

2013 年噴火直前に得られた西之島火山の地球物理学的，地質学的特徴[†]

伊藤弘志*

Geophysical and geological characteristics of Nishinoshima volcano obtained before the 2013 eruption[†]

Koji ITO*

Abstract

Nishinoshima volcano in the middle of the Izu-Bonin (Ogasawara) Arc is one of the active volcanoes that we, the Japan Coast Guard, regularly monitor for maritime safety. We conducted geological and geophysical surveys in 2010, 2011, and 2012, preceding the 2013 Nishinoshima eruption, which occurred for the first time after approximately 40 years of quiescence. In this paper, we report the data of the detailed seafloor topography, free-air and Bouguer gravity anomalies, magnetic anomaly, and rock sampling obtained before the eruption.

Nishinoshima volcano is a young volcano formed on or among old volcanoes. Gravity anomaly data would indicate the location of the magma chamber. Both alkaline and subalkaline rock series are recognized for the Nishinoshima magma, indicating different magmatic processes beneath the volcano.

1 はじめに

海上保安庁は，我が国周辺海域の海域火山における火山の基礎的な情報整備の一環として，測量船による火山基礎情報図調査を行っている。これは測量船を用いた地形，地質構造，地磁気異常，重力異常，噴出物の化学組成等の基礎的情報の収集を目的として 1998 年以降，10 カ所の海域火山で行われているものである。

海域火山は膨大な海水によって覆い隠されており，また人影まばらな海洋域に位置することが多い。そのため，活動が活発化したり噴火が発生したりしても人間の目に触れずに終息してしまうことも稀ではないが，近年では 2000 年に三宅島（例えば中田・他，2001；西澤・他，2001），2002

年に鳥島（伊藤・他，2003），2005 年及び 2010 年に福徳岡ノ場（大谷・他，2006；伊藤・他，2011），2015 年に口永良部島（宇平・通山，2015）で噴火が発生しており，火山活動の現状の把握や予測に役立てるために火山基礎情報図調査の重要性が高まっている。

小笠原諸島の西之島は，2013 年 11 月に 40 年ぶりに噴火した。その後，約 2 年間にわたって大量の溶岩を流出し，旧西之島と一体化して面積を著しく拡大させた。この火山については噴火前の 2010 年から 2012 年にかけて火山基礎情報図調査が行われ，基礎的な情報が得られていた。本報告は，この時の調査結果を取りまとめたものである。

[†] Received April 3, 2017; Accepted June 2, 2017

* 海上保安大学校 海事工学講座 Maritime Science and Technology Department, Japan Coast Guard Academy

2 位置とテクトニクス

西之島火山は七島・硫黄島海嶺の一部を形成する火山島であり、東京から 950 km 南、小笠原諸島父島から 120 km 西方に位置する (Fig. 1)。七島・硫黄島海嶺は伊豆・マリアナ島弧の火山フロントに相当し、北部の伊豆諸島付近では低アルカリソレライト岩系、火山列島付近ではアルカリ岩系のマグマが活動している (Stern et al., 2003)。西之島は地理的に両者の中間にあり、岩石の化学組成もこれらの中間的なものが報告されてきた (小坂, 1973, 1974; 小坂・他, 1974)。西之島火山北方には七曜海山列が、南方には海形海山、海徳海山を経て火山列島が存在している。

一方、西之島火山の東方には小笠原トラフが、西方には西之島トラフが発達し、さらに西方には

西七島海嶺が分布する。西七島海嶺では北東-南西方向の雁行海山列が顕著であり、西之島火山の西方約 30 km にも全長約 25 km の海山列が見られる。

また、伊豆・マリアナ島弧は地震波速度が 6.0 - 6.3 km/s の中部地殻を持つ発達した島弧であり (Suyehiro et al., 1996)、小笠原トラフから七島・硫黄島海嶺にかけての地殻の厚さは約 20 km であると見積もられている (Kodaira et al., 2007; 金田・他, 2015)。

3 地形及び山体構造

2013 年噴火前の西之島の大きさは、最大径約 650 m、最大標高 25 m の小島であった。島の北西部は 1973 年噴火以前に存在していた旧島部分で、細長く平たい航空母艦のような形状をしていた。1973 年の噴火によって西之島新島が形成され、しばらくして波や潮流によって運ばれた火山碎屑物により旧島と新島が一体化した。その後、

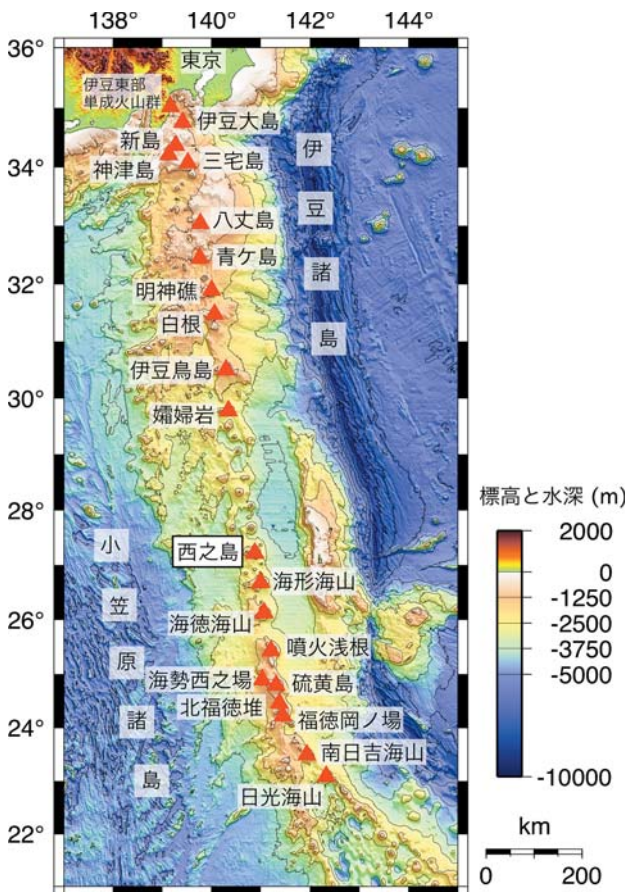


Fig. 1. Location map of Nishinoshima volcano. The red triangles are the volcanic islands and the submarine volcanoes observed by Japan Coast Guard.

図 1. 西之島火山の位置。赤三角は海上保安庁が監視する海域火山。

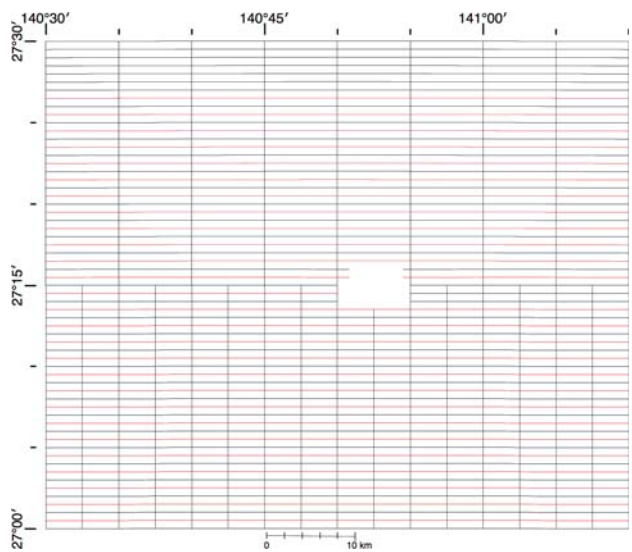


Fig. 2. Survey lines in this report. Topographic survey, seismic survey, gravity survey, and geomagnetic survey were conducted on the black survey lines. Topographic survey, gravity survey, and geomagnetic survey were conducted on the red survey lines.

図 2. 西之島火山における調査航跡図。黒測線では海底地形調査、海底地殻構造探査、海上重力探査、海上磁気探査を、赤測線では海底地形調査、海上重力探査、海上磁気探査を行った。

海食によりその火砕丘はほぼ消失してしまったが、破碎された礫や噴火時に放出された火山噴出物が波によって集まり、年々の著しい地形変化によって、1990年頃に2013年噴火前の形になった。

この西之島を含む西之島火山の地形及び地下構造を明らかにするため、マルチビーム測深機による地形調査とエアガンを用いた反射法地震探査を行った。マルチビーム測深機は測量船「昭洋」搭載のSeabeam2112を、地震探査システムは350 cu. inch (約5.7 liter) のエアガン3基(2010年)及び2基(2011年)とシングルチャンネルのストリーマーケーブルを使用した。調査測線は主測線を東西にとり、2010年の地形調査及び反射法

地震探査並びに2011年の地形調査は測線間隔0.5海里(約900 m)、2011年の反射法地震探査は1海里(約1.9 km)とした。また、4 kmごとに南北方向の補助測線を設定した。調査測線図をFig. 2に、得られた地形陰影図をFig. 3に示す。

地形陰影図から明らかなように、西之島火山は、海面下に直径約30 km、比高約2000 mの円錐形をした大きな火山体を持つ。山頂には水深40 mの島棚が発達し、その中心部にはかつて火口が存在していた(大川・横山, 1977)。1973年噴火はこの火口から始まり、最終的にはすべて埋め立てられている。周囲には小規模な山体がいくつも分布しており、南南東約10 kmに位置する

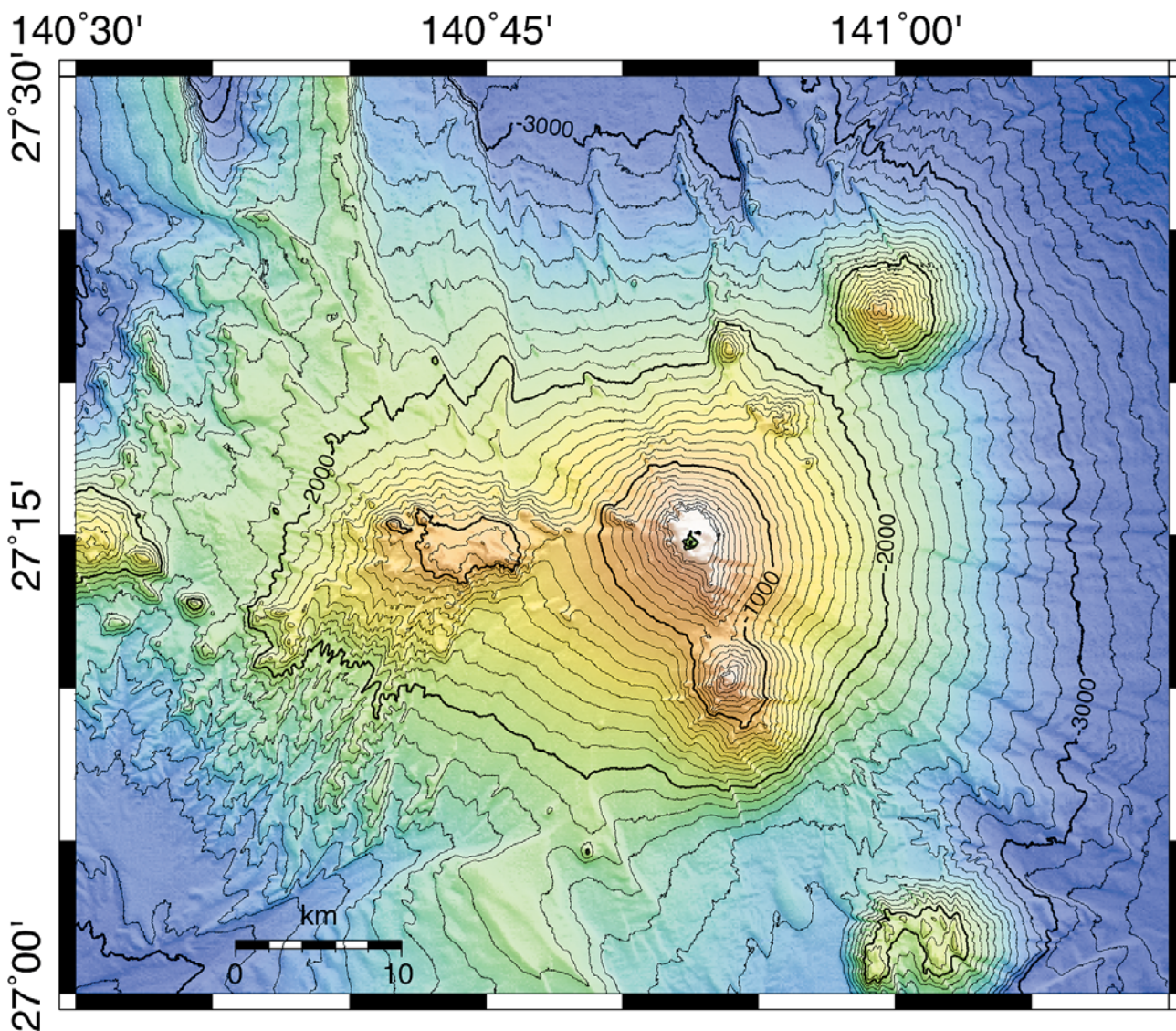


Fig. 3. Topographic chart around Nishinoshima volcano.

図3. 西之島火山周辺の地形陰影図。

西之島南海丘を始めとして、西方約 14 km に位置する山頂が平坦で谷による開析の進んだ山体、北東約 18 km に位置する円錐形の山体、南東約 28 km に位置する開析が進んだ山体などがある。西之島火山はこれらの既存の山体の合間を埋めるようにして成長している。なお、その他に山頂から放射状にいくつかの小さな高まりが見られるが、これらは西之島火山の側火山体であると思われる。

4 地球物理学的特徴

地下の構造を捉えるため、地球物理学的な調査を併せて行った。地磁気については船尾よりプロトン磁力計 (PM-217) を 338 m 曳航し、データを収集した。重力の観測は、船底に備え付けた重力計 (KSS-31) を用いた。

フリーエア重力異常図とブーゲー重力異常図を Fig. 4 及び Fig. 5 に、地磁気異常図を Fig. 6 に示す。地形との対比が付けやすいよう、地形陰影図をそれぞれの背景に挿入した。

フリーエア重力異常は、重力値を観測した場所における標高の影響を取り除いた (フリーエア補正) 後の重力値と正規重力値との差分である。これは主に地形と地下の密度構造による影響を受けた重力異常である。

フリーエア補正を行った後、地形による影響を取り除くために海水を除去し、海底面から基準面まで適当な密度を持った物質で埋めたと仮定し (ブーゲー補正)、さらに地形の凹凸により側方から受ける重力の影響を取り除く地形補正を行って地下の密度構造による影響を表したものがブーゲー重力異常である。一般にブーゲー補正で用いられる平均地殻密度としては 2.67 g/cm^3 が使われることが多いが (例えば及川・金田, 2007)、火山岩においては気泡が多く含まれているため密

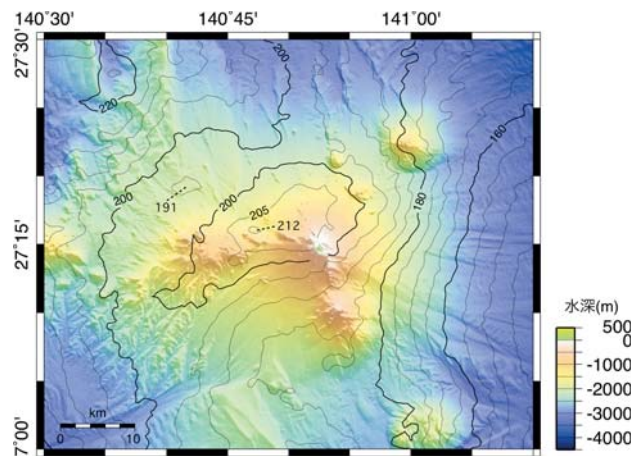


Fig. 5. Bouguer anomaly map around Nishinoshima volcano. Unit of numeral is mgal. Background is the topographic chart.

図 5. 西之島火山周辺のブーゲー重力異常図。数字の単位は mgal。背景は地形陰影図。

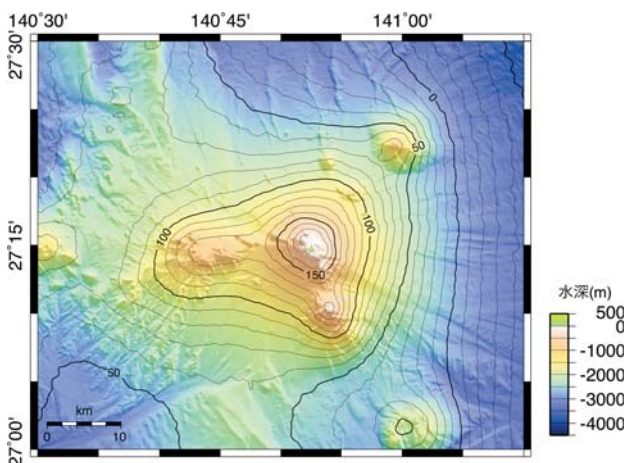


Fig. 4. Free-air anomaly map around Nishinoshima volcano. Unit of numeral is mgal. Background is the topographic chart.

図 4. 西之島火山周辺のフリーエア重力異常図。数字の単位は mgal。背景は地形陰影図。

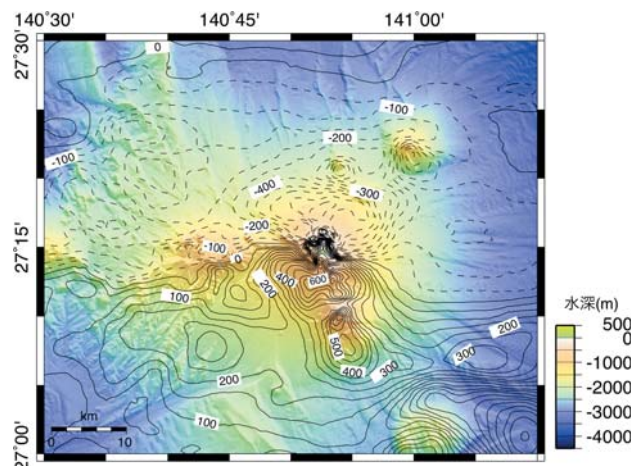


Fig. 6. Geomagnetic anomaly map around Nishinoshima volcano. Unit of numeral is nT. Background is the topographic chart.

図 6. 西之島火山周辺の地磁気異常図。数字の単位は nT。背景は地形陰影図。

度は小さくなると考えられる。今回西之島火山から得られた軽石を除いた岩石の見かけ密度の幅は2.01 ~ 3.09 g/cm³であり（海上保安庁, 2012；海上保安庁, 2014），平均は2.48 g/cm³とやや低い値を示す。そのため，今回は平均地殻密度を大川・横山（1977）に従って2.40 g/cm³とした。地形補正においては萩原（1978）の手法を用いた。

また，地磁気異常を求める際には標準磁場として IGRF2010（IAGA Working Group V-MOD, 2010）を用いた。

5 岩石学的特徴

海面下に隠れた西之島火山やその側火山及び周辺山体などの岩石学的特徴を明らかにするためにドレッジを行い，合計15地点で岩石試料を採取した（Table 1；Fig. 7）。その中から，変質の度合いが小さく，分析のために十分な試料が得られる岩片を選んで薄片観察を行うとともに，蛍光X線分析装置（XRF：X-ray Fluorescence）を用いて全岩化学分析を行った。

今回西之島火山及び周辺から得られた岩石は全て火山岩であり，石質なものと同様に軽石に分けられる。ドレッジで得られる岩石サンプルは基本的に

Table 1. Dredge points around Nishinoshima volcano.

表1. 西之島火山周辺におけるドレッジ地点.

採取年	名前	緯度	経度	火山体区分	産状
2010	P1(2010)	140:59.3	27:1.5	南東の古い火山体	最大30cmの角張った溶岩片。変質はそれほど著しくはないが，やや古びて見える。溶岩片や軽石など複数の岩種が入り混じる。
	P2(2010)	140:53.9	27:10.2	西之島南海丘	最大20cmの，丸みを帯び，赤く酸化し，発泡した火山弾かスパッターのような岩片。
	P3(2010)	140:53.3	27:13.4	西之島の側火山体	最大3cmのやや円摩された溶岩片。色は様々で，複数の岩種が入り混じる。
	P4(2010)	140:50.3	27:15.4	西之島の側火山体	最大20cmの，表面が赤く酸化し，発泡した火山弾かスパッターのような岩片。斜長石斑晶が肉眼で顕著に見られる。
	P5(2010)	140:45.7	27:14.3	西側の古い火山体	最大5cmの円摩した黄白色の凝灰岩片，スコリア，溶岩片。表面にはマンガンコーティングのような黒色の付着物がある。
	P6(2010)	140:30.3	27:14.9	西方の雁行海山	最大20cmの円摩した黄白色の凝灰岩片。表面にはマンガンコーティングのような黒色の付着物がある。
	P8(2010)	140:53.2	27:13.7	西之島の側火山体	最大5cmの全体の赤く酸化し角張った火山弾かスコリアの欠片。
	P9(2010)	140:51.7	27:14.3	西之島火山本体	最大10cmの溶岩片。様々な色，形状，発泡度のものが見られる。
	2011	P2(2011)	140:53.8	27:21	西之島の側火山体
2012	P1(2012)	140:55.9	27:17.8	西之島火山本体	最大5cmの礫～砂。溶岩片や軽石などが入り混じっている。
	P2(2012)	140:41.7	27:15.2	西側の古い火山体	灰色の砂のみからなる。
	P3(2012)	140:40.3	27:28.8	基盤	最大10cmの礫～砂。黒色の溶岩片や黄白色の凝灰岩片などからなる。
	P6(2012)	140:52.2	27:16.1	西之島火山本体	最大30cmの角張った溶岩片。表面はやや酸化して赤くなっている。

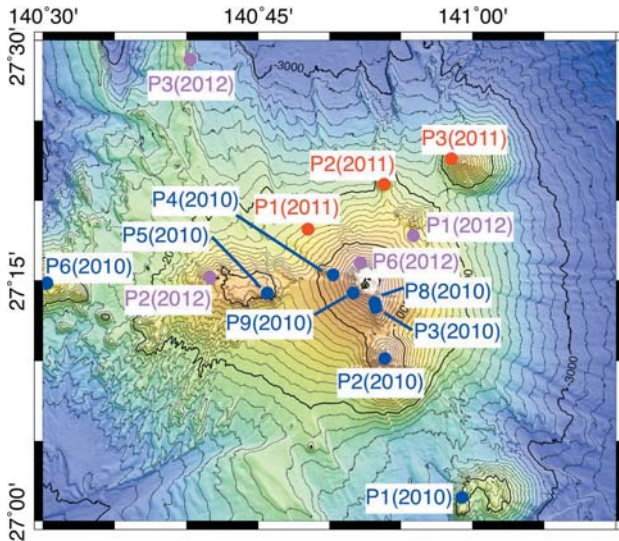


Fig. 7. Location map of dredges. The numbers following each name stand for the surveying year.

図7. ドレッジ地点。地点名称の後の数字は採取した年を示す。

海底に散らばる礫であるため、もとは溶岩であるのか、火山弾であるのか、捕獲岩であるのかといった推定を行うことは困難である。したがって、今回の石質なサンプルは一括して火山岩礫とした。

今回分析した岩石のうち、火山岩礫については近接した火口から噴出したり山体上部から流下したりしてきたものであると考えられる。したがって、岩石サンプルはそれが得られた斜面から直接上方にある火口から噴出したものであるとした。

しかし、海底火山から軽石が噴出した場合には、海面上を数日間漂い風や海流の働きによって遠方まで運ばれて行く事例が知られている（関，1927；吉田・他，1987）。したがって、軽石については採取地点から遠く離れた火山が供給源である可能性がある。

5.1 記載岩石学的特徴

採取された岩石の斑晶鉱物組み合わせを Table 2 に示す。これらの火山岩に含まれる斑晶鉱物は斜長石、かんらん石、単斜輝石、斜方輝石、不透明鉱物で、含水鉱物は含まれていない。石基は結晶度が非常に悪く、濃褐色のガラスが大部分を占め、結晶としては斜長石、輝石、不透明鉱物が認められる。また、気泡中には粘土鉱物が充填されていることがある。なお、詳細な岩石記載は海上保安庁（2012）及び海上保安庁（2014）を参照されたい。

5.2 全岩化学組成

今回合計 15 地点で得られた岩石試料のうち、変質の度合いが少なく、また分析に用いるのに十分な大きさの物を選んで XRF で主成分 10 元素の全岩化学分析を行った。分析を行ったのは 9 地点から得られた計 13 試料である。岩石試料は脱塩処理を行った後に XRF 分析を行い、 FeO 、 H_2O^+ 、 H_2O^- の含有量については湿式分析で決定した。

Table 2. Phenocryst assemblages of the rocks dredged around Nishinoshima volcano.

表2. 西之島火山周辺から得られた岩石の斑晶鉱物組み合わせ。

岩石試料名	産状	斜長石	かんらん石	単斜輝石	斜方輝石	不透明鉱物
P1-1 (2010)	軽石	△		△		△
P1-2 (2010)	火山岩礫	○	△	○		
P1-3 (2010)	火山岩礫	○		○		
P3 (2010)	火山岩礫	○		△		△
P4 (2010)	火山岩礫	○	△	○		
P8 (2010)	火山岩礫	○		△	△	△
P9-1 (2010)	火山岩礫	○	△			△
P9-2 (2010)	火山岩礫	○		△	△	△
P2 (2011)	火山岩礫	○	△	△		△
P1-1 (2012)	火山岩礫	△		△		△
P1-2 (2012)	軽石	△		△		△
P3 (2012)	火山岩礫	○	△	△	○	△
P6 (2012)	火山岩礫	△		△	△	△

○：少量，△：微量

今回得られた 13 試料の分析値を Table 3 に示す。XRF から直接得られたデータの他、全鉄を三価鉄に換算し、無水 100 % で再計算した値も同時に掲載した。岩石名は、化学組成 (Le Maitre et al., 2002) 及び顕微鏡観察の結果を基にして決定した。再計算した分析値及び小坂 (1973), 小坂 (1974), 小坂・他 (1974) によって報告されている 6 試料の分析値を用いて作成したハーカー図を Fig. 8 に示す。

西之島火山及び周辺の古い火山体から得られた岩石に含有される SiO₂ 量を見ると、43.93 % の超塩基性岩から 61.21 % の中性岩までの幅広い組成を示す。ただし、FeO*/MgO は全て 1 より大きな値を示し、初生マグマと見なされ得るものは見られない。晶出相に多く含まれる Al₂O₃, MgO, CaO といった元素は SiO₂ が増加するとともに減少し、TiO₂, Fe₂O₃, MnO といった鉄と似た挙動をする元素はほぼ一定の値を保ち、Na₂O, K₂O, P₂O₅ の液相濃集元素は増加して行く傾向を持つ。これらは、結晶分化作用によるマグマの組成の変化であると考えることが出来る。一方、液相濃集元素である Na₂O, K₂O, P₂O₅ や晶出相に含まれ

る Al₂O₃, MgO, CaO には含有レベルの異なる二本のトレンドが見られる。この二つのトレンドは、SiO₂-Total Alkaline (Na₂O+K₂O) 図 (Le Maitre et al., 2002) においては、液相濃集元素の含有レベルが高いものがアルカリ岩系、低いものが非アルカリ岩系に相当する (Fig. 9)。このうち、非アルカリ岩系に属するものは、Alkaline-FeO*-MgO (AFM) 図 (Fig. 10) 上では分化途中に鉄に濃集するというソレイト系列の特徴を示す。また、K₂O を基にした Gill (1981) の岩石系列区分に、伊豆・マリアナ島弧の他の火山フロント上の火山噴出物の分析値とともにプロットすると、西之島火山の噴出物は過去に得られた岩石試料も含め、全て Medium-K 系列に相当する (Fig. 11)。これは、三宅島火山のような伊豆・マリアナ島弧北部の Low-K 系列の岩石と、福岡ノ場火山や南日吉海山のような非常に K₂O が多く含まれる岩石の中間に位置する。

また、西之島火山のアルカリ岩は K₂O / Na₂O が 0.3 以下と Na₂O 量が多いことが特徴であり、火山列島南部からマリアナ島弧北部にかけてのアルカリ岩の平均値である 0.79 (Bloomer et al.,

Table 3. Chemical compositions of the rocks dredged around Nishinoshima volcano.
表 3. 西之島火山周辺から得られた岩石の分析値。

採取火山体	P1-1 (2010)	P1-2 (2010)	P1-3 (2010)	P3 (2010)	P4 (2010)	P8 (2010)	P9-1 (2010)	P9-2 (2010)	P2 (2011)	P1-1 (2012)	P1-2 (2012)	P3 (2012)	P6 (2012)
岩石系列	南東の火山体	南東の火山体	南東の火山体	西之島側火山体	西之島側火山体	西之島側火山体	西之島火山本体	西之島火山本体	西之島側火山体	西之島火山本体	西之島火山本体	基盤	西之島火山本体
岩石名	アルカリ岩	アルカリ岩	アルカリ岩	アルカリ岩	アルカリ岩	アルカリ岩	アルカリ岩	アルカリ岩	Mid-Kソレイト	Mid-Kソレイト	Mid-Kソレイト	Mid-Kソレイト	Mid-Kソレイト
単斜輝石 粗面安山岩	かんらん石 単斜輝石玄武岩	単斜輝石玄武岩	単斜輝石 ベンモレアナイト	かんらん石 単斜輝石 テフライト	複輝石 ベンモレアナイト	単斜輝石 ベンモレアイト	複輝石玄武岩質 ミジュアライト	単斜輝石 かんらん石 玄武岩	単斜輝石 玄武岩質安山岩	単斜輝石安山岩	複輝石玄武岩質 安山岩	複輝石玄武岩質 安山岩	複輝石玄武岩質 安山岩
SiO ₂	60.20	46.60	48.29	55.59	43.83	55.23	55.21	53.49	49.41	55.56	60.06	53.41	57.25
TiO ₂	0.73	0.73	0.91	0.99	0.89	1.02	1.02	0.94	0.95	0.87	1.00	0.74	1.04
Al ₂ O ₃	14.48	17.63	20.78	17.73	21.01	17.53	17.55	19.06	18.55	17.30	15.14	17.83	14.95
Fe ₂ O ₃	1.65	3.66	2.87	1.18	2.73	1.78	1.70	1.16	3.89	3.20	2.82	3.24	3.34
FeO	6.97	6.23	6.80	7.83	7.93	7.57	7.66	7.74	7.85	6.36	6.87	6.07	8.28
MnO	0.27	0.17	0.18	0.21	0.20	0.23	0.22	0.19	0.19	0.19	0.21	0.17	0.23
MgO	0.70	7.42	2.94	1.27	4.95	1.54	1.27	1.67	4.53	3.27	2.39	5.39	3.08
CaO	3.92	13.32	10.58	6.18	13.35	6.26	6.35	7.78	11.76	9.06	6.15	10.46	7.03
Na ₂ O	6.54	2.77	4.41	6.46	3.58	6.26	6.45	5.57	2.35	3.28	4.01	2.18	3.76
K ₂ O	1.92	0.40	0.55	1.12	0.31	1.11	1.14	0.93	0.43	0.75	1.11	0.42	0.83
P ₂ O ₅	0.19	0.09	0.17	0.23	0.10	0.23	0.24	0.19	0.10	0.18	0.26	0.08	0.21
H ₂ O+	0.85	0.01	0.49	0.01	0.01	0.01	0.01	0.11	0.05	0.00	0.01	0.43	0.00
H ₂ O-	0.00	0.29	0.11	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.16	0.05	0.17	0.02	0.05
Total	98.42	99.32	99.08	98.80	98.90	98.77	98.82	98.85	100.22	100.07	100.20	100.44	100.05
FeO*/MgO	12.08	1.28	3.19	7.00	2.10	5.96	7.24	5.26	2.51	2.83	3.94	1.67	3.66
K ₂ O/Na ₂ O	0.29	0.14	0.12	0.17	0.09	0.18	0.18	0.17	0.18	0.23	0.28	0.19	0.22
SiO ₂	61.21	46.73	48.66	55.78	43.93	55.45	55.40	53.71	48.98	55.16	59.59	53.06	56.73
TiO ₂	0.74	0.73	0.92	0.99	0.89	1.02	1.02	0.94	0.94	0.86	0.99	0.74	1.03
Al ₂ O ₃	14.72	17.68	20.94	17.79	21.06	17.60	17.61	19.14	18.39	17.17	15.02	17.71	14.81
Fe ₂ O ₃ *	9.55	10.61	10.51	9.92	11.57	10.23	10.25	9.80	12.50	10.19	10.37	9.92	12.43
MnO	0.27	0.17	0.18	0.21	0.20	0.23	0.22	0.19	0.19	0.19	0.21	0.17	0.23
MgO	0.71	7.44	2.96	1.27	4.96	1.55	1.27	1.68	4.49	3.25	2.37	5.35	3.05
CaO	3.99	13.36	10.66	6.20	13.38	6.28	6.37	7.81	11.66	8.99	6.10	10.39	6.97
Na ₂ O	6.65	2.78	4.44	6.48	3.59	6.28	6.47	5.59	2.33	3.26	3.98	2.17	3.73
K ₂ O	1.95	0.40	0.55	1.12	0.31	1.11	1.14	0.93	0.43	0.74	1.10	0.42	0.82
P ₂ O ₅	0.19	0.09	0.17	0.23	0.10	0.23	0.24	0.19	0.10	0.18	0.26	0.08	0.21
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

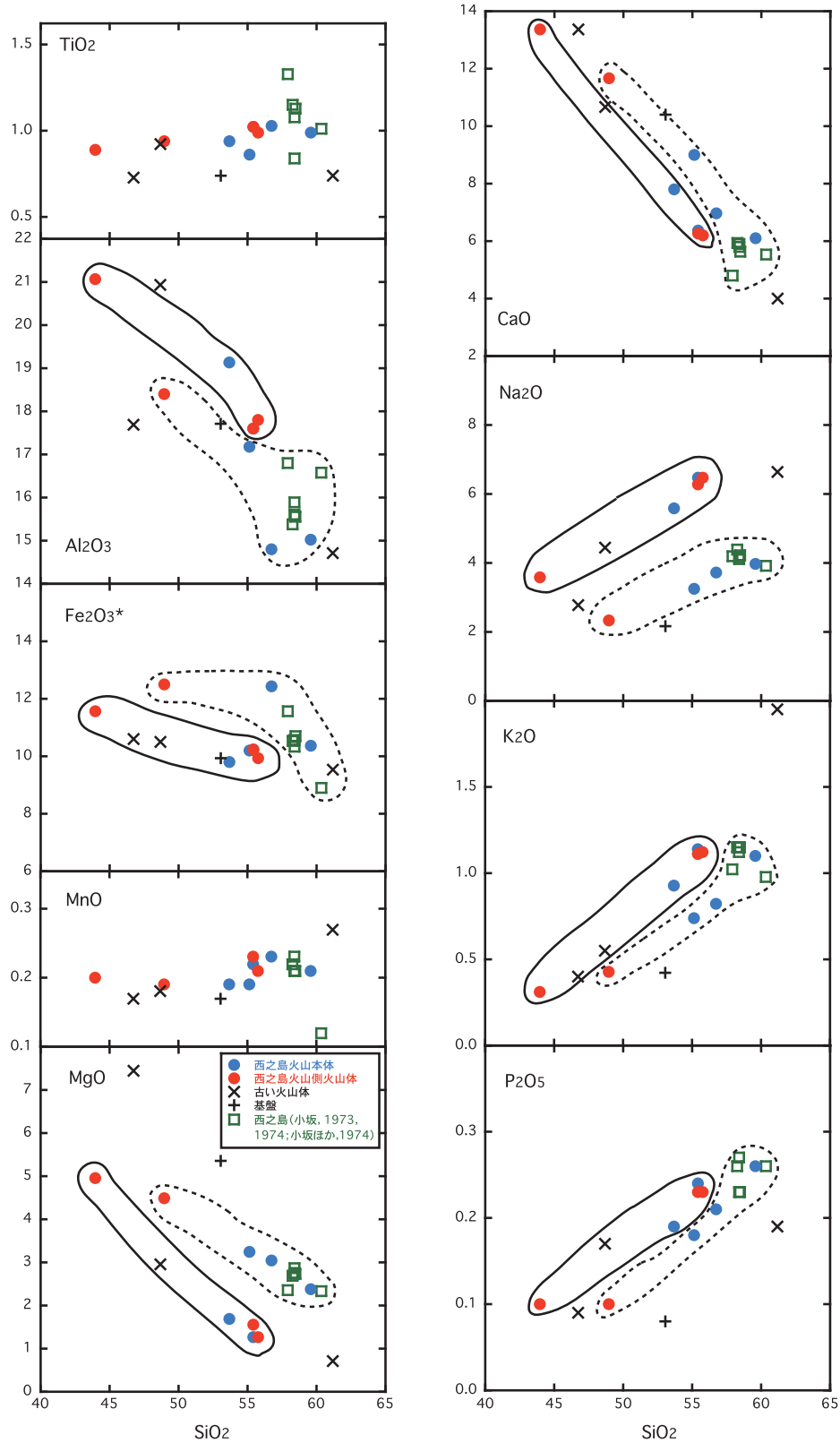


Fig. 8. Harker variation diagrams of rocks dredged around Nishinoshima volcano. Green open squares are from Ossaka (1973), Ossaka (1974), and Ossaka et al. (1974). Solid line and dotted line indicate the incompatible element rich group and poor group of rocks of Nishinoshima volcano, respectively.

図8. 西之島火山周辺で採取した岩石のハーカー図. 緑の白抜き四角は小坂 (1973), 小坂 (1974), 小坂・他 (1974) による分析値. 図中の実線及び点線は, それぞれ液相濃集元素に富むグループと乏しいグループを示す.

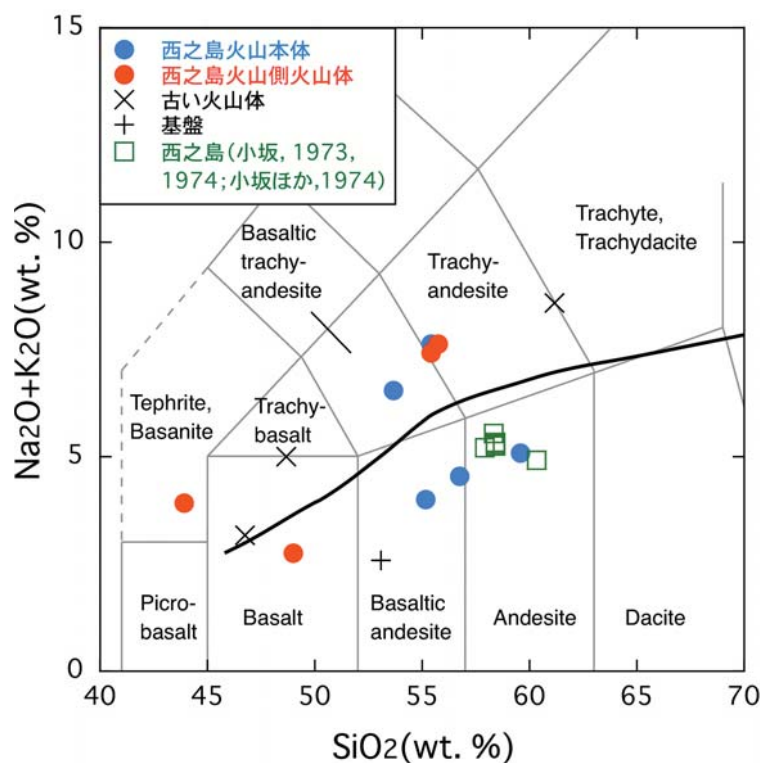


Fig. 9. Total alkalis versus silica diagram of the rocks obtained around Nishinoshima volcano. Thin gray lines and thick black lines are rock classification of Le Maitre (2002) and alkaline-subalkaline boundary of Kuno (1966), respectively.

図9. 西之島火山周辺で採取した岩石の総アルカリ-SiO₂図. 図中の細い灰線は Le Maitre (2002) による岩石区分, 太い黒線は Kuno (1966) によるアルカリ岩と非アルカリ岩の境界.

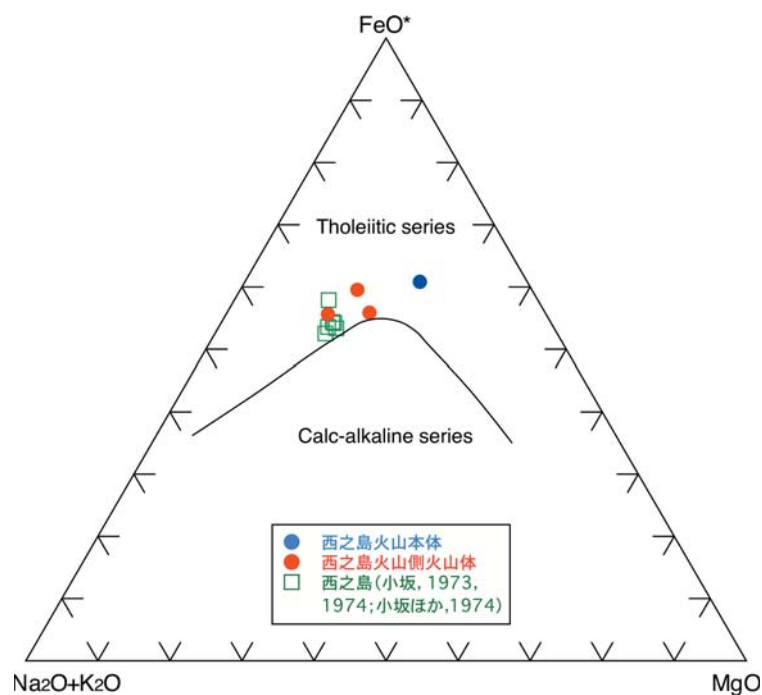


Fig. 10. Alkaline-FeO*-MgO (AFM) diagram of the rocks gathered around Nishinoshima volcano. The curved line is the boundary between the tholeiite series and calc-alkaline series of Irvine and Baragar (1971).

図10. 西之島火山周辺で採取した岩石のアルカリ (Na₂O+K₂O) -FeO*-MgO 図. 図中の曲線は Irvine and Baragar (1971) によるソレライト系列とカルクアルカリ系列の境界.

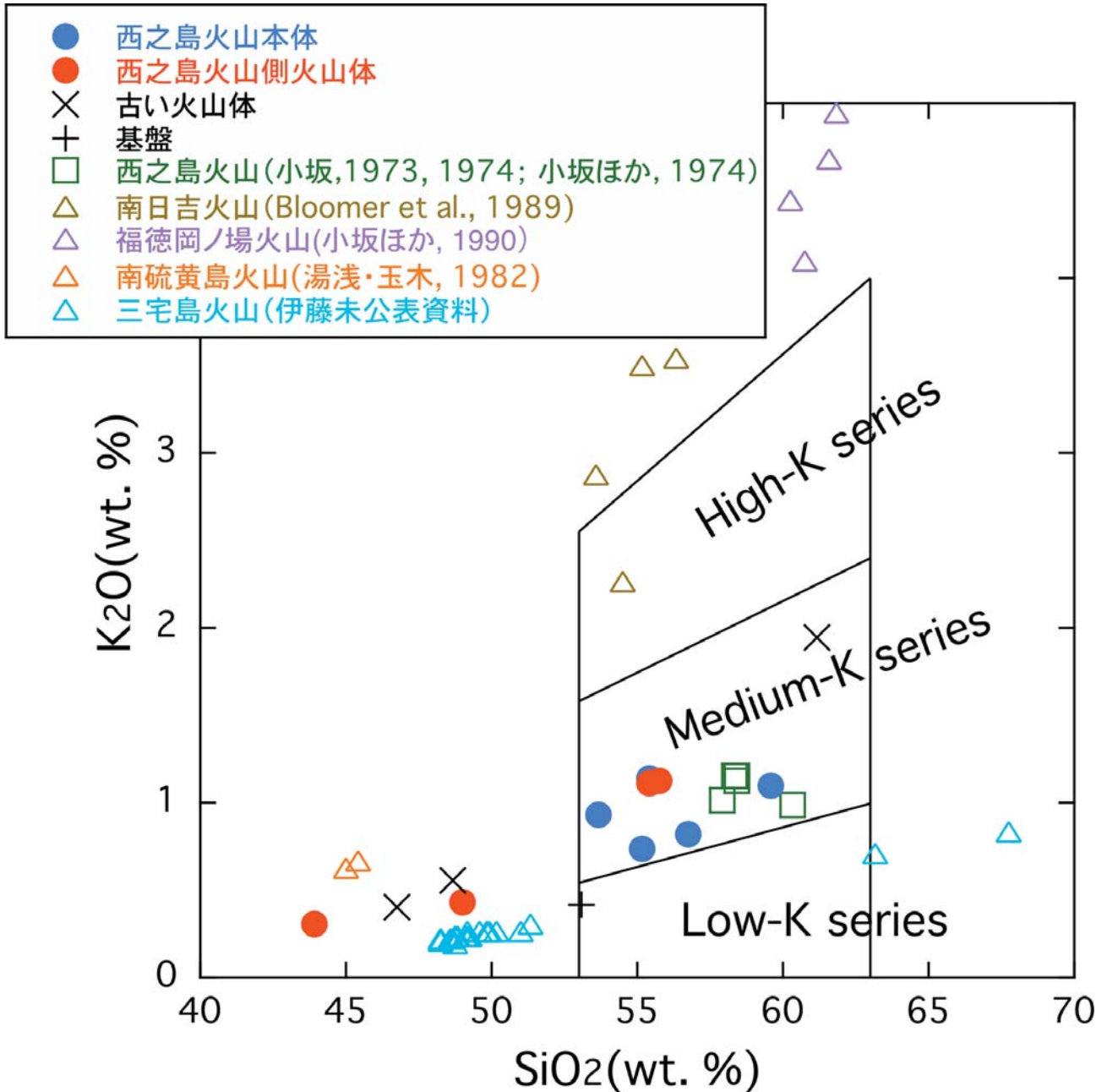


Fig. 11. The subdivision of sub alkaline rocks gotten around Nishinoshima Volcano using the K_2O vs. silica diagram. The boundary is from Gill (1981). Chemical compositions of the rocks from Minamihiyoshi Submarine Volcano (Bloomer et al., 1989b), Fukutoku-Oka-no-Ba Submarine Volcano (Ossaka et al., 1990), Minami Ioto Volcano (Yuasa and Tamaki, 1982), and Miyakejima Volcano (Ito, unpublished data) are also placed for comparison.

図 11. 西之島火山周辺で採取した岩石の K を用いた区分. 境界は Gill (1981) による. 比較のため, 西之島火山の他に南日吉海山 (Bloomer et al., 1989a), 福徳岡ノ場火山 (小坂ほか, 1990), 南硫黄島火山 (湯浅・玉木, 1982), 三宅島火山 (伊藤未公表分析値) の分析値ものせている.

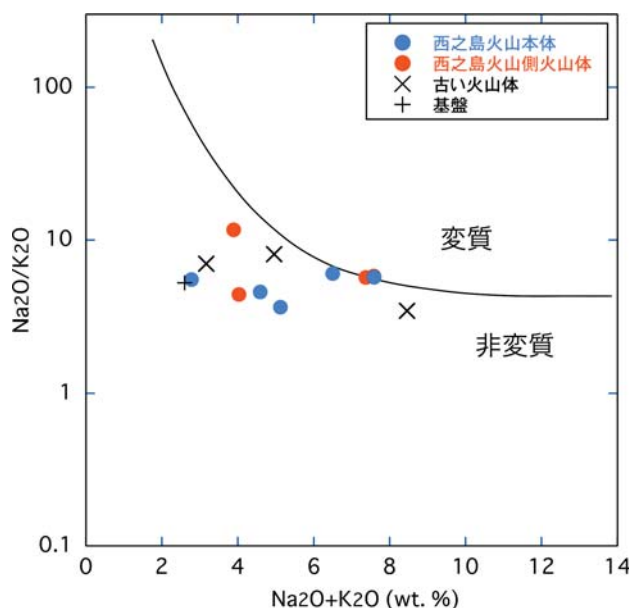


Fig. 12. $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ diagram (Miyashiro, 1975). Rocks dredged around Nishinoshima volcano are mostly plotted in “fresh” area.

図 12. $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 図 (Miyashiro, 1975). 分析値は概ね非変質の領域にプロットされる。

1989a) とかなり異なっている。一般に岩石が変成・変質すると Na_2O が移動してくるため、変成・変質の度合いが激しいほど Na_2O が増える傾向がある。西之島火山周辺の岩石に見られる Na_2O に富むという特徴が変質由来のものでないかどうか、Miyashiro (1975) の $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 図 (Fig. 12) を用いて確かめたところ、全ての岩石は概ね未変質の領域に入るため、変質の影響ではないと判断した。

6 議論

6.1 地下構造と形成史

今回得られた海底地形からは、西之島火山の周辺にいくつかの山体が分布していることが見て取れ、地磁気異常図 (Fig. 6) ではこれらの山体の頂部に磁気異常が認められる。一般的に火山体の火口、火道には固結してから移動していない溶岩が充填されており、強い双極子型の磁気異常を示す。西之島火山周辺では西之島を含む山体の山頂部が最も強い双極子型の磁気異常を示し、西之島

南海丘や周辺に分布するその他の山体の頂部も同様の磁気異常を示すことから、これらの高まりは火山体であることがわかる。周辺火山体の磁気異常が西之島火山に比べ弱いのは、活動年代が古いため熱水的作用などで強磁性を持つ溶岩中の磁鉄鉱が分解されたか、あるいはそもそもの磁鉄鉱含有量の違いを表しているのであろう。

反射プロファイルからは、西之島火山を構成する山体とその下部に位置する古い山体を区別することができた。しかし、古い山体同士は反射面の連続性が悪く、一部を除いて上下関係を推定することはできなかった。地質構造図を Fig. 13 に、代表的な反射断面を Fig. 14 に示す。西之島火山のような火山体は地震波が減衰しやすいため、反射記録からは地下深部の情報を精度良く得ることが困難である。今回は主に地形から各火山体の分布を読み取り、それを基にして反射面の区分を行った。その結果、下部からⅢ層、Ⅱ層、Ⅰ層の3層に区分された。

本地域にはいくつかの火山体が分布するが、それらの共通の基盤となるのがⅢ層である。Ⅲ層は反射記録上では成層構造が発達した層として現れ、大規模な地殻変動等を伴わない不連続である非整合構造が見られることがある。本層の最上部はおおよそ海面から 2250 m のところにあり、西之島以東では海溝に向けて落ち込んでゆく。Ⅲ層の上にはいくつかの火山体が形成されている。これらは新旧が分からないため一括してⅡ層とした。音響的には不透明で内部構造などは分からないが、山麓には山体の崩壊に伴う二次堆積物が成層構造をなして堆積していることがある (例えば Fig. 14a の西之島南海丘における崖錐堆積物)。これらの間隙を埋めるように西之島火山本体とそこから流れ落ちた (広義の) 火砕流堆積物から成るⅠ層が分布する。火砕流は周辺の山体を避けるように流下しているが、北方や南方では断層崖によって流路が規制されている。西之島火山はいくつかの小規模な側火山体を伴っており、山頂付近のものは割れ目噴火により形成されたような放射状の分布を示す。これら側火山体の分布には特に

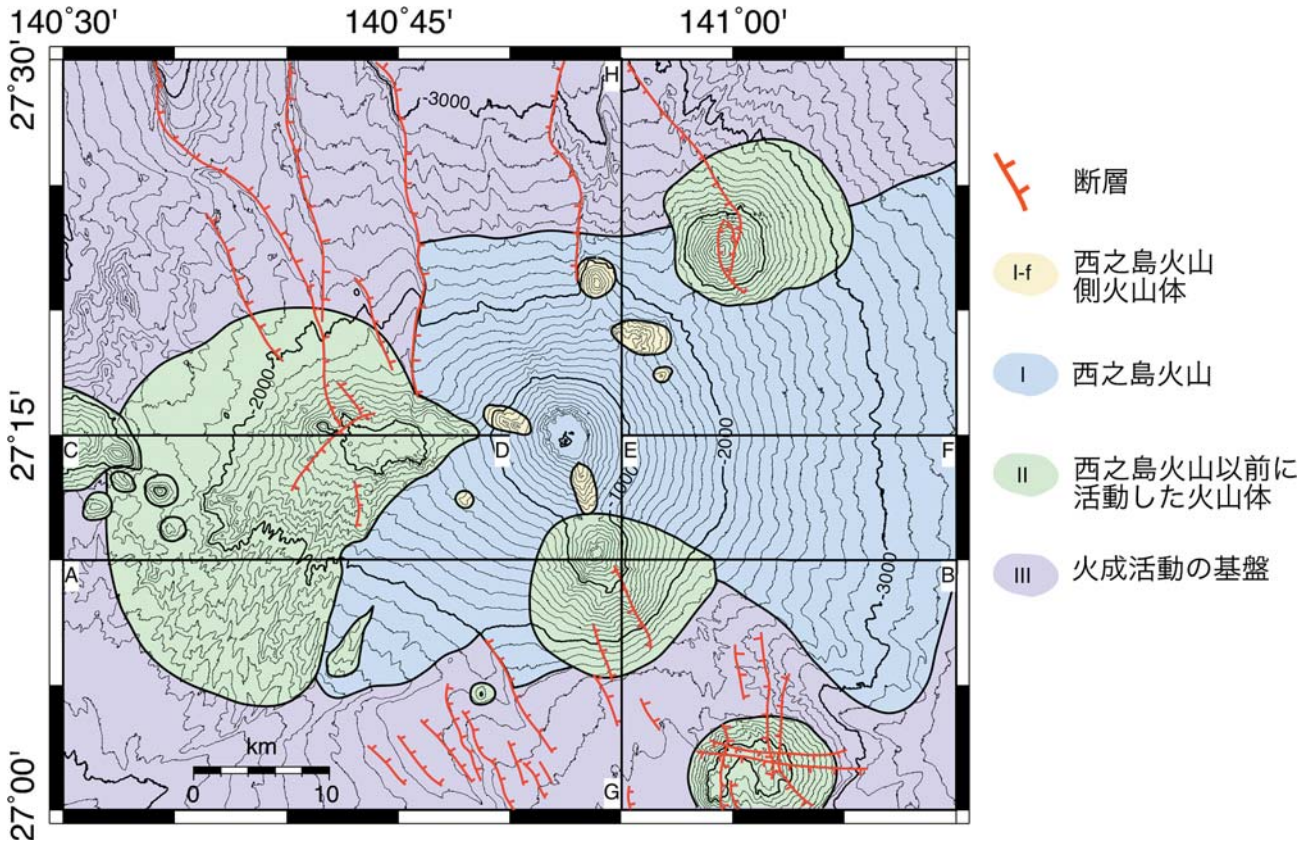


Fig. 13. Tectonic map around Nishinoshima volcano. Black lines indicate the positions of the reflection seismograms in Fig. 14.

図 13. 西之島火山周辺の地質構造図。黒線は図 14 の反射断面図の位置を示す。

顕著な方向性は見られない。側火山体は一括して I f 層とした。

Fig. 14a は西之島火山の南山麓の西之島南海丘を東西に横切る反射断面である。中央部に西之島南海丘があり、その周囲を西之島火山からの堆積物が薄く覆っている。西之島南海丘から連続した成層堆積物が I 層の中に入り込んでいるのが見られるが、これは特定の方向にしか存在せず、また山体上部の崩壊地形と方向が同じであるため、火山活動による噴出物ではなく山体が崩壊して形成された崖錐堆積物であると判断した。Fig. 14b は西之島火山を東西に横切る反射断面である。西之島火山、西方の開析の進んだ古い火山体、さらに西方の雁行海山列の一部が見えている。西方の火山ほど古く、より新しい火山体から流れ出た堆積物によって覆われている。これらの火山体本体は音響的に不透明であり、地震波を通しにくい溶岩や火砕物から構成されていると考えられる。Fig.

14c は西之島火山、西之島南海丘を南北に横切る反射断面である。西之島南海丘の南側には西之島火山からの噴出物は到達していないことが分かる。

西之島火山周辺にはいくつかの断層が見られるが、西之島火山からの新しい堆積物に覆われていない地域では海底面に明瞭な変位地形を残していることが多い。また、西之島火山の北側山腹斜面には、山頂部からもたらされた火砕流によって下刻され露出した断層崖が顕著に見られる。走向は北西-南東方向であり、海溝軸や七島・硫黄島海嶺の走向と一致している。西之島南海丘の南側では、火砕物が西之島南海丘に阻まれてあまり流れてこないため堆積速度よりも断層の変位速度が速く、北西-南東方向の低断層崖が見られる。これらの断層は東部では西落ち、西部では東落ちの活動センスを持ち、全体として地溝を形成しているように見える。Bloomer et al. (1989b) は、島弧

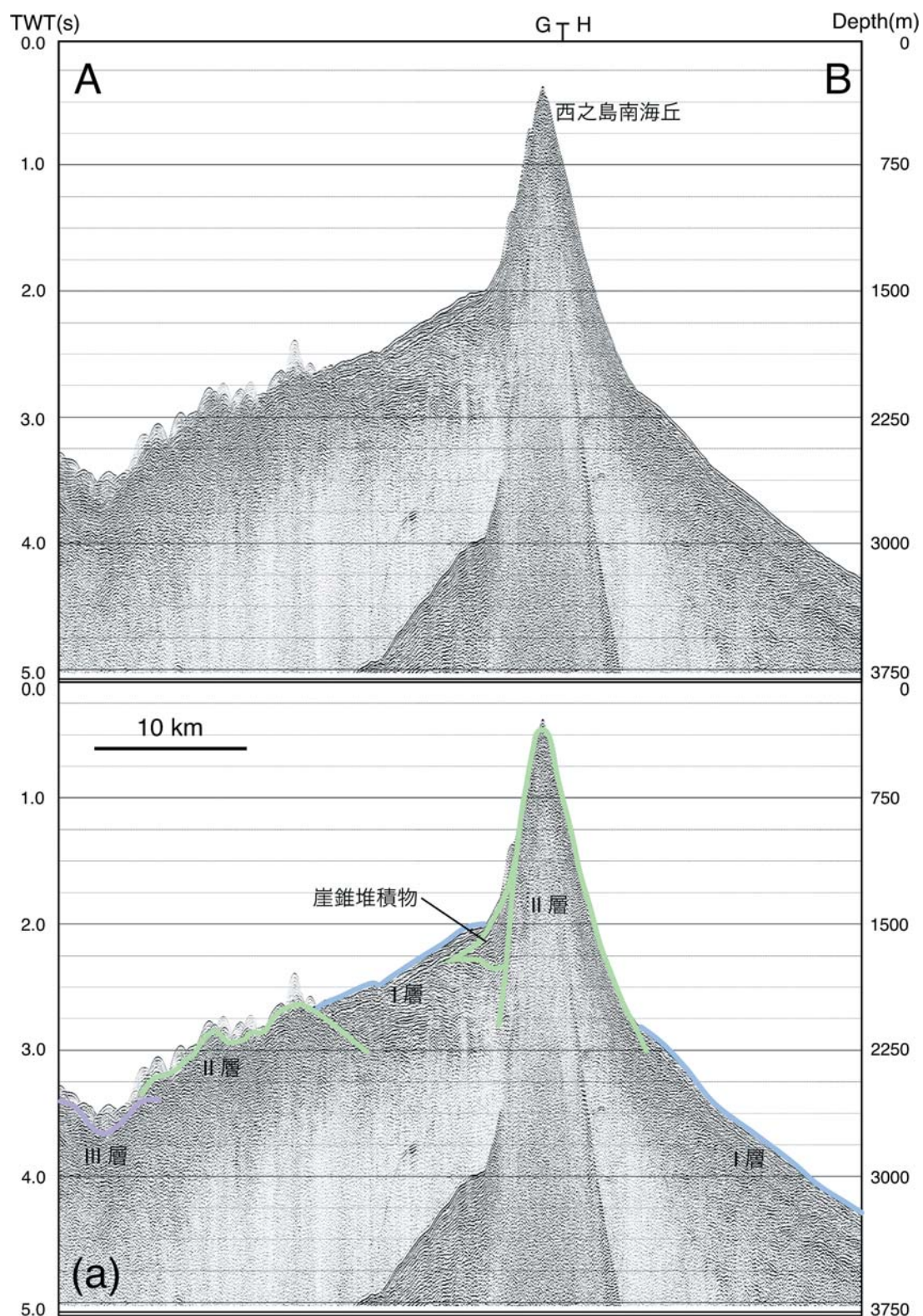


Fig. 14a-c. Reflection seismograms and the explanations around Nishinoshima volcano. The positions of the seismograms are shown in Fig. 13. The colored lines indicate the top of each layer and the color assignment follows that of Fig. 13. The hachures on the faults indicate the relatively downthrown side. The depth was calculated with the sound velocity as 1500 m/s.

図 14a-c. 西之島火山周辺の反射断面図及びその解釈図. 断面の位置は図 13 に示している. 図中の色線は各層の上面を示し, 色は図 13 と同じである. 断層マークの毛羽は相対的に沈降した側を示す. 深さは音速を 1500 m/s で計算した.

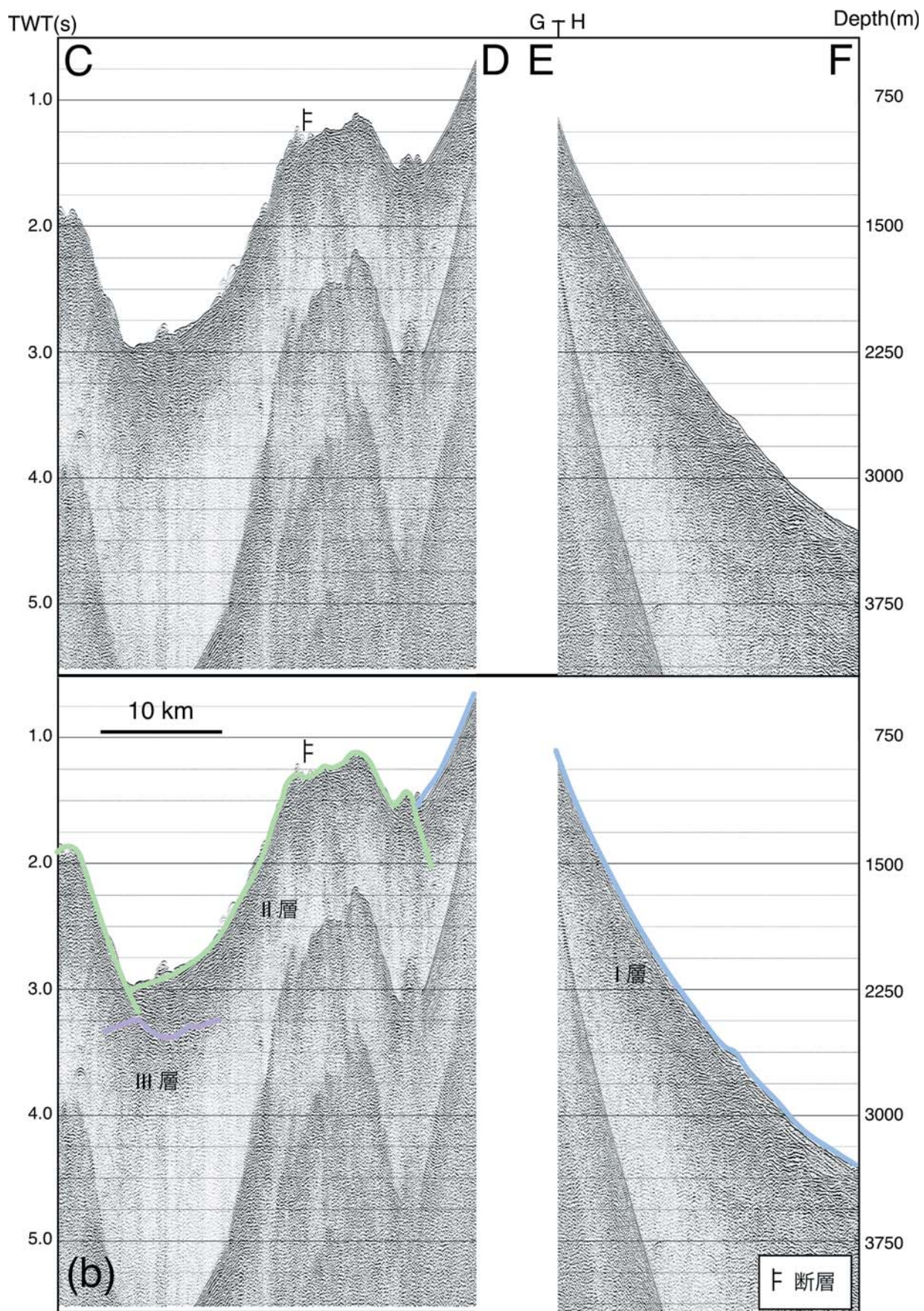


Fig. 14a-c. (continued)

図 14a-c. (続き)

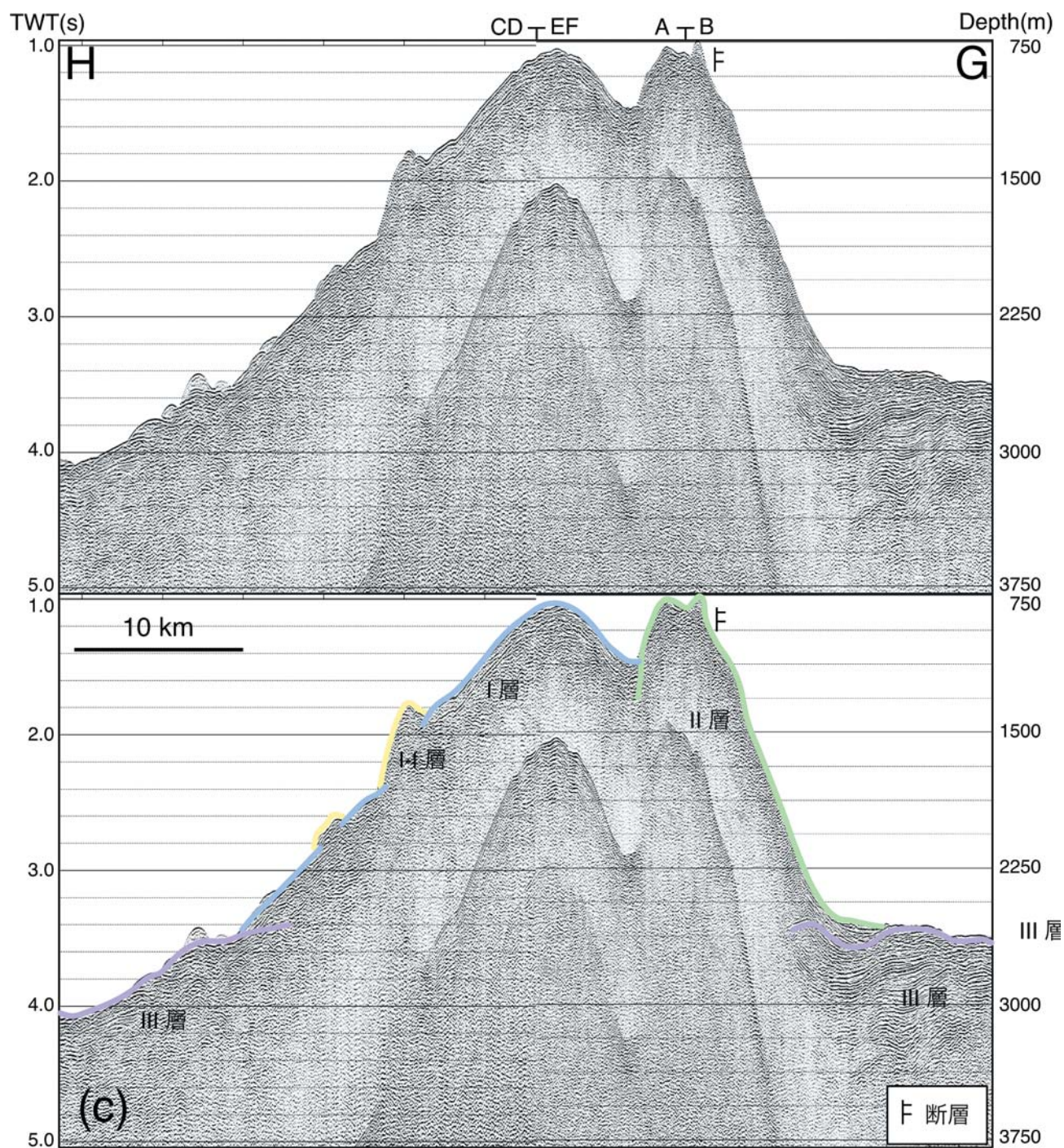


Fig. 14a-c. (continued)

図 14a-c. (続き)

火山が形成される位置はリフティングによる断層面を通過してマグマが上昇することによって規定されていると考えており、西之島火山や周辺の古い火山とこれらの断層も同様の関係にある可能性がある。

6.2 マグマ溜りの位置

西之島火山周辺におけるフリーエア異常はほぼ地形と一致した分布を示しており、標高が高いとフリーエア重力異常値も大きい (Fig. 4)。これは一般的なフリーエア重力異常の特性と一致している。

西之島火山周辺のブーゲー重力異常は東から西に向かって単調に増加しているが (植田, 2005)、西之島火山付近に高ブーゲー重力異常が見られる (Fig. 5)。火山体における高ブーゲー異常は、一般的にカルデラ底に溜まった高密度の玄武岩や、あるいはマグマ溜まりに沈積した高密度の集積岩によるものであると解釈される。西之島火山では地形的にカルデラの痕跡は認められないので、高ブーゲー異常はマグマ溜まりの位置と関連がある可能性がある。岡田・他 (2016) は西之島火山周辺で屈折法地震探査を行い、地震波が減衰する区域を見積もったところ、ほぼ山頂を中心とする範囲で減衰が大きいことが明らかになった。この減衰域の正確な深度や広がりには不明であるため、この高ブーゲー異常域と一致するかどうかは分からないが、高ブーゲー異常でなおかつ地震波の減衰が大きいというのはマグマ溜りに期待される特性と一致している。

一方、西之島火山の西方には 191 mgal の低ブーゲー重力異常域が存在している。これは西之島火山西方の古い火山体を中心に見ているように見え、西之島火山との岩質の違いを表したものである可能性がある。

6.3 西之島火山におけるマグマプロセス

アルカリ岩と非アルカリ岩の間には臨界面があるため (Yoder and Tilley, 1962)、一つの初生マグマから単純な結晶分化作用のみで両系列のマグマ

を形成することはできない。したがって、西之島火山における元素含有量の異なる二つのグループは、マグマ起源物質の不均質性あるいは部分溶融度の違いによって初生マグマが異なっていたか、より未分化であった時点でマグマ混合あるいは地殻物質の混染を受けたために形成されたと考えられる。このような元素含有量の異なる複数のグループが存在するという特徴は三宅島火山 (伊藤・他, 1999)、伊豆島火山 (Tamura et al., 2007)、スミスカルデラ (Tamura et al., 2005) などでも見出されており、マグマ起源物質の部分溶融度の違いが原因であるとされている。また、火山列島北部及びマリアナ島弧中部に産する非アルカリ岩と火山列島南部-マリアナ島弧北部に産するアルカリ岩 (Bloomer et al., 1989a)、そしてマリアナ島弧中部に位置する Pagan (Tamura et al., 2014) に見られる異なったマグマ系列の成因については、マグマ起源物質の部分溶融度の違いのほかに、同位体組成などのデータからマグマ起源物質及び融解に関連した流体相にも違いがあると結論されている。今回の西之島岩石試料の分析では主成分元素の値しか得られていないため、西之島火山におけるアルカリ岩と非アルカリ岩の成因について決定的なことはいえないが、一つの火山からアルカリ岩と非アルカリ岩が産すること、火山列島南部のアルカリ岩と違い Na_2O に富むという特徴は、火山フロントでのアルカリ岩系マグマの成因を考える上で興味深い。

西之島火山におけるこれらの岩石の化学組成の特徴と試料の採取場所には、ある程度の関連性があるように見える。すなわち、玄武岩は側火山体のみから得られ、アルカリ岩系の岩石は山体の南西部から、非アルカリ岩系の岩石は北東部から得られている。しかし、側火山体からは玄武岩のみならず安山岩も産していることや、火山体本体斜面で得られた岩石試料は山頂火口から流れ落ちてきたものであり、その流下の方向性は火口周辺の地形や噴火様式などに左右されるであろうことを考え合わせると、これらの関連性がどの程度の意味を持つかは不明である。

7 まとめ

西之島火山の基礎的な情報を得るために地質学的、地球物理学的な調査を行い、以下のことが明らかになった。

西之島火山の周辺にはいくつかのより古い火山体が存在し、西之島火山はその間を埋めるようにして成長している。山体は円錐形をした成層火山体で、顕著な側火山体やカルデラなどは見られない。守屋（1979）の火山発達史に従えばA型火山第1期に相当し、まだ若い火山であるといえる。周辺には七島・硫黄島海嶺や伊豆・小笠原海溝の走向と調和的な北西－南東方向の断層が見られる。反射断面は明瞭ではないものの、西之島火山、周辺の古い火山、これらの火成活動の基盤を区分することができた。

西之島火山山頂の北西部には高ブーゲー重力異常域が見られ、地下のマグマ溜まりの位置を示している可能性がある。また、地磁気異常からは、西之島火山を含む調査海域内の高まりには双極子型の磁気異常が見られ、これらが強磁性鉱物（たいていは磁鉄鉱）を含む火山体であることを示している。

西之島火山を構成する岩石にはアルカリ岩系とMedium-Kソレイト岩系の2種類が見られ、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅の含有レベルが異なっている。この違いは単純な結晶分化作用のみでは作ることは困難で、これら2つの岩石系列は未分化マグマの時点ですでに組成に違いが生じていたはずであるが、その原因については明らかでない。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、調査活動に従事していただいた測量船「昭洋」の及川昇船長（2010年）、濱岡祐一船長（2011年、2012年）をはじめ乗組員の皆様および海洋調査課、測量船管理室の皆様にご感謝いたします。また、匿名査読者および海洋研究室の西澤あずさ博士、小原泰彦博士、松本良浩氏には原稿を改善する上で有益な助言をいただきました。末筆ながら感謝申し上げます。

文 献

- Bloomer, S. H., R. J. Stern, E. Fisk, and C. H. Geschwind (1989a) Shoshonitic volcanism in the northern Mariana arc 1. Mineralogic and major and trace element characteristics, *Journal of Geophysical Research*, 94, 4469–4496.
- Bloomer, S. H., R. J. Stern, and N. C. Smoot (1989b) Physical volcanology of the submarine Mariana and Volcano Arcs, *Bulletin of Volcanology*, 51, 210–224.
- Gill, J. B. (1981) Orogenic andesite and plate tectonics, *Minerals and Rocks* 16, 392pp., Springer Berlin Heidelberg.
- 萩原幸男 (1978) 地球重力論, 242pp., 共立全書.
- IAGA Working Group V-MOD (2010) International Geomagnetic Reference field: the eleventh generation, *Geophysical Journal International*, 183, 1216–1230.
- Irvine, T. N. and W. R. A. Baragar (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523–548.
- 伊藤弘志・大谷康夫・小野智三・大島治・成田学・山野寛之・佐藤勝彦・渡邊健志・小河原秀水 (2003) 鳥島火山 2002 年噴火の経緯, *火山*, 48, 235–239.
- 伊藤弘志・加藤正治・高橋昌紀・斉藤昭則 (2011) 伊豆－小笠原弧, 福岡ノ場火山における 2010 年噴火後の火山地形, *海洋情報部研究報告*, 47, 9–13.
- 伊藤弘志・吉田武義・木村純一 (1999) 三宅島火山におけるマグマ組成の系時変化, *月刊地球*, 21, 406–411.
- 海上保安庁 (2012) 海域火山基礎情報図「西之島」資料整理作業報告書, 75pp.
- 海上保安庁 (2014) 海域火山基礎情報図「西之島新島周辺北部」底質試料分析作業報告書, 53pp.
- 金田謙太郎・西澤あずさ・及川光弘 (2015) 太平

- 洋プレート北西部およびフィリピン海プレートにおける大規模な地震波速度構造探査—海上保安庁による調査結果—, 地学雑誌, 124, 787-811.
- Kodaira, S., T. Sato, N. Takahashi, S. Miura, Y. Tamura, Y. Tatsumi, and Y. Kaneda (2007) New seismological constraints on growth of continental crust in the Izu-Bonin intra-oceanic arc, *Geology*, 35, 1031-1034.
- Kuno, H. (1966) Lateral variation of basalt magma types across continental margins and island arcs, *Bulletin of Volcanology*, 29, 195-222.
- Le Maitre, R. W., A. Streckeisen, B. Zanettin, M. Le Bas, B. Bonin, and P. Bateman (2002) *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*, 252pp., Cambridge University Press.
- Miyashiro, A. (1975) Classification, characteristics, and origin of ophiolites, *Journal of Geology*, 83, 249-281.
- 守屋以智雄 (1979) 日本の第四紀火山の地形発達と分類, 地理学評論, 52, 479-501.
- 中田節也・長井雅史・安田敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001) 三宅島 2000 年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴—, 地学雑誌, 110, 168-180.
- 西澤あずさ・小野智三・大谷康夫・志岐俊郎 (2001) 2000 年 7 月の三宅島・神津島・新島近海における海底地震観測 (速報), 水路部研究報告, 37, 57-71.
- 及川光弘・金田謙太郎 (2007) 西太平洋海域におけるブーゲー重力異常, 海洋情報部技報, 25, 96-99.
- 岡田千明・小野智三・濱崎翔五・高橋日登美・森下泰成・糸井洋人・田代俊治・西澤あずさ (2016) 西之島における海底地震観測速報, 海洋情報部研究報告, 53, 29-44.
- 大川史郎・横山泉 (1977) 西之島火山における重力異常, 北海道大学地球物理学研究報告, 36, 83-95.
- 小坂丈予 (1973) 西之島付近海底噴火について, 火山, 18, 97-98.
- 小坂丈予 (1974) 西之島付近海底噴火について (その 2), 火山, 18, 173-174.
- 小坂丈予・大平洋子・湊一郎 (1974) 西之島付近海底噴火について (その 3), 火山, 19, 37-38.
- 小坂丈予・松田敏二・平林順一・土出昌一 (1990) 南方諸島海域の海底火山活動に伴って噴出した岩石の化学成分, 火山, 35, 57-61.
- 大谷康夫・笹原昇・矢吹哲一郎・服部敏一・宮寄進・及川光弘・野上健治 (2006) 2005 年「福德岡ノ場」の海底火山噴火, 海洋情報部研究報告, 42, 31-37.
- 関和男 (1927) 軽石の漂流に就て, 海洋気象台彙報, 10, 1-42.
- Stern, R. J., M. J. Fouch, and S. L. Klemperer (2003) An overview of the Izu-Bonin-Mariana Subduction Factory, *American Geophysical Union Geophysical Monograph*, 138, 175-222.
- Suyehiro, K., N. Takahashi, Y. Arie, Y. Yokoi, R. Hino, M. Shinohara, T. Kanazawa, N. Hirata, H. Tokuyama, and A. Taira (1996) Continental crust, crustal underplating, and low-Q upper mantle beneath an oceanic island arc, *Science*, 272, 390-392.
- Tamura, Y., K. Tani, O. Ishizuka, Q. Chang, H. Shukuno, and R. S. Fiske (2005) Are arc basalts dry, wet, or both? Evidence from the Sumisu Caldera Volcano, Izu-Bonin Arc, Japan, *Journal of Petrology*, 46, 1769-1803.
- Tamura, Y., K. Tani, Q. Chang, H. Shukuno, O. Ishizuka, and R. S. Fiske (2007) Wet and dry basalt magma evolution at Torishima Volcano, Izu-Bonin Arc, Japan: the possible role of phengite in the downgoing slab, *Journal of Petrology*, 48, 1999-2031.
- Tamura, Y., O. Ishizuka, R. J. Stern, A. R. L.

Nichols, H. Kawabata, Y. Hirahara, Q. Chang, T. Miyazaki, J. Kimura, R. W. Embley, and Y. Tatsumi (2014) Mission immiscible: Distinct subduction components generate two primary magmas at Pagan Volcano, Mariana Arc, *Journal of Petrology*, 55, 63-101.

宇平幸一・通山尚史 (2015) 口永良部島 2015 年 5 月 29 日の噴火に遭遇して, *火山*, 60, 487-490.

植田義夫 (2005) 日本列島とその周辺海域のブーゲー重力異常 (2004 年版), *水路部研究報告*, 41, 1-26.

Yoder, H. S. and C. E. Tilley (1962) Origin of basalt magmas: AN experimental study of natural and synthetic rock systems, *Journal of Petrology*, 3, 342-532.

吉田武義・藤原秀一・石井輝秋・青木謙一郎 (1987) 伊豆・小笠原弧, 福徳岡の場海底火山の地球化学的研究, *核理研研究報告*, 20, 202-215.

湯浅真人・玉木賢策 (1982) 火山列島, 南硫黄島の玄武岩, *地質調査所月報*, 33, 531-538.

要 旨

西之島火山は伊豆-小笠原弧の中央部に位置する活火山であり, 海上保安庁は定期的な観測を実施している. 約 40 年ぶりの噴火となった 2013 年噴火の直前にあたる 2010 年, 2011 年, 2012 年には, 地質学的, 地球物理学的な調査が行われた. 本報告では, 海底地形, 重力異常, 磁気異常, 岩石資料についての詳細な報告を行う.

西之島火山は古い火山の間を埋め, あるいはその上を覆うようにして成長している新しい火山である. その重力異常値はマグマ溜りの位置を示唆している可能性がある. 岩石学的にはアルカリ岩系列及び非アルカリ岩系列の 2 種のマグマが認められ, 地下での異なったマグマプロセスを反映していると考えられる.