

海と地球の情報誌

Blue Earth

130

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811
2014年3月発行
隔月年6回発行
第26巻 第2号
(通巻130号)

ここまで分かった 巨大地震・巨大津波 の謎

座談会 特別展「深海」を振り返って
PM2.5はどこまで分かったか





「ちきゅうTV」で関連動画を配信中
<http://www.jamstec.go.jp/chikyuu/tv/>

地球深部探査船「ちきゅう」による「東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST）」で採取した岩石試料を調べる国際共同研究チーム JAMSTEC/IODP 提供

1 **特集**
**ここまで分かった
 巨大地震・巨大津波の謎**

22 **座談会**
**特別展「深海 挑戦の歩みと驚異の生きものたち」
 を振り返って**

林 良博 国立科学博物館 館長
 窪寺恒己 国立科学博物館 標本資料センター コレクションディレクター
 平 朝彦 海洋研究開発機構 理事長
 藤倉克則 海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域 チームリーダー

28 **Marine Science Seminar**
**PM2.5はどこまで分かったか
 拡がる人間活動と地球環境への影響**

金谷有剛
 地球環境変動領域 物質循環研究プログラム 大気組成研究チーム 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 **Blue Earthをめぐる**
「ちきゅう」、もう1つの闘い
 宮城県沖日本海溝

所属・役職は取材当時のものです

表紙 2012年4月1日、静岡県の清水港を出て「東北地方太平洋沖地震調査掘削」に向かう地球深部探査船「ちきゅう」（撮影：山科則之）

ここまで分かった 巨大地震・巨大津波の謎

総監修
 海洋研究開発機構 地球深部探査センター
 倉本真一 次長

※参考文献：

1. W. Lin, M. Conin, J. C. Moore, F. M. Chester, Y. Nakamura, J. J. Mori, L. Anderson, E. E. Brodsky, N. Eguchi, Expedition 343 Scientists (2013). Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science* 339, 687-690.
2. F. M. Chester, C. Rowe, K. Ujiie, J. Kirkpatrick, C. Regalla, F. Remitti, J. C. Moore, V. Toy, M. Wolfson-Schwehr, S. Bose, J. Kameda, J. J. Mori, E. E. Brodsky, N. Eguchi, S. Toozko, Expedition 343 and 343T Scientists (2013). Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science* 342, 1208-1211.
3. K. Ujiie, H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi, J. J. Mori, E. E. Brodsky, F. M. Chester, N. Eguchi, S. Toozko, Expedition 343 Scientists (2013). Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments. *Science* 342, 1211-1214.
4. P. M. Fulton, E. E. Brodsky, Y. Kano, J. Mori, F. Chester, T. Ishikawa, R. N. Harris, W. Lin, N. Eguchi, S. Toozko, Expedition 343, 343T, and KR13-08 Scientists (2013). Low coseismic friction on the Tohoku-Oki Fault determined from temperature measurements. *Science* 342, 1214-1217.

2011年3月11日、マグニチュード（M）9.0の
 東北地方太平洋沖地震が発生した。
 この巨大地震に伴い発生した津波の高さは最大40mに達し
 甚大な被害をもたらした。
 地球深部探査船「ちきゅう」は2012年
 その巨大津波の発生現場で海底下の掘削調査を実施。
 その調査に基づく研究成果が2013年、米国の科学雑誌
 『Science』に4編発表された。*
 巨大地震・巨大津波の謎はどこまで解明されたのか。



海溝軸付近の北米プレートが50mすべった

取材協力 JAMSTEC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

2011年3月13日、東北地方太平洋沖地震（3.11）の2日後、海洋研究開発機構（JAMSTEC）の小平秀一プログラムディレクター（PD）は、東京大学の地震研究所にいた。「研究者たちが非公式に集まり、その時点で分かったことをそれぞれ発表しました。その結果、宮城県沖の海溝軸に近い領域の北米プレートが水平方向に50mすべったとすると、地震波や津波の観測データをうまく説明できることが分かりました。しかし何人かの研究者からは、「そんなことが起きるはずはない。絶対に間違っている」という意見が出るなど、緊迫した議論が繰り広げられました」

日本海溝では、太平洋プレートが年間8~10cmの速さで北米プレートの下に沈み込んでいる。3.11の地震は、そのプレート境界の断層が破壊され、一気にすべることで発生した。そのすべりは、三陸沖から茨城県沖まで南北500km、東西200kmの範囲に及び、地震の規模を示すマグニチュード（M）は9.0に達した。

断層の破壊は、宮城県沖の海底下24kmで始まった。海底下10~20km付近では、プレート同士がびったりとくっついた「固着域」になっていると考えられる。そのため太平洋プレートの沈み込みに伴い上盤側の北米プレートは引きずり込まれて、大きくひずんでいく。そしてあるとき、断層が破壊され、北米プレートがもとに戻るよう一気にすべり、地

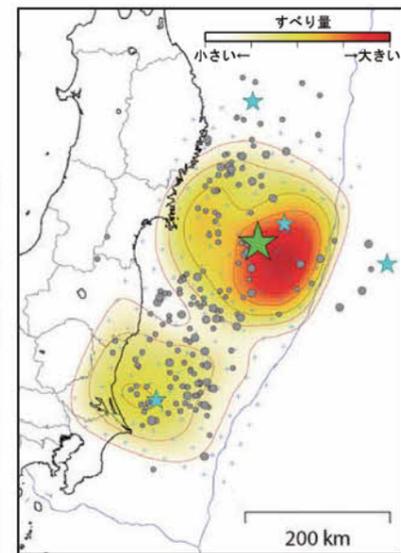
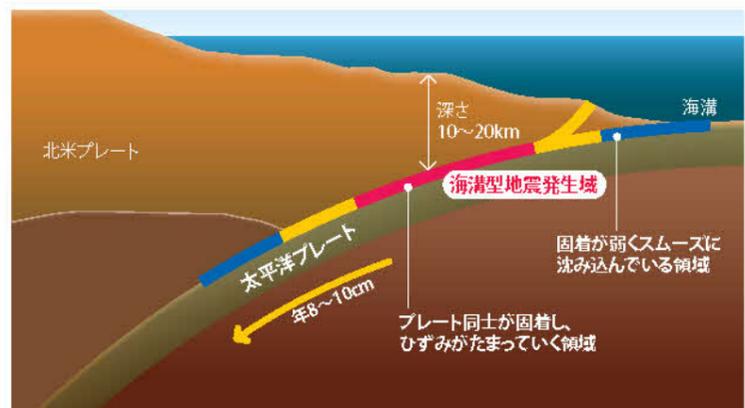
震が起きる。ただし、海溝軸付近の浅い領域のプレート境界は、しっかりと固着していないため、北米プレートはほとんど引きずり込まれず、地震のときに大きくすべることはない、と考えられてきた。そのため、50mものすべりは、従来の考え方を覆す現象だったのだ。

「私たちJAMSTECの役割は、海の現場で何が起きたのか、実像をきちんと調べることでした」と小平PD。JAMSTECでは3.11の3日後に深海調査研究船「かいらい」を日本海溝に緊急派遣し、海底地形や地下構造の探査を始めた。

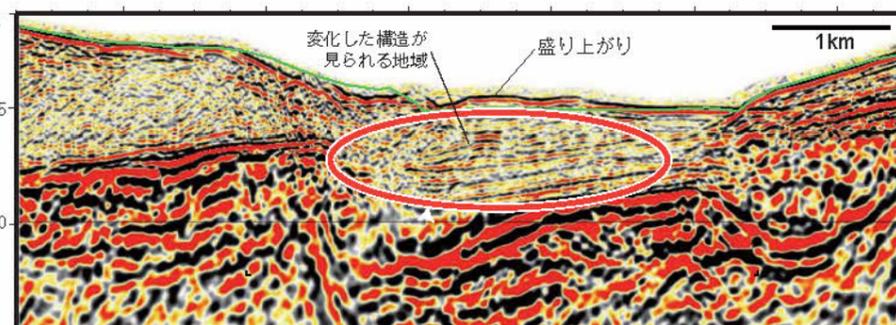
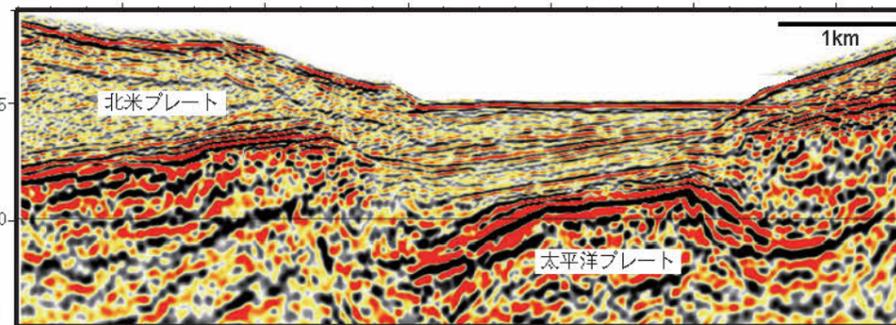
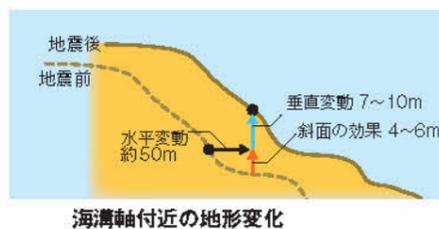
「JAMSTECでは1999年と2004年にもこの海域の海底地形の調査を行っていました。地形データを比較することにより、北米プレートが水平方向に50m、上方に7~10m移動したことが分かりました。「信じられないけれど、やはり事実なんだ」と思いました。さらに海底下の構造探査のデータを1999年と比較することで、プレート境界の断層のすべりが、海溝軸まで突き抜けたことが分かりました」

その大きなすべりに伴い海底地形が大きく変動し、結果的に海水が短時間に持ち上げられ、巨大津波が発生したのだ。なぜ従来の考えとは異なり、海溝軸付近の浅い領域が50mもすべったのか。その謎を解明するには、大きなすべりが起きたプレート境界の断層まで掘り進め、調べる必要があった。

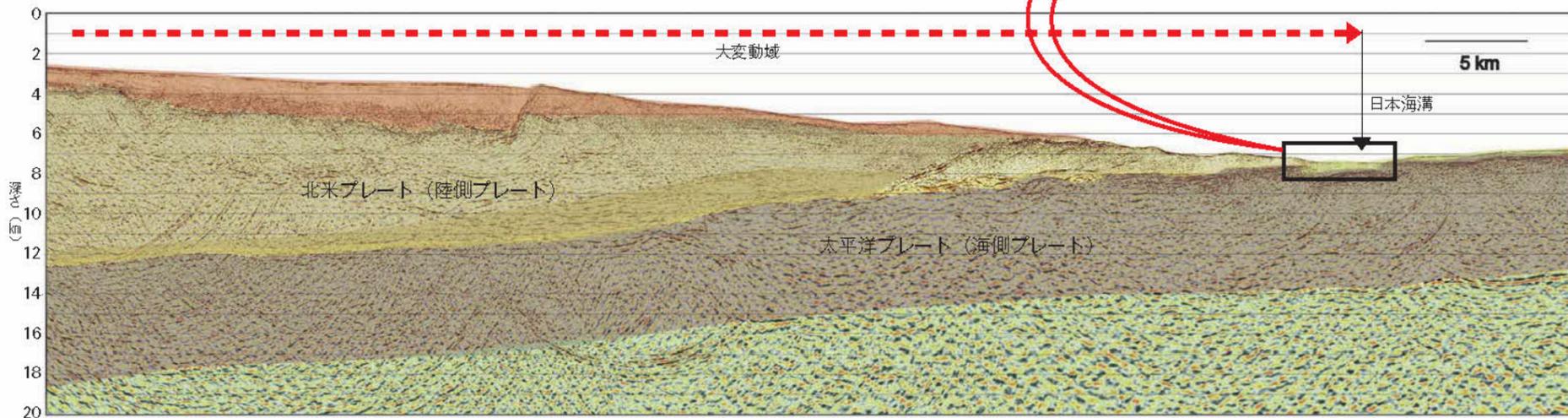
従来考えられていた海溝型地震の発生メカニズム
海溝軸付近は固着が強く、北米プレートはほとんど引きずり込まれないため、地震のときに大きくすべらないと考えられていた



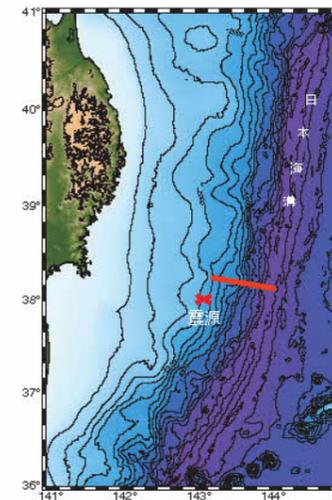
東北地方太平洋沖地震のすべり量分布の推定
(気象庁 2011年3月25日発表)
宮城県沖から日本海溝に至る領域が大きく滑ったと推定されている
★: 本震の破壊開始点
☆: 3月9日以降のM7.0以上の地震の震央
●: 本震発生から1日間のM5.0以上の地震の震央
—: 本震のすべり量分布(すべり量5mごとの線)



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



海溝軸付近の地下構造の変化



海底地形調査・地下構造探査の測線

断層の岩石を採取、温度測定に成功！

取材協力 JAMSTEC地球深部探査センター 江口暢久グループリーダー

「あの1年は忙し過ぎて、あまり記憶がないんです」と地球深部探査センター(CDEX)の江口暢久グループリーダー(GL)は振り返る。CDEXは、国際深海科学掘削計画(IODP)の日本実施機関として、地球深部探査船「ちきゅう」の運用を担当している。

2011年5月、断層が50mすべった水深7,000mの海域で、海底下1,000mまで掘り進めてプレート境界に到達し、断層に温度計を設置すること、そこから岩石試料(コア)を採取することが目標として掲げられた。それからわずか1年後、2012年4~5月および7月、「ちきゅう」による「東北地方太平洋沖地震調査掘削(JFAST)」が、IODP第343次研究航海として実施された。

JFASTはなるべく早く実施する必要があった。断層がすべると摩擦熱が発生する。そのとき断層がすべりやすいほど摩擦熱は低くなる。摩擦熱の余熱を測定することで、地震のときの断層のすべりやすさを推定することができる。「ただし、どんどん冷めていく余熱を捉えるには、地震発生後2年以内のなるべく早い時期に断層に温度計を設置する必要があったのです」

江口GLは、「最大の難関は、総延長8,000mに及ぶドリルパイプの強度でした」と語る。それまでのドリルパイプ長の世界記録は、1978年にアメリカのグロマー・チャレンジャー号が達成した7,049.5mだった。ただし、水深7,034mの海域で掘り進めたのは、海底下15.5mだった。「ちきゅう」も、それまでの調査海域は水深約4,000mまでだった。

「ドリルパイプを7,000mつなぐと重さが約350トンになります。その重さのパイプをぶら下げて、その先端に付けたドリルビット(刃)を回転させて海底下1,000mまで掘り進めるわけです。波や風、海流がまったくなく船が動かなければ、従来のパイプ強度でも大丈夫でしょう。しかし、船が動いたときにパイプが折れない保証はありませんでした。私たちは船が三次元的に動揺したときにパイプにかかる力を検討し、新しいパイプをつくり強度試験を急いで進めました」

装置の切り離し方法も課題だった。「海底における作業で使えるのはドリルパイプだけです。その先に温度計を付けて、掘削孔に入れます。そのとき、温度計を切り離す必要がありますが、従来の方法は使えなかったのです。浅い海域ならば、ドリルパイプを回転させて観測機器を外す方式を用いていま

す。しかし7,000mも先のねじを外すことは無理です。CDEXの技術陣が、パイプ内部に水圧をかけてバルブを外す、切り離し装置を開発しました」

こうして2012年4月1日、世界10カ国32人の研究者を乗せた「ちきゅう」が、日本海溝へ向けて静岡県清水港を出航した。

「出航から3日目に掘削地点に到着しましたが、天候が悪く、しばらく作業ができませんでした」。ようやく12日目から、温度計を設置するための孔口装置の設置作業が始まった。「しかし、新開発した切り離し装置がうまく作動しないトラブルが起きました。そのようなトラブルを、船上で装置を修理・改造することで解決していきました」

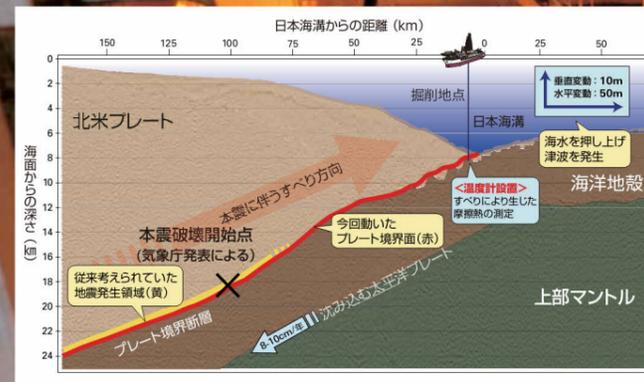
断層の位置を特定するために、掘削同時検層(LWD)が実施された。先端のドリルビットのすぐ上に各種センサーを配置した特殊なパイプを接続して孔壁の自然ガンマ線や電気伝導度を測定することで、断層の位置を探る。「ちきゅう」は、水深6,889.5mの海域で、海底下850.5mまで掘り進め、総ドリルパイプ長7,740mという世界記録を樹立した。LWDの結果、海底下720mと820m付近に断層らしきデータが確認された。

その後、ドリルパイプの破断や水中カメラシステムのトラブルなどが相次いだ。水中カメラの映像がなければ温度計の設置作業は不可能だ。5月24日の航海終了期限が迫るなか、断層からコアを採取する作業を優先することになった。

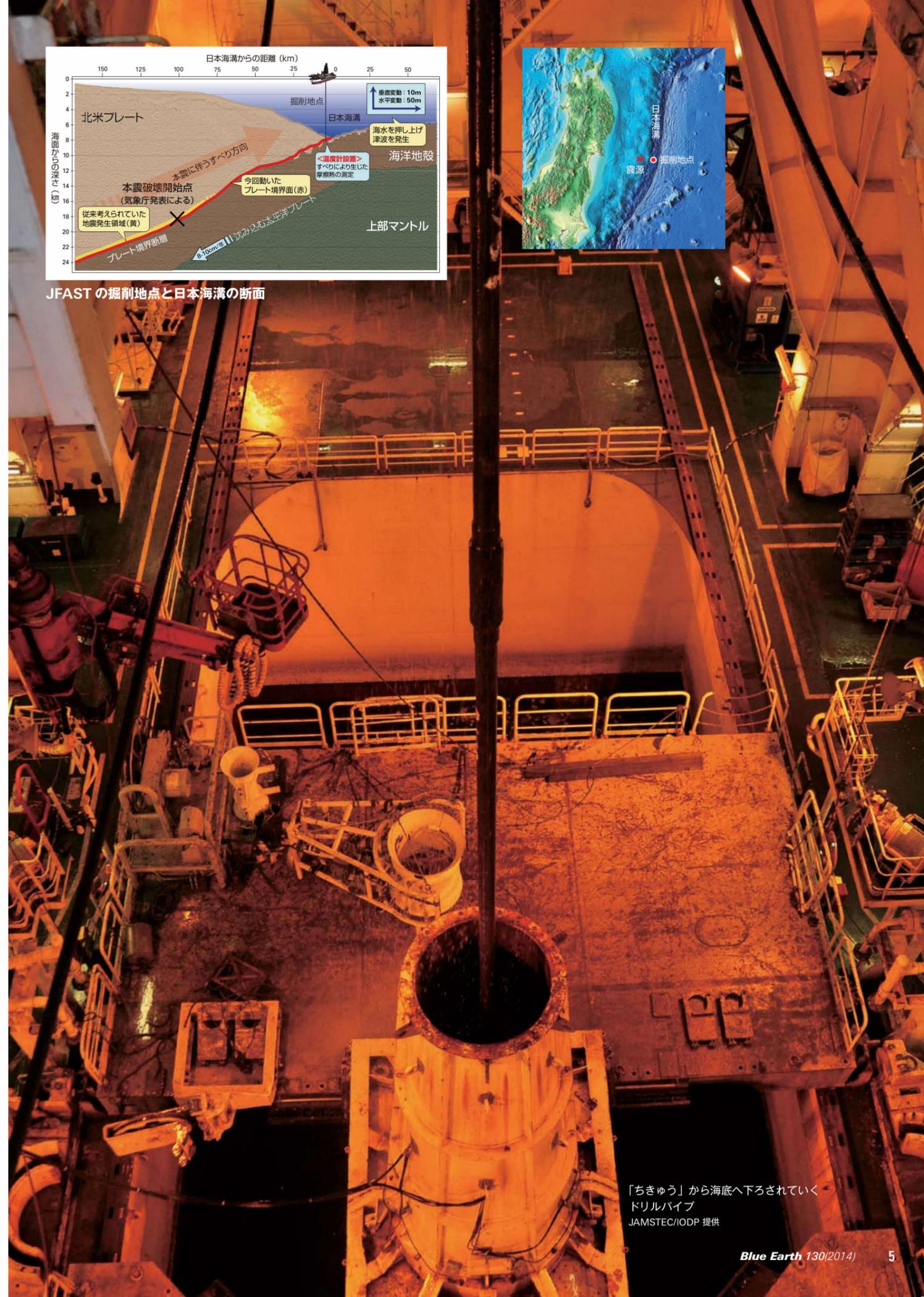
「本来は、海底面から断層まで連続的にコアを採取するのが望ましいのですが、その時間がありません。720m付近と820m付近を集中的に採取しました」

コアは上から順に1R、2R……と番号が振られていく。そして2012年5月21日、それまでとは明らかに特徴が異なるコアが船上に引き上げられてきた。海底下820m付近の17Rだ。それを筑波大学の氏家恒太郎 准教授が、「間違いなし。これがプレート境界の断層です」と認定した。17Rは、研究者たちの間で「奇跡のコア」と呼ばれている。

その後、「ちきゅう」のスケジュールを再調整し、多くの関係者の熱望により、「ちきゅう」は7月に再び同海域に向かった。最終的に孔内の断層帯に計55個の温度計を設置し、JFASTの主な目的を見事に達成した。



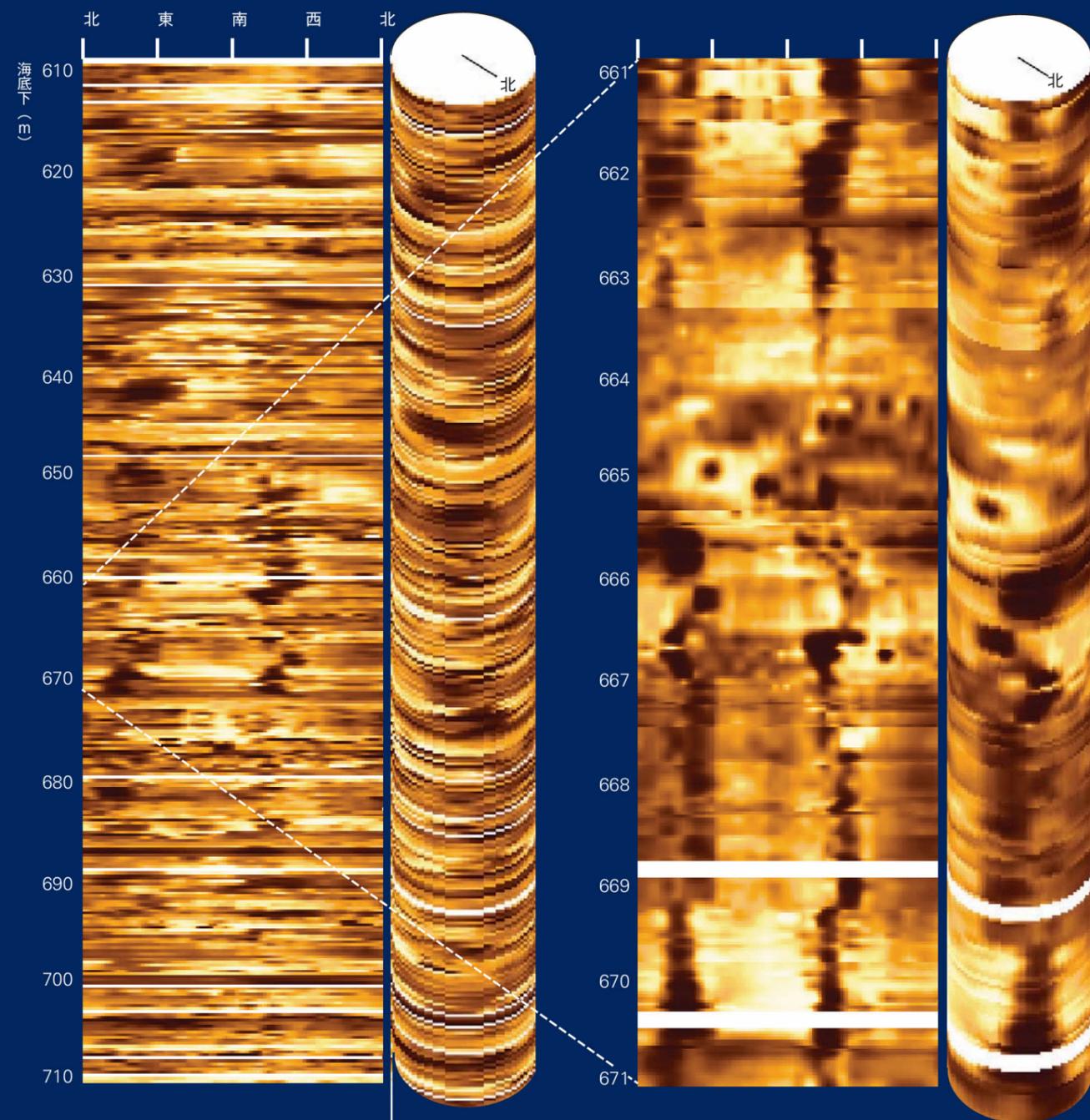
JFASTの掘削地点と日本海溝の断面



「ちきゅう」から海底へ下ろされていくドリルパイプ
JAMSTEC/IODP 提供

海溝付近のプレート境界断層も応力をため込んでいた

取材協力 JAMSTEC高知コア研究所 林為人 グループリーダー



Lin et al. (2013) から作成

掘削同時検層によって測定された電気伝導度のイメージ
暗い部分が電気を通しやすいブレイクアウト

JFASTの調査掘削に基づき、巨大津波を引き起こしたプレート境界断層の実像を明らかにする研究が進められた。まず2013年2月、JAMSTEC高知コア研究所の林 為人GLたちによる研究結果が、『Science』に掲載された。「それはまさに、従来の地震の考え方を覆すものでした」と林GL。

「海底下10~20kmほどの深いところにある固着しているプレート境界では、太平洋プレートの沈み込みに伴い、北米プレートが引きずり込まれてひずみが大きくなり、断層および地層中に応力が蓄積していきます。応力とは、物体に外から力が加わったとき、その物体内部で生じる、押し合ったり引っ張り合ったりする力のことです。断層に蓄積していく応力が、断層が破壊されずに持ちこたえる力よりも大きくなると、断層の破壊が起きて一気に大きくすべり、地震が起きるのです」

ただし、海溝軸付近の浅い領域のプレート境界は固着していないため、太平洋プレートが沈み込んでも北米プレートはほとんど引きずり込まれない、と考えられていた。「従って応力を蓄積せず、地震のときに深部の震源から伝わってきた断層のすべりをさらに大きくすることはない、と信じられていたわけです」

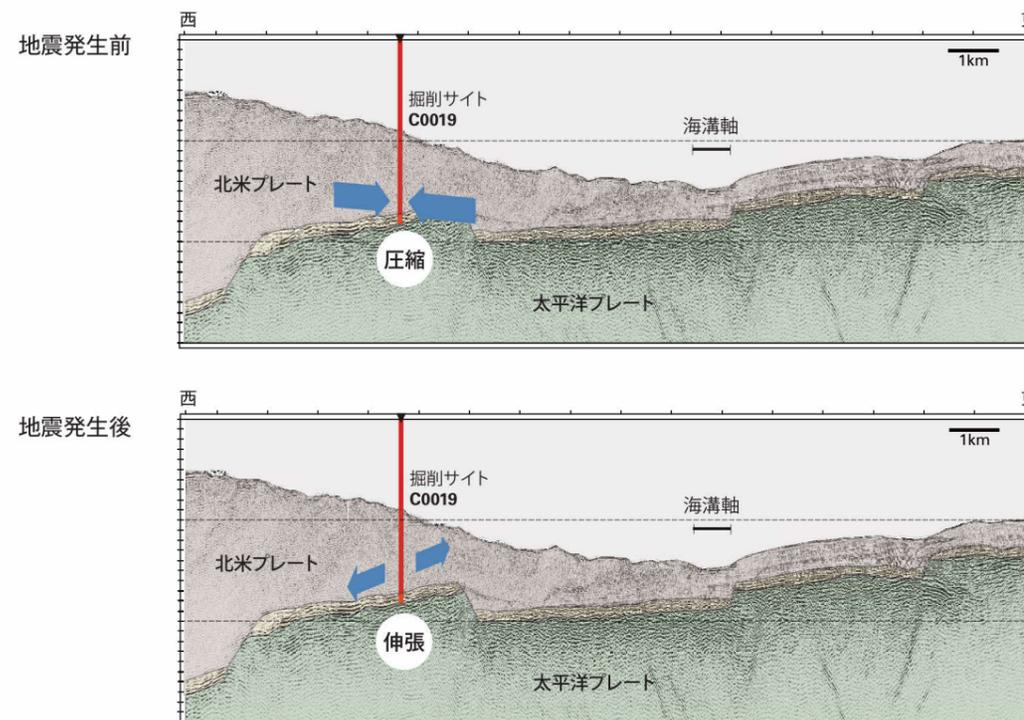
それでは、3.11で50mもすべったプレート境界断

層の応力はどのような状態だったのか。それを知るために、林GLたちは、JFASTによる掘削同時検層(LWD)の電気伝導度のデータを解析した。

「解析の結果、掘削孔の壁に“ブレイクアウト”を発見しました。ブレイクアウトとは、孔壁に応力が働くことでできるひび状の破壊です。ひびの部分は孔内の流体が浸透し、電気が通りやすくなるのです。そのひびの方向や幅から、断層より上の地層(北米プレート)には、地層が伸張するような応力(伸張応力場)がかかっていることが分かりました。一方、JFASTの地質構造解析と過去の調査から、3.11の前には、太平洋プレートの沈み込みに伴い、圧縮応力場になっていたと考えられます」

3.11地震により、圧縮から伸張へと応力場が反転したことは何を意味しているのか。「蓄積されていた応力が地震によりほぼすべて解放された、海溝軸付近のプレート境界も大きな応力を蓄積していた、と解釈できます。地震前に応力を蓄積し、地震時にその応力を解放したからこそ、50mという大きなすべりが起きたと考えられます」

そのプレート境界断層は、どのような物質からできているのだろうか。JFASTで採取された奇跡のコアからその正体が明らかになった――。



断層より上の北米プレートは、地震発生の前後で圧縮から伸張へと応力場が反転した

Lin et al. (2013) から作成

断層の正体は、火山灰由来の粘土層 だった

取材協力 筑波大学 生命環境系 氏家恒太郎 准教授

JFASTで採取された奇跡のコア17R。船上でそれをプレート境界断層だと認定した筑波大学の氏家恒太郎 准教授は、その特徴を次のように語る。「17Rの岩石は魚のうろこのような形状をしています。それは粘土が破壊されたときの特徴です。分析の結果、17Rにはスメクタイトと呼ばれる粘土鉱物が78%も含まれていることが分かりました」

スメクタイトは、数 μm 以下という微細粒子から成る。粒子内部や粒子間に水をたくさん保持する一方、その水は移動しにくい性質がある。

「ちきゅう」は、西南日本南方沖に広がる南海トラフのプレート沈み込み帯での調査掘削も進めてきた。南海トラフでは、フィリピン海プレートが陸側のプレートの下に沈み込んでいる。南海トラフのプレート境界断層から得られたコアのスメクタイトの含有率は30%ほどだ。

17Rの全長は97cm。前後の16Rと18Rとは異なる組成であることが確かめられている。17Rと16Rおよび18Rの間には、コアが採取できなかった箇所がある。そこも17Rと同じ組成だとしても、スメクタイトを高密度で含む層の厚さは最大で4m86cmだ。「普通、粘土層の厚さは20m以上あります。宮城県沖の海溝軸付近のプレート境界には、とても薄い層にスメクタイトが濃集していたのです」

なぜ、そのようなスメクタイト層が日本海溝に存在しているのか。「そもそもスメクタイトは、火山灰起源の微細粒子が風でときには数千km運ばれて海底に降り積もり、変質してできた粘土です。17Rのスメクタイト層は、数千万年以上前の火山活動により、太平洋の海底に降り積もった火山灰が由来です。その海底が太平洋プレートの移動とともに日本海溝に到達し、沈み込んでいます。一方、南海トラフでは、陸に近く土砂が大量に供給されるため、スメクタイトの含有率は日本海溝よりも相対的に低いのです」

スメクタイトが薄い層に濃集していることは、数千万年以上前のある時期に活発な火山活動があったことを示している。それが3.11の巨大津波の遠因になった可能性がある。

それでは、薄いスメクタイト層がどのようなメカニズムで大きくすべったのか――。

Chester et al. (2013) および Ujije et al. (2013)



17Rの全体像。このなかに、地震ですべった部分が含まれているかどうか、氏家准教授たちは顕微鏡観察などによる詳細な分析を進めている

17Rの拡大像。魚のうろこのような形状が見える JAMSTEC/IODP 提供



摩擦熱により水圧が高まり、断層は 急激にすべりやすくなった

取材協力 筑波大学 生命環境系 氏家恒太郎 准教授

3.11の断層の破壊は、宮城県沖の海底下24kmで始まった。そのすべりが海溝軸付近の断層に伝わったとき、何が起きたのか。

氏家准教授たちは、3.11の地震断層の状況を再現するために、17Rの岩石を用いた摩擦実験を行った。「その実験で“サーマル・プレシャライゼーション”と呼ばれる、摩擦発熱により水圧が高くなる現象が起きました」

断層のすべりが伝わると、摩擦熱によってスメクタイト層に大量に含まれる水の温度は高くなり膨張する。「すると水圧が高まります。このとき、スメクタイト層は水が移動しにくい性質があるため、水圧の高い状態が維持されます。断層は上にある地層や海水の重さで上から押さえ付けられていて、すべりにくくなっています。その上からの力を水圧が押し返すことで、断層は急激にすべりやすくなります」



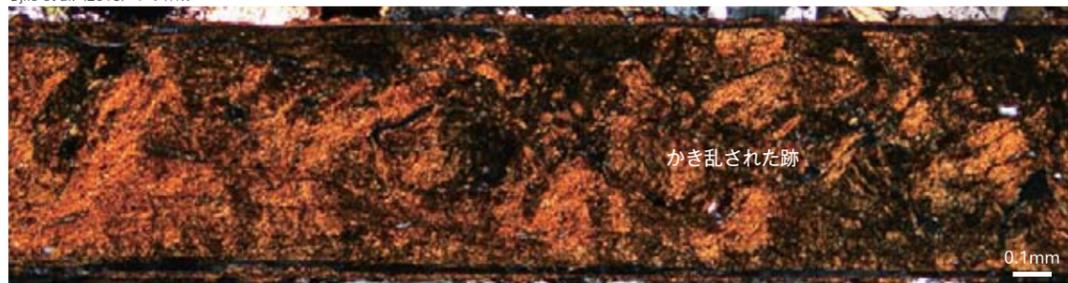
地震前



地震時

サーマル・プレシャライゼーションの原理 地震の摩擦熱により温度が高くなった水が断層に閉じ込められて水圧が高くなり、上からの力を押し返すことにより、断層は非常にすべりやすくなる。そのとき、断層内部は流体のように振る舞い、かき乱される。17Rの岩石を用いた摩擦実験後の試料に、かき乱された跡が見られる（下）

Ujije et al. (2013) より作成



かき乱された跡

摩擦実験後の試料

薄いスメクタイト層に水が閉じ込められることで、水圧は非常に高くなったと考えられる。実際に17Rのスメクタイト層が非常に水を通しにくいことは、JAMSTEC高知コア研究所の谷川 亘 研究員たちによる測定により確かめられた。

「そもそもスメクタイトは地球上で最も摩擦力の小さい鉱物です。そのスメクタイトを78%も含むプレート境界断層では、プレート間の固着は進んでいない状態だと考えられます。従来、地震のときに大きくすべるのは、固着して引きずり込まれ、ひずみをためている部分だと考えられていました。今回のJFASTの大きな成果は、地震前に固着があまり進んでいないと考えられる断層でも、破壊が伝わると、ときとして大きくすべることを明らかにしたことだと思います」

高知コア研究所の林 為人GLたちによる掘削同時検層（LWD）データの分析は、地震前後で応力状態が圧縮場から伸張場へ大きく変化したことを示しており、地震のときに断層が急激にすべりやすくなったという摩擦実験の成果と整合的だ。

氏家准教授は、「地震のときに断層がどのように挙動するのか、そこに注目して今後も研究を進めてい

きたいと思います」と展望を語る。

3.11で破壊が始まったのは海底下24kmの深部のプレート境界だ。そこは普段、ぴったりと固着してひずみを蓄積していたと考えられている。その断層は、どのような性質の岩石から成り、地震のときにどのように挙動したのか。「現在の技術では、日本海溝深部の固着域からコアを採取することはできません。そこで私は、陸上に露出するかつてのプレート境界を調べることにしました」

2014年1月、氏家准教授は、研究室の学生らと共に岐阜県の本曾川沿いにある約2億5000万年前の地層を調査して、断層試料を採取した。「当時、海にすむ生物の大半が死滅する大量絶滅が起き、海底には有機物を大量に含む泥が降り積もりました。どうもプレート境界断層は、この有機質泥岩に沿って発達していたようです。また、断層境界のチャート層（放射虫などの動物性プランクトンの遺骸から成る地層）は真っ黒に変質しており、激しい断層運動の影響を受けているようです。今後、採取した断層試料を分析して、地震ですべった痕跡を探し、地震のときに深部でプレート境界がどのように挙動したのかを明らかにする研究を進めていく予定です」

本曾川沿いの約2億5000万年前の地層に沿って発達する断層（ハンマーが置かれた黒い部分は有機質泥岩と変質したチャート層）



「3.11に直面したとき、地震学者として何かしなければいけない、この地震の特徴である大きなすべりの原因を説明する必要がある、と思いました」。京都大学のJames J. Mori教授はそう振り返る。「そこで、JAMSTEC高知コア研究所の林 為人さんたちと連絡を取り合い、3月下旬のIODPの会議で、地震による摩擦熱の余熱を断層で直接測定する提案をしたのです」

Mori教授は加納靖之 助教たちと共に、1999年の台湾大地震（M7.7）ですべった陸上断層の温度測定を行った経験があった。「地震断層の温度を直接測ったのは、私たちがおそらく世界で初めてでした。しかし地震から5年以上が経過していたため、周囲との温度差は100分の1℃のレベル。地震による摩擦熱の余熱といえるかどうか微妙でした。そこで次の大地震がどこかで起きたら、2年以内に温度測定をすべきだと考えていました」

2012年7月にJFASTで設置された温度計は、翌年4月、JAMSTECの無人探査機「かいこう7000-II」により回収された。9ヵ月間にわたる連続的な温度変化のデータを、Mori教授や加納助教たちを含む国際共同研究チームは分析した。

「孔を掘った影響で孔内および地層の温度は乱されます。その影響がある程度落ち着くのに2ヵ月ほどかかっていました。その後、周囲より温度が高く、徐々に冷えていく場所を探しました。冷えていくことが地震による摩擦熱の余熱である証拠です」と加納助教は説明する。「そして、冷えていくなかで周囲よりも最大で0.31℃高い場所がありました。それが820m付近でした」

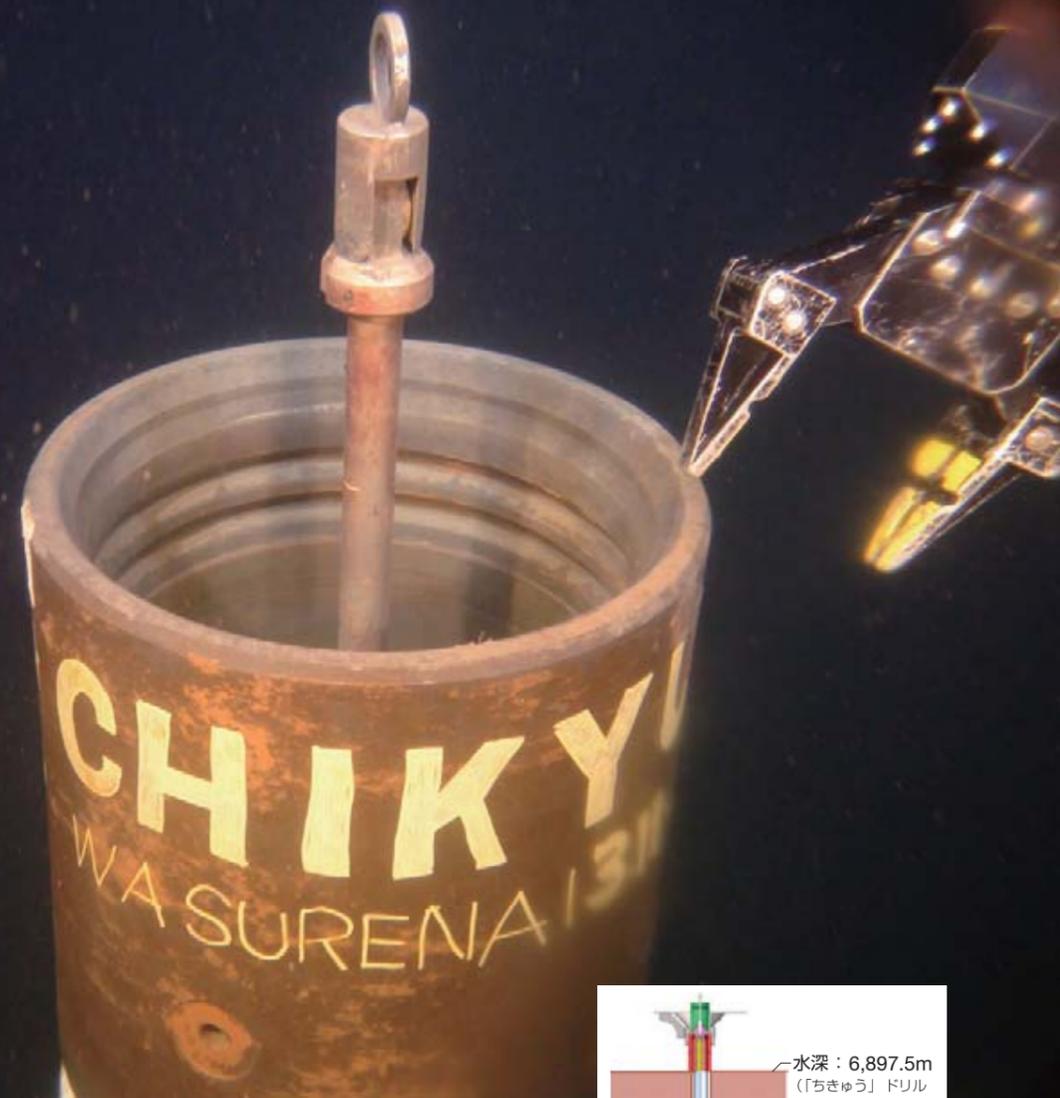
こうして温度測定からも、820m付近が3.11の地震ですべったプレート境界であることが裏付けられた。「0.31℃はとても小さな温度上昇です。つまり摩擦熱はあまり高くなかったのです。断層のすべりやすさを表す摩擦係数は0.08だと私たちは推定しました」とMori教授。

摩擦係数は、値が小さいほどすべりやすいことを示す。「普通の岩石同士の摩擦係数は0.5~0.7くらいの値になります。つまり、この断層は地震のときにとてもすべりやすかったことがわかりました。0.08という摩擦係数は、氏家さんたちの17Rコアの岩石を使った摩擦実験の結果とも整合的です。温度測定と摩擦実験という異なる手法で同じ結論が導き出されたのです」とMori教授は語る。

加納助教は今後の展望を次のように語る。「台湾大地震の調査では、かなり大きな温度計を用いました。しかし温度計自体が大きいと感度が悪くなることを学びました。そこでJFASTでは小さな温度計を55個つないだものを用いました。私はこれからも、掘削孔を利用した温度などの測定から、地震の謎に迫っていきたいと思います」

一方、Mori教授は、「水と地震の関係を探りたい」と語る。「水が流入すると断層はすべりやすくなります。そのため、ダム建設などで断層に水が染み込むと、誘発地震が起きます。自然に起きる地震でも、何らかの理由で断層に水が流入して、地震が引き起こされている可能性があります。水が流入すると固着した断層が剥がされるような現象が起きると予想されます」

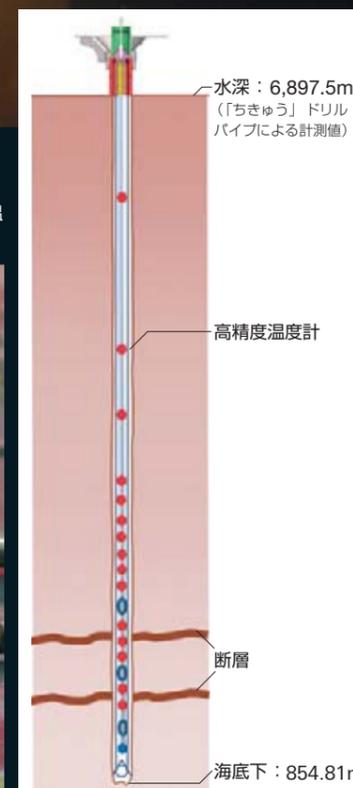
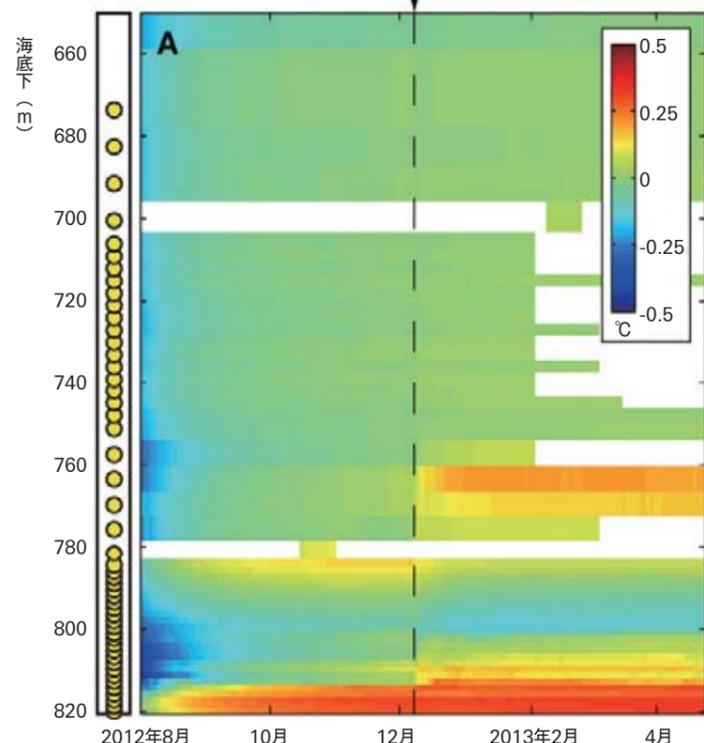
実際にプレート境界の断層帯に水を注入すると、何が起きるのか。その実験を「ちきゅう」で行うことをMori教授は提案している。「プレート同士が横にずれる境界は比較的浅い深度にあります。地震が起きても被害が出ない海域で断層帯まで掘削し、水を注入して断層の挙動を観測することで、地震という現象の理解を深めたいのです」



「かいこう7000-II」による回収作業の様子。孔口装置から伸びる棒状の物が長期孔内温度計の上端部

断層の温度測定データ

820m付近が周囲より最大で0.31℃高かった
Fluton et al. (2013) より引用



高精度温度計と長期孔内温度計の概略。55個の高精度温度計がひもでつながれ、断層周辺に集中して配置された



JAMSTEC/IODP提供

「浅い領域の断層も、地震のときに大きくすべることがある——従来の考え方を覆すその現象の痕跡を、実は3.11の直前に、南海トラフで掘削したコアから、JAMSTECの坂口有人さん（現 山口大学准教授）たちが発見していました」。JAMSTEC高知コア研究所の木下正高 所長はそう振り返る。

南海トラフでは、フィリピン海プレートが陸側のプレートの下へ沈み込むときに海底の堆積物が剥ぎ取られ、陸側に押し付けられて集積した「付加体」と呼ばれる地質体が形成されている。また、ちょうど海岸線のあたりでプレート境界断層から枝分かれした巨大な分岐断層が、付加体の斜面途中に発達している。

1944年に発生したM8の昭和東南海地震では、紀伊半島沖熊野灘の巨大分岐断層もまた、プレート境界とともにすべて津波を発生させたのではないかと推測されていたが、その証拠は得られていなかった。

「ちきゅう」による南海トラフ掘削調査により、巨大分岐断層とプレート境界断層が海底に到達する付近の浅い領域から、コアが採取された。そのコアを分析したところ、地震ですべった摩擦熱によると考えられる岩石の変質が発見された。それぞれ海底下271mと438mで、JFASTで掘削された日本海溝の海底下820m付近よりもさらに浅い領域の断層だ。

「沈み込む海洋プレート上の堆積層に含まれるスメクタイト（粘土鉱物の一種）が、浅い領域のすべりに重要な役割を果たすのではないかと考えられています。スメクタイトの含有量を比べると、JFASTの断層コアの78%に対して、南海トラフの浅い領域では約30%と低いのですが、それでも地震のときにすべりやすい性質を持つ断層であることには変わりないと考えられます」

南海トラフでは100～150年ほどの周期でM8クラスの地震が繰り返し起きてきた。1946年に発生した

M8の昭和南海地震から70年近くが経過し、次の巨大地震が近い将来に起きると予想されている。

3.11の後、南海トラフの想定震源域の見直しが行われた。従来の想定震源域は海底下およそ10～30kmの深度にある固着域の領域だけだったが、それよりも浅い海溝軸までの領域と、逆に固着域よりも深い陸側の領域が、新しい想定震源域に加えられた。いずれもプレート境界は固着しておらず、地震のときに大きくすべることにはないと従来考えられていた領域だ。東海沖から九州の日向灘までの新しい想定震源域全域が連動してすべった場合、地震の規模は最大M9.1、最高30mを超える津波が西日本沿岸を襲うと予想されている。

JAMSTECでは、東南海地震の震源域である熊野灘に地震・津波観測監視システム（DONET）を設置し、運用を開始している。20カ所の海底に埋設された地震計や津波を捉える水圧計の観測データが、海底ケーブルによってリアルタイムで送られている。さらにその西側の南海地震の震源域にもDONET第2期の整備が現在進められている。

2007年から続けられてきた「ちきゅう」による南海トラフの掘削も、クライマックスを迎えようとしている。「ちきゅう」は水深が2,500mまでの海域ならば、ライザー掘削という手法により海底下7,000mまでの掘削能力を持つ。「ちきゅう」はさらに掘削を進め、ここ1～2年以内に、熊野灘の水深約2,000mの海域で海底下約5,200mまで掘り進み、分岐断層の固着域からコアを採取する計画だ。その意義を木下所長は次のように語る。

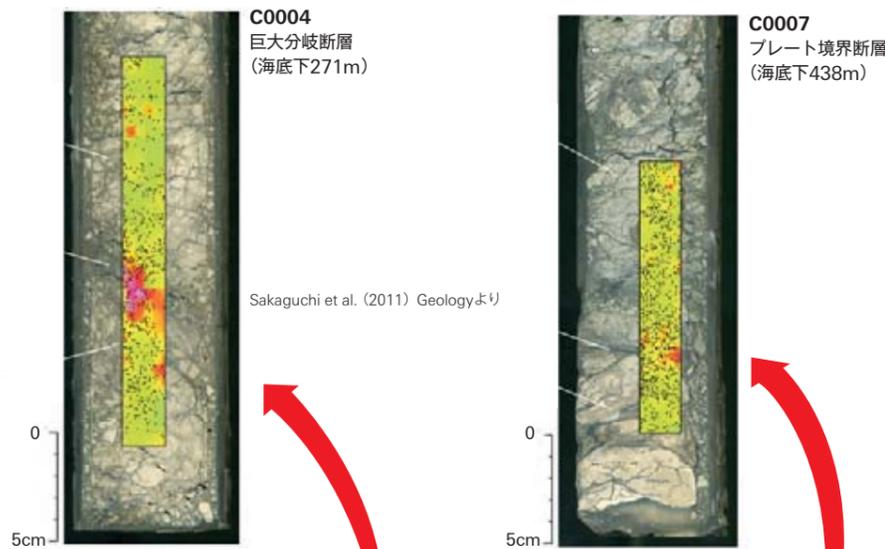
「コアを分析することで、固着域の断層物質の組成

や摩擦係数などの性質が初めて分かります。JFASTのように、これまでの考え方を覆すような研究成果が得られる可能性があります。浅い領域に加えて深部の固着域のコアを手に入れることで、固着域で始まった破壊が浅い領域へどのように伝わり巨大津波を引き起こすのか、その仕組みを説明する新しい仮説をつくることができるでしょう。また、固着域のコアの分析から、複数の震源域が連動してM9クラスの巨大地震に拡大する仕組みを理解するヒントが得られることを期待しています」

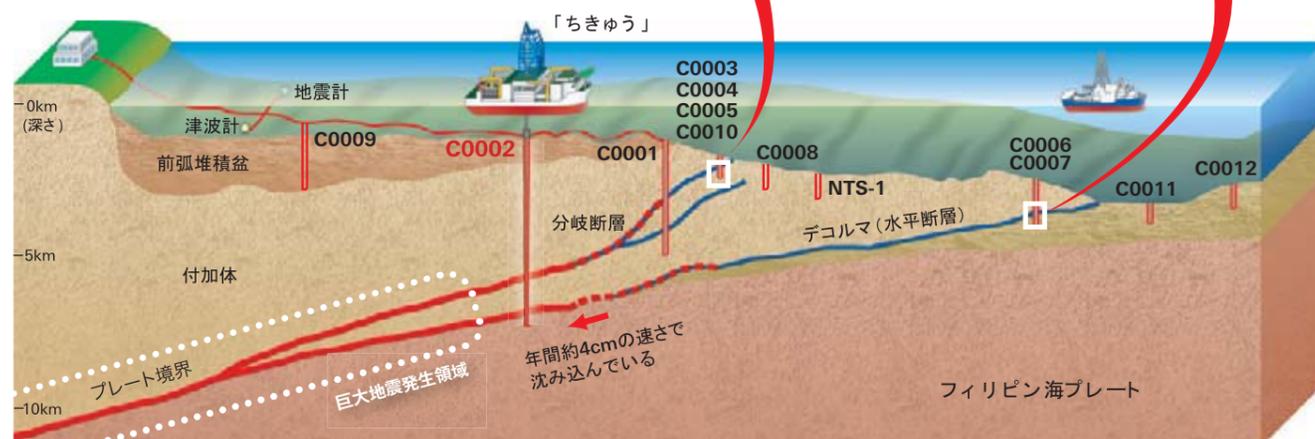
これまでに海底下980mまで掘り進めた掘削孔には、地震計、圧力計、ひずみ計、傾斜計、温度計を備えた長期孔内観測システムがすでに設置され、DONETへの接続も完了している。地震発生現場の状態をリアルタイムで監視し、次の巨大地震の準備状況を把握しようとしている。

コアの分析結果

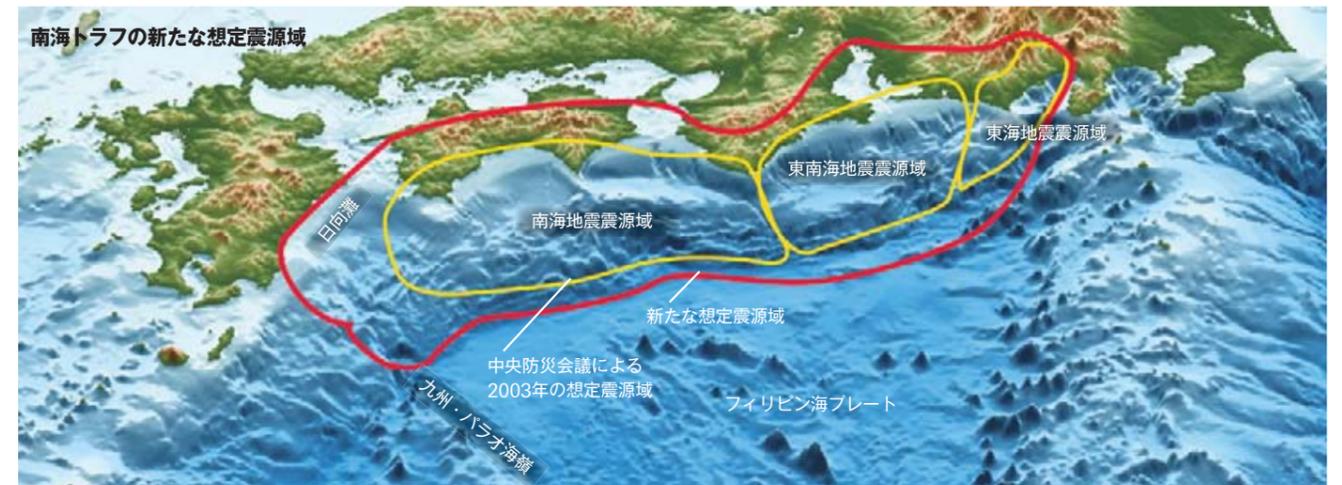
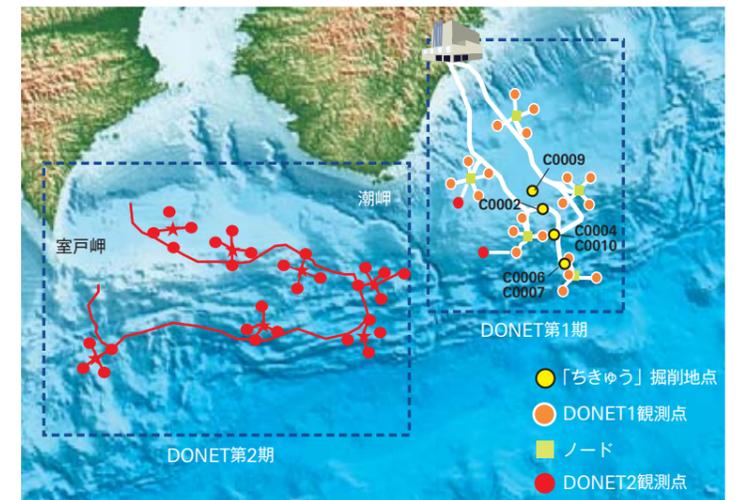
コア試料中の「ビトリナイト」の反射率を測定したところ、分岐断層やプレート境界断層部分のみが過去に300～400℃まで上昇したことが発見された



南海トラフの断面と「ちきゅう」による掘削地点



DONETの観測点と「ちきゅう」による掘削地点



巨大地震・巨大津波の 解明に向けて

JAMSTEC

高知コア研究所
木下正高 所長

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
斎藤実篤 チームリーダー

地球深部探査センター
江口暢久 グループリーダー
倉本真一 次長(司会)



撮影：藤牧徹也

チームワークで成し遂げた JFASTの研究成果

倉本：今日は、JFASTの研究成果を受けて、3.11の残された謎は何か、巨大地震・巨大津波の解明に向けてJAMSTECはどのように研究を進めていくべきか、皆さんで議論したいと思います。

斎藤さんは、JFASTの航海にも参加しましたね。まずJFASTを簡単に振り返ってもらえますか。

斎藤：地球科学者、特に私のようにプレート境界の地質の研究者であれば、JFASTはぜひ参加したいプロジェクトでした。世界初の困難なプロジェクトの実施に、倉本さんや江口さんたちCDEXの皆さんが非常に苦労して、提案からわずか1年後にこぎ着けました。

江口：引き受けてから、技術的な検討を始めました。普通なら何年もかける仕事を、1年足らずで行う必要がありました。JFASTには世界中の研究者から定員の3倍を超える応募があり、人選にも苦労しました。

斎藤：私は数々の研究航海を経験してき

ましたが、JFASTは最高のチームワークで仕事できました。54日間の航海で、悪天候やトラブルにより、実質の作業期間は2週間くらいでした。そのなかで研究者と技術者の連携がとてもうまくいきました。その間に立ち、調整を進めた江口さんたちの功績が大きかったと思います。

JFASTの目的は、50mすべったプレート境界断層の性質を明らかにすることでした。その断層は厚さ5m以下の薄い層にスメクタイトという粘土が濃集していること、採取されたコアの摩擦実験からも断層の温度測定からも、地震の破壊が伝わったときその断層は非常にすべりやすかったことが分かりました。

3.11の残された謎

倉本：そのJFASTの研究成果を受けて、どのような謎が残されているのでしょうか。

小平：地震のときに非常にすべりやすかった断層は、普段はどのような状態だったのか。50mもすべるだけのひずみ

を、どのように蓄積していたのか、説明できていません。

斎藤：3.11は1,000年に1度の巨大地震だといわれますね。プレート境界が大きくなるのは、なぜ1,000年に1度なのか。どのような条件がそろって大きくなるのか。それも3.11の残された大きな謎です。

倉本：津波によって陸上に運ばれた泥や砂、岩石破片などの津波堆積物の研究により、869年の貞観地震の津波の規模が非常に大きかったことが明らかになり、3.11はそれ以来の1,000年に1度の地震だといわれました。しかし、2011年と869年の2点の記録だけでは、本当に1,000年周期なのか、同じような規模の巨大地震・巨大津波が日本海溝で繰り返し起きてきたのか、分かりませんね。

100~150年周期でM8クラスの地震が繰り返されてきた南海トラフでも、M9クラスの地震が発生したことがあるのでしょうか。

木下：津波の規模が特に大きいときにだけ泥や砂が運ばれる海拔数十mにある湖

の堆積物の調査が行われています。それによると、巨大な津波は数百年から1,000年の周期のようです。しかもそのような巨大津波の痕跡が西日本沿岸の全域で同時期に見られます。それが巨大地震に対

応しているらしいことが分かってきましたが、M9クラスなのかどうかは分かりません。

倉本：3.11の巨大津波の発生域として海溝軸付近の浅い領域（海洋プレートが沈み込みを始めて間もない領域）が目ざされ、JFASTの掘削調査が行われました。一方、地震の破壊は500km×200kmという広大な領域に伝わり、M9.0という巨大地震になりました。その謎についてはどこまで分かったといえますか。

小平：日本海溝の海底下10~20kmのプレート境界は固着していて、太平洋プレートの沈み込みに伴い北米プレートが引きずり込まれて、ひずみが蓄積することM7~8クラスの地震が起きるといえる考え方は間違っていないと思います。

また、それほど地震の規模は大きくなくても、巨大な津波が発生する津波地震の記録も残されています。たとえば、1896年の明治三陸地震です。原因はよく分からないが、ときどき大きくすべる海溝軸付近の領域があるらしいことも知られていました。

連動という言葉が適切かどうか分かりませんが、3.11では、固着層で起きる地震と、浅い領域がすべる津波地震が連動して起きた。さらに三陸沖から茨城県沖まで固着層で起きる地震が連動した。そ

の2種類の連動が同時に起きてM9という規模に拡大した、と考えられます。では、なぜそのような連動が起きたのか。それには、まだ答えられません。

倉本：3.11の地震を説明する、いくつかのモデルを理論家さんたちが発表していますね。たとえば、JAMSTECの堀 高峰 主任研究員は、プレート境界がずれながらゆっくりとひずみを蓄積する“グレーゾーン”のなかに、ひずみを蓄積しやすい固着層“レッドゾーン”が点在しているという「階層アスペリティ・モデル」を提唱しています。ひずみをためやすいレッドゾーンは比較的短い間隔でM7~8の地震を起こす。やがて、長い時間をかけてひずみを蓄積するグレーゾーン全体が一気にすべることにより、M9クラスの巨大地震や巨大津波が起きる、という考え方です。

あるいは、深部で始まった地震のすべりが止まらず、行き過ぎて海溝軸まで突き抜ける「ダイナミック・オーバーシュート」というモデルで巨大津波を説明する理論家もいます。

小平：いろいろなモデルが出てくるのは、3.11を現在の地震学では説明できていないことの表れです。さまざまなモデルのうちどれが正しいのか、まだ分かりません。

木下：理論家たちは、モデルを検証す



JFASTの国際研究チーム JAMSTEC/IODP 提供

るためのデータを待ち望んでいる状態でしょう。特に、3.11のような巨大地震がどれくらいの間隔で発生してきたのか、周期の情報がモデルをつくる上で必要です。

環太平洋や日本列島は活動期に入ったのか？

倉本：2004年のスマトラ島沖（M9.1）、2010年のチリ沿岸（M8.8）、そして2011年の日本海溝3.11（M9.0）と、比較的短い期間にM9クラスの巨大地震が環太平洋で続いています。1950～60年代にも、チリ沖やカムチャツカ沖、アリューシャン列島、アラスカなどでM9クラスの巨大地震が立て続けに起きました。

地震研究の世界的権威である金森博雄先生（カリフォルニア工科大学 名誉教授）は、環太平洋にはM9クラスの巨大地震が頻発する活動期がおおよそ50年ほどの周期であるように見え、それには理由があるのかもしれない、と指摘していますね。

木下：そのような活動期が存在するのかわか、データが少ないので否定も肯定もできませんが、現象としては興味深いですね。私は、プレート境界は強度が弱く、深い領域も浅い領域も“危うい世界”である、という認識です。太平洋プレートとかたい板の周囲を、プレート境

界という弱い部分で支えているわけです。1カ所でたがが外れたら、ほかの場所も外れておかしくないと思います。まったくの直感的なイメージですが。

環太平洋の巨大地震活動期と、日本海溝の1,000年といわれるM9の周期には、大きな時間的な隔たりがあります。太平洋プレートの周囲は異なる準備段階のプレート境界が並んでいて、準備が整ったところから順番に巨大地震を起こすのかもしれない。そのような活動期に関する研究は、現在の地震学の基礎にあるプレートテクトニクス理論を超えた、新しい地球観を開く窓になるかもしれません。

江口：一方、科学的に立証できていない活動期という言葉が、一般社会で独り歩

きするのは怖いですね。地震や津波に備えなければいけないのは確かですが、必要以上に危機感をあおるのはよくありません。そこが一般の人たちに向けた情報発信の難しいところなんです。

小平：私たちは、長い地球の歴史の一瞬を見ているにすぎません。私たちがやるべきことは、過去の地震や津波について、どの地域で、どの規模のものが、いつ起きたのか、時空間にわたるデータをそろえることです。データを増やさなければ、活動期についての科学的な議論もできません。

社会に対しては、事実をきちんと伝え、事実の解釈については、あくまでも研究途上の解釈だと断った上で情報発信していくべきでしょう。

倉本：3.11の後、日本列島が活動期に入ったという報道もよく見掛けます。それについてはどう思いますか。

小平：確かに3.11で応力の大きな解放が起き、その後、内陸で地震が多発しています。それを活動期と呼ぶのであれば、そうなのでしょう。

また、3.11のような海溝軸陸側のプレート境界がすべる地震が起きた後、海洋プレートの沈み込みが加速されて引っ張り力が強く働き、海溝軸の海側でアウトライズ型と呼ばれる地震が起きた例が報告されています。3.11の直後に、日本海溝の海側でM7.4の地震が起きました。しかしまだM8クラスは起きていません。M8クラスの地震が海溝軸を挟んでセットで起きる例が知られていますので、注意が必要です。



斎藤実篤 チームリーダー



小平秀一 プログラムディレクター



江口暢久 グループリーダー



木下正高 所長



倉本真一 次長

度など、断層がすべるときほかの条件も検討する必要があります。

小平：実は先日、金森先生にお話を伺いました。金森先生は、地震学を含め地球科学の宿命は、あるアイデアを検証することが非常に難しい、基本的には不可能といってもいいことだ、と指摘されました。ではどうするのか。研究を進めるための作業仮説を立て、それを検証するために事実を少しずつ積み重ねていくしかない、というご意見でした。

本当にそうだと思います。過去に日本海溝で起きた巨大地震や巨大津波を調べるにはどうすればいいのか。今回の3.11で、巨大津波が陸上に砂や泥などを残さなかった地域があります。巨大地震や巨大津波の時間分布を知るには、陸上の津波堆積物の調査だけでなく、海底下数～10mほどの堆積物をピストンコアラーという装置で採取して、津波の痕跡を探す手法が有効です。

地震により断層がすべった痕跡を調べ

るには、やはり断層まで掘り進める必要があります。そのために、「ちきゅう」を使って日本海溝に沿った方向と横切る方向に並んだ8カ所ほどを掘削して、コアを採取するJTRACKという計画を提案しています。特に、明治三陸地震と3.11の震源域、かつて津波地震が発生したといわれる房総沖を掘削調査して、地震の履歴を調べることを考えています。

倉本：JTRACKに対する世界的な評価はどうですか。

江口：評価は高いですね。ただし、また「ちきゅう」が日本周辺から離れられなくなってしまう、というジレンマもあります。

小平：JTRACKは、たとえば、「ちきゅう」がほかの掘削プロジェクトを行う合間に小刻みに掘り進めれば良いと思います。

江口：確かに温度測定をしないのであれば、一気に断層まで掘削しなくてもいいですね。JTRACKには、JFASTの経験を生かすことができます。

斎藤：3.11の後、日本列島の地震の発生パターンが明らかに変わっているので、それを活動期といっているのでしょうか。一方、環太平洋に活動期があるのかどうか、私には分かりません。事実を積み上げていくしかないですね。

日本海溝の地震履歴を探る JTRACK計画

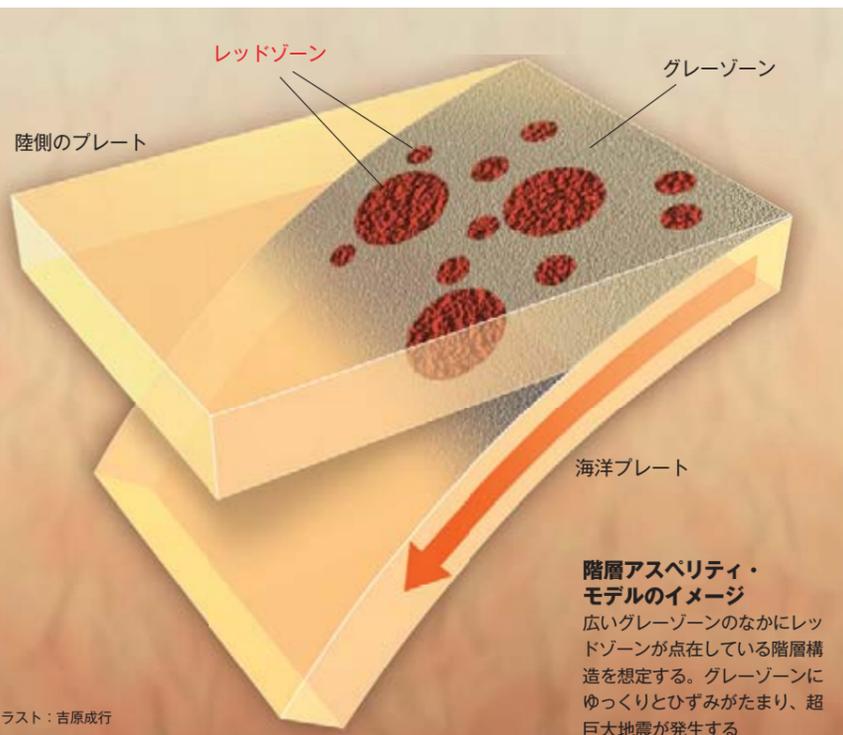
倉本：巨大地震・巨大津波の解明に向けて、これから私たちはどのように研究を進めるべきでしょうか。

木下：JFASTで採取した断層コア中には、スメクタイトが78%含まれていて、地震のときに大変すべりやすかったことが分かりました。ただし、すぐ隣や5km、10km離れた場所ではどうなのか。地震のすべりが伝わったとき、大きくすべる条件が、東北沖のどこでも、いつでも満たされているのか、それを調べる必要があります。

倉本：東北沖のスメクタイト層は、数千万年前に太平洋の海底に降り積もった火山灰が由来だそうですね。ほかの地域にもスメクタイト層は広がっているのでしょうか。

斎藤：西太平洋全域の地層にスメクタイト層が分布している可能性があります。三陸沖でかつて掘削されたコアにもスメクタイト層が見つかりました。調査範囲を広げてスメクタイト層の分布を調べていく必要があると思います。

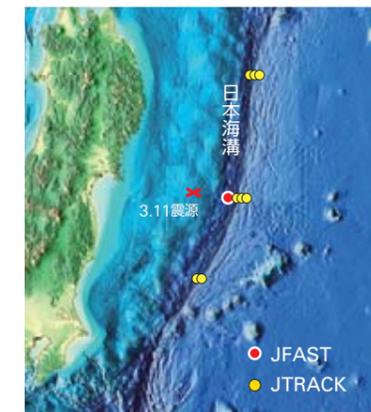
木下：ただし、スメクタイトを多く含む断層が地震のときに必ず大きくすべるとは限りませんね。プレートが沈み込む角



階層アスペリティ・モデルのイメージ

広いグレーゾーンのなかにレッドゾーンが点在している階層構造を想定する。グレーゾーンにゆっくりとひずみがたまり、超巨大地震が発生する

イラスト：吉原成行



JTRACKの掘削提案地点



CRISPの掘削提案地点

CRISP計画、新しい検層技術の開発、コアの分析

倉本：斎藤さんたちは、中米のコスタリカ海溝地震発生帯掘削計画（CRISP）を提案していますね。

斎藤：プレートの沈み込み帯の本質は何かを明らかにするためのプロジェクトです。沈み込み帯は、付加体型と浸食型の2つに大別されます。南海トラフは付加体が発達していて、M8クラスの地震が繰り返し起きています。一方、コスタリカ海溝は、付加体を形成しない浸食型で、M7前後の地震が発生します。それぞれ沈み込み帯をつくっている岩石組成は似ているのに、地震の規模や発生パターンが異なります。何がその違いをもたらしているのか。南海トラフと同様にコスタリカ海溝も固着層まで掘り進め、それぞれの固着層を比較することで、その謎を解明することを目指しています。

倉本：斎藤さんは、沈み込み帯の掘削調査経験が世界で最も豊富な研究者の1人ですね。

斎藤：現場に行き、断層を発見し、特徴を調べる。それを物質科学につなげることで、地震を引き起こす沈み込み帯とは

何か、巨大地震とは何かを解明していく。それが私の研究スタンスです。

それには、掘削同時検層において、さらに多くのデータを測定して断層の特徴をつかむ必要があります。掘削自体も現場で摩擦実験を行っているようなものです。ドリルビットにかかる力などから、断層の力学的性質を解析する研究も進めるつもりです。

倉本：高知コア研究所の所長である木下さんはいかがですか。

木下：地震の仕組みを解明するために、掘削したコアの摩擦実験やマイクロスケールの化学分析が行われています。ただし、私たちが解明したい巨大地震は100km規模のマクロスケールの現象です。地震学では、ミクロの分析とマクロの現象がなかなかつながらないという苦しみが続いています。それを打開するのが、斎藤さんが指摘した新しい検層技術のデータかもしれません。

高知コア研究所には、世界各地で掘削採取されたコアが、合計の長さにして100km分ほど保管されています。その大量のコアの摩擦係数や強度などを系統的に測定してデータを蓄積していくことも突破口になると考えています。

DONETで観測する人類初のデータを生かす

倉本：「ちきゅう」の運営を担当する江口さんはどうですか。

江口：JFASTは大きな科学成果を挙げ、世界に発信することができました。固着層まで掘削する南海トラフの掘削でも、JFASTに匹敵する科学成果を挙げることが期待されていると思います。

小平：南海トラフの掘削孔に設置した長期孔内観測システムは、すでに一部はDONETに接続され、運用を開始していますね。DONETは、南海トラフで地震が起きる前の状態から、巨大地震の瞬間、その後の状態までの連続したデータをリアルタイムで記録し続けることになるでしょう。それは人類初の極めて貴重なデータです。そのDONETのデータを地震の理解や防災に生かしていくことが、JAMSTECの大きな役割だと思います。

倉本：断層のひずみが日々、直線的に蓄積していくのか、あるいは、ある時期に一気に加速するのかなど、海の現場で長期観測をしないと分からないことがたくさんありますね。

木下：エアガンで発生させた人工弾性波

をDONETで捉えることにより、海底下の地下構造を詳細に描き出すことができますね。それを毎年実施することにより、時間変化を追跡することもできます。

倉本：断層をすべりやすくさせる地下水の挙動も捉えることができるはずですね。DONETで水と断層の挙動を同時に捉えることで、地震学を大きく進展させることが期待できますね。

JAMSTECのチーム力で統合的理解に挑む

倉本：最後に、JAMSTECが今後、進むべき方向について伺います。3.11を受けて、新たに策定された長期ビジョンでは「海洋・地球・生命の統合的理解への挑戦」が掲げられ、2014年4月には組織変更も行われます。

木下：科学成果を上げることが、私たちの第一の任務ですが、その科学成果を社会に役立つ「出口」につなげることも求められています。JAMSTECの研究者、職員で「象牙の塔」にこもろうとしている人はいないと思います。問題は、いかにJAMSTEC全体の力を結集させて、さまざまな手法を組み合わせる統合的なアプローチで課題に取り組んでいくかです。それには、みんなが全体のことを考える仕組みが必要だと思います。

江口：限られた予算のなかで、どこに重

点を置いて統合的に研究を進めるのかは、難しい問題ですね。

JAMSTECでは、「ちきゅう」をはじめ、さまざまな研究船や探査機などの研究基盤の整備が進められてきました。しかし、基盤があるだけでは科学は前に進みません。基盤を築く、基盤を使いこなす、研究を行う、という3つの活動を同時にうまく回していく必要があります。

小平：地震や津波の研究に関して、JAMSTECには2つの役割があると思います。1つ目は、地震や津波が起きている海の現場の実像を明らかにして、それを伝えること。2つ目は、地震や津波から社会を守る防災の取り組みに貢献することです。社会が負担できる防災予算にも限りがあります。私たちが海の現場の実像を解明し、最大でどれくらいの規模の地震や津波が起きる可能性があるのかを具体的に明らかにしていくことが、防災に大きく役立つはずはあります。

その役割を果たすには、皆さんがいう通り、研究者、技術者、事務部門が一体となったチーム力が重要です。ホームランバッターばかりをそろえたチームが勝てるわけではありません。バントをする打者や中継ぎ投手も必要です。それぞれの役割をきちんと評価する体制が、チーム力を引き出す上で重要です。論文をたくさん書く研究者だけを評価しては

駄目ですね。

江口：同感です。それぞれが役割を果たすと同時に、チーム全体をまとめる力も必要です。

斎藤：本日、皆さんと議論して、地震・津波には解明すべき謎が多いことを、あらためて感じました。JAMSTECでは、「ちきゅう」による科学掘削を活動の柱の1つにしてきました。その掘削技術は石油産業から学んだものです。もう一度、科学掘削とは何か、という原点に立ち返り、科学掘削ならではの技術、検層やドリリング、解析技術を開発していきたいと思っています。その技術をベースに、より統合的に科学掘削を進めることができるチームを築いていきたいですね。

それには大学や産業界との連携も、いままで以上に緊密にしていかなければなりません。研究成果を社会に見えるかたちで伝えるアウトリーチ活動も重要です。私たち一人一人がアウトリーチの専門家だ、という意識を持つべきです。

倉本：本日は、JAMSTECのこれからをリードしていくべき立場の人たちに集まっていただきました。新たな科学・技術の推進はもちろんのこと、社会・人類の役に立つ成果を出していくために、皆さん、これからも力を合わせて頑張りましょう！ Go! JAMSTEC。



2012年5月20日、JFAST航海中の「ちきゅう」から JAMSTEC/IODP 提供



JAMSTEC高知コア研究所のコア保管庫 撮影：藤牧徹也



有人潜水調査船「しんかい6500」の実物大模型。船体には、内部構造や、潜航していく様子などを投影した。反対側は耐圧殻の側面が切り取られており、コックピットをのぞくことができる

特別展

深海 挑戦の歩みと 驚異の生きものたち を振り返って

2013年7月6日～10月6日に上野・国立科学博物館（科博）で開催された特別展「深海——挑戦の歩みと驚異の生きものたち——」は、59万人を超える入場者を集めた。これまで科博で開催された特別展のなかで5番目の入場者数である。海洋研究開発機構（JAMSTEC）は、科博、読売新聞社、NHK、NHKプロモーションと共に特別展「深海」を主催。この特別展はどのように始まったのか。また、準備の舞台裏、博物館と研究機関が連携したアウトリーチ活動の可能性などについて、開催に深く関わった方々に語り合っていた。

- 林 良博 国立科学博物館 館長
- 窪寺恒己 国立科学博物館 標本資料センター コレクションディレクター
- 平 朝彦 海洋研究開発機構 理事長
- 藤倉克則 海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域 チームリーダー

1通のメールから始まった

窪寺：深海をテーマにした特別展をやろうという話は、科博のなかでだいぶ前からあり、ラフな企画書を提出してありました。開催は、2014年か2015年くらいを考えていました。ところが、

2013年に予定していた特別展がある事情から開催できなくなり、突然、代わりに深海でできないかという打診があったのです。2011年のことでした。

そこで、急ぎよ具体的に企画を考え始めました。科博では日本列島周辺海域の深海性動物相調査を20年近く行っています。その成果を中心にしようと考えたのですが、それだけでは魅力に欠けます。「All about 深海」、つまり深海のすべてを紹介することができないかと考えました。そこで、日本の海洋研究の中心的研究機関であるJAMSTECに相談に乗ってもらうのが一番だろうと、以前から親交のあった藤倉さんにメールを送ったのです。

藤倉：窪寺さんからメールを受け取ったとき、うれしかったですよ。JAMSTECでは、深海についてさまざまな調査研究を行っています。その成果を皆さんに伝える、とてもいい機会だと思いました。また、私たちJAMSTECの研究者にとって深海はとてもメジャーな場所ですが、一般の人にとってはどうなのかが分からずにいました。深海展は、皆さんの深海への興味の大きさを測る上でも、とてもいい機会だと思ったのです。すぐに、

「やります」と返事を送りました。

窪寺：まず、このようなことをやりたいという項目をA4用紙1枚にまとめ、藤倉さんに送りました。そうしたら、藤倉さんが項目を書き加えてA4用紙2枚に膨らませて戻してくれました。メールでのやりとりや会議を重ね、JAMSTECはこういうことができる、科博はこういうことができると、展示の内容を詰めていきました。JAMSTECが深海を拓くために開発してきたさまざまな探査技術はどうしても見せたい。そして調査研究を通して分かってきた、生物たちの深海への適応も見せたい。さらに、科博が所蔵しているさまざまな標本も見せたい。この3つを企画の中心に据えることにしました。

深海への興味を加速させたダイオウイカ

平：JAMSTECでは、タレントさんに有人潜水調査船「しんかい6500」に乗ってもらったり、日本科学未来館に「しんかい6500」の実物大模型を展示したり、講演会を開催したりと、さまざまなアウトリーチ活動を行ってきました。そうした取り組みによって、一般の皆さんのなかにも深海という言葉が少し

ずつ浸透してきているように感じています。

窪寺：地方の博物館などでも深海の生物を紹介する展示が頻繁に行われています。そしてJAMSTECの深海探査機などによって深海の映像が撮影され始めたことで、一般の方が深海の生物を目にする機会も増えました。皆さんの深海への興味は徐々に深くなってきていると、私も思います。

藤倉：しかし何と云っても、NHKと窪寺さんがダイオウイカの撮影に成功し、その番組が放送されたことが、深海に興味を持ってもらう大きなきっかけになったと思います。深海展の開催のタイミングはベストでしたね。前年でも今年でもなく、まさに2013年。

窪寺：深海展の開催が2013年になったことで、NHKと私が10年以上にわたって取り組んでいたダイオウイカの撮影プロジェクトと、ちょうどタイミングが合いました。さまざまなトライ・アンド・エラーを重ねてきましたが、いつダイオウイカを撮影できるかは誰にも分かりません。それが、2012年7月、潜水艇「トライトン」で潜航していた私の目の前にダイオウイカが現れてくれて、23分間の映像を撮ることができました。2013年1月にNHKスペシャル『世界初撮影！深海の超巨大イカ』として放送され、科学番組としては異例の高視聴率を記録しました。皆さんが深海に興味を持ってくれた、そのタイミングで深海展を開催できたのは幸運でした。NHKとNHKプロモーションに深海展の主催に入ってもらった、「深海シアター」として巨大スクリーンでダイオウイカの動画を上映し、また多くの講演会などを通じて深海展のプロモーションもできました。

科博の特別展では過去5番目の入場者数を記録

林：深海展の総来場者数は59万3129人でした。これほどたくさんの方に来ていただき、科博としても大変ありがたいことで



林 良博 国立科学博物館 館長



平 朝彦 海洋研究開発機構 理事長



窪寺恒己 国立科学博物館 標本資料センター コレクションディレクター

す。この入場者数は、過去の特別展のなかで5番目の記録です。深海展が入る前は、1番目から5番目まですべて恐竜をテーマにした特別展で占められていました。その一角を崩したのは、画期的なことです。

来場者のアンケートでは、「深海の開発にも興味を持った」「こういう研究にはさらに費用を掛けるべき」「深海のことは宇宙のことよりも分からないことだらけ。海の特別展をもっと開催すべき」といったご意見を頂きました。

平：「深海調査とはこんなに大変なものだと気付いた」というご意見もありますね。その言葉はとても大事だと思います。

林：ところで、ダイオウイカは今年、あちこちで見つかります。あれは偶然ですか。

窪寺：今年は、すでに6個体が発見されています。日本海のダイオウイカは、対馬海峡を通過して太平洋側から入ってきたのでしょう。冬に水温が低くなって体が弱り、浮力中立が取れなくなったものが海面に浮き上がり、強い西風に吹かれて定置網に掛かったり日本海沿岸に打ち上げられたりするのだと考えられています。珍しいことではなく、これまでも2年に1個体か3年に2個体くらいが打ち上がっています。今年多く感じられるのは、NHKの番組や深海展の影響でダイオウイカが有名になり、発見した人がすぐにマスコミに連絡をして、ニュースで取り上げられるためもあるかもしれません。また、今年日本海の大津側が特に低温になっていることが影響しているかもしれません。2006～07年の冬に6個体のダイオウイカが発見されたという記録があります。その年も異常低温でした。

巨大な空間を埋められるのだろうか

藤倉：深海展について本格的な打ち合わせを始めてすぐのころ、何も入っていない会場を見せていただきました。衝撃的でした。超広大なんです。あの巨大な空間を埋めるには、相当一生懸命に取り組まないといけないと思いました。

窪寺：広い会場を埋めるためにも、「しんかい6500」の実物大模型を持つてくるのができないかとお願いし、途中いろいろ

ありましたが、最終的に展示することができました。ダイオウイカの撮影に使った潜水艇「トライトン」も展示したかったのですが、こちらは残念ながら実現できませんでした。

林：「しんかい6500」の実物大模型は、深海展のなかでも重要な展示でした。「しんかい6500」の耐圧殻に取り付けられているのぞき窓の厚いガラス、青い潜航服なども並べたことで、展示に膨らみが出ました。結果的には、会場はむしろ狭いくらいでした。来場者の皆さんにご迷惑をお掛けしてしまったことは、大きな反省点です。

藤倉：JAMSTECは、このような大規模な展示を行うのは初めてのことでした。今回、特に頑張ってくれたのは、広報課や支援部の人たちです。ほとんどは女性でした。JAMSTECの面々は、こういう仕事が好きなようで、生き生きとしてやっていたね。いろいろなアイデアも出してくれました。

平：イベントを通じて人が育つというのは、研究機関としてもとてもいいことです。

本物を見てほしい。標本と映像の連携

藤倉：主催者が集まった会議で、窪寺さんが「ダイオウイカの標本を展示したくない」といい出したことがありました。その言葉を聞き、読売新聞社やNHKの皆さんの顔が、サーッと青くなりました。そして、「どうかしてください」と、私に目で訴えてきました。仕方がないので、「ダイオウイカの標本を展示しないのだったら、JAMSTECは主催から下りるよ」といったこともありましたね。

窪寺：深海展で展示するダイオウイカの標本が、常設展で展示しているものより小さいということもあり、せめて展示方法を工夫したかったのです。たとえば、丸いアクリルのチューブに入れて下からものぞけるようにしたり……。ところが、そういう展示方法はできないといわれてしまい、それならダイオウイカは展示したくないと、駄々をこねたのです。

平：確かに比較的小さい個体で、巨大なイカ！という印象ではなかったかもしれませんが、本物があるとないのとでは全然違います。

窪寺：博物館ですから、本物を見せなければいけないというのは、その通りです。ただし、深海展の目玉はダイオウイカであっても、本当の狙いは、「All about 深海」なのです。人類がどうやって深海を拓いてきたか、深海にはどのような生物がすんでいるのか、そして深海にどう適応しているのか。それらを皆さんに伝えたかったのです。ダイオウイカは、そのなかの1つでしかありません。

深海生物図鑑というコーナーでは、標本と一緒に映像を映すモニターをたくさん並べてもらいました。標本は本物ですが、

動かないところが難点です。そこで、それが生きているときの映像も同時に見せることで、深海ではこんな生物たちがこういうように生きていて、ということをお伝えられるようにしました。標本と映像の連携は、この10年ぐらいの深海映像の蓄積があって初めて可能になった展示です。

平：ダイオウイカについても、標本と映像のセットがあったからこそ、主役が主役たり得たのでしょうか。

博物館と研究機関の連携が生み出すもの

藤倉：JAMSTECのような研究機関が博物館と協力してこのような展示を行う意義は何か。実は、私にはまだその答えが見えないのです。博物館ではなく、水族館でもいいのかなと思ったりもします。

林：博物館法によれば、水族館と動物園は博物館の類似施設なので、ほとんど同じと考えていただいてもいい面もあります。違いといえば、博物館は自然史や歴史的な流れも含めて説明するので、化石や骨格標本や剥製など、現在は生きていない動物や植物の展示が中心になります。

窪寺：幅の広い年齢層をターゲットにして、実物を見せながら付加的な情報を加えて理解していただく。それが博物館です。



藤倉克則 海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域 チームリーダー

藤倉：その点が、私たちにとっては悩ましい宿題でした。最初に「ターゲットは誰ですか」と聞いたときに、「すべての人です」といわれ、困ってしまったのです。最終的には、科博が持っているさまざまなノウハウのおかげで、小さな子どもでも楽しめる工夫をしたり、専門的な情報は図録に任せたり、広い年齢層の方々が楽しめるものになったと思います。私たちが今後アウトリーチ活動をする上で、学ぶべきことがたくさんありました。

窪寺：今回の深海展は、博物館のスタッフや研究者だけでは、とうていできませんでした。JAMSTECの研究者だけでも、何かに特化した展示内容になってしまったのではないでしょう



ダイオウイカの標本。ひれの先端から腕の先まで約3m、触腕まで含めると約5m。2007年に島根県出雲市沖で捕獲された

か。今回、博物館とJAMSTECがうまく組み合わせられたことで、中身の濃い展示になったのだと思います。

平：まさに、研究機関と博物館が組むことで相乗効果が現れたのですね。

インターネットをいかに利用するか

藤倉：インターネットを通じたSNS（ソーシャル・ネットワーキング・サービス）の力は大きいですね。深海展では、展示物の写真撮影をOKにしました。写真をツイッターやフェイスブックに掲載してもらうことで、また人が集まる。そういう戦略があるのだと、学びました。

平：2013年夏に「しんかい6500」がカリブ海で世界最深の熱水噴出域の潜航調査を行った際、その様子を「ニコニコ生放送」で中継しました。日本時間で真夜中だったにもかかわらず、30万人が視聴し、書き込みが50万を超えました。インターネットの威力を感じましたね。アウトリーチ活動にインターネットをいかに使っていくか、今後の大きな課題です。

窪寺：深海展でも、私と藤倉さんと「しんかい6500」前潜航長の吉梅 剛さんで見どころを解説し、その様子を「ニコニコ生放送」で中継しました。3万~4万くらいの人に視聴いただいたようです。中継は1回だけでしたが、大きな反響があり、こういう手段も必要だと感じました。

林：博物館の立場でいうと、やはり実物を見てもらいたいというのがあります。しかし、遠隔地に住んでいて、どうしても来場できない方々もいらっしゃいます。インターネットをどう利用していくかは、科博としても大きな課題です。

いままでやったことがない展示を

林：今後もJAMSTECと科博が組んで展示を行いたいですね。

ダイオウイカに匹敵するような目玉はありますか。

平：サメも面白いですよね。

藤倉：私たちは2014年度から、トッププレデター、上位捕食者が生態系をどのようにコントロールしているのかというテーマに取り組みます。近年、上位捕食者が地球上の生物の多様性をコントロールしているといわれています。海洋生態系では、サメが典型的な上位捕食者です。サメの生態系における役割を理解することは、とても重要です。

平：JAMSTECと科博が協力して、いままでやったことのないような展示をやりたいですね。たとえば、JAMSTECの大きな研究テーマの1つに環境変動があります。環境変動研究に関連して、台風の発生や氷床の変動など、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を用いてさまざまなシミュレーションを行っています。科博の標本と、シミュレーション、そして実際の気象現象の映像を合わせた展示ができないでしょうか。これを機会に、環境やシミュレーションの研究者と科博の研究者が話し合う機会をつくりたいですね。

窪寺：異なる組織と一緒に展示を企画しようとしたときに何が重要かという、人脈です。深海展も、私と藤倉さんが互いをよく知っていたからこそ実現できたのだと思います。異なる組織間で交流を図るのはなかなか難しいですが、そういうところから新しい企画の芽が出てくる気がします。

藤倉：東北地方太平洋沖地震も重要なテーマの1つです。マグニチュード9.0の地震はどのように起きたのか。さまざまな研究機関と科博が協力し、オールジャパンで企画すれば、充実した展示ができるのではないのでしょうか。

窪寺：科博では、日本の地震計の発達を追ってきました。日本人がどのように地震を捉えてきたかという歴史まで広げると、大きな展示になるかもしれません。

透明球の有人潜水調査船への期待

平：深海展は、深海探査の技術開発について、あらためて考える機会にもなりました。しかしまだ実現できていないことも、たくさんありますよね。たとえば、小笠原諸島の西之島付近で海底火山が噴火している様子をモニタリングしたいのですが、実現できていません。JAMSTECの無人探査機は非常に高価なため、そのような危険な海域に投入することはできないのです。安価な無人探査機の開発が必要でしょう。そして、透明球の有人潜水調査船を、ぜひ実現したい。窪寺さんも、透明球の潜水艇だったからこそ、ダイオウイカとじっくり対面できたわけですよね。

窪寺：ダイオウイカを撮影した「トライトン」の最大潜航深度は1,000mですが、視野は340度あります。「しんかい6500」は



深海生物園。科博やJAMSTECが所蔵する約380点の深海生物の標本などを展示。生きている姿を見ることができるよう、映像を映すモニターも設置した

深く潜ることはできるのですが、窓が小さいために肉眼での観察には限界があります。視野が広くて自分の目で生物を見ることができると、透明球の有人潜水調査船を、ぜひ日本の技術でつくってください。

平：そういう声をたくさん上げてほしいですね。水深1,000mといわず、もう少し深いところまで行けるものをつくりたいものです。

窪寺：「しんかい6500」は、どちらかというと海底を見る潜水調査船です。そうではなくて、中層を調べることができる潜水艇が望まれています。水深1,000mというのは、トワイライトゾーンと呼ばれ、光がぎりぎり届く深さです。そこには生物がたくさんいるらしいのですが、まだよく分かっていません。ダイオウイカも、トワイライトゾーンの豊富な生物たちに支えられて、大きな体を維持できるのでしょう。「トライトン」で潜ったとき、ハダカイワシがとてもたくさんいて、しかも頭を下にして漂っていました。とても不思議な風景でした。ぜひトワイライトゾーンを詳しく調べてみたいと思っています。

平：潜水調査船には速度も必要でしょうか。

窪寺：高速である必要はないと思います。「トライトン」は大きな音がするので、生物が逃げってしまうかと心配しましたが、あまり影響しませんでした。一番の問題は光です。白いライトをつけていくと、それだけで環境を壊してしまいます。環境を壊さない近赤外の強いライトと、それを見ることができるとモニターを用意すれば、いままで見られなかった中層の生物たちの世界を見ることができるようでしょう。

ぜひ深海展の第2弾を

窪寺：ダイオウイカの撮影のとき、水深1,000mでも1~2週間

のサイクルで生物相が大きく変動していることに驚きました。生物がまったく見られず砂漠のような状態であったものが、1週間後にはサルパやプランクトンなどであふれている。そして1週間後には、またいなくなってしまう。潮汐が原因だともいわれますが、本当の理由はまだ分かっていません。

平：中層を長期的にモニタリングする手段が欲しいですね。

藤倉：水深2,000mまでを自動で昇降して水温や塩分のデータを人工衛星経由で送ってくるアルゴフロートが、世界中に約3,500個展開されています。それにビデオや新しいセンサーを付けることも考えられます。

窪寺：中層を長期間モニタリングできる新しい目を、ぜひJAMSTECで開発してください。

林：マッコウクジラにいろいろな装置を付けて、長期的なモニタリングができるような仕組みはできないものではないでしょうか。

窪寺：バイオリギングですね。バイオリギングも海洋のなかをのぞく1つの有効な手段だと思います。水深や3次元の加速度を記録できるので、生物が水中でどういう動きをしているかまで分かります。私たちがマッコウクジラにロガー（小型記録計）を付けて調査をしています。これまでに、イカを追い掛けていき、追い付いたところで体を反転させてイカを食べているのではないかと、という記録が取れています。でも、本当にそういう動きをしているかどうかは分かりません。マッコウクジラの頭にカメラを付けて撮影すれば、はっきりします。

平：ダイオウイカ対マッコウクジラも撮れますかね。

窪寺：撮れたらすごいですよ。

平：新しい目で見た深海の姿が集まってきたら、深海展の第2弾をやりたいですね。

窪寺：はい。ぜひやりたいですね。

座談会撮影：藤牧徹也



左から、国立科学博物館の林館長と窪寺コレクションディレクター、海洋研究開発機構の藤倉チームリーダーと平理事長



泰山 (2006年6月)
早朝には眼下に見えていた汚染層(左)が、昼になると暖められて上がってくる(右)



蟒山 (2007年9~10月) PM2.5濃度によって視界が大きく変わる



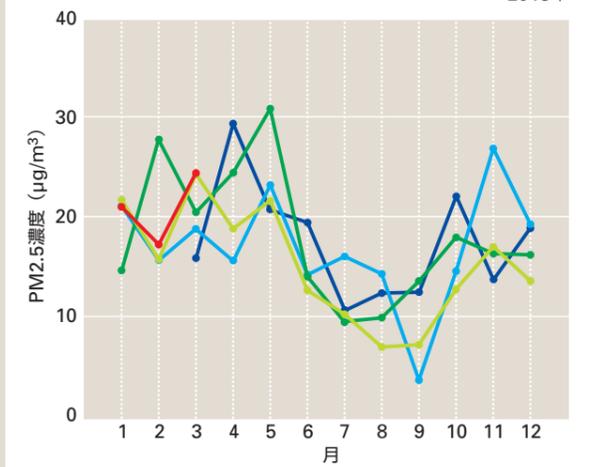
福江島 (2009年2月~) 大陸に近い一方で、近傍にはPM2.5の発生源がほとんどないため、越境大気汚染の観測点として適している

図1 PM2.5濃度の観測

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) では、長崎県五島列島の福江島で2009年2月からPM2.5の観測を開始したほか、中国山東省の泰山、北京郊外の蟒山、上海郊外の如東、韓国の済州島などでも国際共同観測を行っている

図2 福江島でのPM2.5の月平均濃度変動

2009年3月から2013年3月における月平均濃度の変化。夏に低く、秋から冬・春にかけて高くなるという季節変動がある。2013年1月の濃度は、過去3年と比べて特に高いわけではない



PM2.5はどこまで分かったか 拡がる人間活動と地球環境への影響

2013年7月20日 第168回地球情報館公開セミナー



地球環境変動領域
物質循環研究プログラム
大気組成研究チーム
チームリーダー
金谷有剛

かなや ゆうごう。1973年、北海道生まれ。博士(理学)。東京大学理学部化学科卒業、同大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了。2000年、JAMSTEC地球フロンティア研究システム大気組成変動予測研究領域ポスドク研究員。地球環境フロンティア研究センター大気組成変動予測研究プログラム研究員、主任研究員、サブリーダーを経て、2009年より現職。専門は大気化学

PM2.5とは何か?

2013年1月、中国の北京でひどい大気汚染が発生していることが大きく報じられました。同じころ、西日本を中心に比較的高濃度のPM2.5が観測され、越境大気汚染を懸念する声が高まりました。

PM2.5とは、空气中を漂う微小エアロゾル粒子のうち大きさが2.5µm (1µmは1,000分の1mm) 以下のものをいいます。PM2.5には、硫酸塩や硝酸塩、アンモニウム、有機物、すす(元素状炭素、ブラックカーボン)などが含まれています。粒子の形状は球形から複雑なものまで多様で、1個の粒子に硫酸塩と有機物とすすが混ざっていたりします。

PM2.5には人為起源と自然起源のものがあります。人為起源としては工場や自動車、発電所からの排気、肥料、肉の調理など、自然起源としては火山ガス、砂嵐、植物、波のしぶき、森林火災などがあります。さらに、粒子として直接排出

されるものと、窒素酸化物や硫黄酸化物のようにガスとして排出されたものが大気中で化学反応によって粒子化するものがあります。PM2.5が大気中を漂っている寿命は2~7日と短いため全球で一様とはならず、発生源付近に偏っています。

PM2.5が目される大きな理由の1つは、健康への影響です。PM2.5は非常に小さいので肺にまで到達し、呼吸器障害などを引き起こします。また、気候や生態系とも関わる重要な側面があります。

2013年にPM2.5が急増?

2013年にPM2.5が大きな話題になったのは、北京でこの年にPM2.5が急増えたためなのでしょう。公表されているいくつかのデータを見る限り、そうともいえないようです。北京のPM2.5濃度は、変動はありますが、年を追って大きく増えているわけではありません。過去約20年にわたる北京空港での視程(肉

2013年冬以降、空气中を漂う微粒子PM2.5が大きな話題になっています。

PM2.5とは何でしょうか。なぜ急に話題になったのでしょうか。

PM2.5による国境を越えた大気汚染の実態、またPM2.5を含むエアロゾルと地球環境との関わりについて、観測とモデルシミュレーションを駆使して得られた最新の知見を紹介します。

眼で物体がはっきり確認できる距離)のデータでも同様です。

急に話題になった一因は、数値の「見える化」にあります。2010年ごろから北京にあるアメリカ大使館が1時間ごとのPM2.5濃度をツイッターなどで発表するようになり、健康を損ないかねないレベルの日も見いだされました。そのため中国では日本より先行して話題となり、都市政府なども多地点での観測値の発表を始めました。そして1時間値で900µg/m³にも達したとして、2013年1月、衝撃的な映像とともに伝えられたのです。しかし、同程度の汚染は数値の公開が始まる以前にもあったと考えられています。

日本で2009年に設定されたPM2.5の環境基準は、1年平均値が15µg/m³以下かつ1日平均値が35µg/m³以下とされています。西日本ではまれに100µg/m³近くの日がありますが、年平均値は最大でも21~22µg/m³と、北京のおよそ5分

の1です。環境基準との照合から、敏感な方は注意すべき程度とされています。また過去には、2011年2月に濃いもやのなかで別府大分マラソンが行われた例があります。こうして見ると、日本でも2013年にPM2.5が急激に増加したわけではありません。少なくともここ数年は、幾度となく越境大気汚染はやって来っており、いよいよ2013年に大きく取り上げられたということです。

越境大気汚染の実態

PM2.5による越境大気汚染は、どのくらい進んでいるのでしょうか。私たちは2009年2月から、長崎県五島列島の福江島で観測を開始しました(図1)。福江島は、大陸に近く、またPM2.5の発生源がほとんどなく清浄なため、越境大気汚染の実態を把握するのに適した場所です。

そのデータから、夏に低く、秋から冬・春にかけて高くなる季節変化があること

を見いだしました(図2)。また最初の1年では、環境基準を上回る日が26日もあることを明らかにし、警鐘を鳴らしました。高濃度の日の気流は主に大陸方面から来ており、必ずすすの濃度も高くなっています。そうしたことから、PM2.5の高濃度日には、越境大気汚染の影響が強いと結論付けました。

2010年ごろPM2.5の観測点は全国で20点ほどでしたが、現在では500点くらいまで増えています。環境省の発表では2010~11年に環境基準以下の観測点は約30%と低く、基準を超えている観測点は西日本に多いことが分かってきました。

モデルシミュレーションを使う

観測によってPM2.5濃度のおおよその分布は分かりますが、それがどこから来たかについては、よく分かりません。そこで私たちは、観測とモデルシミュレーションを組み合わせで解析をしています。

モデルシミュレーションでは、まず地球を格子状に区切ります。そのモデルに、どこでどの物質がどれだけ排出されるかという推計を入れ、風の流れや物質がガスから粒子に変化したり雨で除去されたりという大気中での化学・物理的な過程を組み込んで格子ごとに計算し、PM2.5

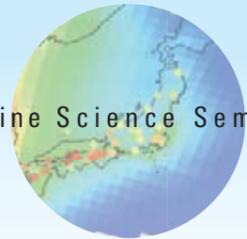


図3 越境大気汚染のシミュレーション

2011年2月6日に開催された別府大分マラソンでは、街がもやに包まれていた。図は、PM2.5濃度分布をその数日前からシミュレーションした結果のスナップショット。東シナ海付近に高気圧があり、そのへりを回り込むようにしてPM2.5が大陸から日本に運ばれてくるのが分かった
(画像提供: 物質循環研究プログラム大気物質循環研究チーム 池田恒平ポストドクトラル研究員)

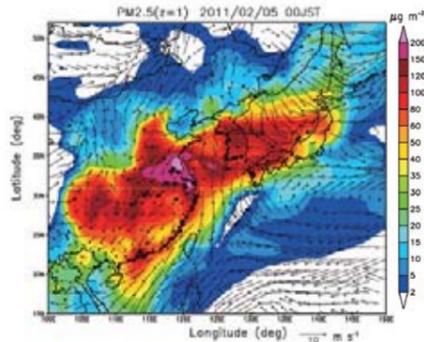
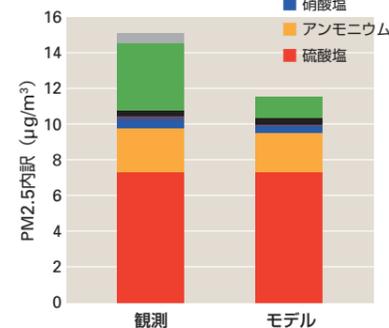


図4 PM2.5の成分内訳

福江島での観測結果とモデルを比較すると、硫酸塩やアンモニウム、硝酸塩などはよく一致しているが、モデルでは有機物が顕著に不足している



濃度の時空間分布を表現します (図3)。
私たちはまず、福江島における2009年のPM2.5について観測とモデルを比較し、濃度の季節変動や短期変動がある程度よく表現されることを見いだしました。PM2.5の成分濃度の内訳は、水分を取り除いた乾燥状態で比較すると、主要成分である硫酸塩、アンモニウム、硝酸塩はよく一致し (図4)、一定の性能が得られることを確かめました。一方で、有機物濃度が、モデルでは観測の約5分の1と低いことも分かりました。有機物を再現することが今後のモデルシミュレーションでの目標の1つに位置付けられます。今回は、このような限界を踏まえつつ、モデルを使用することにしました。

大陸での観測とモデル解析

越境大気汚染を論じる上では、大陸におけるPM2.5の実態を把握することも重要です。私たちは、中国や韓国の研究者と連携して国際共同観測を実施し (図1)、モデルを併用した解析を行ってきました。
2006年6月には、中国山東省の泰山で観測を行いました。早朝に眼下に見えていた白い汚染層が、昼になると空気が暖められて厚みを増し、上がってくる様子が確認できました (図1)。その汚染は、観測された大気微量物質の特性から、工業活動に加えて農業の影響が大きいことが明らかになりました。華北平原一帯では、5~6月に冬小麦が収穫されます。すぐに次の作物を植えるためにわらが燃やされ、それが地域の大气汚染の要因になっているのです。従来のモデルではすすや有機物の観測値を再現できませんし

たが、農業廃棄物の野外燃焼を考慮したモデルでは再現できませんでした。

2007年9~10月には、北京郊外の蟒山^{マングン}で観測を行いました。数km離れた山にある建物がはっきり見える日と、見えない日がありました (図1)。その様子はPM2.5の濃度変化とよく対応します。しばらく雨が降らないとPM2.5が大気中に蓄積していき、低気圧や前線が通過すると雨でPM2.5が流され視程が回復する、ということが約1週間ごとに繰り返されているのが確かめられました。

2012年10月には、韓国の済州島と福江島で同時観測を行いました。PM2.5は済州島から約250km離れた福江島まで5~8時間で到来すること、寒冷前線の通過に伴って大陸から西日本へとPM2.5が運ばれるメカニズムが重要であることが分かりました。それらは、モデルでもうまく表現できています。中国・上海郊外の如東でも2010年6月に観測を行いました。如東と済州島で観測されたPM2.5の成分濃度の内訳をモデルと比較したところ、福江島と共通して、硫酸塩やアンモニウム、硝酸塩はよく一致しますが、モデルにおける有機物は観測の約5分の1にとどまる傾向が明らかとなりました。

どこから、どれだけ来るのか

日本で観測されるPM2.5はすべて大陸から来るわけではなく、国内にも発生源があります。大気汚染の原因究明と対策を考えるには、発源地域を明らかにし、それぞれ何割を占めているか相対的な寄与を知る必要があります。私たちはモデルシミュレーションの応用によ

り、PM2.5はどこからどれだけ来るのかに関する定量的な答えに迫ろうとしています。

まず、日本上空での2010年のPM2.5年平均値の空間分布をモデルで表現したところ、福江島と環境省の観測データから見られた、西日本で濃度が高く東日本で低いという分布を再現していることを確かめました。その上で、PM2.5年平均濃度に対する相対的な寄与率をモデルシミュレーションで試算しました。発生源地域は国内、朝鮮半島、中国4地域とし、受け手側地域は日本を9つに区切りました (図5)。結果をまとめると、日本への寄与率は、国内発生源が2~4割、朝鮮半島起源が0~1割、中国起源は3~6割となりました。中国の寄与は、西日本では5~6割となり越境汚染の重要性が浮き彫りになりましたが、関東では3割にとどまり、国内発生源の方が重要という結果が得られました。

どう解決する？ PM2.5問題

このようなPM2.5越境汚染問題について、対策の見通しはあるのでしょうか。福江島で2010年にPM2.5濃度が環境基準を超えた日のうちモデルでも超過した9日間に着目し、中国と韓国におけるPM2.5の原因物質の排出量を20%削減したと仮定してモデルシミュレーションを行いました。9日のうち7日は環境基準値を下回るという結果になり、20%削減するだけでも一定の効果が期待できることを、私たちは見いだしました。

PM2.5対策は中国も必死で進めています。しかし、改善の加速には国際的な協力が必要です。たとえば、20%の削減であれば、技術協力などにより省エネ対策や住宅の機密性を高めて暖房の効率をよくなるだけでも、効果があるでしょう。地球温暖化問題に対応したIPCC (気候変動に関する政府間パネル) のような国際的枠組みを構築して対策を進めることも効果的かもしれません。それには、国を超えた科学的な知見や認識の共有、信頼関係が基盤になります。

気候や生態系を変える？

ここからは、エアロゾルと地球環境との関わりについてお話します。地球を暖める効果を持つ物質としては

二酸化炭素 (CO₂) が有名ですが、エアロゾルも地球を暖めたり冷やしたりする効果があります。黒い粒子は太陽の光を吸収して地球を暖める効果を、白い粒子は反射して地球を冷やす効果を持ちます。また、エアロゾルがあると雲ができやすくなります。地球温暖化に対するエアロゾルの効果を議論するには、黒い粒子や白い粒子の量、その振る舞いについて理解することが重要です。

私たちはすすの研究をしています。すすは、ディーゼルエンジンの排ガスや燃料燃焼、野焼き、れんがの窯などから排出され、アジアは世界の一大発源地域と考えられていますが、その量はよく分かっていません。私たちは福江島や中国の泰山、黄山ですすの濃度を測定してモデルシミュレーションと比較し、季節性や濃度変化をよく再現できるようになりました。大気中に排出されたすすは、水蒸気となじまないため大気中から除去されにくいのですが、水溶性の物質と混合することで雨によって除去されやすくなります。私たちのモデルは、そうしたすすの細かい状態変化を表現したため、高い再現性が得られたのです。

気候影響を評価できる私たちの最新のモデルによると、すすが温暖化に与える影響は0.4W/m²と見積もられました。CO₂による影響の1.7W/m²と比べると小さい値ですが、削減対策が取りやすいのが特徴です。すすの排出量を削減できれば、温暖化と大気汚染の両方を一気に解決できるかもしれません。

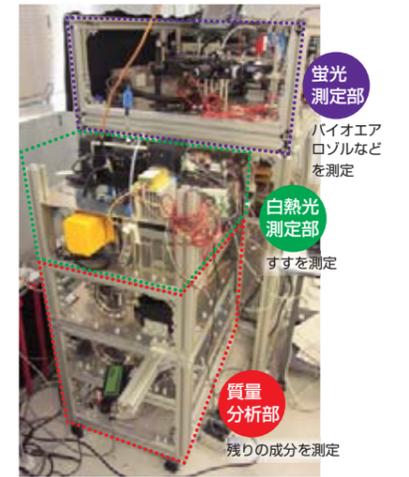
エアロゾルと生態系との関わりも注目されます。自然に由来する黄砂ダスト粒子や産業から発生するエアロゾル粒子には、鉄や硝酸塩など生態系の栄養素となる物質が含まれ、陸の発生源から外洋へ運ばれています。それらが実際に生態系の変調をもたらしているのかどうか、地球システムを俯瞰する立場で検証することも重要となっています。

画期的な複合分析装置を開発

こうした研究を進めるなかで、私たちは有機物やすすの高度な測定法が必要であることを実感し、エアロゾルの新しい複合分析装置を東京大学と富士電機と共同で開発しています (図6)。まず蛍光を用いて有機物を測定し、次に白熱光

図6 新たに開発した複合分析装置

バイオエアロゾルを含む有機物、すす、そのほかのPM2.5を計測できる。しかも、1粒ごとにすすとほかの成分の混ざり具合の測定が可能



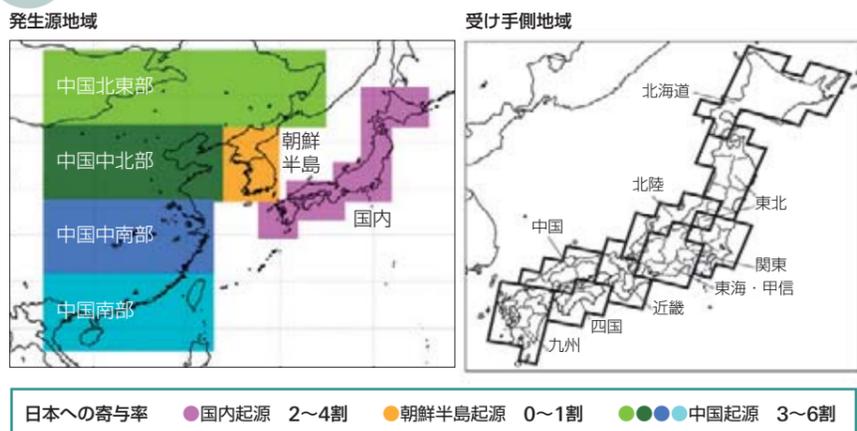
を用いてすすを測定し、最後に質量分析計で残りの成分を分析します。

モデルでは観測された有機物の量をうまく再現できないことから、未知の成分があるのではないかとみられています。候補の1つがバイオエアロゾルです。植物の破片や、花粉、バクテリア、キノコの胞子など、生死を問わず生物由来の浮遊粒子をいいます。観測例はほとんどありません。新しい装置ではバイオエアロゾルの測定も目指しています。

この装置のもう1つの大きな特徴は、すすと別の成分が混ざっているのか、単独なのか、1個1個の粒子について測定できる点です。すす粒子が水溶性の成分と混ざれば、雨に取り込まれやすくなって物質循環の速度が違ってきます。また、ほかの粒子との混合によって、光の吸収性が単独のすす粒子の倍にもなります。1粒ごとにすすとほかの成分の混ざり具合を測定することで、温室効果を正しく理解することができるようになるのです。

締めくくりとして、「PM2.5はどこまで分かったか」というタイトルに対する答えとしては、知見の積み重ねによってようやく少しずつ分かってきた、というところで、直観としては3割くらいかなと思っています。今後は、人間活動によって排出されたエアロゾルが地球システムにも影響を及ぼしていることも踏まえて、広い視野でPM2.5を含むエアロゾルに関する研究を進めていきます。 **BE**

図5 日本のPM2.5年平均濃度に対する相対的寄与率



編集後記

特集「ここまで分かった巨大地震・巨大津波の謎」はいかがだったでしょうか？ 2011年3月11日に東日本大震災が起きてから3年以上が経過しましたが、いまだに被害地域の復興が大きな課題となっていると伝えられています。今回の特集で紹介されている「東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST）」という計画では、震源域付近の海底下を直接観察しようと、2012年の4～5月と7月に地球深部探査船「ちきゅう」による掘削が実施されました。それは、地震によって断層がすべるときに発生する摩擦熱を計測するために、地震発生後できるだけ早く実行する必要性がありました。5月にはプレート境界断層と思われるコア（岩石試料）が採取され、さらに7月には掘削孔に55個の温度計が設置され、目標は無事に達成されました。座談会でも研究者が述べているように、海洋研究開発機構（JAMSTEC）では「ちきゅう」をはじめさまざまな調査船や無人探査機などの調査機器が整備されてきていますが、東北地方太平洋沖地震のように数十年、数百年に1回しか起きないような現象に対しても機動的に対処できるような体制づくりが求められています。そのためにJAMSTECでは、新たに策定された長期ビジョンをもとに「海洋・地球・生命の統合的理解への挑戦」という目標を掲げ、2014年4月には大幅な組織改変を行います。

特別記事として、昨年、上野の国立科学博物館で開催された特別展「深海—挑戦の歩みと驚異の生きものたち—」を振り返る座談会を組みました。多少なりともお手伝いした私を含め広報課のメンバーも、まさか国立科学博物館に入るのに長蛇の列ができるほど人気が出るなんて想像すらしていませんでした。あまりなじみのない深海というニッチ（隙間）な分野にスポットライトを当てて努力された関係者の苦労話などを、ぜひ知っていただければと思っています。（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冊本体286円＋税＋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 広報部 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（136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紹介

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



*お預かりした個人情報は、『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26巻 第2号（通巻130号）2014年3月発行

発行人 鷲尾幸久 独立行政法人海洋研究開発機構 広報部

編集人 満澤巨彦 独立行政法人海洋研究開発機構 広報部 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 (p1-21) / 鈴木志乃 (p22-31、裏表紙)

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)

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26年3月15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IHI	オフショアエンジニアリング株式会社
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	株式会社カイショー
株式会社アイケイエス	株式会社海洋総合研究所
株式会社アイフエンタープライズ	海洋電子株式会社
株式会社アクト	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アサツディ・ケイ	鹿島建設株式会社
朝日航洋株式会社	川崎汽船株式会社
アジア海洋株式会社	川崎重工業株式会社
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	株式会社環境総合テクノス
株式会社安藤・間	株式会社関電工
泉産業株式会社	株式会社キュービック・アイ
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	共立インシュランス・フローカース株式会社
株式会社エス・イー・エイ	共立管財株式会社
株式会社エスイーシー	極東製薬工業株式会社
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	株式会社熊谷組
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ンコーポレーション	株式会社グローバルオーシャンディベロップメント
株式会社MTS雪氷研究所	京浜急行電鉄株式会社
有限会社エルシャンテ追浜	KDDI株式会社
株式会社OCC	鉱研工業株式会社
株式会社オキシーテック	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	株式会社コベルコ科研
国際気象海洋株式会社	五洋建設株式会社
国際警備株式会社	株式会社コンボン研究所
国際石油開発帝石株式会社	相模運輸倉庫株式会社
国際ビルサービス株式会社	佐世保重工業株式会社
株式会社コベルコ科研	三建設備工業株式会社
五洋建設株式会社	三洋テクノマリン株式会社
株式会社コンボン研究所	株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ
相模運輸倉庫株式会社	JFEアドバンテック株式会社
佐世保重工業株式会社	株式会社JVCケンウッド
三建設備工業株式会社	財団法人塩事業センター
三洋テクノマリン株式会社	シチズン時計株式会社
有限会社田浦中央食品	シナネン株式会社
高砂熱学工業株式会社	シーフロアーコントロール
株式会社竹中工務店	清水建設株式会社
株式会社竹中土木	ジャパンマリンユナイテッド株式会社
株式会社地球科学総合研究所	シュルンベルジェ株式会社
中国塗料株式会社	株式会社昌新
中部電力株式会社	株式会社商船三井
株式会社鶴見精機	一般社団法人信託協会
株式会社テザック	新日鉄住金エンジニアリング株式会社
寺崎電気産業株式会社	須賀工業株式会社
電気事業連合会	鈴鹿建設株式会社
東亜建設工業株式会社	スプリングエイトサービス株式会社
東海交通株式会社	
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	
東京製綱織維ロープ株式会社	
株式会社東京チタニウム	
東北環境科学サービス株式会社	

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
セコム株式会社	新潟原動機株式会社
セナーアンドバーンズ株式会社	西芝電機株式会社
株式会社損害保険ジャパン	西松建設株式会社
第一設備工業株式会社	株式会社ニシヤマ
大日本土木株式会社	日油技研工業株式会社
ダイハツディーゼル株式会社	株式会社日産クリエイティブサービス
大陽日酸株式会社	株式会社日産電機製作所
ニッサイマリン工業株式会社	ニッサイマリン工業株式会社
日本SGI株式会社	日本SGI株式会社
日本海洋株式会社	日本海洋株式会社
日本海洋掘削株式会社	日本海洋計画株式会社
日本海洋事業株式会社	日本海洋事業株式会社
一般社団法人日本ガス協会	一般社団法人日本ガス協会
日本興亜損害保険株式会社	日本興亜損害保険株式会社
日本サルヴェージ株式会社	日本サルヴェージ株式会社
日本水産株式会社	日本水産株式会社
日本電気株式会社	日本電気株式会社
日本ヒューレット・パカード株式会社	日本ヒューレット・パカード株式会社
日本マントル・クレスト株式会社	日本マントル・クレスト株式会社
日本無線株式会社	日本無線株式会社
日本郵船株式会社	日本郵船株式会社
済中製鎖工業株式会社	済中製鎖工業株式会社
東日本タグボート株式会社	東日本タグボート株式会社
株式会社日立製作所	株式会社日立製作所
日立造船株式会社	日立造船株式会社

深田サルベージ建設株式会社	株式会社フジクラ
株式会社フジクラ	富士ゼロックス株式会社
富士ゼロックス株式会社	株式会社フジタ
株式会社フジタ	富士通株式会社
富士通株式会社	富士電機株式会社
富士電機株式会社	芙蓉海洋開発株式会社
芙蓉海洋開発株式会社	古河電気工業株式会社
古河電気工業株式会社	古野電気株式会社
古野電気株式会社	株式会社ベッツ
株式会社ベッツ	株式会社マックスラジアン
株式会社マックスラジアン	松本徽章株式会社
松本徽章株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
マリメックス・ジャパン株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
株式会社マリン・ワーク・ジャパン	株式会社丸川建築設計事務所
株式会社丸川建築設計事務所	株式会社マルトー
株式会社マルトー	三鈴マシナリー株式会社
三鈴マシナリー株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
三井住友海上火災保険株式会社	三井造船株式会社
三井造船株式会社	三菱重工株式会社
三菱重工株式会社	株式会社三菱総合研究所
株式会社三菱総合研究所	株式会社森京建築事務所
株式会社森京建築事務所	八洲電機株式会社
八洲電機株式会社	郵船商事株式会社
郵船商事株式会社	郵船ナブテック株式会社
郵船ナブテック株式会社	ヨコハマゴム・マリン&エアロスペース株式会社
ヨコハマゴム・マリン&エアロスペース株式会社	株式会社落雷抑制システムズ
株式会社落雷抑制システムズ	

独立行政法人海洋研究開発機構の事業所

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)

「ちきゅう」、もう1つの闘い——宮城県沖日本海溝

2012年4月3日、地球深部探査船「ちきゅう」は、宮城県牡鹿半島東方沖220kmの海上にいた。「東北地方太平洋沖地震調査掘削(JFAST)」のためである(特集参照)。2日前に静岡県の清水港を出て、順調に掘削地点に到着。しかしこの日、超大型の台風並みに発達した低気圧の接近により、風速30.3m、波高11.0mもの大荒れとなった。全長210mという巨大な「ちきゅう」でさえ大きく揺れ、高さ70mのデリック(掘削やぐら)はきしんで金属音を響かせる。掘削の準備作業はすべて待機、甲板への立ち入りやエレベーターの使用も禁止された。荒天は翌日も続き、ようやく掘削準備を始めることができたのは4月5日になってからである。

5月3日にも海は荒れた。風速21.1m、波高4.9m。このとき、掘削パイプは海面から約6,900mの長さには達し、掘削を進めていた。「ちきゅう」が揺れて掘削パイプや船体が破損するのを避けるため、掘削パイプを水深3,000mまで引き上げ、嵐をやり過ごした。「ちきゅう」は、このように荒天と闘いながら、プレート境界断層を目指して掘削を進めていったのだ。

もちろん、航海中は悪天候ばかりではない。5月21日には、船上から金環日食を見ることができた。そしてその日、「奇跡のコア」と呼ばれるプレート境界断層試料17Rの採取に成功した。



宮城県沖日本海溝



2012年4月4日。「ちきゅう」から撮影した海の様子(JAMSTEC/IODP提供)