

## 2.16 気候変動観測

### (1) 研究開発領域の定義

気候変動観測に関する科学、技術、研究開発を記述する。

気候変動観測データの生成、蓄積、処理、活用を扱う領域である。

ここでは、大気中の温室効果ガスや微粒子（エアロゾル、雲）、短寿命気候汚染物質（SLCPs）の濃度やその変化を把握するための衛星やその他のリモートセンシング、地上観測ネットワークなどの観測技術を対象とする。大気のみならず、気候変動に大きな影響を与える海洋や極地、森林、土地利用変化等の観測技術や各種プラットフォーム（地上、船舶、航空機等）も含む。得られた情報のデータ基盤や情報配信システムの整備についても対象とする。

### (2) キーワード

#### ■衛星による観測

気候変動 環境観測 衛星観測

#### ■大気の観測

温室効果ガス、エアロゾル、雲、短寿命気候汚染物質（SLCPs）、リモートセンシング、地上観測ネットワーク、フラックス、必須気候変数（ECV）、地球温暖化緩和策

#### ■海洋の観測

海洋温暖化（Global Ocean Warming）、海洋炭素循環（Ocean Carbon Cycle）、海洋酸性化（Ocean Acidification）、貧酸素化（Ocean Deoxygenation）、生物地球化学アルゴフロート（BGC Argo）、キャビティリングダウン分光法（Cavity Ring-Down Spectroscopy）、海洋状況把握（Maritime Domain Awareness : MDA）

### (3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

#### ■衛星による観測

近年、異常気象が増加傾向にある<sup>1)</sup>。異常気象の要因として、中緯度偏西風の蛇行（ブロッキング）、温暖化に伴う海面水温の上昇による台風への水蒸気供給量の増大など全球的な気候変動による影響の大きさが指摘されている<sup>2)</sup>。

気候変動あるいはそれに伴う異常気象について、長期的な地球の自然気候変動があるものの、それを助長する形で人間活動による、いわゆる人為起源による影響が産業革命以降有意に大きくなっているという指摘がなされている<sup>3)</sup>。地球の気候の状態を調べ、理解し、診断することが長期的な気候変動の予測及び人為起源の影響を抑制する政策を実施する上で、極めて重要である。局所的な気象状況も遠地の状況と密接に結びついている（テレコネクション）ので、地球の気候は全表面の7割を占める海洋および残りの陸地及び極域、そして大気に分け、それぞれ全球で評価する必要がある。しかし、地球の全地表面に対して、人間が現場で直接計測できる領域や時期は極めて限られており、全球を評価するために必要な均一で広域な観測を地表面上で行うことは困難である。人工衛星観測はその特徴として同じ計測器により全球の地表面およびその近傍の表層を均質かつ周期的・継続的に計測することを可能とした唯一手段であり、全球の気候を観測的に評価するベースデータ取得の観点から極めて重要な観測手法と言える。

## ■大気の観測

炭素等の循環研究では数値シミュレーションが重要な役割を担っているが、その検証と不確実性の軽減のためには観測が必須である。2015年に採択されたパリ協定による地球の平均気温の上昇を2℃より十分下方に抑える長期的な目標に向けた緩和サイクルの世界的な進捗状況を定期的に確認し、取組を強化していく「グローバル・ストックテイク」が実装されるに際し、人為起源排出の管理や森林減少・劣化の抑制策（REDD+）の有効性を観測から評価する視点が重要となっている。近年は、二酸化炭素よりも寿命が短い温暖化に寄与するメタン、対流圏オゾン、ブラックカーボン\*等の短寿命気候汚染物質（SLCPs）が、それらの対策により即効的な温暖化緩和効果が期待されることから、注目を集めている。エアロゾルや雲にも人間活動の影響が及んでいるが、自然変動分も含め、それらの相互作用やプロセス、気候応答に関する理解度は不十分である。

\*注）ブラックカーボンとは大気中に含まれる微粒子であり、大気の加熱効果を持つ。炭素を主成分とする燃料が燃焼した際に発生する。

温室効果ガス、エアロゾルや雲、SLCPsを対象とし、その収支にかかわる陸上生態系や海域を含め、特色を持った衛星観測や地上/船上/航空機観測を実施すること、数値モデルを牽引できる観測情報を提供し、循環や収支の理解を高めるだけでなく、気候および地球システムへの影響とフィードバック機構についても理解を促進するような鍵となる知見を提供することが求められている。

## ■海洋の観測

産業革命以来、温暖化によって地球表層に蓄えられた $3 \times 10^{23}$ ジュールの熱量の90%以上は、地球表面のおよそ70%を占め、大気のおよそ250倍の質量と4倍の比熱を有する水で満たされた海洋に蓄えられている<sup>4)</sup>。海洋の温暖化は、その三次元的な循環を変化させ、大気との熱や水蒸気の交換パターンを変化させることで気候変化を引き起こす要因となるほか、温暖化による海洋内部への酸素供給の減少と合わせて海洋生態系の変化も引き起こしている。また、化石燃料消費によって人為的に排出されたCO<sub>2</sub>のおよそ30%は、物理化学的に海洋に吸収されている<sup>5)</sup>。海洋はCO<sub>2</sub>を吸収することで、その大気中の濃度増加を抑制しているが、これは海水に炭酸を添加していることを意味しており、弱アルカリ性の海水は、産業革命以来、中性方向へと「酸性化」している。海洋の酸性化もまた、海洋の生態系に深刻な影響を及ぼすことから、「もうひとつの二酸化炭素問題」と呼ばれている<sup>6)</sup>。

こうした海洋の物理的・化学的な変化の実態や原因を、それらの気象・気候や生態系への影響を含めて理解し、気候変化の予測や防災のほか、海洋の持続的な利用に役立ててゆくことは、海洋からさまざまな恩恵を受けている世界の多くの国々にとって喫緊の課題である。

## [研究開発の動向]

### ■衛星による観測

現業気象関係の国際枠組みはCoordination Group for Meteorological Satellites (CGMS)によって維持されている。一方、科学的あるいは気候診断の地球観測については、国際的な調整枠組みとしてCommittee on Earth Observation Satellites (CEOS)において、各国の観測衛星開発計画の情報共有がなされており、それを軸として、温室効果ガス、降水、陸域などの目的に応じVirtual Constellationが国際協力による相互データ交換・評価の仕組み

が構築されている。観測対象となる気候システムに必要な物理観測パラメータは国連 World Meteorological Organization (WMO) 下に置かれた Global Climate Observation System (GCOS) により、Essential Climate Variables (ECVs) としてリスト化されており、それを CEOS に答申することにより、観測パラメータの整理がなされる<sup>7)</sup>。特に長期観測が重要なパラメータについては Climate Data Records (CDR) として識別される<sup>8)</sup>。こうした活動においては欧州が観測衛星の計画作成・調整などで積極的に利用し、その推進を牽引している。

国際協調システムを含む衛星計画を前提とし、科学的な研究ターゲット（地球温暖化、バイオマス評価、エアロゾル、極端気象、大気汚染など）については IPCC（気候変動に関する政府間パネル）報告書を起点とした議論が行われている。

#### ①地球温暖化

地球温暖化については、IPCC AR5（第5次評価報告書）において人間活動による温暖化への影響が確定的という報告がなされており、その主要因となる二酸化炭素排出を含む炭素循環を定量的に評価することを目標とし、大気中の CO<sub>2</sub> 量の観測の高精度化を日本の GOSAT シリーズ（環境省/国環研/JAXA）が担っている。GOSAT（Greenhouse Gases Observing Satellite、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」）は、2009年に我が国が打ち上げた。GOSAT は熱赤外（TIR）域だけでなく短波赤外（SWIR）域のセンサを同時に搭載する世界唯一の衛星であり、対流圏全層に感度を有す形で気候変動の主要因である二酸化炭素とメタンの濃度を観測し、そのデータを利用して大陸規模での二酸化炭素等の排出・吸収強度を推定するなど、炭素循環研究等に活用されている。また、都市部などからの二酸化炭素やメタンの排出インベントリの高精度化研究にも活用されている。GOSAT-2 衛星の打ち上げが 2018 年度に予定されている。GOSAT-2 は GOSAT に比べ、センサ感度の向上やインテリジェントポインティング（晴天域を能動的に選定して観測効率を高める）を採用するなど、データ数と測定精度が向上する。米国は 2014 年に OCO-2 衛星（Orbital Carbon Observatory、軌道上炭素観測衛星）を打ち上げた。その複製機である OCO-3 センサは 2018 年以降に国際宇宙ステーションに搭載される予定である。中国は OCO-2 衛星と類似した TanSat 衛星を 2016 年末に打ち上げた。欧州は、大都市などをターゲットにした高空間分解能を有する MicroCarb 衛星を 2021 年に打ち上げる予定である。

#### ②森林バイオマス量

CO<sub>2</sub> の主な吸収源となる陸域での森林バイオマス量の評価については、ALOS シリーズ（陸域観測技術衛星「だいち」）、GCOM-C（Global Change Observation Mission – Climate、気候変動観測衛星「しきさい」）、宇宙ステーション搭載植生ライダー（JAXA【日本の宇宙航空研究開発機構】）などが担う。気候変動に関わるエアロゾル・雲の観測として、我が国は 2017 年末に GCOM-C 衛星を打ち上げ、放射も含めた気候変動に関わる様々な因子の観測を行っている。GCOM-C 衛星に搭載されている多波長光学放射計（SGLI: Second Generation Global Imager）センサの技術的な新規性・優位性は、近紫外チャンネル搭載、高空間分解能観測、偏光観測にある。

#### ③エアロゾル・雲

エアロゾル・雲については、GCOM-C（JAXA）、EarthCARE（Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer、ESA【欧州宇宙機関】/JAXA/NICT【情報通信研究機構】）が担う。

地球の放射収支を大きく左右するエアロゾル・雲～降水のプロセスの正確な理解や、時間的変化の早いこれらの観測的把握が、放射収支からの評価上、大きく影響している。世界最先端の観測能力を有する可視赤外放射計（AHI: Advanced Himawari Imager）を搭載した静止気象衛星ひまわり 8 号が 2014 年 10 月に打ち上げられ、2015 年 7 月より定常運用を開始した。ひまわり 9 号は 2016 年 11 月に打ち上げられ、2017 年 3 月より待機運用を行っている。ひまわり 8・9 号は、これまでの静止気象衛星に比べて時間・空間解像度ともに 2 倍向上し、高時間・高空間解像度のエアロゾル観測が可能である。

#### ④極端現象

極端気象については、GCOM-C, GCOM-W（JAXA）や GPM コア衛星（全球降水観測計画主衛星、NASA/JAXA/NICT）が担う。極端気象は、温暖化により温まった海面水温と海面から放出される大気への水蒸気量の関連性が指摘されており、降水状況の観測と共に水循環について更に観測を詳細化する必要がある。加えて、これまで技術的に困難であった大気の風速ベクトルを計測するライダーや鉛直風を計測する雲レーダが登場し、海上風ベクトルや気象衛星の雲の変化から算出された Cloud Moving Vector による大気力学的観測に対して大幅な発展が強く期待される。

#### ⑤大気汚染

大気汚染については、ADEOS/ADEOS-2（地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」）に搭載した ILAS シリーズ（国環研）に端を発し、対流圏上部より上方を中心とした大気汚染物質の赤外掩蔽観測がなされてきた。さらに宇宙ステーション搭載の SMILES（超伝導サブミリ波リム放射サウンダ）によってサブミリ波掩蔽観測が発展し、宇宙からの大気汚染物質観測の計画として APOLLO（Air Pollution Observation）の検討などが続いている。

#### ⑥プラットフォーム

衛星観測データはこれまで主には衛星ミッション<sup>\*</sup>ごとに整備されてきたものであるが、近年計算機技術の発達とともに、データを統合的に利用するためのインフラの整備が進められている。 ※注）衛星ミッションとは、衛星を使って達成するある目的を指す。

一カ所にデータを集積し、解析できるプラットフォームとして DIAS（データ統合・解析システム、MEXT）、Tellus（政府衛星データのオープン&フリー化及びデータ利用環境整備事業、METI）などの国主導のものや、民間企業によるプラットフォームやクラウドサービスが提供されている。また、衛星データを一元的に提供するためのデータ提供サイトが G-PORTAL（地球観測衛星データ提供システム、JAXA）をはじめとして整備・運用されている。時間空間的に蓄積された衛星データは地理空間情報、地上観測データとあわせてビックデータとして、機械学習、ディープラーニングなどの IT 技術により情報としてサービスされる方向にある。

### ■大気の観測

#### ①温室効果ガス

温室効果ガスに関連する地上観測ネットワークとしては全量炭素カラム観測ネットワーク（TCCON）の重要性の認知度が高まっている。GOSAT 等の衛星データの検証を可能とするなど、衛星観測からの濃度導出の高精度化に結びついている。高精度の地表付近濃度計測では、キャビティリングダウン法（CRD 法）が実用化され、世界的に地上ステーショ

ンに導入されつつあり、物質収支のプロセス理解に資する同位体計測にも適用される。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、渦相関法によるタワー観測ネットワークが展開されており、全球ネットワークとして FLUXNET、そのサブ組織としてアジア域では AsiaFlux が展開されている。これらの観測により大気-陸域間の熱・水・二酸化炭素等のフラックスが連続観測され、データ公開が進められている。FLUXNET については近年大幅なデータのアップデートがあり FLUXNET2015<sup>9)</sup> としてユーザが使いやすい形でデータが提供されている。さらに、これら地上観測ネットワークデータと衛星観測データなどに対して機械学習を行うことにより、地上観測ネットワークデータを広域化した全球プロダクトも構築され、コミュニティが利用できる。

## ② エアロゾル・雲

雲レーダによる雲の鉛直内部構造の観測は、気候変動に伴う放射収支の変化の評価に欠かせない方法である中、我が国は、2006年に米国 NASA/JPL によって打ち上げられた雲レーダ搭載の CloudSat を持つ。現在、CloudSat よりも感度が 10 倍高く、世界で初めて雲内部の鉛直流の情報を衛星から取得するドップラー速度の観測が可能な雲プロファイリングレーダ (CPR: Cloud Profiling Radar) を開発している。この CPR レーダを搭載する雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE) による観測が 2021 年以降に予定されている。なお、強い関連性を有す降水や水蒸気の衛星観測も推進することにより、雲・降水に関わる気候変動研究の相乗効果が期待される<sup>10)</sup>。

エアロゾルの国際地上観測ネットワークについては、米国航空宇宙局 (NASA) 主導の AERONET や、日本が主導している SKYNET (主に千葉大学)、AD-NET (主に国立環境研究所) がそれぞれ、データ取得・準リアルタイム解析・データ公開を定常的に実施し、誰もがデータを使えるよう整備している。月を光源にした夜間観測、紫外可視波長帯による光吸収性エアロゾル (ブラックカーボン、ブラウンカーボンを含む) 観測、雲光学特性観測、エアロゾル組成情報の高度分布導出について、技術的な発展が見られる。なお、我が国の SKYNET および AD-NET については、世界気象機関 (WMO) の GAW (Global Atmosphere Watch) において、contributing network として位置づけられている。また、SKYNET の主力機材であるスカイラジオメータの多地点観測が気象庁でも開始された。地上現場大気測定技術としては、エアロゾル組成の自動連続計測のための国産装置も開発されている。ブラックカーボンの高精度計測装置や、主要無機イオン成分等の湿式計測、微量金属などの元素分析装置などがある。近年、ブラックカーボンを含むエアロゾルに関する計測ガイドライン<sup>11)</sup> が更新され、計測の調和化が推奨されている。エアロゾルが雲核となることに起因する気候への間接効果の不確実性は依然として大きい、その軽減を目指して雲凝結核 (CCN)<sup>12)</sup> や氷晶核<sup>13)</sup> の観測とデータベース化が進んでいる。また、それらと化学組成や起源との対応付け (有機エアロゾルのエイジングや、未解明度の高い生物起源バイオエアロゾルなど) についても注目されている。雲生成のモデル化には質量濃度よりむしろ個数濃度の情報が不可欠であり、1 nm のサイズの極小粒子から個数濃度の計測ができる装置も開発されている。

## ③ SLCPs (短寿命気候汚染物質)

ブラックカーボンの質量濃度を衛星から直接測定することは難しいが、光吸収性エアロゾルの光学的な計測や、それを元にした濃度推定の実施例がある。対流圏オゾンの衛星

観測では、複数の波長帯での計測を組み合わせることなどにより、成層圏オゾンとの区別だけでなく、対流圏内の高度別計測も実現しつつある。オゾンの前駆物質として重要な二酸化窒素や揮発性有機化合物、一酸化炭素の衛星観測については、欧州では MetOp 衛星搭載の IASI、GOME-2 センサによるシリーズ計測が、10 km 弱の水平解像度を持つ Sentinel-5（大気混合と大気質を監視する）等へ継続されていく。地上からの分光リモートセンシングによる校正検証も重要である。二酸化窒素などの大気汚染物質に対しては、紫外可視波長帯の太陽直達光や太陽散乱光を利用したポータブルな受動型リモートセンシング装置（NASA/Pandora、MAX-DOAS）による高度分布計測手法が開発・改良されており、観測網として発展している。これらを衛星観測と統合的に用いることで、より正確なカラム濃度や高度分布を導出することにもつながる。対流圏オゾンアセスメント（TOAR）<sup>14</sup>では、オゾンや前駆物質の地上観測やゾンデ観測を全球規模で網羅的に収集し、気候影響等に関する評価がなされる。

#### ④データ基盤・情報配信システム

大気成分の地上観測データは、WMO/GAW のデータを中心に、気象庁の WDCGG（World Data Centre for Greenhouse Gases）や、後発の WDCA（WDC for Aerosols）、WDCRG（WDC for Reactive Gases）に収録されているが、エアロゾル・SLCPs の観測データ発信の統一化は途上であり、プロジェクトや機関ごとのウェブ発信も多い。ファイルサイズなどの観点から衛星データも各機関から発信されることが多い。

#### ■海洋の観測

海洋観測の分野では、海洋酸性化の脅威への認識の高まりや、国際 Argo 計画による自動昇降型中層フロート（Argo フロート）の展開による海洋の物理変動観測の飛躍的な発達が挙げられる<sup>15</sup>。

海洋酸性化の進行が海洋生態系や社会への明確な脅威として研究者や社会に認識されはじめたのは、海洋酸性化がサンゴ礁など炭酸カルシウム骨格を持つ生物に近未来的に悪影響を及ぼすと予測した論文<sup>16</sup>が発表されたことがきっかけである。以後、同様の予測が多く種の生物種を対象に出され、国連持続可能な開発会議（Rio+20）などを通じて、国連レベルでもその危機感が急速に広まった。それによって海洋の炭素循環や人為起源 CO<sub>2</sub> の収支評価の目的で実施されていた海洋の CO<sub>2</sub> 研究に、新しく海洋酸性化の状況把握と予測の目的が加わった。1990年代には海洋の表層や内部の CO<sub>2</sub> 観測も増え、2000年代には、そのデータベース SOCAT<sup>17</sup> や GLODAP<sup>18</sup> の作成・更新作業も国際協力で進んでおり、時系列観測点等での観測結果と合わせて、海洋への CO<sub>2</sub> 吸収速度の 10 年規模の変動や海洋酸性化の進行速度の実態把握が進みつつあり、地球システムモデルによる将来予測も進められている<sup>19</sup>。

漂流しながら潜航・浮上を繰り返すことで水温や塩分の鉛直構造を自動で観測できる Argo フロートの開発と、国際 Argo 計画によるその全海洋規模展開によって、海洋の物理的変動の観測は飛躍的に発展した。Argo フロートは、3000 台を常時展開する目的を 2007 年に達成し、現在はおよそ 3900 台が展開されている。各フロートは 10 日に 1 回ほどの頻度で、水温・塩分の鉛直分布を水深 2000m まで測定し、ARGOS 衛星通信や、より大容量のイリジウム衛星電話を利用して、準リアルタイムでデータを陸上に送信している。送信されたデータは、取得後 24 時間以内に全球気象通信網（GTS）により、世界中の気象機関などに配布されるほか、6 ヶ月以内に高度な品質管理を施されて、インターネット上で提供される。これによって水温・塩

分の鉛直分布のデータは飛躍的に増加し、海況監視や気象の数値予報のほか、海洋貯熱量の変化や塩分変化に基づく地球規模の水循環の変化の実態解明に大きく貢献している<sup>4)</sup>。

#### （4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

##### ■衛星による観測

###### ①次世代静止気象衛星

静止気象衛星が、GOES-R（米国気象衛星、NASA）およびひまわり 8、9号機が利用できるようになり、これまでの1km分解能から倍の500m分解能への高精度化および撮像間隔を2分半まで縮めたことによる動画観測が実現した。CGMSでは今後イメージャ搭載の他に、赤外サウンダーおよび雷センサの搭載を推奨している。

###### ②地上処理：IT技術（プラットフォーム、大規模データアーカイブ、機械学習・ビッグデータ解析）

膨大な衛星観測データを蓄積し、相互に利用するためにクラウドベースあるいは大型計算機システムを用いたプラットフォームが国内外で整備されている。国内においてもDIAS、Tellus、NICTや産業総合研究所の大規模アーカイブなどが存在している。また地球観測衛星データ、地上データなどのビッグデータから社会情報を抽出する紐付ける機械学習、ディープラーニングなどのIT技術開発については、AISTや民間などにより急速に進みつつある。

###### ③地上処理：衛星間データフュージョン

関連する複数衛星の観測データ結果から統合的に全球状況を把握する手法の研究が行われている。GPM（全球降水観測計画）を元としたGSMaP（衛星全球降水マップ）が代表的であり、またEarthCAREに搭載される複数種のセンサの統合解析、前述のバイオマス評価におけるL帯SAR（合成開口レーダー）/ライダーの統合処理などの活動がある。また、LANDSAT（地球観測衛星、NASA）とMODIS（可視・赤外域の放射計）のデータの統合処理による高時間・空間分解能のNDVI（正規化差植生指数）の作成（STARFM、時空間適応反射率融合モデル）や超高解像度化などの活動がある。

###### ④陸域：植生・生態系

疎な植生や雲・雨などを透過して地表の情報が得られるL帯の周波数を利用したSARは走査幅を増しつつ全球の森林領域の識別とバイオマスの評価を行う。100t/ha以上の高密度森林領域での低感度性については、ライダーによる観測評価による補間をすることで全球バイオマスの測定を実現する。L帯SARは日本で1992年に打ち上げたJERS-1（ふよう1号、地球資源衛星）からの長期の観測データの蓄積があり、現在もALOS-2によりその観測を継続するとともに、1.5ヶ月ごとに、熱帯域の森林変化の情報の観測および提供を継続している（JAXA/JICA）。2020年代には、ALOS-2の後継であり観測幅を広げたALOS-4や、米国でNISAR衛星（S帯およびL帯の合成開口レーダ衛星）などの開発が行われている。また、ライダーでは特に熱帯雨林の評価を行う米国のGEDI（Global Entrepreneurship Development Institute）および、日本のMOLI（Multi-footprint Observation Lidar and Imager）があげられる。森林評価は炭素循環の吸収源となる重要計測であり、大気中二酸化炭素計測と並行した観測が重要である。加えて、林野火災によ

る二酸化炭素排出の把握も重要であり、熱赤外などによる林野火災の発生域の把握、SARなどによる消失面積の把握、およびHAZE（微粒子により視界が悪くなる現象）の観測も行われている。

#### ⑤陸域：土地利用変化

これまで土地被覆・土地利用の把握は、年単位の変動をグローバルで扱うことは、分類の精度や計算能力の観点から困難であった。しかし、近年になり、Google Earth Engineのようなクラウドコンピューティング技術の発展により、土地利用変化、土地被覆変化を年々の単位で追跡することが可能になってきた。Google Earth Engineでは、様々な衛星データ、気象データが収集されており、大量データの解析が行える仕組みを提供する。特に個人研究者レベルでは扱うことができない大量のデータを所有しており、簡単なスクリプトを書くことで様々な解析ができるようになっている。毎年更新されるLANDSATデータ（分解能約30 m）を用いたグローバルな森林伐採・植林年の把握<sup>20)</sup>は、Google Earth Engineを利用した成果である。

#### ⑥極域

極域は、特に温暖化の感度が強いことから、極域の海氷状況については、時間的な面積的把握がSSM/I（DMSP搭載マイクロ波撮像装置）、AMSR-E（改良型高性能マイクロ波放射計）などから始まり継続的にマイクロ波放射計であるGCOM-Wにより続けられている。それに加えて、SARやMODIS、VIIRS（マルチチャンネルイメージャ・放射計）、GCOM-Cによる観測も続けられている。また氷床の厚さの変化を観測するため、ライダーによる氷床観測衛星の後継機が米国により打ち上げられた（ICESAT-2）。

### ■大気の観測

#### ①東アジアの大気汚染の改善傾向

近年特筆すべきは、衛星観測データなどの解析から、最近是中国を含む東アジア域の大気汚染（エアロゾル、窒素酸化物、硫黄酸化物）の大気汚染レベルの改善傾向の指摘がある<sup>21),22)</sup>。我が国のエアロゾルや窒素酸化物濃度の減少トレンドも報告されている。一方、対流圏オゾンの明確な減少は観測されておらず、関連の大気化学研究の今後の進展が望まれる。

#### ②ローコスト小型センサによる計測自由度の向上と社会サービス

従来、大気汚染ガス（CO、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>）や粒子状物質、温室効果ガス（二酸化炭素、メタン）の計測では、地上局に据え付けられた比較的高額な機器が必要とされてきたが、技術の進歩により、ローコスト小型センサが市場に供給されるようになり、2015年ごろから爆発的に利用が進み始めている。ロット間の校正ばらつきや精度・選択性の不足、長期安定性などに依然として大きな課題はあるものの、多点稠密観測やドローン（UAV: Unmanned aerial vehicle）搭載などによる上空での計測なども可能となることから、発生源の識別やその近傍での計測など、目的によっては十分に気候変動理解のための観測にも資する状況となっている。北部カリフォルニアでのBEACO<sub>2</sub>NやチューリッヒO<sub>3</sub>&NO<sub>2</sub>ネットワーク、香港での実証プロジェクトなどが進んでいる。WMOも現時点でのベストプラクティスや将来の応用に関するレコメンデーションを文書<sup>23)</sup>に取りまとめている。

#### ③エアロゾル・雲の観測

雲やエアロゾルの衛星観測は、また、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いる。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、532、1064 nm) のライダーを搭載している。さらに、現在、日本と欧州宇宙機関 (ESA) で EarthCARE 衛星を、2021 年の打ち上げを目指して共同開発中である。同衛星には前述の CPR レーダに加えて大気ライダー (ATLID: Atmospheric Lidar、レーザの波長は 355 nm) が搭載される。

#### ■海洋の観測

- ①大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の測定には、1957 年に C.D. キーリングらがハワイ・マウナロアや南極点で観測を開始して以来、光学フィルターを使って特定波長領域の赤外線強度を測定する非分散型赤外分析計 (NDIR) が使用されてきた。これに対して、近年、レーザーと高反射ミラーを内蔵したキャビティリングダウン分光 (CRDS) 装置が市販され、その利用が広がっている。CRDS は、CO<sub>2</sub> 濃度に対する出力信号の線形性が高く、安定性も優れている。そのため、正確な測定に肝要な濃度検定のための標準空気の使用本数や測定頻度を減らし、標準空気の管理等にかかる手間を大幅に減らすことができ、観測の効率化と観測ネットワークの発達にも役立っている。
- ②メタン (CH<sub>4</sub>) と一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) の濃度測定には、ガスクロマトグラフの使用が一般的だが、これらも CRDS による連続観測が可能になった。CRDS の利用は、温室効果ガスの大気・海洋間の交換量の評価に不可欠な海洋表層水との平衡空気中の温室効果ガス測定にも応用され始めている。これらの温室効果ガスは濃度が特に低いので、気液平衡の達成に要する時間が長いという原理的な問題はあるが、ガスクロマトグラフでは不可能な洋上の航走連続観測による高空間解像度の測定によって、海洋からの CH<sub>4</sub> 放出のホットスポットの検出などが可能になっている。
- ③Argo フロートについては、2000m 以深の深海観測用の “Deep Argo” や、乱流計を搭載したフロートの開発や展開も始まっている。これらは、それぞれ深海の貯熱量変化の評価向上や、海洋循環モデルの向上に資する乱流の実態評価に大きく貢献することが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

#### ■衛星による観測

##### 【国内】

##### ① GOSAT3 (TANSO) +AMSR3

GOSAT-3 は GOSAT, GOSAT-2 に引き続き観測性能を発展させ、排出源を都市別に観測できる最終的な性能を達成する。その上で、AMSR2 後継であり、高周波数を追加した AMSR3 が相乗りする予定である。AMSR (高性能マイクロ波放射計) シリーズは特に気象分野において世界的なデファクトスタンダードのマイクロ波観測センサとなっており、更に長期の継続観測を実現する。

##### ② EarthCARE

EarthCARE は能動 / 受動の光学 / 電波センサを組み合わせた観測衛星であり、世界初のドップラーレーダーによる鉛直風観測を行う。

##### ③ DPR 後継 (GPM 後継)

全球における降水状況の準リアルタイム観測予測システムの中心的衛星である GPM の後継について NASA との協力も含めて、今後の降水ミッションについて検討中。

- ④ SGLI 後継（GCOM-C/GOSAT シリーズ CAI 後継含）  
多方向観測、偏光観測、近紫外バンドを用い、これまで観測困難だった陸上エアロゾルを高精度に観測する性能を有した SGLI の後継について検討中。
- ⑤ ALOS-5, 6（次期光学・L 帯 SAR 衛星）  
大規模災害の監視、被害状況の観測を国際災害チャータ枠組みにより実現している ALOS-3,4 の後継ミッションを検討中。特に ALOS-4 は JERS-1 から続く L 帯 SAR ミッションを継続し、長期データやグローバルデータを持つ日本の特徴となるセンサである。
- ⑥ ISS 搭載 MOLI  
能動光学センサ（ライダー）についてライダーの長寿命化技術の実用性を実証し、SAR との複合利用を証明するためのミッションを準備中。本ミッションで得られる基礎的技術を元に更にドップラーライダー（風計測）、LADAR（地表面 3 次元イメージング）などの応用ライダーへの発展が期待されている。
- ⑦ ドップラーライダー  
民間企業からの要望を基に航空路管理、また大気力学的観測を実現するシステムを担うべく国際協力を前提に検討中。

#### 【海外】

- ① GeoCarb（NASA）  
静止軌道の商用通信衛星への同乗により、特定地域の常時観測性を獲得し、日変化も観測可能となる、OCO-2 の発展形（なお、OCO-3 は ISS に搭載される予定）である。
- ② MERLIN（DLR/CNES）  
将来応用ライダーの一つとして、差分吸収ライダーの原理により、CH<sub>4</sub> の精密局所観測を実現するライダー衛星。将来的な CO<sub>2</sub> 観測への発展が期待される。
- ③ ADM/Aeolus（ESA）  
355nm 紫外レーザーを採用することでエアロゾルの少ない対流圏上部まで風向風速観測を可能とした世界初のドップラーライダー。
- ④ ICESAT-2（NASA）  
極域の氷床厚と陸域の森林などを高精度に測定するレーザー高度計。1号機に対して長寿命化の設計改良が加えられ、初の実用的なレーザー高度計となる予定。
- ⑤ RainCube（NASA）  
6U サイズの Cubesat 衛星バスでは、比較的簡単な受動センサのみが搭載可能であったが、初めて能動センサである Ka 帯降水レーダーを搭載した技術試験小型衛星。
- ⑥ NISAR（NASA/ISRO）：NASA が ISRO と共同して開発した大型展開アンテナをもち L 帯および S 帯の SAR 観測を行う衛星。日本以外での本格的な L 帯 SAR 衛星としては初めてであり、多重バンドを搭載する SAR としても初めてとなる。
- ⑦ SWOT（NASA/CNES）  
Ka SAR 2機と電波高度計を搭載し、これまで 1 次元観測しかできなかった海面高度を 2 次元的に（面的）に計測する Topex/POSEIDON の後継衛星。

#### ■大気の観測

- ① 温室効果ガスと大気質変動の統合的解析とデータ同化  
従来独立に進められてきた温室効果ガスと大気質の研究を統合することにより、両者に共

通となる発生源（化石燃料燃焼など）の特定や、大気中輸送経路の解析、メタン寿命支配因子であり大気質の影響を強く受ける OH ラジカル濃度の評価に関する相乗効果が得られる。とくに、今後計画されている衛星観測を念頭に、両者の衛星観測を同時に大気化学輸送モデルへ取り入れるデータ同化に関して、構想を実装へ移す計画が、各国の宇宙関連機関が参加する地球観測衛星委員会 CEOS の AC-VC 会合（Atmospheric Composition Virtual Constellation）などで活発に議論されている。

#### ②航空機観測関連

航空機観測では、米国の専用機を用いた、南極～北極にわたる高度プロファイル計測（HIPPO, ACOM 等）が長寿命気体・エアロゾル・SLCPs について総合的に実施された。また、欧米の専用機によるアジア観測（2016年 KORUS-AQ, 2018年 EMeRGe-Asia）も実施された。日本は観測専用機を保有しておらず、欧米や中韓にも遅れをとっている。商用航空機を利用した広域観測では、欧州の IAGOS プロジェクト、日本が主導する CONTRAIL プロジェクトが実施されている。

#### ③北極観測研究の重点化

温暖化の進行が著しい北極域の気候環境変動プロセスやフィードバックメカニズムを明らかにするための観測研究が世界的に広く実施されている。日本も ArCS 北極域研究推進プロジェクト（2015-2019年度）などにおいて、陸上・海洋生態系と合わせて、炭素やブラックカーボン循環の理解を進めるための現場観測などを推進している。国際的には、R/V Polarstern を海氷域に閉ざして実施する通年観測計画 MOSAiC（2019-2020）や IASC/IGAC の合同アクティビティ air Pollution in the Arctic: Climate Environment and Societies (PACES) での IMPAACT (Investigation of Multiscale Processes Affecting Atmospheric Chemical Transport) における航空機・地上・船上連携観測計画（2021）へ向けた動きも進んでいる。

#### ④欧州の Copernicus 計画（旧 GMES 計画）

欧州委員会が推進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係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。

#### ⑤短寿命気候汚染物質（SLCPs）削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ（CCAC: Climate and Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants）

2012年に発足した国際パートナーシップである CCAC では、大気中での化学的な寿命が数日から数十年程度と比較的短く、気候を温暖化する作用を持つメタン・対流圏オゾン・ブラックカーボン等の SLCPs の削減により、温暖化と大気汚染の対策を同時に進めることを狙っている。SLCPs の削減は身近な健康影響の低減にも結びつくという点で、新興国などでのインセンティブが期待される。

## ■海洋の観測

### ① SOCCOM (Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modelling、南大洋の炭素と気候に関する観測とモデリング)

観測船による多項目・高精度の観測とともに、生物地球化学変数や生物光学変数を測定するセンサーを搭載した BGC (Biogeochemical) Argo フロート 100 機以上を南大洋に展開してデータを収集し、数値モデリングと合わせて、炭素循環や気候に対する南大洋の役わりを解明することを目的とした National Science Foundation の資金によるアメリカの研究プロジェクト。今後の BGC Argo の国際的な普及・活用を実践面からも科学面からも方向づけてゆくと考えられる。

### ② VOICE (Variability in the oxycline and its impacts on the ecosystem、酸素躍層の変化とその生態系への影響)

海洋温暖化による海洋内部への酸素供給の減少によって引き起こされる貧酸素化の実態把握とその生態系への影響評価を目的に、関連する海洋物理・生物地球化学・生態系の調査を学際的かつ持続的に実施するため、世界気象機関やユネスコ政府間海洋学委員会などが支援する全球海洋観測システム (Global Ocean Observing System) が推進しているプロジェクト。現在は、観測能力の評価や、実態を把握するために必要なデータプロダクトの状況を調査している段階にある。

### ③ SOCAT (Surface Ocean Carbon Atlas) と GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project)

国際的な海洋研究の学術団体 Scientific Committee on Oceanic Research とユネスコ政府間海洋学委員会が支援する International Ocean Carbon Coordination Project (IOCCP) の支援により、海洋表層の CO<sub>2</sub> 観測を行っている研究者や、海洋内部の炭酸物質とその関連物質などの観測を行っている研究者のコミュニティが、それぞれ国際協力で行っている観測データ統合と品質管理されたデータプロダクトの作成・更新活動及びそのデータプロダクト。大気・海洋間の CO<sub>2</sub> 交換速度の変化、海洋内部の人為起源 CO<sub>2</sub> の蓄積量の変化、海洋酸性化の動向など、海洋の CO<sub>2</sub> に関するさまざまな広域評価や、数値モデリングの検証などに活用されている。西太平洋域では日本の研究者が中心的な役割を担っている。

## (5) 科学技術的課題

### ■衛星による観測

#### ① 静止軌道・あるいは小型衛星多数フォーメーションを利用した陸域観測常時化

これまで、地球観測衛星においては、気象衛星に代表される静止衛星観測において、大気を中心とした粗解像での常時観測が行われてきた。一方、現在より詳細な解像力を必要とする陸域については MODIS センサなどの極軌道衛星データが広く用いられているが、特に熱帯雨林地域では雲の発生頻度が高く植生のモニタリングが非常に困難である。静止衛星は高い時間分解能をもち、これらを避けて熱帯雨林などの地域のモニタリングには有効に利用できる可能性がある。今後は、気象衛星以外に高分解能観測を実現する新たな静止衛星や多数小型衛星システムが求められる。この実現には、静止衛星による実現では超大型化では分割式大型望遠鏡技術や大型展開アンテナ技術等が課題であり、多数小型衛星フォーメーションによるシステムでは、超小型軽量化が求められ Ka 帯など高周波採用によるアンテナ小型化や送信デバイスの固体化、及び群衛星運用技術の確立が課題である。

## ②能動光学を用いた観測の高度化

受動光学（光学センサ）、受動電波（マイクロ波放射計）、能動電波（SAR、降水・雲レーダ）などについて実用的な観測衛星が開発されてきたが、今後は、受動光学や能動電波では不可能な高分解能のフットプリント研究や高精度な測距性能を利用した能動光学を用いた観測の高度化が求められる。この実現にはスキャニングなどによる高精度 3D イメージングやドップラー観測による地球大気運動観測技術の確立が課題である。

## ③表層下観測などを実現する新しい手法の研究

リモートセンシングは、基本的には表面から発せられる、あるいは反射される電磁波の計測により表層の情報を取るシステムとして発展してきた。今後は地中や水中などへ観測範囲を拡大する研究が期待されるが、P帯やテラヘルツなどの電波周波数帯の採用や、電磁波計測から離れた重力加速度の計測による地下質量変化計測など新しい手法の確立が課題である。

## ④複数衛星による干渉観測によるリアルタイム化、高精度化

これまで、多くは単独衛星観測システムが研究されてきたが、超高分解能観測を発展させるのに必要な大型光学系/アンテナを衛星1機に搭載できる大きさには限界がある。さらに高分解能化を進めるには仮想的な超巨大アンテナ・鏡の形成技術を確認し、複数衛星にまたがる干渉観測システムの構築が必要である。特に電波領域ではすでに観測対象の一部で、これは実現されているが、将来的には光学イメージング領域にまで拡張していく必要がある。

## ⑤ MEMS（Micro Electro Mechanical Systems：微小な電気機械システム）技術の発展に伴う要素技術の応用研究による新たな観測システム設計

従来、論理的には成立するが、製造不可能だった形状による波長特性変化や高性能化などの問題に対して、MEMS技術の発展により、原子数個の単位でのデバイス形成が可能となってきているので、これらの新技術の適用が課題である。

## ⑥観測データアーカイブから社会利益をもたらす情報化手法の研究

近年多くの地球観測衛星では精細な分解能を持つ多波長の観測データが毎日膨大な量生成されている。目標とする事象が自然現象ではなく社会現象などの場合には、従来の論理的な物理的解析アルゴリズムの研究ではデータ量が多く対応できない。社会現象との相関そのものが社会的利益に直結するので、得られた情報と目標とする事象の相関解析では、ニューラルネットを用いる機械学習手法の実用化確立が課題である。

### ■大気の観測

#### ①小型センサや分光技術の気候変動観測への利用

ローコストセンサに関しては長期安定性や信頼度の向上が重要である。プラットフォームの内、ドローンでの高度分布計測について、自律・自動的に繰り返し計測が達成されるようになると3次元データとして飛躍的にデータの有効性が高まるため、開発に取り組むべき課題である。衛星や航空機からのイメージング分光によるリモートセンシングでは、可視・紫外から近赤外～熱赤外への波長域拡張が応用範囲の大幅な拡大を生むと期待されるが、センサ素子の開発がボトルネックとなっている。

## ②衛星からの温室効果ガス濃度観測

GOSAT、OCO-2のように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。しかし、ライダーでは長期間に渡る運用可能性としてレーザ光源の寿命の問題等の課題がある。

## ③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。

## ④種々のデータの統合的解析

個々の研究結果の長所・短所を踏まえて、様々な研究結果を利用した統合的な解析が進められている。種々のリモートセンシングデータや地上観測データを利用した統合的研究では、独立した各手法からの成果を多面的に見ることが必要である。

### ■海洋の観測

#### ①温室効果ガス観測装置の高性能化

キャビティリングダウン分光（CRDS）装置など、赤外領域の分光分析装置の高性能化と低価格化は、陸上の観測点における温室効果ガス観測の高度化・効率化だけでなく、船舶等における海洋表層水中の温室効果ガス観測の高解像度化と効率化にも有益である。また、CRDS では、原理的に安定同位体比を同時に測定できる。現在、温室効果ガスの炭素 13 や窒素 15 などの安定同位体比は、サンプル大気から温室効果ガスを単離して質量分析計で測定しているが、濃度と同位体比の連続観測の展開によって、気候変化が温室効果ガスの発生・吸収・消滅に及ぼすフィードバックプロセスの研究を大きく進展させるためには、CRDS による安定同位体比の測定精度を質量分析計レベル以上に向上させることが課題である。

#### ② BGC Argo 搭載化学センサーの高性能化

BGC Argo など、自動海洋観測装置による生物地球化学測定においては、S/N 比が小さく、特に出力のドリフト（センサー応答の時間変化）の小さい安定したセンサーの開発が肝要となる。Argo フロートの場合は、陸上で予め検定しておくとともに、海洋への投入時に現場のできるだけ近傍で観測船からの採水などによって高い精度でデータを取得し、これを使ってセンサー出力を検定する必要がある。しかし、その後、センサーを直接的に検定する機会は極めて限られる。最深潜航深度付近の海水の組成が時空間的に安定していると仮定できる場合には、観測船による過去の高精度観測のデータと比較することで検定する方法も考えられるが、一点検定に過ぎず、必ずしも他の濃度領域の出力の検定を担保できない。海洋酸性化や貧酸素化を 10 年ほどの観測で検出するために必要なデータの精度は、pH が 0.002、酸素濃度が  $1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ （表層濃度の 0.5% 以下）であることから、それに匹敵する長期的な安定性を有する高性能のセンサー開発が重要な課題である。

### ③フロートの小型化・長寿命化・低価格化

Argo フロートは、現在、アメリカとフランスの計4社が製品化し、販売しているが、長さは1m余り、重さは20kgほどあって、開発初期から大きな変化がなく、船上などでの取扱いは容易ではない。また、洋上で船舶と衝突した場合などに相手を損傷させる恐れが大きいこともあり、海況監視のニーズが高い沿岸域では展開しにくい状況にある。これらの問題を克服し、Argo フロート観測を維持・発展させるためには、技術革新によるフロートの小型化・軽量化と一台当たりの観測期間の長期化（長寿命化）、そして低価格化が課題である。Argo フロートの長寿命化を図りつつ、生物地球化学センサーなど多くのセンサーを搭載させ、なおかつ運転コストを下げるには、より小型で大容量の電池の開発も課題である。同時に、Argo フロートなど自動海洋観測装置による観測の発展には、洋上のArgo フロートから迅速・安定的かつ安価にデータを送受信できる通信網の整備も課題である。

## (6) その他の課題

### ■衛星による観測

#### ①我が国として整備すべき観測データ項目の認識とデータ入手先についての戦略明確化、データ処理機能の強化

これまで地球観測衛星については、GCOS/CEOS で識別された ECVs リストを参考にしつつ、その充足を目指して計画立案/各々のミッション推進を実施してきた。しかしながら、我が国として気候変動観測についてどのような観測データベースを整備すべきかについて公式の設定は行われていない。他国との協力によるデータ取得も含め、観測データベース整備について、オープンな議論の下、国としての方針を定めていく必要がある。

データを扱うためのプラットフォームの整備、運用とともに、データサイエンティストの観測データへの習熟やアプリケーションの研究開発などが喫緊の課題であり、またアウトプットとしての社会情報の位置づけの検討についても課題である。米国では商業クラウド業者の提供するプラットフォームやNASA などによる研究が、欧州ではコペルニクス DIAS と HORIZON2020 などの研究開発及び人材育成において主要な役割を果たしている。

#### ②国際協力戦略含め我が国としての地球観測計画を立案、評価判断する機能の強化

前項の議論を受け、それらの観測要求を基に、我が国の衛星観測システムをどのように実現していくかについて計画を立案し、それらを検査する必要がある。衛星観測技術の性格から広範とならざるを得ない議論を、各専門分野の立場から補助する機能の強化が課題である。

#### ③複数省庁で利用される観測衛星の予算化の仕組み、衛星運用機関の必要性

現在、提案された衛星ミッションの予算化については、各省庁の予算に帰属されるが、共用目的で使用されるものがほとんどであり、こうしたものの予算化の仕組みを考える必要がある。また JAXA 等研究開発機関が科学技術研究を実施する一方で、開発された技術を用いた衛星を社会インフラとして継続的に運用・利用推進する目的を持つ機関の設置が課題である。

④若手研究開発人材の枯渇対策、知と経験の体系化、拠点化と国際交流強化

衛星地球観測の研究開発人材については、世代交代が必ずしも適切にできておらず急速な科学技術力低下が発生しつつある。これまでに得られた知見を体系化し、若い世代を教育・啓蒙し科学技術力を維持するための実施体制や拠点の整備が課題である。

■大気の観測

①長期観測の実施体制

国策での長期観測に関する戦略作りと計画実装が必要である。たとえば米国の NEON (National Ecological Observatory Network) では 2019 年から 30 年間の本観測実施が、欧州の衛星観測計画では MetOp などのシリーズ化によって 30 年規模の気象・地球観測衛星計画が実装されている。また欧州では ICOS (Integrated Carbon Observation System) として温室効果ガスの地上観測について EU 全体で長期にサポートする計画が実施されている。わが国での計画では 5 年程度のプロジェクトに依存する点が多い点を見直し、特色を持った長期観測を維持するメカニズムを構築していくことが必要である。例えば、GCOM-C, GOSAT, PALSAR などの我が国の高性能な後継センサを高度化しつつ、継続的に打上げていくことにより我が国の優位性を持続することができると期待される。また、次期静止気象衛星（ひまわり 10・11 号だけでなくそれ以降）の継続的な打ち上げについては、気候変動に関わる成分の計測の可能性も含めて、検討が必要である。SKYNET や AD-NET 等の地上観測ネットワークも持続的な長期観測のメカニズムを検討すべき段階にあり、特に、観測のためのインフラ（人的リソースを含む）の維持が課題となっている。

②観測専用航空機

先端的で高精度な観測装置を開発して搭載でき、エアロゾル・雲の相互作用など、現象解明の切り札となる観測が実施できる観測専用航空機が新たに必要である。

③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、安全上の配慮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の鉛直プロファイル観測のために必要な安全確保技術の確立が課題である。

■海洋の観測

現在、日本の海洋観測を担う観測船は、すべて日本の造船会社によって建造された船だが、観測船に搭載されている海洋観測装置や自動観測機器の大半は欧米の（ベンチャー）企業によって開発された製品である。たとえば、Argo フロートについては国内でも一社が深海用フロートを製作・販売しているが、世界の海に 4000 台近く展開されている水深 2000m までの Argo フロートはすべてアメリカまたはフランス製である。搭載されているセンサーも、国内では一社が優れた酸素センサーを開発・販売しているが、他はすべて海外製である。キャビティリングダウン分光分析装置も、すべてアメリカ製である。日本の技術開発力はこれらの分野にほとんど活かされていない。日本メーカーの参入を妨げる要因の一つとして、市場が大きくないことが挙げられる。それゆえ開発にかかる資金援助の拡大が必要である。

(7) 国際比較

■衛星による観測

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	○	↘	IPCC や国際会議における活動は活発であるが、欧米と比較して先端的な研究を実施している人数が少なく層が薄い。若い世代の育成が間に合っていない。世代交代や拠点化などの国内体制整備が必要
	応用研究・開発	○	↘	気候変動観測衛星についての戦略立案がここ数年停止しており、次世代の衛星システムについての準備がされていない。産官学それぞれにおいて若い世代の育成努力が不足しているなど早急に次期戦略が必要
米国	基礎研究	◎	→	NASA-GIS, NOAA やスクリプス研究所、大学および軍関連の研究機関を中心とし、基礎研究についても世界をリードしており、継続中
	応用研究・開発	○	→	地球観測衛星については、Decadal Survey など長期計画を立案しているが、開発実施に至らないあるいは大きく遅れる計画も散見されており、後継機と新規ミッションのバランスを調整中。民営化より軍関連の研究推進が顕著
欧州	基礎研究	◎	→	基礎研究については欧州全体としてはすべての分野について十分な研究体制が敷かれており、ほぼすべての分野をカバーできている。しかしながら先端性については米国あるいは日本などから遅れるところもある 【英国】 基礎研究レベルでは Met Office などを中心とした研究の層が厚く、研究をリードする分野も多い 【ドイツ】 大学やマックスプランク研究所などの組織を中核として、特に電波センサを利用する分野を得意としている 【フランス】 大学を中心とした基礎研究を展開しており、特に光学センサに関する分野を得意としている
	応用研究・開発	◎	→	センチネル衛星群を含むコペルニクス計画において、継続観測に関するインフラシステムおよび得られたデータの社会利用を進めており、民営化の途上にある 【英国】 一時期開発から撤退したので、開発力はかなり低下したが、SSTL など小型衛星については世界的にリードする力を保持しており、今後中大型についても開発再開の方向性 【ドイツ】 DLR を中心とし、X-band SAR 衛星の民営化などを実施し (Tandem-X)、発展を試みている。近年ライダーに対する研究も推進中である 【フランス】 ツールーズの CNES や AIRBUS などによる光学衛星の開発は欧州をリードしており、またライダーの開発も推進している
中国	基礎研究	△	↗	欧州からのドラゴンプログラムによる科学技術移転・流入によりここ 15 年程度急速に成長しつつある。しかしながら、まだ習得中の状態であり、自ら新しい研究を確立する段階にはない。
	応用研究・開発	○	↗	国家資本集中により今後 10 年で 100 機程度の地球観測衛星を開発打ち上げるとしており、急速に技術的キャッチアップアップを行おうとしている状況である。温室効果ガス観測については、様々な観測方式による複数の衛星を打ち上げている。
韓国	基礎研究	△	→	韓国気象庁や大学などによる研究がなされているが、日米欧研究を追随するレベルに有り、急速に発展する様子はない。
	応用研究・開発	△	→	観測衛星については欧州 (AIRBUS) からの購入により観測を行っている。自らは小型の衛星開発を実施しているが実用衛星レベルの開発を自国で行う能力を持つには時間がかかると思われる。

■大気の観測

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	○	→	国際連携などを活用した特色ある観測データ収集や独自のアイデアに基づいた収支解析、大気組成のデータ同化などで一部傑出した成果が出ているが大幅には拡大していない。個々の観測などでは技術の進展がみられるが、それらを統合的に解析する分野での人材が不足している。また全般に若手研究者の育成に問題を抱えている。
	応用研究・開発	○	→	現場観測のためのユニークな観測機器・技術開発が一部にみられるが拡大していない。
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。問題設定に優れ、航空機観測なども用いて、課題解決を強く意識した、発見性の高い研究成果を挙げている。若手研究者の層も厚い。
	応用研究・開発	◎	→	ベンチャー企業などにおいて地上観測での先端的な機器開発を多く手掛けている。
欧州	基礎研究	◎	→	先端的な衛星データと地上観測の連携や、国際標準作りにおいて活発である。また各国が上手く連携・共同研究を進めている。 【英国】 中国との連携が活発であり、気候変動と関連するプロセス理解の増進で成果が多くみられる。 【ドイツ】 研究の層が厚く、北極観測や航空機観測などについても総合的かつ主導的に実施している。傑出した研究機関があり、組織として上手く研究が進められている。 【フランス】 マクロン大統領の施策により優秀な科学者を世界から集めるなど積極的な推進策が見られる。伝統的な赤外衛星観測と解析で進展がみられる。傑出した研究機関があり、EU諸国、中国などを顕著な成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	↗	ECMWFやCopernicus計画でのサービスや、高解像度衛星の実現などにおいて、顕著な成果が上がっている。 【英国】 小型ローコストセンサの開発や実装を主導した研究が近年活発である。 【ドイツ】 精度等に優れた計測機器の継続的な開発がみられる。 【フランス】 ライダなど計測機器の継続的な開発がみられる。
中国	基礎研究	○	↗	大気汚染や温室効果ガスの現場・航空機・衛星観測に進展がみられ、自国の技術も活用しながら欧米を追いかけている。若手研究者、博士課程学生の層が厚く、人材には非常に恵まれており、今後の著しい発展が期待される。
	応用研究・開発	△	→	独自の技術での製品化はみられるが、自国での活用の域を出ていない。
韓国	基礎研究	○	↗	静止衛星からのGOCI後継機による海色計測やGEMS大気汚染計測計画、PM2.5プロジェクトなどによって研究開発が活発化している。自国のセンサ開発は乏しい。若手研究者の育成については、日本と似た問題を抱えている。
	応用研究・開発	△	→	機器開発の産業化などにおいては活発な状況はみられない。

■海洋の観測

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	◎	→	海洋 CO <sub>2</sub> 観測においては、海洋研究開発機構が主に全球船舶海洋観測プロジェクト (GO-SHIP) への貢献などで海洋内部の世界的な観測を、気象庁が西部北太平洋広域の海洋表層と内部の観測を、国立環境研が商船による日本と米国やオーストラリアなどの間の表層観測を行っており、国際的に重要な貢献をしている。 アルゴについては、日本が展開している現行のアルゴの数は、海洋研究開発機構と気象庁で合わせておよそ 150 台であり、その数は突出した米国、オーストラリア、フランス、ドイツ、イギリスに続いている。しかし、生物地球化学センサーを搭載した BGC アルゴについては、海洋研究開発機構が展開する予定であるものの、現行ではゼロで、他国から大きく遅れている。
	応用研究・開発	△	→	深海アルゴの分野において、鶴見精機が“Deep NINJA”を開発し、海洋研究開発機構がこれを用いた深海観測を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	世界の海洋観測においては、衛星観測のみならず現場観測においても、米国の寄与は極めて大きい。 海洋 CO <sub>2</sub> 観測においても、GO-SHIP を主導し、海洋内部の観測を世界規模で行っている。ただし、今後も継続できるかどうかは他国と同様に楽観できる状況にはない。 アルゴにおいても、現在、世界の海で展開されている 3700 台以上のフロートのうち、2000 台以上は米国が投入したフロートである。生物地球化学センサーを搭載した BGC アルゴについても、世界の海に展開されているおよそ 300 台のうち半数は米国によって投入された。これらの多くは、NSF の研究資金による南大洋観測の SOCCOM プロジェクトによって展開されたものである。
	応用研究・開発	◎	→	温室効果ガスの観測に変革をもたらしつつあるキャビティリングダウン分光 (CRDS) 装置を開発し市販している PICARRO 社、LOS GATOS Research 社とともに米国のベンチャー企業である。 世界の海に 4000 台近くが展開されている Argo フロートは、“Navis” (Sea-Bird Scientific, U.S.A.) , “APEX” (Teledyne Marine, U.S.A.) , “Alamo” (MRV Systems, U.S.A.) が米国製であり、それらに搭載されている水温・塩分・圧力センサーの RBRargo CTD sensor (RBR Ltd., U.S.A.) と SBE41 CTD (Sea-Bird Science) も、ともに米国企業の製品である。
欧州	基礎研究	◎	→	EU の研究プロジェクト CarboOcean や CarboChange による大西洋と南大洋の観測で国際的な存在感を示した。現在も大西洋の海洋観測システム AtlantOS を企画し、海洋の気候変化や物質循環の持続的観測に力を入れている。 【英国】 ブリマス海洋研究所、国立海洋学センター、大学などの研究者が、海洋観測を推進しており、海洋 CO <sub>2</sub> 観測においては、GO-SHIP による大西洋内部の観測や大西洋の観測に一定の貢献をしている。 アルゴにおいては、日本とほぼ同等の貢献があるが、BGC アルゴの展開も進めている。 【ドイツ】 キール大学や GEOMAR において、海洋観測やその技術開発が活発に進められており、海洋 CO <sub>2</sub> 観測においては、GO-SHIP による大西洋内部の観測や大西洋の観測に一定の貢献をしている。 アルゴの展開においても日本と同程度の寄与がある。 マックスプランク研究所などでは、気候・海洋の数値モデリングが高レベルで行われている。 【フランス】 パリ大学などの研究者が、大西洋や、フランス領を有するインド洋とその南の南大洋において、海洋 CO <sub>2</sub> 観測に一定の貢献をしている。 BGC アルゴは、アメリカとフランスの研究者が中心になって推進してきた経緯もあり、米国に次ぐ 60 台近くを北大西洋や地中海で展開している。 海洋の数値モデルによる物質循環の研究も、LSCE などで行われており、高い水準にある。

欧州	応用研究・開発	△	→	【英国】 -- 【ドイツ】 -- 【フランス】 nke instrumentation, 社が Argo フロート “Arvor” や “Deep Arvor” を市販している。
中国	基礎研究	○	↗	青島に大規模な海洋研究所の「青島海洋科学・技術国家実験室」を設立して、世界中から人材を集めるほか、砕氷船や観測船の建造を進めるなどして、海洋研究に急速に力を入れている。海洋の CO <sub>2</sub> 研究では、砕氷船による北極海観測などを実施しているが、その他の活動については状況が良く分からない。アルゴは日本に次ぐおよそ 100 台を西部北太平洋に展開しているほか、BGC アルゴの観測も開始している。
	応用研究・開発	△	→	
韓国	基礎研究	○	→	海洋研究に力を入れ、KIOST を拡充させてきた。海洋 CO <sub>2</sub> 観測も実施しているが、必ずしも目立った成果を挙げているとは言えない。アルゴは主に日本海に 40 台ほどを展開しており、そのうちの 1 台が BGC アルゴである。
	応用研究・開発	△	→	

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2) 「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## (8) 参考・引用文献

全体として参考とした文書

- TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ編「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析：気象研究ノート第 234 号」,2017.
  - 日本学術会議 地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会「提言 我が国の地球衛星観測のあり方について」,2017.
  - Shimoda H. and Kimura T., Comprehensive Remote Sensing 1st. ed. Elsevier: 246-280, 2017.
- 1) 気象庁「異常気象レポート 2014 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し (VIII)～」,2014.
  - 2) Herring Stephanie C., et al., “Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99 (1), 2018.
  - 3) IPCC, ” Climate Change 2013: The Physical Science Basis,” Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2013.
  - 4) IPCC, “Summary for Policymakers,” *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2013.
- 5) Le Quéré Corinne, *et al.*, "Global Carbon Budget 2017," *Earth System Science Data*, 10: 405-448, 2018.
  - 6) Scott Doney C., *et al.*, "Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> Problem," *Annual Review of Marine Science*, 1: 169-192, 2009.
  - 7) Global Climate Observation System (GCOS), "Systematic Observation Requirements for Satellite Based Products for Climate," GCOS-107, World Meteorological Organization, 2006.
  - 8) University Corporation for Atmospheric Research, "Climate Data Guide," <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-data-records-overview> (2019年2月1日アクセス) .
  - 9) FLUXNET Network, "Fluxdata," <http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/> (2019年2月1日アクセス) .
  - 10) TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ編「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析：気象研究ノート第234号」,2017.
  - 11) World Meteorological Organization, "WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations," 2nd ed., GAW Report No. 227, 2016.
  - 12) Schmale Julia, *et al.*, "Collocated Observations of Cloud Condensation Nuclei, Particle Size Distributions, and Chemical Composition," *Scientific Data* 4: 170003, 2017.
  - 13) BACCHUS project, <https://www.bacchus-env.eu/in/index.php> (2019年2月1日アクセス) .
  - 14) "Tropospheric Ozone Assessment Report (TOAR)," *Elementa: Science of the Anthropocene*, <https://collections.elementascience.org/toar/> (2019年2月1日アクセス) .
  - 15) Arrhenius Svante, "XXXI. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41 (251): 237-276, 1896.
  - 16) Kleypas J. A., "Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs," *Science*, 284: 118-120, 1999.
  - 17) Bakker Dorothee C. E., *et al.*, "A Multi-decade Record of High-quality fCO<sub>2</sub> Data in Version 3 of the Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT)," *Earth System Science Data*, 8: 383-413, 2016.
  - 18) Olsen Are, *et al.*, "The Global Ocean Data Analysis Project Version 2 (GLODAPv2) - an Internally consistent Data Product for the World Ocean," *Earth System Science Data*, 8: 297-323, 2016.
  - 19) Kwiatkowski Lester and Orr James C., "Diverging Seasonal Extremes for Ocean Acidification during the Twenty-first Century," *Nature Climate Change*, 8: 141-145, 2018.
  - 20) Hansen M. C., *et al.*, "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change," *Science*, 342: 850-853, 2013.
  - 21) Irie Hitoshi, *et al.*, "Turnaround of Tropospheric Nitrogen Dioxide Pollution Trends in China, Japan, and South Korea", 12: 170-174, 2016.

- 22) 鶴野伊津志 他「PM2.5 越境問題は終焉に向かっているのか?」,『大気環境学会誌』,52 巻, 6 号: 177-184, 2017.
- 23) World Meteorological Organization (WMO), “Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications,”  
[https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Draft\\_low\\_cost\\_sensors.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Draft_low_cost_sensors.pdf)(2019 年 2 月 1 日アクセス) .

## 2.17 気候変動予測

### (1) 研究開発領域の定義

気候変動予測に関する科学、技術、研究開発を記述する。

気候変動予測モデルの開発は各種物理法則により構築され、観測データを用いて検証される。

ここでは、大気や海洋の物理法則から成る、地球全体（全球）レベルあるいは特定の領域を対象とした気候モデルのほか、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。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システム開発も対象とする。解像度やダウンスケーリングの現状、および国内または国際的に共有されている目標値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、地球システムモデル、領域モデル、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、地球インフォマティクス

### (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、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。こうした環境変化については、すでに影響が顕在化していると考える専門家も多く、さらにここ数十年から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ることから、予測技術の高精度化が強く期待される。

地球表層・海洋・大気についての必要十分な観測に基づく高精度予測技術の確立により、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、海洋や地球表層に現れる自然環境や極端現象の変化の検出と予測、および温室効果ガス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。また予測された降水量・日射量や風速、海水温等に関するデータは、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。

[研究開発の動向]

地球温暖化の影響が顕在化している、と考える専門家は多い。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<sup>1,2)</sup>。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、大気や海洋の運動を再現し予測する気候モデルによる予測がます

まず重要となってきた。

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気候モデル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<sup>3)</sup>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、気候モデルを高解像度化し、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<sup>4)</sup>。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いく必要がある。

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、温暖化の影響評価のために作成されたデータセットd4PDF<sup>4)5)</sup>では、力学的ダウンスケーリングとアンサンブル実験(条件を少しずつ変えた実験を多数行うこと)によって大規模なデータセットを作成し、様々な分野での影響評価に役立っている<sup>6)</sup>。

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、台風などの極端現象の変化、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。

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、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。例えば今田ほか<sup>7)</sup>は、2013年夏の日本の猛暑に相当するような異常高温の発生確率が10倍前後になっていると評価している。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。

一方、適応策だけではなく、温暖化の進行そのものを止める緩和策の立案にも、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与えられるよう、気候モデルに生態系の働きなどを組み入れた地球システムモデル(ESM)が用いられることが多い。ESMを用いた研究を通じ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CO<sub>2</sub>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<sup>8)</sup>。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°C目標や、2015年に締結されたパリ協定で強調された1.5°C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「炭素予算」と表現される（これは英語表記のCarbon budgetの和訳で、本稿執筆の2018年8月現在で定着した術語とは言えないが、ここではこう訳することにする）。

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<sup>9)</sup>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 $9.4 \pm 0.5 \text{ PgC/y}^{10)}$ の20数年～50年ほどの量にあたる。1.5°C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°C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°C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、という研究結果が複数発表されている<sup>9), 11)-13)</sup>。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るだろう。

#### （4）注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### ①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」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。

##### ②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°C以内に抑え、さらに1.5°C以内に抑える努力も進めることが言明された<sup>14)</sup>。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°C目標と異なり、1.5°C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°Cと2°C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<sup>15)</sup>、2018年10月にはIPCCにより1.5°C目標に関する特別報告書（SR1.5）が公表される予定である。

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。

### ③十年規模変動予測

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<sup>16)</sup>。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短い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<sup>17)</sup>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。国内では海洋研究開発機構が、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。

### ④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。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といった、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<sup>18)</sup>。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<sup>19)</sup>。例えば米国LBNLのJonesら<sup>19)</sup>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。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<sup>20)</sup>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<sup>21)</sup>。

## ⑤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）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<sup>22)</sup>、日本からはDIAS<sup>23)</sup>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<sup>24)</sup>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<sup>25)</sup>。前者の例として、各国研究機関が温暖化予測に用いるシミュレーションモデルの仕様や実験内容を統一的に記述できるようにしたES-DOC（Earth system documentation）<sup>26)</sup>といった活動を挙げることができる。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のESFM（Earth System Modeling Framework）<sup>27)</sup>で開発中である。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<sup>28)</sup>。国内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<sup>29)</sup>。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。

## [注目すべき国内外のプロジェクト]

## ①国内プロジェクト

国内における地球温暖化予測モデルおよび力学的ダウンスケーリングに用いる領域モデルの開発は、主に、文部科学省により2017年度より5年間の予定で実施される「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（統合P）において行われている。統合Pなどの成果物としての予測データは、統合P内での防災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「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」（S-14）においても活用され、気候変動適応法に基づいた適応策立案に役立てられる。

領域モデルは、扱う空間スケールは全球モデルに比べ当然小さいものの、数kmといった高い解像度を持つことも多いため、計算負荷は全球モデルより重くなることもある。解像度を高くするとアンサンブル実験の数が少なくなる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d4PDF<sup>5)</sup>では領域モデルの解像度は20kmと、比較的粗い。数kmの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。

またそれ以外にも、統合Pによる温暖化予測データは、国際配信システム（ESGF）構築に参加する「データ統合・解析システム」（DIAS、文部科学省）を通じ、国内外に発信される。

## ②国際プロジェクト

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, WMO 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するなどの調整を行っている。WCRPは地球温暖化予測に関して最も影響力の強いプロジェクトとあってよい。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「地球システムグリッド連盟」(ESGF)や、メタデータの系統的な記述法を検討する「地球システムドキュメンテーション」(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。

## (5) 科学技術的課題

### ①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気候モデルに関しても、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 Constrain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。

### ②低排出シナリオの検討

従来、ESMを用いた地球温暖化予測では、自然変動に対して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気体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、排出が小さい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、現在の多くの地球システムモデルにおいては、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<sub>2</sub>を含む温室効果気体、エアロゾル、生態系との相互作用過程を陽に組み入

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。

### ③モデル精度向上に伴う計算量増大

ESM 開発の今後の大きな方向性として、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大気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。

### ④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ッシングユニット(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。

### ⑤複合問題としての地球環境問題

ESMでは、温室効果気体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、農作物や生物燃料栽培、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る。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。

## （6）その他の課題

ESM 開発に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、ESM 開発に深く関わることを忌避する傾向が見受けられる。こうした状況の改善のため、研究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。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。

また、地球環境問題の解決のためには、ESM 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 ESM による予測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。

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 IS-ENES<sup>20</sup>、ESMF<sup>27</sup> 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。国内でも同様の取り組みが強く望まれる。

## （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	◎	→	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。文科省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（統合 P）などで資金が拠出されているが、今後の趨勢は不透明である。地球規模の分野横断型での温暖化影響評価に関する世界初の国際プロジェクト（ISI-MIP、欧州が主導）へは、日本を拠点に活動する研究者も参加。
	応用研究・開発	○	↗	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、統合 P、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う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	◎	↘	地球流体力学研究所、米国大気研究センター（NCAR）、オークリッジ国立研究所、NASA など多数の研究機関が ESM 開発に取り組んでいる。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。

米国	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。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	◎	→	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 では高解像度気候モデル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】 英気象庁ハドレーセンターなどが早くから ESM 開発を手掛けている。エクセター大学やレディング大学、イーストアングリア大学などでも ESM 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 ESM の開発が行われている。またドイツ航空宇宙センターの研究者が次期温暖化予測実験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】 フランス国立科学研究センター (CNRS) などで ESM の開発が行われている。仏国で開発された海洋モデル 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。
	応用研究・開発	◎	↗	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 ISIMIP 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。
中国	基礎研究	△	↗	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 7 つの研究グループが ESM 開発に取り組む <sup>31)</sup> 。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。
	応用研究・開発	○	↗	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	△	↗	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 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	○	→	2015 年に「第 2 次気候変動影響評価報告書」が公表され、様々な分野における影響や脆弱性が評価された。2020 年までの適応マスタープランも策定されている。

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2) 「現状」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

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

△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考・引用文献

全体として参考とした文書。

- 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>（平成30年8月21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>（平成30年8月21日アクセス）。

- 1) 「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日オンライン，  
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZ033372420V20C18A7MM0000/>（2018年8月17日アクセス）。
- 2) 『中日新聞』，2018年8月2日オンライン，  
<http://www.chunichi.co.jp/article/front/list/CK2018080202000082.html>（2018年8月17日アクセス）。
- 3) IPCC, “Climate Change 2007: The Physical Science Basis,” Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2007.
- 4) 気象庁「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」『地球温暖化予測情報』9巻：79, 2017.
- 5) database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF),  
<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>（2018年8月17日アクセス）。
- 6) 環境省，文部科学省，農林水産省，国土交通省，気象庁「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～」：130, 2018.
- 7) Imada Y., *et al.*, “The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013,” Explaining Extreme Events of 2013: From A Climate Perspective, *Bulletin of American Meteorological Society* 95 (9): S52-S54, 2014.
- 8) IPCC, “Climate Change 2013: The Physical Science Basis,” Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change, Cambridge University Press: 1535, 2013.
- 9) Millar Richard J., *et al.*, "Emission Budgets and Pathways Consistent with Limiting Warming to 1.5°C," *Nature Geoscience* 10: 741-747, 2017.
  - 10) Le Quéré Corinne, *et al.*, "Global Carbon Budget 2017," *Earth System Science Data Discussions*, 2018.
  - 11) Goodwin Philip, *et al.*, "Pathways to 1.5 °C and 2 °C Warming Based on Observational and Geological Constraints," *Nature Geoscience*, 11: 102-107, 2018.
  - 12) Tokarska Katarzyna B. and Gillett Nathan P., "Cumulative Carbon Emissions Budgets Consistent with 1.5°C Global Warming," *Nature Climate Change*, 8: 296-299, 2018.
  - 13) Holden P. B., *et al.*, "Climate-carbon Cycle Uncertainties and the Paris Agreement," *Nature Climate Change*, 8: 609-613, 2018.
  - 14) Paris Agreement/CP/2015/L.9/Rev.1, UNFCCC secretariat,  
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (2018年8月19日アクセス) .
  - 15) Schleussner Carl-Friedrich, *et al.*, "Differential Climate Impacts for Policy-relevant Limits to Global Warming: The Case of 1.5 deg.C and 2 deg.C," *Earth System Dynamics*, 7, (2): 327-351, 2016.
  - 16) Boer George J., *et al.*, "The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) Contribution to CMIP6," *Geoscientific Model Development*, 9 : 3751-3777, 2016.
  - 17) Roland Séférian, *et al.*, "Assessing the Decadal Predictability of Land and Ocean Carbon Uptake," *Geophysical Research Letters*, 45: 2455-2466. 2018.
  - 18) Collins W. D., *et al.*, "The Integrated Earth System Model Version 1: Formulation and Functionality," *Geoscientific Model Development* 8: 2203-2219, 2015.
  - 19) Andrew Jones D., *et al.*, "Greenhouse Gas Policy Influences Climate via Direct Effects of Land-Use Change," *Journal of Climate*, 26: 3657-3670, 2013.
  - 20) Matsumoto Ken' Ichi *et al.*, "Impact of Climate Model Uncertainties on Socioeconomics: A Case Study with a Medium Mitigation Scenario," *Computers & Operations Research*, 66: 374-383, 2016.
  - 21) Van Vuuren Detlef P., *et al.*, "A Comprehensive View on Climate Change: Coupling of Earth System and Integrated Assessment Models," *Environmental Research Letters* ,7: 024012. 2012
  - 22) Williams Dean N., *et al.*, "A Global Repository for Planet-Sized Experiments and Observations," *Bulletin of the American Meteorological Society* ,97: 803-816, 2016
  - 23) Data Integration & Analysis System (DIAS),  
<http://www.diasjp.net/> (2018年8月20日アクセス) .
  - 24) Earth System Documentation (ES-DOC),  
<https://earthsystemcog.org/projects/es-doc-models/> (2018年8月20日アクセス) .
  - 25) Eyring Veronika, *et al.*, "Towards Improved and More Routine Earth System Model Evaluation in CMIP," *Earth System Dynamics* ,7: 813-830, 2016.
  - 26) Earth System Documentation (ES-DOC),  
<https://earthsystemcog.org/projects/es-doc-models/> (2018年11月18日アクセス) .

- 27) Earth System Modeling Framework (ESMF),  
<https://www.earthsystemcog.org/projects/esmf/>（2018年8月20日アクセス）.
- 28) Valcke S., *et al.*, "Coupling Technologies for Earth System Modelling," *Geoscientific Model Development*, 5: 1589-1596, 2012.
- 29) Arakawa Takashi, *et al.*, "Coupling Library Jcup3: Its Philosophy and Application," *Geoscientific Model Development Discussions*, 1-27, 2018.
- 30) IS-ENES2 project,  
<https://portal.enes.org/ISENES2>（2018年8月20日アクセス）.
- 31) Zhou Tianjun, *et al.*, "Development of Earth/climate System Models in China: A Review from the Coupled Model Intercomparison Project Perspective," *Journal of Meteorological Research*, 5: 762-779, 2014.

## 2.18 水循環

### （1）研究開発領域の定義

水循環に関する科学、技術、研究開発を記述する。

地域や全球など様々なスケールの水の分布や動態の把握、モデル化、シミュレーション等を対象とする。より具体的には、地球温暖化による環境の変化、産業や人口の社会的構造の変化により影響を受ける水循環の現状と将来を把握するための、観測や予測技術を対象とする。観測技術としては、衛星や地上観測、センサーネットワーク、同位体分析等を、予測技術としては流域から全球レベルの地上や地下の水循環のモデル開発とデータの活用等を含める。さらに、観測や予測技術を基盤とした気候変動への緩和や適応として、表層水と地下水の持続可能な利用と管理のための取組（河川管理やデータ配信、デジタル化、ウォーターフットプリントなど）も対象とする。

### （2）キーワード

レーザー分光分析法、フェーズドアレイ気象レーダー、生体影響、ダム再生、準実時間予測、危機管理型水位計、事前放流、アンサンブル予測、水循環基本法、短時間降雨予測

### （3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

水は生命維持と健康で文化的な暮らしに不可欠である。産業や食料生産も大量の水消費に支えられている。一方、洪水や渇水は甚大な被害をもたらす。世界では風水害が地震などよりも主要な自然災害であり、日本でも頻度や損害保険金の支払額などからみて最も深刻な自然災害は風水害である。このように、水の循環とそれにとまなう物質循環の測定、理解と予測は豊かで安全な社会の構築に不可欠である。国際的な観点からも、SDGsには水や衛生の利用可能性と持続可能なマネジメントの確保をはじめとして、貧困の撲滅、食料安全保障と農業、健康、エネルギー、女性の平等の実現など水と密接に結びついた目標が数多く含まれている。また、水が国際的な戦略物質として利用されつつあり、水資源開発や水の輸出入、水処理など水ビジネスが国際的に拡大している。

[研究開発の動向]

水循環研究は、主に水文学を中心とした素過程を探求する基礎的分野と、洪水警戒情報の発信やダムの運用などのより人に結びついた応用的研究に粗く分けることができる。さらに、基礎的研究にはリモートセンシングに代表される観測技術関連研究と全球モデルに代表されるような数値計算関連研究とに分けることができる。これらの区別は明確でなく、各分類をまたがる研究も多い。

基礎的研究として、降雨観測用レーダーの開発が進んでいる<sup>1)</sup>。現在では電気系統、通信系統の技術開発が進み<sup>2)</sup>、ネットワーク化された降水量推定および短時間降雨予測が行われている。人工衛星を用いた観測も活発で、世界初の降雨レーダー（Precipitation Radar : PR）を搭載した熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission : TRMM）は、長期運用（1997-2015）により海陸問わず均質な長期降水観測データを提供し、降水システムの理解を飛躍的に高めた<sup>3)</sup>。現在では様々な衛星観測をもとに、JAXAが全球衛星降水量情報（Global

Satellite Mapping of Precipitation : GSMaP) を発信している。

衛星観測による積雪分布の把握については、可視近赤外センサーによる積雪面積の抽出に加え、受動型マイクロ波センサーによる積雪深・積雪水量の推定も試みられており、降水と同様な全球・長期間をカバーするデータセットが作成・公開されている<sup>4)</sup>。また、地域・流域スケールでは、航空レーザー測量に基づく詳細な積雪分布の把握も試みられている。さらに、温暖化に伴う降雪・積雪量の減少や融雪流出の早期化だけでなく、アンサンブル気候予測データベース (database for Policy Decision making for Future climate change : d4PDF) を用いて将来気候のもとでの豪雪の規模や発生頻度の変化について検討した事例も報告されている<sup>5)</sup>。

蒸発の研究は、植物の茎や幹内を流れる蒸散流を測定する方法や同位体比を利用する方法など、対象が限られるものの、新たな技術の導入も図られてきた。森林樹木による蒸散量を見積もる技術として、グラニエ法など、樹液流速の測定値から単木蒸散量を見積もる安価な技術が開発され、広く普及しつつある。単木蒸散量の見積を可能とする技術は、森林管理による蒸散量や森林内の水移動の変化を予測する技術を開発する上で、非常に有効な技術である。全体としては、より短い時間スケール、より広域を対象とした蒸発（散）量の評価へ進むとともに、蒸発散の構成成分を蒸散、地面蒸発や遮断蒸発に分ける努力がなされてきている。

河川流量観測法について、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : PIV) や粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry : PTV)、LSPIV 法 (Large Scale PIV)、STIV 法 (Space-Time Image Velocimetry) が実用化されている。3次元流速観測が可能な多層式超音波ドップラー流向流速計も広く用いられている。降雨から流量を推定する手法は、現在では数値地図情報を用いた分布型物理流出モデルが主流になりつつある。汎用ソフトとしてデンマーク水理・環境研究所の流域水循環解析統合ソフト MIKE-SHE や米国環境保護庁の SWMM (Storm Water Management Model) などが洪水対策や水資源計画に利用されている。国内では、リアルタイムの水位データを利用した同化手法の導入や数時間先の降雨データを用いた予測手法などの開発が進んでいる。安価な危機管理型水位計を全国に配置し、詳細な洪水予報も進められている。

地下水に関する研究は、地盤沈下が世界で社会問題を引き起こした 1960 年代から 1970 年代にかけては、地盤沈下問題を地下水流動問題として数値解析する研究が行われるようになった。1980 年代に入ると、有害廃棄物の投棄や不注意による有害物質の地下への漏えいによる地下水汚染問題がクローズアップされるようになり、現在に至るまで様々な研究が行われている。

水循環研究における同位体の利用については、水分子を構成する水素・酸素の安定同位体をトレーサー（追跡子）として用いる手法は降雨流出・地下水流動・蒸発散・大気水循環などの各過程について適用され、また水素や水中溶存炭素・塩素などの放射性同位体は年代測定に用いられてきた<sup>6)</sup>。これらによって水の起源・流動経路・滞留時間などの情報が実測値にもとづいて得られるようになった。レーザー分光分析法が普及し、現在では世界標準になりつつあり、この技術は航空機観測や衛星リモートセンシングなどにも応用され、新たなデータを提供している。一方、観測された同位体データを（時）空間的に補間して同位体マップを描くアイソスケープ手法が 2000 年代に大きく進展し、観測値が得られない地点での同位体比が推定可能になるとともに、応用範囲を拡大している。

応用研究としてダム運用高度化は気候変動下において期待が高まりつつある。1990 年代頃から、気象・水文予測情報と初期の人工知能技術を活用したダムのリアルタイム操作支援に関

する研究が行われた<sup>7),8)</sup>。2000年代には、既存貯留施設を有効に活用することで大規模な出水への対応や利水安全性の向上を図る機運が高まり<sup>9)</sup>、ダム弾力的運用に関する研究が行われてきた。富栄養化などの水質問題、濁りによる下流河川の生物生息環境への影響に加え、高経年化による堆砂量の増大や流木対策の研究も展開されている。国は、既設ダムの長寿命化、効率的かつ高度なダム機能の維持、治水・利水・環境機能の回復・向上、ダム再生技術の海外展開、ダムツーリズム等の推進による地域振興への寄与などを掲げ、既設ダムを有効活用するダム再生事業を推進している。

ローカルな洪水や渇水も、元をたざせばエルニーニョ南方振動や気候変動などに伴う地球規模の水循環変動によって生じており、その観測と理解、予測技術の向上は国際連合教育科学文化機関「国際水文学十年計画」(1965～1974年)以来の主要テーマである。地球温暖化に伴う気候変動など地球環境問題が国際的な課題となった1990年代以降、大気モデルと陸面モデルによる全球水循環変動推計などによる世界の水需給バランス推計や気候変動が水分野を通じて社会に及ぼす影響の推計などにおいて日本が世界をリードしている。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

水循環分野では近年、雨量観測技術が進んでいる。X帯に続き、C帯のレーダーも二重偏波ドップラー化されて雨量推定精度を向上し、インターネットとスマートフォンの普及に伴って、雨量推定、短時間降雨予測、3次元情報の利用、出水予測等への利用を促進している<sup>10)</sup>。その中ではレーダーに仰角があることでレーダーから遠いところを計測する際には上空を探知することで異なる降雨強度を算出する vertical profile of reflectivity (VPR)<sup>11)</sup>の解決が課題となる。一方、3次元で降水システムを測定する点において牛尾<sup>12)</sup>によるフェーズドアレイ気象レーダーは30秒で天球内の radar reflectivity factor をすべて観測できる点で革新的な研究である。レーダーを用いて降水強度を推定して短時間降雨予測を行う技術は進んできている。三好ら<sup>13)</sup>はスーパーコンピュータ京を使って前出のフェーズドアレイレーダーのデータを気象庁の非静力学的メソスケールモデルに対して30秒ごとに同化を実施して30分先までを予測するビッグデータ同化手法を開発している。原理的には力学的方法を用いているので、計算能力の向上を見込めば30分以上の降雨予測に対しても期待が持てる。利用について、貯水池管理、河川管理と言った大規模施設の管理だけでなく、下水道の管理や、道路交通情報<sup>14),15)</sup>と高性能レーダー雨量計ネットワーク (eXtended RAdar Information Network : XRAIN) のレーダー情報を組み合わせることで冠水等による交通障害検知の可能性があげられる。また、衛星観測においても TRMM の後継ミッションである全球降水観測 (Global Precipitation Measurement : GPM) は雪や弱い雨も対象とするため2周波レーダーを搭載、観測を継続している。流量観測においても無人航空機 (Unmanned aerial vehicle : UAV) や設置カメラ画像を用いたもの、複数の観測の様々な組み合わせが試行されている。一方で、情報量が膨大になり、解釈や理解を困難にしている事例もある。

水水量の推定値を実用に用いる研究も進んでいる。都市およびその周辺域での大気環境の再現精度は、近年の計算機能力向上と、空間平均モデルや  $k-\epsilon$  モデルなどの乱流計算スキームの向上を背景に、飛躍的に向上しつつある。現在は、理想的な条件下でのシミュレーションから、より大規模な大気場の再現や、メソ気象モデルとのカップリング、データ同化など、よ

り現実な大気場でのシミュレーションへ技術開発のターゲットがシフトしている。今後は、実際に人間が往来する、複雑な3次元構造を持つ都市内部のストリートキャニオン（ビル間）における大気乱流や放射伝達など、実際に人間が生活する場の熱環境、放射環境の再現が課題である。そのためには、新たな乱流スキームや放射スキームの開発が必要となる。また、人間の生活場としての快適な都市の大気/放射環境を実現するためには、大気場のシミュレーションに加えて、大気場に対する人体の生理反応のモデリングが必要となる。

気象・水文予測情報などを活用して、出水が予測される場合にあらかじめ放流を行い、多目的ダムの貯水位を事前に下げることで洪水調節のための空き容量を増大させる事前放流操作に関する研究が近年行われている<sup>16),17)</sup>。雨水の流出時間が短い傾向にある我が国ではこうしたきめの細かい操作が必要であることもあり、この研究分野では世界をリードしている。また、近年、EUや米国、日本などで提供されている現業アンサンブル気象予報のダム運用への利活用に関する研究も各国で行われている<sup>18),19),20)</sup>。大ダムの新設が難しくなっており、既設ダムの高経年化対策と長寿命化に向けた技術開発が主体である。設備管理へのUAVやロボットの活用、AI、IoT、ICTなどの活用、AR、VR技術を活用した技術継承支援システムなどが最近のトピックスである。

水循環モデル開発では、ダム貯水池操作や灌漑取水、灌漑需要を推計するための穀物作付け成長モデル、地下水からの取水などの人間活動を組み込んだ陸面モデルや、氾濫を考慮可能なグローバル水動態モデルなどが開発され、現時点では日本が世界をややリードしている。また、観測雑音のため精密な氾濫計算には利用が難しかった全球デジタル標高データの大幅な改良、国際共同による準実時間でのGSMaPの配信など境界条件情報の向上により、精度の良い実時間での全球水循環モニタリングが可能となりつつある。

他に地下水の恒温性を利用したヒートポンプシステム（地下水熱利用ヒートポンプシステム）が近年注目されている。10m以深の地中温度は、年間を通じて一定であり、その温度はおおよそ平均気温プラス1℃から3℃である。この特性を利用して、夏には冷熱を使った冷房、冬には温熱を使った暖房が行われている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ 気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology)
- ・ 統合的気候モデル高度化研究プログラム (TOUGOU)
- ・ 環境省環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクト S-14、気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究 (MiLAI)
- ・ Panta Rhei、IAHS

#### (5) 科学技術的課題

降水観測ではフェーズドレイ气象レーダーなどの高時空間分解能レーダーからの同化による力学的降雨予測手法の計算速度の向上と精度向上が課題である。また、降雪の推定精度の向上も望まれている。全球の降雨推定において衛星利用が実用化され、TRMM、GPM共に正確な降水観測を実施するが、時空間的カバー率が極めて低い。ギャップをカバーするためには高性能マイクロ波放射計シリーズに代表される観測頻度の向上および長期観測の実施、降水推定

アルゴリズムの改良、ひまわり 8 号に代表される第 3 世代静止気象衛星データによる時間補完、ならびに静止気象衛星データによる降水推定手法の開発、が挙げられる。重要なことは、これらの技術的課題を現象理解および検証<sup>21)</sup>も含め包括的、かつ連動性を高めることが極めて重要である。我が国では JAXA の主導で GSMaP の開発改良を行っている<sup>22)</sup>が、国際競争と国際貢献の観点からも今以上の連動性が求められる。

水循環において、蒸発散は未知のことが多い。現在、理論、技術ともある程度定常的に蒸発散量を評価出来る体制が整ってきているが、測定に必要な機材が高額なため、研究目的以外では蒸発散量の測定が行われておらず、必要な場所、必要な時に蒸発量のデータが存在しないことが最大の課題である。このため、蒸発量の時空間的な分布や変化については、未解決な問題が残されている。また、蒸発と密接に関係する様々な現象、例えば、二酸化炭素の吸収・放出、農地の灌漑や水消費、気候変化などを蒸発散とともに取り組む必要がある。

地下水も観測データ不足が研究を妨げている。帯水層の不均一性は、地下水の流動を大きなスケールで見た場合には大きな問題にはならず、その流向や流速はおおよそ把握できる。しかし、小さなスケールが対象となる場合（例えば、土壌・地下水汚染サイトなど）には、帯水層の不均一性が地下水の流れや物質の輸送を複雑にしており、地下水位や地下水質の観測精度に影響を及ぼしている側面がある。

地下水の流動とならんで観測データが不足しているのが積雪情報である。受動型マイクロ波センサーによる積雪推定手法は、積雪の面的分布だけでなく積雪量（積雪水量）の把握も可能である一方、空間解像度が低いため地域・流域内の積雪量の把握は困難である。また、林床積雪や湿雪に対する推定精度の低下などの問題を克服するためには、積雪量推定アルゴリズムの改良や積雪を対象とした陸面データ同化手法の開発が必要である<sup>23)</sup>。さらに、積雪・融雪モデルや衛星アルゴリズムの検証に利用できる地上観測データの不足も当該分野における課題のひとつであり、今後、湿雪地域を含む多様な積雪地域への検証サイト設置と長期データの取得・蓄積が望まれる。

多様な水文過程の理解に重要な同位体観測においてレーザー分光分析計はメンテナンスの容易さと堅牢さが大きなアドバンテージと言えるが、水蒸気同位体比の原位置測定においては水蒸気濃度変動に対するキャリブレーション手法が未確立といった問題がある。アイソスケイプ手法についても、地域や時間スケール（特に月単位以下）によって補間値の精度が十分ではなく、改善が必要である。

水循環研究の重要な目的である水資源利用においてダムの影響は大きく、課題は多い。気象・水文予測情報に基づいたダム事前放流では、治水面での効果が見込まれる一方、予測情報の精度が十分でない場合には、出水後の水位を十分に回復できない可能性があるなど、利水面でのリスクの増加が懸念される。予測の不確実性を考慮した上でのロバストな操作方法の開発が課題として挙げられる。予測の精度に関する情報が含まれるとされるアンサンブル予測情報の活用は有効だと考えられるが、研究事例は十分でなく、アンサンブル予測に含まれる膨大な情報のダム操作への有効活用に向けた更なる研究が求められる。また、維持管理としてダム高経年化による堆砂量の増大へ対処しつつダム機能を維持していくために、河川の生物生息環境に配慮した土砂マネジメント手法（ダムリフレッシュ・連携排砂・通砂運用）の確立、および異常出水による流木災害の減災技術の開発は取り組むべき研究である。これらの問題に対応するため、国が推進する既設ダムの有効活用に向けたダム再生事業に加え、貯水容量や発電量の増加

を目指した「ダム嵩上げ」に係る技術開発が始まっている。

気候変動の影響はほとんどが水を通じて人間社会に悪影響を及ぼしており、気候変動影響の経済的な定量化と、適応策の費用便益、さらには、人間の well-being に及ぼす影響を踏まえた最適な緩和策と適応策のバランスを求める研究が喫緊に求められている。

#### (6) その他の課題

日本の水循環の研究は政策的課題の影響を強く受けている。水循環基本法（平成 26 年法律第 16 号）は、多くの関係機関にまたがる水循環施策を総合的、一体的に推進することを基本的理念としている。内閣官房の水循環政策本部（本部長：内閣総理大臣）では、水循環基本法に基づき、政府が水循環に関して講じた施策を毎年国会に報告する。この中で、科学技術振興の観点からは、①流域の水循環、②地下水、③水の有効利用、④水環境、⑤全球観測の活用及び⑥気候変動の水循環への影響に関して取り組まれたさまざまな調査研究プロジェクトの概要と成果が報告されている。健全な水循環の維持・回復のための流域の総合的かつ一体的な管理（management）を推進するために、関係する行政などの公的機関、事業者、団体、住民等が相互に連携して活動するために流域水循環協議会を設置し、流域の保全や管理、施設整備及び活動の基本方針を定めた「流域水循環計画」を策定して共有することになっている。計画の目標や目標達成のために実施すべき施策は、この計画を各地域の流域の関係者が共有し、相互に協力することによって森林、河川、農地、下水道、環境等、水循環に関する各種施策の連携のもと、効果的な課題解決が図られることになる。「水循環」に関するさまざまな活動の評価は「流域水循環計画」を策定し実行していく上で、何に貢献することにつながるのかをひとつのメルクマールにすべきである。

これらの取り組みは、わが国における健全な水循環を維持・回復することに寄与するのみならず、世界各国がそれぞれの自然・社会条件のもとで抱えている水循環にかかる課題を解決する上で、わが国がこれまで蓄積してきた、また蓄積しつつある知恵と経験を活かして、国際社会の中で応分の役割を果たしていくための基盤となるとともに、いわゆる「水ビジネス」としてわが国の経済成長の原動力になることも期待される。

世界的に水資源の不足は深刻であり、灌漑用途などのため化石水の過剰な汲み上げなどの問題が発生しており、持続可能性に係わる課題として注目を集めている。先進国都市部などの生活において直接的に利用した水だけでなく、世界の多くの水資源を利用していることを意識するため、製品やサービスの提供にどの程度水が使用されたかを表すウォーターフットプリントという概念や、食料や製品の輸出入にあたって、その生産に用いられた水資源をバーチャル・ウォーター（仮想水）として推計する手法が提案され、欧州を中心に少しずつ普及している。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●レーダーを用いた雨量観測の精度向上が進められている。</li> <li>●地球規模の水循環や気候変動適応策に関する研究が体系的に実施されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●水文モデルの生態、産業、人間活動などへの利用が急速に進んでいる。</li> <li>●ダムの有効活用や柔軟運用、連携運用などの研究が世界をリードしている。</li> <li>●広域の中小河川の流出予測の開発が進んでいる。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●地球規模の水循環や気候変動適応策に関する研究が体系的に実施されている。</li> <li>●衛星情報を利用した全球スケールの基本データの構築で力を持ち続けている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●NSFのINSPIREにおいて地球表面水文モデルの開発が急ピッチで進められている。</li> <li>●Water CouncilやWater Startなど、行政と大学の企業が連携して事業化する技術開発や研究開発の枠組みが構築され、応用研究や革新的な技術開発が進んでいる。</li> <li>●近年のEnergy Water Nexusへの関心の高まりにより、Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)などが急ピッチでモデル開発などを進めている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●第7次フレームワークプログラム (FP7) から Horizon 2020 を通じて水の効率的な利用技術のイノベーション促進を図っている。</li> <li>●モデル開発やシミュレーション分析においては、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。</li> <li>●英国でHyporheic帯 (伏流帯) (HypoTRAIN) や応用統計水文学などの研究プロジェクトがEUのファンドで行われており、Brexit後の展開に懸念がある。</li> </ul>
	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ドイツのハノーバー大学を中心とするグループが、躍進的な進歩を遂げている並列計算技術を生かした、大気乱流シミュレーションモデルの開発を行っている。近年では、実際の都市計画などへの貢献を念頭に、より現実に近い計算設定での大気乱流シミュレーションが可能になりつつある。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Green Blue Cityの研究プロジェクトなど、都市雨水管理とグリーンインフラの応用研究が、多様な利害関係者を含めて展開されており、先駆的な取り組みが実施されている。</li> <li>●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。</li> <li>●英国ではUKCIPが洪水のソフト適応策を充実させている。渇水も同様で複数の事例研究、実施を行っている。</li> <li>●スイス連邦工科大学チューリッヒ校とオランダのデルフト工科大学は水資源分野の世界ランキング (ARWU2018) で世界2位、3位であり、それぞれモデル開発と水文環境分野で質の高い成果を出している。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●これまで全球スケールの水文研究には大きな関心を持っていないようである。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●現政権が強力に開発を推進しようとしている雄安新区にかかわる水環境整備、水資源確保、都市洪水対策研究が急激に発展しようとしている。</li> <li>●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。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●全球スケールのモデルには、ほとんど関心を持っていないように見受けられる。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●研究者の絶対数が日本よりもさらに少なく、複数の分野を1人の研究者が担わざるを得ない状況である。</li> </ul>

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 深見和彦、土屋修一、山地秀幸「レーダ雨量計開発開始から50年の歩み」『河川』842号(2016):17-21.
- 2) 水管理・国土保全局河川計画課河川情報企画室「国土交通省レーダ雨量計の現状と観測技術」『河川』842号(2016)8-10.
- 3) C. Kummerow, *et al.*, “The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15(1998): 809-817.
- 4) D. K. Hall and G. A. Riggs, “MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6,” Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (2016).
- 5) H. Kawase, *et al.*, “Enhancement of Heavy Daily Snowfall in Central Japan Due to Global Warming as Projected by Large Ensemble of Regional Climate Simulations,” *Climatic Change*, 139, no. 2(2016): 265-278.
- 6) C. Kendall and J. McDonnell ed, *Isotope Tracers in Catchment Hydrology* (Elsevier, 1999).
- 7) T. Kojiri and S. Sakakima, “Decision support system of reservoir operation considering weather forecast and hydrograph similarity,” IAHS Publications No.213(1993):429-438.
- 8) S. K. Jain, A. Das and D. K. Srivastava, “Application of ANN for Reservoir Inflow Prediction and Operation,” *Journal of Water Resources Planning and Management* 125, no. 5(1999): 263-271.
- 9) 国土交通省「豪雨災害対策緊急アクションプラン」(2004)
- 10) 中北英一「レーダ雨量計への思い」『河川』842号(2016):3-7.
- 11) J. Kalogiros, *et al.*, “Correction of Polarimetric Radar Reflectivity Measurements and Rainfall Estimates for Apparent Vertical Profile in Stratiform Rain,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52, no.5(2013): 1170-1186.
- 12) 牛尾知雄「30秒更新10分後までの超高速降水予報を開始～最新鋭気象レーダを活用したリアルタイム実証～」(2017)  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170704/index.html> (2019年2月1日アクセス)
- 13) 例えばJST-CRESTプレスリリース「30秒更新10分後までの超高速降水予報を開始」  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170704/index.htm> (2019年2月1日アクセス)
- 14) 三石真也、尾関敏久、角哲也「WRFによる降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性検討」『水文・水資源学会誌』24巻2号(2011):110-120.

- 15) G. Uysal, *et al.*, “Real-Time Flood Control by Tree-Based Model Predictive Control Including Forecast Uncertainty: A Case Study Reservoir in Turkey,” *Water* 10, no. 3(2018): 340.
- 16) S. Oishi, *et al.*, “Optimization of Integrated Operation of Dams Using Ensemble Prediction,” *Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change*, 133-154, 2016
- 17) D. Nohara and T. Hori, “Integrated Reservoir Operation Considering Real-Time Hydrological Prediction for Adaptive Water Resources Management,” *Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change*, 101-132, 2016
- 18) B.A. Faber and J.R. Stedinger, “Reservoir Optimization Using Sampling SDP with Ensemble Streamflow Prediction (ESP) Forecasts,” *Journal of Hydrology* 249, no. 1-4(2001): 113-133.
- 19) D. Nohara, A. Tsuboi and T. Hori, “Long-term reservoir operation optimized by DP models with one-month ensemble forecast of precipitation,” *IAHS Publications* No.331(2009): 284-295.
- 20) F. Wang, *et al.*, “Ensemble Hydrological Prediction-based Real-time Optimization of a Multiobjective Reservoir during Flood Season in a Semiarid Basin with Global Numerical Weather Predictions,” *Water Resources Research* 48(2012), no. 7: W07520
- 21) T. Terao, *et al.*, “Direct Validation of TRMM/PR Near Surface Rain over the Northeastern Indian Subcontinent Using a Tipping Bucket Raingauge Network,” *Sola* 13(2017): 157-162.
- 22) T. Kubota, *et al.*, “Global Precipitation Map Using Satellite-Borne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, no. 7(2007): 2259-2275.
- 23) 筒井浩行 「受動型マイクロ波センサーによる積雪のリモートセンシング」『雪氷』69 巻 2号 (2007):169-184.

## 2.19 水処理

### (1) 研究開発領域の定義

水処理に関する科学、技術、研究開発を記述する。

安全な水供給のための、微量・網羅性・即時性・簡易的な化学物質や病原微生物の分析技術、物理的・化学的・生物学的な各種処理技術などの要素技術開発に加え、デジタル化やAIを活用した効率的なシステムや、海水淡水化・再生水・超純水等を目指したシステムの構築を対象とする。途上国や災害時、過疎地での用途を目指した分散処理システムも含める。

気候変動の影響による水質の変化や、河川や沿岸での親水や生態系を考慮した水処理レベルの評価も対象とする。

### (2) キーワード

飲料水、工業用水、産業排水、下水、浄水、水道水質基準、重金属、栄養塩（窒素、リン）、病原微生物、化学物質、有害物質、臭気原因物質、急速濾過、膜処理、逆浸透、正浸透、消毒、紫外線、アナモックス、微生物燃料電池、バイオマス、水道システム

### (3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

水処理技術は多量の水を必要とする現代の暮らしや生産活動に必須の人間社会の存立に欠かせない技術である。水処理技術により、飲料に適さない様々な水を飲料に適する水質に変換したり、一度使用した水を再生利用したり、従来使用できなかった水資源を利用したりすることができる。また、公害を防止し、環境を維持するために、廃水を浄化してから環境に排出することも必要である。近年は、都市における人口集中、より利便性を追求した種々の製品の製造工程や仕様に起因する新たな化学物質等の出現などにより、河川、湖沼、地下水などの水道水源として利用してきた水道原水の汚濁が進み、これに対応した水処理技術（浄水技術）の革新が求められている。世界的な人口増、工業・農業などの産業活動の増大にともない、水資源がひっ迫している地域が増えており、海水、下水処理水などを原水として飲料水を製造する技術の開発が求められている。浄水技術の基本形は既に確立された技術ではあるものの、以上のような地域的あるいは地球的規模での状況の変化に伴い、水処理技術の革新が求められており、社会的なニーズの極めて高い領域である。また、技術の適用にあたっては、適用する地域の自然的、社会的条件が様々であることから、最適技術を適用するための手法の開発も重要なテーマとなっていることが特徴である。浄水技術は、原水とする水の性状、処理の結果、供給する水道水の水質レベル、必要とする土地の面積、必要となる建設および維持管理・運転コスト、必要な技術者の数とレベルなどの様々な要因の制限をうけるため、これらの状況に応じて適した浄水技術は異なることに留意が必要である。

とくに、世界的には、衛生的なトイレを利用できない人や安全な飲料水を入手できない人が多くおり、その解消が国連でもSDGsのひとつとして、取り上げられている。我が国の水処理技術が世界展開することによって、我が国の産業の振興はもとよりSDGsにも資することができる。

[研究開発の動向]

水処理には、大きく分けて用水処理と廃水処理（排水処理）がある。用水処理技術の対象とする原水は、地下水、表流水（河川水、湖沼水）、海水などの自然環境の水に加えて下水処理水も含まれる。用水処理技術は原水から生活用水、工業用水などを製造する技術であり、上水道で用いられる浄水技術も用水処理技術の一つである。一方、廃水処理技術は、生活廃水や工場廃水を環境に排出して問題のないレベルまで処理する技術であり、下水処理も廃水処理技術の一つである。広義の水処理技術には、吸着剤や膜、凝集剤などの材料・化学製品に関する技術、汚泥のかき寄せや散気装置、オゾン発生装置、水質測定機器などの機械技術、リアルタイムに送気量などをコントロールする制御技術、水資源管理や水処理設備の施工に関する土木技術などを含む。

上水道における用水処理技術は、様々な汚濁物質あるいは飲用に適さない成分を含む原水から、これらの物質を除去し、安全でおいしい飲料水を製造するための技術が求められる。技術開発内容は大きく、①濁質等、金属類、塩類、化学物質、微生物類などを効率的に水中より除去する技術、②個々の水処理技術を他の要素技術と組み合わせてシステムを構築し、場合によりIoTやAIなどの技術を活用しながら、より効率的に処理を行うシステムの開発、③最先端の技術開発だけではなく、途上国対応、災害時対応などの多様な条件における適用を考慮した最適なシステムの開発、などに分類される。

人為的汚染が進行していない原水を対象とした用水処理技術は、濁質および病原性微生物を除去するための緩速砂ろ過、急速砂ろ過などの濁質の除去技術と塩素消毒などの消毒技術の組み合わせた技術で基本的には対応できるが、水源水質の悪化や新規汚濁物質への対応の必要性などから、急速砂ろ過への新たな処理プロセスの付加、膜処理などの新たな技術の適用が進められてきた。また、維持管理の容易さ、必要とする敷地面積の削減などのニーズに対応するため、膜処理技術の革新が進められてきている。

微生物分解しにくい成分の分解を目的としたオゾン処理技術は1990年ごろから急速に普及した。紫外線（Ultra Violet: UV）照射による消毒も同時期から広まり、新しい光源としてUV-LEDが注目されている。活性汚泥処理においても、その運転を工夫することにより窒素やリンを除去できるプロセスが1970年代から次々に開発され、1990年ごろから現在まで徐々に普及が進んできている。凝集剤、消毒剤などの水処理用薬品は、急速ろ過法が標準的造水方法となった第二次世界大戦後にその製造量が都市や産業の成長とともに大幅に増え、とくに凝集剤は高性能のものが次々と開発されてきた。また、消毒用塩素については、消毒副生成物の問題が指摘されたため、その注入方法や貯蔵方法などの技術的工夫がされてきた。

上述の技術開発の進展から、現在の先端技術の完成度として、原水水質が非常に良好で、除去すべき対象物質が濁質と細菌類（塩素によって対応可能）のみである場合、技術水準はほぼ100%である。臭気原因物質や化学物質への対応が含まれる場合の技術水準は90%と評価され、効率性の向上やコスト削減などが課題として残される。除去対象として、クリプトスポリジウムなどの塩素耐性の微生物が含まれる場合、地表水が対象の場合は急速砂ろ過で対応可能であり、技術水準は95%である。急速砂ろ過以外のより効率的な膜ろ過やUV照射を利用するシステムに関しては、効率性の向上への対応では、技術水準は80%程度である。

特に水資源がひっ迫している地域（中東、アメリカ西海岸、オーストラリア西部、地中海沿岸、中国など）では、海水淡水化技術の効率化が求められてきている。そのため、従来の主要

な技術であった蒸留法から逆浸透（Reverse Osmosis : RO）法を利用した技術への変化が進んでいる。RO法について、よりエネルギー効率の良く、耐薬品性、耐久性に優れた膜の開発、加えたエネルギーを回収する技術の開発、特にほう素など海水中に含まれていて、飲料水中における濃度が制限される物質のより効率的な除去方法の開発などの実用上の要請に対応するための研究開発が進められている。RO膜を利用した技術では日本が世界をリードしているといえる。ただし、海水淡水化システムの開発は中国、韓国などでも研究開発が進んでおり、必ずしも絶対的な優位にあるわけではない。中国では、水道水源が悪化しており、化学物質対応の浄水処理技術の開発が中心となっている。アメリカ、ヨーロッパでは、膜技術メーカーが存在するため、膜処理関連の技術において高いレベルを維持している。

また、下水処理水を水道水源として位置づける傾向は、水資源のひっ迫とともに議論が進んでいる。下水処理水の飲用利用は、間接的再利用と直接的再利用に分類される。間接的再利用は、下水処理水を一度、自然水系あるいは地下水系に開放させ、その後、適切な浄水処理によって飲料水を製造し、供給するシステムである。一方、直接的再利用は、下水処理水をRO膜、UV照射などの技術を駆使して一挙に飲料水として適合するレベルの水質まで変換し、そのまま自然水系に開放することなく供給するシステムである。都市域における河川水に下水処理水が含まれる割合は、場合によっては50%以上となることもあり、直接再利用システムと間接的再利用システムにおいて、浄水処理工程における原水水質は極端に異なるわけではない。しかしながら、システム異常への対応方法、住民感情への対応など、水処理技術以外の要因により、その適用に当たっては多くの考慮すべき要因が存在する。

水処理プロセスで産生する汚泥の減量やその農業などでの利活用、栄養塩や炭素資源の地域での循環などに関しても、継続的に様々な技術開発がなされている。汚泥を嫌気性消化して得られるメタンによる発電技術などエネルギー回収技術も長く注目されている。

水処理に用いる化学製品としては、各種水処理薬剤に加えて、イオン交換樹脂、キレート吸着樹脂、活性炭、膜などがある。このうち、イオン交換樹脂は、半導体製造用水など純水製造には欠かせない技術であり、キレート吸着樹脂は、工場排水中の重金属の回収のための主要技術である。活性炭も各種水処理に広く用いられる吸着剤で用量も多い。膜については、素材改良に加え、エンジニアリング面を含めて、1990年代から急速に水処理での使い勝手がよくなり、様々な水処理に利用されるようになってきた。とくに大きな進展が見られたのが、精密ろ過膜と微生物処理を組み合わせた膜バイオリアクター（Membrane Bioreactor : MBR）による廃水処理技術とRO膜による海水淡水化技術である。

また、日本をはじめ世界各国の排水基準や水道水質基準は年々、厳しくなっている。対応が必要な物質が増加し、その都度、新たな除去技術の開発や既存の水処理装置の運転改良による除去率の向上が目指されてきた。ノロウイルスのように都市化とともに、下水・沿岸域・魚介類・ヒト・下水という病原体の循環経路の確立が疑われ、感染症対策としての廃水処理技術の革新が求められている。一方で、栄養塩を含んだ水を排水した方が、漁業の振興にはなるとの見方も存在し、季節によって栄養塩の除去率を調整した運転を行う技術も開発されてきている。一部の物質を完全に除去しながら、一部の物質を除去しすぎないことも水処理技術にとっては難しいチャレンジングな研究課題である。さらに、エネルギー使用の効率化、高齢化や人手不足問題に端を発する維持管理の効率化なども水処理技術に求められている。

#### （4）注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

- 海水淡水化技術のエネルギー消費量、および維持管理コスト削減は大きなトピックとなっている。そのために、より耐久性の高い膜の開発（ロバスト膜）やより透過性の高い膜が注目を集めており、ポリマーに炭素粒子を混合させるなどの技術が開発されている。
- 浄水処理技術を急速ろ過法から、より水処理性能が高度で確実な膜ろ過方式に変更する検討がなされ、維持管理コスト削減のため大型化、効率化が大きなテーマとなっている。特に、原水水質が良好とはいえない地表水への適用について、各国のメーカーがしのぎを削っている。例えば、従来のポリマー膜ではなく、セラミック膜を利用した技術の適用は進んでおり、モノリス型の円筒形膜ユニットを集積した大型ユニットの開発が注目を集めている。
- UV照射技術は、塩素耐性のあるクリプトスポリジウム対策として極めて有効であることが分かってきているが、UVランプに水銀を用いていることが、今後の水銀規制に関連して大きな問題となっている。近年UV-LEDの開発が進んでおり、既に製品レベルまでの開発が進んでいる。日本では2017年に水道技術研究センターによるUV-LED認定制度ができています。
- RO膜では原水側から高圧をかけることからエネルギー消費量が大きいたことが問題となってきたが、原水の持つ浸透圧をそのまま活用して、加圧することなく水を透過させる正浸透技術の開発が進んでいる。正浸透用の膜はRO用の膜とほとんど同じであるものの、ユニット化の工夫、および正浸透に用いるドロー溶液の選定が課題となっている。現状ではアンモニア、二酸化炭素などの揮発性の物質を用いることが多いが、水との分離が容易なポリマーを利用したシステムの開発も進んでいる。
- 飲料水製造とは直接の関連はないが、海水と淡水との濃度差を利用し、RO膜や電気透析膜を用いて発電するシステムの開発が進んでいる。これらは、従来のエネルギーを利用して、海水から高濃度海水と淡水を製造するシステムの逆のシステムであり、低炭素化社会への対応として注目される。
- 微生物処理に関する新たな技術としては、1990年代後半から嫌気性アンモニア酸化（アナモックス）反応が注目され、窒素を多く含む産業排水処理への導入を念頭に、運転技術が今日まで開発されてきている。また、2000年ごろから、微生物燃料電池にも関心が集まっており、廃水処理をしながら発電ができる可能性が追及されてきている。
- 凝集剤などの水処理薬剤の開発は各メーカーが引き続き取り組んでいる。MBRやROなど膜を用いた水処理技術の研究開発は盛んで、従来の圧力をかけて水を絞り出すのではなく、浸透圧差で水を絞り出す正浸透（Forward Osmosis：FO）技術が2000年ごろから着目されている。排水に含まれる栄養塩、エネルギーなどの回収、有効利用技術についても様々な試みがなされている。

##### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- 水道技術研究センターでは、2015年～2018年「A・Batons（アクア・バトン）」「Aqua・Best available technology on new system（to Next Generation）」が進められている。そこでは、①自然条件等の変化が浄水処理に与えている障害を抽出し、今後、増大すると考えられる障害に対する有効な対応策を提案し、社会条件等の変化に対する膜ろ過浄水技術の活用策

の検討、②技術継承において課題となる事象の選択、分析、必要な対策等を整理し、技術継承、人材育成のためのツール等の作成をおこなっている。

- 信州大学、日立製作所、東レ、昭和電工、物質・材料研究機構、長野県の共同で「世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点」が文部科学省と JST の COI プログラム (The Center of Innovation Program)<sup>1)</sup> の一つとして推進されている (2021 年までの予定)。カーボンナノチューブを配合させた RO 膜の開発と応用技術を開発している。
- 日立製作所と東レは NEDO 「省エネルギー型海水淡水化システムの実規模での性能実証事業」 (2018 年 4 月～2023 年 3 月) を実施している<sup>2)</sup>。この実証事業は内閣府が 2009～2013 年度に実施した最先端研究開発支援 (FIRST) プログラムのひとつである「Mega-ton Water System」による RO 膜関連の成果を実証する機会として期待される。
- 経済産業省資源エネルギー庁「微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業費補助金」 (2016 年度～2018 年度) では、一般社団法人藻類産業創成コンソーシアム、熊谷組、高砂熱学工業、筑波大学、日水コン、富士通クオリティ・ラボ・環境センター株式会社、MoBiol、三菱化工機が共同で、下水からの藻類バイオマスの生産を研究している<sup>3)</sup>。
- 米国環境保護庁 (EPA) ではテーマを設定した競争資金を提供しており、水処理と直結した研究として、2018-2020 年実施の「飲料水中の鉛の測定と制御 (総額 3,962,500 US\$)」、2018 年に Science to Achieve Results (STAR) Program として公募中の「パーフルオロアルキル化合物の分析と処理 (総額 6,000,000 US\$ を予定)」などがある。
- European Research Council は、FP7 や Horizon 2020 などの形で様々な研究に資金を拠出しているが、2017 年～2022 年に総額 1,493,734 ユーロで「還元型酸化グラフェンによる水処理」、2017 年～2021 年に総額 1,500,000 ユーロで「相分離によらない分離膜の製法」など、分離膜や水処理素材に対しての大型研究支援が目立つ。

#### (5) 科学技術的課題

- 産業的な実用化が期待される水処理に関する課題は機械工学 (オゾン生成器、分析機器) や化学素材 (RO 膜、MBR 用精密ろ過膜、各種吸着剤、凝集剤) の分野に多い。水処理膜、光触媒、特殊生物処理、UV、凝集剤、吸着剤などの日本が得意とする分野に集中投資を行い、実用化を促進することで産業の国際競争力の向上が期待できる。一方、学術的に注目される課題には分子生物学に係わる課題が多い。次世代シーケンサーを用いたゲノム解析、微生物群集解析により水処理プロセスに係わる微生物学 (水処理に関する微生物、病原微生物と薬剤耐性菌の拡散、挙動) の深化は水処理分野にとどまらず環境、医療、生物学分野への波及効果が期待できる。
- 世界的な水資源のひっ迫の状況を受け、海水や下水処理水を原水とする水処理技術へのニーズは高まっていく。これらの原水から飲料水を製造する技術はすでに確立されているものの、維持管理コストの削減、膜などの耐久性の改善、加圧などに必要となる電力の削減は引き続き大きな課題である。RO 膜では透過性、耐薬品性、耐久性などの性能が求められる。従来のポリアミドや酢酸セルロースなどのポリマー以外の素材を用いた膜の開発などが進んでいくと予想される。
- 浄水処理技術を適用する浄水場は、大都市圏以外では小規模で遠隔地にあり、維持管理の

ための人件費をかけることができない条件のものが多い。特に日本をはじめとする先進国において今後進むと予想される人口減少社会への対応において、これらの小規模浄水場への対応は大きな課題となる。スマートメーターなどによる IoT 技術や AI 技術を活用して、水処理装置の維持管理を遠隔操作で、自動的に行うシステムの開発が期待される。

- 広範囲の浄水場でのデータを集中的に管理し、データを分析しつつ、適切な維持管理を行う集中型管理システムの開発が進んでいる。今後の適用研究が期待される。
- 活性汚泥や急速ろ過といった歴史のある水処理プロセスにおいても、市場規模が大きいこと、新たな除去対象化合物や新たな資源としての回収対象物質が生じること、人手不足や市場化による維持管理の軽減化が求められることなどから、さらに技術改良する研究が必要である。
- 水処理、下水処理に係るエネルギー使用量は高い比率を占めており、地球温暖化の緩和策として、エネルギー高効率化が大きな課題である。下水熱の有効利用や廃水からのエネルギー生産などもシステムとして含めて検討する課題となる。また、下水からのリン資源などの有効資源の高効率回収システムは循環型社会の構築に貢献するだけでなく、資源ナショナリズムの高まりの影響を受けず資源自給率を高める技術であり注目される。
- 近年、世界各地で地震、津波、ハリケーン、豪雨などの自然災害が激甚化、多発化しており、浄水システムもこれらへの対応が迫られている。浄水技術そのものではないものの、浄水場その他の浄水システムを自然災害に対して強靱化する技術の開発へのニーズはさらに高まっていくとみられる。
- 自然災害により浄水システムが壊滅的な打撃を受けた後、迅速に簡易な浄水システムを構築するニーズも高まっている。具体的には、トラックなどに水処理装置を積載したモバイル水処理システムはすでに開発されているが、その機能向上は今後の課題となっている。具体的には、省スペースで高度な処理性能を担保できる膜処理装置を中心としてユニットを積載したものが中心となって開発が進んでいくと思われる。
- 管路システムが十分でない国・地域では浄水システムの分散化へのニーズが高まっていくと予想される。その際、原水水質により選定された各種の膜ユニットを用いた装置が中心となるとみられる。既に中国では RO 膜を利用した浄水器が広く普及しているが、これらの装置の信頼性の向上、コスト削減が技術革新の中心的なトピックとなっていくであろう。

#### (6) その他の課題

日本における下水処理分野では国土交通省 B-DASH の支援による実証実験では、実際に適用するレベルに近い技術を実装置に取り入れるなど、非常に大きなインパクトのある応用研究・開発が行われている。一方で、日本における浄水処理分野では、国などが主体となっている大型のプロジェクトが必ずしも十分にはなく、先進的な技術開発の実証試験などを進めていく環境としてはやや厳しい状況である。これは、水再利用や下水処理分野での状況を比較すると顕著であり、浄水処理分野でも B-DASH のようなインパクトのある支援が望まれる。

海水淡水化の分野では日本の膜メーカー主導による技術開発が進んでいるものの、海水淡水化が適用される地域が中東などの外国であり、特にプラント建設のレベルにおいて日本の国際競争力が低下していることもあり、システムとしての開発は日本では停滞している。また、浄水処理の分野でも一部の膜メーカーは国際競争力をつけて世界的な展開を実現しているもの

の、浄水システムとしての展開はまだ不十分である。従って、膜ユニットのレベルにとどまらないシステムのレベルでの国際競争力を日本の産業界がつけることによって、日本の産業界の技術開発力も上がっていくと期待される。

国内では、水道事業のほとんどは地方公共団体あるいは一部事務組合（県や市町村が事務を共同処理する組織の呼称）が行っており、地方議会などへの対応が必要である。また、水道システムはユーザーの多くは住民であって、常に正常に稼働していなければならない、システム異常などの事態は絶対に避けなければならない状況にある。従って、従来と異なる新たなシステムの導入に対しては、水道事業者は常に慎重であり、実績が多い、あるいは長期にわたる実証実験のデータがあるなどの条件が新技術導入の条件になることがほとんどである。また、水道事業者は、一部を除いて基本的には市町村であり、新技術導入のための余裕がないことがほとんどである。これらの背景は時には浄水技術の革新をためらわせる方向に働くので、例えば新技術によって十分な成果を得られなければ、全国的な組織によって救済するなどの仕組みなどが望まれる。また、技術の革新のためには、水道事業を広域化（例えば、電力事業のレベルのように全国の水道事業を数事業に集約）することが有効である。

社会普及や地方創成の観点では、魚類の養殖水、水族館、温浴施設などニッチな水処理市場の高度化といった観光産業と水処理技術の連携も一考に値する。

#### (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	○	→	●膜処理、UV 処理、高度浄水処理（オゾン・活性炭処理）、新規凝集剤（高塩基度 PAC）、MBR、光触媒などの技術、並びに業産正微生物の処理、リスク評価などに関して、大学を中心として、継続的に行われている。
	応用研究・開発	○	→	●企業による技術開発は RO 膜、淡水化前処理用の限外ろ過膜、オゾン発生装置、MBR 装置などの膜製造および機械設備産業分野で世界的な地位を占めている。 ●下水道分野では国土交通省 B-DASH 支援により、下水道の有効利用の実証技術開発が進められている。 ●水道分野では国立保健医療科学院において飲料水の安全、公衆衛生研究が精力的に実施されているが、規模が小さい。水道技術研究センターでは、従来から産・官・学の共同研究が推進されてきているが、研究費は参加企業が支出する形態となっており、また規模も十分に大きいとは言えない。
米国	基礎研究	○	→	●海水淡水化や下水処理水再利用の分野での基礎研究は進んでいる。また、下水処理水を利用したときにリスク評価の研究は盛んである。 ●水処理分野のトップジャーナルである Water Research 誌への掲載件数も多く、水処理において重要な原理や新規の汚染物質に関する知見が発信されている。NSF (National Science Foundation) による継続的な基礎研究支援と環境保護庁 (EPA) によるテーマを絞った新規汚染物質についての知見の集積支援により、国際的に注目される研究が発信されている。
	応用研究・開発	○	↗	●膜分離技術、地下水利用技術、下廃水の再生利用などの分野で、経験が多く、産業化も進んでいる。 ●カリフォルニア州、テキサス州、フロリダ州などの水不足地域を中心に関心が高く、下水処理水の再利用について、間接および直接の飲用再利用の実用化に向けた検討が進められている。また、海水淡水化事業も盛んである。米国では初となる下水処理水の直接飲用再利用がテキサス州で導入され、今後の拡大については注視していく必要がある。

欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Water Research 誌、Water Science and Technology 誌などでの論文発表件数や論文の質で世界をリードしている。</li> <li>● 個別の有害物質への関心が高く、マイクロプラスチックなど新規の汚染物質に関する知見を多く発信している。アナモックス反応による窒素除去など原理的に新しい水処理方法の提案能力や薬剤耐性菌のコントロールやマイクロプラスチックの除去を目指した水処理の可能性など新しいコンセプトを打ち出す能力も高い。</li> <li>● 2018年2月にEU飲料水指令が改正され給水リスクアセスメントに関連するパラータの導入や、微生物パラメータが強化された、この対応のため、特に微生物学的リスク管理に関する研究が進んでいくと予想される。</li> <li>● ドイツは世界初のセラミック膜などの開発実績があり、水道分野における独自の膜ユニットの開発意欲が日本よりも旺盛で、基礎研究のポテンシャルも高い。</li> <li>● オランダ KWR Watercycle Research Institute やスイス EAWAG などが高い研究レベルを保っている。塩素消毒によらない給水方式を採用していることから基礎研究のニーズが大きいと考えられる。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水メジャー（イギリスのテムズウォーター、フランスのベオリア、スエズ）の技術開発力は高く、IWAなどの国際会議における発表件数も多い。</li> <li>● 水メジャーは国際展開に多くの実績があり、多様な排水や地域の状況に合わせた適切な処理プロセスの設計に強みがある。水処理プロセスの設計、更新のために有用なシミュレーションモデルが優れている。中東やアジアの発展途上国に対する水道ビジネスを広く展開しており、適用技術に関する応用研究のレベルは高い。</li> <li>● オランダでは、塩素を使用しない水道システムを維持するため、浄水処理技術の開発と導入、配水系での先進的な安全管理手法の開発と導入が進められてきた。定量的微生物リスク評価手法の整備と実務への導入が特筆される。オランダ北部の水道事業体である PWN は2015年に膜ろ過法を浄水場に導入するなど、膜ろ過に対する技術開発も盛んである。</li> <li>● ドイツ連邦政府の主導によりドイツ水道パートナーシップ (GWP) が組織され、海外展開を図られている。ドイツ国内では、膜処理の導入を進めると同時に伝統的なろ過技術であるバンクフィルトレーションも維持されている。水道水が塩素消毒されている割合が30%程度から減少してきており、オランダと同様に塩素消毒を回避する方向での水道水質に関する研究が盛んである。</li> <li>● 英国では水道事業は民営化されているが、独立機関である Ofwat の監視下にあり、民営化による大きな問題は発生していない。民営化による浄水技術の基礎研究や応用研究に対する影響は確認できない。</li> </ul>
	中国	基礎研究	○	↑

中国	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●膜処理分野では、精密ろ過膜などは、Orijinn Water、立升などの中国国内で多くのメーカーが開発・製造能力を向上させている。日本のメーカーの製品はコスト的に対抗が難しくなっている。RO膜の開発では、まだ日本の優位性は動かないが、今後技術力の差は縮まってくると予想される。</li> <li>●水道水源の水質が良好ではないため、浄水処理における新技術の導入意欲は高い。新規の浄水処理施設の建設にあたっては、世界的な最先端技術を導入していく可能性もある。</li> <li>●国内の水需要が大きく、MBRなどの新技術による下水再生利用も進められている。</li> <li>●水十条などの政策誘導が進められており、工場や鉱山に由来する重金属汚染、石炭採掘に伴う廃水など公害対策が一気に進展している。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●韓国における上水道に関連する基礎研究は1990年代に開始され、韓国水資源公社(K-ウォーター)主体の膜処理技術の大型プロジェクトが進められてきた。K-ウォーターでは基礎研究にも積極的に取り組んでいる。</li> <li>●ナノテクノロジーを用いた水処理など新規性の高い研究は実施されているが、水処理全般の論文発表数が減少している。既存技術の改良発展のための地味だが研究の裾野を広げる着実な研究は低調である。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●国家プロジェクトとしてECOSTAR(先進的水処理技術開発)が2011年まで実施されていた。また、SEAHERO(革新的海水淡水化膜開発)が実施され、海水淡水化における正浸透技術の適用、エネルギー消費量の削減などに取り組んでいる。政府主導で水産業育成戦略を作成し、水処理技術や膜処理技術の国際競争力を高める努力が継続されており、成果が出ているといえる。K-ウォーターが国内用水供給の他、海外展開に力を入れ、急速に成長している。海水淡水化分野では斗山重工業が重要な役割を果たしている。また、Seohanなどの膜メーカーも力をつけており、RO膜をはじめ各種水処理用膜を製造している。</li> <li>●下水処理水の再生利用、畜産糞尿の処理などが進展している。</li> </ul>

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発(プロトタイプの開発含む)・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 参考・引用文献

1) JST「センター・オブ・イノベーションプログラム」

<https://www.jst.go.jp/coi/site/site.html> (2019年2月1日アクセス)

2) NEDO「エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業」

[http://www.nedo.go.jp/activities/AT1\\_00175.html](http://www.nedo.go.jp/activities/AT1_00175.html) (2019年2月1日アクセス)

3) 経済産業省「微細藻類燃焼生産実証事業補助金」

[http://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan\\_fy2016/pr/e/e\\_enecho\\_taka\\_04.pdf](http://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2016/pr/e/e_enecho_taka_04.pdf)  
(2019年2月1日アクセス)