

断層の K-Ar 年代学

田村 肇¹⁾・佐藤 佳子^{2) 3)}

要旨 本稿では、断層試料に対する K-Ar 年代測定法の適用について解説する。断層活動の年代測定の対象となる試料として、シュードタキライトと断層ガウジ中の自生イライトが注目されている。しかしいずれも、試料の処理や得られた年代の解釈に課題があり、未だ試行錯誤の段階にあるといつてよい。シュードタキライトの分析を行う際は、レーザー融解法による ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定のようなスポット分析により、断層活動に伴う摩擦溶融によってシュードタキライトが生成する際に十分に融解し、大気と平衡になった部分を選択的に分析することが重要であると言える。断層ガウジ中の自生イライトを分析する際は、1 マイクロメートル程度の細粒な試料を得たうえで、含まれているイライトが自生のものであるかどうかについて、電子顕微鏡による観察や粉末 X 線回折法により検討することが重要である。

キーワード：断層，K-Ar 年代測定，シュードタキライト，イライト

1. はじめに

断層活動の年代を知ることは、断層の活動状況を知るために必要不可欠である。断層活動の年代は、一般に年代が既知の地層を断層が切っているかどうかで判断する。断層がある地層を切っていれば、その地層ができた後に断層活動が起こっていると判断され、断層より上位の地層を切っていなければ、断層活動はその地層ができる以前のものと推定する（狩野・村田，1998）。

問題は年代既知の地層を参照できない場合である。

たとえばボーリングコアや坑道内に断層を発見した場合、断層のごく一部しか観察できないために、断層が特定の地層を切っているかどうかを判断できない。こうした場合、放射年代やルミネセンス年代によって断層活動年代を制約する必要がある。また断層活動とそれに伴う熱史を知ろうとすれば、熱年代学的手法を駆使する必要がある。一方ボーリングコア中に発見された断層のように試料の量が限られる場合、含まれる鉱物も限られたものとなり、年代測定法の選択の余地が非常に限られたものとなることもある。

断層活動によって生成するガラス・鉱物等がある場

Engineering Geology of Japan, No. 3, 21-25 (2013)

K-Ar geochronology of fault.

Hajimu Tamura¹⁾ and Keiko Sato^{2) 3)}

tamura.hajimu@jaea.go.jp

¹⁾ Neotectonics Research Group, Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
959-31 Jorinji, Izumi, Toki, Gifu 509-5102 Japan

²⁾ Submarine Resources Research Project, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
2-15 Natsushimacho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061 Japan

³⁾ Research Institute of Natural Sciences, Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005 Japan

¹⁾ 独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット自然現象研究グループ
〒 509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

²⁾ 独立行政法人海洋研究開発機構 海底資源研究プロジェクト
〒 237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

³⁾ 岡山理科大学 自然科学研究所
〒 700-0005 岡山県岡山市北区理大町 1-1

合は、その年代を測ることで断層活動の時期を得ることができる。断層が動く際の摩擦溶融によって発生するシュードタキライトは、有望な分析対象である（例えば、Tagami and Murakami, 2005）。

断層活動による生成物として、単に破壊によって作られる破碎生成物がある。これは摩擦熱の影響が少ないため、断層の年代を決めるためには使うことができない。一方断層ができた場所がある程度地下であれば、熱水が断層に入ってくるものがしばしばあり、そうした条件でできる粘土鉱物の年代がわかれば、断層活動年代を与えることができる。たとえば100~200℃程度の温度条件で生成するイライトが、断層ガウジにしばしば見られる。このイライトの年代は、断層ガウジの年代を与えると考えられている（Lyon and Snellenberg, 1971; van der Pluijm *et al.*, 2001; Srodon *et al.*, 2002）。

しかし、シュードタキライトであれ断層ガウジ中の自生イライトであれ、破碎生成物と入り混じっており、分析対象となる生成物のみを取り出すことが難しい場合が多く、年代を決定するには技術的工夫が必要である。本稿では、K-Ar年代測定（ ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定を含む）に焦点を当て、シュードタキライトのK-Ar年代測定に関わる技術的な工夫と、イライトのK-Ar年代の解析モデルについて紹介する。

2. シュードタキライトのK-Ar年代測定

Sibson (1973) は、断層が高速で滑ることにより発生する摩擦溶融の温度が1000℃を越えることを示した。こうしてできるシュードタキライトはガラス質の脈である（Jeffreys, 1942）。しかし、母岩が破碎されてできた岩片を少なからず含んでいる。シュードタキライトのガラス質の部分はK-Ar年代測定法が適用できる可能性があるが、ガラス部分のみの年代を得るために、近年技術的工夫がなされてきた。

Kelley *et al.* (1994) は、レーザー融解法によりシュードタキライト研磨岩片のスポット ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代を得た。彼らはシュードタキライトと母岩である片麻岩の境界部を厚さ0.5 mmにスライスし、片面を研磨した上で中性子照射し、連続波モードのNd-YAGレーザーにより局所を融解してアルゴンを抽出した。Magloughlin *et al.* (2001) は同様にシュードタキライト研磨岩片のスポット ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定を行うとともに、細粒の試料や表面の局所分析に際して中性子照射中の反跳現象による ^{39}Ar の損失や獲得が問題となる点について、細粒試料を用いたマイクロカプセル法（Foland *et al.*, 1992）を組み合わせることでこれを評

価し、細粒試料から得られる保持年代（Dong *et al.*, 1995）がスポット ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代と整合することを示した。マイクロカプセル法は、真空のガラスアンブル内に試料を封じ込め、そのまま中性子照射し、測定の最初にアンブルを割って、アンブル中に保持されていた、試料から放出されたアルゴンを分析するというものである。Dong *et al.* (1995) は、反跳現象による ^{39}Ar の損失はカリウムが結晶構造中に確保されていないサイトについてのみに起こると考え、試料から放出された ^{39}Ar の量の評価に基づいて、常温で保持されているアルゴンから計算される保持年代（retention age）を提案している。Magloughlin *et al.* (2001) は、破碎岩片は摩擦によって脱ガスしていないが比較的粗粒であり、細粒部分を取り出せば岩片からの影響を取り除くことができることも論じている。

Di Vincenzo *et al.* (2004) は、赤外レーザーによる段階加熱法と紫外レーザーアブレーション法によって得られたスポット ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代に基づいて、ガラス質基質においても母岩からの影響が見られることを示した。Kelley *et al.* (1994) が強いレーザーを当てることで測定点を融解するまで加熱していたのに対し、彼らはレーザーの強度を段階的に変え、融解するまでの各加熱段階で放出されたガスを分析するレーザー段階加熱法を採用し、通常の段階加熱法による ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定と同様の年代スペクトルを得ること、また各加熱段階でのアルゴン同位体組成や年代値を比較検討することを可能とした。彼らは、低温の加熱段階と高温の加熱段階で初生 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比が異なることをアイソクロムプロットから示し、破碎岩片から脱ガスしたアルゴンによる基質の汚染の可能性を論じている。

Kelley *et al.* (1994) や Di Vincenzo *et al.* (2004) は、天然のシュードタキライト試料を分析し、得られた年代の妥当性を検討している。一方シュードタキライトの生成条件を探るため、人工的に摩擦溶融を起こし、摩擦力の時間的変化や摩擦面周辺の状況を検討することが行われてきた（例えば、Spray, 1987）。Sato *et al.* (2009) は、はんれい岩類試料の高速摩擦溶融実験によって作製したガラス質脈をシュードタキライトに見立て、レーザー融解法でスポットAr分析した。中心部の十分融解したガラス質基質では、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比が大気に近い値となった。その一方で摩擦溶融により変成を受けた破碎部や破碎部と母岩の境界にかけて、年代の若返りが見られたほか、逆に年代が古くなる例も見られたと報告している。彼らは他の希ガス元素についてもスポット分析を行っており、摩擦面に近い部分ほど外部からガスが入り込んで大気と平衡になった組成を示す一方、中間部のガラス質脈周縁部や破碎帯では

母岩からのガスの濃集が見られると論じている。このことによって彼らは、試料の吟味を慎重に行い、摩擦面の十分溶融したガラス質基質を対象とすることで、伝統的な (conventional) K-Ar 年代測定法が適用できる可能性を示している。分析の際見られた年代の若返りの原因として、彼らは飛散した溶融ガラスや岩片を原子吸光により分析し、アルゴンの同位体組成が大気と平衡になることのほかに、融解した物質へのカリウムの濃集が影響していることも示した。同様に年代が古くなる現象については、脱ガスの際、質量数の小さい同位体ほど移動性が高いことによる質量分別の結果と判断している。

以上のように、シュードタキライトに K-Ar 年代 (^{40}Ar - ^{39}Ar 年代を含む) 測定法を適用する際には、ガラス化した部分のうち脈の中心に近いところから、ガラス質基質を選ぶことが不可欠である。そのための手段としてはレーザー融解法による ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定法が便利と言えるが、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定法を用いずとも、ガラス質の部分に粒子として抽出することで、レーザーで微小試料を融解して Ar を分析し、融解した試料を回収してカリウムを分析するレーザー K-Ar 年代測定法 (佐藤ほか, 2008) が適用できると考えられる。またそのようなガラス質粒子を十分回収できれば、レーザーを用いない伝統的な測定法も適用できる可能性がある。摩擦面でのメルトの挙動のような基礎データを収集するためには、摩擦溶融実験とレーザー融解法によるスポット希ガス分析が有用であろう。

しかし一方でシュードタキライトを対象とした年代測定には、シュードタキライトを含む試料の採取が困難という問題がある。シュードタキライトは、比較的深部 (たとえば 7km) での大きな断層活動 (滑り速度毎秒 10~100cm) によってのみ生成される (Sibson, 1973)。そのため地表で観察されることは希である。しかしながら、シュードタキライトは断層活動の直接的な生成物であり、採取できれば断層活動の年代の直接決定を期待できる。

3. イライトの K-Ar 年代

粘土鉱物のうちイライトは、粘土鉱物としては高温で生成するため、これを用いて断層ガウジの K-Ar 年代を測ろうとする試みが古くから行われてきた (Lyons and Snellenburg, 1971)。日本でも、中央構造線の断層ガウジを端緒として、1980 年代後半から適用例がある (柴田・高木, 1988; 柴田ほか, 1988, 1989; 山田ほか, 1992; Tanaka *et al.*, 1995; Takagi *et al.*, 2005;

Zwingmann *et al.*, 2010b)。イライト K-Ar 年代の測定手法のうち、試料調製法はほぼ定式化されている。堆積岩・断層ガウジなどから、含まれているイライトのみを取り出す方法だが、イライトの結晶が細かいことを利用し、試料を粉碎した上で、水簸、遠心分離機などを用いて試料を 1 μm 前後の数フラクションに分けるという手法が用いられている (Lyons and Snellenburg, 1971; Liewig *et al.*, 1987; 柴田・高木, 1988; Pecskey *et al.*, 2005; Takagi *et al.*, 2005; Zwingmann and Mancktelow, 2004; Zwingmann *et al.*, 2010b)。試料の粉碎の際、碎屑性の粒子を粉碎して細粒のフラクションを汚染することがないように、凍結と融解を繰り返して、集合した細粒の粒子を徐々に剥がす (Liewig *et al.*, 1987; Zwingmann and Mancktelow, 2004)。こうしていくつかの粒度のフラクションを得るが、細粒のフラクションにおいてもイライトとスメクタイトが組み合わさって結晶を作っている場合があるほか、堆積岩中の断層の場合、断層ガウジ中に自生したイライト以外にも、母岩中にイライトが存在しており、それが碎屑物として混入している可能性がある (Pevear, 1992)。各フラクションを粉末 X 線回折にかけ、鉱物組成を把握することが必要である。

イライト年代の難しさは、得られた年代の解釈にある。Pevear (1992, 1994, 1999) は、堆積岩のイライト年代を解釈する上で、細粒のフラクションほど若い年代値が出る傾向を指摘した。彼はイライトのポリタイプのうち、 $2M_1$ と $1M_d$ の量比を、粉末 X 線回折のスペクトル (XRD スペクトル) を解析することによって割り出し、これと年代値が比例することに基づいて、より低温で生成する $1M_d$ を自生のイライト、高温で生成する $2M_1$ を碎屑性のイライト (もしくは白雲母など) と考えた。粒度によって分けた複数のフラクションについて $2M_1:1M_d$ 比と K-Ar 年代測定を行い、 $1M_d$ が 100% となる回帰直線の切片を求め、その年代値を自生イライトの生成年代として提案している (イライト年代解析:IAA)。van der Pluijm *et al.* (2001) はこの手法を、マイクロカプセル法 (Foland *et al.*, 1992) による ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定と組み合わせ断層ガウジに適用している。 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定法を用いて年代スペクトルを示すことで、得られる年代値が複数の年代の混合したものであることを示し、IAA によって、混合している年代が比較的粗粒 (2-0.2 μm) の碎屑性イライトの年代と細粒 (0.02 μm 以下) の自生イライトの年代であると主張した。Zwingmann and Mancktelow (2004) は、SEM および TEM によるイライト結晶の形状観察から結晶の形状が六角形の自形であることを示し、この形を示すかどうかでイライトが自生である

かどうかを判断することを提案している。Takagi *et al.* (2005) はイライトのポリタイプ解析を行った上で、跡津川断層と茂住-祐延断層の年代を求めているが、含まれるポリタイプを割り出すことはできたものの、量比を決めるために用いるイライトのピークがXRDスペクトル上で不明瞭であったため、この手法を適用するには至っていない。Takagi *et al.* (2005) はイライトのポリタイプ解析にあたり、Pevear (1999) が行ったXRDスペクトル形状の数値シミュレーションによる解析法ではなく、Togashi (1979) による3.00 Åと3.08 Åのピークの高さの比をとる方法を用いている。またHaines and van der Pluijm (2010) は van der Pluijm *et al.* (2001) と同様にマイクロカプセル法を用いた⁴⁰Ar-³⁹Ar年代測定を行っているが、IAAを行う前に、試料の混合年代を作り出している端成分の数についてXRDスペクトルや年代スペクトルを用いて検討を行っており、例えばXRDスペクトルのシミュレーションを行い、実際のXRDスペクトルと合致するものが二種類の碎屑性イライトを含むという結果を元に、一部のガウジ試料について、IAAには適さないと判定している。Zwingmann *et al.* (2010a) はAlpTransitトンネルから得た試料にIAAを適用して得た2M₁の年代値端成分と母岩から得られた白雲母の年代値を比較し、2M₁の年代値端成分の方が若い値を示すことに基づいて2M₁であっても碎屑性の鉱物粒とは限らないと主張している。Zwingmann *et al.* (2011) は、断層活動が繰り返された場合には二成分系的前提が満たされないことを指摘している。Yamasaki *et al.* (2013) は、本来自生イライトしか存在しないはずの花崗岩体中の断層ガウジについて、1Mと2Mのいずれのポリタイプも検出できたことを報告している。Zwingmann *et al.* (2010a) はまた、より細粒の試料が碎屑性鉱物粒による汚染をより受けにくい傾向を示すことを根拠として、火成岩や変成岩を母岩とする断層ガウジ試料についてはもっとも細粒な試料(彼らの結果においては0.4 μm以下)の伝統的な(conventional) K-Ar年代測定を直接的に適用することが可能と主張している。

以上のように、イライト K-Ar 年代の解釈は未だ決定打といえるものがない状況である。イライト K-Ar 年代は、少なくとも 100°C 程度の熱水活動があったと期待できる場合は測定できる可能性が高いが、碎屑物の混入や熱水活動の熱史について十分配慮した上で用いる必要がある。Zwingmann *et al.* (2004) が行っているように SEM や TEM でイライト結晶の形状を観察し、自生かどうかを判断する必要がある。また少なくともポリタイプ解析を行う必要があり、IAA の適用を検討することも必要である。断層ガウジ試料につい

て IAA が成り立つためにはガウジ中のイライトが単一の自生イライトと碎屑性イライトの二成分混合系であるという前提が満たされる必要があるが、この前提が満たされている場合でも、Zwingmann *et al.* (2010a) が行っているように、母岩に含まれる鉱物と照らし合わせて判断する必要がある。また van der Pluijm *et al.* (2001) のように、伝統的な (conventional) K-Ar 年代測定だけでなく、⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代の総合的な検討と組み合わせることも必要であり、可能ならば層序や他の年代測定法とも組み合わせる用い、年代値を吟味することが望ましい。

4. まとめ

K-Ar 年代測定法による断層活動年代の推定は、未だ試行錯誤の段階にあるとよい。断層活動の年代を与える物質として、シュードタキライトと断層ガウジ中の自生イライトが着目されている。シュードタキライトの年代測定はレーザー融解⁴⁰Ar-³⁹Ar法によってガラス質基質のみの年代を得る見通しがあるのに対し、イライトの年代測定では断層ガウジから自生イライトのみを取り出すことが困難であることから、むしろ得られる年代が混合年代であることを前提として、他の情報、たとえばイライトのポリタイプ解析や結晶形状の観察から、混合年代を総合的に解析できるかどうかは鍵となっている。その一方で、断層活動による生成物としては断層ガウジがシュードタキライトに比べ一般的であり、断層ガウジに広範に適用できる年代測定手法が開発されることが望まれる。

謝辞

粗稿に対し注意深い査読の上建設的な意見を下さった独立行政法人日本原子力研究開発機構の國分陽子博士および尾方伸久博士、岡山理科大学の板谷徹丸教授、株式会社蒜山地質年代学研究所の八木公史博士に深く感謝いたします。

引用文献

- Di Vincenzo, G., Rocchi, S., Rossetti, F. and Storti, F. (2004) ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of pseudotachylytes: the effect of clast-hosted extraneous argon in Cenozoic fault-generated friction melts from the West Antarctic Rift System. *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 349-364.
- Dong, H., Hall, C. M., Peacor, D. R., and Halliday, A. N. (1995) Mechanisms of Argon Retention in Clays Revealed by Laser ⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating. *Science*, **267**, 355-359.
- Foland, K.A., Hubacher, F. A., and Arehart, G. B. (1992)

- $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of very fine-grained samples: An encapsulated-vial procedure to overcome the problem of ^{39}Ar recoil loss. *Chemical Geology*, **102**, 269-276.
- Haines, S.H. and van der Pluijm B. A. (2010) Dating the detachment fault system of the Ruby Mountains, Nevada: Significance for the kinematics of low-angle normal faults. *Tectonics*, **29**, TC4028.
- Jeffreys, H. (1942) On the Mechanics of Faulting. *Geological Magazine*, **79**, 291-295.
- 狩野謙一・村田明広 (1998) 構造地質学. 朝倉書店, 東京, 308p.
- Kelley, S. P., Reddy, S. M. and Maddock, R. (1994) Laser-probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ investigation of a pseudotachylyte and its host rock from the Outer Isles thrust, Scotland. *Geology*, **22**, 443-446.
- Liewig, N., Clauer, N. and Sommer, F. (1987) Rb-Sr and K-Ar dating of clay diagenesis in Jurassic sandstone oil reservoirs, North Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **71**, 1467-1474.
- Lyons, J. B. and Snellenburg, J. (1971) Dating Faults. *Geological Society of America Bulletin*, **82**, 6, 1749-1752.
- Magloughlin, J. F., Hall, C. M., and van der Pluijm, B. A. (2001) $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ geochronometry of pseudotachylytes by vacuum encapsulation: North Cascade Mountains, Washington, USA. *Geology*, **29**, 51-54.
- Pecskay, Z., Molnar, F., Itaya, T. and Zelenka, T. (2005) Geology and K-Ar Ceochronology of Illite from the clay deposit at Fuzerradvany, Tokajmts, Hungary. *Acta Mineralogica et Petrographica*, **46**, 1-7.
- Pevear, D. R. (1992) Illite age analysis, a new tool for basin thermal history analysis. In: Water-Rock Interaction (eds. Kharaka, Y. K. and Maest, A. S.), A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 1251-1254.
- Pevear, D. R. (1994) Potassium-Argon Dating of Illite Components in an Earth Sample. Houston, Texas, U.S. Patent Office, patent no. 5, 288, 695.
- Pevear, D. R. (1999) Illite and hydrocarbon exploration. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America, **96**, 3440-3446.
- 佐藤佳子・熊谷英憲・田村 肇・川畑 博 (2008) レーザー融解 K-Ar 法による極微量年代測定法の開発. *地球化学*, **42**, 179-199.
- Sato, K., Kumagai, H., Hirose, T., Tamura, H., Mizoguchi, K. and Shimamoto, T. (2009) Experimental study for noble gas release and exchange under high-speed frictional melting. *Chemical Geology*, **266**, 96-103.
- 柴田 賢・杉山雄一・高木秀雄・内海 茂 (1988) 奈良県吉野地域の中央構造線沿いに分布する諸岩石の同位体年代. *地質調査所月報*, **39**, 759-781.
- 柴田 賢・高木秀雄 (1988) 中央構造線沿いの岩石および断層内物質の同位体年代 - 長野県分杭峠地域の例 -. *地質学雑誌*, **94**, 35-50.
- 柴田 賢・中島 隆・寒川 旭・内海 茂・青山秀喜 (1989) 四国における中央構造線の断層ガウジの K-Ar 年代. *地質調査所月報*, **40**, 661-671.
- Sibson, R. H. (1973) Interactions between Temperature and Pore-Fluid Pressure during Earthquake Faulting and a Mechanism for Partial or Total Stress Relief. *Nature Physical Science*, **243**, 66-68.
- Spray, J. G. (1987) Artificial generation of pseudotachylyte using friction welding apparatus: simulation of melting on a fault plane. *Journal of Structural Geology*, **9**, 49-60.
- Srodon, J., Clauer, N. and Eberl, D. D. D. (2002) Interpretation of K-Ar dates of illitic clays from sedimentary rocks aided by modeling. *American Mineralogist*, **87**, 1528-1577.
- Tagami, T. and Murakami, M. (2005) Zircon fission-track thermochronology of the Nojima fault zone, Japan. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, **85**, 269-285.
- Takagi, H., Iwamura, A., Awaji, D., Itaya, T. and Okada, T. (2005) Dating of Fault Gauges from Major Active Faults in Southwest Japan: Constraints from Integrated K-Ar and XRD Analysis. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, **85**, 287-301.
- Tanaka, H., Uehara, N. and Itaya, T. (1995) Timing of the cataclastic deformation along the Akaishi Tectonic Line, central Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **120**, 150-158.
- Togashi, Y. (1979) Polytypes and expandability of sericite from the Itaya Kaolin clay deposit, Northeast Japan. *Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*, **74**, 100-113.
- van der Pluijm, B. A., Hall, C. M., Vrolijk, P. J., Pevear, D. R. and Covey, M. C. (2001) The dating of shallow faults in the Earth's crust. *Nature*, **412**, 172-175.
- Yamasaki, S., Zwingmann, H., Yamada, K., Tagami, T. and Umeda, K. (2013) Constraining the timing of brittle deformation and faulting in the Toki granite, central Japan. *Chemical Geology*, **351**, 168-174.
- 山田直利・柴田 賢・佃 栄吉・内海 茂・松本哲一・高木秀雄・赤羽久忠 (1992) 阿寺断層周辺地域の火成岩類の放射年代と断層活動の時期. *地質調査所月報*, **43**, 759-779.
- Zwingmann, H. and Mancktelow, N. (2004) Timing of Alpine fault gouges. *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 415-425.
- Zwingmann, H., Mancktelow, N., Antognini, M. and Lucchini, R. (2010a) Dating of shallow faults: New constraints from AlpTransit tunnel site (Switzerland). *Geology*, **38**, 487-490.
- Zwingmann, H., Yamada, K. and Tagami, T. (2010b) Timing of brittle deformation within the Nojima fault zone, Japan. *Chemical Geology*, **275**, 175-185.
- Zwingmann, H., Han, R. and Ree, J. H. (2011) Cretaceous reactivation of the Deokpori Thrust, Taebaeksan Basin, South Korea, constrained by K-Ar dating of clayey fault gouge. *Tectonics*, **30**, TC5015, doi: 10.1029/2010TC002829.