

氏名・(本籍)	ば ば けい 馬 場 敬
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 928 号
学位授与年月日	昭 和 60 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地学専攻
学位論文題目	Study on the thermal history analysis by fission track method (フィシオントラック法を用いた熱史の解析に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 田 口 一 雄      教 授 砂 川 一 郎 教 授 荳 木 浅 彦 教 授 青 木 謙 一 郎

## 論 文 目 次

Abstract

1. Introduction

Acknowledgements

2. Previous studies of thermal history estimation using fission track method

2-1. Thermal history estimation using fission track dating method

2-2. Thermal history estimation by fission track length

2-2-1. Conventional method for fission track length measurements

2-2-2. High contrast and high resolution techniques

2-2-3. Problems of conventional methods for fission track length measurements

2-3. Kinetic interpretation of thermal stability of fission tracks

2-4. Problems of conventional methods for thermal history estimation by fission

track method

3. Thermal history analysis by Fission Track Length method
  - 3-1. Considerations on application of Fission Track Length method to thermal history analysis
    - 3-1-1. Principle
    - 3-1-2. Calculation
  - 3-2. New method for fission track length measurements
    - 3-2-1. Experimental work with apatite
    - 3-2-2. Consideration on experimental results
    - 3-2-3. Construction of Arrhenius plot for reduction of fission track length on apatite
      - 3-2-3-a. Experiments
      - 3-2-3-b. Experimental results
      - 3-2-3-c. Determination of function of time, temperature and fission track length
4. Reproduction experiments of natural condition
  - 4-1. Principle
  - 4-2. Samples
  - 4-3. Experimental procedure
  - 4-4. Analytical considerations on experimental results
    - 4-4-1. Number of measurements required statistically for fission track length
    - 4-4-2. Distribution correction
      - 4-4-2-a. Correction equation
      - 4-4-2-b. Correction procedure on distribution correction of L/T plot
      - 4-4-2-c. Correction procedure on fission track length frequency diagram
    - 4-4-3.  $L_{\min}$  correction
    - 4-4-4. Reading method of data from L/T plot
      - 4-4-4-a. Approximation of L/T plot
      - 4-4-4-b. Reading method of data from approximation curve of L/T plot
    - 4-4-5. Calculation with the aid of computer
    - 4-4-6. Results of analysis on the reproduction experiment samples
      - 4-4-6-a. Analyses of 255°C and 295°C isothermal heating samples
      - 4-4-6-b. Analyses of curve A and curve B samples
    - 4-4-7. Evaluation of errors in the Fission Track Length method
      - 4-4-7-a. Errors resulting from shift of measured values of fission track

length

4-4-7- b . Errors resulting from scattering of measured values of fission track length

4-4-7- c . Errors resulting from fission track retention age

5. Application of Fission Track Length method to natural samples

6. Summary

References

# 論 文 目 次

## 1, 2章. 緒言及び研究史

近年, 続成作用下での石油炭化水素の生成や変質鉱物の形成が, 温度・時間効果に大きく支配されていることが明らかにされている。一方, 近年のプレート・テクトニクス理論の進展は, 島弧系の古地温勾配や構造発達史に関する詳細な情報を必要としている。これらの地質学的要求に応じるためには, 地質時代の熱史推定に関する研究が急務である。特に, この10年, フィッション・トラック年代の獲得温度が熱史推定に応用され注目を受けている。しかし, 従来の方法は, 地質時代のある時点での最高温度, 放射年代獲得温度, 等価温度などを知りうるか, あるいは相対的な古地温変化を推定できるかのいずれかであった。また, 従来の方法は, 構造発達史, 冷却速度, 古地温勾配などの仮定条件をも必要としていた。このため, その解析は多くの時間を要する複雑なものとなり, また地質学的仮定条件から生じる不確かさを排除することができなかった。

本研究は, これらの点を考慮し, より簡便かつ高精度の熱史推定法を開発しようとしたものである。この方法は, 1 試料の天然鉱物中に存在する  $^{238}\text{U}$  自発フィッション・トラック長の頻度分布を調べることにより, 熱史を温度曲線として解析できるという新しいもので, 特に“Fission Track Length 法” (フィッション・トラック長法) と命名された。新方法は, 方法論的考察, フィッション・トラック長測定法の改良, 天然状態の再現実験による実証的検討, 誤差モデルを用いた誤差要因の検討等を経て確立された。

## 3章. フィッション・トラック長法による熱史推定

一般に, 鉱物中のフィッション・トラックは加熱温度・時間の関数として短小化されることが反応速度論的に説明されている。従って, 長い地質時代中に十分な地熱加熱を受けながら  $^{238}\text{U}$  の自発フィッション・トラックを生成している鉱物中には, 種々の長さに短小化されたフィッション・トラックの長さ分布が存在し, この長さ分布中に熱史が単位時間当りのトラック長の短小化率の変化として記録されている。すなわち,  $^{238}\text{U}$  自発フィッション・トラックの長さ分布は天然の自記温度記録計として利用しうる性質を有している。この短小化率は, 温度が高い場合には大きく, 低い場合には小さい。

熱史の解析は, まず鉱物中から測定されたエッチ・トラックを長さの順に一定間隔で並べることによって作図された“L/T プロット”を用い, 個々のフィッション・トラックの生成年代とその時のトラックの短小化率を明らかにした。次に, アレニウス・プロットの図形的近似から得られた温度・時間・フィッション・トラック長の関係式を用い, 単位時間当りのトラックの短小化率からその時の温度を逆算する。この計算を L/T プロットから読み取った各時代の短小化率について行なうことによって, 温度曲線として熱史が一義的に決定される。

フィッション・トラック長法により, 精度の高い熱史推定を達成するためには, 精度の高い

エッチ・トラック長の測定に基づいた L/T プロットの作図が不可欠である。本研究で新たに考案された“New Track 法”は、prolonged etching factor(Khan & Durrani, 1972)を応用したもので、prolonged etching によって出現する new track の長さを測定するものである。この方法を用いると、従来の方法(TINT, TINCLE 法)に比べ、測定誤差を1/5~1/10に縮め、統計的に必要とされる測定数を1/10~1/20までに減少させることができる。

上記の方法により、フィッション・トラック長に関するアレニウス・プロットを作り、再現実験で使用するメキシコ産アパタイトのための、加熱温度・時間及びトラック長に関する関係式を決定した。その結果は、他の産地のアパタイトから報告されている結果と比較的よい一致を示した。

#### 4 章. 天然状態再現実験

天然鉱物アパタイト(メキシコ産)を用い、天然状態の再現実験を行ない、この鉱物に人工的な熱履歴を経験させた。その結果、アパタイト中に  $^{235}\text{U}$  の熱中性子誘発によるフィッション・トラックの長さ分布を形成させることができ、この鉱物試料を用い、フィッション・トラック長法によって解析し得た熱履歴と、実際に与えた加熱温度とを比較することによって、熱史解析の精度及び補正項の検討が可能となった。

天然状態では、長時間、比較的低い温度の地熱加熱を受けながら、鉱物中に  $^{238}\text{U}$  の自発フィッション・トラックが生成する。その生成速度は非常に遅く、 $10^3$ 年から $10^8$ 年の間は近似的にほぼ一定であるとみなせる。そこで、再現実験では、高線量一定線量率の熱中生子により鉱物中に高速一定の割合いで  $^{235}\text{U}$  の熱中生子誘発フィッション・トラックを生成させ、同時に短時間で高温の熱履歴を試料に経験させた。実験は、京都大学原子炉実験所 KUR 炉の  $\text{D}_2\text{O}$  照射室において行なわれ、熱中生子を照射しつつ、加熱炉に入れたアパタイトに熱履歴を経験させた。

再現実験試料のフィッション・トラック長法による熱史解析結果と実際に試料に加えられた温度との比較は、分布補正及び  $L_{\min}$  補正を必要とした。分布補正は、New Track 法におけるエッチ・トラックの検出効率と観測効率を補正するもので、 $L_{\min}$  補正は、L/T プロットの最小端における誤差分布を補正するものである。これらの補正は、L/T プロットの最小端長に関する補正式として一般化された。

次に、これらの補正法に基づき、再現実験試料を使ったフィッション・トラック長法の解析精度の検討を行なった。その結果、単純な熱史の場合として設定された $255^\circ\text{C}$ 、 $275^\circ\text{C}$ 、 $295^\circ\text{C}$ による一定温度加熱試料は、それぞれ $251 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $273 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $291 \pm 2^\circ\text{C}$ の値で推定された。その実際の加熱温度に対するずれは $4^\circ\text{C}$ (2%)以内である。次に、2つの温度ピークを持つ複雑な熱履歴の場合が検討された。この検討において、温度ピークの温度差を大きくした温度曲線と、温度差を1割以内とした温度曲線の再現実験を行なった。その試料の解析結果は、温度推定誤差10%以内、温度ピーク位置の推定誤差8%以内であった。以上の結果は、フィッション・トラック長法の妥当性を裏付けたものと認められる。

次に、フィッシュン・トラック長法による熱史解析の誤差要因と、その解析結果に与える影響が検討された。誤差要因は、エッチ・トラック長測定値のばらつきと、個人誤差に起因するエッチ・トラック長測定値のずれによる2つである。それぞれの場合について誤差モデルを使って検討を行なった結果、単純な熱履歴の場合には約5%以内、温度ピークを持つ複雑な熱履歴の場合でも通常10%以内の誤差で推定可能なことが明らかとなった。この結果は、前述の再現実験試料解析における実際の誤差をよく説明している。

## 5章. フィッシュン・トラック長法の天然試料への応用

以上の検討結果に基づき、フィッシュン・トラック長法による天然試料の熱史解析を試みた。試料として、スペイン・パナスクエイラ産アパタイトを使用した。その推定結果は、152m.y., 150°Cから4°C/10m.y.で徐々に温度が降下し、10m.y., 90°Cから現在にかけて急激に温度が下がったことを示した。

## 6章. まとめ

本研究の成果をまとめると次のようになる。

- 1) 1試料の鉍物を測定することによって、その鉍物が受けた地質時代の熱史を温度曲線として解析することができる。
- 2) 従来の方法では困難であった複数の温度ピークを持つ熱史の解析ができる。
- 3) 通常、10%以内の誤差で熱史推定ができる。
- 4) 天然状態の再現実験を通じて、この方法の解析精度を検討することができる。
- 5) 本研究では、アパタイト鉍物を対象としたが、この方法は、将来、他種鉍物へも応用できることを示唆した。

## 論文審査の結果の要旨

馬場敬提出の論文は、石油炭化水素の発生が主に堆積岩中の不溶性有機物が過去に経験した古地温(熱史)に支配された結果であるという説に基づき、種々の岩石の経験した地質時代の熱史を知る方法として天然鉍物中の $^{238}\text{U}$ -自発トラックの長さを用いた新しい熱史推定法を開発しようとしたものである。

鉍物中のフィッション・トラックは、一般にアレニウスの式に従ってフェイディングすることが知られている。このため地質時代に地熱による加熱を受けた鉍物中には、 $^{238}\text{U}$ -自発トラックが種々の長さで形成、分布している。換言すると鉍物の受けた熱史が、単位時間当りのトラックの短小化率として、長さ分布に記録されている。

本研究は上記の性質を利用し、先ず鉍物試料より測定した多数のエッチ・トラックを長さの順に、一定間隔でプロットしたL/Tプロットを作製し、個々のトラックの生成年代とその時のトラックの短小化率との関係を明らかにすると同時に、アレニウス・プロットの図形的近似から求めた加熱温度、時間、フィッショントラック長の関係式を作製し、両者を用いて単位時間当りの短小化率を求め、この結果から熱史を温度曲線として扱っている。

併しながら、L/Tプロットの作図に際しては、高精度のエッチ・トラック長の測定を必要とするため、新しいエッチ・トラック長測定法を開発している。この方法は、従来の方法(TINTおよびTINCLE法)に比べ、測定誤差を1/5~1/10、統計的に必要とされる測定数を1/10~1/20に減少させることに成功している。

本研究はまた上述の熱史解析法を天然状態再現実験を通じて検討している。実験は、種々の長さの $^{238}\text{U}$ -自発トラックの形成と分布を短時間で再現させるため、京都大学KUR原子炉の熱中性子照射設備を利用し、アパタイト試料に熱中性子を照射しつつ、加熱炉により試料に種々の温度変化を与え、熱履歴を経験させている。アパタイトに実際に加えられた温度と、実験試料に上述の熱史解析法を適用して得た温度との比較は、10%以内の誤差で一致することが認められた。

本研究はまた誤差モデルを用いた考察を通じ、新方法の誤差要因とその解析精度に与える影響についても十分な検討を加えており、さらには実験的な検討に基づいて、天然試料の熱史解析への応用も一応試みている。

本研究は既述のように、地質時代に岩石の経験した熱史を定量的に知ることのできる新方法を開発したもので、未だ検討を要する点も残されているが、理論的、実験的考察を通じ、その原理と方法論を確立している点は高く評価することができる。

よって審査員一同は、馬場 敬提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。