

熱年代学と地震学とのリンク - 跡津川断層のフィッション・トラック温度履歴解析による断層強度推定 Thermal Anomaly and Strength of Atotsugawa Fault, Central Japan, Inferred from Fission-Track Thermochronology

山田 隆二^{1*}, 溝口 一生²
YAMADA, Ryuji^{1*}, MIZOGUCHI, Kazuo²

¹ 防災科学技術研究所, ² 電力中央研究所
¹NIED, ²CRIEPI

熱年代学の応用分野の一つとして、断層の活動史の復元と断層周辺の熱異常の検出がある。断層活動に伴う時間と温度の情報を読み出すことで、破壊に伴うエネルギー収支等に対する制約が得られる。これまでフィッション・トラック (FT) 法を用いた熱年代学的解析によって、いくつかの断層周辺の熱異常の検出が行われている。ここではもう一步進めて、断層を構成する物質の物性値に制約を与えることを試みた。

跡津川断層系の断層破砕帯露頭にて採取した試料から分離したジルコン・アパタイトのフィッション・トラック年代測定を行ったところ、一つの断層粘土試料において熱異常が検出された (Yamada et al., 2009)。跡津川と高原川の合流点から約 1.5 km 上流で、神岡鉱山・佐古西構造坑道の抗口 (海拔約 370 m) 付近の跡津川右岸約 20 m の間に、飛騨変成岩類を原岩とする 6 個の雁行する断層破砕帯が確認された。各破砕帯の幅は約 20-30 cm で、中心部には 1-3 cm 厚の断層ガウジが分布するが目立つ pseudotachylyte 層はみられない。年代測定試料は、各ガウジ部と約 10 cm 離れた破砕岩部および、比較対象として破砕の少ない離れた 2 地点から得た。年代測定の結果、ほとんどのジルコン FT 年代値 (120-150 Ma) とアパタイト FT 年代値 (44-60 Ma) は飛騨帯に貫入した花崗岩類の定置年代と一致した。一つのガウジ試料のアパタイト FT は、統計的に有意に若い年代 (32.1 ± 3.2 Ma) とユニモーダルな長さ分布を持ち、2 次的な加熱による熱異常の影響を示唆する。熱異常が認められたのは約 2cm と非常に狭い範囲で採取されたガウジ試料であるため、熱源としては、破砕帯が高温流体に満たされたのではなく、おそらくアパタイト年代頃にガウジを生じさせた最初の断層運動による摩擦発熱の可能性が高い。

上記の熱異常の原因として単一の断層摩擦発熱を想定し、摩擦による仕事は全て熱に変換されると仮定して発熱・拡散モデリングによって摩擦係数と試料の初期深度を評価した。摩擦熱の拡散に要する時間は断層活動間隔に比べて十分短いため、複数回の発熱の蓄積は無視できる。FT データと露頭における試料の配置から、摩擦発熱中心部のアパタイト FT 年代はリセットするが、10 cm 地点ではどちらもしリセットしないと言う制約が得られる。1 次元の熱拡散モデルを用いて、ガウジの内部と外部における温度の経時変化を計算した。モデル空間は、10 cm 厚の発熱部と 1000 cm の周辺の岩石から構成される。初期条件は、一定の深度における均等な温度分布を与える。地温勾配、岩石密度、熱容量、熱伝導率およびすべり速度はそれぞれ 30 °C/km、1000 J/kg K、3.0 W/m K、1 m/s の定数を与えた。総すべり量は 1858 飛越地震の規模が Mw7.0-7.9 と見積もられることを考慮し 5 m とした。計算の結果、実効加熱時間はスリップ時間よりも有意に長く、特定の地点において最高温度に到達するには発熱から遅延が生じる。中心部と 10cm 地点における最高温度は摩擦係数と初期深度により異なるが、その継続時間はそれぞれ約 100 秒間と約 10000 秒間とほぼ一様な値となった。これらを実効加熱時間とし、ジルコン・アパタイト FT の annealing kinetics を用いて温度条件に変換すると、中心部の最高到達温度は 400 - 750 °C、10 cm 地点では 250 °C 以下の範囲となる。これらの制約条件を満たす初期深度と摩擦係数の組み合わせを求めた結果、深度 2km では 0.6 以上、3km では 0.4 - 0.8 と推定された。この値は、跡津川断層から採取したガウジ試料を用いて行った室内摩擦実験によって得られた値 (約 0.6) とほぼ同じである。今回は間隙水の影響を考慮していないが、間隙水がある場合、温度上昇は上記の計算よりも低くなるためより大きな強度が必要となる。従って、これらの見積りは下限値と見なされる。

Yamada, R. et al, 2009, In: Thermochronological Methods: From Paleotemperature Constraints to Landscape Evolution Models, Lisker, F., Ventura, B., Glasmacher, U. A. (Eds.), 331-337, The Geol. Soc., London, 324.

キーワード: 熱年代学, FT, 断層強度, 摩擦発熱, 跡津川断層

Keywords: Thermochronology, Fault strength, Frictional heat, FT, Atotsugawa Fault

花崗岩の摩擦実験によるアルゴンの放出と年代の若返りの可能性

Experimental study for argon release and possibility of rejuvenated age after frictional heating granite

佐藤 佳子^{1*}, 廣瀬 丈洋², 熊谷 英憲¹, 田村 肇¹, 坂口 真澄³, 鈴木 勝彦¹

SATO, Keiko^{1*}, HIROSE, Takehiro², KUMAGAI, Hidenori¹, TAMURA, Hajimu¹, Masumi Sakaguchi³, SUZUKI, Katsuhiko¹

¹ 海洋研究開発機構, 地球内部ダイナミクス領域, ² 海洋研究開発機構, 高知コア研究所, ³ マリンワークジャパン

¹IFREE, JAMSTEC, ²KCC, JAMSTEC, ³Marine Works, JAPAN

Isotope ratios of noble gas in certain minerals are believed to be modified easily by their ambient reservoirs when the minerals reach higher temperatures than their closure temperature. The thermal history of a rock or a geologic event, even a fault movement, can therefore be determined quantitatively by applying radiometric dating methods to a set of different minerals. However, neither traditional K-Ar nor Ar-Ar dating methods can be applied easily to faulted rocks because, in the case of faulting, it is difficult to prove that the temperature of an event was greater than the closure temperatures of minerals.

Frictional heating experiments performed on fine grain homogeneous gabbros with high temperatures induced by frictional heating using a high-velocity friction apparatus were used to test whether rapid fault movement can rejuvenate the argon isotope ratio of fault rocks by the Argon released. The temperature on the artificial fault plane is flashing and above the closure temperature of the K-Ar system, as expected from the calculated cooling age. The anticipated rapid equilibration of volatiles during the frictional heating of rocks implies that the Argon isotope composition/ratio was released to an atmospheric value during this experiment.

Previous result of gabbroid analysis, we could observed that the reset was occurred only frictional plane, and we setted that second fuse enviroment (stable melted and pseudotachylyte was made) at the time. Rejuvenation and/or apparent increases in the K-Ar ages were only observed in a narrow, 3-mm-wide zone around the fault plane that appears thermally altered and mechanically fractured in thin sections.

In this study, for the granite friction experiment, the Argon gas released timing is faster, which called "first fuse" (Hirose et al., 2005) in the time. The granitoid, which is composed upper crust, include the potassium rather gabbroid, which composed lower crust, because the radiogenic Ar is more abundant in the nature. After granite friction experiment, Argon and other gases released by the sample were collected in a small aluminum tube in a nitrogen atmosphere before and after the frictional heating granite experiment, also. Therefore, we could not observe glass and glassy material after granite experiment, but the argon gas released at "first fuse" stage. We report that the measured noble gas isotopes in an Aji granite sample analysis, compared with gabbroid analysis.

キーワード: K-Ar 年代, Ar 同位体, 摩擦加熱, 花崗岩類, 玄武岩類

Keywords: K-Ar age, Ar isotope, frictional heating, granit, gabbro

海底熱水性重晶石の ESR 年代測定の方法と課題 The method and issues of ESR dating of hydrothermal barite

豊田 新^{1*}, 佐藤 文寛¹, 金光 真弘¹, 内田 乃¹, 石橋 純一郎², 中井 俊一³, 賞雅 朝子³

TOYODA, Shin^{1*}, SATO, Fumihiko¹, KANAMITSU, Masahiro¹, UCHIDA, Ai¹, ISHIBASHI, Jun-ichiro², NAKAI, Shun'ichi³, TAKAMASA, Asako³

¹ 岡山理科大学理学部, ² 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ³ 東京大学地震研究所

¹ Okayama University of Science, ² Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, ³ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

海底熱水活動についての研究の初期段階では、熱水活動の時間変動についてはあまり議論されなかった。しかしながら、海底熱水活動が生物圏に与える影響について議論されるようになって熱水活動の時間変動の詳細を明らかにすることは、重要な課題となってきた。そこで、重晶石の ESR 信号を用いて年代測定を行う方法を開発してきた。

重晶石の電子スピン共鳴 (ESR: Electron Spin Resonance) 年代測定の可能性については、Kasuya et al. (1991) によって指摘されていた。実際の ESR 年代測定は、Okumura et al. (2010) によって海底熱水性硫化物沈殿物の中の重晶石を用いて初めて試みられたが、この研究では、年代としての数値は求められたものの、基礎的な信号の特性や年間線量率についての検討が不足していた。その後、Toyoda et al. (2011), Sato et al. (2011) によって信号の測定条件や、信号の熱安定性についての基礎的な研究が行われた。次の課題は、年間線量率の正確な見積もりである。

他の試料に ESR 年代測定法を適用する場合に比べて、海底熱水性硫化物沈殿物の中の重晶石の場合には年間線量率の考慮を慎重にしなければならない。特徴的な点は次の通りである。

(1) 重晶石のバリウムを置き換えてラジウムを取り込むため、ラジウムから始まる壊変系列の核種からの放射線のみが問題になる。

(2) 重晶石以外の硫化物からの放射線は無視できる。

(3) 重晶石内部からのアルファ線による寄与が大きい (40-60%程度)

(4) 硫化物沈殿物 (チムニー) の形状を考慮する必要がある。

上記の最初の 2 つの項目を考慮することは簡単である。(3) については、タンデム加速器によって He イオンを加速して重晶石に照射する実験を行い、アルファ線による欠陥生成効率の、ガンマ線による劣化効率に対する割合を、0.043 と決めた (Toyoda et al., submitted)。しかし、この実験ではデータのばらつきが大きいため再実験が必要であろう。(4) については、沈殿物 (チムニー) の半径が 20cm 以下であるか、試料を中心部から採取していない場合には、形状の考慮が必要であることがわかった。具体的な補正について発表する予定である。海水中からのガンマ線の寄与は、通常無視できる程度であることが、実際の熱水域の海水中でのガンマ線の測定からわかった。また、重晶石からラジウムの娘核種であるラドンが漏れ出ているという報告 (White and Rood, 2001) があったため、調べたところ、海底熱水域の重晶石についてはそのようなことはないことがわかった。

得られた年代は同じ試料についての U-Th 年代測定結果と大きく異なっていないが、以前に行われた ²²⁶Ra-²¹⁰Pb 年代とは大きく異なる結果となった。再度 ²²⁶Ra-²¹⁰Pb 年代測定を行った結果についても発表する予定である。

キーワード: 電子スピン共鳴, 年代測定, 重晶石, 海底熱水, 自然放射線

Keywords: ESR, dating, barite, sea floor hydrothermal activity, natural radiation

フィリピン共和国ルソン島ザンバレスオフィオライトに産する方解石脈の熱ルミネセンス年代測定 Thermoluminescence Dating of Calcite Veins in the Zambales Ophiolite, Luzon, Philippines

小形 学^{1*}, 長谷部 徳子¹, 藤井 直樹², 山川 稔², 佐藤 努³, 藤田 健太³

OGATA, Manabu^{1*}, HASEBE, Noriko¹, FUJII, Naoki², YAMAKAWA, Minoru², SATO, Tsutomu³, Fujita Kenta³

¹ 金沢大学, ² (公財) 原環センター, ³ 北海道大学

¹Kanazawa University, ²RWMC, ³Hokkaido University

原子力発電に伴って発生する放射性廃棄物の地層処分システムにはセメントやベントナイトが使用されている。セメント系材料から溶出する高アルカリ地下水とベントナイト緩衝材の相互作用によって、緩衝材の膨潤性の低下や亀裂が発生し、人工バリアシステムが劣化するという指摘があり、評価が必要である。地質時間にわたる相互作用の評価のためには自然界に存在する類似現象を研究する。

フィリピン共和国ルソン島では、オフィオライトとベントナイト層が近接している。オフィオライトを起源とする高アルカリ地下水が岩盤の割れ目に沿って上昇しベントナイト層と接触する。このような地層処分システムに類似の現象の時間スケールを決めるため、高アルカリ水から沈殿した方解石の年代測定を熱ルミネセンス法で行った。

蓄積線量測定実験では、まず試料の発光色の確認をした。その結果最も発光量が多い赤色ルミネセンスを測定することとした。方解石で生じる感度変化を評価できる SARA (single-aliquot regeneration and added-dose) 法を用いて蓄積線量測定を行った。

年間線量測定実験では、XRF, EPMA, LA-ICP-MS 分析を用いて方解石とその周囲の岩石の放射性元素濃度を測定し、年間線量を算出した。宇宙線量率は Prescott(1994) の式より算出した。

本研究で用いた試料は不均質な岩石であるが大きさが小さいため正確な岩石分布が分からず、正確な年間線量を測定することは困難であった。そこで周囲の岩石と方解石の岩石比を 8 対 2 から 2 対 8 まで仮定し年間線量を見積もり、年代の算出を行った。その結果、年代のオーダーは 10ka であることが分かった (10 万年より若く 2-3 万年より古い)。より正確な年代決定を行うためには追加照射の誤差を考慮すること、サンプル周囲の正確な岩石分布情報、不均質岩石の年間線量計算法の精密化が必要である。

なお、本報告は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業平成 23 年度「放射性廃棄物重要基礎技術研究調査」により実施した研究成果の一部である。

キーワード: 熱ルミネセンス年代測定, 方解石脈

Keywords: Thermoluminescence dating, calcite vein

茨城県日立鉱床の Re-Os 年代 : 日本列島最古の鉱床 Re-Os geochronology of the Hitachi VMS deposit, Ibaraki Prefecture: The oldest sulfide deposit in the Japanese Island

野崎 達生^{1*}, 加藤 泰浩², 鈴木 勝彦¹, 加瀬 克雄³

NOZAKI, Tatsuo^{1*}, KATO, Yasuhiro², SUZUKI, Katsuhiko¹, Katsuo Kase³

¹ 海洋研究開発機構, ² 東大・工, ³ 岡大・理

¹JAMSTEC/IFREE, ²Univ. of Tokyo, ³Okayama Univ.

We applied the Re-Os isotope dating method to the Fudotaki and Fujimi sulfide ores from the Hitachi Deposit in the Ibaraki Prefecture. The Re-Os isochron of the Fudotaki sulfides yielded ca. 540 Ma which is the oldest age among the all other metal deposits in the Japanese Island. This isochron exhibited excellent linearity and the Re-Os age of the Fudotaki sulfides is much older than a timing of contact metamorphism by the Irishiken Granites (Late Cretaceous). Thus, we interpreted this Re-Os age as a primary depositional age of the Fudotaki sulfides on a paleo-seafloor. On the other hand, the Re and Os isotope compositions of the Fujimi Deposit showed no correlation in the $187\text{Re}/188\text{Os}$ vs. $187\text{Os}/188\text{Os}$ space. The Fujimi sulfides underwent higher grade metamorphism than that of the Fudotaki sulfides up to epidote-amphibolite facies or granulite facies, and the Re-Os isotope system of the sulfide ores was disturbed by metamorphism. Since the Hitachi Deposit is a syn-genetic sulfide deposit, the eruption age of the wallrock (basic volcanic rock) is also estimated to be ca. 540 Ma. This Re-Os age obtained here will be an important age constraint to clarify the geological history of the Japanese Island.

キーワード: Re-Os 年代, 火山性塊状硫化物鉱床, 日立鉱山, 不動滝鉱床, 日立変成帯, 日本列島

Keywords: Re-Os age, VMS deposit, Hitachi Mine, Fudotaki Deposit, Hitachi metamorphic belt, Japanese Island

レーザー段階加熱実験による単結晶黒雲母の閉止温度 Closure temperature of single grain biotite by laser step heating experiment

兵藤 博信^{1*}

HYODO, Hironobu^{1*}

¹ 岡山理科大学自然研

¹RINS, Okayama Univ. of Science

Dodson (1973) が提唱した閉止温度の概念は、様々な鉱物の異なる物理系に拡張され広範な地域や岩体の上昇冷却プロセスを理解する上で利用されてきている。最初に適用された K-Ar 系についてはアルゴンガスの拡散過程が単純な幾何学的モデルに従わない現象などがみられ、さらに拡散ドメインが単一ではなく分布をしていると仮定する複雑なモデルが提唱されたり、必ずしも使う側からみてわかりやすい概念でなくなってしまう。また閉止温度という概念がありながらその数値や地質学的意味について根拠等を明確に解説した論文、教科書は少なく、地質年代を解釈する場面で曖昧なまま温度という概念だけが使われる結果となっている。これはジルコンの U-Pb 年代への適用に関しても同じような状況で閉止温度の数値自体は非常に幅があり (650-900 °C)、使用する側の都合で適当な温度を当てはめている傾向もある。また最近では白雲母に関してもかなり高い閉止温度が提唱されるなど年代学を専門としない研究者にとってどの数値をどのような状況で使えるかで判断ができない状況を作り出している。

今回、特に選別を行わず、今までに行われた黒雲母の ⁴⁰Ar/³⁹Ar 実験データを用いて円筒形の幾何学的形状を仮定して閉止温度の計算を行った。一般に含水鉱物の真空中アルゴン抽出実験に対する異論やレーザー加熱の時間の短さとその安定性を疑問視する見解もあるが、Arrhenius プロットと活性化エネルギーの計算を図から判断して脱水過程が顕著に起きていないと考えられる温度領域 (800 °C 以下) で計算した。

単結晶のサイズはほぼ 0.5 ミリ前後であり、250 ミクロンが拡散の特性半径となる。しかし Arrhenius の関係式は常に D_0/r^2 の形でしか取り扱わないため D_0 単体が特に必要でない限り半径 r の影響は現れない。Arrhenius プロットには大きく 3 つのタイプがみられた活性化エネルギーの高低と脱水過程の影響が顕著であるかないかといった違いである。しかし Dodson の閉止温度の式を使って得られる値は実際にはこれらの変化にあまり影響を受けない。この点について年代スペクトルとともに検討を行う。

キーワード: 閉止温度, レーザー段階加熱 ⁴⁰Ar/³⁹Ar, 黒雲母

Keywords: closure temperature, laser step heating ⁴⁰Ar/³⁹Ar, biotite

レーザー融解 K-Ar 法による極微量年代測定法のための単粒子分析の試み (第2報) Development of un-irradiated and un-spiked laser fusion K-Ar dating for single grain minerals (2nd report)

熊谷 英憲^{1*}, 佐藤 佳子¹

KUMAGAI, Hidenori^{1*}, SATO, Keiko¹

¹ 独立行政法人海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

¹IFREE, JAMSTEC

これまで K-Ar 系の局所年代測定法として、レーザー融解 K-Ar 年代測定を試み、その可能性を示してきた [1, 2]。たとえば、鉄を主成分とする鉱物では、中性子照射によって強く放射化されるため、多量の試料の扱いが困難となり、Ar-Ar 年代測定は必ずしも適さない [3]。一方、カリウム含有率 0.1% 程度の鉱物単粒子に対して K-Ar 法の適用が可能となれば、熱水性鉱物などへの応用が広がることを期待できる。このため、科学研究費補助金新学術領域「海底下の大河」における計画研究の一環として、海洋研究開発機構設置の希ガス質量分析装置 GVI5400He にレーザー融解装置を導入した。

含有率 0.1% 程度の試料に対して精度良く年代測定を行うほどのカリウム定量は、EPMA 分析では困難な場合があるため、単離した鉱物一粒一粒について重量を測定、レーザーで加熱融解しアルゴンの定量を行った後、融解した鉱物粒を回収して低ブランクカリウム分析でカリウムを測定する方法をとっている。この方法では、アルゴン、カリウムそれぞれの回収が不完全であると、年代値確度・精度を損なうので、今回、年代既知の標準試料として用いられている SORI93 Biotite [4] を用いて、レーザー照射および、カリウム定量条件を検討した。

これまでのところ、SORI-93 に報告されている 92.6Ma の年代に対して、15% 以上古い年代値が標本標準偏差で 10% 以上のばらつきで得られているので、原因について検討中である。

[1] 佐藤ほか (2008) 地球化学, 42, 179-199.

[2] 佐藤ほか (2011) 地球惑星科学連合 2011 年大会

[3] 石橋ほか (2009) 地学雑誌, 118, 1186-1204.

[4] Sudo et al. (1998) Geochemical J., 32, 49-58.

キーワード: K-Ar 年代測定, レーザー融解, 単粒子, 年代既知標準試料 SORI-93

Keywords: K-Ar dating, laser fusion, single grain, SORI-93 K-Ar standard

ハワイソレイト試料の K-Ar 年代測定における変質の影響評価 Evaluation of the influence of alteration on K-Ar dating for Hawaiian tholeiites

山崎 誠子^{1*}, 澤田 遼太郎¹, 田上 高広¹
YAMASAKI, Seiko^{1*}, Ryotaro Sawada¹, Takahiro Tagami¹

¹ 京大・理・地球惑星

¹Earth and Planetary Sci., Kyoto University

To obtain reliable K-Ar ages, the lava samples need to meet various requirements, and lack of K and Ar loss during weathering or alteration is one of the most important considerations. It is desirable to choose fresh rock samples that have not been affected by weathering/alteration; however, such samples are generally not available among the tholeiitic lava of shields older than about 1 Ma. In order to evaluate the influence of alteration on K-Ar dating for Hawaiian tholeiites, unspiked K-Ar ages were measured for 21 samples from four lava flows with varying degrees of alteration collected from the Makapuu Head section of Koolau volcano, Hawaii. The samples were classified based on freshness of olivine phenocrysts and the groundmass olivine, and the presence of secondary minerals in vesicles. The age data was evaluated by means of K_2O/P_2O_5 ratios, ^{36}Ar volumes, and calculated atmospheric Ar contamination. The results indicate that the ages for samples with fresh groundmass olivine are reliable, even though olivine phenocrysts may be slightly altered (thin reaction rims) or secondary minerals may have crystallized in the vesicles.

キーワード: K-Ar 年代測定, 変質, ソレイト, ハワイ火山

Keywords: K-Ar dating, alteration, tholeiites, Hawaiian volcano

原子間力顕微鏡によるジルコンの放射線損傷の観察と年代測定

Observation of radiation damage in zircon by atomic force microscope and its application to geochronology

大石 新之介¹, 長谷部 徳子^{2*}, 福間 剛士³

OHISHI, Shinnosuke¹, HASEBE, Noriko^{2*}, Takeshi Fukuma³

¹ 金沢大学大学院自然科学研究科, ² 金沢大学環日本海域環境研究センター, ³ 金沢大学フロンティアサイエンス機構

¹Grad. School of Natural Science & Technology, Kanazawa Univ., ²Inst. Nature and Environmental Technology, Kanazawa Univ., ³Frontier Science Organization, Kanazawa Univ.

フィッシュントラック (FT) 法は鉱物中に含まれる ^{238}U が自発核分裂を起こすことによって生じた損傷の計数に基づく年代測定法である。FT の密度が高くなるにつれ FT 同士が重なり合い計数が困難になるため、現在行われている光学顕微鏡を用いた FT 法では、必要なエッチング時間と分解能の限界により、測定できる密度がある程度制限される。原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) はナノオーダーの高い分解能を有し、より高密度の FT を計数することができる可能性を秘めている。

FT 密度の異なる 4 種類のジルコンを利用して、AFM で観察を行った。その結果、以下のような知見を得た。

コロイダルシリカで研磨した試料は、最終研磨方向に新しい研磨傷を生じず、より綺麗な表面が得られた。トラックはエッチングの追加により、近くのトラックと結合してしまうことがある。そのため、正確なトラック密度の測定には、エッチング前後での画像を比較しながら補正を行う必要がある。補正したトラック密度を使用して求めた FT 年代値は、従来法で求められた年代値とほぼ一致し、AFM を用いた FT 法が成功した。エッチピットの面積は、入射角が大きくなるほど、大きくなる傾向がみられた。しかし、 c 軸とのなす角との相関は見られなかった。FT とは別にエッチングによる発達のない小さな窪みがたくさんあった。数が非常に多いことからアルファリコイルトラック (ART) の可能性が考えられたため、断面の波形の周期が ART の距離に相当すると仮定し、スペクトル解析を行ったところ幾つか卓越した周期が見られた。また ART と FT の数の比較から求めた理想的な ART の値と周期から求めた値を比較したところ、オーダーが合致した。今後さらにこれらのくぼみの正体を明らかにし、さらに熱的な安定性を調べることで、ART 年代測定法への道が開けるかもしれない。

キーワード: 原子間力顕微鏡, フィッシュントラック, アルファリコイルトラック

Keywords: atomic force microscope, fission track, alpha recoil track

石英を用いたテフラのESR年代測定：信号による差異の評価 ESR dating of tephra with quartz: inconsistency between signals

浅越 光矢^{1*}, 豊田 新²

ASAGOE, Mitsuya^{1*}, TOYODA, Shin²

¹ 岡山理科大学大学院理学研究科, ² 岡山理科大学理学部応用物理学科

¹Graduate School of Science, Okayama University of Science, ²Department of Applied Physics, Faculty of Science, Okayama University of Science

Determining the age of tephra is important for reconstructing the history of environmental change during the Quaternary epoch. To this end, we consider dating of quartz using the electron spin resonance (ESR) method. Quartz was first found to be useful for ESR dating of fault gouge while the mineral was also used for dating of tephra, heated flints, and sediments.

The first investigation pertaining to ESR dating of tephra using quartz was published using the Al center (a hole trapped at Al site replacing Si). Subsequently, several other successful results on tephra have been reported (e.g. Imai and Shimokawa, et al., 1988, Imai et al., 1992, Toyoda et al., 1995, and Yokoyama et al., 2004). Buhay et al. (1992) reported that the ESR age (45-49 ka) of a tephra from New Zealand is consistent with the ¹⁴C age (42-44) within statistical errors.

However, in other studies, systematic discrepancies were observed between the ages obtained using the Al center and Ti-Li center (an electron trapped at a Ti atom replacing Si, accompanying a Li ion as a charge compensator). Toyoda et al. (2006) systematically investigated the ESR and RTL (red thermoluminescence) ages of tephra with a known age range of 30 to 900 ka, and found that ESR dating has problems in obtaining equivalent doses. Using the same dose rate, the RTL ages were consistent with the expected ages while the ESR based results were inconsistent and involved large scatter in data. The scatter in ESR ages was found to increase with age. Toyoda et al. (2009) proposed a new protocol, the multiple-aliquot regenerative-additive dose method, which provides equivalent doses estimates with smaller errors than the traditional additive dose method. In the present paper, we have analyzed the same Nm-Sb tephra and A-Fm tephra and Ft to check the reproducibility of dating results and to test if known doses can be recovered using the multiple-aliquot regenerative-additive dose procedure.

The age obtained from Ti-H center is consistent with the age reference for Nm-Sb while the ones from Al and Ti-Li center overestimate. The ages obtained from Al and Ti-H center are consistent with the age reference for A-Fm while the ones from Ti-Li center overestimate. The dose recovery test indicates that the equivalent dose estimate based on the Ti-H center of Nm-Sb and A-Fm agrees within error of the expected dose (370 Gy). We consider the dose recovery test to be a useful procedure for choosing the signal appropriate for dating.

キーワード: 石英, 電子スピン共鳴, 年代測定, テフラ

Keywords: quartz, ESR, dating, tephra

後期完新世産木炭の 14C 年代測定における ABA 処理法の再検証 Re-evaluation of ABA pretreatment for 14C dating of fossil charcoal from late Holocene layer

渥美 晋^{1*}

ATSUMI, Shin^{1*}

¹ 東京理科大学

¹Tokyo University of Science

放射生炭素年代測定法の発展初期から外部有機炭化物の混入による 14C 年代値への影響が疑われ、解明が続けられてきた。ある研究では ABA 法と ABOX 法との間の比較で、AMS を使って混入炭素の年代値への影響が確認された。しかしながら、同研究は完新世木炭試料の化学的な品質について客観的な検査をしていない。また、前処理段階における残留外部有機物が 14C 年代値に対して与える影響についての客観的手法による研究例は無い。さらに、上記のような試料の品質管理や前処理の研究例においては、アルカリ抽出時間は 3 時間より短い場合が多く、したがって年代測定用試料中のフミン酸の残留が強く疑われる。したがって、何が妥当で信頼性のある試料かと言う議論やどのような化学的処理条件が最も適当であるかという議論は未だに決着していない。近年、少数の客観的な化学的指標に基づいた ABA 法に関する報告がされている。木炭に対するラマン分光法を用いたアセスメントが試みられ、木炭試料中のフミン酸の存在を示している。しかし、14C 年代値と前処理との関係は調べられていない。化石と現世の木炭を比較することにより、フミン化のメカニズムが推定された。しかし、特殊な砂漠環境下のフミン化が示されたのみで、14C 年代値への影響は調査されていない。また、外部有機物とフミン化した木炭自体とを区別する確実な化学的方法は今のところ技術的に存在しない。一方、我々は木炭の NaOH 溶液に対する抵抗性は埋没状況や保存状態によって異なることを経験的に知っている。したがって、多くの研究者は木炭のアルカリ耐性が低い時には低濃度 NaOH 溶液を使っている。慣習的 ABA 法の謎は、どの程度の濃度の NaOH 溶液が最も 14C 年代測定試料に対して有効かということである。現在この問題に関して統一見解は無い。すなわち、信頼できる 14C 年代値を得るために適切な試料選択条件および前処理条件が求められる。しかしながら、我々が知る限り、ABA 処理条件に関する詳細なデータと研究はほぼ無い。

本研究では、我々は ABA 法のアルカリ抽出の最適条件を探るため、異なる濃度のアルカリ溶液による薄い濃度から順に行う 5 段階洗浄を試みる。我々は洗浄各段階の木炭の 14C 年代値の比較および各段階の抽出溶液中の溶存有機物の蛍光強度および吸光光度による比較を行い、ABA 法の問題点と現実的打開策を明らかにすることを狙う。14C 年代測定と吸光光度測定および三次元蛍光測定結果から、従来の常識とは異なって溶液の色とフミン酸の蛍光強度との間には相関が無いことが判明した。加えて、どの濃度で高いフミン抽出効果が得られるか予測できないことから、0.001mol/l の低濃度溶液から 1.2M までの多段階抽出が必要であり、かつ短時間(18-20 日)において高効率でフミン酸抽出を促進することが可能であることが判明した。最後に、14C 年代値は NaOH 溶液の濃度 1-2mol/l の間で収束または飽和したことを示している。

キーワード: 酸 アルカリ 酸処理法, 放射性炭素年代測定, 後期完新世

Keywords: ABA(AAA) pretreatment, 14C dating, late Holocene

阿寺断層の垂直変位量と活動開始時期に関する熱年代学的研究

Thermochronological study of the dip-slip displacement and timing of initiation of the Atera fault

山田 国見^{1*}, 安江 健一¹, 岩野 英樹², 山田 隆二³, 梅田 浩司¹, 小村 健太郎³

YAMADA, Kunimi^{1*}, YASUE, Ken-ichi¹, IWANO, Hideki², YAMADA, Ryuji³, UMEDA, Koji¹, OMURA, Kentaro³

¹ 日本原子力研究開発機構, ² 京都フィッション・トラック, ³ 防災科学技術研究所

¹JAEA, ²Kyoto FT, ³NIED

阿寺断層は岐阜県の東部を北西-南東方向に60E3 m以上に渡って連続するA級の活断層であり、傾斜はほぼ垂直、その現在の活動様式は北東側隆起の垂直変位を伴う左横ずれである。基盤(主に濃飛流紋岩)の水平・垂直変位量と地形(段丘や河川屈曲)の水平・垂直変位量が調和的であることから、活断層としての阿寺断層の活動は第四紀初頭以降のものと考えられている。一方、断層破砕帯中に貫入した非破砕の岩脈が約22 Maの黒雲母K-Ar年代を示すこと、断層破砕帯から分離された2E-6 m以下のガウジが23-55 MaのK-Ar年代を示すこと[1]から、阿寺断層が古第三紀には既に破砕と熱水変質作用を伴う活動を行っていたことが示唆されている。これらの活動履歴をより詳細にあきらかにするため、川上川・付知川沿いにおいて阿寺断層の走向と直交する方向に地表で5試料、1997-2000年度に防災科学技術研究所が行った阿寺断層系深層掘削のうち、断層の北東側約200 m地点から垂直に掘削された川上孔のボーリングコアの地下200 m付近と400 m付近から6試料、それぞれ変質していない苗木・上松花崗岩(地表で採取した1試料のみ濃飛流紋岩、また川上コアには断層に起因するであろう破砕帯が存在する)を採取し、ジルコン・アパタイトを分離した。それらを用いてフィッション・トラック(FT)年代測定、FT長測定、それらの順モデリングを行い、垂直変位量と活動開始時期を推定した。年代測定の結果、断層の北東側地表試料(U-5;断層より約3E3 m;標高約600 m(以下同じ))から約69 Ma、北東側の断層近傍地表試料(U-4;400 m;500 m)から約61 Ma、その近傍で掘削された川上コアから65-75 Ma、断層の南西側(沈降側)地表試料(U-1,2,3;10, 5, 2E3 m;300, 300, 400 m)から74-79 MaのジルコンFT年代、U-5から約43 Ma、U-4から約21 Ma、川上コアから19-27 Ma、U-1,2,3から36-50 MaのアパタイトFT年代を得た。ジルコンFT長は全長を測定し、U-4のみ短縮が見られた。アパタイトFT長はFT密度が低く全長が観察されなかったため、結晶表面につななかったFT長を測定した。すべての試料で14E-6 m台のFTが観察され、分布については明瞭な傾向は見られなかった。

これらの結果から、(1) U-5とU-1,2,3で得られたジルコンFT年代の差と標高、地温勾配から計算される阿寺断層の約70 Ma以降の垂直変位量はおおまかに約1E3 mであり、上述の基盤岩や地形の高度差に基づく変位量と変わらないこと、すなわち阿寺断層の現在の変位様式の活動が第四紀初頭以降に開始したという従来の見解と整合的な結果が得られること、(2) ジルコンFT長分布から、U-4は苗木・上松花崗岩の貫入・固結後の40-60 Maごろに約300 程度まで再加熱され、その後5-10 /m.y.程度で徐冷したこと、その加熱が近傍の川上コア試料では見られないことから熱源は断層摩擦や破砕帯内の熱水循環ではなく、より小規模であること、(3) アパタイトFT年代から、20 Ma以降に破砕帯内で断層に沿って広い範囲で200 には達しない程度の加熱があったこと、U-4と川上コアのアパタイトFT長からそれがある程度古い時期(例えば5 Ma以前)であることが明らかになった。すなわち、この時期には既に破砕帯が存在し、断層活動が始まっていたことが推定される。特に(1)と(3)は地形学・地質学的な阿寺断層の活動史と同様の活動史が放射年代からも描かれる点で重要である。

現在の阿寺断層とは異なる、いわば古阿寺断層の活動は、本研究からは20 Ma以降ある程度古い時期には開始していた、と制約される。アパタイトFTのFT全長の測定や、断層活動開始後の早い時期に生成した可能性のある、断層ガウジ中のより細粒のイライトK-Ar年代測定が、さらなる制約に有効であろう。

[1] 山田ほか, 1992: 阿寺断層周辺の火成岩類の放射年代と断層活動の時期. 地調月報 43, 759-779.

Keywords: Atera fault, dip-slip displacement, timing of initiation of active fault, fission-track

スコットランド、リーブン地域のバロビアン変成帯の下限境界 Lower boundary of the Caledonian Barrovian metamorphic belt at Loch Leven, Scotland: Phengite K-Ar ages of metapelites

青木 一勝^{1*}, Brian Windley², 佐藤 佳子³, 澤木 佑介³, 澁谷 岳造³, 熊谷 英憲³, 鈴木 勝彦³, 丸山 茂徳⁴
AOKI, Kazumasa^{1*}, Brian Windley², Keiko Sato³, Yusuke Sawaki³, Takazo Shibuya³, Hidenori Kumagai³, Katsuhiko Suzuki³,
Shigenori Maruyama⁴

¹ 東京大学広域科学専攻, ² レスター大学地質学科, ³ 海洋研究開発機構, ⁴ 東京工業大学地球惑星科学専攻

¹Dept of Earth and Astronomy, The Univ. Tokyo, ²Dept of Geology, Leicester Univ, ³JAMSTEC, ⁴Earth and Planetary Sci., Tokyo Tech

Since the Barrow's report (1893), the Barrovian metamorphic belt in the Caledonides of Scotland has become one of the best-studied orogenic belts in the world. Based on many geological and isotopic studies, this belt has long been considered to be formed by arc-continental collision in the Ordovician-Silurian (the Grampian orogeny: ca. 480-430 Ma) (Dewey and Bird, 1999; Oliver, 2008). However, many controversies and fundamental uncertainties remain. For example, in terms of the polarity of subduction, Ryan and Dewey (1991) and Oliver (2008) assumed that the polarity of subduction was toward the NW, but Clift et al. (2004) proposed the opposite. Also, the main reason for the "orogeny" and metamorphism for several decades has been just burial at depth caused by thrusting, which we consider to be a dated, unlikely concept.

The Barrovian metamorphic rocks in Loch Leven belong to the biotite zone, have been folded and thrust northwards (e.g., Treagus, 1974; Piasecki, 1980), and they overlie weakly metamorphosed rocks (Eilde Flags). Inferring from our understandings of the occurrence and exhumation of HP rocks in Japan (Aoki et al., 2008; 2009), and in many Barrovian orogenic belts worldwide (Agard et al., 2009), we predicted that the lower tectonic boundary of the Barrovian metamorphic rocks should have occurred at Loch Leven. In order to examine this model, we determined K-Ar ages of phengite-rich mineral separates from 6 metapelites in the area.

Our new phengite K-Ar ages are 398.2 +/- 10.4 (sample no. LL46), 406.4 +/- 10.6 (LL20), 405 +/- 10.5 (LL19), 399.7 +/- 10.5 (LL24) and 445.0 +/- 11.6 Ma (LL16). One samples (LL13) has an "anomalously young" age of 340 +/- 8.9 Ma, probably because of its low K₂O content (1.3 wt%). The main results indicate a K-Ar age-gap between ca. 445 Ma and ca. 400 Ma, which, when integrated with previous metamorphic-age (e.g., Oliver, 2008) and structural data from Loch Leven (Rovers, 1976; Atherton, 1977) suggest that the lower boundary of the Barrovian metamorphic belt formed at 445-400 Ma.

The lower boundary of the E-dipping, Barrovian metamorphic belt at Loch Leven has long been considered to be an extension of the 430-413 Ma Moine Thrust (MT) displaced by the Great Glen Fault. The shear sense of the E-dipping MT is top-to-the-WNW/NNW (Butler, 2004). Moreover, we have recently discovered that the upper boundary of the originally E-dipping Barrovian metamorphic belt crops out near Portsoy in NE Scotland, the shear sense of which was top-to-the-SW (Kawai et al., in prep.). In terms of the internal thermobaric Barrovian zones of Scotland, the grade of metamorphism decreases symmetrically upwards and downwards from a central highest-grade zone (Kennedy, 1948), which contains relicts of retrogressed HP rocks. Integration of all multi-disciplinary data provides robust evidence that the Barrovian metamorphic zones were exhumed from a HP depth by N-directed wedge extrusion. The lower wedge boundary was the Moine thrust-Loch Leven thrust, and the upper extensional boundary at Portsoy enabled the downward emplacement of the overlying, lower pressure Buchan metamorphic zonal belt. Thus, formation of the whole Caledonian orogenic belt of Scotland was controlled by wedge extrusion.

宇奈月地域における U-Pb 地質年代図 U-Pb geochronological map of Unazuki area

堀江 憲路^{1*}

HORIE, Kenji^{1*}

¹ 国立極地研究所

¹National Institute of Polar Research

The Unazuki area, situated at the northeastern part of the Hida Belt, which is one of crucial sites for deciphering the Permo-Triassic orogeny in East Asia, has experienced the kyanite-sillimanite type metamorphism characterized by a clockwise P-T path. The Unazuki area is classified into the Hida gneiss region (Katakaigawa group), the Unazuki schist region (Unazuki group), and the Unazuki plutonic complex. Radiometric ages of the Unazuki schists, previously determined by Rb-Sr and K-Ar methods, are scattered from 248 Ma to 175 Ma primarily because of multi-phase metamorphism and deformation. Geochronological data for the Unazuki plutonic complex are limited. In this study, U-Pb geochronology of zircon and titanite was applied to the schists and the plutonic complex to discuss about timing of the kyanite-sillimanite type metamorphism and thermal history.

Protoliths of the Unazuki schists are sedimentary and felsic volcanic rocks. Probability of U-Pb data of detrital zircons in pelitic schist shows some peaks centered at 453, 365, 347, 320, 310, and 298 Ma, which suggests that protolith of the Unazuki metamorphic rocks were deposited after 298 Ma. U-Pb data of quartzo-feldspathic schist derived from felsic volcanics yield an eruption age of 258 ± 2 Ma, indicating that regional metamorphism occurred after 258 Ma. On the other hand, U-Pb age of a granite in north part of the Unazuki area is 253 ± 1 Ma. The granite contains some xenoliths of the Unazuki schist, in which staurolite is replaced by andalusite and cordierite due to thermal flux from granitic magma. Therefore, regional metamorphism occurred between 258 and 253 Ma, suggesting a rapid metamorphic progression. 251 ± 1 Ma of gneissose quartz diorite containing the Unazuki schists supports the timing of the regional metamorphism.

The granite in central part contains Eoarchean-Paleoproterozoic zircon inheritance and shows 256 ± 2 Ma, whereas that in south part is 250 ± 1 Ma. Hornblende quartz diorite in central part yields 191.1 ± 0.8 Ma, whereas biotite quartz diorite in south part is 275 ± 2 Ma. Meta-gabbros in central part yield 260-256 Ma. Some parts of zircon in meta-gabbros were recrystallized at ca. 236 Ma.

Eboshiyama mylonite in the Katakaigawa group shows 250.0 ± 0.4 Ma, which suggests that mylonitization of the Katakaigawa group occurred after the regional metamorphism of the Unazuki group.

キーワード: 地質年代図, U-Pb 年代, ジルコン, 宇奈月, 飛騨帯

Keywords: geochronological map, U-Pb age, zircon, Unazuki, Hida belt

ボルネオ北部の砂岩中のモナズ石の年代分布と供給源について

Age distribution of detrital monazites in the sandstones from the northern Borneo and its tectonic setting

横山 一巳^{1*}, 堤之恭¹, 黄 嵩凱²

YOKOYAMA, Kazumi^{1*}, Tsutsumi Yukiyasu¹, Willy Bong Shun Kai²

¹ 国立科学博物館 地学研究部, ² 東京理科大学 総合化学研究科

¹National Museum of Nature and Science, ²Dept. of Appl. Chem. Tokyo Univ. of Science

ボルネオの北部に後期白亜紀から始新世末期に堆積したタービダイトが広く分布している。これらは、ラジャング層群と呼ばれている。この地層を流れている4つの河川から重鉱物を採集して、その中のモナズ石の年代分布を求めた。4つの河川のモナズ石の年代分布は、1850-1900Ma, 400-500Ma と 200-300Ma に主要ピークがあり、700-1100Ma になだらかなピークが確認された。このような年代分布は、東南アジアから供給されたものではなく、中国南部から供給されたものである。南シナ海の拡大が漸新世には始まっていたこと及びラジャング層群の堆積後に大きな不整合があることを考えると、少なくともボルネオ北部は、南シナ海の拡大時に中国南部の海洋側から現在の位置に移動してきたものと推定できる。ボルネオ南部及びインドネシアの一部も同じ時期に移動したと考えれば、動植物相の境界であるワラッセ線や中新世にインド洋と太平洋の繋がりが縮小したことを説明できる可能性がある。

キーワード: モナズ石, 年代, ボルネオ

Keywords: monazite, age, Borneo