砂岩を用いたフィッション・トラック年代測定法の適用—長崎県の古第三系杵島層群の堆積年代と熱史—

Application of the fission-track dating method on sandstones — depositional age and thermal history of the Paleogene Kishima Group, Nagasaki Prefecture —

Abstract

伊藤久敏* 谷口友規**

Hisatoshi Ito and
Tomonori Taniguchi

2003年6月30日受付.

2004年2月19日受理.

* (財)電力中央研究所地圏環境部

Geosphere Environmental Science Department,
Central Research Institute of Electric Power
Industry, 1646 Abiko, Abiko city, Chiba 270-
1194, Japan

** (株)セレス

CERES, Inc., 1646 Abiko, Abiko city, Chiba 270-
1166, Japan

Fission-track (FT) dating using both zircon and apatite was performed on sandstone of the Paleogene Kishima Group, Nagasaki Prefecture. The depositional age estimated by zircon FT using two statistical procedures was in good agreement with that estimated by other methods, which shows this method using sandstone is useful for evaluating the depositional age. Zircons ~60 Ma in FT age were found in the sandstone and were assumed to have originated from Cretaceous granites around near-by Mt. Seburi because of their similarity in zircon FT ages. Because an apatite FT age of 23.8 ± 5.2 Ma was obtained from the sandstone, the studied Paleogene sedimentary basin was assumed to have never experienced temperatures in excess of $\sim 100^\circ\text{C}$ since 23.8 ± 5.2 Ma.

Key words: Paleogene, sandstone, fission-track dating, depositional age, thermal history, Kishima Group, Nagasaki Prefecture

はじめに

フィッション・トラック (FT) 法は、粒子毎の年代が得られる利点を有するため、生成時代の異なる様々な供給源由来の碎屑粒子からなる砂岩を対象として、砂岩の堆積年代の推定、供給源の推定、および堆積盆の熱史の評価などに適用できる。ジルコンの FT 法は閉鎖温度が 250°C 程度 (Hurford, 1986; Tagami et al., 1998; Brandon et al., 1998) と高いため、堆積年代や供給源の推定に適用でき (Brandon and Vance, 1992; Hurford et al., 1984; Tagami and Dumitru, 1996), アパタイトの FT 法は閉鎖温度が 100°C 程度 (Gleadow and Duddy, 1981; Brandon et al., 1998) と低いため、堆積盆の熱史の評価に向いている (Green et al., 1989; 大平ほか, 1997; Hasebe and Tagami, 2001)。

今回、九州北西部の古第三系とされる杵島層群の砂岩を対象に、ジルコンの FT 法から堆積年代の推定を試み、アパタイトの FT 法から杵島層群を堆積した堆積盆の熱史について若干の考察を行った。

地質概説

九州北部は古第三系が広く分布しており、日本の古第三系の中で最も良く連続した厚い地層群からなる (酒井, 1993; 今岡ほか, 2003) (Fig.1)。これらの地層群は浅海成堆積物と陸成堆積物からなり、地球規模の気候変動の解明や東アジア東縁部の第三紀のプレート運動史を解く鍵を握っている (酒井, 1993)。また、九州北部の古第三系には一部で石炭層が挟

Fig.1. Simplified geological map in the Northern Kyushu. KTF: Kokura-Tagawa Fault, FFF: Fukuoka-Futsukaichi Fault, HF: Hatashima Fault. Simplified from Karakida et al. (1992) and Sakai (1993).

まれており、堆積盆の熱史を解明する上でも興味深い地層群である。これらの地層群は北西～南東ないし北北西～南南東に走る正断層群によって画され、相互に分離した多数の堆積盆地に堆積しており、全層厚は 4000 m を超える (酒井, 1993)。調査地域の長崎県早岐地域は先第三紀の長崎変成岩類を基盤として古第三系の杵島層群が分布し、その上位には新第三系の佐世保層群が整合関係で分布する (長浜・松井, 1982)。杵島層群は層厚約 1100 m で、主に灰色の泥質砂岩からなる海成層であり、しばしば海緑石を含む。長浜・松井

Fig.2. Sampling locality of the fission-track dating. Topographic map is from 1: 50,000 “Haiki” published by Geographical Survey Institute of Japan.

(1982) は本層群を下位から杵島層・曲川層・早岐層・大塔層に区分している。

採取試料の記載

採取した試料は、長浜・松井 (1982) の「早岐」図幅内から採取した杵島層群早岐層の砂岩 (試料コード: 0010-5) である。採取箇所は Fig.2 に示す地点 (標高 85 m) であり、層理 (傾斜ほぼ 0°) の発達する細粒砂岩である (Fig.3)。厚さ 5 cm 程度の硬質な塊状砂岩と厚さ 1 cm 程度のより軟質な層状砂岩との互層よりなる。部分的に風化により黄褐色を呈するが、新鮮な箇所は青灰色を呈する。鏡下では、石英がほぼ半分を占め、斜長石、カリ長石、雲母類、不透明鉱物などがそれぞれ 10 % 以下で見られる。一部でマトリックスに方解石の充填が見られる。長浜・松井 (1982) によると、本層の層厚は 200 ~ 250 m である。

試料は約 6 kg を採取した。大部分は塊状砂岩から採取したが、同時異相の関係にある層状砂岩からも採取し、同じ試料として年代測定に用いた。

フィッション・トラック年代測定

1. 鉱物分離

採取した試料のうち約 3 kg を年代測定用に用いた。ディスクミル等による粉碎の後、篩掛けと椀掛けにより 74 ~ 250 μm の範囲の重鉱物を濃集し、磁気分離 (ハンドマグネットを使用)、重液分離 (ポリタングステン酸ナトリウム (SPT) とジヨードメタンを使用) を行い、ジヨードメタン

Fig.3. Photographs of outcrops sampled for the fission-track dating. a) Distant view. b) Close view.

(比重 3.33) よりも軽い鉱物側からアパタイトを、重い鉱物側からジルコンを得た。ジルコンは不純物を除くために、フッ酸処理を行った。ジルコンとアパタイトはそれぞれ約 500 粒得られた。

ジルコンは長径 (結晶の c 軸方向の径) が 100 ~ 150 μm 、短径 (結晶の a 軸方向の径) が 50 ~ 100 μm の短柱 ~ 柱状のものが多く、ほかに長径 200 ~ 300 μm 、短径 50 ~ 100 μm の長柱状粒子が 15 ~ 20 % 含まれていた。両者とも概ね透明性・自形性は高いが、特に後者の長柱状を示すジルコンの透明性・自形性は顕著に高く、特徴的であるため、これを長柱状ジルコンとして区別した。

2. 年代測定実験

年代測定はゼータ較正法 (Hurford, 1990) による結晶内部面を用いる外部ディテクター法 (ED1: Gleadow, 1981) により行った。用いたゼータ値のうち、アパタイトについては初めての公表であるので、それを Table 1 に示す。年代測定システムとして、顕微鏡ステージをパソコンで制御することで、比較的容易に多粒子の年代測定が行える FT STAge システム (Dumitru, 1993) を用いた (伊藤, 1999)。

ジルコンのエッチングは NaOH-KOH 等モル共融液を用い、225 °C で 29 時間行った。粒子毎の自発トラック密度のばらつきは大きかった ($3 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$) が、このエッチング時間では、自発トラック密度の低いものでも、ジルコン結晶の c 軸に平行な自発トラックが概ね良好に観察されたので、適正なエッチング状態と判断した。年代測定に用いたジルコンは、自発トラックが均等に分布し、トラックとの識別が困難なもの (結晶中の空隙、結晶転位など) を含まず、かつ十分な計測領域が確保できるものを選んだ。

アパタイトのエッチングは 0.6 % HNO_3 溶液を用い、25 °C で 3 分間行った。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 PN-2 (下段) を使用し、ジルコンは 20 秒間、アパタイトは 4 分間の照射を行った。この照射の熱中性子束は $4.7 \times 10^{17} \text{ n / cm}^2\text{sec}$ 、Au に対する Cd 比は 24 である (日本原子力研究所, 2000)。

Table 1. Zeta values of apatite age standards determined at PN-2 (lower position) of JRR-3 in Japan Atomic Energy Research Institute.

Age standard	Sample code	Irradiated date	Number of grains	Dosimeter number	Dosimeter density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	Spontaneous number	Spontaneous density $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$	Induced number	Induced density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	$P(\chi^2)$ %	$\zeta \pm 1\sigma$
Fish Canyon Tuff	FCT98'-A1	99.12.01	8	4096	1.683	70	1.950	492	1.372	95	233.9 $\pm$ 30.4
Durango	DURA4	01.01.30	15	3943	1.620	117	1.492	787	1.003	87	261.3 $\pm$ 26.6
Fish Canyon Tuff	FCTA8	01.01.30	12	3943	1.620	120	2.078	756	1.309	1	217.5 $\pm$ 22.0
Fish Canyon Tuff	FCT01-1A	01.05.29	14	3976	1.634	109	2.050	839	1.575	72	263.3 $\pm$ 27.5
Durango	DURA5	01.05.29	12	3976	1.634	139	1.905	875	1.200	48	242.5 $\pm$ 22.8
Weighted mean 241.6 $\pm$ 11.3											

The ages of the age standard samples are 27.9 $\pm$ 0.5Ma for Fish Canyon Tuff and 31.4 $\pm$ 0.5 Ma for Durango (Hurford and Green, 1983; Green, 1985). Dosimeter glass IRMM-540 used. $P(\chi^2)$: Probability of obtaining χ^2 value for ν degrees of freedom (where ν = number of grains - 1) (Galbraith, 1981).

Table 2. Fission-track dating results of the Kishima Group, Nagasaki Prefecture, as determined by conventional method.

Sample description	Sample code	Mineral	Number of grains	Dosimeter number	Dosimeter density $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$	Spontaneous number	Spontaneous density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	Induced number	Induced density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	$P(\chi^2)$ %	Age $\pm 2\sigma$ (Ma)
Haiki Formation	0010-5Z	zircon	27	1739	3.573	1608	3.633	907	2.049	0	41.7 $\pm$ 7.6
Haiki Formation	0010-5A	apatite	21	3688	1.516	118	2.625	905	2.013	19	23.8 $\pm$ 5.2

Zircon age is calculated using $\zeta=124.8\pm 2.0$ (1 σ error) (Ito and Taniguchi, 2002). Dosimeter glass CN-1 used. Apatite age is calculated using $\zeta=241.6\pm 11.3$ (1 σ error) (Table 1). Dosimeter glass IRMM540 used. $P(\chi^2)$: Probability of obtaining χ^2 value for ν degrees of freedom (where ν = number of grains - 1) (Galbraith, 1981). Ages are mean age for 0010-5Z and pooled age for 0010-5A based on Green (1981). 0010-5Z and 0010-5A are dated by T. Taniguchi and H. Ito, respectively.

3. 年代測定結果

FT 年代測定結果を Table 2 に示す。ジルコンの FT 年代は約 42Ma となったが、 $P(\chi^2)$ 値 (Galbraith, 1981) が 0 % を示し、有意水準 5 % で χ^2 検定に不合格となった。これは、年代測定を行ったジルコンが様々な起源 (年代) を示す粒子群からなる可能性が高いこと示す。そこで、粒子毎の年代分布を年代ヒストグラム、確率密度分布 (Hurford et al., 1984)、および radial plot (Galbraith, 1990) で示す (Fig. 4)。なお、radial plot は、粒子毎の年代誤差も視覚的に表すことができる方法である。図より、粒子年代は概ね 20 ~ 100Ma の範囲にあることがわかる。radial plot には長柱状ジルコンを区別して示したが、長柱状ジルコンは若い年代グループと古い年代グループ (後述) のどちらにも属するため、今後はこれを区別しない。

アパタイトの FT 年代は $P(\chi^2)$ 値が 19 % であるため、 χ^2 検定に合格し、23.8 $\pm$ 5.2 Ma (誤差は 2 σ 以下、年代誤差は全て 2 σ で表示する。) が得られた。なお、年代測定を行ったアパタイト (総数 21) のうち、計数領域に自発トラックがなかったもの、すなわち年代値が 0 を示すものが 6 粒子存在した。

ジルコンの FT 年代値の分離

得られたジルコンの FT 年代は粒子毎に大きくばらつく結

果となった。ジルコンの FT 年代は熱による若返りの影響が小さい (後述) ので、これは生成年代の異なる粒子の集合体を測定したためと考えられる。このような場合、粒子年代のヒストグラムや radial plot (Fig. 4) を用いて、視覚的に同じ年代を示す粒子群に分ける場合もあるが、ここでは、統計的手法を使った検討を行う。この場合、以下の二つが主に用いられる。一つは個々の粒子年代を若い順に並べ、 χ^2 検定に不合格となる直前の粒子群までの年代を求めるものである。この方法は以前より用いられており、 $P(\chi^2)$ 値が 5 % 以下を検定に不合格としたものが多い (例えば、鈴木ほか, 1998; 伊藤, 2000) が、ここでは Brandon (1992) に従い、 $P(\chi^2)$ 値が 1 % 以下を不合格とし、年代 (χ^2 年代: Brandon, 1992) を求めた。なお、両手法の差は粒子 1 個を除くか否か程度の違いで、それぞれの年代は大きくは変わらない。また、この方法では、最も若い年代 (minimum age) のみを得られ、これが堆積年代の下限 (すなわち、堆積年代かそれよりも古い年代) を与えると解釈される (Brandon, 1992)。他の一つは、Galbraith and Green (1990) の方法で、統計学でいう finite mixture model を用いたものである。これは、異なる 2 つ以上の年代からなる粒子群が混合した集合体に対し、最も確からしい各々の年代とその混合割合を、フィッショントラックの出現がポアソン分布に従うとの仮定のもとに求めるものである。このモデルで得られる mini-

a) Zircon

b) Apatite

Fig.4. Distribution of individual fission-track ages in zircon (a) and apatite (b). Age histograms and age spectra (Hurford et al., 1984) are shown to the left and radial plots (Galbraith, 1990) are shown to the right. "Long-columnar" type zircons are shown as open rectangular in the zircon radial plot. In radial plots, fission-track ages of individual grains are read by projecting a radius from plot origin (0) through data points onto radial age scale and grains with statistically more precise ages plot farther to right.

mum age も堆積年代の下限を与える解釈され、他のより古い年代は供給源の推定に適用できる。

以上の手法を適用して得られた年代を Table 3 に示す。 χ^2 年代は、27 粒子中、古い方から 4 粒子を除いた 23 粒子を用いて 33.9 ± 3.6 Ma が得られた。また、finite mixture model では、2 つの異なる年代を示す粒子群から構成される結果となり、27 粒子中 65 % の粒子が 30.1 Ma (誤差は +4.4 Ma, -3.8 Ma)、35 % の粒子が 61.4 Ma (誤差は +12.3 Ma, -10.3 Ma) を示す結果となった。

杵島層群の堆積年代

杵島層群の堆積年代は、凝灰岩を用いたジルコンの FT 年代として 33.9 ± 3.3 Ma が得られており (宮地・酒井, 1991)、石灰質ナノ化石や浮遊性有孔虫などの微化石や軟体動物などの化石から推定される年代とあわせて、その堆積年代は 30 ~ 35 Ma とされている (尾崎・濱崎, 1991; 首藤, 1993)。

今回、杵島層群早岐層の堆積年代は、 χ^2 年代として 33.9 ± 3.6 Ma が、finite mixture model から 30.1 Ma (誤差は 4 Ma 程度) が得られ、これらは杵島層群の既存の推定年代と整合する。このことは、早岐層の砂岩中には堆積年代を保持するジルコン (堆積時と同時期に噴出した火砕岩中のジルコンなど) が含まれ、今回の統計的手法でその年代を推定することができたことを意味する。

堆積岩の堆積年代は、通常、堆積岩中の凝灰岩などの堆積年代を指示する鍵層を対象にジルコンの FT 法などで得られるが、対象とする堆積岩に必ずしも鍵層が含まれているわけではない。今回の結果は、このような場合でも、ジルコンの FT 法で統計的な処理を行うことにより、堆積年代を推定できる場合があることを示している。

供給源の推定

finite mixture model で古い年代として 61.4 Ma (誤差は

Table 3. Fission-track dating results of the Kishima Group, Nagasaki Prefecture, as determined by χ^2 age of Brandon (1992) and finite mixture model of Galbraith and Green (1990).

Sample description	Sample code	Mineral	Number of grains	χ^2 age		finite mixture model			
				Age $\pm$ 2 σ (Ma)	Younger age group Age (Ma)	2 σ	Older age group Age (Ma)	2 σ	Mixing proportion (%) Young/Old
Haiki Formation	0010-5Z	zircon	27 (23)	33.9 $\pm$ 3.6	30.1	+4.4, -3.8	61.4	+12.3, -10.3	65/35

Ages are calculated using $\zeta=124.8\pm2.0$ (1 σ error). Dosimeter glass CN-1 used. The number in parentheses are grain numbers used for χ^2 age calculation.

10 Ma 程度) の年代が得られた (Table 3). この古い年代を示すジルコンの供給源を推定するために、まず、この年代が熱により若返りを受けた年代であるか否かをジルコン中の自発トラック長を測定することで検討した。自発トラック長の測定は、ジルコン結晶内の水平なトラック (horizontal confined track; Laslett et al., 1982) を対象に、FT STAge システムに付属するデジタイザーを用いて行った。このシステムを用いた場合のトラック長測定精度はほぼ 0.2 μm である。

トラック長測定は熱中性子照射を行ったジルコン全体から行ったが、測定結果は、ジルコン全体、年代測定を行ったジルコン、そのうち古い年代を示すジルコン、の3つに分けて示した (Figs.5.a ~ c). なお、古い年代を示すジルコンは以下のようにして決めた。finite mixture model ではどの粒子が古い年代に属するかが示されないため、個々の粒子年代を古い順に並べ、 χ^2 検定 (有意水準: 5%) に不合格となる直前の粒子群までの年代を求め、これらを古い年代を示すジルコンとした。なお、この場合、13 粒子を除いた 14 粒子から 54.8 ± 7.2 Ma が得られた ($P(\chi^2)$ 値は 7.1 %). この年代値は finite mixture model で得られた古い年代と整合している。

トラック長測定の結果 (Figs.5.a ~ c), 全粒子および年代測定を行った粒子を対象にした場合、トラック長は平均が 9.9 ~ 10.1 μm (標準偏差は 1.3 ~ 1.4 μm) であった。参考のため述べると、Hasebe et al. (1994) は、熱による短縮を受けていない3つの年代標準試料を用い、平均 10.6 μm (標準偏差 0.8 μm) を示している。また、古い年代を示すジルコンのトラック長は平均 9.4 μm (標準偏差 1.4 μm) が得られた。但し、この結果はデータ数が7と少なく、5 ~ 6 μm の1本のトラック長の影響が大きく現れている。いずれにせよ、早岐層から得られたジルコンは、古い年代を示すジルコンも含め、トラック長分布は 10 μm 付近にピークをもつことから、年代値の若返りの影響は小さいと考えられる。

九州北部には白亜紀に貫入したとされる花崗岩類が広く分布する (Fig.1)。これらの放射年代は黒雲母の K-Ar 法で 90Ma 前後が多く報告されている (唐木田ほか, 1992) が、調査地域に近い九州北西部の花崗岩 (背振山地の浮岳^{うきだけ}と椿山で Fig.1 の Possible source area に相当) のジルコンの FT 年代として 58 ± 10 Ma (浮岳) と 56 ± 14 Ma (椿山) が得られており (Watanabe et al., 1988), 今回の FT 年代と同様の年代を示す。この花崗岩はジルコンの FT 年代が同程度

Fig.5. Fission-track length distribution in zircon (a ~ c) and apatite (d). Horizontal confined tracks are measured in zircon and both horizontal and inclined confined tracks are measured in apatite. Errors are standard deviation (1 σ). n: total number of tracks measured.

であること、調査地点に比較的近いことから、供給源の候補地の一つと考えられる。その場合、この地域の花崗岩が杵島層群堆積時に地表に露出していたこと、およびその後の花崗岩の剝蝕程度がジルコンの FT 年代に差を及ぼさない程度に小さかったことが前提となる。供給源のより詳細な検討は、杵島層群堆積時の古地理、供給源と推定される地質体と杵島層群の岩石学的な検討なども必要である。今回の結果は、供給源の一つの候補を示したにすぎない。

堆積盆の熱史

アパタイトの FT 年代 (23.8 ± 5.2 Ma) は杵島層群の堆積年代 (30 ~ 35Ma) よりも若い年代を示す。堆積後の熱影

響による年代の若返りがなければ、堆積年代と同じかそれよりも古い年代を示すはずであることから、アパタイトのFT年代は、杵島層群堆積後に二次的な再加熱（埋没による温度上昇）を受け、若返った年代であることが考えられる。

次に、より詳細な熱履歴を検討するために、アパタイトの自発トラック長測定を行った。まず、ジルコンと同様にアパタイト結晶内の水平な自発トラック長測定を試みたが、総数が4本と少なかったため、ここでは結晶内で傾きをもつ confined track も含めた結果を示す (Fig.5.d)。なお、鉛直方向の長さはアパタイトの屈折率 (1.63) で補正した。

アパタイトのトラック長は平均が $12.1 \mu\text{m}$ (標準偏差 $2.3 \mu\text{m}$) となり、最大のピークが $13 \sim 14 \mu\text{m}$ で、 $7 \sim 10 \mu\text{m}$ の短いトラックを含む、バイモーダルなトラック長分布となった。

以上をもとに、堆積盆の熱史の解釈を以下の2つのアプローチにより行う。

まず、年代値と閉鎖温度のみから議論する。アパタイトのFT年代 ($23.8 \pm 5.2 \text{ Ma}$) はアパタイトの閉鎖温度 (約 100°C) 以下になった年代を示すと解釈される。日本列島の地温勾配は、概ね $20 \sim 40^\circ\text{C} / \text{km}$ の範囲に入る (田中ほか, 1999) ので、試料採取地点周辺の堆積盆における過去の地温勾配もこの範囲に入ると仮定し、地表温度 (10°C) を加味すると、地温 100°C は地下 $2.3 \sim 4.5 \text{ km}$ に相当する。従って、杵島層群早岐層はアパタイト年代 ($23.8 \pm 5.2 \text{ Ma}$) 以降、この深度以浅にあったことが考えられる。

次に、トラック長を用いた考察を行う。得られたトラック長分布はバイモーダルな分布を示す。この分布パターンは、得られた年代が単純な冷却年代でないことを示しており、年代値と閉鎖温度のみから推定した前述の議論を再考する必要性を示している。トラック長分布パターンから、アパタイト年代は若返りを受けたことが示されるので、閉鎖温度以下になった時期は、アパタイト年代よりも以前であったと考えられる。従って、いずれにせよ、得られたアパタイト年代以降、採取試料が閉鎖温度以下であったという解釈は成り立つと考えられる。

ま と め

杵島層群の砂岩に含まれるジルコンとアパタイトを用いたFT法により、砂岩の堆積年代とその供給源および堆積盆の熱史について考察した。得られた主要な知見は以下の通りである。

- 1) 砂岩から得られた個々のジルコンのFT年代は、 $20 \sim 100 \text{ Ma}$ の範囲でばらついた。そこで、2つの統計的手法を適用し、若い年代を示す粒子群の年代を求め、堆積年代を推定した。その結果、杵島層群早岐層の堆積年代は約 30 Ma となり、既存の推定年代 ($30 \sim 35 \text{ Ma}$) と整合する年代が得られた。従って、鍵層がない場合でも、砂岩を用いたジルコンのFT法により、堆積岩の堆積年代を推定することが可能な場合があることがわかった。
- 2) 杵島層群の砂岩には 60 Ma 程度のFT年代を示すジルコンが含まれていた。トラック長測定により、このFT年代は

熱による若返りの影響の小さい年代であることが考えられた。ジルコンのFT年代と試料採取地点との距離的な近さから、この年代を示すジルコンの供給源の候補として九州西北部 (背振山地周辺) の花崗岩が考えられた。

- 3) 杵島層群の砂岩中のアパタイトから $23.8 \pm 5.2 \text{ Ma}$ の若返りを示すFT年代が得られた。杵島層群の埋没による温度上昇は、この年代以降現在まで、 100°C を超えることはなかったことが推定された。

謝 辞

電力中央研究所の土志田潔氏には試料採取に同行していただくとともに、文献の紹介等をしていただいた。九州大学の渡辺公一郎教授には、九州北部の花崗岩のFT年代について教えていただいた。日本原子力研究所東海研究所の市村茂樹氏には照射の便宜を図っていただいた。 χ^2 年代の計算および Fig.4 の作成には Tübingen 大学の Istvan Dunkl 氏の作成した Trackkey version 4.0.c を使用した。finite mixture model による年代計算には Yale 大学の Mark Brandon 氏の作成した BinomFit version 1.0.51 を使用した。(株) 京都フイッション・トラックの檀原 徹氏および匿名の査読者から丁寧な査読意見をいただいた。以上の方々に記してお礼申し上げます。

文 献

- Brandon, M.T., 1992, Decomposition of fission-track grain-age distributions. *Amer. Jour. Sci.*, **292**, 535-564.
- Brandon, M.T. and Vance, J.A., 1992, Tectonic evolution of the Cenozoic Olympic subduction complex, Washington State, as deduced from fission track ages for detrital zircons. *Amer. Jour. Sci.*, **292**, 565-636.
- Brandon, M.T., Roden-Tice, M.K., Graver, 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.
- Dumitru, T.A., 1993, A new computer-automated microscope stage system for fission-track analysis. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **21**, 575-580.
- Galbraith, R.F., 1981, On statistical models for fission track counts. *Math. Geol.*, **13**, 471-438.
- Galbraith, R.F., 1990, The radial plot: graphical assessment of spread in ages. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **17**, 207-214.
- Galbraith, R.F. and Green, P.F., 1990, Estimating the component ages in a finite mixture. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **17**, 197-206.
- 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.
- Green, P.F., 1985, Comparison of zeta calibration baselines for fission track dating of apatite, zircon and sphene. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **58**, 1-22.
- Green, P.F., Duddy, I.R., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F., 1989, Apatite fission-track analysis as a paleotemperature indicator for hydrocarbon exploration. In Naeser, N.D. and McCulloh, T.H. eds., *Thermal History of Sedimentary Basins*, Springer-Verlag, New York, 181-195.
- Hasebe, N. and Tagami, T., 2001, Exhumation of an accretionary prism - results from fission track thermochronology of the Shimanto Belt, southwest Japan. *Tectonophysics*, **331**, 247-267.
- Hasebe, N., Tagami, T. and Nishimura, S., 1994, Towards zircon fission-track thermochronology: Reference framework for confined track

- length measurements. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **112**, 169-178.
- 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. Subcommission on Geochronology. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **80**, 171-178.
- Hurford, A.J. and Green, P.F., 1983, The zeta age calibration of fission-track dating. *Isotope Geosci.*, **1**, 285-317.
- Hurford, A.J., Fitch, F.J. and Clarke, A., 1984, Resolution of the age structure of the detrital zircon populations of two Lower Cretaceous sandstones from the Weald of England by fission track dating. *Geol. Mag.*, **121**, 269-277.
- 今岡照喜・松本崇雅・松里英男・松尾征二・飯泉 滋・岩野英樹, 2003, 古第三紀宇部層群中の凝灰岩のフィッション・トラック年代と Sr 同位体比. 地質雑, **109**, 106-115.
- 伊藤久敏, 1999, 高精度 FT 年代測定に向けて—多粒子年代測定を容易にした FT STAge システムの利用—. 地球, 号外 No.26, 83-87.
- 伊藤久敏, 2000, フィッション・トラック法による秋田県秋ノ宮地熱地域の虎毛山層の堆積年代の推定. 日本地熱学会誌, **22**, 9-21.
- 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.
- 唐木田芳文・早坂祥三・長谷義隆 (代表編集委員), 1992, 日本の地質 9「九州地方」. 共立出版, 東京, 371p.
- 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.
- 宮地六美・酒井治孝, 1991, 北西部九州, 第三紀層中火砕岩類のフィッション・トラック年代. 地質雑, **97**, 671-674.
- 長浜春夫・松井和典, 1982, 早岐地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 55p.
- 日本原子力研究所, 2000, 研究炉ひろば. No.1, 通刊 12 号, 5.
- 大平寛人・磯野陽子・榊原正幸・吉村尚久, 1997, 新弥彦—1 号井において観察されたアパタイトのフィッション・トラックの消失とその意味. 石油技誌, **62**, 544-553.
- 尾崎正紀・濱崎聡志, 1991, 福岡県北部に分布する古第三系のフィッション・トラック年代. 地質雑, **97**, 251-254.
- 酒井治孝, 1993, 北部九州の第三紀堆積盆地のテクトニクスと堆積作用. 地質学論集, no.42, 183-201.
- 首藤次男, 1993, 内弧における造盆運動と広域テクトニクス—北部九州の第三紀堆積盆を例として—. 地学雑, **102**, 849-867.
- 鈴木毅彦・藤原 治・檀原 徹, 1998, 関東北部から東西南部に分布する第四紀テフラのフィッション・トラック年代. 第四紀研究, **37**, 95-106.
- Tagami, T. and Dumitru, T.A., 1996, Provenance and thermal history of the Franciscan accretionary complex: Constraints from zircon fission track thermochronology. *Jour. Geophys. Res.*, **101**, 11353-11364.
- 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, 99-112.
- 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. 地調月報, **50**, 457-487.
- Watanabe, K., Watanabe, M. and Hayashi, M., 1988, Fission track dating and thermal history analysis of granitic rocks in northern Kyushu. *Progress Report on Joint Utilization of the Musashi Reactor.*, **12**, 114-117.

(要 旨)

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—長崎県の古第三系杵島層群の堆積年代と熱史—. 地質雑, **110**, 197—203. (Ito, H. and Taniguchi, T., 2004, Application of the fission-track dating method on sandstones — depositional age and thermal history of the Paleogene Kishima Group, Nagasaki Prefecture —. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **110**, 197—203)

長崎県の古第三系である杵島層群の砂岩を用いてジルコンとアパタイトの FT 年代測定を行った. ジルコンの FT 年代を統計的に処理した結果, 杵島層群の推定される堆積年代 (30 ~ 35Ma) と一致する年代が得られたことから, 様々な年代をもつ粒子群からなる砂岩を用いた場合でも堆積年代が推定できることを示した. また, 砂岩中には 60Ma 程度の年代を示すジルコンがあることを見出し, 同様のジルコンの FT 年代が得られていることから, これらのジルコンを供給したのは, 距離的にも近い背振山地周辺の白亜紀花崗岩が候補として考えられることを示した. さらに砂岩中のアパタイトの FT 年代として 23.8 ± 5.2 Ma が得られたことから, 調査地域周辺の古第三紀の堆積盆は, この年代以降現在まで 100°C を越えることはなかったと推定した.