

船久保タフ年代測定結果

報 告 書（その2）

2018 年 7 月 14 日

塩 井 宏 幸 殿

株式会社 京都フィッシュン・トラック

塩井 宏幸 殿

ご依頼いただきました FT 増量 60 粒子の LA-ICPMS 法によるフィッション・トラック年代測定を行いましたので、その結果をご報告いたします。

試料名	LA-ICP-MS-FT 年代 (Ma, 誤差 : 1σ)
船久保タフ (追加 100 粒子のみ)	0.42 $\pm$ 0.08
船久保タフ (前回+追加の 130 粒子)	0.41 $\pm$ 0.07

上記の測定結果に対するお問い合わせには、いつでもお答えいたしますので、遠慮なくお問い合わせください。

2018 年 7 月 14 日

(株)京都フィッション・トラック
Kyoto Fission-Track Co., Ltd.
Tel.075-493-0684, fax.075-493-0741
E-mail: kyoto-ft@ac.auone-net.jp
担当 : 檀原 徹・岩野英樹
檀原有吾・奥野博子

表1-1. 年代測定結果一覧表(ジルコン)

試料名	(1)	(2)	結晶 数 (個)	自発核分裂飛跡		²³⁸ U計数(サンプル)		(3), (4) ²³⁸ U計数(スタンダード)		Zeta値 (cm ² ・yr ⁻¹)	(5) 相関 係数 r	(6) χ ² 検 定 Pr(χ ²)	ウラン 濃度 (ppm)	(7), (8), (9)	(10)
	測定 鉱物	測定 方法		ρ _s (cm ⁻²)	N _s	ρ _u (cm ⁻²)	N _u	ρ _{ustd} (cm ⁻²)	N _{ustd}					FT年代値 (Ma) Age±1σ	U-Pb年代値 (Ma) Age±2σ
① 船久保タフ	Zr	Ext.S	88	1.82 ×10 ⁴	32	6.63 ×10 ¹²	12,503,145,211	3.428 ×10 ¹²	13,713,470	37.3 ± 1.7	0.282	77	143	0.42 ± 0.08	0.63 ± 0.01
船久保タフ	Zr	Ext.S	100	1.80 ×10 ⁴	37	6.45 ×10 ¹²	14,100,878,794	3.428 ×10 ¹²	13,713,470	37.3 ± 1.7	0.254	71	139	0.43 ± 0.07 *	±

- (1) 測定鉱物 Zr:ジルコン, Ap:アパタイト, Sp:スフェーン

(2) 測定方法 : LA-ICP-MS-FT (内部面:IntS, 外部面:ExtS)

(3) ²³⁸U濃度, U-Pb年代測定用標準試料:91500(Zr),Durango(Ap)

(4) レーザービーム径 : 測定条件一覧表(別紙)に記載

(5) r : ρ_s と ρ_u の相関係数
- (6) Pr(χ^2) : χ^2 値の自由度(n-1)の χ^2 分布における上側確率 (Galbraith, 1981)

(7) 年代値: $T = (1/\lambda_D) \cdot \ln[1 + \lambda_D \cdot \zeta \cdot (\rho_s/\rho_u) \cdot \rho_{ustd}]$ (Int.Sは $\rho_s \times 1/2$)

(8) 誤差: $\sigma T = T \times [1/\Sigma N_s + 1/\Sigma N_u + 1/\Sigma N_{ustd} + (\sigma \zeta / \zeta)^2]^{1/2}$

(9) ²³⁸Uの全壊変定数 : $\lambda_D = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$

(10) *参考値: 全測定粒子の平均年代値

船久保タフ

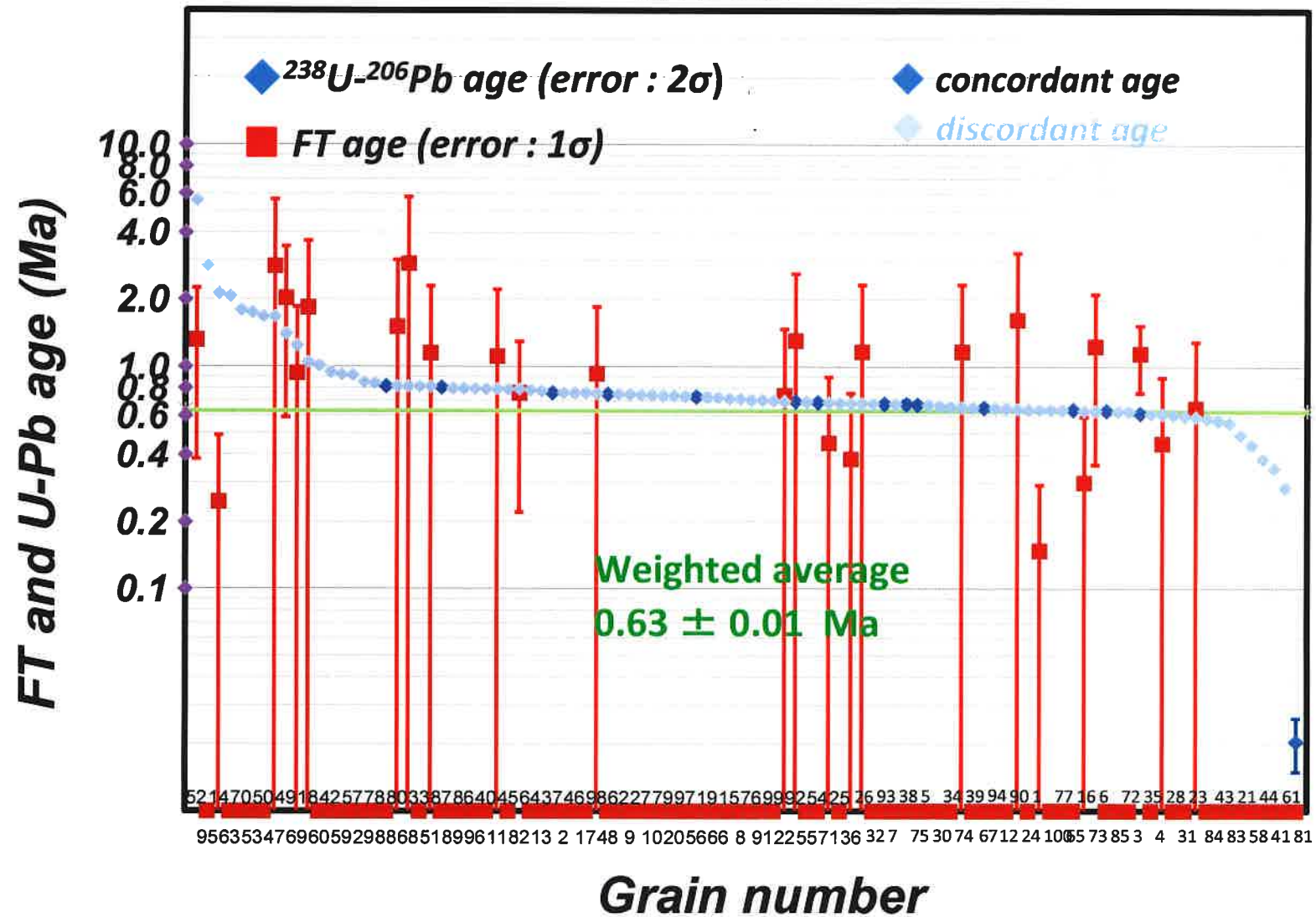


Table 1. FT and U-Pb age date for zircon crystals determined by LA-ICP-MS

Sample Name	FT age (Ma)		U-Pb age (Ma)		
Grain Number	Grain age	Error 1 σ	238U-206Pb	Error 2 σ	235U-207Pb Error 2 σ
船久保タフ					
no.1	0.15 ± 0.15		0.64 ± 0.01		0.38 ± 0.04
no.2	0.00 ± #DIV/0!		0.76 ± 0.02		1.01 ± 0.09
no.3	1.15 ± 0.39		0.62 ± 0.01		0.63 ± 0.06
no.4	0.45 ± 0.45		0.61 ± 0.01		0.77 ± 0.08
no.5	0.00 ± #DIV/0!		0.67 ± 0.02		1.34 ± 0.15
no.6	0.00 ± #DIV/0!		0.63 ± 0.01		0.69 ± 0.08
no.7	0.00 ± #DIV/0!		0.68 ± 0.01		1.03 ± 0.09
no.8	0.00 ± #DIV/0!		0.71 ± 0.02		1.91 ± 0.16
no.9	0.00 ± #DIV/0!		0.75 ± 0.02		1.27 ± 0.11
no.10	0.00 ± #DIV/0!		0.74 ± 0.03		2.20 ± 0.24
no.11	1.11 ± 1.11		0.79 ± 0.02		2.40 ± 0.16
no.12	0.00 ± #DIV/0!		0.65 ± 0.02		1.26 ± 0.12
no.13	0.00 ± #DIV/0!		0.77 ± 0.02		3.46 ± 0.25
no.14	0.25 ± 0.25		2.14 ± 0.04		26.95 ± 0.59
no.15	0.00 ± #DIV/0!		0.72 ± 0.02		1.52 ± 0.13
no.16	0.30 ± 0.30		0.63 ± 0.01		0.79 ± 0.08
no.17	0.00 ± #DIV/0!		0.76 ± 0.02		0.93 ± 0.12
no.18	1.84 ± 1.84		1.05 ± 0.02		1.31 ± 0.13
no.19	0.00 ± #DIV/0!		0.73 ± 0.03		1.94 ± 0.28
no.20	0.00 ± #DIV/0!		0.74 ± 0.02		0.90 ± 0.11
no.21	0.00 ± #DIV/0!		0.49 ± 0.01		0.73 ± 0.09
no.22	0.74 ± 0.74		0.70 ± 0.02		0.85 ± 0.12
no.23	0.65 ± 0.65		0.60 ± 0.02		1.19 ± 0.13
no.24	0.00 ± #DIV/0!		0.64 ± 0.02		1.02 ± 0.13
no.25	0.00 ± #DIV/0!		0.69 ± 0.01		1.14 ± 0.11
no.26	1.17 ± 1.17		0.68 ± 0.02		1.06 ± 0.16
no.27	0.00 ± #DIV/0!		0.74 ± 0.02		1.17 ± 0.12
no.28	0.00 ± #DIV/0!		0.61 ± 0.02		1.43 ± 0.16
no.29	0.00 ± #DIV/0!		0.85 ± 0.02		4.82 ± 0.21
no.30	0.00 ± #DIV/0!		0.67 ± 0.01		0.80 ± 0.09
no.31	0.00 ± #DIV/0!		0.60 ± 0.01		0.93 ± 0.11
no.32	0.00 ± #DIV/0!		0.68 ± 0.02		0.98 ± 0.12
no.33	0.00 ± #DIV/0!		0.81 ± 0.02		2.99 ± 0.21
no.34	0.00 ± #DIV/0!		0.66 ± 0.02		0.31 ± 0.09
no.35	0.00 ± #DIV/0!		0.61 ± 0.02		0.90 ± 0.11
no.36	0.38 ± 0.38		0.68 ± 0.01		0.54 ± 0.06
no.37	0.00 ± #DIV/0!		0.76 ± 0.01		0.82 ± 0.08
no.38	0.00 ± #DIV/0!		0.68 ± 0.02		0.55 ± 0.13
no.39	0.00 ± #DIV/0!		0.65 ± 0.02		1.07 ± 0.15
no.40	0.00 ± #DIV/0!		0.79 ± 0.01		1.43 ± 0.08
no.41	0.00 ± #DIV/0!		0.35 ± 0.01		0.28 ± 0.05
no.42	0.00 ± #DIV/0!		0.95 ± 0.02		1.21 ± 0.12
no.43	0.00 ± #DIV/0!		0.57 ± 0.02		1.23 ± 0.14
no.44	0.00 ± #DIV/0!		0.39 ± 0.01		0.84 ± 0.09
no.45	0.00 ± #DIV/0!		0.79 ± 0.02		1.12 ± 0.13
no.46	0.00 ± #DIV/0!		0.76 ± 0.03		0.98 ± 0.17
no.47	2.82 ± 2.82		1.68 ± 0.04		17.54 ± 0.60
no.48	0.00 ± #DIV/0!		0.75 ± 0.02		0.82 ± 0.11
no.49	2.03 ± 1.44		1.41 ± 0.03		5.86 ± 0.33
no.50	0.00 ± #DIV/0!		1.69 ± 0.04		22.29 ± 0.75
no.51	1.15 ± 1.16		0.81 ± 0.02		3.84 ± 0.17
no.52	1.32 ± 0.93		5.61 ± 0.09		10.24 ± 0.44
no.53	0.00 ± #DIV/0!		1.75 ± 0.04		18.85 ± 0.62
no.54	0.00 ± #DIV/0!		0.69 ± 0.02		0.70 ± 0.09
no.55	0.00 ± #DIV/0!		0.69 ± 0.02		1.59 ± 0.17
no.56	0.00 ± #DIV/0!		0.73 ± 0.02		0.74 ± 0.11
no.57	0.00 ± #DIV/0!		0.92 ± 0.02		5.16 ± 0.28
no.58	0.00 ± #DIV/0!		0.45 ± 0.02		2.25 ± 0.22
no.59	0.00 ± #DIV/0!		0.92 ± 0.02		6.80 ± 0.26
no.60	0.00 ± #DIV/0!		1.01 ± 0.03		10.15 ± 0.46
no.61	0.00 ± #DIV/0!		0.29 ± 0.01		0.50 ± 0.08
no.62	0.00 ± #DIV/0!		0.75 ± 0.02		1.16 ± 0.11
no.63	0.00 ± #DIV/0!		2.08 ± 0.05		26.81 ± 0.89
no.64	0.00 ± #DIV/0!		0.78 ± 0.02		1.34 ± 0.12
no.65	0.00 ± #DIV/0!		0.64 ± 0.02		0.74 ± 0.09
no.66	0.00 ± #DIV/0!		0.72 ± 0.02		1.29 ± 0.15
no.67	0.00 ± #DIV/0!		0.65 ± 0.02		0.69 ± 0.10
no.68	2.90 ± 2.90		0.82 ± 0.02		2.42 ± 0.22
no.69	0.93 ± 0.93		1.25 ± 0.03		11.19 ± 0.42
no.70	0.00 ± #DIV/0!		1.80 ± 0.04		23.55 ± 0.83
no.71	0.45 ± 0.45		0.69 ± 0.02		0.92 ± 0.10
no.72	0.00 ± #DIV/0!		0.63 ± 0.02		1.46 ± 0.16
no.73	1.24 ± 0.88		0.63 ± 0.01		1.27 ± 0.10
no.74	1.17 ± 1.17		0.66 ± 0.02		1.14 ± 0.13
no.75	0.00 ± #DIV/0!		0.67 ± 0.02		0.67 ± 0.09
no.76	0.00 ± #DIV/0!		0.71 ± 0.02		1.07 ± 0.15
no.77	0.00 ± #DIV/0!		0.64 ± 0.01		0.99 ± 0.09
no.78	0.00 ± #DIV/0!		0.84 ± 0.02		1.22 ± 0.14
no.79	0.00 ± #DIV/0!		0.74 ± 0.02		1.35 ± 0.17
no.80	1.51 ± 1.52		0.82 ± 0.02		1.66 ± 0.16
no.81	0.00 ± #DIV/0!		0.02 ± 0.01		0.04 ± 0.02
no.82	0.76 ± 0.54		0.79 ± 0.01		2.93 ± 0.15
no.83	0.00 ± #DIV/0!		0.56 ± 0.01		1.04 ± 0.12
no.84	0.00 ± #DIV/0!		0.58 ± 0.01		0.96 ± 0.08
no.85	0.00 ± #DIV/0!		0.63 ± 0.01		1.17 ± 0.11
no.86	0.00 ± #DIV/0!		0.80 ± 0.02		1.66 ± 0.19
no.87	0.00 ± #DIV/0!		0.81 ± 0.02		0.83 ± 0.11
no.88	0.00 ± #DIV/0!		0.82 ± 0.02		0.74 ± 0.10
no.89	0.00 ± #DIV/0!		0.80 ± 0.03		1.65 ± 0.21
no.90	1.63 ± 1.63		0.65 ± 0.01		0.87 ± 0.10
no.91	0.00 ± #DIV/0!		0.71 ± 0.02		1.02 ± 0.11
no.92	1.31 ± 1.31		0.70 ± 0.02		0.77 ± 0.11
no.93	0.00 ± #DIV/0!		0.68 ± 0.02		0.73 ± 0.09
no.94	0.00 ± #DIV/0!		0.65 ± 0.01		0.93 ± 0.10
no.95	0.00 ± #DIV/0!		2.86 ± 0.04		42.20 ± 0.84
no.96	0.00 ± #DIV/0!		0.79 ± 0.02		2.76 ± 0.16
no.97	0.00 ± #DIV/0!		0.73 ± 0.02		1.44 ± 0.16
no.98	0.93 ± 0.93		0.75 ± 0.02		1.15 ± 0.13
no.99	0.00 ± #DIV/0!		0.70 ± 0.02		2.11 ± 0.17
no.100	0.00 ± #DIV/0!		0.64 ± 0.01		0.80 ± 0.08

測定条件 一覧表 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設のLA-ICP-MSシステム

試料名：船久保タフ

[2018年 7月 11日測定]

1 レーザーアブレーションシステム

製造元	Photon Machines
製品名	Analyte Excite
レーザー種類	Excimer laser
パルス幅	< 4 ns
波長	193 nm
フルエンス	2 J/cm ²
ビーム径	20 μm (一辺)
周波数	5 Hz
ショット数	100
照射時間	20 s
キャリアガス (He)	0.80 L min ⁻¹

2 ICP質量分析計

製造元	ニューインストルメンツ社 (Nu Instruments)
製品名	Nu Plasma II
ICP-MS 種類	マルチコレクター型
RFパワー	1300 W
キャリアガス (Ar)	0.95 L min ⁻¹
ThO ⁺ /Th 酸化物生成率	< 1%
データ取得方法	Time-resolved analysis
データ取得時間	~30 s (~15 s gas blank, ~15 s ablation)
測定同位体	²⁰² Hg, ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U

3 スタンダード試料

1次スタンダード (U-Pb)	Nancy 91500 ^{*1}
2次スタンダード (U-Pb)	OD-3 ^{*2, 3, 4} , GJ-1 ^{*5} , Plešovice ^{*6}
1次スタンダード (FT)	Fish Canyon Tuff ^{*7}
2次スタンダード (FT)	Bishop Tuff ^{*7}

*1, Wiedenbeck et al. (1995); *2, Iwano et al. (2012); *3, Iwano et al. (2013); *4, Lukács et al. (2015); *5, Jackson et al. (2004); *6 Sláma et al. (2008); *7 Danhara and Iwano (2013)

弊社でのLA-ICP-MS測定は、上記の東京大学平田研究室所有の装置を用い、共同研究の一環として行っています。この共同研究では、装置や測定技術の開発にとどまらず年代測定法を含むLA-ICP-MSを用いた測定法の理論的開拓も同時に進めています。その中で、皆様からご依頼いただいている試料の分析は、10⁴~10⁹年オーダーの広い年代幅や以下に示す様々な条件①鉱物種、②粒子サイズ、③ウラン濃度、④結晶内の累帯構造、⑤妨害鉱物や元素の存在、⑥変成による結晶成長、⑦被熱影響などの天然の実験場となり、私たちの共同研究には欠くことのできないものとなっています。そのため、測定結果を出来る限り広く公表いただくようお願い申し上げます。

目 次

はじめに.....	1
1. FT と U-Pb ダブル年代測定について	1
1.1 ダブル年代測定の歩み	1
1.2 参考文献	7
2. フィッション・トラック年代測定.....	10
2.1 フィッション・トラック法とは	10
2.2 フィッション・トラック年代算定式	10
2.3 分析方法および標準試料	11
2.4 測定機器および測定方法	12
2.5 再現性および分析誤差	13
2.6 測定結果について	14
2.7 参考文献 (FT 法)	19
3. U-Pb 年代測定.....	22
3.1 U-Pb 測定法とは	22
3.2 U-Pb 年代測定法の原理	22
3.3 年代一致曲線 (コンコーディア図)	23
3.4 ICP-MS 質量分析法	24
3.5 レーザーアブレーション試料導入法	25
3.6 測定装置と測定方法	25
3.7 測定誤差	26
3.8 放射非平衡補正	27
3.9 測定結果	28
4.0 参考文献 (U-Pb 法)	31

はじめに

ジルコンを対象にした放射年代測定法にはフィッション・トラック (FT) 法や U-Pb 法、(U-Th)/He 法などがあります。本報告は、地質試料のジルコンについて U-Pb 年代測定および FT 年代測定を行った結果をまとめたものです。今回の目的は、閉鎖温度の異なる 2 つの手法によるクロスチェックを行い、同一粒子から正確なジルコン年代を明らかにすることです。ここでは新しい試みとして、FT 年代算出に必要なウラン濃度測定をレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法 (LA-ICP-MS 法) で行いました。この方法は、従来の原子炉照射で誘起させるウランの誘導トラックに代わる原子炉に依存しない手法として注目されています。

U-Pb 年代測定およびウラン濃度測定はエキシマレーザーと組み合わせた LA-ICP-MS システムを使用しました。以下に、U-Pb 法および FT 法についての概説、測定装置と測定条件、測定結果、解析結果を示します。

1. FT と U-Pb ダブル年代測定について

2011 年以降弊社では、ジルコンやアパタイトを対象に 1 つの結晶で FT と U-Pb の 2 種類の年代測定を行う、ダブル年代測定 (岩野ほか, 2012) [1] を開始しました。この測定法の開発により、1 個の結晶から高低 2 つの異なる閉鎖温度に対応した放射年代が得られるようになりました。その結果、単独の粒子 FT 年代あるいは粒子 U-Pb 年代から得られる情報だけでは知ることのできなかった、複雑な試料年代の解析や熱史の推定が可能となってきました。ここ数年をとってみても LA-ICP-MS 測定技術の進歩は著しく、それを反映してダブル年代測定技術は年を追うごとに向上していますが、一方で進歩のスピードが速すぎるため、その技術や応用論文の公表が追いつかないのが現状です。そのため、ここではダブル年代測定の一般的な概念を説明するに留めます。

1.1 ダブル年代測定の歩み

我が国では既に 1980 年代に研究用原子炉の老朽化が議論され、毎年のように何らかの軽微な装置トラブルにより使用予定の変更が常態化していました。

1989 年の武蔵工業大学 (現東京都市大学) の実験用原子炉の濾水漏れ事故を契機に、弊社では原子炉によらない U 濃度測定法の開発を始めました。当時最も有効な測定法として SIMS があり、LA-ICP-MS 法が潜在力を秘めた測定法として候補となりました。

我が国では平田岳史教授を中心に当時急速な発展途上にあった LA-ICP-MS 法は、その後国際的にも著しい発展を遂げ、その成果は広く知られるところとなっています（平田他 (2013) [2]、Sylvester and Jackson (2016) [3]）。この間弊社では、LA-ICP-MS による U 濃度測定および U-Pb 年代測定の実用化を見越し、 ^{238}U の壊変定数の決定など FT 研究のうちでも最も基礎的な問題の解決を図ってきました（檀原・岩野 (2013) [4]、Danbara and Iwano, 2013) [5]）。その過程で 1990 年代には、LA-ICP-MS 法を用いた FT 年代測定と同時に U-Pb 年代測定も行う、ダブル年代測定 (double dating) の構想が大きく浮上してきました Kimura et al (2000) [6]、檀原 (2001) [7]（岩野ほか (2013) [8]）。2000 年台初頭には国際的にも Cox et al. (2000) のアパタイトの FT 年代測定法への適用を嚆矢として、Svojtka & Kosler (2002) [9]、Kosler & Sylvester (2003) [10]、Hasebe et al. (2004, 2009) [11, 12]、Donelick et al. (2005) [13] などが公表され始めました。最近ではより実用的段階に至り、伊藤ほか (2010) [14]、Chew and Donelick (2012) [15]、Shen et al. (2012) [16]、Sakai et al. (2013) [17] [18]、Okamoto et al. (2015) [19] など多くの研究が続いています。

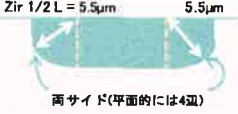
この流れの中にあって私達が強く意識したのは、我が国のユーザーは若い年代測定、特に第四紀試料のダブル年代測定が可能とならなければ評価しないであろうということです。このことは U-Pb 年代測定が少なくとも 1Ma 以下、さらに 10 万年程度までの適用が可能とならねばならないことを意味します。これは極めて高い要求水準ですが、ダブル年代測定の実用化において、我が国では越えねばならない壁となっていました。10 年以上に亘る平田岳史教授との共同研究により、ようやく実用化のレベルにまで到達したといつてよいと考えられます。私たちは今後さらなる測定技術と理論の両面から改良を加え、より精度の高い安定した測定の実現を目指します。

ダブル年代測定で重要なことは測定の実現性にこそあり、測定上の好条件を備えていない通常の試料においても、いかに測定を可能にできるかという技術的問題の克服こそが核心となります。その詳細の一部は岩野ほか (2012) に述べられています。しかし実用化してから現在までに測定技術は大きく進歩し、今もなお進化の途上にあります。私達は最良の測定結果を取得できるように常時改良を加えていますが、残念ながらその詳細の公表は常に遅れがちとなります。そのため、測定条件の詳細は逐次前掲の測定条件一覧表に記載することとし、本文中への記載は省略しています。そのためより詳細な情報が必要な場合には遠慮なくご連絡ください。可能な限りお答えさせ

ていただきます。

まず、FT と U-Pb (U-Th-Pb) 年代測定と比較をします(表 1)。

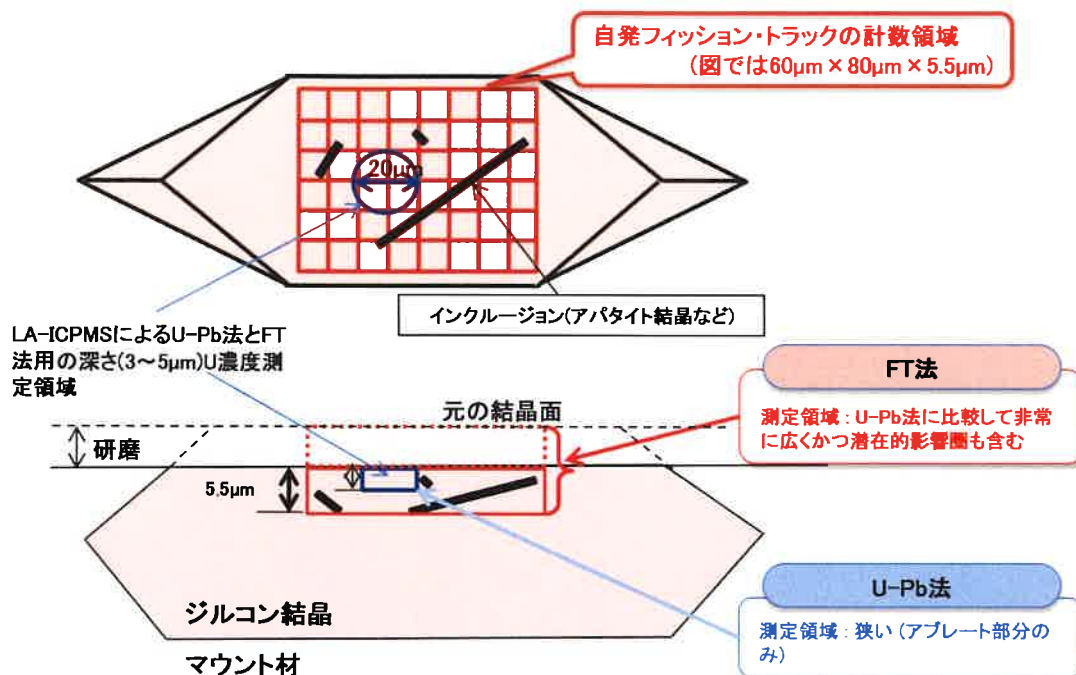
表1. FTおよびU-Pb年代測定の比較

	FT dating	U-Th-Pb dating
原理と放射改変の種類	^{238}U の自発核分裂片飛跡密度が年代と共に増大することを利用	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ decay chain $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ decay chain $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ decay chain } UやThの放射性元素の崩壊を利用
崩壊定数(壊変定数)	$\lambda_f = 8.5 \pm 0.1 \times 10^{-17} \text{ yr}^{-1}$	$\lambda_{^{238}\text{U}} = 1.55125 \pm 0.00083 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ $\lambda_{^{235}\text{U}} = 9.8485 \pm 0.0067 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ $\lambda_{^{232}\text{Th}} = 0.49475 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$
閉鎖温度	ジルコン : 240°C (/1Ma) アパタイト : 120°C (/1Ma)	ジルコン: $700 \sim 900^\circ\text{C}$ アパタイト: $\sim 500^\circ\text{C}$
測定方法	光学顕微鏡での自発FT密度測定 ウラン濃度測定 外部ディテクター法(原子炉法) U同位体測定(LA-ICP-MS法)	U, Th, Pbなどの同位体分析 LA-ICP-MS法 SIMS法
測定対象領域	評価原理 : 広範囲×多数粒子 FT観察深度 $\text{Zr} : \sim 5.5\mu\text{m}$ $\text{Ap} : \sim 8\mu\text{m}$	レーザスポット径 : $10 \sim 50\mu\text{m}\phi$ スポット深度 : $3 \sim 5\mu\text{m}$
測定影響圏	 設定area周辺に1/2Lの縁辺領域が存在	 spot外の影響は受けない。
結晶中での年代分布	閉鎖温度が低いため累帯構造に関わらず、年代値は結晶内で均一。ただし、累帯構造に伴うU濃度の変化に対応し、結晶内部の3D位置によりみかけ年代が変化するため注意が必要。	inherited coreとrimや、累帯構造の内外で年代値の異なる場合が存在するため、測定部位の見極めは測定上の重要な要素となる。
inclusion	低U mineral (Ap, Spなど)中のZircon inclusionは避けるべき。 Zircon中のinclusionは問題とならない	Zircon中のAp inclusionはcommon Pbの影響があるため除去が必要→この意味から広い面積(濃度)の測定には不向き→事前の観察によるinclusionの回避が必要
非破壊性 結晶へのダメージ	エッチングによる自発FTの発生がダメージを与える。誘導FTは外部ディテクターを用いるため非破壊分析(原子炉法では複数回の照射可能) LA-ICP-MS法の場合にはクレーター部分が測定時に失われる	LASER spot径内の結晶は測定により消滅していく。破壊分析(研磨により深度方向に進行する可能性あり)。
測定時間	FT密度により大きく変化する。自発、誘導の二回の測定。1~2 hr/1試料(30粒子)。	同じ粒子数ならば一定。 U, Pbその他の元素を同時に測定。1~2 hr/1試料(30粒子)。

表示された簡単な比較によっても2つの測定法は大きく異なることが分かります。

さらに表 1 で示された測定領域の違いについても図 1 に示します。

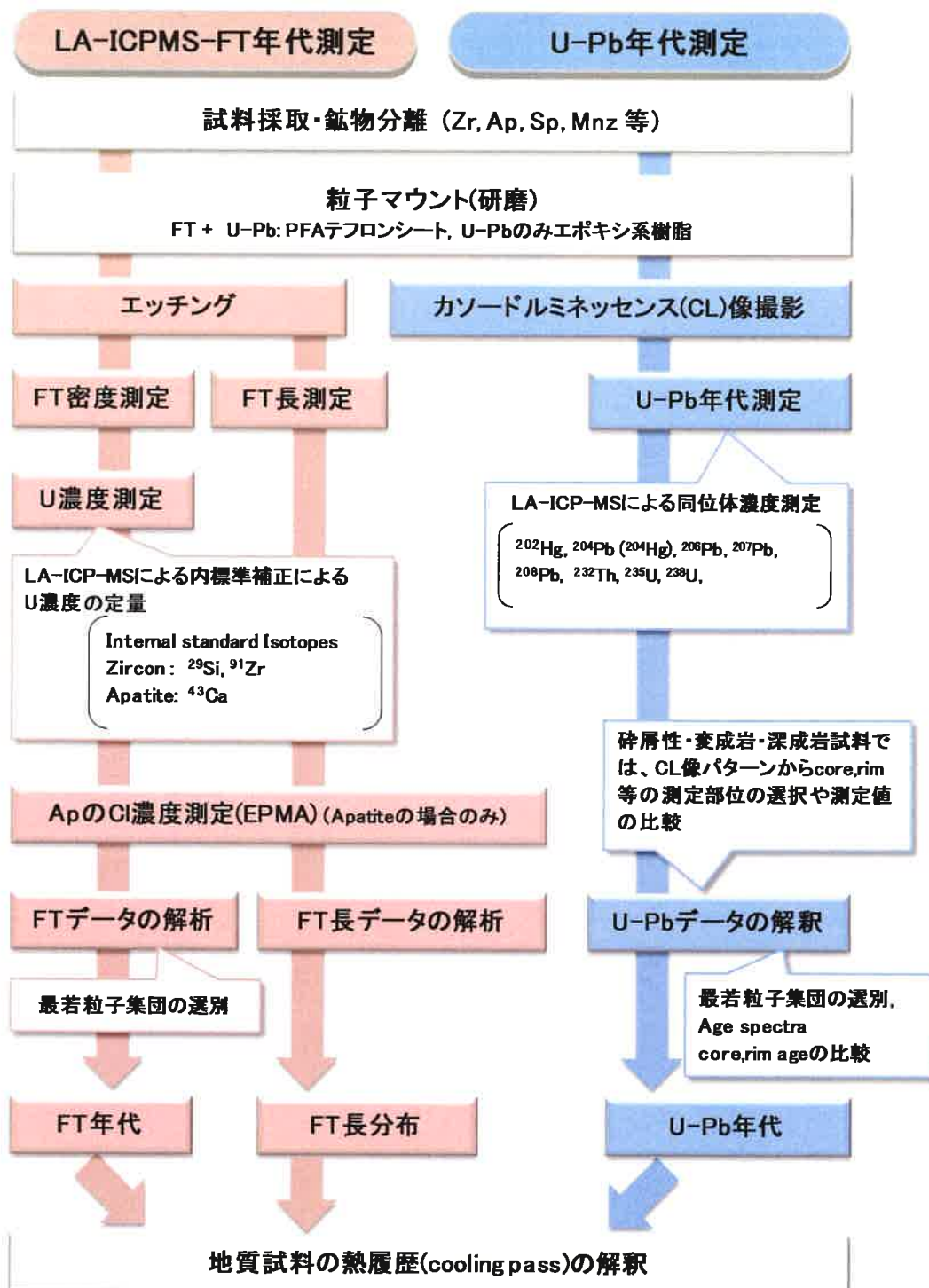
図1. Double datingにおけるFTおよびU-Pb dating領域の比較



これらの比較の中で重要なのは、FT と U-Pb 年代測定での閉鎖温度と測定領域の大きな違いです。たとえばジルコンでは閉鎖温度の高い U-Pb 年代は結晶の生成年代を示し、通常リセットすることはないと考えられます。これに対し FT 年代は閉鎖温度が低いため、容易に熱影響を受けリセットしやすい特徴を持ちます。この 2 つの測定法の特徴をうまく組み合わせることにより粒子ごとの起源や熱履歴だけでなく、本質結晶か外来結晶かの識別や本質結晶の有無などについての解析も行える可能性が増しました。

次ページの図 2 にダブル年代測定の流れを示します。

図2. double datingの流れ図



測定結果を解析するため、実際のダブル年代測定結果に基づいて、パターン化したものを図3に示しました。個々の測定結果を判断する上で、参考となるものと思われます。

a) U-Pb 年代 > FT 年代の場合

多くの深成岩・変成岩に見られ、FT および U-Pb 粒子年代は良くまとまり、一部にインヘリタンスを含むこともある。双方の年代は一定値を示すため、徐冷下で測定法の閉鎖温度の違い(U-Pb : 700~900°C, FT : 200~300°C)に対応する年代を示す。

(b) U-Pb 年代 $\approx$ FT 年代の場合

比較的若い非変質の火山岩・テフラで多くみられ、均質な自形結晶で構成されることが多いところから、本質結晶の生成年代(U-Pb) $\approx$ 噴出年代(FT)と考えられる。

(c) U-Pb 年代 < FT 年代粒子を含む場合

多くは U-Pb 年代 > FT 年代であるが、一部 U-Pb 年代 < FT 年代粒子を含む。基本的には(a)の場合に相当すると考えられるが、結晶中の累帯構造の影響が強く、見かけの FT 年代が U-Pb 年代を越える異常な粒子が含まれる。しかし“若い”見かけ年代粒子も伴うことから、平均値は U-Pb > FT 年代となる。

(d) U-Pb 年代 が大きくばらつく場合

全体として U-Pb 年代 > FT 年代を示す。古期の砂岩など堆積岩起源の変成岩あるいは不均質なテフラでみられる。生成年代が大きく異なるため、U-Pb 粒子年代で著しくばらつくが、FT 年代においては一定のまとまりを示す。そのため、被熱レベルは U-Pb の閉鎖温度以下であったが、FT 年代はリセット年代と考えられる。

(e) FT 年代 が大きくばらつく場合

全体として U-Pb 年代 > FT 年代の傾向をもつものの、FT 年代が若いため、FT 粒子年代は 0(ゼロ)年代を含み大きくばらつく。

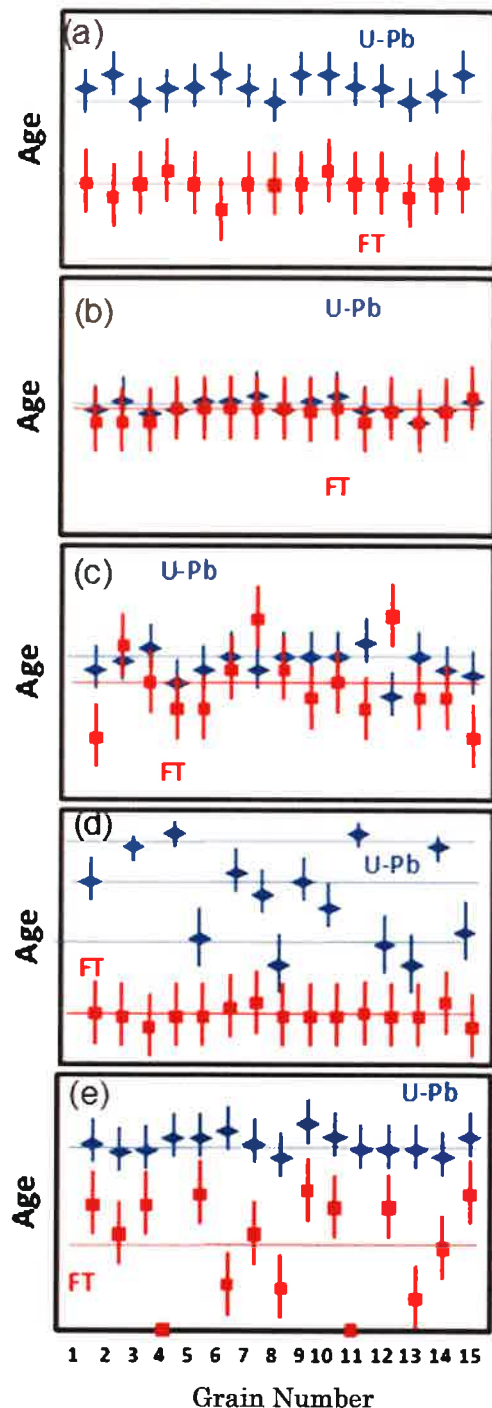


図 3. 同一粒子での FT と U-Pb 年代同時測定における測定年代値の比較

1.2 参考文献

- [1] 岩野英樹・折橋裕二・檀原徹・平田岳史・小笠原正継 (2012): 同一ジルコン結晶を用いたフィッション・トラックと U-Pb ダブル年代測定法の評価—島根県川本花崗閃緑岩の均質ジルコンを用いて—。地質学雑誌, 118, 365–375.
- [2] 平田岳史・坂田周平・岩野英樹・折橋裕二・岡林織起・横山隆臣・牧賢志・昆慶明・服部健太郎・小宮剛・飯塚毅・檀原徹・丸山茂徳 (2013): レーザーアブレーション ICP 質量分析法による U-Pb 年代測定。月刊地球/号外, No. 62, 100–110.
- [3] Sylvester, P. J., and Jackson, S. E. (2016): A Brief History of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS). ELEMENTS, 12, 307–310.
- [4] 檀原徹・岩野英樹 (2013): 独立した FT 年代測定の確立—LA-ICPMS-FT 法に向けてのここ 10 年間の歩み—。月刊地球/号外 No. 62, 111–116.
- [5] Danhara, T. and Iwano, H. (2013): A review of the present state of absolute calibration for zircon fission track geochronometry using the external detector method. Island Arc, 22, 264–279.
- [6] Kimura, J., Danhara, T. and Iwano, H. (2000): A Preliminary Report on Trace Element Determinations in Zircon and Apatite Crystals using Excimer laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ExLA-ICPMS). Fission Track News Letter. 13, 11–20.
- [7] 檀原徹 (2001): レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析 (LA-ICPMS) を用いた FT 年代測定法の構築とテフラ研究への応用。月刊地球, 23, 629–633.
- [8] 岩野英樹・檀原徹・坂田周平・平田岳史 (2013): LA-ICPMS 法によるウラン定量と第四紀ジルコン FT 年代測定—ベトナム産ジルコンメガクリストの例—。月刊地球/号外 No. 62, 117–123.
- [9] Svojtka, J. and Kosler, J. (2002): Fission-track dating of zircon by laser ablation ICPMS. Geochim. Cosmochim. Acta. 66: A756.
- [10] Kosler, J. and Sylvester, P. (2003): Present Trends and the Future of Zircon in Geochronology: Laser Ablation ICPMS. Hornum, J. M. and Hoskin, W. O. (eds) Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53, 243–275.

- [11] Hasebe, N., Barbarand, J., Jarvis, K., Carter, A. and Harford, J. (2004): Apatite fission-track chronometry using Laser ablation ICP-MS. *Chem. Geol.*, 207, 135-145.
- [12] Hasebe, N., Carter, A., Hurford, A. and Arai, S. (2009): The effect of chemical etching on LA-ICP-MS analysis in determining uranium concentration for fission-track chronometry. Lisker, F., Ventura, B. and Glasmacher, U.A. (eds) *Thermochronological Methods: From Palaeotemperature Constraints to Landscape Evolution Models*. Geological society, London, Special Publications, 324, 37-46..
- [13] Donelick, R.A., O' Sullivan, P.B. and Ketcham, R.A. (2005): Apatite Fission-Track Analysis. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58, 49-94.
- [14] 伊藤久敏・田村明弘・森下智晃・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. *地質学雑誌*, 116, 544-551.
- [15] Chew, D.M. and Donelick, R.A. (2012): Combined Apatite Fission Track and U-Pb Dating by LA-ICP-MS and Its Application Apatite Provenance Analysis. *Mineralogical Association of Canada Short Course 42*, St. John' s NL, May 2012, 219-247.
- [16] Shen, C.B., Donelick, R.A., O' Sullivan, P.B., Jonckheere, R., Yong, Z., She, Z.B., Miu, X. L. and Ge, X. (2012): Provenance and hinterland exhumation from LA-ICP-MS zircon U-Pb and fission-track double dating of Cretaceous sediments in the Jiangnan Basin, Yangtze Block, China. *Sedimentary Geology*. 281, 194-207.
- [17] Sakai, H., Iwano, H., Danhara, T. and Takigami, Y., Roy, S.M., Upreti, B.N. and Hirata, T. (2013): Rift-related origin of the Paleoproterozoic Kuncha Formation, and cooling history of the Kuncha nappe and Taplejung granites, eastern Nepal Lesser Himalaya: a multichronological approach. *Island Arc*. 22, 338-360.

- [18] Sakai, H., Iwano, H., Danhara, T., Hirata, T. and Takigami, Y. (2013): Emplacement of hot Lesser Himalayan nappes from 15 to 10 Ma in the Jumla–Surkhet region, western Nepal, and their thermal imprint on the underlying Early Miocene fluvial Dumuri Formation. *Island Arc*. 22, 361–381.
- [19] Okamoto, A., Takeshita, T., Iwano, H., Danhara, T., Hirata, T., Nishido, H. and Sakata, S. (2015): Fission track and U–Pb zircon ages of psammitic rocks from the Harushinai unit, Kamuikotan metamorphic rocks, central Hokkaido, Japan: constraints on metamorphic histories. *Island Arc*, 24, 379–403.

2. フィッション・トラック年代測定

2.1 フィッション・トラック法とは

フィッション・トラック (fission track、以下 FT と略す) 法とは、ウランウム ^{238}U 原子核の自発核分裂現象を利用した放射年代測定法の 1 つです [3]。広く知られているように放射性元素である ^{238}U は、 α 線や β 線放射崩壊により複雑な長い壊変系列を経て ^{206}Pb へと変化します。しかし一方で、自発核分裂という壊変現象も併行して生じるのです。この自発核分裂とは、 ^{238}U 原子核が自然状態で約 140 と約 90 の質量をもつ 2 個の原子 (核分裂片) に分裂することで、天然の核種においてこの現象がみられるのはウラン同位体の大部分を占める ^{238}U の寄与が圧倒的に大きいのです。鉱物やガラスに含まれる 1 個の ^{238}U 原子核が自発核分裂を起こすと約 200MeV のエネルギーを放出し、その際生じた 2 個の原子が固体中を反対方向に飛び去り、みかけ上 1 本の飛跡 (track) を作ります。これが原子核分裂 (fission) により生じた飛跡 (track) であることから、測定法の名称となりました。一般に高温中で生成した鉱物やガラスが冷却すると、FT は一定の壊変率をもって内部に蓄積されていきます。この自発核分裂で生じた単位体積当りの自発 FT 密度は試料の年代とウラン濃度 (^{238}U 原子核密度) に比例し、この関係から年代値を算出することができます。

なおウラン濃度の測定には、ウラン同位体の中で熱中性子によって選択的に誘導 (起) 核分裂を起こす ^{235}U を利用します。原子炉内で一定量の熱中性子を照射して生じた ^{235}U の FT 密度を測定することにより、 ^{238}U との同位対比 (一定) から換算して求めます。FT 年代測定法に関する詳しい説明は檀原 (1995, 1999 など)、兼岡 (1998) など [4, 5, 6] に記載されています。最近では LA-ICP-MS によるウラン濃度測定法も行われています。

2.2 フィッション・トラック年代算定式

フィッション・トラック年代値は後述するゼータ較正法 [1, 2, 7] に基づき以下のように算出されます。

$$\begin{array}{cc} \text{〈原子炉法〉} & \text{〈LA-ICPMS-FT 法〉} \\ T = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left(1 + \lambda_D \cdot g \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_s}{\rho_i} \cdot \rho_d \right) & T = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left(1 + \lambda_D \cdot g \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_s}{\rho_u} \cdot \rho_{ustd} \right) \end{array}$$

ここで T は年代値、 λ_d は ^{238}U の全壊変定数 ($\lambda_d = 1.55125 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$) [8]、 ρ_s は自発

トラック密度 (cm^{-2})、 ρ_i は誘導トラック密度 (cm^{-2})、 g はジオメトリーファクター、 ρ_d は標準ガラスの誘導トラック密度 (cm^{-2}) です。ジオメトリーファクターは、結晶内部面、外部面の時それぞれ 0.5、1 を代入しています。 ζ は測定方法ごとに較正されたゼータ値です。LA-ICP-MS-FT 法では試料の計数領域内における ^{238}U の総カウントを数 N_u 密度が ρ_u に変更され、 ρ_d が ρ_{ustd} (標準物質の ^{238}U 総カウント数の密度) に変更されます。

次に、上式で算出された年代値の誤差 (1σ) は下式で得られます。

$$\sigma_T = T \times \sqrt{\frac{1}{\Sigma N_s} + \frac{1}{\Sigma N_i} + \frac{1}{\Sigma N_d} + \left(\frac{\sigma_\zeta}{\zeta}\right)^2} \quad (1\sigma) \quad \langle \text{原子炉法} \rangle$$

$$\sigma_T = T \times \sqrt{\frac{1}{\Sigma N_s} + \frac{1}{\Sigma N_u} + \frac{1}{\Sigma N_{ustd}} + \left(\frac{\sigma_u}{u}\right)^2} \quad (1\sigma) \quad \langle \text{LA-ICPMS-FT 法} \rangle$$

ここで ΣN_s 、 ΣN_i 、 ΣN_d はそれぞれ、自発トラック、誘導トラックおよび標準ガラスの総トラック数、 σ_ζ はゼータ値測定に伴う誤差 (1σ) です。

2.3 分析方法および標準試料

現在フィッション・トラック年代測定法は、K-Ar 法など他の年代測定法により信頼できる年代値が与えられた年代標準試料をもとに、測定者ごとの測定システムを較正することが国際的に合意されています。これをゼータ較正法[1, 2, 7]といい、ゼータ較正法では従来の年代算出式にまつわる定数を一括してゼータ値とし、標準試料の分析値から逆算して測定者ごとに実験的に求められるものです。この較正法により国際的に同一規格の FT 年代値が得られ、それ以前に研究室間で異なる物理定数を用いることによって生じた食い違いがなくなり、FT 年代データの研究室間の比較や他の年代測定法との比較が可能になりました。そのため各測定者が簡便に実行できることから、地質学的研究に広く用いられています。

ゼータ値は熱中性子線量測定に使用する標準ガラスに対して規定されるほか、測定者ごとの実験条件の違い、具体的には測定手法 (鉱物、ディテクター) や測定環境 (原子炉、顕微鏡など) を一定化した上で決定されるものです。そのため実験条件が変化

すればそのたびに新たに決定する必要があります。

ゼータ（ ζ ）値および ε 値は以下の式で与えられます。

$$\zeta = \frac{\exp(\lambda_D T_{std}) - 1}{\lambda_D \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_u}\right) \cdot \rho_{ustd}}$$

ここで、 T_{std} は年代標準試料の標準年代値です。ゼータ較正法では、年代未知試料の年代値は上式で求められたゼータ値を年代算定式（前述）に代入して算出されます。ゼータ値および ε 値の単位は $\text{yr} \cdot \text{cm}^{-2}$ （以下省略）です。

弊社におけるゼータ較正には、Hurford (1990a, b) [1, 2]に示される3つのジルコン年代標準試料（Buluk Member Tuff、Fish Canyon Tuff、Tardree Rhyolite）と2つのアパタイト年代標準試料（Fish Canyon Tuff、Durango Apatite）を用いています。これまで原子炉、標準ガラス、ディテクターなどの変更のたびに、ゼータ値は変更されています[9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]。2011年以前のシステムでのゼータ値は Danhara & Iwano, (2009) [15]にまとめられ、未知試料の測定に際しては、照射の分析結果の信頼性や再現性は、未知試料とともに照射した Fish Canyon Tuff 試料などの年代標準試料の測定値により評価しています。

一方 2011 年以降は LA-ICP-MS 装置を用いた方法に移行しています。LA-ICP-MS-FT 法による分析は、原子炉法によるものと同様にして、スタンダード試料 FCT を用いてゼータ値を求め年代較正を行っています。

2.4 測定機器および測定方法

弊社における FT 年代測定システムは、高品位モニター上で顕微鏡像を観察する方法（モニター測定システム）を用いています。このモニター測定システムでは、光学顕微鏡（Nikon ECLIPSE E1000）とドライの対物レンズ（100 倍）を用い、光学的に 1000 倍の顕微鏡像を高品位デジタルカメラ（浜松フotonクス C9440-05G）を通して高品位モニター画面（タッチパネルシステムズ 17 モニター）上で観察します。この時の画面上での観察倍率は 2550 倍です。

測定結晶としてジルコンを用いた場合、まず 100 粒子程度を PFA シートに溶入した後、結晶外面の自発トラックをエッチングします。エッチングには KOH : NaOH (=1:1) の共融液を 225°C で用い、最もエッチングされにくい結晶 C 軸にほぼ平行なトラックが出現し、トラックの方位分布が等方的になるまでエッチングを行います。Int. S 法

を適用する試料では、外部面のトラックが消えるまでダイヤモンドペーストを用いて研磨した後再度エッチングします。一方アパタイトの場合、約 100 粒子程度をエポキシ樹脂で固定し、その後ダイヤモンドペーストを用いて研磨します。自発トラックのエッチングには 0.7% HNO_3 溶液 (20°C) を用います。

LA-ICP-MS-FT法によるウラン濃度（と算出式中の ρ_{ustd} 値に相当）は、U-Pb年代分析データのうち ^{238}U データのみを利用して定量します。一般的には、ウラン濃度既知の標準ガラス (NIST610, NIST612) を基準にし、さらに ^{29}Si あるいは ^{96}Zr の主成分元素を内標準にして精密に行います。現在弊社では91500スタンダード「18」のウラン濃度から相対測定する方法で行っています。LA-ICP-MS法では、ウラン同位体のうち ^{238}U のみを定量することができます。標準物質としてはNISTが発行する合成ガラス標準物質 (SRM610, SRM612) を用いるのが理想的です。ただし、その場合には、標準物質と測定試料 (ジルコンやアパタイト) の間の主成分元素組成や密度が大きく異なることで生ずるマトリクス効果の補正法がカギとなります。

具体的にはジルコンの場合、91500 のウラン濃度として弊社で慎重に値付けした 2 つの破片 (91500_{tef} : 74ppm, 91500_{epo} : 100ppm) を基準にしており、未知試料のウラン濃度を ^{29}Si あるいは ^{96}Zr を内標準として 91500 ジルコンの ^{238}U カウント数と同条件で測定し、未知試料の ^{238}U カウント数から比例計算して求めます (岩野ほか, 2013; Hasebe et al, 2013)。ウラン濃度測定に伴う測定誤差は、91500 のウラン濃度基準値の曖昧性を加味して暫定的に約 10% と与えています。一方アパタイトの場合には Durango アパタイトを用い、 ^{43}Ca を内標準として同様に ^{238}U で濃度を求めています。なお、これらの測定は東京大学平田研究室所有の LA-ICP-MS 装置で実施し、測定条件は前掲の一覧表に詳しく示しています。

弊社における標準的な測定では、ジルコン（あるいはアパタイト）のトラック計数を行う前に、計数に適した粒子について 30 粒子になるまでランダムに顕微鏡写真を撮り、粒子写真上で計数領域を記録しています。

2.5 再現性および分析誤差

測定の再現性は、年代標準試料を繰り返し分析した結果、ゼータ値が一定範囲内に収まることで確認されます [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]。さらに年代標準試料 (Fish Canyon Tuff) を同時照射し、その分析から測定の再現性があることで確認できます。

年代値の測定誤差は誤差式に従い計数誤差として表示しますので、総トラック計数に依存することになります。例えば、計数トラックの種類にかかわらず 1000 本あるいは 2000 本のカウントに対して、1 σ で 3 あるいは 2%の測定誤差が伴うことになります。

2.6 測定結果について

測定結果は表 1 にまとめられ、各試料についての情報は(1)判定カード、(2)年代試料カード、(3)結晶一粒子ごとの年代一覧表、(4)粒子年代順の年代一覧表、(5)分析結果図表、(6)結晶写真により構成されていますので、参考としてください。

測定結果判定カードは、後述のような多角的・総合的な判定要素について検討し、その判定結果を明示するとともに、測定結果に対するコメントも記載しています。

以下には判定要素の記載要領についてご説明します。

2-6.1 年代試料としての質の検討項目

①岩質

ボルカニクラスチック物質においては基本的に異種年代粒子混入の可能性が存在し、一方岩質的に均質と考えられる深成岩試料では徐冷や外部効果の影響が予想されるため、岩質を前もって知ることは測定上極めて重要です。

②本質結晶含有率

抽出結晶の個体レベルの特徴（自形性・色・晶癖・自発トラック密度・自発トラック長・適正エッチング条件）から、経験的に最も若い年代を与えると推定される粒子群の割合を判断します。その場合に試料提供者の予想年代は重要な判断基準材料とされますが、予想年代と観察結果が一致しない場合もあります。一般に本質結晶含有量の高い試料ほど良質と判断できます。

③粒子の均質性

一般に粒子の均質性の高いものほど年代試料としては良質です。しかし複数起源の粒子が様々な割合で混入している場合や、外来結晶でありながら均質性の高いものが大量に含まれている場合もあり、その判定には注意が必要です。

④含有結晶量

総抽出個数/総重量で示します。特に細粒でない限り、本質結晶が 100 個/kg 以上含まれれば測定には十分な場合が多いようです。しかしそれを下回ると当然測定条件は低下するため、含有結晶量は測定の難易や安定性に与える影響力が大きいといえます。

⑤トラック計数作業の難易性

トラック計数は、平滑でインクルージョンがなく縦横ともに柱面の広く発達した粒子では計数が容易で、作業性は良いと判断されます。逆に、粒径が非常に小さい場合や累帯構造が強く現れる試料では計数領域の設定が困難となり、作業性は悪化します。

⑥結晶の表面状態

結晶外部表面に融蝕跡をもつ試料や、地熱試料などで結晶表面に多数の浅い pit を生じたものは、測定作業に悪影響を与える場合があります。

⑦外部効果

外部効果とは、ジルコン結晶表面付近にウランが濃集するために、結晶が有する年代とは無関係な外部からのフィッション・トラックの寄与により生じる現象で、結晶外部面を用いた場合、みかけ上古い測定年代値が得られます。したがって原則として深成岩には Int. S 法、それ以外の試料には Ext. S 法を適用します。アパタイト試料はすべて Int. S 法を適用します。

特に深成岩や一部の流紋岩試料においては、外部効果の危険性を事前にチェックすることが極めて重要です。

⑧試料の再加熱歴

ボルカニクラスチック物質など一般に生成後急冷したと考えられる試料においては、自発トラック長の著しい短縮化傾向が認められる場合に再加熱歴があると判断されるものがあります。また 1 粒子中に含まれる短縮化した自発トラックの存在は本質結晶か否かの判定に影響を与える場合が多く、トラック長分布の検討はその点からも重要です。

測定結果の評価

まず全測定粒子を対象に 1 粒子あたりの平均 N_s ($\overline{N_s}$) と平均 N_u ($\overline{N_u}$) を求め、合

わせてそれらの標準偏差 1σ を算出します。これは、粒子年代のばらつきや N_s, N_u, ρ_s, ρ_u の相関係数を算出した場合、 $\overline{N_s}, \overline{N_u}$ 両値の大きさを粒子集団の均質性の判断に用いることができるからです。

ここで粒子年代は分子 (N_s) と分母 (N_u) の比に計数を乗じたものですから、誤差的には下式で示される範囲内に粒子年代の 1σ が含まれると考えられます。

$$\frac{\overline{N_s}}{\overline{N_u}} \pm \frac{\overline{N_s}}{\overline{N_u}} \sqrt{\left(\frac{\sigma N_s}{\overline{N_s}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma N_u}{\overline{N_u}}\right)^2}$$

その結果、粒子年代ヒストグラム上でのバラつきは $\overline{N_s}, \overline{N_u}$ それらの偏差値から算出された誤差範囲内に収まると予想されます。その場合に平均値から $\pm 1\sigma$ の範囲内に 67% の粒子年代値が入り、 $\pm 2\sigma$ の範囲内には 95% の粒子年代値が入ることになります。したがって、この範囲を大きくはずれる粒子や粒子年代集団がある場合には、それらを異種年代粒子集団として識別できます。実際には計数値にさらに別のばらつき要素が加わるため、粒子年代はより広くばらつくことになりますが、 $1\sigma, 2\sigma$ 範囲は一応の目安として重要な意味を持つものと考えられます。

N_s-N_u あるいは $\rho_s-\rho_u$ の相関性は、 N_s, N_u 値や ρ_s, ρ_u 値が大きいと、高い方がデータのまとまりが良いと一般に考えられます。しかし、例外もあるので注意が必要です。まず比較的若い試料では、均質集団においても特に N_s, ρ_s 値が小さくなり、各相関性は低くなります。この場合には粒子ごとのウラン濃度のばらつきが小さいことをチェックすることが大事です (ρ_u ヒストグラム参照)。また、均質度が高く粒子間のウラン濃度のばらつきが非常に小さい試料では、 $\rho_s-\rho_u$ の相関性はみかけ上悪くなることがあり、この場合も注意すべきです。逆に N_s-Ni や $\rho_s-\rho_u$ の相関性が 1 に近いからといって安心はできません。たとえばウラン濃度のばらつきが著しく高く 10 倍以上にもなる試料の場合は、多少の年代値のばらつきがあっても相関係数は見かけ上高いままで小さくならないからです。

最後に、Galbraith(1981) [18] により提唱された χ^2 検定 (有意水準 5%) も、測定データの妥当性の検討には有効とみなされていました。この検定に失格した場合には、測定データ中に非ポアソン・エラーが含まれる可能性が高いためです。もっとも Int. S データを検討する場合には、粒子内のウラン濃度変動が影響しやすく失格する率が高いため [9] 常に有効と言うことはできません。けれども、Ext. S データの

場合には異種年代結晶混入の目安となり、失格のときは個々の粒子の χ^2 値[19]のうち最も大きな粒子から順に除外しながら χ^2 検定を繰り返し検討していました。しかし、最近では同一粒子でFTとU-Pb年代測定を行うダブル年代測定(double dating)によるU-Pb粒子年代で結晶ごとの生成年代が分かるため結晶のグルーピングが χ^2 検定よりはるかに直接的に行えるようになりました。そのため現在弊社では、ダブル年代測定での結晶のグルーピングを χ^2 検定にまさる異種年代結晶除外の有効手段として解析に用いています。

分析結果の図表示について

以下に分析結果の図表示について、図a～fの順で説明します。

粒子年代ヒストグラム（図a）

1粒子ごとに算出される年代値のヒストグラムで、各表示枠内の数字は粒子番号を示します。平均年代を算出した粒子グループを白抜き枠で表示し、一方黒地枠は平均年代の算出から除外した粒子を示します。この図から粒子ごとの年代値分布が検討できます。

Ns-Nu 相関図（図b）

粒子ごとの自発トラック計数(Ns)と粒子ウラン計数(Ns/Nu)の散布図で、白丸が平均年代を算出した対象粒子、黒丸がその算出から除外した粒子を示します。図中の直線は最小二乗法による回帰直線で、除外粒子がある場合分析対象を実線、全粒子データを破線で示しています。年代値が等しい粒子では、Ns/Nu比が一定となり、原点を通る直線が得られます。また年代値の大きい試料ほど傾きは大きくなります。相関係数(r)は相関性評価の一助として用いられます。

$\rho_s - \rho_u$ 相関図（図c）

粒子ごとに自発トラック密度(ρ_s)と粒子ウラン計数密度 ρ_u の比(ρ_s/ρ_u)を求め描いた図で、白丸が平均年代を算出した対象粒子、黒丸がその算出から除外した粒子を示します。年代値が等しい粒子は ρ_s/ρ_u 比が一定となり、傾

き 45° の直線上に並びます。年代値が等しくとも粒子間のウラン濃度差が大きい場合にはデータは直線上に分散し、ウラン濃度が高いと右上へ、低いと左下へ寄ります。一方ウラン濃度差が小さい場合には狭い範囲に集中します。若い年代を持つ試料やウラン濃度の低い試料では、1 粒子ごとの計数が少ないためデータのばらつき、分布は大きく分散します。

さらに若い年代をもつものやウラン濃度の低い試料では、しばしば自発トラックが観察されない粒子（ゼロ・トラック粒子と呼ばれる）が存在しますが、 $\rho_s = 0$ データは対数グラフ上では書き込むことができないため図には表示されません。また相対的に年代値の大きい粒子ほど ρ_s / ρ_u 値が大きいため左上方に寄り、逆に若い粒子ほど右下に向けて分布します。相関係数（ r ）は相関性評価の一助として用いられます。

粒子年代の確率密度分布（図 d）

図 a で示された粒子年代の分布は、粒子ごとの誤差要素が表現されておらず、測定全粒子からみた総合的な評価をしにくいという欠点があります。そこで粒子ごとの年代誤差を、 N_s, N_u の計数が正規分布するものとみなし、全測定粒子について積算した確率密度分布図[20]を示します。図 a で見かけ上ばらつきのある分布も、この図によって滑らかな分布として表されます。前述のように自発トラック計数の少ない年代試料では粒子年代はみかけ上大きくばらつき、しばしば複数のみかけ年代ピークを示しますが、この図によって真の年代分布を捉えやすくなります。また異なる年代粒子群が含まれると、複数の年代ピークが表示される場合があります。除外粒子がある場合、平均年代を算出した粒子データを実線で示し、一方全粒子データを破線で示します。ピーク年代値は最も顕著な年代スペクトルの頂点の年代を示しますが、必ずしも年代測定結果（加重平均値）とは一致しません。

ラディアル・プロット radial plot（図 e）

各粒子年代と年代誤差（精度）を同時に表示することを目的に開発された粒子年代分布図[21, 22]です。現在日本語での訳語はありません。白丸が平均年代を算出した粒子で、黒丸が分析除外粒子を示します。ただしゼロ・トラック粒子はこ

の図には表示されません。右端の円弧上に年代が刻まれており、各粒子の年代は左座標の原点Oと各粒子を結んだ直線が年代との交点で示されます。図中で粒子ごとの誤差はどの点でも等しい長さ (2σ) で表示されます。左座標の ± 2 が 2σ 誤差を示します。粒子ごとの誤差は、図中に書き込むと大変見にくくなるため図示されてはいませんが、各白丸の位置で上下に $\pm 2\sigma$ の誤差があると決められています。横軸は測定精度を示し、年代値に対する相対標準誤差 (1σ) と精度 ($1/\sigma$) が併記されています。精度の高い粒子は右寄りに、精度の低い粒子は左寄りにプロットされます。網掛けは、算出された加重平均年代値のもつ誤差範囲を示し、統計的には対象とした年代粒子の95%がこの範囲に含まれることが期待されます。したがって網掛け範囲をはずれたところにプロットされた粒子は、一般に異種年代をもつ可能性が高い傾向にあるとみなされます。

ウラン濃度ヒストグラム (図 f)

1 粒子ごとに計算されるウラン濃度ヒストグラムで、各データの数字は粒子番号に対応します。白抜きのデータが平均年代を算出した対象粒子であり、黒地のデータが分析対象から除外した粒子を示します。この図から粒子ごとのウラン濃度の違いや分布が読み取れます。

以上各項目について述べましたが、最終的には総合的に測定データの判定を行うことが必要です。

2.7 参考文献 (FT 法)

- [1] Hurford, A. J. (1990a): standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. subcommission on Geochronology. Chem. Geol., 80, 171-178.
- [2] Hurford, A. J. (1990b): International Union of Geological Sciences subcommission on Geochronology recommendation for the standardization of fission-track dating calibration and data reporting., Nucl. Tracks radiat. Meas. 17. 233-236.

- [3] Fleisher, R. L. Price, P. B. and Walker, R. M. (1975): Nuclear Tracks in Solids: principles and applications., Univ. of California press, 605pp.
- [4] 檀原徹 (1995): 第四紀テフラの高精度フィッション・トラック (F T) 年代測定-ジルコンとガラスを用いた測定法の確立に向けて-. 第四紀研究, 34, 221.-237.
- [5] 檀原徹 (1999): フィッション・トラック法. 松浦・上杉・藁科編「考古学と年代測定学・地球科学」, 44-55. 同成社.
- [6] 兼岡一郎 (1998): 年代測定概論. 東京大学出版会、315pp.
- [7] Hurford, A. J. and Green, P. F. (1983): The zeta age calibration of fission track dating, isotope Geosci., 1, 285-317.
- [8] Steiger, R. A. and Jager, E. (1977): Subcommittee on Geochronology on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 359-362.
- [9] Danhara, T., Kasuya, M., Iwano H., and Yamashita, T. (1991): fission-track age calibration using internal and external surfaces of zircon., Jour. Geol. Soc. Japan., 97, 977-985.
- [10] 岩野英樹・檀原徹 (1997): 高品位モニターを用いたフィッション・トラック年代測定システムのゼータ校正とシステム間比較. フィッション・トラックニュースレター, No. 10, 11-20.
- [11] Iwano, H. and Danhara, T. (1998): A re-investigation of the geometry factors the fission-track dating of apatite, sphene and zircon., Van den haute and De Corte (edu.), Advances in Fission-Track Geochronology, 47-66. Kluwer Academic Publishers.
- [12] Danhara, T. and Iwano, H. (2001): System calibration for fission track dating of zircon using the new standard glass dosimeter IRMM-540. FTNL, 14, 1-14.
- [13] Danhara, T., Iwano, H., Yoshioka, T. and Tsuruta, T. (2003): Zeta Calibration values for fission track dating with a diallyl phthalate detector. Jour. Geol. Soc. Japan, 109, 665-668.

- [14] Danhara, T., Iwano, H., Kobayashi, H. and Tsuruta, T. (2007): A report on Fission-Track data of zircon and apatite age-standards for age calibration using diallyl phthalate (DAP) resin detectors and a minor revision of zeta values by Danhara et al. (2003). *Journal of Geology of Japan*, 113, 77-81.
- [15] Danhara, T. and Iwano, H. (2009): Determination of zeta values fission-track age calibration using thermal neutron irradiation at the JRR-3 reactor of JAEA, Japan. *Journal of Geology of Japan*, 115, 141-145.
- [16] 岩野英樹・檀原徹・坂田周平・平田岳史 (2013): LA-ICPMS 法によるウラン定量と第四紀ジルコン年代測定. 日本地質学会第 120 回学術大会 (東北大学), R22-P-14.
- [17] Hasebe, N., Tamura, A. and Arai, S. (2013): Zeta equivalent fission-track dating using LA-ICP-MS and examples with simultaneous U-Pb dating. *Island Arc*, 22, 280-291.
- [18] Galbraith, R.F. (1981): On statistical model for fission track counts. *Math. Geol.*, 13, 471-488.
- [19] 糟谷正雄 (1986): ジルコンの外部面を用いたフィッション・トラック年代測定の手法-群馬県富岡地域中新統馬場凝灰岩の例-. *地質学雑誌*. 92. 49-496.
- [20] Hurford, A. J., Fitch, F. J. and Clarke, A. (1984): Resolution of the age structure of the detrital zircon populations of two Lower Cretaceous sandstone from the weald of England by fission track dating., *Geological Magazine*, 121, 269-396.
- [21] Galbraith, R.F. (1988): Graphical Display of Estimates Having Differing Standard Errors., *TECHNOMETRICS*, 30, 271-281.
- [22] Galbraith, R.F. (1990): The Radial Plot: Graphical Assessment of Spread in ages., *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 17, 207-214.

3. U-Pb 年代測定

3.1 U-Pb 測定法とは

原子核壊変を利用した年代測定法は、試料の放射年代を決定する重要な手段です。地球科学的試料の年代測定に広く用いられている K-Ar 法、Rb-Sr 法、Sm-Nd 法、Re-Os 法は、それぞれカリウム-40 の殻外電子捕獲 (EC)、ルビジウム-87 の β -壊変、サマリウム-147 の α 壊変、レニウム-187 の β 壊変を利用したものであり、親核種と娘核種の存在比および娘核種の同位体成長を分析することにより試料の放射年代を決定することができます [1][2]。

ウラン-鉛 (U-Pb) 法は、ウランの原子核壊変による鉛同位体成長を利用した年代測定法であり、他の年代測定法にはないユニークな特徴を持っています。それは、同じ親元素から 2 つの違う経路をたどり同じ娘元素へと壊変する現象を利用することです。すなわち、U-Pb (ウラン-鉛) 法では、天然に存在するウラン-238 (^{238}U) およびウラン-235 (^{235}U) は、それぞれウラン系列とアクチニウム系列の別種の経路で原子核壊変を生じ、最終的にそれぞれ鉛-206 (^{206}Pb) および鉛-207 (^{207}Pb) になります。その結果この年代測定法では、 ^{238}U - ^{206}Pb 年代と ^{235}U - ^{207}Pb 年代の 2 つの年代を求めることができます。

U-Pb 法の利点を最大限に引き出すことができる対象鉱物の 1 つがジルコンです。一般にジルコンは親核種であるウランの存在度が高いうえに、初生鉛 (放射性起源でない鉛) 存在度が非常に低く、U-Pb 法にもっとも適した試料の 1 つです。またジルコンは、副成鉱物として広く存在する鉱物でありながらそれ自体の物理的・化学的安定性が高く、地質年代を通じて閉鎖系を保持します。そのため、これまで地球形成初期の地球科学的情報を引き出す目的で、従来から、多くの研究者がジルコン U-Pb 年代測定法を利用してきました。最近では、若い年代の火成岩試料の年代測定にも広く用いられるようになり、同一試料から得られたジルコン FT 年代との比較検討 (ダブル年代測定) も可能となってきています。

3.2 U-Pb 年代測定法の原理

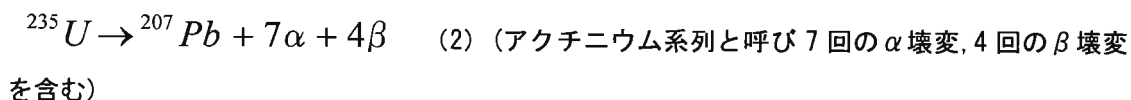
U-Pb 法は、U/Pb 検出強度比から年代値を算出する方法です。この方法には、U と Pb の同位体の高い検出精度が要求され、質量分析計が用いられます。自然界には U には 3 つ、Pb には 4 つの同位体が存在します。U の同位体は、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U であり、Pb に

は ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb が存在します。このうち ^{204}Pb のみが安定同位体であり、 ^{204}Pb は common Pb または始原鉛ともよばれ、測定対象の鉱物に外部から混入した可能性のある Pb の同定に用いられます。これらの存在比を表 1 に示した。 ^{208}Pb については、 ^{232}Th からの壊変によるものです。

表 1. U および Pb の同位体存在比

U 同位体	同位体存在比 (%)	Pb 同位体	同位体存在比 (%)
^{234}U	0.0052 ± 0.0002	^{204}Pb	1.4 ± 0.1
^{235}U	0.7200 ± 0.0051	^{206}Pb	24.1 ± 0.1
^{238}U	99.2745 ± 0.00106	^{207}Pb	22.1 ± 0.1
		^{208}Pb	52.4 ± 0.1

U-Pb 年代の導出方法として、 ^{238}U は最終的に ^{206}Pb に、 ^{235}U は ^{207}Pb に壊変するため、親核種と娘核種が同じ元素で成立する 2 種類の年代測定法が可能になります (^{238}U - ^{206}Pb 法、 ^{235}U - ^{207}Pb 法)。次式に壊変する系の式を示します。



ここで、式 (1)、(2) のそれぞれに対応する壊変定数を λ_{238} 、 λ_{235} は以下のような値です。

$$\lambda_{238} = (1.55125 \pm 0.00016) \times 10^{-10} \text{ (yr}^{-1}\text{)} \quad [3]$$

$$\lambda_{235} = (9.8485 \pm 0.0134) \times 10^{-10} \text{ (yr}^{-1}\text{)} \quad [4]$$

3.3 年代一致曲線 (コンコーディア図)

測定対象鉱物において、形成時に U に富み、Pb をほとんど含まない試料では、試料中の Pb は放射性起源同位体と見なすことができます。放射性起源の同位体に [] をつけて表すと、次のような関係が示されます。

$$\frac{\{^{206}\text{Pb}\}}{^{238}\text{U}} = [\exp(\lambda_{238}t) - 1] \quad (3)$$

$$\frac{\{^{207}\text{Pb}\}}{^{235}\text{U}} = [\exp(\lambda_{235}t) - 1] \quad (4)$$

よって、これらから t の値を逆算するとそれぞれ次のようになります。

$$t = \frac{1}{\lambda_{238}} \times \ln\left[\frac{(^{206}\text{Pb})}{^{238}\text{U}} + 1\right] \quad (5)$$

$$t = \frac{1}{\lambda_{235}} \times \ln\left[\frac{(^{207}\text{Pb})}{^{235}\text{U}} + 1\right] \quad (6)$$

以上より以下の式によって年代値 t [Ma] が導かれます。

$$t = \frac{10^4}{1.55125} \times \ln\left[\frac{(^{206}\text{Pb})}{^{238}\text{U}} + 1\right] \quad (7) \quad ^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb} \text{ 年代}$$

$$t = \frac{10^4}{9.8485} \times \ln\left[\frac{(^{207}\text{Pb})}{^{235}\text{U}} + 1\right] \quad (8) \quad ^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb} \text{ 年代}$$

計算により導出される年代値において、100 Ma よりも若い年代値をもつ試料の場合では、同位体存在度の大きい $^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ 法のほうが高感度で、信頼性の高い値が得られます。

3.4 ICP-MS 質量分析法

結合誘導プラズマ質量分析法 (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS) の進歩は元素分析の高感度化、分析空間分解能の向上、分析の迅速化の全てに多大な貢献を果たしています [5] [6]。質量分析計では分析元素あるいは分子をイオン化し、電場あるいは磁場を用いて分析対象とするイオンまたは分子を重さごとに分離します。分析元素イオンを”数える”ことができるため、他の分析法に比べ非常に高い検出感度が得られます。さらにプラズマイオン源では周期律表の殆どの元素に対して 90%以上の高いイオン化効率が得られるため高感度・多元素同時分析法が実現できます。高温アルゴンプラズマの特長はイオン源が大気圧であるため、様々な試料導入法が適用可能です。そのうちのひとつに、レーザーアブレーション試料導入法があります。

3.5 レーザーアブレーション試料導入法

レーザーアブレーション試料導入法 (Laser Ablation Technique、以下 LA 法と略記) では、レーザー光を集束して固体試料の一部を加熱し、気化あるいはエアロゾル化した試料をプラズマイオン源 (ICP) に導入します。固体試料を分解処理することなく迅速な化学組成分析が可能であり、さらにレーザー光を絞り込むことにより固体試料の局所部分の化学・同位体組成分析も可能です。照射するのがレーザー光であることから、試料の研磨処理や伝導性膜をコーティングする必要がなく、また試料を真空容器内にセットする必要があるため、試料交換も簡便であり、迅速かつ高感度な元素分析が可能です。試料前処理が最小限であることから、ICP 質量分析計の最大の特徴である「分析の迅速性」を最大限に引き出すことができる試料導入法の一つです。

3.6 測定装置と測定方法

今回行った U-Pb 年代測定は、LA-ICP-MS 装置によりしました。レーザーアブレーションには、レーザービーム径の調整が比較的容易なエキシマレーザーを使用しました。アブレーションガスを He ガスの雰囲気中で実施し、その He ガス流を Ar ガス流に混合させ、ICP-MS 装置に導入させます。レーザー照射径は標準的に $20\ \mu\text{m}$ としますが、レーザー装置の種類や 1 回の照射でのポイント数は試料条件に合わせ最適となるよう適宜変更しました。U-Pb 年代として、 ^{238}U - ^{206}Pb 年代と ^{235}U - ^{207}Pb 年代を求め、ジルコンの標準試料による補正には 1 次スタンダードとして Nancy 91500 [7] を用いました。2 次スタンダードとして OD-3 [8] [9] [10]、GJ-1 [11] などを未知試料の推定年代やウラン濃度に応じて適宜選択し用いました。

測定した元素およびその同位体は、 ^{202}Hg , ^{204}Pb (^{204}Hg), ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U です。 ^{202}Hg と ^{204}Hg は common Pb (^{204}Pb) の汚染を見積もりとその補正に用います。

U-Pb 年代測定に供したジルコンは、FT 年代測定を行う場合と同様に PFA テフロンシートに埋め込んだ後、研磨・エッチングされています (巻末ジルコン写真参照)。この場合、ジルコンのトラックエッチングによる common Pb の混入が U-Pb 年代に影響を与える可能性があります。そこで ICPMS データ取得の際には、一度レーザーで短時間照射することによって試料表面をきれいにし (one-shot cleaning)、そののち、本測定を行ないました。なお具体的な測定の詳細は基本的に Iizuka and Hirata (2004) [12], Hirata et al. (2005) [13] に準拠しています。また今回のように非常に若

い U-Pb 年代データにおいては Sakata et al. (2017) [14] による U-Th-Pb 放射壊変系列の放射非平衡の補正をおこないました。

3.7 測定誤差

U-Pb 年代測定での年代誤差は、年代較正に使用するスタンダード (91500 ジルコン) の ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{235}U , ^{238}U の測定にまつわる誤差と未知試料の測定値 (^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{235}U , ^{238}U) があります。一般には、未知試料の測定前後に測るスタンダードジルコンの同位体比測定値の平均 (m_{std}) と相対標準誤差, SE_{std}) から測定誤差が算出されます。

$$\text{Error } (1\sigma) = t \times \sqrt{\left(\frac{SE_{\text{std}}}{m_{\text{std}}}\right)^2} \quad (9)$$

しかし今回のような若い試料の年代誤差算出法としては、上述のスタンダードの測定誤差に加え、未知試料のカウント数にまつわる計数誤差を含めるのが妥当と考えられます。下式で N_{238} , N_{206} は ^{238}U , ^{206}Pb のカウント数を表します：

$$\text{Error } (1\sigma) = t \times \sqrt{\frac{1}{N_{238}} + \frac{1}{N_{206}} + \left(\frac{SE_{\text{std}}}{m_{\text{std}}}\right)^2} \quad (10)$$

後述するように、2つの年代値 (^{238}U - ^{206}Pb 年代と ^{235}U - ^{207}Pb 年代) のうち前者のみを今回議論に用います。 ^{238}U や ^{206}Pb のカウント数が大きく、そのために測定精度の高い ^{238}U - ^{206}Pb 年代では (9) 式と (10) 式で算出される誤差に大きな差がでません。しかし計数誤差を含めた誤差で表示するため以後、年代誤差として示す場合には、大きめに誤差が算出される (10) 式で表示します。

これらの誤差計算をおこなったうえで、測定結果を誤差楕円プロットで示してあります。誤差楕円プロットは以下のような手順で描いています。

測定点をプロットするために、まず楕円の方程式を導出する必要があります。

焦点座標を $(-a, 0)$ 、 $(a, 0)$ 、楕円上にある任意の点を $P(x, y)$ 、焦点との距離の和を d とおくと、以下のような関係にあることが分かります。

$$\sqrt{(x+a)^2+y^2} + \sqrt{(x-a)^2+y^2} = d \quad (13)$$

この式を変形して整理すると

$$\frac{4}{d^2}x^2 + \frac{4}{d^2-4a^2}y^2 = 1$$

となり、さらに書き換えると

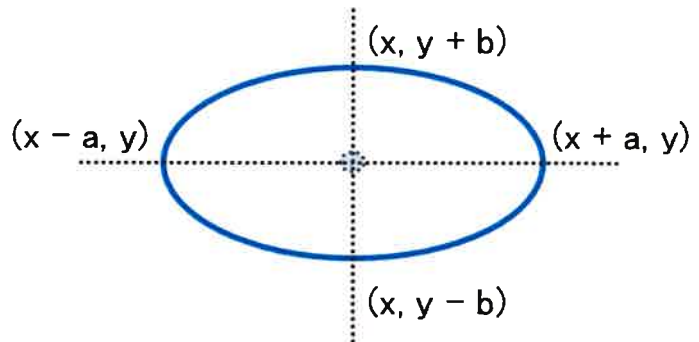
$$\left(\frac{x}{\frac{d}{2}}\right)^2 + \left(\frac{y}{\frac{\sqrt{d^2-4a^2}}{2}}\right)^2 = 1 \quad (15)$$

となります。ここで、

$$\frac{d}{2} = a, \frac{\sqrt{d^2-4a^2}}{2} = b$$

とすると、(15)式は

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (16)$$



と書くことができます。この式は楕円の方程式の基本形です。楕円軌道を求める方法はいくつかありますが、短軸および長軸の長さが分かるだけで導出することができます。楕円の中心座標は測定結果の ^{238}U - ^{206}Pb 年代、 ^{235}U - ^{207}Pb 年代の同位体比の値です。短軸、長軸は測定誤差のエラーバーに相当します。図より $2p$ は短軸、 $2q$ は長軸であるから、 $2p$ を ^{238}U - ^{206}Pb 年代 mean 値に対する 2σ Error、 $2q$ を ^{235}U - ^{207}Pb 年代値に対する 2σ Error で表すことができます。

この結果、短軸、長軸の座標が既に分かっているため、楕円の方程式の基本形から楕円軌道上にある任意の座標を知ることができ、後は各座標を線で結ぶことで誤差楕円がプロットできます。なお、国際的に広く利用されている Isoplot (Ludwig, 2008) [15]) によるデータ表示では長軸・短軸に一定の傾きがあたえられていますが、弊社の表示では傾きは 0 とします。

3.8 放射非平衡補正

ここまで説明してきた従来の U-Th-Pb 年代測定法では、ジルコンが形成される時に、ウラン系列 (^{238}U - ^{206}Pb)、アクチニウム系列 (^{235}U - ^{207}Pb)、トリウム系列 (^{232}Th - ^{208}Pb) の親

核種と (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th) と放射壊変生成物 (^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb) の間に放射非平衡が成り立つことを前提としていました。しかし実際には、ジルコン形成時に放射壊変系列の全ての核種がジルコン結晶に分配されるわけではありません。マグマ(液体)とジルコン(固体)では核種の量比(分配比)が異なるためです。放射平衡が成り立っておれば、放射壊変核種の量はその半減期に応じて決まっています。しかしマグマからジルコンが形成(晶出)する際にはこのバランスがくずれ、非平衡状態となります。この影響でジルコン中の鉛の生成量は、単純に放射平衡を仮定した場合からズレが生じます。

放射平衡からのズレの大きさは、マグマ中の親核種(U, Th, Pb)とジルコン中での放射壊変生成核種の比から見積もることができます。またそれぞれの放射壊変生成核種がどれくらいの時間で放射平衡に戻るかは、その核種の半減期で決まります。

ジルコンを対象とした U-Th-Pb 年代測定においては、新生代あるいは特に若い第四紀の若い試料では、放射非平衡補正の適用が現在では不可欠となっており、この補正を加えない U-Pb 年代値は最大 0.1Ma 程度若く見積もられる恐れがあります(坂田ほか, 2013, Sakata et al., 2017 など)。

3.9 測定結果

コンコーディアプロット(Concordia plot)

年代測定の結果のうち意味のある”年代値”として採用される値は、原則として閉鎖系であることが要求されます。ジルコンなどのウラン鉱物では、1 試料から、 ^{238}U - ^{206}Pb 年代と ^{235}U - ^{207}Pb という 2 つの年代値が同時に得られることを利用して、閉鎖系の検証が可能です。すなわち論理的には、測定試料(鉱物)中で U および Pb に関して閉鎖系が成立している場合には ^{238}U - ^{206}Pb 年代と ^{235}U - ^{207}Pb が一致し、コンコーディア(年代一致曲線)上にのります。

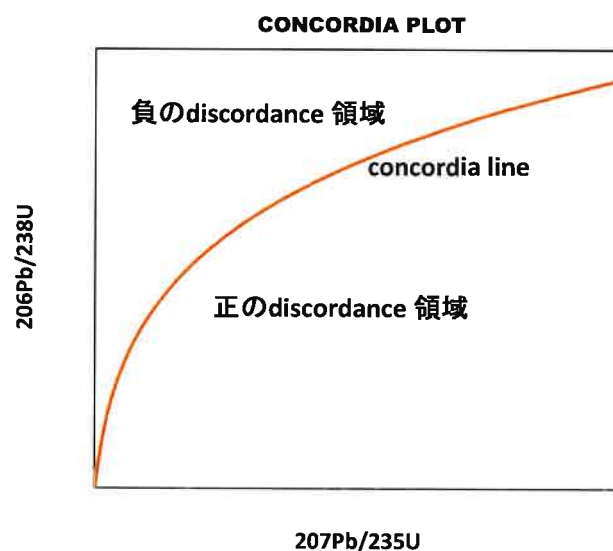
この場合に、誤差を持つ 2 つの測定値この場合に、誤差をもつ 2 つの測定値が一致するかどうかは、誤差の定義により左右されます。本報告では、誤差範囲を 2σ (95% confidence) とし、 ^{238}U - ^{206}Pb 年代と ^{235}U - ^{207}Pb が 2σ 誤差内で一致する場合にコンコーダント、逆に 2 つの年代が一致しない場合にはディスコーダントと判断します。なお、年代データ一覧表中のディスコーダンス(disc. と略記)は下記の式で計算され、2 つの年代値の大小や不一致の程度を数値化して示しています。

$$Discordance = \left(1 - \frac{{}^{206}Pb^* / {}^{238}U_{age}}{{}^{207}Pb^* / {}^{235}U_{age}} \right) \times 100 \quad (17)$$

${}^{238}U$ – ${}^{206}Pb$ 年代 > ${}^{235}U$ – ${}^{207}Pb$ 年代のとき : 負

${}^{238}U$ – ${}^{206}Pb$ 年代 = ${}^{235}U$ – ${}^{207}Pb$ 年代のとき : 0 (2つの年代が一致)

${}^{238}U$ – ${}^{206}Pb$ 年代 < ${}^{235}U$ – ${}^{207}Pb$ 年代のとき : 正



変質を受けていない若い試料では、一般に閉鎖系が成立している可能性が高いと考えられます。しかし、数10億年という古い実際の2試料ではコンコーディアにのることはむしろ少なく、コンコーディアから外れてはいるが、直線的に並ぶものが少なくありません。これらの測定点がつくる線をディスコーディア (Discordia: 年代不一致曲線) と呼びます。このような現象は加熱や変成作用などにより、2次的試料からのPbの損失が生じることが原因と考えられ、数多くの議論やモデルの提唱が行われています。さらに、Tera-Wasserburg コンコーディア図も広く利用されています。この図は

縦軸に $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 比をとり表示するもので、数億年かそれより若い年代試料の解析に有効とされています。

今回の U-Pb 年代測定では、1 次スタンダード試料は Nancy 91500 ジルコンを用い、2 次スタンダード（前掲の測定条件一覧表参照）を未知試料の前後で測定し較正を加えています。測定結果は U-Pb データー一覧表に示します。

一般に鉱物個体の年代測定では、試料形成時の年代を保持する本質結晶以外に、より古い形成年代をもつ鉱物粒子がしばしば見いだされます。これらの鉱物粒子を、碎屑岩（堆積岩や火山碎屑岩など）では外来結晶（detrital crystal）、深成岩ではインヘリタンス（inheritant crystal）などと呼んで区別しています。最近ジルコン U-Pb 年代測定が広く適用されるようになった砂岩試料のように、初めから本質結晶を含み得ないものは、堆積年代に最も近い一群の鉱物粒子が形成する最若年代粒子集団の年代を追求するのが重要な目標となります。いずれも岩質試料の場合においても、最も若い年代をもつ粒子群を見出すことは、本質結晶の結晶生成年代や堆積年代に制約を与えるという意味で重要です。

業務測定の場合、しばしば試料そのものの地質学的背景が不明あるいは匿名性の高い試料があります。そのため、限られた制約の範囲内で有効な解析を行うとすれば、最若年代粒子集団（以後最若粒子集団と略す）を測定データを用いて選別し、それらの平均年代を求めることが必要となります

具体的には、以下の 3 段階の手順で最若粒子集団の絞り込みを進めます。①粒子年代データで信頼性の高いコンコールド粒子群を選別します。次に②コンコールド粒子中で誤差 3σ 範囲 (97.5% confident) に収まる年代粒子を選びます。最後に③それらの粒子年代の加重平均値を算出します。このようにして、最若粒子集団とその平均年代を求め、岩質に応じ得られた年代値のもつ意味を解釈します。もちろん、試料の地質学的背景が明確でなければデータの解釈は下せません。そのため、依頼に応じエクセル表化した生データを提供しますので自由に解析いただくことも可能です。

以 上

4.0 参考文献(U-Pb 法)

- [1] 兼岡一郎 (1998) : 年代測定概論. 東京大学出版会、315pp.
- [2] Gradstein, F. M. , Ogg, J. G. , Schmitz, M. D. and Ogg, G. M. (2012) : The Geologic Time Scale 2012. Vol. 1, 116–126. Elsevia, pp435.
- [3] Jaffey, A. H. , Flynn, K. Glendenin, L. E. , Bentley, W. C. , Essling, A. M. (1971). Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U . Physical Review C4, 1889–1906.
- [4] Steiger, R. H. , Jaeger, E. (1977) : Subcomission on geochronology ; convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry. Earth and Planetary Science Letters 36 (3), 359–362.
- [5] 平田岳史・坂田周平・岩野英樹・折橋裕二・岡林識起・横山隆臣・牧賢志・昆慶明・服部健太郎・小宮剛・飯塚毅・檀原徹・丸山茂徳 (2013) : レーザーアブレーション ICP 質量分析法による U-Pb 年代測定. 月刊地球-号外. No. 62, 100–110.
- [6] Sylvester and Jackson (2016) : A Brief History of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS). Elements, 12, 307–310.
- [7] Wiedenbeck, M. , Alle, P. , Corfu, F. et al. (1995) : Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace element and REE analyses. Geostandards Newsletter, 19, 1–23.
- [8] 岩野英樹・折橋裕二・檀原徹・平田岳史・小笠原正継 (2012) : 同一ジルコン結晶を用いたフィックション・トラックと U-Pb ダブル年代測定法の評価-島根県川本花崗閃緑岩中の均質ジルコンを用いて-. 地質学雑誌, 118, 365–375.
- [9] Hideki Iwano, Yuji Orihashi, Takafumi Hirata, Masatsugu Ogasawara, Tohru Danhara et al. , (2013) : An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U-Pb dating standard. Island Arc, 22, 382–394.
- [10] Lukacs, R. , Harangi, S. , Backmann, O. , Guillong, M. , Danisik, M. , Buret, Y. , von Quadt, A. , Dunkl, I. , Fodor, L. , Sliwinski, J. , Soos, I. , Szepesi, J. (2015) : Zircon geo -chronology and geochemistry to constrain the youngest eruption events and magma evolution of the Mid-Miocene ignimbrite flare-up in the Pannonian Basin, eastern central Europe. Contrib. Mineral. Petrol. 170, 52.

- [11] Jackson, S. E. , Pearson, N. J. , Griffin, W. I. and Belousova, E. A. (2004) : The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*. 211, 47-69.
- [12] Iizuka, T. and Hirata, T. (2004) : Simultaneous determinations of U-Pb age and REE abundances for zircons using ArF excimer laser ablation -ICPMS. *Geochemical Journal*. 38, 229-241.
- [13] Hirata, T. , Iizuka, T. and Orihashi, Y. (2005) : Reduction of mercury background on ICP-mass spectrometry for in situ U-Pb age determinations of zircon samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 20, 696-701.
- [14] Sakata, S. , Hirakawa, S. , Iwano, H. , Danhara, T. , Guillong, M. and Hirata, T. (2017) : A new approach for constraining the magnitude of initial disequilibrium in Quaternary zircons by coupled uranium and thorium decay series dating. *Quaternary Geochronology*. 38, 1-12.
- [15] Ludwig, K. R. (2008) : User' s Manual for Isoplot 3.6. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronology Center Special Publication No. 4.
- [16] 坂田周平・平川晋輔・岩野英樹・檀原徹・平田岳史(2013) : 第四紀ジルコンの U-Th-Pb 年代測定における初生放射非平衡の補正. *月刊地球-号外*. No. 62, 142-152.
- [17] Sakata, S. (2018) : A practical method for calculating the U-Pb age of Quaternary zircon: Correction for common Pb and initial disequilibria. *Geochemical Journal* 52. (doi:10.2343/geochemj.2.0508).

LA-ICP-MS-FT 年代測定結果

試料名： 船久保タフ (Zr)

1.判定カード

2.年代試料カード

3.結晶一粒子ごとの年代一覧表（結晶番号順）

4.粒子年代順の年代一覧表（ χ^2 検定結果）

5.分析結果図

6.結晶写真

測定結果判定カード

KFT.No.180619-5080

試料名: 船久保77 (FT)

(図 1 a ~ 1 f)

1. FT年代試料としての適格性

岩 質	含有結晶量	本質結晶含有率	測定粒子の均質性	総合判定
ガラス質火山灰、可	10 ⁴ 個/63g、優	不明、-	FT年代としてはみかけ上ほぼ均質	良
計数の難易	結晶表面状態	外部効果	試料の再加熱	
可	良	-	-	

2. 測定結果のまとめ(全粒子を対象とした時)

(参考値) T= 0.43 ± 0.07 Ma

1粒子あたりの Ns, ρ_s , Nu, $\rho_u \pm 1\sigma$	粒子年代T のまとめ	U濃度の まとめ	NsとNuの 相関性	ρ_s と ρ_u の 相関性r	χ^2_{test} P(χ^2)	総合 判定
Ns = 0.4 ± 1.0 ρ_s = 0.14 ± 0.29 E5	劣	可	0.66 可	0.254 弱	70% 合格	要検討
Nu = 14100 ± 14557 E3 ρ_u = 6445 ± 3089 E8						

3. 異種年代と思われるものを除外した時(条件: U-P年代で普通鉛汚染のある12粒子を除外)

(報告値) T=0.42 ± 0.08 Ma

1粒子あたりの Ns, ρ_s , Nu, $\rho_u \pm 1\sigma$	粒子年代T のまとめ	U濃度の まとめ	NsとNuの 相関性	ρ_s と ρ_u の 相関性r	χ^2_{test} P(χ^2)	総合 判定
Ns = 0.4 ± 1.1 ρ_s = 0.14 ± 0.29 E5	劣	可	0.678 可	0.282 弱	72% 合格	可
Nu = 14207 ± 14837 E3 ρ_u = 6626 ± 3177 E8						

4. 総合所見

試料条件: 本試料は、K-Ar年代測定用にHbを抽出(蒜山地質による)した中間分離物37 фракционを一括した63gからジルコンを抽出したものである。その目的は測定粒子数を増加させることにより、FT年代精度の向上を図ることにある。そのため依頼粒子数は基本単位30粒+追加30粒の60粒子であったが、今回100粒子の測定を一気に行った。したがって前回(2018年3月16日報告)分の30粒子を合計すると、測定粒子数は130個に達する。測定要領は前回と同様であり、基本的にランダム測定を実施した。ただし測定装置上の制約からレーザー装置はエキシマレーザーを用いており、必ずしも同じではない。そのため本報告では今回の100粒子測定に焦点を合わせ結果を解析するが、最終的には併行して実施したU-Pb法の結果や、前回報告のFT年代値との加重平均値計算を行っている。

測定結果: 今回の全測定粒子100個の粒子データは、基本的に前回とほぼ同様な状況を示す。1粒子あたりの自発FT計数が平均0.4本/1粒子と著しく少ないため、粒子データはみかけ上大きくばらつくが統計上特に問題点は指摘されず、 χ^2 検定にも合格する。そのため全測定粒子100個を単一年代集団とみなすと、それらの加重平均値0.43±0.07Maが得られる。本値は前回の報告値0.38±0.14Maと誤差内で一致し、精度は約2倍に向上している。さらに前回と今回の測定値の加重平均値を求めると0.41±0.07が得られ、今回の結論となる。なお併行して実施したU-Pb年代測定においては、コンコードント最若粒子集団4粒子(0.62,0.63,0.64,0.65Ma)の加重平均値0.63±0.01Maが得られ、前回報告を裏付ける結果となった。この事実からFT年代<U-Pb年代となり、FT年代が噴出年代を示す可能性が高いと判断される。

フィッシュン・トラック年代試料カード

年月日：	2018 年 7 月 14 日
No. KFT：	180619-5080
調査名：	船久保タフ年代測定結果報告書（その2）
試料名：	船久保タフ
岩石名：	ガラス質火山灰
採取者：	塩井 宏幸
採取年月日：	2018 年 1 月 14 日
採取地：	139° 38' 13" E, 35° 12' 38" N
層 準：	宮田層相当層（詳細不明）（第四紀更新世）
予想年代：	0.38±0.14 Ma
年代測定方法：	LA-ICP-MS-FT法（外部面：Ext. S）使用鉱物名：ジルコン（Zr）
エッチング条件	KOH：NaOH=1:1(mol) etchant, 225°C, 43 h 00 m
ウラン定量方法：	91500スタンダードジルコンを基準とした定量
Zeta値：	ζ Ext. S = 37.3 ± 1.7
ウラン定量装置：	レーザーアブレーションICP質量分析計
測定年月日：	2018 年 7 月 11 日
受付試料全量：	63 g（蒜山地質にてHb抽出済み試料3フラクション全量）
処理試料量：	63 g（蒜山地質にてHb抽出済み試料3フラクション全量）
抽出結晶量：	10 ⁴ 個
本質結晶含有率：	不 明
測定年代値：	0.42 ± 0.08 Ma(単位：100万年)
コメント：	

測定値に対するコメントの詳細は、前述の通り。

測定者：岩野 英樹

解析者：檀原 徹

受注番号：

発注者：

担当者：

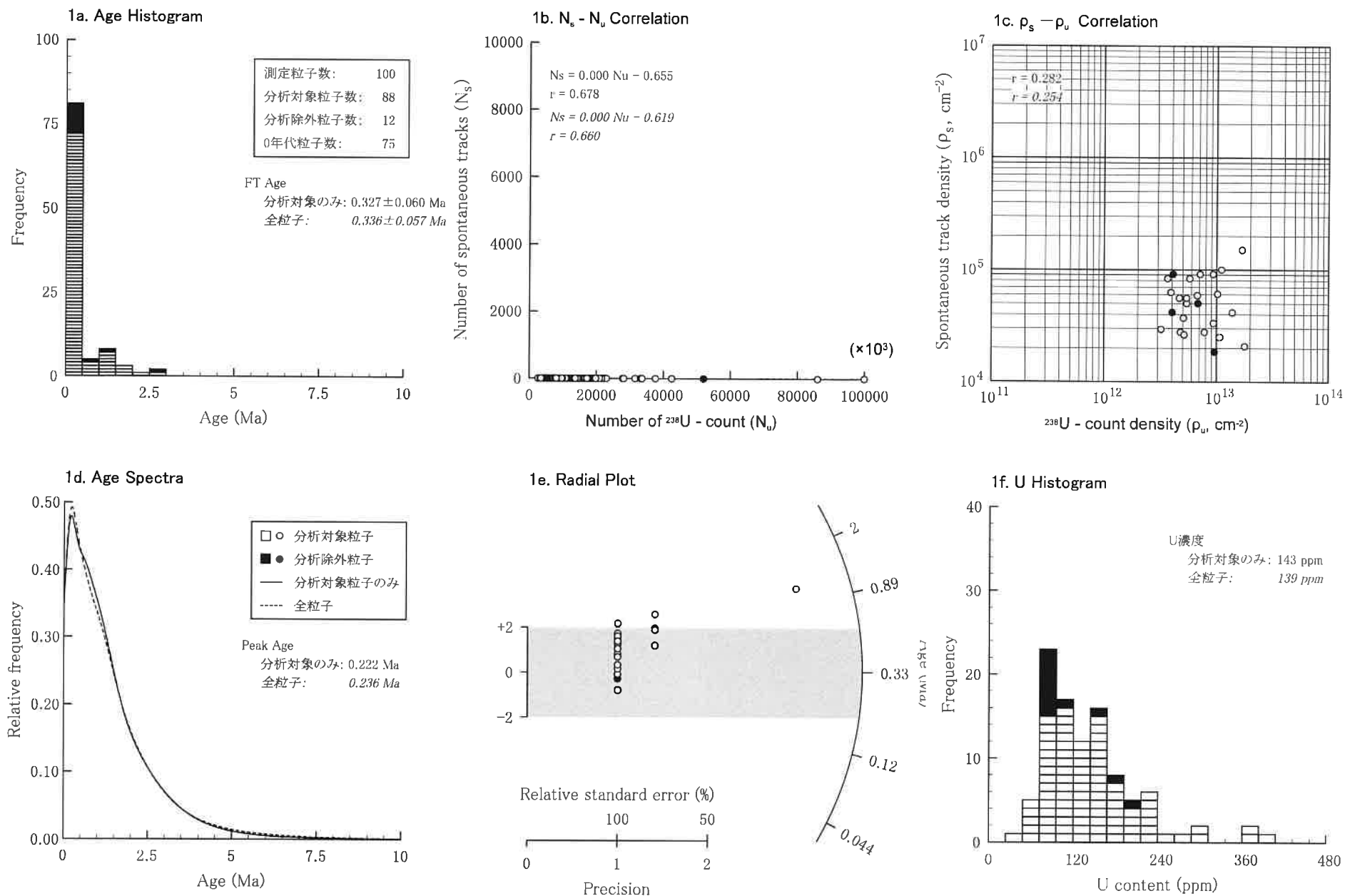


図1. [船久保タフ] (KFT: 180619-5080) 分析図.

1. 船久保タフ FT年代分析結果一覧表

Table.1 Results of fission-track dating of zircon samples by Thermo iCAP using 91500 standard

(1)	(2)	LA-ICP-MS Data							LA-ICP-MS-FT Age							(10)	
		Fission Track Data			Sample		91500 standard (5)		(6)		(7), (8), (9)						
		Ns	Count Area	ps	(3)	N _{U-sp}	(4)	ρ _{U-sp}	N _{U-std}	LA spot area	ρ _{U-std}	Pr (χ ²)	U _{ICP}	Age (Ma)			
		(10 ⁻⁶ cm ²)	(cm ⁻²)	area-corrected N _{U-sp}	area correction value	(cm ⁻²)	(10 ⁻⁶ cm ²)	(cm ⁻²)	(%)	(ppm)	t	±	1 σ				
no.1	Ext.S	1	48	2.083E+04	860,699,150	71,724,929	12.00	1.793E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.70	387	0.15 ± 0.15			
no.2	Ext.S	0	12	0.000E+00	120,707,836	40,235,945	3.00	1.006E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.32	217	0.00 ± #DIV/0!			
no.3	Ext.S	9	60	1.500E+05	1,000,809,266	66,720,618	15.00	1.668E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	15.47	360	1.15 ± 0.39			
no.4	Ext.S	1	30	3.333E+04	282,778,584	37,703,811	7.50	9.426E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.09	203	0.45 ± 0.45			
no.5	Ext.S	0	36	0.000E+00	151,921,022	16,880,114	9.00	4.220E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.40	91	0.00 ± #DIV/0!			
no.6	Ext.S	0	15	0.000E+00	131,643,093	35,104,825	3.75	8.776E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.35	189	0.00 ± #DIV/0!			
no.7	Ext.S	0	36	0.000E+00	377,248,276	41,916,475	9.00	1.048E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.99	226	0.00 ± #DIV/0!			
no.8	Ext.S	0	11	0.000E+00	62,078,813	22,574,114	2.75	5.644E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.16	122	0.00 ± #DIV/0!			
no.9	Ext.S	0	30	0.000E+00	223,383,345	29,784,446	7.50	7.446E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.59	161	0.00 ± #DIV/0!			
no.10	Ext.S	0	10	0.000E+00	26,493,062	10,597,225	2.50	2.649E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.07	57	0.00 ± #DIV/0!			
no.11	Ext.S	1	17	5.882E+04	115,070,455	27,075,401	4.25	6.769E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	1.61	146	1.11 ± 1.11			
no.12	Ext.S	0	18	0.000E+00	119,861,284	26,635,841	4.50	6.659E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.31	144	0.00 ± #DIV/0!			
no.13	Ext.S	0	34	0.000E+00	134,977,237	15,879,675	8.50	3.970E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.35	86	0.00 ± #DIV/0!			
no.14	Ext.S	1	54	1.852E+04	520,482,121	38,554,231	13.50	9.639E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.10	208	0.25 ± 0.25	*		
no.15	Ext.S	0	44	0.000E+00	316,259,459	28,750,860	11.00	7.188E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.83	155	0.00 ± #DIV/0!			
no.16	Ext.S	1	40	2.500E+04	425,866,488	42,586,649	10.00	1.065E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.01	230	0.30 ± 0.30			
no.17	Ext.S	0	12	0.000E+00	54,521,851	18,173,950	3.00	4.543E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.14	98	0.00 ± #DIV/0!			
no.18	Ext.S	1	12	8.333E+04	69,399,549	23,133,183	3.00	5.783E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	3.67	125	1.84 ± 1.84			
no.19	Ext.S	0	27	0.000E+00	46,601,118	6,903,869	6.75	1.726E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.12	37	0.00 ± #DIV/0!			
no.20	Ext.S	0	36	0.000E+00	201,719,104	22,413,234	9.00	5.603E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.53	121	0.00 ± #DIV/0!			
no.21	Ext.S	0	36	0.000E+00	279,534,319	31,059,369	9.00	7.765E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.73	168	0.00 ± #DIV/0!			
no.22	Ext.S	1	36	2.778E+04	172,463,124	19,162,569	9.00	4.791E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.66	103	0.74 ± 0.74			
no.23	Ext.S	1	38	2.632E+04	196,539,397	20,688,358	9.50	5.172E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.45	112	0.65 ± 0.65			
no.24	Ext.S	0	20	0.000E+00	86,379,296	17,275,859	5.00	4.319E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.23	93	0.00 ± #DIV/0!			
no.25	Ext.S	0	24	0.000E+00	172,939,636	28,823,273	6.00	7.206E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.45	156	0.00 ± #DIV/0!			
no.26	Ext.S	1	34	2.941E+04	109,507,800	12,883,271	8.50	3.221E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	1.77	70	1.17 ± 1.17			
no.27	Ext.S	0	15	0.000E+00	91,886,535	24,503,076	3.75	6.126E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.24	132	0.00 ± #DIV/0!			
no.28	Ext.S	0	12	0.000E+00	47,349,468	15,783,156	3.00	3.946E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.12	85	0.00 ± #DIV/0!			
no.29	Ext.S	0	16	0.000E+00	119,799,388	29,949,847	4.00	7.487E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.31	162	0.00 ± #DIV/0!			
no.30	Ext.S	0	6	0.000E+00	49,471,774	32,981,183	1.50	8.245E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.13	178	0.00 ± #DIV/0!			
no.31	Ext.S	0	32	0.000E+00	183,726,430	22,965,804	8.00	5.741E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.48	124	0.00 ± #DIV/0!			
no.32	Ext.S	0	15	0.000E+00	76,030,833	20,274,889	3.75	5.069E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.20	109	0.00 ± #DIV/0!			
no.33	Ext.S	0	20	0.000E+00	92,071,138	18,414,228	5.00	4.604E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.24	99	0.00 ± #DIV/0!			
no.34	Ext.S	0	20	0.000E+00	71,753,650	14,350,730	5.00	3.588E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.19	77	0.00 ± #DIV/0!			
no.35	Ext.S	0	16	0.000E+00	87,290,367	21,822,592	4.00	5.456E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.23	118	0.00 ± #DIV/0!			
no.36	Ext.S	1	24	4.167E+04	333,127,630	55,521,272	6.00	1.388E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.02	300	0.38 ± 0.38			
no.37	Ext.S	0	8	0.000E+00	72,901,050	36,450,525	2.00	9.113E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.19	197	0.00 ± #DIV/0!			
no.38	Ext.S	0	18	0.000E+00	48,599,652	10,799,923	4.50	2.700E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.13	58	0.00 ± #DIV/0!			
no.39	Ext.S	0	10	0.000E+00	34,273,693	13,709,477	2.50	3.427E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.09	74	0.00 ± #DIV/0!			
no.40	Ext.S	0	14	0.000E+00	230,837,311	65,953,517	3.50	1.649E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.61	356	0.00 ± #DIV/0!			
no.41	Ext.S	0	11	0.000E+00	143,723,989	52,263,269	2.75	1.307E+13	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.38	282	0.00 ± #DIV/0!			
no.42	Ext.S	0	33	0.000E+00	217,080,397	26,312,775	8.25	6.578E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.57	142	0.00 ± #DIV/0!			
no.43	Ext.S	0	8	0.000E+00	35,625,520	17,812,760	2.00	4.453E+12	13,713,470	4.00	3.428E+12	0.09	96	0.00 ± #DIV/0!			
no.44	Ext.S	0	20	0.000E+00	16												

1-2. 船久保タフ FT年代分析結果一覧表

Table.1-2 Results of fission-track dating of zircon samples by Thermo iCAP using 91500 standard

LA-ICP-MS Data													LA-ICP-MS-FT Age			
(1)	(2)	Fission Track Data			Sample			91500 standard (5)			(6)	(7), (8), (9)			(10)	
Sample / Grain No	Method	Ns	Count Area	ps	(3)	N _{U-sp}	(4)	ρ _{U-sp}	N _{U-std}	LA spot area	ρ _{U-std}	Pr (χ ²)	U _{ICP}	Age (Ma)		
		(10 ⁻⁶ cm ²)	(cm ⁻²)	area-corrected N _{U-sp}	area correction value	(cm ⁻²)	(10 ⁻⁶ cm ²)	(cm ⁻²)	(%)	(ppm)	t	±	1 σ			
no.1	2	1	48	2.083E+04	860,699,150	71,724,929	12.00	1.793E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.70	387	0.1	±	0.1
no.2	2	0	12	0.000E+00	120,707,836	40,235,945	3.00	1.006E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.32	217	0.0	±	#DIV/0!
no.3	2	9	60	1.500E+05	1,000,809,266	66,720,618	15.00	1.668E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	15.47	360	1.2	±	0.4
no.4	2	1	30	3.333E+04	282,778,584	37,703,811	7.50	9.426E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.09	203	0.5	±	0.5
no.5	2	0	36	0.000E+00	151,921,022	16,880,114	9.00	4.220E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.40	91	0.0	±	#DIV/0!
no.6	2	0	15	0.000E+00	131,643,093	35,104,825	3.75	8.776E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.35	189	0.0	±	#DIV/0!
no.7	2	0	36	0.000E+00	377,248,276	41,916,475	9.00	1.048E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.99	226	0.0	±	#DIV/0!
no.8	2	0	11	0.000E+00	62,078,813	22,574,114	2.75	5.644E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.16	122	0.0	±	#DIV/0!
no.9	2	0	30	0.000E+00	223,383,345	29,784,446	7.50	7.446E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.59	161	0.0	±	#DIV/0!
no.10	2	0	10	0.000E+00	26,493,062	10,597,225	2.50	2.649E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.07	57	0.0	±	#DIV/0!
no.11	2	1	17	5.882E+04	115,070,455	27,075,401	4.25	6.769E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	1.61	146	1.1	±	1.1
no.12	2	0	18	0.000E+00	119,861,284	26,635,841	4.50	6.659E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.31	144	0.0	±	#DIV/0!
no.13	2	0	34	0.000E+00	134,977,237	15,879,675	8.50	3.970E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.35	86	0.0	±	#DIV/0!
no.14	2	1	54	1.852E+04	520,482,121	38,554,231	13.50	9.639E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.10	208	0.2	±	0.2
no.15	2	0	44	0.000E+00	316,259,459	28,750,860	11.00	7.188E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.83	155	0.0	±	#DIV/0!
no.16	2	1	40	2.500E+04	425,866,488	42,586,649	10.00	1.065E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.01	230	0.3	±	0.3
no.17	2	0	12	0.000E+00	54,521,851	18,173,950	3.00	4.543E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.14	98	0.0	±	#DIV/0!
no.18	2	1	12	8.333E+04	69,399,549	23,133,183	3.00	5.783E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	3.67	125	1.8	±	1.8
no.19	2	0	27	0.000E+00	46,601,118	6,903,869	6.75	1.726E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.12	37	0.0	±	#DIV/0!
no.20	2	0	36	0.000E+00	201,719,104	22,413,234	9.00	5.603E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.53	121	0.0	±	#DIV/0!
no.21	2	0	36	0.000E+00	279,534,319	31,059,369	9.00	7.765E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.73	168	0.0	±	#DIV/0!
no.22	2	1	36	2.778E+04	172,463,124	19,162,569	9.00	4.791E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.66	103	0.7	±	0.7
no.23	2	1	38	2.632E+04	196,539,397	20,688,358	9.50	5.172E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.45	112	0.7	±	0.7
no.24	2	0	20	0.000E+00	86,379,296	17,275,859	5.00	4.319E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.23	93	0.0	±	#DIV/0!
no.25	2	0	24	0.000E+00	172,939,636	28,823,273	6.00	7.206E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.45	156	0.0	±	#DIV/0!
no.26	2	1	34	2.941E+04	109,507,800	12,883,271	8.50	3.221E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	1.77	70	1.2	±	1.2
no.27	2	0	15	0.000E+00	91,886,535	24,503,076	3.75	6.126E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.24	132	0.0	±	#DIV/0!
no.28	2	0	12	0.000E+00	47,349,468	15,783,156	3.00	3.946E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.12	85	0.0	±	#DIV/0!
no.29	2	0	16	0.000E+00	119,799,388	29,949,847	4.00	7.487E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.31	162	0.0	±	#DIV/0!
no.30	2	0	6	0.000E+00	49,471,774	32,981,183	1.50	8.245E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.13	178	0.0	±	#DIV/0!
no.31	2	0	32	0.000E+00	183,726,430	22,965,804	8.00	5.741E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.48	124	0.0	±	#DIV/0!
no.32	2	0	15	0.000E+00	76,030,833	20,274,889	3.75	5.069E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.20	109	0.0	±	#DIV/0!
no.33	2	0	20	0.000E+00	92,071,138	18,414,228	5.00	4.604E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.24	99	0.0	±	#DIV/0!
no.34	2	0	20	0.000E+00	71,753,650	14,350,730	5.00	3.588E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.19	77	0.0	±	#DIV/0!
no.35	2	0	16	0.000E+00	87,290,367	21,822,592	4.00	5.456E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.23	118	0.0	±	#DIV/0!
no.36	2	1	24	4.167E+04	333,127,630	55,521,272	6.00	1.388E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.02	300	0.4	±	0.4
no.37	2	0	8	0.000E+00	72,901,050	36,450,525	2.00	9.113E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.19	197	0.0	±	#DIV/0!
no.38	2	0	18	0.000E+00	48,599,652	10,799,923	4.50	2.700E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.13	58	0.0	±	#DIV/0!
no.39	2	0	10	0.000E+00	34,273,693	13,709,477	2.50	3.427E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.09	74	0.0	±	#DIV/0!
no.40	2	0	14	0.000E+00	230,837,311	65,953,517	3.50	1.649E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.61	356	0.0	±	#DIV/0!
no.41	2	0	11	0.000E+00	143,723,989	52,263,269	2.75	1.307E+13	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.38	282	0.0	±	#DIV/0!
no.42	2	0	33	0.000E+00	217,080,397	26,312,775	8.25	6.578E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.57	142	0.0	±	#DIV/0!
no.43	2	0	8	0.000E+00	35,625,520	17,812,760	2.00	4.453E+12	13,713,470	4.000	3.428E+12	0.09	96	0.0	±	#DIV/0!
no.44	2	0	20	0.000E+00	163,543,025	32,708,605										

1-1. 船久保タフ U-Pb年代分析結果

Table. 1-1 U-Pb isotopic date for zircon crystals determined by LA-ICP-MS

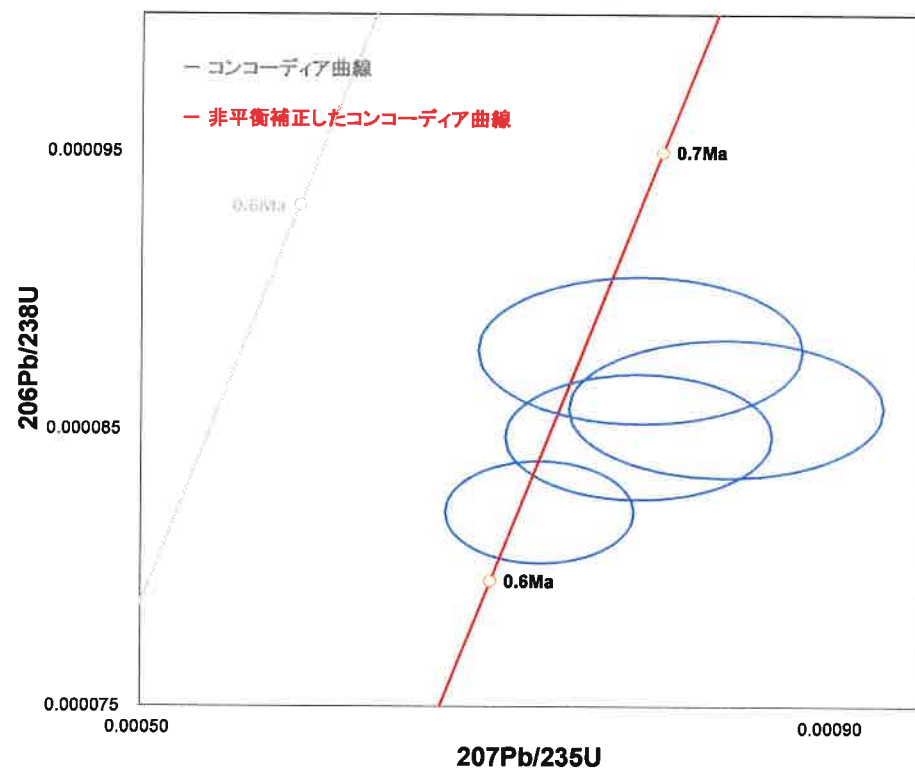
		Total count					Isotopic ratios					fTh/U 0.194 ± 0.014		fPa/U 3.36 ± 0.2			
No.	sample name	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²³² Th	²³⁵ U	²³⁸ U	Th	²⁰⁷ Pb	Error	²⁰⁶ Pb	Error	²⁰⁷ Pb	Error	Disc. *	Disequilibrium corrected age (Ma)	Error	f 206%
							U	²⁰⁶ Pb	²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	²³⁸ U	²⁰⁷ Pb	²³⁵ U		²³⁶ Pb	²³⁵ U	
1	1 船久保タフTef.3ES no.1	17960	535	17716065	520198	71724929	1.09	0.04068 ± 0.00357	0.000086 ± 0.000002	0.00048 ± 0.00004	55	0.64 ± 0.01	0.38 ± 0.04	-1			
2	2 船久保タフTef.3ES no.2	12231	686	11389019	291819	40235945	1.25	0.07667 ± 0.00602	0.000104 ± 0.000003	0.00110 ± 0.00009	-19	0.76 ± 0.02	1.01 ± 0.09	4			
3	3 船久保タフTef.3ES no.3	15933	753	29204242	483904	66720618	1.93	0.06454 ± 0.00482	0.000082 ± 0.000002	0.00073 ± 0.00005	concordant	0.62 ± 0.01	0.63 ± 0.06	2			
4	4 船久保タフTef.3ES no.4	8941	504	10041669	273454	37703811	1.17	0.07705 ± 0.00706	0.000081 ± 0.000002	0.00087 ± 0.00008	-10	0.61 ± 0.01	0.77 ± 0.08	4			
5	5 船久保タフTef.3ES no.5	4462	373	2778961	122426	16880114	0.73	0.11417 ± 0.01232	0.000091 ± 0.000003	0.00143 ± 0.00015	-73	0.67 ± 0.02	1.34 ± 0.15	9			
6	6 船久保タフTef.3ES no.6	8661	427	12145190	254604	35104825	1.53	0.06735 ± 0.00668	0.000085 ± 0.000002	0.00079 ± 0.00008	concordant	0.63 ± 0.01	0.69 ± 0.08	3			
7	7 船久保タフTef.3ES no.7	11207	726	18407522	304007	41916475	1.94	0.08854 ± 0.00679	0.000092 ± 0.000002	0.00112 ± 0.00008	-36	0.68 ± 0.01	1.03 ± 0.09	5			
8	8 船久保タフTef.3ES no.8	6386	695	5954395	163723	22574114	1.16	0.14864 ± 0.01189	0.000097 ± 0.000003	0.00199 ± 0.00015	-143	0.71 ± 0.02	1.91 ± 0.16	13			
9	9 船久保タフTef.3ES no.9	8870	627	9170509	216017	29784446	1.36	0.09655 ± 0.00799	0.000102 ± 0.000003	0.00136 ± 0.00011	-53	0.75 ± 0.02	1.27 ± 0.11	6			
10	10 船久保タフTef.3ES no.10	3130	373	1733193	76858	10597225	0.72	0.16298 ± 0.01786	0.000101 ± 0.000004	0.00228 ± 0.00024	-161	0.74 ± 0.03	2.20 ± 0.24	15			
11	11 船久保タフTef.3ES no.11	8616	1037	7353992	196369	27075401	1.20	0.16451 ± 0.01083	0.000109 ± 0.000003	0.00248 ± 0.00016	-181	0.79 ± 0.02	2.40 ± 0.16	15			
12	12 船久保タフTef.3ES no.12	6753	558	5471346	193181	26635841	0.91	0.11280 ± 0.00995	0.000087 ± 0.000003	0.00136 ± 0.00012	-74	0.65 ± 0.02	1.26 ± 0.12	8			
13	13 船久保タフTef.3ES no.13	4927	864	3964892	115170	15879675	1.10	0.23965 ± 0.01770	0.000107 ± 0.000003	0.00352 ± 0.00025	-311	0.77 ± 0.02	3.46 ± 0.25	25			
14	14 船久保タフTef.3ES no.14	35715	16091	7641034	279622	38554231	0.87	0.61557 ± 0.01192	0.000318 ± 0.000006	0.02702 ± 0.00059	-1131	2.14 ± 0.04	26.95 ± 0.59	72			
15	15 船久保タフTef.3ES no.15	8161	716	7005272	208521	28750860	1.07	0.11987 ± 0.00936	0.000098 ± 0.000003	0.00161 ± 0.00012	-93	0.72 ± 0.02	1.52 ± 0.13	9			
16	16 船久保タフTef.3ES no.16	10522	586	9049275	308867	42586649	0.94	0.07607 ± 0.00646	0.000085 ± 0.000002	0.00089 ± 0.00007	-10	0.63 ± 0.01	0.79 ± 0.08	4			
17	17 船久保タフTef.3ES no.17	5506	289	3815760	131810	18173950	0.93	0.07160 ± 0.00865	0.000104 ± 0.000003	0.00103 ± 0.00012	-4	0.76 ± 0.02	0.93 ± 0.12	3			
18	18 船久保タフTef.3ES no.18	10062	501	3839408	167778	23133183	0.73	0.06805 ± 0.00623	0.000149 ± 0.000004	0.00140 ± 0.00013	-10	1.05 ± 0.02	1.31 ± 0.13	3			
19	19 船久保タフTef.3ES no.19	1999	216	916760	50072	6903869	0.59	0.14769 ± 0.02116	0.000099 ± 0.000005	0.00203 ± 0.00028	-124	0.73 ± 0.03	1.94 ± 0.28	13			
20	20 船久保タフTef.3ES no.20	6570	344	4707344	162556	22413234	0.93	0.07156 ± 0.00792	0.000101 ± 0.000003	0.00099 ± 0.00011	-4	0.74 ± 0.02	0.90 ± 0.11	3			
21	21 船久保タフTef.3ES no.21	5690	397	10846074	225264	31059369	1.54	0.09545 ± 0.00991	0.000063 ± 0.000002	0.00083 ± 0.00008	-29	0.49 ± 0.01	0.73 ± 0.09	6			
22	22 船久保タフTef.3ES no.22	5268	278	5442081	138980	19162569	1.26	0.07223 ± 0.00889	0.000095 ± 0.000003	0.00095 ± 0.00011	-2	0.70 ± 0.02	0.85 ± 0.12	3			
23	23 船久保タフTef.3ES no.23	4722	409	4836841	150046	20688358	1.03	0.11846 ± 0.01222	0.000079 ± 0.000002	0.00129 ± 0.00013	-76	0.60 ± 0.02	1.19 ± 0.13	9			
24	24 船久保タフTef.3ES no.24	4311	295	4894066	125296	17275859	1.25	0.09363 ± 0.01127	0.000086 ± 0.000003	0.00111 ± 0.00013	-35	0.64 ± 0.02	1.02 ± 0.13	6			
25	25 船久保タフTef.3ES no.25	7760	548	5288171	209046	28823273	0.81	0.09658 ± 0.00855	0.000093 ± 0.000002	0.00124 ± 0.00011	-49	0.69 ± 0.01	1.14 ± 0.11	6			
26	26 船久保タフTef.3ES no.26	3449	229	2245590	93438	12883271	0.77	0.09069 ± 0.01239	0.000092 ± 0.000003	0.00116 ± 0.00015	-29	0.68 ± 0.02	1.06 ± 0.16	6			
27	27 船久保タフTef.3ES no.27	7223	477	6700372	177713	24503076	1.21	0.09034 ± 0.00855	0.000102 ± 0.000002	0.00127 ± 0.00012	-40	0.74 ± 0.02	1.17 ± 0.12	6			
28	28 船久保タフTef.3ES no.28	3688	369	2761133	114470	15783156	0.77	0.13664 ± 0.01494	0.000081 ± 0.000003	0.00152 ± 0.00016	-106	0.61 ± 0.02	1.43 ± 0.16	12			
29	29 船久保タフTef.3ES no.29	10316	2240	11362523	217217	29949847	1.68	0.29680 ± 0.01390	0.000119 ± 0.000002	0.00487 ± 0.00021	-437	0.85 ± 0.02	4.82 ± 0.21	32			
30	30 船久保タフTef.3ES no.30	8603	453	10517266	239202	32981183	1.41	0.07204 ± 0.00695	0.000090 ± 0.000002	0.00089 ± 0.00008	-4	0.67 ± 0.01	0.80 ± 0.09	3			
31	31 船久保タフTef.3ES no.31	5291	363	7129106	166564	22965804	1.37	0.09378 ± 0.01019	0.000080 ± 0.000002	0.00103 ± 0.00011	-34	0.60 ± 0.01	0.93 ± 0.11	6			
32	32 船久保タフTef.3ES no.32	5417	335	4303877	147047	20274889	0.94	0.08454 ± 0.00953	0.000092 ± 0.000003	0.00108 ± 0.00012	-23	0.68 ± 0.02	0.98 ± 0.12	5			
33	33 船久保タフTef.3ES no.33	6013	866	3947900	133553	18414228	0.95	0.19685 ± 0.01434	0.000113 ± 0.000003	0.00306 ± 0.00021	-239	0.81 ± 0.02	2.99 ± 0.21	19			
34	34 船久保タフTef.3ES no.34	3690	91	3118418	104081	14350730	0.96	0.03371 ± 0.00715	0.000089 ± 0.000003	0.00041 ± 0.00009	80	0.66 ± 0.02	0.31 ± 0.09	-2			
35	35 船久保タフTef.3ES no.35	5154	334	5654776	158272	21822592	1.15	0.08850 ± 0.01001	0.000082 ± 0.000002	0.00099 ± 0.00011	-26	0.61 ± 0.02	0.90 ± 0.11	5			
36	36 船久保タフTef.3ES no.36	14872	552	28069391	402678	55521272	2.24	0.05072 ± 0.00440	0.000092 ± 0.000002	0.00065 ± 0.00006	13	0.68 ± 0.01	0.54 ± 0.06	1			
37	37 船久保タフTef.3ES no.37	11033	513	12785083	264364	36450525	1.55	0.06356 ± 0.00575	0.000104 ± 0.000002	0.00092 ± 0.00008	concordant	0.76 ± 0.01	0.82 ± 0.08	2			
38	38 船久保タフTef.3ES no.38	2869	108	1794532	78328	10799923	0.74	0.05141 ± 0.01008	0.000092 ± 0.000003	0.00065 ± 0.00013	concordant	0.68 ± 0.02	0.55 ± 0.13	1			
39	39 船久保タフTef.3ES no.39	3493	246	2079054	99431	13709477	0.67	0.09619 ± 0.01270	0.000088 ± 0.000003	0.00117 ± 0.00015	-38	0.65 ± 0.02	1.07 ± 0.15	6			
40	40 船久保タフTef.3ES no.40	20940	1539	37651451	478340	65953517	2.53										

1-2. 船久保タフ U-Pb年代測定結果

Table. 1-2 U-Pb isotopic date for zircon crystals determined by LA-ICP-MS

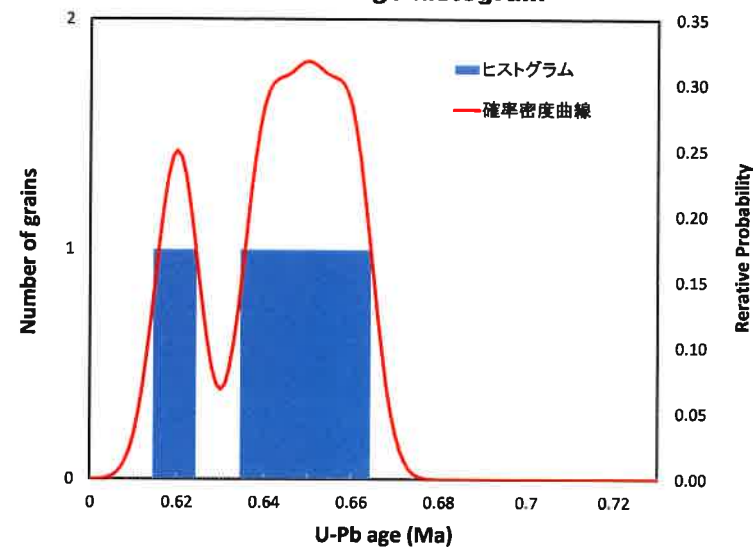
sample name	Total count						Isotopic ratios						Disc.*	Disequilibrium corrected age (Ma)				
	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²³² Th	²³⁵ U	²³⁸ U	Th	²⁰⁷ Pb	Error	²⁰⁶ Pb	Error	²⁰⁷ Pb	Error		²⁰⁶ Pb	Error	²⁰⁷ Pb	Error	
	U						²⁰⁶ Pb	2σ	²³⁸ U	2σ	²³⁵ U	2σ		²³⁸ U	2σ	²³⁵ U	2σ	
船久保タフTef.3ES no.3	15933	753	29204242	483904	66720618	1.93	0.0645 ± 0.0048	0.00008 ± 0.000002	0.00073 ± 0.00005	concordant	0.62 ± 0.01	0.63 ± 0.06						
船久保タフTef.3ES no.6	8661	427	12145190	254604	35104825	1.53	0.0673 ± 0.0067	0.00008 ± 0.000002	0.00079 ± 0.00008	concordant	0.63 ± 0.01	0.69 ± 0.08						
船久保タフTef.3ES no.65	6832	354	8106504	202765	27957230	1.29	0.0708 ± 0.0077	0.00009 ± 0.000002	0.00084 ± 0.00009	concordant	0.64 ± 0.02	0.74 ± 0.09						
船久保タフTef.3ES no.67	6176	294	5843199	178888	24665033	1.06	0.0650 ± 0.0078	0.00009 ± 0.000003	0.00079 ± 0.00009	concordant	0.65 ± 0.02	0.69 ± 0.10						
Average ± 2SD											0.64 ± 0.03	0.69 ± 0.09						
Weighted average											0.63 ± 0.01	0.67 ± 0.04						

CONCORDIA PLOT



年代(Ma)	粒子数	基本統計量	206Pb 238U	207Pb 235U
0.6	0	平均	0.64	0.69
0.6	0	標準誤差	0.00	0.01
0.6	0	中央値	0.64	0.69
0.6	1	標準偏差	0.02	0.04
0.6	0	分散	0.00	0.00
0.7	1	範囲	0.04	0.11
0.7	1	最小	0.62	0.63
0.7	1	最大	0.65	0.74
0.7	0	標本数	4	4
0.7	0	信頼区間(95.0%)	0.02	0.04
0.7	0			

206Pb/238U age histogram

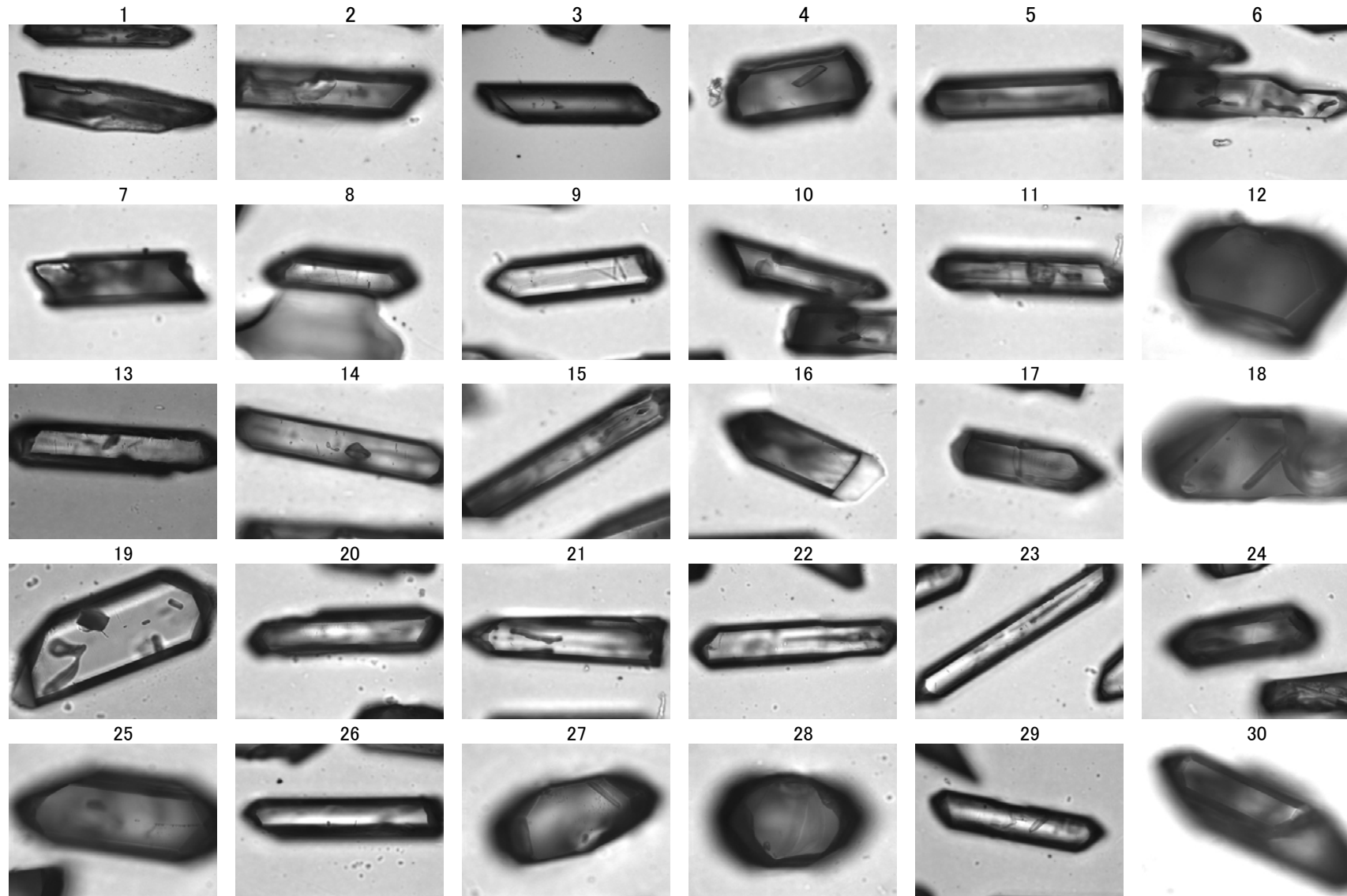


1-1. 船久保タフ U-Pb年代測定結果

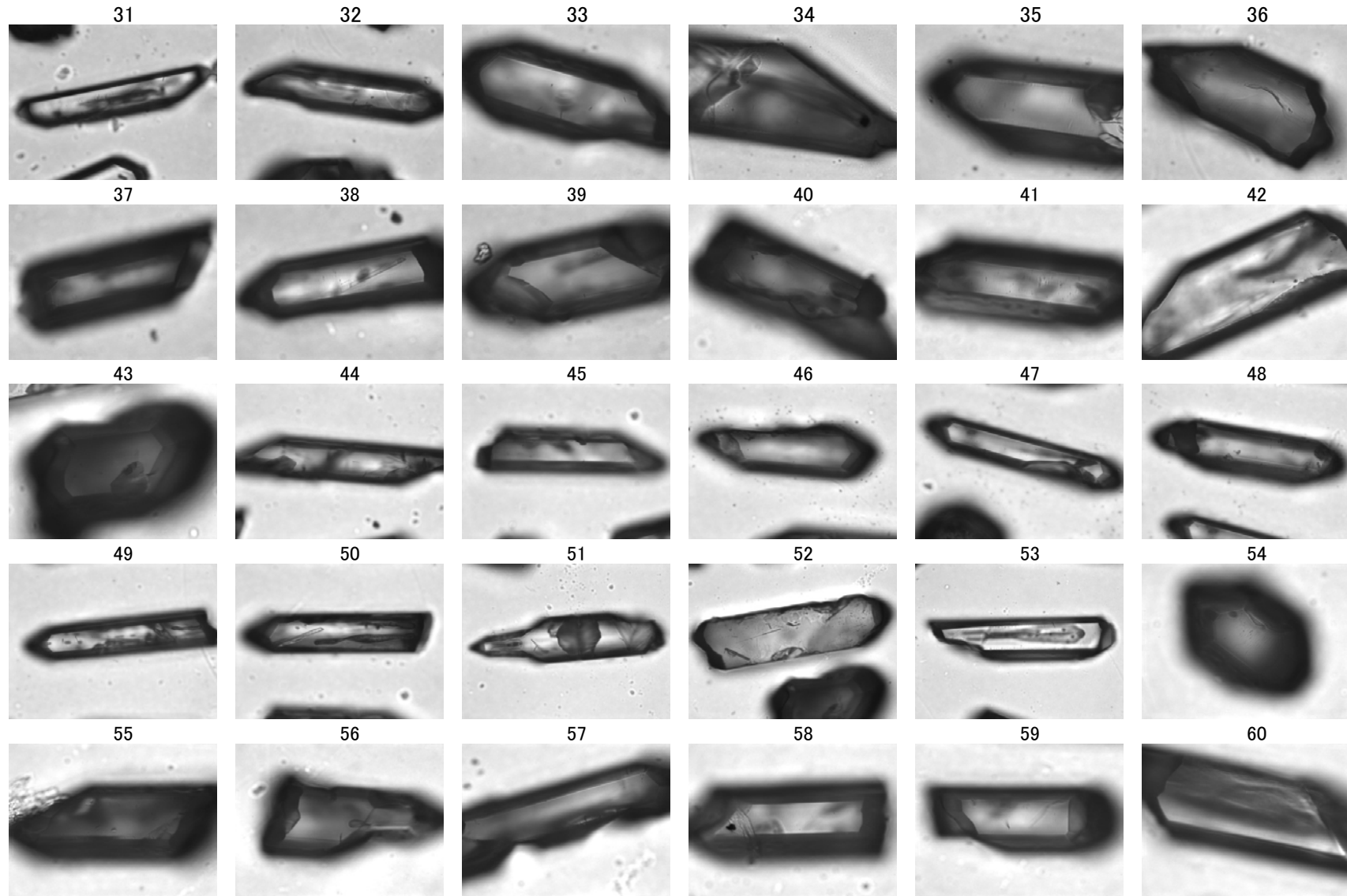
Table 1-1 U-Pb isotopic data for zircon crystals determined by LA-ICP-MS

D214 0.194 ± 0.014															Pb206 3.36 ± 0.2				
No.	sample name	Total count			Isotopic ratios			Error			Disc.			Error			Error		
		206Pb	207Pb	232Th	236U	Th	206Pb	Error	207Pb	Error	206Pb	Error	207Pb	Error	206Pb	Error	207Pb	Error	
1	船久保タフ	17980	536	17718065	520198	71724929	1.09	0.0407	± 0.0008	0.000086	± 0.000002	0.0005	± 0.0000	55	0.84	± 0.01	0.38	± 0.04	
2	船久保タフ	12231	686	11389019	291819	40235645	1.25	0.0767	± 0.0080	0.000104	± 0.000003	0.0011	± 0.0001	-19	0.76	± 0.02	1.01	± 0.09	
3	船久保タフ	15933	753	26204242	483904	68720818	1.93	0.0645	± 0.0048	0.000082	± 0.000002	0.0007	± 0.0001	concordant	0.62	± 0.01	0.63	± 0.06	
4	船久保タフ	8941	304	10041888	273454	37703811	1.77	0.0770	± 0.0071	0.000081	± 0.000003	0.0009	± 0.0001	-10	0.61	± 0.01	0.77	± 0.08	
5	船久保タフ	4462	373	2778981	122426	16890114	0.73	0.1142	± 0.0123	0.000091	± 0.000003	0.0014	± 0.0001	-73	0.67	± 0.02	1.34	± 0.15	
6	船久保タフ	8661	427	12145180	254604	35104825	1.53	0.0873	± 0.0087	0.000085	± 0.000002	0.0008	± 0.0001	concordant	0.63	± 0.01	0.69	± 0.06	
7	船久保タフ	11207	728	18407522	304007	41916475	1.94	0.0895	± 0.0088	0.000092	± 0.000002	0.0011	± 0.0001	-36	0.68	± 0.01	1.03	± 0.09	
8	船久保タフ	6387	685	5984395	163723	22574114	1.94	0.1485	± 0.0119	0.000097	± 0.000003	0.0014	± 0.0001	-143	0.71	± 0.02	1.91	± 0.18	
9	船久保タフ	8870	627	9170509	218017	29764446	1.36	0.0865	± 0.0080	0.000102	± 0.000003	0.0010	± 0.0001	-53	0.75	± 0.02	1.27	± 0.11	
10	船久保タフ	3130	373	1733193	76858	10597225	0.72	0.1630	± 0.0179	0.000101	± 0.000004	0.0023	± 0.0002	-181	0.74	± 0.03	2.20	± 0.24	
11	船久保タフ	8616	1037	7353692	196389	27075401	1.20	0.1845	± 0.0108	0.000109	± 0.000003	0.0010	± 0.0001	-181	0.79	± 0.02	2.40	± 0.18	
12	船久保タフ	6753	558	5471346	193181	28635641	0.91	0.1128	± 0.0089	0.000097	± 0.000003	0.0014	± 0.0001	-74	0.65	± 0.02	1.26	± 0.12	
13	船久保タフ	4927	864	3864892	115170	15679575	1.10	0.2387	± 0.0177	0.000107	± 0.000003	0.0036	± 0.0002	-311	0.77	± 0.02	3.46	± 0.25	
14	船久保タフ	36715	16081	7841034	279822	38554231	0.87	0.1156	± 0.0119	0.000318	± 0.000006	0.0010	± 0.0001	-1131	2.14	± 0.04	26.95	± 0.59	
15	船久保タフ	8181	716	7005272	208521	28750860	1.07	0.1189	± 0.0084	0.000098	± 0.000003	0.0018	± 0.0001	-93	0.72	± 0.02	1.52	± 0.13	
16	船久保タフ	10522	585	9349275	308887	4286949	0.94	0.0719	± 0.0079	0.000101	± 0.000003	0.0010	± 0.0001	-10	0.63	± 0.01	0.79	± 0.08	
17	船久保タフ	6508	289	3815760	131810	18173650	0.83	0.0716	± 0.0087	0.000104	± 0.000003	0.0010	± 0.0001	-4	0.78	± 0.02	0.83	± 0.12	
18	船久保タフ	10082	501	3839408	187778	2313183	0.73	0.0680	± 0.0082	0.000149	± 0.000004	0.0014	± 0.0001	-10	1.05	± 0.02	1.31	± 0.13	
19	船久保タフ	1899	218	916780	50072	6803989	0.59	0.1477	± 0.0212	0.000099	± 0.000005	0.0010	± 0.0001	-124	0.73	± 0.03	1.94	± 0.28	
20	船久保タフ	4311	344	8571344	225256	22413254	0.93	0.1004	± 0.0085	0.000110	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-80	0.74	± 0.02	1.40	± 0.11	
21	船久保タフ	5980	387	10646074	225264	31058369	0.54	0.0854	± 0.0089	0.000093	± 0.000002	0.0008	± 0.0001	-29	0.48	± 0.01	0.73	± 0.09	
22	船久保タフ	5268	278	5442081	138980	19162569	1.28	0.0722	± 0.0089	0.000085	± 0.000003	0.0009	± 0.0001	-2	0.70	± 0.02	0.85	± 0.12	
23	船久保タフ	4722	408	4838841	150048	20883558	1.03	0.1165	± 0.0122	0.000079	± 0.000002	0.0013	± 0.0001	-76	0.60	± 0.02	1.19	± 0.13	
24	船久保タフ	4311	344	8571344	225256	22413254	0.93	0.1004	± 0.0085	0.000110	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-80	0.74	± 0.02	1.40	± 0.11	
25	船久保タフ	7780	548	5288171	208046	28852373	0.81	0.0868	± 0.0085	0.000093	± 0.000002	0.0012	± 0.0001	-49	0.89	± 0.01	1.14	± 0.11	
26	船久保タフ	3449	229	2245560	93438	12883271	0.77	0.0907	± 0.0124	0.000092	± 0.000003	0.0012	± 0.0002	-29	0.68	± 0.02	1.06	± 0.16	
27	船久保タフ	7223	477	6700372	177713	24503076	1.21	0.0903	± 0.0085	0.000102	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-40	0.74	± 0.02	1.17	± 0.12	
28	船久保タフ	4686	389	27811351	114470	15783158	0.77	0.1366	± 0.0044	0.000081	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-108	0.68	± 0.02	1.04	± 0.16	
29	船久保タフ	10318	2240	11362523	217217	26498947	0.68	0.2988	± 0.0138	0.000119	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-437	0.85	± 0.02	4.82	± 0.21	
30	船久保タフ	8603	453	10517286	238202	32981183	1.41	0.0720	± 0.0070	0.000080	± 0.000002	0.0009	± 0.0001	-4	0.67	± 0.01	0.80	± 0.09	
31	船久保タフ	5291	363	7129108	169584	22985804	1.37	0.0938	± 0.0102	0.000080	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-34	0.60	± 0.01	0.93	± 0.11	
32	船久保タフ	5417	433	4303877	102787	14027486	0.94	0.0945	± 0.0085	0.000092	± 0.000003	0.0010	± 0.0001	-22	0.68	± 0.02	0.98	± 0.12	
33	船久保タフ	6013	866	3847800	133553	18414228	0.95	0.1968	± 0.0143	0.000113	± 0.000003	0.0010	± 0.0002	-239	0.81	± 0.02	2.99	± 0.21	
34	船久保タフ	3690	91	1318418	104081	14350730	0.98	0.0337	± 0.0072	0.000089	± 0.000003	0.0004	± 0.0001	80	0.66	± 0.02	0.31	± 0.09	
35	船久保タフ	5194	334	5654778	158272	21822882	1.15	0.0885	± 0.0100	0.000082	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-28	0.61	± 0.02	0.90	± 0.11	
36	船久保タフ	14392	562	26089391	402678	55202122	2.24	0.0907	± 0.0044	0.000092	± 0.000002	0.0008	± 0.0001	13	0.68	± 0.01	0.54	± 0.08	
37	船久保タフ	11033	513	12785083	284364	36450525	1.55	0.0636	± 0.0057	0.000104	± 0.000002	0.0009	± 0.0001	concordant	0.78	± 0.01	0.82	± 0.08	
38	船久保タフ	2869	108	1794532	78328	10789923	0.74	0.0514	± 0.0101	0.000092	± 0.000003	0.0007	± 0.0001	concordant	0.68	± 0.02	0.55	± 0.13	
39	船久保タフ	3483	246	2079054	98431	13709477	0.67	0.0862	± 0.0127	0.000098	± 0.000003	0.0012	± 0.0001	-38	0.65	± 0.02	1.07	± 0.15	
40	船久保タフ	20940	1539	4786501	145240	26533517	1.53	0.0941	± 0.0053	0.000110	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-48	0.91	± 0.01	1.34	± 0.09	
41	船久保タフ	6222	306	12550478	379049	52263269	1.07	0.0871	± 0.0079	0.000091	± 0.000001	0.0004	± 0.0000	7	0.35	± 0.01	0.28	± 0.05	
42	船久保タフ	10119	523	4810306	190838	26312775	0.81	0.0707	± 0.0084	0.000133	± 0.000003	0.0013	± 0.0001	-13	0.95	± 0.02	1.21	± 0.12	
43	船久保タフ	3872	269	2902389	129190	17912780	0.73	0.1272	± 0.0140	0.000075	± 0.000003	0.0013	± 0.0001	-87	0.57	± 0.02	1.23	± 0.14	
44	船久保タフ	4408	469	7402153	227153	3070895	1.01	0.1455	± 0.0142	0.000047	± 0.000002	0.0009	± 0.0001	-91	0.39	± 0.01	0.84	± 0.09	
45	船久保タフ	6245	371	4374349	144314	19889007	0.98	0.0812	± 0.0087	0.000109	± 0.000003	0.0012	± 0.0001	-23	0.79	± 0.02	1.12	± 0.13	
46	船久保タフ	3183	175	1634251	76785	10587104	0.69	0.0751	± 0.0117	0.000104	± 0.000004	0.0011	± 0.0002	-4	0.78	± 0.03	0.98	± 0.17	
47	船久保タフ	11754	4423	3327988	116589	16486788	0.90	0.5145	± 0.0184	0.000247	± 0.000008	0.0175	± 0.0008	-908	1.98	± 0.04	17.54	± 0.60	
48	船久保タフ	4408	469	7402153	227153	3070895	1.01	0.1455	± 0.0142	0.000047	± 0.000002	0.0009	± 0.0001	-91	0.39	± 0.01	0.84	± 0.09	
49	船久保タフ	9307	1422	3887653	114223	15749057	1.10	0.2089	± 0.0102	0.000026	± 0.000005	0.0009	± 0.0003	-290	1.41	± 0.03	5.86	± 0.33	
50	船久保タフ	14300	551	1770285	98702	1302248	0.62	0.0728	± 0.0103	0.000093	± 0.000002	0.0010	± 0.0001	-213	0.74	± 0.01	0.91	± 0.11	
51	船久保タフ	9400	2548	14076940	31231	44332272	1.41	0.2514	± 0.0107	0.000113	± 0.000002	0.0039	± 0.0002	-360	0.81	± 0.02	3.94	± 0.17	
52	船久保タフ	4000	2540	2891528	117488	16020298	1.74	0.0867	± 0.0098	0.000887	± 0.000014	0.0102	± 0.0004	-73	0.61	± 0.09	1.20	± 0.44	
53	船久保タフ	4188	387	1078760	167876	18512468	1.18	0.0731	± 0.0078	0.000080	± 0.000006	0.0008	± 0.0008	807	0.75	± 0.04	1.88	± 0.45	
54	船久保タフ	6287	377	2887287	223169	28510528													

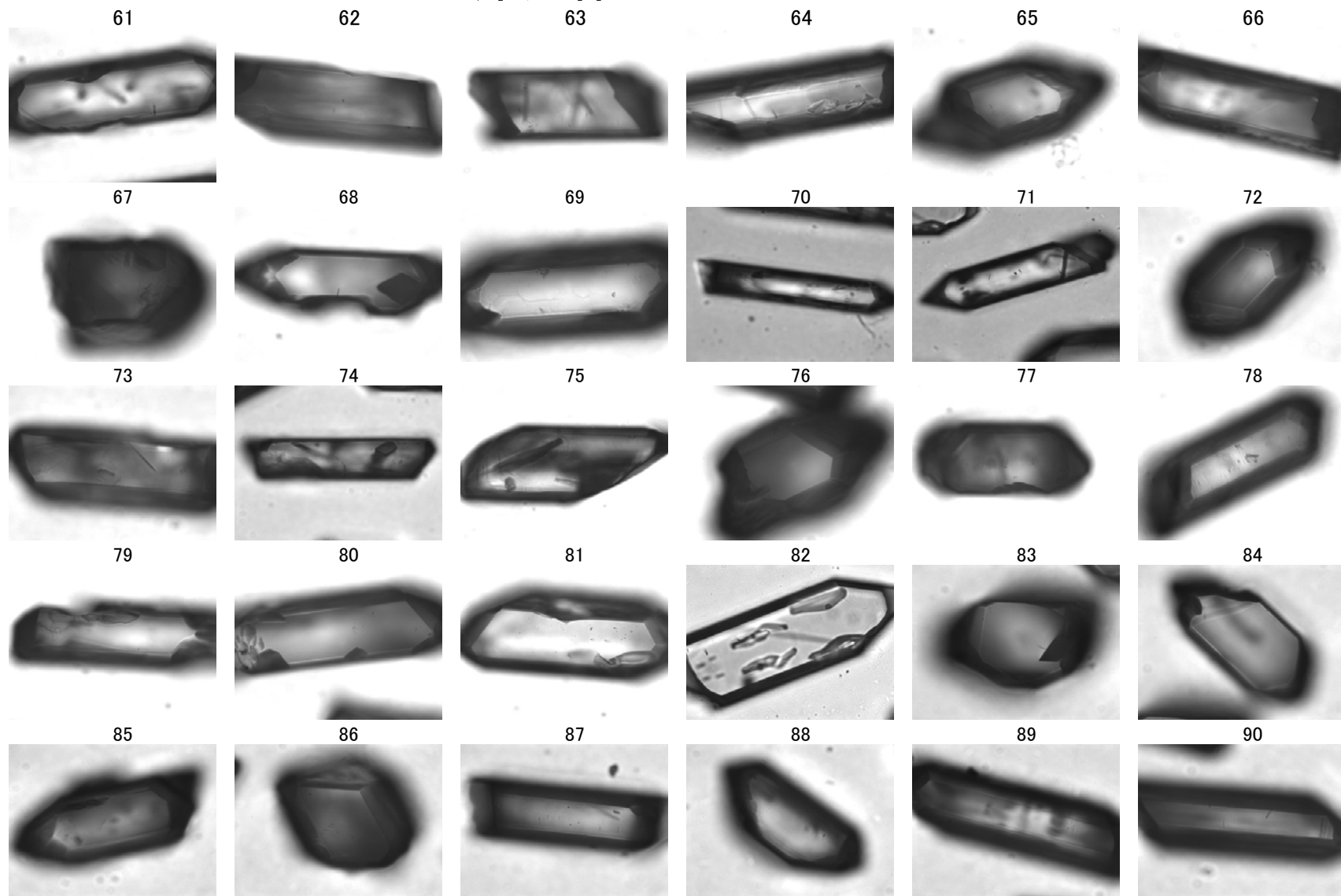
船久保タフ no.01-30



船久保タフ no.31-60

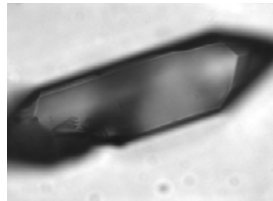


船久保タフ no.61-90

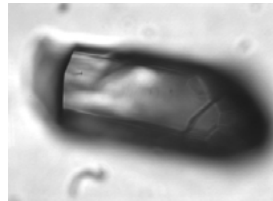


船久保タフ no.91-100

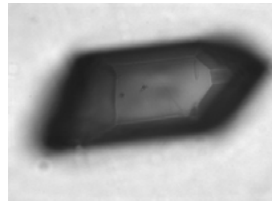
91



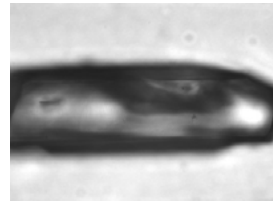
92



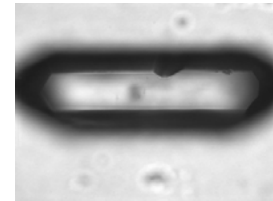
93



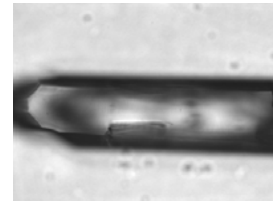
94



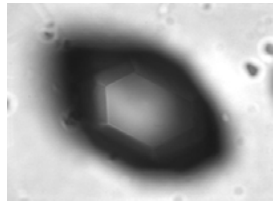
95



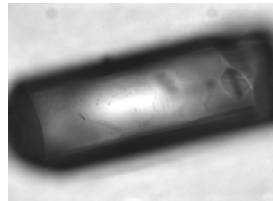
96



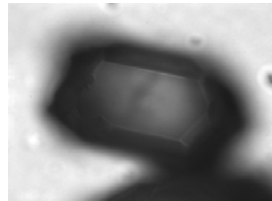
97



98



99



100

