

## 野島断層およびその周辺の花崗岩質岩から得られたジルコンの U-Pb および FT 年代 - LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定法の新たな展望 -

Zircon U-Pb and fission-track ages of granitic rocks from the Nojima Fault and its vicinity: A new horizon for the LA-ICP-MS U-Pb dating method

### Abstract

伊藤久敏\* 田村明弘\*\* 森下知晃\*\*  
荒井章司\*\*\*

Hisatoshi Ito\*, Akihiro Tamura\*\*,  
Tomoaki Morishita\*\* and Shoji Arai\*\*\*

2009年11月13日受付.

2010年7月8日受理.

\* (財)電力中央研究所地圏科学領域  
Geosphere Science Sector, Central Research  
Institute of Electric Power Industry, 1646  
Abiko, Abiko, Chiba 270-1194, Japan

\*\* 金沢大学フロンティアサイエンス機構  
Frontier Science Organization, Kanazawa  
Univ., Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192,  
Japan

\*\*\* 金沢大学理学部地球学教室  
Department of Earth Sciences, Kanazawa  
Univ., Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192,  
Japan

Corresponding author; H. Ito,  
ito\_hisa@criepi.denken.or.jp

Zircon U-Pb dating by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) and zircon fission-track (FT) dating were performed on granitic rocks from the Nojima Fault and its vicinity on northern Awaji Island, Hyogo Prefecture, Japan. The analyses yielded zircon FT ages of 52-78 Ma, which are in agreement with previously reported zircon FT ages. Zircon U-Pb ( $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$ ) ages of 83-88 Ma were also determined. By combining these results with existing radiometric age data, we estimated the entire cooling history of the granitic basement on northern Awaji Island, spanning the period from the time of intrusion to the present. U-Pb ages were determined from zircons that were prepared for FT dating. Moreover, U-Pb ages were corrected based on analyses of Fish Canyon Tuff zircons as a standard material. As a result, a precise and accurate age of  $16.3 \pm 0.1$  Ma was obtained for the Buluk Member Tuff. This result demonstrates that the effect of common Pb is minimal even when analyzing zircons that are chemically etched, and that the Fish Canyon Tuff, which is a well-known age standard for FT dating, can be used as a standard for U-Pb dating. Many previous studies have reported on zircon FT analyses performed throughout the world. The method applied in the present study should pave the way for adding information on the crystallization age of the studied rocks by analyzing the zircons prepared previously for FT dating.

Keywords: U-Pb dating, LA-ICP-MS, fission-track dating, zircon, Nojima Fault

### はじめに

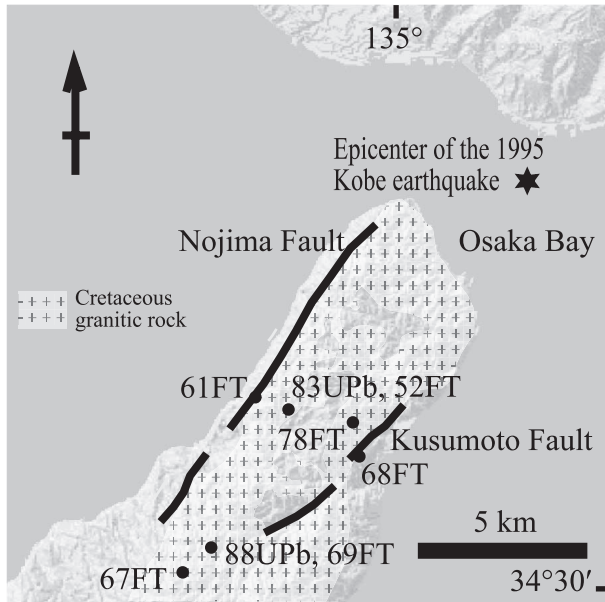
1995年に発生した兵庫県南部地震時に活動した野島断層については、シュードタキライトから抽出したジルコンの FT 年代 (Murakami and Tagami, 2004) を始め、断層活動に関連した岩石試料を用いたジルコンとアパタイトの FT 年代 (Yamada et al., 2007)、断層中の方解石脈の U-Th 年代 (Watanabe et al., 2008) 等の報告がある。また、著者の一人は、野島断層およびその周辺の花崗岩質岩のアパタイトの FT 年代 (Ito, 2004) と (U-Th)/He 年代 (伊藤, 2006) を報告した。今回、Ito (2004) と同じ岩石試料から新たにジルコンの U-Pb 年代と FT 年代を報告する。特に、ジルコンの U-Pb 年代は、FT 年代測定用に作成した試料を用い、Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) により得たものである。今回、同一の岩石試料を用い、閉鎖温度の高いジルコンの U-Pb 年代から閉鎖温度の低いアパタイトの (U-Th)/He 年代まで得ることができ、野島断層周辺の花崗岩質岩の熱履歴をより詳細に決定することができた。また、FT 年代測定用ジルコンを用い、LA-ICP-MS による簡便かつ高精度な U-Pb 年代測定が可能であ

り、今後の活用への展望が拓けたことを報告する。

### 地質概説および年代測定用試料

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)。断層周辺には、鮮新-更新統の大阪層群と中新統の神戸層群が一部で分布するほか、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)。

年代測定に用いた試料は、野島断層およびその周辺から採取した花崗岩質岩 6 試料である。試料の採取位置は Fig.1 に示す箇所である。試料はすべて露頭から採取したものであり、淡路島の隆起地塊を構成する花崗岩質岩から 4 箇所、野島断層破砕帯から 1 箇所、楠本断層影響帯 (下盤側) から 1 箇所を採取した。採取した岩石試料の記載は伊藤 (2006) を参照されたい。なお、U-Pb 年代測定は、隆起地塊を構成する花崗岩質岩 2 試料と野島断層破砕帯試料の合計 3 試料について実施した。各岩石試料約 2.5kg をジョークラッシャー等に



**Fig. 1.** Topographic map showing sampling localities on northern Awaji Island, along with zircon U-Pb and zircon FT ages (Ma) obtained in this study. UPb: zircon  $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  age, FT: zircon fission-track age. Geology is after Mizuno et al. (1990).

よる粉碎の後、篩掛けと椀掛けにより 74 ~ 250  $\mu\text{m}$  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ородメタンを使用) を経て、各試料 1000 粒程度のジルコンを得た。

各試料について、得られたジルコンのうち 200 粒程度を PFA テフロンシート (サイズ: 1 cm  $\times$  1 cm  $\times$  1 mm) に埋め込み、ダイヤモンドペーストにより表面を 10  $\mu\text{m}$  程度研磨した。次に、FT 年代測定のために、NaOH-KOH 等モル共融液を用い、225  $^{\circ}\text{C}$  で 20 時間程度のエッチングを行った。熱中性子照射は日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-3 の気送管 PN-2 により 20 秒間実施した。

**FT 年代測定**

FT 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。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)。

FT 年代測定結果を Table 1 に示す。年代値は 52 ~ 78 Ma のややバラツキの大きい結果が得られた。この結果を既存の報告例と比較すると、野島断層周辺の花崗岩質岩のジルコン FT 年代のうち、二次的な熱による若返りを受けていないと考えられる試料では、Murakami and Tagami (2004) は 70 ~ 80 Ma を報告し、Yamada et al. (2007) は 57 ~ 69 Ma を報告している。今回のジルコン FT 年代は、全体としては既存の結果と調和していると考えられる。ただし、Uplifted

block 1 のジルコン FT 年代が  $51.6 \pm 2.3$  Ma となり、特異的に若い年代を示した。この理由については不明である。

**U-Pb 年代測定**

**1. 年代測定手順**

U-Pb 年代測定は、金沢大学の所有する LA-ICP-MS 装置を用いて行った。実験システムの概要を Table 2 に示す。レーザーアブレーションとして、エキシマレーザー (波長 193 nm) を使用し、アブレーションを He ガスの雰囲気で行い、その He ガス流を Ar ガス流に混合させ、ICP-MS 装置に導入させた。レーザー径は 50  $\mu\text{m}$  である。U-Pb 年代として、 $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  年代を求め、ジルコンの標準試料による補正を行った。ジルコンの標準試料として、Fish Canyon Tuff (Schmitz and Bowring, 2001) を用いた。用いた年代式や測定方法の詳細は伊藤ほか (2009) を参照されたい。

U-Pb 年代測定に用いたジルコンは FT 年代測定用にエッチングを行ったジルコンであり、PFA テフロンシートに埋め込まれたジルコンに、何ら手を加えることなく、同シートをレーザーアブレーション用装置の試料台にセットし、分析を行った。この場合、ジルコンのエッチングによる common Pb の混入が U-Pb 年代に影響を及ぼす可能性がある。そのため、U-Pb 年代補正に用いた標準試料 (Fish Canyon Tuff) についても、同条件のジルコンを使用した。さらに、年代値既知の Buluk Member Tuff (Hurford and Watkins, 1987) について、同条件のジルコンを使用した U-Pb 年代測定を行い、妥当な年代が得られるかどうかのチェックを行った。

U-Pb 年代測定結果を Table 3 と Fig. 2 に示す。年代測定は、各試料 10 粒のジルコンに対して行った。なお、年代値 (T) の誤差 ( $\sigma T$ ) は、個々の粒子年代については次式により求めた。

$$\sigma T = T \times \sqrt{\frac{1}{N_{206}} + \frac{1}{N_{238}}} \tag{1}$$

ここで、 $N_{206}$  と  $N_{238}$  は、それぞれ  $^{206}\text{Pb}$  と  $^{238}\text{U}$  のカウント数 (単位: cps) である。

各試料の年代は、個々の粒子年代とその誤差から得られる加重平均年代とした。なお、Fish Canyon Tuff を除く最終的な年代の誤差 ( $\sigma T^*$ ) は Schmitz and Bowring (2001) により得られた Fish Canyon Tuff の年代 ( $28.402 \pm 0.012$  Ma) と今回得られた Fish Canyon Tuff の年代 ( $28.5 \pm 0.1$  Ma) の誤差も含め、以下で計算した。

$$\sigma T^* = T_w \times \sqrt{\left(\frac{\sigma T}{T_w}\right)^2 + \left(\frac{0.012}{28.402}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{28.5}\right)^2} \tag{2}$$

ここで、 $T_w$  と  $\sigma T_w$  は、それぞれ Fish Canyon Tuff の年代値誤差を含める前の加重平均年代とその誤差である。

**2. 年代測定結果と評価**

今回得られた Fish Canyon Tuff による補正後の年代値として、Buluk Member Tuff では  $16.3 \pm 0.1$  Ma が得られた (Table 3)。得られた年代値は、粒子毎のバラツキが小さく (Fig. 2)、精度の高い年代値である。Buluk Member Tuff は、ジルコンの結晶化した年代として  $16.2 \pm 0.3$  Ma の値が報告されており (Hurford and Watkins, 1987)、両者は一致

**Table 1.** Results of zircon fission-track dating of granitic rocks from the Nojima Fault and its vicinity.

Sample description	Number of grains	Dosimeter		Spontaneous		Induced		P( $\chi^2$ ) %	T $\pm$ 1 $\sigma$ Ma
		number	density x 10 <sup>5</sup> cm <sup>-2</sup>	number	density x 10 <sup>6</sup> cm <sup>-2</sup>	number	density x 10 <sup>6</sup> cm <sup>-2</sup>		
Nojima F.	10	4798	3.055	878	7.600	273	2.363	86	61.0 $\pm$ 4.4
Kusumoto F.	20	4798	3.055	1916	3.321	531	9.203	36	68.4 $\pm$ 3.7
Uplifted block 1	18	4798	3.055	2328	6.392	856	2.350	31	51.6 $\pm$ 2.3
Uplifted block 2	20	4798	3.055	1613	2.874	435	7.751	2	77.8 $\pm$ 6.5
Uplifted block 3	17	4798	3.055	1601	2.599	436	7.079	4	68.6 $\pm$ 4.8
Uplifted block 4	20	4798	3.055	2322	2.528	656	7.141	64	67.1 $\pm$ 3.3

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

する年代を示す。したがって、今回の方法においても、高精度で信頼性の高い U-Pb 年代が得られることがわかる。また、このことから、エッチングによる common Pb の影響は無視できることも示唆される。なお、common Pb とは、放射性起源以外の Pb のことであり、common Pb が含まれることで異常に古い年代が得られる。common Pb の影響を評価する方法としては、放射性同位体ではない、<sup>204</sup>Pb の値から推定可能である。なお、ICP-MS では、<sup>204</sup>Pb と <sup>204</sup>Hg を区別することはできないため、今回示した <sup>204</sup>Pb 値には <sup>204</sup>Hg の値も含まれる。<sup>204</sup>Hg 値の程度は、<sup>202</sup>Hg 値から推定することができる。

今回得られたブランクの <sup>204</sup>Pb 値は 100 cps 程度であった。これに対し、common Pb の影響がないと考えられる Buluk Member Tuff の <sup>204</sup>Pb 値は 40 cps 程度である (Table 3, Fig. 2)。また、野島断層試料以外は、すべて <sup>204</sup>Pb 値はブランクもしくはそれ以下の値を示す。したがって、これらの試料の年代値に及ぼす common Pb の影響は小さいものと判断されるため、ここでは、野島断層試料を除き、最終的に得られた U-Pb 年代が各試料の U-Pb 年代を代表しているものと判断する。

今回得られた年代値のうち、特に、野島断層試料については、バラツキの大きな値が得られた (Fig. 2)。このうち、野島断層の粒子番号 1, 2 のジルコンについては、年代値が 100 Ma 程度と古く、<sup>204</sup>Pb 値が 175 cps 程度と高い値を示すことから、common Pb の混入の可能性が示唆される。ただし、これらの試料は <sup>202</sup>Hg 値も大きく、<sup>204</sup>Pb 値は <sup>204</sup>Hg の影響を受けている可能性も考えられる。次に、野島断層の粒子番号 4 の試料は同試料の他のジルコンに比べ異常に若い年代を示すが、<sup>204</sup>Pb 値は正常な値を示す。このことから、ジルコン中の <sup>206</sup>Pb が溶脱した可能性 (radiogenic Pb loss) が考えられる。以上のことから、野島断層試料については、common Pb の混入や Pb の溶脱の影響が大きいと考えられる。野島断層試料は、断層活動 (断層運動や断層沿いの熱水) の影響によりジルコンが物理的・化学的に影響を受け、さらにエッチングにより、common Pb の混入や Pb の溶脱が促進されたものと思われる。なお、Davis et al. (2003) は

**Table 2.** LA-ICP-MS operating conditions at Kanazawa University, Japan.

<b>Laser Ablation:</b>	MicroLas GeoLas Q plus
Laser type	193 nm (Excimer ArF)
Crater size	50 $\mu$ m
Repetition rate	5 Hz
Preablation	2 sec
Energy density	8 J/cm <sup>2</sup>
Data acquisition	20 sec
<b>ICP-MS:</b>	Agilent 7500s
Acquisition mode	Time resolved analysis
Scanning mode	Peak jumping
Forward power	1200 W
Gas flow rate	plasma) 15 l/min (Ar) auxiliary) 1 l/min (Ar) carrier) 1.3 l/min (Ar), 0.3 l/min (He)
Measured isotopes	<sup>29</sup> Si, <sup>88</sup> Sr, <sup>202</sup> Hg, <sup>204</sup> Pb, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb, <sup>208</sup> Pb, <sup>232</sup> Th, <sup>235</sup> U, <sup>238</sup> U
Dwell time	40 ms for Pb and U
Standard glass	NIST SRM 610, 612

common Pb の混入や Pb の溶脱は、ジルコンに生じた傷に流体が侵入し易い状況が生じた時に起こり易い (例えば、Pb の溶脱は、 $\alpha$  リコイルにより鉛がジルコン中の微細なフラクチャに移動することが一因である) ことを述べており、野島断層試料はこのような例に相当すると思われる。

野島断層以外の花崗岩質岩試料についても、粒子年代のバラツキは、Fish Canyon Tuff や Buluk Member Tuff に比べ大きい。common Pb の影響や Pb の溶脱の影響がある程度は受けていると考えられる。さらに、花崗岩質岩の場合、ジルコンがマグマ中で時間差を置いて晶出する可能性があることも、粒子年代のバラツキを大きくした原因と考えられるが、最終的に得られた試料年代 (83.4  $\pm$  0.4 Ma および 87.6  $\pm$  0.4 Ma) を採用することによる本論文の議論への影響は小さいと判断される。すなわち、厳密な意味では common Pb の定量的な評価等が必要ではあるが、仮にこれらを実施したとしてもその影響は小さいことから、common Pb

Table 3. LA-ICP-MS analytical results.

Sample name	<sup>202</sup> Hg	<sup>204</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>238</sup> U	Uncorrected	Corrected	Age	1σ
	[cps]	[cps]	[cps]	[cps]	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	[Ma]	
<i>Fish Canyon Tuff</i>								
FCT05-1-1	139	31	11337	2086843	0.00543	0.00454	29.2	0.3
FCT05-1-2	78	35	7327	1414037	0.00518	0.00433	27.9	0.3
FCT05-1-3	81	25	13314	2568435	0.00518	0.00434	27.9	0.2
FCT05-1-4	33	21	6461	1238844	0.00522	0.00436	28.1	0.4
FCT05-1-5	65	26	13910	2650981	0.00525	0.00439	28.2	0.2
FCT05-1-6	28	31	14746	2758150	0.00535	0.00447	28.8	0.2
FCT05-1-7	47	19	10312	1937939	0.00532	0.00445	28.6	0.3
FCT05-1-8	31	32	1516	292577	0.00518	0.00433	27.9	0.7
FCT05-1-9	62	10	11859	2163567	0.00548	0.00459	29.5	0.3
FCT05-1-10	35	17	14208	2700034	0.00526	0.00440	28.3	0.2
							<i>Weighted mean</i>	28.5 0.1
<i>Buluk Member Tuff</i>								
BM05-1-1	350	73	626	191776	0.00327	0.00273	17.6	0.7
BM05-1-2	239	47	1445	500454	0.00289	0.00241	15.5	0.4
BM05-1-3	221	55	1550	508171	0.00305	0.00255	16.4	0.4
BM05-1-4	171	39	1361	461046	0.00295	0.00247	15.9	0.4
BM05-1-5	148	39	2152	710930	0.00303	0.00253	16.3	0.4
BM05-1-6	160	23	1762	536351	0.00328	0.00275	17.7	0.4
BM05-1-7	137	23	787	264597	0.00298	0.00249	16.0	0.6
BM05-1-8	176	40	1283	425663	0.00301	0.00252	16.2	0.5
BM05-1-9	147	20	1508	497617	0.00303	0.00253	16.3	0.4
BM05-1-10	160	32	1214	414884	0.00293	0.00245	15.8	0.5
							<i>Weighted mean</i>	16.3 0.1
<i>Nojima F.</i>								
0202-1-1	669	177	33091	1826050	0.01812	0.01516	97.0	0.5
0202-1-2	726	175	25726	1339326	0.01921	0.01607	102.8	0.6
0202-1-3	531	104	18945	1039340	0.01823	0.01525	97.5	0.7
0202-1-4	399	83	1286	95647	0.01345	0.01125	72.1	2.0
0202-1-5	461	87	16743	1009411	0.01659	0.01387	88.8	0.7
0202-1-6	514	123	11529	643532	0.01792	0.01499	95.9	0.9
0202-1-7	402	96	7871	411971	0.01911	0.01598	102.2	1.2
0202-1-8	441	122	23387	1335287	0.01751	0.01465	93.8	0.6
0202-1-9	528	155	23651	1375678	0.01719	0.01438	92.0	0.6
0202-1-10	480	116	15942	934031	0.01707	0.01428	91.4	0.7
							<i>Weighted mean</i>	95.0 0.4
<i>Uplifted block 1</i>								
0202-2-1	335	80	24892	1571131	0.01584	0.01325	84.9	0.5
0202-2-2	281	55	10202	700279	0.01457	0.01219	78.1	0.8
0202-2-3	268	102	18941	1186765	0.01596	0.01335	85.5	0.6
0202-2-4	263	79	25451	1628232	0.01563	0.01308	83.7	0.5
0202-2-5	266	66	32828	2024148	0.01622	0.01357	86.9	0.5
0202-2-6	240	50	6812	471759	0.01444	0.01208	77.4	0.9
0202-2-7	280	59	19409	1284005	0.01512	0.01264	81.0	0.6
0202-2-8	329	78	21111	1372177	0.01538	0.01287	82.4	0.6
0202-2-9	270	67	13750	935158	0.01470	0.01230	78.8	0.7
0202-2-10	405	90	21152	1304965	0.01621	0.01356	86.8	0.6
							<i>Weighted mean</i>	83.4 0.4
<i>Uplifted block 3</i>								
0202-6-1	52	58	10191	609336	0.01673	0.01399	89.6	0.9
0202-6-2	37	33	4788	313403	0.01528	0.01278	81.9	1.2
0202-6-3	60	98	6767	382301	0.01770	0.01481	94.8	1.2
0202-6-4	97	30	2475	158615	0.01560	0.01305	83.6	1.7
0202-6-5	115	67	7211	424112	0.01700	0.01422	91.0	1.1
0202-6-6	100	31	3494	226590	0.01542	0.01290	82.6	1.4
0202-6-7	73	17	2572	159335	0.01614	0.01350	86.5	1.7
0202-6-8	68	23	4694	271801	0.01727	0.01445	92.5	1.4
0202-6-9	74	33	5816	395543	0.01471	0.01230	78.8	1.0
0202-6-10	50	75	23918	1445442	0.01655	0.01384	88.6	0.6
							<i>Weighted mean</i>	87.6 0.4

<sup>204</sup>Pb counts include both <sup>204</sup>Pb and <sup>204</sup>Hg because of instrumental difficulty to separate these isotopes.

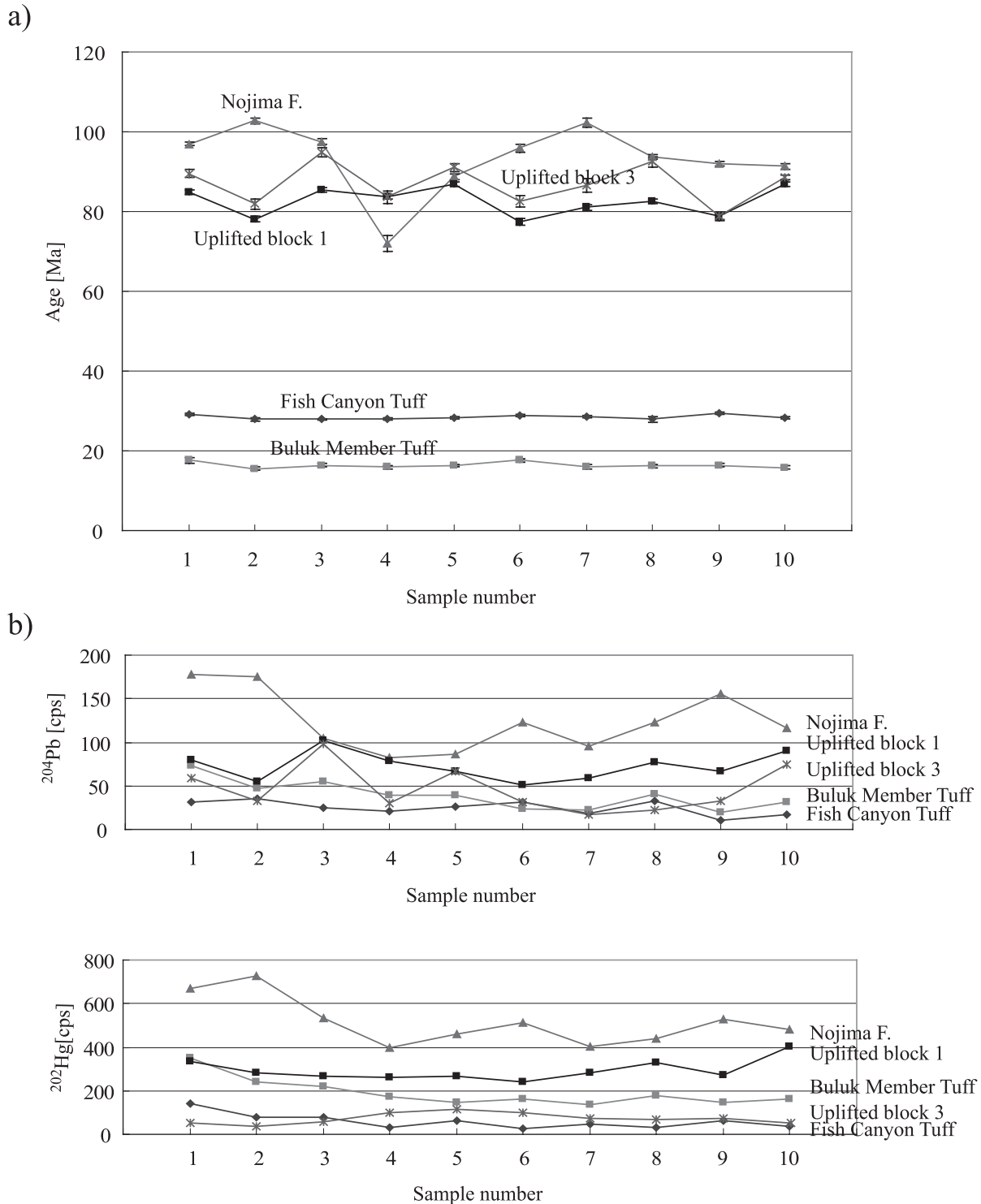


Fig. 2. Grain-by-grain U-Pb ages (a) and corresponding  $^{204}\text{Pb}$  and  $^{202}\text{Hg}$  values (b). Sample numbers correspond to those in Table 3.

の補正等を行わずに以下の議論を進める。

なお、今回と同じ金沢大システムを用い、伊藤ほか(2009)では、Fish Canyon Tuffの年代が補正前後で変化しないことから、UとPbの同位体分別が見られなかったことを報告した。今回、Fish Canyon Tuffの補正前後の $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Table 3)を比較すると、補正前の値(平均値: 0.00529)は

補正後の値(平均値: 0.00442)に比べ、20%程度大きな値を示すことから、今回はUに比べPbを20%程度多く計測する傾向が見られたと言える。この理由については今後の課題としたい。

**Table 4.** Radiometric ages determined for granitic rocks from the Nojima Fault and its vicinity. FT apatite ages are from Ito (2004), and the (U-Th)/He apatite age is from Ito (2006).

Sample description	U-Pb zircon Ma [1σ]	FT zircon Ma [1σ]	FT apatite Ma [1σ]	(U-Th)/He apatite Ma [1σ]
Nojima F.		61.0 ± 4.4	44.1 ± 4.8	
Kusumoto F.		68.4 ± 3.7	53.6 ± 9.9	
Uplifted block 1	83.4 ± 0.4	51.6 ± 2.3	82.6 ± 8.8	
Uplifted block 2		77.8 ± 6.5	80.5 ± 11.2	
Uplifted block 3	87.6 ± 0.4	68.6 ± 4.8	81.1 ± 9.3	44.1 ± 1.3
Uplifted block 4		67.1 ± 3.3	62.9 ± 7.1	

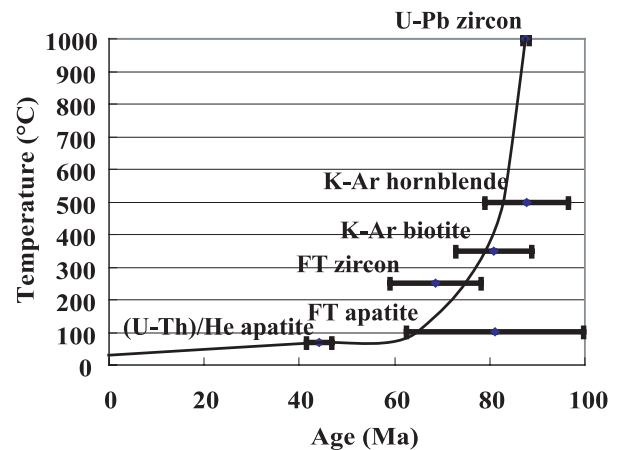
## 考 察

以下に、今回得られた結果に基づき、野島断層周辺の花崗岩質岩の冷却史、および今回実施した LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定法の意義について考察する。

### 1. 野島断層周辺の花崗岩質岩の冷却史

Table 4 に今回用いた岩石試料から得られた放射年代を、既報告結果も含め、全て示す。Table 4 より、得られたジルコン FT 年代は、断層活動による熱の影響を受けていないと考えられる試料 (Uplifted block 1 ~ 4) で、アパタイト FT 年代と同程度の年代が得られた。なお、アパタイト FT 年代がジルコン FT 年代よりも古い傾向が見られるが、これは、アパタイト中のトラックが少なく、計測精度が低い (したがって、年代値誤差が大きい) ためであり、ここでは、ジルコン FT 年代とアパタイト FT 年代が同程度の年代を示すとして議論を進める。両者が同程度の年代を示すことから、淡路島北端の隆起地塊を構成する花崗岩質岩が FT 法のジルコンの閉鎖温度 (約 240 °C: Hurford, 1986) からアパタイトの閉鎖温度 (約 100 °C: Naeser, 1981) にかけての温度領域で、ほぼ同時期に急冷したものと考えられる。一方、野島断層と楠本断層から得たジルコン FT 年代は、それぞれのアパタイト FT 年代よりも古い傾向が見られ、また、これらのジルコンの FT 年代は、断層活動による熱影響を受けていないと考えられる隆起地塊の花崗岩質岩から得られたジルコン FT 年代と同程度の年代を示す。このことは、断層活動により、ジルコンの FT 年代に影響を及ぼす程度の熱影響は受けなかったことを示す。

今回の結果を加えることにより、同一の岩石試料 (Uplifted block 3) を用い、閉鎖温度の高いジルコンの U-Pb 年代から閉鎖温度の低いアパタイトの (U-Th)/He 年代までの年代を得ることができた。その結果を基に、既存の K-Ar 年代測定結果 (高橋, 1992) を加え、淡路島北端部の隆起地塊を構成する花崗岩質岩の冷却曲線を Fig. 3 に示す。今回の結果は、既に報告した冷却曲線 (Ito, 2004; 伊藤, 2006) とほぼ整合するが、ジルコンの U-Pb 年代値を加えることにより、野島断層周辺の花崗岩質岩は、生成後から 100 °C 程度まで冷却する期間は短く、その後、徐冷したことをより明確にすることができた。



**Fig. 3.** Inferred cooling curve for an uplifted block of granite on northern Awaji Island. Horizontal bars represent the error ( $\pm 2\sigma$ ). All the ages except for K-Ar are from Uplifted block 3 (Table 4). K-Ar ages are from Takahashi (1992). The adopted closure temperatures are as follows: U-Pb zircon ( $\sim 1000$  °C) from Mezger and Krogstad (1997), K-Ar hornblende (500 °C) from Harrison (1981), K-Ar biotite (320 °C) from Harrison et al. (1985), FT zircon (240 °C) from Hurford (1986), FT apatite (100 °C) from Naeser (1981), and (U-Th)/He apatite (70 °C) from Farley (2002).

### 2. LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定

今回、FT 法の年代標準試料である Fish Canyon Tuff ジルコンを用い、U-Pb 年代の補正を行った。通常、U-Pb 年代の補正に用いられるジルコン試料は、a) ジルコン粒子が大きく (大きさとしては数 mm ~ 数 cm)、繰り返し測定が可能なこと、b) ジルコン中の Pb/U 比が均一であること (ゾーニングがないこと)、c) 入手が容易なこと、などが条件とされている (例えば、Slama et al., 2008)。Fish Canyon Tuff はこのうち、a) や b) の条件には合っておらず、理想的な標準試料とは言えないかもしれない。しかし、FT 用年代標準試料として広く使われており、Fish Canyon Tuff を使って、問題なく U-Pb 年代が得られることの意義は大きいと思われる。

さらに、今回、FT 年代測定用に準備したジルコンを使って U-Pb 年代測定を行った。この場合、前述したように、エッチング処理を行ったことによる common Pb の混入の影響

により、偽の古い年代が得られる可能性が高いと思われたが、精度と信頼性の高い Buluk Member Tuff の U-Pb 年代が得られたことにより、その影響は無視できることがわかった。ジルコンの FT 年代から得られる情報は、ジルコン FT 法の閉鎖温度以下になった年代であり、より高温であった時代の情報は得られない。しかし、LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定は、FT 年代測定用に準備したジルコンに何ら手を加えず、簡便に実施可能であり、これにより、ジルコンの晶出年代に関する情報が付加できる。ジルコンの FT 年代測定に関する論文はこれまでに国内外で多数発表されているが、今回の方法により、簡便に U-Pb 年代を付加できることの意義は大きいと思われる。

## ま と め

野島断層およびその周辺の花崗岩質岩から得たジルコンを用い、U-Pb 年代測定と FT 年代測定を行った。得られた主要な知見は以下の通りである。

- 1) ジルコン FT 年代は、52 ~ 78 Ma となり、既存の同地域で得られたジルコン FT 年代と概ね調和する結果が得られた。ジルコン U-Pb 年代は、common Pb の影響の小さい年代として 83 ~ 88 Ma が得られた。これらの結果と、既存の他の放射年代結果を合わせ、淡路島北端部の花崗岩質岩について、貫入した時代から現在に至るまでの冷却史を明らかにすることができた。
- 2) U-Pb 年代として、LA-ICP-MS 装置を用い、 $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  法による年代を求めた。また新たな試みとして、FT 年代測定用に準備したジルコンを用いるとともに、FT 年代測定用の年代標準試料である Fish Canyon Tuff ジルコンを U-Pb 年代の補正に用いた。その結果、年代値既知の Buluk Member Tuff で精度と信頼性の高い U-Pb 年代が得られた。以上のことから、FT 年代測定用に準備したジルコンを用い、簡便にジルコンの晶出年代が得られることを示した。

## 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。日本原子力研究開発機構の市村茂樹氏には、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。また、本稿を改善する上で、査読者である金沢大学の長谷部徳子准教授および産業技術総合研究所の昆 慶明博士から多くの有益なご指摘を頂いた。以上の方々にご礼申し上げます。

## 文 献

Davis, D. W., Williams, I. S. and Krogh, T. E., 2003, Historical development of zircon geochronology. *In* Hanchar, J. M. and Hoskin, P. W. O., eds., *Zircon*, Rev. Mineral. Geochem., **53**, 145-181.  
 Dumitru, T. A., 1993, A new computer-automated microscope stage system for fission-track analysis. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **21**, 575-580.  
 Farley, K. A., 2002, (U-Th)/He dating: techniques, calibrations, and appli-

cations. *In* Porcelli, P. D., Ballentine, C. J. and Wieler, R. eds., *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry*, Rev. Mineral. Geochem., **47**, 819-844.  
 Galbraith, R. F., 1981, On statistical models for fission track counts. *Math. Geol.*, **13**, 471-438.  
 Gleadow, A. J. W., 1981, Fission-track dating methods: What are the real alternatives?. *Nucl. Tracks*, **5**, 3-14.  
 Green, P. F., 1981, A new look at statistics in fission track dating. *Nucl. Tracks*, **5**, 77-86.  
 Harrison, T. M., 1981, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in hornblende. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **78**, 324-331.  
 Harrison, T. M., Duncan, I. and McDougall, I., 1985, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in biotite: Temperature, pressure and compositional effects. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 2461-2468.  
 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 Watkins, R. T., 1987, Fission-track age of the tuffs of the Buluk Member, Bakate formation, Northern Kenya: a suitable fission-track age standard. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, **66**, 209-216.  
 伊藤久敏 (Ito, H.), 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—。月刊地球号外 (*Chikyū Monthly, extra ed.*), no. 26, 83-87.  
 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.  
 伊藤久敏 (Ito, H.), 2006, 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—。電力中央研究所研究報告 (*Central Res. Inst. Electric Power Industry Rep.*): N05060, 18p.  
 伊藤久敏・倉橋克聡・田村明弘・千田太詩・荒井章司・森下知晃 (Ito, H., Kurahashi, K., Tamura, A., Chida, T., Arai, S. and Morishita, T.), 2009, LA-ICP-MS を用いたジルコンの FT 用年代標準試料の U-Pb 年代測定—Nd-YAG レーザーとエキシマレーザーの比較—。フィッション・トラックニュースレター (*Fission Track Newsl.*), **22**, 11-19.  
 伊藤久敏・谷口友規 (Ito, H. and Taniguchi, T.), 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 (*Fission Track Newsl.*), **15**, 31-34.  
 活断層研究会編 (The Research Group for Active Faults, ed.), 1991, 新編日本の活断層—分布図と資料— [*Active Faults in Japan, New Edition-distribution map and the related materials*]\*。東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 363p.  
 Mezger, K. and Krogstad, E. J., 1997, Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: an evaluation. *Jour. Metam. Geol.*, **15**, 127-140.  
 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩 (Mizuno, K., Hattori, H., Sangawa, A. and Takahashi, Y.), 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) (*Geology of the Akashi District. Quadrangle Series, scale 1: 50000*), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 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.  
 Naeser, C. W., 1981, The fading of fission-tracks in the geological environment: Data from deep drill holes. *Nucl. Tracks Radiation. Meas.*, **5**, 248-250.  
 岡 義記・寒川 旭 (Oka, Y. and Sangawa, A.), 1981, 東部瀬戸内堆積区の形成と淡路島の隆起。地学雑 (*Jour. Geogr.*), **90**, 25-41.  
 Schmitz, M. D. and Bowring, S. A., 2001, U-Pb zircon and titanite systematics of the Fish Canyon Tuff: an assessment of high-precision U-Pb geochronology and its application to young volcanic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 2571-2587.  
 Slama, J., Kosler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., Horstwood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N. and Whitehouse, M. J., 2008,

- Plesovice zircon—a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1-35.
- 高橋 浩 (Takahashi, Y.), 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 (*Jour. Min. Petr. Econ. Geol./Ganko*), **87**, 291-299.
- Watanabe, Y., Nakai, S. and Lin, A., 2008, Attempt to determine U-Th dating of calcite veins in the Nojima fault zone, Japan. *Geochem. Jour.*, **42**, 507-513.
- Yamada, R., Matsuda, T. and Omura, K., 2007, Apatite and zircon fission-track dating from the Hirabayashi-NIED borehole, Nojima Fault, Japan: Evidence for anomalous heating in fracture zones. *Tectonophysics*, **443**, 153-160.

\* English translation from the original written in Japanese

### (要 旨)

伊藤久敏・田村明弘・森下知晃・荒井章司, 2010, 野島断層およびその周辺の花崗岩質岩から得られたジルコンの U-Pb および FT 年代— LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定法の新たな展望—。地質雑, **116**, 544—551. (Ito, H., Tamura, A., Morishita, T. and Arai, S., 2010, Zircon U-Pb and fission-track ages of granitic rocks from the Nojima Fault and its vicinity: A new horizon for the LA-ICP-MS U-Pb dating method. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **116**, 544—551.)

野島断層とその周辺の花崗岩質岩から得たジルコンを用い, FT 年代と LA-ICP-MS による U-Pb 年代を求めた。その結果, 52 ~ 78 Ma の FT 年代と 83 ~ 88 Ma の U-Pb ( $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$ ) 年代が得られた。今回の結果と既存の放射年代結果から, 淡路島北端部の花崗岩質岩が貫入した時代から現在に至るまでの冷却史を明らかにした。今回, U-Pb 年代を求めるために, FT 年代測定用に準備したジルコンを用いるとともに, Fish Canyon Tuff を U-Pb 年代の補正に用いた。その結果, Buluk Member Tuff で精度と信頼性の高い U-Pb 年代 ( $16.3 \pm 0.1$  Ma) が得られた。国内外でジルコンの FT に関する論文は多数あるが, 今回用いた方法により, FT 年代測定用に準備したジルコンを再利用し, ジルコンの晶出年代を付加することに道を拓くことができたと思われる。