# Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

# 地球温暖化の行方

「IPCC第5次評価報告書」を読み解く



世界最深部に生きる カイコウオオソコエビの食生活

立体視に挑戦! 「江戸っ子1号」が見た深海



#### 1 特集

#### 地球温暖化の行方

「IPCC第5次評価報告書」を読み解く

18 Aquarium Gallery

志摩マリンランド

山の神に好かれた心――オニオコゼ

20 私が海を目指す理由

『地球の腹と胸の内』に導かれて

1中四 生士 地球内部ダイナミクス領域 リンスフェア構造解析研究チーム 技術研究副主任

24 研究の現場から

面白い!から始まる

桑野 修

地球内部ダイナミクス領域 固体地球動的過程研究プログラム 非線形動力学及び応用研究チーム 研究員

28 **Marine Science Seminar** 世界最深部に生きるカイコウオオソコエビの食生活

八林茁城

海洋・極限環境生物圏領域 深海・地殻内生物圏研究プログラム 環境メタゲノム解析研究チーム 主任研究員

32 BE Room

編集後記 『Blue Earth』定期購読のご案内 JAMSTECメールマガジンのご案内

裏表紙 Blue Earthをめぐる

「江戸っ子1号」が見た深海 房総沖日本海溝

所属・役職は取材当時のものです

表紙 グリーンランドのイルリサット氷河の河口付近 (撮影: 齋藤冬樹) 最近、新聞やテレビ、インターネットなどで「温暖化」という言葉を見聞きする頻度が増えたと感じている方もいるだろう。それは、「IPCC第5次評価報告書」が2013年9月に発表されたことが1つの理由だ。

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)は1988年、地球温暖化について科学的、技術的、社会経済的見地から評価を行うことを目的に、国連環境計画(UNEP)と世界気象機関(WMO)によって設立された。「第4次評価報告書」を発表した2007年には、IPCCがノーベル平和賞を元アメリカ副大統領アル・ゴアと共同受賞している。

前回の第4次から6年。世界の科学者たちによる温暖化研究の 最新成果をまとめた「IPCC第5次評価報告書」を読み解くと ともに、海洋研究開発機構(JAMSTEC)における温暖化研 究の最前線を紹介しよう。

# 地球温暖化の行方

## 「IPCC第5次評価報告書」を読み解く

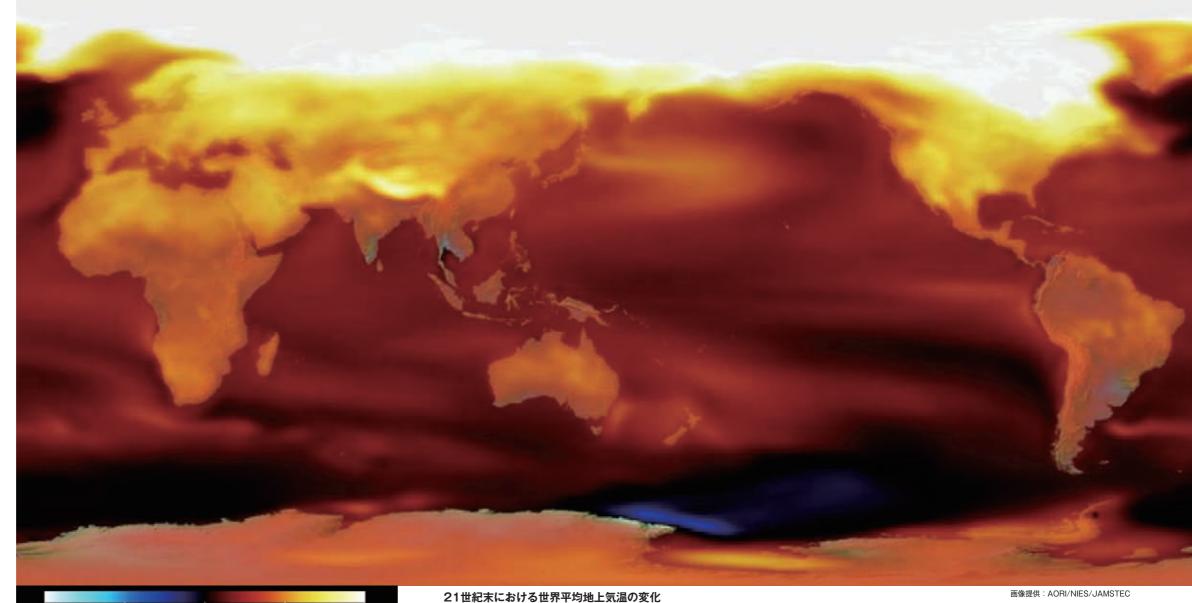
取材協力:地球環境変動領域

地球温暖化予測研究プログラム

河宮未知生 プロジェクトマネージャー 羽島知洋 特任研究員 齋藤冬樹 研究員 海洋環境変動研究プログラム

村田昌彦 チームリーダー 増田周平 チームリーダー 細田滋毅 チームリーダー代理 次世代モデル研究プログラム

木村富士男 プログラムディレクター 小室芳樹 研究員 大内和良 研究員



21世紀末における年平均地上気温上昇量の分布。1971~2000年の平均を基準に、2071~2100年の年平均地上気温が何℃上昇するかを示している。RCPシナリオ(次ページ参照)のうち温暖化を引き起こす効果が最大であるRCP8.5に基づくシミュレーション



## 1880~2012年において世界平均地上 気温は0.85℃上昇。未来の気温はどうなるのか。

2013年夏、西日本では平均気温が統計を開始した1946年以降最も高くなり、高知県四万十市江川崎では41.0℃という国内最高気温の記録を更新した。そうしたことからも、地球の気温が上がっているのではないか、と感じている方もいるだろう。実際はどうなのだろうか。

これまでの観測によれば、1880~2012年において世界平均地上気温は0.85℃上昇している。また、最近30年の各10年間の世界平均地上気温は、1850年以降のどの10年間より高温である。さらに北半球では、最近の30年間が過去1,400年で最も暑い30年間であった可能性が高い。「IPCC第5次評価報告書」(AR5)では、「気候システムの温暖化については疑う余地がない」「20世紀半ば以降、世界的に対流圏が昇温していることは、ほぼ確実である」と結論している。

では、温暖化の原因は何か。地球の気温変動をもたらすものとしては、火山噴火や太陽活動などの自

然要因と、温室効果ガスの排出など人為的要因があ る。温室効果ガスとは二酸化炭素(CO2)やメタン (CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)などで、地表から放 射された赤外線を吸収し、大気中に熱を蓄える働き をする。温暖化は自然要因か人為的要因なのかが長 らく議論されていたが、2007年に発表された「IPCC 第4次評価報告書」(AR4) において「20世紀半ば 以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんど は、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたら された可能性が非常に高いしと結論された。さまざ まな気候モデルを用いて過去の気温変化を再現する 計算を行ったところ、1940~60年代については自 然要因だけで再現できるが、それ以降の気温変化は 自然要因だけでは再現できず、人為的要因を入れて 初めて再現できたのだ。その後、気候モデルの再現 精度も向上したことなどから、AR5では「可能性が 極めて高い」という表現になっている。

温暖化はすでに起きており、その要因は人間活動

である。では、地球の気温はこれからどうなるのだろうか。

IPCCでは、AR5から「RCP(代表的濃度経路)シナリオ」に基づいて将来予測を行うこととした。 RCPシナリオにはRCP8.5、RCP6.0、RCP4.5、 RCP2.6の4つがあり、数字は放射強制力(放射エネルギーの収支の変化)を表し、数値が大きいほど温暖化を引き起こす効果が大きい。

RCPシナリオに基づいて、世界中の研究機関が、それぞれ開発した気候モデルを用いて世界平均地上気温の変化を計算。JAMSTECは、東京大学大気海洋研究所と国立環境研究所と共同で地球システムモデル「MIROC-ESM」を開発し、計算を行った。AR4までは大気と海洋と陸の相互作用を扱う気候モデル「MIROC」を用いていた。「MIROC-ESM」は、「MIROC」に陸域の植生や海洋のプランクトンなど生態系の効果や、大気中のオゾンなど化学物質の化学反応や輸送の効果を取り入れたもので、将来予測

を精度よく行うことができる。それぞれのモデルには特性があり、予測結果は少しずつ異なる。そのため、IPCCでは1つのモデルの結果を取り上げるのではなく、複数の結果を取りまとめている。IPCCの報告書に出てくる数値に幅があるのは、そのような理由による。

そしてAR5では、2081~2100年における世界 平均地上気温は、1986~2005年を基準として、最 も温暖化を引き起こす効果が小さいRCP2.6では 0.3~1.7℃、最も温暖化を引き起こす効果が大きい RCP8.5では2.6~4.8℃上昇すると予測されている。

「AR5では、それぞれの項目について前回のAR4 より予測精度は向上しています。しかし、まだ不確 定要素があるのも事実です」と河宮未知生プロジェ クトマネージャーは指摘する。次からは、AR5をさ らに詳しく読み解くとともに、課題やJAMSTECで 進む最新の研究を紹介しよう。

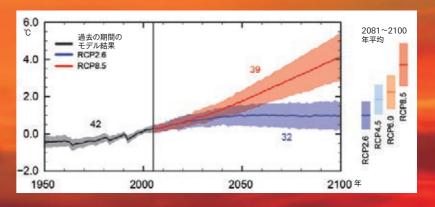
#### RCP(代表的濃度経路)シナリオ

RCPの後ろの数字は放射強制力(単位: $W/m^2$ )を表し、数値が大きいほど温暖化を引き起こす効果が大きい。放射強制力とは放射エネルギーの収支の変化で、正は地表面の温暖化を、負は寒冷化をもたらす。2011年における放射強制力は $2.99W/m^2$ である

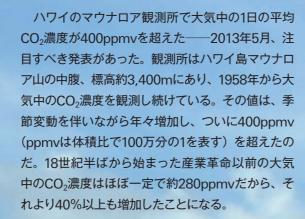
RCP8.5	高位参照シナリオ 2100年に8.5W/m <sup>2</sup> となり、それ以降も上昇が続く	
RCP6.0	高位安定化シナリオ 2100年に6.0W/m <sup>2</sup> となり、それ以降は安定化する	
RCP4.5	中位安定化シナリオ 2100年に4.5W/m <sup>2</sup> となり、それ以降は安定化する	
RCP2.6	低位安定化シナリオ 2100年までにピークを迎え、2100年に2.6W/m <sup>2</sup> となり、 その後減少する	

#### 世界平均地上気温の変化

複数の気候モデルによる1950~2100年の世界平均地上気温の変化。RCPシナリオによって幅があるが、21世紀末には1986~2005年に比べて0.3~4.8℃高くなると予測されている。グラフ中の数字は、平均を算出するために使用した気候モデルの数。AR4では社会的・経済的な将来像で定義した「SRESシナリオ」を用いていた。シナリオの違いを考慮すると、AR5の気温変化の予測は、パターンや大きさにおいてAR4の予測とほぼ同じである出典:IPCC第5次評価報告書



## 海洋は人間活動で放出されたCO2の30%を吸収。これからも海洋は吸収し続けるのか?



南極の氷床に含まれている気泡を調べることで、 過去数十万年間の大気中のCO。濃度が分かる。それ によれば、400ppmvというのは、過去80万年間で 前例のない高濃度である。また、氷期から間氷期に 移行するときにCO。濃度は増加するが、その変化は 1,000年で20ppmv程度だ。一方、2000年代には 年2ppmvの割合で増加している。地球はいま、その 歴史のなかで経験したことのない速度でCO。濃度が 上昇しているのだ。

温暖化の主な要因は人間活動による温室効果ガス の放出であり、なかでもCO2が最も大きく寄与して いることが、AR5でも指摘されている。産業革命以 降、人間活動によって炭素換算で5550億トンもの CO。が放出された。しかし、大気中に増加したCO。 の量はそれよりはるかに少ない。残りはどこに行っ たのだろうか。

COoは、さまざまなプロセスを介して大気、陸、 海洋の間を循環している。人間活動によって放出さ れたCO。は、その約30%が海洋に、約30%が陸に 吸収されている。まず、海洋による吸収について見 ていこう。

現在、大気中のCO。濃度は、海水中のそれより高 い。そのため、大気中で増加したCO。は海水に溶け 込む。海水に溶け込んだCO。は、溶存CO。、炭酸水 素イオン、炭酸イオンなどに分かれ、それらをまと めて「全炭酸」と呼んでいる。CO。が海水に溶け込 むのは、大気に接している表層だけである。しかし、 それではすぐに飽和に達してしまう。実は、海洋に はCO₂を中層や深層に運び込む仕組みがある。冷た く塩分の高い海水は重いため、沈み込んでいく。こ のときCO。も海水と一緒に表層から中層や深層へと 運ばれていくのだ。深層まで届く強い沈み込みは、 南極海と北大西洋のグリーンランド沖で起きている。 また、植物プランクトンは、光合成によって海水に 溶け込んだCOっを取り入れて有機物をつくる。その

排せつ物や死骸が沈むことで、CO。が中層や深層へ 運び込まれていく。前者を「溶解度ポンプ」、後者 を「生物ポンプ」と呼ぶ。

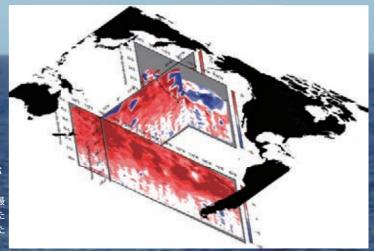
JAMSTECをはじめ世界中の研究機関が協力して 船舶による海洋観測を実施し、海水中の全炭酸の量 を計測している。その結果、人間活動によって大気 中に放出されたCO。が海洋にたまっている様子が明 らかになった。「海域や深さによって増加の傾向や 蓄積量に違いがあります。さらに、海によるCO2吸 収量の時間変化を調べると、近年、1960年代と比 較して吸収能力が弱まっているらしいことが分かっ てきました」と村田昌彦チームリーダー(TL)はい う。海洋の一部では、沈み込みが弱まり溶解度ポン プの働きが弱まっているようだ。

生物ポンプについてはどうか。海水にCO。が溶け 込むと、水素イオンが増える。pHが低下すること から、「海洋酸性化」と呼ばれている。水素イオン が増えると、炭酸イオンが減少する。そのような環 境では、炭酸カルシウムの殻や骨格がつくりにくく なってしまう。AR5では、「海水のpHは産業革命以 降0.1低下している」、さらに「海洋へのさらなる炭 素蓄積の結果、海洋酸性化が進行するであろう」と 述べている。村田TLは「まだ大きな変化は見られま せんが、海洋酸性化や海水温の上昇によって生物ポ ンプの働きが変わる可能性があります」と指摘する。

海洋は、今後もCO。を吸収し続けるのだろうか。 AR5では、「人間活動によって排出されたCO2の海 洋への吸収は、4つのすべてのRCPシナリオにおい て2100年まで継続する」と記述されている。では、 陸はどうなのだろうか。

採水器には、パイプ状のボトルが並んで いる。ボトルの上下のふたを開けたまま でふたを閉じることで、異なる水深での

人間活動によって大気中に放出されたCO。が 太平洋の海洋内部に蓄積されている様子 横軸は経度もしくは緯度、縦軸は深さを表す。赤は最 近の約10年間でCO2が増加したところ、青は減少した ところを示す。人間活動によって大気中に放出された CO<sub>2</sub>は深さ1,500mまで達している





### 地球における人為起源CO2の行方と温 暖化。そしてCO<sub>2</sub>排出量と気温のシンプルな関係。

大気中 589+240±10

平均的な濃度の上昇: 4 (PgC/年)

上地利用の変化

土壌から

化石燃料貯蔵量

ガス:383-1135

石油:173-264

石炭: 446-541

大気中のCO。濃度は、化石燃料の燃焼による排出 や土地利用の変化により、産業革命以前より40% 増加した――AR5では、CO。濃度増加の原因として、 このように述べている。土地利用の変化が、CO。濃 度増加にどう関わるのだろうか。森林を伐採して農 地や裸地にすることで、光合成によるCO。の吸収が 減ったり、植物体に蓄積されていた有機物がCO。と して大気中に放出されたりするのだ。産業革命以降、 人間活動によって炭素換算で5550億トンのCO<sub>2</sub>が 排出されているが、そのうち土地利用変化による排 出は約1800億トンにも上ると推定される。

人間活動によって大気中に放出されたCO。の約 30%は海洋に、約30%は陸に吸収されている。し かし、CO2の増加や気温上昇によって、今後の海や 陸によるCO。吸収量が変化すると考えられる。

たとえば陸では、大気中のCO2濃度が上がると、 植物の光合成が盛んになってCO。の吸収量が増え、 有機物として植物や土壌に蓄えられる。一方で温暖 化が進むと、植物の呼吸が増え、土壌中の有機物の 分解が進み、生態系からのCO2の放出量が増える。 CO<sub>2</sub>増加に対する応答と、気温上昇に対する応答、 主にこの2つのせめぎ合いで、海や陸が今後もCO。 を吸収し続けるのか、どこかの時点で放出に転じる のかが、決まるのだ。

この問題に関し、世界中のさまざまな地球システ ムモデルを用いたシミュレーションが、一斉に行わ れた。「ほとんどのモデルで、CO2増加に対する応 答が気温上昇への応答を上回りました。つまり、海 と陸はCO<sub>2</sub>の吸収源であり続けるという結果です」 と羽島知洋 特任研究員。この結果の一部はAR5に も掲載されているが、「陸域の炭素吸収が将来どう 変化するかは、あまり確かではない」と記述されて いる。羽島特任研究員も、「この結果は、少なくと も大きな課題を3つ示している」と指摘する。

1つ目は、陸の結果についてモデルによってばら つきが大きいという点だ。「ばらつきの理由を調べ ているところですが、炭素循環に加えて窒素循環も 組み込まれたモデルでは、陸のCO。吸収量が大きく 異なっていることが分かりました。今後の鍵になる かもしれません

2つ目は、凍土中に蓄えられている炭素について 考慮されていない点だ。温暖化が進んでシベリアや アラスカに広がる永久凍土が融解すると、その下に ある有機物が分解されて大量のCO2やメタン(CH4)

が大気中に放出されるかもしれない。CH』はCO。よ り温室効果が高いため、温暖化の進行が加速される

3つ目は、土地利用変化の影響だ。羽島特任研究 員は、地球システムモデルを用いた1850~2100年 のシミュレーション結果のうち、陸の炭素量の変化 を追った。すると、土地利用変化を加えるかどうか で、結果が大きく変わったのだ。「愕然としました。 何か間違いをしたかと思ったほどです。土地利用変 化は全球の炭素循環に大きなインパクトを与えるよ うです。その効果をより正確に評価し、温暖化予測 に取り入れていくことが、今後の課題です」

AR5では、新見解として「累積CO<sub>2</sub>排出量と世界 平均地上気温の上昇量はほぼ比例関係にある」と記

海からの吸収・放出

60.7

海洋表層

海洋中深層

37,100

+155 ±30

海底表層堆積物

1,750

0.2

90

101

-大気間のガス交換

9

述している。この事実は、CO。排出と気温上昇の因 果関係、つまり人間活動-炭素循環-気候という-連のつながりをシンプルに示すだけではない。気温 上昇を何℃までに抑えるかという目標から、今後許 容されるCO。排出量を逆算できることを意味する。 たとえば世界平均地上気温を産業革命前と比べて 2℃未満に抑えるためには、CO。だけを考えればそ の累積排出量の上限は炭素換算でおよそ1兆2000 億トン、少し厳しめに見ると1兆トン程度に抑えな ければならない。1870年から2011年までの間に約 5000億トンを排出しているから、今後許容される

陸からの吸収・放出

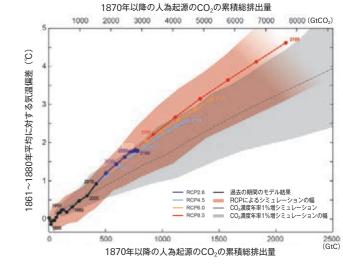
と森林火災 = 107.2 + 11.

岩石の風化

450-650

1,500-2,400

排出量は5000億トンである。目標とする気温によっ ては、排出量をゼロ以下、つまり人為的に大気中の CO。を吸収・固定することも必要になるかもしれな い。また、CO2以外の温室効果ガスまで含めると、 許容されるCO。排出量はさらに厳しくなる。人間活 動によるCO。の排出量と気温上昇がシンプルな比例 関係にあるということは、温暖化対策に関する政策 決定においても非常に重要な示唆を与えるだろう。



#### 世界全体の CO<sub>2</sub> の累積総排出量に応じた世界 平均地上気温の上昇量

人間活動によるCO。の累積総排出量と世界平均地上気温 の上昇量は、ほぼ比例関係にある。4つのRCPシナリオ の結果も一直線上にあることから、シナリオによらず に、気温上昇目標以下にするためにはCO2の累積総排出 量をいくつに抑えなければいけないかが分かる。RCP シナリオではCO。以外の温室効果ガスなども考慮されて いるが、細い黒線はCO₂だけである。陰影部分は、使 われた地球システムモデルの推定結果のばらつきを示 す。これには羽島特任研究員らによる計算結果も反映さ れている。GtCは10億トン炭素量(G[ギガ]=10<sup>9</sup>)。 1GtCは1PgCと同量である

出典:IPCC第5次評価報告書

#### 炭素循環の模式図

永久凍土

フラックス: (PgC/年)

貯蔵量: (PgC)

~1,700

黒は自然活動による炭素の貯留量と異なる領域との交 換量、赤は人間活動によって変化した量を示す。18世 紀半ばの産業革命以降、化石燃料の燃焼やセメントの で5550億トンのCO<sub>2</sub>が大気中に放出された。人間活動 [ペタ] =10<sup>15</sup>)。1PgCは1GtCと同量である 出典:IPCC第5次評価報告書

生成、森林の農地化などの人間活動によって炭素換算 によって増加した大気中のCO₂の約30%は海洋に、約 30%は陸に吸収されている。PaCは1000兆g炭素量(P

Blue Earth 129(2014) Blue Earth 129(2014)

6000

河川

溶存

有機炭素

700

## 深層でも海水温が上昇している。Deep NINJAは南極海での越冬に成功。 測には、表層から深層まで海水温の変動を詳細に捉 間的・空間的な密度も高く、データの品質も均一だ。 3.000m以深の海洋深層で水温が上昇している可 能性が高い-─AR5では新見解として、初めて海洋 えることが不可欠である。 2007年に目標の3,000台を達成し、また10年以上

深層の昇温に言及した。

表層の水温が上昇していることは、以前から指摘 されていた。大気中のCO。濃度が上昇した結果、温 室効果によって大気中に熱が蓄積される。しかし、 大気を暖めるのに使われる熱はほんのわずかで、蓄 積した熱の大部分、具体的には1971~2010年の 期間では90%以上が海洋に吸収されている。そし て、AR5では「1971~2010年において、水深0~ 700mの海洋上部で水温が上昇していることはほぼ 確実しと述べている。海洋は大気に比べて熱容量が 約1.000倍も大きいため、気温上昇や気候変動の予

> 1,000m以深まで水温・塩分を計測した観測点 上はアルゴフロートによる観測点で、2012年に100万点

> を超えた。下は、1870年代のチャレンジャー号航海以来

の観測点で、約53万点。ただし、アルゴフロートによる

ものを除いてある。2014年1月末現在、約3,600台のア

ルゴフロートが稼働している。そのうち約200台を日本

表層の水温については、1870年代に近代的な海 洋観測が始まって以来、船舶による観測が行われて きた。2000年からは国際プロジェクト「アルゴ計画」 がスタートした。アルゴフロートは、水深2,000m までの水温と塩分を10日おきに自動で観測し、その データを人工衛星経由で送信する。「アルゴフロー トの登場によって海洋観測の時代が変わった」と細 田滋毅TL代理はいう。1870年代以降の約140年間 で船舶観測によって蓄積された観測データは、約 53万点だ。アルゴフロートの観測データは、観測開 始からわずか12年で100万点に達した。しかも、時 にわたる観測データが集まったことから、AR5にも 大きな貢献をしている。

一方、深層については、世界中の海で測線に沿っ て船舶観測を繰り返しやろうという国際海洋観測が 1990年代から行われている。地球環境変動領域の 深澤理郎 領域長は、海洋地球研究船「みらい」な どによる1999年の船舶観測で得られた北緯47度に 沿った測線の水温と、同じ測線で1985年に観測さ れた水温を比較した。その結果、水深4,000mより 深層の水温が約0.005℃上昇していることを発見し、 2004年に発表。その後、北太平洋だけでなく、大 西洋やインド洋でも深層の水温が上昇していること が明らかになった。そうした観測研究が、AR5での 新見解につながったのだ。

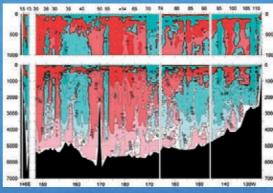
「深層での昇温が温暖化と関連していると断言す るのは時期尚早です」と増田周平TLはいう。「深海 での高精度観測はまだ数回しか実施されておらず、 その間がどうなっているのかが分かりません。継続 的な観測が必要です」

もちろん、観測データがたまるまで、ただ待って いるわけにはいかない。増田TLは、深層の昇温を もたらすシグナルが、どのような経路で、どのよう に伝わってくるかを、データ同化システムを用いて 探っている。データ同化システムでは、観測データ をモデルに組み込んでシミュレーションすることで、 より現実に近い海洋を再現することができる。増田 TLは、北太平洋の深層の昇温は、南極のアデリー海 岸沖の海水があまり冷やされず、沈み込みが弱まっ たことが原因であると突き止めた。「深層の昇温の メカニズムを明らかにするためには、アデリー沖の 表層から深層までの水温データがぜひ欲しい」と増 田TL。しかし、南極海は冬には海氷に覆われるため、 アルゴフロートでは観測できない。そもそもアルゴ フロートが観測できるのは水深2,000mまでだ。

南極海は海水の沈み込みが起きている重要な海 域であるため、観測を切望する声は多い。それに応 えるべく、JAMSTECと㈱鶴見精機が共同で開発 したのが、深海用プロファイリングフロートDeep NINJAだ。水深4,000mまでの水温と塩分を10日か ら1ヵ月ごとに観測することができる。また、水温が 低く海氷の存在が予想される場合は、海面の50m 下で浮上をやめて沈むようにプログラムされてい る。観測は継続し、海氷がなくなり海面まで浮上で きたら、蓄積していたデータを送信する。2012年 12月、南極海に4台を投入。順調に観測を続けた後、 南半球が冬になる2013年6月に通信が途絶えた。そ して11月25日、そのうちの1台からデータが届いた。 「生きていてくれた。感激しました」と細田TL代理。 越冬に成功したのだ。6~11月の海氷下の観測デー タも得られていた。南極海で水深4,000mまでの水 温・塩分について1年を通して連続的に観測したの は世界で初めてだ。2014年にも新たに7台投入し、 観測を行う。海水温の変動の把握や深層の昇温メカ ニズムの解明に大いに役立つと期待される。

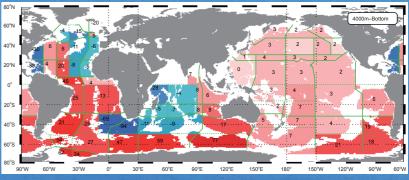


水深4,000mまでの水温と塩 分を10日から1ヵ月に1度、観 測して、衛星を通じデータを 場合は、浮上を中止して沈降 することで、破損を回避する



#### 北太平洋における水温変化

北緯47度線に沿った船舶観測から得られた1999年と1985年の 水温の差。深度4,000m以深に見られるピンク色は、水温が上昇



#### 水深4,000以深における水温変化

1997~2006年のデータと1985~1994年のデータの差から見積もった水温変化を示す。 赤が濃い海域ほど水温が上昇している。太平洋だけでなく、大西洋やインド洋でも深層の 昇温が見られ、南極周辺で大きく上昇している 出典: Kouketsu et al., JGR, 2011



**Blue Earth 129**(2014)

## グリーンランドの氷床の減少速度が加速している。2~4℃の気温上昇で氷床が姿を消す可能性も。

過去20年にわたり、グリーンランドおよび南極の 氷床の質量は減少している――氷床に関してAR5 では、これまでと同様の指摘をしている。しかも、 グリーンランドの氷床の減少率が近年、大きく増加 している可能性が非常に高いという。

グリーンランドや南極大陸の氷床など、陸上の氷が融けて海に流れ込むと、海面水位が上昇する。また、海水温が上がると海水が熱膨張を起こし、海面水位が上昇する。両方の効果により、1901~2010年の間に世界平均海面水位は19cm上昇した。

AR5では、2081~2100年における世界平均海面 水位は、1986~2005年を基準として、最も温暖化 を引き起こす効果が小さいRCP2.6では26~55cm、 最も効果が大きいRCP8.5では45~82cm上昇する と予測されている。AR4では、海面水位の上昇は最 大で59cmと予測されていた。AR5で最大値が前回 より大きくなったのは、シナリオの違いに加え、氷 床が海に流れ込む影響を初めて考慮した結果であ る。しかし、齋藤冬樹 研究員は、「氷床が温暖化に よってどのように変化していくかについては、まだ 不確定性が大きく、その予測は非常に難しいため、 今後大きく変わる可能性もある」と指摘する。

2012年、世界の研究機関が開発している氷床モデルでそれぞれ温暖化の将来予測を行って結果を比較するSeaRISEプロジェクトが行われた。グリーンランドの氷床については8つのモデルが参加し、齋藤研究員も東京大学と共同で開発した「IcIES」で参加。「200年後までの結果では、すべてのモデルを平均すると53.2cmの海面水位上昇に相当する氷床が減少するとなりました。しかし、予測の幅は79cmもあります」と齋藤研究員。氷床が融ける過程には、温度はもちろん、氷床の色やかたち、かた

さ、積雪、雪の融解、流動、氷床、底面すべり、棚 氷からの氷山分離など、さまざまなプロセスが関 わっている。モデルによって重視しているプロセス や計算手法、どの大きさの格子に区切って計算する かという解像度などが異なっているからだ。

「進行速度には幅がありますが、グリーンランドの 氷床が減少していくことは間違いありません。しか し、2100年にすべてなくなってしまうことはないで しょう。問題はその先です」と齋藤研究員はいう。 氷床は応答が遅く、温度が上昇したからといってす ぐに融け始めるわけではなく、変化が現れるまで時 間がかかる。「気温上昇が2100年に止まったとして も、氷床の融解はそこで止まるのではなく、影響は 1000年、2000年と続くのです」

IcIESにおける仮想的な実験によると、気温上昇があるラインを超えると、氷床が急激に減少し始め、

一気に消滅に向かう。グリーンランドの氷床が大部 分残るか、消滅してしまうか、その臨界点は2~4℃ にあるらしい。臨界点を正確に知るには、予測精度 を高めていくことが不可欠である。

将来予測において齋藤研究員が重視しているのが、過去の履歴だ。「応答の遅い氷床は、過去の履歴を引きずって変化していくはずです。単に、現在の氷床を忠実に再現した状態から計算を始めても、正確な将来予測はできません」。ICIESには、グリーンランドの氷床コアから明らかになった過去12万年の気温変動のデータが入っている。過去の氷期・間氷期を経て現在の氷床を再現し、未来に向けて計算を進めていく。「ICIESで計算すると、現在の氷床が実際より少し大きくなってしまいます。それが予測精度を悪くしている可能性があります。現在の再現をよくするための研究などを、進めているところです」





## 2013年夏、北極海の海氷は1980年代の平均的な面積の半分以下に。未来の北極海はどうなるのか。

今世紀半ばまでに9月の北極海で海氷がほぼなく なる――AR5ではこう記述されているが、気候学的 な平均状態と過去約30年の減少傾向を現実にかな り近く再現したモデル、しかも温暖化の効果が最も 大きいRCP8.5シナリオにおいて、という前提があ る。「9月において21世紀のいつごろ北極域の海氷 がほぼなくなるのかについて、ほかのシナリオでは 確信のある予測をすることができない」とも述べて

人工衛星で北極海の海氷を観測できるようになっ た1979年以降、海氷面積は減少を続けており、特 に夏季の減少が急速に進んでいる。2007年夏には 前年から激減し、観測史上最小記録を大きく更新し た。同じ2007年に発表されたAR4でも海氷の減少 は予測されていたが、現実の減少速度は予測をはる かに上回っていた。2007年の激減を含めて現実の 減少傾向をいかに正確に再現するか。それがAR5に 向けて海氷モデル研究の課題だった。

「海氷の予測は非常に難しい」と小室芳樹 研究員 はいう。海氷が減少するメカニズムが完全には理 解できていないからだ。海氷の減少には、海洋、積 雪、風や海流による海氷の輸送、大気、河川からの 淡水の流入など、さまざまな現象が複雑に絡み合っ

ている。さらに、陸がないため連続した詳細な観測 が難しい。複雑な現象である上に観測データが少な いため、モデルをうまくつくれず予測精度が上がら ないのだ。それでも、2007年の激減に衝撃を受け た研究者たちが努力を重ね、減少の傾向を現実にか なり近く再現できるモデルも出てきた。しかし小室 研究員は、「JAMSTECの海氷モデルを含めて多く のモデルでは、まだ減少速度の加速をうまく捉えら れていません。2007年や最小面積をさらに更新し た2012年のような極端な変動の再現も不十分です。 重要な要素の理解がまだ足らないのでしょう」と指

小室研究員は、重要な要素として3つ挙げる。1 つ目は、海氷の厚さだ。厚い氷は融かすのに多くの 熱が必要なだけでなく、薄い氷より大気と海洋の熱 交換を妨げる働きが強いなど、海氷の生成量にも影 響を与える。船舶による観測などから近年、厚い氷 が減っているという報告がある。しかし人工衛星か らは、海氷の厚さを面積のように日々観測すること はできていない。そのため、モデルで再現された海

氷の厚さの検証は不足しがちとなる。JAMSTECで は、厚い氷と薄い氷の混在した状況を表現できる海 氷モデルの開発を進め、この課題に取り組んでいる。

2つ目は、海氷の空間的な分布だ。海氷の減少傾 向を現実にかなり近く再現できているといっても、 それは面積についてであり、海氷の分布、特に縁近 くの分布はモデルによってばらばらだ。海氷の縁の 位置は雲の立ち方や風の吹き方に影響し、それが海 氷の分布に跳ね返る。さらに影響は日本の周囲にも 及ぶ。2012年に地球環境変動領域の猪上 淳 主任研 究員が、北極海の海氷分布と日本の寒冬が関連して いることを明らかにした。また、大西洋側と太平洋 側を結ぶ北極海航路の利用という視点からも、海氷 の分布を精度よく予測することが求められている。

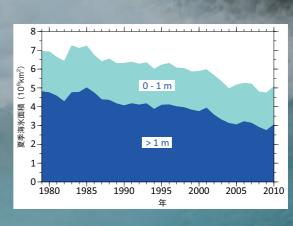
3つ目は、海氷の表面の状態だ。海洋の太陽光反 射率(アルベド)は約10%で、ほとんどを吸収する。 一方で、白く乾いた海氷は太陽光の約60%を反射す る。海氷の上に新雪が積もっていると、アルベドは

80%を超える。時間がたって雪が変質するに従って アルベドも変化する。アルベドの変化は気温を変え、 海氷の生成にも影響する。海氷があるかないかだ けでなく、海氷の表面の状態の変化をモデルに組み 込む必要があるのだ。「北極海での観測が難しい分、 シベリアやアラスカなど陸上の雪氷研究で明らかに なっていることを取り込むべく、その分野の研究者 との共同研究を進めています」と小室研究員。

海氷面積が減少していくと、2007年や2012年の ような極端に大きな変動が起きる頻度が増える可能 性が示唆されている。北極海は、温暖化の影響を最 も受けやすい場所であり、温暖化を加速させる場所 であるともいわれている。北極海の現在を正確に捉 え、海氷減少のメカニズムを解明し、将来予測の精 度を向上させていくことが、強く求められている。

#### 北極海の海氷

2013年に行われた「みらい」 による北極航海で撮影。できた ばかりの1年氷は薄い。冬の間 に成長し、また衝突・合体を繰 り返しながら厚くなり、その結 果、融解期の夏を越えて再び冬 を迎えた氷は多年氷と呼ばれ る。近年、厚い氷が減ってきて いるという報告がある 撮影:堀 正岳



JAMSTECの海氷モデル が再現した過去約30年間 の北極海夏季海氷面積 全体的な減少傾向とともに、 mを超えるような厚い氷が主 に減っていることが分かる



## 猛暑や豪雨などの極端現象の頻度が増 大。海洋でも水循環の変動を捉えた。

世界平均地上気温の上昇に伴って、ほとんどの陸 上で極端な高温の頻度が増加することは、ほぼ確実 である。中緯度の大陸のほとんどと湿潤な熱帯域に おいて、今世紀末までに極端な降水がより強く、頻 繁となる可能性が非常に高い——AR5のこの記述に 対して、木村富士男プログラムディレクター(PD) は、「猛暑や豪雨、竜巻といった極端現象は限られ た地域・時間にしか起こらないため、把握すること はとても難しいものです。過去を正確に把握できて いないのですから、将来予測はさらに難しくなりま す。しかし、極端現象は社会生活に大きな影響を 及ぼします。何とか将来予測をしたいと、限られた データから過去の極端現象と気温との関係を読み取 り、高解像度の気候モデルを用いて計算をすること で、ようやく得られた結果なのです」と解説する。

以前の気候モデルでは、地球全体を1辺数百km の格子に区切って、格子ごとに計算をしていた。し かし、極端現象の範囲は数十kmだから、それでは 格子が粗過ぎる。かといって、地球全体を1辺数km

の格子で区切ったのでは、計算量が膨大になり過ぎ て、実行は不可能だ。そこで考え出されたのが、「ダ ウンスケーリング」という方法である。まず地球全 体を1辺数百kmの格子に区切って計算し、日本列島 周辺だけを1辺数十kmで計算する。さらに特定の領 域を1辺数kmで計算するというものだ。

木村PDは、ダウンスケーリングを用いて温暖化に 伴う日本海側の積雪の変化を予測した。その結果、 標高100m以下の富山県周辺の平地では、2030年代 の年間の総降雪量は現在の60%、6時間降雪量の年 最大値は現在の80%となった。「積雪が減少するので 除雪車を常備しないなど除雪能力が低下し、高齢化 も加わって社会システムが雪に対して脆弱になる可 能性があります。一方で、短時間での降雪量はそれ ほど少なくならないため、豪雪による災害が増加す る危険があります」と木村PDはいう。「気候変化の 予測には大きな不確実性がありますが、それを踏ま えた上で社会に発信することで、国や自治体の政策 に活用し、将来の安全安心に役立てていただきたい

JAMSTECでは、全球雲解像モデル「NICAM」 を用いて温暖化した地球での台風の姿を予測して いる。実は、AR4に向けて1辺20km格子の気候モ デルを開発したが、台風を再現するにはまだ粗かっ た。NICAMの格子は1辺3.5kmだ。この解像度で初 めて、台風の発生から発達、消滅、雲の濃淡など詳 細な構造を表現できるようになった。さらに、非静 力学という新しい物理法則を組み込んであり、上昇 気流など雲の運動を忠実に表現できる。大内和良研 究員は、「NICAMは現在、世界で最も優れた雲のモ デル」と断言する。NICAMを用いた予測によれば、 21世紀末には、地球全体での台風の発生数は減り、 勢力の強い台風の数が増えることが分かった。しか し、これは地球全体での数であり、日本周辺でどう なるのかは不明だ。スーパーコンピュータ「京」を 用いることで、NICAMの格子を1辺1km未満にする ことが可能で、さらに詳しい予測ができると期待さ れている。2013年には、伊豆大島を襲った台風26 号やフィリピンで大きな被害を出した台風30号が発

生した。これらは、温暖化と関係があるのだろうか。 「たまたま勢力の強い台風が発生しただけの可能性 もあり、個別の台風と温暖化の因果関係を科学的に 証明するのは難しい」と大内研究員。

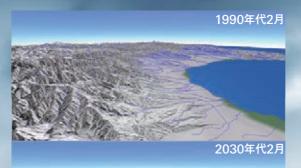
AR5では、「湿潤地域と乾燥地域の間での降水量 の差異が拡大するだろう」と述べている。これは陸 上だけのことではない。細田TL代理は、アルゴフ ロートから得られた海面の塩分の分布を、過去に船 舶で観測されたものと比較した。その結果、塩分が 高いところはより高く、低いところはより低くなっ ていることが分かった。海面の塩分は主に蒸発と降 雨によって決まるため、塩分が高いところは蒸発が 盛んで、塩分が低いところは降水が多いことを表し ている。「海上にたくさんの雨量計を設置すること はできませんが、塩分を調べることで、降水量と蒸 発量を知ることができるのです」と細田TL代理。温 暖化によって海洋でも湿潤地域と乾燥地域で降水量 の差異が拡大することはシミュレーションで知られ ていたが、観測で確かめられたのは初めてだ。



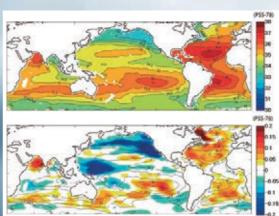


#### NICAMによる1辺0.87km 格子によって再現された台風

2012年8月25日、沖縄を襲った過去最大 級の台風15号で、NICAMをスーパーコン ピュータ「京」で実行した結果。水平格子 間隔1km未満の大気シミュレーションに成 功したのは、世界で初めて。下は、従来の 最高解像度である水平格子3.5km。台風 の構造の細部までは表現できていない 画像提供:理化学研究所 計算科学研究機構 吉田龍二







#### 日本海側の積雪変化の予測

標高100m以下の富山県周辺 の平地では、2030年代の年 間の総降雪量は現在の60%に

(カシミール3D 国土地理院数値地 図50mメッシュ、国十交涌省国十数 値情報を用いた)

#### 全球表層塩分分布

上は、過去の船舶観測デー タ (1960~1989年)。下は、 (2003~2007年) と過去の 船舶観測データ(F)との差 で、最近30年間で表層100m の塩分分布がどのように変化 したかを表している。塩分が 高いところはより高く、低い ところはより低くなる傾向が



## より確かな温暖化予測に向けて

AR4時点と比べてより多くの雲過程やエアロゾル 過程およびそれらの相互作用が気候モデルに組み 込まれているが、モデルにおけるこれらの過程の表 現やその定量化については、依然確信度が低いまま である——AR5では、このように指摘している。

大内研究員は、「全球雲解像モデル『NICAM』 によって台風のような極端な気象現象については再 現できるようになりました。しかし、普通の雲は、 まだうまく再現できません。雲は上空に運ばれた水 蒸気が凝結した粒の集まりですが、その雲の粒1個1 個を表現できていないからです」と解説する。

温暖化予測にとって、なぜ雲が重要なのだろう 地球を冷却する「日傘効果」と、地表から放射され た熱を閉じ込めて温暖化を進める「温室効果」であ る。地上気温は、その2つの効果のバランスで決ま る。そして、それぞれの効果の大きさは、雲の高度 によって変わってくる。一般的には、高度1kmくら いにある低い雲は日傘効果が大きく、高度10km付 近まで達している上層雲は2つの効果が同じくらい であると考えられている。さらに、雲の厚さや濃さ によっても効果の大きさが変わる。つまり、地上気 温の変化を予測するには日傘効果と温室効果の正 しい見積もりが不可欠であり、それには雲粒1個1個 の運動について計算をしなければいけないのだ。し かし、雲粒の数は膨大なため、現在のスーパーコン ピュータの1万倍の計算速度が必要になる。雲の高 さ分布を知ることも簡単ではない。人工衛星の観測

からは雲の底の高さや厚さ、密度は計測できない。 それらの情報をどのように得るかも、今後の課題だ。 河宮プロジェクトマネージャーいわく「雲は古くて 新しい問題」。その解決の糸口を見つけるべく、大 内研究員はNICAMの改良にも取り組んでいる。な お、エアロゾルとは大気中に浮遊する非常に微小な 粒子で、放射を散乱・吸収したり、雲粒の核にもな る。エアロゾルは台風の発生にも影響して、エアロ ゾルが増えると海水面が暖められないため台風が発 生しにくくなる。この数十年でエアロゾルが減少し ている大西洋では、台風の発生が増えている。

温暖化予測の精度を向上させるために、雲のほか か。雲には2つの働きがある。太陽の光を反射してには、どのような課題があるのだろうか。河宮プロ ジェクトマネージャーは「いくつもありますが、私 の専門に近いところでいえば、地球システムモデル に窒素循環を入れる必要があるでしょう」と指摘す る。大気中に炭素が増えると光合成が盛んになる。 一方で、植物の生長には窒素が欠かせない。温暖 化が進んだとき窒素の供給が増えるのか減るのかに よっても、光合成の効率が変わってくる。それは取 りも直さず、炭素循環に影響を与えるのだ。

> JAMSTECの地球システムモデル「MIROC-ESM」に組み込んである陸域の植生モデルでは、1 本1本の木の生長を追えるようになっている。ほか の地球システムモデルでは森林としてまとめて計 算をしてしまうことが多い。また、「MIROC-ESM」 には温暖化すると増加し植物の生長を妨げるといわ れているオゾンの化学反応や輸送についても組み込

んである。「MIROC-ESM」にさらに窒素循環を組 み込むことで、将来の大気中CO。濃度の予測も精度 が大幅に向上すると期待される。

1880~2012年において世界平均地上気温は 0.85℃上昇した。AR5では「世界平均地上気温は 数十年にわたって明確な温暖化を示している」と述 べている。しかし、この10年は地上気温の上昇率が 横ばいになっている。このような気温上昇の停滞状 態は「ハイエイタス」とも呼ばれている。気温上昇 の停滞は、太平洋10年規模振動(PDO)と関連し ていることが指摘されている。PDOとは、日本の東 方海域と、アラスカからカリフォルニア沿岸を経て 赤道域東側までの海域の海面水温が、一方が高い ときには他方は低い状態が10~20年の周期で入れ 替わる現象である。アラスカ~赤道域東側の海域の 海水温が高い状態を正と呼び、地上平均気温を約 0.2℃上昇させる。2006年ごろに正から、日本の東 方海域の海水温が高い負の状態に入れ替わったた め、温暖化による気温上昇を抑えていると考えられ る。JAMSTECが行った2030年ごろまでの予測で は、2015年以降に向けて気温上昇の停滞状態は解 消に向かい、再び上昇に転ずるという結果が出てい る。また、気温上昇の停滞は、海洋深層への熱の取 り込みが強まっていることによるという指摘もある。 気温上昇の停滞の原因を明らかにすることは、温暖 化予測の精度向上にもつながる重要な課題である。

この特集では、AR5のうち科学的根拠を扱う第1 作業部会の報告書を中心に紹介した。2014年3月に は影響・抵抗・脆弱性を扱う第2作業部会の総会が 横浜で、4月には緩和策を扱う第3作業部会の総会 がドイツのベルリンで、それぞれ開催され報告書が 発表される。そして10月に、デンマークのコペン ハーゲンで統合報告書が発表される予定だ。

第6次評価報告書の制作についてはまだ具体的に 示されていないが、JAMSTFCをはじめとする世界 中の科学者たちは温暖化予測研究に引き続き取り組 んでいく。 BE





# ― オニオコゼ

■ Information: 志摩マリンランド

〒517-0502 三重県志摩市阿児町神明賢島

URL http://www.kintetsu.co.jp/leisure/shimamarine/

2013年秋、伊勢神宮で行われた式年遷宮に合わせて、特 別展を企画した。その名も「神にまつわる魚たち」。神に関す る歴史や言い伝えと縁のあるオニオコゼなどを展示した。

オニオコゼ(虎魚、通称:オコゼ)と神様、いったいどん な関係があるのだろう? 山の神は女神で、醜い顔をして嫉妬 深いという伝承が、日本各地に伝わっている。その山の神は オニオコゼが好きらしい。山の神は、自分よりも醜い姿であ るオニオコゼを見ると、安心して鎮まるという。

志摩マリンランドに黄色のオニオコゼが来たのは2009年1 月のこと。普通は黒褐色をしているが、その個体は黄色をし ていた。その年の初漁に掛かった縁起物で、黄金のオニオコ ぜとして大事に飼育していた。その当時から、この黄金のオ ニオコゼと、黒褐色の個体を常設展示した。

オニオコゼは本州中部から南シナ海にまで分布し、内湾か ら水深200mまでの砂泥底に生息している。全長は25~ 28cmほどになる。

特別展終了直後の2013年12月にはオレンジ色の個体が入 館。さっそく黄色、黒褐色、オレンジ色、この3色を同じ水槽 で展示することにした。

ソチ冬季オリンピックの開催もちょうどあり、これらのオ

ニオコゼは「金・銀・銅」のオニオコゼとして人気を集めて いる。

山の神には、こんな話もある。オニオコゼは顔は醜いが、 腹のなかはどんな魚よりも美しい。山の神は、顔のきれいな ものより、邪心のない心のきれいなものを好くという。

3匹のオニオコゼは、じっと見つめている。あなたが美しい のは、どんなところだろう。

取材協力:里中知之/志摩マリンランド・館長

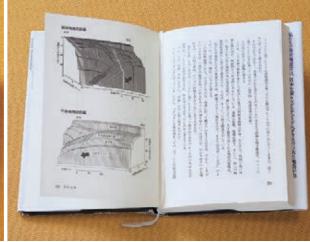
3色のオニオコゼ。オレンジ色の個体は、採 集時の大きさが全長29.7cm、体重500g。 黄色の個体は全長27.3cm、体重290gだっ た。通常は左端の黒褐色をしているが、赤褐 色や黄褐色、灰褐色など、個体による体色変





仲西理子(なかにし・あやこ) 東京都生まれ。理学博士。北海道





島村英紀著『地球の腹と胸の内』(情報センター出版局)と、そこに掲載されている千島海溝と琉球海溝の断面図

#### |地球大紀行| で プレートテクトニクスに目覚める

――子どものころになりたかった職業は 何ですか。

仲西:学校の先生です。小学校のころか ら勉強がわりと好きでした。高学年のこ ろ、朝の自習時間に、友だちの1人が学 級委員だった私のところへ分からない問 題を聞きに来たので教えてあげたら、ほ かの子が列を成しました。人に勉強を教 えてあげるのが楽しかったので、学校の 先生になりたいと思うようになったので

仲西:父の仕事の関係で、小学6年の途 中から中学卒業まで、現地の日本人学校 に通いました。日本人が多く住む国で、 友だちも日本人ばかりでした。公用語は 英語や中国語でしたが、観光地である街 中には日本語が分かる現地の人も多く、 外国語を使う機会はほとんどなかったで すね。帰国後、英語はペラペラでしょう、 と思われるのがつらかったです (笑)。

## のはいつごろですか。

**仲西**: 高校で物理が面白いと思うように なりました。地球や地震へ関心を持つよ うになったのは、NHKの『地球大紀行』 の影響です。46億年という悠久の歴史を 経て、どのようにして地球が現在の姿に なったのか、プレートテクトニクス理論 に基づき描かれていました。そのダイナ ミックで壮大なスケールに憧れました。 月に1回、日曜日に放送があり、翌日学 校で、同じ興味を持つ友だちと番組につ いて話すのが楽しみでした。毎週放送し てほしいと思ったほどです。

地球科学関係の本を読みあさるように なり、北海道大学理学部の地球物理学科 に進学しました。

#### 海底下の構造探査へ

#### -海底下の地下構造を探る現在の研究 分野に進んだ理由は?

仲西:学部3年生のとき、北大の教授だ った島村英紀先生が書かれた『地球の腹 と胸の内』という本を読みました。海底 地震計を苦労して開発した話と、それを 使った最新の海域地震調査・観測の成果 が紹介されていました。そこに載ってい ――その後、シンガポールに行かれたそ た千島海溝と琉球海溝の断面図を見たと き、ぜひこの研究がしたい! と思いまし た。地球内部へ沈み込んだプレートの姿 が実際に分かるんだ、と感激したのです。 その後、大学院へ進み、島村先生の研究 室に入りました。後から先輩にその話を したら、「だまされたんだね」といわれ ました (笑)。

#### ――どのような研究室でしたか。

仲西: 教授の島村先生と助手の塩原 肇 先生 (現 東京大学地震研究所 准教授) ――地球科学へ関心を持つようになった のもとに、学生は私を含め5人ほどでし た。主に塩原先生が私たち学生を指導し てくださいました。

> 研究室に入る前の春休み、塩原先生に 「東京大学へ行って海底地震計の組み立 て方を習ってきて」と命じられました。 東京から帰ってきたら、「じゃあ、海外 へ探査に行くから」と、ノルウェーへ向 かいました。大学院はこういう感じなん だと思いましたが、研究室によって指導 方針がかなり違うことを後から知りまし た (笑)。

> ――修士課程の後、企業に就職したので すね。

仲西:学部のときは学校の先生になるつ もりだったので、教職課程の単位を取り、 4年生のとき教育実習も体験しました。 北海道の高校に行ったのですが、勉強が 嫌いな生徒が多い学校でした。いろいろ なタイプの生徒に教師として対応する自 信がなくなり、学校の先生になることを 断念しました。

その後、修士課程に進みましたが、研 究者としてやっていく自信も持てません でした。しかし地下構造探査の研究に未 練があったので、いっそのことそれとは まったく関係のない仕事に就こうと思 い、電機メーカーに就職しました。する と通信関係の部署に配属され、水中音響 機器を担当することになりました。関連 する論文を読むと、対象こそ違いますが、 使っている原理は地下構造探査と同じで す。どうせやるなら好きなことをやりた



島村研究室に戻ることにしました。入社 した翌年、1995年1月17日、偶然にも阪 神・淡路大震災が起きた日に、上司に辞 表を出しました。

#### データを正しく解釈する

## ですか。

ドです。そこではフィリピン海プレート が沈み込んでいて、100~150年ほどの 間隔で、巨大地震が繰り返し起きてきま した。最近では、1944年にM7.9の昭和 東南海地震、その2年後の1946年にM8.0 の昭和南海地震が起きています。それか ら70年近くが経過し、近い将来、次の巨 大地震が発生すると予想されています。

海洋研究開発機構(JAMSTEC)では、 その南海トラフの大規模な地下構造探査 を行ってきました。

#### ――どのようにして海底下の地下構造を 調べるのですか。

仲西:研究船に搭載したエアガンと呼ば れる装置で人工地震を起こします。その 地震波は海底下に伝わり、反射したり屈 折したりして海底面や海面に戻ってきま す。それを海底地震計や、船から伸ばし たストリーマーケーブルというマイクを 搭載した装置で捉えます。そのような観 測により、船が走った測線の海底下の地 下構造を反映したデータが得られます。

ただしそのデータから自動的に正確な 地下構造が分かるわけではありません。 陸上の地震計はきちんと固定しますが、

い、やれるところまでやってみようと、 海底地震計は重りを付けて海に沈めま した。従来、巨大地震ですべるプレート す。ある研究者は「海底地震計は田んぼ に地震計を置いているようなものだ」と いっていました。海底地震計で捉えたデ ータにはノイズも多いので、まずデータ を正しく解釈する必要があります。

日本海溝などほかの海域と南海トラフ 現在、どのような研究をしているのでは、データの雰囲気が異なります。私 は学生のときから南海トラフの探査を続 **仲西**: 南海トラフが、私の主なフィール けてきたので、この反射波はあそこから 来たものだ、このデータはおかしいぞ、ると考えられるようになりました。新し と直感が働きます。

> そして解釈したデータを計算機で処理 することで、プレートの形状だけでなく、 から九州の日向灘まで連動してすべった 地層のかたさなど物理的な情報を得るこ とができます。

#### 南海トラフでも 超巨大地震は起きるのか?

大でM9.1になるそうですね。

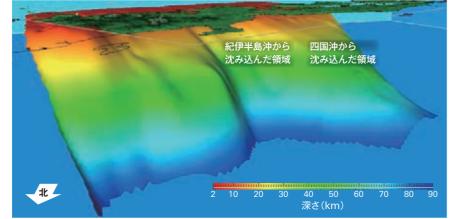
仲西:3.11 (東北地方太平洋沖地震)を 受けて、想定震源域の見直しが行われま

境界は、海底下およそ10~30kmの領域 だと考えられていました。ところが3.11 では、浅い領域の陸側のプレートが海溝 軸まで水平方向に50mもすべったこと が、JAMSTECの調査により明らかにな りました。従来は、巨大地震で一緒にす べることはないと思われていた浅い領域 が大きくすべったことに衝撃を受け、 30kmより深い領域もすべる可能性があ い想定では、海溝軸に近い浅い領域と内 陸側の深い領域もすべり、さらに東海沖 場合、M9クラスになると予測されてい

#### ――本当にそのような超巨大地震が起き るのでしょうか。

仲西:新たな想定震源域(下図)の西端 ――南海トラフで起きる巨大地震は、最 には、九州・パラオ海嶺が沈み込んでい ることが、私たちが2008年に行った地下 構造探査で分かりました。「こぶ」のよ うな海嶺がバリアーになって、地震のす

仲西 技術研究副主任たちが描き出した南海トラフから沈み込んだフィリピン海プレートの形状





べりが止まると考えられます。実際、 り目に注目して、データ解析を行ってい 1968年に日向灘だけで起きた日向灘地 震のすべりも海嶺を越えませんでした。 ただし、昭和南海地震は四国沖までしか すべっていません。地震のすべりが何ら かの理由で四国沖を越えて日向灘まで達 するかどうかで地震の規模が変わりま す。私たちは、2008~12年に行った詳 細な地下構造探査により、四国沖と日向 灘の間に昭和南海地震のすべりを止めた 構造変化が見つかると期待したのです が、大きな変化はまだ見つかっていませ ん。調査がまだ十分ではない深い領域に 大きな構造変化があるのかもしれませ ん。今後、それを探っていく予定です。

#### ――1707年に起きた宝永地震では、東 海・東南海・南海地震が同時に発生し、 さらに日向灘地震も連動した可能性があ るそうですね。

仲西:南海トラフの巨大地震では、昭和 のように東南海と南海の地震が別々に発 生するケースと、宝永のように連動する ケースがあります。私が所属する研究チ ームのリーダーである小平秀一 上席研究 員たちは、2000年代前半の地下構造探査 により、東南海と南海の震源域の境界で ある紀伊半島沖で、直径数十kmの重い 物体が重りのようにフィリピン海プレー トの上に載っていること、さらにその海 側には地殻に裂け目があることを発見し ました。

南海トラフの巨大地震は、その紀伊半 島沖から破壊が始まります。しかし、破 壊されにくい重りと力をためにくい裂け 目が破壊を止める境界となり、昭和のよ うに東南海と南海の地震は別々に起きま す。ところが何回かに一度は重りごとす べって、宝永のような連動地震になると 考えられています。

れらの構造を取り入れてシミュレーショ ンを行い、南海トラフにおいて地震が連 動したりしなかったりする発生パターン をほぼ再現することに成功しました。

より、紀伊半島と四国の間で、沈み込む フィリピン海プレートの形状が変化して いる領域があることが分かってきました。 紀伊半島の下では急角度、四国では緩や かな角度でフィリピン海プレートは沈み 込んでいます。私たちはいま、その変わすか。

るところです。そこにも、破壊が伝わり にくい構造があり、地震が連動するかど うかを左右している可能性があります。

2010年には、紀伊水道に入り込んだ 測線で探査を行いました。それほど陸に 近い海域で探査を行ったことは、いまま でありませんでした。漁業関係者の方々 の理解を得て、指定された時間帯に観測 を行いました。普段は海底に置いていく、 海底地震計につないだ重りも回収しまし た。そのような苦労がありましたが、そ の観測により陸側プレートから、いまま でに見たことのないデータを捉えること ができました。それも地震の連動と関係 する可能性があると考え、データ解析を 進めています。

#### 3.11が意識を変えた

#### 一今後、どのように研究を進展させて いくつもりですか。

仲西:南海トラフの浅い領域や深い領域

では、低周波微動・地震が起きているこ とが分かり、巨大地震との関係が注目さ れています。「ゆっくり地震」「スロースリ ップ」などとも呼ばれる現象です。深い 領域でいえば、深さ40km付近で低周波 微動・地震が起きています。ただしそれ がプレート境界で発生しているのか、あ るいはその上の陸側プレート内部で起き ているのか、よく分かっていません。深 どこで低周波微動・地震が起きているの か把握する必要があります。今後、四国 沖の陸に近い海域での地下構造探査や、 陸上で地震波を観測している研究グルー プとの連携が必要です。

かせません。私たちが描き出した南海ト JAMSTECの堀 高峰 主任研究員がそ ラフの地下構造は、最も現実に近いモデ 以外の計算科学の研究者にもぜひ活用し ていただきたいですね。震度マップや津 波の規模を予測するシミュレーション るはずです。自分たちの研究を、一般の 人たちに伝えたいという意識も高まりま した。それはやはり、3.11の影響が大き JAMSTECでもありません。 いですね。

――3.11のときは、どこにいらしたので **仲西**:楽しい、と思うことにしています



船上での海底地震計の点検作業(2002年)



2013年、サイエンス・パートナーシップ・ブ ログラムで横浜高校の生徒を指導する仲西 技 術研究副主任(『Blue Earth』127号参照)

**仲西**:ここ、JAMSTECの横浜研究所(神 奈川県横浜市金沢区)です。地震後、電 車が止まってしまいました。港区(東京 都) に自宅があり、保育園と小学校に子 い領域の地下構造を詳細に調べることで、どもを迎えに帰る必要がありました。何 とか電話で連絡が取れた後、研究所で利 用していた自転車で4時半ごろ子どもた ちのもとへ向かいました。着いたのは9 時すぎでした。夫の方が早く、8時すぎ に子どもたちを迎えに行った後でした。

#### さらに計算科学の研究者との連携も欠 ——子育てと研究の両立は大変ですか。

仲西:幸い、周囲の理解に恵まれていま す。子どもが生まれてから、私は船には ルだという自負があります。JAMSTEC 乗っていませんが、JAMSTECには0歳児 がいても乗船する女性研究者もいます。 研究職は自己責任で時間の融通が利き、 子育てとうまく両立させている研究者は さらに2008~12年の地下構造探査に に、私たちの地下構造モデルは貢献でき 多いと思います。また、女性研究者の割 合は少ないですが、女性だからという理 由で研究上、苦労した経験は、大学でも

#### ――子育ては楽しいですか?

(笑)。 BE

## 面白い!から始まる

2013年10月に開催された海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 横浜研究所の一般公開で行った実験「寒天でわかる!地球内部の調べ方」は大好評だった。この寒天を使った地震波探査の実験装置は、8月に行われた高校生を対象とした実習のために、地球内部ダイナミクス領域 (IFREE) の桑野 修 研究員が開発したものだ。特許申請中で、キット化を目指している。「実習をしたり演示実験を見たりした人が、面白い!と思ってくれたら、とてもうれしい。また、こうしたアウトリーチ活動は、研究者としての視野を広げることにもなるし、研究への思わぬフィードバックがあります」と桑野研究員。この実験装置は、どのように生まれたのか。桑野研究員の研究の現場をのぞいてみよう。

桑野研究員の専門は、実験地震学である。実験を通して、 地震発生のメカニズムを明らかにしようとしている。

地震とは、地下の岩石に力がかかり、耐え切れなくなった 岩石が断層を境にすべる現象である。その衝撃が波となって 伝わり、地面を揺らす。地震はとても複雑な現象だが、地震 動の大きさは、断層のどのくらいの部分がどのくらいの速度 ですべったかで決まる。それは、岩石の摩擦によって支配さ れている。つまり、岩石の摩擦がどのように決まるかという 摩擦法則を理解できれば、地震発生メカニズムの解明に近づ ける。そこで、一方の岩石を固定し、もう一方の岩石を高速 で回転させて摩擦係数を調べる高速摩擦実験が、近年盛んに 行われている。しかし、桑野研究員は、それとは異なるアプロー チで摩擦法則の理解に挑んでいる。

「岩石は、組成もさまざまで、摩擦熱で高温になれば溶融したり化学反応が起きたりもします。その結果、摩擦係数も変わります。岩石の高速摩擦実験の結果の解釈はものすごく複雑多様で、それぞれの実験結果から定量的・定性的な関係を読み取り、摩擦法則を理解することは、とても難しいものです。しかも、地下の断層から採取してきた岩石は貴重で、繰り返し実験することはできません」と桑野研究員は指摘する。「そこで私は、知りたいこと以外の要素をできるだけ排除して制御された実験を行うことで、普遍的な法則を見つけようとしています」

桑野研究員が注目したのは、粉体だ。「岩石と岩石がこすれると、その間に岩石が破砕されてできたつぶつぶの粉体が

できます。岩石の種類が違っても粉体という点では共通しています。この粉体の大きさや形状が摩擦係数を決める要因になっているのかどうかを調べています。天然の岩石の粉体ではなく、素性の知れたガラス球を用いて実験することで、つぶつぶの粉体であるということそれ自体の性質に迫ることができます|

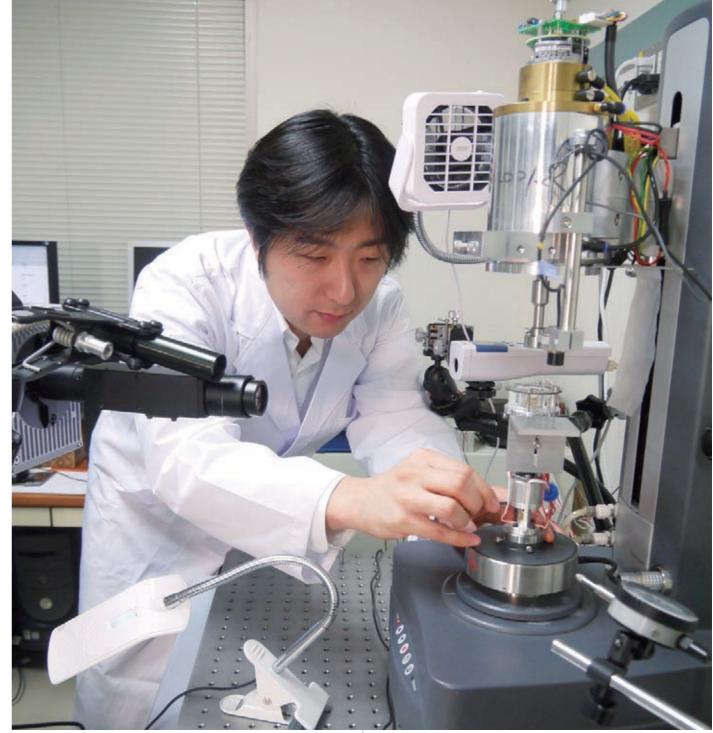
具体的には、レオメーターと呼ばれる装置を使い、表面にガラス球を並べて接着した円盤の間にガラス球の層を挟んで回転させ、高速度カメラでその様子を観察するとともに摩擦係数などを計測する。ガラス球の大きさは直径0.3mmほど。それを試料の表面に並べて接着するのは、手作業だ。これまでに、すべり速度に応じた摩擦係数の変化は粒子の形状には依存しないこと、高速低圧では摩擦係数が大幅に増加することが分かってきた。

直径10mmの円筒形の花崗岩を用いた摩擦実験、そして寒 天 (アガロースゲル)を用いた断層破壊実験も行っている。 岩石に力をかけて破壊の過程を調べる実験が行われている が、岩石のなかをどのように破壊が進んでいるのかを調べる のはとても難しい。寒天であれば、破壊するのにも小さな力 で済み、透明なので破壊過程を詳細に観察できる。

「寒天を用いた断層破壊実験は、私が大学院生だったときに 東京大学地震研究所の一般公開で行った実演実験が始まりで す」と桑野研究員。地震の発生について直感的に理解しても らいたいと、透明な寒天を用いた実験を考え出したのだ。具 体的には、寒天の板のなかに断層を模した弱い面をあらかじ めつくっておく。その寒天の板を立てて置き、左右から力を 加えると、ひずみが徐々にたまっていき、最後に断層がずれ て動く様子を観察できる、というものである。

一般公開用の実演実験から始まった寒天を用いた断層破壊 実験は進化し、いまでは研究の現場で使われている。たとえ ば、断層がどれだけ強くくっついているかという固着度を調 整することで、断層面の外側に亀裂を発生させることもでき る。これは、実際の地震で生じる分岐断層の理解につながる。

「ガラス球や岩石の円柱試料、寒天を用いた実験と、実際に 起きている地震との間には、大きなギャップがあります。大 きさもすべり速度も圧力も違います。しかし、そのなかにも 共通点があります。共通点を手掛かりにすることで、堅実に ミクロから積み上げてマクロな地震発生のメカニズムを理解



摩擦実験を行うレオメーターに試料を設置する桑野研究員

する。それが、私の研究戦略です」

桑野研究員が実験装置を開発したのは、寒天を用いた断層 破壊実験が初めてではない。大学院生だった2005年から特任 研究員だった2011年まで毎年、地震研究所の一般公開のため にさまざまな実験を考案してきた。

その1つが、金太郎あめの破壊実験だ。室温の金太郎あめと40℃に温めた金太郎あめをそれぞれ立てて置き、上から力を加えていく。室温のあめはある程度力が加わったところで急にバリッと割れる。40℃に温めたあめはあまり力が加わらないうちにニューッとゆっくり変形し、たる型につぶれる。これは、地震は地下15kmくらいより深いところではあまり起きないということを実感してもらう実験だ。地震は、地下の岩石がバリッと壊れて断層がすべる現象である。地球は、深く

なるほど温度が高くなる。地下15kmくらいより深いところでは岩石は高温でやわらかくなっているので、40℃に温めたあめのようにニューッとゆっくり変形し、地震を発生させるような壊れ方をすることはない。単純で分かりやすいと、この実験も人気が高かった。

ほかにも、大きい地震ほど少なく小さい地震ほど多いことを示す地震活動のおもちゃ実験、P波とS波の伝播の違いを示す連成ばねの実験、津波発生実験、地下水が流れると電流が流れる界面動電現象の実験など、さまざまな実験を考案・改良している。

「一般公開用に新しい実験を考えたり、皆さんの前で実験を したりするのは、とても楽しい」と桑野研究員はいう。実験 好きの片りんは、小学校時代からあった。「小学6年生のころ、 理科の先生の指導のもとで取り組んだ理科研究、空気の重さ

を量る実験がとても楽しく、印象に残っています。公立の小学校では珍しく理科専任の先生がいて、いろいろな刺激を受けました。信頼性を高めるために、繰り返し同じ実験をして計測するという実験の基本も、そのときに学びました|

ある年の夏休みの自由研究では、スズバチの巣づくりを観察した。巣ができ上がる過程をスケッチしただけではない。ストップウォッチを2個用意して、材料を取りに行っている時間と巣をつくっている時間を記録し、詳細な観察日記に仕上げた。

物をつくったり手先を動かしたりすることが好きだった、という桑野研究員。大学で研究室を選ぶときも実験ができるところを選んだ。そして大学院博士課程修了後、地震研究所特任研究員を経て、2012年4月、JAMSTECの研究員となった。

2013年春のある日、桑野研究員は、「従来の地震波探査実習より、もっと地震波が伝わる様子を実感できる実習はできないかな」と相談された。声を掛けたのは、IFREEの仲西理子技術研究副主任だ(20~23ページ「私が海を目指す理由」参照)。仲西技術研究副主任は、JAMSTECと横浜高校が連携して開催するサイエンス・パートナーシップ・プログラム(SPP)の特別講座の準備を進めていた。

地震波探査とは、人工的に地震を起こし、地下の地層の境界を伝わって返ってきた地震波を観測することで、地下の構造を知る技術だ。その原理を学ぶ地震波探査実習は、地球科学を専攻する大学生や大学院生の定番となっている。従来の地震波探査実習では、ハンマーで地面をたたき、発生した地震波を地震計で記録し、その波形を室内で解析する。屋外ではひたすらハンマーをたたき、室内で見るのは地震計に記録された波形なので、地震波が伝わっていくことを実感しづらい。また、波形解析して得られた地下構造が正解かどうかを確かめることもできない。地震波が伝わる様子を実感できて答え合わせもできる、新しい実習をやりたいと、模索していたのだ。

「寒天を使ったらどうですか、と答えました」と桑野研究員。 寒天を用いた断層破壊実験の経験から、寒天は波の伝播速度 が遅く、また透明なので、寒天をたたけば波が伝わる様子を 肉眼でも見ることができるだろうと思ったのだ。

寒天の濃度を変えて波の伝播速度が異なる2層にすれば、 単純な地下構造を模擬できる。偏光板を使うと波の伝播によ る寒天のひずみが見えるので、高速度カメラで撮影して画像 を波形に変換することも可能だ。その波形を解析して上の層 の厚さを求め、実際に寒天を測って答え合わせをすることも できる。苦労をした点を聞くと、「いままでの経験があったの で、特に苦労した点はありませんでした。大きな寒天の板を 壊さずに立てるのに気を使ったくらいでしょうか」と笑う。

SPP特別講座では、実習の進め方にこだわった。「まず1層の寒天を使って実際に波が伝播する様子を見せました。講義から始めるより、実際に現象を見せた方が興味を持ってもらえると思ったからです。生徒たちの反応は予想以上のものでした」。実習の詳しい様子は『Blue Earth』127号で紹介しているので、ご参照いただきたい。「まずは面白いと思ってもらえることが大切です」と桑野研究員。「面白かったという感想があって、さらにそのなかから地震波探査の仕組みが分かったという声が出てくればうれしいですね」

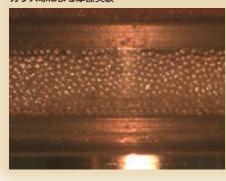
この実験は、「寒天でわかる!地球内部の調べ方」として 2013年10月のJAMSTEC横浜研究所の一般公開でも行い、人 気を博した。「演示実験は、実習とは違った難しさがあります。 でも、面白いと思ってもらうことから始めるというのは同じです」

なぜ、面白いと思ってもらうことが重要なのだろうか。「自分が面白いと思ってやっている研究をほかの研究者や一般の人に面白いといってもらえると、素直にうれしいし、研究の原動力にもなります。そして、私たちがなぜ一般の人向けに実習や演示をするのかというと、研究者が何をやっているかを知ってもらい、研究活動に対する理解を得ることが大きな目的です。それには、面白いという思いを共有してもらうことが早道です」

また桑野研究員は、実習や演示のとき、その現象や手法が、研究者がやっている研究とどのようにつながっているかを、きちんと説明するように心掛けているという。「その現象や手法を使って私たちが何を知ろうとしているのか、何が分かっていないのかを話すことで、研究の大変さや、その研究がい

## ■ 地震破壊や摩擦の物理解明のための実験

ガラス球による摩擦実験



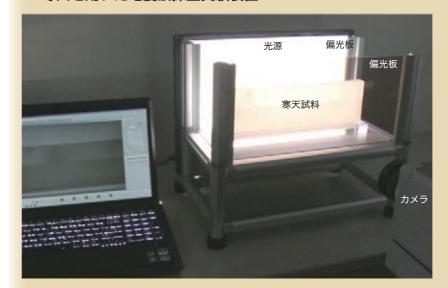
岩石による摩擦実験

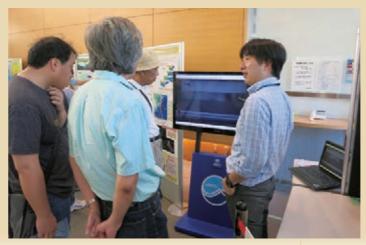


寒天を用いた断層破壊実験

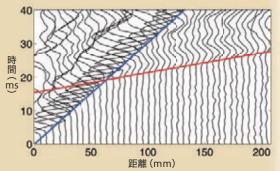


#### ■ 寒天を用いた地震波探査実験装置





発振源 ■ 直接波 第1層 ■ 屈折波 第2層



2層構造での実験の写真と波形の例。下の第2層は寒天の濃度が高く、波の伝播速度が速い。直接波(青)のほかに下の層を通って上がってきた屈折波(赤)が観測される。発振源からある距離より遠くの点では屈折波が先に到達しているのが分かる。実習では、それぞれの層を波が伝播する速度と、上の層の厚さを求める。実際に寒天の厚さを測って答え合わせをする

JAMSTEC横浜研究所の一般公開で行った 実験「寒天でわかる!地球内部の調べ方」 で解説をする桑野研究員

かに重要であるかを知ってもらいたいのです。実習に参加したり演示を見たりした若い人が研究者になることを期待しているわけではありません。研究活動に対する理解者、応援者を増やしたいのです|

この寒天を用いた地震波探査実験装置は、特許を申請中で、学校向けのキット化の準備も進めている。現在の装置で実験を行うには、桑野研究員など装置を熟知している人が不可欠だ。実習や演示をたくさんやりたくても、限界がある。キット化することで、学校の授業などで簡単に実験ができるようにすることを狙っている。「私たちは生徒に教えるプロではありませんから、分かりやすく説明することには限界があります。プロである学校の先生であれば、生徒の知識の程度を把握した上で、もっと分かりやすい、よい実習になるはずだと思っています」

実験装置をつくり始めたときから、学校で使えるキットにすることを念頭に置いていたという。IFREEの研究者が以前、理科教育の研究会に出席したとき、学校の先生が研究機関に何を求めているのか、生の声を聴く機会があった。それによれば、研究者が学校に行く出前授業ではなくさまざまな現象について実験や分かりやすい説明を考えてほしい、どう教え

るかはこちらに任せてください、ということだった。それを聴いていたからだ。

キットの内容は、寒天の材料、寒天の型枠、偏光板、光源、 画像から波形を取得する解析ソフト、そしてマニュアルとな る予定だ。実習では高価な高速度カメラを使用しているが、 毎秒200コマ程度撮影できる市販のデジタルカメラを用意す れば、実験を行うことができる。

さまざまな実験装置を考案、改良してきた桑野研究員だが、 最近、懸念していることがあるという。「研究成果を一般の人 に伝えるアウトリーチ活動が重要であるとする一方で、研究 者や学生の負担になるからと、一般公開などでの実験展示を やめたり減らしたりする傾向があります。それは、とても悲 しいことです。自分の研究と直接関係がなくても、実験の考 案や改良を経験することで、さまざまなことを考え、視野が 広がり、最終的に自分の研究に役立つことがあるものです。 特に学生や若い研究者には、ぜひ経験してほしいですね

桑野研究員の頭のなかには、さまざまな実験のアイデアが 詰まっている。来年の一般公開では、改良された地震波探査 実験や、新しい実験が見られるかもしれない。ぜひ一般公開 に来ていただき、「面白い!」を実感してください。 ■■









# 世界最深部に生きる カイコウオオソコエビの食生活

第161回地球情報館公開セミナー 2013年3月16日開催



海洋・極限環境生物圏領域 深海・地殻内生物圏研究プログラム 環境メタゲノム解析研究チーム

#### 小林英城

こばやし・ひでき。1968年、神奈川県生まれ。博士(工学)。 東京工業大学大学院生命理工 学研究科博士課程修了。ボストン大学を経て、2004年9月 より現職。専門は分子生物学 世界で最も深い海の底は、マリアナ海 溝チャレンジャー海淵です。日本の南方 約2,500km、グアム島の南西部に位置 し、最深部は水深1万900mです。水温 は2℃で、1,000気圧もの水圧がかかって います。それは、1辺10cmの正方形に約 100トンの力がかかることに相当します。 低温、超高水圧に加えて貧栄養であるこ とも、チャレンジャー海淵の特徴です。

海洋研究開発機構(JAMSTEC)の前身である海洋科学技術センターは、1万1000m級無人探査機「かいこう」で1995年に初めてマリアナ海溝チャレンジャー海淵の調査を行い、ナマコやヨコエビの仲間の撮影に成功しました。超深海の過酷な環境にも、生物がいるのです。1998年には、「かいこう」がチャレンジャー海淵において世界で初めて生物の採取に成功しました。そのときの生物が、今回の主役、カイコウオオソコエビです。

## ヨコエビはカニよりもエビでない

カイコウオオソコエビは、その名前からエビの仲間だと思われることが多いのですが、ヨコエビの仲間です。しかも、ヨコエビは "エビ" と付いていますが、実はカニよりもエビでないのです。

ヨコエビは、節足動物門 甲殻亜門 軟甲綱 真軟甲亜綱 フクロエビ上目 端脚目に属しています。エビは、真軟甲亜綱までは同じですが、ホンエビ上目 十脚目に属しています。カニも十脚目です。エビとカニの関係は、ヒトとサルの関係に対応します。そして、ヨコエビとエビやカニの関係は、ヒトとネコやウシの関係に対応し、分類学的にとても離れているのです。

端脚目が属するフクロエビ上目には、 ダンゴムシやフナムシなどの等脚目が入 っています。ヨコエビは、エビやカニよ りダンゴムシやフナムシと近縁です。 カイコウオオソコエビの "カイコウ" は、無人探査機「かいこう」に由来します。そして、体長が3~5cmとヨコエビのなかでは大きく、超深海に生息していることから、"オオソコエビ" と名付けられました。"カイコウオオソコヨコエビ"とすべきなのかもしれませんが、"コ"が多過ぎるのでやめました。

水温は2°C、非常に高い水圧がかかっています。

その過酷な環境でもカイコウオオソコエビは活発に活動しています。

ほかの生物が消化できないセルロースを分解して栄養素を取る

超深海に適応するために独自の進化を遂げたと考えられます。

彼らは何を食べているのでしょうか。研究の結果、木くずを食べていること、

新しい消化酵素を持っていることが分かりました。カイコウオオソコエビは、

#### 何を食べている?

カイコウオオソコエビは、なぜ、そんなに深いところにすんでいるのでしょうか。どこから来たのでしょうか。何を食べているのでしょうか。いつからすんでいるのでしょうか。ほかの生物に食べられているのでしょうか。どのようにして超高水圧に耐えているのでしょうか。カイコウオオソコエビには不思議なことがたくさんあります。そのなかでも、何を食べているかは、重大な問題です。

消化管の内容物を見れば、手掛かりが

つかめるかもしれません。そこで私たちは2009年、1万1000m級フリーフォール型採泥・カメラシステム「アシュラ」を使い、カイコウオオソコエビの捕獲に挑みました(図2)。「アシュラ」は、重りの重さで海底まで自由落下して、カメラで海底の様子を撮影し、海底の泥を採取することができます。さらに、カイコウオオソコエビを捕獲するためにペットボトルでベイトトラップをつくって取り付け、なかに餌のサバを入れました。その「アシュラ」をチャレンジャー海淵の水深1万897mに投入し、海底で約2時間経過した後、重りを外して引き揚げました。

その結果、185匹のカイコウオオソコエビと海底の泥を採取できました(図1)。それらの消化管の内容物を注射器で吸い出して顕微鏡で観察したところ、餌のサバや土が見えました(図3)。棒のような物も見つかりましたが、それが何かは分かりませんでした。そこで、カイコウオオ

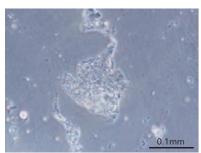
ソコエビが何を食べているかを明らかに するため、消化酵素に注目しました。

#### 消化酵素から食生活を探る

私たちは、肉や穀物や野菜を食べています。食べるということは、それを栄養にすることができるということです。肉や穀物や野菜を構成する炭水化物やタンパク質、脂質を分解して吸収しやすい栄養素にするのが、消化酵素です。私たちは石油を飲んだり、木材を食べたりしても、栄養にできません。ヒトが石油や木材を分解する消化酵素を持っていないためです。消化できない石油や木材は、そのまま排出されます。

つまり、生物がどの消化酵素を持っているかを調べれば、その生物が何を栄養にできるか、つまり何を食べているかが分かります。そこで、捕獲したカイコウオオソコエビの外殻をむき、身をすりつぶして体液を抽出し、どの消化酵素が含まれているかを調べました。その結果、カイコウオオソコエビは、タンパク質やペプチドを分解するプロテアーゼ、脂質や脂肪を分解するリパーゼ、でんぷんやグリコーゲンを分解するアミラーゼ、マルトースを分解するセルラーゼ、グルコマン





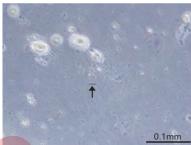


図3 消化管の内容物の顕微鏡写真 カイコウオオソコエビの腸管のなかには、 餌のサバや泥が入っていた。棒のような物 (矢印) も見つかった

ナンを分解するマンナナーゼ、キシランを分解するキシラナーゼを持つことが分かりました(**図4**)。

タンパク質や脂質は、魚や哺乳類、動物プランクトン、微生物に含まれています。でんぷんは、植物の実や根、茎、種子、動物の肝臓に含まれています。セルロースは、植物の骨格ですべての組織に含まれています。グルコマンナンは、コンニャクが有名ですが、針葉樹の葉や樹木部にも含まれています。キシランは、少量ですが植物のすべての組織に含まれています。

カイコウオオソコエビは、動物由来の 物質だけでなく、植物由来の物質も食べ ているようです。しかし、チャレンジャ 一海淵は、地球上で植物から最も離れて いる場所です。そのような場所で植物を 食べているというのは、とても不思議な ことです。そこで私たちは、カイコウオ オソコエビが持つ消化酵素のうちセルラ ーゼに着目して研究を進めました。

#### 新しいセルラーゼを発見

セルラーゼは、セルロースを分解する 消化酵素です。セルロースはグルコース (ブドウ糖) という糖が連なったもので、 セルラーゼはグルコースとグルコースの間 の結合を切断します。セルラーゼにはいく つか種類があり、エンドセルラーゼは、セ ルロースをランダムに切ります (図5)。セ ロビオヒドラーゼは、セルロースを端から グルコース2個ずつの長さで切ってセロビ オースをつくります。 カイコウオオソコエビのセルラーゼでセルロースを分解したところ、グルコースとセロビオースだけができました(図5)。このような分解の仕方をするセルラーゼ、しかもセルロースから直接グルコースをつくるセルラーゼは、これまで知られていません。

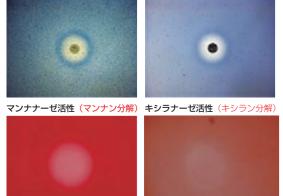
さらに、カイコウオオソコエビのセルラーゼを詳しく調べたところ、分子量は5万9000で、pH (水素イオン指数) 5.6、25~35℃で最も高い反応性を示すことが分かりました。しかし、チャレンジャー海淵の水温は2℃です。その温度では、酵素活性は20%ほどしかありません。このセルラーゼはカイコウオオソコエビの体内で働いていないのではないか、という疑問も出てきます。

ただし、25~35℃で最も高い反応性を示すのは大気圧での実験です。チャレンジャー海淵と同じ1,000気圧では、4℃で最も高い反応性を示します。このセルラーゼは、カイコウオオソコエビの体内できちんと働いているようです。実際、カイコウオオソコエビの体液を調べると、グルコースとセロビオースが含まれていました。これは、カイコウオオソコエビの体内でセルラーゼがセルロースを分解して栄養を得ている証拠です。

#### 木くずを食べていた

カイコウオオソコエビは、なぜ特殊な セルラーゼを持っているのでしょうか。 チャレンジャー海淵の底の泥にも有機

図5 セルラーゼによるセルロースの分解



アミラーゼ活性(でんぷん分解) セルラーゼ活性(セルロース分解)

図4 カイコウオオソコエビの消化酵素の反応

各基質の上にカイコウオオソコエビの消化酵素を滴下して、 室温で反応させた結果。基質には青や赤の色素が含まれて いる。酵素活性がある場合、基質が分解されて周囲が白くな り、高い酵素活性を有していることが分かる

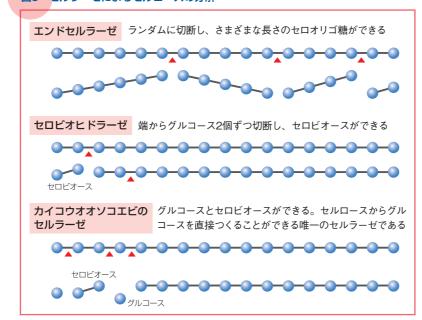




図6 海底下から採取した泥のなかに混ざっていた木くず



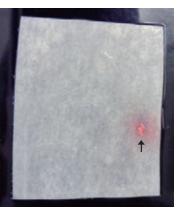


図7 一般再生紙とカイコウオオソコエビのセルラーゼの反応

セルラーゼ溶液を滴下して(左写真矢印)、室温で15時間反応させた。反応後、 グルコース検出溶液を滴下した。グルコースが存在する場所が、赤く染まって いる(右写真矢印)

物が含まれています。しかしその量は少なく、乾燥した底泥1gあたりの有機物は2~3μgです。一方、カイコウオオソコエビ1個体あたり0.4mgのグルコースが含まれています。それだけのグルコースを底泥だけから得るには、130gの乾燥底泥が必要になります。「アシュラ」が捕獲した185匹では、26kg以上の乾燥底泥が必要です。底泥に含まれる有機物だけでは、とうてい生きていけません。

「アシュラ」の採泥装置で採取した底泥を調べると、木くずが入っていました(図6)。長い時間をかけて表層から海底に落ちてきたのでしょう。カイコウオオソコエビは、超深海の貧栄養の環境で独自の進化を遂げ、分解しにくい木くずも栄養にできる消化酵素を獲得したのです。カイコウオオソコエビは、ほかの生物の死骸が落ちてくる間、木くずや枯れ葉、種子などの植物片を食べて命をつないでいると考えられます。消化管のなかに見えた棒状の物も、木くずかもしれません(図3)。

ところで、カイコウオオソコエビには共生生物がいますか、という質問をよく受けます。ウシなどの草食動物や、シロアリなどの昆虫は、体内に微生物が共生しています。その共生微生物がセルラーゼをつくり出し、セルロースの消化を助けているのです。カイコウオオソコエビのすべての遺伝子を調べたところ、細菌や古細菌、真核生物が持つ遺伝子は検出されませんでした。カイコウオオソコエビには共生生物はいないようです。非常に特殊な環境であるが故、共生する生物も生育できないのではないかと考えています。

## セルロースから バイオエタノールをつくる

2012年にカイコウオオソコエビから新しいセルラーゼを発見したことを発表すると、産業界からとても注目されました。

化石燃料の燃焼によって大気中に放出 される二酸化炭素は、地球温暖化を引き 起こします。そのため、化石燃料の使用 を自粛し、再生可能なエネルギーである バイオエタノールへの転換が求められて います。バイオエタノールとは、植物を 原料につくった燃料です。現在はトウモ ロコシのでんぷんをアミラーゼでグルコ ースに分解し、それを発酵させてつくっ ています。しかし、トウモロコシは家畜 飼料や食料としても利用されているため、 供給量が不足し、価格が3倍にも高騰し ました。そこで、食料と競合しない枯れ 木や雑草や古紙などに含まれるセルロー スからのバイオエタノール生産の実現が 期待されています。

しかし、セルロースがバイオエタノールの原料として利用されてこなかったのには、理由があります。セルロースはとても丈夫なため、分解するにはまず酸やアルカリを加えて加熱処理をして結晶構造を緩める必要があります。その膨潤セルロースをエンドセルラーゼでセロオリゴ糖に分解し、次にセロビオヒドラーゼでセロビオースに分解し、さらにβ-グルカナーゼでグルコースに分解しなければなりません。段階が多く複雑なため、工業化が難しいのです。

そこで、カイコウオオソコエビのセル ラーゼに注目が集まっています。カイコ ウオオソコエビのセルラーゼは、セルロ ースを直接グルコースに分解できます。 たとえば、おがくずに加えると、おがく ずのセルロースが分解されてグルコース ができました。また、再生紙に垂らすと、 15時間後には紙のセルロースが分解され てグルコースができました(図7)。

カイコウオオソコエビのセルラーゼは25~35℃で反応するので、加熱処理をする必要もありません。発酵に使う酵母も25~35℃で生育するので、分解と発酵を同時にもできます。またグルコースは、バイオエタノールの材料となるだけでなく食料にもなります。カイコウオオソコエビのセルラーゼはとても有用な消化酵素なのです。

しかし、カイコウオオソコエビのセル ラーゼをバイオエタノールや食料の生産 に使うというのは、まだ夢の段階です。

1匹が持っているセルラーゼは少量です。個体から抽出したセルラーゼを使おうとしたら、非常に大量のカイコウオオソコエビが必要で、現実的ではありません。私たちの次の目標は、カイコウオオソコエビのセルラーゼの遺伝子を取得することです。遺伝子を取得できれば、それを大腸菌に組み込んでセルラーゼをたくさんつくらせることが可能です。

遺伝子を取得するためには、新鮮なカイコウオオソコエビが必要です。2013年3月にもカイコウオオソコエビの捕獲を目指した航海を行いましたが、天候が悪く「アシュラ」を海底に下ろすことができませんでした。機会を見つけて新鮮なカイコウオオソコエビを捕獲し、セルラーゼの遺伝子を取得し、夢を現実にしたいと思っています。

## Room

#### 編集後記

特集「地球温暖化の行方」は、いかがだったでしょうか。IPCC(気候 変動に関する政府間パネル)が「第4次評価報告書」を発表し、ノーベル 平和賞を受賞してから6年。世界の科学者たちによる温暖化研究の最新成 果をまとめた「第5次評価報告書」から、海洋研究開発機構(JAMSTEC) における温暖化研究の最前線を紹介しています。人間活動によって放出 された二酸化炭素は、その約30%が海洋に、約30%が陸に吸収されてい るため、海洋における研究がとても重要になるのです。近年、海洋の水 温や塩分の自動計測にはアルゴフロートが使われ、観測精度と頻度が飛 躍的に向上しました。JAMSTECではさらにDeep NINJAによって、ア ルゴフロートでは計測できない海氷のある海域で水深4.000mまでの計 測にも成功し、さらなる研究の進展が期待されます。

さて、昨年からの「深海ブーム」がまだまだ静かに続きそうで、 JAMSTECと東急ハンズとの共同企画イベントが実現しました。渋谷の 東急ハンズ7階HINT7にて2月22日~4月6日の44日間、「深海ラボカ フェ」をオープンしています。深海に関する雑貨の販売コーナーや深海 生物画像のパネル展示などがあり、JAMSTEC研究員のトークショーや ワークショップも開催予定です。また、熱水噴出孔をモチーフにした「深 海カレー」なども販売します。渋谷に行かれた際には、ぜひお立ち寄り ください。

新しい試みとして、裏表紙に立体視用の写真を載せました。128号で 紹介した無人探査機「江戸っ子1号」で得られた3D動画を変換したもの です。立体視には少しの慣れが必要かもしれませんが、読者の皆さまに 深海の雰囲気を少しでも感じていただければ幸いです。(T. T.)

#### Blue Earth に定期購読のご案内

URL http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html

1年度あたり6号発行の『Blue Earth』を定期的にお届けします。

#### ■申し込み方法

EメールかFAX、はがきに①~⑤を明記の上、下記までお申し込みく ださい。

① 郵便番号・住所 ② 氏名 ③ 所属機関名 (学生の方は学年) ④ TEL·FAX·Eメールアドレス ⑤ Blue Earthの定期購読申し込み

\*購読には、1冊本体286円+税+送料が必要となります。

#### ■ 支払い方法

お申し込み後、振込案内をお送り致しますので、案内に従って当機構 指定の銀行口座に振り込みをお願いします(振込手数料をご負担いた だきます)。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。

平日10時~17時に限り、横浜研究所地球情報館受付にて、直接お支払 いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付け ておりません。詳細は下記までお問い合わせください。

#### ■お問い合わせ・申込先

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25 海洋研究開発機構 横浜研究所 広報部 広報課

TEL.045-778-5378 FAX.045-778-5498

Eメール info@jamstec.go.jp

ホームページにも定期購読のご案内があります。上記URLをご覧くだ さい。

\*定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号(130号)までとさ せていただきます。

バックナンバーの購読をご希望の方も上記までお問い合わせください。

#### ■ バックナンバーのご紹介

URL http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html







Bluetarth

Blue Earthをめぐる

地球シミュレータで



\*お預かりした個人情報は、『Blue Earth』の発送や確認のご連絡などに利用 し、独立行政法人海洋研究開発機構個人情報保護管理規程に基づき安全か つ適正に取り扱います。

#### JAMSTEC メールマガジンのご案内

URL http://www.jamstec.go.jp/j/pr/mailmagazine/

JAMSTECでは、ご登録いただいた方を対象に「JAMSTECメールマ ガジン」を配信しております。イベント情報や最新情報などを毎月10 日と25日(休日の場合はその次の平日)にお届けします。登録は無料 です。登録方法など詳細については上記URLをご覧ください。

#### 海と地球の情報誌 Blue Earth 第26巻 第1号 (通巻129号) 2014年2月発行

発行人 鷲尾幸久 独立行政法人海洋研究開発機構 広報部

編集人 満澤巨彦 独立行政法人海洋研究開発機構 広報部 広報課

Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 有限会社フォトンクリエイト

取材·執筆·編集 立山 晃 (p20-23) / 鈴木志乃 (p1-17、p24-31、裏表紙) /

坂元志歩 (p18-19)

デザイン 株式会社デザインコンビビア

(AD 堀木一男/岡野祐三/飛鳥井羊右)

ホームページ http://www.jamstec.go.jp/ Eメールアドレス info@jamstec.go.jp

\*本誌掲載の文章・写真・イラストを無断で転載、複製することを禁じます。

### 替助会(寄付)会員名簿 平成26年2月28日 駐

独立行政法人海洋研究開発機構の研究開発につきましては、次の賛助会員の皆さまから 会費、寄付を頂き、支援していただいております。(アイウエオ順)

#### 株式会社IHI

あいおいニッセイ同和損害保険株式会社 株式会社アイケイエス

株式会社アイワエンタープライズ

株式会社アクト

株式会社アサツーディ・ケイ

朝日航洋株式会社 アジア海洋株式会社

株式会社アルファ水エコンサルタンツ

株式会社安藤・間

泉産業株式会社

株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所

株式会社エス・イー・エイ 株式会社エスイーシー

株式会社SGKシステム技研

株式会社NTTデータ

株式会社NTTデータCCS 株式会社NTTファシリティーズ

株式会社江ノ島マリンコーポレーション

株式会社MTS雪氷研究所 有限会社エルシャンテ追浜

株式会社OCC

株式会社オキシーテック 沖電気工業株式会社

#### オフショアエンジニアリング株式会社

株式会社カイショー

株式会社海洋総合研究所

海洋電子株式会社

株式会社化学分析コンサルタント

鹿島建設株式会社

川崎汽船株式会社 川崎重工業株式会社

株式会社環境総合テクノス

株式会社関電工

株式会社キュービック・アイ

共立インシュアランス・ブローカーズ株式会社 共立管財株式会社

極東製薬工業株式会社

極東貿易株式会社 株式会社きんでん

株式会社能谷組

クローバテック株式会社 株式会社グローバルオーシャンディベロップメント

京浜急行電鉄株式会社 KDDI株式会社

鉱研工業株式会社

株式会社構造計画研究所 神戸ペイント株式会社

広和株式会社

国際気象海洋株式会社

国際警備株式会社

国際石油開発帝石株式会社 国際ビルサービス株式会社

株式会社コベルコ科研

五洋建設株式会社

株式会社コンポン研究所 相模運輸倉庫株式会社

佐世保重工業株式会社

三建設備工業株式会社

三洋テクノマリン株式会社 株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー

JFEアドバンテック株式会社

株式会社JVCケンウッド 財団法人塩事業センター

シチズン時計株式会社

シナネン株式会社 シーフロアーコントロール

清水建設株式会社

ジャパンマリンユナイテッド株式会社 シュルンベルジェ株式会社

株式会社昌新 株式会社商船三井

一般社団法人信託協会 新日鉄住金エンジニアリング株式会社

須賀丁業株式会社 鈴鹿建設株式会社

スプリングエイトサービス株式会社

住友電気工業株式会社

清進電設株式会社 石油資源開発株式会社

セコム株式会社

セナーアンドバーンズ株式会社 株式会社損害保険ジャパン

第一設備工業株式会社

大成建設株式会社 大日本土木株式会社

ダイハツディーゼル株式会社 大陽日酸株式会社

有限会社田浦中央食品 高砂熱学工業株式会社

株式会社竹中工務店 株式会社竹中土木

株式会社地球科学総合研究所 中国塗料株式会社

中部電力株式会社 株式会社鶴見精機 株式会社テザック

寺崎電気産業株式会社 電気事業連合会

東亜建設工業株式会社

東海交诵株式会社 洞海マリンシステムズ株式会社 東京海上日動火災保険株式会社

東京製綱繊維ロープ株式会社 株式会社東京チタニウム 東北環境科学サービス株式会社 東洋建設株式会社 株式会社東陽テクニカ トピー丁業株式会社

新潟原動機株式会社 西芝電機株式会社 西松建設株式会社

Blue Earth

株式会社ニシヤマ 日油技研工業株式会社

株式会社日産クリエイティブサービス

株式会社日産電機製作所 ニッスイマリン工業株式会社 日本SGI株式会社

日本海洋株式会社 日本海洋掘削株式会社 日本海洋計画株式会社

日本海洋事業株式会社

一般社団法人日本ガス協会 日本興亜損害保険株式会社

日本サルヴェージ株式会社 日本水産株式会社 日本電気株式会社

日本ヒューレット・パッカード株式会社 日本マントル・クエスト株式会社

日本無線株式会社 日本郵船株式会社 濱中製鎖工業株式会社 東日本タグボート株式会社 株式会社日立製作所

日立造船株式会社

深田サルベージ建設株式会社

株式会社フジクラ

富士ゼロックス株式会社 株式会社フジタ

富士通株式会社 富士電機株式会社

芙蓉海洋開発株式会社 古河雷领丁業株式会社

古野電気株式会社 株式会社ベッツ

株式会社マックスラジアン 松本徽章株式会社 マリメックス・ジャパン株式会社

株式会社マリン・ワーク・ジャパン 株式会社丸川建築設計事務所

株式会社マルトー 三鈴マシナリー株式会社 三井住友海上火災保険株式会社

三井造船株式会社 三菱重工業株式会社 株式会社三菱総合研究所

株式会社森京介建築事務所 八洲電機株式会社

郵船商事株式会社

郵船ナブテック株式会社 ヨコハマゴム・マリン&エアロスペース株式会社

株式会社落雷抑制システムズ

独立行政法人海洋研究開発機構の事業所

#### 横須賀本部

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15 TEL. 046-866-3811(代表)

#### 横浜研究所

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25 TEL. 045-778-3811 (代表)

#### むつ研究所

〒035-0022 青森県むつ市大字関根字北関根690番地

#### 高知コア研究所

〒783-8502 高知県南国市物部乙200

#### 東京事務所

〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号 富国生命ビル23階

TEL. 03-5157-3900(代表)

TEL. 0980-50-0111(代表)

TEL. 0175-25-3811(代表)

TEL. 088-864-6705 (代表)

国際海洋環境情報センター 〒905-2172 沖縄県名護市字豊原224番地3

(通巻129号)

広報部

広報課

## 房総沖日本海溝

0

### 「江戸っ子1号」が見た深海

2013年11月、無人探査機「江戸っ子1号」の投入・回収実験が房総 半島沖の日本海溝において行われた。「江戸っ子1号」は、東京や千 葉の中小企業が中心となり、大学や海洋研究開発機構 (JAMSTEC) などが加わって開発された。水深4,000mの海域に1機、8,000mの 海域に2機を投入し、すべて回収に成功(『Blue Earth』128号参照)。 搭載された3Dハイビジョンカメラには、魚類やヨコエビの仲間が 映っていた。3Dハイビジョンカメラの映像は専用の眼鏡を使うこ とで立体的に見える。シンカイクサウオの仲間がカメラに近づいて くる様子は圧巻だ。読者の皆さんにもその迫力を少しでも味わって いただきたく、3D映像を立体視用の写真に加工した。立体視に挑 戦してみよう。





シンカイクサウオの仲間とヨコエ ビの仲間。水深7,816mの海域に 投入した4号機による撮影





シンカイクサウオの仲間とヨコエ ビの仲間。水深7,860mの海域に 投入した3号機による撮影





ソコダラの仲間(上)とソコボウ ズの仲間。水深4,090mの海域に 投入した2号機による撮影

江戸っ子1号プロジェクト推進委員会/JAMSTEC You Tubeで動画を公開 http://www.youtube.com/watch?v=lKsJAORvJzs

#### 立体写真の見方

写真を顔に近づけ、右目で右の写真を、左目で 左の写真を見ながら写真をゆっくり離してい く。2枚の写真が3枚に見えてきたら真ん中の写 真だけを見つめると、立体的に見える。2枚の 写真の間に厚紙を立てて、右目で右の写真を、 左目で左の写真を見ることでも立体視できる。



Blue Earth をめぐる

