

3. 俯瞰区分と研究開発領域

3.1 気候変動区分

気候変動区分では、下記の2つの研究開発領域を設定した。なお、緩和策についてはエネルギー分野で取り扱う研究開発領域が該当すること、また、森林や農地土壌の温室効果ガス（GHG）吸収や農地土壌によるGHG排出抑制は、気候変動区分の「気候変動影響予測・評価」、および、循環型社会区分の「農林水産業の環境研究」で取り扱うことから、研究開発領域として設定していない。適応策については、気候変動影響予測・評価に基づいて行われるため「気候変動影響予測・評価」の一部として扱う。

3.1.1 気候変動予測

3.1.2 気候変動影響予測・評価

区分の概要を以下にまとめる。

気候変動予測について、観測では、衛星による観測性能が温室効果ガス全体の把握から二酸化炭素のみを精密に観測するまでに進んできた。陸域の炭素循環を解析するため、二酸化炭素等のフラックス観測を行うタワーが世界各地に建設され、データの共有が始まっている。温室効果ガス観測衛星では、GOSAT（日本、2009年）、OCO-2（米国、2014年）、TanSat（中国、2016年）、今後は、GOSAT-2（日本、2017年）、MicroCarb（フランス、2020年）の打ち上げが予定されている。日本はGOSATを持ち基礎研究で世界の中心にいる。米国は雲・エアロゾルの三次元情報が得られるレーザレーダ（LIDAR）を用いた大規模な基礎研究を行い、衛星開発で培った技術を地上展開する企業が現れてきている。欧州は、EUが推進するCopernicus計画で衛星データの実利用を推進する応用研究が急速に進む。地球システムモデル（ESM：Earth System Model）では、米国は航空宇宙局（NASA）や大気研究センター（NCAR）など多数の研究機関が基礎・応用研究に取り組み世界をリードしている。欧州は7つのESM開発チームがEUのプロジェクトCRESCENDOに参加し、基礎・応用研究ともに強い。日本はオリジナルのモデル開発を行い研究コミュニティの能力は高い。

気候変動影響予測・評価について、水循環では、米国は衛星情報を利用した全球スケールのデータ構築などで圧倒的な力を持ち基礎研究が強い。欧州は全球水文モデル開発で多数の有力なモデルを開発し世界をリードしている。自然災害では、米国は、米国版のIPCC報告書とも呼べるNational Climate Assessmentを出版しており基礎研究として高い水準を保っている。応用研究は各州の基金で進められている。欧州はEUのHorizon2020などの大型プログラムによりEU全体でのモデル開発が進み、基礎・応用研究ともに強い。自然生態系では、米国は、NEONやLTERなど、温暖化と生態系の応答を長期的にモニタリングするプログラムがあり財政基盤が確立している。データベースやモデリングでも世界をリードし基礎研究が強い。欧州は研究の歴史が長く、EUのLIFE気候行動プログラムの実施などで基礎・応用研究で世界をリードする。農林水産業では、日本では米や果樹などの多くの品目、米国では主要作物（トウモロコシ、大豆、コムギ）について、定量的な影響評価が行われ、基礎研究が進展している。欧州では緩和・適応技術が進む。健康・都市生活では、米国がこ

れまで考慮できなかった森林火災の影響定量化手法などの開発を進めるなど基礎研究が強い。欧州は、新たな統計モデルの開発で世界をリードし、基礎・応用研究ともに強い。日本は、基礎研究で熱関連死亡の全球定量化、ダウンスケーリング、シナリオ開発を進め、応用研究では全球気候モデル、都市への精緻化、新たな健康影響予測（例えば河川洪水）などを進め、欧米と肩を並べる。極地では、米国は、公開性の高い気象数値モデル（WRF：Weather Research & Forecasting Model）の国際共同開発・利用を推進し、基礎研究が強い。欧州は、北極で EU プロジェクトによる研究遂行・ネットワーク化を高めており、同プロジェクトでは、経済影響、経済の指導を含む活動も行い、基礎・応用研究ともに強い。日本は、多年の研究の蓄積があり、北・南極に対し、氷床コア解析と合わせた気候モデル研究も国際的評価が高く、AUV（Autonomous Underwater Vehicle、無人水中探査）の活用等新しい技術を検討するなど基礎・応用研究ともに強い。

3.1.1 気候変動予測

（1）研究開発領域の簡潔な説明

気候変動予測とは、今後、大気中の温室効果ガスや微粒子（エアロゾル）の濃度などがどのように変化するか仮説を立て、コンピュータを用いて気候モデルにより計算し、気候変動を予測することである。気候モデルは、基本的には物理法則によって構築され、観測データを用いて検証される。

ここでは、大気中の温室効果ガスや気候変動に関わる物質の観測データを得るための各種プラットフォーム（地上、船舶、航空機など）での実測技術、衛星による温室効果ガス観測技術やその他のグローバルなリモートセンシング技術、および、大気や海洋の物理だけではなく、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：Earth System Model）を対象とする。また、ESMの構成要素としてエアロゾルの観測やモデルも取り上げる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[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、地球規模の中長期的な状態を精度良く予測する必要性が高まっている。そして、将来の地球環境変化を考えると、気候変動に関わるものが大きく、ここ数十年から100年以内にはグローバルな影響が顕著になると見込まれ、予測技術の高精度化が強く期待される。

気候モデルを用いた気候変動予測は、予測作業そのものおよび予測結果の評価・検証の両面において様々な観測データを必要とする。時空間的に均一かつ高品質な観測データは、より高精度なモデル計算の初期または境界条件等に必須である。また、予測結果の妥当性を裏付ける観測データの存在は、予測結果に基づく各種対策のコスト分担の社会的議論の前提ともなる。中でも衛星観測は全球規模で時空間的に均一／高密度なデータの取得を行える唯一の観測方法であるため、極めて重要である。

海陸の炭素循環や、大気微量組成間の化学反応など、生物、化学的過程を含んだ気候モデルが多数開発されてきており、それらの総称が地球システムモデル（ESM）である。地球温暖化がもたらす環境変化の包括的な予測を行う際、炭素循環と気候変化の相互作用など、従来の気候モデルには含まれていない過程を考慮することが要請される。

実効性のある気候変動政策を推進するためには、政策立案のための現状把握、および対策の効果の検証が不可欠である。さらに、気象災害低減の観点から、温室効果ガスや粒子状物質（エアロゾル粒子）による気候変動および炭素循環を短期・中期・長期的に高精度で予測するための技術の確立が求められている。

[動向（歴史）]

■ 観測

世界初の人工衛星は1957年に旧ソ連が打ち上げたスプートニク1号であるが、その後間

もなく人工衛星の地球観測への利用が始まっている。世界初の気象衛星である米国 TIROS-1 (極軌道衛星)は1960年に打ち上げられた。また、米国の静止気象衛星シリーズである GOES の1号機は1975年に、日本の静止気象衛星シリーズであるひまわりの1号機は1977年に打ち上げられている。

気象衛星による観測データは、当初は雲の分布の把握等に用いられていたが、やがて熱赤外域のカメラによる海面温度/雲頂温度の観測が行われるようになった。さらに赤外域の高波長分解能分光計/サウンダにより、気温等の鉛直分布の観測も行われるようになった。現在では世界気象機関 (WMO) を中心に各国の気象衛星のデータ共有/観測の継続性/校正検証といった面での関係が測られている (1972年設置の CGMS (Coordination Group for Meteorological Satellites) 等)。

災害予測等にも関係する降雨観測については、日米の共同ミッションである熱帯降雨観測衛星 (TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission、運用: 1997~2015年) によって先駆的な衛星観測が行われた。その後、全球降水観測計画 (GPM: Global Precipitation Measurement、日本が開発した GPM コア衛星は2014年に打ち上げ済み) が国際共同事業として実施されている。また、米国の GPS 衛星等からの電波の到達時間が大気中の水蒸気等によって変わることを利用して全球の水蒸気量分布を求めることも行われ、すでに気象庁による天気予報でも利用されている。

1988年の気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) の設置以降注目を集め続けている地球温暖化については、その要因となる温室効果ガスの濃度およびその時空間分布の把握が強く求められているが、十分な精度の観測を衛星より行うことは技術的に困難であり、全球に100~200カ所程度ある地上局による観測に強く依存していた。主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンについて対流圏下部まで感度をもつ観測を行った世界初の衛星は、日本の環境省・宇宙航空研究開発機構・国立環境研究所の共同ミッションである温室効果ガス観測技術衛星 (いぶき、GOSAT: Greenhouse Gases Observing Satellite、2009年打ち上げ) である。その後、2014年には二酸化炭素のみを観測する衛星 OCO-2 (Orbital Carbon Observatory 2) を米国が打ち上げ、2016年末には中国が TanSat を打ち上げた。2017年度には日本が GOSAT-2 を、2020年にはフランスが MicroCarb を打ち上げる予定である。

気象観測については世界気象機関 (WMO) や各国の気象機関による観測が定常的に行われている。特に大気観測については世界気象機関 (WMO) の GAW (Global Atmosphere Watch) において、温室効果ガスについては気象庁の WDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases) にて取りまとめられている。

大気中温室効果ガス濃度を大きく左右する陸域の炭素循環については、二酸化炭素等のフラックス観測を行うタワーが世界各地に建設され、そのデータについては各種地域ネットワーク (AsiaFlux 等) や全球ネットワーク (FLUXNET) での共有が始まっている。

温室効果ガスとともに大気の放射強制力を大きく左右するエアロゾルについては、米国航空宇宙局 (NASA) 主導の AERONET や日本が推進している SKYNET (千葉大学)、AD-NET (国立環境研究所) 等の地上観測ネットワークが活動している。

■ 地球システムモデル (ESM)

地球表層環境をシステムとして見る考え方の提唱者としては、1970年代に地球環境の維持

に生物圏が能動的役割を果たすとするガイア仮説を発表し論争を起こしたジェームズ・ラブロック（英）とリン・マーギュリス（米）などをあげることができる。これらの業績を礎としながら、地球システム科学という術語を明示的に用い、その今日的な意味の輪郭を初めて明確にしたのは、1988年に米国宇宙航空局（NASA）諮問会議から提出された報告書¹⁾であろう。この報告書では地球システム科学の目標を「地球システムの構成要素および要素間の相互作用がどのように発展してきたか、どのように機能しているか、またあらゆる時間スケールについて将来どのように発展していくか、を記述して、地球システム全体についての科学的理解を得ること」と規定し、目標達成のための道具立てとして、全球規模観測や、観測データおよび研究成果を効率的に配布するための情報ネットワーク、モデリングの重要性を指摘している。

近年になってESMが盛んに開発されるようになったきっかけは、炭素循環フィードバックによる温暖化の加速の可能性が示されたことであろう²⁾。多くのESMが炭素循環フィードバックは正の符号をもつ（すなわち温暖化の加速）を示しているが、最近では陸域植生の活動が窒素量により制限されることを考慮すると、この符号が負にもなりうることが分かってきた³⁾。現在、多くの研究機関がESMへの窒素循環過程導入に取り組んでいる。

2021年の発行が想定されているIPCC第6次評価報告書（AR6）へ向け、地球温暖化予測に関する最新の知見を得るうえで重要な役割を果たす第6次結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6：Coupled Model Intercomparison Project Phase 6）の実験仕様においても、ESMの使用が必須となる実験が設定されており⁴⁾、CMIP6参加機関の多くからESMを用いた実験結果が提出される見込みである。ESMを用いた実験では、森林伐採などの土地利用変化が地球環境に与える影響の評価も可能となる設定になっており⁵⁾、温室効果ガスの放出に限らず人間活動の影響を総合的に解析できるようになってきている。このことは、従来の大気海洋結合大循環モデル（AOGCM：Atmosphere-Ocean General Circulation Model）と大きく異なる点といえよう。

粒子状物質（エアロゾル粒子）は、大気汚染物質であるという認識が一般的である。第二次世界大戦直後から、ロンドン・スモッグやヨーロッパでの越境汚染など、先進国での大気汚染は健康被害や環境被害などをもたらす社会問題となった。日本においても、高度経済成長期に大規模な工業地域や都市部で大気汚染は深刻であり、四大公害病の一つである四日市ぜんそくは、二酸化硫黄や、それが酸化して生成される主要エアロゾルの一つである硫酸塩エアロゾルが引き起こす疾患であった。

エアロゾルが引き起こす気候変動については、研究者の間では昔から認識されていた。エアロゾルによって地上に届く太陽光が減衰することを最初に示唆した人物は、ベンジャミン・フランクリンであると言われている⁶⁾。フランクリンは、1783～1784年の厳冬の理由として、エアロゾルの効果を想定した。また、1980年代には、核兵器の使用による爆発や火災に伴ってエアロゾルが大量発生することにより、「核の冬（Nuclear winter）」と呼ばれる寒冷化が起これと考えられた。

エアロゾルの気候変動を定量的に評価するためには、まず大気中のエアロゾルの地球規模での分布を把握する必要がある。エアロゾルは発生源付近に偏在している傾向があり、かつ、発生源自体が時空間変動する場合もあるため、地上での限られた地点での観測だけでは、地球規模での把握は困難であった。1990年代に入り、人工衛星に搭載されている受動型センサ

で得られたデータを解析することにより、連続的な時空間分布の把握が可能となった。同じく 1990 年代には、組成ごとのエアロゾルの発生・輸送・沈着過程を地球規模で計算する数値モデルの開発が進められた⁷⁾⁹⁾。これら数値モデルは、エアロゾルの全球分布の把握には大きく貢献したものの、実際の大気中には様々な組成のエアロゾルが混在しているため、人工衛星のデータと直接比較したり、エアロゾルによる気候変動を定量的に評価したりする用途には利用できなかった。

その欠点を克服する形で、2000 年代になり、大気中の主要エアロゾルを同時に取り扱う数値モデルが開発された。その中でも、東京大学気候システム研究センター（CCSR、現在：東京大学大気海洋研究所）の研究グループが開発した数値モデル SPRINTARS は、世界に先駆けて開発された¹⁰⁾。こうした数値モデルが気候モデルの大気放射（エネルギー収支）過程や雲・降水過程と相互作用することにより、エアロゾルによる気候変動の定量的評価が可能となった。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

■ 観測

● 温室効果ガス観測

地球温暖化の主要原因物質である温室効果ガスについては、その濃度およびその時空間分布の把握が強く求められているが、十分な精度の観測を衛星より行うことは技術的に困難であった。しかし 2009 年打ち上げの GOSAT、2014 年打ち上げの OCO-2 により、二酸化炭素およびメタンのカラム平均濃度について衛星観測の有用性が初めて実証され、日米以外でも温室効果ガス観測衛星が提案されるようになった。

衛星からの温室効果ガスのカラム平均濃度観測手法は、地表面で反射された太陽光を観測する分光計測、または、対象ガスの吸収線近傍の波長のレーザを使う能動型計測に大別される。GOSAT、OCO-2 とともに前者に分類されるが、GOSAT はフーリエ変換分光計とポインティングミラーの組み合わせ、OCO-2 は回折格子を用いた画像分光計と衛星本体のポインティングの組み合わせとなっている。これに対し欧州のグループは回折格子を用いながら観測幅を広げた方式を提案している。後者については日米欧で活発に研究または航空機を用いた実証実験が進められているが、衛生計画として承認／予算措置されたものはない。

● 雲・エアロゾル観測

温室効果ガスとともに大気の放射強制力を大きく左右する雲やエアロゾルの衛星観測については、広刈り幅光学イメージャが長く用いられてきたが、雲・エアロゾルの三次元情報や粒径情報をより直接的に得られるレーザレーダ（LIDAR）の利用の検討が進められてきた。2015 年には米国航空宇宙局（NASA）が開発した CATS（Cloud-Aerosol Transport System）が国際宇宙ステーション（ISS）に取付けられた。同機器は 3 波長（355 nm、532 nm、1064 nm）のライダを搭載している。さらに現在日本と欧州宇宙機関（ESA）で EarthCARE 衛星を、2018 年の打ち上げを目指して共同開発中である。同衛星には大気ライダ（ATLID：Atmospheric Lidar、レーザの波長は 355 nm）が搭載される。

- センサネットワーク

センサネットワークは、基本的に安価・小型・軽量の in-situ 型の各種環境／気象センサと無線通信機能から構成される。AMeDAS 等のすでに実用化されている類似のシステムもあるが、最近では民間を含めて多数の事例がある^{11)・14)}。

- ドローン

ドローン（UAV：Unmanned aerial vehicle）は無人で飛行する機械の総称であるが、昨今のモータ等の部品技術、安定した飛行を行うための制御技術、位置と姿勢を把握する測位技術（衛星測位（GNSS：Global Navigation Satellite System）を含む）等の長足の進歩により、その利用範囲が急速に広がっている。特に気象・気候分野ではドローンを用いた高層・低層気象観測実験や気象観測に活用されている^{15)・18)}。

■ ESM

従来別々の分野で開発されてきた陸域生態系モデル、大気化学モデルをサブモデルとして ESM で統合し、両サブモデル間での物質のやり取りを扱う必要がある。こうした多数のサブモデルの結合を促進するため、カプラーと呼ばれるソフトウェアの開発も盛んになってきている^{19)・21)}。

エアロゾルに関連して、研究ツールとして最近実用的となってきたのが、地球規模の雲解像モデルである。これは、1つ1つの雲を陽に表現できる細かい時空間分解能によりシミュレートする数値モデルであり、その代表例として、国際的に評価されている日本のモデル NICAM（Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model）がある。NICAM には、前述のエアロゾルモデル SPRINTARS が組み込まれており、スーパーコンピュータ「京」を用いて、すでに地球全体を 3.5km 格子にしたエアロゾル分布のシミュレーションには成功している²²⁾。

また、より日常生活に貢献可能な技術開発として、エアロゾルの濃度分布シミュレーションに適用するデータ同化システムの開発があげられる。データ同化とは、数値モデルによるシミュレーションにおいて観測データを直接利用することであり、気象庁において、日々の天気予報には以前から導入されている。その中で、2015年に運用を開始した気象衛星ひまわり 8号により、10分間隔でのエアロゾル分布の把握が可能となった。このことは、例えば、PM2.5 や黄砂の越境飛来の様子を詳細に把握できるようになったことを意味している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■ 観測

- 宇宙基本計画に関する国内関係者の活動

今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合リモートセンシング分科会（23学会参加）の地球科学研究高度化ワーキンググループが 2016 年に取りまとめた報告書「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」²³⁾は、地球科学に関する分野ごとに今後必要となる衛星観測についてまとめた包括的な報告書であり、今後の日本の地球観測衛星の長期計画を考える上で一つのベースラインとなる文書である。

- 欧州の Copernicus 計画（旧 GMES 計画）

欧州委員会が進捗している地球観測計画である Copernicus 計画は、衛星・航空機・船舶・地上局等の様々なソースからの地球観測データを収集し、環境および安全保障に関する各

種サービスを通してユーザに信頼出来る最新の情報を提供することを目的とする。特にその Space Component では欧州宇宙機関（ESA）と EUMETSAT（European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites）を通して様々な地球観測を行う Sentinel 1～6 という 6 種類の衛星またはセンサが運用される（1A、1B、2A、3A は打ち上げ済み）。加えて Contributing missions として ESA、EUMETSAT、これらの機関の加盟国、その他の欧州諸国の衛星や国際サードパーティミッション等とも連携し、それらのデータを Copernicus の枠組みで利用可能とする。

• IG3IS

世界気象機関（WMO）では IG3IS（Integrated Global Greenhouse Gas Information System）という温室効果ガス情報システムのプロジェクトを開始している。IG3IS は気候変動枠組条約 COP21 後の各国の行動を支援するもので、ローカル、リージョナル、国、全球レベルの空間スケールを対象とし、大気組成計測とインベントリ（排出目録）／社会経済活動データを統合する。IG3IS に関する今後の予定は以下の通りである。

- 2016 年秋 IG3IS の目的とスコープの確定
- 2017 年春 IG3IS プログラムロードマップの完成
- 2017 年夏 IG3IS ロードマップの関係者（Stakeholders と Sponsors）によるレビュー

■ ESM

日本では、海洋研究開発機構等が参加する文部科学省の「気候変動リスク情報創生プログラム」（以下「創生プログラム」）や気象研究所で ESM が開発されており、ESM から得られる知見を、今後の温暖化抑制のための社会経済シナリオ立案に活用する研究などが進んでいる。欧米でも主要研究機関は ESM 開発に取り組んでいるが、EU のプロジェクト CRESCENDO は、英国気象庁ハドレーセンター、独マックスプランク研究所など7つの ESM 開発チームが参加する大規模なプロジェクトであり、ESM の開発・検証や温暖化緩和政策立案への有効活用を目指している。

世界気候研究計画（WCRP）が推進する「第 6 次結合モデル相互比較プロジェクト」（CMIP6）²⁴⁾は、国際的な研究協力を促す重要な枠組みとなっている。

世界の各研究機関でエアロゾルモデルを開発している研究者有志により、エアロゾルモデル相互比較プロジェクト AeroCom が 2002 年に設立された。このプロジェクトは、IPCC 第 4 次および第 5 次評価報告書におけるエアロゾル関連の評価で主要な役割を果たしており、現在も高い活動度を維持している。その他、エアロゾルや大気微量気体の気候影響をより統合的に評価することを目的とした AerChemMIP、エアロゾルなどが降水量にもたらす影響を評価する PDRMIP といったモデル相互比較プロジェクトも近年立ち上げられ、活動を開始している。

環境研究総合推進費戦略的研究開発領域 S-12（2014～2018 年度）では、エアロゾルや大気微量気体である短寿命気候汚染物質（SLCP：Short-Lived Climate Pollutants）に関する研究が進められている。これは、大気化学輸送モデルと逆推計手法を用いた SLCP 排出インベントリの高度化、統合評価モデル（AIM：Asian-Pacific Integrated Model）における SLCP 過程の高度化、気候モデルによる影響評価を行い、最適な SLCP 削減パスの探査を行うものである。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

■ 観測

- 衛星からの温室効果ガス濃度観測

GOSAT で用いられているフーリエ変換分光計は、瞬時視野が大きく雲の混入率が高いため、OCO-2 等の回折格子型機器と比べ最終的な気体濃度データ数が大幅に少なくなる。その一方で回折格子型機器では観測波長範囲が狭いため、複数の温室効果ガス等の濃度を同時に計測することは難しい。

また、GOSAT、OCO-2 のような太陽光を使う観測の場合、太陽高度が低くなる冬期や夜間の観測が出来ないが、レーザを使った計測（差分吸収ライダー等）ではこれらの問題点を回避出来る可能性がある。その一方でライダーでは長期間に渡る運用可能性にまだ課題がある（レーザ光源の寿命の問題等）。

- 衛星ライダーによるエアロゾル観測

衛星ライダーによるエアロゾル観測については、すでに CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)、CATS が運用され、ATLID の開発が進められている。しかし CALIOP はすでに寿命を越えており、CATS は ISS 搭載のため観測緯度範囲が限定されている一方、ATLID は運用期間が 3 年と短い。このため ATLID 以降の衛星ライダー計画に着手することが求められているが、高コストのライダー開発、長期間に渡るライダー運用可能性の問題がある。

■ ESM

観測データの不足のため、ESM の開発過程において十分な検証ができず、結果として異なる ESM 間でのシミュレーション結果の差が大きくなってしまふ。こうした ESM 間の相違が、シミュレーション結果を比較して議論する際の障壁になっている。

しかし、仮に十分な観測データがそろったとしても、生物活動に関する数式を多数含む ESM では、含まれるパラメータの値の不確実性が大きく、その調整には膨大な手間と時間がかかることになる。パラメータ調整の際には、パラメータの値を少しずつ変えて多数の数値実験を行ったり、あるいはデータ同化などの応用数学的手法を用いたりして観測データと矛盾しない結果をもたらすパラメータセットを探索することになるが、いずれの場合も膨大な計算機資源が必要となり、例えば、前述の地球全体を 3.5km 格子にしたエアロゾル分布のシミュレーションは、「京」を用いても約 1 年分の計算をするだけでも困難な状況であり、今日のスーパーコンピュータでも十分とはいえない。

また技術的には、多数の変数からなる膨大な ESM 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 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 OASIS¹⁹⁾²⁰⁾、ESMF²¹⁾などといったプロジェクトで、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。

[今後取り組むべき研究テーマ]

■ 観測

- 衛星関係
 - 温室効果ガス観測用フーリエ変換分光計の感度向上（露光時間短縮）、複数素子の利

- 用、広範囲（数百 km 四方）を対象とした雲回避観測技術等によるデータ数増加
- 温室効果ガス観測用回折格子分光計の小型化、広刈り幅化、複数気体種対応
- 温室効果ガス観測またはエアロゾルレーザ計測に用いるレーザや光学部品等の長寿命化
- 宇宙用ライダの低コスト化
- ドローン関係

ドローンについては活発な技術開発／実証実験が進められているが、安全上の不安から各種規制も進みつつある。今後ドローン利用を推進するためには、前提となる安全確保技術の確立が求められる。特に気象分野では大気鉛直プロファイル観測のために必要な安全確保技術に関する研究が望まれる。

■ ESM

2013年に発行された IPCC WG1 の第5次評価報告書（AR5）²⁵⁾は、人為起源二酸化炭素排出の累積量と温暖化による気温上昇がよい比例関係にあることを示した。この比例関係の傾きは「炭素排出に対する気候過渡応答」（TCRE : Transient Climate Response to cumulative carbon Emission）とよばれ、人間が二酸化炭素を排出した時の地球の温まりやすさを示している。TCRE の平均的な値は、約 400PgC（1PgC=炭素 10 億 t）の炭素を排出すると 1°Cの昇温がもたらされることを示しているが、不確実性も大きく、温暖化抑制策立案に資するためには TCRE の評価精度を高めていく必要がある。その際には、前述した窒素循環と炭素循環の相互作用の ESM への導入も重要なステップとなろう。国際的な研究協力体制を構築し、non-CO₂ GHGs やエアロゾルの効果も考慮したうえで、TCRE の最尤値の同定や不確実性の逡減を図ることが急務である。

ESM を通した温暖化抑制策立案への貢献という観点では、土地利用変化も ESM で取り扱うべき重要なテーマとなろう。バイオエネルギー生産のための農地拡大の気候影響や、森林伐採による二酸化炭素放出への炭素税課税の効果など、温暖化抑制策の導入に際する社会経済と地球環境の相互作用の評価を進める必要がある。また海洋についても、酸性化や貧酸素化の水産業への影響など、従来の気候モデルでは取り扱いが困難な問題も顕在化してきているため、高度な海洋生態系モデルを組み込んだ ESM を開発しこれらの予測を行うことが重要な課題となっている。

環境研究総合推進費戦略的研究開発領域 S-12 で実施しているような、SLCP が引き起こす気温変化や降水量変化などの具体的な気候変化の定量的評価を気候モデルを用いて行うことが必要である。国際的なモデル相互比較プロジェクトにおいて、他機関の同様な気候モデルによるシミュレーション結果を比較することにより、SLCP の気候影響の best estimate および不確実性の幅の把握を進めなければならない。

（5）政策的課題

■ 観測

- 衛星開発・運用経費の省庁間分担

地球観測衛星については技術開発を完全に民間／商用ベースにすることは難しく、技術開発に関する国の長期計画およびコスト負担の検討が必要である。一方、民間が地球観測衛星

を長期的に運用するためには、他国の例でも明らかなように、国としての「長期契約によって作り出された安定需要（アンカーテナンシー）」が望まれる。今後は技術開発省庁による長期的な技術開発計画／予算および利用省庁によるアンカーテナンシーにかかる計画／予算を、宇宙関連計画／予算として有機的に取りまとめることが期待される。さらにアンカーテナンシーについては単一省庁では規模／期間的に不十分であると考えられるため、各省庁の案件を国として集約し、民間に示すことが要請される。

● ドローン利用に対する法規制等の緩和

ドローンの利用を進めるためには、安全を確保した上で、飛行場所や飛行高度、飛行時間、目視外飛行等の規制²⁶⁾を緩和することが要請される。

■ ESM

ESM を用いた地球環境変化予測研究は、温暖化問題に関する国際交渉の場で日本が存在感を示し公正な判断を下すための情報基盤となるため、政策課題として戦略的に推進することが重要である。その際には、海外に比べ立ち遅れの目立つ、モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発^{19)・21)・27)}も含めた振興が肝要である。

(6) キーワード

温室効果ガス観測、エアロゾル観測、ライダ、センサネットワーク、ドローン、地球温暖化、スーパーコンピュータ、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）、気候変動枠組条約（UNFCCC）、パリ協定、古気候、生態系、緩和抑制策、大気汚染、エアロゾル、微量気体、短寿命気候汚染物質（SLCP）、気候モデル、地球システムモデル、雲解像モデル、データ同化、Climate and Clean Air Coalition（CCAC）

(7) 国際比較

■ 観測

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	◎	↗	● 温室効果ガス観測衛星についてはそのシリーズ化を受けて世界の中心となっている。エアロゾル観測については独自衛星（GCOM-C1）のほかに欧州との共同プロジェクト（EarthCARE）が進行中である。ただし衛星用観測機器の国内開発に十分なリソースをさけていない面がある（GOSAT-2の分光計は海外製品）。
	応用研究・開発	○	→	● ひまわり8号や世界の雨分布速報（GSMaP）の利用拡大に向けた活動が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	● 国として、戦略的／長期的な視点に基づいて、競争的環境の中で様々な基礎研究を進めている。特にライダを用いた温室効果ガス観測の基礎研究を大規模かつ継続的に続けている。さらに今後の衛星開発の長期計画策定作業も開始されている。 ²⁸⁾
	応用研究・開発	◎	→	● 基盤的な広域衛星観測を行ってきたAVHRRやMODISの運用を継続しつつ、その後継センサ（VIIRS）への移行も国として着実に進めており（Suomi NPP, JPSS-1, JPSS-2）、データ利用の基盤が十分に整備されている。また衛星向け開発で培った技術の地上利用展開を行う企業もある ²⁹⁾ 。

欧州	基礎研究	○	→	● Copernicus 計画への重点化のせいもあり、基礎研究の比重がやや低下／小規模化しているように見受けられる。
	応用研究・開発	◎	↑	● Copernicus 計画を中心として衛星およびその他の地球観測データの定常的な供給を担保し、衛星データの応用、実利用を推進する体制が急速に整備されている。他機関、海外の衛星データを Copernicus に取り込むスキームも構築されつつある。
中国	基礎研究	○	↑	● 温室効果ガス観測を含む数多くの地球観測衛星が打ち上げられ／計画されている ³⁰⁾ 。ただし、成果は外部からは非常に見えにくい。また地上観測データの中には国外持ち出しが困難なものもある。
	応用研究・開発	△	→	● 衛星そのものは外交ツールの的に利用されているが、取得された衛星データの公開は遅く、その活用状況も現状目立たない。
韓国	基礎研究	○	→	● 海色に重点を置いた静止衛星 COMS は独創的であったが、ひまわり 8 号の運用開始により、その優位性はやや落ちている。また COMS は欧州の企業が開発したものである。
	応用研究・開発	△	↑	● 静止衛星 COMS については後継機 (GEO-KOMPSAT-2A, B) の開発も進んでいることもあり、今後データ利用を強く推進することが予想される。

■ ESM (エアロゾルのモデルを含む)

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	○	→	● 気象庁気象研究所、海洋研究開発機構などで 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。創生プログラムなどで資金が拠出されている。 ● 【エアロゾル】 先人による数多くの顕著な業績のために質が維持されているが、当該分野の研究者の減少や地球科学研究専用の航空機がない ³¹⁾ ことなどから、今後は下降する懸念がある。
	応用研究・開発	○	→	● 社会経済分野で温暖化緩和抑制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 の成果を緩和抑制策立案に活用する素地ができつつある。基礎研究と同様、創生プログラムなどで資金が拠出されている。 ● 【エアロゾル】 気象・気候モデルの開発や改良、およびそれらを使用するための実用的なスーパーコンピュータの導入は着実に進歩している。IPCC 評価報告書に引用される論文は着実に増加している ³²⁾ 。
米国	基礎研究	◎	→	● 地球流体力学研究所、大気研究センター (NCAR)、オークリッジ国立研究所、航空宇宙極 (NASA) など多数の研究機関が ESM 開発に取り組んでいる。 ● 【エアロゾル】 海洋大気局 (NOAA)・NASA・大学などによる研究体制が確立されている。人工衛星・航空機・地上からの観測が充実しているため、基盤的な研究成果が得られやすい環境にある。
	応用研究・開発	◎	↑	● 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 ²¹⁾²⁷⁾ 。 ● 【エアロゾル】 気候モデルの質は高いレベルにあるものの、近年は大きな進展が見られない。IPCC 評価報告書における気候変動予測の材料となる主要成果を拠出する地位は維持している。
欧州	基礎研究	◎	→	● 英国気象庁ハドレーセンターなどが早くから ESM 開発を手掛けており ²⁾ 、国際的な研究コミュニティにおいても牽引役となっている。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、欧州全体での層は厚い。 ● 【エアロゾル】 非常にレベルの高い基礎研究が維持されている。特に大気汚染物質と気候変動の関係性については、英国・ドイツ・ノルウェー・スイス・フランスの研究機関や大学で顕著な業績があげられている。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 上記 CRESCENDO では社会経済シナリオ開発と ESM との連携も重要な課題となっている。次期 IPCC 報告書で社会経済シナリオに関する部分を担う国際プロジェクト ScenarioMIP³³⁾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¹⁹⁾²⁰⁾²⁷⁾。 ● 【エアロゾル】 基礎研究の成果を活用した気候モデルの改良を着実に進めている。英国気象庁ハドレーセンターや独マックスプランク気象研究所など、気候変動予測の中心となる研究機関が複数存在し、それぞれが質の高い研究を実施している。
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7つの研究グループが ESM 開発に取り組んでいる³⁴⁾。海外で開発されたモデルをベースに開発を行っているケースも多いが、オリジナルに開発を進めているグループもある。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可能性がある。 ● 【エアロゾル】 自ら測器や数値モデルを開発して研究を行うレベルに達していない。基本的に米国・欧州・日本のこれまでの研究成果を活用した研究が実施されている段階である。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 次期 IPCC 報告書での温暖化予測プロジェクト（CMIP6）には多数の ESM が参加することが予想される。一方で、ESM による成果を緩和抑制策立案に活用するという動きには乏しい。 ● 【エアロゾル】 後発ながら気候モデルを開発し、その研究成果が IPCC 評価報告書へ引用されるまでに成長してきた。自国の問題である大気環境の改善と関係する分野であるため、今後の進展が見込まれる。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 韓国気象庁（KMA）では、英国気象庁ハドレーセンターが開発した気候モデルをベースに ESM 開発を進める方針になっており、自国で ESM 開発に取り組むには国内基盤をいっそう強化する必要がある。 ● 【エアロゾル】 国際的に顕著な研究成果をあまりあげていない。日本と比較して博士課程に進学する学生の比率が高いため、今後レベルが底上げされるポテンシャルはある。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 次期 IPCC 報告書での温暖化予測についても、英国気象庁ハドレーセンターとの協力のもと推進する方針である。韓国独自の観点で ESM の成果を政策立案に活用するのは困難な状況であろう。 ● 【エアロゾル】 気候変動予測に参画しているグループがない。独自の全球気象モデルを構築するための研究所を2011年に設立したり、静止気象衛星による大気汚染物質の観測計画を米国とともに進めていたりするなど、今後の進展は期待される。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) NASA Advisory Council, 1988: Earth System Science: A Closer View, Report of the Earth System Sciences Committee, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 208pp.
- 2) Cox, P., R. Betts, C. Jones, S. Spall, and I. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feed-backs in a coupled climate model, Nature, 408, 184–187.
- 3) Thornton, P. E., S. C. Doney, K. Lindsay, J. K. Moore, N. Mahowald, J. T. Randerson, I. Fung, J.-F. Lamarque, J. J. Feddema, and Y.-H. Lee, 2009: Carbon-nitrogen interactions regulate

- climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model. *Biogeosciences*, 6, 2099–2120.
- 4) C. D. Jones, V. Arora, P. Friedlingstein, L. Bopp, V. Brovkin, J. Dunne, H. Graven, F. Hoffman, T. Ilyina, J. G. John, M. Jung, M. Kawamiya, C. Koven, J. Pongratz, T. Raddatz, J. Randerson, and S. Zaehle, The C4MIP experimental protocol for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, in press, 2016, doi:10.5194/gmd-2016-36
 - 5) Hurtt, G.C., L. P. Chini, S. Frolking, R. A. Betts, J. Feddema, G. Fischer, J. P. Fisk, K. Hibbard, R. A. Houghton, A. Janetos, C. D. Jones, G. Kindermann, T. Kinoshita, Kees Klein Goldewijk, K. Riahi, E. Shevliakova, S. Smith, E. Stehfest, A. Thomson, P. Thornton, D. P. van Vuuren, and Y. P. Wang, 2011: Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, DOI:10.1007/s10584-011-0153-2.
 - 6) Ackerman, T. P. (1988) Aerosol in climate modeling. *Aerosols and Climate*, edited by P. V. Hobbs, and M. P. McCormick. A. Deepak Publishing, 335–348.
 - 7) Langner J., and H. Rodhe (1991) A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle. *J. Atmos. Chem.*, 13, 225–263.
 - 8) Tegen, I., and I. Fung (1994) Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, 99, 22897–22914
 - 9) Liousse, C., J. E. Penner, C. Chuang, J. J. Walton, H. Eddleman, and H. Cachier (1996) Global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols. *J. Geophys. Res.*, 101, 19411-19432.
 - 10) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima (2000) Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, 105, 17853–17873.
 - 11) 総務省 「センサーネットワークの現状について」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000405376.pdf
 - 12) 株式会社 NTT ドコモ ドコモ通信 Vol. 58 「ニュービジネス紹介」
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/library/docotsu/58/technology.html>
 - 13) 株式会社 ウェザーニュース ニュース 「WxBeacon」
<https://jp.weathernews.com/news/5827/>
 - 14) 株式会社 フィールドプロ 「気象データ提供サービス」 ホームページ
<http://weather-data.jp/company.html>
 - 15) 日本リモートセンシング学会誌ダウンロードサイト
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/rssj>
 - 16) 日本気象協会 ニュースリリース 「ドローンによる高層気象観測技術」
<https://www.jwa.or.jp/news/2016/05/post-000667.html>
 - 17) 株式会社 ウェザーニュース ニュース 「ドローンによる気象観測ネットワーク」
<https://jp.weathernews.com/news/7164/>
 - 18) 有限会社 タイプエス 「上空気象観測用ドローン」
http://www.type-s.co.jp/leaflet_2.pdf

- 19) Valcke, S., 2013: The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software, *Geosci. Model Dev.*, 6, 373–388, doi:10.5194/gmd-6-373-2013
- 20) OASIS ホームページ <https://verc.enes.org/oasis>
- 21) Earth System Modeling Framework <https://earthsystemcog.org/projects/esmf/>
- 22) Sato, Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima (2016) Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Sci. Rep.*, 6, 26561, doi:10.1038/srep26561.
- 23) 今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合リモートセンシング分科会/地球科学研究高度化 WG 報告書「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」
<http://www.jsprs.jp/pdf/TF20160531.pdf>
- 24) Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E. 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016
- 25) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 26) 国土交通省 「無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール」
http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html
- 27) Earth System Grid Federation ホームページ <http://esgf.llnl.gov/>
- 28) 米国宇宙航空局 (NASA) , Earth, Decadal Survey,
<http://science.nasa.gov/earth-science/decadal-surveys/>
- 29) HARRIS 社ホームページ
<https://www.harris.com/solution/greenlite-ground-remote-sensing>
- 30) 中国気象局 (CMA) ホームページ <http://www.cma.gov.cn/en2014/satellites>
- 31) 航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進研究計画書。
<http://www.metsoc.jp/2015/10/23/5189>
- 32) 環境エネルギー分野における主な取組の状況 (2 ページ)
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/067/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2015/02/23/1353188_2.pdf
- 33) O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, J., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M. 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2016-84, in review.
- 34) Zhou, T., L. Zou, B. Wu, C. Jin, F. Song, X. Chen and L. Zhang, 2014: Development of Earth/Climate System Models in China: A Review from the Coupled Model Intercomparison Project Perspective, *Journal of Meteorological Research*, 5, 762-779.

3.1.2 気候変動影響予測・評価

（1）研究開発領域の簡潔な説明

気候変動影響予測・評価とは、気候変動予測モデルで得た情報に基づき気候変動による影響を予測し、その結果に基づいてリスク評価する手法である。影響予測はモデルを用いて行い、リスク評価は、モデルによる計算結果を比較解析にて行う。

ここでは、水循環、自然災害、自然生態系、農林業、健康・都市生活、極地（北極、南極）を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

気候変動の影響は、日本でもすでに現れ始めており、今後、様々な分野で拡大するとみられている。気候変動の影響評価では、地域ごとの影響の違いを考慮できる詳細な気候変動予測や、複数のモデルに基づき、不確実性を確率的に評価する予測が求められる。

しかし、影響予測には様々な不確実性があり、気候変動のもたらすリスクを把握するためには、これらの不確実性を含めて、起こりうる影響を予測することが不可欠である。また、現在起こりつつある影響や将来の影響に対しては、予防的な対応という考え方が重要であり、そうした予防策の立案のためには、リスクの高い事柄について、あらかじめ把握し、考慮しておくことが不可欠である。

■ 水循環

地上に降った雨や雪が土壌など地表に浸透・滞留し、蒸発散や流出を経て、再び大気に戻っていくまでのプロセスを水文過程と呼ぶ。温暖化の進行による降水パターンの変化が顕在化する中、人口の増加や経済の発展により世界的に水利用は依然として増加しており、人間にとって不可欠な水資源が将来持続的に得られるか総合的なシナリオ分析を実施することが要請されている。こうした背景から、人間活動を含む全球水文モデル、およびそれを用いたシミュレーションの重要性が地球科学および地球環境学の両面から強く認識されるようになった。

■ 自然災害

2013年から2014年にかけて発表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次評価報告書（AR5）では、熱波、干ばつ、洪水、（熱帯および温帯）低気圧、高潮など人間社会に大きく影響する極端現象（10年に一度発生する現象）の頻度が、人間活動の寄与によっていずれも増大していること、またそれらの極端現象の変化に対して現在の一部の生態系、及び多くの人間社会のシステムは深刻な脆弱性も持つこと、曝露していることを指摘している。そのような極端現象の変化を伴う気候の変動に対して適応（adaptation）した社会を構築するため、正確かつ迅速にそれらの影響を推計評価することが求められている。

■ 自然生態系

生物種の絶滅や分布域の縮小、生態系の変貌には、これまでの土地利用の影響など、他の要因も強く作用してきたことを考慮する必要がある、気候変動の寄与がどの程度であるかを

特定することは難しい。また、生物種は温暖化に対する適応能力、移動分散能力に差があるため、植物と花粉を運ぶ昆虫など、生態系の中でこれまで成り立っていた共生関係が崩れたりする可能性がある。さらに、害虫や疫病を媒介する動物なども、これまで問題がなかった地域まで分布域を拡大させる可能性があり、注意を要する。

■ 農林業

気候変動による影響のなかでも、生態系を基盤とする農林業には極めて大きな影響が予測され、世界的な食料安全保障の低下が危惧されている。IPCC AR5では、特に、気温上昇、干ばつ、洪水、降水量の変動や極端な降水により、特に貧しい人々の食料安全保障が脅かされるとともに、食料システムが崩壊するリスクが指摘されている。また、農業と森林を含む土地利用分野からの温室効果ガス排出に対しても、化石燃料使用にともなう二酸化炭素排出とともに、その削減が求められている。

■ 健康・都市生活

健康分野では、熱ストレスによる死亡者数、下痢性疾患、洪水による死亡者数の増加や、感染症を媒介する生物の生息可能域の拡大などによる死亡の増加が予測されている¹⁾。健康影響（例えば熱ストレスによる死亡やマラリアやデング熱）のリスク予測モデルの不確実性や限界も明示した上で、起こりうる影響を予測することが不可欠である。

都市生活分野では、特にヒートアイランド現象による熱ストレス影響の悪化が懸念されるほか、短時間強雨や渇水の頻度の増加、強い台風の増加などがあり、インフラ・ライフラインへ被害を及ぼす可能性がある。特に、途上国の貧困な都市は、脆弱で、人口も大きく、大きなリスクを負っていると考えられる（IPCC AR5）。ヒートアイランドの評価のために地域ごとの影響の違いを考慮できる詳細な気候変動予測が必要である。

■ 極地

北極では急速な温暖化と海氷減少が進行しており、海岸浸食や海洋生態系の変化が危惧されるほか、日本を含む中緯度の気象へも影響を与えていることが判明しつつある。一方南極では温暖化の影響は地域によって差があるが、氷床の変動は海水準や海洋深層循環へのインパクトが大きく、全地球的な影響をもつ。

[動向（歴史）]

■ 水循環

人間活動を含む全球水文モデルが最初に報告されたのは約20年前である²⁾。以降、農業用水および工業・生活用水の推定³⁾⁴⁾、ダムの貯水と放流⁵⁾⁶⁾、表層水および地下水からの取水⁷⁾⁸⁾と、人間活動のモデルは追加されていった。世界の先進国では、人間活動を含む全球水文モデルが現在も精力的に開発・改良されている。現時点で約15の有力なモデルがあるが、主要な人間要素がすべて含まれ、かつ当該分野をリードしているモデルはWaterGAP（フランクフルト大学・カッセル大学・ボン大学、以上すべてドイツ）、PCR-GLOBWB（ユトレヒト大学、オランダ）、LPJmL（ポツダム気候影響研究所、ドイツ）、H08（国立環境研究所・東京工業大学・東京大学、日本）の4つである。

■ 自然災害

IPCCでは1990年に発刊した第1次報告書より一貫して気候変動の影響評価を主題のひとつとしている。日本では、文部科学省主導の21世紀気候変動予測革新プログラム（2007～

2011年度；以降革新プロ）・気候変動適応研究推進プログラム（2012～2014年度）・気候変動リスク情報創生プログラム（2012～2016年度；以降創生プロ）、および環境省主導の気候シナリオ「実感」プロジェクト（2007～2011年度；以降 S5）、温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究（2010～2014年度；以降 S8）、地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究（2012～2016年度；以降 S10）において、IPCC 第5次評価報告書のうちの気候変動影響評価の内容に大いに貢献する研究およびモデル開発が行われた。

ISI-MIP（The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project；セクター別の気候変動影響評価プロジェクト）は、2012年より本格始動した国際プロジェクトであり、水（水資源・水災害）、陸域生態系、植物生理、農業経済、健康（マラリア）という5つのセクターにおいて、異なる手法（モデル）による気候変動影響評価を相互比較する。その中の「水」において、上記の水循環や干ばつ、洪水の将来推計に関する解析がなされている。

CORDEX（Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment；統合地域ダウンスケーリング計画）とは、世界気候研究計画（WCRP）が主導する、全球気候モデルの将来推計結果を時空間的により詳細な情報にダウンスケールする研究計画であり、幾つかの地域に分かれてそれぞれ領域版気候モデル（RCM）を使ったダウンスケーリングを行っている（日本域は東アジア版 CORDEX-EA に含まれる）。

■ 自然生態系

1990年代頃まで、生物学者は地球温暖化が生物に与える影響について懐疑的であった。温暖化が生物に与える影響が顕在化するのはまだ先のことであり、現状は人間による流域土地開発や富栄養化の影響の方が強く、二酸化炭素増加については植物生理に及ぼす直接的影響に注目してきた。2000年に入り、1700種に及ぶ地球規模のメタ解析を実施した研究が発表され、平均して10年間に6.1km極地方向に分布域が変化し、開花や繁殖などの春季イベントが10年間で2.3日早くなっていることが明らかになった¹⁰⁾。これ以降21世紀に入り、長期的な観測データをもとに多くの研究が実施され、温暖化の影響はすでに生物種や生態系に影響を与えていることが明らかになった。現在では、分布域、フェノロジー、そして体サイズの変化の3点が地球温暖化への生物の主要な応答として考えられている。

これまでの研究の多くは、長期間の生態観測から得られた長期データを解析し、温暖化が生物種や生態系にどのような影響を及ぼしてきたかを明らかにしてきた。一方で、国際社会は温暖化の適応策を検討しなければならない段階に入り、将来予測に関心が向けられてきた。将来予測は当初、気温や標高などの環境変量を用いた種分布モデル（SDM：Species Distribution Model）を用いて実施されてきた。例えばGCM（Global Climate Model）やRCM（Regional Climate Model）によって得られた温暖化予測値を利用し、それをSDMに当てはめて温暖化に伴う種の分布域を推定した。しかし、こうしたSDMを使ったモデルは、その環境条件において個体群が平衡状態にあることが仮定され、さらに生物の移動や分散のプロセスが明確にされていないなどの問題を含んでおり、近年のモニタリングデータと対象種の予測分布が合わないケースが報告されている。そうした問題を背景に、SDMではなく生活史や個体群変動、移動分散を考えたプロセスモデルが検討されるようになってきた¹¹⁾。

それらのモデルを動かすためには多くの生物、生態系パラメータ、分散障壁等の入力が必要とする。残念ながら現状の蓄積データからはこれらのパラメータを正確に推定することができないことが多く、仮の値を当てはめている場合が多い。したがって、SDMとプロセス

モデル両方を使いながら足りない部分を補完するのが現実的な対応と考えられている。

■ 農林業

日本のコメ生産は、現在より 3℃を越える高温になった場合、北日本を除き、減収すると予測されている¹²⁾¹³⁾。コメの品質について、一等米の比率は、登熟期間の気温が上昇することにより全国的に減少することが予測されている¹⁴⁾。また、CO₂濃度の上昇は、施肥効果によりコメの収量を増加させることが FACE (Free-Air CO₂ Enrichment、開放系大気 CO₂ 増加) 実験により実証されている¹⁵⁾¹⁶⁾。果樹について、温暖化にともない、ウンシュウミカンおよびリンゴの主力産地の移動¹⁷⁾や、リンゴの甘みが増すという食味の変化が起きていることも明らかにされている¹⁸⁾¹⁹⁾。また、家畜の成長への影響²⁰⁾²¹⁾、病害虫の発生危険性増加も予測されている²²⁾。

林業について、蒸散量の増加によるスギ人工林の脆弱性増加²³⁾、分布樹種の変化²⁴⁾、加害昆虫の分布拡大²⁵⁾等が予測されている。森林の CO₂ 吸収機能については、これまでの日本における温暖化緩和への大きな貢献とともに、間伐、優良品種の利用、木材利用の促進等の技術による将来の緩和効果について、モデルを用いた評価結果が示されている²⁶⁾。水産業についても述べると、適水温海域の変化にともなう回遊性魚介類の分布範囲の移動^{27)・35)}、サンマの成長鈍化と産卵量増加³⁴⁾、養殖産地の不適化^{33)・35)}が予測されている。

■ 健康・都市生活

個別の健康影響について、気象・気候と関係しているという研究は古くからなされてきた。日本でも、靄山³⁶⁾を筆頭に、詳細な研究が行われてきた。しかし、気候変動による影響に焦点を当てた研究は、IPCC 第 4 次評価報告書に引用された McMichael らの研究³⁷⁾が、少なくとも包括的な研究は始めてであろう。ここで扱われた影響としては、暑熱と寒冷の直接影響(循環器疾患として)、下痢性疾患、マラリア、自然災害、低栄養であった。

世界保健機関 (WHO) のプロジェクトとして、上記の研究をアップデートする作業が始まった。その結果は 2014 年に報告書として発表された³⁾。扱われた影響は熱関連死亡、沿岸洪水死亡、下痢性疾患、マラリア、デング熱、低栄養である。注目すべきは、熱関連死亡のみが先進諸国でも大きな影響を及ぼし、高齢者への影響が大きいのに対し、その他の影響はほとんどが途上国の小児に大きな影響を及ぼすことである。

■ 極地

北極における科学的研究の国際的取り組みは、第一回国際極年 (IPY : International Polar Year、1882~1883 年) を契機に始まった。特に 1987 年のムルマンスクにおけるゴルバチョフ書記長の演説の中で北極における科学協力が提案されたことを受けて、1990 年に北極圏の 8 カ国により国際北極科学委員会 (IASC) が設置され、翌年には日本を含む非北極圏の 6 カ国が加盟、以後各国が研究を活発化させた。日本は 1991 年にスバルバル諸島ニーオルスンに観測基地を設置し、大気、雪氷、海洋、陸域生態、超高層物理の観測を開始した。

南極では、1957-58 年の国際地球観測年 (IGY : International Geophysical Year) 以降、日本を含む多くの国々が南極観測を開始し、大気・海洋・雪氷等に関する多くの観測が現在も継続的に実施されている。これらの長期的な観測は、南極オゾンホール³⁸⁾³⁹⁾につながったほか、氷床コアによる過去約 80 万年の気候変動復元など、地球気候の全容を知るための多くの情報を与えている。雪氷、大気、気象、生態など多分野にわたる両極域での国際的な集中観測が 2007-2008 年の第 3 回 IPY に行われ、両極の観測・研究が集中して行われ

ている。

氷床研究は 1957 年に人工雪の研究で知られる中谷宇吉郎が、グリーンランド氷床調査に参加し、その後もグリーンランド氷床、南極大陸での氷床研究の国内外のプロジェクトに日本の研究者が参加している。南極大陸では日本のドームふじ深層掘削プロジェクトが 1990 年代より活動し、3000m に及ぶほぼ全層の氷床氷の採取と、過去 72 万年前までの温室効果気体と気候変動の記録の解析を行なっているほか、2007-2011 年のグリーンランドでの North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) プロジェクト、2015 年から開始した East Greenland Ice-core Project (EGRIP) プロジェクトへも参加し、国際的な氷床研究活動の主要国となっている。

最近の研究から、南極域の気温変動が他の地域と大きく異なる原因の一つとして、南半球固有の気候変動パターンである南半球環状モード (SAM: Southern Annular Mode) の影響が指摘されている。SAM は、南半球高緯度域と中緯度域の間の気圧のシーソーを表し、SAM が正の位相になると、高緯度域では気圧・気温が低下する。1980 年代以降、この SAM が正位相に偏る傾向が見られ、南極域での温暖化を抑える役割を果たしている。2016 年に発表された研究成果では、南極オゾンホールが発達と地球温暖化の進行が南半球成層圏の極夜ジェットを強化し、その結果 SAM が正位相に偏るようになったのではないかと考えに至っている⁴⁰⁾。

ニーオルスンにおける北極の継続的な観測は、貴重な北極の長期変化記録を提供してきている。また、1998 年からは海洋地球研究船「みらい」による北極海海洋観測や気象観測が実施されてきた。さらに 1990 年代よりアラスカやシベリアなど北極各地での多分野にわたる北極気候観測・研究活動が実施されてきた。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

■ 水循環

先進国が全球水文モデルの開発に継続的・精力的に取り組み、分野的な進展が急速に進んでいる。特に上述した WaterGAP (ドイツ)、LPJmL (ドイツ)、PCR-GLOBWB (オランダ) の開発チームには多くの人材が集まっている。また、米国では 2012 年の干ばつを受け、エネルギー省 (DOE)⁴¹⁾ が水とエネルギーの問題の連鎖について組織的な取り組みを始めた。これを受けて、パシフィックノースウェスト国立研究所 (PNNL) などの有力な研究機関が人間活動を含む全球水文モデルの開発を急ピッチで進めている。

全球水文モデルコミュニティの組織化が進みつつある。従来は個々のモデル開発チームが問題を設定し、データを集め、モデルを開発し、論文を執筆していたが、昨今は世界の主要な全球水文モデルが参加する国際プロジェクトが少数立ち上げられ、問題設定とデータ収集、シミュレーション設定を共通化し、参加モデルを横断的に分析して論文を執筆するスタイルに変化しつつある。

水文モデルと社会経済モデルの連携が実施・強化されている。自然の水循環は基本的に気象・気候によって駆動されるが、人間による水利用は人口、経済活動、技術などによって主に駆動されるため、特に人間活動を含む全球水文モデルにおいて、連携の重要性が増している。

全球水文モデルの超高解像度化、具体的には 1km 解像度で全球をカバーするシミュレーションの実施が今後の全球水文モデルの共通目標であることが世界的に広く受け入れられつつある。

■ 自然災害

日本の創生プログラムにおいて将来予測の不確実性の定量化および統計解析の精度向上のため、現在および将来全球平均気温が 4 度上昇した時点それぞれについて約 100 個のアンサンブルメンバーを用い、それぞれ数十年間のモデルシミュレーションデータを行い、2015 年 d4PDS と名付けて公表した⁴²⁾。結果の一例として、台風に伴う高潮について 100 年に一度程度であったものが、温暖化 30 年～50 年に一度発生することが示された⁴³⁾。同様な大量のアンサンブルシミュレーションは、米国でも CESM-LE という名称で米国大気研究センター（NCAR）が実行している⁴⁴⁾。このような大量のアンサンブルメンバーを用いることで、地球システムそのものの振る舞いに起因する気候変動（いわゆる内部変動）と人間による寄与に起因する気候変動（外部変動）とを統計的に区別することにより、特定の自然災害をもたらした極端現象への人間起因の温暖化の寄与を統計的に見積もるイベントアトリビューション（EA : Event Attribution）手法が確立され、例えば 2013 年の日本の猛暑での温暖化の影響が定量化されている⁴⁵⁾。また国土交通省では、2015 年 7 月に水防法が一部改正され、激甚な浸水被害への予防的対応として「想定最大規模降雨」を用いた河川計画を行うことが決定しており、その作成手法を公開している⁴⁶⁾。それによると、これまでの観測データに基づいて算定された 100 年に一度の降雨量では、想定最大規模の降雨量に遠く及ばない地域が多く出現することがわかっている。d4PDF のような大量のアンサンブルデータは将来気候に関する「想定最大」を推定することにも有用となる見込みである。

また、温暖化に伴い、日本の短時間での降雨（1 日未満）の確率的極大値が増加していることが観測されている⁴⁷⁾。

日本では、データ統合・解析システム（DIAS）と民間企業との共同研究において、洪水時の河川管理に汎用的な陸面水文モデルと大量の観測データ、そしてアンサンブルシミュレーションによる確率的な概念を組み込んだ手法を用いる研究が進められている⁴⁸⁾。こういったアンサンブル数値予測シミュレーションを用いた洪水予測・警報システムの枠組みは、EU⁴⁹⁾や米国⁵⁰⁾でも行われて始めている。

その他、前述の ISI-MIP と創生プロで連動した研究として、気候変動予測では考慮されていない人間が行う農業活動の影響、特に灌漑による水の移動についての影響を加味し、干ばつ日数が今後どのように変化していくかを推計した研究がある⁵¹⁾。

■ 自然生態系

温暖化に伴う分布域の変化を検討する際に考慮しなければならない重要な課題として、生物間相互作用、例えば植物と昆虫の共生関係、食う-食われる関係などへの影響があげられる。近年の研究で、相互作用を形成する生物種間で温暖化に対する反応が異なることが報告されており、生物季節のミスマッチによって個体群の絶滅が予測されている。さらに害虫や病原菌、寄生虫の分布域変化（もしくは拡大）やそれに伴う病気の蔓延に注意しなければならない。例えば牡蠣の寄生虫が分布拡大することで、宿主である貝類の大量斃死を招くことが知られている。また感染症を媒介するマダニの分布域拡大や死亡率の低下、成長期の拡大なども報告されている。

■ 農林業

温暖化を背景とした気象条件を考慮して作物を管理する必要性の増加に対し、1 km メッシュの農業気象データを全国について作成・配信するシステムが開発された⁵²⁾⁵³⁾。また、農業水利用に対する影響評価法を日本全域に適用し、気候変動が農業水利用や水資源に与える影響を評価した全国マップが提示された⁵⁴⁾。

水稻について、大気 CO₂ 濃度が高い条件では、白未熟粒が多発し、品質の指標である整粒率が大幅に低下するが、その程度は高温年で大きく、将来の高 CO₂・高温環境では品質の低下が懸念されるとともに、高温耐性品種では品質の低下が小さいことが示された⁵⁵⁾。また、多収品種タカナリが高い CO₂ 濃度下でも高い収量性を示すメカニズムが解明され、将来の高 CO₂ 濃度環境下での水稻品種開発に役立つ知見が得られた⁵⁶⁾。

エルニーニョ／ラニーニャと世界の主要穀物の生産変動との関連を解析することから、これらの予測に基づく穀物豊凶の早期予測の活用可能性が示された⁵⁷⁾。また、過去 30 年間の世界各地の穀物収量データを解析し、主として気候要因の変化により、一部の地域・穀物で収量が不安定化したことを明らかにされ、収量を安定化するために高温耐性品種の開発・導入、播種日の見直し、灌漑の導入が重要と考えられた⁵⁸⁾。

農地における土壌炭素の増減と温室効果ガス（CH₄、N₂O、化石燃料消費由来 CO₂）の発生量を同時に計算して温室効果ガス発生量の総合評価を簡単に行えるウェブサイトが公開され、農家や行政、生産者団体などが、農地管理による温室効果ガス削減の効果を評価するために活用されることが期待される⁵⁹⁾。

森林については、将来の日本森林による吸収量と木材利用による排出削減量が予測され、地球温暖化対策として木材利用が重要であることが示された⁶⁰⁾。

■ 健康・都市生活

従来は、複数の要因による影響を、すべて直線的な関係の集まりとして計算していたが、一般化線型モデルとその拡張による非線形モデルによって直線でない関連も扱えるようになった。例えば、気温と死亡との関連は、ある気温で死亡リスクが最低となり、その気温よりも高くなっても低くなってもリスクが上昇するという V 字型の関連を示すので、直線回帰では不都合であった。それを V 字型として扱えるようになった。

また、人間活動を含むビッグデータや、地球観測・衛星観測データが利用できるようになり、暑熱曝露による影響の評価等が行われている（研究開発領域 3.2.5(3)参照）。

■ 極地

北半球氷床研究に関しては、過去数十万年間にわたる氷期-間氷期変動を、本格的な気候モデルと氷床モデルを組み合わせて再現することに初めて成功している⁶¹⁾。この中での入力データとして高精度の CO₂ 変動の年代⁶²⁾を使用しているなど、当分野において日本のモデル・データ連携研究が世界をリードしている。

IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）でも引用されている日本の気候モデル MIROC4h の大気に関するモデル部分を用いて、バレンツ・カラ海で海水の量を変化させたシミュレーションを大量のアンサンブルメンバーで実施し、海水の減少がユーラシア大陸の中緯度域に寒冬をもたらし得ることを明らかにしている⁶³⁾。

北極への物質輸送の観測手法についても、ブラックカーボン（BC）などの高精度観測が可能になっている。BC 粒子測定装置（SP2：Single particle soot photometer）により高精度

に BC 粒子の計測を行うことが出来る。温室効果ガスの発生は、凍土域の変動と関連しており、海洋、陸上を含めた炭素循環の変動把握、それらが更なる温暖化傾向の増加にどれだけ影響するかの評価も求められる⁶⁴⁾。

センサの改良や解析アルゴリズムの向上により、衛星による観測の高度化が図られている。海洋基礎生産の観測精度向上などのほか、例えば永久凍土に関連して地表面温度を衛星データから取得し、積雪データと組み合わせるなど、複数の変数を組み合わせたより複雑な解析が試みられている(欧州宇宙機関(ESA)のGlobPermafrost)。陸域の観測においては、地球物理的な探手法(弾性波探査・電気探査など)の普及により、多くの地点で海洋観測においては、自動測器の開発が進み、データ取得可能範囲が増えつつある。今後、ROV(Remotely Operated Vehicle)やAUV(Autonomous Underwater Vehicle)を用いて海水下や海水縁辺部での生態系観測が可能になることが期待される。生態系モデルにおいても複雑化・高解像度化が進み、新しい方向性としては同位体データの同化の試みが行われている。

[注目すべきプロジェクト]

■ 水循環

ISI-MIPは全球規模の温暖化影響に関するモデル開発とシミュレーションを行うプロジェクトとしてドイツのポツダム気候影響研究所(PIK)が主導して2012年に立ち上げられた。フェーズ1には11の全球水文モデルが参加し、IPCC第5次評価報告書に大きな貢献をした。現在はフェーズ2が実施されており、第6次評価報告書などへの貢献を目指した活動が行われている。また、Water Future and Solutions(WFAS)は人間活動を含む全球水文モデルの機能のうち特に21世紀中の世界の水利用の予測に重点を置いたマルチモデルプロジェクトとして国際応用システム研究所によって2013年に立ち上げられた。

■ 自然災害

- ・ 文部科学省「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム」(2016~2020年度): DIAS
- ・ 文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム」(2015~2019年度): RECCAの後継
- ・ 文部科学省「気候変動リスク情報創生プログラム」(2012~2016年度): 人・自然・地球共生プロジェクト(共生プログラム)・21世紀気候変動予測革新プログラムからの後継
- ・ 環境省環境研究総合推進費S-14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」(2015~2019年度)
- ・ 環境省環境研究総合推進費S-10「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究」(2012~2016年度)
- ・ FP7 Enhance (Enhancing Risk Management Partnerships for Catastrophic Natural Disasters in Europe)

■ 自然生態系

米国のNEON(National Ecological Observatory Network)は予算規模としても非常に大きい。土壌、水、生物、大気に関して、米国全土を20の地域に区分し、コア観測拠点を建設し、人間活動が生態に及ぼす影響を30年間にわたって観測する全米生態観測ネットワーク

ークプロジェクトである。当然のことながら温暖化についても調査研究も進んでいる⁶⁵⁾。

欧州委員会は、新規に設置された「LIFE 気候行動プログラム」において、EU 全域で気候変動を克服するための革新的な手法を開発し実施するために、2014 年一年間で 4426 万ユーロを拠出した。EU が進める「2014 年-2020 年 LIFE プログラム」の一部として運営されるもので、6 年間で 8 億 6400 万ユーロが拠出され、気候変動対策や気候変動適応対策に関するコミュニケーションの改善や協働、普及への取り組みが進められる。

■ 農林業

国際的な研究プロジェクトとして、影響評価については、気候変動による農業影響とその対策の評価を目的としたモデルや評価手法を検討するための「農業モデル相互比較・改善プロジェクト (AgMIP : Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project)」が組織され、作物別および地域別の研究チームの活動が推進されている。

日本では、農林水産分野における温室効果ガスの排出削減技術・吸収源機能向上技術、および温暖化の進行に適応した農林水産物の生産安定技術の開発を目指した農林水産省委託研究プロジェクトが進められている。2016 年度は「農林水産分野における気候変動の影響評価及び適応技術の開発」として、中長期的な気候変動予測に基づき、温暖化による収量や品質の低下、病害虫の侵入リスクの回避・軽減、豪雨による農地等の被害の軽減のための技術開発が推進されている。2017 年度からは、これに加えて、「農林水産分野における気候変動緩和技術の開発」が新たに開始される予定である。

■ 健康・都市生活

ヨーロッパにおいては、IMPRESSIONS という EU による気候変動研究プロジェクトが実施されており、健康に限らず多様なセクターにわたって影響研究が行われている。米国では USGCRP (U.S. Global Change Research Program) という省庁横断的な研究計画が進行中である。

健康に特化したものとしては、世界保健機関 (WHO) も、COP などへの貢献のため、できるだけ多くの健康影響予測を行って結果を示す活動を続けている。2015 年には国別の影響予測を発表した。

■ 極地

・ SCAR/PAIS

南極科学委員会 (SCAR) は、南極氷床の過去の変動を調査する PAIS (Past Antarctic Ice Sheet dynamics) を提唱している。ここでは巨大な氷体である東南極と、近年不安定化が話題になっている西南極および南極半島の気候変動および周辺を取り囲む海洋の変動に対する感度を調べる。

・ IPICS

最終間氷期の気候と海面変動に注目した国際氷床研究プログラム。今後は、東南極域で 150 万年前まで遡る事のできる氷床コアを掘削することを目指す国際プロジェクト Oldest Ice Core が予定されている。

・ 南極地域観測第IX期 6 か年計画

「南極域から探る地球温暖化」をメインテーマとして 2016~2021 年度に実施される。「南極大気精密観測から探る全球大気システム」、「氷床・海氷縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」、「地球システム変動の解明を目指す南極古環境復元」

という 3 つのサブテーマから構成される。

- ・ WMO/PPP/YOPP⁶⁶⁾

WMO-WWRP (World Weather Research Programme) のもとに PPP (Polar Prediction Project) が設置されており、数時間から季節スケールの予測可能性研究の推進を極域大気研究のコミュニティに働きかけている。特に 2017-2019 年に設定されている YOPP (Year Of Polar Prediction) は核となる活動で、2018-2019 年にはドイツ砕氷船 Polarstern 号を 1 年間北極海で漂流させる野外観測が予定されている (MOSAic: Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)。領域モデルによる海氷上の境界層や雲の再現性、すなわちパラメタリゼーションに関する素過程、北極低気圧に代表されるような総観規模擾乱の解明、北極温暖化と大陸寒冷化に代表される高緯度-中緯度の相互作用など、マルチスケールの研究課題が設定されている。

- ・ 北極気象観測・同化影響評価研究 (ARCROSE : Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment)

日本が推進する、観測とデータ同化を統合した予測可能性研究。日本の北極観測は、地理的制約を受けるものの、アンサンブルデータ同化やそれを用いた予測可能性研究で着実に成果をあげてきている。例えば、ドイツ砕氷船のラジオゾンデデータで北極低気圧の予測精度が向上し⁶⁷⁾、それに伴って海氷予測も向上すること⁶⁸⁾、「みらい」北極航海のラジオゾンデデータから観測コストを考慮した最適観測頻度 (1 日 4 回) を提唱したことなど⁶⁹⁾、YOPP を意識した先行研究を行っている。

- ・ 北極研究推進プロジェクト (ArCS : Arctic Challenge for Sustainability)

急変する北極の気候変動の解明と環境変化、社会への影響を明らかにし、内外のステークホルダーが持続可能な北極の利用等諸課題について適切な判断を可能とする精度の高い将来予測や環境影響評価等を行うことを目的として実施されている。2015 年 9 月から 2020 年 3 月までの約 4 年半にわたって文部科学省の補助事業として実施される。

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

■ 水循環

人間活動を含む全球水文モデルの開発において最大のボトルネックとなっているのが集約されたグローバルな水利用関連データの不足である。水利用に関するデータはいずれの国においても地方自治体レベルで収集・管理されることが多いが、それらが国レベルに定期的に集約されるケースは少なく、ゆえに国を横断して世界を俯瞰するようなデータも存在しない。水利用に関するモデルを高度化するには、各国の統計データを収集・集約するところから開始せねばならず、効率的な研究展開を妨げている。水利用データを効率的に集め、広く社会に提供する仕組みづくりが求められている。またモデルの開発と解析を行うにあたっては、水文学や農業土木工学などに加え、気候学や計算機科学にもある程度精通する必要があるなど、極めて学際的な知識や能力が要求される。モデルの開発と応用を担える人材を確保するのが、世界のどの開発チームにおいても、大きな課題となっている。

■ 自然災害

- ・ 観測データが欠如している。自然災害の被害金額の精度は低い。金額以外の情報はなかなか観測されない。
- ・ 被害金額推定モデルの開発が困難である。モデルで自然災害の被害金額を算出するためには、資産の詳細な時空間分布データが必要だが、そのようなデータは入手が困難である。
- ・ 洪水・氾濫のシミュレーションの精度は、境界条件（特に標高）および外力（降水量）の精度・解像度に大きく依存する。数 m 解像度の領域データが一部の地域には存在し、全球でも 30m 解像度のデータが存在するが、エラーが多いなどの問題がある。また、河川形状のデータなどはほとんど存在していない。そういった数 m～数十 m 解像度のデータを影響評価モデルの開発者やユーザが簡単に使えるように、高解像度の境界条件データを整備することが強く求められる。

■ 自然生態系

今後の生態系変化を予測するためには、気候変動モデルならびにその計算結果のダウンスケーリングが必要になる。現状の気候変動モデルの出力は、生態系への影響やレフュージア（温暖化の影響を避けて生物が生存できる避難場所）を検討するためには粗すぎて平均的な傾向を得ることしかできない。10～100m 単位の気象パラメータの予測が必要になるが、現状では難しい。また、ダウンスケーリングに関連して、気象学や工学など物理系研究者と生物学、生態学研究者との共同観測、モデリングを含む共同研究が必要になるが、どんな観測値の予測が生物・生態系にとって重要なのかはまだ手探り状態である。同じステーションにおける学際的な研究が必要である。

これまでの研究の多くは、種レベルの分布域変化について解析したものが多く、気候変動が群集レベルや生態系の栄養段階のつながりに与える影響、さらに個体レベルにおける順化や表現型の変化、遺伝子の変異などの適応進化に与える影響については、未だよくわかっていない。

■ 農林業

気候変動が農林業に及ぼす影響評価においては、その不確実性の改善が最大の研究課題である。そのためには、将来気候の予測と農林業の応答予測の双方について、さらなる精緻化が必要である。将来気候の予測には、空間解像度が数 100 km 程度の全球気候モデルをダウンスケーリングし、予測の時空間スケールを影響研究者や行政が要求する程度に細かくする研究技術が用いられているが、その手法を改良し、より細かな時間および空間解像度のデータ提供が求められる。一方、個々の農作物、樹林、水産物の品目について応答予測モデルが開発され、影響評価に用いられているが、影響予測実験結果との検証を積み重ね、さらに精度の高いものに改善する必要がある。また、予測の対象品目もさらに拡大すべきである。例えば農作物については、水稻や果樹などは豊富な知見から比較的精度の高いモデルが開発されているが、他の農作物における研究の進展は不十分である。

■ 健康・都市生活

途上国における健康情報の収集の困難さが大きな問題である。公衆衛生インフラの整備が進んでいないことから、疾病・死亡の報告漏れも多く、また疾病の診断技術も普及が遅れていて不確実である。

■ 極地

極域観測の困難さから、氷床減少のメカニズムを理解するための基礎データが圧倒的に不足している。現在の氷床変動を推定するためには、氷床荷重に応答して変形する固体地球の動きを正確に押さえる必要がある。GIA (Glacial Isostatic Adjustment) を扱うモデルの開発と予測での利用が必要とされる。また、現在の氷床モデルには、氷床-海洋-海水の相互作用が精緻に取り込まれていない。しかし極域の海洋は海水や棚氷に覆われているため、これらの相互作用の観測が技術的に極めて難しいという側面もある。氷床変動の海洋への影響を観測するために、水中無人探査ロボットなどの技術開発が期待される。

南極大陸内陸部の表面付近では顕著な温暖化が見られない一方で⁷⁰⁾、衛星観測の結果から内陸部上空の対流圏では顕著な温暖化が進行していると考えられている⁷¹⁾。しかし、南極大陸内陸部では長期的、かつ信頼性の高い気象観測はほとんど行われておらず、上述の傾向が正しいのかもはっきりしていない。特に、上空の気温を高精度で測定することができ、なおかつ前述の重力波についても調べることができる高層気象観測は、南極大陸内陸部ではほとんど行われていない。

北極の多点観測網の構築と観測データの統合、予測モデルの開発・運用が望まれている。北極海の海水減少が引き起こす冬季中緯度の異常寒波などは、メカニズム自体は多数提唱されているものの⁷²⁾、海水面積の予測、さらにはその影響を加味した気象・気候予測に関しては、依然として発展途上である。

北極海航路上の海水予測には数値モデルそのものの精緻化とともに、観測データの充実化による初期場の改良が必須とされる。そのためには海上風予測に大きな影響を及ぼす海上/氷上ブイの展開、高層気象観測の強化などの推進が効果的である。

さらに、温暖化の影響が明瞭に出現する現在気候の下では、大気と海洋/海水を一つの系として捉えるアプローチが有効で、そのためには、諸外国の現業機関が行っているような大気-海洋-海水結合モデルによる予測が重要である。現業予報モデルをベースに作成する再解析データに関しても同様である。

[今後取り組むべき研究テーマ]

■ 水循環

2011年米国の高名な水文学者であるプリンストン大学 Eric Wood 教授らによって、Hyper Resolution Hydrology が提唱された。これは全球水文モデルの空間解像度を 30 秒 (赤道付近で約 1km、現在の標準的な解像度の 60 倍) まで高めることを提唱したものである。この解像度は、現在の個別流域を対象としたモデルの空間解像度に匹敵するため、全球モデルと地域モデルの区別がほぼなくなることを意味する。実現した際には温暖化などの地球環境研究と水質悪化などの地域環境研究、洪水氾濫などの防災研究などで共通のシミュレーションプラットフォームが利用できることになり、モデルやデータの統合が飛躍的に進むと考えられる。

■ 自然災害

自然災害の研究開発は、精緻な過去再現が可能なモデル構築が必須である。丁寧なモデル検証と、正確なメカニズム・プロセス理解に必要な継続的なモニタリングや集中的な観測がこれまでも増して求められてくる。さらに、長期間 (数世紀以上) の検証には、文献や堆

積物・生物に記録された同位体比のような代替情報が必要である。

■ 自然生態系

気候変動と生態系の応答については、平均的な温暖化傾向と生態系の変化が調査研究されてきており、いわゆる極端現象に対する検討は浅い。こうした極端現象の多くは生態系プロセス維持に影響を与える「攪乱（ディスタージ）」ととらえることができ、気候変動下における生態系の回復力（レジリエンス）や閾値を超えた変化（レジームシフト）を検討するため、気象学、工学等の物理系研究者と生物系研究者の学際的研究が必要になる。

古環境と生物の分布域の研究から予測されている局地的な冷涼環境（避難場所：レフュージア）の存在についても、細かな解像度における研究が必要である。

気候変動に対する種の応答は「個体群間で変異がない」と仮定されることが多いが、局所適応により個体群間でニッチ（適応した気候条件）が異なる場合も考えられる。進化的なプロセスを明示的に扱わない限り、気候変動に伴う生物多様性の低下リスクを過小評価する可能性が少なからずある。

温暖化による生態系の変化は、人間生活や健康に大きな影響を与える可能性もある。日本でもデング熱などの伝染病を媒介するヒトスジシマカが近年注目を集めた。こうした生態系サービスを引き起こす生物の拡大には監視を強化する必要がある。

これまで、気候変動と土地利用変化が生物相に与える影響については、別々に研究されてきたが、将来シナリオを考える上では同時に検討する必要がある。

また、自然生態系がもつ減災・防災機能を分析し、気候変動下における適応策に結び付けていくことも重要な研究開発分野といえる。

さらに、温暖化の進行や速度は生態系によって異なり、氾濫原やマングローブ林、砂漠などで速くなることが予測されている。生育・生息する生物相の移動分散能力、適応能力を評価し、必要に応じて保護区の設定（保護区の拡張・位置の見直し、保護区間の回廊の設置など）を再検討する必要がある。

■ 農林業

将来気候ダウンスケール手法の開発、将来の農業環境変動とその不確実性を評価できる気候シナリオ作成、気候変動の影響評価に必要な基盤情報の整備、現場における影響予測実験結果との検証を基盤とする、農作物、樹林、水産物の品目に対する応答予測モデルの開発と高度化などがあげられる。

■ 健康・都市生活

気候の将来予測を小さな地域でも行うために、すでにダウンスケーリング技法は開発されているものの、都市の土地利用、例えば高層ビルなどの三次元的な情報まで含めた予測技法は、まだ健康影響評価に取り入れられていない。今後進んでいくと考えられている少子高齢化など、すでにある問題も包括的に考慮して、居住形態などを含めた都市の将来像を模索するためにも、微小気候の将来予測とその影響評価への組み込みが必要と考えられる。

例えば、個人情報端末の普及により、個人の健康関連情報（心拍数など）が得られ、それを用いた遠隔からの診断も可能とする公衆衛生サービス向上のプロジェクトが、また、疾病・死亡の把握も容易にし、途上国での情報収集の漏れを減らすことになる。

■ 極地

グローバルな気候変動影響のうち最も大きな影響の一つである、海水準変動予測の不確実

性低減を目指した、モデルの改良・検証、データの蓄積が求められる。高精度の数値氷床モデルをより信頼できる条件設定で計算するために、より詳細なプロセスを考慮したモデルの高度化、地質学的手法を含めた過去の氷床変動の復元、境界条件となる気候モデルの改良が必要である。

不足している極域気候監視データの整備が必要である。自動化された無人気象観測機を南極・北極へ広域展開することにより、気候監視を行うことが可能となる。また、氷床流動に関しては、衛星観測が成果をあげつつあるが、南北両極域の観測を行う衛星観測データ検証のため、氷床流動の現場観測も求められる（GPS 測量、重力衛星、GIA モデルも必要）。

海洋では、海水や棚氷の下の海洋の情報取得が必要である。これには、近年開発が進む無人ロボット観測（温度、塩分、海底地形）の利用が有効である。さらに、精緻な気象・海水予測のため、持続可能な極域観測網の構築が必要とされる。データ同化システムや予報実験を組み合わせた数値的解析から検証する必要がある。

大気・海洋・氷床結合過程を含む予報モデル・再解析データの整備が必要である。天気予報・季節予報の精度向上は、極端気象現象のリスク回避にとって極めて有効である。例えば、北極海の氷床減少が引き起こす冬季中緯度の異常寒波などは、メカニズム自体は多数提唱されているものの、氷床面積の予測、さらにはその影響を加味した気象・気候予測に関しては、依然として発展途上である。再解析データは、その現業予報モデルをベースに改良することが出来る。そのためには、氷床生成過程や氷床・波相互作用など結合系に重要な基礎研究、海峡を通過する流れを精緻化するためのモデルの高分解能化、様々な観測データによるモデルの検証作業など、継続的な研究・開発が有効である。

北極の気象観測と予測による研究から中緯度への影響予測と評価を進展させることも求められる。特に、高緯度海洋が及ぼす北極変動、さらに中緯度の気候との関連を明らかにする必要がある。氷床面積の予測という観点でも、中緯度海洋前線起源の北向き熱輸送が重要な要因の一つであり、それに伴う大気応答も含めるとより広域の視点で北極圏を俯瞰する必要性がでてきている。

その他、温暖化により変化しつつある永久凍土分布と地温の変化傾向を知ることが必要となる。陸域生態系の変化も継続的な取り組みを要する。北極域は現在、正味の二酸化炭素吸収源になっており、世界の陸域吸収量の約 10%を占めている。しかし温暖化が北方林（タイガ）の生育に与える影響は地域によるばらつきがあり、特に降水量の増減により森林の生産量が低下する可能性がある。

（5）政策的課題

■ 水循環

研究評価におけるモデルやデータベースは世界的なデファクトスタンダードになれば論文とは比べ物にならないほど強力な国際的な影響量をもつようになる。モデルやデータベースの製品の開発を後押しする仕組みがあれば、長期的な国際的な研究競争力が生まれてくるだろう。

■ 自然災害

- ・ DIAS で行おうとしているような解析システム・データベースのプラットフォーム構築

およびその高度化は大いに求められている。

- ・ 産学官連携を推進するために、ビジネスチャンスと捉えられるような政策化が求められる。
- ・ 継続したモニタリングがモデル検証の意味から最重要である。そのような基礎的な研究の価値を高め、推奨するようなファンディングの仕組みの検討が必要である。
- ・ モデル開発者の養成が求められる。モデル構築には、現象の本質を数理的に見抜く力とそれをプログラミング言語に書き起こす才能が必要とされる。そういった適正がある若手が継続的に現れてくるような、長期的な視野を持った教育政策が求められる。

■ 自然生態系

長期の生態系変化を追うためには、固定プロットにおける長期的なモニタリング観測と、広域を網羅する調査結果の集積が要請される。前者は大学や研究機関の試験地が中心になると思われるが、後者については各省庁や都道府県が行う生物調査を利用できるようにデータベース化することが求められる。

■ 農林業

国際的にはパリ協定が、日本では「気候変動の影響への適応計画」および「地球温暖化対策計画」に基づく各省庁の対策が図られることとなっている。しかし、成果の社会への発信について、各省庁で独自の取り組みが進められており、ユーザの利便性の観点から、効果的な連携を図ることが求められる。

■ 健康・都市生活

日本に大きな影響を及ぼすであろう熱関連死亡に関しては、緊急避難的対応とはいえ、対策のために空調を用いる必要があり、これは温室効果ガス排出を増加させる。一方、停電などによって、暑さがそれほど極端でなくとも死亡数が増加することも報告されており、台風や地震での停電なども容易に想定される日本においては特に、小地域レベルでの再生可能エネルギーによる空調を備えたシェルターなどを整備することが求められる。

熱関連死亡以外の影響は、主に途上国の小児に大きな影響を及ぼすものであるが、2014年の代々木公園でのデング熱流行に示されるように、社会・経済的な影響は先進国でも大きい。

気候変動による健康影響は、新たに生じたものではなく、もともと存在した問題の重要性が変化したものととらえるべきである。よって、国際協力・援助に関しても、そのような動向の変化を踏まえた上で優先順位を決定する必要が生じている。

■ 極地

アジア諸国の極域研究の協力を探る AFoPS (Asian Forum of Polar Science) の活動が行われているが、その中での主導的な役割を担い、日本の国際的な位置を高めていくことが望まれる。

北極からの気象影響による日本を含む中緯度域の近年の寒冬の頻度の増加は、温暖化の過程で起きる現象だと示唆されている。この結果は、政策決定に資する情報を与える。これは世界気象機関 (WMO) などの国際機関からの要請もあり、研究者だけでなく、いずれは国際的な現業機関の活動構築にもつながる動きの中で日本の参加が望まれている。

北極の大気中への物質輸送の影響とリスク評価は、アジアなどの国の対応が求められている。日本としても北極に輸送されるブラックカーボン (BC) の排出・輸送量を見積もること

でこれに貢献することが期待されている。これら北極の気候変化の研究とその影響評価は、2015年10月に発表された「我が国の北極政策」で掲げている、科学技術をもって北極の継続的な発展に寄与すること、それを通して日本の貢献を高め国際的な役割を担うという目標を実現するものである。

（6）キーワード

リスク情報、領域地球システムモデル、社会シナリオ、不確実性、農林業、食料、影響評価、熱関連死亡、下痢性疾患、マラリア、デング熱、洪水、IPCC、WHO、地球温暖化、南極オゾンホール、南半球環状モード、氷床、棚氷、低層水、海氷、北極航路、観測網、自動観測、結合モデル、人間活動を含む全球水文モデル、国際モデル相互比較プロジェクト、超高解像度モデル、生物多様性、生態系サービス、生物間相互作用、物質循環、海洋の酸性化、温暖化適応策

（7）国際比較表

■ 水循環（水文モデル）

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	△	↘	● 現象・過程の理解や水循環・水資源の基本概念の提唱、全球スケールの基礎データの構築という点において、日本の貢献はゼロではないが、大きいとはいえない。純粋な基礎研究も盛んとは言い難い。
	応用研究・開発	○	→	● モデル開発やシミュレーション分析において、少数の優れた研究者が世界的にも光る研究を展開している。
米国	基礎研究	◎	→	● 衛星情報を利用した全球スケールの基本データの構築などで圧倒的な力を持ち続けている（航空宇宙局（NASA）の衛星重力ミッションGRACE、打ち上げ予定の表層水・海洋ミッションSWAT ⁷³ など）。
	応用研究・開発	○	↑	● 全球水文モデルは観測による検証が難しいため、検証を重んじる米国では長らく敬遠されてきたが、ここ最近 Energy Water Nexus への関心の高まりにより、パシフィックノースウェスト国立研究所（PNNL）などが急ピッチでモデル開発などを進めている。
欧州	基礎研究	◎	→	● ウォーターフットプリントなどの新しい基本概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。また灌漑農地分布地図など、独創性と重要性の高いデータを収集・公開するなど分野全体をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↑	● 人間活動を含む全球水文モデルが複数、精力的に開発されている。若く才能のある人材も引き続きこの分野に流入している。
中国	基礎研究	△	→	● 少なくともこれまでは全球スケールの水文研究に大きな関心を持っていないようである。
	応用研究・開発	○	→	● 同上。ただし、モデル分野には優れた研究者が多く、予算が付けば大きく飛躍するポテンシャルは秘めている。
韓国	基礎研究	△	→	● 全球スケールのモデルにほとんど関心を持っていないように見受けられる。
	応用研究・開発	△	→	● 同上。

■ 自然災害

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	○	↓	● EU、米国と肩を並べ、世界レベルの研究を行っている。しかし、気候モデル開発や影響評価モデル開発（特により基礎となるモデルの各素過程；降水過程や地表面過程等）への支援が課題とされ、若手がモデル開発者になりにくい。
	応用研究・開発	○	→	● 基礎研究（素過程研究）と比して、より応用と考えられる影響評価研究（例：気候変動によって洪水被害は増加するの）には着目されやすい状況となっている。ただし各国に比べると人的・財政的な制約は大きく、限られた計算機資源を集中投下した大量のアンサンブル実験など、効率的な投資が機能することで、なんとか EU・米国と比較可能となっている。水災害・水資源の分野では日本が世界をリードする状況にある。工学系分野の寄与が比較的大きい。
米国	基礎研究	◎	→	● IPCC と同様の間隔で、米国版の IPCC 報告書とも呼べる National Climate Assessment を出版している。特に上向きではないが、高い水準のレベルを保っている。
	応用研究・開発	◎	→	● 気候変動に関する影響評価は、各州レベルでの研究推進が多い。例えばカリフォルニアだと California Energy Committee がファンディングを行っている。
欧州	基礎研究	◎	→	● FP7、JPI Climate, Horizon2020 の取り組みにより、EU 全体でのモデル開発（一部統合）が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	● 特に Belmont Forum による CRA（共同研究活動）に顕著に表れているが、影響評価研究においては、非研究者のステークホルダーも巻き込んだ形で行うことが開始されてきている。
中国	基礎研究	○	↑	● 第 13 次 5 ヶ年計画において高解像度地球観測計画が採択されるなど、年を追うごとに重点化が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↑	● 同様に、影響評価などの応用研究にも引き続き FYP13（第 13 次 5 ヶ年計画；2016-2020）で取り上げられている。国家的な気候変動問題への取り組み状況が上向きであることは間違いない。
韓国	基礎研究	△	→	● 国家レベルでの取り組みはあまり行われていない。KIAPS（韓国大気予報システム研究所）や KMA（韓国気象庁）において、部門ごとに独自の取り組みがある程度。
	応用研究・開発	△	→	● 国家レベルでの取り組みはあまり行われていない。KIAPS（韓国大気予報システム研究所）や KMA（韓国気象庁）において、部門ごとに独自の取り組みがある程度。

■ 自然生態系

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	△	↑	● 大学や研究機関が抱える試験地において、長期的に生態系をモニタリングする基盤が、人的にも財政的に脆弱である。 ● 各地で実施された調査結果がデータベースとして蓄積されておらず、広域の解析を難しくしている。 ● JaLTER などを中心に競争的資金を繋げながら、生態系モニタリングを実施している。
	応用研究・開発	○	↑	● 2015 年温暖化適応策を閣議決定するなど、土地利用も含めた具体的検討がなされた。 ● 気候変動リスク情報創生プログラム（文部科学省）や環境省環境研究総合推進費など、大型予算を使ったプロジェクトが開始されている。
米国	基礎研究	◎	↑	● NEON や LTER など、温暖化と生態系の応答を長期的にモニタリングする財政基盤が確立しており、様々な生態系を代表する試験地の設定がなされている。 ● データベースやモデリングでも世界をリードし、その内容はインターネットを通じて公開されている。

	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 国家気候変動適応戦略支援行動提言（2010）がなされているが、省庁によって具体性には差がある。 ● 温暖化に伴う沿岸域の海面上昇による高潮災害や洪水災害の防止について、生態系を活用した適応策が検討されている。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 歴史の長い欧州、特に英国では、長期モニタリング結果が蓄積されており、様々な分類群に対して解析が実施され、温暖化による生態系の変化を明らかにしている。 ● Birds Directive、Habitats Directive（Natura 2000）や LIFE プログラムの実施など、生物多様性とそのネットワークが形成されており、データベース化されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● LIFE 気候行動プログラムなど、財政基盤のしっかりした大型のプロジェクトが EU 全体で実施され、気候変動対策が具体的に議論されている。 ● 温暖化対策としての生態系を活用した防災・減災機能（Eco-DRR）の活用は早くから検討されており、デンマークでは、すべての自治体においてグリーンインフラをツールとした気候変動適応計画を策定することを義務付けている。 ● 温暖化を見据えた自然再生事業や保護区の見直しなどが行われている。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 経済発展に投資が集中しており、気候変動に伴う生態系への評価についての研究事例は欧米に比べ少ない。 ● 一方で、経済発展とともに観測基盤は徐々に整備されつつある。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 自国の経済発展が第一であり、地球規模での気候変動への緩和策とともに適応策についても対応が遅れている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 国際誌に発表された研究事例も少なく、日本同様、その観測基盤も弱い。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 国レベルでは気候変動に対する適応マスタープランが制定されているが、研究レベルのアクティビティは低い。

■ 農林業

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"> ● 影響評価について、コメや果樹をはじめ、多くの品目で定量的な評価が行われている。 ● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている（Tier：排出量（吸収量）算定方法の複雑さ）。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 2015 年に「農林水産省気候変動適応計画」が策定され、農林水の各分野で適応技術の開発が進められている。 ● 水田、農地土壌炭素、畜産廃棄物管理、森林について緩和技術が開発され、政府の削減目標に盛り込まれている。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 主要作物（トウモロコシ、ダイズ、コムギ）について、定量的な影響評価が行われている⁷⁴⁾。 ● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている⁷⁵⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 2014 年に農務省より「気候変動適応計画」が策定されている。しかし、技術的な内容に乏しい⁷⁶⁾。 ● 農業分野の排出源について幅広く緩和技術が開発され、コスト評価も行われている⁷⁷⁾。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● コムギについて、定量的な影響評価が行われている⁷⁸⁾。 ● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 適応策に関する EU プラットフォームが整備され、各国の施策と技術に関する情報を集積・発信している⁷⁹⁾。また、英国で 2010 年に「気候変動適応計画」が策定されたのをはじめ、各国で施策と技術の展開が進められている。 ● 農業分野の排出源について幅広く緩和技術が開発され、コスト評価も行われている⁸⁰⁾。

中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 主要作物（トウモロコシ、ダイズ、コムギ）について、定量的な影響評価が行われている（日本との共同研究成果⁸¹⁾。 ● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、基礎研究は見られるが、国全体での評価は比較的単純である。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 農林業を対象とした適応技術に関する成果の発信に乏しい。 ● 緩和技術に関する基礎研究は見られるが、実用に近いものは見当たらない。
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 影響評価や温室効果ガス排出に関する研究成果に乏しい。 ● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、基礎研究は見られるが、国全体での評価は比較的単純である。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 2009年に政府の「気候変動適応計画」が策定されているが、技術的な情報発信に乏しい。 ● 緩和技術に関する基礎研究は見られるが、実用に近いものは見当たらない。

■ 健康・都市生活

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	◎	↑	● 熱関連死亡の全球定量化、ダウンスケーリング、シナリオ開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 全球気候モデル、都市への精緻化、新たな健康影響予測（例えば河川洪水）が行われている。 ● 広い影響の全球予測や欧州の予測を援助している。
米国	基礎研究	◎	↑	● これまで考慮できなかった森林火災などの影響定量化手法などを開発している（University of Washington, Columbia University, University of California at San Diego, University of Michigan）。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● Our Changing Planet 2016⁸²⁾ を発表している。 ● 全球包括的なWHO報告では貢献が大きい。
欧州	基礎研究	◎	↑	● 新たな統計モデルの開発で世界をリードしている。（Gasparrini A, Rocklov Jなど、Umea University, University of Heidelberg）
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● IMPRESSIONSプロジェクトが実施されている。 ● 横ばいというよりは高いレベルで安定している。 ● 英国はUK Living with Environmental Change⁸³⁾ を発表している。
中国	基礎研究	△	→	● 欧米などからの知見を利用し、感染症では独自の研究を行っている。（Center on Climate Change and Health at Shandong University）
	応用研究・開発	○	↑	● 既存の手法を用いた活発な将来予測の論文発表を行っている。
韓国	基礎研究	○	↑	● 世界的なネットワークの中で一定の役割を担っている。
	応用研究・開発	○	↑	● 将来予測がやや遅れていたが急速に発展している。

■ 極地

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"> ● 南極：(1)東南極氷床頂上部のドームふじ基地でアイスコア掘削を実施。解析されたデータは100万年スケールの気候変動の議論に不可欠なデータの一つ。(2)南極内陸の観測データが限られる中で、ドームふじ基地の大気・降雪の越冬観測データは国際的に提供されている。今後の越冬観測再開に対して国際的に支持されている。(3)大型大気レーダPANSYによって、南極ではじめて高度100kmまでの風の観測に成功⁸⁴⁾。(4)世界に先駆けて南極で無人飛行機(UAV)の利用を開始。

				<p>2014年には高度 23km からの大気採取・帰還に成功。高度の世界記録。気象、生物調査等、無人飛行機 (UAV) の利用は強く期待されている⁸⁵⁾⁸⁶⁾。(5)温室効果気体の高精度観測を実施。昭和基地は IPCC などでも必ず参照されるデータ⁸⁷⁾。(6)ペンギンなどに取り付けてデータを採取するバイオロギングデータロガーを開発。動物の生態解明に不可欠な機器として世界中で利用。(7)東南極の広域無人気象観測の実施。南極氷床の気候動態をモニターする観測網。</p> <ul style="list-style-type: none"> ●北極：(7)日本が維持するスバルバル・ニーオルスン基地における長期の温室効果ガスモニタリング、雲および放射観測の実績。(8)北極の影響を考慮した中緯度の気象予測システムの向上⁸⁸⁾⁸⁹⁾。(9)北極海における海洋物理観測と海洋生態系変化、特に海洋酸性化に関する成果が認められている。(10)氷河観測、陸上生態に対する調査研究活動でも機動力を生かした調査が展開されている。 ●(11)両極においてオープンデータなどデータの流れを生み出す活動を増加。(12)両極に対し、氷床コア解析と合わせた気候モデル研究も国際的評価が高い。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●(1) AUV (無人水中探査) の活用など新しい技術を検討。(2)アイスコア掘削技術は欧米をはじめ世界に参照されている。(3)PANSY ではエネルギー効率のよいアンテナシステムを開発。(4)極地研が共同開発した無人飛行機 (UAV) は、原発事故や災害地など、危険地帯での空撮などに活用されている。南極観測を含めて更なる発展に期待⁹⁰⁾⁹¹⁾。(4)バイオロギングシステムは、様々なデータ収集に応用可能⁹²⁾⁹⁵⁾。(5)極域観測を行う地球観測衛星開発および打ち上げ技術。衛星センサの小型化による地上観測、移動観測、寒冷地防災への利用、(6)船舶に搭載できる小型サーバーシステム (VENUS) は、データ流通を送信し、多方面のデータ配信の応用性をもつ⁹⁶⁾。(7)北極気象データ同化、中緯度の気象予測の改良、安全船舶航行のための航路・気象情報提供。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●気候変動研究への成果とプロジェクト推進を行う。(1)グリーンランド氷床、南極氷床は衛星や航空機を使った観測を展開している。(2)南極点基地で 50 年以上に亘る気象データを観測。人工衛星による 30 年以上の大気・地表面のデータベースを公開。無人気象観測装置を氷床上に広域に配置⁹⁷⁾。(3)南極域の気温変化・南極氷床の氷の量の増減・海水量変化のモニター、天気予報、気候再解析データのために不可欠な基盤を形成。(4)北極沿岸域での観測網を整備。(5)公開性の高い気象数値モデル (WRF) の国際共同開発・利用を推進。これにより、高緯度域の天気予報。南極氷床の氷の増減を評価するための新しいデータベースを構築。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●北極評議会の影響を越えた、国際活動における主導的立場を目指す。北極に関しては、自然科学から安全・安心、先住民、コミュニティー支援を強化中。カナダとともに先住民との関わりを重点に入れる。(1)アラスカ沿岸の海水レーダネットワーク (機器は日本製)。(2)氷海・気象予測、航海支援情報の提供システム構築。(3)人工衛星センサ技術の軍から民用移転 (DMSP 衛星など)。(4)C130 など航空輸送の軍の強力な活動。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●北極では、EU プロジェクトによる研究遂行・ネットワーク化を高めている (DAMOCLES, ACCESS, ICEARC, HORIZON2020, EU PolarNet)。(2)ノルウェーは国際活動の調整・総合化を目指す。複数の拠点があり、それぞれ特色のある研究を進めている。(3)ドイツはアルフレッドウェーゲーナー極地海洋研究所 (AWI) を中心に進んだ科学力、航空機船舶の機動力の背景がある、また国際的に主導的な活動を行う人材、ネットワークをもつ。(4)デンマークはグリーンランド氷床掘削研究を主導。(5)フィンランド、英国などの活動。(6)スイスは南極研究を開始。グリーンランド氷床でも長期の活動を維持。 ●南極：(7)東南極内陸の観測点として、ロシアのポストーク基地、イタリア・フランスのドーム C 基地、ドイツのコーネン基地 (および中国のドーム A 基地) がある。特にドーム C では 2005 年から高層気象ゾンデ観測を開始し、米国の南極点とともに氷床上の対流圏・成層圏の大気構造を直接観測する唯 2 つの観測点。(8)ドイツは観測用航空機を所有し、2006/07 には日独共同航空機観測を実施。(9)英国はオゾンホール命名など突出した成果を出してきた国。最近、ハレー基地・ウェッデル海域において大気物質の輸送を無人飛行機観測で研究。 ●(10)ロシアでは北極沿岸部の気象観測と海水観測、内陸域での凍土観測が行われている。米国、スウェーデンと共同観測を行っている北極海沿岸での海底永久凍土からのメタン放出の観測は貴重な成果をあげている⁹⁸⁾。航空機による大気観測も積極的。南極に関しては内陸観測点での気象観測維持の活動がある。

欧州	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●(1)EU プロジェクトには社会経済的要素が盛り込まれており、経済影響、経済の指導を含む活動がある。北極変動の影響評価を行い、活動モデルの検討も行う。(2)アイスランドは経済活動を通じた北極圏でのインフラ整備支援を行っている。(3)ノルウェー・スウェーデンでは高層大気観測レーダを整備。(4)英国は自動海中探査 (AUV) の開発を行う。(5)フィンランドは、砕氷船建造技術および航行支援、遠隔地域情報ネットワーク技術の構築、小型衛星開発、衛星検証サイトを提供。(6)南極では、2001年より東南極航空網 (DROMLAN) を開設 (ロシア、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、インド、ベルギーなどが利用)。日本もメンバー。南極への人・物資の輸送に不可欠のインフラとなっている。(6)ロシアの沿岸気象観測点設置、また海氷域の砕氷船の実績、漂流観測ステーションの建造計画は注目される。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●(1)観測活動は北極においては拡大、南極では維持されている。(2)アイスランドにも超高層観測施設整備。(3)南極では、東南極内陸にドーム A 基地を開設。観測成果はいまだ少ないが、フランス・イタリアとの共同研究によって、少しずつ現れている。日本との研究者の交流は友好的。(4)両極域の研究とチベット高原やヒマラヤなどの高山域を組み合わせた研究の提案に意欲をもつ。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●(1)北極においては、航路、漁場開発、産業政治への関連を強める活動がある。国家としての方向性、資金力をもとに活動を強化、外交や産業へも波及している。(2)砕氷船の整備も実施 (砕氷船建造は海外発注)。(3)小型衛星を開発。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●(1)北極では、国家方針として研究と経済、政策への関わりをもつ。(2)北極では陸上生態、海洋調査、メタンハイドレート、中緯度への気象影響、(3)南極では、新基地建設、アジア多国間の連携強化に力を入れる。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●(1)海上交通、造船など産業化へ注力により、国際的に有利な立場を築く活動がある。(2)砕氷船造船の実績をあげつつある。(3)南極では、米国との共同に力を入れており、数値モデリング、無人気象観測装置 (AWS) の展開をしつつある。(4)北極の影響を考慮した、中緯度の気象予測を改良。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

(8) 参考文献 (●は全体的に参考とした文献)

- 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野 (2015年)

<http://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2015-FR-02.html>

- 日本における気候変動による影響に関する評価報告書。中央環境審議会 地球環境部会 気候変動影響評価等小委員会, 2015.

- 1) Hales S et al. Eds, 2014: Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. World Health Organization, Geneva,
- 2) Alcamo, J., P. Döll, F. Kaspar, and S. Siebert (1997), Global change and global scenarios of water use and availability: An Application of WaterGAP1.0 *Rep.*, 47 pp, Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel, Germany, Kassel, Germany.
- 3) Döll, P., and S. Siebert (2002), Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resour. Res.*, 38(4), 1037, doi: 10.1029/2001WR000355.

- 4) Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch, and S. Siebert (2003), Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrolog. Sci. J.*, 48(3), 317-337, doi: 10.1623/hysj.48.3.317.45290.
- 5) Hanasaki, N., S. Kanae, and T. Oki (2006), A reservoir operation scheme for global river routing models, *J. Hydrol.*, 327(1-2), 22-41, doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.11.011.
- 6) Haddeland, I., T. Skaugen, and D. P. Lettenmaier (2006), Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes, *Geophys. Res. Lett.*, 33(8), doi: L08406, doi:10.1029/2006GL026047.
- 7) Hanasaki, N., S. Kanae, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, N. Shirakawa, Y. Shen, and K. Tanaka (2008), An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12(4), 1007-1025, doi: doi:10.5194/hess-12-1007-2008.
- 8) Rost, S., D. Gerten, A. Bondeau, W. Lucht, J. Rohwer, and S. Schaphoff (2008), Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resour. Res.*, 44, W09405, doi: doi:10.1029/2007WR006331.
- 9) Wada, Y., L. P. H. van Beek, C. M. van Kempen, J. W. T. M. Reckman, S. Vasak, and M. F. P. Bierkens (2010), Global depletion of groundwater resources, *Geophys. Res. Lett.*, 37(20), L20402, doi: 10.1029/2010GL044571
- 10) Parmesan, C., Yohe, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37-42, 2003.
- 11) Buckley, L.B., Urban, M.C., Angilletta, M.J., Crozier, L.G., Rissler, L.J. & Sears, M.W. Can mechanism inform species' distribution models? *Ecol. Lett.*, 13, 1041-1054, 2010.
- 12) 横沢正幸、飯島仁之直、岡田将誌, 気候変化が日本におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価, *地球環境*, 14, 199-206 (2009)
- 13) 農業環境技術研究所, 2016: 主要研究成果, 気候変動が日本のコメ生産に及ぼす影響の予測, http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_09.pdf
- 14) Okada M., Iizumi T., Hayashi Y., and Yokozawa M, Projecting climate change impacts both on rice quality and yield in Japan, *Journal of Agricultural Meteorology*, 67, 285-295 (2011)
- 15) 農業環境技術研究所, 2013: プレスリリース, 高 CO₂ 濃度によるコメの増収効果は高温条件下で低下—気候の違う 2 地点の FACE (開放系大気二酸化炭素増加) 実験により確認—, <http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/130307/press130307.html>
- 16) Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Zhu C, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Wakatsuki H, Katayanagi N, Matsunami T, Kaneta Y, Sato T, Takakai F, Sameshima R, Okada M, Mae T, Makino A (2013) Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan. *Functional Plant Biology* 148, 148-159.
- 17) 杉浦俊彦・杉浦裕義・阪本大輔・朝倉利員: 果樹の生育変化と異常: *地球環境*, 17, 75-81 (2012).
- 18) 農研機構果樹研究所, 2013: プレスリリース, 地球温暖化でリンゴの味が変化している, http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/fruit/048269.html
- 19) Sugiura T, Ogawa H, Fukuda N, Moriguchi T: Changes in the taste and textural attributes of apples in response to climate change: *Scientific Reports* 3, 2418 (2013).
- 20) 高田良三, 山崎信, 杉浦俊彦, 横沢正幸, 大塚誠, 村上斉, 2008: 地球温暖化が肥育豚の飼養

- 成績に及ぼす影響—「気候温暖化メッシュデータ (日本)」によるその将来予測. 日本畜産学会報, 79, 59-65.
- 21) 山崎信, 村上斉, 中島一喜, 阿部啓之, 杉浦俊彦, 横沢正幸, 栗原光規, 2006: 平均気温の変動から推定した日本の鶏肉生産に対する地球温暖化の影響. 日本畜産学会報, 77, 231-235.
 - 22) Yamamura K, Yokozawa M, Nishimori M, Ueda Y, Yokosuka T, 2006: How to analyze long-term insect population dynamics under climate change: 50-year data of three insect pests in paddy fields. *Popul Ecol* 48:31-48
 - 23) Shigenaga H, Matsumoto Y, Taoda H, Takahashi M., 2005: The Potential Effect of Climate Change on the Transpiration of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Plantations in Japan. *農業気象* 60 (5): 451-456.
 - 24) Nakao K., Matsui T, Horikawa M, Tsuyama I, Tanaka N, 2011: Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan. *Plant Ecology*, Vol.212, Issue 2, 229-243.
 - 25) 尾崎研一・上田明良・澤野真治, 2014: 北海道における地球温暖化によるヤツバキクイムシの世代数変化予測, *森林防疫*, 63:142-150.
 - 26) 松本光朗, 2015: 森林分野の CO₂ 吸排出量の将来予測と緩和策, 研究成果発表会講演集「地球温暖化の中で森林を活かす」, 3-6
http://ccaff.dc.affrc.go.jp/conference2014/images/seika20141111_forest.pdf
 - 27) Kishi MJ, Kaeriyama M, Ueno H, Kamezawa Y, 2010: The effect of climate change on the growth of Japanese chum salmon (*Oncorhynchus keta*) using a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model (NEMURO). *Deep-Sea Research II*, 57: 1257-1265.
 - 28) Kaeriyama M, Seo H, Qin Y.: 2014: Effect of global warming on the life history and population dynamics of Japanese chum salmon. *Fish Sci* 80: 251-260.
 - 29) Tian Y, Kidokoro H, Watanabe T, Igeta Y, Sakaji H, Ino S., 2012: Response of yellowtail, *Seriola quinqueradiata*, a key large predatory fish in the Japan Sea, to sea water temperature over the last century and potential effects of global warming. *Journal of Marine Systems* 91: 1-10.
 - 30) Kishi MJ, Nakajima K, Fujii M, Hashioka T., 2009: Environmental factors which affect growth of Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, analyzed by a bioenergetics model coupled with a lower trophic ecosystem model. *Journal of Marine Systems* 78: 278-287.
 - 31) Ito S, Rose KA, Miller AJ, Drinkwater K, Brander K, Overland JE, Sundby S, Curchitser E, Hurrell JW, Yamanaka Y., *Ocean ecosystem responses to future global change scenarios: a way forward. MARINE ECOSYSTEMS AND GLOBAL CHANGE*, Oxford University Press.
 - 32) Okunishi T, Ito S, Hashioka T, Sakamoto T, Yoshie N, Sumata H, Yara Y, Okada N, Yamanaka Y, 2012: Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the Western North Pacific. *Climatic Change* 115: 485-503.
 - 33) 桑原久実・明田定満・小林 聡・竹下 彰・山下 洋・城戸勝利, 2006: 温暖化による日本水産生物の分布域の変化予測. *地球環境*, 1, 49-57.
 - 34) 水産総合研究センター, 2009: 地球温暖化とさかな, 成山堂書店, 216 pp.

- 35) 水産総合研究センター, 2014: 水産資源ならびに生息環境における地球温暖化の影響とその予測, <https://www.fra.affrc.go.jp/kseika/ondanka/siryoy1.pdf>
- 36) Momiyama M, Kagami M, Sato T. A medico-geographical analysis of cerebrovascular disease in Tohoku district, Japan. *Geogr Med.* 1988;18:9-26
- 37) McMichael A et al., 2004: Climate change. Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease due to Selected Major Risk Factors, Vol. 2, M. Ezze-ti, A. Lopez, A. Rodgers and C. Murray, Eds., World Health Organization, Geneva, 1543-1649.
- 38) Chubachi, S., Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983, *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Jpn. Spec. Issue*, 34, 13-20, 1984.
- 39) Farman, J. C., B. G. Gardiner, and J. D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction, *Nature*, 315, 207-210, 1985.
- 40) Stocker, T. F., et al., IPCC 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2013.
- 41) US Department of Energy, (USDOE) The Water Energy Tech Team:
<http://energy.gov/under-secretary-science-and-energy/water-energy-tech-team>
- 42) d4PDF <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>
- 43) 創生プログラムテーマD平成27年度研究成果報告書
- 44) CESM1(CAM5) LARGE ENSEMBLE COMMUNITY PROJECT DIAGNOSTICS
<http://www.cesm.ucar.edu/experiments/cesm1.1/LE/>
- 45) 創生プログラムテーマA平成27年度研究成果報告書
- 46) 国土交通省 水管理・国土保全局、浸水想定(洪水、内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法
http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/shinsuisoutei_honnbun_1507.pdf
- 47) Fujibe, F., N. Yamazaki and K. Kobayashi: Long-term changes of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901-2004), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol.84, No.6, pp.1033-1046, 2006.
- 48) 平成28年度「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム」新規公募の審査結果について
http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1369487.htm
- 49) European Flood Awareness System (EFAS) <https://www.efas.eu/>
- 50) NOAA / NWS Hydrologic Ensemble Forecasting
<http://www.nws.noaa.gov/oh/XEFS/index.html>
- 51) 佐藤 雄亮・芳村 圭・金 炯俊・沖 大幹、早魃の将来変化に対する水資源管理の効果に関する研究、*土木学会論文集B1(水工学)*, 71(4), I_391-I_396, 2015.
- 52) 農業環境技術研究所, 2014: 主要成果, 作物気象データベース『MeteoCrop DB』改訂版-最新データの提供でイネの生育診断や高温対策への利用が可能に-,
http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result30/result30_24.html
- 53) 農研機構中央農業総合研究センター, 2015: 成果情報, 1km メッシュの農業気象データを全国について作成・配信するシステム,
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2015/15_066.html
- 54) 農研機構農村工字研究所, 2015: 成果情報, 気候変動が農業水利用や水資源に与える影響の全国評価マップ, http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2015/15_069.html

- 55) 農業環境技術研究所, 2016: 主要成果, 大気 CO₂濃度の上昇はコメの品質を低下させるが高温耐性品種ではその影響が小さい,
http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_28.pdf
- 56) 農業環境技術研究所, 2016: 主要成果, 多収品種タカナリの高 CO₂濃度環境における子実の成長特性 ~高 CO₂濃度で増収に寄与する一要因~,
http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_30.pdf
- 57) 農業環境技術研究所・海洋研究開発機構, 2014: プレスリリース, エルニーニョ/ラニーニャと世界の主要穀物の生産変動との関係性を解明,
<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/140515/>
- 58) 農業環境技術研究所, 2016: プレスリリース, 過去 30 年間に穀物収量が不安定化した地域と気候要因の寄与を明らかに, <http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/160328/>
- 59) 農業環境技術研究所, 2015: プレスリリース, 農地からの温室効果ガス削減効果を計算するウェブサイト—土壌炭素量の増減と温室効果ガス発生量を総合評価—,
<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/150220/>
- 60) 森林総合研究所, 2015: 研究成果選集, 将来予測からみた森林分野の地球温暖化緩和策—木材利用が重要—, <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/2015/documents/p38-39.pdf>
- 61) Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter, Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature* 500, 190–193, doi:10.1038/nature12374, 2013.
- 62) Kawamura, K. F. Parrenin, L. Lisiecki, R. Uemura, F. Vimeux, J. P. Severinghaus, M. A. Hutterli, T. Nakazawa, S. Aoki, J. Jouzel, M. E. Raymo, K. Matsumoto, H. Nakata, H. Motoyama, S. Fujita, K. Goto-Azuma, Y. Fujii and O. Watanabe., Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature* 448, 912–916, 2007.
- 63) [プレスリリース] ユーラシア大陸中緯度域で頻発している寒冬の要因分析 ~北極海の海氷の減少により寒冬になる確率は2倍~ : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20141027.html>, 2014.
- 64) [プレスリリース] 船舶を利用した北極海上でのブラックカーボン粒子の高精度測定に世界で初めて成功 —北極から全球へ、気候変動予測の精緻化に貢献— :
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20160220.html>, 2016.
- 65) Anderegg, W. R.L. and Diffenbaugh, N.S. Observed and projected climate trends and hotspots across the National Ecological Observatory Network regions. *Front. Ecol. Environ.* 13, 547–552, 2015
- 66) WMO, 2016, WWRP Polar Prediction Project, Implementation Plan for the Year of Polar Prediction (YOPP), WWRP/PPP No. 4 – 2016,
https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/FINAL_WWRP_PPP_YOPP_Plan_28_July_web.pdf, 2016.
- 67) Yamazaki, A., J. Inoue, K. Dethloff, M. Maturilli, and G. König-Langlo, Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation. *J. Geophys. Res.* 120, 3249–3273, 2015.
- 68) Inoue, J., A. Yamazaki, J. Ono, K. Dethloff, M. Maturilli, R. Neuber, P. Edwards and H. Yamaguchi, Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route, *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep16868, 2015.

- 69) Ono, J., J. Inoue, A. Yamazaki, K. Dethloff and H. Yamaguchi, The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(1), 292-303, 2016.
- 70) Steig, E. J., et al., Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year, *Nature*, 457, 459-463, 2009.
- 71) Turner, J., T. A. Lachlan-Cope, S. R. Colwell, G. J. Marshall, and W. M. Connolley, Significant warming of the Antarctic winter troposphere, *Science*, 311, 1914– 1917, doi:10.1126/science.1121652, 2006.
- 72) [プレスリリース] 北アメリカの厳冬を引き起こす新たな要因の解明 ～夏季北太平洋亜熱帯からの大気のテレコネクションの影響～ : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150922.html>, 2015.
- 73) Soil Water Assessment Tool (SWAT) <http://swat.tamu.edu/>
- 74) Hatfield, J.L., K.J. Boote, B.A. Kimball, L.H. Ziska, R.C. Izaurralde, D. Ort, A.M. Thomson, and D. Wolfe, 2011: Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351-370.
- 75) US EPS, 2016: Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2014, http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php
- 76) USDA, 2014: 2014 USDA Climate Change Adaptation Plan, http://www.usda.gov/oce/climate_change/adaptation/adaptation_plan.htm
- 77) ICF International and USDA, 2013: Greenhouse Gas Mitigation Options and Costs for Agricultural Land and Animal Production within the United States, http://www.usda.gov/oce/climate_change/mitigation_technologies/GHG_Mitigation_Options.pdf
- 78) Iglesias, A., L. Garrote, S. Quiroga, and M. Moneo, 2012: A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. *Climatic Change*, 112(1), 29-46.
- 79) European Commission and European Environment Agency: The European Climate Adaptation Platform (CLIMATE-ADAPT), <http://climate-adapt.eea.europa.eu/about>
- 80) Pérez Domínguez, I., T. Fellmann, F. Weiss, P. Witzke, J. Barreiro-Hurlé, M. Himics, T. Jansson, G. Salputra, A. Leip (2016): An economic assessment of GHG mitigation policy options for EU agriculture (EcAMPA 2). JRC Science for Policy Report, EUR 27973 EN, 10.2791/843461
- 81) Tao, F., Z. Zhang, and M. Yokozawa, 2011: Dangerous levels of climate change for agricultural production in China. *Regional Environmental Change*, 11(Suppl. 1), S41–S48, doi:10.1007/s10113-010-0159-8.
- 82) Our Changing Planet 2016, USGCRP Climate & Health Assessment <http://www.globalchange.gov/health-assessment>
- 83) UK Living with Environmental Change <http://www.nerc.ac.uk/research/partnerships/lwec/>
- 84) [プレスリリース] 南極最大の気象レーダー「PANSY レーダー」が可能にする南極気象の精密

- 研究 : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150410.html>, 2015.
- 85) Funaki M., S. Higashino, S. Sakanaka, N. Iwata, N. Nakamura, N. Hirasawa, N. Obara and M. Kuwabara, Small unmanned aerial vehicles for Antarctic research: Results of aeromagnetic surveys in the South Shetland Islands, Antarctica, *Polar Science*, 8, 324-356, 2014. doi:10.1016/j.polar.2014.07.001
- 86) Higashino, S., M. Funaki, N. Hirasawa, M. Hayashi, and S. Nagasaki, Development and Operational Experiences of UAVs for Scientific Research in Antarctica, “Autonomous Control Systems and Vehicles” (Nonami, K.; Kartidjo, M.; Yoon, K.-J.; Budiyo, A. (Eds.), 315 p.), *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering Volume 65*, 159-173(Chapter 11), Springer, 2013.
- 87) [国立極地研究所プレスリリース] 昭和基地の大気中 CO₂ 濃度が 400ppm を突破 : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20160712.html>, 2016.
- 88) [プレスリリース] 観測コストを考慮した北極海上の最適観測頻度を実証—北極海航路の気象・海氷予測の高精度化に貢献— : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20151120.html>, 2015.
- 89) [プレスリリース] 北極の観測で猛烈な北極低気圧を予測—北極海航路上の安全航行に向けた予報精度の向上 : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150428.html>, 2016
- 90) Higashino, S., M. Hayashi, S. Nagasaki, S. Umemoto, and M. Nishimura, A Balloon-Assisted Gliding UAV for Aerosol Observation in Antarctica, *Transactions of JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol.12, No.APISAT-2013, pp.35-41, 2014.
- 91) [国立極地研究所プレスリリース] 無人観測航空機、高度 22km の南極成層圏エアロゾルのサンプルリターンに成功！ (2015年3月13日)
- 92) [国立極地研究所プレスリリース] 横に傾いて泳ぐ奇妙なサメを発見し、理由を解明, (2016年7月29日)
- 93) Payne, N. L., G. Iosilevskii, A. Barnett, C.s Fischer, R. T. Graham, A. C. Gleiss and Y. Y. Watanabe, Great hammerhead sharks swim on their side to reduce transport costs, *Nature Communications* 7, doi:10.1038/ncomms12289, 2016
- 94) Watanabe, Y. Y. , Flight mode affects allometry of migration range in birds, *Ecology Letters*, 19(8), DOI: 10.1111/ele.12627, 907-914, 2016
- 95) [国立極地研究所プレスリリース] 渡り鳥の移動距離は体重と飛行様式で決まる, ~渡り鳥 196種のバイオロギングデータの比較で判明~, (2016年7月11日)
- 96) [国立極地研究所プレスリリース] 南極観測船「しらせ」の航行支援として海氷密接度および海面水温の自動配信を実施, (2014年12月19日)
- 97) Automatic Weather Stations, <http://amrc.ssec.wisc.edu/aws/>
- 98) Shakhova, N., I., Semiletov, I. Leifer, V. Sergienko, A. Salyuk, D. Kosmach, D. Chernykh, C. Stubbs, D. Nicolsky, V. Tumskoy and Ö. Gustafsson, Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *nature Geoscience*, vol.7, 64-70, DOI: 10.1038/NGEO2007, 2014