報告

広島県三原市西部に分布する未命名古第三系のジルコン U–Pb 年代

Zircon U–Pb ages of the Paleogene formation in the western part of Mihara City, Hiroshima Prefecture

山崎博史* 久森洸希**† 檀原 徹***
岩野英樹**** 平田岳史****

Hirofumi Yamasaki*, Koki Hisamori**,
Tohru Danhara***, Hideki Iwano*** and
Takafumi Hirata****

2020年12月15日受付.

2021年6月6日受理.

* 広島大学大学院人間社会科学研究科
Graduate School of Humanities and Social Sciences, Hiroshima University, Higashihiroshima 739-8524, Japan

** 広島大学大学院教育学研究科教科教育学専攻
Program in Curriculum and Instruction Sciences, Graduate School of Education, Hiroshima University, Higashihiroshima 739-8524, Japan

*** (株)京都フィッション・トラック
Kyoto Fission-Track Co., Ltd., Kita-ku, Kyoto 603-8832, Japan

**** 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設
Geochemical Research Center, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

† 現所属: 兵庫県立須磨東高等学校
Present address: Hyogo Prefectural Suma Higashi High School, Suma-Ku, Kobe 654-0152, Japan

Corresponding author: H. Yamasaki,
hnmn@hiroshima-u.ac.jp

Abstract: Paleogene formations locally distributed in the southern Chugoku region and the eastern coastal areas of the Seto Inland Sea, southwest Japan, were analyzed in this study. The Paleogene strata were roughly divided based on their major constituents into a formation comprising non-marine and marine sandstones and mudstones and a second formation composed of fluvial conglomerates that are lithologically similar to the previously named “mountain gravels”. However, detailed age information is unavailable for some of these strata. The first reliable zircon U–Pb age was obtained using laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry on zircon grains from a fine-grained sandy tuff intercalated with an unnamed conglomerate bed that, based on lithology, can be correlated with the “mountain gravels” distributed in the western part of Mihara city, Hiroshima Prefecture. The zircon grains yield a U–Pb age of 40.8 ± 0.1 Ma (weighted mean age of the youngest cluster), which is interpreted as the maximum depositional age of the sandy tuff, thus establishing a middle Eocene age for this formation in the southern areas of the Chugoku region.

Keywords: Paleogene formation, Mihara city, mountain gravels, sandy tuff, zircon, U–Pb dating

はじめに

新生代の日本列島の形成史にとって最も重要なイベントは、日本海・千島海盆・四国海盆などの日本列島を取り囲む背弧海盆の拡大であった(中嶋, 2018). この指摘は、背弧海盆の形成による陸弧から島弧への変遷過程を明らかにすることの重要性を示唆しているとも捉えられる. 陸弧から島弧への変遷過程は、西南日本弧では、①陸弧の発達(中期始新世～前期漸新世: 47–28 Ma), ②背弧海盆の形成と西南日本弧の回転運動(後期漸新世～中期中新世初頭: 28–15 Ma), および③前弧域の火成弧化と島弧の発達(中～後期中新世: 15–6 Ma)に区分されている(尾崎, 2009). これらのうち「①陸弧の発達」に関連する古第三系の地質情報は背弧海盆拡大イベント直前の状況を示すものであり、背弧海盆拡大イベントを理解する上でも重要と考える.

瀬戸内海沿岸域(宇部～神戸)に分布する西南日本内帯の古第三系については、今岡ほか(2003)が指摘しているように、近年になって各種の年代資料の蓄積により、改めてその存在が確認されつつあるという状況である(Fig. 1). このうち中国地方南部～瀬戸内海東部沿岸地域に分布する河川成礫岩層や海成層についても、新第三系および第四系とされてきたが、フィッション・トラック年代測定、ストロンチウム同位体比、および産出化石により、古第三系の存在が明らかになってきている. 具体的には以下の通りである.

中国地方南部～瀬戸内海東部沿岸地域に分布する古第三系は、岩相と主要な分布域により2つのグループ(以下、それぞれ第1グループと第2グループと呼ぶ)に大別されている(松原, 2009). 第1グループは広島県東部～岡山県の中国地方南部に点在する主に河川成礫岩層であり、第2グループは中国山地南縁～瀬戸内海東部沿岸に点在する陸水成層と海成層である(Fig. 2).

第1グループの河川成礫岩層は一般にくさり礫の産状を呈し、従来、中新統(備北層群等)ないし鮮新統～更新統の「山砂利」として一括されてきた地層である(松原, 2009). しかし、それらのうち岡山市の北方に分布する地層中に挟在する凝灰岩から後期始新世～後期漸新世を示すジルコンのフィッション・トラック年代が報告され古第三系吉備層群が設定された(鈴木ほか, 2003, 2009). それ以降、河川成礫岩層を一括して古第三系とする見解(松浦ほか, 2002)がある一方で、一部では中新統ないし鮮新統～更新統の可能性もあり、対比に課題が残されているとの指摘もある(松原, 2009).

第2グループの陸水成層と海成層は従来中新統とされていたが、それらのうち浪形層、児島湾干拓地地下の備北層群

Fig. 1. Location of the study area and distribution of the Paleogene formations in the southern part of the Chugoku region and the coastal areas of the Seto Inland Sea with reported radiometric ages (Ma) and estimated geological ages based on the fossil occurrences. The base map is from [URL]. Data sources: *1 (Takahashi, 1975); *2 (Ozaki and Matsuura, 1988); *3 (Imaoka et al., 1996); *4 (Imaoka et al., 1999); *5 (Kurita et al., 2000); *6 (Yamamoto et al., 2000); *7 (Kurita et al., 2001); *8* (Matsuura, 2001); *9 (Kurita and Matsuura, 2002); *10 (Kurita et al., 2002); *11 (Matsuura, 2002); *12 (Matsuura et al., 2002); *13 (Imaoka et al., 2003); *14 (Suzuki et al., 2003); *15 (Tanaka et al., 2003); *16 (Matsuura et al., 2004); *17 (Matsuura and Seno, 2017); and *19 (Yamasaki et al., 2017).

Fig. 2. Correlation chart of the Paleogene formations distributed in the southern Chugoku Mountains from eastern Hiroshima Prefecture to Okayama Prefecture (modified from Matsubara, 2009). The formations are divided into two associations G1 and G2 based on lithology. The geological timescale is after Cohen et al. (2013, updated in 2020).

Fig. 3. A) Simplified geological map of central to western part of Mihara city, Hiroshima Prefecture modified from [URL1]. B) Locations of sample Hongo_Zen02 and photographs in Fig. 4 (A–D). The topographic base map is from [URL2].

Fig. 4. Field photographs of the unnamed conglomerate beds: A) cobble conglomerate with boulder clasts; B) highly weathered conglomerate (sensu “Kusarireki”); C) part of ca. 1 m thick, normally graded (arrow) pebble conglomerate to fine sandstone bed; and D) highly weathered granule to pebble conglomerate with crude stratification (dashed line) and sandy tuff. Scale bars in A and D are 1 m, and in B and C are 20 cm. See Fig. 3B for photograph locations.

相当層、および前島層は、ジルコンのフィッション・トラック年代、化石炭酸塩中のストロンチウム同位体比、および産出化石に関する先行研究の成果に基づいて始新統～漸新統とされている(松原, 2009; Matsubara, 2013)。また、三原市中央部に分布する高坂層(四藤, 1966)は岩相層序の類似性からこのグループに相当する可能性が高い(松原, 2009)。

本研究の対象である広島県三原市西部に分布する未命名礫岩層についても、年代に関する情報が不足しているため、新第三系や第四系とする見解や古第三系とする見解があるなど意見の一致には至っていない。すなわち、広島県(1964)では鮮新世～更新世未区分礫層と、山田ほか(1986)では鮮新世～更新世前期甲立礫層及びその相当層とされ、さらに近年では古第三系(松浦ほか, 2002)、始新世(ルテシアン期～プリアポニアン期)の非海成層[URL1]、あるいは時代不詳(松原, 2009)とされている。

そこで本研究では、上記の見解の相違の解決において重要な情報であるジルコン年代に関する情報を得たので以下に報告する。なお、地質年代については Cohen et al. (2013, updated in 2020)に基づく。

地質概説および試料

三原市中央部～西部には古第三系が点在して分布しており

(Fig. 3A)、砂岩主体層と礫岩主体層に区分されている[URL1]。これらのうち本研究で対象とした試料(Hongo_Zen02)は、時代不詳の山砂利層(松原, 2009)とされた、三原市西部、本郷町善入寺の未命名礫岩層分布域内の1地点(34°24′35″N, 132°55′13″E)から2014年に採取された(Fig. 3B)。

この未命名礫岩層分布域内に僅かに点在する小露頭では、円礫～垂角礫を主体とする礫支持の礫岩や礫岩中にほぼ水平に挟在する砂岩が観察される(Fig. 4)。鍵層を欠くため露頭間の地層対比は困難な状況である。

礫岩の内部構造は不明瞭な場合が多いが、基底面が下位層を侵食していることを確認できる場合もある。礫サイズは中礫～大礫を主体とし、希に50 cmを越える礫が混じる(Fig. 4A)。礫自体が著しく風化してくさり礫化し、露頭全体が褐色～赤褐色を呈している場合もある(Fig. 4B)。砂岩は、中礫岩から漸移し上方に向け細粒砂岩へと細粒化する厚さ約1 mの級化構造を示す場合(Fig. 4C)や、厚さ約10 cmの連続性の悪い細粒砂岩が礫岩中に認められる場合がある。

試料採取地点付近では基盤の花崗岩類の上位にくさり礫化した淘汰の悪い細～中礫岩と砂質凝灰岩が累重する(Figs. 4D, 5)。不淘汰の細～中礫岩は垂角礫を主体とし礫の含有量の違いにより弱い成層構造が認められる。採取試料はベン

Fig. 5. Measured stratigraphic section showing the position of the Hongo_Zen02 sample. See Fig. 3B for location.

Table 1. Analytical conditions for the LA-ICP-MS system used in this study.

Laser ablation system	
Model	CARBIDE, Light Conversion, Lithuania
Laser type	Yb:KGW femtosecond laser
Pulse width	290 fs
Wave length	257 nm
Outputs	15 mW
Energy density	1.9 J/cm ²
Beam size	10 μm
Laser ablation method	Fast beam scanning
Galvano optical system	used
Frequency	150 Hz
Laser ablation geometry (area)	25 μm × 25 μm
Duration of laser ablation	15 s
Carrier gas (He)	0.60 L min ⁻¹
ICP-MS	
Model	Nu Instruments Nu Plasma II
ICP-MS type	double focussing magnetic sector
Forward power	1300 W
Make-up gas (Ar)	0.90 L min ⁻¹
Data acquisition protocol	Time-resolved analysis
Detection mode	Multiple collector mode
Data acquisition time	24 s (12 s gas blank, 12 s ablation)
Monitor isotopes	²⁰² Hg, ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁵ U
Standards	
Primary standard	Nancy 91500 ^{*1}
Secondary standard	OD-3 ^{*2,3,4} , Plešovice ^{*5}

*1, Wiedenbeck et al. (1995); *2, Iwano et al. (2012); *3, Iwano et al. (2013); *4, Lukács et al. (2015); *5, Sláma et al. (2008)

トナイト化した細粒な砂質凝灰岩であり、黄白色を呈し、ねじり鎌で露頭から堀り出せる程度の固さであり、水分を含むと容易に軟化する。層厚は概ね 10 cm であるが、より厚い部分もあり一定しない。

U-Pb 年代測定

砂質凝灰岩試料からのジルコン粒子の分離は、手もみによる粉碎、ふるい分け、パンニング、磁気分離、および重液分離の手順で行った。分離したジルコン粒子の多くは見かけ上均質な色調(赤褐色)と晶癖を持つ自形結晶であった。これらのうち 76 粒子を PFT テフロンシートに包埋し、ダイヤモンドペーストを用いて研磨し、インクルージョンの位置による測定領域の設定が困難な不適粒子を除いて無作為に選別した 30 粒子を測定対象とした。

U-Pb 年代測定は LA-ICP-MS 法により実施した。東京大学大学院理学系研究科でフェムト秒レーザーアブレーション装置 (CARBIDE, LIGHT CONVERSION) とマルチコ

Fig. 6. Concordia plots of U-Pb ages of zircons from sample Hongo_Zen02. Thick solid ellipses show the age of 22 grains forming the youngest age cluster.

Fig. 7. Weighted average plot and the weighted mean of the ²³⁸U-²⁰⁶Pb age (horizontal thick line) of the youngest age cluster.

レクター磁場型 ICP-MS (Nu Plasma II, Nu Instruments Ltd.) を備えた装置を使用した。レーザーアブレーションはヘリウムガスの雰囲気中で実施し、そのヘリウムガス流をアルゴンガス流に混合させ ICP-MS に導入した。分析に用いたレーザー照射径は 10 μm で、ガルバノ光学系装置 (Yokoyama et al., 2011; Makino et al., 2019; Iwano et al., 2020) を使い、25 μm 平方の領域を高速走査した。測定条件および測定機器の概要は Table 1 の通りである。U-Pb 年代として ²³⁸U-²⁰⁶Pb 年代と ²³⁵U-²⁰⁷Pb 年代を求めた。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 ジルコン (1065 Ma : Wiedenbeck et al., 1995) を用いた。また、測定値の確度を確認するため、

Table 2. Summary of zircon U–Pb dating results for sample Hongo_Zen02.

Sample Name: Hongo_Zen02											
Grain No.	Th U	Isotopic ratios				Age (Ma)				Remarks	
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	Error 2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	Error 2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	Error 2σ		
no.1	1.20	0.0485 ± 0.0008		0.00646 ± 0.00015		0.0432 ± 0.0009		41.5 ± 1.0		43.0 ± 1.0	
no.2	1.05	0.0477 ± 0.0008		0.00635 ± 0.00015		0.0417 ± 0.0009		40.8 ± 1.0		41.5 ± 1.0	
no.3	0.98	0.0475 ± 0.0009		0.00634 ± 0.00015		0.0416 ± 0.0010		40.7 ± 1.0		41.4 ± 1.0	
no.4	0.77	0.0488 ± 0.0013		0.00619 ± 0.00015		0.0417 ± 0.0013		39.8 ± 1.0		41.5 ± 1.3	
no.5	1.11	0.0483 ± 0.0007		0.00639 ± 0.00015		0.0425 ± 0.0009		41.0 ± 1.0		42.3 ± 0.9	
no.6	1.19	0.0643 ± 0.0008		0.00648 ± 0.00008		0.0575 ± 0.0009		41.7 ± 0.5	discordant	56.7 ± 0.9	
no.7	0.70	0.0497 ± 0.0013		0.00613 ± 0.00009		0.0420 ± 0.0011		39.4 ± 0.6	discordant	41.8 ± 1.2	
no.8	0.78	0.0487 ± 0.0009		0.00655 ± 0.00008		0.0440 ± 0.0009		42.1 ± 0.5	Excluded from the	43.7 ± 0.9	youngest age cluster
no.9	0.78	0.0485 ± 0.0016		0.00641 ± 0.00010		0.0429 ± 0.0014		41.2 ± 0.6		42.7 ± 1.5	
no.10	1.26	0.0486 ± 0.0007		0.00647 ± 0.00008		0.0434 ± 0.0007		41.6 ± 0.5	discordant	43.2 ± 0.7	
no.11	1.28	0.0479 ± 0.0006		0.00628 ± 0.00008		0.0414 ± 0.0006		40.3 ± 0.5		41.2 ± 0.6	
no.12	0.62	0.0498 ± 0.0014		0.00645 ± 0.00009		0.0443 ± 0.0013		41.4 ± 0.6	discordant	44.0 ± 1.3	
no.13	1.42	0.0476 ± 0.0006		0.00649 ± 0.00008		0.0426 ± 0.0007		41.7 ± 0.5	Excluded from the	42.3 ± 0.7	youngest age cluster
no.14	1.67	0.0471 ± 0.0005		0.00644 ± 0.00008		0.0418 ± 0.0006		41.4 ± 0.5		41.6 ± 0.6	
no.15	1.31	0.0486 ± 0.0006		0.00647 ± 0.00008		0.0433 ± 0.0007		41.6 ± 0.5	discordant	43.1 ± 0.7	
no.16	0.69	0.0480 ± 0.0013		0.00647 ± 0.00009		0.0428 ± 0.0012		41.6 ± 0.6	Excluded from the	42.6 ± 1.2	youngest age cluster
no.17	2.12	0.0476 ± 0.0006		0.00643 ± 0.00008		0.0422 ± 0.0006		41.3 ± 0.5		42.0 ± 0.6	
no.18	1.13	0.0483 ± 0.0005		0.00643 ± 0.00008		0.0429 ± 0.0006		41.3 ± 0.5		42.6 ± 0.6	
no.19	1.03	0.0475 ± 0.0007		0.00631 ± 0.00009		0.0413 ± 0.0009		40.5 ± 0.6		41.1 ± 0.9	
no.20	1.52	0.0472 ± 0.0006		0.00632 ± 0.00008		0.0411 ± 0.0008		40.6 ± 0.5		40.9 ± 0.8	
no.21	0.98	0.0478 ± 0.0007		0.00641 ± 0.00009		0.0423 ± 0.0009		41.2 ± 0.6		42.0 ± 0.9	
no.22	0.69	0.0492 ± 0.0013		0.00644 ± 0.00010		0.0437 ± 0.0013		41.4 ± 0.6		43.4 ± 1.4	
no.23	0.78	0.0478 ± 0.0011		0.00636 ± 0.00009		0.0419 ± 0.0011		40.9 ± 0.6		41.7 ± 1.2	
no.24	1.55	0.0477 ± 0.0006		0.00632 ± 0.00008		0.0415 ± 0.0008		40.6 ± 0.5		41.3 ± 0.8	
no.25	1.03	0.0476 ± 0.0007		0.00626 ± 0.00008		0.0411 ± 0.0008		40.2 ± 0.5		40.9 ± 0.9	
no.26	0.54	0.0491 ± 0.0014		0.00631 ± 0.00010		0.0428 ± 0.0014		40.6 ± 0.6		42.5 ± 1.4	
no.27	0.73	0.0478 ± 0.0011		0.00612 ± 0.00009		0.0404 ± 0.0011		39.3 ± 0.6		40.2 ± 1.1	
no.28	1.34	0.0478 ± 0.0006		0.00632 ± 0.00008		0.0417 ± 0.0008		40.6 ± 0.5		41.4 ± 0.8	
no.29	1.19	0.0482 ± 0.0006		0.00630 ± 0.00008		0.0419 ± 0.0008		40.5 ± 0.5		41.7 ± 0.8	
no.30	1.40	0.0473 ± 0.0006		0.00631 ± 0.00008		0.0412 ± 0.0008		40.5 ± 0.5		41.0 ± 0.8	
Weighted average (n=22)											
40.8 ± 0.1											
41.6 ± 0.2											
Standards											
PSV 150Hz	0.09	0.0528 ± 0.0003		0.0542 ± 0.00063		0.3944 ± 0.0042		340.1 ± 4.1		337.6 ± 4.3	
PSV 150Hz	0.09	0.0532 ± 0.0004		0.0534 ± 0.00069		0.3915 ± 0.0066		335.2 ± 4.5		335.5 ± 6.6	
OD3 150Hz	0.84	0.0476 ± 0.0007		0.0052 ± 0.00006		0.0340 ± 0.0006		33.3 ± 0.4		33.9 ± 0.6	
OD3 150Hz	1.04	0.0472 ± 0.0006		0.0051 ± 0.00007		0.0333 ± 0.0007		32.9 ± 0.4		33.3 ± 0.7	

The grains highlighted in gray belong to the youngest age cluster.

OD-3 ジルコン(33 Ma: 岩野ほか, 2012; Iwano et al., 2013; Lukács et al., 2015) と Plešovice ジルコン(337 Ma: Sláma et al., 2008)を 2 次スタンダードとして分析した。なお、本研究では ^{238}U - ^{206}Pb 年代と ^{235}U - ^{207}Pb 年代が誤差 2σ で一致する場合にコンコダントとみなし、U-Pb 年代として ^{238}U - ^{206}Pb 年代を用いる。また Isoplot 4.15 (Ludwig, 2012)を用いてデータのコンコディア図と加重平均年代を示した。

測定結果

本試料のジルコン含有量は多く、試料 0.3 kg を処理して 10000 粒子が得られた。ジルコン粒子は軸長数 10~200 μm 程度のものを主体として約 600 μm のものも認められ、インクルージョンは少量であった。

測定結果を Figs. 6, 7 および Table 2 に示す。測定した 30 粒子のうち 83% に当たる 25 粒子がコンコダント粒子であり、最も古い年代は 42.2 ± 0.5 Ma (粒子番号 no. 8)、最も若い年代は 39.4 ± 0.6 Ma (粒子番号 no. 27)であった。これら 25 粒子の年代値は 42~39 Ma に集中する。測定したジルコン粒子は高いコンコダント粒子比率を示しているが、砂質凝灰岩の堆積年代の推定を目的として、以下の手順で最若年代グループの絞り込みを行った。すなわち、コンコダント粒子中で最も若い年代を示す粒子と誤差 3σ の範囲 (97.5 % conf.) で重複する粒子を選び(植木ほか, 2019)、それらの粒子年代の加重平均を算出した。その結果、最も古い年代 41.6 ± 1.0 Ma (粒子番号 no. 1) と最も若い年代 39.4 ± 0.6 Ma (粒子番号 no. 27) との間の 22 粒子が該当し、加重平均値 40.8 ± 0.1 Ma (2σ) が得られた。最若年代グループから得られた年代値を砂質凝灰岩の最大堆積年代と仮定すると、本砂質凝灰岩を含む未命名礫岩層の年代は中期始新世(パートニアン期)に位置づけられる。

本研究により広島県中部の瀬戸内沿岸地域に分布する始新世堆積岩類の存在を示す新たな根拠が得られた。この結果は、砂質凝灰岩を挟む三原市西部の未命名礫岩層の年代が古第三紀(松浦ほか, 2002)あるいは始新世(ルテシアン期~プリアボニアン期) [URL1]とされていることと整合的であり、これらの堆積年代推定についてのより強い拘束条件となり得る。

また一方で、得られた U-Pb 年代は広島県東部~岡山県の中国地方南部に点在する第 1 グループの礫岩層(松原, 2009)から従来報告されたジルコンのフィッション・トラック年代に比べると古い(Figs. 1, 2)。三原市西部の未命名礫岩層は、松原(2009)においても山砂利層とされているように、その主要な岩相は第 1 グループの礫岩層に類似している。今後、両者の関連についての岩相に基づく検討に加え、第 1 グループとされた礫岩層の年代に関して、碎屑性ジルコンを用いた U-Pb 年代等の年代情報が蓄積され、詳しく検討されることが望まれる。

謝 辞

広島大学技術センターの石佐古早実氏には薄片製作でお世

話になった。査読者の鈴木茂之氏(岡山大学)と担当編集委員の常磐哲也氏から頂いたご指摘により本稿は改善された。本研究は JSPS 科研費 19K03144 および 2020 年度サタケ基金により助成を受けた。記して感謝の意を表する。

文 献

- Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L. and Fan, J.-X., 2013, updated in 2020, The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, **36**, 199–204.
- 広島県, 1964, 20 万分の 1 広島県地質図および同説明書。広島県, 182p. [Hiroshima Prefecture, 1964, *Geological Map of Hiroshima Prefecture 1: 200,000 and Its Instruction Manual*. Hiroshima Prefecture, 182p.]*
- 今岡照喜・松本崇雅・松里英男・松尾征二・飯泉 滋・岩野英樹, 2003, 古第三紀宇部層群中の凝灰岩のフィッション・トラック年代と Sr 同位体比。地質雑, **109**, 106–115. [Imaoka, T., Matsumoto, T., Matsusato, H., Matsuo, S., Iizumi, S. and Iwano, H., 2003, Fission-track ages and Sr isotope ratios of tuffs in the Paleogene Ube Group, SW Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **109**, 106–115.]
- 今岡照喜・西村祐二郎・吉原和彦・田中盛正・加々美寛雄, 1999, 古第三紀宇部層群中の白岸凝灰岩の岩石記載とその噴出源。地質学論集, **53**, 393–401. [Imaoka, T., Nishimura, Y., Yoshihara, K., Tanaka, M. and Kagami, H., 1999, Petrography and source vent of Shirogishi Tuffs in Paleogene Ube Group, Yamaguchi Prefecture, Southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **53**, 393–401.]
- Iwano, H., Danhara, T., Danhara, Y., Hirabayashi, S., Nakajima, T., Sakai, H. and Hirata, T., 2020, Zircon fission-track and U-Pb double dating using femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry: A technical note. *Isl. Arc*, **29**, e12348, doi: 10.1111/iar.12348.
- 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—。地質雑, **118**, 365–375. [Iwano, H., Orihashi, Y., Danhara, T., Hirata, T. and Ogasawara, M., 2012, Evaluation of fission-track and U-Pb double dating method for identical zircon grains: Using homogeneous zircon grains in Kawamoto Granodiorite in Shimane prefecture, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **118**, 365–375.]
- Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Yamamoto, K., 2013, An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U-Pb dating standard. *Isl. Arc*, **22**, 382–394.
- 栗田裕司・松原尚志, 2002, 香川県豊島、土庄層群唐櫃層の古第三紀渦鞭毛藻化石群集とその意義。日本地質学会第 109 年学術大会講演要旨, 53. [Kurita, H. and Matsubara, T., 2002, Paleogene dinoflagellate cyst assemblages from the Karato Formation, Tonosho Group, Teshima-Island, Kagawa, SW Japan, and their implications. *109th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 53.]
- 栗田裕司・松原尚志・山本裕雄, 2000, 香川県小豆島の第三系土庄層群四海層の渦鞭毛藻化石年代(始新世)とその意義。日本古生物学会第 149 回例会予稿集, 57. [Kurita, H., Matsubara, T. and Yamamoto, Y., 2000, An Eocene age of dinoflagellate cysts from the Shikai Formation, Tonosho Group, Shodoshima Island, Kagawa, southwest Japan, and its implications. *149th Reg. Meet. Palaeont. Soc. Japan, Abstr. & Prog.*, 57.]
- 栗田裕司・松尾裕司・松原尚志, 2001, 神戸市西部、神戸層群多井畑層の渦鞭毛藻化石年代(始新世)とその意義。日本古生物学会 2001 年年会予稿集, 184. [Kurita, H., Matsuo, H. and Matsubara, T., 2001, An Eocene age of dinoflagellate cysts from the Tainohata Formation, Kobe Group, western Kobe area, southwest Japan, and its implications. *2001 Annu.*

- Meet. Palaeont. Soc. Japan, Abstr., 184.]
- 栗田裕司・瀬戸浩二・山本裕雄・鈴木茂之, 2002, 岡山県児島湾地下に分布する第三系から産出した始新世渦鞭毛藻化石群集. 日本古生物学会第151回例会予稿集, 42. [Kurita, H., Seto, K., Yamamoto, Y. and Suzuki, S., 2002, Eocene dinoflagellate cyst assemblage from a Tertiary subsurface section in the Kojima Bay, Okayama Prefecture, SW Japan. 151st Reg. Meet. Palaeont. Soc. Japan, Abstr. & Prog., 42.]
- Ludwig, K. R., 2012, *User's Manual for Isoplot 3.75: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication 5, 77p.
- Lukács, R., Harangi, S., Bachmann, O., Guillong, M., Danišik, M., Buret, Y., Szepesi, J., 2015, Zircon geochronology 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**, 1–26.
- Makino, Y., Kuroki, Y. and Hirata, T., 2019, Determination of major to trace elements in metallic materials based on solid mixing calibration method using multiple spot-laser ablation-ICP-MS. *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 1794–1799.
- Matsubara, T., 2002, Molluscan fauna of the “Miocene” Maejima Formation in Maejima Island, Okayama Prefecture, southwest Japan. *Paleontolog. Res.*, **6**, 127–145.
- 松原尚志, 2009, 中国山地南部—瀬戸内海東部沿岸地域. 日本地質学会編, 日本地方地質誌6, 中国地方, 朝倉書店, 110–112. [Matsubara, T., 2009, Southern part of the Chugoku Mountain to coastal regions of the Seto Inland Sea. In Geological Society of Japan, ed., *Regional Geology of Japan, Vol. 6, Chugoku Region*, Asakura Publ., 110–112.]*
- Matsubara, T., 2013, Molluscan fauna of the “Miocene” Nami-gata Formation in the Namigata area, Okayama Prefecture, southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **119**, 249–266.
- 松原尚志・平松 力・鈴木茂之・田中 元, 2004, 岡山県倉敷市における海成古第三系の発見とその意義. 日本古生物学会 2004 年年会予稿集, 94. [Matsubara, T., Hiramatsu, Ch., Suzuki, S. and Tanaka, H., 2004, Discovery of Paleogene marine sequence in Kurashiki City of Okayama Prefecture and its significance. 2004 Annu. Meet. Palaeont. Soc. Japan, Abstr., 94.]
- 松浦浩久, 2001, 三津地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 58p. [Matsuura, H., 2001, *Geology of the Mitsu District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, 58p.]
- 松浦浩久・栗本史雄・吉田史郎・斉藤文紀・牧本 博・利光誠一……広島俊男, 2002, 20 万分の 1 地質図幅[岡山及丸亀]. 産総研 地質調査総合センター. [Matsuura, H., Kurimoto, F., Yoshida, S., Saito, F., Makimoto, H., Toshimatsu, S., ...Hiroshima, T., 2002, *Geological Map of Japan 1: 200,000, Okayama and Marugame*. Geol. Surv. Japan, AIST.]
- 松浦浩久・妹尾 護, 2017, 岡山県南部の始新世番田玄武岩及び串の山玄武岩. 地質雑, **123**, 93–99. [Matsuura H. and Seno, M., 2017, Eocene Banda and Kushinoyama basalts from southern Okayama district, southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **123**, 93–99.]
- 中嶋 健, 2018, 日本海拡大以来の日本列島の堆積盆テクトニクス. 地質雑, **124**, 693–722. [Nakajima, T., 2018, Tectonics of sedimentary basins in and around Japan since the opening of the Sea of Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **124**, 693–722.]
- 尾崎正紀, 2009, 始新世から中新世の地質構造発達史. 日本地質学会編, 日本地方地質誌 5, 近畿地方, 朝倉書店, 43–61. [Ozaki, M., 2009, Tectonic evolution during the Eocene to Miocene. In Geological Society of Japan, ed. *Regional Geology of Japan, Vol. 5, Kinki Region*, Asakura Publ., 43–61.]*
- 尾崎正紀・松浦浩久, 1988, 三田地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 93p. [Ozaki, M. and Matsuura, H., 1988, *Geology of the Sanda District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, Geol. Surv. Japan, 93p.]
- 尾崎正紀・松浦浩久・佐藤喜男, 1996, 神戸層群の地質年代. 地質雑, **102**, 73–83. [Ozaki, M., Matsuura, H. and Sato, Y., 1996, Geologic age of the Kobe Group. *J. Geol. Soc. Japan*, **102**, 73–83.]
- Sláma, J., Košler, J., Comdon, D. J., Clowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M.,Whitehouse, M. J., 2008, Plešovice zircon: A new natural reference material for U–Pb and Hf isotope microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1–35.
- 鈴木茂之・檀原 徹・田中 元, 2003, 吉備高原に分布する第三系のフィッション・トラック年代. 地質雑, **112**, 35–49. [Suzuki, S., Danhara, T., and Tanaka, H., 2003, Fission-track dating of Tertiary tuff samples from the Kibi Plateau area, Okayama Prefecture, Southwest Japan. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **112**, 35–49.]
- 鈴木茂之・松原尚志・松浦浩久・檀原 徹・岩野英樹, 2009, 岡山市周辺の吉備高原に分布する古第三系「山砂利層」と海成中新統. 地質雑, **115**, S139–S151. [Suzuki, S., Matsubara, T., Matsuura, H., Danhara, T. and Iwano, H., 2009, Paleogene “mountain gravels” and marine Miocene sediments on the Kibi Plateau in the north of Okayama City, southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **115**, S139–S151.]
- 高橋英太郎, 1975, 宇部層群. 山口県の地質, 高橋英太郎ほか編, 山口県立山口博物館, 山口, 154–163. [Takahashi, E., 1975, Ube Group. In Takahashi, E. et al., eds., *Geology of Yamaguchi Prefecture*. Yamaguchi Pref. Mus., Yamaguchi, 154–163.]*
- 田中 元・鈴木茂之・宝谷 周・山本裕雄・檀原 徹, 2003, 吉備高原周辺の古第三系に関する最近の知見とその古地理学的意義. 岡山大学地球科学研究報告, **10**, 15–22. [Tanaka, H., Suzuki, S., Hotani, S., Yamamoto Y. and Danhara, T., 2003, Distributions and ages of the Paleogene deposits in the Kibi Plateau area, and Paleogene paleogeography. *Okayama Univ. Earth Sci. Rep.*, **10**, 15–22.]
- 植木忠正・丹羽正和・岩野英樹・檀原 徹・平田岳史, 2019, 中部日本, 鮮新世東海層群中の大田テフラのジルコン U–Pb およびフィッション・トラック年代. 地質雑, **125**, 227–236. [Zircon U–Pb and Fission-track ages for the Ohta Tephra in the Pliocene Tokai Group, Central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **125**, 227–236.]
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W. L., Meier, M., Oberli, F.,Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Newsl.*, **19**, 1–23.
- 山田直利・東元定雄・水野清秀, 1986, 20 万分の 1 地質図[広島]. [Yamada, N., Higashimoto, S. and Mizuno, K., 1986, *1: 200,000 Geological Map, Hiroshima*, Geol. Surv. Japan.]
- 山本裕雄・栗田裕司・松原尚志, 2000, 兵庫県淡路島北部の第三系岩屋層から産出した始新世石灰質ナノ・渦鞭毛藻化石とその意義. 地質雑, **106**, 397–398. [Yamamoto, Y., Kurita, H. and Matsubara, T., 2000, Eocene calcareous nannofossils and dinoflagellate cysts from the Iwaya Formation in Awajishima Island, Hyogo Prefecture, southwest Japan, and its their geologic implications. *J. Geol. Soc. Japan*, **106**, 397–398.]
- Yamasaki, H., Suzuki, M., Harada, K., Suga, T. and Hayashi, T., 2017, Newly identified Oligocene formation in the Sera Plateau, Hiroshima, SW Japan. *Bull. Graduate Sch. Educ. Hiroshima Univ. Part II (Arts Sci. Educ.)*, **66**, 1–8.
- Yokoyama, D. T., Suzuki, T., Kon, Y. and Hirata, T., 2011, Determination of rare earth element abundance and U–Pb ages of zircons using multispot laser ablation–inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal. Chem.*, **83**, 8892–8899.
- 四藤幸子, 1966, 三原市高坂町付近の地質. 広島大学教育学部東雲分校理科同好会理科研究報告, **5**, 47–48. [Yoto, S., 1966, Geology of Takasaka, Mihara City. *Sci. Res. Rep., Sci. Club, Shinonome Branch, Hiroshima Univ.*, **5**, 47–48.]*
- [URL] 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, 産総研地質調査総合センター, データ更新日: 2020 年 4 月 6 日 (Seamless Geological Map of Japan V2, Geological Survey of Japan, AIST, data update: April 6, 2020), <https://gbank.gsj.jp/>

seamless/.

[URL2] 地理院地図(電子国土 Web), 国土地理院(GSI Map, Geospatial Information Authority of Japan), <http://maps.gsi.go.jp>.

*English translation from the original written in Japanese.

(役割分担)

山崎博史	地質調査および試料採取・総括・原稿執筆・編集委員会との対応
久森光希	地質調査・原稿執筆
檀原 徹	ジルコン U-Pb 年代測定・測定値の解析・原稿執筆
岩野英樹	ジルコン U-Pb 年代測定・測定値の解析・原稿執筆
平田岳史	ジルコン U-Pb 年代測定・測定値の解析の補助

科学論文では、学説の検証可能性を保証することが重要です。そのため、地質学雑誌掲載論文には、重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります。言うまでもないことですが、見学や採取を行う場合、各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい。詳しくは、以下のサイトをご覧ください。

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>

一般社団法人日本地質学会