

報告

海洋底から採取された火山ガラスの主要・微量元素組成: 深海底岩石試料データベース (GANSEKI) の利用

Major and trace element compositions of volcanic glasses recovered from the ocean floor: An example of the effective use of the “GANSEKI” database of rock samples from the deep sea floor

名内理恵* 森下知晃* 田村明弘*
荒井章司** 佐藤 暢*** 市山祐司****

Rie Nauchi*, Tomoaki Morishita*,
Akihiro Tamura*, Shoji Arai**, Hiroshi Sato*** and
Yuji Ichiyama****

2011年3月29日受付.

2011年7月11日受理.

* 金沢大学フロンティアサイエンス機構
Frontier Science Organization, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

** 金沢大学理工研究域自然システム学系
Faculty of Natural System, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

*** 専修大学経営学部
School of Business Administration, Senshu University, 2-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 214-8580, Japan

**** 独立行政法人海洋研究開発機構, 地球情報研究センター
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Data Research Center for Marine-Earth Sciences (DrC), 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan

Corresponding author; T. Morishita,
moripta@kenroku.kanazawa-u.ac.jp

Abstract: Many samples of various rock types recovered directly from the ocean floor are housed at the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). The GANSEKI database, maintained by JAMSTEC, provides a record of submarine rock samples and is currently available on the Internet, enabling the user to search for specific types of submarine rock samples and their conditions, such as size, lithology and degree of alteration/weathering. We used the GANSEKI database to obtain submarine samples recovered from various tectonic settings, such as mid-ocean ridge, back arc, and forearc, and here we report on the major and trace element compositions of volcanic glasses from mid-ocean ridge settings.

Keywords: sea-floor basaltic rocks, mid-ocean ridge basalt, database, GANSEKI

はじめに

近年, 公表された火山岩の化学組成値のデータベース

(PetDB, GEOROC) が整備され, 広範囲で大量の化学分析値を用いた研究に利用されている (例えば, Iwamori & Albarède, 2008; 佐藤ほか, 2008). 一方で, 研究者本人で試料準備, 観察, 分析する “自前” データが必要となる場合も多い.

独立行政法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) は, これまでに JAMSTEC の有人潜水船, 無人探査機等によって様々なテクトニックセッティングに属する深海底から採取された岩石試料のデータベース GANSEKI (Geochemistry and Archives of ocean floor rocks on Networks for Solid Earth Knowledge Integration) の整備を行っており, 日々, 更新・改良を続けている (市山ほか, 2011). この GANSEKI は, 岩石試料と化学組成値を組み合わせたタイプとして, 上記の公表分析値のデータベースとは異なり, これまで採取された貴重な海洋底試料を効率的に検索し, 実際に研究に利用することができる (市山ほか, 2011 を参照). また, 実際に GANSEKI に保管されている試料の分析値を新たに登録していくことで, データベースの質が向上することが大きな特徴の 1 つである. そこで, 本論では, GANSEKI を用いて, 異なるテクトニクス場から採取された火山ガラスを含む試料の検索例を紹介し, 主要・微量元素組成の測定ができた太平洋, 大西洋, 南西インド洋の中央海嶺系海洋底で採取された試料の分析値を報告する.

試料検索・記載と問題点

海洋底試料の中でも, 中央海嶺, 背弧, 前弧と異なるテクトニックセッティングから採取された玄武岩質試料の多元素化学組成差を検討することを目的とした (Fig. 1). 中央海嶺の試料に関しては, 拡大速度の違いを考慮するため, 東太平洋海膨 (East Pacific Rise, EPR: 高速拡大軸), 大西洋 (Mid-Atlantic Ridge, MAR: 低速拡大軸), 南西インド洋海嶺 (Southwest Indian Ridge, SWIR: 超低速拡大軸) から検索を行った (Fig. 1). 背弧環境として, 沖縄トラフ (OKNW), 日本海 (JS), 前弧環境として, 伊豆-小笠原弧の前弧領域 (IB) より採取された試料の中から検索を行った. GANSEKI を使用することで, 試料周辺の海洋底地形データを取得した航路の地図上での確認や, 他の試料採取地点 (緯度, 経度, 水深) との位置関係を把握することができる.

GANSEKI の岩石記載/総重量や写真を参考に, 候補試料を選んだ後, 実際に JAMSTEC に保存されている試料について肉眼観察による検討を行い, 研究試料を選択した.

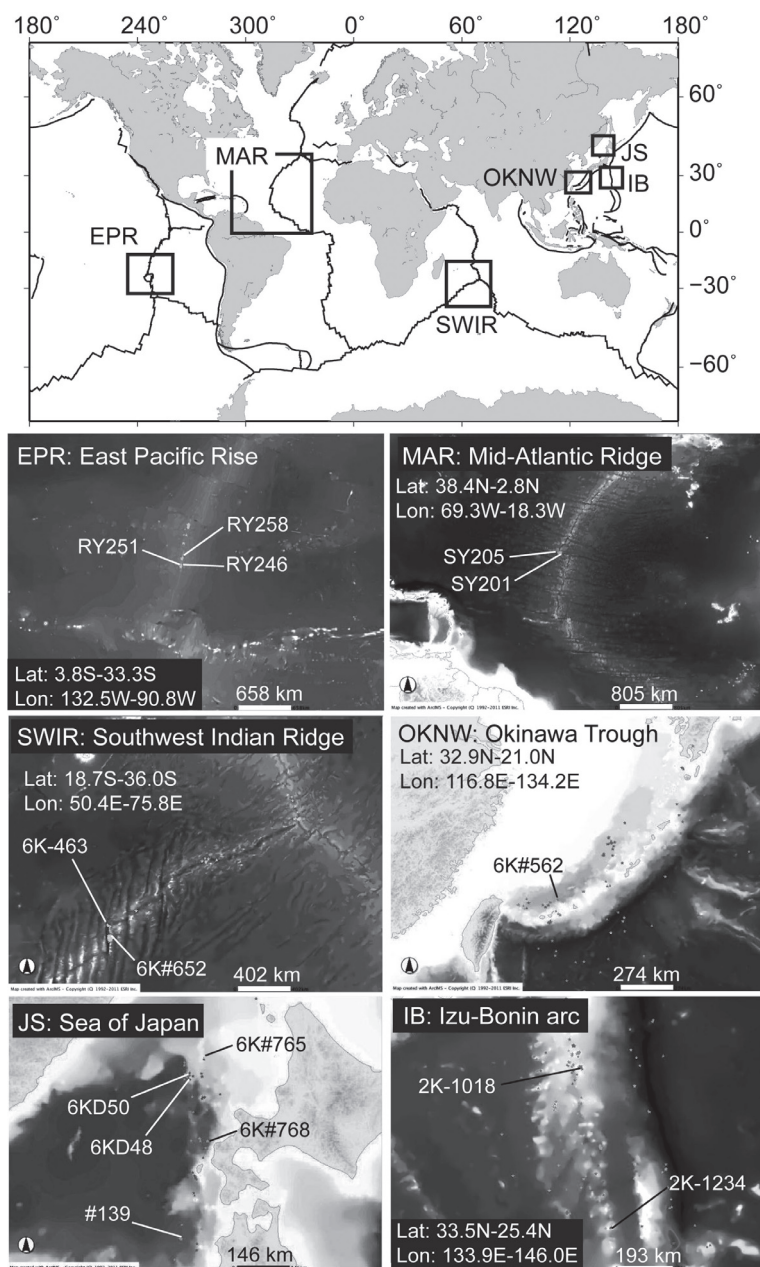


Fig. 1. World map showing the locations of sampling areas considered in this study. The lower six panels show sample localities at each area, plotted on maps obtained using the GANSEKI database. All maps are available as color figures on the Web site but were converted to gray-scale for publication.

GANSEKIに登録されている岩石記載は、ほとんどが船上での肉眼観察に基づいた情報で、火山岩の場合、組織、斑晶、鉱物組み合わせ、変質の程度などを知ることができる。この点は、下記に示すように、今後改善が必要であると思われる。試料を研究に使用する際の条件・手続き等に関しては、市山ほか（2011）を参照して欲しい。検討した試料の産地、試料番号をTable 1に示した。各地点から複数の試料について検討を行った。日本海試料をのぞき、各地域の記載岩石学的特徴（組織、鉱物組み合わせと量）は類似しているため、以下では、まとめて報告する。

東太平洋海嶺試料中の斑晶は、斜長石、かんらん石で、それぞれ0.5–1 mm、0.5 mmの自形から半自形を呈する。石基は、ほぼガラス質な領域から、急冷結晶が徐々に増加し、ほぼ急冷結晶から構成されている領域へと変化する。

大西洋試料中の斑晶は、0.5–2 mmの自形から半自形のかんらん石、斜長石斑晶である。石基は、ガラス質から、急冷結晶が徐々に増加し、ほぼ急冷結晶から構成されている領域へと変化する。

南西インド洋試料中の斑晶は、5 mmに達する斜長石、0.5–3 mmの自形から半自形のかんらん石である。石基は、ガラス質な部分が観察され、微細な斜長石、かんらん石で構成されている。

沖縄トラフ試料中の斜長石斑晶は、0.5–1 mmの結晶が集まった集斑状組織を呈している。そのほかに、0.5–1 mm程度のかんらん石、単斜輝石斑晶を含む。気泡を多く含む。石基は、一部ガラス質な領域も観察されるが、大部分は、急冷結晶相で構成されている。

伊豆–小笠原弧試料中の斑晶は、0.5–1 mmの斜長石、

Table 1. Sample localities and selected information available in the GANSEKI database.

Sample ID	Sample Name	No.	Size(cm)	Weight (Kg)	Latitude	Longitude	Depth (m)	Area
East Pacific Rise								
708	RY258-R03			0.3	-17.4387	-113.1944	2628	East Pacific Rise 17S
710	RY258-R05				-17.4363	-113.2019	2590	East Pacific Rise 17S
725	RY251-R07				-18.3627	-113.3828	2674	East Pacific Rise 18S
726	RY251-R08a	01	16.0×12.5×5.3	2.00	-18.3629	-113.3843	2680	East Pacific Rise 18S
716	RY246-R03				-18.3623	-113.3837	2681	East Pacific Rise 18S
717	RY246-R04a		6.3×5.6×5.1	0.30	-18.3579	-113.3843	2667	East Pacific Rise 18S
Mid-Atlantic Ridge								
583	SY205-3-1	02		0.5	23.8373	-46.3173	4988	Kane FZ
586	SY205-6-1	01	9.7×9.2×7.7	1.00	23.8360	-46.3197	4845	Kane FZ
558	SY201-3-1				23.8317	-26.3148	4928	Kane FZ
Southwest Indian Ridge								
6840	6K652-R10	01			-32.5801	57.2641	2521	Atlantis II FZ
1220	6K-463R2	01	11.0×10.5×3.8	0.80	-31.9087	57.0743	5185	Atlantis II FZ
1222	6K-463R4	02		0.55	-31.9026	57.0704	5075	Atlantis II FZ
Okinawa								
6928	6K#562R001		10.6×6.3×5.5	0.50	25.2379	124.8815	1924	Okinawa Trough
6929	6K#562R002		13.5×10.8×10.8	1.70	25.2379	124.8815	1924	Okinawa Trough
6930	6K#562R003		11.2×7.8×4.8	0.70	25.2376	124.8816	1913	Okinawa Trough
6934	6K#562R008	01	14.0×9.5×9.5	1.10	25.2362	124.8807	1924	Okinawa Trough
6935	6K#562R009	01	17.0×12.6×12.0	1.65	25.2358	124.8798	1851	Okinawa Trough
6936	6K#562R010	01	25.0×20.5×15.0	6.25	25.2308	124.8735	1898	Okinawa Trough
6937	6K#562R011	01	15.0×12.0×12.0	1.65	25.2293	124.8705	1702	Okinawa Trough
6938	6K#562R012	01	15.8×10.3×7.9	1.20	25.2294	124.8700	1669	Okinawa Trough
Izu-Bonin								
294	2K-1234-R2				26.7103	141.0742	436	Kaikata Seamount
296	2K-1234-R4	01	6×5×5	0.15	26.7099	141.0742	451	Kaikata Seamount
298	2K-1234-R6	02	13×8×5.5	0.45	26.7107	141.0735	474	Kaikata Seamount
299	2K-1234-R7	01	8.5×6.5×5	0.15	26.7107	141.0735	474	Kaikata Seamount
269	2K-1018-R2	01	16.5×12.5×11	2	31.4188	140.1218	925	Sumisu Island
270	2K-1018-R3	01	14.5×13×12	1.65	31.4188	140.1218	939	Sumisu Island
Japan Sea								
6911	6K#768-R-1				42.7021	139.6795	3029	Southeastern Shirebeshi Trough
2219	6KD48R01		8.9×5.8×5.4	0.35	44.0000	139.1667	2727	Okusiri Ridge
2228	6KD50R01				44.0583	139.1250	3040	Okusiri Ridge
6909	6K#765-R-2	01	12.0×10.0×6.9	1.35	44.8874	139.4556	1299	Northern Oshoro Seamount
2235	#139	02	21.3×12.5×9.0	3.50	40.6950	139.0015	3277	Off Oga Peninsula

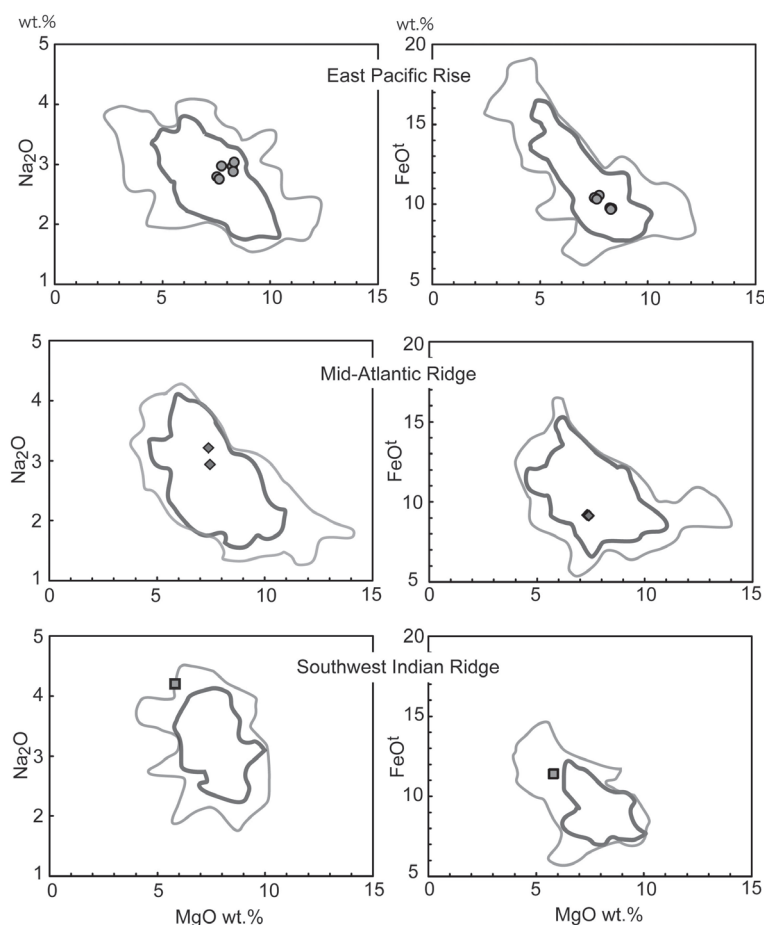


Fig. 2. Plots of MgO versus Na₂O (left panels) and MgO versus FeO^t (total Fe as FeO) (right panels) in volcanic glasses from the East Pacific Rise (upper panels), the Mid-Atlantic Ridge (middle panels), and the Southwest Indian Ridge (lower panels). The compositional range of each oceanic area (from Sato et al. (2008) using the PetDB database) is shown by thick and thin (light-color) lines, representing the compositional range of most samples and of all samples, respectively.

0.5 mm 程度のかんらん石である。斜長石斑晶は、しばしば集斑状組織を示す。石基は、一部ガラス質な領域も観察されるが、微細結晶が多く含まれている。石基の大部分は、急冷結晶相で構成されている。気泡を多く含む。

日本海試料 (768R91) 中の斑晶は、~1 mm の斜長石と ~1 mm の単斜輝石、斜方輝石、<0.5 mm の不透明鉱物である。斜長石斑晶には、汚濁帯が普遍的に観察される。輝石斑晶はしばしば集斑状組織を呈している。日本海試料 (D48)

Table 2. Averaged major and trace element compositions of volcanic glasses from the East Pacific Rise, the Mid-Atlantic Ridge, and the Southwest Indian Ridge.

Sample	East Pacific Rise			Mid-Atlantic Ridge			Southwest Indian Ridge		
	RY251-R07	RY251-R08a	RY246-R04a	RY246R03	RY258-R03	RY258-R05	SY201-3-1	SY205-6-1	6K463R2-01
wt. %	N = 3	N = 3	N = 3	N = 3	N = 3	N = 3	N = 3	N = 3	N = 2
SiO ₂	49.7	49.6	49.5	49.5	50.1	50.1	50.5	50.6	50.6
TiO ₂	1.54	1.52	1.48	1.45	1.67	1.58	1.52	1.41	2.40
Al ₂ O ₃	15.0	15.0	14.7	15.1	14.2	14.3	15.0	14.9	14.3
FeO	9.8	9.8	10.6	9.7	10.4	10.3	9.1	9.0	11.4
MnO	0.25	0.21	0.16	0.22	0.04	0.20	0.15	0.21	0.26
MgO	8.2	8.3	7.7	8.3	7.5	7.6	7.4	7.5	5.8
CaO	11.7	11.7	11.6	11.7	11.8	11.8	11.3	11.6	9.7
Na ₂ O	3.0	3.0	3.0	2.9	2.8	2.8	3.2	2.9	4.2
K ₂ O	0.08	0.09	0.01	0.07	0.13	0.12	0.11	0.15	0.28
P ₂ O ₅	0.10	0.15	0.04	0.10	0.19	0.08	0.16	0.21	0.27
Total	99.5	99.4	98.9	99.0	98.9	98.9	98.5	98.6	99.3
Mg#	60.0	60.3	56.6	60.4	56.3	56.9	59.3	59.7	47.6
ppm									
Li	5.9	6.2	5.9	5.8	5.5	5.4	5.6	5.3	8.9
B	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Sc	35	35	37	36	40	38	37	37	39
Ti	9412	9248	9702	9927	11254	10337	9723	9529	16405
V	280	277	297	292	342	327	274	285	324
Cr	355	339	273	335	17	271	334	347	227
Co	42.7	42.3	42.5	43.2	1.7	40.4	36.7	37.7	37.6
Ni	108	109	89	116	4	79	74	84	52
Rb	0.72	0.74	0.40	0.72	0.02	0.93	1.12	1.48	1.22
Sr	97.6	97.5	91.5	99.3	101.5	95.8	121.7	113.6	161.3
Y	23.0	22.9	24.7	23.8	26.3	24.2	23.2	22.9	38.8
Zr	64.2	63.8	64.6	66.5	76.7	66.1	75.7	69.6	153.5
Nb	1.69	1.68	1.22	1.78	3.25	2.25	2.38	3.11	4.17
Cs	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Ba	5.79	5.38	3.12	5.95	11.67	7.46	10.54	13.52	14.37
La	2.37	2.26	2.13	2.42	3.44	2.67	3.09	3.15	5.95
Ce	8.46	8.38	8.09	8.45	10.58	8.86	10.32	10.01	19.39
Pr	1.37	1.38	1.36	1.40	1.66	1.42	1.65	1.55	3.08
Nd	7.49	7.48	7.51	7.81	9.04	7.98	8.66	8.23	16.96
Sm	2.64	2.56	2.57	2.78	3.03	2.74	2.85	2.77	5.40
Eu	1.02	1.00	1.02	1.06	1.15	1.03	1.10	1.06	1.82
Gd	3.51	3.43	3.55	3.53	3.88	3.53	3.57	3.46	6.25
Tb	0.58	0.57	0.62	0.61	0.65	0.61	0.63	0.61	1.04
Dy	4.18	4.14	4.45	4.36	4.90	4.41	4.35	4.25	7.48
Ho	0.91	0.86	0.91	0.93	1.02	0.93	0.94	0.86	1.53
Er	2.56	2.51	2.69	2.71	3.00	2.71	2.54	2.56	4.28
Tm	0.38	0.36	0.40	0.39	0.45	0.39	0.39	0.36	0.59
Yb	2.67	2.64	2.92	2.77	2.97	2.82	2.66	2.39	4.16
Lu	0.36	0.38	0.41	0.37	0.42	0.39	0.37	0.36	0.59
Hf	1.72	1.77	1.68	1.76	2.02	1.82	1.96	1.85	3.75
Ta	0.11	0.11	0.09	0.12	0.21	0.14	0.17	0.19	0.28
Pb	0.35	0.40	0.03	0.40	0.02	0.34	0.05	0.46	1.15
Th	0.09	0.01	0.07	0.09	0.19	0.13	0.14	0.17	0.02
U	0.04	0.04	0.03	0.04	0.08	0.06	0.06	0.07	0.09

STD = standard deviation, N = numbers of analyses, Mg# = Mg/(Mg+FeO^{total}), All Fe is treated as FeO.

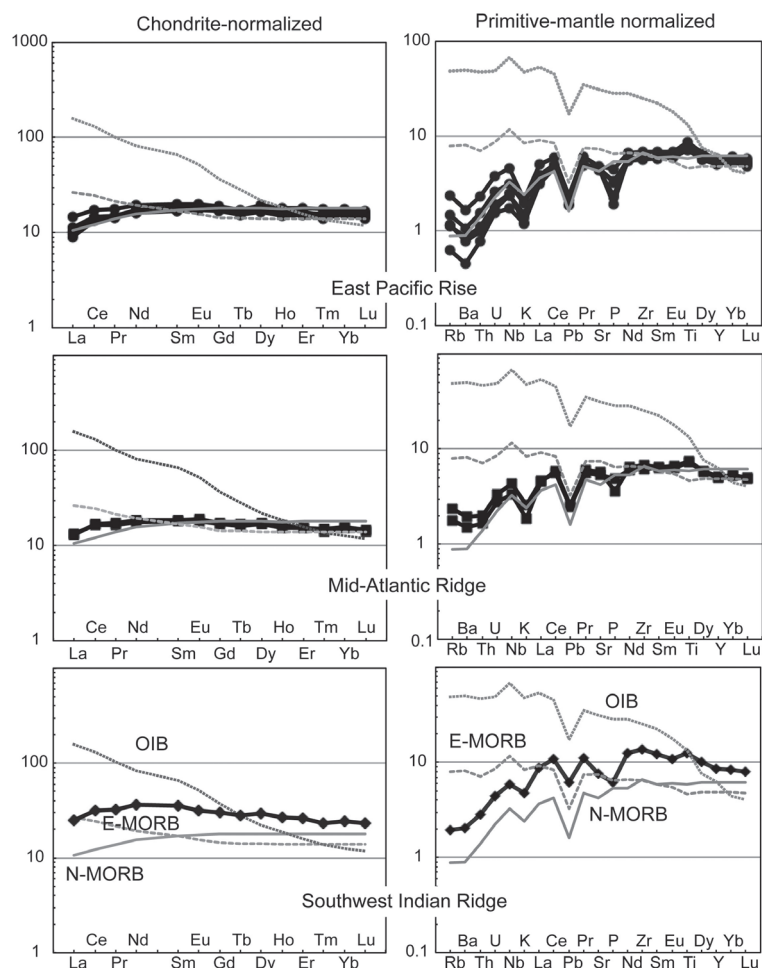


Fig. 3. Chondrite-normalized rare earth element patterns (left panels) and primitive-mantle-normalized trace element variation diagrams (right panels) for volcanic glasses (thick black lines with symbols) from mid-ocean ridges. For comparison, patterns are also shown for N-MORB (normal mid-ocean ridge basalt), E-MORB (enriched mid-ocean ridge basalt), and OIB (ocean-island basalt), Sun and McDonough (1989). Chondrite and primitive mantle values are from Sun and McDonough (1989).

は、岩石全体がやや変質しており、気泡の周りや石基部分の大部分が細粒茶褐色～緑色結晶で置き換えられている。斜長石斑晶は中心部に汚濁した部分を有している。単斜輝石斑晶は1 mm以下で、しばしば0.5 mm程度の単斜輝石が集斑組織状を呈している。日本海試料(D50)はドレライト的組織を呈しており、1 mm程度の単斜輝石がしばしば集斑組織を呈して産する。斜長石斑晶は2 mm程度の大きさである。日本海試料(765R02)は、やや変質した0.5 mm程度のかんらん石斑晶を含み、石基は伸張した斜長石が流理構造を呈するように配列したピロタキシティック組織を呈する。日本海試料(139-2)中の斑晶は、自形～半自形で1 mm程度のかんらん石と、2 mmに達し、累帯構造が顕著に発達している単斜輝石、1 mm程度の斜長石斑晶である。

近年、化学分析手法の発達によって、極微量の試料で、多くの元素の化学分析が可能となり、さらに、分析手法によっては、短時間での測定が可能のため、多くの試料の処理を行えるようになった。一方で、単なるデータの大量化に陥らないために、データの質を高める必要があり、各分析手法に最適な試料を厳選しなければならない。データベースから研究試料候補を短時間に検索するためには、採取された試料の記載の更なる充実が必要である。実際に航海で得られた試料の場合、船上で記載した試料を、下船後に詳細に観察・研究を行うことで、船上では気づかなかった新たな知見が得ら

れることや、船上での記載に誤りがあることは少なくない。しかしながら、これらの実情が早期のデータの公表を妨げ、結果として、貴重なデータを有効に利用できていない現状がある。これまでの未公表データを、積極的にデータベース化できれば、GANSEKIの価値を高めることになる。また、今後、新たに得られる試料に対しては、乗船中の記載事項について、すべての船に共通する記載事項と、判断基準を整備し、すぐにGANSEKIへのデータベース化ができるシステムの構築が必要であろう。しかし、いくら記載事項を共通項にしても、研究者間での認識の差が、記載の差に現れることは避けられない。そのため、『できるだけ岩石組織がわかる』写真を、船上で用意できる工夫が必要である。船上研究者、下船後の研究者の相互の協力とデータ提供が、本国に保存・管理されている貴重な海洋試料の重要性を高める。GANSEKIを積極的に利用し、得られたデータをフィードバックさせるシステムを築いていく必要がある。

化学分析方法

火山ガラスの主要元素組成は金沢大学付設の電子線マイクロアナライザー(EPMA: 日本電子社製JXA-8800)を使用して測定した。測定条件は、加速電圧が15 keV、試料電流が20 nA、測定ビーム径を10 μm とした。測定元素の電子線照射時間はピークで10秒間、バックグラウンドは2ボ

イントで各5秒間測定した。すべての試料に対して、測定前にNa, KのX線強度が試料測定開始から1分間は大きく経時変化しないことを確認したため、電子線照射中のX線強度変化に対する補正は行っていない。微量元素組成は、金沢大学付設のレーザーアブレーションICP-MS (LA-ICPMS) を用いて測定した。レーザーには、193 nm ArF excimer laser (GeoLas, Q⁺) を、ICP-MSは四重極型 (Agilent 7500 s) を使用した (Ishida et al., 2004)。レーザー側の条件は、照射率5 Hz, エネルギー密度8 J/cm², 直径50 μmの条件で照射した。標準試料にはNIST SRM 612 ガラスを用いた。データ解析は、Longerich et al. (1996) の手法に従った。測定中の感度ドリフトを補正するため、3~4点の未知試料分析の前後に標準試料を分析し、各元素の感度ドリフトを直線回帰し、補正を行った。NIST SRM 612の濃度はPearce et al. (1997) で報告された値を使用した。濃度への換算は、EPMA分析により得られたSiO₂含有量を用いて、²⁹Siを内標準元素として求めた。金沢大学LA-ICPMS分析システムの詳細は、Morishita et al. (2005a, b) で報告されている。

本研究では、火山ガラスの化学組成を上述した局所分析法によって測定するため、光学顕微鏡を用いて、レーザーサンプリング径50 μmで周囲の相と混合しない面積70×70 μm内で、かつ通常薄片の厚さ(30 μm)中で、急冷結晶などを含まない領域が得られる試料を厳選した。その結果、今回の試料中では、中央海嶺系で採取された試料中のみ、測定可能なガラス領域を得ることができた。そのため、以下では、中央海嶺系試料の結果のみ報告する。

結 果

各試料の化学組成分析結果をTable 2に示した。また、Fig. 2にMgOに対する総鉄含有量をFeOとしたときの値とNa₂O値との関係を図示した。南西インド洋海嶺の試料は、ややNa₂Oに富むが、測定された組成は、佐藤ほか(2008)によるデータベースPetDBを用いてコンパイルされた各海域の火山岩組成範囲内にプロットされた (Fig. 2)。南西インド洋海嶺の試料は、MgO含有量が乏しく、微量元素の絶対値が他の海域の試料よりも高いことから、より分化を受けた組成を示しているといえる。いずれの試料においても、コンドライト値で規格化した希土類元素パターンは、重希土類元素からNdまでほぼ平らからわずかに増加し、軽希土類元素で左下がりのパターンを示す (Fig. 3)。初生的マントル値で規格化した微量元素パターンも左下がりで、いずれもN-MORBパターンの特徴を示す。軽元素であるLi含有量は、太平洋、大西洋の試料については5~6 ppmで、南西インド洋の試料はやや高く9 ppm程度である。これらの値は、Ryan and Langmuir (1987), Chan et al. (1992) によって報告された中央海嶺玄武岩の組成範囲内である。B含有量は、検出限界以下(3 ppm以下)であった。中央玄武岩で報告されているB含有量の多くが3 ppm以下であること (Ryan and Langmuir, 1993) と調和的である。

謝 辞

査読者の平野直人氏、編集担当の伴雅雄氏のコメントによって本稿は改善された。海洋研究は、研究者だけでなく、調査船運航チーム、研究サポートなしには成り立たない。本報告に使用した試料のみならず、これまでの海洋底試料採取に関与してきた関係者の努力に敬意と感謝の念を表したい。澤田明弘氏には、図の作成の一部を手伝っていただいた。森下は科学技術振興調整費「若手研究者の自立的研究環境整備促進プログラム」による研究支援をいただいた。

文 献

- Chan, L. H., Edmond, J. M., Thompson, G. and Gillis, K., 1992, Lithium isotopic composition of submarine basalts: implications for the lithium cycle in the oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **108**, 151–160.
- 市山裕司・華房康憲・相馬伸介 (Ichiyama, Y., Hanafusa, Y. and Soma, S.), 2011, 深海底岩石試料データベース「GANSEKI」の紹介。地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **117**, 579–584.
- Ishida, H., Morishita, T., Arai, S. and Shirasaka, M., 2004, Simultaneous in-situ multi-element analysis of minerals on thin section using LA-ICP-MS. *Sci. Rep. Kanazawa Univ.*, **48**, 31–42.
- Iwamori, H. and Albarède, F., 2008, Decoupled isotopic record of ridge and subduction zone processes in oceanic basalts by independent component analysis. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Q04033, doi: 10.1029/2007GC001753.
- Longerich, H. P., Jackson, S. E. and Günther, D., 1996, Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric transient signal data acquisition and analyte concentration calculation. *Jour. Anal. At. Spectrom.*, **11**, 899–904.
- Morishita, T., Ishida, Y. and Arai, S., 2005a, Simultaneous determination of multiple trace element compositions in thin (<30 μm) layers of BCR-2G by 193 nm ArF excimer laser ablation-ICP-MS: implications for matrix effect and element fractionation on quantitative analysis. *Geochem. Jour.*, **39**, 327–40.
- Morishita, T., Ishida, Y., Arai, S. and Shirasaka, M., 2005b, Determination of multiple trace element compositions in thin (<30 μm) layers of NIST SRM 614 and 616 using laser ablation ICP-MS. *Geostand. Geoanal. Res.*, **29**, 107–122.
- Pearce, N. J. G., Perkins, W. T., Westgate, J. A., Gorton, M. P., Jackson, S. E., Neal, C. R. and Chenery, S. P., 1997, A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials. *Geost. Newsl.*, **21**, 114–144.
- Ryan, J. G. and Langmuir, C. H., 1987, The systematics of lithium abundances in young volcanic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 1727–1741.
- Ryan, J. G. and Langmuir, C. H., 1993, The systematics of boron abundances in young volcanic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**, 1489–1498.
- 佐藤 暢・熊谷英憲・根尾夏紀・中村謙太郎 (Sato, H., Kumagai, H., Neo, N. and Nakamura, K.), 2008, 中央海嶺玄武岩の化学組成の多様性とその成因。地学雑 (*Jour. Geogr.*), **117**, 124–145.
- Sun, S. -S. and McDonough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In Saunders, A. D. and Norry, M. J., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*, *Geol. Soc. Spec. Pub.*, **42**, 313–345.