※ 本仮訳は、駐日英国大使館主催ウェビナーシリーズのために用意されたものです。 原文をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

ROYAL SOCIETY

気候変動:科学と解決策 | 報告1

次世代気候モデル:

ネットゼロと気候適応への重要な変化

概要

気候モデルは、気候変動を理解し、そのリスクを予見するために必要不可欠である。気候モデルは、影響を予測し、適応に関する決定を導き、緩和目標を設定する際の土台を提供する。今、社会は、急速に拡大する気候変動を目の前にして、2050年までにネットゼロを実現させるという目標の達成に向けて確固たる意思決定を可能にするための、より詳細で正確な情報を必要

としている。現在の技術的可能性と科学的能力は、新たなレベルの国際協力と、次世代スーパーコンピューティングおよび地球システム科学への投資を通じて生かすことができる。このような重要な変化を伴う変革により、今後数十年間の緩和と適応に関するより高い目標を後押しするために必要な堅牢な科学が生み出される可能性がある。

知見

- エクサスケール・コンピューティングとデータ機能に基づく国際的な次世代気候モデリング・センターがあれば、重要な変化をもたらすことができる。現在、ネットゼロへのテクノロジーロードマップと気候適応への投資を支えるモデリング能力においてこうした変化が可能となっている。
- ・素粒子物理学の分野において欧州原子核研究機構(CERN)が果たす役割と同じような役割を担う未曾有の規模の専用施設があれば、過去50年間の最大級の科学的成果のひとつである地球システムモデルの構築を土台として、タイムリーかつ詳細で一貫性があり直ちに実行可能な今後100年間の気候予測の実現を阻んでいる科学的・技術的障害が克服できるだろう。
- 次世代高分解能モデルにより、世界的および 地域的な気候影響から未曽有の異常気象と危 険な気候変動のリスクに至るまで、緩和と適 応に関して入手できる情報の品質が革命的に 変わる可能性があることが最近の研究で明ら かになった。

- こうしたグローバルな新施設との連携と協力 を通して、世界中の国々の気候モデリングと 気候サービスの可能性が新たなレベルへと進 むだろう。これはそれぞれの国の市民、そし てまさしく世界の利益になる。
- 最新の予測を確実に理解し活用するため、この施設には、データ分析と情報科学の分野の最新デジタルテクノロジー(人工知能(AI)、機械学習、高度な可視化機能など)を含む専用のオペレーショナル・データ・サービスを組み込むことも考えられる。
- 気候モデル情報の開発者と使用者を教育する 学術機関に加え、次世代モデリングのための 斬新なアイディアを刺激する「インキュベー ター」、データクラウドとアプリケーショ ン・プログラミング・インターフェース (API) に基づく最先端デジタルソリューションにおける官民パートナーシップを促す 「オープン・データ・ラボ」もまた、継続的 な進歩を後押しする可能性がある。

1. これまでの経緯

1.1. 地球の気候の将来的変化を予測する

地球の気候はとてつもなく複雑である。科学者は観察を通じて地球の気候の多くの変化を察知できるが、これらの観察結果だけでは、なぜ気候が変化しているのかも、今後どう変化するのかも説明できない。気候モデルが必要なのにはそうした理由がある。

1896年の時点で、すでにアレニウスは単純 なエネルギーバランス理論に基づき、二酸 化炭素が2倍になると4℃の地球温暖化が起 きると主張していた1。数値気象予報ととも に地球の(大気・海洋)大循環の応答をシ ミュレーションできる気候モデルが開発さ れたのは、1950年代にコンピュータが登場 してからであった。これらのモデルは基本 的な物理法則を用いて第一原理から行う気 象および気候のシミュレーションに基づい ている。等式で表されるこれらの法則を最 先端の数値計算技法を用いて解かなければ ならない。地球の大気、海洋、土地、氷原 を何百万ものマス目に分け、先回りして等 式を解くことにより、今後数時間から数十 年間のそれぞれのマス目の中の気象と気候 の変化のシミュレーションを作成できる2。

モデルの最大の課題は常に、モデルのマス目より小さなスケールで起きる雲の形成や積雲対流といったプロセスをどうすれば一番うまく表せるかである。これらのプロセスは、気候変動の大きさと速さの判断、降雨量の変化の予測、熱帯低気圧や洪水といった深刻な気象事象の把握に不可欠である。気候モデルにおけるこれらのプロセスを詳細にシミュレーションする能力が欠けているため、特に地域レベルと同地レベルでの未来の気候における非常に重要な不確定要素が存在する3。

1.2. 利用可能な計算機能力と基礎科学を人 類の利益のために生かす

気候モデルは当初からコンピューターを駆使してきた。従って、その能力をどれだけ使えるかによって、精巧さのレベル、さらには結果として実行可能なシミュレーションのタイプが決定づけられてきた。現在、これらのモデルはスーパーコンピューティングの最も複雑な応用例の代表であり、一般に 100 万行を優に超えるコードを含む。

物理的な気象と気候のシミュレーションにおいて確立されたこれらの強みを土台として、近年、炭素・窒素循環といった海洋生態系と陸域生態系に関係する大気化学と生物地球化学的循環の導入とともに、地球システムプロセスがモデルに加えられた。これらのモデルは、専門家が地球の未来の気候とその影響を判断する際に、気候変動の物理的特性を超えて、自然資源と管理資源、そして生態系が果たす役割を検討することを可能にした4(図1)。

地球システムをシミュレーションし、基本的な物理原則から、気象と気候がどのように変化するかを科学者が予測することを可能にするコンピュータモデルの構築は、過去 50 年間で最も重要な科学的成果の一つである。これにより、社会は未来を見通し、温暖化する世界がもたらす影響を認識できるようになった。その結果、今では、気候変動への取り組みが 21 世紀の明確な課題であることについてすべての国家の意見が一致している 5.6。

気候モデルと、さまざまな排出シナリオに関してなされた予測が、緩和と適応のためのエビデンス基盤の大部分を形成する7。巨大な熱貯蔵能力を持つ海洋が、今後数十年の間に気候変動がどのような形で現れるかの鍵を握ることを科学者たちは学んだ8。候変動が、ますます深刻化する干ばつだけでなく、より異常な降雨と洪水をもたらすことを知った9。温暖化と降雨パターンの変化に対し陸上生物圏が応答するということは、二酸化炭素吸収源としての効率が低下することを意味し、その結果、人為的な炭素排出の温室効果が拡大するおそれがあることを科学者たちは知ったのである10。

気候モデルは同時に、温暖化する地球システムが、現在予想されているよりもはるかに危険で11、もしかすると取り返しのつかない状態に陥る可能性を科学者が探ることを可能にした。これらの転換点には物理的な気候システムが含まれる可能性がある。例えば、氷床の急速な減少や海洋の熱塩循

環の崩壊、さらには陸域炭素循環の崩壊 (永久凍土融解やアマゾン熱帯雨林の喪 失)などである。このような自然の変化 は、例えば、将来の排出に関して許容さ れる炭素「予算」が減らされることによ って、世界の適応能力と国際的な緩和政 策に多大な影響を及ぼすだろう。

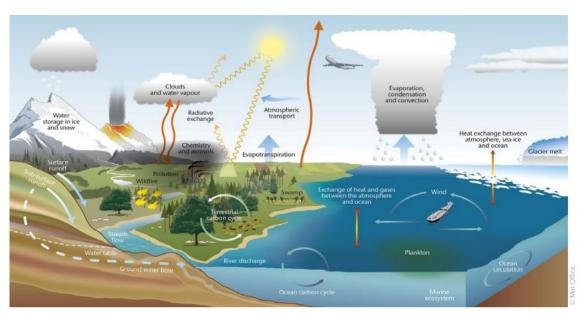
これまでのさまざまな進歩にもかかわらず、気候モデルとそれによる予測にはまる大な欠陥があることを気候科学者たちは知っている。地球システムについだの基本知識が十分でないことが一因だが、スーパーコンピューティング能力に起因する科学的限界も要因の一つである。モデリングコミュニティ)が、全に対している適応・緩和アクション全体を支援するために必要な詳細情報を遺れている適応を支援するために必要な詳細情報を遺れるためには、この課題に早急に取り組まればならない。

この 50 年で大 きな進歩があっ たとはいえ、気 候モデルとそれ による予測には まだいくつもの 重大な欠陥があ る。それらの欠 陥の主因は、ス ーパーコンピュ ーティング能力 に起因する科学 的限界であり、 急を要する課題 として取り組む 必要がある。

図 1

現世代気候モデル

現世代気候モデルに含まれる物理的・生物学的プロセスを示す模式図地球の基本的循環(水、 炭素、大気化学的プロセス、海洋生物地球化学的プロセス)を促す大気と海洋の流れの重要性 が強調されている。



2. 気候アクションのために気候モデルが重要な理由

2030年までの貴重な数年の間、気候モデルは気候変動の緩和と気候変動への適応の両面で必要不可欠な情報をもたらすだろう。

2.1. さまざまな緩和戦略の意味を理解する

気候モデルによるシミュレーションと予測に基づく評価を用いて、各国および多国間の排出緩和政策の実現可能性を検証しなければならない。こうした評価により、必要な排出削減が果たされないことで生じるる。 根本で生じることが、異常事象によるリスができる。 何が危険にさらされているのか、 無作為になるのか。 これらのことを我々を使用するしかない。

ネットゼロへの道筋は、状況を一変させ、 風力・太陽光・水力といった気象主導の再 生可能エネルギーへの依存度を高めるだけ でなく、水・エネルギー・食料の連結を圧 迫する可能性もある(「報告9:気候変動と 土地」、「報告10:100億人を持続可能な 形で養う」を参照)。緩和アクションが、 気候に伴う気象の変化に適合しており、予 期せぬ結果が生じないようにするために は、強固な気候科学的根拠が絶対に不可欠 である。

2.2. 適応戦略と長期的レジリエンスのために情報を提供する

適応に関しては、生活と町や都市を気候変動に耐えられるようにすると同時に、自然環境も守られるような計画を立てる必要がある。アントニオ・グテーレス国連事務総長が述べたように、「レジリエンスへのレース」は「ネットゼロへのレース」と同じぐらい重要である12。人間による影響が、

多くの異常気象事象の可能性と重大度を高めていることを示す証拠が次々と見つかっている 13。大気中には炭素がすでに蓄えられ、システムには慣性があるため、たとえ排出が減少したとしても、さらなる気候変動は不可避である。地球・地域・局地レベルでのこうした適応プロセスのために、生命・暮らし・重要インフラの保護や、食料・水・エネルギーの持続可能な供給の確保への影響を示し、情報提供を行うためには、気候モデルによる予測が必要不可欠である。

適応への将来的投資の規模と、世界的な社会的脆弱性の拡大を考え合わせると、気象と気候、特に異常気象災害が向こう数十年間とそれ以降にどう変化するかについてのより詳細で正確な情報が非常に重要視される。詳細な局地的気候情報により、今後数十年の間に実行されるインフラプロジェクトに関し、立地・建設・管理運営面で予想される気候変動の影響に対するレジリエンスを確保することで、数兆ドル規模の投資を守ることができる。(「報告8:「嵐を乗り切る:適応を通じたグローバルな気候レジリエンスの強化に科学はどう貢献しうるか」を参照)。

今、気候科学は重大な分岐点を迎えている。科学と技術は、次世代気候モデルへの 飛躍的進歩が視野に入るレベルまで進ん だ。すなわち、意思決定を後押しし、世界 が実行しなければならない投資を導き、保 護するために社会が緊急に必要とする緩和 と適応のための詳細な科学的エビデンス基 盤を提供しうるモデルである。国際的な協 議は、この急速な進歩を実現させるため に、政策決定者が気候科学界との協力を開 始するための話合いの場を提供する。

3. 次世代気候モデル: 気候モデリングとその応用に革命が起きる可能性

3.1. 未来の気候を予測するにあたっての明確な課題

既存モデルは、利用可能なコンピュータ能力が不足しているため、局地的な気象と気候のシミュレーションという面で大きな欠陥がある。沿岸部浸水、洪水、干ばつ、山火事など、さらに犠牲の大きい気候変動の影響の多くを引き起こす熱帯低気圧、低気圧、長引く高気圧といったシステムの詳細な構造とライフサイクルは既存モデルでは解像できない。また、気候変動性と地域的気候変動の重要な要素である海流も再現できない14。

1990年の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第1回評価報告書 (AR1) 以来、解像度と複雑性の面でモデルは次第に進化し、このプロセスに取り組む国も増えた。AR1 の気候モデルが300km間隔の横のマス目を使用していたのに対し、現在、IPCC AR6 の気候モデルの解像度は約100kmとなっている。使用可能なコンピューティングリソースで、苦労して勝ち得た成果である。解像度が半分になる都度(例えば、100kmから50kmになると)、必要なコンピューティング能力は10倍に増える。

一方、IPCC レポートと同じ 30 年の間に、 気象予報の分野では「静かな革命」が起き ていた 15。気象モデルはすでに、10km の解 像度で世界の気象を予測できるようになっ た。地域予報はキロメートル単位である。 こうした進歩により、雲システム、上昇気 流、組織化されたモンスーン降雨帯、熱帯 低気圧などの重要な気象構成要素だけでな く、局地的な異常事象の正確なモデリング にも、ほぼキロメートル単位の解像度が必 要であるという証拠が明白に示された。 それでは、なぜ気候モデリングは同じような道筋を辿っていないのだろうか。ごく簡単に言えば、多数のシナリオに関して何世紀分もの地球規模のシミュレーションを安定した速度で行うために必要なコンピューティング能力は、向こう数週間の実用的な気象予報を行うために必要な能力を大きく上回るからである。

3.2. 地球規模から局地まで全レベルのアクションのために情報を提供するグローバル 気象システムのモデリング

問題の核心は、キロメートル単位の解像度 で、数十年間から数世紀という期間にわた ってグローバル気候システム全体(特に大 気と海洋)をシミュレーションしなければ ならないという点である。これが必要なの は、最も深刻な損害をもたらす異常気象事 象が、キロメートルスケールで作用するプ ロセスによって引き起こされるからであ る。同時に、重要な理由として、これらの 特性が、はるかに大きなスケールを持つ海 洋と大気の循環によっても形成されるとい う点が挙げられる。さらに、大小のスケー ルの間には双方向の相互作用が存在する。 言い換えれば、気象と気候は、ごく小さな スケールから最大の地球規模の大循環への エネルギー・カスケード(小規模から大規 模な運動へのエネルギー伝達)とその逆の エネルギー伝達の連続体なのである。

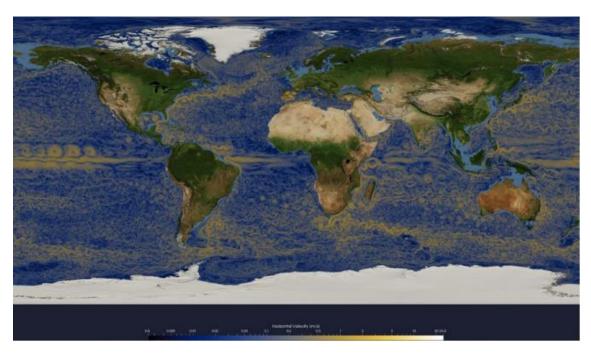
キロメートルスケールのグローバルモデルへの大きな飛躍は、最終的に最小スケールの運動による大きなスケールの運動の条件付け(およびその逆)を可能にするかもしれない。地域モデリング方式が有用である一方で、それ自体だけでは不十分である根本的な理由はそこにある。暴風や海洋渦などのキロメートルスケールの現象を明確に解像する次世代グローバルモデルを使った世界の気象予測に関しては、現在すでに可能性が存在する。

図 2

次世代グローバル暴風・海洋渦解像気候モデルは、気象システム(上)と海洋渦・海流(下)を明確に再現する 16 。

このようなリアルな再現により、水の可用性、異常気象、海洋の熱と炭素の取り込み方、自然の生態系サービスへの影響の変化をより確信を持って予測することが出来る。こうした知識は、生息地の喪失、疾病の蔓延、山火事リスク、大気質、農業・漁業・林業の産出量など、社会的に関係の深い要素の定量化を可能にする。





画像提供: Bjorn Stevens 教授、Jochem Marotzke 教授を通じて、マックスプランク気象研究所(MPI-M: Max Planck Institute for Meteorology) およびドイツ気候計算センター(DKRZ: German Climate Computing Centre) より

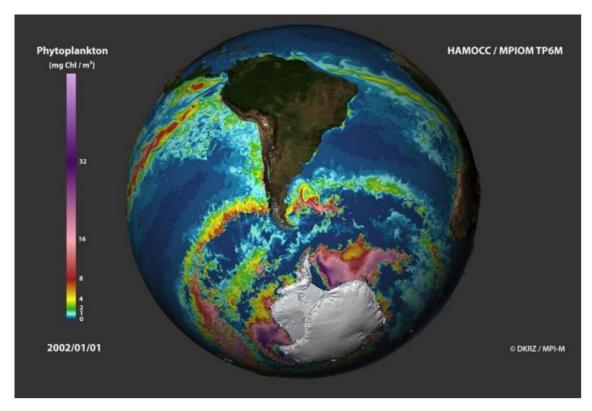
一定期間(一般に 10 日単位)をシミュレーションするために、こうしたキロメートルスケールモデルのプロトタイプが現在構築されている。これらのリアルな再現のレベルは画期的である(図 2) 17.18。この次世代モデルは、世界の気候感度(一般に、二酸化炭素レベルが 2 倍になるごとの温度変化によって定量化される)や地域の気候影響から、未曽有の異常気象や危険な気候変動のリスクまで、気候変動に関する意思決定を裏付ける気候情報の品質を革命的に変化させるだろう 19。

これらのモデルは物理的な気候システムを超えて、炭素、エアロゾル、海洋の栄養素など、地球システムの他の構成要素が、気候トラジェクトリーを大きく変えるような形で微細スケールの大気・海洋循環にどのように依存しているか(図3)について新たな知見を提供してくれる(報告7:炭素循環」を参照)。植生と土壌炭素、海洋循環と海洋生態系の複雑な相互作用、さらには人間の活動を詳細に再現することによって、気候の不安定化、異常、不可逆的転移に起因するリスクが、社会と自然システムにどのような影響を与える可能性があるかを調査するための次世代気候/地球システムモデルへの道が開かれる。

図 3

植物プランクトン大増殖の今後を予測する

植物プランクトン大増殖の今後を予測することは、将来的な海洋の炭素取り込みとともに、海洋生態系の将来的な状態を理解するために不可欠である。植物プランクトンの大増殖は、渦・海洋前線・沿岸湧昇域などの海洋循環の微細スケール構造に関係している。新しいキロメートルスケールの地球システムモデルでは、これらを初めて捉えることができるようになった。



画像提供: Bjorn Stevens 教授、Jochem Marotzke 教授を通じて、マックスプランク気象研究所(MPI-M: Max Planck Institute for Meteorology) およびドイツ気候計算センター(DKRZ: German Climate Computing Centre)より

4. 国際的な取り組みは?

高受な持にの組けき課年をなたソ研る調にばいが問題のにばいが問題のにばいが問題のだめよりなでな10にある。

ネ気ンを達は用情大せるシレンをすす直きのく必は、で報きるのののののののでである。 使候をさめ

高度な教育を受けた、豊富なリソースを持 つ研究者らによる全世界の協調的取り組み によらなければ対処できないような課題が 今後10年の間に生じるだろう。ネットゼロ と気候レジリエンスという対をなす目標を 達成するには、直ちに使用できる気候情報 の提供を大きく加速させる必要がある。過 去30年間の気候モデルの漸進的改良から、 能力の重大な変化へと移行するための技術 的可能性は存在する。この任務は手ごわ い。すなわち、科学的、技術的に複雑なだ けでなく、局地から全球まですべてのレベ ルで社会のニーズに応える必要があるから である。この取り組みを成功させるために は、強力なグローバル・パートナーシップ でこれを支えなければならない。

4.1. 世界に利益をもたらす国際連携

現在、最先端の全球気候モデルの構築と実行に必要な事業のスケールに対応できる者は数少なくなっている。必要とされる人材、コンピューティング、データ、エネルギー資源は膨大で、一国で対応できる能力を超え始めているからだ。モデルの最適分解能に近づくためには、未曽有のパワーを持ち、膨大なコストを要するエクサスケール・コンピューティング(1秒間に10¹⁸回、つまり100京回の演算を行うシステム)が必要である²⁰。同時に、データのスケールの問題も大ききく、エクサバイトのデータ生成(10億ギガバイト)に間もなく到達する可能性がある。

術的・科学的ソリューションを入手できるようになったことが挙げられる。核融合(国際熱核融合実験炉(ITER))やヒッグス粒子の発見(欧州原子核研究機構(CERN))といった世界の主要な科学的課題と同じく、国際レベルでインフラと戦略的思考による問題解決能力を合体させることによって必要な重大変革を起こし、目標への到達を目指すことができる^{21,22}。

プラス面としては、モデリング技術界が技

基本的に必要になるのは、地球システムのタイムリーなシミュレーション・予測・データ分析を専門とする、未だかつてないスケールのコンピューティングおよびデータ施設である。この施設は処理されたデータを全世界と共有し、各国の気候施設ネットワークの拠点としての機能を果たす。あらゆる段階において、この施設は局所から全球までの全レベルの社会的ニーズを指針としなければならない。

こうしたイニシアチブは、タイムリーで一 貫性があり詳細で実行可能な今後 100 年間 の気候予測を、キロメートルスケールで、 地球システムの複雑性をさらに高めて提供 する際の科学的・技術的障害を克服する道 を開く可能性がある。

この施設は CERN のように単一の物理的な 組織であっても、緊密にネットワーク化さ れた各国のまたは国際的なエクサスケール 施設の集合であってもよい。最も重要な目 標は、ニーズと能力に応じて全ての国家が アクセスできる、キロメートルスケールの 全球気候予測およびサービスの実現となる だろう。その成否は、学術機関、各国の気 候研究センター、気候サービスプロバイダ ーといった全世界の気候科学、モデリング およびサービスの専門家の知識と知力のネ ットワークを維持・拡大できるかどうかに 大きくかかっている。

これは国際レベルでの新たな投資と協力を要する壮大な取り組みだが、この投資は、取り組みを行わない代償と比較検討しなければならない。世界はすでに気象・気候事象によって甚大な人的・経済的損失を被っている。気候の変化に伴い、損害は大きくなるばかりである。国連防災機関は、2000年以降、災害事象で123万人の命が奪われ、経済的損失は約3兆ドル(毎年1,500億ドル)にのぼると推定している23。こうしたレンズを通してみてみると、この取り組みがもたらす恩恵は、投資の規模よりけた違いに大きいことがわかる。

4.2. 科学的進歩とイノベーションの加速

このような中心機関はその目的を果たすために、各国がすでに持っている能力を土台とし、それらの能力と連動し、強化する独自の最先端の設備とサービスを提供するために、コンピュータとデータ科学・技術のイノベーションを活用し、奨励している。また、計算プラットフォームを提供することで「地球観測」への巨額の投資を活用する。投資は状況に当てはめて、地球システム科学を進歩させるため、また、予測の初期設定を行い、モデルのパフォーマンスを評価するために使用されることになる。

こうした重大な変化はモデリング能力だけでなく、専用のオペレーションデータサービスを創出する機会を同時に提供する。こうして、AI、機械学習、高度な視覚化など、データ分析と情報科学分野の最新のデジタルテクノロジーを用いて、予測が確実に行動の指針となる。その結果、全員の利益になる、信頼できる情報源とデータサービスが提供される。このサービスポータルは単一の組織であっても、EUのコペルニクス気候変動サービスのように緊密にネットワーク化された地域の主要気候サービスプロバイダーの集合であってもよい24。

さらに、こうした一歩前進を「インキュベーター」が補強する。斬新なアイディアの創出・開発を促すと同時に、専門家が会合し、協力し合うことができるフォーラムを提供するのである。CERNの例に倣い、モデリングの取り組みに「オープン・データ・ラボ」を役立てることも可能である。これは、全世界の気候科学界とユーザー群のための最先端のデジタルソリューション開発を加速させる独自の官民パートナーシップである。

人間の能力に関しては、真の意味でグローバルな科学者とエンジニアをこうした中心機関に配置する。世界各国の気候科学研究活動と世界の気候科学研究機関が、気候モデル情報の未来の開発者とユーザーを教育する交換プログラムを特色にすることもできる。

基に地のなシ測析るてルーよ設本な球タショ・を、なのテびでのスムュ・一門だスンンーる必はテリレ予タとかケピグタ。要、ムーー 分すつーュお施

5. 2030 年と 2050 年の気候モデリングはどのような姿になっているか。

エクサスケール・コンピューティングの課題が克服され、キロメートルスケールの次世代グローバル・ストーム解像気候モデルを開発できれば、2030年までには意思決定のための気候変動情報の革命が起きているだろう。

目の前の気象、そして人間のレジリエンスを試すような局地的異常事象に何が起きそうかを、全世界の科学者たちは知ることになるだろう。降雨の分布、頻度、激しさがなぜ、どのように変化しうるか、海流がどう動き、地域の気候と海面上昇にどのような物理的気候システムの知識があれば、全ての人々に安全で持続可能で健全な未来を与えるという目標のもとに、食料・水・エネルギー資源をより効率的に管理することができる。

2050年までには、グローバルレベルと各国レベルの両方で、物理的環境と自然環境の間のいくつもの関係、そして可能性として環境と社会との関係を予測できる地球生命システム・シミュレーターが構想される可能性がある。必然的に、これが地球の物理的デジタルツイン(モデルと観察を最適に融合し、人間活動のデジタルツインを取り込んだ地球システムの動的再現)となり、地球システム全体の現在、そして起こりうる未来の調査を可能にする。このような事業の実現可能性は、EUのプログラム

Destination Earth (DestinE): Shaping

Europe's digital future (欧州のデジタルな未来の形成) 25」においてすでに検討されている (報告 2:「ネットゼロのためのコンピューティング」参照)。

最後に、ビーグル号の艦長、ロバート・フィッツロイ海軍中将の言葉を思い起こすべきだろう。彼は重要な航海にチャールズ・ダーウィンを同乗させた人物であると同時に、英国気象庁の創立者でもあり、初めて公の天気予報を発表した人物でもある。

1859年の大嵐で勅許状をなくした彼は、

「The Times」紙に次のような文を寄稿した。「人は荒れ狂う風を止めることはできないが予測することはできる。人は嵐を和らげることはできないが、嵐の猛威から逃れることはできる。(難破から)命を救うために使えるすべての道具が正しく用いられれば、こうした恐ろしい災厄の影響を驚くほど和らげることができるかもしれない」。

フィッツロイは 150 年以上前に、悪天候の 影響を緩和し、これに対処する手段として の「予測」という長い旅に乗り出していた のである。気候変動への対処についても同 じことが言える。全球から局地、そして数 時間単位から数十年単位での気象と気候 (まさに地球システム全体)を理解し、そ の結果として予測を行うことで、社会が未 来に向けて計画を立て、人々と自然環境の 安全を守ることが可能になる。

この報告資料は、排出ネットゼロを実現させ、気候変動に適応するための世界的な取り組みを、科学と技術がいかに後押しできるかを検討する一連の資料の一つである。この報告資料集は、各国が 2050 年までのネットゼロに向けた自国のロードマップを策定するにあたり、科学的情報が状況の理解とアクションを助けることができる 12 の課題に関して全世界の政策決定者に情報を提供することを目的としている。

全資料をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

この著作物の文章は、クリエイティブ・コモンズ表示ライセンスの条件のもとで認可されています。原作者および 出所のクレジットが表示される限り、無制限の使用が認められます。

ライセンス入手先: creativecommons.org/licenses/by/4.0 発行: 2021 年 5 月 DES7287_3 © The Royal Society

参考文献

- Arrhenius S. 1896 On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 41(251):237–76. (doi: 10.1080/14786449608620846)
- Carbon Brief. 2018 Q&A: How do climate models work? 15
 January 2018. See https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work (accessed 25 February 2021)
- Fiedler S. et al. 2020 Simulated tropical precipitation assessed across three major phases of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). Monthly Weather Review. 148(9):3653–80. (doi: 10.1175/MWR-D-19-0404.1)
- Bonan GB, Doney SC. 2018 Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. Science. 359(6375):eaam8328. (doi: 10.1126/science.aam8328).
- UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. 1992 (FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E) 200705), New York. See https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf
- UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. 2015 Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties (FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1), Paris. See https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf (accessed 25 February 2021).
- IPCC. 2014 Climate Change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri, Meyer LA (eds). Geneva, Switzerland: IPCC. See https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/ (accessed 29 March 2021).
- IPCC. 2019 IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. Pörtner H.-0 et al. (eds). In press. See https://www.ipcc.ch/srocc/ (accessed 29 March 2021).
- IPCC. 2012 Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, CB et al. (eds). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. See https://archive.ipcc.ch/report/srex/ (accessed 29 March 2021).
- IPCC. 2019 Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Shukla PR et al. (eds). In press. See https://www.ipcc.ch/srccl/ (accessed 29 March 2021).
- Lenton TM et al. 2019 Climate tipping points too risky to bet against. Nature. 575(7784):592–5. (doi: 10.1038/d41586-019-03595-0).

- United Nations Secretary-General. 2020 Secretary's General address at Columbia University: "The State of the Planet". See https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2020-12-02/address-columbia-university-the-state-of-the-planet (accessed 25 February 2021).
- 13. Carbon Brief. 2021 Attributing extreme weather to climate change. See https://www.carbonbrief.org/mapped-how-climate-change-affects-extreme-weather-around-the-world (accessed 25 February 2021).
- Marotzke J et al. 2017 Climate research must sharpen its view. Nature Climate Change. 7(2):89–91. (doi: 10.1038/nclimate3206).
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G. 2015 The quiet revolution of numerical weather prediction. Nature. 525(7567):47–55. (doi: 10.1038/nature14956).
- Stevens, B. et al. 2019 DYAMOND: the DYnamics of the atmospheric general circulation modeled on non-hydrostatic domains. Progress in Earth and Planetary Science, 6(1). (doi: 10.1186/s40645-019-0304-z).
- Satoh, M. *et al.* 2019 Global cloud-resolving models. Current Climate Change Reports. 5(3), 172–184. (doi: 10.1007/s40641-019-00131-0)
- 18. Op. cit. note 16.
- Palmer, T, and Stevens, B. 2019 The scientific challenge of understanding and estimating climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(49), 24390–24395. (doi: 10.1073/pnas.1906691116)
- Neumann, P. et al. 2019 Assessing the scales in numerical weather and climate predictions: will exascale be the rescue? Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 377(2142), 20180148.(doi: 10.1098/rsta.2018.0148).
- 21. Op. cit. note 19.
- Palmer, T. 2011. A CERN for climate change. Physics World 24(03), 14. (doi: 10.1088/2058-7058/24/03/24).
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2020
 Human Cost of Disasters. An overview of the last 20 years
 (2000 2019). See https://www.undrr.org/news/drrday-unreport-charts-huge-rise-climate-disasters (accessed 25
 February 2021).
- European Union (EU) Copernicus Climate Change Service.
 See https://climate.copernicus.eu (accessed 25 February 2021).
- Destination Earth (DestinE): See https://ec.europa.eu/digitalsingle-market/en/destination-earth-destine (accessed 25 February 2021).