

伊豆小笠原諸島近海における 海底火山活動とその温泉化学的研究

岡山大学理学部 小坂 丈 予

1 ま え が き

東京の南方海上には富士—マリアナ火山帯に沿って、伊豆七島から火山列島を経てマリアナ諸島に続く多くの火山島が存在している。それらのうちでも伊豆大島、三宅島、青ヶ島、鳥島、硫黄島、ウラカス島、パガン島などでは近年も時々噴火をくり返している。さらにこの海域では海面下でも多くの海底火山が活動しており最近では明神礁、西之島、福徳岡之場、福神海山、南日吉海山、海徳海山などの各地点において海底噴火がおこった事が確認されている(図1、表1)¹⁾。

筆者らはそれらの海底火山の活動にさいして、活動状況の現地観測、活動経過の記録、噴出物の調査研究等にたずさわって来た。それらの活動では変色海域の出現、水柱、海中よりの噴煙、噴石の放出、海底地震、津波の発生、水中音波の転搬、浮遊軽石の流動等海底火山活動に特有の火山現象が観察される。それらの諸現象のうちでも、変色海域の発生は海底火山活動で最も多く見られる現象の一つであり、多くの場合それらの変色海水の色調、濃度、面積、形態などが、海面下の火山活動の規模、激しさ、継続状況などのほか、噴火位置、深さ等をも推定する可能性もある重要なものである。しかし変色海水の試料の採取は著しく危険を伴い、且つ作業が困難なため、これまで長らくその実態を把握することが出来なかったが、1973~1974年の西之島の海底火山活動の際、種々の安全処置をほどこした上、はじめて数回にわたってその変色水を採取するこ

表1. 南方海域の火山島と海底火山の活動年

No.	地 点 名	活 動 年
1	明神礁	1870, 1896, 1906, 1915, 1924, 1946, 1952-1953, 1954, 1955, 1960, 1970
2	ベヨネーズ列岩	
3	スミス岩	1870, 1915, 1916, 1974, 1976
4	鳥島	1371, 1902, 1939
5	ソーフ岩	
6	西之島	1973-1974
7	海徳海山	1984
8	北硫黄島	1780, 1880-1889
9	硫黄島	
10	福徳岡之場	1904-1905, 1914, 1952, 1968, 1972, 1973-1984
11	南硫黄島	
12	南日吉海山	1975-1978
13	福神海山	1952, 1958-1959, 1967, 1973-1982
14	ウラカス島	1865, 1875, 1901-1902, 1912, 1925, 1932, 1934, 1936, 1953, 1969

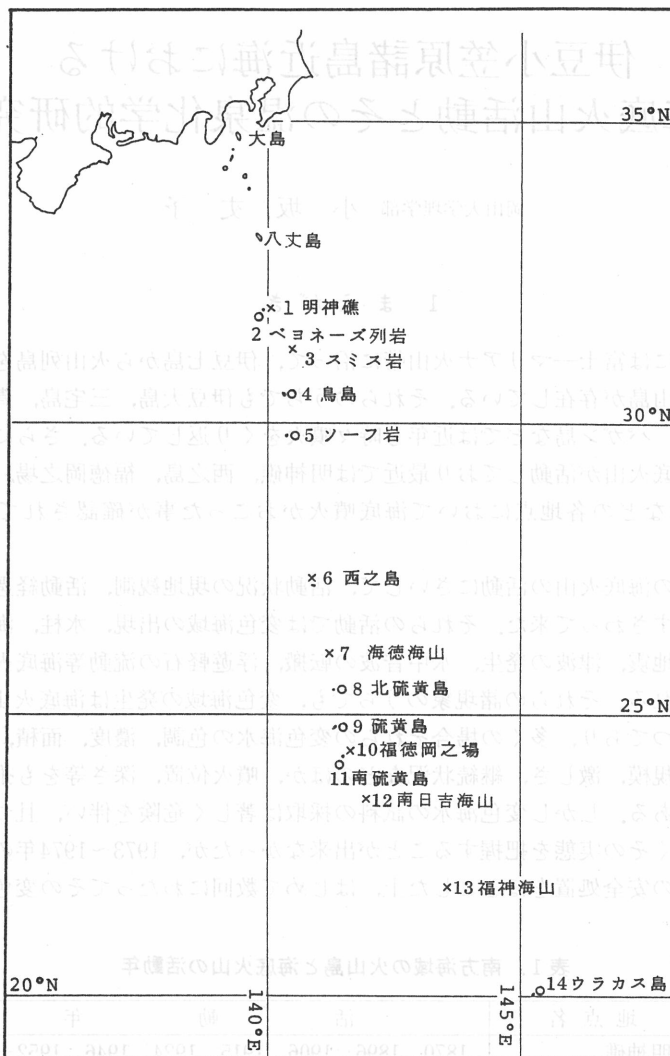


図1. 南方海域の火山島と海底火山

とに成功した。化学分析や鉱物学的同定の結果から、それらの変色水はいずれも $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系の非晶質で微細な沈殿物が懸濁しているものであることが判明した²⁾。またこれと類似の沈殿物が薩摩硫黄島の海岸で生成しているのを筆者らが以前に発見しており、その発生機構などについても種々検討していたが³⁾、それらの結果から西之島の変色海水の成因もこれとほぼ同様なものと同推察され、また両者の比較により西之島海底火山の海面下における活動強度や規模などもある程度推定し得た。

そのごもこの南方海域の福德岡之場⁴⁾、福神海山⁵⁾、海德海山⁶⁾などが海底火山活動を行ったさいに、それらの変色海水を採取し得たので、同様の方法でそれらの活動度や噴火の規模を推定する事を試みた。

2 変色海水の採取とその成分

2-1 西之島海底火山

西之島の海底活動にあたっては、1973年5月の噴火発見時よりその存在は確認されていたが、同年9月海底より新火山島が形成された時期が最盛期であり、翌1974年6月活動が一旦休止するまで大量の変色海水を放出しつづけ、そのご数十年を経た現在でも、新島の周辺では時々変色水が認められる事もあった。

試料は先づ1973年10月、小笠原父島の漁船第35勇漁丸で新島に接近を試みた時、約8km離れた変色海流の末端で、さらに1974年3月、日東京水産大学の神鷹丸から発進し、同船中から制御する無線操縦艇の採水ポンプにより、また同年7月7～8日同島に上陸したさい、東海大学望星丸の救命艇から夫々採取したものを中心に、活動の影響をうけないと考えられる外洋の海水までを分析した結果を表2に、また夫々の採水位置を図2に示す。

またこれらの海水を濾過した固形物のみの分析値を表3に示した。それらを総合し、これに粉末X線回折、示差熱分析の結果を併せると、この黄変色海域の実態は SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 H_2O を主成分とする低結晶質の微細な沈殿粒子が海水に懸濁しているものであることが判明した。さらにその化学成分を詳しく見ると同火山の活動の活発な時期ほど、また噴火点に近いほど SiO_2 、 Al_2O_3 の量に較べて Fe_2O_3 の含有量の多いこともわかった。またこれらの海水にはHg、Cu、Cd等マグマ中の揮発成分とされている物質が一般の海水より多く存在している事も認められた。

2-2 福徳岡之場海底火山

同火山は1968年我々が観測を開始して以来ほとんど常時変色水が認められているが、目下のところそれ以上に発展する兆候はない*。そこで筆者らは1977年3月と1979年3月の2回にわたって観測船から発進し航空機上から誘導する無線操縦艇を用いて同火山直上を航行させ、海底地形測量、水温観測とともにこの変色海水を採取した。両回の結果を総合すると表4のようになり、至って Fe_2O_3 の少い稀薄な成分であって、これは海面上に見られる変色海域の色調が白色に近い淡色を示していたのとよく一致する。

2-3 福神海山の変色海水

福神海山も以前から時々活動と休止をくり返しているが、たまたま1981年1月7日、海上保安庁の巡視船「うらが」が同海域を調査中、その位置で変色海域を発見、同船搭載のヘリコプターと救命艇により、それを採取することが出来た。化学分析の結果は表5に示したが主成分の SiO_2 と Al_2O_3 、 H_2O のほか Fe_2O_3 は福徳岡之場海底火山の場合よりは多く、色調も若干黄色が強いようであった。

2-4 海徳海山の海底火山活動

1984年の海徳海山の海底火山活動中の3月14、15日は海上保安庁の巡視船「うらが」搭載のヘリコプターにより、また3月22、23、24日には同庁水路部の測量船「昭洋」により採取された黄色海水の採取位置を図3に、分析結果を表6、図4、5に示した。それによると変色水のNo.2が最もpH値が小さくまたその試料のFeが最も多く、またNo.6がpH値は最も大きく、Feの量は最も少く、一般には図4に示したようにpH値が小さくなるほど変色水中のFe含量が多くなる事が明らかになった。さらに図5には噴火点から離れる程pH値が高くなることを示しており、これは変色海水のその時の形や方向、或は規模などによって種々変化するはずであるが、特に同一

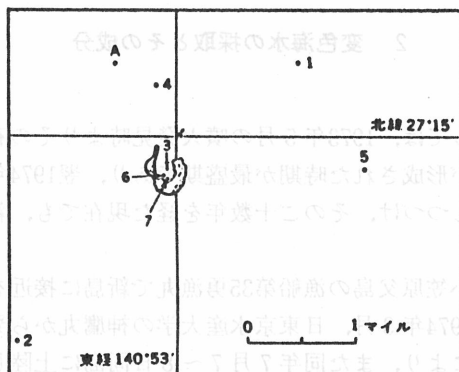


図2. 西之島付近変色海水採取点

表2. 西之島付近変色海水の化学成分

1987年	水温	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	F	Fe	Al	SiO ₂	Hg	Cu	Zn	Cd
		(g/l)						(mg/l)			(μg/l)				
3月6日第1回	20.7	10.90	0.407	1.374	0.401	19.85	2.74	—	0.09	—	—	0.4	4.3	10.0	0.4
3月6日第2回	20.5	10.85	0.397	1.374	0.402	19.84	2.73	—	0.04	—	—	0.2	4.3	6.8	—
3月14日第1回	28.9	10.70	0.406	1.371	0.408	19.93	2.75	2.0	2.58	1.86	20.1	1.0	8.6	11.0	0.8
3月14日第2回	—	10.80	0.410	1.350	0.408	19.90	2.77	1.4	0.07	—	1.3	1.3	—	6.0	1.4
3月15日	19.0	10.98	0.403	1.347	0.408	19.84	2.74	—	0.05	—	—	0.1	2.8	8.0	0.4
7月7日第2回	—	10.80	0.403	1.280	0.388	19.50	2.68	1.4	1.45	0.21	24.9	1.2	—	18.1	2.8
7月8日	—	10.60	0.408	1.310	0.407	19.60	2.65	1.6	0.14	—	27.2	1.2	—	12.1	2.2
一般海水	—	10.50	0.380	1.35	0.400	19.00	2.65	1.3	0.01	0.01	3.1	0.03	3.0	10.1	0.11

表3. 西之島・変色海水中の沈殿物の化学成分*

	1973. 10. 9 〔A〕湾外	1974. 3. 14 〔3〕湾外	1974. 3. 14 〔4〕湾外	1974. 7. 8 〔7〕湾内 (水洗せず)
SiO ₂	30.20	14.97	1.61	22.98
TiO ₂	—	0.29	—	0.36
Al ₂ O ₃	22.27	8.56	21.33	5.87
Fe ₂ O ₃	14.93	45.70	12.88	36.52
MnO	—	—	0.00	0.46
MgO	0.17	1.02	none	0.98
CaO	0.96	こん跡	none	1.89
Na ₂ O	1.85	0.50	0.62	3.61(2.40)**
K ₂ O	0.63	0.21	0.13	0.46(0.13)**
lg. loss	27.15	28.38	7.15	23.01
不溶残分	—	—	6.28	—
合計	98.16	99.63	100.00	100.00

* 大平洋子分析

** () 内は水溶成分含量

表4. 福徳岡之場海底火山変色水の化学成分*

	変色水	pH	mg/l Fe	mg/l Al	mg/l Si	mg/l Mn	°C 水温
1977-3-21	中心	7.9	0.15	0.09	0.29	0.045	—
"	辺縁	8.0	0.13	0.09	0.20	0.045	—
"	外洋	8.45	0.04	0.00	0.03	0.022	—
1979-3-27	中心	7.96	0.13	0.08	0.05	—	22.3

* 平林順一分析

表5. 福神海山の変色水の分析結果*

	No.1 (噴出点から150m)	No.2 (噴出点から15m)	No.3 (噴出点から10m)	No.4 (噴出点)	海水 (参考)
pH 測定開始時	—	5.20	4.50	4.30	} 8.2~8.4
pH (測定終了時)	8.03	7.72	6.70	7.04	
鉄 (mg/l) Fe ⁺⁺	0	0	0	0	
" (") Fe ⁺⁺⁺	0.52	0.65	0.72	0.83	
" (") 全鉄	0.52	0.65	0.72	0.83	0.02
全炭酸 (mg/l)	180.0	191.0	94.1	145.0	67~110
硫酸根 (mg/l)	—	2670	2710	2700	2650

* 平林順一分析

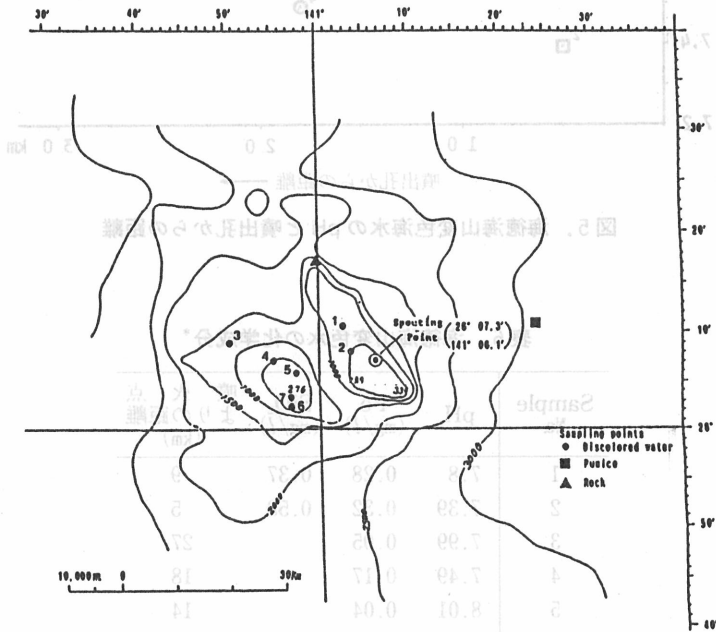


図3. 福徳海山付近図

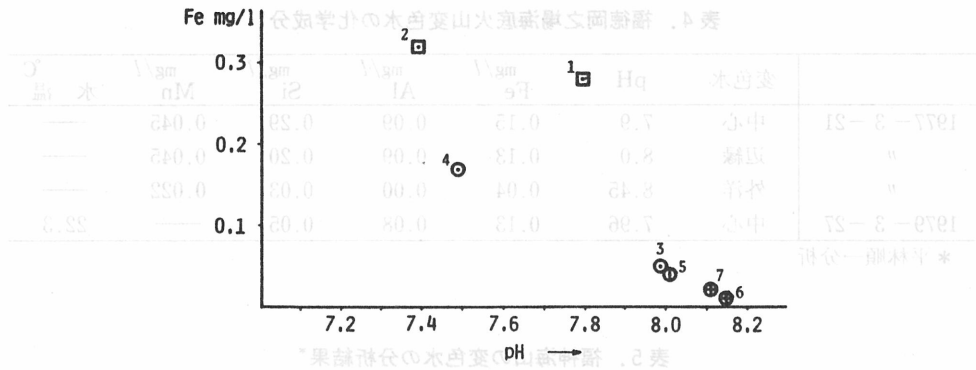


図4. 海徳海山変色海水のpHとFe

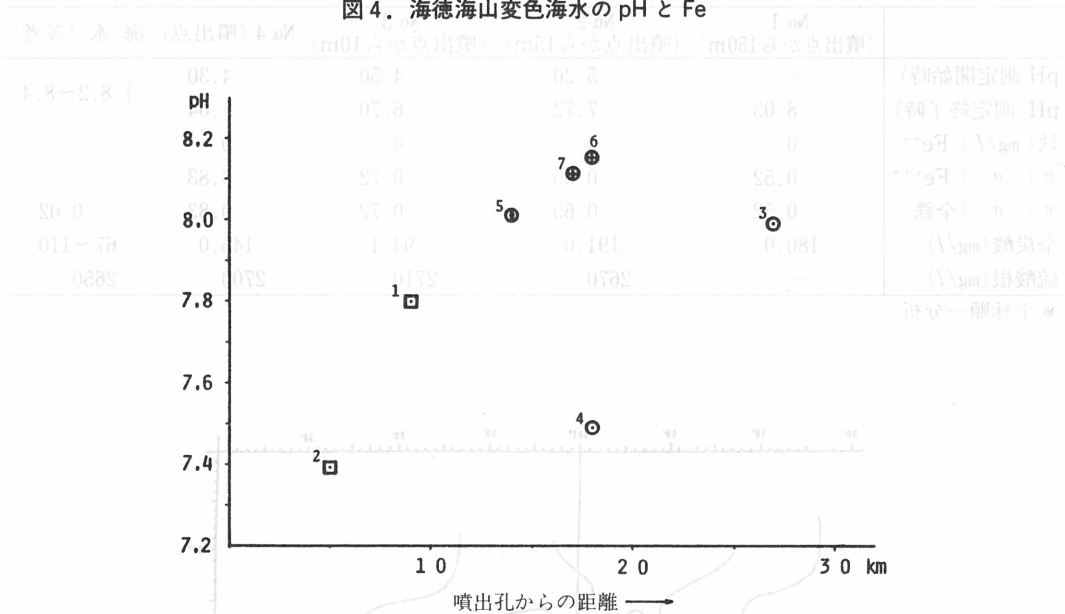


図5. 海徳海山変色海水のpHと噴出孔からの距離

表6. 海徳海山変色水の化学成分*

Sample No.	pH	Fe (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	噴火点よりの距離 (km)
1	7.8	0.28	0.37	9
2	7.39	0.32	0.58	5
3	7.99	0.05		27
4	7.49	0.17		18
5	8.01	0.04		14
6	8.15	0.01		18
7	8.11	0.02		17

* 平林順一分析

の時期に同一の方向へ向うものどうしを比較すると、より上記の傾向が著しい事も認められた。

3 変色海水の生成機構とその成分変化

3-1 薩摩硫黄島における変色水の生成

以上本邦南方海域において海底火山の活動時に出現する変色海水について述べて来たが、それらの現象は

- 1) 海底火山活動の活発な時のみに出現する。
- 2) 噴出は海底における活動中心と思われる所から行われている。

などの理由で、恐らく活動中の火口から海水中に放出された火山噴出物によるものであらうと考えられる。しかし海底火山においてはその火口或は噴出口が海面下にあるため、それらの火山噴出物を海水との混合前に入手することは困難であり、これまでその成因や生成機構に関する研究は不可能であった。

ところが既述のように1983~1984年の西之島海底火山の活動にさいして採取された変色海水の主成分 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ を主体とした微細な沈殿物であることが判明したため、それと類似の物質が薩摩硫黄島の海岸において生成されつつあることが想起され、それらの現象との対比により、変色海水の成因に関する考察や研究が著しく進展した。

即ち薩摩硫黄島(図6)の海岸には表7に示すような高温、強酸性の温泉が湧出しており、これらの温泉水が海中に流入して海水と混合することにより沈殿が生成し、変色海水が出現しているのが観察される。それ故ここでは海水と混合する前の温泉を採取することが出来、海水との人工混合実験を行った結果を表8、図7に示した。それによると多量にFe, Al, H_2SiO_3 を含んだ強酸性泉が海水との混合により次第にpHが上昇し Fe^{2+} , Al^{3+} が夫々水酸化物として沈殿し始め H_2SiO_3 も共沈現象によってこれに伴い、結局 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系の成分をもつ沈殿物を生じ、それが懸濁して変色海域を形成する事が明らかになった。また北平下温泉の下の海岸では、温泉混入量の多い(従ってpH値の低い)岸辺よりも、温泉混入量の少ない(pH値の高い)沖合いの方が懸濁沈殿物中の Fe_2O_3 含量が少いことも判明し、これが後述する変色水成分から火山活動度を推定する根拠になった(表9)。

3-2 変色水の成分から海底火山の活動度の推定

海底火山の活動期に発生する変色海域には活動の強弱や規模に応じて淡青、白、淡緑、黄、黄褐、褐、茶褐、赤褐色など種々の色調と濃淡、形、大きさを呈すが、特にその色調は微細な懸濁沈殿物の化学成分、中でも Al_2O_3 , SiO_2 と共に混在する Fe_2O_3 の含量に支配される。海底火山活動では海底の火口から噴出する火山性成分(この場合は主として温泉として)が海水と混合して $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ を主成分とする微細な沈殿物を生ずるものであらうと推察されたが、その際火山発散物(例えば温泉水)の混合量が多ければ酸性が強く(pH値が小さく)なり、これは海中での火山活動が活発であることを意味している。前項の結果を総合すればその時に生ずる沈殿には Fe_2O_3 の含有が多く、従って変色水は褐色ないし茶褐—赤褐色を呈する。一方海水中への火山発散物の混入量が少ければ酸性が弱く(pH値が大きく)なり、その時には Fe_2O_3 の少い沈殿が生じ、変色水は淡黄ないしは白色となり、その場合は海底での火山活動もあまり激しくないと推定される。

以上の原則を適用して、南方諸島海域の海底火山活動に於て薩摩硫黄島の海岸の例も含めてこれまで測定し得た変色海水の化学成分から、その時期の活動度(強弱)を比較して見た(表

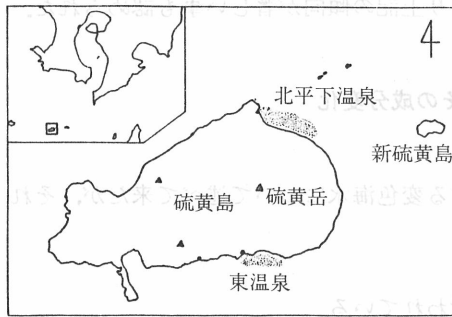


図6. 薩摩硫黄島における酸性泉の位置と海中沈殿物の位置と海中沈殿物

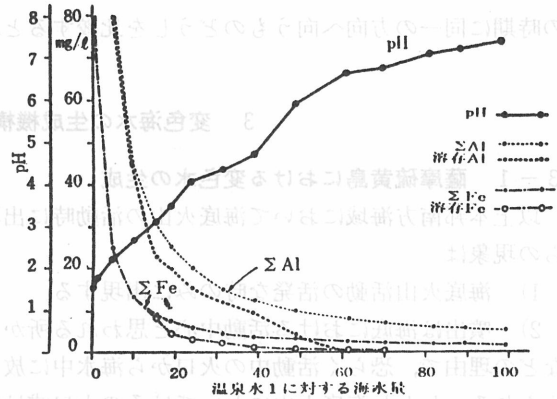


図7. 東温泉泉水と海水の混合による成分変化

表7. 薩摩硫黄島の強酸性泉の化学成分

	東温泉		北平下温泉	
	'62-7-23	'75-8-2	'62-7-30	'75-8-3
採水日				
水温 °C	51.5	56.0	70.0	61.0
pH	1.7	1.6	1.3	1.3
Na ⁺ mg/l	320	324	545	1710
K ⁺	97.0	57.6	240	356
Mg ⁺⁺	59.0	65.7	115	211
Ca ⁺⁺	168	143	222	281
Mn ⁺⁺	10.8	4.4	20.9	18.5
Fe ⁺⁺	33	85.9	420	347
Fe ⁺⁺⁺		62.3		13.9
ΣFe		148.2		361
Al ⁺⁺⁺	788	545	1250	1316
Cl ⁻	804	906	2450	4672
SO ₄ ⁻⁻	5232	4980	9220	11370
ΣCO ₂	51.2	52.0	149	193
H ₂ SiO ₃	301	300	330	317

表8. 東温泉泉水と海水との混合実験結果

No.	温泉水1に対する海水量 (%)	温泉水 (%)	沈殿生成後の母液中のpH	混合時の原液の成分			沈殿生成後の母液中の成分		
				Si (ppm)	Al (ppm)	ΣFe (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	ΣFe (ppm)
1	1	50	1.82	52.82	253	75.4	53.75	253	75.4
2	4.9	17	2.30	18.37	85.9	25.7	16.36	81.6	25.2
3	10.1	9	2.72	10.00	45.5	13.6	8.18	43.4	13.4
4	15.7	6	3.19	6.87	30.3	9.05	5.14	22.6	8.13
5	19.0	5	3.52	5.80	25.3	7.54	4.21	19.9	4.42
6	32.3	3	4.38	3.72	15.1	4.52	2.92	9.5	2.30
7	39.0	2.5	4.71	3.20	12.6	3.77	2.69	3.8	1.11
8	49.0	2	5.91	2.68	10.1	3.02	1.99	0	0.83
9	61.5	1.6	6.63	2.26	8.1	2.42	1.75	0	0.48
10	70.0	1.4	6.73	2.05	7.1	2.11	1.52	0	0.19
11	82.3	1.2	6.98	1.84	6.1	1.81	1.40	0	0.11
12	99.0	1.0	7.33	1.63	5.1	1.51	1.29	0	0.01

表9. 薩摩硫黄島海岸の沈殿物の化学成分とその沈殿物のpH

試料番号	母液 pH	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O ₋	H ₂ O ₊	NaCl	KCl
S-504	4.32	1.5%	24.7%	14.5%	25.0%	27.4%	6.4%	0.6%
S-505	4.43	0.7	25.0	14.8	25.9	26.0	6.7	0.4
S-509	4.80	2.3	30.5	6.2	26.7	27.9	5.3	0.3
S-506	5.15	1.0	33.6	5.1	24.4	28.0	5.4	0.3
S-507	5.39	2.1	32.5	4.2	24.3	25.8	8.3	0.4
S-508	5.89	7.1	34.3	4.4	20.4	25.0	7.2	0.7

表10. 各海底火山の変色水の成分と噴火強度順

順位	場所	測定年月	pH	Fe(mg/l)
1	西之島	1974年3月	——	23.9 ~ 45.7
2	薩摩硫黄島	1963年7月	4.32~5.89	4.2 ~ 14.8
3	福神海山	1981年1月	4.30~5.20	0.52 ~ 0.83
4	海德海山	1984年3月	7.39~7.8	0.28 ~ 0.32
5	福德岡之場	1977年3月	7.9 ~ 8.0	0.13 ~ 0.15

10). それによると1973年5月の噴火開始以来わずか4ヶ月で108mの海底から新火山島を出現させ、さらに翌年6月の噴火終了までに23万m²の島に拡大した西之島の活動が第1位であり、最高70°C, pH1.3の強酸性泉が海岸から海中に流入直後の薩摩硫黄島がこれに続き、一時は水深3mと言われながら現在まで時々海底活動のみをくり返している福神海山は、それより上位の2火山よりはるかに低い活動を示しているし、1984年の海德海山はその規模は著しく大きかったが、その活動の強さは、福神より若干低い程度のもので、遂に火山島は出現しなかった。福德岡之場海底火山は以上の諸火山中では最も活動が弱いものに属し、この火山はさきの1904年と1914年の2回火山島を形成したにもかかわらず、その水没し、ここ十数年は活動が続いているにもかかわらず、水深40mの海底の山頂が少しも浅くならないのは、継続しているその活動が著しく微弱なものであるためと考えられる。

4 あとがき

以上の諸結果から、海底火山活動に伴って出現する変色海域の海水を採取・分析することにより、海面下の観察困難な火山の活動度や活動状況をある程度推定出来る事があるのは解ったが、依然としてそれらの変色水は入手に危険と困難を伴うもので、いつでもこの方法を適用することが出来るわけではない。ただ問題のFeの含量は沈殿の色に著しく影響を与え、前述のような白~赤褐色の多くの色を呈するので、この色を航空機上からマルチバンド・カメラやライン・スキャナーを用いて測色し、その色調から変色水の成分を推算し、さらに海底火山の活動度を推定する試みが行われている⁷⁾。鹿児島湾で潜水艇で降下して水銀その他のマグマ揮発成分が海底の噴気孔周辺に集積されていることにもふれたが、本題から離れることになるので、それらについては別な機会に述べることにしたい。

本稿をまとめるまでには多くの方々の御協力を賜ったが、とりわけ海上保安庁、及び同水路部、東京水産大学、東京工業大学の各位の絶大な御助力が必要であった。ここに深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 佐藤孫七, 小坂丈予, 加藤 茂: 南方海域海底火山の活動記録, 関東地区災害科学資料センター資料 (その16) (1983).
- 2) 小坂丈予: 西之島海底火山の噴火と地球化学, 現代化学 1975年10月 P12-20
- 3) 小坂丈予, 大平洋子, 平林順一, 森 彰: 海中で生成したシリカーアルミナ含水低結晶物質と沈殿アロフェンとの比較, 鉱物学雑誌 13 特別号 178~186 (1977).
- 4) 小坂丈予: 海底火山の活動と新島の誕生, 化学と工業 30 658~660 (1977).
- 5) 海上保安庁水路部: 南硫黄島周辺海底火山の最近の活動等について, 火山噴火予知連絡会々報 21 37~39 (1981).
- 6) 土出昌一, 加藤 茂, 打田明雄, 佐藤寛和, 小西直樹, 小坂丈予, 平林順一: 海徳海山の海底火山活動, 水路部研究報告 20 47~82 (1985).
- 7) 大谷康夫, 加藤 茂, 佐藤寛和, 小坂丈予, 平林順一: 航空機および人工衛星による海底火山の監視, 最近の海底調査シンポジウム資料 3 7~15 (1981).

追記: 全く偶然としか言いようがないが, 筆者が本稿を書き上げて温泉学会宛に投函するため外出したその直後の1986年1月19日の夜, 出先への緊急連絡により, 同日午後4時30分頃, 本文にも記載されている福徳岡之場海底火山が突然噴火を開始した事を知らされた. 同海底火山は既述の通りその同じ位置に1904年と1914年の2回にわたり海中噴火と海蝕により新しい火山島の出現と消滅をくり返した前歴をもっており, 1950年頃からはそのあとにしばしば変色水の存在することが認められていた. しかしその後はなかなか火山島が出現しないのは, その海底火山活動が甚微弱なものであり, それを示す変色海水も酸性が弱く, 鉄分の少い乳白色のものばかりであることを本文で指適しておいた.

しかしこの度の活動では, その噴火が発見されてからわづか3日目(海上自衛隊報告の前日, 付近で操業中の漁船も噴火を目撃している。)の1月20日早朝には海上自衛隊のヘリコプターと海上保安庁水路部の測量船が火山島の出現を確認しており, それ以前の観測による水深40mを短期間で上昇し海面上に島をのぞかせた事になる.

1月20日, 21日の噴火は激烈なもので, 10秒ないし2分おき位に爆発をくり返し, 火山弾, 黒色の水柱等を400~500m噴き上げ, これにともなう噴煙は3000~6000mにも達した. 島の大きさは最大時南北約800m, 東方の欠けた半月形を示し, その東約500mの噴火口から前記噴出物のほか黄褐色ないし茶褐色の変色海水を海中に流出させ, 海面上には軽石が長さ10km, 巾200~300mにわたって浮流していた. しかしこの激しい噴火活動も1月22日には水面下の活動を残してほとんど停止し, 水没後やや北方に移動した海中の噴出孔から流出する黄緑色の変色水と, 新島を削って浮流するわづかの軽石流が認められるのみとなり, 島は波浪により急速に縮小し, 3月末にはほとんど消滅してしまった.

しかし海上保安庁の測量船「拓洋」, 巡視船「うらが」及びその搭載ヘリコプターなどにより, 今回の活動で噴出した軽石や変色海水の採取が行われ, その試料が筆者らの研究室に届けられた. それらの試料は東京工大並びに岡山大学に於て早速化学分析その他の検討が行われつつあるが, その中から東工大の平林順一氏の行った変色水の分析結果を速報する. 即ち, pH: 7.46~8.28, Fe: 0.02~1.9mg/lとなり, 表10に示した変色水の成分と噴火強度の表にあてはめると, 福徳岡之場海山の平常値が各火山のうちでも最低のランクであったのが, 今回の活動では一挙に上から3位にまで急上昇し, その火山活動が急激に活発化したことが如実に示され, 変色海水の色, 或は成分の測定による活動度の推定の有効性が更めて確認された.