

# 水曜海山における海底掘削 -海底熱水系直下にどのようにしてアプローチするか-

丸茂 克美<sup>1)</sup>・浦辺 徹郎<sup>2)</sup>・江橋 俊臣<sup>1)</sup>・中島美和子<sup>3)</sup>

## 1. はじめに

アルビン号やしんかい2000のような有人潜水艇による調査の結果, 1,000m以深の深海底には海底熱水系と呼ばれる海底の温泉から300℃にも達する高温の熱水が噴出し, 熱水噴出口の近傍には様々な生物が生息することが明らかにされました。

これらの深海底での発見は, 地質・生物学上極めて重要なものです。海底熱水系から放出されている熱や物質は, 海洋における熱・物質収支にとって貴重な存在です。また, 海底熱水系で生成する鉱物は金, 銀, 銅, 鉛, 亜鉛の新たな金属資源として将来の開発が期待されています。

さらに海底熱水系から放出される熱水は高温・高圧・嫌気性であるため, 海底熱水系は地球が誕生して間もない環境に類似していると考えられます。したがって, 海底熱水系に生息する生物は, 生命の進化過程を解明する上で重要であるとともに, 高温・高圧環境で生息できる生物資源開発などの産業分野にとっても魅力的な存在です。

文部科学省の科学技術振興調整費による総合研究課題である「海底熱水系における生物・地質相互作用の解明に関する国際共同研究」(以下ではアーキアンパーク計画と呼ぶことにします)では, 平成13年度, 14年度に第2白嶺丸とBMS (Boring Machine System, Benthic Multi-coring System)を用いて, 伊豆小笠原弧の水曜海山海底熱水系の掘削調査を実施しました。

その結果, 我々は現在活動中の熱水噴出口周辺の地下に関する貴重な地質学的情報を得ることができました。この報告では海底掘削の概要と, 掘削によって得られた地質・鉱物学の知見の一部につ

いて紹介いたします。

## 2. 海底熱水系の地下にいかによりアプローチするか

アルビン号やしんかい2000などの有人潜水艇による調査では, 海底で起きている熱水噴出状況を肉眼で観察し, 遠隔操作で駆動するアームを用いて, 熱水噴出口に様々な機材 (例えば温度計や熱水採取装置など) を設置し, 熱水の採取や熱水の温度測定をすることができます。

しかし潜水艇では, 熱水噴出口の下でどのような地質現象が起きているのか, またどのような生物が地下に生息するかについてはわかりません。海底熱水系の地下を調べるためには, 海底に孔を掘る必要があります。

国際深海掘削計画 (ODP, Ocean Drilling Program) は, 海底掘削船であるJOIDES Resolution号を用いて, カナダ西海岸のバンクーバー島沖合に存在するMiddle Valley海底熱水系で, 掘削調査を実施することに成功しました (Proceeding of the Ocean Drilling Program, 1992)。この後もODPでは太平洋や大西洋などの海底熱水系で掘削調査を行い, これらの海底熱水系の地下に分布する岩石や堆積物を採取してきました。

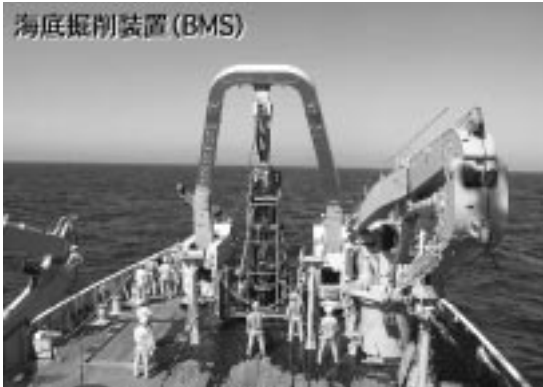
しかし, JOIDES Resolution号による掘削では, 海底直下数10mから深度数100mまでの岩石や堆積物コアを採取できますが, 海底熱水系の熱水噴出口の直下数mから数10mのコアを攪乱なしに採取することはできません。また海底熱水系を掘るといっても, 掘削点をピンポイントで狙うことはできません。例えば潜水艇調査の結果, ある特定の熱水噴出口から高温の熱水が噴出していたとしても, その熱水噴出口に掘削用のビットを下ろすことは極め

1) 産総研 地質情報研究部門

2) 東京大学大学院理学系研究科地球惑星専攻

3) 九州大学大学院理学研究院

キーワード: 海底熱水系, 海底掘削, 粘土鉱物, 海底設置型掘削装置, 第2白嶺丸, 黒鉱型鉱床, 水曜海山, アーキアンパーク計画



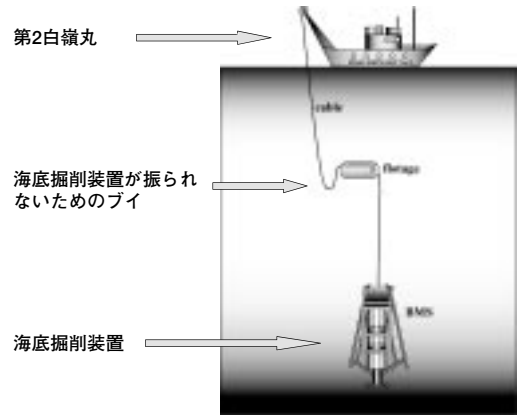
第1図 海底にプラットフォームを設置し、第2白嶺丸の遠隔操作で堆積物や岩石を採取する、海底設置型掘削装置 (BMS)。

て困難です。

しかし、こうした熱水噴出口の直下数mから数10mの岩石・堆積物コアは、地質学的にも生物学的にも研究対象としての価値が極めて高いものです。なぜならば、熱水噴出口の直下数mから数10mの深度では、地下から上昇してくる還元的高温熱水と、海底面に浸透していく酸化的な低温海水が混じり合うため、地下温度や酸化還元状態が著しく変化し、様々な熱水鉱物が沈殿するとともに、様々な生物が生息している可能性があるからです。

海底熱水系において、海底直下数mから数10mのコアを採取するための海底掘削装置には、1) 採泥管を自由落下させて海底に突き刺して堆積物や岩石を採取する柱状採泥器 (ピストンコアラーやグラビティーコアラー、ハンマーコアラーなど)、2) 海底にプラットフォームを設置し、遠隔操作で船上からコントロールしながら堆積物や岩石を採取する掘削装置 (海底設置型掘削装置、後述するBMSが現在世界で唯一該当する) があります。

これらの装置のうち、海底熱水系の熱水噴出口のようなピンポイントを標的として掘削できるのは、BMSのような遠隔操作で船上からコントロールしながら堆積物や岩石を採取する装置に限られます (第1図)。なぜならば、BMSには水中カメラが設置されているため、カメラの映像を母船に送ることにより、BMSのオペレータは海底面を見ながら熱水噴出口のような掘削対象地点を探することができるからです。掘削目標地点周辺にBMSを着底させる



第2図 第2白嶺丸の甲板上で海底設置型掘削装置 (BMS) の回収作業をしている姿。

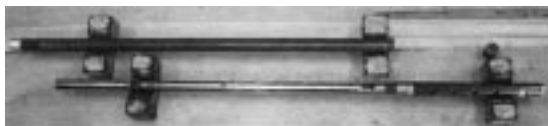
ことにより、標的地点での掘削ができます。

一方、ピストンコアラーやグラビティーコアラーを落下させる場合には掘削地点を特定することはできず、また海底掘削船による掘削の場合にもピンポイントを狙った海底掘削は不可能です。

初期の海底設置型掘削装置はバッテリーを装備し、その電力で駆動するもの (例えば1975年に日本の旧工業技術院地質調査所によって開発されたMD300PT) で、掘削できるコア長も1m程度でした。しかし日本の金属鉱業事業団 (MMAJ、現：石油天然ガス・金属鉱物資源機構) が所有するBMSでは、洋上の調査船 (第2白嶺丸) から深海まで光・動力複合ケーブルによるデータ交信と電力供給が可能です (第2図)。BMSは海底の状況を深海用水中カメラで観察しながら、掘削したい場所を選定し、海底直下のコアを採取することができる世界唯一の掘削装置であり、サンプルコア径44mmで掘削能力も20m、掘削最高水深6,000mに達します (松本・皿田, 1996)。

1997年以来、金属鉱業事業団および深海資源開発株式会社 (DORD) は、海洋技術開発株式会社とともに、世界で唯一の海底設置型掘削システムであるBMSによる海底掘削を行っています。

今回我々のアーキアンパーク計画が調査対象としている小笠原海域の水曜海山カルデラの海底熱水系 (後述) においても、DORDは深海底鉱物資源量評価の一環として、すでに平成11年度に5孔、平成12年度に5孔、合わせて10回の掘削 (コア長は12.06m～4.23m) を実施しています。



第3図 カスター(KUSTER)式温度計.

### 3. カスター式温度計による孔内計測

海底熱水系に孔を掘った場合、我々がまず知りたい情報は、地下の温度がどの程度高温であるかということです。掘削孔内の垂直方向の温度の変化は地質学的にも生物学的にも重要なパラメーターと言えます。そのためアーキアンパーク計画では、海底掘削時の各深度の温度測定を行うため、陸上の地熱地帯の井戸の温度測定に用いられるカスター(KUSTER)式温度計(第3図の上の写真)を使用しました。

この温度計はコイル状のバイメタルを用いて、掘削孔内の温度変化を記録針の回転運動に変えます(温度変化が大きいほど回転運動が激しい)。それとともにゼンマイ時計によって記録チャートを一定速度で移動させながら、記録針の動きをチャートに刻むことによって、温度の時間変化を記録します。チャートに刻まれた記録計の跡を拡大鏡で読みとることにより、温度測定が可能となります(第3図の下の写真)。

この温度計は構造の簡単な機械式であり、高温に弱い複雑な電子回路がないため、300℃にも達する高温熱水環境でも温度測定の実現の可能性が

高く、陸上の地熱地帯の井戸の温度測定で威力を発揮してきました。そのため、今回はカスター式温度計をBMS掘削に使用するインナーバレルの内部に固定することによって、掘削後の孔内温度の測定の実現をめざしました。

なお、カスター式温度計の測定温度下限は62℃であるため、掘削孔内温度がそれ以下である場合は測定が困難となります。そのため地下温度が62℃以下である地点においても最高温度の目安を得るため、40、50、60、70℃で変色するサーモテープを温度計センサー上部に張り付けました。

また、海底掘削後に潜水艇で掘削孔を訪問し、孔から出て来る熱水の温度を測定する作業も実施しました。

### 4. 水曜海山の地質概要

次に、アーキアンパーク計画の調査対象である水曜海山について簡単にご紹介します。

伊豆・小笠原弧には、<sup>そうふ</sup>婦岩と西ノ島の間七曜海山列と呼ばれる海底火山群(日曜海山から土曜海山までの7つの海底火山)が存在します。

このうち水曜海山は、七曜海山列のほぼ中央の北緯28度35分、東経140度40分に位置しています(浦辺, 1995; 口絵2)。伊豆・小笠原弧は典型的な島弧系であるため、黒鉍型鉍床(新第三紀中新世の島弧系の化石海底熱水系で、金、銀、銅、鉛、亜鉛に富む金属鉍床)が現在進行形で生成される場の有力候補地として着目されています(藤岡, 1983)。

水曜海山は小笠原舟状海盆底からの比高が3,000m以上ある島弧系の海底火山であり、山頂水深約860mの西峰と1,310mの東峰との2つの山体を連ねた円錐型海底火山です。西峰山頂部には北北東方向に開いた馬蹄型カルデラが存在しています。潜水艇による岩石採取の結果、この火山はデイサイト質から流紋岩質の組成を持つ溶岩が主体であると考えられています。カルデラ内部の北東端には大岩と呼ばれているデイサイト質溶岩の巨大な転石があり(以下では大岩と呼ぶことにします)、カルデラ内部での道標的役割を果たしています。カルデラ内部の大半は軽石や火山砂で覆われ、平坦な地形を形成しています(渡辺ほか, 1994)。

潜水艇による調査の結果、水曜海山カルデラ内部の水深1,380mから1,390mでは、「大岩」の南部に中央熱水帯が、南西部には西部熱水帯が、南東部には東部熱水帯が見られました。このうち最も顕著な熱水活動は、中央熱水帯で、高さ20cm以下の熱水噴出口(煙突のようなのでチムニーと呼ばれる)の存在で特徴づけられます。チムニーは厚さ1cm以下の硬石膏壁とその表面に付着した硫化物の細粒結晶からなる、きわめて脆いものであることが多いことが判明しました(渡辺, 1999)。

一般に活発な海底熱水系には、崩壊したチムニーの破片や硫化物を伴う火山礫などが堆積して顕著な地形的盛り上がり(硫化物マウンド)が伴われることが多いのですが、水曜海山カルデラ内部の熱水活動ではこうした硫化物マウンドが発達していないため、地形的に顕著な凸部が見られません。こうした平坦な海底地形はBMS掘削にとって有利な条件といえます。

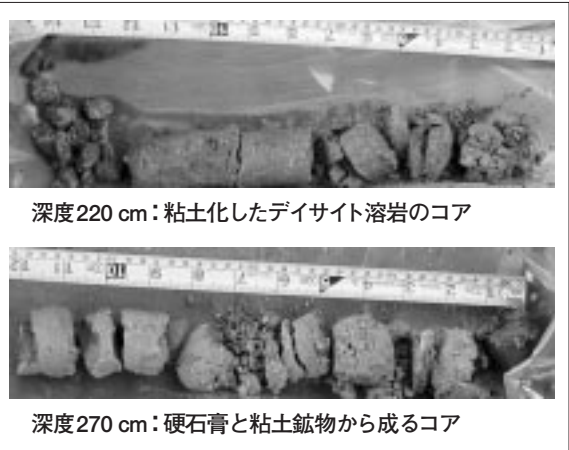
## 5. 水曜海山の掘削結果の概要

アーキアンパーク計画では平成13年度に7本、14年度に3本のBMS掘削に成功しました。口絵3にこれらのBMS掘削地点を示します。掘削は熱水系の東部熱水帯(APSK01など)や中央熱水帯(APSK07など)、西部熱水帯(APSK05など)で実施されました。以下の報告では、これらのBMS掘削のうち、APSK01、APSK05、APSK07の概要について、ご紹介します。

APSK01は「大岩」の約180m南東で掘削しました。ここでは高さ10~30cmほどの活動を停止したチムニーが数本立っており、周囲に高さ20cm程のシンカイヒバリガイのコロニーが数箇所で見られます。これらのコロニーの付近には2、3個の弱い熱水のゆらぎが見られ、このマウンドが活動の末期にあることを示しています。

掘削コアの上部160cmは硬石膏( $\text{CaSO}_4$ )によりセメントされたデイサイト質の凝灰岩からなり、その下の120cmは熱水変質の著しいデイサイト質の凝灰岩であり、粘土鉱物と硬石膏の細脈から構成されています。

APSK05は「大岩」の南西約50mにおいて、直径1m程の硫化物マウンドの近傍で掘削を行いました



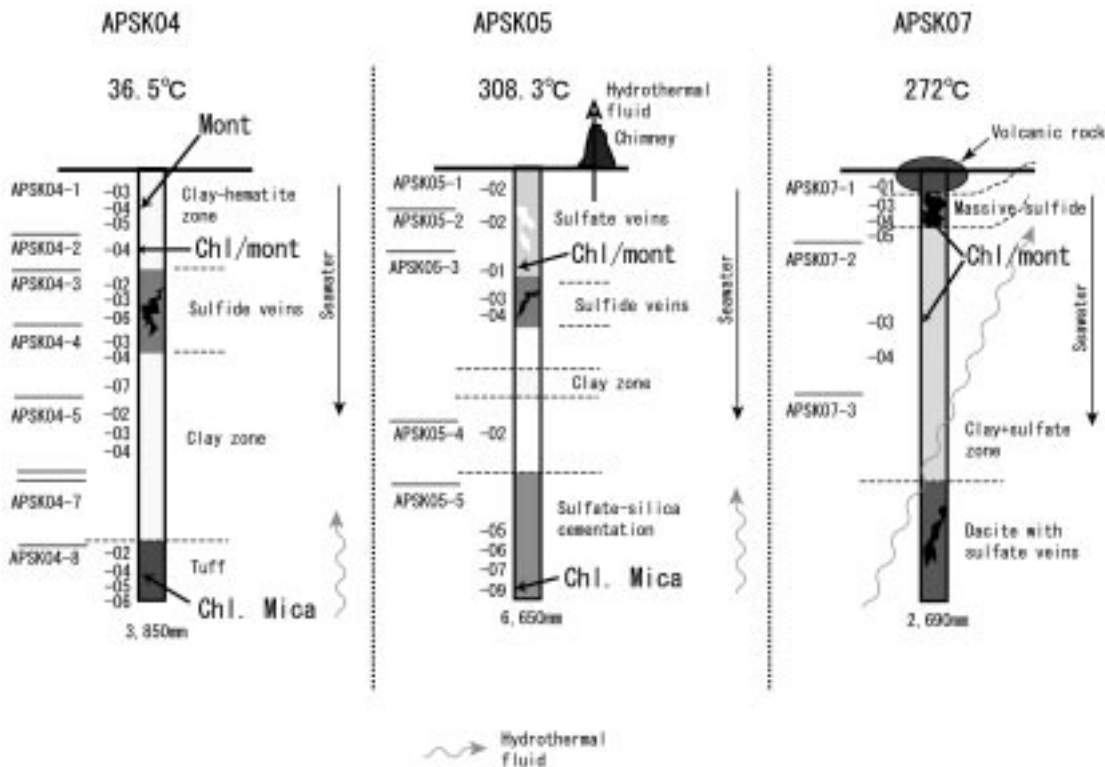
第4図 BMSコア写真。

た。このマウンドでは流量は少ないものの熱水がブラックスモーカーとなって噴出しています。ビット深度が499cmに達した段階で温度計測に移ろうとしたところ、数秒後に突然砂煙とともに熱水が噴出しました。カスター式温度計で10分間温度計測を行った結果、304℃の値が得られたことが判明しました。このコアも熱水変質の著しいデイサイト質の凝灰岩であり、粘土鉱物と硬石膏の細脈から構成されています。コアの写真を第4図に示します。

APSK07は「大岩」の南東約120mの地点の、直径5m程ある火山岩・硫化物マウンド地帯において、マウンドを構成する火山岩礫の直下を掘削しました。このマウンドの付近にはシンカイヒバリガイの群生が多数あり、それぞれ熱水がクリアスモーカーとなって噴出しているのが認められます。このマウンドはシンカイヒバリガイの群生が多く見られるということと、熱水がブラックスモーカーではなくクリアスモーカーとして噴出していることから、活動の最盛期をやや過ぎたマウンドのように思われます。掘削コアの最上部(火山岩礫直下)には黒鉱型鉱床の層状鉱石のような硫化物の沈殿物が認められます。その下は粘土化の著しいデイサイト質凝灰岩ですが、最深部では硬石膏の細脈が認められます。カスター式温度計による温度計測では、地下温度が156℃であることが確認されました。

## 6. 海底熱水系の熱水変質帯の特徴

光学顕微鏡やX線回折によるBMS岩石・堆積



第5図 BMSコアの鉱物組成の深度変化。

物コア試料の鉱物組成分析の結果、各コア試料には黄鉄鉱や閃亜鉛鉱、黄銅鉱などの硫化鉱物や、硬石膏や重晶石などの硫酸塩鉱物、それにモンモリロナイトや、クロライト/モンモリロナイト混合層鉱物、マイカ、クロライトなどの粘土鉱物が産することが確認されました。

こうしたモンモリロナイトや、クロライト/モンモリロナイト混合層鉱物、マイカ、クロライトなどの粘土鉱物は、新第三紀中新世の島弧系の化石海底熱水系である黒鉱型鉱床の熱水変質帯に普遍的に産する熱水鉱物です (Shirozu, 1978)。

黒鉱型鉱床の熱水変質帯に産する粘土鉱物は、鉱床探査指標として重要であり、金、銀、銅、鉛、亜鉛に富む硫化物鉱物はマイカやクロライトなどの粘土鉱物が産する変質帯中に存在する場合があります (Date et al., 1983)。また熱水変質帯の粘土鉱物組成は、鉱床を生成した熱水と岩石との相互作用を解明し、黒鉱型鉱床の生成メカニズムを解明するためにも有益な研究対象です。

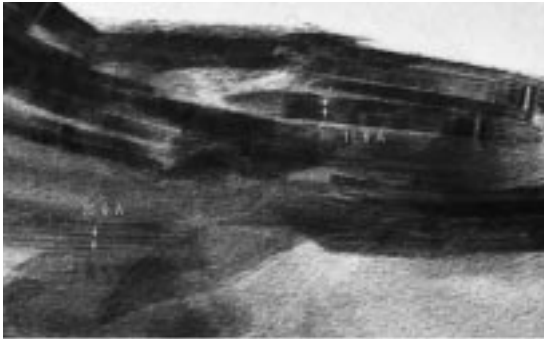
水曜海山海底熱水系の熱水変質帯は、現在進行

形の熱水と岩石の相互作用の生成物であるため、我々はBMS掘削やカスター式温度計による孔内温度測定により、熱水鉱物の生成温度を測定することができます。

実際、水曜海山の海底熱水系に産する熱水鉱物のうち、コアの深度の増加に沿って顕著な鉱物組成変化を示すものは粘土鉱物です。例えば APSK05では深度100cm付近にクロライト/モンモリロナイト混合層鉱物が、またコアの最深部(665cm)にはマイカとクロライトが産していました (第5図)。

こうした粘土鉱物組成の深度変化は、地下から上昇している熱水が海水と混合することにより急激に冷却するために熱水の温度が海底面に近づくほど低下していく姿を反映しているものと考えられます。

APSK05の最深部でのカスター式温度計による孔内温度測定では、約304℃の値が得られましたが、この温度は新第三紀中新世の黒鉱型鉱床のマイカの酸素同位体比から予測された温度である290℃ (Marumo and Hattori, 1999)に極めて近い



APSK05-5-09B

第6図 BMSコアから得られた粘土鉱物の電子顕微鏡写真.

値です.

しかし、これらの粘土鉱物の超薄片をマイクロトームで作成し、透過型電子顕微鏡で観察すると、様々な組成のマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物の存在を示唆する11.6オングストロームや25.9オングストロームの層間隔のイメージが確認され、粘土鉱物組成はより複雑であると考えられます(第6図).

## 7. 終わりに

海底掘削装置を用いることにより、海底熱水系の地下での岩石・熱水反応で生成した鉱物の産状を確認することができました。こうした鉱物はいずれも新第三紀中新世の島弧系の化石海底熱水系である黒鉱型鉱床の熱水変質帯に産するものです。

新第三紀中新世の黒鉱型鉱床がどのようにして

生成したかについて、我々は観察することは不可能ですが、水曜海山のような海底熱水系の地下を調べることにより、過去の地質現象を推定することが可能となります。

最後に、アーキアンパーク計画の第2白嶺丸航海にあたっては、第2白嶺丸の皆様には様々な協力をいただきました。この場を借りて感謝の意を示したいと思います。

## 参考文献

- Date, J., Watanabe, Y. and Saeki Y. (1983): Zonal alteration around the Fukazawa Kuroko Deposits, Akita Prefecture, Northern Japan. In the Kuroko and Related Volcanogenic Massive Sulfide Deposits (ed. H. Ohmoto and B. J. Skinner); Econ. Geol. Mon. 5, 365-386.
- 藤岡換太郎 (1983): 黒鉱鉱床はどこで形成されたか, 鉱山地質特別号, 第11号, 55-68.
- 松本勝時・皿田 滋 (1996): 深海用ボーリング・マシン・システムの開発, 資源と素材, 112, 1015-1020.
- Marumo, K. and Hattori, K. (1999): Seafloor hydrothermal clay alteration at Jade in the back-arc Okinawa Trough: Mineralogy, geochemistry and isotope characteristics. *Geochem. Cosmochim. Acta* 63, No.18, 2785-2804.
- Proceeding of the Ocean Drilling Program (1992): Initial Report, Volume 139, 1026p.
- Shirozu, H. (1978): Wall rock alteration of Kuroko deposits. In *Clays and clay minerals of Japan* (ed. T. Sudo and S. Shimoda), Chap.3, 127-145. Elsevier.
- 浦辺徹郎 (1995): 西太平洋の島弧・縁海系の海底熱水活動, 地学雑誌, 104 (3), 438-448.
- 渡辺一樹 (1999): 水曜海山の海底熱水鉱床, 資源地質学会年会講演要旨.
- 渡辺一樹・芝田 厚・梶村 徹 (1994): 水曜海山カルデラの熱水活動域のマッピング, JAMSTEC 深海研究, 第10号, 55-62.

MARUMO Katsumi, URABE Tetsuro, EBASHI Toshiomi and NAKASHIMA Miwako (2004): Drilling into the active seafloor hydrothermal system at Suiyu seamount.

<受付: 2003年10月30日>