JAMSTEC

平成15年度海洋科学技術センター研究報告会

2004

海洋の科学と技術、
次世代への展望



平成16年3月25日(木)
13:00～17:25
経団連会館14階経団連ホール

海洋科学技術センター

研究報告会

JAMSTEC 2004 *Contents*

「海なる地球と科学」.....1

理事　末廣 潔

「海洋科学技術センターの技術研究の現状と近未来への展望」.....13

海洋技術研究部　青木 太郎

特別講演1「失敗学のすすめ」.....20

講師：畑村 洋太郎　工学院大学教授

特別講演2「文明の海洋史観」.....21

講師：川勝 平太　国際日本文化研究センター教授

海洋科学技術センターにおけるこれまでの主要な成果

・深海研究部.....22

・海洋技術研究部.....26

・海洋観測研究部.....33

・海洋生態・環境研究部.....42

・地球フロンティア研究システム.....46

・地球観測フロンティア研究システム.....50

・極限環境生物フロンティア研究システム.....54

・固体地球統合フロンティア研究システム.....58

・地球シミュレータセンター.....66

・深海地球ドリリング計画推進室.....71

主要施設・設備.....76

海洋科学技術センターの機能と組織.....77

賛助会員名簿.....79

海洋の科学と技術、
次世代への展望



海洋科学技術センター会長
武井　俊文



海洋科学技術センター理事長
平野　拓也

1971年 10月、海洋科学技術の総合的な試験研究を行うことを目的として、科学技術庁(当時)の認可法人として海洋科学技術センターが設立されました。

当センターは、1970年代の模索と基盤づくりの時代から始まり、1980年代は深海研究・海洋研究の幕開け、1990年代はグローバルな海洋研究の展開、21世紀に入ると「地球と生命の探求」をテーマとして邁進して参りました。この度、当センターは平成16年4月1日をもって解散され、独立行政法人海洋研究開発機構として生まれ変わることとなりました。

本年度の報告会では、「海洋の科学と技術、次世代への展望」をテーマとして、これまで当センターが実施してきた活動について、創設以来32年間の歩みと成果を振りかえるとともに、新法人へ向けての展望について紹介します。

また、特別講演として、失敗を積極的に捉え次の創造へつなげる新しい失敗文化を築いた工学院大学の畑村洋太郎教授に講演を頂きます。さらに、歴史の大きな枠組みについて常識をくつがえす斬新な「文明の海洋史観」を提唱した国際日本文化研究センターの川勝平太教授に講演を頂きます。

海洋科学技術センターは皆様とともに、海洋と地球の探究を通じて人類の未来を切り拓くべく努力して参りましたが、独立行政法人海洋研究開発機構となりましても、皆様の一層のご支援、ご指導を賜りますようお願い申しあげます。

海なる地球と科学

海洋科学技術センター　理事
末廣　潔

1．根源的な問いと喫緊の問題

人類にまで生命を進化させた地球は、宇宙との関わりの中で進化してきた。地球を特徴づけるのは海であり、生命は海から陸にあがった。その海はどこから来たのだろうか（図1）？生命は、いかに生じたのだろうか？地球外からの助けはいらなかったのだろうか？地球と生命の進化はどのように進んだのだろうか？それは偶然なのか、必然なのか？われわれの行く末はどうなるのか？このような惑星地球の海と生命の謎が解き明かされるときは来るのだろうか？



図1　ハッブル望遠鏡による地球の水と似た水を持った彗星

現在の人類は、その文明の進歩にもかかわらず、あるいは進歩が自然に関わるほどにもなって、自然の脅威を感じている（図2）。地球を構成する大気・海洋、地球内部、そして、微生物が人類の脅威にもなる。とくに、地球温暖化への人類の文明活動の影響（化石燃料からのCO_2放出）の評価は、世界各国の重要アジェンダになっている。しかも、地球はその歴史においてもっと生物に過酷な環境を提供したことが幾度となくあるのだ。

私たち人類は、ほとんど偶然に地球46億年の歴史の末にいるように見える。地球が人類の将来を約束してくれているとは思えない。安心と安全はぜんぜん簡単ではないのだ。そのような認識をもつとき、私たちは空の落下を心配した杞人の憂いを科学にしなくてはならない。そしてJAMSTECは何ができるのだろうか？私は、目前の問題解決に対応することと同時に、究極の解決をめざして、根源的問いに答えるための長期戦略を併せ持つことができると思う。

海洋科学技術センター（JAMSTEC）はその長期計画書（1998年）で、地球とは、それを構成するいろいろな要素が複雑に相互作用しあう複雑な複合体（地球システム）であるとの認識に立って地球と生命をより良く知ることをめざすと宣言した。その海洋科学技術センターは、2004年3月をもって消滅し、42年の歴史を持つ東京大学海洋研究所の研究船運航組織と併せて、あらたに独立行政法人海洋研究開発機構に生まれ変わるが、その宣言

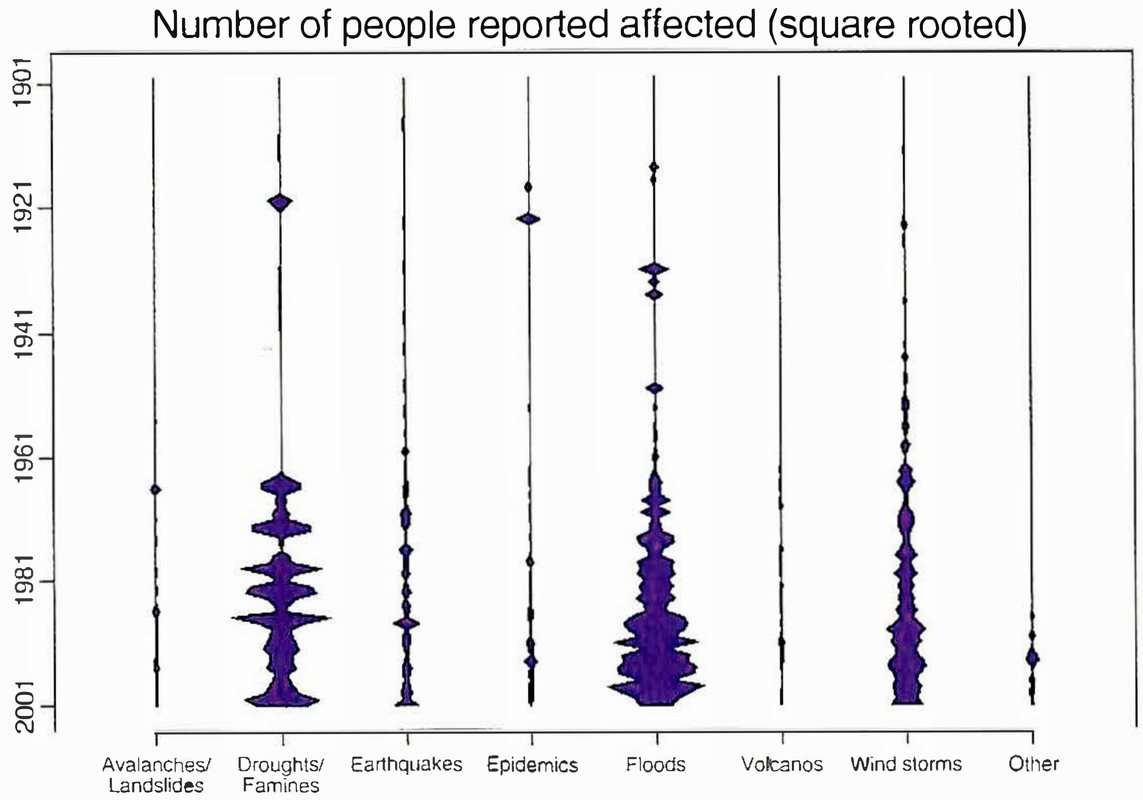


図2　20世紀の人類の脅威(左から地滑り、飢饉、地震、伝染病、洪水、火山、風雨、その他)。人口増加に影響されている。

は中期目標、中期計画のなかに生き続ける。以下、JAMSTEC33年間の活動の中で科学への貢献について私なりに振り返り、さらに貢献していくための近未来への想いを述べることにする。

2. 海なる地球と生命の科学の歴史

JAMSTECにおける1971年創立以来の科学的成果を、科学とはどのように展開するものかも含めて、できるだけ広い角度から見てみたい。そのために、いささかオーバーかもしれないが19世紀にさかのぼって、海洋と生命にスポットをあてて主観的ではあるが発展を追ってみる。

2.1. JAMSTEC以前の海と生命像

1831年ビーグル号はダーウィンを乗せて「種の起源」につながる航海に乗り出した。19世紀半ばまでに、地球の公転、自転が測定された。また、地球の大気運動を決める重大な要素のコリオリの力に気がついた。想像上の生物などを想起させ、畏怖の念を抱かせて来た海洋も、深海底は無生物と信じられており、ベルヌの想像によっても同様であった(「海底2万里」)。が、ダーウィンは、海底に「生きた化石」の存在を示唆していた。地球の年齢は、ケルヴィンにより冷却説にしたがって一般的な感覚からは長いが1億年と推定されていた(1863)。逆に生物進化を知るダーウィンや地質学者には短すぎると映った。

1872年英国のチャレンジャー号が、世界一周航海に出た。おびただしい数の新しい生物、海底の山脈、マンガンノジュールが発見され、海と生命像を変えた。海洋学の創始である。1864年には実際に海底から生きた化石のウミユリが採取されていたが、チャレンジャー号もリスボン沖で採取し、ダーウィンの予想を裏付けた。モナコのアルベール公は、中層の生物の新種発見に興味を持ち、米国ではスクリプス家、ロックフェラー財団が

それぞれ、スクリプス海洋研究所、ウッズホール海洋研究所を創設した。

20世紀に入り、地球の年齢は、放射性元素の崩壊熱の存在を考慮することにより一気に伸びた。内部構造が地殻、マントル、核に分かれることも地震学的に検出された。生物進化の重要な鍵を与えたバージェス頁岩化石が1909年発見された。1912年、物性研究に欠かせないX線解析手法をブラッグが確立。ミランコビッチは、地球軌道の変動がおよぼす日射量変化による長期的気候変動を予測し(1914)、ウェーゲナーは、大陸と海洋の起源を著した(1915)(図3-1)。

海面下世界の利用は、海底通信ケーブルが1858年に大西洋を横断したことが始まりであろう。欠かせないケーブルルート調査に音響測深が使われ始めたのは1920年である。しかし、深海底のほとんどは、高圧暗黒のベールに包まれていた。

質量分析計が動き出したのは1918年頃。抗生物質ペニシリンが発見されたのは1928年。1931年には電子顕微鏡がつくられる。この頃までには、地球の磁場の逆転現象が松山によって示され、地球の地質年代尺度が示され(ホームズ)、炭素14同位体法が1946年につくられた(リビー)。1938年には、白亜紀に姿を消したはずのシーラカンスが見つかった。1943年には、バクテリアの突然変異現象発見。

第2次世界大戦は科学と技術の進歩を促した。50年代には海底のあらたな特徴が続々見つかり始めた。チャレンジャー海淵、大西洋海嶺の中央火山列などである。有名なミラーとユーレイの初期地球を模したアミノ酸生成実験が1953年。同年、ワトソン、クリックは構造が複製プロセスを可能にするというDNAの二重らせん構造を提唱した(図3-2)。60年にはメイマンがレーザーを発明。応用範囲の広い技術のブレークスルーである。

建造援助をしたイタリアの都市名をつけたTriesteが、米国海軍の所有となり、1960年ピカールとウォルシュが世界最深のチャレンジャー海淵潜航し海底に生物を目視。しかし、この頃から深海における平和的科学目的利用はサポートを得るのがむつかしくなった。1961年ディーツが海底探査のデータをもとに海洋底拡大説を提唱。メキシコ湾では、大水

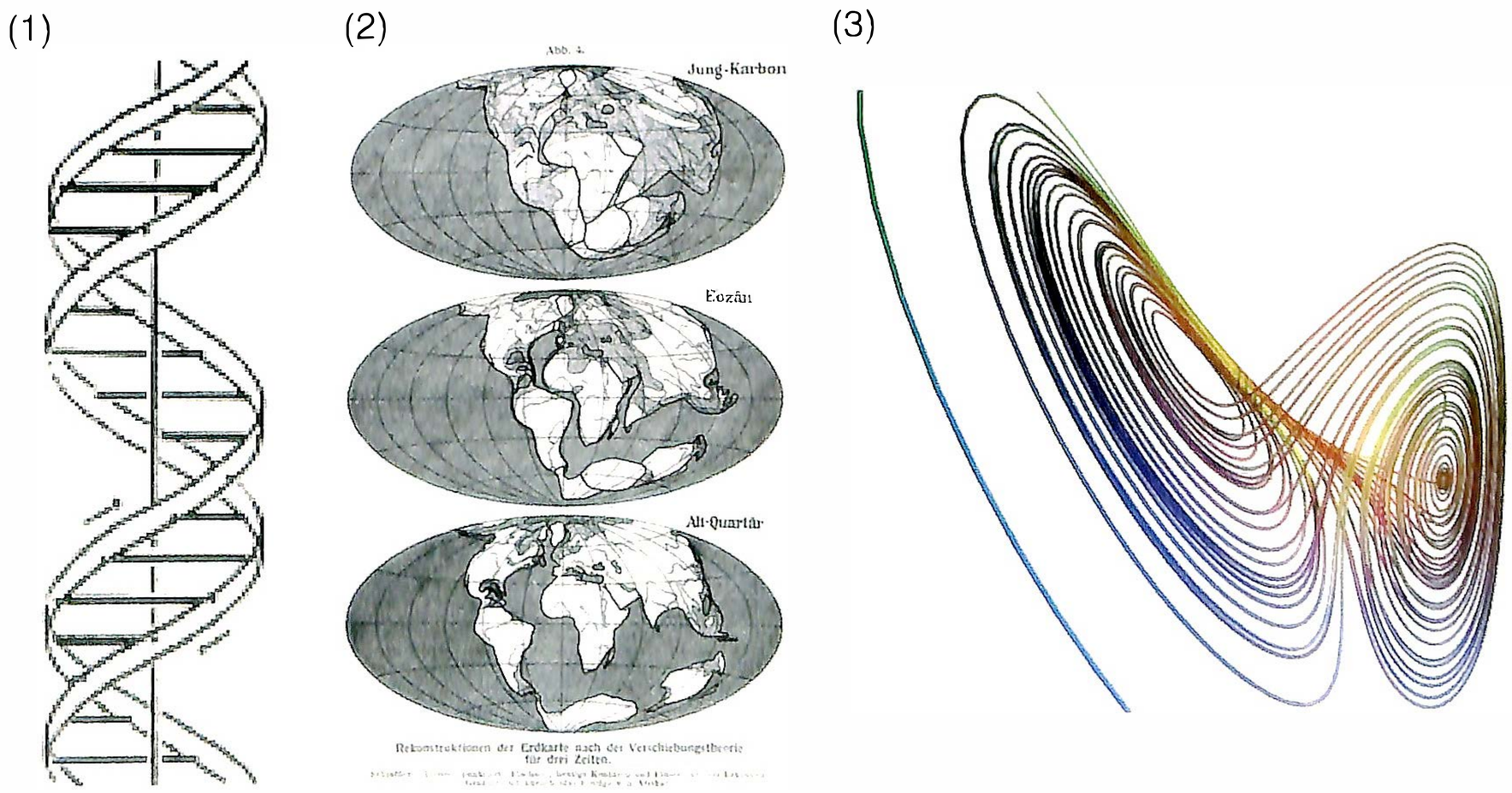


図3 (1)DNAの構造(原論文);(2)大陸移動説(原著);(3)ローレンツ"バタフライ"(蝶の羽のどちらの状態になるかはきわめて小さな刺激で変わる)

深での掘削成功。1962年「沈黙の春」がベストセラーになり、生態環境破壊が問題になる。1963年はローレンツがバタフライ効果（ブラジルで蝶が羽ばたくとテキサスに竜巻が起きるか）を提唱。きわめて小さな初期値の違いが未来予測を変えることを示した（図3-3）。同年、地磁気逆転の海底磁化記録が海嶺の両側に線対称に並ぶ現象が海洋底拡大説によって説明された。プレートテクトニクスの夜明けであり、ウェーゲナーの復権でもある。米国海軍は、1964年に深海を自由に動けて、原子力潜水艦員救助も可能とする有人潜水艇Alvinを開発、66年にはスペイン沖に沈んだ水爆を発見。東西冷戦の中、深海の技術は深海を軍事的に重要視した米国海軍によって圧倒的に進歩したようだが、一般、学界には秘密であった。

1967年、真鍋とウェザルドが人類による温室効果への影響を警告。1969年アームストロング船長とオルドリン飛行士、月に降り立つ。地球の宇宙的視点を得る。宇宙の中の太陽系、その中の地球、さらに地球を大気、海洋、地圏、生命圏が構成し、それらの相互作用の中で、進化を遂げてきたという漠とした図式はできつつあった。しかし、基本的にはそれぞれの部分をそれぞれの学問分野で解明することに忙しかったと言えよう。

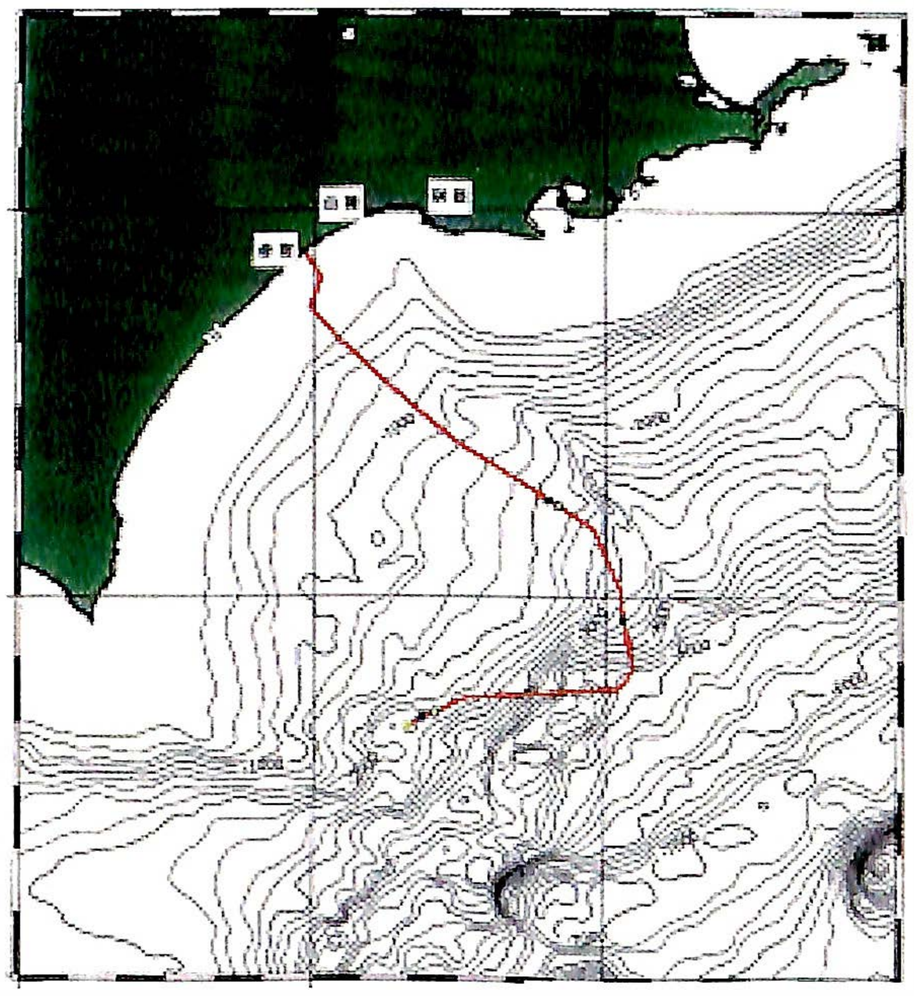
2.2. JAMSTECの歩みと海と生命像

1970年代：この間、JAMSTECは技術力を蓄えつつ、海を相手に、そのエネルギー利用、大陸棚開発、深海探査の素地を作っていたように見える。73年のオイルショックは、市民にエネルギー問題を実感させた。科学的には、76年バイキングが火星に着陸し氷を発見、77年DNA配列の解読。Alvinが太平洋ガラパゴス諸島付近に熱水噴出孔をついに見つけたとき、奇妙な新種生物のみならず（ハオリムシ類やシロウリガイ類）、食物連鎖の起点が光合成ではなく細菌による化学合成であるという生態系の発見に驚いた。79年にはカリフォルニア湾で初のブラックスモーカーを発見。海洋地殻誕生の場に生命、資源に関するまさにあたらしい発見がもたらされた。

1980年代：JAMSTECは、ディープトウ、有人・無人潜水艇を続々開発し、世界に躍り出た。海底の生態系、熱水孔の発見をプレートの海嶺境界にとどまらず、島弧・海溝系にも拡げた（図4-1）。日本周辺海域の地震活動の調査にものりだし、海底に残された傷跡を記録した。調査は、母船とともに東太平洋にも足を伸ばし始めた。ハワイでは、80年代に深層水利用に気がついて実行していたが、JAMSTECは、海洋深層水有効利用施設を室戸沖でスタートさせ、今では、全国的な利用の発展を見ており、その波及効果には眼を見張る。

隕石衝突による恐竜絶滅説が提出されたのは、1980年であった。同年、生命の起源は熱水噴出孔であるとの考えも出された。進化の実際の意外な手がかりが証拠立てられてきた。1982年、国連海洋法が提出され、深海の資源は世界のものとする。フロリダ沖の冷湧水のハオリムシ生態系発見と相模湾のシロウリガイコロニー発見は同じ1984年であった。世界の競争に追いついてきたとも言える。いずれもメタンガス（直接的には硫黄細菌による硫化物の酸化）がエネルギー源の化学合成生態系であり、熱水噴出孔のまわりに見られる生態系同様、太陽エネルギーが基本となる生物とは別な地球生物圏の主人公がその姿を現し始めた。

(1)



(2)



(3)

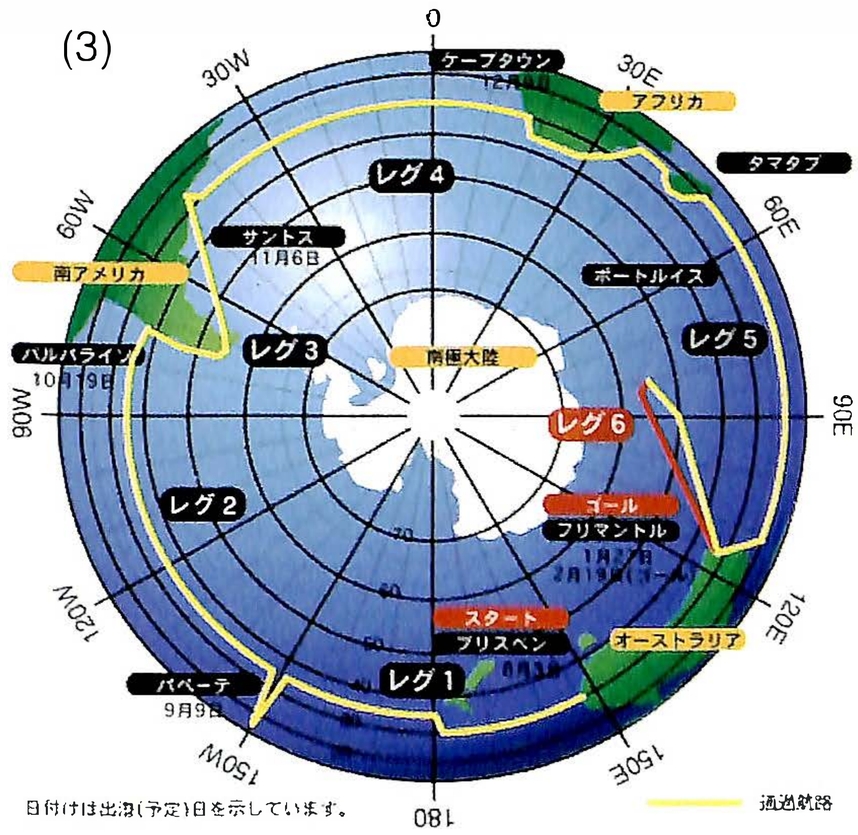


図4　(1)十勝釧路沖ケーブルシステム；(2)熱水噴出孔；(3)BEAGLE2003航路

1985年にはオゾンホールが見つかった。JAMSTECは黒潮、エルニーニョ観測に乗り出す。深海底では北フィジー海盆、海形海山、沖縄トラフで熱水活動を発見した。フリートには、ドルフィン3K、よこすか(1988)が加わり、さらに1989年しんかい6500が着水し、技術的に世界のトップに躍り出た。80年代を過ぎてJAMSTECは、世界がうらやむ海洋研究手段を手にしたと言える。とくに平和目的であり科学のためであることは、特筆すべきだろう。一方世界もベルリンの壁が壊され、海洋における東西融和も進んだ。

1990年代：JAMSTECは野心的だがフォーカスを持った深海微生物研究(ディープスタープロジェクト)を開始した。また、海洋研究は、観測困難な高緯度海域に足を伸ばし始めた。1992年には北極海に氷海自動観測ステーションを設置した。鳥島沖の海底では、鯨骨に生物群集を発見。世界では89年にサンタカタリナ海盆で、鯨の死骸が分解され発生するメタンや硫化物をエネルギー源にする化学合成生態系が発見されている。これは、深海の化学合成生態系が分散するときの中継点になるというステッピングストーン説を生んだ。1993年には、初島沖に海底長期観測ステーションを設置し、世界に先駆けた光

ファイバーを用いた海底環境長期計測を開始した。同年には、かいこうが試験潜航を開始し、世界を瞠目させた。また、しんかい6500が大西洋に進出し、中央海嶺のケーン破砕帯で有人の最深部探査記録を打ち立てた。95年には、かいこうがチャレンジャー海淵の最深部にTrieste以来の潜航し、サンプリング記録を残した。この頃、米国は軍事用だったハイドロホンの平和利用で火山活動のキャッチを公表し始めた。96年にはみらい、かいれいが進水した。日本周辺は世界有数の地震活動帯であり、海域に地震観測の網を広げるのは、研究者の念願であるが、95年の阪神淡路大震災をきっかけに、97年には室戸沖海底総合観測システムが観測を開始、99年には2号機として、釧路十勝沖システムが稼働し始め、データはリアルタイムで全国ネットにのせられている(図4-2)。JAMSTECにフロンティア研究システムが、続々と設置され、インド洋のダイポールモード(年スケールの大気海洋カップリングによる気候現象)発見、有用な酵素を持つ微生物の全塩基配列決定、などの成果を得た。従来の研究部の研究者に加えて、あたらしく任期制の研究者群が加わったことは、大きな刺激となった。

2000年以降:2000年には、トライトンブイデータとNOAAのTAOブイデータを結合したエルニーニョ監視体制が出来上がった。フィリピン海プレートの沈み込みに伴って四国沖には海山が入り込み、大地震発生の規制を行っている可能性が示された。また、コンピュータ上でダイポールモードが再現された。地球シミュレータが2002年に完成し、格段の精度を持った地球のプロセス再現実験が始まった。米国は、スプートニクならぬコンピュートニクショックと評した。熱水孔、化学合成生物群集がインド洋にも見つかった。もはやその存在は驚きではないが、見つけたものが何を物語るかが科学である。2003年には、みらいが、南緯40度線に沿った世界一周海洋観測航海を始め海洋構造とその変動の画期的データを収集した(BEAGLE2003プロジェクト;図4-3)。JAMSTECにとって始まって以来の大プロジェクトはOD21(地球深部探査計画)であるが、その旗艦である地球深部探査船ちきゅうの建造が進み同時に研究体制の国際構築に貢献している。

3. さらに海に地球と生命を知るために

海なる地球と生命の科学的理解の進歩をJAMSTECの歴史もからめて概観したが、JAMSTECは、世界の第一線に追いつき、追い越し始めた部分もあると思える。研究者とて競争相手となればいつも優しくにこやかにはできなくなるのでわかる。JAMSTECは、その得意なことを伸ばし、必要なら創造し、総合的アプローチを持って、海なる地球にアクセスし、活動状態をモニタし、背後の原理を透徹し、計算機上にシミュレートし、そして未来を予測することが、期待されているだろう。総合的アプローチをとって成功するのは、簡単ではなく、たいへんな努力と才能を要する。しかし、私には、地球に関わるサイエンスのブレークスルーを生むために欠かせない道に思える。ここからは、歴史的記述ではなく、最近の研究例をとり、いくつかの観点からJAMSTECの科学の伸ばすべき特性について考えを述べる。

3.1. 探査と研究

探査(exploration)と研究(research)は科学の2つの側面である。最近では研究課題というと仮説検証型がもてはやされている。この重要性はいくらでも強調できるが、しかし、予想できないことはやりようがなくなるというのでは困る。とくにJAMSTECのように、ほかにない自然観測、観察の手段に持っている場合は、まったく新しい発見のチャンスは高いと思うべきであろう。新しい発見を見過ごすことがないようにして、冒険的探査に挑戦するのもよいと思う。われわれはエキゾチックな場所に行きたがるが、何も新しい発見などありそうもないところ、つまり、何の魅力的仮説もないような場所にこそ発見があるかもしれないのだ。

チャレンジャー号の航海は、探査が主であった。JAMSTECのBEAGLE2003と銘打ったみらいの航海は研究でもあり、探査の機会でもあった。バランスはむつかしいと思うが、われわれは、まだ、地球解読のごく断片をもとに全時空間変動を理解しようとしているに過ぎない。

結局この「断片」が本質の代表なのかどうかということであろう。クラゲの生態研究には、有人潜水艇利用が欠かせないと言われており、その映像はわれわれを魅了する(図5)。しかし、じっさいのところ、地球の進化にとっては端役なのだろうか？くらげの研究者によると、ゼラチン質プランクトンは主役に躍り出る可能性もあるらしい。海底に炭素を運ぶ生物ポンプの意義が今は、はっきりしていない。定量化とそのメカニズムを明らかにするためには、中深層の探査にどのような新展開をもたらすべきだろうか。

JAMSTECの研究活動は、ほかの例にもれず、今後、激化する競争原理にさらされつつ進められると予想される。競争原理とはしかし、科学の進展が目標であって、競争が目的ではないことはいうまでもない。寄れば文殊の知恵ではないが、とどのつまり、科学は個人的なものであるという考えに立っても、協調は大切である。さいわい、JAMSTECの研究者はそのような輪の拡げ方をよく知っている。

人類と地球のための科学と技術という観点に立てば、自ずとふだんからいかに未来の予測精度を高めたらよいか工夫することになる。ブレークスルーをもたらすためには、当然かげに何10倍もの失敗があるのが通常であり、冒険を恐れないことが大事である。

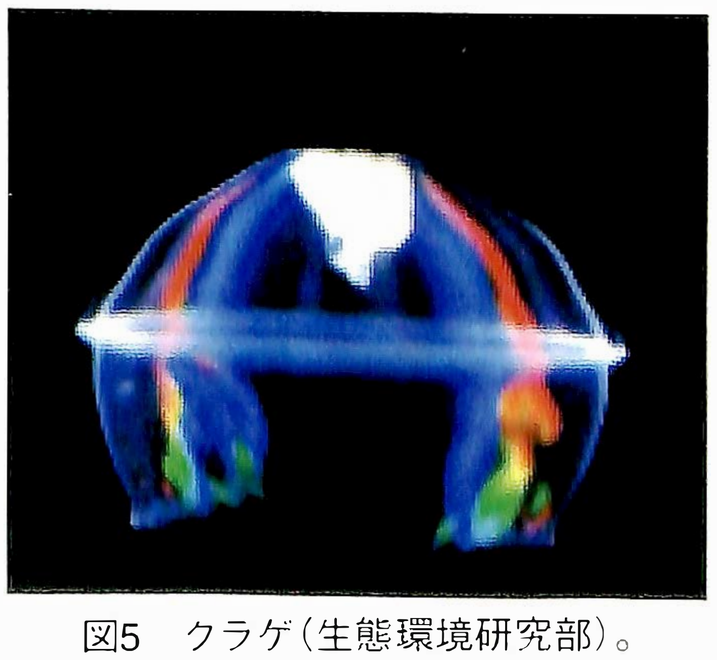


図5　クラゲ(生態環境研究部)。

3.2. 観測対象の俯瞰と近接

衛星軌道からわかることは指標にはなるが限界があり、われわれは、いろいろな手段を講じて現場へアクセスすることが必要不可欠である。地球の海を眺めると、水深6000m以深の世界は、海洋面積の3%程度らしい(図6-1の赤、紫、黒色部分)。世界的に見て、日本から近いところに多い(図6-2)。地図を見ると、深い部分は、特徴的な分布を示す。プレートの沈み込む境界となる海溝であり、それだけ冷却して沈降する古いプレートが沈み込む西太平洋に多い。しかし、海盆部までプレートの力学的性質で説明しよう

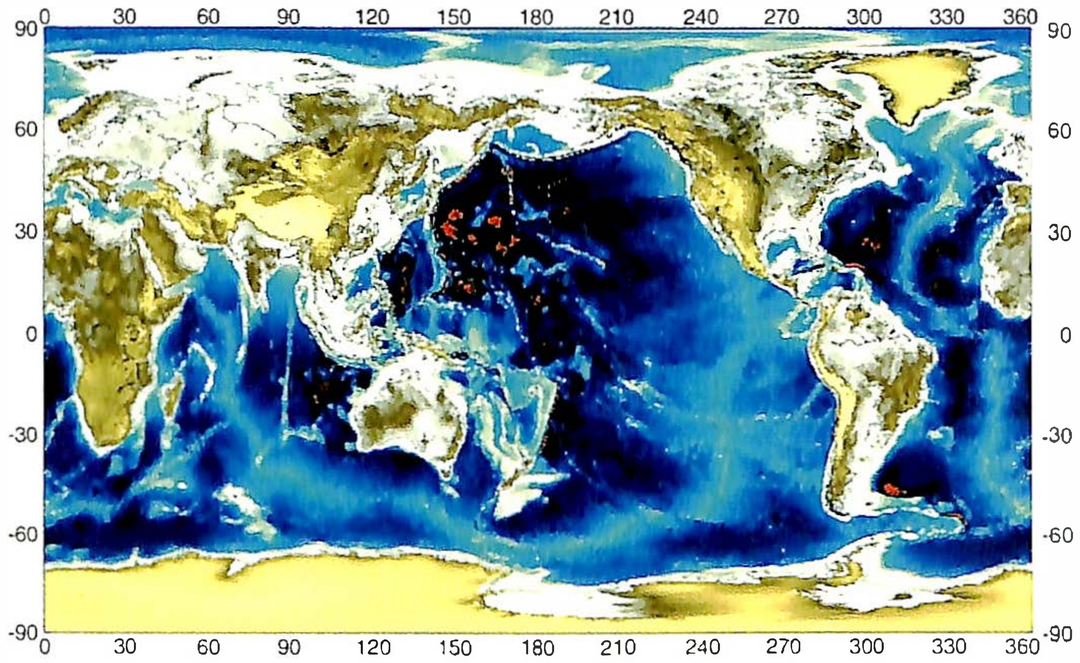


図6-1　世界地形図。水深6000m以深を赤、紫、黒で表示。

としても、あまりうまく説明できない。約2000年で循環すると言われる海洋深層循環の定量化には、流れが集中する深海通路と呼ばれる特定な海域での現場観測が重要であろう。このように、本質を探るために、接近すべきことが多く残されている。

かいこうは、チャレンジャー海淵に潜航し、180種の新種の微生物を分離したという。超深海を好む微生物がいること、さらには、超好熱菌までこの低温世界にいることには驚かされる（図7）。熱水系の生物群集は、1億年スケールでリフレッシュされる海洋地殻、

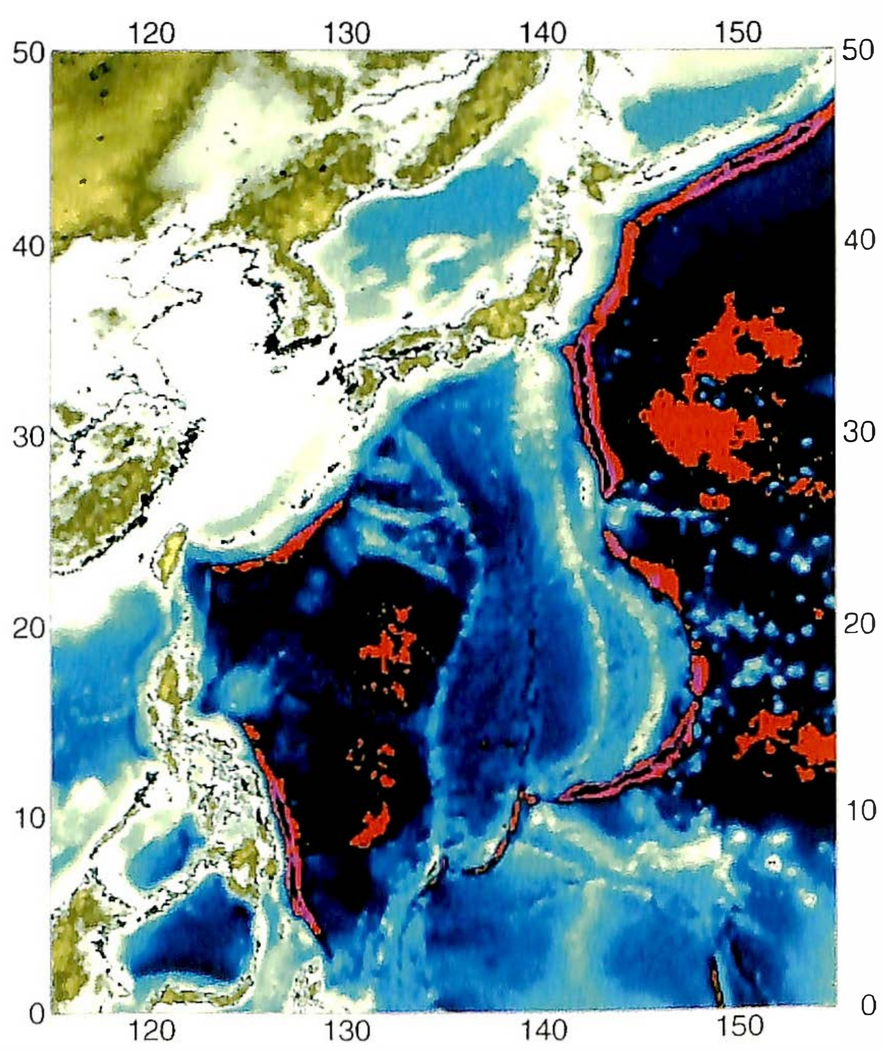


図6-2　日本周辺地形図。

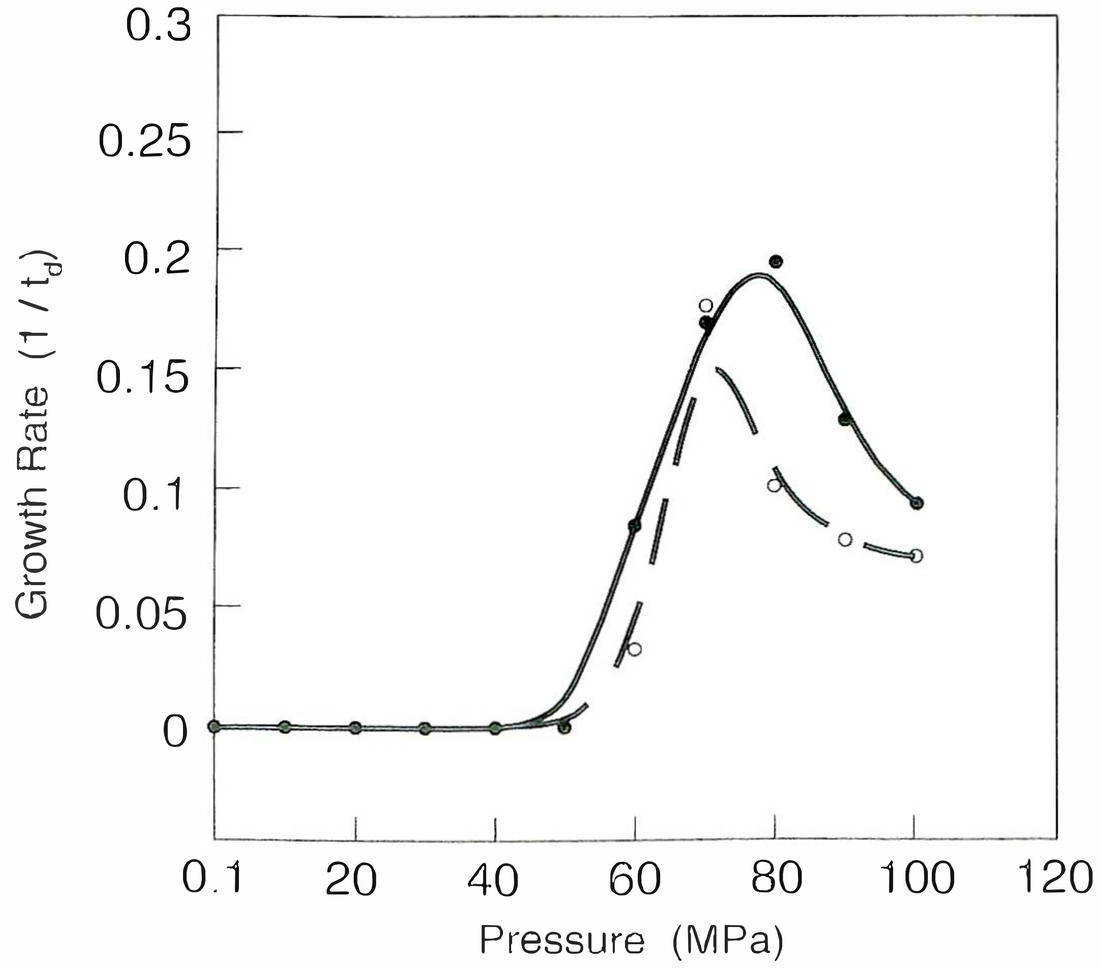


図7　チャレンジャー海淵の超高圧菌の存在（ディープスター）。

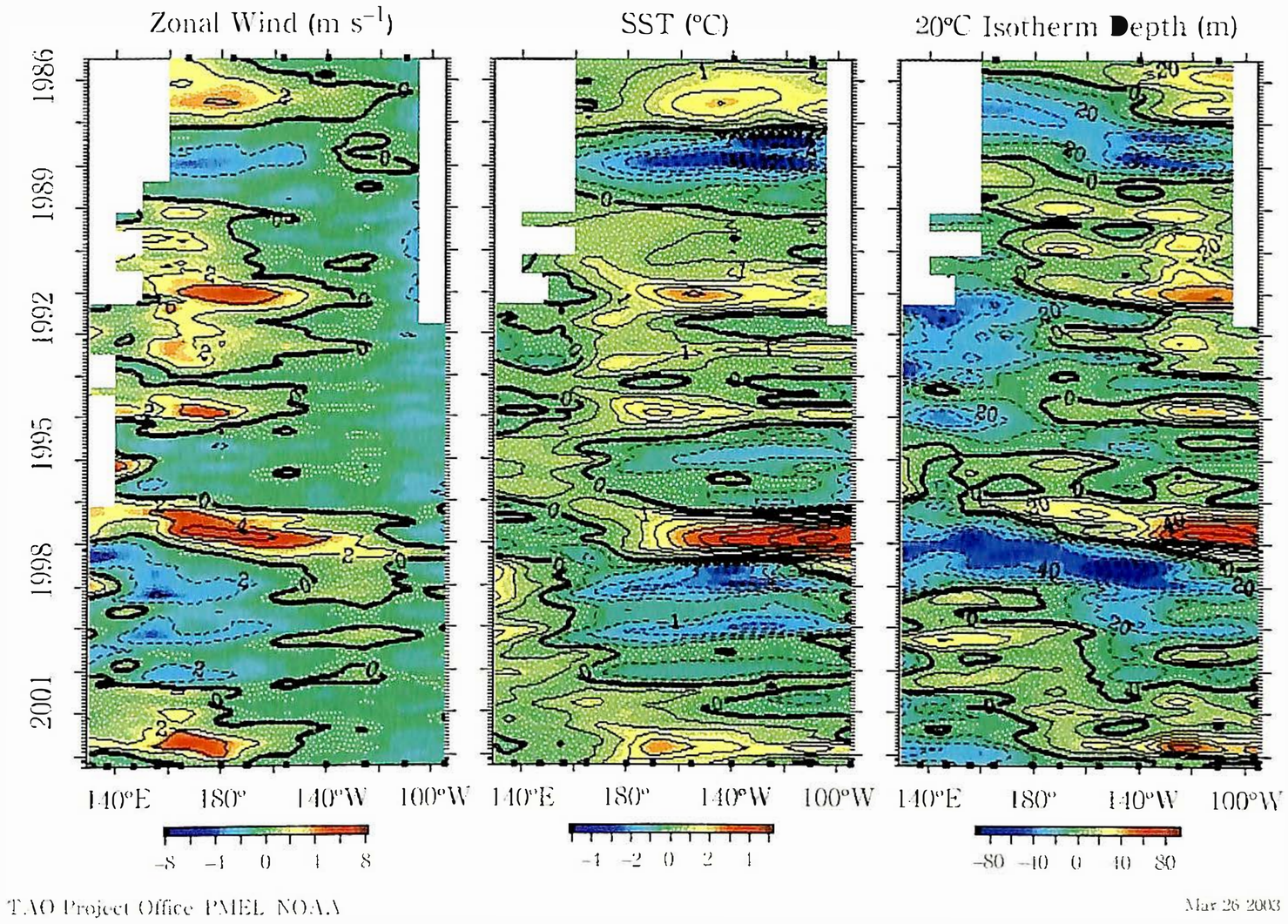


図8　赤道熱帯域日米共同観測ブイによる大気海洋変動観測（海洋観測研究部）。

ずっと短いスケールで消長を繰り返す熱水噴出孔の環境変化にどのように生き延び、進化し、今の分布に至ったのか。

JAMSTECは、1998年以来順次海洋・気象観測ブイ（トライトンブイ）を西部熱帯太平洋およびインド洋に18基設置しており、まさに貴重な近接データを得ている。2002-2003年のエルニーニョはその開始から収束までを捉えた（図8）。これは、NOAAとの共同事業であり、全体では約70基のリアルタイムネットワークを成す。まだ不完全だったとは言え、予測もこのブイのおかげで行われた。ブイの役割は、衛星観測の実証（20世紀最大のエルニーニョは、火山噴火に邪魔されたらしい）ならびに衛星からは見えない海洋中データモニタリングである。ENSOと呼ばれるエルニーニョ南方振動現象は、大気海洋結合による年スケールの現象で、全世界の気候に影響するため、その把握と予測はきわめて重要である。

掘削船「ちきゅう」の建設が進んでいるが、これは、世界中の研究者がこれまで決して手を触れることのできなかった世界へのアクセスを可能にするまさにエポックメーキングになると目されるツールである。マグニチュード8の地震が発生する南海トラフの地震スリップ面は、西日本下に沈み込むフィリピン海プレートの上面である。と、確実視されているが、じっさいのところ、現場における物理化学プロセスはわかっていない。ここでも、近接データを手にしていないと、遠隔観測データの生かし方がわからない。大きな目標は、大地震の予測可能性を詰めることである。

近接という点では、かいこうが、超深海を相手にできたことは特筆すべきように思う。海なる地球はまだまだふるまいのわからない相手であり、海洋の3%未満をアクセス不能にしておいてよいかどうかは、判断である。ちきゅうも到達目標については似た点があるが、マントルへのアクセスは、月の石以上にわれわれの惑星理解を大きく推し進めること

は確実と思う。私は、地球で近接できるものは近接すべきだと考える。それは、新しい物理化学原理を見つけるためではなく、「バタフライ」を追いかけるためでもない。俯瞰と実態をつなぐためである。

3.3. 構造とプロセス

構造という言葉は静的なイメージを与え、プロセスというと本質に迫るかのようなイメージを与える。気の利いた研究者はプロセスの理解に魅力を見いだすことが多い。しかし、言うまでもなく、両方大切であり、構造のマッピングと、プロセスの解明を、実態から離れてしまわないように進めるには、それぞれ得意な研究者が協力することである。

JAMSTECでは、国内で20年ほどの開発の歴史をもつ海底地震計を多数利用して、海底地殻構造マッピングのあたらしい扉を開いた。室戸沖で得られた、地殻構造モデルには、1946年の南海道地震の破壊過程を規定した可能性が高い沈み込んだ海山がイメージにあらわれた(図9)。静的な構造と動的な破壊との関連が示唆されたわけである。これを種に、では大地震の発生メカニズムを予測できるほどまでにモデル化を進めるにはこれから何をなすべきなのだろうか？

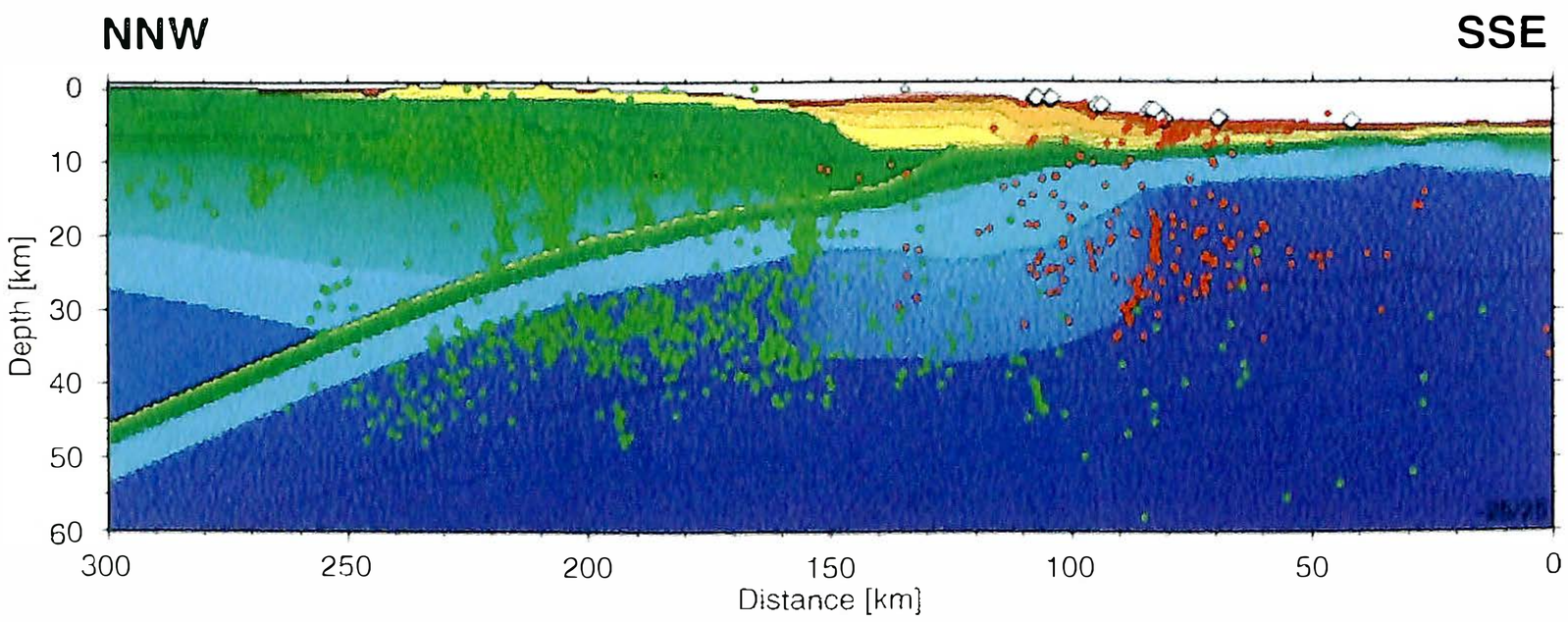


図9　四国沖フィリピン海プレート沈み込み構造と地震(赤は海底地震計による。緑は陸上観測による)(IFREE)。

生命の研究で構造と言えば、遺伝子構造が脚光を浴びている。深海、地底生物圏のそれは、おそらく当分、いくらでも新しい研究対象、新展開を提供するのではないかと思われる。一方、進化の本質に迫ろうとするとどのようなアプローチがあるのだろうか。JAMSTECは、現場の環境把握から、総合的に研究できることが

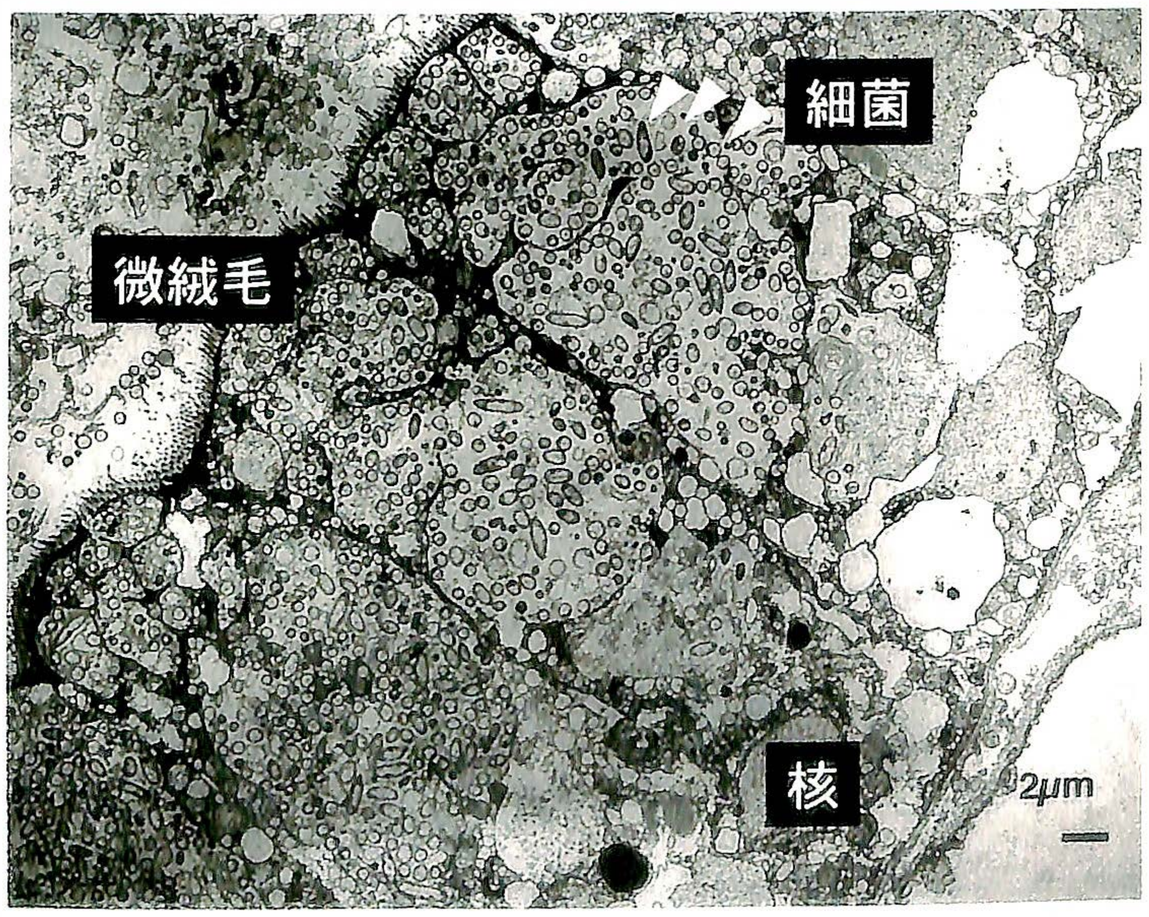


図10　ナラクハナシガイの鰓上皮の電子顕微鏡図(生態研究部)。

魅力だろう。日本海溝の最深部に生育するナラクハナシガイという化学合成生物は、そのエネルギー取得のために自分の細胞内に共生する細菌を入れている(図10)。これは、いずれは進化し一体化するのだろうか？そのプロセスがこの構造から読みとれるだろうか？周囲の環境変遷との関連はどうなっているのだろうか。

構造の研究は、帰納的ボトムアップ的であり、プロセスの研究は、演繹的トップダウン的なところがある。JAMSTECが稼働できるルーチン的研究手段で何をどこまでどのくらいできるかを考えるとき、構造とプロセス研究のバランスが見えてくるのではないだろうか。

4. 日本の課題とJAMSTEC

明日の脅威をよりよく理解し、できうるならば除去したい。JAMSTECは、現在、地球温暖化、地震、大陸棚、そして国際貢献に関わる国の方針に積極的に取り組んでいる。取り組むべき理由ははっきりしていると思うが、いずれもさまざまな意味でグローバルなインパクトを持つことを強調しておきたい。温暖化はわかりやすいが、たとえば、地震被害は物理的には局所的でも、いろいろなかたちを持って影響は世界に及ぶことがある。地震で失われる命は過去2千年間毎年約9000人と推定されているが、どこが襲われるかでさまざまなインパクトを持ち、柔軟な対応が求められる。

温暖化問題については、科学者が競ってモデルをつくり、未来予測を進めているが、結果はモデルによって異なる。使用するデータ、原理に違いがあり、制約があるからだ。JAMSTECは、一頭地を抜きん出ていておかしくない。自らトライトンブイ、BEAGLE2003航海、深層流測定など、海洋で観測しており、世界最速の計算機を持っているからだ。結局、10－100年の変化の検証は過去を再現できるかにかかっており、これは、過去の再現も科学として必要であるということである。ノンリニアであるので、ちょっとしたトリガー、あるいは1000年以上の変化が、短い時間スケールを影響することも考えられるだろう。

地震については、その理解はとりもなおさずプレートテクトニクスの理解を進める。プレートの相互作用の中で、たまたまぎくしゃくしたスリップを起こすのが地震である。大陸棚の問題に関しては、あまりぴんと来ないかもしれないが、日本列島周辺の地形変化、地殻構造の変化を、かくも広域大規模に調査できる機会は、公募型研究ではありえない。科学としては、日本の周りで言えば、海底の多様性を島弧・海溝系の複雑さを説明できていない。代表的サンプルを調べさえすればことがわかるわけではないからだと思う。この



図11　地球深部探査船ちきゅうへの期待。アースシミュレータが仮想地球実現、同時立体観測が全球ネットワーク化、そしてちきゅうが、地球生命そのものを採取する。

ような調査を進めるにあたっては、科学としては、仮説あるいは説明を構築すべきである。調査範囲は、地理的に広いだけでなく、広く異なる進化の段階を見ることになるのだ。

国際貢献は、いろいろなレベルで実施しており、政府間レベルから、機関間、さらには、部局レベルまである。いずれも、科学の進歩という観点を忘れないことがだいじである。また、いわゆるキャパシティビルディングも科学の進歩に含まれることも忘れてはならない。科学は全人類にとっての財産であるべきだからだ(図11)。JAMSTECが蓄えてきたデータ、サンプルを、わかりやすいかたちで一般へ提供することの重要性も強調したい。知識の活用である。

5. 夢あり夢を追う

月にうさぎはいず、雲上に雷様はいず、地底人も人魚もいない。科学は夢をなくすのだろうか？未来を垣間見るには、事実に直面し分析解析から予測モデルを立てなければならない。希望を生み出すのは、月のうさぎではなく、このような作業である。人類の希望は神秘をなくすことにあるといってもよいように思う。では、科学が味気ないのかといえばまったくそうではない。月にうさぎを想像するのはじつは困難ではない。なぜ落ちてこないのかと思う方がトンでいるではないか。この飛躍が科学の醍醐味に思える。

海なる地球の理解はまだ著についたばかりである。冒頭にあげた根源的問いへの答えはまだない。空想の生物より現実に発見される生物が不可思議である。人間の想像は自然の創造と比べればたかが知れているともいえる。つまり、まだ発せられていない重要な問いが眠っているはずである。複雑系、カオス、自己組織化など自然を記述する考え方が提出されているが、一方で私たちは、現実の自然のふるまいをもっと理解しなくてはならない。私たちのチャレンジは、海なる地球の異なる時間スケールでのふるまいの理解である。氷に覆われる北極海から、年中荒れる高緯度海域から、超深海まで、人類はチャレンジをやめないだろう。北極海は、米国原子力潜水艦の科学調査が5年(95-99)続いたし、もうすぐ、IODP(国際統合深海掘削計画)の掘削も行われる。南極の氷の下にあるボストーク湖にも掘削の手を伸ばす動きがある。さらに、木星の衛星エウロパでは、氷の下に海が全球を覆っていると言われ、氷を融かして海に潜水艇をというアイデアもあるそうだ。このようなエキゾチックな海も含めて、科学者はセンサーの触手を伸ばそうと考えているのだ。

海なる地球が何をしているのか、どう変わろうとしているのか、陸面との相互作用も含めた地球システムとして理解を進めるには、現場の立体ネットワーク観測、移動観測実験、データ・サンプルの分析解析、実験、仮想地球のシミュレーション能力をまだまだ技術的に高めなければならない。陸上と同等条件にならなければ、進歩の余地ありということだ。

JAMSTECは、海から地球システムを理解するCOEをめざす。すなわち世界中の先端研究者が来訪したがるところとなることをめざす。それは、JAMSTECのサイエンスといえば、センスオブワンダー、希望、パイオニア、フロンティア、冒険、幸福を追求する魅力を持つことを意味する。このような夢を共有できたとき未来が拓かれるだろう。

海洋科学技術センターの技術研究の現状と近未来への展望

海洋技術研究部
青木　太郎

1. はじめに

海洋科学技術センターの創設以来の32年間は、海洋関連の技術開発の歴史でもある。世界に誇る有人潜水調査船「しんかい6500」や、海の最深部マリアナ海溝に到達した「かいこう」に代表される海洋技術は、現在でも当センターのバックボーンである。このような深海探査に便利な“道具”を活用することで、深海底研究や深海生物研究の分野で多くの業績を築いてきたと言えよう。当センターが海洋研究というより地球研究センターと呼べるほど多岐にわたる研究分野を抱える組織になった現在、技術研究も、より高度で多様な技術分野を必要とされるようになってきた。地球シミュレータは、電子工学、精密工学の最先端技術を結集した成果であり、これを生かす情報工学も重要な“海洋技術”と認識される。また、地球深部探査船「ちきゅう」の掘削技術も当センターの将来を担う重要な技術といえる。

限られた紙面で当センターの過去と現在の技術の全てを記述することは難しい。このため、当センターにおいて、現在、取り組んでいる技術研究で、外部に紹介されたことの少ない基礎的な研究の中から、重要な技術や、いずれ海洋調査に役に立つと思われる数テーマを選択し、その研究の現状について述べる。

また、最後に、昨年の5月に行方不明となってしまった「かいこう」の再建についても述べる。

2. 取り組んでいる基礎技術

2.1. 動力源

海洋技術で最も重要な装置の一つが、動力源・電源である。多くの海洋機器開発で常に問題となる装置が電源である。いかにエネルギー密度の高い電源或いは動力源を組み込むかが、機器の性能を左右する。

当センターにおいては、均圧型の電池はセンター創設以来、燃料電池は平成2年から研究開発に取り組んできた。

＊閉鎖式燃料電池

平成5年に1kWの閉鎖式固体高分子膜型燃料電池（PEFC；Polymer Electrolyte Fuel Cell）の試作機を開発し、これをテストベッドに各種の性能試験を実施した。平成10年度の深海巡航探査機「うらしま」の開発が始まった際、「うらしま」用の4kW燃料電池の開発を始めた。密閉空間で水素と酸素を燃料電池発電部（スタック）に供給し、生成物である水もこ

の空間内におさめなくてはならない技術は、当初考えていた以上に性能を確立することに時間を要した。ガス循環、排熱処理、保温、冷却等の周辺技術でも工夫が必要であった。現在でも決定版とはいえず、改良しなくてはならない部分が多く存在する。しかし平成15年9月の海域試験で、7時間連続、30kmを巡航した際に測定されたエネルギー効率54%は、自動車用燃料電池の二十数%の効率に比べ約2倍と、格段の性能を示した。また、金属セパレータを用いたコンパクトなスタック(発電装置)が実用的に用いられた世界初の事例であることを自負している。

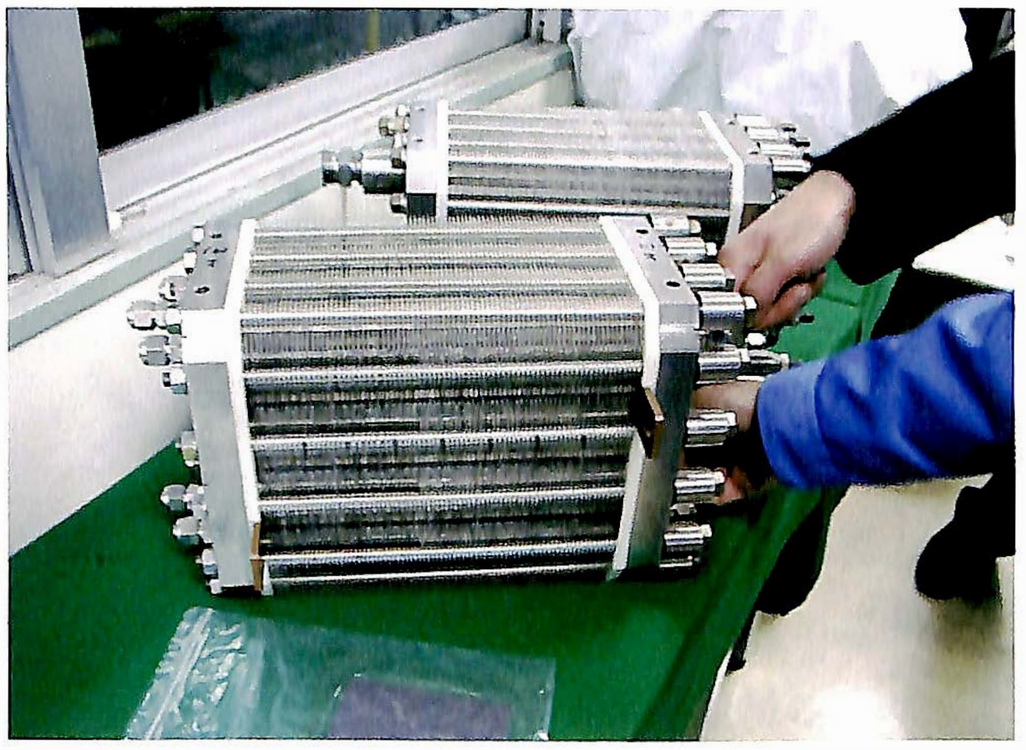


図1　燃料電池の発電部(スタック)

＊均圧式リチュウムイオン電池

二次電池であるリチュウムイオン電池を均圧式にして水中で使った例は、当センターが開発した細径ケーブル方式無人探査機「UROV7K」に用いたことが世界初である。平成7年に当時としては比較的大容量である30Ahセルを開発した。110V 30Ah容量の電池群を製作し、この2群を並列接続60Ahとして機体に搭載した。その後、100Ahセルを開発した。124V 100Ah 容量の電池を3群用いて300Ahを構成し、「うらしま」の電源として平成14年度まで使用した。更に、平成15年に小型AUV(Autonomous Underwater Vehicle)「MR-X1」に15Ahセルを用いた110V 15Ah電池を4群搭載した。「MR-X1」用電池の価格は、「UROV7K」の約1/8に低減された。今後は、エネルギー密度が現在の約2倍の300W/kgセルを実現させる計画を進める。

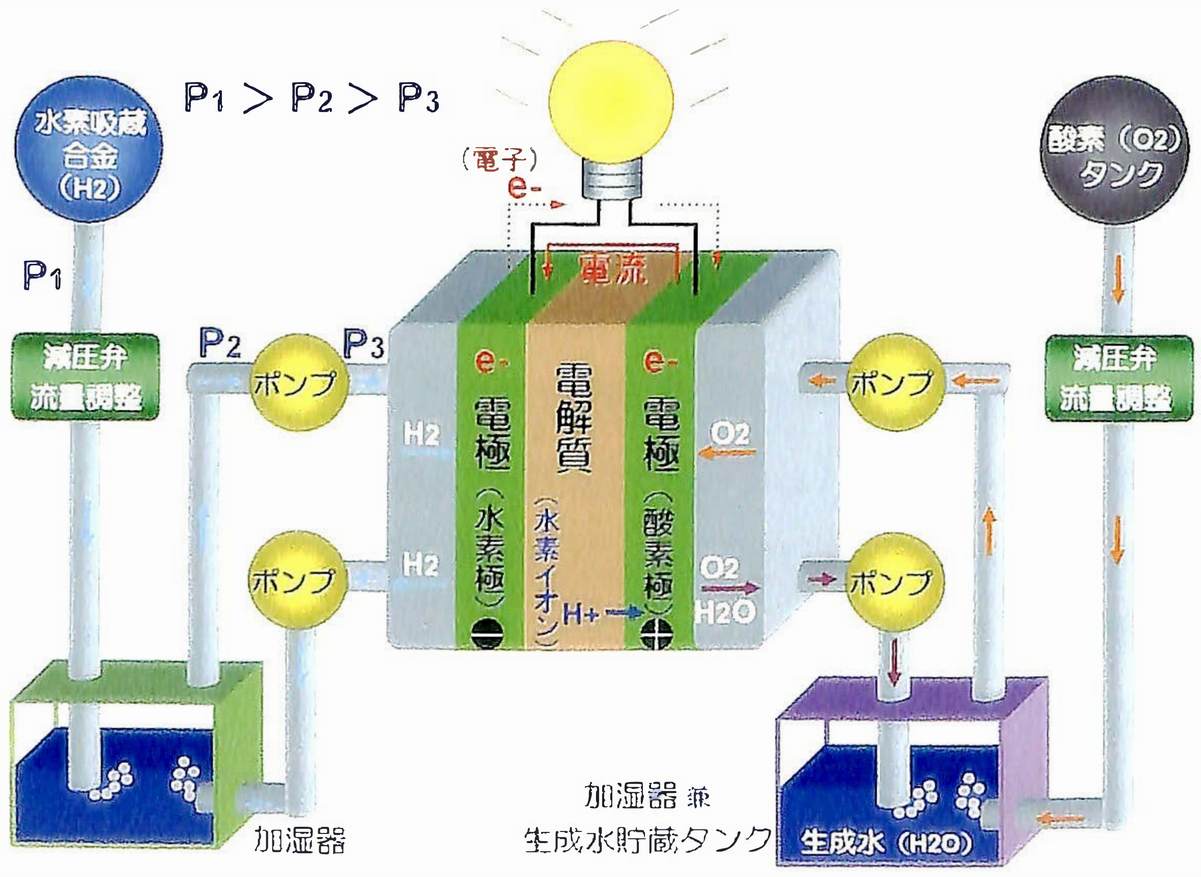


図2　「うらしま」用閉鎖式燃料電池の原理図

2.2. 材料

＊高強度材

海洋機器には、水圧から電子機器等を保護する耐水圧容器が必要で、軽量で強靱な材質が望まれる。「しんかい6500」をはじめとする大深度で使用する耐水圧容器の材料として一般的に6・4チタンと呼ばれるチタン合金（Ti-6Al-4V）を用いている。このチタン合金が普及し始めておよそ十数年が経過した。近年、ナノテクノロジーを駆使し、性能を向上させる手法が報告されている。この様な技術を用いてチタン系や、アルミ系、マグネシュウム系の合金を作成し、6・4チタン合金の性能を上回る材料開発を進めている。比強度が6・4チタン合金の1.3倍以上を3年後に実現することを第一段階の目標としている。



図3　6・4チタン合金の約3割強度が高い新合金

＊ガス貯蔵材

ガス貯蔵方法の研究は、燃料電池に関連する研究で、燃料電池に使用する水素と酸素を、その体積や重量が出来る限り小さく、且つ安全に貯蔵できる材料と、その貯蔵排出装置の研究を行っている。

水素については、世界トップレベルの貯蔵重量率2.8wt%のチタン系の合金を開発した。また貯蔵率の良い従来の合金には高価なバナジュウムが多く含まれていたが、本合金にバナジュウムを全く含むことなく高貯蔵率を成し遂げた。そして更に、貯蔵率の高い材料の開発を目指している。現在、燃料電池自動車の水素貯蔵は、高圧ガスボンベ貯蔵方式が多く用いられている。安価で比較的簡単な方式であるが、安全性から考えると良好な方式とは思われない。燃料電池自動車が普及期に入る十数年後には、我々が進めている貯蔵合金を用いた方法や安全な他の貯蔵方式に移行すると予想される。

酸素であるが、「うらしま」の燃料電池用酸素は、高圧ボンベに200気圧で貯蔵して搭載した。平成14年度にナノカーボン材に貯蔵する試験を行い、試料体積の約200倍の酸素を吸蔵させることができた。現在は実用的な貯蔵装置の開発を進めている。



図4　ガス貯蔵試験に使用しているナノカーボン資料

2.3. 制御システム

深海巡航探査機「うらしま」の機体内に搭載し、機体全体を制御させているコンピュータは、32Bitマイクロプロセッサーと補助プロセッサーで構成されている。オペレーション・システム（OS）はVxWorksを用いている。この構成は、世界のAUVの主流を占めている。この単CPUとマルチタスクOSの構成で、徐々に「うらしま」の制御ソフトウエアを高機能化させてきたが、これ以上に高機能化した場合、プログラムを効率よく走らせることが難しくなっている。このため別の方式の開発に取り組んでいる。現状のタスク数に相当する複数の多機能小型CPUボードを通信回線で結合させ、プログラムを走らせる方式である。将来、開発する無人探査機をはじめ複雑な機能を必要とする機器に組み込んでいきたいと計画している。

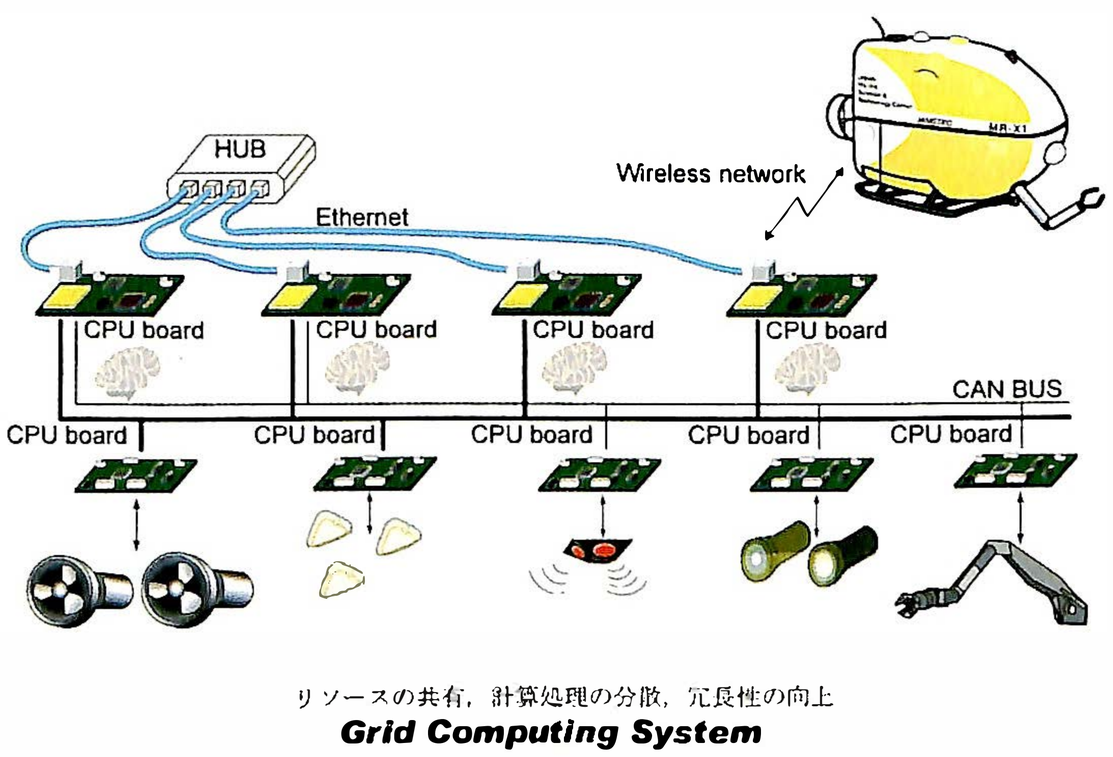


図5　複数CPUを用いた開発中のAUV用制御システム

2.4. 映像

水中を観測する装置としてTVカメラは、重要な海洋観測装置であると共に、無人探査機のみならず有人調査船においても、安全に運用するために欠かすことの出来ない装置である。戦後の電子技術の進展にともない、TVカメラは目覚ましい進化を遂げてきたが、それでもまだ“人間の目”には及ばない。しかし、昨今の高速コンピュータや、大規模集積回路素子の登場により、視野や解像度については、“人間技”では不可能な事が可能となってきた。当センターで研究開発した広視野をもつ映像装置は、3台のTVカメラの映像を融合し、水平120°の前方視界を映し出す事が出来る。現在は、NTSC準拠の映像に対応しているが、これから本格化するハイビジョン（HD）映像に対応する装置の研究開発も始めている。



図6　3台の水中カメラ映像を合成して広視野を得た画面

2.5. 通信

数千mの深度で調査をする水中機器と海表面の船舶とが連絡するデータ通信手段は、海洋調査が多様性を増してきたことに伴い、ますます重要性を帯びている。これに呼応するため、研究を進めている水中音響通信と電磁場通信を紹介する。

＊ 音響通信

当センターでは、「しんかい6500」に搭載した水中TVカメラの映像を支援母船に伝送することに10年前に成功して以来、更に伝送データの性能向上を図ってきた。水中を移動する「うらしま」から波浪の影響を受けながら水面を走る支援母船にTV画像を送ることにも可能となった。この通信には25kHz前後の周波数を用いてきたが、約10倍の伝送容量を見込める200kHz程の周波数で長距離通信させる研究を行っており、現在、500m程度の伝送距離が可能となっている。

＊ 電磁場通信

従来、水中では一般的な電波通信は困難なため無線通信は音波通信が主流であった。しかし磁力線は水中でも通過できることから、電気で磁場を作りこれをコントロールして水中通信を行う研究を進めている。送信装置やアンテナを工夫することで海水中において電磁場通信ができることを確かめた。電磁場通信は、伝達時間がほぼリアルタイムで遅れがないことや、多重反射が少ないことのメリットがある。電磁場通信を用いて無人探査機の遠隔制御を行う研究も進めている。

また通信ではないが、海底下の地質構造を調査する方法として音波探査が一般的であるが、この海底下の地質構造調査においても、高圧大電流の電磁パルスを用いた探査装置の研究を進めており、地質研究者に新たな調査手段を提供できるように努力している。

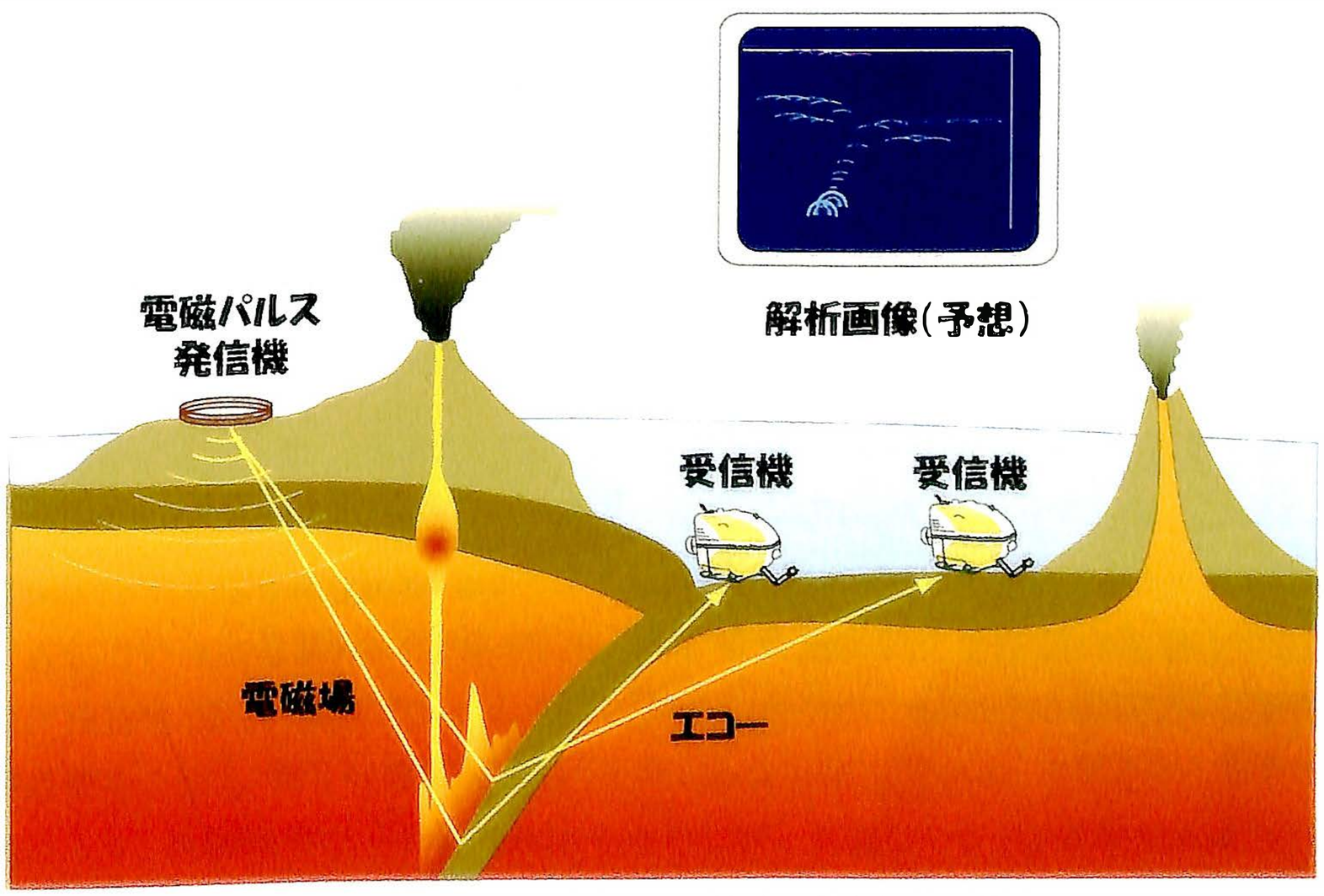


図7　電磁パルスを用いた地質構造探査装置の開発

＊人工衛星利用

独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の計画している技術試験衛星（ETSⅧ）と超高速インターネット衛星WINDSの利用計画に当センターも積極的に参加している。現在、遠洋上の調査船舶と横須賀の当センターの間の通信は、インマルサット衛星を使用した“細い”通信回線に頼っている。しかしETSⅧやWINDSが登場すると海洋調査の事態は大きく変わることが予想される。TVカメラのような大容量データ伝送を必要とする装置の双方向通信が可能となり、商用放送局が独占していた衛星放送が自前で出来るようになる。例えばマリアナ海溝を調査中の無人探査機の映像を横須賀本部にリアルタイムで伝送することが可能となり、研究者が現場にいなくてもマリアナ海溝の海底を観る事が出来る。あるいはトライトンブイやシベリアに設置した測定器のデータも横須賀本部で直接入手可能となる。このように海洋観測や調査の方法を大きく変化させる可能性がある。しかし、その実現には当センターで、この衛星通信に対応するアンテナと送受信システムを用意する必要があるため、小型で安価な装置の開発を進めている。

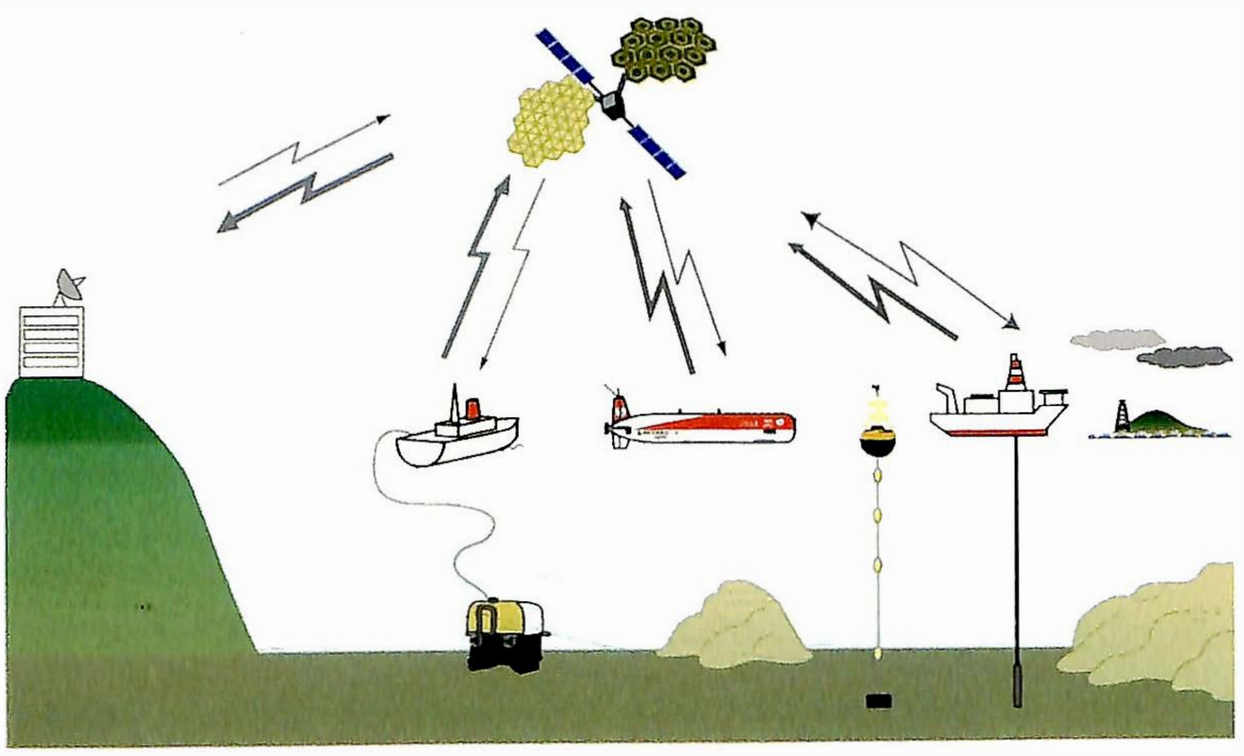


図8　人工衛星を利用した海洋観測の運用

3. 近い将来（中期計画）に実現を目指しているプロジェクト

＊深海底観測ケーブルネットワーク

1993年に初島沖の群生域に「深海底観測ステーション」を設置して以来、室戸沖、釧路沖に観測ステーションを増設してきた。この観測ステーションの実績から、巨大地震が発生するプレート境界付近の深海底に、観測ステーションを多数配置してネットワーク化することを計画している。観測データはケーブルを介してリアルタイムで地上に送られる。このことで、将来の地震予知や、津波警報に役立つと期待している。

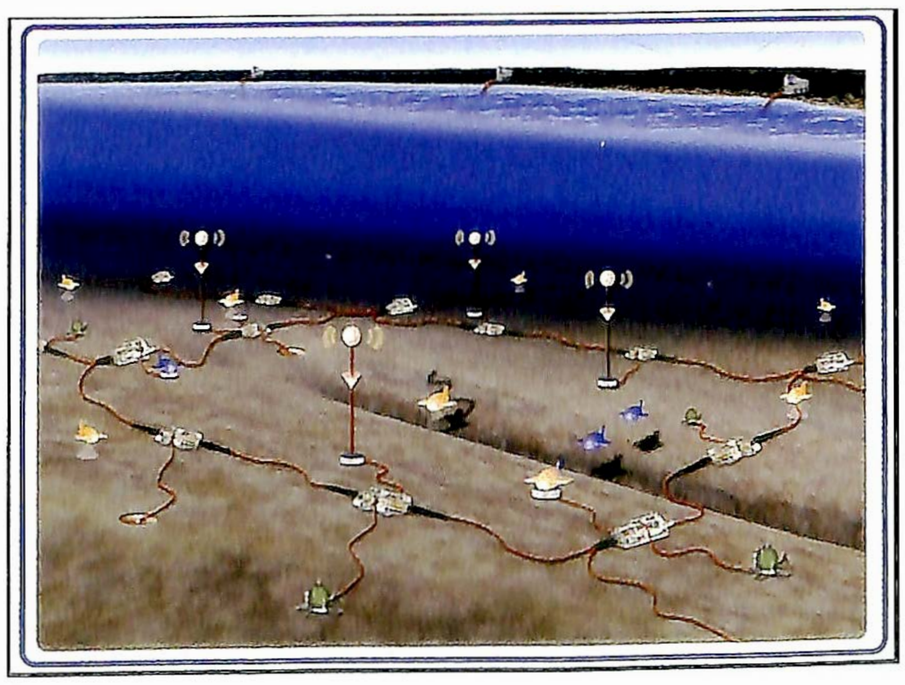


図9　深海底観測ネットワーク構想図

＊深海巡航探査機

深海巡航探査機「うらしま」は、平成15年9月下旬に駿河湾において、連続7時間。距離約30kmを燃料電池で航走することが出来た。平成16年度には、目標とする航続距離300kmの航走トライアルを行う。海底地質研究者の要望に応じた調査試験航走も実施する計画である。平成17年度以降は、実運用を実施するとともに不具合点の改良を行う。また、更に航続距離の長い2号機の実現を目指し、各種の実証試験を行う計画を立てている。2号機には上述した基礎技術を結実させ、深海底地質や地震、地球温暖化の研究の貴重なツールとなることを期待している。



図10　深海巡航探査機「うらしま2号機」構想図

4.「新かいこう」について

深海無人探査機「かいこう」は、平成15年5月末に四国沖で行方不明となった。深度8,000m以上を調査できる現役探査機は、世界でも「かいこう」のみであったことから、大深度において「かいこう」を使用して研究を進めていた研究者に大きな影響を与えている。

「かいこう」は、平成7年に完成したが、これに用いられている技術は1980年代のもので、当時としては先端的技術を駆使していたが、現在の技術レベルから見直すと、既に陳腐なものとなっている装置が、多々、存在する。特に、制御システムや、光ファイバ通信、映像、位置計測に関連する装置は、最新の技術を用いた方式にすることが必須である。建造し直すからには最新鋭の技術を取り入れ、10年後においても十分に深海研究に通用する探査機にする計画である。



図11　「新かいこう」構想図

5. おわりに

「しんかい6500」の開発には「アルビン」というお手本があり、「かいこう」には「CURV」や「RUWS」といった先輩ROVが存在した。これ等を目標にし、乗り越えることでJAMSTECの海洋技術は頂点に立てたといえる。世界最先端の研究のためには、世界最新鋭のハードが必要なことは、新しい組織になっても変わらない事実である。目標となるお手本がない時代に入り、新機軸のハードを生み出すためには、上述したような先進的な基礎技術に積極的に関わり、自らの能力を高めていく努力を継続していかねばならない。

特別講演

Special Lecture

「失敗学のすすめ」

講師：畑村　洋太郎
工学院大学　教授



失敗をしたいと思う人はいない。それなのに失敗は起こる。なぜか。それは失敗をあってはならないこととだけ考え、失敗のプラス面を考える広く深い考え方をしないからではないだろうか。

失敗学では、人や組織が成長・進歩を求めるときに必然的についてまわる失敗を“許される失敗”として、同じ愚を繰り返す“許されない失敗”と区別し、失敗を通じて獲得する“体感・実感”が真の科学的な理解をもたらすことを説く。失敗を通して技術が進歩した例、正しい情報発信によって同種の事故が根絶された例を挙げる。一方、三陸の大津波のような大災害の教訓さえ次第に忘れられることから、失敗経験が風化しやすいことを示す。失敗学では失敗経験を正しく伝達するには上位概念に登って知識化することの重要性を説き、そのための方策を提案する。

一方、失敗が個人や組織の手抜きやインチキで起るのではなく、産業や社会の成熟と密接に関連しており、マニュアルの形骸化や組織の縦割りから隙間領域が生じ、それから種々の失敗が生じていることを示し、従来の固定的な物の見方から離れ、自ら考え行動することの大切さ、それを実効たらしめる出力型学習の大切さを説く。

特別講演

Special Lecture
「文明の海洋史観」

講師：川勝　平太
国際日本文化研究センター　教授



『文明の海洋史観』(中公叢書)での私の主張は、執筆当時には「読者には荒唐無稽に聞こえるかもしれない」という懸念がありました。近代文明はアジアの海から誕生した、正確にいえば、海洋アジアからのインパクト(圧倒的な影響)に対するレスポンス(対応)として、日本とヨーロッパに近代文明が出現した、という主張です。これは、日本が欧米社会へのキャッチアップで近代文明を形成したという通念に対する異議申し立てです。少し正確にいえば、英国が最初に産業革命を経験し、他の欧米諸国がそれに続き、明治以後に日本はその後塵を拝して現代に至ったという通念に対する反論です。そこには、戦後日本の知識人の心をとらえた「唯物史観(奴隷制－封建制－資本主義－社会主義)」というマルクス主義の歴史観を退ける意図がありました。返す刀で、唯物史観に対する反論として知られる「文明の生態史観」も、唯物史観と同じ陸地中心の見方だ、と切って捨てました。幸い、多くの読者を得ています。過去の見直しは未来図を変えます。歴史の曲がり角に立つ日本の将来指針を、海洋的観点から思い切って提示して、ご批判を仰ぎたいと思っています。

深海研究部

Deep Sea Research Department

平成15年度、深海研究部の研究活動は取り分け実りの多い年度となった。数多くの成果が報告されたなか、ここでは、以下の3つの成果について紹介する。

1. 釧路・十勝沖海底ケーブルシステムを用いた十勝沖地震（M8.0）の観測

9月26日午前4時50分、十勝沖を震源とするM8.0の巨大地震が起こった。これによって北海道の太平洋側では震度6弱の揺れを記録し、負傷者800人を超える惨事となった。今回の地震は、同海域で起こった1952年の十勝沖地震（M8.2）と比較すると、1）同じアスペリティで大きなすべりを有する、2）千島海溝から沈み込む太平洋プレート上面で起こったプレート間地震であり典型的な海溝型地震と捉えることができる点から、1952年の地震の再来地震と考えられている。

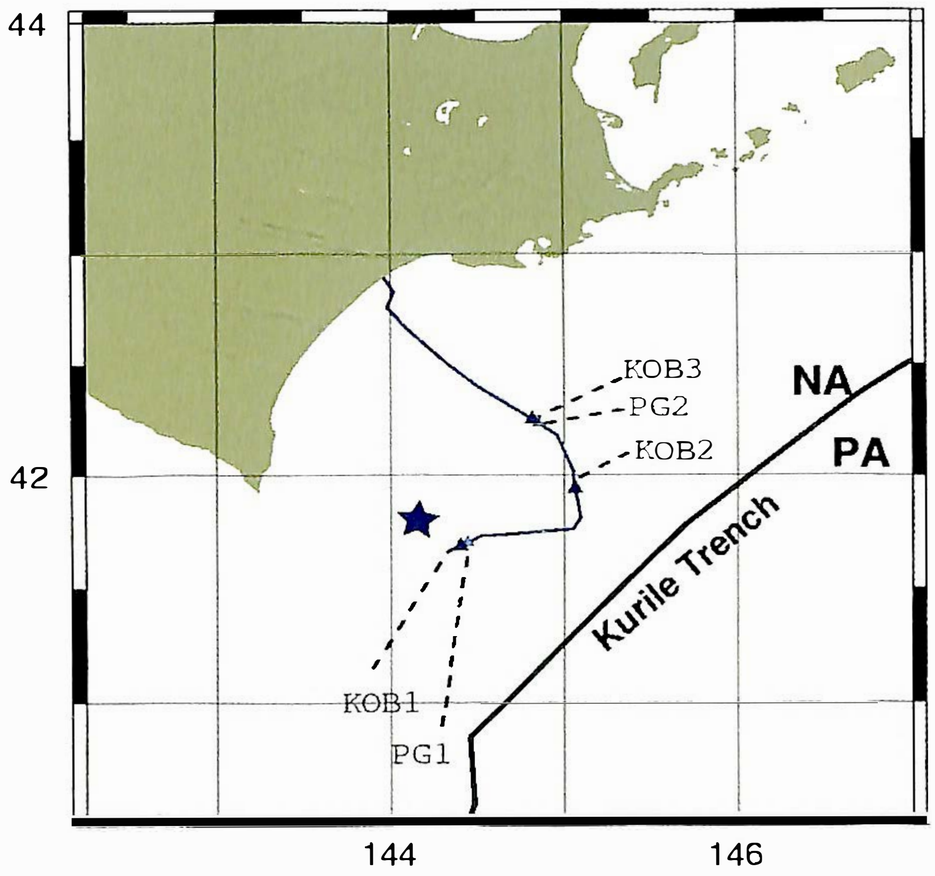


図1　釧路・十勝沖海底ケーブルステーションの位置。KOB1～KOB3までの3台の海底地震計とPG1とPG2の2台の津波計の位置が示されている。星印は今回の地震の震央。

釧路・十勝沖海底ケーブルシステム（図1）では、海溝型地震の震源に極めて近い場所（ほぼ直上）でリアルタイム海底観測を行うことを目的に、海底地震計・津波計・水中温度計・流速計等を用いた観測を行ってきた。今回、海溝で生じるM8クラスの巨大地震を海底ケーブルを使って観測することに世界で初めて成功した。とりわけ、1952年の十勝沖地震（M8.2）の再来地震として想定した地震を観測できたという点で大きな意味をもつ。図2は、海底ケーブルに設置した海底地震計によって記録された地震波形である。また図3は、2台の津波計で観測された圧力変動である。これをみると、本震および津波の擾乱が含まれている。今回、津波計のデータを用いこれまで観測されたことのない海底面の変動を定量的に得ることに成功した。地震直後に海底の隆起が記録されているだけでなく、地震後継続する隆起を示していることが観測された。また、地震に伴い海底では斜面崩壊が生じ密度流が流れ出たことも観測された。

このような信頼できる観測データが今回初めて得られたもので、今後の地震・津波モデルの構築に貢献できるものと期待される。

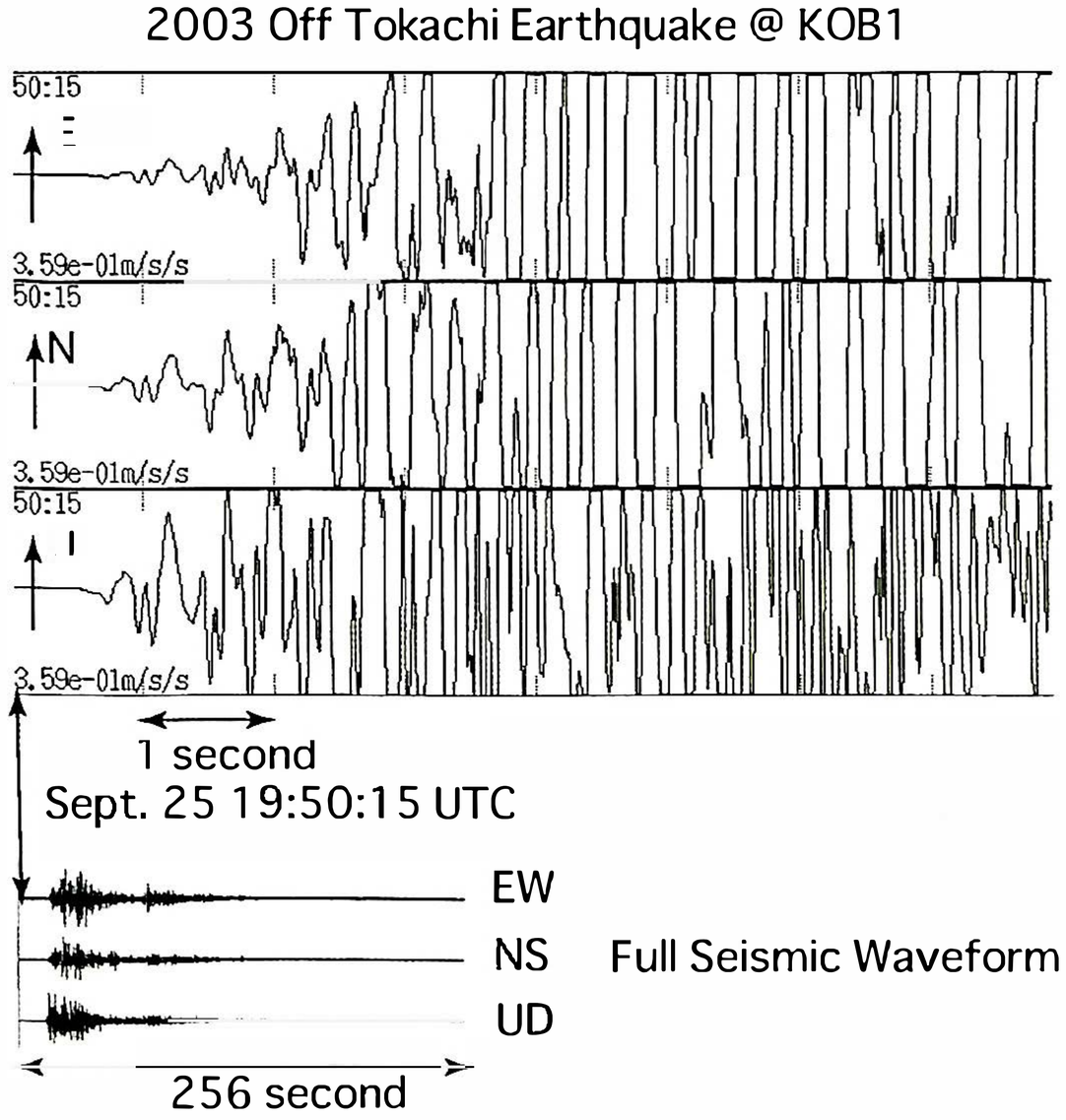


図2　KOB1で記録された地震の揺れ

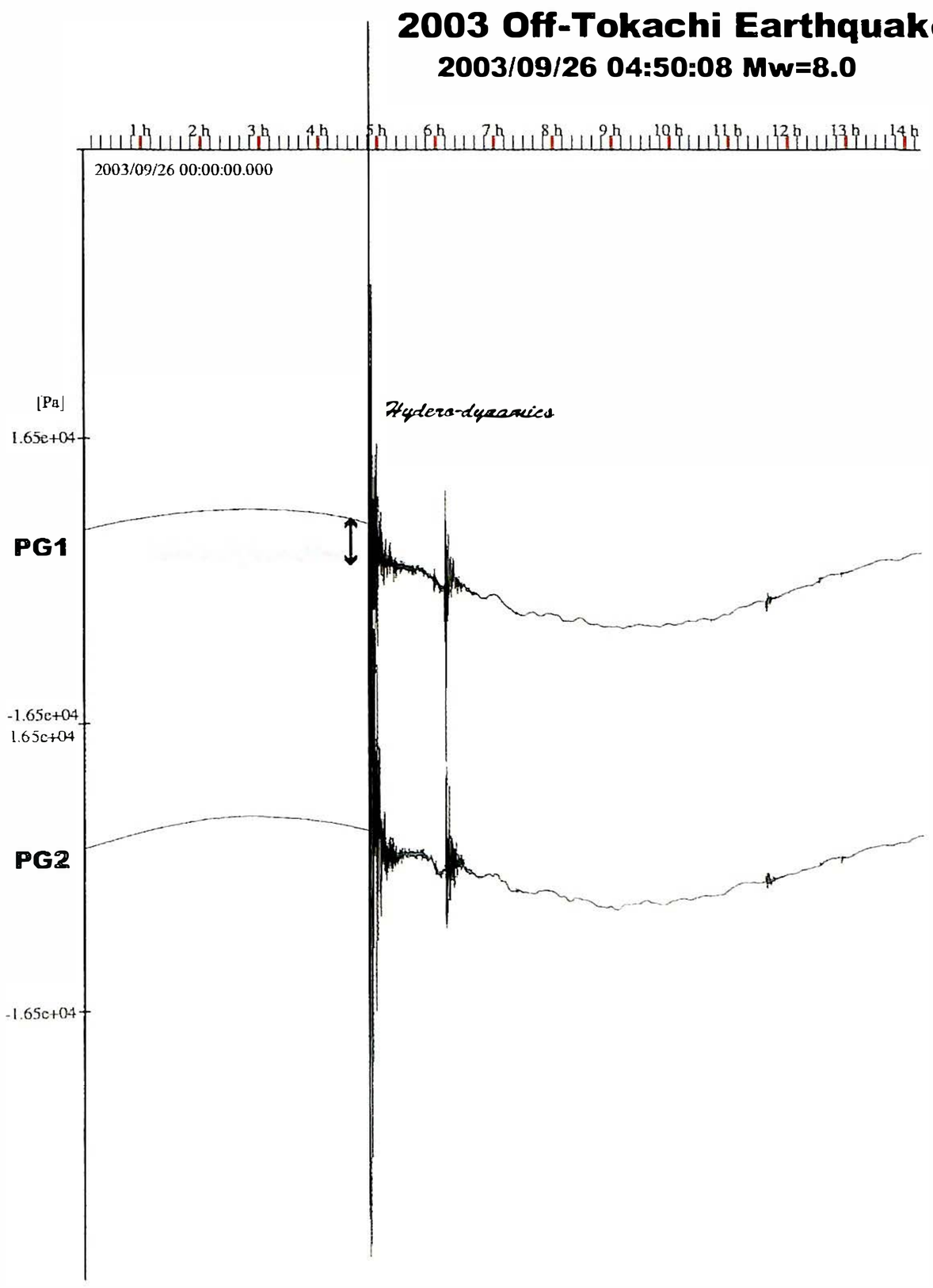


図3　PG1とPG2で観測された水圧変動

2. 電磁力を用いた海底下深部地下構造のイメージング

巨大地震の発生や火山の形成には、地殻やマントル内部の流体（水やマグマ）の寄与が大きいと考えられている。電気伝導度は流体の存在に敏感であるため、電気伝導度構造は地下の流体分布の指標として利用可能である。近年は海底電位差磁力計（OBEM：図4）を用いることにより、海底での電磁場変動の観測が可能となったため、海底下の地殻～マントルの電気伝導度構造を求めることができる。図5は伊豆マリアナ弧の北緯17度線の沿った東西断面である。図の右端が海溝に相当する場所で、前弧域には蛇紋岩火山、図の中央部に火山前線上の島弧火山、さらに背弧側には背弧拡大が生じている。図5をみると、沈み込むプレートや、その上方には流体の存在を示す高い電気伝導度がみられないことと、島弧火山の前線直下では流体の存在を示す高い電気伝導度がみられないが、背弧拡大直下では電気伝導度は高い値を示しており、流体が多い「湿った」状態にあること等が読み取れる。

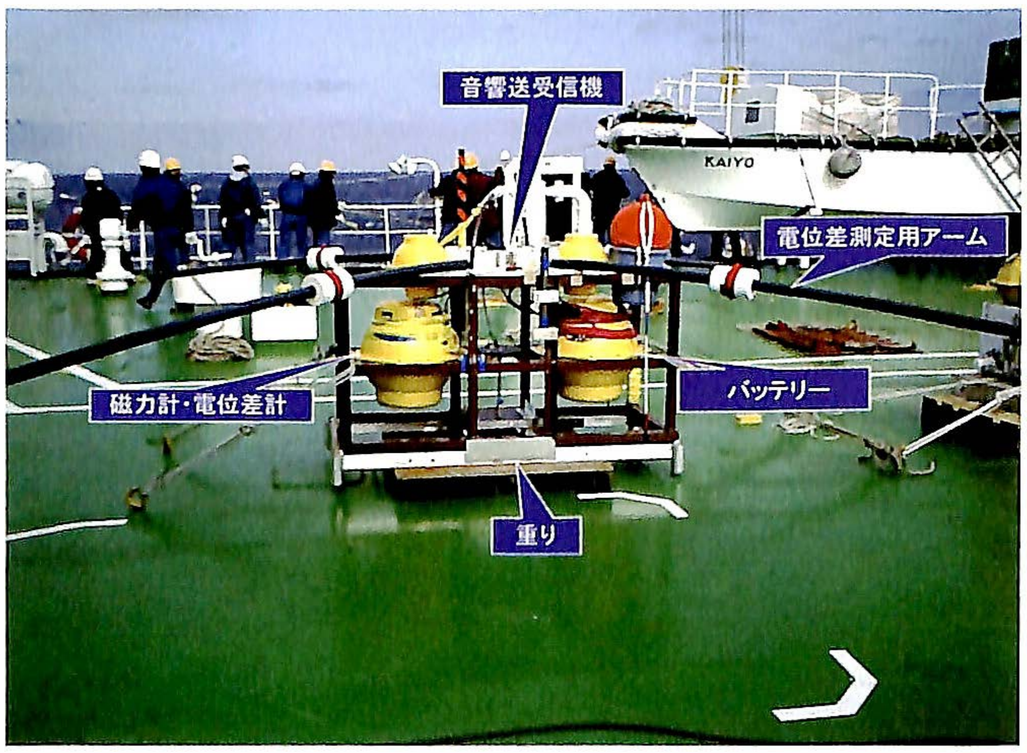


図4　今回使用された海底電位差磁力計

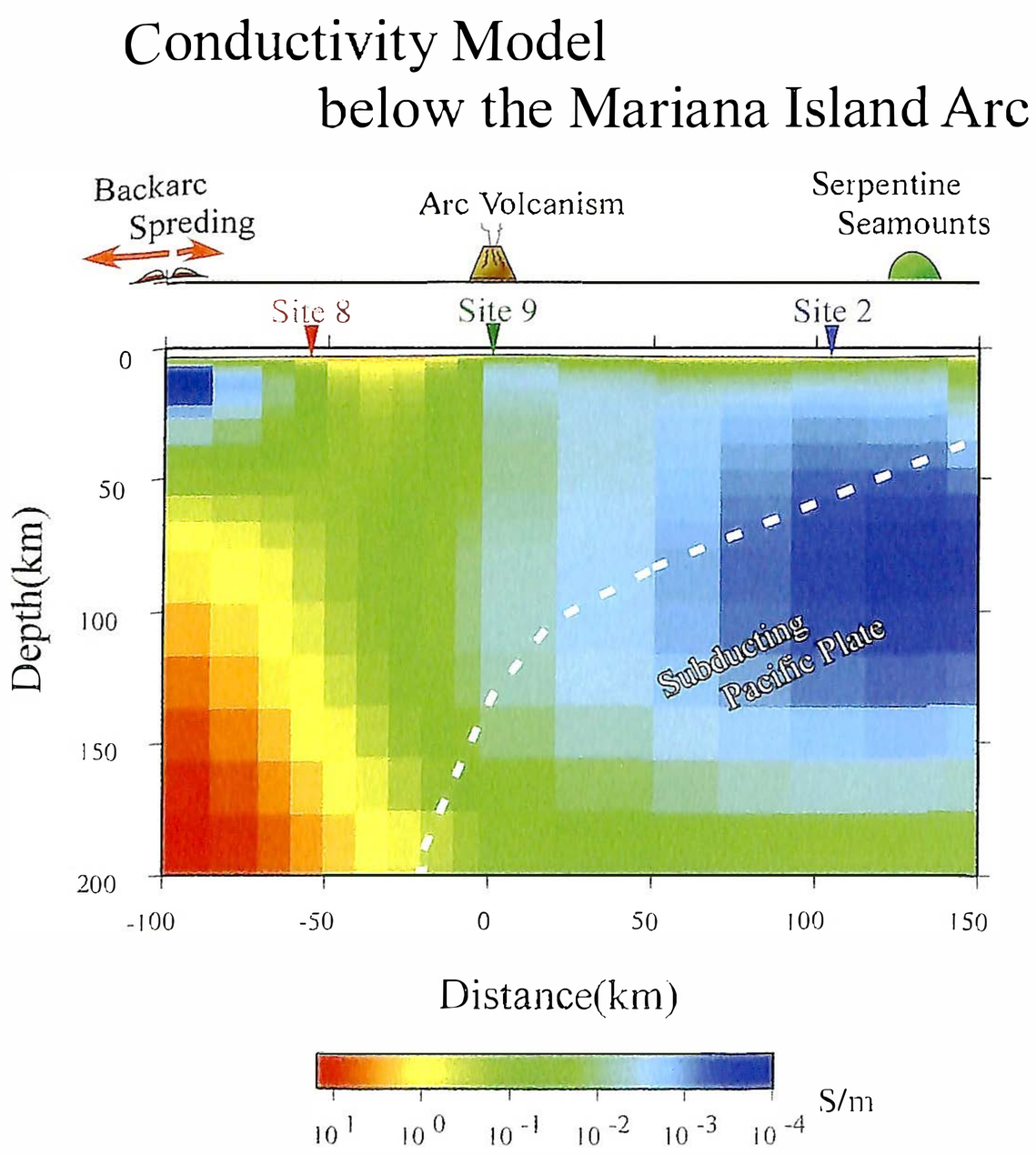


図5　マリアナ弧を東西に切る電気伝導度からみたイメージ

3. 自航式サンプル採取システムのオペレーション

近未来に巨大地震が想定されている相模湾・東海沖の海底活断層の示す変位量や再来周期を明らかにするは重要である。深海底の活断層でこれらを明らかするためには、正確な場所からピンポイントで表層堆積物試料を採取することが強く求められている。今回、東京大学海洋研究所と共同して、自航式サンプル採取システムを開発した。これは、船上からコントロール可能な自航式ビークルに柱状採泥装置を装着した物(図6参照)で、船上からビークルの位置を確認し、ビデオカメラにより目標とする地点の海底をリアルタイムに観察し、試料を採取するシステムである(図7参照)。このような機器は世界に類がない。この自航式サンプル採取システムの試験・運航を、調査船「かいよう」を使い実施することに成功した。このシステムは柱状採泥装置だけでなく、海底への観測機器の設置においても有効なツールで、実際に長期型熱流量測定システム(東京大学地震研)の設置もこのシステムを用いて行われた。従って、この装置を用いれば、「しんかい6500」や現行のROVが持つことのできない大型で重い海底観測機器を、指定されたピンポイントの場所に正しい姿勢で設置することができ、さらにこれらを水中着脱装置を用いてケーブルでつなぐことで、いくつかの機器を組み合わせたより複雑な長期観測ステーションの建設も視野に入ってくるものとして期待されている。

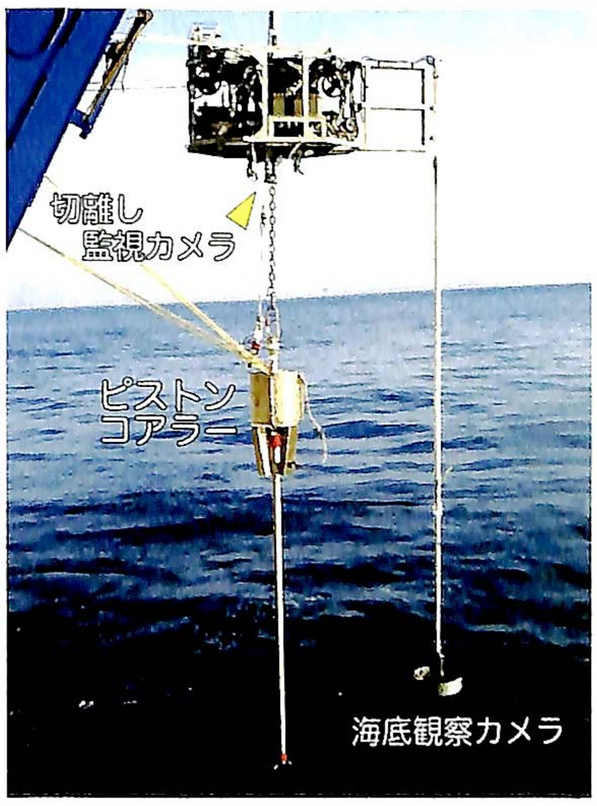


図6　調査船「かいよう」を用いたNSSの投入の様子



図7　NSSカメラが捕らえたピストンコア採取直前の海底(上の図)と採取直後の様子

海洋技術研究部

Marine Technology Department

海洋調査技術と機器開発の歴史

海洋科学技術センターの設立から現在に至る約30年において、海洋科学技術センター深海開発技術部、潜水技術部および海域開発研究部では、飽和潜水技術、波力エネルギ、有人潜水船、無人探査機および支援船舶の開発を実施し、わが国の海洋開発の一翼を担ってきた。これら海洋開発の技術は組織改変を経て海洋技術研究部が継承している。以下、この間に開発された海洋調査技術と機器開発の歴史を紹介する。

1. 有人潜水船

表1に主要目を示す2隻の有人潜水船が開発、建造された。

1.1. しんかい「6500」

6000m級潜水調査船の開発は、「しんかい2000」の開発を経て、実に20年の年月を費やされた。写真1に外観を示す「しんかい6500」は、1987年6月に起工、7月進水を経て、1989年11月に完成した。また、支援母船「よこすか」は1989年4月に完成し、実海域での調査潜航が開始された。

大深度潜水調査船の調査効率を上げるには、海面と海底との間の下降・上昇に要する時間を極力縮めることが求められるので、船型を工夫して、鉛直方向移動時の抵抗を少なくした。また、下降と上昇はバラストを

表1　開発・建造された有人潜水船の主要目

	しんかい6500	しんかい2000
全長 [m]	9.5	9.3
幅 [m]	2.7	3
高さ [m]	3.2	2.9
空中重量 [ton]	25.8	23.2
最大潜航深度 [m]	6500	2000
定員　研究者	1	1
乗組員	2	2
耐圧殻内径 [m]	2	2.2
潜航時間	9	6
ライフサポート時間	129	80
ペイロード　[kgf 空中]	200	100
最大速力　[kn]	2.5	3
作業機器	マニュピレータ 2x7自由度	マニュピレータ 1x6自由度



写真1　しんかい6500

搭載して自重を調整し、重力と浮力を利用することで省エネルギ化を実現した。耐圧殻は材質にチタン合金（AMS 4907C）を使用し、1986年に縮尺模型（内径700mm）による疲労圧壊試験を実施し、実機設計製作への検証を行った。

浮力材は大深度潜航における高圧力に耐えるために、中空ガラス球を使用し大径と小径を組み合わせ立方格子状に組み合わせるバイナリミクスチャ法がとられた。中空ガラス球の空隙をエポキシ樹脂で固め、比重0.54g/cm³の浮力材を使用している。

1.1. しんかい「2000」

前述した「しんかい6500」の建造に先立ち、大深度潜航時の海中における測位技術および着揚収技術の確立のために1981年に建造された。耐圧殻の材質は高張力鋼（NS90）を使用した。写真2に外観を示す。2002年11月11日、1411回の潜航を最後に運用を停止した。

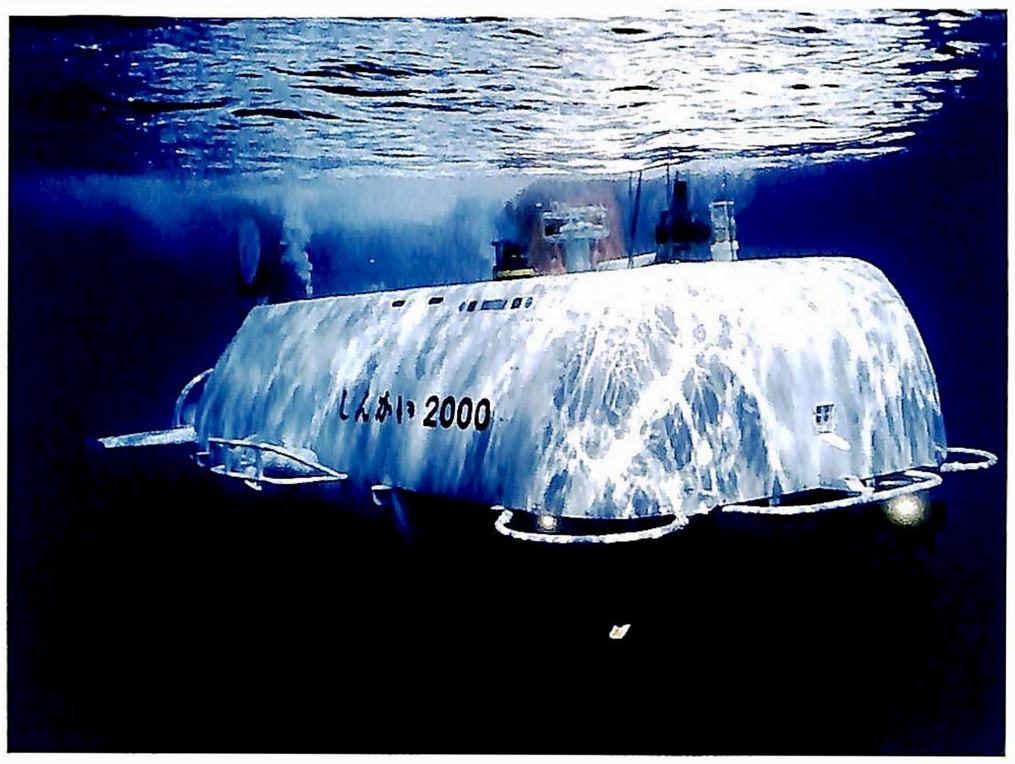


写真2　しんかい2000

2. 無人潜水機

2.1.「ドルフィン3K」

写真3に外観を示す「ドルフィン3K」は、3000mの潜航能力を有し、「しんかい2000」の救難機として、計画が進められた無人探査機で1988年に就航した。「しんかい2000」とともに「なつしま」に搭載され、「しんかい2000」による調査海域を事前に潜航して海域の安全性を確認したほか、「かいよう」に搭載して海底に棲息する生物の採集および調査機械の設置およびメンテナンスを実施した。わが国、初の遠隔操縦式無人探査機であったが、2002年9月29日、576回の潜航を最後に運用を停止した。

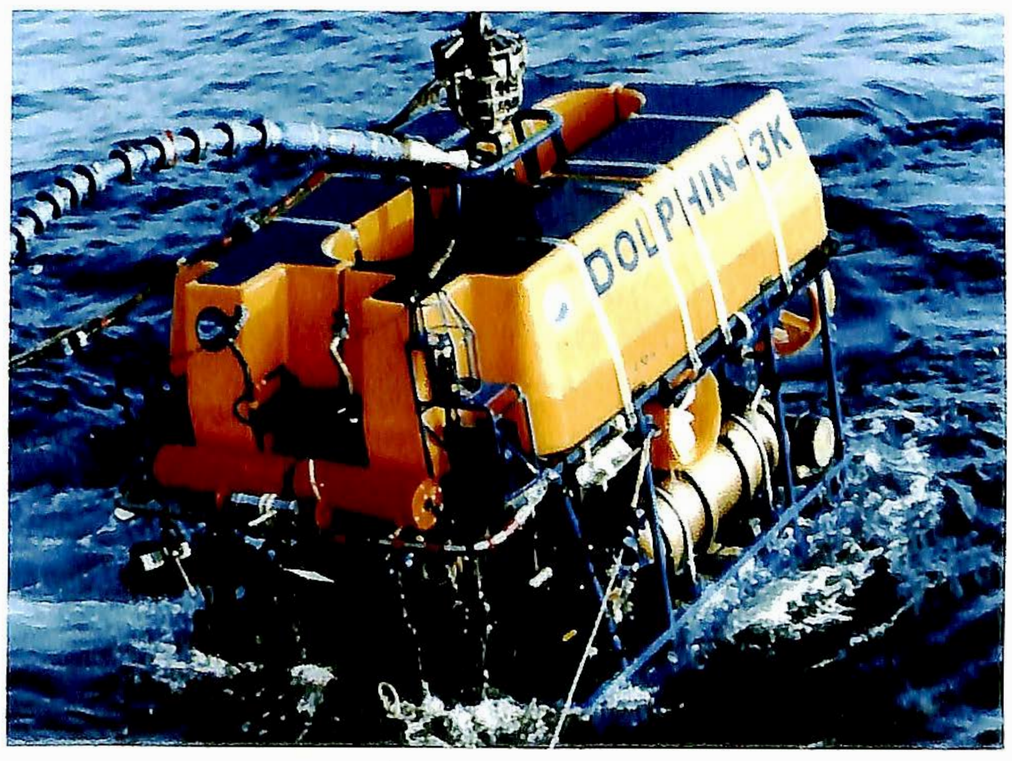


写真3　ドルフィン3K

2.2.『かいこう』

写真4に外観を示す「かいこう」は、11,000mの潜航能力を有し、「しんかい6500」の救難機として、計画が進められた無人探査機で1995年に就航した。支援母船上のオペレータがビークルに搭載したカメラの映像をもとにジョイスティックなどの制御装置を操縦して無人潜水機の運動や観測装置を操作する。ビークルに搭載したテレビカメラで目標物の詳

細な映像を移動しながら取得でき、生物や岩石などの採集作業などマニュピレータを使用した作業などに利用されている。作業には大きなエネルギが必要であり、支援母船から電力エネルギを供給するため、無人潜水機は支援母船と電力ケーブルで結ばれる。大深度潜航を目的としたビークルは、作業中のビークルが支援母船の動揺の影響を受けやすいなど、無人機の運動はケーブルによって拘束されてしまう。そこで、「かいこう」ではランチャー方式を採用し、目標深度においてランチャーからビークルを発進させ安定した観測を実現した。中空ガラス球の空隙をエポキシ樹脂で固め、比重0.63g/cm³の浮力材を使用している。2003年5月にビークルを流失してしまったが、大深度海洋調査への期待は大きく代用として、後述するUROV7Kを改造する作業が進められている。

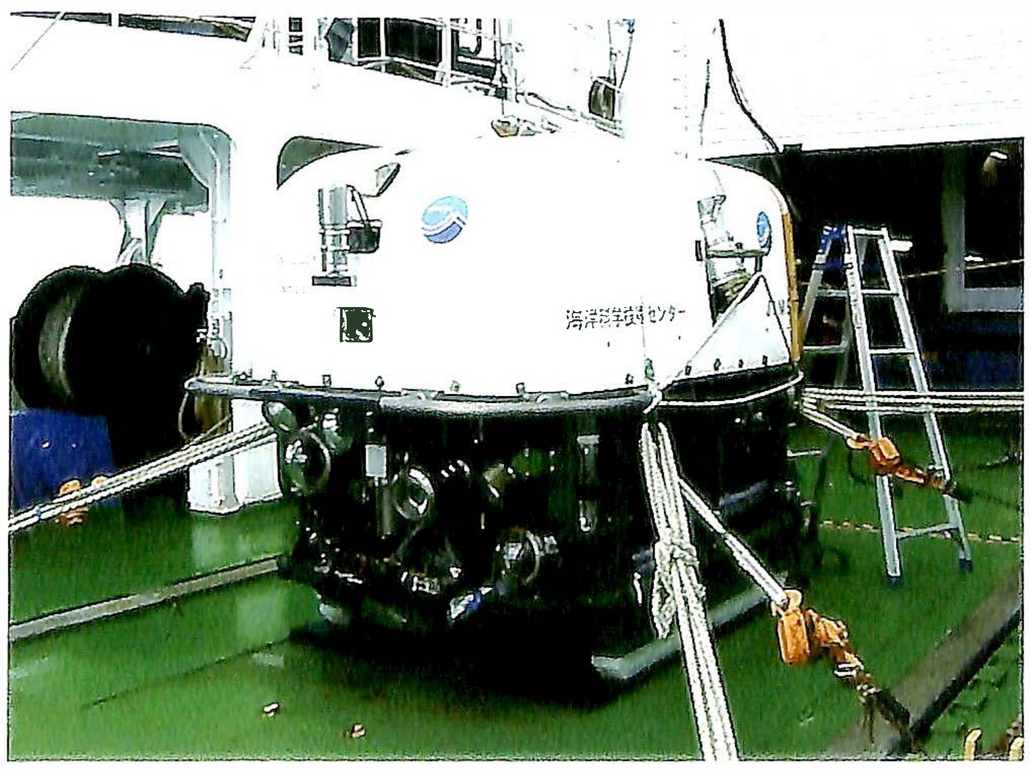


写真4　かいこう

2.3. 細径ケーブル式無人潜水機「UROV7K」

海中で無人機がテザーケーブルから受ける影響を可能な限り排除するため、無人機と支援母船間を通信ケーブルのみで接続したのが細径ケーブル方式無人潜水機（以下、UROVと称す）である。通信ケーブルは細径の光ファイバを使用して、スプーラと称する容器に長尺の光ファイバを収納した。スプーラは無人機と支援母船の双方に装備して、光ファイバは無人機と支援母船のそれぞれの移動につれて繰り出されるので、無人機の運動を拘束しない。潜航中に光ファイバが断線し通信が途絶した場合、すべてのバラストを投下して浮上する。UROVは一般に利用されている有索式無人潜水機と同様、支援母船上のオペレータが制御装置を操縦して無人潜水機の運動や観測装置を操作する。

上昇はすべてのバラストを投下して、浮力によって海面に浮上するように錘の切り離し装置を装備した。海水の密度は海水の状態方程式によって表現され、海水密度は塩分濃度、温度および圧力に大きく依存することが示されている。従って、海底付近で機体が浮きも沈みもしない状態をつくるには、機体が海水から受ける浮力の変化に適応しなければならない。機体の容積を変化させるには複雑な機構を要するので、UROV7000では自重をバラストで調整する調整装置を搭載した。


写真5　UROV7K

調整装置は浮上用バラストの

投下口を狭め電磁力によって鉄粒を保持する構造を持つ。従って、電磁力を消失させればバラスト(鉄粒)が投下され機体重量を低減させることができる。バラスト(鉄粒)を保持するために、電力を消費するが浮力調整装置の構造を工夫し省電力型を実現した。

大潜航深度に向けて長時間運用が可能なように、電池は最もエネルギ密度が大きいリチウムイオン電池を油で封入し、環境圧で利用できる均圧型リチウムイオン電池を初めて搭載した。内蔵電池ですべての電力を供給するので、海中で軽作業に限定かつ運用時間も定めて電池の容量を決定した。

実海域での潜航試験では、海底付近で数キログラムのバラストを投下して機体の重量を調整し、海底映像を取得することに成功した。外洋では、海面付近の風および潮流の影響を低減させるために、船上スプーラを小型ウィンチを使用して深度300mに吊り下げている。写真6は「なつしま」による伊豆小笠原海域での潜航試験で得られた3,700m付近の海底で撮影したテレビ映像の一部である。船上に大型ウィンチを必要としないので、艤装時の船舶への負担が少ない。



写真6　海底のテレビ映像(伊豆小笠原3,700m)

2.4. 深海巡航探査機「うらしま」

写真7に外観を示す「うらしま」は、2000年3月に完成した最先端のAUVで、科学的海洋観測を主要ミッションとしている。現在、実海域試験によって測位およびエネルギ技術などの検証を行っている。全長9.8m、幅1.3m、高さ1.5mで、最大深度3500m、巡航速度3ノット、最大速度4ノットである。動力源は、2002年までリチウムイオン電池を使用した試験を実施し、2003年以降は燃料電池を搭載することにより、300kmの航続距離を目指している。リチウムイオン電池では慣性航法装置を使用し、前方障害物回避ソーナー、ホーミングソーナーと組み合わせて自律航行を行う。この他、光ファイバーによる遠隔操作モード、音響テレメトリによる遠隔操作モードを有しており、ミッションにより運用方法を選択できる。観測機器も、サイドスキャンソーナー、CTDO、テレビカメラ、スナップショットデジタルカメラといった通常の機器の他、前方の状況を超音波によって画像化する音響画像装置を装備している。



写真7　うらしま

3. 波力エネルギ

波力エネルギ利用技術の研究は、1976年に開始された大型浮体式波力発電装置「海明」の研究開発に始まる。その後、波浪エネルギから電気エネルギへの変換効率を高めるために、写真8に構成を示す沖合浮体式波力装置「マイティホエール」による波力エネルギの実証試験が実施された。実海域における長期間の実証試験のために1994年から2001年まで実験データが収録・解析された。その結果、波浪エネルギから電気エネルギへの変換効率は最大で15%であり、水槽実験および理論検討による推定値とほぼ一致することが示された。

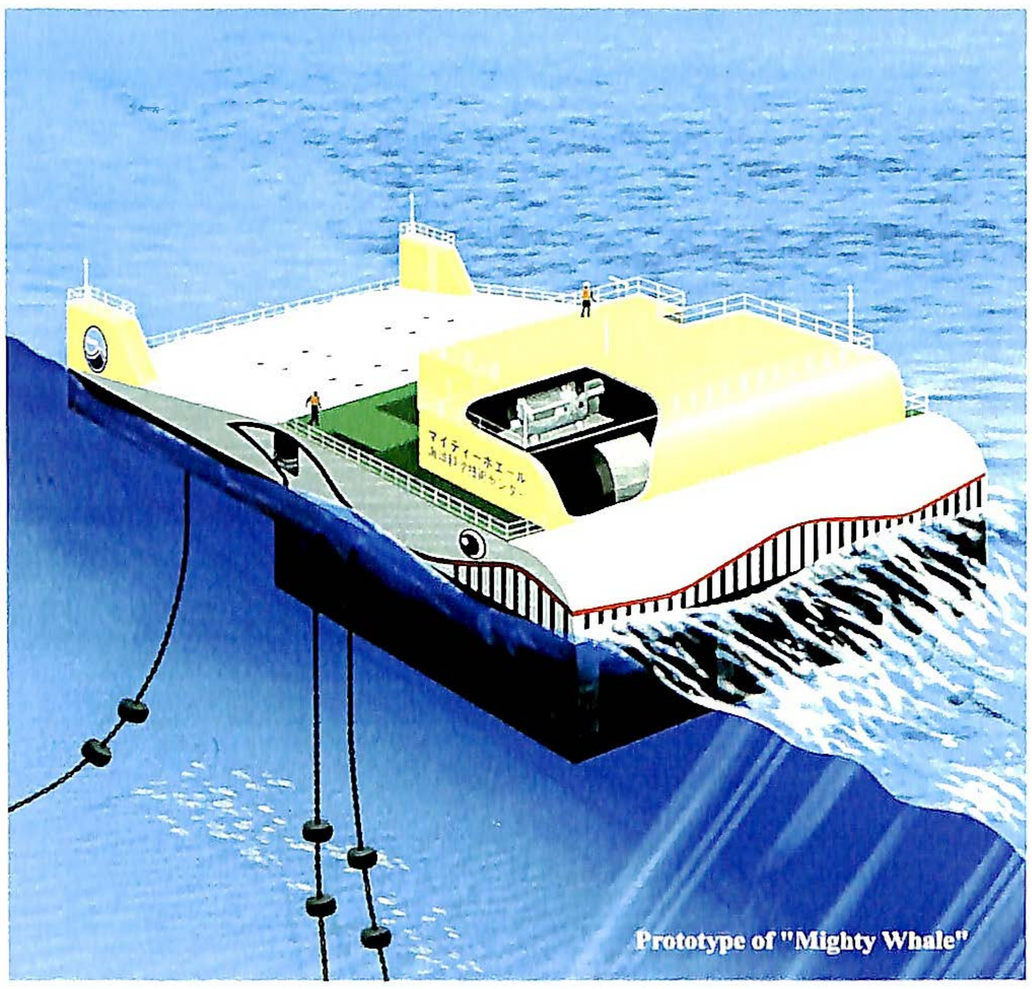


写真8　マイティホエール

4. 潜水技術

水深100mまでの実験（1971～75年）では、「シートピア計画」と称して30m、60mの海底にダイバーがそれぞれ3日間居住した。この海底居住実験では、海中作業基地（ハビタート）を海底に設置して、内部を周囲の水圧同等のヘリウム・酸素環境下で温度や酸素分圧の環境コントロールを行って4人のダイバー（アクアノート）が海底に滞在した。水深100mの実験では、海底居住方式をやめて船上に高圧のまま居住する方式とし、100mの海底に水中エレベータで9回降りて行き、本格的な水中作業の実績をつくった。後にこの潜水技術は1979年～81年本州四国連絡橋工事の水深50mまでの検査工事にシステムとともに参加して実用に供することができた。

写真9に潜水実験風景を示す、水深300mまでの実験（1976～90年）は、まず、潜水シミュレーターを使っての模擬実験（シードラゴン計画）によってダイバーの加圧・減圧、高圧下の水中作業、潜水器・装備品の安全確認が行われた。実際の海域実験では、ニューシートピア計画と称して海中作業実験船「かいよう」（後に海洋調査船）と搭載されているSDC/DDCシステムを使って水深100m、200m、300mと徐々に深度を増し、「かいよう」のダイナミックポジショニング（定点保持）によって、ダイバーによる深海での水中作業、海底でのダイバー誘導による構造物の組立て、パイ


写真9　潜水実験風景

プラインの模擬保守作業、水中作業能力の検査など実施し、深海（水深300mまで）でのダイバーによる長時間の作業実績を築いた。また、この実験では無人探査機「ホーネット」によるダイバー監視・支援作業が安全確保に大きく貢献した。

5. 支援船舶

海洋科学技術センターは就航中の船舶を5隻有する。有人潜水船の支援母船として建造された「なつしま」および「よこすか」、潜水技術支援の目的で開発された「かいよう」さらに深海研究および海洋調査のために「みらい」が建造された。表2に各船の主要目を示し、以下、各船の概要を紹介する。

表2　建造された海洋調査船および母船主要目

	かいよう	なつしま	よこすか	かいれい	みらい
全長 [m]	61.6	67.4	105.2	105.2	128.6
幅 [m]	28	13	16	16	19
深さ [m]	10.6	6.3	7.3	7.3	10.5
喫水 [m]	6.3	3.6	4.5	4.5	6.9
総トン数 [G.T.]	3176	1738	4439	4628	8687
航海速力 [kn]	約13	約12	約16	約16	約16
航海距離 [n.m.]	約6200	約10800	約9500	約9600	約12000
定員　研究者（観測員を含む）	31	11	15	31	46
乗組員	29	44	45	29	34
主機関	電動機 4x860kW 2x可変ピッチプロペラ	ディーゼル 2x630kW 2x可変ピッチプロペラ	ディーゼル 2x2250kW 2x可変ピッチプロペラ	ディーゼル 2x2250kW 2x可変ピッチプロペラ	複合1）

1）ディーゼル・電動機複合　主機関　ディーゼル 4x1560kW
電動機　2x700 kW

5.1.「なつしま」

有人潜水船「しんかい2000」の支援母船として、1981年に就航した。わが国、初の大深度潜水調査船を支援するために、船尾に設置されたAフレームクレーンをはじめとする特殊装置の開発を実施した。着水および揚収作業、音波を利用した潜水船と通信または測位のために、船体が放射する雑音を低減するための開発が実施された。

5.2.「かいよう」

写真10に外観を示す「かいよう」は船体を双胴船として、水中部に没した部分で浮力を得て海面上の船体を支える。船殻と船体上部を支える構造部の水線面積係数を小さくして、船体上下動による浮力変化を抑制した。SWATH（Small Water Area Twin Hull）構造と呼ばれ、波浪による

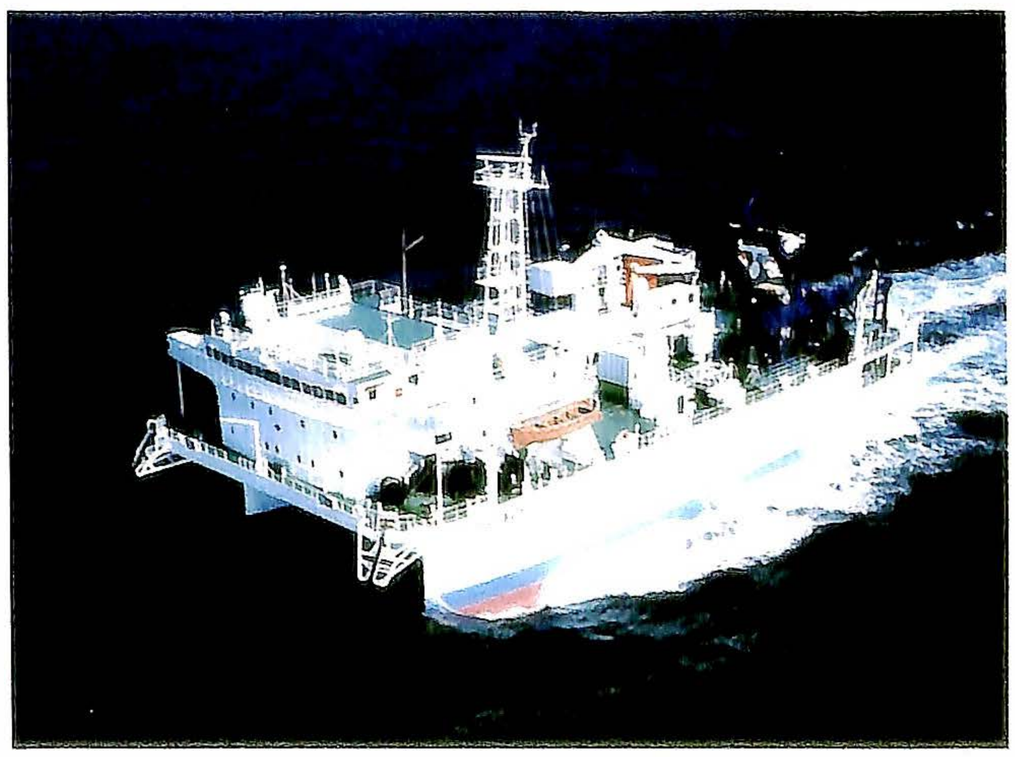


写真10　かいよう

動揺モーメントの影響を小さくできる。1985年に就航し、動揺しにくい利点を生かし、実海域における飽和潜水技術開発のために水中エレベータを搭載した。飽和潜水実験に使用した水中エレベータを撤去し、上甲板の開口部を塞ぎ海洋調査船として活躍している。

5.3.「よこすか」

有人潜水船「しんかい6500」の潜航を支援するために1988年に建造が始まり、1989年に就航した。「しんかい6500」支援のほか、「うらしま」などの無人探査機の試験航海、曳航体による海底調査およびブイの設置回収作業も実施している。

5.4.「かいれい」

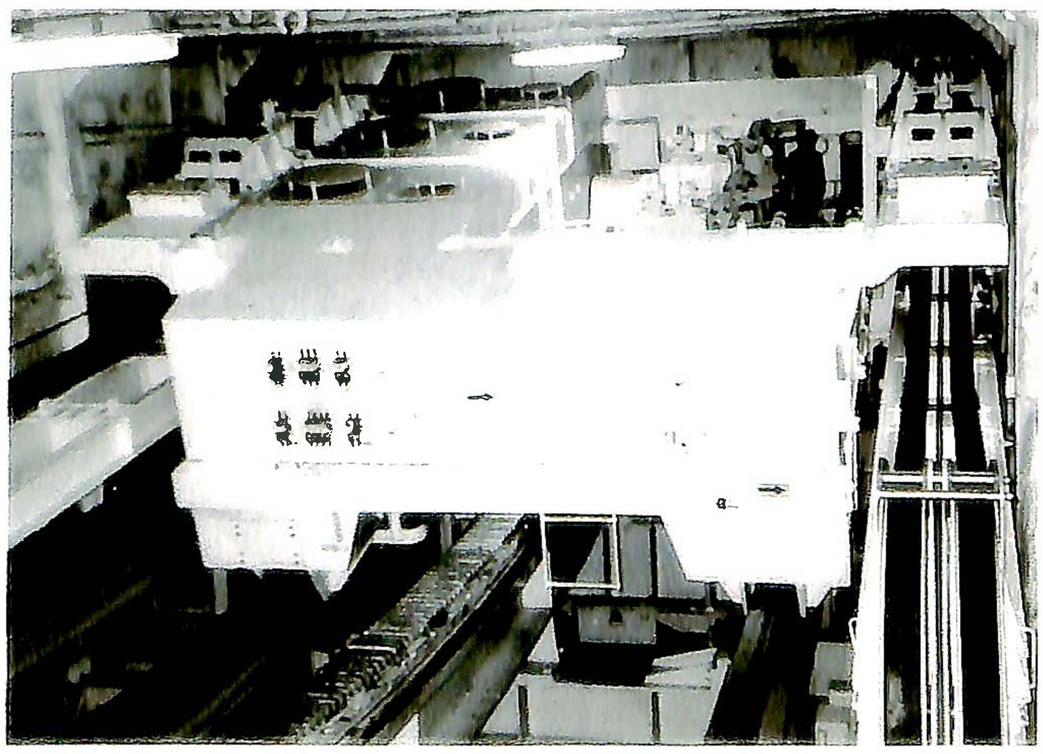
10,000m級無人探査機の専用母船として1997年に就航した。このほか、深海調査研究船として、海底下深部構造を調査するための機器を搭載する。音源としてエアガン、受信装置として約5,000mのストリーマケーブルおよび高圧空気を作るためのコンプレッサを備える。

5.5.「みらい」

写真11に外観を示す「みらい」は海洋の熱循環、物質循環、生態系および海洋底ダイナミクスの解明と海洋観測ブイの展開を目的として1997年に就航した。大型の海洋研究船として耐候性が有利であること、航続距離も長いことから、研究航海が長期間にわたるだけでなく、海象が悪い海域でも調査を実施している。細長い船体は波浪によって、横揺れが極端に大きくなるのでさまざまな横揺れ低減装置（減揺装置）が開発されてきた。航行時に効果があるフィンスタビライザは、多くの船舶に利用されているが、停船して作業を行う観測船では効果を期待できない。そこで本船には、写真12に示す大型船としてはじめて船幅方向に移動する稼動質量の運動をモータで制御して、横揺れを抑制するハイブリッド減揺装置を搭載した。ハイブリッド減揺装置は荒天時における効果を実証し、観測作業をはじめ住環境の向上に貢献している。



写真11　みらい


写真12　ハイブリッド減揺装置

海洋観測研究部

Oceean Observation and Research Department

1. トライトンブイネットワークの完成と2002－2003エルニーニョ発生から消滅までの観測

1.1. 熱帯域のエルニーニョ観測ブイネットワークの概要

熱帯域のエルニーニョ観測ブイネットワークはエルニーニョと南方振動（ENSO）に関する年々変動についてモニターし、理解し、予測能力を向上するためのデータを得ることを目的としている。このブイネットワークは太平洋赤道沿いに約70基の表面係留ブイからなり、海洋と海上気象データをリアルタイムで得ることができる。TAOブイ網として米国海洋大気庁太平洋海洋環境研究所が中心となり1985年－1994年の熱帯海洋と全球大気研究計画（TOGA）の観測システムとして展開されてきた。

多くのブイは1980年台中期から展開され、1990年台のはじめにブイ網として展開が達成され、15年以上にわたり熱帯太平洋全域でENSOに関わる変動を捉えてきた。もっとも長いデータは1980年から継続的に設置されてきた赤道東経110度のブイからのものであり20年以上にもわたり、季節内変動から季節変動、ENSO変動、10年規模の時間スケールまで幅広く現象が見られ、極めて貴重なデータとなっている。

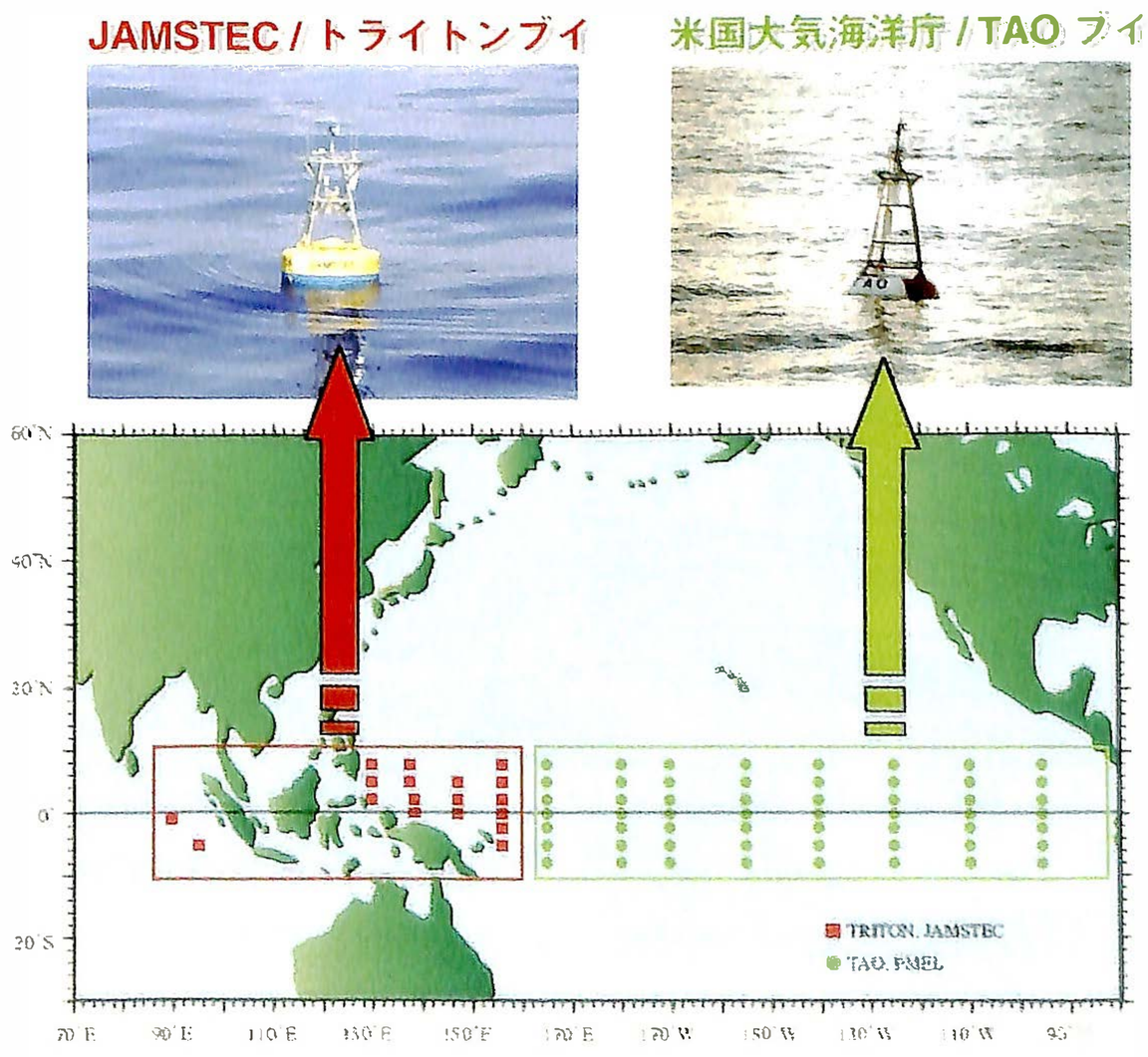


図1　トライトンブイとTAOブイ

海洋科学技術センターは、水温のみならず海洋の塩分計測を可能にしたトライトンブイを開発し、1998年に東経156度の4点から展開を開始した。トライトンブイが西太平洋のTAOブイに取って代わり、2000年からTAO/TRITON（タオ・トライトン）ブイ網として日米共同でデータを取得し提供してきた（図1）。2001年から東部インド洋においても赤道東経90度と南緯5度東経95度の2点で展開してきた。これは大気の季節内振動が引き起こす赤道ジェットにともなう海洋変動や、ダイポールモード変動にともなう海洋内部の変動を調べることを目的にしている。

1.2. トライトンブイネットワークの完成

2002年8月13日に海洋地球研究船「みらい」により、フィリピン東方の北緯8度、東経130度に18基目のトライトンブイが設置された（図2）。これにより、トライトンブイによる西部熱帯太平洋およびインド洋での当初目標に掲げた観測網が完成した（図3）。このネットワークにより2002－2003エルニーニョの発生から消滅までをとらえることができた。



図2　トライトンブイ18基展開達成時の海洋地球研究船「みらい」上での記念写真

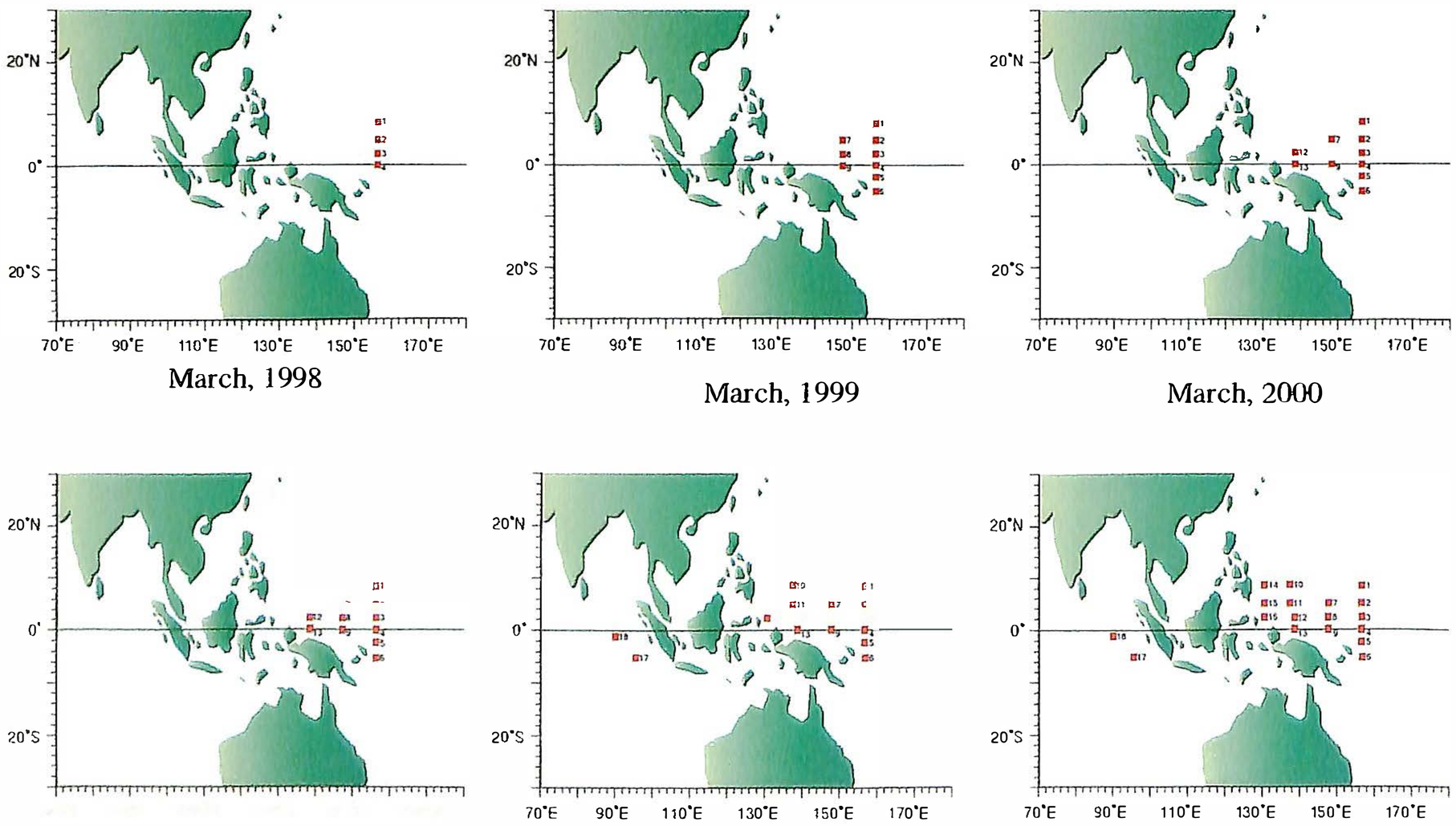


図3　トライトンブイの発展

1.3. 2002エルニーニョの発生・発達・終息の様子

史上最大の1997/98エルニーニョの終了後、2年以上に渡りラニーニャが継続し西部熱帯太平洋に熱が蓄えられていった。そして2001年6月から2002年5月にかけて大気の季節変動による暖水の東部熱帯太平洋への移動があり、2002年夏以降エルニーニョが発生し12月にかけて発達したが2003年2月には急に終息した。

(1) エルニーニョ発生の準備：西太平洋への暖水の蓄積

TAO/TRITONブイネットワークから得られた赤道沿いの海上風、海面水温、20度等温線深度とその平年値からの偏差の時系列データに注目する(図4)。2000年3月から4月に西部熱帯太平洋では、この20度等温線深度が赤道上で非常に深くなり、ブイのデータが取られるようになった1990年以来最大となっていた。トライトンブイの時系列データは、1998年からラニーニャが継続したことにより、西部熱帯太平洋には十分熱が蓄えられており、エルニーニョへ移行する一つの条件が整えられた状態にあることを示した。

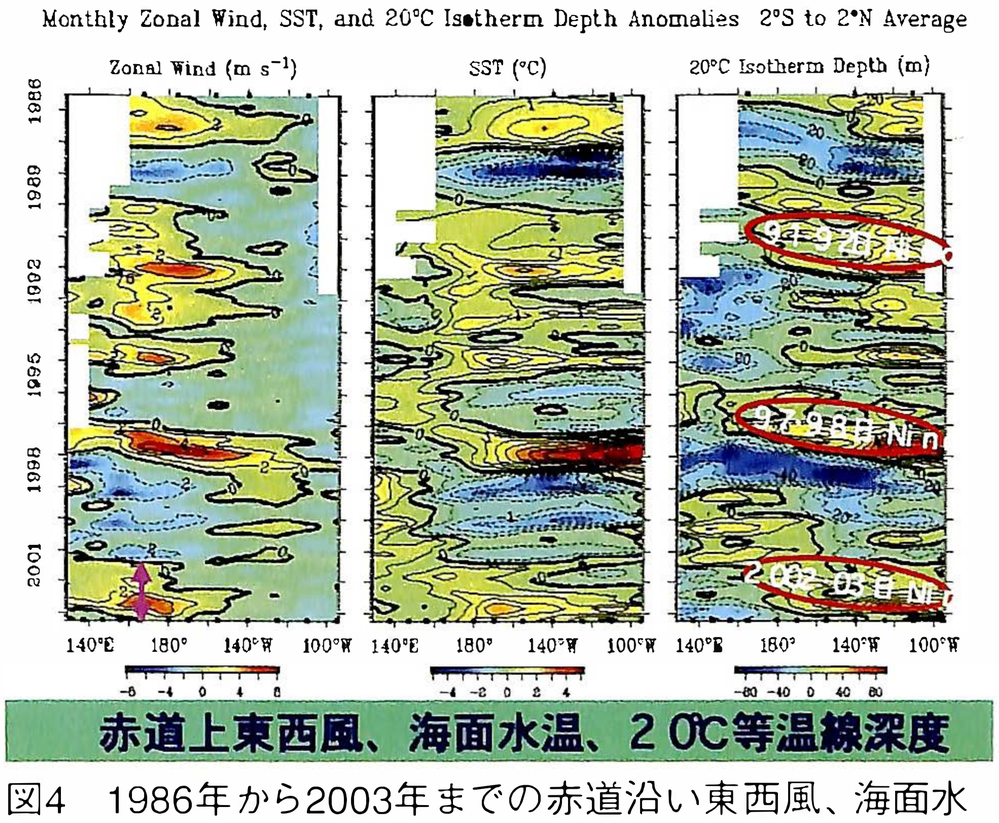


図4　1986年から2003年までの赤道沿い東西風、海面水温、20℃等温線深度

(2) エルニーニョ発生のきっかけ：30～60日周期の西風が暖水を東に押し出す効果

エルニーニョ発生のほかの条件は、この西部熱帯太平洋に蓄えられた暖水を東に押しやる役割を持つ季節内変動に伴う強い西風がこの暖水プール域で強く吹くことである。トライトンブイは、風、水温躍層の変化と同時に流速もリアルタイムの計測を可能にし、これにより、2001年6月の西風バーストに伴う劇的な海洋の変化を見事にとらえた(図5)。6月末に東経156度のトライトン付近で季節内振動に伴う対流活動が停滞し、西風が連吹し、1.5m/sの極めて強い東向流が引き起こされた。この赤道ジェットは、この東側で暖水の収束をもたらし大きな躍層の下向き偏差をつくる。このときは西風が止まったあとも0.5m/s以上の強い東向流は約1ヶ月間継続した。このあと水温躍層の下向き偏差は東部熱帯太平洋に伝播した。しかし、海面水温の正偏差域が中部太平洋に移動したものの海洋と大気の大規模な結合は起こらずこの年にはエルニーニョの発生はみられなかった。

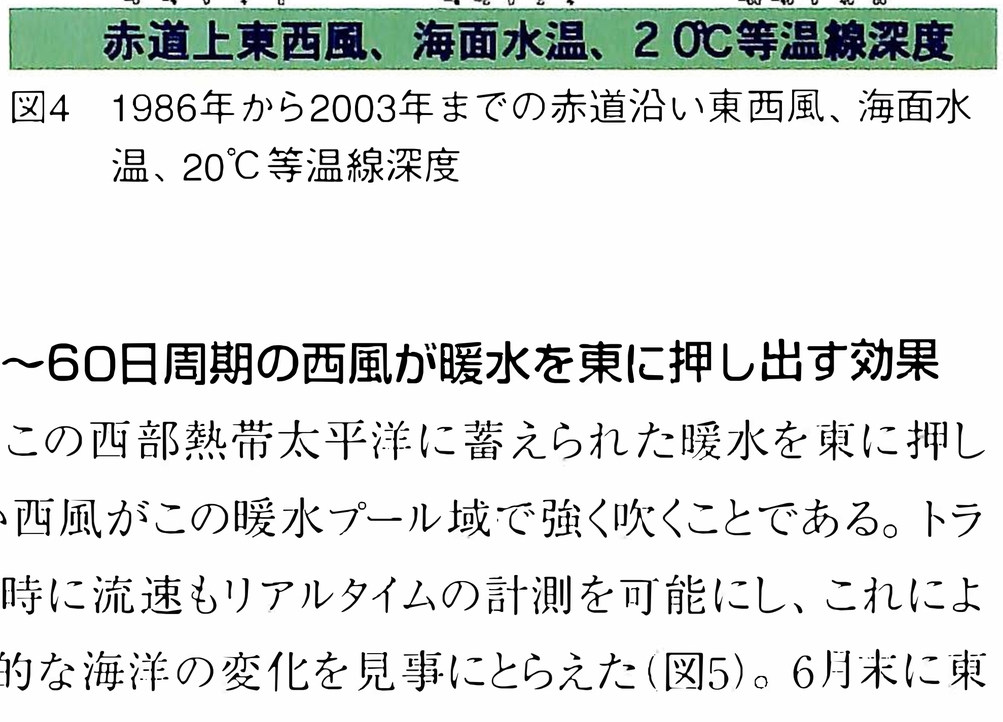


図5　東経156度に沿う東西風と10m深の東西流速

(3) エルニーニョの発生と終息：

2001年12月、2002年5月に強い西風バーストが起こり、2002年夏には中部太平洋では海洋と大気の強い結合がおこり、高い海面水温の海域と大気の対流活発域が同期しながらゆっくりと東部太平洋に進行した。12月には東部太平洋での100mから150mで平年よりも5℃以上高温となり、また海面水温も東部太平洋から中部太平洋にかけて2℃以上高温となっておりエルニーニョの成熟期の状態となった(図6)。しかし、2003年2月には温度躍層の上向き偏差をもたらすケルビン波の伝播とともに暖水が赤道域から失われ、東部熱帯太平洋の海面水温も平年の状態に戻りエルニーニョは終息した。

観測史上最大といわれた1997－1998エルニーニョのように半年程度の間におきた数回の西風バーストで急速に発達した場合と異なり、今回のエルニーニョは発生までに1年程度を要し、その規模も小さかった。このように各エルニーニョ間の特徴の違いが何によってもたらされるか非常に興味深く、塩分データなどを考慮した表層混合層の解析や、躍層内の水塊混合過程の解析を進め熱帯循環と亜熱帯循環の関わりについて研究を進める必要がある。

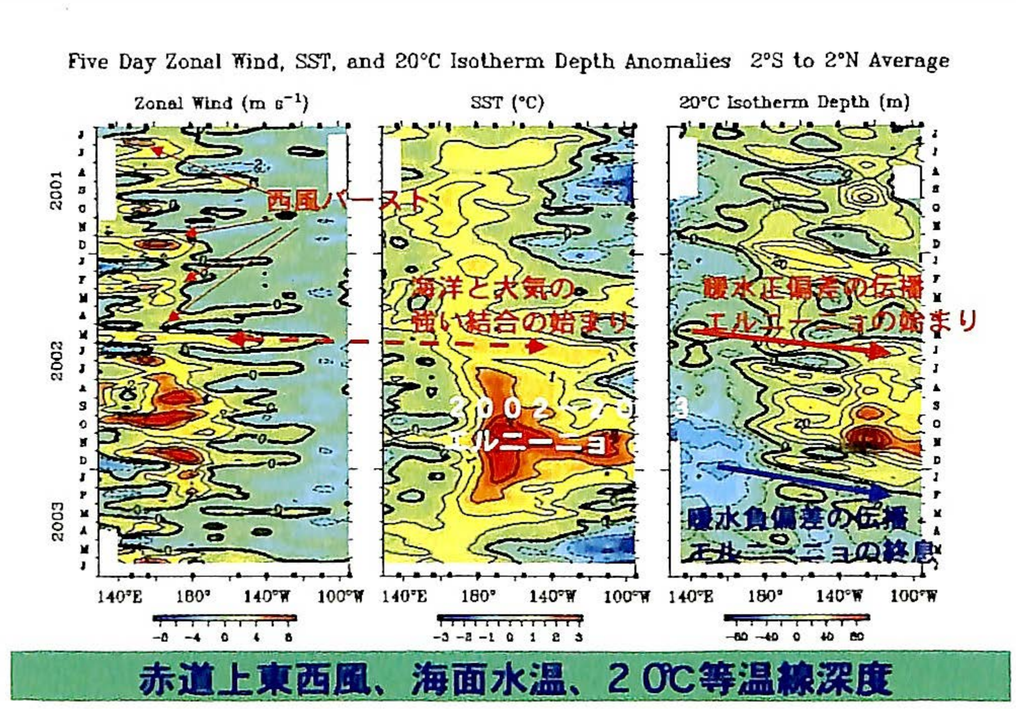


図6　2001年から2003年までの赤道沿い東西風、海面水温、20℃等温線深度

1.4. 社会的貢献と今後

このようにTAO/TRITONブイ網は、熱帯域の様々な時間スケールで起きている海洋と大気変動についての研究に、特にENSO現象の理解を深める上で、最も重要で基礎的なデータを提供してきている。また、これらのブイデータは世界の気象機関でエルニーニョ予報モデルの初期値として用いられ6ヶ月以上前に実用的なエルニーニョ予測を可能としている、また、日々の気象予報や季節予報にも利用されており、予測能力の向上に著しく貢献しておりきわめて社会的意義は高いといえる。

将来的には、多数個のブイを10年－20年にわたり持続的に展開することや、インド洋熱帯全域へのブイネットワークの拡張を考えれば、小型、軽量、安価な簡易型のブイの技術開発が必要である。逆に、より高精度で熱フラックスを計測し、さらには生物・化学センサーを搭載するようなブイを、それぞれの海域の特性が強く現れるような点に少数展開するような高機能型のブイのニーズも高い。今後、さらなる研究の進展を図るとともにそれらの技術開発が必要と考えられる。

2. Beagle2003

2.1. はじめに

2003年8月から2004年2月にかけて、海洋地球研究船研究船「みらい」を利用して、南半球中緯度の各大洋を横断する海洋観測が実施された。この航海はJAMSTEC30周年事業の一環であり、Blue Earth Global Expeditionの頭文字をとってBEAGLE2003と命名された。図7は上段に測点を、下段に採水層を示したものである。周航は、本年8月にブリスベーンを発ち、太平洋、エルパソ、大西洋、インド洋の各セクターで観測を実施し、2004年1月にフリーマントルに到着した。その後ケルゲレン海台における観測を経て、2004年2月に再びフリーマントルに入港し、終了した。この内、太平洋、大西洋、インド洋のセクターでは、それぞれ、1990年代にWOCEで観測されたWHP-P6、A10、I4、I3の再観測を実施した。これらのWHP再観測点の合計は、実に493点となり、全点でCTDおよび最大で鉛直36層採水による、海面から海底直上までの塩分、水温、溶存酸素、栄養塩、流速観測が、また半分以上の点で、炭酸系3成分、フロン等の分析が実施される他、炭素同位体比、セシウム等の放射性物質分析のための海水が採取された。例えば太平洋セクターにおいては、1,500m以深のCTDによる測定精度は、水温が0.6mK、塩分がPSS78で0.0004、溶存酸素が0.04 μ mol/Lという高精度観測を実施することができた。

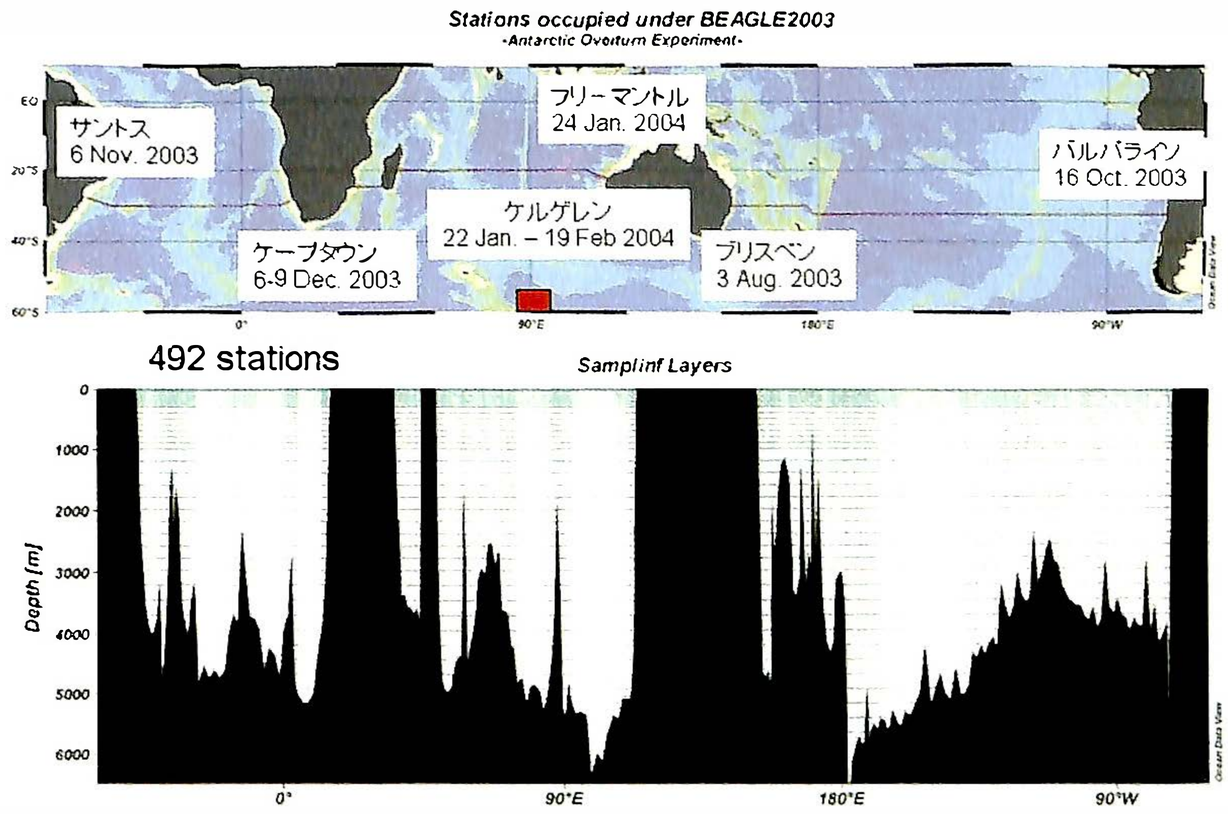


図7　Beagle2003の測点（上段）と採水層（下段）

2.2 国際協力

海洋観測研究には、南北問題が存在している。JODC、NODCあるいはAODCにアーカイブされたhydrographic observationの測点数は2001年現在で、北半球海洋10に対し南半球海洋は、わずかに1.5に過ぎない。この比は、皮肉なことにWOCEの期間中に大きくなった。各国で自国周辺の観測を強化した例が多かったこと、そして海洋観測に資本を投下できる国家が北半球に偏っているためである。南半球＝海半球でのこのような観測研究活動の低調さを憂慮し、各国の主要な海洋研究所、大学の経営者で構成される「全球海洋観測パートナーシップ（POGO）」では2001年に南半球海洋での観測と海洋研究者育成を強化することを主旨とするサンパウロ宣言を採択した。本周航航海は、サンパウロ宣言に対応するものとして提唱されPOGOからの支持と協力を受けている。その結果、南半球の10ヶ国を含む12ヶ国（インドネシア、スリランカ、アルゼンチン、チリ、トルコ、ペルー、コロンビア、ウルグアイ、ブラジル、ナミビア、タンザニア、南アフリカ）からのべ18人

のPOGO Traineeが乗船し、さらに8ヶ国（チリ、ブラジル、ナミビア、南アフリカ、ケニア、モザンビーク、マダガスカル、モーリシャス）からのべ12人の若手研究者を招聘した。また、2003年のWSSDヨハネスブルグ会議でも、アフリカ諸国に対する日本の具体的なscience capacity buildingとして紹介され、関心を集めている。その他にも、ACE-CRCからはエンジニアがのべ3人乗船するなど、6ヶ国（オーストラリア、ニュージーランド、フランス、チリ、ブラジル、南アフリカ）からの支援を受け、7つの国際共同プログラム（CSIRO, ACE-CRC, コンセプシオン大学, サンパウロ大学, IAEA, ケープタウン大学, IOCCG, Argo Science Team (Scripps, AOML, SOC)）の下、のべ10人の研究者が乗船した。

2.3. Quick Topics

図8上段はBEAGLE2003で得られた塩分の鉛直断面を示す。図中、黒枠で囲った部分は、塩分の極小層を示し、これは、南極中層水と呼ばれる水塊である。南極中層水は、南極周辺で大気と熱交換を行い、その後、中層へ沈み込むことが知られている。図8下段は、BEAGLE2003で得られたポテンシャル水温と、約10年前に同一測線で実施された観測によって得られたポテンシャル水温との差を、縦軸を密度として示したものである。黒枠で囲った部分が、上段の南極中層水に該当する。南極中層水が太平洋、大西洋、インド洋で、約0.07℃冷やされていることがわかる。この0.07℃という値は、極めて微小な変化と考えられがちであるが、この冷却が南極中層水の全てで見られる現象だと仮定し、この中層水の厚みを200mと考えると、この冷却によって中層水から失われた熱量は、温度差×比熱×南極中層水の質量で計算される。それは、

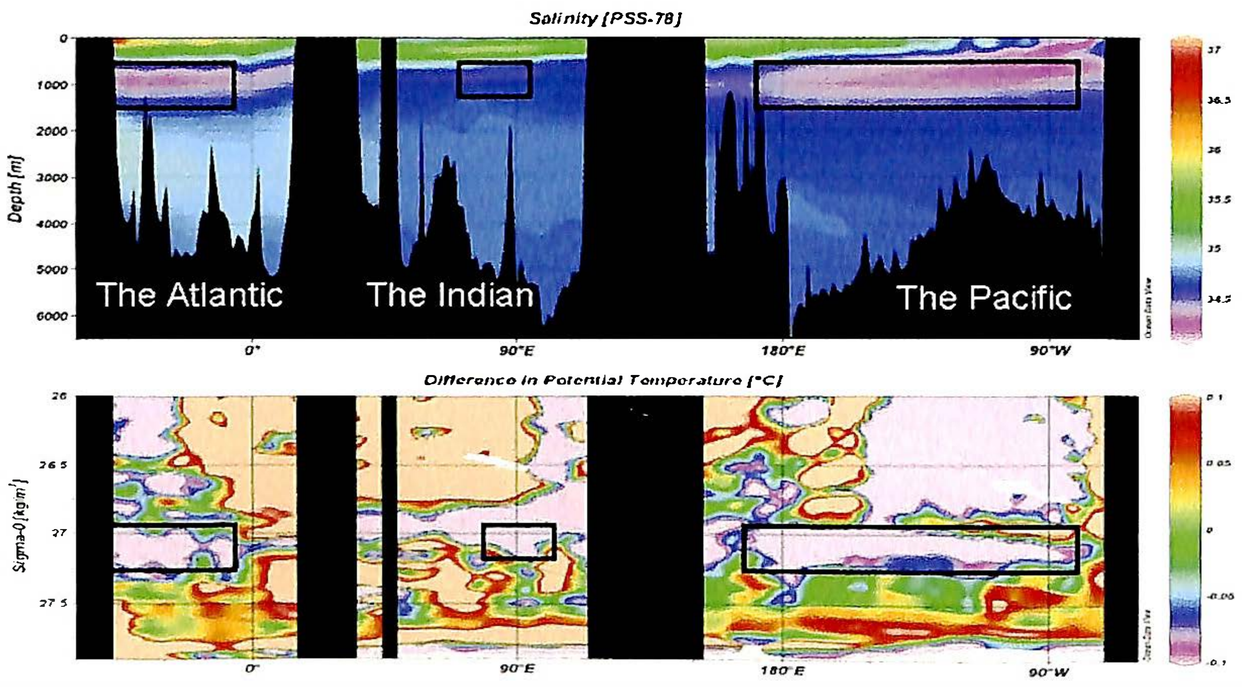


図8　上段：Beagle2003によって得られた塩分の鉛直断面図。黒枠の部分は南極中層水（塩分極小層）を示す。南極中層水は南極周辺で大気と熱交換を行う代表的な水塊の一つである。下段：約10年前に実施された同一測線とのポテンシャル水温の差。縦軸は密度を示し、黒枠の部分が南極中層水を示す。南極中層水が約0.07℃冷えていることがわかる。大気と海水の熱容量を考慮すると、この冷却は、全大気を10年間で約1.2℃暖める熱量が中層水から失われたことをを示唆している。

$$0.07\,℃ \times 3.9\,J/gK \times 200m \times (5.4\times10^{13}\,m^2 + 2.7\times10^{13}\,m^2 + 2.0\times10^{13}\,m^2) \times 10^6$$
$$= 6\times10^{21}J$$

となる。全大気の質量はおよそ、5×10^{18}kg、その比熱は1J/gKであるから、南極中層水から失われた熱量は、大気全体をおよそ1.2℃上昇させる熱量に相当する。今回、発見された種々の海洋内部構造の変化と気候変動、特に大気海洋の熱交換の実態については更に研究が進められている。

3. 西部北極海気候研究(JWACS: Joint Western Arctic Climate Studies)

北極海域における観測研究推進のために、海洋科学技術センターとカナダ漁業海洋省は、2000年3月にMOU(Memorandum of Understanding)を締結した。その後、3度のワークショップを開催し、西部北極海の気候システム理解のための共同観測研究プロジェクト「西部北極海気候研究(JWACS: Joint Western Arctic Climate Studies)」が、2002年から始まった。

3.1. JWACSとは

JWACSは、日本側は海洋科学技術センター海洋観測研究部、カナダ側はカナダ漁業海洋省／海洋科学研究所(DFO/IOS)が中核となり、西部北極海において以下の様な目的を持った学際的な観測研究である。

(1) 物理環境を中心として、地球規模気候変動と北極海気候変動との関係を探るために、季節変動スケールから10年スケールの変動に対する北極海の応答、北極海と太平洋/大西洋との相互作用についての理解を深める。

(2) 北極海の平均循環場及び構造変化を調べるために、北極海成層構造を構成する主要水塊の循環経路の解明を目指した海洋観測、係留観測網を展開する。

(3) 物理環境変化の生物環境への影響を調べる。

(4) 地球温暖化の要因となる炭素循環を調査する。また、海底下からの温暖化ガス放出など、地質分野との連携を図り、総合的調査行う。

(5) 海底堆積物より、最終氷期以降の北極海環境変遷について把握する。

3.2. 観測活動

(1) JWACS 2002

図9に示した様に、海洋地球研究船「みらい」、カナダ沿岸警備隊砕氷船「ルイ・サンローラン号」と「サー・ウィルフリッド・ローリエ号」の3隻により、8月から10月にかけて、船上での物理、化学、生物、地質観測を行うと同時に、係留系の回収・設置と氷海観測用漂流ブイ(J-CAD)を設置した。

観測海域は、アラスカ・カナダ沖北極海のみならず、ベーリング海峡(太平洋側)からデービス海峡(大西洋側)までの環西部北極海全域において、3隻の船舶の長所を最大限に活かし、約500点でのCTD/XCTD/採水観測を実施することができた。単年度で、このような広域同時観測を実施することができたのは、西部北極海観測史上初である。



図9　JWACS 2002に参加した観測船と航跡図

(2) JWACS 2003

カナダ沿岸警備隊砕氷船「ルイ・サンローラン号」と「サー・ウィルフリッド・ローリエ号」の2隻により7月から10月にかけて、船上での物理、化学観測を行うと同時に、係留系の回収・設置と氷海観測用漂流ブイ(J-CAD)の回収・設置を行った(図10)。

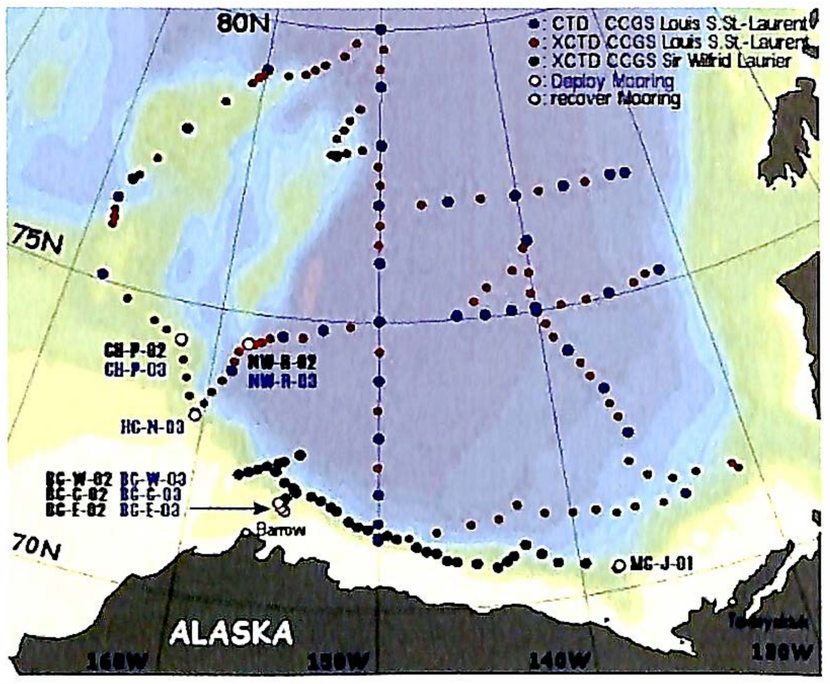


図10　JWACS 2003でのCTD、XCTD観測点及び係留系の設置地点

3.3. 成果（夏季太平洋水が西部北極海の海氷分布に与える影響）

図11は北半球で最も海氷域が後退する9月末の、過去20年間の平均密接度と2002年の海氷密接度の分布を示している。北極海では1990年代になって海氷の面積・厚さの減少が報告されているが、2002年夏季は特に著しく、太平洋側では観測史上最も海氷域が後退し、大西洋側ではグリーンランド海から海氷が消滅するなど地球温暖化を思わせる変動が起こっている。

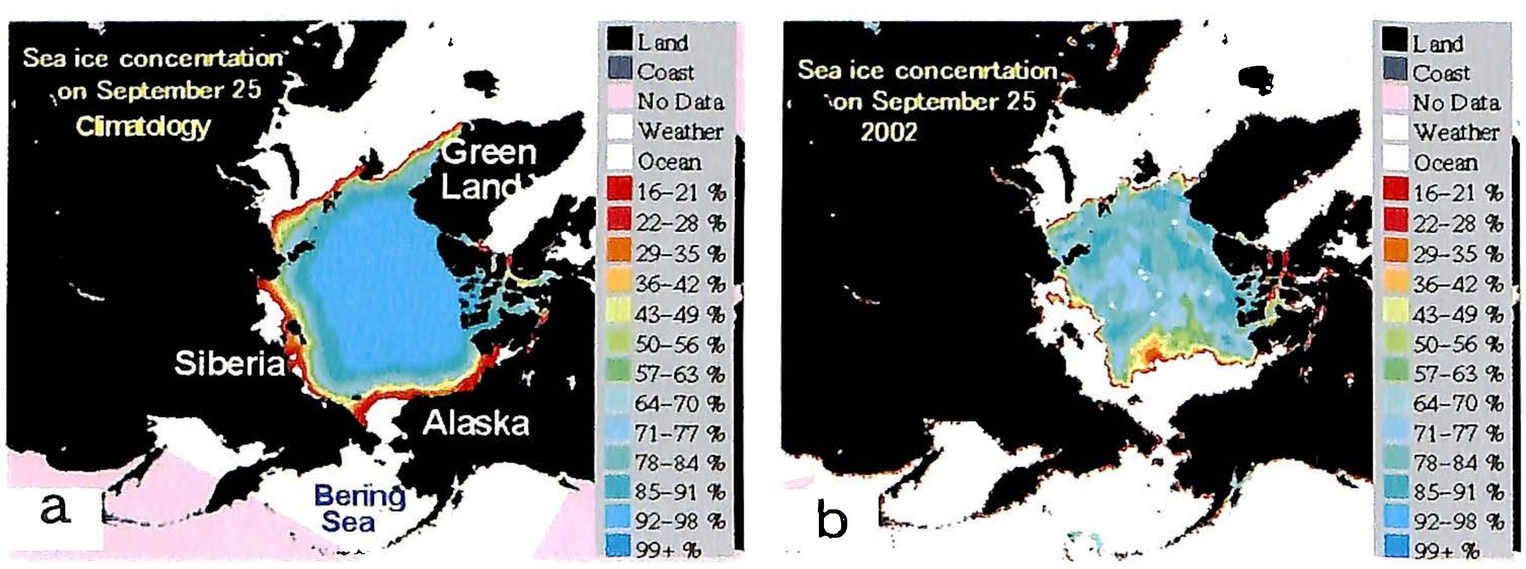


図11　SSMI画像による9月25日の海氷分布。a；気候値、b；2002年

海氷域の後退はどこでも一様に起こっているわけではなく、特にベーリング海峡の北側の西部北極海で著しく見られる。この海域では、夏にベーリング海から塩分31～32psuで特徴付けられる夏季太平洋水と呼ばれる暖水が流入し、深さ数10mに広がっている。図12は西部北極海における、2002年の夏季太平洋水の水温分布を示したものであり、そこには2つの高水温域が存在する。一つはバロー海底谷周辺、もう一つはノースウィンド海嶺上である。バロー海底谷周辺の高水温域は水温5℃以上で、2002年夏に流入した新しい夏季太平洋水であり、ノースウィンド海嶺上の高温域はバロー海底谷周辺のものよりも水温が低く、前年の夏に太平洋から流入したものと考えられる。一方、図13はJWACS2002の海洋観測が行われる1ヶ月前、7月中旬の人工衛星から見た海氷の分布である。東部のカナダ側では海氷密接度が高く一面海氷に覆われている。一方、西部、アラスカ側のノースウィンド海嶺やバロー海底谷周辺は融解が進み海水面も見られ、全体的

に密接度が小さい海域となっている。9月には、この低密接度海域の海氷は融解して、図11bに現れている様に海氷縁は大きく北へ後退した。図12の夏季太平洋水の高水温域と図13の海氷の低密接度領域はよく一致しており、夏季太平洋水が西部北極海の海氷分布に大きな影響を与えている証拠と言える。過去の研究では、北極海の海氷変動に影響を与えるのは大西洋からの流入水の変動であると言われてきた。しかし今回の観測から、西部北極海の海氷変動に影響を与えるのは、深さ数100mに広がる大西洋水ではなく、表層に広がる夏季太平洋水の役割が大きい事が明らかになった。

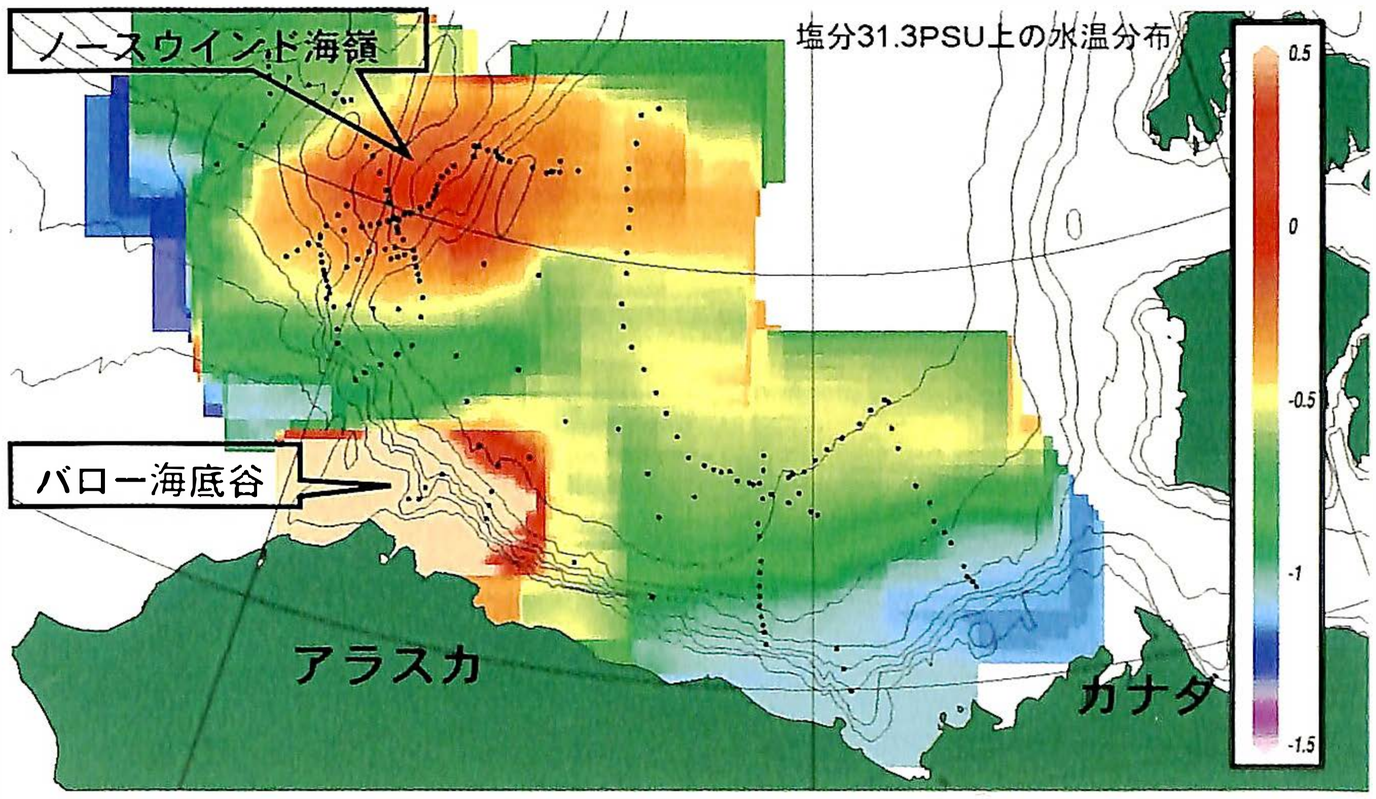


図12　JWACS 2002の観測データによる、夏季太平洋水を代表する塩分=31.3面上（深さは約30～70m）の水温分布

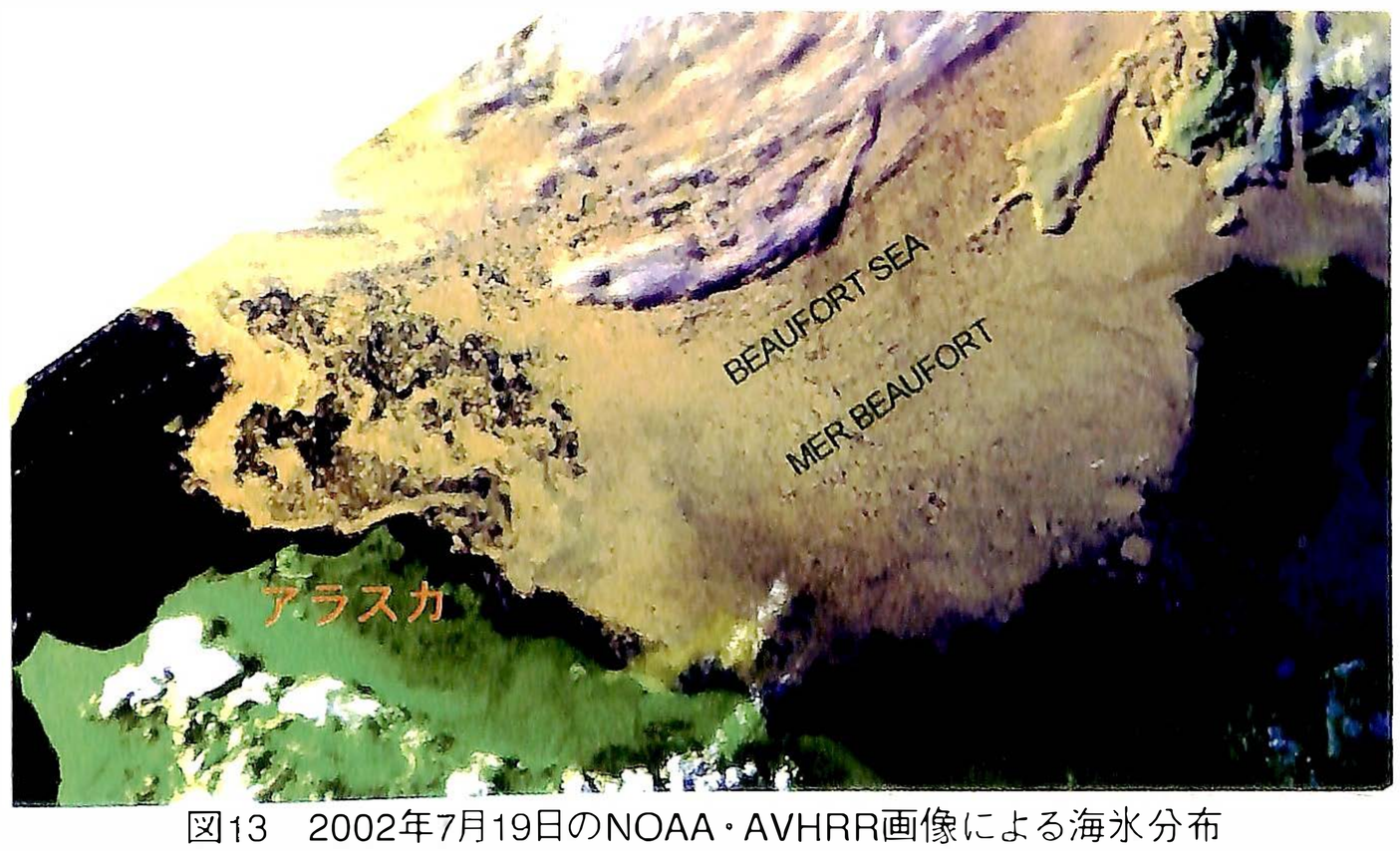


図13　2002年7月19日のNOAA・AVHRR画像による海氷分布

海洋生態・環境研究部

Marine Ecosystems Research Department

1. 西太平洋域からの深海化学合成生態系の発見と分布・群集組成・共生システムの解析

JAMSTECの海洋生物研究では、熱水噴出孔や冷湧水域など、活動的なプレート境界域に存在する深海の化学合成生物群集を調査研究してきた。その成果として、沖縄トラフや南海トラフ、相模湾などの日本周辺、およびパプアニューギニア沖やインド洋などの生物群集より数多くの新種を発見するとともに、群集組成や生物分布を比較検討し、その特徴を明らかにしてきた。また、ベントスと化学合成細菌の共生システムに関しては、宿主と共生体の共進化を遺伝子系統関係から明らかにしてきた。

さらに、新種の化学合成生物群を日本海溝において発見し、化学合成細菌との共生が熱水や冷湧水域に特異的ではなく、深海底における普遍的な環境適応戦略のひとつであるとの証拠を得ることができた。また、ベントスの共生システムには多様な様式があることを明らかにし、生息環境との関連性を示すことができた。



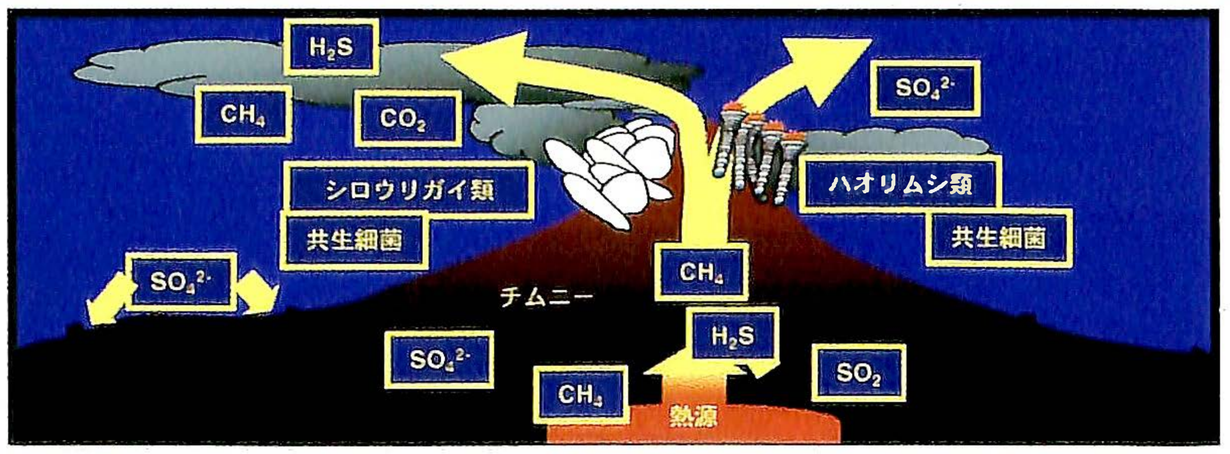
相模湾初島沖の冷水湧出帯生物群集に密集するシロウリガイとシマイシロウリガイ。水深約1150m。

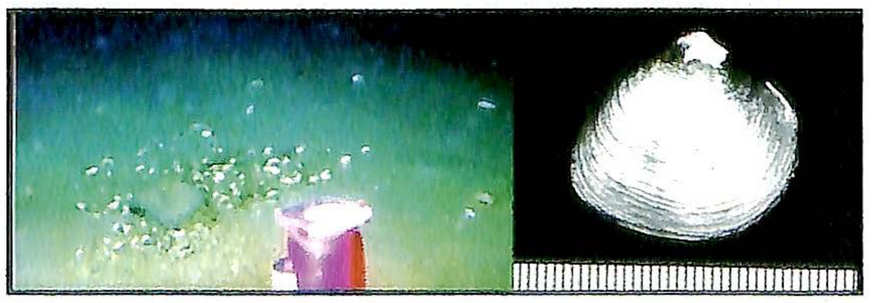


パプアニューギニア沖マヌス海盆の熱水噴出孔生物群集に密集するハオリムシの1種。水深約1900m。

1平方メートルに最大20kgの生物が生息する深海化学合成生物群集

深海化学合成生物群集
・熱水噴出域：沖縄トラフ、小笠原・マリアナトラフ、マヌス海盆など
・冷湧水域：相模湾、南海トラフなど





日本海溝陸側斜面水深7400mで発見された化学合成生物群（ナラクハンシガイ）

最深部（水深7400m）に生息する新種の化学合成生物群の発見

・深海化学合成生物群集の生物量は化学合成細菌により維持されている（地球内部エネルギーの利用）

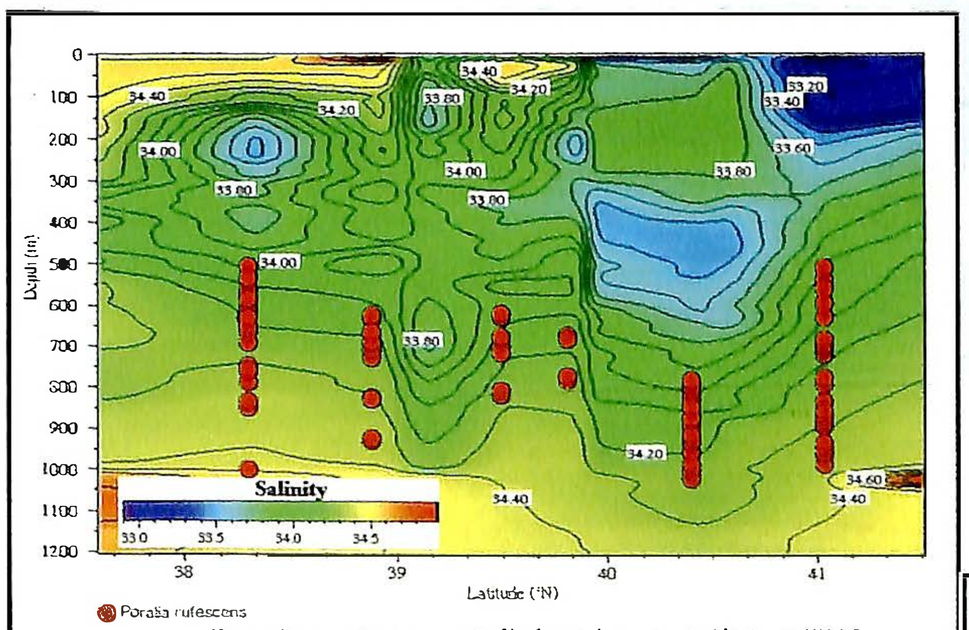
・ベントス群集は共生細菌に依存することで深海底の環境に適応した（共生進化）

深海底の化学合成生物群集は、サンゴ礁生物群集を凌ぐ生物量を維持している。この深海底での生物生産は遺骸として堆積物層に埋没するのか、あるいは中深層へと移送されるのか、また堆積物層や地下生物圏との関わりなど、食物連鎖と物質循環の流れが今後の研究調査課題として残されている。

2. 中・深層生態系の高い多様性と生物量、生物ポンプの物質輸送能力

クラゲなどのゼラチン質プランクトンは、海洋の90%あまりを占める中深層で最大の生物量を維持している生物群と推定されている。しかし、従来のプランクトンネットによる調査では、壊れやすいクラゲ類の生息分布や生態などを明らかにしえなかった。潜水艇でのゼラチン質プランクトンの調査法を確立したことにより、鉛直分布調査、自然状態での生物行動観察、損傷を与えない個体捕獲などが可能になった。その成果は、新種のクラゲ類の発見につながり、またクラゲ類の分布パターンが塩分や水温など海水の物理化学因子と相関するなど生態の解明へと展開された。

クラゲ類などの分布と生態を調査することで、中深層の生物群が果たしている海洋生態系での潜在的役割が明らかになり始めている。この中深層生物群の研究により、深海から浅海へと向かう食物連鎖の流れと物質循環過程を解明して、海洋生態系モデルの高度化を目指している。



*Poralia rufescens*の分布パターンと塩分の関係



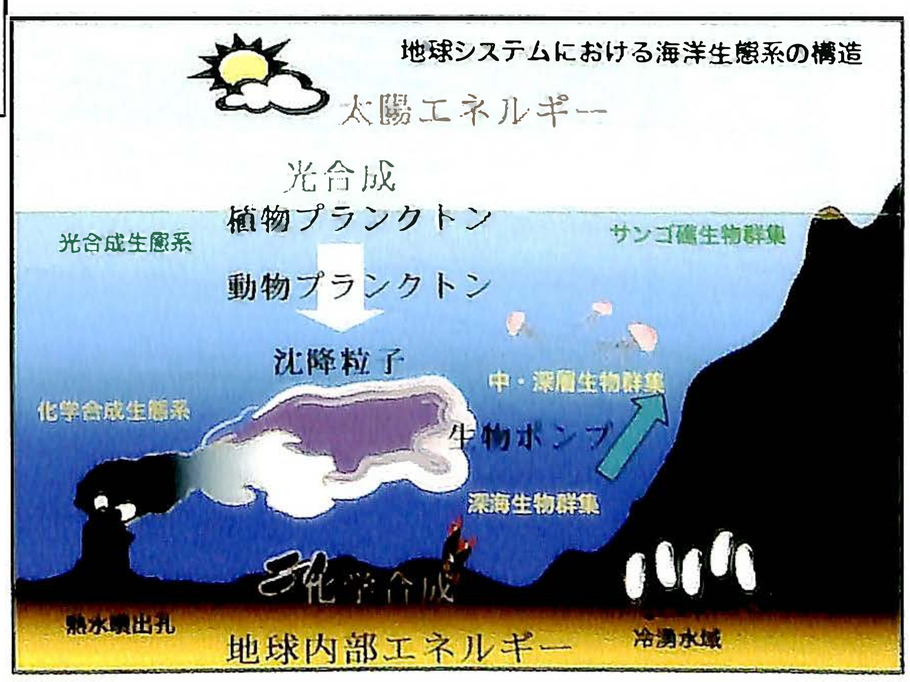
・新種の発見

・潜水艇での観察により明らかにできたクラゲ類の分布パターン

・大型のゼラチン質プランクトンが他の生物に生息場所や餌を供給している

・鉛直移動による物質輸送能力（浅海と深海をつなぐ生物ポンプ）

表層と深層をつなぐ食物連鎖と物質循環の流れを明らかにする調査研究への展開

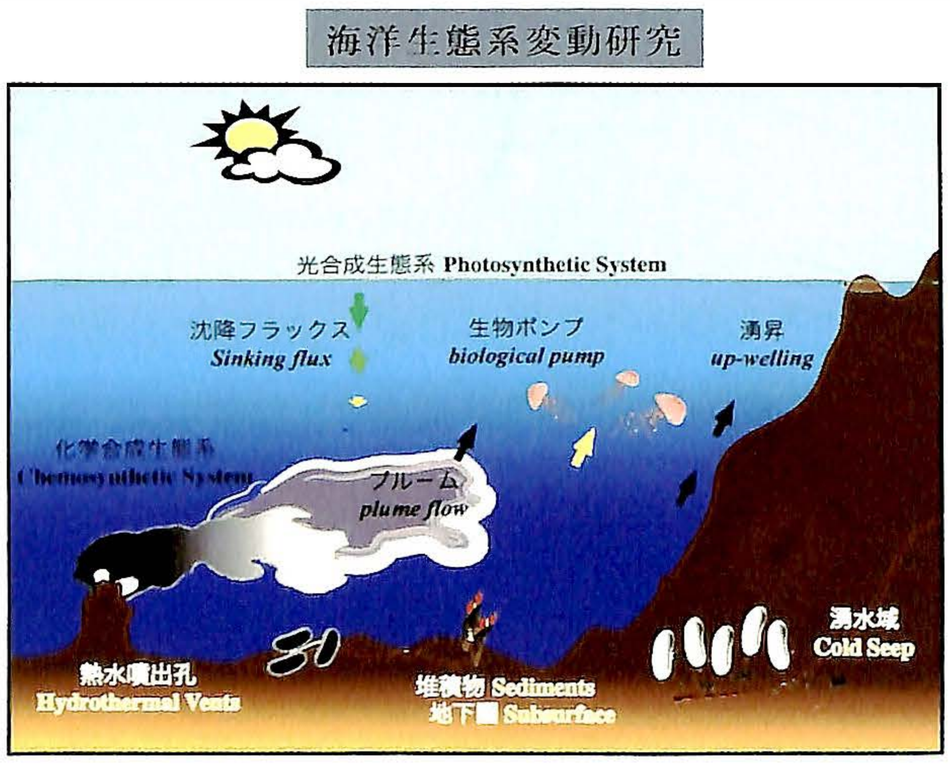


3. JAMSTECにおける海洋生物・海洋生態系研究の今後の展開

海洋生物の「共生進化」と海洋生態系の「物質循環」に焦点を当て、研究プロジェクトを進めてゆく。

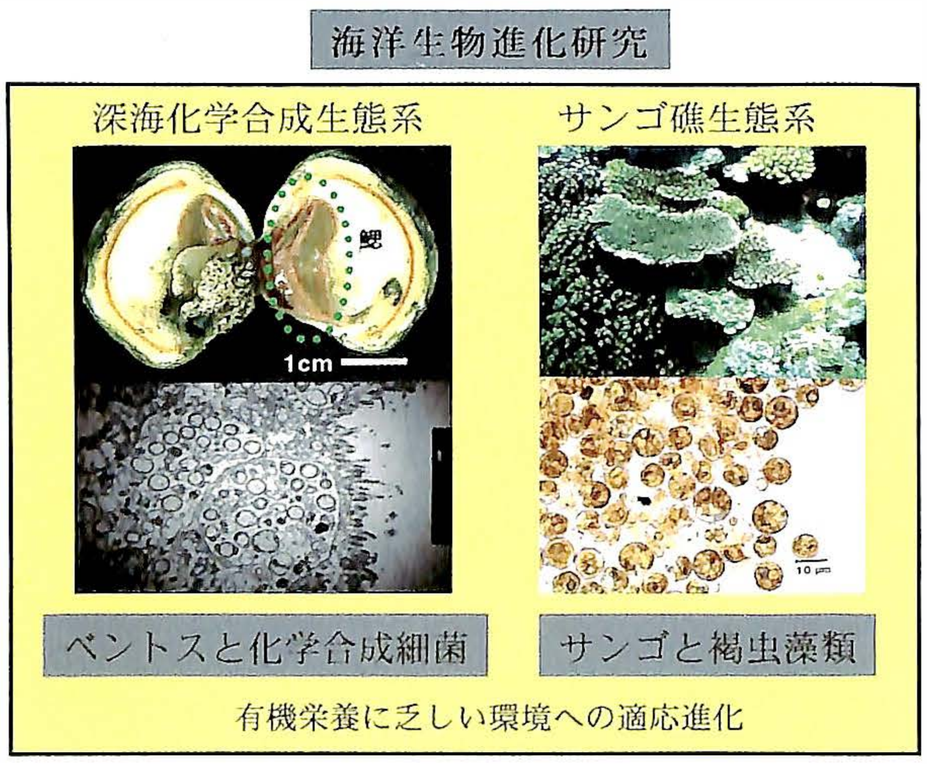
進化研究においては、化学合成系のシロウリガイ・ハナシガイ・ハオリムシ、および光合成系のサンゴ礁生物など、動物と微生物との共生メカニズムを解析し、共生現象が進化に与える影響を明確にしたい。

海洋生態系研究では、JAMSTECが保有する潜水調査船や海底観測ステーションを利用し、中深層及び化学合成生態系を対象とした定量的な群集構造解析と生物環境計測を実施する。これにより、深層から表層へとつながる生物連鎖を明らかにし、海洋生態系の変動モデルの高精度化に貢献したい。また、AUVや画像解析などの新技術を導入して長期観測による海洋生物と深海生態系の変動解析を実現したいと考えている。



1. 海域に集中した深海生物調査により深層から表層にいたる生物連鎖の流れを解明する
2. 海洋生態系モデルの高度化に貢献する
3. 深海生物調査に新たな技術を導入し、深海生態系での長期観測の実現を目指す

深海底から見上げる海洋生態系



1. ゲノム・遺伝子解析から共生進化のメカニズムを解析する
2. 海洋生物が示す多様な共生現象の生理メカニズムを解析する

共生が推し進める生物進化

用語説明

化学合成(chemotroph or chemosynthesis)

生物のエネルギー代謝は、有機物を分解する従属栄養、太陽の光エネルギーを利用する光合成、そして無機化合物の酸化還元エネルギーを利用する化学合成の3種類に分類できる。熱水噴出孔や温泉、メタン湧水域、鉱山などの環境には、硫黄、鉄、マンガン、アンチモンなどの化合物またメタンや水素などをエネルギー源にする化学合成独立栄養の原核生物(細菌、古細菌)が生息している。彼らは光合成と同じく、二酸化炭素を固定して有機物を合成する生態系の一次生産者である。

ベントス(benthos)

貝類(軟体動物)、ヒトデ(棘皮動物)、ゴカイ(環形動物)などのように海底や湖底また堆積物表層に生息する底生生物の総称名である。語源はギリシャ語である。

ナラクハナシガイ(*Maorithyas hadalis*)

ハンシガイ科の二枚貝で、日本海溝の深度7300mの堆積物層より発見された。エラに生理機能が異なる2種類の共生細菌を保有している。世界最深部に生息する化学合成生物群である。

褐虫藻類(*Symbiodinium* spp.)

サンゴ礁生物(サンゴ虫、シャコガイなど)に特徴的な共生藻類である。捕食だけでは補えない栄養を共生藻類による光合成から獲得することで、宿主動物は貧栄養な海域でも生息できる。環境条件が悪化すると褐虫藻が宿主細胞より脱落することがある。これがサンゴ礁の白化現象である。

生物ポンプ(biological pump)

生物による物質移送の過程を示す用語である。捕食、成長・代謝、排泄にともなう物質循環は、海水流動や濃度依存の拡散と異なる滞留時間と移送経路を持つ。深層から表層への生物移動による物質移送には、生物ポンプの役割が大きいと考えられている。

地球フロンティア研究システム

Frontier Research System for Global Change

地球フロンティア研究システムは、宇宙開発事業団（現：宇宙航空研究開発機構）と海洋科学技術センターの共同プロジェクトとして平成9年10月に発足しました。地球変動のプロセス研究と地球シミュレータ上で駆動するモデルを開発し、高精度な地球変動予測に資することを目的としています。このプロジェクトは第一期10年、第2期10年の20年計画で、5年毎に外部評価を実施しています。昨年度より、文部科学省による「人・自然・地球・共生プロジェクト」が始動し、また、地球シミュレータを使用しての研究も進めています。当システムでは、地球変動予測の活動を推進するため、プロジェクトの成果や今後の方向性を積極的に公表してまいりました。ここでは、今年度プレス発表を行いました「冬の天候から夏の天候をつなぐ北極域雪氷圏」の研究、及び、将来計画についてご紹介いたします。

1．研究成果紹介

冬の天候から夏の天候をつなぐ北極域雪氷圏
－北極の冬の気候と日本の夏の気候の関係を解明－

地球フロンティア研究システム国際北極圏研究センターの立花義裕研究員と山崎孝治研究員らのグループの研究成果により、冬の北大西洋と北極域の気圧配置の関係から夏の大気の循環を予測する可能性を明らかになりました。今まで、日本の夏の気候の傾向は、エルニーニョ現象など、南からの影響がよく知られていますが、今回の研究で、北極および高緯度の冬の気候も日本の夏の気候に影響を与える大きな要素の一つであることがわかりました。また、夏の気候から冬の気候を予測する研究は知られていますが、今回の研究で、冬の高緯度の気候も、夏の気候に影響を与えることが証明されました（図1）。

毎年の冬と夏の大気の関連性を調査したところ、北大西洋振動（NAO）/北極振動（AO）が正（注1）である冬に続く夏の北半球北緯60度付近は高気圧になることが判明し、特にオホーツク海高気圧は強まることが示されました。これは、大気圧は短期の記憶しか持たないことを考えると、北極及びその周辺地域の冬の気候と日本の夏の気候をつなぐものとして、長期の記憶を持つ大陸規模の積雪量、海氷、海面水温との関係が挙げられます。

注1：冬季北大西洋に存在するアイスランド低気圧とアゾレス高気圧がともに強まったり弱まったりする現象（大気のシーソー現象）を北大西洋振動（NAO）と呼びヨーロッパの冬の天候を支配する現象として古くから知られています。また、北極域と中緯度域の大気圧のシーソー現象は、北極振動（AO）と呼ばれます。北極域の気圧が低くなるときをNAO/AOが正といい、気圧が高くなるときをNAO/AOが負と言います。



「正」のパターンの冬は、ユーラシア大陸の温度は高温になる。

春には、ユーラシア大陸の積雪や、北極（バレンツ海）などの海氷が少なくなる。

雪の量の変化は、春に雪が溶けても土壌水分量に影響を与え蒸発・降水・温度変化の熱量・輸送過程を通して大気の過熱に影響を与えると考えられる。

オホーツク海、東ヨーロッパ、イギリス、アメリカ大陸上など高気圧が強まる場所は、図１中央で示した積雪変動や海氷変動が少ない場所にほぼ一致する。特にオホーツク海に大きな高気圧が発達。

図1

北極域及び中緯度域の気圧と日本の夏の関係

北極域の気圧	中緯度域の気圧	NAO/A0	オホーツク海高気圧	日本の夏
低い	高い	正	強い	冷夏
高い	低い	負	弱い	猛暑

この冬の北大西洋と北極域の気圧配置の関係と夏の大気の循環との関係は、8月上旬に米国地球物理学連合（American Geophysical Union）発行の地球物理研究レター（Geophysical Research Letter）に掲載されました。

2. 将来計画

2.1. 地球温暖化のための地球システム統合モデルの開発

地球フロンティア研究システムでは、「地球変動予測の実現に向けて」という目標のため、さまざまな研究活動を行っています。

本プロジェクトの目的は、地球環境全体の変化、すなわち気候・大気・海洋の組成、陸・海の生態系が相互に影響を与えつつ変化していく様子（図2）をシミュレートできる統合モデルを開発すること、及びそれを用いて炭素循環のフィードバックを含んだ地球温暖化予測を行うことです。

これまでの地球温暖化予測では、人間活動による二酸化炭素放出シナリオと、植生・土壌への二酸化炭素吸収量を見積もる簡単なモデルとを用いて、大気二酸化炭素濃度の

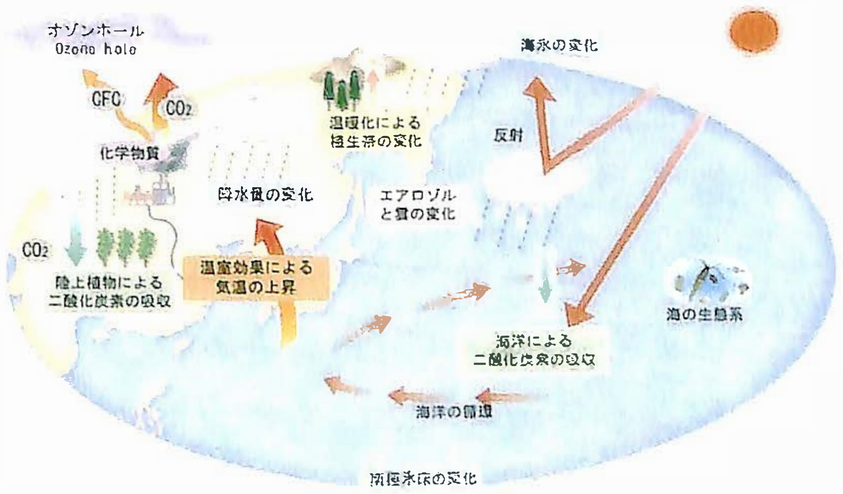


図2　地球温暖化に関与する諸過程

将来予測を先ず行い、その予測結果を気候モデルに編入して温暖化や気候変化のシミュレーションを行ってきました。しかし、この手法から得られる予測の信頼性は決して高くありません。その理由は、これらは大気中二酸化炭素濃度増加が気候変化を引き起こす過程のみに着目し、それとは逆の過程、すなわち気候変化が大気中二酸化炭素濃度に影響するといったフィードバック効果を取り入れていないからです。

例えば、温暖化は土壌有機物の分解速度を増大させるはずですが、それによって土壌からの二酸化炭素放出速度は高まり、従って、この過程は温暖化を更に進行させるはずです。その他にも、もう一つの温室効果ガスである対流圏オゾンの濃度も温暖化・気候変化から影響を受けるはずですし、極域氷床の融解が海水面の上昇を通じて何らかの影響を与える可能性もあります。これらより、地球環境変化について信頼性の高い予測を得るためには、気候・炭素循環・大気化学組成間の相互作用を扱った統合モデルが強く求められています。

本プロジェクトでは、そのような統合モデルを新たに開発し(図3)、地球シミュレータ上で温暖化予測実験を行うことを計画しています。

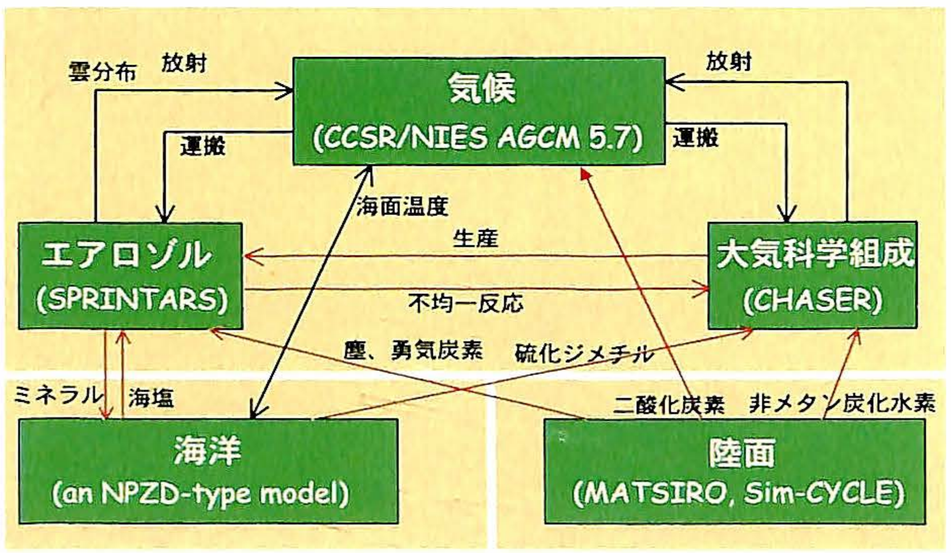


図3　我々が開発している統合モデルの概略。矢印は、各コンポネントモデル間の結合を示しており、黒線は現在作業が進められている結合、赤線は今後作業を予定している結合を表しています。

2.2. 次世代型大気大循環モデルの開発

このプロジェクトの目的は、気候研究のための次世代型大気大循環モデルを構築することにあります。地球フロンティア研究システムの研究グループでは、モデルを水平方向に5km以下、鉛直方向には100mオーダーのような超高解像度で走らすことを意図しています。このような超高解像度シミュレーションでは、全球大気において、積雲パラメータリゼション(現行のモデルでもっとも不確定性の高い要素)を用いずに、より精緻な構造が捉えられることが期待できます。

この目的のためには、物理的および計算パフォーマンスの観点から、支配方程式系および既存の数値計算法の見直しを計らなければいけません。前者においては、静力学プリミティブ方程式系の代わりに非静力学方程式系を採用するべきです。研究グループは、長期間のシミュレーションに耐え得るような質量及び全エネルギーの保存を考慮した非静力学スキームの開発を行って来ました(文献1, 2)。また、後者においては、水平方向の格子系として正20面体格子(図4)を用いることを決めました。

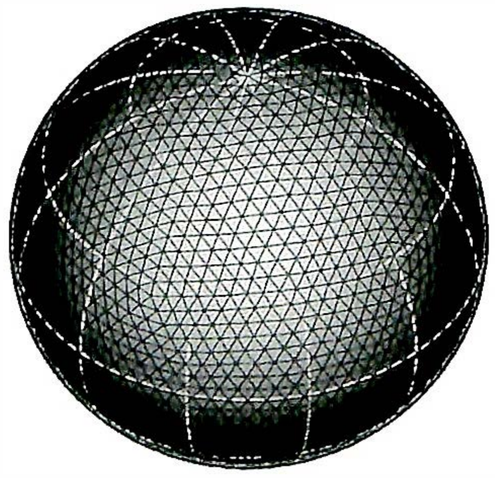


図4　正二十面体格子

これは、準一様格子と言われるものの一つです。研究グループは、格子に修正を施すことでこの格子系にまつわる様々な技術的困難を克服して来ました(文献3, 4)。

現在、正二十面体格子の非静力学ダイナミカルコアの開発を終了しました。モデルの名前は、NICAM(Nonhydrostatic ICodahedral Atmospheric Model)です。図5は、地球シミュレータを用いた温帯低気圧のライフサイクル実験のデモを示しています。この計算での水平格子間隔は、全球でおよそ7.5kmぐらいになります。複数のシャープな前線(領域A)や閉塞した低気圧(領域B)などの細かな構造が捉えられています。

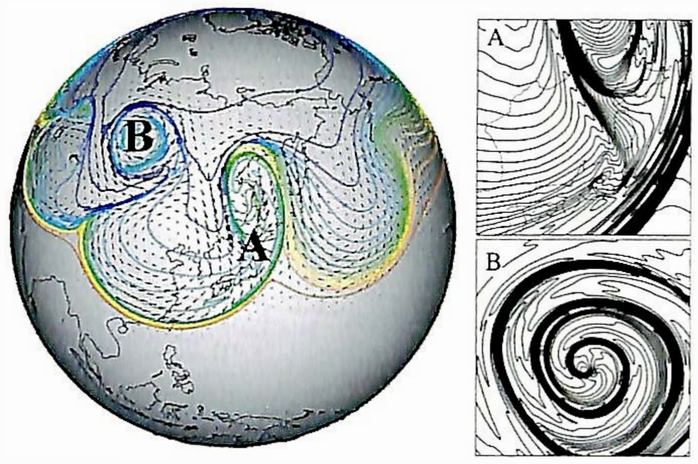


図5 (a)NICAM(7.5km格子)を用いた温帯低気圧のライフサイクル実験の8日後の地表面温度の分布(等値線は2.5度間隔)
(b)領域A、Bでの拡大図(等値線は0.5度間隔)

NICAMは、まだ開発途上であるため、このモデルを気候モデルとして完結させるためには、超高解像度に適した物理過程(特に雲物理)の開発を行うなど、多くの課題が残されてます。

参考文献

1. Satoh, M. (2002), Mon. Wea. Rev., 130, pp.1227--1245
2. Satoh, M. (2003), Mon. Wea. Rev., 131, pp.1033--1050
3. Tomita, H. et al. (2001), J. Comput. Phys., 174, pp.579--613
4. Tomita, H. et al. (2002), J. Comput. Phys., 174, pp.307--331

海洋科学技術センターにおけるこれまでの主要な成果

地球観測フロンティア研究システム

Frontier Observational Research System for Global Change

地球観測フロンティア研究システムは1999年に発足して以来、地球環境に関わる諸現象の素過程とそれらの間の相互作用の解明を目指し、海洋、陸面、大気を対象として観測を実施してきました。発足から今日までの4年半を振り返り、数々の成果の中から、中国で実施した、梅雨前線上で集中豪雨をもたらす巨大積乱雲の発達過程を捉えた高精度観測についてと海洋観測研究部と共同で取り組んでいる国際プロジェクト「アルゴ計画」についてご報告致します。

1. 集中豪雨の源となる降水システムの高精度観測
―低気圧の発達過程を捉えることに成功―

日本では梅雨の時期になると、毎年のように大雨による災害が発生します。豪雨をもたらす降水システム（直径数100kmの巨大積乱雲）の多くが、中国の東海岸周辺で発生すると指摘されるものの、その原因は謎のままでした。地球観測フロンティアでは、積乱雲の構造を観測するドップラーレーダーやウインドプロファイラーなどの装置をこの地域に設置し、高精度の立体観測を日本と中国の共同で初めて実施しました（図1）。その結果、降水システムの立体構造とその発達過程を捉えることに成功しました。

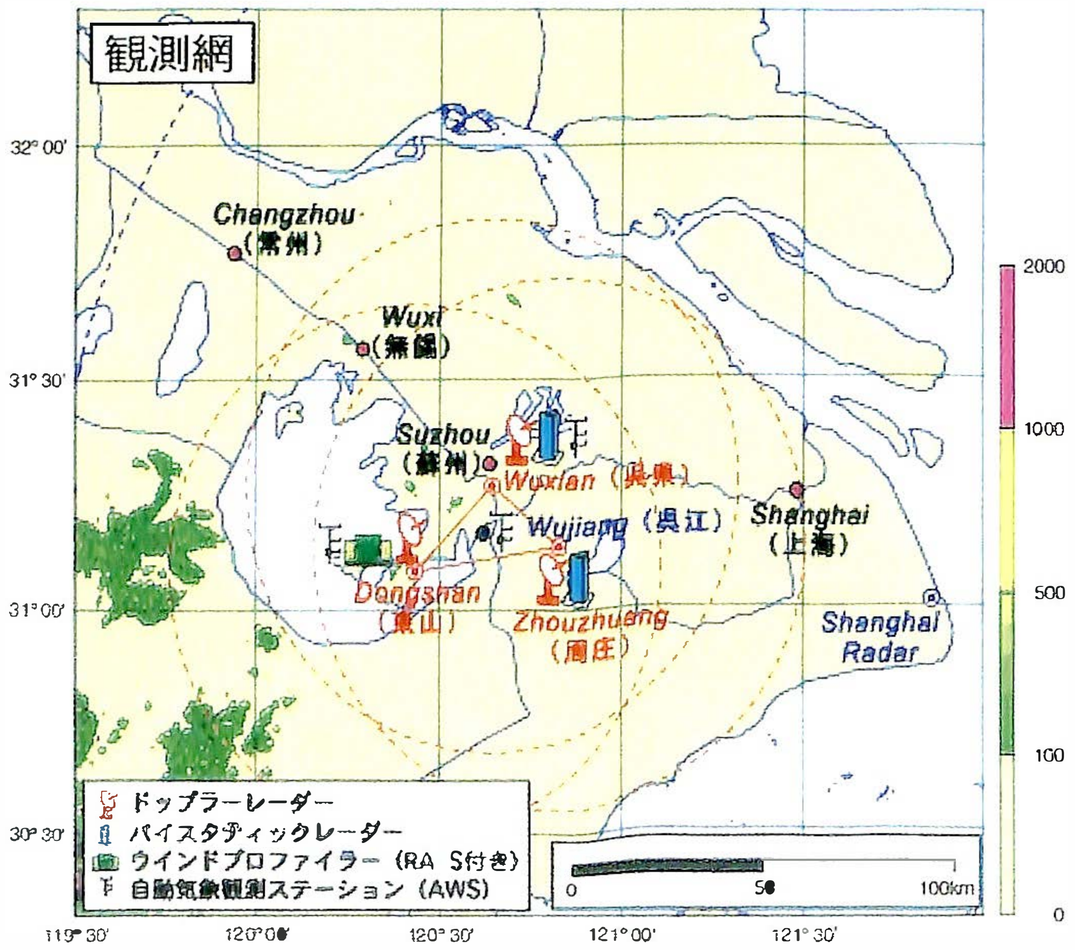


図1　蘇州市近郊に構築した高精度の気象観測網

2001年6月19日に観測地域で発生した低気圧は、東に進んで翌日には西日本に300ミリを超える豪雨をもたらしました。高精度観測網は、この低気圧に伴う降水システムの構造をしっかり捉えました。図2に示すように、大陸の東海岸地域で暖かく湿った強い風が南西から入り込み、これが北寄りのやや冷たい風と衝突して持ち上げられ、積乱雲が発達し、やがて大量の雨に変わりました。この降水システムは東シナ海上へ出た後に衰退しましたが、低気圧は梅雨前線の上に残りました。この低気圧が九州に近づいたとき、再び湿った空気を集めて新たな降水システムが形成され、西日本各地に豪雨をもたらしたと推測されます。つまり、大陸の東海岸周辺では日本に豪雨をもたらす雲そのものを形成しているのではなく、豪雨の雲を作る低気圧が作られていることがわかります。また、このような低気圧は初期にはそれほど強くなく、天気予報などに使われる数値モデルでは、その発達をうまく捉えられないことも今回の観測で判明しました。

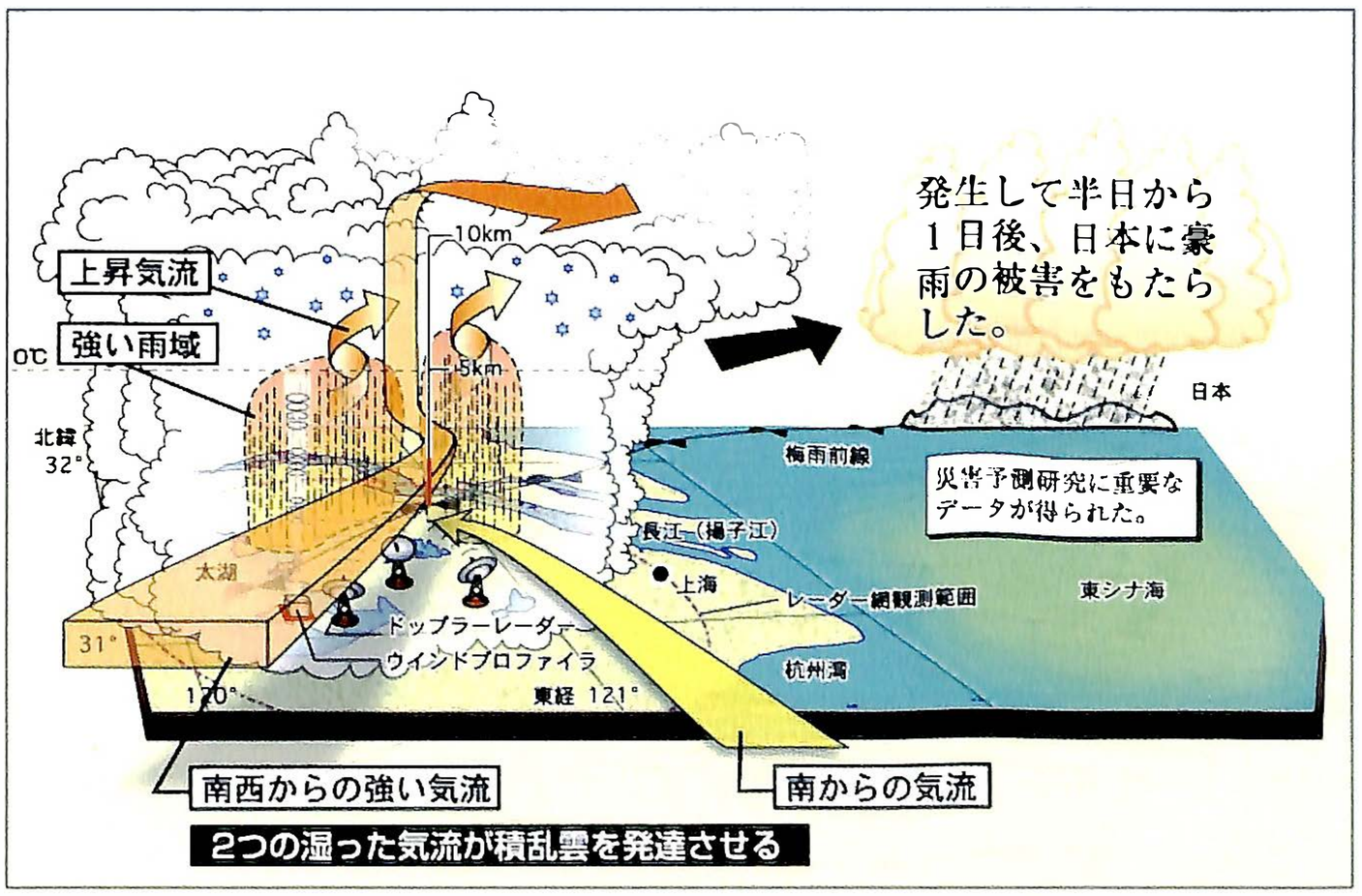


図2　発生期の低気圧にともなう降水システム（3次元構造）

この観測で得たデータは、梅雨前線に伴う降水システムを再現する気候変動予測モデルの精度向上に貢献します。観測によって豪雨発生のメカニズムが解明され、豪雨が事前に予測できるようになると、日本の防災にも役立つでしょう。今後も中国の研究機関と連携して、中国の雲・降水システムに関する観測を継続する予定です。さらに、パラオやフィリピンなど、東アジア亜熱帯前線帯における雲・降水の変動に影響を与える地域においても高精度のデータを取得することを目指しています。

2. ARGO（アルゴ）計画－高度海洋監視システムの構築（地球観測フロンティア研究システム＆海洋観測研究部）

ARGO計画とは：

全世界の海洋に約3,000台のアルゴフロートを展開することにより海面から2,000ｍまでの水温、塩分等の分布をリアルタイムで監視できるシステムを構築し、維持する国際協力プロジェクトです。現在、米国、日本をはじめとする17カ国とEUが、WMO（世界気象機関）やIOC（ユネスコ政府間海洋学委員会）等の協力の下で実施しています。日本では文部科学省（実施機関は海洋科学技術センター）と国土交通省（気象庁と海上保安庁）が共同して、ミレニアムプロジェクト－高度海洋監視システムの構築－として2000年度（平成12年度）から実施しています。その目的は、全世界の海洋の内部まで含めた状況を常時監視し、数値モデルと組み合わせることで、数ヶ月から数十年の時間スケールで起こるエルニーニョ等の気候変動研究や、長期予報の精度の向上に大きく寄与することです。

方法：

海面下2,000m付近を流れながら10日毎に海面に浮上するアルゴフロートを使用します。アルゴフロートは海面に浮上する際に水温、塩分を観測し、海面で人工衛星にデータを送信します。データ送信後、2,000mまで降下し周囲の水と共に10日間流れ、再び浮上します（図3）。 アルゴフロートの寿命は約4年で、その間、浮上・降下のサイクルを約150回繰り返します。

データの配信・利用：

アルゴフロートから人工衛星に送信されたデータは、1日以内にGTS（国際気象通信システム）を通じて全世界の気象機関に配信されています。海洋科学技術センターでは、アルゴフロートデータに科学的な品質管理を施した後、グローバルデータセンターに送っています。これらのデータはインターネットを通じて無料でだれでも利用することができます（図4）。

現在の状況と将来計画：

2004年2月現在、全世界で約1,043台のアルゴフロートが稼動しており、日本は米国に次いで世界で第二位の貢献をしています（図5）。プロジェクトへの参加国も順調に増加しており、2006年には目標値である3,000台のアルゴフロートの展開を達成することが期待されています。ミレニアムプロジェクトは平成16年度で終了しますが、それ以降も海洋科学技術センターで実施する予定です。

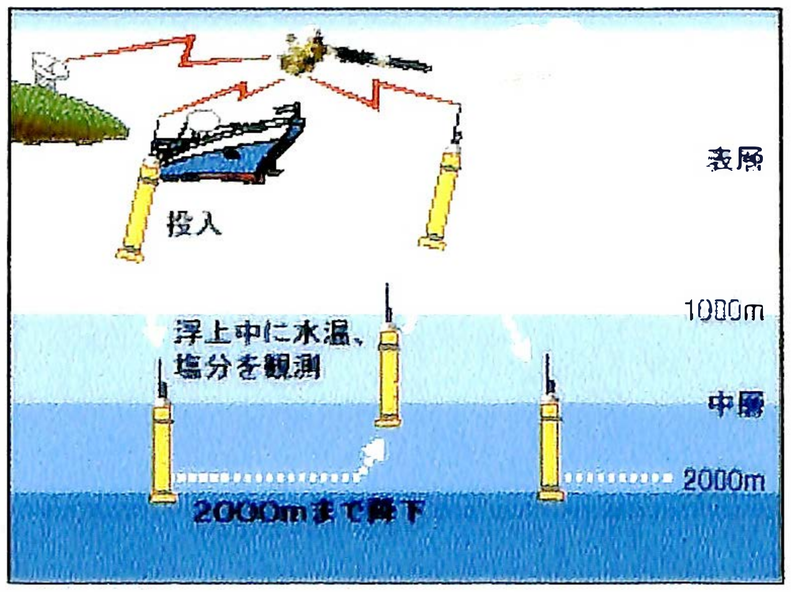


図3　アルゴフロートの動き

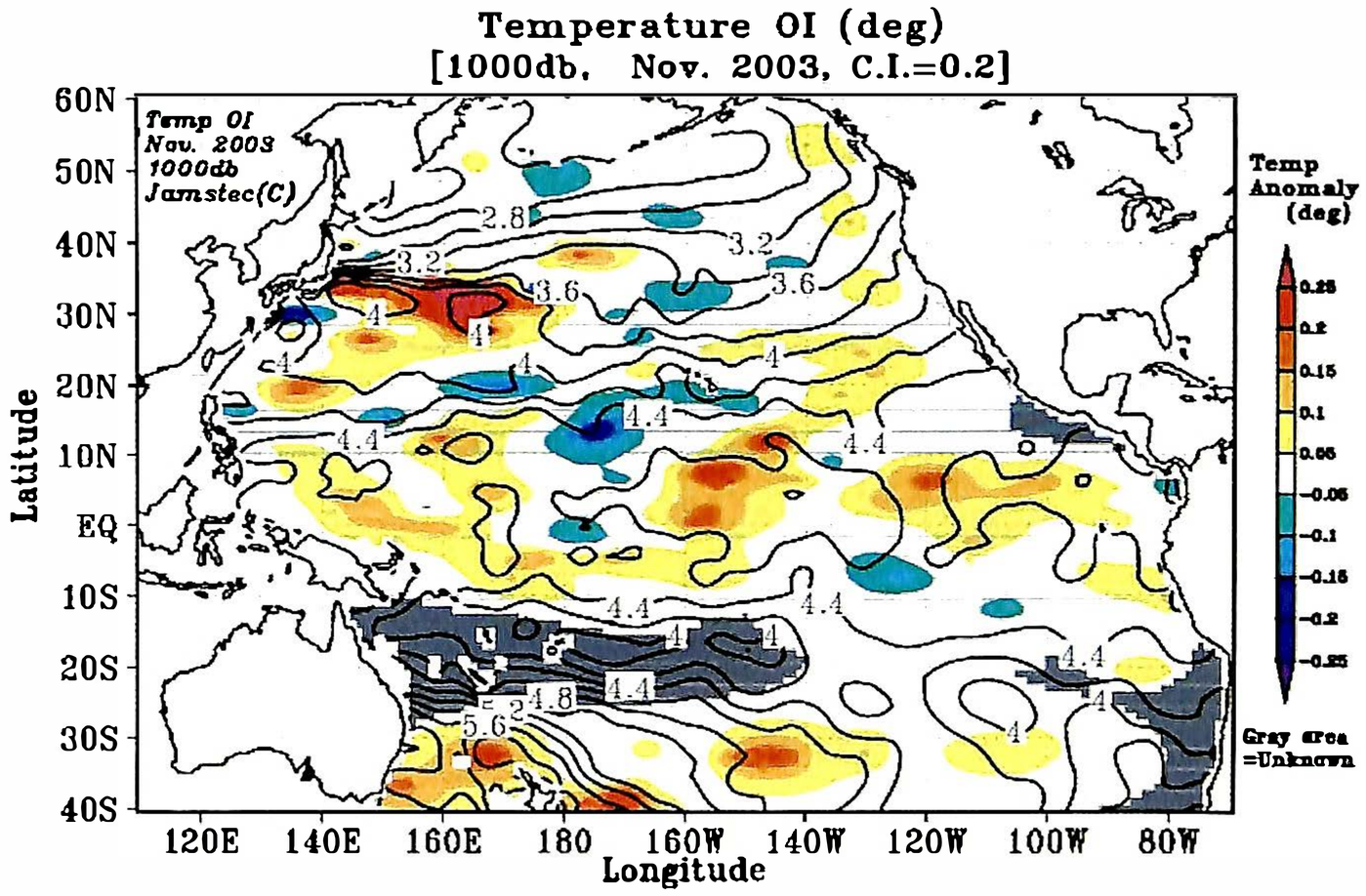


図4　アルゴフロートと観測船によるデータを元に描いた深さ1000mの水温分布

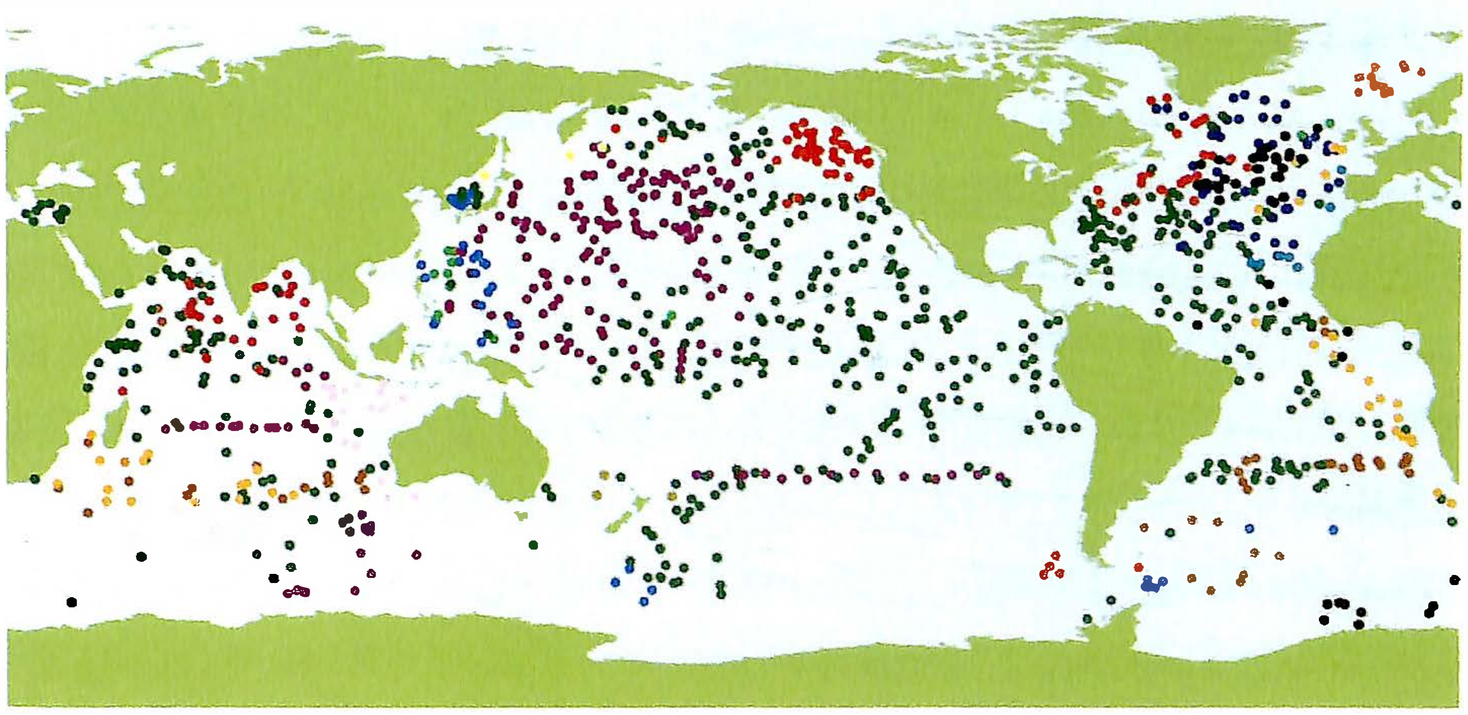


図5　全世界のアルゴフロートの稼動状況（2004年2月現在）

極限環境生物フロンティア研究システム

Frontier Research System for Extremophiles

1. 深海底熱水活動域の海底下に「地球を食べる微生物生態系」を発見

極限環境生物フロンテイア研究システム地殻内微生物研究領域では、深海底熱水噴出孔域における微生物生態系について、世界をリードする研究を行ってきました。

近年では特に、1993年、米国ワシントン大学のデミングとバロスがその存在を予想した熱水孔下微生物圏（サブベントバイオスフェア）仮説の証明を目指しています。

一方、地殻内微生物研究の分野においては、地球内部エネルギーにのみ依存した地殻内独立栄養微生物生態系（スライム）の探索が注目を集めています。スライムは、惑星の熱と玄武岩と水さえ揃っていれば（化学物質で言えば水素及び二酸化炭素）、いかなる惑星でも存在することが理論的には可能なため、地球外惑星における生命の存在様式としての最有力候補と考えられています。にもかかわらず、これまで世界のいかなる研究者もそのスライムの存在を証明することに成功していませんでした。地殻内微生物研究領域は、深海底熱水活動域の海底下環境の物理的及び化学的背景から、熱水孔下微生物圏にこそ、超好熱性のスライム（ハイパースライム）が存在するという仮説を提唱し、その仮説を検証するため、2002年1月−3月にかけて当海洋科学技術センターの有人潜水調査船「しんかい6500」を用いたインド洋中央海嶺熱水活動域調査航海（YK01-15）を行いました。

本研究では、インド洋中央海嶺のかいれいフィールドと呼ばれる熱水活動域の純粋な365℃の熱水によって、熱水孔下微生物圏から運ばれてくる微生物を地殻内微生物研究領域で新たに開発した現場培養器と呼ばれる装置で濃縮し、微生物そのものの培養、DNAを用いた解析、熱水化学成分の詳細な分析といった多面的な方法で、熱水孔下微生物圏における微生物群集の解析を行いました。

すべての方法において、365℃の熱水によって運ばれてくる微生物のほとんどすべてが、培養可能な超好熱菌であることが明らかとなりました。しかもその大部分が、水素と二酸化炭素のみをエネルギー・炭素源とす

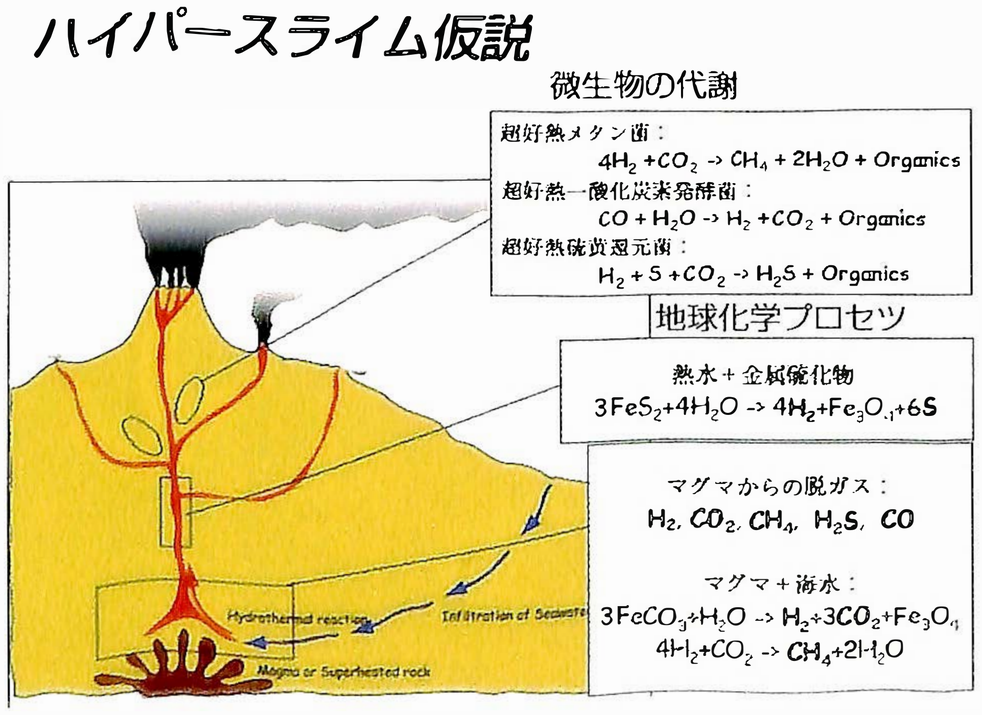


図1　ハイパースライム仮説の概念図

る超好熱メタン菌であること、また同じ熱水中に含まれるメタンの炭素安定同位体比の結果から、その超好熱メタン菌が作ったメタンが半分以上含まれていることが示されました。これらの結果の意味するところは、極限環境生物フロンテイア研究システム地殻内微生物研究領域が世界で初めて、インド洋中央海嶺熱水活動域の海底下環境に、ハイパースライムが存在することを証明することができたということです。この発見は、地球上に最初に誕生した生態系と変らない微生物生態系が、今なお地球の地殻内に生き残っていること、さらに同様な微生物の世界が、地球以外の惑星に存在する可能性を大きく引き上げることに繋がっています。

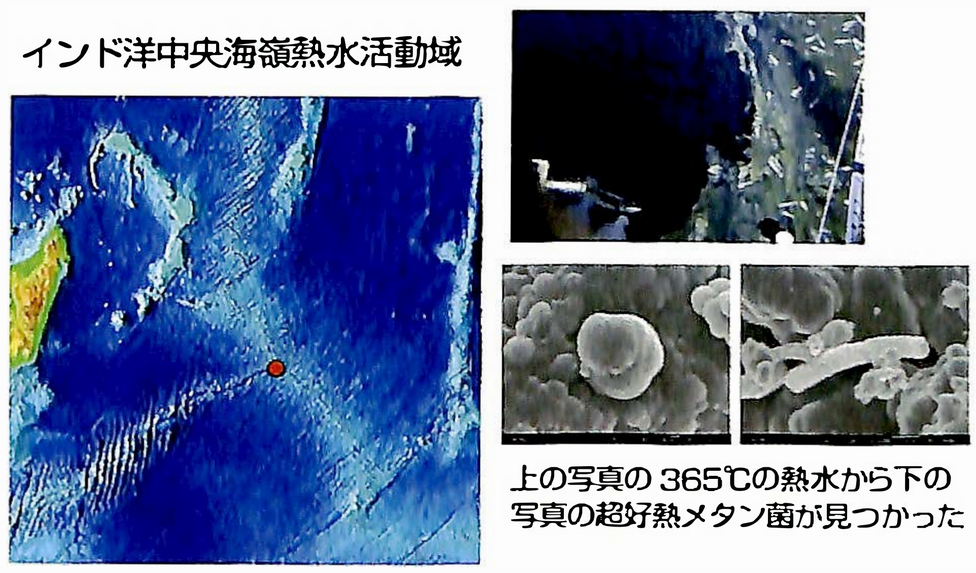


図2　インド洋中央海嶺熱水活動域と超好熱メタン菌

2. 圧力生理学研究の進展

圧力は深海環境に普遍的な熱力学的因子であり、総じてネガティブで抑制的に作用します。事実、調べられた限りでは大気圧下にすむ生物の諸機能は圧力で阻害されます。ところが深海の好圧性細菌は逆に高圧環境を好んで生きています。この違いは何なのだろう?圧力適応は他のストレス応答とどう対比されるのか?こうした問いかけに答えるために我々が提唱したのが“圧力生理学(Piezophysiology)”です。実験材料としては、真核生物のモデルであり、広く産業的にも利用されている出芽酵母*Saccharomyces cerevisiae*を選びました。この生物の持つゲノム・分子生物学・生理学の圧倒的な優位性を背景に、圧力の影響とは何かをまず追求しました。

出芽酵母は250気圧の高圧条件下で増殖が停止します。ところが、約1億分の1の確率で高圧条件で増殖する変異株が出現してきました。このような変異株を合計400株取得し、そのうちの一つ、HPG1株におけるゲノムの変異部位を特定しました。驚いたことに、変異は1400万塩基対からなる酵母ゲノムDNAに生じたわずか一カ所の塩基置換でした。変異部位にコードされていたのはRsp5ユビキチンリガーゼと呼ばれるタンパク質であり、細胞内タンパク質の選択的分解に関わる重要な酵素でした。ヒトにも類似の遺伝子が多数存在し、それらが変異すると、脳に不要なタンパク質が異常蓄積し重い中枢疾患になります。Rsp5ユビキチンリガーゼの触媒部位HECTドメインをホモロジーモデリングにより3次元構築したものを図に示しました。E2酵素に結合したユビキチン(Ub-E2)は矢印の方向から接近し、Rsp5に受け渡され、そのユビキチンは標的タンパク質に受け渡され、ユビキチン化されたタンパク質は分解されます。ではなぜ一体、RSP5遺伝子の変異が酵母に高圧増殖能をもたらしたのだろうか?それを解く鍵はアミノ酸の一つであるトリプトファンの取り込みにありました。

酵母も人間と同様、20種類のアミノ酸のうち一つでも欠けると増殖・生育することができません。既に我々は、高圧条件が酵母のトリプトファンの取り込みを著しく阻害すること、トリプトファン輸送体Tat2がやがて分解されてしまうことを報告しています。このときTat2を過剰発現させると、野生型にもかかわらずその株は250気圧以上のもとで増殖するようになります。一連の実験から、高圧増殖変異株HPG1株の細胞内ではTat2タンパク質が分解を免れ蓄積し、圧力が高くてもトリプトファンを十分に取り込める結果として、細胞は高圧増殖したという事実が浮き彫りになりました。

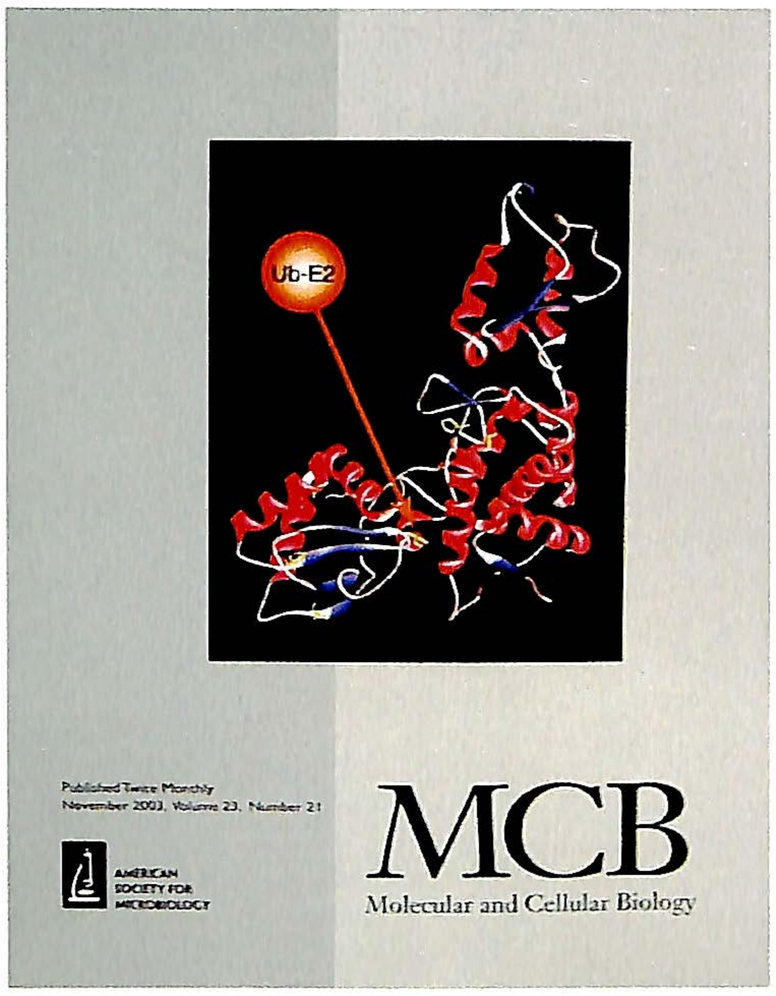


図3　Rsp5ユビキチンリガーゼの触媒部位HECTドメインの3次元構造モデル。ユビキチン化されたE2酵素（Ub-E2）は矢印の方向から接近する。HECTドメイン内の変異は出芽酵母に高圧増殖能をもたらす。なお、この図は、米国分子細胞生物学会誌2003年11月号の表紙を飾った。

実は酵母におけるトリプトファンの取り込みは“細胞のアキレス腱”と呼ばれるほど外的変化に弱く、免疫抑制剤のFK506やラパマイシン、吸入麻酔剤イソフルラン、副腎白質ジストロフィー治療薬4-フェニル酪酸、有機弱酸、フィトスフィンゴシン、そして高圧と低温という見かけ上関連性のない要因で細胞増殖は止まります。そしてほとんどの場合、Tat2の高発現により耐性となります。こうした阻害因子のほとんどは膜構造に影響を及ぼす点で共通しています。従って、「適正な膜の状態」がトリプトファン輸送に重要であり、一連の相関関係を解く鍵であることがわかりました。圧力と薬剤の決定的な違いは、圧力作用は可逆的で系を除圧すればもとに戻せる点にあります。温度と組み合わせれば膜の状態をかなり幅広くコントロールすることもできます。こう考えると、圧力は確かに生物にとって抑制的だが、うまく条件さえ整えてやれば、生命現象、特に生体膜に関わる細胞機能を新たな角度から探る有効な手段となりえます。この点に関し、我々はTat2がトリプトファン輸送に伴ってどのように構造変化するのかを、圧力実験による活性化体積（Activation volume, $\Delta V^{\neq}$）の測定結果から予測しました。結果は構造変化が膜構造の性質を反映するものであり、圧力研究が膜ドメインの情報を提供する可能性を示唆しています。圧力という未知なファクターが、複雑なシステムからなる細胞にどのような影響を及ぼすのか、課題は無数に残されていますが、酵母の分子生物学が圧力生理学における基本的概念を構築する上で絶大な威力を発揮することは間違いないでしょう。

3. 深海バイオベンチャーセンターの活動

深海バイオベンチャーセンターは、既に10社を超える企業と研究に着手しています。その共同研究範囲は、生理活性物質探索、環境浄化、有用酵素の探索と立体構造解析、

有用酵素の改良、有用遺伝子の探索など広範囲に渡ります。既に深海や地殻内微生物から新規な生理活性物質や有用酵素を多数発見しました(図4)。短期間で大きな成果が得られるのは、深海が生物資源として未踏分野であるためで、バイオ産業にとっては正に「宝の山」になる可能性を秘めていると言えます。

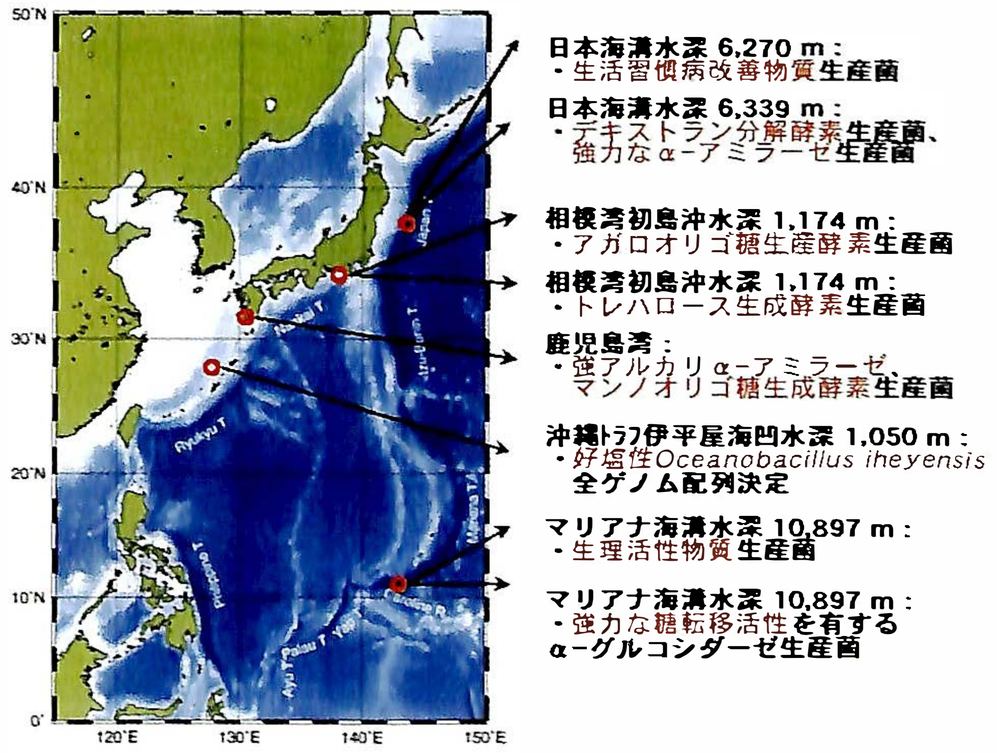


図4　深海より発見された新規有用微生物

その一例を新規な寒天分解菌について説明します。従来、寒天は食べると体に良いと言われて来ました。最近、寒天そのものではなくその分解産物である寒天オリゴ糖が、ガン抑制、炎症疾患の予防・治療、美白、肌の保湿、デンプンの老化防止など多様な効果があることが判ってきました。当ベンチャーセンターでは、深海から多種の寒天分解酵素を分離しています。その中で、寒天をオリゴ糖に分解し、耐熱性や種々の化学物質に耐性を有する菌を次々と発見しました。図5は、発見した菌の電子顕微鏡写真です。新種の菌で、*Mcrobulbifer*という属に分類されます。寒天のキューブを作り、その上にこの菌を植え付けると、生育に伴い、寒天が完全に液状(オリゴ糖化)になります(図6)。この菌を液体培養して得られた寒天分解酵素は、60℃まで安定であり、高濃度の界面活性剤、重金属、キレート剤などに対し強い耐性を有しているため、工業化の際、極めて有利と言えます。深海からは、他にも多種多様な新種の菌や新規有用酵素などが続々と発見されて行くでしょう。

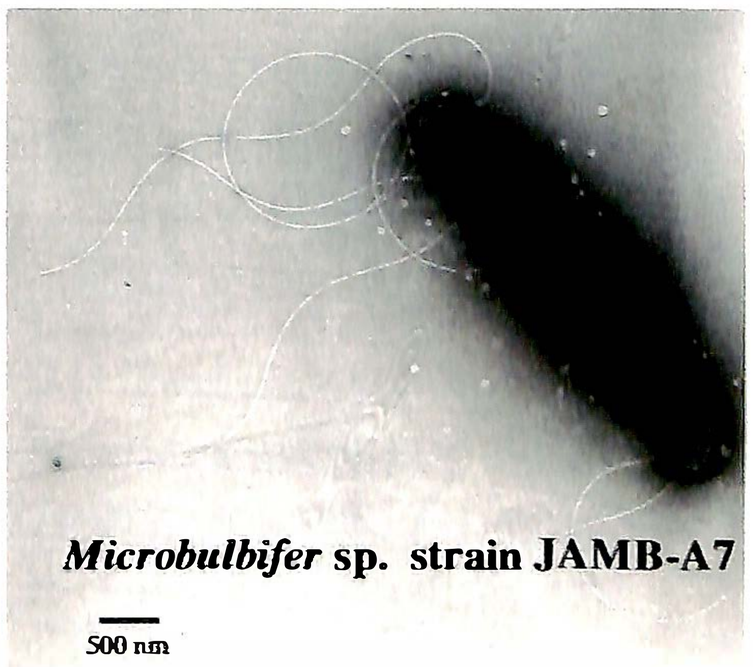


図5　深海由来新規アガラーゼ生産菌



新規寒天分解菌を植え付けると、寒天のキューブがドロドロに溶解することが判る。

図6　寒天分解酵素生産菌による寒天分解

固体地球統合フロンティア研究システム

Institute for Frontier Research on Earth Evolution

1. 東南海地震域の分岐断層と四国四万十帯の地震の化石から見た沈み込み帯震源断層～地殻構造探査と過去の付加体の陸上調査との統合研究～

歴史的に巨大地震が繰り返し引き起こされてきた南海・東南海の海溝域には(図1)、プレート沈み込み作用に伴って海底堆積物が陸側地殻に押し付けられて変形・隆起・陸化する付加体が発達しており、このシステムの中で震源断層は成長発達していると考えられる。断層運動の結果として生じる地震の発生メカニズムを理解するためには、断層の摩擦挙動を左右する、断層面の構造、状態、構成物質の力学挙動を知る事が欠かせない。広域的な沈み込み帯の地形、断層形状、分布、地殻構造、音波特性などの全体像の把握に構造探査研究はきわめて有効であり、南海トラフの陸上延長である四万十帯に隆起露出している過去の断層分析は、微細な断層物質の分布や組織、状態の情報を提供し、これらを統合することで沈み込み帯の地震発生過程研究を行う。

1.1. 熊野灘沖分岐断層

熊野灘沖南海トラフにおいて反射法探査(2001年実施、図1)の結果、東南海地震に関係すると考えられるプレート境界より派生する分岐断層のイメージングに成功し(図2)、この海域の震源断層の一部として分岐断層が大きな役割を果たしていた可能性を初めて示した。

熊野灘沖の分岐断層は、トラフ軸より約50－55km陸側で深度約10km付近から、沈み込む海洋プレート境界より分岐しており、外縁隆起帯のすぐトラフ軸側の海底付近に達する(図2、図3)。そこは津波解析(Tanioka and Satake, 2001)ならびに地震波解析(菊地・山中, 2001)で得られている1944年東南海地震破壊域の南東縁とほぼ一致しており(図1)、分岐断層の繰り返

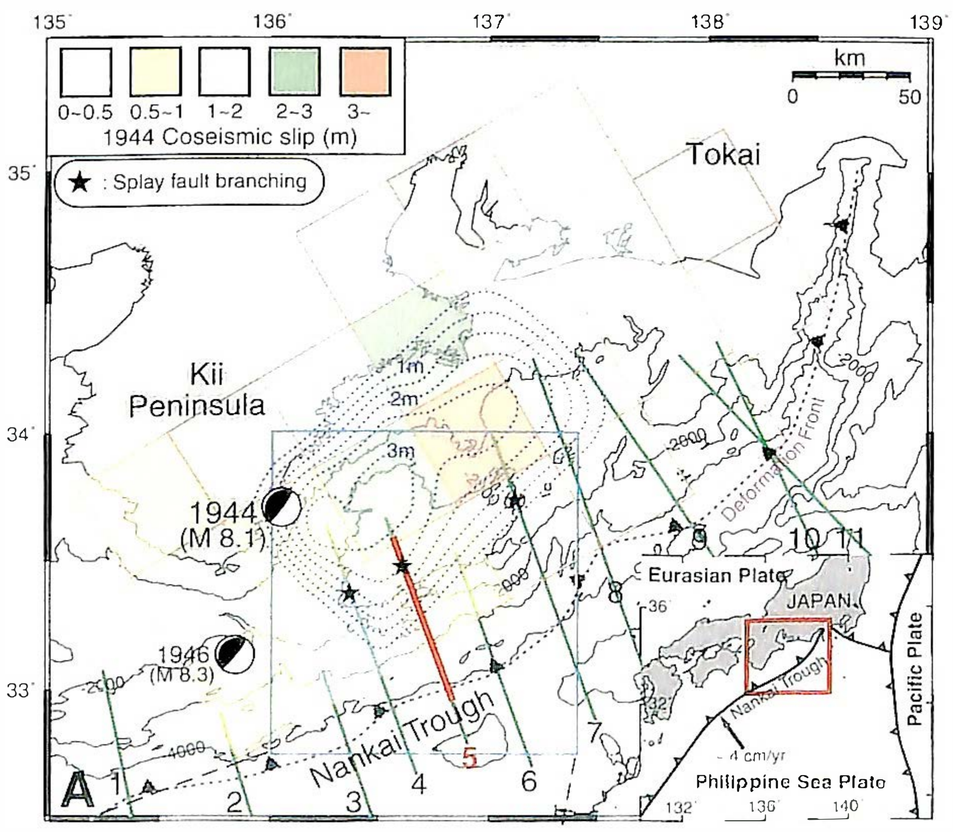


図1　熊野灘沖南海トラフ反射法探査の調査地域および地震波形、津波データから得られた1944年東南海地震破壊域。

図2　反射法探査によって明らかになったプレート境界より上方へ派生する分岐断層（図1の測線5）。この分岐断層は1944年東南海地震破壊域に十分含まれることからその時に滑った“震源断層”であると考えられる。また、断層面の強反射波の波形極性は反転しており、断層付近に水の存在が示唆される。

しすべりによって外縁隆起帯が形成されたと考えられる。また反射波形解析によると分岐断層からの強反射波は波形極性が反転しており、しかも分岐断層の海底到達点周辺には深海調査よって海底冷湧水が既に確認されていることから、この分岐断層に沿った流体の存在が示唆される。

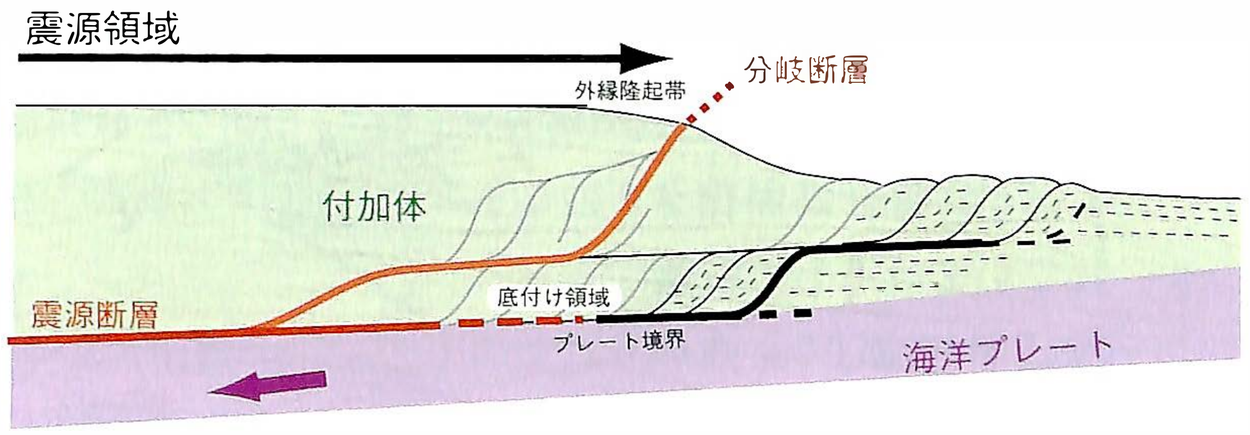


図3　付加体の模式図。海溝堆積物はプレートの沈み込み作用によって剥ぎ取られ、覆瓦状に重なり隆起・陸化する。プレート境界の深部では、堆積物は岩石化し震源断層へ変化する。分岐断層はプレート境界から派生する。

1.2. 四万十帯の震源断層の化石

プレート沈み込み帯で発生したシュードタキライトが、四万十帯興津メランジュで世界で初めて発見された（図4、図5）。断層の高速摩擦加熱によって生じたガラス質の断層岩シュードタキライトは、「地震の化石」と認識されており内陸型の断層での報告例は数多くあったが、沈み込み帯型はこれまでに報告例がなかった。地質調査の結果、断層は約5500万年前（K-Ar法、Ager, 1988）に、楔形の付加体が急激に肥大化する底付け領域（図3）の深度

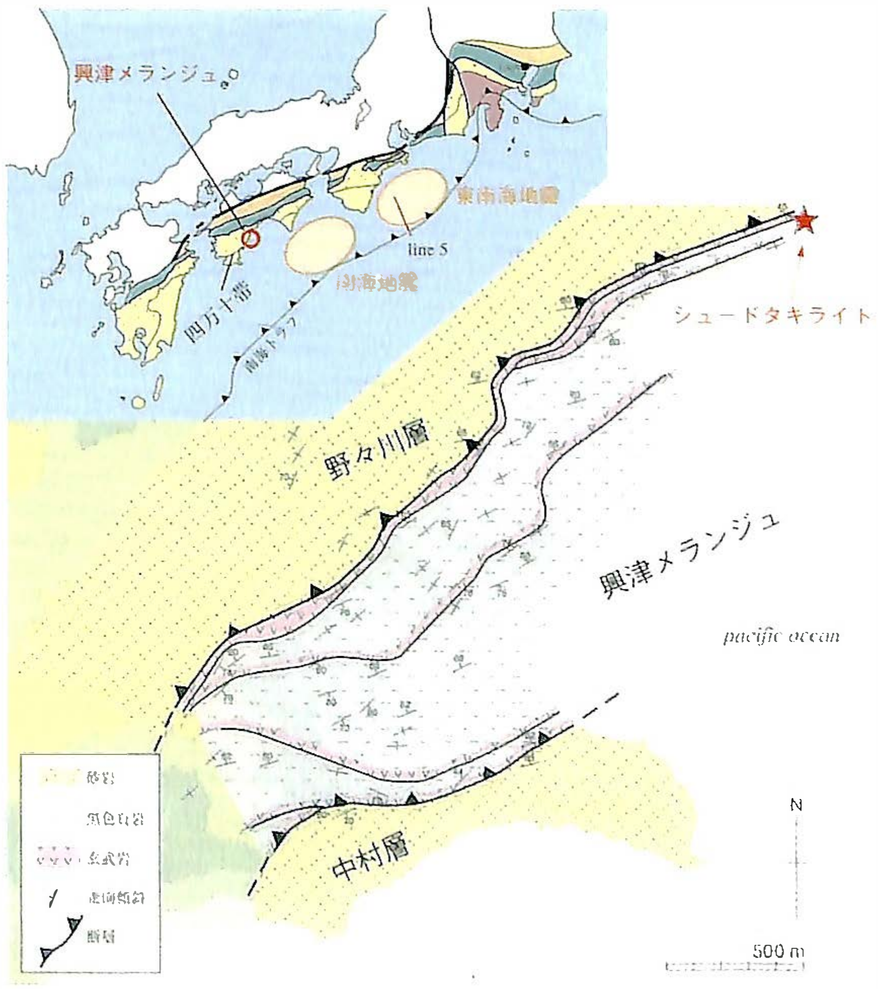


図4　過去の震源断層は南海トラフ付加体の陸側延長である四万十帯の興津メランジュで発見された。興津メランジュは、海溝堆積物が覆瓦状に重なった構造をしており、付加体深部の底付け領域で形成された。

約4-5kmにプレート境界に平行に発達しており、断層運動を繰り返してきたことがわかった(図5)。すなわちこの断層は、南海トラフと同様な地質的環境で発達した断層深部が露出していると考えられる。断層帯は熱水沈殿物である鉱物脈とシュードタキライトとが特異的に濃集していることで特徴付けられ(図5)、これによって破砕帯は固化されている。そして断層帯は周辺層よりも高い温度を受けていることから、断層沿いに熱水移動が盛んであったと推測される。

過去の震源断層はどのようにして地表に隆起・露出するのか？

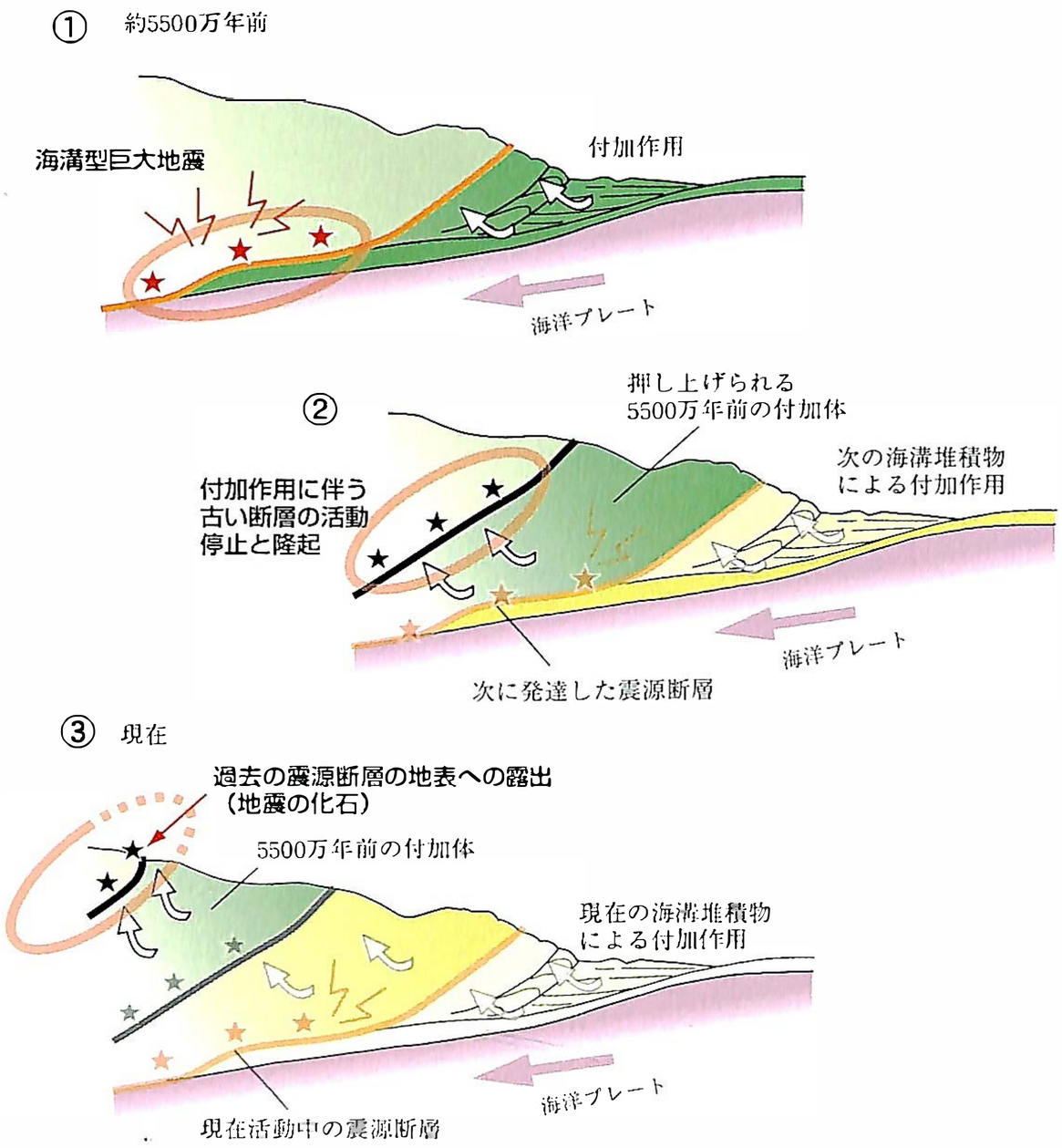


図5　過去の震源断層は、次々と生じた付加作用により徐々に隆起、削剥され、その深部が陸上に露出した。

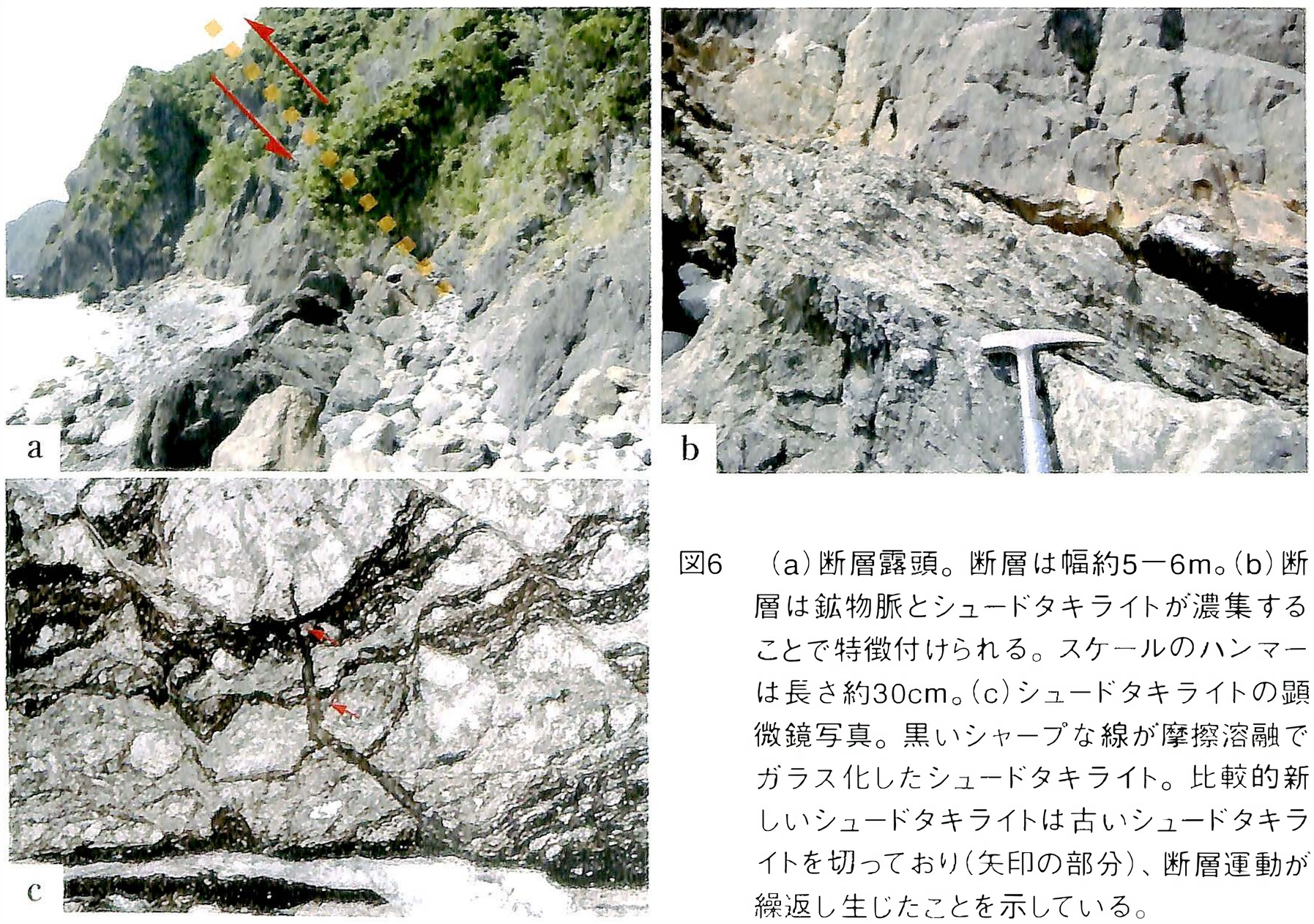


図6　(a)断層露頭。断層は幅約5－6m。(b)断層は鉱物脈とシュードタキライトが濃集することで特徴付けられる。スケールのハンマーは長さ約30cm。(c)シュードタキライトの顕微鏡写真。黒いシャープな線が摩擦溶融でガラス化したシュードタキライト。比較的新しいシュードタキライトは古いシュードタキライトを切っており(矢印の部分)、断層運動が繰返し生じたことを示している。

熊野沖の分岐断層と興津メランジュの震源断層は、互いに繰り返し地震を起こしたという点、付加体底付け領域でプレート境界と平行に発達した断層であるという点、そして断層沿いに流体が多いという点で類似した震源断層と考えられる。今後は地震活動や岩石の摩擦特性評価研究、統合国際深海掘削計画（IODP）、モデリング研究などと連携して海溝型地震発生過程の研究を推進する。

1.3. 用語

外縁隆起帯：

断層運動等によって、前弧海盆の海溝側に形成される隆起帯。

震源断層、分岐断層：

地震を発生させる断層全体のことで、分岐断層は震源断層の一部をなしプレート境界から分岐した断層で、上方に向かって急角度になっている。

付加体、四万十帯：

プレートの沈み込み作用に伴って海溝の海底堆積物が陸側に剥ぎ取られて、隆起・陸化した地帯を付加体と呼ぶ。西南日本に広く分布する四万十帯は典型的な付加体。

メランジュ

本来は混合を意味するフランス語で、プレートの沈み込み作用によって様々な種類の岩石が複雑に入り交じった地質体。

2. サブダクションファクトリー：その地球進化における役割

海嶺で生まれた海洋プレートは、次第に冷えて重くなり、やがてマントル内へと落下してゆく。この場所を沈み込み帯（サブダクションゾーン）と呼ぶ。沈み込み帯は、しばしば巨大な工場（ファクトリー）に例えられる（図7）。ベルトコンベアー（海洋プレート）で原材料が搬入され、騒音や震動（地震）を出しながら、また煙突（火山）から煙を出しながら、製品（マグマやその固結物である大陸地殻）を作っている。工場で製品を製造する工程では，当然ながら廃棄物が生まれる。この工場における製造工程と，廃棄物の行方を探ってみよう。

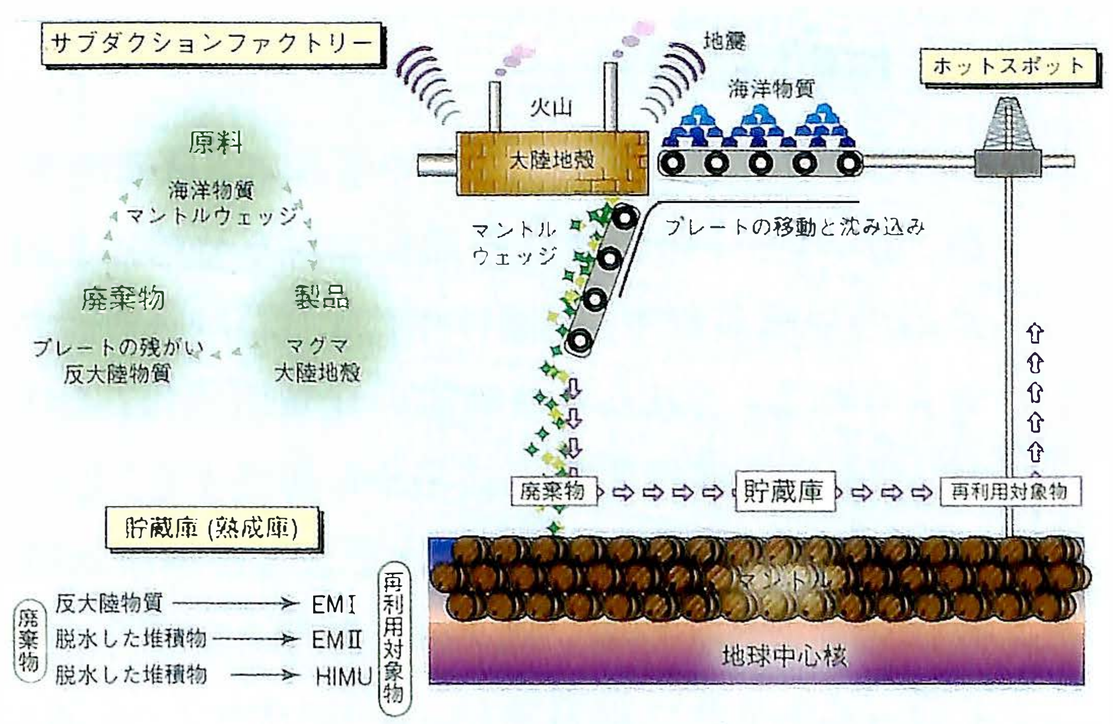


図7　サブダクションファクトリー の概要。この工場では、大陸地殻などの製品を作り出しながら，廃棄物を地球深部に備蓄している。これらの深部物質は，ホットスポットマグマの製造工程で再利用される。すなわち，サブダクションファクトリーは，完全なゼロエミッションを達成している。

2.1. 大陸地殻の成因

プレートテクトニクスが作動し始めて以来の長い地球史を通じて，サブダクションファクトリーで製造されてきた主な製品は，大陸地殻である。大陸地殻は，固体地球の僅か0.4%の質量を占めるにすぎないが，固体地球における軽元素の主要な貯蔵庫であるために，その成因を理解すること無しには，地球の進化を語ることはできない。

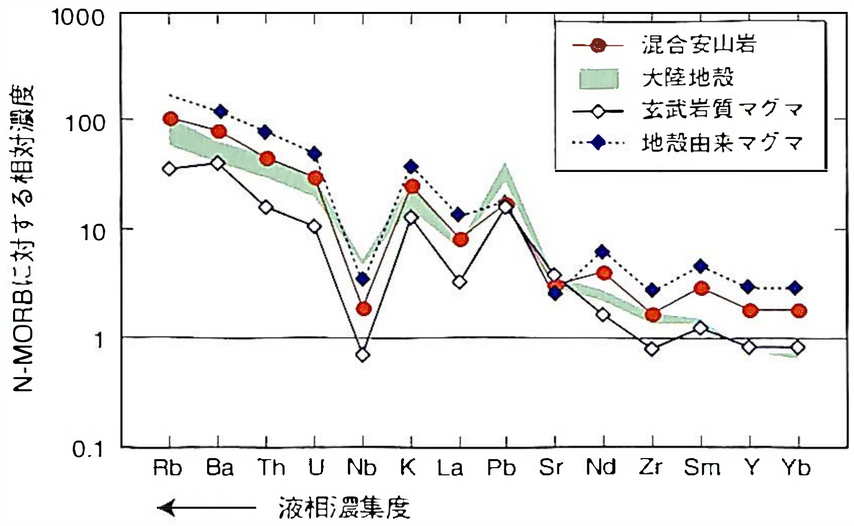


図8　マントル由来の玄武岩マグマと，初期地殻由来のマグマの混合に対する化学的モデリングによって再現された，安山岩質マグマの化学的特徴。大陸地殻のそれと良く一致する。

大陸地殻は，沈み込み帯を特徴づけるカルクアルカリ安山岩と主要元素組成が非常に良く似ている。従って，これら2つの安山岩質の岩石は，同一のプロセスで生成されると考えて良い。現在最も合理的であると考えられるカルクアルカリ安山岩の製造工程は，全体として玄武岩質の組成を有する初期地殻が融解してできたマグマと，マントルで生まれた玄武岩質マグマが混合した，とするものである。

現存する大陸地殻の主要な部分が形成されたと考えられる，今から20-30億年目のマントルの化学組成は，これまで比較的よい推定値が得られている。この化学組成を基にして，上記の過程を再現した化学的モデリングを行った結果を図8に示す。微量元素の化学的特徴が良く再現されており，この過程によって大陸地殻が生まれたと考えることが妥当であることを示している。

しかし，この過程では，玄武岩質の初期地殻に玄武岩質マグマが注入されているために，全地殻はやはり玄武岩質の組成を有しており，全体として安山岩質の組成を持つ大陸地殻を生み出すためには，初期地殻の融解残渣（反大陸物質）を取り去ることが必要である。このような過程は，剥離作用（デラミネーション）と呼ばれ，下部地殻物質とマントル物質の密度関係によって，しばしば地殻形成過程で起こったと考えられている。

2.2. 廃棄物の行方

サブダクションファクトリーで生み出される廃棄物としては、1）沈み込み海洋地殻の残骸、2）プレートの沈み込み過程で脱水分解により組成変化した堆積物、3）安山岩質大陸地殻の形成過程で，剥離作用によって初期地殻から取り去られる「反大陸地殻物質」、が考えられる。これらの廃棄物の化学組成は、これまで我々が行ってきた地球化学的モデリングや高温高圧実験の結果から推定することができる。

海嶺での熱水変質作用で水を含んだ海洋地殻は、サブダクションファクトリーでの重要な水の供給源となる。例えば20億年と30億年前のサブダクションファクトリーで脱水分解によって生まれた廃棄物は、図9に示すような同位体比組成を有することが予想できる。この廃棄物の異常に高い鉛同位体比は、娘元素である鉛が親元素であるウランやトリウムに比べて、脱水分解反応で海洋地殻から取り去られることが原因である。また新鮮な海洋地殻は、サブダクションファクトリーの製造工程では全くと言っていいほど利用価値がない。しかしこの部分も、プレート運動によって地球深部へ持ち込まれて、図9に示すよう

な同位体比組成を有して、脱水分解反応を経験した海洋地殻物質とともに、マントルの底に貯えられて熟成されてきたはずである。これら2種類の同位体比組成の異なる海洋地殻は、併せるとHIMUと呼ばれるマントル端成分（マントル深部起源のホットスポットマグマを作るために必要な成分）の化学的特徴とよく一致する。

サブダクションファクトリーの製造工程で用いられるH_2Oのもう1つの主要な原料は沈み込む堆積物である。図9には、10-20億年前のサブダクションファクトリーで脱水分解反応を経験し、そしてそれによって添加物を抽出されてしまった堆積物の同位体比組成を示してある。「始源的なマントル」と比べると、高いSr、Pb同位体比、低いNd同位体比を有している、そしてこの廃棄物は、始源的マントルと併せて、EMIIと呼ばれるマントル端成分として再利用されていると考えて良い。

大陸地殻製造工程では、安山岩質の製品を作り出すために、デラミネーションによって反大陸物質が地球内部へ廃棄物として運搬される必要がある。この廃棄物の放射性同位体比の時間変化を推定した結果を、図10に示す。この場合には一次地殻の再融解でできたSiO_2に富む地殻由来マグマが完全に分離しない可能性があるので、その割合を変化させてある。すると、そのような分離できなかったマグマを10数%含む反大陸物質が、20-40億年地球内部で蓄えられると、EMIとよばれる端成分として、再利用できるようになることがわかる。

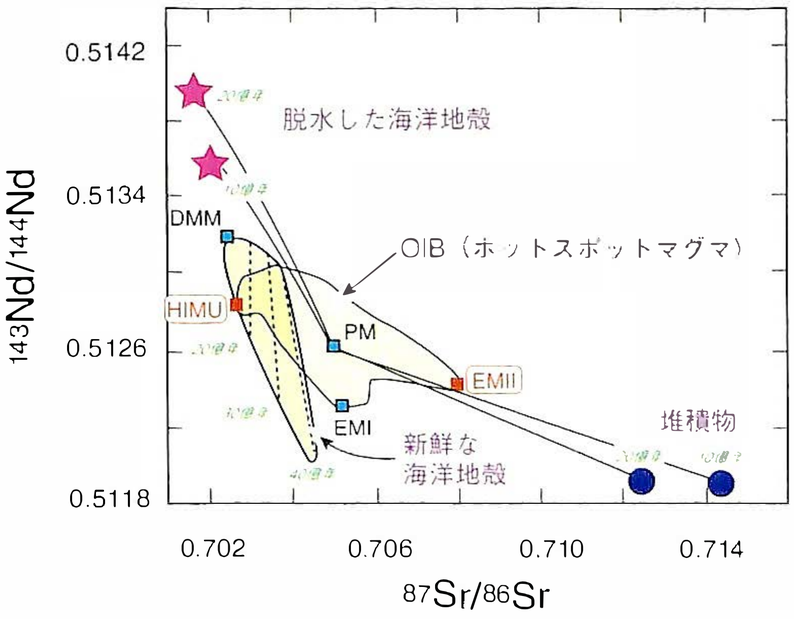


図9　サブダクションファクトリーで，プレートの沈み込みに伴う脱水分解反応で形成される廃棄物の同位体比進化。海洋地殻と堆積物に由来する廃棄物はそれぞれ，HIMUとEMIIと呼ばれるマントル端成分に熟成され，ホットスポットマグマの原料として利用されているらしい。

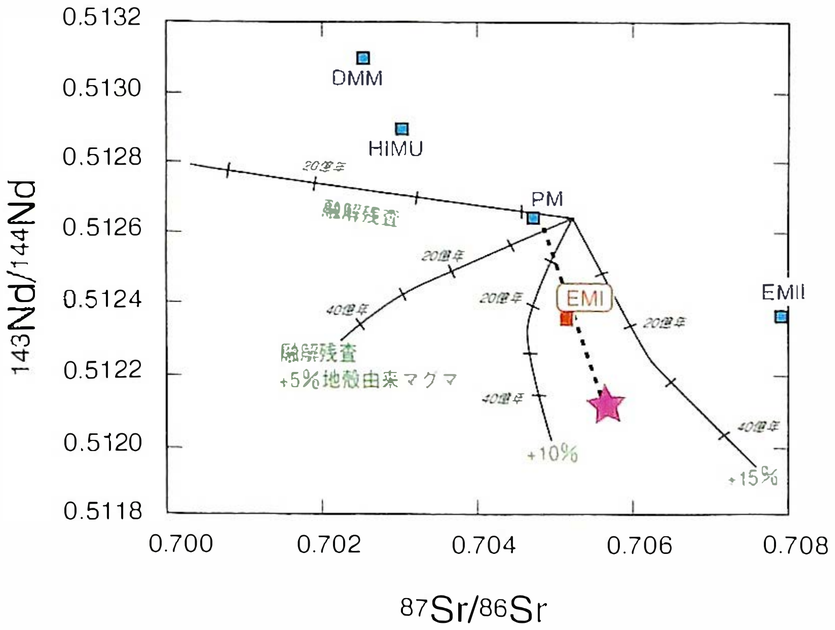


図10　大陸地殻の形成に伴って生み出される廃棄物（反大陸物質）の同位体比進化。この廃棄物は，EMIと呼ばれるマントル端成分に熟成され，ホットスポットマグマの原料として利用されているらしい。

サブダクションファクトリーでは、海洋地殻や堆積物などの海洋物質からH_2Oや特定の元素を抽出した後に生まれる廃棄物、それに大陸地殻を製造する際に生じる廃棄物、これら全てを、不法投棄することなくホットスポット工場でのリサイクル工程に利用していたのである。つまりサブダクションファクトリーは、完全な「ゼロ・エミッション」を達成しながら、地殻とマントルの進化に決定的な役割を果たしてきたのである(図7)。

3.　「地球シミュレータ」を用いて精密な地震シミュレーションに成功－「2003年ゴードン・ベル賞」を受賞－

固体地球統合フロンティア研究システム(IFREE)分析解析センターの坪井誠司プログラムディレクターと米国カリフォルニア工科大学地震研究所の研究グループは、「地球シミュレータ」を用いて、2002年11月3日に米国アラスカで発生した巨大地震(Mw=7.9)を精密に再現させることに成功した。この研究成果は、米国アリゾナ州フェニックスで2003年11月16日-21日に開催されたハイ・パフォーマンスコンピューティング(高性能計算技術)に関する国際会議SC2003において「2003年ゴードン・ベル賞(最高性能部門)」を受賞し、「地球シミュレータ」を用いた研究成果は、昨年に引き続き、2年連続の受賞となった。

地震の「揺れ」は地震波として、地球全体に伝播していく。地震の際、各地の地震計がとらえた地震波データを解析することにより、震源の位置、地震の規模、その発生状況などを推定し、地震発生のメカニズムを解明するための研究が行われている。地震波が地

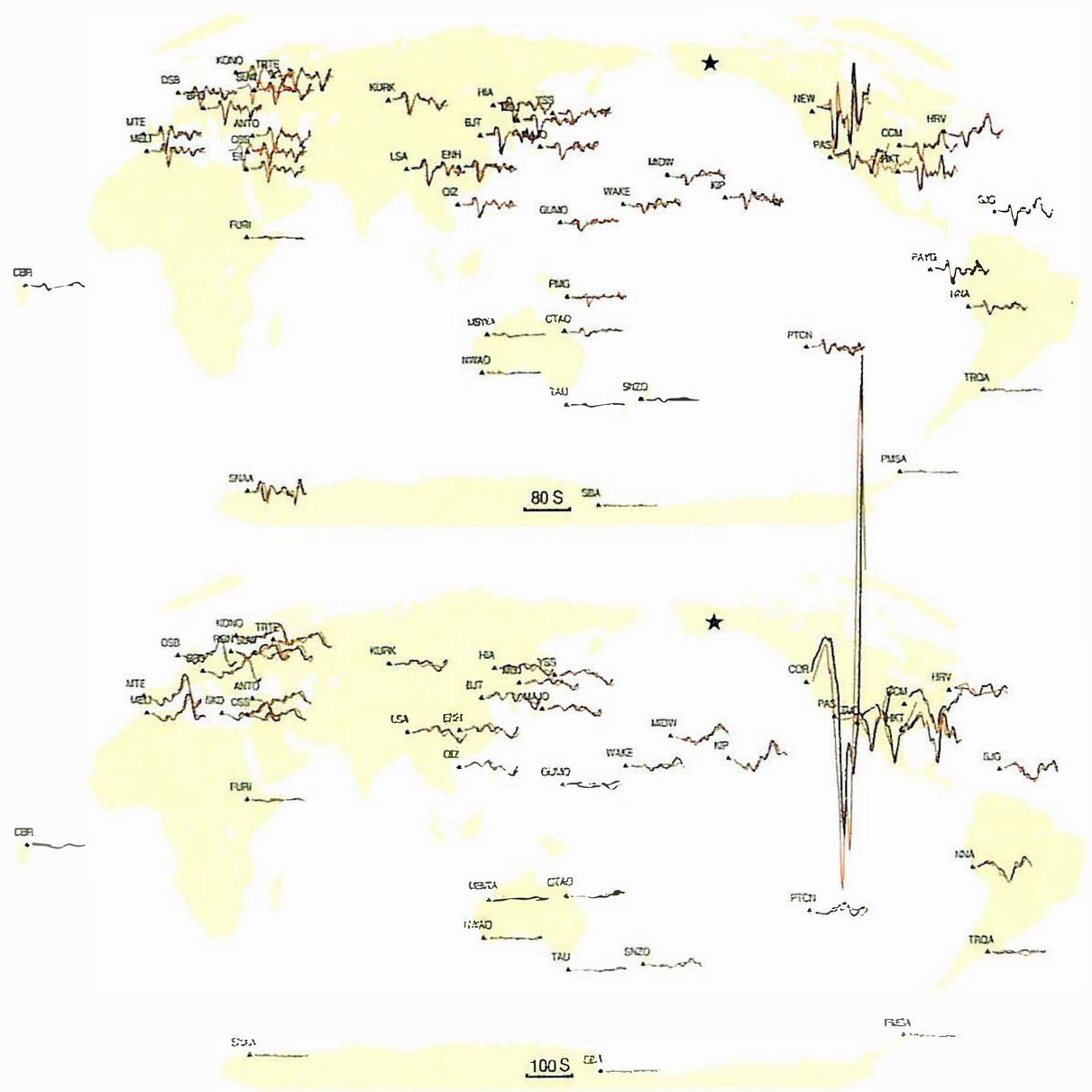


図11　2002年11月3日に米国アラスカで発生した巨大地震(Mw=7.9)の観測された地震波形(黒)と地球シミュレータで計算した3次元地球モデルに対する理論波形(赤)との比較。上が地震波のP波で下が地震波のS波の結果。黒い星印が地震の震央を表している。

球全体に伝わる際には、地球の形状（正確には球ではなく楕円体である）、地表や海底の地形、そしてマントルや核といった地球内部構造などの影響を受けるが、今までの研究ではこれらの影響を考慮した解析を行うことがほとんどできなかった。

本研究では「地球シミュレータ」の243ノード（1944プロセッサー）を用いることにより、地球内部を54億個の格子点に分割し（格子点の間隔は、地球表面で約2.9km）、地震波の伝播に影響を及ぼす地球の形状などの様々な要因をすべて考慮した地球モデルを作った。このモデル上で、2002年11月にアラスカで発生したマグニチュード7.9の地震を再現させ、周期5秒（0.2Hz）までの精度で地震波が世界各地に伝播する様子をシミュレーションした。このシミュレーションの計算結果を、実際の地震の際に観測された地震波データと比較したところ、地震波形を正確に再現できることが明らかになった（図11）。このシミュレーションの実効性能は5テラフロップスを記録した。このように、本研究は、高性能並列計算機を「地震のシミュレーション」という実用的な科学技術計算に応用し、その研究内容、シミュレーションの規模、共に他に類を見ない優れたものであることが評価され、ゴードン・ベル賞の受賞となった。

図12に示すように、地球の3次元的な構造を考慮しない場合は、明らかに観測データとの一致は良くない。従って、「地球シミュレータ」を用いて、震源域の複雑な地形や地球内部構造などの影響を考慮した地震波の伝播のシミュレーションを全地球規模で行うことが可能となったことで、実際に記録された地震波データの中から、地震そのものが原因になっている部分と、震源付近の地球内部構造や地形が原因になっている部分とを分離して解析することができるようになり、地震波データの解析による地震の発生メカニズム研究が飛躍的に発展することが期待できる。

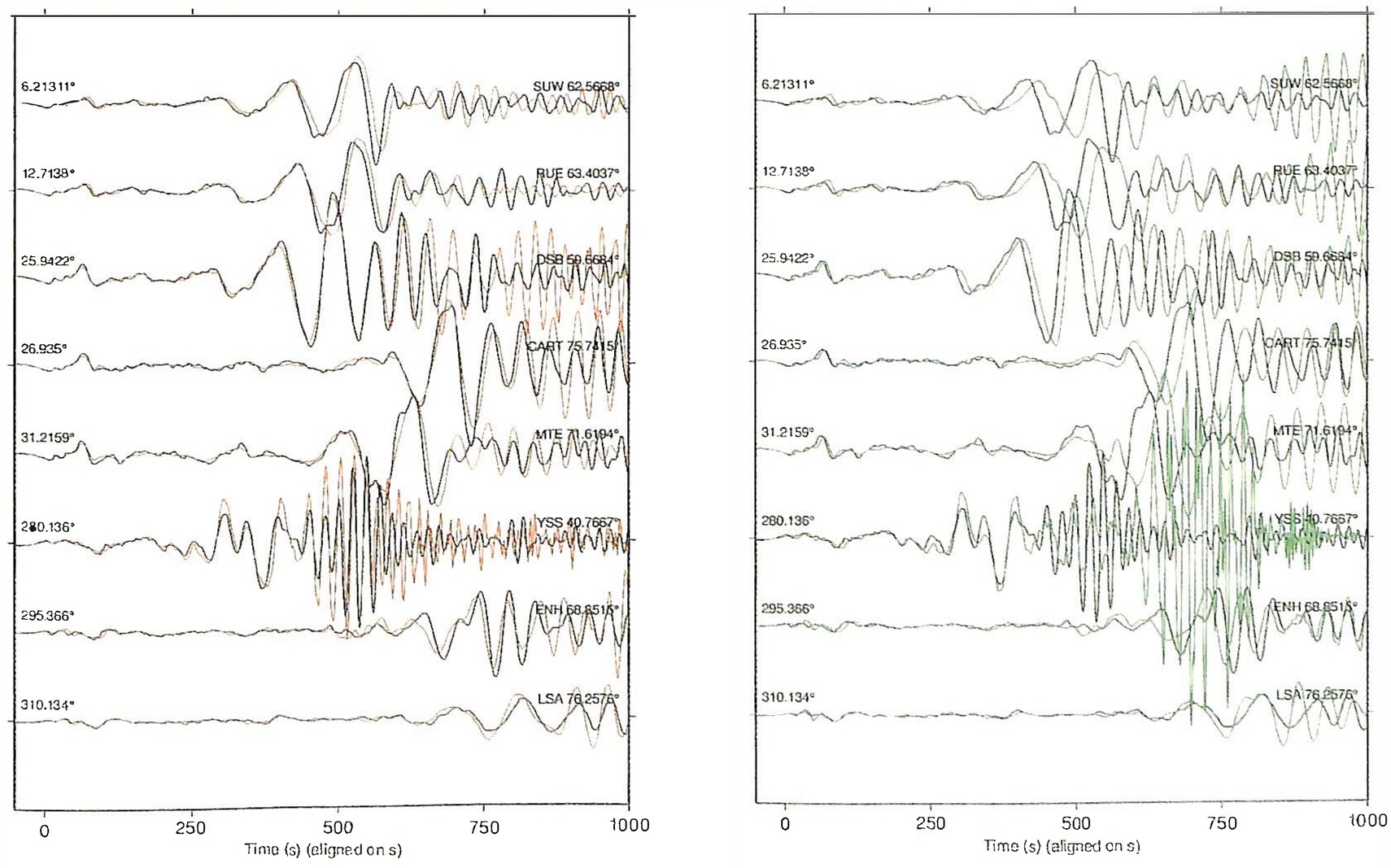


図12　（左）2002年11月3日に米国アラスカで発生した巨大地震（Mw=7.9）の観測された地震波形（黒）と地球シミュレータで計算した3次元地球モデルに対する理論波形（赤）との比較。（右）同じ地震に対し、観測された地震波形（黒）と3次元構造を取り入れていない理論波形（緑）との比較。

地球シミュレータセンター

The Earth Simulator Center

1. 2002年8月の欧州における集中豪雨の予測可能性（図1）

2002年8月に欧州中部で集中豪雨があり、各地で洪水が発生した。この集中豪雨は5～6日から2週間程度の中期予測では予報できず、被害が大きくなったと言われている。そこで、AFESで20kmメッシュの超高解像度ハインドキャストなどを行い、その予測可能性を研究した。

左図は、集中豪雨がおきた頃の赤外放射の人工衛星による観測結果を示している。右図はAFESの3.5日ハインドキャストによるシミュレーション結果である。両図を比較すると、ヨーロッパ中部に切離低気圧に伴う雲が見られ、ハインドキャストは成功したと考えられる。

しかしながら、3.5日よりも長いハインドキャストは、準定常ロスビー波の伝播には、さほど違いがなかったにもかかわらず、欧州中部の集中豪雨を再現することができなかった。

そこで、その原因を把握するために、気象庁の25メンバーアンサンブル予報を使って、簡単な感度テストを行った。それによると、集中豪雨の2日前には、北米大陸の東海岸に低気圧、高気圧偏差があることと、熱帯低気圧Cristobalがその南西にあることが重要であることが分かった。

結果を良く見てみると、Cristobalが低気圧に伴う前線と一体化し、相互作用を引き起こすことが重要であることが示唆された。そして、中規模現象（熱帯低気圧や前線）の相互作用が大規模場（ロスビー波など）に作用し、それが、中規模な切離低気圧の発生に関与しているという仮説をたてることができ、現在は、そのメカニズム解明を行っているところである。

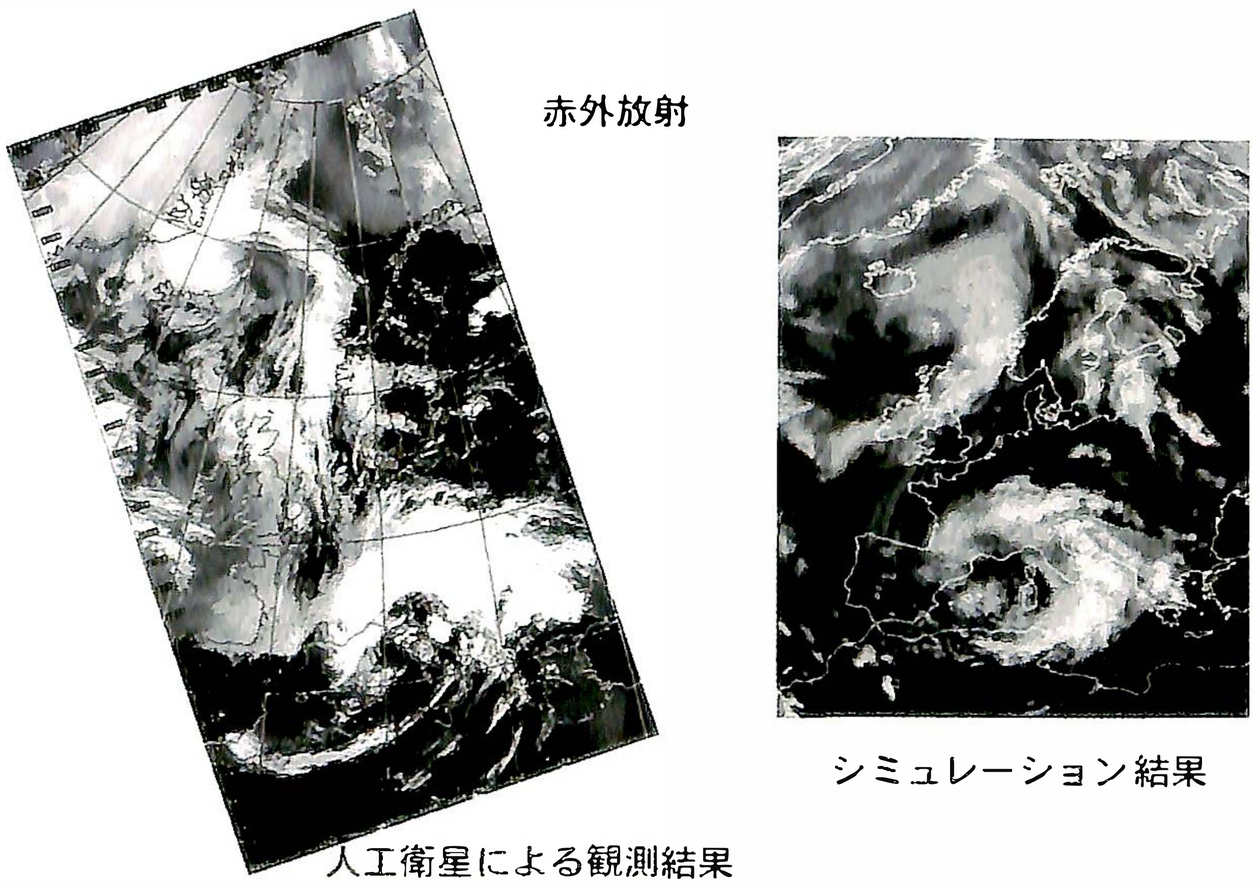


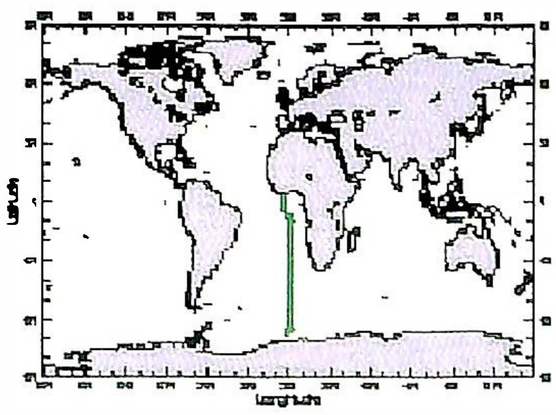
図1　2002年8月の欧州集中豪雨の再現シミュレーション

2. 高解像全球海洋モデルOFESを用いたフロンシミュレーション（図2及び3）

フロンは非常に安定であるために、オゾン層の破壊や地球温暖化などが大きな問題となっているが、安定に存在し追跡ができることから、大気や海洋における物質の輸送を調べるのに適した「トレーサー」として知られている。大気に放出されたフロンは、わずかながら海洋に吸収され広がっており、その分布を調べることは、人為起源二酸化炭素の海洋への吸収や海洋循環による輸送を調べる上で重要なテーマとなっている。海洋におけるフロン観測は1980年代に始まり、1990 年代に入って世界海洋循環実験（World Ocean Circulation Experiment）観測の下で広く実施され、現在も活発に行われている。また、海洋モデルによるフロンシミュレーションも行われてきた。しかしながら、これまでのシミュレーションでは、水平解像度が十分ではなかったために、西岸境界域や沿岸域での重要なプロセスが十分に解像できず、これらの海域でのフロン吸収量や、吸収されたフロンの外洋への輸送経路を確認することが困難であった。そこで水平解像度0.1度（約10km）の高解像度モデルを用いて、全球渦解像フロンシミュレーションを実施した。

モデルは米国GFDLで開発された海洋大循環モデルMOM3を基に、地球シミュレータ向けに最適・並列化されたOFES（OGCM for the Earth Simulator）にフロンを加えたモデルを用いた。初期値は十分に長い50年間のスピンアップをした循環場用い、海洋中のフロン濃度をゼロとして、1950年～1997年のシミュレーションを行った。

まず、人為起源二酸化炭素の吸収域として重要と考えられている南大洋のフロン濃度分布の観測結果とシミュレーション結果を図2に示す。シミュレーションで得られたフロン



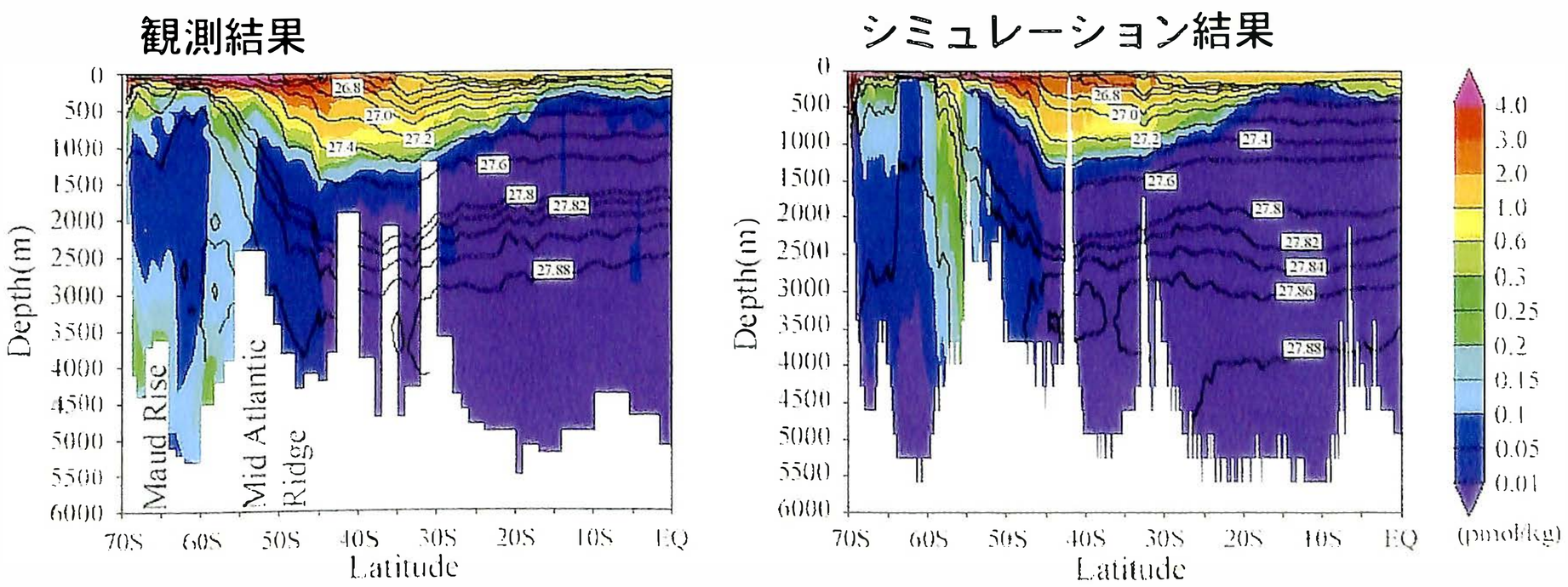


図2　南大洋のフロン11濃度分布とポテンシャル密度分布（1983年）

分布は、南緯45度付近で深さ1000m程度までフロンが浸入している様子や、南緯55度から60度付近で海底まで認められる高濃度のフロン分布をよく再現している。これらは各々、南極亜寒帯モード水（南大洋の水温10度前後の一様な性質を持った水）や南極底層水（主にウエッデル海で形成される水温0度以下の世界で最も高密度な海水）の形成に伴って取り込まれたフロンが、中深層に広がっていることを示している。さらに、シミュレーション結果を用いて輸送経路を調べたところ、ウエッデル海からフロンが2つの経路を通って輸送されていることを明らかにすることができた。

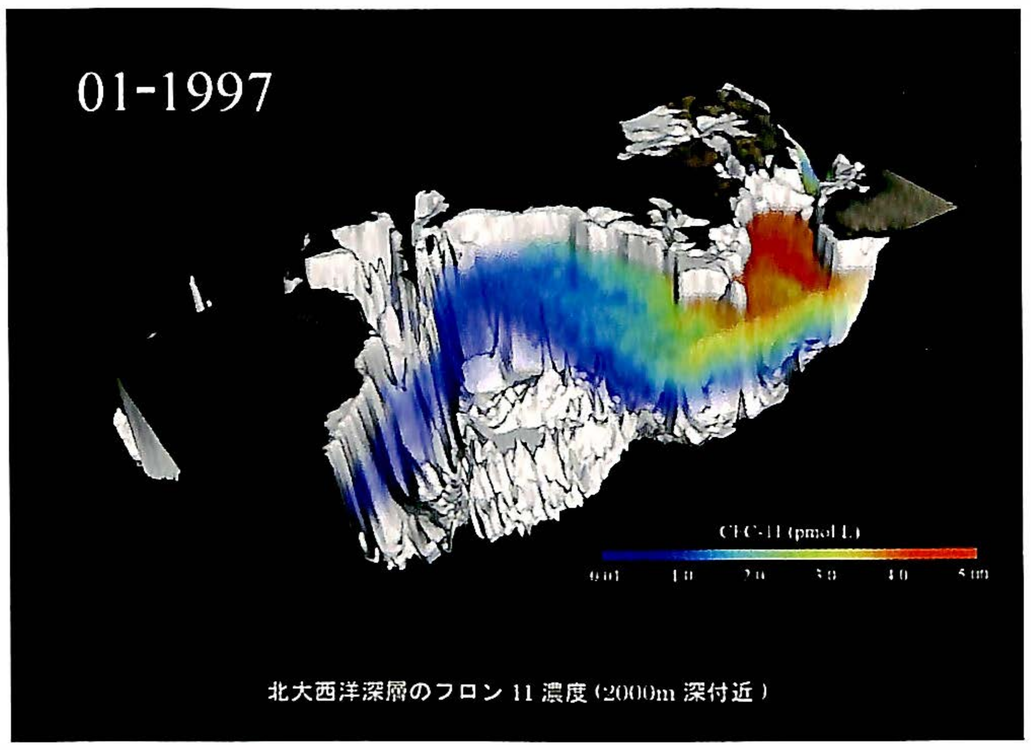


図3　大西洋西部のフロン11濃度分布のシミュレーション

南大洋とともに、北大西洋北部は深層水が形成される海域として知られている。図3は、大西洋西部の2000m深付近のフロン濃度分布を示している。北大西洋で沈みこんだフロンは、西岸の約2000m深を北から南にゆっくりと流れる深層の西岸境界流により輸送される。シミュレーションを実施した1950年から1997年までのフロン濃度分布の挙動により、深層の西岸境界流の経路をはっきりと捉えることができた。以上のようにシミュレーションによりフロン濃度分布をよく再現することに成功したが、その要因は高解像度モデルを用いることにより、西岸境界流などの循環場をよく再現し、海底地形も現実的に解像できたことによると考えられる。

3. 陰陽格子系によるマントル対流のシミュレーション（図4及び5）

地球シミュレータの演算性能をフルに活用するために、球形状で偏微分方程式を解くための新しい計算格子系「陰陽格子」を開発した。陰陽格子は、二つの要素格子を、部分的な重なり合いを許しながら組み合わせて球面を覆ういわゆるキメラ座標の一種である（図4の左）。陰陽格子は、通常の緯度経度格子法において問題となる1）座標特異点と2）格子間隔の極端な不均一性を持たないという優れた特徴がある。この陰陽格子を使ったマントル対流と地磁気ダイナモのシミュレーションコードを開発した。このコードの妥当性を調べるために、ブシネ型の熱対流モデルを解くことにより、これまでに三次元球殻マントル対流計算から得られている結果との比較を行った。その結果、従来のコードから得られた結果との間には、離散化法や、数値計算手法、格子点数の違いがあるにも関わらず、数%以内の誤差で整合することを確認した（図4の右）。また、粘性率が温度にのみ依存する場合には、5桁以上変化しても数値的に安定なコードであることを確認した。一様粘性率でレイリー数が低い場合における結果を図4の右に示す。

一様粘性率で低レイリー数（$Ra=10^3$から10^6）における詳細なパラメタサーチを行った結果、与えたレイリー数が臨界レイリー数100倍程度で、対称性が崩れ非定常な対流パター

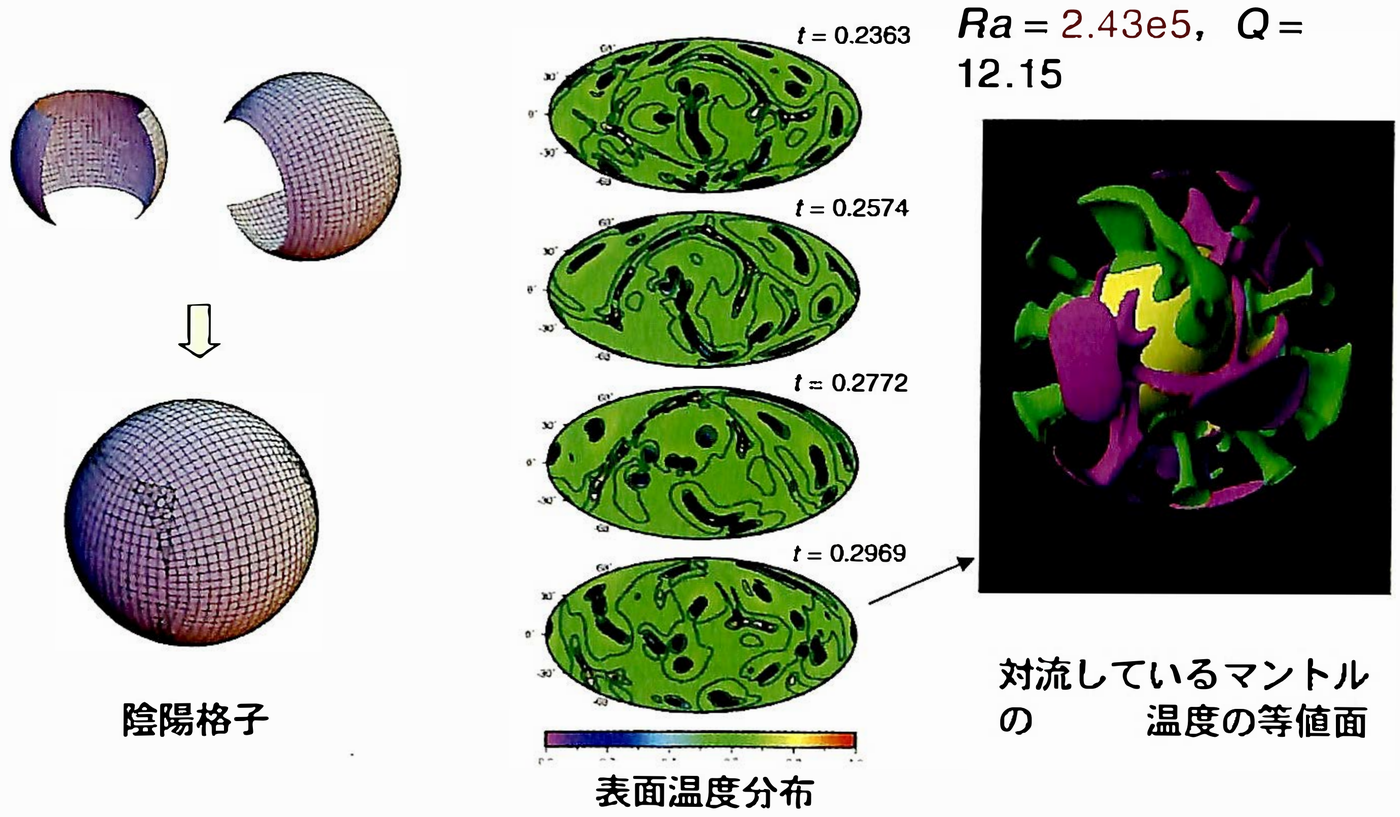


図4　陰陽格子とそれを用いたマントル対流シミュレーション

ンが得られることが分かった。緯度経度格子を用いた有限体積法コードでは、同じレイリー数で非定常な対流パターンは得られない。これは、上に述べた格子間隔の極端な不均一性により、特に六面体型対流パターンでは、対流の上昇流が数値計算上の「極」域で幅広く、「赤道」域で幅狭くなるという幾何学的に非対称な定常対流のパターンを許してしまうためであると考えられる。

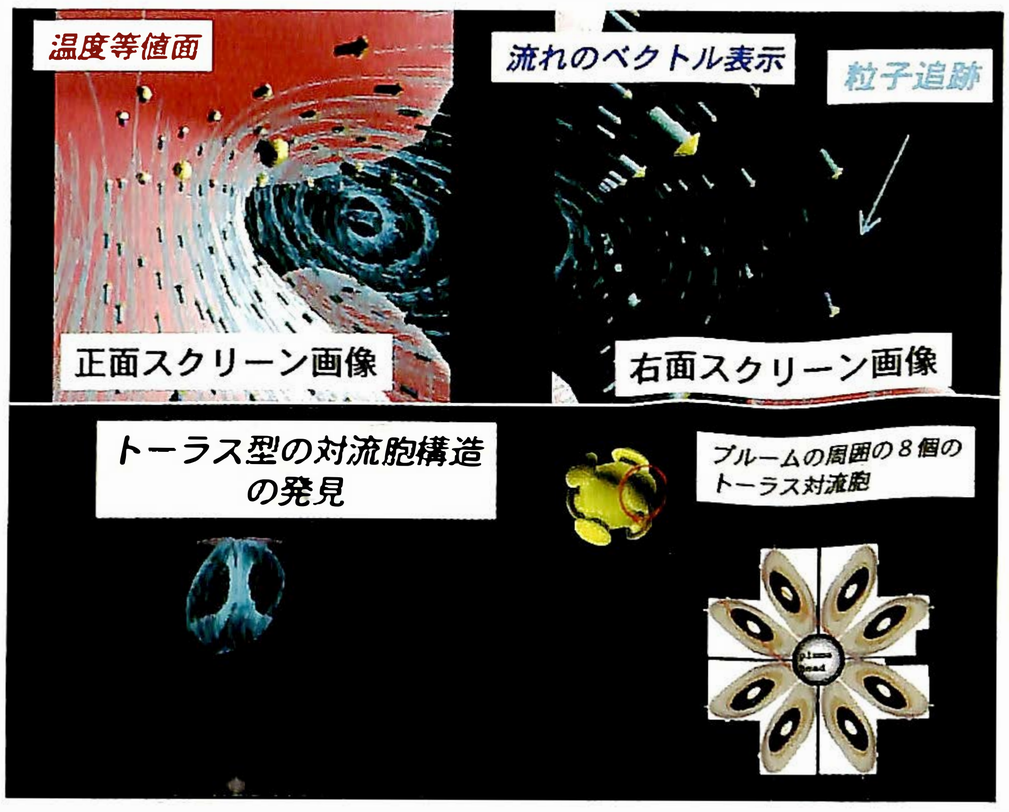


図5　3次元可視化装置BRAVEを使ったマントル対流の空間基本構造の解析

このシミュレーション結果を、3次元可視化装置BRAVE を用いて解析した(図5)。その結果、低レイリー数における定常で対象なマントル対流は、互いに混合のない独立した、トーラス型(ドーナッツ型)の構造を持った対流胞の集まりとして組織化されていることを見いだした。すなわち、マントル対流の任意の一点から出発した流線は、一つのトーラス(ドーナッツ)構造の表面を稠密に覆うような閉じた曲面を構成する。これはマントル対流の基本解としての定常対象流に関する重要な発見の一つである。

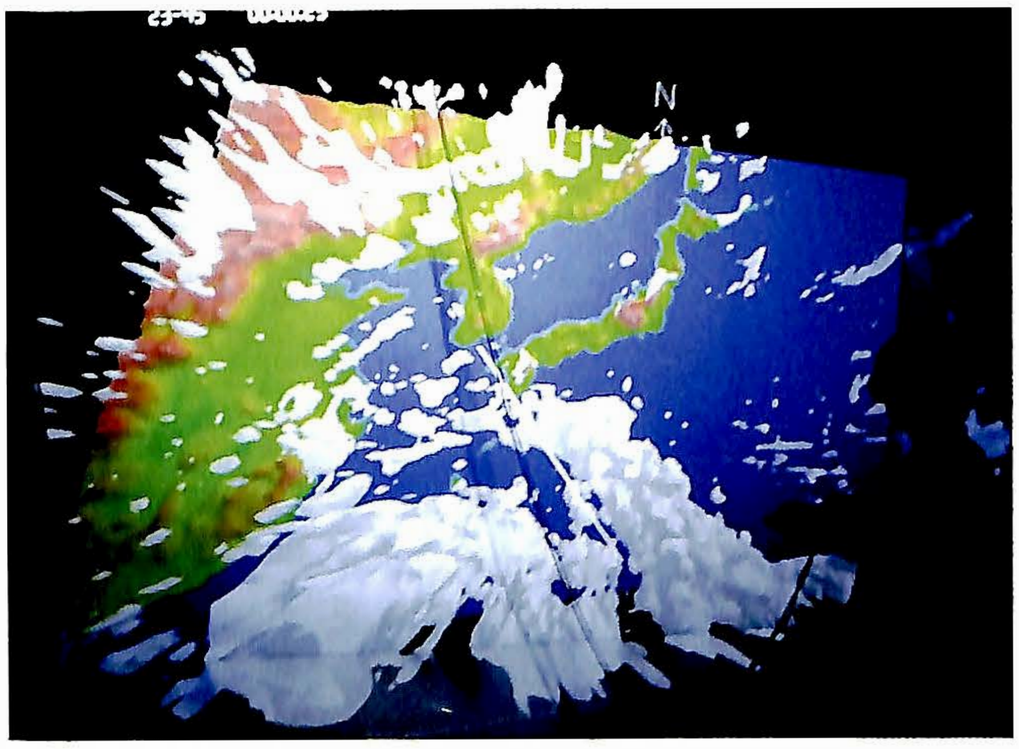
4. 3次元可視化装置、BRAVEの導入と画像表示ソフトの開発(図6)

平成15年に導入した3次元可視化装置、BRAVEは、左右、正面、床の4面の巨大なスクリーン(3m×3m)上に、少し異なった角度からの画像を映し、その中に入った人間には、その画像が立体として感じられるように再現する可視化装置である。

人間が、物を立体として認識できるのは、左右の目が僅かに離れているので、両眼がそれぞれ違う角度で物をとらえることができるためで、BRAVEは、この原理を応用している。

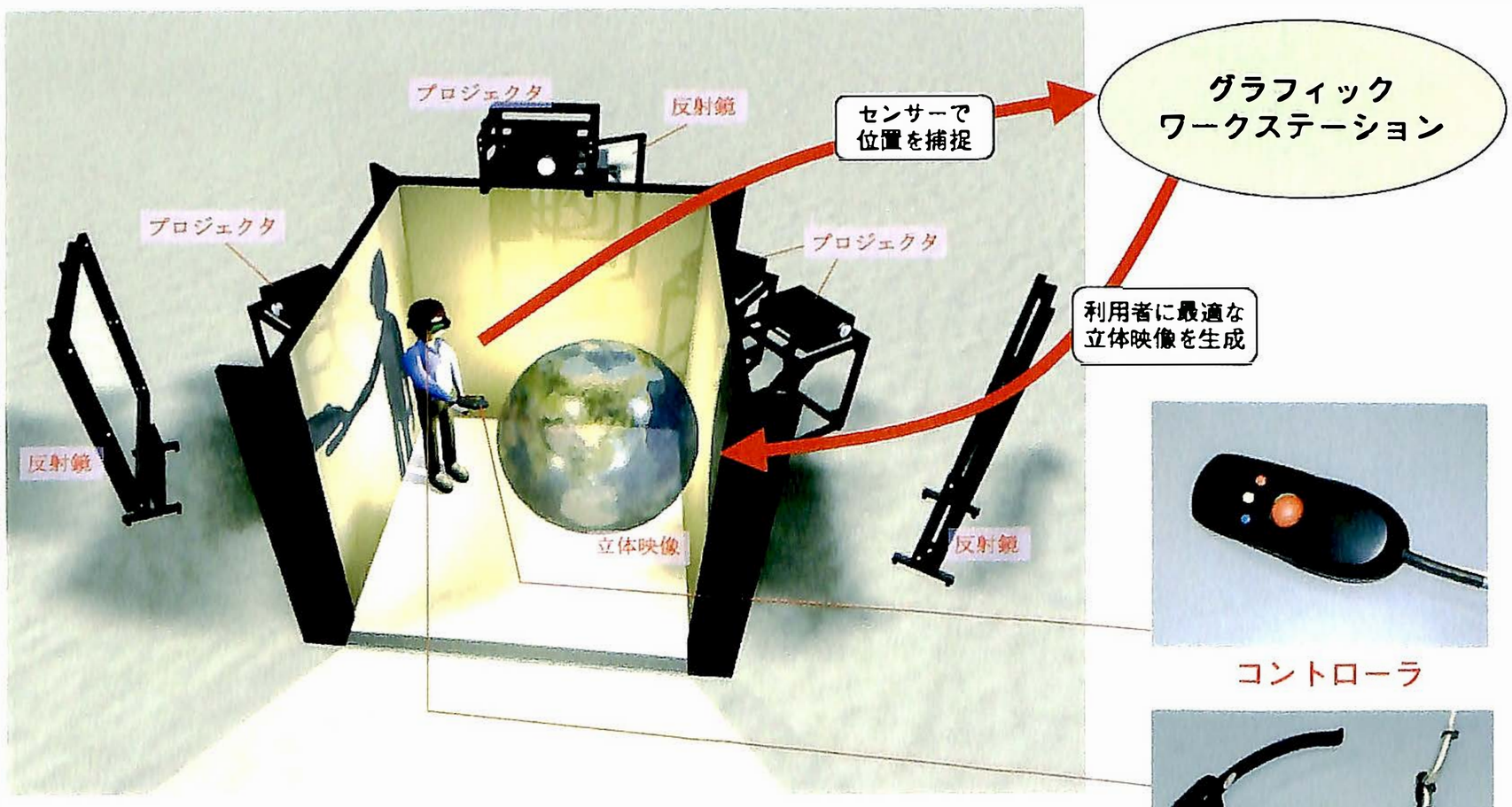
シミュレーションデータをそれぞれ右目用と左目用に画像処理して、専用眼鏡に用いて、頭の中で仮想的な立体として認識させる方法を用いている。さらに、スクリーンに設置されている磁気センサーが、観察者の位置を検知し、立ち位置と、見ている位置に相応しい立体画像を作り出す。シミュレーション結果を直感的に理解するため、この装置で画像処理するソフトウェアを開発してきた。

その一例を図6に示す。夏近い季節、東アジア域では、南からの暖かく湿った空気と、北からの冷たく乾いた空気のぶつかり合い、梅雨前線に伴う雨がみられる。図は、日本付近にあらわれた、梅雨前線に沿って生じた、大気中の雲水の量が時間変化する様子をBRAVEを用いて立体的に示し、解析しているところである。図の右の方に、スクリーン内に入って解析している研究者がいる。



例：梅雨時の雲水解析

3次元動画処理装置　BRAVE (Booth for Resolving Aspects of Virtual Earth)



シミュレーションの可視化を行い、そこから新たなる発見を引き出すためのツールとして、CAVEシステム・BRAVEを導入。

利用者の位置と見ている方向を、センサーで捉えることにより、利用者にとって最適な立体映像を表示することができる。

コントローラを用いることで、立体映像の調べたい部分に対して、直接的な操作を行うことができる。

視界全域をスクリーンで覆うことで、利用者は表示枠の制限に左右されずに広大な映像空間の中で自由に解析ができる。

図6　3次元可視化装置（BRAVE）の解析ソフトウェア開発

海洋科学技術センターにおけるこれまでの主要な成果

深海地球ドリリング計画推進室

Ocean Drilling in the 21st Century

1. 深海地球ドリリング計画（OD21）～統合国際深海掘削計画（IODP）

1960年代以降、米国主導で行われていた海洋科学掘削は、1985年から2003年10月までの間、国際的な協力の下に米国主導で行われた「国際深海掘削計画（Ocean Drilling Program : ODP）」に至り、プレートテクトニクスの実証、地球環境変遷史の解明、新たな地下生物圏の発見等、数々の功績を地球科学にもたらしてきた。その一方で、1980年代後半以降、我が国でも深海掘削の重要性が確認され、海洋科学技術センター（以下「海洋センター」という。）を中心として深海掘削技術の研究開発を進める「深海地球ドリリング計画（Ocean Drilling in the 21st Century : OD21）」が提唱された。2003年10月からはODPとOD21がいわば統合され、日米主導の国際プロジェクトである「統合国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program : IODP）」が発足した。

IODPは、国際的な協調と資金の導入、統一された科学計画機能により、日本が提供する地球深部探査船「ちきゅう」、米国が提供するノンライザー掘削船及び極限・浅海域において使用される特定任務掘削船（MSP）、更に、新たな陸上施設や先端的な技術・機器というこれまでにない強力なインフラを用いて、21世紀の地球科学・生命科学の研究領域において大きな進歩をもたらす研究テーマや、自然災害の低減等社会が直面する課題の解決へも貢献できるテーマに取り組み、人類のさらなる発展に寄与することを目指す壮大な国際科学プロジェクトである。ここに、深海地球ドリリング計画の提唱者である海洋センターのこれまでの取り組みを概観する。



建造中の「ちきゅう」（2003年11月）

2. 統合された科学計画

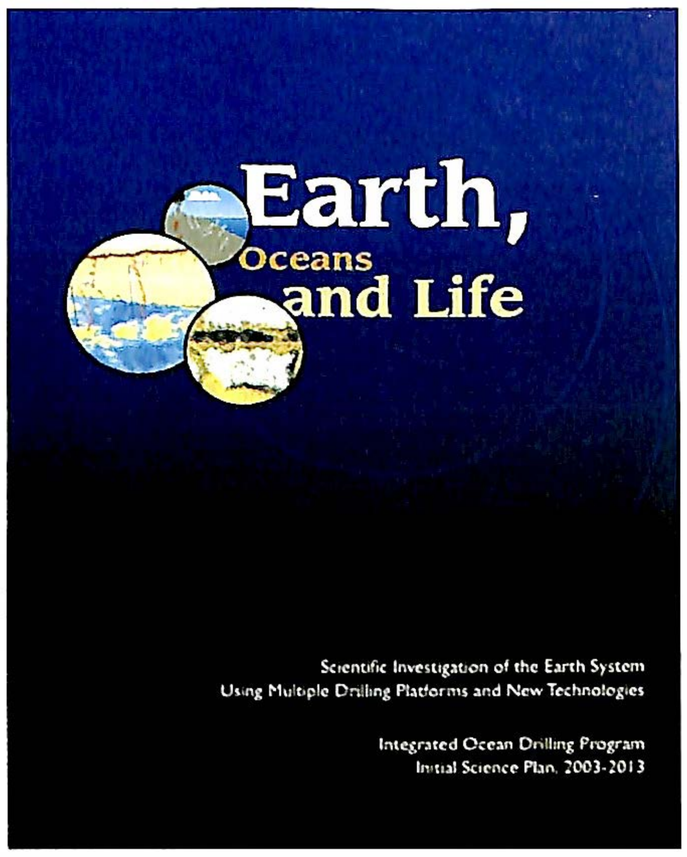
2.1. IODP初期科学計画の策定

1997年後半以降、海洋センターの研究者も中核に加わりつつ、世界中の研究者による度重なる検討を経て、2003年から10年間のIODPの統合された科学目標を設定した初期科学計画（Initial Science Plan : ISP）が作成された。ISPに述べられている究極的な目標は大

気－地球表層－地球内部間の相互作用による物質移動の解析に基づく統一的な新しい地球観の創出である。初期10年間の主要課題を：

1) 地殻内生物圏と「海底下海洋」
　・地殻内生物圏
　・ガスハイドレート
2) 環境変動－その過程と影響
　・極限気候
　・高速気候変動
3) 固体地球ダイナミクス
　・大陸分裂と堆積盆形成
　・巨大岩石区
　・21世紀モホール
　・地震発生帯

と設定している。



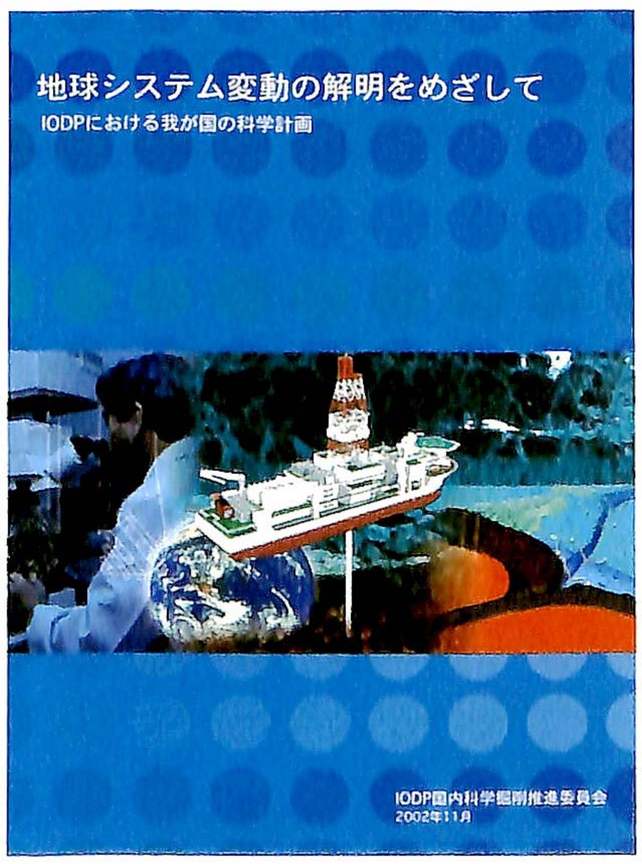
「Initial Science Plan (ISP)」

2.2. IODPにおける我が国の科学計画策定

一方、ODPからIODPへの発展に伴い、我が国からの科学提案の数を飛躍的に増大させる必要がある。科学提案を奨励・促進するためには、その指針となる我が国としての科学計画書の作成が必要があり、海洋センターに設置された有識者から成るIODP国内科学掘削推進委員会で、その検討を行い、「地球システム変動の解明をめざして－IODPにおける我が国の科学計画」として2002年11月に纏められた。この中で

1. マントル活動と地球システム変動
2. 地殻活動と地球システム変動
3. 沈み込み帯ダイナミクス・物質循環と地球システム変動
4. 長期孔内計測
5. 地下生物圏研究

の5項目を我が国が主導するIODP科学研究テーマとして掲げた。



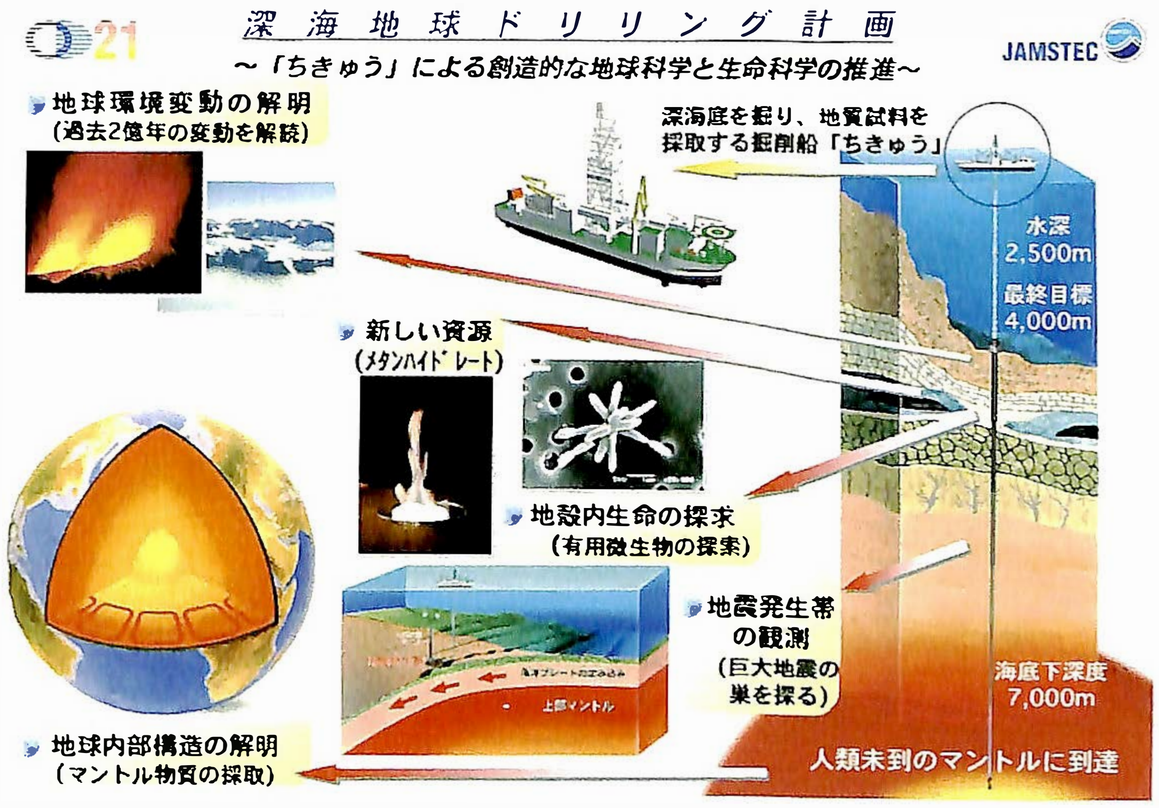
「IODPにおける我が国の科学計画」

2.3. 研究推進・支援

このような科学計画を総合的に推進していく上では、我が国全体の研究基盤の整備・充実等を進める必要があり、その一環として、海洋センターは2001年に固体地球統合フロンティア研究システム(IFREE)及び極限環境生物フロンティアシステム(DEEPSTAR)を設立し、IODP関連研究の質・量における向上を図っている。

更に、IODPを中心とした地球掘削科学に関する研究計画の立案、掘削科学に関係する研究コミュニティーの拡大、研究基盤の検討とこれに関連する政策提言等を目的に、

「日本地球掘削科学コンソーシアム」(会長：久城育夫固体地球統合フロンティア研究システム長)が2003年4月に発足され、大学・研究機関の代表者を中心に、海洋センターからも5部署が入会しその活動が開始された。また、本コンソーシアムの設立・運営に関しては、海洋センターも積極的に支援しているところである。

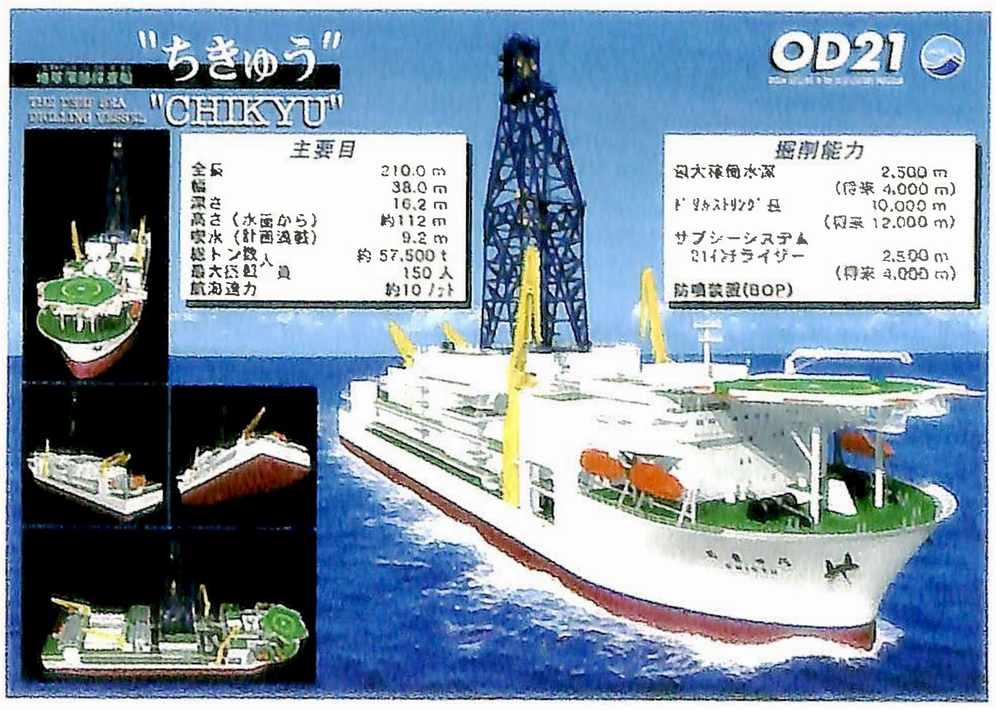


3. 地球深部探査船「ちきゅう」の建造

1980年代後半、我が国の研究者の中で、大型科学掘削船を建造し、新しい地球科学の創設に貢献しようとする気運が生まれた。その理由は、当時行われていたODPにおいては、技術的に海底下2,000mの掘削が限度であり、マントルや巨大地震発生域などの深部ターゲットへ到達することが不可能である、というところにあった。その後、科学技術庁(当時)における審議等を経て深海掘削の重要性が確認され、最新鋭の掘削機能を持つ大型科学掘削船の建造とそれに伴う技術開発の推進は、海洋センターが中心となってOD21として実施することとなり、研究に着手した。

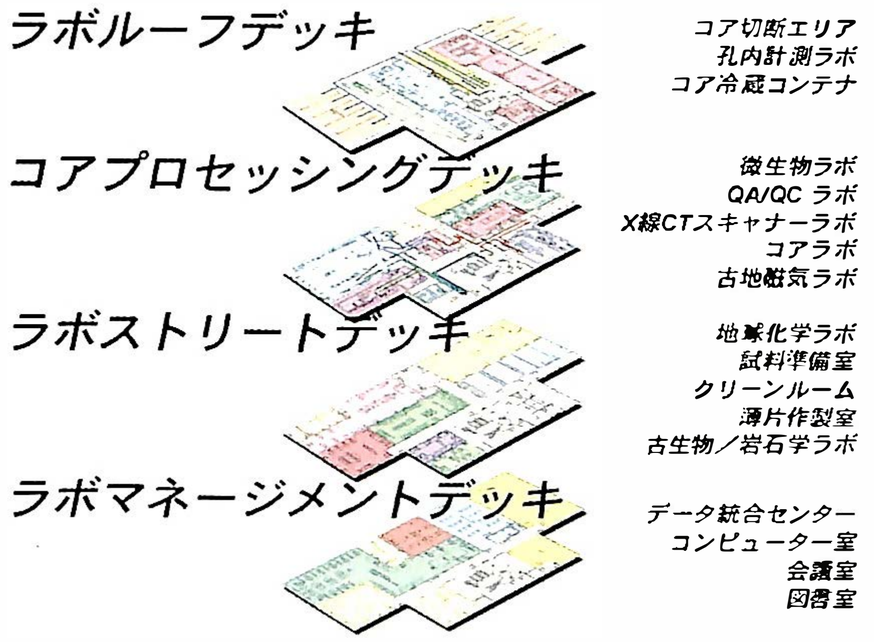
2001年4月25日、三井造船(株)玉野造船所において起工、2002年1月18日に進水したこの大型科学掘削船は地球深部探査船「ちきゅう」と名付けられた。船体部分の艤装工事の後、2003年4月から6月にかけて海上確認運転を行い、7月には三菱重工業(株)長崎造船所香焼工場へ回航された。同工場で渠内において艤装が施され、9月に出渠、岸壁において掘削櫓(やぐら)が搭載された。現在は、船上試験及び船内へ搭載する研究機器の整備等を行っている。

「ちきゅう」の最大の特徴は、ライザー掘削技術を駆使できることにある。ライザー掘削とは、掘削パイプをさらに大きな径のパイプ(ライザー)の中を通すことによって、粘土鉱物などの鉱物粉末を含む比重の大きい水(泥水)を循環させる方式である。泥水は、孔壁の閉鎖や崩壊を防ぐとともに、掘削切り屑



（カッティングズ）を持ち上げてくる役目を果たす。また、泥水循環方式の採用は、石油やガスの含有が予想される地層における掘削も可能とする。当初、2,500ｍの水深から海底下7,000ｍまでの掘削を目指すが、これは科学掘削としては初めての試みであり、将来は、水深4,000ｍ下における掘削技術の確立し、人類未到のマントルまでの到達を計画している。

また、「ちきゅう」は洋上における研究施設として最新鋭の研究機器を搭載している。上述の掘削によって採取されたコアは、環境の変化による影響を受けやすいため、速やかに処理を進める必要があり、その分析内容は多岐に亘っている。このため、作業が効率的に流れていくように様々な工夫がなされており、地球科学や生命科学における幅広い分野の研究がより効率的で高度な研究環境下で行える設計となっている、まさに海に浮かぶ研究施設である。



船上研究区画配置図

4. 地球深部探査船「ちきゅう」の運用準備

2007年頃からの「ちきゅう」の本格運用開始を目指し、海洋センターでは運用体制の整備、慣熟訓練の準備、及び陸上研究・コア保管施設等の整備を進めてきている。

運用体制の整備においては、2003年10月に「ちきゅう」の運用実施組織として地球深部探査センター（Center for Deep Earth Exploration : CDEX）を設置し、運用マニュアル、安全管理・環境保全マニュアル（HSE）の策定、及び科学支援業務の準備等、各種運用開始準備業務を実施している。

特に、2005年4月の「ちきゅう」の引き渡し後に予定している慣熟訓練のため、慣熟訓練予定海域において地震探査法等による調査を行い、掘削地点の選定を行うと同時に、船上機器の習熟のための訓練計画を策定している。

陸上研究・コア保管施設の整備については、「ちきゅう」により採取されたコア試料等を保管し、各種分析・解析を総合的に実施するために、高知大学に整備された「高知大学海洋コア総合研究センター」を高知大学と共に共同運営している。

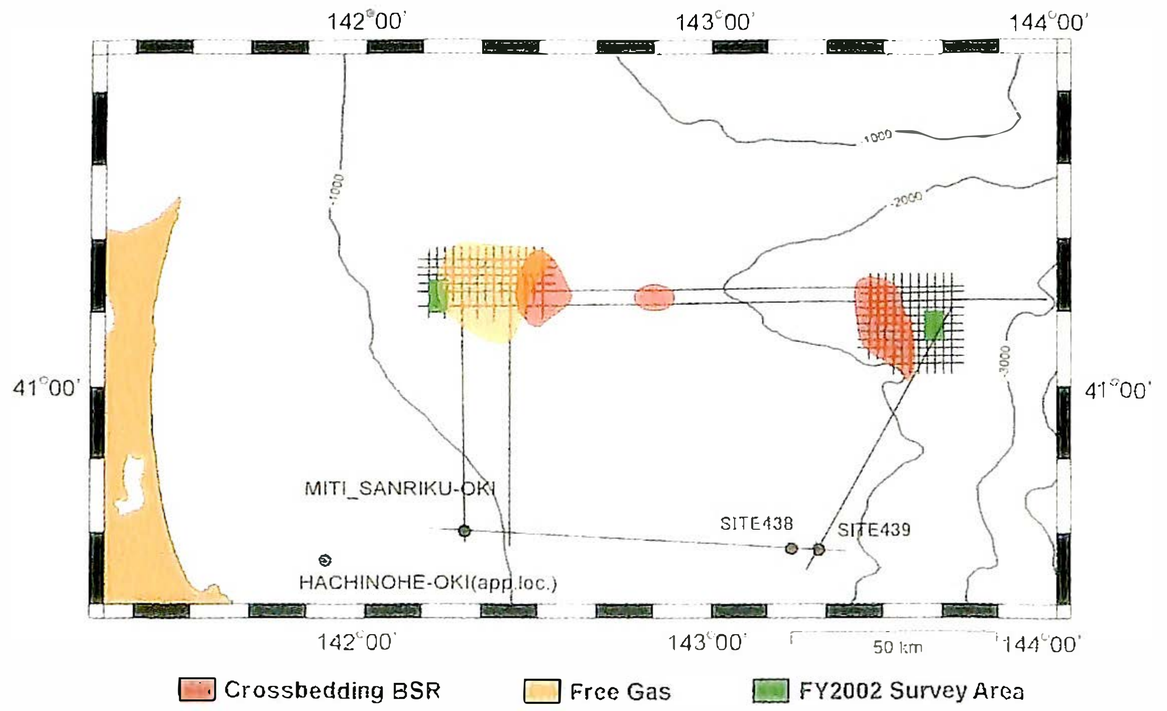


Fig.-1 Seismic Survey Area off Eastern Shimokita Peninsula

下北半島東方沖における地震探査

5. IODPの国際推進体制の構築

IODPの基本的考え方や仕組みは、これまで、政策担当者レベルの作業部会である国際ワーキンググループ(IWG)により検討されてきた。IODPの主導する政府機関である文部科学省及び全米科学財団が共同議長を担当、海洋センターは1997年に開催された第1回会合より参加している。また、IWGの事務局を担当するIWG支援オフィスを米国海洋研究所連合法人(JOI)と共同で運営する等、IODPに係る国際的な推進体制の構築に関しても積極的に支援した。2003年10月のIODP発足以降は、IODP評議会がIODP参加国間の意見交換・調整の場となり、その第1回会合(2003年12月に開催)に海洋センターも参加し、大きな役割を果たしている。

IODPを推進していくための中核となる日米二国間の覚書は、2003年4月22日に遠山文部科学大臣・コルウェルNSF長官(共に当時)により署名が行われた。また、現在、欧州がIODP参加のために設置した欧州海洋研究掘削コンソーシアム(ECORD:2004年2月現在、英仏独はじめ12ヶ国が参加)や中国との覚書署名に向けた調整・検討がすすめられている。

IODPの中心は、参加各国の研究者/科学者グループが作成する掘削提案である。これを評価・検討する科学アドバイス組織(SAS)について、IODP発足前は暫定科学アドバイス組織(iSAS)がSAS組織の検討と科学提案の評価を行ってきた。海洋センターは、iSASの各委員会・パネルに積極的に参加するとともに、その運営を行うiSASオフィスを2001年より海洋センター内に設置し、積極的な支援を行ってきた。IODP発足後に活動を開始したSASにおいても、各委員会・パネルの運営に対し、同様に積極的な参加や支援を行っている。

SASにおける掘削提案の評価・検討の結果を受け、中央管理組織(CMO)がIODPの年間計画を策定する。CMOは計画資金の管理や計画全体の運営を行うIODPの中核となる組織であり、その機能・役割については、海洋センターをはじめ日米各関係機関による検討が進められてきた。その結果、IODP国際計画管理法人(IMI)がCMO業務を担当することとなり、現在、活動開始にむけた最終調整が行われている。2004年春頃にはCMO業務の主要部分である科学計画立案支援部門(IMI-J)が日本に設置される予定であり、海洋センターを始めとする日本の各大学・研究機関がIMIの会員としてその設立当初より活動に協力してきた。



署名式での遠山文部科学大臣とコルウェルNSF長官(共に当時)

6. さらなる発展に向けて

現在、「ちきゅう」は、来るべき運用に向けて長崎の港で建造の佳境を迎えている。海洋センターは、我が国における総合推進機関として、本船が、我が国のみならず世界の未来に対し、多大なる貢献をもたらす貴重な財産と認識し、関係諸機関との密接な連携の下、本計画を積極的に牽引していく。そして、このことを通じ、これからの地球科学の大いなる発展、更には人類の安定かつ安全な発展に寄与していきたい。

主要施設・設備



支援母船「なつしま」

全長	67.4 m
幅	13.0 m
深さ	6.3 m
総トン数	1,738トン
航海速力	約12ノット
航続距離	約10,800マイル
乗員数	55名



有人潜水調査船「しんかい2000」

全長	9.3 m
幅	3.0 m
高さ	2.9 m
潜航深度	2,000 m（最大）
空中重量	23.2トン
水中速力	3ノット（最大）
乗員数	3名



無人探査機「ドルフィン3K」

全長	2.9 m
幅	1.9 m
高さ	1.9 m
潜航深度	3,300 m（最大）
空中重量	3.7トン
水中速力	3ノット（最大）



支援母船「よこすか」

全長	105.2 m
幅	16.0 m
深さ	7.3 m
総トン数	4,439トン
航海速力	約16ノット
航続距離	約9,500マイル
乗員数	60名



有人潜水調査船「しんかい6500」

全長	9.5 m
幅	2.7 m
高さ	3.2 m
潜航深度	6,500 m（最大）
空中重量	25.8トン
水中速力	2.5ノット（最大）
乗員数	3名



海洋調査船「かいよう」

全長	61.6 m
幅	28.0 m
深さ	10.6 m
総トン数	3,176トン
航海速力	約13ノット
航続距離	約6,200マイル
乗員数	60名



無人探査機「かいこう」

潜航深度	11,000 m
水中速力	2ノット

	ランチャー	ビーグル
全長	5.2 m	3.1 m
幅	2.6 m	2.0 m
高さ	3.2 m	2.3 m
空中重量	約5.1トン	約5.4トン



深海調査研究船「かいれい」

全長	105.2 m
幅	16.0 m
深さ	7.3 m
総トン数	4,628トン
航海速力	約16ノット
航続距離	約9,600マイル
乗員数	60名



海洋地球研究船「みらい」

全長	128.6 m
幅	19.0 m
深さ	13.2 m
総トン数	8,687トン
航海速力	約16ノット
航続距離	約12,000マイル
乗員数	80名



無人探査機「UROV7K」

全長	2.8 m
幅	1.8 m
高さ	2.0 m
潜航深度	7,000 m（最大）
空中重量	2.7トン



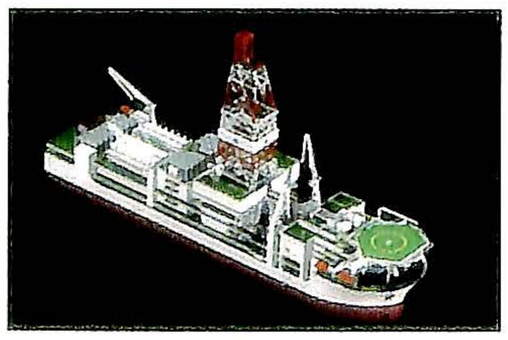
無人探査機「ハイパードルフィン」

全長	3.0 m
幅	2.0 m
高さ	2.3 m
潜航深度	3,000 m（最大）
空中重量	3.8トン
水中速力	3ノット



深海巡航探査機「うらしま」

全長	9.7 m
幅	1.3 m
高さ	1.5 m
最大深度	3,500 m
空中重量	7.5トン
水中速力	3ノット（巡航）4ノット（最大）



地球深部探査船「ちきゅう」

全長	210 m
総トン数	57,500トン
最大稼働水深	2,500 m（将来：4,000 m）
最大掘削深度	7,000 m
完成予定	2004年

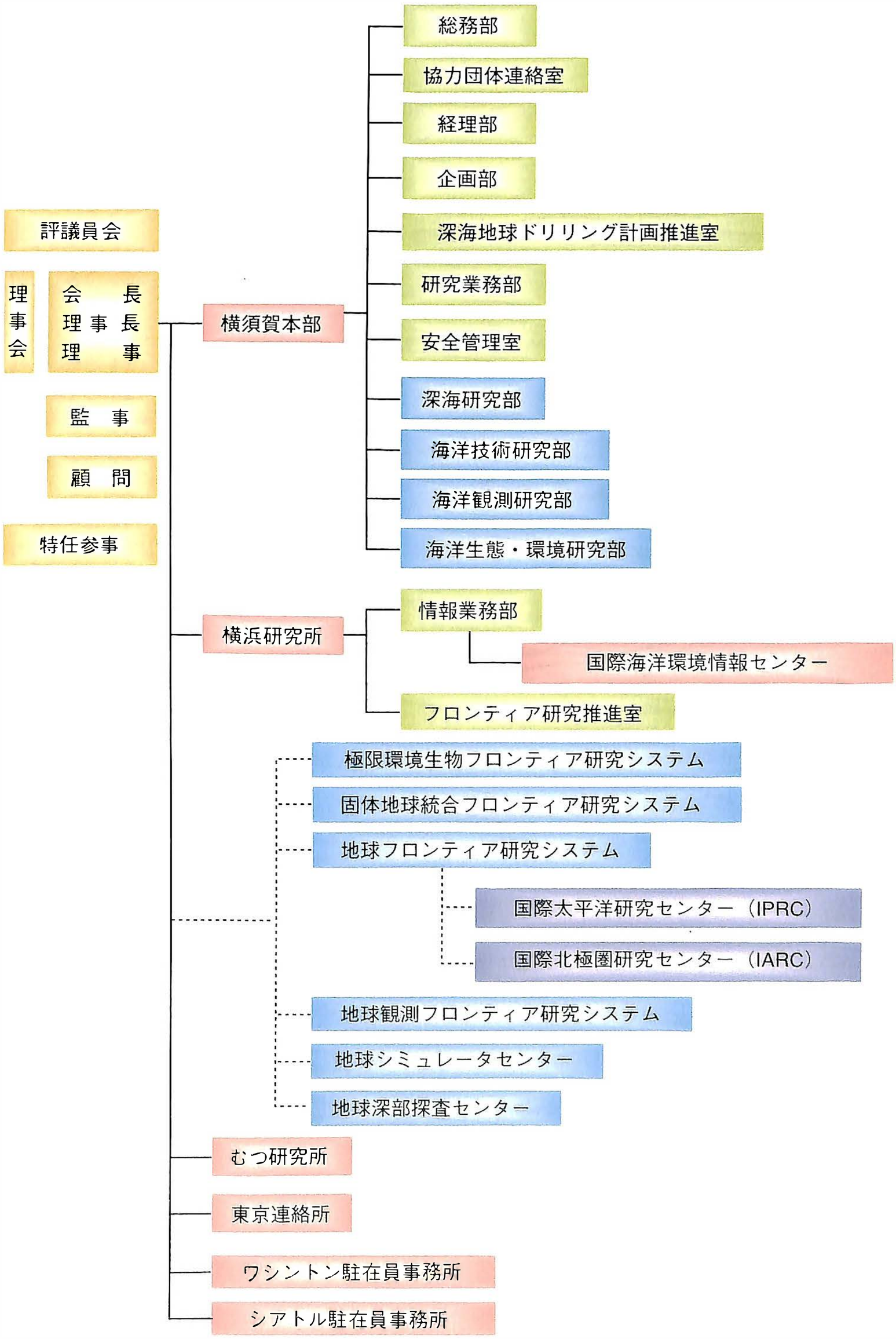


掘削孔利用システム「べんけい」

最大稼働深度	6,000 m

	ピークル	ステーション
全長	5 m	2.3 m
幅	2.6 m	2.3 m
高さ	2 m	2.8 m
空中重量	4.8トン	3.6トン

海洋科学技術センターの機能と組織

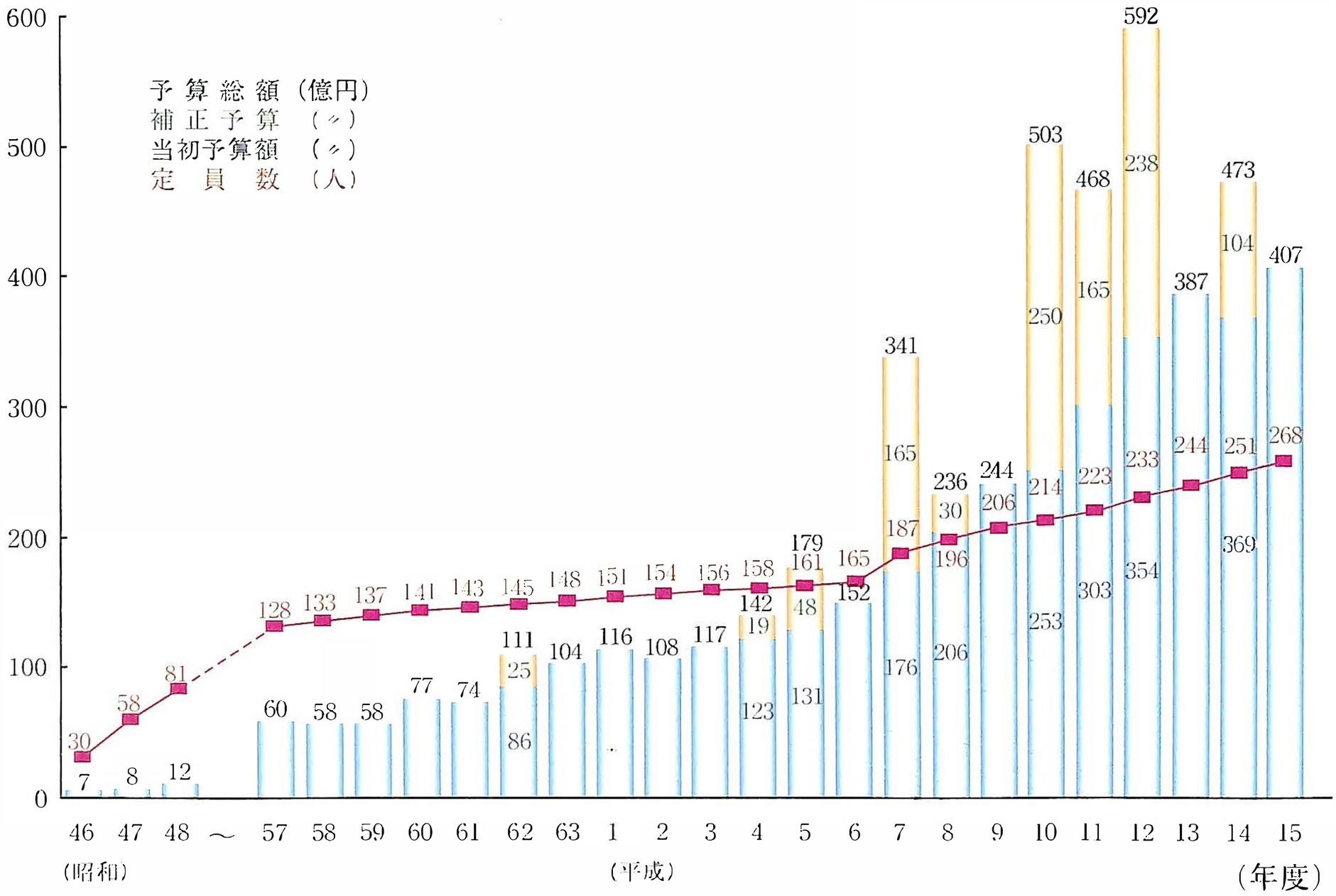


役　員

会長	武井　俊文（非常勤）（石川島播磨重工業(株)相談役名誉会長）		
理事長	平野　拓也		
理事	千々谷眞人	木下　肇	末廣　潔
理事（非常勤）	真鍋　淑郎	加藤郁之進	中西　俊之
監事	高山　進一	太田　英美（非常勤）	

評議員

浅井　冨雄	内田　勇夫	小川　健兒	小池　勲夫
小山　健夫	谷口　一郎	三村　明夫	豊田　惠聖
鳥井　弘之	濱田　隆士	平島　治	藤　洋作
堀　由紀子	前田　久明	松原　謙一	丸野　豊子
松尾　邦彦	和田　龍幸		


予算総額（億円）
補正予算　（〃）
当初予算額　（〃）
定員数　（人）
600
500
400
300
200
100
0
30 58 81 128 133 137 141 143 145 148 151 154 156 158 161 165 179 236 244 251 268
7 8 12 60 58 58 77 74 111 104 116 108 117 142 131 152 341 236 244 251 268
25 86 19 123 48 165 187 30 196 206 214 223 233 244 251 268
503 468 592 473 407
250 165 238 104
253 303 354 369
46 47 48 ～ 57 58 59 60 61 62 63 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
（昭和）
（平成）
（年度）

賛助会員名簿

海洋科学技術センターの研究開発につきましては、次の賛助会会員の皆さまから会費、
寄付をいただき支援していただいております。(50音順)

株式会社アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド殿
アイワ印刷株式会社殿
株式会社アクト殿
株式会社アサツーディ・ケイ殿
株式会社淺沼組殿
アジア海洋株式会社殿
株式会社アルファ水工コンサルタンツ殿
石川島播磨重工業株式会社殿
泉産業株式会社殿
株式会社伊藤高壓瓦斯容器製造所殿
栄光電設株式会社
株式会社エス・イー・エイ殿
株式会社NTTデータ殿
株式会社エヌ・ティ・ティファシリティーズ殿
株式会社MTS雪氷研究所殿
株式会社０CC殿
オートマックス株式会社殿
沖電気工業株式会社殿
海洋電子株式会社殿
株式会社化学分析コンサルタント殿
鹿島建設株式会社殿
カネダ株式会社殿
カヤバ工業株式会社殿
川崎設備工業株式会社殿
株式会社川崎造船殿
川本工業株式会社殿
株式会社関西総合環境センター殿
株式会社関電工殿
株式会社キュービック・アイ殿
共立管財株式会社殿
極東貿易株式会社殿
株式会社きんでん殿
株式会社熊谷組殿
株式会社グローバルオーシャンディベロップメント殿
ケイジーケイ株式会社殿
京浜急行電鉄株式会社殿
ケー・エンジニアリング株式会社殿
KDDI株式会社殿
神戸ペイント株式会社殿
国際気象海洋株式会社殿
国際石油開発株式会社殿
国際ビルサービス株式会社殿
小倉興産株式会社殿
国光施設工業株式会社殿
五洋建設株式会社殿
三機工業株式会社殿
三建設備工業株式会社殿
株式会社三晃空調殿
三洋テクノマリン株式会社殿
財団法人塩事業センター殿
ジオテクノス株式会社殿
有限会社システム技研殿
シナネン株式会社殿
シバタ工業株式会社殿
清水建設株式会社殿
株式会社商船三井殿
株式会社湘南殿
昭和高分子株式会社殿
昭和ペトロリューム株式会社殿
株式会社白石殿
社団法人信託協会殿
新日本海事株式会社殿
新日本製鐵株式会社殿
新菱冷熱工業株式会社殿
須賀工業株式会社殿
鈴鹿建設株式会社殿
スプリングエイトサービス株式会社殿
住友重機械工業株式会社殿
住友電気工業株式会社殿
清進電設株式会社殿
西武造園株式会社殿
セナー株式会社殿
セントラル・コンピュータ・サービス株式会社殿
株式会社総合企画アンド建築設計殿
株式会社損害保険ジャパン殿
第一設備工業株式会社殿
株式会社大気社殿
大成建設株式会社殿
大日本土木株式会社殿
ダイハツディーゼル株式会社殿
有限会社田浦中央食品殿
高砂熱学工業株式会社殿
株式会社竹中工務店殿
株式会社竹中土木殿
株式会社地球科学総合研究所殿
中国塗料株式会社殿
株式会社鶴見精機殿
株式会社テザック殿
寺崎電機産業株式会社殿
電気事業連合会殿
東亜建設工業株式会社殿
東海交通株式会社殿
洞海マリンシステムズ株式会社殿
東京海上火災保険株式会社殿
東京製綱繊維ロープ株式会社殿
東北ニュークリア株式会社殿
東洋建設株式会社殿
東洋通信機株式会社殿
株式会社東陽テクニカ殿
東洋熱工業株式会社殿
戸田建設株式会社殿
飛島建設株式会社殿
有限会社長澤工務店殿
株式会社中村鉄工所殿
奈良建設株式会社殿
西芝電機株式会社殿
西松建設株式会社殿
日動火災海上保険株式会社殿
日南石油株式会社殿
日油技研工業株式会社殿
日鉱金属株式会社殿
株式会社日産セキュリティ・サービス殿
日新火災海上保険株式会社殿
ニッスイ・エンジニアリング株式会社殿
ニッセイ同和損害保険株式会社殿
日本SGI株式会社殿
株式会社日本海洋科学殿
日本海洋掘削株式会社殿
日本海洋計画株式会社殿
日本海洋事業株式会社殿
社団法人日本ガス協会殿
日本興亜損害保険株式会社殿
日本サルヴェージ株式会社殿
社団法人日本産業機械工業会殿
日本酸素株式会社殿
日本水産株式会社殿
日本電気株式会社殿
日本電池株式会社殿
日本飛行機株式会社殿
日本ヒューレット・パッカード株式会社殿
日本無線株式会社殿
日本郵船株式会社殿
株式会社間組殿
株式会社ハナサン殿
濱中製鎖工業株式会社殿
東日本タグボート株式会社殿
株式会社日立製作所殿
日立電線株式会社殿
日立プラント建設株式会社殿
深田サルベージ建設株式会社殿
株式会社フジクラ殿
藤沢薬品工業株式会社殿
富士ゼロックス株式会社殿
株式会社フジタ殿
富士通株式会社殿
富士電機システムズ株式会社殿
物産不動産株式会社殿
古河総合設備株式会社殿
古河電気工業株式会社殿
古野電気株式会社殿
松本微章株式会社殿
株式会社マリン・ワーク・ジャパン殿
株式会社丸川建築設計事務所殿
株式会社マルタン殿
三鈴マシナリー株式会社殿
株式会社みずほ銀行殿
三井住友海上火災保険株式会社殿
株式会社三井住友銀行殿
三井造船株式会社殿
三菱重工業株式会社殿
株式会社三菱総合研究所殿
株式会社明電舎殿
株式会社森京介建築事務所殿
有限会社やすだ殿
山岸建設株式会社殿
株式会社ユアサコーポレーション殿
株式会社ユアテック殿
郵船商事株式会社殿
郵船ナブテック株式会社殿
ユニバーサル造船株式会社殿
株式会社リブロ殿
株式会社緑星社殿
若築建設株式会社殿

平成16年2月現在



海洋科学技術センター

問い合わせ先　〒237-0061　神奈川県横須賀市夏島町2-15　TEL 046-867-9233

企画部計画管理課

ホームページアドレス　http://www.jamstec.go.jp/