

地震断層の熱年代学

田上高広*

Thermochronology of earthquake faults

Takahiro Tagami*

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University.

地震断層がいつどのように動き、それに伴い熱・水などがどのように発生/移動したかを明らかにすることは、地震発生時の断層面応力問題に加えて、地殻・マンツルの熱収支や温度構造そして変動履歴を明らかにする上で欠かすことができない。本講演では、断層岩（または断層帯）そのものを直接年代測定するアプローチに焦点を当て、これまで試みられてきた方法と成果を総括すると共に、今後の方法論的展望を描くことを目指した。

断層岩の分析に基づく放射年代測定の基本は、断層運動の結果として母岩に残された物質科学的痕跡から、運動の時期に関する何らかの情報を解読することにある。これまで用いられて来た代表的な方法は、その原理から以下のように大別される。

- ・断層運動による母岩の破碎と細粒化・粘土化：断層ガウジ中の雲母粘土鉱物を用いたK-Ar ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) 年代測定

- ・断層摩擦発熱による母岩の加熱イベント：シュードタキライトに含まれるジルコンを用いたフィッシュントラック (FT) 分析と(U-Th)/He年代測定、断層ガウジに含まれる石英中のESR信号の解析

- ・断層運動に伴う地下水起源鉱物脈の形成：方解石等の鉱物脈のウラン系列非平衡年代測定法 (別名U/Th法、アイオニウム法)

本講演では、FT法と(U-Th)/He法による熱年代学を中心に最近の研究進展を紹介した。

上述した断層岩の年代測定において、鍵となる物理条件が断層運動に関連した熱過程である。なぜなら、一般に、年代測定における閉鎖/開放系を支配する最も重要な要因は、放射壊変により鉱物中に形成される娘核種の拡散/散逸の速度であり、これは温度依存性が極めて高いからである。断層運動に関連した熱過程を要素分解すると、以下の三つに帰着できるであろう。

(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

地震発生時のモデル化において、重要かつ未知のパラメータの一つが、断層面応力である。この値を推定する方法の一つとして、地震発生時の断層面での摩擦発熱量の観測が試みられて来た。また、断層岩に残された摩擦発熱の痕跡を何らかの分析により定量化し、応力を推定する研究も行われている。

断層摩擦発熱は、地殻構成岩石の熱伝導率が低いことから、基本的には断層近傍に限られた熱現象である。例えば、通常のシュードタキライトの形成場であれば、母岩側の加熱帯の幅は、数ミリから数センチ程度であると推定される。また、発熱の期間も、通常地震発生時の断層運動継続時間から数秒程度であると推定されるので、比較的高温で短時間な熱過程である。

(2) 断層帯における熱水の移流に伴う熱輸送と母岩の加熱

断層帯は地殻深部からの熱水の移流経路となっているかもしれない。もしも高温の流体が断層帯に沿って流れる場合、断層面周辺に熱異常帯を形成するであろう。その時空分布の評価は難しいが、鉱物脈の存在する領域などから判断すると、断層面から数10mにまで達するかもしれない。

(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

上記二つが断層帯に沿った局所的な熱現象であるのに対して、これは断層を挟む二つの岩盤の間での相対運動の垂直成分に由来する広域的なものである。上部地殻は一般に30°C/km程度の地温勾配を持つため、地表面の浸食を伴う広域的な上昇があると、地殻深部の岩石は相対的に地表面に接近し、結果として、冷却されることになる。逆に、広域的な沈降が埋没を伴う場合、岩石は相対的に地表面から遠ざかり、温度上昇を被る。

以上3つの熱過程に対する放射年代計の振る舞いを含めて、上部地殻の地温に相当する温度域についての熱年代学の全容は、例えば、4年前に出

版された包括的なレビュー論文集 (Low-temperature thermochronology, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Vol. 58, 2005) を参照されたい。断層運動に関連する熱現象に限定すれば、熱年代学の適用に関して以下が要点となろう。

(1) 反応時間への依存性

これは熱年代学全般に言えることであるが、放射年代系の閉鎖／開放は、基本的には親核種に比べて動きやすい娘核種の固体内拡散・移動を反映するため、温度だけでなく加熱が継続する時間 (反応時間) にも支配されることになる。熱年代学を広義の地質温度計として捉える場合、ここが、相平衡や化学平衡・同位体交換平衡を仮定する通常の方法と根本的に異なる点である。

(2) 閉鎖温度と部分安定領域

閉鎖温度 (T_c) に関して留意すべき点は、その温度で系の閉鎖／開放が起っているのではない事である。放射年代系の閉鎖／開放は基本的には固体内の熱拡散に支配されており、従って、ある温度域を中心に連続的に起こる現象である。これを表現するために、通常は地質学的な反応時間 (または冷却速度) に対して、Partial Stability Zone (PSZ, 部分安定領域: FT法では Partial Annealing Zone と呼ばれる) の温度上限と下限が用いられる。温度上限は、その反応時間で系が完全に開いてしまう温度 (即ち、娘核種が全て系外へ散逸する温度: 但し、系外の娘核種濃度は 0 と想定) を示す。一方、温度下限は、その反応時間で系が開き始める温度であり、一義的には決められないので、通常は 5% (または 1%) の散逸により与えられる。以上より、PSZ と T_c の関係は、どのような冷却速度に対しても次のようになる:

PSZ下限 < T_c < PSZ上限

(3) 手法間での反応時間依存性の違い

ジルコン中のフィッショントラック (FT) の熱アニーリングと 4He の熱拡散に関する、時間-温度座標におけるアレニウス・プロットにおいて、両者のモデル関数が有意に異なる傾きを持つことが知られている (アパタイトについても同様)。その結果、地質学的な長い時間スケールでは、FTよりHeの方がより低温で閉鎖系が破れるのに対し、断層摩擦発熱のような短い時間スケールでは、むしろFTよりHeの方がより高温まで開放系にならない (閉鎖系の破れが完了しない) ことが予想される。地質学的な時間スケールでの

両者の熱特性の比較はすでに広く行われ、この予想と整合的であることが確認された。一方、短い時間スケールについては、ジルコンFT系について黒鉛炉を用いた短時間加熱実験により、モデル関数を決定したのが現在、唯一信頼できる研究である (Murakami et al., 2006; Yamada et al., 2007)。

この傾き (すわなち反応時間依存性) の違いを用いると、2次的な加熱を受けた試料について、FT法と(U-Th)/He法との見かけ年代値の比較から、熱現象の時間スケールを定量的に絞り込むことが可能になる。これに、温度履歴のインバージョン解析を組み合わせると、加熱の時期、期間、温度を求める事が出来る。これにより、断層運動に関連した熱現象について、新しい温度-時間情報を得られることが期待される。

以上に関する詳細な検討は、月刊地球の2010年1月号「地震断層の年代学-最近の新展開と今後の展望」を参照されたい。

参考文献

- Murakami, M., Yamada, R. and Tagami, T. (2006) Short-term annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon: A qualitative description. *Chem. Geol.*, 227, 214-222.
- Yamada, R., Murakami, M. and Tagami, T. (2007) Statistical modelling of annealing kinetics of fission tracks in zircon; Reassessment of laboratory experiments. *Chem. Geol.*, 236, 75-91.