

鬼界カルデラの海底地質調査

— 特に giant pumice の産状、微地形の検討、水温の測定について —

中村光一*1・阪口圭一*1・長井俊夫*2

1985年3月、鬼界カルデラにおいて、1)カルデラ壁の地質調査、2)後カルデラ火山噴出物の産状調査、3)カルデラ内熱水活動の検知、を目的として「しんかい2000」による3回の潜航調査を行った。

調査海域での既存調査の測線をコンパイルして海底地形図の精度を吟味したところ、凸地形の分布の測線依存性が認められた。実際の潜航においても、測線からはずれた場所では最大50mの地形図との深度のずれが認められ、複雑な地形の火山地域では面的な地形調査が必要であることが示された。

海底は直径数m～十数mの岩塊が広く覆っており、カルデラ壁の露頭と考えられるのはカルデラ北西縁、水深340mの地点で見られた、成層した凝灰岩(?)からなる高さ数mの小崖だけであった。

海底に散乱する岩塊の多くは稜のはっきりした多面体で、亀甲状割れ目のある急冷表面と節理面のような平滑な面の両方を持つことが多い。その分布はカルデラ内ほぼ全域とカルデラ外まで認められる。この産状と分布、および採取した径40cmの急冷表面を持つ岩塊の見かけ密度が0.76であることは、数m以上の岩塊の多くが、1934-5年の新硫黄島を形成した海中噴火の際に目撃された浮遊する巨大な軽石塊(最大径30m)と同様の物であることを示唆する。類似の堆積物を記載した MAHOOD (1980) にならい、これらの岩塊を giant pumice と呼ぶ。

3ヶ所で採取した5個の岩塊(最大径40cm)はいずれも軽石であり、giant pumice と同質であると考えられる。見かけ密度は0.52-0.76であった。5個の試料の主成分化学組成は相互によく一致するが、後カルデラ珪長質火山岩の中では最も苦鉄質な組成であり、新硫黄島熔岩を含めた他の後カルデラ火山岩の組成とは有意の差が認められる。

海底での熱水噴出を検知するために4種類の温度測定装置を用意したが、今回の潜航調査では海水の温度異常は認められなかった。

*1 工業技術院地質調査所

*2 海上保安庁水路部

*1 Geological Survey of Japan

*2 Hydrographic Department, Maritime Safety Agency

**Marine geological survey in the Kikai caldera with special references to
the occurrence of giant pumices, the detailed survey on
topography and the measurement of sea water temperature**

Ko-ichi Nakamura ^{*1}, Keiichi Sakaguchi ^{*1} and Toshio Nagai ^{*2}

The Kikai caldera is one of the gigantic submarine calderas located to the south of Kyushu. Only small parts of the caldera rim and central cones crop out above sea level. Seismic and topographic profiling was conducted by the Hydrographic Department and the Geological Survey of Japan for many transects in the area. A detailed topographic map on the scale of 1:50,000 was published by the Hydrographic Department. Compiled survey tracks on the map reveal that it is not enough to show the volcanological features even though the map is based on the densest surveys. Deep towed TV camera and side-scan sonar site surveys were also carried out by the Japan Marine Science and Technology Center as site survey for the diving missions of the submersible "Shinkai 2000".

The deep towed TV camera survey and three diving missions discovered the wide-spread occurrence of "giant pumices" in and out of the caldera. The diameter of the giant pumices ranges from a few to a dozen meters. Giant pumices have sharp polygonal forms and quenched polygonal cracks on their surface with many open or closed joints perpendicular to the quenched surface. The other surfaces of polygons do not show the quenched polygonal cracks. The distribution and the features of the giant pumices suggest that they were formed during the post-caldera submarine eruptions. The occurrence of such giant pumices was observed during the submarine eruption from 1934 to 1935 that finally formed the new Shin-Iōjima Island.

A small outcrop less than a few meters high was found at the northwest corner of the caldera rim. It is believed to be composed of stratified fine to coarse tuff. But almost all of the seabed was covered with many giant pumices and fine ashy sediments even at the steep cliffs of the caldera walls.

The apparent densities of five pumice samples from three sites, which are believed to be small fragments of giant pumices, range from 0.52 to 0.76. Major-element compositions of these samples are almost identical and the samples have the most mafic composition among the post-caldera silicic rocks. Their chemical composition is not the same as the rhyolitic lava of Shin-Iōjima Island which erupted in 1935.

The sea water temperature measurement was carried out using four devices at the bow of the submersible. No hydrothermal activity was detected during the three dives.

1. 鬼界カルデラの概要

鬼界カルデラは、松本唯一（1935, 1943）が九州の四大カルデラと呼んだ阿蘇、始良、阿多、鬼界の内、最南端にあって、ほとんどが水中に没しているカルデラである（図1）。カルデラの大きさは径20kmで、長井他（1977）により、二重のカルデラ壁を持つことが指摘されている。一方、海上にある薩摩硫黄島、竹島の地質調査及び広域テフラの検討から、先カルデラ期の火山噴出物の上位に、少なくとも3つのユニットの火砕流堆積物が識別されている（小野他1982）。それらは、下位から小アビ山火砕流、長瀬火砕流、船倉火砕流及び竹島火砕流である。最下位の小アビ山火砕流は両島に分布し、多数の薄いフローユニットよりなり、かなりの部分が強く熔結している。噴出年代はわからないが、町田・新井（1978）は現在より低い海面の時代に噴出したものと推定している。長瀬

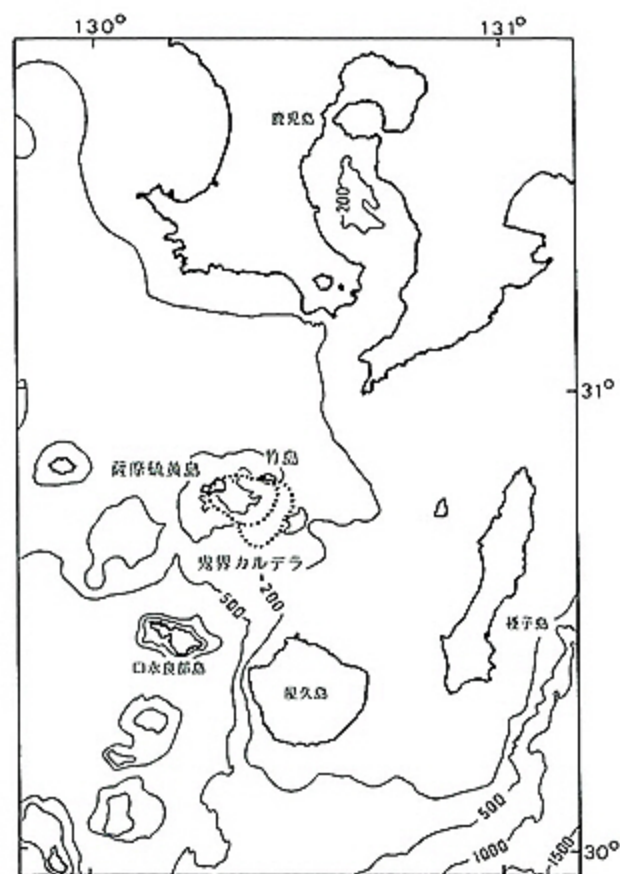


図1. 調査海域位置図。点線は鬼界カルデラ縁を示す。

Locality map. Dotted lines show the double rim of the Kikai caldera.

火砕流は、日本列島に広く分布する鬼界—葛原^{とずらはら}火山灰（K-Tz）を co-ignimbrite ash として放出した噴火時の火砕流で、K-Tz の層序上の位置から7.5～8万年前と考えられている（町田1983, 町田・新井1983）。船倉火砕流及び竹島火砕流は、非常に短い時間間隔で噴出した火砕流で、後者は南九州では幸屋火砕流と呼ばれ、やはり co-ignimbrite ash として鬼界—アカホヤ火山灰（K-Ah）を放出し、分布範囲は韓国から中部本州、そして太平洋まで及んでいる。その噴出年代は約6300年前と推定されている（町田1980, 町田他1983）。

これらの大規模火砕流の放出と二重のカルデラ地形の形成との関係についてはよくわかっていない。町田・新井（1978）は a) アカホヤ火山灰のマグマ換算体積よりもカルデラ地形から推定される陥没量の方がはるかに大きい、b) カルデラ内の中央火口丘群の体積が大きい、c) 大規模火砕流が何枚もある、などの理由により、最後の大規模火砕流によって作られた地形は、現在見られるカルデラの一部であろうと推定している。

6300年前の大噴火の後、薩摩硫黄島の稲村岳の玄武岩質火山活動や、現在カルデラ内に海丘をなしている中央火口丘群や硫黄岳の珪長質火山活動があった後、最近では1934～35年に薩摩硫黄島と竹島間の水深約300mの海底から火山活動が始まって、新硫黄島が形成された。

2. 海底地質調査の経緯とデータのコンパイル

当海域では、海上保安庁水路部、地質調査所によって詳細な地形、地質調査が行われており、海洋科学技術センターも潜航の予備調査を行った。以下に各機関の調査の概要を年代順に示す。

1973年 水路部、大陸棚の海の基本図（1/20万）測量作業。後に海底地形図、海底地質構造図、地磁気全磁力図、重力異常図として刊行。
1975年 地調、白嶺丸 GH75-1 調査航海。後に Cruise Report, 1/100万海底地質図を刊行。
1976年 地調、調査船「わかしお」による GW76 GK 調査航海。後に小野他（1982）の海底部分として刊行。

1980～81年 水路部、沿岸の海の基本図（1/5万）「薩摩硫黄島」の調査。後に海底地形図、

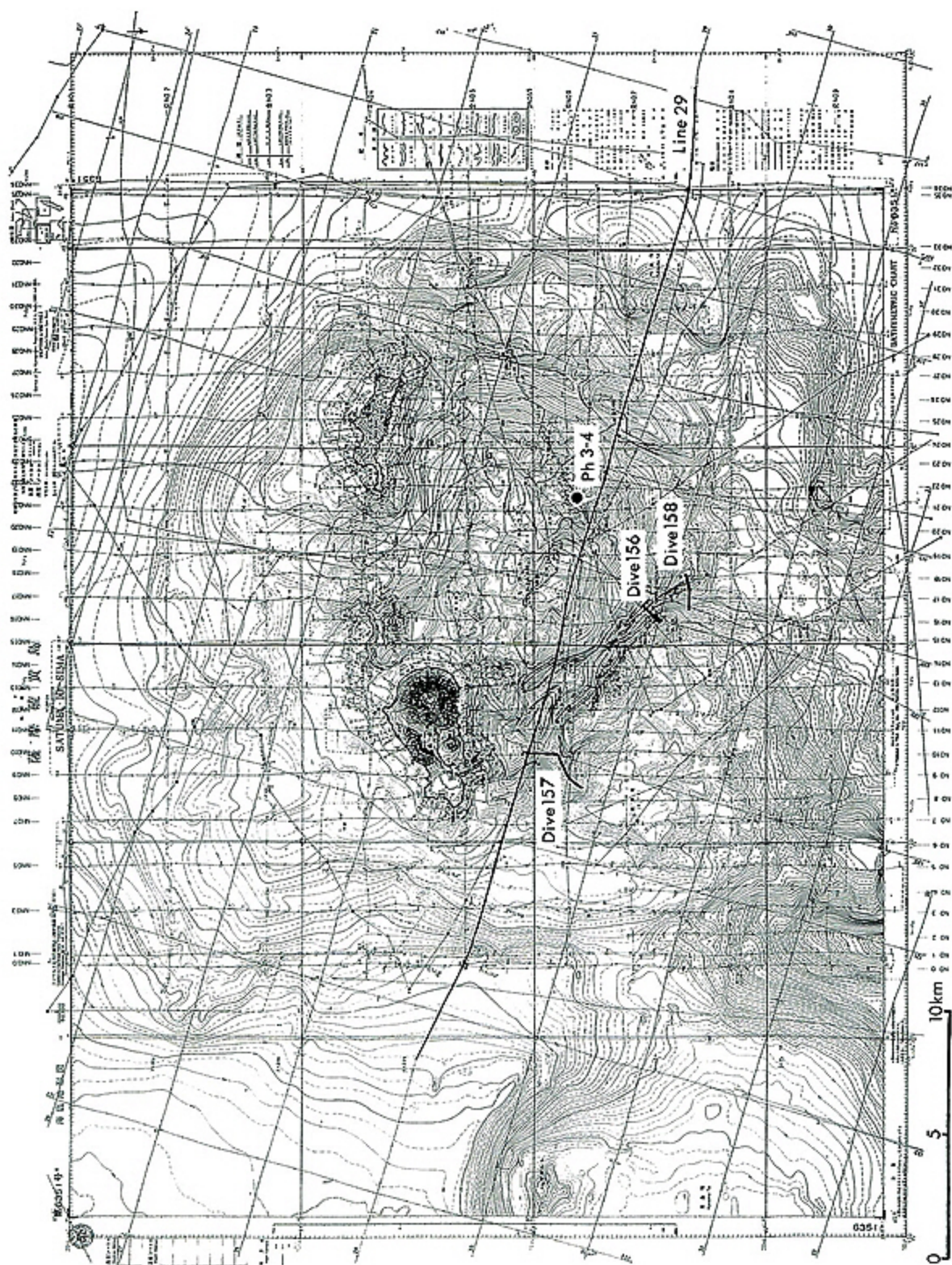


図2. 調査海域での既存調査の測線のコンパイル図。海底地形図には沿岸の海の基本図薩摩硫黄島 (No. 6351⁴⁾) を使用している。今回の潜航調査航跡も合わせて示してある。原図は 1/5 万。
 Compiled survey lines on the bathymetric chart (No. 6351⁴). These surveys were conducted by Hydrographic Department, Geological Survey and Japan Marine Science and Technology Center. Three dive tracks of this study (Dives 156 - 158) are also shown.

海底地質構造図を刊行。

1984年 地調、白嶺丸 GH84-1 & 3 調査航海。

1/20万海底地質図、堆積図として刊行予定。

1984年 JAMSTEC「なつしま」による深海曳航調査。

この海域は火山地域であるため、海底の微地形が非常に複雑であることが予測された。そのため、主に海底地形図の精度を吟味する目的で、事前に1/5万沿岸の海の基本図「薩摩硫黄島」の上に各機関のすべての測線、採泥点をコンパイルした。それが図2である。この図には1973年の水路部の調査以外のすべてのデータが記入されている。また「しんかい2000」の3回の潜航調査の航跡も記入されている。コンパイル作業は1/5万に調整された各機関の測線原図を製版カメラを用いて重ね焼きして行き、最後に1/5万海底地形原図に重ねるという方法で、水路部で行われた。ひとつの海底火山の地域としては世界で最も高密度の測線及び採泥調査がされていると言っても過言ではない。測線の間隔は1km以下で、通常の海域では、1/5万海底地形図として十分な精度が期待できる。しかし、ここでは線的調査では不十分なことが地形図と測線図を重ねて見るとよくわかる。凸地形の分布、特に頂上の位置の測線依存性が明瞭に認められる。

実際の潜航調査に際しては、この図からさらに潜航地点付近の1/5,000地形図を製版カメラによって拡大、作成し、ルート設定及び調査の参考にした。潜航調査の結果、最深点、地形的高まりなどの位置の精度は、トランスポンダ航法による位置

の精度と比較して充分であった。第157潜航では、はじめ水路部の沿岸の海の基本図の測線に沿って走っているところでは、地形図の水深値とSTDの水深値がよく一致した。しかし、潜航の最後で測線の間を浅い方に向かって走って行ったところでは、水深値にして50mほどの差が生じた。これは測線間の補間のし方に問題があることを示している。補間は、なだらかな海底では各測線記録の傾斜変換点や側方反射を参考にして地形図学的に処理される。しかし、鬼界カルデラのように複雑な地形の火山地域では不十分であることが示された。

今後は、SEAMARCタイプの曳航式サイドスキャンソナーやHydrochart等の浅海用マルチナロービーム音響測深機と言った面的調査が行われることが望ましく、また、そこから得られた地形情報による地質構造解析への寄与は大きい。

3. 潜航調査の目的

調査の第1の目的は、図3に見られるような音波探査できれいな成層構造が見られる所を選んで、成層構造の実態をとらえてカルデラ周辺の外輪山を含めた地質構造を明らかにすることにあつた。第2に、音波探査で音響的に不透明なところは、これまでの調査で火山岩の露出地域とされてきたが、そこで水中あるいは空中の火山活動の産物の直接観察をし、鬼界カルデラの火山活動様式を調べることを目的とした。そして、第3の標的は、薩摩硫黄島には多くの温泉があり、カルデラ内側に1935年に新硫黄島が形成されていることもあ

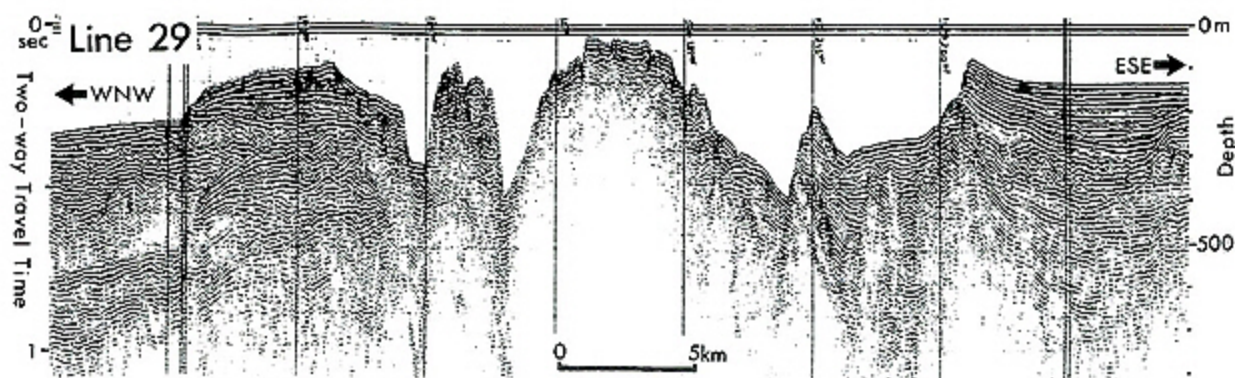


図3. 鬼界カルデラの音波探査記録の代表的な例。場所は図2のL29。

A representative seismic profile in the Kikai caldera. L29 of Fig. 2.

り、熱水活動の存在が多いに予想されたが、もし、そうした物に遭遇した場合、温度等を計測することであった。

当初の計画では、JAMSTEC、地調、水路部各2回、計6回の潜航を予定し、カルデラ内壁の4ヶ所に予定ルートを設定し、直前の潜航結果を見ながら、機動的に対処して行く構えであった。しかし、天候不順のため、予備日をすべて使っても、第156潜航（門馬）、第157潜航（中村）、第158

潜航（阪口）の3潜航しか実施できなかったのは非常に残念であった。実際に潜航した経路は図2及び図5、6に示してある。各潜航の概要は表1に示してある。

4. 潜航調査の装備—とくに水温測定装置と結果について

熱水活動を捕えるにも、標的になる水温の見積りが必要である。鬼界カルデラ同様、水没したカルデラである鹿児島湾奥の始良カルデラでは、200℃を越える海底噴気活動が認められている（鹿児島県1978）。しかし、海中は陸上と違って、熱水を冷す媒体である海水が周囲に大量に存在するため、例えば熱源が高温でも、高温水の湧出は局所的であったり、微温水しか表面に出なかったりする可能性がある。また、本海域のように黒潮の直接の影響下にあるところでは、深海底と違って周囲の温度も高く、日変化、季節変化もある。「しんかい2000」にはSTD（塩分濃度、水温、水深測定装置）が装備してあるが、センサが船首部に固定してあるために、熱水活動に伴う局所的な水温異常の検出、測定には使用できない。今回

表1. 潜航の概要
Summary of the dives.

潜航番号	156	157	158
期 日	1985. 3. 14	1985. 3. 18	1985. 3. 19
潜航地点	30°42.5' N 130°21.0' E	30°44.5' N 130°17.0' E	30°41.5' N 130°21.0' E
観 察 者	門馬 大和	中村 光一	阪口 圭一
潜水船船長	井田正比古	田代 省三	井田正比古
潜航士	内田 徹夫	桜井 利明	田代 省三
潜航開始時刻	12:21	11:53	9:44
浮上時刻	16:23	16:27	14:28
潜航時間	4hr. 02min.	4hr. 34min.	4hr. 42min.
最大潜航深度	510m	390m	580m
海底移動距離	約1,500m	約3,100m	約1,700m
天候・風力・波浪・うねり	C・4・3・3	BC・4・3・2	C・4・3・3

表2. 水温測定装置
Summary of the temperature measurement devices.

温度計	簡易型 CTD	サーモラベル	デジタル液晶温度計	指針式 オープン温度計
センサ、 測定原理	白金式温度センサ	溶融性顔料の融点を利用した色変化	液晶の色変化	バイメタル
測定温度範囲、 精度	-2 ~ 35℃ ± 0.08℃	変色温度が40℃から240℃までのものを10℃間隔で用意 変色精度は±2~3℃	-6 ~ 34℃, 2℃ 間隔 ± 0.5℃	50 ~ 300℃ 最小目盛は10℃
読取方法、 記録方法	内部メモリに記憶し、浮上後ハンドヘルドコンピュータで呼出す	潜水船観察窓から読取る 変色は不可逆で浮上後確認可能	潜水船観察窓から読取る 記録は残らない	潜水船観察窓から読取る 記録は残らない
取付位置	マニピュレータ	細長い鉄板に貼付け 採泥管入に装備	観察窓付近	マニピュレータ先端

の潜航調査では、十分に洗練されたシステムを作製する時間的、資金的余裕がなかったため、急場しのぎではあるが、事前に実施された沖縄トラフでの経験（上田他 1985）も踏まえて、以下の4種類の温度測定装置を用意した。それぞれの主な性能は表2に示した。また潜水船前面にすべての装置を装着した様子を写真1に、各装置の詳細を写真2に示した。

1) 簡易型自記CTD（電気伝導度、水温、水深測定装置）

鶴見精機製。本来は深海曳航体に取り付けるために開発したものである。電気伝導度測定用及び水温、水深測定用の2個の円筒型耐圧ケース（直径10cm、長さ約60cm）よりなり、両者を接続コードでつないで同期させる。測定データは内部メモリに記憶され、浮上後にハンドヘルドコンピュータを使って呼び出す。サンプリング間隔は5秒から2時間まで9段階あり、潜航前にセットする。高精度で連続記録が取れるが、測定温度範囲が狭い、潜水船内でリアルタイムに記録が読めないなどの難点がある。第157、158潜航ではマニピュレータに取付けた。

2) サーモラベル

日油技研工業製。3cm四方のベースシートの中央に径1cmの示温エレメントがマウントされている。特定温度になるとエレメントが変色し、一旦変色すると元には戻らない。変色温度が40℃から240℃までのものを10℃間隔で用意し、5cm×40cmの細長い鉄板に貼付けた上で、防水シールで保護した。CTDがリアルタイムで値が読めないため、熱水噴出孔が見られた場合には、マニピュレータでつかんで噴出孔にかざして、温度を測定できるように、潜水船の採泥管入れに装備した。

3) デジタル液晶温度計

日油技研工業製。液晶の色変化により、現在温度を示す数字が緑色に発色するもの。-6℃から34℃まで2℃間隔のものをアクリル板に貼付け、防水シールで保護して、カメラ窓の外側に取付けた。潜水船周囲の水温を知る目安とした。

4) 市販の指針式料理用オープン温度計

マニピュレータの先端近くに取り付け、熱水の噴出があった場合、まず初めにおおよその温度が読み取れるようにした。

鬼界カルデラにおける1回目の潜航（第156潜航）ではCTDを潜水船のSTDのセンサ部に取り付け、両者の校正を行なった。測定結果の一部を図4に示す。CTD、STDの水温、水深値は両者ではほとんど差は認められないが、約1分の時間のずれがある。これはCTDの起動と、STDが連動している潜水船の時計の時刻合わせに異なる時計を用いたためと考えられる。この潜航では熱水活動は目撃されず、CTD記録にも異常は認められなかった。第157および158潜航でも、残念ながら、海底での熱水活動は目撃されなかった。また浮上後再生したCTD記録にも温度異常は観測されていなかった。

カルデラ南縁から西縁にかけての3回の潜航調査では、海底での熱水活動を検知できなかった訳であるが、これだけでこの地域の海底熱水活動の有無について言及する訳にはいかないであろう。しかし、硫黄岳や新硫黄島に見られるように、最新期の活動はカルデラ北から北西縁に集中しており、それに伴う活発な熱水系もその周辺に限定されているのかもしれない。カルデラにおける熱水系の実態の解明は、鉱床や地熱の面からも注目されており、カルデラ全域にわたる熱流量測定などと絡めた今後の調査が望まれる。

今回の温度測定は、本来は海底熱水活動などを対象としない既存の温度測定装置を、いわば間に合わせ的に利用した試みであり、それらが海底で使用可能であるかどうかを試すものでもあった。結果として、それぞれの装置の精度内で充分役に立つであろうことが確かめられたが、所詮間に合わせの域を出ない。今後ますます重要になるであろう海底での温度測定に備えて、以下の条件を満たす温度計の開発、装備が望まれる。1) 小型、軽量で噴気孔にかざせるなどの機動性があること。2) 測定温度範囲は0～200℃以上、精度は0.1℃以上であること。3) 潜水船内でリアルタイムに測定値が読めること。4) 連続ないし短い時間間隔で数時間にわたる記録が取れること。

5. 潜航調査で判明した地質学的事実

以下では、第156潜航から第158潜航までに得られた観察と、「なつしま」による事前調査のVTRを見た結果を合せて、総括的に記述する。

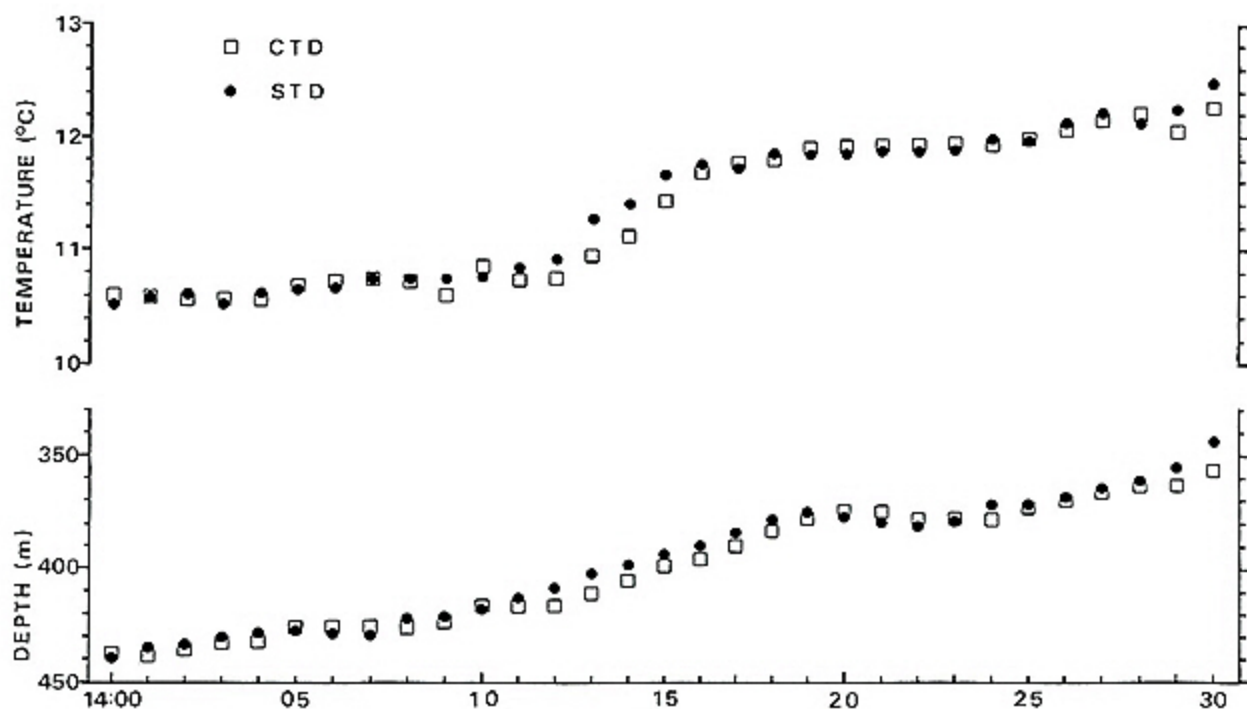


図4. 第156潜航での水温測定結果の一部。STDとCTDの間の約1分の時間のずれはCTD起動の計時ミスによる。

An example of temperature measurement during Dive 156. Approximately 1 minute time lag is caused by the miss-set of the CTD clock.

中央火口丘域（曳航調査）、カルデラ内壁（全潜航）、カルデラ壁頂部（第156潜航）、カルデラ外（第157潜航の後半）を通して、海底面は、堆積物の上に径数mから十数mの本稿でgiant pumiceと呼ぶ岩塊で覆われていた。この岩塊はカルデラ内壁のかなり急な斜面にも多く、この広い分布は予想外の事実であった。岩塊は等方的な外皮を持つものはまれで、多くは稜のはっきりした多面体で、六面体が多く、一面が亀甲状に割れており、他の面はなめらかか、平行な節理が入っているものが多い。亀甲状割れ目、節理ともに、単なる線状に見えるものから、かなり割れ目として開いているものまで、様々である（写真3）。中央火口丘山麓部、カルデラ内壁に特に多く、累々と積み重なっている。この累積により、時にある岩塊の上面と次に現われる岩塊の上面に10m近い高低差を生じていることもあって、曳航調査、潜航調査に相当の困難をきたした。海底面が見えるところでは、岩塊は砂質、泥質の堆積物の上に載っており、あまり埋まったような形態は示さない。

岩塊の形態、特に亀甲状割れ目や節理の開きの仕方、表面の曲率などは、急冷された熔岩が遅延発泡して、膨張した特徴をよく示している。また、近接する数個の岩塊の相対する面がジグソーパズル状に一致し、明らかに現在の位置に到達した時に割れて、着底していることを示す例もある。

多面体の稜のはっきりしたものが多く、稜の磨耗を示すものが少ないこと、及び中央火口丘形成期以後に堆積したと推定せざるを得ないにもかかわらず、区別の全くつかないものが、カルデラの内側のみならず外側まで分布していることは、この岩塊が中央火口丘などの上部から転動によって現在の場に供給されたとは考えにくいことを示している。

1934年の新硫黄島を形成した噴火を記録した松本唯一や田中館秀三の報告には、直径30m位の大きさの多数の軽石が海水を蒸発させ、ガスを出しながら、赤熱状態で、夜は光を発して数日間浮遊して冷却し、水没して行ったことが記されている。また今回、潜航調査中に採取した岩石で最大

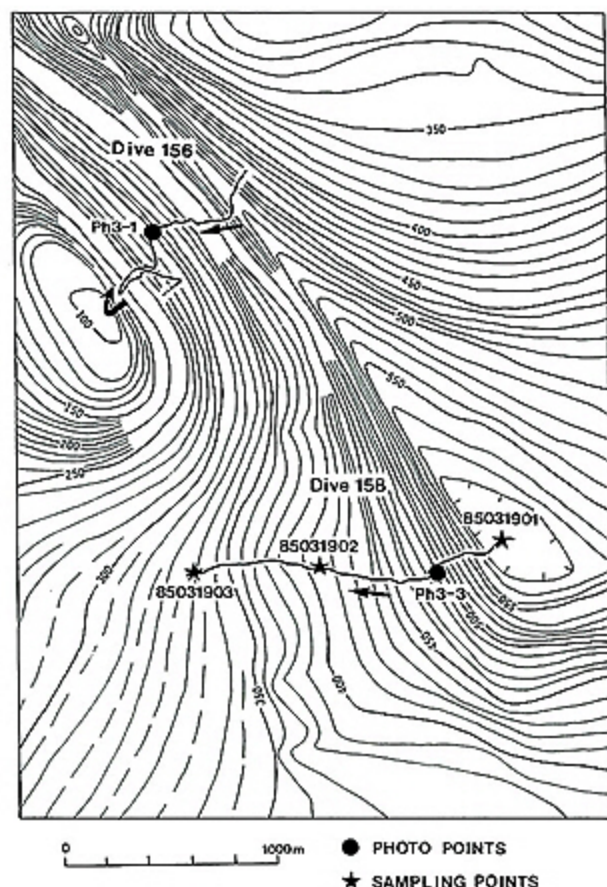


図5. 第156, 158潜航の航跡図。写真撮影位置(Ph3-1, Ph3-3), 資料採集位置(85031901~3)を示してある。

The dive tracks of Dives 156 and 158.
Ph3-1 and Ph3-3: photo points.
85031801~3: sampling points.

のもの(85031903-3)は写真5に示すように亀甲状割れ目を持つ表面と、それに垂直な節理を持って、海底で多数見られた岩塊によく似ているが、後に述べるように密度は0.76で水より軽い。このようなことから、海底に大量に存在している岩塊は軽石であろうと考えられる。

メキシコのSierra la Primavera 複成火山を研究したMAHOOD(1980)はカルデラ形成後にできた湖水の堆積物の中に特徴的な鍵層として the giant pumice horizon というのを記載している。彼女の記載は次のようである。

A 3- to 13-m-thick horizon of giant pumice blocks set in a diatomaceous ashy matrix was deposited over the entire 110 km² of the lake. The

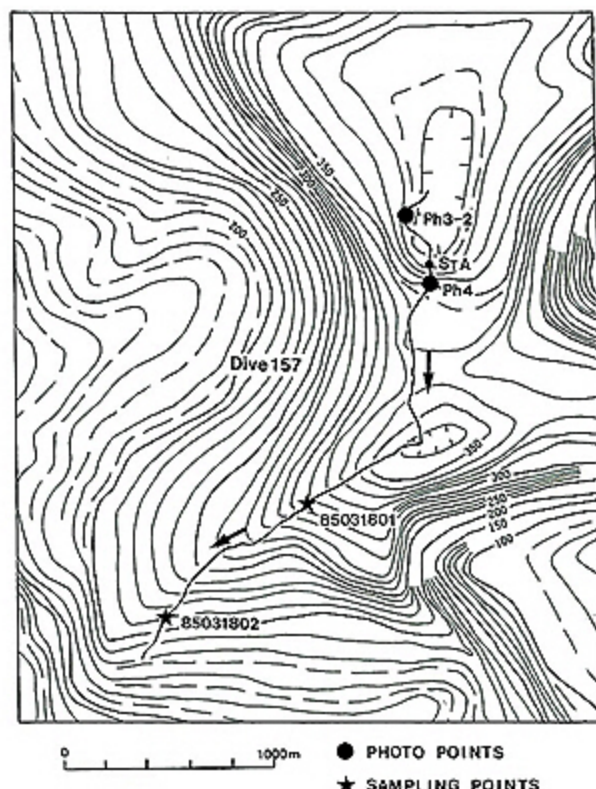


図6. 第157潜航の航跡図。写真撮影位置(Ph3-2, Ph4), 試料採集位置(85031801, 2)を示してある。

The dive track of Dive 157.
Ph3-2, Ph4: photo points.
85031801, 2: sampling points.

blocks of fully inflated pumice range from 0.3 to more than 6 m across. Many blocks are columnar-jointed in a crudely radial pattern and have vaguely botryoidal margins. The ashy matrix is finely laminated and the laminae are deformed around the pumice blocks. The distribution of particle sizes is bimodal; pumice lapilli of intermediate size are rare. The unique character of this deposit made it an important stratigraphic marker bed within the lake bed sequence.

この記載は我々が鬼界カルデラで見出した岩塊と非常によく似ている。我々は当初、この岩塊を水中急冷熔岩と呼んだが(中村他1985)熔岩と呼ぶと緻密な感じを与えるので、暫定的に giant pumice と呼ぶことにする。今のところ、MAHOOD(1980)以外によくあてはまるものを記載した文献を見出していない。

堆積物は2ヶ所で得られた試料のスミヤスライド及び走査電子顕微鏡を用いた観察では、碎屑粒子を主体とし、火山ガラスを多く含み、有孔虫、放散虫、ナンノプランクトンなどの生物遺骸も多数見られる砂質シルトであった。giant pumiceの上には堆積物はあまり載っておらず、カルデラ内壁の最も深いところで、数cm程度被覆しているにすぎない。第157潜航の着底点付近では、特徴的にgiant pumiceや周囲の海底に火山岩と思われる径20cm大以下の角礫が散点的に載っていた。これは薩摩硫黄島由来の火山弾の可能性もあるが、潜水船が着底できず、試料も得られていないので詳しいことはわからない。

先カルデラ期の火山体の内部構造を見せられる露頭は、第157潜航の地点Ph4(図6)、水深340m付近で、高さ数mのベンチとして、層理が見え、露頭の下部は細粒で、上部30cmほどはかなり粗粒な凝灰岩?があっただけである(写真4)。この露頭は高さはさほどないが、前方ソーナーの記録から160°方向に20mほど続いており、その走向はこの付近におけるカルデラ壁の一般走向と一致する。また、この露頭の下方、水深370mの地点StA(図6)では、この露頭と同質と考えられる、数m大の同じく層理の見える凝灰岩のブロックが崩落していた。この露頭は、カルデラ壁の一部と考えられるが、giant pumiceに大部分は埋もれて、わずかに一部がベンチ状に顔を出していると考えられる。

第156潜航の前半は、カルデラ内壁上にある小さな沢筋のようなものを上ったらしく、緻密な感じのする火山岩が、崖状にたまっている。VTRを見る限りでは、長柱状に割れたブロックが多く、柱状節理に沿って割れていると考えられる。これは、1976年の調査船「わかしお」の調査航海に際して得られた試料(GW76KG-D6、小野他1982 p. 26)と形態が似ており、場所も同じヤクロ瀬の北東側のカルデラ内壁である。一ヶ所、露頭かとも考えられる比高1m内外のベンチ状の地形もあったが、詳細はよくわからない。

中央火口丘頂部付近では円卓型ミドリイシ類(tabular *Acropora*)のサンゴが群生している。沖縄ではふつう水深15m位までに内外海に面した礁上縁部に多産する種で、それがここでは水深

25~30mまで生息していることは、鬼界カルデラ内の海水の透明度が高く、水がよく動いていることを示唆しているかもしれない。(松田伸也私信)

6. 採取試料の検討とgiant pumiceの成因

採取した岩石試料は3ヶ所から5個である。採取地点は、図5、6に示してある。第158潜航の第3地点(85031903)からは3個の試料を採取した。試料はいずれも斑晶に斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物を持つ軽石である。いずれの試料の切断面、薄片での観察でも数mm大の未発泡の本質岩片を含み、特に85031802及び85031903-2では径1cmの本質岩片を含んでいる。最後に採取された85031903-3が最大で、直径40cmあり、写真5でもわかるように、亀甲状に割れた急冷表面と、それに垂直な節理を持つ。海底では、急冷表面を上にして、半分以上、泥質な堆積物の中に埋まっていた。他の4つのサンプルのいずれも海底面上にあったものである。

これらの試料について、ビーズ法(佐々木・勝井1981)で密度を測定し、更に蛍光X線分析装置を用いて主成分の化学分析を行った。軽石内の不均質さが測定に反映するかどうかチェックするため、85031802の試料からはa, bの2個、85031903-3からは4個の試料を100~500gずつ取って、測定に供した。85031903-3の試料でmarginとは亀甲状に割れた急冷表面に近い部分で、coreとはその反対側の面に近い部分、middleとはその中間である。coreを通常とは異なる使い方をしたのは、急冷表面の反対側には、急冷構造が見られず、また生物の付着がなく、何か大きな岩塊から割れた一部のような見かけを呈するため、元の岩塊のcore側に近いと考えたためである。試料から生物の付着のある面を切り落とし、大きな本質岩片のあるところは避けて、数cm角の大きさに切り、イオン交換水につけて、超音波洗浄を繰り返し、切断の際に気泡に入った切り屑や海底で気泡に入り込んだ泥を落とし、かつ海水の吸着が分析値に反映するのを防ぐため、所謂塩抜きをした。ほとんど水が濡らなくなった段階で、恒温槽で100℃で約1.5日乾燥し、50, 100, 500mℓのメスシリンダーと直径2mmのガラスビーズを用いて体積を測り、かつ試料の重さを測って、密度を算出した。

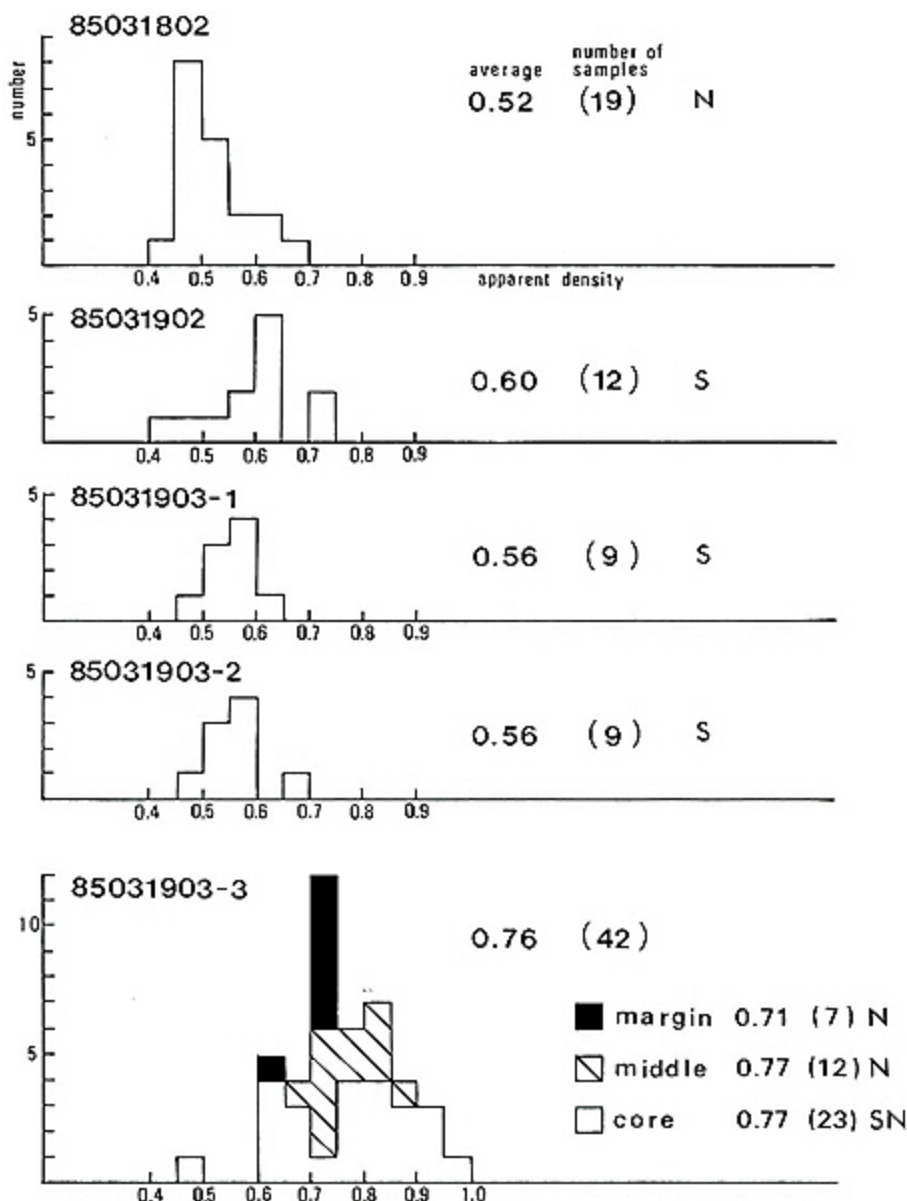


図7. 軽石の見掛け密度の測定結果。図中のN, Sは測定者 (N: 中村, S: 阪口) を示す。

Apparent densities of pumices. N and S show the measurers. N: Nakamura, S: Sakaguchi.

体積の測定には、精度を上げるため、なるべく容量の小さなメスシリンダーを用いた。その後、目に見える限り、気泡に付着、残留している泥を削り落とした上でステンレス乳鉢で5mm角以下に砕き、更に上澄液がAgNO₃溶液で白濁しなくなるまで、イオン交換水を換えながら、超音波洗浄をくり返した。その後、再び恒温槽で120℃で約1.5日乾燥した後、メノウ製ボウルミルで全量粉末にした。化学分析は、地質調査所のフィリップス社

製の全自動PW400型蛍光X線分析装置を用いた。分析方法、測定条件は曾屋他(1984)と同一であるので、詳しくは、その論文を参照されたい。

見掛け密度の測定結果を図7に示す。中村、阪口は今回初めてビーズ法による軽石の密度測定を行なったので、測定における各種ノウハウや、こゝを完全に体得しておらず、また、測定には、佐々木・勝井(1981)よりも大口径のメスシリンダーを用いたため、ビーズ体積の読み取り精度が悪

表3. 採取した試料の主成分化学組成, 他その後カルデラ火山岩との差が見られる。硫黄岳熔岩, 新硫黄島熔岩の分析値は小野他(1982)に, 浅瀬熔岩の分析値は氏家他(1986)による。

Major-element analyses of collected samples, compared with other post-caldera rhyolites. Analyses of Iōdake lava and Shin-Iōjima lava are referred to Ono et al. (1982) and that of Asase lava is referred to Ujike et al. (1986).

	Dive157		Dive158								Shin-Iōjima	Asase	Iōdake
	8503 1802	8503 1802	8503 1902	8503 1903-1	8503 1903-2	8503 1903-3	8503 1903-3	8503 1903-3	8503 1903-3		IW74S-24	78I0165 -1	IW74S -13
	a	b				core1	core2	middle	margin				
Chemical composition without water													
SiO ₂	68.42	68.90	68.72	69.07	68.66	68.95	68.61	68.51	69.00				
TiO ₂	0.63	0.65	0.64	0.64	0.65	0.65	0.66	0.65	0.64				
Al ₂ O ₃	14.58	14.28	14.31	14.32	14.43	14.39	14.44	14.37	14.35				
Fe ₂ O ₃	4.23	4.31	4.29	4.37	4.35	4.31	4.45	4.35	4.28				
MnO	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11				
MgO	1.12	1.12	1.07	1.08	1.08	1.06	1.11	1.09	1.07				
CaO	3.71	3.56	3.50	3.52	3.55	3.51	3.62	3.52	3.52				
Na ₂ O	4.08	4.11	4.04	4.10	4.00	4.07	4.07	4.12	4.10				
K ₂ O	2.11	2.15	2.15	2.15	2.14	2.17	2.14	2.16	2.15				
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14				
Total	99.14	99.34	98.98	99.52	99.12	99.37	99.37	99.02	99.36				
H ₂ O(ig. loss)	0.59	0.86	0.40	0.61	0.52	0.36	0.56	0.38	0.55				
Recalculated to Total=100%													
SiO ₂	69.01	69.36	69.42	69.40	69.27	69.39	69.06	69.19	69.44	71.57	71.19	71.03	
TiO ₂	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.64	0.61	0.60	0.51	
Al ₂ O ₃	14.70	14.37	14.45	14.39	14.55	14.48	14.53	14.51	14.44	13.99	14.05	14.03	
Fe ₂ O ₃	4.26	4.34	4.33	4.39	4.39	4.34	4.48	4.40	4.30	3.56	3.43	4.35	
MnO	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	0.12	0.11	
MgO	1.13	1.13	1.08	1.09	1.09	1.07	1.12	1.10	1.07	0.83	0.82	0.91	
CaO	3.74	3.59	3.54	3.54	3.58	3.53	3.64	3.56	3.54	2.76	2.86	2.59	
Na ₂ O	4.11	4.13	4.08	4.12	4.04	4.10	4.09	4.16	4.13	4.25	4.38	4.32	
K ₂ O	2.13	2.17	2.18	2.16	2.16	2.19	2.16	2.18	2.17	2.44	2.41	2.37	
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.10	0.14	0.14	
ΣFeO	3.83	3.91	3.90	3.95	3.95	3.91	4.03	3.96	3.87	3.20	3.09	3.91	
ΣFeO/MgO	3.39	3.46	3.61	3.62	3.62	3.65	3.60	3.60	3.62	3.86	3.81	4.30	
Na ₂ O+K ₂ O	6.24	6.30	6.26	6.28	6.20	6.29	6.25	6.34	6.30	6.69	6.79	6.69	

くなり、図6に示した結果は佐々木・勝井(1981)に示された2%という測定誤差に比べ、かなり、大きな誤差を含んでいると考えられる。また、測定者の違いによる差があるかどうかとも確かめられていない。図7で、密度の値の右端に書いてあるN, Sは、測定者、中村、阪口のイニシャルである。85031903-3のcoreの値がバイモダルになっているのは、軽い側の山が、阪口、重い側の山が中村による測定の結果である。両者の測定した試料はcoreの部分から別々に切り出されたものであり、中村、阪口の測定値の違いが、軽石内の不均質さによるものか測定者の違いによるものかは明らかではない。

0.52~0.76というのが今回得られた密度値だが、giant pumice全体の代表値としてどういう値が考えられるかは全くわからない。前章で述べたようにgiant pumiceは軽石であることに違いはないと考えられる。潜航中に、潜水船がgiant pumiceに衝突することが一度あり、その際、giant pumiceは演劇の張りぼての大道具の岩の如く、ゆらゆらと動いたことがある。しかし、これもツリムを取っている潜水船の慣性質量を見積ることは難しく、相手が軽いということになるかどうかよくわからない。giant pumiceの密集するところでは潜水船が着底できず、運よく近くに空地があったとしても、マニピュレータでは、たたき割ることができないので、giant pumiceそのものから試料は得られない。先に述べたように85031903-3の試料がgiant pumiceと組織が似ていることと、次に述べる化学分析値の均一さが、今回得られた試料がgiant pumiceを代表している可能性の強いことを示す唯一の根拠である。

化学分析の結果を表3に示す。同一試料から切り出した粉末による分析値は、誤差の範囲でよく一致し、分析に到る手順に問題のないことを示している。かつ、5個の試料相互の値もよく一致している。小野他(1982)や氏家他(1986)が述べているように、鬼界カルデラの海上露出部分は $\text{SiO}_2 = 50 \sim 60\%$ と $69 \sim 73\%$ というバイモダルな火山岩類で構成されている。氏家他(1986)の既分析値をすべてプロットした図に今回の分析値をプロットすると、85031802-aの分析値の内、 $\text{SiO}_2 - \Sigma\text{FeO}/\text{MgO}$ と、 $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ の図での

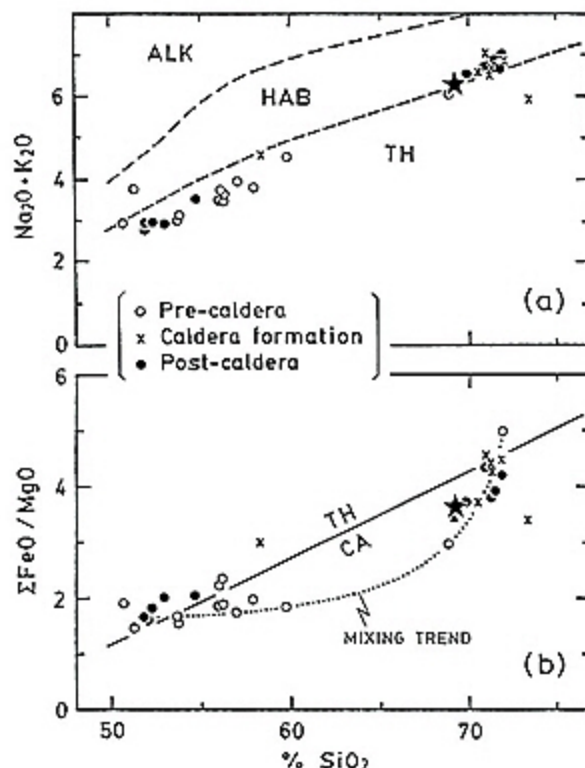


図8. 鬼界カルデラ火山岩の $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ ダイアグラム(a)および $\Sigma\text{FeO}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ ダイアグラム(b)。氏家他(1986)のFig. 3に採取試料の分析値(星印および(b)の黒三角)をプロットしたもの。(a)のALK(アルカリ系列), HAB(高アルミ玄武岩系列), TH(ソレイト系列)の境界はKuno(1966)に、(b)のTH, CA(カルクアルカリ系列)の境界はMiyashiro(1974)による、Mixing trendは氏家他(1986)による。(a) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ diagram and (b) $\Sigma\text{FeO}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ diagram for the Kikai caldera volcanic rocks(Fig. 3 of Ujike et al., 1986). Stars and a solid triangle in(c) show the newly analyzed dive samples. ΣFeO : total iron as FeO. ALK(alkalic), HAB(high-alumina basalt) and TH(tholeiitic) in(a): compositional fields by Kuno(1966). TH and CA (calcalkalic) in(b): compositional fields by Miyashiro(1974). Mixing trend was calculated by Ujike et al.(1986).

み、黒三角の位置にプロットされるのを除いて、すべて、星印の腕を除いた本体部分に集中してプロットされる。(図8, 9)。しかも、その点は、珪長質な岩石のグループの内、post calderaの火山

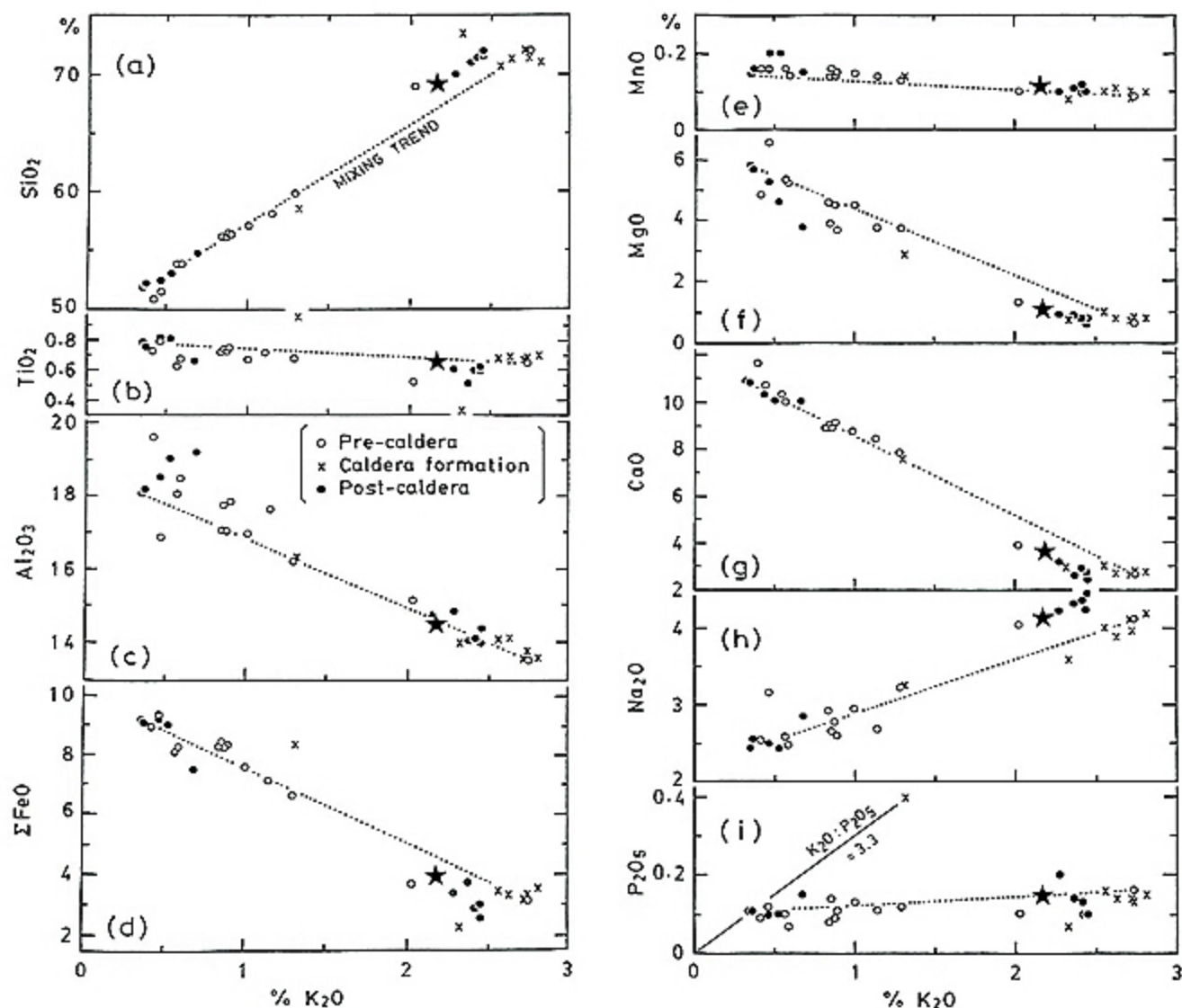


図9. K_2O バリエーションダイアグラム。氏家他(1986)のFig. 4に採取試料の分析値(星印および(c)の黒三角)をプロットしたもの。
 K_2O variation diagram for the Kikai caldera volcanic rocks (Fig. 4 of Ujike et al., 1986). Stars and a solid triangle in (c) show the newly analyzed dive samples.

岩の中では、最も苦鉄質なグループに近い側にプロットされる。

giant pumiceの鬼界カルデラの火山活動史の中での位置づけとしては、先に触れた1934~35年の新硫黄島を形成した最新の海底火山活動の際にできたと思うのが一つの有力な考え方である。しかし、新硫黄島の1935年の熔岩の分析値は表4にも見られるように最も珪長質であり、giant pumiceの分析値とは有意の差がある。1935年の熔岩は1934~35年の活動の最後に島を作った際に流出した熔岩である。一方、giant pumiceが

1934年に海中で盛んに噴火していた際に形成されたとすると、噴火の最後のステージで流出した熔岩の方が珪長質となって、普通考えられる噴火の際の化学組成の変化のトレンドとは逆になってしまう。化学組成上の有意の差は今わかっている分析値で見限る限り、他の海中の中央火口丘である浅瀬熔岩や、硫黄岳の分析値との間にも存在する。

鬼界カルデラにおけるgiant pumiceの分布はかなり広範囲で量も多い。しかし、従来、陸上での水底火山噴出物の研究では、あまり、このような産状は報告されていない。記載的に似ているも

のとして、見出したものは、先に紹介した MAHOOD (1980) の giant pumice horizon だけである。この g. p. h. は、層準としては、中央火口丘の形成初期である。彼女は giant pumice の成因としては、水による急冷加水圧によって、噴煙柱が空中に噴出しなかったためきたと考えている。湖水は、その後も残るが、同様な噴出物は生じていない。これは、その後の火山活動がカルデラ縁の ring fracture 沿いの場所に移行したためかもしれない。更に MAHOOD (1981) によれば、g. p. h. 中の pumice の分析値も値の分布範囲は異なるが、post caldera の火山噴出物の中では、最も苦鉄質な傾向を示している。面白いことに、同層準にあり、岩質的に類似しているため、成因的に関係が深いと考えられる熔岩円頂丘より約 2% SiO_2 が少なくなっている。

以上述べて来たように giant pumice に関しては、産状を含めた鬼界カルデラの火山活動史上への位置づけの問題、およびそれに関する、化学組成上の問題が残されている。1934年に噴出された軽石は、噴火が水深 300 m から始まって、島を形成していることから推測されるように、相当な量にのぼると考えられるから、現在の海底で見られないはずはない。今後、1934年の軽石と確定できる試料や、他の海底より採取された岩石、また陸上の岩石についても分析を進める必要がある。

謝 辞

今回の調査に際しては、山田章夫司令をはじめとする「しんかい 2000」運航チームの方々、浜中利夫船長をはじめとする「なつしま」乗組員の方々、堀田宏部長をはじめとする海洋科学技術センター深海研究部の方々にはたいへんお世話になり、深く感謝いたします。特に第 156 潜航のデータを使わせていただくことを快諾された門馬大和氏に感謝いたします。また、水温測定の様々な装置の装着については運航チームの方々の御協力なしには実現できないものでした。福井勉整備長以下、整備班の方々に特に感謝いたします。水温測定の機器については、地質調査所地殻熱部松林修氏、海洋地質部木下泰正氏、鶴見精機(株)鈴木重教氏、日油技研工業(株)宮崎秀久氏に特にお世話になりました。蛍光 X 線分析については、地質調

査所服部仁地質部長、同部中野俊氏にお世話になりました。厚くお礼申し上げます。陸上の地質、岩石についての、地質調査所環境地質部長小野晃司氏、同部曾屋龍典氏、富山大学氏家治氏、神戸大学宇井忠英氏、鹿児島大学小林哲夫氏との討論は非常に有益でした。サンゴについては琉球大学松田伸也氏に御教示いただきました。最後に、中村、阪口に対して「しんかい 2000」乗船の機会を作っていただき、色々とお世話いただいた水野篤行前海洋地質部長(現在山口大学)にお礼申し上げます。

参考文献

- 小野他(1982)にはそれまでの鬼界カルデラに関する文献が網羅されているので、そこに載っているものについては本稿で引用しても繁雑さを避けるため、以下には掲げない。
- 鹿児島県(1978) 鹿児島湾の水銀に係る環境調査報告書. 38 p.
- KUNO, H. (1966) Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, v. 29 p. 195-222.
- 町田 洋(代表)(1983)『日本列島周辺の深海底堆積物の分析を中心とした第四紀火山活動と気候変動の研究』昭和 57 年度科学研究費補助金(総合研究 A) 研究成果報告書 60 p.
- ・新井 房夫(1983) 鬼界カルデラ起源の新広域テフラと九州における更新世後期大火砕流の噴出年代。火山, 第 2 集, vol. 28, p. 206.
- ・———・李 炳島・森脇 広・江坂 輝弥(1983) 韓半島と済州島で見出された九州起源の広域テフラ, 地学雑誌 vol. 92, p. 409-415.
- MAHOOD, GAIL A. (1980) Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center—Sierra la Primavera, Jalisco, México. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 8, p. 199-230.
- (1981) Chemical Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center; Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 77, p. 129-149.
- MIYASHIRO, A. (1974) Volcanic rock series in

- island arcs and active continental margins,
Amer. J. Sci., v. 321 - 355.
- 中村 光一・阪口 圭一・長井 俊夫・堀田 宏・
門馬 大和・田中 武男(1985)「しんかい2000」・
深海曳航体による鬼界カルデラの海底地質調査、
火山, 第2集, vol.30. p.295.
- 小野 晃司・曾屋 龍典・細野 武男(1982)薩
摩硫黄島の地質・地域地質研究報告(5万分の
1図幅)地質調査所, 80p.
- 佐々木龍男・勝井義雄(1981)ガラスビーズを使
った軽石の密度測定法, 火山, 第2集, vol.26.
p. 117-118.
- 曾屋 龍典・宇都 浩三・牧本 博・鎌田 浩毅・
奥村 公男・須藤 茂(1984)三宅島火山1983
年噴出物の化学組成および鉱物組成。火山, 第
2集, vol.29. 三宅島噴火特集号S.283-S.296.
- 上田 誠也・木村 政昭・田中 武男・兼岡 一
郎・加藤 祐三・久城 育夫(1985)沖縄トラ
フ拡大軸の研究。海洋科学技術センター試験研
究報告「しんかい2000」研究シンポジウム特
集-p.123-142.
- 宇井 忠英(1984)『鬼界カルデラ起源の拡散型
大規模火砕流』昭和58年度科学研究費補助金
(一般C)研究成果報告書15p.
- 氏家 治・曾屋 龍典・小野 晃司(1986)九州
南方, 鬼界カルデラ産火山岩類の主成分およ
びRb・Sr・Y・Zr組成の起源, 岩石鉱物鉱床
学会誌 vol.81. p.105-115.
- WALKER, G. P. L.・宇井 忠英(代表)(1984)『拡
散型大規模火砕流での火山地質学的調査研究』
日米科学協力事業共同研究成果報告書。27p.

(原稿受理: 1986年6月10日)

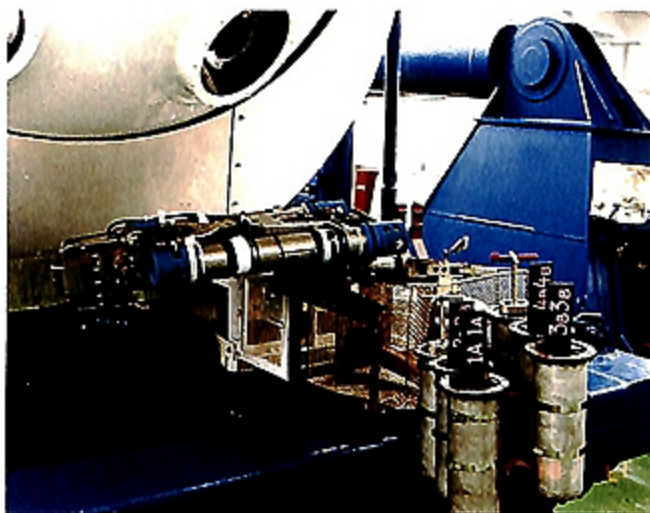


写真 1. 潜水船前面に装着された温度測定装置類。
Temperature measurement devices are equipped at the bow of "Shinkai 2000".

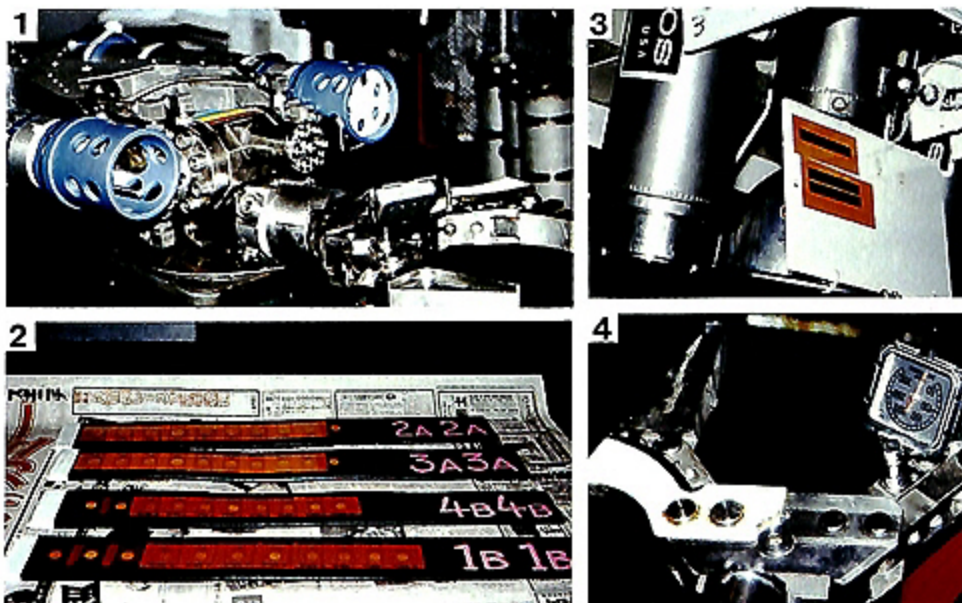
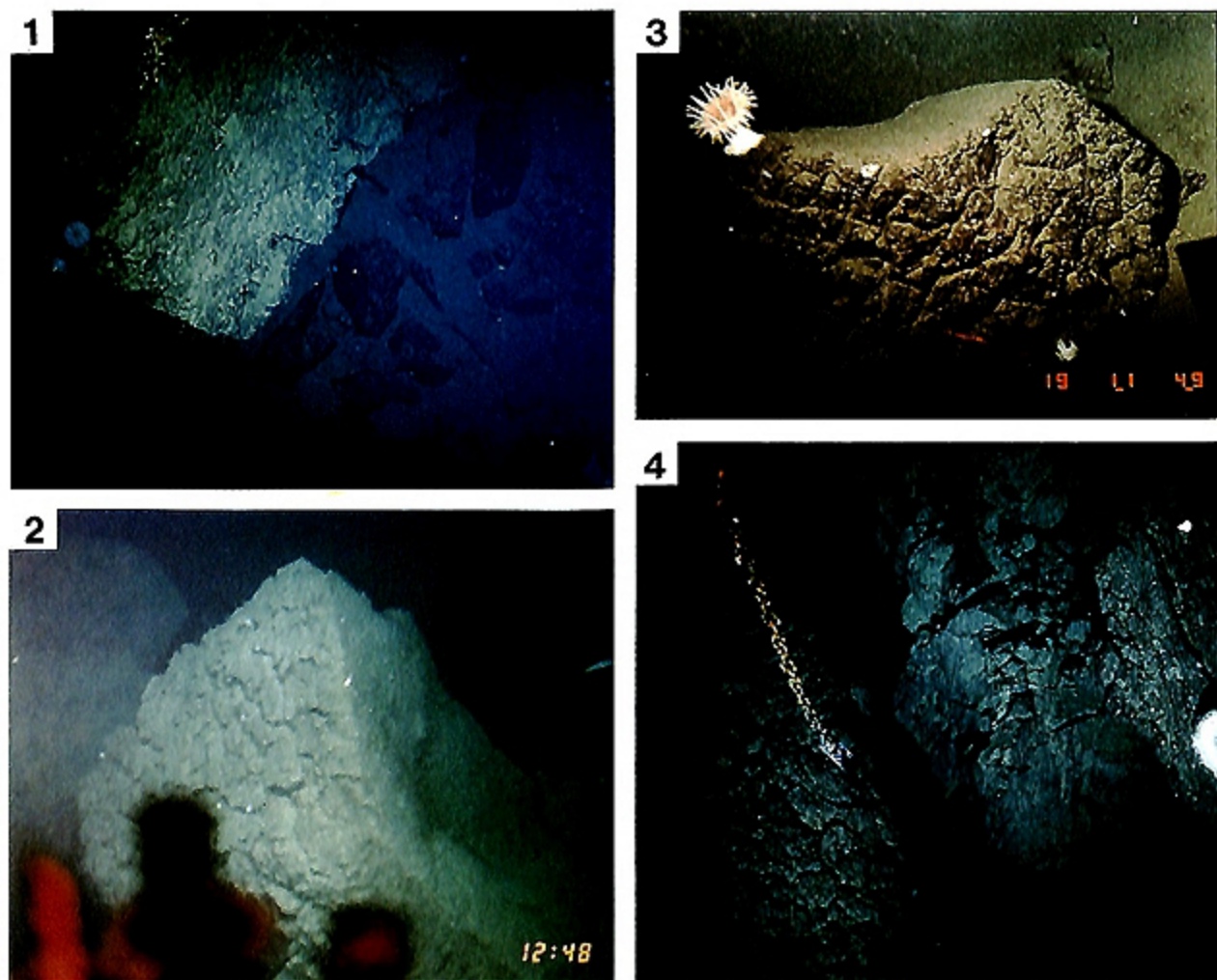


写真 2. 温度測定装置類。

1. マニピュレータに取り付けられたCTD。円筒状のカバーの内側に水温、水深（手前）、電気伝導度（向う側）のセンサがある。
2. サーモラベル。設定温度になるとラベル中央の白丸の部分が不可逆的に変色する。変色温度が10℃間隔の多数のラベルを一枚の板に貼り付けてある。
3. 液晶温度計。アクリル板に貼り付け、カメラ窓の外側のステレオカメラに取り付けたところ。
4. オープン温度計。マニピュレータ先端に取り付けたところ。

Details the temperature measurement devices.

1. CTD, tied on the manipulator.
2. "Thermolabels" on slices of iron plates. Color of each element (small white disk) changes irreversibly at a specific temperature.
3. Liquid crystal thermometer in front of the camera window.
4. Oven thermometer, screwed on the tip of the manipulator.



- 写真3. Giant pumice の産状。1 - 3 の撮影地点は図5, 6に, 4の撮影地点は図2に示してある。
1. カルデラ南縁部のカルデラ壁斜面上(第156潜航)。散乱している小さな岩片は発泡した様子はなく, これらはカルデラ壁上部からの崖錐堆積物かもしれない。
 2. カルデラ西縁部のカルデラ底(第157潜航)。向って左側の面はパン皮状の表面を持つが, 右側の面は節理に沿って割れたような平滑な面を持つ。
 3. カルデラ南縁部のカルデラ底(第158潜航)。
 4. 中央火口丘地域(曳航調査)。

Examples of "giant pumice". The points of each photos are shown in Figs. 2, 5 and 6.

1. On the slope of the southern caldera wall(Dive 156). Smaller fragments probably be derived from caldera wall rocks.
2. On the caldera floor near the western caldera rim(Dive 157). Left side surface of the block is bread crust like, but right side surface is rather smooth like a joint surface.
3. On the caldera floor near the southern caldera rim(Dive 158).
4. In the central cone area (site survey in 1984).

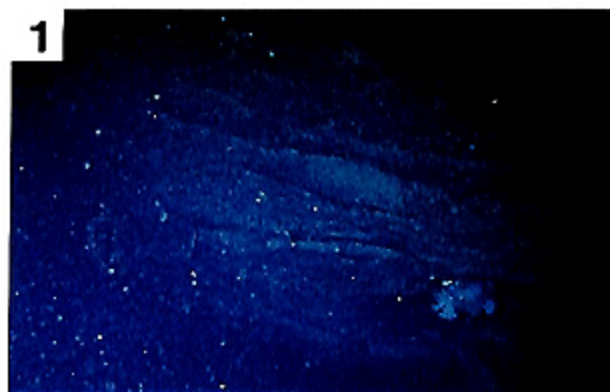


写真4. カルデラ西縁部で見られたカルデラ壁の露頭と思われる凝灰岩(?)の小崖(157 Dive)。成層構造が認められ、最上位に粗粒の堆積物がある。1はステレオカメラ、2は船内からの撮影。

A small outcrop composed of stratified tuff(?) (Dive 157). It is probably a part of the caldera rim. Uppermost part is somewhat coarse-grained. Photo 1 was taken by the fixed camera at the bow. Photo 2 was taken by the observer in the submersible.



写真5. 急冷表面を持つ軽石塊(85031903-3)。左側の色の濃い面には亀甲状の割れ目と表面から垂直に伸びる節理がある。左側が本稿で margin と呼んだ部分、右側の色の薄い部分が core と呼んだ部分である。スケールの赤と黄色はそれぞれが 10cm である。

A pumice lump (85031903-3) which has a quenched surface (left side) and joints perpendicular to the quenched surface. We call the left side part of this sample "margin" and the right side part "core". Each red or yellow portion of the scale shows 10 cm.