

ジルコン FT アニーリング・カイネティクス：2005 モデル

山田隆二*・Rex F. Galbraith**・村上雅紀***・田上高広***

Annealing kinetics of fission-tracks in zircon: 05's model

Ryuji Yamada*, Rex F. Galbraith**, Masaki Murakami***, Takahiro Tagami***

* 防災科学技術研究所, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

** Department of Statistical Science, University College London

*** 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 Kyoto University

はじめに

ジルコン中のフィッション・トラック (FT) のアニーリング・カイネティクスに関わる研究は、主として仁左平デイスイト (NST) 中のジルコンの自発トラック長を用いた室内加熱実験によって行われてきた。Yamada et al. (1995a) は事実上初めての実用的なモデルを示し、同じデータを用いて、Galbraith and Laslett (1997) はモデル手法の改良を行った。Tagami et al. (1998) は 10000 時間加熱実験のデータを追加し、深層ボーリングコア中の試料との比較から地質学的検証を行っている。最近では、Murakami et al.

(2005) が地震発生時の摩擦発熱現象の検出を目指して数秒間という短時間加熱実験を行った。

今回我々は、上記の文献にて公表されている NST ジルコンを用いた加熱実験の結果を用いて、新たなカイネティクスモデルを求めた。加熱温度は 350-912°C、加熱時間は 10^{-3} - 10^4 時間に及ぶ範囲で行われた 43 個の実験データを用いた。1 時間以上の加熱実験ではマッフル炉、それ以外の短時間実験には黒鉛炉を用いた。そのほかの実験条件は全て同じである。短時間加熱において tracks in cleavage (TINCLE) が非常に多く見られ、それらを測定対象とすることによるバイアスを避けるため、既存のデータ全てから TINCLE を省き、tracks in track (TINT) の測定のみを採用している (表 1)。

表 1 モデル計算に用いた NST ジルコン中における自発トラックの室内実験結果

<i>t</i> (h)	<i>T</i> (°C)	<i>N</i>	<i>L</i> (μm)	<i>sd</i> (μm)	<i>t</i> (h)	<i>T</i> (°C)	<i>N</i>	<i>L</i> (μm)	<i>sd</i> (μm)
<i>Control</i>		58	11.04	0.67	1	395	31	10.85	0.91
					1	446	36	10.59	0.53
0.0010	599	37	10.72	0.56	1	500	32	10.62	0.75
0.0010	700	38	9.90	0.72	1	550	38	10.15	0.59
0.0011	751	38	8.92	1.36	1	599	37	9.47	0.63
0.0010	800	38	8.50	1.29	1	650	31	8.16	0.92
0.0011	912	4	5.86	0.97	1	696	8	6.28	1.66
0.0029	599	31	10.57	0.86	1	748	0	—	—
0.0030	649	35	10.13	1.18	11	397	28	10.89	0.65
0.0030	700	30	9.40	1.00	11	499	29	10.16	0.59
0.0029	750	35	8.35	1.18	11	548	30	9.22	0.69
0.0028	800	29	7.32	1.31	11	598	30	7.72	0.70
0.0029	858	3	5.71	0.27	11	649	0	—	—
0.028	549	38	10.72	0.76	100	350	35	10.79	0.71
0.028	649	14	9.34	0.64	100	449	32	10.13	0.76
0.028	698	25	8.74	0.88	100	501	35	9.22	0.75
0.028	750	26	7.78	1.01	100	549	26	8.10	0.71
0.028	805	6	5.23	1.19	100	599	3	6.73	1.63
0.028	858	1	4.05	—	1000	398	33	10.27	0.55
					1000	450	41	9.47	0.72
					1000	498	40	8.59	0.73
					1000	535	10	7.11	1.16
					1000	546	0	—	—
					10000	398	38	9.71	0.88
					10000	498	25	7.18	1.51

モデル化

基本的なモデルの形は、加熱温度・時間・長さの三次元的な関係をアレニウス図上に表した際の長さ軸方向の等高線の形によって分類される。等高線が直線となるか曲線となるかによって“linear”と“curvilinear”，さらに、等高線が収束する交点の有無によって“fanning”と“parallel”に分けられ、それぞれの組み合わせによって合計 4 つの基本モデルに分けられる (Crowley et al., 1991)。アバタイト・ジルコンを問わず、広く用いられている従前のモデルのほとんどが fanning-linear model である。今回のモデル化

では、まずモデルの形を決定し、次に最もよく記述するパラメータを計算によって求めるという2段階の手順を踏んだ。モデルおよびパラメータの評価には Schwarz's Bayesian Information Criterion (BIC) を用いた (Schwartz, 1978)。

全てのデータを用いた fanning-linear model による近似では、残差に系統的な構造が残るなど、良い近似を示さなかった。そのため、高温側のデータを徐々に減らした結果、725°C 以下のデータのみを用いた fanning-linear model が最も良い近似を示した。高温側は同様に低温側のデータを徐々に減らした結果、475°C 以上のデータを用いた parallel-linear model が良い近似を示した。全温度領域でモデルを用いられるようにするため、重複する温度領域では両者の加重平均を与える hybrid-linear model を作った (図 1A)。アニーリングの支配要因が短縮 (shrinking) から分断 (segmentation) へ移行することがわかっているが (たとえば Paul and Fitzgerald, 1992, Yamada et al., 1995b), 上記の解析結果は, Murakami et al. (2005) が示唆したように、支配要因の移行の様子が高温領域と

低温領域では異なることを支持する。さらには curvilinear-model の検討も行ったところ、式の形が単純な parallel-curvilinear model が hybrid-linear model 同等の良い近似を示した (図 1B)。

モデルの評価

これらのモデルによる地質時間における短縮したトラック長の予測値を3つの深層掘削コア試料の実測値と比較した。その結果, linear-model による予測値は非常に良くコアの実測値と一致し、一方 curvilinear model による予測値は実測値に比べてやや短くなるものの、測定等に伴う誤差の範囲内では一致する。

一般的な地質現象における温度履歴解析には hybrid-linear model を構成する parallel-linear model を用いることができる。断層摩擦熱の検出など、短時間の発熱現象を含む場合には hybrid-linear model を用いるべきである。長時間現象における高い解析精度を求めない場合などには、より単純な式の形を呈する parallel-curvilinear model が便利であろう。上記の

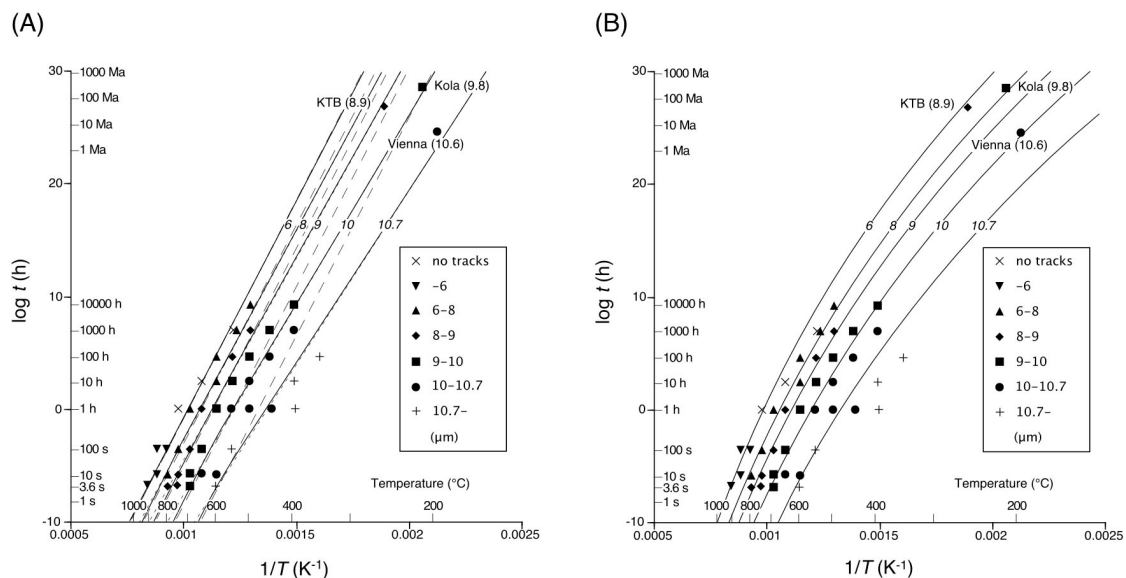


図1 室内加熱実験のアレニウスプロットと各 model による近似線。異なるシンボルは FT の短縮率の違いを示す。深層掘削コアデータも併せて示されているが、これらは近似計算には用いられていない。(A) linear model 近似の結果。点線と鎖線は、それぞれ fanning model と parallel model を表し、実線はそれらを合成した hybrid model を表す。(B) curvilinear model 近似の結果。実線は parallel-curvilinear model を表す。

parallel-liner model による地質時間での partial annealing zone は、その範囲を平均トラック長の短縮率 0.5-0.9 相当と定義すると、 10^6 、 10^7 年の等温加熱に対して、それぞれ約 252-352°C、234-330°C となる。これらのモデルを用いる際に最も重要なことは、エッチング等の実験・測定条件をモデル計算に用いた室内実験と同じにすることである。

文献

- Crowley, K.D., Cameron, M. and Schaefer, R.L., 1991, Experimental studies of annealing of etched tracks in fluorapatite, *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 1449-65.
- Galbraith, R.F., and Laslett, G.M., 1997, Statistical modelling of thermal annealing of fission tracks in zircon. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)* 140, 123-135.
- Murakami, M., Yamada, R., and Tagami, T., Short-term annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon: a qualitative description, *Chem. Geol.* submitted
- Paul, T., and Fitzgerald, P. F., 1992, Transmission electron microscope investigation of fission tracks in apatite, *Am. Mineral.* 77, 336-44.
- Schwarz, G., 1978, Estimating the dimension of a model, *Annals of Statistics*, 6, 461-464.
- Tagami, T., Galbraith, R.F., Yamada, R. and Laslett, G.M., 1998, Revised annealing kinetics of fission tracks in zircon and geological implications, In: Van den haute, P. and De Corte, F., eds., *Advances in fission-track geochronology*. Kluwer academic publishers, Dordrecht, The Netherlands, 99-112.
- Yamada, R., Tagami, T., Nishimura, S. and Ito, H., 1995, Annealing kinetics of fission tracks in zircon: an experimental study, *Chem. Geol.* 122, 249-258.
- Yamada, R., Tagami, T. and Nishimura, S., 1995, Confined fission-track length measurement of zircon: assessment of factors affecting the paleotemperature estimate. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sec.)* 119, 293-306.