。断層活動時のゼロイングが完全であれば、評価される年代は対象とする断層の最新の活動年代を示すことになる。これまで、両手法によって多数の断層活動年代が報告されてきた。そしてそれらの報告はすべて、細粒

*現在 奈良教育大学大学院教育学研究科修士課程

試料ほどゼロイングがより完全におこっている、というものであった（たとえば、ESR 法では Buhay *et al.*, 1988; Lee & Schwarcz, 1994, TL 法では Hiraga & Nagatomo, 1995）。

我々は、現在までに報告された事実が、普遍的なことなのか否かの検討を、敦賀断層破砕帯内試料を用いておこない、同時に活動年代評価も試みた。その結果、細粒試料ほどゼロイングがより完全におこっているとは限らないことを報告した（森本・平賀, 1996a）。さらに、再確認のため試料採取からやり直したが、やはり同様の結果を得た（森本・平賀, 1996b）。これらのデータを再検討したところ、いっそうの吟味・議論が必要となったので報告する。

試 料

試料は敦賀断層破砕帯より、平賀（1993）にしたがって採取した。Fig. 1 に敦賀断層の位置および試料採取地点を示す。活断層研究会（1991）によれば、本断層は確実度 I、活動度 B 級の活断層である。露頭位置は、 $35^{\circ}34'29''\text{N}$; $136^{\circ}2'54''\text{E}$ で、風化花崗岩中に幅 10~20cm の断層角礫帯が 4 本走っている。それらの中には幅 2~4cm の断層ガウジ帯が認められ、本研究に供した試料は、走向傾斜が $\text{N}41^{\circ}\text{E}$; 85°W である一条より採取した。

測 定

等価線量の評価

試料処理は、石英粗粒子法（Ichikawa, 1965, 1967; Fleming, 1970）に基づいた。Fig. 2 に手順の詳細を示す。この処理を経た、もとの粒径 250~150, 150~105, 105~75, 75~63 μm の石

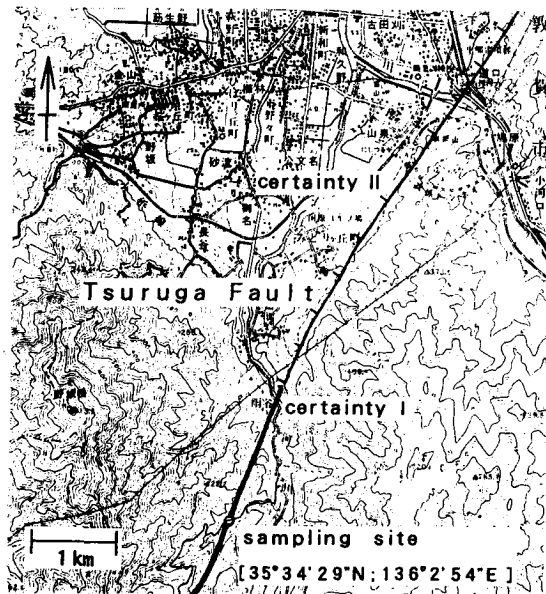


Fig. 1 Locality of the Tsuruga Fault and sampling site. The figure is based on a topographic map "Tsuruga", 1:50,000 in scale published by Geographical Survey Institute (1993) and "Active Faults of Japan" edited by the research group for active faults of Japan (1991).

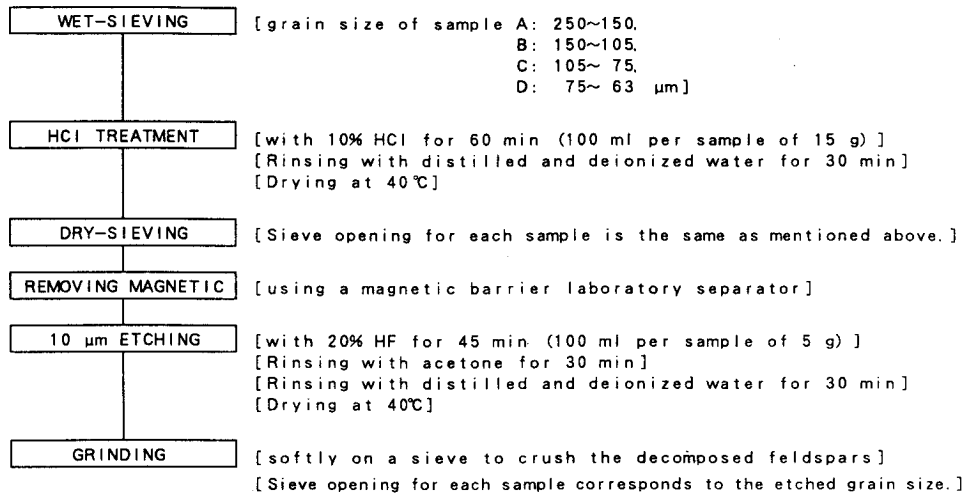


Fig. 2 Flow chart of sample preparation based on the quartz inclusion method. All the procedure was executed under red light of 12 lx or less.

英粒子を、それぞれ試料 A, B, C, D とした。

等価線量の評価には付加線量法を採用した。 ^{60}Co を γ 線源とし、線量率 5.518mGy/s で上述の 4 試料に、200, 400, 600Gy を付加した。照射は、 ^{60}Co 620 Ci 照射制御装置 (ヨシザワ LD 株) を用いて、奈良教育大学 RI 実験棟でおこなった。低温領域における短寿命の TL 信号を除去するため、天然試料とともに線量付加後の試料を、50°C で一週間アニーリングした。

TL 測定は、Harshaw TL2000A および TL2080 を用いて、窒素雰囲気下でおこなった。用いたフィルターは 350~570nm の光を透過させるものである。試料 15mg を一回の測定に供し、プレヒート 100°C、昇温率 10°C/s で 470°C まで加熱した。

年間線量の評価

年間線量の評価は、市川・平賀 (1988) に基づいた。

β 線量の評価には、TLD 素子として $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (Harshaw Co.) を用いた。 β 線は試料の含水率に応じて減衰する。含水率 9.0% に相当する水を、 β 線量測定用のディスクに滴下し、現地の状態を再現してこの効果を補正した。鉛ボックス中に放置した期間は、21.00d である。

γ + 宇宙線量の評価には、TLD 素子として $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (松下電気産業株) を用いた。センサーの現地埋設期間は、85.02d である。

両素子の TL 測定においては、昇温率 5.7°C/s で 310°C まで加熱したが、他の条件は等価線量評価のそれと同様である。

結 果

天然試料の TL 強度曲線を Fig. 3 に示す。各曲線は、BG 補正をおこなった 3~5 本の生データを平均したものである。

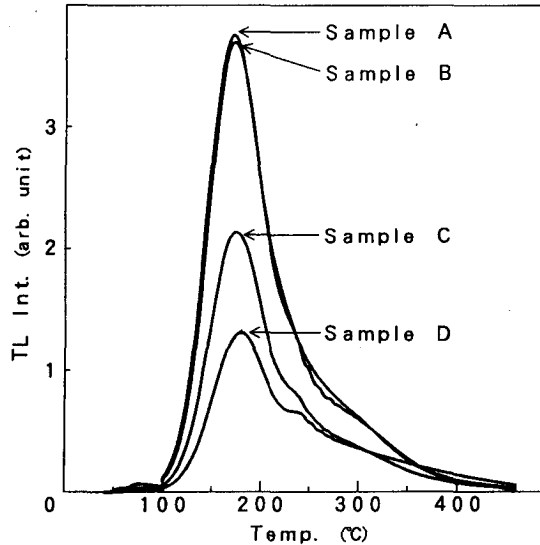


Fig. 3 Natural TL glow curves of the quartz from the fracture zone of the Tsuruga Fault. The quartz grain size of sample A, B, C or D is 250~150, 150~105, 105~75 or 75~63 μm , respectively. Each TL glow curve is the average of 3~5 measurements corrected for background. The maximum deviation of the measurements is 7% at most.

試料 A と B の TL 強度曲線がほとんど一致してはいるが、細粒試料ほど TL 強度が小さくなるという結果を得た。

各試料の成長曲線を Fig. 4 に示す。この TL 強度は、各付加線量に対しても天然試料と同様に平均の TL 強度曲線を求め、試料 A と B に共通の 264~272°C のプラトー領域にわたって積分したものである。なお、試料 C と D は飽和領域にあり、明瞭なプラトーを示さなかったが、上述の温度領域を採用し条件を揃えた。一般的には、成長曲線から直線領域を判断し、一回帰によって等価線量を評価する。しかし、いずれの試料も飽和の傾向を示したので、今回は指数回帰

Table 1 TL characteristics of the quartz from the fracture zone of the Tsuruga Fault.

Sample	Saturation level (arb. unit)	Potential TL (arb. unit)	Sensitivity ($10^{-3}/\text{Gy}$)
A	$3.5 \pm 0.6(16)$	$1.7 \pm 0.6(32)$	$1.8 \pm 0.9(50)$
B	$2.9 \pm 0.1(5)$	$1.3 \pm 0.2(11)$	$2.3 \pm 0.6(25)$
C	$1.4 \pm 0.1(8)$	$0.1 \pm 0.1(91)$	$3.4 \pm 2.0(58)$
{ D	1.0	0.1	0.5]

The quartz grain size of sample A, B, C or D is 250~150, 150~105, 105~75 or 75~63 μm , respectively. Each value is obtained from a curve fitting to a function: $y = a - b \cdot \exp(-c \cdot x)$, where y is the TL intensity and x is the dose. Its parameter a , b or c represents saturation level, potential TL or sensitivity, respectively. Equivalent dose [ED] can be obtained from these parameters using an equation: $ED = 1/c \cdot \ln(a/b)$. Weighting is used for sample A, B and C, but not for D. The values for D are only shown for reference. All the values in parentheses are error percent.

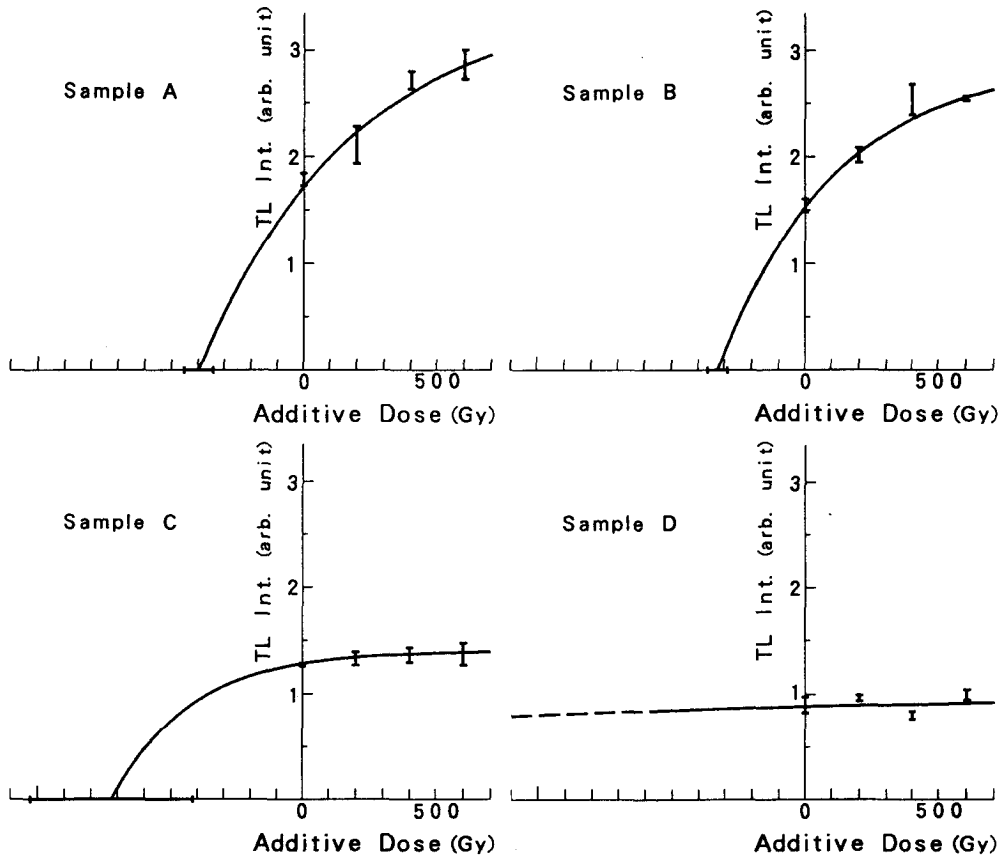


Fig. 4 First-glow growth characteristics of the quartz from the fracture zone of the Tsuruga Fault for evaluation of the equivalent doses. The quartz grain size of sample A, B, C or D is 250 ~ 150, 150 ~ 105, 105 ~ 75 or 75 ~ 63 μm , respectively. The curve fitting using weighting was done for sample A, B or C ($W_i=1/\sigma_i$). Unity weights, however, were used in the fit for sample D. Error bars represent $\pm 2\sigma$ uncertainties.

を試みた。試料 A, B, C に対しては、TL 強度の偏差の逆数で重みをつけたが、ほぼ完全な飽和状態にある試料 D に対しては、重みなしで回帰している。各試料の TL 特性を表す回帰式のパラメータを、Table 1 に示す。

同一の破砕帯から試料を採取したにもかかわらず、粒径によって成長曲線の形が異なる、すなわち TL 特性が異なる、という結果を得た。とりわけ興味深いのは、細粒試料ほど TL 強度の飽和値が小さいという事実である。

各粒径の試料について評価した TL 年代を、等価線量および年間線量とともに Table 2 に示す。

考 察

蓄積線量は、等価線量とスーパラリニアリティ補正值との和で表される。しかし、石英のスー

Table 2 Equivalent dose, annual dose and TL age of the quartz from the fracture zone of the Tsuruga Fault.

Sample	Equivalent dose (10^2 Gy)	Annual dose (mGy/a)			TL age (10^4 a)
		β	γ + cosmic	Total	
A	4.0 \pm 0.3(7)				4.1 \pm 0.5(11)
B	3.2 \pm 0.2(6)				3.3 \pm 0.3(10)
C	7.2 \pm 1.5(21)	6.3 \pm 0.8(13)	3.3 \pm 0.1(4)	9.6 \pm 0.8(8)	7.5 \pm 1.7(23)
[D	41.6				43.4]

The quartz grain size of sample A, B, C or D is 250~150, 150~105, 105~75 or 75~63 μ m, respectively. The values for D are only shown for reference. All the values in parentheses are error percent.

プラリニアリティ補正値は、ふつう多くても数十 Gy 程度である。試みに、試料 A および B についてスープレリニアリティ補正値を求めたところ、等価線量の 1% 以下であった。これは等価線量のもっとも小さい評価誤差に比べてもじゅうぶん小さく、無視して差し支えないと判断した。したがって、以下、等価線量を蓄積線量として考察する。

細粒試料ほど蓄積線量の飽和値が小さかったことについて

これまで、同一破碎帯からの試料であれば、成長曲線の形は粒径にかかわらず同じである、と暗黙に考えられてきた。Fig. 5 に示したように、そのような成長曲線では、蓄積線量のゼロイングがより完全におこっていると期待される細粒試料ほど、より若い TL 年代を示すことになる。Fig. 3 に示した天然試料の TL 強度のみを見れば、細粒試料ほどゼロイングが完全である、という従来の報告（たとえば、ESR 法では Buhay *et al.*, 1988; Lee & Schwarcz, 1994, TL 法では Hiraga & Nagatomo, 1995）と、今回の結果は一致する。しかしながら、Fig. 4 に示した成長曲線は、各試料の TL 特性が明らかに異なっていることを表している。とりわけ、蓄積線量の飽和値が細粒試料ほど小さく、したがって有効トラップ数が少ない、という事実を Table 1 から読み取ることができる。

試料粒径により蓄積線量の飽和値が異なる原因としては、履歴の異なる石英の混合物を試料としている可能性が考えられる。上盤と下盤の岩質が異なる断層破碎帯から試料を採取した場合には、この可能性を考慮すべきであろう。しかし、本研究の試料は、両盤ともに風化した花崗岩中の破碎帯から採取したものであった。したがって、試料粒径により蓄積線量の飽和値が異なる原因としては、別の可能性を考慮すべきである。断層活動により破碎が進行する過程で、あるいは断層活動の休止期において、粒径ごとの TL 特性とりわけ蓄積線量の飽和値、すなわち有効トラップ数を変化させる現象が生じた、と考えるのが妥当であろう。

細粒試料ほど有効トラップ数が少ない、という今回見いだされた事実はどういうようにして生じたのか、二つの可能性を検討する：

1) 粗粒試料の有効トラップ数が増加した可能性。

試料とした石英は、断層活動によって破断したものである。あらたな界面をつくりだす破断という過程を通して、有効トラップ数が増えることは、有り得るかもしれない。しかし、そうであ

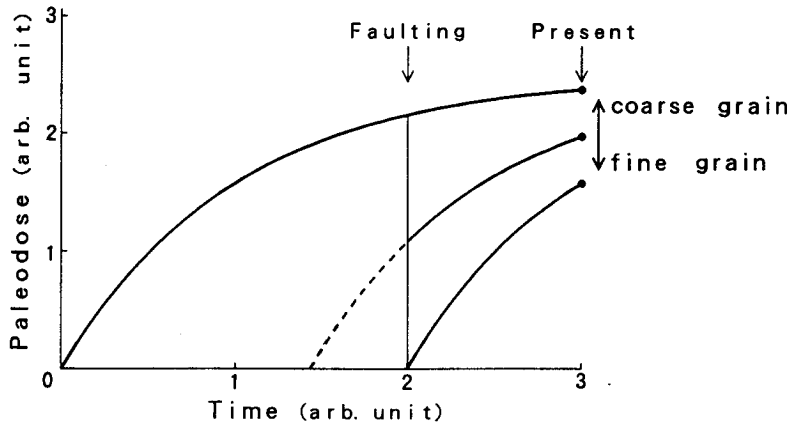


Fig. 5 Growth curves of paleodose before/after faulting. The more extent of zeroing at fault movement, the younger TL age is evaluated. Fine grains are considered to be more suffered zeroing than coarse ones.

るならば、より多くの破断を被ったと考えられる細粒試料ほど有効トラップ数が増加し、蓄積線量の飽和値が大きくなる、と期待される。これは事実と矛盾する。

2) 細粒試料の有効トラップ数が減少した可能性。

断層破砕帯は土壤水あるいは地下水の通路となり、破砕帯物質は絶えず水による変質作用を被ることとなる。試料表面から進行するこの変質作用により、試料の有効トラップ数が減少することが考えられる。この影響は、単位質量あたりの表面積が大きい細粒試料ほど、より効果的に現れる。その結果、粗粒試料におけるよりも細粒試料で、有効トラップ数がより減少し蓄積線量の飽和値が小さくなった、と解釈できる。

以上、二つの可能性を検討した結果、細粒試料ほど蓄積線量の飽和値が小さいという事実は、土壤水あるいは地下水による変質作用の結果、細粒試料の有効トラップ数が相対的に減少したことに起因する、と解釈するのが妥当であろう。

細粒試料ほどより若い TL 年代を示さなかったことについて

完全であれ不完全であれ、蓄積線量のゼロイングは断層活動時におこる。詳細ははまだ明らかではないが、剪断応力による破断あるいは断層面に沿うすべり運動の際の摩擦熱が、ゼロイングの原因であろう。これらはいずれも表面現象である。すると、単位質量あたりの表面積が大きい細粒試料ほど、より完全なゼロイングを被ることが期待される。

すでに言及したように、細粒試料ほど、天然試料の TL 強度が小さくなってはいたが、蓄積線量は必ずしもそうでなかった。すなわち、細粒試料ほどより若い TL 年代を、必ずしも示さなかった。とくに、もっとも細粒の試料 D の蓄積線量と TL 年代が、けた違いに大きかったことは、従来の報告(前出)とは異なり、細粒試料において、ゼロイングがより不完全な場合のあることを意味している。どのような状況を考えれば、この事実を説明できるだろうか。

断層破砕帯は、粗粒物質と細粒物質の混合物からなる。断層活動において、剪断あるいは摩擦といった作用をこれら粉体が受ける際に、粗粒試料がそれら作用の大部分を受けとめ、細粒試料

に対して「影」をつくることが考えられる。すなわち、「影」にある細粒試料は、その作用をある程度免れると考えられる。すると、細粒試料が実質的にゼロイングしない、あるいは不十分なゼロイングしか被らない、という状況がおこり得るだろう。断層活動における諸作用に対する応答が、このように試料粒径によって異なるということを想定すれば、細粒試料ほどゼロイングが必ずしも完全でなかったことを解釈できる。言い換えれば、もっとも効果的にゼロイングされる試料粒径が存在し、それは必ずしもより細粒のものとは限らない、ということである。

粒径あるいは破碎の程度の異なる試料で評価された蓄積線量が一定値に収斂すれば、断層活動時のゼロイングは完全であったと期待される (Hiraga & Nagatomo, 1995)。本研究において得られたデータはその傾向を示さず、完全ゼロイングを実証できるものではなかった。したがって、試料 B が示したもっとも若い TL 年代は、直近の断層活動年代を示しているとは限らない。敦賀断層は 3.3×10^4 年前より新しい時期に活動した、と解釈するのが妥当であろう。

結 論

活断層の TL 年代評価を、同一破碎帯から採取した異なる粒径の試料を用いておこなう場合、以下の諸点に留意することが重要である。

- ①各試料の天然 TL 強度を比較すること。
- ②成長曲線から各試料の TL 特性を明らかにすること。

とりわけ、試料の蓄積線量が直線領域にある場合には感度すなわち成長曲線の傾きを、飽和の傾向にある場合には飽和値を、具体的に明らかにすること。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、奈良教育大学物理学教室の長友恒人博士、同地学教室の西田史朗博士ならびに和田穰隆博士には、終始有益なご助言をいただいた。広島大学原爆放射能医学研究所の星正治博士には、較正照射をしていただいた。また、応用地質(株)の石沢一吉氏には、フィールドを案内していただいた。以上の方々に深謝の意を表します。

文 献

- Buhay, W. M., Schwarcz, H. P. and Grün, R. (1988). ESR dating of fault gouge: the effect of grain size. *Quaternary Science Reviews*, 7, 515-522.
- Fleming, S. J. (1970). Thermoluminescent dating: refinement of the quartz inclusion method. *Archaeometry*, 12, 133-145.
- 平賀章三 (1993). 熱ルミネッセンス法。「第四紀試料分析法 1 試料調査法」所収。60-62. 東京大学出版会.
- Hiraga, S. and Nagatomo, T. (1995). How to confirm "complete zeroing" in TL dating of fault movement—Case of the Higashiura Fault, Awaji Island in Japan—. *Bulletin of Nara University of Education*, 44 (2), 17-25.
- Ichikawa, Y. (1965). Dating of ancient ceramics by thermoluminescence. *Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University*, 43, 1-6.
- Ichikawa, Y. (1967). Dating of ancient ceramics by thermoluminescence II. *Bulletin of the Institute for Chem-*

- ical Research, Kyoto University, 45, 63-68.
- 市川米太・平賀章三 (1988). 熱ルミネッセンス法. 地質学論集, 29, 73-82.
- Ikeya, M., Miki, T. and Tanaka, K. (1982). Dating of a fault by electron spin resonance on intrafault materials. Science, 215, 1392-1393.
- 活断層研究会 (1991). [新編] 日本の活断層——分布図と資料. 東京大学出版会, 438pp.
- 国土地理院 (1993). 1:50,000地形図“敦賀”.
- Lee, H. K. and Schwarcz, H. P. (1994). Criteria for complete zeroing of ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, southern California. Tectonophysics, 235, 317-337.
- 林 愛明 (1989). 伊那谷南部・飯田地域の活断層の ESR および TL 年代測定. 活断層研究, 7, 49-62.
- 森本 晃・平賀章三 (1996a). TL 法による敦賀断層の活動年代評価——細粒試料がより若い TL 年代を示すとは限らない——. 日本地質学会第103年学術大会講演要旨. 386.
- 森本 晃・平賀章三 (1996b). 敦賀断層の TL 法による活動年代評価. ESR 応用計測, 12, 50.
- Nishimura, S. and Horinouchi, T. (1989). Thermoluminescence ages of some quartz in fault gouges. Journal of Physics of the Earth, 37, 313-323.