

F T法による温度履歴解析： 黒部川花崗岩類におけるケーススタディ

山田隆二*・西村 進*

Analysis of Temperature history using fission track method;
A case study for the Kurobegawa Granitic Rocks

Ryuji Yamada* and Susumu Nishimura*

ジルコン・アパタイトなどの鉱物中に生じるフィッショントラック(以下FT)は、時間の経過とともに増加し、また加熱により短縮・消滅するという性質を持つ。これにより年代時計としてのみならず温度計としての利用も可能であり、岩体の温度履歴解析を行うことができる。これは、各種の放射年代測定法・鉱物組み合わせにおける閉鎖温度の相違を利用した温度履歴解析に対して、FT法単独で行うことができるという利点を持つ。特にジルコンFTは300℃前後で敏感な温度計として利用でき、深成岩体の上昇・冷却などテクトニックなイベントに対する強力なツールとなりうる。加熱を受けた試料中のFTはその温度・時間関数に応じて固有の長さ分布を示す(図1)。横軸にFT長、縦軸に頻度をとる長さ分布図では、再加熱を受けていない急冷試料の場合生成時のFT長付近に幅の狭

いピークを示すが、加熱を受けた試料の場合、短縮したFTと新しくできた長いFTが混在し幅の広い分布を見せる。これらの分布パターンから定量的に温度・時間関数を知る方法としては、(1)考えられる温度履歴から長さ分布パターンを計算し測定したものと比較する、(2)逆問題としてこれを解く、といった方法が考えられる。最近ジルコンFTの熱的性質が詳しく調べられ(Yamada et al., 1995a, b; 図2)、任意の温度・時間関数に対する長さ分布パターンを求めることが可能となった(forward modeling)。(1)はforward modelingを繰り返す行いことで実現する。また(2)を解析的に行うことは極めて難しいが、ランダムモンテカルロ法を応用したシミュレーション的な方法などが考案されている(Corrigan, 1991)。

Forward modelingに関してはCrowley (1985)

*京都大学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, Kyoto 606, Japan

が基本的なアプローチ法について述べている。しかし、彼のいくつかの前提には非合理的な点があり、Green, Laslett 等のグループがその問題点を詰めてアバタイトを題材にして合理的な modeling 手順を編み出している (Duddy et al., 1988; Green et al., 1989 など)。Forward modeling をジルコンFTにて行うためにはいくつかの実験的な特性を求める必要があったが、今回我々は必要な要素を実験により、あるいは過去の文献の再検討により全て整えた。これにより任意の温度・時間関数に対応するFT長分布が計算可能となった。ジルコンFTのアニーリング特性上、partial annealing zone (PAZ)を越える約400℃以上ではこの modelingは意味を持たない。

簡単に forward modeling 手順を説明すると(図3), (1)あるモデル時間(十分に年代値よりも長い必要がある)を考え、その時間軸に対応する温度を想定する(温度・時間関数をつくる)。時間軸をnステップに分解し、各ステップでは等温であるとして温度時間関数を近似する。(2) i ($i=1, 2, \dots, n$)ステップ中にできたトラックは始め一定の長さを持ち、 $i, i+1, i+2, \dots, n$ ステップで加熱を受けると考え、アニーリング関数を用いてトラック長を短縮させる。このとき、アレニウスプロットを近似して得られたアニーリング関数は等温変化でしか用いられないことを考慮する必要がある (Duddy et al., 1988)。このようにトラックの生成・短縮を逐次繰り返す。(3)各 i ステップでできたトラックを最終ステップまで短縮させた後、実験的に求められたトラック長とトラック密度、及び、トラック長とトラック長の分散との関係式を利用して、各 i ステップでできたトラックのトラック密度、及び正規分布を仮定した長さ分布を計算する。最後に正規分布をトラック密度で加重をかけて足し合

わせ、最終的なトラック長分布が得られる。また、トラック密度とモデル時間から年代値も計算される。

Forward modelingが可能になると、実際に測定した天然サンプルのトラック長分布・年代値と、計算されたものとの比較を繰り返すことで定量的な温度履歴解析が可能となる。我々は、まず想定される時間・温度領域をメッシュに切り、メッシュの各点を結ぶことで温度時間関数を作り出し、計算結果を逐次評価することで1次近似モデルを得、これを順次改善することで最適解を得ることを考えた(具体例は後述)。Corrigan(1991)はランダムモンテカルロ法を応用した方法で1次近似モデルを用いることなく解を求める方法を編み出した。現在、両者を比較検討中である。

FT法による温度履歴定量解析の実際の地質体への応用を試みた。対象としたのは、富山県黒部川中～上流部にかけて南北40km東西15kmに分布する黒部川花崗岩類(図4)。飛騨帯、飛騨外縁帯、中生層を貫きゼノリスとして包有する。貫入時期は周囲の岩体との関係から～50-35Maと考えられている。Nishimura and Mogi (1986)によると、この岩体のK-Ar: 黒雲母年代は約0.7-6.1Maと非常に若い値を示す。彼らは、年代値と標高との関係から、また、岩体中心部付近に最高温度が約160℃にも達する高熱隧道がありこれが岩体の残熱である可能性があることから、この年代は岩体上面からの冷却で説明できるとしている。

約800-2100mに渡り同一岩体中標高を変えてサンプリングを行い、それぞれの地点におけるジルコンFT年代値とFTの長さ分布を求めつつある。その一例を図5に示す。ここでトラック長分布図を得るためには統計的、あるいは経験

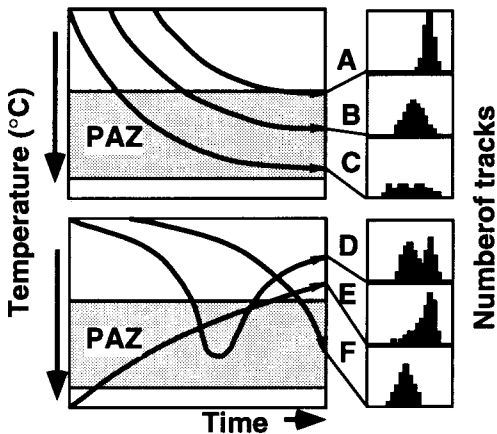


図1 仮想的な温度時間バスとそれに伴うトラック長分布パターン(Gleadow et al., 1983)。温度は下方に正で右端が現在を表す。Partial annealing zone (PAZ) は、トラックが部分的に短縮を受ける範囲。これよりも上部ではトラックは影響を受けず、下部では完全に消滅してしまう。

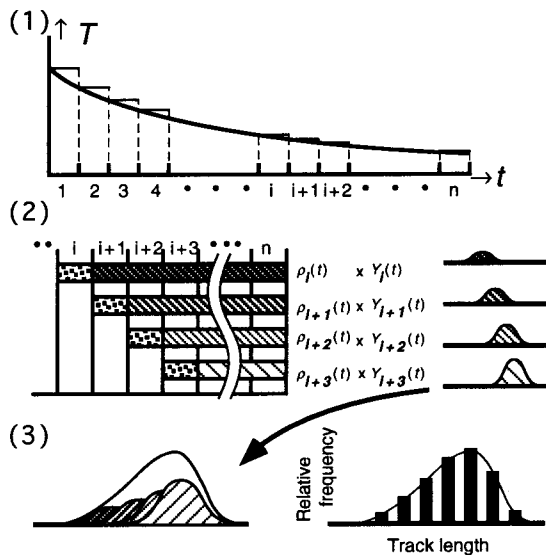


図3 Forward modeling手順の模式図。(1)温度時間関数を与え、任意のステップに分ける。(2)各ステップ毎にできたトラックの短縮を考える。最終ステップで密度・長さの分散等を計算し、分布の形を正規分布で表す($Y_k(t)$)。(3)密度で加重をかけて全ステップの分布を足し合わせる。任意の長さにおける頻度を棒グラフ化し測定データと比較する。

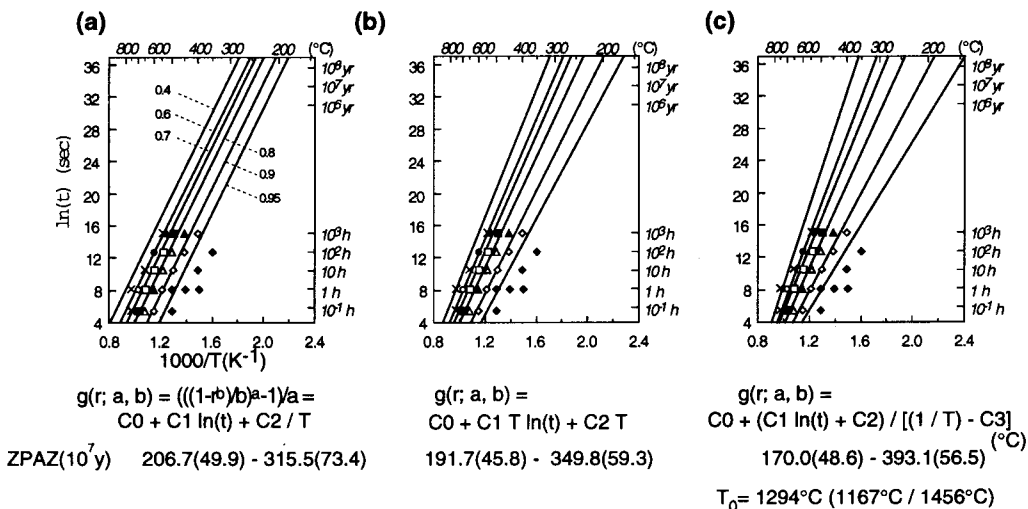


図2 ジルコンFT長アニーリング室内実験とフィッティングの結果 (Yamada et al., 1995b; Fig. 4)。各プロット下は近似に用いたモデル式と107年で計算したZPAZの温度範囲と誤差 (2σ)。プロット中の直線はそれぞれ非加熱時のトラック長に対する相対短縮率を表す。(a) parallel model, (b) fanning model, $T_0 = \infty$. T_0 は各contour lineが1点で交わる時の温度(critical temperature), (c) fanning model, $T_0 \neq \infty$.

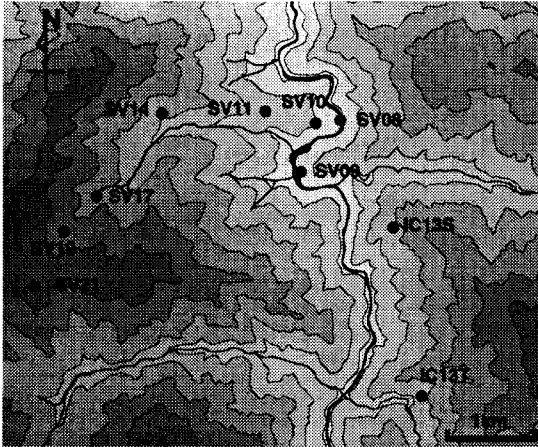


図4 黒部川花崗岩類のサンプルリング地点と標高及びK-Ar年代

(m)	Code	Rock type	Altitude	K-Ar, bt *
2200	SV08	biotite granite	800 m	Ma
2000	SV09	biotite granite	860	0.9±0.4
1800	SV10	biotite granite	990	
1600	SV11	biotite granodiorite	1140	2.3±0.6
1400	SV14	biotite granodiorite	1420	5.0±0.8
1200	SV17	hornblende granodiorite	1700	
1000	SV19	biotite granite	1880	
800	SV21	biotite granite	2130	4.2±0.8
	IC13T	biotite granite	1310	0.7±0.2
	IC13S	biotite granite	1350	

* Nishimura & Mogi, 1986

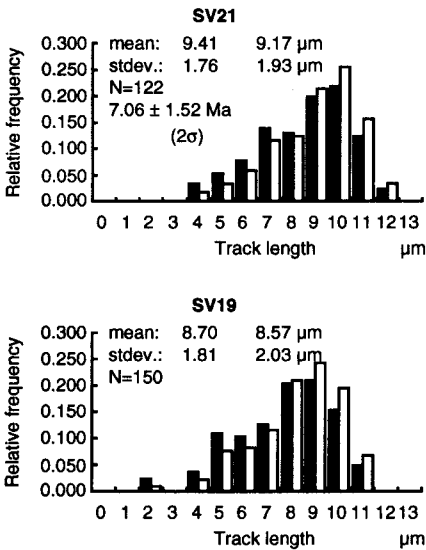


図5 トラック長分布の例。白部は測定値、黒部は補正後。mean, stdev.はそれぞれ平均長、長さの標準偏差。数値は左が測定値、右が補正後。補正により全体がやや左側に動くことが分かる。SV21の年代値は暫定値。

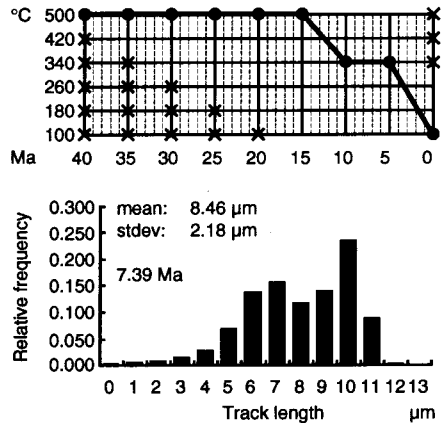


図6 1次近似に用いたメッシュとSV21の1次近似結果。×印の点は除外した。ノードとノードの間の温度は外挿して求めた。メッシュ中の黒丸及び太線によるパスが最もよく近似した。下はそれに対応するトラック長パターンを計算したもの。

的に100本程度以上のHorizontal Confined Track (結晶表面に水平でかつ両端が確認でき、全長が測定できるトラック)が必要である。また、モデリングに必要なトラック長の精度は0.5 μm 程度と考えられるので、これを越えるような影響を与える要素は評価・補正する必要がある。補正する要素としては、長短のトラックが混在している場合、length biased sampling (Laslett et al., 1982) の影響が考えられる。また、ここで用いたアニーリング関数(Yamada et al., 1995) はアニーリング・エッチング異方性の影響を取り除き評価した式であるので、測定データについてもこれを除くことが望ましい。

必要と思われる補正を施し、SV21について前述の1次近似モデルを得た(図6)。モデリングの条件は(1)花崗岩体は40Maに貫入した。モデル時間を40 m.y. とし、これを40ステップに分割した。(2)更にノード(節点)を等間隔に9個つくり、全体を8分割した。各ノードにおける温度を100 $^{\circ}\text{C}$ から500 $^{\circ}\text{C}$ まで、80 $^{\circ}\text{C}$ 間隔とした。(3)更に花崗岩体は単に冷却するのみで、温度上昇はしなかったとする。つまり、各ノードの温度は、一つ前のノードの温度と等しいか低い。これは周囲の状況からこの花崗岩体を加熱する要素が見あたらないため妥当な仮定であると考えられる。これらの条件の下、調べるべき温度・時間関数パターンは約1000となった。これら一つ一つについて forward modeling 計算を行い、測定結果と比較をし評価する。評価するのは分布の形と年代値であり、 χ^2 値、または換算 χ^2 値による検定を行う。以上の手順により得られた最適1次近似モデルとそれに対応するトラック長分布を示す。500 $^{\circ}\text{C}$ 以上では全く感度がないため、水平な線になっている。

1次モデルによると、徐冷していた花崗岩体はかなり最近になって急冷したと考えられる。

そういった冷却史を仮定しforward modeling をいくらか行くと条件によっては確かに bimodal に近いパターンが現れる。従来、このような bimodal パターンは一旦冷却したものの PAZあたりへの再加熱を想定していたが(例えば Gleadow et al., 1983), cooling rateの変化によっても生ずることが分かった。

Modelingの結果と、標高が下がるにつれトラック密度が下がる、すなわち岩体の年代値が若くなる傾向があることにより、この岩体は貫入以降かなり長い期間にわたり約300 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温であったことが示唆される。これはK-Ar年代測定の結果と調和的である。また、温度履歴解析の結果によると岩体は貫入後単にゆっくりと($\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{m.y.}$)冷却しただけでなく、最近(数Ma?)になってやや早い冷却(数10 $^{\circ}\text{C}/\text{m.y.}$?)をした可能性がある。これはこの地域の上昇速度の大きな変化と関連があるのかもしれない。今後はモデリングの精度を上げ、標高と温度履歴との関係を求めるとともに、加えて水平方向のバリエーションも含めて岩体全体の冷却史を考えていく。

謝辞

黒部サンプリングの時には大変お忙しい中を松田高明先生、京大の長谷部徳子博士、外田智千君にお手伝いいただいた。ここに心から感謝いたします。

文 献

- Corrigan, J., 1991, Inversion of apatite fission track data for thermal history information. *J. Geophys. Research*, **16**, 10347-10360.
Crowley, K.D., 1985, Thermal significance of fission-track length distributions. *Nucl. Tracks*, **10**, 311-322.
Duddy, I.R., Green, P.F. and Laslett, G.M., 1988,

- Thermal annealing of fission tracks in apatite
3. Variable temperature annealing. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **73**: 25-38.
- 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. *Aust. Petrol. Explor. Assoc.*, **23**: 93-102.
- Green, P.F., Duddy, I.R., Laslett, G.M., Hegarty, K.A., Gleadow, A.J.W., and Lovering, J.F., 1989a, Thermal annealing of fission tracks in apatite. 4. Quantitative modeling techniques and extension to geological time scales. *Chem. Geol. Isot. Geosci. Sec.*, **79**: 155-182.
- Laslett, G.M., Kendall, W.S., Gleadow, A.J.W. and Duddy, I. R., 1982, Bias in measurement of fission-track length distributions. *Nucl. Tracks*, **6**, 79-85.
- Nishimura, S and Mogi, M., 1986, The interpretation of discordant ages of some granitic bodies. *J. Geothermal Res. Soc. Japan*, **8-3**, 145-164.
- Yamada, R., Tagami, T. and Nishimura, S., 1995a, Confined fission-track length measurement of zircon; assessment of factors affecting the paleotemperature estimate. *Chem. Geol.*, **119**, 293-306.
- Yamada, R., Tagami, T., Nishimura, S. and Ito, H. 1995b, Annealing kinetics of fission track in zircon: an experimental study. *Chem. Geol.*, **122**: (In press).