用語解説

フィッション・トラック年代測定

加 藤 進*

(Received April 18, 2005 ; accepted July 8, 2005)

A commentary on “Fission-Track Dating”

Susumu Kato

Abstract : Fission-track (FT) dating is a radiogenic method of age estimation based on the accumulation of damage trails left by nuclei that are expelled during spontaneous nuclear fission of the uranium isotope ^{238}U . Significant amounts of uranium occur in rock-forming minerals such as apatite and zircon. Data obtained by FT dating such as grain ages of internal and external surfaces, different closure temperatures of both surfaces, and distribution patterns of FT lengths give us valuable information as a geological clock and thermometer. Two examples from the Niigata district demonstrate the application of FT dating.

Key words : fission-track dating, apatite, zircon, grain age, closure temperature, FT length

1. はじめに

時間はあらゆる現象の変化を記録するための重要な要素であり、その時間軸を定める直接的な方法が年代測定である(兼岡, 1998)。年代は、化石などを用いて時間の前後関係を示す相対年代(relative age)と、放射性核種の壊変などを利用して得られる放射年代(radiometric age)のような数値年代(numerical age)[†]に大別される。

フィッション・トラック(FT)法は ^{238}U の自発核分裂(spontaneous nuclear fission)により鉱物やガラス中に生じた核分裂飛跡(フィッション・トラック:fission track)を化学薬品によってエッチング(etching:腐食)して利用する年代測定法である。1960年代前半に測定法の基礎が築かれ、年代値を必要とする研究者にFT法は急速に広まった。測定者間や他の放射年代測定法との比較を容易にするため、年代標準試料の年代値に対する相対値としてFT年代値を算出するゼータ校正法が勧告され(Hurford, 1990)、FT法は“測れた”から“確実に測れる”時代に入った(檀原, 1995)。

FTは、時間とウラン濃度に比例してFT密度が増加

することを利用した時計としての機能と、一定長をもって生成されるFT(アパタイト:15~16 μm , ジルコン:11~12 μm)が加熱により短縮することを利用した地質温度計としての機能を持っている(檀原, 1997)。

FT法の特色として、1) FTの計数のためには大型の測定機器を必要としない(光学顕微鏡と試料処理のための簡単な化学実験設備のみ)、2) 鉱物粒子ごとの年代測定が可能、3) 閉鎖温度が比較的低いので熱史の解析に適している、4) FT長の解析から二次的な影響の識別が可能、5) 風化変質した試料にも適用できる、6) 測定可能な年代範囲が広い、などが挙げられる(兼岡, 1998など)。ウラン濃度を推定するために原子炉による熱中性子照射が必要である。

本解説では、FT年代測定結果が石油探鉱にどのように利用できるかに主眼をおいて述べることにするので、FT年代測定法の詳細については兼岡(1998)、檀原(1997)、大平・永井(2004)などを参照願いたい。

2. FT年代測定の基礎

年代値は次式で計算される(通常誤差($\pm 1\sigma$)と一緒に10⁶年前(Ma)の単位で表示される)。

[†] 相対年代に対して絶対年代(absolute age)と呼ばれることも多い。

$$T = \frac{1}{\lambda_d} \ln (1 + \lambda_d \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_s}{\rho_i} \cdot \rho_d)$$

λ_d : ^{238}U の全壊変定数 (1.55125×10^{-10} / 年)

ζ : 年代校正定数 (ゼータ値)

ρ_s/ρ_i : 試料の ^{238}U 自発 FT 密度 / ^{238}U 誘発 FT 密度

ρ_d : 標準ガラスの誘発 FT 密度

ウラン濃度を推定するために外部ディテクター法 (ED 法: external detector method) が通常用いられている。また、測定面には結晶表面を用いる外部面 (2π : ED2) と研磨面を用いる内部面 (4π : ED1) がある。

ウラン濃度は鉱物によりかなり変化するので、FT 法で測定可能な年代範囲は鉱物ごとに異なっており、ウラン濃度が高い (例えば 100 ppm) ジルコンの場合数千年前～数億年前の年代測定が可能である (図 1)。年代が古い試料であれば、ウラン濃度が低いアパタイトも利用できる。

図 1 FT 法で測定可能な年代範囲 (兼岡, 1998 に加筆)

ゼータ法で用いられる年代標準試料を表 1 に示す。ジルコンでは Fish Canyon Tuff (FCT) が最も広く利用されている。

3. FT 年代値

火山岩類の場合、岩石が生成される (噴出) 時にマグマから晶出したジルコン結晶 (本質結晶: E) と外部から取り込まれた結晶 (外来結晶: A) が混在している可能性がある (図 2)。外来結晶は十分な熱 (十分に高い温度と長い被熱時間) を受ければ FT が消滅して年代値がリセットされるが、リセットされない結晶も残る場合がある。凝灰岩の場合はこの外来結晶が多く含まれることが知られている。FT 法では通常 30 のジルコン結晶を測定に用いるが、本質粒子 (図 2) のみが測定されていれば、年代値は噴出 (生成) 年代を示す。本質粒子と異質粒子は測定者によってある程度区別される (檀原, 1995) が、これらを完全に区別することは難しい。通常、 χ^2 検定に合格 (5% 以上) するかどうかが一応の目安として用いられているが、これでも必ずしも十分ではない場合がある。

本質粒子と異質粒子の区別を正確に行うためにいろいろな解析図が提案されている (例えば、檀原ほか、

表 1 年代標準試料

鉱物	年代標準試料	年代値 (Ma)
アパタイト	Fish Canyon Tuff	27.8 ± 0.2
	Durango	31.4 ± 0.5
ジルコン	Fish Canyon Tuff	27.8 ± 0.2
	Buluk Member Tuff	16.3 ± 0.2
	Tardree Rhyolite	58.7 ± 1.1
	Mt Dromedary Banatite	98.7 ± 0.6
チタナイト (スフェーン)	Moldavite	(15.1)

図 2 火山岩類のジルコン結晶の簡単なモデル

2004)。年代標準試料である FCT で行った FT 年代測定結果の粒子年代ヒストグラムと、誤差を考慮した確率密度分布図である粒子年代スペクトル (Hurford *et al.*,

1984) を図 3 に示す。内部面年代値および外部面年代値は互いに一致しており、FCT の推奨年代値 (27.8 ± 0.2 Ma) とも一致している。粒子年代スペクトルは原則的にポアソン分布をとるので、ピーク年代値は加重平均値である内部面年代値や外部面年代値より若くなっている。

異質粒子が含まれている場合、粒子年代ヒストグラムで複数のピークを作ったり、粒子年代スペクトルで古い年代の方に肩や張り出しが認められ (図 4 A)、年代値とピーク年代値の比較も参考になる。これを Brandon (1996) の方法で解析すると、主ピークのほかに副次ピークを抽出することができる (図 4 B)。主ピークの年代値は粒子年代スペクトルのピーク年代値と一致しており、副次ピークの年代値 (約 12 Ma と約 66 Ma) は後背地での火山活動や基盤 (花崗岩) の年代を示唆しており、より下位の層準に関する情報も入手できる可能性もある。

4. アニーリング

FT は温度に対して敏感であり、ある温度以上になるとアニーリング (annealing) によりその長さは急速に短くなり、消滅する (兼岡, 1998)。FT が完全に消滅する温度領域 (TAZ: total annealing zone)、FT が短縮するが消滅しない温度領域 (PAZ: partial annealing zone)、そして FT が安定な温度領域 (TSZ: total stability zone) に

図 3 Fish Canyon Tuff (FCT) の FT 年代測定結果 (栃京都フィッション・トラックの未公表データ)

図 4 異質粒子が含まれる試料の FT 年代測定結果 (A) と Brandon (1996) の方法で解析した結果 (B) A では 20 Ma より古い粒子を除いてプロットしている。A と B で横軸 (年代) の取り方が異なる。

表2 フィッション・トラックの閉鎖温度

鉱物	閉鎖温度 (°C)	測定面	文献
アパタイト	130 ± 20 約 110 110 ± 15		兼岡 (1998) 松田 (1999) 角井 (1988)
ジルコン	約 240 約 340 200 ± 30	内部面 外部面	松田 (1999) 角井 (1988)
チタナイト (スフェーン)	340 ± 25*		兼岡 (1998)

* 近年の地質学的研究によれば、より低温の閉鎖温度が示されている (例えば Coyle and Wagner, 1998)。

分けることができる。閉鎖温度 (FT が 50% 程度保持される温度: Gleadow and Duddy, 1981) は鉱物ごとに異なっている (表 2)。アパタイト (燐灰石) の閉鎖温度は約 110°C と低く、ほぼ石油熟成帯に一致しているので、AFTA (Apatite Fission Track Analysis) として堆積盆解析、特に熱史解析に利用されている (角井, 1988; 伊藤, 1994)。図 5 はオーストラリア Otway 堆積盆の坑井から採取した砂岩試料で観察されるアニーリングを簡略化したものである。地層は現在最高温度にあり、この状態が数千万年間続いている。50°C 未満の温度では、わず

かな年代値の若返りと FT 長の減少が認められるだけであり、砕屑性のアパタイトは供給源の本来の FT 年代値を保持している。温度が上昇すると、部分的なアニーリングにより FT 年代値と平均 FT 長は減少し、FT 長の分布は広がる。約 90 ~ 120°C の温度では、粒子年代値のバラツキが大きくなり、125°C を超えるとすべての粒子から FT が消滅する。また、FT 長の分布は熱史に応じて変化し (図 6)、徐々に埋没深度が増加していった場合 (A ~ C)、過去に熱イベントを経験した場合 (D)、閉鎖温度より高い環境から徐々に冷却された場合 (E)、最近になって急熱された場合 (F)、などで FT 長分布は異なる。

ジルコンでは閉鎖温度が内部面と外部面で異なることが知られている (松田, 1990)。同じ試料で内部面年代値と外部面年代値が異なる場合があり、その場合外部面年代値が内部面年代値よりも古くなる (例えば、松田, 1999)。この例として、新潟地域グリーンタフから採取されたコア試料の FT 年代測定結果 (檀原ほか, 2004) を図 7 に示す。外部面年代値 (17.1 ± 0.9 Ma) は上位の泥岩から産出する微化石から推定される年代と調和しているが、内部面年代値 (12.8 ± 0.6 Ma) はそれよりも明らかに若い。この年代値は五十嵐川上流周辺で七谷層最上部に厚く発達する五百川凝灰岩の FT 年代値 (12.8 ± 1.2 Ma: 村松, 1985) と一致しており、これに関連した

図5 オーストラリア Otway 堆積盆の坑井から採取した砂岩試料で観察されるアニーリング (Dumitru, 2000 を簡略化) FT 数は 100 に、粒子数は 20 に規格化。

図6 異なる熱史を反映したFT長分布 (Gleadow *et al.*, 1983 を一部修正)

熱イベントの年代を示していると考えられる。

5. おわりに

FT法は、内部面と外部面で粒子年代値だけでなく、FT長の情報も入手できるので、地質時計および地質温度計としていろいろ利用できる。特に、ジルコンは風化に強く、酸性火山岩類だけでなく、砂岩などの碎屑岩にも豊富に含まれている。

また、現在FT法の最大の弱点となりつつある原子炉の使用に対し、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析 (LA-ICPMS) によるウラン濃度の測定が試みられつつある (檀原, 2001)。したがって、今後ジルコンを用いたFT法が多方面で活用されることが予想され、石油探鉱でも新しい適用が期待される。

謝 辞

檀原 徹氏、岩野英樹氏など(株)京都フィッション・トラックの各氏には未公表データの提供や各種のプロット、解析をしていただいた。また、檀原氏には原稿に目を通していただき、貴重な助言をいただいた。ここに記してお礼申し上げます。

引用文献

- Brandon, M. T., 1996: Probability density plot for fission-track grain-age samples. *Radiation Measurement*, **26**, 663–676.
- Coyle, D. A. and Wagner, G. A., 1998: Positioning the titanite fission-track partial annealing zone. *Chem. Geol.*, **149**, 117

図7 内部面年代値と外部面年代値が異なる例
ED 1 では6粒子を異質粒子として除いて年代値を計算した (全粒子で計算した年代値は 13.3 ± 0.6 Ma)。

–125.

檀原 徹, 1995: 第四紀テフラの高精度フィッション・トラック (FT) 年代測定—ジルコンとガラスを用いた測定法の確立に向けて—. 第四紀研究, **34** (3), 221–237.

檀原 徹, 1997: FT法の最近の成果と石油探鉱へのジルコンの応用. 石技誌, **62** (1), 25–34.

檀原 徹, 1999: ジルコンを用いた第四紀試料の高精度FT年代測定の現状と将来. 月刊地球/号外, No.26, 70–76.

檀原 徹, 2001: レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析 (LA-ICPMS) を用いたFT年代測定法の構築とテフラ研究への応用. 月刊地球, **23** (9), 629–634.

檀原 徹・岩野英樹・加藤 進・松井良一, 2004: ジルコンFT年代測定における試料評価と測定値の解釈.

- 石技誌, **69** (2), 200–213.
- Dumitru, T. A., 2000 : Fission-Track Geochronology. *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*, 131–155.
- Gleadow, A. J. W. and Duddy, I. R., 1981 : A natural longterm track annealing experiment for apatite. *Nucl. Tracks*, **5**, 169–174.
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R. and Lovering, J. F., 1983 : Fission track analysis; a new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential. *APEA Jour.*, **23**, 93–102.
- Hurford, A. J., 1990 : Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the fission track working group the I.U.G.S. subcommision on geochronology. *Chem. Geol.*, **80**, 171–178.
- Hurford, A. J., Fitch, F. J. and Clarke, A., 1984 : Resolution of the age structure of the detrital zircon populations of two Lower Cretaceous sandstones from the Weald of England by fission track dating. *Geological Magazine*, **121**, 269–277.
- 伊藤康人, 1994 : フィッション・トラック法を用いた堆積盆解析. 石油の開発と備蓄, **27** (3), 81–86.
- 兼岡一郎, 1998 : 年代測定概論. 東京大学出版会. 315p.
- 松田高明, 1990 : ジルコン外部面トラックのアニーリング特性. フィッション・トラックニュースレター, No.3, 51–52.
- 松田高明, 1999 : 火山岩類のジルコンのフィッション・トラック年代の評価. 月刊地球, **21** (12), 816–820.
- 村松敏雄, 1985 : 新潟県下に分布する新第三系のフィッション・トラック年代. 新潟大学理学部研究生研究業績報告書, 20p.
- 大平寛人・永井淳也, 2004 : 放射年代学 (FT 法) 入門. 地球科学, **58** (3), 185–189.
- 角井朝昭, 1988 : FTD (FISSION TRACK DATING) 法を用いる石油熟成度評価法及び堆積盆解析. 地質ニュース, 402 号, 50–63.