

NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

野島断層の断層破碎物質を用いた地震性すべりの直接的年代測定手法の検証

Validation of direct dating methods of a coseismic fault slip event using fault gouges along the Nojima Fault

宮脇 昌弘 内田 淳一

MIYAWAKI Masahiro and UCHIDA Jun-ichi

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

原子力規制委員会

Nuclear Regulation Authority

令和3年2月

February 2021

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電話：03-5114-2226
ファックス：03-5114-2236

野島断層の断層破碎物質を用いた地震性すべりの 直接的年代測定手法の検証

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門
宮脇 昌弘 内田 淳一

要 旨

断層破碎物質の直接的年代測定による断層の最新活動時期の評価手法の確立は、原子力関連施設周辺の断層の活動性評価の高度化のために有用である。断層の最新活動時の年代値を取得する方法として、断層活動時の摩擦熱により年代がリセットする温度に達した断層破碎物質を用いて年代を測定する手法がある。しかし、断層破碎物質を用いた活動性評価に関しては、年代のリセットする条件が明らかとなっていないため信頼性の高い活動年代の評価手法が確立されていない。断層活動に伴う摩擦熱は、深部ほど封圧とせん断応力が大きくなるため高くなると考えられる。地表付近では摩擦熱が十分に高くないために断層の最新活動時の年代値が得られない。正確な年代値を取得するためには、摩擦熱により年代がリセットした断層破碎物質の有無を確認し、その深度について検討する必要がある。

そこで、本研究では 1995 年の兵庫県南部地震で活動した野島断層を対象として、ボーリング調査及びトレンチ調査により異なる深度の断層破碎物質を採取し、それらの年代測定を実施することにより、断層の直接的年代測定法の有効性について検証した。なお、本研究のうち地質調査及び年代分析については、国立大学法人京都大学に委託した。本研究では、それらの結果を用いて年代のリセットの検証を原子力規制庁が実施したものである。

最新活動面の年代値は、本研究開始時において地震時からまだ 20 年程度しか経過していないため、おおむねリセットしているはずであるが、得られた年代値は一部を除いて実際の年代よりも古い値を示した。しかし、いずれの年代値も深度が深くなるほど若い年代値を示す傾向が認められた。これは、深部ほど年代のリセットする程度が高くなることを示唆している。

今回、各深度の断層破碎物質について最新活動面の試料とそれ以外の試料について区分し、それぞれの断層破碎物質について年代測定を行った。その結果、最新活動面付近の断層破碎物質の年代値は、それ以外の断層破碎物質の年代値に比べて有意に若くなった。これは、断層変位に伴う摩擦熱が年代値に影響を与える主要な原因であることを示唆している。

最新活動面の年代値は、同じ試料において3種類の年代測定法により測定した。光・熱ルミネッセンス年代測定法(OSL・ITL)が最も若い年代、電子スピン共鳴年代測定法(ESR)が中間の年代、K-Ar年代測定法が最も古い年代を示した。これらの測定手法間の年代値の違いは、熱に対する感度の違いを反映していると考えられる。すなわち、ルミネッセンス年代測定は、他の年代測定手法に比べて有意に熱の感度が高く、数十万年前より若い年代値が得られている。特に最深部の試料のITL年代測定では、ほぼ年代がリセットし、約1,000年前の年代値が得られた。ESR年代測定は約10万年前から約400万年前の年代値を示し、ルミネッセンス年代よりも古い年代値を示している。一方、K-Ar年代測定は、約4,000万年前よりも古い年代値しか得られておらず、これは、母岩の花崗岩の年代値に近い。ルミネッセンス年代測定法による年代値は、他の年代測定手法に比べて有意に若い年代値を示し、比較的、浅い深度で採取された試料でも、更新世の年代幅で検討される断層の活動時期の評価に利用することが可能であることを確認した。

本研究では、野島断層を対象として直接的年代測定手法の検証を行ったが、今後は、同断層とは活動性の異なる断層での検証等を継続し、同手法の信頼性の向上を目指す。

Validation of direct dating methods of a coseismic fault slip event
using fault gouges along the Nojima Fault

MIYAWAKI Masahiro and UCHIDA Jun-ichi
Division of Research for Earthquake and Tsunami,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

A direct dating method for fault gouges is crucial for assessing most recent fault activities when no overlying sediments are available (e.g., Late Pleistocene sediments). Use of direct dating for fault gouge is a method for obtaining the age of the latest fault slip event when the fault gouges which have been subjected to sufficiently high frictional heating for age resetting. However, direct dating methods have not been fully established for fault gouges because age resetting conditions have not been clearly identified. Frictional heating is expected to be higher deep underground because the frictional heating generated by fault movements is dependent on both shear stress and confining pressure. Therefore, it is likely that fault gouges at the surface would be older than the most recent fault movement owing to incomplete age resetting.

To validate the direct dating method, we compared the estimated ages of fault gouges obtained from different depths using a deep borehole and surface trench along the Nojima Fault, which caused the 1995 Kobe earthquake. Part of this study was implemented by the Kyoto University under the auspices of the S/NRA/R to perform geological survey and dating analyses. Validating the age resetting condition was conducted by S/NRA/R using these data.

Based on the 1995 Kobe earthquake, the expected age of the most recent active fault plane would be 20 years. However, most of these obtained ages were found to be older, although these became progressively younger with the increasing depth. This implies that the age reset ratio increases with the depth.

We distinguished the fault gouges of the main fault planes from the others and estimated each of their sample ages. Younger samples were predominant in the main fault planes. This result suggests that the frictional heating caused by fault displacement was the primary reason for the variation in age.

Ages were obtained using three methods for the same depth samples. The youngest was the luminescence dating achieved through optically stimulated luminescence (OSL) and isothermal

thermoluminescence (ITL). This was followed by the electron spin resonance (ESR) and potassium-argon dating (K-Ar). Each method showed a different age for samples from the same depth. This discrepancy is attributed to thermosensitivity differences in each method. The luminescence dating, which has a significantly high thermosensitivity, showed the youngest age, estimating the age of the samples to be a few hundred thousand years old. ESR showed ages that ranged from 0.1 to 4 Ma; these ages were older than the luminescence ages. By contrast, the K–Ar dating, which exhibits a low thermosensitivity, found the samples to be older than 40 Ma, which is closed to the age of the basement granite. These results suggest that the luminescence dating can be applied to evaluate fault activities during the Middle Pleistocene and later periods even if the samples are obtained from a shallow depth.

In the future studies, we will strive for improving the reliability of these methods through validations of other fault activities.

目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	2
1.3 本技術関連の既発表論文等	2
2. 断層破碎物質を用いた年代測定に基づく年代リセットの検証	3
2.1 断層破碎物質の年代測定による断層の活動性評価の課題	3
2.2 野島断層破碎帯掘削計画	5
2.2.1 トレンチ調査	8
2.2.2 深部ボーリング調査	11
2.3 断層破碎物質の微細構造観察	14
2.4 断層破碎物質を用いた年代測定	17
2.4.1 年代測定の方法	17
2.4.2 年代測定結果	25
2.5 考察	43
2.5.1 最新活動面における破碎部の各種年代値と深度との関係	43
2.5.2 断層破碎物質の年代リセット状況	46
3. 直接的年代測定による断層の活動性評価上の留意点	47
4. 結論及び今後の課題	50
参考文献一覧	52
執筆者一覧	57

表 目 次

表 2.1	野島断層掘削計画の主な参加機関	5
表 2.2	試料採取位置、採取深度及び実施した年代測定方法一覧	17
表 2.3	SAR 法による OSL 測定手順	19
表 2.4	SAR 法による ITL 測定手順	20
表 2.5	浅野断層から得られた断層破砕物質の OSL 年代測定結果	26
表 2.6	NFD-1-S1②孔の断層破砕物質の OSL 年代測定結果	30
表 2.7	NFD-1-S1②孔の断層破砕物質の ITL 年代測定結果	31
表 2.8	NFD-1-S6 孔の断層破砕物質の OSL 年代測定結果	31
表 2.9	NFD-1-S6 孔の断層破砕物質の ITL 年代測定結果	31
表 2.10	浅野断層のトレンチ調査から得られた断層破砕物質の ESR 年代測定結果	32
表 2.11	NFD-1-S5 孔の断層破砕物質の ESR 年代測定結果	37
表 2.12	NFD-1-S1②孔の断層破砕物質の ESR 年代測定結果	37
表 2.13	浅野断層のトレンチ調査から得られた断層破砕物質の K-Ar 年代測定結果	38
表 2.14	NFD-1-S3 孔の断層破砕物質の K-Ar 年代測定結果	42
表 2.15	最新活動面の断層破砕物質から得られた年代測定結果	45

目 次

図 1.1	断層の活動性評価手法の例	1
図 2.1	不完全なリセットが年代値に及ぼす影響	4
図 2.2	予想される断層沿いの年代リセット状況の変化	4
図 2.3	ボーリングサイト位置図及び淡路島北部の地質図	6
図 2.4	ボーリング及びトレンチサイト周辺の位置図	7
図 2.5	トレンチ法面の写真の展開図	9
図 2.6	トレンチ法面のスケッチの展開図	10
図 2.7	野島断層ボーリングサイトの全景	11
図 2.8	ボーリング地点周辺の地質断面図	12
図 2.9	NFD-1 孔の物理検層の結果	13
図 2.10	断層コア写真及び詳細スケッチ (1/2)	15
図 2.11	断層コア写真及び詳細スケッチ (2/2)	16
図 2.12	プレヒートドーズリカバリーテストの結果	19
図 2.13	ドーズリカバリーテストの結果	20
図 2.14	浅野断層の露頭写真及び年代測定結果	25
図 2.15	浅野断層から得られた断層破砕物質の OSL 減衰曲線及び成長曲線の例	26
図 2.16	ボーリングコアの OSL 及び ITL 年代測定結果 (NFD-1-S1②: 深度 506-507 m)	28
図 2.17	ボーリングコアの OSL 及び ITL 年代測定結果 (NFD-1-S6: 深度 897-898m)	29
図 2.18	野島断層から得られた断層破砕物質の OSL 減衰曲線及び成長曲線の例	30
図 2.19	浅野断層から採取した ESR 年代測定用の試料	32
図 2.20	ボーリングコアの ESR 年代測定結果 (NFD-1-S1②: 深度 506-507 m)	34
図 2.21	ボーリングコアの ESR 年代測定結果 (NFD-1-S5: 深度 904-905 m)	35
図 2.22	NFD-1-S1②孔の試料から得られた ESR スペクトル及びシグナル強度成長曲線の例	36
図 2.23	NFD-1-S5 孔の試料から得られた ESR スペクトル及びシグナル強度成長曲線の例	36
図 2.24	トレンチ法面における試料採取位置 (北壁)	39
図 2.25	トレンチ法面における試料採取位置 (南壁)	40
図 2.26	ボーリングコアの K-Ar 年代測定結果 (NFD-1-S3: 深度 532-533m)	41
図 2.27	最新活動面における破砕部の各種年代値及び深度との関係	44
図 3.1	想定される破砕部の年代値及び深度との関係	47

略 語 表

EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy (エネルギー分散型 X 線マイクロナライザ)
ESR	Electron Spin Resonance (電子スピン共鳴)
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (誘導結合プラズマ質量分析計)
ITL	Isothermal Thermoluminescence (アイソサーマル熱ルミネッセンス)
K-Ar	Potassium-Argon (カリウム-アルゴン)
OSL	Optically Stimulated Luminescence (光ルミネッセンス)
SAR	Single-Aliquot Regenerative-dose method (単アリコット再現法)
SEM	Scanning Electron Microscope (走査電子顕微鏡)
TL	Thermoluminescence (熱ルミネッセンス)
XRD	X-ray diffractometer (X 線回折装置)

用語の定義

以下は本技術報告における用語の定義であり、一般に用いられる用語とは若干定義の異なる部分があります。

地表地震断層	地下深部で地震を発生させた断層のずれが地表まで到達して地表にずれが生じたもの。
直接的年代測定手法	断層破砕物質の年代測定により断層の活動性を特定する方法。
断層角礫	断層運動に伴う破砕によって生じた角礫状の断層破砕物質。
断層年代	断層が最後に活動してからの経過時間。
断層ガウジ	断層運動に伴う破砕によって生じた細粒・未固結の断層破砕物質。
断層破砕物質	断層がずれ動いたときに、岩盤の剪断変形にともなって形成される物質。断層岩とも言う。
ESR 信号	格子欠陥に天然放射線で電離した不対電子が捕獲されることにより格子欠陥中心が形成され、信号として検出されたもの。 ESR 信号には、Al 中心、Ti 中心、E1' 中心等がある。
上載地層法	トレンチ調査等により断層上位を被覆する地層の切断関係、地層の年代から断層の活動性を特定する方法。
Ka	kilo annum。千年前を表す単位。「1 ka = 1000 年前」。
カタクレーサイト	地下深部で断層運動に伴う破砕によって生じた固結した断層破砕物質。
鉍物脈法	断層の最新活動面とそれを横断する鉍物脈との関係、鉍物の生成深度等から断層の活動性を評価する方法。
Ma	Mega annum。百万年前を表す単位。「1 Ma = 100 万年前」。
年代リセット	試料に蓄積した捕獲電子が熱、光等により放出されること。
年間線量率	試料が年間に受ける自然放射線の量。
ルミネッセンス年代測定	石英、長石等が微弱な自然放射線及び捕獲電子を蓄積していくことを利用した年代測定法。熱ルミネッセンス (TL)、光ルミネッセンス (OSL) 等がある。
シュードタキライト	断層運動による摩擦熱により岩石の一部が熔融し急冷再固結した岩石。
総被曝線量	試料がこれまでに受けた自然放射線の総量。
トレンチ調査	活断層等の過去の活動性を調べるために、断層の通過地点及びその活動があったと予測できる地点において、溝 (トレンチ) を掘り、その壁面にみられる地層の観察を行うこと。

1. 序論

1.1 背景

「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」¹（以下「審査ガイド」という。）では、将来活動する可能性のある断層等の認定について、「(1) 将来活動する活断層等は、後期更新世以降（約 12～13 万年前以降）の活動が否定できないものとする、(2) その認定に当たって、後期更新世（約 12～13 万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約 40 万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること」を定めている。一般に、これらの断層の活動性評価は、トレンチ調査等により断層上部を被覆する地層の切断関係や地層の年代から特定すること（以下「上載地層法」という。）が多い（図 1.1 の①）。しかし、地域によっては地層の欠如、年代試料が採取できない等の理由により、上載地層法が適用できないことがある。このような場合、一般に鉱物脈や岩脈と断層との切断関係、あるいは断層本体の断層破碎物質の性状や年代測定等により総合的に活動性を評価する（図 1.1 の②）。しかしながら、断層破碎物質を用いた活動性評価に関しては、信頼性の高い活動年代の評価手法が確立されてない。このため、これまでの新規制基準適合性審査では上載地層法又は鉱物脈法²が用いられてきたが、断層破碎物質から直接年代測定を求める方法は、断層活動性評価には用いられていない。

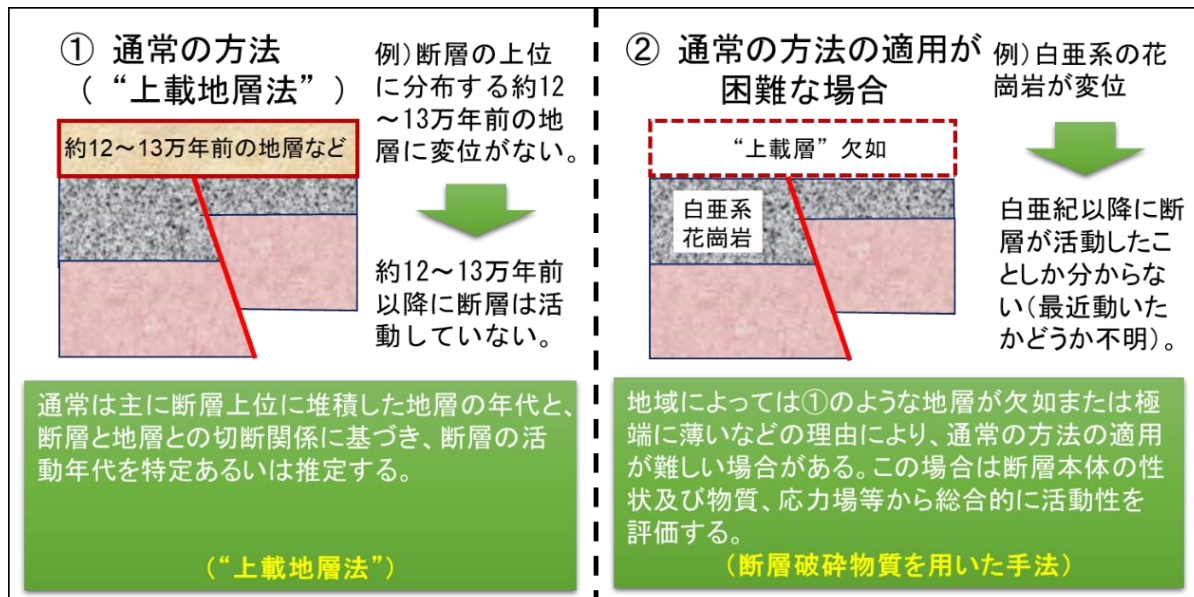


図 1.1 断層の活動性評価手法の例

Figure 1.1 Examples of evaluation methods for fault activities.

1.2 目的

本研究は、安全研究プロジェクト「断層破砕物質を用いた断層の活動性評価手法に関する研究」（実施期間：平成 25 年度～令和元年度）プロジェクトのうち、「定量的評価手法に基づく断層の活動性評価手法の整備」に係る研究テーマの一部である。審査ガイドでは、後期更新世の地層や地形面が存在しない場合には、「中期更新世以降（約 40 万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。」を定めている。本技術報告では、断層破砕物質の年代測定によって、実際の活動時期との関連性を検証し、中期更新世以降の断層の活動性評価に適した年代測定手法を検討することを目的とする。

1.3 本技術関連の既発表論文等

本研究は、トレンチ調査、ボーリング調査及び年代測定の実施については平成 27 年度から平成 30 年度にかけて国立大学法人京都大学に委託したものであり、それらのデータを用いて断層破砕物質の最新活動面との関係、年代測定値の妥当性の確認及び総合的な評価を原子力規制庁として実施したものである。本技術報告に関連する既報告書及び学会発表を以下に記す。

- ・国立大学法人京都大学、“平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（野島断層における深部ボーリング調査）事業 報告書”、2017.³
- ・国立大学法人京都大学、“平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（ボーリングコアを用いた断層破砕物質の分析）事業 報告書”、2018.⁴
- ・国立大学法人京都大学、“平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（追加ボーリングコアを用いた断層破砕物質の分析）事業 報告書”、2018.⁵
- ・国立大学法人京都大学、“平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（断層破砕物質を用いた断層活動性評価手法に係る総合検討）事業 報告書”、2019.⁶
- ・宮脇昌弘、内田淳一、“断層の活動性評価手法を構築するための破砕帯掘削プロジェクトの概要”、日本地球惑星科学連合 連合大会 2015 年大会、MIS32-15、2015.⁷
- ・Miyawaki, M., and Uchida, J. , “Development of evaluation method for fault activity from fault gouges”, American Geophysical Union (AGU) 2016 Fall Meeting, T43D-3070, USA, 2016.⁸
- ・Miyawaki, M., Uchida, J., and Satsukawa, T. , “Development of direct dating methods of fault gouges: Deep drilling into Nojima Fault, Japan”, American Geophysical Union (AGU) 2017 Fall Meeting, T21C-0568, USA, 2017.⁹
- ・Miyawaki, M., and Uchida, J. , “Towards understanding the direct dating of coseismic fault slip events”, American Geophysical Union (AGU) 2018 Fall Meeting, T23D-0401, USA, 2018.¹⁰
- ・Miyawaki, M., and Uchida, J. , “Validation of the direct dating of coseismic fault slip events along the Nojima fault”, Hokudan 2020 International Symposium on Active Faulting, Hokudan earthquake memorial park, Awaji city, 2020.¹¹

2. 断層破砕物質を用いた年代測定に基づく年代リセットの検証

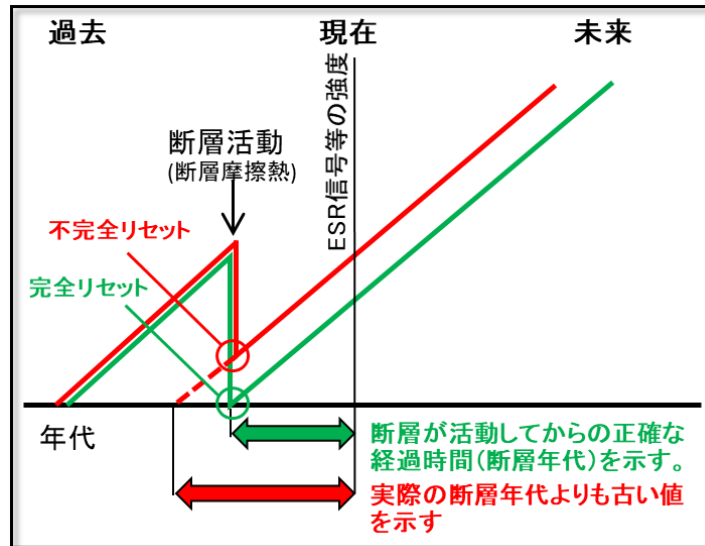
2.1 断層破砕物質の年代測定による断層の活動性評価の課題

断層破砕物質を用いた年代測定は、これまでも K-Ar 年代等による測定が行われており^{12, 13}、断層の活動性等が解釈されてきた。この手法は、断層破砕物質中の自生鉱物が断層活動に伴う熱水変質によって生成したとする考えに基づくものである。しかしながら、K-Ar 年代の測定限界は 10~100 万年前よりも古い活動の断層であり、それより新しい断層の活動性を評価することは困難であるとされている¹⁴。歴史時代に活動したことが確認されている活断層を対象として行った断層破砕物質の K-Ar 年代測定では、実際の活動年代よりも古い年代値を示すことが確認されている¹⁵。Ikeya et al. (1982)¹⁶は、断層破砕物質中の石英粒子の電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance; ESR) 年代を測定することにより、後期更新世以降に活動した断層の活動時期を特定する手法を開発した。この手法は、断層活動による摩擦熱により年代がリセットするという考えに基づくものであり、断層破砕物の年代値はおおむね断層が最後に活動してからの経過時間を示すとされる。しかし、ESR による年代測定においても、地表付近で採取した断層破砕物質の年代は実際の断層の活動年代よりも古い年代を示すことが報告されている¹⁷。また、ESR よりも熱に対して敏感なや熱ルミネッセンス (Thermoluminescence; TL) による年代測定により断層の活動性の評価が試みられるようになったが、実際に断層が活動した時期との検証が十分に行われていない^{18, 19, 20}。近年、光ルミネッセンス (Optically Stimulated Luminescence ; OSL) による年代測定も断層活動性評価に適用されるようになってきた。OSL は太陽光場曝により年代がリセットすることを前提にしているが、熱によってもリセットすることが知られている^{21, 22, 23, 24}。雁沢ほか (2013) は、跡津川断層の断層破砕物質を用いて OSL による年代測定を行い、得られた年代値が西暦 1858 年の飛騨地震と誤差の範囲で一致することを確認した²⁵。

断層の活動年代は、断層が活動してからの経過時間 (以下「断層年代」という。) で示される。例えば、ESR による年代測定では、断層活動時に生じた摩擦熱により断層破砕物質中の ESR 信号強度がリセットされる (図 2.1)。その後、時間の経過とともに地中の自然放射線により電離した不対電子が蓄積することにより ESR 信号が増大する。断層年代は、断層破砕物質中の ESR 信号から求めた総被曝線量を断層領域の年間線量率で除すことにより求めることができる。一方、断層活動時の摩擦熱が不十分であった場合には、断層活動前に蓄積した ESR 信号が断層活動後も残存するため、断層活動時に完全に ESR 信号がリセットしたケースに比べて、総被曝線量は高い値となる。このため、断層年代が実際よりも見かけ上古い値を示すことになる (図 2.1)。

一般に、断層活動時の断層破砕物質の摩擦熱は、地下深部ほどせん断応力と封圧が増加するため高くなると考えられる。浅い深度で採取した試料は、断層活動時に断層破砕物質の温度が十分に上がらないために年代値がリセットせず、正確な断層年代が得られないと考えられる。したがって、断層破砕物質の年代測定によって断層の活動性の評価を行うためには、正確な断層年代が得られる適切な深度を把握する必要がある (図 2.2)。このよう

な観点から、1995年兵庫県南部地震で活動した野島断層を対象として深度約1,000 mまでの異なる深度の断層破碎物質を採取して複数の手法による年代測定を行い、各年代値のリセット状況を検証した。検証対象とした年代測定手法は、審査ガイドで将来活動する可能性のある断層等として定めている中期更新世以降（約40万年前以降）の年代が測定可能とされるESR法、OSL法、アイソサーマル熱ルミネッセンス（Isothermal Thermoluminescence; ITL）法のほか、断層破碎物質の年代測定で最も実績のあるK-Ar法を選定した。



出典) 福地 (2004) ¹⁷ を一部編集

図 2.1 不完全なリセットが年代値に及ぼす影響

Figure 2.1 Effect of incomplete age resetting on fault age.

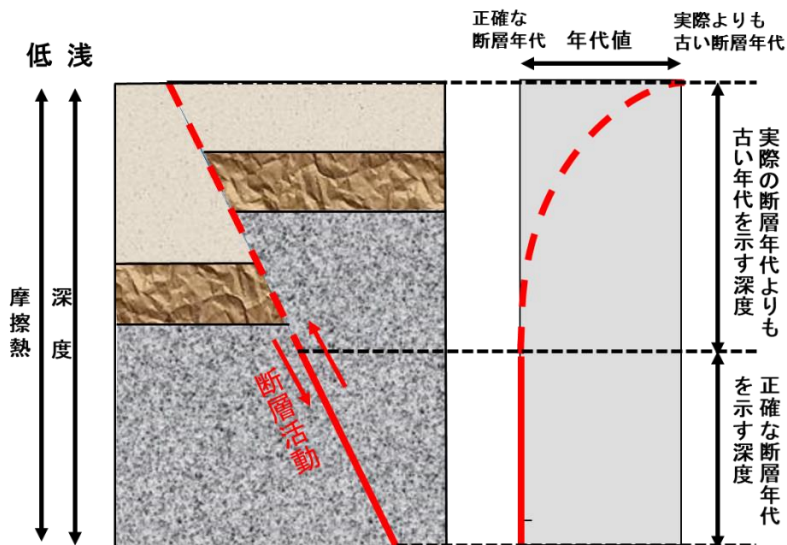


図 2.2 予想される断層沿いの年代リセット状況の変化

Figure 2.2 Schematic diagram of age resetting conditions.

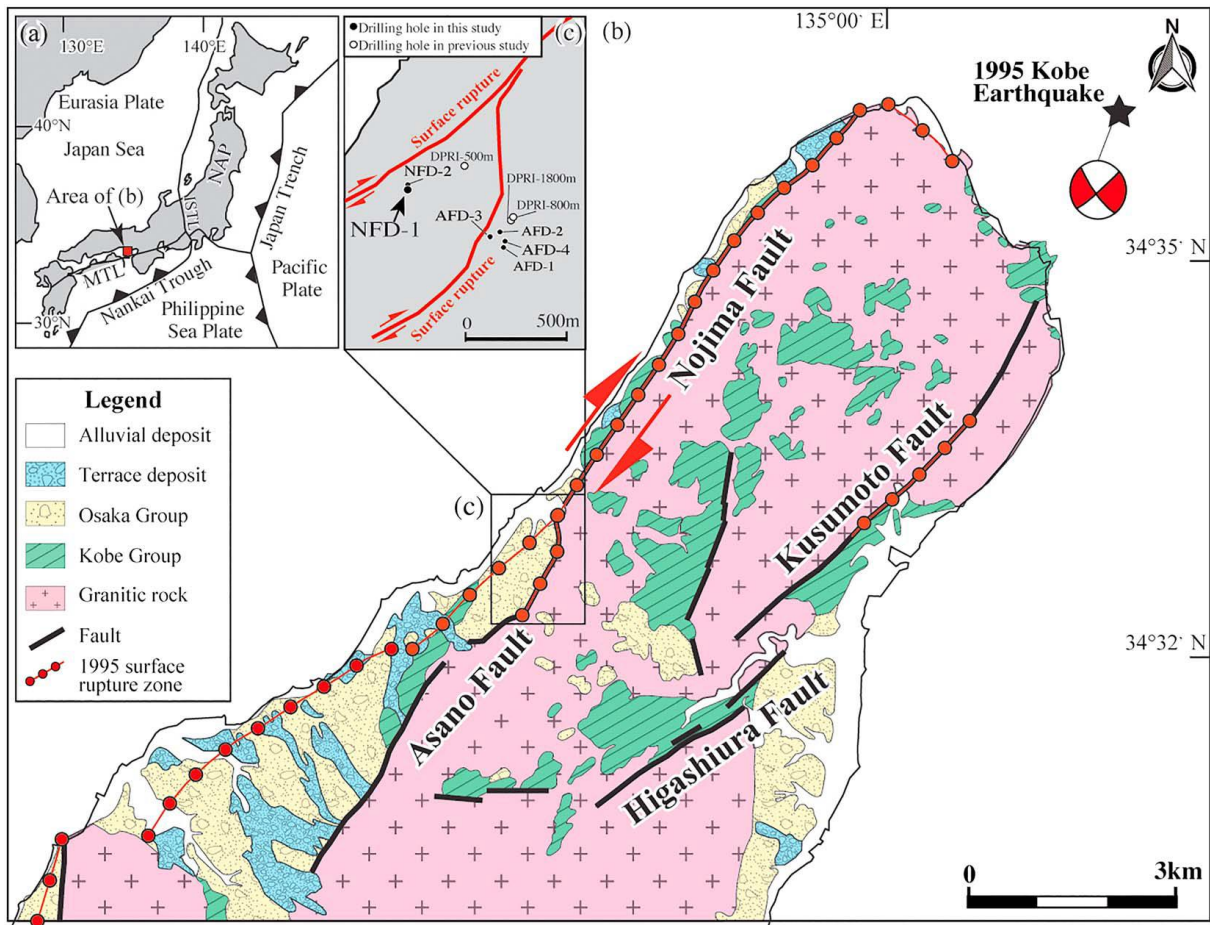
2.2 野島断層破砕帯掘削計画

野島断層破砕帯掘削計画（DFDZ：Drilling into the Fault Damage Zone, Nojima Fault）^{26, 27}は、原子力規制庁の委託事業として国立大学法人京都大学が中心となって平成 27 年度から約 4 ヶ年にわたって野島断層を貫く深部ボーリング調査、トレンチ調査等を行ったものである。野島断層は 1995 年に発生した兵庫県南部地震において地表地震断層が確認された断層である。地震直後に科学技術庁防災科学技術研究所（現国立研究開発法人防災科学技術研究所）、通商産業省工業技術院地質調査所（現国立研究開発法人産業技術総合研究所）、京都大学防災研究所（現国立大学法人京都大学防災研究所）の 3 機関によって野島断層を対象とする深部ボーリング調査が行われた。掘削は、当時の京都大学防災研究所の掘削サイト近傍に位置する兵庫県淡路市小倉において行った（図 2.3、図 2.4）。この付近では、野島断層及び浅野断層（野島断層の分岐断層）の地表地震断層が確認された。本計画の主な目的は、トレンチ調査及びボーリング調査によって地表から深度約 1,000 m までの異なる深度の断層破砕物質を採取し、断層年代のリセット状況を検証することである。野島断層を選定した理由は、断層が活動した時期が明らかであること、基盤岩が比較的均質な花崗岩からなり、年代測定に必要な鉱物を多く含むこと、既往のボーリング調査結果を利用することにより断層の姿勢等を事前に把握できること、地震直後のデータと新たに取得したデータとを比較することができること等である。本計画の主な参加機関を表 2.1 に示す。

表 2.1 野島断層掘削計画の主な参加機関

Table 2.1 Major participants of the DFDZ.

大学名	実施内容
国立大学法人京都大学	プロジェクト統括、 微細構造解析、年代分析（K-Ar 等）
国立大学法人山梨大学	年代分析（ESR）
National Centre for Scientific Research (NCSR)、ギリシャ	年代分析（OSL、ITL、ESR）
(株)蒜山地質年代学研究所	年代分析（ESR）
応用地質(株)	深部ボーリング掘削、トレンチ掘削



出典) Nishiwaki et al. (2018)²⁷

図 2.3 ボーリングサイト位置図及び淡路島北部の地質図

Figure 2.3 Location of drilling sites and geological map of the northern part of Awaji Island.



出典) 国土地理院電子国土地形図²⁸に栗田・水野(1998)²⁹の断層トレース
及び本研究の調査地点を加筆

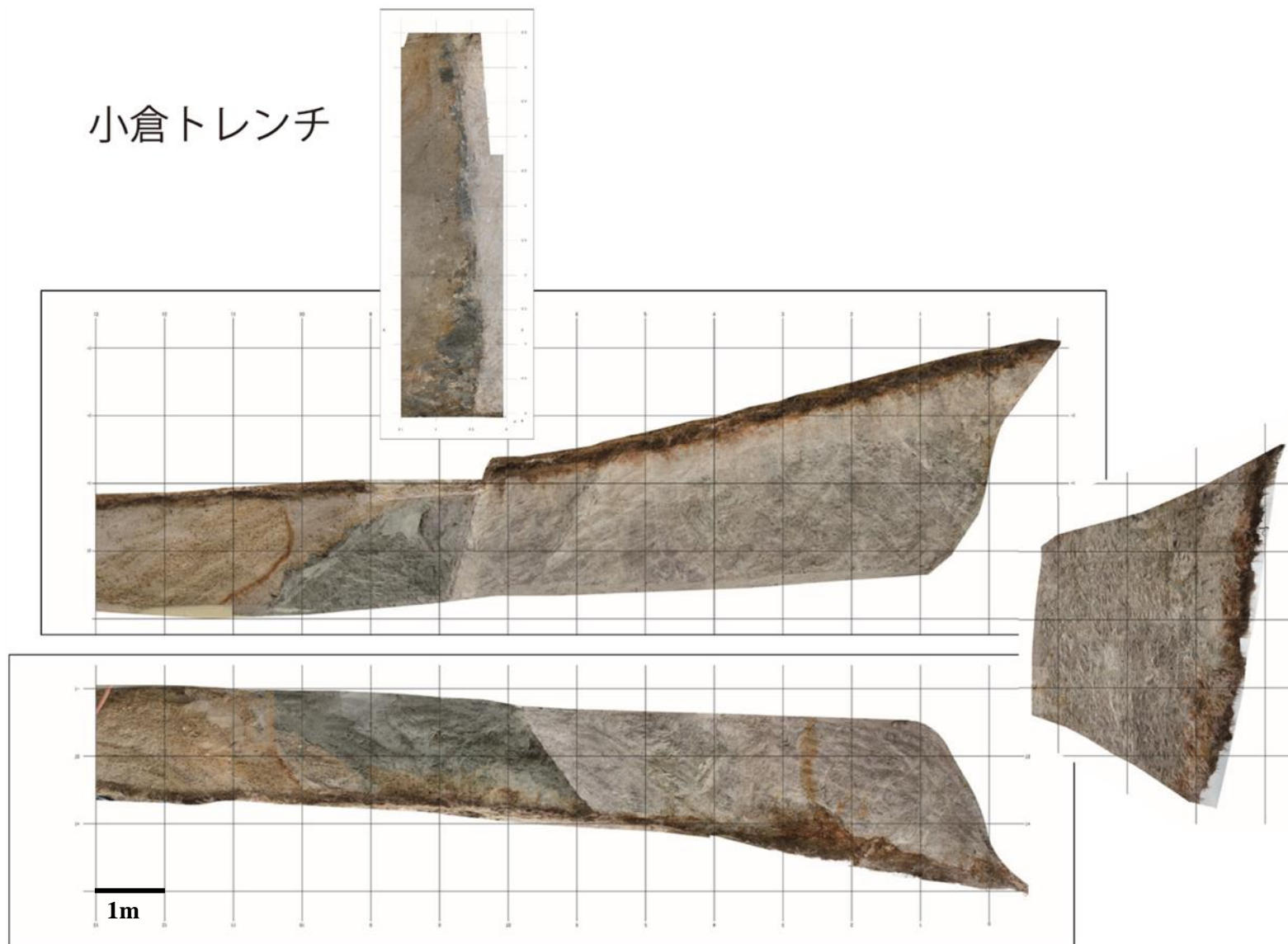
図 2.4 ボーリング及びトレンチサイト周辺の位置図

Figure 2.4 Location of drilling and trench sites.

2.2.1 トレンチ調査

浅野断層の地表地震断層が確認された淡路市小倉においてトレンチ調査を1箇所実施した(図 2.4)。本地点でトレンチ調査を行った理由は、深部ボーリング調査で対象とした花崗岩起源の断層破碎物質が地表部で採取できるためである。なお、同地点北方を通過する野島断層は、大阪層群の堆積物中を通過する。1995年の兵庫県南部地震においてトレンチ調査地において確認された調査地点近傍の地表地震断層の変位量は、水平右横ずれ0.08~0.20 m、鉛直東上がり0.06~0.14 mと報告されている²⁹。

図 2.5 及び図 2.6 にトレンチ法面の写真及びスケッチの展開図を示す。断層の西側には上部鮮新統~下部更新統の大阪層群³⁰の砂礫層と泥岩、断層の東側には白亜系の花崗岩が分布する。調査地域に分布する花崗岩類の年代は $95\pm 15\text{Ma}$ と報告されている³¹。これらの地層中には複数の断層が認められ、その中で最も連続性が良く直線性が高いのは花崗岩と泥岩を境する断層である。断層面の方向は、 $N35^{\circ}E$ 、 $65^{\circ}W$ であり、断層面には $N19^{\circ}E$ 、 $22^{\circ}E$ の条線が認められる。条線の方法は水平横ずれ成分が優勢であり、地表部の断層変位量から推定される中角度の断層変位の方向と調和的ではない。地震直後に観察された野島断層及び浅野断層の条線の方法は、しばしば同一断層面上で変化していることが確認されており^{32, 33}、本地点でもその一部を測定している可能性がある。地質境界断層に沿って断層ガウジ、断層角礫、カタクレーサイトからなる断層破碎帯が花崗岩及び大阪層群の泥岩において幅10 m以上発達する。断層近傍では大阪層群の砂礫層及び泥岩が 40° 以上の急傾斜をなす。トレンチ法面において、年代測定用の断層試料を採取した。

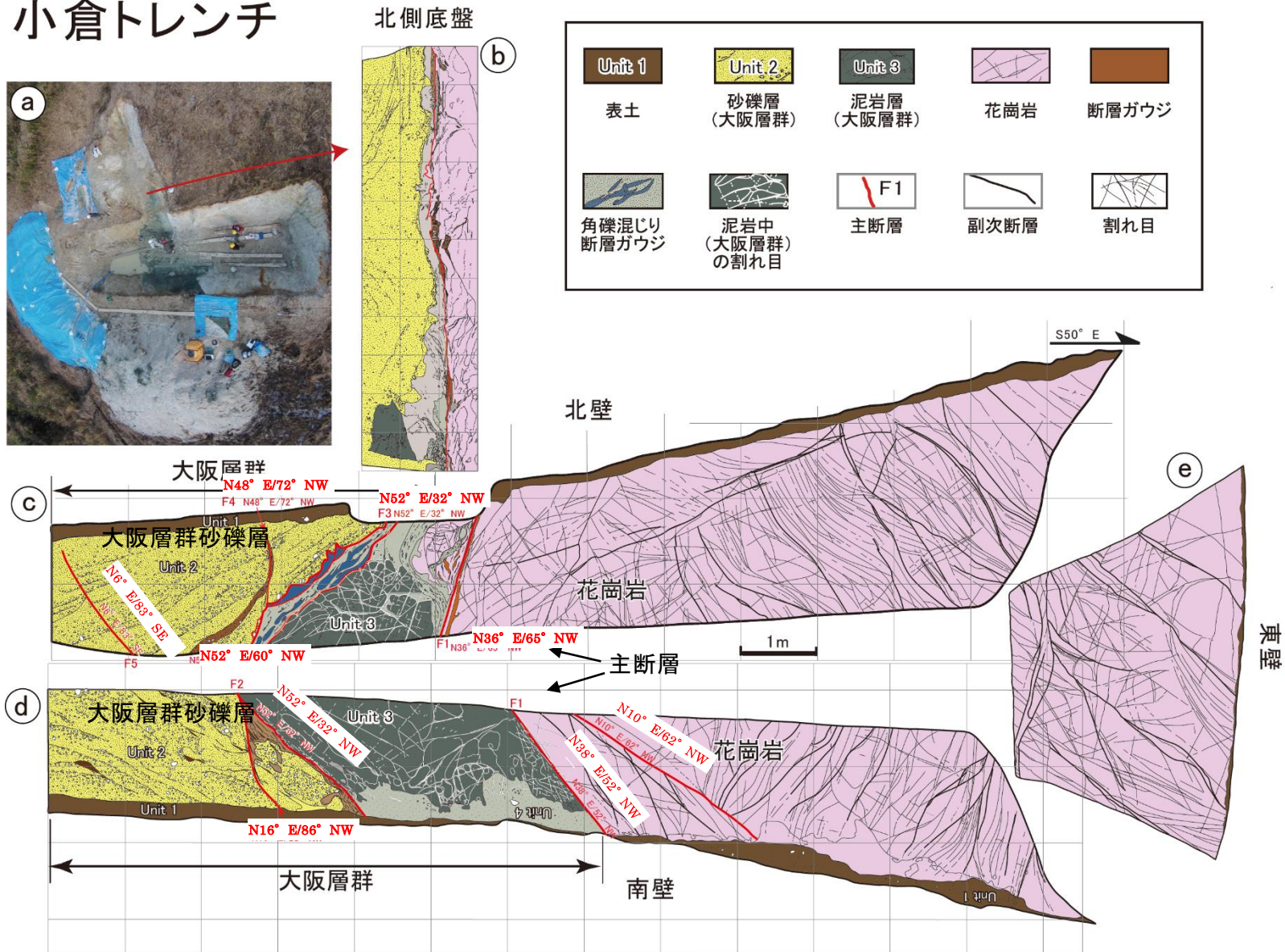


出典) 国立大学法人京都大学 (2017) ³を一部編集

図 2.5 トレンチ法面の写真の展開図

Figure 2.5 Photograph of trench site.

小倉トレンチ



出典) 国立大学法人京都大学 (2017) ³を一部編集

図 2.6 トレンチ法面のスケッチの展開図

Figure 2.6 Sketch of trench site.

2.2.2 深部ボーリング調査

淡路市小倉において深部ボーリング調査を実施した（図 2.4、図 2.7）。掘削地点は野島断層の地表地震断層の南東約 100 m に位置する。1995 年兵庫県南部地震時において、掘削地点直近で確認された地表地震断層の変位量は、水平右横ずれ 1.1~1.4m、鉛直東上がり 0.5 ~0.6m と報告されている²⁹。

最初に断層の方向を確認するために断層方向への傾斜 77°、深度 450 m のパイロット孔（NFD-2）を掘削した。その後、鉛直方向、深度 1,000 m の本孔（NFD-1）をワイヤーライン工法により掘削した。本孔では、更に異なる深度の断層破砕物質を採取するため、サイド・トラック工法により本孔からの分岐孔を 6 孔（S1~S6）掘削した。更に、NFD-1-S1 孔は、破砕部を対象として、2 回の掘削を行った（NFD-1-S1①孔及び NFD-1-S1②孔）。

図 2.8 にボーリング調査地点の地質断面図を示す。深度 190 m 以浅には、上部鮮新統～下部更新統の大阪層群³⁰の砂礫層が認められ、それ以深では中部～上部始新統の神戸層群^{34,35}の砂岩泥岩互層が深度 220m まで確認された。深度 220m から深度 1,000 m までは、白亜系の花崗岩が分布することが確認された。NFD-2 孔では、深度 261 m 及び深度 321 m 付近に、せん断面が卓越する断層が確認され、断層に沿って神戸層群の堆積岩及び花崗岩が混在する破砕部が認められた。NFD-1 孔では、深度 529 m 付近の花崗岩中に断層ガウジを伴う主断層を確認した。サイド・トラック孔においても同様の性状からなる主断層を確認した。各ボーリング孔で確認した断層面の分布から、本調査地点における野島断層の深部での主断層の断層面の傾斜角は約 72°であることが分かった。この断層面を浅部に延長すると、NFD-2 孔の深度 321 m で確認した断層に一致するが、地表部まで延長すると地表地震断層には連続しない。一方、野島断層の浅部での傾斜角を 77°とすると、地表断層に連続する。したがって、調査地点の野島断層は、浅部では 2 本に分岐していると推定でき、NFD-2 孔の深度 321 m で確認した断層は、大阪層群中でせん滅するか深度 261 m で確認した断層と地表付近で合流すると推定できる。

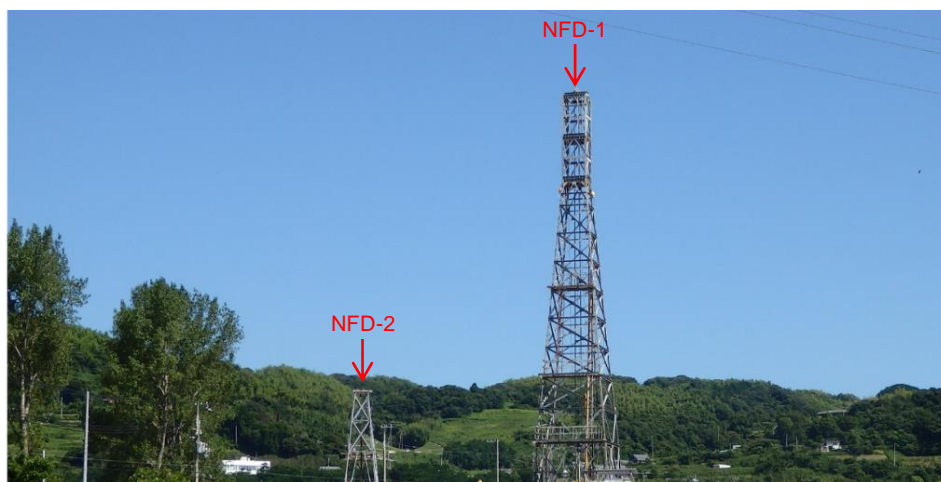
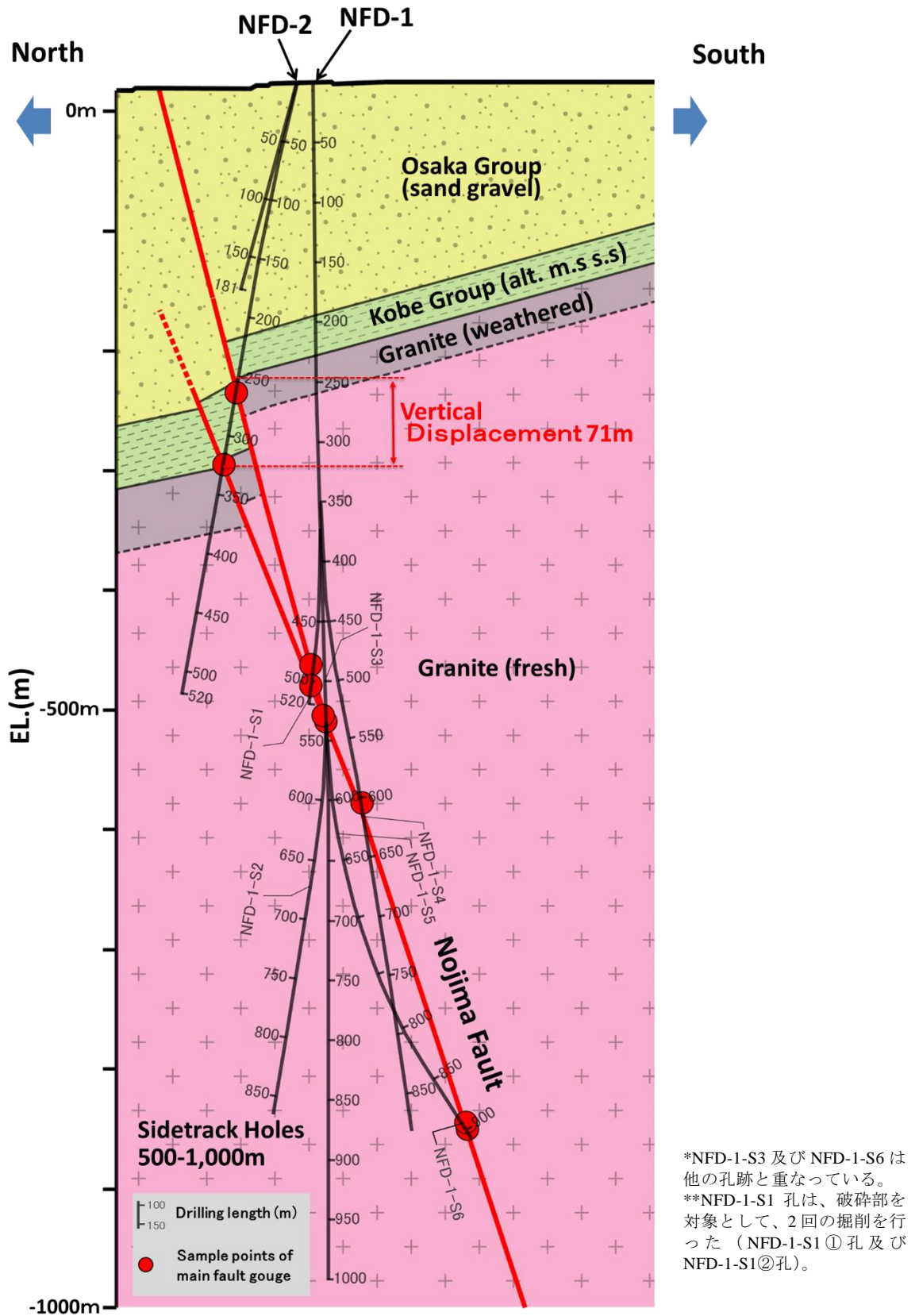


図 2.7 野島断層ボーリングサイトの全景

Figure 2.7 Drilling site at the Nojima Fault.

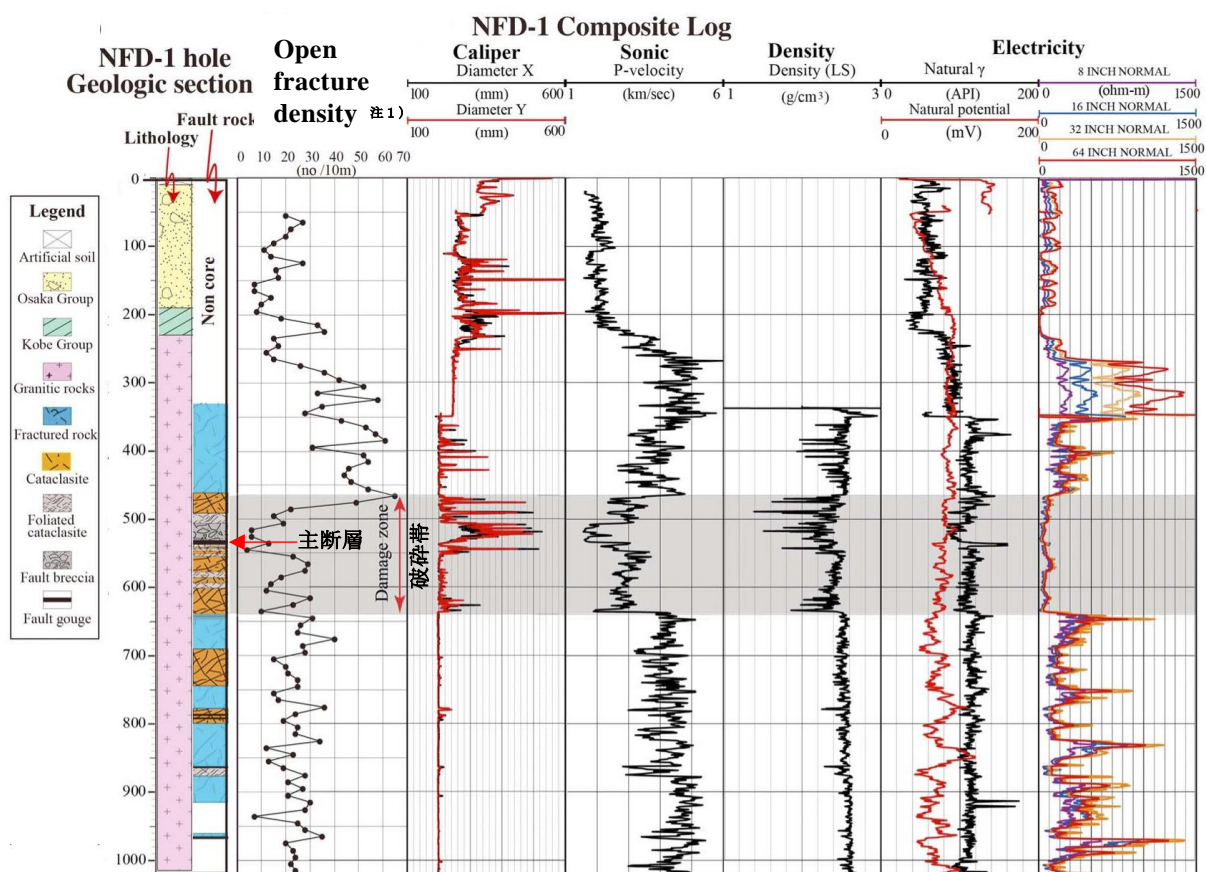


出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶ のデータに基づいて作成

図 2.8 ボーリング地点周辺の地質断面図

Figure 2.8 Geological profile of the drilling site.

NFD-1 孔で実施した地質観察の状況、開口割れ目の密度分布、物理検層の結果を図 2.9 に示す。物理検層は、孔径検層、音波検層、密度検層及び電気検層を実施した。開口割れ目の密度分布は、大阪層群、神戸層群、破碎帯及び主断層下盤の花崗岩において平均 30 本/10m 程度以下の低い密度を示した。孔径検層では、大阪層群、神戸層群及び破碎帯において孔径が拡大していることが確認された。音波検層では、大阪層群、神戸層群及び破碎帯において、P 波速度が 2~4km/sec 程度の低い速度を示した。密度検層では、破碎帯において密度の変化が大きく、 2.5g/cm^3 以下の低い密度を示した。電気検層では、大阪層群、神戸層群及び破碎帯において約 $200\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下の低い比抵抗値を示した。これらの地質観察の状況、開口割れ目の密度分布及び物理検層の結果から、深度 460m から深度 650m の区間が野島断層の破碎帯の主部と推定した。破碎帯は主に固結したカタクレーサイト、軟質で脆弱な断層角礫及び断層ガウジから構成される。



出典) Lin and Nishiwaki (2019)²⁶ を一部編集

図 2.9 NFD-1 孔の物理検層の結果

Figure 2.9 Logging data in the Hole NFD-1.

注 1) Open fracture density は 10m 区間長当たりの岩盤中の開口割れ目の本数を示す。

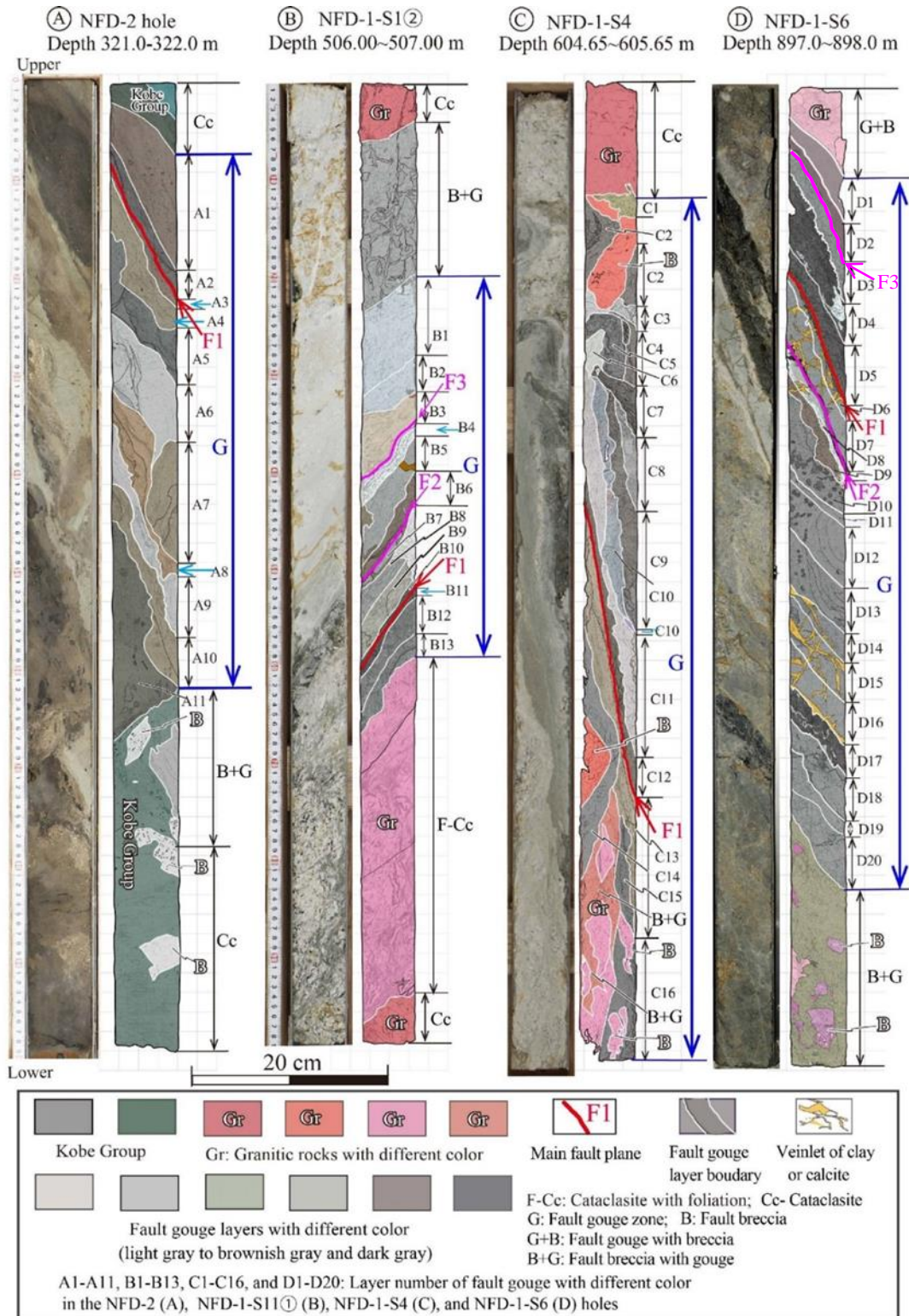
2.3 断層破砕物質の微細構造観察

断層運動時における地震性すべりは厚さ数 mm に集中することが知られている³⁴。このことは、断層活動時に摩擦熱で温度が上昇する厚さも数 mm に集中することを示唆している。そこで、採取した断層破砕物質について、断層面の形状、連続性等を観察し、数 mm の精度で最新活動面可能性のある断層の認定及び破砕部の区分を行った。微細構造観察は、野島断層のボーリング調査で採取した主断層の断層破砕物質を対象として目視観察等により行った。観察結果を図 2.10 及び図 2.11 に示す。

断層破砕物質の原岩は、NFD-1 孔では花崗岩、NFD-2 孔では神戸層群の砂岩泥岩互層である。各断層破砕物質試料は、断層ガウジ、断層角礫、カタクレサイト及び面状カタクレサイトに区分した。せん断面は各断層破砕物質の境界及び断層ガウジ内部に多数認められ、その中で平滑で連続性の高いものを最新活動面の可能性のある断層と認定した。さらに、最新活動面の可能性のある断層は、各試料において数条認められ、その明瞭さ及び直線性から最近に活動したと考えられるものを最新活動面 (F1、F2 及び F3) と認定した。

各試料で認められた断層ガウジは多様な性状を示す。断層ガウジの色調は、灰白色、明灰色、暗灰色、褐灰色、褐色、暗灰色、黒色等を呈する。最新活動面付近では、灰色より暗い色を呈する断層ガウジが多い傾向がある。断層ガウジの固結度は、固結したものから未固結のものまでであるが、最新活動面沿いの断層ガウジは全て未固結である。固結した断層ガウジは、最新活動面から離れた箇所に認められることが多い。一部に、完全に岩石化して黒色隠微晶質のシュードタキライト様の組織を確認した(図 2.11、E の E2 及び E3 層、G における G6 層中の黒色部)。多くの断層ガウジは層状を示すが、最新活動面から離れた位置の断層ガウジは湾曲し(例えば、図 2.11 の I)、一部はブロック状に他の断層ガウジに取り込まれるもの(例えば、図 2.10 の C15)、ネットワーク状に他の断層ガウジに貫入するもの(例えば、図 2.11 の H8)が認められる。多くの断層ガウジ中には、岩片及び粒子の配列によって定義される面構造が卓越する。最新活動面近傍の断層ガウジ中には、面構造がせん断面に平行もしくはやや斜交している様子が明瞭に確認される。また、一部の断層ガウジ中には、脈状に細粒物質が注入している構造が認められる(例えば、図 2.10 の D)。

断層角礫は破砕岩片及び基質の細粒物質の量比によって破砕岩片支持のものと基質支持のものがあり、それぞれガウジ混じりの断層角礫(B+G)、角礫混じりの断層ガウジ(G+B)に区分した。破砕岩片は原岩のカタクレサイト及び断層ガウジのブロックからなり、基質の細粒物質は泥状～砂状の断層ガウジで構成される。カタクレサイトは微小割れ目が多数発達し、割れ目沿いに変質が進み全体が脆弱になっている。面状カタクレサイトは、伸張した黒雲母粒子及び微小割れ目により定義される面構造が卓越する。



出典) Lin and Nishiwaki (2019)²⁶ 及び国立大学法人京都大学 (2018)⁵ を一部編集

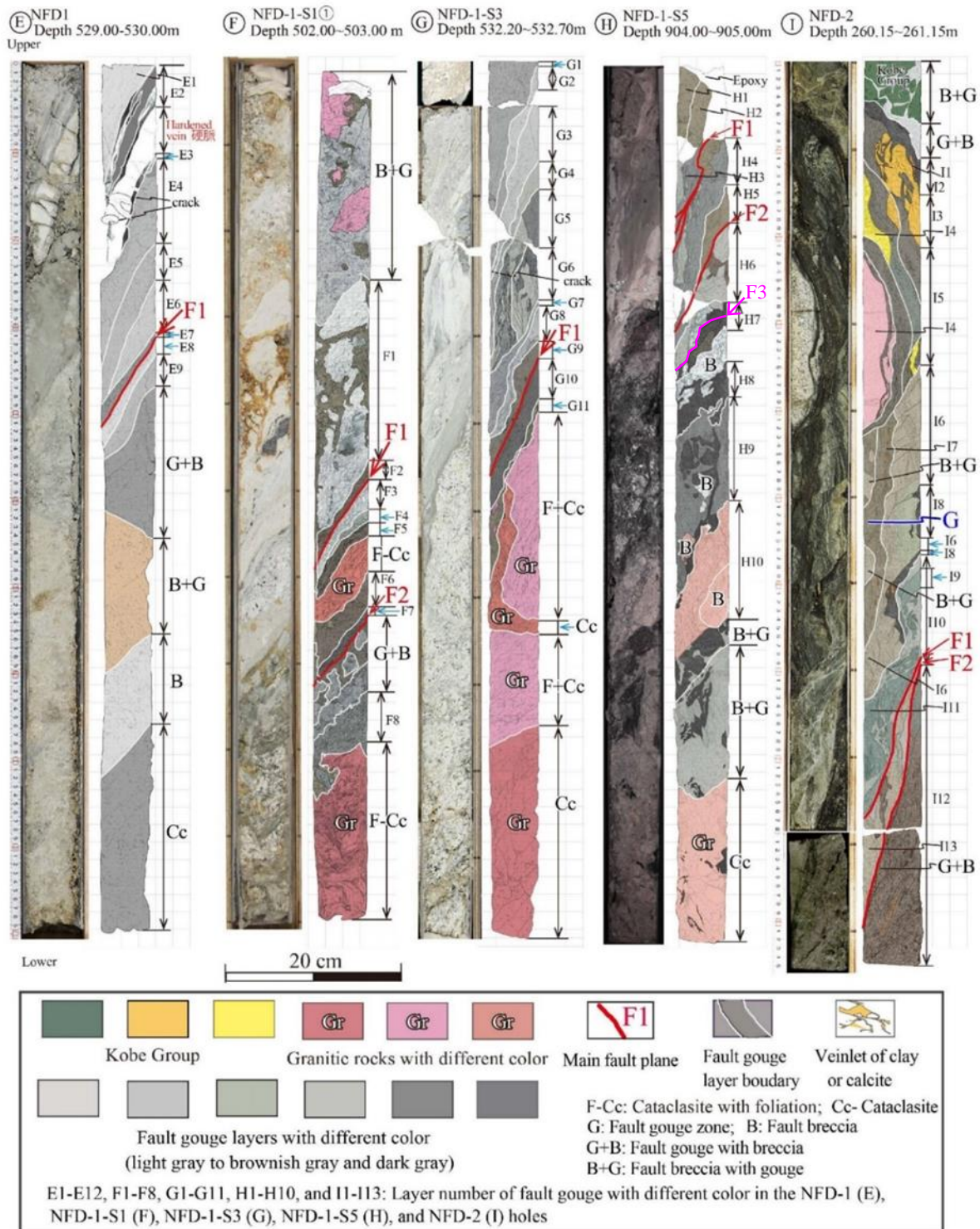
図 2.10 断層コア写真及び詳細スケッチ (1/2)

Figure 2.10 Photographs and corresponding sketches of the representative fault gouge cores (1/2).

注 1) A: NFD-2 孔 321.00-322.00 m、B: NFD-1-S1②孔 506.00-507.00 m、

C: NFD-1-S4 孔 604.65-605.65 m、D: NFD-1-S6 孔 897.00-898.00 m

注 2) NFD-1-S1②孔の末尾の②は、NFD-1-S1 孔で 2 本掘削したうちの 1 本を意味する。



出典) Lin and Nishiwaki (2019)²⁶ 及び国立大学法人京都大学 (2018)⁵ を一部編集

図 2.11 断層コア写真及び詳細スケッチ (2/2)

Figure 2.11 Photographs and corresponding sketches of the representative fault gouge cores (2/2).

注 1) E: NFD-1 孔 529.00-53.00 m、F: NFD-1-S1①孔 502.00-503.00 m、G: NFD-1-S3 孔 532.20-532.70 m、H: NFD-1-S5 孔 904.00-905.00 m、I: NFD-2 孔 260.15-261.15 m

注 2) NFD-1-S1①孔の末尾の①は、NFD-1-S1 孔で 2 本掘削したうちの 1 本を意味する。

2.4 断層破砕物質を用いた年代測定

浅野断層を対象として行ったトレンチ調査及び断層露頭調査、野島断層を対象として行った深部ボーリング調査において断層破砕物質を採取し、年代測定を行った。深部ボーリング調査により採取された試料のうち年代測定に用いた試料は、主断層の破砕部として認定した深度 904～905 m の NFD-1-5 孔の試料、深度 506～507 m の NFD-1-S1②孔の試料、深度 897～898 m の NFD-1-S6 の試料、深度 532～533 m の NFD-1-S3 の試料である。年代測定は、断層露頭の試料では、OSL の 1 種類、トレンチ調査の試料では、ESR、OSL 及び K-Ar の 3 種類について、深部ボーリング調査の試料では、ESR、OSL、ITL 及び K-Ar の 4 種類について行った。表 2.2 に試料採取位置、採取深度及び実施した年代測定法の一覧を示す。

表 2.2 試料採取位置、採取深度及び実施した年代測定方法一覧

Table 2.2 Sample locations, sample depths and applied dating methods.

試料採取位置	採取深度	年代測定法
トレンチ	地表	ESR, OSL, K-Ar
断層露頭	地表	OSL
NFD-1-S1-②孔	506-507m	OSL, ITL, ESR
NFD-1-S3 孔	532-533m	K-Ar
NFD-1-S6 孔	897-898m	OSL, ITL
NFD-1-S5 孔	904-905m	ESR

2.4.1 年代測定の方法

(1) OSL 及び ITL 年代測定

小倉地点のトレンチ及び露頭から得られた断層試料、ボーリングコアのうち NFD-1-S1 ②孔の断層試料、NFD-1-S6 孔から得られた断層試料の年代測定は、ギリシャの研究機関 National Centre for Scientific Research (以下「NCSR」という。)が実施した。以下に本手法の手順を示す。

OSL 及び ITL 年代測定に用いる試料は、熱又は光で信号がリセットするため、試料採取及び分析において暗室もしくは赤色光下で作業を行った。露頭及びトレンチでの試料採取は、長さ 15cm に切断した径 46.6mm の単管パイプを露頭面にハンマーで打ち付けて試料を採取した。試料採取後、単管パイプの両端をビニールテープで遮光し暗室に搬入した。暗室内において単管パイプから試料を取り出し、試料の両端部から約 1cm の部分を取り除いた残りの試料を分析用の試料として用いた。ボーリングコアは、掘りあがったコアチューブを暗室に持ち込んで開封した。その後、ボーリングコアを暗室内においてカッターで半割にし、半分を遮光下で年代測定用の試料に用い、残り半分を露光下で構造観察用及び

その他の分析用の試料に用いた。コアの表面は掘削ビットの回転による摩擦や破碎の影響を受けている可能性があるため、コアの表面から約 1cm の部分を除いた内部の試料を用いた³。

採取された試料に対して下記の化学処理でガウジ試料から石英粒子を分離した。本手法は、Jackson et al. (1978)³⁷、Rees-Jones (1995)³⁸、Zhang et al. (2018)³⁹等で行われている石英分離方法に従った。

- ① 10%塩酸 10%過酸化水素水を用いて有機物及び炭酸塩鉱物を除去した。
- ② ふるいによって粒径 40 μm 以上の石英粒子を除去した。
- ③ 40%のフッ化水素酸を用いて表面処理を行った。
- ④ 粒径 40 μm 以下の石英粒子をストークスの定理を用いた沈降分離法により、4~11 μm の石英粒子のみ分離した。一般に、石英粒子は細粒なほどリセットしやすいことが知られているため、今回はこの細粒石英のみ分析に供した。
- ⑤ 40%のフルオロケイ酸塩による表面処理をさらに 9 日間行い、純粋な石英粒子を得た。
- ⑥ 得られた石英粒子の純度は走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM) に装備されたエネルギー分散型 X 線マイクロアナライザ (Energy Dispersive X-ray spectroscopy; EDX) によって確認した。

試料の年間線量の測定は、各試料に含まれる放射性元素の U、Th、K 及び Rb の濃度を誘導結合プラズマ質量分析計 (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer; ICP-MS、Perkin Elmer Sciex 社製、ELAN 9000) により定量し、年間線量計算ソフト (Dose Rate calculator DRc)⁴⁰を用いて計算して求めた。DRc は、Guérin et al., (2011)⁴¹に基づく変換係数と Aitken (1985)⁴²、Nathan and Mauz (2008)⁴³、Guérin and Mercier (2012)⁴⁴に基づく α 線、 β 線、 γ 線の減衰係数によって元素濃度を年間線量に変換し、試料採取位置 (緯度経度) 及び採取深度から宇宙線による影響を Prescott and Stephan (1982)⁴⁵、Prescott and Hutton (1988)⁴⁶ 及び Prescott and Hutton (1994)⁴⁷に基づいて考慮し、年間線量を決定する。最終的な年間線量は、各試料の各粒径のフラクションごとに算出した。なお、試料は採取された時点から真空パッキングにより保管されている。したがって、含水率は、採取時から $\pm 5\%$ の誤差の範囲内で変化がないと仮定した。

OSL は、単アリコット再現法 (Single-Aliquot Regenerative-dose method; SAR) 法により測定した。測定手順は、Murray and Wintle (2000)⁴⁸に従った (表 2.3)。この方法は、測定粒子群を載せた 1つのアリコットから、年代測定に必要な蓄積線量を求める手法である。蓄積線量 D_e の不均質性を少なくするために、Fuchs and Wangner (2003)⁴⁹の方法に従い、アリコットの中央、直径 2 mm の範囲にのみ試料を置き、測定を行った。測定機器は、Risø 社の EMI 光電子増倍管付き TL-DA15 ルミネッセンス測定器である。照射は校正済み $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β

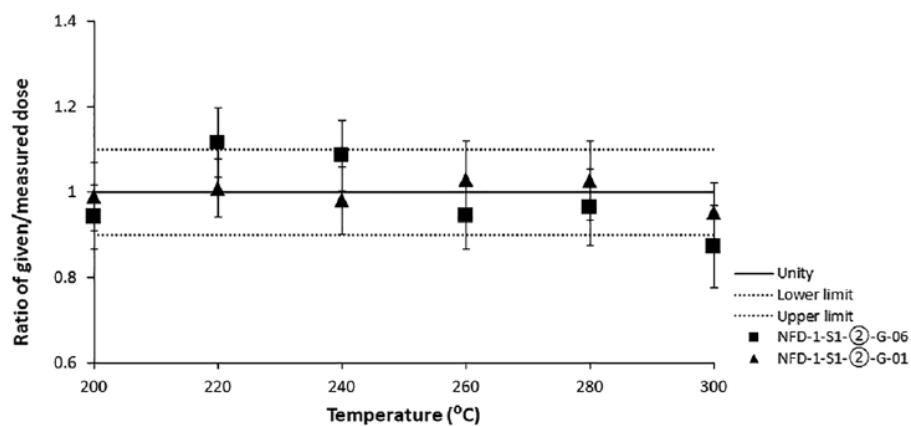
線源によって行った⁵⁰。OSL 信号の励起には青色 LED (波長 470 nm) が用いられ、7.5 mm Hoya U-340 光学フィルターを通して検出波長を選択した。OSL 強度の計算は最初の 0.6 秒間で検出されたファースト成分を用いた。プレヒート温度は、図 2.12 に示すプレヒートドーズリカバリーテスト⁴⁸により 220~260°Cの間で De 比がほぼ一定となったため、中央値の 240°Cを採用した⁵¹。更に、SAR 法による等価線量の推定が正しく行われているかを検証するため、ドーズリカバリーテスト⁵²を実施した (図 2.13)。その結果、De 比はおおむね 0.9~1.1 の範囲に分布することから、SAR 法が正しく機能していることを確認した⁵¹。

表 2.3 SAR 法による OSL 測定手順

Table 2.3 SAR protocol for OSL measurements.

Step	Treatment
1	Give dose
2	Preheat, 10 s at 240 °C
3	Blue-LED stimulation, 40 s at 125 °C
4	Give test dose
5	Cut-heat, 0 s at 200 °C
6	Blue-LED stimulation, 40 s at 125 °C
7	IR diodes stimulation, 100 s at 125 °C
8	Return to Step 1

出典) 京都大学 (2019)に基づいて編集

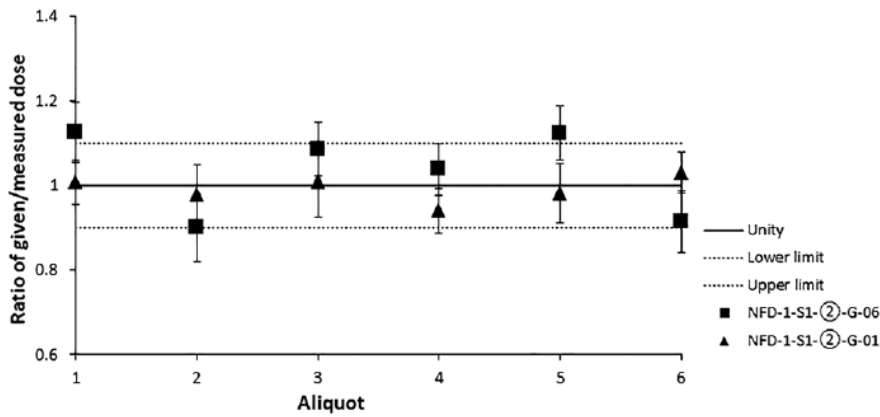


出典) Tsakalos et al. (2020)⁵¹

図 2.12 プレヒートドーズリカバリーテストの結果

Figure 2.12 Result of the preheat-dose recovery test.

注 1) NFD-1-S1②孔の G-01 及び NFD-1-S1②孔の G-06 の細粒石英粒子を使用



出典) Tsakalos et al. (2020)⁵¹

図 2.13 ドーズリカバリーテストの結果

Figure 2.13 Result of the dose recovery test.

注 1) NFD-1-S1②孔の G-01 及び NFD-1-S1②孔の G-06 の細粒石英粒子を使用

TL は、通常の TL 年代測定ではなく、ITL (Isothermal Thermoluminescence) 年代測定法によって測定した⁵³。通常の TL 測定が一定の速度で温度を上昇させてルミネッセンス強度を測定するのに対し、ITL 法は一定の温度下でのルミネッセンス強度の時間変化を測定する。この手法を用いたのは、本試料の量が限られていること、通常の TL よりも飽和線量が多いこと、再現性の確認が出来ること等による。

ITL は、SAR 法により測定した。測定手順は、Murray and Wintle (2000)⁴⁸に従った (表 2.4)。測定機器、照射線源、信号励起に用いた LED、光学フィルターは、先述の OSL と同様である。測定は温度 310 °C で 300 秒間行った。測定手順を表 2.4 に示す。テスト照射は 2 °C/秒の加熱速度で行った。ITL 測定の際に 310 °Cの加熱を行うため、プレヒートは行わなかった。ITL 強度の計算は初めの 5 秒間のデータを用い、バックグラウンドの計算には最後の 20 秒間の測定データを用いた。

表 2.4 SAR 法による ITL 測定手順

Table 2.4 SAR protocol for ITL measurements.

Step	Treatment
1	Give dose, $D_t^{(a)}$
2	Heat to 310 °C, (hold for 300 s)
3	Give test dose, $D_t^{(b)}$
4	Heat to 310 °C, (hold for 300 s)
5	Return to step 1

^(a) D_0 = natural dose; ^(b) D_t = Fixed test dose

出典) 京都大学 (2019)⁶

(2) ESR 年代測定

NFD-1-S5 孔の断層試料の分析は株式会社蒜山地質年代研究所、NFD-1-S1②孔の断層試料の分析は NCSR、小倉地点のトレンチの断層試料の分析は国立大学法人山梨大学が実施した。

株式会社蒜山地質年代研究所が行った ESR 年代測定の手順を以下に示す。

総被曝線量測定のための試料については、100 μm 前後の粒径の石英を得るため、試料の状態を考慮して以下の処理を行った。なお、断層ガウジの ESR 年代測定については本来、ガウジ中の石英の粒径ごとに年代値を求め、細粒のものについて年代値が一定となるかどうかを検討する⁵⁴が、本報告においては試料の量が限られているため 1 フラクションについてのみ実施した。試料の分取及び処理は 1 ルクス程度の暗赤色灯下で行った。試料処理は全て室温で行い、試料を乾燥させる際には 40 $^{\circ}\text{C}$ の恒温乾燥器を使用した。以下に、試料処理の手順を記す。

- ① 断層ガウジ試料にイオン交換水を加え、攪拌棒で押さえながら試料を分散させた。
- ② 10% の過酸化水素水を用い、24 時間処理することで有機物を除去した。
- ③ 20% の塩酸を用い、24 時間処理することで炭酸塩鉱物を除去した。
- ④ ネオジム磁石を用いて、強磁性鉱物を除去した。
- ⑤ 比重を 2.60 に調整したポリタングステン酸ナトリウム (SPT) 重液を用いて比重選別した。
- ⑥ Shitaoka et al. (2012)⁵⁵ の方法により 20% のフッ化水素酸を用い、90 分間処理することで α 線の影響を受けている石英表面をエッチングするとともに、石英以外の鉱物の大部分を除去した⁵⁵。
- ⑦ 標準ふるいで粒径を 50~250 μm にそろえて測定試料とした (以下「Natural」という)。

以上の処理により得られた石英は、一部に約 1.5g 得られた試料もあったが、多くは 1g 未満であった。

年間線量率は、高純度 Ge 半導体検出器による γ 線スペクトル法によって評価した。断層ガウジ試料に関しては、分取した試料が約 20g~70g と少量だったため、年間線量率測定用に十分な量を確保することができなかった。そこで、S5-01~S5-10 (後述) のガウジ部分については、それぞれから約 2g ずつ取り分けたものを合わせてガウジ部分の年間線量率測定用試料とした。年間線量率の評価には、試料の含水率により補正することが必要であるため、石英抽出の試料処理に先だって含水率の測定を行った。この測定は、総被曝線量測定用の試料を用い、以下の手順で行った。

- ① 試料の重量を測定した後、40 $^{\circ}\text{C}$ の恒温乾燥器で十分に乾燥させた。

- ② 乾燥試料重量を測定し、含水率を求めた。
- ③ 乾燥試料を、メノウ製乳鉢を用いてすり潰した。
- ④ すり潰して均質化した試料を測定用標準試料と同程度の重量となるように約 20 g 取り分け、プレス成型した後プラスチック容器に封入した。
- ⑤ 放射平衡を満たすまで約 30 日間静置し、測定試料とした。

総被曝線量評価のための ESR 測定は付加線量法によって行った。付加線量法は、試料処理によって得られた試料 Natural について、段階的な γ 線照射によって得られた信号強度の増大傾向を、信号強度 0 の点まで外挿して総被曝線量を求める方法である。グラフの回帰は基本的に飽和曲線とし、直線近似の方がより適当と判断される場合は直線として最小二乗法を適用した。測定には、照射ステップごとに約 60~70 mg に分取した試料を使用した。放射線の照射には、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門高崎量子応用研究所のコバルト 60γ 線源を使用した。 γ 線の線量率 3.22 C/kg/h で、未照射試料と併せて 8~10 段階となるように線量を変えて照射した。なお、試料処理後の石英の質量が 8~10 段階の測定に十分でない試料については、付加照射・ESR 測定後の試料を回収し、再度 γ 線照射を行うことで 8~10 段階となるように実施した。ESR 測定には、日本電子製 JES-PX2300 を使用し、Al 中心、Ti 中心及び E1' 中心について信号強度を測定した。測定条件は、Al 中心及び Ti 中心については液体窒素温度で、マイクロ波周波数約 9.1 GHz、マイクロ波出力 5 mW、磁場掃引幅 15 mT、掃引時間 30 秒、磁場変調周波数 100 kHz、磁場変調幅 0.1 mT とした。E1' 中心の場合は室温にてマイクロ波周波数約 9.4 GHz、マイクロ波出力 0.01 mW、磁場掃引幅 2.5 mT、掃引時間 30 秒、磁場変調周波数 100 kHz、磁場変調幅 0.1 mT とした。

本ガウジ試料において 50~250 μm の石英粒子を用いて総被曝線量評価を行う場合、ESR に寄与する自然放射線はガウジ試料からの β 線及び、その周囲約 30 cm からもたらされる γ 線である。 β 線及び γ 線の年間線量率は U、Th 及び K の濃度から計算できるので、高純度 Ge 半導体検出器を用いた γ 線スペクトル法によって U、Th 及び K の濃度を測定した。測定には、キャンベラ製の高純度 Ge 半導体検出器 (GC1520) を用いた γ 線スペクトル測定システムを使用した。上記の手順で封入したガウジ試料 20.27 g、カタクレーサイト試料 20.13 g を 14 日間測定し、U 系列は ^{226}Ra (186.0 keV)、 ^{214}Pb (295.2 keV、351.9 keV)、 ^{214}Bi (609.3 keV、1120.3 keV、1764.5 keV)、Th 系列は ^{228}Ac (338.4 keV、911.1 keV、968.9 keV)、 ^{212}Pb (238.6 keV、300.1 keV、727.2 keV)、 ^{208}Tl (583.1 keV、2614.5 keV) のピークに注目し、Uchida et al. (2015)⁵⁶により作成された測定用標準試料 (U 標準試料 : U 濃度 110 ppm の SiO_2 、Th 標準試料 : Th 濃度 125 ppm の NaCl 、 K_2O 標準試料 : K_2O 濃度 63.2 % の KCl) との比較からそれぞれの核種の含有量を求めた。得られた各核種の濃度から、ラドン損失の有無を検討し、 ^{238}U 及び ^{232}Th 濃度を仮定した。さらに Guérin et al. (2011)⁴¹ の換算表を用いて β 線及び γ 線の線量率を算出し、事前に測定した含水率を用いて含水率補正 (Aitken,

1985)⁴²、粒径によるβ線の減衰の補正 (Mejdahl, 1979)⁵⁷を行った。なお、本試料は深さ約 900 m から得られたため、宇宙線は上部の地層によって減衰していると考え、宇宙線による線量率はゼロと仮定した。

NCSR が行った ESR 年代測定の手順を以下に示す。

総被曝線量測定のための試料の分離は、OSL 及び ITL と同様の方法で行った。年代測定には、主として粒径 4-11 μm の石英粒子を使用し、4-11 μm のものを十分得られなかった場合には、粒径 80-125 μm の石英粒子を使用した。分量は粒径ごとに得られた全ての石英粒子を使用した。

試料の年間線量の測定についても、OSL 及び ITL と同様の方法で行った。

総被曝線量の測定は、各試料について、放射線を照射していない状態で ESR 測定を行った後、試料ごとに異なる線量の放射線を段階的に照射し、照射線量ごとにシグナル強度を測定した。放射線の照射は、Risø 社製の TL/OSLDA-15B 測定装置に搭載されている 1.48 GBq (40m Ci) ⁹⁰Sr/⁹⁰Yβ 線源を用いた。この線源は、β線を最大 2.27 MeV のエネルギーで放出し、石英粒子への線量率は、0.1 Gy/s 程度である。線源は上記測定装置内の Be 薄膜真空器内に装着されており、コンピュータ制御によってその場照射を行う。ESR 測定には、Bruker 社製の ESP 380E ESR 測定装置を用いた。測定は E1'中心と OHC 信号に対しては室温下、Al 中心に対しては液体 He により 100 K の低温条件で測定した。低温での温度管理には、Oxford Instruments 社製のクライオスタットを用いた。測定条件は、E1'中心と OHC 信号について、室温下でマイクロ波周波数 9.647 GHz、マイクロ波出力 6.41 W、磁場掃引幅 2.5 mT、掃引時間 30 秒、磁場変調周波数 100 kHz、磁場変調幅 0.1 mT とした。Al 中心の測定条件は、100 K の温度下でマイクロ波出力 2 mW、磁場掃引幅 8 mT、その他の条件は室温測定と同様である。

国立大学法人山梨大学が行った ESR 年代測定の手順を以下に示す。

年代測定用に用いた試料は、1 試料あたり 50 mg でありバルク状態の試料を対象とした。ESR 測定は、日本電子株式会社製 JES-RE3X を使用し、石英の Al 中心、モンモリナイト (Mo) の四重信号 (B、C 信号) について信号強度を測定した。Al 中心の測定条件は、低温下 (77 K) で、掃引磁場 331±25 mT 及び 325±5 mT、マイクロ波出力 1 mW、マイクロ波周波数 9.1 GHz、変調磁場周波数 100 kHz、磁場変調幅 0.05 mT、応答時間 0.3 秒、掃引時間 8 min./scan、コンピュータによる積算回数 3 回で実施した。石英の Al 中心、モンモリナイト (Mo) 四重信号 (B、C 信号) の測定条件は、室温条件で、掃引磁場 400±400 mT 及び 336±5 mT、マイクロ波出力 1 mW 及び 0.01 mW、マイクロ波周波数 9.4 GHz、変調磁場 100 kHz 0.05 mT、応答時間 0.3 秒、掃引時間 8 min./scan、コンピュータによる積算回数 3 回で実施した。ESR 年代値を測定するのに必要な年間線量率を計算するために、各断層破砕物質中の ²³⁸U、²³²Th 及び K₂O 濃度の定量をエイキット株式会社に依頼した。使用した分析装置は Agilent Technologies 社製 ICP-MS (7700x) 及び Rigaku 製蛍光 X 線装置 (ZSX100e) である。年間線量率は、測定した放射線元素濃度から線量換算表⁵⁸を使用して算出した。

総被爆線量を決定するために必要な放射線の照射は、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所のコバルト 60 γ 線源を使用した。

(3) K-Ar 年代測定

小倉地点のトレンチ調査によって得られた断層試料の分析及び NFD-1-S3 孔の断層試料の分析は、国立大学法人京都大学が実施した。

国立大学法人京都大学が行った K-Ar 年代測定の手順を以下に示す。

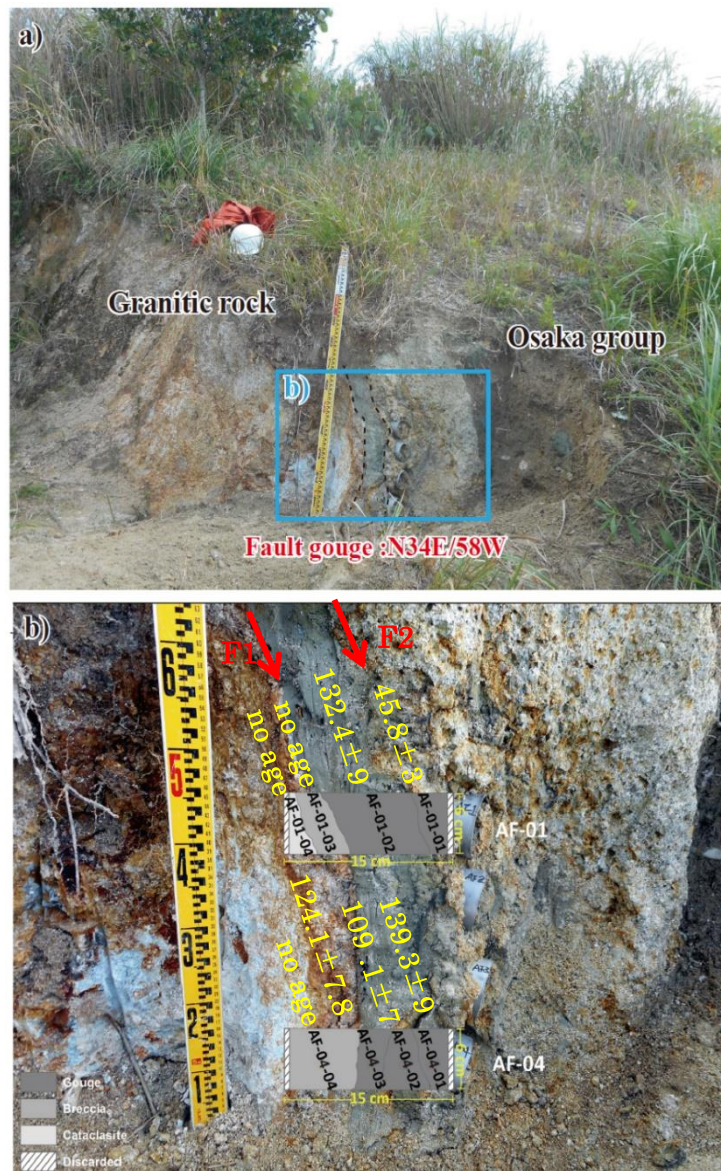
採取した試料から自生の粘土鉱物を抽出するため粘土の分離作業を行った。K-Ar 年代測定に用いる試料は、自生の粘土鉱物以外のカリ長石のような K を含む鉱物の混入を最小にする必要がある。このため、凍結・融解の繰り返しによって試料を粉碎し、ストークスの定理を用いた沈降分離法により、粒径 2 μm 以下及び粒径 2~6 μm の粒子を抽出した。さらに、大容量遠心分離機を用いて粒径 0.1 μm 以下の粒子を抽出した。抽出した粒子は、X 線回折装置 (X-ray diffractometer; XRD) を用いて、自生鉱物の有無を確認した。

K-Ar 年代測定の方法は、Dalrymple and Lanphere (1969)⁵⁹ や McDougall and Harrison (1999)⁶⁰ 等に準拠した。K の含有量は、アジレント・テクノロジー社製の ICP 発光分光分析装置 (ICP-OES) を用いて分析した。分析に用いた試料は 1 試料あたり 25 mg 程度である。K の測定誤差は、全ての分析試料において 2 % (2σ) の範囲を示した。同位体の分析は、Bonhomme et al. (1975)⁶¹ の方法に準拠した。Ar の質量は、希ガス分析装置 (VG Instruments 社製、VG3600) を用いて分析した。分析に用いた試料は、1 試料あたり 20 mg 程度である。K-Ar 年代測定は、Steiger and Jäger (1977)⁶² が推奨する余剰 ^{40}K と崩壊定数の値を用いて計算した。年代値の誤差は、 $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 及び K の分析値の計量誤差から算出した。

2.4.2 年代測定結果

(1) 断層露頭から得られた断層破砕物質の OSL 年代測定結果

浅野断層の断層露頭の断層破砕物質について OSL 年代を測定した (図 2.14、表 2.5)。最新活動面の可能性のある断層として、花崗岩起源のカタクレーサイト及び断層ガウジを境する断層 (F1) と、大阪層群及び断層ガウジを境する断層 (F2) が認定されており、これらの最新活動面付近の断層破砕物質の OSL 年代は、4.6 万年前~13.9 万年前を示した。カタクレーサイトの試料からは年代値が得られなかった。OSL 減衰曲線及び成長曲線の例として図 2.15 に AF-01-02 で得られた結果を示す。蓄積線量値が 300Gy 以上の高い値を示しているものが多いが、成長曲線からは完全に飽和していないと考えられる。



出典) 国立大学法人京都大学 (2019)⁶ 及び Tsakalos et al. (2020)⁵¹ に基づいて編集

図 2.14 浅野断層の露頭写真及び年代測定結果

Figure 2.14 Photograph of Asano fault at the fault outcrop and estimated ages (ka).

注 1) a) は露頭写真、b) は年代測定結果 (単位は ka) を示す。

表 2.5 浅野断層から得られた断層破碎物質の OSL 年代測定結果

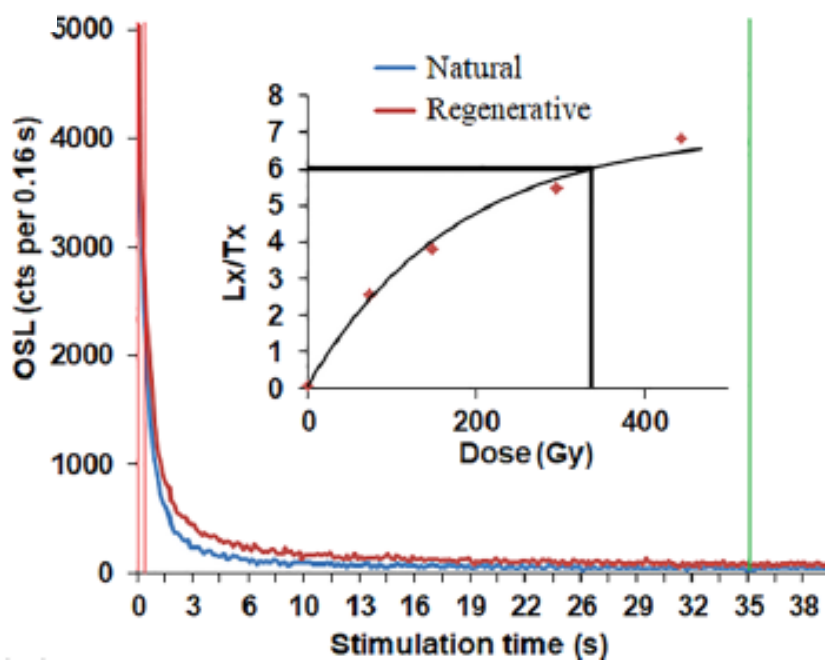
Table 2.5 OSL dating results from gouge samples of the Asano Fault.

Sample ID	Material	Number of aliquots	D_E (Gy)	D_E Overdispersion (%)	D_r (Gy/ka)	Age (ka)
AF-01-01	Gouge	20	136±4.9	12	2.97±0.16	45.8±3
AF-01-02	Gouge	14	401.2±10.4	0	3.03±0.19	132.4±9
AF-01-03	Breccia	*	**	**	2.21±0.14	**
AF-01-04	Cataclasite	*	**	**	2.6±0.17	**
AF-04-01	Gouge	17	413.7±8.4	0	2.6±0.17	139.3±8.9
AF-04-02	Gouge	20	321.9±6.5	5.1	2.97±0.18	109.1±7
AF-04-03	Gouge	18	358.5±7.9	2.8	2.95±0.18	124.1±7.8
AF-04-04	Breccia	*	**	**	3.64±0.24	**

*印は分析試料の分量が不足し、測定不可能であった試料

**印はルミネッセンス信号が安定せず、測定できなかった試料

出典) Tsakalos et al. (2020)⁵¹に基づいて編集



出典) Tsakalos et al. (2020)⁵¹

図 2.15 浅野断層から得られた断層破碎物質の OSL 減衰曲線及び成長曲線の例
Figure 2.15 Example of the OSL decay curve and the growth curve from gouge samples of the Asano Fault.

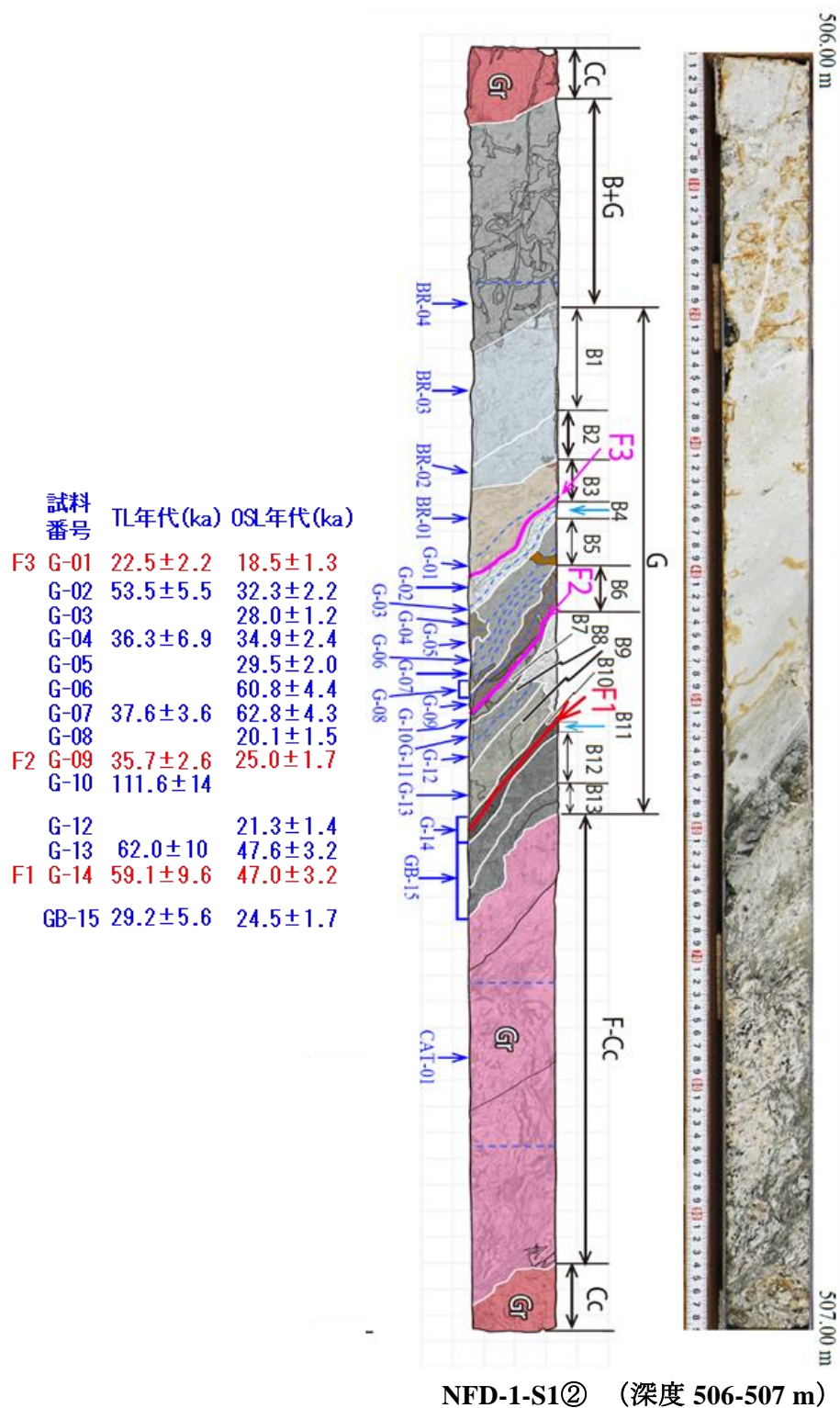
注 1) AF-01-02 の測定例

(2) 深度 506～507 m 及び深度 897～898 m から得られた断層破砕物質の OSL 及び ITL 年代測定結果

NFD-1-S1②孔の深度 506～507 m 及び NFD-1-S6 孔の深度 897～898 m において確認された野島断層の主断層の断層破砕物質について OSL 及び ITL による年代測定を行った（図 2.16～図 2.17、表 2.6～表 2.9）。

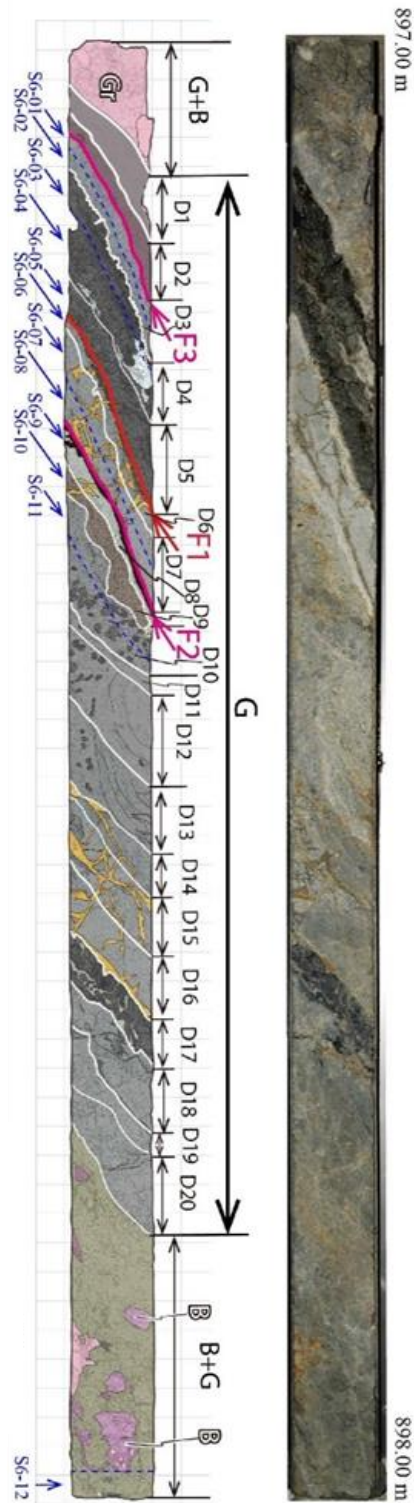
NFD-1-S1②（深度 506-507 m）では、断層破砕物質中の断層のうち特に平滑で連続性の高い断層を最新活動面の可能性のある断層として 3 本認定した（F1、F2 及び F3）。断層破砕物質全体の ITL 年代は約 2.3 万年前～約 11.1 万年前、OSL 年代は約 1.9 万年前～約 6.3 万年前を示した。最新活動面付近では、ITL 年代は約 2.3 万年前～約 5.9 万年前、OSL 年代は約 1.9 万年前～約 4.7 万年前を示した。最新活動面全体の断層破砕物質の年代幅は、その他の断層破砕物質の年代幅よりも新しい年代を示した。図 2.18 に NFD-S1②-G01 で得られた OSL 減衰曲線を示す。

NFD-1-S6（深度 897-898 m）では、断層破砕物質中の断層のうち特に平滑で連続性の高いものを最新活動面の可能性のある断層として 3 本認定した（F1、F2 及び F3）。最新活動面付近では、ITL 年代は約 0.1 万年前～約 5.4 万年前、OSL 年代は約 1.2 万年前を示した。最新活動面全体の断層破砕物質の年代幅は、その他の断層破砕物質の年代幅よりも新しい年代を示した。最新活動面の可能性のある断層のうち最も連続性の高い F1 断層の ITL 年代は約 0.1 万年前を示し、周囲の断層破砕物質の年代値に比べて有意に新しい年代を示した。



出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶ 及び Tsakalos et al. (2020) ⁵¹ に基づいて編集
 図 2.16 ボーリングコアの OSL 及び ITL 年代測定結果 (NFD-1-S1② : 深度 506-507 m)
 Figure 2.16 Estimated OSL and ITL ages from the drilling core (NFD-1-S1②: 506-507 m depth).

試料番号	ITL年代(ka)	OSL年代(ka)
F3 S6-01	34.92 ± 4.41	
S6-02	114.63 ± 16.15	10.4 ± 0.52
S6-03	149.54 ± 16.79	13.4 ± 0.7
S6-04	172.46 ± 17.10	12.9 ± 0.7
F1 S6-05	1.06 ± 0.87	
S6-06	51.09 ± 6.09	12.6 ± 0.2
S6-07	57.86 ± 13.18	12.5 ± 0.7
F2 S6-08	54.07 ± 4.28	11.9 ± 1.1
S6-09	98.81 ± 9.65	

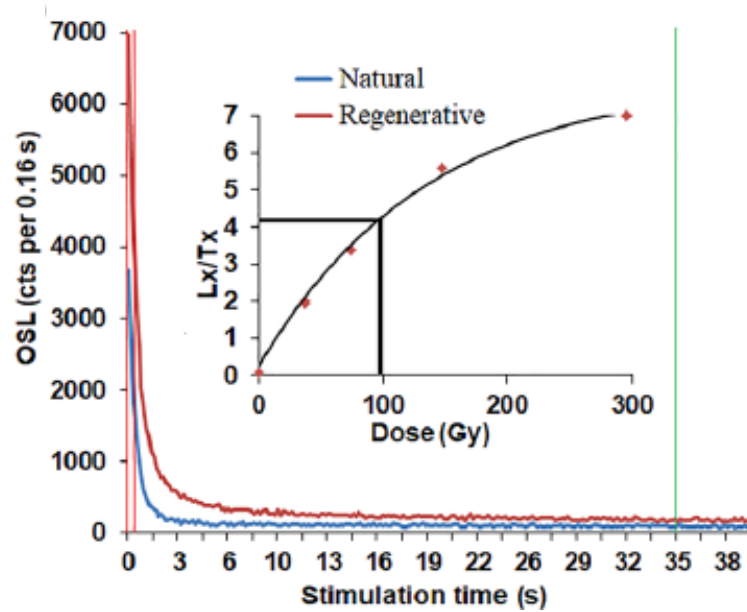


NFD-1-S6 (深度 897-898m)

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶ のデータに基づいて編集

図 2.17 ボーリングコアの OSL 及び ITL 年代測定結果 (NFD-1-S6 : 深度 897-898m)

Figure 2.17 Estimated OSL and ITL ages from the drilling core (NFD-1-S6 : 897-898 m depth).



出典) Tsakalos et al. (2020)⁵¹

図 2.18 野島断層から得られた断層破碎物質の OSL 減衰曲線及び成長曲線の例

Figure 2.18 Example of the OSL decay curve and the growth curve from gouge sample of the Nojima Fault.

注 1) NFD-S1②-G01 の測定例

表 2.6 NFD-1-S1②孔の断層破碎物質の OSL 年代測定結果

Table 2.6 OSL dating results from gouge samples of Hole NFD-1-S1②.

Sample ID	Material	Material used	Number of aliquots	D _E (Gy)	D _E Overdispersion (%)	D _r (Gy/ka)	Age (ka)
NFD-1-S1-②-G-01	Gouge	Quartz	20	98.9±1.9	5.1	5.35±0.36	18.5±1.3
NFD-1-S1-②-G-02	Gouge	Quartz	20	150.4±3.2	5.1	4.66±0.3	32.3±2.2
NFD-1-S1-②-G-03	Gouge	Quartz	20	117.5±2.4	5.8	4.2±0.27	28±1.2
NFD-1-S1-②-G-04	Gouge	Quartz	20	169.1±3.5	3.6	4.84±0.31	34.9±2.4
NFD-1-S1-②-G-05	Gouge	Quartz	20	146.1±2.5	0	4.95±0.32	29.5±2
NFD-1-S1-②-G-06	Gouge	Quartz	19	305.6±10.9	14	5.03±0.32	60.8±4.4
NFD-1-S1-②-G-07	Gouge	Quartz	20	313.2±7.5	7.6	4.99±0.32	62.8±4.3
NFD-1-S1-②-G-08	Gouge	Quartz	20	90.6±3.3	12.6	4.5±0.28	20.1±1.5
NFD-1-S1-②-G-09	Gouge	Quartz	20	121.3±2.6	3.4	4.86±0.31	25±1.7
NFD-1-S1-②-G-10	Gouge	Quartz	*	*	*	4.92±0.31	*
NFD-1-S1-②-G-11	Gouge	Quartz	*	*	*	4.62±0.29	*
NFD-1-S1-②-G-12	Gouge	Quartz	20	103.8±2.1	2.2	4.88±0.31	21.3±1.4
NFD-1-S1-②-G-13	Gouge	Quartz	20	220.1±5.3	0	4.62±0.29	47.6±3.2
NFD-1-S1-②-G-14	Gouge	Quartz	20	214.2±4.6	1	4.56±0.29	47±3.2
NFD-1-S1-②-GB-15	Gouge/ Breccia	Quartz	20	108.4±2.5	5.9	4.42±0.28	24.5±1.7
NFD-1-S1-②-CAT-01	Cataclasite	Quartz	*	**	**	4.39±0.28	**
NFD-1-S1-②-BR-01	Breccia	Quartz	*	**	**	4.43±0.28	**
NFD-1-S1-②-BR-02	Breccia	Quartz	*	**	**	4.5±0.28	**
NFD-1-S1-②-BR-03	Breccia	Quartz	*	**	**	4.51±0.28	**
NFD-1-S1-②-BR-04	Breccia	Quartz	*	**	**	4.63±0.29	**

*印は分析試料の分量が不足し、測定不可能であった試料

**印はルミネッセンス信号が安定せず、測定できなかった試料

出典) 国立大学法人京都大学 (2019)⁶ 及び Tsakalos et al. (2020)⁵¹ に基づいて編集

表 2.7 NFD-1-S1②孔の断層破碎物質の ITL 年代測定結果

Table 2.7 ITL dating results from gouge samples of Hole NFD-1-S1②.

Sample ID	Material	Material used	Number of aliquots	Grain size (μm)	D _E (Gy)	Dr (Gy/ka)	Age (ka)
NFD-1-S1-②-G-01	Gouge	Quartz	10	4-11	120.1±9.4	5.35±0.3	22.5±2.2
NFD-1-S1-②-G-02	Gouge	Feldspar	12	80-125	248.1±19	4.64±0.32	53.5±5.5
NFD-1-S1-②-G-04	Gouge	Quartz	12	4-11	175.6±32	4.84±0.24	36.3±6.9
NFD-1-S1-②-G-07	Gouge	Feldspar	12	80-125	190±15.3	5.05±0.25	37.6±3.6
NFD-1-S1-②-G-09	Gouge	Feldspar	12	80-125	177.3±9.5	4.97±0.25	35.7±2.6
NFD-1-S1-②-G-10	Gouge	Feldspar	12	80-125	527.7±65.9	5.13±0.25	111.6±14
NFD-1-S1-②-G-13	Gouge	Feldspar	12	80-125	295.7±45.2	4.77±0.25	62.0±10
NFD-1-S1-②-G-14	Gouge	Quartz	8	4-11	269.4±41.5	4.56±0.22	59.1±9.6
NFD-1-S1-②-GB-15	Gouge	Quartz	10	4-11	129.3±24.1	4.43±0.2	29.2±5.6

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶に基づいて編集

表 2.8 NFD-1-S6 孔の断層破碎物質の OSL 年代測定結果

Table 2.8 OSL dating results from gouge samples of Hole NFD-1-S6.

Sample ID	Material	Material used	Number of aliquots	Grain size (μm)	D _E (Gy)	Dr (Gy/ka)	Age (ka)
NFD-S6-G02	Gouge	Quartz	12	63-80	42.7±1.4	4.11±0.2	10.4±0.52
NFD-S6-G03	Gouge	Quartz	12	63-80	54.9±1.7	4.11±0.2	13.4±0.7
NFD-S6-G04	Gouge	Quartz	10	63-80	52.3±2.1	4.04±0.2	12.9±0.7
NFD-S6-G06	Gouge	Quartz	12	63-80	46.2±1.2	3.66±0.2	12.6±0.2
NFD-S6-G07	Gouge	Quartz	12	63-80	42.9±1.2	3.45±0.16	12.5±0.7
NFD-S6-G08	Gouge	Quartz	12	63-80	40.9±3.3	3.44±0.16	11.9±1.1

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶に基づいて編集

表 2.9 NFD-1-S6 孔の断層破碎物質の ITL 年代測定結果

Table 2.9 ITL dating results from gouge samples of Hole NFD-1-S6.

Sample ID	Material	Material used	Number of aliquots	Grain size (μm)	D _E (Gy)	Dr (Gy/ka)	Age (ka)
NFD-S6-G01	Gouge	Quartz	12	4-11	165.16±18.06	4.73±0.3	34.92±4.41
NFD-S6-G02	Gouge	Quartz	12	4-11	536.48±67.30	4.68±0.3	114.63±16.15
NFD-S6-G02	Gouge	Feldspar	10	63-80	439.40±47.00	4.66±0.2	94.29±10.87
NFD-S6-G03	Gouge	Quartz	12	4-11	710.32±65.93	4.75±0.3	149.54±16.79
NFD-S6-G03	Gouge	Feldspar	12	63-80	530.10±54.80	4.74±0.2	111.84±12.49
NFD-S6-G04	Gouge	Quartz	11	4-11	800.22±67.71	4.64±0.24	172.46±17.10
NFD-S6-G04	Gouge	Feldspar	10	63-80	576.70±34.20	4.62±0.2	124.83±9.17
NFD-S6-G05	Gouge	Quartz	12	4-11	4.17±3.40	3.92±0.22	1.06±0.87
NFD-S6-G06	Gouge	Quartz	12	4-11	220.19±22.94	4.31±0.25	51.09±6.09
NFD-S6-G06	Gouge	Feldspar	10	63-80	270.50±19.50	4.26±0.2	63.50±5.46
NFD-S6-G06	Gouge	Feldspar	10	80-125	262.30±29.00	4.28±0.2	61.29±7.36
NFD-S6-G07	Gouge	Quartz	12	4-11	233.76±51.40	4.04±0.24	57.86±13.18
NFD-S6-G08	Gouge	Quartz	12	4-11	216.29±11.76	4±0.23	54.07±4.28
NFD-S6-G09	Gouge	Quartz	12	4-11	458.48±36.70	4.64±0.26	98.81±9.65

*石英粒子の年代値のみ採用

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶に基づいて編集

(3) トレンチ調査から得られた断層破砕物質の ESR 年代測定結果

浅野断層のトレンチの法面において採取した主断層の断層破砕物質について ESR 年代を測定した(図 2.19、表 2.10)。ESR による年代測定は、断層破砕物質から検出された ESR 信号(石英の Al 中心、モンモリロナイト (Mo) 四重信号 (B 信号、C 信号))の強度及び年間線量率から求めた。最新活動面(図 2.19 : ⑤及び⑥の間)の断層破砕物質の ESR 年代は、Al 中心からは約 96 万年前、Al 中心(超微細構造)からは約 186 万年前、モンモリロナイト四重信号の B 信号からは約 108 万年前、モンモリロナイト (Mo) 四重信号の C 信号からは約 418 万年前を示した。



主断層における
ESR 年代測定箇所

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶ を一部編集

図 2.19 浅野断層から採取した ESR 年代測定用の試料

Figure 2.19 Collected sample for ESR dating from the Asano Fault.

表 2.10 浅野断層のトレンチ調査から得られた断層破砕物質の ESR 年代測定結果

Table 2.10 ESR dating results from gouge samples of trench investigation at the Asano Fault.

Sample	ESR Signal	Rn loss (%)	k-value	Δ	$\phi\alpha$	$\phi\beta$	$\phi\gamma$	^{232}Th (ppm)	^{238}U (ppm)	K_2O (%)	D (Gy/ka)	$\pm\sigma_D$ (Gy/ka)	TD (kGy)	$\pm\sigma_{TD}$ (kGy)	AGE (Ma)	$\pm\sigma_{AGE}$ (Ma)	R(%)
試料⑥	Al center (bfs)	0-100%	0.1±0.05	0.2±0.1	1	1	1	9.1±0.63	1.9±0.13	1.9±0.01	2.5583	0.4399	4.7601	1.3819	1.86	0.63	78.8
	Al center												2.4668	0.3824	0.96	0.22	94.6
	B signal												2.7688	0.4497	1.08	0.26	93.6
	C signal												10.693	6.1238	4.18	2.50	51.1

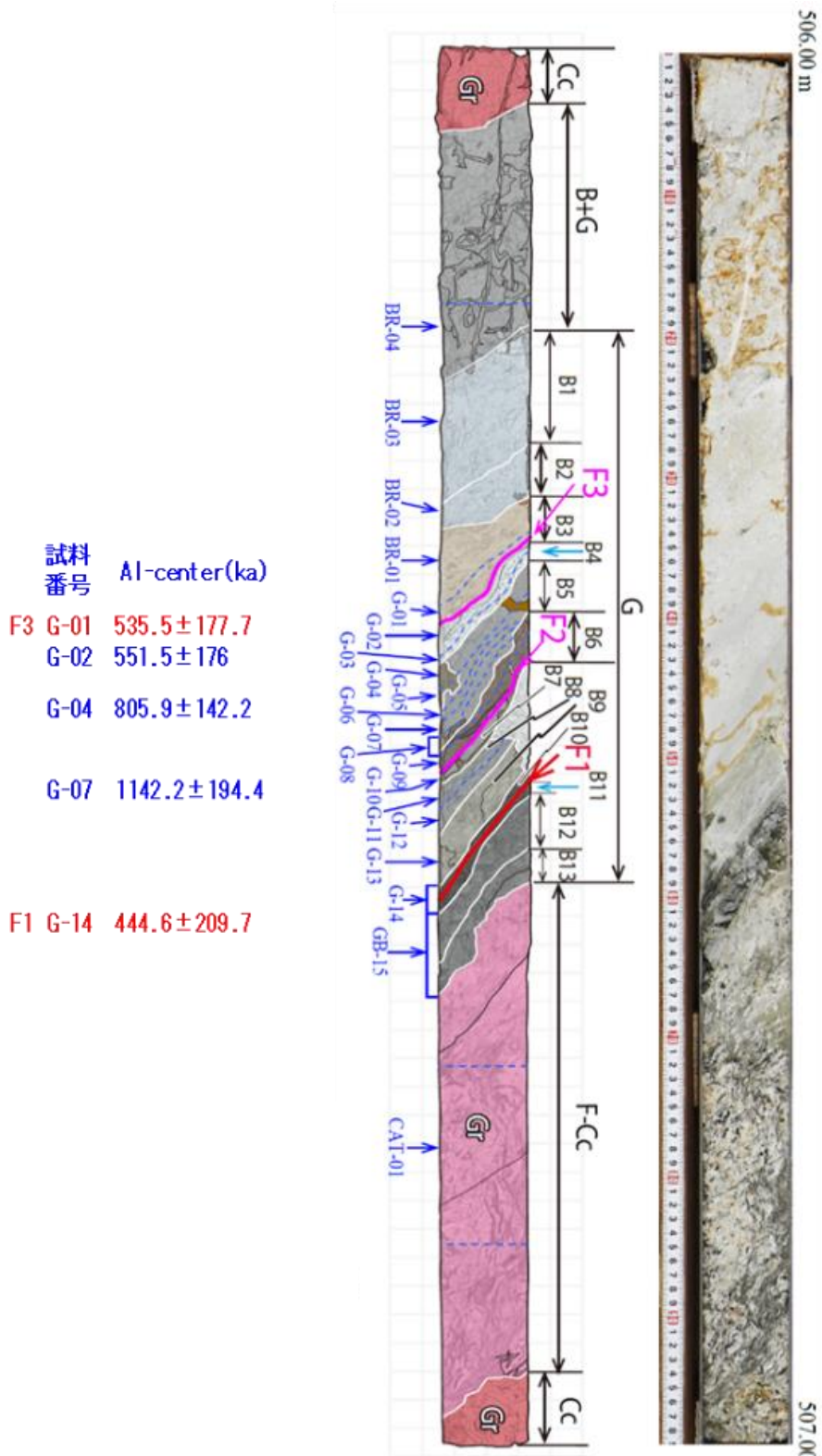
k-value: α -rays efficiency, Δ : water content, $\phi\alpha$, $\phi\beta$, $\phi\gamma$: average α, β, γ -attenuation factor for grain size of $<2\mu\text{m}$, D: annual dose, σ_D : errors of annual dose, TD: total dose, σ_{TD} : errors of total dose, σ_{AGE} : errors of ESR age

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶ に基づいて編集

(4) 深度 506～507 m 及び深度 904～905 m から得られた断層破砕物質の ESR 年代測定結果 NFD-1-S1②孔の深度 506～507 m 及び NFD-1-S5 孔の深度 904～905 m において確認された野島断層の主断層の断層破砕物質について ESR による年代測定を行った (図 2.20、図 2.21、表 2.11、表 2.12)。

NFD-1-S1② (深度 506-507 m) では、断層破砕物質中の断層のうち特に平滑で連続性の良い断層を最新活動面の可能性のある断層として 3 本認定した (F1、F2 及び F3)。断層破砕物質全体の ESR 年代は、Al 中心からは 44.4 万年前～114.2 万年前を示した。最新活動面付近では 44.4 万年前～53.6 万年前を示した。Al 中心の ESR スペクトル及びシグナル強度成長曲線の例として図 2.22 に NFD-1-S1②-G-02 で得られた結果を示す。

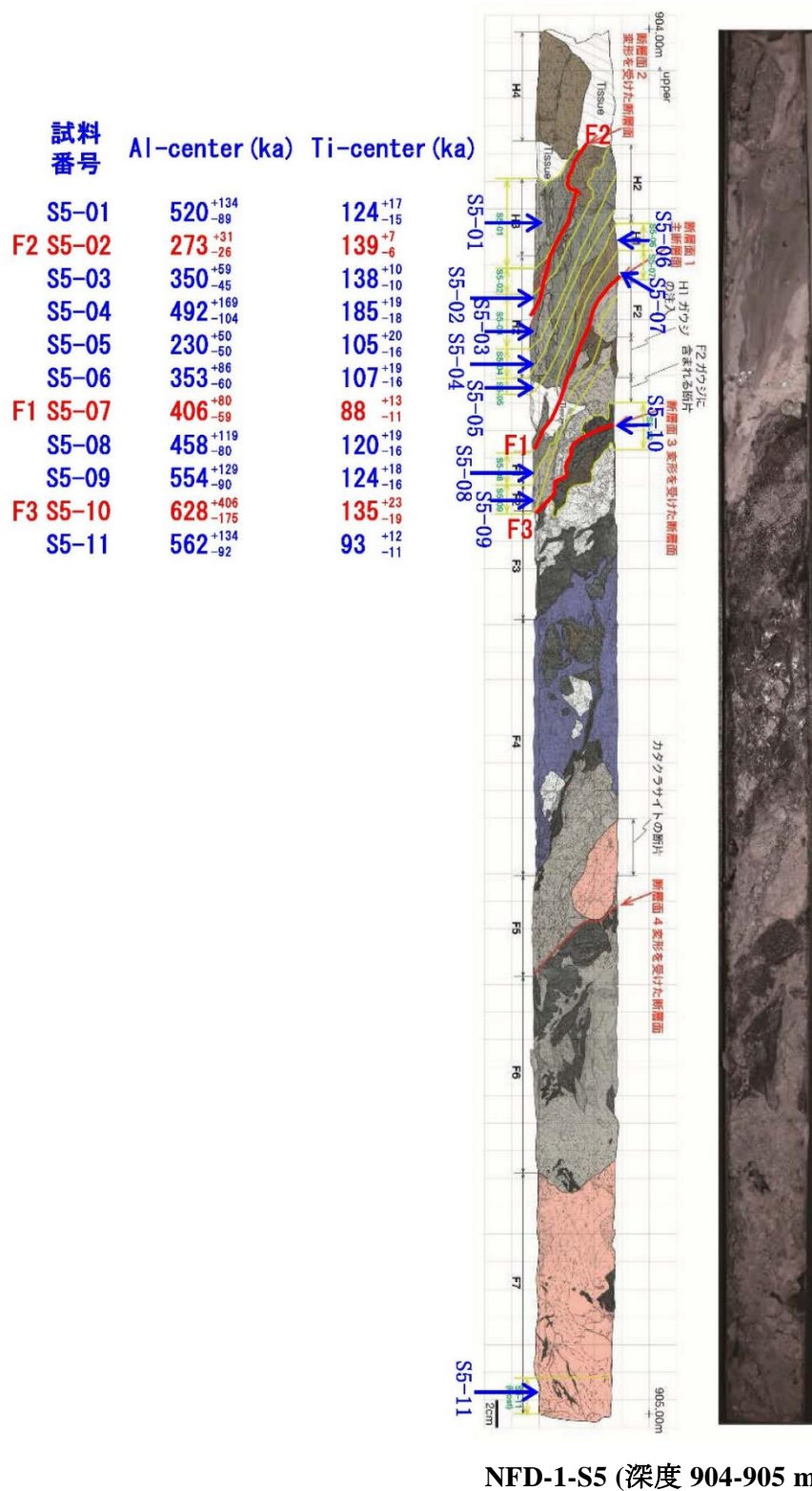
NFD-1-S5 (深度 904-905 m) では、断層破砕物質中の断層で特に平滑で連続性の良いものを最新活動面の可能性のある断層として 3 本認定した (F1、F2 及び F3)。断層破砕物質全体の ESR 年代は、Al 中心からは 23.0 万年前～62.8 万年前を示し、Ti 中心からは 8.8 万年前～18.5 万年前を示した。最新活動面付近では、Al 中心からは 27.3 万年前～62.8 万年前を示し、Ti 中心からは 8.8 万年前～13.9 万年前を示した。Al 中心及び Ti 中心の ESR スペクトル及び Ti 中心のシグナル強度成長曲線の例として図 2.23 に NFD-1-S5-01 で得られた結果を示す。



NFD-1-S1② (深度 506-507 m)

出典) 国立大学法人京都大学 (2019)⁶ 及び Tsakalos et al. (2020)⁵¹ に基づいて編集
 図 2.20 ボーリングコアの ESR 年代測定結果 (NFD-1-S1②: 深度 506-507 m)

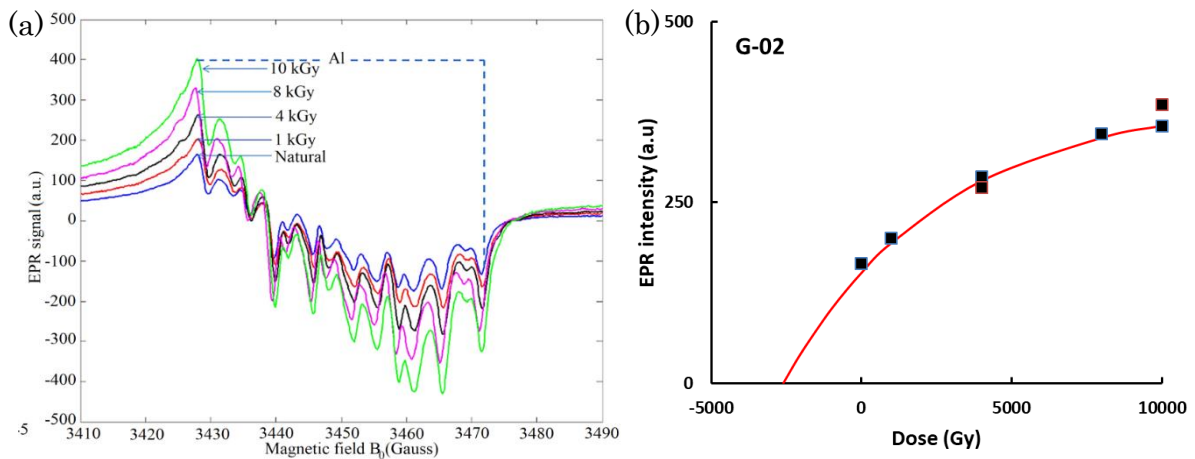
Figure 2.20 Estimated ESR ages from the drilling core (NFD-1-S1②: 506-507 m depth).



出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶ のデータに基づいて編集

図 2.21 ボーリングコアの ESR 年代測定結果 (NFD-1-S5: 深度 904-905 m)

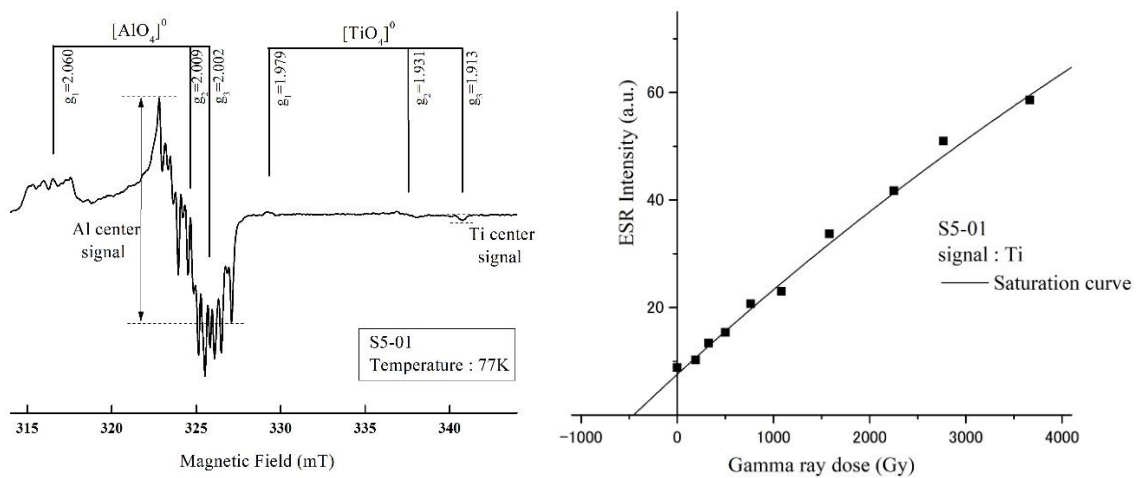
Figure 2.21 Estimated ESR ages from the drilling core (NFD-1-S5: 904-905 m depth).



出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶

図 2.22 NFD-1-S1②孔の試料から得られた ESR スペクトル及びシグナル強度成長曲線の例
 Figure 2.22 Examples of ESR spectols of Al center (a) and the growth curve of ESR intensity (b) (NFD-1-S1②-G-02).

注 1) (a)Al 中心から得られた ESR スペクトル、(b)Al 中心のシグナル成長曲線、いずれも NFD-1-S1②-G-02 の測定例を示す。



出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶

図 2.23 NFD-1-S5 孔の試料から得られた ESR スペクトル及びシグナル強度成長曲線の例
 Figure 2.23 Examples of ESR spectols of Al center and Ti center (a) and the growth curve of ESR intensity for Ti center (NFD-1-S5-01).

注 1) (a)Al 中心及び Ti 中心から得られた ESR スペクトル、(b)Ti 中心のシグナル成長曲線、いずれも NFD-1-S5-01 の測定例を示す。

表 2.11 NFD-1-S5 孔の断層破碎物質の ESR 年代測定結果

Table 2.11 ESR dating results from gouge samples of Hole NFD-1-S5.

Sample ID	Dose rate (mGy/y)	Equivalent dose (Gy)				ESR age (ka)					
		Al-center		Fitting* ¹	Ti-center		Fitting* ¹	Al-center		Ti-center	
S5-01	3.68±0.15	1913	+492 -327	S	455	+63 -55	S	520	+134 -89	124	+17 -15
S5-02	3.50±0.14	957	+107 -90	S	488	+23 -23	L	273	+31 -26	139	+7 -6
S5-03	3.75±0.15	1314	+220 -169	S	518	+38 -37	L	350	+59 -45	138	+10 -10
S5-04	3.77±0.15	1854	+638 -392	S	698	+72 -69	L	492	+169 -104	185	+19 -18
S5-05	3.79±0.15	872	+109 -72	S	398	+75 -62	S	230	+50 -50	105	+20 -16
S5-06	3.73±0.15	1320	+322 -224	S	401	+71 -60	S	353	+86 -60	107	+19 -16
S5-07	3.66±0.15	1489	+294 -216	S	322	+46 -41	S	406	+80 -59	88	+13 -11
S5-08	3.69±0.15	1692	+439 -296	S	442	+70 -60	S	458	+119 -80	120	+19 -16
S5-09	3.52±0.14	1953	+456 -316	S	437	+63 -55	S	554	+129 -90	124	+18 -16
S5-10	4.28±0.17	2688	+1737 -750	S	577	+96 -80	S	628	+406 -175	135	+23 -19
S5-11	3.80±0.11	2135	+511 -351	S	353	+45 -40	S	562	+134 -92	93	+12 -11

* S: 飽和曲線でフィッティング、L: 線形でフィッティング

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶に基づいて編集

表 2.12 NFD-1-S1②孔の断層破碎物質の ESR 年代測定結果

Table 2.12 ESR dating results from gouge samples of Hole NFD-1-S1②.

Sample ID	Material	Material used	Grain size (μm)	D _E (Gy)	Dr (Gy/ka)	Age (ka)
NFD-1-S1-②-G-01	Gouge	Quartz	4-11	2862±940	5.35±0.3	535.5±177.7
NFD-1-S1-②-G-02	Gouge	Quartz	4-11	2577±812	4.67±0.23	551.5±176
NFD-1-S1-②-G-04	Gouge	Quartz	4-11	3904±660	4.84±0.24	805.9±142.2
NFD-1-S1-②-G-07	Gouge	Quartz	4-11	5697±925	4.99±0.24	1142.2±194.4
NFD-1-S1-②-G-10	Gouge	Quartz	80-125	No reliable D _E	4.19±0.2	No age
NFD-1-S1-②-G-14	Gouge	Quartz	4-11	2025±950	4.56±0.22	444.6±209.7
NFD-1-S1-②-G-15	Gouge	Quartz	4-11	No reliable D _E	4.43±0.2	No age

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶に基づいて編集

(5) トレンチ調査から得られた断層破碎物質の K-Ar 年代測定結果

浅野断層のトレンチの法面において採取した主断層の断層破碎物質について K-Ar 年代を測定した（表 2.13、図 2.24 及び図 2.25）。その結果、K-Ar 年代は 5,150 万年前～9,030 万年前を示した。

表 2.13 浅野断層のトレンチ調査から得られた断層破碎物質の K-Ar 年代測定結果

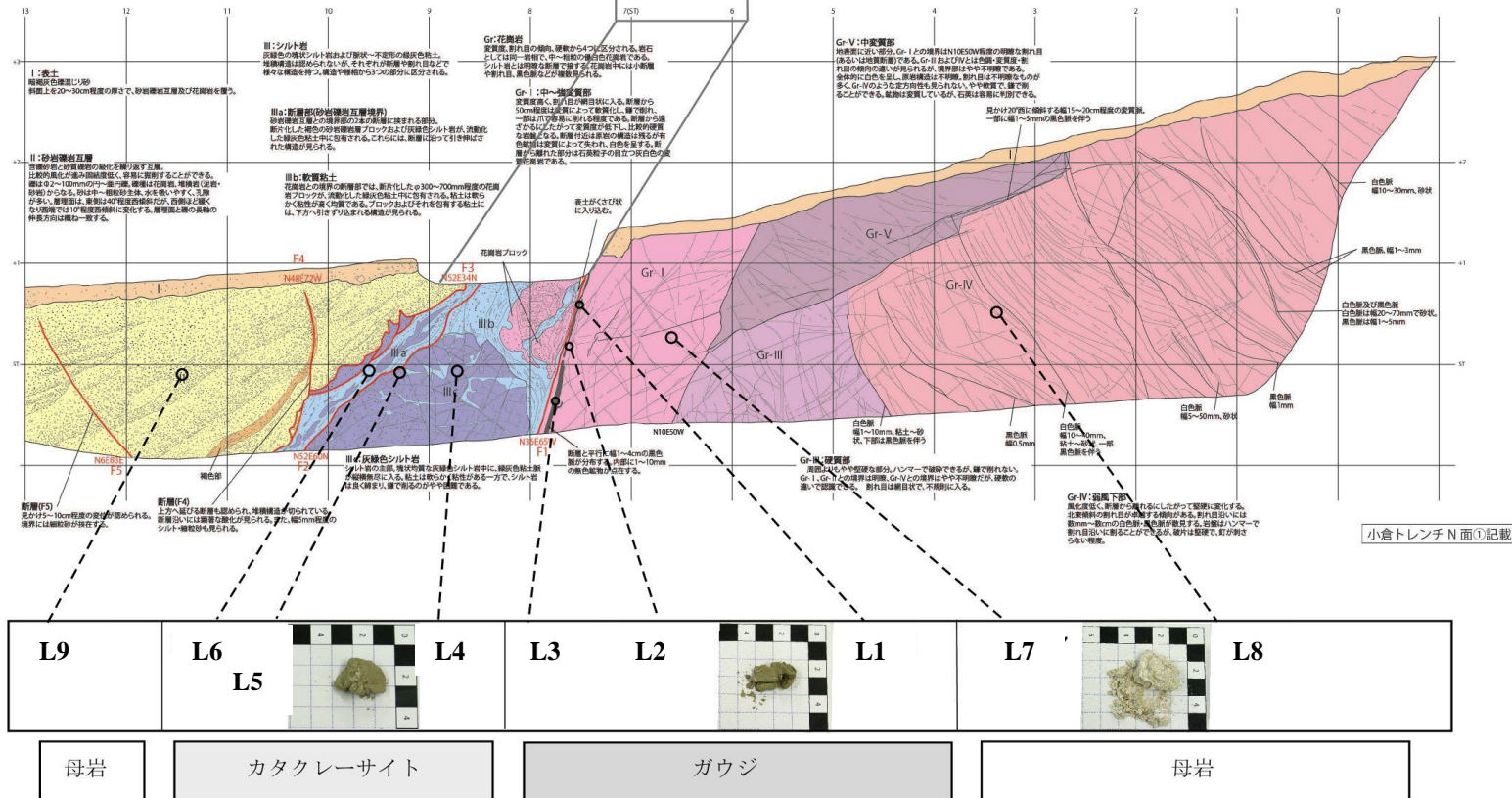
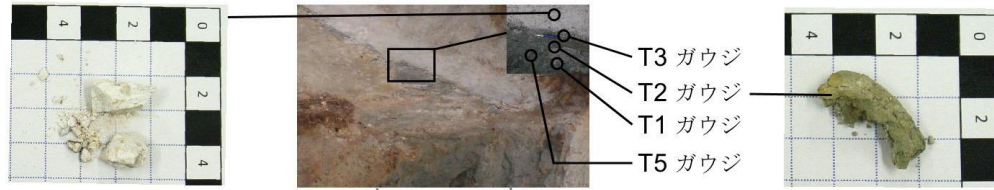
Table 2.13 Estimated K-Ar ages from fault gouges at the trench.

Sample ID *	Age (ka)
T1 (gouge) <2	51,500±1,300
L3 (gouge) <0.1	64,400±3,600
L2 (gouge) <2	66,900±2,400
T2 (gouge) <2	67,900±2,700
L3 (gouge) <2	72,700±3,000
L3 (gouge) 2-6	77,500±2,400
R1 (gouge) <2	83,800±2,900
R1 (gouge) 2-6	90,300±2,300

* 試料番号の <数値、<数値-数値は粒径(μm)を示す。

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶に基づいて編集

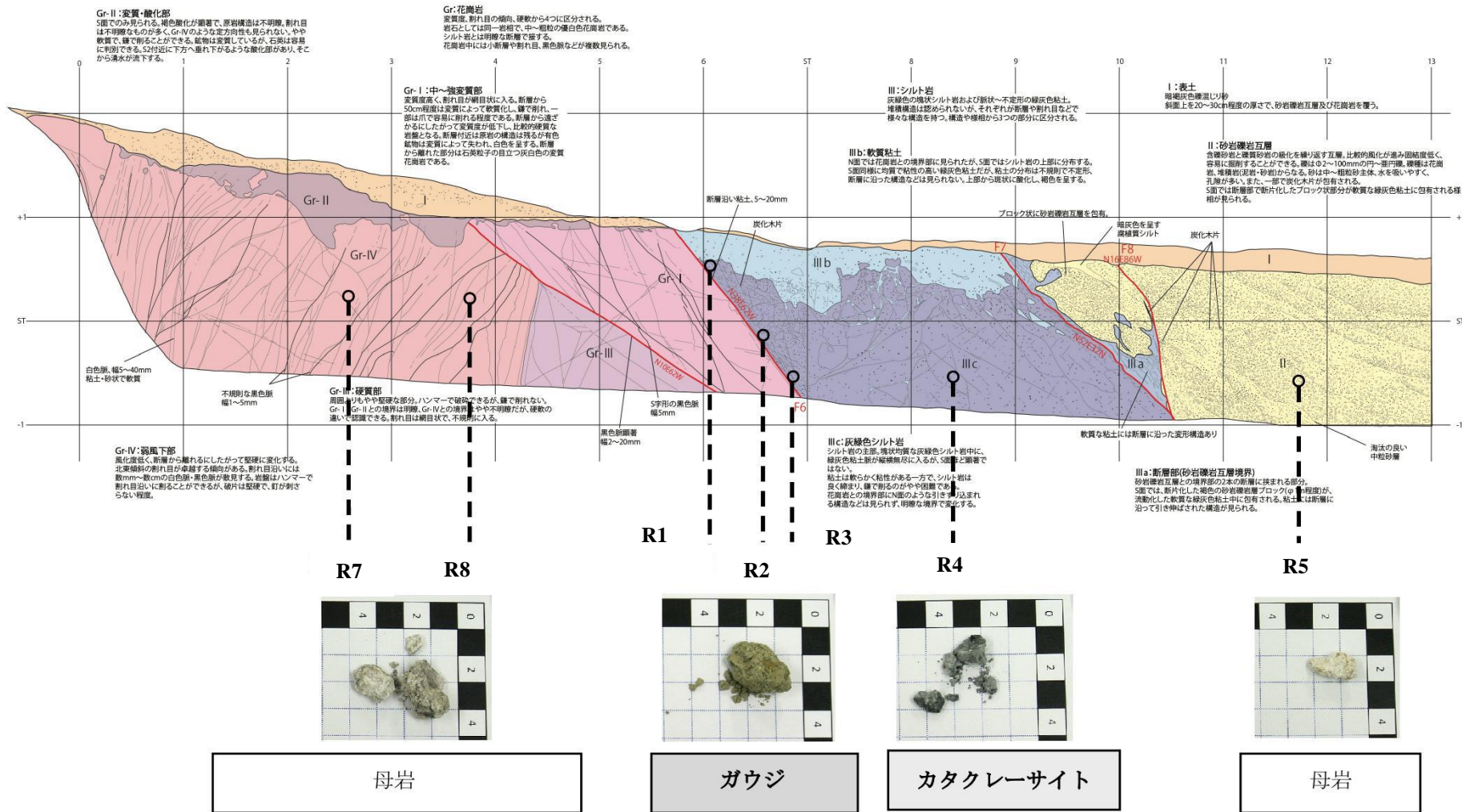
T4 カタクレーサイト



出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶を一部編集

図 2.24 トレンチ法面における試料採取位置 (北壁)

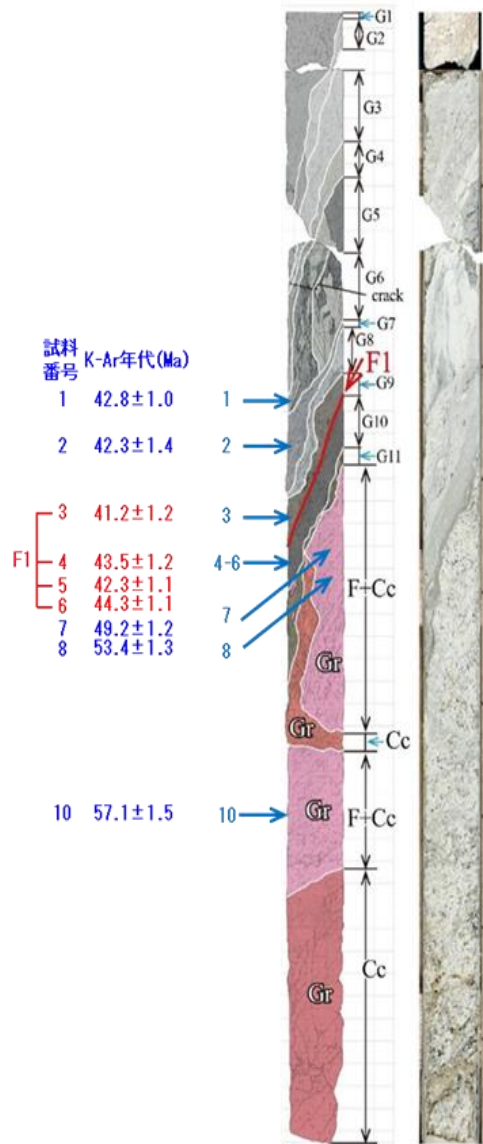
Figure 2.24 Location of K-Ar dating at surface trench (north face).



出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶ を一部編集
 図 2.25 トレンチ法面における試料採取位置 (南壁)
 Figure 2.25 Location of K-Ar dating at surface trench (south face).

(6) 深度 532~533m から得られた断層破碎物質の K-Ar 年代測定結果

NFD-1-S3 孔の深度 532~533 m において確認された野島断層の主断層の断層破碎物質について K-Ar 年代を測定した (図 2.26、表 2.14)。NFD-1-S3 孔では、断層破碎物質中の断層のうち特に平滑で連続性の良い断層を最新活動面の可能性のある断層として 1 本認定した (F1)。断層破碎物質全体の K-Ar 年代は 4,120 万年前~5,340 万年前を示した。F1 断層付近では 4,120 万年前~4,430 万年前を示した。



NFD-1-S3 (深度 532-533 m)

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) のデータに基づいて編集

図 2.26 ボーリングコアの K-Ar 年代測定結果 (NFD-1-S3: 深度 532-533m)

Figure 2.26 Estimated K-Ar ages from the drilling core (NFD-1-S3: 532-533 m depth).

表 2.14 NFD-1-S3 孔の断層破碎物質の K-Ar 年代測定結果

Table 2.14 K-Ar dating results from gouge samples of Hole NFD-1-S3.

Sample ID	Material	Grain size (μm)	K (%)	Rad. ⁴⁰ Ar (%)	Age (Ma)	Error (Ma)
NFD-1-S3-532-1	Gouge	<2	2.55	71.58	42.8	1.0
NFD-1-S3-532-2	Gouge	<2	1.90	49.09	42.3	1.4
NFD-1-S3-532-3	Gouge	<2	2.53	59.27	41.2	1.2
NFD-1-S3-532-4	Gouge	<2	2.31	58.34	43.5	1.2
NFD-1-S3-532-5	Gouge	<2	2.48	61.79	42.3	1.1
NFD-1-S3-532-6	Gouge	<2	2.70	68.18	44.3	1.1
NFD-1-S3-532-7	Gouge	<2	2.48	66.90	49.2	1.2
NFD-1-S3-532-8	Gouge	<2	1.72	53.69	53.4	1.3
NFD-1-S3-532-10	Gouge	<2	1.63	55.34	57.1	1.5

出典) 国立大学法人京都大学 (2019) ⁶に基づいて編集

2.5 考察

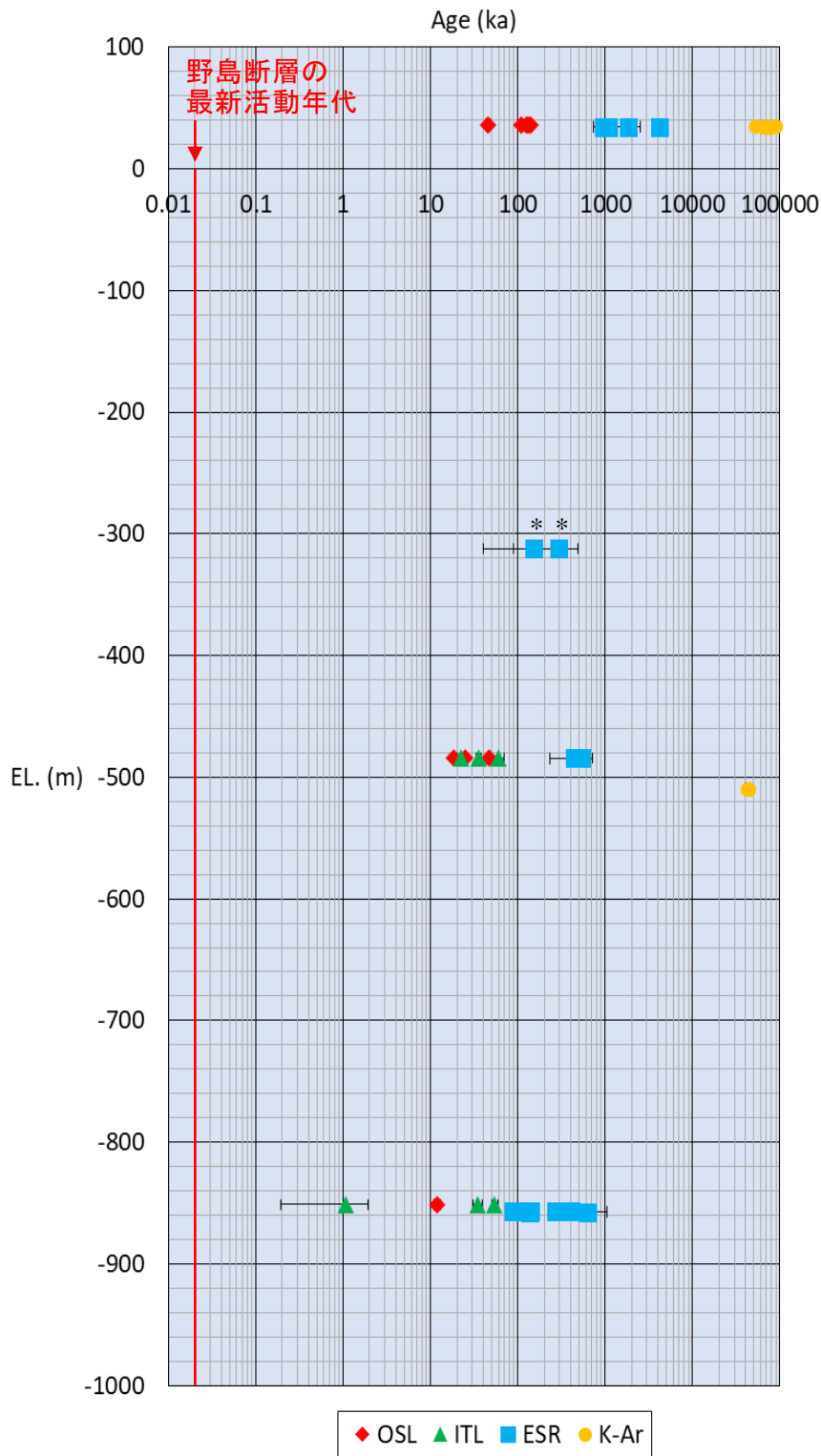
2.5.1 最新活動面における破砕部の各種年代値と深度との関係

野島断層及び浅野断層の破砕部において最新活動時に活動した可能性のある断層の破砕部の年代値は、その他の断層の破砕部の年代値に比べて有意に若い年代値を示すことから、断層活動時により温度が上昇し年代がリセットしたと考えられる。このため、最新活動面の破砕部の各種年代値と深度との関係を整理した（図 2.27、表 2.15）。

最新活動面の破砕部の年代値は、いずれの年代測定手法においても深度が深くなるほど若い年代を示した（図 2.27。）以下に年代測定結果の概要を述べる。

- ① K-Ar 年代測定は、地表部及び深度 532～533 m から得られた試料を用いて実施した。地表部では約 5,150～9,030 約万年前、深度 532～533 m では約 4,120～約 4,430 万年前の年代値を示した。
- ② ESR 年代測定は、断層露頭、深度 506～507 m 及び深度 904～905 m から得られた試料を用いて実施した。また、既往のボーリング調査により採取した最新活動面の破砕部の ESR 年代測定の結果⁶³についても図 2.27 にプロットした。地表部の試料は Al 中心からは約 96 万年前、Al 中心（超微細構造）からは約 186 万年前、モンモリロナイト（Mo）四重信号の B 信号からは約 108 万年前、モンモリロナイト（Mo）四重信号の C 信号からは約 418 万年前の年代値を示した。深度 506-507 m は、Al 中心で約 44.4～約 53.5 万年前の年代値を示した。深度 904～905 m の試料は Al 中心で約 40.6 万年前、Ti 中心で約 8.8 万年前の年代値を示した。既往調査⁶³で採取された深度 388 m の最新活動面の破砕部の ESR 年代値は、約 15～約 29 万年前の年代値が報告されている。
- ③ OSL 年代測定は、地表、深度 506～507 m 及び深度 897～898 m から得られた試料を用いて実施した。地表の試料は約 4.6～13.9 万年前、深度 506～507 m の試料は約 1.9～約 4.7 万年前、深度 897～898 m の試料は約 1.2 万年前を示した。
- ④ ITL 年代測定は、深度 506～507 m 及び深度 897～898 m から得られた試料を用いて実施した。深度 506～507 m の試料は約 2.3～5.9 万年前、深度 897～898 m の試料は 0.1～5.4 万年前の年代値を示した。
- ⑤ ESR の Al 中心の年代値は、深度 506～507m で約 44～約 80 万年前、深度 904～905m で約 23～約 62 万年前と大差がないが、前者は粒径 4～11 μm 、後者は粒径 50～250 μm の石英粒子を対象として年代測定を行っている。既往研究では、細粒であるほど若い年代値を示すことが知られており^{64, 65}、年代値に差がないのは、測定試料の粒径が影響している可能性がある。
- ⑥ 本研究では、K-Ar 年代測定は国立大学法人京都大学、OSL 及び ITL は NCSR が年代測定を行った。一方、ESR の年代測定は、複数の機関がそれぞれ異なる深度の試料を用いて行った。OSL 及び ITL は SAR 法⁴⁸による測定手法が標準となっているが、そ

他の年代測定手法については、定まった測定方法がないため、年代測定手法の差違が年代値の誤差の主要な原因になっている可能性がある。



出典) Miyawaki and Uchida (2020)¹¹を一部編集

図 2.27 最新活動面における破砕部の各種年代値及び深度との関係

Figure 2.27 Age distribution of the latest fault gouges as function of elevation.

注) エラーバーは 1σ を示す。*は Fukuchi (2001)⁶³による ESR 年代。

表 2.15 最新活動面の断層破碎物質から得られた年代測定結果

Table 2.15 Dating results from the main fault gouges.

位置	試料番号	採取深度 (GL. -m)	採取標高*1 (EL. m)	測定対象鉱物*2	測定法	断層年代 (万年)			文献
						年代値	誤差(-)	誤差(+)	
小倉トレンチ	試料⑥	0.77	34.6	qtz, Al-c	ESR	96	22	22	6
小倉トレンチ	試料⑥	0.77	34.6	mo-b	ESR	108	26	26	6
小倉トレンチ	試料⑥	0.77	34.6	qtz, Al-c	ESR	186	63	63	6
小倉トレンチ	試料⑥	0.77	34.6	mo-c	ESR	418	25	25	6
500 m drilling core	0-3mm (0% water, 0%Rn loss)	388.42	-312.0	qtz	ESR	15	11	11	63
500 m drilling core	0-3mm (10% water, 100%Rn loss)	388.42	-312.0	qtz	ESR	29	20	20	63
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G14(F1)	506.56	-484.6	qtz, Al-c	ESR	44.46	20.97	20.97	6
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G01(F3)	506.39	-484.4	qtz, Al-c	ESR	53.55	17.77	17.77	6
NFD-1-S5-904m	S5-07(F1)	904.24	-857.2	qtz, Ti-c	ESR	8.8	1.1	1.3	6
NFD-1-S5-904m	S5-07(F1)	904.24	-857.2	qtz, Al-c	ESR	40.6	5.9	8	6
NFD-1-S5-904m	S5-02(F2)	904.13	-857.1	qtz, Al-c	ESR	27.3	2.6	3.1	6
NFD-1-S5-904m	S5-10(F3)	904.30	-857.3	qtz, Al-c	ESR	62.8	17.5	40.6	6
NFD-1-S5-904m	S5-02(F2)	904.13	-857.1	qtz, Ti-c	ESR	13.9	0.6	0.7	6
NFD-1-S5-904m	S5-10(F3)	904.30	-857.3	qtz, Ti-c	ESR	13.5	1.9	2.3	6
NFD-1-S3-532m	NFD-1-S3 532-3<2(F1)	532.41	-509.4	illite	K-Ar	4120	120	120	6
NFD-1-S3-532m	NFD-1-S3 532-5<2(F1)	532.41	-509.4	illite	K-Ar	4230	110	110	6
NFD-1-S3-532m	NFD-1-S3 532-4<2(F1)	532.41	-509.4	illite	K-Ar	4350	120	120	6
NFD-1-S3-532m	NFD-1-S3 532-6<2(F1)	532.41	-509.4	illite	K-Ar	4430	110	110	6
小倉トレンチ	T1 (gouge) <2	0.03	35.3	illite	K-Ar	5150	130	130	6
小倉トレンチ	L3 (gouge) <0.1	1.65	34.0	illite	K-Ar	6440	360	360	6
小倉トレンチ	L2 (gouge) <2	1.16	34.6	illite	K-Ar	6690	240	240	6
小倉トレンチ	T2 (gouge) <2	0.03	35.3	illite	K-Ar	6790	270	270	6
小倉トレンチ	L3 (gouge) <2	1.65	34.1	illite	K-Ar	7270	300	300	6
小倉トレンチ	L3 (gouge) 2-6	1.65	34.1	illite	K-Ar	7750	240	240	6
小倉トレンチ	R1 (gouge) <2	0.37	34.9	illite	K-Ar	8380	290	290	6
小倉トレンチ	R1 (gouge) 2-6	0.37	34.9	illite	K-Ar	9030	230	230	6
NFD-1-S6-897m	NFD-S6-G08(F2)	897.32	-851.3	qtz	OSL	1.19	0.11	0.11	6
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G-01(F3)	506.39	-484.4	qtz	OSL	1.85	0.13	0.13	6,51
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G-09(F2)	506.48	-484.5	qtz	OSL	2.5	0.17	0.17	6,51
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G-14(F1)	506.56	-484.6	qtz	OSL	4.7	0.32	0.32	6,51
露頭 (小倉地点)	AF-01-01	0.00	36.5	qtz	OSL	4.58	0.3	0.3	6,51
露頭 (小倉地点)	AF-04-02	0.00	36.2	qtz	OSL	10.91	0.7	0.7	6,51
露頭 (小倉地点)	AF-01-02	0.00	36.5	qtz	OSL	13.24	0.9	0.9	6,51
露頭 (小倉地点)	AF-04-01	0.00	36.2	qtz	OSL	13.93	0.89	0.89	6,51
露頭 (小倉地点)	AF-04-03	0.00	36.2	qtz	OSL	12.41	0.78	0.78	6,51
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G-01(F3)	506.39	-484.4	qtz	ITL	2.25	0.22	0.22	6
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G-09(F2)	506.48	-484.5	fld	ITL	3.57	0.26	0.26	6
NFD-1-S1-②-506m	NFD-1-S1-②-G-14(F1)	506.56	-484.6	qtz	ITL	5.91	0.96	0.96	6
NFD-1-S6-897m	NFD-S6-G01(F3)	897.11	-851.1	qtz	ITL	3.492	0.441	0.441	6
NFD-1-S6-897m	NFD-S6-G05(F1)	897.24	-851.2	qtz	ITL	0.106	0.087	0.087	6
NFD-1-S6-897m	NFD-S6-G08(F2)	897.32	-851.3	qtz	ITL	5.407	0.428	0.428	6

*1 断面図からの読み取り値

*2 qrz : 石英、fld : 斜長石、mo : モンモリロナイト

2.5.2 断層破碎物質の年代リセット状況

断層の最新活動時の年代値を得るためには、断層活動時に生じる摩擦熱が、年代のリセットする温度まで上昇する条件が整っている必要がある。地表付近は封圧が低いため断層面に作用するせん断応力は深部に比べて小さいと考えられる。このため、断層が動いても十分な摩擦熱が発生せず、得られた年代値は、実際よりも古い活動年代を示すと考えられる。野島断層の最新活動時期は 1995 年の兵庫県南部地震であり、本研究開始時において地震時からまだ 20 年程度しか経過していない。したがって、断層の最新活動面の年代値はおおむねリセットしているはずであるが、得られた年代測定値は一部を除いて実際よりも古い値を示した。しかし、いずれの年代測定手法も、深度が深くなるほど若い年代を示す傾向が認められた。これは、深部ほど年代リセットの程度が高くなること、言い換えれば深部ほど断層活動時の摩擦熱が高くなることを示している。断層近傍での温度上昇の原因については、①断層摩擦発熱による断層面の極近傍にある岩石の急速な加熱、②断層帯における熱水の移流に伴う熱輸送及び断層帯周辺部の加熱、③断層運動が垂直成分を伴う場合の広域的な加熱及び冷却が知られている（田上ほか、2010）⁶⁶。各深度の断層破碎物質について最新活動面の試料とそれ以外の試料について区分し、それぞれについて年代測定を行った結果、最新活動面付近の断層破碎物質の年代値は、それ以外の断層破碎物質の年代値に比べて有意に若い年代値を示した。また、最新活動面付近の微細構造観察によると、熱水の移流を示唆する鉱物脈等が最新活動面付近に認められなかった。これらのことから、断層近傍でのこの温度上昇の主要な原因は、断層活動時の摩擦により断層面の極近傍の岩石が急速に加熱して生じたものと考えられる。

最新活動面の断層年代は、同じ標高においてルミネッセンス年代測定法(OSL 及び ITL)、ESR 年代測定法、K-Ar 年代測定法の順に若い年代を示した。これらの測定手法間の年代値の違いは、熱に対する感度の違いを反映していると考えられる。熱に対する感度が高いほど低い温度で年代がリセットすることを示唆している。ルミネッセンス年代測定は、他の年代測定手法に比べて有意に熱の感度が高く、数十万年前より若い年代値が得られている。一方、K-Ar 年代測定は、約 4,000 万年前よりも古い年代値しか得られておらず、熱に対する感度は低く最近の断層活動年代は得られていない。ESR 年代測定は約 10 万年前から約 100 万年前の年代値を示し、ルミネッセンス年代よりもやや古い年代値を示している。ルミネッセンスの年代値は、平均的には数万年前程度であり他の年代測定に比べて有意に若い年代値が得られているものの、兵庫県南部地震の年代値（約 20 年前）に比べるとかなり古い。しかし、審査ガイドで要求されている中期更新世以降（約 40 万年前以降）の断層の活動性の有無を評価する手法としては有効な年代手法であるといえる。

以上のように、地下深部での各種年代測定法による年代値の変化の傾向はつかめたが、断層活動時の直接的年代測定手法としては、不完全な年代リセットの影響を加味すると、現状のルミネッセンス年代測定法で深度約 850m の試料を用いて測定しても、数万年オーダーで古い年代値が出ることを考慮する必要がある。

3. 直接的年代測定による断層の活動性評価上の留意点

野島断層で検証した断層の最新活動面における各種年代測定による年代リセット状況を踏まえて、任意の断層の活動性を直接的年代測定により評価する上での留意点を以下に記す。

(1) 想定される年代曲線

審査ガイドでは、将来活動する可能性のある断層等の認定について、「①将来活動する活断層等は、後期更新世以降（約 12～13 万年前以降）の活動が否定できないものとする」と、②その認定に当たって、後期更新世（約 12～13 万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約 40 万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること」を定めている。野島断層での検証結果に基づくと、最新活動面の破砕部の年代値は、いずれも深部に向かって若くなる傾向を示すことが明らかとなった。今後の応用の見通しではあるが、本研究で対象とした年代測定手法を用いて推定した年代値と深度との関係は、図 3.1 に示す 3 つのケースが想定される。ケース①及びケース②に示すように、地表部又は地下深部において最新活動面の年代値が約 40 万年前より若い値を示す断層については、審査ガイドに従うと将来活動する可能性のある断層等に該当することになる。ケース②及びケース③は、ともに地表部で約 40 万年前より古い値を示すが、地下深部で約 40 万年前以降の年代値を示すかどうかは、異なる深度の最新活動面の年代値を測定して判断する。一方、ケース①では、地表部において審査ガイドに示す将来活動する可能性のある断層等に該当しており、最新活動面の年代値が深部に向かって若くなる傾向を考慮すれば、深部の年代を測定する必要はない。

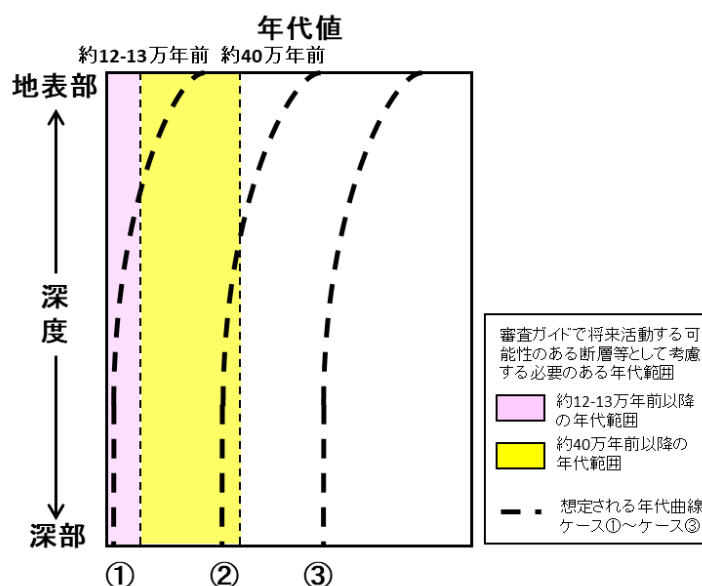


図 3.1 想定される破砕部の年代値及び深度との関係

Figure 3.1 Inferred age distributions of fault gouges as function of elevation.

(2) 年代測定手法の選定

野島断層では、同じ深度の試料でも年代測定手法の違いによって異なる年代値を示すことが分かった。これは、各種の年代測定手法において、熱に対する感度の違い及び測定可能な年代範囲について適用限界があることを示している。したがって、年代測定法の選定に当たっては、中期更新世以降の年代を測定することができる適切な年代測定手法を選定する必要がある。石英を用いた OSL 年代測定による測定可能範囲は、一般に数 10 年から 20 万年程度とされているが、長石を用いた赤色 OSL の場合、約 1～約 2Ma まで適用可能とされている⁵³。本研究では、石英を用いた OSL 年代測定において、約 1～約 14 万年前の年代値が得られた。TL 年代測定の測定可能範囲は、一般に数 100 年から数十万年とされているが⁶⁷、本研究で用いた ITL 年代測定では、条件がよければ約 1.5～約 3Ma 程度まで適応可能とされている⁵³。本研究では、石英を用いた ITL 年代測定において、約 0.1～約 17 万年前の年代値が得られた。ESR 年代測定の測定可能範囲は、数万年から 100 万年程度とされているが¹⁷、本研究では、地表部で約 100 万年前、深度約 850m で数十万年前を示し、実際の断層活動年代よりも古い値を示していることから、審査ガイドが要求している中期更新世以降（約 40 万年前以降）の断層の活動性を精度よく求めることは、現状の技術レベルでは困難であると考えられる。K-Ar 年代測定は、野島断層で約 4,000 万年前より古い年代値しか得られておらず、中期更新世以降の断層の直接的な活動年代の評価には適していない年代測定手法と言える。以上より、中期更新世以降の断層の活動性評価に適した年代測定手法は、OSL 及び TL が挙げられるが、野島断層での深度約 850m の断層試料の年代測定結果からは、数万年オーダーで古い年代値を示すことを考慮する必要がある。

(3) 試料採取位置の選定

断層破碎物質の年代値は深部に向かって若くなる傾向があるため、地表部での年代値が審査ガイドで要求している中期更新世以降（約 40 万年前以降）より古い値を示す場合には、地下深部の断層試料を採取して深度に応じた年代値の変化を確かめる必要がある。年代測定用の試料の採取深度は、定常的な年代値（すなわち実際に断層が活動した年代値）を確認できる深度までとし、当該区間において複数の異なる深度の試料を採取する。また、年代値の若返りは、地熱等の影響でも生じるため、断層変位による年代値の若返りであるかどうか確認する。一般に断層活動時の変形集中域の幅は、数 mm から 10 数 mm と狭いことが知られており⁶⁸、断層の摩擦発熱によって温度が上昇する範囲も変形集中域（すなわち最新活動面）に限定される^{69, 70}。最新活動面付近の試料は周囲に比べて年代リセットの割合が高くなり最も若い年代値を示すと考えられる。断層の最新活動面は、一般に、シャープで連続性があり全体の構造を切断する特徴がある^{71, 72}。最新活動面が通過する可能性のある前後 1m 程度の区間を数 mm～数 cm の間隔で連続的に試料採取し、それぞれの試料について年代測定を行い、最新活動面付近の試料が最も若い年代を示しているか確認する。もし、そのようになっていない場合は、①最新活動面の見落とし、②不完全な年代リ

セット、③測定可能な年代上限値の超過、④地熱による年代値の若返りの可能性がある。①では、破碎部の構造は不均質であり、必ずしも典型的な部分を見出すことができない。このような場合、最新活動面の可能性のある断層を複数本選定するか試料選定区間を広げる。②では、地表付近の試料は封圧が低いために断層が動いても摩擦熱が十分に上がらない可能性がある。その場合、より深部の断層試料を採取して年代値の変化を確認する。③では、使用した年代測定手法による年代値が十分に飽和していることを示すとともに、より古い年代値を測定することが可能な年代測定手法を適用する。④では、地温が断層活動時の摩擦熱よりも高くなっている可能性がある。地熱地帯のように地温が著しく高い地域では本手法を適用することはできない。

(4) 年代測定試料の粒径

ESR 及び TL は、細粒なものほどリセットしやすく若い年代値を示すことが知られている^{21, 64, 65, 73}。本研究で OSL 及び TL の測定に用いた石英粒子の粒径は 4~11 μm であり、通常の年代測定に用いる粒径 (100~200 μm)⁵³ よりも細粒なものを用いた。したがって、本研究で用いた粒径よりも粗粒の石英粒子を用いた場合には、より古い年代値を示す可能性がある。異なる粒径の石英粒子を用いて年代値を求めた場合には、あるサイズ以下の粒径で一定の値を示す年代値 (プラト年代) を採用することが望ましい^{21, 64, 65}。

(5) 試料の取扱い方法

OSL 及び TL は、熱で年代がリセットするだけでなく光でも年代がリセットする。露頭面での試料採取は単管パイプや暗幕を用いて試料を採取する。ボーリングコアの場合、コアチューブから試料を取り出す段階から暗室もしくは赤色光下で作業する (詳細な手順は 2.4.1(1)を参照)。

(6) 適用範囲

本技術報告で検討する断層破碎物質を用いた断層の年代測定手法は、兵庫県南部地震で活動した野島断層を対象として検証したものであり、同様の活動性及び地質を有する断層に対して適用可能である。しかし、野島断層に比べて 1 回の変位量が小さい断層、周辺の地質条件が異なる断層、地温勾配が著しく高い地域においては、年代測定を行う条件も変わるため、これらの断層の活動性を評価する場合においては、断層破碎物質の性状及び断層のテクトニクス的背景を踏まえ、科学的合理性を判断した上で、断層の活動性を評価する。

4. 結論及び今後の課題

本技術報告では、断層破砕物質を用いた年代測定に基づく断層の活動性評価に関する検証を行った。1995年の兵庫県南部地震で活動した野島断層を対象に、トレンチ調査及び深部ボーリング調査によって異なる深度の断層試料を採取し、各試料について各種の年代測定を実施し、年代のリセット状況を検証した。その結果、ルミネッセンス年代測定（OSL、ITL）は、地表部でやや古い活動断層年代を示すものの、比較的浅い深度の断層試料でも中期更新世以降の断層活動の年代測定に有効であることが分かった。得られた知見を以下にまとめる。これらの知見は、審査ガイドを補足する技術情報としても活用できると考える。

- ・採取した主断層の試料について、ルミネッセンス年代測定（OSL、ITL）、ESR年代測定及びK-Ar年代測定を行った。得られた最新活動面の破砕部の年代測定値は実際の最新活動年代よりも古い値を示した。しかし、いずれの年代測定手法も、深度が深くなるほど若い年代を示す傾向が認められた。
- ・各深度の断層破砕物質について最新活動面の試料とそれ以外の試料について区分し、それぞれについて年代測定を行った。その結果、最新活動面付近の断層破砕物質の年代値は、それ以外の断層破砕物質の年代値に比べて有意に若い年代値を示した。
- ・断層近傍での温度上昇の主要な原因は、断層活動時における断層面の極近傍の岩石の急速加熱と考えられる。
- ・最新活動面の断層年代は、同じ深度においてルミネッセンス年代測定法（OSL、ITL）、ESR年代測定法、K-Ar年代測定法の順に若い年代を示した。これらの測定手法間の年代値の違いは、熱に対する感度の違いを反映していると考えられる。熱に対する感度が高いほど低い温度で年代がリセットすることを示唆している。
- ・ルミネッセンス年代測定（OSL、ITL）は、他の年代測定手法に比べて有意に熱の感度が高く、比較的浅い深度でも十数万年前より若い年代値が得られた。
- ・K-Ar年代測定は、約4,000万年前よりも古い年代値しか得られておらず、最近の断層活動年代は得られていない。
- ・ESR年代測定は、約10万年前から約100万年前の年代値を示し、ルミネッセンス年代（OSL、ITL）よりもやや古い年代値を示している。

本技術報告書は、中期更新世以降に活動した断層の年代測定手法を検討するものであるが、本手法をより信頼性の高いものとするためには、以下の技術的課題に取り組んでいくことが重要であると考えられる。

- ・本技術報告において実施した各種年代測定法のリセット状況の検証は、野島断層を対象としたものである。そのため、野島断層と活動性の異なる断層又は周辺の地質条件が異なる断層においても同様の性質があるかどうかを検証する。

- ・ 深度約 500 m 以浅の年代データ数がそれ以深に比べて少ないため、当該深度の年代値に関する深度方向の変化について、特に有意な年代リセットが確認できたルミネッセンス年代を中心に引き続き調査を行い、断層年代の精度を高める。
- ・ 年代測定に用いる試料の粒径が年代値に与える影響を検討する。
- ・ 実際の断層試料を用いた年代リセットの検証のみでなく、高速せん断摩擦試験により摩擦熱と応力状態等との関係を検討し、摩擦熱により年代がリセットされる適切な試料採取深度を求めるためのプロセスを構築する。
- ・ 信頼性の高い断層年代を取得するためには、断層の最新活動面の認定方法についての高度化を進める。
- ・ 断層活動による断層破碎物質の発熱区間は数 mm～10 数 mm 程度であるため、少量の試料でも対応可能な年代測定手法を構築する。
- ・ 野島断層のような最近活動した断層のみでなく、より古い時代に活動した断層についても同様に断層年代の検証を実施する。

参考文献一覧

- 1 原子力規制委員会、“敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド”、原管地発第 1306191 号、2013.
- 2 石渡明、“鉍物脈法による断層活動性評価について”、日本地質学会第 123 年学術大会講演要旨、165、R23-O-3、2016.
- 3 国立大学法人京都大学、“平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（野島断層における深部ボーリング調査）事業 報告書”、2017.
- 4 国立大学法人京都大学、“平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（ボーリングコアを用いた断層破碎物質の分析）事業 報告書”、2018.
- 5 国立大学法人京都大学、“平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（追加ボーリングコアを用いた断層破碎物質の分析）事業 報告書”、2018.
- 6 国立大学法人京都大学、“平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（断層破碎物質を用いた断層活動性評価手法に係る総合検討）事業 報告書”、2019.
- 7 宮脇昌弘、内田淳一、“断層の活動性評価手法を構築するための破碎帯掘削プロジェクトの概要”、日本地球惑星科学連合 連合大会 2015 年大会、MIS32-15、2015.
- 8 Miyawaki, M., and Uchida, J., “Development of evaluation method for fault activity from fault gouges”, American Geophysical Union (AGU) 2016 Fall Meeting, T43D-3070, USA, 2016.
- 9 Miyawaki, M., Uchida, J., and Satsukawa, T., “Development of direct dating methods of fault gouges: Deep drilling into Nojima Fault, Japan”, American Geophysical Union (AGU) 2017 Fall Meeting, T21C-0568, USA, 2017.
- 10 Miyawaki, M., and Uchida, J., “Towards understanding the direct dating of coseismic fault slip events”, American Geophysical Union (AGU) 2018 Fall Meeting, T23D-0401, USA, 2018.
- 11 Miyawaki, M., and Uchida, J., “Validation of the direct dating of coseismic fault slip events along the Nojima fault”, Hokudan 2020 International Symposium on Active Faulting, Hokudan earthquake memorial park, Awaji city, 2020.
- 12 Lyons, J., and Snellenburg, J., “Dating Faults”, Geological Society of America Bulletin, 87, 749-1752, 1971.
- 13 Zwingmann, H., Yamada, K., and Tagami, T., “Timing of brittle deformation within the Nojima fault zone, Japan”, Chemical Geology, 275, 176-185, 2010.
- 14 高木秀雄、柴田賢、“断層ガウジの K-Ar 年代測定—中央構造線における例”、地質学論集、40、31-38、1992.
- 15 安江健一、浅森浩一、丹羽正和、花室孝広、國分（齋藤）陽子、末岡茂、幕内歩、生田正文、松原章浩、田村肇、小堀和雄、石丸恒存、梅田浩司、“地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書（平成 24 年度）”、JAEA-Research 2013-047、2013.
- 16 Ikeya, M., Miki T., and Tanaka, K. “Dating of a fault by electron spin resonance on intrafault materials”, Science, 215, 4538, 1392-1393, 1982.

- 17 福地龍郎、“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、2004.
- 18 林愛明、“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、1989.
- 19 Singhvi, A. K., Banerjee, D., Pande, K., Gogte, V., and Valdiya, K. S., “Luminescence studies on neotectonic events in south-central Kumaun Himalaya - a feasibility study”, *Quaternary Science Reviews*, 13, 595-600, 1994.
- 20 Banerjee, D., Singhvi, A., Pande, K., Gogte, V., and Chandra, B., “Towards a direct dating of fault gouges using luminescence dating techniques – Methodological aspects”, *Current Science*, 77, 256-268, 1999.
- 21 Rink, W. J., Toyoda, S., Rees-Jones, J., Schwarcz, H. P., “Thermal activation of OSL as a geothermometer for quartz grain heating during fault movements”, *Radiation Measurements*, 30, 97-105, 1999.
- 22 Kim, J. H., Ree, J. H., Choi, J. H., Chauhan, N., Hirose, T., and Kitamura, M., “ Experimental investigations on dating the last earthquake event using OSL signals of quartz from fault gouges”, *Tectonophysics*, 769, 228191, 2019.
- 23 Yang, H. L., Chen, J., Yao, L., Liu, C. R., Shimamoto, T., and Thompson Jobe, J. A., “ Resetting of OSL/TL/ESR signals by frictional heating in experimentally sheared quartz gouge at seismic slip rates”, *Quaternary Geochronology*, 49, 52-56, 2020.
- 24 Oohashi, K., Minomo, Y., Akasegawa, K., Hasebe, N., and Miura, K., “ Optically stimulated luminescence signal resetting of quartz gouge during subseismic to seismic frictional sliding: a case study using granite-derived quartz”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB019900, 2020.
- 25 鷹澤好博、高橋智佳史、三浦知督、清水聡、“光ルミネッセンスと熱ルミネッセンスを利用した活断層破碎帯の年代測定法”、地質学雑誌、119、714-726、2013.
- 26 Lin, A., and Nishiwaki, T., “Repeated seismic slipping events recorded in a fault gouge zone: evidence from the Nojima Fault drill holes, SW Japan”, *Geophysical Research Letters*, 46, 1276-1283, 2019.
- 27 Nishiwaki, T., Lin, A., and Lin, W., “Recovery of stress during the interseismic period around the seismogenic fault of the 1995 Mw 6.9 Kobe earthquake, Japan”, *Geophysical Research Letters*, 45, 12814-12820, 2018.
- 28 国土地理院、“電子国土 Web”、2016. <http://maps.gsi.go.jp> (2020年1月14日確認)
- 29 栗田泰夫、水野清秀、“兵庫県南部地震に伴う地震断層ストリップマップー野島・小倉及び灘川地震断層、1:10,000”、構造図、地質調査所、12、74p.、1998.

- 30 吉川周作、宮地良典、三田村宗樹、水野清秀、加藤茂弘、竹村恵二、植村善博、古山勝彦、寒川旭、里口保文、“新生界 4.2 第四系”、日本地方地質誌 5 近畿地方、211-263、朝倉書店、2009.
- 31 柚原雅樹、高橋浩、加々美寛雄、“淡路島の花崗岩類の Rb-Sr 全岩アイソクロン年代と起源物質”、地質調査所月報、49、477-491、1998.
- 32 高木秀雄、小林健太、坂幸恭、加藤潔、松田達生、江原宏幸、“野島地震断層に形成された鏡肌と条線の姿勢と組織”、構造地質、41、1-15、1996.
- 33 大槻憲四郎、皆川潤、青野正夫、大竹政和、“兵庫県南部地震時に刻まれた野島断層の湾曲した断層条線について”、地震 第2輯、49、451-460、1997.
- 34 山本裕雄、栗田裕司、松原尚志、“兵庫県淡路島北部の第三系岩屋層から産出した始新世石灰質ナンノ渦鞭毛藻化石とその意義”、地質学雑誌、106、379-382、2009.
- 35 久富邦彦、尾崎正紀、古山勝彦、前島渉、山元孝広、吉田史郎、佐藤隆春、室生団体研究グループ、和田穰隆、“新生界 4.1 第三系”、日本地方地質誌 5 近畿地方、193-210、朝倉書店、2009.
- 36 Lin, A., “Seismic slip recorded by fluidized ultracataclastic veins formed in a coseismic shear zone during 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake”, *Geology*, 39, 547-550, 2011.
- 37 Jackson, M. L., Savin, M., and Clayton, R. N., “Hexafluorosilicic acid reagent modification for quartz isolation”, *Soil Science Society of America Journal*, 40, 958-960, 1978.
- 38 Ree-Jones, J., “Optical dating of young sediments using fine grain quartz”, *Ancient TL*, 13, 9-14, 1995.
- 39 Zhang, Z., Hou, S., and Yi, S., “The first luminescence dating of Tibetan glacier basal sediment”, *The Cryosphere*, 12, 163-168, 2018.
- 40 Tsakalos, E., Christodoulakis, J., and Charalambous, L., “The dose rate calculator (DRc)-A Java application for dose rate and age determination based on luminescence and ESR dating”, *Archaeometry*, 58, 347-352, 2016.
- 41 Guérin, G., Mercier, N., and Adamiec, G., “Dose-rate conversion factors: update”, *Ancient TL*, 29, 5-8, 2011.
- 42 Aitken, M., “Thermoluminescence dating”, Academic Press, 359p., 1985.
- 43 Nathan, R. P., and Mauz, B., “On the dose-rate estimate of carbonate-rich sediments for trapped charge dating”, *Radiation Measurements*, 43, 14-25, 2008.
- 44 Guérin, G., and Mercier, N., “Preliminary insight into dose deposition processes in sedimentary media on a scale of single grains: Monte Carlo modelling of the effect of water on the gamma dose rate”, *Radiation Measurements*, 47, 541-547, 2012.
- 45 Prescott, J. R., and Stephan, L. G., “The contribution of cosmic radiation to the environmental dose for thermoluminescent dating, attitude, altitude and depth dependences”, *Council of Europe Journal PACT*, 6, 17-25, 1982.

- 46 Prescott, J. R., and Hutton, J. T., “Cosmic ray and gamma ray dosimetry for TL and ESR”, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 14, 223–227, 1988.
- 47 Prescott, J. R., and Hutton, J. T. “Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations”, *Radiation Measurements*, 23, 497-500, 1994.
- 48 Murray, A. S., and Wintle, A. G., “Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol”, *Radiation Measurement*, 32, 57–73, 2000.
- 49 Fuchs, M., and Wagner, G. A., “Recognition of insufficient bleaching by small aliquots of quartz for reconstructing soil erosion in Greece”, *Quaternary Science Reviews*, 96, 595–605. 2003.
- 50 Hansen, V., Murray, A., Buylaert, J.-P., Yeo, E.-Y., and Thomsen, K., “A new irradiated quartz for beta source calibration”, *Radiation Measurements*, 8, 1123–127, 2015.
- 51 Tsakalos, E., Lin, A., Kazantzaki, M., Bassiakos, Y., Nishiwaki, T., and Filippaki, E., “Absolute dating of past seismic events using the Optically Stimulated Luminescence (OSL) technique on fault gouge material-A case study of the Nojima Fault Zone, SW Japan”, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 125, e2019JB019257, 2020.
- 52 Murray, A. S., and Wintle, A. G., “The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability”, *Radiation Measurement*, 37, 377–381, 2003.
- 53 塚本すみ子、岩田修二、“ルミネッセンス年代測定法の最近の進歩—適用年代の拡大と石英の OSL 成分について—”, *地質学雑誌*, 111, 43-653, 2005.
- 54 Bulur, E., “An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment”, *Radiation Measurements*, 26, 701–709, 1996.
- 55 Shitaoka, Y., Maemoku, H., and Nagatomo, T., “Quartz OSL dating of sand dunes in Ghaggar basin, northwestern India”, *Geochronometria*, 39, 221-226, 2012.
- 56 Uchida, A., Toyoda, S., Ishibashi, J., and Nakai, S., “²²⁶Ra-210Pb and ²²⁸Ra-²²⁸Th dating of barite in submarine hydrothermal sulfide deposits collected at the Okinawa Trough and the Southern Mariana Trough”, In, Ishibashi, J., Okino, K., and Sunamura, M., eds., *Subseafloor Biosphere Linked to Global Hydrothermal Systems; TAIGA Concept*, Springer, Tokyo, 607-615, 2015.
- 57 Mejdahl, V., “Thermoluminescence dating: Beta-dose attenuation in quartz grain”, *Archaeometry*, 21, 61-72, 1979.
- 58 Adamiec, G., and Aitken M., “Dose-rate conversion factors: update”, *Ancient TL*, 16, 37–50, 1998.
- 59 Dalrymple, G. B., and Lanphere, M. A., “Potassium - Argon Dating: Principles, Techniques and Applications to Geochronology”, W. H. Freeman and Company, 258p., 1969.

- 60 McDougall, I., and Harrison, M., “Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method, 2nd ed”, Oxford University Press, Oxford, 269p., 1999.
- 61 Bonhomme, M. G., Thuizat, R., Pinault, Y., Clauer, N., Wendling, R., and Winkler, R., “Methodé de Datation Potassium - Argon: Appareillage et Technique”, Université Louis Pasteur, 53p., 1975.
- 62 Steiger, R. H., and Jäger, E., “Subcommission on Geochronology: Convention on the use of decay constants in geo - and cosmochronology”, Earth and Planetary Science Letters, 36, 359–362, 1977.
- 63 Fukuchi, T., “Assessment of fault activity by ESR dating of fault gouge; an example of the 500 m core samples drilled into the Nojima earthquake fault in Japan”, Quaternary Science Reviews, 20, 1005-1008, 2001.
- 64 Buhay, W. M., Schwarcz, H. P., and Grün, R., “ESR dating of fault gouge: The effect of grain size”, Quaternary Science reviews, 7, 515-522, 1998.
- 65 Lee, H. K., and Schwarcz, H. P., “ESR plateau dating of fault gouge”, Quaternary Science reviews, 13, 629-634, 1994.
- 66 田上高広、渡辺裕美子、板谷徹丸、“地震断層の年代学－最近の新展開と今後の展望－”、海洋出版、32編、3-9、2010.
- 67 北沢俊幸、八幡崇、伊藤成樹、橋本哲夫、“ルミネッセンス (TL/OSL) 自動測定システム装備の小型 X 線照射装置の線量率校正”、地球環境研究、13、11-16、2013.
- 68 嶋本利彦、広瀬丈洋、溝口一生、野田博之、“断層の高速摩擦と地震の発生過程－現状と展望－”、地学雑誌、112、979-999、2003.
- 69 Murakami, M., and Tagami, T., “Dating pseudotachylyte of the Nojima fault using the zircon fission-track method”, Geophysical Research Letters, 31, L12604, 2004.
- 70 Tagami, T., “Thermochronological investigation of fault zones”, Tectonophysics, 538–540, 67–85, 2012.
- 71 相山光太郎、田中姿郎、佐々木俊法、“断層破砕帯の詳細構造解析に基づく断層の活動性の検討－山田断層の例－”、応用地質、58、2-18、2017.
- 72 田中義浩、亀高正男、岡崎和彦、鈴木一成、瀬下和芳、青木和弘、島田耕史、渡邊貴央、中山一彦、“断層面の形態観察に基づく断層活動性評価手法の検討”、応用地質、59、13-27、2018.
- 73 Hiraga, S., and Nagatomo, T., “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, 17-25, 1995.

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門

宮脇 昌弘 技術研究調査官

内田 淳一 主任技術研究調査官