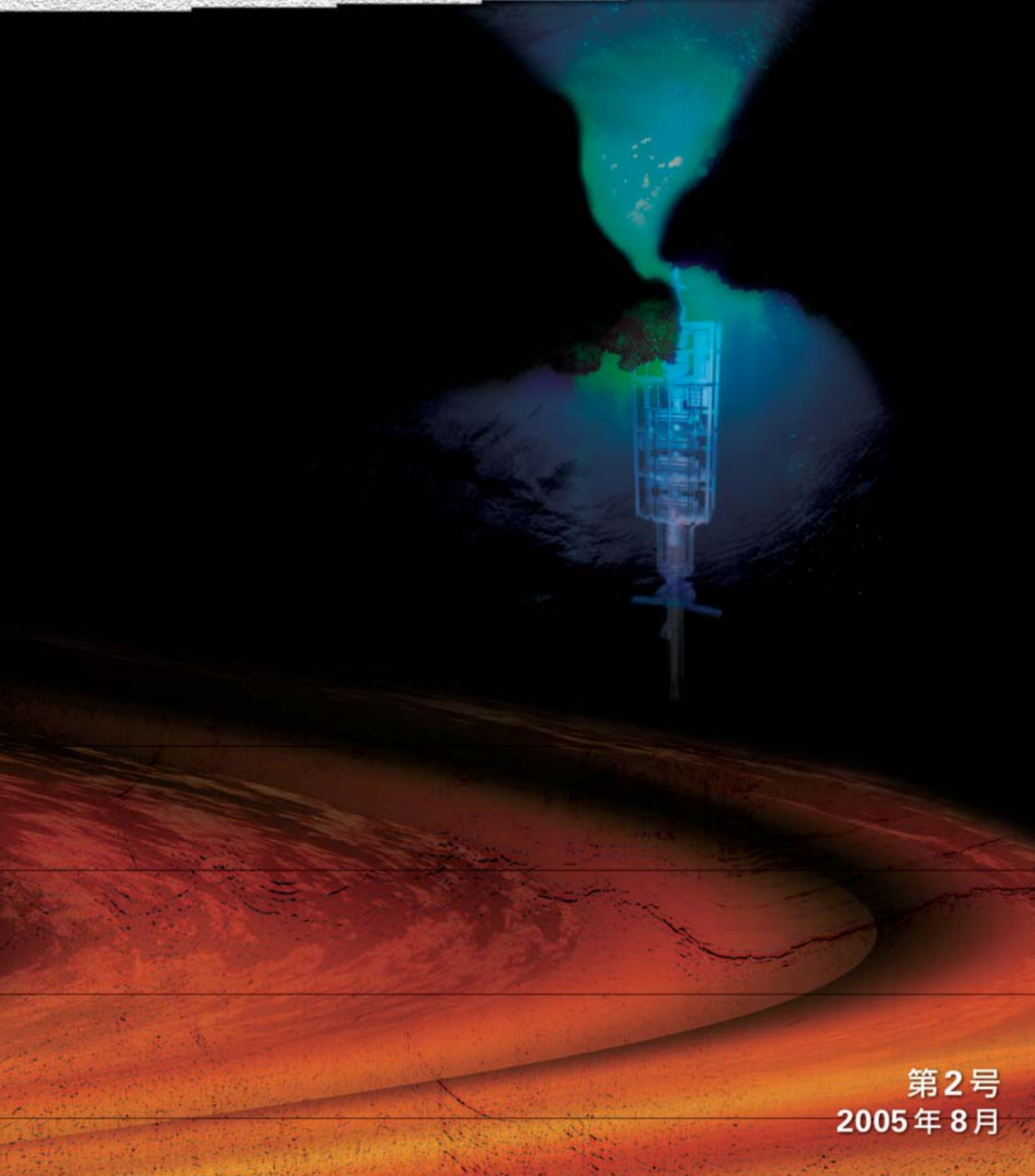


C 地球HIKYU H 発見AKKEN

EARTH DISCOVERY



第2号
2005年8月

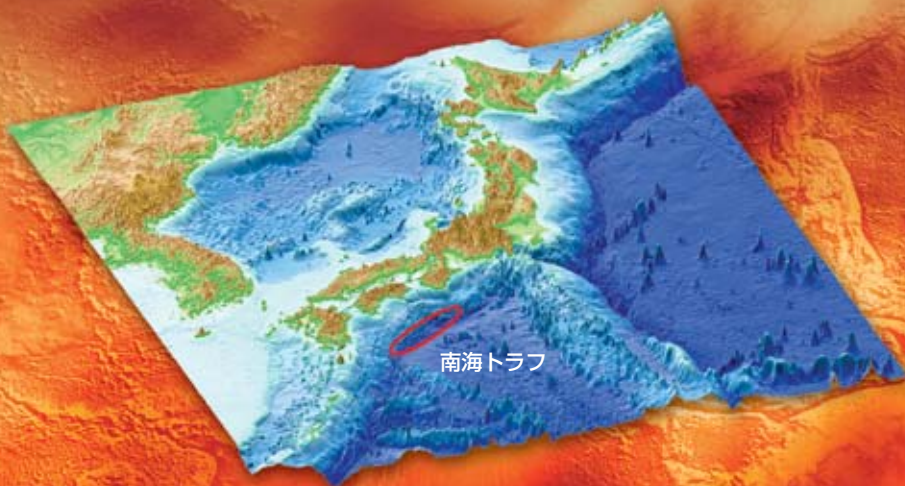
特集

巨大地震発生の謎に迫る

南海トラフで進む地震発生帯の 包括的研究と深海掘削に寄せられる期待

2004年12月26日、スマトラ島沖で発生したマグニチュード9クラスの巨大地震は、大規模な津波を伴い、インドネシアをはじめインド洋沿岸諸国で犠牲者20万人を超える甚大な被害をもたらした。この地震では、過去に地震をおこした複数の震源域が連鎖的に破壊し、規模を大きくしたと推定されている。そして、日本にも、将来、同じような巨大地震がおきるかもしれないと注目されている場所がある。ユーラシアプレートとフィリピン海プレートの境界に位置する南海トラフだ。過去500年の間、南海トラフでは90～147年間隔で巨大地震が発生している。そのなかでも最大規模といわれる宝永地震(1707年)では、四国沖から静岡沖まで広い範囲で破壊がおき、九州から房総半島に及ぶ太平洋岸が津波に襲われた。その後も大きな余震が続き、およそ2ヵ月後には富士山の大噴火もおきるなど、今回のスマトラ島沖地震と非常によく似ているといわれる。

巨大地震が繰り返し発生する南海トラフは、地震の謎を解明するための研究が最も進んでいる場所であり、統合国際深海掘削計画 (IODP) が進める深海掘削においても、重要なターゲットになっている。今後、南海トラフで進められる調査・研究によって、巨大地震発生のメカニズムが明らかになり、防災に役立つ知見が数多く得られることが期待されている。



日本列島周辺の海底地形。紀伊半島南東沖合いから四国西端にかけて発達し、水深約5,000mに達する細長い凹地が南海トラフである。フィリピン海プレートの日本列島への沈み込み帯であり、大規模な海溝型地震の震源地帯として注目されている。(出典：光文社新書「地球の内部で何が起きているのか？」より)

背景：西太平洋とインド洋の海底地形
出典：光文社新書「地球の内部で何が起きているのか？」より



■ 巨大地震はなぜおきる？

世界の地震分布を見ると、プレート境界の周辺に集中して地震が発生していることがわかる。地球の表面は、十数枚のプレートと呼ばれる岩盤によって覆われている。それぞれのプレートは、年間数センチの速さでそれぞれ違う方向に移動しているため、プレート境界には、隣り合うプレートとのせめぎ合いによる大きな力がかかる。ここに蓄えられたひずみエネルギーが、地震をひきおこす原動力となる。日本列島の周辺には、ユーラシアプレート、北米プレート（オホーツクプレート）、太平洋プレート、フィリピン海プレートという4つのプレートがひしめき合っている。日本で地震が多発するのは、これらのプレート運動とその相互作用によって、地殻に様々なひずみが生じるためだ。

日本で発生する地震を詳しく調べると、大きく2つのタイプに分けることができる。ひとつは海溝型（プレート境界型）地震といわれるもの。日本列島の太平洋側には、千島海溝、日本海溝、伊豆・小笠原海溝、南海トラフ、南西諸島海溝というプレート境界の深い溝状の地形が見られる。これらの場所では、上部（陸側）プレートの下にもう一方（海側）のプレートが沈み込んでいる。プレートが沈み込む際、これに接している上部のプレートも一緒に引きずり込まれ、境界部にはひずみが蓄えられる。そのひずみが限界に達すると、上部プレートが跳ね上がり、プレート境界に沿って破壊（滑り）がおきる。こうして発生するのが海溝型地震だ。海溝型地震は数十年から数百年という比較的短い周期でおき、津波を伴うなど、広い範囲に大きな被害をもたらすことが多い。

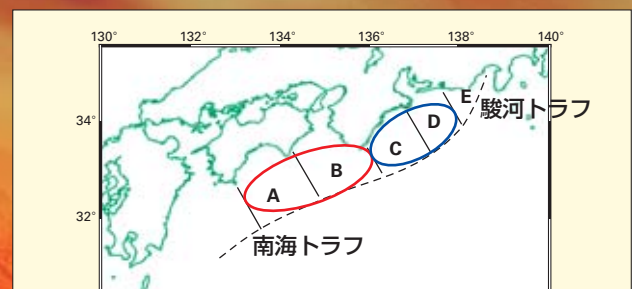
もうひとつは、内陸型（直下型）地震。プレート運動によって大地に蓄えられたひずみに耐え切れなくなったとき、岩盤は割れて急速にずれ動き、地震が発生する。こうしてできた岩盤の傷跡が断層だ。ずれて地震がおきた後も断層にひずみの力が蓄積されると、再びそこで地震がおきる可能性も高まる。そうした断層は活断層と呼ばれ、現在、日本で約2,000の活断層が確認さ

れている。このような断層運動によって、数百年、数千年という長い周期で、陸側プレートの比較的地表に近い場所（活断層）で発生する地震が内陸型地震だ。内陸型地震は、小規模であっても震源が地表に近いため、大きな被害を伴うことがある。

これまで日本で観測されたマグニチュード8以上の大規模な地震の分布を見ると、そのほとんどがプレート境界付近で発生した海溝型地震だ。こうした巨大地震が発生しやすいこともあり、海溝型地震のメカニズムを明らかにするための調査・研究は、積極的に行われている。そのなかでも特に研究が進んでいるのが、南海トラフだ。

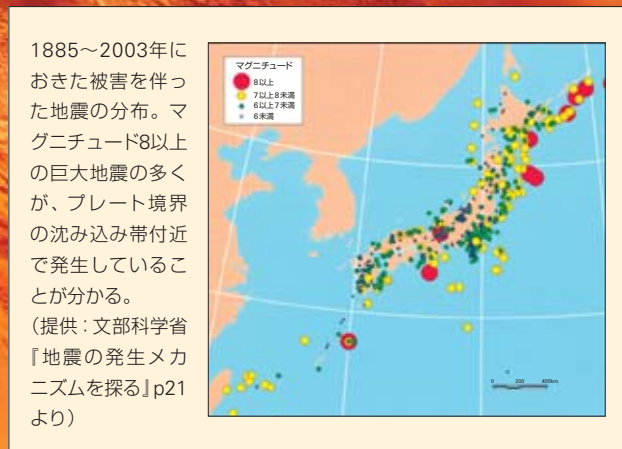
「南海トラフで繰り返し巨大地震が発生したことは、多くの歴史的な資料から明らかです。歴史に残っている最も古い地震は684年（白鳳の地震、『日本書紀』に記述されている）で、その後約1300年の記録が残っています。これだけ詳しくわかっている場所は他にありません。そのため、研究に取り組みやすいということが、研究が進んでいる理由のひとつです。また、プレート境界が陸から近いところにあって調査しやすいことや、沿岸に人口が多く集まっており、巨大地震が発生したときの被害が相当に大きいことが予想されること、さらに、過去のデータから、近い将来、ここで巨大地震が発生する可能性が高いと予測されていることも、関心が高い理由といえるでしょう」と名古屋大学の安藤雅孝教授はいう。

政府の地震調査委員会が2005年1月に公表した国内各地の地震発生確立によれば、南海トラフの南海、東南海エリアで30年以内にマグニチュード8クラスの巨大地震が発生する確率は、それぞれ50%、60%と非常に高い。



西暦	破壊領域	発生間隔
684	A B C D E	↑ 203年 ↑ 209年 ↑ 262年 ↑ 137年 ↑ 107年 ↑ 102年 ↑ 147年 ↓ 90年
887	A B	
1099	A B C D E	
1361	A B	
1498	A B C D E	
1605	A B C D	
1707	A B C D E	
1854	A B C D E	
1944	C D	
1946	A B	
	南海地震 東南海地震 東海地震	

歴史資料や観測データから明らかになった、南海トラフで発生したこれまでの巨大地震。破壊領域がA～Eで表されている。巨大地震が繰り返し発生していることが分かる。(Blue Earth 2004年 3/4月号 p35より)





地震発生メカニズムの解明に挑む

陸側のユーラシアプレートの下へ太平洋側からフィリピン海プレートが沈み込む、その境界に位置している深い溝が南海トラフだ。四国から紀伊半島、さらに駿河湾にいたる太平洋沿岸地域では、古くから、南海トラフを震源域とする海溝型の巨大地震(マグニチュード8クラス)に、繰り返し見舞われてきたことが知られている。最近では、1946年に南海地震(マグニチュード8.0)、その2年前の1944年に東南海地震(マグニチュード7.9)が発生している(一般に、高知県・足摺岬沖から和歌山県・潮岬沖を震源域とするものは南海地震、潮岬沖から静岡県・浜名湖沖を震源域とするものは東南海地震、さらに浜名湖沖から駿河湾を震源域とするものは東海地震と区別されている)。

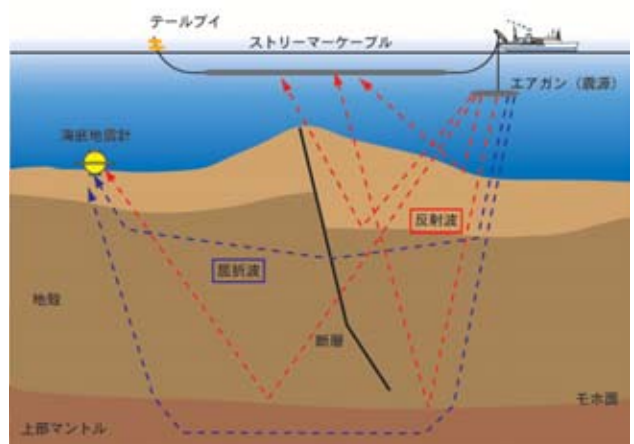
古文書に残された記述をはじめ、海岸段丘のように地震で隆起した地形の調査など、地震考古学の研究によって、これまで南海トラフで繰り返し発生した巨大地震・津波がどのようなものだったのかは、次第に明らかになりつつある。しかし、海溝型地震の発生メカニズムについては、まだわからないことが多い。そして、そのメカニズムを解明するため、様々な科学的アプローチが続けられている。

そのひとつが、南海トラフ周辺の海底下で、フィリピン海プレートがどのように沈み込んでいるかなど、地下深部の地殻構造を理解するために行われている構造探査だ。人工震源(エアガン)を用いるこの探査では、船舶で数多くのマイクロフォンを内蔵したケーブルを曳航し、海底の地下構造境界からの反射波を捕らえて断面構造を調べたり(反射法)、海底に地震計を設置して、構造境界を伝わる屈折波を観測して地下深部までの構造を調べる方法(屈折法)が行われている。こうした構造探査によって、どのくらいの角度でプレートが沈み込んでいるかをはじめ、プレート境界面とは異なる分岐断層の存在やかつての海山や海嶺(海底の山脈)が沈み込んでいく様子なども明らかにされている。

人工衛星による測位システムGPSを活用した地殻変動観測も行われている。これは、複数の人工衛星からの電波を受信することにより、受信点の位置を詳しく知ることができるGPSの仕組みを活かし、数多くの地点で得られたデータを比較して、大地の変形やゆがみをとらえようというものだ。現在、全国に1,000点を超える電子基準点が配備されている。2001年には、このGPS観測網が東海地方で地殻変動の異常を捕らえ、地震研究者らの関心を集めた。通常、東海地方の陸地は、沈みこむフィリピン海プレートに押されて、北西に動いている。ところが、2000年夏以降、反対の南東方向に動き始めたのだ。これは、押されていた陸側プレートがもとに戻ろうとする動きであり、急激に進行すれば地震・津波を引きおこす。幸いなことに、現在まで地震や津波は発生しておらず、ただ陸側の地殻がゆっくり

と動くばかりだ。これが何を意味するのかはまだはっきりとわかっていないが、スロースリップと呼ばれる現象と推察されている。スロースリップとは、文字通りゆっくりとした滑りのこと。陸側プレートは沈み込む海洋プレートとしっかりくっついて陸側に押し込まれているが、何らかの影響で摩擦力が弱まると、破壊せずにヌルヌルと滑りながらもとに戻ろうとする。こうしたゆっくりとした動きがスロースリップだ。

ふたつのプレートの境界面(断層面)は、すべてが同じ性質を



エアガン(写真右)で人工的に地震波を発生させ、その反射波や屈折波を海底地震計(写真左)などで記録し、データを解析することによって海底深部の構造を理解する調査が行われている。

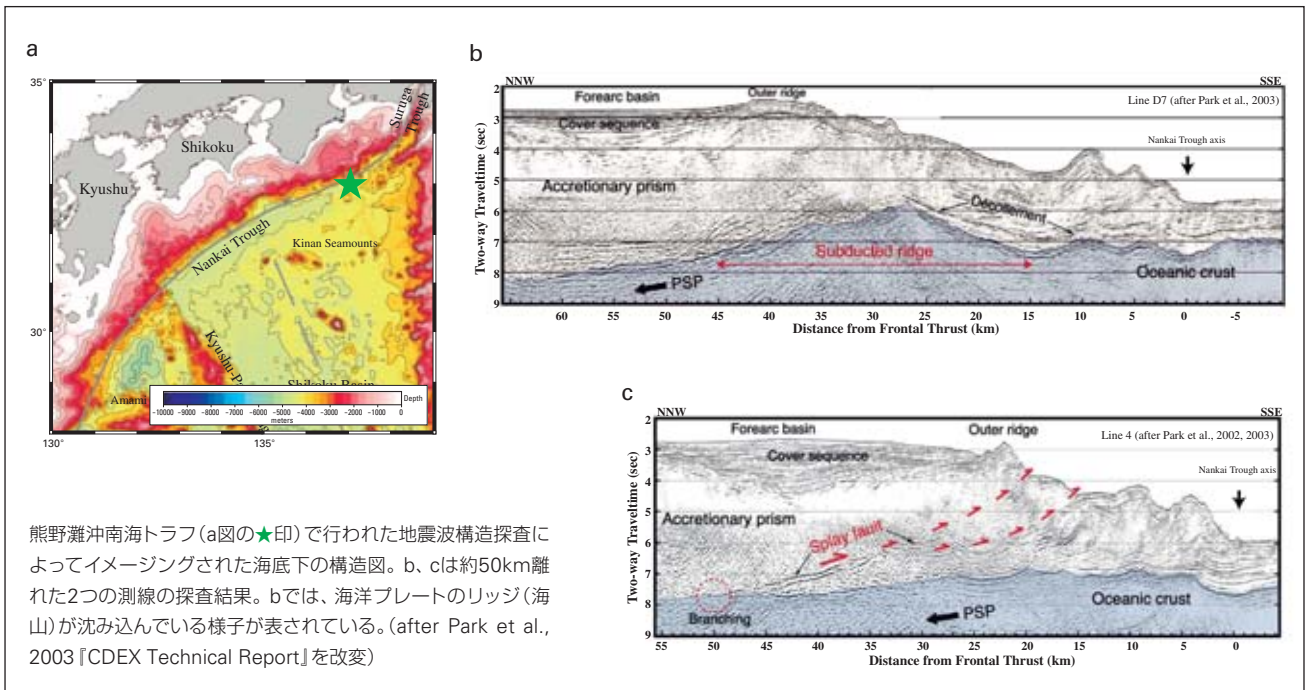
◆ 深海掘削への期待

誰も予想できなかった 新たな発見に期待

名古屋大学大学院環境学研究科附属
地震火山・防災研究センター
安藤 雅孝 教授



南海トラフでは、繰り返し巨大地震が発生しています。しかし、毎回同じように地震がおきているわけではありません。たとえば、1605年の地震(慶長地震)は、津波の被害は記録があるものの、強震動による被害は知られておらず、津波地震だった可能性があります。実に多様な地震が発生しています。実際に地殻を掘ることによって、こうした地震の多様性を説明するような、私たちが予想もしていなかった全く新しいファクターが見つかることに期待しています。断層面が違ったり、どこにあたり、いくつもみつかったりと、これまでのモデルを覆す、驚くような発見があるのではないのでしょうか。



持っているわけではない。摩擦力の強いザラザラ面(固着域)であれば、ぴったりとくっついて、ゆがみエネルギーはどんどん蓄積していくが、摩擦力の弱いヌルヌル面では、破壊を引きおこすゆがみは蓄積されにくい。海溝型地震のメカニズムを理解するには、境界面のどこに地震を発生させるエネルギーが蓄積されているのか、また、エネルギーを蓄積させている原因は何なのかを突き止める必要がある。

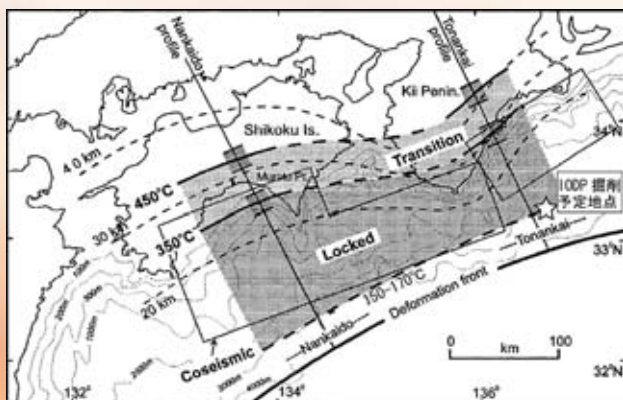
「ザラザラか、ヌルヌルか、それを決定する重要な要素として、境界面を構成する物質、温度、圧力、さらには境界面に存在する水(間隙水)の状態などが挙げられます」と海洋研究開発機構の木下正高グループリーダーはいう。

「境界面の物質は、基本的には海溝軸付近の海底堆積物、たとえば粘土鉱物などが沈み込んでいくことが予想されます。そして、境界面には水も存在します。しかし、それが深くまで沈み込むと、圧力が増加し、温度も上がり、物質の組成が変わ

ります。水の状態も圧力や温度によって変わってしまうでしょう。こうした変質によってヌルヌルからザラザラへ、つまり、地震発生能力を持つ状態へと変化していくことが考えられます」

南海トラフで温度構造についての調査を行っている木下氏は、破壊をおこしそうな境界面の温度の範囲はおよそ150～350℃ではないかという。さらに高温になると、物質は柔らかくなり、摩擦力が低下することが考えられるためだ。

巨大地震のメカニズムを解明するためには、構造探査や地殻変動観測などのマクロの視点と、破壊にいたる境界面の岩石の挙動を明らかにするという物質科学的なミクロの視点の両方が必要なのだ。



南海トラフ沈み込み帯断面層面上で推定された温度分布。北北西に向かってプレート境界が深くなり、それにしたがって温度が高くなっていることが分かる。(Hyndman and Wang, 1995を改変)

◆ 深海掘削への期待

沈み込み帯の温度構造から地震準備過程の理解を



海洋研究開発機構
地球内部変動研究センター
木下 正高 グループリーダー

地球内部からの熱流量を尺度として地下の状態を理解する研究が、私の専門ですから、海底下7,000mの掘削をめざす「ちきゅう」によって、南海トラフの掘削が行われ、沈み込み帯の温度構造に関する正確な情報が得られることに大きな期待を抱いています。温度は、物質の変質を決める重要な要素のひとつです。温度構造をはじめ、巨大地震が発生する場所の環境を詳しく理解することは、地震発生の準備過程において、断層面のどこで、何が原因で、どのように固着しているのかなどを明らかにしていくためにも、とても大切なことなのです。



「ちきゅう」が明らかにする地震の謎

2003年、西南日本の太平洋側に帯状に広がる四万十帯と呼ばれる地質構造区で、南海トラフの海溝型地震発生メカニズム解明につながる新たな発見があった。それは、高知県南部の窪川町で見つかった、「地震の化石」ともいわれるシュードタキライトだった。

海洋プレートが陸側プレートに沈み込むとき、海底堆積物を陸側プレートに押しつける付加作用によって、海底に付加体が形成される。延々と続くプレート運動に伴い、付加体は長い時間をかけて隆起していく。その陸に押し上げられた古い地質体から見つかったのが、約5000万年に南海トラフで発生した海溝型地震で分岐断層（プレート境界から分岐して陸側プレートの上方向に向かって発達した逆断層）が滑った跡とされる、シュードタキライトを含む断層岩だった。シュードタキライトは、断層が高速で滑ったときの摩擦熱で岩石が溶けてガラス質になったもので、厚さはわずか数ミリだが、地震発生過程の物質の挙動や地震に伴う破壊に関する様々な情報を含んでいる。内陸型地震のものはすでに見つけていたが、沈み込み帯のものが発見されたのは世界でも初めてだった。その後、宮崎県の延岡でも、同様の海溝型地震による断層岩が見つかった。

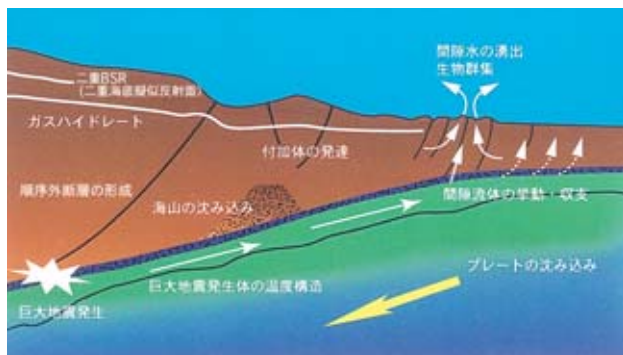
「非常に重要な発見です。これらを詳細に調べることで、巨大地震が発生したとき、沈み込み帯の破壊域の断層で何が起きていたのかを知る大きな手がかりになります。たとえば、延岡で発見された断層岩では、シュードタキライトの周囲で岩石がひどく壊れているのですが、これは水が非常に高圧化して岩石を破壊した痕跡と考えられます。はるか昔に地震をおこした断層は、そこに様々なかたちで水が存在していたこと、また、その水が地震のときに重大な“悪さ”をしたであろうことを予感させます」と東京大学の木村 学教授はいう。

「しかし」と木村教授は続ける。「古い時代の『地震の化石』がすべてを明らかにしてくれるわけではありません。やはり、現在活動を行っている“生きている”断層岩を採取することが必要です。そのためにも、深海掘削という画期的な観測方法に大きな期待がかかっています」。木村教授は、深海掘削の意義を医学にたとえて次のように説明する。

「これまでの地震の観測は、聴診器を当てて診断してきたようなものです。一方、地質学は、江戸時代の腑分けのように死体を解剖することによって、かつて地震をおこした断層岩を調べてきました。まだ、誰も生きた体を開いて、なかを見ようということをしていないわけです。深海掘削技術の発展によって、ようやく、地球の大地の下で動いている現場に、直接メスを入れることができるようになり、地震研究が聴診器の時代から直接観測の時代に進化しようとしているといえるのではないのでしょうか」



2005年7月に完成した地球深部探査船「ちきゅう」。2007年度より、南海トラフをはじめ、世界の様々な海域で深海掘削調査を実施。



海溝型巨大地震の発生域である沈み込み帯には、深海掘削によって解明をめざす様々な疑問が存在している。

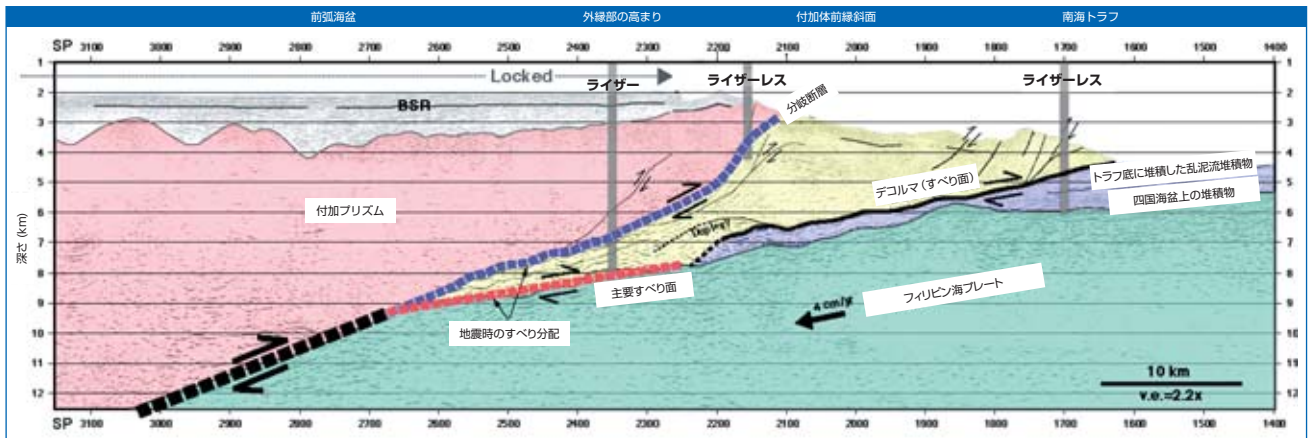
◆深海掘削への期待

活動する断層岩のデータは過去の地震も明らかにする

東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻
海洋研究開発機構
地球内部変動研究センター 上級研究員(兼職)
木村 学 教授



南海トラフでは、この100万年くらいの間だけでも、おそらく何千回という数の巨大地震が発生したと思われます。その地震の記録が、堆積層や断層に残されています。たとえば、沈み込み帯のプレート境界や断層には、様々なかたちで水が存在し、水は地震が発生するときに、非常に重要な役割を果たすと考えられますが、そうした水の痕跡はどのように岩石のなかに記録されているのか、それを私たちは“死んだ石”、つまりかつて地震をおこした断層から詳しく調べています。深海掘削によって、いままさに地震の発生過程にある断層岩を採取し、生きている様子を観測することができれば、断層帯での水の挙動などがはっきりすると同時に、過去におきた地震の痕跡についての理解も進み、これまで何が起きてきたのかを知る重要な手がかりになるはずです。

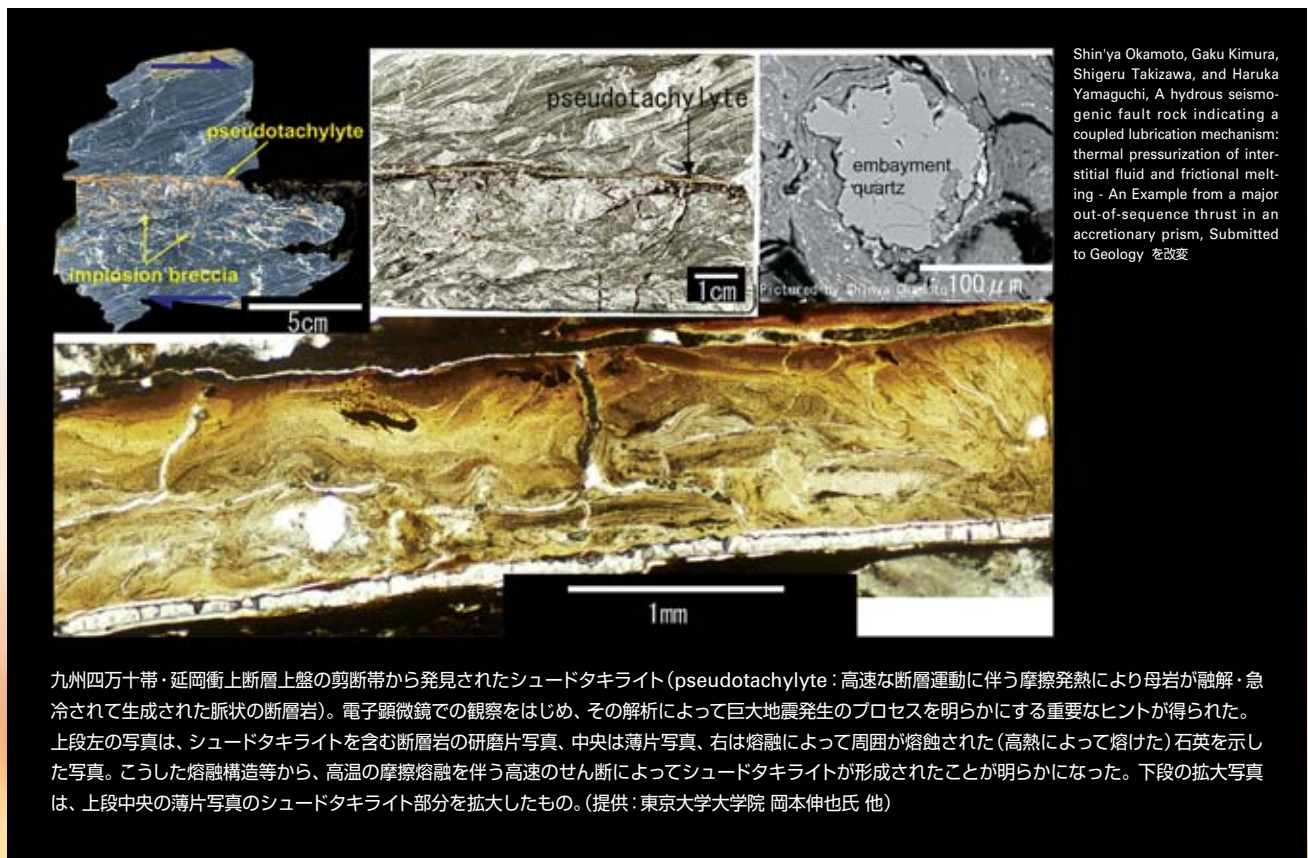


南海トラフ・東南海地震震源域の断面図。大地震をおこすとされるプレート境界断層(赤い破線)、分岐断層(青い破線)、トラフ底周辺など、様々なところを掘削することによって、沈み込み帯で巨大地震が発生するメカニズムの理解が進むものと考えられている。(Park et al., 2002を改変)

深海掘削による地震研究は、ODP(国際深海掘削計画 1985~2003年)などでも行われてきた。しかし、これまで用いられてきた科学掘削船では、掘削システムの技術的な制限から、掘削深度に限界があった(これまでの科学掘削の最大掘削深度は、太平洋中米沖の海底下2,111m)。南海トラフでも、これまで9本の掘削孔が掘られているが、最大掘削深度は、海底下約1,300mだった。南海トラフの地震発生帯で、いつ地震をおこしても不思議でない断層岩を採取するには、少なくとも海底下約6,000mまで掘削しなければならないといわれている。

そこで、大きな期待が寄せられているのが、この夏に完成した世界最大の科学掘削船、地球深部探査船「ちきゅう」だ。ライ

ザー掘削システムを搭載する「ちきゅう」は、掘削の際の掘り屑を船上に回収し、ケーシングパイプで孔壁を保護しながら掘り進むため、掘削孔が崩れてしまうといった従来の掘削システム(ライザーレス掘削)の制約にとらわれることなく、より深くまで掘削することが可能となる。「ちきゅう」は、これまでの科学掘削では考えられなかった、海底下7,000mまでの掘削をめざしている。南海トラフの地震発生帯の断層にも到達することができる深さだ。もちろん、実現には多くの困難を乗り越える必要があると予想されているが、将来、南海トラフでこれが可能になれば、地球内部でおきている巨大地震発生の謎を解き明かすための貴重な手がかりが得られるに違いない。



Shin'ya Okamoto, Gaku Kimura, Shigeru Takizawa, and Haruka Yamaguchi, A hydrous seismogenic fault rock indicating a coupled lubrication mechanism: thermal pressurization of interstitial fluid and frictional melting - An Example from a major out-of-sequence thrust in an accretionary prism, Submitted to Geology を改変

九州四十万帯・延岡衝上断層上盤の剪断帯から発見されたシュードタキライト(pseudotachylite: 高速な断層運動に伴う摩擦発熱により母岩が融解・急冷されて生成された脈状の断層岩)。電子顕微鏡での観察をはじめ、その解析によって巨大地震発生のプロセスを明らかにする重要なヒントが得られた。上段左の写真は、シュードタキライトを含む断層岩の研磨片写真、中央は薄片写真、右は熔融によって周囲が熔蝕された(高熱によって溶けた)石英を示した写真。こうした熔融構造等から、高温の摩擦熔融を伴う高速のせん断によってシュードタキライトが形成されたことが明らかになった。下段の拡大写真は、上段中央の薄片写真のシュードタキライト部分を拡大したものだ。(提供: 東京大学大学院 岡本伸也氏 他)

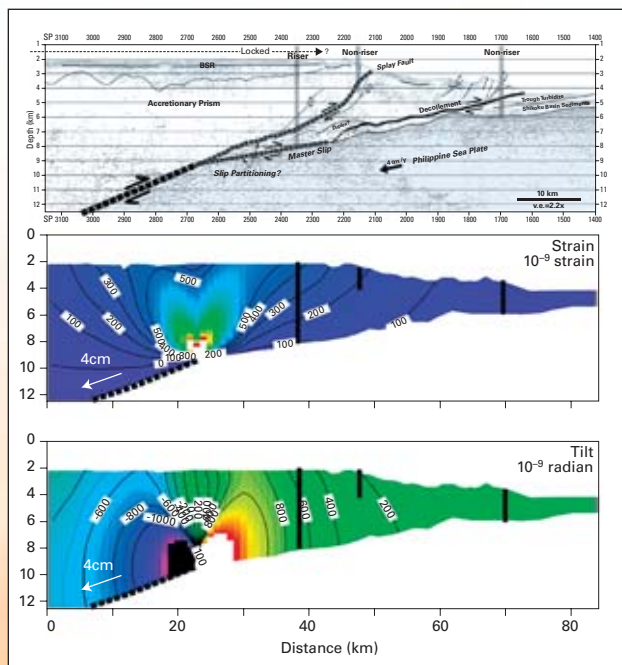
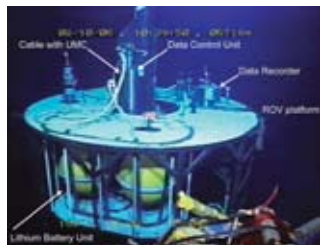
地震研究の未来を開拓する「ちきゅう」

2003年10月、日本と米国、さらに欧州諸国等が参加する国際科学プロジェクト、統合国際深海掘削計画 (IODP) がスタートした。深海掘削によって、21世紀の新たな地球科学のステージを開拓していこうとする壮大なプロジェクトであり、日本は米国とともに計画推進の主導的な役割を果たしている。そして、IODPの主力掘削船として運用されるのが、この夏に完成した地球深部探査船「ちきゅう」だ。

IODPでは、初期の10年間の科学目標として、「地球環境変動」「地殻変動過程と地球内の物質環境の解明」「地下生物圏と地殻内流体の解明」という3つの大テーマと、これに沿った8つの重点研究を掲げている。もちろん、そのなかにはプレート沈み込み帯における巨大地震の発生メカニズムの解明も重要な研究課題として位置づけられている。また、IODPにおける日本の取り組みでも、巨大地震発生メカニズム解明を含む「沈み込み帯ダイナミクス」は、日本がリーダーシップをとって遂行すべき重要な課題と考えられている。

はじめに紹介したように、日本には、活発な地震活動を

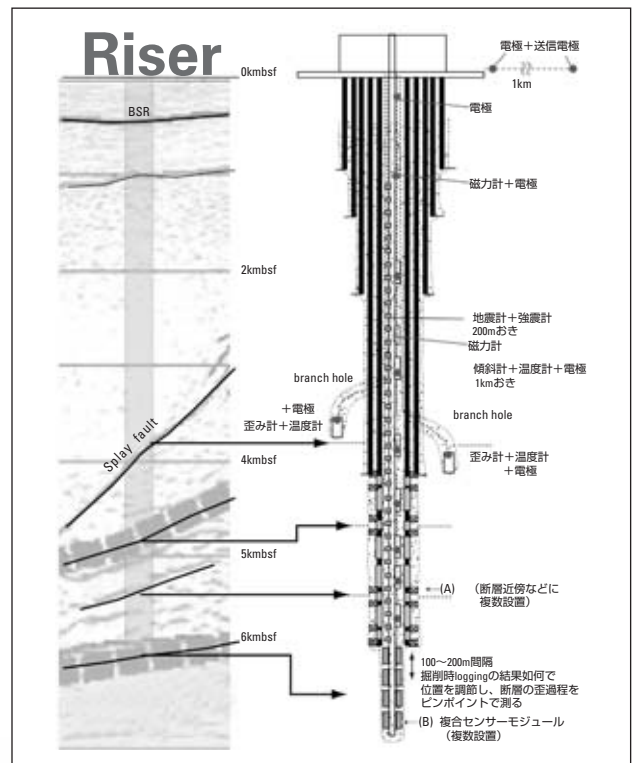
ODP第195次航海・西フィリピン海盆の掘削孔に設置された孔内(広域)地震観測所。水深5,719m。(Shinohara et al., in pressより)



地震前に地震をおこす部分(上図の左下の太い破線)が、沈み込む海洋プレートと一体化して4cm沈み込んだときに観測されるとされるひずみ(中図)と傾斜(下図)。孔内計測の計測感度を見積もるために行ったモデル計算の結果。(Shinohara et al., 2003より)

行っている日本海溝をはじめ、これまで海溝型地震を発生させてきたいくつものプレート境界が存在している。そのなかで、「ちきゅう」による深海掘削の候補地として最も注目されているのが南海トラフだ。なぜ南海トラフなのか、その理由を海洋研究開発機構の末廣 潔理事は次のように説明する。

「掘削ターゲットは、今後まさにマグニチュード8クラスの地



地震発生帯付近の「ちきゅう」による掘削孔に、どのようなセンサーを設置すればよいか、現在、様々な検討が続けられている。(篠原・他 2003より)

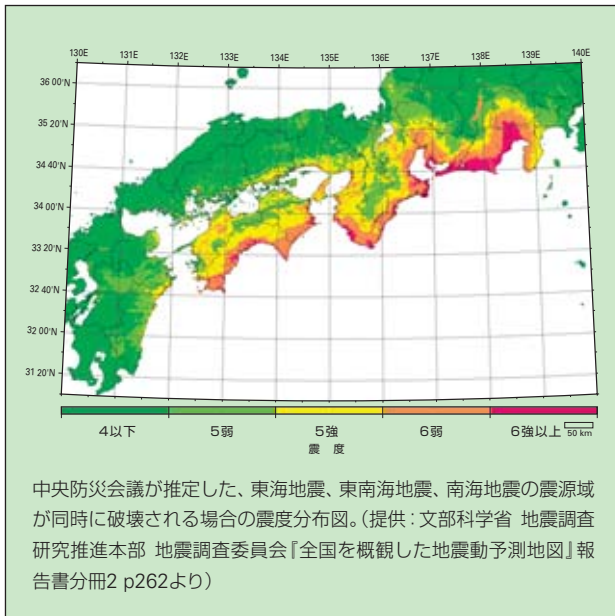
◆ 深海掘削への期待

孔内計測に加えて面的に動きをとらえることが重要

海洋研究開発機構
末廣 潔 理事



掘削孔に地殻変動と地震のセンサーを設置して長期観測を行い、リアルタイムで陸上と結び、常時モニターできるようにしたいですね。そうすれば、時々刻々プレートが何をしているかをつかむことができます。ただ、数少ない孔にセンサーを入れるだけでは、十分とはいえません。とはいえ、たくさん掘削を行うこともできませんから、観測を面的に展開するために、海底に地震計など地殻変動を計測する海底ケーブルを使用したネットワークなどを敷設することが絶対に必要だと考えています。孔内で得られたデータを生かすためにも、観測網を面的につなげていくことができるかが、重要なポイントだと思います。



震をおこす断層でなければなりません。南海トラフは、地震サイクルについての十分なデータの蓄積があり、およそ百数十年の間隔で巨大地震がおきてきたことがわかっています。さらに、過去のデータから見て、いままさに次の地震の準備過程にあるといえます。ターゲットを決める上で重要なもうひとつの問題は、巨大地震をおこす断層に技術的に到達できるかどうかということです。海溝型地震を引きおこすプレート沈み込み帯は、地球上に何万kmと存在していますが、現在の掘削技術で到達できる可能性がある場所は、実は世界中を探しても非常に限られています。海側プレートが比較的緩やかな角度で沈み込んでいる南海トラフは、その点でも最もよいターゲットといえます」

南海トラフといっても、四国沖から紀伊半島沖、さらには浜松沖まで広がっている。そのなかで、現在、「ちきゅう」が行う最初の掘削点の有力な候補地とされているのが、東南海地震の発生帯である紀伊半島・潮岬沖の熊野灘だ。

「国際的に研究者が議論を重ねてきた結果、その方向で進んでいます。重要なのは、地震のときに間違いなく高速破壊をおこし、強い地震波を出すところを掘るということです。つまり、現在しっかりとエネルギーをためていて、地震でエネルギーを放出するところを狙いたい。さらに、『ちきゅう』の掘削能力で到達できる場所でなければなりません。現実にマグニチュード8を引きおこす断層がどうなっているのか、見た人は誰もいません。しかも、非常に広域に展開する現象を、わずか数個の掘削孔から理解しなければいけないという難しい命題を抱えています。深海掘削の成果を、いかにして地震現象全体の理解に結びつけるか、それこそが、深海掘削の学問的なチャレンジであると考えています」と末廣理事はいう。

地震研究にとって、断層岩の採取とともに深海掘削に期待するもうひとつの大きな役割とされているのが、地震発生帯における深部掘削孔を活用する孔内計測(長期孔内計測を

含む)だ。掘り抜いた孔に様々なセンサーを投入・設置し、深部の環境やその変動をモニターしようというのだ。

「たとえば、地震発生帯の掘削孔に地殻変動による傾斜やひずみを計測するセンサーを入れれば、断層のどの部分で固着しているのかがわかります。そのデータから、地震が発生する場所をかなり正確に推定できると考えています。また、温度、圧力も地震発生物理を規定する重要なパラメータです。そのほかにも、地震計の設置、水や生物のモニタリングなど様々な孔内計測が、地震のメカニズム解明とその予測に貢献するものとして、検討されています」と東京大学地震研究所の篠原雅尚助教はいう。

これまでのODPでも、様々な孔内計測・長期孔内観測が行われている。特に、日本の研究チームによる地震計を用いた長期孔内観測では、400日以上記録を得ることに成功するなど、日本は技術的にも研究成果においても世界をリードする立場にある。しかし、これまでのライザーレス掘削と異なり、「ちきゅう」が行うライザー掘削で、どのように孔内計測を行うかについては、技術的に未解決の部分も残されている。

「ライザー掘削では、深度が稼げると言う意味ではメリットも非常に大きいのですが、センサーの設置や電力をどのように供給するかなど、難しい問題もあります。サイエンス的なイメージはほぼできていますが、現在、技術的にどう折り合いをつけるか、検討が続いています」と篠原助教はいう。

地球深部探査船「ちきゅう」が行う南海トラフでの深海掘削が、海溝型巨大地震のメカニズム解明とその予測に向けて、新たな一歩を切り拓くことは間違いない。この壮大なプロジェクトが、いまだ解明されていない巨大地震発生の謎を明らかにする日を楽しみに待ちたい。

◆ 深海掘削への期待

孔内計測の成果が 地震予測の精度を高める

東京大学地震研究所
地震地殻変動観測センター
篠原 雅尚 助教授

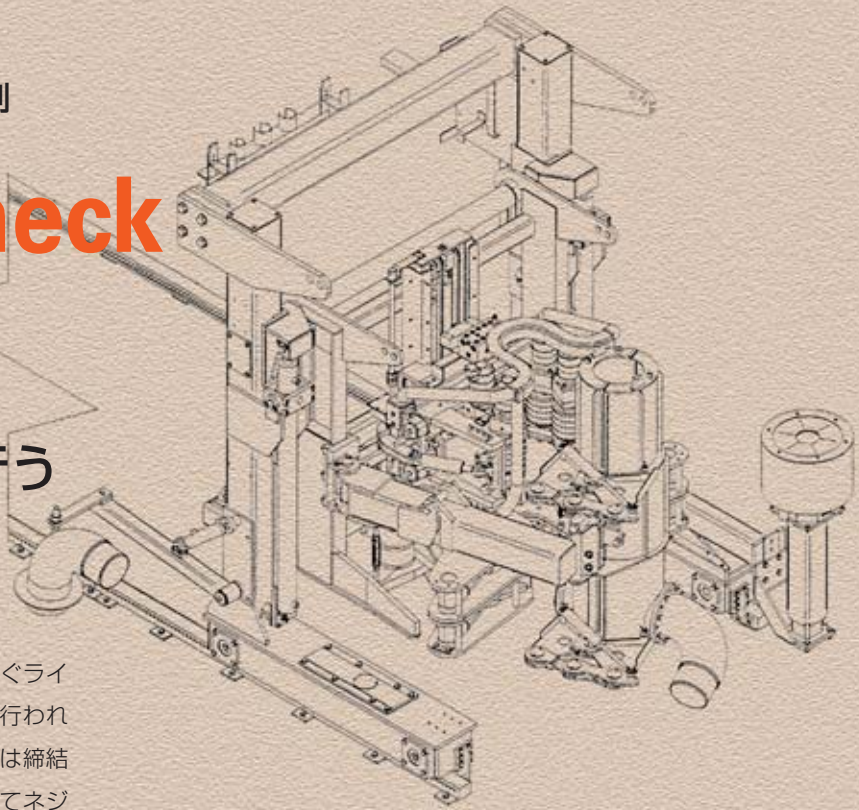


南海トラフの深海掘削では、地震が発生する場所の物質を採取することへの期待が大きいと思いますが、私は、掘削孔を活用した測地学的な観測、要するに、傾斜やひずみを測ることから得られる成果に大きな期待を抱いています。これらの計測は掘削孔を使わないとできないことです。そして、その成果は、沈み込み帯の地震発生メカニズムを明らかにすることに役立つとともに、次の地震でどこが動くのかが予測できることで、地震の規模や各地の震度に関するモデル計算も可能になり、地震予測の精度を向上させることができると思います。

Iron Roughneck

アイアン・ラフネック

高速・全自動で
ドリルパイプの連結を行う
“鉄の荒くれ者”!?



深海掘削は、「ちきゅう」と海底の噴出防止装置を繋ぐライザーパイプのなかに送り込んだドリルパイプによって行われる。ドリルパイプの1本の長さは9.5m。パイプの端には締結するためのネジ山が切られており、パイプを回転させてネジを締めることによって1本1本パイプを連結していく。たとえば、水深2,000mの海底から深さ1,800mまで掘り進めようとする場合には、ドリルパイプを400本連結しなければならない。非常に手間はかかるが、掘削を行うためにはどうしても必要な作業だ。

ドリルフロアでは、ドリルパイプをはじめ掘削孔が崩れないよう、孔内壁面に設置するケーシングパイプなどの連結・切り離しのために、ネジを締めたり、ゆるめたりする作業が繰り返される。そして、この作業を全自動で、安全・高速に行うために開発されたのが、アイアン・ラフネックという機器だ。

アイアン・ラフネックは、大きく分けるとドリルフロア上を移動するための走行装置を備えたフレーム部と、パイプの連結を行うラフネック部から構成される。ラフネック部は、パイプの径によって機構が異なり、作業に合ったものがフレーム部に搭載される。

アイアン・ラフネックが行う作業の手順は次のとおりだ。

1. スタンバイ位置から作業位置へ移動。
2. パイプの連結位置に応じて、上下に移動。
3. ネジ部の洗浄と潤滑・保護剤の塗布を行う。
4. 下方に伸びるパイプをクランプでつかむ。
5. 連結するパイプを高速で回転させて、ネジ部を締結する。
6. 最後に油圧シリンダーでトルク(回転力)をかけて締め込み、作業完了。
7. スタンバイ位置に戻る。

1分間に約100回転という高速でパイプを回転させることができるため、パイプの連結にかかる

時間は、最後の締め込み(このときはゆっくり回転させる)を含めてもわずか十数秒。連結位置の検知や最後の締め込みのトルクのかけ方なども含めて、全ての作業は全自動で行われ(ドリルパイプの場合)、作業員による操作や確認の必要がない。そのため、より安全で効率的に作業を進めることができるのも、アイアン・ラフネックの大きな特徴だ。

「roughneck(ラフネック)」を辞書で引くと、「乱暴者、荒くれ者」といった訳語が載っている。かつての石油掘削では、パイプを連結する作業は作業員たちの手で行われていた。こうした油井作業員たちを通称「ラフネック」と呼んでいたことから、この機器にも「アイアン・ラフネック(鉄の荒くれ者)」という名前がつけられた。しかし、作業の確かさや速さなど、その優れた性能を目にすると、「荒くれ者」という名前は、この機器にはあまり相応しくないようにも思える。



ドリルパイプ用のアイアン・ラフネック。他に口径の異なるケーシングパイプ用もある。



ハイドララッカーのアーム(腕)でドリルパイプを接続位置に運び、アイアン・ラフネックが、結合させる上下のパイプをつかむ。



アイアン・ラフネックによって連結されたドリルパイプは、「ちきゅう」と海底を繋ぐライザーパイプ(イラスト)の中を通過して海底下の地中に送り込まれ、掘削が行われる。

上のパイプを回転させてパイプの接続を開始。接合部の洗浄と摩擦熱を防ぐために、水を噴射しながら作業を行う(写真)。パイプ同士のネジをある程度まで締めたら、クランプで上下のパイプをはさみ、油圧シリンダーで力をかけて締め込む。これで連結完了。

パイプ揚収の場合は、パイプをゆるめるという逆の作業が行われるが、このときパイプ内の泥水(ライザー掘削に用いられる特殊な流体)があふれないように、マッド・バケット(写真 ドリルパイプ周囲の筒部分)を作動させて泥水を回収する。





下北東方沖試験掘削の事前調査完了 事前調査で最良の掘削ポイントを探る

広大な海洋底のわずか1点を数ヶ月かけて掘り進む深海掘削において、掘削地点をどこに決めるかは非常に重要な問題だ。ライザーシステムを使用する深海での掘削作業を安全に進めることができ、障害を避けて効率的な掘削が実施できる、そして何よりも最良の科学成果が獲得できる、そんな理想的な掘削地点を探し出すために行われるのが事前調査だ。

地球深部探査船「ちきゅう」は、国際運用が開始されるまでの約2年間、試験運用として様々な性能試験や訓練が行われる。この試験運用期間中に、「ちきゅう」にとって最初の深海掘削が、下北半島東方沖海域で実施されることになった。掘削を行う海域の選定については、水深や海底地形、地質、海象・気象といった自然条件をはじめ、利用可能な港湾・ヘリポート設備、漁業交渉のしやすさ、科学者の興味など、様々な点から検討された。その結果、下北半島東方沖海域が選ばれた。試験運用期間中、「ちきゅう」はこの海域の2カ所で、ライザー掘削を実施する予定だ。

地球深部探査センターでは、研究者らとともに、2001年度から入念な事前調査を進め、掘削地点を絞り込んでいくための詳細なデータ収集を続けてきた。実際に、下北半島東方沖でど

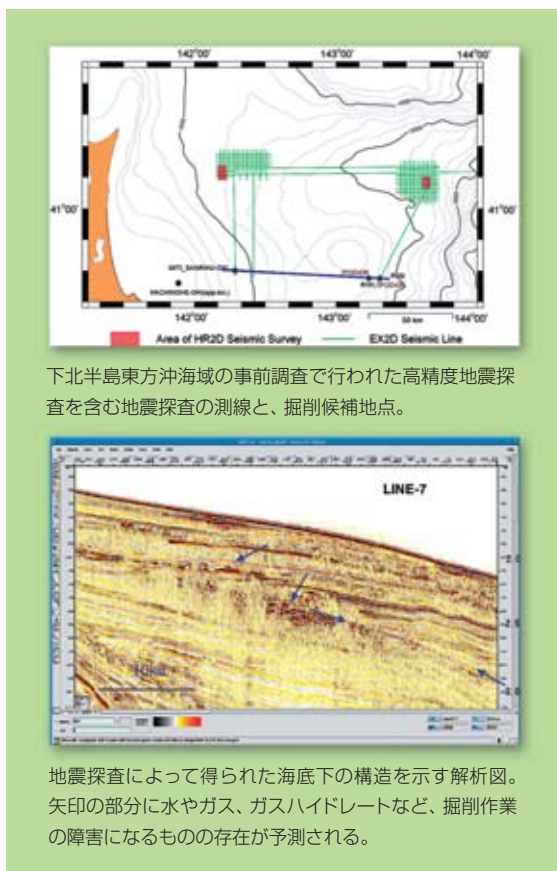
のような事前調査が行われたのか、その内容を紹介しよう。

最初に行われたのは、掘削候補となる海域を含む、全体的な地質構造理解のための「2次元地震探査」だった(2002年)。地震探査とは、調査船より海中に音波を発振し、海底や海底下の地層(の境界)から跳ね返ってくる波をセンサーで捕らえ、その記録を解析することによって海底下の構造や状況を理解するもの。圧縮した空気を一気に放出して音波を発振するエアガンを搭載した調査船を測線に沿って走らせ、何度もエアガンで音波を出し、音波を受振するためのセンサー(ハイドロフォン)をいくつも連ねたストリーマケーブルを曳きながら、反射波を捕らえていく。集められた記録を解析すると、海底下の地層の深度やその傾きなどを知ることができる。

「2次元地震探査」によって大まかな掘削地点の絞込みが行われ、2003年には、その範囲を対象に、より高精度な地震探査が実施された。これによって、より詳しい海底下の構造を理解するだけでなく、地中に溜まっているガスや水など、掘削の障害になる可能性のあるものが、どこに存在しているかも推測することができた。

事前調査では、海底下の構造探査のほかにもいろいろな調査が行われる。海中の潮流に関する調査もそのひとつだ。潮流は、掘削作業中の「ちきゅう」の船体保持や、海中に降るすライザーパイプに大きな影響を与える。そのため、事前調査では音響ドップラー流向流速計などを使い、様々な深度で潮流の計測が行われた。また、「ちきゅう」の掘削では、掘削地点の海底に噴出防止装置(BOP)が設置される。そのため、掘削地点には、海底に急な傾斜やくぼみ、さらには断層がない場所を選ばなければならない。そのため海底地形・海底面状況に関する調査なども行われた。これに加えて2004年には、実際にピストンコアラを使って海底近くのコア試料(地質試料)を採取し、海底がBOPの設置に適しているかどうか調査された。このように、事前調査では、安全で効率的な掘削を行うために、海面から海底さらに海底下まで詳細な調査が行われる。そして、高い科学成果を達成するために研究者から出される提案と事前調査の結果を調整して、掘削地点を決める。

事前調査は、今回だけに限らず、これから「ちきゅう」が掘るすべての深海掘削予定地点で実施される。すでに最初の国際運用の有力な候補地とされる南海トラフでも、事前調査が進行中だ。ここでは、「2次元地震探査」よりも測線の間隔を密にして、さらに詳細な海底下深部構造を理解する「3次元地震探査」の計画が進められており、その成果にも期待が集まっている。



下北半島東方沖海域の事前調査で行われた高精度地震探査を含む地震探査の測線と、掘削候補地点。

地震探査によって得られた海底下の構造を示す解析図。矢印の部分に水やガス、ガスハイドレートなど、掘削作業の障害になるものの存在が予測される。

世界最高の科学掘削システムを実現させた技術開発研究グループ みんなの夢を託して、 人類未踏の深海底下へ、Go for it !



CDEX 技術開発室 技術開発研究グループ

地球深部探査船「ちきゅう」には、ライザー掘削システム、自動船位保持システムなど、これまでの科学掘削船にはない最新のテクノロジーが数多く搭載されている。こうした様々なシステム・機器類、さらには掘削技術・計測技術の研究や開発を、機器メーカーや造船所とともにやってきたのが、技術開発研究グループのメンバーたちだ。

「『ちきゅう』建造を通して、これまで言語・文化・立場の違う大勢のスタッフたちと仕事を進めてきました。ときにはお互いの意見をぶつけ合いながら激しく議論したこともありましたが、『ちきゅう』が完成した今、ひとつのゴールを共有できたことに大きな喜びを感じています。完成までの道のりにはいろいろなことがありました。ダム湖で実施したライザーの100分の1模型実験では、台風に見舞われて散々な目に遭いました。しかし、学ぶことも多かったし、今となっては懐かしい思い出です」と、ライザー掘削システムや噴出防止装置を含むサブシー・システムを担当してきた許サブリーダーはいう。

同じくサブシー・システムなどの研究・開発を担当してきた宮崎研究員も、「プロジェクト立ち上げ時から建造にいたるまで、外国人関係者も含めて、ものすごい数の人々が関わってきました。この世界最新鋭の掘削船の建造に携えることができ、本当によかった。実にやりがいのある仕事だったと思います」と話す。ドリルフロア内の掘削

機器など掘削システム全体の開発・設計・確認試験を担当した井上研究員は、「『ちきゅう』は、これからの新しい地球・生命科学を開拓するという壮大な目標

を持った掘削船です。その建造課程で、自分の設計思想が反映されてきたことは、業務遂行上も、また自分自身にとっての達成感という意味でも、得たものはとても大きいと感じています」と語る。

しかしながら、完成までには、様々な苦労があった。コーパレルや泥水循環システムなどの開発を担当した和田研究員は、次のように振り返る。「『ちきゅう』は、各専門分野の最高の機器を結集して建造されています。しかし、それを問題なく、かつ十分に性能を発揮できるように組み合わせるには、大変な苦労がありました。それぞれの機器の特徴を全て把握した上で、国内外のエンジニアとも綿密な打ち合わせを行い、造船所とも協力し合いながら、とにかくひとつひとつ問題を克服してきました。完成が近づいたところ、デリックの最上部から船を眺めたのですが、すごいものを建造したんだなあとしみじみ感じました(笑)」



グループの努力の結晶ともいえる掘削システムの機器が並ぶドリルフロア。

また、井上研究員は、「調整段階では、担当した掘削システムの機器がうまく作動しないこともありましたが、今ではこちらの思い通りに動いてくれ、「可愛い」とさえ感じることもあります(笑)」と笑顔で話す。

もちろん、「ちきゅう」は無事に完成したものの、彼らの仕事は終わったわけではない。「実際に海上で掘削が実施されるのはこれからです。スムーズに掘削作業が行われるようになるまで、まだ色々な問題点が出てくる可能性があります。また、科学掘削を進めていく上で、新規技術の開発も必要になるでしょう。これらに対応していくことは、これまでよりも大変なこともかもしれません。」と宮崎研究員はいう。彼らの忙しい日々は、まだまだ続きそうだ。

左から
許 正憲 サブリーダー
宮崎 英剛 研究員
和田 一育 研究員
井上 朝哉 研究員



IODPと「ちきゅう」各地に出没！

統合国際深海掘削計画 (IODP) と地球深部探査船「ちきゅう」について、視覚的にインパクトのある「ちきゅう」を様々な角度から撮影した写真ギャラリーや、「ちきゅう」についての情報満載のCHIKYU HAKKEN ウェブサイトの紹介を行いました。展示スタッフはCDEXの船上ツナギを着用して展示に臨み、皆さんに船上での雰囲気味わってもらいました。イベント情報など：<http://www.jamstec.go.jp/chikyu/>



2005年 5月22日～26日
地球惑星科学関連学会2005年合同大会
(幕張)



2005年 6月20日～23日
アジア・大洋州地球科学学会 (AOGS)
第2回年会 (シンガポール)



2005年 8月16日～21日
夏休みサイエンススクエア
(国立科学博物館 / 上野)

「ちきゅう」の航路 (2005年度)



2005年 7月29日
地球深部探査船「ちきゅう」完成！
JAMSTECへ引き渡される
(三菱重工業(株)長崎造船所)

2005年 8月
出港
基本操作試験・操船訓練 (長崎沖)

2005年 12月～2006年2月
基本操作・保守整備試験

2006年 3月初旬
ドック入り (三菱重工業(株)長崎造船所)



2005年 10月～11月
噴出防止装置 (BOP) 設置試験
(下北半島東方沖)

2005年 9月2日 (金)
本牧工場着岸 (三菱重工業(株)横浜製作所)

2005年 9月10日 (土)、11日 (日)、12日 (月)
一般公開 (横浜市および横須賀市)

2005年 9月19日 (月/祝)
一般公開 (名古屋市)



2005年 8月下旬
基本操作試験・操船訓練
(四国沖)

地球深部探査船「ちきゅう」完成！ 国際運用へ向けて、チャレンジは続く



地球深部探査船「ちきゅう」が完成し、2005年7月29日に海洋研究開発機構に引き渡されました。

建造に約5年、開発研究が始まってからは、実に15年以上の年月が過ぎました。いま、建造というひとつのプロセスを無事に終えることができ、ほっとしているのは確かです。しかし、国際運用が開始されるまでのことを考える

と、ただ喜んでばかりもいられません。

「ちきゅう」は、自動車のように、納車されればすぐに使えるというものではありません。最新鋭の高度な機器を組み合わせたひとつのシステムとして、「ちきゅう」をうまく機能させていくためには、これから多くの人たちが知恵を出し合い、どのように動かしていけば最大限の成果が得られるのかを考えていかなければなりません。ライザーパイプ、海底に設置する噴出防止装置、ライザーパイプを支えるテンショナーというシステム、ドリルパイプを吊り下げるデリック、パイプを上げ下げするドロワーक्स、パイプをハンドリングするパイプラッカーなど、「ちきゅう」の掘削システムは、いくつもの主要なコンポーネントによって構成されています。これらがすべてシステムチックに機能しないと深海掘削はできません。ひとつでもうまく動かないと、すべてが止まってしまうのです。これからの2年間の試験運用の間に、「ちきゅう」を最大限に使いこなせるようにチューンアップしていくという重要な仕事が、われわれを待ち受けています。

利用するためのシステムを組み上げる作業には十分な時間が必要です。しかし、いつまでもやっているわけにはいきません。そして、早く深海掘削にチャレンジしたい。このふたつのバランスをどのように取っていくか、それが、これからの最大の課題といえるかもしれません。

試験運用の期間中も、下北東方沖海域をはじめいくつかの海域で深海掘削が実施され、コアの採取も行われます。そして、それは試験や訓練としてだけでなく、科学的にも成果を挙げられるものにしていきたいと考えています。最初の成果として期待しているの

は、極限環境の微生物研究分野です。この分野は、海底を掘れば掘るほど成果が得られます。「ちきゅう」が発信する最初の科学成果は、おそらくこの分野になるのではないのでしょうか。

試験運用が終わって、2007年9月から始まる最初の国際運用の有力な候補地は、今回の巻頭記事でも取り上げた南海トラフです。深海掘削による地震発生帯の研究において、世界で最も期待されているのは南海トラフです。海洋プレートが沈み込むところから地震発生領域までの間にどのような変化がおきているのか、その状態を追跡することは非常に重要です。そして、それができるのは、いまのところ南海トラフしかないといってもよいでしょう。



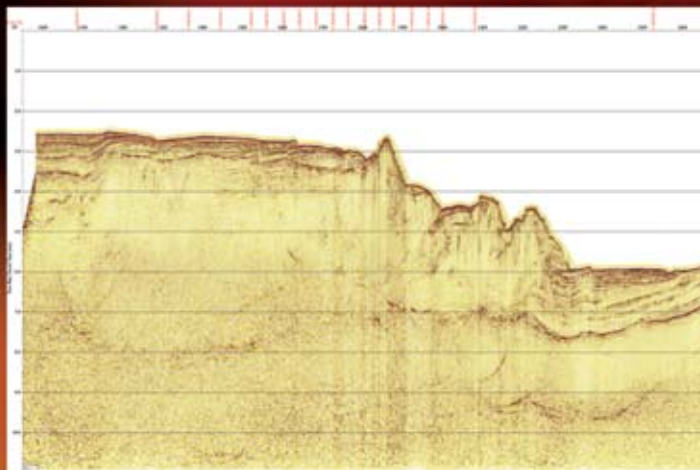
また、これまで南海トラフでは微小な地震はほとんど発生しないと考えられてきました。しかし、観測ネットワークの充実などにより、スロースリップをはじめ様々な動きがあることが分かってきました。「ちきゅう」が実施する深海掘削によってコアを採取することはもちろんですが、掘削孔を利用した長期的な観測などを行えば、沈み込み帯がどのように動き、ここで何がおきているのかという、いわば南海トラフの力学システムが確実に捉えられると確信しています。深海掘削によって、これまで予想もできなかった、驚くような現象がまだまだみつかるのではないかと、そんな期待が私の心のなかで大きく膨らんでいます。





Cover's Note

地震波探査によって得られた海底下深部構造図



今回表紙に使用した画像は、地震波探査によって得られた南海トラフの海底下深部構造図だ。深海掘削を安全かつ効率的に実施するとともに、高い科学成果を得るため、掘削を行う海域では、事前に様々な調査が行われる。地震波（音波）を用いた地質構造探査もそのひとつ。これは、調査船から海中に人工的な地震波を発振し、海底や海底下の地層の境界から跳ね返ってくる波をセンサーで捕らえ、その記録を解析することによって海底下の構造や状況を理解するもの。海底下の地層の深度やその傾き、さらには、地中に溜まっているガスや水など、掘削の障害になる可能性のあるものが、どこに存在するかもイメージすることができる。現在、南海トラフでは、「ちきゅう」による深海掘削を実施する日のために、地震波探査をはじめ、詳細な事前調査が行われている。