

デンマークは超深海を目指す

はじめに

2021年3月末にオーデンセにやってきました、南デンマーク大学（通称SDU）の小栗一将と申します。私は前職の海洋研究開発機構（JAMSTEC）に勤めていた2003年頃から、デンマークやドイツの研究者と一緒に、地質学や地球化学の視点で海底の環境を研究してきました。SDUでもこの路線を引き継ぎ、海洋のなかで極めつけに深い超深海と呼ばれる環境を調査しています。この度Jdnet編集部より執筆の機会を頂きましたので、超深海調査の歴史、デンマークの誇る観測装置、そして最新の研究で明らかになった超深海の環境の話題を織り交ぜながら、私の研究をご紹介します。

超深海と海溝

海洋は地球表層の70%を覆っています。このうち水深200mから6000mまでは深海と呼ばれ、海洋の面積の大部分を占めます。深海のほとんどは、水深4000～6000mの深海平原と呼ばれる広大な地形です。6000mより深い場所は超深海と呼ばれますが、その面積は海洋全体の0.9%しかありません。海底地形図を見ますと、超深海の領域となる海溝は大陸の縁辺に細長く分布していることが判ります（図1）。海溝では、海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込んでいます。水深10000mを超える海溝は深い順にマリアナ海溝、トンガ海溝、フィリピン海溝、ケルマディック海溝で、世界でもこの4か所しかありません。海溝とその周辺は巨大地震の巣窟でもあります。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の震源は、まさに日本海溝の近傍でした。この地震は、日本列島の北半分が乗っている北米プレートの下に沈み込んでいる太平洋プレートとの間に蓄積した歪みが解放されたことにより発生しました。JAMSTECでは震災4ヶ月後に緊急研究航海を実施し、日本海溝の海底をビデオカメラで直接観察しました。このときの映像には、死んだ生物や生きた深海魚が強い濁りのなかを流されていく様子が写っていました（写真1）。一方、震災の13年前に行われた観察では海底の水は澄んでおり、多くの生物が見られました。海溝は変化の乏しい静かで退屈な世界ではな

く、時折発生する地震により激しい攪乱を受ける環境だったのです。

超深海に挑んだ潜水艇

超深海の研究を進めるにあたり、海底における試料の採取や化学成分の測定は不可欠です。しかし、そこには水圧の壁が立ちただかっています。マリアナ海溝に位置する世界最深のチャレンジャー海淵（水深10925±12m）の海底における水圧を計算してみましょう。体積1リットルの海水（重さ約1.02kg）の底面積を1cm²とすると高さは約10mです。つまり、水深10mにある物体は、1cm²あたり約1kg重の水圧を受けます。従って水深10925mの水圧は、その1092.5倍にあたる約1114kg重となります。これは、小指の爪に自動車一台が乗った状態とほぼ等しい力です！深海で使用する装置は、このような高圧によって破壊されないよう、金属で作られた円柱形の容器に収めます。人間が搭乗する有人潜水艇の場合、耐圧殻と呼ばれる厚いチタン合金製の球と、特殊な浮力材を使用します。搭載できる電池の数量も限られるため、潜航は鉄の錘を抱えて重力任せ、浮上は錘を切り離して得られた浮力で行います。JAMSTECが保有する「しんかい6500」（表紙写真左）を例に、潜航の様子を説明しましょう。2名のパイロットと1名の観察者は、内径2mの耐圧殻の中に入り、密閉状態で潜航します。このため潜航中の耐圧殻内は大気中と同じ気圧が保たれます。呼吸で放出される二酸化炭素は薬品ですみやかに吸収され、消費された酸素は常にボンベから供給されます。耐圧殻には操船用のコントロールレーや、障害物を探知するソナー表示器があります。窓は3つあり、それぞれの乗員の視界が確保されています。しかし水は光の減衰が大きいため、透明度の高い海水中でもライトを照らして見渡せるのはせいぜい10mほどです。パイロットは操船に加え、モニタータを操作して試料採取などの作業を行います。海水は電波を遮断するため、母船との音声通信や画像伝送は音響で行います。トイレは我慢かおむつです。勿論、自動車用の非常用トイレが常備してあります。着水から揚収までの時間は、日の出から日没までの最大8時間と決ま



っています。

「しんかい6500」は、その名の通り水深6500mまで潜航できる潜水艇で、1989年の運用開始から25年以上にわたり現役の潜水艇として世界最高の潜航性能を誇っていました。しかし、この水深は超深海のほんの入り口に過ぎません。超深海への潜航のため最初に開発された有人潜水艇はアメリカのTrieste号で、1960年にチャレンジャー海淵（10916m）への潜航に成功しました（図2）。次に続いたのはフランスのArchimède号で、千島海溝（1962年；9500mと1967年；9260m）、プエルトリコ海溝（1964年；8300m）や伊豆・小笠原海溝（1967年；7220m）に潜航しました。1996年には、JAMSTECの無人探査機「かいこう」がチャレンジャー海淵の海底（10911m）に再び到達しましたが、残念ながらケーブルの切断事故により2001年に失われました。2012年、映画監督として知られるJames Cameron氏は、独自に開発した1人乗りの小型潜水艇のDeep Sea Challenger号で、有人潜水艇としては約半世紀ぶりにチャレンジャー海淵（10898m）に潜航しました。そして2019年には、投資家で探検家のVictor Vescovo氏が、やはり独自に開発した2人乗り有人潜水艇のLimiting Factor号（写真2）で、チャレンジャー海淵（10925m）を含む太平洋、大西洋、南水洋、インド洋、北極海それぞれの最深地点に潜航するための航海、The Five Deeps Expeditionを主導、その後も人類未踏の海溝への有人潜航を次々に成功させる大記録を達成しました。それだけでなく、氏は科学にも大きく貢献しています（James Cameron氏も、深海生物の研究者と共著で深海生物の論文を発表しています）。まず、潜航する海溝の最深地点を決定するために最先端の測深機材で得た、超深海の精細な測量データを公的機関に提供しました。さらに、度重なるチャレンジャー海

淵への潜航の結果として、これまでに潜航した無人探査機が投棄した数多くの光ファイバーケーブルが海底に残されていることを論文に発表し、分解することないケーブルを超深海に投棄するような調査のあり方に警鐘を鳴らしました(有人潜水艇は単独潜航するので光ファイバーを使いません)。近年の超深海の探査は、7000mクラスの有人潜水艇、蚊竜号(2016年～)や11000mクラスの奮闘者号(2020年～)の運用を開始した中国の活躍が目立ちます。奮闘者号は運用早々にチャレンジャー海淵(10909m)に到達し、超深海への潜航を50回以上こなしました。さらに昨年はニュージーランドの研究者と共に、ケルマディック海溝の海底水深10000mの調査を行いました。今年で「しんかい6500」の運航開始から34年、「かいこう」の亡失から22年になりますが、日本は次世代の潜水艇や探査機の建造に至っておらず、有人潜水艇の技術の継承や、深海研究の機会が失われてしまう危機的な状況にあります。日本が海洋立国として海洋の科学を推進するためにも、後継機の建造が望めます。

デンマークと超深海研究

デンマークは歴史的にも地理的にも海洋国家ですが、周辺の海域は浅く、地形的に深海とは無縁です。しかし実は、デンマークには世界に先駆けて超深海の研究を推進してきた歴史があります。コペンハーゲン大学の魚類学者Anton Frederik Bruun教授は、1950～52年にデンマーク海軍のGalathea号による世界一周航海を主導し、フィリピン海溝の水深約10000mなど超深海で生物の調査を行ないました。この結果、生物がないと考えられてきた超深海にも様々な生物が生息していることが判明しました。また、古生代デボン紀(約3億6000万年前)までに絶滅したはずの原始的な貝の生体をコスタリカ沖、水深3591mの海底から発見するなど、科学的に重要な成果を挙げました。第二次世界大戦後間もない時期にこのような航海を実施した、デンマークの自然科学に對するチャレンジングな姿勢には感服の他ありません。当時のニュース映像には、前国王のFrederik9世やNiels Bohrを始めとする沢山のデンマーク国民がGalathea号の出航を見送る様子が映っており、海洋調査に對する国民の注目度の高さが窺えます。

デンマークには深海用の有人潜水艇も無人探査機もありません。しかし、ラン

ダーという昇降装置に微小酸素電極というセンサを搭載し、世界的にも先進的でユニークな現場測定を行っています。ランダーは金属のフレームに浮力材、錘と切り離し装置を搭載しただけのシンプルな装置です(表紙写真左)。潜水艇や探査機のように水中や海底で動くことはできませんが、センサ、カメラシステム、生物捕獲器、採水器や採泥器などを搭載して、超深海の海底で観測、撮影や試料の採取を行います。ランダーの能力は限定的であるため、有人潜水艇や無人探査機のような様々なニーズには対応できませんが、コストパフォーマンスが高く研究目的に特化したアレンジが簡単にできるため、合理性を重んじるデンマークやドイツで重用されています。

微小酸素電極による海底の酸素濃度測定

微小酸素電極は先端の直径が10ミクロンほどの細いガラス製の電極で、海底を乱すことなく海水から堆積物内部までの酸素濃度を測定できます(写真3)。
堆積物には有機物が含まれ、バクテリアが有機物を好気分解ーと書くーと難しく感じられますが、我々人間がご飯と空気の酸素で代謝を行い、二酸化炭素を吐き出し排泄をするのと同じことです。ただしバクテリアは海底表層の堆積物1cm³あたり100万から数億匹いますーしているため、堆積物の中で酸素は枯渇します。また海底の直上、堆積物の表面から高さわずか数百ミクロンの水中では、拡散という現象によって水中の酸素が無酸素の堆積物中に常に吸い込まれているため、酸素濃度の勾配が生じています。この勾配を微小酸素電極で測定して計算をすると、海底での酸素の消費速度や二酸化炭素の生成速度を得られます。さらに、化学分析によって得られる堆積物の有機炭素の濃度や、一年に積もっていく堆積物の厚さ、そして二酸化炭素の生成速度を組み合わせると、有機炭素が堆積物の中に保存されていく速度が得られます。ちなみに、微小酸素電極の内部は液体で満たされており空隙はありません。このため電極内部と外部は均圧となり、深海でも破損することはありません(深海魚が潰れないのも同じ理由です)。
ところで、環境測定用の微小酸素電極を開発したのもデンマークの研究者です。開発者であるオーフス大学、Niels Peter Revsbech教授の研究室からは、Unisenseという微小電極を開発・販売するベンチャー企業がスピンアウ

トしました。この会社は、今では環境計測などの分野では世界中で名が知られるようになりました。また、Unisense社は微小酸素電極と画像処理技術を組み合わせた卵子選別装置も開発しました。この装置は製品化され、不妊治療に大変役立っているとのこと。

酸素を通して明らかに！なりつつある、超深海の姿

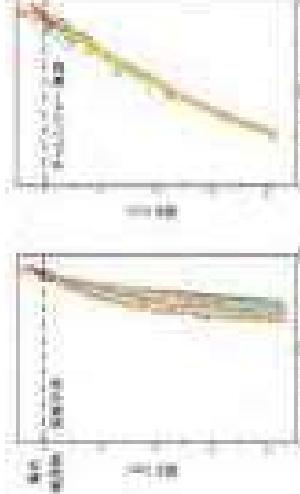
海洋の表層では光合成によって植物プランクトンが増殖します。彼らは死ぬと凝集し、マリンスノーとなって水中をゆっくり沈降します。マリンスノーは水中や海底に住むバクテリアや生物の餌になるため、海底に到達する有機物の量は水深が増すほど減少すると考えられてきました。確かに、深海までの水深ではこの傾向が見られます。しかし超深海では様相が異なります。2010年に日本、デンマーク、イギリス、ドイツの合同チームが、ランダーを使ってチャレンジャー海淵(10817m)とその近傍の深海平原(6018m)のそれぞれの海底に微小酸素電極を挿して酸素濃度を測定しました。この結果は、超深海である前者の方が後者よりも酸素の消費速度が大きーという、従来の常識を覆すものでした(図3)。また、ランダーに取り付けた採泥器で採取した堆積物の有機炭素濃度やバクテリアの生息密度を比較したところ、どちらも前者の方が多いという、またも予想を裏切る結果が得られました。これは、超深海の海溝では一旦深海平原や海溝斜面に堆積した有機物が、流れによって転がり込んで濃集するたーめと考えられます)。また、世界各地の超深海の海溝から得られた堆積物の構造や、そこに含まれる微量の天然放射性核種を分析した結果、海溝の中では堆積物の供給や有機物の濃集が常に起きていること、さらに、大地震に伴う揺れによってこの現象は桁違いに増加、しかも短時間のうちに起きることもしかりました。この結果は、JAMSTECによる緊急調査航海で観察した日本海溝の海底を録画した映像からも予想されましたが、世界中の様々な海溝から得た堆積物を分析したところ、超深海の海溝では時折発生する普遍的な現象であることがはつきりしました。これまでの調査で得られた知見をまとめますと、超深海の海溝は深海平原よりも有機炭素の濃度が高く、高圧であるにも関わらずバクテリアの代謝活性が高いという、海底のなかでも特異的な環境であること、そして人間活動に致命的な被害を与える

大地震も、海溝の堆積物の中に住んでいるバクテリアにとってみれば、大量の有機物＝食物を与えてくれる恵みである、ということになります。

おわりのはじまり

私の所属するSDU生物学学科のHADALは、日本のJAMSTECや東京海洋大学を含む世界中の研究機関・研究者と共に未踏の超深海の調査を行い、まだまだ謎の多い環境や、海底に住む微生物の研究を進めています。しかし、専門外の方が超深海の話を知りたい、なんて人ばかりいるところのようだけれど、この研究の意義はどこにあるのだろうか？と研究の意義はとも知れませんが、私はこの問いに対して、我々の研究は70年以上前のGalathea号航海がそうであったように、科学的な調査によって地球上の科学の空白域を埋めることであると答えたいです。それは巨大なジグソーパズルのピースを見つけてきて、これまでに出来かけている不完全なパズルの一部を埋める作業と言えるのかも知れません。出来かけたパズルの絵からは、地球環境や生物の関わりをより深く理解するためのヒントが現れるはずで、そこから、海溝ごとの生物の多様性、微生物の分布やユニークな代謝経路と化学成分の関係の発見、地球温暖化問題に直接関係する炭素や、人類活動によって作られた物質などのゆくえんの詳細が明らかになる、といった知見が得られれば良いのですが？もっとも、科学の目で見えるものは深遠な自然の一側面に過ぎません。きっとこれからの調査や分析で得られる結果と予想との違いに、一喜一憂することになると思います。

深海は電波も光も通さず高圧に阻まれているため、実は宇宙よりも謎の多い世界です。超深海や海洋の研究に少しでも興味を持って頂けると嬉しいです。



Two globes illustrating the world's deepest ocean trenches. The left globe shows the Mariana Trench (10,925m), Challenger Deep (9,550m), and others. The right globe shows the Tonga Trench (10,800m), Japan Trench (9,346m), and others.

Location	Depth (m)
サウスランド・トラフ (Southland Trench)	8,428m
アタカマ海溝 (Atacama Trench)	8,065m
ケイマン海溝 (Cayman Trench)	7,686m
中央アメリカ海溝 (Central America Trench)	6,668m
アフリカ海溝 (Africa Trench)	10,540m
フィリピン海溝 (Philippines Trench)	10,925m
マリアナ海溝 (Mariana Trench)	10,925m
チャップ海溝 (Chapman Trench)	9,346m
ハズチ海溝 (Hutchinson Trench)	8,034m
ニュエーブリデン海溝 (Newerburg Trench)	9,140m
トンガ海溝 (Tonga Trench)	10,800m
タリマディック海溝 (Tallmadge Trench)	10,047m
ニューヘーベリデス海溝 (New Hebrides Trench)	9,173m
ジャワ海溝 (Java Trench)	7,725m
佐賀海溝 (Sagami Trench)	7,507m
日本海溝 (Japan Trench)	9,020m
千島・カムチャツカ海溝 (Kuril-Kamchatka Trench)	9,550m
アイリッシュ海溝 (Irish Trench)	9,807m
伊豆・小笠原海溝 (Izu-Ogasawara Trench)	9,807m

【追記】7/15-10/9に、東京・上野の国立科学博物館で特別展「海—生命のみもと—」が開催されます。この時期に日本に行かれる機会がありましたら、是非足をお運びください。
<https://umiten2023.jp/>

PROFILE

小黒 一葉(おぐりかずは)

南デンマーク大学自然科学部生物学・准教授。同学科のNordseeとHADAL (Danish Center for Hadal Research) に勤務。国立研究開発法人海洋研究開発機構・招聘主任研究員。観測船に乗り調査を行い、深海カメラシステム、タイマー、採泥器や切り離し装置などの観測機器も開発する。自称「深海のハダドグマン」。

ホームページ <https://sites.google.com/view/deepseasediments>
電子メール ogurik@biology.sdu.dk