

火山性変色水の温度分布と化学成分について†

土出昌一*

Thermal Distribution and Chemical Compositions of Discolored Waters Derived from Submarine Volcanic Activities †

Masakazu TSUCHIDE*

Abstract

The Hydrographic Department actively participates in the national programme for prediction of volcanic eruption since the beginning of this programme in 1973.

This paper shows a review of the analytical results of thermal distribution and chemical compositions of several volcanic discolored waters observed and collected by the Hydrographic Department.

Thermal distribution of discolored water by the airborne thermal infrared radiometer makes clear the complicated thermal distribution pattern around the spouting point of the Kaitoku Seamount and the Hukutoku-Oka-no-Ba submarine volcanoes.

Relative temperature differences between the sea surface temperature and the volcanic discolored water temperature are in harmony with the submarine volcanic activities.

Total Fe is decreasing and pH value is increasing according to the distance from the spouting point of volcanic discolored water.

Triangular diagram on Fe-Al-Si and/or (Fe+Al)/Si from chemical analysis of volcanic discolored waters indicate the degree of submarine volcanic activities and make possible to compare about volcanic activities of submarine volcanoes in different time and/or at different places.

1. はじめに

水路部は1973年に始まった火山噴火予知計画に当初から参画し、海底火山及び火山島の活動監視に努めている。

水路部の火山噴火予知計画については岩淵(1989)により、また調査海域の海底地形については岩淵他(1994)により取りまとめられている。さらに、南方諸島方面の火山岩の化学分析については小坂他(1990)により取りまとめられているが、本論文は火山性変色水の温度測定及び化学成分についてこれまでの水路部の調査で得られた成

果をとりまとめたものである。

2. 観測

火山噴火予知計画が始まった1973年から今日(1997年11月)まで水路部が観測した海域(火山島を含む)の大きな噴火は西之島新島(1973)、南日吉海山(1977)、三宅島(1983)、海德海山(1984)、福德岡ノ場(1986)、大島三原山(1986)、手石海丘(1989)の7ヶ所である(図1)。

観測はもっぱら航空機によるリモートセンシングの手法によりマルチバンドカメラによる火山性変色水の色相調査、熱赤外放射温度計による温度

† Received 1997 December 1st; Accepted 1998 January 20th.
* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory.

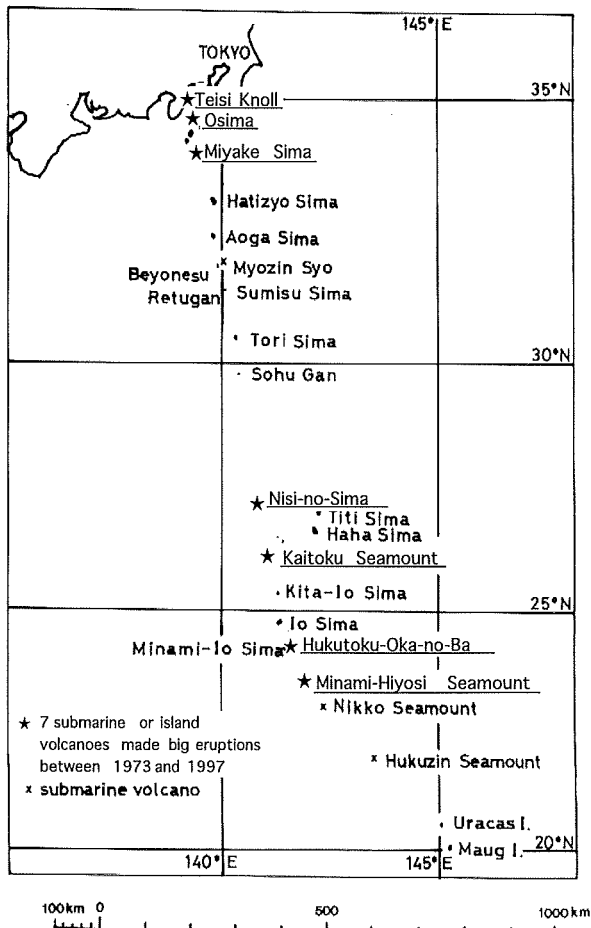


Fig. 1 Location map of submarine volcanoes

測定を行った。また、海底火山活動が確認された場合には安全を確保した上で船舶、あるいは自航式ブイによる調査を行った。

3. 解析手法

火山性変色水の色は変色水中のアルミ、鉄の量により乳白色から赤褐色と変化し、この色から海底火山の活動度が推定できる(小坂, 1986)。マルチバンドカメラは青、緑、赤、近赤外の4バンドを同時に撮影するカメラであり、これら4バンドのフィルム濃度から色相を量的に導く手法を確立することを目的として水路部は火山噴火予知計画への参加と同時に導入したものであるが、近赤外バンドと可視(青、緑、赤)バンドとのフィルム濃度の比を計算することで定性的には現象を捉えることができたものの観測高度等の撮影条件や撮影赤外フィルムの現像等の条件設定を定量的に確定することができず、研究は現在は中断している

(土出, 1978, 大谷他, 1983)。

火山性変色水の温度は海底の噴火口からの噴出物の温度を反映しており、周囲の海水よりも高温になるのが一般的であるが、噴出物が低温の場合には変色水の温度は低温になる。また、噴出物の量が少なかったり噴出の勢いが弱い場合には海底付近の低温の海水を上昇させるだけのこともあり、この場合も変色水の温度は海水よりも低温になる(海上保安庁水路部, 1982)。熱赤外放射温度計による熱測定は当初は測器の感度が低く西之島等の陸上火山において高温の溶岩等の温度分布は測定したものの海水の温度分布は測定できず、西之島新島や南日吉海山の噴火においては変色水の温度についての成果は上げることができなかったが1982年に高感度の機器に更新し(土出他, 1984)三宅島の噴火(1983)以降の観測においてめざましい成果を上げるようになった。

火山性変色水の採水が可能ならばその化学成分より火口からの噴出物を特定することができ海底火山の活動度を推定することができる(小坂, 1980)。変色水が海面上に漂っているのを認めるといことは変色水を生じた海底火山は活動中か少なくともごく最近まで活動していたことを示しており、変色水の採水作業は万全を期して行わなければならない。

4. 熱測定の成果

使用した機器はAGA社のサーモビジョン780であり主な仕様を表1に示す。海域では温度差が小さいため通常は最高感度である2℃レンジで観測を行っている(土出他, 1984a)。

熱赤外線による観測は太陽の影響を受けない夜間、特に温度の安定する日出前が最も望ましく、また精度のよい結果が得られるのであるが遠隔地の観測の場合には航空機の飛行時間や使用空港の関係から日出前の観測は難しく、これまで日出前の観測は大島で行ったのみである。

航空機からの測定では測定温度(機器指示温度)は水蒸気や火山ガスの影響を受けて実際の温度より低く表示され、また温度差も小さくなるため実

Table 1. Specification of the thermal infrared radiometer (AGA Thermovision 780).

Item	Specification
Scanner	HgCdTe sensor thermal resolution 0.1°C
Lens	spectral band 8μm-14μm field of view 20°×20° geometrical resolution 3.4 milliradian focal distance 33 mm
Monitor	black and white CRT screen size 50mm×50mm
Digital recording equipment (MT)	Sensitivity 2°C-1000°C with isotherm function 1/2 inch 9 tracks reel size 7 inch density 1600 bpi record size 1024 characters picture elements 112×64
Monitor (visible images)	color video camera with color video monitor

際の温度に換算するには補正が必要である。補正は温度が既知である物体（地点）を何点か観測することにより行うのが通常の方法であるが、遠隔地の海底火山の場合には表面海水温度（1点）を知ることがせいぜいであり、温度の異なった複数の地点の観測はほとんど不可能である。したがって変色水の温度は表面海水との相対的な温度の高低について議論することになる。以下の事例において便宜上°C表示をしているが、そこに書かれている温度（数字）はその画像内での相対的な温度の高低を示しているにすぎない。

なお水路部では現在は機器を AGA 社の TVS-2000に変更しカラー画像で解析をしている。

(1) 三宅島

三宅島は1983年10月3日15時すぎ噴火した。噴火は雄山の南西斜面の二男山付近で始まり約4.5 kmの割れ目火口群が南南西方向に開口し、17時すぎには新鼻先の海中からもマグマ水蒸気爆発を生じた(荒牧, 早川, 1984)。噴火は10月4日未明に終わったが、水路部では10月5日に航空機からの熱赤外観測を行った(土出他1984b)。

熱赤外映像を図2に地形を図3に示す。図2の画面の真中やや左寄りに見られる中央が真っ白な半円形の地形が図3のS火口、その上に見られる下方向に二またに分かれている真っ白な部分が図

3のQ火口(新滞池火口)であり、画面中央から左下方向への真っ白な帯が図3のA~J火口から噴出した溶岩流でありその先端は海に達している(写真1)。

図2の主な撮影諸元は撮影日時1983年10月5日1650-1740, 撮影高度3000m, 温度測定レンジ2°C, 表面海水温度26°C(海洋速報資料)である。

熱映像から得られた結果は以下の通りである。

S火口, Q火口, 溶岩流は2°Cレンジではスケールアウトしており映像は真っ白である。

海水に流入した溶岩流による海水の高温(100°Cレンジでの測定によれば機械指示温度30°C)は600 m以上追跡できる。

外洋域(26°C)より0.5°C高温な海水が東方に数km追跡できる。

S火口を源とする変色水の分布と海水の高温域とはパターンが比較的良好に一致している。

(2) 海徳海山

海徳海山は1984年3月7日噴火した(土出他1985)。水路部では3月9日, 13日及び29日の3回航空機による変色水の温度分布の測定を行った。

3月9日の映像を図4及び図5に, 3月13日の映像を図6及び図7に, 3月29日の映像を図8及び図9に示す

図4は変色水が海面下から湧き出した直後の映

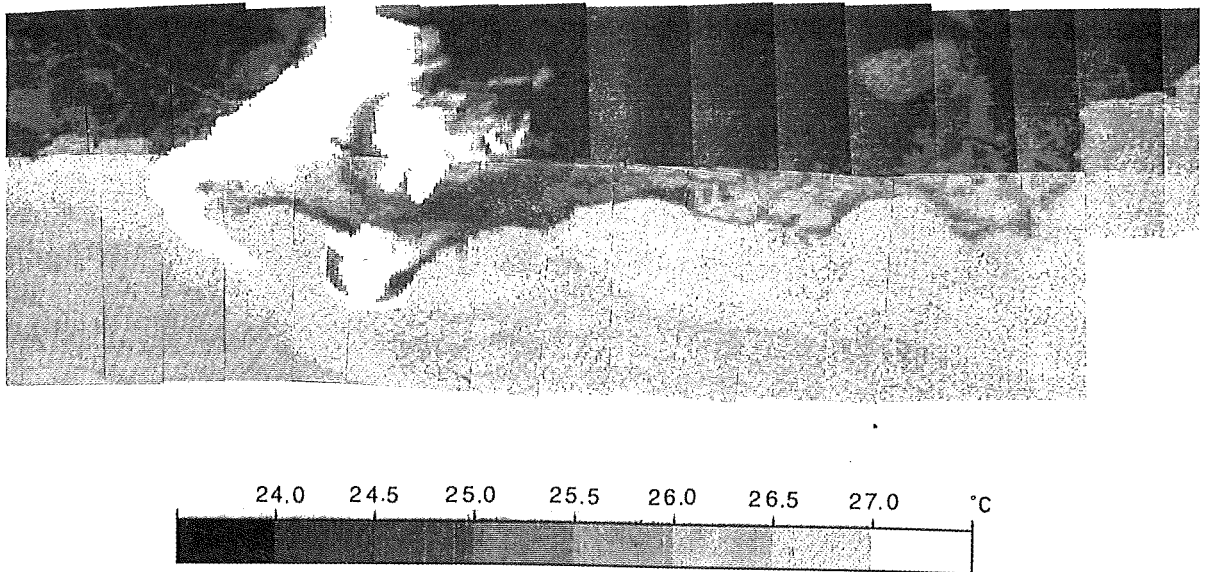


Fig. 2 Surface temperature distribution of discolored waters near S crater and Ako lava flow, Miyake Sima

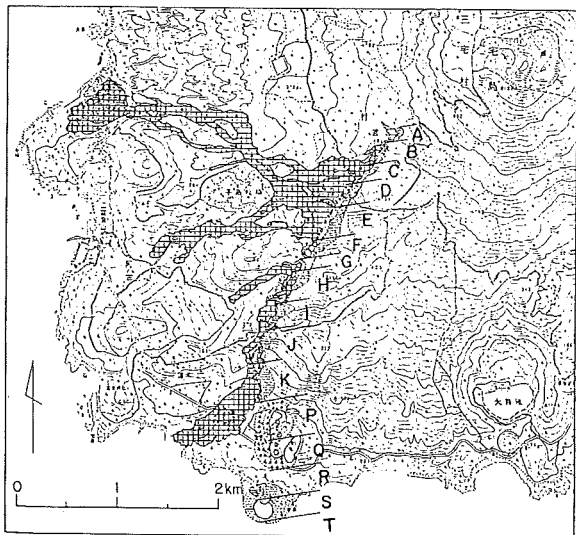


Fig. 3 Index map showing the distribution of craters and lava flows. Letters from A to T indicate groups of the vents. (after Aramaki and Hayakawa, 1984)

像であり、図5はその約5分後の同じ変色水の温度分布である。図4では下から次々と湧き出してくる環状の様子が認められるが図5の温度分布は単調である。

図6は図4と同じように湧き出し直後の映像であり(写真2), 図7はその5分後の映像であるが、その温度パターンは図6とはかなり異なっている。

図8及び図9を測定した3月29日は火山活動は

観測中は穏やかであり下からの激しい湧き出しのような現象は認められなかったが、温度分布も単調なパターンを示している。

各図の撮影諸元は温度測定レンジはすべて2°C、高度及び時刻は図4及び図5は高度300m、時刻1030(図4)1035(図5)、図6及び図7は高度1000m、時刻0620(図6)0625(図7)、図8及び図9は高度700m、時刻1256(図8)1303(図9)であり表面海水温度のデータはない。6枚の熱映像から得られた結果は以下の通りである。

変色水は周囲の海水に比べて機械指示温度上0.5°C程度高温である。

噴出点の温度は周囲の海水に比べて2°C以上高温である。

変色水は噴出直後は対流によって引き起こされた海表面での拡がりやを反映して極めて複雑な温度分布を示すが時間とともに単調になる。

変色水の温度分布の時間変化は早い。特に噴出直後は著しく5分後には単調な温度分布を示すこともある。

噴出点のすぐ傍らに低温部分が存在する。これは高温の変色水の噴出に引きずられて変色水の周辺の低温な海水が変色水と一緒に、あるいは少し遅れて海中から海表面に上昇してきたものである。

噴出による高温部分はほぼ同心円状に拡がる。

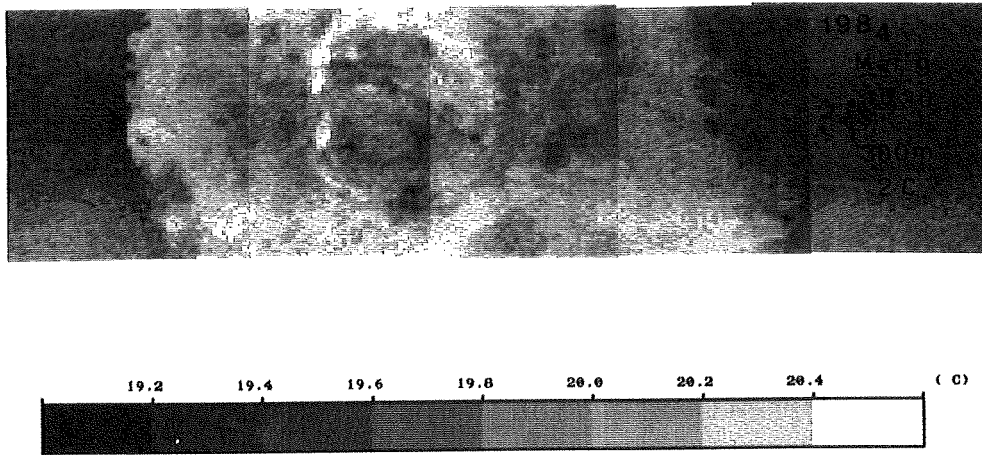


Fig. 4 Surface temperature distribution of discolored water around the Kaitoku Seamount on Mar. 9, 1984.
time : 1030 altitude : 300 m

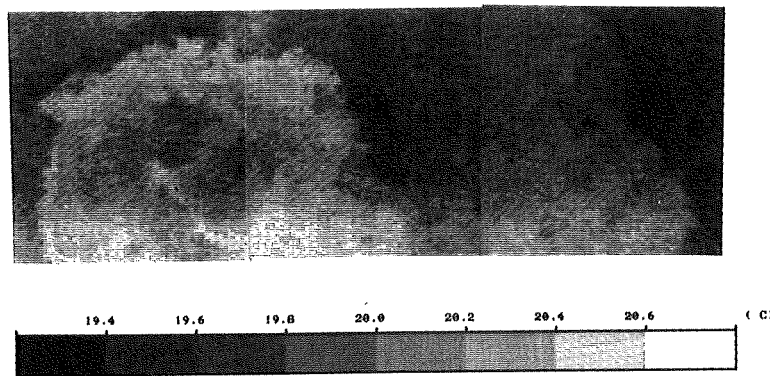


Fig. 5 Surface temperature distribution of discolored water around the Kaitoku Seamount on Mar. 9, 1984, showing thermal distribution pattern 5 minutes later of the Fig. 4
time : 1035 altitude : 300 m

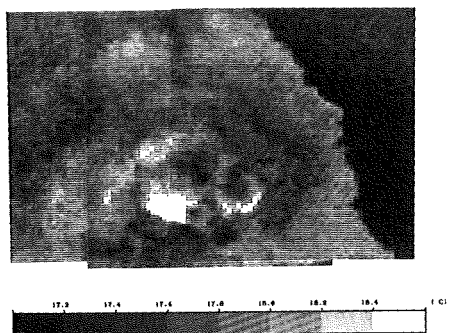


Fig. 6 Surface temperature distribution of discolored water around the Kaitoku Seamount on Mar. 13, 1984.
time : 0620 altitude : 1000 m

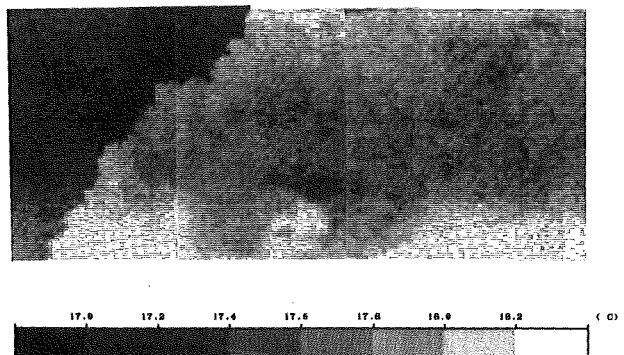


Fig. 7 Surface temperature distribution of discolored water around the Kaitoku Seamount on Mar. 13, 1984, showing thermal distribution pattern 5 minutes later of the Fig. 6
time : 0625 altitude : 1000 m

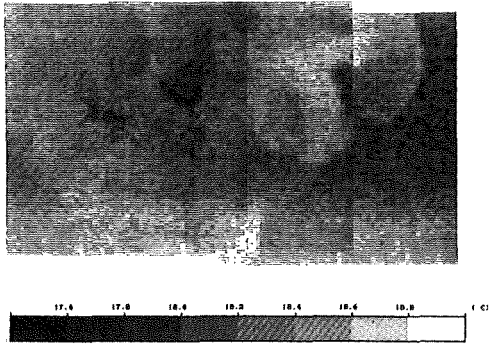


Fig. 8 Surface temperature distribution of discolored water around the Kaitoku Seamount on Mar. 29, 1984.
time : 1256 altitude : 700 m

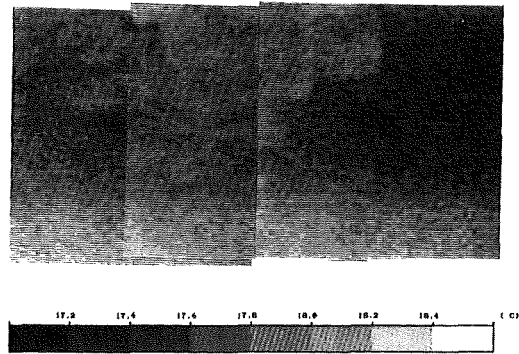


Fig. 9 Surface temperature distribution of discolored water around the Kaitoku Seamount on Mar. 29, 1984, showing thermal distribution pattern 7 minutes later of the Fig. 8
time : 1303 altitude : 700 m

3日間計8回の測定において得られた変色水の温度をグラフに示してみる。図10は周囲の海水温との温度差を縦軸に、観測日時を横軸にとって描いたものであり、海底火山活動は13日が最も活発であり次いで9日となり29日は活動が低かったことがうかがえる。

もっとも活動（変色水の噴出）は連続しているのではなく間欠的であるから、たまたま13日は噴出時に撮影を行うことができ9日は噴出直後の、29日は噴出後時間が経過した変色水を観測した結果を示したにすぎず変色水の温度は海底下の火山活動度を反映しているものではないともいえる。しかし、通常は現場で1時間程度の観測を行っており、火山活動の程度は写真等のデータや目視観測をもとに現場の状況と合わせて観測者が判断できる場合が多い。

(3) 福徳岡ノ場

福徳岡ノ場は1986年1月20日に海底噴火により火山島を形成したが、波浪の浸食によりその火山島は2ヶ月後の3月26日には消滅した（土出・佐藤, 1986）。

変色水の温度調査は1月21日、23日、29日及び2月14日の4回行ったが、1月21日には形成された新島が噴火中であり変色水は噴煙及び軽石流に覆われておりその温度は測定できなかった。

1月23日の熱映像及び解析した温度分布図を図

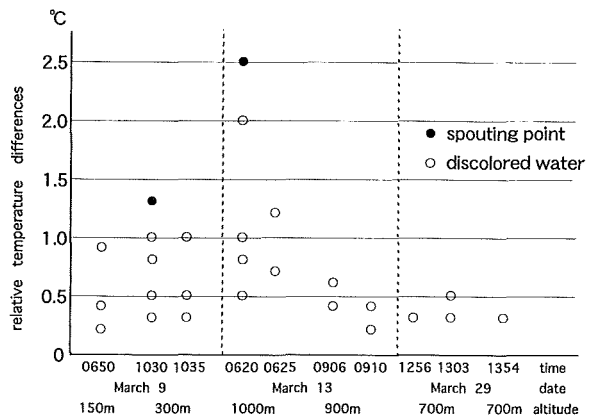


Fig.10 Relative temperature differences of discolored waters around the Kaitoku Seamount

11及び図12に示し、1月29日及び2月14日の熱映像を図13及び図14に示す。

各図の撮影諸元は温度測定レンジは新島が高温であったため図11及び図13では5℃であり図14のみがこれまでと同じ2℃で測定したものである。高度、時刻及び表面海水温度については図11は高度1000m、時刻1334、海水温度22.7℃、図13は高度2400m、時刻1304、海水温度23.0℃、図14は高度2200m、時刻1357、表面水温23.0℃であり、表面水温のデータは福徳岡ノ場近傍で火山活動を監視中の巡視船によって測定されたものである。いずれの場合も変色水は新島の周りとは新島からその東方約400mにある水中の噴火口方向へ分布して

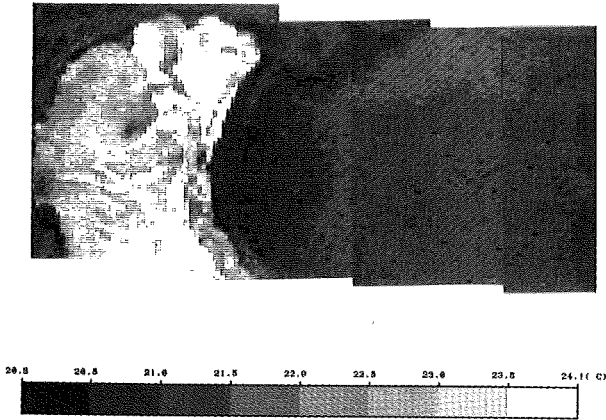


Fig.11 Surface temperature distribution of discolored water around the Hukutoku-Oka-no-Ba (submarine volcano) on Jan. 23, 1986.

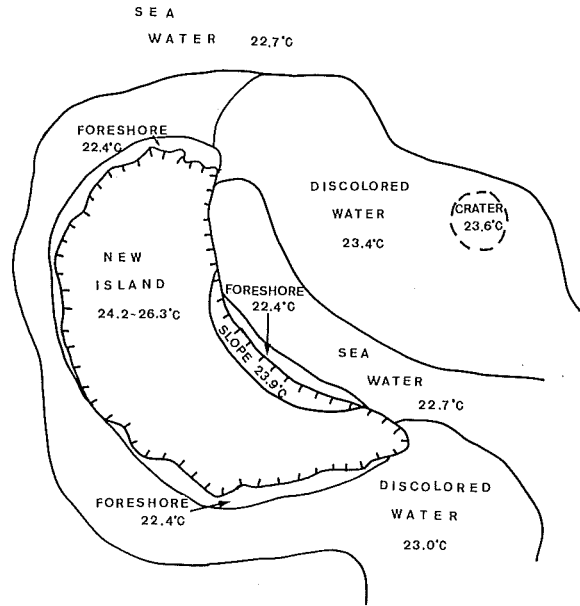


Fig.12 Isothermal Map around the Hukutoku-Oka-no-Ba drawn by the data on Fig.11

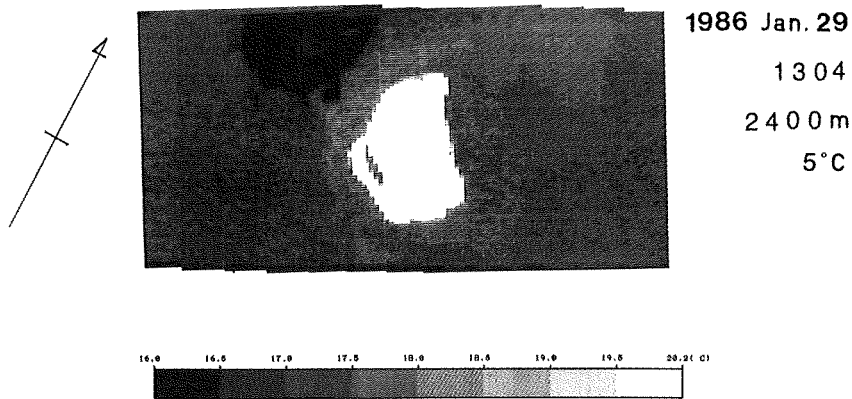


Fig.13 Surface temperature distribution of discolored water around the Hukutoku-Oka-no-Ba on Jan. 29, 1986.

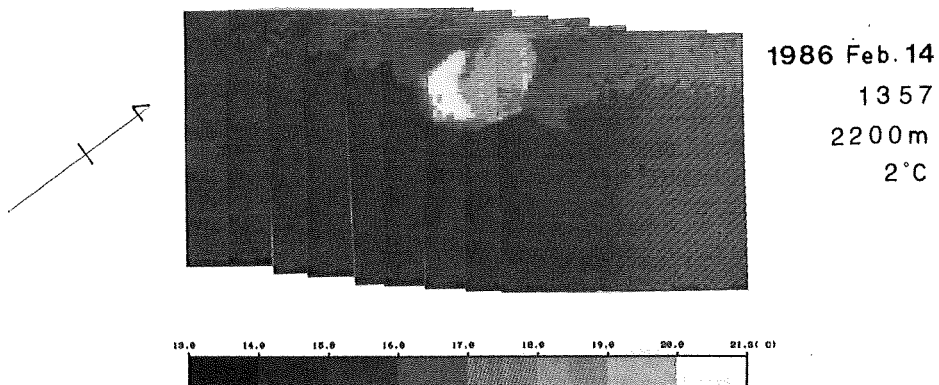


Fig.14 Surface temperature distribution of discolored water around the Hukutoku-Oka-no-Ba on Feb. 14, 1986.

いた。

図12は写真3などを参考にして変色水や新島の機械上での温度を読みとって描いてみたものであり絶対値は全く信用できないが相対的な温度の高低や温度差の比較はできる。

熱映像から得られた結果は以下の通りである

海底の噴火口と思われる場所の直上の変色水の温度は噴火終了直後の1月23日には周囲の海水に比べて最高0.9℃高温であったものが時間とともに単調に減少し、22日後の2月14日には0.2℃の差になった。

新島の周囲の変色水の温度は1月中は周囲の海水に比べて0.2℃～0.7℃高温だったものが2月14日には差は0.2℃となり海底の噴火口上の変色水と同温度になった。

海徳海山の場合と同様に変色水と付近の海水との温度差を縦軸としてグラフを描いてみれば図15のようになり変色水と海水との温度差は単調に減少している傾向が読みとれる。

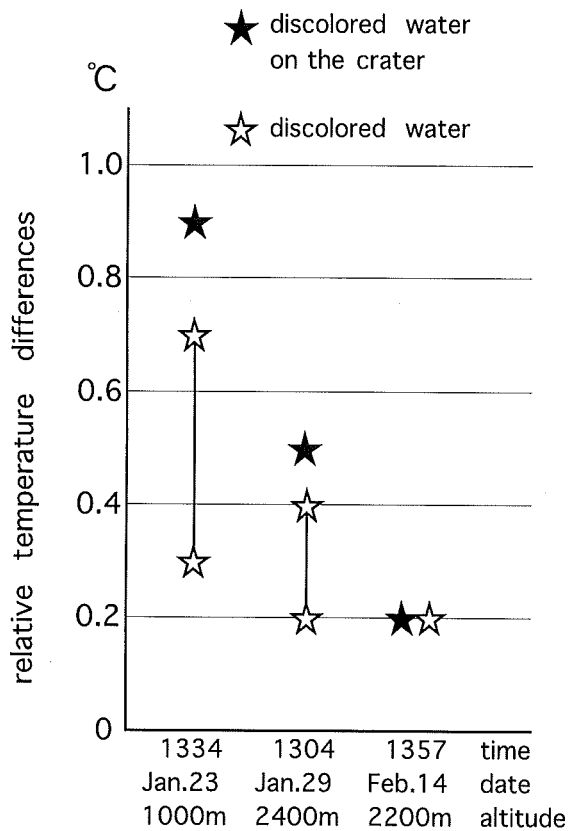


Fig.15 Relative temperature differences of discolored waters around the Hukutoku-Oka-no-Ba

(4) 伊豆大島

伊豆大島は1986年11月15日に1974年6月以来12年振りに噴火した(気象庁, 1984)。

噴火に伴う変色水は島の周囲の21カ所で確認され(土出他, 1987), 温度測定は1986年11月22日から1987年3月3日まで9回実施した。そのうち1986年12月9日, 1987年1月28日及び3月3日の3回は日出前の調査である。

顕著な変色水が観測され水蒸気爆発が懸念された筆島付近の日出前の3回の調査を熱映像と解析した温度分布図をまとめて図16に, 昼間の観測例として2月10日の熱映像を図17に示す(写真4)。

撮影諸元は両図とも温度測定レンジ2℃, 高度3000mであり, 時刻及び表面海水温度については図16はそれぞれ時刻0604, 0711, 0552, 海水温度15.6℃, 11.8℃, 12.4℃であり, 図17は時刻1321, 海水温度不明である。表面水温のデータは大島周辺で火山活動を監視中の巡視船によって測定されたものである。

大島の場合は大島南東の筆島付近で特に顕著な変色水が観測されたがその温度は周囲の海水よりも低温であった。また波浮港内では変色水は観測されていないが顕著な低温水域が観測された。これは低温の湧出水(筆島近傍)や火山活動に伴う何らかの原因(地下水の海底からの湧き出し等)により誘発された対流による海底近傍の低温海水の海水表面への湧き出し(波浮港内)を測定したものと解釈される。

日出前の測定では陸地(大島)は海水に比べて低温であるが, 日中(午後1時すぎ)の測定(図17)では太陽の輻射により陸地は日射を受けた高温部分と影の低温部分が縞模様となり, 海水の表面水温は日射により一様な温度パターンを示しており筆島付近と波浮港奥の低温部分がわずかに認められる程度である。

大島の熱測定で得られた結果は以下の通りである。

変色水は周囲の海水に比べて1℃～2℃低温であり高温の変色水は検知されなかった。

変色水の色が濃い場合, その発生源と海水の低

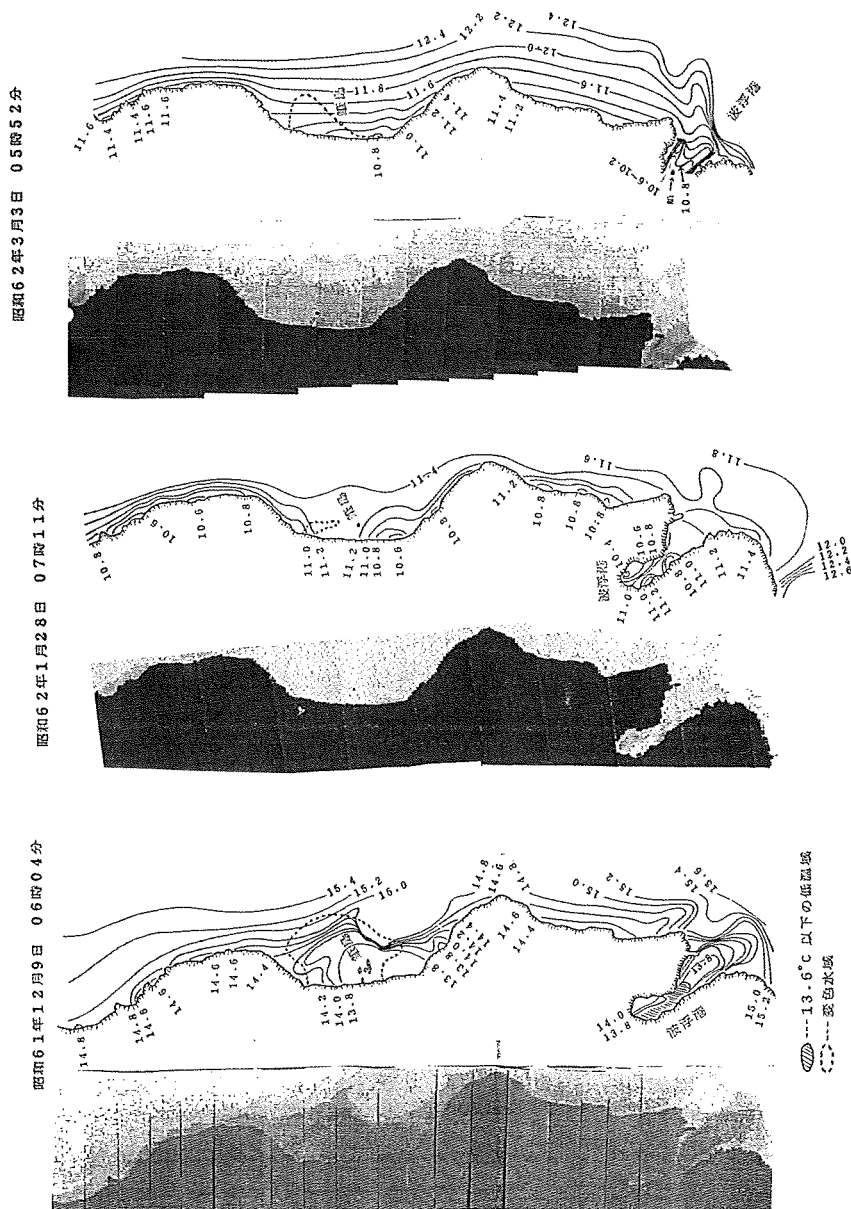


Fig.16 Surface temperature distributions before sunrise and isothermal maps of discolored waters around the Hudesima, Izu Osima on Dec. 9, 1986, Jan. 28, 1987 and Mar. 3, 1987. (upper to lower)

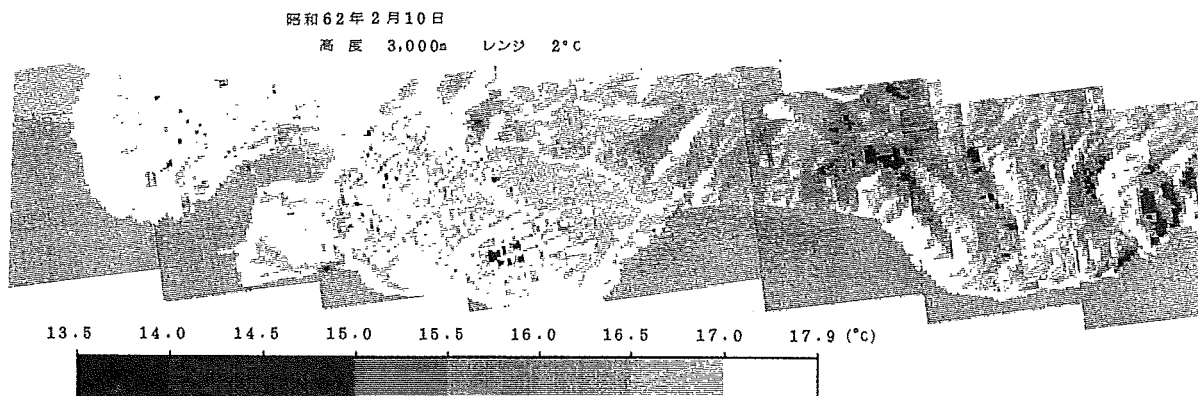


Fig.17 Surface temperature distributions of discolored waters around the Hudesima, Izu Osima on Feb. 10, 1987 observed in the daytime.

温源は一致する場合が多く変色水域と等温線の相関は良い。

海水の低温源は変色水とは限らない、むしろ変色水でない低温源の方が多い。

変色水の色が薄い場合、変色水域と等温線の相関はほとんどない。

日出前の調査は微妙な海水温度分布の測定に最適である。

日中の調査においても曇天等の天候であれば場合によっては微妙な海水温度分布の測定を行うことができる。しかし、一般的には温度勾配の少ない単調な映像となる場合が多い。

5. 化学分析の成果

水路部では海底火山活動に起因する変色水の分析はもっぱら水路部の非常勤研究員でもあった小坂教授（東工大、後に岡山大）に依頼して行っていたのであるが、大島の調査を契機に水路部においても分析を行うようになった。

詳細な分析法については伊豆大島の変色水について柴山らが詳しく述べている（土出他1987）。

(1) 海徳海山

変色水は1984年3月14日、15日に巡視船「うらが」により、3月22日、23日、24日に測量船「昭洋」により採取された。

採取地点を図18に、採取位置・日時等を表2に、東工大小坂研究室においてなされた分析結果を表3に示す。

小坂（1986）によれば海底火山の活動度は火山性変色水のpH値、あるいはFe量と強い相関を持ち、pH値が小さいほど、あるいはFe量が多いほど海底火山の活動度は高いとされる。

噴出点からの距離を横軸としてpH値及びFe量をプロットすれば図19のようになり、pH値が低くFe量が多いほど噴出点に近い採取点であることがわかり、変色水が噴出点から単調に拡散していることを示している。ただし、pH値はNo. 2, No. 1, No. 5, No. 7, No. 6の順に直線上に並びNo. 4, No. 3が線上から外れているのに対してFe量はNo. 2, No. 1, No. 4, No. 3の

順に直線上に並んでおりNo. 5, No. 7, No. 6が別の直線上に並んでいるように見える。海流の流向流速や海面上の風向風速は時間とともに変化しておりそれらの影響の程度がpH値とFe量では異なるためと推察されるが、pH値及びFe量はともに距離に対してほぼ直線上に並ぶことから噴出点直上（距離ゼロ）でのpH値あるいはFe量を推定する、すなわち海底火山の活動度を推定する手がかりを与えているように見える。

(2) 福徳岡ノ場

変色水は1986年1月20日に測量船「拓洋」により、1月22日、24日には巡視船「うらが」及び同船搭載のヘリコプターにより採取された。

採取地点を図20に、採取位置・日時等を表4に、岡山大小坂研究室においてなされた分析結果を表5に示す。

海徳海山と同じように距離を横軸としてpH値、Fe量及びSiO₂量をプロットすれば図21のようになり、海徳海山の場合ほど顕著ではないが距離に比例して変化（拡散）する傾向がうかがえるが、新島直近のNo. 3ではFeの増加量が大きくSiO₂量の割合は小さくなっている。

福徳岡ノ場の場合には変色水の採取条件を考慮する必要がある。つまり、No. 1（測量船「拓洋」採取）は福徳岡ノ場が噴火中に採取したものであり、「拓洋」は船舶の安全確保のため噴火の影響を受けないよう常に細心の注意を払って行動していた。変色水は広範囲にわたって分布していたがその主流は軽石を伴った帯状の流れであり「拓洋」はできるだけそれを避けるよう行動していたため採取した変色水は中心部分ではなく傍流のかなり拡散したものであった。一方No. 2及びNo. 3は噴火終了直後に採取されたものであり比較的噴出点に近く、特にNo. 3はヘリコプターによって新島の直近で採取されたものであり船舶からではとても採取できない位置での試料である。つまり直線を引く（噴出点上でのpH値あるいはFe量を求める）場合には噴火が落ちついた1月24日の試料であるNo. 4とNo. 5に重点を置いて引くべきである。

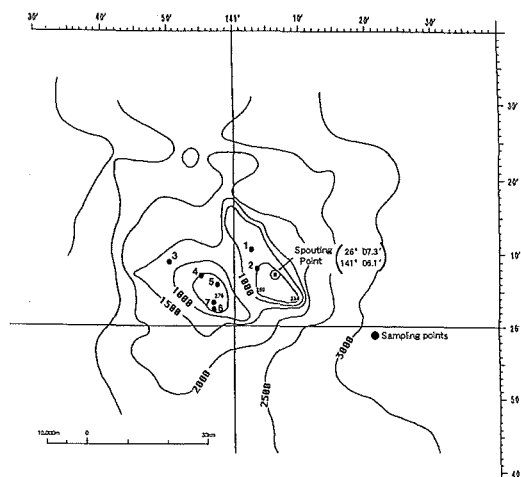


Fig.18 Topographic map of the Kaitoku Seamount and the sampling points of discolored waters.

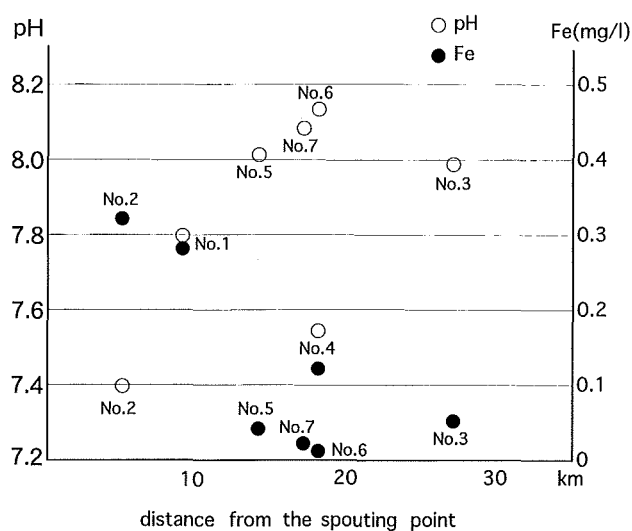


Fig.19 Relationship between pH value and Fe content in discolored water and the distance from the spouting point of the Kaitoku Seamount.

Table 2. Sampling positions of discolored waters around the Kaitoku Seamount

Sample No.	Date	Position	Distance from the spouting point (km)	Collector
1	Mar. 14, 1984	26° 10.2' N 141° 02.5'E	9	Patrol vessel [URAGA]
2	Mar. 15, 1984	26° 07.9' N 141° 03.3'E	5	"
3	Mar. 22, 1984	26° 09.0' N 140° 50.1'E	27	Survey vessel [SHOYO]
4	"	26° 07.3' N 140° 55.1'E	18	"
5	Mar. 23, 1984	26° 06.1' N 140° 57.6'E	14	"
6	Mar. 24, 1984	26° 02.9' N 140° 57.3'E	18	"
7	"	26° 03.6' N 140° 57.5'E	17	"

Table 3. Chemical compositions of discolored waters around the Kaitoku Seamount

Sample No.	pH	Fe (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Distance from the Spouting point (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

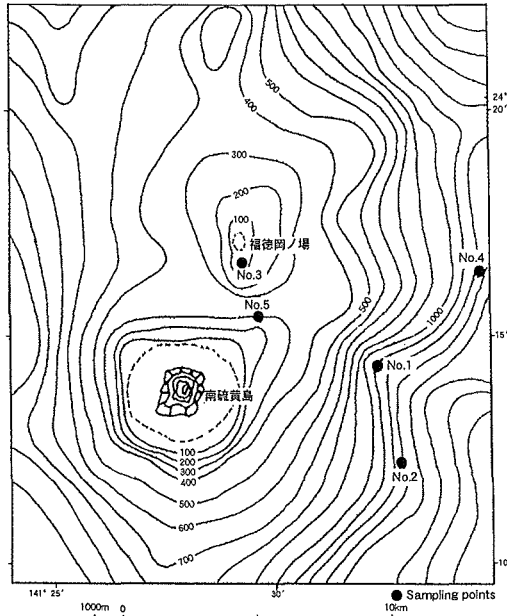


Fig.20 Topographic map of the Hukutoku-Oka-no-Ba (submarine volcano) and the sampling points of discolored waters.

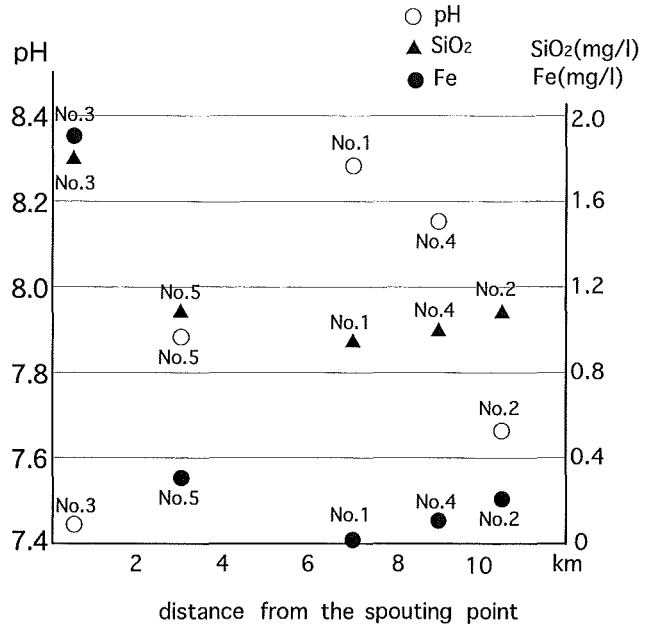


Fig.21 Relationship between pH value, Fe content and SiO₂ content in discolored water and the distance from the spouting point of the Hukutoku-Oka-no-Ba.

Table 4. Sampling positions of discolored waters around the Hukutoku-Oka-no-Ba

Sample No.	Date	Position	Distance from the spouting point (km)	Collector
1	Jan. 20, 1986	24° 14.33' N 141° 32.24' E	7	Survey vessel [TAKUYO]
2	Jan. 22, 1986	24° 12.2' N 141° 32.8' E	10.5	Patrol vessel [URAGA]
3	"	24° 16.6' N 141° 29.2' E	0.5	"
4	Jan. 24, 1986	6.2 miles, 68° from Minami-Io Sima	9	"
5	"	2.0 miles, 45° from Minami-Io Sima	3	"

Table 5. Chemical compositions of discolored waters around the Hukutoku-Oka-no-Ba

Sample No.	pH	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Distance from the spouting point (km)
1	8.28	0.03	tr.	0.95	7
2	7.66	0.2	0.9	1.1	10.5
3	7.46	1.9	1.6	1.8	0.5
4	8.15	0.1	tr.	1.0	9
5	7.88	0.3	0.8	1.1	3

海徳海山 (図19) 及び福徳岡ノ場 (図21) の例より, 変色水試料が何地点かで得られた場合にはその pH 値と Fe 量を噴出点からの距離でプロットすることによりかなり乱暴ではあるが噴出点上 (距離ゼロ) での pH 値及び Fe 量が推定でき, それから海底火山の活動度が推定できることになる。ただ事例が 2 例だけでは傾向を出すにはあまりにも少なく, 今後事例を増やし傾向をより確かなものにして行く必要があると考える。

(3) 伊豆大島

変色水は1986年12月1日から1987年3月26日までの約4ヶ月間にラジコンボート及びヘリコプターによって大島周辺で延べ15日62点で採取した (土出他1987), ここでは筆島周辺に現れた変色水の分析結果についてのみ述べる。

採取地点を図22に, 採取位置・日時等を表6に示す。採取点数は32点であるがほぼ同じ場所で採水したこともあり図22では21点が示されている。

分析は水路部及び岡山大小坂研究室においてなされたが, その結果も表6に示している。

筆島周辺の変色水はその発生源が不明であり, したがってこれまでのように距離と pH 値の関係を示す図は描けないが, 4ヶ月間にわたって継続的に変色水を取得したので時間変化を図23に示す。上から Fe, Al, Si の成分%を縦軸に, 時間を横軸にとったものである。採水日は12月1日, 10日, 16日, 20日, 1月7日, 8日, 22日, 2月26日, 3月26日の計9回であり, 12月18日の矢印はこの時大島三原山山頂で小噴火があったことを示しているが, この小噴火に向かって Fe 比, あるいは Al 比が増加し Si 比は減少している。また, 1月以降は Fe, Al 両成分比は減少傾向を示している。時間変化をわかりやすくするため $(Fe+Al)/Si$ を見ると (後述, 図25) 12月20日の値をピークとしており大島三原山の火山活動の時間変化と調和的である。

三宅島の噴火に際しては島の南西から南に分布した変色水の採取は行っていない。また, 手石海丘の噴火においては変色水は認められず熱映像の観測は実施していない。

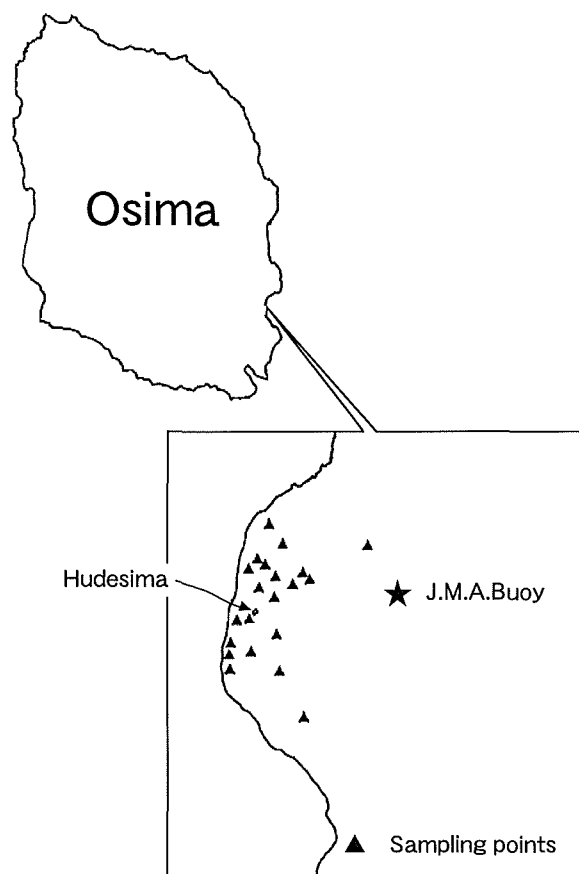


Fig.22 Sampling points of discolored waters around the Hudesima, Izu Oshima

6. 考察

(1) 温度分布

三宅島, 海徳海山, 福徳岡ノ場, 伊豆大島の4例からその火山活動を比較してみる。

周囲の海水温度と機器指示温度との差でみると大きい順に三宅島 (2℃以上で飽和) > 海徳海山 (2℃以上) > 福徳岡ノ場 (1℃程度) > 伊豆大島 (海水温度以下) となる。三宅島と伊豆大島はいずれも火山島であり溶岩を流出する噴火をしたが, その流出溶岩量は三宅島 $4.7 \times 10^6 \text{m}^3$ (荒牧・早川, 1984), 伊豆大島 $22.5 \times 10^6 \text{m}^3$ (長岡, 1988) で圧倒的に伊豆大島の方が多い。一方, 変色水の温度からは海岸付近で海底噴火が起こり溶岩が海に流れこんだ三宅島と周囲の海水よりも低温水を湧出した伊豆大島では圧倒的に三宅島の方が海域での火山活動は激しかったことになる。また, 海底火山である海徳海山と福徳岡ノ場の場合には, 噴

Table 6. Chemical compositions of discolored waters around the Hudesima, Izu Osima

Date	Position	pH	Fe(mg/l)	(%)	Al(mg/l)	(%)	Si(mg/l)	(%)
1986 Dec.1	Hudesima N.E. 200m	8.4	0.12	7	0.23	13	1.44	80
"	Hudesima N.N.E. 350m	8.2	0.11	4	0.32	13	2.09	83
"	Hudesima S.W. 200m	8.4	0.20	11	0.20	11	1.35	78
1986 Dec.10	Hudesima N. 230m	8.1	0.19	5	0.64	18	2.69	77
"	Hudesima S.W. 100m	8.1	0.14	8	0.41	25	1.11	67
"	Hudesima N.E. 320m	8.1	0.23	7	0.84	27	2.03	66
"	Hudesima N.E. 620m	8.1	0.14	5	1.32	47	1.33	48
1986 Dec.16	near Hudesima	8.2	1.25	11	3.94	35	5.99	54
1986 Dec.20	Hudesima S.S.W. 300m	8.2	0.96	17	2.36	42	2.33	41
"	Hudesima S.W. 130m	8.2	0.44	8	1.37	26	3.51	66
"	Hudesima N. 100m	8.2	0.46	9	1.79	34	2.95	57
"	Hudesima N. 420m	8.2	0.39	8	1.96	39	2.62	53
1987 Jan.7	Hudesima N.E. 100m	8.0	0.56	10	1.76	31	3.27	59
"	Hudesima N.N.W. 200m	8.1	1.07	10	3.98	38	5.52	52
"	Hudesima N. 400m	8.1	0.37	9	1.01	24	2.91	67
"	Hudesima S.S.W. 300m	8.1	0.30	11	0.76	27	1.76	62
1987 Jan.8	Hudesima S. 50m	8.1	0.04	6	0.13	19	0.50	75
"	Hudesima S.W. 250m	8.1	0.11	8	0.30	22	0.98	70
"	Hudesima N.E. 300m	8.1	1.18	12	3.32	34	5.24	54
"	Hudesima N.N.W. 200m	8.1	0.20	9	0.55	25	1.48	66
1987 Jan.22	Hudesima S. 250m	8.3	0.05	2	0.12	5	2.13	93
"	Hudesima N. 300m	8.2	0.18	5	0.35	9	3.39	86
1987 Feb.26	Hudesima S.W. 200m	8.4	0.01	1	0.02	2	0.85	97
"	Hudesima S. 80m	8.3	0.00	0	0.13	18	0.59	82
"	Hudesima N.E. 130m	8.4	0.00	1	0.07	8	0.78	92
"	Hudesima N. 350m	8.2	0.06	1	0.12	3	4.42	96
"	Hudesima E. 230m	8.3	0.00	0	0.02	3	0.56	97
"	Hudesima N. 2100m	8.3	0.01	1	0.09	10	0.78	89
1987 Mar.26	Hudesima S.W. 200m	8.2	0.03	3	0.04	4	0.83	93
"	Hudesima S. 20m	8.2	0.06	7	0.02	2	0.78	91
"	Hudesima N. 300m	8.3	0.03	3	0.08	7	1.02	90
"	Hudesima N. 4600m	8.4	0.01	2	0.04	6	0.59	92

出点直上で噴出時の測定であった海徳海山の方が火山島を形成したものの既に活動をほぼ終えていた噴出点直上での観測であった福徳岡ノ場よりも高温であったのはある意味で当然であり、観測された変色水の温度で見ると海徳海山の方が福徳岡ノ場より活動度が高かったと判断される。福徳岡ノ場は島を形成したのであるが、島の形成直前の噴出点直上での変色水の温度データがあれば海徳海山より温度差の大きいデータの取得が予想され、福徳岡ノ場の方が海徳海山より活動度が高

かったと判断されたであろう。いずれにしても異なった場所を比較する場合にはデータの取得状況を十分考慮しなければならないことを示している。

変色水温度の時間変化は海徳海山にしても福徳岡ノ場にしてもその火山活動とよい相関を示している。

(2) 化学成分

すでに述べた海徳海山、福徳岡ノ場、伊豆大島に加えて1973-1974年の西之島新島(小坂1986)、

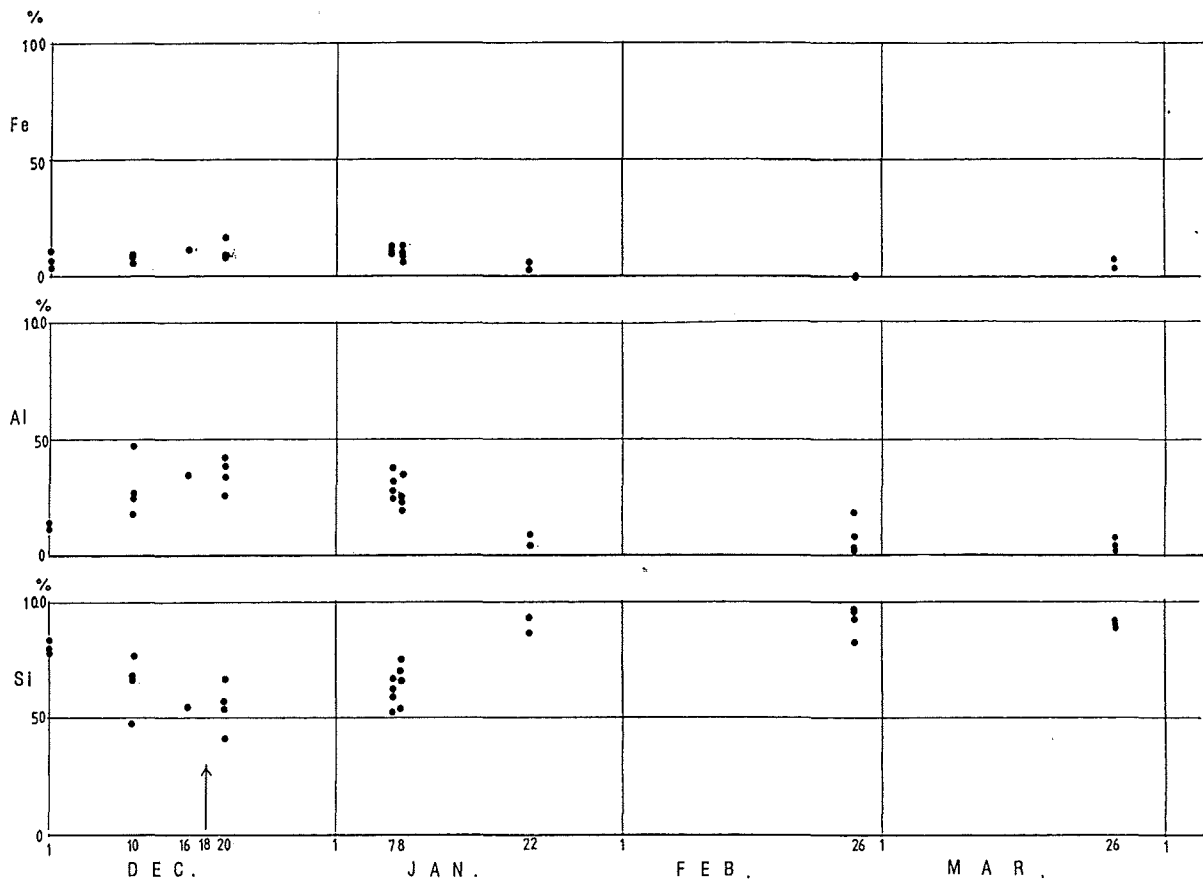


Fig.23 Time change of Fe, Al and Si ratio of the discolored waters around the Hudesima, Izu Osima

1977年の福徳岡ノ場（文部省総合研究班，1977），1978年の薩摩硫黄島（大谷他，1983；小坂1986），1981年の福神海山（海上保安庁水路部，1981）の計7例の変色水の化学分析結果を表7に示し，Fe-Al-Si 3成分の3角ダイアグラムを図24に示す。また3成分の時間変化を見るために $(Fe+Al)/Si$ を図25に示すが，時間変化を追うことのできる海底火山活動は西之島新島，1977年福徳岡ノ場，海徳海山，1986年福徳岡ノ場，大島（筆島付近）の5例であり表7では採取日の古い順に試料番号をつけている。

既に述べたように海底火山の活動度はFe量が多いほど，あるいはpH値が小さいほど高いとされるがこれらの値は噴出点からの距離によって変化するため採取地点による差が大きく比較のための基準を設定することが難しいが，海底火山の活動度はFe-Al-Si 3成分の比によっても判定することができる。すなわちFe比が大きいほど活動

度は高く次にAl比となりSi比の大きいものはその火山活動度は低い（低調）（小坂（1986），土出（1989））とされており，それにしたがって図24を解釈してみる。

伊豆大島筆島付近のFe比の小さいのがまず目に付く。Fe量の比較的多かった12月20日の試料No.4でさえ，そのFe比は17%にすぎず，1987年1月22日以降の試料No.6～試料No.8にいたってはFe比及びAl比はともに10%以下と極めて小さく，伊豆大島筆島付近の火山活動度は弱かったものと解釈される。

1986年の福徳岡ノ場の変色水は，噴出点から離れた試料No.1とNo.4を除けばFe比，あるいはAl比が大きい傾向を示す。新島のすぐ近くで噴火直後に採取された試料No.3はFe比が44%と大きく $(Fe+Al)/Si$ も4.2と大きいのが1日経過した試料No.5ではFe比が小さくなり $(Fe+Al)/Si$ は2.2とほぼ半減しており，噴火は激しかった

Table 7. Chemical compositions (Fe, Al and Si) and (Fe+Al)/Si of discolored waters (7 examples from 3 submarine volcanoes and 3 volcanic islands)

Sample No.	Volcano	Date	pH	Fe		Al		Si		(Fe+Al)/Si
				(mg/l)	(%)	(mg/l)	(%)	(mg/l)	(%)	
1	Nisinosima-Sinto	1973. Oct.9		10.45	29	11.78	32	14.10	39	1.6
2	"	1974. Mar.14		31.99	74	4.53	10	6.99	16	5.2
3	"	1974. July 8		25.56	65	3.11	8	10.73	27	2.7
1	Hukutoku-Oka-no-Ba	1977. Mar.21	7.9	0.15	39	0.09	24	0.14	37	1.7
2	"	1977. Mar.24	8.0	0.13	42	0.09	29	0.09	29	2.4
1	Satuma-Io Sima	1978. Aug.29	5.52	3.32	24	8.3	60	2.24	16	5.2
2	"	1978. Aug.29	6.65	2.07	21	5.5	57	2.10	22	3.6
3	"	1978. Aug.29	7.25	1.76	37	1.5	32	1.45	31	2.2
4	"	1978. Aug.29	7.41	0.93	22	2.0	48	1.23	30	2.4
5	"	1978. Aug.29	7.65	0.97	23	2.2	52	1.03	25	3.1
6	"	1978. Aug.29	8.05	0.61	19	1.3	42	1.22	39	1.6
1	Hukuzin Seamount	1981. Jan.8	4.3	0.83	38	0.6	28	0.75	34	1.9
2	"	1981. Jan.8	5.2	0.52	48	0.2	18	0.37	34	1.9
1	Kaitoku Seamount	1984. Mar.14	7.8	0.28	62	—	0	0.17	38	1.6
2	"	1984. Mar.15	7.39	0.32	54	—	0	0.27	46	1.2
1	Hukutoku-Oka-no-Ba	1986. Jan.20	8.28	0.03	6	—	0	0.45	94	0.1
2	"	1986. Jan.22	7.66	0.2	12	0.9	56	0.51	32	2.2
3	"	1986. Jan.22	7.46	1.9	44	1.6	37	0.84	19	4.2
4	"	1986. Jan.24	8.15	0.1	18	—	0	0.47	82	0.2
5	"	1986. Jan.24	7.88	0.3	19	0.8	50	0.51	32	2.2
1	Osima (around Hudesima)	1986. Dec.1	8.4	0.20	11	0.20	11	1.35	77	0.3
2	"	1986. Dec.10	8.1	0.14	8	0.41	25	1.11	67	0.5
3	"	1986. Dec.16	8.2	1.25	11	3.94	35	5.99	54	0.9
4	"	1986. Dec.20	8.2	0.96	17	2.36	42	2.33	41	1.4
5	"	1987. Jan.7	8.0	0.56	10	1.76	31	3.27	58	0.7
6	"	1987. Jan.22	8.3	0.05	2	0.12	5	2.13	93	0.1
7	"	1987. Feb.26	8.4	0.01	1	0.02	2	0.85	97	0.0
8	"	1987. Mar.26	8.2	0.06	7	0.02	2	0.78	91	0.1

ものの噴火終了後には急速にその火山活動は低下していったものと推定される。

海徳海山の変色水は Al は定量限界以下であったためその数値は示していないが Fe 比は50%を越えており火山活動は激しかったことを推定させる。1986年の福徳岡ノ場と比べると Fe 比が大きいため火山活動度は高く評価される。島を形成した福徳岡ノ場の火山活動が結局島は形成しなかった海徳海山より活動度が高かったと考えるのが普通であろうが、海底火山が島を形成するかどうかは火山活動の激しさだけで決まるものではなく、噴火地点の水深も極めて重要であり、同じ噴火で

あれば水深の浅い方が島を形成しやすいことはいうまでもない。噴火前の海徳海山の山頂水深は289 m (海図記載水深)、一方福徳岡ノ場の山頂水深は18m (海図記載水深) であってこの深さの差が島の形成の有無を決定した一因であろうことは十分に考えられる。また、今回の比較においてはあくまでも採取された変色水の分析値に基づくものであって必ずしも火山活動の最盛期の時の試料とは限らない。変色水の分析値からは海底での噴火は海徳海山の方が1986福徳岡ノ場よりも激しかったと解釈される。

福神海山については変色水の Fe 比は38%

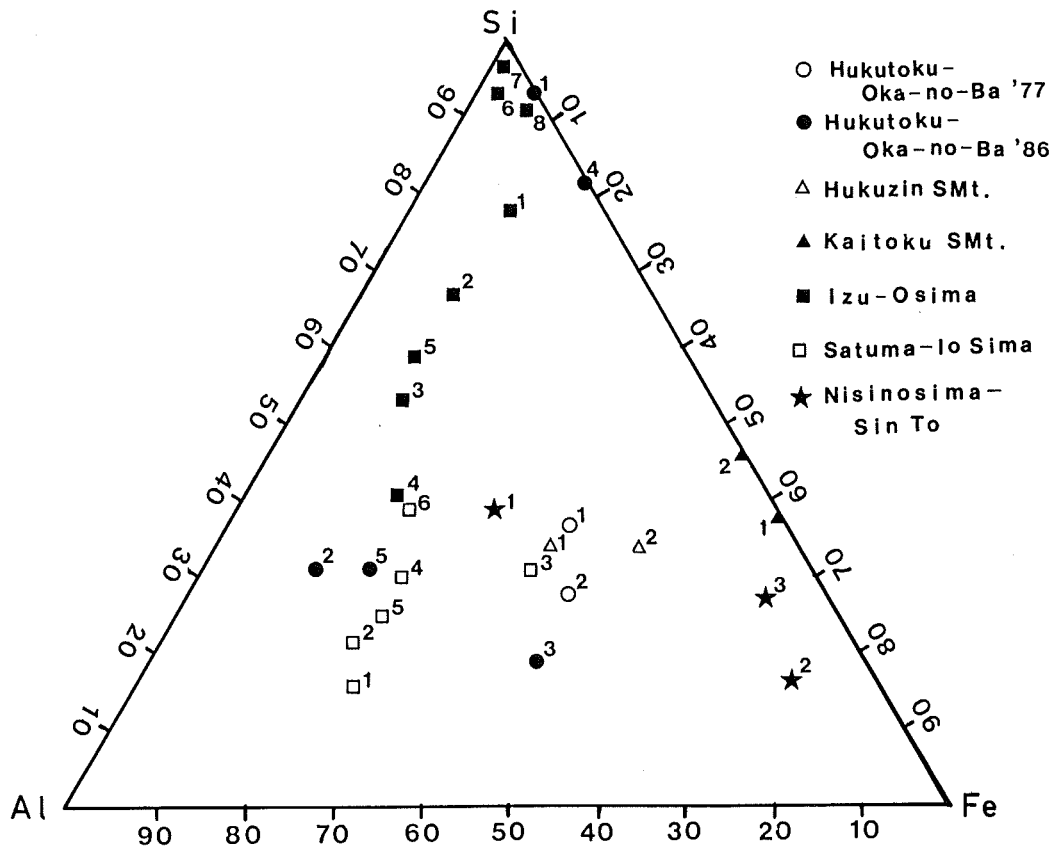


Fig.24 Triangular diagram on Fe-Al-Si from chemical analysis of some volcanic discolored waters

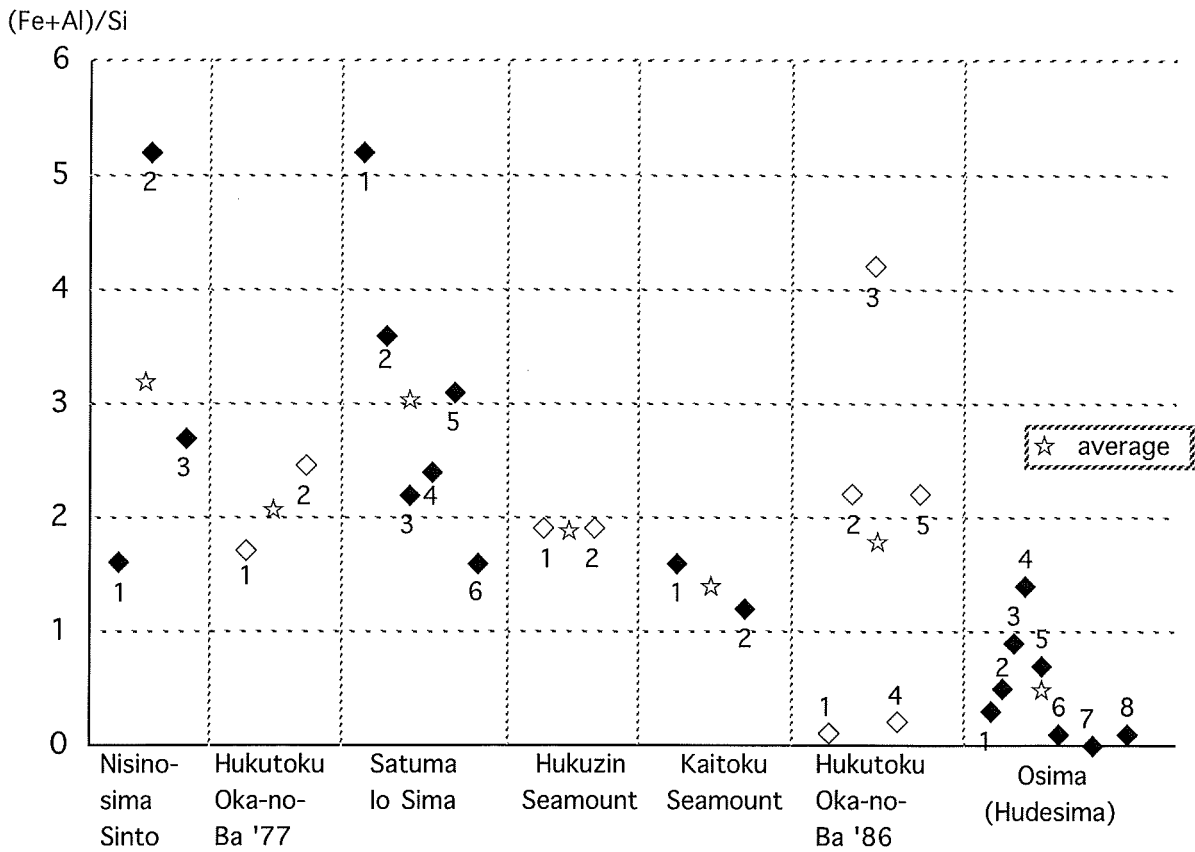


Fig.25 (Fe+Al)/Si of some volcanic discolored waters

～48%であり海徳海山のその Fe 比54%～62%に比べて小さいが Fe 量は0.52～0.83mg/l であって海徳海山の Fe 量0.28～0.32mg/l に比べて2倍以上である。また福神海山の変色水の pH 値は4.3～5.2であり海徳海山のその pH 値7.4～7.8 くらべて酸性が強い。したがって Fe 比をみる限りはその火山活動度は海徳海山>福神海山となるが Fe 量が2倍以上であることと pH 値が強酸性であることは採水地点による違いを考慮しても大きく火山活動度は福神海山>海徳海山と考えたい。

変色水は10km以上にわたって拡がっていることは珍しいことではなく場所をとわなければ採取することはさほど危険なことではない。しかし、噴出点から離れるほど形成されたコロイド状の Fe, Al, Si は個々に拡散、沈殿が進むため Fe 比, Al 比, あるいは (Fe+Al)/Si は噴出時の値から変化してしまう。したがって海底火山の活動度を変色水から求めるための最良の試料は Fe 量, あるいは pH 値の決定のためにも活動中の噴出点直上のものであることになるがこの採取は危険であり「マンボウ」のような無人調査ブイ (土出・村井, 1988) を使用しなければ不可能である。複数の地点での変色水の Fe, Al, Si の成分比から火山活動度を定量的に推定するためには変色水の採取時間及び採取地点による補正が必要となるがその方法及び補正量については今後の課題である。

とりあえず表7にかかげた変色水についてそれぞれの採取時間及び採取地点による希釈の度合いや Fe 量, pH 値を勘案しつつ図24を見ると火山活動度は

西之島>福神海山>海徳海山>1986福徳岡ノ場～薩摩硫黄島～1977福徳岡ノ場>伊豆大島となる。

次に図25から海底火山毎の火山活動の推移を解釈してみれば、西之島は試料 No. 2 (1974年3月14日) を火山活動のピークとする傾向が、1977福徳岡ノ場は活動活発化の傾向が、海徳海山では沈静化の傾向が、伊豆大島では試料 No. 4 (1986年12月20日) を活動のピークとして試料 No. 6 (1987年1月22日) 以降は活動が極めて弱い傾向が読みとれ

る。1986福徳岡ノ場については試料 No. 1 と試料 No. 4 は噴出点から離れた試料であるため除くと沈静化の傾向が読みとれる。

7. まとめ

* 熱赤外放射温度計による変色水温度の測定は海底火山の活動度の推定に有効である。

変色水温度と表面海水温度との差の時間変化は海底火山活動の推移を示す

機械表示温度で活動度を推定してはいけない。周囲の表面海水温度との差で海底火山の活動度が推定できる。

観測日時の異なった温度を比べるときはそれぞれの観測条件を考慮して比較する必要がある。

海底火山直上では変色水の噴出時と噴出後とでは温度分布が異なる。噴出の最中のものかそうでないものかを区別をして比較する必要がある。

* 火山性変色水の Fe, Al, Si の成分比は海底火山の活動度の推定に有効である。

Fe 比が大きいほど海底火山の活動度が高く Al 比が大きいときはその活動度は中程度であり, Si 比が大きいときはその活動度は極めて低い。

変色水の Fe 量, あるいは pH 値は噴出点からの距離によって Fe 量は減少傾向を, pH 値は増加傾向を示す。距離と Fe 量, あるいは距離と pH 値の関係から噴出点直上での Fe 量あるいは pH 値が推定でき、海底火山の活動度が推定できる可能性がある (事例が少ないためさらに検証を進める必要がある)。

変色水の (Fe+Al)/Si の時間変化は海底火山活動の推移を示す。

変色水の採取に際しては噴出点と変色水採取場所との位置関係及び噴出状況確認時刻と変色水採取時刻についてできる限り正確な情報の入手に努める必要がある。

海底火山の観測報告用として別紙のような「海底火山活動観測簿」を羽田航空基地、海上自衛隊厚木基地第四航空群等に配布し、観測の際には項目に沿っての記入をお願いすることにより均質な

データの収集に努めている。

8. 謝辞

熱赤外放射温度計による観測では羽田航空基地の搭乗員の人たちの、変色水の採取では測量船・巡視船の乗組員の人たちの協力なくしては試料を得ることができない。ここに感謝の意を表しますとともに、「海底火山活動観測簿」への記入等今後のより一層のご協力をお願いいたします。

査読者の指摘によって本論文は大幅に改善されました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 荒牧重雄・早川由紀夫：1983年10月3、4日三宅島噴火の経過と噴火様式，火山第2集，29，三宅島噴火特集号 S24-S35，(1984)
- 岩淵義郎：水路部の火山噴火予知計画，水路部研究報告，25，1-72 (1989)
- 岩淵義郎・加藤茂・芝田厚：本邦海域火山通覧（改訂版），水路部研究報告，30，191-236，(1994)
- 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会報，21，37-39，(1981)
- 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会報，25，53-56，(1982)
- 気象庁：日本活火山総覧，278-290，(1984)
- 文部省総合研究班：硫黄島南方海域海底火山活動調査，火山噴火予知連絡会会報，10，4-7，(1977)
- 長岡正利：1986年伊豆大島噴火による地形変化と噴出物量の計測，火山第2集，33，伊豆大島特集号 S 7-S15，(1988)
- 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，第3回海底調査シンポジウム-最近の海底調査 その3-，7-15，(1983)
- 小坂丈予・大平洋子・平林順一・森彰：海中で生成したシリカ-アルミナ含水低結晶物質と沈殿アロフェンとの比較，鉱物学雑誌特別号，13，178-186，(1977)
- 小坂丈予・平林順一・岡田清：海底火山活動にもなう2-3の鉱物の生成，鉱物学雑誌，14，特別号2，118-125，(1980)
- 小坂丈予：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，温泉科学，36，75-84，(1986)
- 小坂丈予・平林順一・松田敏二・大島章一・土出昌一・加藤茂：小笠原弧海域の海底火山活動に伴って噴出した岩石とその付近に産出する火山岩の化学成分，水路部研究報告，26，61-85，(1990)
- 土出昌一：西之島火山に対する噴火予知研究（第2報）-予備的数値解析-，水路部研究報告，12，35-49 (1978)
- 土出昌一・佐藤寛和・小西直樹：火山噴火予知調査に用いる熱赤外放射温度計について，水路部技報，2，23-29，(1984a)
- 土出昌一・佐藤寛和・小西直樹：空中熱赤外放射温度計による三宅島（1983年10月5日）の表面温度測定，火山第2集，29，三宅島噴火特集号 S153-S157，(1984b)
- 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)
- 土出昌一・佐藤寛和：福徳岡ノ場（1986）の火山活動について，写真測量とリモートセンシング，25，12-18，(1986)
- 土出昌一・柴山信行・背戸義郎・桑木野文章・佐藤寛和・小坂丈予・信国正勝・当重弘・福島秀生：伊豆大島沿岸に見られた変色水の分析，水路部研究報告，23，伊豆大島特集号，15-128，(1987)
- 土出昌一・村井弥亮：自航式ブイの開発，第8回海底調査シンポジウム資料-最近の海底調査 その8-，55-84 (1988)
- 土出昌一：海底火山活動に伴って出現する変色水の研究，岡山大学学位論文，(1989)

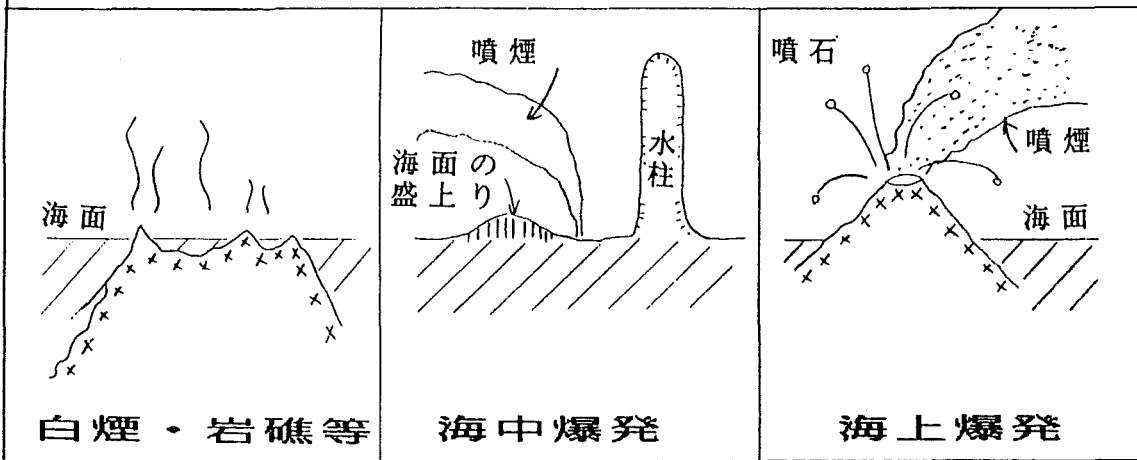
海底火山活動観測簿 (航空機用)

一般事項	所属基地		機種機番		機長	
	調査海域 (名称)		高度	～	フィート	
	日時	平成	年	月	日	時 分 ~ 時 分
	天候		雲形 雲量		気温	℃
	風向 (16方位)		風力 (階級)		気圧	hPa
	風浪	方向 階級	うねり	方向 階級	一般海水の色	
変色域	変色域の有無	※有・無	噴出点の数		箇所	
	中心位置 (噴出位置)		°	'N	°	'E
	近くの目標 (島など) からの方位と距離		°		海里	
	形・	※円・楕円・扇状・帯状・その他 ()				
	変色域の色	※淡青・白・黄緑・緑・黄・黄褐・茶褐・赤褐・黒・その他 ()				
	大きさ	幅	長さ	流向	変動あれば その周期	
	固形浮遊物	※有・無	粒径・色・形など		浮遊範囲	
	変色水の活動階級 (別添写真参考)	※弱	1・2・3・4・5		強	
	噴出点の深度階級 (別添写真参考)	※浅	A・B・C		深	
	測位方法	※GPS・ロランC・タカン・レーダ・その他				
写真記録	カメラ		焦点 距離	フィルム	撮影 高度	※垂直・斜
測深記録	最浅所推定		m	浅所周囲	m~	m
測温記録	中心点	℃ (深度 m)		付近海域	℃~℃ (深度 m)	
水中聴音記録	センサー名	深度	※爆発音・噴出音・地鳴・その他			
航空磁気記録	センサー名	高度	付近海域と中心との比較			
その他						

※印は、そのうち適当なものを選んで丸で囲む。

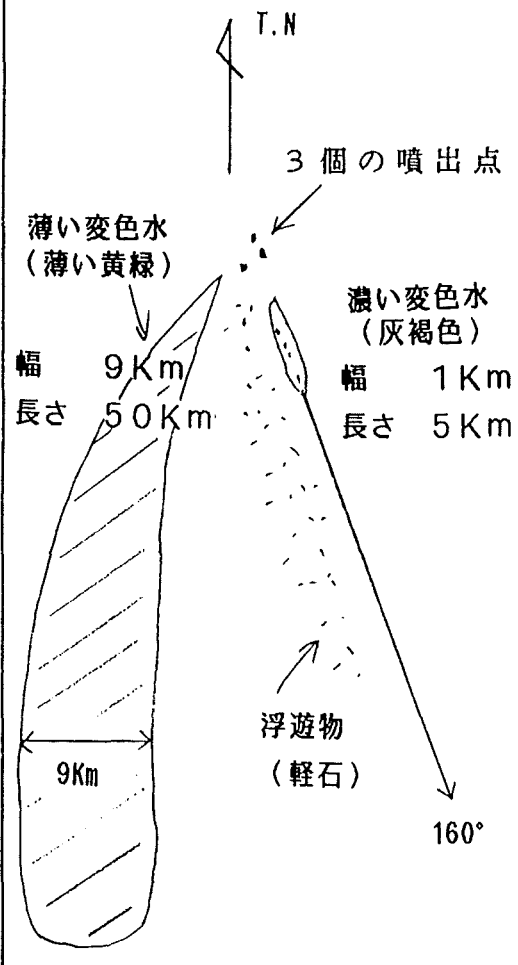
特 記 事 項		有	無	周 圍	色	形	数・大きさ・量等
	白煙 (水蒸気)						
	海面の盛り上り						
	水 柱						
	噴 煙 (有色)						
	噴 石						
	火 柱 (夜間)						
	岩 礁						
	熔 岩 流						
	火 (孔) 口						
状 況 略 図	別紙記載例参照						
留 意 事 項	1. 噴出点直上は超低空で飛行することをさける.						
	2. 高空からの全般的観察と低空での詳細な観測を併用する.						
	3. 出来るだけ現地に長時間滞空し, 活動状況の変化及び周期を測定する.						

活動状況説明図



変色水域全体図

(スケッチ例)



別添写真 1

浅

↑ A



B



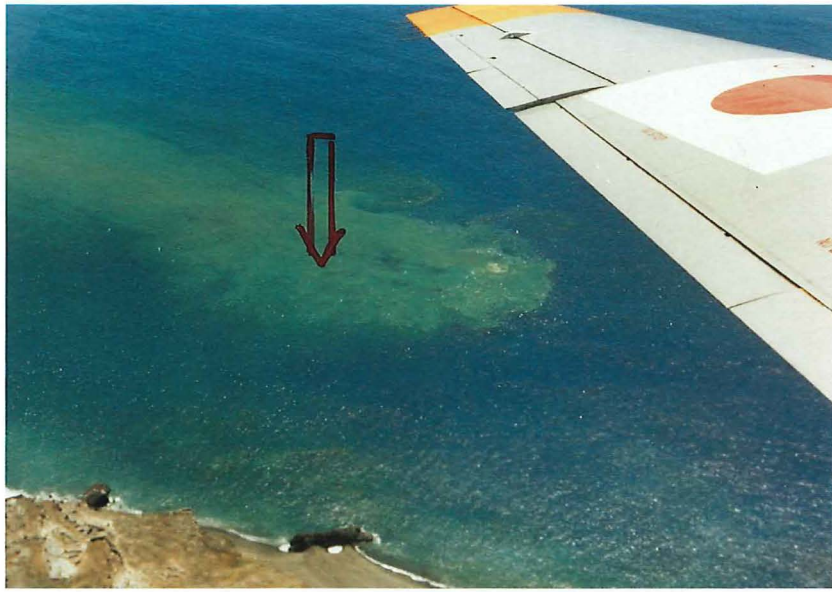
↓ C

深



別添写真 2 - 1

弱
↑
色 1



色 1'



色 2



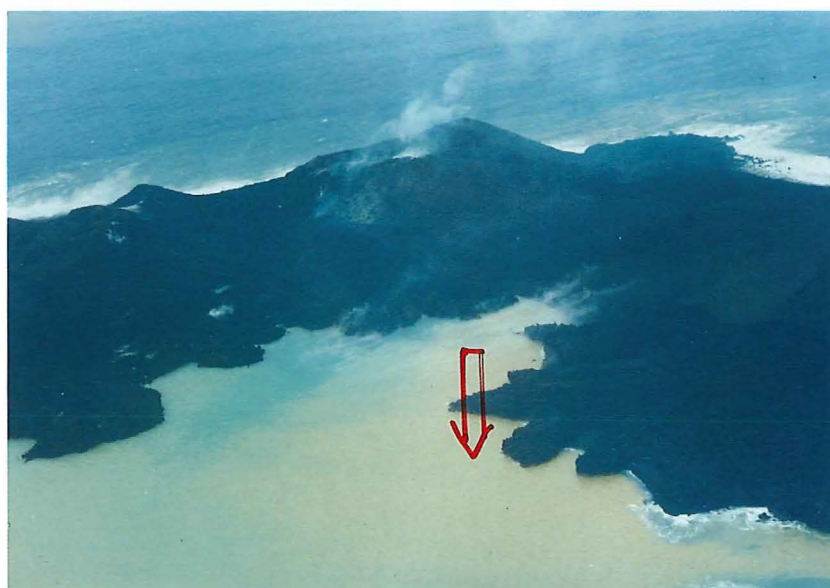
別添写真 2 - 2



色 3



色 4



色 5



強



Photo 1. S crater and discolored water at Miyake Sima on Oct. 5, 1983



Photo 2. Discolored water around the Kaitoku Seamount on Mar. 23, 1984



Photo 3. Discolored water around the Hukutoku-Oka-no-Ba new born volcanic island on Jan. 23, 1986



Photo 4. Discolored water around the Hudesima, Izu Osima on Jan. 7, 1987