

海と地球の
情報誌

2006年

1-2月号

BlueEarth

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

特集

もっと知りたい海洋・地球科学

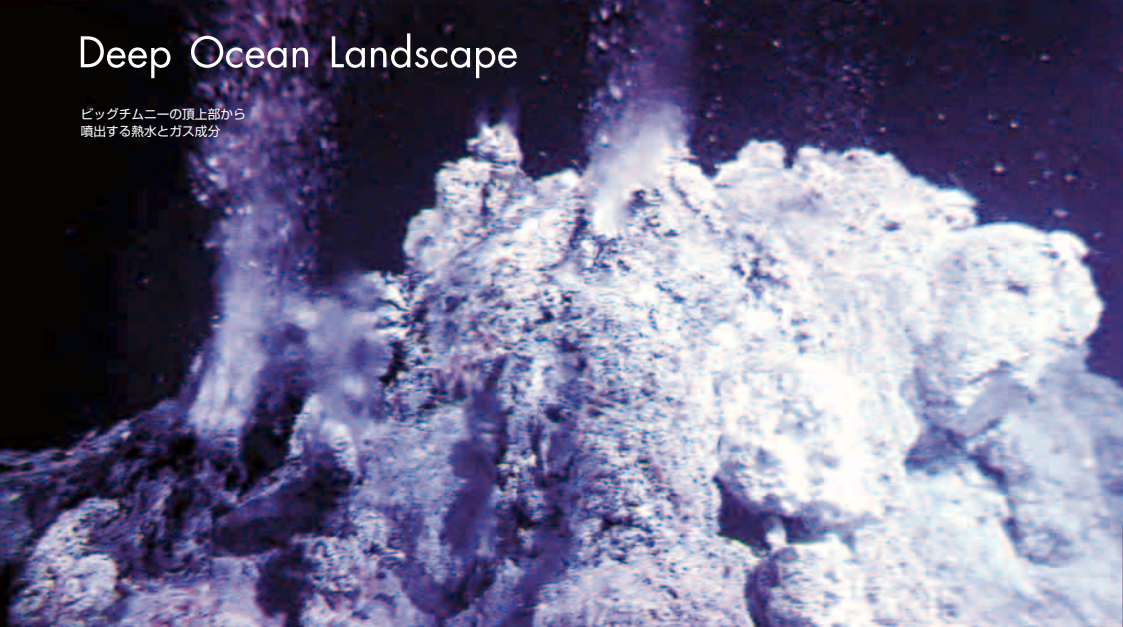
JAMSTEC Report BEAGLE 2003によって明らかにされた
海洋が吸収した人為起源CO₂量の変動

Aquarium Gallery アカガニの展示飼育に世界で初めて挑戦



Deep Ocean Landscape

ビッグチムニーの頂上部から
噴出する熱水とガス成分



深海に屹立するビッグチムニー 沖縄・鳩間海丘（水深約1,500m）

取材協力：
山本 啓之 グループリーダー
極限環境生物圏研究センター
海洋生態・環境研究プログラム
海洋生態変動研究グループ

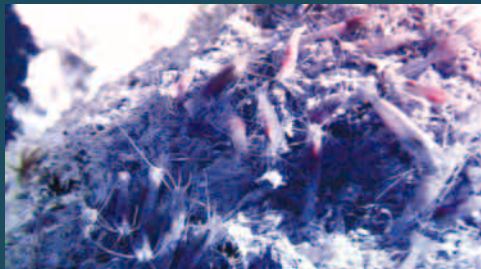


チムニーの壁面に群をなすゴエモンコシオリエビ

熱水噴出孔は、海底の岩の割れ目や断層からしみ込んだ海水が地下のマグマによって熱せられ、再び海中に噴出している場所だ。熱水には鉄などの重金属をはじめ様々な成分が溶け込んでいる。こうした成分によって、噴出孔の周囲には、チムニーと呼ばれる煙突状の構造物が形成される。日本周辺の海域で特に大きなチムニーとして知られるのが、沖縄・鳩間海丘のチムニーだ。西表島の北方約30kmに位置する鳩間海丘の頂上部には、周囲の三方を崖に囲まれたくぼ地（カルデラ）があり、そのなかに、高さ約20mの2本の巨大なチムニーがそそり立っている。チムニーを支える基部（マウンド）を含めたカルデラ底からの高さは40mにも及ぶ。そして、チムニーの周辺は、ゴエモンコシオリエビやシンカイヒバリガイ類など、化学合成系生物たちのオアシスになっている。



チムニーの周囲を取り巻くように集まるシンカイヒバリガイの仲間



オハラエビの仲間も数多く見られる



20mほど離れて並ぶ2本のチムニーのうちのひとつ。高さは約20m

BlueEarth

1-2月号/2006

CONTENTS

- 2 特集 もっと知りたい海洋・地球科学
海洋・地球科学への招待
海洋と地球の不思議を解き明かす7つの鍵
- 4 深海掘削が果たす地球科学への貢献
- 6 地球内部では何が起きているのか
- 8 深海に生きる甲殻類
- 10 水中音響システムはここまで進化した
- 12 世界各地の「異常気象」の原因を探る
- 14 雪氷がもたらす気候への影響
- 16 海洋・大気の知られざる現象に迫る
- 18 Key Person
東京大学海洋研究所 塚本 勝巳 教授
- 22 特別企画 連携大学院方式と科学技術の発展
連携大学院方式の進展が育む科学技術の新たな可能性
- 26 Aquarium Gallery
アカガニの展示飼育に世界で初めて挑戦
- 28 JAMSTEC Report
超高压高温発生技術によって
巨大ガス惑星深部の新鉱物を合成
- 31 JAMSTEC Report
BEAGLE 2003によって明らかにされた
海洋が吸収した人為起源CO₂量の変動
- 34 Marine Science Seminar
「地球温暖化とエコシステムの最前線」
～生態系と二酸化炭素の相互関係を解明する～
- 38 BE ROOM
横浜研究所・地球情報館で鉄腕アトム短編作品を上映
「科学技術への顕著な貢献」に選ばれたスマトラ島沖大地震直後の海底調査
BOOK
- 39 研究の現場から
『Blue Earth』定期購読のご案内
- 40 プレゼント／編集後記

賛助会会員名簿

表紙：深海調査研究船「かいりけい」から見た日の出
（表紙・裏表紙／写真提供：日本海洋事業株式会社 須佐美 智嗣）

海洋・地球科学への招待

海洋と地球の不思議を解き明かす 7つの鍵

地球環境問題が人類と地球の未来を揺るがす大きな課題としてクローズアップされている。この半世紀あまり、人類の活動は環境への配慮が十分でないまま、これまでにない規模で拡大を続けてきた。そして、21世紀を迎えたいま、私たちは、人類が暮らす地球について、より深く理解することが、どれほど重要であるかということを思い知らされている。

いまや人類の活動は宇宙空間にまで及んでいる。しかし、地球環境に大きな影響を与えている海洋、さらにはその下に広がる地球深部は、いまだに多くの謎に満ちたフロンティアだ。また、地球環境変動についても、明らかにされていないことが数多く残されている。海洋・地球科学技術は、こうした未知の世界に光を当て、人類と地球の未来を切り拓いていくための重要な役割を担っている。今回は、この海洋・地球科学が、どのように海と地球の謎に挑み、何を明らかにしてきたのかを、様々な研究分野の成果から紹介する。



深海掘削が果たす地球科学への貢献

新たな地球観の構築に重要な役割を担う深海掘削

科学目的の深海掘削は1960年代に始まり、今日まで約40年間という長期間に亘って、国際共同研究として継続されている。これまでに掘られた掘削孔は2,000本を超え、のべ数千名の地球科学者たちが深海掘削研究に参加してきた。そして、深海掘削は20世紀の地球科学の進展に多大な貢献を果たしてきた。ここでは、これまで行われてきた深海掘削研究のなかから、主な成果を紹介する。



取材協力：
伊藤 久男 室長
地球深部探査センター
科学計画室

深海掘削によって 海洋底拡大説を証明

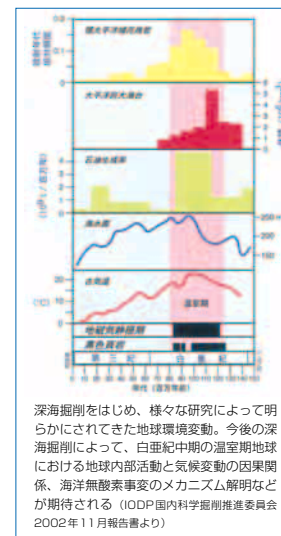
本格的に深海掘削が動き出したのは、1964年、米国で地球深部試料採取海洋研究所連合（JOIDES）が組織され、深海掘削計画（DSDP）に着手してからだった。それ以前にも、海底地殻を掘り抜いてマン

ットのみで、計画は頓挫している。DSDPは、1968年から掘削船「グローマーチャレンジャー」による深海掘削を開始した。この計画の大きな目的は、海洋底拡大説を証明することだった。そのころ、大西洋では様々な方法で海底の探査が進められていた。音響測深技術による海底地形の調査、地震波を用いた地質構造探査、さらには海上からの地

球磁場観測なども行われた。こうした探査から、海洋底は中央海嶺で誕生し、中軸部から両側に広がるように移動しているのではないかと海洋底拡大説が生まれた。そして、これを実証するには、海底堆積物の年代を測定して、中央海嶺から離れるにしたがって海底の年代が古くなること、海底の岩盤（海洋地殻）がマグマの固まった玄武岩でできていることを証明する必要がある。こうして、DSDPによる大西洋での深海掘削が実施された。「グローマーチャレンジャー」は、大西洋中央海嶺の両側で8カ所の掘削を行った。年代測定には、日本人研究者の齋藤常正氏（当時、米コロンビア大学ラモント研究所）も参加し、浮遊性有孔虫の微化石から海底直上の堆積物の年代を調べる研究が行われた。その結果、中央海嶺から遠ざかるにつれて海底の年代が古くなっていることが明らかとなり、海洋底拡大説は見事に実証された。さらに、大西洋の海底は年間に4cm程度の速度で両側に広がっていることも分かった。この成果は、これまでの深海掘削研究において非常に大きな成果であるだけでなく、20世紀の偉大な科学的発見のひとつとされている。

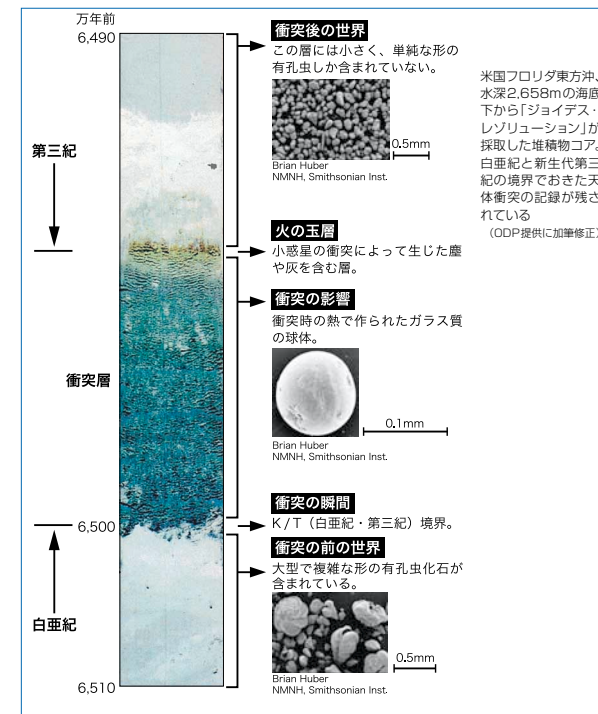
恐竜絶滅の原因となった 天体衝突の証拠をつかむ

DSDPを引き継いで、1975年からは国際共同研究として国際深海掘削計画（IODP）が始まり、日本も深海掘削に正



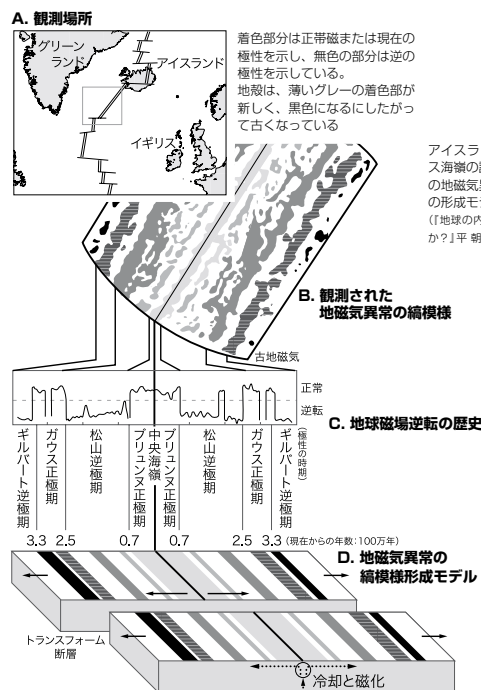
式に参加することとなった。さらに1985年からは国際深海掘削計画（ODP）となり、より大型の掘削船「ジョイデス・レゾリューション」が登場した。

IPOD、ODPにおいて大きく進展した分野のひとつとして、地球環境変動の研究があげられる。海底には陸上から運ばれた植物の花粉や鉱物粒子、火山灰、海面表層に生息するプランクトンの遺骸などが降り積もり、海底堆積物には、その時代の環境を物語る様々な情報が蓄積されている。こうした海底堆積物試料を掘削によって採取し、詳しく分析することから過去の地球の環境変動を理解しようとする研究が進められた。たとえば、有孔虫の炭酸カルシウムでできた殻に含まれる酸素の同位体比を連続的に測定し、有孔虫生息当時の海水の温度変化を調べる研究もそのひとつだ。こうした研究によって、これまで地球で何度も氷期・間氷期が繰り返されてきたことや、1億年前の地球が、今日よりずっと暖かった（温室期地球）ことなどが明らかになった。深海掘削による環境変動研究のなかで、特に大きな成果として知られるのが、白亜紀と新生代第三紀の境界でおきた地球への天体衝突の証拠を発見したことだ。



この時代に恐竜をはじめとする生物の大量絶滅がおきていたことは知られていたが、長い間、その原因は定かではなかった。しかし、天体衝突説を裏付ける確かな証拠が、1997年、北米東海岸沖で行われた深海掘削によって得られた。採取されたコア試料からは、衝突前の大型で多様な有孔虫の化石が含まれた層、天体衝突による熱で溶けた岩石が吹き飛び、空中で冷やされて球体になったガラス質の玉や衝突によって生じたチリや灰を含む層、衝突後の小さくて種類の限られた有孔虫の化石が含まれた層などが見つかり、6,500万年前、地球上で生物に壊滅的な影響を与えた大事件が、はっきりと記録されていた。

他にもメタンハイドレートの発見をはじめ、深海掘削の成果は数多くあるが、2003年にODPに替わって始動した統合国際深海掘削計画（IODP）において、さらに興味深い成果が期待される分野として、地下生物圏の探査が挙げられる。地下深部に微生物が存在する可能性があることは、地下水の採取や油田掘削などの報告によって以前から指摘されていた。しかし、注目されたのは1990年代に入ってからであり、これまで実施されてきた深海掘削によって、地殻内微生物の存在は、もはや間違いないものと考えられるようになった。熱水や地下水の活動が地下深部に達するなど、海底下の環境は想像以上に物質循環が活発であり、変動の大きな場所が存在する可能性が高い。こうした場所に未知の生態系があることは、十分に予測できる。地下生物圏の検証は、新たにスタートしたIODPの大きなテーマのひとつになるはずだ。そして、現在、試験運用が行われている地球深部探査船「ちきゅう」が、地下生物圏の解明はもちろん、21世紀の地球科学を開拓する新たな研究の進展に、大きく貢献してくれることは間違いない。



地球内部では何が起こっているのか 長い時間をかけた壮大な物質循環の謎に迫る

私たちはちょうど海洋プレートが陸地の下に沈み込む地震の頻発地帯に住んでいる。このプレートの運動が地球内部のマントル対流を引き起こしている。また海洋プレートが沈み込む一方で、地球深部から地表へ浮上する「ブルーム」があり、長い時間をかけてダイナミックな物質循環が行われていることが、これまでの研究からわかってきている。最近、その地球内部の物質循環が気候変動とも密接な関係のある可能性も浮上してきた。



取材協力：
異 好幸 プログラムディレクター
地球内部変動研究センター
地球内部物質循環研究プログラム

プレートの運動と海洋地殻の関係

地球を球形の卵にたとえ、地面や海底は卵の殻にあたる地殻と呼ばれる部分で、花崗岩や玄武岩などの比較的軽い岩石でできている。地殻には海洋地殻（主に玄武岩）と大陸地殻（主に花崗岩）があり、海洋地殻の厚さが平均6km、大陸地殻は30～50kmくらいの厚さである。卵の白身に当たるのがマントルで、カンラン岩と呼ばれる重い岩石だ。卵の黄身に当たるのが核で、この部分は鉄ニッケル合金である。さらにマントルは上部マントルと下部マントルに、核も外核（液体）と内核（固体）に分けることができる。

まず地殻から見ていこう。海底にはたくさんの火山を持つ巨大山脈がいくつもある。これら海底山脈（海嶺）の部分ではマグマが上昇して海洋地殻を作り、それが水平方向に広がって行く。地殻とそれに接する上部マントルの一部は固い岩石の状態（リソ

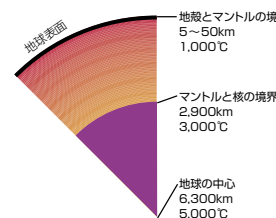
スフィア）であり、その下に流動するマントル（アセノスフィア）がある。リソスフィアは何枚かの巨大なプレート（板状の岩盤）に分かれている。つまりプレートは地殻と固体化したマントルという2種類の異なる岩石からできており、それがアセノスフィアの上に集まっているのである。地殻とマントルでは構成する岩石が異なるが、プレート下部とアセノスフィアは同じカンラン岩で、温度によって固体と流体に分かれているだけである。

海嶺でできたばかりのプレートは薄いのが、移動しながら冷えてだんだん分厚く重くなり、大陸地殻の下に沈み込む。この沈み込む力がプレートを動かし、また海嶺であらたな海洋地殻およびプレートが生まれる。このプレートの運動によって地質の現象や地球物理学的な現象を説明しようというのがプレートテクトニクスという考え方である。海洋地殻は海洋プレートの一部として沈み込むが、周囲のマントルとは組成が違う。沈み込むにつれ圧力が高まるため鉱物

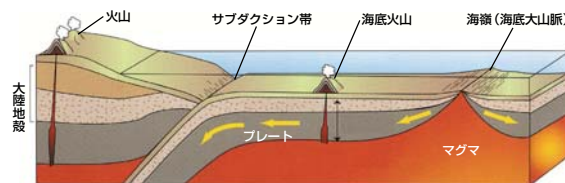
はより安定した分子間がより緊密な構造をとるようになる。それは海洋地殻とマントルの双方に起こるが、上部マントルの底、深さ650kmくらいまでは海洋地殻のほうが重い。深さ650～800kmあたりに、逆に周囲のマントルのほうが重くなる境界域がある。沈み込んできた海洋地殻に含まれる物質（地殻物質）はマントルを構成する物質と異なるため、その深さに滞留する。ある程度溜まって塊として成長すると、地殻物質の構造変化が進み、また周囲より重くなる。そして重くなった分がするすると下に漏れ出し、さらにマントル層の底まで落ちていく。

地殻物質のかわりに上昇するブルーム

地殻物質がマントル層の底まで落ちる分、質量を保存するために何かが上がっていかなければならない。それがマントルの上昇流「ブルーム」だ。沈み込む地殻物質とブルームが地球内部の循環・マントル対流を形作る。海嶺で海洋地殻を作っているマグマは、すぐ下の浅いところから上がってくるが、ブ

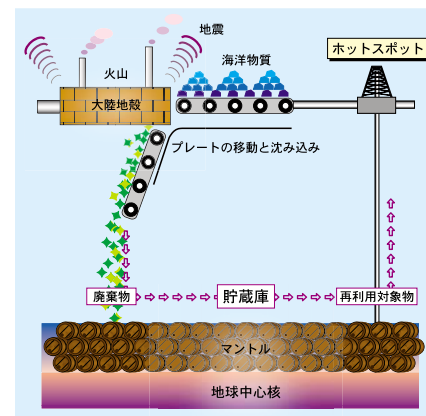


地球内部構造模式図
地球の半径はおよそ6,300kmであり、地殻はごく表面を覆っているに過ぎない。中心に向かうにつれ圧力と温度は上昇し、大まかにいって、地殻とマントルの境界が約1,000°C、マントルと核の境界は深さ約2,900kmで温度は約3,000°C、地球の中心部が5,000°Cくらいと推定される。



海嶺と沈み込み帯の模式図

テーブルクロスの方の端を固定し、もう一方を下に引っ張り続けると、やがて真ん中が裂ける。その裂けた部分が海嶺にあたり、裂け目が水平に広がると下からマグマが上昇して新しい海洋地殻とプレートを作ると考えるとわかりやすい。海嶺から横に広がったプレートは、海嶺から離れるにしたがって冷え、それに伴って、温度で支配されるプレートの厚さは増し、大陸地殻の下に沈み込んでいく。この部分をサブダクション帯（沈み込み帯）と呼ぶ。



地球表面から深部へ物質を運ぶベルトコンベア
サブダクション帯は巨大工場にたとえられる。海洋プレートやその上の堆積物（海洋物質）はプレートの移動によってサブダクション帯に運びこまれ、この「サブダクションファクトリー」でマグマや大陸地殻に加工される。加工されずに残った物質はマントルと核の境界部分に落ち込んで蓄えられ、やがてブルームとしてホットスポットとして再上昇すると考えられている。

は、高圧実験と構造解析で確認しているところだ。現在、物質は外核の中層まで確認できており、地球の中心まで迫る日も近い。核に含まれていると考えられる軽元素が特定できると、地球全体の物質循環が見えやすくなる。ただし高圧実験はあるひとつの手法からの証明でしかない。地球科学では地質学的データ、高圧実験、化学組成、すべてのデータで同時に説明できることが必要である。

もし核からブルームに炭素や水素が大量に供給されているなら、特に炭素は温室効果ガスとなるので、マントルの循環だけではなく地球全体の温暖化にも影響している可能性がある。1億年前の地球は「温室期地球」と呼ばれ、当時の地球の気温は現在より20度以上高かった。この時期は沈み込み帯のマグマ活動（下降流）もブルーム（上昇流）も盛んで、地球の磁場も南に固定されて反転せず、核も現在の状態とは違っていたと考えられる。過去のデータを見ると1～1.5億年周期でこのようなことが繰り返されている。地球は大気から核までがひとつのシステムとして、非常に長いスパンではあるがダイナミックかつ自律的に動いていると考えられるのだ。その全容の解明は、まだこれからである。

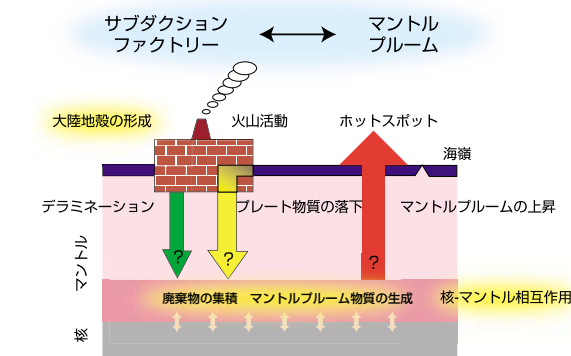
ブルームはより深いところから生じ、海嶺のマグマとは別のものである。
マントル最深部から上昇するからには、ブルームは周囲の物質より軽いはずである。なぜ軽くなるのかについてはまだよくわかっていないが、ひとつの仮説として、核からメタンや水素など軽い物質が付け加わって軽くなるのではないかとという考え方がある。
核は鉄ニッケル合金だ。しかし、現在地球の重力から推定されている核の密度は、純粋な鉄とニッケルだけからなる密度より低い。つまりもっとも軽い元素が入っているはずである。炭素は鉄と相性がよく、また実験の結果から、核のような高圧環境では核の内部に水素や酸素も入り込むことがわかっている。内核は固体なので、炭素、水素、酸素などの軽元素は液体である外核に集まる。やがて過飽和となって核からマントルのほうへ移動し、それがマントルを軽くしてブルームが生まれるのではないかと考えられるのだ。

うことがわかる。温度も絶対値はわからないが、平均的な場所比べて高いか低いかの判断は可能だ。また太陽系の組成と原始地球の組成は同じと考えられるので、小惑星帯から来た隕石（コンドライト質の隕石）と地球の組成はだいたい同じと推定できる。隕石は砕けた惑星の核の部分と考えられるし、隕石にはマントルに相当する部分もある。そのような情報を組み合わせていくと、地球の内部がどのような物質かという化学組成が推定できるのだ。

地震波を使った調査から想像される密度や組成を持った物質が本当にあるのかどう

地球内部の探査方法と検証

ところで、地球の地中深くがどのような物質でできていて、どのくらいの温度かということはどうやって調べるのだろうか。人間の体をCTスキャンで調べるのと同じように、地震波を使って内部の状態を調べることができる。地震波の伝わり方から、その部分の物質の密度や固体か液体かとい



サブダクションファクトリーとマントルブルーム

サブダクションファクトリーからはプレート物質（その一部としての地殻物質）が落下し、その反作用としてマントルブルームの上昇を招く。ただし、それにはブルームが周囲より軽い必要があるので、核から何らかの軽い物質が付け加わっているのではないかと仮定される。しかし、この部分についてはまだわかっていないことが多く、これから検証していく必要がある。

深海に生きる甲殻類

水深1万mにも、熱水噴出孔にもいるエビ・カニの仲間

海洋生物のなかでも一般によく知られるエビやカニは甲殻類に分類される。同じ節足動物の仲間である昆虫類が、陸上の幅広い環境で見つかるのと同様に、甲殻類は、淡水から、世界で最も深い水深1万mを超える海底まで、様々な環境に分布しており、その生態や形態も非常に多様化している。深海に棲む甲殻類の不思議に満ちた生き方を紹介する。



取材協力：
土田 真二 研究員
極限環境生物圏研究センター
海洋生態・環境研究プログラム
海洋生態変動研究グループ

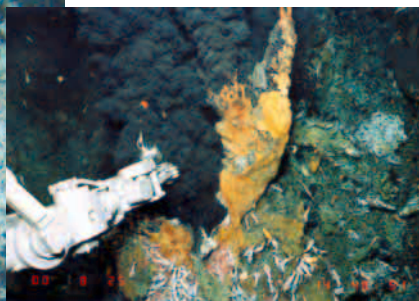
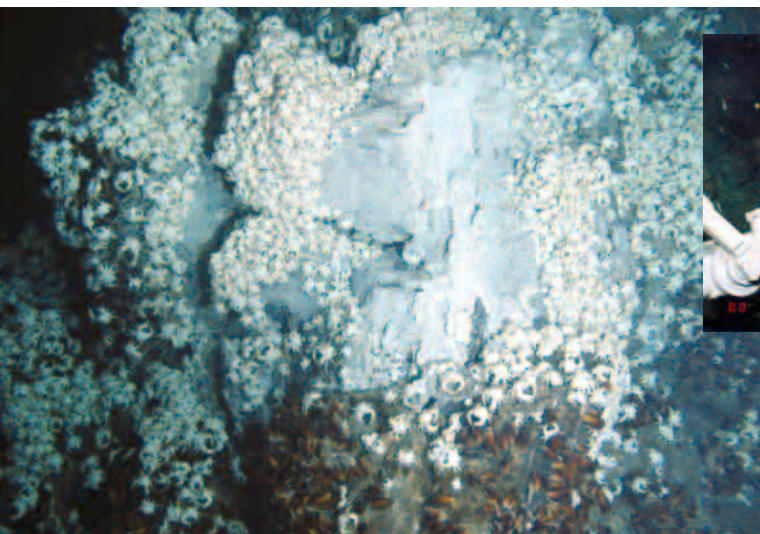
熱水噴出孔の甲殻類

甲殻類は、その種数が5万種とも6万種ともいわれ、非常に種類が多い。大部分が海に棲息するが、河川などの淡水や陸域にも見られるなど、実に幅広い環境に分布している。同じ海でも、表層を漂うものもいれば、マリアナ海溝で見つかったカイコウオオソコエビのように、水深1万mの環境に適応しているものもある。また、タカアシガニのように、脚を広げると3~4mという大型のものもいれば、1ミリに満たない小さなものもあるなど、生態も形態も実に様々だ。

そんな多様な甲殻類のなかでも、かな

り変わった生態を持つものを熱水噴出孔の周囲で見出すことができる。熱水噴出孔は、海水が地下のマグマによって熱せられて海中に噴出している場所だ。噴出する熱水にはメタン、硫化水素、他の重金属などが含まれ、水温は高水圧のために400℃以上になることもある。通常の海のなかの環境と比べれば、生物の生態には過酷と思われるが、熱水噴出孔周辺には、こうした環境に適応した様々な生物が集まり、独自の生態系をつくり出している。その生物量は、通常の深海底の数万倍にも及ぶ。噴出孔の周囲には、熱水に含まれるメタンやイオウから有機

物をつくるバクテリアが大量に存在している。これらのバクテリアが一次生産者となって、豊かな生物群集を支えているのだ。化学合成生態系と呼ばれるこうした環境にいる生物として、体内に化学合成バクテリアを共生させて有機物を得るハオリムシ、シロウリガイ、シンカイヒバリガイなどがよく知られる。そして、こうした生物とともに熱水噴出孔生物群集を構成しているのが、熱水性甲殻類のオハラエビ類、コシオリエビ類、ユノハナガニ類、さらにはフジツボの仲間やヨコエビ類やカイアシ類などの小型甲殻類たちだ。



熱水に飛び込むほどに近づくカイレイツノオハラエビ

熱水噴出孔の近くに密集して群をなすゴエモンコシオリエビ



オハラエビの仲間



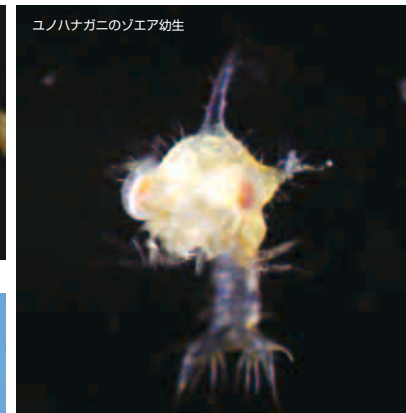
ゴエモンコシオリエビ



マリアナ海溝で採集されたカイコウオオソコエビ



インド洋中央海嶺で採集されたロドリグスユノハナガニ



ユノハナガニのゾエア幼生

生活史を理解することが必要だ。残念ながら、深海に棲む熱水性甲殻類の生活史については、ほとんど知られていない。しかし、ユノ

バクテリアを体に共生させる甲殻類も

これら化学合成生態系の甲殻類のなかには、ユノハナガニのように熱水噴出孔に集まるエビや貝などの生物を捕食するものもある。また、直接化学合成バクテリアを捕食するものや、自らの体の一部（体表の剛毛など）をバクテリアが生きる場として提供するものもある。つまり、人間が穀物や野菜を栽培するように、バクテリアを栽培しているのだ。ツノナシオハラエビやゴエモンコシオリエビなどが、こうした栽培（外部共生）を行っている。このように、甲殻類のなかには、同じ熱水噴出孔周辺にいても、その生き方は大きく異なっている。

ユノハナガニと同じように捕食性の強いイバラガニの仲間などは、通常の海底でも見られるが、熱水噴出孔や冷水湧出帯の周辺でよく見かける。イバラガニの仲間は熱水や冷水に完全には依存していないが、ユノハナガニなどは熱水噴出孔にしか見られないため、完全に熱水に

依存していると言える。通常の生物にとって、熱水噴出孔の熱水中に含まれる重金属や硫化水素は猛毒だ。こうした環境下で、オハラエビやユノハナガニなど熱水性甲殻類が、なぜ生きていくことができるのか、その理由や生理的な機能については、まだよく分かっていない。

生活史から見えてくる生き延びるための戦略

熱水域は連続して存在しているわけではなく、しばしば隣の熱水域まで数十〜数百kmも離れている。不思議なのは、熱水噴出孔とともに生きる生物たちが、どうやって分布を広げているのかということだ。また、熱水噴出孔の活動は、同じ場所ですっと続くとは限らない。活動が停止することもあれば、別の場所で新たに活動が始まることもある。熱水とともに生きる生物たちは、別の場所に子孫を残していくために、どのような戦略を持っているのだろうか。

その戦略を理解するためには、彼らの

生活史を理解することが必要だ。残念ながら、深海に棲む熱水性甲殻類の生活史については、ほとんど知られていない。しかし、ユノハナガニについては、つい最近、抱卵メスを採集し、飼育下で卵を孵化させることに成功した。これまでまったく不明であったゾエア幼生の飼育研究も進められようとしている。その幼生の姿は、およそカニとは思えない変わった形をしている。特徴的なのは、体に多数の複雑な突起が見られることだ。これは、より大きな浮力を得るためのものと考えられる。これによってユノハナガニの幼生は、かなり表層近くまで浮遊し、海流によって遠くまで移動することができるのではないかと予想される。一方、ゴエモンコシオリエビも同様に抱卵雌を採集し、飼育下で卵の孵化に成功した。このゾエア幼生は、こうした突起がほとんどなく、親のいる場所から長距離の移動をせず、あまり分散しないことが予想される。同じ熱水噴出孔周辺に生きる甲殻類でも、種によって生き延びるための戦略はまったく違っている。このように変化に富んだ生き方こそが、甲殻類が海で大繁栄できた所以であると言えるだろう。

水中音響システムはここまで進化した

電波の届かない海中での探査や通信の仕組み

水中で初めて音波が使われたのは19世紀、スイスのジェノバ湖で初の音速の計測が行われたときだ。その後、水中音響技術は潜水艦の登場により急速に進歩し、海中や海底の調査に欠かせないものとなった。現在、音波ならではの壁に挑みながら、海洋調査をさらに円滑に行えるよう海水中での音響通信技術開発も進められている。



取材協力：
月岡 哲 サブリーダー
海洋工学センター
海洋技術研究開発プログラム
自律型無人探査機技術研究グループ



取材協力：
越智 寛 サブリーダー
海洋工学センター
海洋技術研究開発プログラム
海洋観測技術研究グループ

ソーナーや音響通信の基本的な仕組み

海洋調査に用いられるソーナーと音響通信には、それぞれ海中での音の散乱（反射）と伝搬が利用されている。海水を音が伝搬していく過程を通信に使ったり、散乱（反射）を用いて海底面の形状を見たりする。ソーナーは受信した音から、目標物までの距離と大きさなどの情報をできる限り引き出し、調査対象の様子を知るのが目的である。一方、通信は海水中で音波が受ける影響や海底や海面で反射してきた音などの余分なもの（外乱）を極力取り除き、元のデータを再現することが目的となる。

音響が使われるのは海水中では電波が使えないからである。海中で情報を持った信号を伝える手段は今のところ音波しかない。ただし音波は水中でも約1.5km/秒と、電波の30万km/秒に比べて格段に通信

に時間がかかり、音響で海底を探索する場合も分解能（細かい部分まで見る能力）が劣るといった弱点がある。さらに音波が水中を伝わる場合、減衰（吸収損失）が起こる。その度合いはほぼ周波数の2乗に比例し、高周波音、つまり音が高くなるほど到達距離が短くなる。海底探査では音波を発し反射して戻ってくる時間から深さを測定する。この場合、音波のパルス幅が短いほど解像度が高くなり、通信でもたくさんのデータを載せられるので周波数は高いほうがよい。ところが周波数を上げると減衰率も上がってしまうという問題がある。また音波の伝搬は海水中の温度、圧力、塩分濃度に影響される。高い精度のデータを得るためにはその影響の程度をあらかじめ正確に知っておく必要がある。

水中音響技術の現状と課題

海中での音響技術はまず深さを測ること（測深）から始まり、潜水艦の出現によって技術が飛躍的に向上した。現在測深に使われているのは「マルチナロービーム音響測深機」だ。船の進行方向に対して横方向に出す扇型のビーム（ファンビーム）と船の縦方向に構成する多数のファンビームを合成して多数のペンシルビーム（細いビーム）を作り出す。多いものでは一回の計測で250ポイントのデータを取り、それをつなげてコンターマップ（等深図）を作成する。

しかしこれだけでは、海底がどのような物質でできているかはわからない。それを調べるのが「サイドスキャン・ソーナー」である。泥などやわらかいものでは反射が弱く、硬い岩では強い反射になることを利用している。この二つの観測

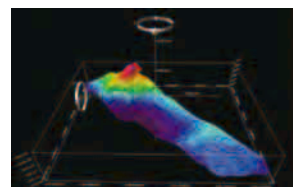


図1 「うらしま」によるAUV計測例
400kHzの周波数を使用して、海底から50mの高さで計測した例

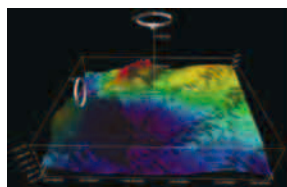


図2 「なつしま」による船舶計測例
50kHzの周波数を使用して、海底から800mの高さでの（水面からの）計測例。一般に解像度は距離の2乗に反比例するため、距離だけと比較すると、図1のほうが図2より1/16倍だけ接近しているため、250倍高い解像度で探査できることになる

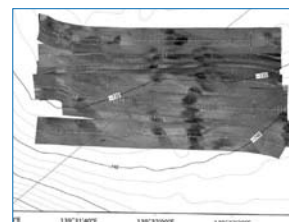
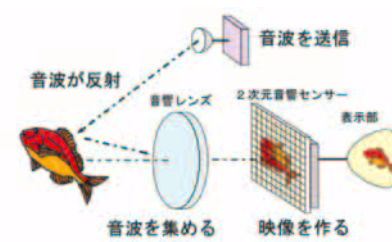


図3 AUVが図2と同時に記録したサイドスキャンイメージ画像（音響イメージ Acoustic image）



図4 「うらしま」に搭載されている音響レンズ（矢印）による音響TVカメラの仕組み



を併せて海底の状態がどのようなものかを判断していく。

海底や海中での映像を捉える音響TVカメラは、2次元の音響アレイ（素子の集合体）に特定の方向からの音が入ってくると映像化できる仕組みだ。たくさんの素子から電子的に合成するとシステムが大きくなり費用もかかるため、深海巡航探査機「うらしま」では音響レンズが用いられている。音にも光と同じく透過と屈折が起こるので、虫眼鏡が像を結ぶのと同じようにレンズを通して反対側に鏡像が結ばれる。

現在、海洋調査船「かいかい」などは1万m級の測深を行うため周波数の低い10kHz帯の測深器を積んでいるが、海底面に照射する音波ビーム範囲が広がってしまう。そこで「うらしま」などのAUV（無人探査機）で海底面に近づき、近距離から400kHz音波で詳細な海底

の地形図を得て合成する手法が取られている。船からの測深では海面の高さが変わるがAUVは高さを一定にして計測でき、さらに近距離から解像度の高いデータが取れるという利点がある。今後、ソーナーの技術開発は人工衛星で用いられているような方向性が考えられる。人工衛星は地上の情報を細かく捉えることができるが、それは一点からの信号を移動しながら何回も取って重ね合わせ、その中に埋もれたデータを取り出す「合成開口」の手法をとっているからである。ソーナーでも合成開口ができれば、低い周波数で見たデータを合成し、あたかも高い周波数で見たかのような分解能を得ることができる。

ただし合成開口を行うには、AUVの動揺を減らし位置だけでなく姿勢を正確に計測する必要がある。海中ではGPSによる位置計測ができないので、時々刻々機体の姿勢変化を計測して移動量を積算する慣性航法が用いられている。AUVは速度が遅いため正確な計測が難しかったが、近年の電子技術の発達により実用化が可能になった。

一方、水中音響通信の目指しているのは、音波にたくさんのデータを載せてできるだけ高速で送ること、雑音や残響などの外乱を排除して正確な情報を送るという2つである。

音波に載せられる情報量は、周波数を上げることで向上し「しんかい6500」（4-QPSK）時代の2ビットを1とすると、「うらしま」（16-QAM）が2倍（4ビット）、現在取り組んでいる32-QAMでは2.5倍（5ビット）となった。今後はさらに情報量を上げ、画像圧縮の技術を援用して、テレビ電話レベルの準動画に持っていくのが目標だ。正確な情報を送ることに関しては、符号化によってより正確に情報を送るスペクトラム拡散という方法を用いている。ただしこの方法では確実に情報を再現するために余分な情報を載せているため、速度は15分の1になる。正確さの追求と速度のバランスが課題である。

いままでは送波器（トランスデューサー）の性能を上げるなどして、できるだけ長距離の通信を行い、そこで大量のデータを送り通信速度を上げようという長距離・高速の技術開発を行ってきたが、この方向には限界が見え始めた。そこで無人探査機のランチャーとビークルの間での通信など、中継点を置くことで物理的な距離を近づけ近距離・高速通信を実現しようという方向に転換し、実用化に向けて研究が続けられている。



図5 32-QAMを用いた実海域音響通信実験の結果
送信した画像がエラーなく再現されている

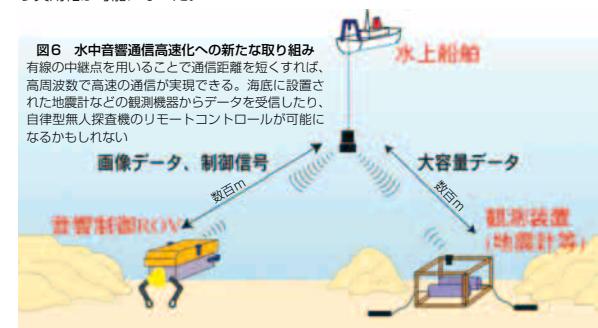


図6 水中音響通信高速化への新たな取り組み
有線の中継点を用いることで通信距離を短くすれば、高周波数で高速の通信が実現できる。海底に設置された地震計などの観測機器からデータを受信したり、自律型無人探査機のリモートコントロールが可能になるかもしれない

世界各地の「異常気象」の原因を探る

短期気候変動の予測技術向上に向け研究が進行中

同じ地域がある年は暖冬、ある年は猛烈な寒波に襲われる。冷夏の年も猛暑の年もある。ある地域では大雨による被害が生じているのに、同じ時期早魃に苦しむ地域がある。このような違いはなぜ生じるのか、そのメカニズムについてはかなり詳しく解明されてきた。またその成果をもとに世界各地の異常気象を早期に予測し、災害や飢餓の防止に役立つ情報を提供する取り組みが続けられている。



取材協力（写真左より）：
ベヘラ スワディビン サブリーダー
アングリ スルヤチャンドラ ラオ 研究員
羅 京佳 研究員
本田 明治 研究員
地球環境フロンティア研究センター
気候変動予測研究プログラム

熱帯域に起因する2つの現象が世界の気候を左右する

地球規模に気候への影響を与える大気海洋相互作用は、太平洋におけるエルニーニョと南方振動(ENSO)が広く知られている。通常、太平洋熱帯域では風は東から西に吹き、西太平洋の表層に暖かい海水が溜まるが、エルニーニョが発生しているときはその暖かい海水が東太平洋に移動する。すると大気の流れにずれが生じ、そのずれが伝わることでこの海域から遠く離れた地域も影響を受け、いつもと違った気候になる(図1)。かつて地球規模の異常気象は、このENSOの影響が主であると考えられていた。

1994年夏、日本を含む東アジア域は例年になく猛暑と乾燥に見舞われたが、東太平洋の海水温は通常通りで、エルニーニョは発生していなかった。それでは、この気候変動の原因はどこにあるのだろうか。観測データを調べていくと、インド洋東部で通常より雨が少ない一方、西部で雨が多く、東西に並んだ降水量のダイポール構造(二極構造)が見つかった。さらにこの降水量のダイポール構造は、インド洋の西部で海水温度が高く、東部で低いという海水温度差の

ダイポール構造に起因していることが分かった。これをインド洋ダイポール(IOD)現象と呼ぶ。通常、インド洋の熱帯域では西から東に風が吹いて、東側のインドネシア周辺に暖かい海水が溜まっている。ところがIOD現象が起こっているときには、赤道上で東から西に風が吹き、この暖かい海水の塊が西に移動してしまう。その分、インド洋南東部では深層から冷たい海水が上がってくるため、海水温が低くなる。この2つの海域の温度差が大きいくほど、強いIOD現象が発生している。

IOD現象が発生するとそこを起点に、地理的に離れた東アジアの気候にも大きな影響を及ぼす。これにはヨーロッパを経由するルートと、中国南部から東アジアへとより直接に影響が波及するルートがある。同様にIOD現象の遠隔地への伝播は、アフリカ、オーストラリア、南アメリカにも影響を与えていることが、「地球シミュレータ」による

モデル計算から分かっている(図2)。

IOD現象は4月過ぎに始まり、大気と海洋の相互作用で発達して10月

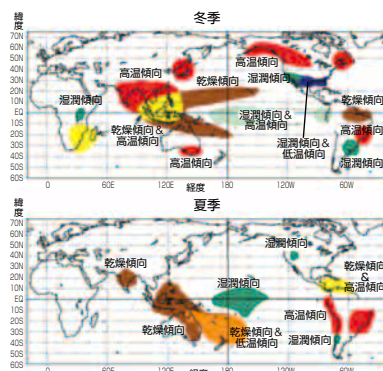


図1 太平洋熱帯域で起こるエルニーニョは、遠く離れた地域にも影響を与える (NOAA)

にピークを迎え、12月頃から急激に衰える。IOD現象の終息には「マディンジュリアン振動」と呼ばれる季節内振動に伴う強い西風「西風のバースト(突風)」が関連していることがわかった。強い西風は赤道付近で、

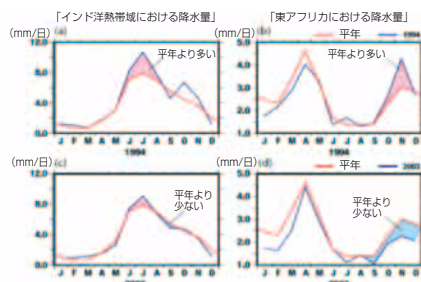


図3 IODが発生した1994年と早期に終息した2003年の降水量の季節変化を年値と比較すると、(c)、(d)ともに特に夏以降、降水量が減少していることがわかる

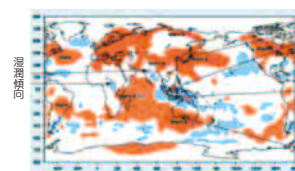


図2 インド洋熱帯域で起こるIODも、エルニーニョ・南方振動と同じく、その発生から終息までの間、世界中の気候に影響を与える

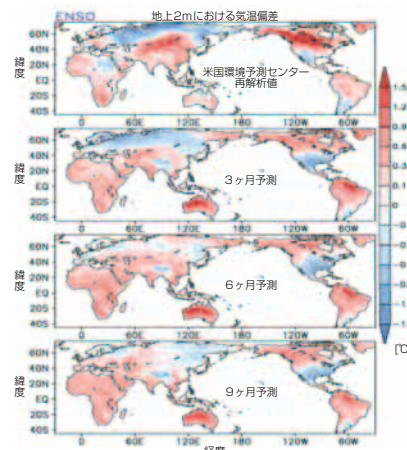


図4 モデル計算による予測によって、ENSOの影響による世界各地の気候の大きな傾向を予測することができる

早い時期から各地の気候を予測するという取り組みを行っている。ENSOによって海面の温度偏差や、人類が大きな影響を受ける陸地の気温がどのように変化するのが、多くの初期値を用いるアンサンブル予測で世界各地の気候予測実験を行った結果、3ヶ月前の予測はかなりの精度で観測値を再現でき、6ヶ月、9ヶ月前の予測でも、大まかな気温の偏りを予測することができた(図4)。今後はさらに予測精度を上げていく予定である。

北半球中高緯度の気候循環が日本に及ぼす影響

このように、熱帯域での現象は地球全体に大きな影響を及ぼしているが、日本周辺の気候には、熱帯域だけでなく北半球中高緯度の気候循環変動も大きな影響力を持っている。2005~2006年にかけての冬、日本列島は記録的な寒波に襲われた。寒さをもたらした原因の一つが、北極振動とは極域と中緯度域の気圧がシーズンのように振動するものである(図5)。北極振動の指数がマイナスになると中緯度域には極域からの寒気が流れ込み、日本のみでなく北米やヨーロッパの気温も下がると考え

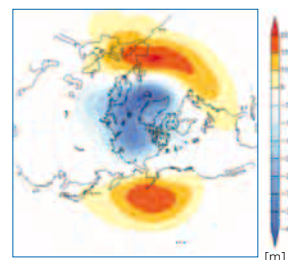


図5 北極振動とは極域と中緯度域の気圧がシーズンのように振動するものである。北極振動の指数がマイナスになると、日本を含む中緯度域には極域に溜まっていた寒気が流れ込む (NOAA気候予測センターHPより)

られる。しかし、日本の気候と北極振動の指数は完全に一致するわけではない。その他に北太平洋北米パターン(PNA)と呼ばれる北太平洋に大きな振幅を持つ波列が伝わる現象も影響していると考えられる。

さらに、北太平洋のアリューシャン低気圧と、北大西洋のアイスランド低気圧がシーズン状態で強くなったり弱くなったりする、アリューシャン・アイスランド低気圧シーソー(AIS)と呼ばれる現象がある(図6)。アイスランド低気圧が強いときには日本への寒気が弱く、ヨーロッパへの暖気が強くなり両方が暖かくなるが、アリューシャン低気圧が強まると、逆に日本への寒気が強く、ヨーロッパへの暖気は弱まる。AOとAISの影響は一見似ているが、特に日本周辺への影響はAISの影響がAOを上回っていると考えられる。

アリューシャン低気圧が弱まる(強まる)と約1ヶ月後にアイスランド低気圧が強まる(弱まる)ため、AISも季節予測に役立てることができる。ただ、アリューシャン低気圧とアイスランド低気圧の関連がはっきり出る時期と出ない時期があり、その違いがなぜ起こるかが現在研究が進められているところである。

このように熱帯域から極域までを視野に入れた複眼的な研究によって、気候変動のメカニズムの解明と、日本にとどまらず世界各地の短期気候予測への取り組みが進められている。

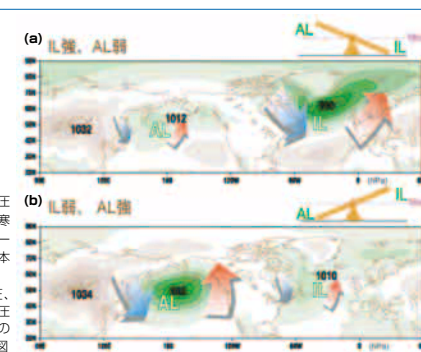


図6 アイスランド低気圧が強いと日本に流れ込む寒気は弱まり、逆にアリューシャン低気圧が強いと日本に流れ込む寒気が強まる (a)アイスランド低気圧、(b)アリューシャン低気圧の勢力がそれぞれ強い年の典型的な海面気圧の分布図

雪氷がもたらす気候への影響

気候変動の理解には雪氷を含む水の挙動が重要

地球には大量の水が存在し、水が大気・海洋・陸域を循環することで、地球の豊かな環境が保たれ、気候の多様性と安定性をもたしている。こうした水の循環で、忘れてはいけないのが雪氷の存在だ。地球上に存在する水のほとんどは海水で、淡水の割合は3%弱に過ぎないが、その淡水で最も多いのは雪氷なのだ。雪氷は、地球の環境にどのような影響を与えているのだろうか。



取材協力：
大畑 哲夫 プログラムディレクター
地球環境観測研究センター
水循環観測研究プログラム

温暖化で注目される 雪氷の挙動

世界気候研究計画（WCRP）は、国連機関の世界気象機関（WMO）などが推進する研究プログラムであり、世界海洋循環実験（WOCE）など、地球の気候システムを理解し、気候変動予測の精度を高めるための様々な国際的な副プログラムが実施されている。その副プログラムのひとつとして、2000年から、気候と寒冷（雪氷）圏（Clic）計画の活動が開始された。Clic計画は、気候システムの重要な要素である雪氷圏と気候変動との関係を明らかにしながら気候システム研究を進めていくことを目的とし、観測やモデル研究等によって、氷床・氷河と海面水位の相互作用や、雪氷圏と大気・海洋との全球規模の相互作用などの理解促進をめざしている。

雪氷圏については、これまでも研究

が行われてきたが、どちらかといえば地域性が強く、研究地域に偏りが見られ、研究者の連携や網羅的な観測ネットワーク構築などもあまり進められていなかった。しかし、地球温暖化などにより全球的な気候システムの理解が求められるなか、雪氷の挙動が非常に重要であることがあらためて認識され、世界的に雪氷圏への関心が高まりつつある。

地球の水循環と雪氷

地球上に存在する水の分布を見ると、97%以上（体積）と海洋が圧倒的な割合を占めている。大気中の雲や水蒸気

は僅か0.001%であり、河川や湖沼、地下水、雪氷など、陸域にある淡水は全体の3%弱だ。そして、その淡水の70%以上を、雪氷が占めている。雪氷とは、自然界に存在する水の固相、つまり雪と氷のことで、具体的には、南極とグリーンランドに存在する氷床、極地や高山地域に見られる氷河、南極や北極海域で海水が凍った海水、1年中凍結状態が続く凍った地面である凍土、そして季節積雪などをさす。低温とこれらの雪氷の存在で特徴づけられる地域（海洋を含む）は寒冷圏（雪氷圏）と呼ばれる。地球上に存在する雪氷の質量は、およそ 2.4×10^{18} kgで、そ



JAMSTECが行った北極海での海水の調査



東シベリアの凍土とその上に育つ森林。地中に氷塊が見えるが、融解が進んでいる
(撮影/矢吹裕伯)



モンゴル・アルタイの氷河。これはモンゴル最大の氷河で全長は約11km
(撮影/門田 勲)

の大部分は氷床によって占められている。もし地球上の雪氷がすべて溶けたとしたり、海面水位は100m近く上昇するといわれる。

地球上の水は、蒸発・降水によって地球上の海洋・大気・陸域を広く循環している。そして、その過程でエネルギー循環に大きく関わっている。雪氷もそうした水循環の一部であり、地球の気候システムに大きな影響を与えている。たとえば、雪氷の日射反射率は約80%と非常に大きく、エネルギー放出に貢献し、地球の冷熱源として重要な役割を果たしている。雪氷は、極域を中心に陸域・海域の広い面積を覆い、地球は高緯度域で冷却されるが、低緯度域では太陽からの熱エネルギーを吸収して加熱される。そして、大気（水蒸気）と海洋の循環によって、低緯度域から高緯度域へ熱輸送が行われ、熱収支のバランスがとられている。だが、もし何らかの理由で極域の雪氷面積が減少し、海面や大地が変わると、高緯度域での太陽エネルギーの吸収量は増大し、バランスが崩れて温暖化が進行するなど、気候システムに影響が出ることが考えられる。

雪氷が気候に与える 影響は様々

ひとくちに寒冷圏といっても、陸面を覆う氷床、海水が凍る海水など、雪氷は様々な形で存在し、その気候システムに与える影響も異なる。雪氷のなかで最も総量が多い（質量で約99%を占める）氷床は、現在、南極とグリーンランドに存在している。氷床は近年の温暖化によって溶け出し、一方で降雪量が増え、量的にはそれほど変化はないといわれている。短期的にはあまり気候に大きな影響を与えず、氷期サイクルで変動するとされる。

逆に、気候に左右されやすく、温暖化の影響を受けて大きく減少しつつあるのが、氷のダムといわれる氷河だ。アラスカ、北欧、アルプス、中央アジア、南米パタゴニアなど各地の氷河は、どんどん小さく薄くなっていると報告されている。

同様に減少が続いているといわれるのが、北極海や北極周辺の海水だ。海水は季節変化が大きく、成長すると海洋と大気との熱交換を制御する働きを持つ。また、海水は日射反射率を左右し、気候の変動を加速させる働きが

ある。

季節積雪も季節変化が大きい。最大で氷床を除いた全陸地の約34%を覆う。春になり、気温が暖かくなるとともにゆっくり溶けて河川に流れ込むため、水循環の強さやタイミングを変化させる効果を持つ。凍土も同様の効果を持つが、溶けるのは表層の活動層だけで、その下は凍結したまま再び冬を迎える。シベリア、アラスカ、カナダなどの広大な面積を占め、氷床を除いた全陸地の約19%に及ぶ。凍土の存在がシベリアの大森林帯を形成し、地中の水の流れを制御するが、未知の点が多い。

寒冷圏は、その多くが人々の生活地域から離れた場所であるため、これまで詳しい調査や研究があまり行われておらず、グローバルな視点からのデータも十分ではなかった。しかし、雪氷は存在自体が気温に規定され、それが水になることで別の性質を持つため、気候や環境への変化の影響が非常に大きい。今後は、気候システムの重要な構成因子として、大気や海洋など他分野との協力のもとで詳細な観測・モデル研究を進めていく必要がある。

海洋・大気の知られざる現象に迫る 超高解像度シミュレーションで何が見えるか

膨大な量の計算を高速で行えるスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」の登場で、気候や海洋循環の研究は新しい段階に入った。地球表面を格子(メッシュ)に区切って行うシミュレーションの解像度が飛躍的に向上し、これまで捉えることができなかった細部の変動までを再現することができるようになったからである。この高解像度シミュレーションを用いて分かってきたことは何か、また今後どのような研究が進められようとしているのだろうか。



取材協力:
大淵 清 グループリーダー
地球シミュレータセンター
計算地球科学研究所研究開発プログラム
大気・海洋シミュレーション研究グループ

「地球シミュレータ」の登場がもたらした進化

「地球シミュレータ」は世界最大規模のスーパーコンピュータで、計算性能もデータ容量も以前と比べて桁違いに大きい。そのため、膨大な量の計算およびデータ処理が不可欠な気候シミュレーション研究はまったく新しい段階に入った。地球温暖化の予測を含む、数年から数千年まで様々な時間スケールの気候変動予測や、大気や海洋で起こっている様々な現象を解明するために「地球シミュレータ」が活用されている。

このような大規模シミュレーションには、それに対応したモデルが必要である。モデルとは、例えば大気は微視(ミクロ)的には窒素などの分子、つまり「粒子」で構成されているが、それを巨視(マクロ)的に流体という「連続体」として置き換えるなど多岐に渡っているが、無限に複雑とも言える自然界を科学者が分かるものに近似したものである。それをもとにコンピュータで計算するプログラム(コード)が作られる。

地球シミュレータセンターの大気・海洋シミュレーション研究グループでは、「地球シミュレータ」用に開発された大気大循環モデル(AFES)を用いて大気大循環変動のメカニズム等についてのシミュレーション研究を、同じく海洋大循環モデル(OFES)を用いて海洋大循環やそれ

と海氷モデルなどを加えた大気海洋結合モデル(CFES)で大気と海洋の相互作用や気候変動研究を主に地球環境フロンティア研究センターと協力しながら行っている。

現在、大気循環では全球(地球全体)を10km格子(メッシュ)で区切ったシミュレーションを実現し、海洋循環では0.1度(赤道付近で約10km)メッシュで全球規模100年間のシミュレーションという、超高解像度、また長期間の計算のシミュレーションが可能になっている。そのため、解像度の粗い段階では見えなかった大気循環や海洋循環の詳しい構造がシミュレーションによって「見える」ようになってきた。

海と大気はどちらも流体であり、流れの特徴的な空間スケールは流れや波の速さに応じて大きくなるという性質がある。大気は海と比べると流れが速いため、偏西風の幅が数千km規模なのに対し海洋ジェットは数百km規模。大気の高気圧・低気圧は数千km規模の大きさだが、それと同様の傾圧不安定構造として海洋に生じる渦は数百km規模だ。海洋の流れや渦のスケールは大気の10分の1程度と考えてよい。そのため、解像度が高くなるほど、スケールの大きな大気循環よりも海洋循環で、今まで見えなかった細部の構造が見えることが期待される。

例えば、これまで1度メッシュのシミュレーションでは海洋における高気圧・低気圧(傾圧不安定構造)に相当する渦

の存在が表現されなかったが、OFESの0.1度メッシュ流速シミュレーションでは海流の周辺にたくさんの渦が見える。海は一般的に思われているようなゆったりした流れだけでできているのではな

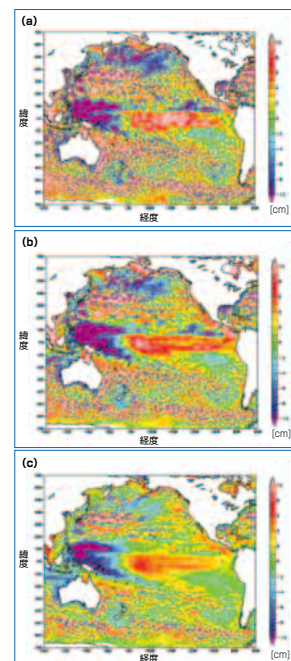


図1 海中は電波が通らないが、海表面が上下する様子は人工衛星から高度計で計測できる。(a) 4年間平均を計算し、それからのある週の偏差をプロットしたもの。(b) (a)の前後4週間ずつ、計9週間の平均の偏差。(c) (a)の前後16週間ずつ、計33週間の平均の偏差。長期間の平均を取ることで、「渦」が互いに打ち消し合い、日本の東側の渦構造が明瞭になる

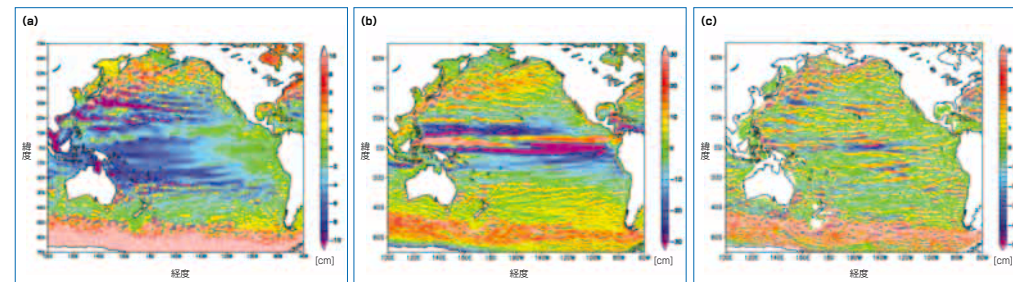


図2 (a) OFESの結果を用いて図1(c)に近い図を作ったもの。10年平均を計算し、それからある8ヶ月間(約34週間)平均の偏差。同じ条件ではないので、エルニーニョの影響などで赤道付近の様相は異なるが、日本の東側に渦状の構造が見て取れる。(b) OFESの同じ8ヶ月の平均の表面東西流と、(c) 1,000m深の東西流、緯度にして3〜5度くらいの幅の渦が現われるため、その10倍程度の解像度が必要である。海表面の変化は衛星から観測できるが、太平洋スケールの海中の様子はシミュレーションでのみ捉えることが可能だ

く、実際には渦でいっぱい変動が激しい流れ場である。観測や理論からも分かっていたことではあるが、超高解像度シミュレーションは、地球規模、深層まで含めてその認識を深めたと言える。地球は丸く、緯度によって自転軸の方向が変わるために中緯度は熱帯より流れの空間スケールは小さい。今後さらに細かいメッシュで中緯度に限定したシミュレーションを行えばさらに違った構造が見えてくるのではないかと期待される。

また、水はほとんど電波を通さないため、海洋内部の4次元(経度、緯度、深さ、時間)構造を観測によって知ることが難しい。そのため海洋循環の研究においてはシミュレーションの役割がより重要になってくる。

「海洋の渦模様」研究と季節予測への挑戦

最近研究が活発になってきたことの一つに「地球の海洋にも木星や土星のような渦模様が見える」という現象がある。2005年に東京大学の研究グループが発表した論文が発端となった。おそらく海洋と木星の間には回転流体力学的なパラメータに同じ部分があって、似たような渦模様が見えるのではないかと考えられる。

ただし、木星や土星の渦模様は天体望遠鏡でのぞけばすぐに観察できるが、地球の海洋の場合は時間平均を取らないと

見にくい。またシミュレーションで地球の自転を早めると、大気にも渦模様ができることもわかっている。シミュレーションの中でできる渦構造が時間的にどのように変動して空間的にどのような構造をしているか、そしてなぜ渦構造ができるのかを解明していくのが今後の研究テーマである。それを明らかにするには、

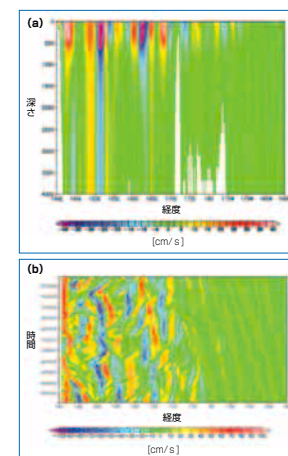


図3 (a) 図2と同じOFESの結果を用い、北緯35度で経度方向に切って0〜4,000mまで南北方向のある瞬間の速度を描いたもの。赤は北向き、青紫は南向きの流れを表す。(b) 同じシミュレーション結果の北緯35度、250m深での経度-時間の南北流、これらの渦は西向きに進む性質があるが、この緯度帯では海流が東向きなので渦の動きは非常に複雑である。これらの渦は、基本的には大気の高気圧・低気圧と同じものと考えられ、このような傾圧不安定波の生成、伝播、減衰によってジェットができると予想される

シミュレーション結果に基づき、渦模様を生む流れの4次元構造とエネルギーや運動量の輸送に関して解析する必要がある。さらに、シミュレーション研究の結果を観測を行う研究者にフィードバックし、観測データによってシミュレーションが正しいかどうかを検証していくことも不可欠である。海洋の渦構造を理解できれば、大気の大気や木星や土星の構造の解明にもつながっていくことだろう。

また、大気・海洋シミュレーション研究グループでは海洋学者と気象学者が力を合わせ、超高解像度シミュレーションを用いてより精度の高い季節予測を行う試みや、どのような予測が可能かという予測可能性の研究を進めている。例えば季節予測の精度を上げるには、たくさんのシミュレーション結果から数値がばらついた箇所を特定することで、観測データのどの部分が不足しているか推定そこを埋めていくことが必要である。また予測可能性については、台風が発生数、規模、ルート、日本へ上陸する数などのうち、どれが予測できてどれができないかを研究する等の方向性が考えられる。

このように、超高解像度シミュレーションとその結果解析および観測による検証を繰り返すことで、海洋から他の惑星に共通する理論から我々の生活に密着した季節予測までさまざまな分野の研究が進められているのである。



東京大学海洋研究所 塚本 勝巳 教授 に聞く 学術研究船「白鳳丸」で ウナギ大回遊と産卵場の謎に迫る



学術研究船「白鳳丸」

海と川を行き来するニホンウナギの詳しい生態は、いまだ明らかにされていない。どのような回遊行動をとるのか、産卵する場所はどこなのか…、東京大学海洋研究所の塚本教授は、「白鳳丸」とともに、長年に亘ってウナギ大回遊の謎に取り組んできた。そして、「白鳳丸」が東京大学海洋研究所から独立行政法人海洋研究開発機構に移管されて2年目を迎えた2005年初夏、ついに研究を大きく進展させる成果が得られたという。その成果についてはこの春にも発表される予定だ。今回はこれまでの研究経緯を振り返りながら、ウナギ研究や産卵場調査航海などについてお話を伺った。

Profile

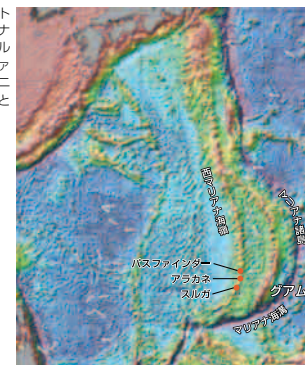
1948年、岡山県生まれ。1971年に東京大学農学部水産学科卒業。1974年に東京大学大学院農学研究科博士課程中退。同年、東京大学海洋研究所助手となる。アユ、サクラマス、ウナギなど回遊魚の研究を始める。1986年に東京大学海洋研究所助教授、1994年に東京大学海洋研究所教授に昇任、現在に至る。専門は海洋生物学、資源生態学。当初、回遊研究の1モデル魚種として着目したウナギの研究だったが、謎の多い生態に惹かれ、やがてウナギの回遊行動・繁殖生態が研究活動の中心となる。「現代の魚類学」「魚類生理学」「Eel Biology」などの著書がある。



1991年の調査で採集されたニホンウナギのレプトセファルス。
体長は上から9.8mm、21.6mm、33.5mm

(撮影：九州大学 望岡典隆・木村清朗)

フィリピン海プレート東縁近くの西マリアナ海嶺に位置するスルガ、アラカネ、バスファインダーの3海山がニホンウナギの産卵場と推定されている



ニホンウナギの回遊研究は、「探検の時代」からやっと「科学の時代」に入りました。謎に包まれた繁殖生態や回遊行動が明らかにされる日も近づいています。

Blue Earth 編集部 (以下BE) 2005年5～7月にマリアナ海域で行われた、学術研究船「白鳳丸」による研究航海で、ニホンウナギの産卵場と繁殖生態に関する画期的な成果が得られたそうですね。

塚本 教授 (以下敬称略) ウナギはレプトセファルスと呼ばれる長距離移動に適した形態で幼生期を過ごし、3、4ヵ月で透明なウナギの稚魚(シラスウナギ)に変態します。これまでの研究航海で体長7.7mm(孵化後2週間前後)の小さな個体も採集されていますが、多くは15mm程度で、孵化してからおよそ3週間は経過したものでした。しかし、今回はこれらのものよりさらに发育段階の早いプレ・レプトセファルスを大量に採集できました。これは産卵場の謎の解明に直接結びつく大きな発見になりました。学会での正式発表を春に行いたいと考えています。

BE 産卵場については、ウナギ研究の中でも最大の謎といわれていますね。

塚本 古代ギリシアのアリストテレスは、ウナギは泥の中から自然発生すると、かの「動物記」に記しています。どこをいくら探しても、卵をもつウナギもウナギの子供も見つからなかったためです。ウナギが海で産卵することが分かったのは、つい20世紀初頭のことで、デンマークの海洋学

者、ヨハネス・シュミット博士が北大西洋のサルガッソ海で小さなレプトセファルスを採集し、ウナギが海で産卵することを突きとめたのが最初でした。しかし厳密にいうと、今日に至るまで世界にいる全18種のウナギのうち、1種たりとも産卵場は特定されておらず、まだ誰もウナギの産卵現場を見たことはありません。

30年間かかった ニホンウナギの産卵場探索

BE 東京大学海洋研究所が本格的にウナギの産卵場研究に取り組んだのはいつごろからですか。

塚本 1973年が「白鳳丸」による第1回のウナギ産卵場調査航海でした。このときは1967年竣工の初代「白鳳丸」でしたが、航海前には全国のウナギ研究者が東京大学海洋研究所に集まって、熱心な航海計画シンポジウムを行ったものでした。以来30余年の間に計12回のウナギ産卵場調査航海が行われましたが、そのなかで4回、研究の大きな転機となった忘れられない航海がありました。2005年の航海もそのうちの1つで、これによって産卵場探索のための一連の研究航海にほぼ終止符が打れたといっていいいでしょう。

BE 2005年以前の3回の忘れ難い航海

と成果は、どのようなものですか。

塚本 最初の大きな成果は、1973年台湾の東方海域で54個体のレプトセファルスの採集に成功したこと。体長は50～60mmと比較的大きなものでしたが、それまで1個体しか採集されていなかったことを考えると大変大きな進歩でした。このとき、私は大学院博士課程の学生として乗船していました。来る日も来る日もサンプリングのためにネットをひき続けましたが、大成果のあった歴史的場面に立ち会えたことで、とてもわくわくしたのを思い出します。

2つ目は1986年の第4回ウナギ産卵場調査。私がウナギ研究に主体的に関わるようになったのも、この航海からでした。フ



レプトセファルスを採集するために海中に投入される大型のプランクトンネット



ネットで採集された試料からレプトセファルスを選別する作業。「白鳳丸」第7研究室(ウェットラボ)



陽が沈んでからが採集調査の本番



海洋科学研究のボトムアップ促進のためにも、学術研究船「白鳳丸」「淡青丸」が果たす役割と、その重要性を理解していただきたい。

イリビンの東方海域で体長30mmクラスのレプトセファルスを21個体採集できました。ちょうどそのころ、シラスウナギの耳のなかにある「耳石」と呼ばれる硬組織から孵化後の日齢を知る技術が導入されました。この方法によって個体毎に孵化日を推定すると、ニホンウナギは夏に生まれていることが分かったのです。それまで、ニホンウナギは冬に産卵するというのが常識で、産卵場調査航海も冬を中心に行われていましたが、これより後は夏に集中して実施されるようになりました。

そして3つ目が1991年の航海です。1989年に2代目の「白鳳丸」が建造され、速力も12ノットから16ノットに向上し、CTD、Aフレームなど様々な設備もすべて高性能になったことで、シブタイムは同じでも、より広い海域をカバーし、かつ高精度の調査を行うことが可能になりました。その結果、この航海では体長15mm前後のレプトセファルスを約1,000個体採集できました。さらに、どの海域にいてどこにいないかという分布の実態を厳密に把握することができたのです。これを解析して、ニホンウナギの産卵場を北緯15度、東経140度付近とおおまかに推定することができました。

その後も94、95、98年と研究航海が実施され、15mm前後のレプトセファル

スはいつ、どこに行けば採集できるか予測できるようになり、1991年の成果に再現性のあることが確かめられました。しかしこれよりさらに小型の、孵化後間もない個体を採集することは難しく、推定産卵場の範囲や産卵のタイミングをさらに絞り込まねばなりません。

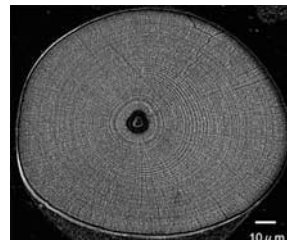
そこで私たちはニホンウナギの産卵場所とタイミングを推定するため、2つの仮説を立てました。それが「海山仮説」と「新月仮説」です。レプトセファルスの分布、日齢、海流などを注意深く解析し、ニホンウナギの産卵場として推定されたのは、西マリアナ海嶺を構成する3つの海山（スルガ、アラカネ、パスファインダー）でした。これら富士山クラスの巨大な海山は、広大な海の中でウナギの雌雄が出合うための待ち合わせ場所として、また産卵日までの待機場所として重要です。さらに伊豆諸島、小笠原諸島から続く西マリアナ海嶺の海山列は、親ウナギを産卵場まで導く道しるべとなります。

一方で、1991年7月に採集されたレプトセファルスの耳石を解析したところ、孵化日が5月と6月の2群にはっきりと分かち、それぞれのピークが各月の新月の日にはほぼ一致していることが分かりました。このことから、ニホンウナギは産卵期に毎日だらだらと産卵するのではなく、新月の日に

同期して一斉に産卵するという「新月仮説」が生まれたのです。

この2つの仮説に基づいて、1998年にはドイツ・マックスプランク研究所の小型潜水艇JAGOを「白鳳丸」に積み込んで、親ウナギの産卵シーンをこの目で見ようと張りきってでかけましたが、海山における計28回の集中的なダイブにもかかわらず、結局親ウナギを見つけることは出来ませんでした。恐らくその年はエルニーニョの影響が強く、調査した海山とは別の海山で産卵が行われたためと考えられました。そしてその後は、いきなり産卵中の親ウナギを見つけようというのはいささか性急すぎたと考え、まずウナギの卵もしくは孵化仔魚を採集することで産卵場の特定を図ろうという地道な方針に切りかえました。

BE その壁を、ようやく昨年2005年の



レプトセファルスの耳石。年輪のように見える同心円状の輪紋は1日に1本ずつ形成される日周輪で孵化日を知る重要な手がかりとなる



航海で打ち破ることができたわけですね。

塚本 ええ、やっとプレ・レプトセファルスを採集することができました。これはもちろん世界初です。この標本は船上に持ち込んだ遺伝子解析装置でただちに種査定を行い、ニホンウナギに間違いないことを確かめました。今回の成果によって、我々の海山仮説・新月仮説が間違っていなかったという確信をもちました。また、これによって、ウナギの産卵場は一体どこかと血眼になって探し求めた「探検の時代」が終わり、これからは、謎に包まれたウナギの繁殖生態と回遊行動の実態に迫る「科学の時代」に入ったといえるでしょう。さらに「白鳳丸」によるウナギ研究が進めば、ウナギという資源を後世まで保全していくための確かな方策を具体的に提言することもできるようになるでしょう。

海洋研究の普及と学術研究船が果たすべき役割を考える

BE ウナギをはじめとする海洋生物のダイナミックな回遊行動に関する研究を進められる一方で、昨年、海の様々な表情を撮影した美しい写真と、海洋科学の成果を「科学詩」によって綴った「グランバシフィコ航海記」という非常にユニークな本をまとめられましたね。

塚本 それは国の大型研究プロジェクト「海洋生命系のダイナミクス（DOBIS）」の成果の一部として発表したものです。「白鳳丸」に乗って海の研究をしながら北

極から南極まで太平洋をグルリと一周する仮想の航海記です。日ごろあまり海とつきあいのない人々に、海洋科学という楽しい世界があることを知ってもらうためにつくりました。当初は小学生から大人まで、幅広い読者層を対象にしようとしたのですが、科学詩はさすがに小学生にはちょっと難しかったかもしれません（笑）。また、読み物や写真だけではなく、研究プロジェクトの最新成果も随所にちりばめた、楽しく、美しい本になるようにまとめました。つまり、これは私たち海の研究者が一般の方々に発信する「海への誘い」でもあるのです。

BE この本の特長のひとつは、海のすばらしさが伝わってくる美しい写真が満載されている点だと思います。これらの写真はご自身で撮られたのですか。

塚本 もちろん私自身が撮った写真もたくさん入っていますが、同僚の研究者から超一流のプロカメラマンまで、いろいろな人たちの写真が掲載されています。流氷の海から熱帯の海、表層から深海、バクテリアからクジラまで、海と海の生き物のおもしろさを伝えるたくさんの写真を使わせていただきました。JAMSTECの研究者が撮った貴重な写真も載っています。この本によって、海の生き物に興味を持ってくれる人が少しでも増えることを願っています。

BE とところで、2004年春から、学術研究船「白鳳丸」と「淡青丸」は東京大学海洋研究所から海洋研究開発機構に移管され



「グランバシフィコ航海記」(東京大学海洋研究所編 東海大学出版会刊)

ました。塚本先生は、研究船共同利用運営委員会の運営部長を務めておられますが、新しい運用体制に関してどのようにお感じになっておられますか。

塚本 移管後はJAMSTECが運営のハード面を担当し、ソフト面は東大海洋研究所と全国の海洋研究コミュニティの代表からなる「研究船共同利用運営委員会」が司ることになったわけですが、お互いにうまく機能していて、よいチームワークができつつあります。今後この連携はさらによくなっていくと感じています。

BE 今後の学術研究船の運用について、JAMSTECへの要望はありますか。

塚本 まずは学術研究船移管時の約束でもあった「運航日数年間300日」を今後も堅持して行ってほしいですね。また、学術研究船は他のJAMSTECの船舶と異なり、全国大学共同利用に供される大型研究設備ですから、これを最大限に活用できるような仕組みを我々と一緒に作り上げてほしいです。全国の海の研究者ひとりひとりの自由な発想から生まれた、ボトムアップ型の小規模研究計画が、「白鳳丸」「淡青丸」でさらに数多く実現できるようにしていきたいものです。いかにすばらしい巨大プロジェクトも、その萌芽は個人の小さな発想から始まっていることを考えれば、海洋科学の大いなる発展のためにボトムアップの小規模研究がもっともっと数多く必要であることは明かです。海洋科学の更なる発展のために大いにがんばりましょう。



連携大学院方式の進展が育む 科学技術の新たな可能性

研究活動の活性化と研究体制の充実に大きな期待

取材協力：
経営企画室 評価交流課



海洋研究開発機構の施設を見学する連携大学院協定を結んだ大学の学生たち

様々な分野で産学官連携が進められるなか、研究機関と大学が協定を締結し、研究機関の研究者が大学院において教育に参画する連携大学院方式が、新たな大学院の教育方式として広がりをみせている。独立行政法人海洋研究開発機構でも、これまで10大学と協定を結ぶなど、連携大学院方式推進に積極的に取り組んでいる。研究や技術開発に専念する立場にある研究機関の研究者が教育に携わることによって、大学や研究機関に何がもたらされるのだろうか。科学技術の更なる発展のために連携大学院方式がめざすものについて、また、海洋研究開発機構における推進の現状などについて紹介する。

連携大学院方式に期待される 研究・教育の活性化

2005年10月、海洋研究開発機構は、10大学目となる連携大学院協定を横浜市立大学と締結した。これにより、両機関は連携・協力して、同大学大学院国際総合科学研究科の大学院生への教育や研究指導などを行うこととなった。具体的には、海洋研究開発機構の極限環境生物圏研究センターの研究者が同大学の客員教員として委嘱され、大学院生の学位論文作成の指導を行うとともに、大学院での講義などが実施される予定だ。

科学技術が急速な進展と高度化を遂げるなか、様々な分野で共同研究をはじめとする研究交流が盛んに行われ、連携大学院方式も広がりを見せている。連携大学院方式は、大学と研究機関などが協定を結び、研究機関の研究者が大学から教授・助教授の委嘱を受けて講義を行ったり、大学院生を実習生や研究生などとして受け入れて研究機関内で研究指導を行う取り組みだ。研究機関の人的資源および充実した研究施設と、大学が持つ教育機能を活かすため、双方が協力し合って科学技術の発展に寄与していくことをねらいとしている。

海洋研究開発機構は、1999年3月に東海大学大学院海洋学研究所との間で初めて協定を締結し、以後、その数を徐々に増やしてきた。当初は、どちらからといえば共同研究などの延長線上で、大学と研究者との個人的なコミュニケーションなどから協定に至るケースが多かった。しかし、2004年に独立行政法人として新たに発足してからは、連携大学院方式の重要性を再確認するとともに、これを推進するための組織的な態勢の整備に力を注いでいる。

「かつては、研究者にボランティア・ベースで協力を仰ぎながら進めてきた部分がありました。しかし、現在はJAMSTEC全体で活動を支援する必要

があるという認識で、関係規程類の見直しなどに取り組んでいます」と経営企画室 評価交流課・中島敏光課長代理はいう。しかし、教育という新たな活動を組み込むために、個別に締結してきた複雑な協定の調整を行う管理部門の苦労は多く、「実習生としての大学院生の受け入れや、機構の施設の利用など、細部に渡って調整を行っていく必要があり、しっかりと整えるまでにはもう少し時間がかかりそうです」と同課・大宅直哉係員。それでも、同課・西川 徹係長は、「外部との交流促進という観点からも重要であり、管理部門としても、研究者の研究環境を整えつつ、バランスを取りながら進めていく必要があると思います。また、研究者のみなさんにも、今後は人材育成という新しい役割について認識を持っていただくことが必要と考えます」と話す。

重要な取り組みとして認識されている連携大学院方式だが、実際のところ、大学および研究機関の双方にとって、

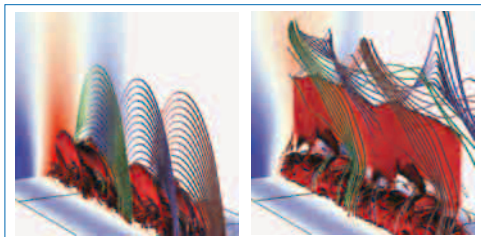


連携大学院協定を結んだ大学の学生たち（上）を招いて行われた講義の様子（下）

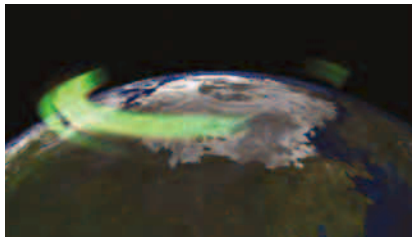
どのようなメリットがあるのだろうか。研究機関がこの取り組みに大きく期待するのは、大学の幅広い領域にわたる基礎的な研究成果を活用したり、若い研究者の新たな研究の視点や方法が導入されることにより、研究体制や研究内容が充実し、研究活動の活性化が促進されるという点だ。さらに、研究機

海洋研究開発機構が連携大学院協定を締結している大学

大学名	協定締結（改定）	締結研究科	連携講座	教員数	講義名
東海大学	1999.3 (2005.1)	大学院海洋学研究所	(未定)	4	海洋科学技術特論
広島大学	1999.4 (2005.10)	大学院生物圏科学研究所	環境循環予測論講座	3	海洋循環変動予測論Ⅰ
					海洋循環変動予測論Ⅱ
					海洋循環変動予測論Ⅲ
東京工業大学	1999.11 (2004.11)	大学院先端物質科学研究所	計算物理学	1	宇宙プラズマ物理学
		大学院総合理工学研究所	(未定)	1	(未定)
高知大学	2001.4 (2004.12)	大学院理学研究科	海洋自然科学講座	3	環境理工学特別講義
					海底環境特講
					海底地形学特講
神戸大学	2003.10 (2005.4)	大学院自然科学研究科	海洋環境計測科学講座	4	海底熱水鉱床学特講
					海洋循環論
					海洋海底観測論
東京海洋大学	2003.10 (2005.4)	大学院海洋科学技術研究所	海洋探査・利用工学講座	3	海洋環境化学 (未定)
					水中探査機器工学
					水中音響工学
明治大学	2004.2 (2004.12)	大学院理工学研究科	(未定)	1	浮体利用工学
東洋大学	2004.10	大学院工学研究科	(未定)	1	(未定)
		大学院生命科学研究所	(未定)	1	(未定)
九州大学	2005.4	大学院総合理工学研究所	海洋機器開発講座	2	海洋機器設計学
					海洋機器運用学
横浜市立大学	2005.10	大学院国際総合科学研究科	(未定)	1	(未定)



「地球シミュレータ」によって行われた太陽フレア爆発のシミュレーション。左図は爆発前、右図は爆発の様子。爆発によって磁力線が繋ぎ変わり、高速プラズマが宇宙空間に放出されることが予測された



「連結階層シミュレーション」によって、宇宙空間の大規模なプラズマの流れと、地球に降り注ぐ微細な電子の運動を同時に計算して、オーロラを再現

関の社会的な役割が問われるなかで、優れた人材の育成に貢献できるという点も重要だ。一方、大学にとっては、先端的な研究活動を展開する研究者による応用分野を含めた新たな研究の導入、最先端かつ大規模な施設・機器の利用などによる教育・研究活動の充実と活性化が見込まれる。こうした双方のメリットから、連携大学院方式への期待は大きい。

連携大学院方式で 教育に携わる研究者たち

では、実際に海洋研究開発機構で、どのように連携大学院方式が進められているのか、その一例を紹介しよう。

2005年10月に協定が改定され、連携大学院方式の対象が全研究科に拡大した広島大学では、これまでの同大学院生物圏科学研究所に加えて、新たに大学院先端物質科学研究科に、地球シミュレータセンター・連結階層シミュレーション研究開発プログラムの草野完也プログラムディレクター（PD）が客員教授として迎えられた。草野PDは、専門分野である「宇宙プラズマ物理学」の講義を大学院で行うほか、修士課程の学生2名、博士課程の学生1名の指導にあたっている。また、博士課程の学生は、現在、海洋研究開発機構の実習生として地球シミュレータセンターで研究を行っている。

「昨年秋まで大学（広島大学大学院先

端物質科学研究科・助教授）にいたかもしれませんが、個人的には、研究と教育は切り離せない部分があると考えています。新しい研究を行っていく上で最も大切なものは、新しい物事への好奇心です。その意味で、フレッシュな好奇心を持っている若い学生たちの存在は重要です。教育を通して、学生たちと議論するなかから、新しい発想が生まれてきます。ですから、研究と教育は、私たちの活動の両輪といえるのではないかと考えています」と草野PDは語る。

さらに、「自分自身の研究も大切ですが、もっと広い視野で見ると、海洋研究開発機構は、日本の海洋・地球科学技術の中枢研究機関であり、科学技術の発展に対して責任ある立場にあります。日本の場合、各大学やそのなかの研究室は、比較的孤立した存在、いってみればタコソツ的にがちです。こうしたなか、連携大学院方式のような枠組みによって、研究者や学生が大学と研究機関を行き来して情報交換を促すことは、日本全体の研究レベルの向上にとっても意味のあることだと思います」と話す。

現在、草野PDは、地球シミュレータセンターにおいて、宇宙プラズマ分野だけに留まらず、雲の成長過程や燃焼過程など様々な分野でマイクロスケールの現象とマクロスケールの現象を結びつける連結階層シミュレーション研究



広島大学大学院先端物質科学研究科に客員教授として迎えられた、地球シミュレータセンター・連結階層シミュレーション研究開発プログラム・草野完也プログラムディレクター

を行っている。今後は大学においても、いろいろな分野の学生がこの連携大学院方式を利用して研究できるようなシミュレーション科学の講座を展開していきたいと考えている。

2004年11月、海洋研究開発機構は、九州大学と「海洋ロボットの研究開発と応用」における包括的連携研究に関する協定を締結した。これにより、海



実習生として地球シミュレータセンターで草野PDの指導を受けながら研究を行っている広島大学大学院博士課程の井上 諭さん



山本GLが開発した魚ロボット。本物そっくりの動きと設計思想の斬新さなどが高く評価され、海洋技術分野の優れた設計者に贈られるフランス国際ARCHIPEL AEGO 賞を受賞



自律型無人探査機への搭載をめざして開発が進められているマルチCPUシステム。新たな探査機の実現には高精度な電子制御技術の開発が欠かせない



九州大学大学院総合理工学府・大気海洋環境システム学専攻に教授として迎えられた、海洋工学センター・海洋技術研究開発プログラム・自律型無人探査機技術研究グループの山本都夫グループリーダー



2005年2月に行われた「うらしま」の性能試験で、AUV連続航行距離317kmの世界記録を達成したときの記念写真。前列中央が山本GL

洋ロボット研究分野の共同プロジェクトに加え、技術交流・人的交流など広範な協力活動が展開されることになった。そして、2005年4月には、この協定に基づいて連携大学院協定が結ばれ、九州大学大学院総合理工学府・大気海洋環境システム学専攻に、海洋機器開発講座・海洋機器開発研究室が新設された。そして、海洋工学センター・海洋技術研究グループの山本都夫グループリーダー（GL）が同研究室の教授として、また同グループの月岡 哲サブリーダーが助教授として迎えられた。

山本GLは、現在、海洋研究開発機構が開発を進めている深海巡航探査機「うらしま」をはじめ、自律型無人探査機に関する研究開発の中心的な役割を担っているほか、本物そっくりに動く魚ロボット（生物運動型潜水機）を開

発し、海洋技術分野の優れた設計者に贈られるフランス国際ARCHIPEL AEGO 賞を受賞するなど、第一線で活躍する研究者だ。新設された海洋機器開発研究室では、無人探査機システムの設計と開発に関する研究、魚口ロボット（自律型無人探査機）の開発に関する研究など、海洋機器開発研究の基礎から応用までを扱い、これまで同大学院で行われてきた基礎的な研究に加えて応用面の研究が一層充実されることになった。すでに、研究室では博士課程の学生1名が、生物運動型水中ロボットの高性能化に関する研究を進めているほか、春からは修士課程の学生4、5名が加わる予定だ。

「大学に迎えられたことは、たいへん光栄なことだと思っています。また、私自身も、研究開発の進展を通して世の中での科学技術の革新的発展に寄与

ることと同時に、科学技術者の育成を通して産業技術力の基盤を強化することが重要であると考えておりましたから、ちょうどよい機会に恵まれたと受けとめています。学生たちへの教育・指導にあたっては、海洋機器の開発における科学技術の基礎理論および工学応用法の習得や、設計の思考法を構築するための鍛錬、さらには、様々な物理現象を広い視点からとらえ、現象解明のための理論構築と実験による論理検証能力を養成することを重視していきたいと考えています」と山本GLは話す。また、「科学技術は、ものすごいスピードで進歩し続けています。私たちは常に新しいことを吸収しながら、成果を生み出していかなければなりません。そのためには、新しい技術を生み出す若い研究者・技術者に活躍してもらう必要があります。連携大学院方式によって、適切な指導のもと、学生たちの新しい論理、新しい提案を積極的に実機に取り入れていくことは、海洋研究開発機構が進める海洋機器の開発にも大きなメリットがあると考えます」という。

大学、研究機関、企業など、組織の枠組みを超えた連携と協力が、様々な分野で科学技術の新たな活性化を生み出そうとしている。そして、連携大学院方式にも、今日の科学研究を活性化させるとともに、次世代の科学技術の発展を担う新たな力を育成するという大きな期待が寄せられている。

1億2千万匹が、海を目指して大行進!? アカガニの展示飼育に 世界で初めて挑戦



アカガニ担当の飼育技師・安部 泰さん。熱帯雨林を再現したアカガニの展示ブースの前で

取材協力: 横浜・八景島シーパラダイス アクアミュージアム



展示ブースの中のアカガニ。空気を満たしたあとは、物陰でじっとしている



クリスマス島はインド洋上に浮かぶオーストラリア領の小島。大陸と陸続きになったことがなく独自の生態系を持つ



●横浜・八景島シーパラダイス アクアミュージアム (神奈川県・横浜市) ホームページ: <http://seaparadise.co.jp/aquarium/> 連絡先: 045-788-8888

大潮の夜、ワサワサと動く真っ赤なじゅうたんが海岸を埋め尽くす…。その正体はアカガニ。インド洋に浮かぶ小さな島、クリスマス島にしかない陸ガニで、生息数は1億2千万匹にもなる。彼らは内陸部の熱帯雨林に棲むが、雨季の始まる11～12月にかけて、繁殖のために海を目指し群をなして大行進を行うのだ。

2005年12月、横浜・八景島シーパラダイス アクアミュージアムは、3年越しの交渉が実

り、世界で初めてアカガニの展示飼育を実現させた。飼育担当者が自ら捕獲してきたカニたちは、主食である枯葉を敷き詰め、室温28℃、湿度50%に保たれた展示室の中で元気に暮らしている。アカガニの寿命は14～15年もあるため、館での繁殖も成功させることができればということだ。

クリスマス島はサンゴ礁に囲まれ、ジンベエザメやマンタにも出会えるダイビングスポ

ット。そうした大型魚類がこの海域に生息できるのも、実はアカガニのおかげ。海に放卵されたアカガニの卵は、かえるとすぐにプランクトンとなるが、そのほとんどは魚たちのエサとなる。1カ月ほどの海の生活を終え、無事、島に戻るアカガニは全体の数パーセントにすぎない。しかし、そのおかげで貧栄養のサンゴ礁にも大型の魚たちが生息できる豊かな環境が生まれるのだ。



森から海を目指し、道路を横断するアカガニ (クリスマス島にて)



アカガニが放卵する美しいインド洋の海



波に洗われ鮮やかな赤が真っ白な砂に映える (クリスマス島にて)

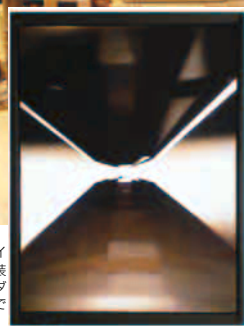


腹の下に大切に卵を抱えるアカガニのメス (クリスマス島にて)



共同研究が行われている「SPring-8」高圧構造物性
ビームラインBL10XUの実験施設の様子

「レーザー加熱式ダイ
ヤモンドアンビル装
置」は、対向するダイ
ヤモンドの先端で
試料を加圧する

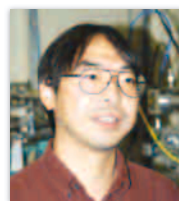


地球内部環境を再現する

超高压高温発生技術によって 巨大ガス惑星深部の新鉱物を合成

300万気圧・2,000度の環境でシリカの構造や物性を解明

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センターは、国立大学法人東京工業大学、財団法人高輝度光科学研究センターと共同で、地球深部の超高压高温環境を実験室で再現し、地球内部物質の構造や物性を明らかにする研究を行っている。プロジェクトが開始された2000年には、80万気圧・2,000度が限界だったが、現在では実験装置の改良などによって300万気圧・2,000度を再現することが可能になった。今回、この技術を用いてシリカ（二酸化ケイ素）を用いた実験を行い、天王星・海王星の核を構成する主要物質と考えられるパイライト型シリカと呼ばれる新鉱物の合成に初めて成功した。研究成果は、『サイエンス』誌（2005年8月5日）に掲載された。



取材協力：
廣瀬 敬 上級研究員
地球内部変動研究センター
地球内部物質循環研究プログラム
ブルーム物質循環研究グループ

超高压高温環境にある 地球中心の再現をめざす

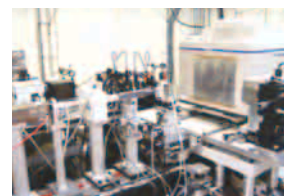
地球の半径は、約6,400km。地表から深さ約2,900kmまでは岩石圏（酸化物からなる鉱物の集合体）であり、その

内側には鉄などからなる金属の核がある。地球内部は、深くなるにつれて圧力と温度が上昇し、マントルと核の境界では135万気圧・3,000～4,000度（K：絶対温度）、地球の中心は365万気圧・

5,000度にも及び超高压高温の世界とされている。こうした極限状態ともいえる未知の領域が、どのような構造や物性を持った物質によって構成されているのかは、未だ明らかにされていない。



「SPring-8」の実験ホール内に設置された実験ハッチの外観



実験ハッチ内部の「レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置」

海洋研究開発機構地球内部変動研究センター、東京工業大学、高輝度光科学研究センターの共同研究グループは、これまで誰も実現していない地球中心に相当する超高压高温環境を実験室で再現し、地球全体の圧力・温度条件を手に入れることによって、地球深部の構造を明らかにするための研究を続けている。

超高压高温環境を再現するために技術開発を進めているのが、「レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置」だ。プリリアントカットした2つのダイヤモンドの間に試料を挟んで加圧し、高出力の近赤外レーザーで加熱するのが、この装置の原理。200万気圧、300万気圧といった超高压に耐えられるようにするために、ダイヤモンド先端部のカットには特殊な工夫が施されている。ただし、この装置によって超高压高温環境が再現できるのは、わずかに50マイクロメートル径（1マイクロメートルは100万分の1メートル）、厚さ10マイクロメートル以下という微小領域でしかなく、試料はその半分ほどに限られてしまう。試料の結晶構造や物性を理解するためには、試料にX線を当て、散乱や回折の強度分布を測

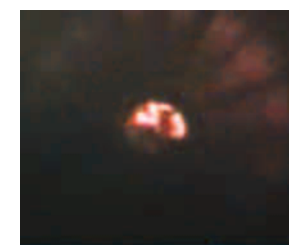


141ヘクタールの広大な敷地に設置された大型放射光施設「SPring-8」（兵庫県・佐用町）。蓄積リングの周長は世界最大の1,436m
（写真提供／財団法人高輝度光科学研究センター）

定して原子配列や電子密度分布などを調べるX線回折法という手法が用いられるが、従来のX線発生装置では、小さな試料に十分なX線を当てるのが困難だった。しかし、世界最大規模の放射光施設である「SPring-8」では、従来の装置から得られるX線と比較して、約1億倍の明るさ（輝度）の放射光X線が得られる（放射光とは、ほぼ光速まで加速された電子の軌道を磁石などで変えた際に発生する極めて明るい光。指向性に優れ、X線から赤外線までの広い波長領域を含む）。さらに、その集光を高めるといった技術開発が進められ、小さな試料でも高度なX線回折測定が可能になった。

成の変化を伴わずに、圧力や温度などの外的要因によって、別の構造状態（相）に変化すること。よく知られる例としては、黒鉛からダイヤモンドへの変化などが挙げられる。

シリカ鉱物は、常圧常温では石英（水



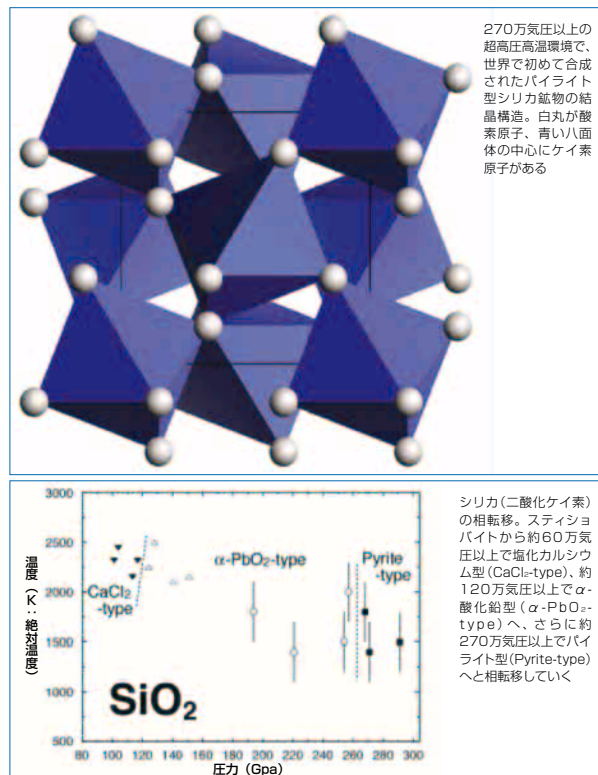
超高压高温下におかれた試料の様子



「ダイヤモンドアンビル装置」。超高压高温状態を発生できるのは、中心部のわずか数十マイクロメートルほどの領域に限られる

新シリカ鉱物の合成に成功

こうした実験装置の進歩に伴って、2005年には地球の外核に相当する300万気圧という超高压下において、2,000度以上の高温環境が再現できるようになった。共同研究グループは、この成果を利用して、地球を含め太陽系の惑星を構成する最も代表的な物質であるシリカの超高压高温環境における相転移を調べる実験を行った。相転移とは、組



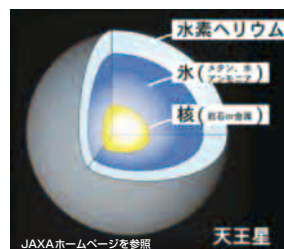
晶は六角柱状の結晶)として知られる。このほか、高温環境下で相転移したトリディマイト、クリストパイライトという鉱物としても産出する。さらに、隕石孔で衝撃を受けた砂岩のなかからは、相転移した高压型シリカ鉱物であるコーサイト、スティショバイトが見つかった。石英は、3万気圧以上でコーサイト、10万気圧以上でスティショバイトに変化することが分かっている。さらに圧力を高めていくと、天然では見つからない塩化カルシウム型(60万気圧以上)、α-酸化鉛型(120万気圧以上)へと相転移していくことも明らかにされている(鉱物学では、天然で発見されていないものには鉱物名がつけられないため、結晶構造が同じ他の物質の名前を用いて「○○型」と呼ぶ)。

今回は300万気圧・2,000度という超高温高温環境下で実験が行われた。そして、270万気圧以上でパイライト型新鉱物の合成に成功した。パイライト型と呼ばれるのは、サイコロ状の鉱物であるパイライト(二硫化鉄、鉱物名は黄鉄鉱)と同じ結晶構造を持つためだ。この新鉱物の密度は、これまで知られていたシリカ鉱物よりはるかに大きく、常圧常温の石英の2倍以上の重さを持つ。また、黄鉄鉱が金属であることから、パイライト型シリカが金属化することも期待されたが、酸素原子間の距離が離れていて結合が強くなく、金属化していないことが明らかになった。

新鉱物の安定領域である270万気圧



上は常圧常温で安定なシリカ鉱物である石英の六角柱状結晶(水晶)。下はパイライト(二硫化鉄)のサイコロ型結晶。超高温高温環境下では、シリカもこのような結晶となる



JAXAホームページを参照
パイライト型シリカ鉱物は地球には存在しないが、天王星・海王星の中心核を形成している可能性が高い

以上は、地球内部では液体の鉄からなる外核に相当するため、パイライト型シリカは地球には存在しない。しかし、シリカは太陽系惑星を構成する主要成分のひとつであることから、地球より大きな惑星、なかでも巨大ガス惑星である天王星・海王星の核に、この新鉱物が存在する可能性が高いと考えられている。

共同研究グループでは、今後さらに「レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置」の性能を高め、地球中心の超高温高温環境を再現することを目指しており、すでに300万気圧を超える実験にも成功している。地球の核の内部で鉄をはじめとする物質がどのように存在し、そこで何がおきているのか、その謎が明らかになる日もそう遠くないはずだ。



BEAGLE 2003では、全炭酸をはじめ、様々な項目の高精度観測が行われた

高精度な海洋観測を行い、気候変動予測に欠かせない重要なデータの収集に貢献する海洋地球研究船「みらい」

図1 BEAGLE 2003によって南太平洋中緯度帯WHP-P6セクションの再観測が行われた

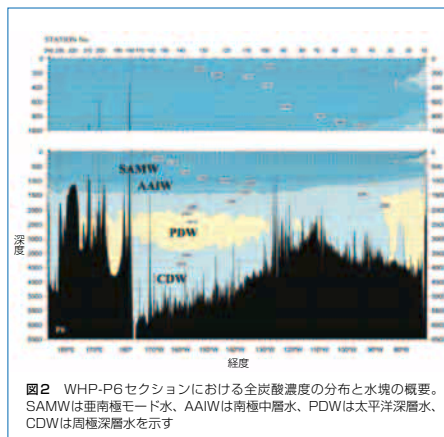
BEAGLE 2003によって明らかにされた海洋が吸収した人為起源CO₂量の変動

南太平洋中緯度海域の再観測で人為起源CO₂の吸収量増加を実証



取材協力:
村田 昌彦 サブリーダー
地球環境観測研究センター
海洋大循環観測研究プログラム
化学トレーサグループ

温室効果ガスとして知られる二酸化炭素(CO₂)の濃度が大気中で増加するなか、その吸収源のひとつである海洋の動きに大きな注目が集まっている。独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究センター・海洋大循環観測研究プログラムの村田昌彦サブリーダーらは、BEAGLE 2003における南太平洋中緯度海域の横断観測で得られた全炭酸濃度に関する観測成果と、約10年前に世界海洋循環実験(WOCE)のWOCE測線観測計画(WHP)で行われた同じ測線(P6セクション)の観測データをもとに、海洋の人為起源CO₂吸収量の変動についての解析を行った。その結果、南極周極海域で形成される南太平洋中深層水に吸収された人為起源CO₂の量が、約10年間でどのように変動したのかが明らかになった。



南極中深層水におけるCO₂吸収量の変動を探る

2003～04年にかけて、海洋地球研究船「みらい」による南半球周航観測航海 (BEAGLE 2003) が実施された。太平洋・大西洋・インド洋の南半球中緯度を一気に横断し、約500点で詳細な海洋観測を行うというこのプロジェクトは、1990年代に世界海洋循環実験 (WOCE) で実施されたWOCE測線観測計画 (WHP) の再観測でもあった。

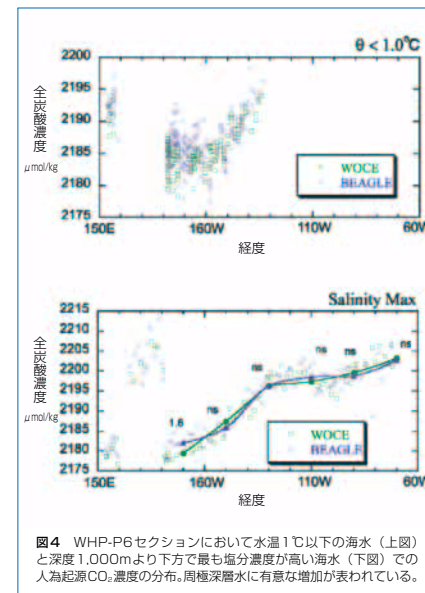
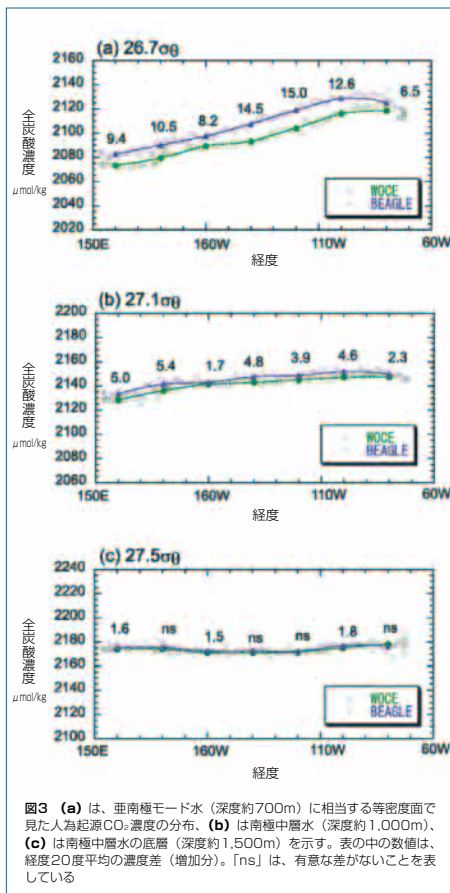
太平洋 (図1) では、8月3日にオーストラリア・ブリスベンを出国して、途中タヒチに寄港し、10月15日にチリ・バルパライソに着くまでの間に、200点を超える観測点で、海面から海底直上までの水温・塩分測定と鉛直36層の採水観測が行われ、様々な測定がなされた。この間、全炭酸濃度については、120点の観測点で採水が行われ、船上で分析したサンプルの数は3,200を超えたという。大気から海洋に溶け込んだ (吸収された) CO₂は、気体のままの溶存CO₂としてだけでなく、炭酸イオンや炭酸水素イオンとして安定した形で海中に存在している。全炭酸濃度とはこれらの総和をさす。

村田サブリーダーらは、この分析結

果を、1992年に得られた同じ測線 (P6セクション) の観測データと合わせて解析することによって、約10年間の間に、人為起源CO₂がどれだけ増加したのかを、南極周極海域で形成される南太平洋中深層水に注目して比較した。南極周極海域の表層では、亜南極モード水、南極中層水、周極深層水が形成され、世界の大洋に供給されて、海洋の鉛直的な熱・物質分布構造に大きな影響を及ぼしている (図2)。そこで、この南極周極海域で沈み込んだ3つの水塊で、10年間のCO₂の変動を見ようと

したわけだ。

海洋表層で海水に吸収された人為起源CO₂は、そのまま運ばれるわけではなく、生物活動の影響によって増え、生物活動の影響によって増える可能性がある。人為起源CO₂を見るためには、生物活動による影響を補正する必要がある。幸いWOCE観測でもBEAGLE 2003でも、溶存酸素濃度や栄養塩などが測定されている。これによって生物活動による増加が分かるため、解析では、これを取り除いた上で、大気中で増加した人為起源CO₂が海水の物理化学的性質によって吸収



された分だけを比較できるように補正された。

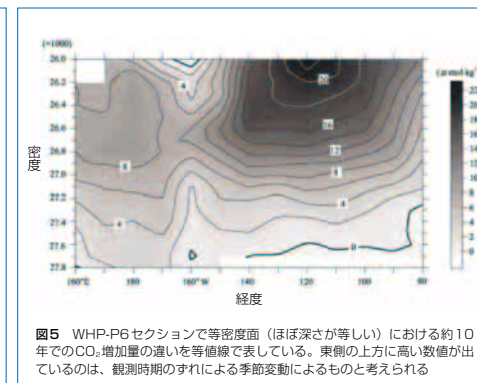
解析から見えてきた人為起源CO₂量の増加

こうしてWOCE観測データとBEAGLE 2003で得られたデータを比較した結果、深度約1,500mまでの亜南極モード水、南極中層水において、人為起源CO₂の有意な増加が検出された (図3)。この解析結果から、人為起源CO₂の約10年間の平均的な増加量は、亜南極モード水で10.0±3.1 μmol/kg、南極中層水で4.1±2.0 μmol/kgだった。また、南極中層水の底層に相当する深度約1,500mあたりが、大気から取り込まれた人為起源CO₂の増加が現れるギリギリのところであることが分かった。さらに、それより深い太平洋深層水 (PDW、北太平洋から戻ってきた非常に古い海水) では、有意な差は出てこなかった。

また、太平洋深層水よりさらに深い

ところにある、水温が1℃より低く、塩分濃度が最も高い水である周極深層水では、西経180～160度の深度3,500mより深いところにおいて、ごく僅かだが、人為起源CO₂の有意な増加が確認された (図4)。

これらの解析結果で気になるのは、図3 (a) で亜南極モード水の西側に比べて東側で人為起源CO₂の増加量が多い点だ。大気中のCO₂濃度の増加は、観測によって明らかであることから、測定された海水が南極周極海流表層にあったとき、大気からどのくらいのCO₂が取り込まれたかを、理論的に計算することができる。こうした計算によれば、理論的にはおよそ10.0 μmol/kgの増加が見込まれる。つまり、東側は、やや増加量が大きく出ていることになる。これについては、季節変動の影響ではないかと考えられる。実は、WOCE観測とBEAGLE 2003は、同じ測線を観測しているものの、その時期は最大で4ヶ月ほどずれているのだ。季節に



よって、上層や下層の影響を受けやすい混合層の厚さは変化し、特に海洋表層に近いより深度が浅い部分では季節変動の影響が大きい。図3 (a) で東側の増加量がより大きく出た原因は、こうした季節変動が効いているのではないかと考えられる (図5)。

今回の解析から、南太平洋中緯度海域における人為起源CO₂増加の全体的な蓄積量は、1年当たり、1.2±0.3 mol/m²と見積もられた。これまでに、米国の研究グループが北太平洋で同様の解析を行っている。その数値は約1.1 mol/m²であり、増加率においてはほぼ同程度の結果が出ていると考えられる。

ところが、太平洋に続いて解析が行われている大西洋では、0.6～0.7 mol/m²と、太平洋と大きく異なる数値が出ている。過去10年に限った解析結果ではあるが、海域によって人為起源CO₂の増加率に大きな差が出ているのはなぜなのか。

「今後は、こうした海域による違いの原因を明らかにするための研究を行い、さらには、国際的な枠組みのなかで、各国が収集したデータを共有しながら、よりグローバルな視点で研究を進めていきたい」と村田サブリーダーは話す。

「地球温暖化とエコシステムの最前線」 ～生態系と二酸化炭素の相互関係を解明する～

(2005年6月11日 海洋研究開発機構 横浜研究所 第34回地球情報公開セミナーより)

地球温暖化による気温の上昇は生物活動に大きな影響を与えます。さらに、空气中にCO₂が増えると植物の光合成活性も高くなります。このふたつの側面から、地球温暖化が陸域の生物界に及ぼす影響を考えることができます。同様に、海ではこうした気候変動と植物プランクトンの関係が魚などの水産資源にも影響を与えています。今回は陸域と海域、それぞれのエコシステムと地球温暖化に関する最前線の話をご紹介します。



和田 英太郎 プログラムディレクター
地球環境フロンティア研究センター
生態系変動予測研究プログラム

1939年東京都生まれ。東京教育大学理学部博士課程修了。自然界における窒素・炭素循環の研究が専門で、海洋、湖、南極、アマゾン、耕地など様々な地域を研究。現在は生物界、特に都市域の温室効果ガスの生成をテーマとし、将来、その成果を社会に還元していくべく研究を続けている。



千葉 早苗 研究員
地球環境フロンティア研究センター
生態系変動予測研究プログラム
海洋生態系モデル研究グループ

1962年神奈川県生まれ。東京水産大学水産学研究所博士課程修了。専門は生物海洋学。南北両極域の動物プランクトンの生態を中心に、海洋環境と生態系のかわりを見てきた。現在の研究テーマは10年から数十年規模の気候変動に対する海洋生態系の応答。

地球環境とプランクトンの深い関係

まず、陸域に比べてなじみの薄い海洋の話から始めます。地球温暖化が海洋生態系に与える影響という、すぐ思い浮かぶのは、氷が溶けて極域の大型生物の生態が脅かされるとか、大型クワガタが発生するといった話でしょう。しかし、これらの現象は水温上昇に伴ってはいますが、必ずしも地球温暖化と直結するものではありません。そして、海洋生態系の中で最も注目すべき生き物は、その根

幹を担う小さなプランクトンです。地球温暖化がプランクトンの生息環境を変化させることで、海洋生態系に大きな影響を与えるのです。海洋生態系の有機物の循環も陸上と同じく太陽が基本です。植物プランクトンが光合成によって有機物を作り、この植物プランクトンを動物プランクトンが食べ、それを肉食性の生き物が食べます。生き物の死骸や廃棄物は海底に沈み、バクテリアなどに分解されて再び植物プラン

クトンの栄養分となります。しかし、植物プランクトンは光合成を行うため光の届く浅いところにしか分布できません。ここで、温帯から亜寒帯の海洋環境の季節変化を考えてみます(図1)。冬の強風と海面の冷却による海水の上下混合で、栄養分は深層から表層に運ばれます。そして春、冬に供給された栄養と春の光を受け、植物プランクトンは活発に増殖を始めます。さらに気温が上昇する夏は、暖水層ができて海水が混ざらなくなり表

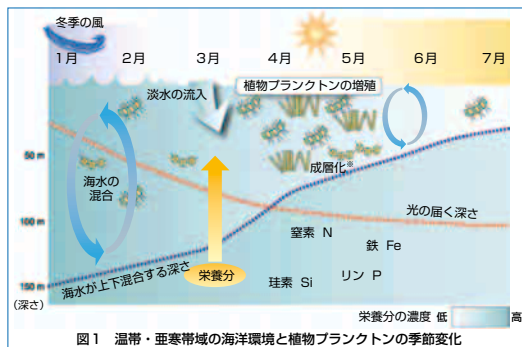


図1 温帯・亜寒帯域の海洋環境と植物プランクトンの季節変化

※成層化：水、空気、その他の物質が混ざり合わず、層を成している状態を言う。水域では、主に水温、塩分などの濃度の違いによって成層化が起きる。

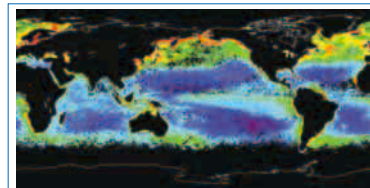


図2 人工衛星から見た植物プランクトン分布(2005年5月)
青い部分は少なく、緑～赤色は多い。沿岸域、亜寒帯域などで多く、熱帯域では少ないことが分かる

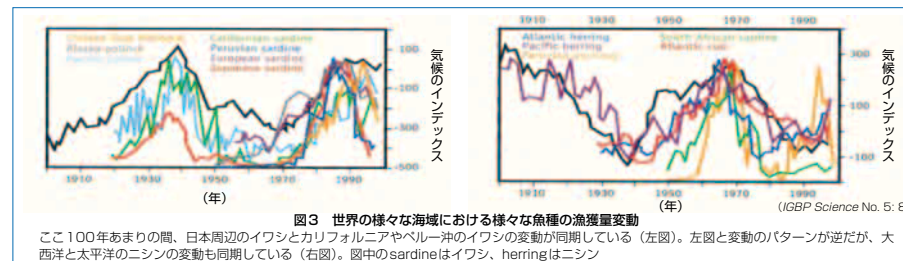


図3 世界の様々な海域における様々な魚種の漁獲量変動

ここ100年あまりの間、日本周辺のイワシとカリフォルニアやペルー沖のイワシの変動が同期している(左図)。左図と変動のパターンが逆だが、大西洋と太平洋のニシンの変動も同期している(右図)。図中のsardineはイワシ、herringはニシン

層の栄養は枯渇してプランクトンの生産力は弱まります。熱帯の海は、常にこの夏と似た状態なのでプランクトンの分布密度が低いのです(図2)。このように気候の変化とプランクトンの生産量は密接に関係しています。

次に、地球上のCO₂の収支を考えてみます。陸上の植物の光合成と呼吸だけを見ると収支はおおよそプラスマイナスゼロです。しかし、人間活動によって6ギガトンが放出されています。一方、海では放出量に比べて吸収量が約2ギガトン多く、それが毎年、海洋にストックされます。海洋は温暖化を緩和する大きな働きをしているのです。この海のCO₂吸収には、物理的作用と生物的作用があり、特に生物的作用は複雑で、温暖化予測を難しくしています。生物活動による炭素の深海への移動を“生物ポンプ”と呼びますが、この生物ポンプの働きは一定ではありません。親潮のように栄養に富み大

型の植物プランクトンが多いと、それを食べる動物プランクトンとその廃棄物も大きくなり、その結果、沈降も速く生物ポンプの効率は高くなります。逆に、栄養が少なく小さな植物プランクトンばかりだと生物ポンプの効率も低下します。また、円石藻という植物プランクトンは炭酸カルシウムの殻を持ち、この殻を作る際にCO₂を出します。そのため、円石藻が大発生すると、やはりCO₂の吸収が減り生物ポンプの効率が弱まります。このように、生息するプランクトン組成の変化も温暖化に作用します。

長期変動と生態系

日本周辺のイワシの漁獲量は何十年かの周期で変動しており、世界的にも同じような現象が見られます(図3)。このことから魚の増減は地球規模の気候変動と関係があると見られています。海面水温偏差に基づいた太平洋の気候の十年規模変動

を見ると、1976年頃に大きな水温の変化があり、「レジームシフト」*が起こったとされています(図4)。北太平洋の海面水温偏差は冬のアリューシャン低気圧の強弱に影響を受けます。1976年のレジームシフト以降10年ほどは、この低気圧が強まって海流に影響を与え、アラスカ湾や中央太平洋の生物量が増えました。一方、日本周辺は寒くなり春の生物量は減っています。しかもこの時期、日本周辺では夏は逆に例年より暑く、プランクトンの生産に適した時期は非常に短くなりました。1990年以降は暖冬冷夏でこれとまったく逆の現象が起きています(図5)。

海洋には数年から数十年まで様々な周期の変動があるため、この30年ほどの間に見られた変動が、温暖化によるものか長周期変動の一部なのか、残念ながらまだ出ていません。こうした変動の

*レジームシフト：北太平洋の長期変動の大きな特徴で、ある周期で気候が大きく転換する現象。20世紀中に3回の大きなシフトが報告されており、海洋生態系にも強い影響がある。

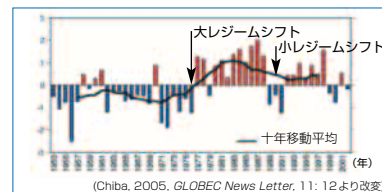
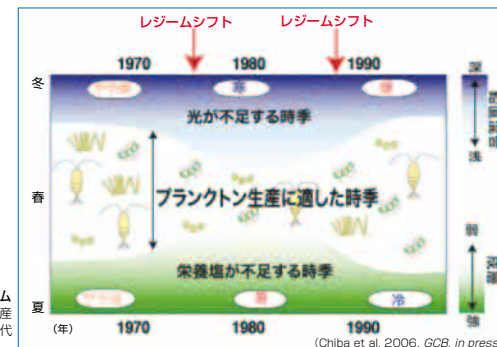


図4 太平洋十年変動指標(PDO)と気候のレジームシフト
海面水温偏差に基づいて作られた太平洋十年変動指標(PDO)のグラフ。1970年代半ばと1980年代終わりに目立った変化が見られ、気候の「レジームシフト」が起きたとされている

図5 プランクトンの生産時の10年規模変動とそのメカニズム
冬と夏の気候の条件の組み合わせで、年間のプランクトン生産量が決まる。1980年代は生産に適した時期が短く1990年代は長い



(Chiba et al. 2006, GCB, in press)

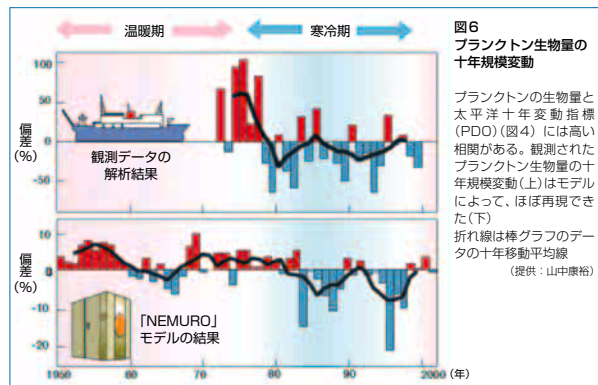


図6
プランクトン生物量の
十年規模変動

プランクトンの生物量と太平洋十年変動指標(PDO)(図4)には高い相関がある。観測されたプランクトン生物量の十年規模変動(上)はモデルによって、ほぼ再現できた(下)折れ線は棒グラフのデータの十年移動平均線
(提供：山中康裕)

仕組みと生態系への影響を調べるために、モデルによる温暖化実験も実施されています。またより複雑な生態系モデル「NEMURO」を用いることで、環境の変動によって栄養塩の供給等が変わった場合のプランクトンの組成や生物ポンプの能力の変動を知ることができます(図6)。このモデルは北太平洋の亜寒帯域をターゲットに開発されましたが、今後これを改良することで全球レベルの予測が可能となれば、地球変動研究にさらに貢献できるのではないかと期待しています。

1枚の葉っぱから見る地球温暖化

一方、陸域における生態系変動の研究も進められています。ご存じの通り、若い森林はCO₂の吸収量が大きく、成熟

するに従ってプラスマイナスゼロに近づきます。また、温暖な地域より寒冷地の森林の方がCO₂をより吸収するという報告もあります。そうした森林の変化と温暖化の関係を、主にその生産量から予測していきます。ひとつの水系を単位として、1枚の葉っぱ、樹木、森、土壤、河川、湖、そして最終的には全球までの変動を見ていくのです。

例えば、葉っぱの生産性を考えてみます。様々な地域の森林で葉の光合成活性量を計測した結果、光合成活性を縦軸、時間を横軸にとると1枚の葉の面積はほぼ同じでした(図7)。つまり、光合成活性を上げれば葉の寿命は短くなります。温暖化によって大気中のCO₂が増加すると、光合成活性は高まって1枚の葉の

寿命は短くなります。

葉の生産性は地域によっても変化します。常緑広葉樹は、通常は春から秋にかけて光合成が活性化し、冬は効率が下がります。しかし、鹿児島などの温暖な地域では冬でも光合成活性の効率は下がりにません。これは、森林を伐採して農耕地を作る場合に、関東地方なら冬の植物の増産作用を考慮する必要はないが、温暖な地域では裏作をしないと冬の間の光合成活性が減少し、地域の炭素収支が以前に比べて大きく変わるようになります。

そして、木の成長を観測データを基にシミュレーションできるのが「Pipe-Treeモデル」です。大気中のCO₂濃度が上がると光合成活性も上がり、長期的には樹冠が発達した樹形になったり、樹高が高くなるといった予測結果も出ています(図8)。

人間活動による新たな生態系

流域ごとの炭素の循環を考えてみると、森林で作られた有機物は枯葉となって土壌に貯まり、最終的には河川を流れて湖沼や海に流出します。通常、健全な湖沼では、植物プランクトンによる有機物の生産と分解量は、ほぼ1:1でバランスがとれています。しかし、湖沼に窒素やリンの流入量が増えると植物プランクトンの光合成活性が高まり生育も早くなり、その結果、生物由来の沈降粒子が増えます。

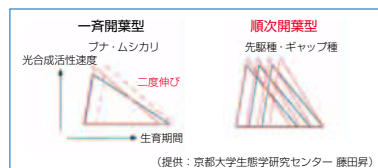
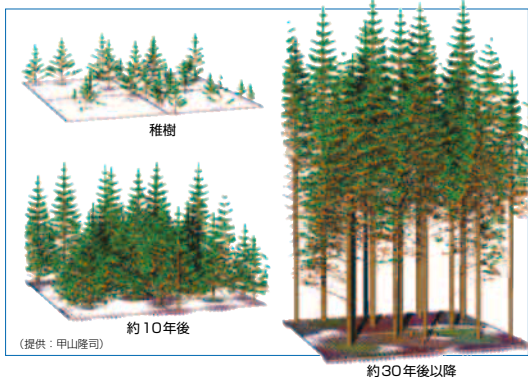


図7 光合成活性の速度と葉の生育期間の関係

黒の実線は現在、赤の実線は大気中のCO₂が2倍の濃度になった時を示している。すなわち葉の光合成活性が高まり、葉の寿命は短くなる。1年間で見た葉の枚数が多くなる。例えば右図では3枚が4枚になっている。これは多くの樹種で起こることが予想される

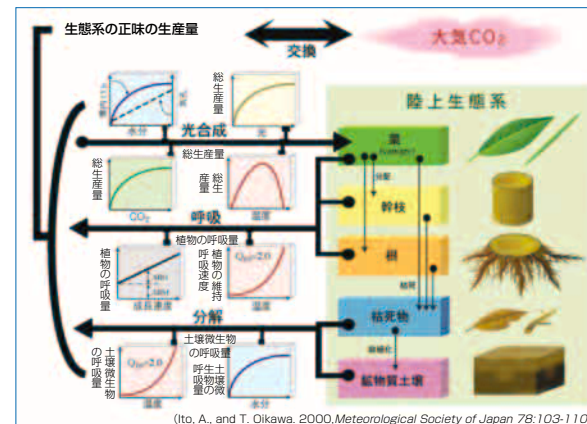
図8 Pipe-Treeモデル

大気中のCO₂の濃度の増加により現在のものより木が高くなり、葉は木の上のほうにつく(刈りあがる)ようになることが3つの図から読み取れる



(提供：中山隆司)

約30年後以降



(Ito, A., and T. Oikawa, 2000, Meteorological Society of Japan 78: 103-110)

図9 Sim-CYCLEの概念図

植物生態学的な理論に基づく炭素循環モデル。植物を葉、幹、根、枯死物、鉱物質土壌の各部分に分け、光合成、呼吸、分解の各段階で炭素の収支を計算し、その変動を予測する。地球上の植生を約32のバイオームに分け、各地域ごとに上記炭素収支を計算し、全陸域の炭素収支のマップを作成する

流入有機物も多くなっているために、湖沼全体で有機物の生産量よりも分解される方が多くなります。この傾向は中深層では特に顕著になります。琵琶湖を例にとると、一番深い水深90m付近の水温はこの10年間で約1.2℃上昇しています。そうすると、底泥中の有機物の分解が促進されてメタンが放出され、いっそう温暖化を促進する可能性が高いのです。琵琶湖に有機物が溜まる原因は、そこへ流れ込む河川、特に都市部や田んぼと直結した小さな水路が大きく貢献しています。

琵琶湖のように底泥で分解が進み、水中の溶存酸素が減ると、酸素のないとこ

ろで生きるユスリカの幼虫なども増えます。メタンを酸化するバクテリアや、そのバクテリアをエサにする生き物たちも増えていきます。人間活動によって酸素のない世界が増えると、そこに適応した生き物も拡張するのです。

社会とつながる生態系変動予測研究

現在、生態系変動予測研究プログラムでは、植物を32のバイオームに分類して、それをさらに葉、幹、根、落ち葉、土壌と分割し、それぞれが気候変動への関数式を導入して、全球の炭素循環モデルを作っています。これは「Sim-CYCLE」とい

う世界的に有名なモデルです(図9)。このモデルで2100年までの生態系の変動を予測すると、中国の揚子江周辺は降水量が増え植物も増加する、シベリアでは土壌中の有機物の分解が促進され地力なくなる、といった予測ができます(図10)。炭素分布の世界地図も作れます。これを、人間活動に必要な有機物生産量の分布地図と比較すれば、地域ごとの需給関係がわかります。こうした予測が、今後、特にアジアの人たちには非常に重要になってくると思われます。

さらに、陸と海の比較研究も今後の重要な課題です。バイカル湖に生息するオムルという魚のウロコの炭素同位体比の変化を調べると、ここ数十年間の大気中の二酸化炭素の炭素同位体組成の変化と同じような勾配で変化していることがわかりました。これをさらに調べれば、前半で述べた北太平洋のレジームシフトとの関係が発見されるかもしれません。

生態系変動予測モデルは社会システムに一番近いところにいる研究です。近年は、衛星などを使って精度の高い様々な情報がリアルタイムで入手できます。また、それを計算するコンピュータも飛躍的に進化しています。あと10年を経れば、複雑な生態系モデルも流域単位で作れるようになるでしょう。そして、その結果得たシナリオを、政策や住民の合意形成に役立てていくような時代が来ると思います。

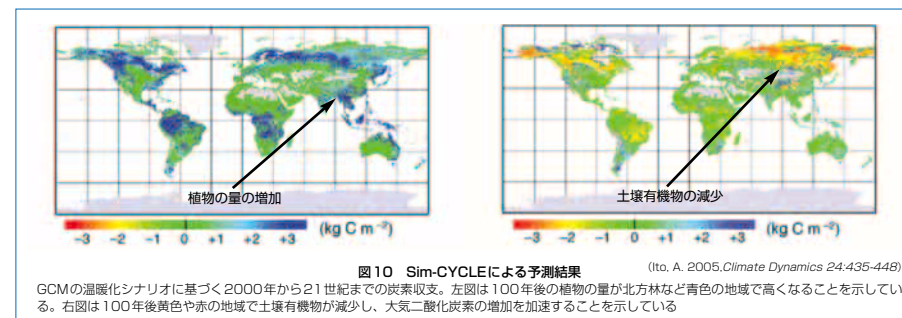


図10 Sim-CYCLEによる予測結果

GCMの温暖化シナリオに基づく2000年から21世紀までの炭素収支。左図は100年後の植物の量が北方林など青色の地域で高くなることを示している。右図は100年後黄色や赤の地域で土壌有機物が減少し、大気二酸化炭素の増加を加速することを示している

(Ito, A. 2005, Climate Dynamics 24: 435-448)

TOPICS

横浜研究所・地球情報館で
鉄腕アトム短編作品を上映

横浜研究所・地球情報館の見学者のなかには小学生以下の児童も少なくない。そうした子どもたちにも深海に興味を持ってもらおうと、同館では人気TVアニメーションシリーズ、アストロボーイ・鉄腕アトムの短編「グーノンの大冒険」の上映を行っている。

物語の舞台は深海だ。昔から多くの船が消えている謎の海域・カメロン海峡。そこに住むという「白い怪物」の謎を解き明かすため、アトムた



©Tezuka Productions・SPEJ

上映作品：アストロボーイ・鉄腕アトム
「グーノンの大冒険」(25分)
開館時間：平日10時～17時（最終上映18時）
上記の時間帯にて、いつでもご覧いただけます。
入場料：無料
上映場所：横浜研究所地球情報館

●横浜研究所・地球情報館
ホームページ
<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/yokohama/ESM/index.html>

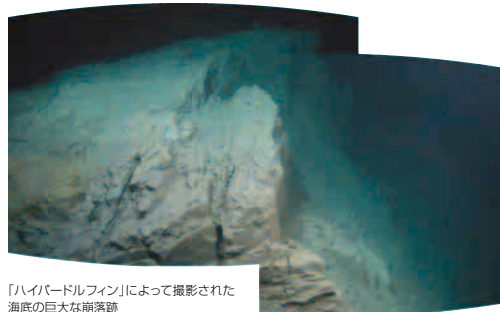
ちは深海捜査ロボット、グーノンと深海へと向かう。グーノンは怯えてばかりいるが、実は彼は独自で海の調査ができるよう、恐怖心を持つロボットとして作られていたのだ。やがて一同は、深海で船の墓場を見つける。その時、グーノンは海底に巨大な何かの気配を察知した。それこそが「白い怪物」だったのだ!!

そして、その正体とは? 物語にはグーノンのほかに、有人調査船も登場。マリンスノーや水圧、深海魚などの説明もあり、楽しみながら深海の世界に触れられる作品だ。

「科学技術への顕著な貢献」に選ばれた
スマトラ島沖大地震直後の海底調査

さる平成17年12月27日、科学技術政策研究所の「科学技術への顕著な貢献 in 2005」プロジェクト部門に海洋研究開発機構がインドネシア技術評価応用序と共同で行ったスマトラ島沖大地震緊急調査が、「スマトラ島沖大地震震源近傍の海底変動をハイビジョンカメラで観る」として選ばれ、プロジェクトを代表して末廣潔理事が選定された。これは、同研究所の約2,000人の専門家ネットワークの意見を参考に「研究」「プロジェクト」「理解増進・教育」の各部門において科学技術に貢献した人またはその代表者を選んだもので計10人が選定された。

この調査はスマトラ島沖大地震の発生メカニズムなどを解明するためのもので、無人探査機「ハイパードルフィン」のハイビジョンカメラが世界で初めて地震直後の震源近傍の海底の様子を捉え、巨大地震断層の所在を明らかにしたことが評価されたもので、さらなる防災科学技術推進への貢献が期待されている。

「ハイパードルフィン」によって撮影された
海底の巨大な崩落跡

(JAMSTEC/BPPT)

BOOK

『深海生物ファイル』

北村 雄一／著 独立行政法人海洋研究開発機構／協力
ネコ・パブリッシング株式会社／刊
1,700円（税込）



深海生物のマニアは結構多いのだが、一般に向けた専門書は意外に少ない。そういう意味で、本書はマニア待望の1冊だろう。

まず、特筆すべきは豊富なカラー写真。海洋研究開発機構の全面的な協力により、「しんかい6500」による深海の写真はもちろん、研究者が撮影した貴重な生態写真も多数掲載。その他研究機関などからの写真も含めると、その数は200点以上にのぼ

る。加えて、生物たちのユニークな生態は、著者が平易な文章とイラストで補足し、読み物としても楽しめる内容となった。

深海を読み解く水圧や光、地形などのキーワード解説や観測機器に関するコラム、用語説明、巻末のインデックスなども充実している。深海生物を“奇妙な生き物”のひとつとして扱う本では物足りなかった読者にも、自信を持っておすすめしたい。

研究の現場から

“トン・ツー”から電子メールへ

海上の調査船と陸地とを繋ぐ命綱は、何といても通信だ。20世紀初頭、モールス符号と無線電信機による船舶無線に始まった海上通信技術は、ここ数十年の間に飛躍的な進歩を遂げた。現在、日本の周辺では衛星船舶電話、さらに遠い海域もインマルサット衛星を利用して、電話やFAXはもちろん、データ通信も行えるようになった。

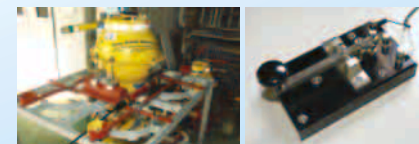
とはいえ、つい最近まで、モールス電信は海上通信において重要な役割を担っていた。電信に使われるモールス符号は「トン(・)」「ツー(ー)」という2つの長さの信号の組み合わせを文字に置き換えたもの。たとえば、「トン・ツー」は、国際通信であればアルファベットの「A」を、日本語の通信では「いろは」の「い」を表す。また、船舶同士の通常の情報交換には、「Q」で始まる世界共通の3文字符号(Qコード)があり、お互いの母国語が違っても簡単な会話ができる。たとえば、「[QRA]は[自分たちの船の名前]を意味し、[QRA?]とすれば相手の船の名前を問う言葉となる。このほか、「[SOS]も世界共通の遭難信号だ。非常時に最も間違えにくく、受信側も認識しやすい符号の組み合わせとして「[SOS=····· — — — — ····]」が選ばれた。「Save Our Ship(Souls)」の略というのは、後からつけられた話だという。そして、この「[SOS]遭難信号を発信した世界最初の船が、氷山に衝突した豪華客船「タイタニック号」であったといわれている。

長い間、海上通信の主役を務めてきたモールス電信だが、1999年に海上通信から姿を消した。通信衛星を利用した船舶電話の普及、さらには、安全な航行のための様々な情報を自動受信し、遭難時も確実・迅速な救助要請が行えるGMDSS(Global Maritime Distress and Safety System)が構築されたためだ。こうした海上通信技術の進歩に伴い、今日では通信士の仕事も大きく変化している。海洋研究開発機構の調査船でも、「通信長(士)」から「電子長(士)」へと名

称が変わった船もあり、仕事内容もメールサーバや船内ネットワークの管理など、データ通信に関する業務が増え、調査船によっては観測機器の管理やデータ処理なども担当するようになっている。

海上通信においてモールス電信はその役割を終えたが、海洋調査の世界には、いまでも密かに「トン・ツー」を発しているものもある。海底地震計の標識ブイだ。海底地震計が海面に浮上すると、各標識ブイに記録された識別情報が、モールス符号で発信される仕組みになっている。そのため、モールス符号を知らない技術者は困惑することがあるという。

かつての電信の時代、調査船と陸上との連絡にはモールス符号を使った電報が用いられていた。そのため、「タンサキニトラブルハツセイ」、「デンアツツカカニンセヨ」という具合で、コミュニケーションを取るのも大変だった。だが、いまでは電話やFAXはもちろん、インターネットメールも利用できるようになり、通信情報は格段に便利になった。その反面、調査航海に出ても、調査以外の陸の仕事が船にまで持ち込まれ、「船上での仕事が増えてしまった」と嘆く乗船研究者らの声も聞こえてくる。



海底地震計(左上)の標識ブイの信号には、いまでもモールス符号が使われている。かつて電信の時代に活躍した電鍵(上)。通信士に替わって安全な航行に欠かせない情報を受信し、遭難を知らせるGMDSS機器(左)

『Blue Earth』定期購読のご案内

定期購読のご案内 URL:
<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/regular/index.html>

定期的にお手元に届く『定期購読』をご利用ください。お申し込みは、以下の内容を明記のうえEメールかFAX、もしくはハガキにてお願い致します。購読するためには、

定価(1冊300円) + 送料(実費)が必要となります。
(当機構指定口座への振込の場合は、その手数料もご負担いただきます)

郵便番号・住所・氏名・所属機関名(学生の方は学号)・TEL・FAX・E-mailアドレス・定期購読を希望する刊行物名(海と地球の情報誌「Blue Earth」)

●支払方法

最初にお届けする号に同封する請求書に基づき、その号から年度最終号の3-4月号までを一括で当機構指定の口座にお振り込みください。
(請求書発行日の翌月末までの平日に限り、横浜図書館でも請求書持参のうえでお支払いいただけます。その際は手数料は必要ありません。なお、年末年始などの休館日は受け付けておりません。詳細はお問い合わせください)

●お問い合わせ・申込先

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
海洋研究開発機構 横浜研究所 情報業務部 情報業務課「Blue Earth」編集室
TEL: 045-778-5350 FAX: 045-778-5424
E-mail: info@jamstec.go.jp

※定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号の3-4月号までとさせていただきます。申込日以前に発行されたバックナンバーの購読をご希望の方はあらかじめお問い合わせください。バックナンバー参照URL: <http://www.jamstec.go.jp/pdf/index.html>
※1年度あたり6回発行
※お預かりした個人情報(「Blue Earth」の発送や確認のご連絡等)に利用し、独立行政法人海洋研究開発機構個人情報保護管理規程に基づき安全かつ適正に取り扱います。



プレゼント Present



JAMSTECオリジナル 地球深部探査船「ちきゅう」 クリスタルストラップ

昨年夏の地球深部探査船「ちきゅう」完成を記念してつくられた、JAMSTECオリジナルの地球深部探査船「ちきゅう」クリスタルストラップです。本体内部に、レーザー光で緻密に描かれた立体的な「ちきゅう」の姿が浮かび上がります。今回は、この「ちきゅう」ストラップを抽選で5名様にプレゼントいたします。なお、JAMSTECグッズとして、「ちきゅう」のほか「うらしま」、「しんかい6500」の3種類のクリスタルストラップが販売されています（各300円）。
●メールでもご応募いただけます。

応募方法
ハガキ、メールどちらも、1. プレゼントの品名、2. 氏名、3. 住所（郵便番号も含む）、4. 年齢、5. 職業（学生の方は学年）、6. 電話番号、7. いちばん興味を持った記事、8. 「Blue Earth」へのご意見・ご希望を明記の上、下記までご応募ください。応募締め切りは、2006年2月28日（火）です（ハガキの場合は当日消印有効）。なお、当選者発表は、発送をもってかえさせていただきます。

応募先
〈ハガキ〉
〒236-0001
神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
海洋研究開発機構 横浜研究所
情報業務部 情報業務課
「Blue Earth」編集室プレゼント係
〈メール〉
info@jamstec.go.jp
「Blue Earth」編集室プレゼント係

※お預かりした個人情報、はプレゼントの発送または確認のご連絡のために利用し、独立行政法人海洋研究開発機構個人情報保護管理規程に基づき安全かつ適正に取り扱います。

編集後記

遅ればせながら、みなさま、新年おめでとございます。本年も「Blue Earth」をご愛読いただきたく、よろしく願いいたします。さて、新年号にちなんで、深海調査研究船「かいれい」船上から見た日の出を表紙の写真にしてみました。このように穏やかな海況が毎日毎日続いてくれば、観測計画どおりすべての観測点でデータが取得でき、主任研究者は思わず万歳を叫びたいくなるはずですが、しかし、どっこいそうはいかないのが海上での観測や実験なのです。ひとたび低気圧や台風が発生し、季節風の吹き出しなどが始まる

と、一夜にして天国から地獄に突き落とされます。その地獄の状況が裏表紙です。ひどいときは、ブリッジよりも高いうねりが容赦なく襲ってきます。船長はこのような天候になると予想すれば、ひとすべら全速力で安全な海域に逃げます。しかし、当機構の船の速力は、いくらがんばっても、せいぜい16ノット（約30km/h）程度ですから、原付バイクで台風から逃げるようなものです。

今から30年ほど前のことです。当時の海洋科学技術センターは自前の船舶を持っています。ましてしたから、民間会社の船を備船し、観測機器を船用コンテナに積み込んで、時間をかけて艦装し、実験海域に赴いていました。当時、入手できる気象情報はラジオによる天気図や短波によるFAXくらいでしたから、台風の進路などはなかなか正確に把握できませんでした。通信手段もモリス符号（本誌39ページ参照）がまだまだ活躍していました。編集子が乗り込んだある航海ではオーシ

ヤンタを備船したのですが、太平洋のただ中で台風と低気圧に挟まれ、動きがとれなくなりました。大きなうねりが青波となって後部甲板を襲い、本当に恐怖を覚えました。そして、コンテナの様子を見に行けるまでに天候が回復したときには、すでに丈夫なコンテナに大きな穴があき、大事な実験機材があらかた流されていました。数ヶ月の苦労が水泡に帰したことが、今でも苦い思い出として残っています。

現在では、気象衛星のデータを直接受信し、通信衛星により陸上から多くの情報を得ることができ、容易に天候の変化を予測することができるようになりました。そのため昔に比べれば、はるかに安全な運航が行えるようになっています。とはいえ、海上における作業は、常に危険と隣り合わせです。編集子としては、今年も機構の船舶が安全に運航できることを心から祈念しています。

(T.T)

賛助会（寄付）会員名簿

独立行政法人海洋研究開発機構の研究開発につきましては、次の賛助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。（アイウエオ順）

平成17年12月現在

株式会社 アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド	有限会社システム技研	株式会社日産クリエイティブサービス
アイワ印刷株式会社	シナネン株式会社	ニッスイ・エンジニアリング株式会社
株式会社アクト	清水建設株式会社	ニッセイ同和損害保険株式会社
株式会社アサソーディ・ケイ	株式会社商船三井	日本SGI株式会社
株式会社浅沼組	株式会社湘南	株式会社日本海洋科学
アジア海洋株式会社	昭和ベトリウム株式会社	日本海洋掘削株式会社
石川島播磨重工業株式会社	株式会社白石	日本海洋計画株式会社
泉産業株式会社	社団法人信託協会	日本海洋事業株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	新日本海事株式会社	社団法人日本ガス協会
栄光電設株式会社	新日本製鐵株式会社	日本興亜損害保険株式会社
株式会社エス・イー・エイ	新菱冷熱工業株式会社	日本サルヴェージ株式会社
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	須賀工業株式会社	社団法人日本産業機械工業会
株式会社NTTデータ	鈴鹿建設株式会社	日本水産株式会社
株式会社エヌ・ティ・ティファシリテーズ	スプリングエイトサービス株式会社	日本電気株式会社
株式会社MTS雪氷研究所	住友電気工業株式会社	日本飛行機株式会社
株式会社OCC	清進電設株式会社	日本ビュレット・バックカード株式会社
オートマックス株式会社	セナーアンドバーンズ株式会社	日本無線株式会社
沖電気工業株式会社	セントラル・コンピュータ・サービス株式会社	日本郵船株式会社
株式会社オーケービリアルティシステム	株式会社総合企画アンド建築設計	株式会社間組
株式会社海洋総合研究所	株式会社損害保険ジャパン	株式会社ハナサン
海洋電子株式会社	第一設備工業株式会社	濱中製鋼工業株式会社
株式会社化学分析コンサルタント	株式会社大気社	東日本タグポート株式会社
鹿島建設株式会社	大成建設株式会社	株式会社日立製作所
カナダ株式会社	大日本土木株式会社	日立プラント建設株式会社
カバシステム マシナリー株式会社	ダイハツディーゼル株式会社	深田サルベージ建設株式会社
川崎設備工業株式会社	大陽日酸株式会社	株式会社フジクラ
株式会社川崎造船	有限会社田浦中央食品	富士ゼロックス株式会社
株式会社環境総合テクノス	高砂熱学工業株式会社	株式会社フジタ
株式会社開電工	株式会社竹中工務店	富士通株式会社
株式会社キュービック・アイ	株式会社竹中土木	富士電機システムズ株式会社
共立インシチュアランス・ブローカーズ株式会社	株式会社地球科学総合研究所	物産不動産株式会社
共立管財株式会社	中国塗料株式会社	古河総合設備株式会社
極東貿易株式会社	株式会社鶴見精機	古河電気工業株式会社
株式会社きんでん	株式会社デザック	古野電気株式会社
株式会社熊谷組	寺崎電気産業株式会社	松本商事株式会社
株式会社クロスワークス	電気事業連合会	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
株式会社グローバルオーシャンディベロップメント	東亜建設工業株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
ケイジーケー株式会社	東海交通株式会社	株式会社マルタン
京浜急行電鉄株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社	株式会社マルトロー
ケー・エンジニアリング株式会社	東京海上日動火災保険株式会社	三鈴マシナリー株式会社
KDDI株式会社	東京製綱繊維ロープ株式会社	株式会社みずほ銀行
株式会社ケンウッド	東北環境科学サービス株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
神戸ベイント株式会社	東北ニュークリア株式会社	三井造船株式会社
国際気象海洋株式会社	東洋建設株式会社	三菱重工業株式会社
国際警備株式会社	株式会社東陽テクノカ	株式会社三菱総合研究所
国際石油開発株式会社	東洋熱工業株式会社	株式会社明電舎
国際ビルサービス株式会社	戸田建設株式会社	株式会社森京建築事務所
小倉興産株式会社	飛島建設株式会社	有限会社やすだ
五洋建設株式会社	有限会社長澤工務店	郵船商事株式会社
相模運輸倉庫株式会社	株式会社中村鉄工所	郵船ナブテック株式会社
三建設工業株式会社	奈良建設株式会社	ユニバーサル造船株式会社
株式会社三晃空調	西芝電機株式会社	株式会社緑星社
三洋テクノマリン株式会社	西松建設株式会社	レコードマネジメントテクノロジー株式会社
株式会社ジエス・ユアサ テクノロジー	日南石油株式会社	若葉建設株式会社
財団法人造事業センター	日油技研工業株式会社	

海と地球の情報誌「Blue Earth」第18巻第1号（通巻第81号）2006年1月 発行
編集人 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 情報業務部 情報業務課 栗田 桂
発行人 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 情報業務部 土屋 利雄
本部 〒237-0061 神奈川県横浜市中区新港2番地15 TEL.046-866-3811（代表）
横浜研究所 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25 TEL.045-779-3811（代表）
むつ研究所 〒035-0022 青森県むつ市大字関根字北関根690番地 TEL.0175-25-3811（代表）
高知コア研究所 〒783-8502 高知県南国市物部乙200 TEL.088-864-6705（代表）
東京事務所 〒105-0003 東京都港区西新橋1-2-9 日比谷セントラルビル10階 TEL.03-5157-3900（代表）
国際海洋環境情報センター 〒905-2172 沖縄県糸満市玉豊原224番地3 TEL.0980-50-0111（代表）
Washington D.C. Office 1120 20th street, NW, Suite 700, Washington, D.C. 20036, USA TEL.+1-202-872-0000 FAX.+1-202-872-8300
Seattle Office 810 Third Avenue Suite 632 Seattle, WA 98104, USA TEL.+1-206-957-0543 FAX.+1-206-957-0546

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/> Eメールアドレス info@jamstec.go.jp
制作 株式会社 ミュール

※本書掲載の文章・写真・イラストを無断で転載、複製することを禁じます

