

環境エネルギー科学技術に関する 研究開発課題の事後評価結果

令和5年1月

科学技術・学術審議会

研究計画・評価分科会

研究計画・評価分科会委員名簿

◎岸本	喜久雄	国立教育政策研究所フェロー、東京工業大学名誉教授
●高梨	弘毅	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター長、東北大学名誉教授
春日	文子※	国立研究開発法人国立環境研究所特任フェロー
濱口	道成※	国立研究開発法人科学技術振興機構顧問、国立研究開発法人日本医療研究開発機構先進的研究開発戦略センター長
明和	政子	京都大学大学院教育学研究科教授
村山	裕三	同志社大学名誉教授
安浦	寛人	九州大学名誉教授、国立情報学研究所副所長学術基盤チーフディレクター・特任教授
五十嵐	道子	フリージャーナリスト
出光	一哉	九州大学大学院工学研究院教授
上田	正仁	東京大学大学院理学系研究科教授
上田	良夫	大阪大学大学院工学研究科教授
上村	靖司	長岡技術科学大学技学研究院教授
佐々木	久美子	株式会社グルーヴノーツ代表取締役会長
高梨	千賀子	東洋大学経営学部教授
田中	隆章	京セラコミュニケーションシステム株式会社コンサルティング事業本部・理念・教育コンサルティング部・責任者
塚本	恵	J, S. Held, LLC 上席顧問、一般社団法人デジタルソサエティフォーラム代表理事
長谷山	美紀	北海道大学副学長、大学院情報科学研究院長
林	隆之	政策研究大学院大学教授
原澤	英夫※	元国立研究開発法人国立環境研究所理事
水澤	英洋※	国立研究開発法人国立精神・神経医療研究センター理事長特任補佐・名誉理事長
宮園	浩平	国立研究開発法人理化学研究所理事／東京大学大学院医学系研究科卓越教授
李家	賢一	東京大学大学院工学系研究科教授

◎：分科会長、●分科会長代理

※本評価には参加していない。

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
第11期環境エネルギー科学技術委員会 委員

- 伊香賀 俊治 慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科開放環境科学専攻 教授
- 石川 武史 横浜市温暖化対策統括本部長
- 石川 洋一※ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター長（上席研究員）
- 浦嶋 裕子 MS&AD インシュアランスグループホールディングス株式会社
総合企画部サステナビリティ推進室 課長
- 大久保 規子 大阪大学大学院法学研究科 教授
- 堅達 京子 株式会社NHK エンタープライズ第1制作センター社会情報部
エグゼクティブ・プロデューサー
- 佐々木 一成 九州大学 副学長・主幹教授 水素エネルギー国際研究センター長
次世代燃料電池産学連携研究センター長
- 佐藤 縁 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 省エネルギー研究部門
総括研究主幹
- 関根 泰 早稲田大学先進理工学研究科 教授
- 竹ヶ原 啓介 株式会社日本政策投資銀行 設備投資研究所 エグゼクティブフェロー
- 田中 謙司 東京大学大学院工学系研究科 技術経営戦略学専攻 准教授
- 中北 英一※ 京都大学 防災研究所 所長・教授
- ◎原澤 英夫※ 元国立環境研究所 理事
- 藤森 俊郎 株式会社IHI 技術開発本部 技監
- 本郷 尚 株式会社三井物産戦略研究所 国際情報部 シニア研究フェロー
- 本藤 祐樹 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 教授

（五十音順、敬称略）

◎：主査 ○：主査代理

※：利害関係者のため、この研究開発課題の評価には加わらない。

統合的気候モデル高度化研究プログラム

事後評価調整グループ 構成員一覧

	氏名	所属・職名
主査	花輪 公雄	東北大学 名誉教授／ 山形大学 理事・副学長
	日下 博幸	筑波大学 計算科学研究センター 教授
	栗栖 聖	東京大学大学院工学系研究科 都市工学専攻 准教授
	高村 ゆかり	東京大学 未来ビジョン研究センター 教授
	福濱 方哉	国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 部長
	真砂 佳史	国立環境研究所 気候変動適応センター 気候変動適応戦略研究室 室長

統合的気候モデル高度化研究プログラムの概要

1. 課題実施期間及び評価実施時期

平成 29 年度～令和 3 年度

中間評価 令和元年 8 月、事後評価 令和 5 年 1 月

2. 研究開発概要・目的

本事業では、国内外における気候変動対策に活用されるよう、地球観測ビッグデータやスーパーコンピュータ等を活用し、気候変動メカニズムの解明、気候変動予測モデルの開発等を推進することを目的としている。

国際的に信頼性の高い適応策・緩和策の基盤となる我が国独自の基盤的気候モデルを開発するとともに、緩和策立案に大きな科学的根拠をもたらす炭素・窒素循環や気候感度等の解明を可能とする段階を目標とした気候モデル要素の精度向上、国内や東南アジア地域を対象とした気候モデル活用のための高度化を行う。また、これらの成果を活用しつつ適応策に資する我が国独自の統合的ハザード予測を実施する。以上の研究課題を、連携させた統合的な研究体制の下で取り組む。

3. 研究開発の必要性等 ※必要性、有効性、効率性に関する中間評価の結果の概要を記載

<必要性>

本プログラムは、信頼性の高い最新の基盤的気候モデル開発による成果を土台としながら、世界的に重要かつ活発な最新の研究分野において我が国の成果を示すことを目指す事業であり、我が国の主要排出国としての国際的責務の履行及びプレゼンスの維持・向上や、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）等における気候変動外交交渉を科学的側面からリードするために、必要な取組となっている。加えて、政府全体の緩和・適応計画に貢献し、文部科学省としての役割を果たすためにも、本プログラムが必要となる。

<有効性>

本プログラムでは、国内の適応策立案に必要な空間スケール数 km 程度の気候変動に関する情報を創出すること、また、緩和策立案及び評価に科学的な知見をもたらす炭素・窒素循環や気候感度等の不確実性の低減、ティッピング・エレメントの解明等を目指すよう体制が構築されており、国の防災計画の策定や緩和策の立案・評価に対して科学的知見を創出する点において有効性が担保されている。さらに、日本国内だけではなく、東南アジア地域等における適応支援のための気候変動予測情報の創出も可能なプログラム構造となってお

り、国際貢献のできる有効性のあるプログラムとなっている。

<効率性>

本プログラムでは、気候変動という分野に様々な立場から携わっている研究者たちに協働作業を促すことで、各テーマにまたがり広範囲に気候変動研究を支援する本プログラムにしか実現できない気候変動予測情報を創出し、社会実装に役立つ新たな成果を創出することを目的としている。加えて、環境エネルギー課において行われる他の環境関係事業とも連携によるシナジー効果が可能であり、それぞれの成果が当該事業に留まることなく、広く社会的な課題解決に活用される道筋があると考えられる。これらのことから、本プログラムは効率性が高い研究体制であると評価できる。

4. 予算（執行額）の変遷

年度	H29(初年度)	H30	R1	R2	R3	総額
予算額	582 百万円	582 百万円	554 百万	744 百万	687 百万	3150 百万
執行額	582 百万円	582 百万円	554 百万	744 百万	683 百万	3146 百万

5. 課題実施機関・体制

プログラム・ディレクター	東京大学未来ビジョン研究センター特任教授	住 明正
プログラム・オフィサー	国立環境研究所	理事長 木本 昌秀
プログラム・オフィサー	国立環境研究所	元理事 原澤 英夫

【領域テーマA：全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発】

領域代表者	東京大学大気海洋研究所 教授 渡部 雅浩
主管研究機関	東京大学
再委託機関	国立環境研究所、海洋研究開発機構

【領域テーマB：炭素循環・気候感度・ティッピング・エレメント等の解明】

領域代表者	海洋研究開発機構 地球環境研究部門 環境変動予測研究センター センター長 河宮 未知生
主管研究機関	海洋研究開発機構
再委託機関	電力中央研究所、高度情報科学技術研究機構、国立環境研究所

【領域テーマC：統合的気候変動予測】

領域代表者	気象業務支援センター地球環境・気候研究推進室 高藪 出
-------	-----------------------------

主管研究機関 気象業務支援センター
再委託機関 名古屋大学、海洋研究開発機構、北海道大学、東北大学

【領域テーマD：統合的ハザード予測】

領域代表者 京都大学防災研究所 教授 中北 英一
主管研究機関 京都大学
再委託機関 名古屋工業大学、北海道大学、
農業・食品産業技術総合研究機構、土木研究所

事後評価票

(令和5年1月現在)

1. 課題名 統合的気候モデル高度化研究プログラム

2. 研究開発計画との関係

施策目標：最先端の気候変動予測・対策技術の確立

大目標（概要）：

気候変動メカニズムの解明や地球温暖化の現状把握と予測及びそのために必要な技術開発の推進、地球温暖化が環境、社会・経済に与える影響の評価、温室効果ガスの削減及び地球温暖化への適応策等の研究を、国際協力を図りつつ、戦略的・集中的に推進するために、スーパーコンピュータ等を用いたモデル技術やシミュレーション技術の高度化を行い、時間・空間分解能を高めるとともに発生確率を含む気候変動予測情報を創出する。また、洪水や高潮による将来の外力の変化を分析する。

中目標（概要）：

気候変動メカニズムの解明、気候変動予測モデルの高度化を進め、より精確な将来予測に基づく温暖化対策目標・アプローチの策定に貢献する。また、不確実性の低減、高分解能での気候変動予測や気候モデルのダウンスケーリング¹、気候変動影響評価、適応策の評価に関する技術の研究開発を推進する。

重点的に推進すべき研究開発の取組（概要）：

国内外における気候変動対策に活用するための気候変動予測・影響評価技術の開発
本課題が関係するアウトプット指標：

気候変動メカニズムの解明や気候変動予測モデルの高度化等による本事業における累計論文数（本）

年度	R1 年度	R2 年度	R3 年度
活動実績	547	798	1028
目標値	450	550	650

本課題が関係するアウトカム指標：

研究開発成果を活用した国際共同研究の海外連携実績（件）

年度	R1 年度	R2 年度	R3 年度
成果実績	85	68	63
目標値	50	50	50

¹ 粗い空間解像度のデータを、より細かなシミュレーションや空間補間等により、高解像度化すること

3. 評価結果

(1) 課題の達成状況

本事業は、地球観測ビッグデータやスーパーコンピュータ等を活用し、気候変動メカニズムの解明、気候変動予測モデル（以下「気候モデル」という。）の開発等を推進することで、国内外の気候変動対策に活用できる気候変動予測情報の創出を目的としている。プログラム・ディレクター（PD）及びプログラム・オフィサー（PO）の下、以下A～Dの4つの領域テーマを設定して事業を実施している。

- ・領域テーマA：全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発
- ・領域テーマB：炭素循環・気候感度・ティッピング・エレメント等の解明
- ・領域テーマC：統合的気候変動予測
- ・領域テーマD：統合的ハザード予測

本事業の状況については以下のとおり。

【領域テーマA：全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発】（東京大学）

領域テーマAでは、東京大学を中心に、海洋研究開発機構、国立環境研究所が連携して、信頼性の高い全球規模の気候変動予測情報を生成するために全球気候モデル（MIROC）、全球雲解像大気モデル（NICAM）及び統合陸域シミュレータ（ILS）を開発・高度化した。これらを通じて、気候変動メカニズムの解明や、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第6次評価報告書（AR6）²のベースとなる、第6期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）³へ参加・主導した。主な成果は以下のとおりであり、本テーマの目標は達成したと評価できる。

・全球気候モデルの開発・高度化

全球気候モデルにおける雲・降水・放射過程を、人工衛星データを活用して詳しく調べ、改良することで、気候モデルの現象再現性が向上した。また、大気の雲降水過程、陸域統合モデル、海洋モデルの精緻化など各コンポーネントの開発・高度化を推進した。これらは次期気候-地球システムモデル MIROC7-ESM へ統合することで、ポスト AR6 で用いられるフラッグシップモデルになることが期待される。

² 気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）は、人為起源による気候変動、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988年に世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）により設立された組織。IPCCが作成する評価報告書は、気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）をはじめとする、地球温暖化に対する国際的な取り組みに科学的根拠を与えるものとして極めて重要な役割を果たしてきた。現在第6次評価報告書の統合報告書の作成プロセスが進行中である。

³ 結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP: Coupled Model Intercomparison Project）は、世界各国・各機関の多数の気候モデルを相互比較することにより、地球の気候システムの科学的理解を深めるとともに、気候モデルの高精度化を効率的に進める国際的な研究プロジェクト。CMIPのシミュレーションデータはIPCCの評価報告書に活用される。CMIP6は中核実験のほか、多数の実験から構成される。

本事業期間に、本テーマの研究者が気候研究の国際コミュニティを統括する世界気候研究計画（WCRP）の重点研究プログラムと連携し、新たな評価手法を考案することで、カーボンバジェット推定など緩和策に重要な意味をもつ気候感度⁴の推定幅を半減できた。気候感度研究においては、MIROCを用いた気候フィードバックの研究及び、NICAMを活用した雲プロセスの研究等が役割を果たした。また、気候感度と関連して水資源予測等に重要な水循環感度（全球の降水量変化）についても、MIROC6やCMIP6のデータを用いて有益な知見が得られ、将来予測の不確実性低減に成功した（Natureに掲載）。

・気候変動メカニズムの解明

本テーマでは、将来の気候変動予測情報の科学的根拠として不可欠である、多岐にわたる気候変動のメカニズム研究を行った。具体的には、温暖化停滞（ハイエイタス）の原因である熱帯太平洋海面水温の変化パターン及び赤道貿易風強化の要因究明、北極海氷の減少メカニズム及びその中緯度寒冬への影響特定、北太平洋の海面水位変動の要因分析、黒潮と北大西洋の湾流の十年規模同期現象の発見等が主要な成果である（ScienceやNature Climate Change等に掲載）。また、イベントアトリビューション⁵研究を進展させることで、目標に掲げた「社会に開かれた温暖化サイエンス」を推進した。「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」（d4PDF）⁶を毎年の状況に合わせて延長し、本テーマの全球規模のイベントアトリビューションを領域テーマCで実施された日本域の結果と組み合わせたグローバルアプローチを開発した。この手法を平成30年の猛暑・豪雨事例等に適用し、温暖化の進行がなければ観測された規模の事例が起こり得なかったことを予測データに基づき示した。こうした極端気象の要因分析は、気象庁「異常気象分析検討会」に情報提供するとともに独自にメディアや一般講演会を通じて情報発信し、国内で大きな反響を得た。

・IPCCへの貢献

IPCC AR6の根拠となるCMIP6実験を計画通り完了し、将来シナリオ実験を含む多数のシミュレーションデータを世界中に公開することで、AR6をはじめとするさまざまな温暖化予測情報に活用された。2021年8月に公表されたIPCC AR6第一作業部会報告書には、本テーマの関係者4名が参加し、先述の気候感度の評価をはじめ、地域気候変化、極端気象の変化、気候変動要因分析等に関して大きく貢献した。また、10年規模気候予測を実施し、全球気温上昇が1.5°Cを超える時期の見通しを得た。その成果はIPCCの1.5°C特別報告書にも活用された。

⁴ 大気中の二酸化炭素濃度が2倍になった時の気温上昇量

⁵ 気候モデルを用いて、温暖化した気候状態と温暖化しなかった気候状態のそれぞれにおいて、大量の計算結果を作り出して比較する手法を「イベントアトリビューション（EA）」と呼ぶ。

⁶ 気候モデルによる過去再現実験や非温暖化実験（1850年以降の温室効果ガス等の人為起源物質が排出されなかったと仮定した場合の境界条件を与えた実験）、将来予測実験等から得られた気候データが保存されているデータベース。それぞれの実験について多数の計算例（多数の異なるシミュレーション結果）が利用できる。多数の計算例を使うことで、温暖化の影響を確率的に捉えることができる。

【領域テーマB：炭素循環・気候感度・ティッピング・エレメント等の解明】（海洋研究開発機構）

領域テーマBでは、海洋研究開発機構を中心に、電力中央研究所、高度情報科学技術研究機構、国立環境研究所が連携して、全球気候モデルに炭素循環や生態系変化等のプロセスを取り込んだ地球システムモデル（ESM）を用いてCMIP6実験に参加した。ESMの開発等を通じて、気候感度やティッピング・エレメント⁷、地球システムと人間システムの相互作用等の気候変動対策に与える影響が大きい要素の解明を進めた。また、テーマ間連携のための技術支援として、共有ファイルサーバシステムを運用するとともに、更新・ディスク増強を行い、各テーマの目標達成に寄与した。事務支援に関しては、シンポジウム等の開催や広報用シミュレーション動画の作成を通じて本プログラム全体の成果の発信を推進した。主な成果は以下のとおりであり、本テーマの目標は達成したと評価できる。

・地球システムモデルの開発・応用

領域テーマAで開発された最新の全球気候モデルをベースに、生態系・物質循環（窒素等の養分が生態系に取り込まれる過程等）を考慮した新たな地球システムモデル二種（低解像度・軽量動作版のMIROC-ES2L及び高解像度・大気化学過程有りのMIROC-ES2H）を開発した。これらは、新たに全球窒素循環や鉄循環の気候影響等が予測に反映できるようになっており、本モデルを活用し、緩和策に関わる研究成果や、CMIP6に関連した多数の国際共著論文と科学的知見が得られた。また、他研究機関のモデル結果を考慮した不確実性評価を行えるよう、複雑な地球システムモデルの振る舞いを簡易的に模擬する手法（エミュレータ）の開発に取り組み、その成果論文はIPCC AR6に引用された。

地球システムモデル開発環境基盤としての結合ソフトウェア開発についても、NICAM等の結合基盤として実モデルへ適用されるなど、気候変動予測モデルのソフトウェア基盤開発として十分な成果を上げることができた。

・ティッピング・エレメント

地球システムモデルの開発において、全球気候と海面上昇に強い影響を与えうる、海洋上の南極氷床融解に着目した南極氷床末端の棚氷要素（南極氷床－棚氷モデル）単体の高度化も行われ、南極氷床－棚氷過程においてティッピング現象の存在を示唆する研究成果が世界で初めて得られた。

・地球－人間システム相互作用

労働生産性を通じた気候から社会へのフィードバックを考慮するモデル（ESM-IAM 結合モデル）を作成し、実験の解析結果を示すことができた。また、陸域統合モデル（陸面過程のモデルをベースに人間活動モデルを結合）による実験を行い、地球システムの陸面過程と人間活動（水管理・作物生産・土地利用）の相互作用についての定量的な分析を行った。この研究を発展させ、大気・海洋・陸面過程を記述する地球システムモデルに上記の人間活動を組み込んだモデルの開発を完成させ、人間活動と地球システム全

⁷ 気候変動があるレベルを超えたとき、気候システムに不可逆性を伴うような激変が生じる現象

体のフィードバック過程を考慮に入れた分析を行い、国際会合等で発表を行った。

・データ統合・解析システム (DIAS) と連携した予測データの配信

CMIP6 実験データや本プログラムで創出された予測情報等を、DIAS を通じて国際配信システムに提供し、国内外の研究者に展開するなど、気候変動に係る研究基盤の強化を推進した。

CMIP6 に関しては、CMIP6 に参加するために必要な情報を関係者に展開し、また、CMIP6 へ提供すべき様々な情報を関係者から集約・整理して提出することで、極めて早い時期から CMIP6 へのデータ提供を実現し、本プログラムの IPCC AR6 への多大な貢献の一助となった。その際、DIAS とも十分連携し、効率的なデータ提供体制を構築できた。

【領域テーマ C : 統合的気候変動予測】(気象業務支援センター)

領域テーマ C では、気象業務支援センターを中心に、名古屋大学、海洋研究開発機構、北海道大学、東北大学が連携して、地域気候モデルを開発し、日本付近の詳細な気候予測データを創出するとともに、日本領域の気候変動メカニズム研究を進めた。また、国際貢献として、東南アジア諸国との共同研究や、同地域における温暖化予測支援等を実施した。主な成果は以下のとおりであり、本テーマの目標は達成したと評価できる。

・地域気候モデルの開発

新たに大気海洋相互作用の効果を限定的に評価する地域気候モデルの基本部分を開発した。海洋の影響を動的に入れることに成功した当該モデルにおいて、台風の再現性等の改善を確認した。

また、ユーザーニーズに従う物理プロセスの高度化の試みとして、次世代モデルの構築に活かすためのユーザとの意見交換会を実施した。

・日本付近の詳細な気候予測データの創出

RCP2.6 シナリオと RCP8.5 シナリオによる 5km/2km メッシュの詳細な予測データセット、+1.5/+2.0/+4.0°C シナリオでの 20km メッシュのアンサンブル気候予測データ (d4PDF シリーズ)、時間連続データ、台風の表現に優れる雲解像モデル及び海洋モデルによるデータ等を創出し、いずれも DIAS に搭載するとともに、ユーザに提供した。これらは、文部科学省・気象庁により 2022 年に公表された「気候予測データセット 2022」の主要部分を構成する。

・温暖化による気候変化のメカニズム解明

日本周辺の特徴的な気候要素である、梅雨前線性の降雨と、台風の振る舞いについて解析を行い、梅雨期を含む夏季の日本周辺の降水の変化は、梅雨初期の 6 月と盛夏期の 7-8 月で異なること、またその原因を明らかにした。台風については、将来日本に襲来する台風は強度が増し、さらに速度の低下が相まって総降水量増加に伴う災害生起確率が增大することを示唆した。さらに、極端降水の再現性にはモデルによる台風再現性が重要であることも確認した。これらの成果は気象庁と文部科学省により刊行された「日本の気候変動 2020」にも提供し、活用された。

先述のとおり領域テーマAと連携し、イベントアトリビューション実験により、本プログラム期間内に生じた極端現象を含む梅雨前線・台風による豪雨、豪雪等への温暖化の効果の解析を行い、その一部は気象庁の「異常気象分析検討会」にも提供するなど社会に情報発信した。

・台風シミュレーション

台風の表現に優れるモデルである CReSS-NHOES により、台風の再現性向上と、このモデルを用いた高精度の将来予測とイベントアトリビューション実験を行った。災害をもたらした台風に関する実験を行い、温暖化の寄与についても調べ、台風の速度の低下による災害の激甚化が示唆される結果等を得た。

・東南アジア等への展開と国際貢献

東南アジア各国（ベトナム、フィリピン、タイ、マレーシア、インドネシアの5か国）の気候研究者を招聘し、共同研究として地球シミュレータを用いて5 km/2 km メッシュの高解像度モデルにより気候変動予測データセットを作成し、統合地域ダウンスケーリング実験⁸-東南アジア（CORDEX-SEA）に貢献した。作成された予測結果を解析することにより複数の論文が執筆された。これらの気候変動予測データの利用普及活動を領域テーマDと共同で行い、具体的には2019年1月にタイでトレーニングワークショップと水管理及び気候変動に関する国際会議を現地との連携で開催した。

また、高解像度全球大気モデルを用いた比較プロジェクトである HighRes-MIP に参加し、高解像度150年連続データを提供した。また、統合地域ダウンスケーリング実験-東アジア（CORDEX-EA）へも参加し、東アジアの降雪・積雪の再現性を調査した。

【領域テーマD：統合的ハザード予測】（京都大学）

領域テーマDでは、京都大学を中心に、名古屋工業大学、北海道大学、農業・食品産業技術総合研究機構及び土木研究所が連携して、台風、高潮等による過去ハザードのメカニズムを解明するとともに、ハザードの将来変化や社会影響を分析することで、適応策に必要なハザード予測情報を創出し、社会課題解決へ貢献した。また、領域テーマCと共同して、アジア諸国等との連携研究を通じて、ハザード予測技術を海外に展開するなどの国際貢献をした。主な成果は以下のとおりであり、本テーマの目標は達成したと評価できる。

・ハザードモデルの開発・予測

d4PDF 等の気候予測データに基づき、不確実性を考慮した上で、ハザードモデルを開発・高度化し、想定し得る最大クラスの極端現象による気象ハザードの将来予測を行った。気候変動やハザードの予測結果を定量的に活用するために必要となるバイアス補正

⁸ 統合地域ダウンスケーリング実験（CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment）は、地域気候モデルによるダウンスケーリングに関する世界気候研究計画（WCRP）の国際的枠組み。

⁹法・極値評価技術の体系化・開発等も行い、d4PDF等を対象にバイアス補正済みデータを作成し、数百年に一度の稀な現象を分析する極値評価技術を提示した。

河川ハザードについては、日本全国109の河川流域を対象として開発した河川流量シミュレーションモデルを用いて、気候変動時のダム貯水池の治水機能の分析のため、河川流量変化予測を行った。また、気候変動影響の発現特性の時空間的な違いを分析するため、領域テーマCの150年連続データを活用して降水量の変化を分析した。三大都市圏については、浸水・氾濫シミュレーションモデルの高精度化を継続し、最大クラスの氾濫予測を実施して適応策に資する研究を行った。

沿岸域ハザードについては、日本周辺の海面上昇、高潮及び高波の将来変化の予測を行い、適応策に資する分析を行った。また、大気モデルと結合した波浪、高潮モデルの高度化を進め、大気・海洋間の相互作用を考慮した台風に関連する極端な沿岸ハザードの将来変化予測を行った。

また、水災害・水資源の将来予測や適応に資する研究を農業分野や森林分野、海洋環境分野にも広く展開した。具体的には、領域テーマCの150年連続データを活用して、各種農業分野に関連する水循環変化予測を実施した。陸域水循環モデルを用いて、複数の気候シナリオ及び土地シナリオについて河川水量や水資源量に関する150年連続的な推定も実施し、河川流況変化に適応した貯水池操作規則の変更の必要性やその効果について検討した。畑地帯においては、長期的な基盤整備の進展を考慮した浸水予測並びに農業用ため池の洪水流量に関する予測を実施した。河川流量の推定において良好な推定精度を示す陸面過程モデルSiBUCを結合したモデル開発により、人間活動を考慮した精緻な陸面過程の計算が可能になった。沿岸域については、海面上昇と波浪特性の将来変化を考慮した砂浜の将来変化予測及び日本近海等におけるサンゴ・藻場等の沿岸生態系に関する将来予測等を行った。適応策に資する研究としては、全国の市町村を単位とした人口分布の変化を考慮し、2050年までの自然災害に関する予測を行うための基本的情報を得た。また、ハザードの将来変化予測に基づき、科学的不確実性を適応戦略に反映するためのモデルを構築し、気候変動に伴う高潮リスク等の変化に対応した防御施設の適応策の検討につながる成果を得た。

・過去ハザードのメカニズム解明

台風に加えて、豪雨や低気圧等も対象に、過去ハザードの発生要因を分析し、気候変動要因を評価した。歴史的な事象のみならず、例えば、令和2年7月豪雨といった近年の災害イベントにも着目し、大きな被害をもたらしたハザードの将来変化の要因を評価した。さらに、日本国内での台風や低気圧のハザードを評価し、地域別に台風ハザードマップを作成した。

・社会課題解決への貢献

本テーマにおける成果は、社会資本整備審議会河川分科会「大規模広域豪雨を踏まえた水災害対策検討小委員会」、国土交通省「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検

⁹ それぞれの気候モデルが持つ系統的、または規則的に見られる誤差（バイアス）を含む気候予測情報を、観測の情報を使って補正すること

討会」、農林水産省・国土交通省「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会」等の実務省庁の技術検討において活用されてきた。これらをベースに、国土交通省においては、全国5河川で河川整備基本方針が更新された。また、本プログラムの知見は地方整備局等での検討にも活用され、大阪府の高潮3大水門の改築といった具体的な適応策にも活用が広がった。

・東南アジア諸国への展開と国際貢献

領域テーマCにおいて作成される東南アジア諸国の詳細な予測データを活用し、タイ、ベトナム、インドネシア、フィリピン等の研究者との共同により、気候変動に伴うハザードの将来予測を実施した。気候変動に伴って、ベトナムのレッドリバーでの大幅な流量増加、太平洋島嶼国での高潮リスク増加等、適応策検討に有用な知見が創出された。

さらに、先述の領域テーマCと連携したタイにおける気候変動予測データの利用普及活動を行ったほか、フィリピン及びインドネシアにおいては関係行政機関等における水災害管理上の意思決定に影響する要因・動向やニーズ、能力の把握や可能な政策オプションを調査し、これらの調査結果をもとに、気候変動適応策の実装支援を目的とする「知の統合システム (Online Synthesis System for Sustainability and Resilience: OSS-SR)」を構築した。

以上を踏まえ、本プログラムは、気候モデル開発等を通じ、気候変動適応策に活用される科学的知見（予測データ）や世界的にインパクトの高い科学的知見（気候変動メカニズムの解明）を創出するだけでなく、IPCC や東南アジア諸国の気候変動適応等への国際貢献も行われており、本事業の目標は達成したと評価できる。

<必要性>

評価項目

- ・科学的・技術的意義（独創性、革新性、先導性、発展性等）
- ・社会的・経済的意義（国際的プレゼンスの維持・向上）
- ・国費を用いた研究開発としての意義（国や社会のニーズへの適合性、国の関与の必要性・緊急性、他国の先進研究開発との比較における妥当性等）
- ・政策・施策の企画立案・実施への貢献

評価基準

- ・本プログラムによる研究内容には、気候変動研究における世界最先端の分野に関する研究が含まれているか（文部科学省が担う分野としても相応しいと言えるか）。
- ・本プログラムが目指す研究成果は、気候変動研究の国際研究コミュニティや気候変動対策の国際交渉の場において、我が国のプレゼンスを高めることが可能な程度にまで研究内容が充実しており、かつ世界に発信できるものか。
- ・本プログラムが扱う研究テーマは、国内での適応策策定ニーズ等への影響評価モデル

の適合性の確保や、他国の先進気候モデル研究との比較における我が国の先進性維持等を通じて、国費を用いた研究開発としての意義を果たせるものか。

- ・本プログラムが扱う研究テーマは、気候変動対策に係る政策・施策の企画立案・実施に科学的知見の提供の面から貢献するものか。

(気候変動メカニズムの解明や気候変動予測モデルの高度化、気候モデルや影響評価モデル等の開発数、研究開発成果を活用した国際共同研究等の海外連携実績、累計論文発表数等)

以下の各評価項目における評価結果のとおり、必要性はあったと評価できる。

- ・科学的・技術的意義（独創性、革新性、先導性、発展性等）

気候感度について、新たな評価手法を考案することで、過去40年間ほぼ変わらなかった気候感度の不確実性の推定幅の半減に貢献した。この大きな科学的成果は IPCC AR6 の第一作業部会報告書にも強く反映された。また、全球的影響が大きいと目される南極氷床-棚氷過程においてティッピング現象の存在を示唆する研究成果を世界で初めて得たほか、東南アジア地域において世界初となる5km/2kmメッシュの高解像度ダウンスケーリングにより詳細な気候変動の評価を実施した。

これらの成果は総合誌（Nature：関連誌を含む17本、Science：関連誌を含む3本）に掲載された。また、累積論文数及び国際共同研究等の海外連携実績については、上述のアウトプット指標及びアウトカム指標に示しているとおり、当初目標値を上回る成果を示した。

これらのことから、本プログラムでは、世界最先端でインパクトの大きな成果が十分創出されたと評価する。

- ・社会的・経済的意義（国際的プレゼンスの維持・向上）

気候モデル MIROC6 を用いた第6期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）実験を完了し、多数のシミュレーションデータを世界中に公開することで、IPCC AR6をはじめとするさまざまな温暖化予測情報に活用された。本プログラム関係者が主執筆者等として参加したAR6では、本プログラム関係者による論文の被引用数が400を超えた。また、本プログラムの研究成果のうち、近未来気候予測のデータは英国気象局の現業10年気候予測に活用されたほか、詳細な陸域過程をモデル化した統合陸域シミュレータである ILS は海外でも高評価を受け、河川モジュールは欧州中期予報センター（ECMWF）の現業予報モデルに採用された。

これらのことから、本プログラムにおける研究成果は、気候変動研究の国際研究コミュニティ等における我が国のプレゼンスを高め、かつ世界に発信されたと評価する。

- ・国費を用いた研究開発としての意義（国や社会のニーズへの適合性、国の関与の必要性・緊急性、他国の先進研究開発との比較における妥当性等）

国際的に地球システム予測が次の研究課題になりつつある中で、先駆けて5～10年の炭素循環の予測を試みた。また、パリ協定等の動向を受け、CMIP6 策定当初には想定されていなかった CDRMIP（Carbon Dioxide Removal MIP）や ZECMIP（Zero Emission

Commitment MIP) が急遽立ち上げられた中、迅速な参加表明と実験実施を行い、開発した地球システムモデルやソフトウェアにより、人為影響等を踏まえたより精緻な気候変動メカニズムの解明や、詳細な予測と緩和策情報の提示を可能とした。気候変動による風水害の将来変化は、災害対策、防災インフラ等の中長期整備に直結する喫緊のテーマである中、主な風水害を対象としてハザード予測モデルの開発とそれらを用いた影響評価に資する研究を行うとともに、社会経済的要因も考慮に入れた適応策評価に資する研究を実施した。

これらのことから、本プログラムは、国や社会のニーズへ適合し、我が国の先進性も維持したと評価する。

・政策・施策の企画立案・実施への貢献

本プログラムで創出されたデータやモデルは、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT * 令和元年度終了）や国土交通省の治水計画検討、環境省の地域適応コンソーシアム事業（* 令和元年度終了）や環境研究総合推進費研究課題等に用いられた。

<有効性>

評価項目

- ・ 実用化・事業化や社会実装に至る全段階を通じた取組（防災・減災への貢献等成果の社会実装に向けた寄与等）
- ・ 知的基盤の整備への貢献や寄与の程度

評価基準

- ・ 本プログラムにより創出された科学的知見は、国内の適応策検討等への貢献を通じて社会実装に至る取組となっているか。
- ・ 本プログラムにより創出された科学的知見は、国内及び東南アジア地域等における気候変動対策策定のための材料となるなど、知的基盤の整備への貢献を果たすものか。
(気候変動影響評価・適応策評価技術の研究開発によって整備された国内の適応策検討や東南アジア地域支援に資するデータセットの数、研究開発成果を活用した国際共同研究等の海外連携実績等)

以下の各評価項目における評価結果のとおり、有効性はあったと評価できる。

- ・ 実用化・事業化や社会実装に至る全段階を通じた取組（防災・減災への貢献など成果の社会実装に向けた寄与等）

本プログラムにおける成果は、国土交通省「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」や農林水産省・国土交通省「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会」、大阪府河川整備審議会「高潮専門部会」や関西国際空港「台風 21 号越波等検証委員会」等において活用されている。また、「気候変動に関する懇談会」（文部科学省研究開発局長・気象庁長官主催）、環境省の「気候変動予測及び影響評価の連携推進に向けた検討チーム」等に本プログラム関係者が委員として参画し、「日本の気候変

動 2020」の公表等、それぞれの検討において本プログラムの成果が活用された。

これらのことから、本プログラムの成果は、国内の適応策検討等への貢献を通じて社会実装に至る取組となったと評価する。

・ 知的基盤の整備への貢献や寄与の程度

「社会に開かれた温暖化サイエンス」の推進として、極端気象の要因分析について、気象庁「異常気象分析検討会」に情報提供するとともにメディアや一般講演会を通じて情報発信を行い、国内で多数のメディアに大きく取り上げられた。また、領域テーマC・Dの連携により、東南アジア諸国との共同研究等を通じて、東南アジア等における気候変動予測データセットの作成・解析や、災害を引き起こすハザードの詳細な将来予測等を実施し、その成果をもとに、気候変動適応策の実装支援を目的とする「知の統合システム (Online Synthesis System for Sustainability and Resilience: OSS-SR)」を構築した。また、東南アジア諸国の気候研究者を招聘することによりキャパシティービルディング¹⁰を実施するなどの国際貢献を進めた。さらに、本プログラムで創出されたCMIP6実験データや国内の予測情報等を、DIASを通じて国内外の研究者に展開するなど、気候変動に係る研究基盤の強化を推進した。

これらのことから、本プログラムは、国内外における気候変動対策策定のための材料となる、知的基盤の整備へ貢献したと評価する。

<効率性>

評価項目

- ・ 研究開発の手段やアプローチの妥当性
- ・ 計画・実施体制の妥当性

評価基準

- ・ 本プログラムの実施内容は、社会実装に有効な成果を創出するために妥当なアプローチとなっているか。
- ・ 本プログラムのテーマ間連携の運営体制は、研究実施上において適切な体制となっているか。

(気候変動影響評価・適応策評価技術の研究開発によって整備された国内の適応策検討や東南アジア地域支援に資するデータセットの数、テーマ間連携を実施する運営体制の設置等)

以下の各評価項目における評価結果のとおり、効率性はあったと評価できる。

- ・ 研究開発の手段やアプローチの妥当性

DIAS との連携により CMIP6 実験データが公開され、SI-CAT においては本プログラムの成果であるモデル／予測データが活用され、影響評価の基盤となった。また、研究成果は日本における気候変動対策の効果的な推進に資することを目的として、文部科学省が気象庁とともにまとめた「日本の気候変動 2020」に反映されており、さらに、

¹⁰ Capacity building : 能力習得・構築の支援

文部科学省・気象庁により公表された「気候予測データセット 2022」にも用いられた。なお、本プログラムでは「気候予測データセット 2022」の整備や今後の拡充・高度化のため、2020年度に3回にわたり、予測データ作成者やデータ利用者との意見交換会を実施した。

これらのことから、本プログラムは、社会実装に有効な成果を創出するために妥当なアプローチが取られていたと評価する。

・計画・実施体制の妥当性

全体を統括するPD・P0のリーダーシップの下、各テーマの研究者が双方向コミュニケーションにより、連携して研究を進めるとともに、各テーマ間で成果を相互に活用している研究推進体制が構築され、効率的な事業運営・研究開発が実施された。研究調整委員会（年1回以上実施）においては、PD・P0、全てのテーマ代表者（及び関係者）が参加し、各テーマにおける進捗状況、連携状況、連携促進の議論が行われたほか、各テーマの研究運営委員会（各テーマで年2回実施）には外部委員及び他テーマ領域代表が相互に参画しテーマ間連携を推進する研究体制がとられた。また、テーマ間で共同利用する数値実験データについて、共有ファイルサーバシステムを連携基盤として利用し、各テーマ間の連携が推進された。各テーマ間の連携事例としては、テーマAとテーマBは気候モデル・地球システムモデル開発に関して、テーマC及びテーマDは、日本周辺の詳細な予測情報の創出や東南アジア等への国際貢献で連携した。特に、テーマAはテーマBと連携し、近未来予測技術を地球システムモデルに実装し、気候・炭素循環の近未来予測という研究領域を新たに開拓した。さらに、テーマAはテーマCと連携し、d4PDFの全球シミュレーションを用いた気候・気象状態の要因分析を領域シミュレーションに繋げる「グローバル」アプローチを開発することで、従来はできなかった地域規模の熱波や豪雨等に対する温暖化寄与推定を可能とし、研究成果についてメディアを通じた一般への啓発効果が特に顕著だった。

新型コロナウイルスの影響により、本プログラムの実施期間後半は対面での打合せや国内外の学会が中止・延期になったが、オンライン会議システムの積極的活用や地球シミュレータの遠隔利用の促進等により、研究作業の遅滞を避け、研究成果を継続的に創出した。

これらのことから、本プログラムのテーマ間連携の運営体制は、研究実施上において適切な体制となっていたと評価する。

（2）科学技術基本計画又は科学技術・イノベーション基本計画等への貢献状況

科学技術基本計画において、「地球規模での温室効果ガスの大幅な削減を目指すとともに、我が国のみならず世界における気候変動の影響への適応に貢献する。」、科学技術・イノベーション基本計画において、「高精度な気候変動予測情報の創出や、気候変動課題の解決に貢献するため温室効果ガス等の観測データや予測情報等の地球環境ビッグデータの蓄積・利活用を推進する。」と示されている。

本事業では、気候変動適応策の基盤となる気候モデルの開発を通じて予測情報を創出するものである。また、予測情報は、国、地方公共団体等における適応策の検討に活用され

ている。以上より、科学技術基本計画及び科学技術・イノベーション基本計画に基づき、事業が実施され、両計画に貢献したと評価する。

(3) 総合評価

①総合評価

本プログラムでは、気候感度について、新たな評価手法を考案することで、過去40年間ほぼ変わらなかった気候感度の不確実性の推定幅の半減に貢献し、その科学的成果はIPCCの報告書にも強く反映された。また、全球的影響が大きいと目される南極氷床-棚氷過程におけるティッピング現象の存在の示唆等、世界初となる研究成果も得ており、これらの成果はNatureやScienceに掲載された。本プログラムで得られた多数のシミュレーションデータは、世界中に公開し、IPCCをはじめとするさまざまな温暖化予測情報に活用された。本プログラムでは、国際的に地球システム予測が次の研究課題になりつつある中で、先駆けて5~10年の炭素循環の予測を試みた。さらに、気候変動による風水害の将来変化は、災害対策、防災インフラ等の中長期整備に直結する喫緊のテーマである中、主な風水害を対象としてハザード予測モデルの開発とそれらを用いた影響評価に資する研究を行うとともに、社会経済的要因も考慮に入れた適応策評価に資する研究を実施した。本プログラムで創出されたデータやモデルは、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラムや国土交通省の治水計画検討、環境省の地域適応コンソーシアム事業や環境研究総合推進費研究課題等に用いられた。これらのことから、本プログラムの必要性はあったと評価できる。

本プログラムにおける成果は、国土交通省「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」や農林水産省・国土交通省「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会」、大阪府河川整備審議会「高潮専門部会」や関西国際空港「台風21号越波等検証委員会」等において活用されたほか、文部科学省が気象庁とともにまとめた「日本の気候変動2020」及び「気候予測データセット2022」にも用いられた。また、東南アジア諸国との共同研究等を通じて、東南アジア等における気候変動予測データセットの作成・解析や、災害を引き起こすハザードの詳細な将来予測等を実施し、その成果をもとに、気候変動適応策の実装支援を目的とする「知の統合システム」を構築するなどの国際貢献も進めた。さらに、本プログラムで創出された実験データや国内の予測情報等を、DIASを通じて国内外の研究者に展開するなど、気候変動に係る研究基盤の強化を推進した。これらのことから、本プログラムの有効性はあったと評価できる。

本プログラムでは、全体を統括するPD・P0のリーダーシップの下、研究調整委員会や各テーマの研究運営委員会の開催等を通じ、各テーマの研究者が双方向コミュニケーションにより、連携して研究を進めるとともに、各テーマ間で成果を相互に活用している研究推進体制が構築され、効率的な事業運営・研究開発が実施された。また、テーマ間で共同利用する数値実験データについて、共有ファイルサーバシステムを連携基盤として利用し、各テーマ間の連携が推進された。これらのことから、本プログラムの効率性はあったと評価できる。

以上より、必要性、有効性、効率性を踏まえると、本プログラムは、気候変動メカニズ

ムの解明、気候変動予測モデルの開発等の推進に大きく貢献したと評価できる。

②評価概要

本プログラムでは、国内外における気候変動対策に活用されるよう、気候変動メカニズムの解明、気候変動予測モデルの開発等を推進することを目的とし、国際的に信頼性の高い適応策・緩和策の基盤となる我が国独自の基盤的気候モデルを開発するとともに、緩和策立案に大きな科学的根拠をもたらす炭素・窒素循環や気候感度等の解明を可能とする段階を目標とした気候モデル要素の精度向上、国内や東南アジア地域を対象とした気候モデル活用のための高度化を行った。必要性、有効性、効率性を踏まえると、本プログラムは、気候変動メカニズムの解明、気候変動予測モデルの開発等の推進に大きく貢献したと評価できる。

(4) 今後の展望

本プログラムの成果である気候予測データは、上述のように治水対策等の気候変動対策に係る政策・施策の科学的根拠として活用される例が出てきているが、不確実性による予測精度、近未来予測データの不足等の課題もあり、活用の範囲を広げていく必要がある。昨今の気候変動による激甚災害等を踏まえると、防災・減災等においては、過去データをもとにした対策から、科学的な将来予測データも活用した対策へのパラダイムシフトがさらに加速していくことが想定される。これらの動きを更に加速させるためには、気候モデルのさらなる高度化・精密化を図りつつ、国、地方自治体、国際社会等における幅広いニーズ等を踏まえた気候予測データの高精度化を進めることが必要である。「気候予測データセット 2022」の更新への貢献も課題である。

本プログラムの科学的成果は、AR5 から大きく論文の被引用数を伸ばして AR6 に活用されており、我が国の気候変動研究における国際的なプレゼンスは増してきている。気候変動対策は世界が一体となって取り組むべき課題であり、今後の CMIP7 や AR7 に貢献するため、欧米等との国際共同研究を通じ、引き続き効果的・効率的に研究開発を推進していくことが重要である。改良された地球シミュレータ等のハイパフォーマンス・コンピューティング (HPC) の活用にも期待するところも大きい。

本プログラムでは、創出された国内の予測情報等について DIAS を通じて国内外の研究者に展開するとともに、研究成果についてメディアや一般講演会を通じて情報発信を行い、国内で多数のメディアに大きく取り上げられた。2050 年カーボンニュートラル (CN2050) の実現には、国民一般の意識変容を伴う大きな社会変革が必要であり、そのための信頼できる科学的知見や幅広い情報発信の重要性は今後も増大することが想定される。企業も (サプライチェーンを含め) 気候変動リスクマネジメントに取り組んでいる。また投資家も投資の判断基準の一つとして気候関連財務情報開示タスクフォース (TCFD) など気候変動リスク情報の開示を求めたり、トランジションファイナンスに取り組むなどしており、近未来予測データや排出シナリオ評価等の科学的根拠の重要性が金融業界でも認識されている。これらの動きに資するため、金融業界等のニーズも踏まえながら、気候予測データの高精度化 (や関連情報の整備) 等とあわせて、研究成果を活用し、日本の企業や自治体等

が使いやすい、ユーザフレンドリーなデータ・システムの構築及び提供に向けた取組に繋がっていくことが望まれる。