

2.7.2 気候変動予測

(1) 研究開発領域の定義

本領域は気候変動研究のうち予測に関する研究開発動向を含む領域である。大気や海洋の物理法則から成る全球レベルあるいは領域レベルの気候モデル、雲解像モデル、海洋モデルなどのほか、エアロゾル、植生、海洋生態系などの要素も取り入れた地球システムモデル (ESM) やそのサブモデル、社会経済シナリオを取り入れた予測を行う統合評価モデル (IAM) の高度化に係る研究開発動向を主な対象とする。モデル評価手法、ダウンスケーリング、データ同化、地球環境予測のための基盤技術開発も含まれる。これらのモデル開発や基盤技術開発と関連の深い国際共同研究の進捗、データ配信やカプラ等の研究インフラ開発、気候変動影響の評価や適応との連携強化の状況も対象に含まれる。

本領域では主として季節予測や気候予測に主眼を置き、短時間降雨予測は「2.7.3 水循環 (水資源・水防災)」領域で扱う。気候変動影響の評価や適応に関しては「2.8.2 農林水産業における気候変動影響評価・適応」領域や「2.8.3 都市環境サステナビリティ」領域で扱う。観測については「2.7.1 気候変動観測」領域と「2.10.1 地球環境リモートセンシング」領域で扱う。

(2) キーワード

地球温暖化、季節内～十年規模予測、全球雲解像モデル、気候モデル (GCM)、地球システムモデル (ESM)、領域モデル、グローバル解析、イベント・アトリビューション、力学的ダウンスケーリング、大型計算機、大規模計算、機械学習、短寿命気候強制因子 (SLCFs)

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球温暖化、オゾン層破壊、砂漠化、海洋汚染、酸性雨など、地球規模もしくは広域規模での環境問題が深刻化する中で、20世紀以降に観測された地球規模の環境変化を再現し、その中長期的な将来変化を精度良く推定する必要性はかねてから認識されてきた。こうした環境変化の影響が最近の20～30年で顕在化していると考える専門家も多く、さらに今後数十年から100年以内には全球的な影響がより顕著になると見込まれることから、予測・推定技術の高精度化が強く期待されている。

気候変動・変化の予測には数値モデルを用いたシミュレーションが不可欠である。そのため、大気・海洋・陸域・海氷などの時々刻々の状態変化を物理法則に従って計算し、温室効果ガス (GHGs) の濃度上昇に対する気候システムの変化を推定するために用いられる全球気候モデル (Global Climate Model : GCM)、それを高解像度化して雲を解像する全球雲解像モデル (Global Cloud-Resolving Model : GCRM)、GCMの要素に加えて自然の炭素循環や植生変化、海洋生態系までを取り込み、GHGsの大気中濃度を同時に計算する地球システムモデル (Earth System Model : ESM)、さらに、社会経済シナリオを取り入れた気候変動予測を行う統合評価モデル (Integrated Assessment Model : IAM) 等が開発・高度化されてきた。またシミュレーションには多くの計算資源を要するため、地球シミュレータや富岳などの国内トップクラスの大型計算機が不可欠であり、モデルの高度化は大型計算機の技術の発展と肩を並べて進められている。モデルの再現性は、その都度、観測データを用いて検証されている。

本研究開発領域を維持強化することにより、全球のGHGsや粒子状物質の動態把握とその将来予測の不確実性低減、大気・海洋を含む地球表層に現れる長期変化や極端現象の変化の検出と予測、およびGHGs排出削減の国際的な意思決定が与える効果の評価などが可能となる。GCM・ESMのシミュレーションから得られる降水量、日射量、風速、海水温等の将来変化に関するデータは、治水や再生可能エネルギー、農林水産業といった分野において大規模環境変化の影響を把握し対策を立案するために活用されるなど、様々な分野への波及効果も大きい。経済的な効果や損失の推定に対するニーズも高く、より精確な気候変動予測が

求められている。一方、地球温暖化は全地球規模の長期的変化でありながら局所的かつ短期的な現象と密接につながっており、多様な時空間が相互作用する複雑系の問題である。また人が居住する陸上地表付近だけでなく、海洋（水圏）や雪氷圏あるいは生態系（生物圏）にまで至る多圏が相互作用する複雑系の問題でもある。そのため数値モデルは、複雑系の個々の部分を精確に表現するのみならず、それらの多岐にわたる相互作用を適切に表現する必要がある。同時に予測の初期値となる状態の正確な把握や記述、観測や継続的なモニタリングの進展も重要となる。

[研究開発の動向]

全球平均の地表気温が上昇していることは確かな観測事実であり、過去100年あたりで0.73°C温暖化している¹⁾。地表気温の上昇は世界のほとんどの地域で見られており、ヒートアイランドの影響を除去した日本の地表気温も100年あたり1.28°Cと全球平均を上回るペースで温暖化が進んでいる。地球温暖化の証拠は地表気温以外の多くの気候システムの要素に見られているが、社会への影響という意味では全球平均よりも地域の気候変化、さらに台風や熱波のような極端な気象現象（いわゆる異常気象）の変化が重要である。

異常気象自体は自然の変動として発現するが、その強さや出現しやすさに対する地球温暖化の影響が顕在化していると考えられる専門家が增多している。2021年に公表された「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の第6次評価報告書では、地球温暖化が異常気象に確実に影響している例を複数挙げている²⁾。こうした地球温暖化の顕在化という認識は一般社会でも広まりつつある。社会からの要請に応え、地球温暖化の影響の深刻化を避けるために、大気や海洋の状態を再現し、将来の変化を予測するGCMやESMの開発と改良がますます重要となってきた。

2021年は、IPCC第6次評価報告書（第一作業部会）の公表、米国プリンストン大学上席研究員の真鍋淑郎氏のノーベル物理学賞受賞と、気候変動予測の研究開発領域においてビッグイベントが目白押しだった。真鍋氏が構築した元祖GCMは1970年代に既に二酸化炭素の気候影響を予言し、その結果をもとに発表された1979年のチャーニー・レポートは地球温暖化科学の大きな発展のきっかけとなった。以降、大型計算機の発達とともにGCMは高精度化されていった。IPCCの評価報告書は1990年に第1次評価報告書が公表されたが、2000年代はじめころまでは気候変動における人間活動の影響検出やGCMによる地球温暖化予測の妥当性検証など、温暖化に関する科学的理解の増進が地球規模の気候変動・変化の問題に携わる研究者にとって大きな課題であった。しかし2007年に公表された第4次評価報告書（AR4）で20世紀後半以降の温暖化が人間活動によるものとほぼ断定されて以降、科学的理解の増進に加え、温暖化への対策立案に資するデータの創出にも力が注がれ始めている。第5次評価報告書（AR5）では、GCMに加えてESMの結果が活用され、適応策（今後避けられない温暖化に社会が適応するための政策）や緩和策（地球温暖化の進行そのものを止める抑制策）に資する多様なデータの創出が進められた。最新の第6次評価報告書（AR6）²⁾では、人間の影響が大気、海洋及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言された他、人為起源の気候変動が世界各地の気象および気候の極端現象に既に影響を及ぼしていることが示され注目を集めた（後述）。

適応策の立案には地域ごとに詳細な情報が必要となるが、地球全体（全球）を対象とした気候モデルでは計算機資源の面から高解像度化に限界があり、最も高解像度のもので格子間隔20 km程度である。この解像度では、細かな地形の影響を受ける降水分布などについて、精度の高い再現性が望めないため、日本周辺など特定の領域を対象とした領域モデルが用いられることが多い³⁾。ただし、対象領域周辺に関する情報（境界条件）は、全球モデルによる予測結果から与える必要があるため、全球モデルと領域モデル両方の再現性や予測精度を向上させていく必要がある。全球モデルで得られた予測データの一部を境界条件として領域モデルに与え、対象領域に関する予測データを高解像度化する手法を力学的ダウンスケーリングと呼ぶ。その他には統計的なモデルを用いて高解像度化を行う統計的ダウンスケーリングという手法もある。

このような高解像度化に加え、気候シミュレーションの発展のもう一つの軸として、大規模アンサンブル実

験（初期条件を少しずつ変えて行う複数のシミュレーション）がある。アンサンブル実験は、目的に応じて意味するものや利用方法が異なる。IPCCのAR5までは気候シミュレーションの1モデル当たりのアンサンブルサイズは10メンバー程度が一般的であったが、大型計算機の能力向上に伴い、100メンバー以上のアンサンブル実験を実施して極端現象の振る舞いを議論する研究がここ10年間で盛んになってきた。その口火を切ったのがイベント・アトリビューション研究で、主に大気大循環モデルを利用して大気の内外部変動によって生じ得る偶発的な現象の多様性の幅を捉え、極端気象の発生確率を直接見積もることで温暖化の影響を評価する研究が注目を浴びた。イベント・アトリビューションに関するマルチモデル比較のためのプログラムも立ち上げられたが、大規模アンサンブル計算は計算機負荷が高いため、IPCC AR5までは結合モデル相互比較実験（CMIP実験）とは時期をずらして負荷分散する策が取られていた。しかしIPCC AR6では、イベント・アトリビューション研究の成果が積極的に引用され、人為起源の温暖化の影響が既に各地の極端気象現象に影響を及ぼしている根拠として取り上げられた。日本では、2016年に、過去から将来の温暖化の影響評価のために、格子間隔60 kmのGCMによるアンサンブル実験に領域大気モデルによる力学的ダウンスケーリングを組み合わせた大規模なデータセットのアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）^{4), 5)}が作成され、様々な分野での影響評価に役立てられている⁶⁾。近年は、大規模アンサンブル化の動きは大気大循環モデルだけでなく、より計算負荷の高い大気海洋大循環モデル（結合モデル）にも適用されるようになってきた。これにより、大気の内外部変動だけでなく、海洋の内外部変動も長い時間スケールで偶然起こり得るゆらぎの幅として捉えることができるようになった。これらの大規模アンサンブルが表現する内部変動の幅は、マルチモデル実験の結果から得られる不確実性の幅とは異なる概念であり、これらを組み合わせることで大気と海洋を含めた気候システムの理解が加速している。

これらの気候変動予測に用いられる数値モデルは気候研究の基幹技術であり、気候システムを構成する各要素の表現が精緻化・複雑化される方向での高度化と、より多くの要素を包含する方向での多様化が従来に引き続いて進んでいる。その中で、気候予測の最大の不確実要因である大気物理過程、特に雲・降水の気候モデルにおける取扱いは、モデルが高解像度化してきたことも相俟って近年顕著に進展しており、日本でも高度化が進められた⁷⁾。これと並行して、従来のGCMではパラメータ化で表現されていた雲や対流を全球規模で直接解像する全球雲解像モデルの開発も日本での成功⁸⁾を皮切りに世界各国で進められている。また、このようなモデル高度化は人工衛星等の発達による地球観測の拡充によるところも大きく、観測情報を能動的に活用して数値モデル開発を加速させる方向性が打ち出されつつある。

2021年に開始したパリ協定に基づくグローバル・ストックテイクでは、緩和等の取り組みの進捗を評価するために、GHGsの排出量・吸収量の高精度な把握と同時に将来予測が必要になると見られている。また、適応策の検討では10年程度先の予測に対するニーズが高まっている。こうした状況を背景に、2100年前後の予測のみならず、1年～10年程度先を対象とした予測研究が盛んになってきている^{9), 10)}。このような予測では、海洋の長い時間スケールの変動がメモリーとなるため、大気モデルを利用する日々の天気予報とは異なり、大気海洋結合モデルを観測値で初期値化する。現業の気象予報機関における季節予報モデルの開発では、季節予報システムを十年規模予測まで拡張するとともにESMを用いた十年規模予測も登場した。これらにより、大西洋の十年規模変動の代表である大西洋数十年規模振動（Atlantic Multidecadal Oscillation：AMO）の予測可能性が高いこと、その強制力として人為起源の短寿命のエアロゾル（短寿命気候強制因子、Short-lived Climate Forcers：SLCFs）が重要であること等が明らかになってきた^{11), 12)}。一方、太平洋の十年規模変動の予測には課題が残されている。2000年から2015年頃にかけて生じた地球温暖化の停滞（ハイエイタス）は、太平洋十年規模振動（Pacific Decadal Oscillation：PDO）と呼ばれる内部的気候変動と関係することが分かってきたが、初期値化過程を取り入れた十年規模予測でも十分な予測スキルが見いだせていないのが現状である。その要因として、海洋過程のモデル表現が不十分であることが挙げられ、PDOやハイエイタスに直接影響する海洋中層（数100～1000 m深）の循環を適切に表現するためには格段に高い解像度が要求されることから、渦を解像できる高解像度の海洋モデルを気候シミュレー

ションに用いる取り組みも開始されている。2022年9月現在、熱帯太平洋ではラニーニャ現象の傾向が3年間持続しており、十年規模変動の新たな位相に突入した可能性もあることから、今後の動向が注目されている。

直近での新たな研究トピックとして、新型コロナウイルス感染症が招いた社会経済活動の変化は、気候変動に影響を与え得る要因の一つとして注目された。2020年の感染拡大の初期には、世界各国の社会経済活動が停滞し、結果として人為起源の二酸化炭素（CO₂）排出量が一時的に減少したことが報告されている（2019年比で約5.4%減少）。しかしこの量は陸域生物圏や海洋の吸収量の自然変動による年々のCO₂濃度変動幅より十分小さく、気候への影響は小さいと考えられている^{1), 13), 14)}。実際、世界各国の最新の気候モデルを用いて新型コロナウイルス感染症に伴うGHGsや人為起源エアロゾルの排出量減少が気候変動に及ぼす影響を見積もるモデル相互比較実験（CovidMIP）では、2020年から2021年の排出量の減少が2020年から2024年の地上気温や降水量にほとんど影響を与えていないことが示された¹⁵⁾。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• IPCC第6次評価報告書（第1作業部会）²⁾の公開

2021年8月に承認されたIPCC第6次評価報告書（第1作業部会）では人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには「疑う余地がない」と断言された。IPCC第4次評価報告書では気温上昇傾向に対して「疑う余地がない」という言葉が用いられて話題になったが、今回、人間活動の影響に言及した。さらに向こう数十年の間にGHGsの排出が大幅に減少しない限り、21世紀中に、工業化前から1.5°C及び2°C以上上がるとの警鐘も鳴らされた。技術的には大規模アンサンブルという概念が加わり、自然の内部変動によって偶発的に生じる極端な現象の発生確率を陽に評価対象とすることが可能になった。実際に発生した特定の極端現象に地球温暖化が与える影響を評価するイベント・アトリビューションもその一つであり、IPCC第6次評価報告書の中では人為起源の気候変動と極端気象現象の関連を示す根拠として取り上げられた。また、気候影響駆動要因（Climatic Impact Drivers: CIDs）という用語が導入されたことや、CIDsに含まれる駆動要因の複合現象（compound event）を対象とする研究にも注目が集まっている。CO₂の増加に対する気温の昇温量（気候感度）の評価の幅が第5次評価報告書よりも狭まったことも特筆すべき点である。

• 初期値化予測の大規模アンサンブル化

気候変動予測において大規模アンサンブル実験が盛んになっていることは前節に述べたが、この動きは、季節内から十年規模の予測にも拡張されつつある。従来、季節から十年規模の初期値化した予測は10本程度の限られたアンサンブルメンバーで運用されることが主流だったが、近年は50以上のアンサンブルサイズで実施されるようになった。これにより、平均値の底上げ・底下げだけでなく、確率的に発生する極端気象現象の発生確率の予測可能性を検証することが可能となった。

• オペレーショナルな十年規模変動の予測と要因分析

十年規模予測を実務的に運用し、この先十年程度の気候変動の傾向と、その各種要因を定量的に評価する要因分析までをセットにして情報発信することの重要性が国際的に唱えられている。十年という時間スケールは、初期値に含まれる内部変動の影響だけでなく、境界条件として与えられる外部強制力の十年スケールの変動にも影響を受ける。後者の代表的な要因が短寿命気候強制因子（SLCFs）である。両者を含む個々の要因を分離して再予報を行う感度実験への期待と、SLCFsの動態や強制力を定量的に把握する必要性が高まっている。

• 機動的イベント・アトリビューション

イベント・アトリビューション（EA）が誕生して10年が経ち社会からの注目度も年々高まる傾向にあるが、

IPCC 第6次評価報告書で大きく取り上げられたことで、気候サービスとしての運用に向けた取り組みが本格化してきている。特に欧州では、極端気象現象が発生した直後にイベント・アトリビューションの結果を速報する簡易的EA手法をいち早く確立し、メディア向けに解説書を準備するなどの活発な取り組みが行われている。日本でも、文部科学省の気候変動予測先端研究プログラム（後述）の中で、イベント・アトリビューションの結果を即時的に発信するための新しい手法の開発が始められている。

• ストーリーライン

最近10年の間に、「ストーリーライン」という言葉が気候変動予測分野で頻繁に使われるようになった。最初に登場したのはイベント・アトリビューションの分野である。イベント・アトリビューションには2通りのアプローチがあり、大規模アンサンブル実験を活用して極端現象の発生確率を対象とするものと、極端現象の発生から発達までをモデルで忠実に再現した上で強度や量への影響を見積もるものがある。前者をrisk-basedアプローチ、後者をstorylineアプローチと呼ぶ¹⁶⁾。一方で、気候変化の将来予測の不確実性を議論する際にもストーリーラインという言葉が使われるようになったが、イベント・アトリビューションの場合とは意味が異なる¹⁷⁾。将来気候のシミュレーションでは、複数のモデルの結果を統合して多数決で予測情報を導き出すのが従来の考え方だったが、ストーリーラインの考え方では、一つ一つのモデルが予測する将来を一つのシナリオと捉え、シナリオ（ストーリー）に沿った各種予測情報や影響評価結果を複数パターン用意するという戦略を取る。ストーリーラインの考え方については、IPCC第6次評価報告書²⁾（参考文献の1.4.4.2節およびBox. 10.2）の中でも詳細な議論が行われている。

• グローカル解析と線状降水帯

地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）の誕生により、大規模アンサンブルの全球モデルと領域気候モデルの出力をセットで解析することで、局所的に発生する気象現象の要因を全球スケールの気候まで遡って分析することが可能になった。このような新たなアプローチは「グローバル解析」と呼ばれ、近年盛んに研究が進められている¹⁸⁾など。気象庁では、線状降水帯に伴う災害を軽減するための取り組みが一層強化されているが、グローバル解析を用いると、従来メソ気象の分野に分類される線状降水帯を全球スケールの気候変動と結びつけて発生ポテンシャルを予測することなどが可能になると期待されている。

• 沿岸海洋予測

詳細な地域的予測への関心が高まっているが、海洋の場合には、人に近い沿岸海洋の予測や影響評価に対するニーズが特に高い。IPCCの結合モデル相互比較実験（CMIP）の枠組みでは一部で海洋水平格子10km程度の予測が試みられているが、沿岸海洋予測に対する現状のニーズに対応するためには水平格子100m以下が求められる。沿岸海洋は陸の影響を大きく受ける一方で、流れ等の現象に対する支配的要因が外洋と大きく異なり、グローバルな気候変動を対象とした既存のGCMやESMの単純な拡張で扱うことはできない。そうした中で、沿岸地域に特にフォーカスしたESM開発という方向性が欧米で見られるようになり、米国ではICoM（Integrated Coastal Modeling）等具体的な研究プロジェクトも進行中である。従来、沿岸海洋の研究は湾など狭い個別海域を各論的に扱う形で発展し、沿岸海洋の予測も個別海域ごとに実装されてきた。しかしながら、地球温暖化の影響などでグローバルに生じる沿岸海洋の問題には、従来の各論的な枠組みでは対応しきれなくなっている。そうした背景から、欧米では沿岸海洋研究に関する大規模ネットワークが形成され、それに基づく大規模研究プログラム（例えばUS Coastal Research Program、EU Horizon 2020 COASTAL）が進行しており、我が国でもネットワーク構築やそれを活かした予測の取り組みが望まれている。

• 衛星観測とモデリングの連携

衛星観測が2010年頃から急速に発達してきたことで、気候を構成する様々な要素や側面を包括的に観測

することが可能になってきた。これは気候モデルを構成する様々なコンポーネントに対して観測的な拘束条件を与えることになり、従来はチューニングの対象とされてきた不確実なモデルパラメータをこれらの観測情報のデータ同化によって推定したり¹⁹⁾、物理プロセスのモデル表現（パラメタリゼーション）の定式化を観測情報の組み合わせによって素過程レベルで評価したりする試み²⁰⁾が始められている。

・機械学習を活用したモデル高速化・高度化

数値気候モデルの一部の構成要素（物理プロセス）について、多大な計算コストを要する第一原理的な計算手法を機械学習によって模倣する新しい手法が提案されつつある²¹⁾。このアプローチは計算速度を損なわずに第一原理計算の精度を保つことを可能とし、従来のGCMやESMで採られてきたパラメタリゼーション近似に新しい流れを生み出している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

・文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」(令和4～8年度)

気候変動予測の研究開発を推進する中核的プログラムであり、「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(平成29年度～令和3年度)の後継としてスタートした。全球規模から領域規模までの気候変動予測やそれに関わるモデル開発が4つの領域課題の下で実施されている。モデル開発ではGCM、ESMの高度化開発も行われている。4つの課題が連携して近未来予測情報の創出に取り組むことや、気象変数から気象災害リスクまでを網羅するアクションブル・イベント・アトリビューションの実現が掲げられている点が新しい。AIや衛星観測の活用にも重点的に取り組んでいくとしている。

・新学術領域研究「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」(令和元～5年度)

中緯度の大気海洋相互作用を海洋の能動的な役割に着目しながら多角的に理解することを目的とした研究プロジェクト。観測とモデリングを組み合わせることで大気・海洋の階層的なスケール間相互作用に関する理解を深め、極端気象や海流の予測を向上させることを目指している。

・学術変革領域研究(A)「陸域から外洋におよぶ物質動態の総合的シミュレーション(マクロ沿岸海洋学)」(令和4～9年度)

従来各論的に実施されてきた沿岸海洋研究をマクロスケールに統合する枠組みを構築し、特に日本沿岸海域を対象として、陸域や外洋の物理・物質環境と連動して変動する沿岸海洋の予測や影響評価の手段となるシミュレーションシステムの開発を目指している。

・学術変革領域研究(B)「Deep Numerical Analysis (DNA) 気候学への挑戦」(令和2～4年度)

従来用いられてきた気候モデルでは計算速度の制約等により雲の生成・発達・衰退・消滅の時間変化が直接的に計算できなかったため、雲の広がりや厚みをエネルギー収支や気温・相対湿度などから推定しており、台風等の顕著現象や雲-放射相互作用が十分に表現できていなかった。こうした問題を克服するため、雲微物理の方程式に基づいて実体の雲の時間発展を表現する次世代気候モデルの開発・実用化を目指している。

・「北極域研究加速プロジェクト」(ArCS2)(令和2～6年度)

北極域環境の変化とそれがもたらす社会影響を統合的に扱う、北極域研究に関する国内のフラッグシッププロジェクト。北極域の気候変動およびそれと連動した北極域外の気候変動や、その結果として日本を含めた地球上の様々な地域に生じる極端現象に関するメカニズム理解と予測手法高度化を目的とした課題が含まれる。

- 環境研究総合推進費 戦略的研究開発 (I) S-20 「短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に対応する緩和策推進のための研究」(令和3～7年度)

CO₂に比べて寿命が顕著に短い短寿命気候強制因子 (SLCFs) が引き起こす複合的な気候変動と環境影響を定量的に評価し、影響緩和へむけたSLCFsの排出量削減シナリオを策定するための研究開発プロジェクト。

- 「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」(令和2～4年度)

激甚化する極端気象現象に対する防災・減災の実現に向けて、スーパーコンピュータ「富岳」を活用して気象・大気環境予測の大アンサンブル実験を実施し、極端事象の確率予測を行うための予測技術確立のための研究開発プロジェクト。

- ムーンショット型研究開発事業 目標8「2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現」(令和4～8年度)

極端気象の深い理解と気象モデルやデータ同化、アンサンブル手法などの気象予測技術を高度化することによって、社会的・技術的・経済的に実現可能な気象制御技術の実現を目指した研究開発プロジェクト。

■ 国外

- 世界気候研究計画 (WCRP) 「Light House Activities」

世界気候研究計画 (WCRP) は、IOC-UNESCO (ユネスコ・政府間海洋学委員会、Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO) やISC (国際学術会議、International Science Council)、WMO (世界気象機関、World Meteorological Organization) などから資金を得て活動する国際プロジェクトであり、1980年に設立された。地球温暖化予測に関する国際的な研究コミュニティの中で最も影響力の大きいプロジェクトと言え、地球環境研究に携わる日本を含む世界の研究者が参加している (ただし一般社会の利害関係者も巻き込んで地球環境に関する課題を検討し科学に基づいた解決策を探る「フューチャー・アース」でもGCMやESMを活用した研究が展開されている)。

温暖化予測に関する国際的な共通実験仕様 (CMIPシリーズ) を作成しているのがWCRPの下部組織「結合モデル作業部会」(WGCM) であり、現在は次期CMIP7の仕様の検討が行われている。予測データの力学的ダウンスケーリングに関する国際協力を進める「統合地域ダウンスケーリング実験」(CORDEX) もWCRPの活動の一部である。世界をいくつかの区域に分けて参加研究機関に担当区域を割り当てたり、境界条件の与え方などを統一したりといった調整を行っている。個人の行動に繋がる (actionable) 地域スケールの気候情報ニーズの高まりを受けてRiFS (Regional Information for Society) と呼ばれる新たなプログラムの発足準備も進められている (2022年現在)。

WCRPは以前、重点研究課題として7本の柱 (融氷、気候感度、炭素循環、極端現象、水資源と食料、海面水位変化、近未来予測) をGrand Challenge (GC) として掲げていたが、2021年にその後継としてLight House Activities (LHA) を立ち上げた。LHAは5つの重点課題 (①Digital Earths、②Explaining and Predicting Earth System Change (EPESC)、③My Climate Risk、④Safe Landing Climates、⑤WCRP Academy) を掲げ、今後10年間の世界の気候変動研究の方向性の旗振り役を担っている。

LHAの課題の一つであるDigital Earthsは、高性能計算インフラ (HPCI) に支えられた高解像度数値モデリングと地球観測ビッグデータを融合し、過去・現在・未来の地球を高リアルティで計算機上に再現した「デジタル地球」を作り出すことを目指している。そのために、全球雲解像モデルやより高解像度のモデリングと、それに対する衛星などの地球観測データの同化を、人工知能 (AI) など活用して進めるコンセプトが

提案されつつある²²⁾。同じくLHAのひとつであるEPESCは、10年規模の気候変化に焦点を当て、その実態を地球温暖化だけでなく人為起源のエアロゾルや自然の内部変動など多様な要因から定量的に説明することを目標として掲げている。WMO主導のマルチモデル10年規模予測のリアルタイム運用（GCの成果）とも連携し、予測情報に対して準リアルタイムに解釈を与えることを目指すとしている。

• 「World Weather Attribution」(2014年～)

World Weather Attribution (WWA) は、イベント・アトリビューションを気候サービスとして提供することを目的に発足した欧州のプログラム。社会ニーズを踏まえて極端現象が発生してから間をおかずにイベント・アトリビューションの結果を速報することを最優先にし、極値統計の推定手法を導入して手法の簡略化を実現した。欧州で発生する現象のみならず、平成30年7月豪雨や令和元年東日本台風など、日本で発生した極端現象に対して適用した実績もある。発展途上国の気候サービスにも重点を置き、気候変動問題における地域間格差を減らす取り組みを積極的に行っている。2022年5月にはイベント・アトリビューションを解説するメディア向けガイドを公開し²³⁾、日本を含む8ヶ国語に翻訳して各国のメディアに働きかけるなど日本のメディアとの連携も強化している。

• 全球雲解像モデル比較プロジェクト「DYAMOND2」(2017年～)

世界各国で開発が進んでいる全球雲解像モデルの国際相互比較プロジェクトの第2期。大気モデルのみであった第1期²⁴⁾に比べて、大気海洋結合モデルを含むさらに多くのモデルが参加している。日本からは第1期に引き続き、全球非静力学大気モデル（NICAM）およびその海洋結合モデル（NICOCO）が参加し、水平解像度3.5kmの実験データを提供している。本プロジェクトはWCRP Digital Earthsの中核とリンクした活動としても位置づけられている。

• Destination Earth (2021～2030年)

地球システムと人間活動の相互作用を全球スケールで精密かつ高い解像度で監視、予測するためのモデル構築を目指す。欧州グリーンディールとデジタル戦略の柱と位置づけ、欧州宇宙機関（ESA）、欧州中期予報センター（ECMWF）、欧州気象衛星開発機構（EUMETSAT）が中心となって実施される。取り組みは（1）リアルタイム観測と高解像度の予測モデリングの高度な融合に基づく地球システムのデジタルツイン構築、（2）コベルニクスプログラム等の既存事業を通じて収集・蓄積されるデータの更なる充実およびデジタルツインによって生成されるデータの蓄積、（3）デジタルツインおよび各種データの利活用を促進するユーザーフレンドリーなデータ基盤の構築、という3つの柱から構成される。当面は、2024年までに、気候変動と極端現象に関するデジタルツインの開発とデータ蓄積、データ基盤構築を進める。長期的には2030年までに生物多様性、水資源、再生可能エネルギー、食糧、防災・減災に関するデジタルツインの開発も目指す。

• Energy Exascale Earth System Model (E3SM) (第一期：2014～2018年、第二期：2019～2021年、第三期：2022～2024年、第四期：2025～2027年)

米国エネルギー省が100億円規模の研究助成を行う気候モデル開発プロジェクト。エクサスケールのスーパーコンピュータ利用を前提に、戦略的なモデル開発と組み合わせることによって超高解像度の地球システムモデリングの実現やアンサンブル実験の実施等を目指す。

• Next Generation Earth Modelling Systems (Next GEMS) (2021年～)

EUの研究・イノベーション枠組みであるHorizon2020（2014～2020年）下で採択された研究プロジェクト。水平解像度3 kmの高解像度の地球システムモデルを2つ開発することを目指す。また、細かい地形が大気に与える影響、海洋渦が海洋熱輸送に与える影響および氷床との相互作用、エアロゾル・雲相互作用等

の気候プロセスとして重要だが従来の気候モデルでは無視ないし経験的に表現していた事柄を明示的に表現できるようにすることを目指す。独マックスプランク研究所とECMWFの研究者が中心となり欧州の26の研究機関から研究者が参加しコンソーシアムを形成している。

- **Integrated Coastal Modeling (ICoM) (2020年～)**

沿岸海洋における物理・環境・人間システムを統合的に理解し予測するためのモデリングシステム構築を目指した米国の複数研究機関が参加する共同プロジェクト。米国エネルギー省が助成を行っている。

(5) 科学技術的課題

- **観測情報を活用したモデル評価手法の確立**

より高い信頼性と精度を全球気候モデルに基づく気候変化の将来予測に与えるには、モデルを構成している物理素過程の表現（パラメタリゼーション）を観測データに基づいて評価・拘束し、それを通じて現在のモデルに内在している誤差補償を軽減することが必要である。そのためには、地球観測衛星など拡充されつつある観測情報をより詳細に活用し、重要な物理素過程の情報を観測的に抽出し、それに基づいてモデルを評価・高度化する研究が必要になる。加えて従来行われてきた全球気候場の評価も含め、これらのモデル評価を自動的に行うツールを整備し、モデル性能を包括的に常時モニターしながら開発が進められる環境を作ることが望ましい方向性と認識されている。

- **低排出シナリオの検討と複合問題としての地球環境問題**

カーボンニュートラル実現へ向けて、CO₂の低排出シナリオの検討は今後さらに重要になっていくと考えられるが、そこではエアロゾルなどの短寿命気候強制因子（SLCFs）の寄与が大きくなっていくため、多様な気候強制因子による複合的な気候影響メカニズムの理解が求められる。さらに、SLCFsには気候影響だけでなく環境影響や健康影響ももたらすものがあるため、それらの排出削減シナリオを探索するにあたっては、これらの多面的な影響を同時に評価する必要がある。そのためには大気化学や生態系を組み込んだESMの一層の高度化が必要であり、またそれを統合評価モデルとも適切に組み合わせる排出量変化と多様な影響評価をEnd-to-Endに結びつける枠組みの開発が望まれている。

- **沿岸海洋予測におけるスケールギャップ**

沿岸海洋と外洋の間に存在する海底深度の急激な変化は大規模かつ定常的な流れによる両者の海水交換を著しく阻害する。そのため、外洋から沿岸海洋への影響においては水平数km以下や数時間以下といった時空間スケールで激しく変動する現象が本質的に重要となる。一方、陸水（その中に含まれる物質を含む）流出も沿岸海洋に大きく影響する要素である。洪水の頻度・強度増加など、気候変動の中でその様相が大きく変化しつつあるが、陸水の沿岸海洋中での輸送や拡散にはさらに小さな時空間スケールの現象が支配的な役割を果たす。気候変動の文脈で沿岸海洋予測を考えるにあたっては、大気の極端現象を考える場合以上に大きなスケールギャップが存在し、それを埋めるための科学的理解や技術開発が不可欠になる。

- **ビッグデータのハンドリング**

数値モデルの高解像度化やそれらを用いた実験の大アンサンブル化は今後も進むことが予想され、また衛星などの観測情報も拡充していることから、モデル・観測から得られるデータはともに増加の一途を辿ると考えられている。そのようなビッグデータの解析作業を効率化するために、遠隔アクセスによる解析作業を容易にするネットワーク環境の整備や、複数の研究機関に分散して置かれているデータをクラウド上で同時に解析することを可能にするシステムの構築の必要性が高まっている。

• プログラムコードの複雑化に伴う維持管理の難しさ、計算機の変化への対応

GCMやESMを構成する巨大なプログラムコードはモデルの発達に伴って複雑化し続けており、一人の研究者がその全体を詳細まで把握することは難しくなっている。この状況でモデルの全体性能にも注意を払いながら構成要素（素過程）の高度化を行っていくために、プログラムの階層構造を把握しやすくするツールの開発などモデル開発環境をさらに整備するとともに、モデル研究者間で役割を分担しながら全体システムをカバーできる体制を構築することが望まれている。

• モデル研究と観測研究の相互作用

観測データをモデルの評価・改良に活用していく研究やモデル予測に同化していく研究は引き続き重要だが、その方向とは逆の、高解像度化しつつあるモデルを用いて観測パラメータをシミュレートする「観測システム再現実験（OSSE）」を確立することも必要と考えられている。これによって観測とモデルが双方向に連携し、モデル高度化にとってどのような観測情報が必要かを能動的に探りながら最適な観測システムをデザインできるようになることが望まれている。

• オープンデータ化への対応

2016年頃から研究データのオープンデータ化に関する議論が盛んに行われている。Findable（見つけられる）、Accessible（アクセスできる）、Interoperable（相互運用できる）、Reusable（再利用できる）の頭文字を取ってFAIR原則という標語が用いられ、学術論文誌の投稿規定の中でも義務付けられることが多くなってきた。FAIR原則に従うためには、研究データにORCIDやDOIなどの永続的識別子を付与し、基準を満たした信頼性の高いリポジトリに保存する必要がある。また、できるだけオープンなライセンス（CC0、CC-BY 4.0など）が求められる場合もある。DOIを付与する資格を有する機関は世界に10機関あり、日本では国立国会図書館など4つの国内学術機関が共同運営するジャパンリンクセンター（JaLC）が唯一のDOIの登録機関である。海外では、簡単な手続きで迅速にDOI付与とリポジトリ提供を行うサービスが存在しており、日本の科学者が海外のリポジトリサービスを利用する例も出てきているが、国の知的財産の流出の観点から問題視する声も上がっている。

• モデルチューニング、機械学習との融合

全球気候モデルのパラメータ・チューニングは多大な労力と経験を要する職人的な技術だが、気候モデリングの作業効率を向上させるためにも、これを客観的に自動化して行えるようになることが望ましい。これに対してデータ同化によるパラメータ最適化と機械学習を組み合わせた技術の開発が近年提案され注目されている。

(6) その他の課題

• モデリング業界の人材不足、キャリアパス

モデル開発は気候変動予測技術の根幹をなす研究だが、多大な労力を要する一方で論文成果になりにくい側面もあることから、モデル開発者を志す若手研究者の育成は気候研究コミュニティ全体にとって大きな課題となっている。それと同時に、近年はモデル開発に加えてCMIPなどの国際モデル相互比較への参画とそのための実験データ提供もますます大きなタスクとなってモデル研究者たちにのしかかっている。これらの問題に対処するために、モデル開発や実験実施に関わる科学的部分と技術的部分を科学者と技術者とで分担できる仕組みを作るとともに、気候モデリングに関わる技術的業務を専門的に遂行できる人材を育成することが急務となっている。またこのためには、論文成果を求めない技術的業務でステップアップできるキャリアパスを用意することが必要と考えられている。

• 継続的な気候変動予測体制の確立

現在の気候変動予測の研究開発および実施は文部科学省による有期プロジェクトに依存しており、必ずしも安定的な体制とは言えない。気候変動予測の社会的重要性に鑑みて、気象庁のような現業機関と大学や国立研究所などの研究機関が適切に分担・連携しながら継続的に取り組む現業と研究の協働体制が重要と認識されている。これにより有能な人材の育成・集積も可能となると期待されている。

• 省庁間連携体制の構築・強化

気候変動予測研究は文部科学省、環境省、気象庁に跨る大きなトピックであり、それぞれの省庁の傘下に研究機関が存在している。研究機関の間では、統括する省庁に関係なく強固な協力体制が築かれているのに対し、研究成果の出口を考える際に省庁間の縦割りの構造が障壁になることもある。適応策、緩和策、防災など、気候変動予測に関わる行政機関どうしの連携体制の構築・強化が求められている。

(7) 国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------|---------|----|------|--|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ●東京大学、国立環境研究所、気象庁気象研究所、海洋研究開発機構などでGCMおよびESM開発が取り組まれている。全球雲解像モデルを世界に先駆けて開発した実績では世界をリードしている。いずれの機関でもオリジナルのモデルを開発しており、研究コミュニティの潜在能力は高い。継続的に気候変動予測研究が実施される中、文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」も開始し、社会への情報発信を念頭においた気候科学の基礎研究が着実に進められている。 ●極端気象現象の気候変動との関係性の解明（イベントアトリビューション）や北極域温暖化の中緯度域への影響などにおいて特筆すべき成果を挙げている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> ●防災など適応に関する諸科学分野の研究者や、社会経済分野で温暖化緩和シナリオの開発に取り組む研究者と、気候科学者との連携が盛んになってきており、ESMの成果を適応策・緩和策立案に活用する素地ができてきた。基礎研究と同様、文科省の先端プロや「富岳」成果創出加速プログラム、環境省「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」「短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に対応する緩和策推進のための研究」などで資金が拠出されている。 ●国立環境研究所を中心に適応策の立案・実施に向けた情報基盤（A-PLAT）構築や共同研究の模索などが進められている。 ●イベント・アトリビューションを水文学や疫学に応用する分野間連携の取り組みが活発化している。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> ●地球流体力学研究所（GFDL）、米大気研究センター（NCAR）、ローレンスリバモア国立研究所、エネルギー省（DOE）、NASAなど多数の研究機関がGCM・ESM開発に取り組んでおり、複数の機関で全球雲解像モデルの開発も進められている。予算的にも人的にも研究規模は日本よりもはるかに大きく、活発な活動を維持している。 ●NCARやGFDLでは、ESMや季節予測モデルを用いた大規模アンサンブルデータセットを作成する動きが活発であり、多くの成果を挙げている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> ●NCARに社会経済シナリオ開発部門が設置され、気候科学の成果を取り入れた温暖化抑制シナリオ開発に取り組むなど、ESMによる成果の政策立案への応用が進展している。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も活発。また、エネルギー問題に資する科学研究推進のためにエネルギー省が研究助成を行う気候モデル開発プロジェクトE3SMが進行するなど、システム開発の動きも活発である。2021年の政権交代を機にトレンドは回復傾向。 |

| | | | | |
|----|---------|---|---|--|
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | <p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● EU プロジェクト CRESCENDO には7つの ESM 開発チームが参加しており、また別の EU プロジェクト PREMAVERA では高解像度 GCM の開発に欧州諸国の研究機関が協力して取り組むなど、欧州全体での層は厚い。Copernicus Climate Change Service (C3S) では、気候科学に関わる多様なデータを収集・蓄積し、解析ツールも備えたデータサーバーを提供している。予算的にも人的にも研究規模は日本よりもはるかに大きく、活発な活動を維持している。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 気象局ハドレーセンターが早くから国内の GCM・ESM 開発を一本化して最高レベルのモデルを構築している。気象局と協力する形で国内トップ大学 (エクセター大学、レディング大学、イーストアングリア大学) などでもモデルを用いた研究が盛んである。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● マックスプランク研究所 (ハンブルグ) で早くから GCM・ESM の開発が行われてきたが、最近は全球雲解像モデルの開発にも力を入れており、その国際相互比較プロジェクト (DYAMOND) でも先導的役割を果たしている。またドイツ航空宇宙センターの研究者が CMIP6 仕様策定の中心となるなどこの分野での影響力は大きい。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ピエール・サイモン・ラプラス研究所 (IPSL) およびフランス気象局 (MeteoFrance) で GCM・ESM の開発が行われている。英国と異なり現業機関と大学研究機関それぞれでモデル開発している点は日本と似た状況にある。海洋モデル OPA が欧州全体の共通モデル NEMO として採用されるなど基礎的な開発能力や科学の水準は高い。 <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 英独仏以外ではノルウェーやスウェーデンなど北欧諸国やオランダの存在感が高い。ベルゲン大学、スウェーデン気象水文研究所 (SMHI)、オランダ王立気象研究所 (KNMI) などで GCM・ESM を用いた研究がおこなわれている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | <p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 上記 CRESCENDO や PREMAVERA では社会経済シナリオ開発や温暖化影響評価と ESM との連携も重要な課題となっている。IPCC 報告書サイクルで影響評価に関する部分を担う国際プロジェクト ISI-MIP においても、米国と並び欧州出身の研究者が多数主導的立場で活動している。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。 ● 上記 C3S は緩和策や適応策の政策決定に資するサービスも提供している。 ● World Weather Attribution は即時的イベント・アトリビューションに力を入れ、メディアへの働きかけがさらに活発になってきている。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ハドレーセンターが環境・食料・農村地域省 (Defra) およびビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) の支援を受けて「英国気候予測 2018」(UKCP2018) をまとめ、適応策立案に有用な情報の提供を図るなど予測データの応用が活発である。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ポツダム気候影響研究所 (PIK) を 1992 年に設立し影響評価研究を行うなど、予測データの応用に早くから取り組んでいる。ドイツ気候計算センター (DKRZ) を中心にデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 仏全国気候変動影響適応計画が 2011 年に策定され、それに基づいて仏国のモデルによる予測が影響把握に用いられるなど、予測データの応用が進んでいる。 <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● デンマークで「気候変動適応戦略」が、オランダで「気候変動に対する国家空間適応プログラム」が策定されるなど、適応策の法的後ろ盾の整備が進んでおり、予測データの活用が今後進むと見られている。 |

| | | | | |
|----|---------|---|---|---|
| 中国 | 基礎研究 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> ●現在、大気物理研究所、第一海洋研究所など中国内で少なくとも8つの研究グループがGCMあるいはESM開発に取り組み、CMIP6にも参画している。現状は主に海外から輸入したモデルを改良・調整して用いているが、潤沢な予算を背景に欧米から中国人科学者を呼び戻して基盤を作りつつあり、近い将来にはオリジナルモデルが増えてくる可能性もある。 ●IPCC WGIの共同議長を出すなど、国家的に気候科学分野のテコ入れを図っており、今後顕著な発展を見せると予想される。 |
| | 応用研究・開発 | △ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> ●ESMによる成果を活用して緩和策立案に資するという動きには乏しいが、上述の国家的支援の効果が予測データの応用面にも及んでくる可能性は高い。「国家適応気候変動戦略2035」も2021年に策定している。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> ●韓国気象庁(KMA)では、英国ハドレーセンターが開発した気候モデルをベースにGCM・ESM開発を進める方針になっている。自国でESM開発に取り組むには国内基盤を一層強化する必要があるが、基礎科学研究所(IBS)を2011年に創立し、2017年に気候物理センターを設置するなど力を入れている。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ●2015年に「第2次気候変動影響評価報告書」が公表され、様々な分野における影響や脆弱性が評価された。2020年までの適応マスタープランも策定されている。 |

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・気候変動観測（環境・エネ分野 2.7.1）
- ・水循環（水資源・水防災）（環境・エネ分野 2.7.3）
- ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測（環境・エネ分野 2.7.4）
- ・農林水産業における気候変動影響評価・適応（環境・エネ分野 2.8.2）
- ・都市環境サステナビリティ（環境・エネ分野 2.8.3）
- ・地球環境リモートセンシング（環境・エネ分野 2.10.1）

参考・引用文献

- 1) 気象庁「気候変動監視レポート2021」気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/>, (2022年12月29日アクセス) .
- 2) V. Masson-Delmotte, et al., eds., *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021).
- 3) 気象庁編『地球温暖化予測情報第9巻：IPCCのRCP8.5シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測』(東京：気象庁, 2017) .

- 4) Ryo Mizuta, et al., “Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models,” *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, no. 7 (2017) : 1383-1398., <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>.
- 5) 文部科学省地球環境情報統合プログラム (DIAS)「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (database for Policy Decision Making for Future Climate Change: d4PDF)」, <https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/>, (2022年12月29日アクセス) .
- 6) 環境省他「気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート2018～日本の気候変動とその影響～2018年2月」, <https://www.env.go.jp/content/900449808.pdf>, (2022年12月29日アクセス) .
- 7) Takuro Michibata, et al., “Prognostic Precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and Evaluation Against Satellite Observations,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11, no. 3 (2019) : 839-860., <https://doi.org/10.1029/2018MS001596>.
- 8) M. Satoh, et al., “Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations,” *Journal of Computational Physics* 227, no. 7 (2008) : 3486-3514., <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.02.006>.
- 9) Gerald A. Meehl, et al., “Decadal Climate Prediction: An Update from the Trenches,” *Bulletin of the American Meteorological Society* 95, no. 2 (2014) : 243-267., <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00241.1>.
- 10) George J. Boer, et al., “The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6,” *Geoscientific Model Development* 9, no. 10 (2016) : 3751-3777., <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3751-2016>.
- 11) Ben B. Booth, et al., “Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability,” *Nature* 484, no. 7393 (2012) : 228-232., <https://doi.org/10.1038/nature10946>.
- 12) Katinka Bellomo, et al., “Historical forcings as main drivers of the Atlantic multidecadal variability in the CESM large ensemble,” *Climate Dynamics* 50 (2018) : 3687-3698., <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3834-3>.
- 13) World Meteorological Organization (WMO), “WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No.16 : The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019,” WMO, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21795, (2022年12月29日アクセス) .
- 14) World Meteorological Organization (WMO), et al., “United In Science 2021: A multi-organization high-level compilation of the latest climate science information,” WMO, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21946, (2022年12月29日アクセス).
- 15) Chris D. Jones, et al., “The Climate Response to Emissions Reductions Due to COVID-19: Initial Results From CovidMIP,” *Geophysical Research Letters* 48, no. 8 (2021) : e2020GL091883., <https://doi.org/10.1029/2020GL091883>.
- 16) Theodore G. Shepherd, “A Common Framework for Approaches to Extreme Event Attribution,” *Current Climate Change Reports* 2 (2016) : 28-38., <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0033-y>.
- 17) Theodore G. Shepherd, et al., “Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of *climate change*,” *Climatic Change* 151 (2018) : 555-571., <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9>.
- 18) Y. Imada and H. Kawase, “Potential Seasonal Predictability of the Risk of Local Rainfall Extremes

Estimated Using High-Resolution Large Ensemble Simulations,” *Geophysical Research Letters* 48, no. 24 (2021) : e2021GL096236., <https://doi.org/10.1029/2021GL096236>.

- 19) Shunji Kotsuki, Yousuke Sato and Takemasa Miyoshi, “Data Assimilation for Climate Research: Model Parameter Estimation of Large-Scale Condensation Scheme,” *JGR Atmospheres* 125, no. 1 (2020) : e2019JD031304., <https://doi.org/10.1029/2019JD031304>.
- 20) Eric D. Maloney, et al., “Process-Oriented Evaluation of Climate and Weather Forecasting Models,” *Bulletin of the American Meteorological Society* 100, no. 9 (2019) : 1665-1686., <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0042.1>.
- 21) A. Gettelman, et al., “Machine Learning the Warm Rain Process,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 13, no. 2 (2021) : e2020MS002268., <https://doi.org/10.1029/2020MS002268>.
- 22) Tapio Schneider, et al., “Earth System Modeling 2.0: A Blueprint for Models That Learn From Observations and Targeted High-Resolution Simulations,” *Geophysical Research Letters* 44, no. 24 (2017) : 12396-12417., <https://doi.org/10.1002/2017GL076101>.
- 23) World Weather Attribution, “Reporting extreme weather and climate change: a guide for journalists,” <https://www.worldweatherattribution.org/reporting-extreme-weather-and-climate-change-a-guide-for-journalists/>, (2022年12月29日アクセス) .
- 24) Bjorn Stevens, et al., “DYAMOND: the DYNAMICS of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains,” *Progress in Earth and Planetary Science* 6 (2019) : 61., <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>.

※ 「(7) 国際比較」の表作成にあたっては以下の文献も参照した。

- 気候変動適応計画のあり方検討会「地球環境部会(第125回)資料 気候変動への適応のあり方について(報告)平成27年1月」環境省, <https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-125/mat02.pdf>, (2022年12月29日アクセス) .
- 環境省地球環境局「地球環境部会(第137回)資料 気候変動の影響への適応の最近の動向と今後の課題平成30年1月10日」環境省, <https://www.env.go.jp/press/y060-137/mat02.pdf>, (2022年12月29日アクセス) .
- 外務省国際協力局「総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(第39回会合)資料 気候変動に関する最近の動向 2021年3月」資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/039/039_006.pdf, (2022年12月29日アクセス) .