

ESR年代測定法による断層活動性評価 Assessment of fault activity by the ESR dating technique

福地 龍郎^{1*}

FUKUCHI, Tatsuro^{1*}

¹ 山梨大学大学院総合研究部教育人間科学域

¹ University of Yamanashi

2011年東北地方太平洋沖地震以後、12~13万年前以降に活動した断層を活断層として来た原発の耐震指針における活断層の定義が変更となり、40万年前以降に活動した断層も活断層と見なして活動性を評価しなければならなくなった。しかし、変動地形が明瞭でない活断層や年代測定可能な上載層が存在しない活断層の場合、活動性評価を行うことは容易ではなく、断層の活動履歴を記録している断層岩から直接活動年代を見積る技術の開発が求められている。ESR（電子スピン共鳴）年代測定法は、断層摩擦熱で一旦リセットされた断層岩構成鉱物（石英、粘土鉱物等）のESR信号や断層作用で新たに生成した鉱物のESR信号を利用して活動年代を見積る手法である（福地, 2010）。

ESR法を断層に適用する際の問題として、ESR信号が断層活動時に完全にリセットされるのかどうかこれまで議論されてきた（福地, 2004）。ESR信号が不完全にリセットされた場合、総被曝線量が過剰見積りとなり、実際の活動年代よりも古い年代値が得られてしまうからである。しかし、リセットが完全であっても無くても、理論的にはESR年代値（ T_e ）は実際の活動年代（ T_a ）の上限値を与える（ $T_a \leq T_e$ ）ので、更新世中・後期以降の若いESR年代値が得られる時には活動性評価にそのまま利用できる。また、ボーリング掘削が可能な場合には、リセットが実現し易い地下深部から試料を採取することで、この問題を解決できると考えられる。その反面、光ブリーチングを起こす不安定な信号は、より高温状態にある地下深部では断層摩擦熱が上昇しなくても減衰し、若い年代値を与える危険性があるので、年代測定に使用する信号には十分注意する必要がある。

ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震以降、活動性が高まっていることが指摘されている糸魚川-静岡構造線（糸静線）活断層系の一部を構成する下戸井断層及び鳳凰山断層にESR法を適用した例を紹介する。完新世に活動したことが知られている下戸井断層の最終活動で生成された黒色脈状岩のESR年代測定を実施した結果、石英起源のAl中心から 1.3 ± 0.2 Ma（決定係数 R 値 99.8%）、Ti 中心から 2.0 ± 0.3 Ma（R 値 99.2%）という年代値が得られた。断層露頭から採取された試料のため、断層摩擦熱による完全リセットは実現していないが、熱的に最も不安定なAl中心の年代値から下戸井断層の活動年代（ T ）は、 $T \leq 1.3 \pm 0.2$ Ma と見積もられる。一方、第四紀以降の活動性が不明である鳳凰山断層の最終活動で生成された灰色ガウジをESR年代測定した結果、モンモリロナイト起源の四重信号から $1.4 \sim 1.9 \pm 0.2$ Ma（R 値：99.2-99.5%）、Al 中心から 1.2 ± 0.2 Ma（R 値：99.0%）という年代値が得られた。加熱実験により、Al 中心には別の信号が重なっていて年代値は過剰見積りであることが判明したので、Al 中心の超微細構造（hfs： $g=2.0187$ ）から更に年代値を求めた結果、 0.6 ± 0.1 Ma となった。hfs から求めた年代の R 値は 98.8% と信頼性が高いことから、鳳凰山断層の活動年代（ T ）は、 $T \leq 0.6 \pm 0.1$ Ma と見積もられる。

引用文献

福地龍郎, 2004, ESR法による断層活動年代測定—その原理と実践. 深田研ライブラリー 63, 45pp.

福地龍郎, 2010, ESR法による地震断層の絶対年代測定—その原理と適用限界—. 月刊地球, Vol.32, No.1, p.16-23.

キーワード: ESR, 電子スピン共鳴, 熱年代学, FMR 信号, 断層岩, 糸魚川-静岡構造線

Keywords: ESR, electron spin resonance, thermochronology, FMR signal, fault rock, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line

年代測定によって得られる”年代”とは？ What does a "radiometric age" mean?

兼岡 一郎^{1*}
KANEOKA, Ichiro^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

近年の各種年代測定法の技術的進歩はめざましく、得られた年代数値の制度の向上や年代測定の適用可能範囲の大幅な拡大がなされてきている。

しかし年代測定で得られた年代数値が、そのまま直接地学現象に対応した年愛を示すとは限らない。年代測定値が地学現象の年代として意味をもつためには、それぞれの年代測定法で要求されている前提条件が満足されていることを確認する必要がある。さらに異なった年代測定法においてはそれぞれ異なった原理に基づいて年代値を得るが、それらの示す年代数値がそれぞれ異なった地学現象に対応している場合も少なくない。しかし現状は多くの場合年代測定法の技術的な改良のみに重点が置かれていて、得られた数値の意味を十分に検討しているとはいえない。本講演ではいくつかの例を紹介し、各年代測定法の原理や前提条件などを十分に踏まえた上で、得られた年代数値の意味を検討することの重要性を強調したい。

各種の年代測定法に対して、異なった鉱物はそれぞれ異なる閉鎖温度を持つということを利用して、それらの鉱物を算出した地域の熱史を明らかにする研究がよく行われている。その際、放射壊変を利用した年代測定法に対する閉鎖温度は、冷却速度によっても変わる。そのため、文献などの閉鎖温度として与えられた数値に対しては大体の目安を与えたもので、10度未満の数値まで議論することは無意味である。またフィッシュン・トラック法などに対する閉鎖温度の定義は、放射壊変による同位体比などの変動を利用した方法とは定義が異なるので、それらを同じ基準の温度尺度として細かい数値を扱うことに対しては十分な注意が必要である。

近年では、ジルコンを用いた U-Pb 年代測定法に関しての測定技術のめざましい進歩によって、1粒のジルコンや100万年より若い試料などの測定も可能となっている。またフィッシュン・トラック法でも、従来からジルコンを主要な試料として用いてきている。これらの方法は他の手法に比べて相対的にその測定が簡便であり、地球形成時から第四紀後半までの広い年代範囲を測定できるということで、それらを併用して地学現象の年代を記載するジルコン年代学の分野が盛んになっている。ジルコンは他の鉱物に比べて変質や変成などの影響を受けにくいという特質があり、特に先カンブリア紀などの古い時代の年代値を求めることに大きな利点を有している。しかし特に100万年より若い年代に対しては、年代測定法としての前提条件に関しての吟味が重要である。U-Pb 系に対する閉鎖温度は700度を超えているが、フィッシュン・トラックに対しては250度以下であり、両者の差は大きい。しかし多くの変成作用は両方の閉鎖温度の間の温度で起こる。ジルコンの形成は地下で行われるので、その示す年代は火山の噴出年代とは異なる。さらにジルコン粒のマagmaだまりでの形成期間は明確でない。こうしたことなどを踏まえて、地球史における各種の年代については、ジルコン以外の試料を用いた各種の年代測定法によって得られる年代数値も不可欠であり、それらを比較することにより実際に起こった地学現象の年代をきちんと理解することができる。そのためにもアイソクロン法を活用した年代測定などは重要で、そうした視点からの研究がもっと行われる必要がある。

一方、アイソクロン法の年代の取り扱いにも注意が必要である。例えばアイソクロン法を用いた Ar-Ar 年代は過剰アルゴンの影響を取り除くことができるという解釈がよくされるが、ダイヤモンドや急冷ガラスなどの場合には、それが必ずしも成立しない。そうした結果は、ほかの年代測定結果との比較によって初めて明らかになるのでその検討が重要である。

結局、各種年代測定法によって得られた年代数値が、地学現象としての年代値とし意味を有すると判断できるのは複数の手法による結果の比較・検討が重要であり、それぞれの手法における前提条件を常に考慮して解釈することを心がけるべきである。

キーワード: 年代測定, 放射年代, 年代数値, 地学現象, 前提条件, 閉鎖温度

Keywords: dating, radiometric age, age value, geologic event, required condition, closure temperature

高圧・超高压変成岩のフェンジャイト年代学：変形作用におけるアルゴン離散メカニズム

Phengite geochronology of HP-UHP metamorphic rocks: Implication of argon release mechanism during deformation

板谷 徹丸^{1*}

ITAYA, Tetsumaru^{1*}

¹ 岡山理科大学

¹Okayama University of Science

A systematic K-Ar age mapping along transects perpendicular to metamorphic thermal gradients have been carried out in the HP schist belts, SW Japan, revealing two contrasting age-T?structure relationships. The Sanbagawa HP schist belt in central Shikoku exhibits a thermal structure that the highest grade rocks occur in the middle part of the apparent stratigraphy and a positive correlation in age-T relationship that the ages are progressively older with increasing metamorphic temperature. The similar age-T- structure relation is observed in the Suo HP schist belt of the Ishigaki area. In contrast, the Sanbagawa HP schist belt in the Kanto Mtns area and the Suo HP schist belt in the Nishiki area, where the thermal structure for the higher grade zone is in the lower part of the apparent stratigraphic succession, display a negative correlation that younger ages are in higher-grade metamorphic rocks.

Why do these age-T?structure relationships appear in the HP schist belts, SW Japan? It is difficult to explain the reason based on the closure temperatures (CT) by the thermally activated diffusion model. CT that has been believed for long time is wrong and must be much higher (ca. 600 °C) as revealed by the argon geochronology of the polymetamorphic terrains. This shows the metamorphic sequences mentioned above formed in the temperatures lower than the CT. The HP-UHP schists have been deformed severely during the exhumation of their host rocks and the phengites have experienced the argon release from the phengite crystals by their dynamic recrystallization. The K-Ar ages are related directly to the ductile deformation history of the matrix phengite during exhumation and cooling of the rocks. This suggests that the argon release ceases when the ductile deformation of phengites stopped and the K-Ar ages are related to the timing of ceasing of ductile deformation. This means the phengite (without deformation) included in garnet give a timing of peak metamorphism.

The phengite geochronology of HP-UHP metamorphic rocks in western Alps conducts the following conclusions. Each mica crystal has experienced the different deformation - Ar depletion history during the exhumation of the host rocks and the portions within a crystal have the different history. This phenomenon may be more distinct in the rocks that have experienced the limited deformation history. K-Ar ages of the mica separates from the rocks indicate the average values of the ages from each crystal. To justify this Ar release mechanism requires further investigation using UV laser probe in-situ Ar-Ar analyses of micro-domains in phengite crystal with high sensitive noble gas mass spectrometer.

キーワード: 高圧・超高压変成岩, フェンジャイト年代学, 変形作用, アルゴン離散メカニズム, 閉鎖温度

Keywords: HP-UHP metamorphic rocks, phengite geochronology, deformation, argon release mechanism, closure temperature

九重火山中部地域の感度法 K-Ar 年代 Unspiked K-Ar dating for the central part of Kuju volcano, Kyushu, Japan

山崎 誠子^{1*}; 星住 英夫¹; 松本 哲一¹

YAMASAKI, Seiko^{1*}; HOSHIZUMI, Hideo¹; MATSUMOTO, Akikazu¹

¹ 産総研 活断層・火山研究部門

¹ GSI, AIST

感度法による K-Ar 年代測定では、アルゴン初生比の質量分別補正が可能であり、特に 50 万年より若い火山岩試料に対しても信頼性の高い年代値が報告されてきた。本研究では、九重火山中部地域に分布する扇ヶ鼻、中岳、三俣山火山（松の台岩屑なだれ堆積物）から採取した火山岩試料について感度法による K-Ar 年代測定を実施した。Ar 同位体の測定は MM5400Ar 型希ガス質量分析計を用い、K 定量はアサヒ理化製 FP-33D 型蛍光光度計を用いてリチウムを添加する内部標準法により実施した。

九重火山は地形的に西部、中部、東部に区分され、大まかに西部が古く、東部が新しい。活動ステージは 4 つに区分され、九重火山の活動開始から飯田火砕流噴火の前までの第 1 期、飯田火砕流の噴火活動である第 2 期、中部の多くの山体と東部の山体基底部を形成した第 3 期、及び東部での苦鉄質マグマの噴出から現在までの第 4 期である（川辺ほか、2015）。これまで従来法の同位体希釈法（星住ほか、2013）及び感度法（山崎ほか、2014）による K-Ar 年代測定から、主に第 1 期の活動史が明らかにされてきた。それらによると、約 200 ka に最も西に位置する獺師山から九重火山の活動が開始し、約 150 ka に中部の基底部を構成する杓掛山と硫黄山が形成された。その後、西部の黒岩山と中部の鳴子山が約 90 ka に形成され、活動が中部に移ってきたと考えられる。

中部の火山体の大部分は、54 ka (¹⁴C 年代; 奥野ほか、2013) に起きた九重火山最大の飯田火砕流噴火より後に形成され、扇ヶ鼻火山（扇ヶ鼻、岩井川岳、肥前ヶ城など）、中岳火山（中岳、久住山、稲星山など）、三俣山火山、星生山火山などから構成されている（川辺ほか、2015）。中部の火山体については、同位体希釈法による K-Ar 年代測定を適用するには、予想年代が若いこともあり、これまで年代末詳の部分が多かったが、最近では熱ルミネッセンス（TL）年代等により活動史が明らかになりつつある。

扇ヶ鼻火山については、南斜面の溶岩（扇ヶ鼻南溶岩）の上流部から 34 ± 3 (1 σ 水準) ka の年代が得られた。この年代は TL 年代 (34~37 ka; 奥野ほか、2013) とよく一致し、地質層序とも矛盾はない。一方、同溶岩の下流部の試料からは 65 ± 8 ka の年代が得られ、上流部に比べ誤差の範囲を超えて古く、むしろ、隣接する岩井川岳溶岩の TL 年代 (60~70 ka; 奥野ほか、2013) に近かった。このことから、扇ヶ鼻南溶岩は、噴出年代の異なる複数の溶岩から構成されている可能性がある。

中岳火山の一部である稲星山の溶岩からは、層序に一致する 46 ± 12 ka の年代が得られ、飯田火砕流とほぼ同時期、もしくは、すぐ後の活動で形成したと考えられる。

三俣山火山の北方に分布する松の台岩屑なだれ堆積物は三俣山起源と考えられ、その全岩化学組成も三俣山の噴出物と類似する。松の台岩屑なだれ堆積物中の岩塊の K-Ar 年代を測定したところ、 36 ± 12 ka の年代が得られた。この年代は同堆積物中の木片の ¹⁴C 年代 (約 20 ka; 川辺ほか、2014) と誤差の範囲で一致し、松の台岩屑なだれが、三俣山火山成長中に発生したとの地質層序（川辺ほか、2015）と矛盾しない。今後、三俣山火山から採取した試料の K-Ar 年代測定も実施予定であるが、今回の年代測定の結果から、九重火山の中部では、飯田火砕流が噴出した後の約 54~30 ka の間に、複数の山体を形成するような活動があったと考えられる。

キーワード: 九重火山, K-Ar 年代測定, 感度法

Keywords: Kuju volcano, K-Ar dating, Unspiked method

CHIME 年代測定におけるエックス線の干渉補正モデルの影響評価 Validation of X-ray interference correction methods in EPMA-CHIME dating

加藤 丈典^{1*}; Cho Deung-Lyong²; Jeon Mi-Jung³
KATO, Takenori^{1*}; CHO, Deyng-lyong²; JEON, Mi-jung³

¹ 名古屋大学年代測定総合研究センター, ² 韓国地質資源研究院国土地質研究本部, ³ 釜山国立大学共同実験実習館
¹Center for Chronological Research, Nagoya University, ²Geological Mapping Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, ³Center for Research Facilities, Pusan National University

CHIME 年代測定は電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) を用いることにより、ミクロンスケールの非破壊年代測定を行うことができる。CHIME 年代測定では、ウラン、トリウム及び鉛の正確かつ高精度な定量分析を行う必要がある。EPMA では加速した電子の衝突により発生する特性エックス線の強度から濃度を測定するが、元素ごとの特性エックス線強度を測定しなければならない。しかし、複数元素を含む試料では、ある元素から発生するエックス線が他の元素の特性エックス線と近接するエネルギーを持つことがある。このような場合、測定されたエックス線強度に対して干渉補正を行い目的とする元素の真のエックス線強度を見積もる必要がある。

エックス線干渉補正では、(1) 波形分離に基づく方法、(2) エックス線強度比を用いる方法 [1]、及び (3) 化学組成の見かけ上の比を用いる方法 [2] がある。EPMA を用いた CHIME 年代測定における干渉補正において、これらの手法を評価した。

波形分離に基づく方法は (1) ピークプロファイルを用いるため微量元素に適用するのが困難であること、及び、(2) 基準になるプロファイルを作成した試料と年代測定の対象試料で妨害エックス線の波形形状が異なる場合に大きな誤差を生じさせるという問題がある。エックス線強度比を用いる方法は、微量元素でも容易に適用可能ではあるが、干渉補正の決定に用いた試料と年代測定の対象試料の化学組成がことなる場合、質量数係数の違いなどの要因により不正確になる。化学組成の見かけ上の比を用いる方法は、干渉補正を決定する際に、化学組成既知の試料が必要となる。

名古屋大学の JCXA-733 (日本電子)、韓国地質資源研究院の SX-50 (カメカ) と釜山国立大学の SX-100 (カメカ) を用いて U に対する Th の干渉及び Pb に対する Th と Y の干渉について評価した。その結果、Donovan ら [2] の指摘通り、X 線強度の段階で補正を行う方法は物質依存性が大きく、化学組成の見かけ上の比を用いる方法は物質依存性が小さいことが示された。したがって、正確な CHIME 年代を得るためには、化学組成の見かけ上の比を用いることが望ましい。

[1] Åmli & Griffin, W.L. (1975) *Amer. Mineral.*, 60, 599.

[2] Donovan, J.J., Snyder, D.A. & Rivers, M.L. (1993) *Microbeam Anal.*, 2, 23.

キーワード: CHIME 年代測定, 干渉補正, 電子プローブマイクロアナライザー (EPMA), 定量分析

Keywords: CHIME dating, X-ray interference correction, electron probe microanalysis (EPMA), quantitative analysis

ジルコンの外部面を用いた LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定：マグマ活動履歴を読めるか？

LA-ICP-MS U-Pb dating using non-polished zircons: Can we read magma residence time?

伊藤 久敏^{1*}
ITO, Hisatoshi^{1*}

¹ 電力中央研究所
¹Central Research Institute of Electric Power Industry

LA-ICP-MS を用いるジルコンの U-Pb 年代測定は、TIMS に比べると年代決定精度が劣り、SIMS に比べると空間分解能に劣るとされている。しかしながら、LA-ICP-MS は TIMS や SIMS にはない利点がある。LA-ICP-MS は、通常、1 回の測定で、ジルコンを 20 μ m 程度掘削する (SIMS は通常 2 μ m 程度)。これは、ジルコンの表面から深部 (コア部) までの情報が一度に得られることを意味し、TIMS や SIMS にはない利点と考えられる。特に、研磨しないジルコンを用いれば、1 回の測定で、ジルコンの結晶成長の最初から最後まで履歴 (マグマ活動履歴) を読める可能性がある。但し、LA-ICP-MS ではサンプリング時間の経過につれて (深く掘削するにつれて) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比が上昇する現象 (down-hole fractionation) が存在する (これは U-Pb 年代を見掛け上古くする)。今回、この効果を考慮に入れた場合でも、世界で最も噴出量が多いとされる酸性火山岩である Fish Canyon Tuff のマグマ活動継続時間が、従来考えられている 40 万年以下ではなく、100 万年以上であると推定されることを報告し、未研磨ジルコンを用いる LA-ICP-MS 法の有用性を議論する。

キーワード: U-Pb 年代測定, ジルコン, LA-ICP-MS, マグマ継続時間, Fish Canyon Tuff
Keywords: U-Pb dating, zircon, LA-ICP-MS, magma residence time, Fish Canyon Tuff

火星表層環境史の解明に向けた、火星隕石の水素同位体比&ウランー鉛年代のNanoSIMS局所同位体比分析

Investigation of martian surface history: NanoSIMS analyses of D/H ratios and U-Pb chronology of martian meteorites

小池 みずほ^{1*}; 佐野 有司¹; 高畑 直人¹; 石田 章純¹; 杉浦 直治²; Anand Mahesh³
KOIKE, Mizuho^{1*}; SANO, Yuji¹; TAKAHATA, Naoto¹; ISHIDA, Akizumi¹; SUGIURA, Naoji²; ANAND, Mahesh³

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ³ Department of Physical Sciences, The Open University, UK

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, ² Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, ³ Department of Physical Sciences, The Open University, UK

水は、地球型惑星の表層環境や生命の存在にとって、非常に重要な物質である。火星表層には粘土鉱物や流水地形が見られ、かつて液体水が存在したことが示唆される [1][2]。しかし、水の存在期間や規模については十分わかっていない。現在の火星大気の水素同位体比 (D/H 比) は地球の 5 倍以上重水素に富み [3]、過去の大規模な表層水散逸が指摘されている。一方で、火星隕石は過去の表層水や初生水の D/H 比を記録するため、表層水散逸史の手がかりとして期待される [4][5][6][7][8]。特に、隕石中のリン酸塩鉱物は、D/H 比とともにウランー鉛年代の情報を持つため、隕石の記録から過去の環境を推定する上で重要である。本研究では、2 種類の特徴的な火星隕石: 太古の orthopyroxenite である ALH 84001 (ALH) と、若い enriched shergottite である LAR 06319 (LAR) について、リン酸塩鉱物の D/H 比とウランー鉛年代を調べ、さらに LAR のメルト・インクルージョンの D/H 比を調べた。

ALH では、ウランー鉛年代既知 [9] のメルリライト 3 粒の D/H 比を分析した。LAR では、複数のリン酸塩 (アパタイト、メルリライト) にてウランー鉛年代を求めた後、リン酸塩鉱物とメルト・インクルージョンの D/H 比を調べた。分析には、東京大学大気海洋研究所設置の二次イオン質量分析計 NanoSIMS を用いている。年代分析は先行研究 [9] と同条件で行った。D/H 比分析は、一次イオンに Cs⁺ を使い、¹H⁻, ²D⁻, ¹²C⁻, ¹⁸O⁻ の二次イオンを計測し、標準試料としてモロッコ産の天然アパタイトおよび NIST SRM 610 ガラスを利用した。また、表面吸着水素による汚染を防ぐため、試料は金蒸着の前後で各一晚、約 100 度でベイクしている。さらに、先行研究 [7] に従い、チャンバ内の残留水素、試料クラック中の有機物による汚染を軽減した。

ALH メルリライトの D/H 比は、 δD 値で -300~1970 ‰ であった。これは、報告されている ALH の炭酸塩鉱物およびマスケリナイトの D/H 比と整合的である [4]。同じメルリライト粒のウランー鉛が 3990Ma の変成年代を示すことから [9]、この D/H 比は、3990Ma の衝撃加熱またはその後の水質変成で取り込まれた表層水の情報であると思われる。また本結果は、約 40 億年前までに火星表層水の大部分が失われたとする二段階進化説 [5] を支持する。一方、LAR リン酸塩鉱物のウランー鉛年代は 167 $\pm$ 57 Ma と得られ、他の年代系と誤差の範囲内で一致した。リン酸塩鉱物のウランー鉛系は形成以降、閉鎖系であったと解釈できる。LAR の D/H 比は、アパタイト: 3340~4380 ‰, メルリライト: 1070~5260 ‰, メルト・インクルージョン: 1150~6830 ‰ となり、鉱物ごとの違い (i.e. インクルージョン > メルリライト > アパタイト) が見られた。同様の傾向が、他の shergottite 隕石でも報告されている [7]。リン酸塩鉱物が形成後に変成を受けていないとすれば、リン酸塩鉱物の D/H 比は、マグマが取り込んだ地殻物質を反映していると思われる。一方で、インクルージョンの結果から、より高い D/H 比を持つ水が、メルトの捕獲過程または鉱物形成後にインクルージョンに取り込まれた可能性が考えられる。

[1] Bibring et al. (2006) Science 312, 400-404. [2] Ehlmann et al. (2011) Nature 479, 53-60. [3] Owen et al. (1988) Science 240, 1767-1770. [4] Sugiura and Hoshino (2000) Meteorit. Planet. Sci. 35, 373-380. [5] Greenwood et al. (2008) Geophys. Res. Lett. L05203, 1-5. [6] Usui et al. (2012) Earth Planet. Sci. Lett. 357, 119-129. [7] Hu et al. (2014) Geochim. Cosmochim. Acta 140, 321-333. [8] Usui et al. (2015) Earth Planet. Sci. Lett. 410, 140-151. [9] Koike et al. (2014) Geochem. J. 48, 423-431.

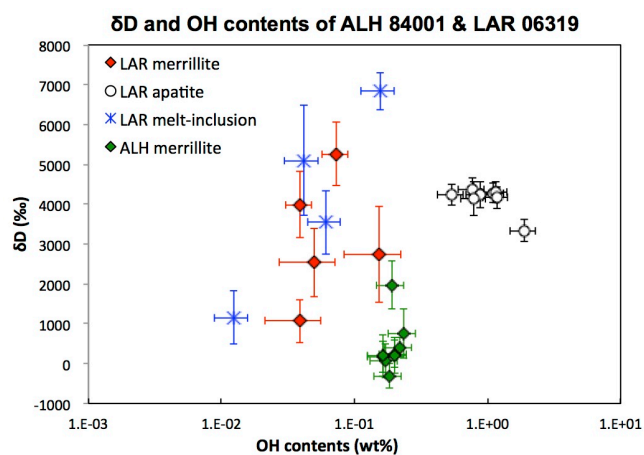
キーワード: 火星隕石, NanoSIMS, 水素同位体比, ウランー鉛年代分析, リン酸塩鉱物, メルト・インクルージョン

Keywords: martian meteorites, NanoSIMS, D/H ratios, U-Pb dating, phosphates, melt-inclusions

SGL39-07

会場:A03

時間:5月24日 10:30-10:45



酸素同位体比年輪年代法の地球科学的応用の可能性と課題

Application of oxygen isotopic dendrochronology to Earth Science: Its potentials and challenges

中塚 武^{1*}

NAKATSUKA, Takeshi^{1*}

¹ 総合地球環境学研究所

¹ Research Institute for Humanity and Nature

●はじめに

考古学で主に使われてきた年輪年代法は、「特定の地域で成長した特定の樹種の木材の年輪幅が、気温や降水量などの経年変動を反映して、個体間で同調して変化すること」を原理とした高精度の年代決定法であり、地球科学の分野でも、地滑りや火砕流で埋没した樹木の枯死年からの地震や噴火の発生年の決定や、気候変動の復元に広く用いられている。

しかし従来の年輪年代法では、第一に、任意の時代の木材の年代決定のためには、年輪幅の標準変動曲線（マスタークロノロジー）を地域毎にできるだけ長く作成する必要があること、第二に、年輪幅の気候応答特性は樹種毎に違うため、マスタークロノロジーは樹種毎に作成する必要があること。第三に、樹木の枯死年の決定には、樹皮付きの試料が必要になること、などの課題があった。本講演では、年輪セルロースの酸素同位体比を用いることで、これらの課題がどのように克服され、その地球科学への応用に際して、どのような展望が開けるのかについて議論したい。

●従来の年輪年代法を地球科学に応用する上での課題

これらの課題に対して、年輪幅に基づく年輪年代法の現状は、以下の通りである。第一に、世界では一万年を越える標準変動曲線が作成された地域もあるが、そうした地域は氷期に氷床に覆われる寒冷域のため、最終氷期を越えて延伸できる展望は無い。一方温暖な日本では最終氷期以前の木材も発見されるが、高い樹木個体密度に伴う生態学的攪乱のため、個体間での年輪幅のパターンマッチング（クロスデーティング）が難しく、クロノロジーはヒノキやスギの約3千年分に留まっている。その結果、第二に、日本では膨大な種類の樹木が存在するが、ほとんどの樹種は年輪年代法の対象外であり、第三に、樹皮が残りやすい試料の多くは小径木で年輪数が少なく、年輪幅だけでは統計的な信頼に足る年代決定はできないことが多い。

●酸素同位体比の年輪年代法における特徴

年輪幅の代わりにセルロースの酸素同位体比を用いる新しい年輪年代法には、以下のようなデメリットとメリットがある。デメリットは、「測定に年輪幅の千倍もの手間が掛かること」と「地中に長く埋没していた木材の一部は、セルロースが選択的に分解・消失していて酸素同位体比の測定ができないこと」である。特に後者は従来の年輪年代法はもちろん、放射性炭素年代法にも無いデメリットであり、応用面での一つの制約になっている。

一方のメリットは、年輪セルロースの酸素同位体比が、成長期の降水同位体比と相対湿度という2つの気象因子のみを反映するため、「同じ季節に成長する樹木であれば、その変動パターンは樹種の違いを越えて高い相関性を示すこと」にある。更にその変動パターンは、日本のような温暖湿潤域では、「夏の降水量の指標」になるため、年単位の古気候復元に使える。また年層を細かくスライスして、酸素同位体比の年層内変化を測定することで、「各年層の中から高解像度の季節変動の記録を得ることも可能」である。

●酸素同位体比年輪年代法を地球科学に応用するメリット

こうした酸素同位体比のメリットを生かすことにより、年輪年代法を地球科学に応用する際の上記の3つの課題は、次のように克服されつつある。第一に、年輪セルロース酸素同位体比の高い個体間相関性のため、従来年輪幅ではクロスデーティングができなかった数千年前の埋没木材群でも次々と年代決定が成功しており（2015年2月現在、本州で4300年前まで到達）、埋没木の系統的な発掘が進めば、近い将来、日本でも最終氷期に達するような超長期の年輪酸素同位体比のマスタークロノロジーの構築が可能になるかも知れない。第二に、その成果は樹種の違いを越えてあらゆる発掘木材の年代決定に利用できるため、地震や火山噴火などの地球科学的イベントの年単位での年代が、関連地層中の枯死木の年輪測定により決定できるものと思われる。第三に、セルロース酸素同位体比の年層内変動データの整備が進めば、14C測定と組み合わせることで、年輪数が5-10年程度の小径木についても、年代決定ができる展望が出てくる。

酸素同位体比年輪年代法による多様な木材の年単位での年代決定は、考古学における人間の歴史の研究に効力を発揮するだけでなく、テフラ年代の一年単位での確定、地震や津波の短期間での集中発生の可能性の検討、氷河期における気候のテレコネクションパターンの解析など、将来、全く新しい研究分野が開ける可能性があり、系統的な努力の傾注が求められている。

SGL39-08

会場:A03

時間:5 月 24 日 11:00-11:15

キーワード: 樹木年輪, セルロース, 酸素同位体比, 年輪年代法
Keywords: tree ring, cellulose, oxygen isotope ratio, dendrochronology

後期完新世層からの木炭の ^{14}C 年代測定のためのABA洗浄の再検証 Re-evaluation of ABA treatment for ^{14}C dating of charcoal from the Late Holocene layer

渥美 晋^{1*}
ATSUMI, Shin^{1*}

¹ 東京理科大学大学院総合化学研究科

¹Tokyo university of science, Graduate School of Chemical Sciences and Technology

放射生炭素年代測定法は地球科学や考古学で広く応用されている。特に考古学の分野では数十年単位の高精度測定が求められている。同測定法は発展初期から外部有機炭化物の混入による ^{14}C 年代値への影響が疑われ、解明が続けられてきた。しかし、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。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 ^{14}C 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 ^{14}C 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 ^{14}C 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。 ^{14}C 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、 ^{14}C 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。また、異なる8つのNaOH溶液の濃度でアルカリ洗浄した場合、1.2mol/Lで年代値が最も収束した。本研究の結果から、0.001, 0.01, 0.1, 1.0, 1.2mol/Lの5段階のアルカリ洗浄を推奨する。今回、我々は ^{14}C 年代測定法の問題点を体系的に論じる。

キーワード: ^{14}C 年代測定法, 後期完新世, 酸-アルカリ-酸 処理法, フミン酸, 三次元蛍光分光測定法

Keywords: Radiocarbon dating, Late Holocene, ABA method, Humic acid, 3D-Fluorescence spectroscopy

南アフリカ・バーバートン帯・フィグツリー層のU-Pb年代測定および有機炭素同位体測定

U-Pb dating of zircons and measurement of organic carbon isotope in the sedimentary rocks from the BGB

原田 拓哉^{1*}; 清川 昌一¹; 三木 翼¹; 寺司 周平¹; 堤 之恭²; 池原 実³

HARADA, Takuya^{1*}; KIYOKAWA, Shoichi¹; MIKI, Tsubasa¹; TERAJI, Shuhei¹; TSUTSUMI, Yukiyasu²; IKEHARA, Minoru³

¹九州大学理学部地球惑星科学科地球進化史部門, ²国立科学博物館地学研究部, ³高知大学海洋コア研究センター

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ²National Science Museum, ³Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University

バーバートン帯・フィグツリー層群下部のマペペ層は、約32億年前の堆積岩からなり、層序的には火山岩主体のオンファワット層群の上に重なる(Lowe D. R. et al., 1999)。しかし、岩相は場所ごとに大きく異なっており、比較的深い海から扇状地やBIFを含む浅海堆積層からなる。最終的には上方浅海化して、礫岩層からなるムーディーズ層群に移り変わるが、信頼できる堆積年代は明らかになっていない。本研究では、バーバートン帯南東部のコマチ川沿いに分布するマペペ層について、堆積年代の制限および堆積環境の復元を目的とし、層序記載および年代測定・帯磁率測定・有機炭素分析を行った。

南アフリカ・バーバートングリーンストーン帯における調査によって、以下のことが明らかになった。

【U-Pb 放射年代測定】

フィグツリー層群マペペ層は、可能性の高い堆積年代の制限を行うと、少なくとも3080 ± 19Ma以後に堆積したと解釈することができることが分かった。また、オンファワット層群では石英斑岩の貫入活動が約32億年前に起こっており、オンファワット層群の基盤岩に貫入している可能性があることが分かった。

【有機炭素分析】

緑色頁岩中の有機炭素量は最低値0.001wt.%, 最大値は4.835wt.%, 平均が0.72wt.%であった。コマチセクションから採取された緑色頁岩における有機炭素量を実現させるためには、1) 現在より生物生産量を増加させる、2) 酸化分解の量を減少させる、のどちらかを達成する必要があるが、生物生産量については、正味の生物生産量と碎屑粒子等他の供給量とのバランスで成り立っているため、有機炭素量だけでは議論は不可能である。また、黒色頁岩・緑色頁岩およびジャスパーの有機炭素同位体組成は-30.6‰から-20.3‰の間の値であった。本研究で得られた値におけるヒストグラムは-21‰から-32‰の間と-32‰以下の二つの範囲に分布し、そのうち前者はシアノバクテリアのような光合成細菌のδ¹³Corgの値と一致したため、これらの生物による活動の可能性が考えられる。

キーワード: U-Pb年代測定, 有機炭素同位体比測定, バーバートングリーンストーン帯

Keywords: U-Pb Dating of Zircons, Measurement of Organic Carbon Isotope, Barberton Greenstone Belt

太古代ジルコン中アパタイトの水素、ストロンチウム同位体比測定：初期地球内部進化の解明を目指して D/H and Sr isotopic ratios of apatite inclusions from Archean zircons to study Earth's evolution

石田 章純^{1*}; 高畑 直人¹; 佐野 有司¹; デイビット ジーン²; ピンティ ダニエル²
ISHIDA, Akizumi^{1*}; TAKAHATA, Naoto¹; SANO, Yuji¹; DAVID, Jean²; PINTI, Daniele²

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² ケベック大学モントリオール校

¹AORI Univ. Tokyo, ²Universite du Quebec a Montreal

太古代火成岩中の水素などの揮発性成分や、ストロンチウムなどインコンパティブルな元素の同位体比を明らかにすることは、初期地球の内部進化を解釈する重要な手掛かりの一つである。火成岩中に産するジルコンにはアパタイトやガラスなどの包有物が見られることがあり、特にアパタイトは水素やハロゲン、ストロンチウムなどの元素を保有しているため、分析対象として好ましい。こうした包有物はジルコンに保護されることによって初生的な同位体比を保持していると期待されるが、数十マイクロのジルコン中の包有物であるため数マイクロ程度の直径であるものがほとんどである。そのため、こうした包有物の分析には高精度かつ高空間分解能な手法が求められる。本研究では NanoSIMS50 を用いてこれらの問題へのアプローチを行った。

本研究におけるこれまでの分析において、カナダ、Nuvvuagittuq supracrustal belt のトーナル岩から分離されたジルコンを対象に NanoSIMS50 を用いた U-Pb 年代測定を行ってきた。過去の研究で報告されているこのトーナル岩の年代は、LA-MC-ICP-MS を用いた U-Pb 年代測定法で $3661 \pm 4 \text{ Ma}$ であるが、これと良く一致する $3638 \pm 19 \text{ Ma}$ の年代が得られた。一方で一部の試料において2つの年代値の不一致(ディスコーダント)が見られており、熱変成による鉛の損失が示唆された。このようなジルコンでは包有物中の揮発性元素の始原性は失われている可能性が高いと考えられる。そのような試料は対象外とし、包有物アパタイト中の水素同位体比およびストロンチウム同位体比の測定を行った。測定は Cs^+ イオンを1次イオンとして水素同位体比測定では H および D を、また、 O^- イオンを1次イオンとしてストロンチウム同位体比測定では ^{86}Sr 、 ^{87}Sr 、 ^{88}Sr を、磁場を変化させひとつの検出器で1組の同位体比を測定可能なよう分析を行った。測定においては試料表面のコンタミネーションやチャージアップの影響を極力低減するため、測定領域のスパッタリングや電子銃によるチャージアップの中和など最も効果的な方法を検証した。

アパタイトの水素同位体比の分析の結果、分析試料表面や分析チャンバーに由来する水素のコンタミネーションが大きいものの、ジルコン中アパタイトの水素同位体比値として $+17 \pm 40 \text{ ‰}$ という値を得た。これは Pope ら (2012) によって報告されている太古代海洋の水素同位体比値 -25 ‰ と比較して重い値であり、直接的に地球内部物質の水素同位体比を測定した初めての例である。ストロンチウムの同位体比の測定についてもアパタイトを対象とした分析手法の確立を進めており、本発表ではその最新の分析結果を報告する。

キーワード: アパタイト, ウラン鉛年代測定, 水素同位体比, ストロンチウム同位体比, 太古代

Keywords: apatite, U-Pb dating, hydrogen isotopic ratio, strontium isotopic ratio, Archean

硫黄, 炭素, 窒素の深部循環 Geodynamic cycles of sulfur, carbon and nitrogen

鹿児島 渉悟^{1*}; 佐野 有司¹
KAGOSHIMA, Takanori^{1*}; SANO, Yuji¹

¹ 東京大学大気海洋研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

硫黄は生物活動のみならず工業・医療面でも重要性の高い元素であるが、そのマントル-地球表層間における深部循環は十分に定量化されてこなかった。この物質循環を解明するためには希ガス元素であるヘリウムの同位体 ^3He が有用である。 ^3He は、そのマントルから大気、海洋へのフラックスが良く制約されており、他の揮発性物質のフラックスを推定するためのトレーサーとなる。最近になって、MORB、海底熱水、および火山ガスに含まれるヘリウム、硫黄、炭素の組成を基に、硫黄、炭素の上部マントルから地球表層環境へのフラックスが推定された [1]。これらのフラックスの推定は、海嶺における ^3He フラックスの最新の推定値である 530 mol/y [2] を基準にして行われた。東太平洋海膨 (13N, 17S)、大西洋中央海嶺 (15N, 37N)、中央インド洋海嶺 (24S-25S) の6か所で採取された MORB の気泡、および東太平洋海膨 (11N-47N, 17S-19S)、大西洋中央海嶺 (23N-38N) における10か所の高温 ($>200^\circ\text{C}$) の海底熱水の組成から推定された中央海嶺における $\text{S}/^3\text{He}$ 比は 1.9×10^8 であり、硫黄フラックスは 100 Gmol/y と計算された。また環太平洋地域の15か所で採取された高温 ($>200^\circ\text{C}$) の火山ガスの $\text{S}/^3\text{He}$ 比の平均値 (6.5×10^9) および、海嶺における ^3He フラックスから推定された火山弧における ^3He フラックス (110 Gmol/y) を基に、火山弧における硫黄フラックスは 720 Gmol/y と計算され、海嶺からのフラックスよりも大きい値となった。しかしながら火山ガス中の硫黄の起源はマントルだけではない。火山ガスの $\text{S}/^3\text{He}$ 比および $\delta^{34}\text{S}$ 値は、上部マントル由来の硫黄、沈み込んだ堆積物やスラブ由来の硫化物、沈み込んだ海水や堆積物由来の硫酸塩の三つの端成分のミキシングによって説明可能である。火山弧からの硫黄フラックスに対する上部マントルの寄与は2.9%にあたる 21 Gmol/y であり、上部マントルからのフラックスは火山弧よりも海嶺の方が大きいことが示された。炭素の海嶺からのフラックスは MORB および海底熱水のデータを基にした上部マントルにおける $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比 (2.2×10^9 [3]) から 1200 Gmol/y と計算された。環太平洋地域の24か所で採取された高温 ($>200^\circ\text{C}$) の火山ガスの $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比の平均値 (2.0×10^{10}) を基にした火山弧からのフラックスは 2200 Gmol/y であった。火山ガスの $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比および $\delta^{13}\text{C}$ 値は、上部マントル由来の成分、沈み込んだ有機堆積物由来の成分、沈み込んだ石灰岩とスラブ由来の炭酸塩とヘリウムの三つの端成分で説明可能であり [4]、火山弧からの炭素フラックスに対する上部マントルの寄与は11%にあたる 240 Gmol/y であると計算された。上部マントルから大気、海洋へのフラックスは炭素 (1440 Gmol/y) の方が硫黄 (121 Gmol/y) よりも12倍大きく、この比は二つの揮発性元素の表層存在度の比である13 [5] に近い。これは現在、地球表層に存在する硫黄と炭素の起源がともに上部マントルであることを示唆している。また、地球表層環境における硫黄と炭素のインベントリーの定常状態を仮定するとき、沈み込む硫黄、炭素の全量はそれぞれ 820 Gmol/y , 3400 Gmol/y となり、それらの15%, 42%にあたる量が火山弧からリターンせず地球深部へと到達しなければならない。本研究では硫黄、炭素のほかに窒素の物質循環についても定量化し、これらを比較して議論する。

参考文献: [1] Kagoshima et al. (2015) *Sci. Rep.* **5**, 8330. [2] Bianchi et al. (2010) *EPSL* **297**, 379-386. [3] Marty & Tolstikhin (1998) *Chem. Geol.* **145**, 233-248. [4] Sano & Marty (1995) *Chem. Geol.* **119**, 265-274. [5] Hilton et al. (2002) *RiMG* **47**, 319-370.

キーワード: 硫黄フラックス, 炭素フラックス, 窒素フラックス, 中央海嶺玄武岩, 海底熱水, 火山ガス
Keywords: sulfur flux, carbon flux, nitrogen flux, mid-ocean ridge basalt, hydrothermal fluid, volcanic gas

Petrology, Structure and Chemostratigraphic Correlation of Chehmit inlier, Tigray, Northern Ethiopia

Petrology, Structure and Chemostratigraphic Correlation of Chehmit inlier, Tigray, Northern Ethiopia

TESEMA HUNDESSA, Tadele^{1*}; ALENE, Mulugeta¹; SWANSON HYSELL, Nicholas²; MALOOF, Adam³
TESEMA HUNDESSA, Tadele^{1*}; ALENE, Mulugeta¹; SWANSON HYSELL, Nicholas²; MALOOF, Adam³

¹Addis Ababa University, ²university of california, Berkley, ³princeton university

¹Addis Ababa University, ²university of california, Berkley, ³princeton university

Chehmit area is one of the four exposed Neoproterozoic inliers in northern Ethiopia, which consists of both Tsaliyet and Tambien Group rocks. The metavolcanics, metavolcanoclastics and phyllite rocks exposed in the area represent the Tsaliyet Group whereas the mixed clastic-carbonate metasedimentary rocks constitute the Tambien Group deposited ~800-740Ma ago. An integrated structural, petrological and carbon and oxygen isotope study has been carried out to understand the deformation, metamorphic and Neoproterozoic history of the area. Field structural data demonstrate that there are at least three phases of deformations. Earliest deformation produced minor, steep tight folds and N-S trending, pervasive regional foliation; followed by the formation of major upright folds, and latest brittle structures. Petrographic study of rock samples from the area shows predominantly lower green schist facies metamorphism coeval with the earliest phase of deformation. Stable C and O isotope analysis of the carbonates is also carried out to evaluate chemostratigraphy. The limestone unit contains anomalous C-isotope depositional signature which, together with lithological features, enabled local and global correlations with other Neoproterozoic formations. The $\delta^{13}\text{C}$ values of the limestone in Chehmit range from -5.79 ‰ to -1.99 ‰ with an average value of -3.80 ‰ whereas the value of $\delta^{18}\text{O}$ ranges from -7.119 ‰ to -14.164 ‰ with an average value of -11.300 ‰. Although negative carbon isotope excursion in Neoproterozoic era is often related to snowball earth conditions, no glaciation features and erosion surfaces are observed in this unit. Thus the negative C-isotope excursion is, instead, correlated with the Bitter Springs Stage anomaly (found in Australia and Svalbard) which is considered to be the result of inertial interchange true polar wandering. The $\delta^{13}\text{C}$ values obtained from the Chehmit limestone indicate a match with the top most excursion of the Bitter Springs anomaly. Radiometric dating and paleomagnetic studies of the rocks of the Chehmit area can be useful to further support this hypothesis

キーワード: Tambien Group, chehmit area, carbonates, Neoproterozoic, Bitter spring stage, True polar wandering

Keywords: Tambien Group, chehmit area, carbonates, Neoproterozoic, Bitter spring stage, True polar wandering

ジルコン中のアルファリコイルトラック観察の試み Observation of alpha recoil tracks in zircon: An attempt

長谷部 徳子^{1*}; 小坂 明弓¹; 伊藤 健太郎¹; 福岡 剛志¹; 松本 篤¹
HASEBE, Noriko^{1*}; KOZAKA, Ayumi¹; ITO, Kentaro¹; FUKUMA, Takeshi¹; MATSUKI, Atsushi¹

¹ 金沢大学

¹Kanazawa University

重元素が放射壊変する際に結晶中に残される放射線損傷を利用する放射年代測定にフィッショントラック (FT) 法やアルファリコイルトラック (ART) 法がある。ART は ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th やその娘核種が α 線を放出した際に残った原子核がその反動で動くためにできる損傷である。FT に比してサイズが小さいためその観察は難しく、これまでは主として雲母類での観察例があるのみであった。ウラン濃度の高いジルコンで ART 法が確立できれば数千年オーダーの第四紀試料の年代測定を可能にできる。

原子間力顕微鏡を利用し、ジルコン表面を観察したところ、約 33Ma の FT 年代を示す試料で、FT 以外にも 10 ナノ程度の深さの凹みが多数存在し、表面に波状の高低差が生じていた。この波状構造は試料を 600 °C で 1 時間アニーリングしてもなくならないが、1000 °C でアニーリングすると消失した。また現世の火山噴出物から分離したジルコンの表面にも、少数であるが、同様のサイズの凹みが観察された。これらは観察条件を変化させても同じ地点に存在し、測定ノイズではなく確かに凹みであった。これら凹みが ART であるかどうかを確認するために、さらに約 6 万年の年代の火山岩から分離したジルコンの観察を進めた。このジルコンにも同様のサイズの凹みが存在し、エッチングを進めると場所によっては凹みの数が増加した。これらのことからこの凹みが ART である可能性が高いと思われる。

キーワード: 放射線損傷, 原子間力顕微鏡, アルファリコイルトラック, フィッショントラック, ジルコン
Keywords: radiation damage, atomic force microscope, alpha recoil track, fission track, zircon

黒雲母の塑性変形を伴う破碎帯の活動時期：FT 熱年代による年代制約の試み Attempts to date slip event of crush zones associated with plastic deformations of biotite based on FT thermochronology

末岡 茂^{1*}; 島田 耕史¹; 石丸 恒存¹; 丹羽 正和¹; 安江 健一¹; 梅田 浩司¹; 檀原 徹²; 岩野 英樹²
SUEOKA, Shigeru^{1*}; SHIMADA, Koji¹; ISHIMARU, Tsuneari¹; NIWA, Masakazu¹; YASUE, Ken-ichi¹;
UMEDA, Koji¹; DANHARA, Tohru²; IWANO, Hideki²

¹ 日本原子力研究開発機構, ² 株式会社京都フィッション・トラック

¹ Japan Atomic Energy Agency, ² Kyoto Fission-Track Co., Ltd.

一般に、断層の活動年代は、断層変位を受けた地形面や地層、または人工物などの変位指標の年代から推定される。しかし、基盤岩中の断層など、変位指標を持たない断層についてはこのような変動地形学的手法は適用できない。上記のような断層に対しては、断層活動時の摩擦発熱や岩石破碎に伴う放射年代のリセット（例えば、Ikeya et al., 1982, Science; Murakami and Tagami, 2004, GRL; Yamada et al., 2012, JAGS; 雁沢ほか, 2013, 地質学雑誌）や、断層活動後に形成された粘土鉱物や熱水脈の形成年代（例えば、Zwingmann et al., 2004, JSG; Watanabe et al., 2008, Geochem. J.; Siebel et al., 2009, JES; Yamasaki et al., 2013, Chem. Geol.）に基づいた、地球年代学的なアプローチが試みられてきた（Tagami, 2012, Tectonophysics.）。しかし、断層帯近傍における熱現象や物質移動は単純ではなく、決定的な方法は未だに確立されていない。同手法の今後の発展のためには、さらなる基礎研究と、様々な地形・地質条件と年代測定手法の組み合わせにおける事例研究の蓄積が必要である。

本講演では、基盤岩中の黒雲母の塑性変形を伴う破碎帯に対し、フィッション・トラック（FT）熱年代測定法を用いて、最新活動年代の推定を試みた事例について紹介する。本研究で対象としたのは、敦賀半島北西部の高速増殖原型炉もんじゅ敷地内に露出する、江若花崗岩敦賀岩体中に分布する破碎帯である。原地地形面および上載地層は、もんじゅ建設工事に伴い掘削されており、変動地形学的手法による断層活動年代の推定は困難である。観察される破碎帯はいずれも長さ数～10 数 m、幅数 cm 程度と小規模で、網目状の分布を呈し、概して延性的である。破碎帯沿いには、黒雲母粒子の塑性変形が普遍的に観察され、150～250 °C 程度以上（例えば、Lin, 1999, Tectonophysics.; Passchier & Trouw, 2005, “Microtectonics 2nd ed.”）での変形が示唆される。母岩である江若花崗岩敦賀岩体は白亜紀末ごろに貫入し、その後の数 100 万年程度で周辺温度まで冷却され、古第三紀初頭以降は岩体スケールでの二次的加熱は受けていない（末岡ほか, 投稿中）。一方、破碎帯の近くには、約 19Ma に玄武岩岩脈が貫入しているように（末岡ほか, 投稿中）、岩体冷却以降でも、破碎帯周辺のみが局所的に加熱されるようなイベントの存在は否定できない。本研究では、破碎帯周辺が最後に 150～250 °C 程度以上に加熱された時期が破碎帯の最新活動年代に一致するという仮定に基づき、破碎帯周辺の花崗岩の FT 熱年代解析を行っている。アパタイト FT 年代のリセットは、 $10^6 \sim 10^7$ 年の長期スケールでは 90～120 °C 程度で起こるが、玄武岩岩脈の貫入や熱水活動のような時間～年単位の短期間の加熱に対しては 200 °C 以上の温度が必要となる（例えば、Laslett et al., 1987, Chem. Geol.）。これは、上記の黒雲母の塑性変形温度領域とほぼ一致する。講演当日は、FT 解析結果の速報を報告予定である。

キーワード: フィッション・トラック熱年代, 破碎帯の年代測定, 黒雲母の塑性変形, 江若花崗岩

Keywords: fission-track thermochronology, dating of crush zones, plastic deformation of biotite, Kojaku Granite

石英の OSL 特性変化に関する物理的履歴の影響 Effects of physical aging degradation on OSL properties of quartz

長田 章良^{1*}; 山中 千博¹; 高田 将志²
OSADA, Akira^{1*}; YAMANAKA, Chihiro¹; TAKADA, Masashi²

¹ 大阪大学大学院理学研究科, ² 奈良女子大学文学部人文社会学科

¹Department of Earth and Space Science, Osaka University, ²Department of History, Sociology and Geography, Faculty of Letters, Nara Women's University

光励起発光 (OSL) 年代測定法は、石英や長石が蓄積する自然放射線被曝量の情報を用いた年代測定法である。鉱物の価電子帯の電子や正孔は自然放射線により励起され、不純物センターや酸素欠陥などに捕らえられ、準安定状態を形成する。ルミネッセンス法では、光や熱によってこの準安定状態の電子を伝導帯に励起し、正孔と再結合した際の発光を計測する。こうしたルミネッセンス法の一つである OSL 法では、太陽光への曝露で簡単に起こる発光を観測するため、土砂が堆積した時点から現在までの年代を知ることができる。しかし、試料によって同じ放射線照射量に対しても発光量の違いがあり、また励起光に反応して発光する時間も試料によって異なっている。年代測定には時間が短い成分 (Fast 成分) が卓越した試料が適しており、火成岩質の岩石に由来する石英では、より Fast 成分が見られにくいという報告がある [1]。

本研究では、石英の OSL 特性と物理的機構の関連を解明することを目的としている。特に今回は発光強度・感度の変化について詳しく実験を行った。具体的には、ボールミルで削る時間による発光量の比較、 α 線照射による発光量変化、加熱による発光量・発光感度変化の3つについて調べた。測定機器は RISØ-TL/OSL reader DA-20 を用いた。ボールミルによる比較実験では、試薬石英に対して削る時間 30 分、1 時間、2 時間のものについて粒径 149~250 μm の粒子を抽出し発光量を比較した。 α 線照射試料は、照射線量 1.3kGy、5.5kGy、63kGy の3試料について測定を行った。加熱実験では、上記の2パターンの処理を加えた試薬石英の他に、Li を 0.01mol% ドープした試薬石英、そして発光量・感度の良い自然試料として、エアーズロックの石英砂とインド・タール砂漠の石英砂を用意し、300 °C ~ 800 °C まで 100 °C 毎に 60 分間加熱施した。

ボールミルによる実験においては、削る時間の増加とともに発光量が増加し、 α 線照射実験では、ボールミルによって削った石英と比較して 100 倍以上の強い発光が観測された。これらの結果は、 α 線の飛程を考えると、発光量変化の要因として石英粒子表面付近の欠陥が発光に大きく関わっているということがわかる。

また加熱実験においては、500 °C 以上の加熱により発光量は最大で約 10 倍に増加し、その傾向はボールミル、 α 線照射を行った試料で顕著であった。しかし逆に、Li をドープした試薬石英では、300 °C 以上の加熱で最小 10 分の 1 程度の発光量まで減少した。エアーズロック試料では 500 °C 以上の加熱で発光量の増加が見られなかったが、インド・タール砂漠試料では最大で約 20 倍と、ボールミル・ α 線照射を行った試薬石英の増加率に比べてもさらに大きな発光量の増加が見られた。これらの加熱による発光量変化の実験結果とはまた異なり、発光感度 (Fast 成分の発光量全体における割合) については、試薬石英で加熱による変化が見られなかったのに対し、発光感度の良い自然試料については最大約 5 倍の感度の増加が見られた。これら加熱実験の結果は、加熱による電子の移動が発光量の増加および発光パターンの変化に関わっていること、そして加熱に対する安定性が Fast 成分の発光とそれ以外の発光を示すセンター、および発光を妨害するセンターで異なっていることを示唆している。

参考文献

[1] Tokuyasu K., Tanaka K., Tsukamoto S., and Murray A., "The characteristics of OSL signal from quartz grains extracted from modern sediments in Japan", *Geochronometria* 2010, vol.37, pp13-19.

キーワード: ルミネッセンス年代測定, 光励起発光 (OSL), 石英
Keywords: Luminescence dating, Optically Stimulated Luminescence, Quartz

安定同位体比質量分析計 IsoPrime100 を用いた高精度・高感度分析システムの開発 High precision and high sensitive stable isotopic analysis by using original CF/DI-IRMS system for IsoPrime100

中根 雅晴¹; 田中 崇史¹; 鐵 智美¹; 高木 悠花²; 石村 豊穂^{1*}

NAKANE, Masaharu¹; TANAKA, Takashi¹; TETSU, Tomomi¹; TAKAGI, Haruka²; ISHIMURA, Toyoho^{1*}

¹ 茨城工業高等専門学校, ² 早稲田大学

¹ National Institute of Technology, Ibaraki College, ² Waseda University

[はじめに]

炭酸塩、特に炭酸カルシウム (CaCO_3) の炭素酸素安定同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) は、生成当時の環境履歴をその同位体値に記録することから、過去 60 年以上にわたり世界中の地球科学研究で活用されてきた。特に生物源炭酸塩殻の安定同位体組成は、海水の $\delta^{18}\text{O}$ (塩分変動・全球氷床量) と水温履歴、そして溶存無機炭素 (DIC) の $\delta^{13}\text{C}$ を記録するので、物質循環や環境変動メカニズムの解明に関わる基礎情報として重要である。また、堆積物中や岩石中で無機沈殿によって形成される炭酸塩の安定同位体組成も、生成に伴う環境履歴を記録していることから、周辺水の温度や流体に含まれる炭素源の推定に活用することができる。この安定同位体値を国際対比するためには、国際標準炭酸塩や標準海水を用いた安定同位体比分析を高精度で安定して行うことが分析の基本となる。同時に、常に同じ基準での分析を維持するためには分析機器の長期安定性を確保する必要がある。しかし最近の商用分析システムは自動化と電子化 (=ブラックボックス化) が進み、結果的に経年劣化への対応に困難を伴う場合があり、常に国際対比に耐えうるだけの分析精度を維持することが容易ではない。

当該研究の進展に伴い、高解像度解析を目的とした微量炭酸塩の「高感度」安定同位体比分析が重要視されている。また、近年注目されている絶対温度指標である clumped-isotope 古水温計 (Gosh et al., 2006 など) の研究には質量数 47 の CO_2 の高精度分析が必須であり、従来よりも「高精度」での分析をおこなう必要がある。これらの問題を解決するために、茨城高専では 2014 年に 2 台の安定同位体比質量分析計 IsoPrime100 を導入し、分析計の高度な調整を進めている。加えて、信頼性と安定性の高い分析を実現するための試料導入システムを独自に構築し、高精度化と高感度化を実現しつつ分析の効率化と透明性の確保を目指した。

[高精度安定同位体比分析の概要]

デュアルインレット式安定同位体比質量分析計と、独自に構築した小型多連式ガス精製・保存システム (SPICAL2) およびガス試料導入システムからなる。100 % CO_2 ガス分析の外部精度は $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ ともに 0.01 ‰前後であり、内部精度とほぼ同等の外部精度を引き出せることがわかった。また、国際標準炭酸塩 NBS19 の外部精度は、短期 (1 日, $n=5$) で $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ ともに ± 0.011 ‰, 長期 (1 ヶ月, $n=36$) では $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ それぞれ, ± 0.026 ‰と ± 0.056 ‰であった。

[高感度安定同位体比分析の概要]

連続フロー型安定同位体比質量分析計と自作の前処理システム (Ishimura et al., 2004, 2008) から構成され、炭酸塩試料と海水試料を分析した際の外部精度は $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ ともに ± 0.1 ‰程度であり、0.1 μg 以上の炭酸塩 (CO_2 で 1nmol に相当) でも同位体比を測定できることがわかった。分析に必要な炭酸塩量は、最新の商用分析システムと比べても 1/100 以下での分析が可能であり、ナノグラムオーダーの炭酸塩の安定同位体組成を古海洋学・環境解析学に有用な精度で簡便に分析することが可能である。これまでの安定同位体比分析と比較すると、(1) サンプル量が少なく同位体比分析が困難であった試料を研究対象することが可能で、貴重な測定対象の消失も最小限に抑えることができ、(2) 分析に用いる炭酸塩量を事前に秤量する必要が無く、試料サイズに対する自由度が高い (0.1~500 μg までの分析実績がある)、また (3) 反応した炭酸塩重量を高感度で簡単に定量でき、さらに (4) 質量分析計に導入しなかったガスを保持することによって、複数回の導入・分析が可能で、必要に応じて分析値の検証や分析精度の向上が可能である。

[今後の展望]

精度・感度・安定性に関しては調整を加えることによってさらなる向上が期待できる。高精度分析システムに関しては、質量数 47 の CO_2 の測定精度の検証と実際の試料分析への応用をめざしている。また高感度分析システムは分析方法の基盤を確立し、有孔虫、サンゴ、魚類の耳石、岩石切片試料など多分野に渡っての応用研究を推進している。

キーワード: 安定同位体, 炭酸塩, 開発, 高精度, 微量分析

Keywords: High precision, stable isotopic analysis, carbon and oxygen isotope, carbonate, development

炭酸塩の高精度・高解像度環境解析の進展 -魚類耳石の安定同位体比を用いた環境履歴解析を例に-

High-resolution stable isotopic analysis of CaCO_3 to clarify the life history recorded in fish otolith

鐵 智美¹; 石村 豊穂^{1*}; 尾田 昌紀²; 坂井 三郎³

TETSU, Tomomi¹; ISHIMURA, Toyoho^{1*}; ODA, Masanori²; SAKAI, Saburo³

¹ 茨城工業高等専門学校, ² 鳥取県水産試験場, ³ 海洋研究開発機構

¹National Institute of Technology, Ibaraki College, ²Tottori Prefectural Fisheries Experimental Station, ³JAMSTEC

炭酸カルシウムで形成される魚類の耳石の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は生息環境の温度を反映し、また炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) が餌や代謝といった生体内の情報を反映することが近年の研究にて報告されている (例えば Kitagawa et al., 2013). さらに、耳石の日周輪形成とともにその日の安定同位体組成を記録する特徴を利用して、生態推定や環境指標への活用が期待されている。しかしながら、耳石を高解像度で成長段階ごとに切削し同位体比を定量するには、切削した極微量の粉末試料の回収方法の検討と、微量量での同位体分析の実践が必要であった。

本研究に先立ち、マイクロドリルを用いて耳石の微小領域を手動で切削・回収し、微量炭酸塩安定同位体比質量分析システム (MICAL3, Ishimura et al., 2008) を改良した MICAL3c (茨城高専) を用いて予察的な安定同位体比測定をおこなった。結果、この分析手法を用いて耳石に残された環境情報を数十マイクロメートルオーダーで詳細に分析できる能力があることを確認した。そこで本研究では、微小領域を精密に切削することができる高精度マイクロミルシステム Geomill326 を活用し、すでに回遊経路が解明されているマイワシの耳石を成長段階ごとに切削・回収し、それらの安定同位体比からマイワシの回遊履歴全体を再現できるかどうかについて検討した。

分析の結果、マイワシの耳石中心部・縁辺部の安定同位体組成に明確な違いがあることがわかった。特に縁辺部 $\delta^{18}\text{O}$ 値は、個体が採取された時点の生息環境の $\delta^{18}\text{O}$ を精度良く反映している。また、耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 値を見てみると2つのグループに分かれることが明らかとなり、それぞれグループには食性や代謝過程の違いがある可能性が示唆される。この考察に関しては、マイワシの生態をふまえたうえで今後の詳細な検討が必要である。つぎに、一般量販店で購入した1歳魚と推定される千葉県産マイワシの耳石を成長段階ごとに詳細に切削し、それらの安定同位体比を測定した。その結果、成長段階によって安定同位体組成が明瞭に変動することを確認でき、このマイワシ耳石の同位体比の変動幅から北西太平洋を回遊する群集であることが推測された。そこで回遊経路を照合したところ、黒潮から混合域、そして親潮へ移動した情報が耳石に記録されており、実際の回遊経路とも整合性があることが示された。

これらの結果から、Geomill326 と MICAL3c を組み合わせた微小領域における炭酸塩の安定同位体比分析は、今後の高解像度環境解析に有効に活用できることを裏付けた。今後は、より正確に日周輪にそって耳石を切削するためにも、切削深度や切削に用いるサンプルの選定について検討する必要がある。

キーワード: 安定同位体, 微量分析, 炭酸塩, 耳石, 高解像度, 炭酸塩

Keywords: otolith, stable isotope, microscale analysis, high resolution, environmental proxy, carbonate

鍾乳石における地殻変動イベント検出の試み An attempt to obtain earthquake-related events from stalactite

川端 訓代^{1*}; 久保田 好美²; 田中 秀実³; 角森 史昭⁴

KAWABATA, Kuniyo^{1*}; KUBOTA, Yoshimi²; TANAKA, Hidemi³; TSUNOMORI, Fumiaki⁴

¹ 鹿児島大学総合研究博物館, ² 国立科学博物館, ³ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ⁴ 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設

¹The Kagoshima University Museum, ²National museum of nature and science, ³School of Science, The University of Tokyo,

⁴Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo

鍾乳石の多くは縞状構造を持ち、鍾乳石の成長過程における何らかの変化が記録されている。縞状の鍾乳石は主に過去の陸域における古環境変遷を明らかにする目的で解析されてきた。我々は、鍾乳石が断層などの亀裂を通る地下水の涵養状態に大きく影響され成長する事に着目し、古環境要因以外の地震など地殻変動によるイベントの検出を試みた。

試料として栃木県葛生地域のつらら石と沖縄県石垣島の石筍を用いた。これらの試料の顕微鏡観察・ICP-MSやEPMAによる元素分析を行い縞状構造の特徴を明らかにし、つらら石については放射性炭素年代測定法によっておおまかな形成年代と成長速度を算出した。

結果、つらら石と石筍の両方において縞を構成している暗色層には、Si, Al, Fe, Mgが濃集し、粘土鉱物が定期的に付着し縞状構造が形成されたと推測される。またつらら石の年代測定によって炭酸塩鉱物は約37000年から33000年(¹⁴C年代)の間連続的に成長した事が明らかになった。しかしこの成長速度には一部に変則的に成長する時期が確認された。これらの結果から本発表では縞状構造形成に関わる環境要因と地殻変動要因それぞれの可能性について議論する。

キーワード: 鍾乳石, 石筍

Keywords: stalactite, stalagmite