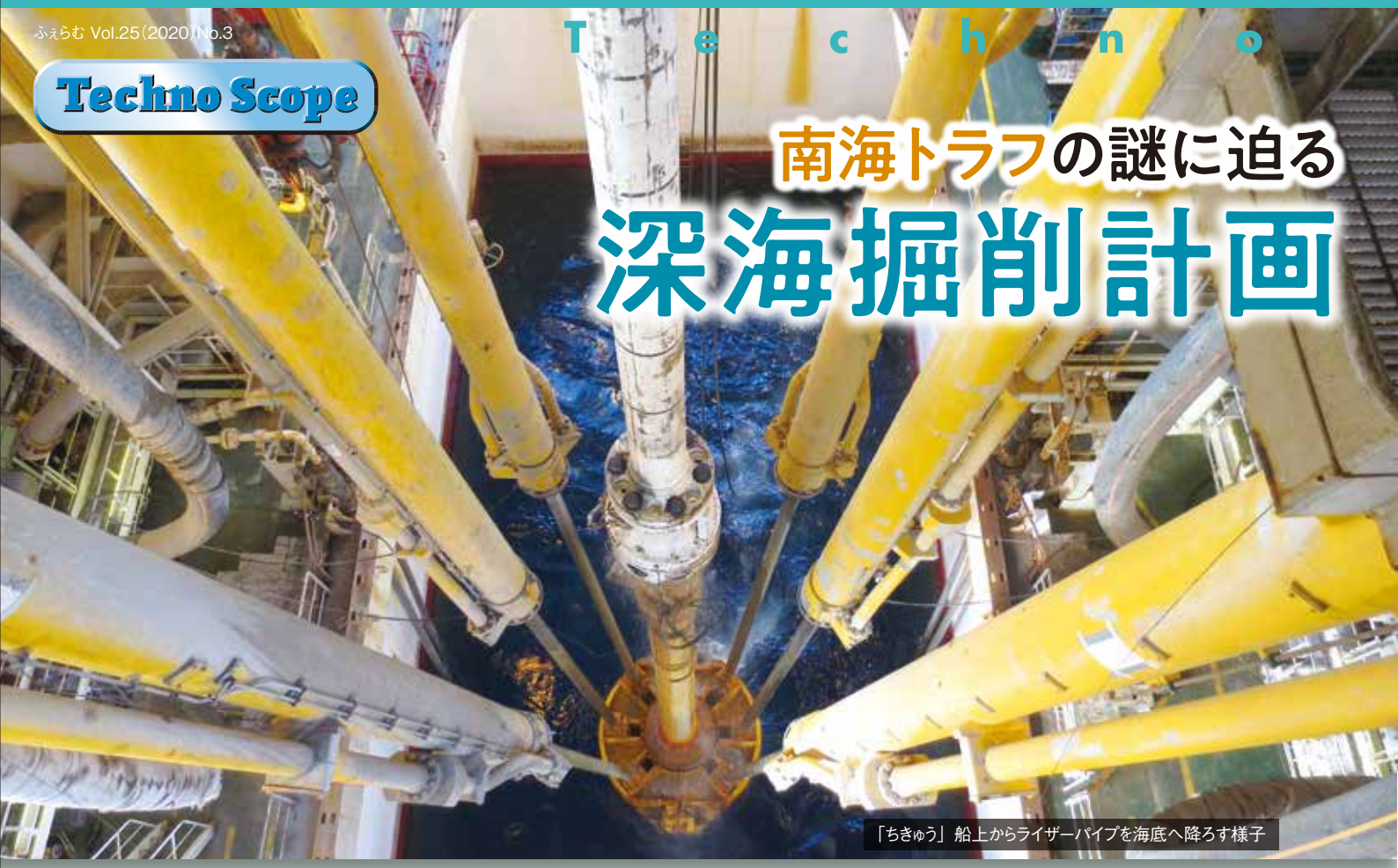
Techno Scope

南海トラフの謎に迫る 深海掘削計画



「ちきゅう」船上からライザーパイプを海底へ降ろす様子

九州から東海の南岸に広がる水深4,000m級の南海トラフ。そこは巨大地震が、世界で一番浅い所で発生している場所である。地震のメカニズムを探るため海底下の断層を調べる科学掘削プロジェクトが、さきごろ一旦終了した。海底下3,000mにも達する大深度を掘り抜くため、最高の掘削技術が投入された。

地球の深部を探るチャレンジ

日本列島は、地球を覆っている十数枚のプレートのうち4枚のプレート(北米プレート、ユーラシアプレート、太平洋プレート、フィリピン海プレート)の衝突部に位置する。太平洋プレートの日本列島下への活発な沈み込みは、日本列島を世界でも有数な火山・地震列島にしている(図1)。世界で、マグニチュード7以上の地震は最近90年間に900回ほど起きているが、そのうち10%が日本周辺で起きている。日本近海のプレート運動は、日本列島に強いひずみを与え、世界でも有数の地震多発帯、火山活動多発帯を形成し、非常に活動的な地質構造をもつ日本列島を作り上げている。重いプレートが軽いプレートの下に潜り込んだ「沈み込み帯」を調査し、プレートの形状、過去の地震でできた断層の位置や形、岩盤の硬さ、岩石の種類や構造、摩擦特性などを知ることにより、地震のメカニズムの解明が図られる。

地球の中はどうなっているのか、実際に調べてみたい。研究者たちの大いなる興味から、海洋科学掘削へのチャレンジが始まった。

1968年、アメリカで本格的な海洋科学掘削が開始され、その後、日本、アメリカ、ヨーロッパの各国が参加して国際的な海洋科学掘削計画が進められてきた。1985年にはアメリカの深海掘削船「ジョイデス・レゾリューション」の運用が開始されたが、その後、より能力の高い科学掘削が求められ、日本で地球深部探査船「ちきゅう」が建造された。

● 日本列島とその南岸に広がる南海トラフ(図1)

世界最高の科学掘削能力を持つ「ちきゅう」

2005年7月に完成した「ちきゅう」。全長210m、幅38.0m、総トン数56,752tの巨大な船は、世界最高の科学掘削能力(水深2,500m、海底下7,000m)を持つ(図2)。最大の特徴は、科学掘削として世界で初めて「ライザー掘削」が可能なことである。

海底下を掘削する場合、深く掘り進むことによって海底下の地層からかかる圧力が高くなると、掘削した孔が崩れてしまい、

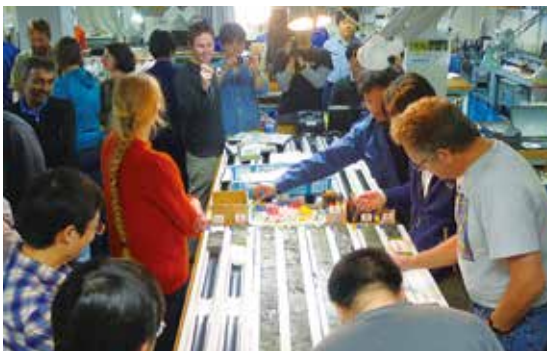
● 地球深部探査船「ちきゅう」(図2)

主要目:全長210.0m、幅38.0m、深さ16.2m、喫水9.2m、船底からの高さ130.0m、定員200名
最大掘削能力(ライザー掘削の場合):水深2,500m、海底下7,000m

それ以上進めなくなる。しかし、パイプの内側から力をかけて圧力を均等化すれば掘削孔はつぶれない。

ライザー掘削とは、船上と海底の掘削孔とのあいだを二重のパイプでつなぎ、その中に船上から掘削流体を循環させて、地層からの圧力を抑えながら掘削する技術である(図3)。ライザーパイプを使わないライザーレス掘削の場合、海底下の深部では地層からの圧力に負けてしまい、掘削孔がつぶれてしまう。ライザー掘削は、海底油田やガス田などではこれまでも使われてきた技術だが、科学掘削では「ちきゅう」で初めて採用された。

「ちきゅう」が目指すべき科学目標は何か。世界中の研究者たちは、議論の末に、最も緊急度の高いテーマとして「巨大地震発生のメカニズム解明」を決めた。巨大地震が多く発生する環太平洋地域のなかで、一番浅い場所で発生したのは日本の南海トラフである。南海トラフでは、過去1000年以上にわたり、百から百数十年前後の間隔で繰り返し巨大地震が発生してきたことがわかっている。そこで、最初に掘削するターゲットとして、南海トラフが選ばれた。南海トラフで地震発生帯の断層の地質試料(コア試料)を採取することにより、断層の強度や断層をすべらせようとする力を調査し、掘削孔に観測システムを設置して地殻変動のモニタリングを行うことなどを目的として、2007年9月に最初の航海が開始された。

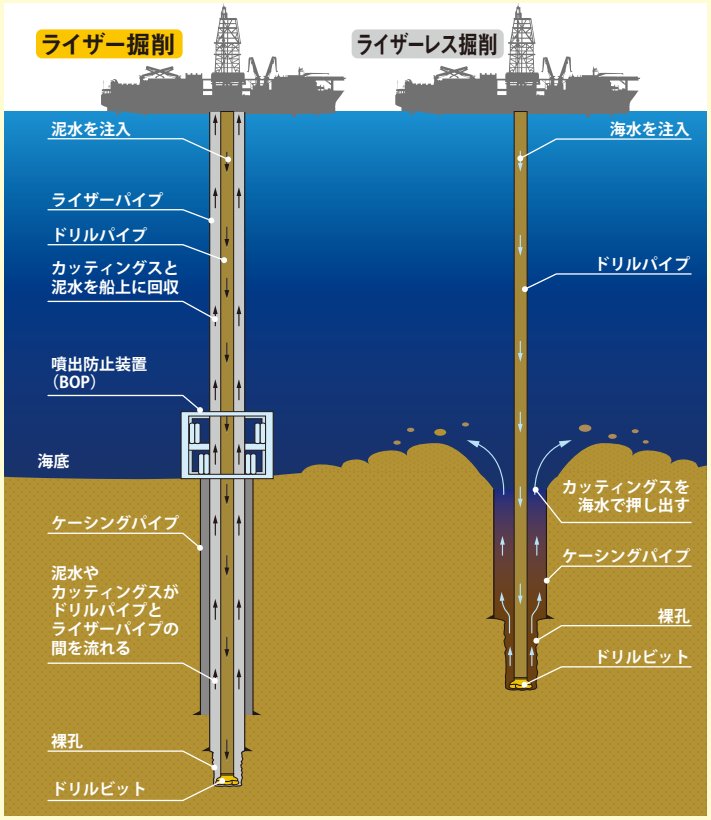


研究者たちによるコア試料の分析

科学掘削で重要な役割を果すパイプ

科学掘削の現場では、多くの鉄鋼製品が活躍している。なかでもパイプは、船と海底および海底下をつなぐ重要な役割を果す。

主要なパイプの一つがドリルパイプである(図4)。先端に付けたドリルビットを回転させ海底を掘り進むとともに、ライザー掘削において掘削流体をドリルビットまで通すための流路となり、孔内に生じる岩石の破片(カッティングス)を除去するなど、重要な役割を果たす。1本の長さは約9.5mで、「ちきゅう」には常時10,000m分が搭載されている。材質や形状は、基本的には石



大深度掘削を可能にするライザー掘削(図3)

ライザー掘削で使われるパイプは、孔内を保護するライザーパイプ(直径約50cm)と、先端にドリルビットを付けて掘削するドリルパイプ(外径約15cm)が二重になっている。掘削時には、ライザーパイプの先端に噴出防止装置(BOP)を付けて海底に降ろし、BOPを掘削孔につなぐ。ここから海底下に向けて掘削が開始される。掘削流体は、鉱石粉末などを調合した特殊溶液で、地層圧力や地質の変化によって比重を変えて使用する。掘削流体は、船上からパイプの内側を通ってドリルビットの先端まで達し、その後ライザーパイプとドリルパイプとの間を通って船上まで運ばれる。

海底下の掘削孔につながれる噴出防止装置(BOP)

油掘削用のドリルパイプと変わらないが、ドリルパイプの内側で採取したコア試料を回収するため、内径は一定(基本的に4-1/8in以上)になっている。

ドリルパイプには、接合時にかかる捻りの力、吊り下げた時に引っ張られる力、掘削孔の底にドリルビットを押し付ける時にかかる力など、さまざまな力がかかる。掘削孔の中は300℃以上の高温になる場合もあり、また海底では二酸化炭素や硫化水素に対する耐食性も必要となる。過酷な要求特性を満足するため、「ちきゅう」ではクロムモリブデン鋼をベースとしたパイプが開発され、高強度グレードのS140(耐力965MPa)及びS150(耐力1034 MPa)相当のドリルパイプが、世界で初めて製品化された。

二つ目はライザーパイプである。ライザーパイプは船体と海底とをつなぐパイプで、ライザー掘削システムの要である。1本の長さは27mで、「ちきゅう」には常時2,500m分のライザーパイプが搭載されている。ライザーパイプには高い耐久性が求められ、例えば100年に一度という大波の中で、2,500m長のライザーパイプを吊り下げても破損しないような性能が要求されるという。

このほか、海底下で掘削した孔が崩れないように保護するケーシングパイプがある。通常、掘削孔をある程度深く掘り進むとケーシングパイプを孔内に挿入し、孔壁が崩れないように保護してから、掘削を再開する。しかし、これを繰り返していくとケーシングパイプと掘削孔の内径が徐々に小さくなってしまい、深く掘り進むことが難しくなる。「ちきゅう」では、2018年に科学掘削としては初めて「エクスパンダブルケーシング」が採用された(図5)。エクスパンダブルケーシングとは、パイプの内側から加えた泥水による圧力により、内蔵されたブロックが押され、パイプの内径を拡張する技術である。これにより孔が小さくなることを防ぎ、より深くまで掘削することが可能になった。

世界最高深度を達成、次の目標を見据える

南海トラフの巨大地震発生メカニズム解明を目指した科学掘削プロジェクト(南海掘削計画)は、2007年9月に始まり2019年3月をもって一旦終了した。これまでの11年で、地球深部探査船「ちきゅう」は、南海トラフにおいて15地点68孔を掘削し、掘削総延長は約34kmに及んだ。

この間に多くの科学成果を収めてきたが、なかでも付加体*先端部で発見された断層で、これまで常識と考えられていた非地震帯が高速すべりをしていたことを発見した。この成果は、東日本大震災での断層運動と同様のふるまいであると考えられ、大津波の発生原因として重要視されるに至った。

掘削深度において当初の目標は、通常上下のプレートが固着している状態のプレート境界断層が存在するとされた、海底

*海洋プレートが陸側プレートの下に沈み込む際に、海洋プレート上の堆積物が剥ぎ取られ、それが褶曲や断層によって厚く成長した地質体。

海底下を目指すドリルパイプ（図4）

掘削やぐらの真下にはムーンプールと呼ばれる空間があり、ここから海面下に掘削用のパイプを吊り下げる。ドリルパイプは長さ約9.5m、重さ約350kgで、あらかじめ4本ずつつないでおく。掘削やぐらからこのパイプを吊り下げ、継ぎ手でつなぎながら、海中に降ろしていく。ドリルパイプの下部先端には、タングステンカーバイドや人工ダイヤモンドなどの刃がついたドリルビットが付いている。海底3,000mまで降ろすとすれば約6時間かかるという。

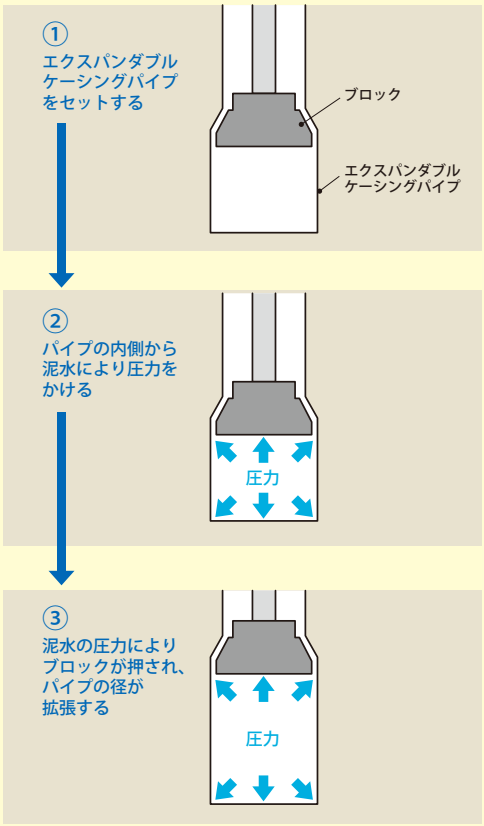
船上で待機するドリルパイプ

掘削やぐらから吊り下げられたドリルパイプの先端にはドリルビットが取り付けられている

掘削孔の大きさにより太さを変えて使用するケーシングパイプ

エクスパンダブルケーシングの仕組み（図5）

エクスパンダブルケーシングは、パイプの内側から加えた泥水による圧力により、内蔵されたブロックが押され、パイプを塑性変形させて内径を拡張する方法。孔が小さくなることを防ぎ、より深くまで掘削することが可能になる。



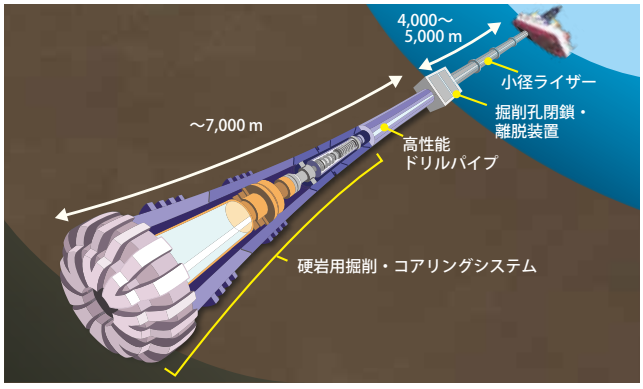
下5,200m付近であった。結果としてはそれには及ばなかったものの、科学掘削としては世界最深の掘削深度である海底下3,262.5m（水深1,939m）まで到達した（2018年12月7日）。また、海洋科学掘削としては世界最深の海底下深度2,836.5～2,848.5mの区間で計約2.5mのコア試料を採取した。

南海掘削計画はさらなる深部掘削を予定しているが、一旦終了となった。今後の目標として期待されるのはマントル掘削である（図6）。マントル掘削では水深4,000m超の海底からさらに6,000 mを超える海洋地殻を掘削することになると考えられている。

マントル掘削に挑戦するためには、パイプにも新たな特性が要求される。例えばパイプの軽量化は重要な課題である。掘削やぐらの吊り下げ能力は最大1,250tであるため、ライザーパイプでは軽量なCFRPなど材質の検討や鋼製の継ぎ手の強度を確保する技術が検討されている。そのほか、超高強度ドリルパイプの開発など、材料開発の点でも高い目標を達成することが求められるはずだ。

「ちきゅう」で得た科学掘削の知見をベースに未知の領域に挑む。地球深部掘削という壮大な挑戦が、どのような成果を見せてくれるのか、今後も目が離せない。

マントル掘削の概念図（図6）



人類が未だ到達していないマントル掘削を実現するためには、新たな大深度掘削技術の開発が必要となる。

●取材協力、図版提供　海洋研究開発機構
●文　杉山香里

Interview

海底下に広がる未知の世界「ちきゅう」が担う壮大なチャレンジ

巨大地震の発生が切迫しているといわれる南海トラフで、地震発生のメカニズムの解明に挑んだ地球深部探査船「ちきゅう」。この調査は国際深海科学掘削計画(IODP)の一環で、2019年3月をもってひとまず終了となった。このビッグプロジェクト(南海掘削)の中で全体を統括してきた海洋研究開発機構(JAMSTEC)の倉本真一氏にお話をうかがった。

海洋研究開発機構
研究プラットフォーム運用開発部門　部門長
倉本 真一 氏

── 南海トラフというと、プレート同士がぶつかり合っているようなイメージがありますね。

日本列島の南にあるフィリピン海プレートやその他のプレートは、ゆっくり動きながらプレート同士がぶつかり合い、削りあったりしています。プレート境界には「固着領域」と呼ばれ、プレート同士がしっかりくっついているところがあり、ここが地震のエネルギーを貯めつつあると考えられています。南海トラフは、固着領域が世界一浅いところにあります。そこで、固着領域の地質試料を採取したり、観測機器を設置するのが、南海掘削の目標でした。

しかし掘削海域が実際に決まるまでには、喧々諤々の議論がありました。世界中の何百人もの研究者が関わって、その中で一つの方向性を決めるのです。プロジェクトの中心である「ちきゅう」の運航はJAMSTECが行うので、責任重大でした。

── 南海掘削で難しかったことはどんなところですか。

掘削では、ドリルビットやドリルパイプなど、強靭な鉄が多く使われます。沈み込んでいくプレートの上には、地層がぐにゃぐにゃ曲がっていたり、断層があったり、と複雑な地質構造があります。地層と地層の境界にドリルビットがあたると、まっすぐに掘れなくなったり、ドリルビットが回らなくなってしまいます。このような地層が多くあるので、南海トラフは掘削するのが非常に難しい場所だと思いました。

── 長いプロジェクトの中で印象深い出来事を教えてください。

ある時、地震発生と直接関係ないと考えていた場所と比較するため、とりあえず掘削してみたところ、思いもよらぬ構造が見つかりました。プレートが沈み込みを始めたばかりのところは「非地震帯」と呼ばれますが、ここには堆積物がはぎとられたばかりの軟らかい地層がくっついていて、ひずみエネルギーを貯めるような性質はない、と従来考えられていました。ところがこの掘削で、非地震帯の先端部の断層が高速すべりをしていたことが明らかになり、地震や津波を起こすような性質があることがわかったのです。この事実を発表した論文も、これまでの常識と異なるためか、なかなか受理されませんでした。これと似た断層が東日本大震災の東北沖でも見られたことがわかったのは、論文が受理されたすぐ後のことでした。

── 今後はどのような科学掘削を行うのですか。

将来的な目標の一つに、マントル掘削があります。地殻の下にあるマントルのサンプルを採取してみたい。これまで実際にマントルを掘った人は誰もいません。それでも挑戦すべきだと以前から言われてきたのですが、技術的な課題が残っています。マントルの深さは海底下6,000m以上で、ライザー掘削が必要ですが、最大吊り下げ能力は1,250tなので、現在使っているパイプでは重すぎる。実現するためには、パイプの素材や掘削技術などの開発が重要になります。

マントルの中には、大量の水や炭素が含まれていて、数億年かけて地球の中で循環しながら、海洋や大気の中に放出されると考えられています。マントルの運動が、46億年の地球の歴史にどのような役割を果たしているのか。マントル掘削は、その謎を明らかにする手掛かりになるはずです。ぜひチャレンジしたいと思います。