

連携記事

付加体掘削（南海トラフ掘削）の難しさの 経験談と解説

The Trials and Tribulations of Drilling into Accretionary Prisms: The Nan Tro SEIZE Drilling Project

国立研究開発法人海洋研究開発機構
深海資源生産技術開発プロジェクトチーム
プロジェクト長代理

澤田郁郎
Ikuo Sawada

国立研究開発法人海洋研究開発機構
研究プラットフォーム運用開発部門
運用部 部長

江口暢久
Nobuhisa Eguchi

地球深部探査船「ちきゅう」は2007年9月21日に統合国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program：IODP）第314次航海に向けて、新宮港を出港した。これから12年間続くことになる、南海トラフ地震発生帯掘削計画の最初の航海であった。

1 地球深部探査船「ちきゅう」とは

海洋研究開発機構（JAMSTEC）の地球深部探査センター（当時）は統合国際深海掘削計画（IODP：Integrated Ocean Drilling Program）のもと、2005年に完成した地球深部探査船「ちきゅう」を用いて2007年9月から科学掘削航海を開始した。「ちきゅう」は、海底面下をより深く掘削するため、科学掘削船として世界で初めてライザー掘削技術が導入されている。「ちきゅう」以外の科学掘削船はライザーレス掘削技術による掘削しか行えず、海底面下2,000m程度までの地質試料の採取しかできなかったが、「ちきゅう」が就航したことで更に深い海洋の地質試料や様々なデータの取得が可能になっ



図1 地球深部探査船「ちきゅう」

た。その掘削能力は最大水深2,500mで海底面下7,000m程度を掘削することができる。

2 海洋科学掘削

50年を超える歴史がある海洋科学掘削は、2003年10月から始動したIODPから日・米が主導国となり、多国間（21ヶ国）国際科学プログラムとして新しいフェーズに入った。日本が

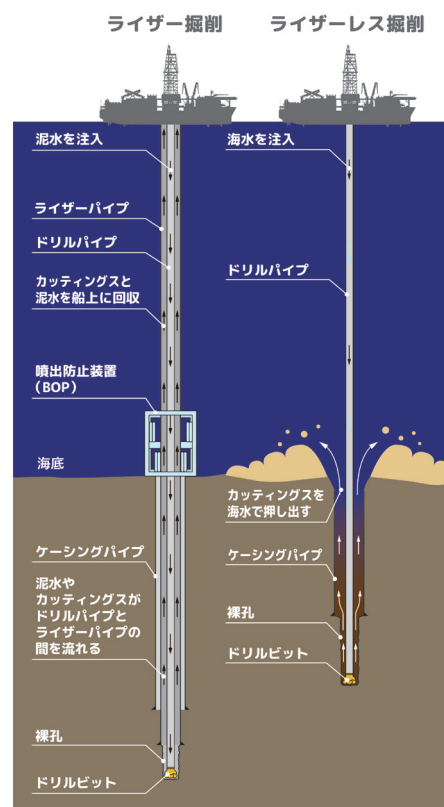


図2 ライザーレス掘削技術とライザー掘削技術

建造・運航する地球深部探査船「ちきゅう」と、アメリカが運航する掘削船「ジョイデス・レプリーション」を主力掘削船とし、欧州が提供する特定任務掘削船を加えた複数の掘削船を用いて深海底を掘削することにより、地球環境変動、地球内部構造、地殻内生命圏等の解明を目的とした研究を行うことを目的とした本計画は、2013年9月に、10年間の計画期間を終了した。2013年10月からは国際深海科学掘削計画（IODP：International Ocean Discovery Program）として、現在23ヶ国が本計画に参加し、日本は引き続き地球深部探査船「ちきゅう」を提供している。

3 南海トラフ地震発生帯掘削計画

2003年、IODPの数あるプロポーザルの中から「南海トラフ地震発生帯掘削計画」はフラッグシッププロジェクトとして採択された。IODPの目指すサイエンスプランには、「巨大地震発生メカニズムの解明」があげられている。紀伊半島沖（熊野灘）の南海トラフは、南東方向から沈み込むフィリピン海プレートと、その上位に位置するユーラシアプレートの固着域で繰り返し巨大地震を起こしており、その歴史は684年におきた白鳳（天武）地震まで遡ることができる。近年では、1944年および1946年に巨大地震を起こしている。海溝型の巨大地震を起こすプレート境界は世界中に存在するが、それらの固着域の深度は南海トラフと比較すると、はるかに深い位置である。しかし、南海トラフの地震発生帯は、「ちきゅう」の掘削能力で到達可能な深度にプレート境界断層固着域及び

巨大分岐断層が存在している。このような条件を満たすことから、「巨大地震発生メカニズムの解明」のために、この海域が、国際研究コミュニティから第一候補として選択された。「南海トラフ地震発生帯掘削計画」では、将来沈み込んで地震発生帯となるフィリピン海プレート上から、沈み込み帯浅部そして最終的にはプレート境界断層までの複数地点で総合的に掘削を行い、地質試料や様々なデータを取得していく。そして、孔内に設置した長期孔内観測システムにより、断層の地震性すべりと非地震性すべりを決定づける条件（地震発生条件）を明らかにすることを目的としていた。

「南海トラフ地震発生帯掘削計画」は、2007年9月からの第314次航海から始まり、2019年3月終了の第358次航海まで全13航海が実施された。

4 南海トラフ地震発生帯掘削計画の難しさ

紀伊半島の南東にある南海トラフのプレート境界地震発生帯は、世界中に存在する海溝型巨大地震発生帯の中で、「ちきゅう」の能力で到達できる深度に存在すると考えられていた。しかし、同時にこの海域は海洋掘削をするには過酷なロケーションであった。それは、川のように流れる黒潮、そして、フィリピン海プレート上の堆積物がプレートの沈み込みによって削剥されて、陸側に付加して作られる付加帯という地質構造であった。

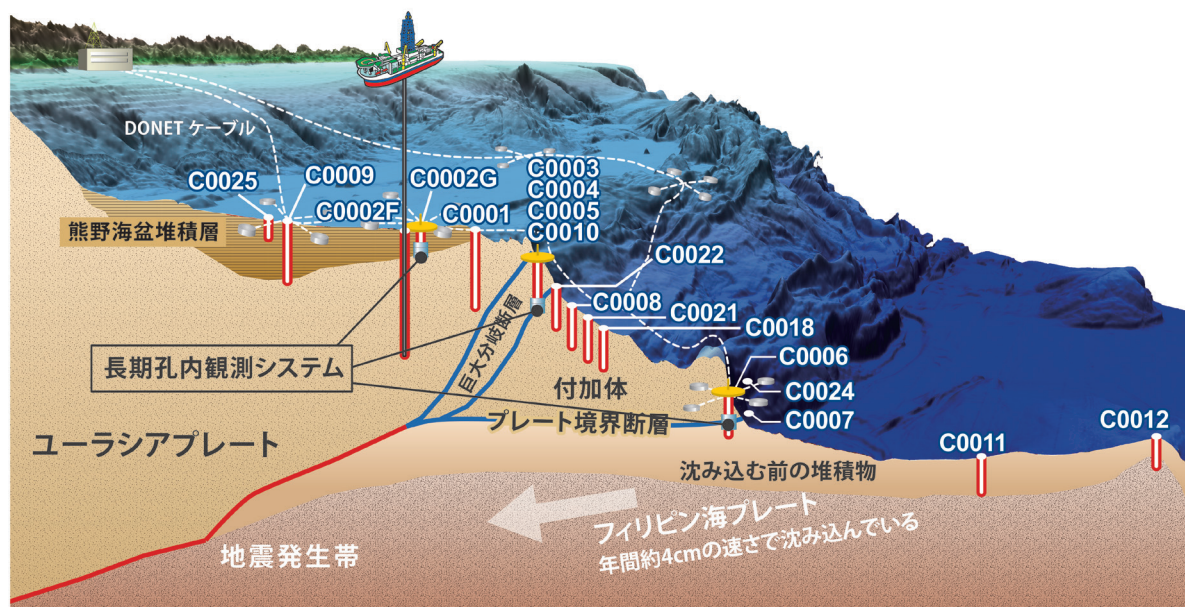


図3 南海トラフ概略図

表1 南海トラフ掘削概要

IODP 航海番号	実施期間 掘削方法	目的
314	2007/9月~11月 ライザーレス掘削	掘削同時検層による付加体断面の孔内地層各種データの取得
315	2007/11月~12月 ライザーレス掘削	分岐断層浅部と熊野前弧海盆の堆積構造発達史の解明
316	2007/12月~2008/2月 ライザーレス掘削	沈み込む堆積物とプリズム尖端部のコアリング
319	2009/5月~8月 ライザーレス掘削	巨大地震発生帯直上域でのライザー掘削と物理検層と実施
322	2009/9月~10月 ライザー掘削	地震発生帯に運び込まれる物質の初期状態の解明
326	2010/7月~8月 ライザー掘削	プレート境界断層に向けた大深度掘削の坑井準備
332	2010/9月~10月 ライザーレス掘削	付加体内部の圧力・温度変化を長期モニターする為の孔内観測装置の設置
333	2010/12月~2011/1月 ライザーレス掘削	海洋プレートが陸側プレートに沈み込む直前の地点での表層堆積物の採取と熱流量の測定
338	2012/10月~2013/1月 ライザー掘削	プレート境界断層に向けた大深度掘削（続）
348	2013/9月~2014/1月 ライザー掘削	プレート境界断層に向けた大深度掘削（続）
365	2016/3月~4月 ライザーレス掘削	設置中の孔内観測装置回収及び恒久使用予定の長期孔内観測システムの設置
380	2018/1月~2月 ライザーレス掘削	恒久使用予定の長期孔内観測システムの設置
358	2018/10月~2019/3月 ライザー掘削	プレート境界断層に向けた大深度掘削（続）

4.1 黒潮の存在

過酷な障害の一つが熊野灘を通る海流、黒潮である。「ちきゅう」は自動船位保持システム（DPS：Dynamic Positioning System）によって、定点に船体を保持できるように設計されている。掘削作業を開始すると、数週間から数カ月にはわたって、船は定点に留まっていることが必要とされる。しかし、掘削地域では、黒潮の大蛇行が起きない限り、常時5.5km/hr～9.3km/hr（3ノット～5ノット）の黒潮が西から東方向に流れている。掘削作業中には、それ以上の流速に見舞われたこともあった。

4.2 船体位置保持喪失のリスク

通常の海域では掘削船は風向と波方向を主に考慮しながら船首方向を決めている。しかしながら、南海トラフ掘削の場合は船体に対するもっとも強い外力である黒潮の流れに向かって船首を常に向けていなければならない、船首方向の許容範囲が非常に狭くなる。このため、寒冷前線の通過のような強い風の急激な風向の変化があった場合、それに対応して位置保持を行うことは非常に困難になる。実際に第338次研究

航海のライザー掘削作業では、寒冷前線が掘削地点を通過した際の急激な風向変化に船首方向が対応することができず、位置保持不能となり船体が1km程流されてしまった。そのため、ライザー管の一部が船体に接触して損傷、掘削作業継続が不可能になってしまった。

4.3 渦励振によるパイプの損傷

黒潮の流れが速いことで、掘削パイプやライザーパイプが渦励振を引き起こし、疲労によって切断する可能性がある。渦励振を抑制するために、ライザーパイプの強潮流対策用にフェアリングを新たに開発した。これによって、ライザーパイプ周りに渦励振が起らないようにすることによって、ライザーパイプの疲労蓄積を最低限に抑えることに成功した。

また、ライザーレス掘削では、特に長期孔内観測装置を設置する際には、掘削パイプに沿ってロープを配置することによって、渦励振軽減を行い、精密機器を安全に掘削孔に挿入することに成功している。また、掘削パイプが海流により一方向に押されるため、やぐら直下にあるパイプ入口で掘削パイプが一方向に当たるため、応力集中によるパイプ破断の危

険性がある。応力集中を抑制させるために、当機構が開発したRGR：Rotated Guide Rollerを搭載してライザーレス掘削を実施している。

5 付加体中の孔内不安定性

付加体とは、海洋プレートが陸側プレートの下に沈み込む際に海洋底堆積物が陸側に押しあげられて、くさび上に堆積



図4 フェアリング写真



図5 RGR写真

物が厚くなっている場所である。付加体が地質学的時間で徐々に成長することで日本列島が形成されたことが知られているが、この付加体の掘削は、掘削作業者にとっては、まさに悪夢である。

5.1 予測不能な付加体の地質構造

一般的な地層は水平に堆積するので、掘削前の物理探査による地層構造の予測が可能である。しかし、付加体の地層構造は非常に複雑で掘削前の事前調査では地質構造予測が難しく、掘削計画を立てるのが困難であった。特に掘削した孔井を保護するための鉄管であるケーシングの設置深度やその間隔を決めることが困難であった。特に、「南海トラフ地震発生帯掘削計画」の最終目標である、海底下約5,200メートル付近に存在しているプレート境界断層を目指す大深度掘削においてこれは大きなハードルとなった。2018年から2019年にかけて行われた第348次航海では、この問題を解決する手段の一つとして、通常掘削よりも多くの種類のケーシングを準備することにした。しかし、単純にケーシングの枚数を多くしてしまうと、最終的な孔径が小さくなってしまい、コア採取機器や掘削機器が目標深度まで到達できなくなる。これを回避するために、コア採取機器や掘削機器が通る孔径を可能な限り確保できる「エキスパンドブルケーシング」という最新技術を採用し、プレート境界断層を目指した。この技術は、2013年に実施された第348次航海ではまだ確立されていなかった技術である。

5.2 予測不能な付加体地層の圧力

付加体の掘削でさらに問題になったのは、複雑な地質構造であるがゆえに孔井にかかる応力の予想ができなかったことである。第348次航海までは実掘削で得られる付加体中の掘削データがほとんどなかったため、応力の状態がわからなかった。そのため、適切な泥水比重がわからず、掘削した孔井が崩壊して掘削パイプが何度も抑留されるトラブルに遭遇した。その後、実掘削データを詳細に分析したところ、地層が水平ではなくほぼ垂直に立っており、孔壁崩壊のメカニズムは異方性崩壊であることが判明した。また、泥水が非常に薄い層面に侵入することで、異方性崩壊を誘発することも判明した。第358次航海では、地層圧力予測のモデルを構築

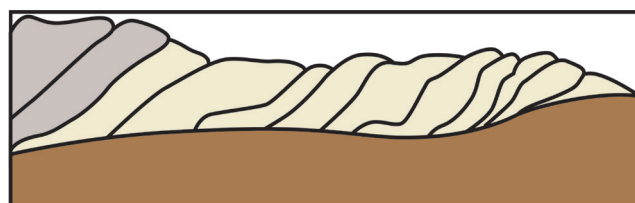


図6 付加体の構造

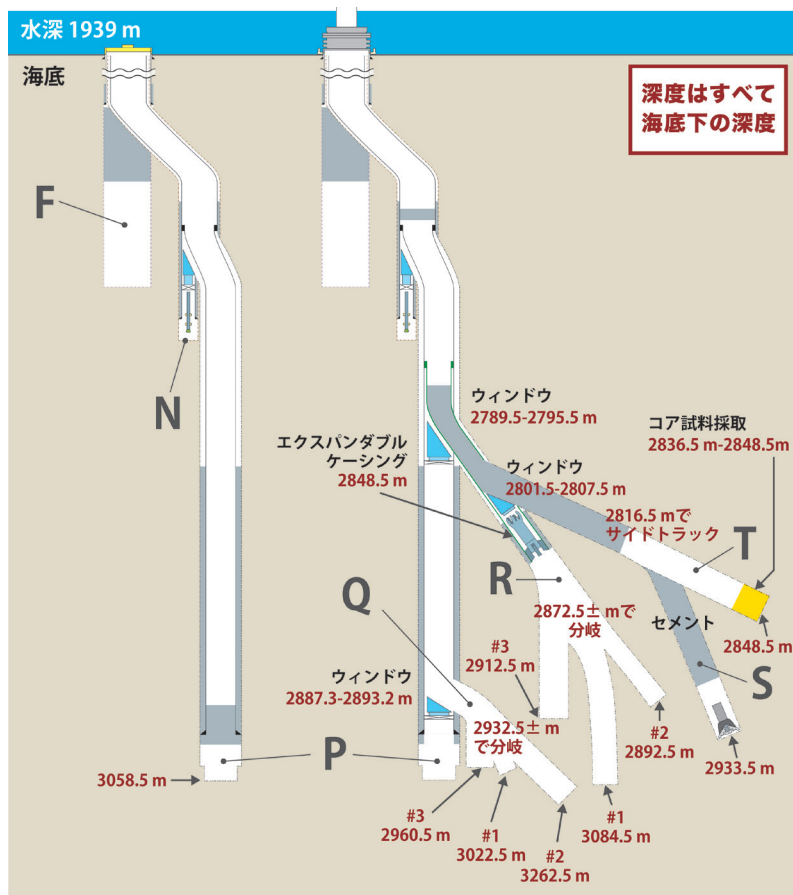


図7 第358次航海最終孔井図

し、掘削中のリアルタイムデータから常時モデルの精度を高める体制も整えて掘削作業を開始することとした。また、地層への泥水の侵入を防ぐための泥水の組成の改良も行った。しかし、このような様々な対策をして、第358次航海ではプレート境界面を目指したが、海底面下5,200mに到達することはできなかった。

5.3 地層崩壊による掘削パイプの抑留

第348次航海と第358次航海では、たびたび掘削パイプの抑留に遭遇した。抑留原因のほとんどは孔井の崩壊によるものであった。崩壊した地層が掘削パイプや掘削ビットの周りに蓄積し、パイプの回転や上下操作、泥水の循環も不可能になってしまい掘削パイプが抑留してしまった。通常であれば、孔井の孔径が30～40cm程度であるべきところが、付加体内で崩壊した部分では、2m以上にもなっていた。掘削パイプの回収が困難であると判断した場合は、抑留部分より浅部で掘削パイプを切断して上の部分だけを回収した。その後、孔井に残った機器を避けるため、より浅い深度から新たに枝掘り（サイドトラック）をして深部を目指して掘削作業を継続した。

6 さいごに

地球深部探査船「ちきゅう」は2018年10月3日に「南海トラフ地震発生帯掘削計画」の最終章であったプレート境界断層をめざすIODP第358次航海として、清水港を出港した。本航海は黒潮の大蛇行によって、黒潮による影響はなく、また台風に襲われることもなかった。しかし、様々な対応策を準備したにも関わらず、付加体を形成する地層や、これまでに行ってきた掘削による孔井の不安定さによって、枝掘り掘削中に意図しない枝掘りが起こり幾つもの孔を掘ることになり、どうしても深部への掘削が困難となってしまった。こうして、本航海は当初の目的を達成しないまま、無念にも終了することになった。現在、様々な側面からのレビューを行っており、全てではないものの、何が孔井内で起こっていたかが、徐々に見えてきている。これまで、人類が到達できなかったプレート境界地震発生帯へのアプローチは、巨大地震の発生メカニズムを理解する上で非常に重要なミッションであり、本プロジェクトの再起動が待たれるところである。

(2019年12月23日受付)