

ランダムモンテカルロ法による フィッショントラック温度履歴定量解析モデリング

山田隆二*

Random Monte-Carlo simulation for quantitative modeling of thermal history using fission track data

Ryuji Yamada*

Abstract : We developed the inverse modeling method for quantitative analysis of the thermal history applying the mathematical description of annealing characteristics of fission tracks (FTs). This modeling is to determine the range of thermal histories compatible with the measurements of FT age and the FT length distribution by the random Monte-Carlo simulation method on computers. Simulated annealing method was applied to optimize the modeling schedule, and could skillfully narrow the range for searching the compatible thermal histories in the model space of calculations.

Results for synthetic data sets for diverse model thermal histories suggest that the modeling method developed in this study is not sensitive to the variation in temperature except around partial annealing zone (PAZ) because of the annealing characteristics of FTs. This modeling method can, however, give strong restriction on the temperature and timing to the samples having the thermal history of monotonic cooling or secondary heating at around PAZ. For the case of monotonic cooling, the order of the cooling rate around PAZ can be estimated. For the case of secondary heating at around PAZ, the highest temperature and the timing of the heating event can be estimated within the range of $\pm \sim 20$ °C and $\pm \sim 10\%$ of FT age of the sample, respectively.

1996年4月26日受付, 1996年5月29日受理

*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, Kyoto 606-01, Japan

はじめに

鉱物中のfission track (FT) は地質学的時間を経て一定の割合で生成し、温度の上昇に伴いアニーリングされる。そのために岩石試料中のFTを解析することで岩石の温度履歴に関する有用な情報を得ることが出来る。アパタイトに関してトラックアニーリングの定量解析が行われ、石油探査や地質学において極めて有用な温度履歴解析ツールを供してきた（例えばGleadow et al., 1983; Gleadow et al., 1986; Green et al., 1986; Hurford, 1991）。このような目的のためにトラックの短縮を数式によって記述するannealing kinetic function (AKF) が求められている（例えば、アパタイトに関してLaslett et al., 1987; Crowley et al., 1991, ジルコンに関してYamada et al., 1995b）。

AKFが求められると、岩石試料がたどった温度-時間の軌跡 ($T-t$ path) から年代値を求めたり、あるいはその逆に年代値・トラック長などのFTデータから $T-t$ path を求めたりすることが計算機を用いたモデル計算によって可能となる。ここで温度履歴の解析における順計算、逆解析の定義をする（図1）。順計算法に関しては、山田・西村（1995）が概説した。アパタイトのAKFを用いた定量温度履歴解析手法は既にいくつか開発されている（例えばCorrigan, 1991; Gallagher et al., 1996）。

今回我々はジルコンのAKFを用いて、現在主流となっているランダムモンテカルロ法による定量温度履歴逆解析法を開発した。逆解析のアルゴリズムに関しては基本的にCorrigan(1991)

を参考にしている。この小論ではその仕組みについて概説する。

解析手法

まずはじめに、この小論中、モデリングの手順を説明する上で必要であると思われるいくつかの用語の定義・説明を行っておく。

MCS: Monte-Carlo simulation using segmented thermal history model (折れ線にて分割して表現した温度履歴を用いたランダムモンテカルロシミュレーション法)、今回開発したモデリングプログラムのこと。

$T-t$ path: が被った温度の時間に対する関数。温度履歴のこと。

FTデータ: FT年代とトラック長分布パターンを含む。

モデル: 計算上得られる $T-t$ pathのこと。

モデリング: 計算機によって測定FTデータから

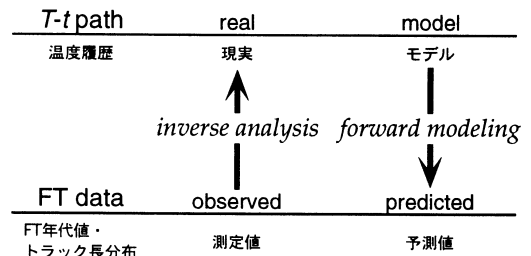


図1 FT温度履歴解析における順計算 (forward modeling) と逆解析 (inverse analysis) の定義。仮想的なモデル温度履歴からAKFを用いてFTデータの予測値を計算することを順計算と呼ぶ。FTデータの測定値から現実には測定した試料が被った温度履歴を推定することを逆解析と呼ぶ。一般的に逆解析では測定値とよく一致する予測値を与えるモデルを探すことによって実際に推定する。

尤もらしいモデルを逆解析によって求める一連の工程。

モデルの修正：解析の過程で1つ前に発生したモデルを計算機が新たに発生したモデルと入れ替えること。次のモデルの比較の対象を交代すること。

修正ベクトル：解析の過程で計算機が新たに発生したモデルと1つ前に発生したモデルを記述する節点の移動方向をベクトルで表したもの：(節点数 - 1) × 2(個)の成分を持つ。

FTアニーリングとは、(1)トラック長の変化は短縮するのみの1方向の現象であり、(2)トラックを短縮させる要因が加熱時間・温度と複数ある。つまり、ある短縮したトラックが存在する場合に、その短縮をもたらした加熱時間・温度条件を特定できず、また、その短縮以前の情報は「消滅」してしまっているため $T-t$ path は一意に決まらない。そこで、ある程度測定結果を説明できる $T-t$ path モデルを乱数によりさがすが、というのがランダムモンテカルロ法による逆解析の主旨である。

ランダムモンテカルロ法による逆解析の全体の流れは大まかに次のステージに分割できる。

- (1)乱数によって新しい $T-t$ path を発生させる。
- (2)その $T-t$ path に対応するFTデータを順計算する。
- (3)測定FTデータと比較し統計的検定を行う。
- (4)ある範囲で検定に合格するモデルが一定数見つかるまで上記の(1) - (3)を繰り返す。
- (5)合格 $T-t$ path を集めて後処理を行い元の $T-t$ path を推定する。

この流れを実際の計算機上でどのように実現しているかを流れ図(図2)に示す。モデルの設定を図3に示す。モデル空間の温度方向の範

囲はFTアニーリングが感度を持つ範囲よりもやや大きめに取る。時間方向の最大値 t_{max} は次の式によって求める (Corrigan, 1991) :

$$t_{max} = \left(\frac{l_0}{l_{mean} - \sigma_l} \right) \quad (式1)$$

ここで l_0 は生成時のFTの長さ、 l_{mean} はトラック長の平均測定値、 σ_l はトラック長測定値の標準偏差をあらわす。Corrigan (1991) とは異なり $T-t$ path はいくつかの節点を持った折れ線によって表す。この節点の数によって表現できる $T-t$ path の複雑さを変えられる。MCSでは4または5に設定した。モデルの2つの端点は時間方向に固定・温度方向に自由、その他の点は時間・温度双方に自由に動くのでモデルを記述す

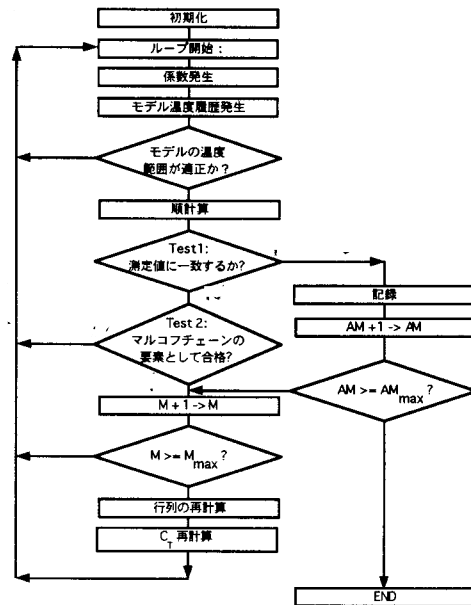


図2 MCSにおける解析手順の流れ図。M: マルコフチェーンの長さ; AM: 測定値とある範囲で一致するモデル(acceptable model)の数; m_{max} : それぞれの最大値; C_T : 最適化コントロールパラメータ。各々の用語については文中を参照。

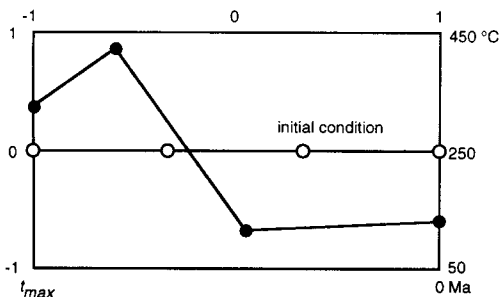


図3 MCSにおけるモデル空間の設定. モデル温度履歴はいくつかの節点をもつ折れ線で表される. 温度軸は50-450°C, 時間軸は0- t_{max} の大きさを持っている. 計算上は温度・時間軸ともに(-1, 1)としている. 図は節点数が4個の場合. 節点のうち, 2つの端点は温度方向に自由・時間方向に固定, その他の点は温度・時間方向に自由に動くため, 任意のモデル温度履歴は(節点数-1)×2個のパラメータで表される. 順計算を行うときにはこのモデルをさらに N_s ステップに分割する. 初期状態は, 時間方向に均等に分割し, 温度は250°C一定とした(白丸で示されたモデル).

るパラメータは(節点数-1)×2個である. ひとたび $T-t$ pathが決まるとそれを時間方向に N_s 個に分割し, 山田・西村(1995)で紹介した順計算ルーチンにかける. 従って, 時間方向には t_{max} / N_s 以下の分解能はあり得ない. $T-t$ pathの初期値としてはどのような測定FTデータに対しても温度方向には250°C一定, 時間方向には節点を均等に割り当てることとした.

パラメータの選択によってモデリング自体の性格が変わる. MCSではYamada et al.(1995b)中, fanning modelを採用した. このannealing kinetic function に対して感度のある温度領域をみるために, 加熱時間を固定してトラック短縮率(r), 及び r の温度微分を図4に示す. これによるとこの関数の感度領域は必ずしもいわゆるZPAZ (zircon partial annealing zone)とは一致せずやや広い領域である. この図をもとに感度領域は50-450°Cに固定した.

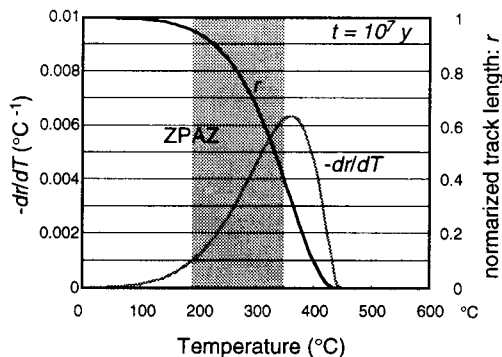


図4 MCSに用いるAKFの温度変化に対する感度を表す曲線. AKFはYamada et al. (1995b)中のfanning model ($T_c = \infty$). 等温加熱時間を 10^7 年としたときの r とその温度微分を示した. Yamada et al. (1995b)はPAZを $r: 0.4 < r < 0.95$ で定義したが(陰の部分), $r < 0.4$ でも関数自体は温度変化に対して感度を持つため, モデル空間としてはPAZよりもやや広げる必要がある.

順計算における $T-t$ pathの分割ステップ数が実は最も大きく計算時間を左右する. つまり, 計算時間の大半はここで消費されるのである. 一回の順計算にかかる時間は分割ステップ数 N_s のほぼ2乗に比例する. そこで N_s は小さいほど望ましいのだが, どの程度まで小さくできるのかをみた(図5). トラック長パターンがいわゆるbimodal patternになることが期待される $T-t$ pathにおいてもっとも分割ステップ数の差がでてくると考えられる. 図5中の(a)のパターンに対して N_s を20, 50, 100, 500と変えて, 順計算を行いFTデータを得た(b). $N_s = 500$ の場合をパターンを(a)に対する真のFTデータであると考え, $N_s = 20, 50$ では大きな差がみられるが, 100ではかなり良い一致(年代値で1%の差)を示す. この結果をもとにMCSでは N_s を100とした.

MCSの中で, 乱数によって決められるものは図3中の節点の移動方向(修正ベクトル)で

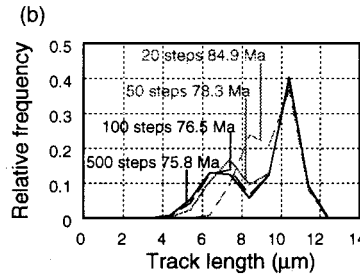
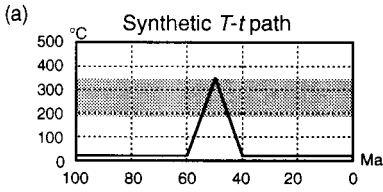


図5 順計算における温度履歴の分割数による計算結果の違い。(a)の人工データに対して(b)分割ステップ数を20, 50, 100, 500ステップとして順計算した結果. 500ステップと100ステップではよく一致(年代値で1%程度の差)するのに対し, 20ステップでは年代値・トラック長パターンともかなり異なる.

ある. もう少し正確にいうと, 修正ベクトルを乱数によって少しずつ変える. つまり次式のように乱数ベクトル u は用いられる:

$$dx = A \cdot u \quad (\text{式2})$$

ここで x はモデルの修正ベクトル, A は修正ベクトルの変化方向を決める行列 (step distribution matrix) である. この A を如何に巧妙に修正していくかがモデリングの命である.

次にモデルの評価法について述べる. モデルの評価は順計算によって得られた対応する FT データを用いて行う. 2通りのモデルの評価を行う. 1つはあるモデルが合格レベルに達しているものであるかどうか (Test 1) であるが, FT データの2つの要素を別々に評価する. 年代値に関する評価値 E_1 は次式によって得る:

$$E_1 = \frac{(age^{pred} - age^{obs})^2}{(2\sigma_{age}^{obs})^2} \quad (\text{式3})$$

ここで, age^{pred} , age^{obs} はそれぞれ, FT 年代のモデル値と測定値, σ_{age}^{obs} は age^{obs} の誤差を表す. 合格範囲は $E_1 \leq 1.0$ とする. これは, 測定値とモデル値が測定値の 2σ の範囲で一致している場合に相当する. トラック長パターンに関する評価値 E_2 は次式によって得る:

$$E_2 = \frac{1}{M-1} \left\{ \sum_k \frac{(N_k^{pred} - N_k^{obs})^2}{N_k^{pred}} \right\} \quad (\text{式4})$$

ここで, M は, 度数が0ではない bin (ヒストグラムの階級) の数, N^{pred} , N^{obs} は k 番目の bin に属するトラックの数のモデル値と測定値を表す. E_2 は換算 χ^2 値と呼ばれる統計量で $E_2 < 2.0$ の場合を合格とする. これは, 有意水準5%で測定値とモデル値が同一の分布から得られたものであるという仮説を検定した場合にほぼ相当する. 年代値とトラック長パターン双方が合格範囲に入っている場合に限りそのモデルを合格モデルとする.

全くでたために乱数を発生させては, いつまでたっても合格モデルは十分な数集めることは出来ず, ひたすら計算時間を取るだけであるので, 乱数発生を効率的に行うアルゴリズムが必要である. そこで, あるモデルがその1つ前のステップで発生したモデルよりもよりよいモデルであるか (Test 2) を評価する. この目的は乱数発生によるモデル検索が「よりよい方向に向かっているか」を知ることである. E_1 と E_2 を用いてモデル自体の評価値 E を次式のように定義する:

$$E = w_1 E_1 + w_2 E_2 \quad (\text{式5})$$

ここで w_1, w_2 は重み係数であり、解析対象データにより異なる。現在のモデルと1つ前のモデルとの E の差を dE とすると、 $dE < 0$ の場合に新しいモデルが「よりよいモデル」ということになり、Test 2 の合格とする。そして Test 2 に合格した場合にはモデルは修正される。

新しいモデルは一つ前の状態のみを参照して、乱数によって決まり、それ以前の「過去の履歴」には依存しない。このような性質を Markov 性という。モデルの修正が選択的に特定の方向に進まないために必要な性質である。MCS で用いているアルゴリズムは Markov 性を持ち、モデルを検索する過程（モデルがたどった軌跡）は Markov チェーンを形成しているといえる（正確には Markov 性を持つ確率過程のことを Markov chain という）。この Test 2 のおかげで「よりよい方向」に進んでいるとはいえ、計算時間を減らす為にもう少し方向を絞り込みたい。そこである程度は過去の経験を生かしてみるために、チェーンを一定の長さに切り、そこでチェーンがたどった大まかな方向を振り返ってみる。修正ベクトルを一定回数分記録しておき、平均的な方向とふらつきの程度を求め、次のチェーンではその方向に修正ベクトルが向くように行列 A の再計算を行う。

ところが、この論法に従って「よりよい方向」をさがすと、収束が悪い時点、つまり E 自体が大きい時点で向かった方向にモデルの検索が進むことになり、局所解に陥りやすくなってしまふ。モデルを記述するパラメータの数が多い場合（ここでは（節点数 - 1）× 2）、パラメータが形成する空間にはいくつもの極小が存在することになり、このような局所解がすなわち最小とはならない。モデリングの目的は最小（ある

いはある程度以下）の E を与えるパラメータの組を求めることにあるので、このように局所解に陥ることは避けなくてはならない。この様な数多くの極小の中に真の最小が隠れているような問題を解決するのが Metropolis algorithm (Metropolis et al., 1953) である。これは simulated annealing 法を数値計算に取り入れたものである。Simulated annealing とは、熱力学、特に液体が結晶化したり、金属が冷えるときの焼きなましとの類比である。全く無関係ではないが、いわゆる「FT アニーリング」のことでない。Boltzmann の確率分布

$$P(E) \propto \exp(-E/kT) \quad (\text{式6})$$

が示すように、温度 T で熱平衡にある系のエネルギーは多数のエネルギー状態 E に確率的に分布する。ここで k は Boltzmann 定数である。たとえ低温でも系が高いエネルギー状態にある確率が、少しではあるが、ある。従って、系がエネルギーの極小から飛び出して、よりよい極小にたどり着く可能性がある。言い換えると、系は坂を下るばかりでなく、ときには坂を登るが、温度が低いほど坂を登る可能性が小さい。Metropolis たちはこのアルゴリズムを数値計算に取り入れた。熱力学を模した系が次々にいろいろな状態に出会う。元のエネルギーが E_a で、新たに出会ったエネルギーが E_b ならば、確率

$$P = \exp[-(E_a - E_b)/kT] \quad (\text{式7})$$

で新しい状態に遷移する。もし $E_b < E_a$ ならこの値は 1 より大きくなるが、このときは $P = 1$ として必ず新しい状態に遷移する。Metropolis

algorithm を用いるMCSでは、新しく発生したモデルが1つ前のモデルよりも「よりよいモデル」でない場合でも、次式で表される確率値で Test 2 を合格させ、チェーンを1つ加える：

$$P = \exp[-\Delta E/C_T] \quad (\text{式8})$$

ここで、系の「温度」になぞらえた C_T を control parameter と呼ぶ。はじめのうちはこの「温度」は高く設定する。大きめのエネルギー状態の変化を許すためである。MCSの初期状態ではほとんどすべてのモデルが Test 2 に合格する。各マルコフチェーンの終わりに行列 A を再計算する際に系の温度も同時に変える。このスケジュールの組み方が、モデリングの命である行列 A の修正過程を変え、Metropolis algorithm における鍵となる部分である。ゆっくり冷やすことでモデル空間全体を隈なく探索することが出来るが、時間がかかってしまう。早く冷やしすぎると局所解に陥りやすくなる。そこで巧妙に系の冷却スケジュールを組む必要があり、MCSでは E の分散を利用して冷却スケジュールを組んでいる。このスケジュールの組み方が各モデラーの腕の見せ所であり、ここでは詳しく述べない。事実上経験と勘に頼る部分である。

解析プログラムは Metroweaks® Code Warrior c++ を用いて組んだ。解析に必要な計算時間は用いる計算機によるが、Power PC を搭載した Macintosh (例えば Power Macintosh 8100 /100 AV) を用いた場合、10分程度で一回の解析ができる。68040 Macintosh では50倍程度以上の時間がかかる。

解析結果

解析のテストを行う要領を示す (図6)。(1) まず任意のテスト $T-t$ path を与える。(2) 与えた $T-t$ path に対応する FT データを順計算によって得る。(3) 2 で得られた FT データを「測定値」と考え、MCS にかけて逆解析を行い、得られた推定 $T-t$ path を一定数 (ここでは200パターン) 重ね合わせて描く。(4) 3 の推定 $T-t$ path の集中度を濃度分布で表し、推定モデルの集中した部分を「最も尤もらしい解析結果」と考え、1 で与えた $T-t$ path と比較し、どの程度再現できるかをみる。

実際に MCS がどのような範囲を検索しているかをみるために、ZPAZ をほぼ $10^\circ\text{C}/\text{m.y.}$ で通過・冷却する単純冷却パターンと、最高到達温度 300°C のパルス状の2次加熱パターンの逆解析時にモデルがたどったパスを図7, 8 に示す。それぞれ、(a) 1-200回目、(b) 201-400回目、(c) 401-600回目、(d) 901-1100回目、(e) 最後の100回に発生したモデルを重ねて描いたもので

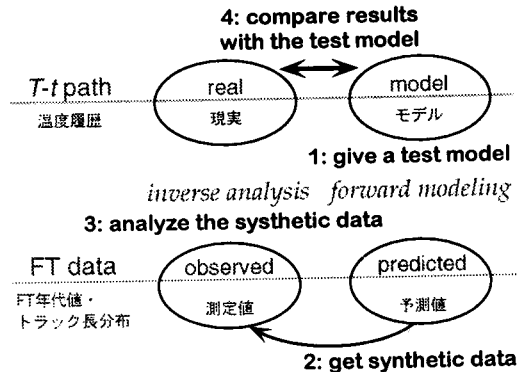


図6 MCSの定量解析テストを行う要領。1: 任意のテスト温度履歴モデルを与える。2: 順計算によって人工FTデータを得る。3: 人工データを測定値と考え解析を行う。4: 解析で得られた結果をはじめに与えたテストモデルと比較し、再現の程度から解析能力を見積もる。

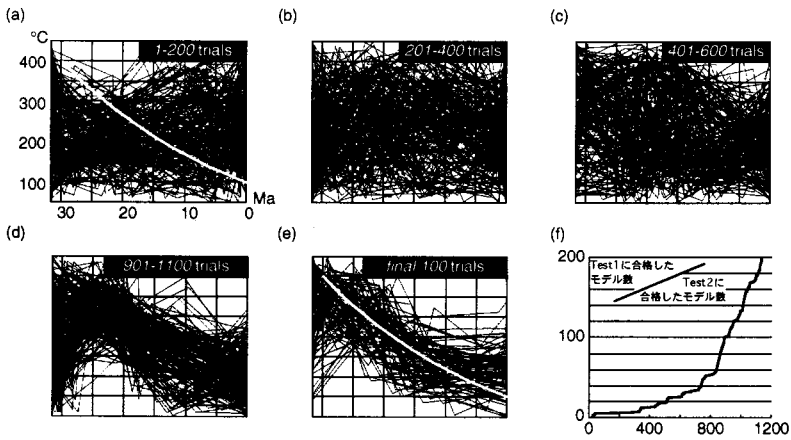


図7 MCSにて逆解析時に乱数によって発生されたモデルの軌跡。はじめに与えた人工データは(a), (e)中白線で示した指数関数で表された単純冷却パターン。冷却速度はほぼ $10\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{Ma}$ 。(a)-(e)はそれぞれ1-200回目, 201-400回目, 401-600回目, 901-1100回目, 最後の100回で発生したモデルを重ね合わせたものである (Test2に不合格のものも含む)。全体ではおよそ1450回の計算をした。比較的初期(a-c)にはモデル空間を満遍なく検索しているのに対し, 解析が進むと(d-e)次第に検索範囲がしぼられていくのが見て取れる。(f)は, Test2に合格したモデル中, Test1に合格したものの比をみたもの。解析が進むにつれTest1の合格モデルの割合が高まっている。

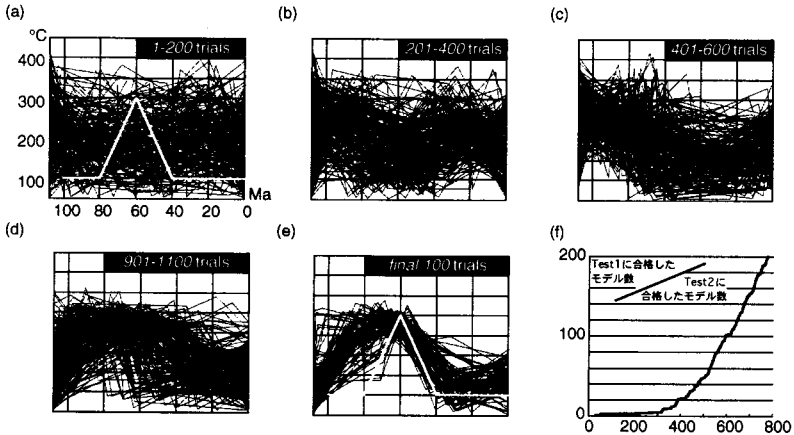


図8 MCSにて逆解析時に乱数によって発生されたモデルの軌跡。はじめに与えた人工データは(a), (e)中白線で示したパルス状の2次加熱パターン。(a)-(f)は図7と同様。全体ではおよそ1650回の計算をした。図7の場合同様、比較的初期にはモデル空間を満遍なく検索し, 解析が進むと次第に検索範囲がしぼられていく。

ある。乱数によって十分に満遍なくモデル空間中を検索した後、巧妙に検索範囲を絞り込んでいく様が見られる。(a)と(e)に示した白線もとに与えた温度履歴である。たいていの場合、およそ1500-2000回の順計算によって200の合

格パターンが得られる。図7, 8の(f)は, Test 2に合格したモデルのうち Test 1に合格したモデルがどのように増加しているかを示している。はじめのうちは Test 1に合格するモデルはなかなか増加しないが, ある時点から急に増加し始

める。

解析テストの結果を図7, 8のパターンについてそれぞれ図9, 10に示す。図9はZPAZをほぼ $10^{\circ}\text{C}/\text{m.y.}$ で通過・冷却する単純冷却パターンに対応する解析結果である。モデルが集中している部分は、ある程度幅はあるもののほぼ与えたテスト $T-t$ pathと一致する。しかし、感度領域から外れる低温度部ではモデルの分布が広がり、尤もらしい範囲を特定しにくくなる。図10はジルコンFTアニーリングが最も感度の良い領域である 300°C のパルス状の2次加熱パターンに対応する解析結果である。単純冷却パターンほど、きれいにモデルの再現は出来ていない。再加熱時点に注目すると、その最高到達温度はほぼ特定できている。最も集中した部分と元のパターンを比較するとほぼ 20°C 以内で一致している。時期についてはやや再現性が悪い。年代値の10%程度古い方向(ここでは約 10m.y.)

にモデルは最も集中している。最高温度到達以降は単純冷却パターンと同様の結果となっているが、それ以前はほとんど再現できていない。これは、再加熱によってトラックが短縮してしまい、それ以前の情報がほとんど消えてしまっているためである。しかしながら、モデルが存在する温度領域が限られるために最高到達温度についての情報は得られる。図10の場合、与えたパターンと解析結果は $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で一致している。また、最高到達時点以降の冷却過程においては、図9の場合程良く一致していない。このことは、温度冷却速度が急変するパターンの再現性は良くないことを示している。

議論

FTアニーリングの特性上、MCSはPAZ近傍での温度変化以外は解析能力を持たず、PAZ相当

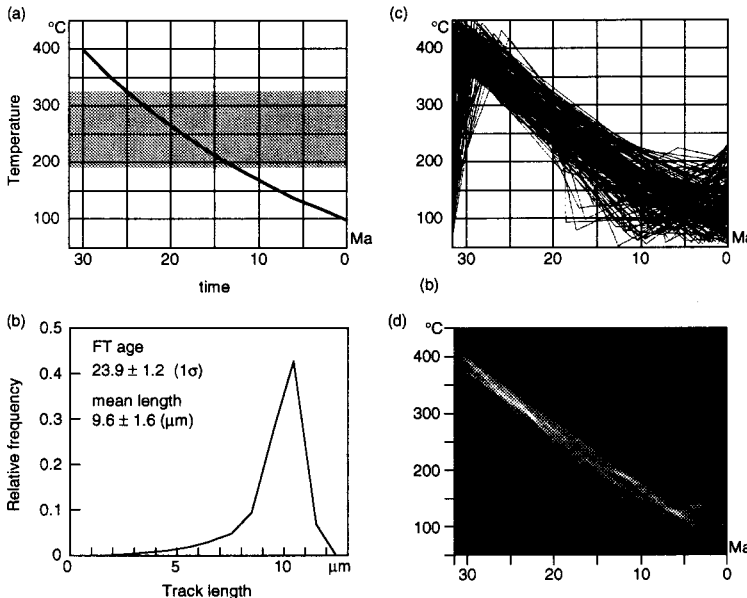


図9 MCSによる温度履歴解析結果。(a): テストに用いた人工 $T-t$ path. ZPAZをほぼ $10^{\circ}\text{C}/\text{m.y.}$ で通過する冷却パターン。図7の $T-t$ pathと共通。(b): (a)の順計算によって得られたFTデータ。(c): (b)のデータをMCSによって解析した結果得られた推定 $T-t$ pathを重ね書きしたもの。(d): (c)の推定 $T-t$ pathの集中度を濃度分布に示した。

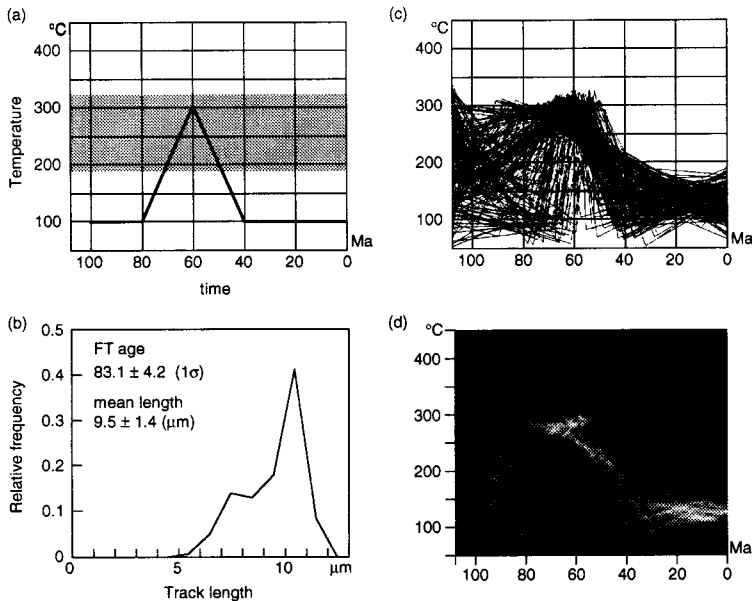


図10 MCSによる温度履歴解析結果. (a)-(d)の内容は図9と同じ. (a)で与えた人工T-t pathは図8のT-t pathと共通. モデル時間を100 Maとしたときに60Maに300℃まで達するパルス状の2次加熱パターン.

温度まで後時加熱イベントがあった場合には、その加熱イベント以前の情報は消えてしまい復元は難しい。そのことはパルス上の2次的加熱パターンの解析テスト結果にも表れている。つまり、再加熱時点以前の情報は、ほとんど失われ、再加熱時点近傍での最高到達温度が示されるに過ぎない。しかしながら、PAZ内での温度変化、例えば冷却過程に対しては高い感度を示す。また、埋没・上昇や、近辺での火成活動等による2次的加熱を受けた試料においては、その最高到達温度がPAZ内の場合、その温度・時期に対してかなり強い制約を与えることが出来るだろう。試料が冷却過程をたどった場合、PAZを通過する過程においては少なくとも冷却速度のオーダーの見積りは可能であると言って良い。PAZに相当する程度の2次的加熱を受けた試料においては、±20℃程度でその最高到達温度を見積もることが出来る。一方、図10の

解析結果の最高温度到達時点以前をみると、温度上昇過程にある（あるいは最近まで温度上昇過程にあった）試料の場合、トラックに記録された加熱以前の情報が消えてしまうため、温度上昇以前の温度変化の再現は難しいが、最高到達温度がPAZ内を越えない場合、その温度に関しては制約を与えられるといえる。

MCSなど温度履歴逆解析ツールの結果を用いて議論する場合に、解析結果の信頼度を決定する要素としては主に以下の5つが考えられる。(1) 解析で用いているannealing kinetic functionが如何によく決まっているか；(2) 鉱物ごとのFTアニーリング特性に対する理解；(3) horizontal confined track 検出に関するバイアスの評価；(4) FTデータ、特にトラック長分布に対する統計的取り扱い；(5) 解析結果の取り扱い。(1)に関しては、特に温度の見積りに対して大きく影響を与えるため、室内実験のみならず、複

数の地質学的検討を含めた関数の検討・決定が望まれる。ジルコンのFT長を用いた関数は実質上1つしかなく (Yamada et al., 1995b), この関数が普遍的にあらゆるジルコン試料に対して用いられるためには試料を変えての研究が必要である。(2)に関しては, FTがアニーリングによって短縮する際に一様に長さを減じているのではなく, ある程度短縮した後に segmentation (分裂) を起こしていることが分かっている (例えば Paul and Fitzgerald, 1992; Yamada et al., 1995a)。また, アパタイトでは異方的にFTアニーリングが進んでいることが分かっている (例えば Donelick, 1991)。このようにFTアニーリング現象そのものの理解が必要である。(3)に関しては, 特に短縮されたトラックの検出に関する検討が重要である。短縮したトラックは確率的に検出しにくい, 短縮したトラックこそ過去の温度履歴に関する情報を最も多く持っており, これを見落とすことは誤った解析結果を導き出す元になる。モデル上で仮定されている「理想的な」トラック長分布と, 実際の測定によって得られるトラック長分布の間の検出効率に関するバイアスの考察は欠かせない (例えば Laslett et al., 1982; Galbraith et al., 1990; Donelick, 1991)。さらに, 例えばタンデム加速器を用いたトラック検出効率の向上手法など, 実験的要素の研究が必要になるであろう (例えば Donelick, 1991; Watanabe et al., 1991; Ohira et al., 1994; Yamada et al., 1996; 山田・他, 1996 (今号))。この場合もバイアスの検討は必要である。(4)に関しては, 要するに「いったい何本のトラックを測定したらよいのか」という問題である。経験的にはおそらく100本程度であろうと思われる

が, 測定誤差, 認識効率等を含めて統計的に考慮する必要があるだろう。(5)に関しては, 今回のMCSではある基準に達する200のモデルが集中する部分を以て最も尤もらしいとし, ある程度の解析精度が得られた。しかしながらこれが最も良い方法であるとは言い難い。MCS等の逆解析ツールが出力した情報から何をどのように抽出するのが, 温度履歴逆解析モデリングにおける今後の最も大きな課題であろう。

謝辞

吉岡 哲氏にはモデリングプログラムを作成するにあたり, 技術的な支援で大変お世話になった。本論をまとめる機会を下さった渡辺公一郎氏とともに, 査読をしていただき有用なコメントを頂いた角井朝昭氏, 大平寛人氏に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Crowley, K.D., Cameron, M. and Schaefer, R.L., 1991, Experimental studies of annealing of etched fission tracks in fluorapatite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 1449-1465.
- Corrigan, J., 1991, Inversion of apatite fission track data for thermal history information. *J. Geophys. Res.*, **96**, 10347-10360.
- Donelick, R.A., 1991, Crystallographic orientation dependence of mean etchable fission track length in apatite: An empirical model and experimental observations. *Am. Mineral.*, **76**, 83-91.
- Donelick, R.A. and Miller, D.S., 1991, Enhanced TINT fission track densities in low spontaneous track density apatites using ^{252}Cf -derived fission fragment tracks: a model and experimental observations. *Nucl. Tracks Rad. Meas.*, **18**, 301-307.

- Galbraith, R.F., Laslett, G.M., Green, P.F. and Duddy, I.R., 1990, Apatite fission track analysis: geological thermal history analysis based on a three-dimensional random process of linear radiation damage. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **332**, 419-438.
- Gallagher, K., 1996, Evolving temperature histories from apatite fission-track data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **136**, 421-446.
- 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.
- Gleadow, A.J.W., Duddy, I.R., Green, P.F. and Lovering, J.F., 1986, Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 405-415.
- Green, P.F., Duddy, I.R., Gleadow, A.J.W., Laslett, G.M. and Tingate, P.R., 1986, Thermal annealing of fission tracks in apatite 1. A qualitative description. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **59**, 237-253.
- Hurford, A.J., 1991, Uplift and cooling pathways derived from fission track analysis and mica dating: a review. *Geologische Rundschau*, **80**: 349-368.
- 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.
- Laslett, G.M., Green, P.F., Duddy, I.R. and Gleadow, A.J.W., 1987, Thermal annealing of fission tracks in apatite: 2. A quantitative analysis. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **65**, 1-13.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A. and Teller, E., 1953, Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.*, **21**, 1087-1092.
- Ohira, H., Heiguchi, K., Komatsubara, T., Furuno, K., Kudo, H. and Hashimoto, T., 1994, Comparison of two methods of enhancing detection of confined fission tracks in minerals - Ni ion irradiation using a tandem accelerator and fission fragment irradiation using ^{252}Cf source -. *J. Geol. Soc. Japan*, **100**, 129-135.
- Paul, T.A. and Fitzgerald, P.G., 1992, Transmission electron microscopic investigation of fission tracks in fluorapatite. *Amer. Mineral.*, **77**, 336-344.
- Yamada, R., Tagami, T. and Nishimura, S., 1995a, Confined fission-track length measurement of zircon: assessment of factors affecting the paleotemperature estimate. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **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. Isot. Geosci.*, **122**, 249-258.
- 山田隆二・西村 進, 1995, FT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. フィッション・トラックニュースレター, **8**, 35-40.
- Yamada, R., Yoshioka, T., Watanabe, K., Tagami, T., Nakamura, H., Hashimoto, T. and Nishimura, S., 1996, Experimental techniques to enhance the detection efficiency of confined fission tracks in zircon. *in prep.*
- 山田隆二・吉岡 哲・渡辺公一郎・中村裕之・田上高広・西村 進, 1996, 仁左平デイスサイト及び歌長流紋岩ジルコンアニーリング特性-タンデム加速器照射による再検討-. フィッション・トラックニュースレター (今号) .
- Watanabe, K., Izawa, E., Kuroki, K., Honda, T. and Nakamura, H., 1991, Detection of confined ^{238}U fission tracks in minerals and its application to geothermal geology. *Ann. Rep. Tandem Accelerator Lab, Kyushu Univ.*, **3**, 151-155.