

[17010]

## 丹後半島に分布する郷村断層及び山田断層の 放射線損傷ラジカル信号による年代測定その 2

### DATING OF THE GOMURA AND YAMADA FAULTS DISTRIBUTED ON TANGO PENINSULA USING RADIATION DEFECT RADICAL CENTERS PART 2

福地龍郎<sup>#,A)</sup>

Tatsuro Fukuchi <sup>#,A)</sup>

<sup>A)</sup> Faculty of Education, Graduate Faculty of Interdisciplinary Research, University of Yamanashi

#### Abstract

When we evaluate the activity of faults in the region with unclear tectonic landform or without Quaternary overlying sediments, we have no choice but to estimate the age of the latest fault movement from the formation age of fault gouge or from the age of resetting induced by frictional heating using absolute dating techniques such as the ESR (electron spin resonance) dating method. I carry out ESR dating of the fault gouge collected from the Yamada fault located in Toyooka city on Tango Peninsula; the age of the latest fault movement along the Yamada fault has not been decided yet. As a result, the ESR age of  $0.19-0.26 \pm 0.08$  Ma is obtained from the fault gouge using surface E' center in quartz, which is a lattice defect center created by shearing. This result shows that the age ( $T_a$ ) of the latest fault movement along the Yamada fault is estimated as  $T_a \leq 0.19-0.26 \pm 0.08$  Ma on the basis of the principle of ESR dating of fault movement, and thus this supports that the Yamada fault is indeed an active fault that has moved in the Middle - Late Pleistocene. I conclude that the ESR dating technique is available for the assessment of fault activity of unrecognized active faults that have moved in the Middle - Late Pleistocene.

**Keyword:** ESR dating, radical center, Gomura fault, Yamada fault, Tango Peninsula, 1927 Kita Tango earthquake

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究の目的

原子力発電所（原発）周辺に分布する断層の活動性は、原発の耐震設計における基準地震動（発生する可能性がある最大の地震の揺れ）の策定に大きく影響する。現在、断層活動性評価法として活用されている上載地層法は、放射性炭素  $^{14}\text{C}$  法による年代測定可能な有機物が断層母岩や上載地層に含まれている場合には有効であるが、断層母岩や上載地層に有機物が存在しない場合も少なくなく、断層の活動時期の特定が困難なことも多い。また、上載地層法は断層の活動年代を直接見積もる絶対年代測定法ではなく、断層が変位している地層と断層を覆っている地層の年代から断層の活動年代を推定する相対年代測定法であるので、より古い活断層の場合には推定年代幅が広すぎて活動性評価ができないこともあり、上載地層法以外の断層活動性評価法の開発が期待されている。

ESR 年代測定法（ESR 法）は、断層すべりに伴う断層破砕作用で生成する断層岩を試料として、断層岩中に含まれる石英や粘土鉱物起源のラジカル信号（ESR 信号）が断層摩擦熱によりリセットされることを前提として断層活動の絶対年代を見積もる断層活動性評価法である。本研究（研究期間：平成 28 年度～30 年度）では、原発銀座と呼ばれる若狭湾に面する丹後半島に分布する活断層である郷村断層及び山田断層を研究対象として、ESR 法による断層活動性評価法の有効性を検証することを目的とする。

##### 1.2 断層の ESR 年代測定法の原理

上述したように、断層の ESR 年代測定法では、断層露頭から採取される断層岩試料（断層ガウジ）に含まれる石英や粘土鉱物起源の各ラジカル信号が、断層すべりに伴い発生する断層摩擦熱で一旦リセットされることを仮定している。断層摩擦熱によりリセットされた各ラジカル信号は、その後、天然放射線による損傷を受けて再び生成・増大して行く。そこで、断層ガウジに人工ガンマ線を照射して各ラジカル信号の放射線損傷生成効率を求めることにより、断層活動時から現在まで各ラジカル信号が被曝してきた放射線の総量である総被曝線量（TD 値）を見積もることができる。一方、各ラジカル信号が一年間に被曝する放射線量である年間線量率（D 値）は、ICP 質量分析法等により定量される断層ガウジ中の  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  濃度から放射線量率換算表<sup>[1]</sup>を使用して計算され、TD 値を D 値で割ることにより断層の ESR 年代値（ $=\text{TD}/\text{D}$ ）が決定される<sup>[2]</sup>。しかし、断層摩擦熱で断層ガウジ中のラジカル信号が完全にリセットされる保証はなく、地表付近では封圧が小さいこともあり、断層摩擦熱がほとんど上昇しない場合もあり得る。活断層は繰り返し活動するので、最新断層活動時にラジカル信号が完全にリセットされない場合、得られる TD 値は過剰見積もりとなるので、ESR 年代値は実際の最新活動年代（ $T_a$ ）よりも古い値を示す。従って、断層の ESR 年代値（ $T_{\text{esr}}$ ）は、理論的には最新活動年代の上限値を与えることになり、 $T_a \leq T_{\text{esr}}$  という関係式が成り立つ<sup>[3]</sup>。

<sup>#</sup>tfukuchi@yamanashi.ac.jp

[17010]

## 2. 研究結果

### 2.1 断層岩試料

今年度は、丹後半島に分布する活断層である山田断層の断層露头（豊岡市中藤地区）から採取した断層岩試料の ESR 年代測定を実施した結果について報告する。山田断層中藤露头の断層岩試料の写真を Fig.1 に示す。山田断層の最新活動は 3,300 年前以前とされているが、詳細な活動時期や平均活動間隔については不明である<sup>[4]</sup>。山田断層の最新活動時に変位したと考えられる断層面（図中の fault plane）沿いには、断層ガウジ（a～e）が数 mm～5mm 程度で発達している。

各断層ガウジ（a～e）から検出される ESR スペクトルを Fig.2 に示す。ESR 測定には、山梨大学大学院総合研究部教育学域科学文化教育講座福地研究室の日本電子製電子スピン共鳴装置（JEOL RE3X）を使用した。測定条件については、以下の通りである：マイクロ波周波数 9.25～9.44 GHz、マイクロ波出力 1 mW 及び 0.01 mW、変調磁場 100 kHz 0.05 mT、応答時間 0.3 s、磁場掃引速度 8 min./scan、コンピュータ積算回数 3 回。

室温（RT）及び低温（77K）での ESR 測定の結果、各断層ガウジ（a～e）からは年代測定に利用できるラジカル信号である石英 E' 中心（surface E' 中心及び E<sub>1</sub>' 中心）、石英 Al 中心及び Ti 中心が検出された他、モンモリロナイト（Mo）四重信号（A～D 信号）の B 信号の位置に未知の信号が検出された<sup>[2]</sup>。最新断層活動時に変位した断層面上に位置する断層ガウジ（a 及び b）から検出される ESR スペクトルを見ると、ガウジ a では各ラジカル信号に減衰が認められるが、完全にはリセットされておらず、また、ガウジ b では信号がほとんど減衰していないので、最新活動時に断層摩擦熱はそれ程上昇しなかったと推定される。

### 2.2 ガンマ線照射実験

最新断層活動面上のガウジ a にガンマ線照射した時の ESR スペクトルの変化を Fig.3 に示す。ガンマ線照射は、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所の食品照射棟第 2 照射室のコバルト 60 線源を使用し、照射線量率 9.49 C/kg/h（吸収線量率 390.2 Gy/h）で実施した。石英の機械的破断により形成される surface E' 中心や石英の結晶内部に形成される E<sub>1</sub>' 中心、石英中の不純物起源の Al 中心及び Ti 中心は、ガンマ線照射によりほぼ規則的に増大することが確認できる。一方、Mo 四重信号の B 信号の位置に出現する未知の信号は、ガンマ線照射によって増大せず、飽和傾向を示している。

### 2.3 ESR 年代測定結果

ガンマ線照射により規則的に増大する石英 surface E' 中心、E<sub>1</sub>' 中心、Al 中心及び Al 中心の超微細構造 hfs (g=2.0187)、Ti 中心を用いて、断層ガウジ a～c の ESR 年代測定を実施した。ESR 年代値を求めるに当たり、含水比は 0.157～0.252±0.1、Rn 損失は 0～

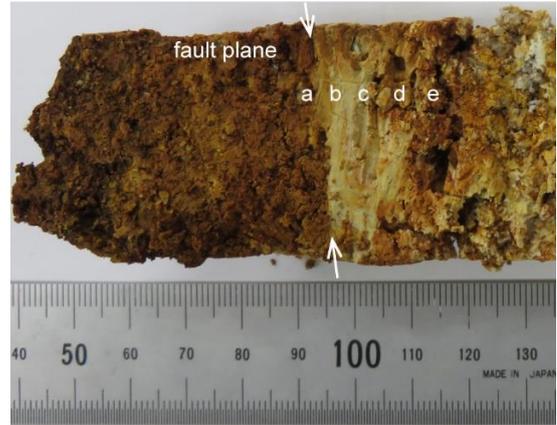


Figure 1. The Yamada fault gouge used for ESR dating.

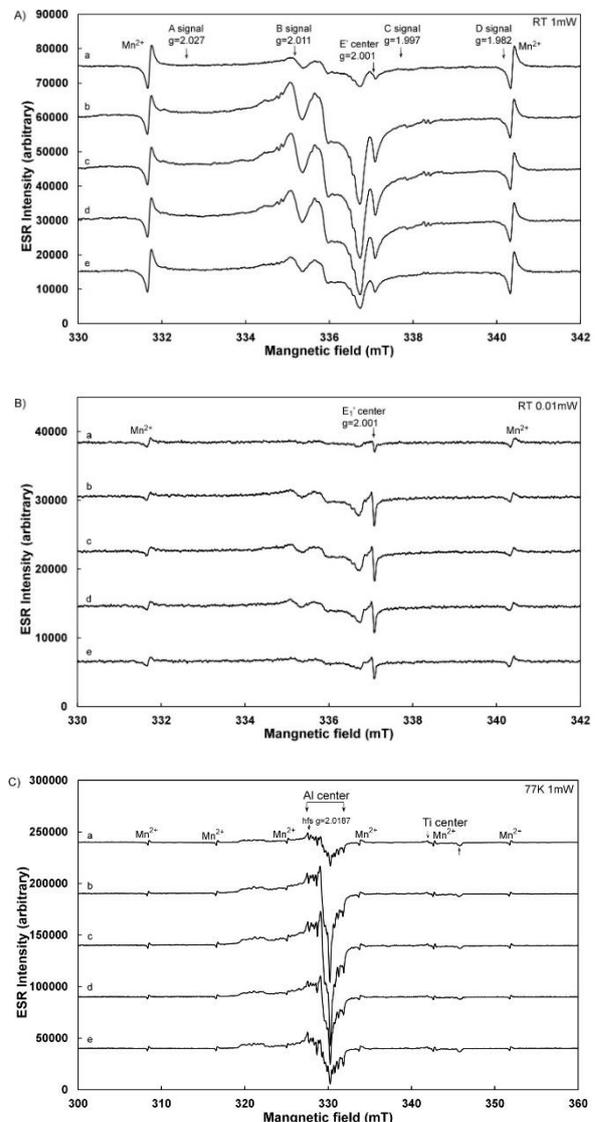


Figure 2. ESR spectra obtained from the Yamada fault gouge. A) RT, 1mW, B) RT, 0.01mW, C) 77K, 1mW.

[17010]

100%,  $\alpha$ 線損傷生成効率は  $0.1 \pm 0.05$  とし,  $\alpha$ 線及び  $\beta$ 線の粒度に対する減衰因子は 1.00 とした。また, 断層岩中の  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  及び  $\text{K}_2\text{O}$  濃度は, エイキット(株)において Agilent Technologies 社製 ICP-MS (7700x) を使用して決定し, Adamiec & Aitken (1998)<sup>[1]</sup>の放射線量換算表及び Fukuchi & Imai (1998)<sup>[5]</sup>の線量率補正式を使用して年間線量率を計算した。

ESR 年代測定の結果, 断層ガウジ a~c の石英 surface E'中心からそれぞれ  $0.62 \pm 0.21$  Ma (決定定数  $R=83.5\%$ ),  $0.19 \pm 0.07$  Ma ( $R=97.3\%$ ),  $0.26 \pm 0.08$  Ma ( $R=97.1\%$ ) という中期更新世を示す年代値が得られた。また, 石英 E<sub>1</sub>'中心からは, それぞれ  $1.70 \pm 0.36$  Ma ( $R=95.6\%$ ),  $1.19 \pm 0.31$  Ma ( $R=94.0\%$ ),  $1.49 \pm 0.35$  Ma ( $R=95.5\%$ ) という前期更新世を示す古い年代値が得られた。さらに, 石英 Al 中心 (全体) からはそれぞれ  $0.85 \pm 0.20$  Ma ( $R=93.9\%$ ),  $1.17 \pm 0.30$  Ma ( $R=95.6\%$ ),  $0.68 \pm 0.16$  Ma ( $R=97.6\%$ ), Al 中心 hfs からはそれぞれ  $1.97 \pm 1.33$  Ma ( $R=53.8\%$ ),  $0.53 \pm 0.19$  Ma ( $R=89.7\%$ ),  $1.55 \pm 0.81$  Ma ( $R=65.5\%$ ), 石英 Ti 中心からはそれぞれ  $0.59 \pm 0.14$  Ma ( $R=95.2\%$ ),  $1.45 \pm 0.37$  Ma ( $R=95.1\%$ ),  $1.07 \pm 0.24$  Ma ( $R=98.1\%$ ) という主に前期更新世を示す古い年代値が得られた。

### 3. 考察及び結論

石英 E<sub>1</sub>'中心は加熱により増大することが知られており, 摩擦熱等の影響で信号強度が増大したために古い年代値が得られた可能性がある。一方, 石英 Al 中心 (全体) は石英中の過酸化ラジカルである peroxy 中心<sup>[2]</sup>とオーバーラップしており, 信号強度が実際よりも大きくなっているために古い年代値が得られたと考えられる。また, Al 中心 hfs から得られた年代値の決定定数 (R) はいずれも 90%を切る低い値を示しており, 信頼性は低いことが分かる。

石英 surface E'中心は断層破碎時の機械的破断により形成され, 得られる年代値は石英が破断を受けた年代を示している<sup>[2]</sup>。ESR 年代測定法の原理で述べたように, 断層の ESR 年代値は, 理論的には最新活動年代の上限値を与えるので, 決定定数  $R > 97\%$  で信頼性が高く, 最も若い年代値を与える石英 surface E'中心の ESR 年代値を用いると, 山田断層の最新活動年代は,  $T_a \leq 0.19 \sim 0.26 \pm 0.08$  Ma となり, 山田断層は中期~後期更新世以降に活動した活断層となる。

### 4. 謝辞

本研究で使用した断層岩試料は, 平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費 (丹後地域における地質構造等に係る調査) 事業で発掘された断層露頭から採取された。断層岩試料の採取では, 東北大学大学院今泉俊文教授及び岡田真介助教, 応用地質(株)の村上雅紀氏及び阿部恒平氏に大変お世話になった。ガンマ線照射では, 高崎量子応用研究所の八木紀彦氏及び山縣諒平氏, 大学開放研究室の大工原和子氏に大変お世話になった。また, ICP 質量分析では, エイキット(株)の高木英一氏にお世話になった。以上の方々に深く感謝する次第である。

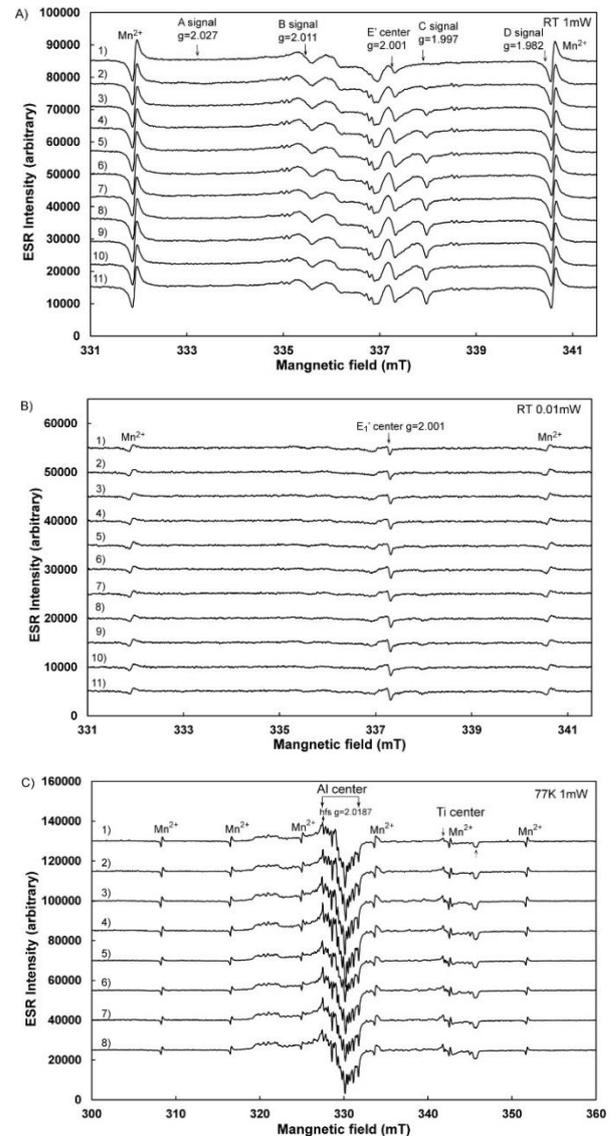


Figure 3. ESR spectra obtained from the Yamada fault gouge a. A) RT, 1mW, B) RT, 0.01mW, C) 77K, 1mW. 1) 0 kGy, 2) 0.39 kGy, 3) 0.78 kGy, 4) 1.17 kGy, 5) 1.56 kGy, 6) 1.95 kGy, 7) 2.34 kGy, 8) 2.73 kGy, 9) 3.12 kGy, 10) 3.51 kGy, 11) 3.90 kGy.

### 参考文献

- [1] G. Adamiec & M. Aitken (1998) *Ancient TL*, Vol.16, p.37-50.
- [2] 福地龍郎 (2004) ESR 法による断層活動年代測定—その原理と実践—. 深田研ライブラリー, No.63, 45pp.
- [3] 福地龍郎 (2015) ESR 年代測定法による断層活動性評価. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会講演要旨, SGL39-01.
- [4] 地震調査研究推進本部 (2004) 山田断層帯の長期評価について. 主要活断層帯の長期評価, 28p.
- [5] T. Fukuchi & N. Imai (1998) In: Parnell, J. (ed.) *Dating and Duration of Fluid Flow and Fluid-Rock Interaction*. Geological Society, London Special Publications, Vol.144, p.261-277.