IN THE ZONE

震源への船出

Nature Vol.449 (278-280) / 20 September 2007

地球深部探査船「ちきゅう」

最新の装置を搭載した世界最大の科学掘削船「ちきゅう」が、科学調査のための初航海に乗り出そうとしている。巨大地震が起こる現場（南海トラフ）を押さえようとするちきゅうの船出を David Cyranoski が報告する。

対自然災害に関していうならば、日本政府は数字に強い。例えば、今後30年以内に、日本の太平洋岸沖約100kmの海底にある南海トラフという凹地を震源とするマグニチュード8.1の地震が起きて、1万2000～1万8000人の死者が出ると予測している。

南海トラフは、1つの構造プレートが別の構造プレートの下にもぐり込んでいく「沈み込み帯」である。沈み込み帯は、プレートのもぐり込みに伴って岩石のひずみが蓄積され、ついには世界最大規模の地震を引き起こす可能性がある、危険な領域である。実際、マグニチュード9以上の巨大地震のすべてが、このような沈み込み帯で起きている。南海トラフで次に起こる地震は、それほど大規模にはならないと予測されているものの、こ

の領域を調査することで、沈み込み帯で起きる地震がこれほど膨大な量のエネルギーを解放する理由を解明するためのヒントが得られる可能性がある。

この新造の科学掘削船は、9月21日に和歌山県の新宮港を出発し、5年間に及ぶ調査計画の第1ステージに着手することになる。南海トラフ地震発生帯掘削計画は、過去数十年間に行われた一連の深海底掘削調査の中で最も新しく、最も野心的な計画である（コラム「浮沈にかかわる大問題」参照）。

地球深部探査船「ちきゅう」と名づけられたこの科学掘削船の全長は210メートル、ドリルストリング長は10キロメートル、建造費は600億円で、あらゆる意味でスケールの大きい船である。また、「ちきゅう」はメインドリルパイプを囲む巨大

なライザーパイプを導入する最初の科学掘削船でもある。これにより安定した掘削が可能になるため、「ちきゅう」は他の科学掘削船の3倍以上の深さまで掘り進めることができる¹。

掘削のターゲットである海底下約6キロメートルの地震発生帯に到達したら、今後は非常に小さいスケールでの仕事が続いている。「ちきゅう」に乗船している科学者たちが、深海底から掘り出された岩石の間隙率やそのほかの特徴に見られる微細な変化を観察するのである。最終的には、掘削を終えた孔内に観測装置を設置して、数年間にわたってデータを収集することになっている。その目的は、岩石にひずみが蓄積していくようすを観測し、地震が準備されるメカニズムに迫ることにある。

JAMSTEC

もっと深く

地震発生帯の観測は過去にも行われており、米国カリフォルニア州パークフィールドにある有名なサンアンドレアス断層などでも実施された。しかし、沈み込み帯でこれほど正確な調査が行われるのは今回が初めてである。横浜市にある地球深部探査センター長の平朝彦は、「これは、巨大地震が準備される過程を追うことができる初めての機会なのだ」と語った。同センターは「ちきゅう」の運行機関であり、この船を使って地震の起源を明らかにする計画を指揮している。「イカの生態を明らかにしたいなら、スルメではなく生きたイカを使わなければならない。地震発生帯を掘削して観察を行うのも、それと同じことなのだ」と彼はいう。

日本が「ちきゅう」の建造費を負担し、南海トラフの調査に力を入れているのには理由がある。日本はユーラシアプレート

の上に乗っているが、その下にフィリピン海プレートが毎年約4センチずつ沈み込んできているからである。2つのプレートの境界上にはプレートどうしが固着している部分があり、その部分の圧力が高まっている。1944年（東南海地震）と1946年（南海地震）²には、このような固着部分の2か所で巨大地震が起きている。いずれの固着部分も幅は約100キロメートルにもなり、各地震で約1300人ずつの犠牲者を出した。現在も、このような固着部分の圧力が高まり、次の地震の準備をしていると考えられている。巨大地震が起こる可能性は高い。南海トラフでは、過去1300年にわたり、90年から210年に一度の頻度でマグニチュード8以上の巨大地震が起きているからである。

この規則性が、沈み込み帯で地震が発生する前後の状態を比較するための絶好の機会を与えてくれる。「このような場所

は、ほかにありません」と平は説明する。

トラフを調査するなら、地下深くで行うのがいちばんである。「ちきゅう」に乗り込んだ科学者たちは、ライザー技術を使って究極の孔を掘削しようとしている（ちなみに、これまでに科学調査のために海底に掘削された孔の中では、ジョイデス・レゾリューション号が1993年に掘削した2111メートルの孔が最も深い）。「ちきゅう」はそのほかに、長さ70キロメートルの直線上の少なくとも5か所で、プレート境界上のさまざまな深度に達する孔を掘削する予定である（下図参照）。「我々は、温度、圧力、物質組成、脱水の程度を調べ、これらの性質がプレート境界の浅部と深部とでどのように違っているかを比較することができる」と語るのには、横須賀にある海洋研究開発機構地球内部変動研究センターのグループリーダーであり、南海トラフ地震発生帯掘削計画の首席研究者である木下正高だ。

しかし、このような比較は、2012年以降に計画が完了するまで待たなければならない。9月21日からの第1次研究航海では、8週間という短期間で6か所の掘削予定地点の調査を行う。「ちきゅう」に乗り込んだ16人の科学者たちは、ドリルビットの上方に装着されたセンサーを使って、ドリルから伝えられるγ線、電流、音波の信号をキャッチし、周囲の岩石の間隙率や密度に関する情報を収集する。「本格的な掘削に入る前に、岩石の性質についての情報を記録することができるのだ」と語るのには、この計画のもう1人の首席科学者であるウィスコンシン大学マディソン校のHarold Tobinである。「この方法では、極めて自然に近い状態の岩石のデータを収集できる」。

計画を迅速に進めるために、今回の研究航海ではコア（地層の柱状試料）の採取は行わない。コアの採取は、11月の後半から4～5週間の予定で計画されている第2次研究航海で行うことになる。その際には海底下1000メートルまでのコアを採取し、「ちきゅう」に備えられた高価な研究設備を使ってそれら进行分析する。例えばCTスキャンでは、コアを

掘削深度

地球深部探査船「ちきゅう」は、日本の海岸（左上）から海に運ばれてきた堆積物の中を掘り進み、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界（黄土色の断面に黒く波を描くように走る線）に達する孔を掘削する予定である。CG中で最も陸地に近いNT2-04は予備の孔である。今回の第1次研究航海では、残りの6か所の掘削予定地点の調査を行い、第2次～第3次研究航海で計3地点（NT2-03、NT2-01、NT1-03）の海底下1000mまでのコアを採取する。

破壊せずに内部構造を調べることができる。12月の終わりからは第3次研究航海が予定されており、他の2か所で海底下1000メートルまでの掘削を行う。

その後は、漁業との兼ね合い、資金の節約、整備作業などの理由から一旦作業を休止することになる。掘削を再開するのは2008年10月になり、このときには巨大なライザー掘削システムが導入される。ライザー掘削システムは、船体から海底下の掘削箇所までライザーパイプがドリルパイプを取り囲む2重管構造になっている。石油掘削船ではよくみられるシステムであるが、科学調査船には珍しい。ライザーパイプとドリルパイプの間には高圧の泥水が循環している。これによって孔壁を安定させ、崩壊を防ぐのである。

長さ9メートルの柱状のコアからは、その一帯の地質学的歴史に関する重要な

情報を得ることができる。Tobinは、コアの層は「年輪のようなもの」であり、そこに刻まれた「どの年代も見逃したくない」と語る。しかし、コアの採取には時間がかかる。なぜなら、コアは9メートルごとに船に引き上げられてくるのだが、引き上げ作業が完了するまで掘削作業は再開できないからである。コアの引き上げは掘削箇所の深さによって異なり、15分ほどで終わる場合もあれば、1時間以上かかる場合もある。

航海時間が限られているため、乗組員は24時間体制で作業にあたることになる。科学者や掘削作業員を交代させるために、2週間に一度、ヘリコプターが陸地と船の間を往復する。「最終的に海底下6キロメートルまで掘り下げるには、8週間の集中的な掘削作業が6回以上必要になるだろう」とTobinは語る。

地球深部探査船「ちきゅう」が採取するコアは、日本周辺で発生する地震についてまったく新しい情報をもたらすだろう。

採掘されたコアの半分は船上で分析されるが、残りの半分は高知大学で永久的に保管されることになる。まずは「ちきゅう」に乗り込んだ研究者たちによって調査が行われるわけだが、採取から1年後には、申請すれば誰でも調査を行うことができる。

IODP/JAMSTEC

浮沈にかかわる大問題

日本の巨大な深海掘削船「ちきゅう」は、資金繰りという頭痛の種もたらした。

「ちきゅう」の建造費は日本が負担したが、さらに毎年100億円ずつ維持費がかかる。こうした費用のほとんどは、ワシントンに本部を置く統合国際深海掘削計画（IODP）のメンバー国である日本とアメリカによって支払われる。しかし「ちきゅう」を使った研究探査への出資者は、石油探査を依頼してくる資金力のある石油掘削企業と競争しなければならないだけでなく、掘削作業員や造船所の確保についても彼らと競争しなければならない。昨年度、「ちきゅう」はオーストラリアの企業のためにケニア沖で石油探査を行った。

最大の影響を受けたのはジョイデス・レゾリュション号である。レゾリュション号は、長年にわたり海底掘削には欠かせない戦力であった。この船は、

IODPの前身である国際深海掘削計画（ODP）によって1985年に石油掘削船から科学調査船に改造されて以来、1797か所の掘削孔から3万5772本のコアを採取してきた。IODPは当初、日本の100キロメートル沖に位置する南海トラフで、「ちきゅう」とレゾリュション号に同時に作業をさせる予定であった。

2003年にODPが解散したときに、レゾリュション号の運用も中止された。IODPの活動のために改良を加えるのがその目的であったが、それ以来シンガポールの造船所に入ったきりである。油田掘削装置の建設需要が高まったため、作業員がそちらに流れてしまったのである。レゾリュション号が南海トラフの作業に参加するのはいつのことになるのか、そもそも、この作業に参加することがあるのかどうかもわからない。横須賀にある海洋研究開発機構

のGreg Mooreは、「2隻が共に作業する象徴的な姿が見られないのは残念だ」と語る。

南海トラフ掘削計画の開始は2006年に予定されていたが、膨らみ続ける費用の支払いを助けるために、今年の9月に延期された。また、この計画は2009年に終了する予定であったが、レゾリュション号を使えないことで、終了予定も2012年に延期された。

IODPは、「ちきゅう」のほかに特定任務掘削船の掘削計画にも資金を提供している。しかし、「ちきゅう」にかかる巨額の費用が他の掘削計画を脅かすのではないかと懸念も生じている。「ちきゅう」のためにIODPの他の掘削計画に悪影響が及ぶようなことがあれば、「IODPを支えているコミュニティからの支援が大きく減少する可能性もあります」と語るのには、IODP科学計画委員会の前

ジョイデス・レゾリュション号は当初、石油探掘船として建造された。

議長をつとめた東京大学の海洋地質学者Mike Coffinである。

実際、IODPの他の掘削計画は困難に直面している。今年の7月には、ニュージャージー沖の大陸棚を掘削する計画が延期された。予定していた掘削船が利用できなくなったからである。「ちきゅう」の運用開始後初の研究航海として、IODPは赤道太平洋での掘削を計画しているが、これがスタートするのは来年の3月になってからである。 D.C.

IODP

震源の観測装置

実のところ、多くの科学者は、掘削が終わってからの可能性に、より大きな期待を寄せている。この計画に従事する研究者たちは、いくつかの掘削孔内に観測機器を設置して、岩石の傾動、地震活動、ひずみ、間隙圧、温度など、岩石のふるまいを理解するためのかぎとなる変化を長期間にわたり観測する予定なのである。観測機器は、かなりの高温に耐えられるように設計する必要があり、開発には5年の歳月と約15億円のコストが必要になると見積もられている。「ちきゅう」の掘削探査が終了するまでにこれらが完成するかどうかは、現時点では不明である。研究者たちは、装置の設置から少なくとも5年間は観測を続けたいと考えている。観測データはおそらく、遠隔操作型の深海潜水装置にアップロードするか、海底に引いたケーブルを通じて陸地のコンピュータに転送することになるだろう。

この観測装置が測定するのは、地震の際に地上で感じられる揺れとは比べ物にならないほど小さな変化である。けれども、「地震のエネルギーが蓄積されるようすを定量的に説明するためには、このような測定がかぎとなるのだ」と木下はいう。長期的には、地震が始まったばかりの段階でこれを感知する方法を発見し、まだ地震波が伝わっていない地域に警告を出せるようにさえなるかもしれない、と平は付け加えた。

この観測は、「沈み込んでいくプレー

トの中では、岩石やそこに含まれる水に何が起きているのか?」「地震が表面に到達するまでの間に、ひずみはどのように解放されていくのか?」「どのような条件下で、地震は津波を引き起こすのか?」など、研究上重要な疑問の解明にも役立つだろう。以前の掘削では、プレート境界のふるまいに関する疑問を解決するためのヒントが得られた。例えば、パークフィールドでは3キロメートルの深さまで掘削を行った結果、岩石の中に滑石（ケイ酸塩鉱物の一種）が含まれていることが明らかになり、その地点のプレートどうしがスムーズにずれていく理由がわかった³。

5年前に周波数の非常に低い地震波を生じる地震が発見されて以来、南海トラフでの低周波地震への関心が高まっている。それまでは、沈み込み帯にはプレートどうしがスムーズにずれていく「安定すべり域」と、プレートどうしが固着してひずみが蓄積される「固着域」があると考えられていた。けれども、日本の科学者たちが広帯域地震計を使って観測を行った結果、これまで地震活動がないと考えられていた領域にも、従来の地震計では検出できなかった低周波数の地震が起きていることが明らかになったのである。こうした低周波地震の多くはマグニチュードが3〜4の範囲にある。平は、このような地震が長い時間をかけてひずみを解消していると推測している。「これが、地震の周期となんらかの関係があることは明らかだ」と彼は話す。

茨城県つくば市にある防災科学技術研究所地震研究部副部長の小原一成は、新たに発見された地震には、沈み込んでいくプレートに含まれる水が関与しているのかもしれないと考えている。この水が作る粘土様の層が「クッションのような働き」をすることで、地震による揺れがゆっくりになるというのである。

小原とその同僚の伊藤喜宏が「ちきゅう」の掘削エリアの浅い領域でこうした低周波地震を発見したことで、このプロジェクトにはまったく新しい目標ができた⁴。

「ちきゅう」の掘削計画が立案された

2001年当時には、「このような地震の存在を誰も知らなかった」と海洋研究開発機構のGreg Mooreはいう。「今では、多くの地震活動が起きていることがわかっている」。

2012年までに、「ちきゅう」は南海トラフに関する一連の詳細な調査を終えることができるだろう。その後は、「ちきゅう」を使おうと待ちかまえている他の多くのプロジェクトにつくことになる、とプロジェクトマネージャーらは予測している。次に「ちきゅう」を必要としているのは、インド洋での古気候についての研究プロジェクトと、コスタリカ共和国の沖にある中米海溝での地震発生メカニズムに関する研究プロジェクトである。いずれも、「ちきゅう」にしか到達できない深さへの掘削を必要とする研究である。

「ちきゅう」は将来、海底科学掘削の最大の夢の1つを果たすかもしれない。1960年代の科学者たちは、海底掘削によって地球のマントルに到達しようともくろんでいた。その計画は「モホール計画」とよばれていたが、海底下10キロメートルの地殻とマントルの境界面に到達するどころか、200メートルしか掘削できなかった。しかし、「ちきゅう」が改めてモホール計画にチャレンジする日が来るかもしれない。

地殻からマントルまでの距離が最も短くなる深海で作業を行うためには、現在2.5キロメートルのライザーパイプを4キロメートルまで延長する必要がある。これは決して安い変更ではないが、その価値はあると木下は考えている。「なぜならこれは、全人類が（とはいえないまでも、少なくともすべての地球科学者が）長年にわたって夢見てきたことなのだから」。

David Cyranoski は *Nature* の東京を拠点とするアジア・パシフィック特派員。

1. Dalton, R. & Cyranoski, D. *Nature* **426**, 492–494 (2003).
2. Ichinose, G. A., Thio, H. K., Somerville, P. G., Sato, T. & Ishii, T. *J. Geophys. Res.* **108**, 2497 (2003).
3. Moore, D. E. & Rymer, M. J. *Nature* **448**, 795–797 (2007).
4. Ito, Y. & Obara, K. *Geophys. Res. Lett.* **33**, L02311 (2006).

地球深部探査船「ちきゅう」のライザー掘削システムを使った掘削により、マントルに到達できるかもしれない。