

科学技術・学術審議会 海洋開発分科会 海洋科学掘削委員会（第４回）
議事次第

1. 日時 令和４年７月４日（月）９時３０分～１２時３０分

2. 場所 文部科学省 18 階第研究開発局会議室 1 又はオンライン

3. 議題

- （１）海洋科学掘削の現状と課題について（ヒアリング）
- （２）我が国における研究資源としてのコアの保管・管理・活用の現状について（ヒアリング）
- （３）意見交換
- （４）その他

4. 資料

- 資料１ 海洋科学掘削委員会（第３回）議事録（案）
- 資料２ 海洋科学掘削に係る現状と課題について
- 資料３ 我が国における研究資源としてのコアの保管・管理・活用の現状について
- 資料４ 報告書とりまとめ方向性（案）

科学技術・学術審議会 海洋開発分科会
海洋科学掘削委員会（第3回）議事録（案）

1. 日時：令和4年6月6日（月曜日）14時15分～17時15分
2. 場所：文部科学省15階第1会議室又はオンライン
3. 議題：
 - (1) 地球惑星科学分野の研究開発動向について（ヒアリング及び意見交換）
 - (2) 2024年以降を見据えた国際動向について（非公開）

4. 出席者

【委員】

川幡主査、石井委員、小原委員、窪川委員、阪口委員、鈴木委員、巽委員、野田委員

【文部科学省】

大土井海洋地球課長、戸谷深海地球探査企画官、伊藤海洋地球課長補佐 ほか

【説明者】

金子 克哉 神戸大学大学院理学研究科教授

荒木 英一郎 国立研究開発法人海洋研究開発機構海域地震火山部門グループリーダー

中久喜 伴益 広島大学大学院先進理工系科学研究科助教

【補足説明者】

国立研究開発法人海洋研究開発機構 倉本理事、研究プラットフォーム運用開発部門江口運用部長

5. 議事録

【川幡主査】 ただいまより、第11期科学技術・学術審議会海洋開発分科会海洋科学掘削委員会の第3回会合を開催いたします。

本日は御多用中にもかかわらず、委員の皆様にご出席いただき、誠にありがとうございます。

まずは、事務局より定足数の確認及び配付資料の確認をお願いいたします。

【事務局】 事務局でございます。本日は、現在、阪口委員が所用で少し遅れておられますが、8名全ての委員に最終的に御出席いただきまして、本委員会の運営規則第2条に定める

定足数の過半数を満たしておりますことを御報告いたします。

また、事務局としまして、文部科学省研究開発局海洋地球課長の大土井、深海地球探査企画官の戸谷、課長補佐の伊藤のほか、海洋地球課の関係者が出席しております。どうぞよろしく願いいたします。

続きまして、配付資料の確認をさせていただきます。本日は、議事次第にありますとおり、資料1から資料2－4まで御用意させていただいております。また、後の非公開部分の資料を机上配付資料として御用意させていただいております。委員の皆様には、事前に議事次第を含め資料を一つにしたものと、非公開の配付資料を送付させていただいております。会場にお越しの委員の皆様にも、お手元に同様のものを御準備しております。本日の委員会では、議事に合わせて画面共有させていただきます。

御不明な点、不備等ございましたら、事務局までお知らせください。

また、資料1として、第2回海洋科学掘削委員会の議事録（案）を用意しております。委員の皆様は事前に確認いただき、御意見を反映したものとなっております。万が一、追加で修正等ございましたら、明日7日をめどに事務局まで御連絡をお願いいたします。

事務局から以上でございます。

【川幡主査】 ありがとうございました。

議題に入る前に、第1回、第2回の振り返りを少しさせていただきます。

前回は分野ごとの科学的な総括の発表がありました。この中から今後の議論に重要な点について総括したいと思います。説明を誤りなく表現するため、基本的に言葉は議事録5万5,000字からピックアップしてあります。時間数180分。何かアナウンサーがゆっくりしゃべると300秒だと5万4,000字なので、皆さんフルに御発言していただき、どうもありがとうございました。

まず、1番目。巽先生の、反省点も含めて総括から始まりました。科学に関しましては、当初考えた科学に関して、達成できない部分も結構あったというのは事実だと思うとの御発言がありました。ただし、一方で、幾つかの分野で日本が主導して、比較的重要な貢献が行われたのも確かで、かなりの科学成果は発表できたと考えています。

技術に関しては、開発はベストを尽くし、お金のかなりの部分は実際には技術開発に費やされています。プレート境界まで達する掘削というのも掲げましたが、南海トラフでは難しかったけれども日本海溝ではちゃんと成功しているという事実をみんなで確認できたと思います。

次に、科学・技術と並んで重要なのはマネジメントだという指摘がありました。委員から、自分も別に「ちきゅう」自体をけなしているわけではなくて、一番の問題はやはりプロジェクトマネジメントであると。科学者のニーズ、高度なエンジニアリング、お金を含めたマネジメントがきちっとできることが重要だと。非常に重要な御指摘を受けたと思います。目標の設定に多少問題があつて、マントル掘削の独り歩きみたいなのところもあつたとの発言がありました。

次、2番目。現状の把握というので、スペック、仕様との乖離を私が指摘しました。米国ジョイデス・レゾリューション号の504Bで1.8km程度の掘削をしましたが、マントルまで残りのシート状ダイク0.2km、マグマだまりに相当するハンレイ岩4kmを掘りぬくことができませんでした。もしこの時掘れていたら、マントルに達しました。ジョイデス・レゾリューション号では、この岩脈1.8kmのところ、さらに、その下のハンレイ岩層も掘削した経験があり、スペック上はどんどん深くまで掘れるんだと、私も30年前に伺いました。しかし、実際には、現在も上から1.8kmのところにとどまっているというのが現状だというのは、やはり事実として重要なこと。そうしたら、鈴木先生から、「ちきゅう」はいまだに基盤岩の掘削を行った経験がないとの指摘がありました。これも事実であります。

3番目。次の議論に向けて。「ちきゅう」は評判がよくないかなとかいう石井先生のつぶやきから始まりまして、そしたら皆さん、そんなことはない。「ちきゅう」の掘削能力というのは非常に高いんだ、「ちきゅう」をけなしたのではない、と数人の委員からポジティブな発言がありました。それに対し御意見ありますかと聞きましたが、反対はなかった。ですから、もちろん反省は必要であります、今後もう少し明るい雰囲気での議論したいと考えています。

地球深部探査船「ちきゅう」なしに実行できない事項も、幾つもこの前の委員会で明らかになっています。「ちきゅう」は、掘削技術取得のための人材開発の場になりました。それからレアアース泥、私も驚いたんですけど、コスト的にも、陸上に届くところまでできているとのプレゼンがありました。資源安全保障の面からは非常に重要かと思います。

また、大水深での開発という目標を進めてきたけれど、メキシコ湾の事故で、少し経費の観点から変わってしまったが、実際には、産業的規模でやるときには、掘削リグで対応するが、最初は「ちきゅう」でパイロット・スタディーをやったらという感じで考えていますよとありました。

この前、あまり言及がありませんでしたが、経済産業省は2050年ゼロエミッションに向けて、二酸化炭素の地中貯留を積極的に進めましょうというふうに言っています。この間、Jp

GUされていました。

今後の発展として、サイエンスに関しては、最深部も掘ったら出てくるようなエキサイティングな科学というより、ダイナミックな地球を知るために科学を進化させて、それからエボリューションさせるという手法を今後私たちは目指すべきだというのが巽先生の総括。また、反省を踏まえて今後こういうふうに行うとJ-DESCがまとめた科学計画、それは非常に妥当なものだと理解しているという御発言がありました。

また、減災などに関しましては、多点での展開が必要ですねというのが小原先生のほうから指摘がありましたが、減災するためには掘削だけじゃなしに、まず理論、掘削、モニタリング、モデリング、この4つを協力させてやっていく。これもプロジェクトマネジメントであります、それが問われていますよという指摘は非常に重要なと思いました。

その他に、資源と、あとCCSすなわち海底下地層貯留への期待もあったということを述べておきたいと思います。

いずれにしても、今後の期待という発言も随所にあったというのは事実だったと思いますので、それを総括の中に今述べました。

最後になりますが、前回からの確認事項で、議論の対象とする時間レンジは数年、マキシмумでも10年程度として、現実的な、地に足をついた議論をしていきたいと思います。

もし間違っていたら御指摘していただければと思います。これを出発点に、今日議論したいなと思います。どうでしょうか。よろしいでしょうか。

じゃあ、先ほど申しましたが、もう少し明るい雰囲気でも議論したいと思います。よろしくお願いいたします。

では元に戻しまして、本日は火山・火成活動分野、海底観測研究分野、地震研究分野、マントルダイナミクス研究分野における研究開発動向をヒアリングいたします。最初の分野は神戸大学の金子克哉先生、次はJAMSTECの荒木英一郎先生、地震研究分野は野田委員、マントルダイナミクス研究分野は広島大学の中久喜先生、それぞれに話題を御提供いただきます。よろしくお願いいたします。

それではまず、火山・火成活動研究分野について、神戸大学の金子克哉教授から話題提供いただきたいと思います。金子先生、10分程度でよろしくお願いいたします。

【金子教授】 神戸大学の金子と申します。私からは、自分の研究分野である火山の研究、また、火成活動に関する研究ということで、これまでの掘削の例とか、そして今後どうある

べきかということに関して、私としての意見をちょっと御紹介したいと思います。

今まで火山学とか火成活動学、マグマの活動、マグマの動きと言うべきでしょうけど、マグマに関する海底掘削というのは行われてきました。、基本的に海底のものというのは、火山にしても、火成活動にしても、実際に物を取るという、私の場合だと、火山噴出物あるいは火成岩なんかを実際に取り上げて分析するということを通じて研究を行います。陸上では手に入らないものなので、海底での掘削とか、あるいはピストンコア、ドレッジといったような、海底における試料採取が必要不可欠です。

また、火山分野などでも陸上なんかでは火山の掘削が数多く行われてきて、非常に重要な成果を上げてきました。一つは、陸上であつても火山というのは上に、例えばこの図ですと、多分これ富士山ですけども、上に新しいものがかぶっていて下が見えないので、その火山発達史を知るためにはやはりやはり掘削というのは非常に大きな手段であります。また、火山の地下構造、どのように物がたまっているかどうか、そういったものを知る上でそこは非常に重要です。また、熱水の研究とか、あるいはその観測機設置のための観測井というのがこれは陸上ではこれまで行われています。それで、実際問題として、掘削というのは火山、火成活動においては、もう海底にしても陸上にしても非常に必要不可欠な方法なのだというふうに認識しております。

海洋に限りますと、今まで重要な海洋掘削というのは、私はこの3つじゃないかなと思ってまとめてみたんですけども、一つは、皆さんは御存じだと思いますが、海洋底の拡大軸の掘削で、これは地球の火山活動の70%が大体ここで行われているわけなんですけど、それに関して、割と大深度の掘削も含めて行われています。これにより、海洋の地殻の構造とか、地殻内部の過程、オフィオライトとの整合性、あるいは層状貫入岩、あるいはハンレイ岩とかというのが分かってきて、そしてマグマとマントルが反応するというようなプロセスや、地殻の変成作用なんかは分かってきました。

また、巨大火成区といいますけど、LIPsとよく言われるんですけども、これはおおむね洪水玄武岩と言われる、非常にまれな現象なんですけども、そのたびに地球の環境、生命に対しても大きな影響を与えたのではないかと考えられる、海底に広がる非常に大規模な火山帯です。これらがどのようにできたかというようなことを掘削によって噴出物を調べることによって、その成因が明らかになってきましたが、まだまだなかなか性質が多いです。現在もこれは恐らく、今後も行われるかもしれませんが、基本的にはさらに取ったものをいろいろと考えるステージに来ているのかなというふうに思いました。

また、我々が暮らす日本のような島弧、これは特にJAMSTECなんかで伊豆－ボニン－マリアナ弧の掘削が行われて、日本のような沈み込み帯の掘削が行われて、島弧の進化成長史などに非常に重要な理解をもたらして、今後も行っていくべきものじゃないかと私は考えております。

ちょっと陸上の掘削として話を移すと、火山を掘削して、その上で火山の歴史を知るということは基本的にはいろいろ行われています。特に陸上でやった火山掘削として重要なのは、例えば、ハワイのマウナケアにおいて割と大深度の掘削が行われて、基本的にホットスポット火山の成長過程というのが非常によく分かるようになりました。

あるいは、これはまたちょっと話が違うんですけども、ハワイのキラウエアの溶岩湖によって、マグマが噴出した後に窪地にたまってが固まる過程を観察したんですけども、固まりつつある溶岩湖の過程というのがよく分かりました。これはマグマだまりなんかに応用が利きますし、実際にマグマがどのように流動し、結晶の中での結晶沈降、分化過程がどのように起こるのかということが非常によく分かった。これは古い研究ですけども、非常によく分かったというふうに認識されています。

また、話題を日本に移しますと、小型カルデラ、3kmぐらいのいわゆる大規模カルデラとは違うんですけども、その地下構造というのが、陸上のカルデラ掘削によって明らかになってきました。このじょうごカルデラと言われるものは今までよく分かってなかったものが、噴火によって砕けたものが基本的にたまっているという内部構造なんかが明らかになって、カルデラ研究の一つのマイルストーン的なものになりました。

また、最近ですが、ちょっと前に雲仙の掘削プロジェクトが行われて、1990年から95年の噴火があったものの、その火道を直接ここから掘削して、実際にまで入れたということがあります。この結果、この辺の火山の構造がよく分かりましたし、激しい熱水変質などが起きている、また、それで非常に急速に冷えてるなんていうこともよく分かりました。ちょっとまだ、その成果という部分ではサンプルを取り足りない部分もありますけども、1回目の初めての掘削であり、非常に意欲的なものであったというふうに思っております。

今後の海底掘削の話に入ります。どのようなことを行っていくべきなのかなというのを考えますと、私としては、ターゲットを厳選して、非常になるべく深い掘削によって、学術的なあるいは実用的な進展があると考えております。

以下のものが特に重要じゃないかなと思っています。一つは、カルデラ構造のための掘削。これ、後で少し詳しく話します。一つは、海底火山堆積物理解のための掘削。また、大陸地

殻形成過程の理解のための掘削。皆さんも話題にしていると思いますが、モホールです。

火山においては、地下深くなればなるほど陸域と海域の差がなくなるので、それゆえ海域の火山掘削というのは、その海域ならではの特徴が表れる噴火解析物とか、あるいは、地下数mまでぐらいだと思うんですけども、比較的浅部の構造研究のための掘削に意味があるのだと、私は思います。また、地殻マントルとかテクトニクスに関係した火成活動の研究においては、今後も海底掘削は非常に重要だと思います。

今4つ挙げたので、少し紹介しますと、まず、火山構造の解明なんですけども、現在、神戸大学では、海底陥没カルデラ火山である鬼界火山の研究に非常に力を入れて取り組んでおります。カルデラ火山というのは複数回の噴火があって、その結果一番最初の噴火によってカルデラの構造ができているんだと考えられているのですけども、その際に噴火がどのように起こるかというようなことは、よくまだ分かってない部分もあります。例えばリングダイクといって、落ちたところ、こういうところから全部にわたって、こういうところから全部噴出するのかとか。これ、熊野酸性岩なんかではそのような構造が解析されたカルデラでは見えています。

また、鬼界火山ではいろんな堆積物の関係、分布から、中心噴火、こういうリングダイク噴火でなく中心噴火ではないかというようなことも言われていて、一体どのような噴火なのかというのは、やはり掘削によって分かることだろうと思います。また、こういう断層などをきちんと掘削によって理解することによって、陥没メカニズムなんかが明らかになるものと期待します。

また、浅い部分において、海底の場合だったら、地下水や熱水構造は特に海底を特徴としてどのようなになっているかというのは、海底の火山によって、海域火山の掘削によって明らかになるのだらうと思います。ここら辺のことはまだよく理解されていないところです。

次です。海底噴火堆積物に関してなのですが、海底で大規模な噴火が起こると、浅い場合だと、海上を流れる火砕流であったり、あるいは中を流れる火砕流であったりすることは、こういうのは同時に起こると考えられます。

この辺のことはまだやはりよく理解されてなくて、今回、数年前に鬼界カルデラで100mぐらいの掘削をした結果、この海底にたまった火砕流の堆積物のコア試料を得ました。そうすると、これ陸上のコア試料とは非常に大きく産状が異なっていて、海底において大量のマスフローがあったときにどのように広がっていつて堆積するかというのは、こういった海底の噴火堆積物の掘削によってのみ、距離を変えるとどんなふうに変化するかとか、そういう例

例えば、今回やったのはここら辺なんですけども、これが遠ざかるについてどのように変化していくかというのは、この拡散や堆積過程を解明するのは、まさに掘削によってのみ行われることではないかと思います。

また、大陸地殻の進化に関してですが、これまでJAMSTECを中心に伊豆－ボニン－マリアナ弧を対象にして、様々な研究が進められてきました。非常に魅力的な研究対象として、大深度の掘削も、これからトライも含めて今後も継続すべきではないかと考えます。

要は、若い沈み込み帯の火成活動域の掘削によって、このまさに現在成長している大陸地殻の構造を解明し、その大陸地殻の発達過程を調べるという、大陸地殻の発達というのは、我々の分野で非常に基本的な問題です。堆積岩の深部構造、あるいはマグマだまり産状、また特に現在、伊豆－ボニン－マリアナ弧では、日本の陸域とは異なる非常に性質の異なっている巨大かつバイモーダルなマグマ活動というのが起こって、それがどのようなメカニズムで起こっているかを調べるというのは、非常に価値あることだと思います。これもやはり、掘削によるサンプル採取によってできていくことだと思います。

最後にモホールなんですけども、これは私から言うこともないのかもしれませんが、本当に2次作用を受けていない通常の海洋地殻とマントル、及びアウターライズなどで沈み込み直前のプレートの状態を調べるという、そのモホールの地殻の水の付加プロセスなんかを調べるということは重要なだろうと思います。

また、防災としてどのような意味があるのだろうというのをやりたいのですが、防災に関しては、割と短期的な予測というのと、長期的な危険度を評価するというのと、もし起こった場合にどのようなことが起こるかというのを評価するという、この3つが防災に関して資する情報なんだと思います。このような危険度を評価することに対して、最初の推移予測とか割と短期的予測に関しては、掘削とはあまり関係ないのかなとは思っています。でも、危険度を予測するということで、特に海域の噴出物の拡散、堆積過程の理解というのは、これは掘削によってその試料を解析することによってだんだんと見えるものだと考えます。どのようなことが起こってくるのか、これは要は海底火山の歴史を知ることによって、危険度の評価というのはなされると思います。

また、海底の堆積物を掘削することによって、どのような拡散や堆積過程が進行しているのかということは、海底火山の危険度の評価、あるいは起こった場合に何が起こるかということを知るための試料であって、海域の火山の掘削というのは、この面において重要になるのではないかと思います。

ということで、ちょっと取り留めがなかったのかもしれませんが、まとめとしては、これまで掘削によっていろんな計画の掘削が行われて重要な成果が得られてきました。

火山研究に対しては、掘削というのは海底堆積物、浅部構造の解析にとって重要。また、火成活動あるいはテクトニクス研究、さっき言った地殻の発達と、そういうものは海域に非常に重要な対象であり、掘削がすごくその点において有効だと思います。

ということで、今後、ターゲットを厳選したなるべく深い掘削によって、学術的な、あるいは実用的な進展というものが期待できるのではないかと私は考えます。

ということで、以上になります。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。

全般的に全部お話しいただいてありがとうございます。巽先生、補足するところありますか。専門同じだから。

【巽委員】 補足というか、むしろ金子さんの御意見をお伺いしたいと思います。火山研究もしくは地球科学としての火山を対象とした掘削研究のターゲットというのは、まさに今おっしゃったようなことで間違っていない、もしくは正当な道だと思うんですけども、防災という観点で見た場合に、恐らくこれから荒木さんもお話しされるような観測というものと、掘削もしくは陸上の調査というものを全て合わせて、例えば30年、50年、100年程度の予測というものがすごく重要になってくると思います。この辺り何かお考えありますでしょうか。こういうふうなことをやりたいとか、こういうふうなことが重要であるとか、もしくはこういうふうなことをするために日本としてはこういうふうな努力が必要である、といったお考えありますでしょうか。

【金子教授】 なかなか難しいことなんですけども、何でも掘ればいいというものじゃなくて、掘削として重要なのは、やはり活動度の高い火山に集中した投資をして、それによって火山活動史など、どのようなことが分かるかということ、つまり掘削の有効性、重要性を評価することかと思います。やはりよい研究対象を通じ、その掘削によって、そのようなこういう長期予測に資するデータが出るかどうかということをもっと見極めるような研究が必要です。例えばそういう意味では、やはり活動度の高い鬼界火山なんかは比較的いいんじゃないかと思うんですけども、そういうところでの堆積物あるいは火山の発達史研究などにより、それが果たして評価できるかということをもっと考えていくことがよいのではないかなと思います。そういうように考えます。

【巽委員】 ありがとうございます。きっと金子さんが言いたかったことをもう少し補足

すると、例えば地震波とか電磁波とかいろんなものを使って火山の地下構造を調べて、それが噴火予測につなげるという努力は一つの方法としてあると思うのです。

ただそれは、掘削という作業が伴って、その地下をつくっている実際の物質がどういうものであるかということと反映しながら、もしくはお互いのそのデータを交換しながら精度を上げていくということが必要不可欠になってきて、そういうふうなことが合わさって初めて、比較的精度のよい、確度のよい予測につながっていくんだろうと思いますので、そういうふうな総合研究が必要だということだと思います。

【金子教授】　そうですね。先ほどこちよつと言い忘れたんですけども、堆積物において掘削というのは、単純にどういうものが起こったかというよりも、今言われたような例えば反射法地震探査による層構造で、一体それが何かということの評価する上でも非常に重要なデータになって、そういう点でも総合的な研究の中で掘削というのは位置づけられて、その掘削することによって、後で、反射法地震探査などで得られた層構造で、これは何だ、あれは何だということが、より分かるわけで、そこら辺は非常に火山の掘削における非常に重要なことではないかと思います。総合研究も含めてということですよ。

【川幡主査】　どうもありがとうございます。ちょっと時間があるので、あと1つぐらい質問とかコメント受けたいと思いますが、委員の先生、いかがでしょうか。後でまた30分ぐらいありますけど。よろしいですか。じゃあ、次に行かせてもらいます。

どうもありがとうございました、金子先生。

【金子教授】　どうもありがとうございました。

【川幡主査】　続きまして、海底観測研究分野について、JAMSTECの荒木グループリーダーから話題提供いただきます。荒木先生、お願いします。

【荒木グループリーダー】　よろしくお願いします。では始めさせていただきます。

まず、私の研究開発動向ということなんですけども、私は、南海トラフにおいて地震研究・観測技術研究のコンテキストで20年程度活動しています。その視点ですのでちょっと偏ったものになるかと思いますが、その中で海底ケーブルを使った観測というものと、そういう掘削というものを融合させるということに努力をしてきました。観測ケーブルということで、非常にリアルタイム性の高いような観測ができて、つないでいる観測のパフォーマンスを上げるということで、飛躍的な発展をなすことができたというふうに認識しています。

まず、南海トラフの地震発生帯では、2006年以前では非常に少ない観測体制だったんですけども、巨大地震の発生が危惧されるという中で、実態把握とリアルタイムの防災対応を

兼ねるという目標で、観測網の開発と展開を10年程度かけて実施しました。その結果として、DONETは、DONET-2というのが今現在稼動しておりまして、その中では、観測点を増やすというだけではなくて、観測装置の広帯域化ということで、高い能力にするということ、質を上げるということをやった結果、これまでには解析できなかったようなゆっくり地震のメカニズムを非常に詳細に解析できるようになるという、観測網によって新しい窓を広げるということを実現しています。

その中で、DONETは、地震と津波というものの観測を目標にしていますが、海底地殻変動というものを把握するためにはちょっと足りないということで、IODPの南海掘削計画において、長期孔内観測システムの開発と展開を行いました。さらにその観測システムをDONETに接続するということで、長期的な観測を実現しています。

現在、3点の観測装置が入って稼動しているということは、小原先生のほうからも前回お話あったと思いますけれども、観測を長期的に行うためには、やはりネットワークにつながるということで非常に確実な観測が行えるようになったということを、ここでは繰り返し述べたいと思います。

観測装置の電力をもらって、さらにデータを送り返すということをやだけでなく、そのデータの時刻づけを正確にできるということがあります。それによって得られるデータの数を飛躍的に高めるということが期待されています。

そういう観測を実施した結果によって、南海トラフの浅部では、これまで知られていなかったゆっくり滑りが繰り返し発生しているということを見いだすことができました。その詳細についてはここに書いてあるとおりですけれども、DONETではゆっくり地震というのが見えておりましたけれども、掘削孔で初めて、ゆっくり滑るような、さらにゆっくりとした現象を知ることができました。

この結果は、現在ではモニタリングのフェーズになっておりまして、国に定期的に報告をしておりますし、この図を見ますと、時折大きな滑りがある場合がありますけど、特にそのような場合には詳細な解析をして報告するようにしております。

一方で、この熊野灘では3点入りまして、モニタリングということができているんですけれども、南海トラフ全体を見ますと非常に広い海域であります。ですので、例えばプレート間カップリングが地域によって異なっている様であるとか、巨大地震も連動性があるということは古くから知られているところですが、現在のプレート境界がどのような状態にあるかというのは全く把握できない領域が広がっているというのが現状でございます。

そこで、私たちはより広域、リアルタイムに地殻変動を把握しようということで、技術開発とそれから海域実装に現在取り組んでおりまして、一つはDONETで展開されている津波計が50点程度ありますけれども、これを使って海底の上下変動を把握できるような技術開発を行っています。

これは、地震サイクル間でプレート間カップリング、GNSS/Aという方式で把握した結果、地域的に差異があるのですけれども、これがリアルタイムにどう変化していくかというのを見ていくことを目指しています。

それから、ゆっくり滑りの現象を海底でも捉えようという取組でありまして、一つは光ファイバーひずみ計、この右にあるような観測装置を展開しまして、海底のひずみ変化を見るというように取り組んでいますし、こういうふうなボーリングマシンで浅い穴を掘って、そこに傾斜計入れまして、そこでのゆっくり滑りを捉えるということにも取り組んでいるところ です。

もう一つ、技術的に今後有用かなと考えている技術に関しましては、光ファイバーセンシングというものがあります。光ファイバーセンシングはこのポンチ絵にありますように、海底に展開した光ファイバーのケーブル自体をひずみ・温度のセンサーとして用いる技術であります。

特徴は、非常に稠密、1m間隔ぐらいでその変動を捉えられるということで、非常に多点の観測ができます。また、比較的長距離、最大120km程度の観測ができるのが特徴でありまして、機構では、DONETの整備が行われました関係で運営停止しています室戸沖のケーブルなどを使って、光ファイバーセンシングの研究開発を進めております。

ここに示しておりますように、地震の良好な観測が行えるほか、例えばこの右にありますような、ひずみの長期間の変動などの観測も行えそうだというところまでできています。また、光ファイバーは温度にも応答していますので、例えば海底の温度場の把握手法としても非常に有効だというふうに考えています。これは、海底の、土佐バエという海底面のちょっと浅いところがありますけど、そこの海洋変動を温度を通じて捉えているものと考えられます。

そういうふうな、海底でいろいろな努力をしています現状ですけれども、掘削孔による観測は決定的に重要だと私は考えています。現在、長期孔内観測では、堆積層の下部とか付加体上部の深度が大体海底下500mから1kmの深さで観測を行っています。私たちはゆっくり滑りというものを特に注目して観測していますけれども、そのような断層の多くは深さ数kmで起こっていると考えられますので、実は、海底下で観測しているといっても、海底での変形

と孔内での観測ではあまり変わらないということが期待されることです。

しかし、なぜ孔内の観測が必要かといいますと、例えばこのゆっくり滑りを孔内で観測した事例からしますと、観測されているゆっくり滑りの多くは非常に小さな現象でありまして、大体 0.1μ strainぐらいの変化量しかない。それに対して今、努力をして海底で観測をしようとしていますけど、海底で観測した場合も 0.2μ ひずみが何とか検出できるかということで、この孔内で見えている現象の多くは見えないということになります。ですので、海底で広域でやったとしても、規模の大きいものは捉えられるんですけど、全体を把握していることは言えないんじゃないかということを考えています。

また、海底面は泥で御存じのとおり覆われておりますので、例えば大きな地震が発生したときには、海底の泥はめっちゃめっちゃに壊れてしまうというふうに考えられます。そこでの観測は、決して地下の断層温度を正確に把握できない可能性が高いと思っています。しかし、海底などでもいろいろ努力をしているんですけども、やはり掘削孔の環境というのは、地震の正体を知るという意味では非常に重要な観測だと言えます。

また、超深部掘削に関しては、南海トラフで目標として実施されてきていますけれども、その再掲ですが、プレート境界は、地震はプレート境界とか地下の断層で起こっているということは常識的な考え方になって、長い年月がたっていますけれども、実際に断層が動く様子を実測しているわけでは当然ないわけです。

ですので、地震がどのように準備され、どのように進行し、終わるのかということに関しては、科学的に非常に解き明かす必要があるというようなことだと、問題意識だと思いますけれども、非常に仮説に基づいて、非常に弱い基盤の上で議論しているというのが現状だと思います。

ですので、南海トラフの超深部掘削では、断層帯を掘り抜いてサンプルを得るとともに、地震発生場の環境条件はまずピン留めされておられません。それを明らかにするという。それからそれがどのように振る舞うのか。断層帯が地震の準備に関してどう振る舞うのかというのを実測するというのが目標だったと思います。これらの目標、どれも達成はされていないというふうに私は考えています。ですので、その達成に向けて再検討して、ぜひ実施できればというふうに私は思っています。

現在の掘削孔の観測は非常に有用なものでありますけれども、この2番の場の発生条件というのは全然届いておりませんので、できない。それからこの振る舞いについても、ゆっくり滑りの観測はできておりますけれども、かなり離れた場所からぼんやりとしたイメージ

で捉えているというのが現状かと思います。

掘削科学は、掘ってサンプルを浅いところで得たことによって、仮説が進化して、それを実装するというようなこと、サイクルを半分ぐらい回したところだと私は思います。ですので、南海トラフで当初目指した目標達成の重要性というのはますます高まっているのではないかと思います。ですので、技術革新を行って、実現のロードマップを再び設定すべきではないかというふうに私個人は考えているところです。

将来展望としましては……。

【川幡主査】 すみませんが、10分越えたので、急いでもらえますか。

【荒木グループリーダー】 はい。将来展望としても南海トラフに3点のゆっくり滑りを観測するという目標の観測網を提案していきまして、一部、予算措置されておりますので、これを進めているところです。また、現在DONETの開発から10年経過しまして、通信技術の発展とか半導体の世代交代という世の中の変化がありまして、当時の技術をそのままつくることはできなくなっています。このため私たちは、DONETでの開発に加えて、近年の技術発展を反映させた新しい装置の開発を構想しまして、その中には光ファイバーセンシングという先ほどお伝えしたような技術を導入するというのを考えています。非常に高いポテンシャルがありますので、これを構想しているということです。

それから、超深部掘削に関しては、これまでの観測方面の困難は高温環境でも長期間安定して動作するという機器の製造が困難だったことが大きいんですけども、これに関しても光ファイバーセンシングの活用が考えられます。現在で高温の対応は十分されているような開発が行われておりまして、生産井などでの観測も実用化されているというところです。

ですので、物理パラメーターの観測に関しては、掘削がされれば、このような観測を実施することは十分可能だというふうに考えられます。また、光ファイバーは、このような地球科学的な生物学的な観測のデータを光で送るというようなことも研究されておりますので、こういうふうな活用を超深部掘削で行っていくことは非常に有用かと思います。

最後に、もう一つの点ですけども、海底のデータの利用というのは現在、研究のためだけではなくて、民間の利用、自治体の防災対応の利用なんかも進められております。例えば、この左に書いたものは、DONETの津波データを使って、ローカルな津波警報の利用を自治体との間で共同開発したような成果でありますけれども、このようなものは掘削孔での観測は信頼性が高いということが期待されますので、防災利用のポテンシャルに非常につながるものと考えています。

ですので、IODPなど科学掘削計画で培ったいろんな技術を使って、民間主体の観測網構築も可能性としては考えられると考えています。CCSなど、海底下環境の産業利用が進められる中、科学ベースの技術を民間のそういうふうなものに使っていくというのは非常に重要だと思っています。

それから、海底観測のデータはリアルタイムに得られるということで、科学研究だけではなくて様々な応用が広がりますので、融合したものに考えていくというのが非常に重要かなと思っています。

ちょっと駆け足ですが、以上です。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。質問、コメントありますでしょうか。

小原先生、お願いします。

【小原委員】 荒木さん、どうも御説明ありがとうございました。

紀伊半島南東沖では、長期孔内観測装置が3点設置されたおかげで、スロースリップの動き、その発生する場所であるとか、移動もかなり正確に捉えられたと思います。そういった観点では今後、南海トラフに展開する計画では、長期孔内観測装置の設置は各3つのエリアそれぞれ1か所ですね。かなり少ないなという気はしているんですけども、それ以外に、浅い傾斜計とかひずみ計とかを設置もされているということですが、それでカバーできますか？

【荒木グループリーダー】 正直なところを言いますと、なかなか厳しいというのが実感です。ですので、やはり現状では、予算の規模などの問題がありますので、やはりこの紀伊半島のパイロットケースをてこに、広域展開をするという辺りを掘削孔に関しては考えています。当然その光ファイバーのセンシングはじめ海底での技術も並行して進めていますので、それらを合わせて何とかというようなところが正直なところでは。

【小原委員】 なるほど、分かりました。ありがとうございます。

【川幡主査】 どうもありがとうございます。

私から阪口先生に質問してもよろしいでしょうか。いいですか、阪口先生。

【阪口委員】 はい、荒木さんではなくて？

【川幡主査】 荒木さんではなくて。いやいや、なぜかというと、この南海トラフの件は結構要で、実際掘削と理論とモニタリングとモデリング、これを合体させて、防災減災に生かしていこうということで、マネジメントの力というのがすごく問われているかなと思います。阪口先生は、JAMSTECの色々な部門を統括する研究担当理事をされていたので、何が問題で、どういうところが改善するといいいかなというのがもしあれば教えていただければと思い

まして。

【阪口委員】 そのところは正直に申しますと、荒木さんが言われたことが実は正しいなと私は思っていて、計画の半分か半分ちょい以下ぐらいしか進んでないと。そこで投げ出すのではなく、例えば、前回の委員会で石井さんが話されたように、南海掘削では掘削技術そのものというよりは、縦に断層が並んでやっているところをどうやって孔壁を保ちながら掘るかとか、そういう準備が必要ですよね。しかし、準備と戦略というものがあまりなされずに突き進んだために、所定の予算を使い果たして時間も使い果たして、できなかったと。それが敗因ですが、物理的に不可能だったわけではないということが、いろんなところで反省点として指摘されていますね。

だとすると、私は今、「ちきゅう」を使っていろんなことをてんでばらばらに計画するのではなくて、この南海トラフを中心とした地震研究をやるんだったら、そこは1点集中できちんとやると。それから、先ほどの小原さんの質問にもありましたように、何点あれば非常に確かな情報が得られるのかということを、これはやはり理論と数値シミュレーションの部隊とが一致団結して、観測点の最適化問題という、そっちにきちんと落とし込んでやるべきであって、やはり体制ですね。一致協力して一つのことをやるということをきちんと目標設定をして、その上で体制を組んで、理論的な部分と技術的な部分と資金的な部分をしっかりと固めてやるべきだと。

というのは、この南海トラフ掘削に取り組まないでいいという国民はほぼいないと思うんです。そうすると、国民からの支援をある程度得られるという状況があるんだったら私は、今言った3つの体制をしっかりと組んでやるべきだと。それでとことんやるべきだというのが私の意見で、夢物語で云々とか、何かで予測ができるから云々という話ではなく、一つ一つが分かっていく、ここを押さえればこれが分かるということが、かなり近い話なので、それをちゃんとやれば、南海トラフ、それから地震研究、ここについての掘削というのは、むやみにその大深度、いきなり7,800m行くとかそういうことではなく、着実な計画と、理論、それからシミュレーション、そこを組み合わせる体制さえ整えれば、かなり可能性はあると私は考えています。

【川幡主査】 どうもありがとうございます。ポジティブな意見ありがとうございます。

では今日、荒木先生は15分しゃべられましたが、今の質問も含めて、1分で答えを全部まとめて言ってもらえませんか。ファクター1分ぐらいで何かみんなに分かるように。

【荒木グループリーダー】 やはり10年の中で変わってきています。ですので、これをや

はりちゃんと反映させて、前に狙ったことができなかったということは今度はやるんだということをしっかり考えて、なおかつ民間の力もしっかり入れて実現できればと思っています。

【川幡主査】 また後で、委員から質問があるかもしれませんが、荒木先生いったんどうもありがとうございました。

じゃあ次に行きたいと思います。

次は、地震研究分野について、野田委員から話題提供いただきたいと思います。10分程度でお願いいたします。

【野田委員】 野田です。地震研究分野ということでレビューさせていただきます。自分は地震研究の中でも非常にマイナーな分野にいる人間でして、摩擦実験、シミュレーションなどを通じて地震がどういうふうに起こりそうか、そういうことが分かたらいいなという研究に取り組んでいます。ですので、地震研究といったときに、メインの観測研究とかのほうはあまりカバーできないので御容赦ください。

門外漢ではありますが、学会などで聞いていて感じる雰囲気、そういったものからちょっと言っておきますと、最近は特にデータの利用・活用の仕方が質的に変わってきているなと思っております。特に最近数年、ぐぐっと出てきましたのは、こういうAIの活用による過去のデータから、地震のカタログ等を膨大な数に増やして、それでいろんなものが見えてくるという研究です。

左の例は、アメリカのスタンフォード大学のグループの論文ですけれども、通常のカタログ、デイリーカタログみたいなもので、マシンラーニングをやると濃度は全然違うと。それでプロットしたらいろいろ見えてくるのであるとか、日本でも内出さんなんか、JMAのイベントデータなどを使いまして、このメカニズム解というんですけれども、地震がどういう断層で割れたかみたいなやつを桁違いにデータを増やしてプロットすれば、日本がどっち向きに押されていてどっち向きに引っ張られているかというのがぱっと見えるということで、これまで人海戦術で波形の読み取りとかがなされてたんですけども、それが非常に効率化、自動化して、これまでの蓄積データの実力をより引き出せるような、そういう時代になっているんだなと、すごいなと思っております。

データ自体に関しましても、これまでに、前回の小原先生の発表でありますとか、先ほどの荒木さんの発表でいろいろありましたが、データの量であるとか質的な充実がどんどんなされております。もともと日本は非常に密な観測点がありましたが、それが、こういう面的な、光ファイバーだったら線的な分布に、あと領域に関しましても、陸域から海域へという

ふうにどんどん広がっていつているという状況です。

それで、最近、非常に注目を浴びておりますスロー地震、ゆっくり地震に関しましても、発見当初は非常に限られた沈み込み帯でしかないんじゃないかという話だったんですけども、今やもういろんなところで見つかりまして、ほぼ全てのところであるんじゃないかぐらいの、そういう認識に変わりつつあると思います。

これ、真ん中の図は京大の西川先生の論文なんですけれども、S-net、日本海溝のところにあるステーションですけれども、それを使ったTremorであるとかVLFの検出でして、見つかっただけではなくて、こういう東北地震の大きく滑ったところでは実際抜けていると、これはステーションがここにありますので、多分ほんまなんやと思うんですけれども、そういうことまで見えてきているとか。

右の例では、これメキシコですけれども、この地図の範囲の右のほうでM8の地震が起こったんですが、その後にこのゆっくりした滑りがこういうところで起こって、それでローディングされるところで次にM7.2が起こった。その後、そのアフタースリップであるとか、他のSSCが起こったり、そういうスロー地震と大地震の相互作用が見えてき出しているんじゃないかなと、そういう時代に差しかかっているというふうに思っております。

その中で、これは自分も分担研究者として声かけていただいた案件です。学術変革領域Slow-to-Fast地震学というものがスタートしておりまして、今後いろいろ出てくるんじゃないかなと楽しみにしているところです。

分野全体的なメインのほうの話は以上です。結構マニアックな自分の専門のほうですが、地震発生物理学というんですか、どんなふうにして地震破壊が起こるのかというところを説明していこうと思います。まず、ちょっと基本的な事項から説明させていただこうと思います。

地震で断層が割れるときに、破壊エネルギーという量がよく重要視されます。これは破壊面を健全な状態から破壊した状態、滑っている状態、そこに遷移させるのに必要なエネルギーということで、表面エネルギーみたいなものです。もしくは、ジッパーですね、ファスナーを閉じたり開いたりするときに、その摩擦抵抗みたいなものです。大きいほうがタフな断層面であるというものなんですけれども、これは幾つか仮定を置きますと、地震学的に求めることができまして、これ2015年の論文ですが、横軸が地震の平均滑り量、縦軸が破壊エネルギーということで、こういうスケーリング則みたいなのが見えると。大きな地震ほど強靱な領域が割れたように見えるということになっています。

この知識自体は大分前からあったんですけど、もし本当にそうになっていますと、破壊力学的には大きい地震は大きい震源核というか破壊核が必要ということで、それはひょっとしたら観測にかかるかもしれないということでうれしいわけなんですけれども、必ずしもそうはなってない。これ右、パークフィールドの地震のプロットなんですけれども、大きい地震も小さい地震も同じように始まっているように見えます。そういうことがあって、これをどう説明しようかというふうなところはちょっと大きいかなと思います。

複数の、主に2つのアプローチがあるんですけども、一つは断層面の不均質で説明しよう。かつてアスペリティーモデルと言われる、こういう地震が繰り返すモデルがあったんですけども、それが連動するかもしれないというような話から、もっと複雑化した階層アスペリティーという考え方があります。断層面は、凸凹はこういうふうセルフアフィンな形をしていまして、ラフネスみたいなものがあると。そういったものからモチベートされて、支配的な素過程はあまり気にしないんですけども、こんな形に大きなタフなパッチと小さなパッチが混在していると、こういうふうになっているんじゃないかというのが、Ide and Aochiで提唱されて、これはつまり、もろい小さなパッチが割れたのは小さな地震で、大きいタフなパッチが割れたのが大きな地震であると。こうなりますと、不均質が重要ということで、なかなか断層1点の情報から物事言うのは厳しいということになります。

このモデルでいろいろ地震を説明する試みがなされておりまして、例えば、左は東北地震に関するIde and Aochi2013ですけども、本震が始まったところのパッチ、それが1つ割れただけではそれで終わってしまうのだけど、その前震、それが割れたときのこの応力集中みたいなものを使えば、大きい地震に成長できるという準備が重要であったと。前震が重要であった、そういうモデルでありますとか、これは自分の話ですけども、地震が割れるときだけじゃなくて、ゆっくり滑っているときなんかも記述できるような断層の構成則がありまして、それを使って、もろいパッチと大きいタフなパッチみたいなことをしますと、地震のサイクルのシミュレーションですけども、一つの歴史の中で、小さいところから始まって小さいだけで終わる地震とか、同じところから始まるけれども、周りが十分に剥がれている状態、そういうときには大きい地震になると。というわけで準備が大事だということが分かっています。

最近、今の階層性を増やすには非常にマシンパワーが必要でして、Slow-to-Fast地震学のモデル予測班というところでは、HPCの力を使ってより多階層をシミュレーションしようと、そういう計画もあります。

一方で、先ほどは摩擦に関しましてはかなり抽象的といいますか、素過程はあまり気にしないモデルだったんですけれども、一方で、断層、岩石の摩擦の比較的普遍的な性質でそれらを説明しようというアプローチがあります。断層の摩擦発熱とか温度が上がったとか、そういう話を気にするにはこっちの話のほうが親和性がいいと思うんですけれども、これ左上の図は横軸、滑り速度、縦軸、摩擦係数でして、非常に速く、地震時のように速く滑らせると、摩擦係数がぐんと落ちると。そういった話は、もう25年ぐらい前から分かっておりました。

これ、いろんなメカニズムが考えられているんですけれども、例えば、摩擦発熱で温度が上がって、その間隙水圧が上がって、それで摩擦抵抗が低下すると、サーマルプレシャライゼーションと呼ばれるプロセスがあるんですけれども、それを仮定しますと、滑れば滑るほど、だんだんだんだんだ摩擦抵抗が落ちていって、それでどこかで止まったときには、見かけ上この破壊エネルギーみたいのが増大していきますよというふうな話があります。

【川幡主査】 10分過ぎたので、急いでお願いいたします。

【野田委員】 分かりました。

それを取り入れたサイクルのモデルとかいろいろあるんですけれども、そういったところにコア試料の物性値を使うことはできますが、1点だけの情報であるということと、不均質性が分からないということで、これで何か将来が予測できるとかではなくて、定性的な、そういった計算モデルにはなるかなと思います。

ちょっとここら辺は省かせていただきますが、室内実験には課題がありまして、多くの摩擦試験では、細粒部を抽出したりしますが、構造が失われてしまうと。実際に露頭から切り出した擾乱の少ない試料だとすごく弱いという構造をちゃんと残すことが大事であるという話もありますし、あと、人間が室内実験でやりますので、せいぜい1ミクロンパーセカンド程度の実験で、これは天然の断層の滑り速度では非常にまれな領域で、外挿しなければいけないという話です。長い実験も不可能。微物理モデルを構築している一連の研究もあります。まだあるということは、つまりまだ式の形も固まってないということです。そういう現状があります。

最近はどこまでそういう細かいのをやらないといけないのかということから、摩擦則のスケール依存性が重要であるということで、それをターゲットにした実験等も実施されておまして、例えばこれは防災科研の山下さんの実験ですけれども、1.5mの断層を使うと、実際にこの摩擦強度がぐっと下がるが、大分低い滑り速度でもそれが起こるとか、この面

の不均質の状態によってスティックスリップのときの滑る前の状況が大分違うといった話もあります。

また、最近では、実際の断層を摩擦実験してしまおうという試みもありまして、これ唯一かもしれないと思っているんですが、フランスのグループですが、断層に水を注入して滑らせると。この滑らせるときの滑りなどを測って、そのデータがあつて、一方でここの摩擦実験をしたやつから実際に合うかどうかみたいなこともやられています。このケースは、地震に至らない、ゆっくり滑っているケースですけれども、定量的に合うという報告が論文には書いてあるというわけで、非常に限られた状況ですけれども答え合わせも一部されているのですが、地震がサイクルで起こるようなところに関して、果たしてどういう摩擦実験結果をどう使っているのかというところは、まだまだ全然枯れていない研究トピックだというふうに個人的には認識しています。

長くなりましたが、以上です。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。有意義な御講演ありがとうございます。

では、専門が似ている小原先生、何かコメントありましたらお願いいたします。

【小原委員】 似ているというか。ありがとうございました。

やはり、断層破壊運動を調べるためには、その不均質が非常に重要だということだと思えますけれども、その際にその摩擦構成則については、やはり現場のサンプルを取ってきて摩擦実験するというのも非常に重要なことかなと思うんですけれども、その際にやはり岩石摩擦の普遍的な性質を明らかにする上では、どういうサンプリングで断層物質を採取すればいいのかというところがなかなか難しいと思います。どういうふうにお考えでしょうかね。

【野田委員】 それは非常に難しいと思いますね。というのは、未擾乱のサンプルを取ってきて、それがしかも面的に取れればいいんですけども、そんなの恐らく不可能ですし、取れる分しか取れないだろうなというふうには思います。

それで、サンプルは取ってきて、それがどういうものであるのかというのを詳細に調べるのも非常に大事だと思います。石の性質からアプローチする上では、絶対にそこは避けては通れない、構造を見るというところ。コアサンプルはやはり量が限られて、追試ができないんです。できるのかもしれないですけど、難しいと個人的には思っておりまして、やはりその構造の似たサンプルをいろいろ実験して、その構造と式の形であるとか、パラメーターがどういうふうになってそうかとか、そっちのほうをもっと充実させる事が重要。構造に関してはもう、粒一つ一つまでの勢いで頑張って記載するみたいな、そういうアプローチのほう

が個人的にはいいのではないかなと。答え合わせのために少数のコアサンプルを摩擦実験してみるというのはありだと思うんですけども、個人的にはそういうイメージを持っております。

【小原委員】 そうすると、その粒一つ一つというところでは、そのシミュレーションも非常に活躍できるということですね。

【野田委員】 どうなんでしょう。それが、やはりいろんな素過程があるんです。前半のこのラフネスの話は素過程を気にしてないんですけども、実際にはその断層滑りだけではなくて、ちょっと説明を飛ばしてしまった部分ですけども、母岩が塑性変形とか割れるとか、断層が枝分かれしてしまうとか、断層の形状自体は粗いとか、そういったものも重要であるというシミュレーション等も出てきておりまして、ですので、必ずしもその点での摩擦挙動が完全に分かれば、断層全体の挙動が完全に分かるのかということも含めて、実は仮説かなというふうに個人的には考えております。

【小原委員】 ありがとうございます。

【野田委員】 ありがとうございます。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。また、後で、皆さんとディスカッションするときに戻ってくるかもしれません。どうもありがとうございました、野田先生。

では次に、最後になりますが、マントルダイナミクス研究分野について、広島大学の中久喜先生から話題提供をお願いしたいと思います。中久喜先生、どうぞよろしくお願いいたします。

【中久喜助教】 よろしく申し上げます。中久喜です。では、ちょっと画面の共有をさせていただきます。これで、スライドが出たかと思います。

私は、マントルダイナミクスという分野を研究しております。今ひとつ、何でこの場に呼ばれたのかちょっと不思議に思っているんですけど、まず、マントルダイナミクスをなぜ研究するのかなんですけど、マントル対流というのは地球の長期変動の原動力でして、プレート運動・地震・火山など、ほとんどの地学現象を力学的・熱的に駆動しています。

また、その環境に影響を与えられる岩石・水・炭素の循環といったものを駆動していて、非常にゆっくりとした影響ではあるんですけども、環境とか生命の進化に影響を与えているだろうと思われます。また、長期の未来、こういうのを予測しても悲しくなるだけかもしれませんが、長期の未来への予測もまた一つの課題であると思います。

もう一つは、重要な地球の特徴として沈み込み帯というものがあるんですけども、日本列

島というのは沈み込み帯でして、沈み込み帯のダイナミクスを調べるということは、我々その日本の自然というのを理解するにも重要であろうと思われます。

それで、こういうのはちょっと余計かもしれないんですけど、マンテル対流の研究分野というのはどんな分野で研究されてきたかというのを大きく分けると3つあると思います。1つはマンテル対流の構造です。対流の層構造とか、マンテル深部の化学的不均質、あるいは物質の循環もまあそうですけども、ちょっと今のところは置いておいて、化学的不均質なんていうのもあります。

2番目としては、マンテル対流による熱と物質の輸送です。例えばマグマによる物質の分化とか混合、揮発成分の輸送といった問題、また、地球が45億年にわたってどうやって冷えてきたのかというのもこの分野の課題になっています。

最後の1つは、マンテル対流とプレートテクトニクスとの関係です。これは、プレートテクトニクスというのは、数ある地球型惑星の中で、現在唯一プレートテクトニクスが起こっているのが地球でして、そういったプレートテクトニクスの成因を調べていくというのは、我々にとって非常に重要な課題であります。もう一つは、沈み込み帯のテクトニクスとかマグマ生成を再現するといった課題もあると思います。

それで、マンテルダイナミクスの研究方法ですけども、地球の内部というのは直接見ることができませんので、いろんな間接的な方法を組み合わせて、いろんな視点から検討していくわけです。これは大きく分けると、観測と、その物質の性質を調べる物質のモデリングと、あと、我々はこの力学的モデリングというのをやっているわけです。モデルをつくって、それが力学的にどういう意味があるのか、また、ある解釈が正しいのか。もう一つは、熱と物質の輸送。これは長い時間をかけて行われるものが、物理法則を満たした上でどんなふうに行われているのかというのを調べていくことです。

掘削の科学と関係あることは2つあると思います。地球物理的には、トモグラフィーといって、地球の内部の構造を調べることと、化学成分の解析です。特にマンテル対流の問題では、同位体とか揮発性成分の分析といったことが重要になるかと思います。ただし、掘削、海洋ですので、1億6,000万年分ぐらいなので、もしかしたら、マンテルの進化の効果はあまり表れないので、要するに、現在の地球の変動を知るといったことで重要になるのかもしれません。

ちょっとこの辺の説明はもう要らないかもしれませんが、我々はマンテル対流のモデリングというのをやっています。モデルのつくり方は二通りあります。一つは皆さんよく御存じ

のとおり、気象の予報に当たるような、とにかく現実にあるものを全てモデルになるべく入れ込んで、天気とか降雨量といったものを現実的に予測することです。

これは、いろんな既知の情報です、方程式とか物理パラメーターとか分かっている場合には可能なんですけども、マントル対流の場合は、物理パラメーターとかレオロジーの法則といったもの自体があんまり分からないので、結局物理モデルといって、単純だけでも一つの過程を精密に取り込んで、対流の構造とか変動の様式といったものがどういうふうに変ってくるのかというのを調べるようなモデリングを行っています。

それで、幾つかの例を見ていこうと思うんですけども、少しずつ、こちらの現実の予測のほうにも近づいていっているかなと思います。この辺はもう時間もないことですし飛ばしますが、マントル対流で重要なのは流動則と密度がパラメーターとして非常に重要になります。

それで、世界でどんな研究が行われているのかというのをざっと概観しておきますと、まず、マントル対流コードの開発です。二次元の箱型のものから地球を模した、ちゃんと三次元の球殻のものまでいろいろ行われているとか、粘性の変化に対して、二次元の場合比較的安定に解けるけども、三次元だと粘性変化が小さい場合のみ高速かつ安定に解けますよとか、そういったことが今のところ分かっています。一つ、この技術を応用するとしたら、例えば氷河の流動なんていう、氷河とか南極の氷床、そういう流動の問題に応用できる可能性はあるかもしれません。

あとは具体的にどんな問題が行われているかなんですけど、この後ろにつけた丸は、さっき3つの分野に分けましたけども、そのどの分野と関連しているかというのを示しています。一つは地球深部の大規模構造とマントルプルームに関する研究。もう一つはプレートテクトニクスの発生とプレート運動に関する研究です。3番目はプレート沈み込みに関する研究です。世界ではこういった分野が行われていますけども、日本でマントル対流研究している研究者というのは、こちらの最後の部分、私もここ20年ぐらいは沈み込みに関する研究を行ってきました。

それで、具体的な例として、このプレートテクトニクスの発生とプルームの問題と、最後、私たちの研究をちょっと紹介しようかと思います。

これは、プレートテクトニクスがマントル対流の中でどうやったらなるべく過程の少ないモデルで発生できるのかというのをシミュレーションしたものです。動画で紹介しておきますと、この青く塗ってあるところが大陸のある場所です。こちらのほうは、海のところは水深を表してしまして、茶色っぽいところが新しくできた海です。これ、大陸と大陸がぶつか

って超大陸を形成していくというプロセスのところを映しているんですけども、これ、この辺からよく見ていただくと分かるんですけども、比較的結構うまくいっていると思います。ここに中央海嶺があって、三重会合点があって、ちゃんとこのプレートが大陸の下に沈み込んでいるというプレートテクトニクスの特徴は、ある程度うまく再現できると思われています。どういうことを研究しているのかというと、どういうふうなレオロジーを与えたらこういう運動ができるのかというようなことを研究しています。

【川幡主査】 10分経過したので、すみませんけど、急いでください。

【中久喜助教】 あとスライドを2枚だけ出します。

これはマントルブルームのシミュレーションです。ホットスポットというのはマントルブルームからできていると言われていて、そのホットスポットが移動しない理由とか、ホットスポットがどのくらいの継続時間可能なのかというのをシミュレーションした問題です。

マントルブルームの形状や安定性を調べているんですけども、その継続、こういうものを観測と比べようと思ったら、トモグラフィーの解像度、大体100kmぐらいに上げないといけないんだということを知っていただきたいと思います。

少し先に進みますと、私のこれまでの研究のうち、沈み込み帯の研究を紹介します。それで、水の輸送を研究していて、大体二次元のモデルを使うと今どのくらいのことができるかというと、大体地球全体のスケールぐらい1万km掛ける2,000kmとか3,000kmの領域を大体2kmぐらいのレゾリューションで解けるようになっていて、沈み込み帯に水が沈み込んでいく様子なんですけども、水が沈み込んでいくような、こういった非常に沈み込み帯の細かいスケールがマントル全体の構造の中で再現できるようになっています。こっちは、東北地方にスラブの形と年代を合わせたモデルですけども、このとおり、水が出てきたところと震源の重なりがあるというのが再現できるようになっていて、こうしたことから地域毎の特徴も再現が可能になってきています。

全体のまとめがあまりないんですけども、現状ではこういうことが再現できるようになってきています。

2分半過ぎてしまいました。すみません。これで終わります。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。最後の図も非常に印象深いと思うので、ありがとうございます。

では、コメント及び質問等、お願いいたします。

【巽委員】 巽です。よろしいですか。

【川幡主査】 どうぞ。

【巽委員】 中久喜さんがここでお話しいただいた最大の理由はきっと、マントルのダイナミクスというのと、地表とのいろんな現象との間にはリンクがきつとあると多くの方が思っていて、地表の変動というものが掘削によってレコードを知ることができて、それからマントルダイナミクスまでは理解できるのではないかという意味を持っているからだと思います。

それで、その観点で2つ質問があります。一つは、一番最後のほうにおっしゃっていた、その水の話ですけども、地球がだんだん冷えてくると、水というのはもう結局、沈み込み帯で放出されることなく、その含水鉱物としてマントルの中へずっと入っていくようになりますよね、いずれ。そうするといずれ、海水はなくなる可能性はありますよね。

そういうふうな時期というのは、マントルダイナミクスの研究からある程度予測できますか？というのはどれぐらいの温度構造になったときに、含水鉱物がマントルの中へ水を持ち込んでいるということは分かっているんですけど、その温度構造に今達しているのか達していないのかというのは分かるものですか？

【中久喜助教】 現在、もしマントルの中が空っぽだ、水が入ってないとすると、現在の温度でも十分沈み込んでいくと思います。ただ、10億年以上の時間はかかると私は思っています。それは、沈み込む海洋プレートのところで、地殻だけに水が入るのか、マントル側まで水が入るのかで変わってきます。

【巽委員】 そうですね。

【中久喜助教】 だから、それを掘削で調べるということは、非常に重要なことです。私の計算、今ちょっとムービーをお見せしましたが、この計算だと12億年ぐらいはかかりますね。これは、ちゃんと沈み込み帯の形とか沈み込む速さとかそういうのをちゃんとスケールリングしてつくったモデルです。

【巽委員】 ありがとうございます。見事に誘導尋問に引っかかっていたいてありがとうございます。

それからもう一つは、例えば白亜紀のようにマントルのアクティビティーが非常に高かった時期、その高くなったトリガーというのは、地球表層という観点からすると表層にあると思いますか、それとも内部にあると思いますか。

【中久喜助教】 それは、まず内部の変動が、確かに1億年とかのスケールでは多分ブルー

ムの変動とかあるかとは思いますが、私は一番大きな原因というのは、プルームと中央海嶺が非常に密接に相互作用をしたのが一番の理由じゃないかなと思っています。

【異委員】 ありがとうございます。また、そういうふうな表層とのリンクということで今後ともまた、いろいろ御助言いただければと思います。ありがとうございます。

【中久喜助教】 どうもありがとうございました。

【川幡主査】 ほかにコメントありますでしょうか。

今の最後の異先生の質問に答えられた白亜紀ですけども、現在私たちが困っている二酸化炭素の問題の石油も、ある説によれば白亜紀に大体50から70%石油がつくられている。石油はいつもつくられているんじゃないので。

【中久喜助教】 それはそうですね。

【川幡主査】 そういうのがマントルの対流と非常にいろんな意味で密接に結びついているからであると。あと、海業の人にはショックかもしれないけど、この星から海がなくなるよというのきちっと説明いただきました。学問というのは非常にロングターム、面白いよというのをきちっと言ってもらったかなと、そのように思います。

直接掘削には関係ないかもしれないけど、その背後にこういう学問がありますよというので、皆さん興味持ったと思います。どうもありがとうございました。

【中久喜助教】 どうもありがとうございました。

【川幡主査】 では、ありがとうございました。前回含めこの議題で計6分野の先生から御発表いただきました。ちょっとせかしてしまってますみません。時間取りますので、ここから全体を通じて意見交換を行いたいと思います。

ちょっと残り時間が短くなっていますけれども、もし質問や議論が多かったら、休憩の時間をちょっと後ろにずらしたいと思います。もし先ほど時間なくて、ちょっと言い足りなかった御説明とか、あと質問とかありましたら、自由に発言していただければと思います。

ちょっと今日の話題だと質問しにくいかもしれないけど、鈴木先生、どうですか。

【鈴木委員】 ありがとうございました。私、今日の場合はちょっと質問しにくい部分はあるんですが、先ほど南海掘削やDONETの話がありました。私も高知にいたので、地震が来るかもしれないということを早期に感知できるということがどれだけ人命を救うかということを感じていました。現在その掘削孔にいろいろな機器を入れて、データを取っているというお話でした。地震予測などもそうですが、実際の物質と、掘削孔のセンサーで得られる環境のデータと理論とというのを誰かがきっちりと合わせて統合していかないといけないと

思うんですが、そういったコーディネーションというのは、今のところどういう感じでなされているのでしょうか。これから拡大というか、こういった穴をどんどん掘っていく予定があるのかなのかよく分からないんですが、そういうふうにしていき、より効果的に地震予測を行うには、どういったところが大きく進むステップになるのかなと思っています。

【川幡主査】 地震関係の委員の先生、もしくは荒木先生、お願いします。

【小原委員】 じゃあ、小原ですけれども、私から。

【川幡主査】 お願いします。

【小原委員】 全体のコーディネートというか、地震研究に関するかなり基本的な戦略については、科学技術・学術審議会の測地学分科会のほうで扱っており、私はその分科会長をやっています。その分科会の下に地震火山観測計画部会というものがございまして、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画というものを立案しています。

また、地震調査研究推進本部におきましては、地震研究に関する基本的な戦略を立案していて、そこで、総合的な基本施策というものをまとめており、その中で地震観測や地震研究、シミュレーション等も含めた研究の全体的なプランニングを行っています。

その中でやはり重要になってくるのは、海域におけるモニタリング研究ということで、海域のケーブルを使ったリアルタイム地震観測であるとか、それからまさに掘削孔による長期孔内観測、やはりそれらも非常に重要な観測手法であるということで、それらは推進したいということを立案しているというふうに理解しています。

【川幡主査】 どうもありがとうございます。鈴木先生、ほかにも何かありますか。

【鈴木委員】 いえ、ありがとうございます。大丈夫です。

【川幡主査】 ほかにコメントありましたら、お願いします。

【大土井課長】 海洋地球課の大土井でございます。さっき、鈴木先生と小原先生の質疑に加えて、役所サイドとしましては、先ほどのプレゼンにありますとおりで、一番初めは先生方の理学的なアプローチから始められるんです。大水深での観測をでき、なおかつ地中での観測もでき、それをできるかどうかというのをやってみる、それは理学的だと思うんです。測地学分科会とかで、それを広角的なアプローチに変えて、実際に観測を行おうというところまで転換している。それは役所サイドの話なんですけど、恐らくそこはJAMSTECの現場の中でも、あるいはJ-DESCの中でも、きっと橋渡しをされておられる方がいらっしゃるんだろうと思っています。すみません。本当に補足でございます。

【川幡主査】 これに関してコメントありますでしょうか。 じゃあ、ちょっと別の話題

か何かで、窪川先生、どうでしょうか。指【窪川委員】 今のご質問と少し似ていますが、2点あります。まず一点目、今の流れと関係しますが、私は今日、専門外なのですが、お話をお聞きしていて、どんどん解っていくということがすごく楽しかったです。例えば一般市民として、地震の、南海トラフに関する東海・南海地震の検討会の発表で、ゆっくり滑りに関する調査結果がこうでしたと必ず入ってきています。要するに、非常に新しい理論だと思っていました。それがすごい重要な理論で、それをそのまま掘削によっていろいろ調べていく方向性は、どんどん進めるべきといつも気にしていました。

今日、JAMSTECのお話の中に、例えば光ファイバーセンシングという新しい技術を使って、よりよい観測技術をできる、やらなくてはいけない、そういった話はもうぜひ急いでやっていただきたい。DONETと、多分、掘削孔を使っていくというところと密接に関係してくるんですけども、そういった進め方もです。もう一つ、日本の中の話だけではなくて、この観測の現場は世界中の研究者にとっても注目されるべきことだと思います。日本でこういうことをやっていくことに対して、世界的な支持はどのくらいあるのか併せてお伺いしたいと思いました。

【荒木グループリーダー】 荒木ですが、よろしいですか。

【川幡主査】 お願いします。

【荒木グループリーダー】 最後の国際的なところに関しては、日本国外でもやはり海底ケーブルの観測網であるとか、こういうふうな高度な掘削の観測を、今のところ海外では、やはりネットワークと融合してないんですけども、どんどんやって、科学研究もそうですし、防災にも役に立てていこうという話があります。

例えば、ニュージーランドとかでは実際に掘削の観測も始まっているところです。今後はやはり日本と同様に、ネットワークにつないでいくということをニュージーランドの国の研究者の人もやっていますし、それにいろんな国際的な研究者集団と一緒に議論して進めているというところで、当然日本のところでこういう実施した例なんかの経験は広く共有して、海外での適用をやるとか、そういうふうな相互のフィードバックをかけて進んでいくものだと思います。

ですので、やはり研究者の純粋な興味というのものもあるんですけども、その中での交流と意見の交換みたいなことで、やはりより効率よく進められるものではないかというふうに私は考えています。

【川幡主査】 どうもありがとうございます。

【窪川委員】 もっと強く、日本でぜひやってもらいたいとか、そういったような要望というのは地震、防災も含めて地震火山研究、特に海底火山は日本の領域海内に多いので、すごく強くあるのでしょうか。学会全体のことはよく分からないのですけれども。

【荒木グループリーダー】 まず、日本はやはり、その南海トラフの地震等でもすごく、現実的なニーズもありますから、まず、先導実験、新しい、先ほどの光ファイバーの技術に関しても適用していこうというふうなことを提案する立場にあると思っています。

ですので、そういう形でまず先導的にやるというところを積極的にやりつつ、海外の人たちも一緒に入ってやっていくというのが非常に重要かなと思います。

【窪川委員】 ありがとうございます。

【川幡主査】 ありがとうございます。

御意見ありますでしょうか。阪口先生、お願いします。

【阪口委員】 鈴木先生、さっき手挙げていたけど、大丈夫ですか。

【川幡主査】 この後、お願いしますので。

【阪口委員】 野田さんと小原さんにお伺いしたいんですけれども、荒木さんですが、その昔、天気予報って、大昔は占いの世界で、それから財宝運ぶ船が海を行き来するようになったときによく沈没して財宝なくなるから、各国の王様が絶対に当たる天気予報をつくれということで、そこからいわゆる物理というものが発達したという背景があります。それでとどのつまりは、気圧配置図が書いて、それがどう変化するかということ予測することができると天気は予測できるという物理に最終的に落ちていって、そこに今は数値計算が入って、かなり高精度な天気予報ができるようになりましたというストーリーは有名な話だと思うんですけれども、理論されている方と観測されている方が両方おられると思うんですけれども、地震の場合は、何と何と何が分かれば、地震はいつどこでどんなものがおおよそ起こるようになるのかということが分かるんでしょうかという質問にはまだまだ答えにくいと思うんですけれども、おおよその方向性というのはどの辺にあるのかというのをちらっと皆さんに解説していただくと、今後、地震の予測精度を上げるとか理解を深めるために、掘削データがどれぐらい必要なのかということの重要性とか必要性がよりクリアになると思うんですが、何かお答えできるところの範囲まででいいので、ちょっと答えていただくと私はうれしいんですが、いかがでしょうか。

【川幡主査】 面白い質問ありがとうございます。3人の先生、それぞれ教えてください。

【野田委員】 じゃあ自分から。個人的見解になるんですけれども、結局解くべき式が分

かれば、それは例えばパラメーターの分布とかも含めて、データ同化であるとかそういう方法であり得るかなと。

その解くべき式というのが、今のままの弾性論でいいのか、もっと複雑なことを考えないといけないのか。摩擦は、境界条件で必要ですから、摩擦の何か式が要するんですけども、その式の形が結構適当でも、データ同化の精度というか能力が出るのか、かなりそこをつくり込まないといけないのかとか、もっといくと、地震って大きいのもありますけれども小さいのもいっぱいあって、じゃあどれだけ小さいのまで気にしないといけないのか、どこら辺まで構成則として丸め込めるか、そこら辺の話になると、もう連続体でいいのかどうかという、どこで粗視化するかとか、そういう個人的には難しいと思っている話になってきて、ですので、なかなか難しそうだなと。

やってみたら、多少粗いやつでもぼつとできるのが現実なのかもしれないんですけども、いずれにせよ、構成則も適当なものからつくり込んだものまで、かなりいろんなバージョンありますから、それもいろいろ比べて、結局最終的にはデータ同化みたいな方法でどれが一番精度が出るのか、性能が出るのかということを評価するのが本来かなというふうに思っております。

【川幡主査】 ありがとうございます。じゃあ次、小原先生、お願いします。

【小原委員】 じゃあ私。基本的に地震というのは断層破壊現象で、応力が加わって断層面での摩擦を超えて、それで最終的に破壊に至るわけですけども、その応力がどういうふうに蓄えられていくかという状況をモニタリングすることができれば、切迫度みたいなものは、ある程度分かるんじゃないかなと。

いつ壊れるかというのは、絶対的な応力というのはなかなか測定することが難しいし、強度そのものも分からないので、本当にいつ壊れるかというところについての予測は非常に難しいですけども、ある時間の中でどれだけの応力が蓄積されてきているかということについては、測地測量であるとか、それから地震発生状況である程度分かります。

観測については、例えばスロー地震が発生することによって、その部分ではある程度応力が開放されて、ですけども、その周辺に対しては応力がより加わる性質になってきますので、そういう相互作用を明らかにするうえでも非常に重要になってくると。

その際に、物理モデルをきちっと立てて、それで予測をするということが非常に重要で、ただ、先ほど野田委員のお話では、摩擦の構成則というか解くべき式そのものもまだ十分に分かっていないということもございますので、そういう意味で、いつ予測が実現するかとい

うところについてはなかなか難しいところはあるかもしれませんが、でもある程度、確率論的な予測という面では大分できてきているのではないかなと。そのインプットとして、観測データが非常に重要になるということです。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。荒木先生、お願いします。

【荒木グループリーダー】 荒木です。例えばゆっくり地震の成因とかで、すぐに研究者の人たちは、地下の間隙水圧がちょっと高まっていてというようなことを、見てもいないのに言うのです。でも、断層の構成則とかを使って理解しようとする、そういうことを言わざるを得ないというのが現状だと思うんです。

ですから、やはり、うそかもしれないけどというのが今の現状の理解だと思うんで、振幅スタックで狙っていた断層、ここがひずみがためていると思われるところの物理状態を測るというのは、やはりピン留めを1か所でもいいからしなきゃいけないということで、非常に重要だと思います。

一方で、そのピン留めする場所が実際はどういうふうには振る舞っているのかというのは、これもまたやはり、現状ではぼやっとしか見えてなくて、様々な過程で議論しているというのが現状です。それを何とかしたいということで、南海掘削計画では複数点の孔内観測点で把握しようということをやったり、あとは今、光ファイバーの海底での観測網なんかも、その場所というのは実際はどう振る舞っているのかというのをちゃんと理解しなければ、議論に乗っからないよねというつもりでやっています。

それぞれ、結構実施するものと金のかけ方としては、かなり対極にあるように見えるんですけども、バランス取って両方とも押さえていかないとやはり、統合的な理解ということではできませんし、それに基づかない科学原理とか、その実際のデータに基づかない予測というのはやはり砂上の楼閣だろうと思う次第なので、やはりバランスを取ってやっていく必要があるのではないかと思います。

【川幡主査】 阪口先生、今の3人の先生の答えを聞いて、何かコメント、またありましたらお願いします。

【阪口委員】 いや、そんなこと言ったら身も蓋もなくなりますけど、天気予報みたいに流体の方程式と、それから気体の状態方程式と連立させて解けば、かなりの精度で、あと観測値ですよ、逐次アップデートするための気象観測のデータをアップデートすることによってかなり高精度にできるという状況からはまだ程遠いということを今、お三方には言っていたしましたが、最後荒木さんが言われたように、とはいえ全部が仮説だから、1個ぐらい

ちゃんとピン留めして一つを仮説を仮説でなくしていくために掘削のデータは必要であるという、非常に重要なこと、それから小原さんも言われたように、やはり観測、それから測地学データから追い詰めていくというその努力がなくしては何も前に進まないで、ぜひそういうところをくみ上げて応援していくべきだなというのがよく分かりました。ありがとうございました。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。

では鈴木先生。

【鈴木委員】 今日いろんな方がお話しされている中でも、やはり理論だったり物質だったり、さらには資金的なもの、国際協力的なものってすごく多角的なものが必要だなと思います。JAXAでは、「はやぶさ2」などのプロジェクトに都度都度プロマネみたいな方がいて、おのおのサイエンス、技術でリーダーがいて、それを運用していくシステムがしっかりできているんです。この掘削のこういった地震に関してはそういった、例えばこういった次世代リーダーがいるとかそういうリーダー的なもの、存在というのは、すごく重要なんじゃないかと。統合的に考えていく及び物事を真っ当に動かしていくのに重要なんじゃないかというふうに思っているんですけども、その辺りいかがでしょうか。

【川幡主査】 JAMSTECの倉本理事、お願いします。

【倉本理事】 JAMSTECの倉本です。今日はオブザーバー参加させていただいております。

南海掘削のマネジメントは、JAMSTEC、J-DESCという国内の研究者の方々とのすり合わせに加えて、IODPという国際計画の中で進めてまいりました。IODPは、ボトムアップの提案をいただいて、それを掘削計画に落とし込んで実施するということをしております。その間、全体のマネジメントとしては、若干いろんな反省はもちろんですけれども、プロジェクトチームをつくりまして、研究成果を最大にするための掘削計画の改定等々しながらやっていくという方法でやってまいりました。

それで、まさに、どこまで掘ったり、どういうサンプルを取ったり、あるいは途中でどういう観測を入れていくか。最終的にオブザーバトリーでしたら、オブザーバトリーの中で重要な観測項目を入れる、それを入れやすいような形にし、つくり込むというところまで国際計画の中でやってまいりました。

荒木さんに説明していただいたオブザーバトリーもその中での一つでありまして、実際には荒木さんを中心に設計していただき、一部は海外の研究者が持ち込んだ観測機も含まれて、それを最終的にJAMSTECからDONETにつなぎ込むというところをして、データ配信にするとい

うところまで行っております。そうした国内と国際の融合をしながらやってきたという計画であります。

以上です。

【鈴木委員】 分かりました。何となく、宇宙だと割とリーダーの顔が見えるところが、よくよく考えれば掘削ではあまり見えてなかったかなという気がちょっとしたので。でも、なかなか合議制では難しい部分もあるかなというふうに思っておりましたので、意見として言わせていただきました。

【川幡主査】 この件は、次回か何かに、結構重要だと思いますので、マネジメントに関わるところで何かまた議論できればと、そのように思いますので、取っておきます。それでよろしいでしょうか、鈴木先生。

【鈴木委員】 ありがとうございます。

【川幡主査】 今日せっかく火山のお話もしていただいたんですけど、トンガで噴火して、あの後、研究分野の中で雰囲気が変わったとか何かありますか、金子先生。

【金子教授】 あまりないんじゃないですかね。

インパクトがあったのは、トンガは遠かったんですけど、やはり福徳岡ノ場は非常にインパクトがありますね。トンガに関して言うと、恐らくはピナツボぐらいの噴火な感じがしたんですけど、雰囲気としては、最近、海域の噴火というのが非常に多くなって、我々、そのことについて、陸上の噴火に比べるとあまりまだ知らないもので、そういうことを一つ、やはり今後やっていかなきゃならないというような雰囲気は出てきているのかなというのは思いますけど。

【川幡主査】 日本で起こったらやはり大変なことになっちゃうからね。

【金子教授】 そうですね。それでまた、津波なんかの問題もあるので、なおかつ、海底の噴火で何が起こるかというのはやはりかなりまだ未知数な部分があるので、ぜひそういう研究というのは続けていかなきゃならないと思っています。

【川幡主査】 窪川先生。

【窪川委員】 私、まさに委員長と同じことを聞きたかったのです。今回火山のお話、また前回の巽先生のお話があって、日本は地震大国ですけども、海底火山大国でもあるんですよね。

【金子教授】 そうですね。

【窪川委員】 結構それは見過ごされていて、やはり身近ではないというところがあるの

で、トンガの場合にも津波のおそれとか、あるいは軽石で着目されましたけれども、やはり遠い存在になる。火山研究で掘削はやはり、なかなか大変というか、できない場合というか、やりたいのだけれどもというところはあるのでしょうか。

【金子教授】　そうですね。恐らく海域の火山ですごく甚大な被害が出る場合というのは、相当でかい場合になりますよね。相当大きな噴火の場合になって、そうすると非常にやはり頻度としては下がるので、やはりそこだけ見ていると、ついつい後回しになってしまう傾向あるかもしれませんが、いざ起こったときは非常に大変な甚大な被害が出るというのは間違いないので、それは恐らく異さんなんかよく言われていることだと思いますけど。

そういう点で、割とある程度定期的に起こる地震なんかに比べると、ちょっと後回しにされるのかなというふうに思いますが。しかしながら、非常に大きな噴火を起こす、例えば今私たちがやっている鬼界なんかは、ほんの縄文人のいた時代に大変な噴火を起こして被害を出したと考えられますので、やはりそういう、海底の噴火が何が起こるかというのは、今後、ちゃんと腰を据えて研究していかなくちゃならないと思っております。

【窪川委員】　多分1つの海底火山だけではなく、やはり連続しているところも調べなくてはいけないという研究の方向も当然、先生方の重要なところでしょうか。

【金子教授】　連続してというのはどういう。

【窪川委員】　火山が連なっているといいますか。一火山だけを掘削して調べるというよりも、幾つかの火山を掘削して、比較研究をするということです。

【金子教授】　それはそうなんでしょうね。だから、限られたバジェットの中で最も重要なのは何かということが非常に選ぶのが難しいところですね。とはいえ、やはり火山は幾つかタイプがあると思いますので、そういうところで非常に代表的な部分を選んで調査研究を進めていくということだと思います。

【窪川委員】　ありがとうございました。

【川幡主査】　巽先生、コメントをお願いします。

【巽委員】　巽です。よろしいでしょうか。今の御質問に少し答えたいと思うんですが、もちろん海底の火山ということに注目する最大の理由は、陸上の火山よりも海底の火山のほうがいろんな意味で地下を見やすいということがあります。例えば地震波を使って、地下のマグマだまりが存在しているのかどうかということを調べようとした場合、陸上ではほとんど、人口が稠密なので、それは不可能なわけですね。そういうところで総合的に地震のデータ、電磁気のデータ、それから掘削のデータと全てを合わせて研究できるのは、海域の火山のほ

うがずっと優れているという利点があります。

もう一つ重要なことは、皆さん恐らく、大きな噴火が起こるときには、地下にあるマグマだまりからマグマがいっぱい出てきてどかんと噴くと思っていらっしゃると思うんですが、そのマグマだまりが実際地下に存在しているかどうかということを可視化した例は世界中に存在しません。いまだにまだそういう科学的な状況です。ですから、今我々が本当にしないといけないのは、そういうものをきちっと可視化して、それを連続的にモニタリングして、いろんな噴出物の調査と併せて総合的な火山像をつくっていくことだと思います。

ですから、先ほど窪川先生がおっしゃった、幾つか連続している火山にはもちろん注目したいわけですが、最も重要かつ、これからの防災・減災ということに関して重要であるのは、大きな噴火、明らかに日本全体に影響を及ぼすような、もしくは世界全体に影響を及ぼすような巨大噴火に対して、火山のイメージを我々がまずきちっと持てて、それに対してどういうふうな観測をすれば予兆を捉えることができるかということをはっきりとすることだと思います。そういう意味で、海域火山に対する掘削を含めた総合研究は非常に重要である、かつ、これは世界的に見て日本がやるべき仕事だというふうに思います。

以上です。

【窪川委員】 ありがとうございました。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。

ほかに質問、コメントありますか。では、阪口先生、お願いします。

【阪口委員】 巽さんに質問なんですけども、今の三段論法の理屈は割と通るとは思うんですけども、それをいろんな人が言って、資源が細分化されて、どれも前に進まなくなるということも一つの現状だと思うんです。さっきの南海トラフ大事だぜって言って、海域火山大事だぜって言って、別の人は、SIPでちゅちゅっと吸い上げるのが大事なはずって、いろんな人がいろんなことを言うわけじゃないですか。

その状況をどうやって打破して、きちんと国家プロジェクトとして、掘削をしたことによって科学が進み、国民に還元するという状況をつくるためには我々という関係者が何をしなければいけないとお考えでしょうか。質問の意味は分かりますよね。

【巽委員】 もちろん分かりますよ。それはお答えするのはどれほど難しいかということもお気づきになった上での質問だと思いますけど。

【阪口委員】 でも本質的じゃないですか。

【巽委員】 でも3つのうちの1つ選ぶという問題ではきっとないと思います。まず、

我々がしないといけないのは、我々が暮らしているこの日本列島というところがどういうふうな世界的な中で特異なところにあるのかということを理解することであって、そのことの中に、幾つかの要素、今おっしゃったような、地震が起こったり、火山の巨大噴火が起きたり、資源があったりというようなものがあって、それぞれはお互いに関連した事象に伴って起きていることであるという認識を多くの方はまず持つことだと思います。

その中で、できるだけ、例えばその3つに関して共通するような事項について、まず戦略的に物事を進めていくということが必要なんだろうと思います。その3つでけんかしても意味がありませんので。その辺りを例えば国として、もしくはJAMSTECが、国の中の海の研究機関として、この辺りを重点項目と設定して、それを3つを包括的に理解する策を講じていくということを宣言することだと思います。

以上です。

【川幡主査】 阪口先生、どうでしょうか。

【阪口委員】 絶句はしてないんですけども、うまいこと言い逃れたなって感じはするものの、果たして解になっているのかというのもちょっと疑問です。これはみんなで考えることだと思いますので、ぜひぜひまた最後のほうでも、総括の総括をやるようなところでも扱っていただければと思います。

【川幡主査】 SIPのほうも地層貯留のほうも、科学掘削とちょっとまた別の側面もありますので、全体として資金を確保しながらできる限りやると、そんな感じの議論も含めて、次回かその次ですか、そのときにもうちょっと深く議論できたらと思います。それでいいですか。議事録にちゃんと書いておきますので、やります。

【阪口委員】 よろしくをお願いします。

【川幡主査】 では、ちょっと時間延びしていますけれども、この辺でちょっと休憩に入りたいと思います。その休憩の前にちょっとアナウンスがありますので。

それでは、次の議題に入る前に10分間の休憩を取りたいと思います。

次の議題は、2024年以降を見据えた国際動向についてとしまして、前回非公開部分で事務局から国際動向を御説明いただいたものの続きとなります。先日、米国出張してこられた事務局から、国際動向についてアップデート情報を御説明いただき、前回の報告も併せて意見交換を行いたいと思います。前回確認したとおり、国際動向については、今まさに議論中で、相手国との関係に支障を来さぬよう、今回も非公開といたします。ただし、補足説明者として、一緒に出張されていたJAMSTECの関係者には同席いただければと思っています。

では、委員の皆様は休憩していただき、事務局は非公開とする準備をお願いします。

今、16時15分なので16時25分開始としたいと思います。よろしくお願いいたします。

【事務局】 事務局でございます。

次の議事より非公開となりますため、傍聴者の皆様はここで御退出いただきますようお願いいたします。少し時間を置いた後にまだ接続されている方がおられた場合、こちらから強制的に退出させていただきますので、あらかじめ御了承ください。

事務局からは以上でございます。

【川幡主査】 では、10分休憩、お願いします。

<議題2（非公開）>

【川幡主査】 というわけで、今日はどうもありがとうございました。

【事務局】 最後に事務局からでございます。本日はお忙しいところ長時間にわたりまして、ありがとうございました。

本日の議事録につきましては、これまでと同様、案を作成しましたら、委員の皆様にもメールで御確認をお願いしたいと思いますので、よろしくお願いいたします。

また、次回日程につきましては、7月4日の9時半から12時半を予定しております。どうぞよろしくお願いいたします。

以上でございます。

【川幡主査】 どうもありがとうございました。では、次回まで元気に暮らしてください。今日はありがとうございました。

— 了 —

海洋科学掘削委員会

海洋科学掘削に係る現状と課題

令和4年7月



国立研究開発法人

海洋研究開発機構

I. 「ちきゅう」

1. 海溝型巨大地震発生帯掘削に関する現状と課題

(1) 南海トラフ地震発生帯掘削計画(NanTroSEIZE)の現状

- ①南海トラフ地震発生帯掘削計画の目標
- ②ステージ3達成にむけたEXP358の実施

(2) 技術的課題と対策

- ①南海トラフ地震発生帯掘削の技術的課題
- ②これまでの結果を踏まえた技術的改善策

(3) プロジェクトマネジメントの課題と対策

- ①EXP358におけるマネジメント
- ②プロジェクトマネジメントの進め方

2. マントル掘削に関する現状と課題

(1) マントル掘削の現状

- ①当初目標
- ②現状

(2) 技術的課題 「マントル掘削技術検証委員会報告」より

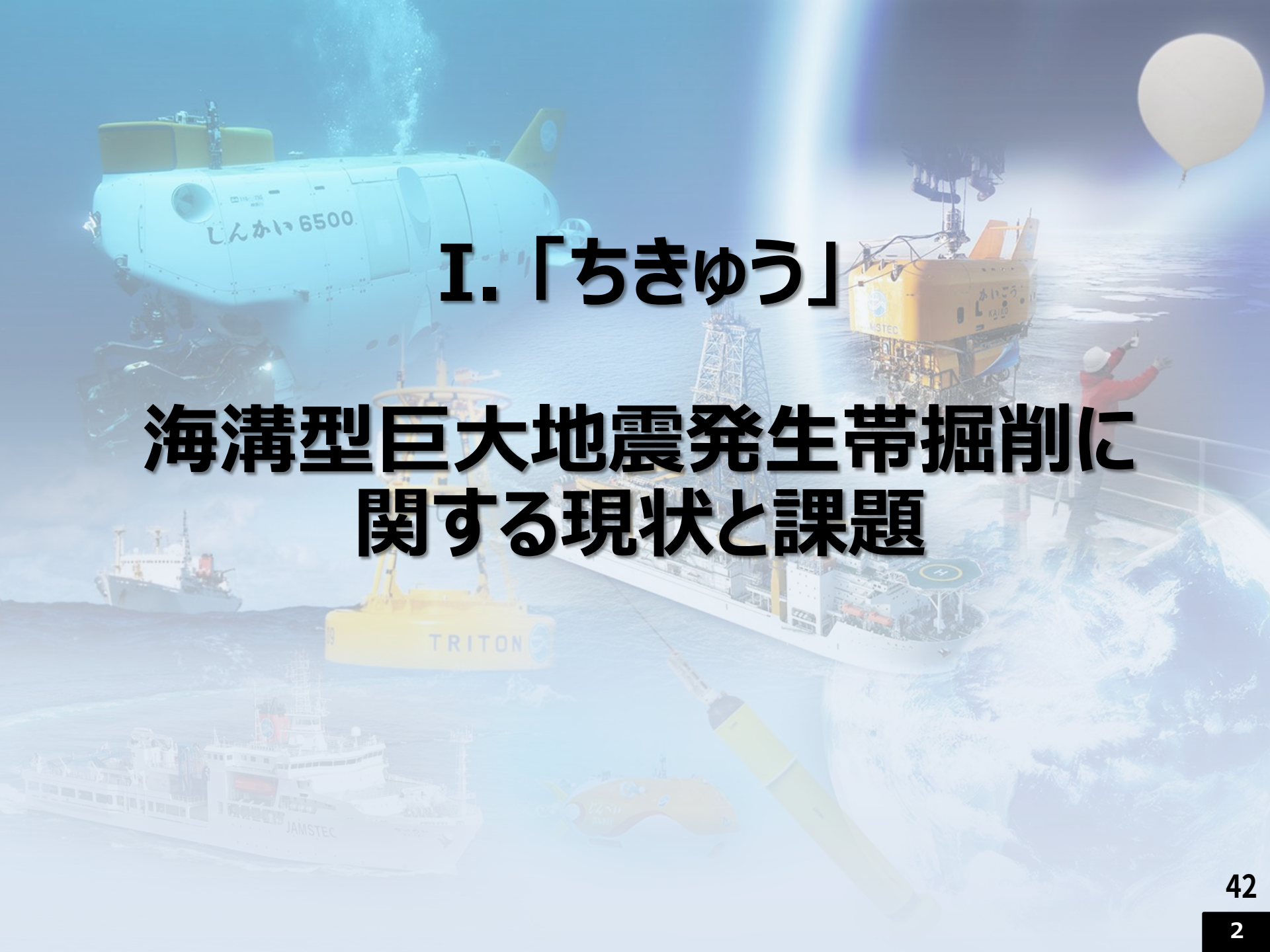
3. 今後の「ちきゅう」を用いた海洋掘削について

- (1) これまでの掘削に要した経費
- (2) 貢献を期待されている掘削
- (3) 今後の「ちきゅう」を用いた海洋掘削について

II. 「かいめい」

1. 「かいめい」の掘削関連設備に関する状況

- (1) 「かいめい」掘削関連設備 (BMS・GPC)
- (2) BMS・GPCの使用実績
- (3) BMS・GPCの技術的状況等



I. 「ちきゅう」

海溝型巨大地震発生帯掘削に関する現状と課題

(1) ①南海トラフ地震発生帯掘削計画の目標

南海トラフ地震発生帯の掘削実施計画は、科学掘削提案に基づき、その実施の効率性や科学的な手順を勘案し、4つのステージから構成されている。

ステージ	概要	掘削航海（実施年）	現在の状況
1	巨大分岐断層浅部やプレート境界断層浅部（海溝軸付近）を掘削し、地質学的特徴や過去の変動の歴史、現在の応力状態などを把握する。	Exp. 314, 315, 316 (2007-2008)	【完了】付加体先端部の掘削による地震性破壊の証拠発見。東南海地震の津波断層の発見。
2	巨大地震を繰り返し起こしていると考えられる断層（巨大地震発生帯）の直上浅部の地層を掘削し、その地質学的特徴を把握するとともに、掘削孔内に観測装置を設置して巨大地震発生に起因する地殻変動などを観測する。また、プレート沈み込みにより将来巨大地震発生帯に持ち込まれる海底堆積物を掘削し、その地質学的特徴を把握する。	Exp. 319, 322 (2009) Exp. 332 (2010) Exp. 333 (2010-2011) Exp. 365 (2016) Exp. 380 (2018)	【完了】初のライザー掘削。沈み込み初期堆積物と基盤岩の連続コア採取。海底地すべりの痕跡のコア採取。C0002, C0006, C0010で長期孔内観測装置設置。
3	超深度掘削（水深約1,900m、海底下約5,200m付近の巨大分岐断層及びプレート境界断層の接合部）を行い、巨大地震発生帯の地質学的特徴を把握する。	Exp. 326 (2010) Exp. 338 (2012-2013) Exp. 348 (2013-2014) Exp. 358 (2018-2019)	【未達成】C2孔口装置の設置(2010)。ライザー掘削により3航海で2005.5m (2013)、3058.5m (2014)、3262.5m (2019)まで掘進。検層データにより深部での応力を推定。目標深度には未到達。
4	超深度掘削孔に地震断層やその周辺の地層の微小な変動を捉える長期孔内観測装置を設置する。将来的に地震・津波観測監視システム（DONET）と接続し、地震掘削孔に地震断層やその周辺の地層の微小な変動を捉える長期孔内観測装置発生現場からリアルタイムでデータを取得する観測網の構築を行う。	未実施	【一部着手】DONETとの接続はステージ2で断層直上浅部に設置した観測装置で実施済

(1) ② ステージ3 達成にむけたEXP358の実施

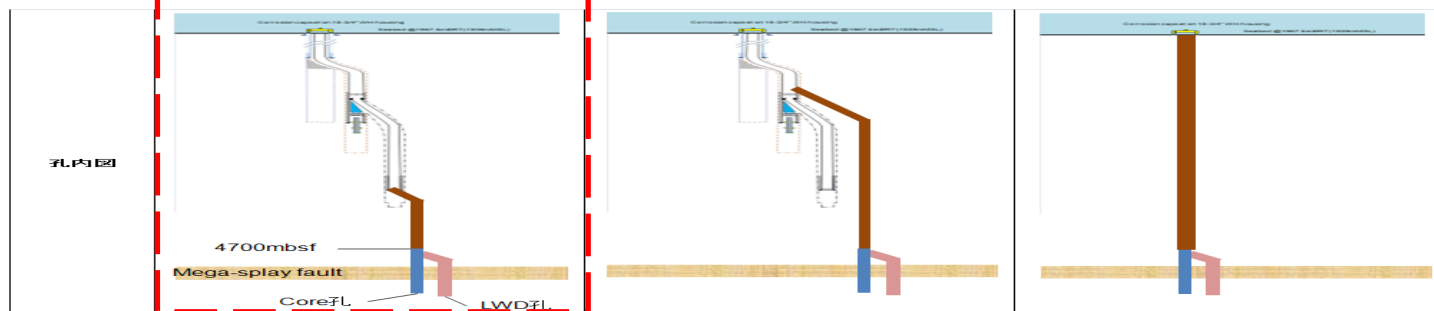
EXP358に向けた流れ

- EXP348の後、CDEX（地球深部探査センター 平成30年度まで「ちきゅう」運用を所掌）にて3つの掘削案を策定し、海洋開発分科会 深海掘削委員会第14回（平成26年6月）に報告。
- 同年8月の海洋開発分科会からの提言を受け、引き続き掘削計画を検討。外部委員会の助言や研究者意見、予算状況など擦り合わせ、ケースA案をベースとした計画をCDEXで策定。ちきゅうIODP運用委員会（CIB）の支持を経て、最終的にJAMSTEC理事会で計画が承認された。

EXP358の実施

- C0002地点にて超深度ライザー掘削を実施（2018年10月7日～2019年3月31日）
- 目標：海底下5,200mまで掘り抜いて、プレート境界断層の試料採取と物性解明を目指す
= 南海トラフ地震発生帯掘削計画ステージ3の達成を目指す
- 結果：掘削編成を変える度にもとの掘削孔に戻れない等の状況が発生し、目標深度への到達を断念
代替サイト（予備計画）として予め検討していた、科学成果補完・補強のためのライザーレス掘削を2地点で実施

ケース	A	B		C	
作業	Drilling below 11-3/4"Liner	Sidetrack from 13-3/8"CSG		New hole	
最終孔径	6"	6"		8-1/2"	
最大ケーシング枚数	4	5		8	
ケーシングデザインの自由度	低	中		高	
作業リスク	高	中		低	
日数(日)	230	1 航海の場合 260	2 航海の場合 293	1 航海の場合 319	2 航海の場合 335



3つの掘削案（平成26年8月地球深部探査船「ちきゅう」による南海トラフ地震発生帯掘削計画の進め方に関する提言より）

(2)① 南海トラフ地震発生帯掘削の技術的課題

●掘削環境

これまでの委員会で述べられたとおり、南海トラフの掘削には、強海流や、台風・寒冷前線の通過といった、厳しい環境がある。

事例：EXP326：渦励振によるケーシング（保護パイプ）の脱落事故
EXP338：強海流と寒冷前線通過のために定点保持能力を失い、1.3km流される（フォースオフ）

※事故回避の対策を実装済だが、悪条件でも掘削をずっと継続出来るわけではなく、状況が厳しくなった際の事故回避／避難による不稼働時間の発生は防げない。

●地層崩壊

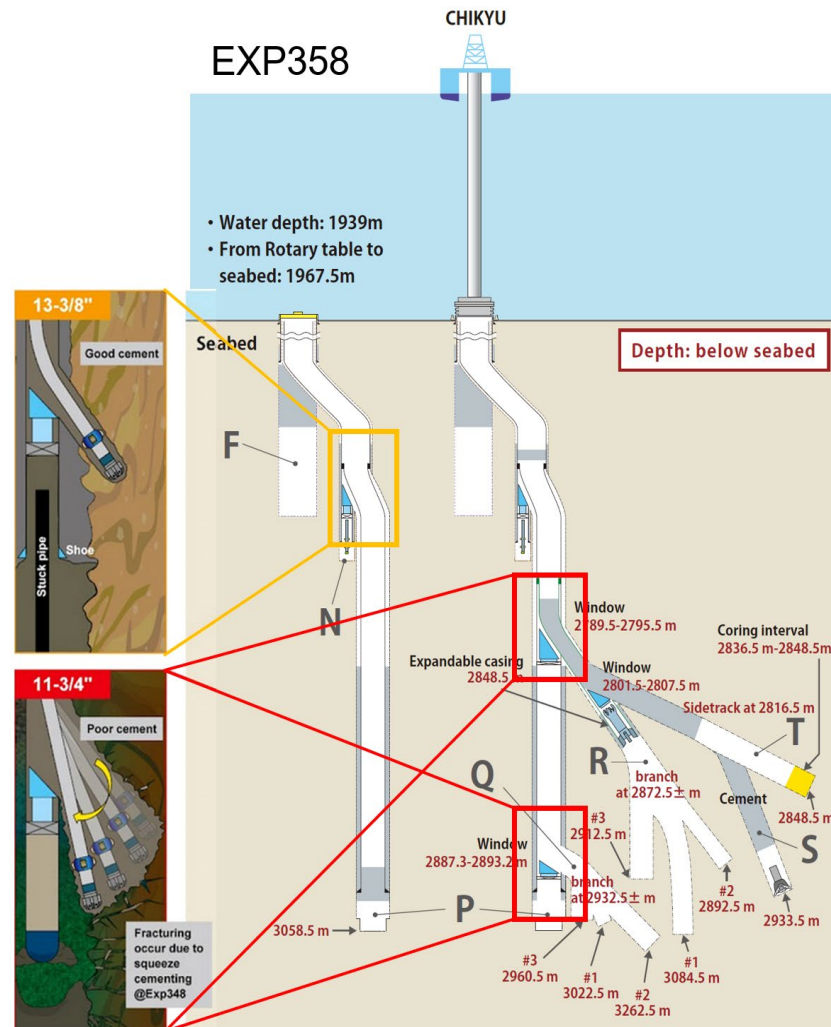
地層傾斜が60-90度であるために崩壊が起きやすく、また掘削時に安定しない、地層の激しい変形（褶曲）や、断裂（断層）を伴う複雑な地質構造をしている。

事例：EXP348

- 1000m以上掘進後に地層崩壊が発生
- 崩壊により掘削した坑内にアクセスできなくなる
- ケーシングを掘削長より短くしか設置できない
- ケーシングの下に数百メートルの崩壊層ができる
- ケーシング下の崩壊層ではなく、横穴を開けて新しい地層に掘り込んだ（EXP348では実施出来た）が、ある程度掘削すると孔内状況が悪化

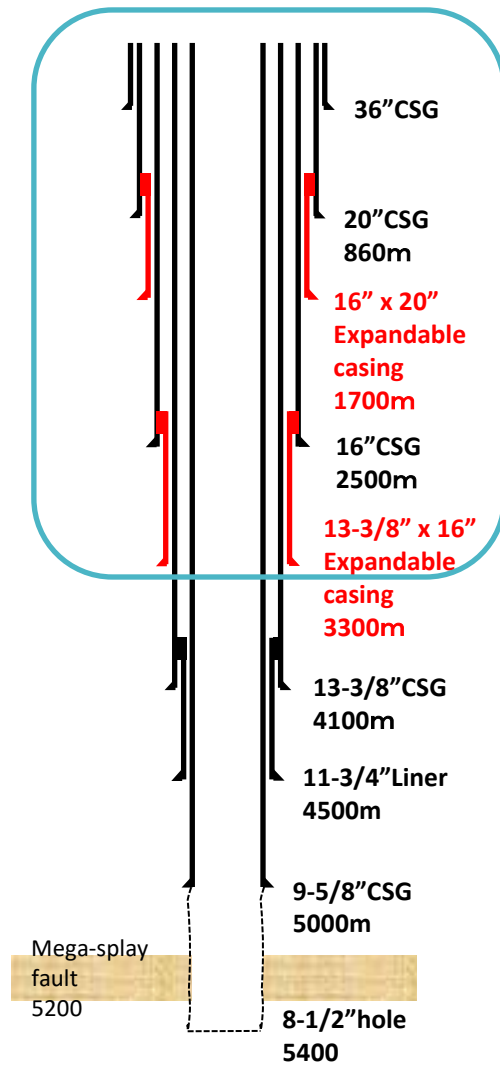
EXP358

- 地層崩壊に対しシーラント（地層の割れ目の目止め）等対策を用意
- しかし、これまでの掘削によるケーシング周りの地層のダメージが大きく、横穴を開け掘削するとすぐ崩壊。穴変わりが発生
- 孔内の不安定な状況や、細かく破碎された粘土状の地層が掘削ビットへ張りつくことにより、掘進率（スピード）も上がらなかったと推定される



(2) ② これまでの結果を踏まえた技術的改善策

- 複雑な地層構造を伴う大深度掘削では、地層崩壊は大きな課題
- 一方、これまでの掘削結果から、急傾斜や変形のある地層に対し掘削するにあたっての知見も得られている
- 例えば地震発生帯掘削においては、既存技術・設備を用いた下記等の対策の実施が考えられる
 - ・ケーシング枚数増により各セクションを短くし、崩壊リスクを抑制
 - ・崩壊リスク軽減効果を発揮する施策の実施
例：地層への泥水の浸透軽減、孔内圧力の一定化、地層崩壊のモニタリング等
 - ・蓄積ダメージのない海底面からの掘削
 - ・サイドトラック(横穴からの掘削)による掘削トルク等問題の回避
- これらは同じような構造を伴う他の掘削でも活用可能



EXP358のプロジェクト管理に関して、JAMSTECでは理事長の指示により、「IODP 第358 次研究航海「南海トラフ地震発生帯掘削計画」プロジェクト管理に関する外部評価・助言委員会」（以下、「委員会」という）を設置。令和元年8月～11月にかけて外部評価と助言を受けた。

○委員会では、南海トラフ地震発生帯掘削の必要性、これまでのC0002地点における掘削経緯、EXP358の計画立案、掘削作業の経過、オペレーション中の情報共有と意思決定について、CDEX職員へのアンケートや幹部へのヒアリングを実施



職員のアンケート結果、担当理事、幹部職員からのヒアリングを踏まえ、委員会の議論において、以下の点が抽出された。

- ① マネジメント体制の不備
- ② 予算構造上の制約
- ③ 人材の不足

委員会議論の要約

① マネジメント体制の不備

- ・全体としてJAMSTEC 内において誰がどういった責任をもって意思決定しているかが曖昧であった。
- ・重要な決定についても、どのような事象に関して役員に判断を仰ぐ必要があるかということが明確化されていなかった。

- ・科学目的を加味した計画立案から安全検討、財源の獲得、予算管理まで全て現場部門であるCDEXが行っている。
- ・CDEX以外の部署や立場から、掘削計画に対するレビューや審査を行う体制が無かった。

- ・プロジェクトの明確な定義がなされていない。
- ・Exp.358 は予算規模も大きく挑戦的な掘削を実施することから、プロジェクトとして認識し、適切な体制を事前に構築して実施することが望ましかった。
- ・JAMSTECの意思決定に対し、外部委員会からの意見等をどのように反映させるかが事前に明確になっていなかった。

② 予算構造上の制約

- ・文科省及びJAMSTECが国際的にコミットした科学掘削計画に対して、国からの十分な予算措置がされず、CDEXが財源確保を強いられる予算構造は計画立案にあたり大きな制約であった。
- ・中期計画を跨がっての予算繰越が認められない制約を克服することは重要な役割であった。

③ 人材不足

- ・掘削技術者の多くを出向者に頼っており、その結果技術や知識が限られた個人にのみ蓄積され、技術の継承に支障をきたす可能性がある

前述の議論に基づき、今後に向け委員会より下記の助言を受けた

- ・「ちきゅう」の科学掘削を、明確に定義された「プロジェクト」と位置付ける。
- ・プロジェクト遂行にあたり、意思決定レベル、意思決定に使用するフォーマット、報告方法・時期などを明確にする。
- ・科学目標、技術リスク、マネジメントリスク、コスト評価、スケジュール管理などを事前に十分検討する。
- ・JAMSTECの意思決定に外部委員会の意見をどのように用いるのかを明確にする。
- ・推定されるコストやリスクに対して、プロジェクトの実施が妥当か否かを、現場部門以外の立場から客観的に評価する体制を構築する。
- ・プロジェクト実施中にはマイルストーン審査を実施し、現場部門以外の他部署の立場や意見も踏まえて、役員によるプロジェクトの中断、中止といった計画変更判断が行える体制を構築する。

上記のとおり、意思決定レベルや方法を明確にし、また現場部門以外の評価体制を構築・マイルストーン毎の審査をすること等により、前のめりにならず、適切な撤退判断等も含めた、客観的な意思決定が行える体制を構築することが不可欠と認識している。



マントル掘削に関する現状と課題

深海地球ドリリング計画評価報告書（平成10年12月）

・急激な気候変動や地震の解明、地殻内生命や新たな資源の探求のため、世界最高の深海掘削能力を持つ“地球深部探査船”を開発し、創造的な地球科学と生命科学を推進する。具体的には、海底を掘ることによって、（中略）、人類未踏のマントルに到達し、地殻深部のダイナミクスを解明する。

深海地球ドリリング計画中間評価報告書（平成18年2月）

・（前略）さらに、科学者のニーズに応え、海洋底を掘削して、地殻とマントルとの境界（モホロヴィチッチ不連続面）を貫くため、「ちきゅう」の試験運用及び国際運用を通じて、機器開発及び運用技術の検討を行っていくことで、水深4,000メートル級での大深度掘削の世界に先駆けての実現に向けて取り組むべきである。

・海洋地殻全体の組成及び構造の解明並びに固体地球の80パーセントを占めるマントルの特性を把握することは、地球の進化を理解するために不可欠であり、地球深部探査船を用いて海底下7,000メートルのマントルまでの到達を目指す。

(1) マントル掘削の現状 ②現状

【サイエンス面】

- ・令和3年9月9日付でJ-DESCからJAMSTECに提出された要望書においては「今後の掘削科学の重要項目の背景と実績、そして今後の要望」として、①プレート沈み込みの研究、②火山噴火の研究、③気候変動の研究、④夢のある海底下生命・物質科学の研究、⑤船舶運用・掘削関係技術の高度化、以上の5項目が挙げられており、このうち④において、海洋地殻を貫通しマントルまでのサンプルリターンを実現し、人類・生命と地球の共生社会の創造に貢献すること、に触れられている。
- ・令和2年10月には、マントル到達へ向けたパイロット孔と位置づけた海底下約2,500mまでのライザーレス掘削プロポーザル（※）が、IODPに提出され、またマントル到達を目標とする本孔掘削については、科学コミュニティでその立案・実現に向けた段階的な議論が継続している。

※「ハワイ沖海洋地殻掘削プロジェクト（Drilling Middle Aged Oceanic Crust on North Arch off Hawaii: Umino et al., 951-Full）」

【技術面】

- ・地球深部探査船「ちきゅう」は建造当時から、象徴的なターゲットとして、マントル掘削を将来的に目指す目標として位置付け、それに向けた技術開発も同時に進めてきた（建造当時はマントル掘削に必要な仕様を満たしていない）が、これまで進めてきた大水深・大深度掘削技術開発が一部を除き実用化できていない状況。
- ・このため、第3者である有識者を委員とした、「ちきゅう」によるマントル掘削技術にかかる検証委員会（マントル掘削技術検証委員会）を設置し、令和3年9月以来6回にわたって大水深・大深度掘削技術開発の現状を検証し、マントル掘削を行う際に必要となる技術について客観的な検討結果を取りまとめた。

マントル掘削技術検証委員会では、マントル掘削に活用するためにJAMSTECが実施してきた掘削技術開発を以下の通り分類し、それぞれに対して検証を行った。

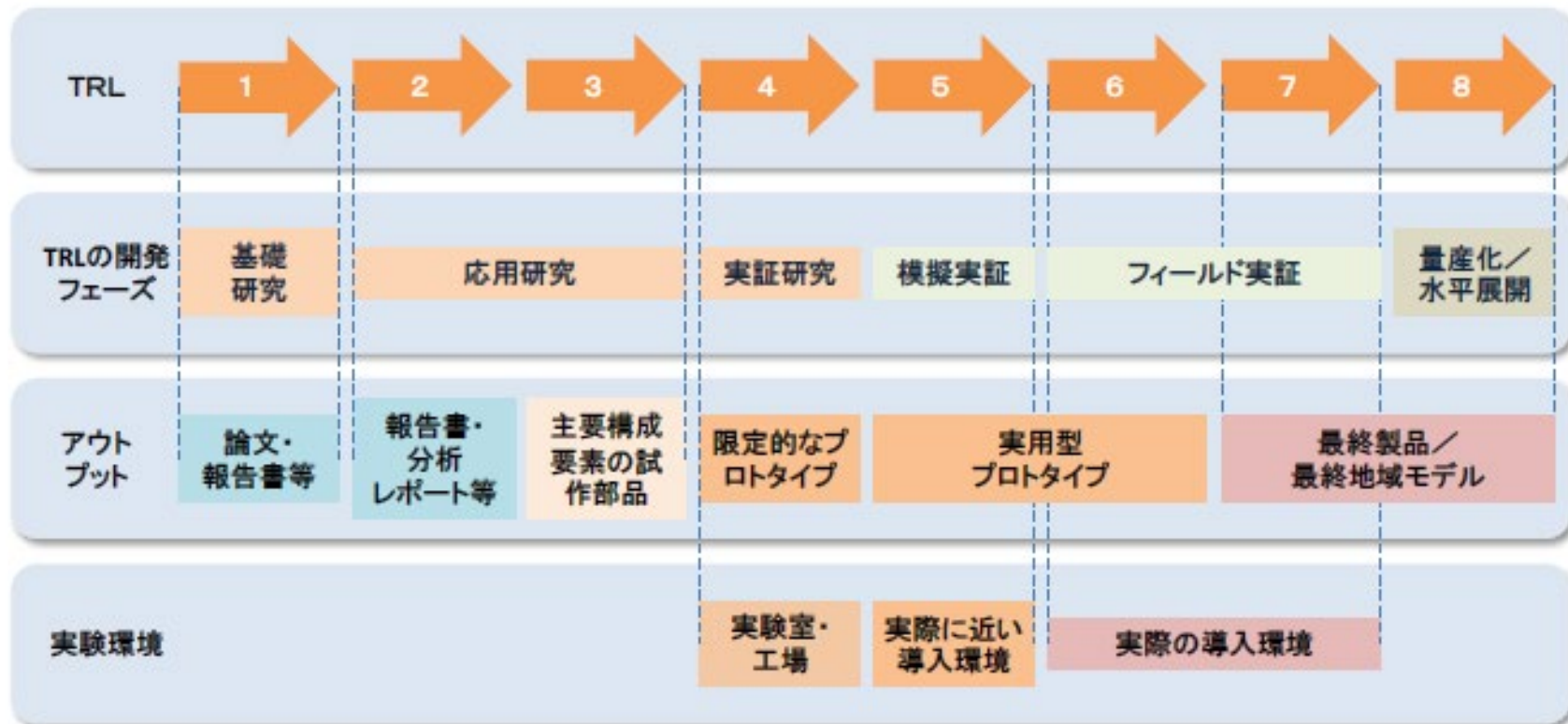
- (1) 掘削予定地点の水深が深いこと、への対応
- (2) 掘削予定深度が深いこと、への対応
- (3) 掘削予定深度（モホ面近傍）が高温であること、への対応
- (4) 掘削候補地点の詳細地質（特に物性）が不明であること、への対応
- (5) (1)～(4)以外の開発項目

ただし、(5)はマントル掘削に必須ではないため説明は割愛する。

(参考)

各技術の開発の状況については、客観的な物差しで技術成熟度の評価を行うため、NASAが提唱し定義した技術成熟度（Technology readiness levels;TRL）を用いて検証を実施した。

なお、本検証においては、環境省が公表したものを採用している。



TRL表まとめ

達成
未達成

(1)大水深					(2)大深度					(3)高温		(4)詳細地質が不明	
軽量ライザー (CFRP)		軽量ライザー (チタン合金/ アルミ合金)		小径ライザー		12,000m ドリルパイプ		8,000m超級 ドリルパイプ		高温用泥水		タービン方式 (硬岩用コアリング システム)	
TRL8		TRL8		TRL8	2022 ↑	TRL8	2022 ↑	TRL8	2018 ↑	TRL8	2018 ↑	TRL8	2022 ↑
TRL7		TRL7		TRL7		TRL7		TRL7		TRL7			
TRL6		TRL6		TRL6		TRL6		TRL6		TRL6			
TRL5		TRL5		TRL5		TRL5		TRL5		TRL5			
TRL4	2019 ↑	TRL4		TRL4		TRL4		TRL4		TRL4		TRL4	
TRL3		TRL3		TRL3		TRL3		TRL3		TRL3			
TRL2		TRL2		TRL2		TRL2		TRL2		TRL2			
TRL1		TRL1		TRL1		TRL1		TRL1		TRL1			
	2013		2008		2018		2007		2009		2016		2007
○CFRPの有効性を確認 ✕メーカー撤退 ✕業界の協力見込めず		✕技術的に高難易度 ✕材料費が高い		○SIPで実証中 ○市場に製品有 ✕ウェルコントロールを要検討 △ケーシングの枚数を要確認		○近年市場に製品が確認された △「ちきゅう」での運用や掘削への適用可能性を要検討		○ライザーレス掘削で実作業を実施済 ✕長さが不足(12,000m必要)		○市場に製品有		○方式は完成 ○硬軟互層で実試料採取に成功 ✕要耐久性の確認	
補助管の軽量化、浮力体システムの導入、BOPの必要耐圧の低下等の検討を優先的に進め、既存のライザーシステムを活用し4,000m対応を目指す						・実際にマントル掘削に必要な条件を見直し、市場調査によりマントル掘削への適用可能性が示唆されるドリルパイプの活用を優先的に検討する				市販品をベースに運用を検討		振動方式コアリングシステムやビットの開発を中止し、上記に集中して開発	

○委員会の提言総括（抜粋）

- ・ マントル掘削を達成するためにはいくつかの大きな技術的課題があり、特に水深4,000mまで対応可能なライザーシステムと、12,000m級のドリルパイプの開発、以上2つが大きな課題であり、優先的に検討する必要がある。
- ・ このほか、泥水の検討、硬岩用掘削システムの検討等を進めるとともに、一部開発項目を中止し真に必要な技術開発に注力するなど、メリハリをつけた技術開発を行う必要がある。
- ・ なお、これらの課題を乗り越えるためには、相応の準備や開発のための期間と費用が必要となる（例えば、ライザーシステムの大深度化のみに限定してもパートナー企業の開拓から始める必要があり、5～10年を超える期間で、少なくとも60億円程度の開発・調達費用が必要と試算。）。
- ・ さらに、個々の技術的課題への対応に加え、大規模プロジェクトを推進するためにはマイルストーンを設定しステップ・バイ・ステップで進める適切なプロジェクトマネジメントが重要。
- ・ また、これまで誰も到達したことのない大深度掘削孔の状態が不明であることから、代表的な海洋地殻のパイロットホールを掘削することにより、掘削地点の地質や物性、掘削パフォーマンス等を確認しながら進める必要がある。
- ・ こうした結果を踏まえ、「ちきゅう」の船齢、世界的な情勢、JAMSTECをはじめとした国立研究開発法人及び政府全体の科学技術関連予算の状況などを総合的に勘案し、しっかりと検討することを期待する。



今後の「ちきゅう」を用いた 海洋掘削について

(1) これまでの掘削に要した経費

これまでの掘削に要した経費（運営費交付金）

掘削名称	種別	掘削 地点数	航海日数	最大掘削深度	予算額
下北半島東方沖掘削試験	ライザー	1 地点	約80日	約650m	約21億円
東北地方太平洋沖地震調査掘削	ライザーレス	1 地点	約50日	約850m	約9億円
室戸沖限界生命圏掘削調査	ライザーレス	1 地点	約70日	約1,200m	約12億円
南海トラフ地震発生帯掘削計画	ライザーレス	16地点	約550日	約1,400m	約120億円
南海トラフ地震発生帯掘削計画	ライザー	2 地点	約550日	約3,300m	約140億円
南海トラフゆっくりすべり断層観測監視計画	ライザーレス	3 地点 (予定)	約30日※	約500～ 1,000m	約11億円※

※ 1地点あたりの日数、予算額

掘削に必要なだった技術開発経費（運営費交付金）

強海流下における運用技術（ライザーフェアリング等）、大水深・大深度での掘削技術（特殊環境に対する技術開発や運用技術、軽量ライザーシステム等）、長期孔内観測システム等…計約75億円

【防災への貢献】

本委員会第2回の、科学的視点のご説明において、Post-IODPに向けた新たな科学計画として、下記の提示を頂いている。

海洋科学掘削委員会第2回 資料 2 - 1 我が国における海洋科学掘削の取組について～科学的視点～より抜粋

- プレート沈み込みの研究（地震・津波に対する防災・減災）
- 火山噴火の研究（超巨大噴火への防災）
- 気候変動の研究（現代の脱炭素社会への貢献）
- 夢のある海底下生命・物質科学の研究（人類・生命と地球の共生社会創造）
- 船舶運用・掘削関係技術の高度化（孔内観測を通じた防災）

また、同回の社会的視点（防災・減災）のご説明において、今後の期待として下記の提示を頂いている。

海洋科学掘削委員会第2回 資料 2 - 2 我が国における海洋科学掘削の取組について～社会的視点（防災・減災）～より抜粋

- ① 南海トラフ浅部スロー地震広域リアルタイム観測
- ② 地震発生メカニズムの解明とその貢献
- ③ 巨大地震発生直後の緊急掘削

ご提示のうち、防災・減災の観点では、国の施策（地震調査研究推進本部 第3期総合基本施策）でも「プレート間固着・すべりの状況やスローリップ現象に関するリアルタイムでの観測手法の開発等を目指して地殻変動・地震活動データ等の各種観測データの充実が必要である。」とされており、

JAMSTECでは、既に実績のある、南海トラフにおける比較的浅部の掘削及び孔内観測装置の設置・観測点の面的展開を、令和7年度までに計画している。

【資源への貢献】

●SIP（レアアース・CCS）

我が国の経済（エネルギー）安全保障等の観点から、我が国の資源に関する貢献も「ちきゅう」には期待されており、本委員会の第2回でも、下記等のご説明がされたと理解している。

海洋科学掘削委員会第2回 資料2－3 我が国における海洋科学掘削の取組について～社会的視点（資源）～ 資料から引用（一部改変）

- ・内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期 革新的深海資源調査技術で、「2,000m 以深での深海資源調査技術、回収技術を世界に先駆けて確立・実証するとともに社会実装の明確な見通しを得る」ことを目指している。
- ・その一環として、深海のレアアース泥の生産技術確立を「ちきゅう」を用いて目指している。
- ・SIP第3期に向けて、「6,000m での レアアース泥の生産実証試験及び世界初の大水深掘削技術の開発」や、「玄武岩海山を利用した大規模CO2貯留・固定化技術の基礎調査研究」が提案中。

●メタンハイドレート

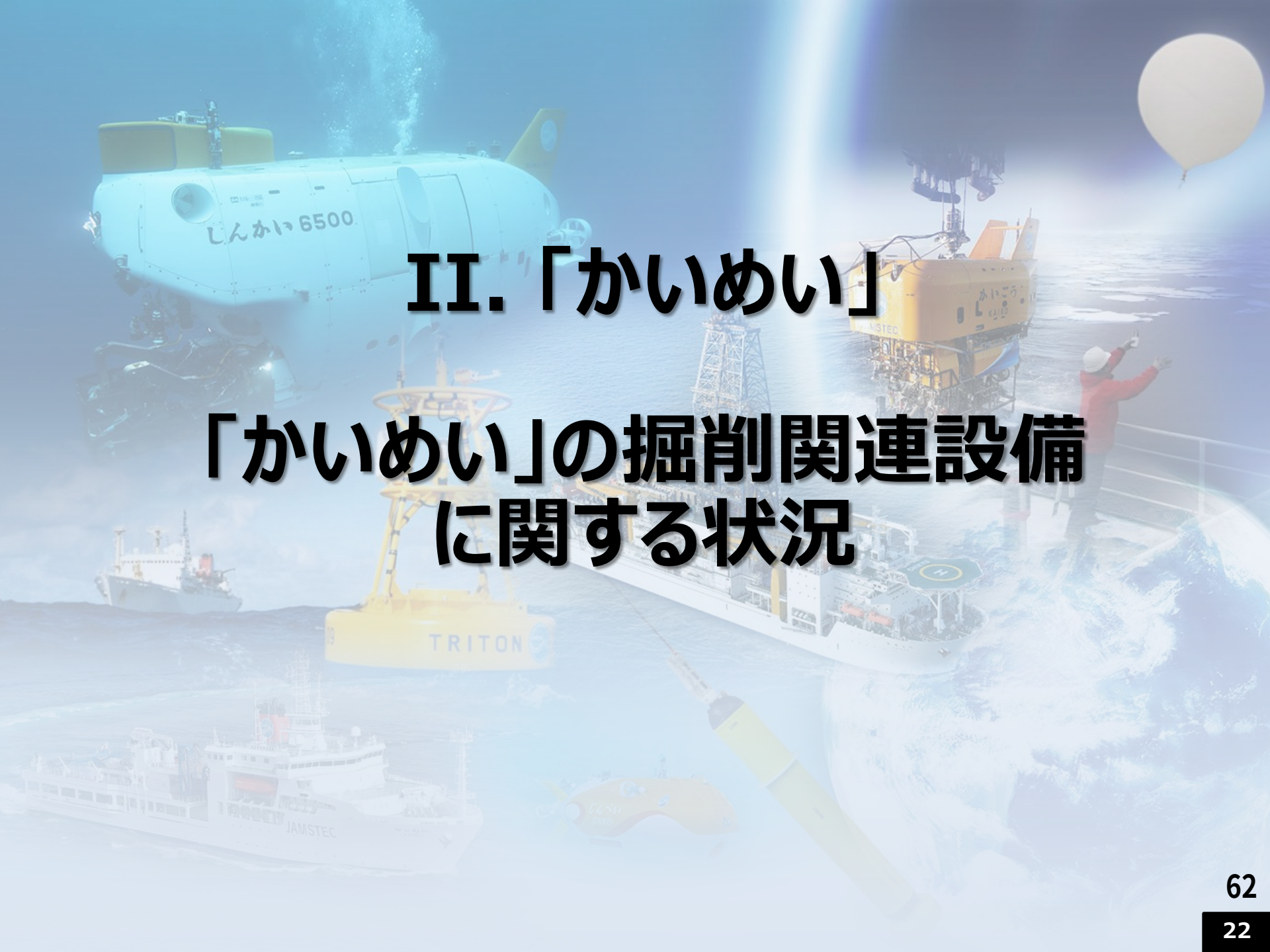
経済産業省では、将来の国産天然ガス資源として期待されているメタンハイドレートの商業的な利用を目指して研究開発を行っている。そのメタンハイドレートの研究開発において、これまで生産試験等で「ちきゅう」が活用されてきた旨を、本委員会の第1回で説明したところ。

**我が国の経済安全保障にとって重要である海洋資源開発に関し、
我が国のファシリティや人材をもって貢献することが求められていると理解している**

- 今後の掘削にあたっては、その科学的・社会的意義と、「ちきゅう」の船齢、予算の状況などを総合的に勘案し、実現可能性を考えていかなければならない。
- 本委員会での、5年～10年を視野とした我が国の海洋科学掘削における今後の方針の議論を踏まえ、行政・科学コミュニティ・産業界などステークホルダーと対話を重ね、科学的・社会的要請を受け、行うべき掘削を現実的に検討する。
- 計画された掘削については、プロジェクトマネジメントを合理的に行い、途中の撤退判断等も含めて、責任をもって適切に実施。また、これまでの教訓を反映し、必要な体制を整備する。

II. 「かいめい」

「かいめい」の掘削関連設備 に関する状況



(1) 「かいめい」掘削関連設備 (BMS・GPC)

●「かいめい」

我が国周辺海域に存在する海洋資源の科学調査など、海洋の広域科学調査を加速させることが期待される研究船。
 様々な用途に用いられるが、海洋科学掘削で重要なコアリングが可能な設備として、下記のBMS・GPCを備えている。



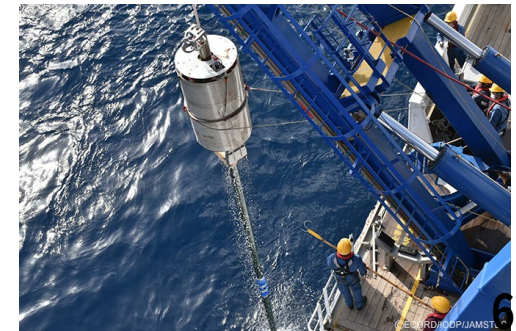
● 海底設置型掘削装置 (BMS)

最大3,000m 水深、海底下60m まで掘削可能な装置。

海底に自重で姿勢が安定する場所に着座させ、船上から遠隔操作を行い掘削する。下記ピストンコアラが比較的柔らかい堆積物等を対象とするのに対し、硬い海底に対応可能。

● ジャイアントピストンコアラー (GPC)

パイプ長40mの大口径コアラー。船上から自由落下させコアを採取する。
 通常のピストンコアラーは最大でパイプ長20m程度であり、ピストンコアリングとしては長大なコアを採取可能。
 それでも掘削船のコアリングシステム (HPCS) より短いものの、表層堆積物を比較的きれいに採取できるメリットがある。



(2) BMS・GPCの使用実績

BMS・GPCを用いた航海一覧

年度	課題名	海域	設備	期間
2017年度	「かいめい」慣熟訓練航海 BMS	相模湾・駿河湾及び南海トラフ北縁部・拓洋海山	BMS	2017/4/29-5/4
	「かいめい」慣熟訓練航海 GPC	南海トラフ	GPC	2017/5/4-5/10
	「かいめい」慣熟訓練航海 BMS	相模湾, 拓洋第2 海山、拓洋第3 海山	BMS	2017/9/13-9/22
	「かいめい」慣熟訓練航海 BMS	東青ヶ島カルデラ・駿河湾	BMS	2017/12/3-12/10
	戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「海洋資源の成因に関する科学的研究」による 南鳥島周辺レアアース泥広域調査およびコバルトリッチクラスト調査	南鳥島周辺及び拓洋第5海山周辺	GPC	2017/12/16-12/29 2018/1/4-1/7
2018年度	戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 海底熱水鉱床調査技術プロトコルの検証	沖縄トラフ	BMS	2018/9/3-10/5
	「国土強靱化に向けた海底広域変動観測」プロジェクト リアルタイム連続地殻変動観測技術の開発・展開	熊野灘	BMS	2018/10/13-10/20
	海底熱水鉱床調査技術プロトコルの検証	沖縄トラフ	BMS	2019/2/1-2/14
2019年度	海底震源断層の高精度広域調査（地震履歴調査）	東北沖太平洋	GPC	2019/5/23-5/31
	戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) レアアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析	南鳥島周辺海域	GPC	2019/6/8-7/3
	「国土強靱化に向けた海底広域変動観測」プロジェクト 連続リアルタイム地殻変動観測技術の開発・展開	熊野灘	BMS	2020/2/2-2/10
	GPC採泥確認航海	東北沖太平洋、南海トラフ	GPC	2020/2/18-2/25
2020年度	革新的深海資源調査技術（第2期海洋課題） レアアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析	南鳥島周辺海域	GPC	2020/9/9-9/28
	連続リアルタイム地殻変動観測技術の開発・展開	熊野灘・室戸岬沖	BMS	2021/1/17-1/31
2021年度	日本海溝沈み込み帯でのGPCによるサンプル採取 (IODP第386次研究航海 Japan Trench Paleoseismology)	日本海溝	GPC	2021/4/13-6/1
	戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) レアアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析	南鳥島周辺海域	GPC	2021/6/6-6/27
	戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) レアアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析	相模湾 南鳥島周辺海域	GPC	2021/8/6-8/27
	鬼界海底カルデラの総合調査	鬼界カルデラ	BMS	2022/1/7-1/19
	南海トラフ・千島海溝における 巨大地震・津波発生源の地震履歴研究	北海道太平洋沖	GPC	2022/3/17/3/31

(2) BMS・GPCの使用実績

令和3年度のIODP第386次研究航海において、
「かいめい」とGPCを国際の海洋科学掘削に初めて供用した。

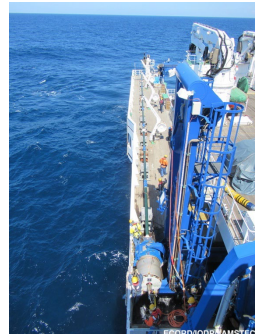
IODP Expedition 386の概要

- ・ JAMSTEC協力のもと欧州海洋研究掘削コンソーシアムサイエンスオペレーター(ESO)が主導するプロジェクト
- ・ 10カ国（日本、イギリス、ドイツ、フランス、アメリカ、オーストリア、韓国、中国、フィンランド、ノルウェー）からの参加者をサイエンスパーティとする
- ・ 日本海溝沿いの海底堆積物（大口径ピストンコア試料）を用いて、地震の発生履歴（いつ、どこで、どのような規模で発生したのか）の解明を目的とする

Offshore



- ・ 2021年4月13～6月1日実施
- ・ 海域：日本海溝
- ・ コアリング地点：15サイト
- ・ コアリング実施数：29回
- ・ 830mを超える試料を回収
- ・ コア試料からのサンプリング、間隙水抽出、一部分析を実施
- ・ 高校/大学へのライブ授業実施



Onshore Science Party (OSP)

- ・ 2022年2月14～3月15日実施
- ・ 清水港
- ・ 「ちきゅう」ラボ
- ・ コア試料観察/記載、サンプリング、試料発送、一部分析を実施

Personal Sampling Party (PSP)

FY2022後半
海外在住者を
含む全サイエ
ンスパーティにて
「ちきゅう」で実
施予定



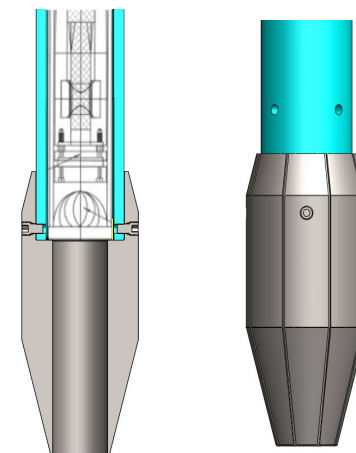
- ・ COVID-19のため日本在住の人員のみで実施
- ・ 毎日夕方5時にESOとzoom会議で状況報告
- ・ オンラインストレージサービスを利用して取得データを毎日更新
- ・ 活動の様子を撮った10枚程度の写真を毎日送信

●BMSの技術的状況

掘削機能は基本的に問題なく、「ちきゅう」担当者の知見も活かして改良も加えている。今後に向けては研究者及び運用チームから、軟質海底への対応や、掘屑の影響軽減等のさらなる改良要望も受けている。

●GPCの技術的状況

運用当初は、コアラーの貫入・引き抜きに関し技術的課題があったが、改造等によりそれを克服。
また、EXP386より前には本体リリース（投下）時の想定外挙動があったが、その後レビューされ、本航海で対策が採られた。



GPC 貫入しやすいビットデザイン

●海洋科学掘削への供用に向けて

「かいめい」は海洋科学掘削でも、国内外での利用が期待される一方、機構の研究航海利用で運航スケジュールが詰まっており、外部や国際に供用していくには、数年前からの計画や、内外での調整が必要。

以降 参考資料

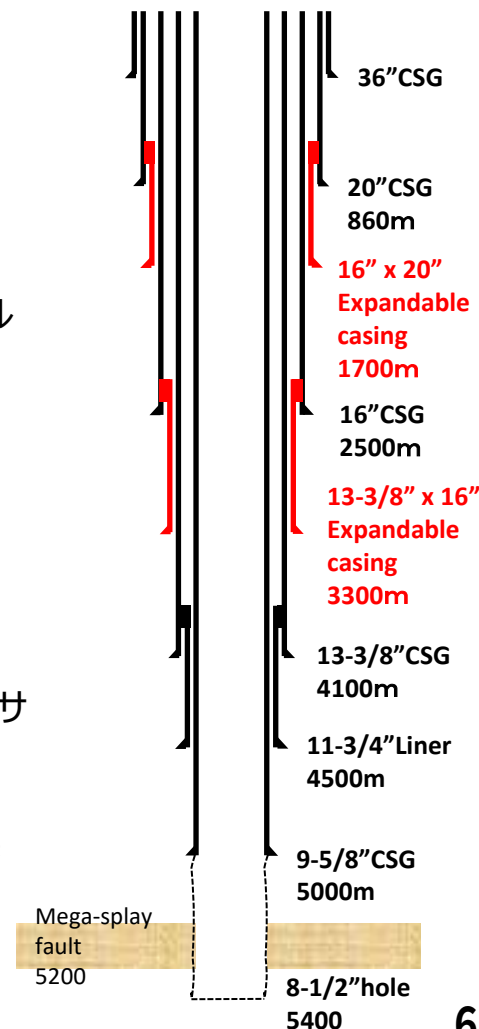
これまでの結果を踏まえ地層崩壊に対し有効と考えられる方策

●崩壊を起こさない方策

- ・ ケーシング枚数は8枚を準備（オリジナル計画では6枚）
- ・ 地層の崩壊・逸泥などの傾向があった場合、掘削を継続せずケーシングを設置
- ・ 1区間の掘削長を最大900mとして崩壊を起こす前にケーシングを確実に設置
※過去に崩壊した掘削長から安全マージンを高く取って設置
- ・ 球状シーラントを混入し、泥水の地層への侵入による地層の脆化を防止
- ・ ケーシングセット毎にエクステンデッドリークオフテスト（地層強度確認）を行い、ジオメカモデルに反映する。LWDイメージツールにより地層の崩壊状況を確認しながら掘進
- ・ NSDはECDの変動抑制のために次回も使用し、崩壊の原因となる圧力変動を排除
- ・ Barolift等ファイバー系の孔内クリーニング添加剤を用意

●崩壊を起こした場合の方策

- ・ ケーシング下に崩壊層ができた場合でも主にケーシング下の崩壊層へのアクセスをメインとし、サイドトラックは選択せず、ケーシング下の崩壊層のクリーニングを真っ直ぐな編成で行う
- ・ クリーニング後すぐにケーシングをセットし、ケーシング下への掘削を継続する
- ・ ケーシング下のアクセスに失敗した場合には、もう1段上部のケーシングからサイドトラックを実施する

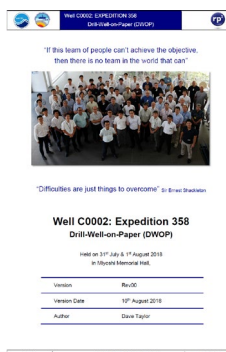


これまでの南海掘削を踏まえた技術的知見

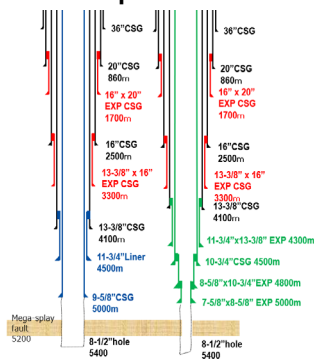
掘削コンサルタント会社（Merline ERD Ltd.）に、南海EXP338/348/358の技術資料をNDAを結んで提供。
技術的なレビューを受けた（令和元年7-12月実施）。下記の助言があり、それぞれ対応策を検討している

- ・ 隠れたリスクの洗い出し
→DWOP(掘削計画の机上演習)を再度実施して、今までのリスクと今後のリスクの洗い出しをする
- ・ バックアッププラン（問題対応の選択肢）の用意
→ケーシング枚数を8枚とし、必要に応じてさらに枚数を追加。これにより問題への柔軟な対応を可能とする
- ・ 坑内不安定に対する圧力変動要因の排除。泥水のテストやシール剤の再検討
→指摘されたシール材準備、泥水の事前システム循環テスト、NSDの適用を実施する
- ・ 坑内状況のモニタリングで問題をいち早く検知することが重要
→トルクドラッグモニタリングは継続。加えてLWDイメージによる地層崩壊のモニタリングも継続する
- ・ サイドトラック方式の採用条件見直し
→セメントの質が低い場合にはサイドトラックは選択せずに掘削坑のクリーニングを行う
- ・ トレーニングによる作業手順の徹底
→掘削前にクルーにトレーニングを受けさせる
- ・ QA/QCインスペクターの利用によるサービス会社機材の質の向上
→LWDなどにもQA/QCを行う
- ・ サービス会社のレポートの質向上
→特にコントラクターのレポート内容について業務範囲に記載を入れる
- ・ 計画外の事象に対するMOC(Management of Change) プロセスの策定・実施
→プロジェクトマネジメント（後述）の一環で検討。計画の逸脱時に原因やオプションの選択基準などを記録に残す
- ・ チャレンジングな掘削に対する十分な予算・スケジュールの確保
→プロジェクトマネジメント体制を構築し 出口戦略も含め検討

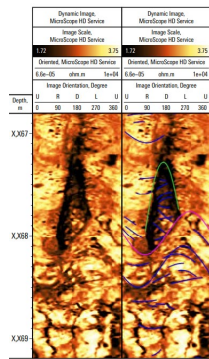
DWOP



Backup CSG Plan



LWDモニタリング



MOC

[illegible]

これまでの掘削から、失敗を含めて多くのlesson learnedがあり、第1～2回委員会で述べられたとおり、南海掘削や東北地方太平洋沖掘削等の実施によって培われた技術がある。科学掘削だけでなく、SIP（レアアース）やメタンハイドレート開発などの掘削でも活用される。

● 強海流下の運用（南海）

- ・定点保持技術（操船）、前線通過時の作業限界定義、機器の保護、ライザー緊急離脱時の挙動解析
- ・ライザーハンドリング技術：VIV対策のモニタリングシステム、ライザーフェアリング（整流装置）
- ・ドリルパイプのVIV対策：ロープに拠る減衰

● 大深度掘削（南海）

- ・LWD掘削と拡張の同時実施
- ・地層の状態を24時間リアルタイム監視する体制
- ・泥水比重、素材の最適化（例：地層内への流体侵入の防止）
- ・新たな掘削資機材の使用 例：エキスパンタブルケーシング

● 大水深掘削（東北）

- ・機器の疲労、曲げストレスや熱による劣化を防止する機器（改定掘削サポートシステム）の開発
- ・水深7000m下でコンダクターパイプ（基礎となるパイプ）を設置後に連続して掘削できる機器（時間短縮）
- ・吊り下げ機器の荷重対策
- ・ROVの稼働水深（～3000m）を超えるUWTVとサポート機器（海底設置システム）の開発

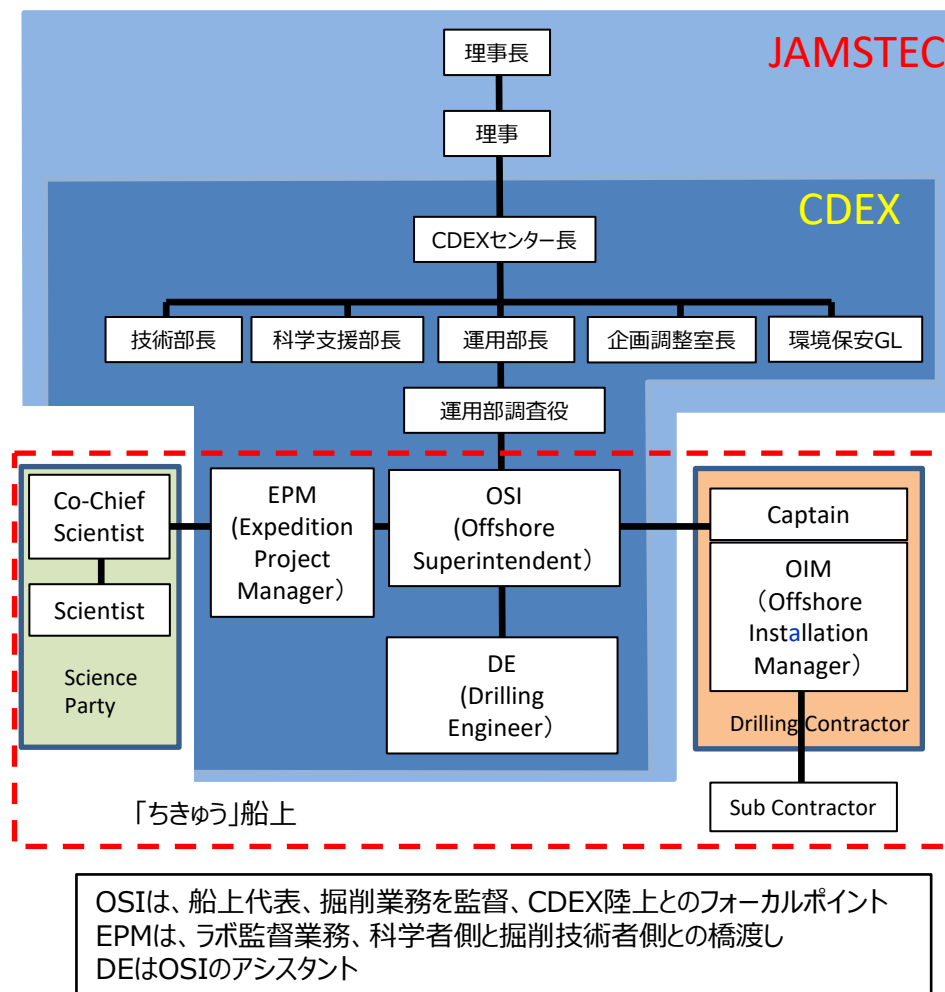
Exp358当時におけるマネジメント体制として、「ちきゅう」の掘削計画立案や掘削作業の実施は、地球深部探査センター（CDEX）が担っていた。

● Exp.358実施中の意思決定

- ・掘削作業における各種意思決定は、機器故障など即断が必要なものは、OSIにより決定された
- ・計画変更や重大な機器故障などの場合は、OSIからCDEX陸上に相談され運用部長により対応が行われた。
- ・計画遂行に支障を来す重大な事象については、CDEXセンター長による判断がなされた。

● CDEXとJAMSTEC経営の意思疎通

- ・CDEXから2週間に1度の役員連絡会で状況報告を行った。
- ・計画に支障を来す重大な事象については、随時CDEXからJAMSTEC役員に報告が行われた。
- ・しかしながら、意思決定に必要なレベルの想定や方向について、業務マニュアル等で明確な取り決めが行われておらず、JAMSTEC役員に対する報告についても、書式やタイミング、報告すべき事象などは明確化されていない状況にあった。



(1) 掘削予定地点の水深が深いこと、への対応

軽量ライザー (CFRP)	軽量ライザー (チタン合金/ アルミ合金)
TRL8	TRL8
TRL7	TRL7
TRL6	TRL6
TRL5	TRL5
TRL4	TRL4
TRL3	TRL3
TRL2	TRL2
TRL1	TRL1
○CFRPの有効性を確認 ✕メーカー撤退 ✕業界の協力見込めず	✕技術的に高難易度 ✕材料費が高い

達成
 未達成

課題：
 水深2,500mから4,000mへの増進化により、ライザーパイプの本数に応じて重量が増加するためライザーパイプの軽量化が必須。

JAMSTECの対応：
 ライザーパイプの**素材変更による軽量化**。

技術開発状況：
 ・炭素繊維強化プラスチック（CFRP）で試験を実施し**有効性を確認したが、メーカーの撤退等により断念**。
 ・チタン合金やアルミ合金は、技術的難易度が高い、材料費が高い、などの理由により検討を**断念**。

委員からの主な意見：
 ・価格を考えるとCFRP以外はないのでは。他方で論文ベースでも、チタンやアルミを使ったライザー挙動の評価はなされているようだ。
 ・メインパイプではなく、補助管の軽量化やBOPの必要耐圧を下げる、浮力体を用いるなどはどうか。

(1) 掘削予定地点の水深が深いこと、への対応（続き）

小径ライザー
TRL8
TRL7
TRL6
TRL5
TRL4
TRL3
TRL2
TRL1
○SIPで実証中 ○市場に製品有 ✕ウェルコントロールを要検討 △ケーシングの枚数を要確認

達成
 未達成

課題：

2,500m→4,000mへの増進化により、ライザーパイプの本数に応じて重量が増加するため、ライザーパイプの軽量化が必須。

JAMSTECの対応：

ライザーパイプの小径化による軽量化。

技術開発状況：

- ・別事業により導入する、既存のライザーパイプより径の小さなライザーパイプ（市販品）の実運用について検討中。
- ・ただし、径が小さいことによりケーシングの枚数が従来より少なくなるデメリットを解消する必要あり。

委員からの主な意見：

- ・不確定要素が大きい掘削であるため、冗長性が大幅に犠牲となる小径化は賛成できない。また、最終口径が6インチと非常に小さくなる（コアサンプルの量も犠牲となる）可能性も踏まえる必要あり。
- ・ウェルコントロールができないなど安全性の確保に懸念があり、あくまでバックアップ的にであれば活用の可能性。

(1) 掘削予定地点の水深が深いこと、への対応（続き）

軽量ライザー (CFRP)	軽量ライザー (チタン合金/ アルミ合金)	小径ライザー
TRL8	TRL8	TRL8
TRL7	TRL7	TRL7
TRL6	TRL6	TRL6
TRL5	TRL5	TRL5
TRL4	TRL4	TRL4
TRL3	TRL3	TRL3
TRL2	TRL2	TRL2
TRL1	TRL1	TRL1
○CFRPの有効性を確認 ✕メーカー撤退 ✕業界の協力見込めず	✕技術的に高難易度 ✕材料費が高い	○SIPで実証中 ○市場に製品有 ✕ウェルコントロールを要検討 △ケーシングの枚数を要確認

達成
 未達成

委員からの意見を踏まえた新たな技術開発の方向性（提言）：

・大水深化については、軽量化、小径化、ともに一長一短があり、現時点では決め難い。新素材を用いたライザーパイプの軽量化も並行して検討するものの、まずは補助管の軽量化、浮力体システムの導入、BOPの必要耐圧の低下等の検討を優先的に進め、既存のライザーシステムを活用し4,000m対応を目指す。

・小径ライザーについては、別事業で進める試験の結果やパイロットホール掘削情報を踏まえ、バックアップとしての活用の可能性を模索する。その際、現在整備する小径ライザーパイプ（14インチ）よりやや口径の大きいライザーパイプの整備も考慮する。

（・新しいBOPの導入については、引き続き情報収集を進めるが、主として既存のBOPを活用する。）

(2) 掘削予定深度が深いこと、への対応

12,000m ドリルパイプ	8,000m超級 ドリルパイプ
TRL8	TRL8
TRL7	TRL7
TRL6	TRL6
TRL5	TRL5
TRL4	TRL4
TRL3	TRL3
TRL2	TRL2
TRL1	TRL1
○市場に製品有 △「ちきゅう」での運用や掘削への適用可能性を要検討	○ライザーレス掘削で実作業を実施済 ×長さが不足(12,000m必要)

達成
 未達成

課題：

現在の「ちきゅう」のドリルストリングス長は10,000mであるが、現在想定されているマントル掘削の候補地点の掘削には12,000m程度の長さが必要。

JAMSTECの対応：

- ・12,000m級ドリルパイプの開発。

技術開発状況：

- ・12,000m級ドリルパイプの開発に着手したが、概念設計や素材の検討を踏まえ、12,000m級のドリルパイプの開発は断念し、8,000m級に目標を変更。アメリカ石油学会（API）の規格に基づくS155を用いたドリルパイプについて、実運用できることを確認。
- ・市場調査により、12,000m級での使用に耐えうるドリルパイプが流通していることが確認され、この活用について検討を開始。
- ・技術開発として、応力緩和を図るStress Relief Grooveについて特許を取得。また、新コンセプトのドリルパイプの開発の検討を開始。

(2) 掘削予定深度が深いこと、への対応（続き）

12,000m ドリルパイプ	8,000m超級 ドリルパイプ
TRL8	TRL8
TRL7	TRL7
TRL6	TRL6
TRL5	TRL5
TRL4	TRL4
TRL3	TRL3
TRL2	TRL2
TRL1	TRL1
○市場に製品有 △「ちきゅう」での運用や掘削への適用可能性を要検討	○ライザーレス掘削で実作業を実施済 ×長さが不足（12,000m必要）

達成
未達成

委員からの主な意見：

- ・陸上掘削（コラ半島）の超深度掘削が12,000m超であり、その実績から考えれば12,000mのドリルパイプは成立しうる。この事例を分析し参考とすべき。
- ・11,000m級であれば技術的難易度は下がるのでは。

目標を明確に。

- ・マントル掘削には必要不可欠であり、重点課題として各分野の専門家でチームを編成して検討すべき。

委員からの意見を踏まえた新たな技術開発の方向性（提言）：

- ・ドリルパイプ長など実際にマントル掘削に必要な条件を見直す。
- ・市場調査によりマントル掘削への適用可能性が示唆される商業用製品のドリルパイプについて、マントル掘削への活用を優先的に検討する。
- ・技術開発については、上述の活用が難しい場合は再検討が必要となるため、真に必要な目標を明らかにし、最低限の技術開発を継続する。

(3) 掘削候補地点が高温であること、への対応

高温用泥水
TRL8
TRL7
TRL6
TRL5
TRL4
TRL3
TRL2
TRL1
○市場に製品有

達成
 未達成

課題：

マントル掘削の3点の掘削候補地点のうち、1番温度が高いと見込まれる掘削地点の温度は250℃超。

JAMSTECの対応：

適切な泥水の選定。

技術開発状況：

- ・市場調査により、商業用製品で250℃超が対応可能である製品が存在することを確認。
- ・海底面付近のごく低温環境から掘進後のマントル近傍付近のごく高温環境まで大きく温度差が生じることから、この環境下で適切に比重や粘性をコントロール可能かどうかの確認を今後進める予定。

委員からの主な意見：

- ・地熱の分野では250～300℃は通常の温度域。日本にもメーカーが存在するため相談してはどうか。
- ・イタリアの超臨界地熱井掘削プロジェクトでは、想定地層温度が400℃であった。その時の実績を参考にしてほしい。

委員からの意見を踏まえた新たな技術開発の方向性（提言）：

上記をベースに検討を継続する。

(4) 掘削候補地点の詳細地質（特に物性）が不明であること、への対応

タービン方式 (硬岩用コアリング システム)
TRL8
TRL7
TRL6
TRL5
TRL4
TRL3
TRL2
TRL1
○方式は完成 ○硬軟互層で実試料 採取に成功 ✕要耐久性の確認

達成
 未達成

課題：

斑れい岩やかんらん岩などの硬い地層の掘削が求められるのに加え、掘削中に摩耗により交換の回数が増えると掘削スピードに大きな影響があるため、コアリング機器には高い耐久性と高度が求められる。

JAMSTECの対応：

- ・ 従来とは異なる方式のコアリングシステムの検討（①タービン方式、②振動方式）
- ・ ③高耐久のコアビットの開発

技術開発状況：

- ・ ①は、開発を進め、令和元年度にはJR号における実海域試験において硬軟互層のコア採取に成功し、実用化の一手前まで進んでいるが、耐久性の向上などの課題の解決が引き続き課題。
- ・ ②は、主に砂や砂礫層の高回収率・高品質なコア採取を目的に開発を進め、全体の概念検討及び起振機の試作・試験を実施。ただし期待される成果が望めないことから、令和2年度末をもって開発を終了。
- ・ ③は、石油・鉱山業界で使用するビットの調査を行い、既製品で存在しないこと確認、そのうえで材料の選定や小型ビットの要素試験・改良を実施し性能を確認。

(4) 掘削候補地点の詳細地質（特に物性）が不明であること、への対応（続き）

タービン方式 (硬岩用コアリング システム)
TRL8
TRL7
TRL6
TRL5
TRL4
TRL3
TRL2
TRL1
○方式は完成 ○硬軟互層で実試料 採取に成功 ✕要耐久性の確認

委員からの主な意見：

- ・ JOGMEC（メタハイ関連でコアリングシステムを新規開発していると聞いている）や国内外の研磨メーカー、金属加工メーカーと等情報交換してはいかかがか。
- ・ コアビットを自主開発するのは奨励しない。メーカーに任せた方がいい。
- ・ 回収率を上げることに膨大なコストと時間をかける必要はないのではないか。

委員からの意見を踏まえた新たな技術開発の方向性（提言）：

- ・ これまで開発してきた技術のうち、マントル掘削で想定される硬岩の掘削に必要なタービン方式のコアリングシステムの開発は継続する。
- ・ コアビットについては独自の開発は中止する。紹介のあった機関等との情報交換を踏まえ、商業用製品を原則として適切なビットの選定を進める。

達成
未達成