

記 録

文書番号	S C J 第 25 期 050706-25491000-082
委員会等 名	日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学 委員会合同 FE・WCRP 合同分科会
標題	大気化学の将来構想 2022-32
作成日	令和 5 年（2023 年）7 月 6 日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学委員会合同 FE・WCRP 合同分科会 IGAC 小委員会での審議結果を踏まえ、環境学委員会・地球惑星科学委員会合同 FE・WCRP 合同分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学委員会合同 FE・WCRP 合同分科会

委員長	三枝 信子	(第三部会員)	国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域領域長
副委員長	中村 尚	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
幹 事	張 勁	(連携会員)	富山大学学術研究部理学系教授
	沖 大幹	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	春山 成子	(第三部会員)	三重大学名誉教授
	東 久美子	(連携会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所教授
	阿部 彩子	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	植松 光夫	(連携会員)	埼玉県環境科学国際センター (CESS) 総長、東京大学名誉教授
	江守 正多	(連携会員)	東京大学未来ビジョン研究センター教授、国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域上級主席研究員
	大手 信人	(連携会員)	京都大学大学院情報学研究科教授
	大政 謙次	(連携会員)	高崎健康福祉大学農学部長・教授、東京大学名誉教授
	春日 文子	(連携会員)	長崎大学大学院熱帯医学・グローバルヘルス研究科／プラネタリーヘルス学環教授
	蟹江 憲史	(連携会員)	慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科教授
	齋藤 文紀	(連携会員)	島根大学エスチュアリー研究センター センター長・特任教授
	佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	高薮 縁	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	谷口 真人	(連携会員)	大学共同利用機関法人人間文化研究機構総合地球環境学研究所副所長・教授
	中島 映至	(連携会員)	東京大学名誉教授
	原田 尚美	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所国際・地域連携研究センター教授
	氷見山幸夫	(連携会員)	北海道教育大学名誉教授
	福士 謙介	(連携会員)	東京大学未来ビジョン研究センター 副センター長・教授、国連大学サステイナビリティ高等研究所学術研究官
	山形 俊男	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構アプリケーションラボ特任上席研究員/東京大学名誉教授
	山形与志樹	(連携会員)	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授

吉田 丈人	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
渡辺 知保	(連携会員)	長崎大学プラネタリー・ヘルス学環長、 大学院熱帯医学・グローバルヘルス研究 科教授
齊藤 宏明	(連携会員(特任))	東京大学大気海洋研究所教授
見延庄士郎	(連携会員(特任))	北海道大学理学研究院地球惑星科学部門教 授

日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学委員会合同 FE・WCRP 合同分科会
IGAC 小委員会

委員長	金谷 有剛	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環 境部門センター長
副委員長	持田 陸宏	名古屋大学宇宙地球環境研究所教授
副委員長	竹川 暢之	東京都立大学大学院理学研究科教授
副委員長	谷本 浩志	国立研究開発法人国立環境研究所地球シス テム領域プログラム総括
幹 事	滝川 雅之	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環 境部門グループリーダー
	植松 光夫 (連携会員)	埼玉県環境科学国際センター (CESS) 総 長、東京大学名誉教授
	張 勁 (連携会員)	富山大学学術研究部理学系教授
	猪俣 敏	国立研究開発法人国立環境研究所地球シス テム領域主席研究員
	入江 仁士	千葉大学環境リモートセンシング研究セン ター教授
	江口 菜穂	九州大学応用力学研究所准教授
	笠井 康子	東京工業大学環境社会理工学院教授、国立 研究開発法人情報通信研究機構 B5G ユニッ ト研究統括
	黒川 純一	アジア大気汚染研究センター情報管理部部 長
	齋藤 尚子	千葉大学環境リモートセンシング研究セン ター准教授
	定永 靖宗	大阪公立大学大学院工学研究科准教授
	須藤 健悟	名古屋大学大学院環境学研究科教授
	関山 剛	気象庁気象研究所全球大気海洋研究部主任 研究官
	豊田 栄	東京工業大学物質理工学院准教授
	永島 達也	国立研究開発法人国立環境研究所企画部室 長
	中山 智喜	長崎大学水産・環境科学総合研究科准教授
	原 圭一郎	福岡大学理学部助教
	廣川 淳	北海道大学大学院地球環境科学研究院准教 授

町田 敏暢
松木 篤
宮崎 雄三
森本 真司
米村正一郎

国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域室長
金沢大学環日本海域環境研究センター准教授
北海道大学低温科学研究所助教
東北大学大学院理学研究科教授
県立広島大学生物資源科学部教授

(協力者)

本記録の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

梅澤 拓	国立環境研究所 地球システム領域
江波 進一	筑波大学数理物質系化学域
伊藤 彰記	海洋研究開発機構 横浜研究所
松井 仁志	名古屋大学 大学院環境学研究科
大畑 祥	名古屋大学 宇宙地球環境研究所、高等研究院
水野 亮	名古屋大学 宇宙地球環境研究所
丹羽 洋介	国立環境研究所 地球システム領域
斉藤 拓也	国立環境研究所 地球システム領域
PATRA Prabir	海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター
坂本 陽介	京都大学大学院 地球環境学堂
関谷 高志	海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター
藤縄 環	国立環境研究所 地球システム領域
出牛 真	気象庁気象研究所 全球大気海洋研究部
佐藤 知紘	情報通信研究機構 テラヘルツ研究センター
石塚紳之介	名古屋大学 宇宙地球環境研究所
羽馬 哲也	東京大学 先進科学研究機構
伊藤 昭彦	国立環境研究所 地球システム領域
松田 和秀	東京農工大学 農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター
谷 晃	静岡県立大学 食品栄養科学部
竹谷 文一	海洋研究開発機構 地球環境部門
岩本 洋子	広島大学 大学院統合生命科学研究科
西岡 純	北海道大学 低温科学研究所
當房 豊	国立極地研究所
板橋 秀一	電力中央研究所
大島 長	気象庁 気象研究所
鈴木健太郎	東京大学 大気海洋研究所
佐藤 陽祐	北海道大学 大学院理学研究院
山下 陽介	国立環境研究所地球システム領域
秋吉 英治	国立環境研究所地球システム領域
長濱 智生	名古屋大学 宇宙地球環境研究所
酒井 哲	気象庁 気象研究所
富川 喜弘	国立極地研究所
中島 英彰	国立環境研究所 地球システム領域
杉田 考史	国立環境研究所 地球システム領域

坂崎 貴俊 京都大学 大学院理学研究科

本記録の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	佐々木 亨	参事官（審議第二担当）
	柳原 情子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐

1 作成の背景

将来の懸念事として認識されてきた「地球温暖化」は、今や「気候危機」へと姿を変え、我々の生活を脅かしている。その根本的な原因は人間活動であり、CO₂などの長寿命温室効果気体（GHGs）^{*1}やメタンを含む短寿命気候強制因子（SLCFs）^{*2}などの排出量の増大であることは疑う余地がないとされた（IPCC 第6次評価報告書、2021）。また、大気中のPM_{2.5}^{*3}やオゾン^{*4}による健康リスクは、いまでも世界で年間400万人もの余命を縮める重要な問題であり（WHO Fact Sheets、2022）、改善が強く望まれる。これらの大気中微量成分の動態を科学的に明らかにし、自然による吸収や緩衝効果も評価しつつ、排出削減などの「緩和策」とその経路を合理化し、気候問題・健康問題の両方を「根本的な解決」に導き、カーボンニュートラルとウェルビーイングが両立する社会づくりに貢献することは、「大気化学」研究分野の大きな使命である。2050年カーボンニュートラルや2030年SDGsの達成といった時限付きの目標を念頭に、期待される社会的な役割を果たすため、また、物質科学としての学術の深化も同時に遂げるために、当分野が備えるべき基本姿勢と、今後推進すべき研究開発を明らかにすべく、今般、「大気化学の将来構想2022-32」を取りまとめた。当分野では、2000年に「日本の地球大気化学研究1989-1999-10年間の総括と今後の研究戦略-」を、2008年に「今後の日本の大気化学研究IGAC小委員会の提言」を著した経緯があり、本将来構想はそれらの後継文書に位置付けられる。7テーマから構成される各論は200ページにも及ぶものとなったため別冊(<https://jpsac.org/sp1/>)として扱い、本「記録」では、各論を要約しつつ重要な研究開発の方向性や課題について述べる。また、分野間・国際・国内連携で当分野の果たすべき役割や、必要となるファシリティや人材育成等の課題をまとめる。特に、地球大気化学国際協同研究計画(IGAC)^{*5}や、その母体である「大気化学と地球汚染に関するコミッション(iCACGP)^{*6}」及び「フューチャー・アース(FA)^{*7}」において、我が国の研究開発の特色をどのように活かすかについて述べる。

2 究極のゴールから見た過去10年の進展と現在の課題

本将来構想の策定では、まず「究極のゴール」を描き、その達成へ向けた世界の動向と我が国の強み、現在の重要なギャップを把握したのちに、今後10年間でどのような取組を進めるべきか、と論考を進めた。読者もその論考を辿ることで理解を高められるものとした。この作業は、設定した各論の7テーマ「長寿命気体」「反応性気体」「物理化学」「大気陸域統合」「大気海洋統合」「エアロゾル^{*8}・放射・雲」「成層圏・中間圏」でそれぞれ実施した（別表1-1~7）。それらに基づき、究極のゴールは以下の3点に集約された。

- 1) 専門知の深化：温室効果気体（GHGs）、オゾン層破壊物質（ODSs）^{*9}、大気汚染を起こす反応性気体、エアロゾル等のあらゆる大気成分について、濃度や特性の変化を方程式やパラメータを用いて表現でき、実大気中の現象や変化の仕組みの説明と将来予測が可能となること、大気化学プロセス（排出・分子反応・輸送循環・吸収沈着など）の役割や、自然の巧妙な酸化能^{*10}や浄化作用などの機能のメカニズムを理解すること
- 2) 地球システム^{*11}の学際^{*12}探求：気候影響（雲・放射相互作用を含む）や健康影響を定量

化でき、陸・海（生物圏を含む）との物質科学的な相互作用を体系的に理解すること
3) 社会課題解決のための超学際連携^{*13}：これらの理解の深化に基づいて、排出量や濃度などの状態変化を即時に検出でき、気候変動や大気汚染等の緩和・適応策のためのエビデンスを提供すること、社会への確かな将来予測情報を提供できること

過去 10 年間では、世界的に、「観測と数値モデルの高度化と統合」や、「排出量推計の手法の複合化」が進み、新たな主題（エアロゾル状態・サイズ別モデリング等から気候危機・カーボンニュートラルまで）が浮上してきた。日本の研究はこれらの先端を担うとともに、地域的な特性を生かし、アジア越境大気汚染問題の解明や、付随するプロセス研究、基礎理論評価(OH ラジカル^{*14}反応性評価等)で成果を上げてきた。また、酸化鉄など、新たな重要物質の収支の理解などで強みを発揮してきた。同時に、IGAC や FE・WCRP（世界気候研究計画）^{*15}でも研究の組織化が進展し、日本の研究者も関与を深めてきた。一方で、さらなる重要物質（含多酸素有機化合物 HOMs^{*16}、バイオ粒子^{*17}、氷晶核等）も見出され、その物質循環や機能の解明が求められている。また、新たな手法（人工衛星観測・データ同化^{*18}・質量分析・分光計測・同位体解析等）の適用や高度化によって、メカニズム解明の鍵となる科学的知見や、社会課題の解決につながる重要な情報を得るための道筋も見えてきた。さらに、海・陸を含む地球システムの理解の増進とモデル化、社会経済分野との対話など、従来の学術研究分野の単位を超えた連携が求められている。今後、根源的な科学探求の継続に加え、環境問題の根本的解決を追求し社会の要請に陽に答えるべきである。

3 今後 10 年に実施すべき課題

こうした状況を踏まえ、「今後 10 年に実施すべき課題」を 7 つの研究テーマで整理し、横断的に取りまとめた結果、以下の 4 点へと集約された。

- A) 気候安定化等の社会的課題解決に資する物質科学的知見の結集：大気汚染物質と温室効果気体の複合的視点の導入や人工衛星利用の推進による、排出量や健康影響等の社会に繋がる情報の創出
- B) 大気化学に残る謎を解く鍵プロセスの探求と知識の体系化：未知過程の発見や理論と現実の不整合の解消、非線形性や多相化学^{*19}の解明、分子から全地球までの包括的理解
- C) 地球システム理解増進のための学際連携：地球のサブシステム（生態系・大気組成・気候及び気象・人間活動）の間の相互作用（健康影響を含む）とフィードバック^{*20}の解明と統合的評価
- D) 研究インフラの強化と長期観測体制向上による変化検出力の向上、人材育成の推進、データ科学の展開と特色ある国際貢献

これらの課題の達成のため、大気化学プロセス理解の高度化を分野内で推進することに加え、隣接分野（気象・気候科学、海洋学、雪氷学など）や国際研究コミュニティとの連携を積極的に強化し、地球システム理解増進に貢献すること、社会課題解決のため、研究開発・学術教育・民間企業など、カーボンニュートラルを目指すあらゆるステークホルダーや、政策決定者・市民との対話を拡大し、科学知識やデータを結集することを、2022～32 年の基本姿勢に取り入れていく。

目 次

1	大気化学研究分野の究極のゴールとこれまでの発展	1
(1)	大気化学研究の目指すもの	1
(2)	大気化学研究のルーツと歴史的発展	3
(3)	直近10年間の研究動向の分析とさらなる課題	4
2	今日の大気化学研究の課題と意義	5
(1)	今後10年間で実施すべき取組	5
(2)	社会的意義	7
(3)	科学的価値と学術研究の方向性	9
(4)	分野間連携の現状と今後の在り方	11
3	国内外連携の在り方	14
(1)	国際プロジェクトとの協調	14
(2)	国内の省庁等の関連業務と委員会	18
4	大気化学研究開発の基盤の拡充と課題	21
(1)	大気化学研究のプラットフォーム・資源	21
(2)	研究データの整備と利用	25
(3)	人材育成	26
	<用語の解説>	28
	<参考資料>	36

1 大気化学研究分野の究極のゴールとこれまでの発展

(1) 大気化学研究の目指すもの

大気化学とは、地球大気に含まれる物質（気体や粒子）の量や性質を扱い、それらの変化に関わる自然・人為プロセスを体系的に理解し、地球温暖化や大気汚染などの地球大気環境の諸問題を解決に結び付ける学問である。本研究分野が目指す「究極のゴール」は、今回の「大気化学の将来構想 2022-32」の策定の議論を通じて、改めて以下のように整理された。

- 1) 専門知の深化：温室効果気体（GHGs）、オゾン層破壊物質（ODSs）、大気汚染を起こす反応性気体、エアロゾル等のあらゆる大気成分について、濃度や特性の変化を方程式やパラメータを用いて表現でき、実大気中の現象や変化の仕組みの説明と将来予測が可能となること、大気化学プロセス（排出・分子反応・輸送循環・吸収沈着など）の役割や、自然の巧妙な酸化能や浄化作用などの機能のメカニズムを理解すること
 - 2) 地球システムの学際的探求：気候影響（雲・放射相互作用を含む）や健康影響を定量化でき、陸・海（生物圏を含む）との物質科学的な相互作用を体系的に理解すること
 - 3) 社会課題解決のための超学際連携：これらの理解の深化に基づいて、排出量や濃度などの状態変化を即時に検出でき、気候変動・大気汚染の緩和・適応策のためのエビデンスを提供すること、社会への的確な将来予測情報を提供できること
- （※なお、基礎作業を行った各論7テーマ「長寿命気体」「反応性気体」「物理化学」「大気陸域統合」「大気海洋統合」「エアロゾル・放射・雲」「成層圏・中間圏」ごとの究極のゴールについては、別表 1-1～7 を参照のこと。上記の3点はその集約版である。）

大気化学研究分野の現代の取組からゴールまでを表現した概念図を図1に示す。

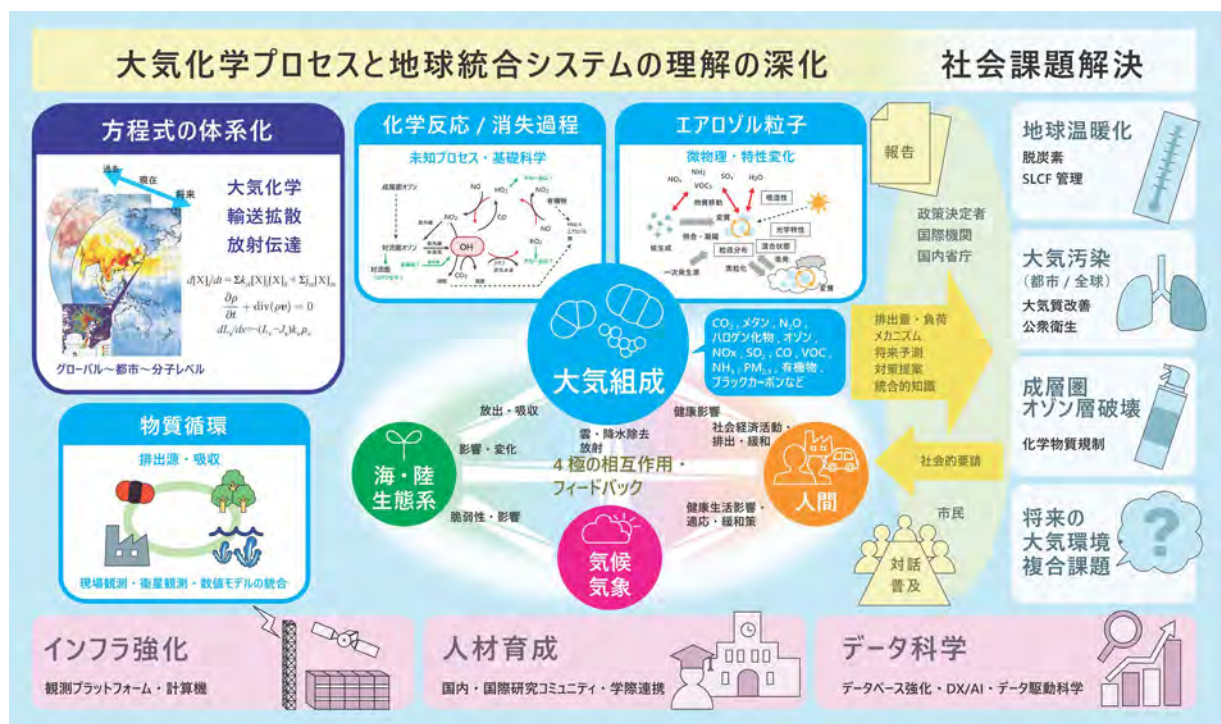


図1 現代における大気化学研究の概念図

(出典) IGAC 小委員会にて作成

空間範囲としては、我々の生活空間や排出源付近の「局所」から、我が国を含むアジアなどの「地域」、極域を含む「全球」までとし、高度範囲としては「地表付近」を含む「対流圏」を中心に、成層圏などの「高層」までを対象としている。図の最上部に示すように、「大気化学プロセス」と「地球統合システム」の理解の深化から、「社会課題解決」までを一繋ぎのものとして扱う。人間活動と自然の両方に由来する物質を総合して「大気組成」として取り扱い、温室効果気体などの物質循環、反応性気体の化学反応・消失、エアロゾル粒子の微物理や特性の変化などの素過程を解明する。それらの大気組成を、人間活動、気候・気象、及び海・陸・生態系とともに地球環境システムの重要な「サブシステム」として捉え、それら4極のサブシステム間の相互作用やフィードバックを含めて地球システム全体の振る舞いを明らかにする。社会課題解決のためには、システムの変調の駆動力となる「排出量」の推計など「現在の状態」の分析結果や、シミュレーションに基づく「将来予測」の情報、及びそれらを基にした「因果関係」などの統合的知識を、政策決定者や行政機関に提供し、「社会的な要請」に応える（図1右部）。こうした研究開発と社会課題解決の推進のために、研究インフラの強化、人材育成、データ科学の展開は基盤的な要素となる（図1下部）。また、これらは地球惑星科学・環境学の発展に通底するものであり、多分野と協働しつつ先導的な取組を目指す。

今回の「大気化学の将来構想 2022-32」の策定においては、まず前述の「究極のゴール」の長期的達成を意識し、次項に示すように、これまでの歴史的発展の流れを押さえた上で、直近の10年間の「世界の動向」と、その間の取組における「我が国の研究開発の強み」を分析した。この分析を基に、現在の「重要なギャップ」とさらなる課題を

整理し、「今後 10 年間にどのような取組を進めるべきか」と論考を進めた。この作業についても、前述の究極のゴールの場合と同様に、各論 7 テーマごとに進め（別表 1-1 ～ 7）、その上で全体を統括した。なお、各論の本文は、200 ページを超えるものとなったため、別冊 (<https://jpsac.org/spl/>) 及び日本大気化学会の「大気化学研究」誌第 47、48 号に掲載した。各論では、「尖った」研究構想をまとめることを目指したため、重要な研究であっても十分に網羅されていないことがある点を付記しておく。

(2) 大気化学研究のルーツと歴史的発展

表 1 は、大気化学研究の歩みを年表にまとめたものである。これまでの研究主題は、1990 年代以降、成層圏オゾン層破壊、越境大気汚染、地球温暖化など、地球規模の社会的課題とともに変遷してきた。研究アプローチでは、従来は小規模だった観測が人工衛星観測の発展などによって組織化・大規模化し、数値モデルとも統合しつつある。超高層大気学・気象学・光化学・反応速度論などを源流として生まれた「大気化学」は国際組織である、地球大気化学国際協同研究計画（IGAC、以下「IGAC」という。）、及び大気化学と地球汚染に関するコミッション CACGP（現 iCACGP、以下「iCACGP」という。）とともに成長し、関連する複数のノーベル賞受賞も研究分野の推進力となった。国内でも「日本大気化学会」や「日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学委員会合同 FE・WCRP 合同分科会 IGAC 小委員会」（以下「IGAC 小委員会」という。）が中心となり、国際会議の誘致などを契機に発展してきた。

表 1 大気化学研究の歩み

	研究主題・社会的課題	アプローチ	学問発展の流れ・組織や会合	発行物
1960-1979	光化学スモッグ・酸性雨	野外観測、チャンバ実験	CACGP(1971) エアロノミー（超高層大気学）、気象学、光化学・反応速度論	
1980-1989	成層圏オゾン層破壊		IGAC 発足(1988)	
1990-1999	地球温暖化 グローバル大気化学	航空機・船舶・成層圏衛星観測、集中観測・長期観測	大気化学黎明期 大気化学シンポジウム(1991) IGAC 富士吉田会議(1994) ノーベル化学賞(S. Rowland 氏、M. Molina 氏、P. Crutzen 氏 1995) 大気化学討論会(1995～) 大気化学研究会(1999～2013)	「日本の地球大気化学研究 1989-1999 — 10 年間の総括と今後の研究戦略 — (2000)」
2000-2009	メガシティ、多相化学、気候モデル科学	数値モデル・対流圏衛星観測	ノーベル平和賞(IPCC AR4, 2007)	今後の日本の大気化学研究(2008)
2010-2019	越境大気汚染(PM _{2.5})、放射性物質、大気質	観測モデル統合、組織化	大気化学成熟期 日本大気化学会(2014～) iCACGP-IGAC 高松会議(2018)	
2020-2050	コロナ影響排出削減評価、SDGs、カーボンニュートラル、気候変動適応、防災	面的連続・高分解能観測、データ同化、	ノーベル物理学賞(真鍋淑郎氏、2021)	本将来構想(2023)

(出典) IGAC 小委員会にて作成

(3) 直近 10 年間の研究動向の分析とさらなる課題

こうした歩みの中で、特に、直近の 10 年間に着目して「世界の動向」を分析したところ、観測と数値モデルの高度化と統合や、排出量推計手法の複合化などにおいて、顕著な進展があったことが改めて認識された。前者については、例えば、観測された現象のプロセス解釈に、各物質の排出量分布や気象場・化学過程等が表現された大気化学輸送モデルを援用する事例や、エアロゾルの混合状態を解像する新たな数値モデルが構築され、観測によって検証された事例などが挙げられる。観測のみ、数値モデルのみで構成される論文の割合は減少しつつある。後者としては、社会経済の部門別（エネルギー転換・産業・運輸・家庭など）の活動量の統計値と排出係数の積として排出量を見積もる「ボトムアップ法」と、観測された大気濃度から排出量を逆推計する「トップダウン法」がそれぞれ高精度化した。例えば、GCP^{*21} (Global Carbon Project) では両者が統合的に評価され、ハイレベルな報告書が定期的に出版されている。さらに、この直近の 10 年間においては、新たな主題（気候危機・カーボンニュートラルなどの社会的主題から、界面問題、エアロゾル状態・サイズ別モデリング等の個別研究主題レベルまで）が浮上してきたことも特徴として挙げられた。

この期間において、「日本の研究の強み」としては、気候や生態系に影響をもたらす新たな物質として注目が集まった産業起源の酸化鉄について、観測や数値モデルを統合して収支を明らかにし、従来知られた自然起源鉱物ダスト由来の鉄と複合させた評価で世界をリードした点や、大気の酸化能と自然の浄化作用を支配する OH ラジカル反応性の定量化等を通じ基礎理論の評価を実践してきた点、長期間の高精度な GHGs 観測によって吸収・放出フラックス変化に関する世界最先端の評価を実現した点などが挙げられた。また、地域的な特性を生かし、アジア越境大気汚染問題の解明や、それに付随するプロセス研究が進展し、PM_{2.5} の越境大気汚染の発生メカニズムの解明や、起源寄与情報の行政への提供などで成果を高めた点も特筆すべきである。さらに、この間、IGAC や FE・WCRP (世界気候研究計画) でも研究の組織化が進展し、日本の研究者も関与を深めてきた。

一方で、国内外の研究の進展に伴い、さらなる新重要物質（含多酸素有機化合物 HOMs、バイオ粒子、氷晶核生成物質等）も見出されるようになり、先に述べた究極のゴールを達成するには、既知の成分に加え、これらの物質の循環や機能の解明も求められるようになった。加えて、新たな手法（人工衛星観測・データ同化・質量分析・分光計測・同位体解析等）の適用や既存技術の高度化によって、次の 2 章で述べるように、自然科学的なメカニズムを解明するための鍵となる科学的知見や、社会課題の解決につながる重要な情報を得るための道筋も見えてきた。さらに、海洋・陸域を含む地球システムの理解の増進とモデル化の必要性、宇宙からの影響の理解、社会経済分野との対話など、従来の個別分野の単位を超えた連携が求められるようになった。

2 今日の大気化学研究の課題と意義

(1) 今後 10 年間で実施すべき取組

1 章で述べた究極のゴールの達成を数十年後に見据え、また、歴史的な発展及び最近 10 年間の進展状況を踏まえた考察の結果、「今後 10 年に実施すべき課題」は以下の 4 課題へと集約された（同様に、7 テーマの課題は別表 1-1～7 を参照されたい）。

- A) 気候安定化等の社会的課題解決に資する物質科学的知見の結集：大気汚染物質と温室効果気体の複合的視点の導入や人工衛星利用の推進による、排出量や健康影響等の社会に繋がる情報の創出 {長寿命気体 6 章、反応性気体 3 章、エアロゾル放射雲 4 章、成層圏・中間圏 6 章} ※中括弧内は各論（別冊、<https://jpsac.org/spl/>）の章番号を指す。
- B) 大気化学に残る謎を解く鍵プロセスの探求と知識の体系化：未知過程の発見や理論と現実の不整合の解消、非線形性や多相化学の解明、分子から全地球までの包括的理解 {物理化学 3・4 章、反応性気体 2 章}
- C) 地球システム理解増進のための学際連携：地球のサブシステム（生態系・物質（大気組成）・気候及び気象・人間活動）の間の相互作用（健康影響を含む）とフィードバックの解明と統合的評価 {大気陸域統合、大気海洋統合、エアロゾル放射雲 3 章、成層圏・中間圏 4 章}
- D) 研究インフラの強化と長期観測体制による変化検出力の向上、人材育成の推進、データ科学の展開と特色ある国際貢献 {エアロゾル放射雲 2 章、成層圏・中間圏 3 章}

ここで A)、B)、C) は、究極のゴールとして述べた 1 章 (1) の 3)、1)、2) にそれぞれ対応するものであり、D) はそれらの共通基盤の強化として位置付けられる。

A) においては、喫緊の課題である気候安定化を中心に、社会課題解決のために知見を結集する。社会で掲げる目標年次（例えば、2050 年カーボンニュートラルや 2030 年 SDGs など）までに十分な科学的知見を得て社会へ浸透させ変容を促す。その際に、適切な方向に進んでいるかどうかを随時確認し、対策を最適なものとするために、排出量変化などの評価ステップを「迅速」なものとし、目標年次までに繰り返す。目標年次を意識した社会の動きの科学的評価としては、これまでに、オゾン層を破壊するフロン類に関するモントリオール議定書での削減や、IMO（国際海事機関）による船舶用燃料油の硫黄分規制強化(2020年)などがあったが、今後、温室効果気体等でも広く意識すべきものとなる。その際、技術進歩の著しい「大気環境観測衛星」からの専門的な観測データを、遅滞なく社会で活用できる情報に転換するシステムの開発を進めるべきである。また、これまで独立に取り組まれていた GHGs と大気汚染物質の変動を統合的に解析することが有効である。その利点としては、両者で共通となるエネルギー燃焼関連の発生源や排出量の評価を効率化できること、大気汚染で問題となる対流圏オゾンやエアロゾルは短寿命気候強制因子 SLCFs であり、地球温暖化抑止のために GHGs と統合的な管理が必要であることが挙げられる。気候安定化だけでなく、大気質・健

康保全も念頭に、社会の対策の指標として重視される「排出量変化」や「気候・健康へのインパクト」についても、濃度・状態といった専門分野内の変数と合わせて、解析を強化し、科学的な情報を発信していく。

B)は、大気化学に残る謎を解く鍵プロセスを探求し、諸現象を説明するメカニズムの見解を定めていくものである。各論の議論では、具体的には、大気の酸化能を決定づける OH ラジカル反応系に残る亜硝酸や不均一反応^{*22}の重要性、二次生成エアロゾル^{*23}の生成経路・収率問題、極域の大気化学反応などが挙げられた。素過程の探求を深め、オゾン生成化学過程等の「非線形性」や、界面^{*24}や不均一反応を含む「多相化学」の理解を増進し、実大気での局所（ミクロ）～全球（マクロ）の挙動を結び付ける際の従来の障壁を乗り越えるものである。物理と化学が複合する過程として、温室効果気体と HFC 類^{*25}の増加に伴う、成層圏の気温構造と中高緯度の大気循環変化の定量化の課題などもある。

C)については、大気化学と隣接分野との協働を深め、地球システムの統合的理解を高めるものである。図 1 について解説したように、大気組成を、地球システムの 1 つのサブシステムと捉え、他の 3 つのサブシステム（生態系、気象・気候システム、人間活動）と合わせた 4 「極」が相互作用するメカニズムやフィードバック（例えば、人間活動による物質（大気組成）の変動が気候に与える影響や、気候変動が物質循環を介して生態系へフィードバックをもたらし作用）を、統合的に明らかにするものである。具体的には、陸域植生からのバイオエアロゾルや二次有機エアロゾルが気候プロセスに与える影響、地球温暖化・海洋酸性化・栄養塩の大気からの沈着量変化によって引き起こされる、海洋から大気へのエアロゾルや前駆物質の供給量の変化と、雲を介した気候フィードバック、雲・降水・エアロゾルの同時衛星観測によるエアロゾル－雲相互作用の診断、北極域の湿地・永久凍土・森林火災・海洋循環の劇的な変化と大気化学を介する地球システム変動などが挙げられる。

D)については、特色ある長期観測を継続することで、従来よりも小さな変化シグナルまでを捉えられるようにすること、A)～C)までを達成するために必要な研究インフラを強化し、データ科学など新たな視点を導入しつつ、次世代の人材を育成するものである。

以上の 4 課題への取組方についても、すでに示した概念図（図 1）で表現されている。これらの課題の達成には、大気化学プロセス理解の高度化を分野内で推進することに加え、国内の隣接分野（気象・気候科学、海洋学、雪氷・極域科学、生態学、大気環境学、公衆衛生学など）や国際研究コミュニティとの連携を積極的に強化し、地球システム理解増進に貢献すること、社会課題解決のため、研究開発・学術教育・民間企業など、カーボンニュートラルを目指すあらゆるステークホルダーや、政策決定者・市民との対話を拡大し、科学知識やデータを結集することが重要であり、これらの点を 2022～32 年の基本姿勢に取り入れていく。

(2) 社会的意義

2021 年 8 月には気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC、以下「IPCC」という。）の第 6 次評価報告書（WG1）が公表され、地球温暖化の根本的な原因は人間活動にあり、CO₂ やメタン、オゾンやエアロゾルを含む短寿命気候強制因子（SLCFs）などの排出量が増大して、それらの大気中の濃度が上昇し、さらに地球の放射収支が変化した結果であることに、疑う余地がないとされた（図 2）。また、パリ協定で目標とする「産業革命前から 1.5℃ 上昇」までに残された昇温幅はわずか約 0.4℃ であり、許容される CO₂ の今後の排出量（残余カーボンバジェット^{*26}）は、近年の排出量換算でわずか約 12 年分と推定された。このように、地球温暖化問題は、前世紀末からやや遠い将来の懸念事と認識されてきたが、いまや喫緊の対応が求められる「気候危機」へと姿が変わった。2020 年には、我が国としても「2050 年カーボンニュートラル」を目指すとの方向性が強く打ち出され、あらゆる社会経済活動分野における排出削減の加速が求められている。残余カーボンバジェットの推定では、今後の SLCFs の変化による昇温の寄与分を除いてから CO₂ 分を評価する必要があるため、CO₂ と合わせて、大気汚染にも密接にかかわる SLCFs の排出もよく管理し、気候影響を評価する必要がある。

大気組成の変化は気候リスクだけでなく、大気質・健康リスクとも直結している。PM_{2.5} やオゾンによる健康リスクは、世界で年間 400 万人もの余命を縮めており（WHO Fact Sheets, 2022）、改善が強く望まれる。国内の最近の大気中濃度と大気環境基準の関係では、PM_{2.5}（日平均 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ 、年平均 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ ）については達成率が向上しつつあるが、光化学オキシダント（オゾン、1 時間値で 60 ppb）の達成率は未だにほぼゼロである。世界保健機関（WHO）は疫学などの視点から 2021 年にガイドライン値をむしろ引き下げており（PM_{2.5} は 5 $\mu\text{g m}^{-3}$ 、オゾンは季節極大が約 30 ppb、表 2）、大幅な改善が必要となっている。さらに、海や陸の生態系に対して重要となる反応性窒素（硝酸）やリンの物質循環は「惑星の許容限界^{*27}」を超えているともされ、循環径路上の大気を含め管理が求められている。

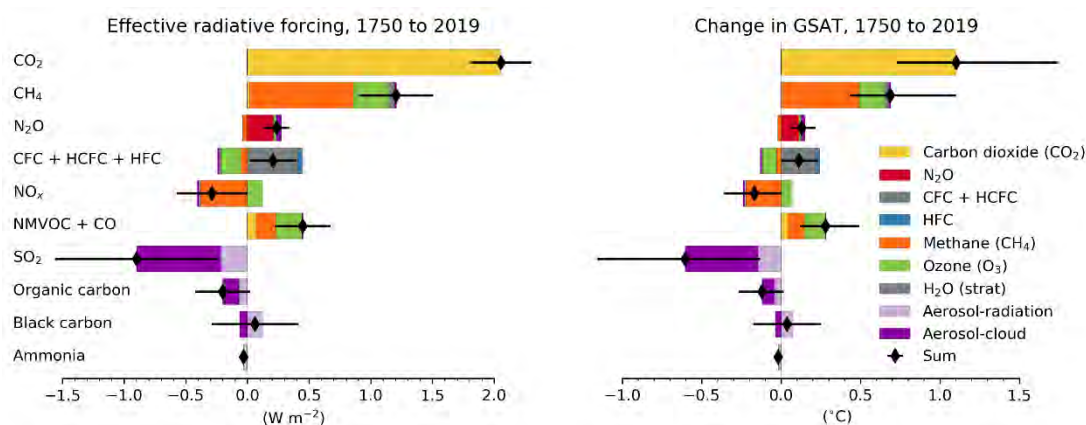


図 2 1750 年から 2019 年にかけての地球温暖化（有効放射強制力及び世界平均気温）への排出物質毎（縦系列）・大気成分毎（色）の寄与
(出典) IPCC 第 6 次評価報告書 WG1 第 6 章 Figure 6.12

表2 PM_{2.5}と地表オゾン濃度に関するWHOによる大気質ガイドライン及び我が国の環境基準値

汚染物質	平均時間スケール	大気質ガイドライン		日本の現行環境基準
		WHO 2021 年改訂	改訂前 (WHO 2005)	
PM _{2.5} (μg/m ³)	年	5	10	15
	24 時間	15	25	35
オゾン (μg/m ³)	極大となる季節	60 [約 30 ppb]	N/A	[60 ppb、 1 時間]
	8 時間	100 [約 50 ppb]	100 [約 50 ppb]	

(出典) <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> 及び <https://www.env.go.jp/ki jun/taiki.html>

こうした状況において、CO₂やメタン、PM_{2.5}・オゾン・窒素酸化物^{*28}等の大気汚染物質の科学を扱う大気化学研究分野では、隣接分野や社会と連携して課題解決の要請に応える必要性も高まっており、専門性に根差したエビデンス提供などの新たな使命も生まれている。

課題解決の社会的要請に応えるためには、環境問題一般の因果関係のフレームワークとして欧州から広まる DPSIR^{*29} の概念を念頭に、自然科学的理解を増進させ、社会科学・政策決定者へのエビデンス提供から対処を促すことが有用である (図3)。DPSIR は Driver (根本原因)、Pressure (負荷)、State (状態)、Impact (影響)、Response (対策や対応) の頭文字であり、大気環境問題に当てはめると、P は「排出負荷」、S は「大気成分濃度の変化」、I は「気候や健康への影響」となる。それらの間の因果関係を科学的に明らかにすることは、2章(3)で示すように必須である。その上で、獲得した知識をスムーズに遅滞なく政策決定者や国際機関・国内省庁などへわかりやすく展開し、R (国内・国際対策や対応) を通じて D (グローバル社会経済) の変容を促す。例えば、排出削減対策で狙いをつけるべき地域・部門のピンポイント化、経済・社会工学分野との連携による対策のコスト・ベネフィット評価、現況分析・将来予測や地球統合システム変動の知識の提供、意思決定の支援などの面で、当分野の専門的知識を社会へと普及していく。市民との対話による社会変容に対する意識の醸成も重要である。今後、人工衛星による大気組成の計測が、水平解像度などの点で大きく発展し、従来は難しかった、国や都市、個別事業所単位での GHGs 排出量の変化を追跡することまでもが可能となると見込まれている。時々刻々の排出削減努力の可視化情報は、ESG^{*30} (環境・社会・ガバナンス) 活動やTCFD^{*31} (気候関連財務情報開示タスクフォース) 報告書作成などを通して気候変動問題への対応・社会変容の牽引・リスク管理の情報公開を進める民間企業に向けても意義深く、コンサルティングなどの新たなサービスにも結び付くだろう。その意味で、大気化学の専門知識と社会経済活動の橋渡しができる人材を増やすことも重要な課題となっている。

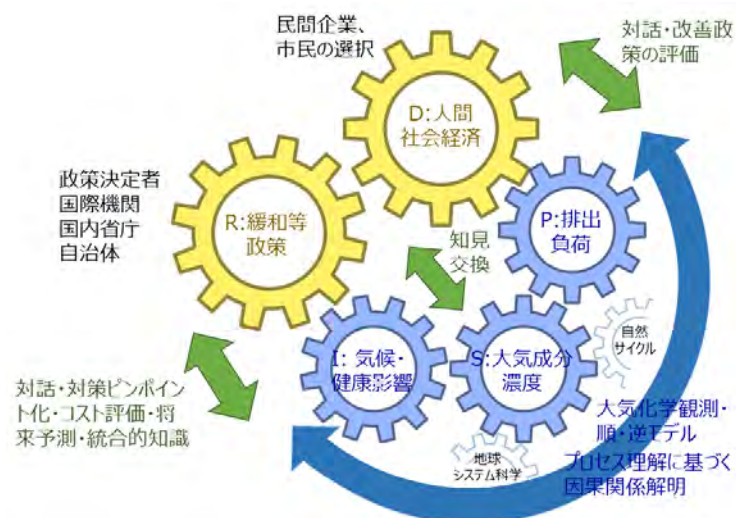


図3 大気化学分野からの社会との連携に関する模式図（大気化学の専門的知識を基盤とし、社会経済～排出負荷～大気成分濃度状態～気候・健康影響の因果関係を明らかにし（青）、科学的エビデンスに基づいた政策（黄）が適切に社会変容や排出負荷の緩和に結び付くようにする。このように、DPSIR（本文参照）の概念に基づき課題解決サイクルを回していく。求められるタイムスケールでの問題解決のために、排出・濃度変化の評価を迅速化し、現況分析結果や将来予測情報などに関し、政策決定者・国際機関・国内省庁等との対話を拡張する（緑）。排出削減政策の成否を、さらなる観測によって実証する。社会変容の加速のためには民間企業や市民の選択のための情報を提供する。歯車は因果関係や情報の確実な伝達を象徴している。）

（出典）IGAC 小委員会にて作成

(3) 科学的価値と学術研究の方向性

今後 10 年間で取り組むべき研究の科学的価値や学術としての方向性に関して、個別の大気化学プロセス（排出・分子反応・輸送循環・吸収沈着など）を好奇心に基づいて深く追究理解することの重要性は明らかであるが、本項では俯瞰的に2点、「劣決定問題^{*32} underdetermined system からの脱却と優決定系への移行」、「階層的なシステム理解の確立」を取り上げる。

大気化学の諸課題への取組では、正確に知りたい変数の数に比べて観測量が不足し、方程式の数に対し未知数が上回る「劣決定問題」に直面する場合が多い。例えば、ある地点である物質の大気中濃度を精度よく計測できたとしても、それだけでは排出量や化学的生成・消失・流入フラックスなど、大気中濃度の変化を引き起こす複数のプロセスは定量的に一意には決まらない。実際には、大気は開放系で、排出量などの境界条件が時間とともに変化し、多種の物質群の濃度や特性が互いに関係しながら時空間4次元にわたり変化する。そのような真の状態のうち、限られた局面のみが観測でき、その中から鍵となるプロセス（未知プロセスの場合もある）を定量評価してゆくこととなり、事態はさらに複雑である。言わば、ピースの欠けたパズルから、通底するメカニズムや理論を推定する試みのようである。しかしながら、気象場や力学・化学過程などを表現した大気化学輸送モデルによって、限られた観測の情報を繋ぎ合わ

せることができるようになり、観測とモデルを両輪とした解析の有効性が見出されるようになってきた。今後は、観測情報量の飛躍的な向上と、データ同化技術などのスマートな方法論の併用によって、こうした劣決定状態から脱却してゆくことが重要である。

近年では、人工衛星から大気中の多成分について、濃度の面分布を空間連続的に、高い水平分解能で計測することが可能となってきた {反応性気体 2 章}。また、大気環境の静止衛星も登場し、日中の時間変動も追跡することが可能となってきた。複数の物質間には、共通の排出源、共通の輸送、化学反応に伴う関係性、「共変関係」が存在する場合があります、共通の過程を紐解くために、複数の物質を組み合わせで解析することには意義がある。このように、多成分の時間的・空間的に密な観測と、それによって検証された数値モデルを駆使して、引き出される情報の質と量を向上させることが、劣決定問題を overdetermined system (優決定系) へと近づけていくための鍵の 1 つになると考えられる。

例えば、2024 年に打上予定となっている GOSAT-GW/TANSO-3 では、GHGs として重要な CO₂、メタンの計測に加え、高温のエネルギー燃焼起源のマーカーとなる NO₂ の計測が同時に行われる計画であり、都市や発電所からの排出量の把握などで我が国が世界をリードできる可能性がある。一方、衛星観測では手が届かないスケールの事象もあるため、地球観測ネットワーク(地上・航空機・衛星)を相補的に拡充することが重要である。そして、成分間・時空間の情報を複合的に繋ぎ合わせるデータ同化手法や、その基盤となる大気化学輸送モデルの進化が、こうした膨大な観測情報の解析のために有効となる。この複合解析においては、複数の重要因子の不確かさをどのように正確に把握し、その上で大気化学の状態変化の解析に結び付けてゆくか、戦略やアイデアも必要となるだろう。

また、こうした多成分の空間・時間分解能の高い計測情報の利用以外にも、同位体情報の高度な利用^{*33}や、濃度・フラックス(反応性)の同時測定も、優決定系への移行を促進しうる。そのような取組も今後推進されるべきである。エアロゾルの光学的性質や雲凝結核 CCN 等としての特性、活性酸素種などを通じた健康影響の指標など、「物質の性質」とその変化を明らかにすることも当分野の大きな目標の 1 つであり、性質の次元の情報量を増やすことも重要である。このような考え方は、個別の排出物質やオゾン・PM_{2.5} など大気中で生成する重要物質、さらには未知の重要物質のいずれに関しても、自然・人為起源寄与割合や大気中の化学過程、輸送過程、消失過程に至るまでの全ライフサイクルを明らかにするために重要となるだろう。そして、大気酸化能と自然の浄化作用を支配するものの、全球スケールでの変動が捉えられていない、OH ラジカルの挙動解明など、大気化学の残された中心的課題を解くためにも有効なアプローチとなるだろう。

2 点目の「階層的なシステム理解」は、大気化学分野内の理解の体系化を起点として、大気と接する陸・海を含む地球表層物質循環の自然システム面を理解し、さらに、人間活動の地球環境への影響や、逆に地球環境が人間へ与える影響を加えた気候・物

質科学を系統的に理解することを、階層的・段階的に目指すものである。第一段階の大気化学の理論としては、素反応過程単位の知識の集積と大気化学方程式の体系化が重要であり、液相・気相とそれらの界面を含む多相化学など、今後の取組が必要な部分も大きい。また、エアロゾルの化学組成・微物理特性と放射をよりよく結び付ける必要がある。第二段階では、地球サブシステムとしての海・大気・陸といった各構成要素内を体系的によく理解した上で、それらのサブシステム間や、人間活動との間にみられる物質交換フラックスや相互作用に関して、定量的・整合的な理解を得ることが重要である。例えば、陸域と大気との間の CO_2 交換量について、大気プロセス側から見た評価と、陸域植生側から見た評価とを十分にすり合わせ、共通の理解を得るということなどである。第三段階は、自然システムだけでなく、人間活動との相互作用のメカニズム（社会経済活動による排出量変化や人為的な土地利用改変と、気候変動との相互作用や、大気組成変化がもたらす健康影響の作用機序も含む）の理解を促すものである。このような考え方で、個別分野としての大気化学研究を深化させた上で、地球システムの学際研究や、社会課題解決に向けた超学際連携へと段階的に貢献していけるだろう。そして、こうした活動の中で対象としたシステムに関して獲得した「知」を、外のシステムにも適用できる普遍知へと昇華させていくことも目指すべきであろう。

(4) 分野間連携の現状と今後の在り方

3章(3)のような10年計画の達成には、前述したように、分野内の研究開発の深化に加え、以下に例示するような、隣接分野との連携の強化や、これまで接点のなかった分野との連携も強く求められる。

・地球システムモデル科学

IPCC 報告書へ直結する CMIP 結合モデル相互比較^{*34} 実験では、標準的に扱われる CO_2 変化に加え、大気微量気体やエアロゾルの変動を含むシナリオ実験が多く組まれ、我が国の地球システムモデル^{*35}（気象研究所の MRI-ESM2.0 や海洋研究開発機構他の MIROC-ES2L）が参画している。今後も、これらの地球システムモデル実験への参加や、詳細度の高い大気化学プロセスモデルや観測との地球システムモデル比較評価などが望まれる。生態系を含む陸面・海洋と大気組成の間のフィードバックのうち、例えば、生物起源揮発性有機化合物 BVOC^{*36} 類の反応によるエアロゾル・オゾン生成、バイオエアロゾル粒子の氷晶核化がもたらす気候へのインパクト評価や、地球温暖化に伴う森林火災の頻発化や永久凍土の融解による GHGs 放出の温暖化フィードバックなどについて、理解を高めることができる。

・経済・社会工学

CO_2 や SLCFs などの人為排出インベントリ^{*37} 作成は経済・社会工学分野との直接的な接点であり、削減対策の基盤として高精度な情報が必須である。科学面で CO_2 や SLCFs、

大気汚染物質の有効な排出削減対策が見出されても、経済的な合理性が伴わないと社会的に有効な対策とならない。経済分野と連携した限界削減費用計算なども一部なされつつあるが、費用対便益^{*38}の評価に発展させるなど、今後の連携強化が必要である。CO₂削減等に関する民間企業の ESG 活動や TCFD 対応のためのコンサルティングや専門的知識提供・普及も重要な方向性である。

新型コロナウイルス感染症の蔓延防止策がもたらしたグローバル社会経済の変化は、大気中 NO₂ 量を計測する当分野の全球衛星観測^{*39} から一目瞭然であり、地域・時期ごとに定量化された。また、将来の排出抑制がもたらす大気質改善・気候安定効果を先取り評価した。それ以外にも、例えば原発事故や火山噴火など、予期しない突発的な社会様式の変容に前後して起こる大気質の変化に備え、それを追跡するためのデータを整備することも、大気化学と社会経済学との重要な接点になる。基盤データは長く継続すればするほど学術的な価値が高まり、当分野の科学者コミュニティに資するのみならず、社会的な各種対策の長期的な検証などにも役立つことになる。

・衛星地球観測

地球観測衛星は、これまでも大気化学分野と密接な関わりを有してきた。従来は、大気化学コミュニティから衛星センサの開発等に直接的な貢献をする動きは限定的であったが、関係者の継続的な尽力により近年その活発化がみられる。我が国として、限られた資源を意義のある地球観測衛星計画に投入するため、諸学協会が合同で運営する「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」の場で公平な議論やミッション公募がなされるようになった。日本大気化学学会はこの活動に加わり、関係者として、静止衛星からの大気環境計測などの提案や他ミッションの評価などを行うことで連携や相互理解を高めている。また、日本学術会議「地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会地球観測衛星将来構想小委員会」でも、地球観測衛星の科学的・社会的な意義の議論と推進を行っている（3・4章を参照）。

・計算科学

スーパーコンピュータ「京」や「富岳」に代表されるように、近年の計算科学の進歩は目覚ましく、分子レベルから全球スケールまで幅広い現象の理解向上に貢献してきた（4章を参照）。大気化学としても、エアロゾルなど界面反応に関わる理論計算や、CO₂ や SLCFs の気候影響予測の精緻化など、既に多くの接点がある。さらに、AI や機械学習を活用したデータ解析も行われるようになり、古典的な統計解析ではデータセットのバイアスで隠れていたような現象の発見につながることも期待される。

一方で、大気化学分野で計算科学を専門としている人材は限られており、ブレークスルーとなりうる革新的なアルゴリズムを開発するレベルには至っていない。このため、モデルで用いられる大気化学プロセススキームの多くは海外の知見に依存している状況にある。今後は、計算科学を専門とする数理科学分野の研究者とも緊密に連携し、日本独自のアルゴリズム開発につなげることも必要であろう。観測データの拡充

との相乗効果により、観測とモデルのギャップを埋める方向に向かうことが期待される。

・健康・医学・生命科学

オゾンやPM_{2.5}など呼吸器を介して健康に悪影響を与える因子については、疫学調査を中心とした長い研究の歴史がある。近年では、肺胞での物質交換など多相・不均一系のダイナミクス、大気中で生成する有機エアロゾルや過酸化物が誘起する酸化ストレス、あるいは不溶性の固体粒子の循環器系への移行など、より物理・化学過程に踏み込んだ研究も盛んになっており、大気化学と医学・生命科学との重要な境界領域になっている。さらに、インフルエンザやコロナウイルスなど空気を媒介とした感染症に加えて、川崎病など原因が十分に特定されていない感染症に対する大気組成の関わり の探求なども今後取り組む意義がある問題である。このような研究は欧米が先行しているが、アジア特有の汚染物質発生源や気候、あるいはアジアの人種的な特性を踏まえて、疫学研究や毒性評価に新しい展開をもたらすことは重要であり、その研究の推進において大気化学研究分野のポテンシャルが発揮されることが期待される。

3 国内外連携の在り方

(1) 国際プロジェクトとの協調

大気化学の研究では、地球規模での包括的な理解や課題の解決につなげていくために、最先端の研究成果を磨くことに加え、国際的な研究コミュニティと共有し連携していくことも等しく重要である。

この国際連携の点で大きな役割を果たしているのが、地球大気化学国際協同研究計画（IGAC: International Global Atmospheric Chemistry Project）並びに、大気化学と地球汚染に関するコミッション（iCACGP: International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution; 発足当時は CACGP）である。IGAC 発足当初は、Scientific Steering Committee（SSC）と呼ばれる執行部は欧米の研究者が中心であったが、現在は日本や中国だけでなく、南・東南アジアの研究者が SSC に入り活躍している。今後も、SSC への関与を通じて日本から国際的に貢献するとともに、世界の動向や趨勢を日本の研究コミュニティに伝えることも重要である。

IGAC 及び iCACGP は、定期的に国際会議を開催しており（2022 年以降は 2 年毎に合同開催予定）、草の根で国際連携のシーズが生まれる場、将来のリーダーを育成する場として重要な役割を果たしている。日本では、黎明期の 1994 年の富士吉田会議（参加国 27 カ国から外国人約 170 名、日本人約 90 名）、1997 年の名古屋会議（外国から約 90 名、日本人約 90 名）、成熟期の 2018 年の高松会議（45 ヶ国から 725 名）を成功させ、日本の大気化学コミュニティが世界に認知され国際交流と連携を飛躍的に高める機会となった。また、近年では、国際会議の参加者のうち約 40%が Early Career Scientists（IGAC の定義では大学院生及び学位取得後 3 年以内の研究者）であり、次世代の大気化学者の育成にとっても、こうした国際会議の重要性は増している。

2022 年現在、IGAC は 10 種の Activity（表 3）と 6 種の Working Group を推進しており、それぞれ国際共同研究のリーダーシップとキャパシティビルディングの役割を担っている。これらの定常的な活動も、国際連携を継続的に推進し、発展させる場として重要な役割を果たしている。

表 3 IGAC が推進する Activity (2023 年時点)

略称	Activity 名称	和訳
PACES	Air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies	北極の大気汚染と気候・環境・社会
AMIGO	Analysis of Emissions using Observations	大気観測からの排出量解析
ACAM	Atmospheric Composition and the Asian Monsoon	大気組成とアジアモンスーン
CCMI	Chemistry-Climate Model Initiative	化学気候モデリングイニシアティブ
GEIA	Global Emissions Initiative	地球規模の排出量研究イニシアティブ
MAP-AQ	Monitoring, Analysis and Prediction of Air Quality	大気質のモニタリング・解析・予測
CATCH	The Cryosphere and Atmospheric Chemistry	寒冷圏と大気化学
TOAR	Tropospheric Ozone Assessment Report	対流圏オゾン評価報告書
ACPC	Aerosols, Clouds, Precipitation and Climate	エアロゾル・雲・降水・気候
DEBITS	Deposition of Biogeochemically Important Trace Species	生物地球化学的に重要な微量成分の沈着

(出典)<https://igacproject.org/activities>

これらが扱うトピックスは、本将来構想の各論が対象とした内容とも重なりあっており、現在日本から参画している研究者に加え、今後、若手・学生を含む広い年代層が関わっていくことで、直接的な貢献の厚みを増すべきである。

一方の Working Group は、大気化学として重要な地域にもかかわらず、当該地域における研究者コミュニティが発展途上で国際的な代表性や認知度が弱い地域について、IGAC が 2010 年に立ち上げた活動である。草の根的な研究者ネットワークを強化し、他の地域の研究者との国際的な連携を促進することを目的としており、現在、アフリカ、北・中南米、中国、日本、モンスーンアジア、南半球を対象としたものがある。日本を対象とした Japan National Committee (<http://igacproject.org/JapanNationalCommittee>) は、日本学術会議の IGAC 小委員会を Working Group として位置付けたもので、国際的な「見える化」が進んだ。今後もさらに相互発展的な関係性の維持が求められる。また、大気化学研究者が組織化されておらず、国際コミュニティとあまり繋がっていないモンスーンアジアでのワーキンググループ MANGO (Monsoon Asia and Oceania Networking Group) に対しても、日本が果たせる役割は大きい。

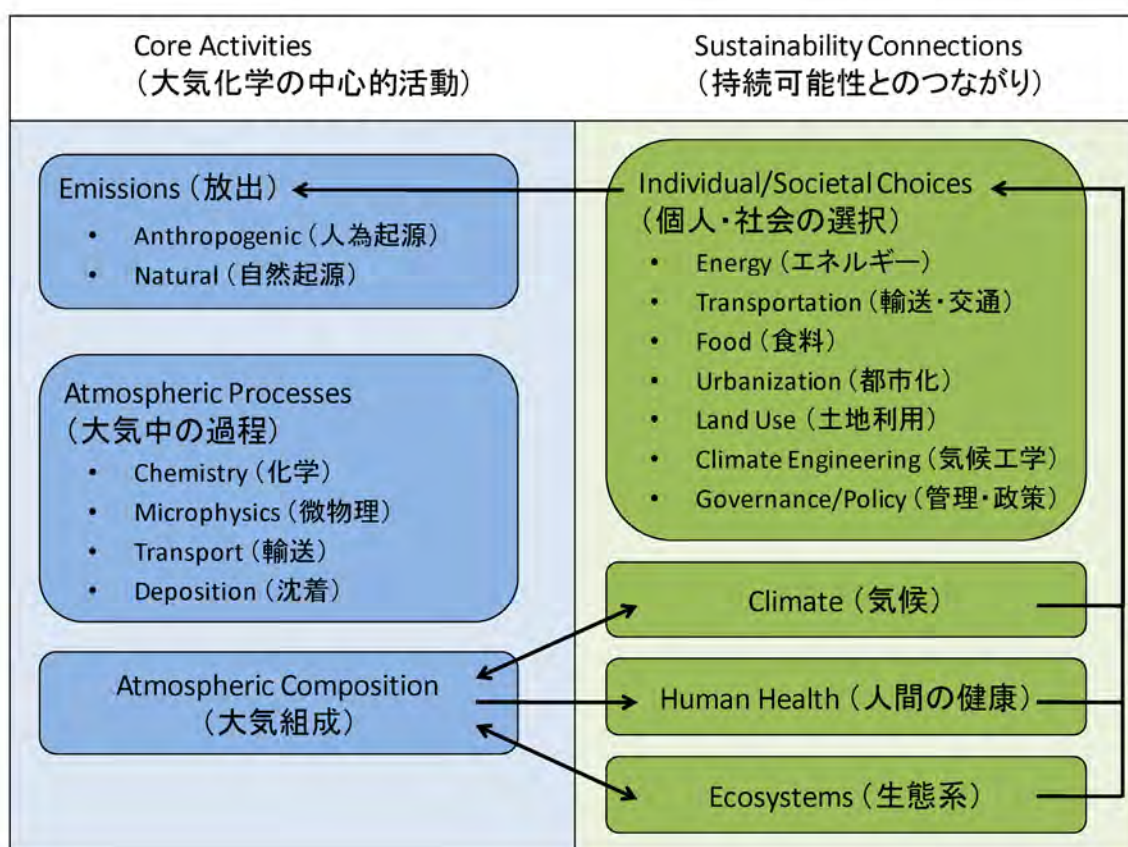


図4 IGAC のビジョンダイアグラム。(IGAC のビジョンは、大気プロセスを完全に理解するために、すべての大気化学分野の協力とバランスを確保し、大気プロセスに関連する他の科学分野と交流し、持続可能性について政策立案者、ステークホルダー、社会と関わることである。) (出典) <https://igacproject.org/mission>

iCACGPの活動としては、前述の国際会議の準備に加えて、国際測地学・地球物理学連合（IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics）^{*40} 国際会議の中の大気化学関連 IAMAS セッションの企画がある。地球システム科学の中において大気化学のポジションを適宜見直し、陸域や海洋を含む周辺分野と広く連携していくための窓口の役割を果たしうる。一方、地球圏－生物圏国際協同研究計画（IGBP: International Geosphere-Biosphere Programme）が、周辺プログラムとマージして発足した国際研究プログラムであるフューチャー・アース（Future Earth）は、IGAC が Global Research Project (GRP)^{*41} として属する母体であり、大気化学コミュニティが、持続可能性を軸にした社会への貢献と連携を強化する上で重要な役割を果たしうる。フューチャー・アースには、事務局長を置く日本ハブがあり、国立環境研究所や総合地球環境学研究所、東京大学等も支援している。SDGs の 17 のゴールの内、気候変動対策やクリーンエネルギー等、大気化学者が果たせる役割も大きい、そのレベルでは健康に影響する「大気質」の観点が見えにくく、大気化学コミュニティとして今後働きかけが必要である。特に、アジアにおいては、大気汚染の健康被害や気候変動による災害が深刻化しており、大気化学研究のさらなる貢献が必要である。さらに、フューチャー・アース傘下の隣接分野である SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study)^{*42} や iLEAPS (Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study)^{*43}、GCP (Global Carbon Project) と、それぞれ海洋・陸域・炭素循環の観点での連携を深め、大気化学へも新たな観点や人材を取り込むことが重要である。以上のように、地球システム科学としての進化と、持続可能な社会への貢献は、今後の大気化学研究の2つの軸として重要である（図4）。

IGAC や iCACGP 以外にも、重要な役割を果たすべき国際研究委員会、国連・国際機関の活動は多い。世界気象機関（WMO）は、リサーチ・ボードと呼ばれる仕組みを通じて Environmental Pollution and Atmospheric Chemistry Scientific Steering Committee (SSC-EPAC) (<https://community.wmo.int/governance/commission-membership/research-board/ssc-epac>) という委員会があり、大気化学に関係が深い。特に、GAW^{*44} (Global Atmosphere Watch) Programme は、温室効果ガスや大気汚染物質の大気モニタリングで重要な役割を果たしており、その Scientific Advisory Group (SAG) には、Ozone、UV Radiation、Greenhouse Gases、Aerosols、Precipitation Chemistry、Reactive Gases、GURME（都市気象・環境）といった7つの委員会がある。気象庁が担う温室効果ガス世界資料センター^{*45} (World Data Centre for Greenhouse Gases: WDCGG) などのデータセンターやデータの品質管理への関与から、（GAW ステーション以外の）観測ステーションの維持や観測データの提供まで、広い貢献を目指すべきである。また、研究的インフラストラクチャーの技術面を議論し答申する Expert Team があり、サイエンスを社会へのサービスにつなげるイニシアティブとして GAFIS (Global Air Quality Forecasting and Information System)、IG3IS (Integrated Global Greenhouse Gas Information System) では、それぞれ大気質と健康、都市の温室効果ガス排出を対象にしている。国連環境計画（UNEP）^{*46} は、Climate and Clean Air Coalition (CCAC)^{*47}、International Methane

Emissions Observatory (IMEO)^{*48}といったイニシアティブを立ち上げ、SLCFsに関する研究開発と国際的な機運の醸成を推進している。

東アジアでは、2001年に開始された東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)^{*49}が大きな役割を果たしており、酸性雨問題だけでなく、オゾン汚染、エアロゾル汚染、さらには、SLCFsを通じた気候変動問題への取組の点で今後さらなる役割が期待されており、日本に拠点を置くアジア大気汚染研究センター(ACAP)を通じて日本の大気化学研究者が果たせるポテンシャルは大きい。広域の大気汚染問題に関しては、ACAPが事務局を担うMICS-Asia^{*50}(Model Inter-Comparison Study for Asia)を通じてTask Force on Hemispheric Transport on Air Pollution (TF HTAP)^{*51}への貢献も重要である。

2009年に打ち上がったGOSAT衛星による温室効果ガス観測への取組を中心に、人工衛星による地球観測にも日本の大気化学研究者の貢献は大きい。GEO^{*52}(Group on Earth Observations)傘下のCEOS^{*53}(地球観測衛星委員会)は、GEOSS^{*54}(Global Earth Observation System of Systems)の宇宙部分を担っており、具体的なグループとしてAtmospheric Composition-Virtual Constellation (AC-VC)等がある。日本としては、2020年に大気汚染物質観測のための静止衛星を打ち上げた韓国とも連携しつつ、GOSAT-GWの推進や新規提案ミッション{各論の長寿命気体、反応性気体を参照}を通じて、宇宙からの地球観測の点でも国際連携を深め、アジアにおけるリーダーシップを強化する余地は大きい。

気候変動問題の点でも国際的な連携は重要である。特に、2021年の気候変動枠組み条約(UNFCCC)^{*55}の締約国会議COP26では、パリ協定の「2℃/1.5℃目標」実現に向けて各国が2050年カーボンニュートラルに向けた政策目標を打ち出しており、脱炭素対策による温室効果ガス排出量とその推移の把握、そして気候変動の緩和策の1つとしてのSLCFsの削減は、大気化学者が重要な役割を果たせるテーマである。この点で、IPCCへの関与は重要である。国内の大気化学分野からは第5次・第6次評価報告書に執筆チームメンバー(Lead Author, Review Editor)等を輩出してきた。SLCFsに関しては、第6次評価報告書で独立章が設けられ、また、第7次評価報告書に向けて、2023年頃にもインベントリガイドラインの目次案が作成されることがIPCCで決定され、排出削減に向けて国際的な動きが加速している。SLCFsは、IPCC以外にも北極評議会もEGBCM^{*56}(Expert Group on Black Carbon and Methane ブラックカーボン^{*57}及びメタン専門家会合)やAMAP^{*58}(Arctic Monitoring and Assessment Programme 北極圏監視評価プログラム)で取り組まれている。特に、北極評議会ではブラックカーボン・メタン削減のために、排出量を報告したオブザーバ国は、非北極圏国であっても北極圏国(カナダ、デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、米国の8カ国)と対等な地位でExpert Groupに参加して今後の対策につき議論に参加することができる。科学的知見の提供は、我が国の国際的立場を高めることができる場合があり、その観点で、国際法学者や政策決定者との議論も重要である。

国際的な観測キャンペーンやモデル相互比較実験への関与もまた重要である。例えば、NASA は、Global Tropospheric Experiment (GTE) と呼ばれる大気化学の航空機観測を世界各地で実施してきた。アジアでは、日本をベースとした PEM-West A 及び B (1991、1994 年)、TRACE-P (2001 年) があった。いずれも日本をベースに、アジア大陸から西太平洋上空への広域を観測対象にしていた。2016 年、約 20 年ぶりにアジアでの NASA による航空機観測 KORUS-AQ が韓国をベースに行われたが、これは韓国上空の比較的狭域に焦点を当て排出源からの排出と化学変質を直接観測した。また、2018 年には、ドイツ主導で台湾をベースに EMeRGe-Asia 航空機観測が行われた。今後、NASA は、KORUS-AQ の後継となる ASIA-AQ を 2024 年に計画し、人工衛星や数値モデルと連携して、東・東南アジアの超広域を対象に、排出源と化学変質を観測することを計画している。人工衛星観測の検証や、統合的な三次元的な大気組成変動の把握には航空機観測は欠かせない要素であり、研究用航空機の保有に至っていない日本としては、引き続き他学会と共同で、地球観測専用の航空機保有へ向けた提案と働きかけを学术界や省庁へ継続するとともに、当面は、このような機会に地上観測や船舶観測を同期させて関与するほか、独自開発した観測機器を持ち寄って参加し実績を積むことも重要である。

以上の国際連携全般において課題となるのは、科学コミュニティがどうしても欧米中心となりがちで、かつ中国が著しく存在感を増しつつある現状において、我が国からの新知見や成熟した成果をいかに効果的に発信するかである。国際的なハイレベル報告書が頼りにするような地域レポートのイニシアティブや、AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) などアジア・オセアニア地域でのリーダーシップの発揮なども有効であろう。また、カーボンニュートラルに便乗した実効性のない取組や提案が広まるようなことがないよう、専門的視点や公平中立な評価を提供し、適正なルール作りに貢献することも、我が国の研究者が担うことができる役割と考える。

(2) 国内の省庁等の関連業務と委員会

1995 年に始まった「大気化学討論会」に源流を置く「日本大気化学会」は、日本の大気化学研究者の発展と連携に貢献してきた。2006 年には、日本地球惑星科学連合 (JpGU: Japan Geoscience Union) に加盟し、それまで開催してきた 2 つの研究集会のうちの 1 つである「大気化学シンポジウム」を 2007 年から JpGU 大会における「大気化学セッション」に発展的に移行し、今では連合大会の主要セッションの 1 つとなっている。こうした JpGU への関与は、大気化学を他分野の研究者にアピールするだけでなく、大気化学に関連する地球科学分野との連携を強化する機能を果たしている。また、JpGU のみならず、日本地球化学会、大気環境学会、日本気象学会、日本海洋学会等の会員を兼ねる会員も多く、研究集会やセッションを共催・後援とする場面もあり、周辺分野との連携も進んでいる。今後は、地球表層システムを構成する分野として、総合的な科学理解にいかに貢献しうるか、地球環境問題への関わりの中で社会への科学的知見の発信をいかに効果的に果たしうるか、といった点が重要である。こうした点

で、日本大気化学会のポジショニングと強み・弱みを整理するとともに、周辺学会との相補性を意識して今後の連携に取り組むべきであろう。

先に、日本大気化学会は IGAC と関連が深い旨を述べたが、日本大気化学会の特徴は、IGAC に関連する研究者を中心にしつつ、それだけでなく WCRP の SPARC^{*59} (Stratosphere – Troposphere Processes And their Role in Climate、成層圏対流圏過程とその気候における役割)、フューチャー・アースの SOLAS や iLEAPS にも関係する研究者が会員となり、研究集会や運営に参加している点にもある。対流圏大気だけでなく、より広く、対流圏や成層圏、炭素循環と反応性物質、陸域生態系や海洋表層との物質交換・相互作用を議論するフォーラム（場）を作っている点が世界的にみてもユニークであり、10～20 年の間に変化する学問分野の趨勢や地球環境問題への社会的ニーズに伴って求められる組織やコミュニティの再編圧力に対してレジリエントな体制となっている。

現在、日本大気化学会は日本学術会議の協力学術団体であり、多様な活動に関与していくことは重要である。IGAC 小委員会は、国際対応面で日本の大気化学研究を IGAC 国際連携に結び付けるものである。大型研究計画マスタープランや未来の学術振興構想に提案された、気候環境変動の改善を健康・エネルギー・食糧など他の価値とどのように両立させるか、といった更なる課題に取り組む際には、キープレイヤーの役割を果たすべきであり、また日本学術会議の「カーボンニュートラル（ネットゼロ）に関する連絡会議」では、気候変動の物質科学に関する最新知見を、日本学術会議第三部（理学・工学）だけでなく第一部（人文・社会科学）・第二部（生命科学）へも普及すべきであろう。このような当分野の最新の動向や課題については、隔年で出版されている科学技術振興機構・研究開発戦略センターの「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野」の取りまとめにも反映されており、今後の横断的取組等の起点の 1 つとしていくべきである。

科学的知見を社会課題の解決に結び付けるために、大気化学の専門性を生かして国内の省庁等の関連業務や委員会への貢献しているものには以下のような例がある（表 4）。

表 4 大気化学の専門的知見が提供されている行政関連の委員会の例

省庁・委員会等	活動内容
環境省中央環境審議会・微小粒子状物質等専門委員会	PM _{2.5} 及び光化学オキシダント（オゾン）の国内濃度削減、基準値達成のための方策を専門的見地から議論しており、越境大気汚染や脱炭素などの影響も加味した専門的知見を提供している。
経済産業省 VOC 排出削減効果の定量的評価に向けた検討等業務検討会	経済産業推進の視点から、オゾンの前駆物質としての VOC 削減を、国内一律ではなく地域性・業種別特性を加味した形で推進する方策などを検討しており、その科学的根拠等を専門的見地から議論している。
文部科学省・気象庁・環境省・経済産業省 IPCCAR6WG1 国内幹事会、IPCCAR6 国内連絡会	IPCCAR6 の著者チームメンバーを中心に組織され、章や WG 間の情報交換や、我が国の IPCC への貢献拡大のための議論を行っている。
国土交通省気象庁品質評価科学活動懇談会	気象庁が行っている WMO/GAW 全球大気監視計画に沿った GHGs、オゾン、エアロゾル、放射等の計測に関し、その品質向上などについて専門家の意見や科学的・技術的助言を行っている。
文部科学省地球観測推進部会	関係各府省や機関等が連携して地球観測を推進するための実施方針や実施計画を策定している。

（出典）IGAC 小委員会にて作成

その他、常設またはアドホックに開催される、環境省の大気汚染常時監視業務に関する委員会、宇宙航空研究開発機構の人工衛星観測ミッションに関する委員会等が挙げられる。

こうした活動は、地球規模の気候変動や大気汚染問題への社会的ニーズの高まりを受けて、今後さらに拡充すべきであろう。また、より柔軟な形での政策貢献や、政策貢献をリードしていくことも考えられる。例えば、環境省は、外務省経由で北極評議会の EGBCM に「ブラックカーボン／メタン排出量の年次 National Report」を提出しているが、省内所掌の都合上、複数部局が関わっているためそのプロセスは複雑であり、窓口である省庁と、正確な情報・最先端の科学的知見を有する研究者が繋がっているとは言い難い。そこで、少なくとも研究側での体制や情報を整理しておくことで、研究側からの行政支援がスムーズかつ迅速に行える。IPCC でも、第7次評価報告書に向けて SLCF インベントリの方法論を構築することが正式決定、2023 年前半に SLCF インベントリガイドラインの目次案が決定されて文書作成が早速始まる見込みであるが、こうした動きに日本として遅滞なく、かつ科学的合理性を備えて政策対応するためにも、研究側で準備・検討を開始しておくことで、スムーズな行政支援が可能となり、さらには IPCC の動きを先導することにもつながる。このように、「行政・実務・研究の連携強化」に関して研究側からできることは大きい。

国レベルだけでなく、地方自治体レベルでも大気化学者が果たせる役割は大きく、都道府県や市などの環境影響評価委員会などにも貢献している。その際、人間活動に起因する温室効果ガスの排出を抑えていく「脱炭素化」も今後貢献すべきテーマである。日本政府は「2050 年のカーボンニュートラル、2030 年の温室効果ガス排出量 46%削減（2013 年比）」の削減目標を掲げ、世界的な約束事となっているが、具体的な対策や検証は局所的で、自治体レベルの対応となることも多い。温室効果ガスだけでなく、大気汚染物質についても、人為または自然起源から大気中に排出される物質を扱う大気化学は、これら物質の排出インベントリの構築に加え、大気中濃度から排出量の逆解析（逆推計）も対象としており、気候変動や大気汚染の原因物質の排出量を精緻に把握することで削減対策につなげ、これらの緩和策に貢献しうる。こうした研究開発は、現在、亜大陸や国レベルで行われているが、今後の観測やモデル技術の向上により、都市レベルでの現状把握が可能となり、地方自治体の脱炭素化や大気汚染対策に対しても、より直接的に政策貢献できる時代が来ると思われる。

このような重要な役割にもかかわらず、大気化学に関する地球観測の長期維持や連携については課題も大きい。2004 年の「地球観測の推進戦略」以降、GEO 戦略計画に関連し、現在では 2015 年の「今後 10 年の我が国の地球観測の実施方針」に基づいて、文部科学省・気象庁・環境省等や各機関が連携した大気観測計画を構築し維持しているが、実際はオゾンゾンデ観測など、各省庁において予算削減により観測終了を余儀なくされている場面も多い。研究コミュニティとの連携強化などにより、観測終了の影響を和らげるソフトランディングを図ることや、地球観測連携拠点の SLCFs 分野の構築など、体制の強化が望まれる。

4 大気化学研究開発の基盤の拡充と課題

(1) 大気化学研究のプラットフォーム・資源

様々な時空間スケールにおける大気成分の動態を対象とする観測では、観測対象に応じたその場測定あるいはリモートセンシングを実施するためのプラットフォームが必要となる。これまで利用されている代表的なプラットフォームには、広域・全球の長期観測に適した人工衛星、ある領域の空間的分布の把握に適した航空機・船舶、さらには、長期監視や地表・鉛直分布の状態の観測、先端的計測機器の運用に適した地上観測ステーションなどがある。

人工衛星による微量ガス及びエアロゾルの観測は、広域の時空間分布を把握するための強力な手法であり、大気化学における重要性はさらに高まると考えられる。その応用には、大気モデルシミュレーションにおける評価や、逆計算による発生源の推定、データ同化による予報などがある。日本はこれまで、GOSAT シリーズ衛星の1・2号機によるCO₂・メタンの衛星観測に成功しており、新たにNO₂を加えた3号機による観測ミッションが予定されている。面的に連続した、キロメートル級の解像度を持つ観測からは、非線形大気化学プロセスの直接評価や個別発生源の評価が期待される。また、ADEOS/ADEOS-II 衛星に搭載された改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS/ILAS-II) によるオゾン層観測、人工衛星ではないが国際宇宙ステーションに搭載した超電導サブミリ波放射サウンダ (JEM/SMILES) による、オゾン破壊に関わるハロゲン化学物質等の観測の実績がある。人工衛星による大気観測は、日本の大気化学研究の特徴ある取組の1つと言え、継続的な基盤の維持と強化により世界の学術コミュニティへの貢献が望まれる。米国や欧州では大気微量成分の衛星観測が継続的に進展しており、日本の研究者にとって極めて重要な観測データの基盤となっているほか、近年開始された韓国のGEMS センサによる静止衛星観測は、アジア太平洋域の大気化学研究において強力な手段となると考えられる。日本において、これら海外の衛星観測と連携した研究を推進・強化することも重要な課題である。将来の衛星観測プロジェクトにおいては、既に衛星観測の実績がある成分については、観測の時間・空間分解能の向上により、都市など局所的な発生源を持つ成分の動態を追跡するなどの発展が期待される。また、揮発性有機化合物 (VOC) ^{*60} などの新たな微量成分の検出・定量の可能性を広げることも望まれる。地球惑星科学委員会の地球観測衛星将来構想小委員会での議論や 25 の学協会で構成される「タスクフォース会合・リモセン分科会」でのミッション公募提案を継続し、実現を図ってゆくべきである。また、日本大気化学会は、正式メンバーとなったCONSEO (衛星地球観測コンソーシアム) の場を活用し、産官学連携や社会課題解決のためのデータ活用を推進すべきである。

航空機は、鉛直分布を含む大気成分の空間分布を把握するための優れたプラットフォームであり、現在の人工衛星では捉えきれない多様な気体成分の計測や、組成・粒径など複雑な属性を持つエアロゾルの観測において強みを持つ。日本の大気化学研究における取組としては、A-FORCE 航空機観測や米国が主導した TRACE-P など海外の航空機プラットフォームを用いる観測研究などの実績がある。しかし、日本において航空

機を利用する観測研究を支援する体制は脆弱であり、大気化学分野を含め、地球科学分野における観測は外部資金による短期のチャーター機利用に頼る現実がある。このため、国内の研究者の航空機観測への参入は難しく、また、観測技術を蓄積し発展させる基盤は極めて脆弱である。そこで今後、支援体制を整備し航空機観測のすそ野を広げることが求められる。日本学術会議が提案する「第 24 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」（マスタープラン 2020）では、重点大型研究計画の 1 つとして「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」が学術大型研究計画の中から特に速やかに推進すべき計画として選定された。本計画で提案されている地球観測専用の航空機の導入が実現すれば、大気微量ガス・エアロゾルの動態・発生源の把握や陸面・海洋との相互作用や気候・気象との関連について、地上や人工衛星のプラットフォームでは得られないデータの取得が大きく進むと期待される。なお、本計画では、名古屋大学宇宙地球環境研究所の飛翔体観測推進センターが共同利用・運用の中核となる形が提案されている。また、本計画に関連して、日本気象学会で「航空機観測による気候・地球システム科学システムの推進研究計画書」が報告書としてまとめられている。引き続き関係する学術機関・団体と協力し、地球観測航空機の導入に向けた検討を継続することが望まれる。

CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for Trace gases by AirLiner) プロジェクトでは、民間定期航空機を利用した CO₂ 濃度連続測定が行われており、国立の研究機関が民間の事業者と連携した航空機観測も大気化学研究の強力な手段となっている。航空機の利用に加え、ドローンなど他の飛翔体の利用においても大気化学研究における民間のプラットフォームの活用について検討する価値がある。なお、民間との連携においては、民間側の厚意に依存する側面もあるため、安定的で基盤的な観測体制の確立について留意する必要がある。東アジア域における近年の航空機観測には、米国の NASA の研究プロジェクトである KORUS-AQ において米国と韓国の研究者の連携による朝鮮半島南部付近を対象とする航空機観測研究などがある。アジア域における国際航空機観測に対する日本からのコミットについても、強化していくことが望まれる。また、成層圏の観測においては大気球の利用が有効であり、持続的な観測体制の確立が望まれるほか、成層圏通信プラットフォーム (HAPS) の開発状況も注視すべきものである。

船舶は、空間分布を把握する重要なプラットフォームであり、設置できる観測機器の自由度は、積載量に厳しい制限のある航空機よりもはるかに大きい。観測域が海洋上に限られるが、地上観測ではカバーできない領域を観測できる重要なプラットフォームである。海洋域に特有の化学的プロセスを対象とする研究を行う上においても、船舶観測は重要である。さらに極域の大気環境の把握においても重要なプラットフォームである。これまで、学術研究船白鳳丸／新青丸・海洋地球研究船みらいなどを利用した大気化学分野の観測研究が行われており、日本の海洋大気観測の環境は比較的恵まれていると言える。しかしながら、大気化学観測を対象とするプロジェクトは必ずしも豊富とは言えず、大気化学分野が船舶観測を主導する余地はまだ十分にある。

その外、微量気体の観測において民間の船舶の利用実績があり、今後も民間の観測協力船の活用を進めることも重要である。2026 年度の竣工へ向け現在建造中である北極域研究船では、大気組成の基礎的な成分を常時計測する計画で、海洋研究開発機構を起点とし、持ち込み機材を加えた総合的な国内・国際協同観測を推進すべきである。また、将来の南極観測船しらせの後継船などの議論も継続することが重要である。

地上観測網は、長期モニタリングと、先端的計測機器を用いる大気プロセスを対象とする集中観測の両方にとって重要なプラットフォームである（図5）。長期モニタリングのプラットフォームとしては、国立環境研究所の辺戸岬大気・エアロゾル観測ステーションや千葉大学が代表機関として維持する福江島大気環境観測施設、金沢大学の能登スーパーサイトなどの研究拠点の外、気象庁の全球大気監視観測所、環境省による大気汚染物質の常時監視のネットワークや、越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングが挙げられ、今後の継続が望まれる。特に、島嶼・沿岸部においてアジア大陸からの汚染物質のアウトフローの長期観測において大気化学分野における大きな実績があり、今後の維持発展が強く望まれる。国内の施設は、例えば、韓国のスーパーサイトの設備・施設の充実ぶりと比較すると大きく見劣りする場合もあり、欧米研究者を招いて国際共同観測研究を行う際の障壁ともなっている。また、エアロゾルの個数濃度や粒径に関わる地上観測の体制はまだ乏しく、エアロゾルの気候影響評価などへの貢献を視野に、今後の拡充が望まれる。

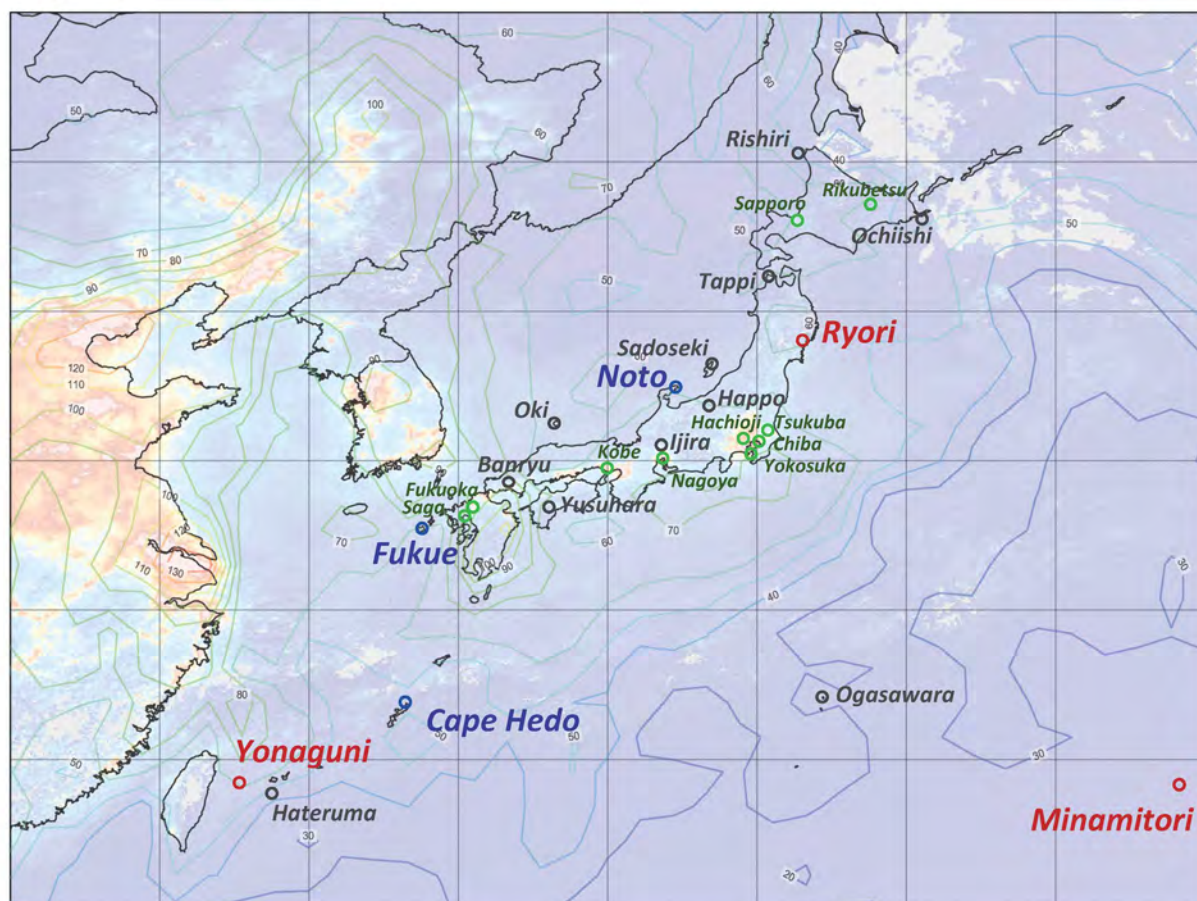


図5 国内の地上観測サイト（赤：気象庁、青・灰色：研究コミュニティ及び研究所が維持するスーパーサイトと観測点、緑：リモートセンシング計測点。背景の塗りには衛星TROPOMIによる対流圏NO₂カラム濃度（排出量の分布が読み取れる）、等高線はデータ同化TCR-2による典型的な春季の地表付近オゾン濃度分布）

（出典）IGAC 小委員会にて作成

研究プラットフォームの整備は大気観測において必要であるだけでなく、大気化学の素過程を理解するための室内実験研究においても、その整備が求められる。特に、大型の反応チャンバ（反応槽）は、気体成分やエアロゾルの化学的変質を追跡する実験において強力なツールとなる。国立環境研究所にあるスモッグチャンバは、日本のチャンバ実験の中心的なプラットフォームとして多くの成果を挙げてきた。チャンバやそれに付随する計測装置の維持管理を個人研究者レベルで行うことは負担が過大であり、効率的とはいえないことから、今後のプロセス研究の継続と発展に向け、大気化学のコミュニティとして反応実験のプラットフォームの維持や発展について検討することが望まれる。特に、化学反応を追跡するチャンバの利用だけでなく、氷晶核等に関わるテーマについて、雲チャンバを用いる実験のプラットフォームを大気化学研究と結び付けることについて検討が望まれる。また、大気中の新粒子生成の課題は大気微量成分に関わりガス・エアロゾルにまたがる重要残存課題であるが、その機構に関する研究は欧州原子核研究機構（CERN）における CLOUD 実験の独走状態にある。このような海外の先端実験研究にコミットすること、また、室内実験研究を日本が主導するための独自の実験プラットフォームについて検討することも望まれる。

計算機は、大気化学分野で広く行われているモデルシミュレーションにおいて必須となる研究資源である。大気化学シミュレーションは気象・気候モデルと結合したオンラインモデルと、気象・気候モデルの計算結果を入力データとして取り込むオフラインモデルとに大別され、前者の場合は予報変数の数が飛躍的に増加するため CPU 資源及びメモリ使用量が非常に増加し、後者の場合はそれらに加えて、ストレージ資源及び I/O 通信量が顕著に増加することになる。データファイルを転送する負担も大きいいため、オンプレミスあるいはプライベートクラウドのサーバが使われることが多い。オンプレミス、すなわち、使用者が管理している施設内に機器を設置して運用する形式のサーバとしては理化学研究所の富岳、海洋研究開発機構の地球シミュレータ、各機関の大型計算機があるが、今後は、パブリッククラウドサーバや仮想サーバの利用へと選択肢が広がる可能性もある。現在は、実機から実機以外の解析手法への過渡期にあると考えることもでき、計算機性能や利用可能資源の発展に伴い、それらを活かした大気化学研究を積極的に提案・推進していくことが望まれる。現状では、大気シミュレーションはベクトル型あるいはスカラー型のコンベンショナルな CPU を搭載した大型並列計算機に大きく依存している一方、昨今その技術進歩が著しい機械学習計算用の GPU を搭載した汎用機が充実するようになった。今後は、これまでのような著しい CPU 性能の向上は難しいと考えられており、GPU を活用した効率的な並列処理による高

速化も視野に入れる必要がある。GPU の活用においては旧来の物理化学モデル計算を GPU 向けに移植するだけでなく、機械学習を大気化学シミュレーションに活用する手法（いわゆる代理モデリング）についても技術開発が必要となるはずである。大気化学シミュレーションにおける目的と計算方法に応じて、今後こういった計算機資源が必要あるいは利用可能か整理することが求められる。

(2) 研究データの整備と利用

近年、学術雑誌上での論文発表時に使用したデータの公開が求められることが一般的となり、研究者間相互でデータ利用を推進する土壌が整いつつある。しかし、大気化学に関わる観測データの見える化は必ずしもシステマティックに行われているとはいえず、研究者個人による努力や模索が求められる現状にある。PANGAEA などのデータリポジトリが整備される中、日本からデータ公開・利用にどのように貢献するかを考える必要がある。大気化学分野では多数の変数が利用対象となる上、今後、データの高解像度化が更に進むと見込まれ、サイズの大きなデータを安定的に公開し DOI を付与できる仕組みの整備について検討することが望まれる。このため、世界資料センター (WDC) の 1 つである温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) や国立極地研究所の ADS などの既存の取組との連携を含め、データの収集・保管・配布に関する議論を進めることが望まれる。日本での大気化学観測データ全体のポータルを整備する、あるいは一元化する取組や、大気化学分野のニーズを取り込んだ、新たな取組について検討することが望まれる。これらの大気観測データの利用を推進する上で、測定手法の標準化を進めることも重要である。この点においては、先端的な計測を中心に、標準化がそぐわない観測データをどのように収集しまとめるかを検討することも求められる。

気象データの再解析データや排出インベントリは、海外の取組を中心に長くデータの共有が行われており、大気モデル研究等における重要な資源となっている。実験・観測とモデル研究を結び付けるこれらの研究資源の維持・発展は、今後も引き続き重要となる。気象データとしては日本の気象庁、欧州中期気象予報センター (ECMWF) や米国の国立環境予測センター (NCEP) が提供する再解析データがある外、微量化学成分の情報を含むデータとしてアメリカ航空宇宙局 (NASA) が提供する MERRA-2 がある。また日本においても、エアロゾル版再解析プロダクト (JRAero) や第 2 世代化学再解析データセット (TCR-2) の取組があり、微量成分の情報を取り入れたデータの更なる拡充が望まれる。これらの再解析の進展に伴い、微量成分の再解析データを整備し一元化する取組についても検討が望まれる。排出インベントリに関しては、日本ではアジア域の大気汚染・気候変動関連物質の排出インベントリの開発に実績があり、今後もアジア域のインベントリ開発や、排出削減施策の指針提供への貢献が強く期待される。

データサイエンスに対する学術分野からの投資は、今後更に大きくなっていくことが考えられる。大気化学は大きなデータを扱う学問分野の 1 つとはいえ、データサイエンスとの連携により、新しい角度からの大気化学の発展に結び付く可能性がある。

人工知能のアプローチを用いる大気化学研究はまだ黎明期にあると考えられるが、今後の発展が大いに期待される手法である。一例として海外では、モデルの全球 OH ラジカル変動に深層学習を適用し、変動要因を解析する取組が報告されている。現状のデータアーカイブの仕組みをどのように整え、ビッグデータに関する基盤整備を進めるかは、機械学習などの人工知能の手法の利用を進める上で検討する必要がある。

(3) 人材育成

日本における大気化学の継続的な発展には、それを支える人材の育成に関わる課題を整理し、その改善を図ることも重要である。中等教育では、大気化学の基礎となる化学・物理に関する学習の機会が得られる一方、大気化学に関わる気候変動・大気質のトピックスを含む地学の学習機会は、大学受験科目の関係などから、外の理科科目と比較して格段に少ないと考えられる。高校での地学教育に対する学術コミュニティからの支援強化や、高校地学の学習経験が乏しい学生に配慮した大学学部授業の整備により、地球科学教育における高校・大学間の接続を整えることが望まれる。中等教育機関においては、SDGsなどを念頭に、グローバルな視点での環境問題・社会課題解決能力を備えた次世代の人材育成に力を入れており、当分野からも積極的な貢献を行うべきである。また、高等教育における大気化学の教育は、大学院における取組が主流であると考えられ、学士課程で取り上げられる機会は少ないと思われる。学部授業で扱いやすい教材の拡充など、学部教育の支援を通して、大気化学に対する学生の興味を惹きつける取組を考える余地がある。大学院における大気化学系の研究室では、地球環境問題などに興味を持つ、化学・物理一般のバックグラウンドを持つ学生を広く受け入れており、地球科学の専門に限らず幅広い専門性を活かすことができる学問分野であることは強みといえる。また、地球温暖化や大気汚染などで改善指標となる物質濃度のデータを取り扱い、効果的な削減策を提示するなど、社会課題の根本的な解決に直結する知識を創出しうることを広くアピールすることが望まれる。国立研究機関においては、研究者が連携教員などの立場で高等教育の支援を行っており、これらの研究機関の豊富な研究資源を有効に活用することで、大学における人材育成を大幅に充実させられる可能性がある。

大気化学を学んだ学生の学位取得後の進路として、国立環境研究所などを中心に若手向けのポストの公募があり、学位を取得して間もない若手研究者を取り巻く就職状況は悪いとは言えない。ただし、他の学術分野と同様に、パーマネントポストの獲得は容易とはいえず、任期付きのポストを続けてパーマネントポストやテニュアトラックポスト（審査後にパーマネントへ移行できるポスト）への採択を目指す状況にある。大学においては、外部資金で雇用されるポストドクトラル研究員（以下「ポストドク」という。）に加え、若手のポストとしてテニュアトラック教員や任期付き教員のポストがあるが、多くの募集で関連分野との競合があると考えられ、大気化学分野の優秀な若手人材の輩出が大学における大気化学教育の継続・発展の大きな鍵となる。なお、大気化学分野に限らず日本の学術界の課題として、ポスト獲得の競争に見合う待遇や

異なるキャリアへの再挑戦の機会が不十分で、学術研究職が若手にとって魅力的な選択肢になっていない懸念がある。また、日本の名目・実質賃金が伸び悩む中、大学や研究所を問わず、ポストクを含む研究職の待遇が国際的な競争力を失い、海外の優秀な若手人材の呼び込みを阻害している可能性も考えられる。政府の若手支援策などにより当該分野の就業を取り巻く状況が改善していくのか、今後注視していく必要がある。

大気化学に関わる製造業や産業界との接点は多いとは言えず、より接点のある分野の取組などを参考に、計測手法開発やコンサルティング業などに繋がり得る連携を考えることは、大気化学研究の強化に資するだけでなく、多様なキャリアパスの形成や、産学の人材交流の視点からも考慮する価値がある。大気化学の専門性を有した人材を民間や社会に輩出することは、当分野からの社会還元にも位置付けられる。地球環境のデータサイエンス利用には期待が高く、大気組成の衛星観測データの Google Earth Engineでの利用などを通じ、産業界や隣接分野の専門家にも浸透させることは、広い意味での人材確保に結び付くだろう。男女共同参画の推進は、大気化学分野の就業における重要な課題の1つであり、日本大気化学会では運営側に立つ女性比率を積極的に高めているほか、日本大気化学会における男女共同参画・人材育成委員会では、研究集会中の保育支援や女性会員を対象とした交流企画を実施するとともに、国内外の次世代を担う若手人材への積極的な支援や働きかけを行っている。

大気化学は地球全体の大気を対象とし、地球温暖化などの人類共通の課題を扱う学問分野であることから、海外の研究者と研究対象を共有し、国際的な交流に結び付けやすい分野だと考えられる。この利点を活かし、人材交流に基づく国際的な人材育成を進める余地がある。日本の大気化学研究の推進のためだけでなく、国内の若手研究者を育成する機会としても、国際共同研究の積極的な展開が望まれる。また、海外の若手研究者の育成に貢献していくことも、世界の中の日本の学術コミュニティとしての重要な務めである。2018年に高松で開催された iCACGP-IGAC 2018 国際会議における若手向けのショートコースの取組など、海外の学生・若手研究者を対象とするスクール等の取組を参考に、国内の大気化学コミュニティへも波及させるべきである。国内の共同利用研究所などが主導して海外の若手を招くなどの取組により、将来の国際交流に繋げていくことが期待される。

＜用語の解説＞

*1 温室効果気体 (GHGs)：地球が黒体として放射する赤外線を吸収して再び放射する性質をもつことで、大気中濃度の増加が地球温暖化に寄与する気体の総称。二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素、ハロカーボン類、オゾンなどが含まれる。Greenhouse Gases の略。

*2 短寿命気候強制因子 (SLCFs)：およそ 20 年以下の大気中寿命（滞在時間）をもつガス成分・粒子のことで、直接的あるいは間接的に（化学反応を経て）地球の放射収支に影響を与える物質のこと。メタン、ハロゲン化合物、オゾン、窒素酸化物、二酸化硫黄、一酸化炭素、揮発性有機化合物、アンモニア、エアロゾル粒子では、ブラックカーボン、有機エアロゾル、硝酸・硫酸・アンモニウム塩、鉱物ダスト、海塩粒子などを指し、ほぼすべての大気汚染物質類が含まれる。SLCFs は Short-lived Climate Forcers の略。

*3 $PM_{2.5}$ ：2.5 μm 以下のサイズの空気中のエアロゾル粒子のことで、微小粒子状物質とも呼ばれる。気道の奥にまで入り込みやすいために、呼吸器疾患などの健康被害を引き起こす。主な化学成分としては、硫酸塩、アンモニウム塩、有機物、ブラックカーボンなど。

*4 オゾン：成層圏オゾン、対流圏オゾンのように、大気中の存在高度で区別されて呼ばれる。成層圏オゾンはオゾン層としても知られ、有害な紫外線が地表に降り注ぐことを防ぐ役割をもつ。対流圏オゾンは、光化学オキシダントの主成分であり、人間の健康影響だけでなく森林の光合成機能や農作物の収量の低下をもたらす大気汚染物質である。また同時に、赤外線等を吸収するため第 3 の温室効果ガスとして地球温暖化に寄与している。

*5 地球大気化学国際協同研究計画 (International Global Atmospheric Chemistry: IGAC)：IUGG-IAMAS(*40 参照)傘下の iCACGP と、FE(*6 参照)を母体とする、地球大気化学に関するグローバル研究プロジェクト (GRP)。

*6 大気化学と地球汚染に関するコミッション (International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution: iCACGP)：IUGG-IAMAS 傘下のコミッションの 1 つ。以前は CACGP と呼ばれていた。

*7 フューチャー・アース (Future Earth: FE)：持続可能な社会への転換をめざす、地球環境研究・サステナビリティ科学の国際的研究プラットフォーム。旧地球圏・生物圏国際協同研究計画 (International Geosphere-Biosphere Programme: IGBP)、地球環境変化の人間の側面国際研究計画 (International Human Dimension Programme on Global Environmental Change: IHDP)、生物多様性科学国際協同計画 (International Programme on Biodiversity Science: DIVERSITAS) が合流して 2013 年に発足。

*8 エアロゾル：大気中に浮遊する液体または固体の粒子と周囲の気体の混合体のこと。IPCC 報告書などでは、その粒子（エアロゾル粒子）のことを指す場合もある。PM_{2.5}はエアロゾル粒子の一部である。

*9 オゾン層破壊物質（ODSs）：クロロフルオロカーボン、四塩化炭素、1, 1, 1-トリクロロエタンや代替フロン類、ハロン、塩化メチル、臭化メチル、極短寿命ガスなど、光化学反応を経て成層圏オゾン破壊に寄与する物質の総称。Ozone-Depleting Substances の略。

*10 自然の巧妙な酸化能：対流圏大気中にはごく少量(1 pptv(体積混合比 1 兆分の 1)以下)、反応性が極めて高い OH ラジカルが存在し、メタン・窒素酸化物・一酸化炭素・二酸化硫黄など、多くの成分と反応して酸化・除去を開始し、それぞれの物質の大気中寿命を決定づけている。他に、NO₃ ラジカルなども存在するが、主に、OH ラジカルが酸化能を支配していると考えられている。その大気中の濃度は長期にわたり自然システムの中でほぼ一定に保たれ、また人間活動による摂動が加わっても変化は±10%以内に収まっていると考えられ、大気化学反応メカニズムがもつ巧妙な側面と捉えられる。

*11 地球システム：地球を構成する大気圏、水圏、固体地球圏、生物圏（サブシステムと呼ぶ）や、それらの間の相互作用などを含めて統合的に扱い、組織化された複雑系としての地球の全体的な振る舞いを明らかにしようとする捉え方。地球統合システムとも呼ばれる。

*12 学際：学問の一専門領域と、隣接する領域との間を指す。異なる学問分野が横断的に協業して研究する活動を学際研究と呼ぶ。

*13 超学際連携：科学各分野の協力である学際を超えた概念で、学術と社会の間の垣根をこえて、社会のさまざまなステークホルダー（利害関係者）が連携して取り組む活動。

*14 OH ラジカル：メタンや多くの大気汚染物質を分解させる大気中の超微量物質。オゾンや二次的なエアロゾル粒子の生成にも深く関与する。その場の大気中の OH ラジカル濃度の計測は可能となったが、時空間変動が大きく、全球的な存在量や分布などは直接観測からは情報が得られておらず、大気化学研究の心臓部でありながら、ブラックボックスとなっており、今後の研究が必要である。酸化能(*10)の記述も参照。

*15 WCRP (World Climate Research Programme、世界気候研究計画)：世界気象機関 (WMO)、国際学術会議 (ISC) 及び政府間海洋学委員会 (IOC) のもとで行われている、気候変動予測及び人間活動が気候に及ぼす影響の研究を行うプログラム。

*16 含多酸素有機化合物 HOMs：大気中に存在する有機過酸化ラジカル RO₂の自動酸化反応

の繰り返しによって、分子内にヒドロペルオキシド基-OOH が複数個存在するようになった物質のことで、エアロゾル粒子の生成、特に、新粒子の成長に寄与していると考えられている。

*17 バイオ粒子：生物起源一次粒子のことで、花粉や孢子、真菌、細菌からウイルスなどの総称。生死を問わず、破片や滲出物なども含む。バイオエアロゾル粒子とも呼ばれる。

*18 データ同化：シミュレーションを実際の観測データとつぎあわせ、シミュレーションの軌道を修正して「確からしさ」を高める手法。気象だけでなく化学物質などにも応用範囲が広がっている。

*19 多相化学：気相・液相・固相やその界面など、複数の相の存在により引き起こされる化学プロセスのこと。

*20 フィードバック：地球システムのある変化（例えば地球温暖化）が、それによって引き起こされる、システム内の別の変化によって強められたり弱められたりすること。

*21 Global Carbon Project (GCP)：世界の温室効果ガス排出量とその原因を定量化することを目的とした組織で、CO₂、メタン、N₂O の収支評価を定期的に報告している。フューチャー・アースのグローバル研究プロジェクトの1つであり、WCRP の研究パートナーである。

*22 不均一反応：2種の相の共存下で進む反応のこと。大気化学では特に、気相とエアロゾル・雲粒子の境界、あるいは気相と地表面・海表面・雪氷面の境界で起こる反応のことを指すことが多い。

*23 二次生成エアロゾル：ガスを原料とし、大気中の化学反応や熱力学的平衡によって二次的に生成するエアロゾル粒子のこと。有機物や硝酸塩・硫酸塩・アンモニウム塩の生成が代表例。

*24 界面：気液・固液界面など、物質の密度分布のミクロな偏りなどの影響で、大気化学的視点でも特有の反応が起こる場のこと。

*25 HFC 類：ハイドロフルオロカーボン類。代替フロンの一種で、塩素原子を含まないためオゾン層を破壊しないが、強力な温室効果を持つ。

*26 残余カーボンバジェット：カーボンバジェットは、地球温暖化による気温上昇をある目標水準（1.5℃など）までに抑えようとする場合に、許容されるCO₂の累積排出量（過去

と今後)の上限のこと。残余カーボンバジェットは、そのうち今後に許容される上限値のこと。

*27 惑星の許容限界：プラネタリー・バウンダリーとも呼ばれ、人類が生存できる安全な活動領域と限界点を、9つの指標プロセスについて表現したもの。生物地球化学的循環（リン・窒素）についてはすでに限界を超えているとされている。成層圏オゾン層破壊、大気エアロゾル負荷、気候変動なども指標プロセスとなっている。

*28 窒素酸化物：一酸化窒素(NO)、二酸化窒素(NO_2)から成る NO_x のこと。

*29 DPSIR：Driver（根本原因）-Pressure（負荷）-State（状態）-Impact（影響）-Response（対策や対応）の頭文字をとったもので、環境問題一般に適用される、因果と対処のフレームワーク。欧州環境機構により1999年に構築され、広まった。

*30 ESG（環境・社会・ガバナンス）活動：環境や社会、ガバナンスに対する企業取組のこと。持続可能な未来社会への貢献度が、業績や財務状況と合わせて企業の評価に重要となっており、 CO_2 排出量削減や大気汚染軽減なども指標となる。

*31 TCFD(気候関連財務情報開示タスクフォース)報告書：金融安定理事会（FSB）により設置された気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）が推奨する年次の財務報告書で、財務に影響のある気候関連情報（気候変動のリスクと機会）を開示したもののこと。脱炭素を目指す社会の仕組みの一環と捉えられる。環境省も賛同し、民間の取組をサポートしている。

*32 劣決定問題：得られる計測データ数 m に対して、未知パラメータ n が多く、連立方程式の逆問題で一意に解が得られない問題のこと。

*33 同位体情報の高度な利用：例えば、ある分子がもつ2種の起源の寄与割合を調べたい場合に、2種の起源が異なる固有の同位体組成をもっていれば、同分子の同位体比を計測すれば、劣決定問題は解決し、求めたい起源寄与割合の情報が得られる（同位体により化学的挙動は変化しないとする）。

*34 CMIP 結合モデル相互比較：IPCC 報告書での気候シミュレーションのアンサンブル評価のために WCRP がコーディネートし、世界の数十のグループが協調して取り組む、大規模な相互比較モデル実験のこと。全球気候モデルに生態系・物質循環を結合した地球システムモデルも参加する。IPCC AR6 用の CMIP6 では、21 種のモデル相互比較実験(MIP)が公式選定された。 CO_2 を扱う MIP に加え、大気化学やエアロゾルに焦点を当てた AerChemMIP なども含まれる。

*35 地球システムモデル：大気・海洋・陸域における物理現象を中心に扱う気候モデルを核とし、炭素や微量成分の地球表層物質循環や生態系を統合したモデルのこと。

*36 生物起源揮発性有機化合物 BVOC 類：陸上や海洋の生態系から大気へ放出される、揮発性有機ガスの総称。炭素数 5, 10 の炭化水素であるイソプレンやモノテルペン類が代表例。Biogenic Volatile Organic Compounds の略。

*37 排出インベントリ：大気汚染物質や温室効果ガスが、地域や国・自治体などの単位で、どのような経済活動部門から、あるいは自然界のメカニズムによって、大気中へ排出（放出）されているか、社会経済統計情報等をもとに集計されたもの。大気化学輸送モデルの重要な入力データとなる。

*38 費用対便益の評価：地球温暖化や大気汚染の対策の優先順位や有効性を調べるために、対策ごとに、緩和されるダメージコストや他の経済的便益と、対策に要する費用との比により評価すること。

*39 当分野の全球衛星観測：例えば、大気汚染ガスである二酸化窒素(NO_2)の TROPOMI センサによる衛星観測では全球を毎日 $5.5 \times 3.5\text{km}$ の解像度で計測している。新型コロナの蔓延防止のためのロックダウンにより経済活動が低下(運輸部門等)した際には、どの地域で影響が出ているかが、こうした衛星画像から一目瞭然となり、大気組成の衛星観測の有効性が浮き彫りとなった。

例 : https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/COVID-19_nitrogen_dioxide_over_China

*40 国際測地学・地球物理学連合 (IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics) : IUGG は国際学術会議 (ISC) の加盟団体の 1 つであり、下部組織として国際気象学・大気科学協会 (International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences, IAMAS) が含まれる。

*41 Global Research Project (GRP) : フューチャー・アース傘下の、IGAC を含む 19 のプロジェクトのこと。

*42 SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study) : 海洋・大気間の物質相互作用研究計画のことで、IGAC と同様にフューチャー・アース傘下のグローバル研究プロジェクトの 1 つである。

*43 iLEAPS (Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study) : 統合陸域生態系—

大気プロセス研究計画のことで、IGAC と同様にフューチャー・アース傘下のグローバル研究プロジェクトの1つである。

*44 GAW (Global Atmosphere Watch) Programme : 世界気象機関 WMO が各国気象機関や研究機関の協力を得て実施している、大気化学・地球環境に関する地球規模の観測プログラム。

*45 温室効果ガス世界資料センター (World Data Centre for Greenhouse Gases: WDCGG) : 世界気象機関(WMO)の全球大気監視(GAW)計画の下に設立された世界資料センター(WDC)の1つで、気象庁において運営されている。大気や海洋で観測された温室効果ガス(CO₂, CH₄, CFCs, N₂O など) と関連するガス(CO)のデータを収集・保管・配布している。(気象庁ウェブページ <https://gaw.kishou.go.jp/jp> より)

*46 国連環境計画 (United Nations Environment Programme:UNEP) : 環境分野における国連の主要な機関。国連システム内にあつて持続可能な開発の取組の中で環境に関連した活動を進めている。

*47 Climate and Clean Air Coalition (CCAC) : UNEP 等が 2012 年に発足させた、気候と大気浄化の国際パートナーシップ。

*48 International Methane Emissions Observatory (IMEO) : 2021 年に G20 サミットで発足した、UNEP 傘下のメタン排出の国際観測所のこと。研究レベルの観測データ、Methane Alert and Response System (MARS)からの衛星データ、産業界の報告書、国別の排出インベントリの間の整合性を図ることを目的としている。

*49 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia:EANET) : 2001 年に本格稼働した、東アジア地域における酸性雨の現状の把握やその影響の解明に向けた地域協力の体制を構築することを目的としたネットワークで、北東・東南アジアの 13 か国が参加する。日本環境衛生センター・アジア大気汚染研究センター(新潟)が EANET の活動の技術的拠点であるネットワーク・センターに指定されている。

*50 MICS-Asia (Model Inter-Comparison Study for Asia):アジアの大気環境に関する科学的理解を深めるとともに、政策検討のための科学的共通認識を構築することを目的とし、大気質モデル・化学気候モデルの精度向上を目指しているプロジェクト。
<https://www.acap.asia/research-main/mics-asia/>

*51 Task Force on Hemispheric Transport on Air Pollution (TF HTAP): 国際連合欧州経済委員会 (UNECE) の長距離越境大気汚染条約(LRTAP)のための、大気汚染の半球規模移動

に関するタスクフォースのこと。最近では HTAP_v3 排出インベントリモザイクの作成や大気化学輸送モデルシミュレーションの相互比較などに取り組んでいる。
<https://htap.org/>

*52 GEO (Group on Earth Observations) : 地球観測に関する政府間会合で、100 以上の各国政府と国際機関の任意のパートナーシップ。GEOSS(*53)も参照のこと。

*53 CEOS (Committee on Earth Observation Satellites、地球観測衛星委員会) : 各国の宇宙関連機関等が集まり、地球観測に関する標準、国際的な情報インフラ、将来的な開発や協力に関わる構想を議論する委員会。

*54 GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) : 地球観測に関する政府間会合 (GEO) 参加国・機関のボランティアな貢献による、環境分野における国際条約義務の実施を含む、社会における情報に基づく意志決定を支援する調整され統合された地球観測及び情報システムのネットワークのこと。

(https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/035/shiryo/attach/1236367.htm より)

*55 気候変動枠組み条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change:UNFCCC) : 1994 年に発効した、地球温暖化問題に関する国際的な枠組みを設定した環境条約のこと。締約国会議は COP と呼ばれ、2022 年には COP27 が開かれた。IPCC の評価報告書などをもとに、国際的な取り決めに決定する場となる。

*56 EGBCM (Expert Group on Black Carbon and Methane) : 北極評議会のもとに設置されたブラックカーボン及びメタン専門家会合のことで、2015 年に採択した「強化されたブラックカーボンとメタンの排出削減: 北極評議会の行動枠組み」の実施を支援している。隔年で進捗状況と推奨事項の概要を整理しレポートを発出している。

*57 ブラックカーボン : エアロゾル粒子に含まれる「すす」粒子のことで、大気中で太陽光を吸収し、雪氷表面に沈着して光反射率を弱めることによって、地球温暖化に寄与する物質。

*58 AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme 北極圏監視評価プログラム) : 北極評議会の 6 つの分野別作業部会の 1 つ。1991 年に設立され、北極域の汚染や気候変化の問題について監視を行い、その状態を評価する報告書を発表している。
<https://www.amap.no/>

*59 SPARC (Stratosphere -Troposphere Processes And their Role in Climate、成層圏対

流圏過程とその気候における役割):WCRPのコアプロジェクトの1つで、気候形成・変動における成層圏・対流圏及びその間の相互作用の役割解明を主眼にしている。

*60 揮発性有機化合物 (VOC) : 人間活動や自然界から大気へ排出 (放出) される、ガス状の有機化合物の総称。生物起源の VOC は BVOC と呼ばれる (*36 参照)。近年では BVOC として主要なイソプレン (C_5H_8) の人工衛星観測も直接的に実現され、大気化学研究のブレークスルーの1つとなっている。

<参考資料>

別表 1-1. 長寿命気体テーマでのサマリー表 (出典)「大気化学の将来構想 2022-32」各論、<https://jpsac.org/sp1/>

1. 究極のゴールは何か。	・ GHG や ODS の大気中濃度の変動要因を放出源や消失・吸収源の観点から定量的に理解し、循環メカニズムの理解にもとづいて正確な将来予測を可能とすること ・ パリ協定やモントリオール議定書にもとづく国際社会の取組に対し、対象気体の放出起源や分布の情報を正確に提供し、実効的な排出削減策の立案に貢献すること
2. この 10 年での世界的な動向や日本での研究の強み	・ 継続的に発展してきた大気観測、排出インベントリ、大気化学輸送モデル、陸域生態系モデルなどを活用し、トップダウン法とボトムアップ法の統合比較解析が可能になり、そのための国際プロジェクトが組織されて日本の研究者も多く参加してきた ・ 日本の GHG 観測衛星である GOSAT/TANSO-FTS による CO₂ や CH₄ のカラム平均濃度のデータ処理・利用研究が大きく進展し、後続の国内外の衛星観測データも利用可能となっており、衛星観測データを利用した地表面フラックスの推定研究も進展した ・ パリ協定の発効を受け、GHG の人為排出量を地域・都市域スケールで把握するための観測・モデル研究が盛んに行われている ・ GHG や ODS の放出源としてアジア地域の重要性が高まるなか、アジア地域の放出源変動を高感度に検出できる日本の観測データの価値は高く、継続的で高品質なデータ提供が求められている ・ 日本国内の観測では、地上のみならず、大気球、航空機、船舶など、独自の観測プラットフォームが開発・維持されるとともに、GHG の循環解析に有効な関連トレーサの観測も独自の技術開発にもとづいた成果が報告されている ・ 大気化学輸送モデルや陸域生態系モデルが日本の複数の研究グループで独自に開発され、世界的にも高い認知度を得ている
3. 現在の重要なギャップ	・ 全球スケールでは大陸内陸部や熱帯地域の観測データが依然として不足しており、地域・都市域スケールではさらに高密度の観測データが期待されているが、高精度観測の維持や解析システムの整備、新たな観測の展開などには技術的・コスト的な課題が大きい ・ 多様なプラットフォームによる観測データが飛躍的に増加しているが、統一的なデータの質の担保やデータを最大限活用するためのモデルの高度化など、多様なデータを地表面フラックスの逆解析に十分に活用するための課題がある
4. それらを踏まえ、今後 10 年の研究をドライブする key question or 作業仮説	・ パリ協定やモントリオール議定書が機能しているかをどのように評価するか？どのような時空間密度・測定精度・観測プラットフォームの観測データが必要なのか？多様な観測データを活用するためのモデル解析システムをどのように構築すべきか？ ・ 気候変動、海洋酸性化、オゾン層破壊・回復などに伴って、海洋と陸域生態系の GHG と ODS の放出源・吸収源、大気化学反応はどのように変化するのか？特に劇的な変動が起こりうる北極圏の湿地、永久凍土、森林火災がどのような影響を受けるのか？
5. 主な連携相手	GCP、RECCAP、NOAA、AGAGE、IGAC

別表 1-2. 反応性気体テーマでのサマリー表 (出典)「大気化学の将来構想 2022-32」各論、<https://jpsac.org/sp1/>

1. 究極のゴールは何か。	・光化学反応・大気輸送・沈着等の諸プロセスを方程式で表現でき、排出量や境界条件が与えられれば、大気微量ガス成分群の濃度時間発展や収支を将来予測できること。各プロセスの役割を定量的に理解できること。 ・濃度変動の原因を排出量変化に結び付けて把握でき、フィードバックを含め各成分による短寿命気候強制因子 (SLCFs) としての気候変動への寄与や健康影響を定量化でき、緩和策を提案できること。 ・物理および化学等の法則に基づき、精度のよい化学天気予報を社会に発信できること。
2. この 10 年での世界的な動向や日本での研究の強み	・世界的に、衛星観測や高精度現場観測・標準化が進展し、大気成分濃度情報の時空間的なカバレッジが大幅に向上し、観測と数値モデルの統合化が進んだ。 ・日本の強みとしては、東アジア広域オゾン・PM_{2.5}大気汚染の原因把握、OH ラジカル反応性や不均一反応取り込み係数の評価、同位体などからのプロセス知見、複数の地球システムモデル開発、大気化学輸送モデルとデータ同化の進展、GOSAT 等で培った衛星観測解析技術、排出インベントリの高度化がある。
3. 現在の重要なギャップ	・大気化学の心臓部となる OH ラジカル反応系の理解不足 ・オゾン化学の非線形性と生成速度制限因子の空間分布の理解不足 ・大気組成変化と排出との因果関係定量化、排出インベントリ/削減施策の迅速評価が不十分 ・向上した衛星観測でも高度分布情報 (成層圏含む)、日変化情報が得られない ・突発事象予測のための早期検出観測情報の不足
4. それらを踏まえ、今後 10 年の研究をドライブする key question or 作業仮説	・OH 反応系の理解不足は亜硝酸、ハロゲン類、不均一反応、揮発性有機化合物などで解消し、全球 OH 量推定における方法間のギャップ(半球間勾配、トレンド) は埋まるか？ ・キロメートル級の水平分解能を備え、連続的な面分布を計測できる衛星観測システムや温室効果気体 (GHG)-大気質 (AQ) の統合解析は、オゾン化学の非線形性・生成制限因子の把握や、重要な排出源の評価を格段に進展させるか？ ・地球温暖化による各物質へのフィードバック等の理解も向上させて、脱温暖化などの意思決定に科学エビデンスを与えられるか？ ・数値モデルへのデータ同化の対象に、アンモニア、VOC などを NO_x 等に加え総合化すると、オゾン、PM_{2.5} 予測等が向上するか (気候変動・健康問題に加えて食糧問題へも知見を提供してゆけるか) ？ ・大気化学と気象・地球システムとの相互作用の理解向上や、鍵となる観測情報の取り込みにより、化学天気予報・地球システム将来予測だけでなく、気象の現業数値予報モデルが向上でき、社会に有益な情報を与えられるか？
5. 主な連携相手	IGAC、iCACGP、COSPAR、CEOS、SPARC

別表 1-3. 物理化学テーマでのサマリー表 (出典)「大気化学の将来構想 2022-32」各論、<https://jpsac.org/sp1/>

1. 究極のゴールは何か。	・大気中で起こるすべての物理化学過程の理解。 ・分子レベルの不均一性を与える溶媒効果や界面の特殊性を考慮した反応速度定数・取り込み係数・光学定数の導出。 ・上記のデータをもとに、大気中で起こるすべて物理化学過程（エアロゾルに関しては、化学組成・揮発性分布・吸湿性・光学特性）を計算によって再現・予測可能。
2. この 10 年での世界的な動向や日本での研究の強み	・世界的に、エアロゾルの生成につながる気相反応の理解が進んだ。 ・界面を含む多相反応の重要性が認識されるようになった。 ・界面の性質を明らかにする実験装置や理論計算が発達した。 ・日本では、物理化学をベースとしたオリジナルの研究成果が出ている。 ・アジアの新興国の台頭と日本の地理的なメリット（共同研究や人材交流）。
3. 現在の重要なギャップ	・室内実験（シンプルな系かつ高濃度）と実大気（複雑な系かつ低濃度）のギャップ。 ・最終生成物の生成メカニズムを確定するための中間体の検出。 ・エアロゾル成分の中で、どれだけの割合のものを分析でき、また正しく定量できているか。 ・エアロゾルと雲の相互作用の理解が不十分。 ・大気との間で物質移動がある海洋のマイクロレイヤーや氷雪が関与する反応が与える影響評価が不十分。 ・界面現象は定性的にしか扱えず、定量化できていない（例えば界面における反応速度定数の非線形的増大）。
4. それらを踏まえ、今後 10 年の研究をドライブする key question or 作業仮説	・計測機器の高感度化・多成分同時高時間分解能計測装置の精度の向上ができるか？ ・酸化過程におけるモノマー・ダイマーの生成機構（特に HOM）や粒子相での化学反応過程を正しく理解できるか？ ・二次生成エアロゾルの生成収率は、鍵と考えられる要因（酸化剤・気温・湿度・既存粒子の量や性状）でどう（シンプルに）整理できるか？他に見落としている要因はあるか？ ・エアロゾルの化学的変質過程を microscopic に捉えられないか？（具体例：光ピンセットで大気中のエアロゾルを捕捉、そのまま数日キープして分光(Raman、 IR)測定。日中の OH 酸化、夜間の NO₃ 酸化による成分変化の証拠が得られないか？） ・界面特有の現象の把握 ・不均一性（複雑さ）・界面現象の定量化に向けたブレークスルーは何か？
5. 主な連携相手	IGAC・分子科学会・有機合成化学

別表 1-4. 大気陸域統合テーマでのサマリー表 (出典)「大気化学の将来構想 2022-32」各論、<https://jpsac.org/sp1/>

1. 究極のゴールは何か。	・長寿命気体、特に温室効果ガスの動態・交換量をマルチスケールで短期～長期にわたり高精度に把握する。交換の変化のメカニズムを解明し、地球環境変動に伴う収支を定量的に予測することで影響評価、適応・緩和策の立案に貢献する。 ・大気物質の沈着・交換プロセスの理解を深め、現象をモデル化し、化学輸送モデルの予測精度向上へと繋げる。 ・BVOCの放出機構やそれに及ぼす要因を、分子・細胞・組織・個体・群落の各レベルで明らかにし、BVOCが介在する大気質や気候への影響を解明する。 ・大気エアロゾルの収支に対する陸域生態系の影響を定量的に把握し、その将来予測を可能とする。また、これをエアロゾルの気候影響や気候と植生の関係から理解する。
2. この10年での世界的な動向や日本での研究の強み	・地上・衛星による観測データ量の飛躍的な増大や温室効果ガスの統合解析の実施。日本は高精度の大気観測データや、大気輸送・地上物質循環モデルによる収支推定で貢献。iLEAPSが実施され、国内でも大気-陸域間の物質交換に関する学際的な研究が活性化した。 ・今世紀に入り、新技術による様々な化学成分・沈着表面に対するフラックス観測が行われ、モデルの検証・比較が行われた。沈着速度の不確実性が大きい成分・表面などが明らかになった。 ・植物間コミュニケーション、放出の環境応答等の分子～生態学レベルの研究や、リアルタイム測定装置の開発・普及が進展。日本で土地改変・都市緑地に関するBVOC研究が進展した。 ・自動酸化による高次に酸化された有機分子(HOMs)の生成など、生物起源二次有機エアロゾル(BSOA)の生成機構の理解が向上。分子トレーサー分析や蛍光測定に基づくバイオエアロゾル研究に進展。日本ではBSOAに関わる室内実験・野外観測での貢献。
3. 現在の重要なギャップ	・温室効果ガスに関して、モデル相互比較の結果に乖離が大きい。排出インベントリにも深刻な不確実性。予測困難なイベントに伴う変動を把握するためのモニタリング体制の拡充が必要。 ・沈着速度の理論・観測値との不一致、上向きの放出現象を再現できない点、越境大気汚染対策のための輸送・沈着シミュレーションの精緻化への貢献。 ・BVOCの放出量・濃度の測定や、それらの推定の手段となる衛星観測手法の進展、安価な分析手法の開発が必要。測定装置が高価であり、若手研究者が容易に取り組める分野でない。 ・BSOAの生成量・特性の把握と大気モデルによる表現に課題。バイオエアロゾルの測定手法が十分に確立されていない。BSOA観測に利用できるリソースが活用されていない。 ・大気・陸域生態系の物質循環とその変化が人間社会に与える影響を理解する上で、BVOCやエアロゾルに関する学術的知見が不足しており、それらの知見を社会実装に結びつける取り組みが乏しい。
4. それらを踏まえ、今後10年の研究をドライブするkey question or 作業仮説	・CO₂施肥効果の長期的な減衰の有無、将来の森林破壊・火災の炭素収支への影響、大気汚染物質が温室効果ガス交換に与える影響。観測・モデル手法を高度化し、全球的な収支の整合的な説明が求められる。パリ協定のGSTに向けた科学的データ提供のための取り組みが必要。 ・Asia-Fluxなどと連携した、特に森林をターゲットとするフラックス観測に基づく戦略的な観測による高精度データセットの取得が、プロセスの理解の深化とモデル予測精度の向上をもたらす。 ・BVOCの新規測定・分析手法の開発と分析装置の低価格化。大気化学・生態学・植物生理生態学など分野横断組織の編成とプロジェクトの立ち上げによる新規研究者の参入環境の整備。 ・BSOA生成プロセスの理解を深化させ生成量・特性を説明する。BSOA・バイオエアロゾルの生成が気候プロセスもたらす影響を量的に把握し、植生に対するフィードバック機構の有無・程度を明らかにする。 ・分野間(例えばCO₂、GPP、BVOC、BSOA)にまたがる相互作用(例えば窒素沈着によるGPP促進とCO₂固定)を網羅的に把握することで、未発見の過程の解明や物質収支の定量性の向上につながる。 ・陸域生態系が関わる全有機物の動態について、人間活動の影響を含めて定量予測性を高める。 ・地球表層システムの統合的理解を目指す大気・陸域生態系研究を進め、また、それに基づき、同テーマの社会実装を推進する。
5. 主な連携相手	IGAC、GCP、iLEAPS、FLUXNET、iCACP など。

別表 1-5. 大気海洋統合テーマでのサマリー表 (出典)「大気化学の将来構想 2022-32」各論、<https://jpsac.org/sp1/>

1. 究極のゴールは何か。	・人類は地球規模での大気汚染や温暖化を引き起こし、人新世と呼ばれる時代に突入した。それらの人為的な地球環境変化が大気化学・陸域海洋生態系相互作用へ与える影響およびその影響による気候フィードバックを本質的に理解し、統合的に評価・予測することは重要である。従って、観測・実験・数値モデル研究を融合し、人新世における「大気微量成分と海洋生物活動の相互作用による気候影響と海洋生態系へ与える影響およびその気候フィードバックを明らかにすること」が究極のゴールとなる。
2. この 10 年での世界的な動向や日本での研究の強み	・海洋生物－大気エアロゾルの化学・物理過程－雲凝結核能・氷晶核能への影響に関する統合的な研究が国内外で進んだ。 ・国内では北太平洋を中心として船舶による大気化学観測データが蓄積された。 ・有機物・鉄・反応性窒素の大気－海洋間収支に関する分野横断の観測・モデルの統合研究体制が構築された。 ・同位体を用いた解析や蛍光法を用いた成分解析など先端的な計測/分析による洋上観測により海洋大気エアロゾル組成の新たな情報が蓄積された。 ・北太平洋亜寒帯において、海洋内部の鉄の分布や循環に関する知見が蓄積された。 ・鉱物起源鉄に加えて燃焼起源鉄を新たに考慮することで、大気モデルによるエアロゾル中鉄濃度および鉄溶解率の観測再現性が向上し、燃焼起源鉄は鉱物起源鉄より効率的に栄養塩施肥効果に働くことが海洋モデルから示唆された。
3. 現在の重要なギャップ	・表層海水から大気への有機物の供給過程・量と、その雲凝結核能・氷晶核形成能、雲降水過程への影響に関する気象・気候システムとしての総合的な理解が不十分である。 ・各海域において海洋生態系に影響を与える大気成分の供給量および起源に関する理解が未だ不十分である。 ・北極海・北太平洋・インド太平洋・南太洋において、大気・海洋パラメータを同期させた統合的な船上観測やメソコスム等の現場実験による検証データが少ない。 ・海洋-大気境界層での有機物と栄養塩の相互作用の理解が不足している。
4. それらを踏まえ、今後 10 年の研究をドライブする key question or 作業仮説	・地球温暖化や海洋酸性化および海洋への栄養塩の沈着量の変化に伴って、海洋から大気へのエアロゾルや前駆体の放出量・質はどうかを明らかにする。 ・大気から海洋への様々な栄養成分および阻害成分の供給に対する海洋生態系(基礎生産など)の応答を定量化する。 ・北極海・北太平洋・インド洋・南太洋において長期的な大気・海洋統合船上観測と大気・海洋物質循環モデル研究を展開する。 ・大気化学だけでなく、海洋分野も含め、個別に行われてきた有機物・栄養塩の観測・実験・モデル研究を融合するとともに、分野横断型研究へと発展させる。
5. 主な連携相手	・日本海洋学会、日本気象学会、日本地球化学会、日本エアロゾル学会、SOLAS、CATCH、 BEPSII、 GESAMP、 GEOTRACES、 IMBeR

別表 1-6. エアロゾル・放射・雲テーマでのサマリー表 (出典)「大気化学の将来構想 2022-32」各論、<https://jpsac.org/sp1/>

1. 究極のゴールは何か。	・エアロゾルの組成ごとの粒径別数濃度や総質量濃度の時空間分布を把握し、予測できること。 ・個々のエアロゾル粒子ならびにその総体としての全エアロゾルの、光学特性・吸湿性・雲凝結核特性・氷晶核特性などの諸特性を把握・予測できること。 ・現場観測や衛星観測により検証・拘束された数値モデルを用いて、エアロゾル-放射相互作用やエアロゾル-雲相互作用に関わる諸過程を適切に表現し、信頼性の高い気候予測・環境影響予測を実現すること。
2. この 10 年での世界的な動向や日本での研究の強み	・エアロゾルの組成や物理化学特性（吸湿性・雲凝結核特性・氷晶核特性など）を測定する技術が発展し、世界的に各種エアロゾルの室内実験・大気観測データが蓄積された。それに対応して、数値モデルにおける、エアロゾルの混合状態・吸湿性・雲凝結核能などの諸特性や、新粒子生成・二次有機エアロゾル生成・湿性沈着などの諸過程の表現が改善された。日本では特に、地理的にアジア大陸の下流に位置することを生かした観測やモデル研究により、エアロゾルの放出・輸送・化学変化・沈着等の諸過程の知見が蓄積され、越境大気汚染の影響やエアロゾルの放射強制力の推定が改善されてきている。 ・衛星観測・大循環気候モデル・全球雲解像モデルが相互に影響しながら発展し、エアロゾル-雲相互作用の理解が進んできた。衛星観測では、能動型センサと受動型センサの複合利用により、エアロゾル摂動に対する雲応答の観測的な理解が進んだ。京や富岳などの世界最高性能の大型計算機の活用により、日本は全球雲解像モデルによるエアロゾル-雲相互作用の研究をリードしてきた。
3. 現在の重要なギャップ	・最新の IPCC 第 6 次評価報告書においても、エアロゾル-放射相互作用とエアロゾル-雲相互作用による放射強制力の推定の不確定性幅は第 5 次評価報告書から減少しておらず、各気候モデル間の推定のばらつきは依然として大きい。これらの放射強制力を決めるエアロゾルの物理化学特性・時空間分布の推定も、依然としてモデル間のばらつきが大きい。 ・エアロゾルの時空間分布、特に極域や外洋域や対流圏上層におけるエアロゾルの動態の把握と数値モデルによる再現が不十分である。また、アイスコア分析に基づく過去のエアロゾルの動態把握や数値モデルの検証が不十分である。 ・氷晶核として働くエアロゾル (INP) の大気存在量・動態、氷晶を形成するメカニズムの理解が不十分である。 ・欧州と比較して、相対的にアジア、南米、アフリカ、オセアニア、シベリアの長期モニタリング観測拠点が不足している。 ・エアロゾル摂動に対する雲・降水系の応答の理解は不十分である。特に、氷を含む雲の応答を素過程レベルで理解していくことが必要である。 ・エアロゾル・雲・降水に関わる素過程のモデル表現は観測によって十分に拘束されていない。
4. それらを踏まえ、今後 10 年の研究をドライブする key question or 作業仮説	・エアロゾル-放射相互作用とエアロゾル-雲相互作用による放射強制力の推定の不確定性幅は、現場観測や衛星観測データの蓄積、観測と数値モデルの統合、数値モデルの精緻化や高解像度化により減少させることができるか？ ・室内実験・観測で得られるエアロゾル過程（混合状態、有機エアロゾルの生成過程・吸湿特性、ブラックカーボンの変質過程、ブラウンカーボンの放出・生成過程、新粒子生成など）の知見を、適切に数値モデルに導入できるか？ ・INP の持つどのような表面構造によって、氷晶の形成が誘発されるのか？多地点における INP の長期観測により、INP の動態を明らかにできるか？そのための新たな計測技術を開発できるか？INP の数濃度を数値モデルで適切に表現できるか？ ・地上リモートセンシング観測に加えて、エアロゾルの光学特性、粒径分布、雲凝結核、INP、化学組成の持続可能な長期観測網を、日本を含む東アジアで構築できるか？ ・大気汚染要因の将来変化を定量的に予測できるか？大気汚染と気候変動の両方への対策が可能となる放出シナリオの策定に貢献できるか？ ・既存のほとんどのエアロゾルモデルで十分に考慮されていない要素（氷晶核特性、鉱物ダストの鉱物組成、バイオエアロゾルなど）を数値モデルに導入し、その時空間分布や放射強制力を明らかにしていくことができるか？ ・人為起源エアロゾルだけでなく、自然起源エアロゾルの気候変化に対する応答も含め、より定量的かつ総合的なエアロゾルと気候との相互作用の推定・評価を実現できるか？ ・雲レーダ・降水レーダ・ライダーを同時搭載した新しい衛星観測ミッションにより、エアロゾルへの雲応答を複雑にしている微物理過程と力学過程の相互作用を解明できるか？この複合的な観測情報をどのように活用してエアロゾル・雲・降水の重要な素過程を観測的に診断できるか？ ・大循環気候モデル (GCM) において、氷を含む混合相雲へのエアロゾルの影響とそれによる放射影響や、対流雲とエアロゾルの相互作用を解明できるか？全球雲解像モデル (GCRM) により過去の気候状態を再現し、気候研究に結びつけることができるか？GCRM からシームレスに繋がる形で全球 LES モデルでのエアロゾル-雲相互作用研究をいち早く進めることができるか？ ・これらのモデルにおけるエアロゾル・雲・降水素過程の表現を衛星観測情報に基づいてどのように拘束・高度化できるか？ ・機械学習を活用して、モデル素過程の高精度化と高速化をどのように両立できるか？
5. 主な連携相手	日本気象学会、日本雪氷学会、日本地球惑星科学連合、日本エアロゾル学会、IGAC、ESA-JAXA EarthCARE 衛星ミッション、NASA AOS 衛星ミッション

別表 1-7. 成層圏・中間圏テーマでのサマリー表 (出典)「大気化学の将来構想 2022-32」各論、<https://jpsac.org/sp1/>

1. 究極のゴールは何か。	・対流圏と成層圏との境界領域の構造の理解と対流圏-成層圏間の力学的結合と物質交換との関係の理解。 ・微量成分 (GHG、オゾン、代替フロン、水蒸気等) の変化が成層圏の大気循環に与える影響の理解。 ・気候変動に伴うオゾン層変化、およびオゾン層変化が気候に与える影響の理解。 ・火山噴火や大規模森林火災起源の成層圏エアロゾルの化学影響の理解と人為起源エアロゾルの成層圏への寄与および流入過程の定量的な理解。 ・温暖化対策として成層圏エアロゾル層を改変するジオエンジニアリングの影響予測とそれに基づいた適切な指標。 ・太陽活動 (放射・高エネルギー粒子) や磁気圏現象がイオン化学を通して NO_x、HO_x を生成し、中間圏・成層圏オゾンを変化させる影響とそれが気候に与える影響の理解。
2. この 10 年での世界的な動向や日本での研究の強み	・日本は熱帯域における SOWER などの気球観測、大型の大気レーダー (インドネシア、南極 PANSY)、CONTRAIL などで UTLS 領域の観測で貴重な貢献。 ・数値モデルの高度化。積雲や重力波のパラメタリゼーションの改良。化学輸送モデルによる UTLS の各過程の精緻化 (への貢献)。 計算機リソースの発展に伴う分解能の向上。 ・数値モデルを用いたオゾン層の気候影響研究は、オゾン分布を与えるのではなく、化学気候モデルの中でオンラインでオゾン分布を計算する例が増加。 ・世界初の機械式極低温冷凍機で動作する超伝導検出器を搭載し、地方時の制限を受けない太陽非同期軌道で観測した日本の SMILES はオゾンの日周変化や日食に伴う変動を発見するなどのユニークな成果を輩出した。 ・スーパープレッシャー気球を用いると、ほぼ同じ高度で 1 ヶ月程度、成層圏の in-situ 観測が可能になる。 ・地上 FTIR では、解析ツールや分子パラメータを世界的に統一して最適化することでグローバルな経年変化を調べる研究が増加。強度の弱い CFC や HFC などの吸収線についてもカラム量の導出が可能となってきた。 ・地上、衛星ともにマイクロ波観測は、他の測器では困難な中間圏以上の領域のデータを提供。日本は、SMILES をはじめ地上の放射計でも超高感度の超伝導受信機開発で高い技術を有する。
3. 現在の重要なギャップ	・対流圏-成層圏 (-中間圏) の物質循環・相互作用を理解するためには、現状の観測データやモデルの時間分解能と鉛直分解能では不十分である。熱帯積雲対流や対流圏界面褶曲 (tropopause folding) など、スケールは小さいが物質輸送にとっても重要と思われる現象を解像できるような高解像度の観測・モデルによる現象の理解が必要。 ・将来予測の精緻化のため、オゾン等の微量成分と気象場との相互作用を理解し、高分解能化学気候モデルに適切に取り入れる必要がある。 ・世界的な衛星計画の停滞 (具体的な継続ミッションの計画が立ち遅れている) により、グローバルデータの継続性や観測可能な微量成分の種類が限られる恐れがある。これによって、微量成分濃度の長期トレンドの理解や輸送過程の理解 (気象場と様々な微量成分輸送との間の整合的な理解)、等価実効成層圏塩素 (EESC) や反応性窒素酸化物 (NO_y) 等の量の推定に支障をきたす可能性がある。
4. それらを踏まえ、今後 10 年の研究をドライブする key question or 作業仮説	・微量成分、特に短寿命化学種が対流圏から成層圏にどのように流入するか? また、そのタイムスケール、対流圏-成層圏の交換時定数はどれぐらいか? ・GHG の増加に伴い水蒸気などの化学種の対流圏から成層圏への流入量 (またその逆) が変化することによって、成層圏の気温構造がどう変化するのか? 基本的に CO₂ 増加による成層圏冷却効果が今後も支配的だが、国際的な規制に反し、HFC 等の濃度が増えた場合は下部成層圏において気温上昇に作用し、冷却効果を部分的に抑える可能性もあり得る。これら気温構造の変化による中高緯度における大気循環はどのようなのか? ・太陽活動や磁気圏活動、宇宙線などによる地球大気へのエネルギー流入はどの程度グローバルな環境に影響を与えるのか? また、そうした影響は対流圏まで伝播するのか?
5. 主な連携相手	SPARC、NDACC、SCOSTEP

※「大気化学の将来構想 2022-32」の各論詳細版を含む全編は <https://jpsac.org/sp1/> を参照のこと。