

[18006]

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 3

DATING OF THE GOMURA AND YAMADA FAULTS DISTRIBUTED ON TANGO PENINSULA USING RADIATION DEFECT RADICAL CENTERS PART 3

福地龍郎^{#,A)}

Tatsuro Fukuchi ^{#,A)}

^{A)} Faculty of Education, Graduate Faculty of Interdisciplinary Research, University of Yamanashi

Abstract

To 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 apply the ESR dating method to the fault gouge collected from the Yamada fault located at the Mushiu district 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 0.26 ± 0.06 Ma is obtained from the fault gouge using the Al center in quartz, which is an impurity defect center derived from a hole trapped at an Al atom site in quartz. This result means that the age (T_a) of the latest fault movement along the Yamada fault in the Mushiu district is estimated as $T_a \leq 0.26 \pm 0.06$ 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 since the Middle Pleistocene. I conclude that the ESR dating technique is available for the assessment of fault activity of unrecognized active faults that have moved since the Middle 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

活断層の活動性評価法として現在活用されている上載地層法は、断層により切られている地層あるいは断層を覆っている上載地層中に、放射性炭素 ^{14}C 法による年代測定可能な有機物が含まれている場合には有効である。しかし、断層岩盤や上載地層中に有機物が含まれていない場合も少なくなく、例え有機物が含まれていたとしても、地層に含まれている有機物の年代が ^{14}C 法の適用限界である約 6 万年前より古い場合には、断層の活動時期を特定することは困難である。また、上載地層法は、断層が切っている地層と上載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、中期更新世に活動した活断層の場合には、推定年代幅が広すぎて活動性評価ができないこともある。このように、上載地層法が適用できない、特に中期更新世に活動した活断層の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碎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

上述のように、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に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}U , ^{232}Th , K_2O 濃度から放射線量率換算表^[1]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^[2]。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_{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^[3]。

[#]tfukuchi@yamanashi.ac.jp

[18006]

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頭（豊岡市但東町虫生地区）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^[4]。山田断層虫生露頭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^[5]。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～d）が 5～10mm 程度で発達している。

各断層ガウジ（a～d）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～d）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 E₁' 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 信号が検出された^[2]。最新断層活動時に変位した断層面（Fig.1 中の fault plane）上に位置する断層ガウジ（b 及び c）から検出される ESR スペクトルを見ると、より古いガウジ c に比べて、ガウジ b では、石英 Al 中心及び Ti 中心に減衰が認められるが、完全にはリセットされておらず、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 b 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 E₁' 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 信号は、ガンマ線照射によって増大せず、既に飽和傾向を示していると考えられる。

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、E₁' 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 $0.117\sim0.144\pm0.1$ 、Rn 損失は 0～

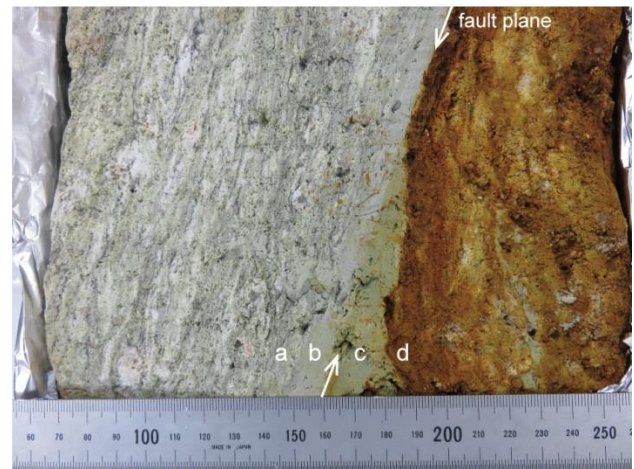


Figure 1. The Yamada fault gouge at the Mushiu outcrop.

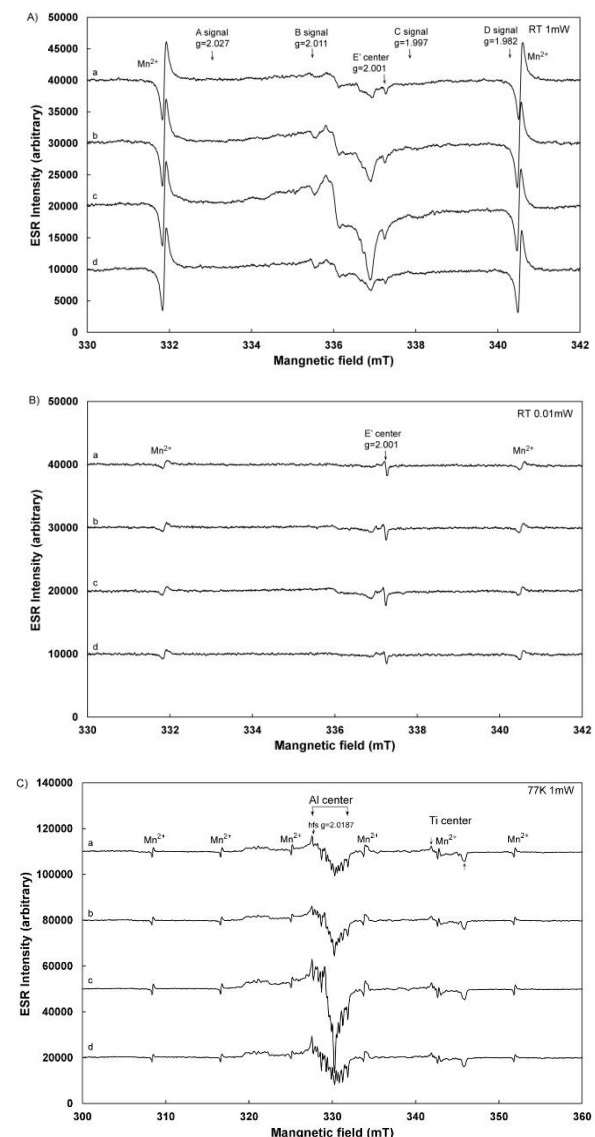


Figure 2. ESR spectra obtained from the Yamada fault gouge. A) RT, 1mW, B) RT, 0.01mW, C) 77K, 1mW.

[18006]

100%, α 線損傷生成効率は 0.1 ± 0.05 とし, α 線, β 線及び γ 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}U , ^{232}Th 及び K_2O 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) [1] の放射線量換算表及び Fukuchi & Imai (1998) [6] 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~d の石英 surface E' 中心からそれぞれ 0.44 ± 0.09 Ma (決定定数 $R=97.3\%$), 0.65 ± 0.13 Ma ($R=98.4\%$), 0.32 ± 0.08 Ma ($R=96.8\%$), 0.42 ± 0.18 Ma ($R=81.7\%$) という中期更新世を示す年代値が得られた。また, 石英 E_1' 中心からは, それぞれ 0.46 ± 0.14 Ma ($R=86.9\%$), 1.53 ± 0.37 Ma ($R=91.1\%$), 1.60 ± 0.36 Ma ($R=93.4\%$), 1.15 ± 0.32 Ma ($R=88.0\%$) という前期~中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 0.38 ± 0.09 Ma ($R=96.3\%$), 0.26 ± 0.06 Ma ($R=98.7\%$), 0.70 ± 0.14 Ma ($R=97.6\%$), 0.80 ± 0.16 Ma ($R=99.6\%$), Al 中心 hfs からはそれぞれ 0.89 ± 0.42 Ma ($R=70.3\%$), 0.68 ± 0.26 Ma ($R=81.3\%$), 0.95 ± 0.35 Ma ($R=65.5\%$), 0.99 ± 0.24 Ma ($R=95.4\%$) 石英 Ti 中心からはそれぞれ 0.61 ± 0.14 Ma ($R=94.9\%$), 0.34 ± 0.07 Ma ($R=98.7\%$), 1.03 ± 0.26 Ma ($R=92.2\%$), 1.00 ± 0.21 Ma ($R=96.1\%$) という主に前期~中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 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すと考えられる [2]。石英 E_1' 中心は加熱により一旦増大するので, 摩擦熱等の影響で信号強度が増大し, より古い年代値が得られる可能性がある。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 [2] とオーバーラップして信号強度が大きくなっており, 実際よりも古い年代値が得られる可能性がある。一方, Al 中心 hfs は, 測定時の変動が大きいため決定定数 (R) が低くなる傾向があるが, 得られる年代値の内, 90%を切る低い決定定数 (R) を示すものは信頼性が低い。

断層の ESR 年代測定法の原理に従えば, 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 0 定数 $R>97\%$ で信頼性が高く, 最も若い年代値を与える石英 Al 中心の ESR 年代値を用いると, 山田断層の最新活動年代は, $T_a \leq 0.26 \pm 0.06$ Ma となり, 山田断層は中期あるいは後期更新世以降に活動した活断層となる。これまでの断層調査で, 山田断層の最新活動は 3,300 年前以前であることが判明しているので, ESR 年代測定の結果とは矛盾せず, ESR 法の有効性が確認された。

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

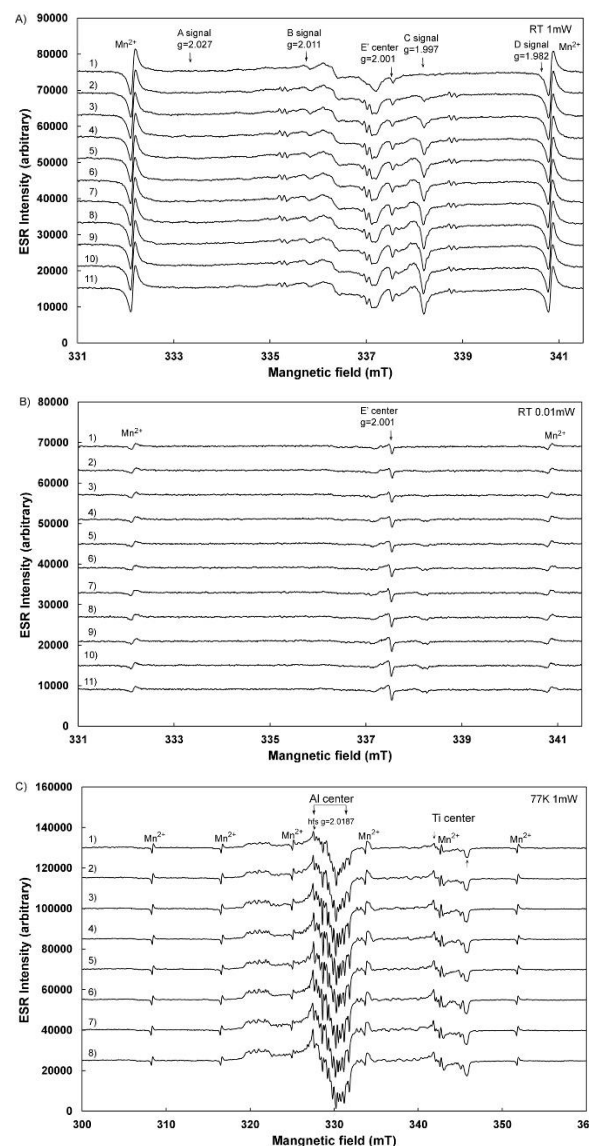


Figure 3. ESR spectra obtained from the Yamada fault gouge a. A) RT, 1mW, B) RT, 0.01mW, C) 77K, 1mW. 1) 0 kGy, 2) 0.39 kGy, 3) 0.78 kGy, 4) 1.17 kGy, 5) 1.56 kGy, 6) 1.95 kGy, 7) 2.34 kGy, 8) 2.73 kGy, 9) 3.12 kGy, 10) 3.51 kGy, 11) 3.90 kGy.

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。

参考文献

- [1] G. Adamiec & M. Aitken (1998) *Ancient TL*, Vol.16, p.37-50.

[18006]

- [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] 岡田真介・坂下 晋・今泉俊文・岡田篤正・中
村教博・福地龍郎・松多信尚・楮原京子・戸田
茂・山口 覚・松原由和・山本正人・外處 仁・
今井幹浩・城森 明 (2018) 横ずれ断層における
各種物理探査の適用可能性の検討 (その 1 : 浅層
反射法地震探査・屈折法地震探査・CSAMT 探査・
重力探査) —郷村断層帯および山田断層帯におけ
る事例—. 物理探査, 第 71 巻, p.103-125.
- [5] 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.
- [6] 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.