2.2.2 気候変動予測

(1) 研究開発領域の定義

本領域は気候変動予測に関する新しい研究アプローチや、新しい技術の導入等に係る動向を含む領域である。

ここでは、大気や海洋の物理法則から成る領域レベルや全球レベルの気候モデルのほか、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)等を対象とする。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も含む。また、国際的なモデル比較研究の進捗、データ配信やカプラ等の研究インフラ開発、現在のモデルの解像度や、領域を狭めて詳細な計算を行う力学的ダウンスケーリングの現状も含む。気候変動をめぐる国際動向を踏まえつつ、国内または国際的に共有されている目標値やシナリオについては本領域の現状を知る客観的な数値として記載する。

※気象と関連の深い各種影響予測(豪雨や台風、海洋、極地)は本領域で触れるが、水資源、生態系(農 林水産業含む)、健康・都市生活についての影響予測や緩和・適応については別領域で扱う。

(2) キーワード

地球温暖化、シミュレーション、気候モデル(GCM)、地球システムモデル(ESM)、領域モデル、スケール間相互作用、多圏相互作用、海洋酸性化、土地利用変化、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、地球インフォマティクス、新型コロナウイルス

(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が高まっている。こうした環境変化については、最近の20~30年で影響が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。二酸化炭素などの温室効果ガス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、全球気候モデル(Global Climate Model、GCM)と呼ばれる、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するプログラムが開発されてきた。また、自然の炭素循環や植生変化、海洋生態系までを取り込み、温室効果ガス排出に対する気候変化および温室効果ガス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)はGCMを包含する形で開発されている。これらGCMやESMの開発には膨大な人員と時間が必要で、これまで30年以上かけてモデルの改良・拡張が進められており、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。気候変動・変化の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京などの国内トップクラスの大型計算機が活用されている。またこれらのGCM・ESMおよびそれらのサブモデルに加えて、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)等もある。

地球表層・海洋・大気についての必要十分な観測(2.2.1節)を活用しつつ、本研究開発領域を維持強化

することにより、全球の温室効果ガス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、および温室効果気体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利用され、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、他の関連分野への波及効果も大きい。

地球温暖化およびそれに伴う極端気象現象の増加により、居住環境の悪化や災害リスクが増加し、大きな経済的損失が懸念されている。他方、地球温暖化には、北極海航路の利用や北極域開発など、正の経済的効果がもたらされ得るという一面も存在する。こうした正負いずれの観点からも、精確な気候変動予測に対するニーズは高い。地球温暖化は全地球規模の長期的変化である一方で、局所的かつ短期的な現象と密接につながっており、広い時空間スケールにわたる相互作用を伴う複雑系の問題である。さらには、人が居住する陸上地表付近だけではなく海洋(水圏)や雪氷圏あるいは生態系(生物圏)までに至る多圏が相互作用する複雑系の問題でもある。気候変動予測の難しさはまさにこれらの点にある。すなわち、予測の手段となる数値モデルにおいては、複雑系の個々の部分を精確に表現するばかりでなく、それらの多岐にわたる相互作用を適切に表現する必要もある。また、精確な気候変動予測を実現するためには、予測の初期値となる状態の正確な把握と記述、および数値モデルの検証という面から、新規的観測や継続的気候モニタリングの進展が並行する必要性が高い。

[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0.74℃温暖化している¹¹。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1.24℃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、と考える専門家が増えている。実際、2018年7月に発生した「平成30年7月豪雨」と、引き続いて日本を含む世界各所を襲った猛暑について、気象庁や世界気象機関は、背景となる要因の一つとして地球温暖化を挙げている^{2),3)}。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ている。

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「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の第4次報告書⁴⁾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はじめている。

こうした状況のもと、GCMを高解像度化し、今後避けられない温暖化に社会が適応するための政策(適応策)立案に資するよう、地域ごとに詳細な情報を発信する動きが盛んになってきている⁵⁾。この場合、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も格子間隔 20km 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。 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ゆく必要がある。

このように、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(他に、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)。実際、過去から将来の温暖化の影響評価のために、格子間隔60kmのGCMによるアンサンブル実験(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)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d4PDF $^{6),7)$ が作成されており、様々な分野での影響評価に役立っている $^{8)}$ 。

1990年以来5~7年毎に出版されるIPCC評価報告書においても、気候変動予測モデリングは着実に高解像度化を進めてきた。その結果、予測ターゲットに関しては、初期にはグローバルおよび長期(100年程度)の時空間スケールが中心であったが、近年はより限定的な地域という空間スケールや社会的な意思決定により強く影響を及ぼす中期的(10年程度)時間スケールへとシフトしている。また、領域ごとの詳細な情報提供は、日本だけでなく世界的にも大きな趨勢になっている。例えば、2021年の公表が予定されているIPCC第6次評価報告書(AR6)では、地域的な空間規模における温暖化予測について、全12章のうち3章が充てられ、全球規模変化との関連、台風・豪雨などの極端気象現象の変化、災害影響などについて評価がなされることになっている。気候の中長期的変化の結果として現れる極端気象現象の増加は、社会的な意思決定という意味においてその局所的短時間スケール現象への影響も重要視されてきており、その科学的根拠および予測手法の確立が強く求められている。

一方、2000年から2015年程度にかけて生じた地球温暖化の停滞(ハイエイタス)は、これまでの気候変動予測モデルのいずれもが全く予測できていなかった現象でもあり、温暖化懐疑論も含めて気候変動予測研究における一大問題であった。過去数年の研究によって、ハイエイタスは(人為的温室効果気体増加等と関係ない)内部的気候変動の一部として海洋の蓄熱が10年スケールで変化することが原因になっている明らかとなり、現状の数値気候モデルではそれを表現する海洋過程が不十分であることも明らかとなった。ハイエイタスは太平洋十年スケール振動(PDO)と呼ばれる内部的気候変動と関係することが指摘されているが、そもそもPDOを適切に再現できる気候モデルは現状では存在しない。それはひとえに、現状の気候予測モデルにおいて海洋過程の表現が不十分なためである。PDOやハイエイタスに直接的に影響を及ぼす海洋過程は中層(数100~1000 m深)の循環であると考えられ、その適切なモデル表現のためには現状の数値気候モデルが用いているよりも格段に高い解像度が要求されることが数値海洋モデリングから示されている。

また、将来予測だけでなく、現在発生している異常高温や集中豪雨に関し、地球温暖化がどの程度寄与しているかを評価する、「イベント・アトリビューション」と呼ばれる研究も盛んになってきている。例えば今田ら⁹⁾ は、2018年夏の日本の猛暑を対象にd4PDFのデータを詳細に解析し、20世紀の温暖化が進行していなければ、このときの異常高温はほぼ発生しなかったと推定している。大雨のイベント・アトリビューションは、現象がより局地的であるためにまだ途上であるが、川瀬ら¹⁰⁾ は同年の西日本豪雨に対する温暖化の寄与を、力学的ダウンスケーリングを用いて推定し、大規模な場の温暖化に伴う水蒸気の増加(1℃あたり約7%)に相当する降雨量が温暖化で説明されることを示している。国際的にも、アメリカ気象学会誌(BAMS)が毎年1回イベント・アトリビューションの特集を組むことにするなど、この種の研究の発展は著しい。極端気象現象発生に対する温暖化の寄与の評価は、適応策を立案するうえでも重要な情報となる。

極端気象現象に関しては、夏季における豪雨増加や台風強勢化といった気候変動からある意味自然に導出

される現象にとどまらず、冬季における寒波の増加という気候変動とは逆方向に思われる現象も現れている。 日本・北米・欧州で近年頻発する記録的寒波には、北極域が温暖化した結果として中緯度に出現する寒冷渦 が関与していることが指摘されている。この寒冷渦はまた、2018年台風12号のような迷走台風の原因になっ たことも指摘されている。さらには、北半球中緯度における冬季寒波の直後の夏には熱波が訪れやすいという 指摘もある。北極域・南極域は気候温暖化の影響が最も顕著に現れている領域であり、その影響が全地球規 模に及んでいることが指摘されており、そのメカニズム理解や予測手法確立が気候変動予測の中でも大きな テーマとなっている。

一方、適応策だけではなく、地球温暖化の進行そのものを止める緩和策(抑制策)の立案にも、気候モ デルによる予測は貢献している。こうした場合、二酸化炭素の「濃度」ではなく、人間活動による排出量を 直接入力データとして、ESMを用いて大気中二酸化炭素濃度を予測の対象とする。 ESMを用いた研究を通 した緩和策への貢献として代表的な成果の一つに、人間活動で排出されたCO₂の累積量と、その時点まで の昇温とのよい比例関係を示したことがあげられる110。このときの比例定数は「排出に対する過渡気候応答| (TCRE) と呼ばれる。国際交渉でしばしば言及される2℃目標や、2015年に締結されたパリ協定で強調さ れた1.5℃目標の達成のために、今後の排出量をどの程度にとどめておくべきか、その上限を定量化するのに 重要な量である。 TCRE等に基づいて評価された今後の二酸化炭素排出許容量はしばしばCarbon budgets (炭素予算) と表現される。

2013年公表のIPCC第5次評価報告書(AR5)の時点では、2°C目標達成のための炭素予算は産業革命 以前からの累積値で790-900GtCと見積もられている。現在までの炭素排出量が約 $550GtC^{12)}$ であること を考えると、残された炭素予算は240-450GtCと評価できる。これは現在の人為起源二酸化炭素排出量9.4 ±0.5 PgC/y¹³⁾ の20数年~50年ほどの量にあたる。1.5℃目標に対する炭素予算となると当然これより小 さくなり、現在の人為起源二酸化炭素排出量の10年分ほどにしかあたらないことなどを考慮すると、1.5℃ 目標の達成は事実上不可能と考えられてきた。しかし近年、ESMによる予測結果に基づき、1.5℃目標達成 のための炭素予算はもう少し多くて、現在の排出量20年分ほどにあたるのではないか、という研究結果が複 数発表されている¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。炭素予算の他に、ESMから社会的に有用な情報として提供できそうなものとしては、 様々な社会経済シナリオに付随する土地利用変化の気候影響評価、温室効果気体の年々変動の収支の精確な 把握などがあげられる。AR6に向けては、各国研究機関が最新のESMを用い、これらの課題に取り組むこと になろう。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 気候変動適応法をめぐる動向

地球温暖化対策は、温室効果気体の排出削減と吸収の対策を行う「緩和(抑制)」と、既に起こっている、 あるいは将来避けられない温暖化による影響への「適応」に分けられる。このうち、国内における適応策の 推進のため、2018年に「気候変動適応法」が可決された。同法成立以前に閣議決定され、今後法廷計画 への格上げと拡充が見込まれる「気候変動適応計画」においては、基盤的・国際的施策の一つとして、「モ デル技術やシミュレーション技術の高度化」が挙げられている。こうした背景のもと、温暖化影響評価のため、 農林水産業や防災に関する科学分野との連携を強め、シミュレーションモデルによる予測データの精緻化と 整備、提供する動きが促進されることが予想される。

• 地球温暖化に関する国際交渉における展開

国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)履行のため2016年から発効したパリ協定は、2021年から2030年までの地球温暖化対策の枠組みである。同協定では、2100年時点での温暖化を産業革命以前に比して2℃以内に抑え、さらに1.5℃以内に抑える努力も進めることが言明された 17)。同協定採択以前から国際交渉の場でしばしば言及された2℃目標と異なり、1.5℃目標については温暖化影響の評価に関する研究があまり行われてこなかった経緯から、近年では1.5℃と2℃の温暖化で影響がどのように異なるか、評価する研究が盛んになってきており 18)、2018年10月にはIPCCにより1.5℃目標に関する特別報告書(SR1.5)が公表された 19)。また、気候変動と人間の土地利用の関係についてまとめた「土地関係特別報告書 20 」(2019年8月)、海洋と雪氷圏の変化の実態・将来・適応に関する「海洋・雪氷圏特別報告書 21 」(2019年9月)の3編の特別報告書が出版された。いずれも、地球温暖化下におけるこれらに対する問題意識の高さを反映している。

また同協定では、「自国が決定する貢献」(NDCs)として参加各国が定めた目標に従って温室効果気体の排出削減を進めることとが定められており、さらに2023年を皮切りにして、「グローバル・ストックテイク」と呼ばれる、上記温暖化緩和目標へ向けての世界全体の進捗状況の確認作業が行われることになっている。グローバル・ストックテイクでは、実施時点での最新の科学的知見に照らして進捗状況が評価されることが謳われており、研究の現場でもこうした場への貢献を意識した課題に取り組む傾向が強まるであろう。

• 十年規模変動予測

上記のグローバル・ストックテイクにおいては、実施時期の直近数年間の気温や温室効果気体濃度の動態 把握、さらには直後数年にわたっての予測が求められることが予想される。このため、2100年前後の予測のみならず、現在から先の1年以上、最大10年程度の時間スケールを対象とした予測研究が盛んになってきている $^{22),\,23)}$ 。十年規模予測では、100年程度の時間スケールを対象とした予測と異なり、自然変動による揺らぎの位相を正確に取り込む必要があるため、データ同化と呼ばれる手法を用いて特定の時点に対応する観測データになるべく近い初期値を作成して予測を始めることになる。データ同化は従来、天気予報のような比較的時間スケールの短い予測のため発達してきた手法であるが、温暖化予測に対する要請の高度化に伴いより長い時間スケールや、生物・化学過程などへの応用が進みつつある。例えばフランスの研究チームは、「パーフェクトモデルアプローチ」(モデル結果を観測に見立てて行う予測可能性検証実験)に基づいた研究により、地球規模の炭素循環に最大6年間の予測可能性があることを示している 24 。国内では海洋研究開発機構と東京大学の研究チームが、データ同化により赤道太平洋域からの二酸化炭素フラックス変動を予測する研究などに取り組んでいる。

• 社会経済分野との連携とモデル結合

人間活動は、産業や森林伐採による温室効果気体の排出のみならず、耕作地の拡大などを通じ地表面の太陽光反射率(アルベド)を変えることによっても気候に影響を与えている。地球温暖化による農業生産性の変化が、人口を支えるため必要な耕作地拡大の推定量に影響を与え、それがさらにアルベドの変化を変化させ温暖化の度合いを変えるといった、地球温暖化と人間社会との相互作用の存在が指摘されている²⁵⁾。こうした相互作用は、特に地域スケールでの温暖化予測に有意な影響を与える可能性があり、社会経済分野と気候予測分野の間の連携課題として取り組む必要がある。相互作用の整合的・包括的推定には、社会経済分野で開発されている統合評価モデル(IAM)と、ESMとの結合モデルを開発することが望まれる。実際、そうしたモデルは米国等で開発され炭素税の課税手法の検討などに応用されている。例えば米国LBNLのJonesら

は、炭素税を森林伐採由来の炭素排出にも課した場合と、化石燃料と産業由来の排出のみに課した場合とでは、2100年時点での温暖化が後者において有意に抑制されることを示した $^{26)}$ 。また国内では、社会経済を結合したモデルではないものの、地球システムの不確実性が将来の温暖化対策費用の見積に大きな不確実性をもたらすことなどを指摘した研究 $^{27)}$ などがあり、今後社会経済モデルとの結合へと発展する可能性もある。ただし、関連するプロセスのモデル化には大きな誤差が含まれるため、モデルの適用限界などを十分検討したうえで進めるべきとの慎重論も唱えられている $^{28)}$ 。

• 地球環境予測を支える技術基盤

2021年公表予定のIPCC第6次評価報告書(AR6)へ向け、第6次結合モデル相互比較計画 $(CMIP6)^{291}$ と呼ばれる枠組みのもと各国研究機関が共通の実験デザインに基づいて行う温暖化予測のデータについては、世界中の関連分野の研究者らが自由に使えるようデータ配信システムの整備がなされる。このシステムの開発は、欧米の情報技術分野の専門家を中心として形成される「地球システムグリッド連盟」 (ESGF) によって主導され 301 、日本からは文部科学省「データ統合・解析システム(DIAS)」 311 の研究者らが関与している。またデータ配信システムのみならず、モデル仕様の説明やデータの内容などを示すメタデータの効率的な記述手法の統一規格「地球システムドキュメンテーション((ES-DOC)」 321 や、データサーバ上でのデータ解析を可能にすることで通信の負担を軽減するサーバーサイドコンピューティングの導入も進められている 331 。後者に関しては、各国のモデル間で異なる格子点の自動変換や、一部のデータを切り出すシステムなどが(ESGF)でも開発中である 341 。さらに、気象学、海洋学、生態学、水文学など個別の分野で開発される要素モデルを効率的に結合してモデル開発を促進するカプラ技術も盛んに開発されている(EF)のでは結合用ライブラリJ-Cupの開発が進んでおり、サブモデル間で異なるグリッドシステムやタイムステップの間で、保存則を満たしながらデータ交換を行うためのより一般的な手法などが開発を進める上での課題となっている(EF)0。こうした地球環境予測のための技術基盤開発は、「地球インフォマティクス」などとも呼ぶべき一大分野として興隆の兆しを見せている。

• 量子コンピュータの商用・実用化

2019年1月にIBMは初の商用の量子コンピュータを発表し、2019年10月にはGoogleが古典コンピュータの計算速度を超える初の量子コンピュータ計算の実現を発表した。 GCM・ESMに適した量子コンピュータの実現にはまだ時間を要すると思われるが、量子コンピュータの実用化自体が多くの人々の想定を超える速度で進展しており、本領域としても状況を注視し対応を検討する必要がある。

• データ活用社会創成プラットフォーム

Society5.0の実現に向けてデータ科学・データ活用を推進するための手段として、データ高度利活用環境の整備が開始された(国立情報学研究所・東京大学)。ビッグデータに基づく科学的成果の社会応用(実装)という側面を持つ本領域とはつながりが深いものであり、こうした動きと連携していく必要がある。

• 新型コロナウイルスのパンデミックに伴う温室効果ガス排出減

2019年12月に中華人民共和国武漢市で発生した新型コロナウイルス感染症(COVID-19)は、半年を 待たずに世界各地に感染が拡大し、2020年3月11日にはWHOがパンデミックを宣言した。各国で都市封 鎖などが続き、世界経済の停滞や人の移動の制限の結果、2020年初頭からの世界のCO₂排出量は減少した。 速報的な推定では、2020年5月までの CO_2 排出は、前年比で-17%となった³⁷⁾。ただし、大気中 CO_2 濃度(7月20日時点で414ppm)にはまだ反映されておらず、もしCOVID-19の感染が年内に収束すれば、今年の終わりごろには排出経路は元に戻ると予測される。同様の CO_2 排出量減少は、2009年のリーマンショック後にもみられたが、そのときも長期的な CO_2 排出増への影響は一時的であった。とはいえ、COVID-19に伴う排出減が短期的な気候に与える影響の評価は行われる必要があり、国際的に $GCM \cdot ESM$ を用いた相互比較実験プロジェクトが始まったところである。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

• 統合的気候モデル高度化研究プログラム

国内におけるGCM、ESMの開発および力学的ダウンスケーリングは、文部科学省によってが2017年度より2022年度まで「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(TOUGOU)において主に行われている³⁸⁾。予測モデルの開発、将来予測実施と国際プロジェクト(CMIP6)への結果提出、将来予測に係る各種データセットの整備提供に関する国内のフラッグシッププロジェクトである。 TOUGOUの成果物である気候予測データは、プログラム内の連携研究に用いられるほか、同省「気候変動適応技術社会実装プログラム」(SI-CAT)や、環境省による「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」(S-18)といった影響評価・適応研究課題においても活用され、気候変動適応法に基づく施策立案に役立てられる。またそれ以外にも、TOUGOUで作成された CMIP6 の温暖化予測データは、ESGF に参加する DIAS を通じて国内外に提供されている。

• 気候変動に関する懇談会(気象庁・文部科学省共催)

気候変動予測から適応までを一本化するための省庁連携も進んでいる。文部科学省と気象庁は合同で「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 39 」を2020年12月に公表し、今後の世界平均気温が 2° C上昇シナリオ及び 4° C上昇シナリオで推移した場合の将来予測を取りまとめた。また、環境省は「気候変動影響評価報告書 40 」を2020年12月に公表し、その後は5年ごとに評価を見直す計画としている。2022年にはそのための「気候予測データセット2022」とその解説書が作成され、利用者に提供されることになっている。

北極域研究加速プロジェクト(ArCS II)

北極域環境の変化とそれがもたらす社会影響に関して統合的に扱う、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である。実施期間は2020~2024年度の5年間である。

■国外

• 世界気候計画

地球環境研究に携わる世界の研究者が参加する「世界気候計画」(WCRP)は、IOC-UNESCOやICSU (国際科学会議、International Council for Science)、WMO(世界気象機関、World Meteorological Organization)などから資金を得て活動するプロジェクトであり、1980年に設立された。温暖化予測に関して、国際的に共通の実験仕様(CMIP6)を作成しているのも、WCRPの下部組織である「結合モデル作業部会」(WGCM)である。また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の活動の一部であり、世界をいくつかの区域に分け、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。WCRPは地球温暖化予測に関して国際的な研究コミュニティにおいて最も影響力の強いプロジェクトといってよい。加えて、一般社会における利害関係者も加えて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」においても、GCMやESMを活用した研究が展開されている。

また技術基盤に関しては、予測データの管理、配信システムを開発する ESGF や、メタデータの系統的な記述法を検討する ES-DOC などの国際プロジェクトがあり、上述の CMIP6 と密に連携を保ちながら活動している。

• EU Polar Cluster

Horizon 2020および Framework Programme 7による連携を図るための枠組みで、現在15の北極・南極研究プロジェクトで構成されている。

(5) 科学技術的課題

• 観測データの拡充とモデル評価手法の確立

ESMによるシミュレーションから出力される変数として、海陸の炭素貯留量やその収支などがあるが、こうした変数の全球的な分布に関しては観測データが乏しい場合が多く、観測データの拡充が強く望まれる。また生物化学過程を含まないGCMに関しても、観測の再現性に関する判断には任意性が残るうえに、地球温暖化予測に関しては現実の再現性評価だけにとどまらず、将来予測の精度まで見積もる必要がある。最近になって、現在気候の再現性と将来予測の精度を結び付けて評価するEmergent Constraintと呼ばれる手法を適用した研究が盛んになってきており、この傾向は今後も続くと思われる。

• 低排出シナリオの検討

従来、GCMやESMを用いた地球温暖化予測では、自然変動に対して地球温暖化のシグナルが大きくなることから、二酸化炭素などの温室効果ガスの排出が比較的大きい排出シナリオに対する予測結果を解析することが通例であった。しかし、IPCCがSR1.5の編纂を決定したことが一つの契機となり、低排出シナリオに関する予測結果解析や、それを応用した影響評価研究が盛んになってきている。この流れはSR1.5公表後も続くと思われる。低排出シナリオにおける解析では、自然起源と人為起源の変化の分離が困難になるため統計的な処理に工夫が必要となったり、短寿命気候汚染物質(SLCP)を含む二酸化炭素以外の気候影響要因の重要性が相対的に増したりなど、従来とは異なった問題にも注意を向ける必要があり、今後大きな課題となる可能性が高い。例えば、現在の多くのESMにおいては、メタンや亜酸化窒素の循環過程は大気化学モジュールの中で閉じているため、将来の生態系-エアロゾル/大気化学の相互作用変化を予測に反映することができない。 CO_2 を含む温室効果ガス、エアロゾル、生態系との相互作用過程をあらわに組み入れた地球システムモデルの開発により予測の高度化を図ることが必要であろう。また、低排出シナリオにおけるシグナルの優位性を高めるため、長期的な地球温暖化予測では従来それほど重視されてこなかったアンサンブル実験の重要性も高まる可能性があり、計算機能力の向上が望まれる。

• モデル精度向上に伴う計算量増大

力学的ダウンスケーリングに用いられる領域モデルでは、扱う空間領域は全球モデルに比べ当然小さいものの、より詳細な計算を行うために数kmといった高い解像度を持つことも多く、計算負荷は全球モデルより

重くなることもある。同じ計算資源であれば、解像度を高くするとアンサンブル実験の数を少なくせざるを得ないというトレードオフが常に存在するため、アンサンブル実験数を重視したd4PDF⁷⁾ では領域モデルの解像度は20kmと、比較的粗い。平成30年豪雨や令和2年豪雨のような大雨の再現と要因分析、将来予測を行うには、2km以上の空間解像度でアンサンブル実験数100以上のデータセットを揃えることが望ましいが、そのためには現在の1000倍以上の計算能力が必要とされる。

GCM・ESM開発の今後の大きな方向性としても、高解像度化、アンサンブル数増大、多くのプロセスを取り込む複雑化の3つが挙げられる。高解像度化は、細かな空間スケールでの大気の対流活動や地形の変化が重要な役割を果たす降雨過程などについて、モデルの再現性を向上させるために必須である。また、100年や1000年に一度と言った、非常にまれな集中豪雨、熱波、渇水の発生確率の変化を検出するためには、従来高々100程度が普通であったアンサンブル数を1桁は増やす必要がある。さらに前述のSLCPの取り扱いには大気中の化学反応などについて、これまでモデルに含まれていなかったプロセスも導入する必要がある。例えば、人為、自然両方のソースから排出されうる揮発性有機炭素(VOC)から、大気中の光酸化反応により二次有機エアロゾルが生成されるプロセスなどである。これらの方向性はいずれも計算負荷の増大を伴うことになるため、今後大型計算機の性能が順調に向上することがこの分野の発展にとって決定的に重要である。

• 計算機の発展とモデルの高度化に伴うプログラムコードの複雑化

これまでのところ、計算機の性能は「ムーアの法則」と呼ばれる経験則にしたがって向上してきた。性能向上のために、並列計算やグラフィックプロセシングユニット(GPU)など、時代に応じて新しい技術が導入されてきている。これらの技術を活用するためには、ESMのプログラムコードを書き換える必要がある。また上述の通りモデルの高度化のため多くのプロセスが加わる傾向にあり、これらが相まってプログラムコードが著しく複雑化してきている。バージョン管理ツールなどのソフトウェア導入で対応を図ってはいるが、コードに初めて触れる若手研究者などに対する障壁となる可能性がある。プログラム構造を容易に把握できるツールの開発など、モデル開発環境の一層の整備が望まれる。

• 複合問題としての地球環境問題

ESMでは、温室効果ガスの排出による気候変化のみならず、二酸化炭素の海洋吸収による海洋酸性化、 農作物やバイオ燃料栽培、あるいは都市化に伴う土地利用変化の環境影響など、様々な問題を包括的に取り 扱うことができる。一方で、こうした問題は伝統的な気候科学の範疇では取り扱えず、農学や社会経済など 多様な分野の研究者との協働が必要とされる。さらに、社会問題としての地球環境問題に対処するためには 一般社会における利害関係者の意見も聞きながら問題設定を行う必要があろう。こうしたアプローチは、専 門性を高め取り扱う問題を厳密に定義することで知見を集積し発展してきた従来型の科学のそれとは異なる。 多様な分野、セクターを巻き込んでコミュニケーションの場を設けることで、連携を深めていく必要がある。

• 観測研究との相互作用

GCM・ESMの対象には、その実態にいまだ不明な点が残るものを多く含んでいる。モデルを高度化して 予測を高精度化するためには、現象の観測的記述・理解が進展することが欠かせない。その際、モデル開発 側が積極的にモデル高度化に必要とされる観測を提示すること、そしてそれを実現するためのインセンティブ (資金的枠組み等)が用意されることが望まれる。

• 計算機の変化への対応

気候変動予測の高精度化はこれまで常に最新の大型計算機の発展とともにあったが、主流となる大型計算機のアーキテクチャは大きく変化してきた。20年前の大型計算機の主流はB/F値が大きいベクトル型であり、計算過程で多くのデータ転送を必要とする流体(大気・海洋)計算に向いており、計算機の理論最大性能の30%以上の効率で気候モデルを稼働させることも容易であった。しかしながら、10年程度前から大型計算機の主流はB/F値が小さいスカラー型に移行し、気候モデルでは計算機の理論最大性能の5%の効率を出すことも困難となった。近年機械学習等で重用される加速演算(GPGPU等)型計算機においては、計算機の理論最大性能の1%を出すことすら困難である。変化していく計算機アーキテクチャの中で気候モデルが計算機性能をよりよく引き出すようなプログラム開発を行うことも重要であるが、世の流れに任せるのではなく気候モデルに適したアーキテクチャの大型計算機を確保していくことも検討する必要がある。同時に、来るべき量子コンピュータにどのように対応するか、できるかを検討することも必要だろう。

(6) その他の課題

モデル開発者の評価・キャリアパス

GCM・ESMの開発には、気候における個々の要素や現象に関して高度な科学的知識が必要とされるばかりでなく、それを数値モデルとしてプログラムする技術、さらには複雑系の全体を俯瞰する能力が求められる。それらを併せ持つモデル開発者は希少な存在であるが、モデル開発自体は学術的な観点からは必ずしも論文成果を挙げやすいものではない、あるいは多大な労力が必要とされ、論文としての成果創出までに多くの時間を費やすことになる。加えて、出力データを管理、解析するためのサーバ管理といったメンテナンス業務に時間をとられるケースも多く、研究者らの間に、モデル開発に深く関わることを忌避する傾向が見受けられる。もしくは、開発者を踏み台にしてモデル利用者あるいはモデルプロダクトとしての予測結果データ利用者が論文成果を挙げていくという構図に陥ってしまう。そのような構図は開発者の意欲を削ぎ、開発者の育成にも大きな負の影響を及ぼす。

こうした状況の改善のため、研究者・モデル開発者の人事評価の際に開発面での貢献を重視したり、メンテナンス業務に専従する技術者を確保したりするといった対策をとっている機関もあるが、研究能力の指標として論文数が最重要視されるのは研究コミュニティ全体の傾向であり、機関単独での対処には限界がある。モデル開発者の成果を論文以外の形を含めて正当に評価し、それに見合う十分なキャリアパスを用意することが必要である。モデル開発者の減少に歯止めがかからなければ、地球環境問題に関する日本の国際的地位の低下と言った負の波及効果につながる可能性がある。

技術的には、多数の変数からなる膨大なモデル出力データを保管・配信し解析したり、多くのサブモデルを結合してGCM・ESMを開発する際の作業を支援したりするシステムが研究効率の向上のため必須であり、欧米ではプロジェクトベースで、情報技術者と気候学者との連携によりそうしたシステムの開発が進展している³²⁾。国内でも同様の取り組みが強く望まれる。

• 継続的な気候変動予測体制の確立

気候変動予測の研究開発および実施は、現状で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るならば、気象庁のような現業機関が 継続的に実施することが望まれる。また、そのような体制があってこそ、有能な人材の育成・集積が可能となる。

• 省庁間連携体制の構築

地球環境問題の解決のためには、モデルによる予測と産業への影響評価、適応策の立案、化石燃料使用 量削減など様々な過程が必要となり、それぞれの過程に従事する関係者の協力も当然求められる。これらの 過程に関しては、大型計算機を必要とする数値シミュレーションは文部科学省や気象庁、気候変動適応法に 基づく適応策立案は環境省、化石燃料使用を始めとするエネルギー問題は経済産業省といった所掌が確立 している。こうした役割分担は、作業を効率的に進める上で有効であるが、一方で、必要な連携を阻害する、 いわゆる縦割りの問題につながる可能性がある。役割分担のうえでは見かけ上の重複があっても、十分な説 明のもと必要な連携を進めていく柔軟な事業展開が望まれる。

(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	0	\rightarrow	 ●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。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。文部科学省「統合的気候モデル高度化プログラム」の実施により継続的に気候変動予測研究が実施され、CMIPおよびIPCCへの貢献を着実に進めている。 ●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	0	A	●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つつある。基礎研究と同様、TOUGOU、文科省「気候変動適応技術社会実装プログラム」(SI-CAT)や、環境省「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」などで資金が拠出されている。気候変動適応法の成立を受け、今後関連研究が盛んになることが予想される。
米国	基礎研究	0	\rightarrow	●地球流体力学研究所、米国大気研究センター(NCAR)、ローレンスリバモア国立研究所、NASAなど多数の研究機関がGCM・ESM開発に取り組んでいる。前政権による温暖化研究予算削減の圧力と、2019年末に宣言されたパリ協定からの離脱のため、下降的雰囲気があった。しかし、もともとの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。
	応用研究・開発	0	٧	●NCARには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盛んである。科学研究費削減の圧力がありトレンドとしては若干下降気味かもしれないが、早晩回復する可能性もある。
欧州	基礎研究	0	\rightarrow	【EU】 ●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。 【英国】 ●英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。

				【ドイツ】 ●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、最近ドイツ気象局とモデルの一部統合を行い、基盤を強化している。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、この分野への影響力は強い。 【フランス】 ●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。英国と違い、現業機関と大学研究機関でそれぞれモデル開発している点で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。 【その他】 ●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	0	7	【EU】 ●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。次期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。 【英国】 ●ハドレーセンターが環境・食料・農村地域省およびビジネス・エネルギー・産業戦略省の支援を受けて、「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。 【ドイツ】 ●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。 【フランス】 ●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。 【その他】 ●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、予測データの活用も進むと思われる。
中国	基礎研究	Δ	\rightarrow	●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。現状は海外で開発されたモデルを輸入して調整を行う程度であるが、海外から中国人科学者を呼び戻して基盤をつくりつつあり、数年後にはオリジナルモデルが増えてくるだろう。 ●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	Δ	7	●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。「国家気候変動適応全体戦略」「国家気候変動対応計画」をいずれも2012年に策定しており、後者では2020年までの行動計画が記載されている。

韓国	基礎研究	Δ	A	●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	0	\rightarrow	●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の範囲

応用研究・開発:技術開発 (プロトタイプの開発含む) の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎:特に顕著な活動・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

関連する他の研究開発領域

- ・気候変動観測(環境・エネ分野 2.2.1)
- ・水循環 (水資源・水防災)(環境・エネ分野 2.2.3)
- ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測(環境・エネ分野 2.2.8)
- ・都市環境サステナビリティ (気候変動適応、感染症、健康) (環境・エネ分野 2.2.11)
- ・農林水産業における気候変動適応 (環境・エネ分野 2.2.12)

参考・引用文献

報告書執筆全般、特に(7)国際比較の表作成については、以下の文献を参照した。

- ・環境省, 気候変動への適応のあり方について (報告), 気候変動適応計画のあり方検討会, 平成27年1月, https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-125/mat02.pdf (2020年12月29日アクセス)
- ・環境省地球環境局, 気候変動の影響への適応の最近の動向と今後の課題, 中央環境審議会地球環境部会 (第137回)資料, https://www.env.go.jp/press/y060-137/mat02.pdf(2020年12月29日アクセス)
- 1) 気象庁地球環境・海洋部地球環境業務課,「気候変動監視レポート2019」, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html (2020年12月29日アクセス)
- 2) 細川倫太郎,「世界の異常気象「地球温暖化と関係」国際機関」『日本経済新聞』2018年7月25日, https://www.nikkei.com/article/DGXMZO33372420V20C18A7MM0000/(2020年12月29日アクセス)
- 3) 桑原紀彦、「昨夏の猛暑、温暖化なければ発生せず?気象庁など分析」『朝日新聞』2019年5月22日、https://www.asahi.com/articles/ASM5P65XRM5PULBJ00V.html (2020年12月29日アクセス).
- 4) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

- Intergov-ernmental Panel on Climate Change, S. Solomon et al. eds. (Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007)
- 5) 気象庁, 『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』長谷川直之編, 地球温暖化予測情報第9巻(東京: 気象庁, 2017)
- 6) R. Mizuta et al., "Over 5,000 years of ensemble future climate simula-tions by 60-km global and 20-km regional atmospheric models", *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98 no. 7 (2017): 1383–1398, doi: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1
- 7) 気象庁気象研究所他,「将来の気候変化に関する政策決定に資するデータベース (Database for Policy Decision Making for Future Climate Change, d4PDF)」『海洋開発研究機構』, http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/(2020年12月29日アクセス)
- 8) 肱岡靖明他, 「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~」 『環境省』, https://www.env.go.jp/press/105129.html (2020年12月29日アクセス)
- 9) Y. Imada et al., "The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming", *SOLA* 15A (2019): 8-12, doi: 10.2151/sola.15A-002
- 10) H. Kawase et al., "The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 101, no. 1 (2019): \$109-\$114, doi: 10.1175/BAMS-D-19-0173.1
- 11) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T. F. Stocker et al. eds. (Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013)
- 12) R. J. Millar et al., "Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5°C", *Nature Geoscience* 10, no. 10 (2017): 741-748, doi: 10.1038/ngeo3031
- 13) C. Le Quéré et al., "Global carbon budget 2017", *Earth System Science Data* 10, no. 1 (2018): 405-448, doi: 10.5194/essd-10-405-2018
- 14) O. Goodwin et al., "Pathways to 1.5°C and 2°C warming based on observational and geological constrains", *Nature Geoscience* 11 (2018): 102-107, doi: 10.1038/s41561-017-0054-8
- 15) K. B. Tokarska and N. P. Gillett, "Cumulative carbon emissions budgets consistent with 1.5 °C global warming", *Nature Climate Change* 8 (2018): 296-299, doi: 10.1038/s41558-018-0118-9
- 16) P. B. Holden et al., "Climate-carbon cycle uncertainties and the Paris Agreement", *Nature Climate Change* 8 (2018): 609–613, doi: 10.1038/s41558-018-0197-7
- 17) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) secretariat, "Paris Agreement/CP/2015/L.9/Rev.1", UNFCCC,http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf(2020年12月29日アクセス)
- 18) C. -F. Schleussneret al., "Differential climate impacts for poli-cy-relevant limits to global warming: The case of 1.5° C and 2° C", *Earth System Dynamics* 7, no. 2 (2916): 327-351,

- doi: 10.5194/esd-7-327-2016
- 19) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Special Report on Global Warming of 1.5°C", IPCC, https://www.ipcc.ch/sr15/ (2020年12月29日アクセス)
- 20) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Special Report on Climate Change and Land", IPCC, https://www.ipcc.ch/srccl/ (2020年12月29日アクセス)
- 21) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate", IPCC, https://www.ipcc.ch/srocc/(2020年12月29日アクセス)
- 22) G. A. Meehl et al., "Decadal climate prediction: An update from the trenches", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 95, no. 2 (2014): 243-267, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00241.1
- 23) G. J. Boer et al., "The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6", Geosci. Model Dev. 9, no. 10 (2016): 3751-3777, doi: 10.5194/gmd-9-3751-2016
- 24) R. Séférian, S. Berthet and M. Chevallier, "Assessing the decadal predictability of land and ocean carbon uptake", *Geophys. Res. Lett.* 45, no. 5 (2018): 2455–2466, doi: 10.1002/2017GL076092
- 25) W. D. Collins et al., "The integrated Earth system model version 1: formulation and functionality", *Geosci. Model Dev.* 8, no. 7 (2015): 2203–2219, doi: 10.5194/gmd-8-2203-2015
- 26) A. D. Jones et al., "Greenhouse gas policy influences climate via di-rect effects of land-use change", *J. Climate* 26, no. 11 (2013): 3657-3670, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00377.1
- 27) K. Matsumoto, K. Tachiiri and M. Kawamiya, "Impact of climate model uncertainties on socioeconomics: a case study with a medium mitigation scenario", *Computers & Operations Research* 66 (2016): 374-383, doi: 10.1016/j.cor.2015.01.011
- 28) D. P. van Vuuren et al., "A comprehensive view on climate change: coupling of earth system and integrated assessment models", *Environ. Res. Lett.* 7, no. 2 (2012): 024012, doi: 10.1088/1748-9326/7/2/024012
- 29) V. Eyring et al., "Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization", *Geosci. Model Dev.* 9, no. 5 (2016): 1937–1958, https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016
- 30) D. N. Williams et al., "A global repository for planet-sized experiments and observations", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 97, no. 5 (2016): 803-816, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00132.1
- 31) データ統合・解析システム(DIAS),「DIASデータセット検索」, http://www.diasjp.net/(2020年 12月29日アクセス)
- 32) S. Murphy et al., "The Earth System Documentation (ES-DOC) project", Astrophysics Data System, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFMIN21D..07M/abstract(2020年12月29日アクセス)
- 33) V. Eyring et al., "Towards improved and more routine Earth system model evaluation in CMIP", *Earth Syst. Dynam.* 7, no. 4 (2016): 813–830. doi: 10.5194/esd-7-813-2016
- 34) Earth System Modeling Framework (ESMF), "Community Infrastructure for Building and

- Coupling Models", ESMF, https://earthsystemmodeling.org/(2020年12月29日アクセス)
- 35) S. Valcke et al., "Coupling technologies for Earth System Modelling", *Geosci. Model Dev.* 5, no. 6 (2012): 1589-1596, doi: 10.5194/gmd-5-1589-2012
- 36) T. Arakawa et al., "Coupling Library Jcup3: Its philosophy and application", *Prog. Earth Planet Sci.* 7, no. 6 (2020), doi: 10.1186/s40645-019-0320-z
- 37) C. Le Quéré et al., "Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement", *Nature Climate Change* 10 (2020): 647-653, doi: 10.1038/s41558-020-0797-x
- 38) 住明正他,「統合的気候モデル高度化研究プログラム」『文部科学省』, http://www.jamstec.go.jp/tougou/index.html (2020年12月29日アクセス)
- 39) 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-」, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html (2020 年 12 月 4 日アクセス)
- 40) 環境省地球環境局総務課気候変動適応室、「気候変動影響評価報告書:総説 2020 年 12 月」、 https://www.env.go.jp/press/files/jp/115261.pdf (2020 年 12 月 29 日アクセス)