

海と地球の情報誌

# Blue Earth

ISSN 1346-0811  
2012年8月発行  
隔月年6回発行  
第24巻 第2号  
(通巻118号)

## 118

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

# 東北地方 太平洋沖地震に関連する JAMSTECによる調査・研究 その成果と今後

透明球有人潜水船で新領域を拓く

深海のUFO!? メンダコ

海洋循環から環境変動に迫る

有人潜水調査船「しんかい6500」が発見した海底の亀裂。東北地方太平洋沖地震の震源海域である日本海溝陸側斜面、水深5,351m。亀裂は、幅、深さともに約1mで、南北方向に少なくとも約80m続いていた。2006年と同じ場所で潜航調査を行ったときには亀裂は見つかっていないため、東北地方太平洋沖地震を含む一連の地震活動で生じたものと思われる

# 東北地方太平洋沖地震に 関連するJAMSTECによる 調査・研究 その成果と今後

2011年3月11日、マグニチュード（M）9.0の超巨大地震が宮城県牡鹿半島沖の日本海溝で発生。

最大震度7という大きなゆれが襲い、さらに巨大津波によって甚大な被害が出た。

日本海溝でいったい何が起きたのか、地震・津波発生の詳細なメカニズムを解明するため、JAMSTECでは地震発生直後から緊急科学調査を実施。また、地震に伴って発生した福島第一原子力発電所の事故に関して、国の要請を受け周辺海域の放射線モニタリング調査を行った。さらに2012年4～5月には、地球深部探査船「ちきゅう」による震源域の掘削を実施した。

東北地方太平洋沖地震に関連するJAMSTECの調査・研究の成果、そして今後の取り組みを紹介する。

## 1 特集

**東北地方太平洋沖地震に  
関連するJAMSTECによる  
調査・研究  
その成果と今後**

## 18 Aquarium Gallery

沼津港深海水族館  
深海のUFO!?——メンダコ

## 20 私が海を目指す理由

海洋循環から環境変動に迫る

額綱慎也  
地球環境変動領域 海洋環境変動研究プログラム  
海洋循環研究チーム 主任研究員

## 24 Blue Earth Time Travel

2018年  
透明球有人潜水調査船で  
知られざる生態系を探る

平朝彦  
海洋研究開発機構 理事長

## 28 Marine Science Seminar

生物多様性  
海洋生態系の仕組みと成り立ちを知る  
土屋正史

海洋・極限環境生物圏領域  
海洋環境・生物圏変遷過程研究プログラム  
同位体生態学研究チーム チームリーダー（技術研究副主任）

## 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

2005年  
地球深部探査船「ちきゅう」完成

この記事は以下の発表・講演などをまとめたものです。

- 「東日本大震災 緊急調査報告会 ～緊急調査の成果と今後の展望～」  
2011年11月20日開催
- 平成23年度海洋研究開発機構研究報告会「JAMSTEC 2012」  
—新しい海洋立国への道— 2012年3月14日開催
- 「ブルーアース2012」2012年2月22・23日開催
- 公開セミナー「ちきゅう」による東北地方太平洋沖地震の  
震源調査掘削 2012年5月12日開催

### 取材協力：

地球内部ダイナミクス領域  
小平秀一 プログラムディレクター  
富士原敏也 技術研究副主任

海洋・極限環境生物圏領域  
藤倉克則 チームリーダー  
小栗一将 技術研究主任  
川口慎介 研究員

地球環境変動領域  
河野健 プログラムディレクター  
升本順夫 プログラムディレクター  
本多牧生 チームリーダー  
滝川雅之 チームリーダー  
熊本雄一郎 技術研究副主任  
地球深部探査センター  
吉澤理 技術主任

これまで私たちが考えていた海溝型地震のモデルではどうも説明できない——多くの研究者が、そうつぶやく。それが、2011年3月11日午後2時46分に発生した東北地方太平洋沖地震である。

震源は宮城県牡鹿半島の東南東約130km沖の海底約24km、地震の規模を示すマグニチュード(M)は9.0。宮城県栗原市で最大震度7を記録したほか、東日本の広い範囲で震度5を超える強いゆれに襲われた。この地震に伴って発生した津波は、最大40mにもなり、東北地方から関東地方沿岸にかけて甚大な被害をもたらした。この地震による災害を「東日本大震災」と呼ぶ。

地震発生直後、海洋研究開発機構(JAMSTEC)は一気に慌ただしくなった。緊急科学調査の準備を始めたのだ。

地震とは、断層のすべりである。東北地方太平洋沖地震では、東北日本を載せた北米プレートと、その下に沈み込んでいる太平洋プレートの境界がすべった。そして動いたプレートが海水を持ち上げ、津波が発生した。「海溝型」あるいは「プレート境界型」と呼ばれるタイプの地震である。太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込む日本海溝の帯では、海溝型地震が繰り返し起きてきたし、近い将来にも起きることが想定されていた。しかし、想定されていた地震の規模は最大でもM8.0程度だった。なぜM9.0という超巨大地震になったのか。なぜ40mもの巨大な津波が発生したのか。そのメカニズムを明らかにするには、海底面や海底下の構造の変化などを調べるのが不可欠である。

JAMSTECには、それが可能な船舶や設備、そして人がいる。今回の地震の実態を解明し、その知見を広く社会に伝え、後生に残す——それがJAMSTECの使命である。そうした強い想いから、地震発生わずか3日後に緊急科学調査が始まった。

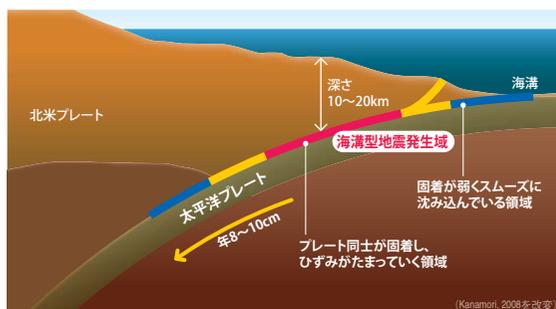
JAMSTECが実施した緊急科学調査は大きく3つのテーマから成る。深海調査研究船「かいらい」と海洋調査船「かいらよ」による海底地形調査と海底下構造探査、深海曳航調査システム「ディーブ・トウ」や有人潜水調査船「しんかい6500」による海底面調査、海洋地球研究船「みらい」や学術研究船「白鳳丸」「淡青丸」による採水や採泥などの震源域総合調査である。

さらに、地震・津波に伴って東京電力福島第一原子力発電所の事故が発生したのを受け、文部科学省からの要請によって周辺海域での放射線モニタリング調査を3月22日から実施。「白鳳丸」「みらい」「かいらい」「よこすか」「なつしま」「かいらよ」が参加した。

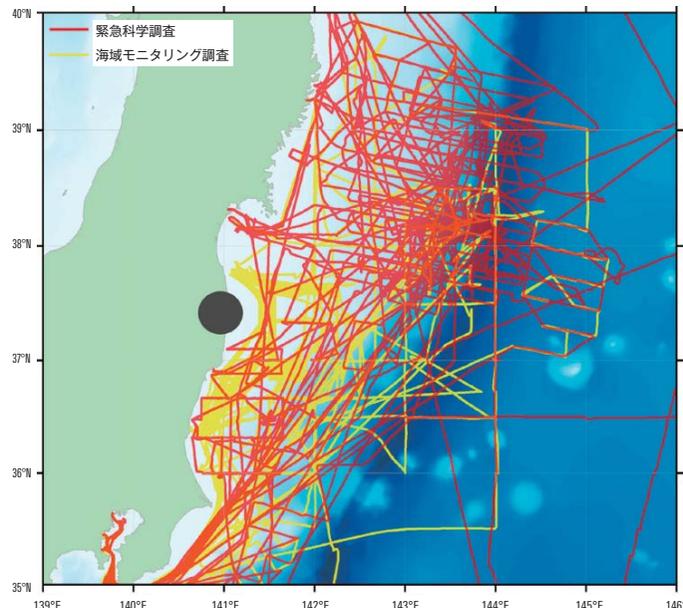
2012年5月12日現在、緊急科学調査と海域モニタリング調査を実施した日数は合計525日間、参加した船舶は延べ33隻に上る。調査は現在も継続中である。また、2012年4月1日から5月24日にかけて、統合国際深海掘削計画(IODP)第343次研究航海として地球深部探査船「ちきゅう」による震源域の掘削を実施した。

こうした調査研究から、東北地方太平洋沖地震の実態が少しずつ見えてきた。これまでの成果を紹介していこう。

**日本周辺のプレートと東北地方太平洋沖地震の震源・震源域**  
地球の表面は数枚のプレートと呼ばれるかたい岩板で覆われ、日本周辺は4つのプレートがひしめき合っている。東北地方太平洋沖地震は、東北日本を載せた北米プレートと、その下に沈み込む太平洋プレートの境界で発生した海溝型地震である。観測された地震波や津波のデータから、プレート境界の断層が三陸沖から茨城県沖まで南北500km、東西200kmにわたってすべったと考えられている



**従来考えられていた海溝型地震の発生メカニズム** 深さ10~20kmあたりではプレート同士がぴったり固着しているため、沈み込む太平洋プレートに北米プレートも引きずり込まれ、プレート境界にひずみがたまっていく。ひずみが限界に達すると、プレート境界が一気に壊れて大きくすべる。これが海溝型地震である。海溝周辺の浅い領域では、プレート同士の固着は弱くスムーズに沈み込んでいるため、地震時に大きくすべることはないと考えられていた



**緊急科学調査・海域モニタリング調査の船舶の航跡** 2012年5月12日現在、緊急科学調査と海域モニタリング調査を合計525日間実施。参加した船舶は延べ33隻に上る。黒い丸は、福島第一原子力発電所から半径20kmの警戒区域を示す。下は調査研究活動に参加した船舶



2011年3月14日~3月31日

**日本海溝域**  
「かいらい」によるマルチチャンネル反射法地殻構造探査、海底地震計を用いた余震観測

3月22日~7月17日(連続)

**福島沖**  
「白鳳丸」「みらい」「かいらい」「よこすか」「なつしま」各船交代による放射線モニタリング調査

4月28日~5月21日

**日本海溝域**  
「かいらい」によるマルチチャンネル反射法地殻構造探査、海底地震計を用いた余震観測

6月3日~23日

**三陸沖**  
「よこすか」による地形・地質調査および海水、堆積物などのサンプリング

7月11日~28日

**三陸沖**  
「よこすか」による地形・地質調査および海水、堆積物などのサンプリング

7月30日~8月14日

**三陸沖**  
「よこすか」および「しんかい6500」による地形・地質調査および深海生物、海水、堆積物などのサンプリング

8月22日~28日

**福島沖**  
「かいらよ」による放射線モニタリング調査

8月27日~9月11日(ほか)

**日本海溝域**  
「かいらい」によるマルチチャンネル反射法地殻構造探査、海底地震計を用いた余震観測

10月21日~11月11日

**日本海溝域**  
「かいらよ」によるマルチチャンネル反射法地殻構造探査、海底地震計の回収

11月30日~12月2日

**福島沖**  
「かいらよ」による放射線モニタリング調査、そのほか「みらい」「白鳳丸」「淡青丸」による採水・採泥など各種調査観測

2012年2月20日~3月3日

**三陸沖**  
「みらい」による日本海溝域での調査観測

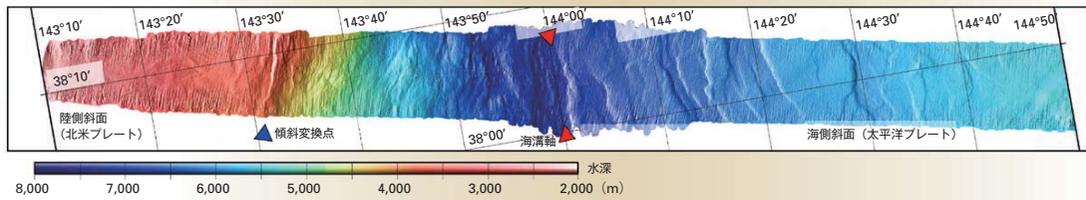
3月6日~3月30日

**三陸沖**  
「みらい」による沿岸域の調査観測

4月1日~5月24日

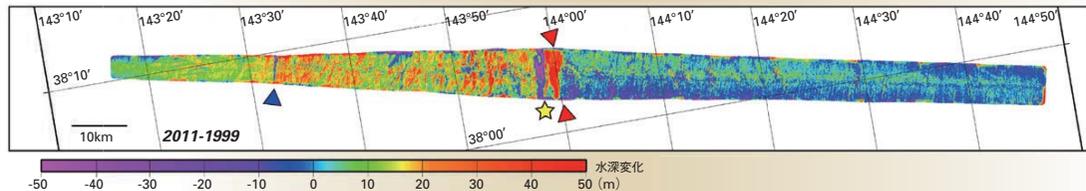
**三陸沖**  
「ちきゅう」による東北地方太平洋沖地震震源域掘削

# 陸側の海底が東南東に50m、上方に7~10m移動。その変動が 巨大津波を生んだ。



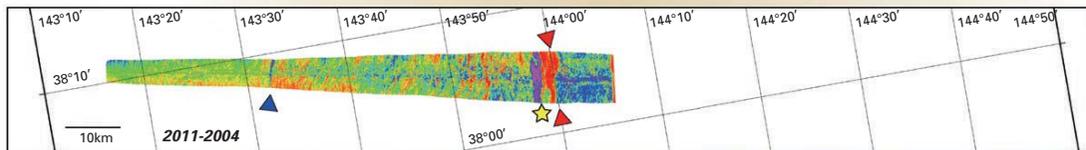
## 2011年の海底地形

色は水深を表し、赤は浅く、青は深い。赤い三角は海溝軸の位置を示す。青い三角は陸側斜面の傾斜変換点の位置を示し、ここを境にして海溝軸へ向かって急傾斜になる



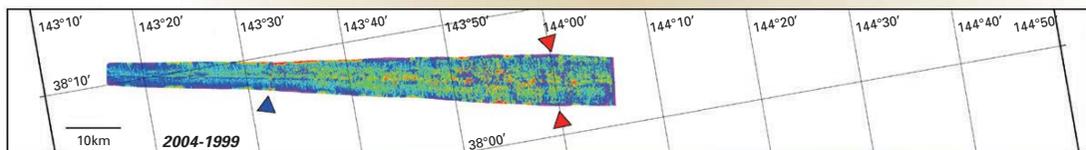
## 1999年に対する2011年の地形変化

色は水深の変化を表し、赤は上昇、青から紫は沈降したことを示す。陸側斜面のうち傾斜変換点から海溝軸寄りの海底が大きく上昇している。東南東に56m、上方に10m移動したと見積もられている。海溝軸近傍に約50m下降している領域と約50m上昇している領域がある（星印）。これは地震による地すべりと、地下構造の変化によると考えられている。「2011年の海底地形」で示した範囲より狭くなっているのは、測定精度の高い領域だけを用いているためである



## 2004年に対する2011年の海底地形

1999年の地形と比較した場合と同じ傾向で、陸側斜面のうち傾斜変換点から海溝軸寄りの海底が大きく上昇している。使用するデータによって若干の数値の違いが出るが、移動量は東南東に50m、上方に7mと見積もられている



## 1999年に対する2004年の地形変化

数m程度のばらつきが見られるのみで、顕著な海底地形変化は見られない

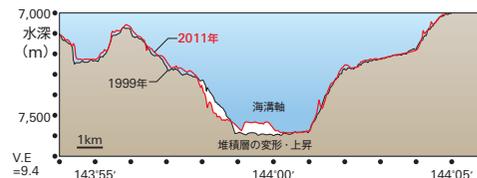
最初に緊急科学調査に向かったのは、「かいいい」である。「かいいい」は、マルチナロービーム音響測深機やマルチチャンネル反射法探査システムを搭載し、海底地形調査や海底下の構造探査で活躍している。実は東北地方太平洋沖地震が発生したときも、「かいいい」は小笠原海域で調査中だった。調査を中断し、JAMSTECの本部がある横須賀に急ぎ帰港。準備を整え、震源域へ向かったのだ。

「かいいい」の任務の1つは、マルチナロービーム音響測深機によって海底地形を調査し、地震によって海底地形がどのように変化したかを明らかにすること。船底から音波を扇状に発信し、海底で反射して返ってくる時間から調査海域の水深、つまり海底地形を知ることができる。日本海溝周辺ではこれまでに何度も海底地形調査が行われている。過去と同じ測線を調査して比較すれば、地震による変化が分かる。まず注目したのが、1999年と2004年に調査した測線だ。海溝に直交して太平洋プレートと北米プレートをまたぎ、今回の地震の震源にも近い。

2011年の調査で得られた海底地形図を見てみよう。最も深いところが、プレートの沈み込み口の海溝軸である（赤い三角）。海溝軸の両側は斜面になっている、それぞれ海側斜面、陸側斜面と呼ばれる。陸側斜面は、傾斜変換点（青い三角）から海溝軸側で急斜面となっている。こうした特徴は、1999年、2004年の調査で得られた海底地形も変わらない。

地震後の2011年の地形から地震前の1999年の地形を引くと、明らかな高低差が現れた。海溝軸を境に海側と陸側ではっきり違い、陸側斜面しかも傾斜変換点から海溝軸寄りまで海底がより上昇していることが分かる。2011年と2004年の比較でも同様の傾向が見られる。2004年の地形から1999年の地形を引いた値では高低差はほとんどないことから、この変化は東北地方太平洋沖地震によるものだと分かる。

こうした解析から、地震によって海底地形が東南東

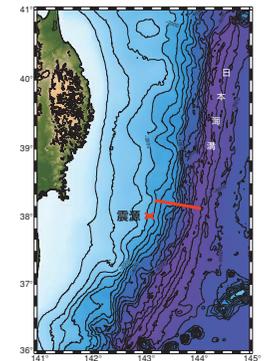


**海溝軸近傍の地形変化** 地震の発生によって、海溝軸陸側の斜面が長さ1kmにわたって崩落した。海溝軸の底は幅1.5km、高さ50mほど上昇している

方向に約50m、上方に7~10m移動したと推定されている。これは過去の調査記録があったからこそ得られた成果である。2004年にインドネシアのスマトラ島沖で発生したM9.1の海溝型地震でも海底地形の調査が行われたが、過去の調査がないため、変動を検知することはできていない。基盤的な調査研究はすぐには役立たないかもしれないが、それがいかに重要なことを示すよい例である。

海底が上昇すると、上にある海水を持ち上げ、津波が発生する。この地形変動が巨大津波を引き起こしたのだろうか。今回の地震では海底が7~10m上昇したことに加え、斜面の効果が加わり、巨大津波となったと考えられている。斜面の効果とは？ 陸側斜面では、陸の方が高くなっている。しかも海溝軸近傍は急傾斜だ。その斜面が海溝軸方向に水平移動することで、実際に海底が上昇した量より高く海面が持ち上がることになる。この地形変動に基づいて津波の発生をシミュレーションすると、実際に観測された津波の波形を説明できることも分かった。

地形変動の解析結果は、もう1つとても重要なことを示している。変動が海溝軸まで達していることだ。これは、プレート境界の断層が海溝軸まですべったことを意味する。海溝型地震において地震に伴う大きなすべりが海溝軸まで及んだことを観測した例はなく、そんなことが起きるとは、多くの研究者は考えていなかった。海底下で何が起きたのか。JAMSTECの緊急科学調査によって、その実態が見えてきた。



**海底地形調査の測線**  
図中の赤い線が海底地形調査の測線を示す。×印は東北地方太平洋沖地震の本震の震央位置を示している



**海底地形の変動と斜面の効果** 海底面の上昇変動は7~10mである。しかし、斜面が約50m水平変動することで、さらに4~6m上昇したのに相当する効果が加わる。その結果、海面が11~16m持ち上げられ、巨大津波となった

# 海溝型地震断層、そして地震による地下構造の変化を世界で初めて見た。

地震が起きる、つまりひずみに耐え切れなくなったプレート境界が壊れて一気に大きくすべるのは、海底下10~20kmの領域である。海溝軸近くの浅い場所ではプレート同士の固着が弱くスムーズに沈み込んでいたのでひずみがたまりず、そこが地震時に大きくすべることはない——これが、海溝型地震の常識だった。しかし、JAMSTECの緊急科学調査が明らかにした海底地形の変動は、東北地方太平洋沖地震ではプレート境界の断層が海溝軸まですべったことを示している。これは従来の海溝型地震の発生メカニズムでは説明できない現象である。

いったい、どの断層が、どのようにすべって海溝軸まで達したのだろうか。それを知るには、反射法地震探査が有効である。エアガンから微弱な地震波を発生し、地層や断層で跳ね返ってくる音波を観測することで、海底下の構造を知ることができる。これまでも日本海溝では反射法地震探査による海底下の構造探査が行われていたが、測線は50~100km間隔とまばらだった。地震発生後、海溝軸に直交する14本の測線、海溝軸に平行な2本の測線で反射法地震探査を実施。測線は20~10km間隔となり、陸側斜面の下の構造に南北で違いがあることなど、地下構造が詳細に分かってきた。

今回、最も知りたいのは、断層の最先端部、海溝軸近傍の地下構造だ。海溝軸近傍のデータを拡大し、地震発生後の2011年と地震発生前の1999年を比較してみよう。太く濃い色の線が太平洋プレートの上面である。1999年のデータを見ると、太平洋プレートの上には堆積層があり、海溝軸の海底は平らだ。海溝軸の陸側にある小さな高まりに注目して

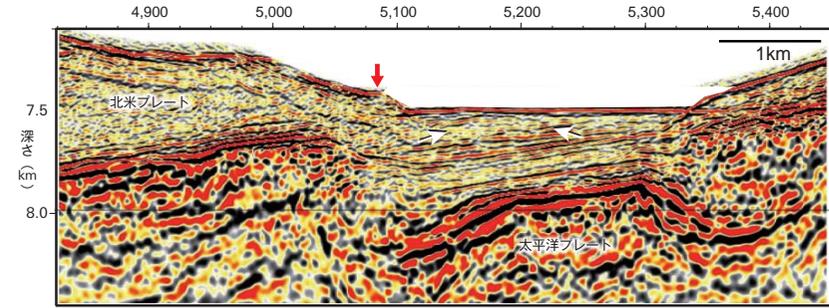
ほしい。2011年のデータでは、その高まりが海側に移動し、平らだった海底が盛り上がっている。そして堆積層には、圧縮の力が加わったときにできる逆断層がたくさんできている。これは、東北地方太平洋沖地震が引き起こした変化にほかならない。

海底下約24kmで始まった断層のすべりは、太平洋プレートの上面から約200m上、北米プレートの底が削られてきた堆積層の上面を伝って海溝軸まで進み、いくつもの断層に分岐しながら海底に突き抜けて止まった——地下構造データの詳細な解析から、そんな地震の実態が見えてきた。

海溝型地震の断層、そして地震による変形構造を捉えたのは、世界で初めてである。その変形構造は、いわば超巨大地震の足跡だ。同様の変形構造が日本海溝のどこにあるかを調べることで、東北地方太平洋沖地震と同じタイプの地震がどこでどのように発生してきたかを知る手掛かりになる。そのために、日本海溝全域で、より高分解能での地下構造探査を計画している。

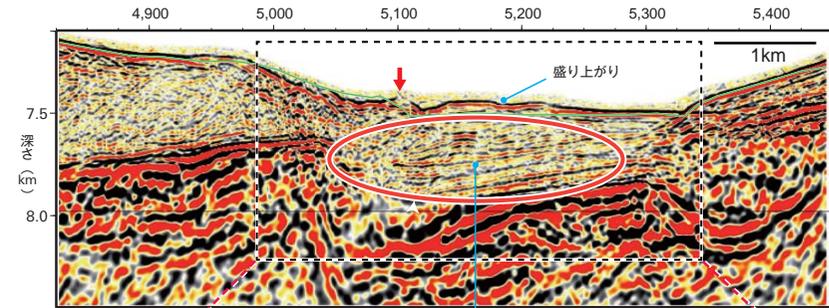
しかし、断層がなぜ海溝軸まですべったのか、その答えは出ていない。もしかしら、これまでの常識とは異なり、海溝軸周辺の固着が強かったのかもしれない。東北地方太平洋沖地震の発生メカニズムを解明するためには、断層の性質やプレートの固着の度合いを明らかにする必要がある。それには、海底を掘削して直接調べるしかない。

2011年10月には、「かいよう」によって海溝軸近傍について高分解能の反射法地震探査が行われ、掘削地点を決定。2012年4月から「ちきゅう」による掘削が行われた。

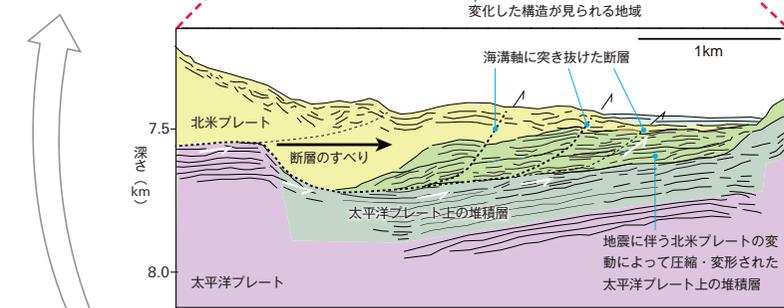


地震による海溝軸近傍の地下構造の変化

**1999年**  
海溝軸の海底は平らで、太平洋プレートの上に堆積層がある。海溝の陸側には小さな高まりがある（矢印）



**2011年**  
海溝の陸側にあった高まりが海溝軸側に移動し（矢印）、平らだった海溝の海底が盛り上がっている。緑色の線は、1999年の海底面を示す。陸側のプレートが東南東方向に約50m移動したことで堆積物が圧縮されて変形し、逆断層がたくさん見られる

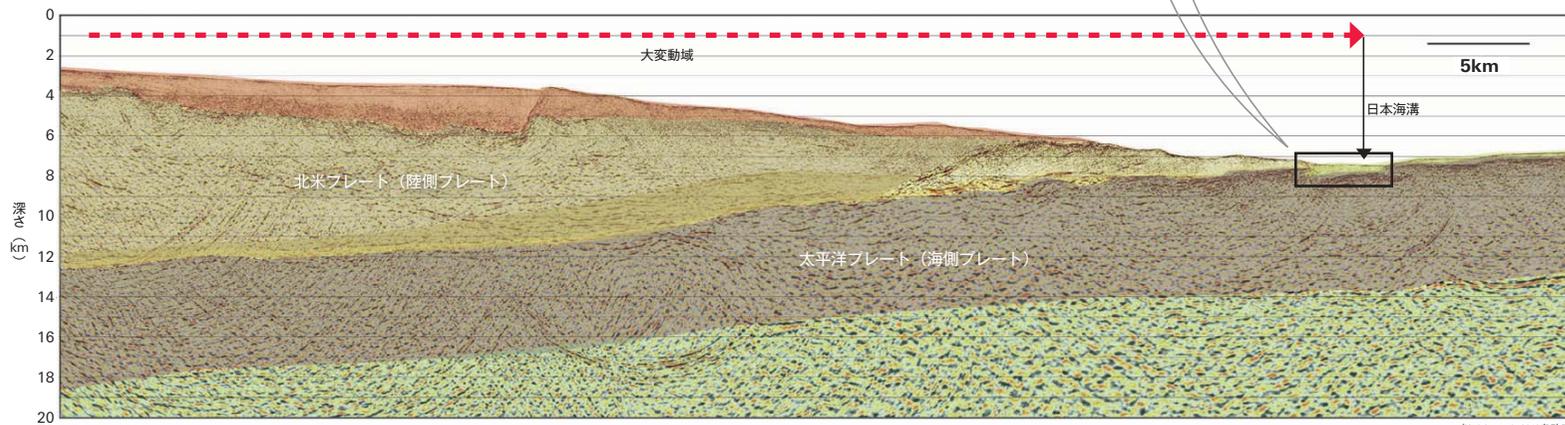


東北地方太平洋沖地震ですべった断層

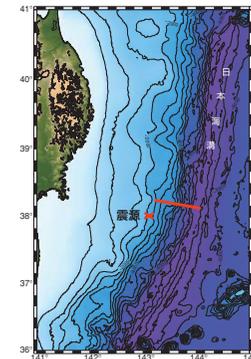
固着していたプレート境界が海底下約24kmで破壊し、断層すべりが始まった。海底軸まで達した断層のすべりは、堆積物を圧縮・変形させ、いくつもの断層に分岐しながら海底に突き抜けて止まった

## 2011年の反射法地震探査による震源域の地下構造断面

地震波は断層や地層で強く反射する。北米プレートの下に沈み込む太平洋プレートの上面がはっきり見て取れる。北米プレートには、両側に引っ張られることのできる正断層がたくさんある。日本海溝では、北ほど正断層が多くなっていることも、緊急科学調査によって明らかになった



(Kodaira et al., 2012を改変)

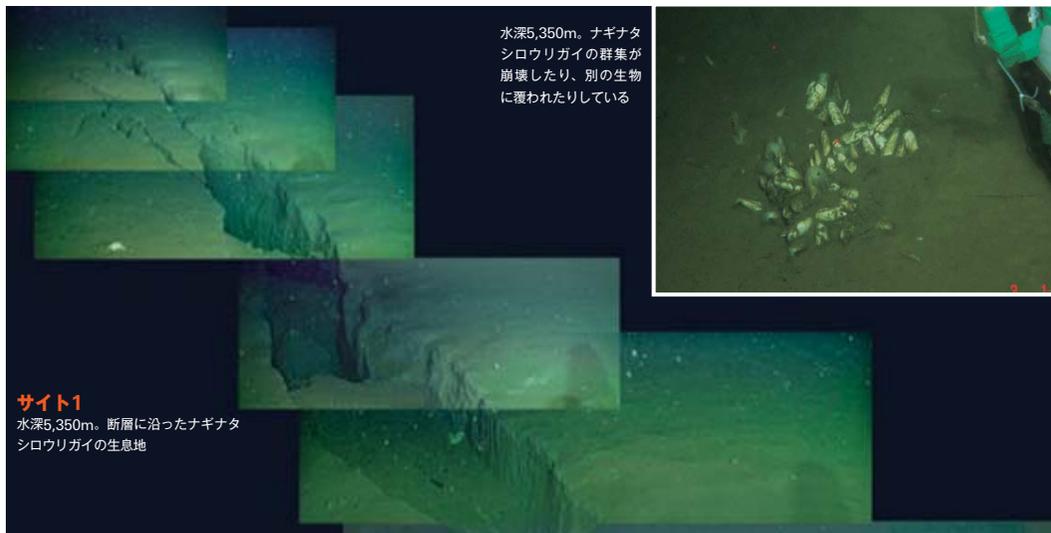


反射法地震探査の測線

5ページで紹介した海底地形調査と同じ測線。この測線では1999年にも反射法地震探査が行われている

# 海底の亀裂、バクテリアマット、ウシナマコの集団……。

# 「しんかい6500」が見た地震発生後の深海底。



水深5,350m。ナギナタシロウリガイの群集が崩壊したり、別の生物に覆われたりしている

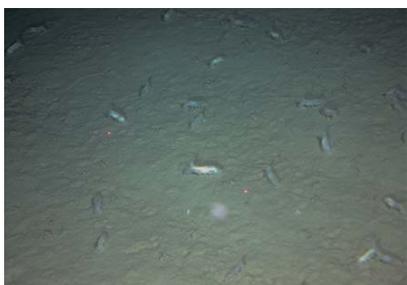
**サイト1**  
水深5,350m。断層に沿ったナギナタシロウリガイの生息地



水深5,348m。バクテリアマットが長さ約2mほどの線状に伸びている。その下にある断層からメタンを含む海水が湧き出ていると考えられる。すぐ上には、高濃度の硫化水素が漂っていた。バクテリアがメタンと硫化水素から硫化水素をつくっているため、硫化水素をエネルギー源とするバクテリアも生息していると思われる。下はバクテリアマットの拡大。セラチンのように見える



水深5,341m。バクテリアマットが約20m四方に広がっている



水深5,350m。高密度に生息するウシナマコ類。2006年の潜航調査では、イソギンチャク類が多く、ナマコは確認できなかった

水深5,351m。幅、深さともに約1mの亀裂が南北方向に少なくとも約80m続いていた。2006年に同じ場所で潜航調査を行ったときには、亀裂は見つかっていない。東北地方太平洋沖地震でできた亀裂だと考えられる

M9.0という巨大な地震は、海の中も大きくかき乱し、深海の生態系にも影響を与えたに違いない。しかし、地震による生態系への影響を調べた例は、ほとんどない。地震によって海の中、特に生態系に何が起きたのか。それを確かめるため、「しんかい6500」による有人探査が計画された。

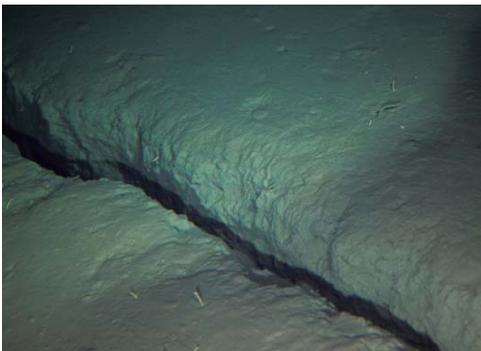
2011年6月、「よこすか」に搭載された深海曳航調査システム「ディーブ・トウ」による事前調査を実施。「ディーブ・トウ」のカメラは、ウシナマコ類の集団、海底の変色など、地震発生前には見られなかった光景を映し出した。こうした事前調査の結果を踏まえて検討し、3つの潜航地点が決定した。

そして7月30日から8月14日にかけて、「しんかい6500」による有人探査を実施。海底に到着した乗組員の目にまず映ったのは、海底に走る亀裂だ。サイト1は、2006年にも潜航調査を行っている。そのとき亀裂はなかったことから、東北地方太平洋沖地震に伴ってできたものと考えられる。

海底の白い変色も、あちこちで見られた。線状に伸びるもの、広範囲に広がっているものがある。白い変色は、バクテリアが大量に繁殖した、バクテリアマットだった。線状のバクテリアマットでは、その下に断層があり、メタンを含む海水が湧き出ているのだろう。そこにはメタンをエネルギー源とするバクテリアが集まってくる。さらに、それらが作り出す硫化水素

**サイト2**  
水深3,200m。断層はないが、過去の調査で底生生物が多かった場所

水深3,218m。幅約20cmの亀裂が、南北方向に少なくとも数十mは続いていた。底は深く、深さは確認できない



をエネルギー源とするバクテリアが大量に繁殖し、バクテリアマットが形成されたと考えられる。メタンの湧水域には普通、化学合成生物群集が見られるが、それらのバクテリアマットにはシロウリガイなど大型の生物はいなかった。

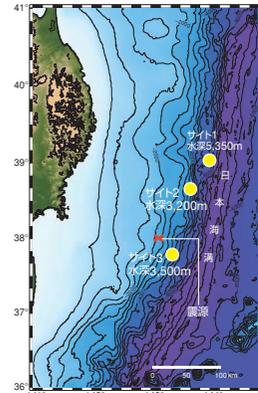
ウシナマコ類の集団も見られた。乱泥流などによって有機物を含む堆積物が巻き上げられたことで海底に有機物が豊富になり、それらを餌としているウシナマコ類が一時的に大量発生したのではないかと考えられる。

これらの変化は、地震によるものである可能性が高い。そして、これらが今後どのように変化していくのか、定期的に調べる必要がある。湧水域のバクテリアマット周辺には、時間がたつとシロウリガイなどの大型の生物が現れ、化学合成生物群集が形成されていくのだろうか。あるいは、地震発生前の海底の状態に戻るのだろうか。「しんかい6500」は、長期モニタリング用のマーカーを深海底に設置してきた。今後も調査を継続し、地震によって変動した深海生態系の回復や再生の過程を追う。

**サイト3**  
水深3,500m。事前調査で海底の変色が見つかった場所

水深3,551m。幅2~3m、長さ5~6mに広がったバクテリアマットである

イソギンチャク。サイト3で観察されたイソギンチャクの半数程度が、海底に付着していない。このような状態のイソギンチャクは、とても珍しい



「しんかい6500」の潜航地点

# 海水は激しく濁り、マンガンやメタンの濃度が上昇。そして

# 微生物生態系の変化を捉えた。

M9の巨大地震はさまざまな変動をもたらしたが、そのなかには時間とともに消えてしまうものがある。そうした変動を速やかに捉え、記録することも、緊急科学調査の重要な目的である。

東北地方太平洋沖地震の発生から36日後の4月15日に、「みらい」による海洋調査を実施。震源域から日本海溝の最深部に向かって直線上の4つの観測点から日本海溝の最深部に計測するとともに、深層海水を採取してメタンやマンガンなどの化学組成や微生物の組成を調べた。さらに、地震発生70日後の5月20日と98日後の6月17日にも、「よこすか」で調査を行った。

透明度の計測では、すべての観測点で、通常の深海環境では見られないほどの海水の濁りが検出された。海溝軸に近いほど濁りの程度と広がりが大きかった。海溝軸に近いほど濁りの程度と広がりが大きいことが分かった。海溝軸に近いほど濁りの程度と広がりが大きいことが分かった。海溝軸に近いほど濁りの程度と広がりが大きいことが分かった。

投入。海溝軸では海底まで35m、海側斜面では海底まで20mくらいのところから濁りが激しくなっていく様子を捉えた。地震発生から4ヵ月。海水はまだ濁っていたのだ。ランダーが採取した堆積物のコアを調べると、真新しい層がいくつか見える。3月11日の本震のゆれや地すべりによって発生した濁りがずっと続いているのではなく、濁りが収まっては余震でまた濁る、ということ繰り返しているようだ。

海水の化学組成を調べた結果、マンガンやメタンの濃度が通常と比べて最大で100倍近く増加していた。マンガンやメタンは海底の堆積物中に大量に存在するので、それが巻き上げられたのだろうと考えられた。しかし、メタンについて炭素安定同位体比を使って詳しく調べると、意外な事実が分かった。N1という観測点で採取した海水には、海底の堆積物中に存在していたもの以外に、海底下1,000mより深いところから由来するメタンが含まれていたの

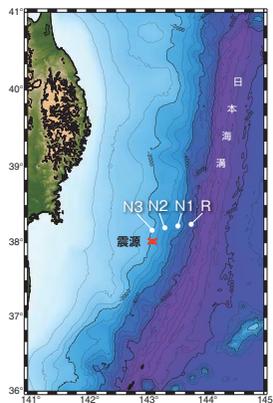
だ。観測点N1の海底下には、大規模な断層がある。この断層を伝ってメタンを含む流体が深部から海底に出てきたのだろう。

海水中の微生物についても調べた。36日後の調査では、微生物の数は通常の3倍程度まで増加していた。しかも、堆積物のなかで生息している微生物に加え、通常深層の海水中にはほとんど生息していない微生物がいた。70日後と98日後の調査では、微生物の数や種類はもとに戻りつつあった。

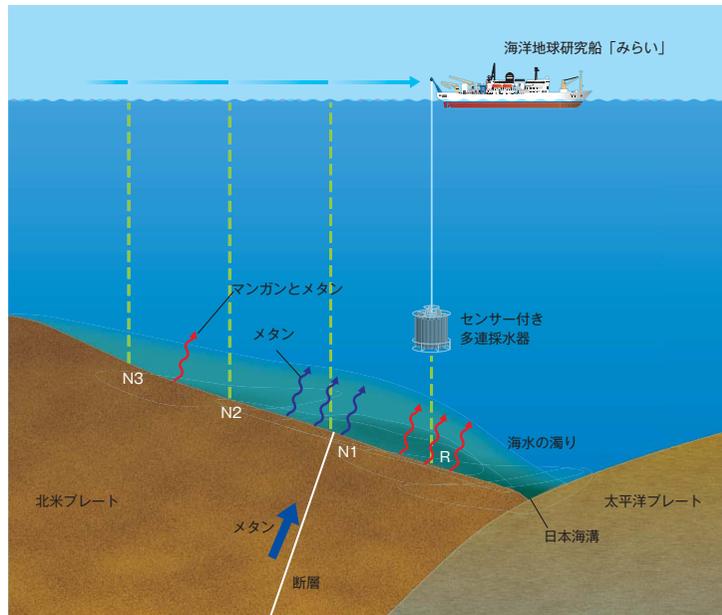
地震後の化学環境と微生物の変化を併せて調べたのは、今回が世界で初めてだ。地震発生36日後という早い時期に1回目の調査をしていなかったら、微生物の数や種類の変化は検出できなかったかもしれない。海水の濁りや、マンガンやメタンの濃度、微生物の数は、どのくらいの期間で地震前の状態に戻るのだろうか。あるいは、地震前とは異なった状態になるのか。今後、継続して調べる必要がある。

そして、いま注目されているのが、深部から由来するメタンの起源である。断層がすべるときに水素が発生することは知られていたが、JAMSTECでは岩石を用いた実験から、地震によって発生する水素の量の測定に成功。それによれば、今回M9.0という巨大地震によって大量の水素が発生したはずだ。微生物のなかには、水素をエネルギー源にしてメタンをつくり出すものがある。検出されたメタンは、そうした微生物が作り出した可能性がある。

地震は、生態系をかき乱すが、一方で、生命を育てているのかもしれない。断層の試料を手にし、地震によって発生した水素や、水素をエネルギー源とする微生物が見つければ、「地震生命圏」の存在が証明できる。「ちきゅう」の掘削には、地震発生メカニズムの解明に加え、そうした新しい期待もかかっている。



**調査海域**  
震源域から日本海溝の最深部に向かって直線上の4つの観測点 (N3、N2、N1、R) で海洋調査を実施した



**海洋調査の結果** 「みらい」からセンサー付きの採水器を降ろして深層海水を調査したところ、すべての観測地点で強い濁りが検出された。海溝軸に近い観測点では海底から高さ1,500mまで濁った水が検出された。濁りは、海底に近いほど強かった。また、海水中から高濃度のマンガンとメタンを検出。海底の堆積物中に含まれていたものが地震動や地すべりなどによって海水中に放出されたもののほか、断層を伝って深層から放出されたと考えられるメタンも観測されている。深層由来のメタンは、特に断層の上の観測点で検出されている



**ランダーの投下の様子** ランダーは水深1万1000mまで潜航可能。深海カメラを搭載し、着底する過程や着底後の周辺の様子を7時間以上にわたって連続撮影できる。表層50cmの堆積物を採取できる採泥器を3本搭載可能。今回の調査でも採泥を行った



# 福島第一原発から放出された放射性物質は、どのように広がるのか？

濃度は？ その疑問に海域モニタリングとシミュレーションで答える。

地震・津波に伴って東京電力福島第一原子力発電所の事故が発生し、セシウムやヨウ素、ストロンチウムなどの放射性物質が放出された。文部科学省は2011年3月22日に、福島県沖の発電所沖合30km圏外の海域における「海域モニタリング計画」を発表。JAMSTECは、文部科学省からの要請を受け、22日のうちに「白鳳丸」を福島県沖に向かわせた。その後、「みらい」「かいいい」「よこすか」「なつしま」が海域モニタリング調査を実施してきた。

船がモニタリング点に到着すると、まず空間放射線量率を測定する。その後、大気中の浮遊粉じんの捕集、海水の採取、海底土のサンプリングなどを行った。これらの試料は翌日、常陸那珂港で引き渡し、日本原子力研究開発機構などで放射能濃度が分析された。その結果は、文部科学省のホームページで公開された。

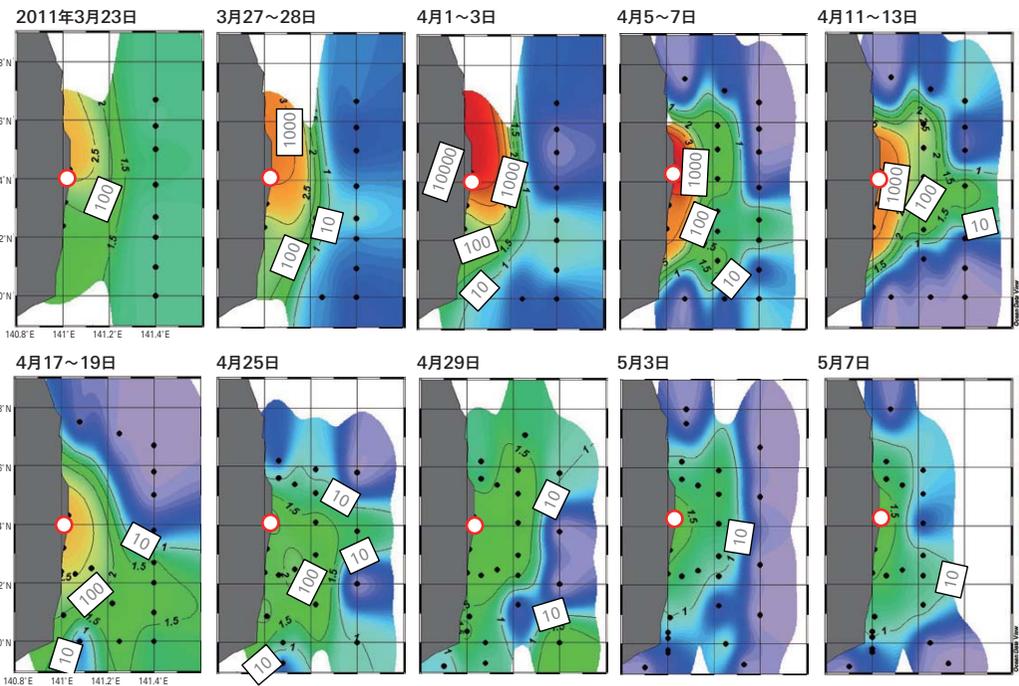
今回のモニタリング調査で特に重要とされたのが、セシウム137である。セシウム137は半減期が30.1年で、環境中に比較的長くとどまる上に、海水中に溶けることから食物連鎖を通じて海洋生物に濃縮する心配がある。3月11日以前の日本周辺の表層海水のセシウム137の濃度は約0.001Bq/L (Bq: ベクレル)。それに対して、事故後の4月半ばには最大値186Bq/Lが観測された。国が定める飲料水の暫定基準値200Bq/Lより低いが、事故前の10万倍以上である。その後、徐々に減少し、9月末にはすべてのモニタリング点で計測限界の9Bq/L以下となった。セシウム137の濃度の時間変化を見ると、福島県沖を南

北に広がりながら、中規模の渦や黒潮主流と呼ばれる流れによって、北太平洋を東に広がっていくことが明らかになった。

JAMSTECでは、文部科学省と海洋生物環境研究所の要請を受けて行った海域モニタリングとは別に、北太平洋におけるセシウム137の拡散状況調査を実施。海水だけでなく、動物プランクトンや海水中の懸濁粒子を採取し、放射能濃度を測定した。その結果、発電所から950km離れたS1および1,900km離れたK2という観測点で1か月後に採取した海水や動物プランクトンや懸濁物にも、セシウム137が含まれていることが分かった。セシウム137は大気経路でも輸送され、短期間で西部北太平洋の広い範囲に拡散したようだ。国が定める肉や魚の暫定基準値500Bq/kgよりはるかに低いが、事故前の100倍以上である。

また、放射性物質の北太平洋における広域拡散シミュレーション研究も実施。放射性物質がいつ、どこまで、どのくらいの濃度で広がるのか。それを予測するため、JAMSTECが開発した日本沿海予測可能性実験 (JCOPE) システムによってシミュレーションを行った。JCOPEでは直近の観測データを取り込む「データ同化」という手法を使うことで、予測精度の向上を図っている。

放射性物質の挙動は日本のみならず、世界中から注目されている。こうした海域調査やシミュレーションを行い、その結果を公表していくことは、私たちの責務である。

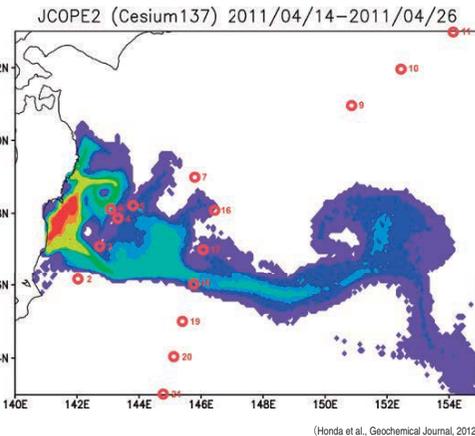


海域モニタリングによって得られた表面海水中セシウム137濃度の時間変化

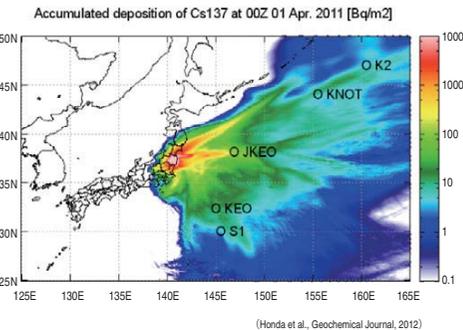
単位はBq/L。ただし等高線は対数表示。赤い丸は福島第一原子力発電所の位置。セシウム137は、岸沿いに南北に広がり、その後、沖へと広がっていく (文部科学省発表のデータを利用)

**放射性物質を含む汚染水の拡散シミュレーション** 発電所から海洋に放出された放射性物質は岸に沿って南北に広がった後、複雑な流れに乗って沖へと広がっていく。そして黒潮に取り込まれた放射性物質は薄まりながら急速に東へと広がっていく。4~5か月で日付変更線付近まで達するが、濃度はかなり低くなる。シミュレーション結果は、三陸沖で観測された比較的高い濃度のセシウム137を再現できている

**大気による放射性物質の拡散シミュレーション** 海洋に直接放出された放射性物質の拡散シミュレーション (左) では、わずか1か月で西部北太平洋の広い範囲に放射性物質が拡散しているという観測結果を説明できなかった。大気からの降下物をシミュレーションに加えると、観測結果を説明できる



(Honda et al., Geochemical Journal, 2012)



(Honda et al., Geochemical Journal, 2012)

## 放射性物質の海域モニタリング



モニタリング点に到着すると、まず甲板で空間放射線量率を測定する

採水作業。採水器をクレーンで降ろし、海水を採水する。左下の三脚の上には、大気中の浮遊粉じんを捕集する装置が設置されている

採水した海水は、20リットルの容器 (中央の黄色い箱) に入っている透明なビニール容器) に移される。手前は、国際原子力機関 (IAEA) のオブザーバー

# 「ちきゅう」によって日本海溝の海底下からプレート境界 断層の岩石を手に入れた。

2012年5月21日、多くの人が金環日食や部分日食を見ようとする空を見上げていた日。地球深部探査船「ちきゅう」は宮城県牡鹿半島東方沖、約200kmの日本海溝の上にあった。統合国際深海掘削計画（IODP）の第343次研究航海「東北地方太平洋沖地震調査掘削」のためだ。4月1日から開始した航海も、あと数日を残すばかりになっていた。

東北地方太平洋沖地震では、海底地形が東南東方向に約50m、上方に7~10mも移動し、断層が海溝軸まですべるといふ、これまでの海溝型地震の発生メカニズムでは考えられないことが起きた。断層がなぜ海溝軸まですべったのかを知るには、断層の性質を詳しく調べる必要がある。そこで、「ちきゅう」による掘削が計画されたのだ。今回のミッションは大きく2つ。

掘削孔に温度計を設置して温度を測ること。そして、断層の岩石を採取することである。

地震とは断層がすべることだ。断層がすべると摩擦熱が発生する。その温度が分かれば、断層にどのくらいの力がかかり、どのように動いたかを突き止めることができる。また、断層の岩石を採取することで、断層周辺の物性を直接調べることができる。そうした総合的な解析から、日本海溝の海底下でいったい何が起きたのか、東北地方太平洋沖地震の発生メカニズムを明らかにすること。それが、「ちきゅう」による掘削の目的である。

「ちきゅう」は、まず掘削同時検層を実施。ドリルパイプの先端近くに物理計測センサーを搭載し、掘削と同時に孔内の物性データを取得していく。この掘削は、水深6,889.5m、海底下850.5mに達した。総ド

リルパイプ長は7,740m。これは、1978年にアメリカのグローマーチャレンジャー号がマリアナ海溝チャレンジャー海淵で達成した7,049.5m（水深7,034m、海底下15.5m）を超え、世界最長記録である。

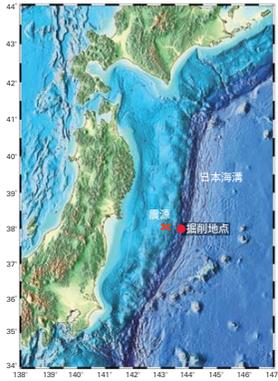
そして5月13日、いよいよ断層の岩石を採取するための掘削を開始。地下構造探査や掘削同時検層のデータから、目指すプレート境界断層は海底下820m付近だと予測されていた。そして5月21日夕方、狙っていた海底下820m付近の岩石が「ちきゅう」の船上に引き上げられた。

待ちに待った試料の到着に人が集まってくる。「これ、これ!」「なんでこういうかたちになるの」「わあ、すご!」「Oh my God!!」……。研究者も掘削の技術者も、誰もが興奮している。「これが断層でいいの?」

という声に促され、岩石をじっと見つめていた構造地質学の研究者が「間違いはないです。断層です」。大きな拍手が沸き起こった。

海溝型地震のプレート境界断層の岩石を、地震発生からわずか1年後に採取した例は、これまでない。世界初だ。しかし、プレート境界にはたくさんの断層があるため、東北地方太平洋沖地震と巨大津波を引き起こした断層の特定には詳細な解析が必要になる。掘削孔内への温度計の設置は、水中テレビカメラシステムに不具合が生じたため延期されたが、7月にあらためて実施した。東北地方太平洋沖地震ですべった断層は、摩擦熱が残っていて周囲より温度が高いはずだ。孔内温度計の計測データは、地震断層の決定的な証拠になると期待されている。

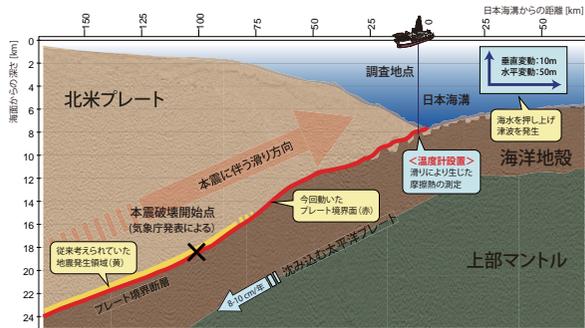
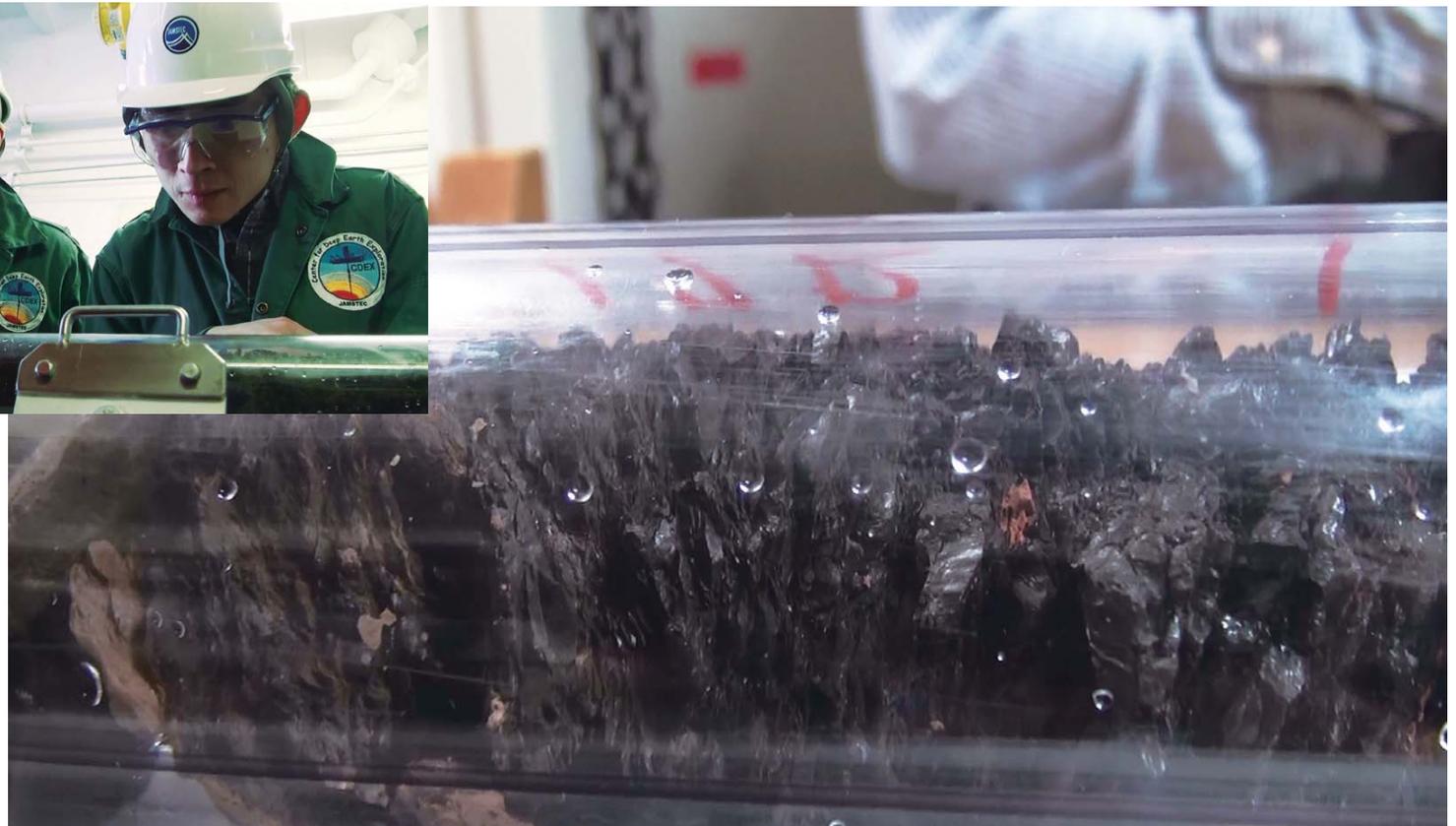
採取した日本海溝のプレート境界断層の試料 (JAMSTEC/IODP 提供)



掘削地点 宮城県牡鹿半島東方沖、約200kmの海域で掘削を行った



採取に成功した日本海溝のプレート境界断層の試料を見つめる研究者たち (JAMSTEC/IODP 提供)



掘削地点の海底下構造の概念図 「ちきゅう」は、水深6,889.5m、海底下850.5m付近のプレート境界断層まで掘削を行った。海底下648~844.5mの区間でプレート境界断層の岩石を採取した

# M9の巨大地震の実態はまだ見えていない。地震後の変化を追い、過去を探り、未来に活かす。

東北地方太平洋沖地震を引き起こしたプレート境界断層を掘削中の「ちきゅう」から撮影した夕日 (JAMSTEC/IODP 提供)



## ■東北マリンサイエンス拠点が始動

JAMSTECでは現在、新たな研究船の建造が進んでいる。この研究船は、2012年1月に始動した「東北マリンサイエンス拠点」を中心に運用される。東北マリンサイエンス拠点は、東北大学と東京大学大気海洋研究所とJAMSTECが主導し、大学や研究機関、民間企業などが参画。東北地方太平洋沖地震と津波が沿岸の海洋生態系に及ぼした影響を把握し、その変動機構を解明するとともに、科学的なデータに基づいて漁業の復興と産業の創出に寄与することを目指している。

## ■太平洋プレート内部の応力場が変わった

復興を進める一方で、再び大きな地震が起きる可能性はあるか、誰もが気になるところだろう。

東北地方太平洋沖地震が起きた約40分後、2011年3月11日午後3時25分にM7.5の余震が発生した。震源は、日本海溝の

東側の太平洋プレート内部、深さ11kmである。その後もしばらく、日本海溝の東側で活発な余震活動が続いた。JAMSTECは、2011年4月下旬に「かいらい」によって日本海溝東側で海底地震計を20台設置し、地震観測を実施。7月上旬に「よこすか」で回収し、地震波を解析した。地震波を解析することで、震源の位置だけでなく、断層にどのような力がかかって地震が発生したかを知ることができる。解析の結果、地震の震源は太平洋プレート内部の深さ40km付近まで分布していること、さらに、詳細に解析した50個の地震はいずれも引っ張りの力によって起きる正断層型であることが分かった。

東北地方太平洋沖地震が起きる前はどうかだったのか。東北大学などが以前実施した海底地震観測の結果によれば、海底20kmくらいまでは引っ張りの力がかかり、それより深部では押し合う力が働いていた。この力のかかり方、応力場は、

太平洋プレートが沈み込みに伴って折れ曲げられていることと符号する。それが地震後、深部の応力場が、押し合う圧縮場から引っ張り合う伸展場に変化したのだ。海溝型地震の発生によって海溝海側のプレート内部の応力場の変化を捉えたのは、世界で初めてである。

太平洋プレート内が深さ40km付近まで伸展場となっている——この状態は、断層が深部から浅部まで一気にすべりやすい、つまり大きな地震が発生しやすいことを意味する。震源が浅い場合は、大きな津波が発生する可能性もある。1933年の昭和三陸地震は、まさに日本海溝東側の太平洋プレート内で起きた地震だ。M8.1で、巨大津波が発生し、大きな被害が出た。実はその37年前、1896年に日本海溝を震源とするM8.2の明治三陸地震が起きている。明治三陸地震によって日本海溝東側の太平洋プレート内の応力場が変化し、昭和三陸地震を引き起こしたのではないかと考えられている。だとすれば、今後、津波を伴う巨大地震が日本海溝の東側で発生する可能性があるのだろうか。

## ■東北地方太平洋沖地震に関連する調査研究は続く

それを知るためには、海底地震観測を継続し、太平洋プレート内の応力場の変化を監視していく必要がある。東北地方太平洋沖地震に関連する調査研究は、地震前後の変化を捉えて終わりというので

はなく、続けなければならないのだ。そうした背景から、「東北地方太平洋沖で発生する地震・津波の調査観測」プロジェクトが2011年度から5年計画で始まっている。東京大学地震研究所、北海道大学、東北大学、千葉大学、産業技術総合研究所、そしてJAMSTECが参加。JAMSTECは、地下構造探査、海底地形調査、日本海溝東側の海底地震観測などを担当する。

地下構造探査は、日本海溝全域にわたって密な測線で、そして高解像度で実施する。東北地方太平洋沖地震後の探査で見えられた地下構造の変形、いわば“超巨大地震の足跡”を探ることが大きな目的だ。それにより、東北地方太平洋沖地震が特異なものだったのか、日本海溝のあちらこちらで繰り返し起きているものなのか分かるだろう。しかし、地下構造探査だけでは、その地下構造の変形がいつ起きたかまでは分からない。そこで、ビストンコアラによって海底の堆積物を採取し、年代を決定することを計画している。そうした調査観測から、巨大な海溝型地震や津波の履歴、発生メカニズムを明らかにし、未来に起きる地震の減災・防災に役立てることを目指す。

## ■南海トラフの巨大地震に備える

東北地方太平洋沖地震の調査では、過去の調査データが非常に役立った。地震の前後を比較することで、今回の地震による変化を知ることができたのだ。す

ぐには役立つかもしれないが、基盤データを蓄積しておくことの重要性が再認識された。観測の空白域をつくらないことも重要だ。東北地方沖の日本海溝に注目が集まっているが、房総沖の日本海溝や沖繩トラフの調査観測も不可欠である。

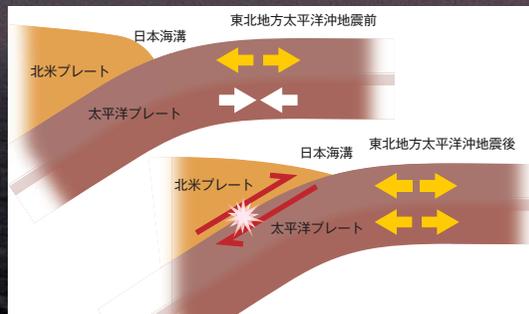
そして、南海トラフ。南海トラフでは、フィリピン海プレートが西日本を載せたユーラシアプレートの下に沈み込んでおり、100~200年間隔でM8クラスの地震が繰り返し起きている。過去の発生間隔から考えると、次にここで起きる地震は、駿河トラフを震源域とする「東海地震」、東海沖から紀伊半島の潮岬沖の南海トラフを震源域とする「東南海地震」、潮岬沖から四国の室戸岬沖の南海トラフを震源とする「南海地震」が連動する巨大地震になるかもしれないと考えられてきた。さらに最近では、それより西の九州の日

向灘を震源とする「日向灘地震」も連動する可能性が指摘され、その場合、Mは東北地方太平洋沖地震と同じ9.0と予測されている。

JAMSTECでは、南海トラフで起きる地震の発生メカニズムの解明を目指し、「ちきゅう」による南海トラフの掘削を継続中だ。また東南海地震の震源域である紀伊半島沖の熊野灘に、地震・津波観測監視システム (DONET) を構築し、2011年8月から本格稼働している。海底に設置した高精度な海底地震計や津波計のデータはケーブルを通じてリアルタイムで陸上に送られ、緊急地震速報などにも活用されている。DONETの第2期として、南海地震の想定震源域である紀伊水道沖に構築する準備も進んでいる。

次号の『Blue Earth』では、来るべき巨大地震に備えるJAMSTECの取り組みを紹介しよう。

BE



東北地方太平洋沖地震前後の太平洋プレート内部の応力場の変化  
地震発生前は、太平洋プレート内の浅部では引っ張り合う伸展場、深部では押し合う圧縮場になっていた。地震発生後は、深さ40km付近まで伸展場に変化した。これは、大きな正断層型の地震が発生しやすい状態である。

# 深海のUFO!?—メンダコ

メンダコの大きさは、足を広げた状態で上から見たときの直径が30～40cm程度。大きさに雌雄の差はなく、吸盤を見ると区別できる。雌は吸盤が一列に並び、雄は互い違いに並んでいる



真っ暗な深海で暮らすために、墨袋は失っている。動きはゆっくりとしていて、展示でも耳のようなひれの部分以外はほとんど動かない。周囲をゆっくりと明るくしていくと動きだすことがある

27日間。これが沼津港深海水族館で樹立されたメンダコ飼育の日本最長記録。パタパタと動く耳のようなひれ、大きな眼、放射状に広げた足。その姿はさながらUFOだ。そんなユーモラスな姿ゆえ展示したいという強い要望は後を絶たない。しかし、飼育がとても難しく、世界的に見ても展示はほとんど実現してこなかった深海200～1,000mにすむタコ。深海水族館と名乗る以上、なんとしてもこのメンダコの展示を行う。それは自分に課した責任と挑戦だった。

静岡県にある沼津港には地の利がある。ほかの県では深海魚を捕獲するにははるか沖まで行かなければならず、そこで底引き網漁をすれば、港に戻るまでに数日はかかってしまう。沼津港ならば世界で最も深い湾である駿河湾に面しているため、深海魚を捕獲してその日のうちに戻ることができる。

メンダコの長期飼育を実現するために、捕獲方法を工夫し

た。まず、網を引く時間を通常の6割程度まで短くした。メンダコは引き上げられたときに、網のなかですれ合っただけでスライム状になってしまっていることも少なくない。また、やわらかい身体に同じ網にかかったエビの触角などが突き刺さったりして、負傷していることもある。底引きの時間が短ければ、網にかかる生きものの数は減り、すれ合う時間も短くなる。

さらに漁師さんの協力も不可欠だった。海面と荷台の高さがあまり変わらない船を選び、低水温の海水を常に満たした大きめのプールを船上に設置させてもらう必要があった。これなら海面から網を高く持ち上げることなく、平行移動に近いかたちで生きものをプールへと運ぶことができる。

2011年11月16日、いつものように船に乗り込んだ。底引き網が引き上げられると、プールへと滑るように生きものたちが入っていく。その雑多な群れの一つ上に、まるでショートケーキのイチゴのように君臨するやつがいた。メンダコだ。プールの前で待ち構えていた自分の面前に、そのままずっとやって来た。大切に特製のお玉ですくい取る。体温が伝わらないように厚手のゴム手袋を使い、圧縮酸素と海水とともに手早くプラスチックバッグにパッキングして暗いところへ移した。このときのメンダコが、27日間生きた個体だ。

上陸するとすぐさま水族館にあるバックヤードの水槽に移した。まずは慣らし飼育。この期間に亡くなってしまいう個体も多い。飼育記録がほとんどなく、餌の情報も海外の短い論文に甲殻類と書かれているだけだ。死んでしまった個体を解剖し、小さいエビとイソメを食べていることは、すでに突き止めていたため、同様の餌を与えた。

慣らし飼育を終えて展示すると、メンダコはいつもバターっと平らになっていた。砂のなかに身体をほとんどを隠し、足先だけをほんの少し砂の上ののぞかせている。まるでできそこないの目玉焼きのようだ。そんな姿で過ごしている個体はほかにはいなかった。案外、調子がよいときはこうしているのかもしれない。深海で暮らすメンダコの生態は、いまでも不明な点が多い。たとえば、メンダコは瞬間的な光にとっても弱いようだ。携帯電話のカメラに付いた距離センサーの明かりでさえ、死に至ることがあることも分かった。すべてが手探りだが、一步一步進んでいく。

少しでも長く生かし、一人でも多くの人にメンダコを見てほしい。光に弱いメンダコをどのように見やすく展示するのか。「生かす」と「見せる」。この2つを両立させたい。毎日が闘いであり、勉強の日々だ。それが何より楽しい。

取材協力：石垣幸二／沼津港深海水族館・館長  
撮影：STUDIO CAC

■ Information: 沼津港深海水族館  
〒410-0845 静岡県沼津市千本港町83番地  
TEL 055-954-0606  
URL <http://www.numazu-deepsea.com/>

# 海洋循環から環境変動に迫る

「海は知れば知るほど、不思議な現象が見えてきます」

そう語る額額慎也 主任研究員は、さまざまな規模の海洋循環の変化を捉え、気候変動や生物生産に与える影響を探ろうとしている。

## 額額慎也

地球環境変動領域  
海洋環境変動研究プログラム  
海洋循環研究チーム  
主任研究員



額額慎也（こうけつ・しんや）  
1976年、岐阜県生まれ。博士(理学)。  
2004年、東京大学大学院理学系  
研究科地球惑星物理学科地球惑星  
科学専攻博士課程修了。2005年、  
海洋研究開発機構（JAMSTEC）  
地球環境観測研究センター ポス  
トドクトラル研究員。研究員を経て、  
2012年より現職。2012年度 日本  
海洋学会 岡田賞を受賞

背景は深海潜水調査船支援母船「よこすか」



海洋地球研究船「みらい」とCTD / RMSシステム (右)

CTD / RMSシステムは、電気伝導度、水温、深度を計測する中央部のCTDの周りを、36本の採水器から成るRMSが取り囲んでいる



## 研究とテスト勉強は正反対

—子どものころから海が好きだったのですか。

額額：木曾川と飛騨川が合流する岐阜県可児市で育ちました。海は家から遠く、年に1度、夏休みに連れていってもらえる、憧れの場所でした。小学校のころから理科が好きで、やがてそのなかでも物理に引かれるようになりました。

—物理の魅力は？

額額：高校になるとテストで点数を稼ぐには化学や生物は暗記することが多過ぎて……。物理はいくつかの公式さえ覚えておけば、その場で解けばいいので楽だなと（笑）。自然界には物理法則があり、公式を使うと問題がきれいに解けることが魅力的でした。

—東京大学の地球惑星物理学科に進み、やがて海を専攻テーマに選んだのはなぜですか。

額額：地球温暖化やエルニーニョ現象などが一般でも話題になり始めた時代に育ち、気象や海に興味を持つようになりました。海を選んだきっかけの1つは、学部で受けた海洋物理の授業です。物理法則を当てはめると海洋の基本現象をきれいに説明できる、という講義に引かれたのです。また、気象はすでによく分かっている分野だと誤解していました。後で勉強してみると、もちろん、そんなことはないのですが、一方、海は観測手段がとて限られていることを学びました。海面は人工衛星で水温などを観測できますが、海のなかには観測船でその海域に行き、観測機器をつり下げるなどして観測しなければ何も分かりません。海は分かっていることが多く面白そうだと思う

い、大学院では海の観測を行っている研究室に入りました。

—どの海域を観測したのですか。

額額：西日本の太平洋沖を北上した黒潮は、房総半島沖から日本沿岸を離れて東へ進みます。その黒潮主流と呼ばれる流域を観測しました。

修士課程1年のあるとき、初めて観測船に乗り込みました。先生や先輩たちがひどいんです。「酔い止め薬に頼ると飲み続けてしまう」と忠告され、薬を持っていきませんでした。そうしたら、食べたものをそのままトイレに運ぶ状態に。2週間の航海が終わった後、「船には二度と乗るものか」と誓いました。薬は絶対に持っていくべきです！

研究活動の現実にも戸惑いました。研究は高校までのテスト勉強の延長線だ、というイメージを持っていました。しかし、すでに発見された物理法則の公式を解くことと、自然現象を観測して新しい物理法則を発見することは正反対です。私は公式で問題がきれいに解けることに魅力を感じて物理が好きになりましたが、観測ではうまくいかないことばかり。期待通りの観測データはなかなか得られません。

—それでも研究者の道を選び、海を目指す理由は？

額額：学び続けている間に、海のことや現象を見たときに、不思議に思えるようになります。たとえば、ある海域に通常では見られない渦があったとします。知識がなければ何も分かりませんが、勉強を続けていくことで、「ここになぜ渦があるんだ？」と疑問に思えるよう

になります。そして観測データや現象の意味が分かってくると、何とかしてもっとよい観測データを得たい、もう少し頑張ってみよう、と思うようになりました。

## 深層循環と気候の大変動

—現在、どのような観測を行っているのですか。

額額：1980～90年代、世界の海に東西・南北にわたる観測線を引き、各国の観測船で表層から深海までの水温や塩分を精度よく観測する取り組みが行われました。その後、同じ観測線で同じ精度で再び観測して変化を探る国際プロジェクトが行われており、JAMSTECも参画して海洋地球研究船「みらい」による観測を実施しています。私もその観測に携わり、世界の海を航海して、新しい海を知る喜びを感じています。

—そのような観測で、海洋のどのような変化が分かるのですか。

額額：観測データとコンピュータ・シミュレーションによる解析により、南極周辺の深層の水温が最大で0.077℃上昇していることを、私たちは突き止めました。熱の上昇は、ほかの大洋へも広がっていることも分かりました。従来、深層の変化はとても小さいと考えられていたの、これは予想外の大きな変化です。

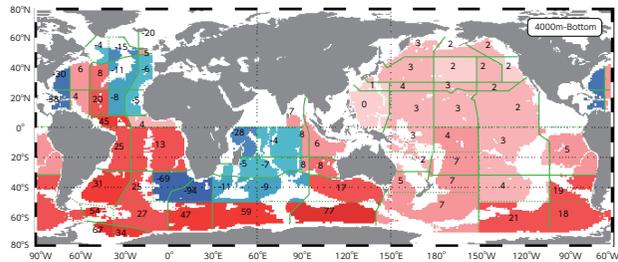
—深層で熱が大きく上昇している原因は何ですか。

額額：南極周辺とグリーンランド沖では、大気は海水によって温められ、海水は熱を大気に放出することで冷えます。そして、冷たく塩分の高い重い海水となって深層に沈み込み、世界の海を巡っています。この流れを「深層循環」といいます。

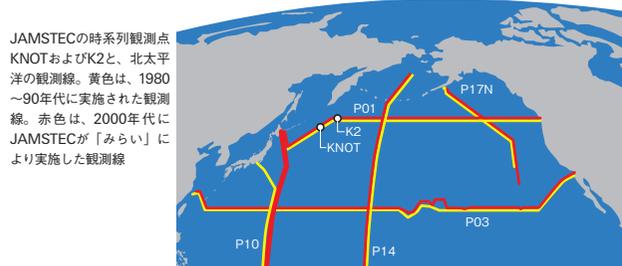
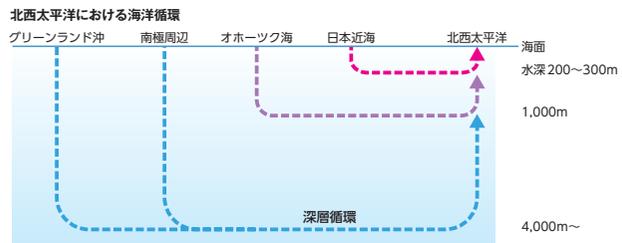
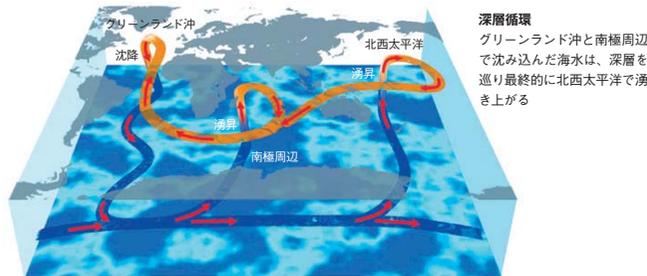
南極周辺の深層水温の大きな上昇は、この海域で冷たい海水の沈み込み量が減少し深層循環が弱まっていることを示しているのかもしれない、と指摘されています。

—深層循環が弱まると、どのような影響がありますか。

額：気候に大きな影響を及ぼす可能性



4,000mより深い深層の水温度変化  
1985～1994年と1997～2006年の水温の観測データを比較すると、南極周辺が熱が大きく上昇していることが分かった（図の赤が濃い海域ほど熱が上昇している）



JAMSTECの時系列観測点 KNOTおよびK2と、北太平洋の観測線。黄色は、1980～90年代に実施された観測線。赤色は、2000年代にJAMSTECが「みらい」により実施した観測線

があります。たとえば約1万2000年前、北半球高緯度域で100年に約5℃という急激な寒冷化が起きました。この「ヤングドリウス・イベント」と呼ばれる気候変動の原因は、深層循環が止まったことによるものだ、といわれています。当時は、地球が寒冷な水期から温暖な間水期へ向かう移行期でした。温暖化によ

り北米を覆っていた氷床が融けて、真水が北大西洋へ流れ込みました。すると海水の塩分が低くなり、軽くなります。そのためグリーンランド沖での沈み込みが起きなくなり、深層循環が止まった可能性があります。すると海水による大気の加熱効果が弱まり寒冷化した、と考えられているのです。

私もこの1万2000年前に起きたとされる気候変動の推察は大筋では間違っていないと思いますが、完璧なストーリーではないと考えています。ヤングドリウス・イベントを再現するコンピュータ・シミュレーションでも、条件によっては深層循環が止まらないケースがあります。当時の大気や海洋の記録をさらに詳しく調べるとともに、現在の海を詳しく観測して、当時と同じような現象を抽出し、その過程を詳しく解明していく必要があります。

—海と気候変動は密接に関連しているのですか。

額：そもそも地球は海があるおかげで、気候変動が和らげられています。海は大気に比べて熱を1,000倍も蓄積することができます。そして温暖化ガスである二酸化炭素を60倍も溶かし込んでいます。海が大気から熱や二酸化炭素を吸収したり放出したりすることで、急激な温暖化や寒冷化を緩和しているのです。

ただし、そのような緩和効果がどれくらいの時間スケールで、どれくらいの効果をもたらすのか、はっきりした量は分かっていません。それを知るには、海洋循環が長期的にどのように変化しているのか、その変化が海と大気の熱や物質のやりとりでどれくらい影響を与えているのかを調べる必要があります。そのため私はいま、中層の海洋循環に注目しています。

さまざまな規模の海洋循環が気候や生物に影響を与えている？

—深層循環以外にも、さまざまな海洋循環があるのですか。

額：海水の沈み込みはさまざまな海域で起きています。たとえば北西太平洋では、オホーツク海や日本近海で冷やされた海水が沈み込んでいます。ただし、その沈み込みは深層までは達せず、水深200～1,000mの中層で広がり、30年ほ

どで海面へ上昇してきます。

実は、北西太平洋は深層循環の終着点です。4,000mを超える深層からは、約1,500年前にグリーンランド沖で沈み込んだものと南極周辺で約800年前に沈み込んだものが混じった海水が上昇しています。さらに水深200～1,000mの中層では、オホーツク海や日本近海で30年ほど前に沈み込んだ海水が合流します。このように、さまざまな年代に沈み込んだ海水が混ざり、海面へ上昇してきているのです。

—中層の海洋循環も気候変動に関係しているのですか。

額：JAMSTECむつ研究所では、北西太平洋沿岸に係留した観測装置や「みらい」による定期的な観測を行っています。そのような定点での時系列観測や、沿岸で各機関により長年続けられてきた観測により、中層へ沈み込んだ低温の海水量が10～20年周期で増えたり減ったりしている、と指摘されています。その変化が、気候へ影響を及ぼしている可能性があります。

ただしその影響を知るには、定点で観測した変化がどれくらいの海域に広がっているのかを調べる必要があります。私たちは「みらい」により、1980～90年代に観測された北太平洋の観測線を再び観測しました。そして、沿岸観測などで指摘された20年周期の変動にあたる変化が、北太平洋の広い海域でも見られることを明らかにしました。

—北太平洋中層水の形成・構造と変動に関する観測的研究により、2012年度の日本海洋学会 岡田賞を受賞されました。なぜ、中層の海洋循環が20年周期で変化しているのですか。

額：それが重要ですが、仕組みはよく分かっていません。中層における低温層の厚みの変化を観測して、沈み込み量が増えたり減ったりしているのかわかりません。沈み込み量そのものが20年周期で変化しているのならば、海による大気の加熱効果が変わり、気候変動を引き起こす要因となっているかもしれません。

ただし、中層の低温層の厚みは、風や潮汐力によって表層と中層がかき混ぜられることによって変化します。かき混



「みらい」の船上で観測を行う額主任研究員

ぜにより中層の低温層の厚みが変化しても、海面の水温が変化しなければ気候に直接的には影響を与えません。気候への影響を知るには、どのような仕組みで20年周期の変化が起きているのか突き止める必要があります。

また、海洋循環は気候だけでなく、生物生産にも影響を与えている可能性があります。日本近海で沈み込んだ海水は水深200～300mで広がり、やがて上昇してきます。北西太平洋の表層は、水深200～300mから上昇してくる海水に含まれる豊富な栄養塩を使って植物プランクトンが大繁殖し、イカやサケ、サンマ、イワシなどが大きく成長する世界最大級の生物生産の現場になっています。そのような生物生産に対して、水深200～300mの海洋循環の変化が直接影響を及ぼしているかもしれません。

海洋循環の変化を観測して、地球の過去と未来を知る

—江戸時代は現在より気温が低く、小氷期だったといわれています。それも海洋循環と関係している可能性がありますか。

額：中層における海洋循環の数百年周期の変化がある程度関連しているのかも

しれません。—気候や生物などの未来を予測するには、深層循環だけでなく、さまざまな規模の海洋循環の変化を観測する必要があります。

額：その通りです。深層循環の観測や分析は多くの研究者が進めていますが、海のなかの観測は深層だけに限定せず、広く行わなければなりません。海は知れば知るほど、予想外の不思議な現象が見えてくるからです。私は、さまざまな規模の海洋循環を観測し、それらがどのように変化しているのか、その変化が気候や生物生産にどのような影響を与えているのかを調べていきたいと思っています。そのような研究により、海が気候変動をどの程度緩和しているのかを理解することができるでしょう。そして過去に起きた急激な気候変動の解明や未来予測にも役立つはずです。

—最後に、研究者を目指す「Blue Earth」の若い読者にアドバイスをください。

額：テスト勉強と研究は正反対だといいましたが、高校までの勉強が研究を行う上でのベースとなることは間違いありません。あまり考え過ぎずに、そのときに必要なことを、素直に頑張ることが大切だと思います。



2018年

## 透明球有人潜水調査船で 知られざる生態系を探る

潜航開始からすでに一昼夜が経過していた。小笠原諸島沖の水深1,000mの深海。私たちはマッコウクジラに付けた発信器からの信号を頼りに、高速航行でクジラの追跡を続けてきた。深海の生物は光に敏感なので、ライトを落としたまま赤外線モニターを見ながらの操縦だ。

突然、マッコウクジラが激しく動き始めた。大きな獲物を捕らえたようだ。至近距離まで近づきライトを点灯。すると、透明球の窓いっぱいには2体の巨大な生物の姿が浮かび上がった。マッコウクジラはダイオウイカと格闘していた

のだ。それだけではない。あたり一面にマリンスノーが降り注ぐとともに、たくさんの生物が生息している。水深1,000mに、知られざる豊かな生態系が広がっていた。

私たちが乗り込んだのは、海洋研究開発機構(JAMSTEC)が「しんかい6500」の建造以来、四半世紀の歳月を経て2018年に完成させた新しい有人潜水調査船。いまここに発見した生態系の成り立ちを探るため、次の潜航ではこの海域の水深3,000mに広がる深海底を目指すことにしよう。

# 新しい領域を開き、社会に貢献する

——平朝彦 理事長に聞く

平朝彦 海洋研究開発機構 理事長



たいら・あさひこ。1946年、宮城県生まれ。Ph. D. 東北大学理学部卒業。テキサス大学ダラス校大学院博士課程修了。高知大学助手、東京大学海洋研究所教授などを経て、2002年、海洋科学技術センター地球深部探査センター長。海洋研究開発機構理事長を経て、2012年4月より現職。専門は海洋地質学

## 海洋の中層にハイブリッド生態系が広がっている？

——前ページで、水深1,000mに広がる豊かな生態系の想像図を描きました。本当にそのような生態系があるのでしょうか。

平：その存在は確かめられていませんが、私は海の中層、水深500~2,000mに知られざる生態系が広がっていると予想し、「ハイブリッド生態系」と名付けています。

——ハイブリッドとは、「混合」という意味ですね。

平：中層には、表層と深海の両方から物質の供給があり、それらが混合しているという考えです。

表層では、植物プランクトンが盛んに光合成を行い、生物の栄養源となる有機物をつくり出しています。それら植物プランクトンなどの死骸が、マリンスノーとなって中層に降り注いでいます。

一方、深海底にはメタンが湧き出ている場所や、海底下の化学物質を溶かし込んだ熱水が噴き出している熱水噴出孔があります。たとえば新潟沖の日本の海底には大量のメタンが放出されている場所があり、そこにベンズワイガニが密集していることを、東京大学の浦環教授たちが明らかにしました。そのようなメタンや熱水に含まれる化学物質、さらにそこに含まれる微生物などが中層へ運ばれています。

従って中層では、表層と深海の両方から供給される物質をエネルギー源とする微生物が活発に活動し、それらと共生したり、あるいは捕食するさまざまな生物たちが集まったりして、豊かな生態系を築いている、と私は予想しているのです。

普段は栄養源に乏しい深海に生息している生物も、ときには中層へ移動して栄養補給をしているかもしれません。表層にすむ生物にとっても、中層は交尾や産卵を行う場になっている可能性があります。中層の生態系は、海洋のさまざまな層に生息する生物たちが出会う場となっているのではないかと。このようなハイブリッド生態系は地質学者である私の仮説ですが、同様な考えを持つ生物学者も多いと思います。

## 新しい領域を開くための次期有人潜水調査船

——ハイブリッド生態系を検証するために、新しい有人潜水調査船が必要なのですね。

平：ハイブリッド生態系のような新しい領域を開くときには、その現場をよく観察することが重要です。特に生物は、実際の生息場所において予想もできない生態を見せます。陸上の生物ですら、その生態は分かり始めればかり。多くの深海生物の生態は、まったく分かっていません。

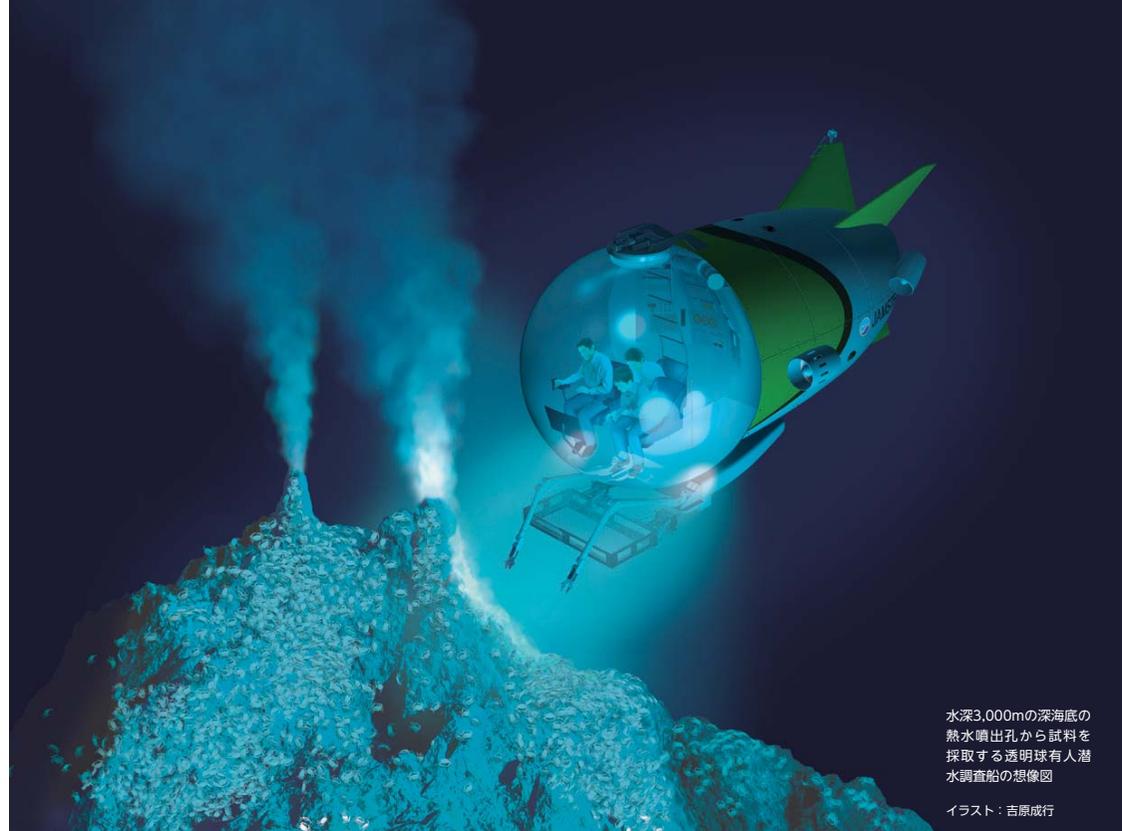
有人潜水調査船の最大のメリットは、人が現場に行き直接見たり、周囲の状況を感じ取ったりすることができる点です。「しんかい6500」は素晴らしい成果を挙げましたが、小さな窓（内側の直径12cm）から深海の世界をのぞいてきました。水中の最大速度は2.7ノット（時速約5km）。潜航時間は8時間で、日中に潜航開始から海面浮上までを行うことになっていますので、深海での調査時間は限られています。

新しい有人潜水調査船では、人が透明球に乗り込んで広い視野で深海を観察し、その世界を感じ取れるようにしたい。さらに、生物を追跡する高速航行や長時間の潜航により、現場をじっくり徹底的に観察することで、新しい領域を切り開きたいのです。

——潜航深度は？

平：深海からハイブリッド生態系への物質の流れや生物の移動を調べるには、水深3,000mくらいの潜航能力がほしいですね。さらに11,000mの世界最深部への到達も不可能ではありません。もちろん、そのような透明球有人潜水調査船はハイブリッド生態系の検証だけでなく、さまざまな研究分野にブレークスルーをもたらさずにはなりません。

透明球有人潜水調査船はまだ、私個人のアイデア



水深3,000mの深海底の熱水噴出孔から試料を採取する透明球有人潜水調査船の想像図

イラスト：吉原成行

の段階です。JAMSTEC海洋工学センターでは、次期有人潜水調査船について、チームを立ち上げて検討を進めています。ただし、その基本は新しい領域を切り開くためのものでなければならない、というのが私からの要望です。

——「しんかい6500」の建造から20年以上がたち、技術の伝承が難しくなりつつあります。

平：建造するとなったら、ぜひ世界の技術を結集したいですね。大企業だけに依頼するのではなく、多くのベンチャー企業も巻き込み、匠の技をたくさん組み込みたいと思います。

## 自由闊達にして愉快なる理想の研究所に

——今年4月にJAMSTEC理事長に就任されました。

どのような研究所を目指しますか。

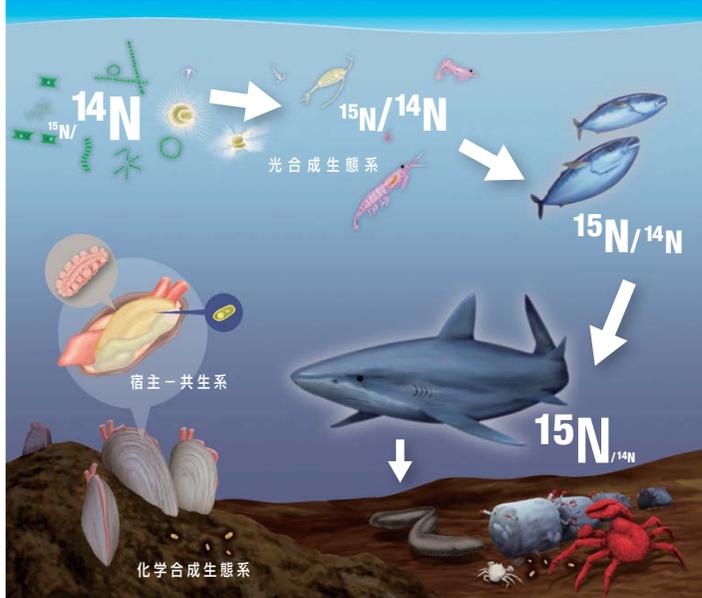
平：地球は広大な海を持つユニークな惑星です。海があり続けたからこそ、生命が誕生し多様な進化を遂げてきました。大陸地殻と海洋地殻から成る表層の構造や運動、大気の組成や気候の特徴も、海が存在が主因となっています。地球と生命を理解する上で、海の解明が欠かせません。

JAMSTECには、海を解明するための研究船や研

究基盤がそろい、基礎研究から応用研究まで、さまざまな分野の優秀な研究者・技術者が集まっています。そのようなJAMSTECの個性を生かし、JAMSTECにしかできないことをやりたい。それには、地球や生命を一体として捉え、新しい領域を根本から掘り起こし、応用までを一気通貫に考える必要があります。それを組織としても個人としても考え抜く研究所に育て上げたいと思います。

ハイブリッド生態系も、そのような考えに基づくアイデアの1つです。ハイブリッド生態系の検証により地球と生命の理解が進むだけでなく、そこにはエネルギーや食糧問題の解決、病気の克服に役立つような優れた酵素を持つ生物がいるかもしれません。それを同時に探査します。

ソニー創業者のひとりである井深大さんは、会社設立の目的として、「真面目なる技術者の技能を、最高度に発揮せしむべき自由闊達にして愉快なる理想工場の建設」と記しました。私たちも、研究者のみならず、技術者、事務職員、経営者を含めてひとりひとりが創造的な意志を持ち、自由闊達にして愉快に未踏領域の研究を進めて社会に貢献する。そういう理想の研究所を目指していきます。 **BE**



イラスト：山田純一

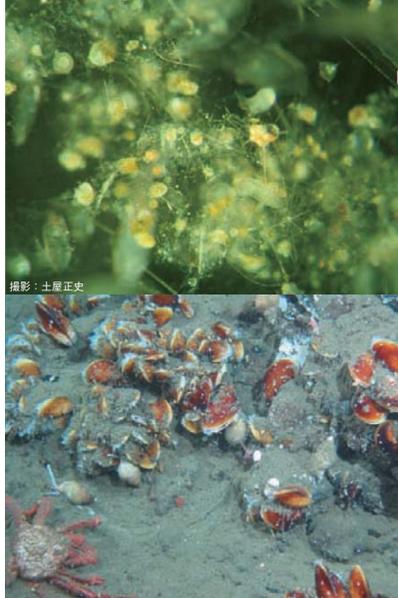


図1 生物間の関係とアミノ酸の窒素同位体比の変化

食物連鎖など生物の複雑な関係を解き明かす新しい指標が、アミノ酸に含まれる窒素(N)の同位体比である。生産者(14N)に対して15Nの割合が高い。捕食者の体内に重い窒素15Nが濃集していくため、栄養段階が高くなるほど15Nの割合が高くなっていく。上の写真は、光合成生態系の実験者である植物プランクトンと、低次消費者である有孔虫やカイアシ類。下の写真は、化学合成生態系のシンカイヒバリガイ類の群集と、それを捕食するツツナリシャジクとエゾイバラガニ(相模湾)

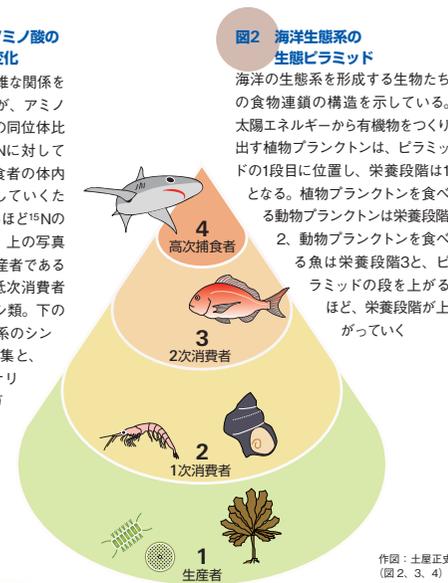


図2 海洋生態系の生態ピラミッド

海洋の生態系を形成する生物たちの食物連鎖の構造を示している。太陽エネルギーから有機物をつくり出す植物プランクトンは、ピラミッドの1段目に位置し、栄養段階は1となる。植物プランクトンを食べる動物プランクトンは栄養段階2、動物プランクトンを食べる魚は栄養段階3と、ピラミッドの段を上がるほど、栄養段階が上がっていく

# 生物多様性

## 海洋生態系の仕組みと成り立ちを知る

2011年12月17日 第138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  
海洋環境・生物圏変遷過程  
研究プログラム  
同位体生態学研究チーム  
チームリーダー(技術研究副主任)  
**土屋正史**

つちや・まさし。1971年、岩手県生まれ。博士(理学)。2000年、静岡大学大学院理工学研究科環境科学専攻修了。海洋研究開発機構極限環境生物圏研究センター/日本学術振興会特別研究員(PD)などを経て、2006年、地球内部変動研究センター技術研究副主任。2009年から現職。有孔虫を中心とした原生動物の生態や分子生態学的研究、同位体生態学研究を行う

生物多様性とは、生物の種類が多様であることだけを表す言葉ではありません。同種の個体間にある遺伝子の違いや、熱帯雨林や砂漠といった生息環境の違い、そして生物同士の関わり方の違いを含めて、生物多様性といいます。

最近の調査から、日本近海は世界の海のなかでも生物多様性がとても高い「生物多様性のホットスポット」であることが明らかになりました。日本近海には、3万3625種もの生物が生息しています。世界中の海洋生物は約25万種といわれているので、その13%以上が日本近海に存在していることになります。

日本近海では、熱帯性の黒潮と寒冷な親潮が交わり、水温や塩分の異なる海水が複雑に混ざり合う環境ができています。同時に多くの栄養塩類やプランクトンが運ばれ、「潮目」と呼ばれる良好な漁場が形成されています。さらに日本近海は、熱帯海域から寒冷海域、干潟から

深海まで、環境も多様です。また日本列島の周辺では、地球の表面を覆うかたい岩板であるプレートがぶつかり合っています。そのため海底地形は非常に複雑で、プレート境界では硫化水素やメタンを含む地下水が湧き出して、化学合成生態系という特殊な生物群集を育てています。このような要因から、日本近海では多様な生態系が形成されているのです。

### 生物間のつながりを調べる

私たちは、日本の周りに広がる豊かな海からさまざまな恩恵を受けています。こうした生物多様性は、生態系を構成する生物同士の複雑な相互作用の上に成り立っています。しかし乱獲や環境の変化によって特定の種の個体数が減ったり増えたりすると、生態系のバランスが崩れ、生態系の恩恵を受けられなくなる恐れも出てきます。生物の多様性を守りながら利用していくためには、環境の変化によ

熱帯海域から寒冷海域まで多様な海洋環境を持つ日本近海は、3万種以上もの海洋生物が暮らす生物多様性のホットスポットです。この貴重な海洋生態系は、どのような仕組みで成り立っているのでしょうか。生物の体を構成するアミノ酸に含まれる窒素の同位体比を用いた先進的な分析方法で、生物の食物連鎖や共生の関係を解き明かし、複雑な海洋生態系のダイナミクスに迫ります。

って生態系にどのような影響があるかを予測する必要があります。そのためには、生態系を構成する生物同士のつながりを理解することが不可欠です。

海洋研究開発機構(JAMSTEC)海洋・極限環境生物圏領域の同位体生態学研究チームでは、海の生物たちが何を食べて何に食べられているのかという生物の食物連鎖から、生態系の構造を明らかにしようとしています(図1)。

生態系の構造を表すとき、生態ピラミッドがよく使われます(図2)。植物プランクトンなどの生産者が1次消費者の草食動物に食べられ、それが2次消費者の肉食動物に食べられるというつながりを示したものです。生態ピラミッドの段を、「栄養段階」といいます。海洋生態系では、植物プランクトンの栄養段階は1、動物プランクトンが2、小型の魚が3、サメが4といったように、1つ上の捕食者になると栄養段階が1つ上がります。

生態系の構造を理解するには、いくつかの方法があります。生物を採取して個体数を数えたり、生物の胃のなかを調べて食物連鎖の関係を明らかにしたりするのも1つの方法です。しかし、オキアミなど大きさが数cmの生物では、胃のなかを調べるのはとても大変です。そこで、食物連鎖の関係を、ある物差しを使って比較しています。それが安定同位体です。

### 安定同位体比から食物連鎖が分かる

安定同位体とは、同じ元素でも重さ(質量数)の異なる元素のことで、海洋生態系の食物連鎖の関係を調べるには、有機物に多く含まれている窒素や炭素の同位体比がよく使われます。

たとえば窒素の場合、窒素(N)の安定同位体には、質量数が14の<sup>14</sup>Nと、質量数が15の<sup>15</sup>Nがあります。<sup>14</sup>Nは軽い窒素なので、生物の体内で代謝されてアン

モニアなどの代謝物質が尿として排出されるときに、重い窒素<sup>15</sup>Nよりも排出されやすくなります。そして捕食者の体内には、重い窒素<sup>15</sup>Nが濃集していきます。そのため、栄養段階が高くなるほど<sup>15</sup>Nに対する<sup>14</sup>Nの割合(同位体比)が段階的に高くなるのです(図1)。

たとえばロシアにあるバイカル湖の調査では、植物プランクトンから動物プランクトン、小型の魚、大型の魚、バイカルアザラシへと、<sup>15</sup>Nの同位体比が段階的に高くなっていることが分かりました。窒素同位体比から、生態系の構造がきれいに見えるのです。

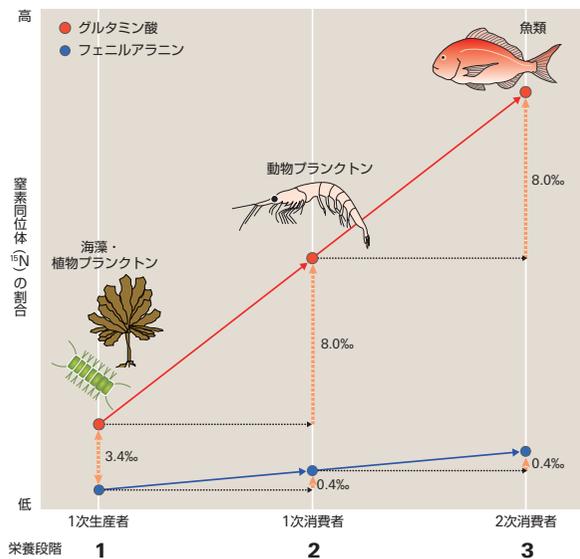
しかし、この方法にはいくつかの問題があります。栄養段階を決めるには、生産者の窒素同位体比を調べて基準とする必要があるのですが、生産者の窒素同位体比は地域や季節の影響を受けやすく、大きく変動してしまうのです。栄養段階による同位体比の差は非常に小さく、%より1桁小さい‰(‰:パーミル、1000分の1)で表さなければならぬほどです。基準となる生産者の窒素同位体比が大きく変動するのでは、栄養段階によるわずかな同位体比の差を読み取ることは至難の業です。

### アミノ酸の窒素同位体比

そこで私たちは、アミノ酸に含まれる

図3 アミノ酸の窒素同位体比分析による栄養段階の推定

グルタミン酸とフェニルアラニン、生物の体に含まれるアミノ酸である。グルタミン酸では、栄養段階が1つ高くなると、<sup>15</sup>Nの割合が約8.0‰(‰:パーミル、1000分の1)ずつ上がる。フェニルアラニンでは、栄養段階が高くなっても<sup>15</sup>Nの割合はほとんど変わらない。グルタミン酸における<sup>15</sup>Nの割合とフェニルアラニンにおける<sup>15</sup>Nの割合の差が大きいほど、栄養段階が高いと推定できる



窒素の同位体に着目して、生物の栄養段階を調べる新しい方法を開発しました(図3)。アミノ酸とは、細胞の基礎となる物質で、酸素、炭素、水素、窒素からできています。生物の体内に含まれるアミノ酸のうち、グルタミン酸とフェニルアラニンという2種類のアミノ酸に含まれる窒素同位体比を調べて栄養段階を求めます。

グルタミン酸は、栄養段階が上がるほど、重い窒素<sup>15</sup>Nの割合が一定の率で増えていきます。それに対してフェニルアラニンは、栄養段階が上がっても、<sup>15</sup>Nの割合はほとんど変わりません。つまり、グルタミン酸の<sup>15</sup>Nの割合とフェニルアラニンの<sup>15</sup>Nの割合を比較して、両者の差が大きければ大きいほど、栄養段階が高いということが分かります。季節変動などの影響を受けやすい生産者の情報を基準とする必要はありません。調べたい個体のグルタミン酸とフェニルアラニンの<sup>15</sup>Nの割合が分かればよいのです。

しかも、これまでの手法では、試料に含まれるすべての窒素の同位体比を解析するためたくさんの試料が必要でしたが、新しい手法では、魚のうろこ1枚ほどのごくわずかな試料で分析が可能です。このアミノ酸の窒素同位体比を用いた新しい分析法によって、海洋生物の食物連鎖の

関係がはっきり見えてきました(図4)。

### オキアミ類の生存戦略

図4から、いくつかの生物について詳しく解説していきます。オキアミとツノナシオキアミは、同じオキアミの仲間ですが、栄養段階には約0.5の差が見られるので、食べているものが違うと推測できます。

ツノナシオキアミの分布は、植物プランクトンが多い沿岸域です。しかし沿岸域は捕食者である魚や海鳥も多いので、捕食者から逃れるため、昼間は深いところに潜っています。一方オキアミは、動物プランクトンが多い外洋にいます。捕食者が少ないので、水深の深いところに潜る必要はなく、そのため余分なエネルギーを使わずに済みます。

ツノナシオキアミの栄養段階がオキアミより低く、植物プランクトンとの中間的な値になるのは、オキアミが動物プランクトンをよく食べるのに対して、ツノナシオキアミは植物プランクトンも食べるためだろうと考えられます。このように、生態的な特徴と栄養段階を調べれば、オキアミ類の好みや生存戦略も知ることができます。

### 食物連鎖を裏付けるデータ

次に、深海にいる化学合成生態系の生物について紹介します。化学合成生態系とは、深海底から地下水が湧き出す場所などに形成される生態系です。地下水には、硫化水素やメタンといった生物には毒となる成分が含まれています。この硫化水素やメタンを使って細菌が有機物をつくり出し、生態系の生産者となっています。この生物群のうち、シンカイヒバリガイ類という二枚貝と、ツブナリシャジクという巻き貝について、アミノ酸の窒素同位体比から栄養段階を調べました(図4)。

その結果、ツブナリシャジクの栄養段階は、シンカイヒバリガイ類より0.8高いことが分かりました。このことは、ツブナリシャジクが栄養源のほとんどをシンカイヒバリガイ類から得ていることを示しています。

ツブナリシャジクがシンカイヒバリガイ類を食べていることは、胃の内容物や、潜水調査船を用いた調査によって、すでに推測されていました。シンカイヒバリ

ガイ類のコロニーの脇にサバを置いてもツブナリシャジクは集まってきましたが、潜水調査船のマニピュレータを使ってコロニーをつぶしてみたところ、ツブナリシャジクが集まってきて、つぶれたシンカイヒバリガイ類を捕食する様子が観察されたのです。アミノ酸に含まれる窒素同位体比から得られた栄養段階のデータは、このようなツブナリシャジクの行動を裏付けるものでした。

### 宿主と共生菌の関係

化学合成生態系のもう1つの例を見ましょう。シロウリガイという二枚貝は、硫化水素やメタンを使って有機物をつくる細菌をえらにすまわす、自らの栄養源にしています。このような関係を「共生」といいます。宿主と共生菌の関係も、広い意味では食物連鎖に入ると考えられるため、共生菌とシロウリガイの間でも、アミノ酸の窒素同位体比の違いがあるはずですが、海洋生態系の構造を知るには、このような微小な生物間関係も見なければいけません。

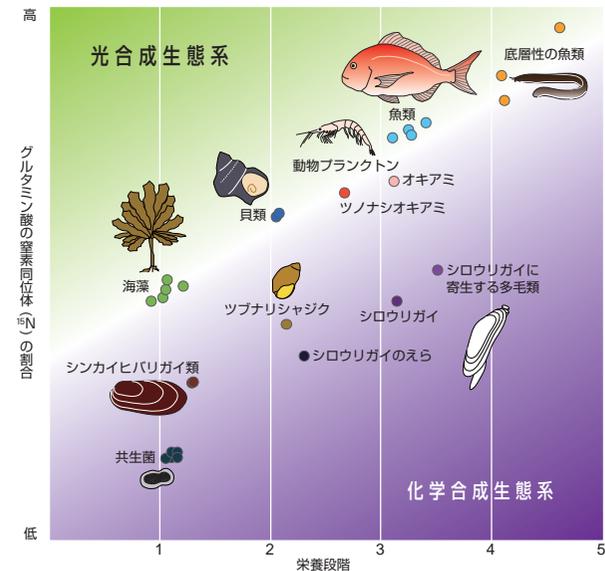
窒素同位体比を調べた結果、共生菌、シロウリガイのえら、シロウリガイ、シロウリガイに寄生する多毛類(ゴカイの仲間)の順で、栄養段階が上がっていくことが分かりました(図4)。共生菌と宿主であるシロウリガイでは、栄養段階がほぼ1上がっており、食物連鎖と同じ関係があることを示しています。多毛類は、シロウリガイのえらより1.2上がっているため、シロウリガイのえらを食べていることが分かります。

いくつかの分析例を紹介してきましたが、これらは海の生物のごく一部にすぎません。海洋生態系の構造を理解するには、もっとたくさんの生物について食物連鎖の関係を明らかにする必要があります。

生物が食べられるということは、有機物がより高次の捕食者に移動するということです。そうした物質の流れに加えて、エネルギーの流れを明らかにすることも重要です。もともと有機物は、太陽エネルギーや化学エネルギーが生産者によって変換されたものです。どこで、どのくらいのエネルギーが有機物に変換され、その有機物がどのように移動していくのか。近い将来、海洋でのエネルギーと物質の流れを描き出したいと思っています。

図4 アミノ酸の窒素同位体比と栄養段階

相模湾で採取された海洋生物の体に含まれるアミノ酸のうち、グルタミン酸とフェニルアラニンの窒素同位体<sup>15</sup>Nの割合を分析し、栄養段階を計算した。各点の色は、生物種の違いを表している。グルタミン酸の<sup>15</sup>Nの割合は、高次の捕食者ほど高くなっている



### 生物多様性の進化

生物多様性とその変動を考えるには、生物の絶滅や進化も重要です。栄養段階の分析は、絶滅や進化の理解にも役立つと期待されています。まだ仮説の段階ですが、その例をご紹介します。

秋田県の田沢湖において絶滅したと考えられていたクニマスが、2010年、山梨県の西湖で再発見され、ニュースになりました。田沢湖と西湖のクニマスのアミノ酸に含まれる窒素同位体比を調べて、もし栄養段階が同じならば、生息地が変わっても餌の種類はほとんど変わらなかったことが分かるでしょう。逆に栄養段階が大きく異なれば、垂種や変種のレベルに分化が進みつつあるという可能性を示すこととなります。

実際に、生息環境の変化によって栄養段階が大きく変わった例もあります。アメリカのレイクトラウトというマスの仲間の例です。レイクトラウトが生息する湖にブラックバスが持ち込まれたところ、レイクトラウトの栄養段階が4から3に下がってしまったのです。

もともとレイクトラウトは、餌の60%が小魚、40%が動物プランクトンでした。

しかしブラックバスが小魚を食べてしまうので、レイクトラウトの餌の80%が動物プランクトンになり、小魚はわずか20%になってしまいました。これが、栄養段階が下がった要因です。

この状態が長く続けば、レイクトラウトは絶滅する恐れもあります。あるいは、プランクトンを食べやすいように消化器官や消化酵素が変わるかもしれません。こうした形態の変化とともにレイクトラウトの生態が変化して、やがて異なる垂種になる可能性もあります。このように進化の観点からも、生物多様性の成立過程を読み取ることができるかもしれません。

### 生物多様性の解明に向けて

生物多様性の仕組みと成り立ちについて、私たちの分析手法とデータを交えてお話してきました。しかし生物多様性については、まだ分からないことがたくさん残されています。海の生物を見たときに、その生物を取り巻く多様な環境が存在すること、そして生物同士が複雑につながっていることを感じていただきたいと思います。

## 編集後記

特集「東北地方太平洋沖地震に関連するJAMSTECによる調査・研究その成果と今後」はいかがだったでしょうか。3.11大地震とそれに伴う大津波は、東北を中心とする東日本全域に未曾有の大被害をもたらしました。JAMSTECは、地震発生直後から多くの船舶を用いて幾度も調査航海を行っています。本特集において調査結果の一部をまとめましたので、ぜひじっくりとお読みいただきたいと思います。

これらの調査においても大活躍した「しんかい6500」に大きな改造が行われたことはすでにご報告致しましたが、大きな主推進器が小さな推進器2台になった後ろ姿に、いまだに違和感を覚えます。小生にとっては「せっかく苦労してつくったプラモデルの形が変わってしまっていて……」くらいで済んでいますが、広報担当の皆さんは印刷物やWEBなどの写真の差し替えに大わらわだったようです。読者の皆さんも一般公開などの機会にリニューアルした「しんかい6500」の実物をぜひご覧になり、担当者に運動性能の違いなどをお尋ねになってみてはいかがでしょうか？

さて、懸案だった有人潜水調査船「しんかい2000」の常設展示が7月14日から新江ノ島水族館で開始されました。ご存知のように「しんかい2000」は1981年に完成し、2002年に活動を休止するまで1,411回の潜航を行い、相模湾初島沖での化学合成をするシロウリガイのコロニー発見や沖縄トラフでの熱水噴出現象の発見などの成果を残しています。彼女？のこれからの第二の人生でも、水族館の来場者に多くの夢や感動を与えられることを期待しています。(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館受付にて、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.045-778-5378 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(124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24巻 第2号(通巻118号) 2012年8月発行

発行人 鷲尾幸久 独立行政法人海洋研究開発機構 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 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(p20-27)/鈴木志乃(p1-17、裏表紙)/坂元志歩(p18-19)  
佐藤ひとみ(p28-31)

デザイン 株式会社デザインコンビビア

(AD 堀木一男/岡野祐三/飛鳥井羊右/山田純一ほか)

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

Eメールアドレス [info@jamstec.jp](mailto:info@jamstec.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24年7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)

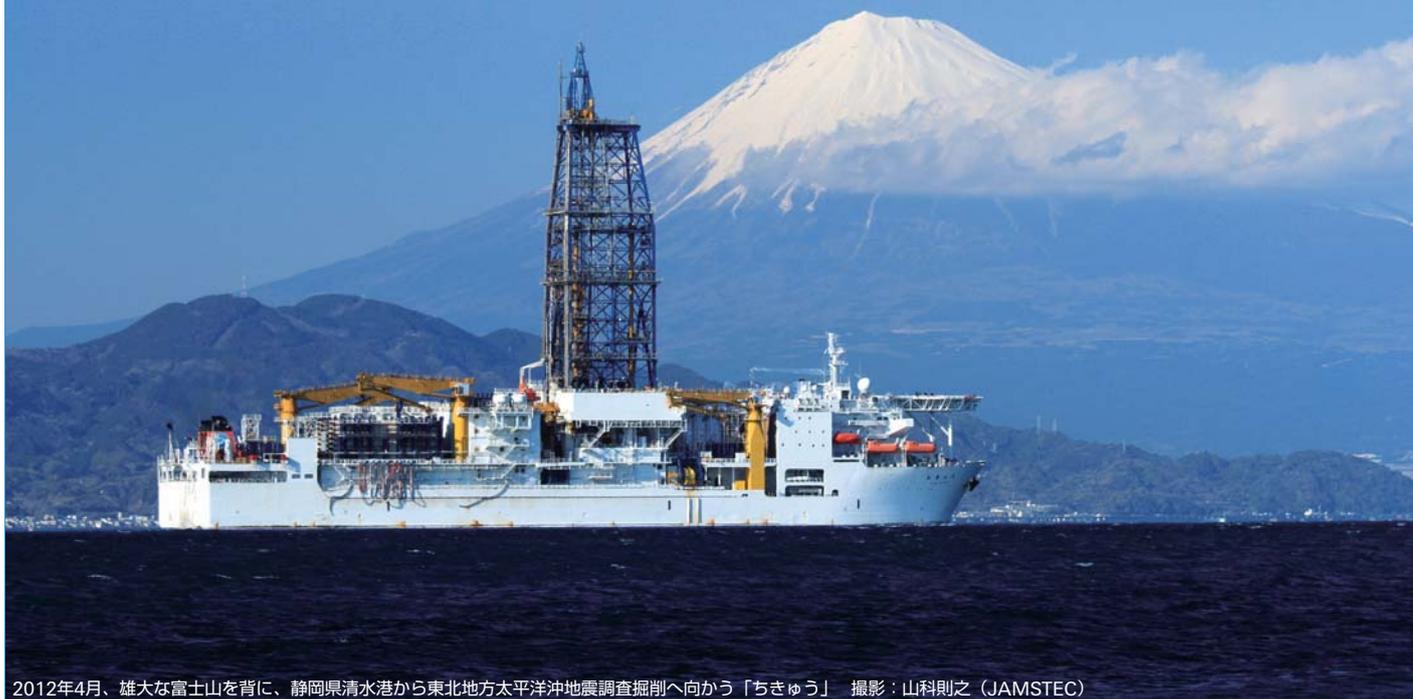
株式会社IH	株式会社カイショー
株式会社アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド	株式会社海洋総合研究所
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	海洋電子株式会社
株式会社アイケイエス	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アイワエンタープライズ	鹿島建設株式会社
株式会社アクト	川崎汽船株式会社
株式会社アサツディ・ケイ	川崎重工株式会社
朝日航洋株式会社	株式会社環境総合テクノス
アジア海洋株式会社	株式会社開電工
株式会社アルファ水工コンサルタント	株式会社キュービック・アイ
泉産業株式会社	共立インシュアランス・プロコース株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	共立管財株式会社
株式会社工ス・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	株式会社ききんでん
株式会社NTTデータCCS	株式会社熊合組
株式会社NTTファシリティーズ	クローバテック株式会社
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	神戸ペイント株式会社

広和株式会社	セコム株式会社
国際気象海洋株式会社	セナーアンドバーンス株式会社
国際警備株式会社	株式会社損害保険ジャパン
国際石油開発帝石株式会社	第一設備工業株式会社
国際ビルサービス株式会社	大成建設株式会社
五洋建設株式会社	大日本土木株式会社
株式会社コンポニ研究所	ダイハツディーゼルの株式会社
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	中部電力株式会社
シナネン株式会社	株式会社鶴見精機
清水建設株式会社	株式会社テザック
シュルンベルジェ株式会社	寺崎電気産業株式会社
株式会社商船三井	電気事業連合会
一般社団法人信託協会	東亜建設工業株式会社
東海交通株式会社	新日鉄エンジニアリング株式会社
新日本海事株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社
須賀工業株式会社	東京海上自動火災保険株式会社
鈴鹿建設株式会社	東京製綱繊維ロープ株式会社
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
住友電気工業株式会社	東洋建設株式会社
清進電設株式会社	株式会社東陽テクニカ
石油資源開発株式会社	トビー工業株式会社

株式会社中村鐵工所	株式会社フジクラ
西芝電機株式会社	富士ゼロックス株式会社
西松建設株式会社	株式会社フジタ
株式会社ニシヤマ	富士通株式会社
日油技研工業株式会社	富士電機株式会社
株式会社日産クリエイティブサービス	古河電気工業株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	古野電気株式会社
日本SGI株式会社	松本徽章株式会社
日本海洋株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本海洋掘削株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海洋計画株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
日本海洋事業株式会社	株式会社マルト
一般社団法人日本ガス協会	三鈴マシナリー株式会社
日本興亜損害保険株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
日本サルヴェージ株式会社	三井造船株式会社
日本水産株式会社	三菱重工業株式会社
株式会社テザック	株式会社三菱総合研究所
日本ビュレレット・バックカード株式会社	株式会社森京建築事務所
日本マントル・クレスト株式会社	八洲電機株式会社
日本無線株式会社	郵船商事株式会社
日本郵船株式会社	郵船ナブテック株式会社
株式会社間組	ユニバーサル造船株式会社
清中製鋼工業株式会社	ヨコハマコム・マリン&エアロスペース株式会社
東日本タグポート株式会社	
株式会社日立製作所	
日立造船株式会社	
株式会社日立プラントテクノロジ	
深田サルベージ建設株式会社	

## 独立行政法人海洋研究開発機構の事業所

<b>横須賀本部</b>	〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島2番地15 TEL. 046-866-3811 (代表)
<b>横浜研究所</b>	〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25 TEL. 045-778-3811 (代表)
<b>むつ研究所</b>	〒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)
<b>高知コア研究所</b>	〒783-8502 高知県南国市物部乙200 TEL. 088-864-6705 (代表)
<b>東京事務所</b>	〒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)
<b>国際海洋環境情報センター</b>	〒905-2172 沖縄県名護市字豊原224番地3 TEL. 0980-50-0111 (代表)



2012年4月、雄大な富士山を背に、静岡県清水港から東北地方太平洋沖地震調査掘削へ向かう「ちきゅう」 撮影：山科則之（JAMSTEC）

## 2005年 地球深部探査船「ちきゅう」完成

巨大地震の発生帯やマントルまで掘削し、その試料を手にした——そうした科学者たちの声から誕生したのが、地球深部探査船「ちきゅう」です。

「ちきゅう」は、全長210m、幅38m、中央にそびえるデリック（やぐら）の高さは船底から130mもあります。全長は新幹線約8両分、幅はフットサルコートくらい、高さは30階建てのビルほど、といった方が、その巨大さを実感していただけるかもしれません。最大乗船人員は200人。4階建ての研究区画を有し、地上の研究施設に匹敵する最先端の設備が整っています。

「ちきゅう」の最大の特徴は、その掘削能力。世界最深、海面から1万mまでの掘削が可能です。より深く掘り進めるため、石油の掘削に使われているライザー掘削という技術を、科学研究用の掘削船として初めて導入しました。

「ちきゅう」は、2001年に建造が開始され、2002年に進水式、2005年に完成しました。試験掘削航海を経て、2007年から日本とアメリカが主導する統合国際深海掘削計画（IODP）の主力船として活躍しています。

最初の任務は、南海トラフ地震発生帯掘削。南海トラフでは、M8クラスの巨大地震が繰り返し発生しています。海底下6,000~7,000mと予想されている地震発生帯まで掘削して、地震発生の現場を直接観測し、岩石試料を手にする事で、地震発生メカニズムの解明を目指しています。2010年までに7回の航海を実施。最終的には、掘削した孔に観測装置を設置し、地震発



2002年1月18日、進水式の様子。  
船名が「ちきゅう」に決定 ©JAMSTEC/CDEX

生帯の変動をリアルタイムで捉える計画です。地震発生メカニズムの解明は、「ちきゅう」の主要な目的の一つです。2012年には東北地方太平洋沖地震調査掘削を実施し、海面下8,000m近いプレート境界の断層を含む試料の採取と断層の摩擦熱を計測する温度計測システムの設置に成功しています。

生命の起源に迫る。過去の環境変動を探り未来を予測する——これらも「ちきゅう」が目指すことです。2010年には沖縄の深海で熱水噴出域直下の生命圏を探り、2012年には下北八戸沖で石炭層生命圏の調査を予定しています。

そして、マントルへの到達。人類は、マントル物質そのものを直接手にしたことはありません。「ちきゅう」が世界で初めてそれに挑みます。