

断層活動年代測定における完全ゼロイング検証法 — TL 信号強度に対する熱パルスの加熱効果の実験的検討から —

平 賀 章 三 ・ 森 本 晃*

奈良教育大学理科教育講座(地学)

(平成13年4月27日受理)

Verification Method of the Complete Paleodose Zeroing in TL Fault Dating — From the Experimental Investigation of the Instantaneous Heating Effect on TL Intensity —

HIRAGA Shozo and MORIMOTO Akira*

(Department of Earth Sciences, Nara University of Education, Nara 630-8528, Japan)

(Received April 27, 2001)

Abstract

We have investigated an elementary process attributable to heat in recovery of radiation damage at the time of fault movement, searching the decrease of thermoluminescence (TL) intensities for quartz grains heated by the instantaneous thermal contact and being of 105~150 μ m diameter.

As a result of the experiments, we have found the following facts:

- ① It cannot be always expected that radiation damage is completely recovered at just an elevated temperature of each sample heated by the instantaneous thermal contact. The complete zeroing is detectable in the lower temperature range.
- ② If the perfect *ED* plateau is detected, then it can be verified that the paleodose zeroing at the time of fault movement must be complete.
- ③ Executing the *ED* plateau test, we can obtain one of the following informations: i) If the *ED* plateau is continuous from the initial temperature of TL measurements, then the estimated TL age is of the newest faulting. ii) If the *ED* plateau is detected, being continuous in only the higher temperature range, then the estimated TL age is of the past faulting. iii) If the *ED* plateau cannot be detected in any temperature range at all, then it can be concluded that though the age of faulting cannot be estimated, the fault in question is active.

Key Words: TL fault dating, complete paleodose zeroing, *ED* plateau test

キーワード: 断層活動年代測定, 完全ゼロイング, *ED* プラトーテスト

1. はじめに

断層活動に因る地震災害を軽減するためには、地震発生のポテンシャルを評価する必要があり、再来周期と最新活動年代に関する正確な情報を得ることが不可欠である。近年、各地でトレンチ調査が盛んに行なわれている

のも、このためである。しかしながら、活断層の危険度を見積もるのにもっとも重要な最新活動年代は、地層・岩体の変位や被覆関係から間接的に推定されているに過ぎない。断層活動の産物である破砕帯内物質を直接の試料として年代測定が可能ならば、その有用性は明らかである。

* 奈良教育大学大学院修了

Ikeya *et al.* (1982) は、跡津川断層破碎帯内石英の ESR 年代測定を試み、断層活動時の応力や熱により信号強度がゼロイングされること、したがって、断層の最新活動年代評価が ESR 法で可能であることを示唆した。これを受け、各地の断層活動年代評価が ESR 法により、精力的に試みられてきた (たとえば、田中ほか, 1981; 大村ほか, 1981; 田中ほか, 1984; 森山ほか, 1984; Fukuchi *et al.*, 1985, 1986; Fukuchi, 1988; Buhay *et al.*, 1988; Fukuchi, 1989; 林, 1989; Lee and Schwarcz, 1994, 1996 など)。やや遅れて、放射線損傷量の測定に基づくという点で、基本的な原理が同じである TL 法も、各地の断層試料に適用されてきた (Sato *et al.*, 1985; Nishimura and Horinouchi, 1989; 林, 1989; Hiraga and Nagatomo, 1995; 森本・平賀, 1997; 平賀・吉田, 2000 など)。

しかしながら、ESR、TL いずれの手法においても、最新の断層活動年代を評価できたと認定できるものはなかった。最新活動時における信号強度の完全ゼロイング、この検証法が確立されていなかったためである。

他方、実際の断層試料の信号強度を測定するのとは異なるアプローチとして、実験に基づいて完全ゼロイング条件を明らかにする試みが、ESR 法においてなされてきた (三木・池谷, 1981; Miki and Ikeya, 1982; Tanaka and Shidahara, 1985; Ariyama, 1985; Lee and Schwarcz, 1993 など)。対照的に、TL 法では、完全ゼロイング条件の実験的検討が未だなされていなかった。断層活動における TL 信号強度ゼロイング機構の詳細は明らかでなく、考えられる素過程ごとの検討を行う必要がある。筆者らは別に、応力に起因する素過程を取り上げ、剪断破壊による石英 TL 信号強度の変化を検討した (Hiraga *et al.*, 準備中)。本研究ではもう一つの素過程として、断層活動時に期待される瞬時の昇温を取り上げ、その効果を熱パルスの加熱実験によって検討した。

2. 実験

試料調整ならびに TL 測定は、基本的に石英粗粒子法 (Ichikawa, 1965, 1967; Fleming, 1970) に基づいた。

2.1. 試料調整

実験に供した試料は、Flattery Silica Sand から抽出した。これはオーストラリア Queensland 州 Flattery 岬の砂丘砂で、ほぼ純粋な石英からなっている。

TL 信号強度に対する断層活動時の昇温効果、これを検討するパレオドース既知試料は、以下の試料調整法に基づいて準備した。

① 不純物除去のため、Magnetic Barrier Laboratory Separator MODEL LB-1 (S.G.FRANTZ Co.) を用いて、

磁気分離。

② フッ酸処理：試料 1 g に対し 20 ml の割合で 20% のフッ酸を加え、マグネティックスターラー MODEL M12C-6 (小池精機(有)) で 60 分間攪拌。少なくとも 5 回蒸留水で洗浄後、さらにアセトンおよび蒸留水で各 10 分間超音波洗浄し、40°C で乾燥。

この処理は、やや大きかった卓越粒径 150~300 μm を短縮するために行った。

③ 目の開き 150 μm の篩上で軽く摩砕。105~150 μm 粒径の試料を回収後、アセトンおよび蒸留水で各 10 分間超音波洗浄し、40°C で乾燥。

④ 石英の低温型・高温型転移温度を考慮し、マッフル炉 MODEL FM-26 (ヤマト科学株) で 565°C、10 分間アニーリングし、蓄積線量を一旦ゼロイング。

⑤ ^{60}Co 620 Ci 照射制御装置 (ヨシザワ LD 株) を用い、線量率 6.6 mGy/s で、既知線量 30 Gy を付加。

⑥ 低温領域の短寿命信号を消去するため、100°C、2 時間アニーリングし、以後、25°C 乾燥状態を保持。

なお、超音波洗浄にはブラソニック卓上型超音波洗浄器 B2200J3 (ヤマト科学株) を、乾燥には送風定温乾燥器 DK-42 (ヤマト科学株) をそれぞれ用いた。

2.2. 加熱実験

断層活動時に期待される瞬時の昇温 (Fukuchi, 1989; 福地・今井, 1998) をできるだけ模するため、以下の加熱方法を採用した。

① 陶器製ポートをマッフル炉で 200・300・400・500°C

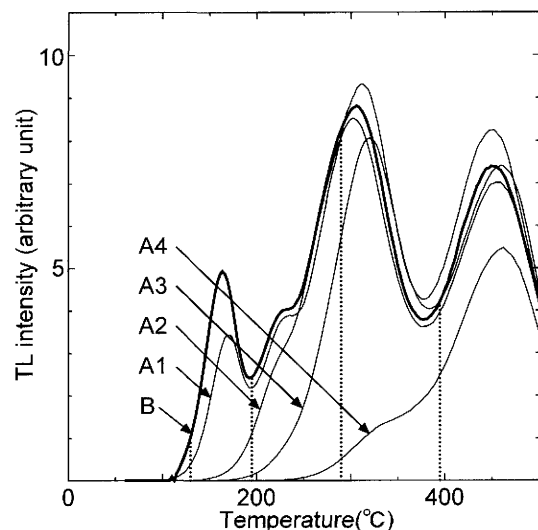


Fig. 1 TL glow curves of the 105~150 μm treated quartz from the Flattery Silica Sand. The sample B is irradiated, 30 Gy with ^{60}Co γ -rays, after annealing at 565°C for 10 min. The sample A1, A2, A3 or A4 is the sample B heated by the instantaneous thermal contact, up to a temperature of 130, 195, 290 or 395°C, respectively. Each glow curve is the average of 3~5 measurements corrected for background.

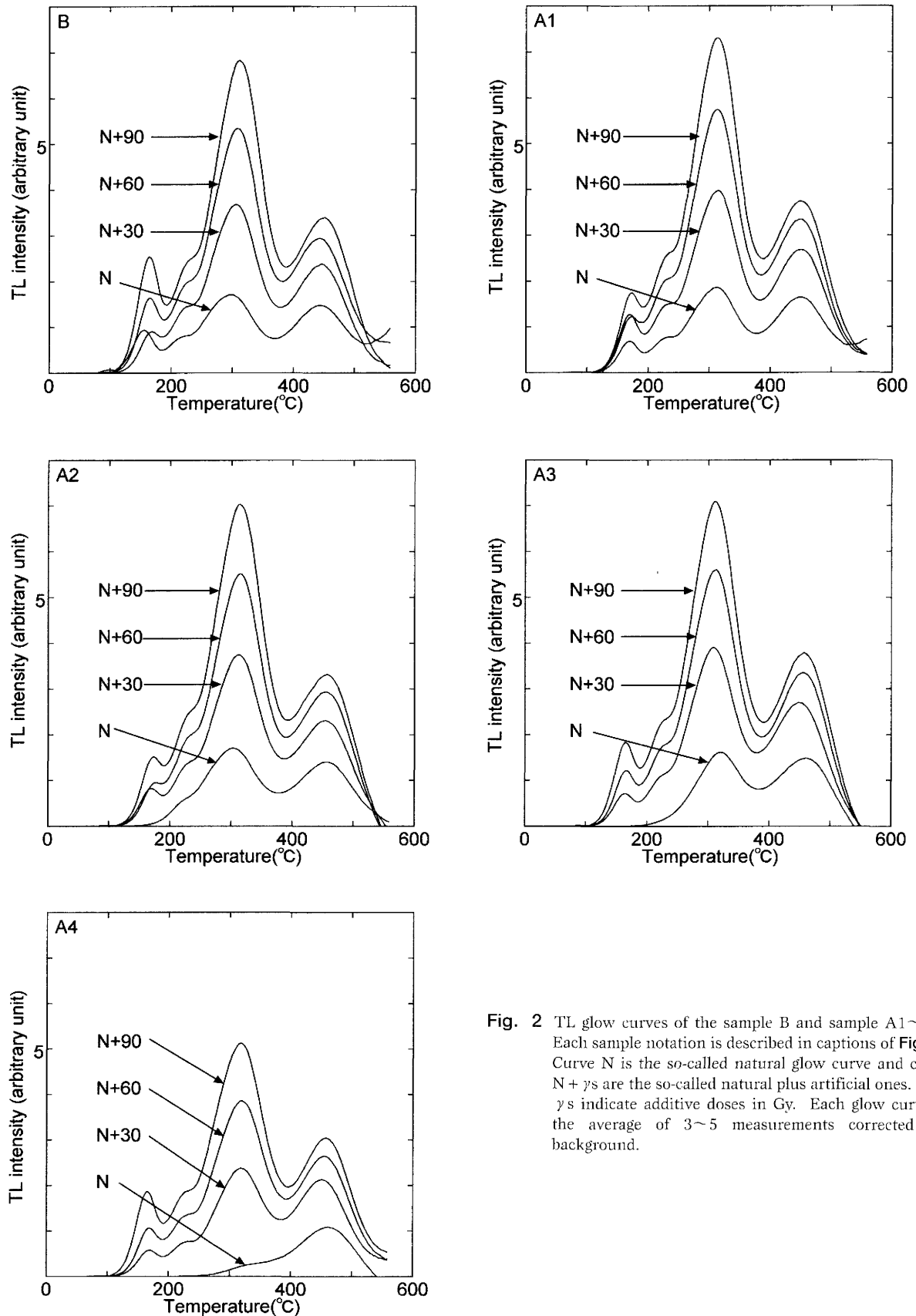


Fig. 2 TL glow curves of the sample B and sample A1~A4. Each sample notation is described in captions of Fig. 1. Curve N is the so-called natural glow curve and curve N + γ s are the so-called natural plus artificial ones. The γ s indicate additive doses in Gy. Each glow curve is the average of 3~5 measurements corrected for background.

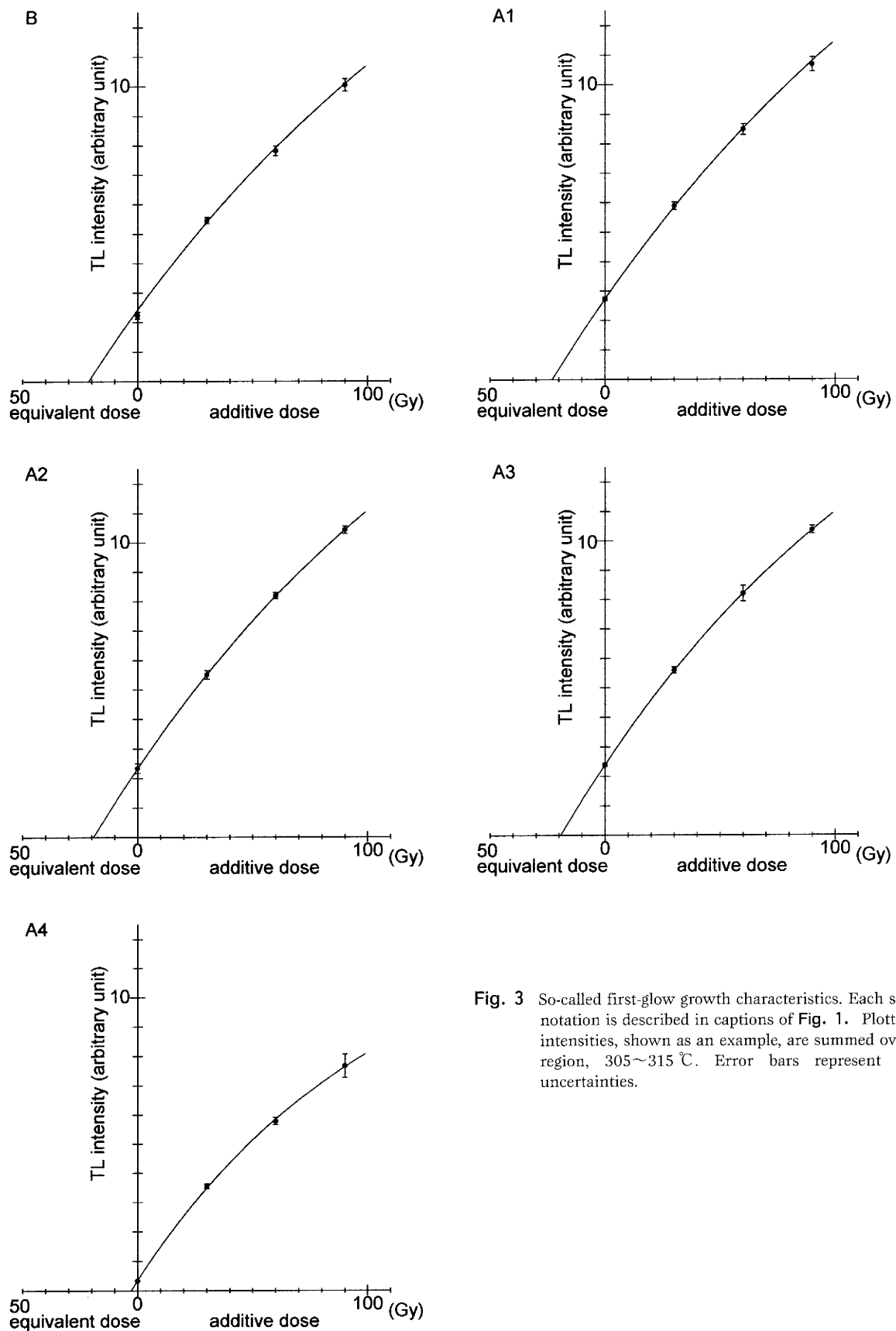


Fig. 3 So-called first-glow growth characteristics. Each sample notation is described in captions of Fig. 1. Plotted TL intensities, shown as an example, are summed over the region, 305~315 °C. Error bars represent $\pm 1\sigma$ uncertainties.

の各温度まであらかじめ加熱。

- ② ボートをマッフル炉から取出し、1度に250 mg の試料石英をただちに散布、約6秒後に回収。

なお、試料回収時のボートの温度は、熱電対による実測で、それぞれ約130・195・290・395℃であった。

以下、これら昇温を被った各試料をA1・A2・A3・A4、非加熱試料をBと称する。試料A1～A4は断層活動による各種程度の摩擦発熱の影響を被った試料を、試料Bは現実には入手し得ない、断層活動直前の試料を、それぞれ模している。

2.3. 線量付加とTL測定

断層活動時の昇温効果を、等価線量EDの評価に基づいて検討するため、前述の装置を用いて、加熱および非加熱両試料それぞれにγ線を照射し、30、60、90 Gyを付加した。その後、低温領域の短寿命信号を消去するため、100℃、2時間アニーリングを行い、TL測定に供した。

TL強度の測定は、TL Picoprocessor TL2000A およびTL2080 (Harshaw Chem. Co.) を用い、試料質量約18 mg、プレヒート100℃、昇温率10℃/sで550℃まで加熱、窒素雰囲気下の条件で行った。なお用いたフィルターは350～570 nmの光を透過させるものである。

3. 結果

非加熱(B)ならびに加熱(A1～A4)各試料に対して線量付加を施していない、いわゆる天然試料のTL発光曲線を、Fig. 1に示す。それぞれ、3～5本の発光曲線を平均している。

ED評価のために線量を付加した、各試料のTL発光曲線を、Fig. 2に示す。

Fig. 2において顕著な310℃ピークのTL強度に基づいた各試料の成長曲線を、1例として、Fig. 3に示す。

4. 考察

4.1. 加熱による信号強度のゼロイング

熱的接触により少なくとも昇温したと思われる温度：約130・195・290・395℃において、TL信号のなお残存することが、Fig. 1からは読み取れる。これは、試料Bの発光曲線を見れば分かるように、上記の各昇温温度よりも高温側に、ピークがあるからである。この高温側にあるピークの信号は、より低温の加熱では完全に消去できず、その裾野部分を観察していた、と考えられる。

各昇温温度におけるTL信号の残存率は約45～65%であった。これは、より高温側ピークの裾野の影響としてもかなりの残存率であり、瞬時の昇温では、完全ゼロ

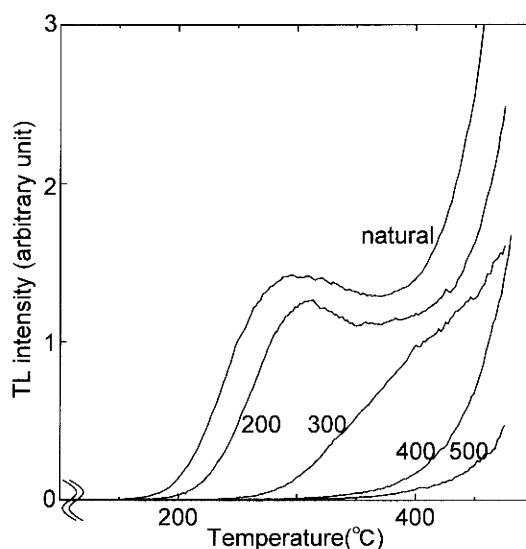


Fig. 4 TL glow curves of the 105～150 μ m natural and heated quartz from the Flattery Silica Sand. The number near by each glow curve is a temperature up to which the sample was heated at the rate of 40℃/s and maintained for 6 s. Each glow curve is the average of 5～6 measurements corrected for background.

イングは期待できないことを示している。もっとも、1度に散布した試料量がやや多かったため、ボートとの十分な熱的接触の保証されなかった粒子が存在していた影響も、あったかも知れない。いずれにせよ、断層活動時の昇温温度よりも高温側にTLピークが存在すると、昇温温度におけるTL信号の完全ゼロイングは、必ずしも期待できない。

では、瞬時の昇温と考えられる断層活動時において、完全ゼロイングは、まったく期待できないのか。筆者らは先に、今回と同一の試料を用いて、TL測定装置そのものを加熱装置とした実験(森本, 1999MS)を行っている。昇温率40℃/sで設定温度に到達後6秒間保持し、加熱停止により放熱後、試料を回収したものである。その実験で得られた発光曲線を、Fig. 4に示す。各設定温度におけるTL信号の残存率は約10%程度で、完全ゼロイングに近い結果を得ている。

今回の実験と比較して、熱的接触時間が少なくとも倍以上長かったこの実験の結果から、高温に保持された時間次第では、ゼロイングの程度の大きくなることが期待される。つまり、より高い昇温温度と、その保持時間が長いと考えられる地下深部試料の場合には、完全ゼロイングされていることも期待できるだろう。

4.2. ED評価に基づく完全ゼロイングの検証法

Fig. 3に示された成長曲線の1例を見ると、熱パルスの加熱前後における単位線量あたりのTL強度、すなわち感度、の変化はほとんど見出せない。試料A4のよう

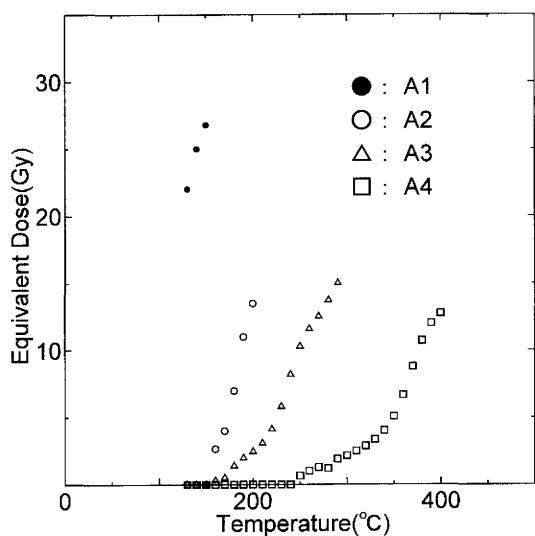


Fig. 5 The equivalent doses *EDs* for the samples A1~A4. Each sample notation is described in captions of Fig. 1. The *EDs* are estimated at 10°C intervals up to an elevated temperature of each sample.

に、たとえ感度変化が認められたとしても、以下の議論において、これは問題とならない。実際の断層試料を扱う場合、断層活動前試料の感度を知るすべはなく、したがって、感度変化の有無を判断すること自体が不可能であることも、一つの理由である。何よりも、以下に示すように完全ゼロイングが検証されるならば、たとえ断層活動前後で感度変化があったとしても、活動後の真の蓄積線量を正しく評価することができるからである。

熱パルスの加熱効果を検討するため、各試料の、少なくとも昇温したと思われる温度まで、10°C 間隔で *ED* 評価を行った。結果を、Fig. 5 に示す。未加熱試料Bの蓄積線量30 Gyの2%未満である *ED* 値をもって、実質的に完全ゼロイングを被っていると見なした。そう評価された温度は、熱パルスの加熱温度よりも低く、試料A2・A3・A4それぞれ150・170・240°Cであった。これらは、昇温温度よりも高温側ピークの裾野部分の信号が、実質的に零となっている温度に他ならない。

Fig. 5において注目すべき事実は、完全ゼロイングを被っていると見なされる温度まで、*ED*は値0のプラトーを呈している、ということである。実際の断層試料の場合、断層活動後の被曝線量に応じた *ED* 値が評価されるが、プラトーは維持されるだろう。つまり、*ED* プラトーを認めることができた場合、完全ゼロイングを検証した、と考えてよいことになる。

4.3. *ED* 評価に基づく活断層 TL 年代値の意味

完全ゼロイングを被ったと見なされ、値0の *ED* が一定の温度まで評価された今回の実験は、断層活動が1回限りの場合に対応している。ところが、実際に内陸に

分布し年代評価の対象となる断層は、ふつう活断層である。最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動することの推定される断層が活断層（活断層研究会、1991）であるから、繰り返し昇温を被ったものと考えなければならない。固有地震説（松田、1995）、あるいはタイムプレディクタブルモデルやスリッププレディクタブルモデル（島崎、1994）を参考に、繰り返しの昇温パターンについて、①昇温温度が毎回一定である場合、②昇温温度が繰り返し毎に変動する場合、を想定し考察してみた。いずれの場合も、最新断層活動による昇温が、低温側より連続する *ED* プラトーをもたらせば、その試料から“最新活動年代”を評価することが可能となること、前節で記したことから自明である。

これに反し、低温側より連続する *ED* プラトーを認めることができなかった場合を、さらに以下の二通りに分けて考察した：

- I) 低温側から連続はしていないものの *ED* プラトーを検出できた場合、
- II) いずれの温度領域においても *ED* プラトーを検出できなかった場合、

Iは、過去に *ED* プラトーをもたらす、すなわち完全ゼロイングを被るような昇温のあったことを示す場合で、その試料からは、最新ではない“過去の活動年代”を評価することが可能となる。昇温温度の低い、より新しい断層活動によって、低温側の *ED* プラトーは破壊されたものと考えられる。IIは、繰り返された不完全ゼロイングを検出していることから、“当該断層は活断層である”という意味を少なくとも見出すことが可能となる。

もしも活断層でないような断層試料であった場合には、TL年代測定可能な年代よりも古い時代の活動ということで、そもそも *ED* を実質的に評価することすら不可能であろう。さらに言うならば、広域応力場が現在のようになってから活動を開始したのが活断層であるから、広域応力場に変化を認めることのできない現時点では、活断層であった、という場合を想定する必要はない。

5. 結 論

断層活動時に期待される瞬時の昇温がTL信号強度に及ぼす影響を、熱パルスの加熱実験により検討し、その結果、以下のことが明らかになった。

- I) 瞬時の昇温では、TL信号の完全ゼロイングを、昇温温度そのものにおいては必ずしも期待できないが、より低温側において認めることができる。
- II) 断層活動による完全ゼロイングの検証は、*ED* プラトーを認めることで可能である。

Ⅲ) *ED* プラトーテストを行うことにより、以下のいずれかの情報を得ることができる：

- ① 低温側から連続する *ED* プラトーを認めた場合には、評価される TL 年代は“最新の活動年代”である。
- ② 低温側から連続はしていないものの *ED* プラトーを認めた場合には、評価される TL 年代は“過去の活動年代”である。
- ③ いずれの温度領域においても *ED* プラトーを認め得なかった場合には、活動年代を評価できないものの、当該断層は“活断層”である。

文 献

- Ariyama, T. (1985). Conditions of resetting the ESR clock during faulting. In *ESR Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki, T., pp.249-256. IONICS, Tokyo.
- Buhay, W. M., Schwarcz, H. P. and Grun, R. (1988). ESR dating of fault gouge: the effect of grain size. *Quat. Sci. Rev.*, **7**, 515-522.
- Fleming, S. J. (1970). Thermoluminescent dating: refinement of the quartz inclusion method. *Archaeometry*, **12**, 133-145.
- Fukuchi, T. (1988). Applicability of ESR dating using multiple centres to fault movement - the case of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, a major fault in Japan. *Quat. Sci. Rev.*, **7**, 509-514.
- Fukuchi, T. (1989). Theoretical study on frictional heat by faulting using ESR. *Appl. Radiat. Isot.*, **40**, 1181-1193.
- Fukuchi, T., Imai, N. and Shimokawa, K. (1985). Dating of the fault movement by various ESR signals in quartz - cases of the faults in the South Fossa Magna, Japan. In *ESR Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki, T., pp.211-217. IONICS, Tokyo.
- Fukuchi, T., Imai, N. and Shimokawa, K. (1986). ESR dating of fault movement using various defect centres in quartz; the case in the western South Fossa Magna, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **78**, 121-128.
- 福地龍郎・今井 登 (1998). 野島断層ボーリングコアサンプルの ICP 質量分析と ESR 年代測定. 月刊地球号外, **21**, 180-185.
- 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 - . *Bull. Nara Univ. Educ.*, **44** (2), 17-25.
- 平賀章三・吉田有香子 (2000). 最新断層活動時におけるパレオドーズゼロイング度の定量的評価—微粒子法の初適用: 野島地表地震断層の場合—. 奈良教育大学紀要, **49** (2), 37-45.
- Ichikawa, Y. (1965). Dating of ancient ceramics by thermoluminescence. *Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ.*, **43**, 1-6.
- Ichikawa, Y. (1967). Dating of ancient ceramics by thermoluminescence. II. *Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ.*, **45**, 63-68.
- 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. pp.438, 東京大学出版会, 東京.
- Lee, H. K. and Schwarcz, H. P. (1993). An experimental study of shear-induced zeroing of ESR signals in quartz. *Appl. Radiat. Isot.*, **44**, 191-195.
- 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. *Tectonophys.*, **235**, 317-337.
- Lee, H. K. and Schwarcz, H. P. (1996). Electron spin resonance plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, southern California. *GSA Bull.*, **108** (6), 735-746.
- 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.
- 松田時彦 (1995). 活断層. pp.242, 岩波書店, 東京.
- 三木俊克・池谷元伺 (1981). 断層の ESR 年代測定—その物理的基礎—. 月刊地球, **3**, 500-504.
- Miki, T. and Ikeya, M. (1982). Physical basis of fault dating with ESR. *Naturwissenschaften*, **69**, 390-391.
- 森本 晃・平賀章三 (1997). 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—. 奈良教育大学紀要, **46** (2) 17-25.
- 森本 晃 (1999). 奈良教育大学修士論文.
- 森山昭雄・池谷元伺・松田時彦 (1984). 三河山地における活断層の ESR 年代. 月刊地球, **6**, 258-262.
- Nishimura, S. and Horinouchi, T. (1989). Thermoluminescence ages of some quartz in fault gouges. *Jour. Phys. Earth*, **37**, 313-323.
- 大村一夫・桜本勇治・豊蔵 勇・辻 善弘・山戸武史・池谷元伺 (1981). 電子スピン共鳴測定法による断層の活動時期測定の試み—六甲断層を例として—. 月刊地球, **3**, 510-516.
- Sato, T., Suito, K. and Ichikawa, Y. (1985). Characteristics of ESR and TL signals on quartz from fault regions. In *ESR Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki, T., pp.267-273. IONICS, Tokyo.
- 烏崎邦彦 (1994). 海の活断層を探る. 地震と断層 (烏崎邦彦・松田時彦編) 所収, pp.63-84. 東京大学出版会, 東京.
- 田中和広・金折裕司・宮腰勝義・池谷元伺・三木俊克 (1981). 電子スピン共鳴測定法による跡津川断層の活動年代測定の試み. 月刊地球, **3**, 505-509.
- 田中和広・金折裕司・宮腰勝義 (1984). 電子スピン共鳴測定法による跡津川断層の活動年代測定の試み (その2). 月刊地球, **6**, 253-257.
- Tanaka, K. and Shidahara, T. (1985). Fracturing, crushing and grinding effects on ESR signal of quartz. In *ESR Dating and Dosimetry*, edited by Ikeya, M. and Miki, T., pp.239-247. IONICS, Tokyo.