

Blue Earth

海と地球の情報誌

ISSN 1346-0811
2017年2月発行
隔月年6回発行
第29巻 第1号
(通巻147号)



147

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

「みらい」で南太平洋を縦横断して

海洋地球大変動 を探る

珪藻の休眠孢子から
地球変動と生物進化を読み解きたい

地球シミュレータを
どう動かしているのか！

ムツゴロウ

1 **特集**

「みらい」で南太平洋を縦横断して
海洋地球大変動を探る

18 **Aquarium Gallery**

むつごろう水族館
干潟に生きる——ムツゴロウ

20 **私がIODPで解きたい謎**

**珪藻の休眠孢子から地球変動と
生物進化を読み解きたい**

須藤 斎
名古屋大学 大学院環境学研究所 地球環境科学専攻 准教授

24 **JAMSTEC発イノベーション**

**自然科学と情報科学の融合で
イノベーションを創出**

桑谷 立
地球内部物質循環研究分野 研究員

28 **Marine Science Seminar**

**「地球シミュレータ」を、
どう動かしているのか!**

スーパーコンピュータの運用・管理の現場から

大倉 悟
地球情報基盤センター 情報システム部
基盤システムグループ グループリーダー代理

32 **BE Room**

Information
「Blue Earth」定期購読のご案内

裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**

**新たな海洋鉱物資源調査システムの
海中試験に成功**

「みらい」で南太平洋を縦横断して 海洋地球大変動 を探る

過去1万年間、地球はかつてなく気候の安定した時代だった。その間に、人類社会は大きく発展した。しかし現在、地球温暖化が急速に進行し、生態系が崩壊しつつある、と懸念されている。海は大気中の二酸化炭素 (CO₂) や熱を吸収して気候を安定させる“緩衝材”の役割をしている。1990年代からの海洋観測により、南太平洋は人類活動によって大気に放出されたCO₂を最も多く吸収している海域の1つであることが分かった。ただしアクセスが困難な南太平洋は、最新データの空白域になっている。海洋地球研究船「みらい」は2016年12月末～2017年3月、南太平洋を縦横断する観測航海を行っている。いま、南太平洋で何が起きているのか。

海は地球の気候を安定させる“緩衝材”

取材協力

村田昌彦

地球環境観測
研究開発センター (RCGC)
全球海洋化学・
物理研究グループ
グループリーダー

2017年1月17日、チリ・プエルトモンント入港。
「みらい」南太平洋縦横断観測航海（レグ1）より。
撮影：村田昌彦/RCGC

温暖な気候が1万年間も安定して続いている時代は、過去200万年までさかのぼっても記録が見つからない。しかし、気候を安定させている仕組みについては、よく分かっていない。

およそ11万5000年前に始まり約2万年前まで続いた氷期には、50～100年間に約5～10℃も年平均気温が上下する激しい気候変動が1,000年ほどの周期で繰り返し起きていた記録が、北半球全域で見ついている。また、氷期が終わり温暖化が進んだ時期にも、一時的に急激に気候が寒冷化した記録が残されている。

現在、気候が安定した時代は終わりを告げ、急速な温暖化が始まりつつある。温暖化研究の最新成果をまとめた「気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書」(AR5) によれば、1880～2012年に世界平均地上気温は0.85℃上昇

した。さらに21世紀末には1986～2005年に比べて0.3～4.8℃の上昇が予想されている。

現在の温暖化の原因は、人類活動によって放出されたCO₂などの温室効果ガスである可能性が極めて高い、とAR5では指摘されている。18世紀半ばに始まった産業革命以前の大気中のCO₂濃度は、ほぼ一定で約280ppmvだった。それが現在では、1.4倍の400ppmvに達している。これは少なくとも過去80万年間で例のない高濃度だ。

産業革命以降、人類は炭素換算で5550億トンものCO₂を排出したと推定されている。「ただし、大気中のCO₂や熱の多くを海が吸収しました。海は気候が激変しないように安定させる“緩衝材”として働いているのです」と村田昌彦さんは指摘する。

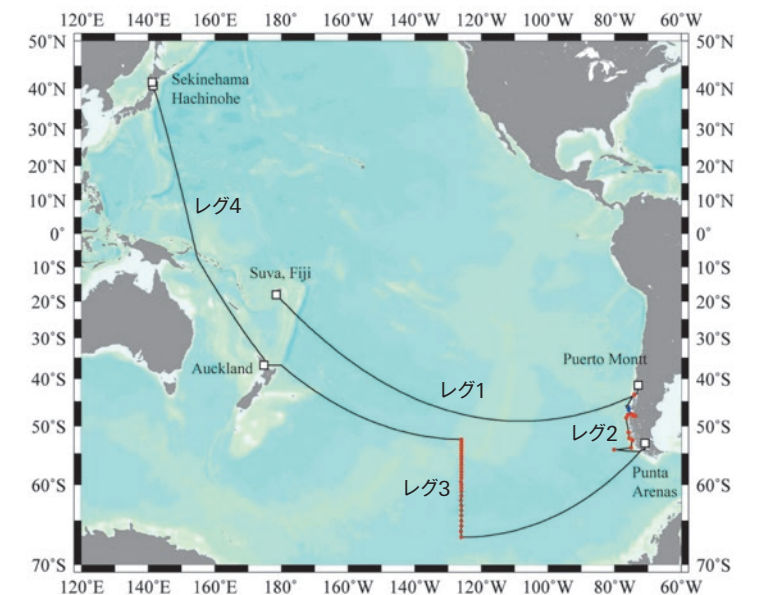
人類が放出したCO₂のうち、陸が30%、海が30%を吸収している。さらに海は熱を蓄える容量

が大気の1,000倍ある。温暖化に伴って地球が新たに蓄えた熱のうち、90%以上は海に吸収されたと推定されている。

海は、今後も緩衝材として十分に機能し、気候を安定させることができるのか？

「大気中のCO₂濃度が400ppmvに達した現在でも、海がCO₂を吸収する能力は大きく、まだ衰えていないと多くの研究者は考えています。しかし、そろそろ吸収能力が弱まり始める可能性がある」と警告する理論家もいます。私たちは、海の観測を繰り返し、CO₂吸収能力など海洋環境に変動があるかどうか確かめています」

そう語る村田さんたちはいま、「みらい」に乗り込み、南太平洋を縦横断して海洋観測を行っている。なぜ南太平洋なのか――



「みらい」南太平洋縦横断の観測海域（2016年12月～2017年3月）

人類が放出したCO₂を吸収する海、その4割は南極海で

取材協力

村田昌彦

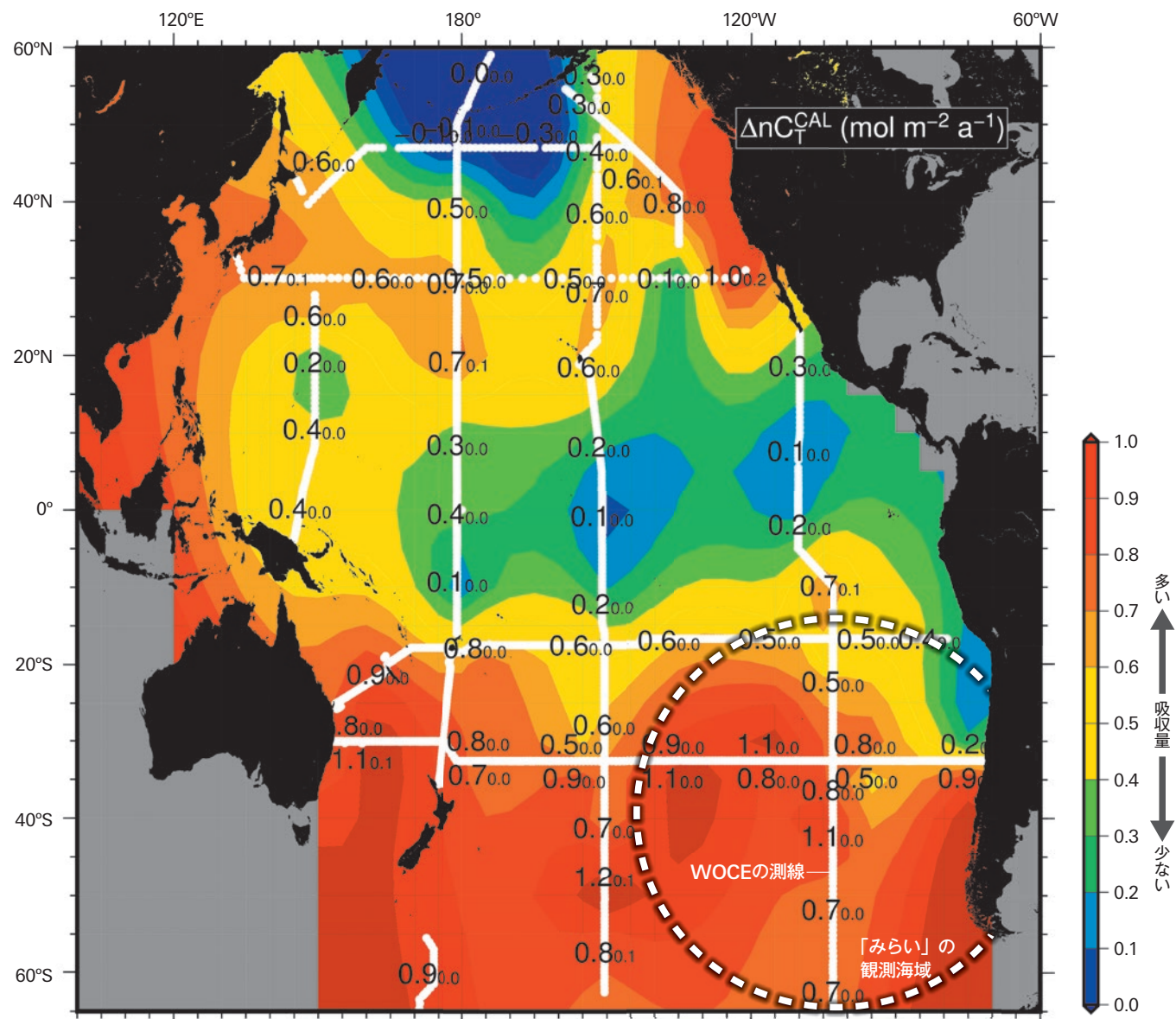
1990年代を中心に、「WOCE（世界海洋循環実験）」と呼ばれる、船舶を使った高精度の海洋観測が行われた。世界中の海に東西・南北に伸びる測線を引き、各国の海洋観測船が海面から深海まで、水温や塩分を計測するとともに、海水を採取して酸素やCO₂などの化学成分を分析した。

さらに2000年から、海面から水深2,000mまでの水温や塩分を計測する自動観測ロボット「アルゴフロート」の投入が始まり、現在では約3,800台が世界中の海で稼働中だ。ただし、2,000m以深の水温・塩分の観測や、海水の化学分析、生物の観測

を行うには、船舶による観測が必要だ。

1990年代のWOCEと同じ測線を再び高い精度で観測して、海洋環境がどれだけ変動しているのかを調べるWOCE再観測プロジェクトが進められている。その観測に大きな貢献をしてきたのが、1997年に就航した世界最大級の研究船「みらい」だ。

「大気比べて海水は暖まりにくく、地球全体で見ると、大気を1℃暖める熱量で、海水温は0.001℃しか上昇しません。高い精度で観測しなければ、海の変化は観測誤差に埋もれてしまいます。水深2,000mを超える深海を、高精度で観測できる研究



海による人為起源CO₂の吸収量

人為起源CO₂を最も吸収している海域の1つを「みらい」で観測する。

Kouketsu et al., 2013

機関は世界でも限られています」と村田さんはいう。

2007年には国際観測プログラム「GO-SHIP」が始まり、アルゴフロートでは測定不可能な海洋深層も含めた全海洋の熱やCO₂（炭素）などの循環や海洋生態系の変化を捉えることを目的とした船舶での観測が続けられている。そのGO-SHIPを、日本では海洋研究開発機構（JAMSTEC）と気象庁が中心となって推進している。

1990年代からの海洋観測により、人為起源CO₂の海洋吸収分のうち、4割を南極海が吸収していることが分かった。「さらに私たちが世界中の海洋観測データを集めて分析したところ、南太平洋が人為起源CO₂を最も吸収している海域の1つであることが分かりました。今回、その海域を『みらい』で重点的に観測することにしました（レグ3）」

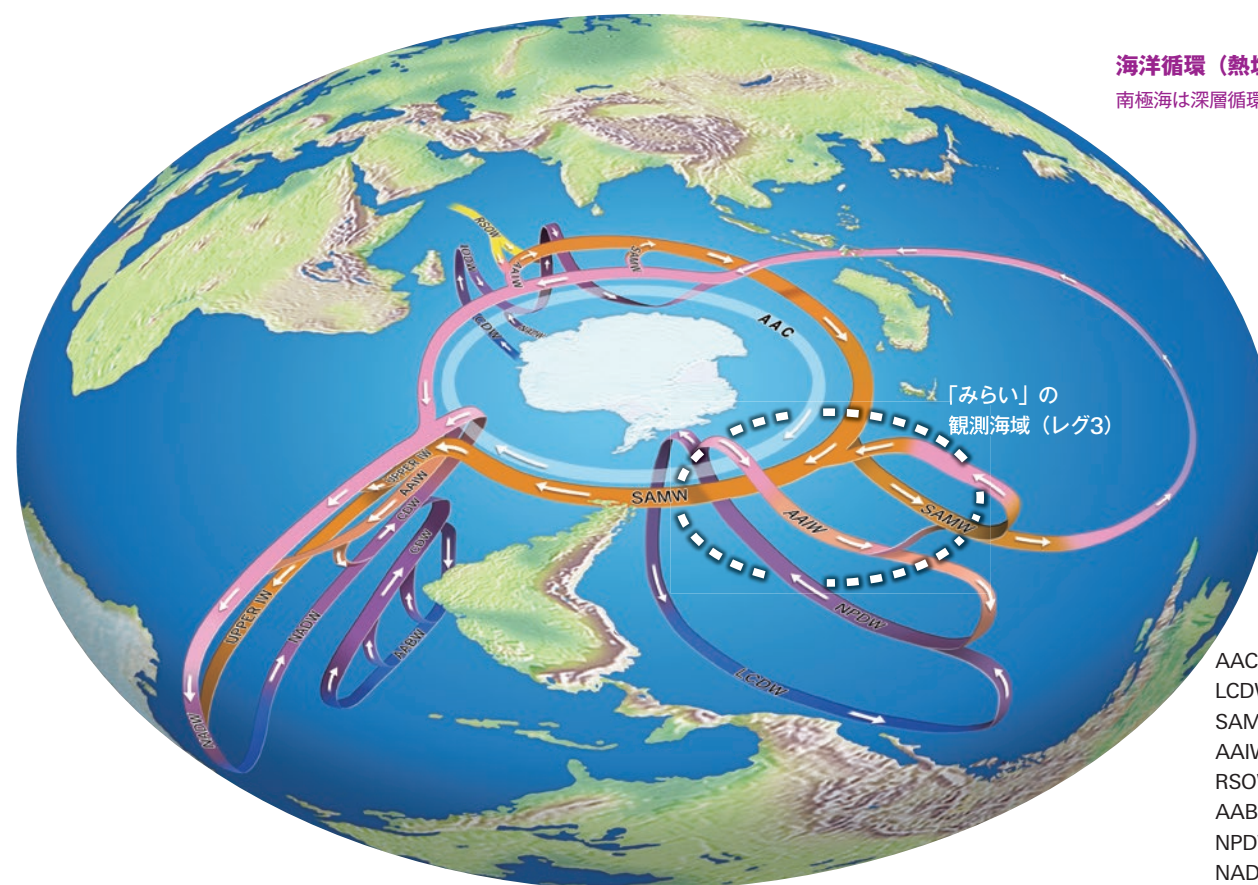
大気中に放出された人為起源CO₂は海の表層に溶け込む。しかし、それだけでは、いずれ海の表層はCO₂の溶け込みの限界に達して、ほとんど吸収できなくなる。冷たく塩分の高い海水は重くなり沈み込んでいく。こうしてCO₂が表層から中層や深層へと運ばれることで、海は大気からCO₂を新たに吸収することができる。これは「物理（溶解）ポンプ」と呼ばれる。

「今回観測する海域では、亜南極モード水（SAMW）や南極中層水（AAIW）などの海洋循環が物理ポンプに関係しています」

高緯度の南極海やグリーンランド沖では、大気が海の熱を奪い取り、冷やされた海水が深層まで達する強い沈み込みが起きている。そうしてできた深層水は世界中の深海を1,000年以上の長い時間をかけて循環している。深層循環の始点であり、人為起源CO₂の多くを吸収することで気候変動にとって重要な南極海だが、先進諸国から遠くアクセスが難しいため、最新データの空白域が多い。

今回の測線（レグ3）をWOCEで観測したのは1992年のことだ。CO₂濃度の変化など、前回の観測から25年間に起きたさまざまな海洋環境の変動を捉えるのだ。「ただし前回の観測データと違いがあったとしても、たまたま今回の測線だけで起きている変化かもしれません。GO-SHIPによるほかの海域での観測やアルゴフロート、人工衛星による観測データやシミュレーション研究と組み合わせる観測データを総合的に評価し、海洋環境変動のシグナルを捉える必要があります」

「私がいま、南極海で最も注目しているのが、氷床の融解が進んでいるかどうかです」と村田さん。南極氷床が融ければ海面水位の上昇が加速する――



海洋循環（熱塩循環）の模式図
南極海は深層循環の始点になっている。

イラスト：加藤愛一

- AAC：南極周極流
- LCDW：下部周極深層水
- SAMW：亜南極モード水
- AAIW：南極中層水
- RSOW：紅海流出水
- AABW：南極底層水
- NPDW：北太平洋深層水
- NADW：北大西洋深層水
- UPPER IW：上部中層水
- IODW：インド洋深層水

南極氷床の大崩壊が始まる？

取材協力

勝又勝郎

RCGC 全球海洋化学・
物理研究グループ
グループリーダー代理

最近、北極の海水が減っているという報道をよく見掛けるが、南極の海水が減っているというニュースはあまり目にしない。「それは、従来の人工衛星の観測により、冬季に南極海を覆う南極の氷の面積が増えていることが分かっているからです。一方で南極や南極海には冬季に海上を覆う季節氷に加え、夏も融けない氷床や棚氷が存在します。21世紀に入り、レーザー高度計や重力場測定装置を搭載した人工衛星が打ち上げられ、南極の棚氷や氷床の厚さが推定されるようになりました。それらの推定値によると、棚氷や氷床が薄くなっている可能性が高いことが分かりました」と勝又勝郎さんは指摘する。

なぜ南極の棚氷や氷床の融解が進んでいるのか。「南緯30～60度付近の海域ではジェット気流による強い西風が吹いています。その風の力によって表層の海水が北へ運ばれます。その分を補充するように、深層から上部周極深層水（UCDW）という暖かい海水が上昇しています。観測により西風が1960年代から強くなっていることが分かっています。それに伴いUCDWの上昇量が増えて棚氷の下面へ流れ込んで氷を融かし、南極の棚氷や氷床の融解が進んでいると考えられています」

特に南太平洋に面する西南極で融解が進行していると推定されている。今回、「みらい」のレグ3ではその沖合を重点的に観測する。

「西南極では大陸棚の張り出しがほかよりも大きく、UCDWの暖かい海水が大陸棚に乗り上げることで、氷床融解が急速に進行している可能性があります。その海底には海山のような突起があり、そこに引っ掛かるようにして氷床がせき止められてい

ます。しかしある臨界点を越えて氷が融けると、せき止められていた氷床が一気に海へ流れ込み、氷床の大崩壊が起きる恐れがあります」

IPCCのAR5で発表された温暖化が最も進む予測シナリオによると、2081～2100年における世界平均海面水位が1986～2005年の基準から45～82cm上昇する。ただしそれには南極氷床の大崩壊は想定されていない。氷床の大崩壊が起きれば、海面水位がさらに上昇して、世界各国の沿岸にある大都市が水没する恐れがある。

そもそも、1960年代から西風が強くなっているのはなぜか。「成層圏のオゾンホールやCO₂などの温室効果ガスの増加の影響で、太陽光を受けて大気に蓄積される熱量の分布が変わり、それが大気の圧力差を大きくして西風が強くなっているというシミュレーション研究があります。成層圏のオゾン層の影響が、風を介して海の深層まで及んでいる可能性があるのです。オゾン層を破壊するフロン物

質の規制でオゾン層は回復傾向にありますが、CO₂など温室効果ガスの増加の影響で西風が強い傾向は続くというシミュレーション予測が多く、南極氷床の融解も続く可能性があります」

強い西風によりUCDWの上昇量が増えれば、大気から海が吸収するCO₂量は低下すると考えられる。UCDWはCO₂濃度が高く、それが表層に運ばれることで大気と海水のCO₂濃度差が縮まり、大気から海へ吸収されにくくなるからだ。また、氷が融けた淡水が表層に流れ込み塩分が下がれば、海水が重くならず沈み込みが弱くなる。すると大気から吸収したCO₂を表層から中層・深層へ運ぶ物理ポンプの働きも弱まると考えられる。

「現在、観測データからはっきり分かっていることは、西風が強くなっていることに加え、南極海の海底近くの低温の海水（底層水）の体積が減少していること、底層水の塩分が低下していることです。それらが起きているのが、沈み込みが弱くなっ

たからかどうかは分かっていません。沈み込みの観測は難しく、シミュレーションでも数日という短い時間スケールで起きる沈み込みを再現することは苦手です。また氷床の融解についても、氷床の厚さを直接測ることは難しく、シミュレーションでも氷床や海水の融解を再現することが苦手です」

勝又さんたちは「みらい」航海により、氷床融解や沈み込みに大きな影響を与える西南極沖合のUCDWの水温などを高精度に計測して、前回の観測から25年間に起きた変化を捉えようとしている。

人為起源CO₂を最も吸収している海域の1つである南太平洋で沈み込みが弱まり、物理ポンプの能力が低下すれば、大気へのCO₂蓄積がさらに進み地球温暖化が加速する可能性がある。

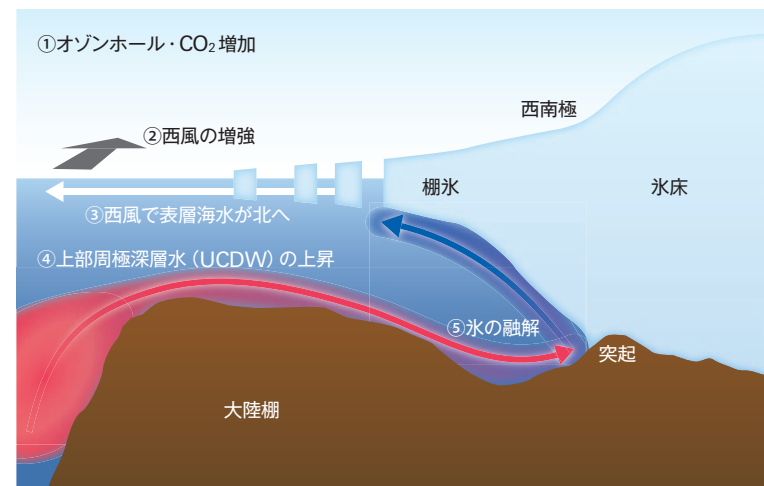
ただし、海がCO₂を吸収する仕組みには、物理ポンプのほかに生物が関与する「生物ポンプ」がある。今回の「みらい」では、南太平洋の生物ポンプの仕組みを解明するための観測も行われる――

南極海の海水。
2012～13年、「みらい」西部太平洋・南大洋の観測航海より。
撮影：土居知将/RCGC



西南極で氷床融解が進む仕組み（仮説）

①成層圏のオゾンホールや大気中のCO₂増加により、②西風が強くなっている。③その西風とコリオリ力で表層海水が北へ移動し、④深層から暖かい上部周極深層水（UCDW）が大陸棚に乗り上げて、⑤棚氷の下面を融かしていると考えられる。臨界点を越えて氷が融けると、海底の突起でせき止められている氷床が一気に海に流れ込み、大崩壊が起きる恐れがある。



温暖化で生物ポンプの働きはどのように変わるのか?

取材協力

吉川知里

生物地球化学研究分野
技術研究員

横川太一

海洋生命工学
研究開発センター
生命機能研究グループ
研究員

海洋表層の植物プランクトンは、光合成によって、海水に溶け込んだCO₂を材料に有機物をつくる。その植物プランクトンの排せつ物や死骸がマリンスノーなどとして中層・深層へ沈み込むことで、CO₂が大気から長期間隔離される。それは「生物ポンプ」と呼ばれる。

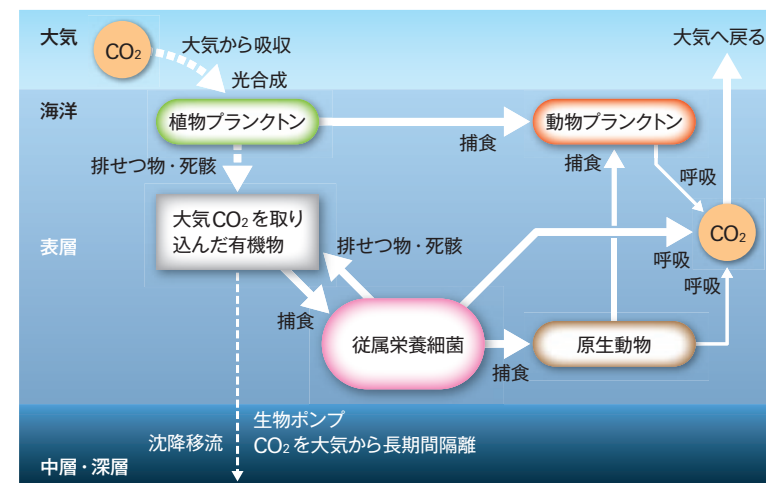
ただし、生物ポンプで隔離されるのは、植物プランクトンが取り込んだCO₂の1割程度だ。植物がつくった有機物は動物プランクトンや細菌（従属栄養細菌）、原生動物など微生物の餌となり、それらの微生物の呼吸によって再びCO₂として大気へ戻

るからだ。

生物ポンプの仕組みを解明するには、それぞれの海域に、どのような種類の微生物がどれだけの数いるのかを調べる必要がある。「海水中の微生物の数を計測できるようになったのは1970年代半ば、DNAの分析から種類を推定できるようになったのは1990年代後半以降です」と海洋微生物が専門の横川太一さんは解説する。「生物ポンプの強弱を解明するには、微生物がやりとりする炭素や窒素などの物質循環を調べる必要もあります」と海洋化学が専門の吉川知里さんは指摘する。

JAMSTECでは、微生物と化学の専門家が「みらい」に乗り込み、表層から深層で採取した海水から微生物の生態や物質循環を調べる研究を2014年から行っている。「これまで日本列島に近い北西太平洋や、北太平洋、インド洋で観測を行いました。航海が終わるころには疲れ果てて“しかばね”のようになる大変な作業です（笑）」。そう語る横川さんや吉川さんたちの目標は、温暖化が進行したときに、生物ポンプの働きがどのように変化するかを予想できるようにすることだ。「いずれはシミュレーションの研究者と共同研究を行い、観測から解明した生物ポンプの仕組みを予測モデルに組み込んでいくつもりです」と横川さん。

温暖化により海水温が上がれば、植物プランクトンが活性化し、光合成によって、より多くのCO₂を取り込んで有機物をつくるようになると思われる。ただし、水温が上がれば、その有機物を食べ



生物ポンプの仕組み

大気から海へ吸収されたCO₂を材料に、表層の植物プランクトンが光合成により有機物をつくる。その植物プランクトンの排せつ物や死骸がマリンスノーなどとして中層・深層へ沈降することで、CO₂が大気から長期間、隔離される（生物ポンプ）。ただし、植物プランクトンがCO₂からつくった有機物の多くは、従属栄養細菌などの餌となり、それら微生物の呼吸により有機物がCO₂に変換されて、再び大気へ戻る。

る微生物も活性化して、呼吸によってCO₂を大気へ戻す量も増えるはずだ。生物ポンプの働きは、温暖化に比例して強まるとは限らないのだ。

「生物ポンプの働きは、細菌が鍵を握ります。海中の細菌は1ミリリットルあたり約1万個と、微生物のなかで最大の勢力を占めるからです。細菌も種類によって最も活性が高まる温度が異なります。従って、それぞれの海域で、どのような種類の細菌がどれだけの数いるのかを知り、それぞれの種類がどのような環境で最も活性化するかを調べる必要があります」と横川さん。

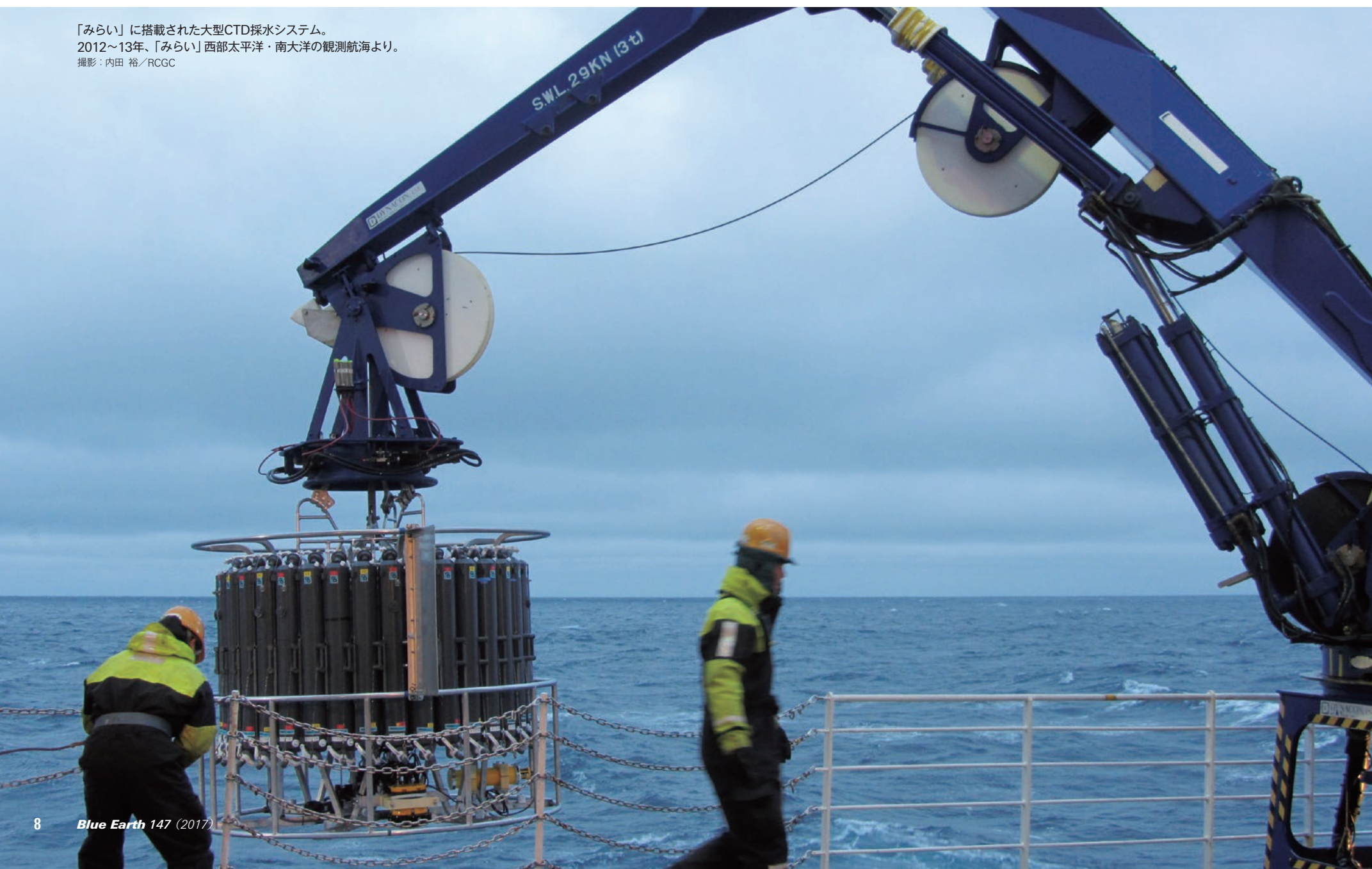
「私は窒素に注目して物質循環を調べています」と吉川さんはいう。「窒素の量によって植物プランクトンや微生物の活性は左右され、生物ポンプの働きも大きく影響を受けるからです。また、微生物が窒素を利用する過程で、亜酸化窒素（N₂O）が発生して大気へ放出されます。N₂OはCO₂に比べて微量ですが、約300倍の温室効果を持ちます」

温暖化で表層の水温が高くなれば、表層と中層・深層の海水が混ぜられる鉛直混合は起きにくくなる。また前述のように、もし南極氷床の融解が進行すれば、人為起源CO₂の多くを吸収している南極海において、表層の淡水化で海水が軽くなることで鉛直混合はさらに起きにくくなる。

「鉛直混合が起きなければ、中層・深層から栄養塩が表層に運ばれなくなり、植物プランクトンの活性は大幅に低下するはずだ。温暖化で生物ポンプの働きがどのように変化するかは、物理・化学・微生物も含む生物学的要因を考慮に入れて予測する必要があります」と吉川さんは指摘する。

人為起源CO₂の増加は地球温暖化だけでなく、海洋酸性化を引き起こし、海の生態系に大きな影響を与え始めている。今回「みらい」で観測するチリ沖は、海洋酸性化が最も進行している海域の1つだ――

「みらい」に搭載された大型CTD採水システム。
2012～13年、「みらい」西部太平洋・南大洋の観測航海より。
撮影：内田 裕/RCGC

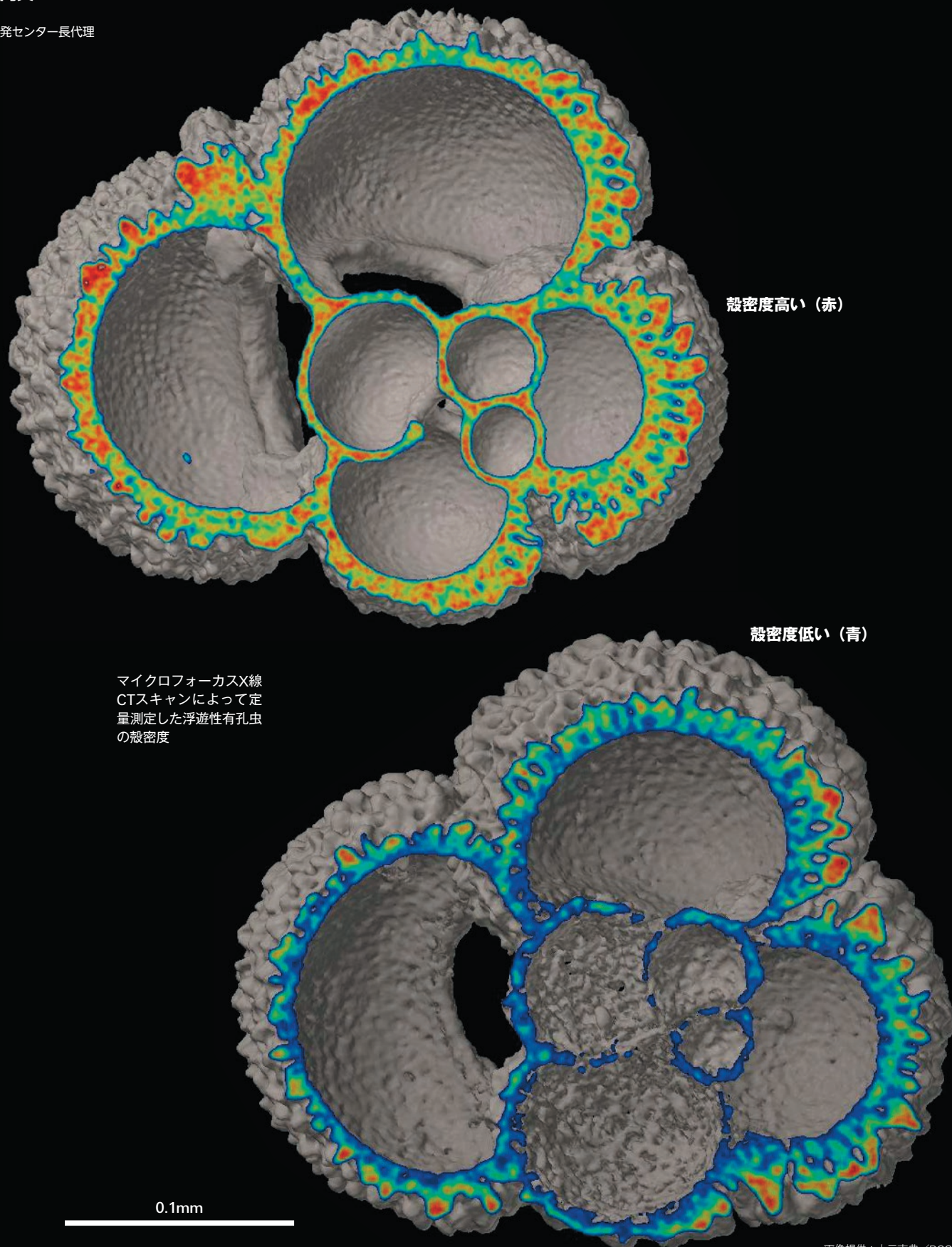


海洋酸性化の影響を定量測定して、 現在と過去の環境変動を探る

取材協力

原田尚美

RCGC
研究開発センター長代理



殻密度高い (赤)

殻密度低い (青)

マイクロフォーカスX線
CTスキャンによって定
量測定した浮遊性有孔虫
の殻密度

0.1mm

画像提供：木元克典/RCGC

「みらい」航海のレグ2で重点的に観測するチリ沖は、深層から栄養塩を豊富に含んだ海水が沿岸に湧昇してくるため、世界有数の生物生産が活発な海域となっている。「深層から表層へ運ばれる海水は高濃度のCO₂を含みます。さらにこの海域は水温が低いので大気から吸収するCO₂量も多くなり、海洋酸性化が深刻になってきています」と原田尚美さんは指摘する。

海に吸収されたCO₂が水と反応することで水素イオンが増加し、海水が酸性側に傾く海洋酸性化が起きる。すると炭酸イオン濃度が低下して炭酸塩の殻や骨格がつくりにくくなったり溶けたりして、浮遊性有孔虫など炭酸塩の殻を持つ生物の生存が難しくなる。食物連鎖の底辺を支える浮遊性有孔虫などの動物プランクトンが減ると、海の生態系全体に大きな影響を与える恐れがある。「そこで、海の生態系の変動を監視して、保全することが人類共通の課題になっています」

ただしこれまで、海洋酸性化の生物への影響を探るために、浮遊性有孔虫など微小生物の殻を定量的に測定することは技術的に難しかった。2010年、RCGCの木元克典 主任技術研究員たちは東北大学との共同研究に着手し、現在、マイクロフォーカスX線CTスキャン (MXCT) により骨殻容積を0.8μmの空間分解能で測定する技術を開発することに成功、ICP-MS (誘導結合プラズマ質量分析計) で求める炭酸塩量と合わせて骨殻の密度を定量測定する分析法を確立した。

「私たちは2003年と2009年にも、『みらい』でチリ沖の観測を行いました。今回初めて、MXCTによる定量測定技術を用いて、海洋酸性化が炭酸塩殻を持つ生物へ及ぼす影響を調べることができます」

そう語る原田さんたちは、現在だけでなく過去に起きた海洋酸性化と生物の応答についても調べる計画だ。「もともとこのMXCT法は、過去の炭酸塩循環を調べる目的で開発に着手しました。海底堆積物を採取し、そのなかに含まれる浮遊性有孔虫の死骸などの殻密度を測定します。2003年と2009年の『みらい』航海では、荒天のため目的の外洋域に到達できず、フィヨルド近傍で過去1万年分くらいの堆積物しか採取できませんでした。今回はぜひ南太平洋において過去2万年より古い時代に相当する堆積物を採取したいと思います」

約2万年前、寒冷な氷期が終わり、温暖期に移行した。「氷期から、約1万年前から現在に至る完新世に移行する退氷期に、何度か急激な温暖化が生じ、その温暖化速度は、現在に匹敵すると考えられています。気温と大気中のCO₂濃度は連動して増

減することが知られています。気温が上がると海水温も上昇し、海洋のCO₂吸収能力が低下して大気中のCO₂濃度が上昇するのではないかと推測されています。当時の大気中のCO₂濃度の絶対値は現在と比べて低いのですが、温暖化に連動してCO₂濃度の上昇速度も速く、海洋酸性化が急速に進行した可能性があります」

退氷期に何が起きたのかを知ることで、現在進行している温暖化により将来起きることを予測するためのヒントが得られると期待される。「飼育実験などの結果、海水中の炭酸イオン濃度の低下に素早く応答して浮遊性有孔虫の殻密度も低下することが分かってきました。殻が溶けることで海洋酸性化は緩和されます。炭酸塩殻を持つ生物は緩衝材としての役割を持つのです。堆積物中の殻の炭酸塩に含まれる酸素同位体比やマグネシウムとカルシウムの比の分析から、当時、その殻を持つ生物が生息していた深度の海水温がわかります。過去の温暖化で水温が上昇したとき、浮遊性有孔虫の殻密度が低下していれば、海洋循環の変化や大気中CO₂濃度上昇の結果もたらされた海水中の炭酸イオン濃度の低下量を知ることにつながり、さらには炭酸塩殻を持つ生物が緩衝材としての役割をどれだけ果たしていたのか定量的に見積もることができるのではないか、と考えています」

浮遊性有孔虫などの骨殻密度を定量測定することで、現在進行中の海洋酸性化による生物への影響を評価できるだけでなく、過去の海水中の炭酸イオン濃度の変化や、炭酸塩殻を持つ生物の緩衝材としての役割の履歴も定量的に推定できる可能性があるのだ。まったく新しい手法によって、これまでまったく分かっていなかった炭酸塩循環の解明につながるかもしれない。ただし、そのためには骨殻密度を定量測定する技術が世界的に普及する必要がある、と原田さんは訴える。

「私たちは最近、海洋酸性化の進行が深刻な北極海での観測に力を入れており、測定すべき試料数は増すばかりです。さらに世界の研究機関から試料の分析やJAMSTECに滞在して分析法を学びたいという学生や若手研究者の依頼が増えています。私たちのMXCT装置1台ではなかなか手に負えない状況ですが、世界の研究機関からの分析依頼や若手の技術指導を通じて、将来、この手法の世界標準化を目指すとともに、全球の海洋酸性化の定量評価に貢献できたらと考えています」

海の波しぶきが雲をつくる？

取材協力

竹谷文一

地球表層物質循環研究分野
主任研究員

「海洋から放出されたエアロゾル粒子（浮遊性粒子）が上空まで運ばれ雲をつくる“種”（雲核）になることが知られていますが、その過程に関しては未解明な部分があります。たとえば、エアロゾル粒子の成分、大きさ、またその場の環境が、雲核になるかどうかに関与すると思われる場合があります。私たちの研究グループでは、海洋から放出されるエアロゾル粒子の雲形成過程における役割を、実際の海洋大気観測により詳細に理解することを目指しています」と竹谷文一さんは語る。

これまで海洋生物由来のガスが海から大気へ放出され、太陽光を浴びて化学反応を起こし、液状のエアロゾル粒子となって上空に運ばれて雲核になると考えられてきた。さらに近年、海洋から直接放出される生物由来のエアロゾル粒子が雲形成に

寄与する、という仮説も注目を集めている。

今回、「みらい」レグ3で観測する南太平洋の南緯30～60度付近は、強風が吹き、海が荒れて大きな波しぶきが立つことが多い。さらに、陸から遠いため、鉱物粒子や人間活動によって排出されたエアロゾル粒子の影響が小さいと予想され、海から

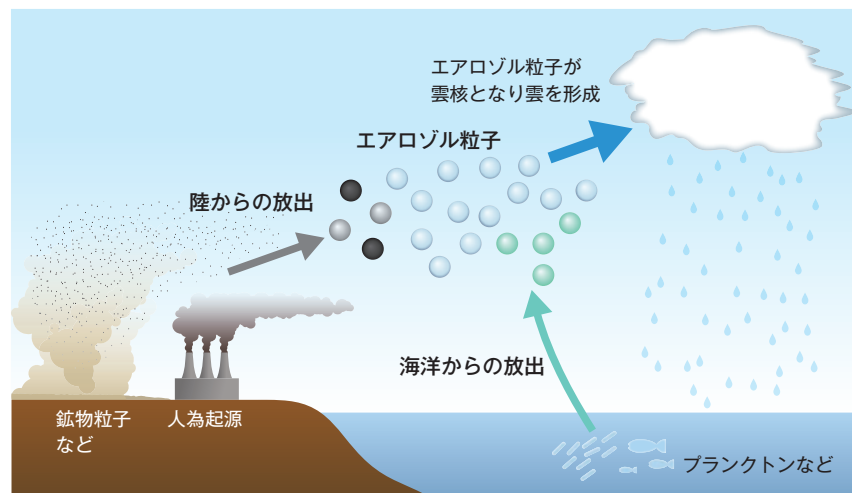
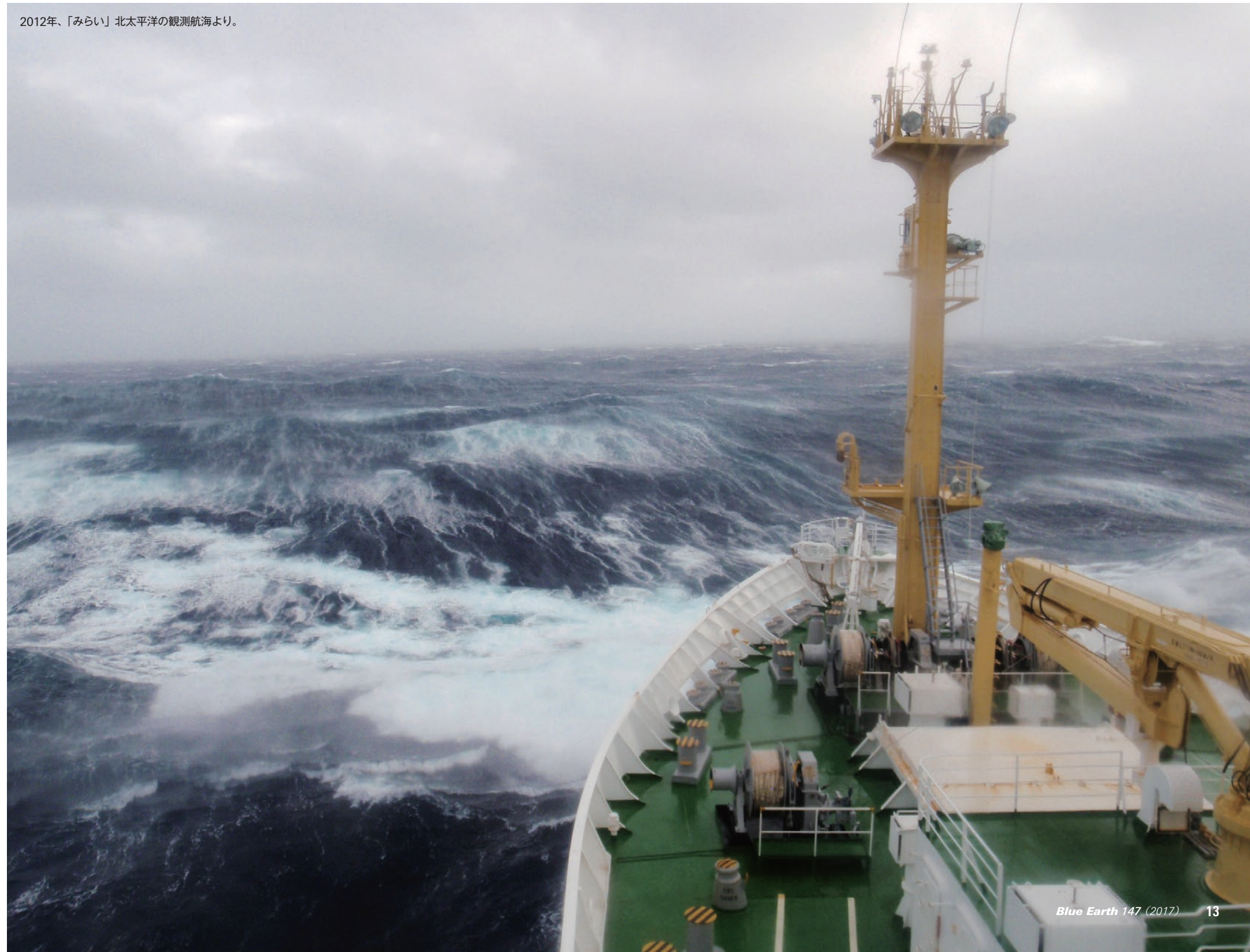
放出されたエアロゾル粒子が雲形成過程にどのように寄与しているのかを探るには最適な海域と考えられる。

「船上の装置でエアロゾル粒子を捉えて、その成分や大きさ、量を調べます。さらにその試料を持ち帰り、どの温度で雲核になるかを調べる実験を、国立極地研究所と共同で実施する計画です。その実験により、エアロゾル粒子に含まれるどの成分が雲核のなりやすさを左右しているのか突き止めたいと思います」

研究グループの大きな目標は、海洋から発生するエアロゾル粒子の研究により雲ができる過程の一端を明らかにして、気候変動予測の精度向上に貢献することだ。「そのために私たちは、今後も定期的に海の現場で観測を続け、海洋から発生するエアロゾル粒子の成分や量の変化を捉えていきたいと思っています」

今回の「みらい」航海では、気候変動だけでなく、海底下を調査して、地震や火山などの地殻変動に関する研究も行われる――

2012年、「みらい」北太平洋の観測航海より。

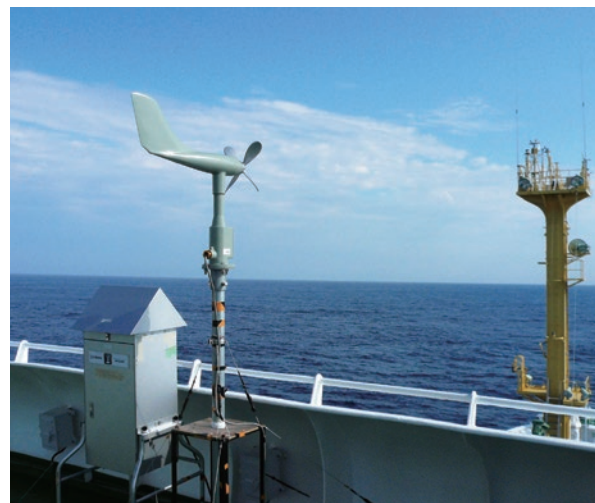


エアロゾル粒子が雲をつくる

陸や海から発生するエアロゾル粒子が上空で冷やされると周りの水蒸気が凝結して雲核（凝結核）が形成される。また、固体の氷なども雲核（氷晶核）を形成し、これらが成長して雲となる。エアロゾル粒子が雲核になるかどうかは、エアロゾル粒子の成分、大きさ、さらにはその場の環境によって異なる。

「みらい」船上に設置されたエアロゾル粒子観測装置「ハイボリュームエアサンプラー」

船からの煙を吸い込まないように、風向計で風の向きをモニターして装置のオン・オフを行う。



チリ沖で巨大地震と火山活動の謎に迫る

取材協力

阿部なつ江

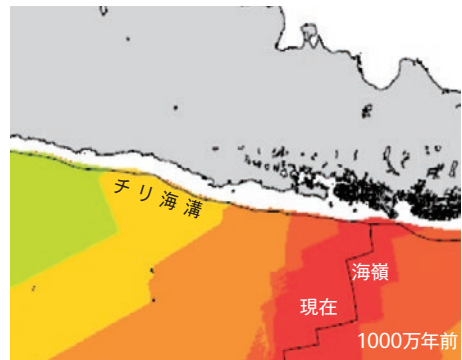
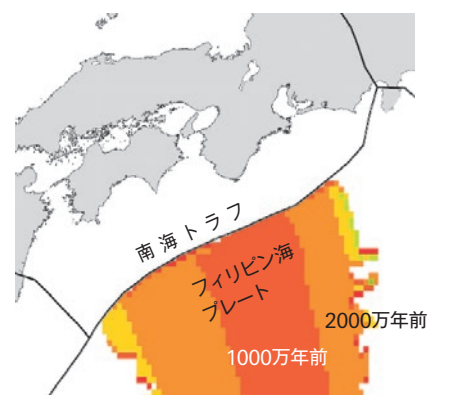
海洋掘削科学
研究開発センター (ODS)
海洋・地球リソスフェア
研究グループ
主任技術研究員

チリ沖では1960年、マグニチュード (M) 9.5という観測史上最大のチリ地震が発生、それに伴う津波が太平洋を横断して日本にも到達した。さらに2010年には、M8.8の巨大地震も発生。それら巨大地震の前後で、火山活動の活発化も観測されている。「地震や火山活動の研究で重要なチリ沖ですが、海底地形などのデータが日本や北中米と比べて非常に少ない、観測の希薄域になっています。私たちは2009年に続いて今回2017年と2019年に、この海域の調査を行います」と阿部なつ江さん。

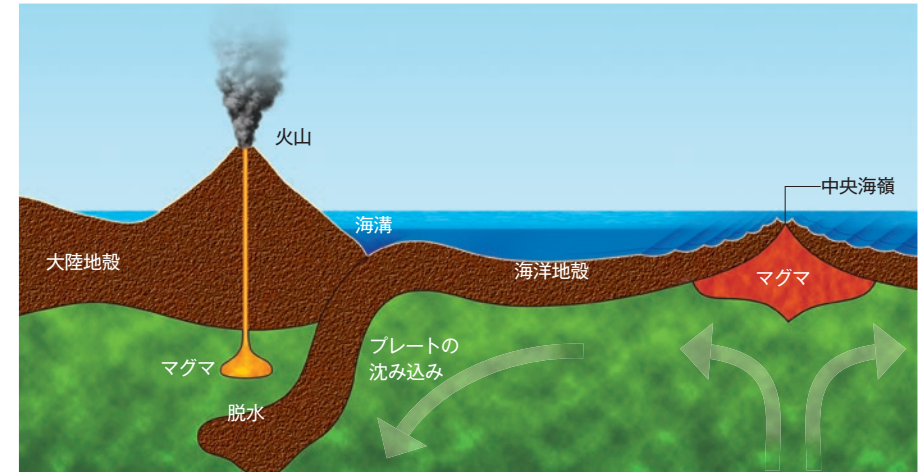
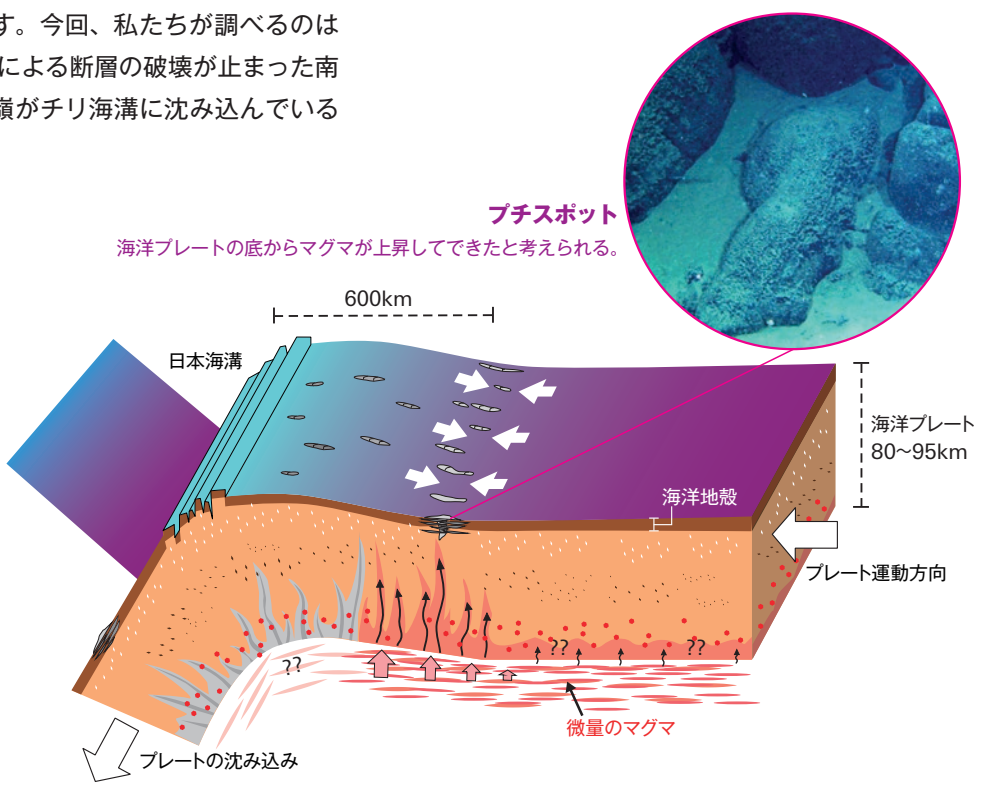
地球の表層は、十数枚のかたい岩板であるプレートで覆われている。海洋プレートは中央海嶺で生まれ、移動し、やがて海溝で地球内部へ沈み込む。「1960年や2010年に起きた巨大地震はチリ海溝で発生したものです。今回、私たちが調べるのは1960年のチリ地震による断層の破壊が止まった南端で、活動中の海嶺がチリ海溝に沈み込んでいる

場所です。そのような場所は、現在の地球上ではチリ海溝ですが、西南日本沖の南海トラフでも約1000万年前まで、活動中の海嶺が沈み込んでいたと推定されています」

南海トラフにはフィリピン海プレートが沈み込み、M8クラスの地震が100~150年ほどの周期で繰り返し起きてきた。今後30年以内に南海トラフでM8~9クラスの地震が起きる確率は70%程度だと予測されている。「南海トラフの地震活動や、西南日本の陸地形成過程を理解するには、かつての海嶺がどのように沈み込んでいるのかを知ることが重要だと考えられますが、それを直接、見るこ



南海トラフとチリ海溝
チリ海溝には活動中の海嶺が沈み込んでいる。南海トラフでも1000万年前まで、活動中の海嶺が沈み込んでいたと推定されている。



地球の内部構造 イラスト：吉原成行

はできません。そこで、海嶺が現在沈み込んでいるチリ海溝を調べて南海トラフの理解に役立てることが、今回の航海の目的の1つです」

日本海溝で起きる地震の理解にもチリ海溝の調査が参考になる。日本海溝では1896年に明治三陸地震 (M8.5) が発生。さらに37年後の1933年、昭和三陸地震 (M8.1) が発生した。昭和三陸地震は太平洋プレートが日本海溝に沈み込む手前の「アウターライズ」と呼ばれる領域で起きたと推定されている。2011年に起きた東北地方太平洋沖地震の後、再びアウターライズで地震が起きる恐れがあると指摘されている。「東北大学の平野直人 准教授を中心とする私たちの研究グループは、昭和三陸地震の震源域で、ブチスポットという新しいタイプの海底火山を2003年に発見しました」

それは高さが100m、直径1kmほどの丘のようなサイズだ。ブチスポット火山は、厚さ100kmほどの海洋プレートの下にあるマグマがプレートの割れ目を通して上昇してできたと考えられる。「ブチスポットがある領域は構造的に弱く、アウターライズ地震とも関係しているかもしれません。平野准教授を中心とする私たちの研究グループは、三陸沖以外のトンガ沖やインドネシア沖 (スンダ海溝)、さらにチリ沖でもブチスポットを発見しました。今回、調査する海域でも、さらにブチスポットを調べたいと思います」

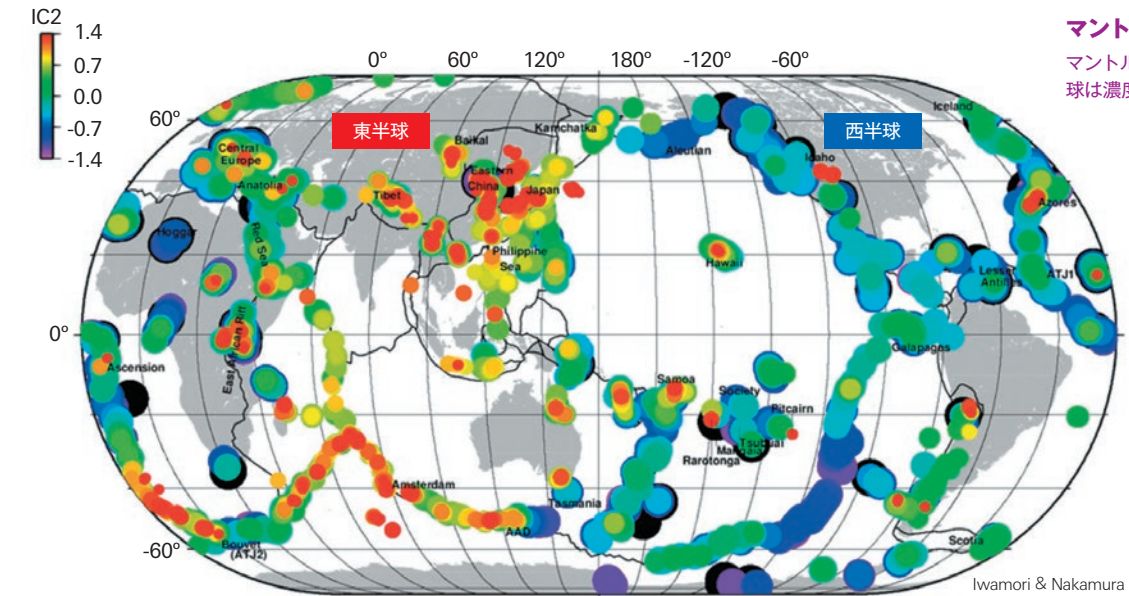
プレートの沈み込みは火山とも関係している。プレートの沈み込みに伴い脱水が起きて地球内部に水が供給されると、その場のマンテル (岩石) が溶けてマグマとなり、それが上昇して火山をつくると考えられている。しかしチリ海溝や日本海溝の沈み

込みに伴う火山帯はあるが、南海トラフがある四国などには活動的な火山帯がない。それは、四国の下では、沈み込んだ海洋プレートの深度が浅いなどの原因で恐らく脱水が起こらず、火山形成に十分なマグマができないからだと推定されている。

「さらに堆積物にも違いがあります。南海トラフでは、砂の堆積層が沈み込んでいます。一方、チリ海溝や日本海溝では、氷河で運ばれた非常に細かい泥や、プランクトンの死骸などが降り積もった泥の堆積物が沈み込んでいます。砂よりも泥の堆積層の方が地球内部に水をより多く供給し、マグマがたくさんつくられると考えられます。それが、火山帯ができる要因の1つかもしれません。生物活動と火山形成は関連している可能性があるのです。今回の航海では、チリ海溝に沈み込む堆積物を採取して分析して、火山との関係も探っていく計画です」

JAMSTEC 地球内部物質循環研究分野の岩森光 分野長たちは2015年、マンテルの化学組成が、地球の東と西の半球で分かれることを明らかにした。かつて東半球に超大陸があり、その下にプレートが沈み込んで水などを供給したことにより、マンテル組成に違いが生じたと考えられている。「マンテル組成以外にも、東西の半球でさまざまな違いが見られます。たとえば、同じ太平洋沿岸の沈み込み帯でも、東半球では日本列島 (島弧) と日本海 (背弧海盆) のような地形が見られますが、西半球にある南北アメリカ大陸には見られません。東西半球の境界は、チリ沖を通過していると考えられています。将来の航海では、その検証を進めます」

そう語る阿部さんには、チリ沖で検証したいことが、さらにある。気候変動と海嶺のマグマ活動が連動しているという仮説だ――



マンテル組成の東西半球構造
マンテル中の水溶液濃集成分の濃度。東半球は濃度が高く (赤)、西半球は低い (青)。

Iwamori & Nakamura (2015) Gondwana Res.

気候変動と海嶺のマグマ活動が連動している？

取材協力

阿部なつ江

2017年、「みらい」南太平洋縦横断観測航海（レグ2）より。
撮影：阿部なつ江/ODS

気候変動と海嶺のマグマ活動が連動しているとはどういうことか？ その鍵は、気候変動によって海面水位が変わることにある。

地球の気候は、地球の自転軸の傾きや公転周期などの変動により、太陽光から受ける日射量が周期的に変化するミランコビッチ・サイクルにより、氷期と間氷期が繰り返されてきた。

寒冷な氷期には、陸上に氷床が広がり、海面水位が下がる。海嶺ではマグマがつくられ、マグマが固まって海洋地殻が形成される。海嶺でできるマグマの量は、海嶺の上にある海水の水圧によって変わる。

海面水位が下がり水圧が低くなるほど、海嶺でつくられるマグマの量は増える。すると、厚い海洋地殻が形成される。逆に、温暖な間氷期には、陸上の氷床が融けて海面水位が高くなる。水圧は高くなりマグマの量は減る。すると、薄い海洋地殻しか形成されない。

「アメリカやヨーロッパの研究者たちが2015年、ミランコビッチ・サイクルに連動して海嶺でつくられる海洋地殻の厚さが1万年より短い時間スケールで変動しているという研究を発表しました。海嶺や海洋地殻のような固体地球の変動と、海洋や気候

の変動が、そのような短いタイムスケールで連動することはないかと思っていましたので、「これは面白い！ぜひ検証してみたい」と思いました」と阿部さん。

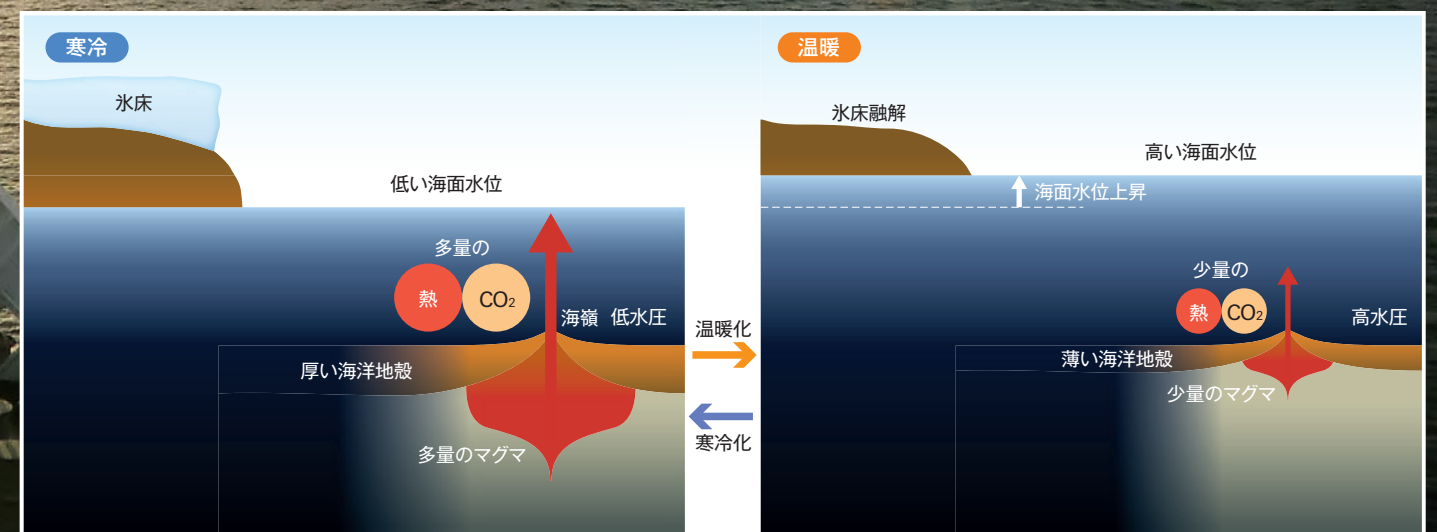
「しかし、その研究はあまり話題になっていません」と続ける。「既存の研究分野には収まらない境界分野の研究で、検証が難しいからかもしれません。固体地球の研究者と、ミランコビッチ・サイクルなど古気候の研究者は学会が分かれていて、あまり交流がないことも原因でしょう」

海嶺ではマグマ活動に伴い熱やCO₂が海洋に供給される。「気候が寒冷化すると海面水位が下がり海嶺でのマグマ活動が盛んになり、たくさんの熱やCO₂が供給されて温暖化に働く。温暖化が進めば、海面水位が高くなり海嶺でのマグマ活動は抑制されて、熱やCO₂の供給が減る。すなわち、海嶺におけるマグマ活動と海面水位の変動、気候変動が連動している可能性があります」と阿部さんは指摘する。

そのような仮説を検証できる研究機関は世界でも限られている、と阿部さんは続ける。「JAMSTECには固体地球や気候、海洋、気候モデルの研究者が集結しています。古気候の専門家の原田尚美さんや地下構造探査の専門家にこの仮説を紹介したところ、とても興味を持ってくれました。JAMSTECの地下構造探査の技術を用いれば、海嶺付近の海洋地殻の厚さを数百mの解像度で分析できます。海洋地殻が高速で拡大している海嶺があるチリ沖で、ぜひ仮説を検証したいですね」

JAMSTECでは、さまざまな分野の研究者が連携して海の現場で観測を行い、固体地球、海洋、気候、生物の相互作用を理解することで海洋地球大変動のメカニズムを解明し、変動のシグナルをいち早く捉えることを目指している。

BE



気候変動と海嶺のマグマ活動が連動する仕組み（仮説）の概念図



ムツゴロウは成魚になると全長17～18cmほどにもなる。ムツゴロウの生息地に細かくてやわらかい潟土は欠かせない。その粒径は0.03mm以下といわれる。大きな粒の土では、体が傷つき、成育することができないのだ。



ムツゴロウの寿命は6～7年。水族館では定期的に新しい個体を補充していく必要があるが、ムツゴロウの繊細な体を傷つけないための「むつほり」「たかっほ」という伝統的な漁を行う人もいまではほとんどいなくなり、手に入りにくい。



直径5mの国内最大級の干潟水槽。600匹ほどの生きものがこの水槽で暮らしている。



むつごろう水族館の外観は、ムツゴロウの姿をしている。ムツゴロウは有明海のシンボリックな存在だ。



ムツゴロウは11月末から3月中旬までの冬のほとんどを生息孔のなかだけで過ごす。1年目の小さいムツゴロウは、深い穴を掘ることができず越冬が難しかった。それが温暖化によって、冬を越せる確率が上がってきているという。



自然界では、ムツゴロウは干潟に穴を掘って暮らしている。暖かい季節、干潮時になると外に出てきて活動し、満潮時には生息孔と呼ばれる穴へ戻る。成魚になれば、1mもの深さの生息孔を掘る。

ここ、むつごろう水族館の干潟水槽では、開館時間を干潮に、閉館時間になると満潮になるよう水の量を調整している。直径5mの干潟水槽は、この水族館の目玉施設。ムツゴロウのほかに、同じハゼ科の水陸両生魚であるトビハゼやカニのシオマネキなど、総勢600匹ほどの大所帯で所狭しと暮らしている。

なかでもムツゴロウたちは、とっても臆病だ。魚類はそもそ

も哺乳類のように人慣れしないが、ムツゴロウたちは魚類のなかでもかなりの内気に思える。水族館で飼い始めた当初、ムツゴロウは生息孔に潜ったきり。餌を食べに出てくることさえ、ほとんどなかったのだ。

自然界のムツゴロウは珪藻類のプランクトンを食べている。むつごろう水族館では、佐賀の水産試験場が開発した餌を導入した。川の藻で育つアユ用の餌にオキアミを混ぜてミンチにし、岩などに塗っておく。ムツゴロウも次第に水族館の環境に慣れてきたのか、餌を食べに顔を出すようになっていった。

通常、ムツゴロウは雌雄ともに1m²ほどの縄張りを持つ。繁殖期になれば雄は自分の縄張りで20cmほどのジャンプを繰り返

返す求愛ダンスを行う。水族館ではムツゴロウたちが縄張りを持たずに暮らしているためだろうか、繁殖にはまだ成功していない。それ故、水族館では定期的に新たなムツゴロウを手に入れなければならない。

ムツゴロウが生息するためには、阿蘇山の火山灰からできた粒子が細かくやわらかい潟土が必要だ。ムツゴロウが日本では有明海と八代海にしか生息していないのは、粒子の細かい潟土がそれらの海にしかないからだと考えられている。

粒子が細かい潟土に海水の組み合わせると、水はよどみやすく管理がとても難しそうだが、実はムツゴロウが大事な役目を果たしているため、それほど大変ではない。ムツゴロ

ウたちが深い生息孔をいくつも掘ってくれることで、水槽の底にある潟土にまで酸素が十分に届き、潟土が腐ることなく保たれる。ムツゴロウは干潟の水質浄化も担っていたのだ。

開館時間、干潟水槽のムツゴロウたちが生息孔からひよいと顔を出す。上を向いた2つの目は、とても愛嬌がある。 **BE**

取材協力：本間健夫／むつごろう水族館
写真提供：諫早ゆうゆうランド干拓の里

◆ **Information:** 諫早ゆうゆうランド干拓の里 むつごろう水族館
〒854-0031 長崎県諫早市小野島町2232番地
TEL 0957-24-6776
URL <http://www.kantakunosato.co.jp>

私が
IODPで
解きたい謎

須藤 斎

名古屋大学 大学院環境学研究所
地球環境科学専攻
准教授

すとう・いつき。1976年、ドイツ生まれ。翌年帰国。博士（理学）。2004年、筑波大学大学院地球科学研究科博士課程修了。名古屋大学大学院環境学研究所助教を経て、2012年より現職。専門は古生物・古海洋学。著書に『0.1ミリのタイムマシン』（くもん出版）、『海底ごりごり 地球史発掘』（PHPサイエンス・ワールド新書）がある。

IODP第317次研究航海（2009年11月～2010年1月、ニュージーランド南島沖）に参加した須藤 斎さん。コアから試料を取っている様子。

©William Crawford, IODP/TAMU

絵を描く仕事をしたい

——子どものころは、どういう職業に就きたいと思っていましたか。

須藤：小学生のころから、絵を描く仕事をしたいと思っていました。景色やスペースシャトルや動物など、格好いいと感じた写真を模写していました。

——大学はどういう理由で選びましたか。

須藤：高校生のとき、シーラカンスが泳いでいる映像を初めて見ました。シーラカンスは数億年前から姿を変えていない生き化石だと聞き、進化する・進化しないって何だろう、と興味を持ったのです。絵は習わなくても描けますが、化石

珪藻の休眠孢子から 地球変動と生物進化を 読み解きたい

須藤 斎さんの専門は、植物プランクトンの一種、珪藻^{けいそう}の化石だ。そのなかでも、栄養が少なくなったときに現れる「休眠孢子」に注目している。

これまで須藤さんは、ヨーロッパが提供する特定任務掘削船による2004年の第302次研究航海で北極海、アメリカの深海掘削船「ジョイデス・レゾリューション」による2009年の第317次研究航海でニュージーランド南島沖、

2013年の第341次研究航海でアラスカ南方沖を調査。

「打率が悪いんですよ。私が乗船すると、なぜか珪藻化石の出が悪い。それでも掘削船に乗船することで得られるものは、とても多く大きい。地球深部探査船『ちきゅう』にも乗船して、国際深海科学掘削計画（IODP）の3船制覇を目指したいですね」。そう語る須藤さんがIODPで解きたい謎とは？



については独学では難しいと思い、それが学べる筑波大学第一学群自然学類に進学しました。

ところが、1、2年生のころは教養科目が多くて、全然面白くない。大学をやめたいとさえ思い、こっそり絵の専門学校を受験していました。合格したものの親にいいだすこともできず……。あのとき勇気を出していたら、まったく違った人生だったのでしょうか。

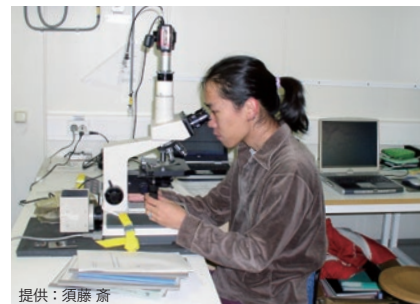
3年生になると専門科目が多くなりましたが、それでも面白いとは思えませんでした。卒業研究では貝の化石をテーマにしたのですが、地質調査も嫌だなあと

思いながらやっていました。

——では、なぜ大学院に？

須藤：貝の化石を採取していた地層からは珪藻の化石も出ていて、それを解析すると地層の年代が分かることを教えてもらいました。早速、専門の研究者を尋ね、試料の解析をお願いしました。すると1週間ほどで、1番の試料は何万年から何万年、2番の試料は何万年から何万年と、リストが送られてきたのです。どうしてこんなことが分かるのだろう？と不思議でたまりませんでした。

それが4年生の10月。実は、自分がやりたいことが分からず就職活動をしてい



IODP第302次研究航海（2004年8～9月、北極海）。上は、研究者を乗せた中型砕氷船「オーデン」から撮影した掘削船「グイダー・バイキング」と大型原子力砕氷船「ソビエツキー・ソユーズ」。左下は、顕微鏡で試料を観察する須藤さん。右下は北極点。

写真を撮って見た気になってしまいがちです。一方、スケッチを描こうとすれば細部まで注意深く観察するし、重要な特徴を誇張することもできます。スケッチは論文にも掲載していて、評判がいいんですよ。

——忍耐力と繊細さが要求されますね。

須藤：もともと絵を描くことは好きですし、分類したり数えたりすることも性に合っていました。しかし、それが研究といえるのだろうか悩んだ時期もありました。そんなとき指導教官から、「分類学というのはフロンティアでありバイオニアなんだ」と、いわれたのです。当時は十分に理解できていなかったかもしれませんが、いまはその意味がよく分かります。分類して名前を付けて数える。すべての科学はそこから始まるのです。

私はこれまでに100種類近くの珪藻化石を新種として論文に記載しています。誰かがその種に関する論文を書く場合、必ず私の論文が引用されます。10年後も100年後も、自分のやったことが残るのは、うれしいですね。

北極海掘削航海へ

——休眠孢子的研究からどのようなことが分かってきたのでしょうか。

須藤：日本沿岸やノルウェー沖、アフリカ沖の海底掘削などで得られた約4000万年前から現在までの堆積物を解析した結果、約3370万年前に珪藻の休眠孢子化石の種類と数が急激に増加していることが分かりました。それを学会で発表して、この時期の休眠孢子的の変化が全地球的なイベントかどうかを調べていきたいと話しました。すると、ある研究者から「近々 IODPの北極海掘削航海があって、その年代の試料が採れる。君は、その船に乗るべきだ」といわれたのです。IODPについてもよく知らないまま応募したのですが、若手研究者の枠で乗船できることになりました。——ヨーロッパの特定任務掘削船によって2004年に行われた航海ですね。

ませんでした。大学院入試も終わっていましたが、その年は欠員が出て2次募集があったのです。卒業後の行き先もないし、珪藻の年代解析法も気になるし、と大学院進学を決めました。

珪藻の休眠孢子に惹かれて

須藤：ところが解析方法を一通り習ってしまうと興味を失ってしまって……。そんなころ、珪藻には休眠孢子という状態になるものがあることを知ったのです。「休眠」という言葉の響きと、研究している人はほとんどいないということに惹かれて、休眠孢子的を研究テーマにすることに決めました。

——珪藻とは、どういう生物ですか。

須藤：単細胞の植物プランクトンで、大きさは0.1mmほどです。2つの殻が弁当箱のように重なっていて、そのなかに細胞が入っています。海洋で行われる光合成の40%以上を担っていて、二酸化炭素の吸収や魚介類の餌として重要な生物です。

珪藻の殻はガラス質のため、化石として残ります。珪藻は1億8000万年ほど前に出現して分布域が広く、また進化の速度が速く1つの種が生息していた期間が短いため、堆積物の年代決定に役立つ示準化石となっています。また、環境に

よって生息する種が異なるため、地層が堆積した環境を知るのに役立つ示準化石にもなります。

——休眠孢子とは。

須藤：珪藻のうち沿岸域に生息するキートケロス属は、栄養がなくなると殻が厚い細胞をつくり海底に沈んで過ごす、という性質があります。その状態を休眠孢子といいます。海水の上下の混合が強くなり、休眠孢子が栄養豊富な深層の海水と共に海面まで運ばれると、細胞分裂を再開し増殖します。

休眠孢子を取り出し、観察、スケッチ、分類、そして数える

——大学院では休眠孢子について、どのような研究を行ったのですか。

須藤：珪藻化石研究の基本は、堆積物に含まれる化石を取り出し、顕微鏡で観察し、種類ごとに分け、数を数えることです。堆積物は普通、深いほど古い年代になります。年代ごとに、どの種類の珪藻と休眠孢子がそれぞれ何個あるか調べていきます。

ほとんど研究されていない休眠孢子は、かたちの特徴をもとに分類するところからやらなければなりません。そのため私はスケッチを描きました。電子顕微鏡を使えば細部まで観察できますが、

須藤：北極海の高環境の解明を目指し、初めて北極海で科学掘削を行うというチャレンジな航海でした。掘削船は耐氷能力がありません。そこで、掘削船「ヴィダー・バイキング」の周りを大型原子力砕氷船「ソビエツキー・ソユーズ」と中型砕氷船「オーデン」が動き回って海水を割り続けながら、掘削が行われました。

——初めての掘削航海はどうでしたか。

須藤：何をどうしたらいいのか、まったく分からなかったですね。1人でいる方が好きで英語も苦手でしたが、寝る時間以外は研究室やラウンジで過ごすというマイルールをつくり、みんなとコミュニケーションを取る努力をしていました。

全体としては、5600万年前までの堆積物試料を採取できて、大成功でした。4600万年前には氷河があったことが分かるなど大きな発見もありました。著名な科学雑誌に次々と論文が出て、すごい航海に参加していたのだと、あらためて認

識しました。

一方で自分の研究は、まったくうまくいきませんでした。掘削開始から2週間ほどは、珪藻化石がまったく出てこない。ようやく出始めても、古い年代のものばかりで、狙っていた3370万年前の珪藻化石はほとんどありませんでした。しかし、この航海でいろいろな研究者と話をすることができ、彼らから多くのことを学び、私の研究スタイルの根っことなる部分がつくられたと感じています。

微化石が語ること

——その後、名古屋大学の助教に。

須藤：北極海掘削では欲しかった試料を手にはできなかったため、別の試料を取り寄せて解析していました。3370万年前ごろの珪藻化石が出そうな掘削航海があれば乗船したいと思いつつ、

——そして2009年に行われたニュージーランド南島沖の掘削に参加されました。「ジョイデス・レゾリューション」

によって、水深およそ100mという非常に浅い海域で掘削を行いました。北極海掘削との違いはありましたか。

須藤：北極海るときは、研究者は砕氷船に乗り、コアと呼ばれる地質試料は掘削船からヘリコプターで運ばれてきたため、掘削の様子は見られませんでした。「ジョイデス・レゾリューション」では掘削の様子を近くで見られて感激しました。

植物プランクトンの珪藻や円石藻、動物プランクトンの有孔虫や放射虫などの目に見えないほど小さな化石を、微化石と呼びます。微化石の研究者は、コアが上がるという放送が流れると、掘削デッキにつながるキャットウォークと呼ばれる狭い通路に行きます。そこで、コアキャッチャーを受け取ります。採取したコアがパイプから抜けないようにふさいでおく部分で、まずそこに詰まっている試料を私たちが解析するのです。掘削デッキの近くまで行くことができ、研究者のなかで最初にコアを解析するのは、微化石研究者の特典です。

——なぜ微化石解析が最初なのですか。

須藤：コアに含まれる微化石の種を特定して何万年前の堆積物まで到達したかを定めるためです。それはほかの解析にも欠かせない情報です。しかし、微化石が年代決定のための道具としか見られていないことがあり、その場合は反論したくなります。微化石の種類や数の変化を解析することで気候や環境の変動を知ることでもできるし、その知見から地球の未来を予測することもできます。微化石は非常に多くのことを語ってくれます。

掘削航海に参加する理由

——2013年にはアラスカ沖の研究航海に乗船しています。

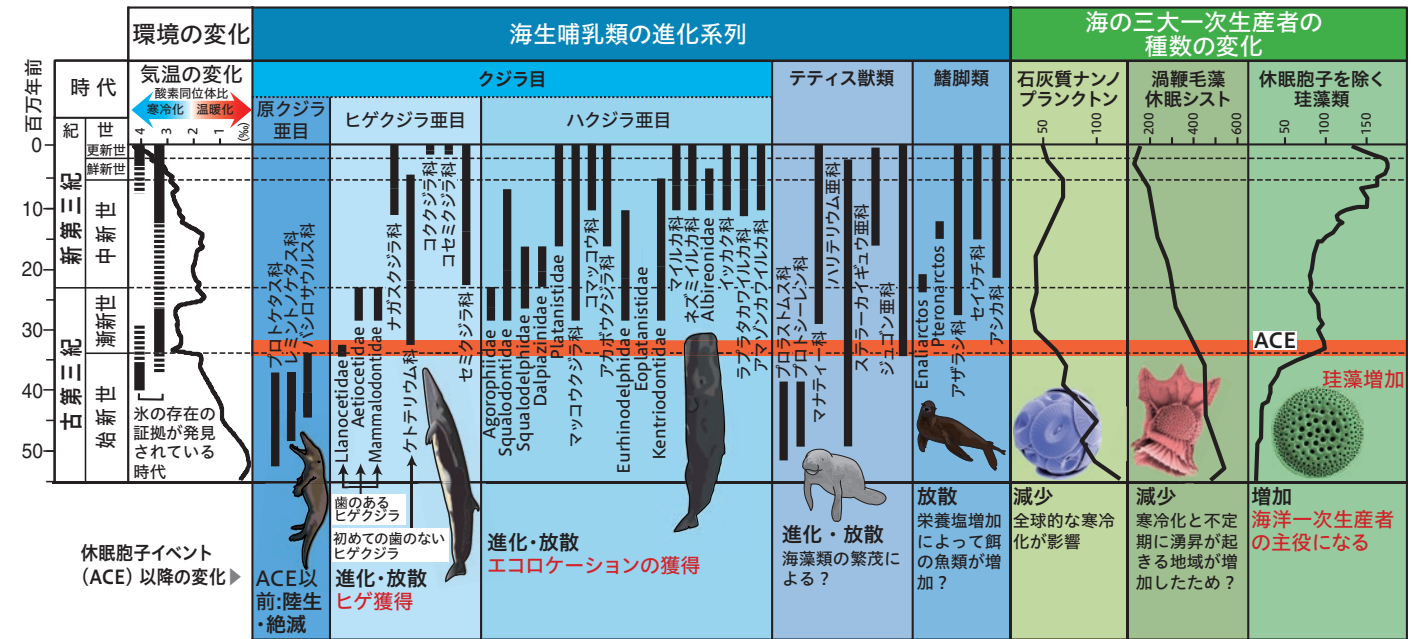
須藤：実は、ニュージーランド南島沖の掘削では、珪藻化石がほとんど出ませんでした。その航海で一緒だった研究者から「今度こそ珪藻天国だよ！」と誘われ、その言葉に釣られて乗船したのですが……、見事に出ない。私は、打率が悪いんです。

——過去の掘削で得られ、珪藻化石が含まれていることが分かっている試料を取り寄せて解析することもできます。

須藤：そういう試料ももちろん使います

海の一次生産者の変化と海生大型哺乳類の進化

寒冷化が始まった約3370万年前にキートケロス属珪藻の種数が増加し、それまで海の一次生産者の主役であった円石藻と渦鞭毛藻の種数は減少している。同じ時代にさまざまな海生哺乳類が多様性を増加させている。珪藻の進化と海生哺乳類の進化には何らかの関連性があると考えられる。提供：須藤 斎



が、自分で乗船して手にしたコアは違うのです。愛情というか執着心が強く、欲しかった年代でなくても徹底的に解析しないと気が済まず、それが思わぬ発見や新しい研究につながることもあります。掘削船には、さまざまな分野の研究者が乗っています。彼らからも大きな刺激を受けます。狙った試料が手に入らなくても掘削航海に参加することで得られるものは非常に大きいのです。

珪藻の進化とクジラの進化

——約3370万年前の休眠胞子の種と数の増加についての研究は、どのように進んでいるのでしょうか。

須藤：約3370万年前は、始新世と漸新世の境界にあたります。始新世は温暖で、海水の上下の混合はあまりありませんでした。漸新世は急激に寒冷化し、表層の海水が冷やされて重くなって沈み込み、深層の海水が湧き上がるようになりました。その環境は、休眠胞子となって海底で眠るという性質を持つキートケロス属にとっては有利に働き、さまざまな種に進化し、数を増やしたと考えています。さらに、このキートケロス属の種と数の増加は、ほかの生物の進化にも影響を与えたのではないかと、という仮説を提唱しています。

——どういった生物ですか。

須藤：たとえばクジラです。河畔に生息

していた原始的なクジラが海洋へ移動し、ハクジラとヒゲクジラが誕生して多様化した時期が、漸新世の初めにあたります。ヒゲクジラはオキアミを食べ、オキアミは珪藻を食べます。キートケロス属の種と数が増加したことでオキアミが増加し、その結果、ヒゲクジラも多様化したのではないのでしょうか。また餌となるオキアミが増加したことで魚類が増加し、それを食べるハクジラも多様化した可能性があります。最近、マンタの進化に関する論文で、私の仮説が引用されていました。同じ時期にマンタやアザラシ、ジュゴンなども多様化しているのです。今後は、環境変動によって海水の上下の混合の強さが変化することで一次生産を担う珪藻が進化・多様化し、その結果、大型動物が進化・多様化する、というつながりを証明していきたいと考えています。それは容易ではありませんが、クジラやマンタなどの研究者と連携して進めていきます。

珪藻って面白い

——今後、どのような掘削計画が必要だとお考えですか。

須藤：最近、ここを掘削すればこういう結果が得られると確証が持てる計画が多くなっています。それも必要ですが、たとえば世界最深のマリアナ海溝を掘削してコアに含まれる微化石をすべて分類

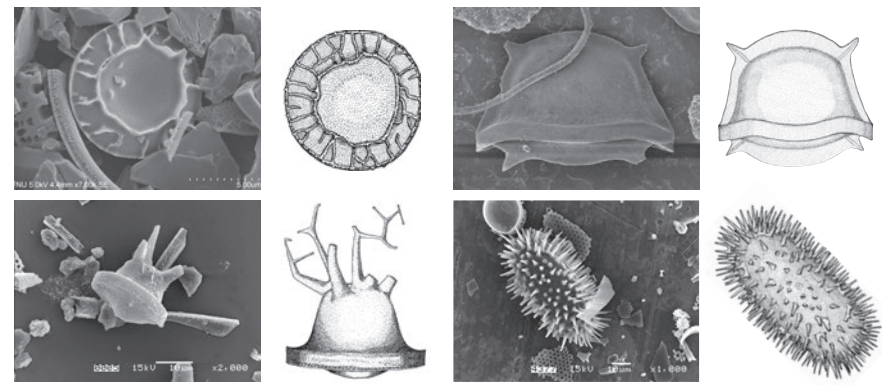
して数えるというような、博物学的な計画があってもいいのではないのでしょうか。思いもよらない発見や研究アイデアが浮かぶかもしれません。

——須藤さんは毎回、船上レポートをウェブで公開しています。

須藤：北極海掘削のとき家族や知人に船上の様子を伝えるために始めたのですが、日本科学未来館のホームページに掲載され多くの人に読んでいただけるようになりました。その後の航海でも毎日レポートを書いて公開しています。

最近、研究者が交代で船上レポートを書いて公開することが増えましたが、私は研究作業の報告だけにしないように気を付けています。掘削航海は、船舶の運航、掘削作業、食事の用意など、多くの人に支えられています。彼らとの交流など、船上の様子を楽しく伝えるようにしています。また、船を下りると、航海の様子や珪藻についてみんなに話したい、という思いが大きくなります。だから、サイエンスカフェや講演にも積極的に取り組んでいます。

珪藻の研究は、私たちの生活にすぐ役に立つものではありません。でも、私の船上レポートや書籍を読んだり講演を聴いたりして、「珪藻って面白そう」と思ってもらえたら、うれしいですね。それがきっかけで珪藻の研究者になる人が現れたら、最高にうれしいです。 BE



いろいろなキートケロス属珪藻の休眠胞子
電子顕微鏡写真と須藤さんによるスケッチ 提供：須藤 斎



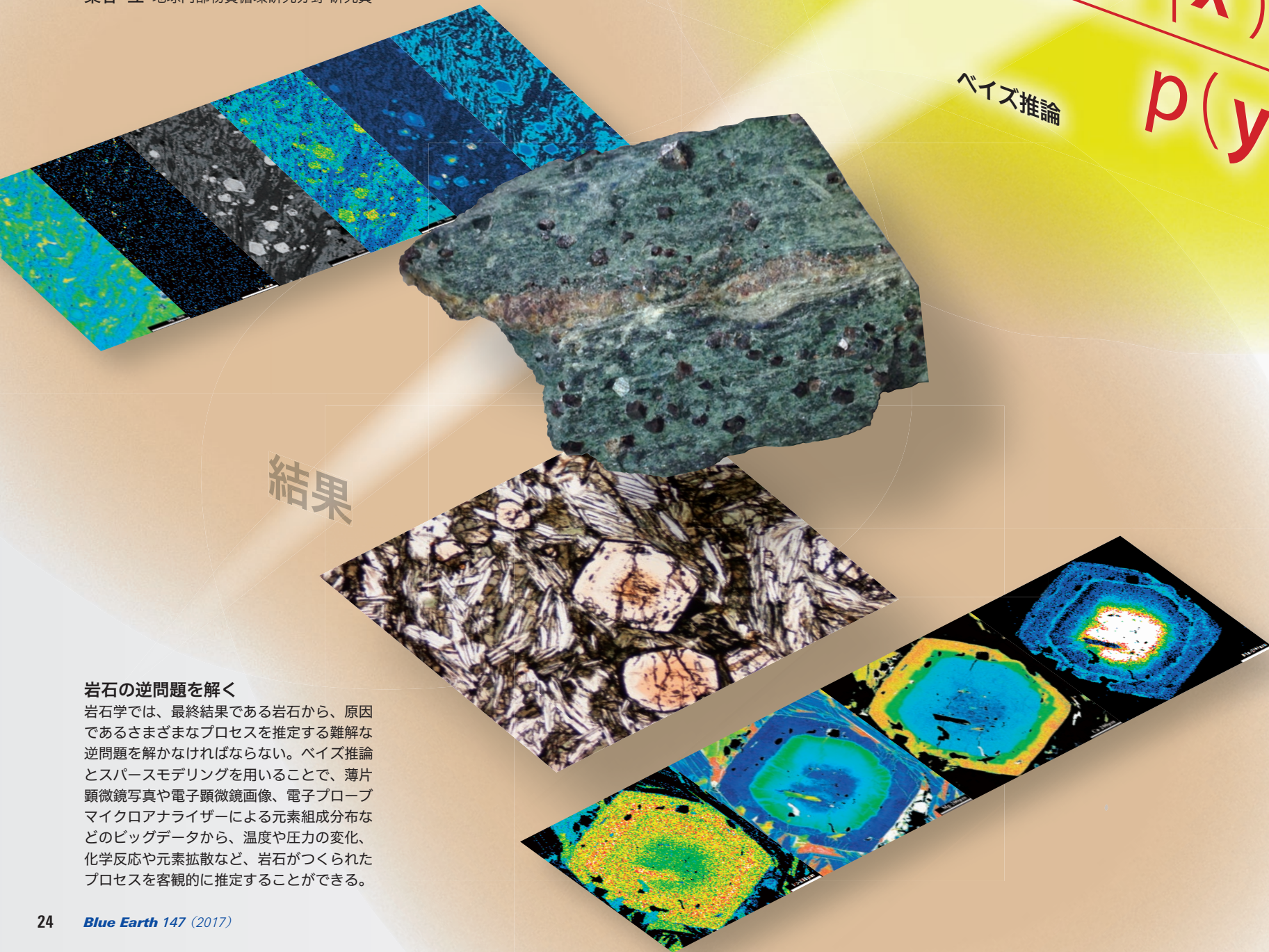
IODP第341次研究航海（2013年5～7月、アラスカ南方沖北太平洋）。左は、ゴムボートに乗って船体の点検作業を見学している様子。「大海原に浮かぶ『ジョイデス・レゾリューション』の船体をぐるっと見ることができた貴重な体験でした」と須藤さん（黄色いヘルメット）。右は、航海中に誕生日を迎え、ケーキでお祝いしてもらった様子（右）。

自然科学と 情報科学の融合で イノベーションを創出

海洋科学技術イノベーションが絶えず創出される土壤をつくる——
桑谷 立さんが「JAMSTECイノベーションアワード」に
応募するにあたって掲げた目的だ。

桑谷さんは、いかにその目的を実現させようとしているのか。
キーワードは、ビッグデータの活用、所属や専門にとらわれない
自由な発想、そして自然科学と情報科学の
学融合共同研究である。

取材協力
桑谷 立 地球内部物質循環研究分野 研究員



結果

岩石の逆問題を解く

岩石学では、最終結果である岩石から、原因であるさまざまなプロセスを推定する難解な逆問題を解かなければならない。ベイズ推論とスパースモデリングを用いることで、薄片顕微鏡写真や電子顕微鏡画像、電子プローブマイクロアナライザーによる元素組成分布などのビッグデータから、温度や圧力の変化、化学反応や元素拡散など、岩石がつけられたプロセスを客観的に推定することができる。

原因

$$E(x) = \|y - Ax\|^2 + \lambda \|x\|$$

スパースモデリング

$$p(x|y) = \frac{p(y|x)p(x)}{p(y)}$$

ベイズ推論

眠っているビッグデータを掘り起こす

「海洋研究開発機構（JAMSTEC）は宝の山。とてもたくさんの強みがあります」と桑谷さんはいう。桑谷さんが考えるJAMSTECの強みは3つだ。1つ目は、海洋調査や物理観測、化学分析などによって日々大量に生み出されるビッグデータである。2つ目は、地球科学から生物学まで、そして基礎研究者から技術者までを擁する多様な人材。3つ目は、「地球シミュレータ」などの高性能計算機と、その効果的な利用を可能にする高度なデータ管理運用体制である。

しかし桑谷さんは、「それらの強み、特にビッグデータが有効活用されていない」と指摘する。「研究に使われるのはデータのほんの一部で、大部分は眠ったままです。あまりにも、もったいない。そこには重要な本質や法則が隠されているかもしれません。大量のデータを余すところなく活用することで、研究が大きく進むだけでなく、社会に革新をもたらすイノベーションにつながる可能性もあります」

しかし、ビッグデータは自然科学の研究者には扱いきれないのが現状だ。「ビッグデータを活用するには、最先端の情報科学が不可欠です。私は、自然科学のさまざまな分野と情報科学の学融合共

同研究を行うことで、同時多発的にイノベーションを創出できる土壤をJAMSTECにつくりたいと考えています」

桑谷さんがこのような考えを持つに至るきっかけは、東京大学大学院新領域創成科学研究科でポスドク研究員をしていた2010年ごろにあった。

岩石学者が情報科学に出会って

「私のもともとの専門は岩石学です」。そういって桑谷さんは1個の岩石を取り出した。四国で採取したもので、地下60kmくらいで形成されて地表に上がってきた岩石だという。「岩石は、地下でつけられたときの情報を、そのなかに持っています。岩石を観察し、それがどのようなプロセスでつけられたかを解き明かすことが、岩石学者に与えられた問題です」

これまでは岩石を薄く削って顕微鏡で観察し、研究者自身の目と手で組織の記載や化学組成の分析を行っていた。最近では計測装置の発達によって、自動で大量の化学組成や元素の空間分布のデータまで得られるようになった。「当時の私は、得られるデータが多過ぎて従来の岩石学の解析手法では対応できないと、頭を抱えていました。そんなとき、同じ研究科の岡田真人教授が『ベイズ推論を使えば、ビッグデータを有効に使って結果から原因を推定できるよ』と教えてくれたのです」と振り返る。「科学的な世界観がガラッと変わるほどの衝撃を受けた」という桑谷さんは、さっそく岡田教授と、岩石学と情報科学の学融合共同研究をスタートさせた。

ベイズ推論とスパースモデリング

桑谷さんが用いている情報科学の解析手法は主に2つだ。1つ目はベイズ推論。原因から結果を導くことは、物理法則が分かっていたら簡単だ。結果から原因を導くことは逆問題と呼ばれ、非常に難しい。それを可能にするのがベイズ推論だ。確率論的な手法のため、データに不確実性があっても正しい原因を推定できるという利点もある。

2つ目はスパースモデリングである。スパースとは、少数という意味だ。「ビッグデータというのは、多次元の空間にたくさんのデータがばらまかれている状態です。そこから何かを導き出すことはとても難しい。スパースモデリングとは、簡単にいうと、高次元を低次元に落とす手法です。低次元になると、データに隠されている法則を見つけやすくなります」

岩石は、温度や圧力の変化、化学反応や元素拡散などさまざまなプロセスが複雑に関わり合っ

できる。これまで岩石学者は、想像力を働かせて、少ないデータから岩石ができるプロセスを読み取っていた。ベイズ推論とスパースモデリングを用いることで、ビッグデータから客観的にプロセスを解き明かすことができるのだ。

自然科学と情報科学の学融合によるイノベーション創出の成功例

「ベイズ推論やスパースモデリングを用いたビッグデータ解析は、岩石学以外にも有用です。さまざまな自然科学分野に波及させたいと考え、岡田教授の主導のもと、プロジェクトを立ち上げました」

文部科学省の新学術領域研究に採択された「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」（2013～2017年度）だ。医学や天文学、脳科学など、さまざまな分野と情報科学の学融合プロジェクトが50課題実施され、すでに大きな成果がいくつも出ている。

その1つがMRI（磁気共鳴画像装置）の高速化で、8倍速で撮影したデータでも診断が可能になった。MRIは撮影時に体を固定しなければいけないため、高速化できれば患者さんの負担が減る。また、ブラックホールの可視化技術の開発にも成功。桑谷さん自身も、堆積物に含まれる元素の比率から、それが津波によって運ばれてきた堆積物かどうかを高精度に判別する手法を開発した。

学融合によりJAMSTECの活性化も期待

桑谷さんは、東北大学大学院環境科学研究科助教を経て、2015年4月にJAMSTECへ。新学術領域研究での経験をもとに、まずは学融合共同研究を立ち上げる準備をしていたところ、2015年12月に「JAMSTECイノベーションアワード」の公募が始まった。桑谷さんは、まだアイデア段階だが飛躍的な技術革新をもたらすような大きなポテンシャルを持っている提案を対象とした「イノベーション萌芽研究プログラム」に応募し、採択された。提案名は、「海洋科学技術イノベーションの萌芽を育むデータ駆動型研究プラットフォームの構築」である。個別のイノベーションの創出に関する提案が多いなか、この提案は独創的だ。

選考にあたった平 朝彦理事長は、学融合の共同研究を通してさまざまな人を巻き込みJAMSTEC全体を活性化させてほしい、と期待を寄せている。「私がJAMSTECでやりたかったことを認めていただき、勇気づけられました。また、提案が採択されたことで、格段に活動しやすくなりました」

融合共同研究を成功させるポイント

桑谷さんはJAMSTEC内外で共同研究立ち上げのためのワークショップを開催している。「従来の共同研究にありがちな、いつか何か面白いことができればいいね、では駄目なんです。明日から動いて確実に結果を出すことを意識しています」

自然科学者側の反応は？「新しいことには慎重になるものです」と桑谷さん。そこで、戦略を考えた。扱いに困っているデータを提供してもらい、その場でデモ用のアプリケーションで解析して見せる。「その場で、というのがポイントです。デモは初歩的な情報科学の手法を用いた解析ですが、情報科学の有用性を実感してもらえます」

新学術領域研究で培った人脈も駆使して、自然科学者と情報科学者をつないでいく。情報科学者にとっては、どういう利点があるのだろうか。「情報科学者は、常に面白い数理の問題を探しています。自然科学者には何ということもないデータが、数理の本質に関わるような問題を含んでいることもあるので、さまざまな自然科学分野との融合に興味を持ってくれる情報科学者も多いです」

情報科学との学融合研究は、近年、非常に盛んだ。しかし、うまくいかない例も多いと聞く。「データを取る自然科学者とデータを解析する情報科学者を分離せずに、自然科学者もデータ解析をすることが、学融合研究がうまくいく重要な条件だと思っています」。情報科学的手法を使いこなすことができる人材、特に若手の育成も重要な課題だ。

イノベーションが続々と生まれつつある

すでにいくつもの学融合共同研究が動いており、成果が出ているものもある。その1つが、スロー地震のすべりの推定である。JAMSTEC地震津波海域観測研究開発センターの中田令子さん、堀 高峰さんらは、GPSが捉えた地殻変動のデータから、スロー地震と呼ばれるゆっくりしたすべりが地下でどのような広がりで起きたのかを詳細に推定する手法の開発に成功した。この手法を用いると、巨大地震の発生域や規模の正確な予測につながるかと期待されている。

また、ニュース記事の話題解析などで使われる情報処理技術を岩石に適用した独創的な研究により、地下で起きている元素移動に関する新発見も生まれた。これは、2016年度から桑谷さんのもとでポストドク研究員として活動する若手岩石学者の吉田健太さんが中心となって上げた成果である。

「特許などの関係で、まだお話しできないものばかりで……」と桑谷さん。「画期的な成果がたくさん出つつあるので、発表を楽しみにしてください」

岩石から地球内部の現象を解読。究極の逆問題に挑む

桑谷さんもイノベーションの創出を目指し、新たな研究テーマに取り組んでいる。「岩石からの



共同研究立ち上げのためのワークショップ（イノベーション共創ワークショップ）の様子

プロセス抽出：究極の逆問題に挑むベイズ計測」で、2016年度後期からの科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業「さきがけ」に採択された。「さきがけ」はイノベーションを生み出す創造的新技術の創出を目的とした個人型研究プロジェクトで、JAMSTECの研究者の採択は初だ。

「ベイズ推論を使うことで、岩石の組織や鉱物の組成のデータから、岩石がつくられたプロセスを推定できます。私は、ベイズ推論と計測を融合させたベイズ計測という新しい技術を使って、さらにさかのぼってより深い原因、つまりその組織や鉱物の組成がどのようにできたのか、地球内部のプロセスまで推定することを目指しています」。通常の逆問題よりさかのぼることから、究極の逆問題への挑戦となる。

これは、材料科学の研究者からも注目されている。航空機は飛行のたびに金属疲労が蓄積していく。現在の金属の状態を計測するだけで、これまで金属が経験した物理プロセスを推定できるので、安全管理にも大いに役立つかもしれない。

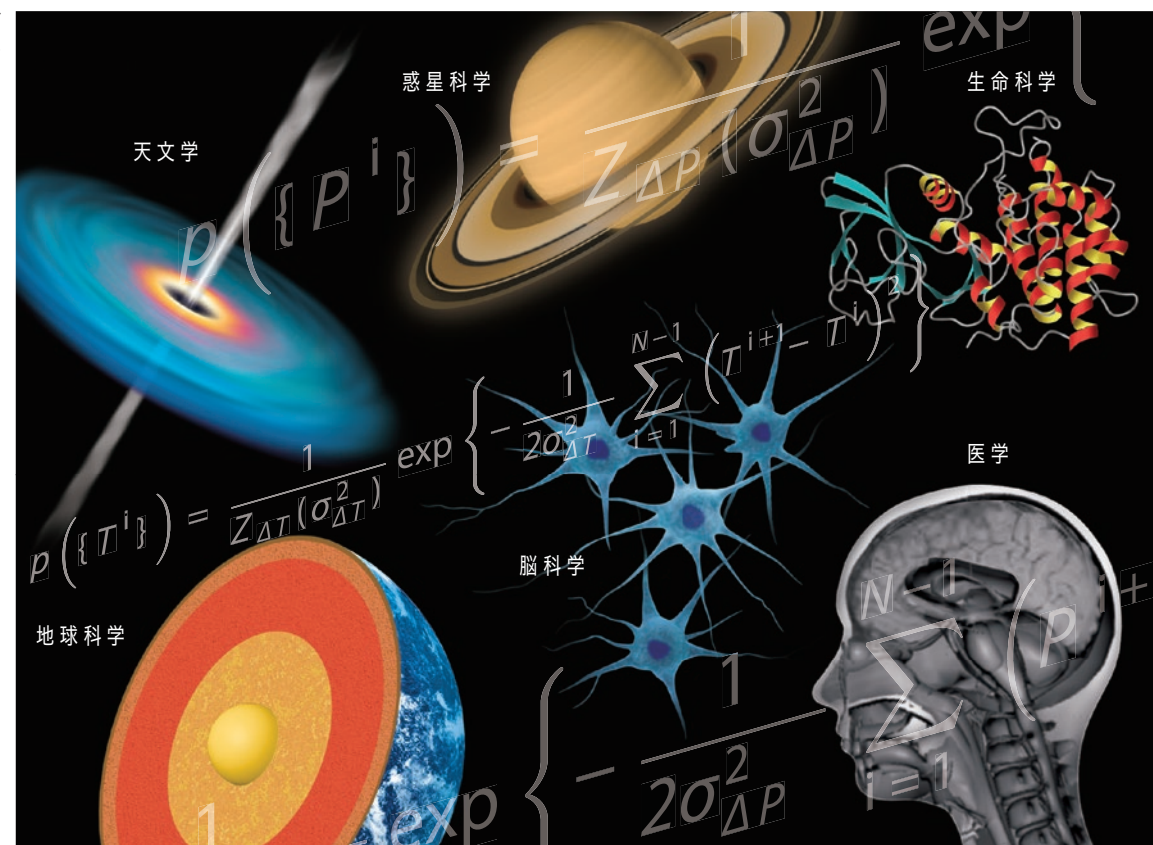
専門にとらわれない自由な発想を

「自然科学者は物事の究極の真理に近づきたいのです」と桑谷さん。しかしイノベーションの創出も求められている。どう取り組めばよいのだろうか。

「私が所属している地球内部物質循環研究分野では、マントルなど地球内部について研究しています。その成果は、直接、人の役に立つことは難しいでしょう。しかし、その研究で使われている技術は、少し発想を変えてみれば、まったく違うものに応用できてイノベーションにつながることもあります。基礎研究を進めつつ、専門にとらわれない自由な発想を持つことが重要なのではないのでしょうか」

BE

イノベーションの創出が期待される自然科学と情報科学の学融合の例



イラスト：吉原成行

「地球シミュレータ」を、 どう動かしているのか！

— スーパーコンピュータの運用・管理の現場から —

地球情報館公開セミナー 第196回 (2016年1月16日開催)

大倉 悟 地球情報基盤センター 情報システム部
基盤システムグループ グループリーダー代理

これまでの地球シミュレータ

JAMSTECでは1990年代前半に、科学技術計算用のスーパーコンピュータが導入されてシミュレーションなどに使われるようになりました。初代の地球シミュレータの運用が始まったのは2002年のことです。

地球シミュレータは、当時の科学技術庁の「地球シミュレータ計画」のもとで、宇宙開発事業団（現 宇宙航空研究開発機構）、日本原子力研究所（現 日本原子力研究開発機構）、海洋科学技術センター（現 海洋研究開発機構）が共同で開発を進めたスーパーコンピュータです。

地球シミュレータの開発にあたり、地球の大気循環をシミュレーションするプログラムを動かしたときの性能を、当時のスーパーコンピュータの1,000倍にすることが目標とされました。またシミュ

レーションの解像度を縦、横、高さ方向それぞれ10倍、合わせて1,000倍の解像度とすることが目標とされました。性能と解像度とで、それぞれ1,000倍を目指したわけでは

初代の地球シミュレータは、2002年6月から2004年6月まで世界最速を誇っていました。その後、市販のスーパーコンピュータの性能が上がり、保守費相当程度のコストでより高性能なマシンが導入できる時代になったこともあり、2009年3月には2代目の地球シミュレータ2が導入されることになりました。地球シミュレータ2は商用機であるNECのSX-9/Eをベースにしたもので、2015年3月まで運用されました。それ以降は、3代目の地球シミュレータが運用されています（図1）。

最新の地球シミュレータ

3代目の地球シミュレータは、NECのSX-ACEという商用機をベースにしています。コンピュータが5,120台あり、それらが高速ネットワークでつながって膨大な計算を行う仕組みです。

1個のCPU（中央処理装置）には、演算処理を行う中核部分であるコアが4個ずつあります。一般的なスーパーコンピュータと比べ、コア1個あたりの性能はとて高くなっています。また記憶装置であるメモリの性能も非常に高いのが特徴です。研究のためのプログラムは膨大なデータを使うものが多いのですが、そのときメモリの性能は非常に重要です。

初代の地球シミュレータの理論上達成し得る最高性能であるピーク性能は、1秒間に40TFLOPS（テラフロップス）でした。FLOPS（フロップス）とは、浮動小数点演算の回数のことです。この数値が高いほど計算がたくさんできると思ってください。「テラ」とは1兆のことで、40TFLOPSというのは1秒間に40兆回の計算ができるという意味です。地球シミュレータ2のピーク性能は初代の3倍でした。

3代目の地球シミュレータの導入にあたっては、研究者が実際に使うプログラムが高速に動くマシンを選定しました。最新の地球シミュレータは、2代目のさらに10倍のピーク性能となっています（図1）。

初代の地球シミュレータは、幅40m、奥行き50mのスペースに計算機がいっぱい並んでいました。この広さはテニスコート4面分ほどにあたります。一方、最新の地球シミュレータでは、ラック2個半程度で同じ性能を持っています。こ

海洋研究開発機構（JAMSTEC）が運用しているスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」は、2002年の運用開始以来、さまざまな研究に利用され、多くの成果を上げてきました。2015年3月からは、3代目の地球シミュレータが稼働しています。地球シミュレータは、高速ネットワークでつながった5,120台ものコンピュータが連携しながら膨大な計算を行います。そのような大規模なシステムを効率よく動かすため、運用管理するためのソフトウェアや、計算機を設置する施設など、さまざまな工夫がなされています。



おおくら・さとる。1967年、秋田県生まれ。1998年に地球シミュレータの研究開発チームに参加。2003年からJAMSTECで地球シミュレータの運用に携わる。

れは広さでいうとだいたい畳2畳程度です。10年ほどで、テニスコート4面分が畳2畳分になるほどに技術が進歩してきたのです。

地球シミュレータを利用した成果

地球シミュレータでは、JAMSTEC内で研究テーマを募集する所内課題のほか、国からの委託などによる指定課題や、一般公募による課題などの研究が行われています。また地球シミュレータを短期間に集中的に使うことで、素晴らしい成果が出るも期待されるテーマを対象とした特別推進課題もあります。産業界でも広く利用されています（図2）。

所内課題の例としては、海大陸研究強化年（YMC）という国際的なプロジェクトに関するものがあります。2017～19年に実施されるYMCの先行研究として、JAMSTECでは2015年11～12月に海洋地球研究船「みらい」を使って熱帯集中観測を行いました。観測を行うにあたり、地球シミュレータで地球全体の大気の様子を1週間分シミュレーション

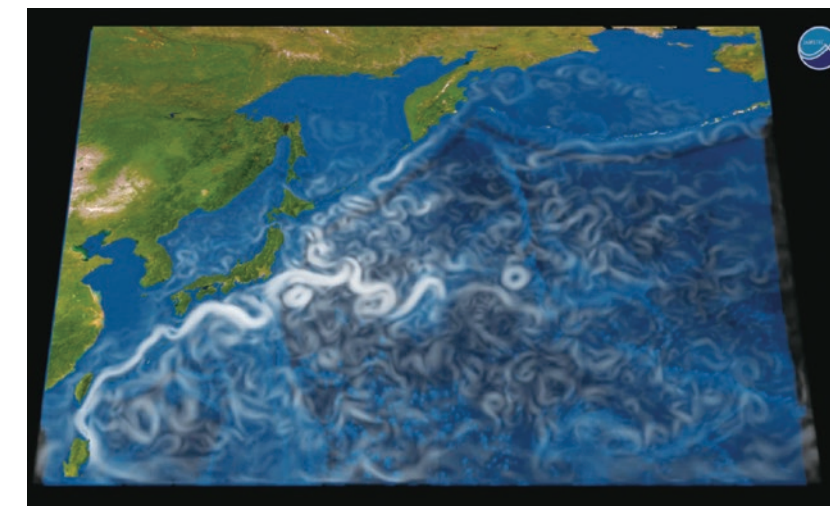


図3：地球シミュレータによる研究の成果の例。特別推進課題での研究成果の例。データ同化の手法を用いて、北西太平洋領域の過去の海洋環境変動を精緻に再現したデータセットが作成された。

して「みらい」に送ります。「みらい」では観測を運営する際の参考にしたり、実際の観測とシミュレーションを比較したりしました。

特別推進課題としては、地球温暖化対策に資するための研究や、過去30年間の日本周辺の海の様子を計算した研究（図3）、また東南海地震が発生したときの津波の状況をシミュレーションした研究などが行われました。1959年に発生した伊勢湾台風のシミュレーションも行われました。これは過去の台風を再現することで、将来の予測などに役立てようという研究です。

自動車や発電、船舶など、さまざまな業種の企業でも、地球シミュレータは利用されています。たとえば、タービンの性能向上を目的としたシミュレーションや、二酸化炭素を地下に貯蔵する取り組みについてのシミュレーション、また鉄道車両に関するものや、タイヤの素材

に関する研究などが地球シミュレータで行われてきました。

地球シミュレータの運用体制

地球シミュレータの運用は、地球情報基盤センター情報システム部が行っています。私は、情報システム部基盤システムグループに所属しています。基盤システムグループは、地球シミュレータを効率的かつ安定的に稼働させることが一番の役割です。

情報システム部にはそのほかに、プログラムの移植や高速化などに関する技術支援などを行う計算技術グループ、数値シミュレーション手法や高度化技術などの研究開発を行うHPC応用グループがあります。3つのグループが協力しながら地球シミュレータを運用しています。また、たとえば電源や空調などといった施設や設備に関することは、総務部横浜管理課が運用しています。

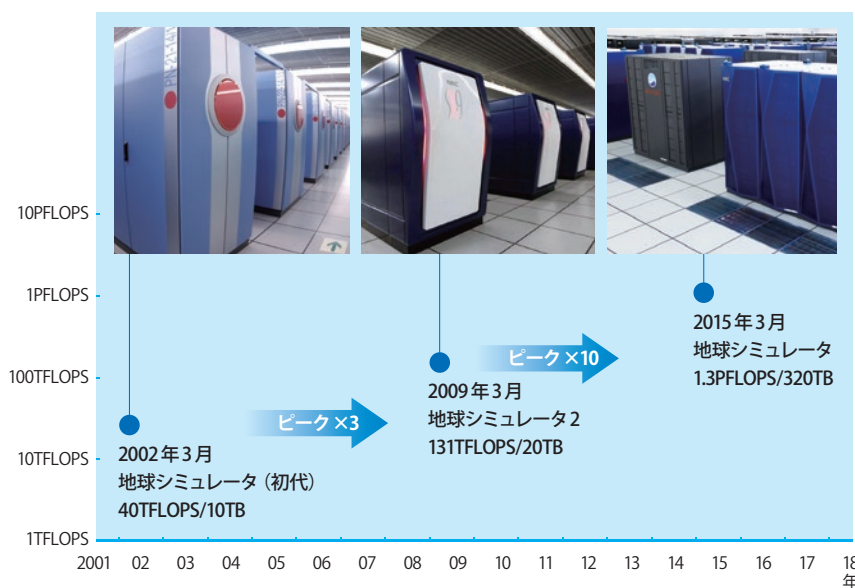


図1：初代～3代目の地球シミュレータの性能。ピーク性能は初代と2代目を比べると3倍、2代目と3代目を比べると10倍になっている。[PFLOPS]のP（ペタ）は1000兆のことで、1.3PFLOPSは1秒間に1300兆回の計算ができることを意味する。10TB、20TB、320TBはメモリ容量で、初代と現在のものを比べると32倍になっている。

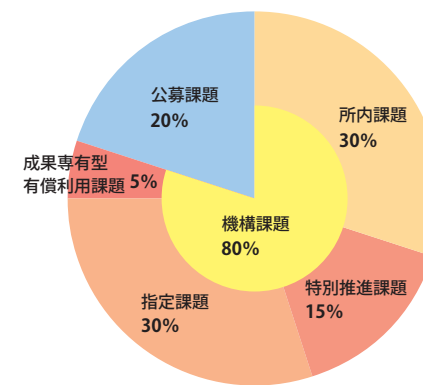


図2：計算資源の割り振り。所内課題や特別推進課題、指定課題などのほか、企業が有償で利用する「成果専有型有償利用課題」もある。

効率的に運用するためのソフトウェア

地球シミュレータを効率的に運用するには、サポートするソフトウェアが必要です。そういったソフトウェアは「運用管理ソフトウェア」と呼ばれます。

地球シミュレータでは、プログラムが最適な状態で最も速く動くことが大事です。また災害が発生したときなど、緊急で仕事をする必要が生じることもあります。研究の進展に合わせて、いろいろと形態を変更する必要も出てきます。そういったことは実際に運用する人にしか分からないことなので、初代の地球シミュレータを開発していた当時、運用管理ソフトウェアはメーカーに丸投げすることなく、自分たちで開発するというポリシーがありました。

その後、メーカーでも経験が蓄積されてきて、技術も進歩してきました。現在は、初代の地球シミュレータの経験をもとに仕様をつくった上でメーカーに依頼して、特別仕様の運用管理ソフトウェア群をつくってもらっています。メーカーの運用管理ソフトウェアの標準機能に、地球シミュレータ向けのカスタマイズをしたものになっています。

大規模な並列処理をできるだけ短時間で行う

地球シミュレータでは並列処理で計算を進めます。並列処理とは、ある1つの仕事を、たとえば4人で分けて進めるような処理のことです。計算が100個あるとしたら、4人で25個ずつ計算するのがです。最後に100個の答えを1つにまと

めます。4人全員の仕事が終わらないと、1つの仕事が終わったことになりません。

地球シミュレータでは5,120ものコンピュータに仕事を割り振って進めます。1つのコンピュータの仕事が遅れると、ほかのコンピュータが空いてしまうので無駄が生じてしまいます。

大規模な並列プログラムを最適な状態で、少しでも短い時間で動かすことが重要です。その実現のため、地球シミュレータを運用するにあたってのポリシーや、地球シミュレータならではの特徴があります。

CPUは計算に専念させる

CPUやメモリ、OS（オペレーティングシステム）などが入った計算を行うための1つの単位のことを「計算ノード」と呼びます。コンピュータ1個1個のことを指すと思ってください。1つの計算ノードには1つのCPUが含まれます。計算ノードを複数のプログラムで共有すると、足を引っ張り合って遅くなります。少しでも短い時間で動かすために、計算ノードは1つのプログラムで占有させます。計算を行うCPUに、可能な限り余計なことはさせないというのが、私たちの大事なポリシーの1つです。

地球シミュレータでは、計算資源の全体を管理したり計算資源の割り当てを行ったりする際に、「ノード時間（ノード時間積）」という単位を使っています。1ノードを1時間使ったら「1ノード時間」です。地球シミュレータには5,120ノードあります。1年間使える最大の計算資源量は、5,120ノード×24時間×365日になります。このような考え方で管理していることも、地球シミュレー

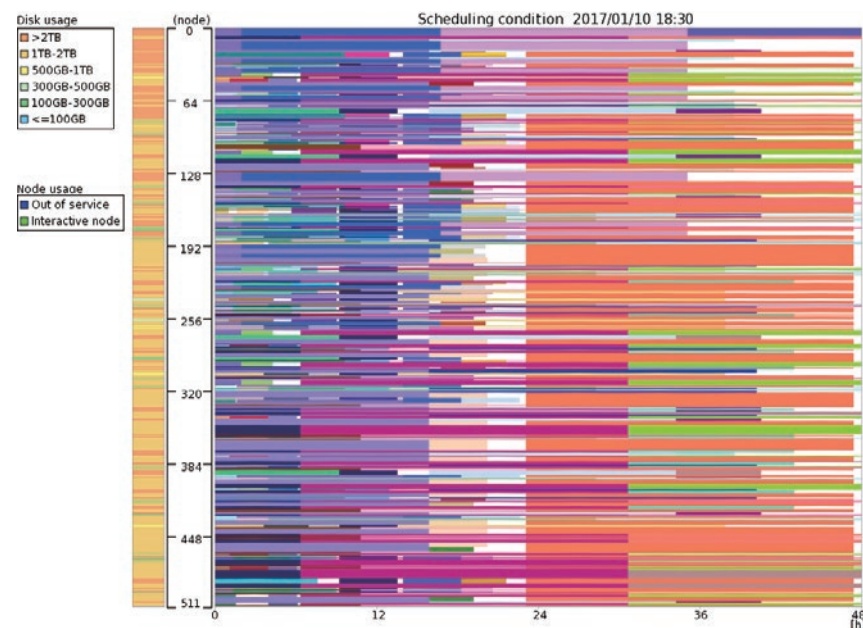


図4：スケジューリングマップ

ジョブスケジューラーによって、多くのジョブが各計算ノードに割り当てられる。空白部分ができるだけ少なくなるように、さまざまなパラメータが調整される。

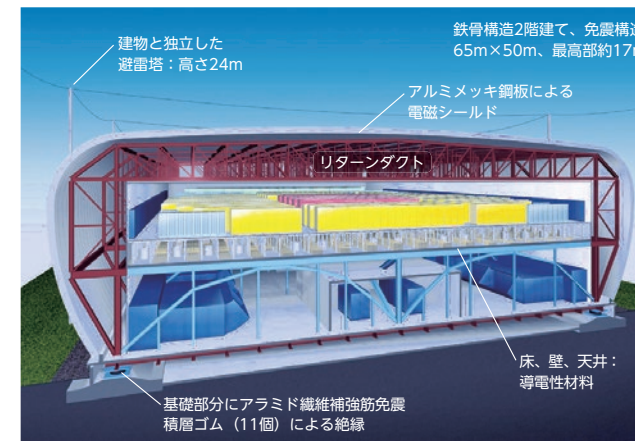


図5：シミュレータ棟

地球シミュレータを設置するためにつくられた建物で、さまざまな工夫が凝らされている。

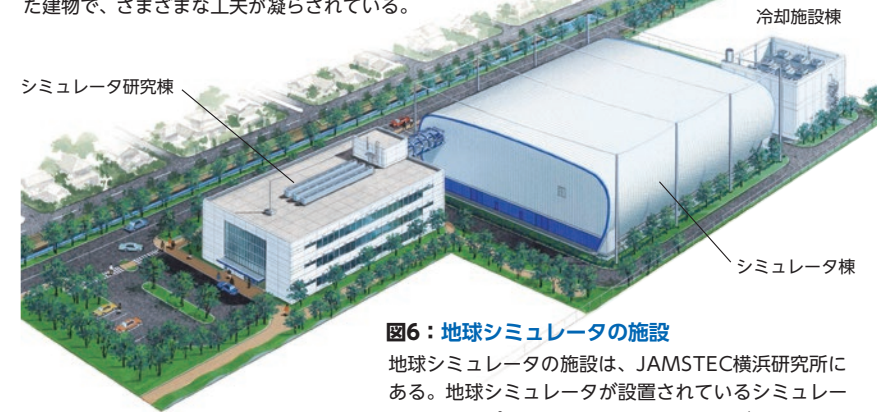


図6：地球シミュレータの施設

地球シミュレータの施設は、JAMSTEC横浜研究所にある。地球シミュレータが設置されているシミュレータ棟、コンピュータを冷やすための設備が置かれている冷却施設棟、地球シミュレータの運用や技術開発を行う研究室などがあるシミュレータ研究棟から成る。



図7：人手で行われる施設・設備の管理

温度や湿度などの管理は、モニタに表示されるデータを見ながら、人手によってきめ細やかに管理されている。

施設や設備の管理も重要

地球シミュレータを動かすためには、まず設置する場所が必要です。設置しても電気が来なければただの箱ですし、動いたとしても冷やさなければ壊れてしまいます。地球シミュレータを運用するにあたっては、施設や設備の管理は非常に重要です。

地球シミュレータは、JAMSTEC横浜研究所のシミュレータ棟という建物に設置されています（図5、図6）。これは地球シミュレータ専用設計された建物です。電磁波から守るためにアルミニウム鋼板で電磁シールドを何重にもつくっています。また地面からの迷走電流を防ぐために、基礎部分には電気を通さないアラミド繊維が使われています。空調に関する部分でも特徴的な構造をしています。考え得る対策はほぼすべて施してある構造になっています。

冷却施設棟には冷凍機があります。そこで冷水をつくり、その冷水を使って送風機から冷風を出します。暖まった空気は、天井を通過して冷凍機に戻ってきます。

こういった設備は、すべて人手できめ細かく管理されています（図7）。たとえば、計算機室内の温度や湿度が一定になるように、外気の温度や湿度を見ながら手で調節が行われます。特に難しいのが湿度の調整です。湿度が高過ぎると結露します。逆に低過ぎると静電気が発生します。室内環境を一定にするために施設担当が手作業で行う調整は、職人技といってよいかもしれません。こういった人たちに支えられることで、地球シミュレータは動いているのです。

タの特徴の1つです。

ステージング方式を採用

プログラムが動くとき、どういう計算をするのかを入力し、計算が終わったら結果を出力する必要があります。入出力時にディスクにアクセスしますが、そのときCPUの動作に邪魔が入る可能性があります。それを排除するため、地球シミュレータでは「ステージング方式」を採用しています。

地球シミュレータでは、各計算ノードに結果を出力するディスクがあります。研究者はそのディスクに直接アクセスすることはできません。ファイルを書き込んでいるときに、横から手を出されると計算の邪魔になるからです。

研究者が計算に使うファイルは別の計算ノードのディスクにあります。必要ときに計算ノードのディスクへ持っていき、計算が終了したら持って帰ります。このように行き来する仕組みのことを「ステージング」と呼びます。この方式は必要なディスクの量が多くなるので

あまり採用されません。しかし私たちは、大規模なプログラムをできるだけ高速で動かすというポリシーのもとで、ステージング方式を採用しているのです。

コンピュータの仕事を管理する

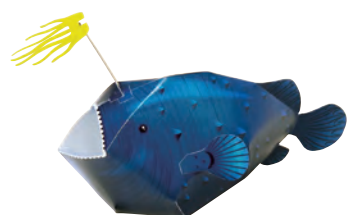
コンピュータの行う仕事のことをジョブといいます。たくさんある計算ノードのなかで、あるジョブをどれにやらせるかという割り振りを考える「ジョブスケジューラー」というソフトウェアがあります。空いている計算ノードにどんどんジョブを入れていき、全体としてたくさんの仕事ができるようにします（図4）。ジョブスケジューラーがきちんとしていないと、稼働率は上がりません。

どのように割り振るかというルールを考える際にも、さまざまなパラメータがあります。たとえば待つ時間や、使用するノード数などに対して重み付けをするなどといったパラメータです。そういったさまざまなパラメータを少しずつ調整しながら、CPUが暇にならないようにすることも私たちの仕事の1つです。

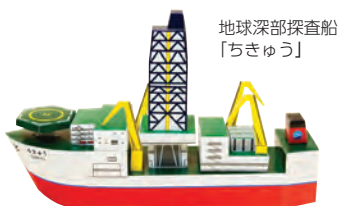
つくって・あそんで・学ぶ 海と地球のペーパークラフト図鑑 公開中!

JAMSTECホームページから、海のいきものや調査船のペーパークラフトがダウンロードできます。

お好きなペーパークラフトをつくって、お楽しみください。



チョウチンアンコウ



地球深部探査船「ちきゅう」



有人潜水調査船「しんかい6500」

アクセス方法

JAMSTECホームページ
(<http://www.jamstec.go.jp>)

▼
トップページ上部の「ミュージアム」をクリック

▼
「楽しむ」の「ペーパークラフト図鑑」をクリック

『Blue Earth』定期購読のご案内

<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メールまたは電話でお申し込みください。
Eメールの場合は、①～⑥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(フリガナ) ③ 所属機関名(学生の方は学年) ④ TEL・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けます)。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(148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案内

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



*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、国立研究開発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。

賛助会(寄付) 会員名簿 2017年2月15日現在

国立研究開発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	オフショアエンジニアリング株式会社
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	海洋エンジニアリング株式会社
株式会社アイケイエス	海洋電子株式会社
株式会社アイワエンタープライズ	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アクト	鹿島建設株式会社
朝日航洋株式会社	川崎汽船株式会社
アジア海洋株式会社	川崎近海汽船株式会社
株式会社天野回漕店	川崎重工業株式会社
株式会社アルファ水工コンサルタント	川崎地質株式会社
株式会社安藤・間	株式会社環境総合テクノス
泉産業株式会社	株式会社キュービック・アイ
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	共立インシュアランス・ブローカーズ
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社	株式会社
潮冷熱株式会社	共立管財株式会社
株式会社エス・イー・エイ	極東貿易株式会社
株式会社エスイーシー	株式会社きんでん
株式会社SGXシステム技研	株式会社熊谷組
株式会社工ヌエールシー	クローバテック株式会社
株式会社NTTデータ	株式会社グローバルオーシャン
株式会社NTTデータCCS	ティベロップメント
株式会社NTTファシリティーズ	株式会社KSP
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	KDDI株式会社
株式会社MTS雪氷研究所	京浜急行電鉄株式会社
株式会社OCC	鉱研工業株式会社
株式会社オキシテック	株式会社構造計画研究所
沖電気工業株式会社	神戸ペイント株式会社

広和株式会社	株式会社ソリッド・ソリューションズ・インク
国際石油開発帝石株式会社	損害保険ジャパン日本興亜株式会社
国際ビルサービス株式会社	第一設備工業株式会社
コスモス商事株式会社	大成建設株式会社
株式会社コノエ	ダイハツディーゼル株式会社
株式会社コベルコ科研	太陽日酸株式会社
五洋建設株式会社	有限会社田浦中央食品
株式会社コンボン研究所	高砂熱学工業株式会社
相模運輸倉庫株式会社	株式会社竹中工務店
佐世保重工業株式会社	株式会社地球科学総合研究所
三建設工業株式会社	中国塗料株式会社
三洋テクノマリン株式会社	中部電力株式会社
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ	千代田化工建設株式会社
JFEアドバンテック株式会社	株式会社鶴見精機
株式会社JVCケンウッド	株式会社テザック
シチズン時計株式会社	寺崎電気産業株式会社
シナネン株式会社	電気事業連合会
株式会社シーフロアコントロール	東亜建設工業株式会社
清水建設株式会社	東海交通株式会社
シモダフランチ株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社
ジャパンマリンユナイテッド株式会社	東京海上日動火災保険株式会社
シュルンベルジェ株式会社	東京製綱繊維ロープ株式会社
株式会社昌新	株式会社東京チタニウム
株式会社商船三井	東北環境科学サービス株式会社
新日鉄住金エンジニアリング株式会社	東洋建設株式会社
須賀工業株式会社	株式会社東陽テクニカ
鈴与株式会社	トビー工業株式会社
セイコーウオッチ株式会社	新潟原動機株式会社
石油資源開発株式会社	西芝電機株式会社
セコム株式会社	株式会社ニシヤマ
セナーアンドバーンズ株式会社	日油技研工業株式会社

株式会社日産電機製作所	古河電気工業株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	古野電気株式会社
株式会社日放電子	株式会社ベッツ
日本アキュムレータ株式会社	松本徽章株式会社
日本SGI株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本エヌ・ユー・エス株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海工株式会社	株式会社マルト
日本海洋株式会社	三鈴マシナリー株式会社
日本海洋掘削株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
日本海洋計画株式会社	三井造船株式会社
日本海洋事業株式会社	三菱重工業株式会社
一般社団法人日本ガス協会	三菱スペース・ソフトウェア株式会社
日本サルヴェージ株式会社	三菱電機株式会社
日本水産株式会社	三菱電機特機システム株式会社
株式会社日本製鋼所	株式会社森京介建築事務所
日本電気株式会社	株式会社モンベル
日本マントル・クレスト株式会社	八洲電機株式会社
日本無線株式会社	ヤンマー株式会社
日本郵船株式会社	郵船商事株式会社
株式会社ハイドロシステム開発	郵船ナブテック株式会社
濱中製鎖工業株式会社	株式会社ユー・エス・イー
ハリマ化成株式会社	ヨコハマゴム・マリン&
東日本タグボート株式会社	エアロスペース株式会社
日立造船株式会社	株式会社落雷抑制システムズ
深田サルベージ建設株式会社	株式会社ラジアン
株式会社フグロジャパン	
株式会社フジクラ	
富士ソフト株式会社	
富士通株式会社	
富士電機株式会社	
古河機械金属株式会社	

国立研究開発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 TEL. 0175-25-3811 (代表)
高知コア研究所	〒783-8502 高知県南国市物部乙200 TEL. 088-864-6705 (代表)
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)
国際海洋環境情報センター	〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3 TEL. 0980-50-0111 (代表)

海と地球の情報誌 Blue Earth

第29巻 第1号(通巻147号) 2017年2月発行

発行人 田代省三 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部
編集人 松井宏泰 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部 広報課
Blue Earth 編集委員会

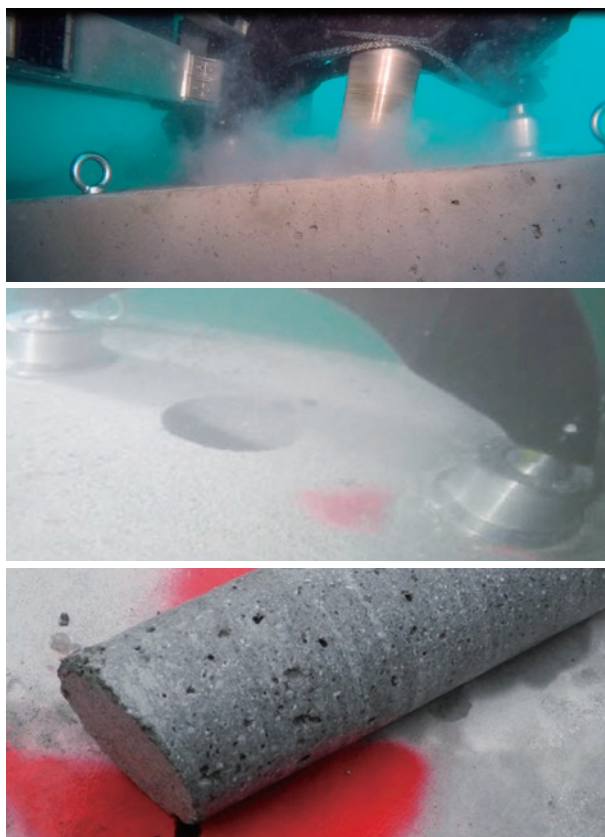
制作・編集協力 有限会社フォトンクリエイト
取材・執筆・編集 立山 晃 (p1-17)、鈴木志乃 (p20-27、裏表紙)
岡本典明/フックブライト (p28-31)、坂元志歩 (p18-19)
デザイン 株式会社デザインコンピビア
(飛鳥井羊右、山田純一、岡野祐三)

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。

高効率海中作業システムの海中試験の様子。
右は上から、海底での模擬岩の掘削、コア
を引き抜いた孔、採取されたコア。



新たな海洋鉱物資源調査システムの海中試験に成功

日本の周辺海域には有望な海洋鉱物資源が存在することが知られている。それらを効率よく調査するため、海洋研究開発機構（JAMSTEC）次世代海洋資源調査技術研究開発プロジェクトチームROVシステム開発ユニットは、日油技研工業㈱、日産自動車㈱、トピー工業㈱と共同で、海底石油・ガス開発などで広く用いられている市販の作業用ROV（遠隔操作型無人機）に取り付けて使用する「高効率海中作業システム」の開発を進めている。これは「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」の課題の一つ「次世代海洋資源調査技術」において実施されているものである。

高効率海中作業システムは、硬質岩石のコアを採取できるコアリングシステムを搭載し、フリッパー型全方向移動クローラーシステムを採用している。このクローラーは、4基のクローラーそれぞれの振り出し角度を調整でき、かつクローラー本体と履帯が回転する世界初の移動機構で、ROVの姿勢を変えことなく前後左右に移動し、姿勢角も変更できる。またアラウンドビューモニター技術を世界で初めてROVに導入。ROV搭載の複数のカメラが撮影した画像を処理することで、ROVを俯瞰したような画像をオペレーターに提示できる。これらを組み合わせて、起伏が大きい海底でもcm単位で精密に位置や姿勢を調節し、最適な地点でのコア採取が可能となる。このような機動性とオペレーター支援機能を備えた資源調査システムは例がない。

2016年11月、海中での総合作動試験を実施。浅海において海底に設置した模擬岩からのコア採取に成功した。今後は実海域での実証試験を行い、コバルトリッチクラストなど海洋鉱物資源調査での利用を進めていく。

海中試験の映像を JAMSTEC のウェブサイトで見ることができます。
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20161219_2/