

論説

ハワイ島西方海底から採取されたフアラライ火山盾状期溶岩の微量元素組成 山崎誠子*・可児智美**・田上高広*

Trace element compositions of Hualalai tholeiites from the west submarine flank of the Big Island of Hawaii Seiko Yamasaki*, Tomomi Kani** and Takahiro Tagami*

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

** 熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻, Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University

Abstract

We report trace element compositions for 10 tholeiitic lavas collected from deep submarine portions of North Kona region, the west flank of Hualalai volcano. The samples were collected during 2002 JAMSTEC Hawaii cruises from the submarine section at Hualalai volcano's northwest rift zone (Dive S690), and an elongate ridge below the central section of the bench (Dive S692). The trace element and isotope compositions of the submarine North Kona tholeiites that erupted during Hualalai shield stage are similar to those of Mauna Loa tholeiites. The samples collected from lower sections of the northwest rift zone of Hualalai (S690-#3A, #3D, #4B; These samples may be related to early shield-stage volcanism.) and from the isolated deep elongate ridge (S692-#13, #14) have lower Zr/Nb than the other submarine North Kona lavas. These results imply that the magma sources that involved in Hualalai volcanism may have changed during shield-stage.

Key words: Hawaii, Hualalai, shield stage tholeiites, trace element compositions, HR-ICP-MS

1. はじめに

太平洋プレート中に独立して存在し、過去 >7000 万年という長期間にわたるプルームの活動により形成されたハワイホットスポットトラックは、マントルプルームの研究に最も適した場所の一つである。深部のマントル物質が上昇して来ていると考えられるホットスポットにおいて、ハワイ火山は最も研究が進んでいるため、マントルプルームの組成構造について多様な制約条件の中で議論ができると考えられる。ハワイ溶岩の中でも、火山体の体積の 95-98%を占める (Clague & Dalrymple, 1987) 盾状期ソレライト溶岩は、ハワ

イプルームの化学組成について最も直接的な情報を与えるだろう (Frey et al., 1994)。そこで、個々のハワイ火山のソレライト溶岩の地球化学的な研究がこれまで多く行われてきた。その結果、(1)火山ごとに溶岩の同位体組成に系統的な差が見られること (e.g., Frey and Rhodes, 1993), (2)地理的にほぼ平行に並ぶ2列の火山列 (Loa trend と Kea trend) の溶岩の地球化学的特徴がそれぞれ異なること (e.g., Tatsumoto, 1978; Stille et al., 1986; Frey and Rhodes, 1993; Lassiter et al., 1996; Abouchami et al., 2005), (3)いくつかの火山の盾状期中で同位体組成の時間変化がある (Loa

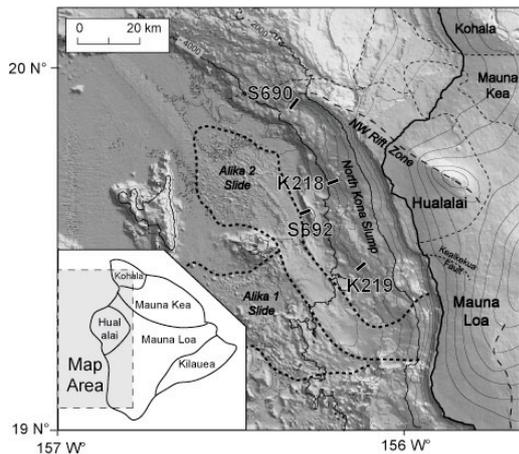


Fig. 1 Shaded slope map of the North Kona region, showing location of the Kaiko dives in 2001 (K218 and K219) and Shinkai 6500 dives in 2002 (S690 and S692). The submarine extension of the NW rift zone is approximate, and provided by Hummer et al. (2006). Subaerial and submarine surficial contacts between separate volcanoes are shown by dotted lines and taken from Wolfe and Morris (1996) and Moore and Clague (1992), respectively.

trend と Kea trend の区分を越えた変動も見られている) こと (e.g., Kurz et al., 1995; DePaolo et al., 2001), がわかった。

フアラライ火山はその陸上部分が後盾状期のアルカリ玄武岩に覆われており (Moore and Clague, 1991), 海底に広がる盾状期ソレイト溶岩が採取困難であったために, ソレイト溶岩についての地球化学的データがこれまでほとんど得られていなかった。ところが, 2001 年と 2002 年に日本とアメリカの共同研究のプロジェクトとして, 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の ROV 「かいこう」, 有人の潜水艇 「しんかい 6500」 を用いて, フアラライ西側山腹, ノースコナ地域の深海底が初めて調査され, マニピュレーターによって 52 サイトでサンプリングが行われた (Fig. 1)。4 つの潜航場所は, フアラライ海底山腹の急傾斜部分において, フアラライ盾状期溶岩の層序を幅広く覆うように選ばれ, ソレイト質の枕状溶岩が採取された (Hammer et al., 2006; Lipman and Coombs, 2006)。

本論文では, このノースコナ地域海底から採取されたフアラライ盾状期のソレイト溶岩のうち, 2002 年 「しんかい」 で採取された 10 試料につい

ての微量元素組成データを報告する。フアラライ北西リフトゾーンから幅広い年代を含むように系統的に採取された試料 (Dive S690) や, 盾状期より初期の火成活動に関連すると考えられる底部のブロックからの試料 (Dive S692) の地球化学的データは, フアラライ火山の盾状期におけるマグマ生成過程の変化や, Loa trend の火山に関与したマントル起源物質を時間変動を遡ってとらえるために重要である。本論文では, このノースコナ地域海底から採取されたフアラライ盾状期のソレイト溶岩のうち, 2002 年 「しんかい」 で採取された 10 試料についての微量元素組成データを報告する。フアラライ北西リフトゾーンから幅広い年代を含むように系統的に採取された試料 (Dive S690) や, 盾状期より初期の火成活動に関連すると考えられる底部のブロックからの試料 (Dive S692) の地球化学的データは, フアラライ火山の盾状期におけるマグマ生成過程の変化や, Loa trend の火山に関与したマントル起源物質を時間変動を遡ってとらえるために重要である。

2. 地質概要と分析試料

2.1. フアラライ火山

ハワイ島マウナロア火山の北西約 40 km に位置し, 地理的には Loa trend に属するフアラライ火山は, ハワイ島で 3 番目に若い火山であり, 現在はアルカリ玄武岩を噴出する後盾状期の活動を続けている。山頂高度は 2,523 m, 陸上の体積は約 600 km³ であり, 751 km² という面積はハワイ島の 7.2% を占める (Moore et al., 1987)。より年代学的研究が進んだ他のハワイ火山の活動との比較から, この火山は ~800 ka に成長を始め, ~300 ka に海面上に現れたと推定されている (Moore and Clague, 1992)。フアラライ火山の陸上表面の約 80% は過去 5000 年のアルカリ玄武岩の溶岩流で覆われており (Moore and Clague, 1991), 一番最近では 1800-1801 年に噴火がおこっている。北西リフトゾーン海底の水深 430 m からドレッジによって採取された盾状期のソレイト溶岩と陸上のアルカリ玄武岩の Ar-Ar 年代により, フアラライ火山の盾状期から後盾状期の移行は ~130 ka から ~100

kaの間であると考えられている (Moore and Clague, 1991; Cousens et al., 2003).

2.2. 各潜航と分析試料について

フアラライ盾状期の地球化学的、構造的な発達を研究するために、2001年と2002年にフアラライ西側山腹に広がるノースコナ地域の海底部分において4つの潜航が行われた。2001年にはノースコナスランプベンチの中腹部において「かいこう」により2つの潜航が行われた (Dives K218, K219; Fig. 1)。Dives K218, K219の試料採取地点は、その傾斜がフアラライ山頂を向いており、フアラライ火山に由来すると考えられる。これらの潜航では中腹部の急斜面を上昇し、スランプの後に噴出し被覆したと考えられるソレライト溶岩が採取された (Hammer et al., 2006; Lipman and Coombs, 2006)。2002年に行われた「しんかい6500」の潜航では、フアラライ北西リフトゾーン北西端の南側の急斜面 (Dive S690) と、ノースコナスランプベンチの底に位置する細長いリッジ (1.8 km×8.2 km×300-700 m; Dive S692) からサンプリングが行われた。Dive S690では北西リフトゾーンの層序をはっきりと与える斜面において系統的に試料が採取された。Dive S692では前盾状期か盾状期初期に噴出したと考えられるアルカリ岩が採取され (本研究では分析はしていない)、リッジの上部ではソレライト溶岩が採取された (#13, #14, #15)。このことからこのリッジは盾状期初期に起こったスランプブロックの破片で、その後の溶岩流によって被覆されていないと考えられる (Hammer et al., 2006)。また、このリッジの底部からの試料 (#1, #2) は、隣接するマウナロア火山との境目で採取されたものであり、マウナロア起源の可能性がある (Hammer et al., 2006)。以上のことから、各潜航試料の噴出時期は、S692 (#13, #14, #15), S690, K219の順であると推定され、S690の浅部試料 (#8A, #8B) と K219の試料の噴出時期はほぼ同時期と考えられる (Hammer et al., 2006)。潜航で採取された試料には、陸上で噴出したフアラライ火山の溶岩流や現在の海岸線から直接堆積したと考えられるよう

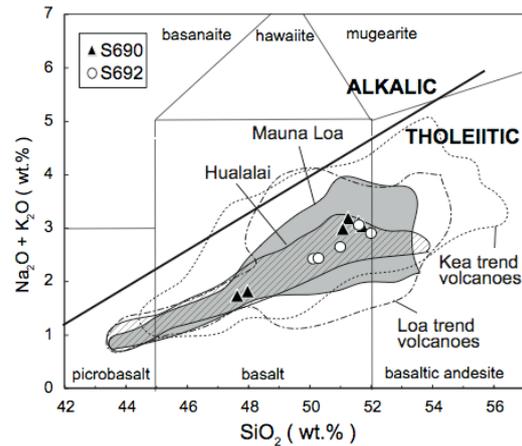


Fig. 2 Major element compositions for S690, S692 tholeiites with Hawaiian tholeiites. The compositional fields of Hawaiian tholeiites are drawn on the basis of GEOROC database (<http://georoc.mpchmainz.gwdg.de/georoc/>).

な海岸の砂の堆積物は見られないことから、フアラライ火山の海底の盾状期 (>130 ka, おそらく >300 ka) に噴出したと考えられる (Lipman and Coombs, 2006)。

試料のほとんどは2-12 mmほどの厚さの急冷ガラス部分を持ち、無斑晶質のS692-#1, #2を除いて、1-25%のカンラン石斑晶を含む玄武岩～ピクライト質玄武岩であった。また、分析に用いたすべての枕状溶岩の主成分元素組成は、これまで報告されているフアラライ火山の北西リフトゾーンの海底溶岩、マウナロア火山のソレライト溶岩の組成に似ていた (Fig. 2; Hammer et al., 2006; Lipman and Coombs, 2006)。

3. 分析手法

10 試料のフアラライ海底溶岩の微量元素組成分析のための化学処理は、熊本大学地球化学実験室でおこなった。溶岩試料は鉄鉢、めのう乳鉢を用いて砕き、双眼顕微鏡下で新鮮なガラスもしくは石基の部分のみを約 100 mgハンドピックにより集めた。集めた岩石チップ (大きさ 0.3-1 mm程度) は 1N の塩酸で 1 分間、超純水で 3 分間×3 回超音波洗浄したのち、硝酸とフッ化水素酸で分解した。その後、蒸発乾固させた試料を硝酸で完全に溶解させ、硝酸濃度が約 2%となるように、超純水で希釈した。この希釈溶液に、内標準溶液 (In, Re, Bi, Rh) を添加し、測定用試料溶液とした。

Table 1 Trace element data for the submarine tholeiites of Hualalai volcano.

Sample ID	S690-#					S692-#					BHVO-2	BHVO-2 (Ref.value)
	3A	3D	4B	8A	8B	1	2	13	14	15		
Depth (m)	2929	2929	2782	2104	2104	4510	4510	4120	4120	4120		
La (ppm)	12.6	12.6	11.2	7.5	7.6	7.6	5.4	7.4	8.2	8.3	15.2	15.2
Ce (ppm)	29.5	31	27.5	18	20.5	20.3	14.5	19	21.1	21.5	37.6	37.5
Pr (ppm)	4.53	4.45	3.87	2.94	3.05	3.11	2.26	2.84	3.07	3.15	5.52	5.29
Nd (ppm)	19.9	19.6	18.5	13.7	14.1	16.1	11.7	13.9	15	15.8	24.7	24.5
Sm (ppm)	5.64	6.02	5.1	4.4	4.68	4.67	3.56	3.9	4.11	4.34	6.4	6.07
Eu (ppm)	1.69	1.72	1.52	1.18	1.3	1.55	1.18	1.25	1.31	1.37	1.98	2.07
Gd (ppm)	5.92	5.68	5.07	4.21	4.58	4.58	3.41	3.97	4.21	4.34	6.15	6.24
Tb (ppm)	0.886	0.939	0.798	0.661	0.742	0.72	0.58	0.63	0.67	0.71	0.936	0.936
Dy (ppm)	5.23	5.07	5.09	4.4	4.53	4.8	3.75	4.01	4.22	4.62	5.44	5.31
Ho (ppm)	1.03	0.98	0.93	0.84	0.84	0.95	0.68	0.77	0.81	0.85	1.05	0.97
Er (ppm)	2.68	2.79	2.59	2.3	2.6	2.5	1.88	1.98	2.09	2.17	2.56	2.54
Tm (ppm)	0.362	0.411	0.367	0.384	0.344	0.36	0.27	0.28	0.3	0.31	0.355	0.341
Yb (ppm)	2.23	2.3	1.98	1.96	2.05	2.11	1.65	1.81	1.76	1.75	2.24	2
Lu (ppm)	0.372	0.312	0.299	0.272	0.284	0.3	0.25	0.24	0.27	0.3	0.291	0.274
Nb (ppm)	13.2	13.7	12.6	8.1	7.8	12.2	9.4	10.5	10.9	9.3	18.7	18
Zr (ppm)	161	161	148	110	114	174	135	118	125	126	173	172

The analytical uncertainties (2σ) for each element are based on replicate analyses of the standards (expressed as percent): La (4.0), Ce (0.7), Pr (1.1), Nd (4.9), Sm (3.0), Eu (5.3), Gd (1.4), Tb (1.1), Dy (4.0), Ho (10), Er (5.2), Tm (4.3), Yb (10), Lu (7.9), Nb (0.5), Zr (1.2). Reference values for BHVO-2 standard are from Raczec et al. (2000) and Wilson (1997).

微量元素組成測定には、熊本大学設置の高分解能誘導結合プラズマ質量分析計 (HR-ICP-MS; Thermo Finnigan ELEMENT) を用いた。USGS 標準岩石 (BIR-1, AGV-2, BHVO-2, BCR-2, W-2, GSP-2) を硝酸とフッ化水素酸で分解し、試料と同様の手順で希釈した。それぞれの標準試料溶液について2度ずつ繰り返し測定をし、検量線を作成した。測定データは添加した内標準元素のカウンタ数を用いてドリフト補正し、それぞれの元素について検量線法により試料の元素濃度を決定した。S690, S692 の潜航場所から採取された 10 試料の分析結果、標準岩石 (BHVO-2) についての分析結果と推奨値は Table 1 に示した。

4. 分析結果と考察

4.1. 希土類元素存在度パターンの比較

Fig. 3a には、フアラライ溶岩の希土類元素 (REE) 存在度パターンをコンドライトで規格化し、比較のために他のいくつかのハワイ火山の盾状期溶岩の希土類元素組成の平均値をあわせて対数表示した。ここで、フアラライ火山の盾状期溶

岩の値は、既報のデータ (3 試料; Norman and Garcia, 1999) と、Dive K219 試料のデータ (12 試料; Kani, unpublished data), 今回分析した Dives S690, S692-#13, #14, #15 (8 試料) の平均をとったものである。S692-#1, #2 の試料はマウナロア起源の可能性があるので除いた。ここに示したハワイ火山盾状期溶岩についての各 REE 存在度の平均値は、軽希土類元素 (LREE) に富み、重希土類元素 (HREE) に枯渇した右下がりのパターンを示し、中希土類元素 (MREE) から軽希土類元素において火山ごとに広がりが見られる。大局的に見ると、Kea trend 火山 (キラウエア, マウナケア) の溶岩の方が、Loa trend 火山 (マウナロア, フアラライ, ロイヒ, コオラウ) の溶岩よりも高い希土類元素存在度を示す。最も LREE に富むのはキラウエア溶岩 (La/Yb \sim 6.0) で、マウナケア溶岩, ロイヒ溶岩, コオラウ溶岩と続き、フアラライ溶岩とマウナロア溶岩はもっともゆるやかな傾き (La/Yb \sim 3.8-4.7) を持つ。

Fig. 3b は Dives S690 と S692 について各試料の REE 存在度パターンを、Dive K219 (Kani, un-

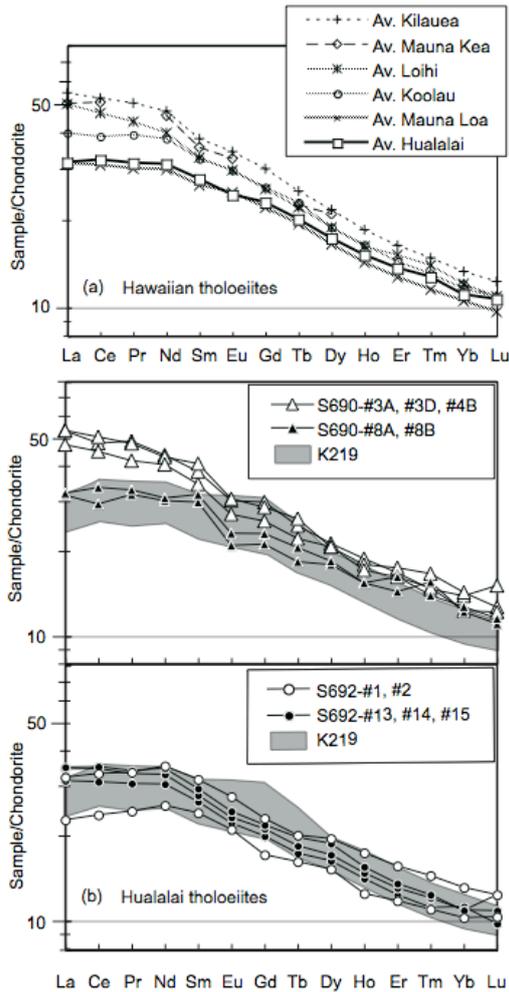


Fig. 3 Chondrite normalized REE pattern for (a) the average of Hawaiian tholeiites and (b) S690, S692 tholeiites (this study) and K219 tholeiites (Kani, unpublished data). Chondrite normalizing values are from McDonough and Sun (1995). The averages of REE abundances for Kilauea (n = 292), Mauna Kea (n = 218), Loihi (n = 46), Koolau (n = 190), Mauna Loa (n = 195) are calculated on the basis of the data from GEOROC database (<http://georoc.mpchmainz.gwdg.de/georoc/>).

published data) のデータ範囲とともに示した。フアラライ海底溶岩のほとんどは、ほぼ平らな LREE と右下がりの HREE のパターンを示す。しかし、S690-#3A, #3D, #4B の 3 試料は他のフアラライ海底溶岩より LREE に富み、LREE から HREE まで一様に下がるパターンを示した。フアラライ北西リフトゾーンから採取された Dive S690 の試料は、層序関係が明瞭だと考えられ、#3A, #3D, #4B は、#8A, #8B より深部から採取された試料であり、フアラライ盾状期初期の溶岩の可能性が高い。#3A, #3D, #4B の REE パターンはフアラライ盾

状期初期の特徴を表すと考えられる。

4.2. 微量元素組成と Pb, Sr 同位体組成から見た起源物質の特徴

Fig. 4 には、フアラライ海底溶岩についての La/Yb と Zr/Nb の関係を示した。ここではフアラライ火山に隣接する Loa trend のマウナロア火山と、Loa trend 火山, Kea trend 火山の盾状期溶岩の組成範囲も同時に示した。マグマ生成過程での部分溶融度の違いなどで大きく変化すると考えられる La/Yb に対し、Zr と Nb はマグマ生成過程でほぼ同じ挙動をする場合が多く、ハワイ溶岩の Zr/Nb は同位体組成変化とともに変化するために、マグマ源の化学組成の特徴を表す指標として用いられてきた (e.g., Frey and Rhodes, 1993)。この図において、マウナロアは低い La/Yb (2.5-6.0)、やや高い Zr/Nb (10.8-17.2) を持ち、比較的狭い組成範囲を示す。フアラライ盾状期溶岩のほとんどは、マウナロア盾状期溶岩の組成範囲と一致し、比較的低い La/Yb (3.3-5.7) と、中間的～高い Zr/Nb (11.2-17.0) の値を持つ。Dive S690 では比較的高い La/Yb (5.5-5.7)、低い Zr/Nb (11.8-12.2) を示す #3A, #3D, #4B と、比較的低い La/Yb (3.7-3.8)、中間的な Zr/Nb (13.6-14.7) を示す #8A, #8B の 2 つのグループに大別できる。

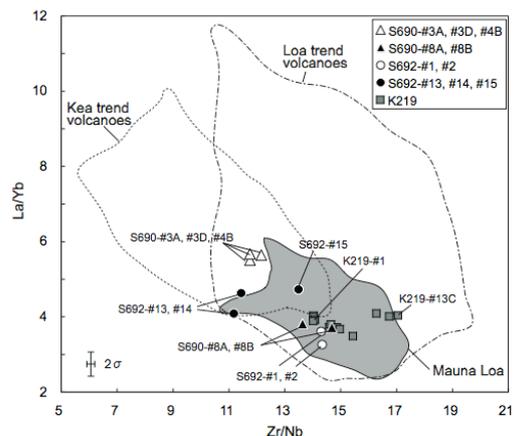


Fig. 4 La/Yb vs Zr/Nb compositions for S690, S692 tholeiites (this study), K219 tholeiites (Kani, unpublished data), and Hawaiian tholeiites. The 2σ error bars are shown in the figure. The compositional fields of Loa trend volcanoes, Kea trend volcanoes and Mauna Loa tholeiites are drawn on the basis of GEOROC database.

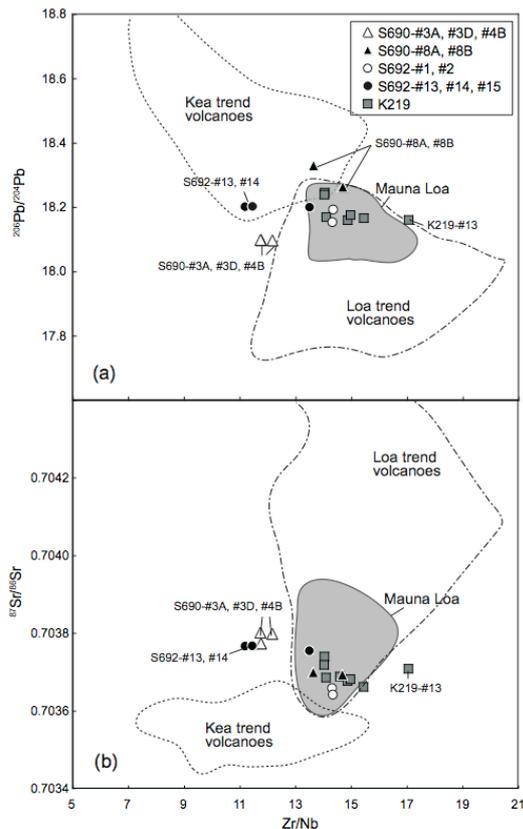


Fig. 5. (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs Zr/Nb compositions and (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Zr/Nb compositions for S690, S692 tholeiites (this study), K219 (Kani unpublished data), and Hawaiian tholeiites. The 2σ error bars are smaller than the size of the symbols. The compositional fields of Loa trend volcanoes, Kea trend volcanoes and Mauna Loa tholeiites are drawn on the basis of GEOROC database. Note the restricted range in Zr/Nb shown by Mauna Loa will expand to as more isotopic data becomes available for samples that also have been analyzed for trace elements.

Dive K219 の試料は、ほぼ一定の La/Yb (3.5-4.1) を示すのに対し、広い Zr/Nb (14.0-17.0) の組成変動を示す。低い La/Yb を示す S692-#1, #2 の試料がマウナロア起源であると仮定すると、低い Zr/Nb を持つ S692-#13, #14 と S690-#3A, #3D, #4B は、ファアラライ盾状期の初期のマグマ源の特徴を表し、その後ファアラライ火山のマグマ源は K219-#13 に見られるような高い Zr/Nb を持つように変化していったのかもしれない。

ファアラライ盾状期溶岩の起源物質の特徴をより詳しく明らかにするために、Fig. 5, 6 にはファアラライ海底溶岩の Pb, Sr 同位体組成データ (Yamasaki et al., 投稿中) と Zr/Nb の関係を示した。Fig. 4 と同様に Loa trend 火山, Kea trend

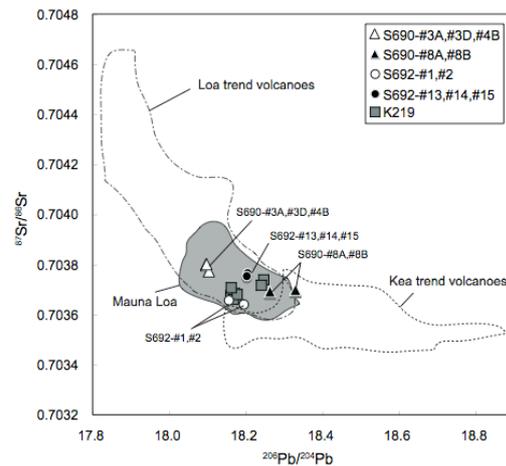


Fig. 6 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ compositions for S690, S692 tholeiites (this study), K219 (Kani unpublished data), and Hawaiian tholeiites. The compositional fields of Loa trend volcanoes, Kea trend volcanoes and Mauna Loa tholeiites are drawn on the basis of GEOROC database.

火山とマウナロア火山の盾状期溶岩の組成範囲も示した。Fig. 5a では、Kea trend 溶岩は高い $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18.16-18.85) と低い Zr/Nb (7.5-15.5) を持ち、Loa trend 溶岩は低い $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (17.75-18.27) と中間的～高い Zr/Nb (11.7-20.3) を示す。また、マウナロア溶岩は中間的な $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18.0-18.3) とやや高い Zr/Nb (13.5-17.2) を持つ。Fig. 5b では、Kea trend は低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7035-0.7037) と Zr/Nb (7.5-15.5) を持つのに対し、Loa trend 溶岩は高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7036-0.7045) と Zr/Nb (11.7-20.3) を持つ。これらの図において、ファアラライ海底溶岩のほとんどは中間的なマウナロア溶岩の組成範囲に重なる。S690-#3A, #3D, #4B と S692-#13, #14 については、より低い Zr/Nb (11.2-12.2) を示し、マウナロア溶岩の組成範囲外にプロットされた。特に S690-#3A, #3D, #4B はより低い $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ と高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を示し、他のファアラライ海底溶岩と区別される。この Pb, Sr 同位体組成の広がりをも説明するためにも、ファアラライ火山盾状期のマグマ生成には、ほかのハワイ火山の溶岩同様 2 成分以上の起源物質の関与を考える必要がある。Yamasaki et al. (投稿中) は、Dive S690 の 10 試料について同位体組成を報告し、Pb, Sr 同位体組成が試料採取深度とともに変化していることがか

ら、フアラライ盾状期の間にそのマグマ生成に関与した起源物質あるいはその混合割合が変化した可能性について指摘した。本研究で分析した Dive S690 試料の微量元素組成でも、深度とともにより低い Zr/Nb から高い Zr/Nb への変化が見られ (Fig. 7), 同位体組成からの知見を支持する結果であった。

5. まとめ

フアラライ海底から採取された盾状期ソレライト溶岩の希土類元素存在度パターンは、マウナロア溶岩とほぼ等しく、ハワイ火山の中でも比較的ゆるやかな傾きを示した。また、フアラライ海底溶岩はマウナロア火山の盾状期溶岩に似た微量元素組成、同位体組成を示し、そのマグマ生成に関与した起源物質が同じであった可能性がある。フアラライ火山北西リフトゾーンの層序をはっきり与えると考えられる Dive S690 の試料について、より深部から採取された試料 (S690-#3A, #3D, #4B) は浅部から採取された試料 (S690-#8A, #8B) よりも低い Zr/Nb, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ と高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を示した。このことから、フアラライ火山盾状期の間に、溶岩の起源物質が変化した可能性がある。

謝辞

本論文を査読していただいた兼岡一郎氏、小木曾哲氏には、大変有意義で建設的なコメントをいただいた。また、編集主幹の山田国見氏には、丁寧なチェックとアドバイスをしていただいた。本研究で分析した試料は、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の 2002 年「よこすか／しんかい 6500」のハワイ調査航海によって採取され、提供していただいた。また、本研究は文部科学省および日本学術振興会による科学研究費補助金 (no. 16403009) と、21 世紀 COE プログラム (京都大学, G3) の一部として行われた。ここに記して深く感謝いたします。

文献

Abouchami, W., Hofmann, A.W., Galer, S.J.G., Frey, F.A., Eisele, J. and Feigenson, M., 2005, Lead

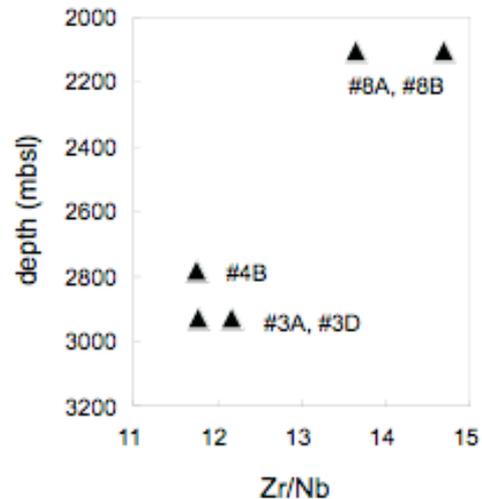


Fig. 7 Zr/Nb ratios of lavas from Hualalai submarine NW rift zone (Dive S690) as a function of sampling depth in meters below sea level.

isotopes reveal bilateral asymmetry and vertical continuity in the Hawaiian mantle plume. *Nature* 434, 851-856.

Clague, D.A. and Dalrymple, G.B., 1987, The Hawaiian-emperor volcanic chain. Part 1: Geological evolution. US Geological Survey, Professional Papers 1350, 5-54.

Cousens, B.L., Clague, D.A. and Sharp, W.D., 2003, Chronology, chemistry, and origin of trachytes from Hualalai volcano, Hawaii, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 4, 2003GC000560.

DePaolo, D.J., Bryce, J.G., Dodson, A., Shuster, D.L. and Kennedy, B.M., 2001, Isotopic evolution of Mauna Loa and the chemical structure of the Hawaiian plume. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2, 2000GC000139.

Frey, F.A. and Rhodes, J.M., 1993, Intershield geochemical differences among Hawaiian volcanoes: implications for source compositions, melting process and magma ascent paths. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, series a342*, 121-136.

Frey, F.A., Garcia, M.O. and Roden, M.F., 1994, Geochemical characteristics of Koolau volcano: implications of intershield differences among Hawaiian volcanoes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 1441-1462.

- Hammer, J.E., Coombs, M.L., Shamberger, P.J. and Kimura, J., 2006, Submarine sliver in North Kona: a window into the early magmatic and growth history of Hualalai volcano, Hawaii. *J. Volcanology And Geothermal Reseach* 151, 157-188.
- Kurz, M.D., Kenna, T.C., Kammer, D.P., Rhodes, J.M. and Garcia, M.O., 1995, Isotopic evolution of Mauna Loa volcano: a view from the submarine southwest rift zone. *Mauna Loa Revealed*, Rhodes, J. M., Lockwood, J. P., AGU, Washington DC, 289-306.
- Lassiter, J.C., DePaolo, D.J. and Tatsumoto, M., 1996, Isotopic evolution of Mauna Kea volcano: results from the initial phase of the Hawaiian scientific drilling project. *J. Geophys. Res.* 10, 11769-11780.
- Lipman, P.W. and Coombs, M.L., 2006, Submarine slumping on the North Kona flank of Hualalai volcano, Hawaii, during tholeiitic shield-stage volcanism. *J. Volcanology and Geothermal Research* 151, 189-216.
- McDonough, W.F. and Sun, S., 1995, The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 120, 223-253.
- Moores, R.B., Clague, D.A., Rubin, M. and Bohron, W.A., 1987, Hualalai Volcano: A preliminary summary of Geologic, Petrologic, and Geophysical data, In: *Volcanism in Hawaii*, USGS Professional Paper 1350, pages 571-585
- Moore, R.B. and Clague, D.A., 1991, Geologic map of Hualalai Volcano, Hawaii. U.S. Geol. Surv. Misc. Invest. Map, I-2213.
- Moore, J.G. and Clague, D.A., 1992, Volcano growth and evolution of the island of Hawaii. *Bull. Geol. Soc. Am.* 104, 1471-1489.
- Norman, M.D. and Garcia, M.O., 1999, Primitive magmas and source characteristics of the Hawaiian plume: Petrology and geochemistry of shield picrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168, 27-44.
- Raczek, I., Stoll, B., Hofmann, A.W. and Jochum, K.P., 2000, High-Precision Trace Element Data for the USGS Reference Materials BCR-1, BCR-2, BHVO-1, BHVO-2, AGV-1, AGV-2, DTS-1, DTS-2, GSP-1 and GSP-2 by ID-TIMS and MIC-SSMS. *Geostandards Newsletter*, 25, 77-86.
- Stille, P., Unruh, D.M. and Tatsumoto, M., 1986, Pb, Sr, Nd and Hf isotopic constraints on the origin of Hawaiian basalts and evidence for a unique mantle source. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50, 2303-2319.
- Tatsumoto, M., 1978, Isotopic composition of lead in oceanic basalt and its implication to mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.* 38, 63-87.
- Wilson, S.A., 1997. Data compilation for USGS reference material BHVO-2, Hawaiian Basalt. U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Wolfe, E.W. and Morris, J.D., 1996, Geologic map of the island of Hawaii. U. S. Geological Survey Miscellaneous Investigations, Map, I-2524.