

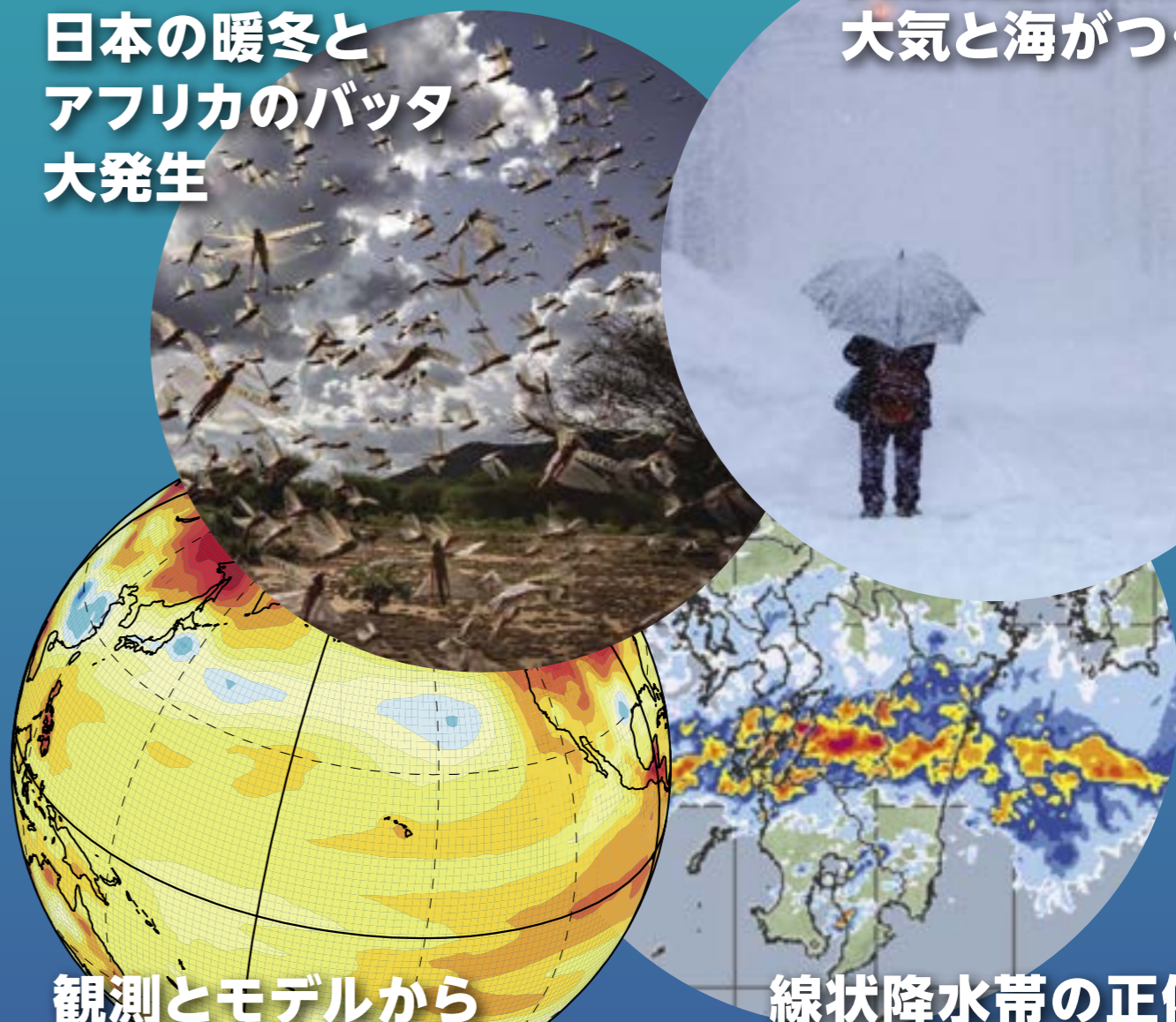


Blue Earth 167

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

異常気象は 大気と海がつくる

日本の暖冬と アフリカのバッタ 大発生



観測とモデルから 温暖化の影響を解く

線状降水帯の正体

特集

極端化する気象を 多様な視点で語ろう

Blue Earth 167号 2021年8月発行 年3回発行
第33巻 第2号 (通巻167号)

編集・発行 国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 広報課
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25

制作・編集協力 有限会社フオントウエイト
デザイン 株式会社デザインコンベクト

海と地球の情報誌



▶入館は事前予約制です。
詳細は国立科学博物館のホームページをご覧ください。
<https://www.kahaku.go.jp>

有人潜水調査船「しんかい6500」。1/2サイズ模型を展示。

Pick Up
JAMSTEC



「日本の海洋調査への挑戦とあゆみ」開催

2021年10月にJAMSTECは創立50周年を迎えます。この機会に、企画展「日本の海洋調査への挑戦とあゆみ」を国立科学博物館（東京・上野公園）にて開催しています。日本における海洋調査の歴史、各種船舶や探査機、調査によって得られた科学的成果について展示し、紹介します。
会期：2022年3月21日まで



賛助会（寄付）会員名簿 2021年7月20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IH
株式会社IH原動機
株式会社アイケイエス
株式会社アクト
朝日航洋株式会社
アジア海洋株式会社
株式会社天野回酒店
株式会社アルファ水工コンサルタンツ
株式会社安藤-間
いであ株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所
伊藤忠テクノソリューションズ
株式会社
一般社団法人インダストリスパコン
推進センター
株式会社INPEX
潮冷熱株式会社
株式会社宇津木計器
海のみらい-静岡友の会
株式会社エヌイーエイ
株式会社エヌイーシー
株式会社SGKシステム技研
株式会社エヌエルシー
株式会社NTTデータCCS
株式会社江ノ島マリナーコーポレーション
MOLマリン&エンジニアリング
株式会社
株式会社MTS雪氷研究所
株式会社OCC
岡本硝子株式会社
株式会社オキシテック
沖電気工業株式会社
海洋エンジニアリング株式会社 | 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
株式会社カネカ
川崎近海汽船株式会社
川崎重工株式会社
川崎地質株式会社
株式会社KANSOテクノス
株式会社キュービック・アイ
京セラ株式会社
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
極東貿易株式会社
株式会社きんぐでん
株式会社熊谷組
グ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
株式会社KSP
KDDI株式会社
京浜急行電鉄株式会社
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
株式会社COAST
国際ビルサービス株式会社
コスモス商事株式会社
株式会社コノエ
五洋建設株式会社
株式会社コンボイ研究所
相模運輸倉庫株式会社
佐世保重工業株式会社 | 三洋テクノマリン株式会社
三和化成工業株式会社
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー
株式会社JSP
JX石油開発株式会社
JFEアドバンテック株式会社
株式会社JVCケンウッド
静岡市
シチズン時計株式会社
株式会社SIX VOICE
シナネン株式会社
清水建設株式会社
清水振興株式会社
シモダフランチ株式会社
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
鈴与株式会社
セイコーフオッチ株式会社
株式会社清友農材センター
株式会社開ツ原製作所
石油開発サービス株式会社
石油資源開発株式会社
セナーアードパワーズ株式会社
株式会社ソリトン
損害保険ジャパン株式会社
ダイキンMRエンジニアリング
大成建設株式会社
ダイハツディーゼルの株式会社
大陽日酸株式会社
有限会社田浦中央食品
株式会社地球科学総合研究所 | 日本ペイントマリン株式会社
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
野村建設株式会社
株式会社ハイドロシステム開発
濱中製鋼工業株式会社
東日本タグポート株式会社
日立造船株式会社
株式会社風力エネルギー研究所
深田サルベージ建設株式会社
株式会社フクロジャパン
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
古河電気工業株式会社
古野電気株式会社
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
株式会社マルト
三鈴マシナリー株式会社
三井E&S造船株式会社
株式会社三井E&Sマシナリー
三井住友海上火災保険株式会社
三菱重工業株式会社
三菱スペース・ソフトウェア株式会社
三菱造船株式会社
三菱電機株式会社
三菱電機特機システム株式会社
株式会社森介建築事務所
ヤンマーパワーテクノロジー株式会社
株式会社ユー・エス・イー
郵船商事株式会社
横河電機株式会社
株式会社落雷抑制システムズ
株式会社ラジアン
若菜建設株式会社 |
|---|---|--|---|

極端化する気象を 多様な視点で語ろう

豪雨や豪雪、猛暑や暖冬などが近年頻発している、と感じている人は多いだろう。

そうした極端な気象は、私たちの生活、さまざまな産業・経済に影響を与え、時には生命を脅かすことから、その増加は重大な問題である。

極端な気象の原因や影響、そして未来の姿は？

気象庁の専門家、サバクトビバッタの研究者、気象予報士、JAMSTECの研究者が語り合う。

iStock.com/tomch

異常気象は「大気」と「海」がつくる

大雪や豪雨、猛暑などのたびに「異常気象」という言葉を見聞きする。

それらは、本当に異常気象なのだろうか。

そもそも異常気象とは？そして異常気象はなぜ起きるのか、発生の予測はできないのか。

気象庁で異常気象や気候変動に関する情報の収集と発表を担っている中三川 浩さんと後藤敦史さん、

JAMSTECで大気海洋相互作用や季節予測の研究に取り組んでいる野中正見さんが語る。

異常気象分析
中三川 浩



気象庁
気候情報課 異常気象情報センター 所長（取材時）
現 名古屋地方気象台長

気象大学卒業。地方気象台や管区気象台などで気象観測や短期予報、気象庁本庁で世界の天候監視や異常気象の分析、季節予報、気候情報を活用する気候リスク管理技術の普及推進などの業務を歴任。

異常気象と
気候変動
後藤敦史



気象庁
気候情報課 気候情報調整官（取材時）
現 異常気象情報センター 予報官

東京大学大学院理学系研究科修了。修士（理学）。気象庁本庁で、気候変動に関する情報収集、予測、発表などの業務、気象業務に関わる国際関係の事務などに従事。2018年4月から1年間、国連の世界気象機関事務局に赴任。

海と大気の研究
野中正見



JAMSTEC
付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ
気候変動予測情報創生グループ グループリーダー

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程修了。博士（地球環境科学）。専門は海洋物理学、気候力学。主な研究テーマは、経年～十年規模の気候変動に対する海洋の果たす役割。

異常気象とは何か？

——異常気象とは、どのような現象を言うのでしょうか。

中三川：豪雨や猛暑、大雪などが発生すると、「これは異常気象ですか？」と、報道機関などから気象庁に問い合わせがあります。異常気象は社会経済に大きな影響を与えるため、皆さんが高い関心を持っています。だからこそ、正しく判断し、正しく伝える必要があります。その役割を担っているのが、気象庁の異常気象情報センターです。

気象庁では、気象が平均的な状態から大きく外れ、およそ30年に1回以下の頻度でしか発生しない現象を「異常気

象」と定義しています。大雨や大雪といった数時間の現象から、冷夏や暖冬、干ばつなど数カ月続く現象まで含まれます。気象庁は、気温や降水量、気圧、日照時間といった気象データを、気象台やアメダスなどによる観測開始から保有しています。例えば統計期間が60年間の場合、1位や2位であれば、異常気象と判断します。

——2020年7月、九州を中心に広い範囲で長期間の大雨となりました。これは異常気象と言えるのでしょうか。

中三川：九州北部地方で48時間降水量がこれまでの記録の1.4倍の値となるなど九州を中心に多くの地点で観測記録が更新されたことから、異常気象と言えます。気象庁では

顕著な災害を起こした自然現象について名称を定めていて、この大雨を「令和2年7月豪雨」と名付けています。

野中：異常気象という言葉は一般の人の興味を引きますが、だからこそJAMSTECでも使い方には気を付けなければいけないと思っています。私は、気象庁が異常気象としているかを確認して使うようにしています。過去何番目、何年以來と説明したり、極端な大気現象という表現を使うこともあります。

中三川：気象庁でも、頻度を問わずに著しい高温や大雨などを、極端気象あるいは極端現象と呼んでいます。

異常気象はなぜ発生？気象庁の大気状態の再現データから解く

中三川：「これは異常気象ですか？」という質問の次には、「なぜ発生したのですか？」と聞かれます。皆さんの疑問に正しく迅速に答えるため、気象庁では2007年から異常気象分析検討会を運営し、大学や研究機関などの専門家の協力を得て最新の科学的知見に基づいて異常気象の発生要因などを分析し、発表しています。

発生要因の分析で鍵となるのが、「JRA-55」というデータセットです。1958年以降の気象観測データを最新の技術で再解析したもので、全球の大気の状態が再現されています。過去のデータと現在のデータの品質が違えば比較できませんが、「JRA-55」のデータは過去から現在まで品質が一定で、しかも高品質です。そのため、異常気象のときと過去の大気の状態を比較して、何がどのように違っていたのかが定量的に分かり、異常気象の発生要因に迫ることができるのです。

野中：「JRA-55」は気候研究のベースとなる重要なデータで、もちろん私たちも使っています。

中三川：こうしたデータは使われて初めて価値が出るので、そう言っただけだと、とてもうれしいです。現在は一辺55kmの格子でデータを作成していますが、一辺40kmに解像度を上げ、1947年まで期間を広げた「JRA-3Q」を

作成中です。「3Q」は、1947年から4分の3世紀分（three-quarter of a century）であることを意味し、利用に感謝する気持ちを込めて「サンキュー」という呼び方を広めようとしています。2021年度中に提供予定で、異常気象の発生要因についてより高度な分析が可能になるでしょう。

「気象」の分析に「海」の研究者が参加する理由とは

——2020年12月、東北地方の日本海側や北陸地方を中心に大雪となりました。その発生要因は？

中三川：「JRA-55」の解析などから、高緯度帯の偏西風と中緯度帯の偏西風が共に日本付近で南に蛇行し、寒気が流れ込みやすくなったことが、大雪の要因だと考えられます。日本付近での偏西風の蛇行には、太平洋熱帯域のラニーニャ現象が影響しているとみられています。

異常気象は、大気だけでなく、海洋の影響を強く受けて出現します。大気が海洋に影響を与えることもあります。異常気象の発生要因を知るには、大気だけでなく海洋の情報が不可欠なのです。野中さんには異常気象分析検討会の資料作成などを支援する作業部会の委員を長く務めていただ



予想を超えた大雪により関越自動車道上り線塩沢石打インターチェンジ手前で立ち往生した車両の列。2020年12月18日撮影。2020年12月中旬以降、北日本から西日本の日本海側を中心にしばしば大雪となり、19地点で72時間降雪量がそれまでの記録を更新した。©時事通信社

いていますが（2021年度から異常気象分析検討会 委員）、それも大気と海洋の相互作用の専門家からの知見を必要としているからです。

野中：ラニーニャ現象とは、太平洋熱帯域の海面水温がペルー沖で平年より低く、インドネシア付近で平年より高い状態が1年ほど続く現象です。海面水温の高低が逆の状態をエルニーニョ現象といいます。インド洋の熱帯域にも似た現象があり、インド洋ダイポールモード現象と名付けられています。

海水温は、その上にある大気の運動を変えます。暖水の上では上昇気流が発生し、暖水の分布が変われば上昇気流の発生場所も変わります。熱帯域は海洋と大気の相互作用が特に活発で、それに伴う変化が大気を通して遠くまで伝達され、日本をはじめ世界各地の気候に影響を及ぼすのです。熱帯域の海洋変動は特に数カ月から季節スケールの気候に影響を及ぼし、ラニーニャ現象が発生すると日本は猛暑・厳冬に、エルニーニョ現象が発生すると冷夏・暖冬に、正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると猛暑になる傾向があるとされています。

私たちは、熱帯域における海洋と大気の相互作用のメカニズムや、熱帯域の海洋変動が世界各地の気候に及ぼす影響を研究しています。異常気象分析の委員をしていると、私たちの研究で明らかになった知見が異常気象の分析に使われていることを実感できて、とてもうれしいです。しかし、既存の知見では異常気象の発生要因をうまく説明できないこともあります。分析していくと、「ここが分かっていない」というところが見えてきます。次に何を研究しなければいけないかを考える機会にもなっています。

気象庁とJAMSTECがつながって 難しい日本の気候予測に挑む

—極端現象の発生は予測できないのでしょうか。

中三川：気象庁が出している明後日までの「天気予報」、7日先までの「週間天気予報」は精度が高く、皆さんも行動を決める参考にしていると思います。しかし2週間を超えると、予測精度が急に落ちます。しかも中緯度に位置する日本の気候は、熱帯からの影響と北極からの影響が複雑に絡み

合っているの、特に予測が難しいのです。そのため、2週間より先の極端現象の予測は、当たるときもあるし外れるときもある、という状況です。

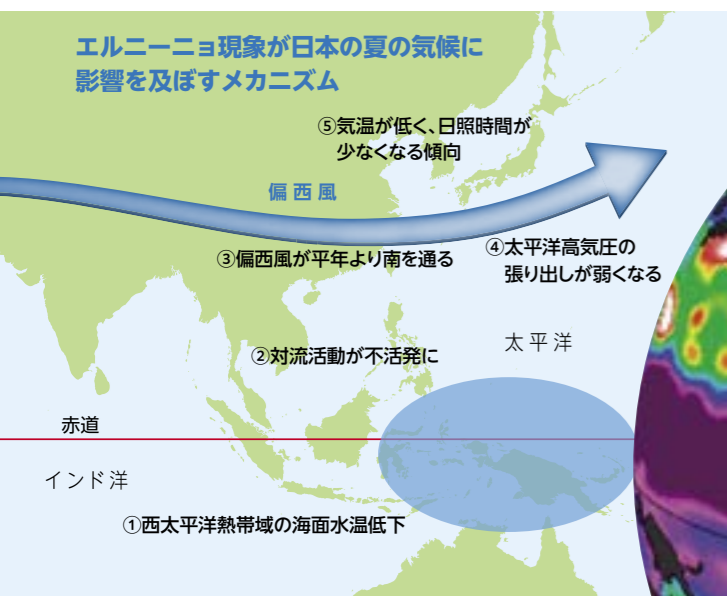
野中：JAMSTECアプリケーションラボでは、「季節予測」を毎月発表しています。これは、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を用いて、海洋と大気が相互作用しながらどのように変化していくかをシミュレーションすることで、エルニーニョ現象などの発生と、それらに伴う猛暑や干ばつなど極端現象の発生を、最大2年先まで予測するものです。JAMSTECは研究機関であり、何をどこまで予測できるかを探る実験としてやっています。気象庁が発表する予報とは違うことに注意が必要です。

JAMSTECの季節予測では、エルニーニョ現象とラニーニャ現象は発生1~2年前から高い精度で予測することができるようになってきました。しかし、極端現象の発生については精度よく予測できる地域と、予測がとても難しい地域があります。また、大気のカオス的な性質のために予測の初期値データに少しずれがあると、まったく違う予測結果になってしまうという問題もあります。どうすれば季節予測の

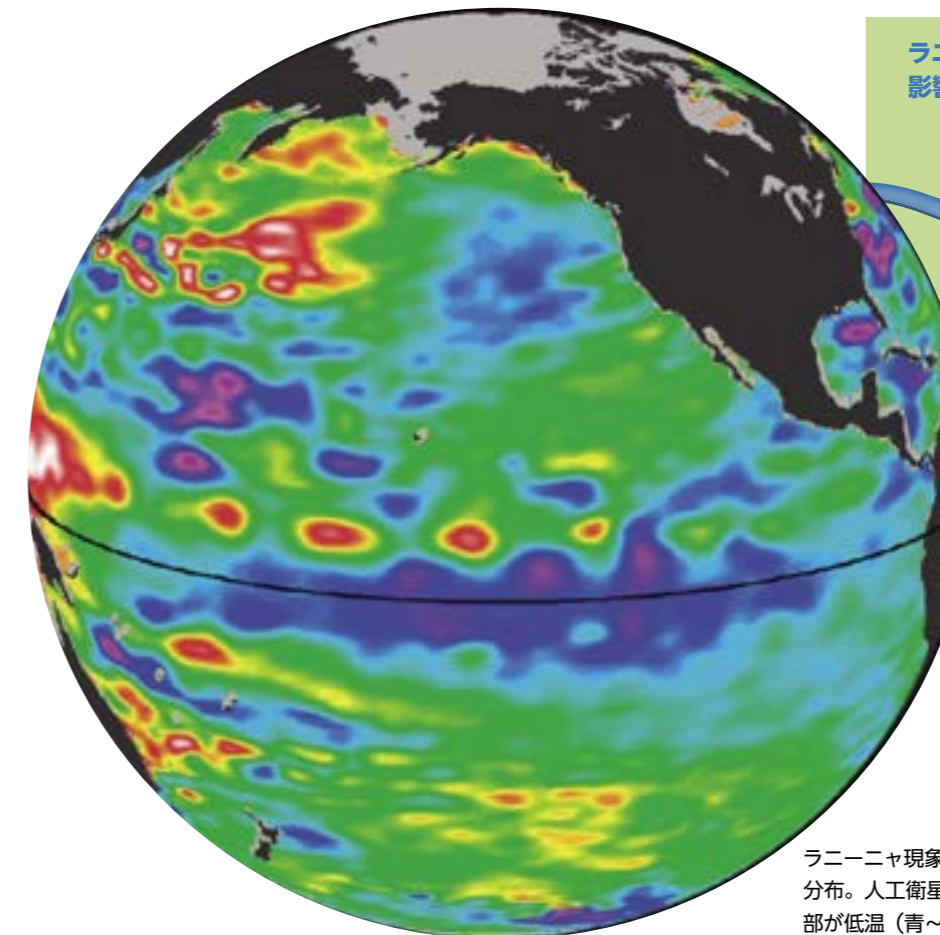
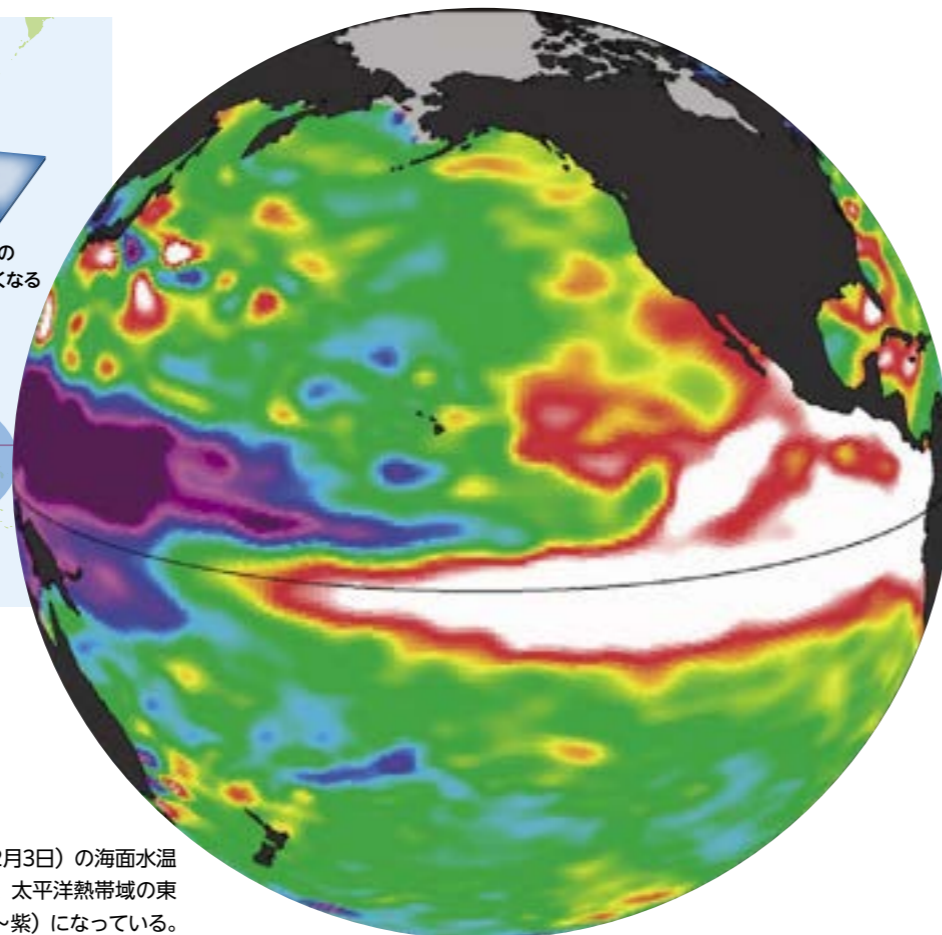
精度が良くなるか、ほかに予測できることはないか、シミュレーションに用いている大気海洋結合モデルの改良など、いろいろなことにチャレンジしています。それは、エルニーニョ現象などの発生メカニズムや、熱帯域の海洋変動が世界各地の気候に影響を及ぼすメカニズムの理解にもつながります。

これまで熱帯域の海洋変動に注目してきましたが、この10年ほどで、日本の気候は中緯度域の海洋変動の影響も大きく受けていることが分かってきました。このため最近では黒潮や黒潮続流といった海流などの変動にも注目して研究を進めています。そしてJAMSTECのいろいろなチャレンジの中から、「これはいい!」という知見や技術が生まれて成熟し、何年後かに気象庁の季節予報に使ってもらいその精度が向上すれば、理想的な展開です。

中三川：JAMSTECの研究には、大きな期待を寄せています。JAMSTECは気象庁が提供する長期再解析データを用いてさまざまな現象のメカニズム解明を進める。気象庁はJAMSTECの研究成果を取り入れ、季節予報の精度を向上させる。Win-Winの関係でいきたいですね。



エルニーニョ現象発生時（2015年12月3日）の海面水温分布。人工衛星による観測データで、太平洋熱帯域の東部が高温（赤～白）、西部が低温（青～紫）になっている。



ラニーニャ現象発生時（2010年12月26日）の海面水温分布。人工衛星による観測データで、太平洋熱帯域の東部が低温（青～紫）、西部が高温（赤～白）になっている。

画像提供：NASA/JPL-Caltech

ニーズを捉えた情報発信で 気候の影響を軽減させたい

—JAMSTECの季節予測は、どのように使われているのでしょうか。

野中: JAMSTECアプリケーションラボの「季節ウォッチ」というウェブサイトで、予測される極端現象を一般向けに解説しています。オーストラリアの農業関係者は、この情報を用いて農作物や牧畜の管理を行っています。また、季節予測をもとにマラリアの流行を予測して感染拡大を防ぐシステムの試験運用を南アフリカで始めています。予測するだけでなく、その結果をどのように応用できるか考えることが、私たちの重要な研究の一つです。

中三川: 予報を使ってもらおうというのは、簡単ではありません。気象庁では「季節予報」として、1カ月、3カ月、暖・寒候期について気温や降水量など大まかな天候を発表しています。あらかじめ天候が分かれば、対策をとることで悪い影響を軽減し、良い影響を活かせることから、季節予報の利活用を農業や飲料、アパレル、家電などさまざまな産業に呼び掛けてきました。しかし、季節予報では気温や降水量について「低い20%、平年並み30%、高い50%」といった確率で表現されるため、分かりにくいと言われ、農業分野以外ではあまり利用が進んでいませんでした。

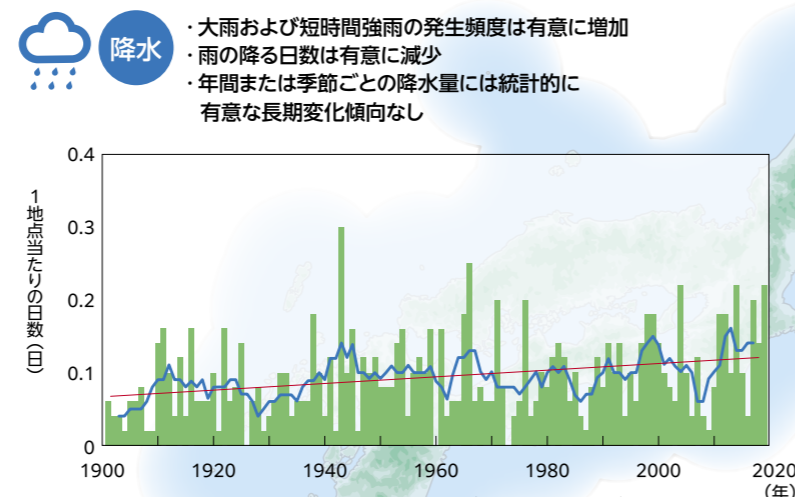
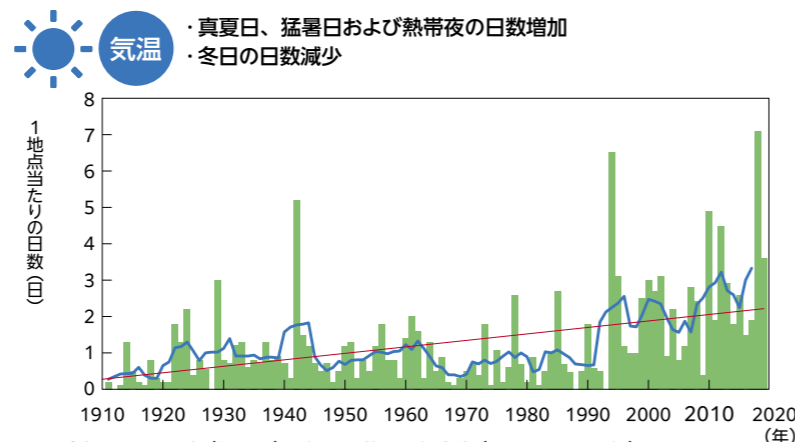
どうか活用してもらいたいと、さまざまな産業の人と対話を重ねて要望を聞き、2019年6月から発表を始めたのが「2週間気温予報」です。週間天気予報の先の2週間先までの地点ごとの最高気温と最低気温について各日の5日間平均を予報しています。すると、季節予報のウェブサイトへのアクセス数が格段に増えました。ユーザーの使いやすさとニーズを踏まえた情報提供が必要だと痛感しました。

極端現象は増えている？ 原因は温暖化か？

—極端現象は増えているのでしょうか。

後藤: 気象庁が積み重ねてきた観測データによれば、異常高温の日は増え、異常低温の日は減っています。雨の降り方では、日降水量が200mmを超えるような大雨が増えています。これは東京の平年の9月の月降水量に相当します。一方で、降水量が少ない月も増えています。つまり、雨の降り方が極端になっていると言えます。日本の気候変動についてこれまでに観測された事実は、文部科学省と気象庁

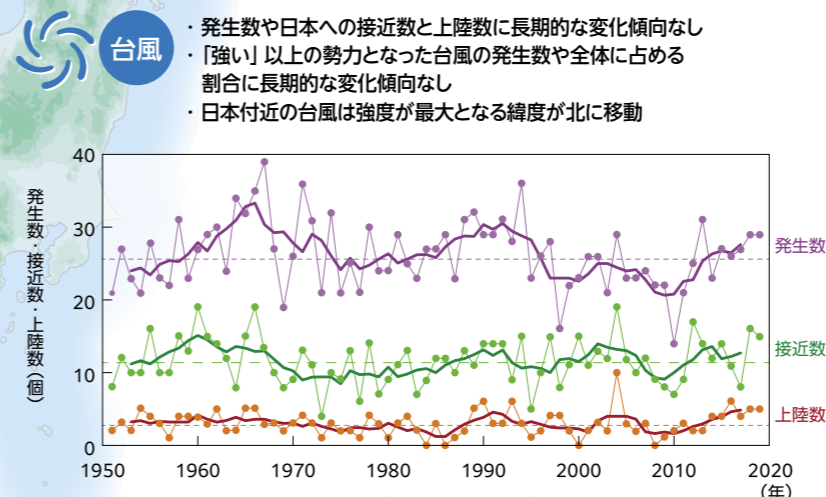
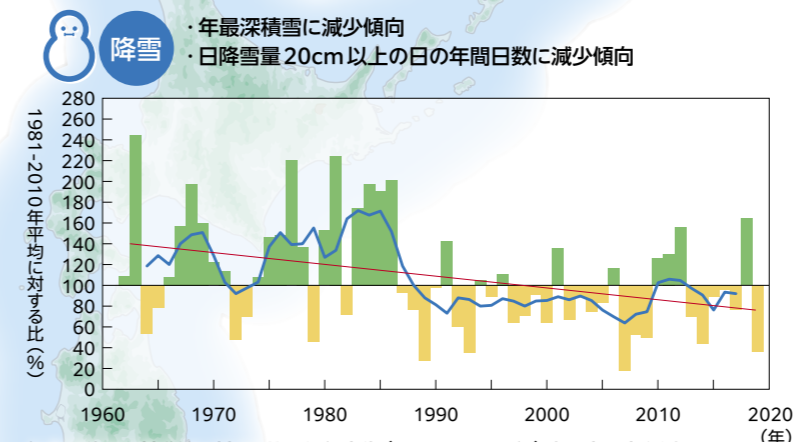
これまでに観測された日本の気候の変化



によって『日本の気候変動2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—』にまとめられ、気象庁のホームページでも見ることができます。

異常高温や大雨の日が増えているのは温暖化の影響なのかどうかという点に、皆さん関心があると思います。現在、JAMSTECの「地球シミュレータ」を活用して作成したデータセットを用いて気象庁気象研究所などが中心となって、さまざまな極端現象について温暖化の影響を受けているのか、いないのか、受けているのであればどのくらい発生しやすくなったのか、どのくらい降水が増えたのかを定量的に評価しようとしています。気象庁は、その結果を客観的に情報発

(文部科学省・気象庁『日本の気候変動2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—』をもとに作成)



信していきます。

異なる役割の中で重要なこと。 「海を知る」と情報交換

—JAMSTECへ、気象庁へ、それぞれの要望をお聞かせください。

中三川: 2020年12月の大雪は、ラニーニャ現象に加えて、日本周辺の海面水温が高かった影響もあったとみられています。黒潮続流の話が出ていましたが、日本周辺の海洋変動が日本の極端現象に与える影響について、JAMSTECによる研究の進展に期待しています。その成果を私たちにフィードバックしていただき、極端現象の要因分析や予測精度の向上に役立てたいと思っています。

後藤: 温暖化で蓄えられた熱の90%以上が海洋に吸収されているといわれています。極端現象や気候変動を理解し予測するには、海の状態を知ることがとても重要です。アルゴフロートという観測ブイを世界中の海に約3,000台展開し、水深約2,000mから表層までの海水温や塩分を10日ごとに自動で計測する国際プロジェクトが行われていて、気象庁もJAMSTECも参加しています。こうした地道な取り組みについても両方で続けていけたら、と思っています。

野中: JAMSTECは現象のメカニズムを解明する、気象庁は予報を出す、という役割の違いがあります。予報を出す際に重要だが分かっていない点を指摘していただき、私たちが研究する。その成果を気象庁の予報に役立てていただく。そういう関係が成り立つと、それぞれが役割を果たし、かつ成長できます。そのためにも情報交換の機会をつくっていきたくと思っています。これからもよろしくお願いします。

日本「暖冬」とアフリカ「バッタ大発生」に関連が？

2019～20年の冬、日本は記録的な暖冬となった。同じころアフリカではサバクトビバッタが大発生し、深刻な農業被害をもたらしていた。日本とアフリカ、暖冬とバッタの大発生。場所も内容も大きく違うが、背景には共通の現象があることが分かってきた。バッタ博士こと国際農林水産業研究センター（国際農研）の前野浩太郎さんと、JAMSTECで大気海洋相互作用や季節予測の研究を行っている土井威志さんが語り合う。



バッタ博士
前野浩太郎

国際農林水産業研究センター 主任研究員

神戸大学大学院自然科学研究科資源生命科学専攻博士課程修了。博士（農学）。日本学術振興会海外特別研究員としてモーリタニア国立サバクトビバッタ研究所に赴任。京都大学白眉センター特定助教などを経て、国際農林水産業研究センター生産環境・畜産領域主任研究員。2021年4月より現職。サバクトビバッタの防除技術の開発に従事。著書に『バッタを倒しにアフリカへ』（光文社新書）と児童書版『ウルド昆虫記』（光文社）がある。



季節予測
土井威志

JAMSTEC 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ
気候変動予測情報創生グループ 主任研究員

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士（理学）。アメリカ・プリンストン大学大気海洋科学講座ポストドクタープログラムなどを経て、2012年よりJAMSTECアプリケーションラボ 研究員。2020年4月より現職。主な研究テーマは、季節予測、熱帯域の気候力学、気候変動とその予測可能性に対する海洋の役割。

バッタの大発生は 始まりも終わりも雨が重要

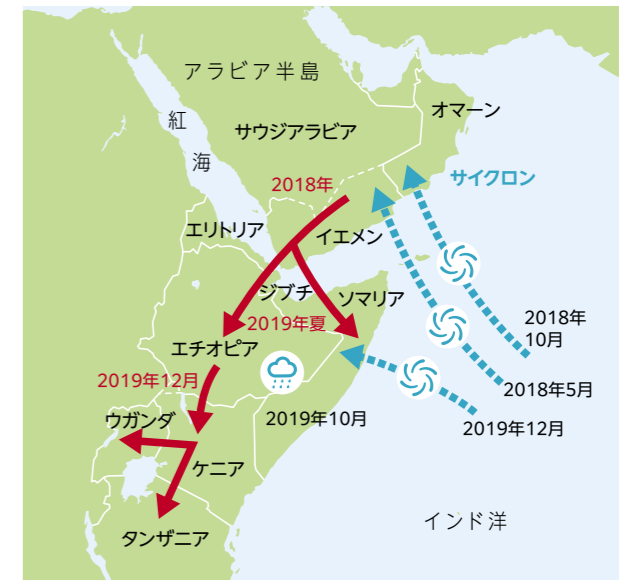
土井：お話しするのは初めてですが、ベストセラーとなった『バッタを倒しにアフリカへ』の著者として前野さんのお名前は存じており、今日はとても楽しみです。

前野：作家の朱野帰子さんがJAMSTECを舞台にした小説『海に降る』を献本してくださり、それが私とJAMSTECのファーストコンタクトでした。その後、この特集にも登場している茂木耕作さんをはじめ研究者とのつながりもできました。今回、土井さんとの対談を通じてJAMSTECの新たな魅力を知ることができればいいなと期待しています。

——サバクトビバッタの大発生についての報道を2020年初めくらいから見聞きます。どのようなことが起きていたのですか。

前野：今回の大発生の発端は2018年にさかのぼります。2018年の5月と10月に、アラビア半島にサイクロンが上陸しました。サバクトビバッタの生息地である半乾燥地帯にも大雨が降り、餌となる植物が繁茂し、バッタが急激に数を

サバクトビバッタの大発生と移動（2018年～）



増やしたのです。サバクトビバッタは、普段は数が少なく点在しているのですが、大発生したときには群れをつくって移動するようになります。バッタは風に乗って飛んでいき、移動距離は1日100kmにもなります。

アラビア半島を移動しながら世代を重ねてさらに数を増やした群れは、2019年夏までに紅海を越えて東アフリカのエチオピアとソマリアに渡ったと考えられます。2019年



飛行するサバクトビバッタの群れ

2020年3月31日、ケニア北部で国連食糧農業機関（FAO）のカメラマンが撮影。大発生したサバクトビバッタは野草だけでなく農作物も食べ尽くしてしまうことから、FAOはその個体数を監視し、各国に対して被害拡大を防ぐための支援を行っている ©FAO/Sven Torfinn

インド洋の変動の影響を受けるのは周辺だけではない。
空はつながっているから —土井威志

12月にはケニアに最初の群れが到達しました。バッタの群れは、野草だけではなく農作物も食べ尽くしてしまいます。2020年1月にはケニアにおけるバッタ発生規模が過去70年で最悪のものになりました。このころから世界中でバッタの大発生について大きく報道され始めたと思います。群れは、ウガンダやタンザニアへも到達しました。危惧された西アフリカへの移動は起きなかったものの、その後も発生は続きました。2021年4月時点でケニアでは群れが急速に衰退しているようです。

土井：大発生が一度起きると何年も続いてしまうのですか。
前野：1年で終息する場合もあれば、14年間続いたこともあります。殺虫剤の散布も終息に寄与しますが、最も利くのは自然によるブレーキです。雨が降らなければ、餌となる植物が枯れて大群を維持できなくなって死滅し、大発生は終息となります。バッタの大発生は、始まりも終わりも雨が重要な要因になっているのです。

土井：今回の大発生の発端になったアラビア半島へのサイクロンの上陸は、数年に1回あるかないかというまれなことです。インド洋の西側では、サイクロンは普通、南半球で発生して南に向かいます。ところが2018年には、北半球で発生して北に向かうサイクロンが2個もありました。

インド洋の変動が大雨をもたらす
アフリカでバッタの大発生が継続

前野：いつもの年と違ったのは、アラビア半島へのサイクロン上陸だけではありません。バッタの群れが2019年夏まで

に東アフリカに渡ったのですが、餌になる植物が枯れる冬には大発生が終息する可能性もありました。しかしその年は、10月に東アフリカの広い範囲で激しい雨が降り、12月には季節外れのサイクロンがソマリアを直撃しました。いつもの年には降らない大雨によってバッタの繁殖・発育に適した環境が維持されたため、大発生が継続したのです。

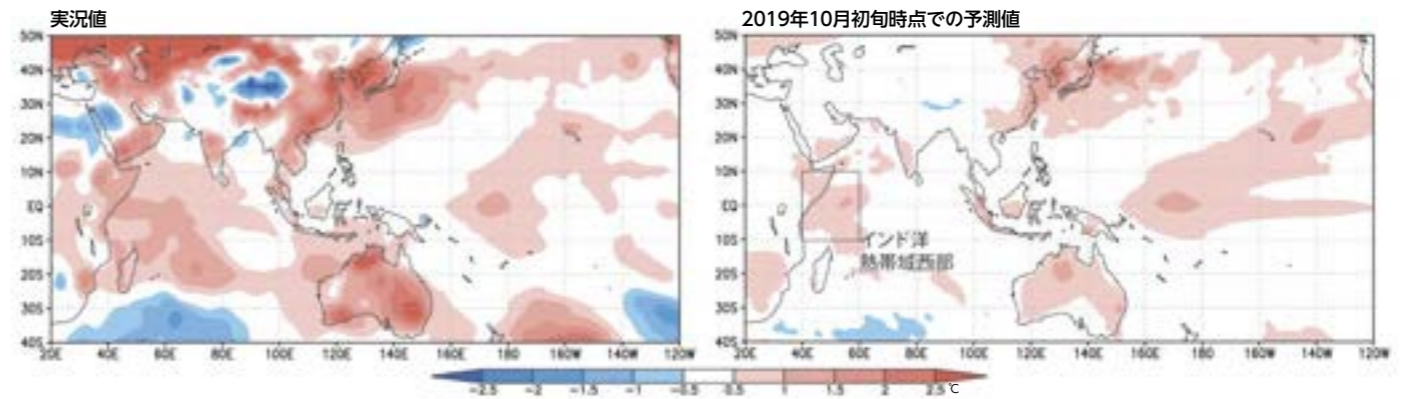
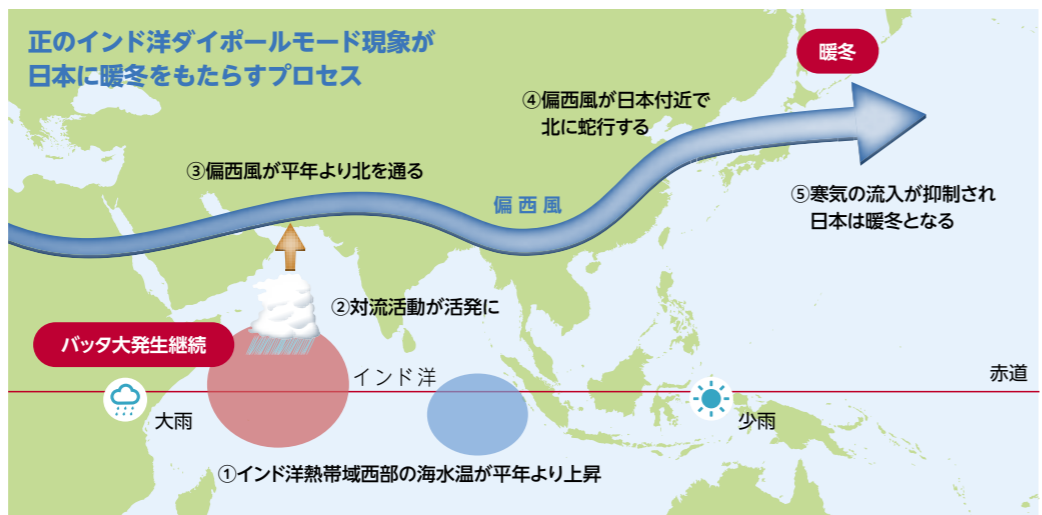
土井：2017年、2018年、2019年は、正のインド洋ダイポールモード現象が発生していました。インド洋ダイポールモード現象は、インド洋熱帯域で数年に1度くらいの頻度で夏から秋にかけて、海と空が互いに影響し合って自然に発生する現象です。正と負があり、正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると、インド洋熱帯域の海面水温が西側で平年より高くなり、東側で低くなります。それに伴って大気の大気対流活動が変わり、東アフリカで雨が多くなり、インドネシアやオーストラリアでは雨が少なくなります。2019年の正のインド洋ダイポールモード現象は過去最強クラスで、10～12月の東アフリカはとてつもない状況になっていました。

前野：インド洋ダイポールモード現象は、干ばつの発生にも影響するのですか。

土井：負のインド洋ダイポールモード現象が発生すると、正のときとは逆で、東アフリカで雨が少なく、インドネシアやオーストラリアで雨が降りやすくなります。

前野：これまでの例から、大干ばつの後に大雨が降るとバッタが大発生しやすいといわれています。大干ばつになると植物が枯れ、バッタもその天敵も死にます。しばらくして雨が降ると、植物が繁茂します。そこにいち早く到達できるの

正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると、日本では暖冬、猛暑になる傾向がある。また、東アフリカでは大雨、インドネシアやオーストラリアでは少雨になる傾向がある。
負のインド洋ダイポールモード現象が発生すると、東アフリカでは少雨、インドネシアやオーストラリアでは大雨になる傾向があるが、日本の気候への影響はまだよく分かっていない。



2019年から2020年にかけての日本の暖冬予測

2019年12月から2020年1月の2カ月間で平均した地上2m気温の偏差（平年からのずれ）を表している。左は実況値。右はJAMSTECアプリケーションラボによる2019年10月初旬時点での予測値（108アンサンブル予測シミュレーションの平均値）。2019年10月初旬時点で、日本付近の暖冬やインド洋熱帯域西部の高温偏差などの予測に成功していたことが分かる。

は、ほかの場所で細々と生き延びていた飛翔力のあるサバクトビバッタです。天敵がない環境は生存に有利で、さらに大雨が降ることで世代を重ね、数が爆発的に増え大発生に至ると考えられています。バッタの大発生の全てをインド洋ダイポールモード現象で説明できるわけではありませんが、リンクはしていると思います。

スーパーインド洋ダイポールモード現象
によって日本では暖冬に

土井：インド洋ダイポールモード現象の影響を受けるのは、インド洋周辺だけではなく、空はつながっていますから、インド洋で起きた変動の情報を、大気の波がはるか遠くまで伝えます。2019年から2020年にかけて日本は記録的な暖冬となりました。これは、正のインド洋ダイポールモード現象の影響が大きかったと考えられています。

正のインド洋ダイポールモード現象が発生していると、日本では猛暑や残暑が厳しくなる傾向があることが知られていました。しかし、冬への影響については、よく分かっていませんでした。インド洋ダイポールモード現象は通常、夏から秋にかけて発達して、その後、急速に衰退します。そのため、冬への影響は顕著に表れなかったのです。

2019年に発生した正のインド洋ダイポールモード現象は、過去最強クラスとなりました。2019年5月ごろから急成長し、11月に最盛期を迎え、12月に衰退し始めたものの終息したのは2020年1月になってからです。そのため、日本の冬への影響が顕著に表れたのです。

前野：日本の暖冬はインド洋ダイポールモード現象だけで全て説明できるのですか。

土井：太平洋熱帯域の変動であるエルニーニョ現象が発生した場合も、暖冬になる傾向があります。日本の気候は、

太平洋やインド洋、大西洋、そして日本周辺の海洋変動の影響を複合的に受けています。海洋とは無関係の場合もあり、暖冬の原因の一つで説明することは難しいです。ただし、インド洋ダイポールモード現象が東アジアの冬の気候に与える影響はこれまで考えられていたより大きいことが分かり、今後はそのプロセスの解明など、さらなる研究が求められています。

発生を予測し被害を抑える。
その難しさは「天候」も「バッタ」も共通

——インド洋ダイポールモード現象の発生は予測できないのでしょうか。

土井：JAMSTECアプリケーションラボでは、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を使った数理予測シミュレーションに基づいて、インド洋ダイポールモード現象や太平洋熱帯域のエルニーニョ現象、ラニーニャ現象の発生、さらにそれらが引き起こす世界各地の猛暑や暖冬、多雨、少雨といった季節の天候不順を予測し、毎月「季節予測」として発信しています。

エルニーニョ現象、ラニーニャ現象は、発生1年前に高い精度で予測できるようになってきました。インド洋ダイポールモード現象については、それらより難しく、発生数カ月前の予測で5～6割当たるといった状況です。ただし、2019年の発生は、前年の秋から予測に成功していました。

写真提供：佐藤克文／東京大学大気海洋研究所



ウミガメのバイオロギング

生物にロガー（送信機やセンサー）を取り付けてその行動や生態について調査研究することを「バイオロギング」という。ウミガメのバイオロギングによって取得した水温データを用いることで、数カ月先の海水温変動の予測精度が向上した。写真は、インドネシアのワルマディ海岸でロガーを取り付けられた後、海に戻っていくウミガメ。ロガーはエポキシ系接着剤で装着され、1～2年後に自然に脱落する。

太平洋熱帯域のエルニーニョもどき現象がその発生に強い影響を及ぼしていたことが、その予測に成功した鍵だと考えています。そして2019年秋の時点で、2020年にかけて日本が記録的な暖冬になることを予測していました。

私たちは、この季節予測を南アフリカにおけるマラリアの流行防止に役立てようとしています。マラリアは、マラリア原虫を保有する蚊に刺されることで起きる感染症です。蚊の繁殖や活動には、気温や降水量が影響します。南アフリカの気温や降水量を予測し、その情報を用いてマラリアの発生がいつ、どこで、どの程度増えるかを予測するのです。予測に基づいて殺虫剤の噴霧計画を立て、リスクの高い時期・地域に人材を配置し医薬品を備蓄することで、マラリアによる被害を抑え込むことを目指しています。

前野：サバクトビバッタについても、人工衛星で観測した

降水量や土壌水分量、植物の広がりなどから大発生を予測する技術の開発が進められています。しかし、バッタの大発生が起きるのは開発途上国が多く、毎年起こるわけではない大発生に備えて殺虫剤などの物資や散布を行う人員を常に確保しておく余裕がありません。そのため大発生を予測できても、迅速に防除することが難しいのです。しかも今回の大発生では、新型コロナウイルスの影響で物資の輸送が妨げられ、専門家を国外から呼ぶことができないなど、防除活動がいつそう難しくなりました。大発生が終息した後、次の大発生に対する備えを維持できる環境を整えることが、重要な課題です。

温暖化が進むと バッタの大発生はどうなる？

——温暖化はバッタの大発生にも影響を与えるのでしょうか。

前野：温暖化による直接的な影響としては、バッタは高温ほど発育が早まるため孵化に要する期間や幼虫でいる期間の短縮などが考えられ、年間の世代数などが変化するとされています。また、植物が生える時期や種類が変わったり、天敵の数や種類が変化したりすることで、間接的な影響を受けるでしょう。その結果、バッタの大発生の頻度や規模が変化する可能性があります。

土井：今回の大発生の発端となったアラビア半島へのサイクロン上陸の背景には、インド洋の海水温の上昇が関係しているといわれています。温暖化が進むと、サイクロンが増えるという予測もあります。また、乾燥している地域はもっと乾燥し、雨が多い地域はもっと雨が降ると予測されています。大干ばつと同じように、温暖化で乾燥が進んだ地域にサイクロンや正のインド洋ダイポールモード現象の影響で大雨が降ることによって、バッタの大発生が起りやすくなるかもしれません。

前野：温暖化した環境でバッタの大発生が起きると、これまでバッタが生息していなかった地域にも侵入し被害が出るのが懸念されています。逆に、これまで発生していた地域で発生しなくなることも考えられます。

ウミガメで、バッタで、バイオロギング

——前野さんはアフリカで野外調査を行っているそうですね。

前野：2020年は新型コロナウイルスの影響で断念しました

が、毎年9～12月に西アフリカのモーリタニアへ行き、サバクトビバッタがどこで何を食べて繁殖しているかといった生理・生態学的な研究をしています。

サバクトビバッタについては、人工衛星を用いた調査や実験室での研究が盛んに行われています。一方で、野生のサバクトビバッタの生態調査は40年もの間、行われていませんでした。一人くらい別のことをやっていた方がいいだろう、それが自分の役割だと思ったのです。野生のバッタの行動を観察し理解することで、効率よく退治できる方法を編み出せないか、という着眼点で取り組んでいます。

一つは、バッタの体温調節行動を調べています。砂漠は1日の中で寒暖の差が激しいため、変温動物であるバッタは、寒ければ暖かい場所へ、暑ければ涼しい場所へ移動することで体温を一定に保とうとします。気温とバッタの行動の関係が分かれば、広域の気象情報からバッタがどこに移動していくか行動を予測できるようになるでしょう。それを目指し、バッタの群れをサーモグラフィーカメラで撮影して気温とバッタの体温を測定しているのですが、バッタは広範囲を移動するので群れを探すのも大変です。

土井さんがウミガメのバイオロギングで得た海洋データを季節予測に利用しているというプレスリリースを読んで、面白いアプローチだと思いました。バッタでも詳細な環境データを取得し、移動経路を追うことができるバイオロギングができればいいのですが。

土井：私たちの研究に興味を持っていただき、ありがとうございます。人工衛星によって海洋の観測データは増えていますが、地形が複雑な縁辺海などの観測データは不足しています。そこでウミガメに深度・水温観測装置を付け、そのデータを利用したところ、数カ月先の海水温変動の予測精度が向上しました。バイオロギングの装置がもっと軽量化できれば、バッタにも使えるかもしれません。

前野：バッタは1日に100km飛ぶといわれていますが、個体を追跡して得られた数字ではありません。バイオロギングによって正確な移動距離や経路や環境データを測定できたら、バッタの生態の理解に役立ちます。

分野を超えた協力で人類が 悩まされている問題の解決に貢献したい

——今後、どのような研究をしようとお考えですか。

前野：サバクトビバッタが大発生して悪者扱いをされてい

ます。しかし冷静に考えると、過酷な環境で生活して、しかも遠くまで飛んでいくことができるなど、すごい能力を秘めています。バッタの能力の一つずつ解き明かしていきたいというのが、生物研究者としての願望です。

私には、もう一つ夢があります。バッタを自由自在に操り、バッタの大群に包まれたいのです。おかしな夢だと言われそうですが、バッタを1カ所に集めて捕獲するといったことも可能になり、防除活動の飛躍的な向上にも役立つと思うのです。

土井：今後、温暖化による変化の上にエルニーニョ現象などの影響が重なることで、猛暑や暖冬などがより極端になり、さまざまな被害が生じる可能性があります。季節予測がより重要になってきますが、予測精度が大幅に上がって天気予報のレベルになることは、理論的には難しいでしょう。それでも私たちが持っている科学技術を駆使して予測が可能なお場合には、その結果を対策に結び付けてもらえるように社会に働き掛けていかなければならないと考えています。

前野：バッタの大発生による被害を抑えるには、バッタについて知るだけでなく、気候や土壌、植物、社会など複合的な関係を踏まえて研究していく必要があります。JAMSTECとのコラボレーションによって、人類が悩まされている問題の解決に貢献していきたいと思っています。

土井：私も同じく、分野の垣根を越えて協力し合うことで、人類の幸せに資することを目指していきたいです。

写真提供：前野浩太郎／国際農林水産業研究センター



群生相のサバクトビバッタの幼虫（上）と成虫（下）

低密度下で発育した個体は孤独相、高密度下で発育した個体は群生相と呼ばれる。群生相化すると、生理、生態、形態、さらに行動まで変化する。孤独相のバッタは互いを避け合うが、群生相のバッタは互いに誘引し合い群れて集団移動する。また群生相のバッタは発育・繁殖能力が向上し、害虫化する。成虫の体長は6～8cm。

線状降水帯の正体

毎年のように梅雨の時期に豪雨災害が起きている。豪雨の原因として注目されているのが、線状降水帯である。

線状降水帯とは？ 線状降水帯はなぜ出現するのか、予測はできないのか。

気象予報士の佐々木恭子さんと、『梅雨前線の正体』の著書もある

JAMSTECの茂木耕作さんが語る。



気象予報士
佐々木恭子

合同会社てんコロ. 代表・気象予報士

早稲田大学第一文学部卒業後、テレビ番組制作会社に入社。バラエティー番組のディレクターを経て、2007年気象予報士の資格を取得し民間の気象会社へ。自治体防災向け局地予報、高速道路・国道向けの雪氷予測などを担当。予測業務のほかにカルチャースクールや資格取得スクール講師を行う。YouTubeで天気ネタを発信。2019年には最新のサイエンスとアートが融合した気象エンタテインメント「てんコロ. 学会2019」を開催。



気象“楽”者
茂木耕作

JAMSTEC 地球環境部門 大気海洋相互作用研究プログラム 副主任研究員

名古屋大学大学院環境学研究科博士後期課程に進学。博士(理学)。京都大学防災研究所水資源研究センターポスドク研究員を経て、2005年よりJAMSTEC研究員。2020年より現職。主な研究テーマは熱帯西部太平洋上での対流。アジア全体の大気海洋観測がどうあるべきかを模索している。著書に『梅雨前線の正体』(東京堂出版)、『天気と気象についてわかっていることないこと』(共著、ベレ出版)がある。

線状降水帯はいつでもどこでも発生

——2020年7月の九州、2018年7月の西日本、2017年7月の九州北部と、毎年のように梅雨の時期に記録的な大雨が発生しています。気象予報士である佐々木さんは、こうした大雨の発生をどのように見ているのでしょうか。

佐々木：それらの大雨は、線状降水帯によってもたらされました。天気図を見ると、これから線状降水帯が出現しそうかどうか分かります。そういうときは、大雨が降り続く

という予報を多くの方が受け取って災害に備えてほしいと思います、また線状降水帯がいつまで居座るのかと天気図から目が離せず憂鬱な気分になります。

茂木：天気図を読めると、これから何が起きるか分かってしまうんですね。線状降水帯という言葉がメディアでよく使われるようになったのは、ここ8年ほどでしょう。そのため、最近出現するようになった現象だと思っている人が多いかもしれません。実際には、線状降水帯は昔からありましたし、梅雨の時期だけ、九州だけでなく、いつでもどこでも発生します。

佐々木：私が気象予報士の資格を取得したのは15年ほど前ですが、そのころも線状降水帯は必ず学ぶところでした。最近では急に有名になって、名前だけが独り歩きしてしまい、不必要に不安をあおるだけの誤った使い方がされている場合もあります。降水域が線状であるだけで大雨になるとは限りません。積乱雲が列を成して同じような場所から動かず、狭い範囲に集中的に強い雨をもたらしてしまう場合に線状降水帯という言葉を用いて警戒を呼び掛け、災害に備えてもらいたいのです。

茂木：強い雨をもたらす積乱雲は、できてから1時間くらいで消えていき、水平方向の大きさは10kmほどなので、積乱雲が1個できただけで豪雨災害に結び付くことは、まずありません。しかし、積乱雲が同じ場所で次々とできて、それらが風に流されて同じ経路で移動しながら発達すると、降水域が線状に連なり、同じ場所に雨が降り続けることとなります。それが線状降水帯です。1時間当たりの降水量が20mm未満のやや強い雨程度でも、それが24時間、48時間、72時間と積み重なることで、災害を引き起こす降水量に達してしまうのです。誤った使い方をされると、本当に必要なときに正しい情報が伝わらず、避けられたはずの災害が起きてしまうこともあるので注意が必要です。

海面水温の上昇で「雨の材料」が増えている

——線状降水帯は昔からあり、いつでもどこでも発生するの

であれば、最近、梅雨の時期に九州で線状降水帯による大雨が多いのには、何か理由があるのでしょうか。

茂木：暖気と寒気がぶつかる前線で、積乱雲が発生し、雨が降ります。前線は普通、南北に移動したり、東西に移動したりします。しかし、梅雨前線は南側にある太平洋高気圧と北側にあるオホーツク海高気圧や黄海高気圧の間に形成され、いずれの高気圧も動きにくいいため、梅雨前線は南北に移動できません。また、もともと東西に伸びているので、東西方向に少し移動しても、配置はほとんど変わりません。そこに暖かく湿った空気が吹き込んでくると、積乱雲が次々と発生し、固定された梅雨前線に沿って移動しながら発達するため、積乱雲が一行に連なります。梅雨の時期は、線状降水帯が形成される舞台が整っているのです。

また梅雨の時期は、海面水温が高くなります。海面水温が高くなると、大気に供給される水蒸気量が増えます。それが雨の材料です。近年、地球温暖化に伴って海面水温も上昇しています。しかも、日本周辺は世界の中でも海面水温の上昇が激しい海域です。そのため、日本周辺では大気に供給される水蒸気量が、以前より大きく増えています。線状降水帯が形成される舞台が整っているところに、雨の材料をたっぷり含んだ暖かい空気が吹き込んでくれば、同じ場所に大雨が長く降り続くと決まってしまうのです。

佐々木：2020年7月の九州の大雨は、九州北東部の梅雨前線上にあったメソ低気圧という小さな低気圧の影響も指摘されていますよね。

線状降水帯の形成

線状降水帯が形成される仕組みの一つが「バックビルディング（後方形成）」である。暖かく湿った空気が山や冷たい空気の塊などにぶつかって上昇して雲が発生し、積乱雲まで成長する。積乱雲は上空の風に流されて前方へ移動しながら発達し、強い雨を降らせる。後方の同じ場所で新しい積乱雲が発生し続けられ、積乱雲が列を成し、前方の積乱雲が衰弱して雨が弱まりかけても後方から移動してきた次の積乱雲がまた強い雨を降らせるため、強い雨が長時間続くことになる。

積乱雲の流される向き

線状降水帯の後方 新しい雲

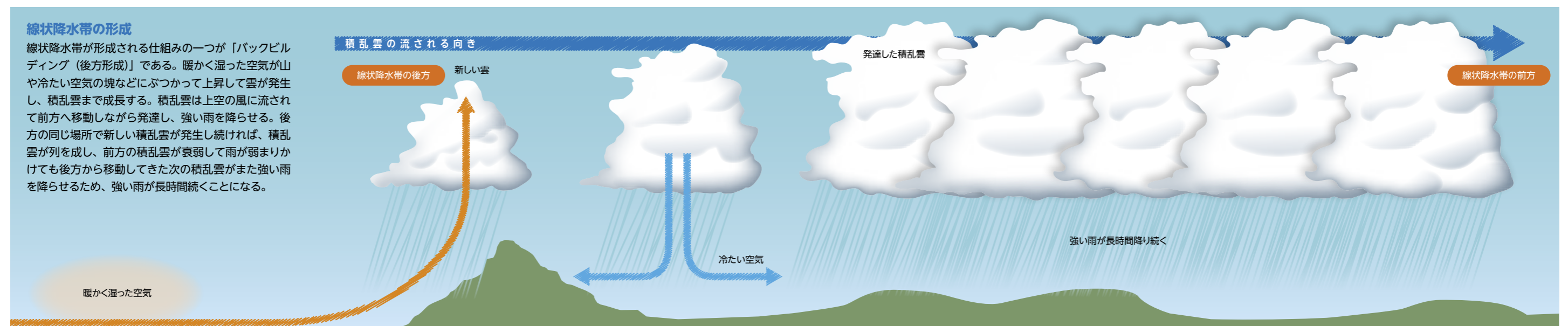
発達した積乱雲

線状降水帯の前方

暖かく湿った空気

冷たい空気

強い雨が長時間降り続く



茂木：メソ低気圧の西側では風速が大きくなり、暖かく湿った空気がどんどん吹き込んでいきます。しかも、九州の西に位置する東シナ海の海面水温がとても高いため、非常にたくさんの水蒸気を含んだ空気が吹き込んできたことから、降水量が増えました。このようにメソ低気圧など気象条件の影響で線状降水帯の長さや幅、維持される時間、総降水量は毎回変わりますが、そもそも海面水温が高い東シナ海に面している九州は、特に梅雨の時期に線状降水帯が形成される条件がそろいやすいのです。ただし、条件がそろえば、いつでも、どこでも線状降水帯による大雨が発生する可能性があることには、注意しておく必要があります。

— 線状降水帯による豪雨災害の頻発は、地球温暖化が影響しているのでしょうか。

茂木：豪雨災害は昔から日本各地で起きていますが、そのたびに最大降水量などの想定を見直し、それに耐えられる治水対策をしてきました。だから被害は少なくなっているはずですが、実際には豪雨災害が発生しています。それは、想定を上回る雨が降っているからです。そうした大雨が温暖化の影響かどうかは、これまでかなり慎重に表現してきました。しかし、さまざまな観測と研究の積み重ねの結果、2015年くらいからは、梅雨における大雨の増加は温暖化

によって海面水温が上昇し大気へ供給される水蒸気量が増えた影響である可能性が非常に高い、と判断できる根拠が整ってきています。

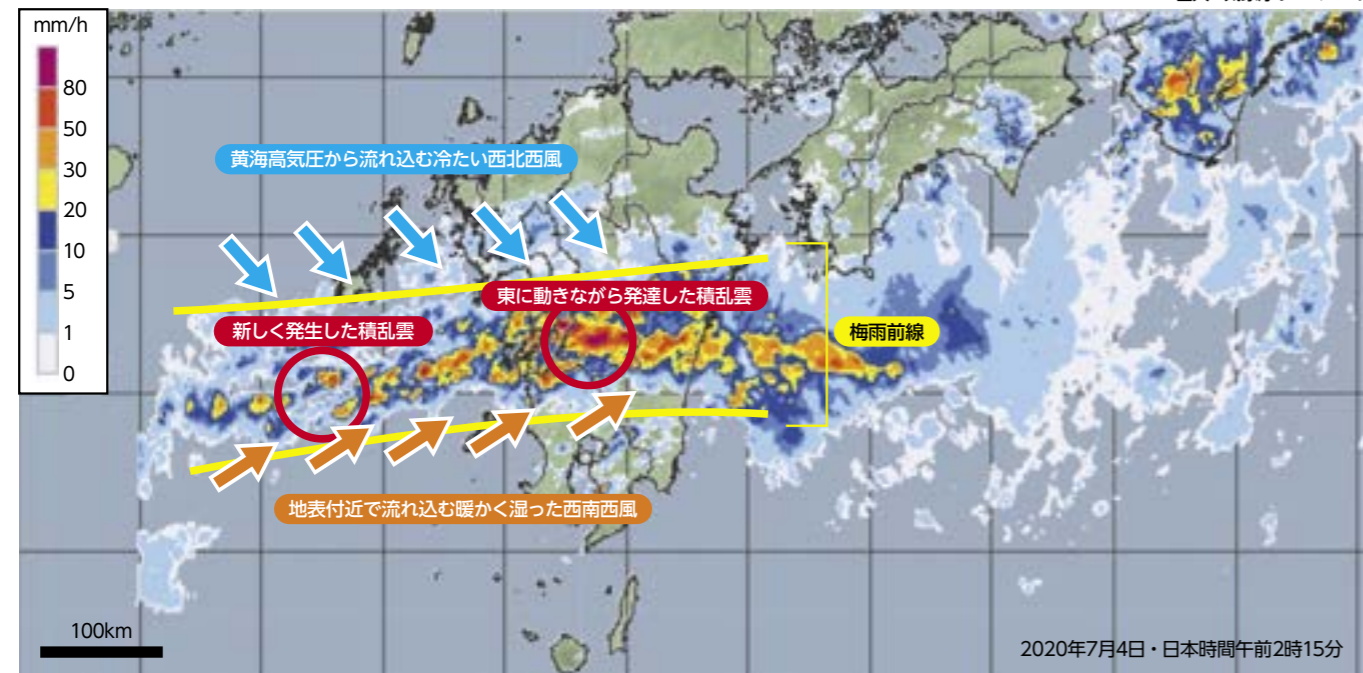
「線状降水帯の予測は難しい」を打破する！

— 天気図を見ると線状降水帯が出現しそうかどうか分かるのとことでしたが、線状降水帯の予測は難しいという報道も見聞します。

佐々木：線状降水帯が出現しそうなのは天気図から分かって、その位置を正確に予想したり、線状降水帯がどのくらいの時間維持されて雨が降り続けるかを予測することは難しいです。

茂木：難しいというのはできないという意味ではなく、100点満点に1点でも近づこうとしているのですよね。豪雨被害を防ぐために求められているのは、線状降水帯の出現を早く予測し、また降水量を正確に予測することです。3時間前ではなく1日前に災害レベルの大雨になることが分かれば、明るい時間帯に避難所に行くことができます。また、24時間の予想降水量が200mmで河川は氾濫しないと見込

出典：気象庁ホームページ



2020年7月、熊本県南部で豪雨が発生していた際の気象庁レーダーによる降水強度分布

海面水温が高い東シナ海上で、水蒸気をたくさん含んだ暖かい空気と北からの冷たい空気がぶつかり積乱雲が発生し、雨が降り始める。積乱雲は梅雨前線に沿って東へ移動しながら発達し、雨も強くなっていく。積乱雲が次々と発生して列を成し、線状降水帯は10時間前後維持された。雨量が積み重なった結果、熊本県で24時間降水量が400mmを超えた地点が複数あった。

まれていたにもかかわらず、実際は220mmとなり堤防が決壊してしまった、ということが現実にあります。200mmか300mmではなく、200mmか220mmかを予測する必要があります。気象庁をはじめとしたさまざまな研究機関では、線状降水帯の予測精度の高度化に向けた研究を継続的に進めています。

降水量の予測において大きな課題になるのが、大気を含む水蒸気の量をどうやって正確に知るかということです。特に、海の上での情報が不可欠です。しかし、全国に約1,300の観測点がある地上と違い、海の観測点は限られています。いかに海の情報を得るかが、線状降水帯の予測精度高度化の鍵です。また、予測精度が上がらないのは、その現象について根本的なことを分かっていないからかもしれません。なぜ線状降水帯が形成されるのか、そのメカニズム解明も重要です。それにはJAMSTECの研究も大いに貢献できるでしょう。

研究者と気象予報士がつながろう

佐々木：気象予報士としてやるべきは、今あるデータを限界まで使い倒して最善の予報を出すこと。また、予報を分かりやすい言葉で伝えることも重要です。しかし、「線状降水帯が出現して大雨になる恐れがあるので注意してください」と伝えても、その情報を受け取って災害に備える行動をしてもらえないことも多いのです。気象予報士として、情報を伝える難しさを感じています。

茂木：僕も、線状降水帯について正しく知ってもらい注意を喚起する必要があると思います。2017年から線状降水帯による大雨が発生するたびにJAMSTECのホームページに解説記事を出しています。2020年7月には、九州で大雨が降っている、まさにその時間に書いていました。

僕たち研究者は、予報を出す立場でもないし、たくさんの人に伝える発信力もありません。だから、気象予報士との連携が重要だと思うのです。気象予報士である恭子さんと知り合って8年ほどになります。僕が書いた『梅雨前線の正体』を読んで興味を持ち、JAMSTECの研究報告会に来てくれたんですね。真剣に話を聞くだけでなく、どんどん質問してくれました。そういう人は意外と少なく、自分の研究に興味を持ってもらえるのは、研究者としてとてもうれしいことです。

佐々木：普段、モテサクさんと呼んでいるのですが、モテ

サクさんは私がイメージしていた研究者と違ってました。研究者って面白い、もっと話を聞きたいと思いましたね。しかも、1聞くと100返ってくるんです。その出会いがきっかけとなって、気象予報士と気象研究者だけでなく、情報通信の研究者や映画監督、俳優、漫画家、デザイナーなどさまざまな人が参加するサイエンスコミュニケーションイベント「てんコロ。学会2019」の開催にもつながりました。

茂木：まずイベントとして行いましたが、分野や所属を超えた交流が日常にならないといけないですね。気象予報士と研究者も、もっとつながれるでしょう。例えば、今あるデータを限界まで使い倒して最善の予報を出すという発言がありました。僕たち研究者は世界中の海洋や大気に関するさまざまなデータを持っています。それも予報に関わるさまざまな解釈を深めたり、表現の幅を広げたりすることに役立つのではないのでしょうか。

佐々木：私は普段、企業などに向けて予報を提供しています。一般向けより詳細な予報なので、気象庁の細かい観測データも見て解釈します。しかし、研究で使うデータとなると、気象予報士が自力で理解するのは無理なものがたくさんあります。研究者に解説してもらわないと。

茂木：そう、ただデータを公開しただけでは使ってもらえませんよね。僕は、研究者はインフラだと思っています。気象予報士の皆さんには、ぜひ「研究者というインフラ」を使ってデータをより楽に理解し、気象情報の発信に活かしてほしいのです。

佐々木：気象予報士のレベルアップは常に必要です。研究者との連携も有効な方法だと思います。また、一般の皆さんには、天気に興味を持ってほしいですね。その上で、気象庁や気象予報士が出す情報をきちんと受け取れるようになれば、命や財産を守り災害の軽減につながられますので。

茂木：僕は、インドネシアなど熱帯太平洋に出掛けていき、熱帯の気象を観測し、その仕組みを研究しています。一方で、大学時代に取り組んだ梅雨の研究をライフワークとして続けています。梅雨は中学の理科の教科書にも載っていることでありながら、まだ分からないことがたくさんあるのです。梅雨の時期は天気予報の精度も下がるので、気象予報士さんにとっても手強い現象です。これからも梅雨や線状降水帯について分かりやすく正確な情報を発信していきたいと思っています。それが気象予報士さんや一般の方々の役に立ち気象災害の軽減につながったらうれしいですし、もっと研究を頑張ろうという気持ちになります。

極端な大気現象と温暖化との関係を「観測」と「モデル」から解く

JAMSTECでは、気候に関する観測研究とモデル研究を行っている。

観測研究者とモデル研究者が同じ組織にいる利点、

それぞれの立場から見た極端な大気現象と地球温暖化の関係、

そしてJAMSTECがこれから取り組むべきことについて、

観測研究を行う米山邦夫さんと、モデル研究を行う河宮未知生さんが語る。



地球システム
モデル
河宮未知生

JAMSTEC 地球環境部門
環境変動予測研究センター センター長

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士（理学）。東京大学気候システム研究センター研究員、ドイツ・キール大学海洋学研究所研究員などを経て、2006年よりJAMSTECグループリーダー。2019年より現職。専門は地球システム科学、気候モデリング。



熱帯観測
米山邦夫

JAMSTEC 地球環境部門
大気海洋相互作用研究プログラム プログラム長

九州大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士課程修了。博士（理学、名古屋大学）。2019年より現職。専門は熱帯気象学。海洋地球研究船「みらい」を用いた熱帯における観測プロジェクトに従事。

熱帯域の観測でも感じた 雨の降り方の変化

—近年の極端な大気現象の発生について、どのように捉えていますか。

米山：私は、熱帯域の太平洋やインド洋に船で行って観測し、熱帯気候のメカニズムや変動について研究しています。熱帯域の観測を30年ほど続けていますが、近年は降らないときはまったく降らず、降るときは非常に激しく、雨の降り方が両極端になっていると感じます。意識のし過ぎかもしれませんが。

河宮：北極域の観測であれば海水の減少など変化を捉えやすいと思いますが、熱帯域で観測している米山さんも変化を感じているんですね。

私は、気候モデルの研究開発を行っています。気候モデルとは大気や海洋などで起きる現象を物理法則の方程式で表したもので、それをスーパーコンピュータで計算していくことで気候をシミュレーションします。地球温暖化が進むと激しい雨など極端な大気現象が増加すると予測されています。私自身そのシミュレーションを行っているのですが、極端な大気現象が増えた実感するようになるのは、先のことだと思っていました。ところが5年ぐらい前からでしょうか、だいたい顕在化してきたなと感じています。それは私の印象ですが、科学的な裏付けも進んできています。

JAMSTECでは観測とモデルが 緊密に連携。気候研究の加速を実現

—気候研究において観測とモデルは、どのような関係にあるのでしょうか。

河宮：観測は現在の状態を知るために不可欠で、その積み重ねで過去からの変化を知ることができますし、観測データという土台なしにモデルはつくれず、シミュレーションもできません。しかし、未来を観測することは不可能です。一方、モデルを使うことで未来を予測できます。

米山：観測とモデルは、一定の距離を保ちつつ、互いの知見を使い合う関係です。ただし15年ほど前は違いました。私たちの研究対象の一つにマッデン・ジュリアン振動(MJO)があります。インド洋で東西数千kmにも及ぶ巨大な雲群が発生し、赤道に沿って東に進む現象です。熱帯域の気候を決めるだけでなく、日本をはじめ中高緯度の気候にも影響を与えますが、巨大な雲群がどのようにして生まれるのか、なぜ東へ進むのかなど、詳しいことは分かっていません。

私たちは、2006年に世界で初めてMJOの雲が発生する瞬間を現場で観測することに成功して発表しました。その少し後に、JAMSTECのモデルのグループが世界で初めてMJOの再現に成功したのですが、私はその発表を外部の人から教えてもらって知りました。同じ組織にいるのだから一

緒にやりましようとなったものの、初めのころはモデルのグループから毎日送られてくる予測をざっと見る程度でした。

河宮：それは全球雲解像モデル「NICAM」の予測ですね。NICAMは、仮定を用いずに全球の雲の生成・消滅を物理法則に従って直接計算し、超高解像度でシミュレーションできます。

米山：はい、NICAMは予測精度の高さから世界的にも評価されていて、特に強い雨を得意としている印象です。バルーンにセンサーを付けて大気の状態を測るラジオゾンデ観測はターゲットによって放球頻度を変えるのですが、短周期で発達する積乱雲を狙うときは衛星画像よりNICAMの予測を当てにすることがあります。

今では観測プロジェクトの準備段階から緊密に連携し、非常にうまくいっています。この関係は自慢していいでしょう。NICAMがあるからJAMSTECの観測プロジェクトに参加したいんだ、という海外の研究者もいます。

河宮：観測研究者と一緒にやると、モデル研究者は鍛えられます。モデルはコンピュータの中の仮想世界ですが、観測の人たちは本物を知っています。そして予測精度によって狙い通りの観測ができるかどうか決まるため、観測の人が予測を見る目はとても厳しく真剣です。しかし、予測は外れることもあります。すると私たちは、なぜ外れたのか原因を探り、どういうデータが不足していたのかを突き止めます。観測と一緒にやっていると、必要なデータをいち早く取ってもらうことができ、モデルの改良、予測精度の向上につながります。モデル研究者は観測研究者に学びながら喜んでいて、ということはあるのかもしれない。

気候モデルを開発している研究機関は世界にいくつかありますが、モデルと観測が緊密に連携しているという話は聞きません。観測と緊密に連携しているJAMSTECでは、モデルの開発・改良のスピードが、ほかと大きく違います。

米山：私たちは、モデルを鍛えているつもりはないんですよ。提示されたデータを取ることでモデルが向上するだけでなく、観測方法を考えたり、それまで観測していなかった項目や場所が現象のメカニズムの理解に重要だと気付かされたり、観測研究も進みます。観測とモデルは、ライバル



JAMSTECの
観測研究とモデル研究

ではなくパートナーです。

■ 極端現象と温暖化の関係が見えてきた

— 極端な大気現象は増えているのでしょうか。また、地球温暖化との関連はあるのでしょうか。

米山：気象庁では、過去に経験した程度から大きく外れた現象で、およそ30年に1回以下で発生するものを異常気象と定義しています。地球環境の観測に人工衛星が使えるようになったのが、1970年代です。また、JAMSTECも参加する国際プロジェクトによって1990年代から熱帯域に海洋観測のためのブイ網が展開されています。30年以上の観測データが蓄積されたおかげで、極端な大気現象が発生したときに、それを引き起こす現象との因果関係と絡めて評価できるようになってきました。しかし、それが温暖化の影響かどうかは、簡単には言えません。

世界中に異常気象をもたらす原因の一つにエルニーニョ現象があります。エルニーニョ現象は自然の変動で数年に1回発生しますが、観測データの蓄積によってエルニーニョ現象が頻繁に発生する時期とあまり発生しない時期が10年から数十年の周期で繰り返されていることが分かってきました。太平洋にはエルニーニョ現象より長い周期で海面水温が変動する太平洋十年規模振動があり、それがエルニー

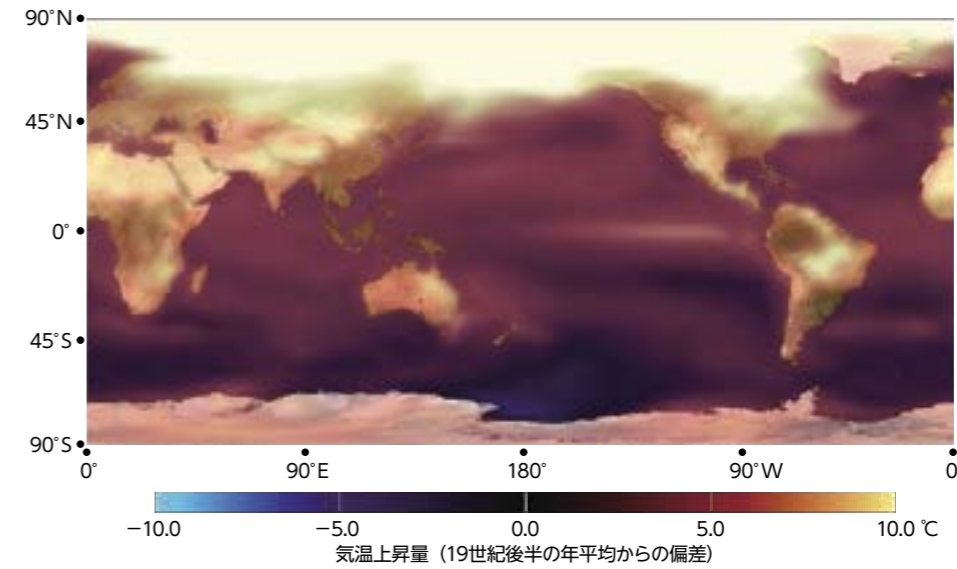
ニョ現象の発生に影響を与えているとの指摘があります。太平洋十年規模振動に影響を与える、さらに長周期の変動もあるかもしれません。異常気象が増加しているとしても、短周期だけでなく長周期の変動との関連、しかも自然変動の影響なのか、人間活動による温暖化の影響なのかを切り分けて考えなければいけないのです。議論できる世界が広がり、研究の新しいフェーズに入ったと感じています。

河宮：異常気象への温暖化の影響については、まだ印象だけで話がされていることが多いように思います。「温暖化がなかった地球」と「温暖化した地球」で、例えば大雨の頻度や程度がどう変わるかなどを比較するのは、気候モデルシミュレーションの得意とするところです。

気候モデルには、NICAMとは異なるタイプで、大気、海洋、陸域、表層の物質循環などの物理現象を扱う地球システムモデルと呼ばれるものがあります。私たちは気象庁気象研究所などと共に、地球システムモデルを用いてたくさんのシミュレーションを行うという手法で、温暖化が近年の日本の豪雨に与えた影響を評価しました。その結果、平成29年7月九州北部豪雨と平成30年7月豪雨における大雨の発生確率は、温暖化の影響がなかったと仮定した場合と比較して、それぞれ約1.5倍および約3.3倍になっていたことが分かりました。このように気候モデルを用いることで、異常気象に温暖化が与えた影響を科学的に評価できるよう

マッデン・ジュリアン振動に伴う雲

2015年12月13日、MJOに伴う雲の塊がインドネシア・スマトラ島西岸に到達。沖合50kmの海域で、YMCプロジェクトの予備観測を行っていた海洋地球研究船「みらい」にて撮影。(提供：茂木耕作/JAMSTEC)



2100年時点での気温上昇量の分布

19世紀後半を基準にして何℃変化するかを示している。最も二酸化炭素を多く排出する想定に基づく、地球システムモデル「MIROC-ES2L」によるシミュレーション結果。MIROC-ES2LはJAMSTEC環境変動予測研究センターを中心とした研究チームが開発している地球システムモデルで、気候に関わる物理的諸現象に加えて、海洋や陸の生態系活動なども同時に解くことができる。

になってきました。

■ 気候研究には人々の行動を変え 未来を変えるポテンシャルがある

河宮：気候モデルを用いると、これだけの二酸化炭素が大気中に増加すると気温が何℃上昇し、雨の降り方がどう変わるかといった予測ができます。将来に予測される降水量がダムや堤防の能力を超える場合、洪水が発生してしまいます。ダムや堤防がどのくらいの降水量に耐えられるのかを評価するのは気候科学の範囲ではありませんが、治水計画などに関わる人たちとの連携には気候科学の研究者は責任を持つべきだと思います。世のため、人のため。気候モデルは、その役目を担っているのです。

米山：私は、物の理を知りたくて、気候科学の研究をしてきました。一方で、気候科学は意識していなくても得られた知見が天気予報などに役立つ学問分野でもあります。ただし最近、自分の研究が社会に役立っているのかを意識するようになりました。温暖化の進行をすぐに止めることは難しいですが、かといって悲観的になるのではなく、洪水などの気象災害に対してどういった作戦が立てられるかを考える。そのとき、気候科学で明らかになった知見が使えるのではないのでしょうか。そのためにも、私たちは研究成果を広く発信していく必要があると思っています。

河宮：研究成果を正しく伝えるというのは、とても難しいと感じています。世界の研究機関や大学でいくつもの気候モデルが開発されています。それぞれ特徴があり、予測が正

反対になることもあります。一つの気候モデルの予測だけを見るのではなく、情報の窓口を広くするべきです。また、温暖化が進むと降水量が増加する、台風が強力になるというのは、そういう傾向があるということで、一つ一つの大雨や台風について言っているわけではありません。このように気候モデルの予測を見るときには注意しなければいけないことが多くあるため、私は一般の人たちに話すときは誤解されないようにあらかじめ表現を変えたりしていました。しかし新型コロナウイルス関連の予測に対する皆さんの受け取り方や行動を見ていて、考えが変わりました。

米山：予測は100%当たるわけではないと各自がエラーバーを設け、柔軟に受け取っているように思います。

河宮：そうなんです。しかも、感染者数の予測を見て、多くの人が外出を控えるなど行動を変えました。そのことに、私はとても驚いています。

今、国連の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第6次評価報告書の準備が進められています。それは科学研究から得られた気候変動に関する最新の知見をまとめたもので、前回の2013年から8年ぶりの更新となります。JAMSTECでは報告書のベースとなる科学論文を多数発表しており、2名の代表執筆者と1名の査読編集者が在籍し、報告書草稿の査読に多くの在籍研究者が関わっています。第6次評価報告書は、2021年8月に発表される予定ですが、その内容もそのままに伝えていく方がよいのかも思っています。新型コロナウイルスの場合のように、多くの人が温暖化予測を見て考え、行動を変えていくことが期待できるかもしれません。

新しい現場観測の在り方。
そして地球を変える駆動力の
78億分の1として

— 極端化する大気現象や進む温暖化について、今後どのような研究が必要だとお考えですか。

河宮: 温暖化が進むとエルニーニョ現象など自然変動の振幅や周期がどう変わるのかは、大きな関心事です。エルニーニョ現象は振幅が大きくなり、頻度が増えると予測をしている気候モデルが多いですが、逆の予測をしている気候モデルもあります。変動の上に変動が重なっているのでシミュレーションがとても難しく、しかも非常に観測しづらい量が鍵になっているようなのです。

米山: 観測しづらいとはいえ、方法はあるはずですが。鍵となっている量に関する手掛かりはありませんか。ヒントを提示してもらえば、私たちが当たりを付けて観測できるかもしれません。

気候モデルの高度化のために、観測点や頻度を増やす、新しい観測項目を追加する、といったことが求められています。観測項目としては新しくないけれども気候モデルのパラメーターとして使われていなかったものを入れることで、

精度が向上する可能性もあります。例えば、気象レーダーで観測した降水量。シミュレーションを行うときは観測データを取り込んで予測値を補正するのですが、降水量の場合、それが難しいという理由であまり使われていません。降水量は気象の基本要素ですから、うまく使えるようになれば予測精度の向上も期待できるのではないのでしょうか。

河宮: 最近、気候モデルのパラメーターをわざと抜いてみるという研究も盛んです。それによって、その現象のメカニズムに最も重要な項目が明らかになるかもしれません。

米山: 観測としては、水蒸気量を正確に測ることに力を入れようと考えています。水蒸気は雨の源です。また、温室効果物質としては二酸化炭素が有名ですが、最も温室効果の高い物質は水蒸気なのです。水蒸気量を正しく把握することは、短期的な豪雨の予測、長期的な温暖化の予測にも不可欠ですし、温暖化の指標として使えるかもしれません。

河宮: 産業革命以降、地上の平均気温は約1℃上昇しました。気温が1℃上昇すると、大気中に含まれる水蒸気量は6~7%増えます。

米山: ところが、大気海洋相互作用研究プログラムの藤田実季子さんたちが、一般には位置を計測する装置として知られているGPSの信号を使って日本の上空の水蒸気量を計

測したところ、11~14%の変化率で気温とともに増加しているという結果になりました。現在この手法を応用して、船舶やウェーブグライダーと呼ばれる無人機に受信機を搭載して、海洋上空の水蒸気測定にも着手しています。

新型コロナウイルスは、観測にも影響を及ぼしています。MJOは、インドネシアやフィリピン周辺の海と陸が混在する海大陸で急に進行方向を変えたり消滅したりします。その変調過程とメカニズムを解き明かそうと、2017年から国際観測プロジェクトYMCを実施しています。しかし私たちは1年以上、海大陸の国々に行くことができず、現地の人に指示を出して観測してもらっている状況です。現地に行かなくてもよい新しい現場観測の在り方を考える必要があります。その場合、いつ、どこで、何を観測するべきかという気候モデルからの提示が、これまで以上に重要になるでしょう。

一つ、河宮さんに聞いたかったことがあります。最近、さまざまな分野でAI（人工知能）が導入されていますが、気候モデルへのAI導入はどのような状況ですか。

河宮: JAMSTECのモデル研究者の中にもAIを取り入れている人がいて、例えばシミュレーションの過程で観測データを取り込んで予測値を補正するときにAIを使えないか検討されています。物理方程式を計算していくのではなくAIで

判断してしまおう、という考えもあります。今後、気候モデルでもAIの導入が盛んになっていくでしょう。

地球では氷期と間氷期が10万年ほどの周期で繰り返されてきました。それは自然の変動で、最終氷期から間氷期に移る約1万年間で気温は4~7℃上昇しました。一方、この100年では約1℃上昇しています。一生物種にすぎない人類が、自然変動の10倍もの速度で地球環境を変えているのです。自分はその駆動力の78億分の1です。だからこそ私は、地球環境がどのような仕組みで変化するのかを理解したいと思うのです。

私が大学生のころ、大気と海洋がつながった気候モデルがつくられ始めました。私は研究室の窓から森林を眺めながら、気候モデルに植物を組み込めたらいいなと思っていました。今ではそれが実現しています。しかし、永久凍土からのメタン放出など、重要でありながら気候モデルに入っていないプロセスもたくさんあります。地球で起きている重要なプロセスを全て取り込んだ気候モデルを開発し、地球環境システムを理解し、未来の地球を予測し、温暖化対策のために必要なデータを創出していく。それがJAMSTECに求められていることだと思っています。

(文・鈴木志乃/フотンクリエイト)

