

深海掘削検討会報告書

平成 2 4 年 3 月

独立行政法人海洋研究開発機構

深海掘削検討会

目次

深海掘削検討会 名簿	i
本報告書に係る審議過程（第1回～第5回およびワークショップ）	ii
要旨	1
はじめに	5
1. IODPの我が国の取り組みについて－これまでの活動と今後について－	6
2. 「ちきゅう」による次期深海掘削計画	9
－地球システムにおける炭素・水サイクルの解明－	
3. 計画推進体制	18
4. 人材育成	20
5. 国民への効果的な広報のあり方	21
まとめ	25
別添1. サイエンスプラン	27
1) 生命科学	27
2) 固体地球科学（ジオハザード等）	39
3) 固体地球科学（マントル掘削を含む物質科学分野）	48
4) 環境科学	53
別添2. 人材育成の具体的な活動について	61
別添3. 次期国際深海掘削計画 新科学計画（要約）	65

深海掘削検討会名簿

	荒井 章司	金沢大学理工学域自然システム学類 教授
	石井 美孝	石油資源開発株式会社国内事業本部操業部 操業部長
	稲垣 史生	海洋研究開発機構高知コア研究所地下生命圏研究グループ グループリーダー
	氏家 恒太郎	筑波大学大学院生命環境科学研究科地球進化科学専攻 准教授
	大谷 栄治	東北大学大学院理学研究科地学専攻 教授
	川幡 穂高	東京大学大気海洋研究所海洋地球システム系 教授
	木村 学	東京大学大学院理学系研究科 教授
	小平 秀一	海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域海洋プレート活動研究プログラム プログラムディレクター
	高橋 嘉夫	広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻 教授
	瀧澤 美奈子	科学ジャーナリスト
	巽 好幸	海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域地球内部物質循環研究プログラム プログラムディレクター
(主査)	鳥海 光弘	海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域 領域長
	西 弘嗣	東北大学学術資源研究公開センター 総合学術博物館 教授
	藤本 博己	東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター 教授
	道林 克禎	静岡大学理学部地球科学科 准教授
	村山 雅史	高知大学海洋コア総合研究センター 教授
	山崎 俊嗣	産業技術総合研究所地質情報研究部門地球変動史研究グループ 研究グループ長

本報告書に係る審議過程（第１回～第５回およびワークショップ）

- 第１回 平成２３年１月１４日
 - 深海掘削検討会の設置について
 - 統合国際深海掘削の概要
 - 次期深海掘削科学計画の概要

- 第２回 平成２３年２月１４日
 - 各委員からの提案
 - ◆ 巽 好幸 委員
 - ◆ 八木 健彦 代理（大谷 栄治 委員代理）
 - 深海掘削検討ワークショップについて

- 第３回 平成２３年３月１０日
 - 各委員からの提案
 - ◆ 稲垣 史生 委員
 - ◆ 高橋 嘉夫 委員
 - ◆ 西 弘嗣 委員
 - 次期深海掘削科学計画の最新版について

- ワークショップ 平成２３年５月２１日
題 目：「深海掘削による生命・地球科学の新しいパラダイムを求めて」
－東日本大震災が投げかけた巨大地震の新たな課題－
開催場所：富国生命ビル２８Ｆ会議室および JAMSTEC 東京事務所

- 第４回 平成２３年６月２１日
 - 各委員からの提案
 - ◆ 瀧澤 美奈子 委員
 - 報告書目次案および執筆者について

- 第５回 平成２３年８月１５日
 - 深海掘削検討会報告書（案）について

要旨

背景

深海掘削科学は、地球環境変動の理解や予測、新しい地下生命圏の探査、地球内部の活動や地震、火山活動といった固体地球活動の実態解明を目的とした広範囲の基礎科学であり、さらには、様々な工学を包含した巨大科学である。これを大きく前進させるため、我が国は地球深部探査船「ちきゅう」を建造し、世界 25 ヶ国が参加する統合国際深海掘削計画 (IODP) を米国と共に主導してきた。

IODP は 2013 年 10 月から次期計画へと移行し、「ちきゅう」を運用する我が国においても、次期計画期間の中で、どのような科学目標を重点とし何をを目指すかを明確にするため、計 5 回の検討会を開催した。以下はその成果である。

次期 IODP における「ちきゅう」の目標

現代地球科学においては、プレートテクトニクスとマントル対流という大きな固体地球のダイナミクスの枠組みを構築するとともに、海洋全域にわたる海水の大循環モデルに基づく長期的な地球環境変動を理解する枠組みが構築された。そして近年では、地球内部からのエネルギーや物質の供給が海洋や大気にもたらされて地球環境が大きく変動するとともに、プレートの沈み込みによる地球内部への物質の還流によって地球内部のダイナミクスにも大きな影響を与えるということが考えられ始めた。

特に「炭素」と「水」は、固体地球、大気・海洋、生命圏等で構成される「地球システム」の変動に対する影響が大きく、それらを中心とした地球内部の物質循環の解明は地球システムを理解する上で重要である。しかしながら、炭素と水が地球内部にどの程度存在しているか、地球内部の核とマントル、地殻の間でそれらの物質の授受が行われているかは実証されておらず、基本的な事柄が依然不明のままとなっている。その主な理由は、地球の体積の約 8 割を占めるマントルについて、その構成する物質を直接採取する技術がなかったためである。

現在日本は、地球深部探査船「ちきゅう」を建造したことによって、マントル物質のサンプルリターン (試料採取) のための大深度掘削の実現に最も近い位置にいる。「ちきゅう」を使った海底下深部掘削によって、特に炭素や水の地球内部における化学的特性や物質循環プロセス等を正確に理解することで、大気・海洋と固体地球内部の間の相互作用を明らかにできる。そして、その相互作用と気候変動、海洋変動、マグマの発生、地震等のすべり破壊、プレート運動やマントル対流といった地球システム変動との関わりを世界で初めて解明でき、新たなパラダイムの創出が可能になる。

このような新たなパラダイムの創出は、長期的かつ連続的な地球システム変動 (プレート運動やマントル対流等) 及び短期的かつ間欠的に起こる大規模な地球システム変動 (急激な気候・海水準変動や地震・火山活動等) の理解に大きな意味を持つ。そして、それらの長期的連続的な現象と短期的間欠的な現象の相互作用を網羅して地球システム変動を理解するこ

と、すなわち「地球システムの包括的理解」を目指す。

地球システムの包括的理解への最も重要なアプローチとして、次期 IODP では人類未到のマントルというフロンティア領域からのサンプルリターンを実施すべきである。あわせて、地球表層と地球内部の間における炭素・水の蓄積や移動過程を包括的に理解するため、海洋島弧及び縁海における超深度掘削を実施すべきである。新たな研究領域も加えて地球全体の物質循環を解明することで、地球科学分野のみならず生命科学分野等における飛躍的な発展やパラダイムシフトが期待される。

(次期 IODP で「ちきゅう」が実施すべき掘削テーマ)

① マントル掘削

中央海嶺では、マントル上昇流に伴って発生したマグマが固結して海洋地殻となり、これと上部マントルの一部がプレートとして移動する。マントル掘削による全海洋地殻及び代表的上部マントルのサンプルリターンとその化学分析によって、マントル物質の組成・物性の実証に加えて、マントルと地殻、地殻と海洋・大気との間における炭素・水に関する相互作用を理解することができる。

また、これまで成し得なかった地球深部掘削の実現により、地球表層の生命圏や海底下生命圏の発生・活動と地球内部のエネルギーとの関係の理解につながり、生命の起源や進化、地球内部の生命圏の規模・限界に関する従来知見を大きく拡大することが期待される。

② 海洋島弧掘削

海洋域のプレート沈み込み帯である海洋島弧では、沈み込むプレート物質から選択的に元素が抽出されて大陸地殻が誕生する一方、プレート抽出残渣や大陸地殻形成残渣等の物質が沈み込んでいる。その中で炭素・水はプレートからの選択的な元素抽出や誕生する地殻の化学組成を決定的に支配している。

伊豆・小笠原・マリアナ弧といった、すでに地殻構造等が高精度で調査されている海洋島弧において、上部地殻から中部地殻の岩石を採取して分析・解析することにより、炭素・水を含む物質が地球内部へ取り込まれるプロセスやその量が把握できる。

③ 縁海掘削

大陸縁辺域に存在する縁海は、地球環境変動の影響を最も敏感に受ける海洋であり、縁海の海底堆積物には、炭素・水の蓄積と移動によって繰り返された気候変動史等が精密に記録されている。従って、縁海の海底堆積物を採取・分析することにより、過去の地球環境変動を詳細に解明できる。

例えば、過去の巨大な環境変動現象である「メッシニア塩分危機」を記録する地中海における掘削研究は、この大規模なイベントの全容とその原因を解明し、固体地球、大気・海洋、生命圏の相互作用と大規模な環境変動との関連性に関する重要かつ新たな知見の獲得が期待される。

また、メタンハイドレートや天然ガス等の炭化水素資源は日本近海等の縁海の堆積物に多く蓄積するが、その形成・蓄積過程には海底下微生物が深く関与していると示唆されており、縁海域における海底下微生物生態系の機能とその役割の解明によって、

炭化水素資源の成因理解にも繋がる。

計画推進体制

「ちきゅう」による科学掘削は、計画立案や事前調査、事後研究等を含めると 5-10 年単位の計画となり、これを推進するためには、組織横断的な研究チームを立ち上げるとともに、研究を牽引する人材やリーダーシップを発揮できる環境、研究予算等の確保が必要である。

「ちきゅう」で行うプロジェクトを具体化するための科学・技術の議論の場として、多くの研究者を巻き込み様々な英知を集めるべく、国内に限らず国際的に公開された場を、日本地球掘削科学コンソーシアム (J-DESC) や海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が中心となって作り上げていくべきである。また、研究推進のためには、政府予算以外の企業・財団等からの資金の確保や、日米欧の掘削プラットフォーム運用に対して国際的に公正で透明な評価をする国際助言組織の維持、掘削試料やデータの一元管理等が必要となる。

人材育成

日本の研究コミュニティがより高い発展をするためには、コミュニティのすそ野を広げるとともに、コミュニティのトップレベルをさらにレベルアップさせていくことが必要である。具体的には、科学提案、国際会議、研究成果発表で活躍できる人材を育成することが必要である。この中でも特に科学提案に関しては、若手研究者に掘削提案の「種」を発案してもらい、国内外のワークショップ開催や研究支援制度の活用等により正式提案に結びつけていくことが必要である。

国民への効果的な広報のあり方

「ちきゅう」を中心とした深海掘削は大型の予算的裏付けを必要としていることから、その広報は、目的や進捗状況、得られた成果に関して国民にわかりやすく説明することが求められ、かつ国際的観点にも留意し、戦略的に進める必要がある。

第一に、海外への情報発信による科学技術立国・日本の地位向上、第二に、他分野を含めた国内研究者への情報公開による知識の集積や支持の獲得、第三に、一般国民への「ちきゅう」周知方法の工夫、第四に、「ちきゅう」掘削計画に関わる人物にフォーカスする等により掘削計画をストーリーとして仕立てるといった、親しみや必要性の理解増進が必要である。その際、特に「ちきゅう」の最大の目標であるマントル掘削について、人類未到のマントルに到達するというフロンティアであること、また超深度掘削に必要な技術開発が間接的に我が国の産業基盤に貢献することを効果的に伝えていく必要がある。

はじめに

本報告書は、独立行政法人海洋研究開発機構に設置された深海掘削検討会や、関連分野の研究者が参集して開催されたワークショップにおいて議論された内容をもとに、次期地球探査計画の全体的な構想、計画推進体制、人材育成、広報のあり方などについてまとめたものである。

地球深部への探査科学である深海掘削科学は、対象とする領域の精細な事前調査研究、モデリング研究、掘削孔を利用した地球内部変動のモニタリングなどを含むことから、広範囲の基礎科学であるだけでなく、深部掘削工学、探査技術、海洋工学などのシステム工学を包含した巨大科学である点に大きな特徴がある。このため、深海掘削計画による国際的・総合的地球探査計画を進めるためには、広範囲な視点からの検討を行う必要がある。

そこで、深海掘削検討会は、日本国内の国際海洋掘削計画に関連する諸分野の研究者と地球科学分野で活躍する研究者、および国際的な掘削計画に関心のあるメディア関係者によって組織し、今後国際的な海洋掘削科学をどのように進めていくか、あるいは科学全般にわたる効果、国民に対する貢献、および地球探査計画の科学的プランをいかなる方策によって他の科学・技術諸分野の研究者および国民の理解につなげるかなどについて、2011年1月から計5回の会合と、ワークショップ「深海掘削による生命・地球科学の新しいパラダイムを求めて」(2011年5月21日開催)によって議論を深めた。

これらの議論を通じて、海洋掘削関連諸科学の総意として、「地球システム進化の包括的理解—地球システムにおける水・炭素サイクルを大きなサイエンスプランとして海洋掘削科学から地球科学全般にわたる大いなるパラダイムシフトを起こす—」という提案が決議された。

その中核的内容は以下3つの前人未踏のチャレンジに象徴される。

第一に海洋地殻からマントルまでの掘削、第二に、島弧地殻の全断面掘削、そして第三に、縁海（大陸周縁や背弧海盆・付加体域）掘削である。また、2011年3月11日に発生した海溝型巨大地震および巨大津波を受け、プレート沈み込み境界の直接超深部掘削も、引き続き重要なミッションとして位置づけられた。

これらの超深度掘削は、現在稼働中の地球深部探査船「ちきゅう」でのみ可能な掘削計画であるとともに、巨大地震・津波からの防衛、大規模資源の探査、地球環境の精密予測、新しい地下生命圏の探査など、いずれもわが国が直面する大きな社会的課題を包含する。同時に地球科学的な視点としては、従来の静的なプレートテクトニクスおよび概括的なプルームテクトニクスから、動的で、物質循環を含む地球システムダイナミクスへとパラダイムシフトを引き起こさせる契機となるものである。

この検討会で提言する内容は、すでに国際的に提言されている、次期IODP（統合国際深海掘削計画）の新サイエンスプランに盛り込まれた内容と整合的・補完的である。したがって、国内関係者は次期IODPの掘削提案にも積極的に貢献するものである。

1. IODP の我が国の取り組みについて－これまでの活動と今後について－

1. 1 国際深海掘削計画の歴史と科学成果

地球内部の層構造の理解が進んだ1920年代以降、地球の表面積の約7割を占める海洋底にはどのような堆積物が堆積し、その下の海洋地殻とはどのような物であるのかという極めて素朴な疑問、興味がわきあがった。1961年には掘削船CUSS 1にてメキシコ沖で人類初の深海科学掘削が行われ、玄武岩の採取に成功した。これに端を発し、マントルまで掘削するという大きな計画が米国で進められたが資金難と技術的未熟さから頓挫した。

その後深海掘削はDSDP (Deep Sea Drilling Project : 深海掘削計画)や、IPOD (International Phase of Ocean Drilling: 国際共同深海掘削計画)、ODP (Ocean Drilling Program : 国際深海掘削計画)など国際掘削計画として引き継がれ、IODP (Integrated Ocean Drilling Program : 統合国際深海掘削計画)の誕生となった。

DSDPの時代には、深海掘削は当時の話題であったプレートテクトニクス理論を実証することを成し遂げ、まさにパラダイムシフトの重要な一翼を担った。IPOD-ODPの時代には、深海掘削によって地球環境の復元をグローバルに展開した結果、白亜紀から現在までの詳細な気候変動、環境変動史を編纂し、時として急激な環境変化（地球外要因も含めて）なども明らかにした。また、大陸縁辺の堆積物環境に莫大な数の微生物細胞から成る海底下生命圏を発見したことも、国際深海掘削計画の特筆すべき成果の一つとして挙げられる。

しかしながらマントル掘削に到る地球深部への道のりは遠く、未だ人類は海洋地殻第III層（ハンレイ岩層）最上部までしか到達できていない。

1. 2 IODPの開始とその意義

IODPでは、それ以前の長い科学掘削の歴史を積極的に顧みて、未だ達成できない世界第一級の科学命題に挑戦すること、あるいは地球の過去・現在・未来の姿を描き、そこから人類の歩むべき指針を科学的に提示していくことが求められている。その具体的な科学テーマに関しては、「IODP初期科学計画：Science Plan for 2003-2013」に記載されている。IODPの特徴は、世界のどんな環境の海域でも掘削できるように、異なる能力を持った複数の掘削プラットフォームが国際的に用意された点であり、歴史的に成功してきた国際計画の延長として新たな出発をした点である。これによりさらなる発見や解明を促し、人類に多大な恩恵をもたらすことが期待されている。

1. 3 我が国の取り組みとリーダーシップ

上記の科学命題に対する具体的な対応として、我が国は地球深部探査船「ちきゅう」を建造し、国際的に運用することを決意した。このインパクトは、米国の深海掘削計画の継続を促し、ライザーレス掘削船を改装し、コア分析機器などの機能を向上して引き続き使用することへと繋がった。また欧州でのIODPへの参加とMSP（特定任務掘削船）

の利用というアイデアへと繋がった。「ちきゅう」はこれまでよりも格段に向上した掘削能力に加えて、船上研究設備の充実は、その設計段階から国際的な科学者集団からも助言を受け、建造された。このような具体的な行動を我が国は主導し、2003年4月に文部科学大臣と米国国立科学財団(NSF)長官が覚書に署名し、IODPはその年の10月より日米を主導国として開始された。

1. 4 IODPの科学成果

IODPは発足以来現在までに、IODP初期科学計画に基づいた科学提案を審議し、2004年6月の掘削航海を皮切りに、36の研究航海(2012年3月現在)を実施した。ライザーレス掘削船では主にグローバル環境変動解析を目的に、太平洋、大西洋、南大洋などで掘削を行い、これまでの掘削研究の空白域を埋める新たなデータ収集、解析を行った。また特定任務掘削船では、初めて北極圏での掘削を行い、かつて北極が暖かかった頃の古環境変動を明らかにした。

地球深部探査船「ちきゅう」は2007年9月よりIODP航海を開始し、南海トラフ地震発生帯掘削(南海掘削)をその最初のターゲットとした。世界中のプレート沈み込み帯の中で、過去1000年以上にわたる歴史地震、とりわけ巨大地震の歴史が明らかになっていること、そして掘削により巨大地震発生場所まで到達できる場所は、世界で唯一熊野灘沖南海トラフ沈み込み帯であった。ここでは1944年に東南海地震が発生し、津波等の解析により、南海トラフ沿いでも最も海側(南側)にまで(浅部まで)破壊が進んだと解釈されている。この海域ですでに「ちきゅう」により8掘削航海が実施された。南海掘削のこれまでの成果として、以下の新たな発見が挙げられる。

- a) プレート沈み込みに伴う広域応力場の変化と絶対値の推定
- b) 海溝付近まで派生した高速破壊断層の痕跡発見
- c) 巨大分岐断層の活動度とその挙動の解明
- d) 巨大地震発生帯起源物質とその物性解明
- e) 長期孔内計測装置の設置と観測の開始

巨大地震発生帯への到達にはまだ時間を要するが、これまでの成果は「津波断層」として活動している可能性の高い巨大分岐断層やプレート境界断層先端部などのダイナミクスの解明に大きく貢献し、2011年3月11日発生した東北地方太平洋沖地震の様な海溝付近での甚大な地殻変動のメカニズム解明にも通じるものと考えられる。今後さらに掘削を進めることにより、巨大分岐断層の深部試料の採取や、プレート境界断層の採取、さらにそれらの断層近傍での連続的なリアルタイム観測が予定されている。これは人類史上初めての挑戦であり、科学的成果のみならず防災面でも飛躍的な貢献が見込まれている。

「ちきゅう」はまた沖縄トラフ熱水系での地下生命圏探査掘削も行った。IODPでの大きな目的の1つでもある海底下生命圏の解明を目的に、精度良く制御された掘削技術を用いて、高温熱水噴出マウンドの掘削およびコア試料の採取に成功し、また海底下で生成されつつある大規模な金属鉱床の実態解明に大きな貢献をした。

1. 5 今後の取り組みと方針

IODP では次期科学計画（Science Plan for 2003-2013）の骨子を国際的な研究集会を開催して集約したが、その中でも特に「ちきゅう」を使った我が国が主導すべき科学計画が挙げられている。特に「ちきゅう」の特性を生かした掘削においては、「ちきゅう」建造時の精神に立ち返り、人類が未だ達成できていないマントル掘削こそが、第一級の優先課題である。その科学的意義、なぜ人類にとってマントル掘削が必要であるのか、そしてその成果が人類に何をもたらすのかということは、研究者だけでなく、広く議論されるべきことである（2. および別添 1 サイエンスプラン参照）。科学技術の先端を我が国主導で切り開き、未来の人類に対して光明を示して行くことが、今の我々に求められていることである。

2. 「ちきゅう」による次期深海掘削計画

－地球システムにおける炭素・水サイクルの解明－

2. 1 新しいパラダイムの創出に向けて

2. 1. 1 掘削計画遂行の意義

現代地球科学は、プレートテクトニクスとマントル対流という大きな固体地球のダイナミクスの枠組みを構築した。また、それとともに海洋全域にわたる海水の大循環モデルに基づく地球環境の長期的な変動を理解する枠組みが構築された。さらに、これらの研究により、地球システムを構成する、地球内部・海洋・大気という複数のサブシステムの間の相互作用が10億年から数万年の時間スケールで行われていることが明らかになりつつある。すなわち、地球内部からのエネルギーや物質の供給が、主に海洋や大気にもたらされ、それによって地球環境が大きく変動する事象が理解されるとともに、地球内部への物質の還流によって、地球内部のダイナミクスにも大きな影響を与えるという、地球システムの統合的な理解が急速に進んでいるのである。

しかしながら、こうした大きな発展のなかにおいても、実際に地球内部の核とマントル、そして地殻の間で物質の授受が行われているか、とりわけ鍵を握っていると考えられる「水」や「炭素」がどのくらいの割合で分配されているのかという基本的な事柄がいまだ不明のままである。

その理由は、対象となる地殻下部やマントル、そして核を構成する物質を直接採取することができなかったこと、そして採取した物質がそれぞれの部位をどの程度代表するかということが明らかではなかったこと、さらには必要とされる超微量で高精度の分析技術が未熟であったため、そのような未知の試料を採取し測定するという現実的な大規模プロジェクトを構築することができなかったことにある。

こうしたなかで、近年、海溝地域や海嶺地域および太平洋プレートなどの海域における地球内部の精密な構造探査技術や、微小および微量分析技術の高精度・高感度化、そして深海底の超深度掘削を可能とする地球深部探査船「ちきゅう」の導入により、これまで直接的な試料分析研究が困難であった地球深部環境への到達と掘削試料の多面的な研究展開が可能となった意義は非常に大きい。

地球の内部エネルギーによって駆動する様々な動的環境場において、「炭素」や「水」の化学的特性や挙動、物質循環プロセス等を正確に理解することにより、大気・海洋と固体地球内部との相互作用や、100年から1万年にわたる大規模な環境変動と海洋変動およびプレート運動との関わりなど、地球システムの包括的理解に繋がる新パラダイムの創出が期待される。

現世における地球システムの大きな変化は、人類社会にとって重大な短期的変動をもたらす可能性は否めない。現世から将来にかけての地球システムの変化を包括的に理解するためには、特に海洋地殻から地球深部にかけての炭素や水を代表する物質の挙動を理解することが重要である。なぜなら、大気における温室効果ガスや海水準変動、地球表層におけ

る生物生産量の分布や規模、地球内部におけるマグマの発生と地震などのすべり破壊の支配、そしてプレート運動やマントル対流の速さの決定、という役割を担っているものが、おおきく炭素と水であるからである。即ち、将来の深海科学掘削においては、次のことを目標とした新たな取り組みが大変に重要である。

(a)地球内部システムにおける「炭素」と「水」の分布とそれらの流れや物理化学的な挙動の正確な理解

(b)地球内部と表層との「炭素」と「水」の配分と、そのことによる(生物)地球化学的な影響の理解

これらの解明のためには、プレート沈み込み帯や海嶺部において、プレートとその下のマントル、プレートと大陸地殻、島弧地殻、海洋および大気などとの間の炭素や水の特性を様々な分析アプローチを用いて解明する必要がある。その成果は、マントル深部の上昇体や下降体、滞留スラブ、マントル最下部や核などを含めた、全球規模の「炭素」と「水」の分配や流れなどを定量的に評価することに繋がる。

そして、そのために海洋深海底におけるプレート境界部掘削、海洋プレート深部掘削、および海嶺部における深部掘削による深部物質の試料採取、その分析と解析および掘削孔における地球物理観測を行うことが必須である。そして、この総合的研究は、地球深部探査船「ちきゅう」を用いてはじめて達成される。

2. 1. 2 「ちきゅう」による新たな取り組み

人間活動に大きな影響を及ぼす巨大地震・火山噴火などの地球現象、さまざまな環境条件における(微)生物の爆発的増殖や絶滅を介した進化プロセス、それらに深く関わる地球環境の急激な変動や地球内部の長期的な変動は、地球の中心核からマントル、地殻、そして海洋と大気における、それぞれのダイナミクスとそれらの連結した挙動に支配されていることがわかってきた。

そして炭素と水は、マグマの発生、プレート境界の滑りやすさ、マントル対流の速さ、圧力や温度などによって規定される鉱物反応など、地球内部における基礎的な物理量を支配していることが実験的にわかってきた。さらには、大気中の温室効果ガスの量や雲の発生メカニズムにも関与し、それに連動して海洋の生物基礎生産の量や分布を大きくコントロールするなど、地球規模での環境変動に大きな影響を与えている。

さらに、近年わかってきたことは、大規模に起こるマグマ噴火を通じて、大量の炭素や水がマントル深部から海洋(または大気)に短期間に直接供給され、そのことが歴史的に地球規模での急激な環境変化を引き起こしたことである。また、プレート内部に海水からもたらされた炭素と水の蓄積が、プレートの沈み込みによって再びマントル内部へと還流されることもわかってきた。こうした知見は実験室での研究から明らかになってきたことである。

ところが、こうした実験室から得た多くの知見が、実際に自然の地球システムでどのように働いているのかについて、未だ直接的な立証は成されていない。このような状況では、現実の地球システムのダイナミクスを正確に理解し、将来の地球環境に対してモデル化することも困難である。とりわけ、大陸地殻、島弧地殻、プレート、マントル、海溝域、海嶺域、平均的海洋

域、さらには海洋島域などの地殻やマントルに含まれる炭素や水の蓄積量と移動量については、地球深部物質の直接的な実測に基づく立証が不可欠である。現在、世界最高の掘削能力を有する「ちきゅう」でのみ、その科学目標が達成できるものである。

このような理由から、2013年以降の10年間には、「主要海洋地殻およびマントルからの深部物質採取とその分析・解析」を最重点課題として実施する。また、現実の地球内部における、炭素・水の蓄積と移動過程の包括的理解に向けて、「海洋島弧および縁海における超深度掘削」を実施する。

これらの掘削計画を実施することにより、地球科学分野のみならず、生命科学分野、災害科学分野、そして海洋工学分野などの隣接科学技術分野にも新しいパラダイムをもたらし、地球システム変動の基本原理の解明に向けた新しい知の枠組みの再編を引き起こすことが期待される。

2.2 海洋地殻・マントルにおける炭素・水の分布と表層との相互作用の理解（マントル掘削）

2.2.1 フロンティアへの挑戦

地殻とマントルの境界をなすモホロビッチ不連続面：モホ面（Moho）を貫く孔（Hole）を確立することから、掘削計画はモホール（MoHole）計画と呼ぶ。厚さ6000mの海洋地殻を貫通し、固体地球の8割を占めるマントル層まで到達するこの掘削調査は、人類未踏の上部マントルからのサンプルリターンというフロンティアの開拓であると共に、地球内部における炭素・水サイクルのスケールを明らかにすることで、地球進化と生命圏の成り立ち、さらにその将来像に関するパラダイムシフトの原動力となることが期待される。

大洋の中央海嶺では、マントル上昇流に伴って発生したマグマが固結して海洋地殻となり、海洋地殻と上部マントルの一部がプレートとして、沈み込み帯へと移動する。従って、地球内部における炭素・水サイクルを理解するためには、プレート内（全海洋地殻および代表的上部マントル）の炭素・水の存在量を実測することが必要不可欠である。これにより、地球表層から内部へ持ち込まれる炭素・水フラックスを推定することが初めて可能となる。

また、海洋地殻・最上部マントルの炭素・水含有量は、マントルからの一次的なフラックスに加えて、海嶺における熱水活動、プレート進化に伴う海水との反応や海洋堆積物の付加などでも支配されている。これらのプロセスを定量的に解析することにより、地球内部と表層との炭素・水に関する相互作用を理解することができる。

2.2.2 マントル掘削による仮説の実証

海洋地域の地球科学研究が進展することによって、大陸地殻の上に積み重なって存在する古い時代の海洋プレートと類似した構成の巨大な岩石体が相次いで発見されている。これは、プレート運動の結果、海洋プレートが陸域に滑りあがったものであり、いうなれば「海洋プレートの化石」と呼ぶべき岩石体である。

驚くべきことに、そのような過去の海洋プレートの化石から、炭素からなる超高压炭素鉱物

(ダイヤモンド) が相次いで発見された。これまでの地球科学のパラダイムでは、海洋プレートの化石であるこうした岩石体は海嶺部の最上部マントルで作られたものと考えられており、ダイヤモンドが安定に存在できる地球深部よりも、はるかに浅い部分の岩石と考えられていたのである。したがって、海洋プレートの化石におけるダイヤモンドの産出は、現在のプレートを作る物質も、100 kmを越す地球深部からの物質が10 km程度で作られた海洋プレートのなかに混在していることを意味している。

つまり、海洋プレートは、従来のように海嶺で新たに作られ、海溝部での沈みこみにより、マントルに還流されるのではなく、深部マントル、おそらくは最深部マントルからも、マントル物質が運ばれ、海嶺部で固体として混合し、海洋プレートと形成するという、新たなプレートダイナミクスの可能性を示しているのである。

このような常識を超えた、マントル深部から地表へ向けての炭素と水の移動と蓄積過程を立証するには、地球深部探査船「ちきゅう」の大深度掘削による試料採取およびその化学分析が唯一無二である。

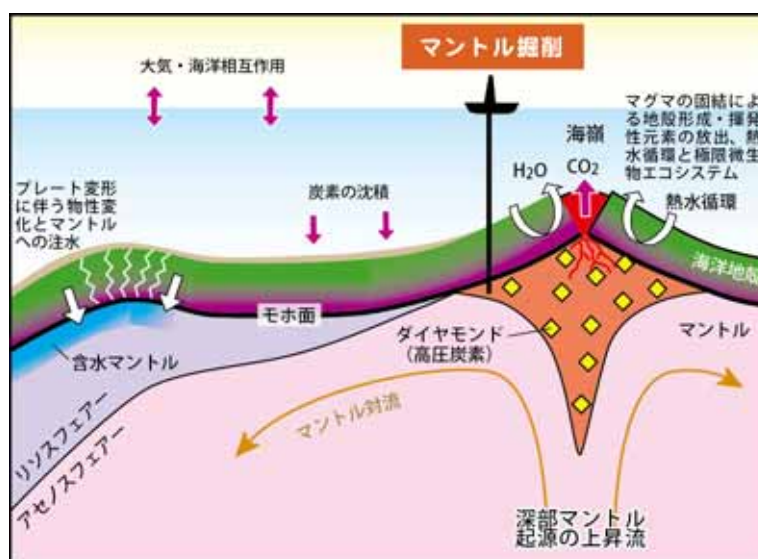


図1. マントル掘削

「ちきゅう」を用いたマントル掘削計画では、このように、深部からの炭素や水の移動と蓄積過程の実態を正確に把握することを目指として、採取した海洋マントル物質中に存在が予想されるダイヤモンドなどの高圧炭素鉱物の同定、およびその中に含まれる希ガスや炭化水素などの成分組成や同位体組成などの化学分析を行う。現実のプレートをつくる海洋地殻とマントル物質を直接採取し、その岩石の正確な分析と解析を行うことこそが、マントルと地殻、地殻と海洋および大気との間における炭素・水の蓄積と移動のダイナミクスの時間的・空間的な規模を明らかにし、それによって、プレート沈み込み帯におけるマグマ発生、プレート境界のすべり運動、島弧地殻の地殻変動の大きさ、深海底における熱水噴出量、マントルの挙動に関連する有用資源物質の蓄積過程などを解明すると期待されるからである。

さらに、地球表層から海洋地殻における炭素や水の動態メカニズムが解明できれば、地球

表層の生命圏や海底下生命圏の成り立ちや活動が、いかに地球の内部エネルギーに依存して発生・存続しているかー即ち、「マントルと生命圏のリンケージ」を包括的に理解する糸口となる。

同時に、原始地球や他の地球型惑星において生命が存在しうる条件や、生命を構成するアミノ酸や脂質・核酸 (DNA・RNA) などの生体高分子の存在 (もしくは生成過程) を追究することが可能となり、生命の起源や進化、地球内部に広がる生命圏の規模や限界に関する従来の知見を大きく拡大することが期待される。

2.3 地球内部への炭素・水インプットの理解 (海洋島弧掘削)

2.3.1 固体地球の「分化と進化」が意味すること

海洋域のプレート沈み込み帯 (海洋島弧) では、活発なマグマ活動が起こり、惑星地球を特徴づける「大陸」が誕生しつつある。海洋島弧掘削調査は、沈み込み帯における物質・元素移動と大陸誕生のプロセスを理解する目的として、典型的な海洋島弧において、海底下 6000m の島弧深部掘削を行うものである。本掘削調査によって、地球表層から内部への炭素・水などの元素フラックスの解明が期待される。

沈み込み帯はしばしば「工場」に例えられる。この工場では、原材料であるプレート物質に含まれる元素を選択的に抽出し、製品である島弧地殻を生産している。この工程によって、軽元素に富むという際立った特徴を有する大陸地殻が誕生する。その一方で沈み込み帯は、プレート抽出残査や大陸地殻形成残査 (反大陸地殻) をマントル深部へ持ち込み、地球内部の元素サイクルを引き起こしている。まさに、沈み込み帯工場は、固体地球の「分化と進化」を支配してきたと言えるであろう。

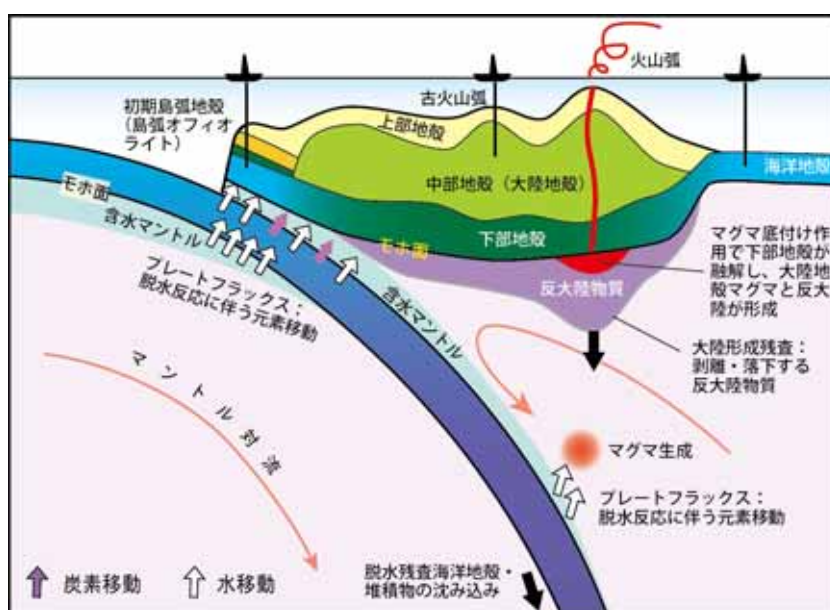


図2. 海洋島弧掘削

ここで注目すべき点は、炭素・水の存在が、プレートからの選択的な元素抽出、発生するマグマやその固結物である地殻の化学組成を決定的に支配することである。例えば、マグマ生成時の炭素と水の割合によって、沈み込み帯で生まれるマグマと島弧地殻の SiO_2 量は 45 から 65 重量%にも変化する。このことは、反大陸物質やプレート抽出残渣の化学組成も炭素・水の存在量に大きく依存することを意味する。

2.3.2 海洋島弧掘削による仮説の実証

このような炭素・水に駆動される沈み込み帯での固体地球の分化過程を理解する対象としては、大陸地殻が十分に発達してそのリサイクルも認められる成熟した沈み込み帯（東北日本弧などの大陸弧）は複雑すぎる。それに代わって、大陸地殻が作られ始めた未成熟な海洋島弧での解析が必要不可欠である。

我が国は、代表的な海洋島弧である伊豆・小笠原・マリアナ弧において、世界でも類を見ない高い精度で地殻・マントル構造を明らかにした。また、マグマの発生・分化の体系化も行ってきた。そして、これらの知見を融合させる事により、沈み込み帯工場内での製造工程や、マントル深部へ持ち込まれる残渣成分の特性と化学進化などをモデル化することに成功した。

このモデリングにおいて唯一仮定されている点は、沈み込み帯工場の製品である、現在の海洋島弧の中部地殻を構成すると考えられる「大陸地殻」の化学組成である。従って、平均的に 4000m の厚さを持つ海洋島弧の上部地殻を貫通し、中部地殻の岩石を採取・分析・解析することによって、沈み込み帯における炭素・水サイクル、大陸地殻の形成過程、沈み込み帯残渣のリサイクルを包括的に理解することができると期待される。

2.4 地球環境変動や海底下生命圏における炭素・水サイクルの役割の理解（縁海掘削）

2.4.1 テクトニックな事象が海洋・地球環境に及ぼす影響

大陸縁辺域に存在する縁海はしばしば島弧によって広大な海洋と切り離される。縁海は、大洋と切り離されているために、地球環境変動の影響を最も敏感に受ける海洋であり、そうした縁海の海底堆積物には、炭素・水の蓄積と移動によって繰り返された気候変動史等が精密に記録されている。

例えば、日本海もそのような縁海のひとつであり、その海底堆積物には、阿蘇カルデラなどの日本各地の巨大な火山噴火のみならず、中国大陸や、はるか遠方のアイスランドや北米西海岸の火山噴出物の記録とともに、乾燥期、湿潤期、氷河期、温暖期などの繰り返される気候変動などが正確な時間軸（堆積物の深さ）とともに記録されている。

そのなかでもとくに、地球上でもっとも巨大な縁海の1つである地中海に堆積した地層の解析によって、600-500 万年前に起こった地中海の蒸発と塩砂漠化事象（メッシニア塩分危機）は、地球システムがこれまでに経験した巨大な環境変動現象の1つであることが明らかになった。この環境変動イベントは、従来の深海掘削によって部分的に解明が試みられている

が、掘削深度の制約や技術的な問題などから重要な試料が部分的にしか採取されておらず、その全容と変動の原因、さらにはこの変動が与えた生命圏や物質循環への影響は未だに解読されていない。

現在、たとえばカスピ海など、世界の孤立した縁海が砂漠化する現実の中で、現在進行中のプロセスを理解し、将来予測に資するには、過去における巨大な縁海砂漠化の現象を正確にモデル化することが重要である。

ライザー掘削による大深度・高圧油ガス域の掘削が可能な「ちきゅう」は、世界的にその学術的重要性が認知されている「メッシニア塩分危機」そのものを記録する、厚さ3000m以上の岩塩（蒸発岩）層を完全回収し、この事変の全容を解明することが可能な、唯一の科学掘削プラットフォームである。

この事変の前後の地中海の地質・気候・生命圏の変動史を解析し、「メッシニア塩分危機」の開始と終焉を引き起こした要因を、特に固体地球と大気・海洋、それに生命圏を加えた相互作用の役割に注目して理解することにより、地球と生命の共進化プロセスに関する重要な新規な知見の獲得が期待される。

さらに、間隙水の塩濃度が飽和状態に近い岩塩層付近の地層には、高度好塩性アーキア（古細菌）をはじめとする未知の極限環境微生物が存在する可能性があり、その環境適応や生命進化の観点から新しい発見が期待される。

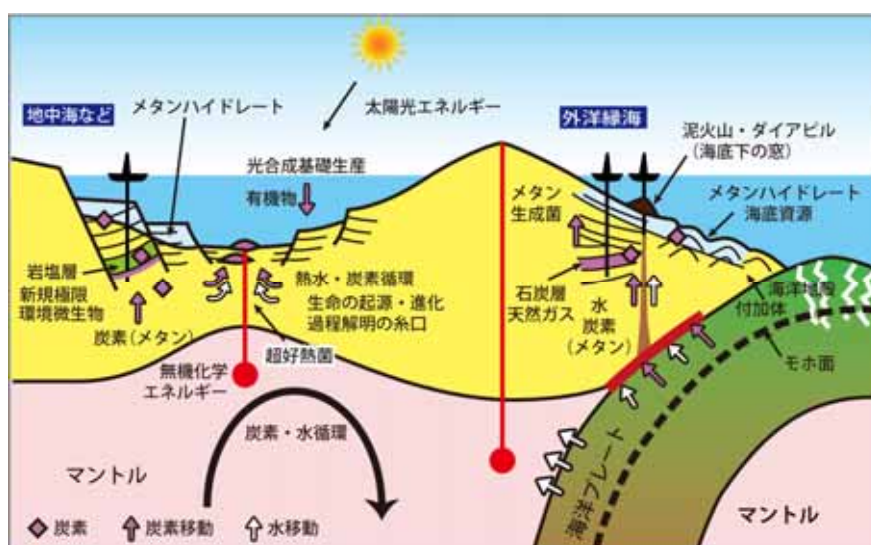


図3. 縁海掘削

2. 4. 2 海底下微生物生態系の機能とその役割

現世において進行中の生物学的・地球化学的プロセスは、過去のダイナミックな気候変動や地球環境変動と同質であり、それらはみごとに海底堆積物に記録されている。また、このプロセスは、縁海における海洋と地殻表層部の炭素・水サイクルに重要な役割を果たしている。

例えば、その多くが縁海堆積物に蓄積するメタンハイドレートや天然ガス等の炭化水素資

源の形成・蓄積過程には、過去の縁海域における卓越した有機物生産とその物理化学的・生物学的な続生作用が深く関与していることが示唆されているが、これまでにライザー掘削による炭化水素リザーバーの深部掘削が行われていないために、その詳細の多くは未だ明らかではない。

縁海の深部環境における炭素・水に関する動態の解明は、有機物を主な代謝エネルギー基質とする莫大な海底下微生物生態系の機能とその地球環境に対する役割の解明など、炭素・水サイクルに関する基礎的な実態解明に資するのみならず、我々の生活に直結する資源・エネルギーの理解や利活用問題にも高い関連性を有しており、将来の持続的な資源・エネルギーシステム構築のための糸口を見いだす可能性を秘めている。「ちきゅう」は縁海における大深度堆積物環境や炭化水素資源胚胎環境に科学的なメスを入れることのできる、唯一の科学掘削プラットフォームであり、地球における炭素・水サイクルの実態解明に不可欠な掘削機会を提供する。

2.5 地球システムの包括的な理解

2.5.1 東日本大震災が示す課題

地球システムの包括的理解にとって重要な事象として、2011年3月に発生した東日本大震災がある。これは、地球システムの急激な変動が人間活動に壊滅的な打撃をもたらすことを見せつけたばかりでなく、これまで東北日本のプレート境界に適用されていた地震学的な中小規模の力学的強結合域＝地震発生域モデルが不十分であり、それらの領域を飲み込むような超巨大地震の発生をも考慮に入れることが必須であることを強く警告したのである。そして、重要なことは、M7－8級の巨大地震を起こす強結合域の挙動とそれらを複数含み、中間の弱結合域を巻き込む、M9以上の超巨大地震の挙動がどのように関連しているかについて、早急に科学的理解を深める必要が明らかとなったことである。

現在遂行されている南海トラフにおける深部掘削科学研究は、南海トラフ沿いに発生が危惧される連動型超巨大地震の実態解明と高度な深部掘削孔モニタリングによる動態研究によって、超巨大地震の科学的理解に大きく貢献できることが期待される。

さらに、世界各地には海溝型巨大地震が発生する地域が複数存在するが、これらの地域についても、歪みの蓄積、地震を引き起こす地殻内部の破壊の始まりや、その拡大様式、破壊範囲の決定要因など、震源域の実態解明や再検討が必要である。そのために、これらの地域の掘削や、地下の地震波や電磁気的な内部構造、海底地形の詳細な変動、震源域から発せられる深部低周波微動やスロースリップイベントなどの微細な活動についての詳細なモニタリングに取り組むことが、より一層重要となる。

2.5.2 変動する地球の理解・解明

このような超巨大地震が発生するプレートの沈み込み帯では、海洋プレートは沈み込む前に大きく湾曲し、断裂することによって流体の通り道を造り、海水を取り込み大きく変化する。また、プレート上部の堆積層も併せて大陸地殻と接しながら地球内部へと沈み込んでいく。こ

の沈み込みの際に、大陸地殻と海洋プレートとは化学反応により固着し、ひずみを増大させ、そしてそのひずみの開放としての超巨大地震を発生させるが、これらの物質や化学反応、流体の量、その地域性、物性の変化などにより超巨大地震の規模、発生様式、発生間隔などがコントロールされていると考えられている。

これらの超巨大地震の予見が困難なことは現状では明らかであるが、それは、実際のプレート境界やその近傍の物質、化学反応、歪蓄積、水や炭素の蓄積量と移動量などを直接実測することができずにいたためである。そこで、地球深部探査船「ちきゅう」を用いて、内部物質を直接手に取ることにより、岩石や軟らかい堆積物の実態解明を行うことが必要である。

さらには、マントル掘削、海洋島弧掘削、孤立縁海掘削を行い、地球の内部物質を直接手に取ることにより地球内部の包括的な理解を飛躍的に進め、超巨大地震の発生も含めた変動する地球の真の姿に迫ることが、その理解・解明のためのブレイクスルーをもたらすと期待される。

2. 5. 3 地球システムの包括的理解に向けて

以上に示してきたように、地球システムにおける水・炭素サイクルの解明に関する意義は、長期的な地球システムの変動のみならず、短期的に、しかも間欠的に起こる超巨大な規模の地球変動においても大きな意味を持っている。そして、それらの長期的連続的な現象と短期的間欠的な現象とが連結して起こる地球変動が、大気、海洋や地殻、マントル、核、というそれぞれの部分との関係とともに、地球システムの進化を決めているのである。そして、そのような地球システムの時間尺度と空間尺度を網羅したシステム変動を明らかにすることが、その包括的理解ということになる。

地球深部掘削を通して得られる水・炭素サイクルはそれらの物質的挙動が、気体、液体、そして固体に取り込まれた形の水と炭素の挙動を意味し、すなわち短期的な挙動の気体、中期的な挙動の液体、そして長期的な挙動を持つ固体内の水・炭素に支配された地球システムの変動の包括的理解なのである。

3. 計画推進体制

広大な海洋底に記録されている地球の歴史を掘り起こし、その躍動的な地球の営みを探る IODP、とりわけ「ちきゅう」を中心として新たな科学を切り開いて行くためには、先端的科学と技術、そしてそれを支える弛まぬ人類の自然への探究心が必要である。それを具体的に、かつ実現可能な体制として推進して行くことが重要であり、それにより人類への貢献がもたらされるのである。その人材育成と一般への普及は次章以降で言及することとし、本章では具体的計画推進体制について言及する。

まず現在の我が国の体制を見ると、全国の大学法人や独立行政法人の研究機関には、多分野に渡る研究者がいるが、所属組織を超えての融合や連携が十分行われているとは言えない状況である。その原因の1つは、昨今の所属組織への貢献要請の増大、そして研究予算の逼迫である。この状況では、大規模な研究計画の推進体制の構築にはほど遠い状況と言わざるを得ない。

「ちきゅう」の科学掘削は、掘削だけでも通常複数年かかって行われ、その計画立案、事前調査や事後研究なども含めれば、5-10 年単位で考えるべき計画である。つまりプロジェクト毎の推進が必要であるということである。そのため組織横断的な研究チームを立ち上げ、研究を牽引するリーダーシップが発揮できる人材と環境、裏打ちされた予算など、研究者にとって魅力ある組織作りが不可欠である。

これについて、そのシンクタンクとなるのは日本地球掘削科学コンソーシアム（J-DESC）であり、実施については IODP の総合推進機関である海洋研究開発機構（JAMSTEC）が中心となって進めていく必要がある。また、そのため、多くの研究者を巻き込み、様々な英知を集める努力をすることが求められ、このことは国内に限らず、国際的に進められることにも留意しなければならない。

「ちきゅう」が 2013 年以降の 10 年間で携わるであろう研究計画は、およそ 3-4 課題程度であると考えるのが妥当である。したがって、グローバル、あるいは国際的な視点として、我が国として進めるべき科学計画が本報告書に（2. および 別添 1. サイエンスプラン参照）記述されているが、これらをプロジェクトとして具体化するための科学と技術の議論をいち早く巻き起こすことが必要で、国際的に公開された議論の場（国際学会やワークショップなど）を J-DESC や JAMSTEC などが作り上げて行くべきである。

研究計画に関する予算は、従来のような政府予算のみに依存するのではなく、企業や財団等あらゆる賛同者、協力者を希求すべきであって、双方にとってのメリットを明確にしていけることが必要である。その任は研究者の説明責任とともに、プロジェクト管理の技術を導入していくことが必要である。

IODP は引き続き日・米・欧により掘削プラットフォームが提供される予定であるので、研究プロジェクトにとって最も効果的で、効率的な運用がなされるように掘削プラットフォームの運用を働きかけて行くことが重要である。そのためにも国際的に公正で透明な評価を受けられるような国際助言組織が必要であり、その運営を司る組織が必要不可欠である。また掘削試料やデータは掘削プラットフォーム毎ではなく、一元管理さ

れ利用者にサービスされることが、研究の推進へと繋がる。したがってそのようなインフラの整備や運用組織の整理等も重要である。以上のような国際組織の維持、運営を財政的に支えるには、IODP に参加する各国の理解と協力が必要である。各国の財政事情は様々であろうが、共通して言えることは、「世界の英知を集めて、科学と技術を融合させてこれまで達成できなかった第一級の科学課題の解決に向け行動する」ことである。あえてここでは「チャレンジ」と言わず、確実な成果、結果を出せるようにすることが肝要である。そのための努力を各国、特に財政当局は弛まなく続けて行く決意をすることである。我が国は、高い志のもと引き続き世界に向けて情報を発信し、国際的な賛同や協力を求めるべく活動して行くことを決意すべきである。

4. 人材育成

人材育成には、本来、明確な理念やビジョンを掲げ、それに基づいたさまざまな長期的施策が必要である。目指す理念やビジョンを定めて、中長期目標を掲げ、一見不可能と思える目標でも、実施すると宣言することで、常識を取り払った発想が生まれる。IODP（統合国際深海掘削計画）における日本のプレゼンスでは、経費の面だけでなく、科学成果という側面でさらに高めていく必要がある。IODP を通じて、科学成果で日本のプレゼンスを欧米以上に高めることは、未来への波及効果も含めて非常に期待される場所である。

IODP は基本的に「ボトムアップ」であるが、日本がより高い発展をするためには、それと併用して、「プルアップ」が必要である。前者はすそ野を広げることであり、後者はトップレベルをさらにレベルアップさせていくことを意味している。「ボトムアップ」については、研究者有志を中心とした「J-DESC（日本地球掘削科学コンソーシアム）コアスクール」「地球システム・地球進化ニューイヤースクール」の開講や「掘削プロポーザル作成支援」「国際ワークショップ」開催等の施策（別添2参照）により、現状でもかなりの成果を挙げているが、今後は「プルアップ」も併用しながらの発展が期待される。具体的には、科学提案、国際会議、研究成果発表に分類される。

科学提案に関しては、J-DESC においては、掘削提案の「種から発芽」までの初段階を行うことを目標としているが、若手研究者に掘削提案の「種」を発案してもらい、J-DESC において審査の上、まず国内中心のワークショップを開催し、より議論を深める。その後、「発芽から苗」の段階は、研究支援制度を活用して、国際的なワークショップへと発展させ、最終的に正式提案に結びつけなければならない。

IODP を実施していくには、提案書作成研究グループや掘削航海を支える非乗船研究グループが必要である。なぜなら、掘削プロポーザルを評価する国際会議においては、提案者などは直接議論に参加できないからである。日本においては、コミュニティが小さいために、この種の研究者人数が非常に限られているが、実際の「提案書の評価・投票」では鍵を握る立場となりうる。したがって、意識的にこの種の人材育成をしていく必要がある。

国際会議および提案書・論文作成については、視点が広い研究者の人材育成が望まれる。日本の教育システムは系統的に広い分野を勉強するように成っていない事が多いので、掘削科学の全分野を系統的に理解することは難しい。そこで、J-DESC を中心として、プロ向けの「レクチャーコース（仮称）」などを将来的に開催して、地質災害、固体地球、環境、生命圏などを系統的に一つのシステムとして知識を身につけ、論理的に繋がった理解をするような育成プログラムの設定が期待される。INVEST 会議（2013 年以降の IODP 科学計画策定に向けた国際会議：2009 年 9 月開催）に向けての国際ワークショップの開催と、それをまとめた掘削科学白書の作成では、人材育成に大きな進歩をもたらしたので、このような活動は非常に期待される。

5. 国民への効果的な広報のあり方

深海掘削を進めるにあたっては、国民から理解を得られるよう、さまざまな工夫をして広報やアウトリーチ活動に努める必要がある。

5. 1 「ちきゅう」を中心とした深海掘削

現在、「ちきゅう」による深海掘削は、IODP（統合国際深海掘削計画）の公正な審査を経て、目的を明確にした掘削が行われている。たとえば、南海トラフや東日本大震災の震源域で計画されている掘削は、地震発生のメカニズムを解明する上で極めて有用である。また、鉱物資源探査に資する掘削や地下生命圏の解明に向けた掘削は、鉱物資源の蓄積と地下生命との間の未知のメカニズムを含んでいるなど、期待される成果は実用的であるだけでなく、「生命とは何か」という人類の根源的な問いに挑戦する課題である。さらに、地球表層から深部までの水・炭素サイクルの解明を目指した掘削によって、地球システムの包括的理解につながり、地球科学の飛躍的な発展が期待される。

このような点をふまえて、「ちきゅう」を中心とした深海掘削に関しての広報は、その目的、進捗状況、得られた成果に関して、国民にわかりやすく説明することに加え、戦略的に進める必要がある。

具体的には第一に、IODPの日本実施機関である海洋研究開発機構（JAMSTEC）の広報担当部署を通じて、できるだけすみやかに、きめ細かな情報発信を、これまで以上に深化させていく必要がある。それによって国内はもちろん、海外での高い評価につながり、科学技術立国・日本の地位が確実に向上する。

第二に、特に日本国内の研究者に対して、得られた情報を広く公開し、活用することで事業は大きな幅を持ち、国内の地震研究、鉱物資源探査などに関する知識の集積に役立つ。また、本事業に予算を拠出することの支持を得るためにも他分野の研究者に向けた情報発信は大変重要である。

第三に、一般国民に対して、「ちきゅう」の公開のさらなる工夫、掘削実績の平易な発表、テレビ報道に対する番組内容に踏み込んだ提案、一般紙への特集の呼びかけに加え、これまで行って来なかった大胆な方法を考えることも意義がある。

第四に、「ちきゅう」における掘削計画を大きなストーリーとして捉える。このためには、掘削計画に関わる人物にフォーカスし、その人物像をとおして、掘削計画への共感を得る。

すなわち、第一によって世界に発信し、第二によって専門家を巻き込み、第三によって一般国民に周知し、第四に親しみや必要性を理解してもらうのである。

知識として「ちきゅう」に関わる掘削計画を発表することはたやすい。それを国民が理解し共感するには、以上4点の要件を満たす必要がある。

5. 2 マントル掘削についての国民への説明

5. 2. 1 未踏のマントルに到達するというフロンティア

宇宙ステーションに滞在し、小惑星からのサンプルリターンが行われる今日においても、約 100 年前に発見された地球内部の「モホロビッチ不連続面（モホ面）」まで到達するマントル掘削は、人類の悲願のまま今日に至る。50 年前にアメリカが挫折し、20 年前にソビエトが断念したマントル掘削において、現在日本は地球深部探査船「ちきゅう」を建造したことによって世界でもっとも達成可能な立場にある。前人未踏のマントル掘削を成功させることは、地球型惑星の実体に迫るための魅力的なアプローチであるだけでなく、技術大国日本の地位を人類史に刻み、さらに、その挑戦によって創出される新技術が今後の日本の発展にとってきわめて大きな利益をもたらすことが期待される。

いうまでもなく、マントル到達という大きな夢を実現させるには、国民に対する十分な説明が不可欠である。国民が十分にその意義を理解し、夢とロマンを共有することができて初めて、このような前人未踏の掘削計画を成功に導くことができる。そのためには、単に知識の理解を深めるのみならず、国民共有の知的財産として、掘削計画の概要や期待される知識が十分に社会に活かされることを周知徹底しなければならない。すなわち、この掘削計画は単なる夢やロマンにとどまらず、未来の科学技術を担う若者を触発して勇気づけ、日本人全体の科学技術リテラシーの向上、ひいては科学技術の担い手の育成に大きな貢献をすべきであり、国民を巻き込んだ掘削計画とするための広報活動が大切である。

5. 2. 2 身近な生活との関連・接点について

マントル掘削は、掘削深度 6km で温度 250℃ を想定している。要求される技術レベルはきわめて高く、マントル掘削によって培われる超深部掘削技術は、海洋底ならびに陸上掘削における石油探査やレアアース鉱床の資源開発を大きく前進させる契機となる。さらに、過酷な掘削環境に耐え得る部品の開発技術や、掘削孔を利用した観測技術は、惑星探査技術と同様に私たちの生活を支える様々なものづくりと密接なつながりがある。マントル掘削は、このように間接的に我が国の産業の基礎に貢献するものである。

5. 2. 3 科学的な価値、興味 これらをいかに効果的にPRするか

わが国は今、2011 年 3 月 11 日に発生した未曾有の大震災からの復旧復興に対し、巨額の財政負担が避けられず、また国民生活も長引く不況のなかにある。大プロジェクトであるマントル掘削の PR を漠然と国民に訴えるだけで、本掘削計画への賛同が容易に得られるものではないことは明らかである。本掘削計画の意義を訴え、国民の十分な理解を得るためには、5. 1 で述べた 4 つの要件をふまえて、PR の対象を複数想定する必要がある。そして、それぞれの対象に適した方法でマントル掘削の理解と賛同を得る努力を行うべきであろう。たとえば、対象として、科学に関心がある一般国民と、科学を生業とする一般国民（科学研究者）とでは、PR の方法はかなり違うものである。

科学に関心がある一般国民に対する PR としては、掘削参加型の広報アプローチが求められるだろう。特に「ちきゅう」が年に数回実施している一般公開を、マントル掘削を周知する機会としてまずは大事にするべきである。「ちきゅう」を見学に訪れる国民こそが、最も関心が高く将来のマントル掘削を支える核となりうる。彼らをマントル掘削の瞬間まで惹きつけていくことが、最終的に国民全体の理解と共感へと発展していくだろう。

ここで、掘削参加型の広報アプローチのアイデアをいくつか例示する。

一番目は「マントル掘削寄せ書きプロジェクト」(仮名)である。一般公開などの際、マントル掘削に使用するツールに見学者の名前を書いてもらう。そして名前リストを保管しておき、10 年後、そのツールをマントル掘削に使用する際にインターネットで中継することによって、寄せ書きした国民にマントル掘削を共有体験してもらう試みである。マントル掘削開始までプロジェクトを続けることで、寄せ書きの延べ人数が数 10 万人規模になることを目指したい。国際的に同様の活動をすれば、さらに波及効果が大い。マントル掘削の広報は、このように今から始めていくべきものである。

二番目に、さらに積極的にマントル掘削に関わりたい国民のために、マントル掘削に使用するドリルビットに少額(郵送代程度)の寄付を募集する「マントル掘削応援プロジェクト」(仮名)を提案する。マントル掘削にあたり、消耗するドリルビットに少額の応援金を寄付してもらうことで、掘削の協力者になってもらう試みである。さらに掘削泥などを乾燥させて寄付した参加者に贈呈することによって、掘削泥とともに参加者の記憶に長く残ることをねらうこともマントル掘削を末永くサポートしてもらうことにつながる。

さらに、「ちきゅう」の様々な装置や設備に対して、国民からネーミング(愛称)を募集する案も、全国規模で周知する広報として有効である。

以上は例に過ぎず、今後、さまざまなアイデアを真摯に検討し、国民を巻き込みながら、合わせて掘削の成果予想を公表していく必要がある。

一方、科学を生業とする国民(科学研究者)に対する PR としては、その他の国民よりもマントル掘削の科学的価値を、明確かつ詳細に提示する必要がある。日頃から学会活動等で鍛えられた科学者の支持を得るためには、例えば 15 分程度の短時間で研究内容を発表することと同様に、論理的かつ簡潔にマントル掘削の意義を説明し、科学的な価値を説得できることが大前提となる。そのため、科学者に向けた PR においてはとくに、マントル掘削に携わる科学者の貢献が不可欠である。

科学者は、たとえ分野が異なっても、新しい知識を文献等によって自らの力で得ようとする。そこでさらなる PR 方法として、マントル掘削に関する記事や総説などを雑誌や書籍を通じて積極的に発表していく。頻繁に目につくほどに情報を発信することが理想であろう。同様に、マントル掘削と直接関わらない分野の学会等においても「ちきゅう」とマントル掘削を紹介するブースを設置するなど、積極的に情報を発信する姿勢も、地道ではあるが効果が期待される。さらに、当該研究者がマントル掘削に関する先行研究を発展させて、一般学術誌に発表することはもっとも強力な説得材料となりう

る。

最後に、マントル掘削に向けた科学的検討を十分に行いながら、同時に国民が理解できる言葉で積極的に話しかける姿勢を科学者自身が取ること無しに、広報活動は成功しないことを強調しておきたい。

6. まとめ

この深海掘削検討会は、2013年9月で終わる統合国際深海掘削計画(IODP)から2013年10月から開始を予定している次期計 IODP について、日本が国際的科学計画をどのように主導していくか、そしてその期待される科学的成果が、国民生活の向上にとってどのような意義があるのかを議論した。また、実行計画がどのように地球科学の内外の分野にとって重要な貢献が期待できるのかについて、各分野の研究者のみならず、国民各階層への説明を如何に行い、その結果として国民からの広範な支持をどのように受けるかについて、議論を行うために開かれた。

このために5回の検討会と、1回のワークショップを開催し、深海掘削検討会のメンバーは別記するように関連する分野の広い範囲をカバーするとともに、さらに広範な諸分野からの講演を受け、現代的な巨大科学となっている地球深部掘削科学がどのように科学の諸分野に、そして社会に影響を与えるのか、社会から影響を受けるかについて議論を深めた。

その結果、「ちきゅう」による深海掘削計画が、大きくは地球の各システムにおける炭素・水循環を中核とした地球システム進化の包括的理解を目指すことが、総合的に科学諸分野にとっても新しい地平を切り開くものであることが指摘された。

特に、この計画の実行により到達しようとするのは深海底の、しかも海底から地下へ6kmを超える未踏の地下圏であり、人類が作ってきた従来の探査船では到底なしえない領域への挑戦である。これはわが国が技術の粋を集めて建造した地球深部探査船「ちきゅう」でのみ可能な世界なのである。この探査船によって、人類未踏の世界を人類の生存圏の最外縁とすることができる。

その内容は、これまでの科学のパラダイムであったプレートテクトニクスおよびプルームテクトニクスの運動論に物質分布、物質変化、そして分化を新たに付与するものであり、これによってプレートテクトニクスそしてマントル対流を取り入れたプルームテクトニクスの運動論から、実質的に人類社会の持続的発展にとって必須の要素である、巨大大自然災害からの防御、極限生命圏などの地下生命圏探査、エネルギー・有用材料資源の探査・新規獲得などを含むものである。

このような内容を持つ「ちきゅう」を中心とした次期計画は、巨額の費用を必要とすることは明らかである。深海掘削検討会では、このことについても議論を深めてきた結果、報告にもあるように、次のような4つの段階を構築することが重要である。

それは情報発信の緻密化、情報の公開と活用と知識の集積、国民に対する「ちきゅう」の公開、掘削実績の平易な発表、テレビ報道に対する番組内容に踏み込んだ提案、一般紙への特集の呼びかけ、さらには、「ちきゅう」プロジェクトストーリーの展開と公開などが大変重要となるとの結論を見た。すなわち、第一によって世界に発信し、第二によって専門家を巻き込み、第三によって一般国民に周知し、第四に親しみや必要性を理解してもらうという一連の流れが必要であろう。このような視点は従来にない考え方であり、今回の検討会で到達した新しい科学と国民との関係の有り様であろう。

このように、本深海掘削検討会は多くの命題について、短時間ではあったが、また東日本大震災という未曾有の事態があったが、その中で、分野を超えた真剣な議論の結果、有意義な多くの結論を見たといえる。今後の実行計画への展開を期待したい。

別添 1. サイエンスプラン

このサイエンスプランは、IODP 新科学計画 (Science Plan for 2013-2023) の中から、我が国としてどのような科学目標を重点とするかについて、ワークショップ「深海掘削による生命・地球科学の新しいパラダイムを求めて」(2011 年 5 月 21 日開催) にて議論された内容をもとに 4 つの分野について取りまとめたものである。

1) 生命科学

1. はじめに

約半世紀以上におよぶ深海科学掘削の歴史の中で、2002 年にペルー沖および東太平洋赤道域で行われた ODP Leg 201 によって世界で初めての海底下生命圏の解明を目的とした掘削調査航海を行ったのを皮切りに、それまでに多くの実態が未解明であった海底堆積物内に含まれる微生物細胞の量や遺伝学的多様性、代謝活性等に関する様々な分子生物学的および生物地球化学的研究が行われてきた。

深海科学掘削によって明らかにされた海底下生命圏に関するいくつかの重要な知見(パラダイム)として、

- ①海底堆積物に含まれる微生物細胞のバイオマスは、地球上の全生命体炭素量の最大約 10%を占める
- ②それらの微生物群集は陸域や海洋などの地球表層生命圏の構成種とは系統的に離れた性状未知の生細胞である
- ③そのゲノム構造の大部分は、既知機能遺伝子のデータベースに相同性を示さない未知遺伝子から構成される
- ④現場環境における代謝活性は、海水や玄武岩帯水層等から供給される水・栄養・エネルギー基質のフラックスに依存する
- ⑤その生態系の多くは、海水表層における光合成基礎生産に由来する埋没有機物を基質とする従属栄養型微生物から構成されている

などが挙げられる。

これらの深海科学掘削によって達成されたパイオニア的成果は、海底堆積物内に広がる生命圏が、我々が知る地球表層生命圏とは多様性や生理生態、地球システムにおける役割等において著しく特性の異なる「未知の生命圏フロンティア」であることを物語っている。

一方、深海科学掘削によって海底下生命圏の実態が明らかになるにつれ、我々は「そもそも生命そして生命圏とは何か」といった生命科学の根幹に迫る命題に直面しつつある。即ち、惑星内部において自らの生命機能を維持し、種の存続を成し得るための生息可能条件(ハビタビリティ)やその生命体の起源・進化プロセス・環境適応等について、我々の知識は未だ机上の空論の域を出ていないと言っても過言ではない。将来の深海科学掘削による生命科学は、その命題の本質的な実証に直接迫ることのできる、唯一

のフィールド研究手段である。

深海科学掘削を通じて、生命活動を規定する温度・圧力・pH・間隙率などの物理化学的条件の他にも、持続的な生命活動を支える流体移動や酸化還元ポテンシャルを含めた様々な環境場における生息可能条件について、生命シグナルの高感度・高精度な分析を行うと同時に、地球化学・水文学・物理特性・地質学などの多面的分野から地球内部における生命活動の実態と生命圏の成り立ちを理解する必要がある（図1参照）。それは究極的には、地球と人間を含めた生命との共存が、過去から現在そして未来において、どのように営まれ、どのようにあるべきかを知る上での重要な手がかりとなる。

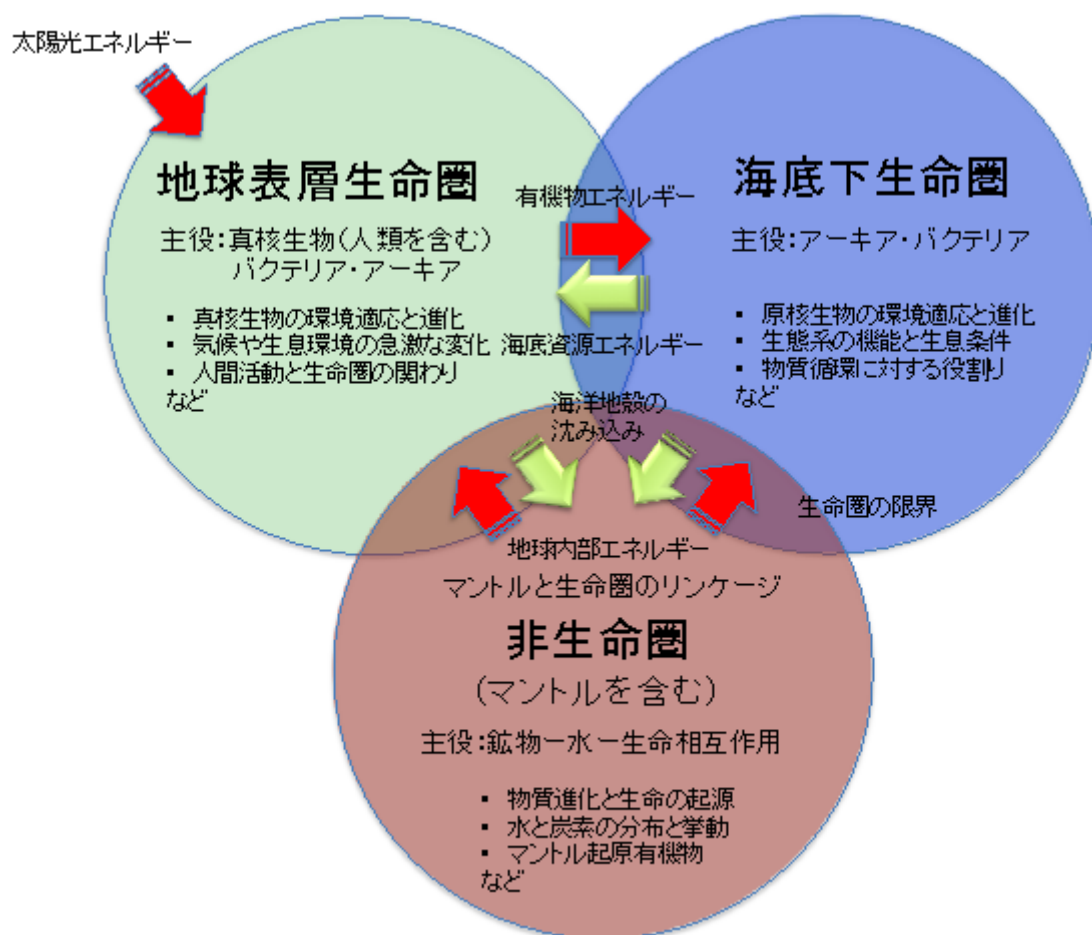


図1. 生命圏と非生命圏の相関と科学的課題を示す概念図

2. 科学目標と期待される成果

従来までの深海科学掘削における生命科学の研究過程において、研究者の間で漠然と理解しながらも、実は明確な検証が成されていない、いくつかの重要な科学的疑問が残されている。

例えば、「海底下生命圏の規模」について、現在のバイオマス試算は極めて限定的な海洋学的セッティングと深度空間に基づくものであり、地球全体の海底下生命圏のバイオマスや空間規模を正確に把握するには、地球規模の高精度細胞密度の空間分布や、上部玄武岩帯水層などの岩石圏における生命検出およびバイオマス試算が必要である。

また、「海底下生命圏の物質循環における役割」に関する知見も極めて限られている。海底下の微生物代謝活性は、地球表層生命圏に比べて極めて微弱な活性ながらも、地質学的な時間スケールをかけて、地球表層をも含めた炭素や窒素・酸素・水素・硫黄・リンなどの物質循環系に対してある一定の役割を果たしていることは事実であろう。しかし、その環境場における外的要因や空間地理的な分布、各元素の循環に対する生物学的な物質変換フラックスやマスバランス、さらに気候や海洋などの地球環境変動に対する影響などを含め、未だ科学的に重要な未解明の問題が残されている。とりわけ、大陸沿岸のメタンハイドレート生成・消費を含めた炭化水素循環のメカニズムには、海底堆積物内の微生物生態系による有機物分解作用やメタン生成活動の寄与が大きいと推測されながらも、未解明の部分が多い。

これらの課題は、2002年に公表されたIODPにおける主要科学目標にも部分的に明記されているが、地球深部探査船「ちきゅう」による掘削研究調査を含めて、将来の深海科学掘削に残された重要な課題となっている。

2013年以降の次期深海科学掘削は、海洋地殻の浅部から上部マントルを含む大深度までの、あらゆる掘削コア試料と海洋学的・テクトニクス的環境セッティングにおいて、

- ① 地球史における動的地球環境と海底下生命の共進化プロセス
- ② 海底資源・エネルギー環境に関連する生命活動の機能および役割
- ③ 鉱物-水-生命相互作用と酸化還元状態の解明
- ④ 生命圏とマントルのリンケージ

等の主要な科学目標を追究する上で、極めて重要かつ希有な研究機会を提供する。これらの研究の科学的新規性・重要性は極めて高い。

深海科学掘削による、未だ人類が科学的メスをいれたことのない生命圏フロンティアの開拓と最先端の地球科学-生命科学融合研究の実践により、地球惑星における生命の本質に迫る基盤的研究から有用代謝機能や新規遺伝子資源などを活用した応用開発研究などの幅広い分野において、地球システムにおける新しいパラダイムの創成や転換、さらに将来の人間社会と地球環境の共存に関する極めて重要な知見を獲得する必要がある。

3. 作業仮説

① 地球史における動的地球環境と海底下生命の共進化プロセス

40億年を超える地球環境と生命の歴史において、生命は常に地球の環境変動に適応した進化を遂げてきた。陸域や海洋などの大気を含めた地球表層の生態系は、プレートテクトニクスやマントルテクトニクス、隕石などの天体衝突イベントなど、地球の内的・外的要因による劇的な環境変動に敏感に反応し、遺伝子の突然変異等によって新し

い形質を獲得し、環境に適応・進化した種が繁茂する生態系を構築してきた（本編 2.4 参照）。

これまでの深海科学掘削で得られたコア試料の古環境学・古生物学的研究は、新種の発生と既存種の自然淘汰による新しい生態系が、地球環境をある一定の秩序やバランスを保って維持する上で重要な役割を果たしてきた事実を明らかにした。

しかしながら海底下生命体については未知な部分が多く、生命の進化論的概念にまで影響を及ぼす可能性がある。ダーウィンの進化論に代表される地球表層生命圏を対象に構築されてきた既存の進化論的概念は、生命活動に必要な物理的な生息空間や、生命活動の維持に必要なエネルギー供給フラックスに極めて制限のある地下生命圏に適用できるかどうかは定かではない。海底下生命圏における生命の進化論は、将来の深海科学掘削における生命科学で検証すべきパラダイムの一つである。

一方、約半世紀におよぶ深海科学掘削の歴史の中で培われた掘削地球科学の特徴の一つとして、コア試料の形成年代や環境中の流体フラックスあるいは化石水の年代など、時間軸に関する研究アプローチが成熟している点が挙げられる。これは、生命科学分野においても、ゲノム進化や動的な生命活動を評価する上で、極めて有効である。

将来の深海科学掘削における生命科学研究の中で、ゲノムに記録される分子進化・分子時計などの進化学的研究や、海底下の生命活動に伴うエネルギー・化学反応速度論的なバイオフィーマティックス研究を通じて、地質学におけるプレートテクトニクスに相当するバイオームテクトニクスの、惑星内部における生命進化および生態系構築に関する新しいパラダイムが創成されるかもしれない。

さらに、地球史の様々な環境イベントに対する進化的なレスポンスに加えて、構築された海底下微生物生態系の代謝活動が地球規模での物質循環や気候変動、地球表層生態系や海洋の化学的性質などに対してどのような影響を及ぼしたかについて、過去から現世、さらに将来予測を含めた、海底下生命活動の生物地球化学的な役割の追究が極めて重要である。

② 海底資源・エネルギー環境に関連する生命活動の機能および役割

海底下に存在する金属資源・炭化水素などのエネルギー資源は、地球表層および内部環境の動勢や化学反応、さらに生命活動による続成プロセスと深く連動している。例えば、大陸沿岸堆積物に胚胎するメタンハイドレートなどの天然ガスや石油・石炭などの炭化水素リザーバーの形成過程には、主に陸域もしくは海洋性の光合成生物に由来する有機物を起源とした微生物生態系が寄与し、地層の沈降や海水準変動などの大陸縁辺の地質形成史に深く関与していると考えられている（本編 2.4 参照）。

しかしながら、海底堆積物内の炭化水素の根源に迫る深海科学掘削はこれまでに実例がなく（産業利用を目的とした資源探査を除く）、有機物の分解プロセスに関わる海底下生命活動の役割や代謝機能、地層内流体およびガス成分の挙動や移動メカニズム、テクトニクスの背景を含めた炭素循環システムに関する科学的な知見は限られている。

また、近年の「ちきゅう」による沖縄トラフ熱水活動域の掘削調査（IODP 第 331 次

調査航海)により、従来の予想を上回る規模の海底地層内の熱水循環と鉱床形成メカニズムが明らかになりつつある(図2参照)。地球の内部エネルギーに依存した大規模な水循環プロセスの解明は、同時に、堆積物および岩石との様々な化学反応や物理化学特性の変化、金属や炭化水素などの海底資源形成メカニズムの解明・発見に繋がる可能性がある。さらに、外洋の広範囲の堆積物に存在する熱水起源の金属酸化物がレアアースを濃集していることが明らかになってきた。

これらの海底資源・エネルギーに関連する微生物生態系の実態や役割の多くは未解明であり、将来の海洋掘削科学を通じた生命科学研究によって明らかにすべき重要な科学目標の一つであると同時に、研究成果の実社会・産業との関連性も非常に高い。特に、海底下の炭化水素資源域の深海科学掘削は、「ちきゅう」のライザー掘削能力を発揮して初めてその学術フロンティアを切り開くことが可能である。

近年の二酸化炭素排出削減や天然ガス・メタンハイドレートなどのクリーンエネルギーの需要に伴い、海底資源の回収や二酸化炭素地中隔離などの地球工学的な研究開発の需要が高まっている。次期科学計画では、海底資源・エネルギーに関する過去から現在の地球環境イベントの実態解明を通じて、環境保全やジオハザード、生態系や気候に与える影響、持続的な資源・エネルギーシステム構築などに関する理解を深め、人間活動と地球環境の共存のあり方を社会に提供する必要がある。

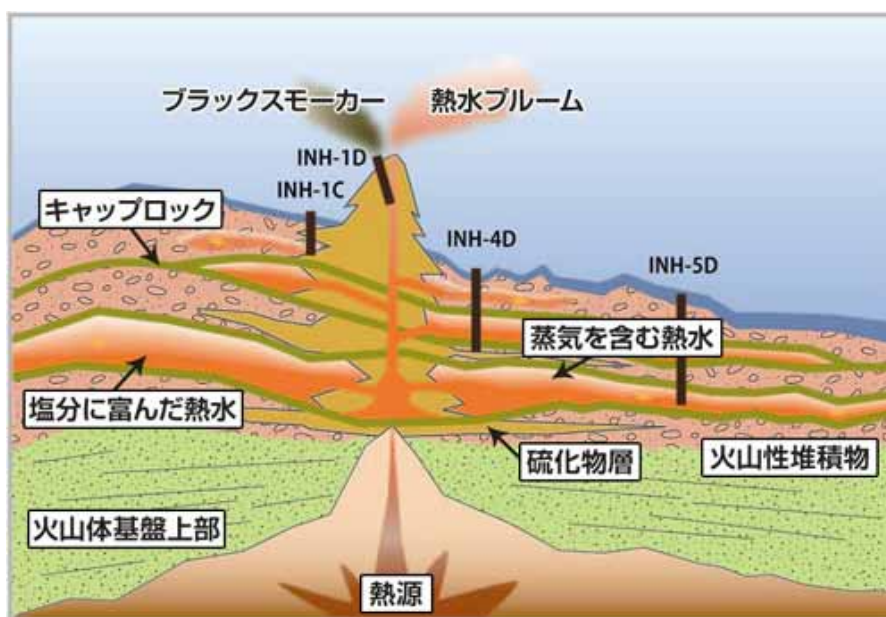


図2. 「ちきゅう」を用いた中部沖縄トラフ伊平屋熱水活動域における IODP 第 331 次調査航海により、海底堆積物内に大規模な熱水循環と黒鉱型金属鉱床が発達している可能性が示された。

③ 鉱物-水-生命相互作用と酸化還元状態の解明

海底下環境において生命が存在しうる条件の一つとして、細胞を構成する DNA やタンパク質の物理化学的な損傷を修復し、地質学的な時間スケールでの生命機能維持および

増殖のための代謝エネルギーを獲得するというプロセスが必要とされる。

それらの生体エネルギーは、主に異化的な呼吸代謝によって獲得される。こうした生命活動を支える根源は、太陽光および地球内部物質がもたらすエネルギーであるが（図1参照）、巨視的な観点から、海底下の生命圏は地球表層と地球内部との間に存在する酸化還元電位の違いによって支えられていると言っても過言ではない。

とりわけ、断層や堆積物—玄武岩境界、蛇紋岩・泥ダイアピルなどの地球内部と地球表層の境界をつなぐ場を流れる「水」の役割は、あらゆる生命を構成する必須の成分として、また酸化還元反応を担う化学物質のキャリアとして極めて重要である。

「水」の動態および酸化還元反応による地球規模での物質循環メカニズムは、将来の深海科学掘削における生命科学と地球化学・鉱物科学・同位体化学・化学状態分析などを融合した多面的な分析アプローチによって解明されなければならない。

このうち同位体化学は、物質の起源解明、化学反応の特定、生命活動の影響を知る上で極めて有効である。近年発達の著しい二次イオン質量分析とナノテクノロジー・分子生物学的手法を組み合わせた微小領域での同位体質量分析は、細胞全体のみならずその内部の器官や代謝産物である生体鉱物を選択的に分析する空間分解能を持ち、現世から過去にかけての生命活動を理解する上で、極めて有用性の高い分析アプローチとして手法開発が進んでいる。

また、放射光X線分析を主とする化学状態分析も、近年あらゆる元素の価数や結合状態が解明できるレベルまで急速な発展を遂げており、地球化学反応の素過程解析や地球化学反応と生体反応の関わりを調べる上で必須の分析アプローチである（図3参照）。

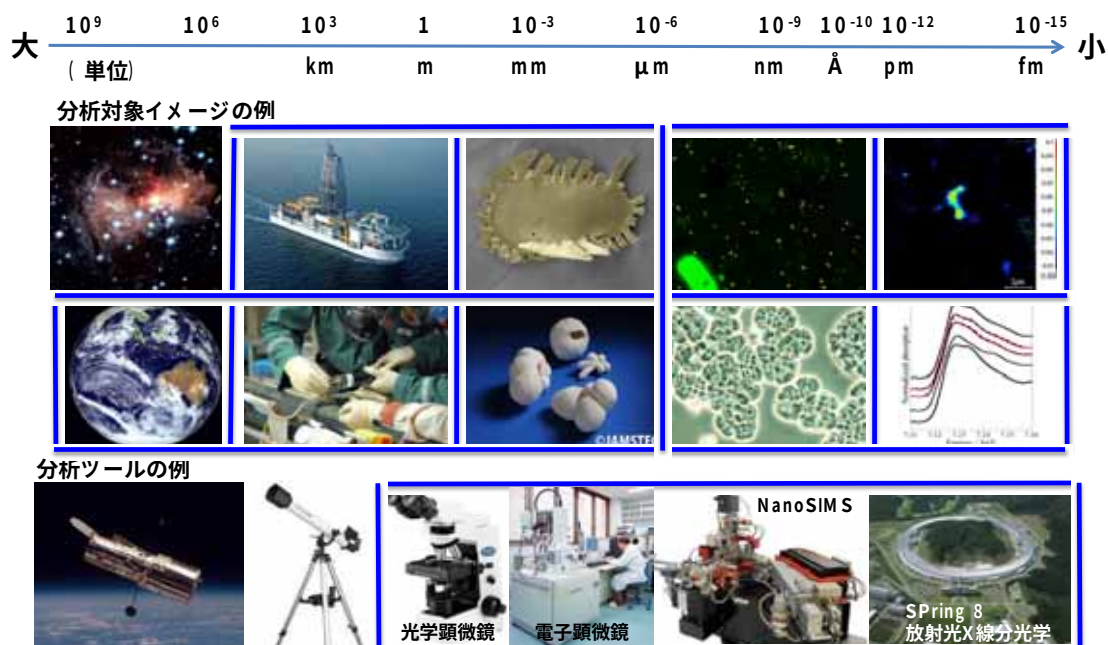
海底下環境における「鉱物-水-生命相互作用」を理解するには、地球科学と生命科学を融合した最先端分析手法を掘削コア試料に適用することにより、以下に代表される研究が不可欠である。

- ①地球深部の酸化還元ポテンシャルと生命活動の関係
- ②地球深部の水循環の解析に基づく水-鉱物反応によるエネルギー生産場の持続性
- ③同位体・化学種分析法による新しい環境プロキシの開発と過去から現世の生命活動シグナルや環境情報の変遷の解明

とくに酸化還元状態の攪乱がないコア試料採取技術の開発と協働することで、生命活動エネルギーを供給する岩石・堆積物中の鉱物-水相互作用や遷移金属の化学状態変遷メカニズムが解明できる。

さらに、生体内微量金属を含む様々な元素の物質循環および化学的挙動の詳細を追究することにより、地球表層から大深度内部環境までの海洋地殻における空間的な酸化還元状態および地球表層と海底下の生命活動を支える条件が明らかとなる。

科学海洋掘削における“Power of Ten” 微小領域における高精度・高感度分析技術の重要性



科学海洋掘削におけるマクロな分析からアトミックスケールの高感度・高精度分析を通じて、海底下における「鉱物-水-生命」相互作用や生命活動を支える酸化還元状態を解明する

図3. 次期科学計画では、放射光X線分光光学や超高感度二次イオン質量分析計（NanoSIMS）などの微小領域における高感度・高精度分析技術の発展に伴って、マクロからアトミックスケールにおける幅広い生命科学の展開が可能である。

④ 生命圏とマントルのリンケージ

将来の深海科学掘削において、「ちきゅう」のライザー掘削能力・船上分析能力およびライザー掘削孔を用いた検層・地殻内流体の現場採取能力をフルに活用し、地球表層から人類未踏の上部マントルまでの一連の「鉱物-水-生命相互作用」のシーケンスを解明することは、地球科学・生命科学における幅広い分野に対して巨大なインパクトを与える革新的なパラダイム創成に繋がる。

「ちきゅう」のライザー掘削により、上部モホ面を貫通するマントル掘削計画が達成されれば、その科学的意義は、地質構造の変化や物理化学的・鉱物学的な実態解明に留まらず、「水」と「炭素」を主要媒体とした「生命圏とマントルのリンケージ」といった壮大な科学目標を達成するであろう（本編 2. 2. 2 参照）。

「生命圏とマントルのリンケージ」の解明は、地球惑星における生命圏の成り立ちを理解する上で重要である。地球の内部エネルギーであるマントルの挙動は、地球表層における太陽光エネルギーと双対をなす恒常的なエネルギー供給源として、地球における生命の誕生と生態系の確立に重要な役割を果たしたに違いない。とりわけ、生命存続機能として必須の半保存的複製機構を備えた核酸様物質や、細胞骨格形成に必須の炭化水

素膜構造などの、地球上のあらゆる生命体を構成する生体高分子の発生および初期構築プロセスは、初期地球環境における単なる偶然反応産物と考えるよりはむしろ、我々の知らない地球環境条件において絶え間なく起きているプロセスから生じる必然的な産物群から生じたメカニズムであり、その鍵を握るのは地球の内部エネルギーであるマントル物質と水との相互作用環境場、つまり現世において唯一海洋地殻の誕生から恒久的プロセスが進行していると推測される海底下深部空間である。

海底下深部環境における「水」と「炭素」の挙動の多くは、掘削による直接的な証拠を得るまで未解明である。初期地球における太陽光に依存しない無機化学因子に依存した化学合成独立栄養微生物生態系の発生には、マントル物質と水の相互作用やマントル由来の化学物質の酸化還元反応によってエネルギーを獲得し、その細胞骨格を成す生体高分子を合成しなければならない。直接的にマントルに由来する生命構築のために使われた化学物質として、一酸化炭素や二酸化炭素などの酸化物質と水素や還元体硫黄化合物などの還元物質が挙げられるが、その他にエネルギー基質および補酵素金属として不可欠な遷移金属元素や、窒素やリン、アミノ酸などの細胞同化基質として必須なマントル由来化学成分について、その量や性状の理解は極めて重要である。

「生命圏とマントルのリンケージ」を解明する上で、生命の生息可能域の物理化学的・エネルギー的な限界値を理解し、地球惑星における生命圏の深度限界や規模および生命圏と非生命圏との境界を高感度・高精度の細胞検出定量法や代謝活性測定法によって規定する必要がある。

その上で、地球の生命および生態系の起源や進化に不可欠な、非生命圏内における化学反応プロセスおよび流体移動プロセスが重要となってくる。例えば、将来の「ちきゅう」を用いた深部海洋掘削により、堆積物に含まれるバイオマス炭素が、付加体や海嶺における海洋地殻の構成過程において、あるいは沈み込んだスラブの分解や融解に伴って、どのようにマグマや上部マントル中の炭素種の化学組成や炭素濃縮プロセスに関与しているかが明らかにされれば、地球規模の炭素循環プロセスや、生命の誕生・初期生命進化を理解する上で直接的な証拠を得ることに繋がるであろう。これは、地球科学および生命科学における新しいパラダイムの創成に必ず直結する。

実際に、オフィオライト中の新鮮なテクトナイトや、超塩基性岩やアルカリ玄武岩中に含まれるゼノリスは、かなり普遍的に細胞膜を構成する脂肪族炭化水素や石油に類似した有機化合物を含んでいる（図4. 参照）。

しかしながら、これらのマントル由来物質に含まれる炭化水素の起源や成因は定かではなく、例えば、深部の蛇紋岩化プロセスに伴うフィッシャー・トロプッシュ反応などの有機合成反応的な要因や海洋地殻に含まれる生物起源の有機物の対流による残存物の可能性がその仮説として挙げられる。それらのマントル由来物質に含まれる炭素の量や化学的性状は、その起源や形成メカニズムの解明を含め、地球における生命の誕生や発生プロセスを解明する上で極めて重要な手がかりとなり得る。

以上の理由から、「炭素」と「水」に関わる生命科学は、上部マントルまで到達する「ちきゅう」を用いた深海科学掘削において検証されるべき最重要科学目標の一つとし

て位置づけることができる。

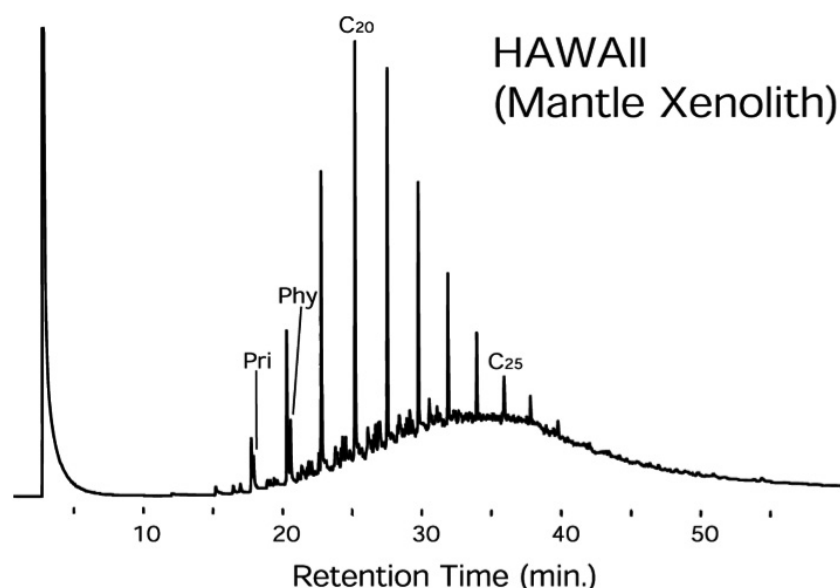


図4. マントルゼノリスやテクトナイトに含まれる高分子有機物の代表的なクロマトグラム。プリスタンやファイタン、長鎖炭化水素などの石油に似た組成を持つ。(Sugisaki and Mimura, 1994)

4. 技術的課題

現在、堆積物や岩石に含まれる微弱な生命活動シグナルを捉えるための地球科学-生命科学融合分析技術は急速な勢いで高精度化・高速化・高感度化している。例えば、従来法であれば評価が困難とされていた現在進行形の生命活動の可視化・定量化を分子質量や遷移状態のレベルで可能にする技術は実用段階にあり、環境中で重要な微生物種のゲノム構造や膜脂質構造などを単一の細胞から網羅的に解読する手法（シングルセルバイオロジー）が日進月歩の進化を遂げている。

それらの高感度・高精度・高速分析技術を用いて、海底下の生命シグナルや生息環境の酸化還元特性などを正確に評価するには、掘削や試料処理などの人為的プロセスによる研究対象試料の汚染（コンタミネーション）を回避するための細心の注意とモニタリングが必要である。試料中に含まれる生命シグナルを正確に捉えるためには、物理的破碎の少ない良質なコア試料の一部を迅速にかつ無菌的に分取し、陸上施設における詳細な研究のための船上処理が極めて重要である。また、生息環境における栄養・エネルギー状態や酸化還元状態を正確に把握するため、保圧コアリングと非破壊分析を組み合わせた実環境試料分析技術の開発・改良や、船上において微弱な代謝活動を評価するための非密封放射性同位体基質などを用いたトレーサー実験施設が必要である。

また、「ちきゅう」によるライザー掘削によって海底下深部の生命科学研究を展開する際に、ライザー掘削の特徴の一つである循環泥水を利用したマッドガスモニタリングを高精度化し、炭化水素や希ガスの高精度船上分析を拡充する必要がある。ライザー掘

削孔を用いた検層・現場サンプリング技術は、生命科学研究に極めて有用である。例えば、石油業界で開発が進められている地層内流体の現場化学分析と保圧サンプリング技術は、生命科学分析に必要な十分量の流体試料を得る数少ない手法の一つであり、将来の大深度深海科学掘削における強力なサンプリングツールの一つとなる可能性がある。

さらに、海底下環境を天然ラボとして捉えたポストドリリング研究は、生命科学分野を含めた幅広い分野の研究において、次期深海科学掘削のポテンシャルを大きく拡大する新しい複合的研究アプローチである。孔内センサーによる環境因子のモニタリングのほかにも、掘削コア試料を用いた研究が困難であった岩石圏内の生命活動の検出や現場培養実験など、生命科学に関連する様々な現場実験研究の展開が期待される。

5. ファシリティの活用

次期科学計画における生命科学分野の展開に必要なファシリティとして、まず「ちきゅう」の掘削試料採取能力と船上分析能力の強化と利活用がある。とりわけ、ライザー掘削システムを用いた炭化水素系海底資源掘削や上部マントルまでの大深度掘削において生命科学研究を展開するには、無機・有機地球化学と微生物学・分子生物学に関連する船上分析機器や保圧掘削設備、石油業界などで開発が進んでいる検層・現場サンプリングツールなどの導入・整備が必要である。勿論、良質の大深度掘削を実現し、良質なコア試料を採取するためのハード的な技術開発、および掘削孔を利用したポストドリリング研究を展開するための技術開発は不可欠である。

深海科学掘削やポストドリリング研究調査を通じて適切に採取・処理をされた海底下の生命科学研究試料は、海洋研究開発機構をはじめとする大学・独法研究機関などに整備されている各種質量分析機器や無機・有機地球化学分析機器、実環境培養実験装置や単一細胞分析機器、遺伝子組換え実験設備などを拡充・高度化することで、最先端の生命科学研究の展開が可能である。特に、SPring-8などの放射光を利用した酸化還元状態などの局所分析や超高解像度・高精度の電子顕微鏡分析機器、各種同位体質量分析計などの、従来の深海科学掘削において適用されていない分析機器のインフラ整備や既存の大型分析機器の利用は、生命活動を支える酸化還元環境や物質循環システムに関する新しい知見を獲得する上で極めて有効である（図3参照）。

現在、海洋研究開発機構と高知大学が共同運営する高知コアセンターでは、世界各地で展開されるIODPの航海期間中に、RMS (Routine Microbiology Sample) として無菌的に採取されたコア試料の一部を液体窒素タンクなどの極低温環境下で適切に保管し、将来の生命科学研究に供するキュレーションサービスを開始している。RMS試料は、将来の新しい生命科学分析ツールを用いた研究や、メタゲノムなどを対象にした世界規模での生命科学研究プロジェクトなど、海底下生命圏に関する次世代生命科学研究を可能にする深海科学掘削の共有財産として利活用を進める。

6. 社会的波及効果（防災、環境、資源エネルギー等）

将来の深海科学掘削を通じた生命科学研究は、地球における生命誕生や生命進化などの基礎的な学術基盤を大きく拡大するポテンシャルを有するのみならず、現世における人間活動を含めた生態系バランスの維持メカニズムや海底資源エネルギーなどに関連する生命活動の解明、さらに新しい微生物資源・遺伝子資源としての利活用手法の開発など、幅広い社会的波及効果が期待できる。

例えば、大陸沿岸の海底下の微生物活動は、次世代クリーンエネルギーとして注目されるメタンハイドレートやコールベットメタン等の天然ガスの生成過程に深く関与しているが、その詳細は明らかではない。

また、産業的な二酸化炭素排出削減に有効な手法の一つとして、世界各地で海底下への二酸化炭素地中隔離が検討されているが、海底下の微生物活動を介した持続的炭素循環システム（ジオバイオリアクター）の構築や環境浄化・保全技術などに関する地球生命工学的な研究が進みつつある。

さらに、海底下表層付近や海底下熱水循環域に発達する金属鉱床の形成メカニズムに関連する生命活動や、断層や泥火山といった動的地質環境における微生物活動の実態解明とその利活用手法の創出も期待されている。

海底下生命圏に関する従来までの研究により、海底堆積物内に生息する微生物の多くが生理・生化学的性状が未知の未培養微生物系統であることが明らかとなっている。陸域や海水中などの既知微生物種と比べて、その生息環境が大きく異なることから、産業上有用なポテンシャルを有する新しい微生物資源の獲得が期待される。

例えば、これまでに海底堆積物に埋没した難分解性産業廃棄物である有機ハロゲン物質の分解作用が確認されているほか、各種有用酵素を生産する細菌株が分離培養されている。リアクター培養技術による嫌気性海底下微生物の培養や、基質誘導型遺伝子発現解析などのバイオテクノロジー技術を海底下の微生物生態系に適用することで、新たな有用微生物・遺伝子資源の開拓やその産業的利活用に関する応用研究の展開が期待できる（図5）。

さらに、将来の「ちきゅう」を用いた上部マントルにまで到達する大深度掘削において、特にマントル起原有機物もしくはスラブ由来のリサイクル有機物に関する定性的・定量的な生命科学研究は、生命の起源や地球深部の炭素循環、地球内部における炭素および水の局在性や循環システム、そしてマントルと海洋地殻を含む地球表層生命圏との相互作用などを考える上で学術的に極めて重要であるばかりでなく、石油や天然ガスなどの資源エネルギー業界に極めて大きなインパクトを与える可能性がある。

上記のように、次期深海科学掘削における生命科学分野の幅広い展開とその研究成果は、生命圏フロンティアの開拓と分析研究を通じて学術基盤を顕著に醸成すると共に、地球環境や資源エネルギーなどに関連する社会的関心事や世界共通の問題などに対して、極めて大きな波及効果が期待できるだろう。

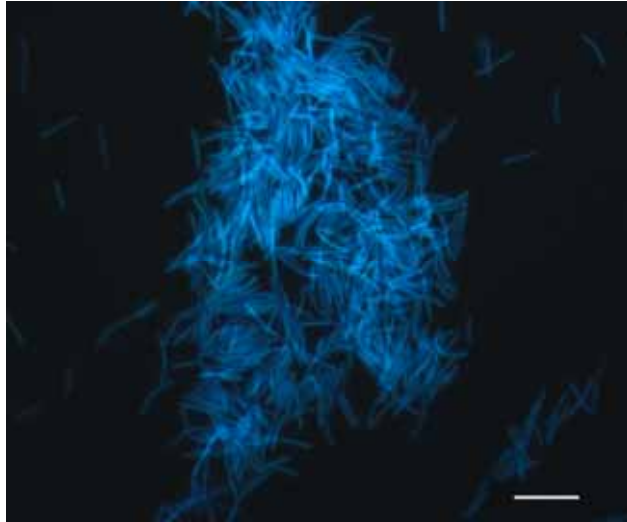


図5.「ちきゅう」により下北八戸沖で採取されたコア試料から、リアクター培養法を用いて分離されたメタノバクテリウム属に近縁なメタン生成アーキア。スケールは10 μ m。(Imachi et al., 2011)

2) 固体地球科学（ジオハザード等）

1. はじめに

海洋プレートの沈み込みは、地球科学的にはマンツルの熱対流の原動力となり、テクニツクな変動とグロツバルな物質循環を引き起こしている。これらの地球変動は、ジオハザードという観点においても重要である。

それは、最大規模の自然災害である巨大な地震や津波、火山噴火を引き起す過程であり、また、温暖化において鍵を握る物質である炭素と水を地球表層から固体地球内部に運ぶ過程でもある。とりわけ注目されるのが「水」である。実は、水の移動は地震の発生や火山噴火にも重要な働きをしている。

このような沈み込み帯の変動現象の解明にブレイクスルーをもたらすと期待されるのは、海洋プレートが沈み込む現場を直接観察できる唯一の手段である深海掘削である。地球深部探査船「ちきゅう」による南海トラフの掘削は、プレート境界地震の断層がどのように滑るかを解明するなど、まさに現場を直接観察することの重要性を示した。

さらに、深海掘削により巨大地震の断層帯や巨大噴火のマグマ溜まりを直接観察するだけでなく、掘削孔内における物理学的・化学的な長期観測や実験により、その活動の時間変動を現場で観測することが可能になる。

以下では、差し迫った課題となっている海溝型巨大地震と巨大噴火に焦点を当てて課題等をまとめる。

2. 科学目標と期待される成果

巨大地震の規模、発生様式、発生間隔などその活動の予見が困難であることは現状では明らかである。それは、プレート境界やその近傍における歪の蓄積と開放という物理過程をはるか遠方で観測していたために詳しいことが分からなかったということだけでなく、断層帯を構成する物質や化学反応、流体量など、物理過程の基礎にある物質科学的な情報が決定的に不足していたからである。また、巨大噴火解明の鍵となる海底カルデラのマグマ溜まりやイベント堆積物はほとんど調べられることなく、海底に眠っている。

そこで、沈み込み帯の掘削により、断層帯を直接観察するとともに、現場周辺における観測を開始し、プレート境界における歪の蓄積過程と開放過程を解明し、巨大地震の活動を理解すること、および海底カルデラの掘削により、過去の巨大噴火の実態を明らかにすることを、今後2年とその後の次期10年の科学目標とする。

(1) 沈み込みプレート境界に歪が蓄積する過程の解明

プレート境界に歪が蓄積する過程について、これまでは陸上のGPS観測や海底の地殻変動観測から、プレート境界における固着の程度を推定するのみであった。深海掘削により、沈み込む海洋プレートと上盤プレートを構成する岩石の物性や流体量を知ることができる。さらに掘削した岩石試料や掘削孔内の計測により、海底下の応力場を知るこ

とができる。プレート境界などの断層帯を掘削できれば、断層面を観察するとともに、得られた試料を用いた岩石実験等により、プレート境界面の強度を決める物理的・化学的特性を明らかにできる。プレート境界周辺やその近傍の掘削孔内において、傾斜や歪などを高感度に連続観測することにより、歪の蓄積過程を詳細に知ることができる。さらに断層周辺の掘削孔内で温度や間隙水圧を連続観測することにより、断層面の強度の時間変化をモニターし、数年程度の周期でおきるゆっくり地震の活動との関係等を明らかにできる。このような成果と海溝型地震のモデリングを統合し、巨大地震がどのように準備されるかを明らかにすることができる。

このような研究を推進するために、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（NanTroSEIZE）が2007年から開始され、これまで東南海地震の固着域浅部堆積盆地からその海側境界断層、そして沈み込む前の堆積層・基盤岩まで、13地点で最大1600mまでの掘削が行われた。コア分析や検層解析（ブレークアウト幅）から、浅部の付加体内では、プレート圧縮によるテクトニックな水平応力を受けているが、付加体の構造に応じて広域応力場が大きく変化していることが明らかになった（図1）。

四国海盆掘削により、基盤岩内部に大量の含水鉱物が存在することが分かった。この鉱物（サポナイト）は100–150℃で脱水して断層や周囲に水を供給する。これまで水の供給源としては付加体堆積層中の間隙水のみが考えられていたが、この発見により、地震発生帯周辺はこれまで思っているよりも間隙水に富んでいることが予見された。

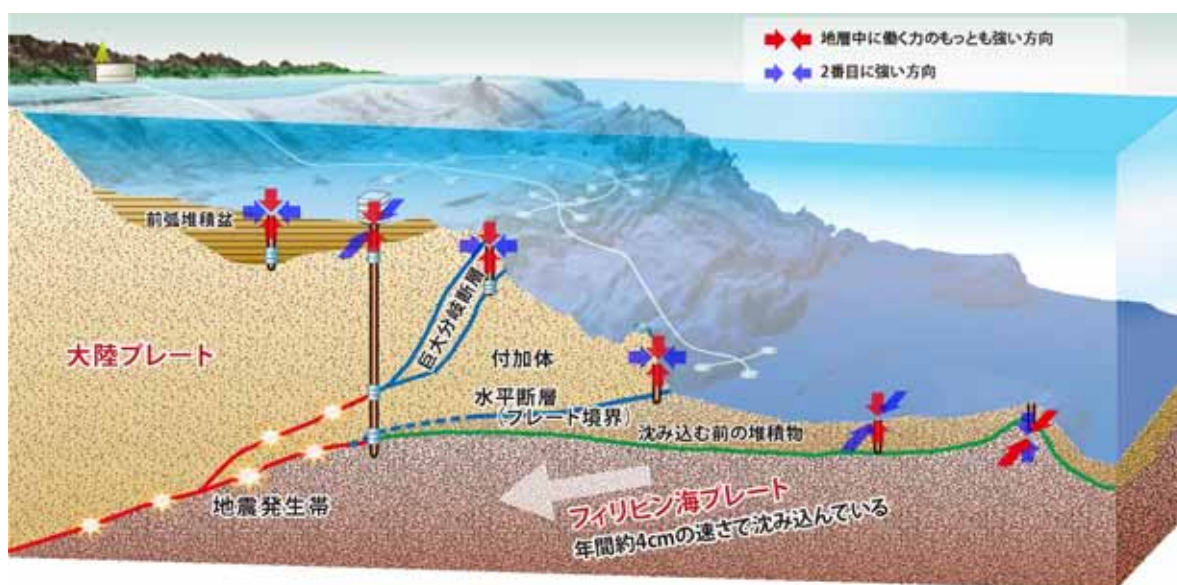


図1. 南海掘削地点と浅部応力場の概要

(2) 海溝型地震による歪の開放過程と巨大津波の形成過程

海洋プレートの沈み込みに伴って蓄積された歪は海溝型地震となって解放され、それに伴う海底の上下変動が巨大津波を形成する。地震破壊が止まると考えられていた浅部

断層が高速破壊を起こすことが分かり、海溝軸近くのすべり特性の見直しが急務となっている。南海トラフやスマトラ沖では、プレート境界から上側に分岐している分岐断層が発達しており、その断層面上の滑りも歪の開放と巨大津波の形成に寄与していると推定されているが、実態の解明はようやく始まったところである。

南海トラフの固着域海側浅部の分岐断層と付加体先端断層（デコルマ）の掘削では、どちらもシャープな断層面が確認され、過去の披歴温度解析から断層面で温度が上昇していたことが確認された（図2）。また分岐断層の上盤表層のみから1944年の東南海地震によると解釈される強震動堆積物が発見された（図3）。これまでゆっくり滑っていると考えられていた付加体先端近傍の断層で、高速の滑りがあったことが示された。固着していない、つまり地震破壊が来ても断層岩が十分堅くないために、滑りが停止すると考えられていた浅部断層にこのような高速破壊を起こす仕組みは現在摩擦実験等により鋭意解析中であるが、高速で破壊が（深部から）伝わってきた場合には、浅部断層物質の摩擦係数が極端に低下する可能性があることが分かってきた。

一方、コアの年代測定と3次元地震探査記録解析から、最近100万年以内では浅部断層滑りは分岐断層ではなく、より先端に近い、デコルマや覆瓦状逆断層で活発に起こっていることが示唆される。2009年に発生した浅部超低周波地震の震源もデコルマ付近の低速度層付近に集中している。しかし掘削が行われたのは海底表層部の断層帯である。今後、プレート境界深部の断層帯や分岐断層深部の掘削を遂行するとともに、能動的な実験も含めて、それらの掘削孔内における物理的・化学的モニタリングを進めることにより、断層帯の活動の実態を明らかにする必要がある。

2011年の東北地方太平洋沖地震では、海溝軸に近いプレート境界で大きな滑りがあったと推定されており、また長波長の大きな津波とともに、短波長かつ大振幅の津波が観測された。この巨大地震の震源域の緊急掘削では、水深6000-7000mの海底で500-1000mの掘削が提案されており（図4）、南海トラフの掘削の成果と合わせて、海溝型地震に伴って地殻の歪がどのように開放され、巨大な津波はどのようにして起きたかということの解明できる得難い機会を与えると期待できる。

地震断層の高速すべり

分岐断層浅部の泥岩に含まれる微小石炭質ケロジェンの熟成度を分析し、断層が経験した温度を推定。最高温度は420度にも達し、断層の高速なすべりによる摩擦熱履歴を検出。

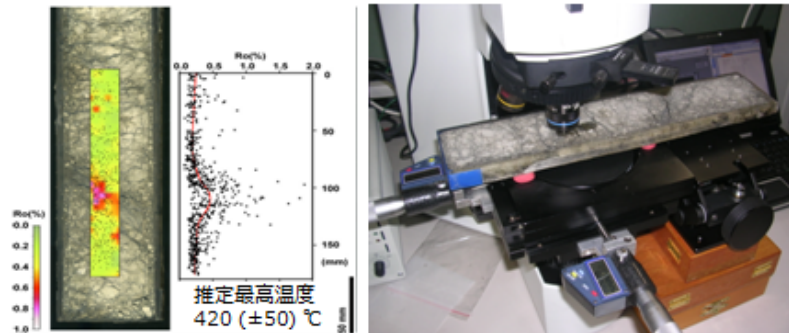


図2. 浅部分岐断層の高速滑りを示す摩擦熱履歴

地震に伴う表層堆積物の崩壊・再堆積過程

分岐断層の上盤表層部に強震動堆積物をX線CTによって初めて確認し、最新イベントの年代(1950±20年)は東南海地震と一致。強震動の場所と規模の新指標となり得る。

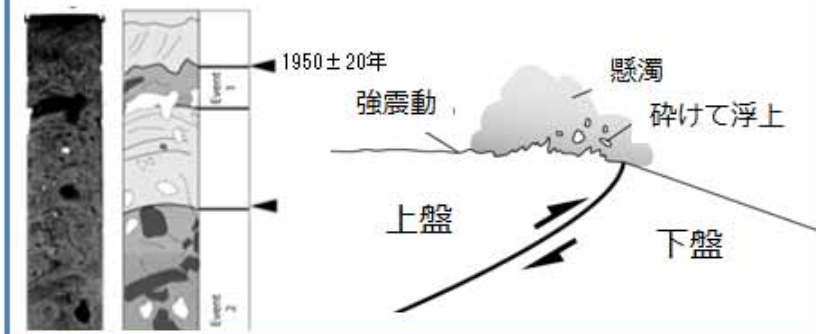


図3. 地震に伴う分岐断層上盤表層堆積物の崩壊・再堆積過程

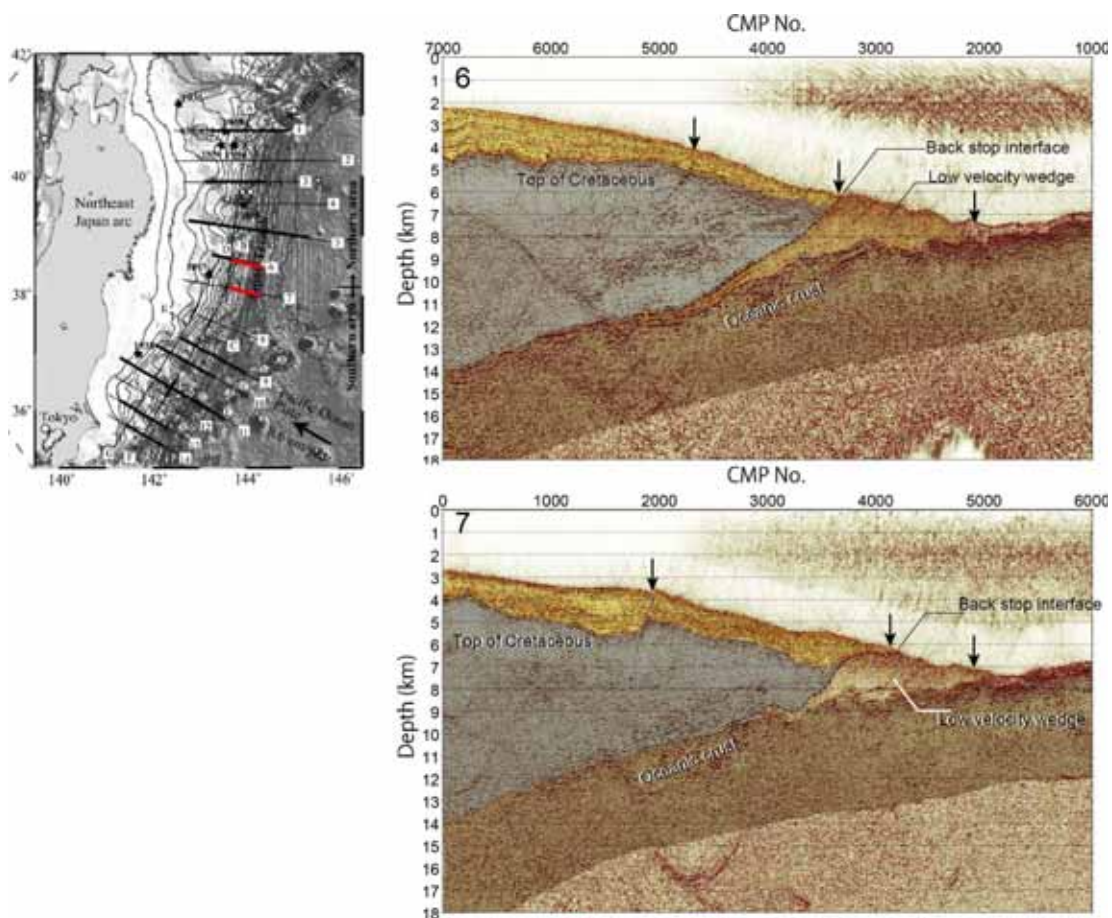


図4．2011年の東北沖巨大地震震源域の緊急掘削計画。左側の地図に地殻構造探査測線を示す。測線6または7に沿って、矢印で示す3ヶ所の掘削が提案されている。

(3) カルデラ形成を伴う巨大噴火の実態解明

カルデラを形成する規模の巨大噴火は、低頻度ではあるが、地球表層環境および生態系の劇的な変動の要因になり得る重大な地質イベントの一つである。例えば、7300年前の鬼界カルデラの噴火は、南九州の縄文文化に壊滅的被害を与え、関東地方にまで降灰をもたらした。巨大噴火の情報は、陸上では浸食や風化によって大部分失われてしまうが、海底には過去の噴火の記録が保存されている。海域における巨大噴火のイベント堆積物の研究はごく限られており、巨大噴火のインパクトの理解は不十分である。過去の巨大噴火イベントの検出と再構築は、将来予想される噴火のパターンとその結果生じ得るジオハザードを探る上で決定的に重要である。

そこで、図5に示すように海底カルデラ周囲における系統的な掘削と噴出物の年代測定を行い、以下の研究を進めて、巨大噴火の実態とその影響を明らかにすることを目標とする。①水中火砕流や、噴煙が海面を突き抜ける海水面上の火砕流の拡散過程、爆発的現象を引き起こすマグマと海水の相互作用の機構や過程、大規模な津波など、個々の噴火現象を明らかにする。これにより、地表現象の多様性を知り、噴火の推移やその影響を理解することができる。②カルデラ火山の巨大噴火の発生履歴・頻度を解明する。

これにより将来の噴火ポテンシャルを評価できる。③表層からマグマ溜まりに至るカルデラ直下の構造と物理化学的状態を調べることで巨大マグマシステムの描像を得る。この成果により、なぜ、どのような地殻の進化を経て巨大噴火が起こるのかという最も本質的な問題に迫ることができる。④巨大噴火の噴出量を正確に見積もるとともに、噴火前後におけるマグマ中の揮発性成分量の変化（特に硫黄含有量）を推定することにより、空气中に放出された火山ガス量と、それに伴い生成される硫酸エアロゾル量を推定する。これにより、巨大噴火に伴い、どの程度の気温変化が生じ、どのくらい続いたかというグローバル・インパクトを評価できる。

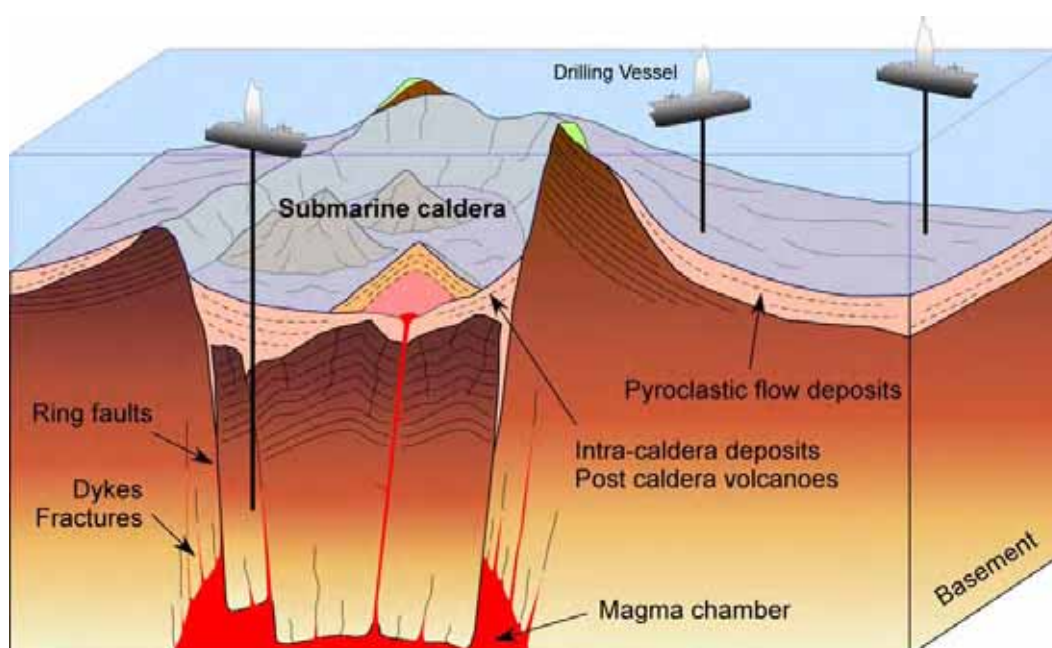


図5. 想定される海底カルデラ近傍での科学掘削の模式図。カルデラ周囲における火砕流堆積物の掘削や、カルデラ内部でのマグマ溜まりまでの掘削が考えられる。

3. 作業仮説

プレート境界に歪が蓄積し海溝型地震が発生するメカニズムについて、アスペリティモデルという有力な作業仮説がある。それによれば、プレート境界のうち、強度の弱い海溝に近い部分と岩石が高温となる深い部分では固着が弱く、常時ゆっくりと滑っている。その間には、普段は固着して歪を蓄積し、地震時に破壊的に滑って歪を開放する固着域あるいはアスペリティと呼ばれる部分があり、ほぼ同じ場所で繰り返し地震を起こす。固着域のまわりは常時ゆっくりと滑っているが、小さい、あるいは弱い固着域が散在しており、ゆっくり地震などを起こして歪を開放する。

最近、このモデルの一部を改定しなければならなくなった。まず、「ちきゅう」による南海トラフ海溝軸近くのプレート境界の掘削により、シャープな断層面が確認された。その断層帯の試料を解析することにより、これまで地震破壊が止まると考えられていた浅部断層が高速破壊を起こすことがあることが示された。この発見は、従来のアスペリ

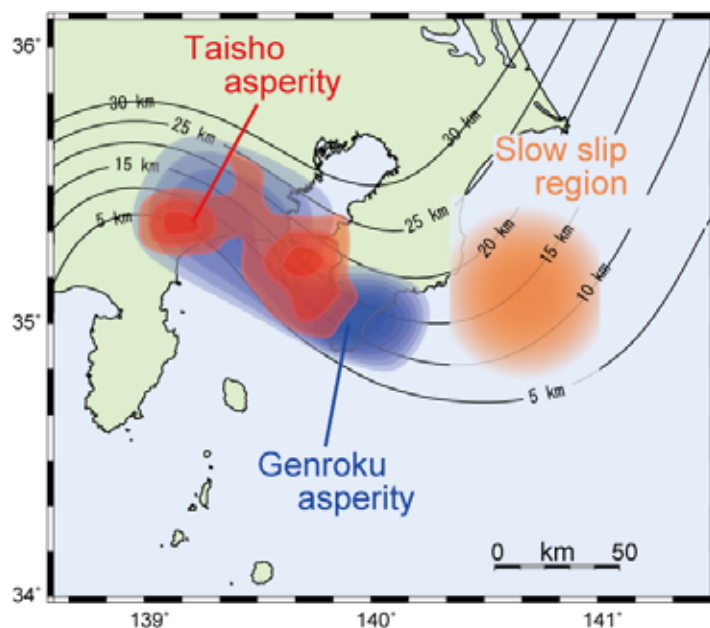
ティモデルでは説明できない 2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震の巨大な断層滑りを理解する鍵となっている。従来の仮説では固着が弱く歪が溜まらなないと考えられていた海溝軸に近いプレート境界で、少なくとも数 100 年分の歪が蓄積され、数 10m という最大の滑りが観測されたのである。

その滑り域より深いプレート境界では、宮城県沖地震が数 10 年の間隔で繰り返し起きていた。これらのことは、プレート境界における固着の構造が、広域の歪を数 100 年かけてゆっくり蓄積する構造と、宮城県沖地震のように数 10 年で歪を蓄積する比較的小さな構造というように、階層的になっていることを示唆している。その謎を解く鍵は、巨大地震を引き起こす海溝軸付近のプレート境界の掘削にある。断層の現場観察と、採取した試料を用いた岩石実験と数値シミュレーション、および掘削孔内における測地・地球化学・地球物理学的観測により、巨大地震がどのように準備され発生するかという謎の解明が期待できる。

フィリピン海プレートが沈み込んでいる房総周辺のプレート境界には、図 6 に示すように、固着強度の強い大正の関東地震の震源域、固着強度が弱く再来間隔の長い元禄地震の震源域がほぼ重なって存在しており、ここでも階層的な歪の蓄積過程が示唆される。さらに固着強度は強いがゆっくり地震しか起きない震源域もほぼ同じ深さに分布している。その 3 ヶ所を掘削する計画が提案されており、プレート境界における歪の蓄積過程の違いが何によって規定されているのかを明らかにしようとしている。

最近、地震波トモグラフィ等の研究により、沈み込んだ海洋地殻から上盤プレートに水が供給されると、マントル部分を構成するかんらん岩が蛇紋岩化することにより強度が低下し、プレート境界の摩擦強度が低下すると推定されている。上述のように、四国海盆掘削により、基盤岩内部に大量の含水鉱物が存在することが確認され、地震発生帯周辺はこれまで思っているよりも間隙水に富んでいることが予見された。「ちきゅう」によりプレート境界を掘削することによって、プレート境界付近の岩石中の水分量と、その岩石の地震波速度と、プレート境界の摩擦強度の関係を検証することができる。

東北太平洋沖地震では、例外的に短波長で大振幅の津波が観測された。そこで注目されているのが、分岐断層が巨大津波を生成するという仮説である。分岐断層は、日本海溝の陸側ではそれほど発達していないが、いくつか観測されている。「ちきゅう」により、図 7 のように、海溝軸付近のプレート境界と分岐断層を掘削することができれば、二つの断層面における滑りが巨大津波の生成に果たしている役割を解明し、分岐断層が巨大津波を生成するという仮説を検証するとともに、図 7 に示す地震・津波発生包括モデルを検証することができる。



Taisho-type earthquakes:
 Recurrence interval: 200-400 yrs, Coupling rate: 80-100 %

Genroku-type earthquakes:
 Recurrence interval: ~2000yrs
 Coupling rate: 10-30 %

Slow slip region:
 Recurrence interval: 5-6 yrs
 Coupling rate: 70-100 %

図6. フィリピン海プレートの沈み込み境界上で、ほぼ同じ深度に分布する特性の異なる3つの固着域。

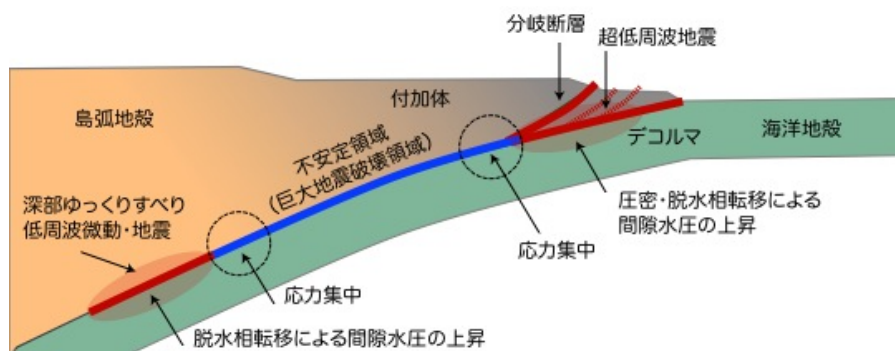


図7. 地震・津波発生包括モデル

74,000年前のインドネシア・トバ噴火は、過去10万年の間における地球上で最大規模の噴火イベントである。このクラスの超巨大噴火については、未曾有の火山災害をもたらす可能性が指摘されているが、その実態は現状では未解明である。トバ噴火のように、陸上で噴火を起こしても、噴出物の多くが海底に沈んでいるために噴火の全貌が掴みきれていないケースが多いことが、研究が進展しない大きな要因である。巨大噴火ジオハザードという視点に立ち、深海掘削によりその実態を可能な限り明らかにすることは、特に火山国日本においては大きな意義があると考えられる。

4. 技術的課題

海溝型地震・津波メカニズムの解明には、その震源域への掘削と近傍での観測・モニタリングが不可欠な要素である。現在ターゲットとして実施中、あるいは検討中の地震

発生帯である、南海トラフ、関東アスペリティ、東北日本弧は、いずれも大水深かつ大深度掘削が必要である。大水深での掘削は可能ではあるものの、パイプトリップ等掘削に要する時間が長くなるうえ、何より掘削時や長期観測機器・潜水船の深度限界を超えてしまうのが問題である。現状では、多くの観測機器は 6000 m 耐圧であるし、潜水船も 7000 m までの調査が限界である。また大深度掘削に必要なライザーパイプは、その強度限界等から最大長が現状では 2500 m であり、これより深い水深ではライザー掘削ができない。ノンライザー掘削では、断層破碎帯などの掘削はかなり困難であることが、これまでの付加体等での掘削から示されている。

ライザー掘削が可能な深度では、今度は地震断層までの海底からの掘削深度が大きくなる。現状の「ちきゅう」のライザー能力で、地震発生帯の固着域に到達できる場所は、唯一南海トラフのみである。関東アスペリティ掘削では、大正地震・元禄地震の震源域へのライザー掘削を行い、固着域上部の状態と物性を把握すると同時に、房総沖で起きているスロースリップイベントの全サイクルを捉えるため、500 m 深度での孔内長期計測を複数地点で実施する計画である。南海トラフでの孔内長期計測は、浅部観測はすでに設置中であるが、固着域での観測（海底下 5000–7000 m）に必要な耐熱性などを獲得するのはこれからの課題である。

掘削により得られるものとして最も重要なものの一つが断層コア試料である。現状では RGB（ロータリーコアバレル）によるワイヤーライン方式でのコア採取がほとんど唯一の手段であるが、そのコア回収率は半分以下であることも少なくない。特に断層などの破碎帯は、砂層とならんで一般に回収率が悪いことが分かっている。回収されなかった部分は、一部はカッティングスで代用できるが、断層の構造など、高品質のコア試料があって初めて可能になる研究が多いため、その回収率・品質の向上が大きな課題である。

地震のメカニズム解明には、海底や孔内での、10 年あるいはそれ以上にわたる長期観測が重要である。それを可能にするために、孔内長期観測をサポートするインフラ（バッテリー、海底ケーブル、航海を含む）が不可欠である。

5. ファシリティの活用

上述のように、地球深部探査船「ちきゅう」は必須のファシリティである。また観測データの長期安定的取得のためには、南海掘削では DONET 海底観測ネットワークをフルに活用していく。

6. 社会的波及効果

2011 年 3 月の東日本大震災で世界中の人々が感じたように、巨大な地震や津波という災害を科学的に捉え、その成果を人々の生活に還元していくことは、人類の、とりわけ日本を含む地震発生帯で暮らす人々にとって第一級の重要性をもつ課題であり、この要請に応えることは、科学技術に携わるものに課せられた使命である。深海掘削計画が応えることができる使命でもある。

3) 固体地球科学（マントル掘削を含む物質科学分野）

1. はじめに

掘削科学の当該分野の研究対象である岩石は、地球表層の7割を占める海洋の基底部を構成し、私たちの住む日本列島をはじめとする島弧を発達させ、大陸を成長させる原材料である。さらにこれらの岩石は、短期的には生命活動のフレームとなり、長期的には表層環境変動を支配するバッファーとして働き、地球が生命を宿す水惑星として機能する役割を担う物質である。

しかしながら、これらの岩石が深い海底のさらに堆積物の下に存在するため、掘削を除けば直接アプローチする手段はなく、地震波探査に頼っている現状である。また、ごく一部の海底起源岩石は陸上で部分的に観察されるものの、物理化学的な2次作用によって変質しており、海底下における真の様相を知るには限界がある。今後、さらなる掘削科学の積極的な貢献が大いに期待される分野である。

2. 科学目標と期待される成果

掘削科学の当該分野の科学目標は、海洋プレートの本質を明らかにすることである。これまでの掘削科学を含めた海洋底研究によって、地球表層を覆う海洋プレートは、全てが同じ構造と均質な物性をもつのではなくプレートの構造と構成物質に多様性が存在する、と考えられるようになった。このような背景をふまえて、これからの10年では、地殻を貫通してマントルまで掘削する超深部掘削計画（マントル掘削）の実施を大きな柱とし、海洋プレート多様性の実体、熱水鉱床を形成し地下生命圏の広がりやを律速する海洋地殻の水みちとしての透水性、そして日本列島をはじめとする沈み込み帯の実体と島弧の形成過程の解明などを掘削科学から目指したい。

特にマントル掘削は、海洋地殻を貫通してマントルに到達する前人未踏の計画である。第1期IODPに引き続き人類の挑戦的課題として次期IODPにおいても最重要課題の1つである。表層で採取できるマントル断片は著しい2次作用によって変質しており、一度溶けた地球型惑星の本質が反映されていない（図1）。この計画によって、約100年前に発見されたモホロビッチ不連続面（モホ面）の実体が明らかになり、さらにその直下の地表の変質を受けていないマントル物質が直接採取されて海洋プレートのみならず地球型惑星の進化研究を飛躍的に発展させることが期待される。

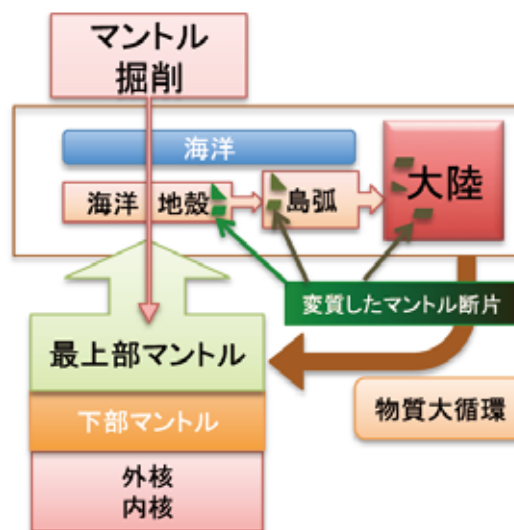


図1. マントル掘削は地球型惑星の進化史を明らかにする。

3. 作業仮説

海洋プレート構造の多様性は、端的には中央海嶺におけるプレートの拡大速度と関連するため、作業仮説は形成された海洋プレートの拡大速度に応じて順に述べていく。

太平洋海域を構成する海洋プレートは、年間 10cm 程度の高速拡大海嶺で形成されている。そして、オマーンオフィオライトなどの陸上地質で確立された所謂“海洋地殻の層構造”をもつとする説が、従来から定説とされてきた。しかし、最近の我が国における高精度な地震波構造探査によって、地殻深部に陸上地質では確認されないモホ面から斜め上方へ続く反射面と、その直下のマントル最上部に陸上地質で頻繁に確認されてきた 10%近い異方性の存在が明らかにされた。これらの地震波構造は、特に海洋地殻について従来の定説とは相容れないことを明らかにし、新しい中央海嶺モデルが提案された（図 2）。その検証には超深部掘削による地殻深部物質の採取と孔内検層が必要であるが、それと同時に特にレオロジーなど従来よりも幅広い分野の研究者の役割が期待される。また、陸上に露出した海洋プレート断片とみなされてきたオフィオライトが、本当に典型的な海洋プレートであるのか岩石学的に疑問をなげかける指摘もあり、オフィオライト問題に対して掘削科学による検証が期待される。

年間 2~3cm ほどの低速拡大海嶺で形成された大西洋海域は、太平洋海域と異なり、

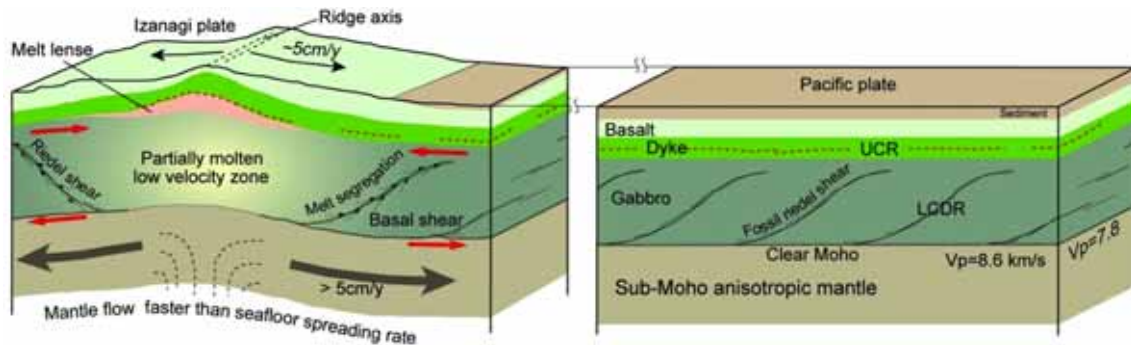


図 2. 地震波探査から提案された新しい中央海嶺モデル。

海底に火山岩からハンレイ岩・蛇紋岩などの海洋地殻深部物質がところどころに露出する。そのため、これまでに多くの海洋プレート断面モデルが提案されてきた。最近の中央海嶺付近の海底地形探査の進展によって、一般的な対称性拡大軸における火成作用によって付加された海洋プレートは半分程度であり、残り半分を「海洋コアコンプレックス」とよばれる火成作用が抑制された伸長テクトニクスによる非対称性拡大によって形成されたとする仮説が提出された。これらの魅力的な海洋底形成論に対して、多種多様な岩石相を観察できる大西洋海域ならびにインド洋海域は、次期 IODP においても格好の研究地であるのは言うまでもない。さらに、海洋プレート深部物質が海洋底に露出したことによって、これらの海域は海洋プレート断面モデルだけでなく冷湧水など生命科学の視点からも地球史探求からも重要な研究材料となり続けるだろう。

マントル掘削が登場した 50 年前に最も重要視された研究課題は、モホ面の実体とは

何か？であった。そして、それは 21 世紀の今もなお未解決の課題である。陸上のオフィオライト研究から「マフィック岩（又はハンレイ岩）と超マフィック岩（又はカンラン岩）の境界がモホ面」とする従来の定説は、先に述べた通りオフィオライト構造が最新の地震波構造探査の結果と合わないことから再考すべき問題である。

最近、オフィオライトのマントル起源物質から微小なダイヤモンド結晶が発見され、さらに同位体比組成からその炭素は生物起源であることが示唆されている。一方、ダイヤモンドは地球 100km 以深の高圧環境下で形成されるため、地表付近の生物起源炭素が地下深部へ持ち込まれた可能性がある。このようなダイヤモンド結晶がマントル掘削によって海洋プレート最上部マントルカンラン岩から発見される可能性がある。また炭素の循環に関しては、高温では分解されて存在できないと考えられていた炭素数 30 以上の高分子有機化合物が、マントル由来のある種のカンラン岩に存在することが、約 20 年前に日本の研究者によって報告されている。その有機物の起源には諸説あるがマントル掘削で期待される物質である。マントルにはこのように予想外の物質が存在している可能性がある。マントル掘削による新物質の発見は、グローバルな炭素循環に強烈なインパクトを与えるだろう。

モホ面の実体として、「マントル内の蛇紋岩とカンラン岩の物質境界がモホ面」とする説が存在する。蛇紋岩は、マントル物質であるカンラン岩が約 400 度以下の低温で水と反応して形成される変成岩である。この蛇紋岩説は、ヘスモデルと言われ 50 年前から論争が続く海洋プレートの最重要課題の 1 つである。もしモホ面が蛇紋岩であるならば、水みちが海洋地殻を貫いて最上部マントルまで続くことを意味する。さらに水の存在は生命活動を示唆し、地球内部のどのくらいの深度までどのような条件で生命が存在するのかを問い続ける、地下生命圏の重要課題に深く関係する。微生物分子温度計などの新しいアイデアが提出されており、マントル掘削は地球内部水循環・地下生命圏の理解に大きく貢献するだろう。

その他、マントル構造探査の視点から、マントル掘削によって得られる地殻・最上部マントルを構成する岩石の温度・化学組成・部分熔融などに関する情報は、上部マントル全体の大スケールの地震波速度構造・電気伝導度構造などの解釈に不可欠であり、海洋超深部マントルダイナミクスにより深い議論を可能にする。このように、マントル掘削は、海洋プレートの実体を解明する物質科学だけでなく、生命科学・地球ダイナミクス研究にとっても貴重な情報を提供する機会となるだろう。

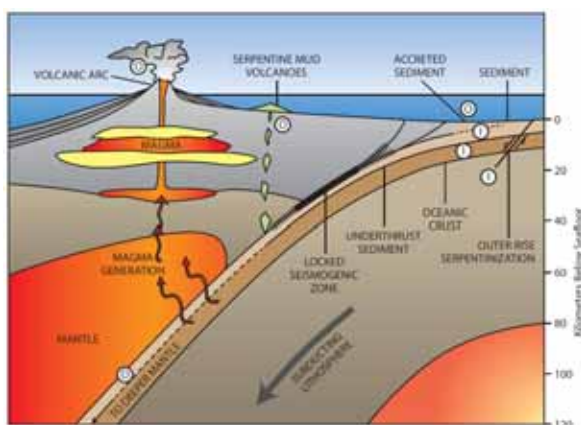


図 3. 沈み込み帯の物質大循環

(Science Plan for 2003-2013 より引用)

日本列島に代表される沈み込み帯は、海洋プレートが水平移動から地下深部へ向かう変換点である（図 3）。沈み込む海洋プレートの浅部で発生する海溝型地震、さらに沈み込んだ海洋プレートからの脱水による火成活動とそれに連動した島弧形成の理解にとって掘削科学の果たすべき役割は大きい。特に島弧の形成過程については、我が国の研究者が中心となって海洋地殻から島弧地殻への物質変化モデルが掲げられる段階にまで達している。今後は、近年の伊豆-小笠原-マリアナ諸島周辺の海域における海洋底探査によって最初期の島弧火山岩（前弧玄武岩）が発見されたことをふまえ、島弧周辺の掘削によって日本列島のような成熟した島弧がなぜ存在するのか？その理解の進展が期待される。

海洋プレートにおける火成活動は、主に中央海嶺と沈み込み帯に分布しているが、21世紀になってプチスポットと呼ばれる新しい単成火山群が日本人グループによって発見された。プチスポットは海洋プレートが沈み込む直前でわん曲したアウターライズで形成されると考えられている。プチスポット火山の存在は海洋プレートが沈み込む前で改変されている証拠であり、沈み込み帯における挙動に少なからず影響すると予想される。プチスポット火山の分布・火成活動の規模等解決すべき点は多いが、海洋プレートの進化過程にとって無視できない大切な研究対象であろう。

4. 技術的課題

マントル掘削は、海洋地殻を貫通してマントルに到達する目的が明快である一方で、技術的・経済的課題が重い足枷となっている掘削計画である。当該分野の掘削科学における技術的課題は、このマントル掘削に関係した超深部掘削技術であり、温度 250 度と海底下 7km を安定に掘り抜くための技術の確立である。これは、他分野とは比較にならないチャレンジングな課題であるが、見方を変えれば、超深部掘削技術の確立は我が国に新しいテクノロジーの創出を引き起こす可能性を秘めているものである。ここで言うまでもないが、技術的な課題を含めて 10 年後の掘削実現に向けて、最も求められるのは、科学者と技術者の強力な連携であろう。

マントル掘削で得られる岩石試料は、大気等に汚染されず「マントルの状態」を保存していることが重要である。例えばハヤブサから回収された試料と同様に、地球表層環境で汚染されない試料の確保なしに、地球内部の希ガスや微量元素の正確な分布、さらに炭素質物質による生命の痕跡を明らかにすることはできない。掘削試料が汚染されない技術の確立はマントル掘削の成功のひとつの鍵となるだろう。

マントル掘削によって実現する海底下 7 km の掘削孔は、地球内部に最も近い地点である。この最深部を利用した地球内部探査は、例えばハッブル望遠鏡と同じ役割を地球内部探査に与えるだろう。その実現に向けて、海底下 7 km における耐岩圧・耐水性・耐塩性なおかつ長期観測が可能なシステムを備えた探査機器の開発が必要であり、それは我が国の技術開発を押し上げることにもなるだろう。

5. ファシリティの活用

当該分野のファシリティとしては、海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域と高知コア研究所に設置された各種分析装置を最大限に利用可能である。これらのファシリティに加えて、産業技術総合研究所や東京大学をはじめとする研究機関・大学のファシリティを連携して活用していく。特にマントル掘削については、10 年後に採取される貴重なマントルカンラン岩から最大限の情報を引き出すことは必須条件である。そのため、Spring-8 などの大型ファシリティを利用して高温高圧条件における弾性波速度や電気伝導度などの物性測定を実施して、海洋プレートのみならずマントルダイナミクスの実体解明を目指すべきであろう。さらに、マントル掘削によって海洋地殻を貫通して確保した掘削孔を最大限に活用するために、孔内検層技術の開発と掘削孔最深部における物理化学的実験を模索するための基礎研究を進めていき、さらに必要なファシリティを適宜追加更新していくべきであろう。状況が許されるなら、ハヤブサ試料と同様にマントル掘削試料に特化した分析装置の開発とそれらの「ちきゅう」への設置、さらに研究ネットワークの構築を期待したい。

6. 社会的波及効果（防災、環境、資源エネルギー等）

掘削科学の当該分野は、海洋プレートそのものが研究対象である。我が国は海洋プレート収束域に位置しており、海洋プレートの理解は海域を含めた国土の環境アセスメント、資源エネルギー源の推定等に直結する。さらに我が国の防災に関して、沈み込み帯における地震活動は海洋プレートの温度圧力変化に応じた物性の理解が不可欠であり、沈み込む前の海洋プレートの理解は全ての第一歩である。

環境にも多大なる影響を短期間に与える危険性のある火山活動もまた、沈み込む海洋プレートを含めた物質大循環のフラックスに関係する現象であり、沈み込む前の海洋プレートと初期島弧状態の理解が必要である。資源エネルギーは、海洋地殻および最上部マントルに通常は極微量な資源物質が水みちに沿って次第に濃集した結果であり、掘削科学による熱水循環の解明は資源エネルギーの探索や見積もりに十分に寄与できるものである。

4) 環境科学

1. はじめに

深海掘削計画は、DSDP (Deep Sea Drilling Project : 深海掘削計画) の開始以来、新しい科学仮説を証明することに成功してきた。開始当初はプレートテクトニクスの証明が大きな課題であり、古環境の研究でも白亜紀の無酸素事変、南極氷床の発達、メッシニアンの塩分危機など、多くの環境変動を明らかにした。本計画は、ODP (Ocean Drilling Program : 国際深海掘削計画) が終了するまでの 210 次の航海を通して白亜紀から第四紀の古海洋や気候変動の全貌を明らかにしたといっても過言ではない。

21世紀になると、人為的な影響による温室効果ガスの増加が注目され、「地球温暖化問題」が人類の取り組むべき最重要課題として提言されるようになった。このような社会的な要請もあり、21世紀に開始されたIODPでも「地球温暖化の進行」を強く意識した内容となっている。

一方、これまでの深海掘削の成果から環境変動には周期性があり、その変化を明らかにすることで未来予測が可能となることを証明した。したがって、「温暖化未来」も過去の堆積物を掘削することで予測することができ、将来に対する提言も可能となる。

2. 科学目標と期待される成果

環境に関する研究は、掘削科学において DSDP 以来、常に優先課題の一つである。「温暖化」の進行は、人為的か自然増加か、依然、議論があるものの確実に進行していると考えてよい。温暖化は、氷床量、海水準、海洋の化学的性質、降水量、生物生産量など、生命圏の“生活基盤”を変化させ、直接に生態系や人間生活へ大きな影響を与える。環境研究では、温暖化が生命圏に与える影響を評価することが最終目標となる。そこで、1) 温暖化を引き起こすメカニズムを明らかにする、2) 温暖化による環境への影響を評価する、3) 実際の社会的な影響や損失を予測する、の3点が重要な科学目標としてあげられる。

3. 作業仮説と科学目標

1) 温暖化を引き起こすメカニズムを明らかにする

過去の環境を明らかにするには、過去の空気を直接測定すればよい。この手法を実践したのは、極域で掘削された氷床コアの研究である。そこで明らかにされたのは、温室効果ガスの量と気温の密接な関係で、例えば最終氷期の時期の二酸化炭素濃度は280 ppm と現在よりも100 ppmも低く、メタン濃度も同様の結果となった。これらの一連の研究を契機として温室効果ガスが地球の気候に及ぼす影響が重要視されることになった。しかし、氷床コアでは過去80万年ぐらいまでは遡れるが、その以降の時代になると難しい。これより過去の時代の温室効果ガスに関しては、R. A. Bernerらが行ったBLAG-modelやGEOCARBとよばれる数値モデルによる推定が有名である。この研究では、

過去6億年間の二酸化炭素濃度の推定を行ったが、古環境の詳細な議論に使用できる解像度はもっていない。

この両者の間を埋めるのが、深海コア試料を用いた二酸化炭素濃度の推定である。掘削コアから得られた保存のよい試料を用いれば、ホウ素同位体比、アルケノンなど幾つかの指標を併用し、過去の二酸化炭素濃度を推定できる。現在では、始新世まで二酸化炭素濃度の変化が描かれている（図1）。しかし、これより古い時代になると、多くの化学的手法は使えないため、シミュレーションなどの手法を併用する必要がある。シミュレーションの結果によると、700 ppmが南極氷床の発達する閾値とされている。100年後にはこの値に達する可能性もあり、氷床の溶解が懸念されている（図1）。

二酸化炭素を主体とする温室効果ガスの量は、炭素循環と密接に関連している。二酸化炭素は火山活動などにより大気中に供給され、風化作用や生物作用により除去されるので、プルーム活動や沈み込み帯などの地球のテクトニクスと密接な

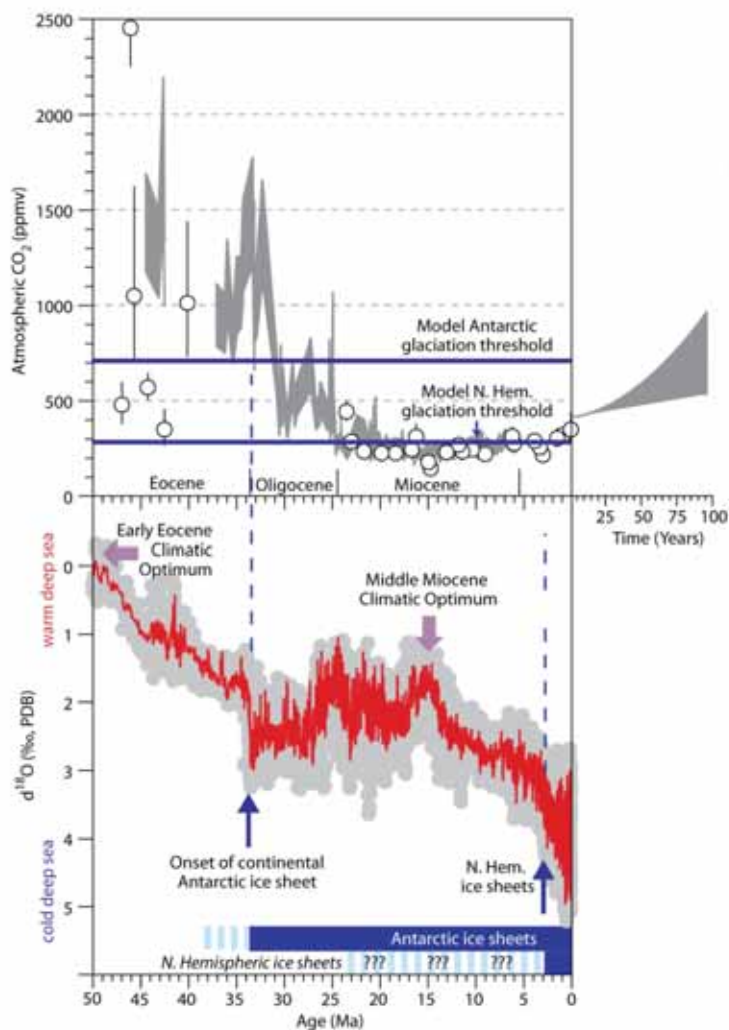


図1 過去50Maにおける酸素同位体比と二酸化炭素濃度の変化

関係がある。洪水玄武岩のような巨大な陸上・海底の火山、沈み込み帯、縁海形成などの火山活動によって、どれくらいの量の二酸化炭素が地表に供給されるのかを見積もることは、今後の重要な課題である。逆に、大陸衝突による風化作用の増大、寒冷化による生物ポンプの強化、黒色頁岩や石油など有機堆積体の形成などが、二酸化炭素を除去するシステムとして上げられるが、これらがどれくらい効果的に働いたかも重要な点である。

2) 温暖化による環境への影響を評価する

温暖化にともない多くの気候や環境の変動が考えられるが、特に、以下の3つが、今後の大きな問題として指摘できる。これらは、いずれも人類社会にとって大きな経済損失を伴う切実な問題である。

5) 海洋酸性化は起こるか？

大気中の二酸化炭素濃度の上昇は、海洋の酸性化を引き起こす。最近の研究では、海水が方解石に対して過飽和であっても pH レベルが低下すると、生物の石灰化速度が変化することが明らかになりつつある。海水の pH は、産業革命以前から現在までに 8.15 から 8.06 まで低下し、今世紀末には 7.9 まで低下すると推測され、海洋酸性化は現実のものとなっている。これまでの深海掘削の研究から、暁新世／始新世境界付近（約 55.8 Ma）に開始された温暖化により深海底では大規模な炭酸塩の溶解が引き起こされたことが明らかにされた。この時期にはメタンハイドレートが崩壊し、大量に放出されたメタンが温暖化を引き起こし、海洋を酸性化させたと推定されている（図2）。始新世では、二酸化炭素濃度が 1000 ppm を越えていたと推定され、そのときの海洋酸性化の程度を確かめる必要がある。Expedition 320/321 Pacific equatorial age transects (PEAT) 航海でも、深海底の炭酸塩補償深度

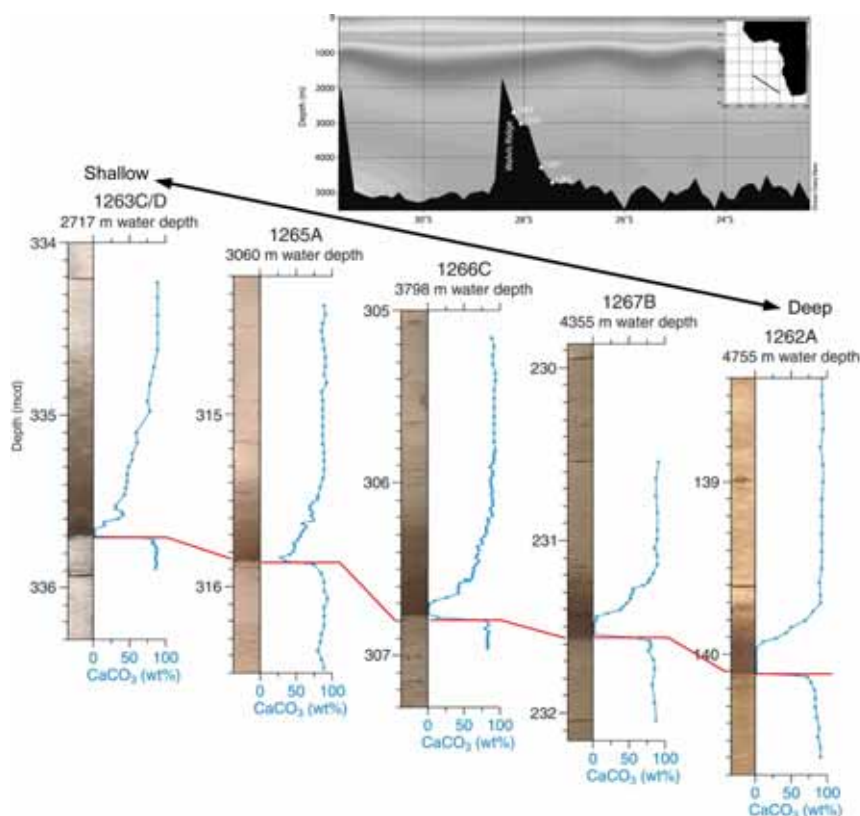


図2 南西太平洋で回収された暁新世－始新世境界付近の堆積物にみられる炭酸カルシウムの変動。赤線は炭素同位体比の異常な層。水深が深いほど炭酸塩の溶解が進んでいることがわかる。

(Carbonate compensation depth, CCD) が温暖期には浅く、寒冷期には深くなることが示され、温暖期には海洋酸性化が進むことが示唆された。したがって、IODP でも堆積物の記録から過去の海洋酸性化の時間的、空間的な広がりほどのくらいあったか、また深海炭酸塩の溶解や大陸風化などによる pH のバッファー効果はどうであったなど、より詳細に検討する必要がある。

6) 超温暖化の地球環境はどうか？

温暖化が進行したとき、地球環境の変化を明らかにすることは掘削科学の重要な使命である。過去の二酸化炭素濃度の計算から始新世には 1000ppm をこえ、特に白亜紀の中期（130～89 Ma）は 2000～4000ppm の世界で「超温室時代」であった。温暖化の影響は高緯度地域に最も大きなインパクトを与える。この時期には、極域には氷床は存在せず、深層水循環や海水準変動に大きな影響を与えたと推定されるが、極域、特に北極地域の掘削データは IODP Expedition 302 以外には、ほとんどないのが現状である。

温暖期の炭素循環も現在と大きく異なる。中期白亜紀には巨大火成岩岩石区（Large Igneous Provinces, LIPs）のような海洋火成活動と大量の黒色頁岩の堆積がほぼ同時期に生じた（図3）。

このときの黒色頁岩が石油となり現代の人類文明を支えている。両者の因果関係は示唆されているものの、黒色頁岩の堆積過程に関しては十分に理解されていない。この例にみられるように、掘削試料の研究が温室地球の将来の姿を予測するための多くのデータを提供してくれるのは間違いない。

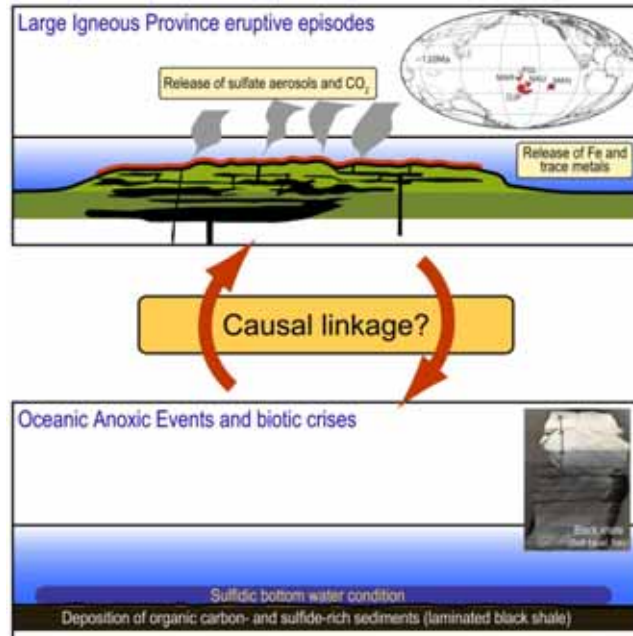


図3 白亜紀中期の巨大火成活動区の火山噴火と黒色頁岩の堆積の関連を示す図（井龍ほか、2010、月刊地球）。オントンジャワ海台（OJP）、マニヒキ海台（MAN）、ナウル海台（NAU）、東マリアナ海台（MAR）、ピガフェッタ海台（PIG）。

3) 実際の社会的な影響を予測する

白亜紀のような古い過去を復元するのも重要であるが、温暖化が進行した 100 年や 1000 年後の未来社会を予想することも、今後の掘削科学に与えられた使命である。完新世のような人間活動によって特徴づけられる時代での千年スケールの変動、最終氷期以降の急激な海水準変動、過去のモンスーンやエルニーニョの影響などを明らかにすることも、近未来を予測する上で重要な研究課題としてあげられる（図4）。

特に、海水準の上昇は、海岸浸食や港湾の保全など人間活動にも密接に関連するが、相対的な海水準変化は氷床量の変化と単純な関係を有しておらず、場所によって大きな差異がある。海水準の復元は、未来を予測するための気候シミュレーション（大気海洋結合の全球気候モデル）に対しても強い制約を与えるので重要である。

また、モンスーンやENSO（エルニーニョ南方振動）のような気候変動も人類史に大きな影響を与えたことが指摘されている。特に降水量の有無は、農業生産に結びつくので、熱帯収束帯（Intertropical Convergence Zone, ITCZ）などの移動を明らかにすることで、文明の盛衰を議論することも行われるようになった。しかし、これらの研究には、ときに数年から数十年規模の

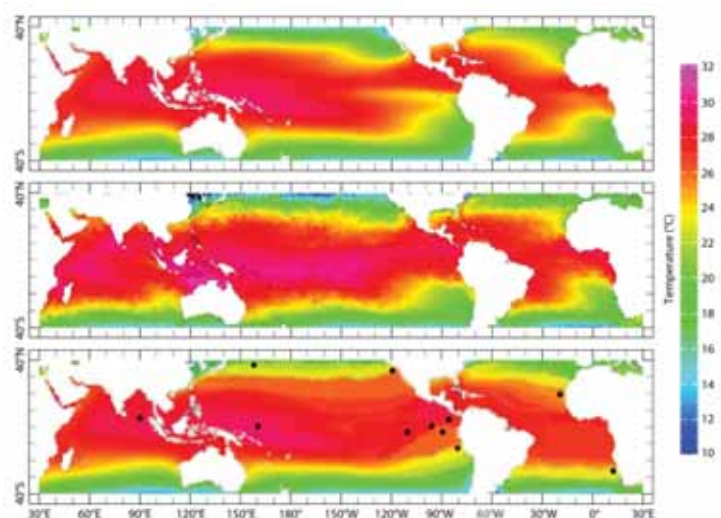


図4 表層水温の変化。現在(上)、エルニーニョ時(中)、鮮新世(4.6～3Ma, 下)

高解像度の研究を必要とするので、陸上掘削やMSP（ミッションスペシフィックプラットフォーム）による掘削が必要不可欠となる。さらに、このような人類期の研究では、気候モデルと実際の試料による研究の組み合わせ（プロキシ - モデル連携研究）が新しい分野として展開されつつあり（図5）、両分野の連携が鍵となっている。

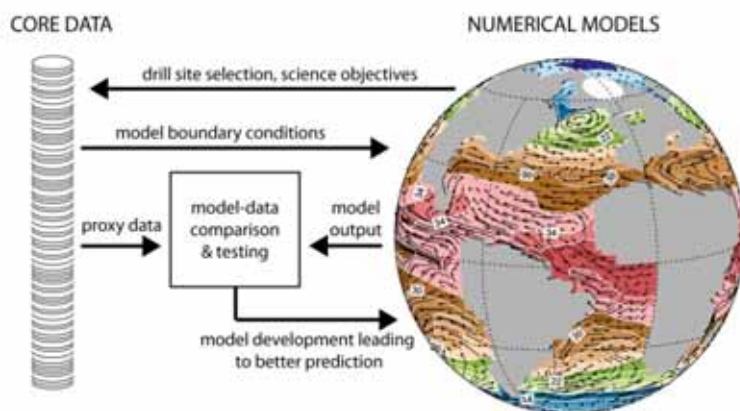


図5 気候モデルと実際の試料による研究の組み合わせ（プロキシ-モデル連携研究）

4) 「ちきゅう」による環境科学への貢献

このような環境関連の科学目標を達成するために「ちきゅう」をどのように活用できるだろうか。温暖化の主要な原因の一つは温室効果ガスの量である。しかし、どのような火山活動によってどのくらいの温室効果ガスが噴出されるか、十分に解明されていない。マントルブルームの活動、海洋地殻の生産速度（プレートの沈み込み速度）、縁海の形成などが温室効果ガスの量に関連する要因である。しかし、その収支計算は未だ正確に試算されていない。

2013 年以降の「ちきゅう」の主要な科学目標として「マントル掘削」が有力視され

ているが、マントルにおける炭素循環、すなわちマントル・地殻中における二酸化炭素量とその収支を明らかにすることが、直接および間接的に「温暖地球の環境変動の解明」と結びついている。

また、島弧火山活動と二酸化炭素量との関係もいまだ未知数である。「ちきゅう」掘削における「モホール計画」や「海洋島弧掘削」により炭素循環を明らかにすることが、温暖化のメカニズムを解明することにつながる。特に、白亜紀中期のような超温暖化の解明にとって重要な手がかりとなる。

一方、地域的な変動が地球環境全体に大きな擾乱を与えることもある。その一例が、後期中新世（約 550 万年前）に地中海が大西洋から孤立し、干上がった「メッシニアン」の塩分危機」事件である。この事件では、地中海が干上がる過程で、酸化還元条件が大きく変わり、塩分濃度が上昇し、厚い蒸発岩が形成された（図 6）。それに伴って、海水の塩組成も著しく変化した。このような極限環境の出現に対して、①生物はどう適応したのか、②白い塩の大地の出現は、地球の気候に影響を与えたか、③大量の塩が地中海に隔離されることで他の海域がどう影響を受けたか、④現在の地中海の海底深くに眠る岩塩を利用する地下生命圏が存在するのか、などの問題を解明することが提起されている。

これまでの深海掘削では、地中海の蒸発岩層の最上部だけが回収されている。地中海が干上がるプロセスを理解し、上記の問題を解明するためには、「ちきゅう」による掘削を行い、地中海の底に眠る厚さ数 1000 m に至る蒸発岩層の全シーケンス回収が必要とされる。「ちきゅう」を使った地中海掘削により、新生代最大級の極限海洋環境の出現について、理解が大きく進むと期待できる。

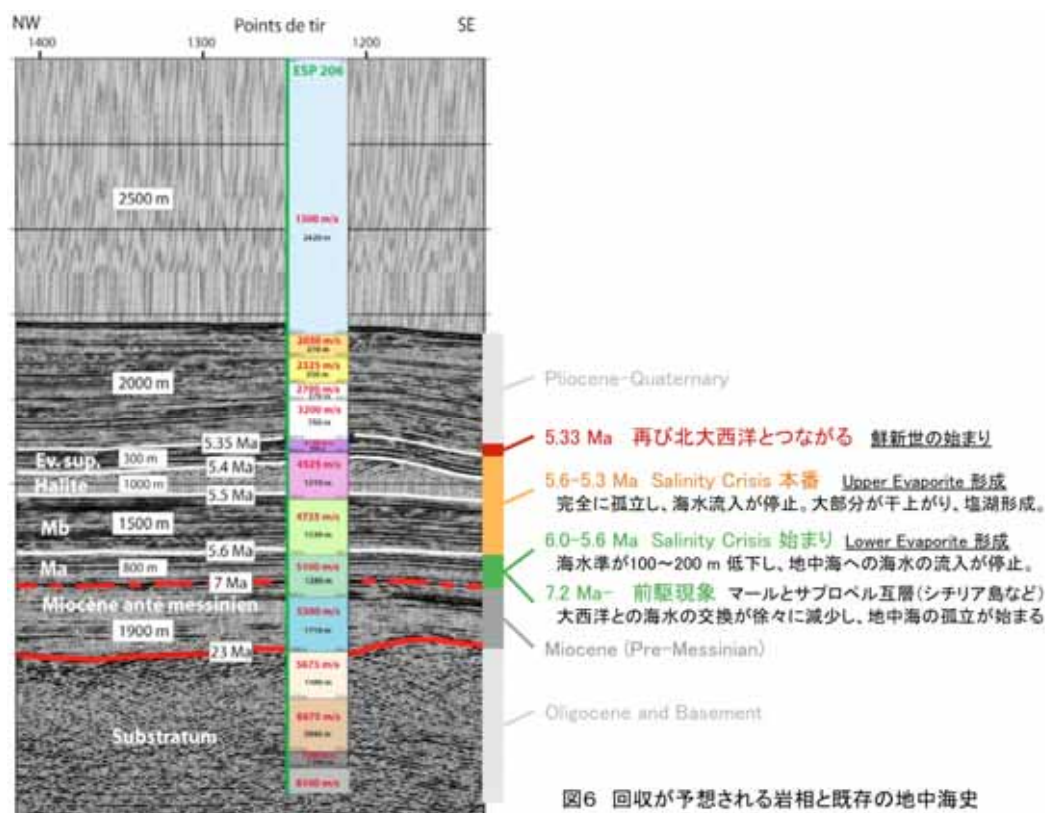


図6 回収が予想される岩相と既存の地中海史

4. 技術的課題

二酸化炭素濃度の推定は、今後のIODPの成果にとって重要である。技術的な課題は、過去の二酸化炭素濃度を堆積物や岩石からどのように測定するかである。アルカリ度を測定できれば、過去の二酸化炭素濃度をある程度推定することができるが、そのためには保存の良い試料を取ることが必要である。また、アルケノンであれば大量の石灰質堆積物が必要で、微量試料を測定できる機器開発も必要である。また、火成岩の試料からそのときの二酸化炭素濃度を推定することは、さらに困難である。これらの技術的な課題を解決することが、本研究課題の重要な点となる。

5. ファシリティの活用

残念ながら我が国では、様々な同位体、アルケノン、Tex⁸⁶などの環境指標を簡便に測定できる研究施設が不足している。測定に携わる人的パワーも同様である。これらの指標をもっと容易に安価に測定できるシステムをつくることが急務で、それなしには迅速な成果報告は難しい。現時点では、海洋研究開発機構、高知コアセンターが中核となっているが、これらの拠点を強化する必要がある。

また、更新世の年代測定にはウラン系列年代測定が必須であるが、同測定に関しても日本では様々な制約のためにむずかしい。このような測定機器の不足に対応するには、

各個人・各研究室で行うのではなく、掘削科学に携わるコミュニティーレベルで解決すべき問題である。

近未来の気候推定には、更新世の情報が重要である。そのためにはサンゴ礁や沖積平野を対象にした陸上・湖沼掘削も重要な手段となり、ICDP（国際陸上科学掘削計画）との連携協力も鍵となる。さらに、気候システムの挙動を理解するためには、海洋堆積物から得られた環境記録のみでは不十分であり、気候モデルとの研究者と協力することが重要である。

6. 社会的波及効果

IODPの科学目標の中でも環境関連の研究は、社会的関心は最も高いといえる。そのため、3つのプラットフォームのうち、主にMSPとJOIDES Resolution号（米国の科学掘削船）の2つが使用されている。特に、上記のような温暖化に関連する科学目標は、どれも社会的な優先順位の高いものと判断される。「ちきゅう」による科学提案は、モホール計画やIBM（伊豆-小笠原弧掘削）のような深部掘削に重点がおかれているが、GOLD（Gulf of Lion Drilling: 地中海深部掘削）計画のような「ちきゅう」を用いた環境関連の掘削こそ重要である。

別添2. 人材育成の具体的な活動について

<掘削科学の分野での人材育成活動>

(1) 研究者有志を中心とした活動

日本地球掘削科学コンソーシアム(J-DESC)の第二期に整備したのが、J-DESCが中心となって実施している「J-DESCコアスクール」で、この他に地球惑星科学分野の若手が中心となって毎年1月に実施してきてきた「地球システム・地球進化ニューイヤースクール」がある。両者ともに基本的にボランティアをベースとした活動となっている。

1) J-DESCコアスクール

J-DESCでは、地球掘削科学における研究手法や計測技術の普及・レベルアップ、人材育成・裾野の拡大、会員機関の相互交流などの観点からJ-DESCコアスクールを2007年度より開催してきている。J-DESCコアスクールには、コア解析に必要な基礎的なスキルを習得するためのコースから、より応用的・専門的なスキルを習得するためのコースがある。

各コース開催の案内については、IODP(統合国際深海掘削計画)・ICDP(国際陸上科学掘削計画)メーリングリストやホームページ上で案内を行ってきており、J-DESC会員機関から参加する学生・大学院生の方を対象に、参加旅費として数千円程度の援助を行っている。コアスクール終了後、受講者には各コースの修了証(受講証明書)を発行している。

①コア解析基礎コース

コア解析基礎コースは、コア解析に関する基礎を学ぶコースであり、大学カリキュラムでは体系的に学ぶ機会がほとんど無いコア試料の肉眼岩相記載の方法、スミアスライド作成・観察法、非破壊計測法などについて、レクチャーと実習を通じて理解し実体験することを目的とした合宿型スクールである。

これまで、100名を超える参加者が実際に深海底から採取されたコアを材料としたコア基礎解析法について、レクチャーと実習を通して理解を深め、それぞれの実践の場へ応用してきている。

②コア同位体分析コース

本コースでは、地球化学試料の同位体分析を取り扱う。地球化学試料の各種同位体組成は、その形成環境・形成過程や構成する物質の起源などによって変動することから、環境解析や年代決定、生物種の同定などに広く用いられている。しかし、実際に利用するには、教科書的な知識に加えて、分析テクニックを学びノウハウを習得することが必要である。コア同位体分析コースは、コア解析のための応用的・専門的なスキルを学ぶためのものである。

③コア記載エキスパートコース

IODP 研究航海の乗船決定者や乗船申請中の者、及び将来乗船したいという希望を持っている者を対象として、船上 VCD (Visual Core Description : 掘削コアの肉眼記載) を想定し、VCD スキーム、VCD のやり方、用語、スミアスライド観察、岩相名決定、要約、サイトサマリーの作り方、などのレクチャーおよび実習を行う。

コースの最初に、短時間でレクチャーとして、統合国際深海掘削計画 (IODP) の概要や、掘削船上でのコアフロー、船上の「sedimentologist (堆積学者)」の仕事などの概要を解説する。次に実習として航海ごとに 2~3 人ずつグループを構成し、実際のコアを材料として岩相観察、スミアスライド観察を実践していく。

④微化石コース

IODP研究航海の成否を握る一つは、航海中に地質年代をすばやく決定することである。微化石は、下船後の研究でも、高い精度での年代決定や、古環境を明らかにするなど、IODPへ大きく貢献してきている。しかし、微化石の種名を決めるのには熟練した作業が必要である。

「微化石コース」では、微化石に関心のある学生や微化石の初学者を対象に微化石実習を行っている。このコースには2つの特色があり、複数の専門家が講師となったティーム・ティーチングと、実物標本の観察である。これにより教科書だけでは得難い経験を積むことができる。

2004年から毎夏、2泊3日のコースとして開催し、これまで有孔虫、石灰質ナノ化石、放散虫、珪藻、貝形虫の実習を行ってきて、一回当たり約30名の受講生が全国各地から集まった。初日の午前中に、IODPと微古生物学研究の関係について講演があり、初日の午後から2日目にかけて、実物標本を観察しながら基本を習い、年代決定や環境研究に重要な種にしぼって実際に種名をつける訓練を行う。3日目の午前には、受講生の希望に応じてさらに深く実習を行い、実習対象外だった分類群についての質問を受け付ける。3日目の昼前にすべての実習を終え、修了証明書を手渡して微化石コースは終了となる。

微化石コースに参加したことが契機となって、微古生物学研究者の所属する大学院へ進学する事例が毎年ある。

⑤最先端非破壊解析 TATSCAN コース

このスクールは、海底堆積物コア、掘削コアなどの非破壊解析について、最先端の解析装置などを使って、原理や手法、具体的なノウハウなどを少人数で学ぶことを主たる目的としている。最先端のコア非破壊解析に関する講義と実験・講義、「最先端のコア非破壊解析と機器開発」、「非破壊XRFコアロガーの概要実習」などを行う。

⑥古地磁気コース

IODPにおいて古地磁気による年代推定は基本的な情報として重要である。これは、ほとんど全ての航海に古地磁気研究者が乗船してきたことから明らかである。船上で古地磁気研究者に求められるのは、まずコアの古地磁気層序を明らかにすることである。堆積物を掘削する航海では、船上でパススルー型超伝導磁力計を用いて、半割コアを連続的に測定する。半割コアやU-チャンネルを用いたパススルー測定には、個別試料 (キュ

ーブ試料)の測定とは異なった固有の問題があり、測定や解釈には相応の知識が必要となる。

古地磁気コースでは、高知コアセンターにおいて、地球深部探査船「ちきゅう」や「JOIDES Resolution号」に設置されているのと同等のパススルー型超伝導磁力計システムを用いて古地磁気測定実習を行い、乗船研究などに必要な知識を習得することを第一の目的としている。また、高知コアセンターには、低温磁気特性測定装置(MPMS)や熱磁気天秤をはじめとする最先端の岩石磁気分析装置が揃っており、共同利用研究として、乗船後の研究に利用して成果を上げることが期待されている。これらの機器を利用した磁性鉱物の決定法などについても実習を行い、岩石磁気測定の実際について学ぶことを第二の目的としている。

⑦ロギング基礎コース

検層はコア取得率の低い場合などに岩石物性値を得る方法としてODP(国際深海掘削計画)時代より使用されてきた。掘削時同時検層(LWD)によって掘削直後の新鮮な状態の地層での測定も行われ、コアによる測定との対比・補完を行うものとしても、検層データは掘削科学において大変重要である。ロギング基礎コースでは、標準的な検層項目で用いられるツールやそれらを用いた計測手法の基礎を学び、実際のデータおよびソフトウェアを用いたデータ解析の実践を通じて、検層に関する基礎的な知識の習得を目指す。

⑧泥水検層コース

DSDP(深海掘削計画)、ODP以来、コア試料を中心に行われてきた掘削科学の物質科学的研究は、ライザー掘削が可能な地球深部探査船「ちきゅう」の登場によって、コア採取だけでなく、泥水検層や物理検層といった、いわゆる孔内検層をその中心に据える時期に変わりつつある。

物理検層はIODP以前にも行われてきたが、泥水検層と呼ばれる手法はライザー掘削によって初めて行われる手法である。これにより、コア試料を採取できないような場合でも地球深部の情報を獲得することが可能となり、掘削科学の研究が大きく広がることが期待される。2009年に実施されたIODP Expedition 319は、泥水検層によるカッティングスやマッドガスの採取を主体とした初めての研究航海であり、多くの成果を挙げた。今後、泥水検層によって得られた試料を用いて研究を進めることが出来る研究者の需要は大きく高まると予想される。一方で、泥水検層は、一般の研究船や掘削船では行われない手法であるので、その手法を身につけるためには、特別なレクチャーが必要である。

掘削科学の分野とは対照的に、石油掘削の分野では、孔内検層を主体として、むしろコア採取を補助的な手法として用いており、採取された試料の処理や分析方法に関しては、非常に多くの蓄積がある。今回、泥水検層コースでは、石油掘削の分野で実績のある、石油資源開発株式会社技術研究所にご協力いただき、泥水検層の基礎および実際の試料処理を行う実習型のスクールを行った。

⑨ICDPトレーニングコース

ICDPトレーニングコースは、ICDP-GFZ（ポツダム地球科学研究センター：ドイツ）が主催するプログラムで、ドイツで実施されることが多い。ICDP/IODPの各プロジェクトに責任のある立場で参加している科学者（PI：研究代表者 やCo-chief：共同主席研究者 その他）や技術者、さらにこれからプロジェクトを計画立案しようとしている人に対して、ICDPのプロジェクトや掘削のオペレーションに関する講義や講習を受けることができる。

2）地球システム・地球進化ニューイヤースクール（NYS）

NYSは地球科学に関して幅広く見識を深める場として毎年開催されてきており、最初の頃はつくばの独立行政法人産業技術総合研究所などでも開催していたが、現在は代々木の国立オリンピック記念青少年総合センターで開催されることが多い。NYSでは毎年各分野の最先端で活躍されている講師の方々や地球科学を取り巻く業界の方々が招かれ、2日間で10コマほどの講演が行われる。基本的に掘削科学以外の地球惑星科学分野を対象としているので、幅広い院生・学部生の交流があり、実りの多いものとなっている。

（2）研究支援施策に基づく活動

IODP関連研究者の育成については、スクールの他に、①掘削提案を促進するための「IODP掘削プロポーザル作成支援」、②科学計画作成の事前準備としての「国内の掘削科学白書」の作成などを行ってきた。特に、後者は150人以上が参加し、最終的にブレメンで開催されたINVEST会議（2013年以降のIODP科学計画策定に向けた国際会議：2009年9月開催）にも100人余の参加し、院生も含めた若手の育成には非常に大きなステップとなってきた。今後は、IODPに興味を持った次世代の若手研究者が乗船研究に積極的に参加することができるような支援体制の確立が重要である。

具体的には、乗船向けのテクニカル教室や乗船後の研究支援であり、さらにこれを発展させ、若手による科学提案作成支援などを行う必要がある。特に、米国で行われている「若手向けの提案書作成講習会」などに日本から大学院生およびポスドククラスの若手を派遣する体制を整える必要がある。また、次代のIODPの活動をリードする研究者の育成が急務である。そのため、若手研究者等の興味を喚起するアウトリーチ活動に一層取り組んでいくことが重要である。

別添3. 次期国際深海掘削計画 新科学計画 (Science Plan for 2013-2023)

「Illuminating Earth's Past, Present, and Future (地球の過去、現在、未来の解明)」の要点

科学研究テーマ

● 気候・海洋変動 ～過去を読み解き、未来を語る～

気候、海洋、氷床が現在起こっている温室効果ガスの急速な増加に対してどう反応するかを予測するため、過去の環境と気候状態の記録を海洋底堆積物コアから読み取る。

・ 二酸化炭素濃度上昇の地球気候システムへの影響の解明

現在よりも二酸化炭素濃度が高かった過去の地球の姿を明らかにすることで、地球システムにおける地球温暖化のプロセス、速度、影響を解明する。

・ 地球温暖化の氷床と海水準への影響の解明

氷床と汎世界的海水準が過去の地球温暖化に対して反応する割合を明らかにすることで、数十年後にどれほど海水準の上昇があるかを洞察する。

・ 地域的な水循環変動の把握

モンスーンやエルニーニョ現象など大気・海洋循環の影響にともなう、水循環変動のパターンを過去の堆積物記録から解明する。

・ 海洋の化学的変動に対する海洋生態系の変動の理解

現在そして未来の海洋環境を予見するため、過去の温暖地球における海洋の酸性化および低酸素化に対する海洋生態系の反応を明らかにする。

● 生命圏フロンティア ～深部生命、生物多様性、生態系の環境影響力～

地球で最も大きな生態系の探査により、深部生命圏の起源と限界、環境変化に伴う生命の進化や起源に対する見識を提供する。

・ 生命の起源や進化、地球規模の重要性の理解

我々の惑星の中で最も大きな生態系の一つである海底下生命圏の姿を明らかにすることで、海洋の化学、炭素循環、そして堆積物と岩石の変質等に影響を与える地球化学プロセスを解明する。

・ 海底下生命圏の限界の探求

現世の地球における生命圏の限界に関する議論を解決するとともに、地球または他の惑星環境における生命の生息可能条件や起源、生態系における代謝プロセス機能を解明する。

・ 地球環境変動に対する海底下微生物生態系および生物多様性・進化の感度の把握

現世および過去における海底堆積物内の生物進化学的な解析を行い、地球史における劇的な海洋環境や気候変動に対して、いかに地球表層および地下圏の生物多様

性や機能が変動し、地球環境に影響したかについて、その関連性を理解する。

● 地球活動の関連性 ～地球深部の活動とその表層環境へのインパクト～

惑星進化の過程にある地球規模の変化の原理を理解するため、地球の核から大気にわたって影響を与える海洋底の形成・消滅、大陸の移動、火山・地震の発生など、地球のダイナミックな活動を理解する。

・ 上部マントルの組成、構造、ダイナミクスの解明

数十年来の深海科学掘削の目標である、海洋地殻全採取、地殻・マントル境界であるモホ面の実態解明、そして新鮮なマントル試料の採取を通じ、地球の体積の約7割を占め、最も大きな化学貯蔵庫であるマントルの理解を深めることで、惑星地球の進化を解明する。

・ 海洋地殻形成に関する、海洋底拡大とマントル融解の関係の把握

低速拡大軸付近に露出した下部地殻とマントル物質の掘削により、海嶺における地殻形成モデルの検証を進める。

・ 海洋地殻と海水の物質循環のメカニズム、規模、歴史の把握

熱水変質作用における海水と海洋地殻の地球化学的相互作用を明らかにするとともに、地球深部から表層への物質循環過程を解明する。

・ 沈み込み帯の形成、そこでの揮発性物質の循環、及び、大陸地殻の創造の総合的理解

地球上で最も大規模な火山の噴火、巨大地震、津波が起こる場所であるプレート収束域の掘削により、沈み込み帯の始まりや大陸地殻の生成における島弧火山活動の果たす役割の解明、および沈み込み帯で発生する地震・火山災害のリスクアセスメントを行う。

● 変動する地球 ～人間活動の時間スケールにおける変動プロセスと災害～

人間活動の時間スケールで起こる地震、地すべり、津波などの地球変動に伴う災害の頻度、メカニズム、影響を明らかにする。

・ 巨大地震、地すべり、津波発生のメカニズムの解明

現代の地球科学が直面する最も緊急かつ挑戦的な任務として、海底における長期リアルタイム観測システムを構築し、地震、海底地すべり、津波等の発生メカニズムの解明や減災に役立つデータの取得をめざす。

・ 海底下の炭素循環および炭素シンクを支配する特性およびプロセスの解明

気候、生物、固体地球、そして災害に関する研究の幅広い空間・時間スケールでの連携に資するため、海底下堆積物の堆積様式と変形、炭化水素の生成と蓄積、海底斜面の安定性、地殻による二酸化炭素の吸収や貯留、そして生態系機能を明らかにするとともに、それらの相互関係を解明する。

- ・ 海底下地質構造、熱、生物地球化学的プロセスと流体との関係の理解

地球最大の滞水層である海洋リソスフェアに存在する流体の循環・化学的挙動を理解することで、海水や地殻内物質循環の変遷、海底下生命圏との関連性を明らかにする。

教育とアウトリーチ

研究のアウトリーチと教育は新計画において欠くことのできない重要な要素となる。最先端の技術や研究設備を兼ね備えた科学掘削船やコア試料保管庫、全世界に公開される科学データ、そして新計画に参画する多くの研究者や海洋技術者たちは、アウトリーチに関わる様々な取り組みを率先して行う。

- 次世代の科学者を育てる

若手研究者や学生たちが、新計画の国際的な科学、技術チームに参加することを通じて、科学界や民間企業、政府機関においてリーダーとなる人材を育成する役割を果たす。

- 地球惑星科学の教育者を支える

研究航海やコア保管庫において、実際の研究サンプルや科学データを活用する機会を教育者に提供することで、地球・生命科学などに関連する教育素材や実習授業の開発を支える。

- 人々に語りかけ、感動をもたらす

社会と活発なコミュニケーションを図るため、印刷物や音声、映像、公共機関やソーシャルネットワークを活用し、人々に地球システムや生命科学の魅力を伝え、感動をもたらす

実施計画

4つの科学目標を達成するため、IODPでは、マントルへの掘削や地震発生帯の掘削など、これまで困難だった領域の掘削を可能にするライザー掘削システムを有する日本の地球深部探査船「ちきゅう」、さまざまな目的で運用できる米国のジョイデス・レゾリューション号、そして、極域や極浅海域などの特別な掘削環境に応じて欧州が傭船する特定任務掘削船（MSP）の3つの異なる掘削プラットフォームを活用する。さらに、過去に掘削された掘削孔への長期孔内観測装置の設置により、新たな試料の獲得や研究技術の開発が可能になる。このような海底の天然実験室による研究は研究成果とともに、IODPの研究者や技術者の技能の向上や経験の積み重ねとなる。