

気候変動予測は 社会を変える

Blue Earth Time Travel

約22億年前
全球凍結と生物大進化

M9の震源付近の海底で
大きな亀裂を確認

海底に沈んだ鯨が育む
生態系



1 **Close Up**
M9の震源付近の海底で
大きな亀裂を確認

2 **特集**
気候変動予測は
社会を変える

20 **私が海を目指す理由**
氷期に消えたCO₂
——30年来の謎を解く

近本めぐみ
地球環境変動領域 地球温暖化予測研究プログラム
古気候研究チーム 研究員

24 **Blue Earth Time Travel**
約22億年前
全球凍結した海水の下
生物は大進化への準備を進めた

渋谷岳造
システム地球学ポ ンレカンブリアンエコシステムラボラトリー 研究員

28 **Marine Science Seminar**
海底に沈んだ鯨が育む生態系

藤原義弘
海洋・極限環境生物圏領域 海洋生物多様性研究プログラム
化学合成生態系進化研究チーム チームリーダー

32 **BE Room**
編集後記
『Blue Earth』定期購読のご案内
JAMSTECメールマガジンのご案内

裏表紙 **JAMSTEC History 1971-2011**
1981年
有人潜水調査船「しんかい2000」

M9の 震源付近の海底で 大きな亀裂を確認

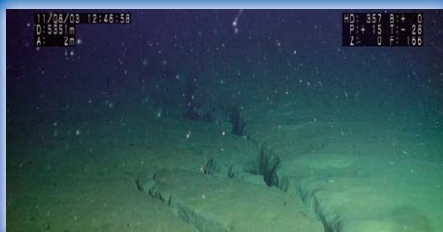
幅と深さが約1mの亀裂が、東西方向に少なくとも80m続いていた——ここに見開きで示した画像は、2011年8月3日、有人潜水調査船「しんかい6500」が東北地方太平洋沖地震(M9.0)の震源付近、水深約5,350mで撮影した海底の亀裂である。潜航中にその全容を確認することができないほど、亀裂は広範囲にわたっていた。

2006年に「しんかい6500」が同じ地点で行った潜航調査では、この亀裂は確認されていない。東北地方太平洋沖地震の本震を含む一連の地震活動で生じた亀裂だと思われる。

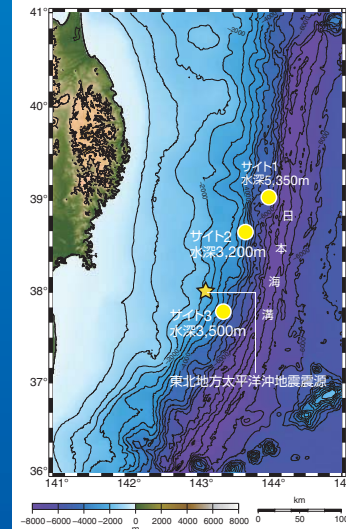
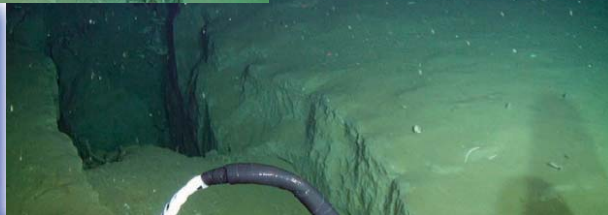
また、この海域ではほとんど確認されたことのないナギナタシロウリガイの群集(バクテリアマット)が見つかった。地震活動に伴い海底下から断層に沿って湧き出してきたメタンや硫化水素をエネルギー源にして、バクテリアが大量に繁殖したものと考えられる。

日本でいまままで観測されたことのないM9の超巨大地震。その発生メカニズムや、地震が環境と生物に与える影響を探るため、海洋研究開発機構では今後もさまざまな現地調査を継続していく。

(取材協力: 藤倉克則 海洋・極限環境生物圏領域 海洋生物多様性研究プログラム 深海生態系研究チーム チームリーダー)



長さ約2mのバクテリアマット。直上には高濃度の硫化水素が漂っていた(サイト1、水深5,348m、潜航者: 藤倉克則チームリーダー)



2011年7月30日~8月14日、「しんかい6500」により3つのサイトの潜航調査を行った。サイト2でも、幅約20cm、南北方向に数十m以上続く亀裂や、1mを超える段差を確認。また、各サイトでバクテリアマットや、断層からしみ出る硫化水素を栄養源とするバクテリアを体内に共生させているナギナタシロウリガイ、2006年の調査では確認できなかったウシナマコ類が高密度で息していることを確認した

亀裂内部には崩れた堆積物やバクテリアマットが確認された(サイト1、水深約5,350m、潜航者: 野牧秀隆 研究員)



気候変動予測は 社会を変える

2011年の日本の夏は、統計のある114年間で4番目に暑い夏だった。1番は2010年だ。

猛暑や寒波、干ばつ、豪雨などの異常気象は、農業をはじめさまざまな産業に大きな打撃を与え、ときには私たちの生命や健康を脅かす。残念ながら、異常気象をなくすことはできない。しかし、その発生があらかじめ分かれば、対策を講じて被害を軽減することができる。

海洋研究開発機構（JAMSTEC）は、エルニーニョ現象やラニーニャ現象、インド洋ダイポールモード現象など、異常気象を引き起こす気候変動現象の発生予測を的中させてきた。予測精度は世界最高だ。JAMSTECアプリケーションラボでは、気候変動現象の予測情報を社会に提供し、異常気象の被害軽減に役立てようという新たな試みに挑んでいる。

気候変動現象はどこまで予測できるのか。そして、それによって私たちの生活、社会がどのように変わるかを紹介しよう。

異常気象は、 社会に大きな打撃を与え、 私たちの生命や健康を脅かす

取材協力
山形俊男
アプリケーションラボ
ラボヘッド

異常気象というと、最近では2010年の猛暑を思い浮かべる人が多いことだろう。2010年は日本各地で最高気温の観測記録が更新され、6～8月の平均気温は平年に比べて1.64℃高く、統計のある過去114年間で最も暑い夏となった。熱中症によって救急搬送された人は全国で5万3843人と2009年の4倍以上となり、死者も出た。また全国的に雨が多く、梅雨の時期には本州の各地で、10月には鹿児島県の奄美地方で大雨による大きな被害が出た。2010年、異常気象が起きていたのは、日本だけ

ではない。ロシア、北アメリカ東部でも異常高温となった。一方、ヨーロッパや北アメリカ南東部では異常低温が見られた。また、バキスタン、中国内陸部、タイ、ベトナム、オーストラリア東部などで豪雨が発生している。

気象庁の定義によれば、異常気象とは、30年間に1回程度、つまり人の一生の間にまれにしか経験しない現象をいう。異常気象が注視されるのは、まれな現象というだけでなく、それが社会に大きな影響を及ぼすからだ。2001年から2010年まで

の日本の気象災害による被害状況を見てみよう。死者・行方不明者、農林水産業被害額ともに大きいのが2004年である。2004年は東京都の大手町で39.5℃を記録し、これは2011年時点でも東京の最高気温である。また、台風の上陸数が過去最高の10個を記録した年でもある。2004年に次いで農林水産業被害額が大きい2003年は、冷夏であった。このように異常気象は、農業や畜産業、漁業など自然を相手にする産業、ひいては経済活動に大きな打撃を与え、私たちの生命や健康を脅かすこともある。異常気象がもたらす災害の克服は、人類にとって重大な課題である。

「残念ながら、異常気象の発生を抑えることはできません。しかし、異常気象の発生を数ヶ月から数年前に知ることができたら、対策を取り、異常気象による災害や悪影響を軽減することはできます」と、JAMSTECアプリケーションラボの山形俊男ラボヘッドはいう。しかし、異常気象の発生をあら

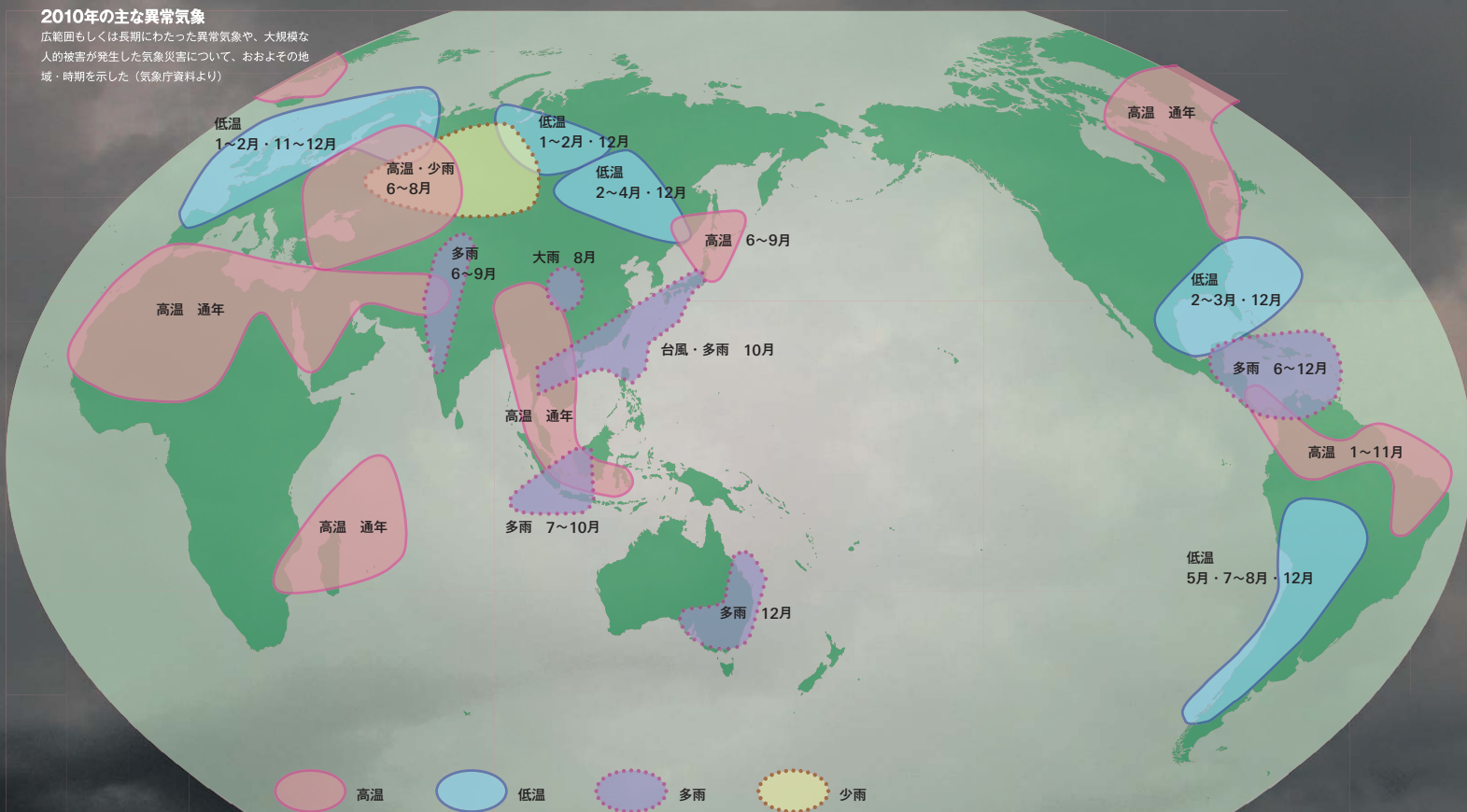
かじめ知ることなど、できるのだろうか。「異常気象は気候変動現象によって起こります。その現象を予測できれば、異常気象が発生する可能性を前もって知ることが出来ます」

気候とは、たとえば大気では気温や降水量、風、日照などの30年間の平均状態をいう。平年（過去30年間の平均）の状態からずれることを「気候変動」と呼ぶ。「数年の間隔で発生し、世界各地に異常気象を引き起こす代表的な気候変動現象が、太平洋で発生するエルニーニョ現象やラニーニャ現象、インド洋で発生するダイポールモード現象です。私たちは、それらの発生を精度よく予測することに成功しています」

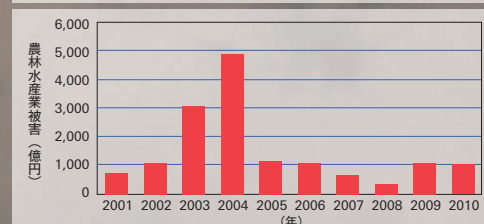
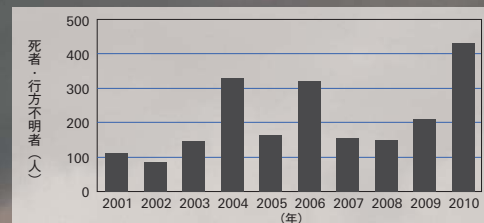
では、エルニーニョ現象やラニーニャ現象、インド洋のダイポールモード現象とは、どのようなものなのだろうか。

2010年の主な異常気象

広範囲もしくは長期にわたった異常気象や、大規模な人的被害が発生した気象災害について、おおよその地域・時期を示した（気象庁資料より）



2001年から2010年までの日本の気象災害による被害状況 (気象庁資料より)



- 2001年 東・西日本、南西諸島で高温
- 2002年 暖冬。3月に記録的高温
- 2003年 北・東日本で10年ぶりの冷夏
- 2004年 北・東・西日本で記録的猛暑。台風上陸数は最多の10個
- 2005年 春～夏に東日本太平洋側、西日本で極端な少雨、西日本で渇水。12月に記録的低温と大雪
- 2006年 日本海側で豪雪（平成18年豪雪*）。7月に本州から九州で豪雨（平成18年7月豪雨）
- 2007年 記録的暖冬・少雪。8月は各地で記録的な高温
- 2008年 8月に中国地方から東北地方で豪雨（平成20年8月末豪雨）
- 2009年 7月に中国地方から九州北部地方にかけ記録的な大雨（平成21年7月中国・九州北部豪雨）
- 2010年 夏の日本の平均気温が過去114年間で最高

*顕著な災害を起こした気象現象については、気象庁が命名

熱帯域で発生するエルニーニョ現象や ダイポールモード現象が 世界各地に異常気象をもたらす

取材協力
山形俊男
アプリケーションラボ
ラボヘッド

世界各地に異常気象をもたらす気候変動の代表格が、「エルニーニョ現象」である。エルニーニョ現象は、太平洋熱帯域の海水温分布が変わるものだ。平常時の太平洋熱帯域では、暖かい海水は西側のインドネシア付近にあり、東側のペルー沖は比較的低温である。エルニーニョ現象が発生すると、暖かい海水が東へ広がり、西側が比較的低温になる。逆に、西側に暖かい海水が平常時より多く蓄えられている状態を「ラニーニャ現象」という。太平洋熱帯域の海水温分布が変わると遠く離れた日本で異常気象が起きるといえるのは、にわかには信じ

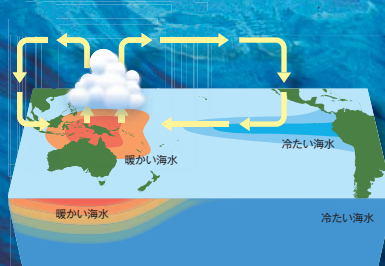
信じ難いかもしれない。「海洋と大気は互いに作用しており、海水温はその上にある大気の運動に影響を与えます。その影響は、はるか遠くまで伝わっていくのです」と山形ラボヘッドは説明する。暖かい海水は大気を加熱し、上昇気流を発生させる。暖かい海水の分布が変われば、上昇気流が発生する場所も変わる。エルニーニョ現象の発生時には、上昇気流とそれによってできる積乱雲が東に移動し、ペルーで多雨、インドネシアで干ばつとなる。ラニーニャ現象の発生時には、積乱雲が西に移動し、インドネシアで多雨となる。暖か

い海水による大気の加熱は局地的なものだが、その影響は、大気の波動によって水平方向にも鉛直方向にも伝わっていき、最終的には太平洋熱帯域から遠く離れた場所にも異常気象をもたらすのだ。大気の状態の変化が遠く離れた場所に伝達される現象を、「テレコネクション」と呼ぶ。日本は、エルニーニョ現象が発生すると冷夏・暖冬に、ラニーニャ現象が発生すると猛暑・厳冬になる傾向がある。実際、冷夏となった2003年はエルニーニョ現象が、日本海側で豪雪となった2006年はラニーニャ現象が発生していた。世界各地に異常気象をもたらす気候変動は、エルニーニョ現象とラニーニャ現象だけではない。「2010年に記録が塗り替えられるまで日本の夏の平均気温が最も高かったのは、1994年でした。1994年は前年のエルニーニョ現象の名残らしきものが中央部太平洋にあり、冷夏が予想されていましたが、猛暑となったのです。私たちは、1994年の猛暑の原因を探っていくなかで、インド洋にも

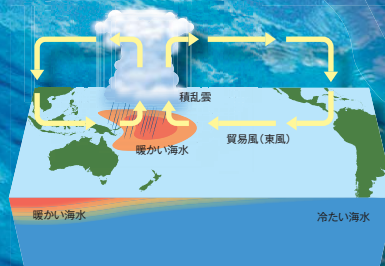
エルニーニョ現象に似た現象があることを1999年に発見し、インド洋の「ダイポールモード現象」と名付けました」平常時のインド洋では、東側のインドネシア沖に暖かい海水がある。正のダイポールモード現象が発生すると暖かい海水が西側のアフリカ沖に移動し、東アフリカでは多雨、インドネシアでは干ばつを引き起こす。負のダイポールモード現象が発生すると、暖かい海水が平常時よりさらに東へ移動し、インドネシア近海で多雨となる。日本は、正のダイポールモード現象が発生すると猛暑になる傾向がある。1994年は、正のダイポールモード現象が発生していたのだ。「エルニーニョ現象やダイポールモード現象の発生を予測しようと、世界中の研究者が激しい競争を繰り広げています。そのなかでトップを走っているのが、私たちJAMSTECのグループです」と山形ラボヘッド。では、気候変動現象をどのように予測するのだろうか。



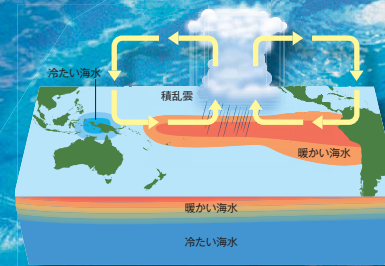
エルニーニョ現象とラニーニャ現象



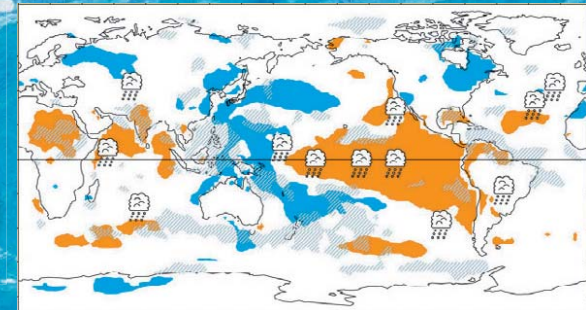
ラニーニャ現象の発生時
西側に暖かい海水が平常時より多く蓄えられている。貿易風が強まり、暖かい海水がさらに西へ運ばれていく



太平洋熱帯域の平常時
太平洋の西側に暖かい海水がある。東から吹く貿易風が表層の暖かい海水を西へ運んでいく。暖かい海水がある場所では、上空の大気が暖められて上昇気流が発生し、積乱雲がきて雨が降る

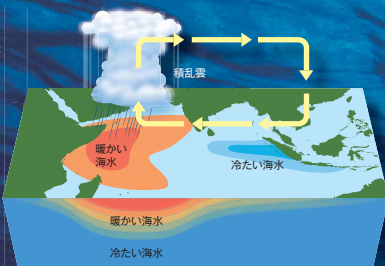


エルニーニョ現象の発生時
暖かい海水が東へ広がる。貿易風が弱くなり、暖かい海水が西へ運ばれなくなる。暖かい海水の分布が変化すると、積乱雲が発生する場所が変わり、雨が降る地域や乾燥する地域も変わる

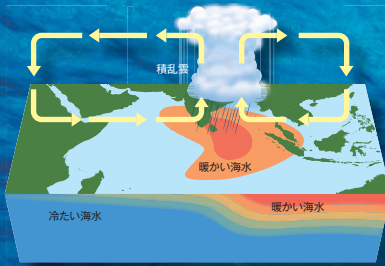


エルニーニョ現象が世界の気候に及ぼす影響
ペルーで多雨、インドネシアで干ばつ、日本は冷夏・暖冬になる傾向がある

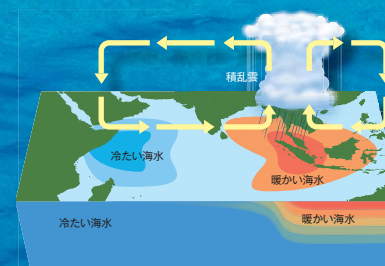
インド洋のダイポールモード現象



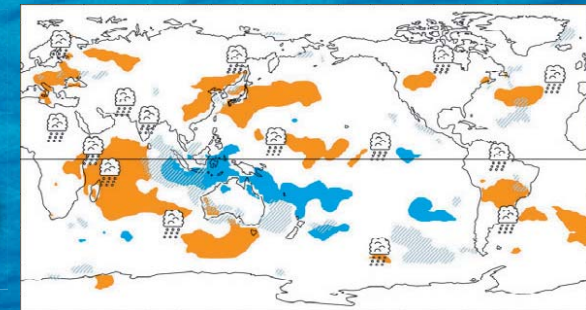
正のダイポールモード現象の発生時
暖かい海水が西側に移動する。東から吹く貿易風が強まり、暖かい海水を西に運ぶ。ダイポールモードとは「双極」という意味。暖かい海水と冷たい海水がインド洋の東西両極に分布することから名付けられた



インド洋の平常時
東側に暖かい海水がある



負のダイポールモード現象の発生時
暖かい海水が平常時よりさらに東へ移動する



正のダイポールモード現象が世界の気候に及ぼす影響
東アフリカでは多雨、インドネシアやオーストラリアでは干ばつ、日本やヨーロッパでは高温になる傾向がある

エルニーニョ現象は2年先、インド洋ダイポールモード現象は1年先の発生予測に成功

取材協力
羅 京佳
 アプリケーションラボ
 気候変動応用ラボユニット
 主任研究員

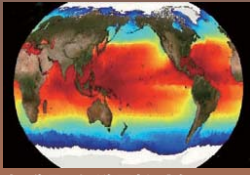
① 海面水温の観測



トライトンプイ 海底におもりで係留され、海面や海中の水温などを観測。現在、トライトンなどの係留ブイが太平洋熱帯域で77基、インド洋熱帯域で30基、観測を行っている



アルゴフロート 10日ごとに深さ2,000mから海面までの水温や塩分を観測。世界の海に約3,200基が投入されている



人工衛星による海面水温分布 赤外線やマイクロ波を使って、全海洋の海面水温を毎日観測している



海洋地球研究船「みらい」 世界でも最大級の大型海洋観測船であり、海洋観測やトライトンプイの設置などを行う

天気予報は、私たちの生活に欠かせない情報の1つとなっている。大気の変動は物理法則にのっとった現象であり、数式で表すことができる。さまざまな数式を組み込んだ数値モデルに、ある時点の大気の数値を入れてコンピュータで計算すると、将来の大気の状態を導き出すことができるのだ。気候変動予測も基本的な手法は天気予報と同じだ。しかし、「気候変動予測はとても難しい」と羅 京佳主任研究員はいう。「天気予報で計算するのは大気の変動だけで、予測期間も数時間から1週間ほどです。しかし、気候変動予測では、大気と海洋が相互作用しながら変化していく様子を、数ヶ月から数年先まで計算しなければいけないからです」

JAMSTECでは気候変動予測を実現するため、大気の変動と海洋の変動を同時に計算できる先端

の大気海洋結合モデル「SINTEX-F」を開発した。その中心となった1人が、羅主任研究員である。

SINTEX-Fによる気候変動予測の手法を簡単に紹介しよう。まず、海面水温の観測データを初期値としてSINTEX-Fに取り込む。コンピュータのなかに現在の状態を再現した仮想の地球をつくり出すのだ。あとは、ひたすら組み込まれた数式で計算をする。すると、海洋が大気を暖め、風が吹いて海水を動かして……と、海洋と大気が互いに影響しながら変化し、未来の気候が導き出される。

大気海洋結合モデルは複雑な計算が必要だが、JAMSTECにはスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」がある。「地球シミュレータ」は、2011年6月版スーパーコンピュータ世界ランキングでは67位と計算速度では断トツとはいかないが、大気や海洋など流体の計算を得意とし、気候変動予測に威力を発揮する。

「問題は、初期値としてどの観測データを入れるかです」と羅主任研究員。「観測データをたくさん入れればいいというものではありません。観測データには誤差があるため、計算を進める間に誤差が増幅され、誤った方向に発展してしまう危険性があります」。そこで、SINTEX-Fでは「アンサンブル

予測」を採用している。27通りの初期値から計算し、その結果を平均化することで、観測データの誤差の影響を打ち消し、予測精度を上げることができるのだ。

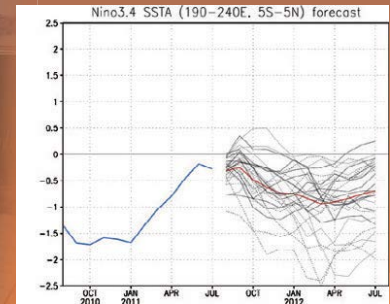
各国の研究機関が、気候変動予測のための数値モデルを開発している。そのなかでSINTEX-Fは、熱帯域の気候変動において世界最高の予測精度を実現している。エルニーニョ現象の発生は2年先まで予測可能だ。ほかの数値モデルでは6~9ヵ月先が限界だから、その差は大きい。インド洋ダイポールモード現象については、2006年秋の発生を2005年11月の時点で予測することに成功。1年先のインド洋ダイポールモード現象の発生を予測したのは世界初だった。いまでも、インド洋ダイポールモード現象の発生予測においてSINTEX-Fを超えるモデルはない。

しかし、羅主任研究員は現状で満足してはいない。「もっと早く、もっと精度よく、気候変動を予測したい」という。「そのためには、SINTEX-Fの改良とともに、観測データの充実が必要です。エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の“種”を見つけることができれば、発生予測の精度は大きく向上します」

SINTEX-Fを用いた気候変動予測の流れ

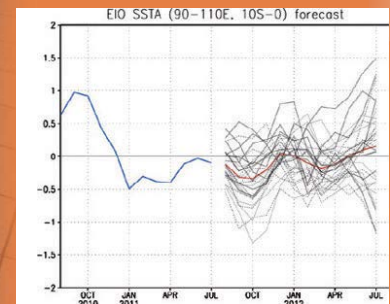
③ アンサンブル予測

27種類の初期値をそれぞれ計算した予測値を平均化する。観測誤差などの影響が打ち消され、予測精度が向上する



エルニーニョ現象の予測

東部太平洋熱帯域の海面水温の年間偏差を、2011年8月から1年後まで予測。青は観測値、赤は27種類の計算値（黒）を平均化した値。ラニーニャもどきのような状態がしばらく続き、最終的にはラニーニャの状態が今年の末に復活し、2012年の開戦くと予測されている

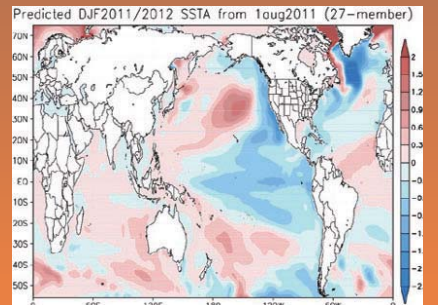


インド洋ダイポールモード現象の予測

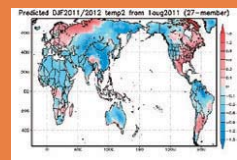
東部インド洋熱帯域の海面水温の年間偏差を、2011年8月から1年後まで予測。弱い正のインド洋ダイポールモード現象が2011年の秋に発生し、オーストラリアの西では今年より暖かい海面水温がしばらく続きと予測されている

④ 予測結果

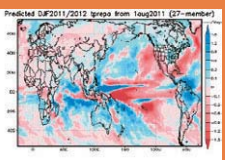
エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の発生予測をもとに、地球全体の海面水温、気温、降水量の予測を行う。図はいずれも、2011年8月から開始し、2011年12月~2012年2月について予測した結果。これらの予測は、JAMSTECのホームページ「季節予報」で公開している (http://www.jamstec.go.jp/frcg/research/d1/ioid/sintex_f1_forecast.html)



海面水温の年間偏差



地上2mの気温の年間偏差



降水量の年間偏差

② 計算

海面水温の観測データを初期値として先端の大気海洋結合モデル「SINTEX-F」に取り入れ、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」で計算する

地球シミュレータ

世界最大のベクトル型スーパーコンピュータ。特に、大気や海洋など流体の計算に優れた能力を発揮する

いまの海を知らなければ、 未来の気候を知ることはできない ——観測網の整備が急務

近年、海洋観測で大活躍しているのが人工衛星だ。全海洋をくまなく観測し、海面水温などのデータを毎日届けてくれる。おかげで、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象が発達・終息していく様子を監視できるようになった。しかし、升本順夫プログラムディレクター（PD）は、「人工衛星で見ることができるのは海の表面だけです。気候変動を理解し、その発生を精度よく予測するには、海の表面だけでなく海のなかを知る必要があります」と指摘する。

エルニーニョ現象とラニーニャ現象が発生する太平洋熱帯域には、現在、係留ブイ77基（表層ブイ71基、亜表層ADCPブイ6基）から成る観測網が展開されている。トライトンブイのような表層ブイでは、ブイと海底のおもりをつなぐロープに観測装置を付け、水温や塩分、流速、流向を常時観測し、観測データは衛星通信を利用してリアルタイムで陸上に送信される。太平洋熱帯域の観測網にはJAMSTECも参加。西太平洋にトライトンブイを16基、流速・流向のみを観測する亜表層ADCPブイを2基設置している。

また、世界中の海には約3,200基のアルゴフロートが投入されている。アルゴフロートは、10日ごとに深さ2,000mから海面まで水温や塩分を観測しながら浮上し、衛星通信を利用して観測データを送信する。係留ブイやアルゴフロート、人工衛星などを組み合わせることで、太平洋熱帯域の海の状態を表面から中層まで、リアルタイムで知ることができるようになった。エルニーニョ現象の発生予測が可能になったのは、こうした充実した観測網のおかげだ。

一方、ダイポールモード現象が発生するインド洋についてはどうか。「まだまだこれからです」と升本PD。「インド洋は太平洋の影響を受けて変化するだけで、気候変動予測のための観測は必要ないと考えられていました。その認識を一変させたのが、1999年、山形ラボヘッドらによるインド洋ダイポールモード現象の発見です」。インド洋の観測が重要だと気付いたJAMSTECは、世界に先駆けて、2000年にADCPを1基、2001年にトライトンブイを2基設置。現在は、気候の変動性及び予測

可能性研究計画（CLIVAR）とインド洋域の全球海洋観測システム（IOGOOS）のインド洋パネルが中心となり、国際協力によって観測網の整備を進めている。升本PDは、CLIVAR/IOGOOSインド洋パネルの共同議長を務める。「46基の係留ブイから成る観測網を展開する計画です。現在30基が設置済みで、JAMSTECの係留ブイは4基。インド洋観測の先駆者としては、もう少し貢献したいですね」

取材協力

升本順夫

地球環境変動領域
短期気候変動応用予測
研究プログラム
プログラムディレクター

羅主任研究員が指摘するように、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の“種”を見つけることができれば、より早く、より精度よく発生を予測することができる。「赤道域での海洋変動の種は通常、大洋の西側で現れ、東に伝わっていきます。だから、西インド洋で観測をしたい。しかし、その海域は海賊が出没するため危険です。西インド洋の観測をいかに実現するか、それが今後の課題です」

エルニーニョ現象もインド洋ダイポールモード

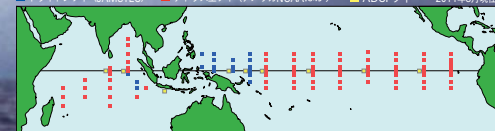
現象も、その発生メカニズムはまだ完全に解明されていない。「観測データを解析し、気候変動を科学的に解き明かすことも重要です。その成果は予測精度の向上に役立ちます。一方で、観測データと予測モデルを結び付けていかに社会に活かすか、それを考える段階に来ていると思います。気候変動予測は、異常気象による災害の軽減だけでなく、新しいビジネスチャンスとなるなど、大きな可能性を秘めているのです」



トライトンブイの設置風景

トライトンブイは、ロープとおもりで海底に係留されている。ロープに取り付けた装置で深さ750mまでの塩分、水温、流速を、浮体に取り付けた装置で風向、風速、日射、湿度、気温、雨量、気圧を観測する。観測データは衛星通信を利用してリアルタイムで陸上に送信する

トライトンブイ (JAMSTEC) アトラス型ブイ (アメリカNOAAほか) ADCPブイ 2011年8月現在



太平洋とインド洋の熱帯域に展開された係留ブイ観測網

太平洋熱帯域には77基が、インド洋には30基が設置されている。インド洋では46基から成る観測網の展開を目指している



稼働中のアルゴフロートの分布

2011年9月現在、3,235基のアルゴフロートが稼働している。JAMSTECなど日本の機関が投入したアルゴフロートは277基（赤）。アルゴフロートは、10日ごとに深さ2,000mまでの水温や塩分などを観測し、データを人工衛星経由で送信する

アフリカ南部における 気候変動予測システムを構築する

取材協力
山形俊男
アプリケーションラボ
ラボヘッド



アプリケーションラボでは現在、「気候変動予測とアフリカ南部における応用*」というプロジェクトが進行中だ。「JAMSTECがエルニーニョ現象やダイポールモード現象の発生予測研究で培ってきた知見を、南アフリカの社会に役立てようという、新しい試みです」と山形ラボヘッドは解説する。

南アフリカはアフリカ大陸最南端に位置し、東側をインド洋、西側を大西洋に囲まれている。気候は1年を通して比較的穏やかで、トウモロコシやコム

ギ、ワイン用のブドウなどの栽培が盛んだ。しかし、自然に依存した生産体制のため、異常気象に見舞われると大きな被害が出る。南アフリカに影響を及ぼす気候変動のメカニズムを解明して予測システムを確立し、リンボポ州と西ケープ州で発生する異常気象を予測して農作物の被害軽減につなげることが、このプロジェクトの目的である。

なぜアフリカ南部なのか、と疑問に思った人もいるだろう。アフリカ南部の異常気象は、南インド洋

の亜熱帯域で発生する気候変動によって引き起こされる。その気候変動を発見し、「亜熱帯ダイポールモード現象」と名付けたのが、JAMSTECの山形ラボヘッドとスワディン・ベヘラ主任研究員なのだ。「熱帯のインド洋ダイポールモード現象の発生予測を世界に先駆けて成功できたのは、私たちがその現象そのものの発見者であり、誰よりもその現象を理解していたからです。亜熱帯ダイポールモード現象の発生予測を行うのも、私たちの使命なのです」

しかし、山形ラボヘッドは、「このプロジェクトは非常にチャレンジング」ともいう。これまで気候変動予測に成功しているのは、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象など熱帯域の現象だけだ。亜熱帯ダイポールモード現象のような中緯度の気候変動は、熱帯域の現象に比べてとても複雑で、その予測に成功した例はまだない。プロジェクト

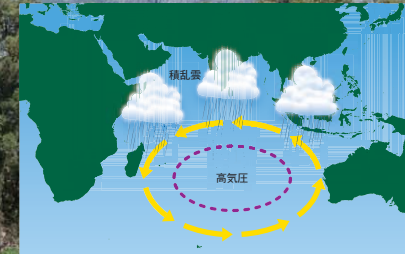
は2010年から3年間で、ちょうど折り返し点に差し掛かったところだ。山形ラボヘッドは、「世界初、やりますよ」と自信に満ちた表情を見せる。

このプロジェクトのゴールはアフリカ南部における気候変動予測システムの確立だが、アプリケーションラボにとっての真のゴールはそこではない。「気候変動の予測情報をインターネットや携帯電話で農業従事者に広く提供し、予測に合わせて作付けを乾期に強いものや雨に強いものに替えることで、計画的な収穫の実現を目指しています。気候変動予測を通して南アフリカの持続的発展に貢献できれば、うれしいですね」

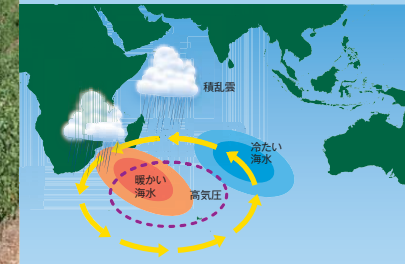
*「気候変動予測とアフリカ南部における応用」は、地球規模の問題を対象として日本と開発途上国が連携して新しい技術を開発し、両国の人材育成を目指す「JST（科学技術振興機構）-JICA（国際協力機構）地球規模課題対応国際科学技術協力事業」（SATREPS）の研究課題として採択された。JAMSTECと東京大学、南アフリカのアフリカ気候地球システム科学応用センターとの共同研究である。



南アフリカ西ケープ州のブドウ畑



平常時
南インド洋の亜熱帯域では、反時計回りの高気圧性の風が吹いている



亜熱帯ダイポールモード現象の発生時
高気圧が西に移動すると、南インド洋の亜熱帯域の西側に暖かい海水が集まり、東側に冷たい海水が集まる。アフリカ南部の降雨量が増加する



南アフリカ・西ケープ州にあるテーブルマウンテンの霧の発生シミュレーション
2008年12月、朝6時ごろの様子を、大気海洋結合モデル「MSSG」を用いてシミュレーションした。西ケープ州はワイン用のブドウの栽培が盛んだ。良質のブドウの生育には、霧が欠かせない。霧の発生をシミュレーションすることで、最適な栽培地や、栽培方法を探る研究も進めている

東南アジアの 天水稲作に気候変動予測を利用。 水問題の解決にも貢献。

アプリケーションラボでは、アフリカ南部のプロジェクトと並行してもう1つ、気候変動予測を農業に役立てることを目指したプロジェクトが進行している。フィリピンの国際稲研究所との共同研究で、2010年から5年間の計画だ。

東南アジアではイネの生産量が頭打ちになっている。かんがいに使える水が不足していることが原因の1つだ。そのため、かんがい稲作から、自然がもたらす水を利用する天水稲作への転換が進められている。しかし天水稲作の場合、高温や干ばつになると収穫量が激減してしまう。そのリスクを回避するため、国際稲研究所では、高温、低温、干ばつ、多雨などさまざまな気象条件ごとに、どの品種の種をいつまいて、いつ植え替え、どの肥料をいつ使用すれば収穫量が最大になるかを予測できる穀物モデル「ORYZA2000」を開発している。「ORYZA2000は経験と実験に裏打ちされた、とても優れた穀物モデルです。ORYZA2000と私

たちの気候変動予測とを組み合わせることで、異常気象の影響を最小限にとどめる天水稲作を実現しようというのが、このプロジェクトの目的です」と佐久間弘文主任研究員は解説する。

東南アジアの気候はエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の影響を強く受けるが、JAMSTECにはその発生予測を成功させてきた実績がある。しかし佐久間主任研究員は、「私たちが提供できる予測情報と農業従事者が欲しい情報には、大きなギャップがあります」という。JAMSTECの先端的な気象海洋結合モデル「SINTEX-F」を用いた気候変動予測では、地球を一辺100kmの格子に区切り、格子点について計算する。一方、農業従事者が知りたいのは自分の水田についての情報だから、その広さは数百mから数kmほどである。「ここは晴れているのに10km離れたところでは雨が降っていることもあるでしょう。100kmごとの点について計算するSINTEX-F

取材協力

佐久間弘文

アプリケーションラボ
気候変動応用ラボユニット
主任研究員

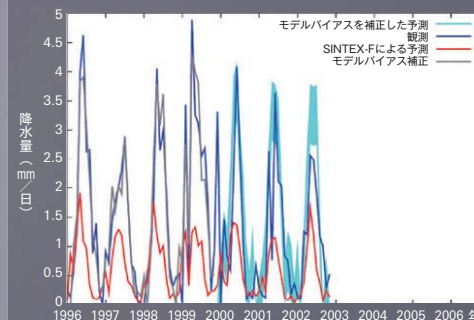
で、個々の水田について気温や降水量を数ヶ月先まで予想することは不可能です。しかも、穀物モデルを精度よく動かすためには、気温は0.6℃の精度で知りたいという要求もあります。無理ですよ」と、佐久間主任研究員は嘆く。「でも、できないとっていいは前に進めません」

佐久間主任研究員には戦略がある。「まず、SINTEX-Fで求めた気温や降水量の予測データと観測データを比較し、場所ごとに誤差の傾向（モデルバイアス）を解析します。そして、モデルバイアスを補正するモデルをあらかじめつくっておくのです。そのモデルを使えば、SINTEX-Fの予測が、各自の水田がある場所の予測に“翻訳”されます。その補正済みの予測データをORYZA2000に取り込めばよいのです」。このプロジェクトではフィリピン、ラオス、インドネシアの3つの実験場を使い、SINTEX-Fの気候変動予測を利用した場合と利用しない場合で収穫量にどのくらいの差が出るかを調べる計画だ。

「SINTEX-Fの気候変動予測は素晴らしいからぜひ使ってください、と一方的に押し付けても駄目」と佐久間主任研究員。「使う側のニーズに合った情報に翻訳して提供することが必要です。それを意識すれば、気候変動予測はさまざまな分野に応用できるでしょう」



国際稲研究所とのプロジェクトで使用しているインドネシア・ジャケナン (Jakenan) の実験場



新手法によるモデルバイアス補正の例

青色は、オーストラリアのバースにおける衛星観測による月平均降水量、赤色は、SINTEX-Fのモデル予測（アンサンブル平均）。観測値とモデル予測値では大きな誤差（モデルバイアス）がある。水色は、新手法によってモデルバイアスを補正して求めた「予測」である。観測値にとても近い曲線になっている。穀物モデルには、このデータを入力する

メートル単位の解像度で 熱や風を予測し、都市設計や 風力利用に役立てる。

取材協力

高橋桂子

アプリケーションラボ
気候変動応用ラボユニット
ユニットリーダー

気候変動予測は、農業に限らず、さまざまな分野への応用が期待されている。その1つが都市計画である。左ページの図は、東京駅周辺の気温分布を、大気海洋結合モデル「MSSG」を用いて予測したものだ。ビルの高さや形状、車やビルのエアコンから排出される熱などの情報を取り込み、気温と風の変化を計算している。エアコンの排熱やアスファルト道路によって熱せられた大気の塊が渦状に上昇したり、ビルの風上・風下側にできた渦がちぎれたり合わさったりしながら流れていく様子や、熱がどこから出てどこにたまっているかが、詳細に分かる。「1辺5mの格子に区切って計算しています」と高橋桂子ユニットリーダー（UL）。「私たちは人の活動を意識した予測を目指しています。それにはメートル単位の解像度が必要です。全球から都市スケ-

ルまで扱うことができる画期的なMSSGと『地球シミュレータ』でなければ、この解像度での予測は実現できません」

近年、都市部の気温が上昇するヒートアイランド現象が問題になっている。こうした予測は、ヒートアイランド現象の原因説明だけでなく、対策の検討にも役立つ。ヒートアイランド対策として屋上緑化や水辺空間を増やすことなどが挙げられているが、どれほど気温を下げる効果があるのか、定量的に調べることは難しい。MSSGを使えば、水辺をつくる場所や大きさ、道路の舗装材料などを自由に変えて、気温が何℃下がるかを予測し、費用対効果を含めて最善の方法を選ぶことができる。「これまでの都市設計は、景観や利便性、治安などの観点で行われてきました。気温や風の予測情報を取り入

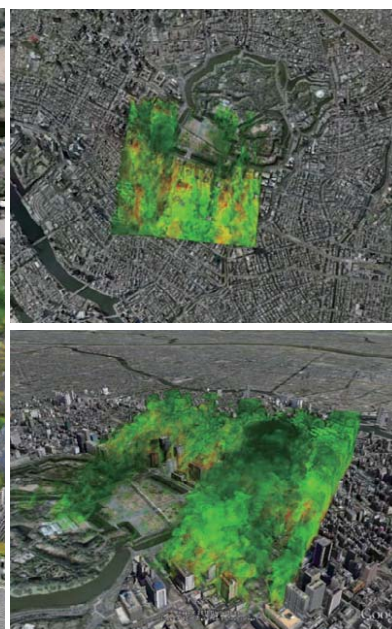
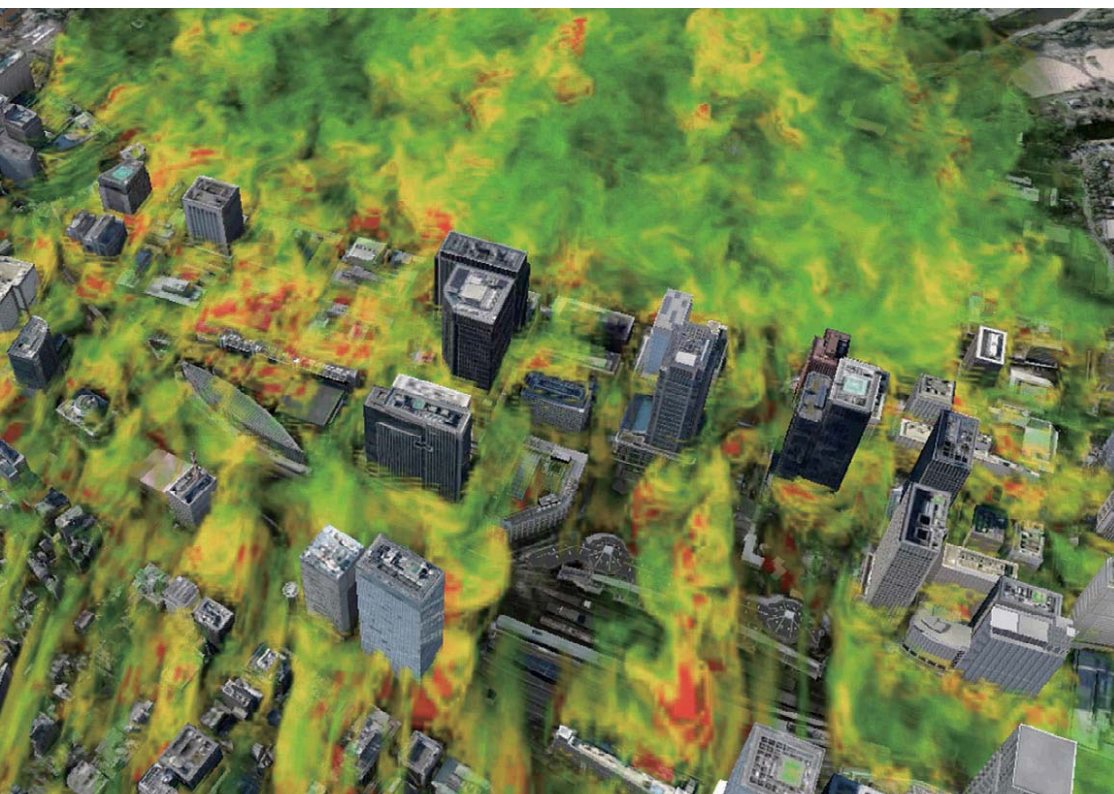
れることで、都市設計が大きく変わるでしょう」

いま再生可能エネルギーに注目が集まっているが、高橋ULらは風力発電にMSSGの予測を応用する研究を以前から進めている。日本の地形は複雑なため、数m移動しただけで風の向きや強さが変わる。「MSSGに地形の詳細な情報を取り込むと、風の向きや強さを予測できます。また、風車に風が当たると渦ができ、隣の風車でできた渦と相互作用して風そのものが変わります。その影響も予測し、発電効率を最大にするには風車をどのように配置したらよいかを評価する技術を開発しています」

高橋ULのもとには、「3日後の風を予測してほしい」という依頼が来ている。風力発電には、風の状態によって発電量が変化してしまうという避けられない問題がある。発電量があらかじめ分かれば、電圧が急変して装置に負荷がかかるのを防いだり、火力や水力の発電量を調整して電力需要に合わせてすることが容易になる。「まずは3日後の風の予測を成功させて、再生可能エネルギーの利用促進に貢献したいですね。そして、10年後、20年後の予測も必要です」と高橋UL。「地球温暖化が進行すると、風の吹き方も変わってくるでしょう。一度設置した風車は、簡単には撤去できません。風力発

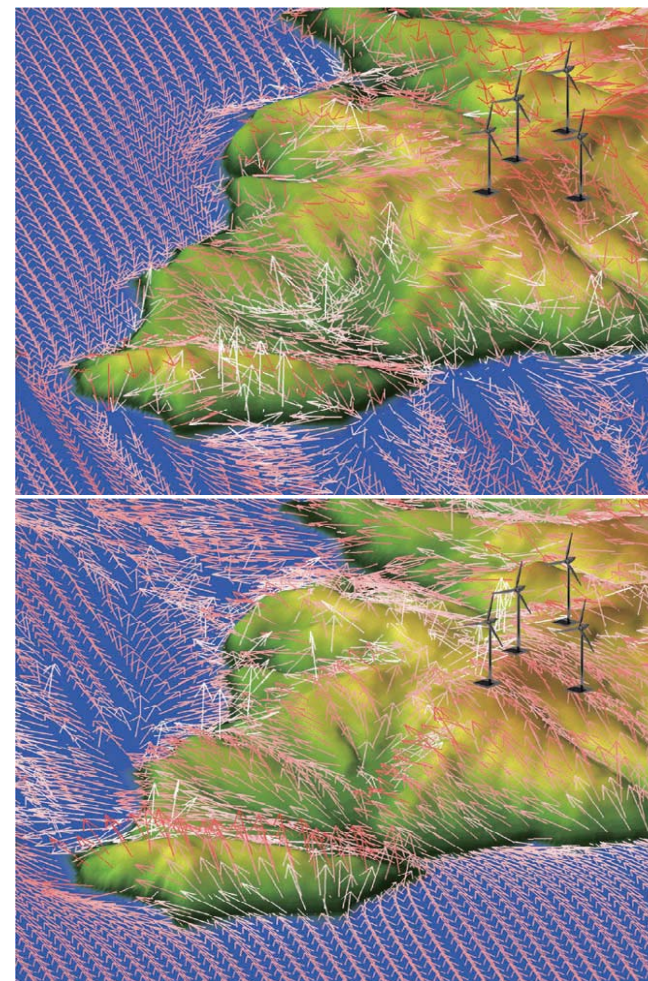
電の立地は、将来の風の予測を踏まえて選定すべきです」

アプリケーションラボの使命は、気候変動や気象の予測を社会に应用すること。しかし高橋ULは、「まだ始まったばかりです。予測を社会に应用するには、研究者と利用者をつなぐコーディネーターが必要です。アプリケーションラボの活動に興味を持たれた方、ぜひ私たちと一緒に、“予測情報を利用すると社会がこんなに変わる”という成功例をつくりましょう」



東京駅周辺の温度分布予測

2005年8月15日午後3時ころの東京駅周辺の気温分布について、10分間の変化を予測したシミュレーションのスナップショット。ビルの高さや形状、道路、車やビルのエアコンから排出される熱などの情報を入力し、気温の分布の変化を計算



効率のよい風力発電を支援する風況予測

図は青森県電飛岬の例。詳細な地形データを取り込み、東から一様に風が吹いた場合と、西から一様に風が吹いた場合について、風向きと強さを予測している。水平方向は10m、鉛直方向は0~50mは5m、50~100mは10mの解像度で計算

気候変動予測は社会を変える

取材協力
山形俊男
アプリケーションラボ
ラボヘッド

アプリケーションラボとは

——アプリケーションラボは、どういう組織でしょうか。

山形：組織横断的な新しい研究体制の1つとして、2008年に設立されました。JAMSTECの地球環境変動領域や地球シミュレーションセンターの研究者で構成されています。「アプリケーション」とは、「応用・実用化」という意味です。JAMSTECが培ってきた基礎的な気候変動予測研究やシミュレーション技術を実業化して実際に社会に応用するまでには、いわゆる「死の谷」があります。それを乗り越えることを念頭に置いた研究を行っています。

——世界各国の研究機関が気候変動予測に取り組んでいます。そのなかでJAMSTECの気候変動予測の特徴は？

山形：JAMSTECの先端的な大気海洋結合モデル「SINTEX-F」によるエルニーニョ現象やダイポールモード現象の予測精度は、現時点で世界最高です。優れた大気海洋結合モデル、高性能のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」、世界中に展開している観測網。それらを統合する睿智こそが、JAMSTECの強みです。

気候変動のメカニズムを理解し、予測精度を上げていくことは、研究としてもとても面白い、重要なことです。一方で、気候変動は猛暑や冷夏、豪雨や干ばつなどの異常気象を引き起こし、社会に大きな被害をもたらします。気候変動や異常気象をなくすることはできませんが、その発生を前もって知ることができれば、被害を軽減することももちろん、場合によってはマイナスをプラスに変えることさえ可能です。予測精度も向上し、気候変動研究は成熟してきました。成果を研究者だけのものにせず、分かりやすいかたちで社会に提供する「気候サービス」の仕組みをつくる段階にきています。それを強く感じたのが、2006年です。

2006年秋からインド洋ダイポールモード現象が発生し、オーストラリアで大規模な干ばつが発生したのです。コムギが不

作となり、大きな損害が出ました。飼料が値上がりし、畜産農家の経営も逼迫しました。オーストラリアの気象局の予測では、ラニーニャ現象のみ着目し干ばつになると出ていなかったの、干ばつへの備えをしていなかったのです。

一方、私たちは2005年11月の時点で、2006年秋に太平洋にはラニーニャ現象が発生するけれども、インド洋にダイポールモード現象が発生するので、その影響でオーストラリアでは干ばつとなる可能性があることを予測していました。それを知った干ばつで莫大な被害を被った人たちが、なぜJAMSTECの予測情報を伝えなかったのかと、気象局を激しく非難したそうです。

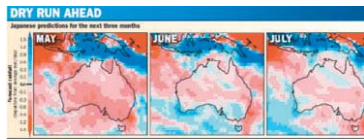
それ以来、オーストラリアの新聞は、自国の気象局の予測ではなく、私たちの研究者を掲載するようになりました。大農場の経営者のなかにはJAMSTECのホームページの「季節予報」を頻りに確認していて、毎月の更新が遅れると催促のメールを送ってくる人もいます。気候変動予測に対する社会からの要請と期待は、とても大きいのです。

しかし、気候変動の予測情報を利用するときには、注意が必要です。予測はまだ完全ではありません。いくつかの機関が公開している予測情報を比較しながら、判断すべきです。

——JAMSTECでは、「季節予報」のほか「海の天気予報」と「化学天気予報」も公開しています。

山形：「海の天気予報」は、日本近海の海面から海底までの海流を予測したもので、2001年から一般に公開しています。2009年にはJAMSTECのベンチャーとして創設されたフォーキャスト・オーシャン・プラスを立ち上げ、海運や造船、遠洋漁業、海洋資源開発、海の安全に携わっている会社や機関などに予測情報を提供しています。

アプリケーションラボでは、「研究と社会との相互的啓発および持続的連携によりイノベーションの実現を目指す」という言葉を掲げています。気候変動予測に限ら



2006年のオーストラリアの大干ばつを伝えるオーストラリアの新聞記事。JAMSTECが公開していた気候変動の予測図を掲載し、干ばつが予測されていたことを告げている

ず、基礎研究を社会に応用することで、新しいビジネスやイノベーションが生まれます。社会からのニーズは基礎研究を進める原動力にもなります。また、ビジネスで得た利益を基礎研究に還元し、その成果を再び社会に戻す。それは科学の本来あるべき姿だと思えます。

人の健康にも貢献

——アフリカ南部や東南アジアの農業に気候変動予測を役立てるプロジェクトが進行中です。日本については、いかがでしょうか。

山形：中緯度の気候は、熱帯域と比べると複雑です。特に日本の気候は、梅雨前線があったり、モンスーンの影響を受けたりと、とても複雑です。まずは、アフリカ南部のプロジェクトで、世界初となる中緯度の気候変動予測システムを確立させます。そして、次は日本の気候にチャレンジしたいですね。

——農業以外には、どのような分野への応用が期待できるのでしょうか。

山形：漁業、畜産業、林業、製造業、都市

設計、保険、健康、水資源管理など、あらゆる産業、あらゆる分野です。

特にいま注目しているのが、人の健康です。ダイポールモード現象が発生すると、アフリカでマラリアだけでなく、眠り病の患者数も増加するという報告があります。眠り病は、ツェツェバエが媒介する原虫によって引き起こされます。ダイポールモード現象が発生すると、アフリカ東部熱帯域で雨が多くなり、ツェツェバエが大量発生するためだと考えられています。ダイポールモード現象の発生があらかじめ分かれば、予防を強化したり、治療薬を備蓄しておくことで迅速な対応が可能になります。

——JAMSTECと医学。新しい展開です。

山形：ぜひ進めたいのですが、私たちに疫学の知識がありませんので、東京大学医学部や長崎大学医学部の研究者との連携を進めています。応用研究を進めるには、応用先の分野にも詳しく、研究者と利用者をつなぐ新しいタイプの人が必要不可欠です。残念ながら、いまのアプリケーションラボにはそういう人材がいません。早急に解決しなければいけない課題です。

地球温暖化も見据えて

——地球温暖化も気候変動の1つと考えてよいのでしょうか。

山形：地球温暖化は、外的な要因により100年単位の長い時間をかけて地球全体の気候が一方に変わっていく現象です。一方、気候変動は大気海洋システムの内的な変動です。地球温暖化は、気候変動とは区別して、「気候変化」と呼ぶべきでしょう。

また、「地球温暖化予測」という言葉も間違っています。地球温暖化の進行は、人がこれからどういう社会を築くかによって変わっていきます。人間圏が絡むために不確実性が極めて高く、検証が可能な科学の世界に収まる予測ではなく、「予想」ともいうべきものです。それに対して、気候変動は自然現象であり数理科学にのみ依存するので、予測です。

——地球温暖化によって気候変動現象の起こり方も変わってきているのでしょうか。

山形：地球全体の気温は、この100年間で0.74℃上昇しました。10年あたりの平均上昇率は約0.07℃ですが、1976年以降の上昇率はそれ以前の2倍になっています。実は、1976年に境に、エルニーニョ現象が頻発し、インド洋ダイポールモード現象

も頻発するようになりました。また、太平洋熱帯域の中央部で海水温が高くなり、その両側に低くなる、「エルニーニョもどき」という新しい気候変動現象も出現しています。地球温暖化に伴って海洋も温暖化し、気候変動現象の発生頻度や発生時期、強度が変動を来しているのです。

——山形ラボヘッドは、海外からの若手研究者とともにインド洋ダイポールモード現象、エルニーニョもどき、亜熱帯ダイポールモード現象など多くの気候変動現象を発見し、命名してきました。まだ発見されていない気候変動現象もあるのでしょうか。

山形：気候変動の予測精度が上がらないのは、まだ見えていない現象があるからかもしれません。地球温暖化に伴って、エルニーニョもどきのような新しい変動現象が出現する可能性もあります。気候変動現象同士の関係も重要です。私たちは、エルニーニョ現象やラニーニャ現象の発生がインド洋ダイポールモード現象の影響を強く受けていることも明らかにしました。気候変動現象同士の関係を理解することは、予測精度の向上にもつながります。

私たちは、このような気候変動現象を生む海をもっと知らなければならない。そのために、地球規模での海洋観測網の整備が不可欠です。

気候変動適応型社会を実現する

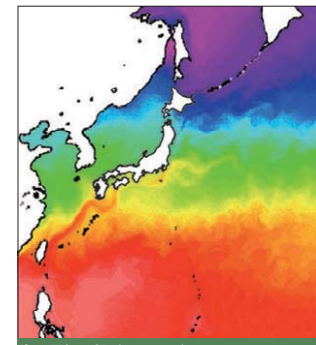
——アプリケーションラボと同様の取り組みは、ほかの国でも行われているのでしょうか。

山形：2009年に開催された第3回世界気候会議で、「気候変動の予測情報を分かりやすいかたちで迅速に社会に提供する気候サービスの仕組みを構築する」という決議が採択されました。「気候サービス」は一躍、世界が注目するキーワードになりました。アプリケーションラボは、世界の動きの一步先を走っています。

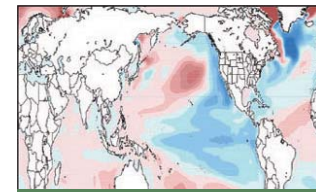
——アプリケーションラボのゴールは？

山形：地球温暖化は確実に進行しています。その影響を受け、気候変動現象や異常気象の発生頻度や発生時期、強度が変わりつつあります。気候サービスによって、いままでに経験したことのない気候変動や異常気象から、皆さんの生命や財産を守ること。それが、私たちアプリケーションラボの使命です。

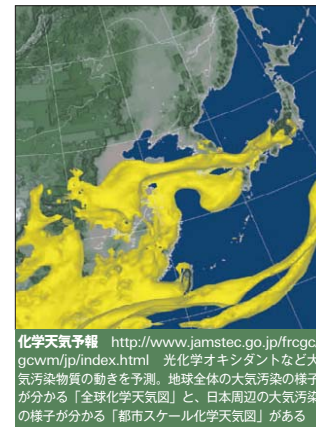
20年前、私がアメリカに渡ったころは、



海の天気予報 (JCOPE)
<http://www.jamstec.go.jp/frcg/jcope/index.html>
日本近海の海面から海底までの海流予測



季節予報 <http://www.jamstec.go.jp/frcg/research/d1/iod/> エルニーニョ、ラニーニャ、インド洋ダイポールモードなどの気候変動の発生予測。海面水温、気温、降水量などの予測情報も公開



化学天気予報 <http://www.jamstec.go.jp/frcg/gcwm/index.html> 光化学オキシダントなど大気汚染物質の動きを予測。地球全体の大気汚染の様子が分かる「全球化学天気図」と、日本周辺の大気汚染の様子が分かる「都市スケール化学天気図」がある

エルニーニョ現象の発生は地震と同様に予測できないと考えられていました。でも、いまでは2年先のエルニーニョの発生さえも高精度で予測できます。この20年間に学術的なブレークスルーがあったからです。気候変動に翻弄されることのない「気候変動適応型社会」の実現も、決して夢ではありません。

BE

氷期に消えたCO₂ ——30年来の謎を解く

寒冷な氷期には、温室効果ガスである
大気中の二酸化炭素 (CO₂) の濃度が低下する。
CO₂はどこへ消えてしまうのか。

近本めぐみ研究員は、
30年来取り組まれているその謎を、
シミュレーションによって解明し、
地球の気候システムを
理解しようとしている。
その研究は、地球温暖化の
予測にも貢献する。

近本めぐみ

地球環境変動領域
地球温暖化予測研究プログラム
古気候研究チーム
研究員



撮影：STUDIO CAG

近本めぐみ (ちかもと・めぐみ)
千葉県生まれ。博士 (地球環境科学)。海
洋研究開発機構 (JAMSTEC) 地球環境
フロンティア研究システム地球温暖化予
測研究領域を経て、北海道大学大学院地
球環境科学研究科大気海洋環境科学専
攻博士課程修了。ミネソタ大学ポスドク
研究員、東京大学気候システム研究セン
ターを経て、2008年より現職

小学校6年生の夏
休みの自由研究。
大日本図書「たの
しい理科」に掲載
された千葉県・
九十九里海岸の
地層を調べた



大学2年生の漁業
実習。左が近本
研究員



教科書に載っている地層を掘る

——理科に興味を持ったきっかけは？

近本：小学校6年生の夏休み、理科の教科書に載っている地層と同じ写真を撮るという自由研究をやりました。教科書の出版社に電話をかけて場所を聞き、家族で九十九里海岸に出掛けて撮影しました。それは、大学で地学を勉強した父のアイデアだと思います。私より父の方が頑張っていました。教科書に載っている地層の現物を見るという体験が、とても楽しかったことを覚えています。理科が好きになり、高校では理数科コースに進みました。——大学ではどのような分野を学びたいと思ったのですか。

近本：高校に電車通学していたとき、汚い川を渡っていました。毎日、それを眺めているうちに水質浄化に興味を持ち、東京水産大学 (現・東京海洋大学) へ進学しました。大学では、水質浄化に関係する授業を受け、有機化学の先生と仲よくなりました。しかし4年生のときに入ったのは、海洋物理の研究室でした。

——それはなぜですか。

近本：3年生の夏、一日中実験を行う有機化学の集中講義がありました。暑さにやられ、実験はつらい! と思いました。そのころ、たまたま海洋物理の授業を取っていて、その授業がとても面白かったのです。海洋物理は、海の水温や塩分がどのように決まるのか、海流がどのように生じるのかなど、海のものの流れを数式で表現します。そのシンプルさに引かれました。高校生のときには物理は苦手と赤点ばかりだったので、まさか自分が物理へ進むとは思っていませんでした。しかし海洋物理は面白くて夢中で勉強しました。

大学には実習船があり、1年生のとき

からクルージングや漁業実習を行います。4年生で研究室に入ってから月に1回ほど相模湾で定期観測を実習船に乗って行います。ところが、私は船酔いがひどいので、まったく仕事できません。これではやっていけない。船に乗らなくてもよいシミュレーション研究へ進もう、と思いました。北海道大学大学院へ進学し、地球規模の海洋炭素循環のシミュレーションを行っている山中康裕先生の研究室に入りました。

——大学院では、どのような研究テーマに取り組んだのですか。

近本：炭素は、二酸化炭素 (CO₂) や有機物などにかたちを変えながら、大気・海洋・陸を循環しています。それが炭素循環です。気候に大きな影響を及ぼす温室効果ガスであるCO₂は、大気から海洋へ吸収されたり、逆に海洋から大気中に放出されたりして、大気と海洋の間を移動しています。

海洋に吸収されたCO₂を含めた炭素の一部は、動植物プランクトンの生物生産を介し有機物や炭酸カルシウムの殻に私たちを変え、最終的にはプランクトンの死骸や糞粒として海底に堆積します。海底では、炭素を海水中に再び戻したり海

底堆積物中に閉じ込める堆積過程が働き、大気と海洋における炭素の総量を調整しています。私は、気候変動によって、炭素の総量がどう変化し、それにに応じて大気中のCO₂濃度がどう変化するかを理解するために、堆積過程をコンピュータのなかで再現するモデルの開発を行いました。

最前線の研究者との出会い

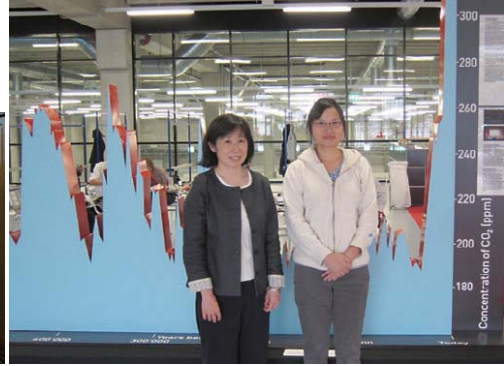
——研究者を目指すようになったのは、いつごろですか。

近本：修士課程を修了した後、JAMSTECに支援スタッフとして就職しました。地球環境フロンティア研究システム地球温暖化予測研究領域 (2009年に地球環境変動領域として組織再編) のグループリーダーを併任された山中先生のもとで、堆積モデルの開発を続けました。そのときの領域長が、眞鍋淑郎先生でした。

——眞鍋先生は、気候変動のシミュレーション研究の先駆者、世界的権威ですね。

近本：そうなのですが、私のような若いスタッフにも気さくに声を掛けてくださり、研究上の相談にも乗っていただきました。眞鍋先生のサイエンスに対する真摯な姿勢に感銘を受けました。好奇心旺盛で、自分の理論に対して強い信念をお

2001年、眞鍋淑郎領域長を囲んで。領域長の後ろが近本研究員。その後ろが、山中康裕グループリーダー



現在所属する古気候研究チームの阿部彩子チームリーダーと、スイス・ベルンで開かれたINQUA（国際第四紀学連合）の学会にて。後ろのグラフは、大気中のCO₂濃度の変動を示す。2007年からその変動メカニズムの解明に、阿部チームリーダーと一緒に取り組んでいる

持ちです。

JAMSTECで眞鍋先生やほかの研究者の方々に刺激を受け、私も独立した研究者になりたい、と思うようになりました。そして山中先生に、「北大に戻って博士号を取りたい」と相談したところ、快く承諾してくださいました。こうして1年で北大に戻り、博士課程で堆積モデルの開発を続けました。

——博士号取得後、海外へ行かれたそうですね。

近本：博士課程のときに共同研究をしていた産業技術総合研究所の松本克美さんがアメリカのミネソタ大学へ移り、「うちの研究室へポストドクとして来ないか」と誘ってくれたのです。松本さんには解析手法から論文執筆まで丁寧に指導いただき、とてもよい研究環境でした。しかし、1年ちょっとで帰国しました。博士課程のときに学生結婚をして、アメリカにいるときに妊娠しました。単身赴任だったので、日本で出産・子育てをすることにしました。しばらくは研究から離れなければいけないと覚悟していたのですが、以前から連絡を取り合っていた東京大学の阿部彩子先生が「一緒に研究しませんか」と誘ってくださいました。

振り返ってみると、私は人との出会いにとても恵まれてきました。

消えたCO₂の謎

——現在、どのような研究をしているのですか。

近本：炭素循環には、過去30年間、さまざまな研究者が挑み、どうしても解明できない謎があります。私も、その謎の解明に挑んでいます。

約2万年前の地球は寒冷で、北米やヨー

ロッパ大陸の広い地域が氷床に覆われた「氷期」でした。その後、地球は現在のような温暖な気候になりました。現在は氷期と氷期の間の「間氷期」だと考えられています。そのような氷期・間氷期が、10万年周期で繰り返されてきました。さらに、氷期・間氷期の気温変化と大気中のCO₂濃度の増減が連動していることが明らかになりました。氷期は間氷期よりも80～100ppmほどCO₂濃度が低くなります。

海洋は大気の約60倍も炭素をためることができると、100ppm分のCO₂は海に吸収されたと考えられます。氷期に海水温が低くなると、CO₂は吸収されやすくなりますが、その効果はせいぜい30ppmほど。残りの約70ppm分のCO₂がどのような仕組みで海に吸収されたのか、それが30年来、謎なのです。

——その消えたCO₂の謎を、どのような手法で解こうとしているのですか。

近本：JAMSTECが東京大学、国立環境研究所と共同で開発した「MIROC」という気候モデルがあります。この気候モデルは、日射量や氷床の分布、大気中のCO₂濃度を条件として与えることにより、地球全体の雲や風、海流や海水温、塩分などを再現することができます。MIROCは温暖化の予測研究で威力を発揮しています。さらにMIROCのすごいところは、現在や未来だけでなく、現在の気候と大きく異なる過去の氷期の気候も再現できることです。

私たちは海洋の炭素循環モデルを開発して、MIROCが描き出した現実に近い氷期の海がCO₂をどのように吸収するのか、シミュレーションを行い、消えたCO₂の謎を解こうとしています。

——CO₂はどこに消えたか予想していま

すか。

近本：氷期には海洋循環が弱まり、中・深層と表層の海水が混ぜられにくくなったと考えています。そのため、中・深層に輸送された炭素が隔離されて海洋表層や大気に戻りにくくなり、結果として海洋の炭素貯蔵能力が高まり、大気中のCO₂をたくさん吸収したのではないかと。このような予想を立て、研究を進めてきました。

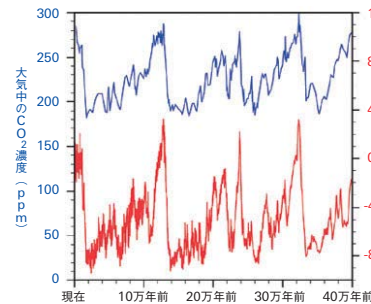
現在、北大西洋のグリーンランド沖や南極周辺は、冷たく塩分の高い高密度の海水が沈み込み、長い時間をかけて全球を巡る深層循環の始点となっています。沈み込んだ海水は、最終的に北太平洋で湧き上がってきます。

一方、氷期には極域での気候の条件が大きく異なり、現在よりも北大西洋の沈み込みが弱かった、あるいは沈み込む深度が浅かった証拠が挙がっています。私は北大西洋の沈み込みが弱くなると、海洋の炭素貯蔵能力が高まると予想してシミュレーションを行いました。しかし、海洋の炭素貯蔵能力はほとんど変化しませんでした。そこでいま、南極周辺の沈み込みに注目して、研究を行っています。

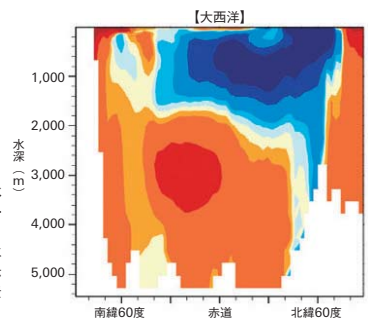
気候システムを統一的に理解する

——今後、研究をどのように進めていきますか。

近本：私たちの目標は、氷期・間氷期の10万年のサイクルをコンピュータのなかで再現することで、気候システムの長い時間スケールにわたる変動を理解することです。日射量に変化したとき、氷床がどのように変化するかは、かなり理解が進んできたと思います。それに対して、氷期に消えたCO₂の謎を含めて炭素循環の理解は、ようやく現実に近い気候モデ



氷期・間氷期の気候変動(赤)と大気中のCO₂濃度(青)の観測データ。氷期の気温低下と連動して大気中のCO₂濃度が80～100ppm低下する。現在との気温差。氷期と現在の気候における海水中の炭素量を比較したシミュレーション。暖色は現在気候よりも氷期に海水中の炭素量が増えている場所を示している。氷期には中・深層に炭素が貯蔵されやすいため分かる



ルによる検証が始まったところです。炭素循環の理解が進めば、氷期・間氷期の再現に大きく近づくことができるはずですよ。

さらに今後は、氷期とは逆の、温暖化した地球の気候についても研究したいと考えています。

——研究室の同じフロアでは、多くの研究者が温暖化のシミュレーション研究に取り組んでいますね。

近本：氷期に深層循環がどう変化したのか、温暖化を研究している人と議論が発展することがあります。逆に、私たち古気候の研究者も、温暖化により極域での海水の沈み込みがどう変化するのか、といった予測研究に貢献できるはずですよ。

——温暖化が進むと、海洋の炭素貯蔵能力はどのように変化するのですか。

近本：海水温の上昇やプランクトンなどの生物生産の変化、さらに深層循環の変化などが海洋の炭素貯蔵能力をどう変化させるのかが議論されています。しかし個々の過程の不確実性は大きく、まだよく分かっていないと思います。氷期の研究と同様に、温暖化の予測研究でも、炭素循環の過程を1つ1つ検証していくことが、気候システム全体を理解する鍵になると思います。

——JAMSTECでは、多くの観測系の研究者も活躍しています。

近本：2010年、海洋堆積物を分析している古海洋環境研究チームと共同研究を行いました。とても面白かったですね。

約1万7500～1万5000年前、氷期から温暖な気候へ移行する時期に、北米大陸を覆っていた氷床が融けることで、一時的に北半球が寒冷な気候に逆行した時代があります。そのときに何が起きたのか。古海洋環境研究チームの岡崎裕典 研究員たちは北太平洋の堆積物を分析することで、当時、北太平洋で海水の沈み込みが起きていた可能性を発見しました。そして、私たち古気候研究チームやハワイ大学国際太平洋研究センター(IPRC)のTimmermann教授がシミュレーションを行い、モデルからも北太平洋での沈み込みが強まることを確認しました(本誌109頁12～13ページ参照)。

古海洋環境研究チームではいま、南極に近い南米チリ沖の堆積物の分析も進めています。私が消えたCO₂の謎を解明する鍵だと考えている南極周辺の海水の沈み込みについても、古海洋環境研究チームや南極海の古環境復元に取り組んでいる研究チームなどと幅広く共同研究をし

ていきたいと思っています。

気構えずに女性研究者として生きる

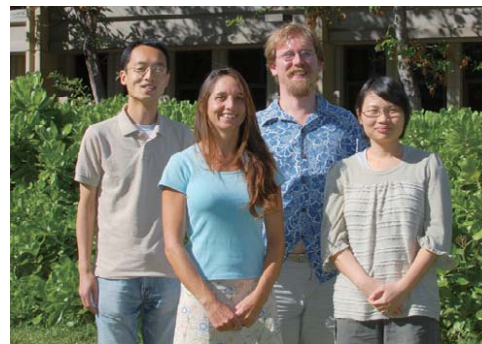
——最後に、研究者を志す『Blue Earth』の読者にアドバイスをいただきたいと思いますが、研究者になるには何が必要ですか。

近本：特別な人が研究者になっているわけではありません。変わり者は多いかもしれませんが……(笑)。研究者も職業の1つにすぎません。興味があれば、気構えずに、研究者を目指せばよいと思います。——子育てと研究の両立は大変ですか。

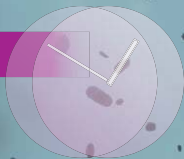
近本：幸い0歳児のときから保育園が見つかり、夫と一緒に子育てをしてきたので、それほど大変ではなかった気がします。

私は以前、仕事のオン・オフの切り替えがあまりうまくできませんでした。しかし一日中、研究のことを考えていても、よい成果は生まれません。いまはオン・オフを切り替えるようにして、仕事と家庭のバランスが取れるようになりました。すると、研究でもよい成果が出るようになりました。——研究者はお薦めの職業ですか。

近本：とても楽しい職業です。ぜひ、もっと多くの女性が研究の世界に入ってきて、サイエンス・コミュニティーを盛り上げてほしいですね。特にシミュレーション研究は、子育て中の女性研究者にとって、とても働きやすい環境です。ネットワークとノートパソコンさえあれば、どこでも研究ができるからです。そのなかでも古気候研究がお薦めです。国際的に女性研究者の割合がとても多いのです。現在気候や温暖化予測の研究では男性が多いのに、「不思議だね」とみんなで話しています。古気候の研究は、とても想像力をかき立てられます。それが多くの女性研究者を引き付けているのでしょう。 **BE**



2010年1月、IPRC訪問。右から近本研究員、IPRCのAxel Timmermann教授とLaurie Menviel研究員、JAMSTECの岡崎裕典研究員。IPRCはJAMSTECとアメリカの2つの研究機関が出資してハワイ大学に設けられた研究センターであり、JAMSTECの多くの研究者が毎年訪れ、アメリカの研究者と共同研究を行っている 写真提供：IPRC



約22億年前

全球凍結した海氷の下 生物は大進化への準備を進めた

約22億年前、青い地球“Blue Earth”に大事件が起きた。全体が氷に覆われた雪玉の地球“Snowball Earth”へと変貌したのだ。

大陸は赤道付近でも氷床に覆われ、海も海水で閉ざされた。地表の気温はマイナス50℃以下。極寒の世界で生物はすべて絶滅してしまったのだろうか――。

陸や海を覆う氷の上をいくら探しても、活動している生物は見当たらない。海水の下へ潜ってみよう。海底を進んでいくと、真っ黒な熱水が激しく噴き出している場所があった。肉眼では見えないが、顕微鏡で観察すると無数の生物がうごめいている。極寒の世界のなかで、生物は温度の高い場所へ逃げ込み、生き延びていたのだ。

当時の生物はまだ、微小で単純な構造の原核生物だった。海底の熱水噴出域は、それらの生物の“避難所”となっただけではなく、大進化の準備を進める“ゆりかご”となった。熱水にたくさん含まれていた元素を利用して、生物は新しい機能を獲得していった。

やがて、全球を覆っていた氷が融け、地球は再びBlue Earthに戻った。その後の地球には、従来よりもサイズが大きく複雑な構造を持つ生物が現れた。あらゆる動植物の祖先である真核生物が誕生したのだ。

太古の海水を復元して、 全球凍結と生物大進化の関係を探る

取材協力：渋谷岳造

システム地球学
プレカンブリアンエコシステムラボラトリー 研究員

全球凍結の後、生物は大進化を遂げた

約46億年に及ぶ地球史では、大規模なマグマ活動や超大陸の形成など、さまざまな事件があった。そのなかでも史上最大級の事件が、約22億年前に起きたらしい。地球全体が凍り付き、陸や海が氷に覆われた「全球凍結」だ。

そして全球凍結が終わった後、生物が大進化を遂げたと考えられている。それまでの生物は、大腸菌のような、細胞核を持たずサイズの小さな原核生物だった。そこに動物の祖先となる真核生物が現れたのだ。細胞核を持つ真核生物は、細胞のサイズも原核生物に比べて大きい。

ただし、真核生物がいつ誕生したのか、よく分かっていない。約21億年前の真核生物の化石が見つかったので、全球凍結が終わった直後に真核

生物が誕生したと考えられている。

約7億5000万年前と約6億3500万年前にも、再び全球凍結が起きたらしい。約6億3500万年前の全球凍結の後、エディアカラ生物群と呼ばれる大型生物が出現した。その後、生物はさらに「カンブリア紀の大爆発」と呼ばれる多様な進化を遂げた。このときも全球凍結の後に生物の大進化が起きたのだ。

岩石に閉じ込められた太古の海水

「多くの研究者が、全球凍結という極限状態が生物に何らかの影響を与え、進化を促したと考えています。それが具体的に何であるかを、世界中の研究者が探っています。私も全球凍結と生物大進化の関係を探りたいと考えています」と渋谷岳造研究員は語る。太古に起きたできごとを、いったいどのような方法で探るのか。

そもそも全球凍結のとき、生物はどこで生き延びたのだろう。マイナス50℃以下という温度では、生物は増殖することが難しい。生物は温度の高いところへ避難したと考えられる。たとえば、海底の熱水噴出域だ。そこでは海底から染み込んだ海水が、マグマに温められ、高温の熱水として噴出している。

「岩石のなかに当時の熱水噴出域の海水が閉じ込められています。それを分析して当時の海水組成を復元することで、全球凍結と生物の大進化の関係を探る計画です」

太古の海水がどのようなかたちで岩石に閉じ込められているのか。海底下の岩石の隙間を熱水が通ると、熱水中の二酸化ケイ素が沈殿して結晶化し、石英ができる。「その石英のなかにガスや水が閉じ込められているのです。そのような水を流体包有物と呼びます。流体包有物には、当時の熱水と海水の情報が含まれています。私は約22億年前を含む、さまざまな年代の流体包有物を何年もかけて集めてきました。そして最近、それらの分析を始めました」

22億年前の海水は塩分が5倍も高かった

渋谷研究員は、東京工業大学の大学院生である斎藤拓也さんとともに、約22億年前の流体包有物を分析して、当時の海水の塩分を導き出した。すると現在よりも約5倍も塩分が高いことが分かった。

氷ができるとき塩分は取り込まれないため、海水や氷床の量が増えるほど海水の塩分は高くなる。海

氷に覆われた全球凍結の時代の海水は、塩分がとても高かったはずだ。

「塩分、すなわち塩化ナトリウムの濃度が高いと、いろいろな元素の陽イオンが陰イオンである塩化物イオンと結び付き、たくさん溶け込むことができるようになります。また、陽イオンであるナトリウムイオンが海底の岩石に吸収され、代わりに岩石からさまざまな元素の陽イオンが出てくる反応が促進されます」

塩分の高い海水が海底から染み込み温められ熱水となって噴き出す過程で、周りの岩石と反応し、さまざまな元素をたくさん溶かし出す。たとえば、銅や鉛、亜鉛などの金属元素を大量に溶かし出した熱水が海底から噴出すると、海水で急冷されて溶けていた成分は硫化物の黒い粒子となる。その黒い粒子を含む熱水は黒煙のように見えることから「ブラックスモーカー」と呼ばれる。

約22億年前の全球凍結のとき、生物が避難した熱水噴出域では、さまざまな元素を豊富に含んだブラックスモーカーが噴き出していたことだろう。

生物大進化の“ゆりかご”

熱水噴出域の海水へ、各種の元素が豊富に供給されることにより、そこに避難していた生物にどのような影響を与えたのだろう。「それまで使っていた元素を別の種類に置換することで、生物が進化するケースがあります」と渋谷研究員は指摘する。

そもそも原始地球の大気や海洋には酸素がなかったと考えられている。地球表層に酸素をもたらしたのは光合成生物だ。そして、大気の酸素濃度が急増したのは、約22億年前の全球凍結後のことだ。それは、急激な温暖化が起きて光合成生物が大繁殖したためだと推測されている。

真核生物の細胞は、酸素を使って呼吸を行い、効率的にエネルギーを生み出すミトコンドリアという細胞内小器官を持つ。真核生物は酸素呼吸を行うために、ある一定以上の酸素濃度を必要とする。全球凍結後の酸素濃度の急増が、真核生物の出現を可能にしたと考えられる。

そして、全球凍結後の光合成生物の大繁殖や真核生物の出現は、さまざまな元素に富んだ熱水噴出域で、その準備が進んだ可能性がある。生物の“避難場所”となった熱水噴出域は、生物大進化の“ゆりかご”でもあったのかもしれない。

「ただし、私たちが流体包有物の分析から突き止めたのはまだ、約22億年前の海水の塩分が高かったという事実だけです。私は1つの石英試料に含まれるガスや流体包有物から、塩分だけでなく、温暖化をもたらす二酸化炭素の濃度、さまざまな元素の量や同位体比など、各種の測定が可能な分析装置の開発を進めてきました」

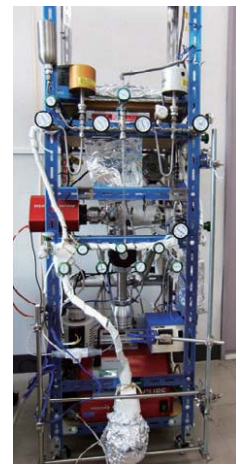
流体包有物の分析は、ほかの研究グループでも行



岩石の隙間を埋める石英（丸で示した部分）



石英のなかに閉じ込められた流体包有物



流体包有物の分析装置

石英を真空中で砕いて流体包有物やガスを抽出し、塩分や二酸化炭素濃度、各種元素の量や同位体比を測定することができる

われてきたが、その目的は熱水噴出域の周りにできるような金属鉱床の研究がほとんどだ。「これまでの流体包有物の研究では、金属元素なら金属元素、ガスならガスしか分析することができませんでした。金属もガスも測定可能な分析装置を開発して、太古の海水組成を復元するべく研究を進めているのは、世界でも私たちだけです。これから、全球凍結が起きた約22億年前だけでなく、その前後を含めた時代の海水組成を時系列的に復元する計画です」

約22億年前の海水は、前後の時代に比べてどのくらい塩分が高かったのか。さまざまな元素がどれくらいの濃度で溶け込んでいたのか。太古の海水組成を復元することで、全球凍結と生物大進化の関係を具体的に議論することが可能となる。そしてそのような研究の進展により、生物が大進化するための条件が明らかになっていくことだろう。 **BE**

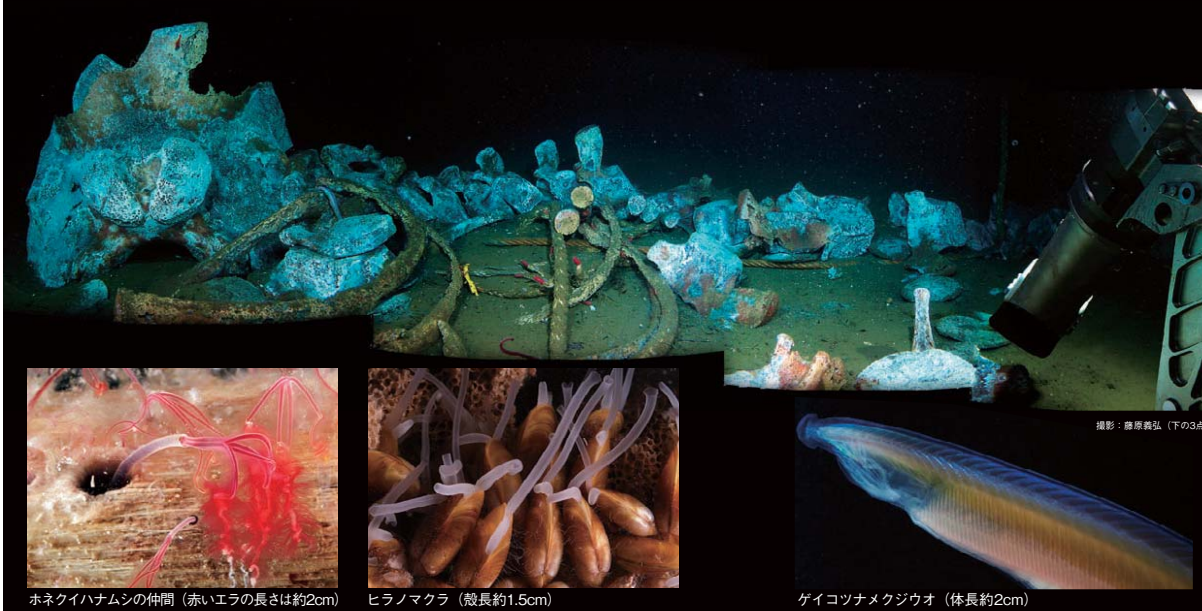
全球凍結した地球の想像図



イラスト：本多冬人



撮影：藤原義弘



ホネクイハナムシの仲間 (赤いエラの長さは約2cm)

ヒラノマクラ (殻長約1.5cm)

ゲイコツナメクジウオ (体長約2cm)

図1 鯨骨生物群集

上は静岡県相模湾の初島沖、水深925mの海底に沈むマッコウクジラの遺骸。沈めてから2年8ヵ月後の様子。骨は化学合成細菌に覆われて白くなり、写真では見えにくいが弓状の肋骨にはホネクイハナムシ類が群生している。右側に見えるのは、無人探査機「ハイパーダルフイン」のマニピュレータ。下は鯨骨生物群集の構成種

図2 鯨骨生物群集の遷移

イラスト：河合晴義



1 腐肉食期：数ヵ月～数年間

2 骨浸食期：数ヵ月～数年間

3 化学合成期：数十年～約100年間

4 懸濁物食期：期間不明

海底に沈んだ鯨が育む生態系

2010年7月17日 第115回地球情報館公開セミナーより



海洋・極限環境生物圏領域
海洋生物多様性研究プログラム
化学合成生態系進化研究チーム
リーダー

藤原義弘

ふじわら・よしひろ。1969年、岡山県生まれ。博士(理学)。筑波大学大学院環境科学研究科修了。1993年、海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)入所。2003～2004年、アメリカ・スクリプス海洋研究所へ留学。広島大学客員准教授。深海生物の撮影も行。著書に『深海のとっても変わった生きもの』(幻冬舎)がある。専門は深海生物の共生と進化

深海底には生物が少なく、1mあたりの生物量は数gほどです。深海には光が届かず、光合成によって光エネルギーから栄養をつくり出すことができないため、表層から落ちてくる生物の遺骸や排せつ物など、わずかな栄養に頼らざるを得ないからです。一方、クジラが死んで海底に沈むと、その巨大な遺骸を食べる生物が集まるほか、骨に含まれる脂質やタンパク質などが嫌氣的に分解されるときに発生する硫化水素をエネルギー源とする生物の群集が生まれます(図1)。この「鯨骨生物群集」の生物量は非常に多く、普通の深海底の数万倍にもなります。

とても変わった生物たちが密集して暮らす鯨骨生物群集についてお話しします。

鯨骨生物群集の移り変わり

クジラが海底に沈んでから土に戻るまで、4つの段階をたどると考えられています(図2)。最初は「腐肉食期」で、サメ

やスタウナギなどが集まってきて、クジラの脂肪や筋肉、内臓など軟組織を消費します。軟組織がなくなって骨が露出すると「骨浸食期」となり、骨に含まれる有機物を栄養源とする生物が現れます。

やがて骨に含まれる有機物を微生物が嫌氣的に分解し始め、それに伴って硫化水素などの化学物質が発生します。硫化水素はヒトや多くの生物にとっては有毒ですが、ある特殊な細菌は硫化水素のエネルギーを利用して有機物を合成することができます。この化学合成細菌を体内に共生させ、自分では餌を取らずに細菌がつくる有機物をもたせて生きる生物が現れます。この時期は「化学合成期」と呼ばれ、海域や水深にもよりますが、数十年～約100年間と非常に長く続くと考えられています。

骨に含まれる有機物がなくなると化学合成期は終わり、骨が単なる付着基質として使われる「懸濁物食期」となります。しかし懸濁物食期は実際に深海で観察さ

海の王者、クジラ。死んで海の底に沈んだその巨体は、非常に珍しい生物が群生する深海のオアシスをつくり出します。

この「鯨骨生物群集」は、海に生きる生物たちが分散・進化するための「飛び石」となってきたと考えられています。

2つの飛び石仮説を中心に、鯨骨生物群集の多様な生物についてご紹介します。

れたことはなく、本当にこういう段階が存在するのか、どれくらいの期間続くのかは分かっていません。この4つの段階の区切りは明確でなく、徐々に移行します。腐肉食期も観察例が少なく、比較的研究が進んでいるのは骨浸食期と化学合成期です。

クジラの骨に生きる奇妙な生物

海にはクジラのほかに大きな生物がいますが、クジラの遺骸だけに特別な生物群が生まれるのには理由があります。1つ目の理由はクジラが地球上最大の動物であること、2つ目の理由は骨の内部に大量の脂質が含まれていることです。微生物による脂質分解はゆっくり進むため、硫化水素が長期間にわたって少しずつ出できます。こうして長い間一定の環境が維持されるため、クジラの骨に特化した生物が成長して子孫を残すことができるのです。

鯨骨生物群集のなかでも変わっている生物の1つが、ホネクイハナムシです(図1)。

ホネクイハナムシはゴカイの仲間ですが、口や胃、肛門はなく、植物の根のような構造をクジラの骨のなかに張り巡らせて栄養を吸収しています。骨の外に赤いエラを伸ばしているのは、すべて雌です。雄はとても小さく、幼生とほぼ同じ大きさのまま成熟して、雌の体の表面に付着して暮らします。

ゲイコツナメクジウオも変わっています(図1)。ナメクジウオ類はヒトと同じ脊索動物ですが、脊椎を持たず、最も原始的な脊索動物です。普通のナメクジウオは温暖で水のきれいな浅瀬にいますが、ゲイコツナメクジウオだけは深海、しかも腐敗したクジラの遺骸の下にある堆積物のなかで暮らしています。興味深いことに、ゲイコツナメクジウオはナメクジウオのなかでも系統が最も古いグループに属しています。

地理的飛び石仮説

鯨骨生物群集は、1987年にカリフォルニア沖1,240mの海底で初めて見つかりまし

た。鯨骨生物群集が目ざされたのは、そこに暮らす生物たちが珍しいだけではありません。クジラの骨が、化学合成生物群集を構成する生物が分散するための飛び石になっているのではないかと「飛び石仮説」が提唱され、世界の注目を集めました。

海底には、硫化水素やメタンを含む海水が地下から出ている熱水噴出域や湧水域があります。その周りには鯨骨生物群集と同じように、化学物質のエネルギーに基づいた特殊な生物群集が形成されています。熱水噴出域や湧水域は、基本的にプレート(地球表面を覆う十数枚の岩板)の境界にしか点在していませんが、世界のどこでもよく似た種類の生物が見られます。たとえば日本周辺とインド洋の中心にある2つの熱水噴出域では、遺伝子的に同種の生物が発見されています。

生物は卵や幼生が海流に運ばれて分散しますが、遠く離れた、しかも点在する別の熱水噴出域まで直接たどり着くのは難しいでしょう。一方、クジラは世界中に暮らしているのだから、鯨骨生物群集はどこにでもできる可能性があります。もし熱水噴出域のそばにクジラの骨があれば、生物は環境が似ているクジラの骨にすま着くでしょう。そしてクジラの骨を飛び石として移動していき、やがて遠く離れた熱水噴出域までた



図3 クジラの骨に群生するサツマハオリムシ
鹿児島湾にあるサツマハオリムシの群生地
の近くにクジラの骨を沈めたところ、遺伝
的に同種のサツマハオリムシがクジラの
骨にも着生し、地理的飛び石説を支持す
る結果となった



図4 サツマハオリムシの産卵
クジラの骨に着生したサツマハオリムシを
研究室で飼育したところ、白い卵を大量に
産んだ。水槽内で新しい個体も生まれ、子
孫を残せることが明らかになった

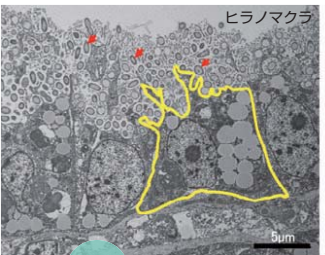


図5 ヒロノマクラとホソヒロノマクラにおける化学合成細菌の共生
エラの上皮細胞の電子顕微鏡写真で、黄色い線は細胞膜、赤い矢印は化学合成細菌を示す。ヒ
ロノマクラはエラの上皮細胞の表面を複雑にして表面積を広げ、その間に化学合成細菌を共生
させている。ホソヒロノマクラは、エラの上皮細胞内部に化学合成細菌を共生させている
(Fujiiwara Y. et al. (2010) PLoS One 5:e11808より引用)

どりに着けるものもいるのではないかと考えら
れます。これが、地理的飛び石仮説です。
実際に、熱水噴出孔生物群集と鯨骨生
物群集には、遺伝的に同種の生物がいま
す。私たちが鯨骨生物群集の研究を始
めた最初の動機は、まさにこの飛び石仮
説を証明したいということでした。

クジラの骨を沈め、 生物を調べる

2002年、14頭のマッコウクジラが鹿児島
県大浦海岸の浅瀬に乗り上げるとい
う事件がありました。このうち12頭の遺骸が
薩摩半島の野間岬沖に沈められたとい
うニュースを聞いたとき、このクジラの遺骸
を調べれば飛び石仮説を検証できるの
ではないか、と思いました。鹿児島湾には湧
水域があり、サツマハオリムシという化学
合成細菌を共生させている生物がいます。
クジラの骨が飛び石として働けば、野
間岬沖のクジラの骨にもサツマハオリムシ
が現れるはずでした。

2002年から2010年にかけて複数回、ク
ジラの骨を船に引き上げて調査を行いま
した。クジラの骨は強烈な悪臭がします。防
護眼鏡と防毒マスクを付けても目が痛くて
仕方ないほどです。ほかの乗組員の迷惑
になるので、臭いが漏れないように船のデ
ッキにあるコンテナに閉じこもり、過酷な
状態で作業しました。

しかし、野間岬沖のクジラの骨からは、
飛び石仮説を支持する結果は得られませ
んでした。サツマハオリムシは見られず、独
自の生物群集ができあがっていたのです。

私たちは、鹿児島湾のサツマハオリム
シ群生地のすぐ近くにクジラの背骨を沈め

る実験も行いました。飛び石仮説が正しく
なければ、サツマハオリムシは現れないは
ずです。ところが、2005年に沈めて毎年1
個ずつ背骨を回収して調べたところ、1年
目からサツマハオリムシが着生し始め、3
年目には337個体にもなっていました(図3)。
遺伝子を調べると、すぐ隣のサツマハオリ
ムシと完全に一致しました。

さらに、回収したサツマハオリムシを飼
育したところ、卵が産まれて小さい個体も
出現しました(図4)。つまり、たまたまク
ジラの骨に付いたサツマハオリムシでも、
次の世代を残すことができたのです。クジ
ラの骨は、場合によっては地理的飛び石
として機能し得ることを、世界で初めて証
明しました。

進化的飛び石仮説

最近、もう1つの飛び石仮説が注目され
ています。深海の熱水噴出域に生息して
いるシンカイヒバリガイ類は、浅い海に暮
らすムール貝と同じイガイの仲間です。深
海の熱水噴出域の環境に適応し、エラの
細胞の内部に化学合成細菌を共生させて
います(図6)。シンカイヒバリガイ類がこ
こまで進化するには、克服しなければなら
なかったことが2つあります。1つは深海の
水圧に耐えること、もう1つは高濃度の硫
化水素という非常に厳しい環境に適応す
ることです。その進化において、深海に沈
んだクジラの骨が利用されたのではない
かと考えられています。これは「進化的飛
び石仮説」と呼ばれています。

沿岸に暮らしていたイガイが、流木に付
いて沖に流されることがあります。流木は、
やがて海底に沈みます。ほとんどの貝は流
木が沈んだ時点で高い水圧や低温のため
に死にますが、なかには生き延び、水圧に
適応していくものもいるでしょう。やがて
沈木は微生物に分解され、硫化水素が発
生します。硫化水素は普通のイガイにと
っては有毒ですが、その環境に適応するも
のが現れたのでしょう。そして、沈木の近
くにクジラの骨があれば、そこに移動す
ることがあるでしょう。クジラの骨の周り
は、沈木の周りより硫化水素の濃度が高
なっていますが、そのような環境にも適
応するものが現れます。やがて、さらに高濃
度の硫化水素がある環境で生息できるよう
に進化したものが、熱水噴出域周辺で暮
らすようになったのでしょう。これが、進

化的飛び石仮説の骨子です。

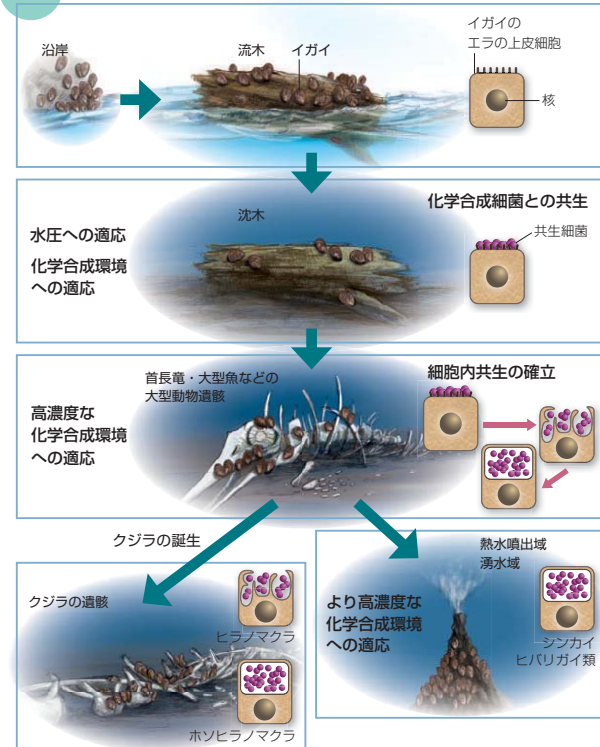
進化の過程が見えてきた

進化的飛び石仮説の検証にあたって、
私たちは化学合成細菌の共生に注目しま
した。共生は、生物の進化に大きな役割
を果たしてきました。遠い昔、真核生物の
祖先はα-プロトバクテリアという細菌を
細胞のなかに取り込みました。それが私
たちの細胞のなかにあるミトコンドリアで、
この共生によって酸素呼吸が可能になり
ました。さらに、ミトコンドリアを持つ真
核生物が、光合成によって有機物をつくり
出すシアノバクテリアを細胞のなかに取り
込みました。そうして生まれたのが、葉緑
体を持つ植物です。シンカイヒバリガイ
類のエラには化学合成細菌が共生してい
ますが、やがて共生細菌がミトコンドリア
や葉緑体のような細胞内の小器官となり、
自ら化学物質のエネルギーを利用できる
真核生物が生まれるかもしれません。実
際、ある貝の共生細菌は、単独では生き
られないほど減少しています。

鯨骨生物群集には2種類のイガイの仲
間、ヒロノマクラ(図1)とホソヒロノマ
クラがあります。どちらも化学合成細菌を
共生させていますが、その共生様式が違
います。ヒロノマクラがエラの細胞の表
面に化学合成細菌を共生させているの
に対し、ホソヒロノマクラは細胞の内
部に共生させているのです(図5)。ヒ
ロノマクラとホソヒロノマクラの違いは、
硫化水素がある環境へ適応しているとい
う進化の過程を示していると考えていま
す。

沿岸域のイガイは化学合成細菌を共生
させていません。一方、硫化水素を発生
している沈木にいるイガイの仲間は、エ
ラの細胞の表面に化学合成細菌を共生
させています。餌は乏しくても硫化水素
がある環境で効率的にエネルギーを得る
ためには、化学合成細菌を共生させる
必要があったのでしょう。クジラの骨
では、沈木より高濃度の硫化水素が発
生するため、より多くの化学合成細菌
を維持することができます。その結果、
細胞の表面を複雑に変形させて化学合
成細菌をたくさん共生させるものや、
化学合成細菌を細胞の内部に取り込
んでしまうものが現れました。前者の
タイプがヒロノマクラ、後者のタイプ
がホソヒロノマクラです。鯨骨生物群
集では、両方のタイプが見られますが、

図6 イガイ類の共生関係の進化



らに高濃度の硫化水素がある熱水噴出域
や湧水域では、シンカイヒバリガイ類の
ように化学合成細菌を細胞の内部に共生
させているタイプが主流になります。

遺伝子の解析からも、3種のなかでヒ
ロノマクラが系統的に最も古く、ホソヒ
ロノマクラ、シンカイヒバリガイ類の順
で新しくなっていることがわかりました。
共生関係の考察や遺伝子解析の結果か
ら、進化的飛び石仮説は正しく、化学合
成生物群集の生物進化においてクジラ
の骨が飛び石の役割をしていることが
できます。

首長竜が飛び石になった?

しかし、進化的飛び石仮説には反論も
あります。熱水噴出域にイガイの仲間
が現れたのは、クジラの祖先が生ま
れるよりもずっと前であり、クジラ
の骨が進化の場となったとは考えら
れないというのです。

その後、北海道から非常に面白い化石
が発見されました。クジラの祖先
が現れるより古い時代に生息していた
首長竜の化石

に、熱水噴出域でしか発見されていない
貝の仲間の化石が見つかったのです。
首長竜の遺骸に依存した生物群集の
発見例は限られているので、いまは
まだ推測にすぎませんが、首長竜
のような大型生物が進化の場にな
り、化学合成生態系の生物たちが
進化したと考えられるようになりました。

鯨骨生物群集には非常に古い形質を持
つものが多いのですが、そうした生
物たちは首長竜などの骨の周りに暮
らしていた生物たちの子孫で、進
化の袋小路に閉じ込められた「生
きた化石」かもしれません。

化学合成生物群集を構成する生物
だけでなく、すべての海洋生物の
進化の謎を解く鍵になるような生
物が、鯨骨生物群集の第1段階の
腐肉食期から継続的に調べると、
クジラの遺骸を沈めた直後から定
期的に調査する計画も進んでいま
す。鯨骨生物群集が存続する100
年余りの間に何が起きているのか、
生物の進化や多様性の側面から
研究を進めたいと思っています。

研究を進めたいと思っています。

特集「気候変動予測は社会を変える」は、いかがだったでしょうか？アプリケーションラボの山形俊男ラボヘッドをはじめとするJAMSTECが誇る第一線の研究者によるさまざまな観点からの最新の研究成果の解説は、なかなか読み応えがあったと思います。「異常気象」とは人の一生の間にまれにしか起こらない現象とのことですが、最近のニュースには「観測史上最大の……」という言葉がたびたび出てきて、とても気になっていました。本誌では、「地道な研究の積み重ねにより、異常気象の発生を予測できるようになる」と述べられており、とても心強く思いました。さて、2011年7月28日付の中国「人民網日本語版」によると、中国が建造した有人潜水艇「蛟龍（ジャオロン）号」は、北京時間の7月26日午前6時12分、水深5,038.5mまで潜航したと伝えてあります。7月28日には、最大水深5,188mに到達したそうです。昨年の試験ではバッテリーや着水揚収装置のトラブルなどがあったということでしたが、今年は順調(?)に潜航試験が進行しているようです。

ただ、「蛟龍号」が計画通り最大潜航深度7,000mまで到達すると、日本の誇る「しんかい6500」は「世界最大深度の有人潜水艇」というキャッチフレーズを外さなくてはならなくなり、とても残念な気がします。「しんかい6500」は、運航スタッフの不断の努力により、建造から現在まで無事故で運航され、しかも大幅に性能がアップしています。しかし、東北地方太平洋沖地震の震源域では、「しんかい6500」では調査が不可能な水深7,000mを超える海域も多く存在しています。編集部としては、それらの海域で潜航調査を行うことができる新しい有人潜水調査船の建造に関し、多くの要望や議論が起こることを望んでいます。(T. T.)

「Blue Earth」定期購読のご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>

1年度あたり6号発行の「Blue Earth」を定期的にお届けします。

■申し込み方法

EメールかFAX、はがきに①～⑤を明記の上、下記までお申し込みください。

- ① 郵便番号・住所 ② 氏名 ③ 所属機関名(学生の方は学年)
 - ④ TEL・FAX・Eメールアドレス ⑤ Blue Earthの定期購読申し込み
- *購読には、1冊300円+送料が必要となります。

■支払い方法

お申し込み後、振込案内をお送り致しますので、案内に従って当機構指定の銀行口座に振り込みをお願いします(振込手数料をご負担いただけます)。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。

平日10時～17時に限り、横浜研究所地球情報受付にて、直接お支払いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付けておりません。詳細は下記まで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 事業推進部 広報課
 TEL.045-778-5406 FAX.045-778-5498
 Eメール info@jamstec.go.jp

ホームページにも定期購読のご案内があります。上記URLをご覧ください。

*定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号(118号)までとさせていただきます。
 バックナンバーの購読をご希望の方も上記までお問い合わせください。

■バックナンバーのご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>



*お預かりした個人情報、「Blue Earth」の発送や確認のご連絡などに利用し、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。

JAMSTEC メールマガジンのご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/mailmagazine/>

JAMSTECでは、ご登録いただいた方を対象に「JAMSTECメールマガジン」を配信しております。イベント情報や最新情報などを毎月10日と25日(休日の場合はその次の平日)にお届けします。登録は無料です。登録方法など詳細については上記URLをご覧ください。

海と地球の情報誌 Blue Earth

第23巻 第4号(通巻114号) 2011年9月発行

発行人 山西恒義 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部
 編集人 溝澤巨彦 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部 広報課
 Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 有限会社フォトンクリエイト
 取材・執筆・編集 立山 晃(p1,p20-27)/鈴木志乃(p2-19)/佐藤ひとみ(p28-31)
 デザイン 株式会社デザインコンピビア(AD 堀井一男/岡野祐三/飛鳥井平右ほか)

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

Eメールアドレス info@jamstec.go.jp

*本誌掲載の文章・写真・イラストを無断で転載、複製することを禁じます。

賛助会(寄付)会員名簿

平成23年9月30日現在

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、寄付を頂き、支援していただいております。(アイウエオ順)

株式会社IH	株式会社カイショー
株式会社アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド	株式会社海洋総合研究所
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	海洋電子株式会社
株式会社アイケイエス	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アイフエンタープライズ	鹿島建設株式会社
株式会社アクト	川崎汽船株式会社
株式会社アサツディ・ケイ	川崎重工株式会社
朝日航洋株式会社	株式会社環境総合テクノス
アジア海洋株式会社	株式会社開電工
株式会社アルファ水工コンサルタント	株式会社キュービック・アイ
泉産業株式会社	共立インシュアランス・ブローカーズ株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	共立管財株式会社
株式会社工ス・イー・エイ	極東製業工業株式会社
株式会社SGKシステム技研	極東貿易株式会社
株式会社NTTデータ	株式会社きんでん
株式会社NTTデータCCS	株式会社熊倉組
株式会社NTTファシリティーズ	クローパテック株式会社
株式会社江ノ島マリコンポレーション	株式会社グローバルオーシャンテック
株式会社MTS雪氷研究所	KDDI株式会社
有限会社エルシャンテ追浜	京浜急行電鉄株式会社
株式会社OCC	株式会社構造計画研究所
沖電気工業株式会社	神戸イベント株式会社

広和株式会社	セナーアンドバーンス株式会社
国際気象海洋株式会社	株式会社損害保険ジャパン
国際警備株式会社	第一設備工業株式会社
国際石油開発帝石株式会社	大成建設株式会社
国際ビルサービス株式会社	大日本土木株式会社
五洋建設株式会社	ダイハツディーゼー株式会社
相模運輸倉庫株式会社	太陽日酸株式会社
佐世保重工業株式会社	有限会社田浦中央食品
株式会社サノヤス・ヒシノ/明昌	高砂熱学工業株式会社
三建設備工業株式会社	株式会社竹中工務店
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ	株式会社竹中土木
JFEアドバンテック株式会社	株式会社地球科学総合研究所
株式会社JVCケンウッド	中国塗料株式会社
財団法人塩事業センター	株式会社鶴見精機
シナノン株式会社	株式会社テザック
清水建設株式会社	寺崎電気産業株式会社
シュルベルベルジ株式会社	電気事業連合会
株式会社商船三井	東亜建設工業株式会社
社団法人信託協会	東海交通株式会社
新日鉄エンジニアリング株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社
東京海上日動火災保険株式会社	新日本海事株式会社
須賀工業株式会社	東京製綱繊維ロープ株式会社
鈴鹿建設株式会社	東北環境科学サービス株式会社
スプリングエイトサービス株式会社	東洋建設株式会社
住友電気工業株式会社	株式会社東陽テクノカ
清進電設株式会社	東洋熱工業株式会社
石油資源開発株式会社	株式会社中村鉄工所
セコム株式会社	西芝電機株式会社

西松建設株式会社	株式会社フジタ
日油技研工業株式会社	富士通株式会社
株式会社日産クリエイティブサービス	富士電機システムズ株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	物産不動産株式会社
日本SGI株式会社	古河電気工業株式会社
日本海洋株式会社	古野電気株式会社
日本海洋掘削株式会社	松本徽章株式会社
日本海洋計画株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本海洋事業株式会社	マリンサポート株式会社
社団法人日本ガス協会	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本興亜損害保険株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
日本サルヴェージ株式会社	株式会社マルト
社団法人日本産業機械工業会	三鈴マシナリー株式会社
日本水産株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
日本電気株式会社	三井造船株式会社
日本ビューレット・バックカード株式会社	三菱重工業株式会社
電気事業連合会	株式会社三菱総合研究所
東亜建設工業株式会社	株式会社森京介建築事務所
東海交通株式会社	八洲電機株式会社
洞海マリンシステムズ株式会社	郵船商事株式会社
新日本海事株式会社	郵船ナブテック株式会社
東京製綱繊維ロープ株式会社	ユニバーサル造船株式会社
東北環境科学サービス株式会社	
東洋建設株式会社	
株式会社東陽テクノカ	
東洋熱工業株式会社	
株式会社中村鉄工所	
西芝電機株式会社	

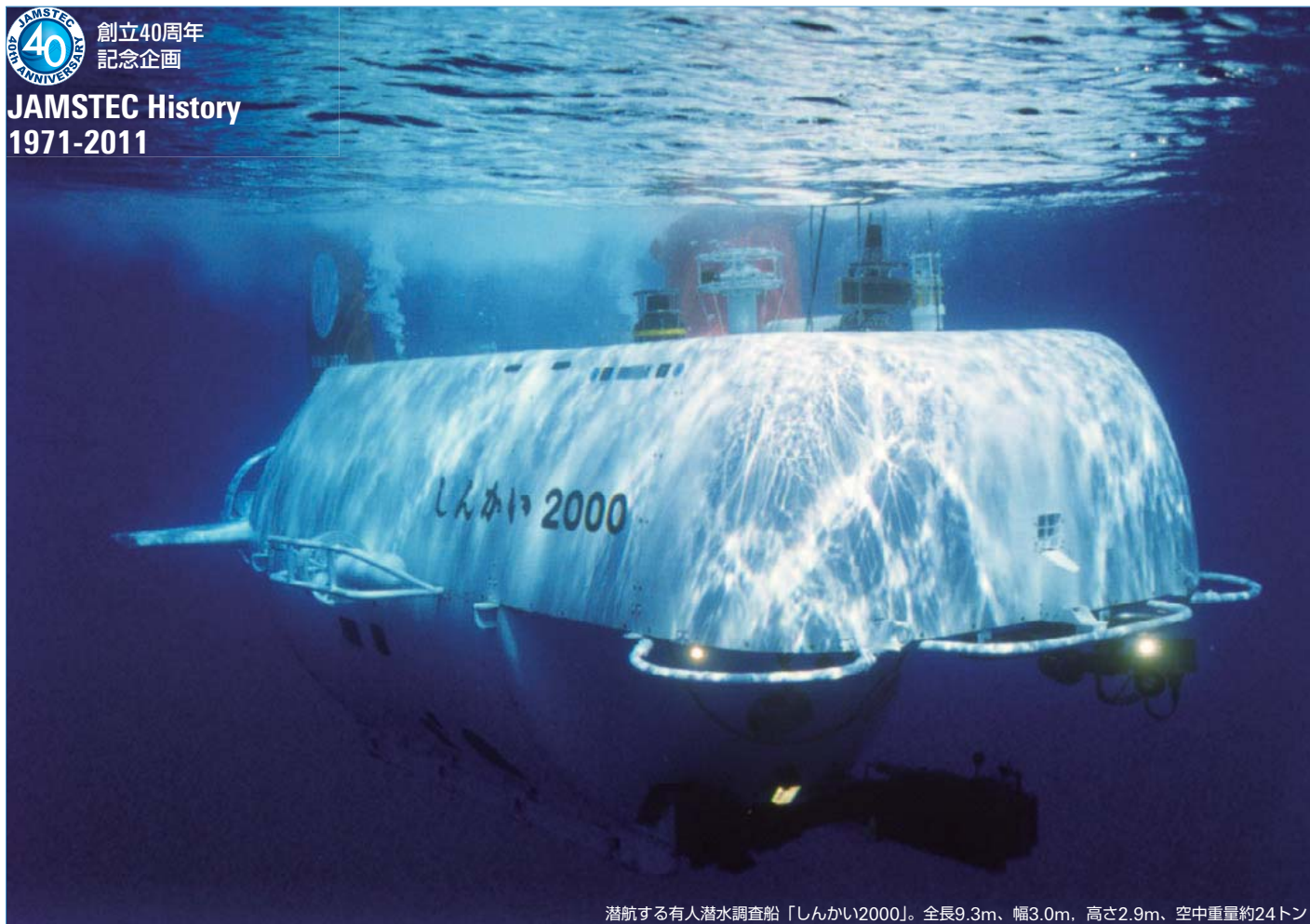
独立行政法人 海洋研究開発機構の研究機関

横須賀本部	〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町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番25 TEL. 045-778-3811 (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	〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号 富国生命ビル23階 TEL. 03-5157-3900 (代表)
国際海洋環境情報センター	〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3 TEL. 0980-50-0111 (代表)



創立40周年
記念企画

JAMSTEC History 1971-2011



潜航する有人潜水調査船「しんかい2000」。全長9.3m、幅3.0m、高さ2.9m、空中重量約24トン

1981年 有人潜水調査船 「しんかい2000」

日本の海洋開発・海洋研究の推進には、6,000m潜水可能な有人潜水調査船の建造が必要である——1973年、海洋開発審議会で、そう提言されました。日本周辺には、海洋プレートが陸側のプレートの下に沈み込んでいる海溝があります。そこでは、巨大地震が繰り返し起きています。2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震も、日本海溝で起きた海溝型地震です。海溝は深く、その調査には、6,000m級の潜航能力が求められるのです。

しかし当時、日本の有人潜水調査船は、1968年に完成した「しんかい」のみ。その最大潜航深度は600mです。一気に6,000mを目指すのは困難だとし、まず2,000m級潜水調査船の開発を行うことになりました。

そうして1981年に完成したのが、「しんかい2000」です。試験・訓練航海では、電線コネクターからの漏水などのトラブルが発生。運用方法についても試行錯誤が繰り返されました。問題を一つ一つ解決し、1983年7月から調査研究潜航を開始。すると、相模湾での化学合成生物シロウリガイの発見、小笠原明神海丘や沖縄トラフでの熱水鉱床の発見など、それまでの科学的常識を覆すような成果を次々と達成。研究者が深海に行き、実際に目で見ることの意義を、強烈に印象づけました。



乗組員は3人で、中央に見える球形の耐圧殻の部分に搭乗する



「しんかい2000」を搭載した支援母船「なつしま」

「しんかい2000」は、2002年11月11日の潜航を最後に活動を休止。潜航回数は1,411回、総潜航時間は7,527時間39分でした。

「しんかい2000」で培った技術を詰め込んだ「しんかい6500」は1989年に完成し、現在も活躍しています。「しんかい2000」の母船として建造された海洋調査船「なつしま」は、3,000m級無人探査機「ハイパードルフィン」の母船として活躍中です。次号の『Blue Earth』では、就航30周年を迎えた「なつしま」を特集します。



独立行政法人
海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

定価300円 (税込)