

沖小島ボーリングコア試料の岩相記載と FT 年代 ——始良カルデラ南縁における先カルデラ活動史——

古川 邦之*・齋藤 武士*・鎌田 浩毅*・檀原 徹**・味喜 大介***・石原 和弘***

(2003年7月2日受付, 2003年10月6日受理)

Lithofacies and Fission-track Ages of Drilling Core from Okogashima Island —Implication for the Eruption History of Southern Margin of Aira Caldera—

Kuniyuki FURUKAWA*, Takeshi SAITO*, Hiroki KAMATA*, Tohru DANHARA**,
Daisuke MIKI*** and Kazuhiro ISHIHARA***

The drilling core (501.9 m in depth) has been obtained from Okogashima Island located in southern margin of the Aira caldera at northern end of Kagoshima Bay in southern Kyushu. The core reveals detailed eruption history prior to the Aira pyroclastic eruptions about 25,000 years ago by descriptions of lithofacies and fission-track dating. The three types of lithofacies are identified in the drilling core. They are (1) 2–8 m in depth: pyroxene andesite; (2) 8–253.2 m in depth: the Okogashima rhyolite lava flow; (3) 253.2–501.9 m in depth: pyroclastic materials. This study focuses mainly on pyroclastic materials, which have not been described yet. The pyroclastic materials in lower levels are composed mainly of tuffaceous sand with cross lamination, containing shell fossils. They also contain pumice-concentration zone and welded tuff, indicating explosive eruption. The pumice-concentration zone occurs in 326–340 m (unit A), 354–360 m (unit B), 425–427 m (unit D), 449–450 m (unit E), and 478–497 m (unit F), while the welded tuff occurs in 360–380 m (unit C). The fission-track ages of around 0.4 Ma from the units B and C indicate that the deposits were erupted prior to the Aira pyroclastic eruptions. Therefore, this drilling core shows that at least sixth pyroclastic eruptions are identified in southern margin of the caldera prior to the Aira pyroclastic eruptions.

Key words: Aira caldera, drilling core, fission track, welded tuff, Yoshino pyroclastic flow

1. はじめに

鹿児島湾北部に位置する始良カルデラ (Matumoto, 1943) は、約 25,000 年前 (松本・他, 1987) の大規模な始

良火砕噴火の給源である (Aramaki, 1984)。その噴火は、大隅降下軽石にはじまり、妻屋火砕流、そして最後の入戸火砕流 (亀割坂角礫岩を含む) までの一連の活動からなり (Aramaki, 1984)、総計 400 km³ を超える、世界でも有数の大規模な噴火活動である。そのため、地質学的・岩石学的な見地からさまざまな研究が行われてきた (例えば Aramaki, 1984; 津久井・荒牧, 1990)。本研究では、その始良火砕噴火以前の火山活動を、先カルデラ活動として扱う。

その大規模噴火に関する研究と同じく、先カルデラ堆積物の岩相記載や、年代を明確にすることは非常に重要である。それは、カルデラ形成を伴うような大規模噴火に至るまでの、噴火様式の変遷やマグマ溜まり成長過程を解く鍵は、先カルデラ活動にあるからである。しかし始良火砕噴火に至るまでの噴火活動についての研究は少なく、まだ不明な点が多い。これには二つの理由がある。ひとつは、始良カルデラを含む鹿児島湾が、鹿児島地溝

* 〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町
京都大学大学院人間・環境学研究科
Graduate School of Human and Environmental Studies,
Kyoto University, Yoshida-Nihon-Matsu, Sa-
kyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan.

** 〒603-8832 京都市北区大宮南田尻町 44-4
(株)京都フィッション・トラック
Kyoto Fission Track Co. Ltd., 44-4, Minamitajiri,
Omiya, Kita-ku, Kyoto 603-8832, Japan.

*** 〒891-1491 鹿児島県鹿児島郡桜島町横山
京都大学防災研究所附属火山活動研究センター
Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Pre-
vention Research Institute, Kyoto University, Sa-
kurajima, Kagoshima 891-1491, Japan.
Corresponding author: Kuniyuki Furukawa
e-mail: furukawa@gaia.h.kyoto-u.ac.jp

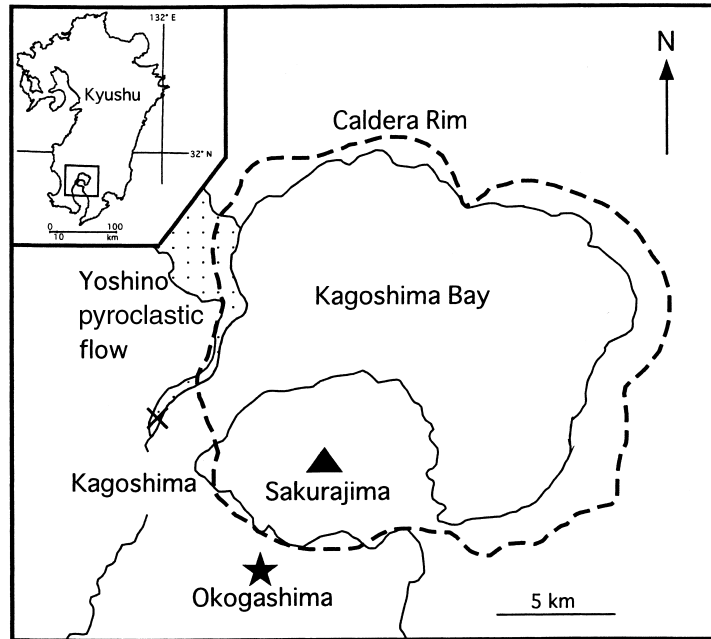


Fig. 1. Okogashima Island (star symbol) is located at the southern margin of the Aira caldera. Inset figure shows the location of the studied area. The triangle is the summit of Sakurajima. The broken line indicates the rim of the Aira caldera (Matumoto, 1943). The dotted area shows distribution of Yoshino pyroclastic flow (modified from Sudo *et al.*, 2000b), and cross indicates sampling point.

帯に属しているため(早坂, 1987), 堆積物は時間が経つにつれて地下深部に埋没してしまう。そのために地表における露頭調査は非常に困難である。もうひとつは, 始良カルデラがじょうご型カルデラ(Aramaki, 1984)であることに起因する。つまり, じょうご型カルデラにおいては, カルデラ床は破碎されるため, カルデラ形成以前の活動記録はカルデラ縁, もしくは外側に分布する堆積物に限定されてしまう。

これまでに, 先カルデラ活動に関する知見は, カルデラ縁もしくは外側に点在する堆積物に基づいた研究から得られてきた。周藤・他(2000a, b)や長岡・他(2001)では始良火砕噴火以前の噴出物の地質調査と年代測定を行い, 先カルデラ活動を以下のように推定した。1) 3~1 Maにはカルデラ北縁および南縁において安山岩質溶岩流が, 2) 1~0.5 Maにはカルデラ北縁および西縁において流紋岩から玄武岩までの溶岩流や火砕流が, 3) 0.5~0.1 Maにはカルデラ南縁において牛根玄武岩と沖小島流紋岩が, 4) 0.1~0.025 Maにはさまざまな降下火砕物およびカルデラ北縁において岩戸火砕流が噴出した。このように, 各堆積物はその岩相や噴出年代が明らかにされつつあり, 先始良カルデラの噴火史を解く鍵となっている。しかし, これらの研究は地表に点在する限られた露頭に基づいているため, 詳細な先カルデラ活動の復元

には至っていないのが現状である。

そこで本研究においては, 始良カルデラの外側, 桜島の南西2 kmの沖合に位置する, 沖小島おこがしま(Fig. 1)におけるボーリングコア試料に着目した。巽・井上(1993)は, 同コアの上部約250 mを占める沖小島流紋岩が, 20~40万年のK-Ar年代を示す, 先始良カルデラの噴出物であることを明らかにした。同コアの下部約250 mは, 火砕物からなる堆積物であり, カルデラ南縁における先始良カルデラ活動史を解明するには, 極めて重要な試料である。しかしこれまでこの堆積物について詳細な研究はなされていない。そこで本稿では, このボーリングコア試料の岩相記載とフィッシュオントラック(FT)年代を報告し, 始良カルデラ南縁における先カルデラ火山活動史を考察する。

2. 沖小島ボーリングコア

1992年に沖小島において, 京都大学桜島火山観測所が深さ501.9 m(坑口: 標高7 m)の観測井掘削を行った。掘削によって得られた試料は, 巽・井上(1993)により岩相から以下の3種に区分される。(1)最上部の輝石安山岩(深度2~8 m), (2)その下位にある沖小島流紋岩(深度8~253.2 m), (3)そしてそれ以下の火砕物である。さらに最上部の輝石安山岩は, その岩石学的特徴が

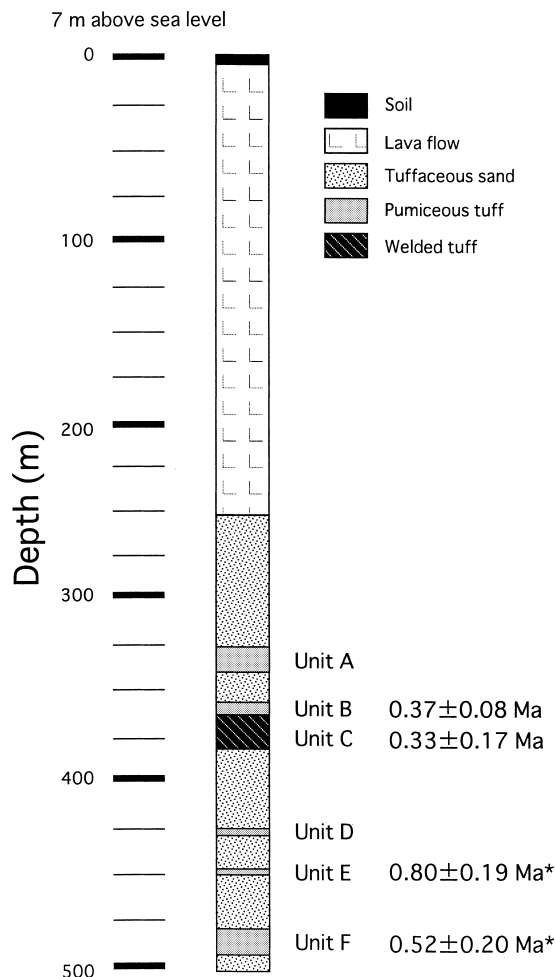


Fig. 2. Schematic section through the Okogashima boring core. The six eruption units (unit A to F) are recognized in the drill core below the Okogashima rhyolite. The fission-track ages are shown beside the schematic section. The fission-track ages with asterisk are regarded as anomalous age data (Refer to the text for details).

ら、桜島火山の噴出物である可能性は小さいこと、沖小島流紋岩については、20~40 万年の K-Ar 年代を示すこと、その岩石学的特徴から、先始良カルデラ噴出物であることが明らかにされた。

沖小島流紋岩以深の火砕岩は、主に半固結状態の凝灰質砂岩よりなっており、直径 < 3 cm のよく円磨された軽石や、直径 1 cm ほどのスコリアをしばしば含む。また、部分的に貝化石が含まれることや、斜交層理が認められることから、これらは水中堆積物であると考えられる。

またこの堆積物中には、非常に特徴的な 5 枚の軽石濃集層と 1 枚の溶結凝灰岩が挟まれる (Fig. 2)。それらを以下に記載する。

(1) 軽石濃集層

軽石濃集層は、326~340 m (unit A), 354~360 m (unit B), 425~427 m (unit D), 449~450 m (unit E), 478~497 m (unit F) の 5 カ所に確認される (Fig. 2)。これらは、直径 < 5 cm の軽石がクラストサポートしており、マトリクス部分は、黄色く変質した粉状の軽石と、少量の岩片からなる (Fig. 3A)。これは、軽石を大量に生産するような、爆発的な噴火イベントを示していると考えられる。

これらの堆積物の主な構成鉱物は、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、鉄-チタン酸化鉱物で、unit D, E においては、緑色角閃石が卓越する。含まれる火山ガラスは、軽石型、もしくはバブルウォール型で、すべて無色透明である。unit E においては、前後の層準からは確認されないカミングトン閃石を含むことや、火山ガラスの屈折率が、1.4968~1.4997 の範囲を示すものが 70% で、1.5025~1.5050 の範囲を示すものが 30% であり、完全に 2 系統に分離することができることから (Fig. 4), unit E が、混合した不均質なマグマによる噴火であったことを強く示唆している。

(2) 溶結凝灰岩

深さ 360~380 m (unit C) には、溶結凝灰岩が確認される (Fig. 2)。下部の 5 m は比較的溶結度が高く、軽石はガラス質レンズ状であるが、内部には気泡を残している (Fig. 3B)。上部は、弱溶結で脆い。また軽石の量は下部に比べ少なく、大きさも直径 2 cm 程度と小さい。ボーリングコア試料は、溶結度や固結度によって回収率はさまざまであるので、これが何枚のフローユニットから構成されているかは確認できない。

主な構成鉱物は、斜長石、斜方輝石、鉄-チタン酸化鉱物、単斜輝石で、微量のアバタイト、緑色角閃石を含む。火山ガラスは、軽石型、もしくはバブルウォール型で、すべて濃い褐色を呈する。

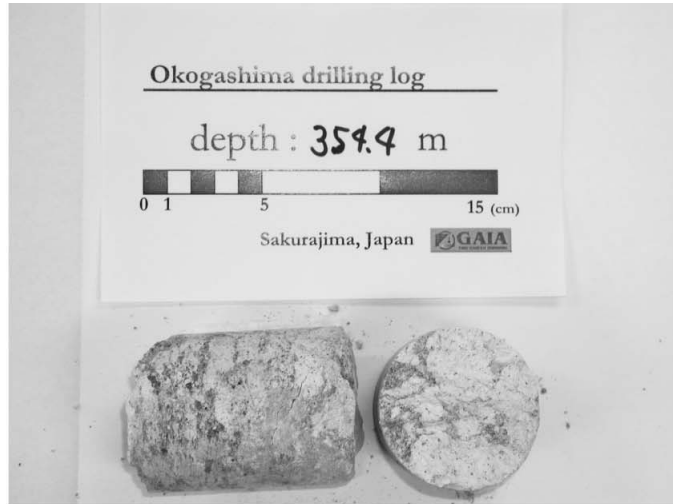
3. FT 年代測定と測定結果

今回は、units B, C, E, F の FT 年代測定とその結果を報告する。

測定試料は、洗浄、粉碎後、60 メッシュサイズ以下の試料について椀かけを行い、磁性分離および重液分離処理をしてジルコン結晶を精選した。表面に付着した微細なガラス、鉱物を除くために 30% HF 液を加え一晩放置し、中和後乾燥してほぼ純度 100% のジルコンを抽出した。

FT 年代測定は、結晶外部面を測定面とした外部検出

(A)



(B)



Fig. 3. Representative core samples. (A) Pumice concentration layer of unit B. This part is almost composed of pumices with <math>< 3\text{ cm}</math> in diameter. The matrix part is composed of altered yellow pumices and rock fragments. (B) Welded tuff of unit C. This deposit shows eutaxitic texture originated from glassy pumice lenses.

器法 (ED 2 法: Gleadow, 1981) を用い, IUGS 勧告 (Hurford, 1990) に準拠したゼータ較正 (Danbara *et al.*, 1991) を行った。また測定手順の詳細は檀原 (1995) に記述されている。

今回得られた年代値は, unit B, C, E, F においてそれぞれ, $0.37 \pm 0.08\text{ Ma}$, $0.33 \pm 0.17\text{ Ma}$, $0.80 \pm 0.19\text{ Ma}$, $0.25 \pm 0.14\text{ Ma}$ である (Table 1)。巽・井上 (1993) では, 沖小島流紋岩から $0.2 \sim 0.4\text{ Ma}$ の K-Ar 年代を得ているため, その層序関係から unit B, C については信頼でき

る値であろう。unit E は, 複数のテフラが混合している可能性が高く, このため, 得られた年代値が真の年代値を表していないかもしれない。unit F については, ジルコンの結晶サイズが小さく, 測定することが困難であったため, 正確な年代値を表しているとはいえない。

4. 議 論

4-1 始良カルデラ南縁における先カルデラ火山活動
沖小島における噴火活動の変遷は, 岩相記載と FT 年

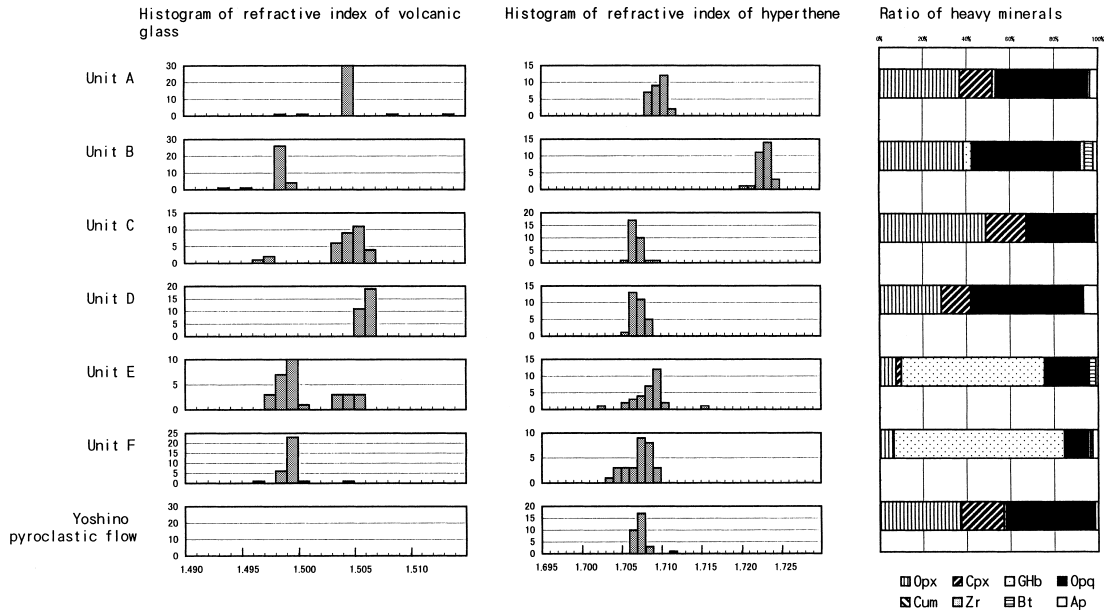


Fig. 4. Histogram of refractive index of volcanic glass and orthopyroxene and volume ratios of heavy minerals in the unit A to F from the Okogashima drill core and Yoshino pyroclastic flow. Opx: orthopyroxene, Cpx: clinopyroxene, GHb: green hornblende, Opq: opaque mineral, Cum: cummingtonite, Zr: zircon, Bt: biotite, Ap: apatite.

Table 1. Fission-track data of zircons from the okogashima drill core and Yoshino pyroclastic flow

Sample name	(1) mineral	No. of grains	Spontaneous		Induced		(2) Pr(χ^2) (%)	(3), (4) Dosimeter		(5) r	(6), (7), (8), (9) U-content (ppm)	Ages σ (Ma)
			ρ_s (cm ⁻²)	N_s	ρ_i (cm ⁻²)	N_i		ρ_d (10 ⁷ cm ⁻²)	N_d			
unit B	Zr	30	3.37 × 10 ⁻⁴	21	2.69 × 10 ⁻⁶	1677	35	8.016	2052	0.348	260	0.37 ± 0.08
unit C	Zr	30	8.05 × 10 ⁻³	4	7.26 × 10 ⁻⁵	361	98	8.015	2052	0.231	70	0.33 ± 0.17
unit E	Zr	30	3.16 × 10 ⁻⁴	18	1.18 × 10 ⁻⁶	672	53	8.014	2051	-0.213	110	0.80 ± 0.19
unit F	Zr	30	1.00 × 10 ⁻⁴	3	1.19 × 10 ⁻⁶	359	35	8.012	2051	0.064	110	0.25 ± 0.14
Yoshino pyroclastic flow	Zr	30	1.06 × 10 ⁻⁴	7	6.07 × 10 ⁻⁵	402	93	8.011	2051	0.427	60	0.52 ± 0.20

(1) Analysed mineral Zr: zircon.

(6) Age: $T = (1/\lambda_D) \cdot \ln[1 + \lambda_D \cdot \zeta \cdot (\rho_i/\rho_s) \cdot \rho_d]$.

(2) Pr(χ^2): probability of obtaining the χ^2 value for ν degrees of freedom (ν = number of crystals-1) (Galbraith, 1981).

(7) Error: $\sigma_T = T \times [1/(\sum N_i + 1) \sum N_i + 1/(\sum N_i + 1) \sum N_i + (\sigma_\zeta/\zeta)^2]$.

(3) Ages were calculated using a dosimeter glass NIST-SRM612.

(8) The total decay constant of ²³⁸U: $\lambda_U = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$.

(4) Zircon grains were irradiated using TRIGA MARK II nuclear reactor of St Paul's University (Rikkyo Daigaku), Japan.

(9) Zeta value: $\zeta = 372a5$ (Danbara et al., 1991).

(5) r: correlation coefficient between ρ_s and ρ_i .

代測定より、以下のように解釈できる。

沖小島ボーリングコア試料は、貝化石を含むこと、斜交層理を示すこと、沖小島流紋岩に水冷破碎部が確認できる(巽・井上, 1993)ことから、約0.2 Ma以前の沖小島付近の地表面は、水面下にあったと考えられる。そして当時の通常の火山活動は、あまり爆発的なものではなく、現在の桜島のように、断続的に降下火山灰、火山礫を放出する活動であった。しかし沖小島流紋岩噴出以前には、爆発的な噴火を示唆する、5枚の軽石濃集層と、1枚の溶結凝灰岩が確認される。つまり、最低6回の爆発的な噴火活動があったと解釈できる。

4-2 沖小島噴火活動の地質学的対比

これまで始良カルデラ周辺には、さまざまな年代、組成の先始良カルデラ噴出物が報告されている(例えば Nagaoka, 1988; 周藤・他, 2000a, b; 長岡・他, 2001)。その中で、非常に特徴的なガラス質レンズ構造を示す unit C の溶結凝灰岩と、地質学的に対比される可能性のある火砕流噴出物を考察した。

主要分布域、岩相、そして FT 年代から考えると、カルデラ西縁部の吉野台地域に露出する吉野火砕流(大木・早坂, 1970)が挙げられる。吉野火砕流は、ユータキシティック構造の発達する強溶結火砕流堆積物で、

unit C の岩相に類似する。またその年代は、鹿児島市清水町の多賀山公園から採取した試料を測定した結果、 0.52 ± 0.20 Ma であった (Table 1)。先行研究においては、 0.46 ± 0.10 Ma (井村・他, 2001), 0.41 ± 0.02 Ma, 0.44 ± 0.02 Ma (周藤・他, 2001) などが報告されている。これらは unit C の年代、 0.33 ± 0.17 Ma と誤差の範囲で一致している。さらに unit C は、ジルコンのウラン濃度が 70 ppm と、非常に低いという特徴がある。これは吉野火砕流から測定されたジルコンのウラン濃度 60 ppm とよい一致を示す (Table 1)。

また今回は、unit C の溶結凝灰岩と吉野火砕流において、鉱物量比と、鉱物屈折率を用いた対比を行った。その結果、構成鉱物は両者ともに、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、鉄-チタン酸化鉱物、少量のアパタイトと緑色角閃石であり、それらの量比においても両堆積物を区別することはできなかった (Fig. 4)。吉野火砕流からは新鮮な火山ガラスが検出されなかったため、斜方輝石を用いた屈折率対比を行った。その結果、両者ともに、屈折率のピークは 1.706~1.707 を示し、有意な差は認められなかった (Fig. 4)。

以上のことは、unit C の溶結火砕流堆積物が、カルデラ西縁に分布する吉野火砕流に対比される可能性があることを示している。

5. 結 論

今回行った沖小島ボーリングコア試料の岩相記載と FT 年代測定より、以下のことが結論される。

- (1) コア試料のうち、沖小島流紋岩以前の岩相は、凝灰質砂岩が主体で、その中に、5 枚の軽石濃集層と 1 枚の溶結凝灰岩が確認できる。つまり、この時期の活動は、火山灰放出が主体であり、その間にも、軽石を放出するような爆発的噴火や火砕流を噴出する活動があった。
- (2) FT 年代測定から、unit B, C について、沖小島流紋岩との層準の関係から整合的な年代値である、0.4 Ma 前後が得られた。
- (3) unit C の火砕流は、始良カルデラ西縁の吉野火砕流と、岩相、FT 年代測定、鉱物量比、鉱物屈折率において極めて類似点が多く、地質学的に対比される可能性がある。

謝 辞

本論文作成にあたり、産業技術総合研究所の宇都浩三博士には研究当初に有益な助言をいただいた。京都大学の宇野康司博士には草稿を手直ししていただいた。FT 年代測定では(株)京都フィッショントラックの岩野英樹

博士、山下透氏にお世話になった。巽好幸博士、1 名の匿名査読者および編集委員の宮縁育夫氏のご意見は、本論文改善のために非常に有益であった。これらの方々に深く感謝いたします。(編集担当 宮縁育夫)

引用文献

- Aramaki, S. (1984) Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000 years ago. *J. Geophys. Res.*, **89**, 8485-8501.
- 檀原 徹 (1995) 第四紀テフラの高精度フィッション・トラック (FT) 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.
- Danhara, T., Kasuya, M., Iwano, H. and Yamashita, T. (1991) Fission-Track age calibration using internal and external surfaces of zircon. *J. Geol. Soc. Japan*, **97**, 977-985.
- Galbraith, R. F. (1981) On statistical models for fission track counts. *J. Math. Geol.*, **13**, 471-478.
- Gleadow, A. J. W. (1981) Fission track dating methods: what are the real alternatives. *Nucl. Tracks.*, **5**, 3-14.
- 早坂祥三 (1987) 鹿児島湾の地質構造。地団研専報, **33**, 225-233.
- Hurford, A. J. (1990) Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommittee on Geochronology. *chem. Geol.*, **80**; 171-178.
- 井村隆介・奥村晃史・須貝俊彦・檀原 徹 (2001) 南九州火砕流堆積物のフィッション・トラック年代。日本第四紀学会講演要旨集, **31**, 118-119.
- Matumoto, T. (1943) The four gigantic caldera volcanoes of Kyushu, Japan. *J. Geol. Geogr.*, **19**, 1-57.
- 松本英二・前田保夫・竹村恵二・西田史郎 (1987) 始良 Tn 火山灰 (AT) の ^{14}C 年代。第四紀研究, **26**, 79-83.
- Nagaoka, S. (1988) The late Quaternary tephra layers from the caldera volcanoes in and around Kagoshima bay, southern Kyushu, Japan. *Geogr. Rep. Tokyo Metropolitan Univ.*, **23**, 49-122.
- 長岡信治・奥野 充・新井房夫 (2001) 10 万~3 万年前の始良カルデラ火山のテフラ層序と噴火史。地質雑, **107**, 432-450.
- 大木公彦・早坂祥三 (1970) 鹿児島県北部地域における第四系の層序。鹿児島大理学部紀要 (地学・生物学), No. 3, 67-92.
- 周藤正史・石原和弘・巽 好幸 (2000a) 始良カルデラ地域の先カルデラ火山活動史—カルデラ北縁部加治木、国分地域及び南縁部牛根地域の溶岩流試料の K-Ar 年代測定—。火山, **45**, 1-12.
- 周藤正史・宇都浩三・味喜大介・石原和弘・巽 好幸 (2000b) 始良カルデラ周縁部に分布する火山岩の K-Ar 年代測定—爆発的な始良火砕噴火以前の火山活動史—。京都大学防災研究所年報, **43B-1**, 15-35.
- 周藤正史・宇都浩三・味喜大介・石原和弘 (2001) 始良カルデラ周縁部に分布する火山岩類の K-Ar 年代測定 (続報)—カルデラ西縁、北西縁部、及び桜島火山の活動史—。京都大学防災研究所年報, **44B-1**, 305-316.

- 巽 好幸・井上 央 (1993) 桜島・沖小島流紋岩—K-Ar 年代および岩石学的特徴—. 京都大学防災研究所年報, **36B-1**, 1-6.
- 津久井雅志・荒牧重雄 (1990) 始良火砕噴火のマグマ溜まり. 火山, **35**, 231-248.