

祝 2021年ノーベル物理学賞受賞

真鍋博士が切り開いた 気候モデル開発の半世紀

取材協力

河宮未知生

地球環境部門
環境変動予測研究センター
センター長



真鍋淑郎 博士

JAMSTECのフェローである

真鍋淑郎 博士(米国 プリンストン大学上席研究員) が、

2021年のノーベル物理学賞を受賞された。

受賞理由は、「地球の気候の物理的なモデル化、気候変動の定量化、地球温暖化の確実な予測」に対してだ。

1960年代、真鍋博士によって始まった気候モデルによる温暖化研究は、その後、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の活動につながり、世界中が温暖化対策を進めるようになった。

真鍋博士は1997～2001年、JAMSTECに在籍して

地球温暖化予測研究領域を率いた。その研究を受け継ぐ

環境変動予測研究センターの河宮未知生センター長に、

真鍋博士の業績と気候モデルの進展について聞いた。

■ 温室効果でマイナス18℃が プラス15℃に

——まず地球温暖化の仕組みについて
教えてください。

1820年代にフランスの数学者
フーリエは、地球の大気には毛布の
ような役割をして熱を閉じ込める温
室効果があることを指摘しました。

地表面は太陽光によって暖められ
ています。そのままでは地表面の温

度は際限なく上昇しますが、地表面
は赤外線を出して宇宙へ熱を逃が
しています。太陽光から入射する熱
と宇宙へ放出する熱が釣り合う温度
を計算すると、地上の平均気温は
－18℃になります。

実際には、地上の平均気温は現在
＋15℃ほどで、33℃の差がありま
す。その差を埋めているのが、大気
中の水蒸気や二酸化炭素（CO₂）、オ

ゾンなどの温室効果ガスです。

温室効果ガスは地表面から宇宙へ
逃げていく赤外線を吸収して、再び
赤外線を放出します。その一部が地
表へ戻ってくことで、地上の気温
を33℃分、上昇させているのです。
温室効果ガスが増え、毛布が厚
くなるように温室効果が高まり、地
球温暖化が進みます。

それでは、大気中のCO₂が2倍に
増えたら、気温はどれだけ上昇する
のか。それは「気候感度」と呼ばれて
いますが、スウェーデンの化学者ア
レニウスは、5～6℃上昇するという
計算結果を1896年に発表しました。

しかし2倍ではなく、例えば1.5
倍ならば何℃上昇して気候はどのよ
うに変動するのか。コンピュータの
中に地球環境を丸ごと再現して、そ
のような問いに答えられるシミュ
レーションを初めて行ったのが真鍋
さんです。

■ 各分野の知見を統一して 大気・海洋結合モデルを開発

——自然現象のシミュレーションが始
まったのはいつごろですか。

シミュレーションとは、実際には
起きていないことを、何らかの手段
を使って似たような状況をつくり出
して調べることです。自然現象を対
象に手動の計算機を使ってシミュ
レーションが初めて行われたのは
1920年代です。英国のリチャード
ソンは、ヨーロッパを一辺が200～
300kmの升目に区切り、気圧や気
温、風速が時間とともにどのように
変化するのか、物理方程式を解くこ
とで天気を予測しました。しかし手
動の計算機では計算速度が遅く、6
時間後の予報を出すのに6週間もか
かったそうです。

1940年代に、計算速度の速い電
子計算機（コンピュータ）が開発され
ると、それを気象のシミュレーショ
ンに利用する取り組みが始まりまし
た。1950年代後半には、米国や日

本で日々の天気予報にシミュレー
ションが取り入れられ始めました。
真鍋さんも東京大学で気象のシミュ
レーションを学んだ後、1958年に
米国へ渡り、地球流体力学研究所
(GFDL) やプリンストン大学で気候
モデルの研究を行いました。

——気候モデルとは？

自然現象をシミュレーションする
ためにコンピュータに計算の手順を
命令するプログラムを「シミュレー
ションモデル」あるいは「モデル」と
呼びます。気候をシミュレーション
するプログラムが気候モデルです。

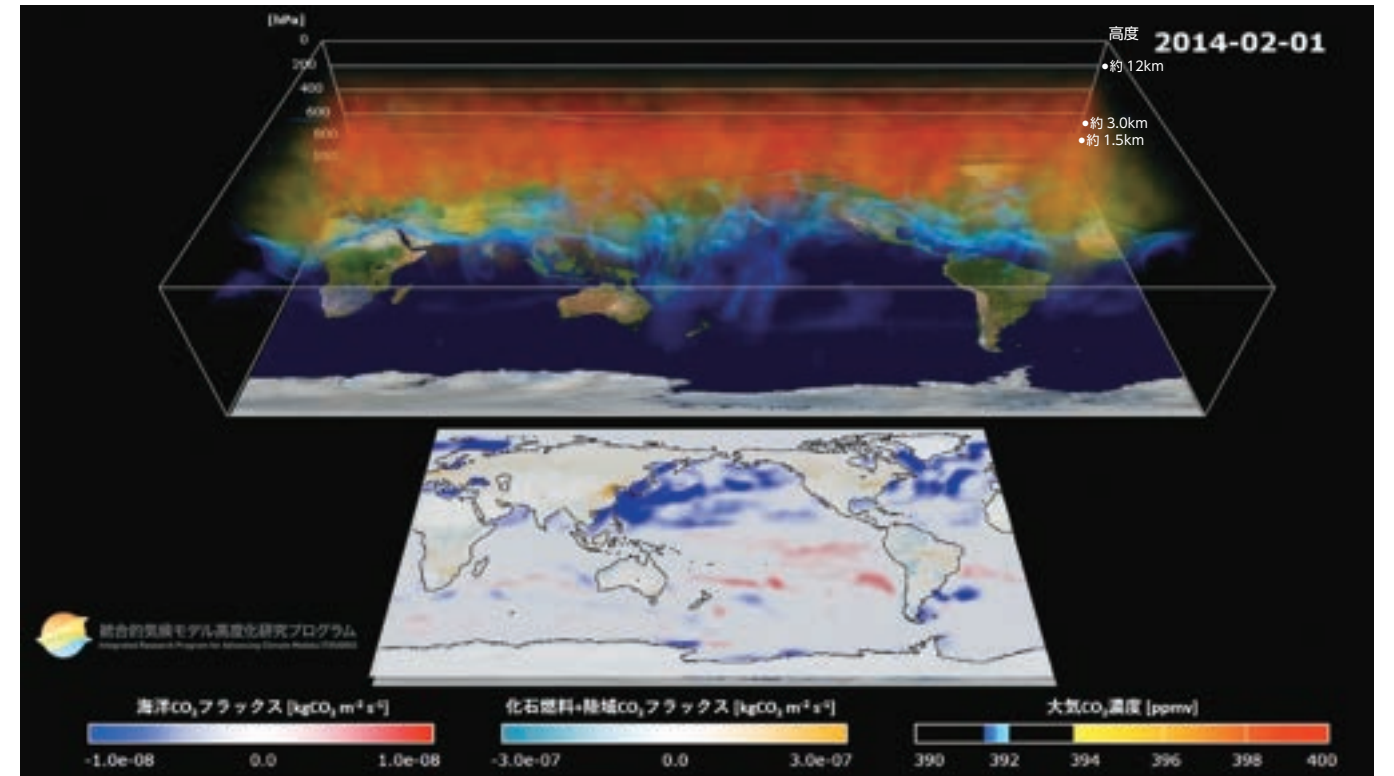
気象や気候を計算する数式には、
中学や高校で習うものも少なくあり
ません。風の吹く向きや強さを求め
る数式は、「力＝重さ×加速度」とい
うニュートンの運動方程式に基づい
ています。それを大気に当てはめる
場合、「加速度」は時間とともに風速
が変化する度合い、「重さ」は大気
の密度を表します。「力」はいろいろ
なものがあありますが、場所ごとの気圧

の違いにより引き起こされる力など
があります。

物体を暖めると温度が上がるとい
う熱力学第一法則や、気体の体積や
温度、圧力の関係を表す状態方程式
も、気候モデルで用いられます。

地球は太陽からエネルギー（熱）
を受け取り、地表面から赤外線とし
てエネルギーを放出する過程で、大
気中ではCO₂が地表面からの赤外線
を吸収し、再び放出するなど、エネ
ルギーのやりとり「放射」が盛んに行
われています。その様子を記述する
数式は放射伝達方程式と呼ばれ、温
暖化予測の土台となっています。

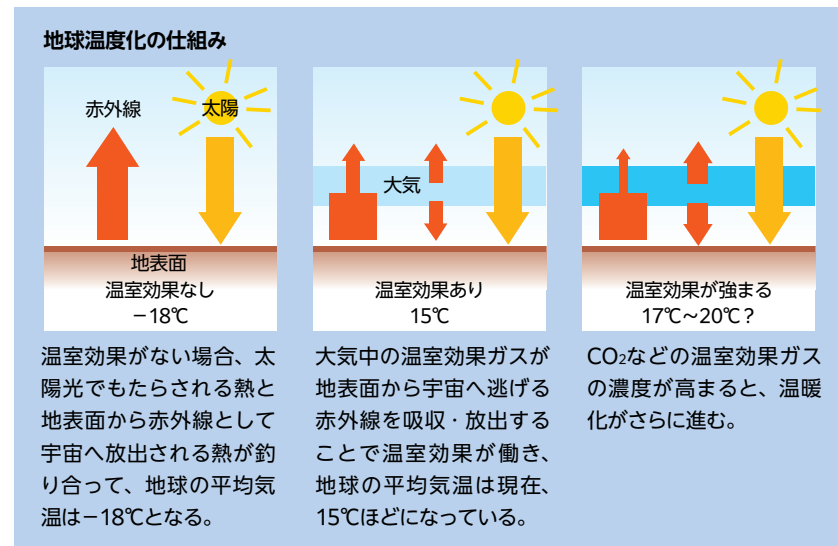
真鍋さんは1960年代の初め、大
気放射モデルが専門のドイツのメ
ラー博士との共同研究を行いました。
また、大気モデルはGFDLのス
マゴリンスキー所長と、海洋モデル
はGFDLの同僚、ブライアン博士と
共同研究を進めました。このように、
真鍋さんはいろいろな分野の専門家
に学び、その知見を吸収し統一する

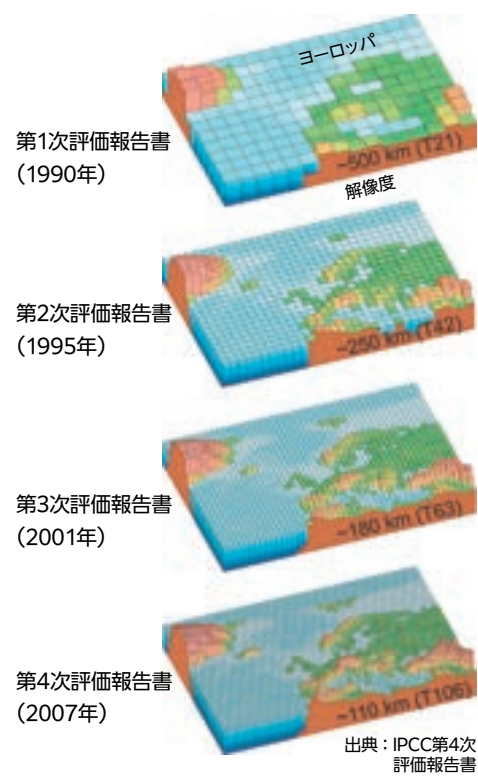


地球システムモデル「MIROC6-ESM」による大気中のCO₂濃度分布の推定

画像提供：文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」

過去から未来における、海と陸でCO₂が排出されたり吸収されたりする季節変動を再現して（下）、大気中のCO₂濃度の分布を高度ごとに推定できる（上）。

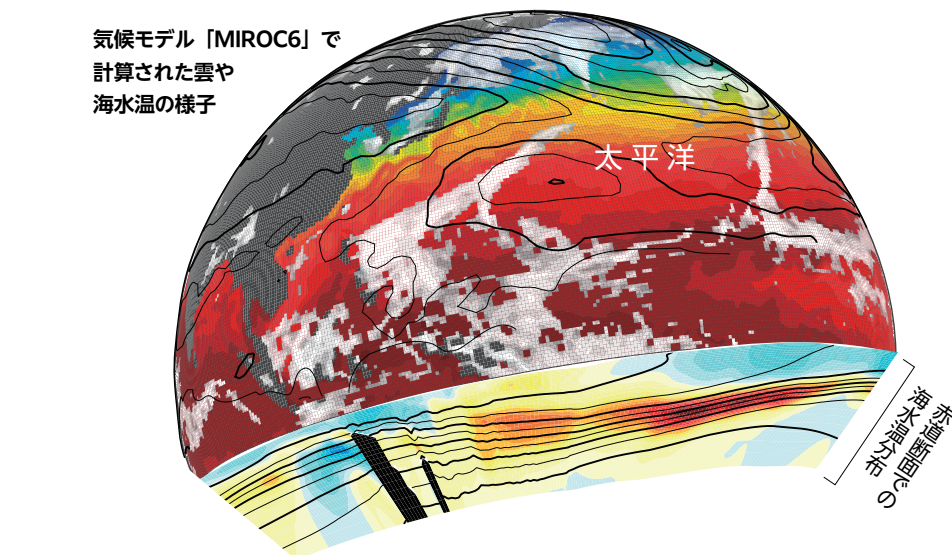




IPCC報告書における気候モデルの高解像度化
解像度が高くなるにつれて地形が鮮明になる。

ことで、コンピュータの中に初めて地球環境を丸ごと再現したのです。私はそこがすごいと思います。

真鍋さんらは1967年、大気を地表付近から高度数十kmまで垂直に立つ柱のような1次元に単純化し、その中での放射や対流、水蒸気の輸送などを計算に入れて、地球の平均気温の高さ方向の分布を描き出しました。そして大気中のCO₂濃度が当時の0.003%から0.006%へ倍増し



たとき、気温が2.36℃上昇すると予測しました。

1969年には、ブライアン博士と共同で大気・海洋結合モデルを開発しています。3次元の大気と海のモデルを結合して、大気と海の熱のやりとりや、風によって海流ができる様子を再現できるようにしました。CO₂が増えたとき気温が何℃上昇し、そのときにどのような気候変動が起きるのかといった温暖化予測が、大気と海洋を結合した気候モデルによって初めて可能になりました。大気・海洋結合モデルを開発したことが、真鍋さんの最大の業績になると思います。

——真鍋博士は何が知りたかったのでしょうか。

いろいろな条件が変わったら地球環境はどうなるのか、という純粋な好奇心が研究の原動力だったのだと思います。1967年の論文でも、CO₂だけでなく水蒸気やオゾンの濃度など、いろいろな条件を変えて計算を行っています。

■ 温暖化予測の枠組みを確立しIPCCに貢献

——その後、気候モデルと温暖化研究は、どのように進展していったのですか。

真鍋さんが1960年代に発表した

論文に触発されて、世界のほかの研究グループも温暖化予測ができる気候モデルの開発を始めました。

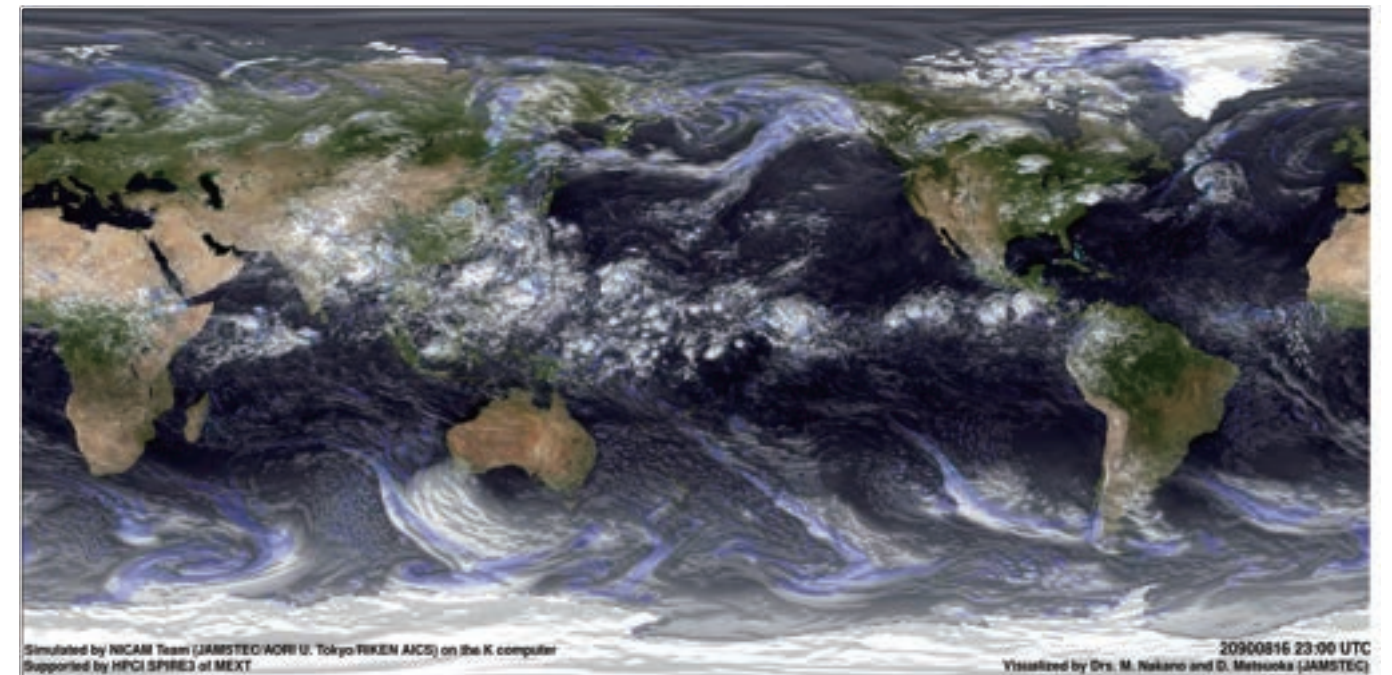
そして真鍋さんは、その後も“ヒット論文”を連発して、この分野を先導していきました。1969年のモデルの地形は、陸や海を四角形で描いた抽象的なものでしたが、1975年には現実に近い地形のモデルを真鍋さんらは開発しました。

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、国連環境計画と世界気象機関によってIPCCが設立されました。真鍋さんらは1989年、CO₂が1%ずつ増えていったときの気温変化を予測する「1%漸増実験」を世界で初めて行いました。この実験は現在でも、気候モデルの性能を確かめる標準的な実験です。そして真鍋さんは1990年に発表されたIPCCの第1次評価報告書の執筆者の一人として貢献しました。

その後も気候モデルは発展を続け、未来の地球ではどれくらい温暖化が進み、どのような気候変動が起きるのか、より高い精度で描き出せるようになってきました。分かりやすいところでは、高解像度化があります。第1次評価報告書では、計算の区切りである升目の一辺は500kmほどでした（左上図）。日本でいえば、東京から大阪までが1つの升目に入ってしまう粗さです。それが2021年の第6次評価報告書では50～150kmになりました。高解像度のモデルほど大量の計算が必要です。気候モデルの高解像度化の背景には、コンピュータの計算速度の高速化が不可欠でした。

■ MIROC-ESMやNICAMの開発

——JAMSTECにおける気候モデル



全球雲解像モデル「NICAM」が描き出した地球全体の雲（解像度14km）
NICAMにより、温暖化した地球における台風のシミュレーションが行われている（本誌10～11ページ）。

による温暖化研究は、どのように始まったのですか。

1997年、JAMSTEC（当時は海洋科学技術センター）と宇宙開発事業団（現・宇宙航空研究開発機構：JAXA）の共同プロジェクト「地球フロンティア研究システム」が設立され、真鍋さんは1997～2001年に地球温暖化予測研究領域の領域長としてJAMSTECに在籍しました。そして、JAMSTEC、東京大学、国立環境研究所により気候モデル「MIROC」の開発が進められました。2002年にはスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が稼働を始め、そこでMIROCを動かして温暖化研究を行い、IPCCにも貢献してきました。その礎を真鍋さんは築いたのです。

私は2002年にJAMSTECへ入り、「地球システムモデル（ESM）」の開発を続けてきました。人類が大気へ排出したCO₂の半分ほどは、陸の森林や海に吸収されて残りが大気中に蓄積します。CO₂濃度が上がり温暖化が進むと、森林などの生態系や化学的な過程が影響を受けて陸と海がCO₂を吸収する量が変化し、それが

温暖化に影響を与えます。そのような生態系や化学的な過程も組み込んだ気候モデルが地球システムモデルであり、MIROCと組み合わせたものが「MIROC-ESM」です。

また、JAMSTECでは東京大学や理化学研究所と全球雲解像モデル「NICAM」の開発を進めてきました。気候モデルの解像度は現在でも50～150kmなので、その升目よりも小さな雲の動きなどを物理方程式で計算することはできません。そこで「ある気温・水蒸気・風などの条件では、こういう雲が発達するだろう」という経験則に基づく方法（パラメタリゼーション）で雲を計算しています。経験則に基づく方法は、気候モデルごとに異なります。それが気候モデルごとに予測にばらつきが出る原因の一つとなっています。

一方、NICAMは一辺が3.5～14kmという細かい升目で区切ることで、大気の運動や雲の成長、雲同士の相互作用などを物理法則に基づき計算することができます。MIROCなどで計算された、温暖化した地球での海面水温の分布などをNICAM

に与えることで、台風の強度や進路がどのように変化するか予測する研究を行っています。

——最後に、真鍋博士のノーベル物理学賞受賞について、改めてコメントを頂けないでしょうか。

高名な先生ではありますが、何度か直接お話ししたことがあり、人柄に親しみを持っていた真鍋先生がノーベル賞を受賞されたことには、この分野の研究者として誇らしさを感じると同時に、ノーベル賞そのものをずいぶん身近に感じさせられました。読者の皆さんにも、真鍋先生の業績や気候モデリング分野の成果を少しでも身近に感じてもらえるお手伝いをしたいと思っています。雲ができたたり風が吹いたり黒潮が流れていたりといった、普段普通に目にする現象が、最先端の科学の話題になっているところが、この分野の面白さの一つだと考えています。そうした楽しさを読者の皆さんと共有できればうれしいです。

（文・立山 晃／フォトンクリエイト）

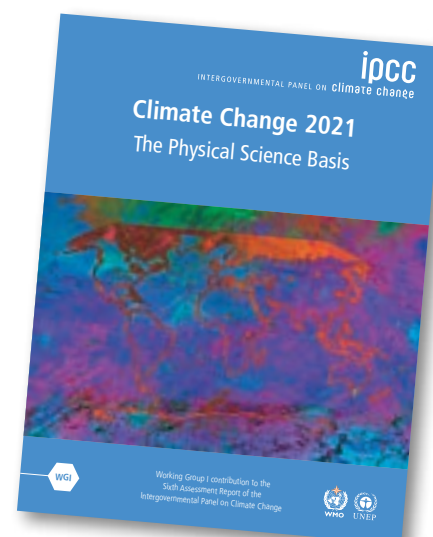
参考文献 『シミュレート・ジ・アース』
河宮未知生 著 ベレ出版（2018年）

温暖化が進む地球で 何が起きているのか？

IPCC「第6次評価報告書」を
読み解き、未来を築く



2021年8月、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、
「第6次評価報告書（the Sixth Assessment Report : AR6）」
第1作業部会（自然科学的根拠）報告書を発表した。
そこでは、人間の影響による地球温暖化は疑う余地がなく、
すでに極端な高温や大雨、干ばつが増えている、と指摘し、
今後の温暖化の行方と気候変動について予測を行っている。
各分野の専門家に、AR6のポイントと
今後の温暖化研究の課題について聞いた。



「第6次評価報告書」第1作業部会（WG1）報告書

IPCCは、世界気象機関（WMO）および国連環境計画（UNEP）
により1988年に設立された政府間組織で、2021年8月現在、
195の国と地域が参加している。

IPCCの目的は、各国政府の気候変動に関する政策に科学的
な基礎を与えることである。世界中の科学者の協力のもと、科
学誌に掲載された論文などに基づいて定期的に報告書を作成し、
気候変動に関する最新の科学的知見の評価を提供している。

IPCCには、3つの作業部会（WG）と1つのタスクフォース
（TF）が置かれており、それぞれの任務は次のとおり。

WG1：気候システムおよび気候変動の自然科学的根拠についての評価

WG2：気候変動に対する社会経済および自然システムの脆弱性、気
候変動がもたらす好影響・悪影響、ならびに気候変動への適応
のオプションについての評価

WG3：温室効果ガスの排出削減など気候変動の緩和のオプションにつ
いての評価

TFI：温室効果ガスの国別排出目録作成手法の策定、普及および改定

IPCCはこれまでに5回、1990年、1995年、2001年、2007年、
2013～14年に評価報告書を公表してきた。現在、第6次評価報
告書の作成が進められており、2021年8月にWG1報告書が発
表された。2022年にはWG2とWG3の報告書および統合報告
書が順次公表される予定である。

すでに人間活動により極端現象が進行

取材協力 **杉本志織**

地球環境部門 環境変動予測研究センター
雲解像モデル開発応用グループ 研究員

カーボンニュートラルが世界共通の目標に

国連の気候変動枠組み条約（UNFCCC）締約国会議COP21において、産業革命前からの世界平均気温の上昇を2℃より十分に抑えるとともに、1.5℃上昇に抑える努力を継続するというパリ協定が採択され、2016年に発効した。2018年、IPCCは「1.5℃特別報告書」を発表して、気温上昇が1.5℃を大きく超えないようにするには、人間活動による二酸化炭素（CO₂）の排出量を、2050年ごろに実質ゼロ（カーボンニュートラル）にする必要があることを示した。そして現在、日本を含む世界の多くの国がカーボンニュートラルを目指すことを宣言している。

地球温暖化はすでに進行している。AR6によると、産業革命前（1850～1900年）に比べて、2011～2020年の世界平均気温は約1.1℃高い。すなわち、1.5℃上昇にはあと0.4℃、2.0℃上昇まではあと0.9℃だ。

前回のAR5では、温暖化していることは「疑う余地がない」としたが、その原因が人間活動の影響であることは「可能性が極めて高い」という表現にとどまっていた。

AR6ではIPCC報告書として初めて、「人間の影響が大气、海洋および陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がな

い」と断定した。

AR6では、異常に高温の日が何日も続く熱波や、豪雨、干ばつ、熱帯低気圧などの極端現象について、地域ごとの記述が増えていることが大きな特徴だ（右図）。

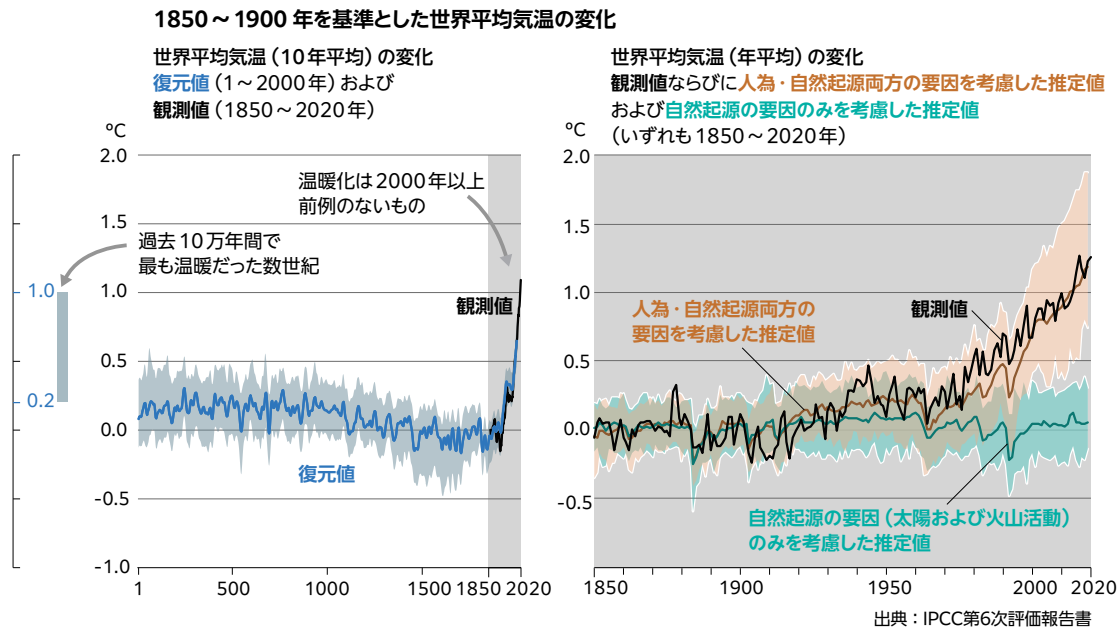
温暖化や極端現象に関する研究プロジェクトに参加してきた杉本志織さんは、次のように解説する。「まれにしか起きない極端現象について調べるには、たくさんのデータが必要です。観測網の充実とともにデータの分析技術が向上したこと、過去の文献に記録された観測値をデータベースに蓄積して統計的に解析したりすることで、それぞれの地域における極端現象に関する研究が進展しました。さらに高解像度の気候モデルを用いて、人間活動に伴う温室効果ガスやエアロゾルの影響を考慮した実験と、それらの影響を考慮しない実験を多数実施し、それぞれの実験で再現された気象現象を比較評価するアトリビューションという手法により、極端現象に対する人間の寄与を地域ごとに評価することができるようになりました」

それによりAR6は、気候変動はすでに人間が居住する世界中の全ての地域において影響を及ぼしており、人間の影響は気象や気候の極端現象に観測された多くの変化に寄与している、と述べている。

1950年代以降、日本を含む東アジアでは極端な高温や大雨、農業や生態系に影響を与える干ばつが、いずれも増加した。今後、温暖化はどのように進展し、気候はどのように変動するのか、次から見ていこう。

世界平均気温の変化と近年の昇温の原因

人間活動の影響により、少なくとも過去2,000年間に前例のない速度で温暖化が進んでいる（左）。その急速な温暖化は、人為起源と自然起源の両方の要因を考慮しなければ説明することはできない（右）。



極端な高温に観測された変化

- 増加（41）
- 減少（0）
- 変化に対する見解一致度が低い（2）
- データや文献が限定的（2）

観測された変化における人間の寄与の確信度

- 高い
- 中程度
 - 低い（見解一致度が低いため）
 - 低い（証拠が限定的であるため）

大雨に観測された変化

- 増加（19）
- 減少（0）
- 変化に対する見解一致度が低い（8）
- データや文献が限定的（18）

観測された変化における人間の寄与の確信度

- 高い
- 中程度
 - 低い（見解一致度が低いため）
 - 低い（証拠が限定的であるため）

農業および生態学的干ばつに観測された変化

- 増加（12）
- 減少（1）
- 変化に対する見解一致度が低い（28）
- データや文献が限定的（4）

観測された変化における人間の寄与の確信度

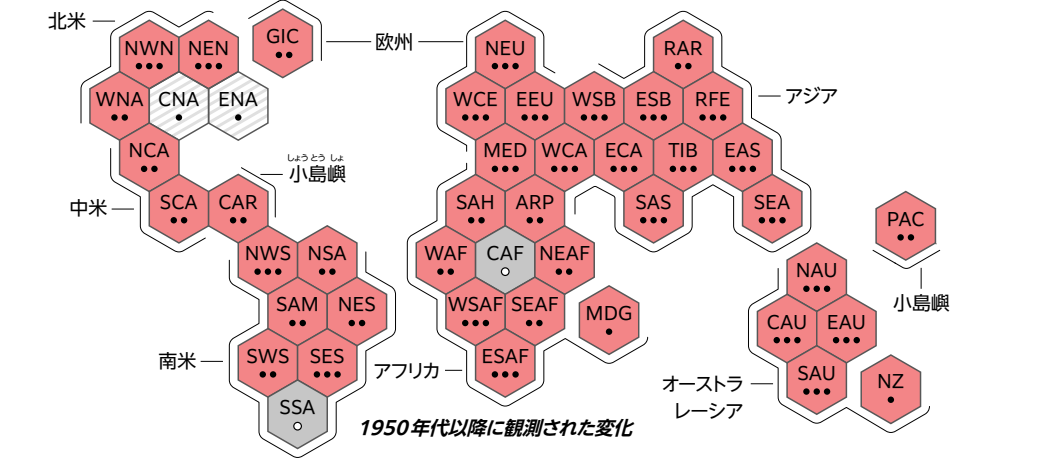
- 高い
- 中程度
 - 低い（見解一致度が低いため）
 - 低い（証拠が限定的であるため）

1950年代以降に確認された地域ごとの極端現象の変化

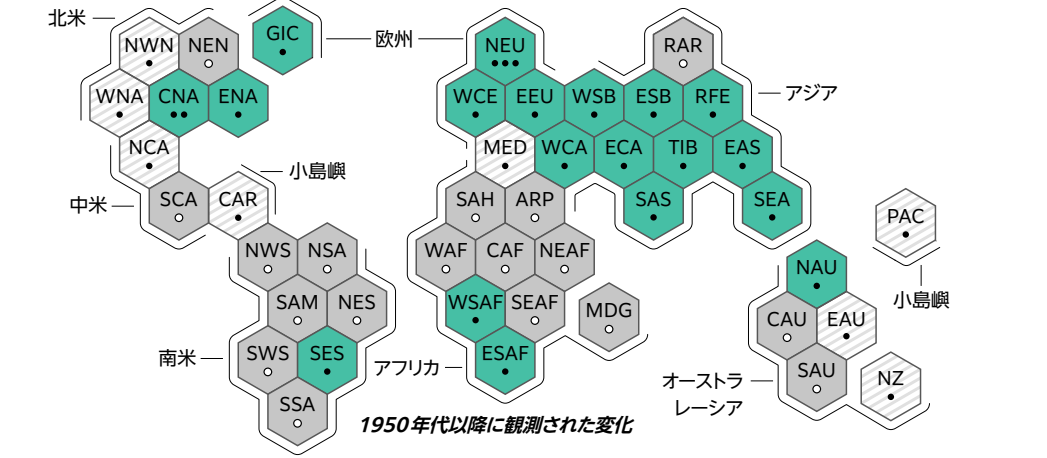
まれにしか起きない極端な高温、大雨、干ばつの増減と、その変化に対する人間の寄与の確信度を示している。極端な高温については、人間活動により極端現象が増加した地域が目立つ。

出典：IPCC第6次評価報告書

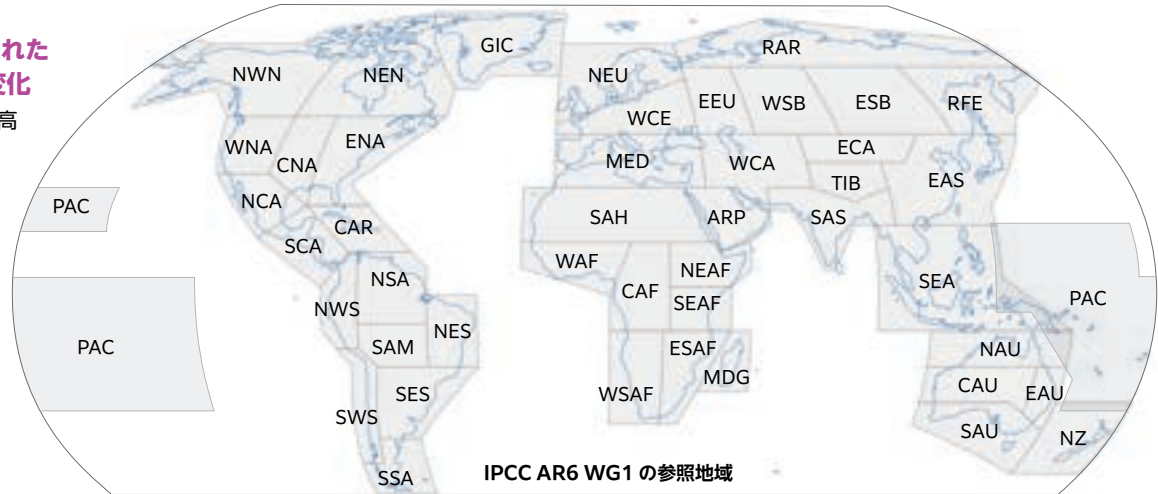
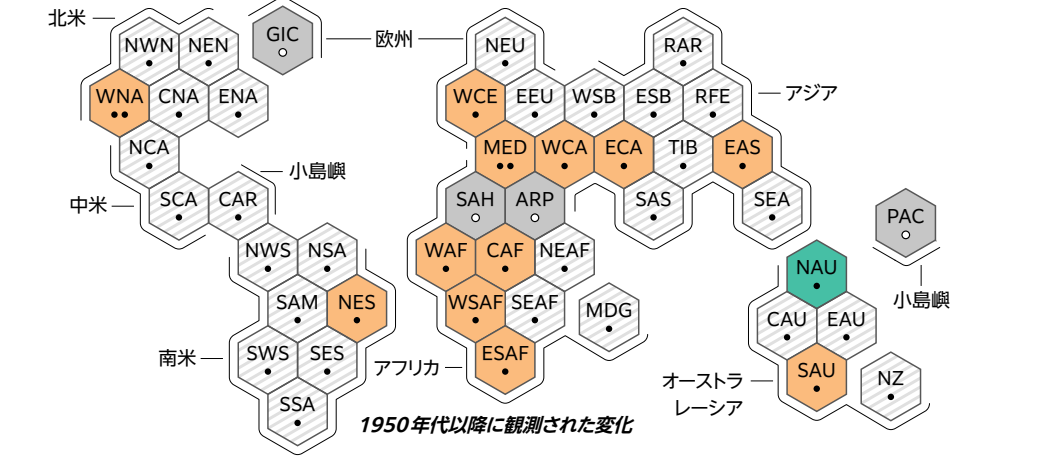
a) 世界中の地域において **極端な高温** に観測された変化の評価と、観測された変化における人間の寄与に関する確信度の合成図



b) 世界中の地域において **大雨** に観測された変化の評価と、観測された変化における人間の寄与に関する確信度の合成図



c) 世界中の地域において **農業および生態学的干ばつ** に観測された変化の評価と、観測された変化における人間の寄与に関する確信度の合成図



CO₂除去やメタン削減が必要

取材協力 **河宮未知生**
地球環境部門 環境変動予測研究センター センター長
金谷有剛
地球環境部門 地球表層システム研究センター センター長

地球システムモデルで、1.5℃に抑えるためのCO₂排出削減量を推定

人間活動に伴うCO₂やメタンなどの温室効果ガスの排出により、それらが大気中に蓄積して地球温暖化が起きている。産業革命前には約280ppm (0.028%) で安定していた大気中のCO₂濃度は、2019年には410ppm (0.041%) と約1.5倍増加した。

AR6では、2010～19年に人間活動により排出されたCO₂のうち、31%が陸の森林などに、23%が海に吸収され、46%が大気中に蓄積したと分析している。ただし陸や海のCO₂吸収量は変動する。気温上昇を1.5℃に抑えるには、人間活動によるCO₂排出をどの程度まで抑えなければならないのか。それを推定するには、温暖化した地球において森林や海がどのように変化し、人類が排出したCO₂を陸と海がどれだけ吸収するのかを高い精度で予測しなければならない。あるCO₂濃度のときの気温や海水温を予測する気候モデルとともに、大気中のCO₂が海へ溶け込む化学的な過程や、森林の光合成でCO₂が吸収される生物学的な過程を再現する化学モデル・生物モデルが必要となる。

21世紀に入り、気候モデルに化学モデル・生物モデルを組み込んだ「地球システムモデル」の開発が各国で進められ、AR5では、人間活動により排出されたCO₂の積算量と地球平均気温の上昇量は比例することが示された。

大気中のCO₂濃度が倍になったときの気温上昇が何℃に落ち着くかを「気候感度」という。AR5では1.5～4.5℃とモデルごとのばらつきがあったが、AR6では2.5～4℃（最良

推定値3℃）とばらつきの幅が半減した。JAMSTECで地球システムモデル「MIROC-ESM」の開発を進めてきた河宮未知生さんは次のように語る。「気候感度は温暖化予測の最も基本となる指標ですが、1990年にIPCCが発表した最初の報告書のころから、ばらつきの幅が縮まらない状況が続いていました。それを半減できたのは画期的なことです」

なぜ、半減できたのか。「複数の要因がありますが、氷期・間氷期を経験してきた過去の地球でCO₂濃度が変化したときに気温がどう変わったのかを推定する古気候の研究が進展したこと、近年に観測されたCO₂濃度の増加と気温上昇の関係を分析する統計的手法が開発されたこと、それらの知見によって地球システムモデルを検証できるようになったことが主な理由です」。未来を予測するには、過去を調べることが重要なのだ。

AR6は予測精度が格段に向上した地球システムモデルにより、気温上昇を1.5℃に抑えるには、人類が排出できる残りのCO₂量（残余カーボンバジェット）を、67%の確率で4000億トンだと推定している。現在の年間CO₂排出量が約400億トンなので10年分だ。「現在から2050年までの30年間でCO₂排出をゼロまで直線的に削減できたとしても、6000億トンを排出する計算になります。1.5℃に抑えるには、6000億－4000億＝2000億トン分、大気中からCO₂を除去する必要があります」

AR6では、2100年までの人類によるCO₂排出について5種類のシナリオを検討している。そのいずれのシナリオでも、今後20年以内に1.5℃上昇に達すると予測している。ただし、最も排出量が低いシナリオSSP1-1.9では2100年の昇温は1.4℃に抑えることができる。しかしそれには、カーボンニュートラルでは不十分であり、大気中からのCO₂除去が必要だとしている。2100年に気温上昇を2℃以下に抑えるSSP1-2.6もCO₂除去を想定したシナリオだ。

1.5℃目標達成に向けて重要性を増すメタン削減

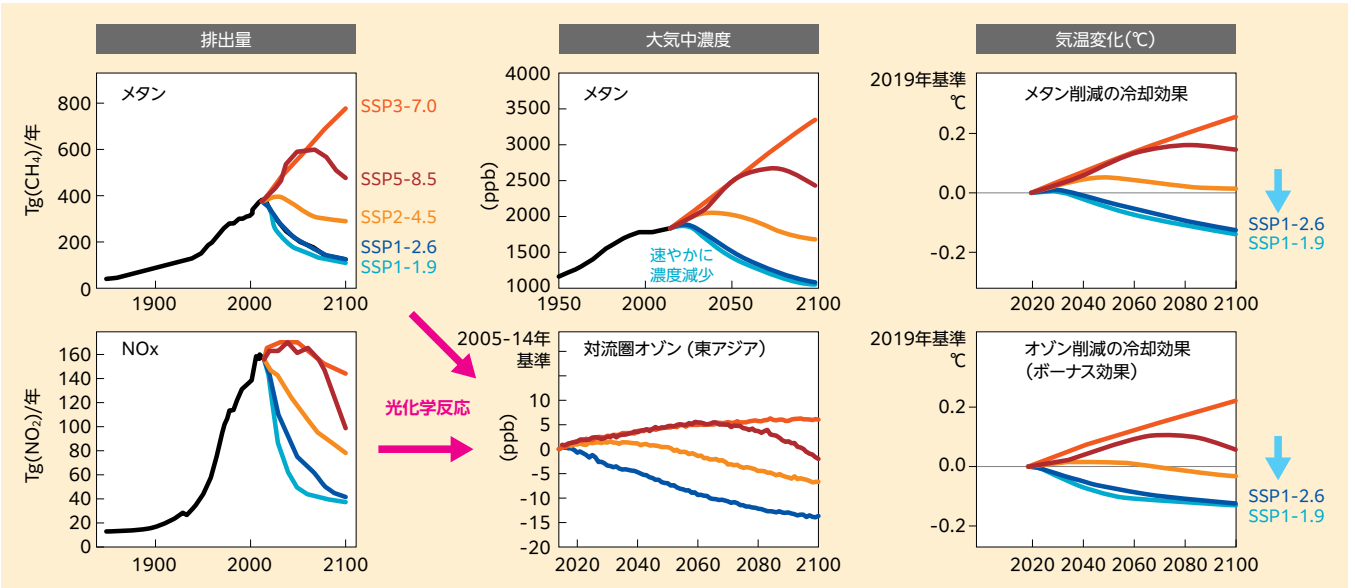
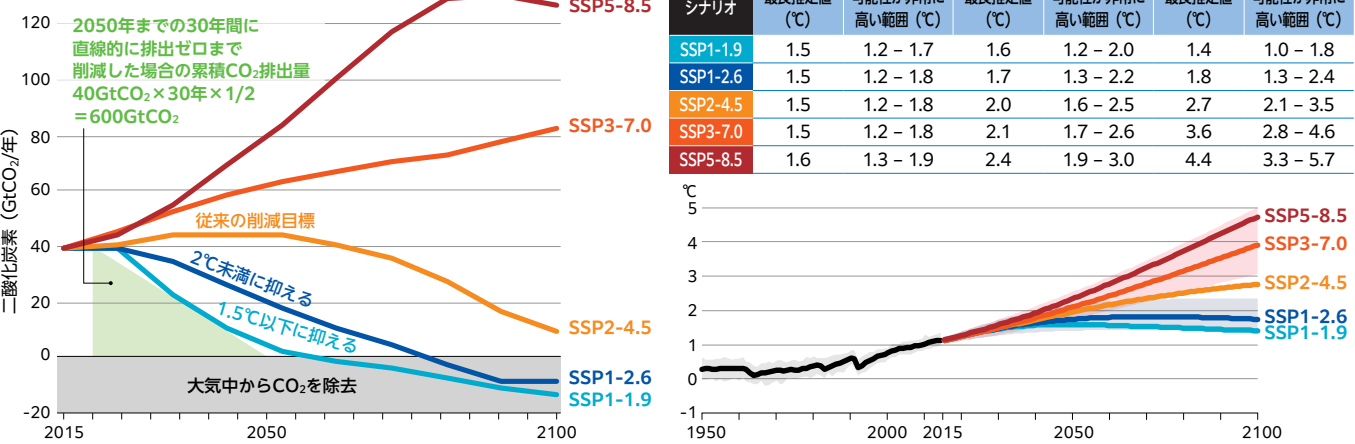
2021年に開かれたCOP26では、気温上昇を1.5℃に抑える努力を追求することを決意する、と明記された。「温暖化にはCO₂の影響が大きいのですが、1.5℃までに残された昇温幅は0.4℃しかないので、CO₂以外のメタンなどの温室効果ガスや、エアロゾルの影響の重要性が増しています」と、AR6の査読編集者を務めた金谷有剛さんは指摘する。

AR6 で使用されている主なシナリオ

SSP1-1.9	持続可能な発展のもとで、産業革命前を基準とする21世紀末までの昇温（中央値）をおおむね（わずかに超えることはあるものの）1.5℃以下に抑える気候政策を導入。
SSP1-2.6	持続可能な発展のもとで、産業革命前を基準とする昇温（中央値）を2℃未満に抑える気候政策を導入。
SSP2-4.5	中道的な発展のもとで気候政策を導入。COP26前の各国の2030年までの「自国決定貢献（NDC）」を集計した排出量の上限にほぼ位置する。
SSP3-7.0	地域対立的な発展のもとで気候政策を導入しない排出量の多いシナリオ。エアロゾルなどCO ₂ 以外の排出が多い。
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展のもとで気候政策を導入しない排出量が非常に多いシナリオ。

人類によるCO₂排出シナリオと世界平均気温の推移予測

出典：IPCC第6次評価報告書の図に一部加筆



メタンとNOxの排出削減効果

SSP1-1.9やSSP1-2.6のシナリオどおりにメタンや窒素酸化物（NOx）の排出を削減できれば、大気中のメタンとオゾンの濃度低下により、2100年までに2019年と比べて0.3～0.4℃ほどの冷却効果が期待できる。

出典：IPCC第6次評価報告書に基づき作成

PM2.5など大気中に浮く液体や固体の粒子であるエアロゾルは、太陽光を遮り気温を下げる効果を持つ。人間が物や化石燃料を燃やすことで大気中に排出されるエアロゾルの量は増加してきたが、最近では削減対策が進み、減少に転じ始めた。「エアロゾルは大気汚染物質なので、その減少は健康には望ましいのですが、一方で気温を下げる効果も減ります。AR6では、大気中のエアロゾル量の減少により2019年に比べて2100年までに最大0.4℃ほどの昇温をもたらすと見積もっています。それだけで1.5℃に達してしまう恐れがあるのです」

AR6のSSP1-1.9やSSP1-2.6では、メタンや窒素酸化物（NOx）の大幅削減も想定している。メタンやNOxは大気

中の光化学反応により、温室効果を持つオゾンに換わる。「SSP1-1.9やSSP1-2.6のシナリオどおりにメタンやNOxを削減できれば、オゾンも削減できるというボーナス効果があります。大気中のメタンとオゾンの濃度低下により、2019年に比べて2100年までに0.3～0.4℃ほどの冷却効果が表れ、エアロゾル削減による昇温の大部分を打ち消すことができる、とAR6は予測しています」

このような予測に基づき、米国と欧州連合は、2030年までに2020年に比べてメタン排出量を少なくとも30%削減することを提案し、日本を含む100カ国以上が賛同した。「その目標は、SSP1-1.9が想定している削減ペースと合致しています」

（Gt＝10億トン） 出典：IPCC第6次評価報告書

1850～1900年を基準とする気温上限までの地球温暖化（℃）	2010～2019年を基準とする気温上限までの追加的な地球温暖化（℃）	2020年初頭からの残余カーボンバジェット推定値（GtCO ₂ ）	気温上限まで地球温暖化を抑制できる可能性	17%	33%	50%	67%	83%
1.5	0.43	900	650	500	400	300		
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550		
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900		

残余カーボンバジェットの推定値

今後の人類によるCO₂排出量を累積で4000億トン（400Gt）にできれば、67%の確率で気温上昇を1.5℃に抑えることができる。

高温や大雨、強い台風の割合が増加

取材協力 **杉本志織**
地球環境部門 環境変動予測研究センター
雲解像モデル開発応用グループ 研究員

山田洋平
地球環境部門 環境変動予測研究センター
雲解像モデル開発応用グループ 特任研究員

10年に1度、50年に1度だった 極端現象が温暖化で頻発する

AR6によると、人間活動による気候への影響がなかった産業革命前の1850～1900年において陸域で平均10年に1回発生していた極端な高温日と同程度に暑い日が、地球全体で平均1℃上昇した世界（現在に相当）では2.8倍の頻度で発生しており、それが1.5℃上昇時には4.1倍、2℃上昇時には5.6倍になる。また、現在の気候で平均10年に1回発生する極端な高温日は、産業革命前に10年に1回発生していた高温日より、日最高气温が1.2℃高いと考えられ、1.5℃上昇時には+1.9℃、2℃上昇時には+2.6℃になると予測されている。

50年に1回発生するようなさらに極端な高温日の発生頻度も、現在の気候で4.8倍、1.5℃上昇時に8.6倍、2℃上昇時に13.9倍になる。「明治時代の人たちが人生で1回しか経験しなかったような高温の日を、私たちは何度も経験するようになっているのです」と杉本志織さんは説明する。

陸域で平均10年に1回発生していた大雨の日（日降雨量を指標とする）の頻度と強度も増加。乾燥化地域においては、農業や生態系に影響を与える干ばつの頻度と強度がさらに増加するとAR6は予測する。「これらのAR6の予測値は世界平均ですが、日本でも極端現象が世界平均と同じ、もしくはそれ以上の頻度・強度になることも想定して備える必要があります。また冬の寒い日が激減することも地域の暮らしや産業、生態系に大きな影響を及ぼすでしょう」

AR6のいずれのシナリオでも今後20年以内に1.5℃を超える昇温が予測されており、極端現象への備えは待たなしの状況だ。杉本さんらは、日本における極端現象を予測する研究を進めて対策に役立てようとしている。「極端現象の中でも、突風や竜巻、集中豪雨など地域や時間が限られた現象、雪になるか雨になるかの推定が必要な大雪の予測については、まだ研究が十分に進んでいません。河川の洪水対策には、それぞれの流域での最大降水量を予測する必要があります。そのような詳細な予測をするために、私たちは高解像度の気象モデルによるシミュレーションを進めています」

非常に強い台風が 勢力を維持したまま北上

日本列島に住む私たちにとって台風の頻度や強度がどう変化するのかも防災にとって重要だ。AR6では、1分間平均の最大風速が秒速50mを超える強い台風（カテゴリ3～5）の発生割合が過去40年間で増加し、北西太平洋の台風がその強度のピークに達する緯度が北に遷移している可能性が高い、と現状を分析している。

さらに温暖化が進行した将来には、1分間平均の最大風速が秒速58mを超える非常に強い台風（カテゴリ4～5）の割合が増え、そのピーク時の風速も増加。また台風に伴う降水量が増加することが予測されている。

最近では、千葉県を中心に強風の被害をもたらした2019年の台風15号（令和元年房総半島台風）がカテゴリ4（上陸時にはカテゴリ3）、東日本各地に水害をもたらした2019年の台風19号（令和元年東日本台風）がカテゴリ5（上陸時はカテゴリ2）だ。

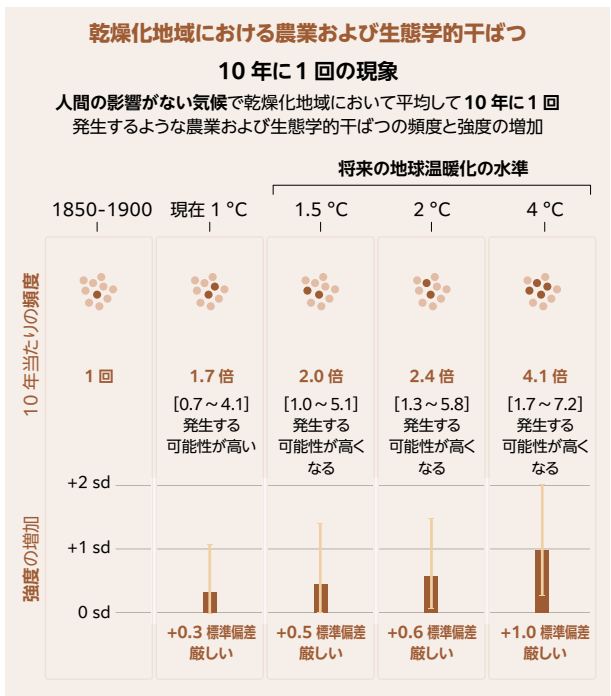
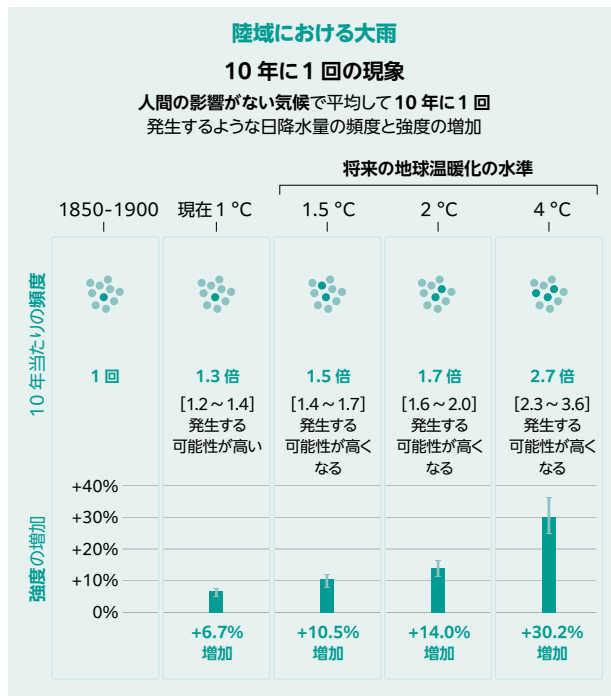
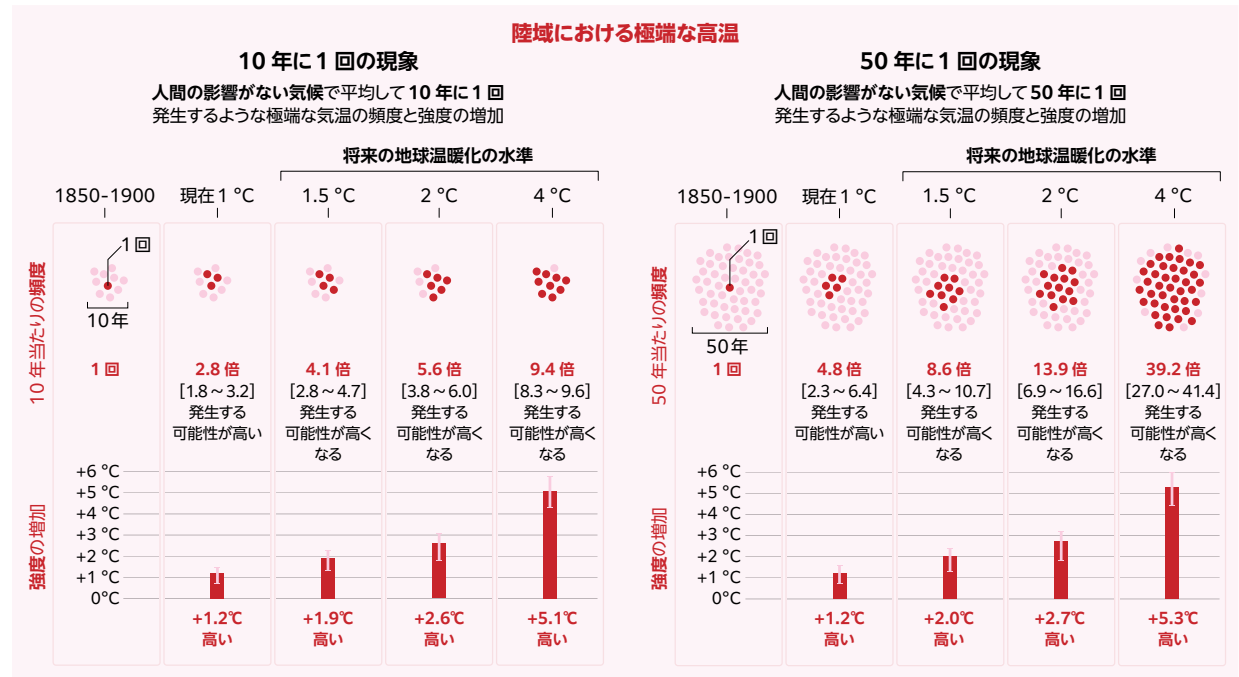
全球雲解像モデルNICAMを用いて、温暖化した地球における台風を予測する研究を続けてきた山田洋平さんは、次のように解説する。「これまでカテゴリ4～5の台風は沖縄諸島を10年に数回ほど襲っても、勢力を維持したまま九州へ北上することはほとんどありませんでした。それが温暖化の影響を受けて現在よりも強い勢力を維持したまま、九州や四国、本州にも接近、上陸する頻度が高まる可能性があります」

強さのカテゴリーを考慮しない地球上の全ての台風の年間発生数は温暖化により増えるのか減るのか。「研究によって予測結果が一致しておらず確信度は低い状態です。NICAMを含めた多くの高解像度モデルは減少すると予測していますが、そのメカニズムは十分には分かっていません。これまでに提案されたメカニズムの中には台風の強度が増すことと台風の発生数の減少が関係する可能性を示唆した研究があります。台風の強度は台風の構造と関係があることが知られています。また台風の発生はエルニーニョのような海面水温の分布やさらには海洋の内部変動の影響を受けます。台風の発生数の将来変化の理解を深めるには台風の構造を表現できる高解像度モデルで多数のシミュレーションを実施する必要があります」

一方で、モデルが現在の台風の状態をきちんと再現しているのかを検証するために、精度の高い観測値が必要だと

温暖化で増加する極端な高温や大雨、干ばつの発生頻度と強度の予測

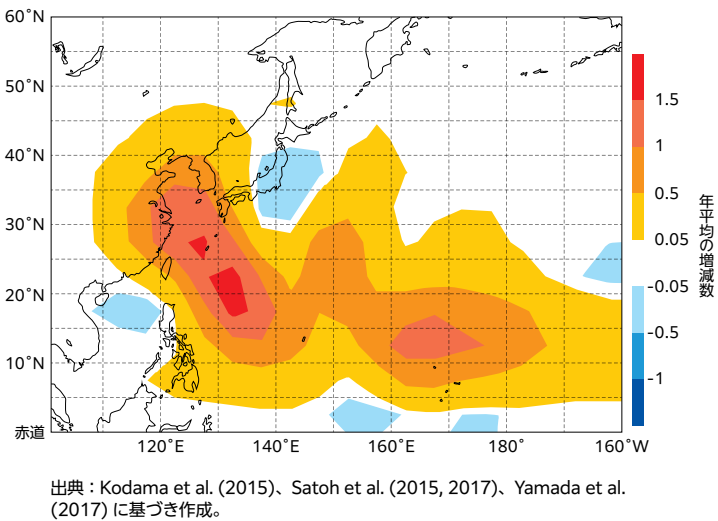
出典：IPCC第6次評価報告書



NICAMによる、温暖化した将来における非常に強い台風の経路の変化の予測

非常に強い台風の現在（1979～2008年）経路に対する、将来（2075～2104年）経路における年平均の増減数の分布。黄色から赤色が増加する地域で、沖縄諸島から西日本までが含まれている。ここで示された非常に強い台風とは、最低中心気圧が945hPa以下に発達したもので、カテゴリ4～5に相当する。この予測結果はAR6に引用された。

山田さんは指摘する。「海上での台風の風速（強度）を直接観測することは困難で、衛星観測からの推定値を利用していますが、そこには不確実性が含まれる可能性があります。衛星観測技術とそのデータ利用の高度化や航空機による直接観測の利用による観測値の高精度化の研究も進んでいます。それらの研究とも連携し、モデルの精度を高め、温暖化したときの台風の発生数やカテゴリ4～5の台風の経路の、将来変化の予測の信頼性向上を目指していきます」



極端な高潮が毎年発生し、熱帯が拡大

取材協力 鈴木立郎

地球環境部門 環境変動予測研究センター
基盤的気候モデル開発応用グループ グループリーダー代理

宮澤泰正

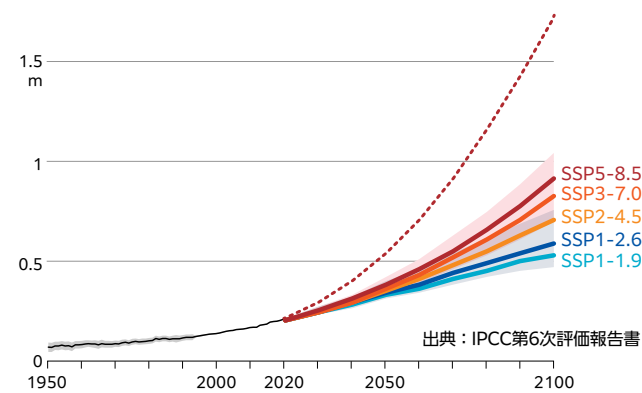
付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ ラボ所長代理

平均海面水位の上昇により、普通の台風でも水害の危険性が増加

AR6は、世界平均海面水位が21世紀の間、上昇し続けることは、ほぼ確実に予測する。産業革命前に比べて気温上昇を2℃未満に抑えるSSP1-2.6シナリオでも、1995～2014年平均と比べて、2100年までに32～62cm、2150年までに46～99cm上昇。排出量の最も多いSSP5-8.5では、2100年までに63～101cm、2150年までに98～188cm上昇する。各海域の平均海面水位の上昇量は、世界の海岸線の約3分の2において、世界平均の±20%以内と予測する。

海面水位の上昇に伴い、AR6では確信度の高い予測として、次のような重要な警告を発している。最近まで100年に1度の頻度で発生していた極端な海面水位の上昇が、2100年までには全潮位計設置場所の半数以上で少なくとも1年に1回発生する。

日本において、過去100年で最大の被害をもたらした極端な海面水位の上昇は、1959年9月の伊勢湾台風に伴う3mを超える高潮だ。愛知県と三重県を中心に5,000名を超える死者・行方不明者を出し、15万戸以上が全壊・半壊した。将来の海面水位を予測する研究を続けている鈴木立郎さんは、「重要な点は、平均海面水位というベースラインが上がるため、普通の強さの台風でも、伊勢湾台風のような極端な高潮が各地で毎年発生することです」と指摘する。



1900年を基準とした世界平均海面水位の変化

破線は、SSP5-8.5シナリオでグリーンランドや南極の氷床が大きく崩壊した場合の予測（本誌14～15ページ参照）。

日本沿岸を見ると、SSP5-8.5では2050年ごろ、SSP1-2.6でも2100年ごろには、大半の沿岸域で極端な高潮が毎年発生する状況となる。「シナリオによらず、いずれは世界のほとんどの沿岸部で極端な高潮に毎年襲われるようになるのです。気温上昇が止まったとしても海面水位は上昇し続けるからです」

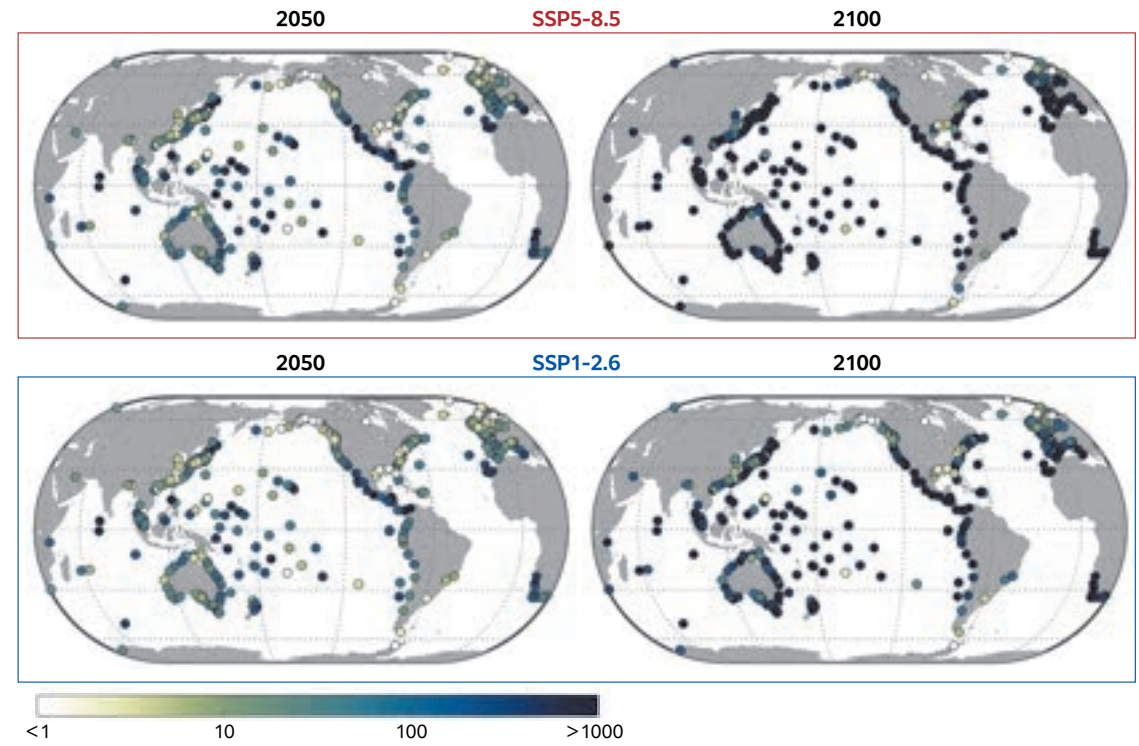
AR6では、1971～2018年の世界平均の海面水位上昇の要因は、海水の熱膨張が50%、氷河の減少が22%、氷床の減少が20%だと推定し、近年は、氷河と氷床の減少の影響が大きくなっていると分析。そして長期的には、海洋内部の温暖化と氷床の融解が続くため、海面水位は数百年から数千年にわたり上昇することは避けられないとしている。

防波堤や水門、堤防の整備などの治水計画はこれまで、過去に最大だった降雨量や高潮の観測値に基づき立案されてきたが、気候変動を踏まえて将来に起き得る予測値に備える方向に転換し始めている。「海面水位の予測においても高い精度が治水のために求められています。そのために私たちは、10kmないし2kmの高解像度海洋モデルで多数の実験を行い、日本の各沿岸で将来起き得る海面水位変動の統計情報を予測する研究を始めています」

熱帯の拡大——貧酸素化が進み、海洋熱波が増加

先述のように、人為起源のCO₂の23%は海に吸収されている。海に吸収された大量のCO₂が水と反応して水素イオンが増加し、海水が酸性側に傾く。AR6は、人為的なCO₂の排出が、現在進行している外洋域表層海水の世界的な酸性化の主要な駆動要因であることはほぼ確実である、と結論付けている。酸性化は、浮遊性有孔虫や貝など炭酸カルシウムの殻を持つ生物の成長を妨げ、食物連鎖を通じて海洋生態系全体に影響を及ぼす恐れがある。

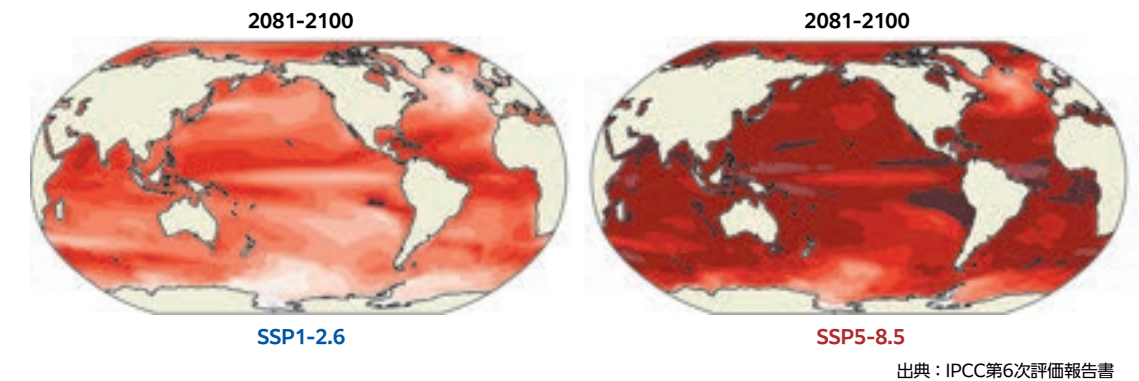
サンゴも海水温の上昇と酸性化によって成長を妨げられる。海洋環境と生態系の変動を研究している宮澤泰正さんは、次のように解説する。「CO₂は海水温が低いほど吸収が進むので、海洋酸性化は高緯度域から進んでいます。一方、海水温の上昇は熱帯域から激しくなります。サンゴは南北から挟み撃ちに遭うようにして影響を受けています。ただし長期的には、高緯度域で吸収されたCO₂が深層に潜り込んで低緯度域で浮上する現象もあります。私たちはそのような海洋循環も考慮して、各海域における海洋酸性化の実態



極端な海面水位上昇の発生頻度の予測

2種類のシナリオによる2050年と2100年における予測。色の凡例の「100」が、最近までそれぞれの沿岸域で100年に1回起きていた極端な海面水位上昇の発生頻度が毎年1回起きることを示す。「10」は10年に1度、「1000」は毎年10回の頻度で起きる。

出典：IPCC第6次評価報告書



海洋熱波の発生確率の予測

シナリオSSP1-2.6およびSSP5-8.5による2081～2100年における予測。濃い赤の領域ほど海洋熱波の発生確率が高い。日本の三陸沖の確率が低く予測されているが、この海域の海洋熱波の発生は黒潮の影響を大きく受ける。

出典：IPCC第6次評価報告書

を明らかにしようとしています」

IPCCが2018年に発表した「1.5℃特別報告書」は、1.5℃上昇ではサンゴ礁が70～90%減少、2℃上昇では99%が消失すると警告する。サンゴ礁は海洋面積全体の約0.2%にすぎないが、海にすむ生物の1/4ほどがサンゴ礁に関わって生息しているといわれる。サンゴ礁の消失は海の生態系の多様性に大きな影響をもたらす。その消失するかどうかの境界が1.5℃と2℃上昇の間にあると予測されているのだ。「沿岸域の海洋酸性化は、肥料や生活排水に含まれる窒素酸化物の海への流出によっても起きています。その流出を防止することもサンゴ礁の保全、消失の回避に重要です」

AR6は、温暖化に伴い海洋表層の成層化と海洋貧酸素化が進行していると指摘する。表層の海水が暖められて軽くなると深層とかき混ぜられづらくなり、大気から海表層へ吸収された酸素が深層へ運ばれないようになる。「すでにペルー沖やカリフォルニア沖などでは海洋貧酸素化により、魚類の大量死が起きています」

AR6は、数日から数年にわたり特定海域の海水温が急

激に上昇する「海洋熱波」が、1980年代以降に発生頻度が約2倍となり、しかもその海水温の上昇量が以前より激しく、期間も長くなっていると指摘し、温暖化が進むほどその発生確率が高くなると予測する。「日本沿岸では2010年くらいから、黒潮により暖水渦が北へ運ばれて三陸沖で直径100～200kmの海洋熱波が頻発しています。それによりサンの生息域が沖側へ移動する一方で、ブリやマグロなど南方にいた魚が北海道沖で増えています。すでに魚種の生息域が変化して漁業に大きな影響を与えているのです」

宮澤さんは大気と海で「熱帯の拡大が起きている」と言う。「海では、熱帯域で多く見られた海洋熱波などが、温暖化によって中緯度域へ広がっています。日本沿岸では、温暖化が黒潮の変化やそれに伴う海洋熱波の頻発の要因になっている可能性があります。ただし黒潮には、温暖化と関係なく強くなったり弱くなったりする自然変動もあります。将来の海洋熱波の発生確率を予測して対策に役立てるには、モデル実験によって自然変動と温暖化による影響を切り分けて理解する必要があります」

北極域は温暖化が急速に進行

取材協力 菊地 隆
地球環境部門 北極環境変動総合研究センター センター長

斉藤和之
地球環境部門 環境変動予測研究センター
地球システムモデル開発応用グループ 主任研究員

齋藤冬樹
地球環境部門 環境変動予測研究センター
基盤的気候モデル開発応用グループ 研究員

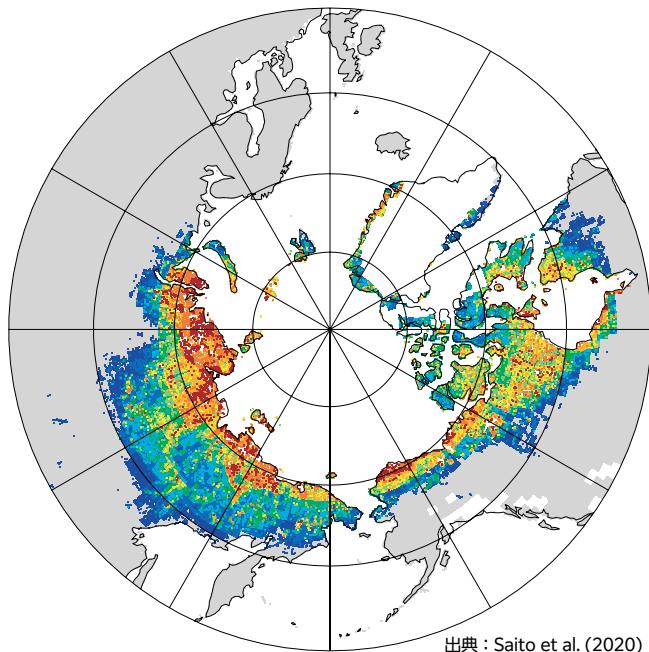
北極域の大きな変化は地球全体に影響を及ぼす

地球温暖化が最も急速に進行しているのが北極域だ。AR6は、北極域が世界平均よりも2倍以上の速度で温暖化し続け、5つのシナリオいずれにおいても、2050年までに少なくとも1回、9月に実質的に海水のない状態になる可能性が高いと予測する。

海水は太陽光を反射するが、海水が融けた海面では太陽光が吸収される。海水面積が最小になる夏に太陽光で暖められた海の熱によって秋から冬にかけて気温が上昇し海水の生成量が減少、次の夏の海水面積がさらに縮小して太陽光を吸収するという「温暖化の増幅」が起きている。また、北極域の温暖化は偏西風を蛇行させて中緯度に寒気をもたらすといった事態が観測され始めている。

永久凍土に含まれる炭素と氷の分布

暖色が炭素と氷が多く、融解すると大量のメタンが生成される可能性が高い地域。各地域における過去12万年間の植生や気温の変化から炭素と地下水の増減をモデルで再現して、観測データにより検証することで、現在の炭素と氷の量の分布を推定した。



出典：Saito et al. (2020)

「北極域はすでに新しい状態になってしまいました」と、長年にわたり北極域の観測を続けてきた菊地 隆さんは指摘する。「2020年にシベリアで+38℃を記録するなど、北極域でも熱波などの極端現象が増えています。特にこの数年、長期間続く寒波が見られなくなりました。北極域における気温や気圧の変化は日本を含む中緯度域の気候や極端現象に影響を与える可能性が指摘され、研究が進められています」

温暖化は、ホッキョクグマなど氷と共に生きてきた生物などの生息を難しくする一方で、亜寒帯域に生息していた陸や海の生物が北極域へ進出することで、生物種の分布の変化をもたらしている。「北極域の急速な温暖化が、地球全体の気候や生態系に影響を及ぼし始めているのです。特に大きな影響を与え得る北極域の変化として、これまでいわれてきた海水減少に加えて、AR6では永久凍土とグリーンランド氷床の融解に言及しています」

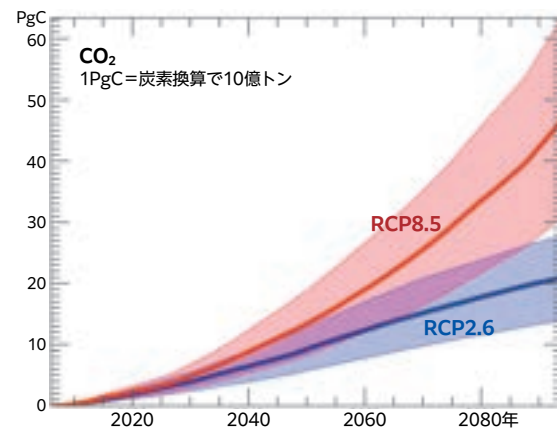
永久凍土に眠る炭素の行方

北極域のシベリアやアラスカ、カナダには永久凍土が広がっている。AR6は、永久凍土の融解に伴い、地中に閉じ込められていた炭素の放出が、数百年の時間スケールで不可逆的に起きると述べている。夏になると永久凍土の表層が融けて、土壌に含まれる有機物を微生物が分解してメタンやCO₂をつくり、その一部が大気へ放出されるのだ。

永久凍土の調査を続けてきた斉藤和之さんは、次のように解説する。「永久凍土には大気中の2倍の量の炭素が含まれていると推定されています。そして1980年以降、永久凍土の地中温度が上昇していることが各地で観測されています。しかし、永久凍土が融けたらどれくらいの量のメタンや

永久凍土から大気へ放出されるCO₂とメタンの予測

炭素と氷の分布に基づく予測であり、シナリオRCP8.5はAR6のSSP5-8.5、RCP2.6はSSP1-2.6に相当する。



CO₂が大気中へ放出されるのかは、よく分かっていません」

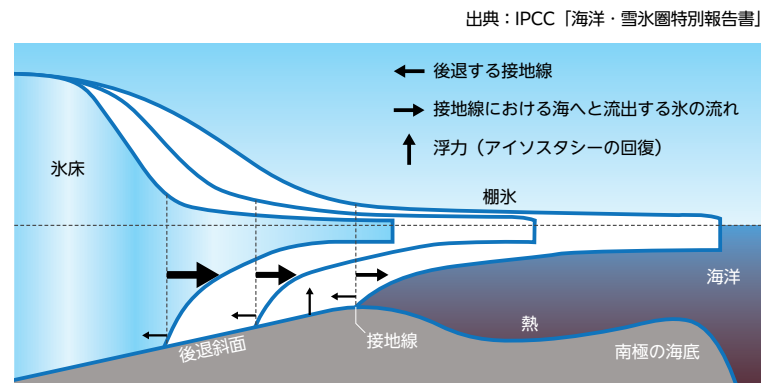
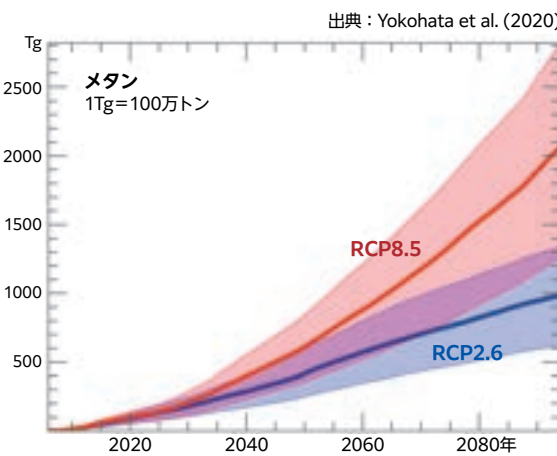
同じ質量で100年間を比較した場合、メタンはCO₂の約30倍の温室効果を持つ。地中の有機物は湿地ではメタンに、乾燥地ではCO₂に分解されやすい傾向がある。永久凍土が融けたとしても、地域ごとに地中に含まれる有機物（炭素）の量はさまざまで、生成されるメタンやCO₂の量も異なる。「地中にたくさんの炭素と氷を含む永久凍土が融けると、メタンが大量に生成される可能性があります。しかし炭素と氷の分布はAR5までは考慮されていませんでした。そこで私たちは、モデルを使って永久凍土における炭素と氷の分布を推定しました」

国立環境研究所の横畠徳太 主幹研究員らは、その分布に基づき、シナリオごとに永久凍土から大気へ放出されるメタンとCO₂の量を推定。その結果が、AR6に引用された。

「ただし、その推定値には大きな幅があります。地中でメタンやCO₂ができたとしても、そのうちのどれくらいの割合が地中に残り、どれくらいが大気へ放出されるのかがよく分かっていないことが主な原因です。私たちは今後、そこを明らかにしていきたいと思います」と斉藤さん。「温暖化により永久凍土でも植物の光合成によるCO₂吸収量が増えることや、海底の永久凍土が融けてメタンやCO₂が放出されることは、AR6では考慮されていません。そのような想定外の現象も評価していく必要があります」

氷床の大崩壊は起きるのか？

北極域で温暖化が急速に進むことで、近年、夏季にグリーンランド全域の氷床表面が融ける全面融解がしばしば観測され始めている。AR6は、1971～2018年の世界平均海面水位上昇の約20%は氷床の減少によると推定している。さらに、グリーンランドの氷床は21世紀を通して減少し続け



南極氷床をせき止める棚氷の変化

棚氷が陸側の氷床が海へ流れ出すのをせき止めている。暖かい海水が流れ込み、接地線が内陸側へ後退して摩擦力が小さくなったり棚氷が分離して海へ流れ出したりすることで、せき止め効果が弱まり、大量の氷床が海に運ばれて崩壊する可能性がある。

ることがほぼ確実であるとしている。

一方、南極の氷床は、AR5までは、温暖化によって降雪量が増えることで氷床が拡大する量と氷床が融けて減少する量のどちらが優勢が分かっていなかったが、AR6では、21世紀を通して減少し続ける可能性が高いと予測している。グリーンランド氷床が全て融けると世界平均海面水位を6～7m上昇させる。南極では、西南極の氷床縮小だけでも5mほどの上昇をもたらす。AR6は、グリーンランドや南極の氷床が大きく縮小する場合、最も排出量が多いSSP5-8.5では2100年までに1900年と比べて2m上昇、2300年には15mを超える可能性も否定できないとしている。

氷床の大崩壊は起きるのか。氷床のモデル研究を行ってきた齋藤冬樹さんは、その可能性を次のように述べる。「南極の沿岸では、海にせり出した棚氷によって陸側の氷床がせき止められています。暖かい海水が流れ込むことで、棚氷が地面と接する接地線が内陸側へ後退して摩擦力が小さくなり、せき止め効果が弱まって大量の氷床が海へ流れ出して崩壊することになります。そのような後戻りできない現象が、南極沿岸のある地点ですでに起きている可能性があります。しかし2100年に2m、2300年に15m以上という海面水位上昇の予測は、南極沿岸の大半の地域でせき止め効果が外れる最悪の事態が起きた場合であり、不確実性が高いと考えられます」

ただし、氷床の大崩壊が起きた場合の影響は甚大なため、検討を進める必要がある。「各地点における棚氷のせき止め効果の変化を予測するには、接地線の後退などを解像度の高いモデルで再現する必要があります。そのような高解像度モデルによって過去の氷期・間氷期に起きた気温と氷床面積の変化をシミュレーションして、古気候のデータと一致するかどうか検証します。さらに、現在の海水温や氷床の観測データを用いることで、将来に起き得る氷床の変化を高い精度で予測することを目指していきます」

日本の気候変動に備える

取材協力 **渡辺真吾**
地球環境部門 環境変動予測研究センター センター長代理

温暖化が進行した日本の未来を描く『日本の気候変動2020』

2013年に発表されたAR5の後、高解像度モデルによる「アンサンブル実験」が各国で盛んに行われるようになった。それは、海面水温の分布や大気の状態を少しずつ変えて多数のシミュレーションを行い、どのような気象現象がどれくらいの頻度で起きるかを調べる手法だ。それにより、10年に1度、50年に1度といった極端現象の予測ができるようになり、その成果がAR6に盛り込まれた。

温暖化の進行に伴い、日本の気候はどのように変動するのか。文部科学省と気象庁は2020年、日本の気候変動に関する観測事実と将来予測をまとめた『日本の気候変動2020』を発表した。

『日本の気候変動2020』の作成に関わった渡辺真吾さんは次のように語る。「まず、世界平均気温が4℃上昇した場合の日本の気候についてアンサンブル実験が行われました（そのデータセットはd4PDFと呼ばれる）。私たちはさらに、2℃に抑えられた場合についてもアンサンブル実験を行いました（d2PDF）。2種類のシナリオに基づいて日本における気象・気候の将来変化を描き出したことが、大きな特徴です」

そのシナリオはAR5で用いられた、世界平均気温を産業革命前に比べて2℃以下に抑えるRCP2.6と、温暖化を抑制する追加対策を行わず約4℃上昇するRCP8.5だ（AR6のSSP1-2.6とSSP5-8.5に相当）。その2種類のシナリオで現在と21世紀末の気候を比較した結果が紹介されている。

21世紀末の日本では、世界平均よりも温暖化が進む。現在と比較すると、RCP2.6では世界平均が＋約1.0℃だが日本は全国平均で＋約1.4℃に、RCP8.5では世界平均が＋約3.7℃だが日本では＋約4.5℃となる。同じシナリオでは緯度が高い地域ほど、また、夏よりも冬の方が昇温の度合いが大きい。日本の多くの地域で、最高気温が35℃以上の猛暑日や、夕方から翌朝までの気温が25℃以上の熱帯夜が増加、最低気温が0℃未満となる冬日の日数は減少する。

全国平均の降雨は、1日の降雨量が200mm以上の大雨の年間日数がRCP2.6では約1.5倍、RCP8.5では約2.3倍に増える。滝のような非常に激しい雨（1時間降雨量が50mm以上）の頻度も、それぞれ約1.6倍と約2.3倍に増加。

6月の梅雨前線に伴う降水帯は強まり、現在よりも南に位置するようになる。日本付近における台風の強度は強まる。

気候変動による被害を回避・軽減するために

『日本の気候変動2020』の予測は、どのように活用されるのか。「例えば、非常に激しい雨の頻度が、現在よりも1.6倍や2.3倍に増えた場合、日本各地でどれくらい水害が発生するのか影響度を評価することで、治水に役立てることができます。すでに国土交通省の関係者たちは、『日本の気候変動2020』の予測を考慮に入れた治水計画を立てる取り組みを始めています」

気候変動による被害を回避・軽減する取り組みを「適応」と呼ぶ。日本では2018年に気候変動適応法が公布され、適応のための情報基盤を整備する中核として国立環境研究所に気候変動適応センターが設立された。2022年には「気候予測データセット2022」が発表される。それに基づく影響評価が気候変動適応センターを中心に進められ、成果をまとめたリポートが2025年に刊行される計画である。

2025年には、『日本の気候変動2025』も発表される予定だ。「現在のモデルの解像度は20km、5km、2kmですが、農業や自治体の人たちからは、さらに解像度を高くするとともに、21世紀末に気温上昇が2℃や4℃に達するまでの経路の情報が欲しいと言われています。5年後、10年後に起き得る気候変動に備えて計画を立てる必要があるからです。『日本の気候変動2025』には、近未来の予測も盛り込むことを目指して、研究を進めているところです」



21世紀末の日本は、20世紀末と比べ…

※黄色は2℃上昇シナリオ（RCP2.6）、
紫色は4℃上昇シナリオ（RCP8.5）による予測

年平均気温が約1.4℃/約4.5℃上昇
猛暑日や熱帯夜はますます増加し、冬日は減少する。



海面水温が約1.14℃/約3.58℃上昇
温まりやすい陸地に近いことや暖流の影響で、予測される上昇量は世界平均よりも大きい。

将来予測	2℃上昇シナリオによる予測 パリ協定の2℃目標が達成された世界	4℃上昇シナリオによる予測 現時点を超える追加的な緩和策を取らなかった世界
年平均気温	約1.4℃上昇	約4.5℃上昇
【参考】世界の年平均気温	(約1.0℃上昇)	(約3.7℃上昇)
猛暑日の年間日数	約2.8日増加	約19.1日増加
熱帯夜の年間日数	約9.0日増加	約40.6日増加
冬日の年間日数	約16.7日減少	約46.8日減少

日降水量200mm以上の年間日数	約1.5倍に増加	約2.3倍に増加
1時間降水量50mm以上 ^{注)} の頻度	約1.6倍に増加	約2.3倍に増加
日降水量の年最大値	約12%（約15mm）増加	約27%（約33mm）増加
日降水量1.0mm未満の年間日数	（有意な変化は予測されない）	約8.2日増加

注）1時間降水量50mm以上の雨は、「非常に激しい雨（滝のように降る）」とも表現される。傘はまったく役に立たず、水しぶきであたり一面が白っぽくなり、視界が悪くなるような雨の降り方である。



激しい雨が増える
日降水量の年最大値は
約12%（約15mm）/
約27%（約33mm）増加
50mm/h以上の雨の頻度
は約1.6倍/約2.3倍に増加



降雪・積雪は減少
雪ではなく雨が降る。
ただし大雪のリスクが
低下するとは限らない。

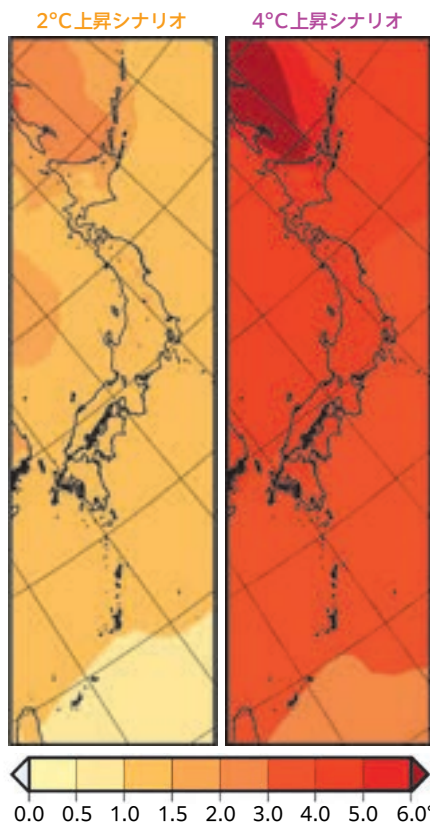
強い台風の割合が増加
台風に伴う雨と風は強まる



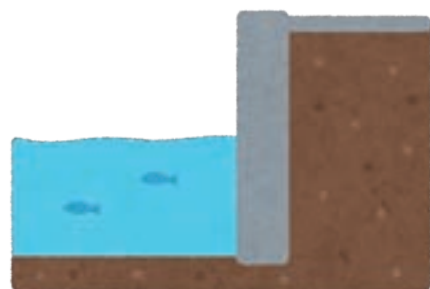
**3月のオホーツク海の海水面積は
約28%/約70%減少**



【参考】4℃上昇シナリオ（RCP8.5）では、21世紀半ばには夏季に北極海の海水がほとんど融解すると予測されている。



21世紀末の日本の年平均気温の変化
21世紀末（2076～2095年平均）における年平均気温の20世紀末（1980～1999年平均）との差。



沿岸の海面水位が約0.39m/約0.71m上昇

日本南方や沖縄周辺においても世界平均と同程度の速度で**海洋酸性化**が進行



出典：文部科学省および気象庁『日本の気候変動2020』

今後の温暖化研究とJAMSTECの役割

地球システムモデルでCO₂排出削減やSDGsに貢献する

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

——地球システムモデルは今後、どのような役割を果たしていきますか？

パリ協定では、各国のCO₂排出削減などの実施状況を、2023年から5年ごとに確認していく計画です。ただし、大気中のCO₂濃度の上昇が抑えられたことが観測されたとしても、どれくらいが人間がCO₂排出を削減した効果によるものなのかは分かりません。

それを知るために、私たちは生態系の変動も取り入れた地球システムモデル「MIROC-ESM」の改良を続けて、人類が排出したCO₂のうち、どれだけの量が陸や海へ吸収されたのか、大気中に蓄積した分はどれだけかを正確に推定する研究を行ってきました。

また、大気中のCO₂濃度が一定でも、エルニーニョやラニーニャが数年の周期で起きて気候が変動します。さらに、数十年の周期で太平洋や大西洋の海面水温の分布が変化して気候変動が起きることが知られています。そのような自然

の揺らぎの理解を深めて、MIROC-ESMで再現できるようにすることを目指します。それにより、観測された気温上昇や極端現象について、どこまでが自然の揺らぎによるものか、人間活動による影響はどの程度かを、より高い精度で推定できるようになります。そして、人類がCO₂排出削減を大きく進めた場合と、あまり削減しなかった場合に、近未来の気温上昇や極端現象にどれだけ差が出るのかを社会に示していくこと、つまり、人類のCO₂排出削減の効果を可視化することが、地球システムモデルの重要な役割の一つになります。

——具体的な排出削減策の検討にも貢献できますか。

例えば、MIROC-ESMでは作物の収穫量も予測できるようになっています。ある地域で森林を切り開いてトウモロコシなどの作物を育て、そこからバイオ燃料をつくった場合、実際にカーボンニュートラルを実現できるのかといった問題や、食料生産との競合はどうか、その地域の水利用にどのような影響を及ぼすかなど、排出削減策や気候変動問題にとどまらずSDGs（持続可能な開発目標）の達成に役立つ情報を提供していくことも、今後の大きな目標です。

現場観測とモデルにより、メタンや大気汚染物質の効率的な削減を促す

金谷有剛

JAMSTEC 地球環境部門
地球表層システム研究センター センター長

——温暖化を防ぐには、何に着目するのがよいでしょうか。

AR6では、人間が排出する各種の温暖化物質が世界平均気温を何℃上昇させるのか、物質別、人間活動の部門別、地域別で初めて示しました。そのようなデータに基づき、温暖化防止に効果的な排出削減を進めていくことができます。

AR6に掲載された図（右ページ）で説明すると、2014年に排出された1年分の温室効果ガスが平均気温に与える影響は、10年スケールではCO₂よりもメタンの方が大きくなっています。これは、同じ質量で比較するとメタンはCO₂よりも温室効果が高いことと、メタンは大気中の化学反応で9～10年で消えてしまう「速い流れ」に例えられることが関係しています。もちろん100年以上にわたり大気中に滞留するCO₂の対策が長期的には重要ですが、「速い流れ」のメタン

に着目するのも有効です。排出を削減すれば大気中の濃度低下とそれに伴う冷却効果が20年以内に起こります。例えば、化石燃料採掘や農畜産業からのメタン排出削減が世界的には注目されています。

——排出削減の実行には、どのような仕組みが必要でしょうか。

狙いを定めた物質・部門・地域の排出量削減がうまくいっているのかを速やかに評価し、結果を社会に返すシステムをつくることです。当面の目標の2030年はすぐにやって来ますから、人工衛星や現場の濃度観測データを使って、数値モデルで速やかに分析し、排出の変化を検出します。そして削減効果が足りないときには対策を強化する仕組みとするのです。

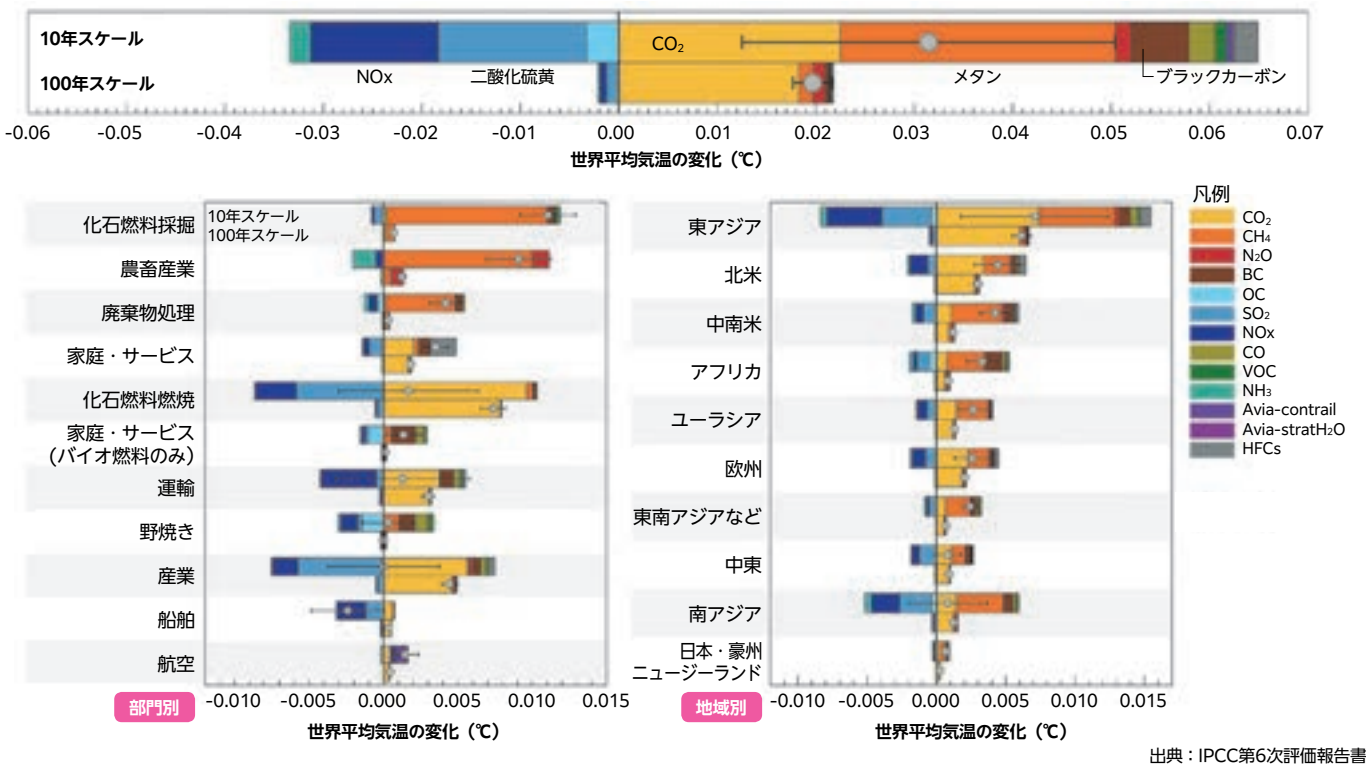
メタン以外では、大気汚染物質であるブラックカーボンやオゾンの変化も捉えることが必要です。ブラックカーボンは、化石燃料やまきの燃焼、森林火災などによって発生する“すす”のことで、大気中で太陽光を吸収したり、北極

域では海水や雪に付着して太陽光の反射率を低下させたりします。衛星では捉えにくいので、私たちが取得している海洋地球研究船「みらい」による海上観測や、長崎県五島列島やアラスカ、ロシアでの陸上観測のデータを役立てます。こうした観測を国際連携で進め、強化する必要があります。

見過ごされている自然界のプロセスの研究も必要です。永久凍土や森林火災の変化を、人間活動と区別して評価することが重要です。また、海や陸から発生する自然のエアロ

ゾル粒子が雲の性質をどのように変えているのか、気候変動につながっているのかを見極めることも大事な課題です。

気温上昇を1.5℃に抑えるには、まずは今後10年の取り組みが重要です。JAMSTECは海や陸での現場観測からモデルによるシミュレーションまでを行っている世界でもまれな研究機関です。その強みを生かして、温室効果ガスや大気汚染物質の変動を監視して、随時、社会に発信していくことが私たちの役目です。



人間活動による2014年1年間分の物質排出が世界平均気温に与える影響

10年スケールで見ると、メタンやCO₂、ブラックカーボンの影響が大きいことが分かる（上段）。メタンは主に化石燃料採掘や農畜産業から排出され（左下）、地域別では東アジアや南アジア、中南米での排出が多い（右下）。

船舶と多機能アルゴフロートによる海洋観測で、予測精度を高める

石井雅男

気象庁 気象研究所 研究総務官

——海洋観測は温暖化研究にどのように貢献してきたのですか。

1990年ごろから、船舶を使った海洋観測が以前に増して高い精度で行われてきました。2007年には、国際観測プログラムGO-SHIPが開始され、日本ではJAMSTECと気象庁が、船舶により海表層から海底付近までの水温や塩分、CO₂濃度などの観測を進めてきました。私も執筆に加わったAR6では、それらの観測データや数値シミュレーションに基づき、人為起源のCO₂のおよそ1/4を海が吸収していると評価しています。

2000年から、海面から水深2,000mまでの水温や塩分を

自動計測するプロファイリングフロートによる国際観測計画Argoも始まり、海洋の循環や貯熱量変化の解明に大きなパワーを発揮しています。日本ではやはりJAMSTECと気象庁がその運用に中心的な役割を果たしてきました。現在、およそ4,000台のフロートが世界中の海で観測を続けています。さらに、酸素とpH（水素イオン濃度指数）などのセンサーを付けた500台のアルゴフロートを投入する計画が米国で始まっています。JAMSTECでも同様な取り組みが推進されることを期待しています。

AR6は、海洋の酸性化や貧酸素化の進行を評価していますが、それは主に船舶による限られた海域・時期の観測データに基づいています。アルゴフロートで酸素とpHを高頻度で計測できるようになれば、船舶による高精度の観測

今後の温暖化研究とJAMSTECの役割

データと組み合わせることで、全海洋における海洋酸性化や貧酸素化の変動を明らかにすることができます。

pHから海中のCO₂濃度を推定することもできます。海にCO₂が吸収され続けるためには、海の表層に吸収されたCO₂を深層に運ぶ海の物理的な循環が重要です。アルゴフロートによる表層から水深2,000mまでの酸素とpHの計測データが加われば、海によるCO₂吸収や海洋循環の変動に関する理解がより深まります。また、CO₂排出削減が進んだ場合、CO₂濃度が下がった大気へ海からCO₂が放出される可能性にも注目する必要があります。

——AR6では、大西洋を南北に循環する大西洋子午面循環(AMOC)が、いずれのシナリオでも21世紀を通じて衰える可能性が非常に高い、と予測しています。

2100年までにAMOCが突然停止しない確信度は中程度と、不確かな予測です。AMOCは大西洋を北上する暖流を形成していて、その暖流のおかげで北米東部や欧州は高緯度のわりに温暖な気候になっています。そのほか多くの海

流についても、温暖化による気候変動によって、21世紀中に流れ方が変わると予測されています。

船舶や多機能化したアルゴフロートによる詳細な海洋観測データによって地球システムモデルを検証することで、海洋循環の変動やそれに伴う気候変動も、より高い精度で予測することができるようになるでしょう。

出典：Argo Information Centerのウェブサイト



アルゴフロートの分布

2021年10月現在、3,870台のうち日本は228台を投入している。

Ⅰ 気候変動予測と影響評価の連携により温暖化に立ち向かう

■ 肱岡靖明

国立環境研究所 気候変動適応センター 副センター長

——日本でも、大雨による河川の氾濫や土砂崩れなどが毎年のように起き、温暖化による極端現象の増加がすでに起きていることを実感するようになりました。

10年前くらいまで、温暖化については懐疑論を含めて50年後、100年後の未来が主な関心事でした。それが今では、目の前で起き始めている気候変動による被害を回避・軽減する「適応」が社会的な課題となっています。

日本では、2018年に気候変動適応法が公布され、適応のための情報基盤を整備する中核として国立環境研究所に気候変動適応センターが設立されました。また、都道府県および市町村が適応計画を策定するとともに、地域気候変動適応センターを設けることが求められています。それらは努力義務ですが、すでに全国で44の地域センターが設立され、各地で適応への取り組みが始まっています。

——適応のための情報とはどのようなものですか。

JAMSTECなどがつくり出している気候変動の予測データに基づき、地域ごとの作物の適地や収量、土砂災害の発

生率や熱中症搬送者数などの将来予測を行い、適応策の検討に役立てています。例えば、温暖化が進んだ将来の土砂崩れ(斜面崩壊)の発生確率を、気候モデルで予測した年最大日降雨量と、地形や地質、近くの河川の水位や流量(水文量)などの情報を組み合わせて評価します。

現在は気候モデルによる予測データの解像度は最高でも5kmないし2kmですが、過去の観測値と比較して市町村レベルで詳細な適応計画を策定するには、理想的には1km以下の解像度と予測の不確実性に関する情報が必要です。また、気温や降雨量だけでなく、梅雨の始まる時期や期間の変化などが、作物の収穫量や品質に大きな影響を与えます。JAMSTECをはじめとする研究機関の気候モデルの研究者たちには、日本各地の気候パターンが、何年後に、どのように変化するかを高い解像度で予測することをお願いしたいですね。

適応法では、おおむね5年ごとに気候変動の影響評価を行い、適応計画を改定することと定めています。そのために、気候モデルの研究者と影響評価を行う私たち適応の研究者が緊密に連携して、気候変動に立ち向かう取り組みを始めています。

現在は、農林水産業や自然生態系保護、治水・防災や健康分野などからの情報提供の要望が多いのですが、気候変動はさまざまな産業分野にとって、リスクにもビジネスチャンスにもなります。気候変動に適応する社会を築くには、地方公共団体のみならず産業界の協力も欠かせません。近い将来、産業界からの要望が急増すると私は予想しており、そのとき求められるきめ細かな情報提供ができるように、JAMSTECとも連携を深めていきたいと考えています。

Ⅱ 温暖化研究のオールジャパンの連携拠点として

■ 渡部雅浩

東京大学 大気海洋研究所 教授

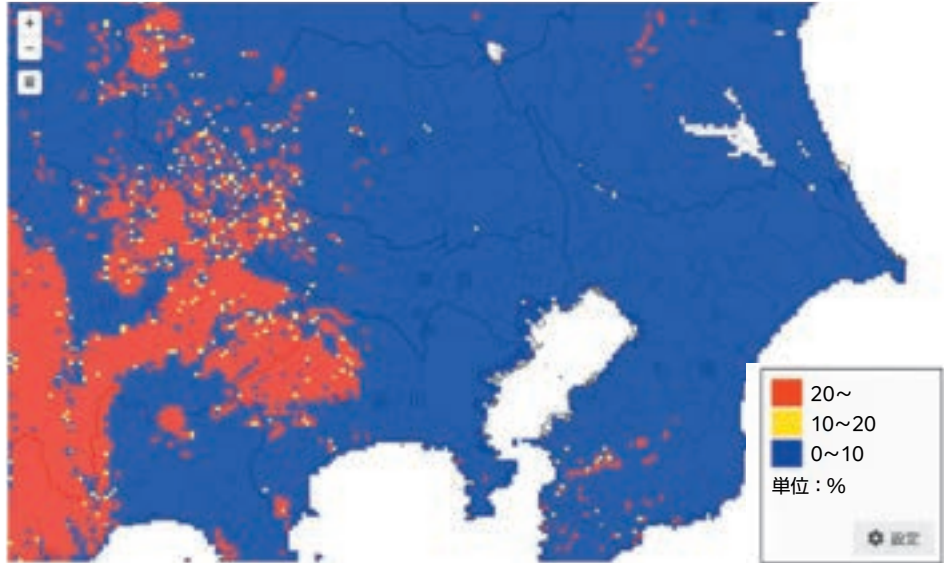
——日本において気候モデルを用いた温暖化研究はどのように進展してきたのでしょうか。

1991年、東京大学に気候システム研究センター(CCSR、現・大気海洋研究所)が設立され、大学発の気候モデリングおよび気候システムの数値的研究が始まりました。1997年にはJAMSTECと宇宙開発事業団(現・JAXA)の共同プロジェクト「地球フロンティア研究システム」が設立されるとともに、気候モデルMIROCの開発も本格化し、当時、CCSRで博士課程にいた私も開発に加わりました。

そして2002年に稼働を始めたスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を契機として、文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト」のもと、MIROCの開発・活用を中心としたオールジャパンの温暖化研究体制が築かれました。一方、気象庁気象研究所では、気象に関する予報モデルをベースに独自の気候モデルの開発を行ってきました。複数の全球気候モデルを開発している国は世界的に見ても少なく、日本の温暖化研究の多様性といえます。

現在、JAMSTECは温暖化研究の一大連携拠点であるとともに「地球シミュレータ」の運営主体です。一方、大学は人材育成という役割を担ってきました。学生のころからスパコンでMIROCを動かして学んだ若い人たちが、JAMSTECや国立環境研究所、大学の研究者となり、独自

出典：気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT)



21世紀半ばにおける斜面崩壊の発生確率

RCP8.5シナリオに基づき気候モデル「MIROC5」で予測した年最大日降水量と地盤情報を組み合わせて評価したもの。気候変動適応センターが運営する「A-PLAT」(<https://adaptation-platform.nies.go.jp>)には、このような適応に役立つさまざまな情報が掲載されている。

の発想でMIROCの開発に貢献するといった柔軟な連携体制で研究を進展させてきました。JAMSTECには大学やほかの研究機関との連携を強化して、オールジャパン体制のハブとしての役割を果たし続けてほしいですね。

——渡部さんはAR6の執筆者の一人として貢献されましたが、温暖化研究の今後の課題は何ですか？

地球環境に重大な影響を与え得る現象で、AR6では不確実とされているものの解明が大きな課題の一つです。例えば、気候が安定化した後の海面上昇の大きさや、永久凍土の融解により放出が予想されるメタンがどの程度温暖化を促進するのかなどが、よく分かっていません。そのような現象の解明には、温室効果ガスの動態や化学・生物過程を扱う地球システムモデルの研究者と、気候の物理プロセスの理解を目指す気候モデルの研究者が連携を深めていく必要があります。

——最後に、温暖化研究に興味を持つ「Blue Earth」の若い読者にメッセージを頂けないでしょうか。

温暖化研究には、気象現象を方程式で解く物理学だけでなく、大気や海で起きる化学反応を解明する化学や、CO₂やメタンに関わる生態系の応答を調べる生物学など、自然科学の広い分野の力が必要です。さらにCO₂の排出削減や今後増える極端現象に適応する社会を築くには、人文・社会科学の力も欠かせません。今、あなたが不思議に思うこと、面白いと思うことを突き詰めていけば、きっと温暖化研究につながります。

BE