

電力中央研究所報告

閉鎖温度の低い年代測定法を用いた地殻浅部の
熱履歴と変動史の評価
—野島断層と柳ヶ瀬断層の例—

研究報告：N05060

平成18年5月

R **CRIEPI**

The image shows a stylized logo in a light gray color. It features a large, bold, serif letter 'R' on the left. To its right, the word 'CRIEPI' is written in a smaller, bold, sans-serif font. Two thick, curved lines, resembling a stylized 'S' or a swoosh, are positioned above and below the text, framing it. The entire logo is centered horizontally on a plain white background.

閉鎖温度の低い年代測定法を用いた地殻浅部の
熱履歴と変動史の評価
—野島断層と柳ヶ瀬断層の例—

伊藤 久敏*

キーワード：フィッション・トラック法
ウラン・トリウム・ヘリウム法
アパタイト
熱履歴
断層

Key Words : Fission-track dating method
(U-Th)/He dating method
Apatite
Thermal history
Fault

**Evaluation of thermal and tectonic history of shallow crust by dating methods with low closure
temperature
- Examples of Nojima and Yanagase faults -**

by **Hisatoshi Ito**

Abstract

Apatite fission-track (FT) and (U-Th)/He dating methods were applied for evaluation of tectonic and thermal stability at shallow crustal level with regard to the geological disposal of high-level radioactive waste. By applying these methods to active faults of Nojima and Yanagase, the followings were revealed. 1) The northernmost part of present day exposures on Awaji Island was situated at a depth range of 3-4 km about 65 million years ago assuming a paleogeothermal gradient of 25 degree-C/km, and the Nojima fault was initiated before ~44-54 million years ago. 2) The present day exposures around the Yanagase fault were situated at a depth range of 3-4 km about ~14-34 million years ago, assuming a paleogeothermal gradient of 25 degree-C/km. 3) These findings lead to a conclusion that FT and (U-Th)/He dating methods using apatite are useful for evaluation of tectonic history of a fault and its surrounding areas and also are applicable for thermal stability evaluation at shallow crustal levels because the FT and (U-Th)/He ages obtained indicate that the rock mass has not been experienced any thermal disturbance in excess of 100 and 70 degree-C, respectively, since that time.

(Civil Engineering Research Laboratory Rep.No.N05060)

(平成 18 年 3 月 31 日 承認)

* 地圏科学領域 主任研究員

背 景

近年、長期にわたる地殻の安定性を評価することの重要性が増している。特に、高レベル放射性廃棄物を地層中に処分する場合には、数 10 万年を越える長期間に亘って、処分場周辺の地質環境が大きく変化していないことを直接的あるいは間接的に示す必要があるという見解が出されている。また、これらを検査するためのツールの一つとして、100°Cあるいはそれ以下の比較的低温の領域に適用できる地質温度計の開発が必要とされている。アパタイトを用いるフィッショソ・トラック (FT) 年代測定法とウラン・トリウム・ヘリウム ((U-Th)/He) 年代測定法^{注 1)}は、閉鎖温度^{注 2)}がそれぞれ約 100°Cと約 70°Cであるため、このようなニーズに込え得る手法として、海外では多くの適用例があるが、国内での適用例はほとんどなく、この手法に関する十分な評価は行なわれていない。

目 的

アパタイトを用いた FT 法と(U-Th)/He 法の地殻変動史解析ツールおよび地質温度計としての適用性を評価する。

主な成果

兵庫県南部地震時に活動した野島断層と近畿の主要な活断層である柳ヶ瀬断層を対象に、アパタイトを用いた FT 法と(U-Th)/He 法を適用し、以下の成果を得た。

1. 淡路島北端部の地殻変動史

淡路島北端部は野島断層と楠本断層に挟まれた隆起地塊である。同地域のアパタイト FT 年代測定結果と(U-Th)/He 年代測定結果から、過去の地温勾配が現在の地温勾配 (25°C/km) と同程度であったと仮定することで、この隆起地塊の現在の地表面は約 65 Ma (Ma: 百万年前) に深度 3~4 km に位置していたと推定した。さらに、野島断層と楠本断層のアパタイト FT 年代として 44~54 Ma が得られたこと、およびこれらの年代よりも古い時期に断層と関連して生じたとされる熱水性鉱物 (濁沸石、緑泥石) が試料中に存在したことから、これらの断層は 44~54 Ma には既に発生していたと推定した。

2. 柳ヶ瀬断層周辺の地殻変動史

柳ヶ瀬断層周辺の地殻を構成する美濃・丹波帯の砂岩を用いたアパタイト FT 年

代として 14~34 Ma が得られた。このことから、当地域の現在の地表面は、過去の地温勾配を 25°C/km 程度と仮定すれば、14~34 Ma に深度 3~4 km に位置していたと推定した。

3. 地殻変動史解析ツールおよび地質温度計としての評価

以上のことから、アパタイトを用いた FT 法と(U-Th)/He 法は地殻浅部 (3~4 km 以浅) の隆起・削剥史を評価できるとともに、断層の発生時期の推定にも役立つ手法であることが分かった。さらに、これらの手法により、淡路島北端部では 44 Ma 以降、柳ヶ瀬断層地域では 14 Ma 以降、地殻浅部でそれぞれ 70°C および 100°C を超える熱影響を受けていないことが推定されたので、これらの手法は地殻の熱的な長期安定性を評価可能な手法として重要である。

今後の課題

アパタイトの FT 法で得られた年代値誤差は大きいため、より精度の高い年代値が得られる手法としての改良が必要である。

注 1) (U-Th)/He 年代測定法：鉱物中に含まれる U と Th の α 壊変により生じる ^4He を用いる年代測定法。

注 2) 閉鎖温度：一般に FT 法のような放射年代測定法で得られる年代は、測定対象物質がある一定の温度以下になってからの年代を示す。この温度を閉鎖温度という。

関連報告書：「花崗岩中の割れ目のキャラクタリゼーション (その 1) - 代表的花崗岩の冷却過程 -」 U92051 (1993.3)

目 次

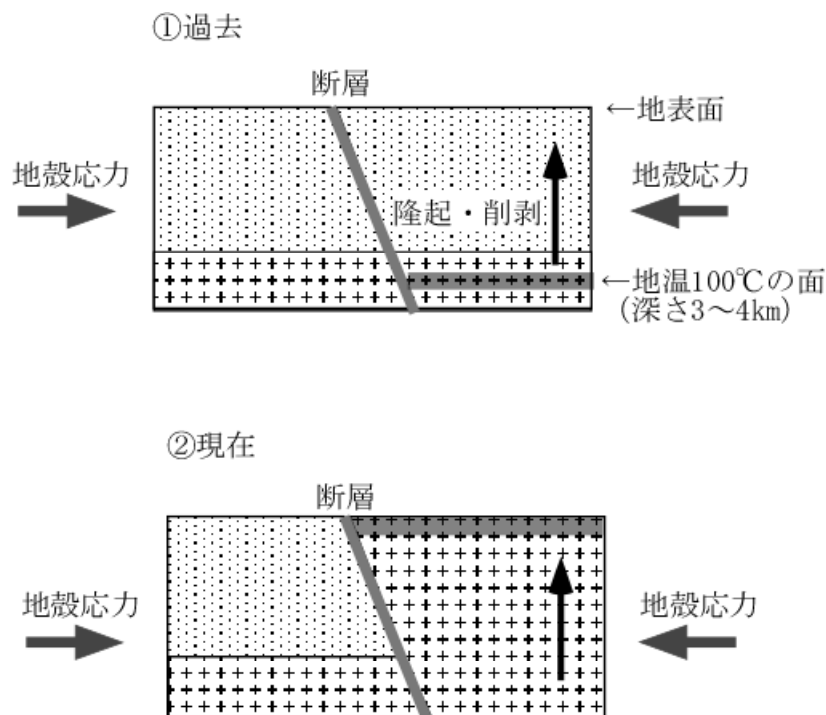
1. はじめに	1
2. FT年代測定法の概要	2
2-1. 原理	2
2-2. 実験方法	3
3. (U-Th)/He年代測定法の概要	4
3-1. 原理	4
3-2. 実験方法	5
4. 野島断層の活動履歴評価	5
4-1. 研究の背景と目的	5
4-2. 地質概要と採取試料	6
4-3. 年代測定結果	7
4-4. 考察	9
5. 柳ヶ瀬断層周辺の隆起・削剥史	11
5-1. 研究の背景と目的	11
5-2. 地質概要と採取試料	12
5-3. 年代測定結果	12
5-4. 考察	13
6. 地殻変動史解析ツールおよび地質温度計としての評価	14
7. まとめ	15
謝辞	15
引用文献	15

1. はじめに

近年、長期にわたる地殻の安定性を評価することの重要性が増している。特に、高レベル放射性廃棄物は地中に処分されることになっており、処分場周辺の地殻の長期安定性については十分な検討が必要とされている。この場合、地殻の安定性に影響を与える要因として、①地震・断層活動、②火山・火成活動、③隆起・沈降・侵食、④気候・海水準変動、がある（核燃料サイクル開発機構、1999）。さらに地殻の安定性を検討すべき期間として、過去数10万年の地殻変動、火成活動などの履歴のみならず、より長期に亘って地質環境が大きく変化していないことを直接的あるいは間接的に示す必要がある（核燃料サイクル開発機構、2005）とされている。また、これら进行评估するためのツールの一つとして、100℃あるいはそれ以下の比較的低

温の領域に適用できる地質温度計の開発が必要（核燃料サイクル開発機構、2005）とされている。

アパタイトを用いるフィッション・トラック（FT）法とウラン・トリウム・ヘリウム（(U-Th)/He）法は、閉鎖温度の低い放射年代測定法として知られており、アパタイト FT 法の閉鎖温度は約 100℃（Wagner and Van den haute, 1992）、アパタイト(U-Th)/He 法のそれは約 70℃（Farley, 2002）である。従って、これらは比較的低温の領域に適用できる地質温度計として有望と考えられるとともに、地殻浅部における地殻変動史の解明にも寄与しうる手法である。例えば、図 1 に示すように、地表面温度を 10℃、地温勾配を 30℃/km とすれば、地下 3 km が地温 100℃であることから、隆起・削剥過程にある岩体のアパタイト FT 年代は、その岩体が地下 3 km 付近に位置した年代を示す。従って、



$$\text{隆起・削剥速度} = (\text{地温}100^{\circ}\text{Cの深度}) / (\text{アパタイトFT年代})$$

図 1 地殻浅部（3～4 km 以浅）における隆起・削剥史とアパタイト FT 年代の関係

隆起・削剥量（ここでは 3 km）をアパタイトの FT 年代で割り算を行なうことで、地下 3 km からの平均的な隆起・削剥速度を評価することが可能となる。アパタイトの(U-Th)/He 法を用いれば、さらに浅部の隆起・削剥史を検討することが可能となる。

アパタイトを用いる FT 法と(U-Th)/He 法は海外では多くの適用例があるが、国内での適用例はほとんどなく、これらの手法に関する十分な評価は行なわれていない。本報告では、これらの年代測定法の地殻変動史解析ツールおよび地質温度計としての適用性を評価するために、これらの手法の概要を述べるとともに、これらの手法を野島断層および柳ヶ瀬断層に適用した結果を示す。

2. FT 年代測定法の概要

2-1. 原理

岩石の年代測定法の 1 つである FT 法は、通常、岩石中に含まれるウラン含有鉱物であるアパタイトとジルコンを用いて年代測定が行われる。ウラン (U) の同位体である ^{238}U は自然界で一定の確率で自発的に核分裂を起こし、鉱物中に核分裂飛跡（フィッショントラック）を残す。これを自発トラック（spontaneous track）という。自発トラック密度 (ρs) は鉱物の年代と鉱物中のウラン含有量に比例する。ウラン含有量は原子炉で熱中性子を照射することで鉱物中の ^{235}U を核分裂させて得られる誘導トラック密度 (ρi) を測定することで求められる。実際のところ、 ^{238}U の自発核分裂定数が精度よく決定されていないなどの問題のため、FT 法では年代値既知の試料（年代標準試料）の ρs 、 ρi とウラン含有量既知のガラス（標準ガラス）の誘導トラック密度 (ρd) から得られる測定者固有の定数であるゼータ (ζ) 値を求めることで年代

値を得る。この方法をゼータ較正法という (Hurford, 1990)。

ゼータ較正法を用いた FT 法の年代値 (T) は以下の式から計算される。

$$T = \frac{1}{\lambda d} \ln \left(1 + \frac{\rho s * \lambda d * \zeta * \rho d * g}{\rho i} \right)$$

λd : ^{238}U の全壊変定数 ($1.551 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$)

ρs : 年代測定試料の自発トラック密度 (tracks/cm²)

ρi : 年代測定試料の誘導トラック密度 (tracks/cm²)

ρd : 標準ガラスの誘導トラック密度 (tracks/cm²)

ζ : 年代標準試料により決定される定数

g : 幾何定数（研磨した試料の場合は 0.5、研磨しない試料の場合は 1）

また、FT 法の年代値誤差 (σT) は以下の式から計算される。

$$\sigma T = T \sqrt{\frac{1}{Ns} + \frac{1}{Ni} + \frac{1}{Nd} + \left(\frac{\sigma(\zeta)}{\zeta} \right)^2}$$

Ns : 年代測定試料の自発トラック数

Ni : 年代測定試料の誘導トラック数

Nd : 標準ガラスの誘導トラック数

$\sigma(\zeta)$: ζ 値の誤差

放射年代測定法の閉鎖温度は、冷却過程にある岩体に対して定義される温度であり、冷却速度に応じて閉鎖温度は異なる。FT 法の場合、閉鎖温度はトラック密度が半減する温度とされており、Gleadow and Duddy (1981)は、実験室での加熱（アニーリング）実験や様々なアパタイトの坑井試料を用いた天然のアニーリング試料を

基に、アパタイトの FT 法の閉鎖温度として、加熱期間を 100 万年、1000 万年、1 億年とした場合、それぞれ、110°C、98°C、85°C であるとした。また、Brandon et al. (1998) は、年代標準試料の Durango apatite の閉鎖温度として冷却速度を 100°C/m.y., 10°C/m.y., 1°C/m.y. とした場合、それぞれ、130°C、115°C、100°C としている。アパタイトの FT 法の閉鎖温度はアパタイトの化学組成の違い（特に塩素の含有量）にも依存するとされているが、ここでは冷却速度や化学組成の違いを包括した値として、一般的に受け入れられている、 $100 \pm 20^\circ\text{C}$ (Wagner and Van den haute, 1992) をアパタイト FT 法の閉鎖温度とし

て用いる。

2-2. 実験方法

アパタイトとジルコンを対象とした FT 年代測定を以下の手順で実施した。なお、FT 年代測定は誘導トラックを外部ディテクター上で計測する方法である外部ディテクター法 (Gleadow, 1981) を用いた。

実験手順は図 2 に示すように大きく鉱物分離、試料作成、トラック数計測、年代値算出の各手順に分けられる。図 2 を参考に、主な要点を以下に述べる。

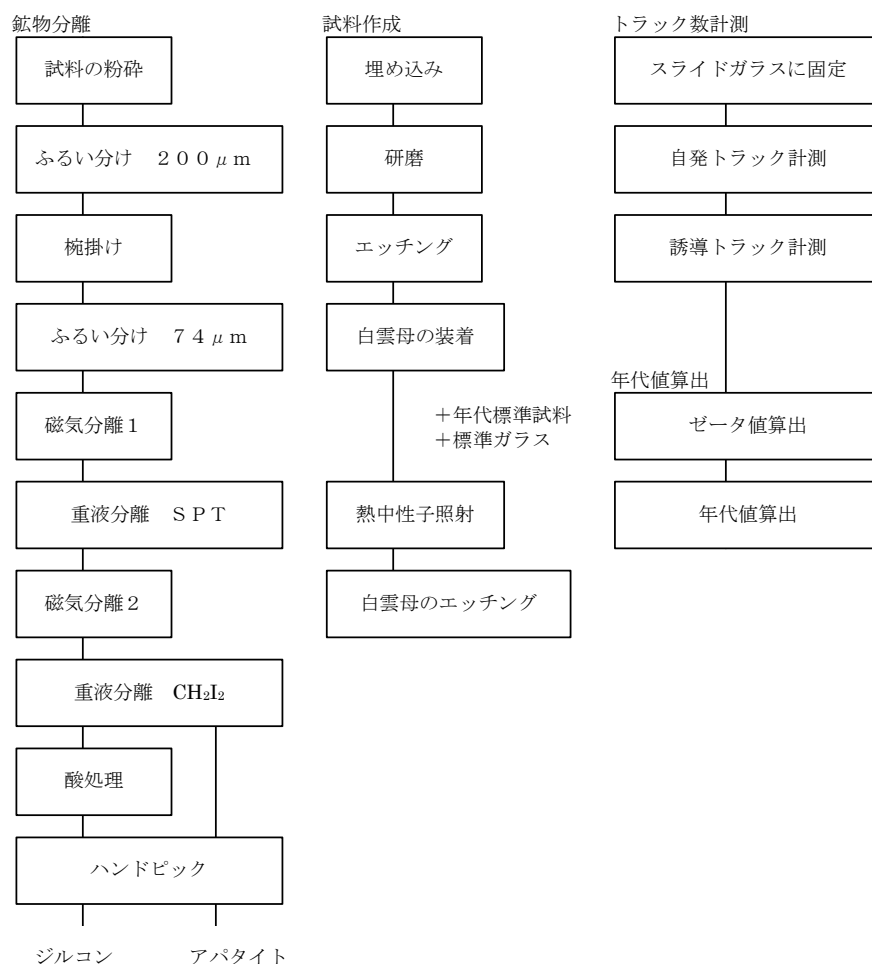


図 2 フィッション・トラック (FT) 年代測定手順

鉱物分離では、アパタイトとジルコンが磁性をもたない鉱物であること、特徴的な比重を示すこと（アパタイトで3.1、ジルコンで4.7）を利用した分離を行う。磁気分離は2回行ったが、これらは（株）京都フィッション・トラック製のハンドマグネットである NEOMAG7000（表面磁束密度は最高約8000 Gauss）を用いて行った。重液分離で用いたSPTとはポリタングステン酸ナトリウム（檀原ほか，1992）のことであり、比重を2.81～2.87に調整したものをを用いた。ジヨードメタン（CH₂I₂；比重3.3）による重液分離で最終的にアパタイトとジルコンのフラクションに分けた。酸処理の工程で、ジルコン中に黄鉄鉱が多い場合は硝酸処理を行い、それ以外の不純物が多い場合はフッ酸処理を行うことで純度の高いジルコンを得た。

試料作成では、アパタイトはペトロポキシ154樹脂に、ジルコンはPFAテフロンシートに、それぞれ埋め込み、埋め込みシートを作成した。各埋め込みシートには概ね100粒程度の鉱物を埋め込んだ。アパタイトのエッチングは野島断層試料については25℃に保った0.6%のHNO₃溶液中で3分行い、柳ヶ瀬断層試料については21℃に保った5M HNO₃溶液中で20秒間実施した（伊藤，2004）。ジルコンのエッチングは225℃に保った水酸化ナトリウムと水酸化カリウムの混合溶液（モル比1対1）中で行い、9.5～27時間実施した。熱中性子照射は日本原子力研究所の研究炉JRR-3の気送管照射設備（PN2）を用い、アパタイトで4分間、ジルコンで20秒間照射した。外部ディテクターである白雲母のエッチングは30℃に保った47%のフッ酸中で7～7.5分間実施した。

トラック数計測は光学顕微鏡としてNikon社製Optiphotを用い、倍率1250倍で行った。また、トラック数計測を補助するシステムとしてFT STAgeシステム（Dumitru，1993）を用いた。トラック数計測時における留意点は伊藤（1999）

に従った。

年代値算出では、まず、年代標準試料のトラック数計測を行い、アパタイトとジルコンについてそれぞれのゼータ値を求めた（伊藤・谷口，2002；伊藤・谷口，2004）。ゼータ値と年代値の計算にはTrackkey version 4.0.cを用いた。

3. (U-Th)/He 年代測定法の概要

3-1. 原理

(U-Th)/He 法は、測定法自体は古くから知られていたが、近年、鉱物中に含まれる少量のHe同位体の高精度測定が可能になってきたことや、アパタイトを用いた場合の閉鎖温度が低いという特徴を有することから、注目を浴びつつある年代測定法であり（Reiners，2002）、現状では、海外の一部の機関でこの年代測定が可能となっている。

(U-Th)/He 法はUとThの α 壊変(⁴Heの生成)を利用した年代測定法であり、次式から年代値(t)が得られる。

$${}^4\text{He} = 8{}^{238}\text{U}(\exp(\lambda_{238} * t) - 1) + 7{}^{235}\text{U}(\exp(\lambda_{235} * t) - 1) + 6{}^{232}\text{Th}(\exp(\lambda_{232} * t) - 1)$$

⁴He, U, Th : 現在の⁴He, U, Thの量

λ_{238} : ²³⁸Uの壊変定数 (1.551×10⁻¹⁰ yr⁻¹)

λ_{235} : ²³⁵Uの壊変定数 (9.849×10⁻¹⁰ yr⁻¹)

λ_{232} : ²³²Thの壊変定数 (4.948×10⁻¹¹ yr⁻¹)

上式はUとThの放射壊変が平衡に達していることを仮定しているが、これは0.35 Maより古い年代をもつ試料に対して成り立つ。

α 壊変により生じる⁴Heは、固体中を約20 μ m移動して静止するとされる。従って、鉱物（ア

パタイト)の大きさや形状により、鉱物外に失われる ^4He の割合は異なる。このことを考慮した補正は α -emission correctionと呼ばれており、鉱物中に ^4He が保持される程度(F_T と呼ばれる)は鉱物の大きさに応じて求められている(Farley et al., 1996)。 α -emission correctionを行うことで、(U-Th)/He年代は次式により得られる。

$$\text{Corrected Age} = (\text{Measured Age})/F_T$$

アパタイトの(U-Th)/He法の閉鎖温度は冷却速度とアパタイトの大きさに依存する(冷却速度が速いほど、粒子径が大きいほど閉鎖温度は高くなる)とされるが、Durango apatiteの場合、冷却速度 $10^\circ\text{C}/\text{m.y.}$ として、閉鎖温度は粒子径 $70\mu\text{m}$ で 72°C 、粒子径 $50\mu\text{m}$ で 67°C と求められている(Farley, 2002)。本研究では、一般的に受け入れられているアパタイトの(U-Th)/He法の閉鎖温度として 70°C (Farley, 2002)を採用する。

3-2. 実験方法

アパタイトの(U-Th)/He法はメルボルン大学に依頼し、実施した。実験手順は概ね以下に従った。

当所より提供されたアパタイト試料を偏光機能付き実体顕微鏡下で観察し、アパタイトの結晶形(六方晶系)を良好に保ち、かつジルコンやモナザイトなどのU, Th含有鉱物が包有されていないと判断されるアパタイトを手選により選別するとともに、アパタイトの粒径を測定した。複数のアパタイトから年代を得る場合には、アパタイトの重量で重み付けをした平均の粒径を求めた。得られた粒径を基にFarley et al. (1996)に従い、 F_T 値を求めた。

次に、アパタイトを真空下で 900°C 、5分間加

熱することで放出される ^4He を四重極質量分析計(quadrupole mass spectrometer; QMS)で測定した。 ^4He を測定したアパタイトは誘導結合プラズマ質量分析装置(inductively coupled plasma mass spectrometer; ICP-MS)を用いて、U, Thの含有量を測定した。

なお、各測定に対し、年代標準試料であるDurango apatiteも同時に測定を行うことで、実験結果の信頼性をチェックした。

4. 野島断層の活動履歴評価

4-1. 研究の背景と目的

淡路島北西端にNE-SW走向で分布する野島断層は1995年の兵庫県南部地震を起こした断層であり、同断層の活動性については多くの研究がなされている。このうち、Murata et al. (2001)は野島断層を貫く傾斜ボーリング調査等に基づき、同断層の南東側は北西側に比べ、花崗岩が約500m浅部にあること、花崗岩に上載する大阪層群のうち、1.2 Ma以降の地層が欠如していること(すなわちこの頃に淡路島周辺で隆起が始まったこと)から、同断層の南東側で花崗岩が1.2 Ma以降約500 m隆起し、その鉛直方向の平均変位速度は $0.40\text{-}0.45 \text{ m}/10^3 \text{ years}$ と推定した。一方、Boullier et al. (2001)は野島断層中に存在するシュードタキライトが15 km以深から上昇したとし、そのためにシュードタキライト生成後の断層の上盤側(淡路島側)の隆起・削剥量は非常に大きい(少なくとも10 km以上)と推定した。

上記の問題、すなわち地殻浅部の隆起・削剥量の見積もりの問題は、地殻浅部の変動史を評価できるアパタイトのFT法と(U-Th)/He法を適用することで解決可能であると考えられたので、本研究では、野島断層周辺の基盤岩(花崗岩)を対象にこれらの年代測定法を適用した。なお、

アパタイトの FT 法のみを用いた結果については Ito (2004)で報告した。

4-2. 地質概要と採取試料

野島断層は全長約 8 km の逆断層成分をもつ右横ずれ活断層である(活断層研究会編, 1991)。同断層周辺には、鮮新-更新統の大坂層群と中新統の神戸層群が一部で分布する他は、白亜紀に貫入した花崗岩類が広範囲に分布する(水野ほか, 1990)。淡路島北端部の地形は、西側に野島断層が、東側に楠本断層がほぼ並走し、これらに挟まれた花崗岩質基盤岩が隆起することで形成されている(岡・寒川, 1981; 水野ほか, 1990)。

年代測定のために合計 6 試料を採取した。そのうち 4 箇所は隆起した花崗岩質岩、1 箇所は野島断層の破砕帯、1 箇所は楠本断層近傍(下

盤側)である(図 3)。以下に各採取試料の位置と簡単な地質記載を述べる。

Nojima F. (世界座標系 WGS84 による緯度経度: $34^{\circ}33'24''\text{N}$, $134^{\circ}56'49''\text{E}$. 標高 20m: 以下, 同様)

野島断層の花崗岩質岩(採取箇所:野島^{ひきのうら} 臺浦)である。採取した試料は風化を受けているが、概ね固結しており、断層ガウジは見られない(写真 1)。兵庫県南部地震時に地表に現れた断層箇所直上と思われる(但し、試料採取時(2002年2月)には、当時の状況は保存されておらず、最新の活動時期を示す明瞭な断層面は確認できなかった)。採取試料の岩石薄片を観察した結果、同岩は弱く破砕を受けており、Tanaka et al. (2001) の weakly pulverized and altered fault-related rock に相当する。

Kusumoto F. ($34^{\circ}32'25''\text{N}$, $134^{\circ}58'40''\text{E}$. 45m)

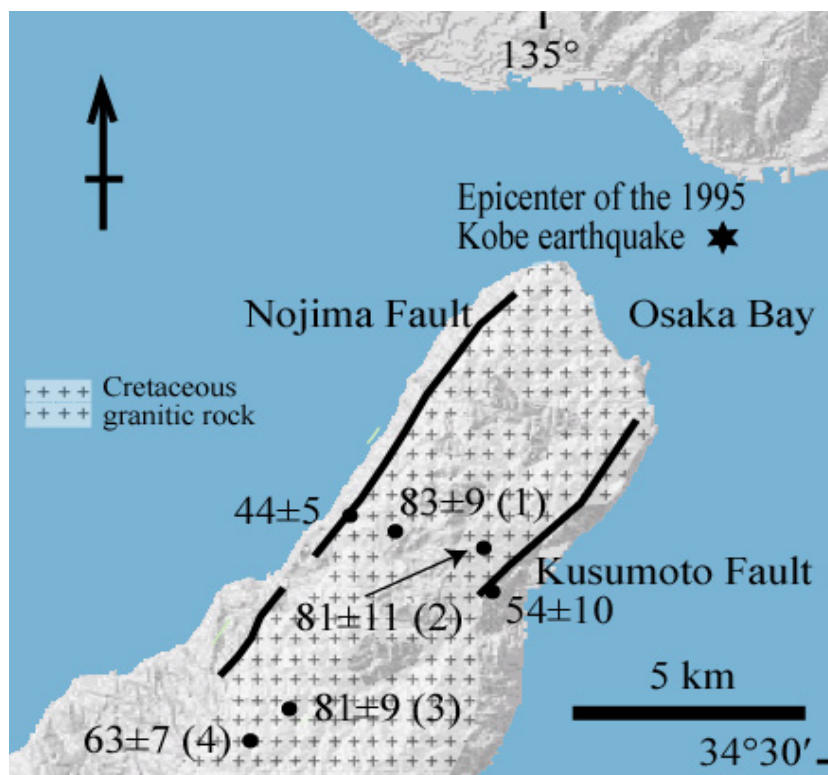


図 3 野島断層周辺の試料採取地点およびアパタイトの FT 年代値。

年代値の単位は Ma, 誤差は 1σ. 括弧内の数値は表 1, 2 の uplift block の数値に対応する。地質図は水野ほか (1990) に基づく。



写真1 採取した野島断層箇所の露頭写真。

左端のコンクリートブロックを除く写真全体が風化した花崗岩で、野島断層に相当する。

楠本断層の下盤側のやや風化した花崗岩質岩（楠本断層から約 100m 東）である。採取試料の岩石薄片を観察した結果、同岩は黒雲母が延性的に引き伸ばされた点で特徴付けられるカタクラサイト（Lin et al. (2001) の foliated cataclasite）に相当する。

Uplifted block 1 (34°33'17"N, 134°57'16"E. 135m)

野島断層の上盤側の新鮮な花崗岩質岩（野島断層から 750m 東）である。

Uplifted block 2 (34°32'56"N, 134°58'33"E. 250m)

楠本断層の上盤側の概ね新鮮な花崗岩質岩（楠本断層から 750m 西）である。

Uplifted block 3 (34°30'55"N, 134°55'58"E. 370m)

久野々断層（水野ほか，1990）の上盤側のやや風化した花崗岩質岩である。なお、本断層は東西走向の小規模な断層であるため、図 2 には記載しなかった。

Uplifted block 4 (34°30'32"N, 134°55'32"E. 470m)

久野々断層の上盤側のマサ化の進んだ花崗岩質岩である。

4-3. 年代測定結果

アパタイトの FT 年代測定結果を表 1 に示す。すべての年代は 44 Ma よりも古い値を示すので、採取した花崗岩質岩はすべて長期間に亘って熱的に安定していたことが推定される。さらに、すべての試料は有意水準 5% で χ^2 検定に合格していることから、花崗岩質岩はそれぞれの試料の示す年代の時期にアパタイトの閉鎖温度（100°C）以下に冷却したことが推定される。さらに、おおよそそれ以後に、100°C 付近に達するような熱的イベントを被っていないことが推定される。野島断層および楠本断層近傍のアパタイト FT 年代は 44~54 Ma であり、隆起した花崗岩質岩の年代（63~83 Ma）よりも若い。このことは、これらの試料は何らかの熱的イベントの影響を受けたことを示している。

表 2 にアパタイトの (U-Th)/He 年代測定結果を示す。(U-Th)/He 年代測定は一試料 (Uplifted block 3) のみについて行なった。5 回の測定を行なったうち、1 回の測定で 110.4±4.5 Ma という

表 1 野島断層のアパタイトの FT 年代測定結果

Sample description	Number of grains	Dosimeter		Spontaneous		Induced		P(χ^2) %	T \pm 1 σ Ma
		number	density x 10 ⁶ cm ⁻²	number	density x 10 ⁵ cm ⁻²	number	density x 10 ⁵ cm ⁻²		
Nojima F.	15	3543	1.459	130	2.75	517	10.94	66	44.1 \pm 4.8
Kusumoto F.	12	3543	1.459	41	0.79	134	2.59	61	53.6 \pm 9.9
Uplifted block 1	15	3543	1.459	165	2.32	349	4.90	77	82.6 \pm 8.8
Uplifted block 2	19	3543	1.459	87	1.15	189	2.50	43	80.5 \pm 11.2
Uplifted block 3	13	3543	1.459	136	2.29	293	4.92	95	81.1 \pm 9.3
Uplifted block 4	15	3543	1.459	133	1.81	370	5.03	99	62.9 \pm 7.1

Pooled ages are calculated using $\zeta=241.6\pm 11.3$ (1 σ error). Dosimeter glass IRMM540 used. P(χ^2): Probability of obtaining χ^2 value for ν degrees of freedom (where ν = number of grains - 1).

表 2 アパタイトの(U-Th)/He 年代測定結果

Sample number	Internal sample run ID	Number of grains analysed	⁴ He (10 ⁻⁹ cc)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Uncorrected age (Ma)	³ F _T	Corrected age (Ma)	Error (\pm 1 σ)	^b MWAR (μ m)	^c SD (μ m)
Uplifted block 3	1825	3	0.262	4.0	11.5	2.99	28.0	0.72	38.9	2.4	56.0	5.2
Uplifted block 3	1826	3	0.15	3.7	12.8	3.62	33.1	0.65	51.0	2.6	44.5	2.2
Uplifted block 3	1946	2	0.206	4.6	13.8	3.00	30.1	0.70	43.0	2.7	50.8	2.7
Uplifted block 3	1947	2	0.539	5.7	14.1	2.47	75.2	0.68	110.4	4.5	50.7	1.6
Uplifted block 3	2011	1	0.764	9.0	14.4	1.60	37.0	0.83	44.4	2.8	-	-
^d Durango	1840	1	6.659			21.67	29.8	-	29.8	1.2	-	-
Durango	1902	1	5.019			20.30	30.4	-	30.4	0.2	-	-
Durango	2020	1	2.950			20.80	30.1	-	30.4	1.9	-	-

^aF_T is the α -emission correction after Farley et al. (1996).

^bMWAR is the mass weighted average radius of apatite crystals measured in the aliquot analysed.

^cStandard deviation of the MWAR is used as a guide for the 'tightness' of the range of single crystal radii picked within a sample.

^dDurango apatite standard (31.02 \pm 1.01 Ma; McDowell et al. 2005) was run as an internal standard with each batch of samples analysed and served as a check on analytical accuracy.

う年代が得られたが、他の 4 回の測定で得られた年代は 39~51 Ma であり、まとまりが良い結果となった。(U-Th)/He 年代測定はアパタイト中にジルコンやモナザイトなどのウランやトリウムを高濃度に含む包有物がある場合、異常に古い年代が得られる。これは、これらの鉱物は ⁴He の量に寄与するが、ICP-MS 分析用にアパタイトを溶かす際に、特にジルコンは、溶けずに残ることから、U と Th の量に寄与しないためである。このため、アパタイトの選別時には細心の注意が払われる。通常、偏光機能付き実体顕微鏡でアパタイトを観察し、アパタイトを消

光位置に置くことで、微小なジルコンでも検出が可能であるが、たまたま、ジルコンがアパタイトと同時に消光する位置にある場合には検出できない。現状では、複数回の測定で年代値が整合しない場合には、微小な包有物が主因と考えられており、このような場合、測定回数を増やし、結果の再現性をチェックすることしかないようである (Farley, 2002)。今回得られた異常に古い年代を示す試料についても、微小な包有物の影響と判断し、ここでは、この試料を除いた 4 回の測定結果から得られる加重平均年代 (44.1 \pm 2.6 Ma : 誤差は 2 σ) を採用する。

4-4. 考察

淡路島北端部の隆起・削剥量

隆起した花崗岩質岩から得られた4試料のうちの1試料(表1のUplifted block 1の試料:アパタイトのFT年代は 2σ 誤差で 82.6 ± 17.6 Ma)は、近傍でK-Ar法の角閃石および黒雲母を用いた年代(それぞれ 2σ 誤差で、 87.7 ± 8.8 Ma, 80.9 ± 8.0 Ma:高橋, 1992)とジルコンのFT年代(2σ 誤差で 74 ± 6 Ma: Murakami et al., 2002)が得られている。さらに、今回得られたアパタイトの(U-Th)/He年代測定結果を用い、それぞれの閉鎖温度から隆起した花崗岩質岩の冷却曲線を求めた(図4)。なお、図4の冷却曲線は、花崗岩の一般的な冷却を仮定して求めたものであり、Ito (2004)で既に報告したものにアパタイトの(U-Th)/He年代測定結果を追加したものである。図4より、Ito (2004)で得られたアパタイトのFT年代の誤差は大きく、推定した冷却曲線の信頼度に影響を与えていたと思われるが、得

られたアパタイトの(U-Th)/He年代測定結果はIto (2004)で推定した冷却曲線と整合しており、この冷却曲線の信頼度の向上に寄与する結果となったと判断される。

図4より、淡路島北端部の花崗岩質岩は約80 Maに500°C付近から100°C付近まで急冷したことで、65 Ma頃に100°C以下に冷却しその後は徐冷したことが読み取れる。ここで、過去から現在までの地温勾配を25°C/km(現在の地温勾配は田中ほか(1999)と矢野ほか(1999)を参照した)、地表面温度を10°Cと仮定すると、当地域の花崗岩質岩は65 Maに深度3.6 km付近にあり、その後の隆起・削剥により、現在地表に露出したものと推定される。

ここで、仮定した過去の地温勾配の妥当性について検討する。まず、淡路島北端部の基盤岩は花崗岩質岩であり、花崗岩質岩貫入後に火山活動を経たという地質学的証拠はない。従って、現在の活火山周辺では、100°C/kmを超える地温勾配を有する地域がある(核燃料サイクル開発

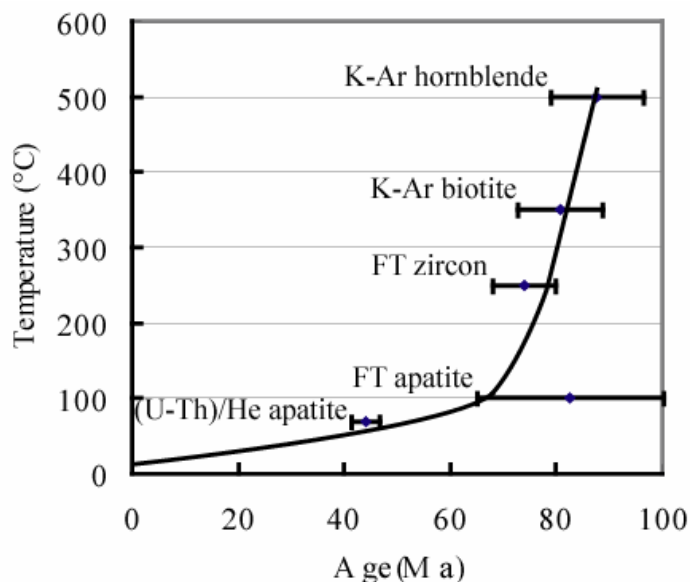


図4 淡路島北端部の花崗岩質岩の冷却曲線

閉鎖温度は以下を採用した。角閃石のK-Ar法(500°C; Harrison, 1981)、黒雲母のK-Ar法(320°C; Harrison et al, 1985)、ジルコンのFT法(240°C; Hurford, 1986)、アパタイトのFT法(100°C; Wagner and Van den haute, 1992)、アパタイトの(U-Th)/He法(70°C; Farley, 2002)。年代値誤差は 2σ 。

機構, 1999) が, 淡路島北端部で, 65Ma 以降にこのような高い地温勾配を経験したとは考え難い。

65Ma 以降に現在よりも高い地温勾配を被った可能性のある時期として, 15 Ma 頃の瀬戸内火山岩類の活動 (角井, 2000; 星ほか, 2002, 2006) が考えられる。同時期には, 瀬戸内地域を中心に, 九州北東部～愛知県設楽地方にかけて散在的に火山活動があったことから, 淡路島北端部においても, 現在より地温勾配は高かったと想定される。ここで, アパタイトの (U-Th)/He 法の年代は 44Ma であり, この火山活動の年代より古い年代を示すため, 15 Ma 頃に 70°C を超える熱履歴を受けていないと推定される。仮に 15 Ma 頃の地温勾配を 40°C/km と仮定したとき, 地下 1.5km で 70°C となるため, この時代のこの岩体 (現在地表に露出する岩体) の深度は 1.5km よりも浅かったことになる。あるいは, 仮に 15 Ma 頃にこの岩体が 1.5km よりも深部にあったと仮定すれば, この時期の地温勾配は 40°C/km を超えなかったと推定される。

過去の地温勾配に関しては, 今後の地質学の発展により, より厳密な設定が可能になると思われる。そこで, それらも考慮し, 地温勾配に

幅をもたせ, 20～35°C/km と設定した場合, 地表面温度を 10°C とすれば, 地温 100°C は深度 2.6～4.5 km に相当する。本報告ではこれを深度 3～4 km 程度と表現する。

淡路島北端部の花崗岩質基盤岩は約 65 Ma に深度 3～4km 付近にあり, 野島断層により 1.2 Ma 以降約 500 m 隆起した (Murata et al., 2001) とされることから, 最近のわずか 1.8% の時間で 15% 程度の隆起・削剥が生じたことになる。従って, 活断層としての野島断層による淡路島北端部の隆起の程度は, それ以前に比して大きく, 野島断層は第四紀以降に活動が活発化した可能性が考えられる。

野島断層の活動開始時期

野島断層や今回採取した楠本断層近傍の試料中には foliated cataclasite が存在する。foliated cataclasite は地下深部で形成されるため, 断層自体が形成された年代は第四紀以前であると推定されている (Lin et al., 2001)。さらに, 年代測定を行った試料を X 線回折法 (X-ray diffractometry; XRD) により分析した結果, 野島断層試料には濁沸石が, 楠本断層近傍の試料には緑泥石の存在が確認された (図 5)。これらは

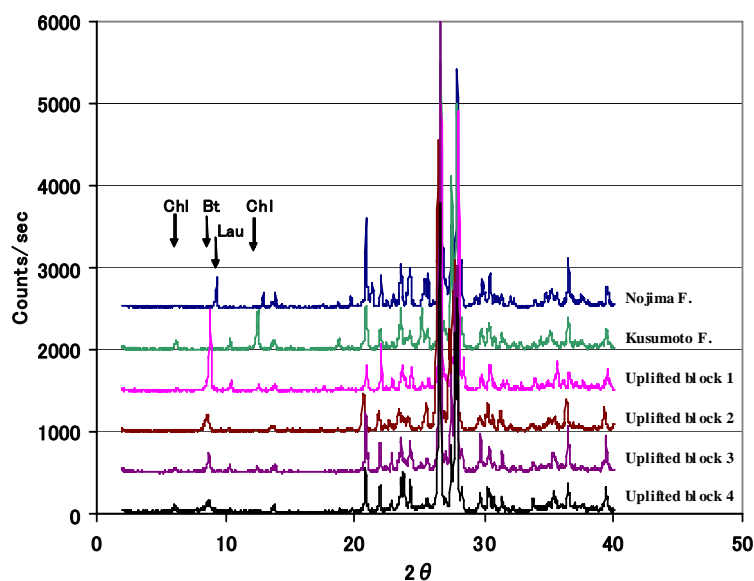


図 5 年代測定試料の XRD 分析結果
Chl: 緑泥石, Bt: 黒雲母, Lau: 濁沸石。

断層運動に関連した熱水活動により生成されたものと推定されている (Fujimoto et al., 2001). また, これらは 130°C 以上で生成される (Fujimoto et al., 2001) が, これらを含む試料のアパタイトの FT 年代は 44~54 Ma であり, この年代は採取した試料が 100°C 以下に冷却した年代を示す. 以上のことから, 野島断層は 44~54 Ma にはすでに形成されていたものと推定される. Murakami and Tagami (2004) は野島断層のシュードタキライトを用いたジルコンの FT 法

により野島断層の活動開始時期を 56 Ma 頃と推定しており, 今回の結果と整合する.

5. 柳ヶ瀬断層周辺の隆起・削剥史

5-1. 研究の背景と目的

柳ヶ瀬断層 (図 6) は滋賀県から福井県にかけて分布する南北ないし北北西-南南東方向に延びる全長約 30km で東側隆起成分をもつ左横

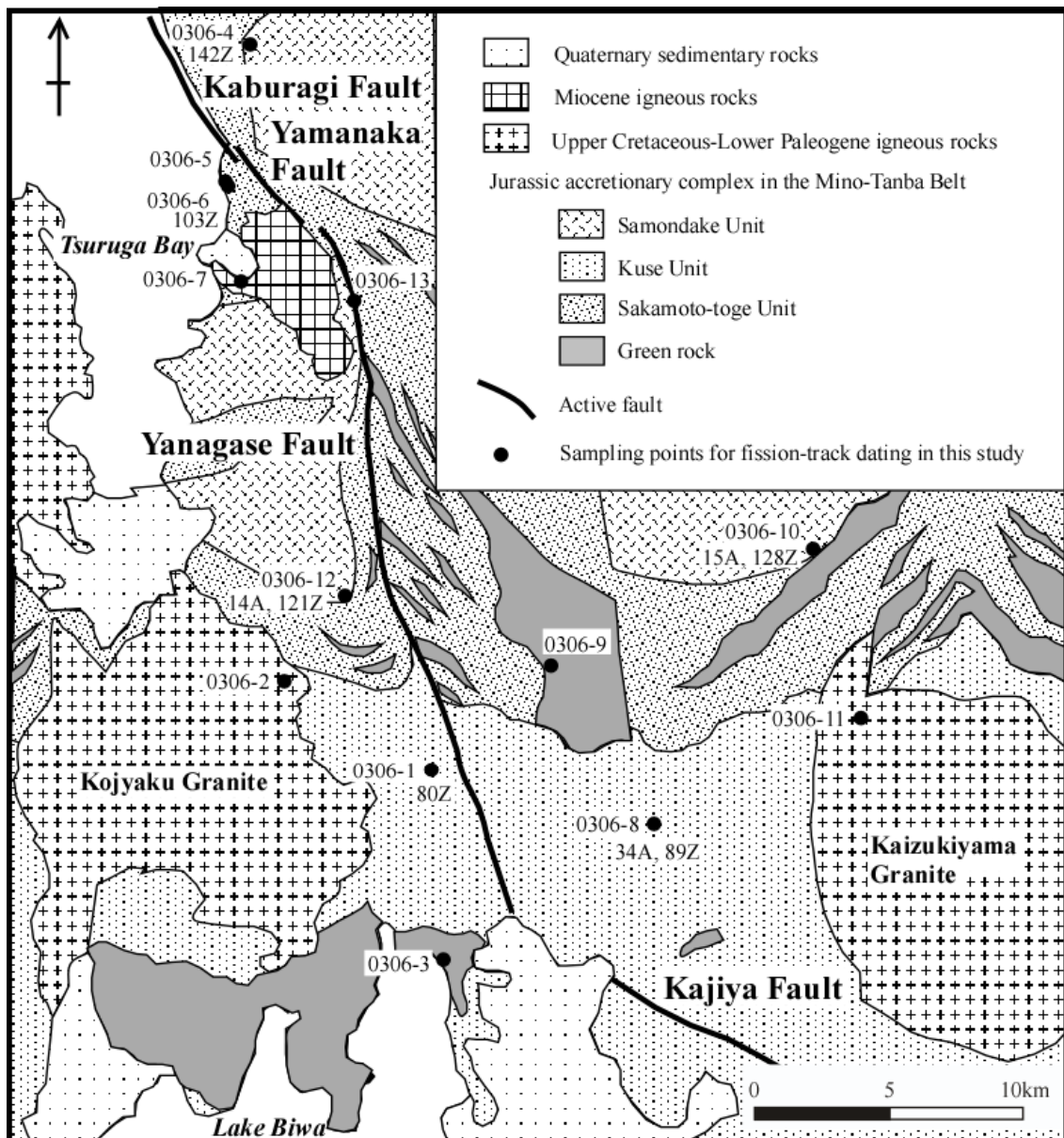


図 6 柳ヶ瀬断層周辺の試料採取地点および砂岩の FT 年代値.

A: アパタイトの FT 年代, Z: ジルコンの FT 年代. 年代値の単位は Ma. 地質図は脇田ほか (1992), 断層の位置は杉山ほか (1994) を基に作成した.

ずれ活断層である(杉村, 1963; 吉岡ほか, 1998). 柳ヶ瀬断層の第四紀の活動性評価に関しては多くの研究例があるが, そもそも断層がいつ頃生じ, 現在までにどの程度の地形的な変位を及ぼしたか等の検討も活断層としての活動性を評価する上で重要と考えられる. 同断層に関しては, その活動開始時期を白亜紀花崗岩の貫入時期としたもの(Kanaori, 1990)や中期中新世の日本海拡大時期としたもの(狩野, 2002)があるが, 放射年代測定に基づく検討はなされていない. これらの問題を検討するために, 本研究ではアパタイトとジルコンを用いたFT法を適用した. このうち, 本報告では, 柳ヶ瀬断層周辺の基盤岩の隆起についての検討結果を述べる.

5-2. 地質概要と採取試料

柳ヶ瀬断層は, 主として, ジュラ紀付加コンプレックスである美濃・丹波帯中に発達した活断層であり, 同断層沿いには, 幅 200~300m の破砕帯やひん岩の貫入が見られる(武藤ほか, 1981). 柳ヶ瀬断層周辺では, 断層の東側で貝月山花崗岩が, 西側で江若花崗岩が, 白亜紀~古第三紀に貫入し, 美濃・丹波帯に熱変成を与えており, 同断層の北部および山中断層沿いに中新世に貫入したとされる小規模な花崗岩体が分布する.

FT年代測定用試料採取は, 柳ヶ瀬断層(および北西延長上の山中断層, 甲楽城断層)周辺 5km 以内を中心に合計 13 箇所で行った(図 6). その内訳は, 砂岩(美濃・丹波帯の堆積岩) 6 試料, 花崗岩 3 試料, ひん岩 2 試料, 緑色岩 2 試料である. このうち, 本報告で検討する砂岩試料の位置と地質記載の概略を以下に述べる.

0306-1 (世界座標系 WGS84 による緯度経度: 35°33'59"N, 136°10'59"E. 標高 360m: 以下, 同様)

刀根コンプレックス(栗本ほか, 1999)の混在岩中の砂岩である. 採取した試料は泥岩中の砂岩ブロック(長径 10m, 短径 5m 程度で紡錘形を呈する)で, 黄褐色を呈する細粒で均質な砂岩である.

0306-4 (35°48'49"N, 136°06'31"E. 100m)

Samondake unit (Wakita, 1988) 中の砂岩である. 採取した試料は暗褐色を呈し, 細粒で均質な砂岩である. まれに頁岩のパッチを伴う.

0306-6 (35°46'01"N, 136°05'56"E. 80m)

Sakamoto-toge unit (Wakita, 1998) 中の砂岩である. 採取した試料は 0306-5 のひん岩採取箇所南約 50m に位置し, 暗青灰色を呈し, 細粒で均質な砂岩である.

0306-8 (35°32'53"N, 136°16'26"E. 340m)

久瀬ユニット(齋藤・沢田, 2000)中の砂岩である. 採取した試料は黄褐色で中粒の塊状砂岩であり, 凝灰質な泥岩片をまれに含むが層理面は不明瞭である.

0306-10 (35°38'30"N, 136°20'22"E. 540m)

左門岳ユニット(齋藤・沢田, 2000)中の粗粒砂岩である. 採取した試料は灰色を呈し, 層理の不明瞭な塊状砂岩であり, 泥岩片を多く含む.

0306-12 (35°37'32"N, 136°08'51"E. 220m)

尾羽梨コンプレックス(栗本ほか, 1999)中の砂岩である. 採取した試料は, 黄褐色を呈する細粒~中粒の砂岩であり, 頁岩のパッチを頻繁に伴う.

5-3. 年代測定結果

FT年代測定結果をアパタイトとジルコンに分けて, それぞれ表 3, 4 に示す.

アパタイトの FT 年代は 3 試料から得られ, 14~34 Ma を示した. このうち, 2 試料については有意水準 5% で χ^2 検定に不合格であり, 個々の粒子年代のバラツキが大きくなった. こ

表 3 柳ヶ瀬断層周辺の砂岩のアパタイトのフィッション・トラック年代測定結果

Observer: H. Ito										
Sample code	Number of grains	Dosimeter		Spontaneous		Induced		P(χ^2) %	U-content ppm	T \pm 1 σ Ma
		number	density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	number	density $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$	number	density $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$			
0306-8	19	2073	1.704	263	4.40	1886	31.57	0	27	33.8 \pm 4.5
0306-10	5	2073	1.704	53	1.92	802	29.04	4	25	15.2 \pm 3.4
0306-12	3	2073	1.704	19	2.48	285	37.18	42	34	13.7 \pm 3.3

Ages are calculated using $\zeta=241.6\pm 11.3$ (Ito and Taniguchi, 2004). Dosimeter glass IRMM540 used. P(χ^2): Probability of obtaining χ^2 value for ν degrees of freedom (where ν = number of grains - 1) (Galbraith, 1981). Ages are pooled age for samples that pass the χ^2 test and mean age for samples that fail the χ^2 test at 5% (Green, 1981).

表 4 柳ヶ瀬断層周辺の砂岩のジルコンのフィッション・トラック年代測定結果

Observer: T. Taniguchi										
Sample code	Number of grains	Dosimeter		Spontaneous		Induced		P(χ^2) %	U-content ppm	T \pm 1 σ Ma
		number	density $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$	number	density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	number	density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$			
0306-1	15	2565	3.320	1204	5.048	310	1.300	11	126	80.0 \pm 5.5
0306-4	30	2565	3.320	3104	8.419	516	1.400	0	143	142.3 \pm 11.3
0306-6	16	2565	3.320	1023	8.667	205	1.737	5	164	102.6 \pm 8.3
0306-8	30	2565	3.320	2871	5.783	715	1.440	0	157	89.4 \pm 7.1
0306-10	24	2565	3.320	3590	9.263	575	1.484	54	145	128.1 \pm 6.6
0306-12	30	2565	3.320	7489	10.467	1360	1.901	0	188	120.8 \pm 8.3

Ages are calculated using $\zeta=124.8\pm 2.0$ (Ito and Taniguchi, 2002). Dosimeter glass CN-1 used. P(χ^2): Probability of obtaining χ^2 value for ν degrees of freedom (where ν = number of grains - 1) (Galbraith, 1981). Ages are pooled age for samples that pass the χ^2 test and mean age for samples that fail the χ^2 test at 5% (Green, 1981).

の原因は不明であるが、異質な年代を示す粒子を排除する理由はないため、ここでは、Green (1981)に従い、バラツキの大きさを考慮した年代値および誤差を求めた。

ジルコンの FT 年代は 6 試料すべてから得られた。このうち、3 試料については χ^2 検定に合格したので、これらについては個々の粒子年代のバラツキの小さい、まとまりの良い年代値が得られた。残りの 3 試料については χ^2 検定に不合格となった。この原因として、砂岩中のジルコンが様々な年代を示す供給源由来であることが考えられる。しかし、以下の考察で述べるように、対象とした砂岩は、すべてジルコン FT 法の閉鎖温度を超え、一旦、リセットされたと考えられるので、供給源の違いが原因とは考え難い。そこで、アパタイトの FT 年代と同様に、

χ^2 検定に不合格な試料については Green (1981) に従った年代値計算を行なった。

5-4. 考察

砂岩を用いたアパタイトの FT 年代として、柳ヶ瀬断層の中部～南部で、同断層の西側から 14 Ma (試料名: 0306-12)、東側から 15 Ma (試料名: 0306-10) と 34 Ma (試料名: 0306-8) を示す年代が得られた (図 6)。柳ヶ瀬断層は東側隆起成分をもつとされているが、今回は、東側の隆起地塊 (柳ヶ瀬断層の東側に隣接する標高 700～800m の尾根をもつ山塊) からの試料採取はできなかったため、断層運動による上盤側 (東側) と下盤側 (西側) の隆起・削剥の程度の違いを評価することはできない。また、これを議

論するためには、より多くの試料採取が必要であるため、ここでは、今回得られたアパタイト FT 年代 (14~34 Ma) を用い、柳ヶ瀬断層周辺の基盤岩の平均的な隆起・削剥の程度を検討する。

美濃・丹波帯は、ジュラ紀中期 (約 170 Ma ; Wakita, 1988) に堆積したとされるが、今回得られたジルコンの FT 年代 (表 4) は、アパタイト FT 年代が得られた試料を含むすべての砂岩試料で 80~142 Ma の年代を示し、堆積年代よりも若い結果が得られた。このことから、今回採取した地域の美濃・丹波帯は堆積後に、ジルコン FT 法の閉鎖温度 (240°C) を超える深度まで埋没し (この時点でジルコンの FT 年代はリセットし)、その後、隆起・削剥を受けて、14~34 Ma に地温 100°C 付近に達し、現在地表に露出していると判断される。

ここで当地域の地温勾配について検討する。当地域の現在の地温勾配は 25°C/km (田中ほか (1999) と矢野ほか (1999) を参照に推定したもの) であるが、過去 34 Ma までの地温勾配に関しては、柳ヶ瀬断層の中部~南部において、局地的に地温勾配を変化させる地質学的イベントはないと考えられる。但し、柳ヶ瀬断層北部では、中新世に貫入した花崗岩質岩が存在し (図 6)、さらに中期中新世の西南日本弧の地温勾配は現在よりもかなり高めであったと推定される (狩野ほか, 2002) ことを考慮すると、柳ヶ瀬断層の中部~南部においても、中新世の一時期に現在よりも地温勾配は高かった可能性は考えられる。そこで、野島断層の箇所同様に、現在から過去の地温勾配を 20~35°C/km と仮定し、地表面温度を 10°C とすると、柳ヶ瀬断層の中部~南部の美濃・丹波帯は 14~34 Ma に深度 3~4km 付近にあり、その後の隆起・削剥により現在地表に露出したと推定される。

なお、長谷部・渡邊 (1998) は、美濃帯の堆積岩を対象とした 4 地点でのアパタイト FT 年代として、今回の結果と大きく異なる、約 55 Ma

を報告した。長谷部・渡邊 (1998) の試料採取地域等の詳細は不明であるが、アパタイト FT 年代の違いは、地域の違いによる地殻変動史の違いを反映しているものと思われる。この点に関するより詳細な検討を行なうために、さらには、日本列島の地殻浅部 (深度 3~4km 以浅) の地殻変動史を明らかにするために、今後、アパタイトを用いた FT 年代と (U-Th)/He 年代データの広域的な取得が重要である。

6. 地殻変動史解析ツールおよび地質温度計としての評価

今回、アパタイトを用いた FT 法と (U-Th)/He 法を野島断層と柳ヶ瀬断層に適用した結果、以下の長所・短所が明らかになったと思われる。

まず、アパタイトを用いる FT 法は、同じくアパタイトを用いる (U-Th)/He 法とともに閉鎖温度が低いため、地殻浅部 (3~4 km 以浅) の隆起・削剥史を評価できるという長所をもつ。それぞれの閉鎖温度は異なるため、野島断層で適用したように、両者を用いることで、より信頼性の高い地殻変動史の解明が可能である。さらに、他の年代測定法や地質学的証拠も加味することで、断層の活動開始時期に制約を加えることが可能であり、日本列島のテクトニクスの解明に大きく貢献できるツールであると思われる。

地殻の安定性評価の観点から、これらの閉鎖温度の低い年代測定法で得られる年代が数 10 Ma という古い年代を示せば、その地域が熱的に長期間安定であったことが示されるという点で、大きな長所である。今回得られたアパタイトの FT 年代で最も若い年代は、美濃・丹波帯の砂岩から得られた 13.7 ± 3.3 Ma であった。この砂岩の場合でも 1400 万年の長期に亘って、100°C を超えるような熱イベントは被っておらず、熱的に長期間安定であったと言える。アパ

タイトの(U-Th)/He法で44.1±1.3 Maが得られた淡路島北端部は、さらに熱的に安定しており、4400万年の長期間、70°Cを越える熱イベントを被っていないと言える。

アパタイトを用いるFT法の短所としては、年代値を高精度に決定することが困難なことが挙げられる。これはFT法の年代誤差が計測したトラック数に依存するため、アパタイトは、ジルコンに比べ、ウラン含有量が低く、自発トラックの測定数が少ないためである(表3, 4参照)。アパタイトのFT法に比べ、アパタイトの(U-Th)/He法は年代誤差の小さな値が得られるが、今回の例でも示されたように、試料によっては、異常に古い年代値が得られることがあり、この点に関して、さらなる検討が必要である。

7. まとめ

以上述べてきたことから、以下の成果が得られたと考えられる。

1. アパタイトを用いたFT法と(U-Th)/He法を適用した結果、淡路島北端部の現在地表に露出する隆起地塊は約65 Maに深度3~4 kmに位置していたこと、およびアパタイトFT年代より野島断層と楠本断層は44~54 Maには既に発生していたことが推定された。
2. アパタイトFT年代より、柳ヶ瀬断層周辺の地殻を構成する美濃・丹波帯は14~34 Maに深度3~4 kmに位置していたことが推定された。
3. アパタイトを用いたFT法と(U-Th)/He法は地殻浅部(3~4 km以浅)の隆起・削剥史を評価できる手法であることが示された。同時に、これらの手法により、淡路島北端部では4400万年前以降、柳ヶ瀬断層地域では1400万年前以降、地殻浅部でそれぞれ70°Cおよび100°Cを超える熱影響を受けていないことが推定されたので、これらの手法は地殻の熱的な長期安定性を評価可能な手法として重要であると考えられた。

謝辞

株式会社セレスの谷口友規氏には、FT用試料の調整とジルコンのFT年代測定を実施して頂いた。当所の田中姿郎主任研究員には柳ヶ瀬断層箇所地質記載を現地で手伝って頂いた。日本原子力研究所東海研究所の市村茂樹氏にFT用試料の照射の便宜を図って頂いた。FT年代測定の計算にはTubingen大学のIstvan Dunkl博士の作成したTrackkey version 4.0.cを使用した。Melbourne大学のBarry Kohn博士には(U-Th)/He法による年代測定を実施して頂いた。

ここに記して、これらの方々に厚く謝意を表します。

引用文献

- Boullier, A.M., Ohtani, T., Fujimoto, K., Ito, H. and Dubois, M., 2001. Fluid inclusions in pseudotachylytes from the Nojima fault, Japan. *J. Geophys. Res.*, 106, 21965-21977.
- Brandon, M.T., Roden-Tice, M.K., Garver, J. I., 1998. Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, northwest Washington State. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 110, 985-1009.
- 檀原 徹, 岩野英樹, 糟谷正雄, 山下 透, 角井朝昭, 1992. 無毒な重液 SPT (ポリタングステン酸ナトリウム) とその利用. *地質ニュース*, 455, 31-36.
- Dumitru, T. A., 1993. A new computer-automated microscope stage system for fission-track analysis., *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, V. 21, No. 4, 575-580.
- Farley, K.A., 2002. (U-Th)/He dating: techniques, calibrations, and applications. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 47, 819-844.
- Farley, K.A., Wolf, R.A., and Silver, L.T., 1996.

- The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 4223-4229.
- Fujimoto, K., Tanaka, H., Higuchi, T., Tomida, N., Ohtani, T. and Ito, H., 2001. Alteration and mass transfer inferred from the Hirabayashi GSJ drill penetrating the Nojima Fault, Japan. *The Island Arc*. 2001, 10, 401-410.
- Galbraith, R. F., 1981. On statistical models for fission track counts. *Math. Geol.*, 13, no.6, 471-438.
- Gleadow, A.J.W., 1981. Fission-track dating methods: What are the real alternatives?, *Nucl. Tracks*, 5, 3-14.
- Gleadow, A.J.W. and Duddy, I.R., 1981. A natural long-term track annealing experiment for apatite. *Nucl. Tracks*, 5: 169-174.
- Green, P. F., 1981. A new look at statistics in fission track dating, *Nucl. Tracks*, 5, 77-86.
- Harrison, T.M., 1981. Diffusion of ^{40}Ar in hornblende. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78, 324-331.
- Harrison, T.M., Duncan, I. and McDougall, I., 1985. Diffusion of ^{40}Ar in biotite: Temperature, pressure and compositional effects. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2461-2468.
- 長谷部徳子, 渡邊宏昭, 1998. 美濃帯の熱年代学的研究. 日本地質学会第 105 年学術大会講演要旨, p127.
- 星 博幸, 岩野英樹, 檀原 徹, 2002. 瀬戸内火山岩類のフィッション・トラック年代測定: 近畿地方, 二上層群の例. *地質学雑誌*, 108, 353-365.
- 星 博幸, 檀原 徹, 岩野英樹, 2006. 西南日本の中新世テクトニクスに対する新たな年代制約: 愛知県設楽地域におけるフィッション・トラック年代測定. *地質雑*, 112, 153-165.
- Hurford, A.J., 1986. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 92, 413-427.
- Hurford, A. J., 1990. Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommittee on Geochronology. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 80, 171-178.
- 伊藤久敏, 1999. 高精度 FT 年代測定に向けてー多粒子年代測定を容易にした FT STAge システムの利用ー. *月刊地球*, 号外 No.26, 83-87.
- 伊藤久敏, 2004. アパタイトの TINT の数を簡便に増やす試みについて. *フィッション・トラック ニュースレター*, 17, 1-7.
- 伊藤久敏, 谷口友規, 2002. フィッション・トラック法を用いた地殻の熱的安定性の検討. *フィッション・トラック ニュースレター*, 15, 31-34.
- 伊藤久敏・谷口友規, 2004. 砂岩を用いたフィッション・トラック年代測定法の適用ー長崎県の新第三系杵島層群の堆積年代と熱史ー. *地質雑*, 110, 197-203.
- Ito, H., 2004, Apatite fission-track dating of fault-related rocks along the Nojima and Kusumoto faults and its tectonic significance. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21610, doi:10.1029/2004GL020776.
- 核燃料サイクル開発機構, 1999. わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 1: わが国の地質環境. JNC TN1400 99-021.
- 核燃料サイクル開発機構, 2005. 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基

- 盤の構築—平成 17 年取りまとめ—分冊
1 : 深地層の科学的研究. JNC TN1400
2005-014.
- Kanaori, Y., 1990. Late Mesozoic-Cenozoic
strike-slip and block rotation in the inner belt
of Southwest Japan. *Tectonophysics*, 177,
381-399.
- 狩野謙一, 2002. 伊豆弧衝突に伴う西南日本弧
の地殻構造変化. *地震研究所彙報*, 77,
231-248.
- 活断層研究会編, 1991. 新編日本の活断層—分
布図と資料. 東京大学出版会. 437p.
- 栗本史雄, 内藤一樹, 杉山雄一, 中江 訓, 1999.
敦賀地域の地質. *地域地質研究報告* (5 万
分の 1 地質図幅), 地質調査所, 73p.
- Lin A., Shimamoto T., Maruyama T., Sigetomi, M.,
Miyata, T., Takemura, K., Tanaka, H., Uda,
S., and Murata, A., 2001. Comparative study
of cataclastic rocks from a drill core and
outcrops of the Nojima Fault Zone on Awaji
Island, Japan. *The Island Arc*, 10, 368-380.
- McDowell, F.W., McIntosh, W.C and Farley, K.A.,
2005. A precise ^{40}Ar - ^{39}Ar reference age for
the Durango apatite (U-Th)/He and
fission-track dating standard. *Chemical
Geology* 214: 249-263.
- 水野清秀, 服部 仁, 寒川 旭, 高橋 浩, 1990.
明石地域の地質. *地域地質研究報告* (5 万
分の 1 地質図幅), 地質調査所, 90p.
- Murakami, M., and Tagami, T., 2004. Dating
pseudotachylyte of the Nojima fault using the
zircon fission-track method. *Geophys. Res.
Lett.*, 31, L12604, doi:10.1029/2004GL020211.
- Murakami, M., Tagami, T., and Hasebe, N., 2002.
Ancient thermal anomaly of an active fault
system: Zircon fission-track evidence from
Nojima GSJ 750 m borehole samples.
Geophys. Res. Lett., 29(23), 2123, doi:
10.1029/2000GL015679.
- Murata, A., Takemura, K., Miyata, T. and Lin, A.,
2001. Quaternary vertical offset and average
slip rate of the Nojima Fault on Awaji Island,
Japan. *The Island Arc*, 10, 360-367.
- 武藤 章, 豊蔵 勇, 松浦一樹, 池戸正行, 1981.
活断層調査の例—柳ヶ瀬断層. *応用地質*,
22, 32-51.
- 岡 義記, 寒川 旭, 1981. 東部瀬戸内堆積区
の形成と淡路島の隆起. *地学雑誌*, 90,
25-41.
- Reiners, P.W., 2002. (U-Th)/He chronometry
experiences a renaissance. *EOS, Trans. AGU*,
83, No.3, 15 Jan., 21, 26-27.
- 斎藤 眞, 沢田順弘, 2000. 横山地域の地質.
地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅),
地質調査所, 126p.
- 杉村 新, 1963. 柳ヶ瀬断層. *第四紀研究*, 2,
220-231.
- 杉山雄一, 栗田泰夫, 吉岡敏和, 1994. 柳ヶ瀬-
養老断層系ストリップマップ, *構造図* 10,
地質調査所.
- 角井朝昭, 2000. 瀬戸内海西部地域における中
新世瀬戸内火山岩類の K-Ar 年代. *地質雑*,
106, 609-619.
- 高橋 浩, 1992. 淡路島の花崗岩類の K-Ar 年
代—特にマイロナイト化作用の時期につ
いて—. *岩鉱*, 87, 291-299.
- 田中明子, 矢野雄策, 笹田政克, 大久保泰邦,
梅田浩司, 中司昇, 秋田藤夫, 1999. 坑
井の温度データによる日本の地温勾配値
のコンパイル, *地質調査所月報*, 50,
457-487.
- Tanaka, H., Fujimoto, K., Ohtani, T., and Ito, H.,
2001. Structural and chemical characterization
of shear zones in the freshly activated
Nojima fault, Awaji Island, southwest Japan.
J. Geophys. Res., 106(B5), 8789-8810.

Wagner, G.A. and Van den haute, P., 1992. Fission-track dating. Kluwer academic Publishers, Dordrecht, 285p.

Wakita, K., 1988. Origin of chaotically mixed rock bodies in the Early Jurassic to Early Cretaceous sedimentary complex of the Mino terrane, central Japan. Bull. Geol. Surv. Japan, 39, 675-757.

脇田浩二, 原山 智, 鹿野和彦, 三村弘二, 坂本 享, 1992. 20 万分の 1 地質図「岐阜」.

地質調査所.

矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司昇, 1999. 日本列島地温勾配図 (1:3,000,000), 地質調査所, 6p.

吉岡敏和, 杉山雄一, 細矢卓志, 逸見健一郎, 渡辺俊一, 田中英幸, 1998. 柳ヶ瀬断層の最新活動—滋賀県余呉町椿坂峠におけるトレンチ発掘調査—. 地震, 51, 281-289.

電力中央研究所報告

[不許複製]

編集・発行人 財団法人 電力中央研究所
地球工学研究所
千葉県我孫子市我孫子 1646
電話 04 (7182) 1181 (代)
e-mail cerl-rr-ml@criepi.denken.or.jp



発行所 財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町 1-6-1
電話 03 (3201) 6601 (代)

印刷所 株式会社 ユウワビジネス
東京都千代田区神田須田町 1-1
電話 03 (3258) 9380

ISBN4-86216-323-8

