



深海調査研究の現状と今後の展望

堀田 宏
Hiroshi Hotta

海洋科学技術センター 理事

The Present Status of Deep Sea Research and Its Perspective

1 はじめに

この頃は、私たちが住むこの地球を外からみることが出来るようになってきた。それは真っ暗な宇宙空間に、あたかも白いレースを纏って浮かぶように見える青く輝く美しい天体である。その青い色は、言わずと知れた薄い大気とその下に広がる海の色であり、白い色は雲であるから、水に満ちた「水球」と呼ぶのが相応しい天体である。しかし、水は光や電波を通さないという大層厄介な性質を持っているので、海水を通してこの海の下に黒ぐろと横たわっている「地球」を見ることはできない。

太陽の光は、地球のあらゆる活動の根源である。この光エネルギーによって陸では植物が育ち、海では植物プランクトンが繁殖し海の生態系の第一次生産者という重要な役割を果たしている。しかし、太陽光は海の中には精々200メートル程度しか差し込むことは出来ず、その下には暗黒で、冷たく、高圧の深海がひろがっている。では一体、海の深さはどれくらいあるのでしょうか？実際に測られた海の深さは、平均で約3,800メートルもあり、最も深い所はなんと約10,900メートルもあるのである。つまり、地球表面の約70%を占めている海の中で光が差し込むことができない暗黒で冷たく高圧の空間を深海と考えれば、海の95%は深海であり、この地球の本質は深海底の下に潜んでいるといえるのである。したがって、この深い海の底で起こっているいろいろな現象を調べその仕組みを知ることは、私たちが住む地球を正しく理解し、今後私たちがその自然と馴染んで地球上の生態系の一部として生き延びていくためには、欠くことのできない大切な仕事なのである。

2 地球観の変遷 —平面の地球から球体の地球へ—

1) 陸と海からみた地球

私たちが最も良く知っている地球は、長年人類が生きてきた陸である。陸の表面は、常に気温の変化を受けると同時に雨などの水の影響を受けて風化が進み、侵食の場となっている。

歴史的にも地球観とはまず「陸からみた地球」であり、それゆえに地球は平面的であって、その周りを太陽などの天体が動いていると考えた。しかし天体の動きを注意深く観察していた科学者達は、天が動くというよりはやはり地球が太陽の周りを回っていると考えるようになった。

やがて陸から海へ漕ぎだした人々は、帆船を駆って大海原で暴風などの過酷な自然の猛威を経験しながらもその先に進み、その先には今まで知られていなかった新しい大陸や島々などの陸地がたくさんあることを発見した。これらの新しい土地にはいろいろな珍しい産物や人々の風習があることを知った人たちは、それらの産物や風習を持ち帰って大きな利益をあげた。このような探検航海には莫大な資金が必要であったため、各国の王侯がそれを支援し、新しく発見した土地を植民地とするとともにそれらの産物を主とする交易を盛んにしていき、各国が競い合う15世紀から18世紀にかけての「大航海時代」となった。16世紀には、このような船を使って海をわたりあるき、一方向に進んで行くとやがて元の場所に戻ることができることも分かったことなどから、地球が相当に広く、深い海からなる球状の天体であるという「海からみた地球」の像が浮かび上がってきたのである。

19世紀にはいると、英国とアメリカ大陸との間に通信用の海底ケーブルを敷設して当時開発されたばかりの電信を利用しようという機運がたかまった。深海を測る一つの

きっかけはこのように極めて平和的なものであった。

2) 空と宇宙からみた地球

やがて20世紀となり航空機が発明され、初めて地面や海面などの地球の表面から離れて相当に高い所から広い範囲を一望のもとに見られるようになり、ますます「丸い地球」の姿は、はっきりしてきた。二度の世界大戦をへて科学技術は、長足の進歩をとげ、1957年の旧ソ連のスプートニクの地球周回の成功に引き続き、ガガーリンの宇宙飛行が実現し、人類の宇宙時代がやって来た。

宇宙空間からみた地球は、暗黒の闇の中でゆっくりと回転しながら刻々その模様を変えてゆく白い雲で覆われた青く輝く美しい天体である。

このように陸から、海から、空から、宇宙からみた地球を通して、私たちは、膨大な太陽エネルギーを受けて変動している地球の姿を少しずつ理解することができるようになってきたのである。

3) 深海底からみた地球

海には二つの顕著な境界面がある。一つは海面であり、他の一つは海底である。海面は、膨大な太陽光のエネルギーを受けて、それ自身が海流の形でその熱を赤道地帯から高緯度地帯まで広い範囲に分配しているほか、その上の大気と複雑なやり取りを行って地球の温暖な環境を作っている。また、太陽光は海面から200メートル位の深さまでは差し込んでいたが、この深さを過ぎると極端に減衰し、暗黒で低温の世界となる。それが深海である。つまり200メートルよりも深い海のもう一つの境界面、海底は太陽光の恩恵を受けない別世界なのである。

この太陽光の恩恵に浴さない別世界にはどんなものがあるのか、そこではどんなことが起こっているのかということが明らかにされるようになったのは、1970年代になってからのことでそう昔のことではない。1960年代終に提唱された「プレートテクトニクス」の仮説は、地球科学史上の最も大きな出来事の一つであるが、それを検証するために、従来の海洋研究では使われたことのない深海掘削船と潜水調査船という二つの全く新しい技術が導入された。それらを駆使して深海底に関する調査研究を進めたところ、地球内部の熱エネルギーがプレートを動かして過去2億年の中生代以来、地球の環境変動に重要な役割を果たしてきたこと、また、そのエネルギーが全く誰も予想もしていなかった未知の、深海特有のといつて良いような動物を中心とした生態系を養っていたことなど従来知られていなかった新しい地球の姿が浮かび上がってきたのである。つまり、地球は太陽エネルギーと地球自身がその内部に抱えている熱エネルギーによって動かされているという新しい地球観をもたらしたのである。

3 深海を調べる

一体どれくらいの深さから「深海」と言うのかということについては、さきに述べた。深海のもう一つの特徴は高圧であることである。これは海水の密度は、空気に較べて約1,000倍も大きいことによるもので、10メートル毎に約1気圧ずつ圧力が増加するためである。深さ200メートルでは20気圧、1,000メートルでは100気圧、そして10,000メートルでは1,000気圧の高圧の世界となるのである。

海洋学としての深海に関する調査に先鞭を付けたのは、有名なイギリスの海洋観測船「チャレンジャーVI」号の世界周航であった。その世界周航の目的は、海の水深はどれほどか、その海底はどんな地質からなっているのか、生物はどの深さまでいるのか、ということ調べようとするものであった。これは、まことに素朴な疑問ではあるが極めて重要な問題である。

「チャレンジャーVI」号は、1872年から1876年までの3年5か月をかけて大西洋、インド洋、南極海、太平洋、そして大西洋と約69,000マイルの航海を行い、その間に362地点で停船して、測深、採水、採泥、ドレッチなどを行った。

その結果、北西太平洋で測られた約8,190メートルが最も深い水深であった。ここが現在のマリアナ海溝であり、1950年にはやはりイギリスの新しい海洋観測船「チャレンジャーVIII」号がもっと深い場所があることを発見した。それがチャレンジャー海淵である。

生物は、当時は1,000メートル程度までしかいないだろうと考えられていたが、実際には5,000メートルを超える深海底からも採集され、その当時の常識をくつがえした。

海底をなす地質については、もちろん大部分は堆積物であった。それらは深さによって違っていて約5,000メートルを超えると「赤粘土」と名付けられたチョコレート色の非常に細かな泥で覆われていることがわかった。この赤粘土とともに太平洋の東部で黒褐色のピンポン玉からじゃがいも大の円礫が大量に採取された。これが有名な「マンガン団塊（ノジュール）」の発見である。

このころ、S. モールズによって発明された電信通信をイギリスとアメリカとの間に海底ケーブルを敷いて、使おうという気運が高まった。そのためには、海の深さを測ってケーブルの長さを見積もる必要があった。測深は、なるべく速く上げ下ろしできるように改良されたウインチを使って、重りを付けた長いロープによっておこなわれた。これによって、深海の測深も出来るようになり、1854年にはアメリカ海軍水路部のM. モーリが初めての近代的な海底地形図として「北大西洋の水深図」を発表した。

4 測深データが示す雄大な海底の景観

世界の各国は、19世紀の後半に国策として海軍に水路部を設けるようになり、わが国でも1871年に大日本帝国海軍水路部が発足した。測深の方法は、重りを付けたロープを下ろす測鉛法から第1次世界大戦で発明されたソーナーを応用した音響測深法に変わって行った。その後起こった第二次世界大戦では潜水艦の作戦のためにも各国は競って測深に力をいれた。

やがて1945年に日本の敗戦によって、戦いは終わった。アメリカを中心とする連合国は、大戦中に各国が軍の秘密資料として保管していた大量の測深データを集めて、海洋研究者に公表することになった。海洋研究者の中でも特に海洋地質学者は、早速このデータを使って等深線による海底地形図を描いてみたのである。そこには驚くべき雄大な景観が浮かび上がったのである。

中央大西洋北部に知られていた高まりは、孤立したものと考えられていたが実際にはずっと南にまで続く大山脈であることがわかり、「大西洋中央海嶺」と名付けられた。また東太平洋では、中米から南米の沖合いにもっと幅の広い長大な大山脈があることが分かり、「東太平洋海膨」と名付けられた。

一方、北西太平洋については日本の海軍水路部が広い範囲について丁寧な測深を行っていて、千島列島から日本列島、さらにマリアナ諸島、ヤップ島の沖合にかけて周囲よりも極端に深い「海溝」があることを明らかにした。また、カムチャツカ半島の南東沖から南南東方向に向けて多くの海山が直線状に並んでいる様子がわかった。水路部ではこれを「北西太平洋海嶺」と呼んでいたが、アメリカの海洋地質学者、R.デイツはこれらの海山に歴代の天皇の名前をつけて、「天皇海山列」と呼ぶことを提唱し、世界的にはこの名称が受け入れられることになった。

音響測深機はその後、急速に発達したソーナー技術とコンピュータ技術の恩恵を受けて海底の地形を従来の方法とは全く違って、面的に測定し、ほとんど実時間で等深線として表示するマルチナロウビーム測深機となった。この技術革新により測深の効率と品質は飛躍的に上がった。

これらの測深資料によって、現実には絶対に見ることの出来ない水を取り除いた地球の姿が明らかにされたのである。その大きな特徴は、約8万キロメートルにわたって大陸の間をくまなく巡っている地球上の最大の地形である大洋中央海嶺である。もう一つの特徴は、特に太平洋の周辺を取り巻くように存在する海溝である。この実に雄大な海底の地形がプレートテクトニクスの考えを引き出す重要

な役割を果たしたのである（図1）。

5 プレートテクトニクスの検証に活躍した潜水調査船

プレートテクトニクスの考えは良く知られているように、地球の表面は何枚かの固い板状の岩盤、つまりプレートによって覆われていて、それらが互いに動いていることによって、地震が起こったり火山が噴火したりする地殻変動が起こると説明するなど多くの地質学的現象を統一的に説明するものである。その最も基本的な原理は、長大な海底の高まりである大洋中央海嶺で地球内部から大量のマグマが上がって来て新しい海洋プレートが作られており、そのプレートは水平に移動しながらやがて冷えて重くなって、海溝の所で沈み込み始め地球の内部に再び戻って行くというものである。この考えによれば、大洋中央海嶺の頂上部の海底では火山活動が活発に起こっているはずであり、またそこには地球の大部分を構成するマントルが一部溶けてマグマとして地球内部から直接上がってきて固まった火山岩があるはずである。それを確かめるために登場したのが潜水調査船であった。

大洋中央海嶺の典型的な例としてまず大西洋中央海嶺北部が選ばれ、アメリカのウッズホール海洋研究所の「アルヴィン」とフランスのイフレメール（国立海洋開発庁）の「シアナ」の2隻の潜水調査船を使った中軸谷における潜航調査が1973-1974に行われた。これが有名な「FAMOUS-French-American Mid-Ocean Undersea Study」計画による潜航調査である。そこでは確かに堆積物を被っていない新鮮な火山岩が露出して、新しい海底火山活動が活発であることが確かめられた。また、そこで潜水船によって採られた岩石試料から大洋中央海嶺を構成する岩石、玄武岩の組成が明らかにされ、その後の研究の基準となった。また、この潜航調査の手順は、その後の潜水調査船をつかった海洋研究の基本的なモデルとなった。

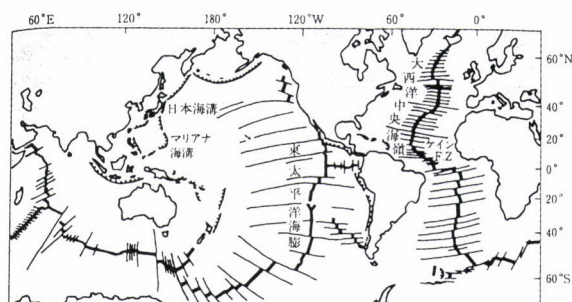


図1 世界の海底地形の概要

6 日本の潜水調査船「しんかい2000」および「しんかい6500」

太平洋の大洋中央海嶺である東太平洋海膨で生成された太平洋プレートは、約1万キロメートルの距離を移動したのち日本海溝などの海溝で地球の内部へ沈みこんでいる。私たちは、この海溝域でのプレートの沈み込みにともなう多くの巨大地震によって昔から繰り返し大きな被害を被っている。

これらのことを踏まえて、わが国の海洋研究や海洋開発を推進する課題をまとめた国の審議会では、6,000メートル級の潜水調査船の研究開発が必要であると提案した。これを受けて海洋科学技術センターでは、その建造にかかわる技術の可能性や、それを使って行うべき研究の課題などについて調査・検討をおこなった。その結果、一挙に6,000メートル級潜水調査船を建造し、運用することは極めて困難であり、一旦その中間段階として2,000メートルまで潜ることのできる潜水調査船を建造し、研究を進めることが望ましいとの結論に達した。

この水深2,000メートルまで潜ることのできる潜水調査船は「しんかい2000」と命名され、その母船「なつしま」とともに1981年に建造された。「しんかい2000」は、おおよそ全長9.3メートル、幅3メートル、高さ2.9メートルの大きさで、重量は約24トンである。二人のパイロットと一人の研究者が乗り込む耐圧殻は約3センチメートルの厚さの超高張力鋼で作られており、内径は2.2メートルの真円球である(図2)。この潜水調査船を使つての潜航調査は、1983年から始められた。最初は、日本海に面した富山湾で水産生物の調査が行われ、実際に生きた生物を海底の現場で観察した生物の研究者達を感激させた。その後、海底地震の研究の関連で相模湾、駿河湾や海底の火山活動にともなう熱水噴出現象の関連で沖縄トラフや伊豆・小笠原海嶺などに潜航調査の海域をどんどん拡げていった。その間に、相模湾においては大型の二枚貝であるシロウリガイ(図3)や非常に変わった管状の生物であるチューブワームの群集

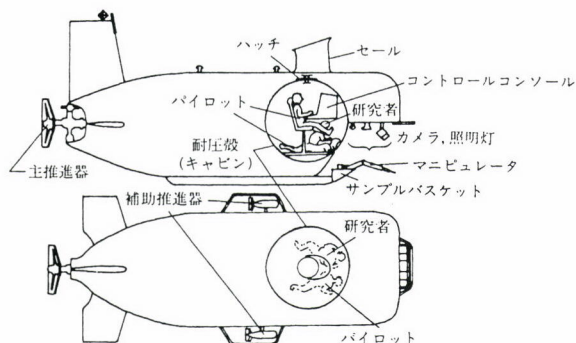


図2 潜水調査船「しんかい2000」の概略図

(図4)が発見されたし、沖縄トラフでは低温から高温の熱水噴出現象が発見されるなど数々の大きな発見が続いた。

これらの潜航調査の間に得られた多くの科学的および運用上の知識と、別に進められた技術開発の成果を一緒にして、いよいよ最終目的である6,000メートル級潜水調査船の建造に取り掛かることになった。ここで「6,000メートル級」とは具体的には何メートルを目指すのかということが議論された。常識的には6,000メートルまで潜ることができれば、世界中の海の98パーセントの海域で潜航調査を行うことができるので、ほぼ暗黙のうちに6,000メートルと考えられていた。しかし、先にも述べたようにわが国の深海研究にとっては、この残りの2パーセントこそが大切なのである。その2パーセントとは、特別に深い海、つまり「海溝」であるからであり、日本海溝の例で分かるように、そこでは大きな被害を与える地震が繰り返し起こっているからである。とりわけ1933年(昭和8年)の三陸地震は、それによる津波で3,000人をこす死者を出すような大きな被害を与えたことで知られている。また、この地震は普通海溝型巨大地震と違って、海溝の海側斜面で起こった極めて珍しい地震であるので、この震源域の調査が重要であると考



図3 相模湾で発見されたシロウリガイの群集(水深約1,100m)



図4 相模湾で発見されたチューブワームの群集。東太平洋海膨でのものと比べるとずっと小形で、直径1~2cm、長さ50~60cm(水深約1,100m)

えた。その地震と関係が深いと思われる断層状の地形は、水深6,500から6,200メートルのところにあって、潜航深度は6,500メートルとすることがきめられた。

この潜水調査船は「しんかい6500」と命名され、その母船「よこすか」とともに1990年に海洋科学技術センターに引き渡された。その建造にさいして、最も工夫を凝らされたことは、潜航・浮上の時間をいかにして短く出来るかということであった。

いろいろな議論の結果、上昇・下降の際に最も抵抗の少ない潜水船の形状を風洞実験によって選び、「しんかい2000」の約2.5倍の速さで沈降・浮上できるようにした。これによって6,500メートルの海底で約3時間の調査ができるようにしたのである。潜水船は、全長9.5メートル、高さ3.2メートル、幅2.7メートルと十分に小型に纏められ(図5)、重量も耐圧殻をチタン合金とすることによって約26トンに収められた。

7 深海底からみた地球

中央大洋海嶺の海底火山活動の調査は、アメリカとフランスとの共同研究のもとで大西洋から東太平洋に場所を移して続けられた。そして1977年に東太平洋海膨から東に続くガラパゴス断層帯の水深約2,500メートルの所で全く予想もしていなかった驚くべき生物群集を発見したのである。そこでは、十数度の温かな水が湧きだしており、その中に生きている多数の二枚貝や目のないカニのほか、いろいろな奇妙な生物が群集をなしていた。

更に、その二年後の1979年には北緯21度付近の東太平洋

海膨の深海底で、まるで真っ黒い煙りを吐いているように見える高さ数メートルの煙突状の自然の構造物が発見された。黒い煙状のものは、300度を超える熱水であることがその後確かめられた。この煙突状の構造物は、その形状から「チムニー」と呼ばれ、黒い熱水を噴き出すチムニーは特に「ブラックスモーカー」と呼ばれている(図6)。これらのチムニーは、一般にマウンドと呼ばれる高まりの上に立っているが、潜水船がこれらの場所から採ってきた地質試料を調べたところ、銅、亜鉛、鉛などの重金属の硫化物を多く含む、いわゆる「海底熱水鉱床」であることが解り、世の中の注目を一身に集めることとなった。

また、これらの熱水噴出域にも先に述べたような特異な生物群集が発見された。その中には、長さが2~3メートルほどの筒状の殻のなかで生きている口も消化管もないのっぽうの動物がいた。これが相模湾などでも見つかったチュウブワームである。これらの生物はその後の研究で、体内に化学合成細菌を共生させて海底から噴き出してくる熱水に含まれている硫化水素の持っている化学エネルギーを利用して有機物を作る極めて特異な「化学合成生物」であることが解った。この潜水船による特異な生物群集の発見は20世紀の自然科学史上の第一級の出来事といえよう。

その後、熱水も温水も出ていない海底にも似た生物群集がいることがフロリダ半島沖のメキシコ湾で発見された。そこでは海底に活断層があり、それに沿ってメタンを含む冷水が湧きだしていることが解った。この発見によって、熱水や温水の湧出が見られない相模湾の海底で発見された特異な生物群集の意味も理解できるようになった。更に、1991年には日本海溝の陸側斜面での「しんかい6500」の潜航で同様の活断層に依存するシロウリガイの群集が発見された。これはいまのところ世界で最も深い生物群集である。

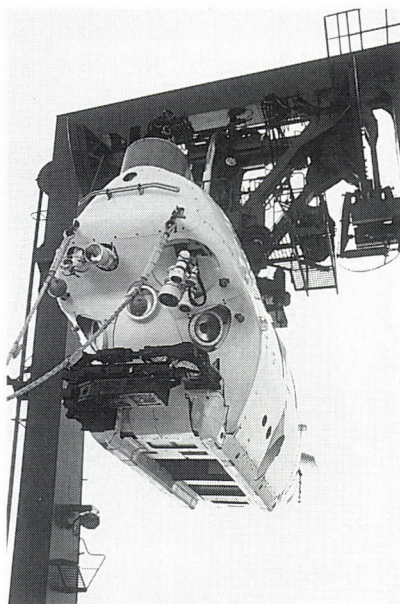


図5 潜水調査船「しんかい6500」

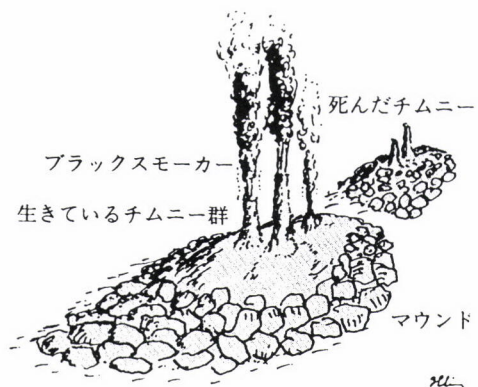


図6 熱水噴出域の概念図 約250~300℃をこえる熱水は黒っぽい色をしているので「ブラックスモーカー」とよばれる。約200℃あるいはそれより低温の熱水は灰色から白色、または透明に近いものが多く、これらは「ホワイトスモーカー」とよばれる。

従来は、海底での活断層の位置を正確に示すことは極めて難しいことであったが、このようなことから特異な生物群集は活断層の位置を示す最も良い指標であると考えられるようになった。

深海に特有なといって良いような特異な生物群集は、プレート生成域や衝突域といった地球上で最も地殻変動の活発な所に見つかっているのである。

潜水調査船によるこのような成果の他に、プレートテクトニクスの考えを直接証明した方法に深海掘削がある。これは、海洋域における石油掘削技術を発展させたもので、数千メートルの深海底を堆積層の下まで掘り抜いて、その最下部に残されている微化石から年代とその当時の水温などを推定しようという計画であった。この計画は、初めアメリカの国内研究計画として始められたが、後にわが国もそのメンバーの一員となった国際共同研究として、見事に約2億年にわたる世界的なプレート運動の軌跡と地球環境のあらましを復元して見せたのである。

おわりに

地球表面の約7割を占める海、その海水に覆われた深海底に関する調査・研究から地球の実態がだんだんとみえてきた。約2億年前には、大きな一つの原始大陸パンゲアとそれを取り巻く原始大洋パンサラッサとから成っていた地球は、やがて地球内部の活動が活発になって、大陸のいたる所で火山活動が起こり、急にばらばらに分離され始めた。この大量の物質と熱の供給を受けて、地球の環境は一挙に温暖化するとともにプレートの運動が始まり、海水の循環運動も広がり始めた。この出来事によって地球に降り注ぐ太陽からの熱エネルギーは、はるか高緯度地帯まで万遍なく分配されるようになり、やがて200万年前頃から急激に寒冷化に向かい、現在のような温暖な気候となっていった。

このような海洋の大循環の変化ばかりではなく、プレートの運動はやがて大陸同士の衝突をももたらし、特にユーラシア大陸とインド大陸の衝突によって高く聳えたヒマラ

ヤ山脈は、大気の循環にも影響を及ぼすこととなり、アジアモンスーンが始まったことも明らかにされた。これらの地球環境の変遷の歴史は、主として深海底の堆積層の中に蓄積されてきた微化石を手掛りに解き明かされてきた。

また、このような地球上の大変化を引き起こしたプレート運動の原動力については、各地で起こっている地震の波の観測から、2,900キロメートルの深さに及ぶマントルの中での大規模な一種の対流といって良いような上昇する温かいプルームと下降する冷たいプルームがあることが解り、それが原動力ではないかと考えられるようになった。これがプルームテクトニクスと呼ばれている新しい考えである。この研究は、現在は地球表面の僅か3割を占めるにすぎない陸域での観測で行なわれているので、まだまだ不明瞭な点が多い。

今後、深海底に残されているより詳しい地球環境の変遷史を明らかにするためにも、また、地球環境に大変化をもたらした原動力であるマントルの様子をもっと明らかにするために深海底で地震波を観測するためにも、従来の掘削法を超えてより深く、より難しい地質構造の海底でも掘削することができる新しい装置を備えた深海掘削船が強く要望されており、その開発が試みられている。この計画は、OD21 (Ocean Drilling 21……21世紀の海底掘削計画) と呼ばれており、実現の暁には現在のODPと合わせて大きな国際協力研究になるものと期待されている。もし、この計画が実現するならばマントルまで掘り抜いて科学者の年来の念願であるマントルの岩石を手にいれてその正体を明らかにすることもできるであろう。そうすれば、マントルのダイナミクスについてのシミュレーションもより現実的なものとなり、将来の地球の変化についてもより正確な予測ができるに違いない。

最後に、もし本稿の内容についてもっと詳しく知りたい方がおられれば拙著「深海底からみた地球……しんかい6500がさぐる世界」、1991年、有隣堂が参考になると思います。

(1998年1月6日受付)