

OCEAN AT RISK

OCEAN AT RISK

危うさに立つ海

OCEAN

AT

OCEAN AT RISK

危うさに立つ海

RISK

はじめに

海洋教育の在り方については、さまざまな考え方がありますが、私たちは、それを、次のように考えています。まず、すべての生命のマトリクス（母胎）であり、また生存の基盤である海がおかれている状況を認識すること、そして、その認識を踏まえて、海洋に対し実際に「呼応的かつ活動的」にはたらきかけることである、と（田中智志編著『温暖化に挑む海洋教育』（東信堂・2020年）参照いただければと思います）。

今回、海洋教育センターが発信する企画『Ocean at Risk——危うさに立つ海』は、海洋がいま直面している危機を、海洋学のさまざまな分野の知見に即しつつ認識し、またそれに対処するための試みです。したがって本企画のめざすところは、たんなる海洋についての知見の習得にとどまりません。本企画のめざすところは、学習者が海洋の直面する危機を科学的に踏まえることで、それを克服するための行動を実際に試みることです。そして、その行動の基礎となる認識が、私たちが、海洋を私たちだけでなく、すべての生命の生存を根本的に支えている大いなる存在としてとらえる、ということです。

こうした目的を達するために、本企画では、海洋がいまかかえているさまざまな問題をつなぐ総論として「地球温暖化」を設定しました。この温暖化という視座のもと、海洋で起きているさまざまな問題のつながりを理解することで、危機に立ち向かう試みが具体的に可能となるのではないか、と考えました。各分野の最先端で活躍する海洋学研究者へのインタビューは、そのさまざまな問題をひとつずつ深いところから解き明かすことで、私たちが「呼応的かつ活動的」なはたらきかけに導いてくれるはずです。

本企画は、海洋教育は何を目指しているのか、確かめたいと思っている教員のみなさんにとっては、学校での授業、生徒たちとの議論と活動のための題材集として、活用いただけるのではないかと考えています。また、海洋への探究と行動を実際に始めようとする生徒のみなさんにとっては、本企画は、どのような海洋への接近の仕方（＝アプローチ・学問分野）があるのか、それを確かめるための道しるべとなるだろう、と考えています。

本企画が、海洋教育の新しい展開を誘うきっかけになってくれれば、と願っています。

田中 智志

東京大学大学院教育学研究科 教授
附属海洋教育センター センター長

目次

はじめに	P3
地球温暖化 茅根 創	P5
北極海の海水融解 川口悠介	P11
海面上昇 鈴木立郎	P17
津波 丹羽淑博	P23
海洋ごみと騒音 青木かがり	P29
海洋生物 遠藤一佳	P35
サンゴの白化 茅根 創	P41
おわりに	P48

地球温暖化

地球温暖化によって
多発する気象災害の脅威
「抑制」と「適応」の両輪で対策を

Interview with

茅根 創

東京大学
大学院理学系研究科 教授
COLE 副センター長

猛暑や熱波、さらには集中豪雨や台風を
引き起こす原因となっている地球温暖化。
その影響はどのようなところにあらわれ、
今後、どのように変化していくのだろうか。
象徴的な「海の危機」としての
地球温暖化の危険性やその対策を、
地球システム学の視点からまずは概括したい。

近年、地球温暖化が気象や海洋に大きな影響をおよぼしていますが、まずはその危険性についてお話しいただけますか。

茅根創 | 地球温暖化による気象異常の最たるものとしてあげられるのは猛暑や熱波です。その因果関係は以前から指摘されていましたが、実をいうと最近まで気象学者は地球温暖化を猛暑などの直接的な原因とすることを避けていました。しかし、ヨーロッパやアメリカ合衆国西部が記録的な熱波に襲われた2018年を機に、地球温暖化が熱波などを引き起こす原因のひとつであるということを認めるようになったのです。それはある意味、猛暑や熱波による被害がこれまで以上に深刻なものになったこと、そして世界規模で早急に対策を講じる必要があることを意味しています。

ところで、2018年といえば日本が記録的な猛暑に襲われた年でもあります。全国各地の最高気温が35℃を超え、8月5日には気象庁

の全国927観測地点の3割近い256地点で猛暑日が記録され(図1)、2018年6~9月の熱中症による死亡者は1518人に上りました(図2)。ですが、それ以上に熱中症による被害が大きかったのは、熱波が発生した2010年のことです。この年には熱中症による死亡者数が過去最高の1731人に達し、大きな社会問題になりました。

熱波は日本においても深刻な被害をもたらしているのですね。では、熱波とはそもそもどのような現象なのでしょうか。

茅根 | 熱波とは気象庁によると「広い範囲に4~5日またはそれ以上にわたって、相当に顕著な高温をもたらす現象」のことを意味します。なお「相当に顕著な高温」としては、平年値が最も高い時期において「かなり高い」気温を目安としています。日本が猛暑に襲われた2018年は世界的に夏場の気温が上昇し、ヨーロッパやアメリカ合衆国西部が熱波に襲われましたし、2010年にはロシアが熱波に襲

われ数万人が死亡する事態になりました。まさに熱波は世界的な課題となっているのです。

地球温暖化が進むと、猛暑や熱波のレベルはどのように変化するのでしょうか。

茅根 | 冒頭で述べたとおり、近年は地球温暖化が熱波の原因のひとつであると考えられています。現時点で地球の平均気温はすでに産業革命前に比べて1℃上昇しているだけでなく、その上昇傾向はこれからも継続するとみられており、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の地球温暖化の「RCPシナリオ」によると今世紀末には1.5~4.8℃も平均気温が上昇するとされています(図3)。また、地球温暖化が加速すると猛暑や熱波のレベルも上がるとされており、たとえば地球の平均気温が+1.5℃になると致死レベルの熱波にさらされる都市が今の1.5倍程度、さらに+4℃になると2.5倍程度になると予測されています。そうなれば当然、世界各地で災害レベルの熱波が多発し、熱中症によって多くの死亡者が発生してしまうことでしょう。熱中症は、温度だけでなく湿度が高いことによって起こり

ますので、とりわけ日本のように温度も湿度も高い国の場合、致死レベルの気象条件になりやすいため注意が必要です。地球温暖化を抑制するという意味では省エネを推進したいところですが、何より人命が大切なので、猛暑の折には迷わずエアコンを使うようテレビなどでも呼びかけていますね。

猛暑や熱波が増えている一方、集中豪雨や台風が多発している印象もあります。

茅根 | 2018年と2019年は集中豪雨や大型台風がつぎつぎと日本列島を襲いました。たとえば、2018年の西日本豪雨においては総降水量が四国地方だけで1800mm、中部地方だけで1200mmとなるなど、多くの地点で観測史上最大となる雨量が記録され、被害総額は約1兆1580億円に上り、死者・行方不明者の数は全国で280名以上に達しました。その被害はインフラにもおよび、西日本豪雨に関しても、2019年の台風15号や台風19号に関しても、多くの堤防が決壊し、広範囲で冠水が発生しました。



地球温暖化が加速することで、猛暑や熱波のレベルも上がってきている



豪雨で水浸しになった道路。地球温暖化にともない、こういった光景が日常的なものになるかもしれない

集中豪雨や台風の多発と地球温暖化にはどのような関係があるのでしょうか。

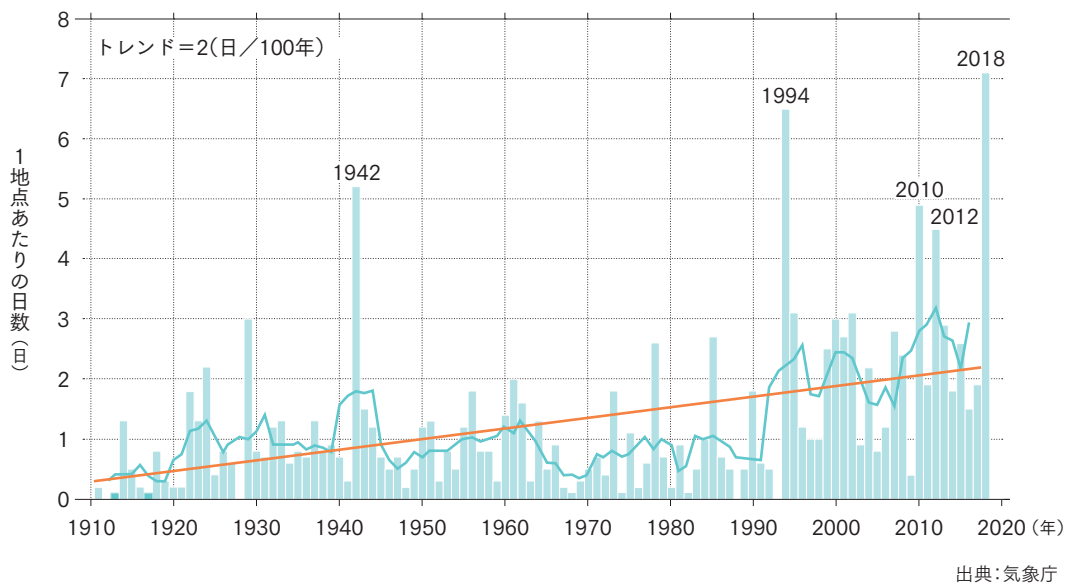
茅根 | そもそも、気温が上昇すると大気はより多くの水分を保持できるようになり、その分だけ降水量が増え、集中豪雨が起りやすくなります。

また、地球温暖化による海水温の上昇も集中豪雨や台風を引き起こす原因となります。たとえば、台風は27℃以上の海水温で勢力を増すので、地球規模で海水温が上昇することで必然的に強度が増加してしまうのです。しかも、日本近海は世界的にも海水温上昇が大きいゾーンになっています。実際、この100年で地球の表面海水温は0.54℃上昇しましたが、気象庁によると日本近海では四国・東海沖で+1.23℃、日本海中部で+1.71℃と平均以上に海水温が上昇しているのです。この勢いで日本近海の海水温が上昇しつづければ、近いうちに日本近海でも台風が発生するようになり、より強い勢力の台風が日本に上陸するようになるでしょう。

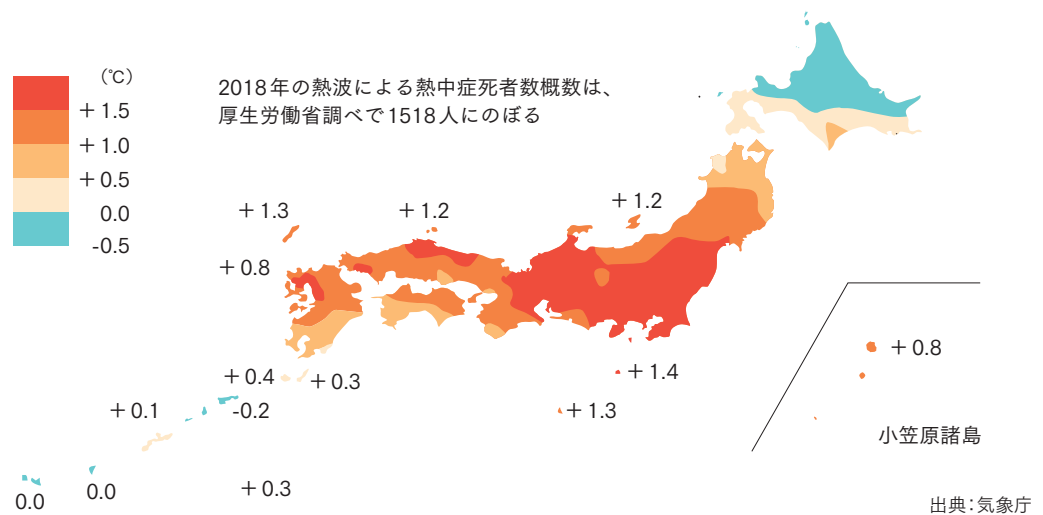
では、私たちは地球温暖化にどのように向き合っていけばよいのでしょうか。

茅根 | まずは温暖化を「抑制」という考え方があります。2015年のパリ協定では、人間社会や生態系に破壊的な影響がおよばないようにするためには、気温の上昇を2℃未満（すでに1℃上昇していますので、あと+1℃）、できれば1.5℃未満に抑制することが必要であることを合意しました。そして、+2℃未満に抑制するには、温室効果ガスの排出量を2050年までに2010年比で40～70%削減する必要があるとされました。そのためにはまさに今、二酸化炭素の排出を前年と同じ量にしなければなりません。しかし、現実の社会はそうなっていません。温室効果ガスの排出量は、リーマン・ショックなど経済が停滞している年以外は、前年比で2～3%ずつ増えていて、2018年の温室効果ガスの排出量は過去最高（二酸化炭素換算で553億t）でした。このままいけば最悪のシナリオ（今世紀末に+4℃以上）をたどることになってしまいます。

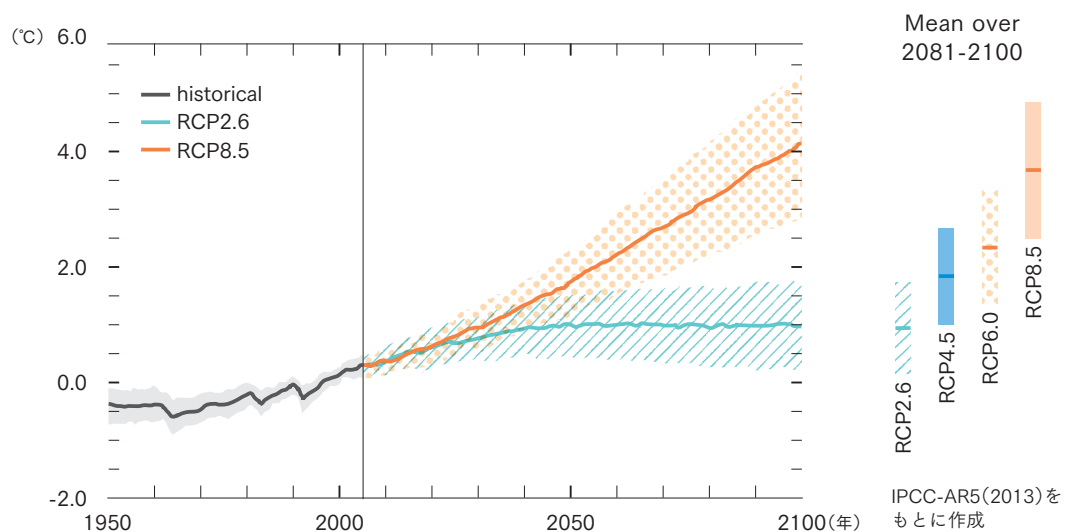
〔図1〕 全国[13地点平均]日最高気温35℃以上(猛暑日)の年間日数



〔図2〕 2018年夏の平均気温平年差(6月～8月)



〔図3〕 地球平均表面気温の変化(RCPシナリオ)



まさに世界的に喫緊の課題になっているのですね。

茅根 | そのとおりです。省エネだけではとても排出を抑制し、将来的にゼロにすることはできません。再生可能エネルギーへの転換をどうしても進めなければならず、そのためにはエネルギー構造や政策、産業の転換が必要です。

また、温暖化せざるを得ないのであれば、温暖化に「適応」することも必要です。たとえば、熱中症対策の徹底を急ぐとともに、豪雨や台風に対して最新基準の堤防や防潮堤を整備したり、ハザードマップを活用した避難行動を周知したりしていく必要があると思います。

教育現場においては、この問題についてどのような姿勢で臨むべきでしょうか。

茅根 | 日本の研究者や研究機関は将来の気温や海面上昇について「地球温暖化『予測』』という用語を使っていますが、IPCCなどの論文では「projection(投影)」という用語が使われています。これは「私たちの過去の状況と現在の行動が将来に投影される」ということを意味しているのです。私は教育現場においても、この投影という概念を重視しながら、地球温暖化の現状やメカニズムについて伝えていくことが大事なのではないかと考えています。地球温暖化は、異常気象などの形でようやく顕在化した問題です。実際にこうした気象が平年化して大きな影響を被り、現在の「投影」の結果を身をもって体験し対応しな



平成30年7月豪雨の際の鴨川沿いの様子(京都府京都市)

ければならないのは、生徒たちとその子どもたちの世代です。そうした将来の自分自身の問題として、生徒一人ひとりに主体的に地球温暖化のことを考えてほしいと思うのです。

海の危機を考えるうえでも、地球温暖化はキーワードになりそうですね。

茅根 | 海は人間が排出した二酸化炭素の3割を、温室効果による熱の9割を吸収する、炭素循環と地球温暖化の巨大な吸収源になっています。しかしそれが、これからもつづくかはわかりません。ある閾値(境界となる値)を超えると、それまでため込んでくれていた炭素や熱を、急激に放出するかもしれません。この冊子は海の危機について、私を含めた6人の研究者がそれぞれの専門分野の視点から海の危機について語るという構成になっていますが、いずれの危機も何かしらの形で地球温暖化に結び付いています。それだけに、まずはこれまでに述べてきたような地球温暖化による影響をあらためて念頭に置いていただきたいと思います。

INTERVIEWEE:

茅根 創 かやね・はじめ

東京大学 大学院理学系研究科 教授
COLE 副センター長

東京大学大学院理学系研究科博士課程修了(理学博士)。通商産業省(現経済産業省)地質調査所研究官、主任研究官を経て、東京大学大学院理学系研究科助教授、2007年より教授。海洋教育センター(COLE)副センター長を併任。地球環境変化に対するサンゴ礁の応答を調査・研究している。



北極海の海水融解

北極海の海水融解が急速に拡大
海洋大循環の乱れと
ポーラーロウの多発を誘引

Interview with

川口悠介

東京大学 大気海洋研究所
海洋物理学部門
海洋変動力学分野 助教

過去35年間で夏季の面積が
3分の2程度に減少したとされる北極海の「海氷」。
温暖化などの影響で融解は急速に拡大しており、
海洋や気象、そして生態系に多大な影響がおよんでいる。
海洋物理学の視点から北極海の海氷と
その融解のメカニズムを知ることで、
海に迫る危機をより深く学ぶことができる。

北極海の海氷融解がもたらすもの

地球の極域である北極と南極はそれぞれ氷に覆われていますが、このふたつにはどのような違いがあるのでしょうか。

川口悠介 | 南極の氷は南極大陸の上に降り積もった雪によって形成された「氷床」と呼ばれるもので、その厚さは数千mにおよびます。他方、北極の氷は海水が凍ったもので「海氷」と呼ばれます。北極海の水深が3000mほどなのに対して、海氷の厚みは2mに満たない程度しかありません。

北極海の海氷はどのように生成されるのですか。

川口 | 北極海には太平洋からベーリング海峡を経て海水が流入しており、海氷は海面がマイナス15℃くらいになったときに生成されます。そして、北極海の中央海盆地で生成された海氷は東グリーンランド海流に乗って南に移動し、ノルウェー海や大西洋に流出、温暖な中緯度の海域まで流れ着く過程で融かされていきます。北極海の中央起源の氷が融けるまでにかかる時間は、およそ2〜3年とい

ったところですが、カナダの北部でも海氷は生成されますが、それらは1年ほどで大西洋のほうに移動し融けてしまいます。ちなみに、現時点で北極点の周辺は1年をとおして氷に覆われていますが、そのほかのエリアについては季節によって変動があります。もちろん、その面積は夏場に最小になり、冬場に最大になります。

北極海の海氷が少なくなっているという話がありますが、実際にはどうなのでしょう。

川口 | 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所（極地研）と国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）による北極海の海氷観測研究によると、北極海の海氷面積が2019年9月17日に396万km²と年間最小値を記録したことが判明しました。この面積は2019年の最小値であるとともに、人工衛星による観測史上、2012年につぐ2番目の小ささです。しかも、過去35年間で夏季の海氷面積が3分の2程度に減少しているというデータもあります。原因は諸説ありま

すが、ベーリング海峡から流入する海水温が高くなり、氷の生成量が減少したことが指摘されています。

北極海の海水にはどのような役割があるのですか。

川口 | 北極海の氷には海洋と大気間の熱・運動量の交換を制限する役割があります。海面の氷が海洋に対してフタのような役割をはたすことによって、波を立てにくくしたり、熱が深層まで入りにくくしたりするわけです。

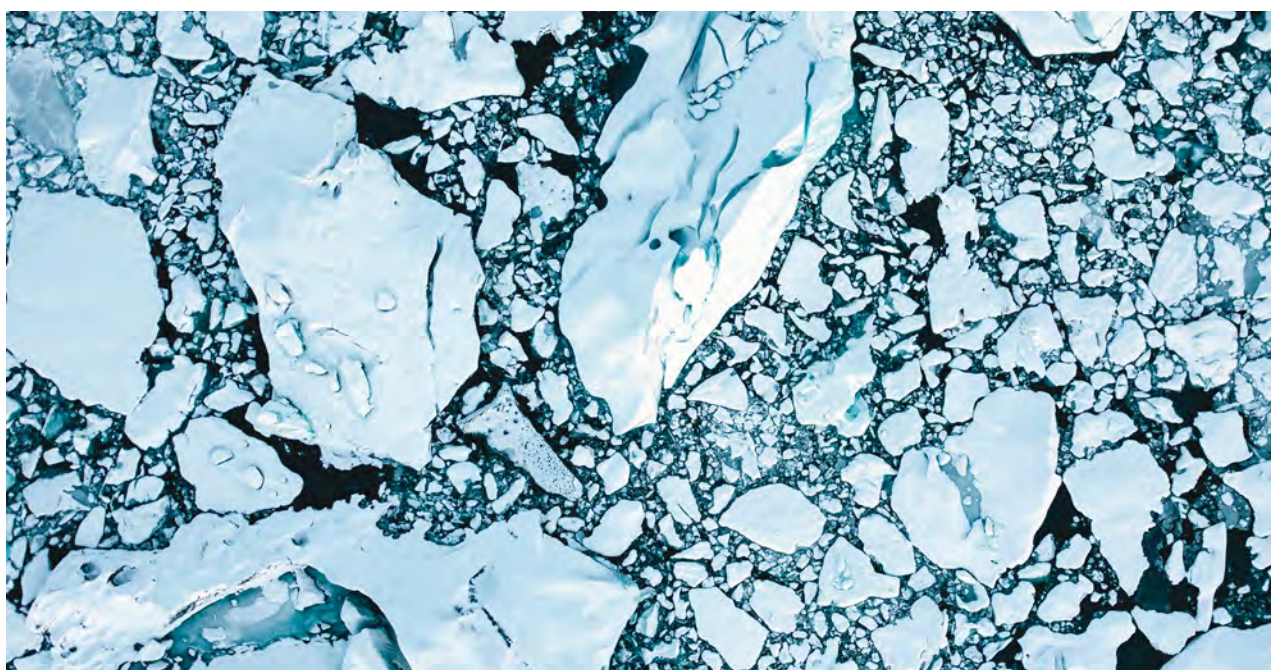
では、その海水が減少すると、どのような変化が生じるのでしょうか。

川口 | 北極海の海水は南極海の氷床と違って量が少ないため、よく問題視される海面上昇の直接的な原因になることはありません。ただし、北極海の海水がなくなると海面が剥き出しの状態になってしまい、従来よりも多くの風の運動エネルギーや熱エネルギーが注入されることによって、海面や海洋の内部にさまざまな混乱が生じてしまいます。具体的には「海洋大循環」（海流など海洋で生じている大規模な熱や水の循環）に大きな変化が生

じると思われます。というのも、この循環の原動力は風の運動エネルギーと海面の加熱・冷却だからです。後者については少々わかりにくいので補足しておきます。太平洋から流入した海水が北極海で冷やされて氷が生成されると、塩分が海洋に放出されて海水密度が高くなり、その水がゆっくりと海底に沈み込んでいきます。これが海洋大循環の原動力のひとつになっているのですが、氷が生成されなくなることによってこの循環が弱まり、海洋中の生態系はもちろん、気象などにも大きな影響を与えると考えられているのです。

私たちの生活にも何かしらの被害はおよぶのでしょうか。

川口 | 北極で上昇気流が生じやすくなり、冬に極低気圧（ポーラーロウ）などが頻発し、大気波動によって中緯度まで伝搬することで広域に被害がおよぶことになるでしょう。ポーラーロウは一般的な低気圧に比べると小規模ではありますが、強風や大雪をとまうため、社会的にもかなりの影響が生じるものと思われます。





©Alfred Wegener Institute



©Alfred Wegener Institute

海水融解はこれからどうなっていくのでしょうか。

川口 | アイスアルベドフィードバックという現象によって、今後も北極海の海水融解は進行していくでしょう。これは氷と海洋のアルベド（太陽に対する反射率）の違い（氷は水よりも光を反射する）によって、氷の面積が減少して隙間が増えると、その隙間にある海洋が日光の熱を従来以上に吸収し、氷の融解を促進させてしまうというものです。この現象を考慮すると、いったん融解してしまった多年氷が再生する可能性はほとんどありませんし、海水融解が加速度的に進む恐れもあります。

生物への影響はどうでしょうか。

川口 | 北極海の氷の裏側にはアイスアルジーという珪藻類が付着しており、それが北極海のほかの生物の食料となっています。そのため、海水融解が進行すれば、生態系が崩壊してしまう恐れがありますし、種によっては絶滅してしまうものもあるかもしれません。また、そういった環境や生態系の変化は、イヌ



© Alfred Wegener Institute

観測中に視認されたホッキョクグマ。MOSAICプロジェクトではこういった“出会い、もしばしばある

イットをはじめとした北緯60度以北の地域で暮らす人々にとっても大きな影響をおよぼすはずです。

北極海を経済的に活用できる要素はあるのでしょうか。

川口 | 北極海を積極的に航路として活用することで、アジアから欧州までの距離をショートカットしようとする動きがあります。また、資源開発の面でも北極海の調査は重要な意味を持っています。実際、ノルウェー沖やアラスカ沖などでは昔から油田開発が進められていますし、今後の海底資源の調査しだいではメタンハイドレートやレアメタルなどの採掘地としても注目されることになるでしょう。

川口先生はアルフレッド・ウェゲナー研究所（ドイツ）が主導する北極域の国際共同観測プロジェクト「MOSAIC（モザイク）プロジェクト」に参加されるそうですね。

川口 | MOSAICプロジェクトは2019年10月から2020年10月にかけて、北極海の中央域で砕氷船を係留・漂流させながら、北極海の大気や海水、海洋の状態を連続的に計測するという国際的な一大プロジェクトです。私は2020年4月からこの船に乗り込み、北極海の海水や海洋に関する観測活動に携わります。私としては北極点にまで行くのは2011年以

北極海で世界的なプロジェクトが進展



MOSAic プロジェクトで北極海のさまざまな観測活動を実施する砕氷船

来となりますから非常に楽しみです。見渡すかぎりの海氷に覆われた北極の光景は実に神秘的で、その光景や調査の様子はMOSAicプロジェクトのウェブサイト (<https://mosaic-expedition.org/>) で公開されているので、興味のある方はぜひチェックしてみてください。

ちなみに、このプロジェクトには「ナンセンのフラム号遠征」というモデルとなったプロジェクトがあります。これはノルウェーの探検家であるフリョフ・ナンセンが北極海の潮流の動きを明らかにするために実施したもので、ナンセンは1893年から1896年にかけてフラム号に乗り込み、氷に閉じ込められた状態で北極海の漂流観測を行い、北極海

のメカニズムを解き明かす大きな足掛かりをつくりました。当時の航海日誌は今も残っているのですが、今回のプロジェクトでは当時の状況との比較も実施されることになっています。

このプロジェクトではどのような成果が期待されているのでしょうか。

川口 | 17カ国の約600人の研究者が参加して、大気、海洋、海水、生物、数値モデルという5つのチームに分かれて、北極海をフィールドにさまざまな観測活動を実施していきます。そして、最終的にそうやって蓄積したデータを地球気候システムモデルの高精度化、北極海の船舶ナビゲーション技術に応用していくことが想定されています。

日本単体での調査も実施されているのでしょうか。

川口 | 海洋地球研究船「みらい」による北極海の調査などを実施しつつけてきたので、これまでの調査結果をMOSAicプロジェクトの成果と統合することで、日本独自の高精度な気象・海氷シミュレーションシステムを開発できるようになるはずです。とはいえ、日本単体での調査には限界があるので、これからも世界的なプロジェクトに積極的に参加していくことで、北極海の調査研究をブラッシュアップしていきたいと思います。

INTERVIEWEE:

川口悠介 かわぐち・ゆうすけ

東京大学 大気海洋研究所
海洋物理学部門 海洋変動力学分野 助教

北海道大学水産学部を卒業後、同大学の低温科学研究所で学び博士号(環境科学)を取得。その後、海洋研究開発機構やワシントン大学で研究員として北極海の研究に携わり、2017年に東京大学大気海洋研究所に着任した。



海面上昇

海面上昇で島国も都市も
危機的な状況。一人ひとりの行動と
予測精度の向上が急務

Interview with
鈴木立郎

国立研究開発法人海洋研究開発機構
地球環境部門
(環境変動予測研究センター)
グループリーダー代理

地球温暖化が進めば、最悪の場合、
2100年までの間に80cmも海面が上昇し、
海拔の低い島国や地域は水没の危機に瀕してしまう。
では、この海面上昇はどのようなメカニズムで
生じているのか。マクロかつ客観的に
この現象を捉えることで、あらためて一人ひとりが
どのような心構えを持つべきか考えたい。

ダイナミックな海面上昇のメカニズム

まずは海面上昇のメカニズムからお話しいただけますか。

鈴木 立郎 | 海面上昇の原因となるのは、主に海水の温度上昇による膨張と氷河氷床の融解とされています。また、近年の変化にかざればどちらかといえば海水の膨張によるインパクトのほうが大きく、20℃の海水温が1℃上昇するだけで、海水の体積がおよそ0.025%も膨張するため、海面から水深500mまでの範囲が2℃上昇すると、海面水位は25cm上昇します。

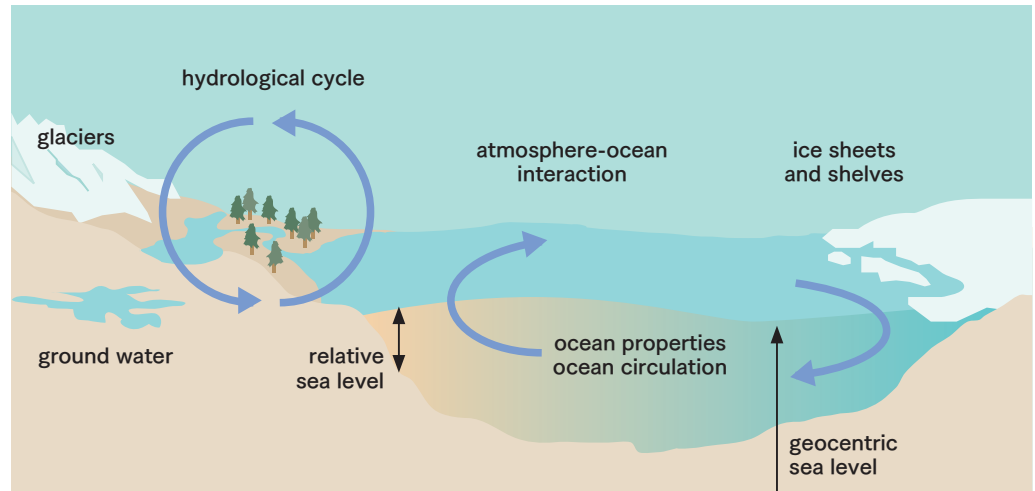
地球温暖化によって海水が温められることで、海面水位の上昇が生じるのでしょうか。

鈴木 | それも要因となるのですが、実際の島国や沿岸地域の変動には、さまざまな要因が絡み合っています。そもそも、海面水位の変動は大気から海洋への熱吸収と海洋大循環に密接に関係しており、このふたつがそれぞれ海面上昇に影響を与えています。

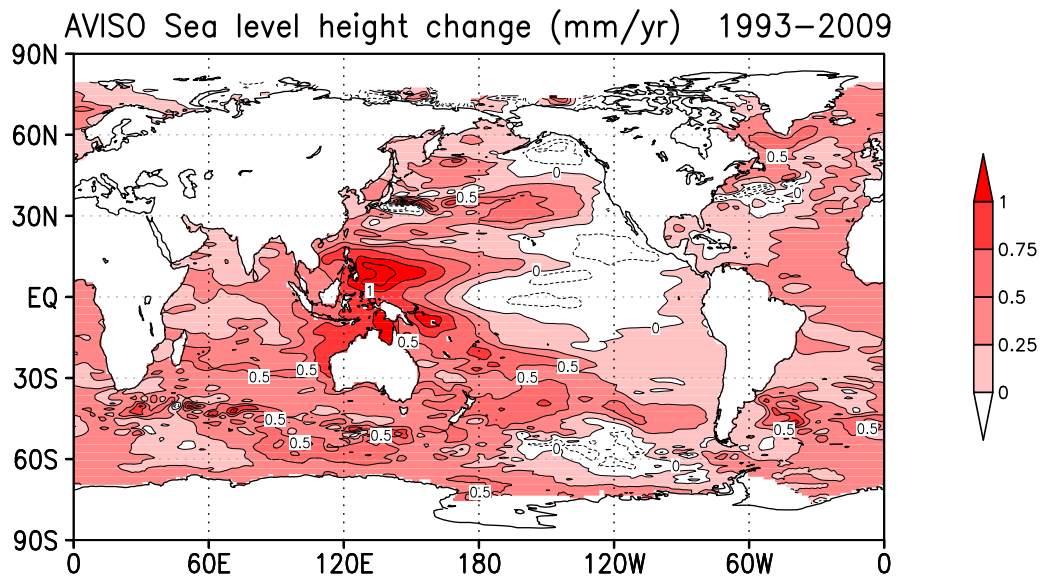
海洋大循環はどのように海面上昇に影響をおよぼしているのですか。

鈴木 | 海洋大循環は風成循環と熱塩循環からなるのですが、そのうち風成循環とはその名のとおり風による影響のことで、海洋の表面から水深数百mくらいまでの範囲に影響をおよぼしており、海水が集まっている場所で力学的に水位が高くなります。他方、熱塩循環は海水の水温と塩分による密度差によって生じるもので、海水の中深層（数百m以深）で生じます。端的に言えば、北大西洋のグリーンランド沖と南極大陸で冷却されて深く沈み込み、それが太平洋やインド洋で浮上するというもので、そのスパンは約1000年といわれています。地球温暖化が進行すると、この深く沈み込む海水が減少して海水の循環も弱くなり、結果として大気に熱を放出できなくなります。そうすると海水温の上昇に拍車がかかり、それにともない海水の体積が膨張し、海面上昇が引き起こされることになるわけです。もちろん、実際の海面上昇には冒頭でお伝えしたとおり、海水温の上昇による南

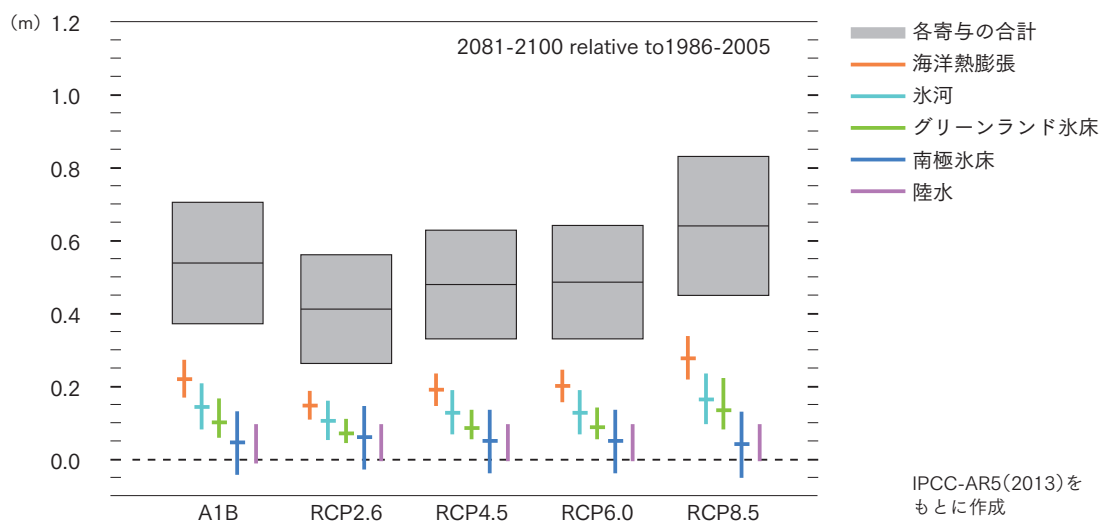
〔図1〕 海面水位変動に影響をおよぼすさまざまな過程(IPCC-AR5 (2013)より引用)

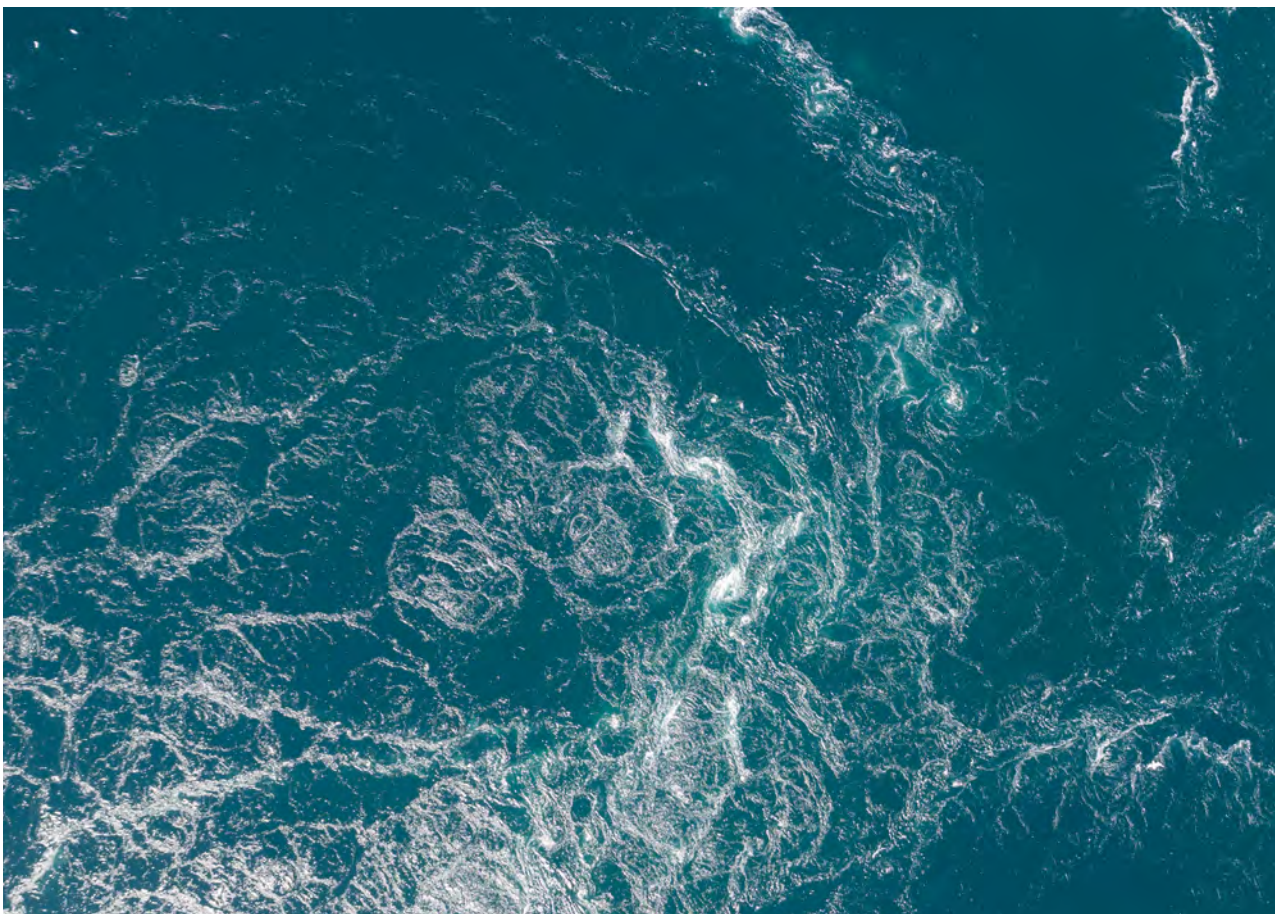


〔図2〕 衛星観測データによって計算された1993年から2009年の海面水位上昇率



〔図3〕 21世紀中の全球平均の海面水位上昇





極の氷河氷床の融解なども加味しなければなりません。

ちなみに、私は国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）で、海洋物理学・気候学の観点から、こうした気候変動や将来の海面上昇に関する研究を行っています。

そもそも海面の上昇を判断するための海面の水位はどのように観測しているのでしょうか。その方法について教えてください。

鈴木 | 代表的な方法は衛星観測とアルゴフロートを使った方法です。衛星観測は海面水位の変化を広範囲で観測できます。一方で、アルゴフロートは漂流ブイの一種で、海洋の流れに沿って海水温や塩分といったデータを観測します。このため、アルゴフロートは海水の熱膨張による影響を評価することができます。現在、地球上にはこのアルゴフロートが3000個ほど設置されており、日本の研究機関では、そのうち230個くらいを投入しています。また、最近の沿岸潮位計による観測では、GPSを用いて地盤沈下の状態なども加味したうえで計測するシステムも増えてきており、従来のものに比べてかなり正確なデータを収集できるようになっています。なお、海面水位が人工衛星によって直接観測されはじめたのが1993年頃、アルゴフロートが使用されはじめたのは2000年頃からです。それまでも、沿岸の潮位計や、船舶によりさまざまな装置を使って観測は行われてきたのですが、広範囲に渡って継続的に行われてきたわけではなく、昨今のデータから計算した水位変化に比べると信頼性はいまひとつです。そのため、将来的に海面水位変化を監視するためには現在の観測網を維持する必要があります。

また、海面水位は風の影響などで、場所によって異なる変動をするので、大気的气圧場などが温暖化により、将来どのように変化するかに注視していく必要があります。

海面水位はどのように変化してきたのでしょうか。

鈴木 | 1900年代からの海面上昇を平均すると年に1.7mmとなりますが、最近のデータでは年3.2mmというデータが出ています。これはつまり、今後100年で32cmも水面が上昇する恐れがあるということを示しています。しかも、地球温暖化にともなって海面上昇のスピードは増してきているので、この数字はさらに大きくなると思われます。

具体的にはどのような予測が立てられているのですか。

鈴木 | JAMSTECも参加しているIPCC(気候変動に関する政府間パネル)が発表した将来の温室効果ガス排出シナリオに沿った将来の海面水位変化の予測によると、どのシナリオでも2100年以降も海面上昇は継続するとみられており、最悪の場合、2100年までに最大で80cmほど上昇するとされています。これは海拔が低い島国にとっては死活問題であり、そういった国々の安全性を担保するには温室効果ガスをRCP2.6(2100年までの気温上昇が0.3~1.72℃)の水準に抑える必要があるとされています。しかし、現在のままでは、RCP2.6の水準を達成するのは難しく、多少対策をとっても中位安定化シナリオのRCP4.5(同1.1~2.6℃)かRCP6.0(同1.4~3.1℃)の水準にとどまると考えられます。

現在の状況がつづけばどうなるのでしょうか。

鈴木 | 現状維持だと最悪のシナリオであるRCP8.5(同2.6~4.8℃)になってしまいかねません。そうなると今世紀以降も海面水位上昇がつづき、島国にかぎらず、地球上のかなり広範囲の陸地が水没してしまい、多くの人たちが生活の場を失うことになってしまうでしょう。

水没以外のリスクもあるでしょうか。

鈴木 | 水没しないまでも、下水や排水といった都市インフラに問題が生じる恐れがあります。東日本大震災のときには30cmほどの地盤沈下が起き、そういったライフラインが寸断され、大いに問題になりました。海面上昇によって、それが世界的な規模で発生する恐れがあるのです。

海面上昇が発生した場合の対策について教えてください。

鈴木 | 堤防を築くというのがもっともシンプルな対策になりますが、それには膨大な費用がかかるため、財政に余裕のある国や地域しか取り組むことはできないでしょう。

そうすると、海面上昇の影響が大きそうな地域だけ局所的に堤防を築くということになりそうですね。

鈴木 | 実際、そういった対策を講じるために「どこでどれくらい水位が上がるのか教えてほしい」といった要望を頂戴することが多いのですが、先述したとおり、海面上昇にはさまざまな要因が絡み合っているので、現時点では局所的な予測を立てることが難しく、明確な答えを出すことができていません。横断的な研究でそのあたりを解明していくことが、私たちの目下の研究課題となっています。

ただ、そういう状況のなかでも、すでに海面上昇のリスクが高いとされている地域はいくつかあります。たとえば、ニューヨークの付近は海面上昇のリスクが高いとみられています。ニューヨークはいわずと知れた世界の都市なので、その一部が海面上昇によって水没したり、機能不全に陥ったりすれば、世界経済にも多大なダメージをおよぼすことになるので、早急に対策を講じておく必要があるでしょう。また日本付近に関しては、黒潮の再循環領域に入っている小笠原諸島なども海面上昇のリスクが高いとみられています。

世界的にさまざまな地域に影響をおよぼす恐れがあるんですね。そういった事態を避けるには温室効果ガスの削減に努めることが重要だと思いますが、そのほかに海面上昇を防ぐための手立てはないのでしょうか。

鈴木 | 個人的には温室効果ガスの回収技術の進歩に期待しています。回収した温室効果ガスの海底貯留という案もありますが、海洋をはじめとした自然環境への影響を考慮すると、うかつに実施するわけにはいきません。ともあれ、こういった技術開発に期待しても、それが実現するとはかぎりませんし、どの程度の効果をもたらすかも定かではありません。やはりまずは一人ひとりがこういった現状を正しく理解し、温室効果ガスの削減に努めることが何よりも大切だと思います。

INTERVIEWEE:

鈴木立郎 すずき・たつお

国立研究開発法人海洋研究開発機構
地球環境部門(環境変動予測研究センター) グループリーダー代理

1970年群馬県生まれ、2000年北海道大学大学院博士課程終了。博士(地球環境科学)取得後、ハワイ大学ポスドク研究員。2001年より海洋研究開発機構所属。専門は海洋物理学、特に気候モデルを用いた海面水位の将来予測。



津波

南海トラフ地震で

30 m 超の津波が発生する!?

発生と予測のメカニズムから最善策を

Interview with

丹羽淑博

東京大学 大学院教育学研究科
附属海洋教育センター (COLE)
特任准教授

2011年3月11日の東日本大震災では
東北地方を中心に、津波による甚大な被害が発生した。
南海トラフ地震にともなう津波の危険性が指摘されるなか、
海洋物理学は津波のメカニズムの根本に迫ることで、
その予測や対策に生かせる知見を与えてくれる。

津波のメカニズムと予測

津波はどのようなメカニズムで発生するのでしょうか。

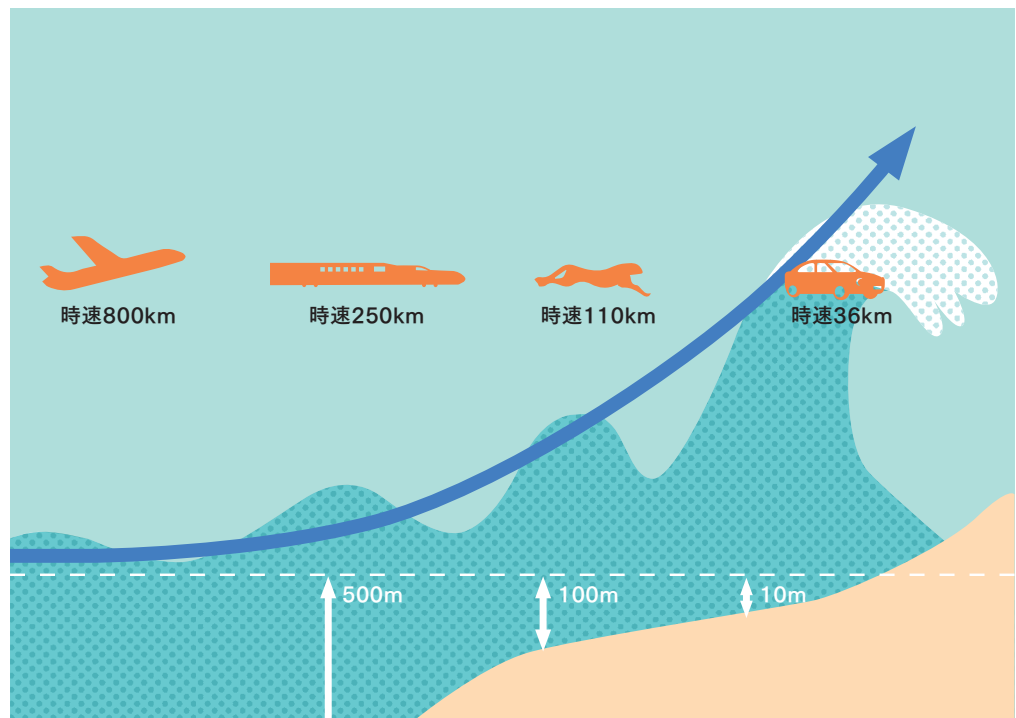
丹羽淑博 | よく知られているように大部分の津波は地震にともなって発生します。より正確にいうと、地震を引き起こす断層運動（断層のズレなど）によって海底が広い範囲にわたって隆起すると、それとほぼ同じ形で海面が隆起し、それが波として伝播するのです。そのため、地震が起きても断層が横ズレの場合は大きな津波は発生しません。縦ズレ断層の場合に注意する必要があります。

さらに、津波には水深が深ければ深いほど、伝播するスピードが速くなるという性質があります。そのため、津波の伝播速度は陸地に近づくにつれて減速し、そこに後方部の波が追いつくことでさらに大きくなっていくのです。なお、「津波が発生すると漁師は船を沖に出す」という話がありますが、それは沖合に行けば津波の波高がなだらかで流れが弱くなり、安全だからです（伝播速度は沖合ほど大きくなるが、津波による流れは遅くなる）。ただし、タイミングを誤ると津波に飲まれてしまう恐れもあるので、かならずしもこの選択が正しいとはいえません。

津波の予測はどのように行われるのでしょうか。

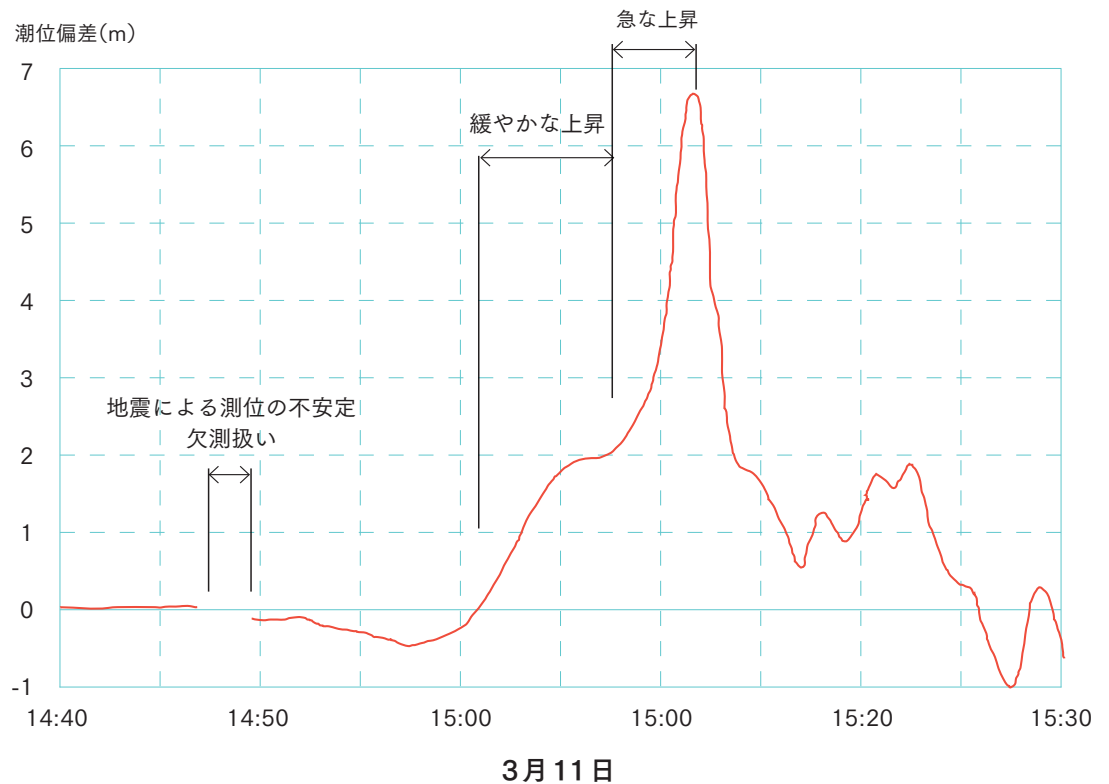
丹羽 | 日本は四方を海に囲まれた島国で、太平洋プレートやフィリピン海プレートなど4つのプレートの上に乗っており、大規模な津波を引き起こすプレート境界断層に囲まれています。津波発生源が近くにあるため、地震が発生してからその都度、全国各地の津波の高さや到着時間を計算していたのでは間に合いません。そこで、気象庁では事前に想定しうる断層ごとに約10万ケースの津波の数値シミュレーションを行い、その計算結果を津波予報データベースとして蓄積しています。地震が発生したら震源位置やマグニチュードを推定し、それにもっとも近いケースの計算結果をデータベースから選んできて津波予報を発表、地震発生から3分以内に津波予報の第一報を出すことになっています。さらに、地震発生から10～15分たってより多くの地震データが集まってくると、断層運動が縦ズレか横ズレかといった情報もわかってくるので、それらをもとにより正確な津波予報を発表します。

〔図1〕 津波の速度と水深の関係



津波の伝播する速度は水深によって決まり、水深が浅いほど遅いため、岸に近づくにつれて後ろの波が前に追いついて、高い津波になる。気象庁 HP (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/generation.html>) から引用

〔図2〕 岩手県釜石沖の波高計が捉えた東日本大震災の津波の第一波



津波予報の第一報の波高3mを大きく超える津波(波高=6.8m)が観測された。
港湾空港技術研究所 HP (<https://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328mlit.html>) から引用

2011年に発生した東日本大震災の津波の規模はどの程度のものであったのでしょうか。また、その際に津波の予測システムは機能していたのでしょうか。

丹羽 | 東日本大震災の超巨大地震を引き起こした断層のズレは南北に500km、東西に200kmと岩手県北部沖から茨城県沖に渡る非常に広範囲におよぶものでした。そのため、遡上高（津波が陸に駆け上がった際の到達高度）が40m以上の巨大津波を発生させました。この津波によって浸水した面積は岩手県、宮城県、福島県など6県で561km²におよぶとされており、各地域で人命を含め深刻な被害が生じました。

東日本大震災で深刻な被害が出た要因のひとつに、津波予測システムの不備がありました。従来の津波予測システムでは、東日本大震災クラスの超巨大地震をカバーできなかったのです。従来のシステムでカバーできるのはマグニチュード8.0程度までで、マグニチュード9.0を記録した東日本大震災の津波で

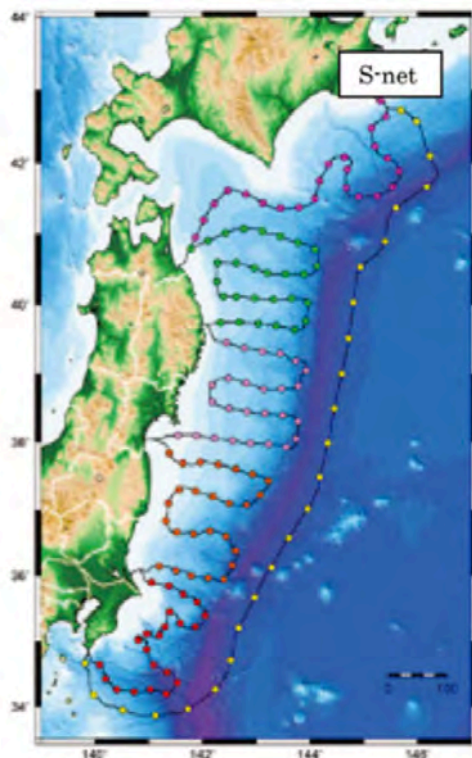
は短時間での正確な予測がそもそも不可能だったのです。そのため、地震発生3分後に出された津波予報の第一報で発表された波高は岩手県が3m、宮城県が6mと大幅に過小評価したものでした。あまりにも巨大な揺れだったので地震計が壊れてしまい、10分～15分後に出されるべき津波予報の更新もできませんでした。

結局、東日本大震災のときは、岩手県釜石市の沖合にあった津波計で、第一報の予報値を倍近く超える津波が来ていることが確認され、それを元に地震発生28分後に予報値をかさ上げして岩手県に6m以上の津波が来るとの警報を出しましたが、その時点ですでに津波は到達直前となっており、その警報はあまり意味をなしませんでした。

そのときの経験は現在の津波の予測に生かされているのでしょうか。

丹羽 | 結局、従来の津波予測システムの問題点は、地震の情報のみに基づいて津波を予測しようとしたところにあります。現在はS-net (Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench) と呼ばれる海底ケーブル観測網（海底圧力の変化で海面の波高を直接観測する津波計を取り付けた海底ケーブル）が三陸沖に張り巡らされており、震源近くで発生直後の津波を直接観測して、その観測データに基づいて予測を行う仕組みを採用しています。同様の海底ケーブル観測網は南海トラフにも導入されており、紀伊半島沖と四国の東方沖にDONET (Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis) という地震・津波観測監視システムが設けられています。また、四国沖から九州の間にも同様のシステムを導入する計画があります。

しかしながら、海底ケーブル観測網は整備が大変で、その耐久年数は25年程度といわれていますし、そもそも敷設するのに膨大な



海底ケーブル式津波観測(S-net)の観測点の配置図。地震調査研究本部HP (https://www.jishin.go.jp/resource/column/topic15win_p4/) より引用

費用がかかるのが大きな問題です。このようなコストがかかる海底ケーブル観測網を世界中はもちろん、日本全域をカバーするように設置することさえ困難です。

そこで、われわれは最近、飛行機を使って津波を予測する方法を提案しています。民間の飛行機には電波高度計というレーダーが搭載されており、離着陸時に飛行機と地表や海面との距離を測定しているので、これを航行時に沖合で使用することで、海面変動を測定していこうというわけです。実際、観測用航空機でテストを行い、航空機レーダーによって津波検知に十分な誤差10cm以下の精度で海面高度が測定しうることを初めて示しました。また、民間航空機だけでなく、将来実用化されうるドローンなどの無人航空機を使った観測ネットワークなど、低コストで世界的に展開しうる津波観測システムを提案していく必要があります。

津波が発生しやすいポイントなどはあるのでしょうか。

丹羽 | 断層のズレが原因なので、やはりプレート境界付近で巨大な津波は発生しやすいです。とくに太平洋にはプレート境界が多く、ハワイにある太平洋津波警報センターではグローバルな規模で海底水圧計と観測データを衛星に転送するブイを組み合わせたDARTと呼ばれるシステムを配置して津波を観測しています。しかし、その数は世界で60数カ所とまだまだ不足しています。

予測しにくい津波もあるのでしょうか。

丹羽 | あります。そのひとつが津波地震と呼ばれる地震による津波です。これは通常よりも断層がゆっくりとズレる地震で、そのため地震の規模は小さいのに、津波が発生することがあるのです。1896年の明治三陸地震はまさにこの津波地震によるもので、津波によって甚大な被害が生じました。S-netのような

津波を直接観測するシステムであれば予報可能ですが、そうでなければ、地震警報がなく、一足飛びに津波警報が来ることになります。

また火山噴火により山体が崩れ土砂が海に流れ込んで起きる津波もあります。江戸時代には北海道の駒ヶ岳や渡島大島、長崎県の島原で巨大な火山津波が発生して、大きな被害を出しています。最近でも2018年にインドネシアのスンダ海峡で火山津波が発生して、400名以上の人的被害が出ています。

また、気象津波と呼ばれるタイプの津波もあります。これは九州の西岸にあたる長崎県の方言では「あびき」と呼ばれます。東シナ海を気圧擾乱^{じょうらん}が通過するときに、何の前触れもなく1mほどの津波が発生するのが特徴で、大きな人的被害を出すほどではありませんが数年に一度の頻度で大規模なものが発生しており、2019年3月には長崎で浸水被害が生じています。

一方で東京、大阪、名古屋といった海に面した平野部にある大都市では、台風による高潮にも気を付けないといけません。高潮は気圧が海面を引き上げて生じる現象であり、海底圧力測定に基づく予報システムでは観測できず、先述したような航空機などを使って上空から海面の高さを直接測定するしかありません。地球温暖化がさらに進んで海面水位上昇がつづく、これまで100年に一度の頻度で発生していた顕著な高潮被害が、今世紀半ばから末には毎年のように発生するようになる可能性があると言われています。

南海トラフ地震に関する津波の危険性はいかがでしょうか。

丹羽 | 高知県に30m以上の津波が押し寄せるとされており、そのほかの地域にも10m以上の津波が来ることが想定されています。地震調査委員会の評価では、住宅が流失・全壊しはじめるとされる高さ3m以上の津波が



高知県黒潮町の津波避難タワー

30年以内に四国、近畿、東海地方を襲う確率は26%以上と推定されています。到達時間は地域によってまちまちですが、なかでも紀伊半島への到達時間ははやく、半島南端の串本では地震発生から数分で津波が到達するという予測もあります。

南海トラフ地震以外にも津波の危険性はあるのでしょうか。

丹羽 | 関東地方にも注意を払う必要があります。元禄地震（1703年）や関東大震災（1923年）では大規模な津波が発生した記録があります

が、これはいずれも相模湾付近を震源としたものです。最近はあまり話題になりませんが、実は相模湾付近ではマグニチュード7.0クラス以上の地震が約70年に一度の頻度で発生しています。津波といえばまずは南海トラフ地震が話題になることが多いのですが、相模湾付近の津波にも十分に注意すべきでしょう。

津波が来るとされている地域の人たちはどのような心構えや対策を講じるべきでしょうか。

丹羽 | 津波は紛れもなく海の脅威のひとつですが、地震発生から多少は時間が空くので、事前に避難計画を立てて地震後すぐに高台に避難すれば大丈夫です。逆に、地震後の空白時間に大丈夫だったと安心しきっていると、津波の被害に巻き込まれてしまうので、まずは自分が住んでいるところが、津波が来る地域なのかどうか、そして地震発生からどの程度で津波が来るのか、避難所はどこにあるのかといったことをハザードマップなどでしっかりと確認してほしいと思います。ハザードマップは最悪の状況を想定して作成されているので、十分に役に立つはずですが、もちろん、ハザードマップにしたがって避難する際にも、より安全な別の場所に避難できるかを考えるなど、そのときにできる最善をつくして避難行動をすることが大切です。

INTERVIEWEE:

丹羽淑博 にわ・よしひろ

東京大学 大学院教育学研究科
附属海洋教育センター（COLE）特任准教授

専門は海洋物理学。内部波や津波などの海洋波動を数値シミュレーションや観測を行い研究している。また、さまざまな海洋現象をわかりやすく伝えるための教育教材やカリキュラム開発にも取り組んでいる。



海洋ごみと騒音

バイオロギングで明らかに
なりつつある海洋プラスチックごみと
海中騒音の影響

Interview with

青木かがり

東京大学 大気海洋研究所
海洋生命科学部門
行動生態計測分野 助教

野生動物に記録装置を取り付けることで、
その行動を明らかにするバイオロギングという
研究手法がある。近年はこの手法によって
海洋動物の行動はもちろん、海洋プラスチックごみや
海中騒音が動物に与える影響も明らかになってきている。
これからはそういった研究成果をもとに、
いかに海洋動物を守っていくかを考え、
行動していかなければならない。

バイオロギングで海洋動物の行動を知る

まず青木先生が取り組んでいるバイオロギングについて教えてください。

青木かがり | バイオロギングとは野生動物に直接、小型の記録装置を取り付け、動物の行動や暮らしている環境などを調べる手法のことです。野生動物の生態、とくになかなか追うことができない海洋動物の生態は未知の部分が多く、バイオロギングは非常に有効な研究方法といえます。

ちなみに、このバイオロギングという言葉は日本で誕生しました。手法そのものは1960年代にアメリカのジェラルド・クーマン博士がキッチンタイマーを改良した記録装置をアザラシに付けたところからスタートしたのですが、2003年に第1回国際シンポジウムを日本で開催した際、大会組織委員会がバイオロギング(Bio-Logging)と名付けたのです。

具体的にはどのようなことがわかるようになったのでしょうか。

青木 | クジラに関しては、20年ほど前からバ

イオロギングによる調査が実施され、最近ではビデオカメラや行動記録計を搭載した記録装置を付けることで、クジラが海中でどのような生活を送っているかがより明確にわかるようになってきました。

たとえば、バイオロギングによってヒレナガゴンドウはお猿さんの毛づくろいと同じように体を触れ合わせることがわかってきました。ヒレナガゴンドウは、頭はずんぐりと丸く、イルカと違って吻は出ておらず正面から見るとまるで笑っているかのように見える愛嬌のある顔立ちのクジラです。彼らは群れで生活しており、ヒレナガゴンドウ1頭に行動記録計を、もう1頭に動物カメラを取り付けたところ、2頭のヒレナガゴンドウは、ぴったりと息を合わせて同調して泳いでいることがわかりました。その間、ときおりおたがいの体を触り合ったり、胸びれで体をゴシゴシこすったりしていました。霊長類にみられる社会的グルーミングと同じように、ヒレナガゴンドウもおたがいの体を触り合うことで、たがいのきずなを深めているのかもしれません。

クジラのように巨大な生物に記録装置を付けるのはなかなか大変なような気がしますが、そのあたりはどうなのでしょう。

青木 | 実際、クジラに記録装置を取り付けるのは大変です。船でクジラの近くまで接近し、長いポールを使ってクジラの背に記録装置を取り付けるのですが、その間もクジラは動いているので、タイミングをはかるのに苦労します。

バイオロギングは海洋生物への海洋プラスチックごみの影響を調べるうえでも役立ちそうですね。

青木 | 海洋動物が海洋プラスチックごみを誤飲すると消化能力が低下し栄養状態が悪くなったり、排泄機能が低下し腸閉塞が起きたりする恐れがあります。また、海洋プラスチックごみに付着した汚染物質が体内に吸収される可能性もあります。最近、バイオロギングによって、プラスチックごみに遭遇したときに動物がどのように反応するか少しずつわかってきました。そこで、プラスチックごみのなかでも、誤飲しやすいごみの形状や材質に特徴があるのかを調べているところです。

海洋プラスチックごみがすべての海洋生物に致死的な悪影響をおよぼしているかといえど、そういうわけでもありません。人からすると、プラスチックごみを食べてしまったら命に関わるように思えますが、そうではない動

物もあります。たとえば、よくウミガメがポリ袋をクラゲと間違えて飲み込み、死にいたってしまうといわれますが、ウミガメはほとんどのポリ袋を排泄できるので、それが直接の死因になることはなさそうです。バイオロギングによって、アカウミガメとアオウミガメでプラスチックごみを飲み込む頻度が違うこともわかりました。アカウミガメは間違えて飲み込むことが少なかったのですが、アオウミガメでは高い頻度でプラスチックごみの誤飲が起っていました。アオウミガメは普段海藻などの動かないものを食べているので、ポリ袋を餌と間違えやすいのかもしれませんが。そのほか、陸に打ち上がったクジラの体内からプラスチックごみが大量に出ると、すぐに



上：
記録装置を取り付けたアカウミ
ガメ(写真：植崎友子)

下：
記録装置を取り付けたアカウミ
ガメ(写真：木下千尋)

それが死因とされがちですが、かならずしもそうとはかぎりません。溺死や病気、漁具が絡まったり船にひかれたりなど、その他の原因も考えられます。海洋プラスチックごみにこだわりすぎると、そのほかの原因を見失ってしまう恐れがあるので注意しなければならないと思います。

では、海洋プラスチックごみの影響が大きいと思われる生物にはどういったものがありますか。

青木 | 私たちが対象とする動物でいえば、海鳥類でしょうか。たとえば、ミッドウェイ環礁では、調査されたコアホウドリの雛のほとんどがプラスチックを誤飲していたことが報告されています。また、油分の多い消化液によってプラスチックごみに含まれる汚染物質が溶け出し、体のなかに蓄積されるということも明らかになってきました。こうした物理的・化学的な影響が、雛の成長率や栄養状

態の悪化に関連していることを示唆する研究結果もあります。さらに、アホウドリ類では漁業による混獲が個体数の激減を招いており、これらを防ぐ国際的な取り組みが必要とされています。

海洋プラスチックごみ以外に問題視していることはありますか。

青木 | クジラの場合は海中騒音が大きな問題になっています。海洋中にはソナーや地震探査、船舶の往来などによる騒音が蔓延しており、それらがクジラの行動に悪影響を与える恐れがあります。たとえば、1500mほど潜水する習性を持つアカボウクジラについては、バイオリギングによって潜水中にソナーの音を感知すると急浮上してしまうケースがあることがわかってきました。アカボウクジラは通常、ゆっくりと浮上するのですが、急浮上してしまうと体に大きな負荷がかかってしまいます。なかにはそれが原因で潜水病になっ

餌と間違えて、プラスチックごみに噛み付くアオウミガメ。飲み込んでしまうこともあるが、排泄されるため、直接の死因にはならない。プラスチックごみの問題は、混獲や産卵場減少などウミガメにとってより大きな脅威を覆い隠すというさらなる問題も招いている





てしまい、陸に打ち上がってしまう個体も存在するほどです。また、ザトウクジラの雄は繁殖海域でソングと呼ばれる音を出して雌にアピールするのですが、船舶の往来がある際は、音を出す頻度が減ったりソングを出すのをやめたりすることが報告されています。前述のヒレナガゴンドウはコールと呼ばれる音を出すのですが、海中騒音が多いとより大きな音を出すといわれています。どちらの場合も、海中騒音によって自身の発する音がかき消されてしまうからかもしれません。

海中騒音はクジラ以外の海洋動物にも多大な影響をおよぼすような気がします。

青木 | 聴覚に依存する傾向が強い海洋動物にはかならず何かしらの影響があると思います。

たとえば、海中騒音が原因で餌を見つけづらくなる可能性も考えられます。

海中騒音は年々増加しています。最近では海洋動物への影響が少ない音圧や周波数帯を研究する動きも増えてきましたが、それ以外にも私たちが海洋動物に配慮できることはたくさんあります。たとえば、クジラが繁殖期にあられる海域では、できるだけ繁殖を妨げるような海中騒音を出さないようにするというのも一案でしょう。人間が考える動物にとっての悪影響と、動物が本当にどう感じるかは別であり、そのギャップを知ることができるのがバイオリギングの強みです。動物視点での対策を講じるためにも、バイオリギングによって海洋動物がそれぞれどのようなときにこういった行動をとっているかを調べ、広

上段：
マッコウクジラに記録装置を取り付ける様子(写真：青木かがり)
下段：
マッコウクジラに取り付けた記録装置が撮影した画像



近年では教科書にもバイオリギングのことが掲載されている

く伝えることが大切なのです。

海洋動物と一括りにせず、種類ごとの行動
を正しく理解したうえで、総合的な対策を
考えていかなければならないですね。

青木 | 最近とはくに海洋プラスチックごみの
問題が取り沙汰されがちですが、人間社会が
海洋動物に与える影響は何もそれだけではあ
りませんし、海洋プラスチックごみさえ削減
すれば海洋動物を保全できるというわけでも
ありません。また、海洋動物とひと口にいつ
ても、その生態や行動は種類によっても個体
によっても異なります。これからはますます
そういったことを理解したうえで、生物や環
境にとって適切な措置を講じていくことが必

要になるのではないのでしょうか。私はそうい
う思いを胸に研究室のメンバーたちと一緒に、
一般の方や子どもたちに動物の暮らしやバイ
オリギングによって明らかになった動物の生
態について伝える機会を設けるようにしてい
ます。そして、その際には、実際にバイオリ
ギングによって得られた動物目線の映像など
を見てもらい、一緒にその動物の行動につい
て考察したり、そういった行動をとる動物と
共存していくにはどういう対策が必要かを考
えたりしています。これからも引きつづき調
査研究に力を入れるとともに、こうした啓発
活動にも積極的に取り組んでいきたいと思い
ます。

INTERVIEWEE:

青木かがり あおき・かがり

東京大学 大気海洋研究所 海洋生命科学部門
行動生態計測分野 助教

2008年東京大学大学院農学生命科学研究科修了(農学博士)。研究テーマは海生哺乳類の採餌行動、バイオメカニクス、社会行動など。主な著書に、『野生動物は何を見ているのか—バイオリギング奮闘記—』(丸善プラネット)



海洋生物

地球が6度目の「大量絶滅」の
危機に瀕している今こそ
海洋生物の神秘と多様性を
学ぶことが重要

Interview with

遠藤一佳

東京大学 大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻
地球惑星環境学科 教授

現在、地球は短期間に全生物種の75%以上が姿を消すという「大量絶滅」の危機を迎えており、海洋生物の多様性も著しく損なわれつつある。あらためて生物の尊さを学ぶためにも、分子古生物学の視点から海洋生物の神秘と多様性を紐解くことが求められている。

いかにして多様な動物が誕生したのか

先生が実施している研究内容についてお聞かせください。

遠藤一佳 | 古生物のなかでもシャミセンガイをはじめとした腕足動物（約5.4億年前～2.5億年前の古生代と呼ばれる時代に海洋底で大繁栄していた二枚の貝殻を持つ無脊椎動物）に着目し、そのDNAに刻まれた情報を最大限に活用し、地球と生物の相互作用の歴史である「進化」を紐解く研究をしています。たとえば、その一環として現存するシャミセンガイのDNAや化石記録を調べたり比較したりすることで、その進化の過程を明らかにする研究に取り組んでいます。

そういった研究からどのようなことが判明してきましたか。

遠藤 | 地球の動物は約5.4億年前の「カンブリア紀の爆発」のときに爆発的に進化したといわれており、腕足動物もまたその時期に誕生したことがわかっています。ただ、もともとは現存するほとんどの動物のグループがこのときに成立したと考えられてきましたが、

実はそれ以前の原生代（約25億年前～5.4億年前）の後半からカンブリア紀にかけて祖先的な動物が誕生したことが明らかになってきました。とはいえ、それまでは目も消化器官も貝殻も持たなかった生物がカンブリア紀前期の短い期間に、現在の動物にみられる多様なボディプランを確立させたのは間違いありません。

なぜこの時期に多様なボディプランが確立されたのでしょうか。

遠藤 | 生物が多様化し、食う食われるの生態系が成立したことで、それぞれの動物が目を進化させたり、貝殻をつくったりしていったのでしょう。いわば生物間での進化の競争に拍車がかかったのがこの時期だったのだと思います。

そのほか、環境変化も大きな要因として考えられます。たとえば、酸素はおよそ22億年前に地球大気にもたらされましたが、原生代の後半には今ほど豊富にはありませんでした。それが「カンブリア紀の爆発」の前（約7～6億年前）に増えたのではないかと想定さ

れているのです。おかげで、動物は身体をつくるのに必要なコラーゲンを合成できるようになり、また、ミトコンドリアでエネルギーを多く生み出せるようになり、一気に動物が増殖できたと考えられます。

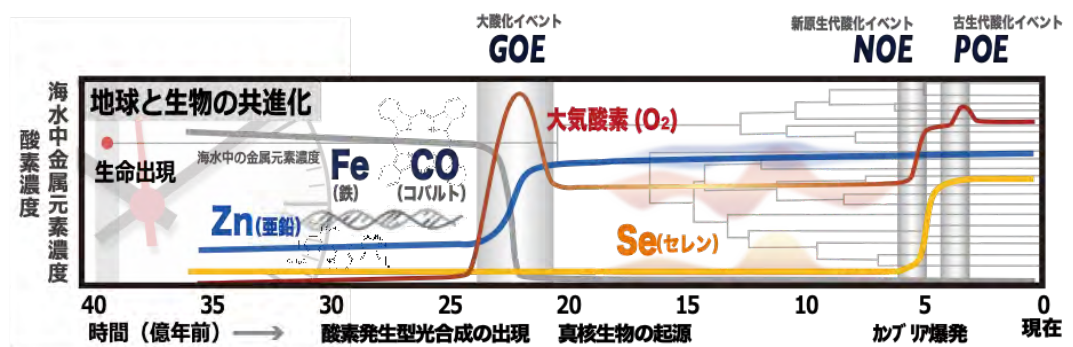
また、古生代に入ってから、石炭紀（約3.6億年前～3億年前）において、木質（森林）をつくる植物が進化したのですが、木質を分解できる微生物が存在せず、有機物の分解に酸素が消費されなくなったため、酸素が増加し大気中の酸素濃度が現在より高くなりました。その証拠として自然発生の山火事で生じた木炭が地質記録に多く残されています。ま

た、この時期に、おそらく酸素増加の影響で陸上の生物が巨大化し、翼幅が60cmを超えるトンボなどが進化したことが化石の調査で明らかになっています。

気候変動も生物の進化に影響を与えてきたのでしょうか。

遠藤 | もちろんです。たとえば、現在の地球は間氷期と呼ばれる氷河時代のなかでも穏やかな時期にあるとされていますが、恐竜がいた中生代（約2.5億年前～6600万年前）は今よりもはるかに温暖でした。が、それより前の古生代末は氷河時代でした。石炭紀に木質

〔図1〕 大気中酸素濃度の変遷と地球生命史



が進化しましたが、その形成に使われた大気中の二酸化炭素が、分解によって大気中に戻されることがなかったため、結果的に大気中の二酸化炭素濃度が低下し、気温が低下したのです。その後、酸素を分解する微生物が進化し、ふたたび気候が温暖になったことは、その後の中生代における恐竜の繁栄と無関係ではなかったはずです。

そういった地球規模の気候や大気の変化は海洋にも影響をおよぼしたのでしょうか。

遠藤 | 気温の変化は海水温に影響しますし、大気中の酸素量が増えれば海洋中の酸素濃度が増えますし、二酸化炭素量が増えれば海洋の酸性化が進みます。また、そういった海水温や酸素・二酸化炭素の状況に応じて、海洋中の各種イオン（カルシウムなどのミネラル）の量も変化します。

たとえば、海嶺にある玄武岩は海水と反応して、マグネシウムを取り込み、カルシウムを海洋中に放出します。とくに白亜紀（約1.5億年前～6600万年前）はマントル・プルームやそれと連動したプレート運動の影響で

この反応が活発化、さらに火山活動が盛んになったために二酸化炭素が大気中に頻繁に放出され、海洋中で多くの炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）が生成されることになりました。とくに白亜紀は炭酸カルシウムのなかでも、ウニやホタテの殻を形成する「カルサイト」という鉱物ができやすい時期であり、カルサイトをつくる生物の進化を促しました。ドナー海峡の白亜の崖はこの時期に形成されたココリスの化石で崖全体がつくられています。これは当時の海水の組成がカルサイトをつくるのに都合がよかったことの証拠とされています。ちなみに、現在の海洋はカルサイトと同じ炭酸カルシウムでありながらも結晶構造が異なる「アラゴナイト」が生成されやすい状況にあります。このアラゴナイトは真珠やサンゴ礁などを構成する鉱物で、現在はこれらのアラゴナイトをつくる生物が生育しやすい海洋環境にあります。

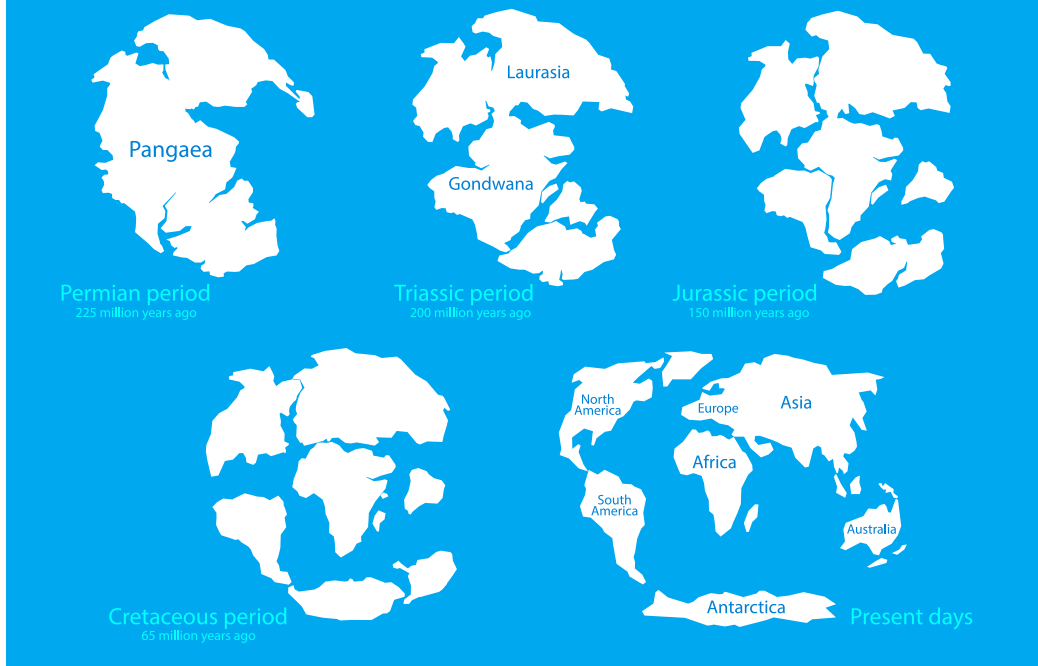
海の配置やエリアによって海洋生物の種類や多様性は異なるのでしょうか。

遠藤 | 古生代の後期、地球上にはパンゲアと



生物のつくる炭酸カルシウムの結晶多形

CONTINENTAL DRIFT



パンゲアにはじまる大陸形成の推移

いう巨大な大陸がありましたが、それが分裂して現在のアフリカやヨーロッパ、アメリカなどの大陸が形成されました。ちなみに、太平洋はパンゲアの外洋として昔から存在しましたが、大西洋はパンゲアの分裂にともなってきた海であり太平洋に比べて歴史が浅いため、生物の多様性が太平洋に比べて低いと考えられます。日本周辺においても太平洋と日本海とでは海の成り立ちが異なるため、生物の多様性は異なります。日本海は約2000万年前に成立した新しい海なので、太平洋に比べると生物の種類は少なくなっています。ただし、日本海は海水準の変動等にもとない、周囲の海から完全に隔離されることもある閉鎖的な環境にあるため、日本海にしか生息しない生物も存在しますし、これからも多くの生物が独自の進化を遂げていく可能性が十分にあるでしょう。

先生の研究領域である腕足動物はどのような進化を遂げたのでしょうか。

遠藤 | 腕足動物に関しては、古生代の頃からそれほど形が変化していないものが多いといわれています。それだけに古生代から長期間にわたり変わらぬ形をつくるDNAを有しており、貴重な研究対象となっているのです。ただ、未記載のものも多く、依然として新種が見つかります。とくに深海は調査が行き届いていないので、これからの調査が期待されます。

「生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム」(IPBES) は「人間の活動によって約100万種の動植物が絶滅危機にさらされている」と発表していますが、そのあたりについてはどのような印象をお持ちでしょうか。

遠藤 | 短期間に全生物種の75%以上が姿を



オオシャミセンガイ(有明海:絶滅危惧1B)

消すこともあった「大量絶滅」は、5億年の間に5回発生しており、現代はその6回目に相当するともいわれています。その原因がすべて人類に起因するものとはいきませんが、その多くに人類が関与しているのは間違いありません。

腕足動物であるシャミセンガイも影響を受けているのでしょうか。

遠藤 | 経済発展による干潟の埋め立てや人口増加による水質悪化等があると、干潟にその多くの仲間が生息するシャミセンガイにとって厳しい環境になっていきます。シャミセンガイの他にも、浅海に生息する貝類の牡蠣やホタテ、アコヤガイが大量死した例なども観測されているので、海洋生物の動向にはさら

に注視していかなければなりません。

もちろん、その一方で環境が改善されたことで、海洋生物の多様性が回復したケースもあります。たとえば、日本周辺の海域においては1970年代には公害などの影響で多様性が著しく低下し、シャミセンガイもほとんど採取できなくなっていました。実際、高度経済成長期以前は東京大学の理学系研究科附属臨海実験所(三崎臨海実験所:神奈川県三浦市)の周辺で普通に採取できていたのですが、私が学生の頃にはすっかり希少なものになっていました。ですが、最近は海洋環境が改善されたことで、その実験所の周辺でも比較的簡単に採取できるようになってきました。ただ、注意しなければならないのは、ひと口にシャミセンガイといってもその仲間は何種類も存在しており、そのうちのいくつかは絶滅の危機に瀕していることです。事実、有明海に生息するオオシャミセンガイは絶滅危惧1類に指定されています。こういった状況を鑑み、最近では遺伝子の塩基配列を調べるDNAバーコーディングという手法を取り入れて、海洋生物の生息状況についてより詳細な調査を進めているところです。今後はシャミセンガイをはじめとした海洋生物の多様性の実態とその変動がより詳細に明らかになっていくでしょう。

INTERVIEWEE:

遠藤一佳 えんどう・かずよし

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻
地球惑星環境学科 教授

1963年生まれ。東京大学理学部卒業後、連合王国(スコットランド)グラスゴー大学でPh.D.取得。筑波大学准教授を経て、現在、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻教授。専門は分子古生物学。著書に『古生物の科学4 古生物の進化』(共著、朝倉書店)、共訳書に『進化の運命—孤独な宇宙の必然としての人間』(サイモン・コンウェイモリス、講談社)などがある。



サンゴの白化

地球温暖化と海洋酸性化によって
地球規模で深刻化する
サンゴの白化

Interview with

茅根 創

東京大学
大学院理学系研究科 教授
COLE 副センター長

2000年代に入って、地球規模でのサンゴの白化が頻繁に発生している。2016～2017年にかけてはグレートバリアリーフ(オーストラリア)を形成する半分以上のサンゴが白化するというショッキングな現象も発生した。その原因やメカニズムを学びつつ、どうすればこの現象に歯止めをかけることができるのかを考えていきたい。

陸からの影響も考慮した保全活動が必要

まずサンゴという生物の特徴についてお聞かせください。

茅根創 | サンゴはイソギンチャクやクラゲと同じ刺胞動物の仲間であり、それらの生物と同じように触手を持ち、動物プランクトンなどを刺して摂食します。また、石灰質の骨格を形成する造礁サンゴの骨格のなかには褐虫藻が生息しており、光合成系による共生(褐虫藻が光合成でつくった有機物をサンゴが摂取する)を成立させています。

そのほかにも、サンゴは海洋中でさまざまな役割をはたしています。たとえば、造礁サンゴの石灰質骨格が積み重なって造るサンゴ礁は天然の防波堤になっていますし、褐虫藻の光合成産物がサンゴを経由して生物の餌になるとともに、複雑な骨格が多くの棲み処にもなるため、サンゴ礁は海洋でもっとも生物多様性が高い海になっています。

地球温暖化によるサンゴの白化はいつ頃から発生しているのでしょうか。

茅根 | 地球規模でサンゴの白化が初めて観測されたのは1998年のことで、主な原因はエルニーニョ現象による海水温の上昇とされています。そして、それ以降もサンゴの白化

は世界各地で発生しつづけています。2003～2010年にかけて何回か大規模な白化が発生しましたし、2016～2017年には世界最大のサンゴ礁地帯であるオーストラリアのグレートバリアリーフが700kmにわたって白化し、全体の半分以上がダメージを受けてしまいました。

日本でもサンゴの白化は発生しているのですか。

茅根 | 日本でも2016年に石垣島から西表島の間広がる石西礁湖と呼ばれるサンゴ礁において、約8割が白化するという深刻な事態が生じています。

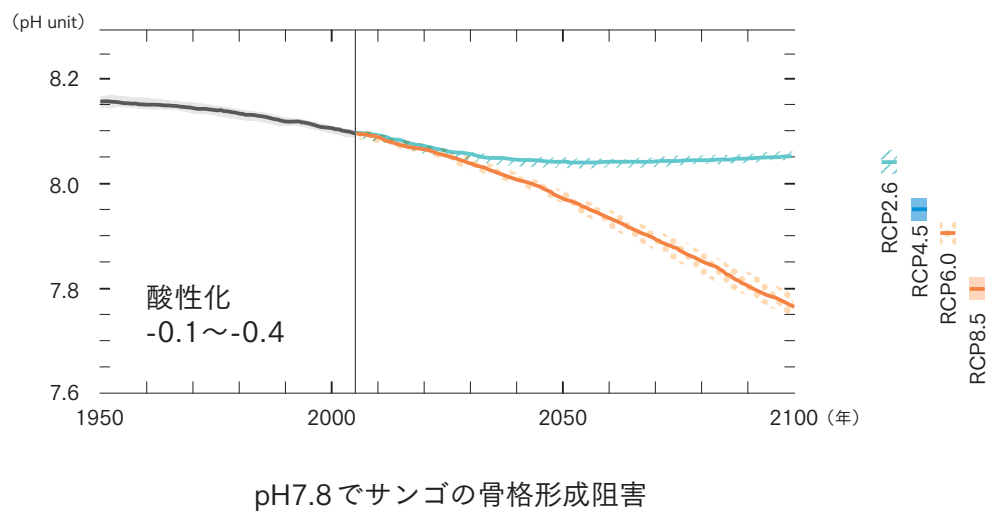
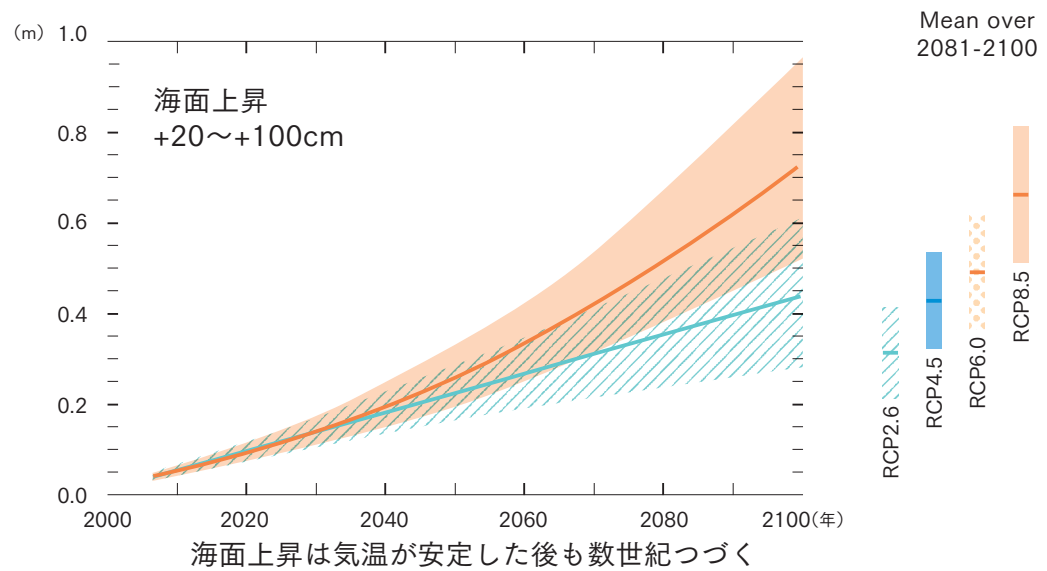
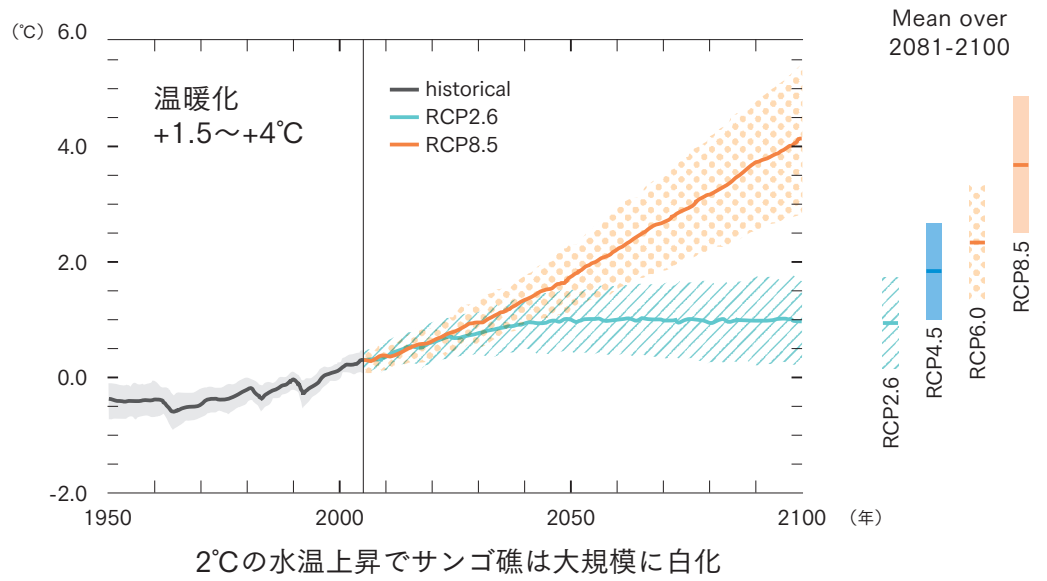
サンゴの白化のメカニズムはどういったものなのでしょうか。

茅根 | サンゴの白化は海水温の上昇をはじめとした環境負荷で、体内の褐虫藻を放出してしまうことが原因で発生します。

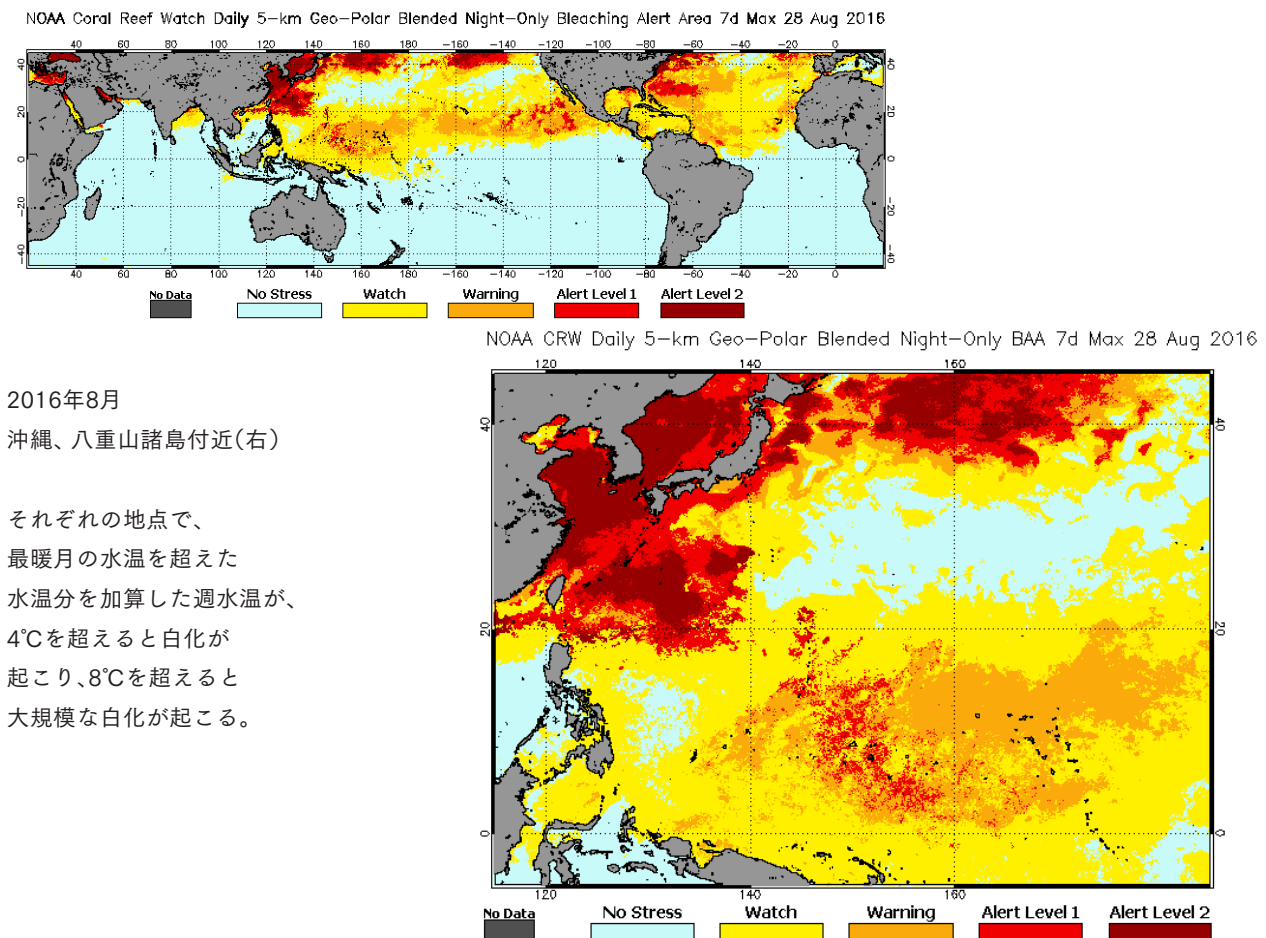
海水温については、どのくらい高くなるとサンゴの白化が発生するのでしょうか。

茅根 | サンゴの生息に適した海水温は25～29℃くらいとされており、現在の熱帯地域の海水温は29℃程度とかなりギリギリのラ

〔図1〕 IPCC AR5 (2013)のシミュレーションデータ
 温暖化、海面上昇、酸性化などの要因がサンゴに悪影響をおよぼす



[図2] 八重山諸島の大規模白化時(2016年8月)の海水温の状況



インになっています。実際、海水温が30℃の状態が2カ月継続すれば深刻な白化が発生することがわかっており、これが31℃であれば1カ月、33℃であれば2週間といった具合になっていきます。

白化の後にサンゴが再生することはあるのでしょうか。

茅根 | 土砂や有害物質の流出といった環境負荷がないという前提で、水温が従来水準に落ち着けば、徐々に生き残ったサンゴの幼生が増殖し、ふたたびサンゴ礁は形成されていきます。実際、石西礁湖に関しては1970年代にオニヒトデによる被害を受け、1998年と2016年に深刻な白化が発生したにもかかわらず、部分的にサンゴ礁が再生はじめています。

しかし、だからといって油断してはいけません。現に私が学生だった1980年代に比べると、沖縄周辺のサンゴ礁は明らかに減少しています。沖縄の海といえば、かつては足の踏み場もないくらいサンゴが分布していましたが、今ではサンゴが分布しているところを見つけるのが難しいくらいの状態です。とくに沖縄本島の沿岸は、リゾート開発などの影響で海洋環境が大きく変わり、ほとんどサンゴがみられなくなっていました。次代にサンゴとそれを取り巻く生態系を残していくには、海洋はもちろん、陸からの影響も意識しなければならないのです。

サンゴに悪影響をおよぼす環境変化には、そのほかにこういったものがありますか。

茅根 | たとえば、そのひとつに海洋酸性化が

あります。海洋酸性化によって大気中の二酸化炭素（CO₂）が増加して海洋に溶け込み、海洋生物が炭酸カルシウムをつくりにくくなってしまうのです。つまり、海洋酸性化が進むことでサンゴは骨格をつくれなくなってしまい、さらにその状況が進行すると骨格が溶けてしまう恐れがあるわけです。

こういった状況に対して、どのような対策が講じられているのでしょうか。

茅根 | 地球温暖化を抑制していくことが急務ですが、その影響をゼロにすることはできません。ですから、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が発表したなかでもっとも気温上昇の低いシナリオ（RCP2.6）を目指しながら、白化に強いサンゴを増やしていくなどの取り組みを進めていく必要があると思います。

遺伝子操作などであらたな種類をつくっていくということですか。

茅根 | そうしたことをはじめている研究者もいます。しかし自然界ではすでに白化に強いサンゴが生き残るようになってきているので、それらを人為的に増やしていけばいいでしょう。ちなみに日本にはサンゴの増殖に関して他国に先駆けて取り組んできた実績があり、水産庁では20年くらい前から水槽内でサンゴの種苗をつくってから海洋に戻すといった取り組みを展開してきました。そうやって培ってきたノウハウがこれから先、ますます重要になってくるはずです。

地域の自治体や住民による取り組みも重要になってきそうですね。

茅根 | そのとおりです。先述したとおり、サンゴは陸の影響を非常に受けやすい生物なので、地域全域の自然環境を保全するという視点がなければ、サンゴの白化は急激に進んでしまいます。そうならないためにも、まずは地元の人たちが自然と共生した観光や産業の

あり方を模索していかなければなりません。すでに多くの国や地域ではエコツーリズムや入島税などの導入が進められてきていますが、こういった取り組みをさらに推進していくことが大切だと思います。と同時に、そういった地域を訪れる人たちもしっかりと自然環境のことを理解したうえで、観光などを楽しむようにしなければなりません。

ところで、茅根先生はサンゴのかけらが堆積してできたバラス島（西表島と鳩間島の間にある無人島）の形成・維持に関する研究も行っているそうですね。

茅根 | バラス島の形成・維持のメカニズムを明らかにすることで、日本最南端にあり、同じくサンゴ礁によって形成されている沖ノ島の維持に役立てることができるのではないかと考えて、この研究に取り組んでいます。

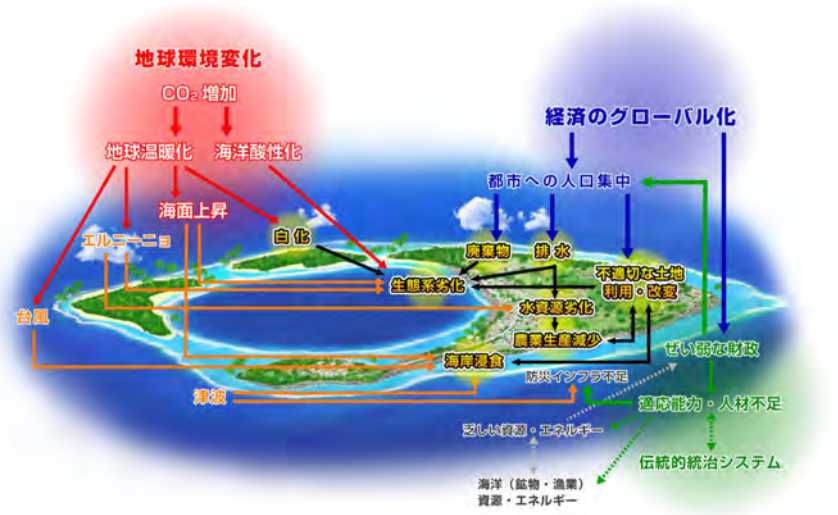
その結果、どのようなことがわかってきましたか。

茅根 | バラス島では、サンゴ礁の上のサンゴが台風などで壊されて^{れき}礫になり、それが波によって打ち寄せられて島を造っていることがわかりました。サンゴ礫は透水性があるので、

〔図3〕 ツバルにおける生態系再生＝国土再生のプラン



〔図4〕 島嶼社会を取り巻くグローバルな問題



いったん堆積すると、波にさらわれないため島を維持できるのです。一方、ツバルなどの環礁では、ラグーン（サンゴ礁に囲まれた浅い海）がある側に星砂（有孔虫の死骸）が大量に砂浜として堆積しており、これが島の維持において重要な役割をはたしていることがわかってきました。

海拔の低い島々の保全にも活用できそうな成果ですね。

茅根 | そう思い立ち、太平洋上に浮かぶツバルという島国で、有孔虫を水槽で増やしてから海洋に戻す取り組みを進めているところです。この実験が成功すれば、地球温暖化による海面上昇で水没してしまう恐れがあるような島々、たとえばモルディブのような島国の救済にも活用できると考えています。ただし、それにはサンゴ礁が島の土台を形成している必要があるということを忘れてはいけません。

有孔虫の活用とともにサンゴ礁の保全にも注力していく必要があるのです。

さまざまな課題解決方法を考え、検証していくことが大切なのですね。

茅根 | 地球温暖化による海洋環境の変化はすでに危機的な状況にあります。「もはやこまめに電気のスイッチを切りましょう」といった啓発では歯止めがかからないようなところまできています。しかし、かといって化石燃料の使用を急にやめることはできません。であれば、私たちは何をすべきなのか。それは簡単な問いではありませんが、その答えを考えつづけること、そしてあらたなアイデアがあれば積極的に検証してみることが、未来につながっていくはずです。そのためにも、ひとりでも多くの人たちにこういった問題があることを知っていただき、ともにどうすべきかを考えてもらいたいと思います。

INTERVIEWEE:

茅根 創 かやね・はじめ

東京大学 大学院理学系研究科 教授
COLE 副センター長

東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）。通商産業省（現経済産業省）地質調査所研究官、主任研究官を経て、東京大学大学院理学系研究科助教授、2007年より教授。海洋教育センター（COLE）副センター長を併任。地球環境変化に対するサンゴ礁の応答を調査・研究している。



おわりに

本企画で私は、地球温暖化とサンゴの白化について、2018年の熱波と豪雨、2016～2017年の白化を紹介しました。インタビューを受けたのち、このあとがきを書いている2020年7月までにも、7月上旬に熊本県を中心とした観測史上最大の豪雨によって球磨川などが氾濫して、60名以上の方々が命を落とされました。また4月には、2020年の高水温で、2016～2017年を生き延びたグレートバリアリーフのサンゴが白化して死滅したことが公表されました。その他の章で報告されている、海水融解、海面上昇、津波、プラスチックごみ、生物絶滅なども、現在進行形の問題です。皆さんは、この企画をもとに、事例をより直近のものに置き換えて、将来のあり方を考えることができるはずです。

気象災害で被災した地域の多くは、河川の氾濫原や土石流の堆積面など、地学的な時間スケールでは堆積や侵食がアクティブに起こっている場です。この半世紀の間、そうした自然の作用を堤防や堰堤^{えんてい}などで抑え込んで、市街地やインフラがつくられました。しかし、温暖化によって勢いを増した自然を抑え込みきれなくなり、災害が起こっているというのが現在の状況です。顕在化した危機は、今の子どもたちが社会で活躍する今世紀半ばには、常態化することが予想されています。抑え込むだけでない対応を考えなければならないのは、子どもたちの世代なのです。

最近の海の危機を前に、欧米の海洋学者は「海は人間が損なうには大きすぎる」というこれまでの物語りから、「海は大きすぎて修復できない」へ転換を迫られています。さらにこれからの海洋学は「海は重要なので無視できない。人間が修復せざるを得ない」という物語りを目指さなければならないと宣言しています。これまで彼らは「自然は原初のまま維持することが目標であり、人間の力で修復することはできない」と考え、広大な海洋保護区を設けて海を保全してきました。しかしこの数年、保全して守ってきたはずの海で、白化やゴミ、生物絶滅などの危機が迫っていることを目の当たりにして「もはや自然に戻すことは不可能、人間が修復せざるを得ない」と考えをあらため、遺伝子から生態系スケールまで、さまざまな修復技術の開発を始めています。

しかし欧米のこの物語りの転換には、人間が自然を管理するという意識が残っているように思えます。海に囲まれた国土に住み、災害に苦しむとともに海の恵みを享受してきた私たち日本人には、海を畏れ敬い、養殖や里海というかたちで海と共生してきた歴史があります。海の危機の正しい理解に基づいて、抑え込むだけ、管理するだけでない、海と贈り与る関係を再構築するために、この企画が活用されることを願っています。

2020年7月

茅根 創

東京大学大学院理学系研究科 教授

海洋教育センター 副センター長

OCEAN AT RISK

ー危うさに立つ海

[発行日]

2020年10月1日

[企画・編集]

丹羽淑博、田口康大、加藤大貴

[取材・編集]

東方通信社

[デザイン]

スタジオ・ブントビルゴラ

[協力]

日本財団

[発行者]

東京大学大学院

教育学研究科附属

海洋教育センター

〒113-0032

東京都文京区弥生2-11-16

東京大学理学部3号館

320A号室

03-5841-4395

cole-info@p.u-tokyo.ac.jp

