

戦略プロポーザル

極端気象災害と 気候変動リスクへの対応強化に 向けた近未来予測

STRATEGIC PROPOSAL

Climate modelling for near future: to deliver reliable navigation in the era of climate change

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください

<https://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

本プロポーザルでは、自然災害と気候変動リスクへの対応を強化するために、数週間規模から十年規模までの時間スケールを対象とした近未来の予測の高度化、およびその社会利用の促進を目指した研究開発戦略を提案する。

自然災害および気候変動のリスクに適切に対処し、適応的かつ強靱な社会を構築することは、日本および世界にとって喫緊の課題である。その対応を強化するためには、将来起こり得る気象・気候の変化の多様な時間的・空間的スケールでの予測、および人間社会や自然環境への影響の多面的評価が必要である。その上で予測情報をステークホルダーに利用しやすい形で届け、対策立案や意思決定、行動変容に効果的に繋げていく必要がある。従来、これらは天気予報や50～100年先を見据えた気候変動予測で主に行われてきた。しかし昨今は気候変動リスクを考慮した自然災害対応が求められており、気候変動の緩和・適応や防災・減災を目的とした計画や対策を講じるためには数週間、数か月、数年、あるいは十年以上先を見据えた予測が必要との認識が自治体等で強まっている（図ES-1）。加えて産業界では「気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）」の提言への対応として気候関連リスクが財務に与える影響の把握・開示が事業者にも今後求められることから同様の時間スケールへのニーズが高まっている。



図 ES-1 予測のニーズが高まっている時間スケール

こうした新たな予測ニーズを背景に、関連する「予測」および「影響評価」の研究開発が近年活発化している。その動きを加速させ、研究開発成果を社会利用に繋げていくためには、国として研究開発を一体的かつ効果的に推進する体制を構築する必要がある。このような認識から本プロポーザルでは、数週間規模から十年規模までの時間スケールを対象とした「予測」ならびに「影響評価」の高度化、およびその社会利用の促進を目指した研究開発戦略を検討した。

研究開発課題は「予測」、「影響評価」、「データ・解析基盤」の3つの柱から構成される（図ES-2）。また推進方策としては以下を提案した。これらの項目に共通するのは既存の分野・セクターを超えた体制の構築や取組みの重要性である。

- (1) 「予測」と「影響評価」の連携強化
- (2) 分野横断的な研究体制の構築
- (3) プログラム・プロジェクトレベルでの複線的な気候予測研究の推進
- (4) 現業機関と研究機関の連携強化
- (5) データ・解析基盤との共進化
- (6) 数理科学・情報科学技術分野との連携強化

(7) 若手の積極登用

幅広い時間スケールの「予測」を可能にするためには分野横断的でミッション志向型の研究体制の構築が必要である。「予測」分野の研究成果を効果的に社会利用に繋げていくためには「影響評価」や社会利用分野との協同も不可欠である。個々のプログラムやプロジェクトが有機的に繋がっていくための傘、あるいはハブ（結節点）を作る仕掛けが求められる。我が国では1991年に文部省学術審議会（当時）での建議を発端に東京大学気候システム研究センター（CCSR）が設置され、我が国の気候研究のけん引役となって分野の発展に貢献した。特に気候変動予測は世界に伍する水準に引き上げられた。こうした過去の経験から学ぶことも有益と思われる。

気候予測研究は科学的探究と並行して社会利用への接続を考えることが常に求められる。とりわけ気候変動の緩和・適応や防災・減災のための具体方策の創出は喫緊の課題となっている。そこではマルチステークホルダーとの協同・連携を通じて研究の計画段階から成果創出までを共に進める共創体制を構築することも必要になるだろう。また短中期的に成果を狙っていくような研究開発と並行して、中長期的に必要な研究開発を計画的に進めていくことも必要である。これらがバランス良く進められ、相互に影響しあう関係性や体制を国内に作り上げていくことが、本プロポーザルが対象とする数週間から十年スケールの予測の研究開発を効果的に推進する上での望ましい方向性である。

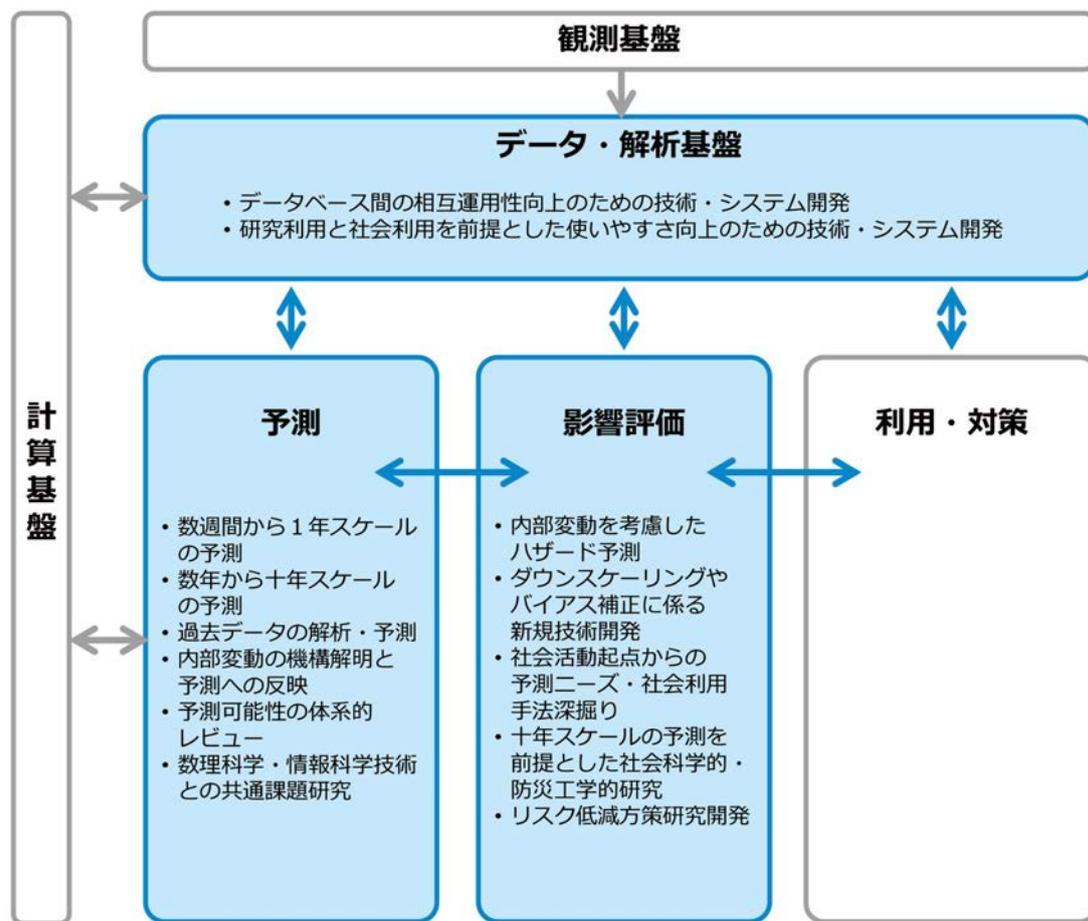


図 ES-2 研究開発課題群とその位置づけ

Executive Summary

The aim of this report is to promote research and development on climate modelling for near-future ranging from weeks to decades and their use in society.

It is an urgent task for Japan and even other countries to build an adaptive and resilient society that can cope with the risks of natural disasters and climate change appropriately. For that purpose, further improvements in predictions of weather and climate on a variety of temporal and spatial scales, and their use to assess the impact on human society and the natural environment is required. It is also necessary to deliver such information to stakeholders in a form that is easy to use, and to effectively convert it into countermeasure planning, decision making, and behavioral change. This is mainly done through weather forecasting and climate change prediction for the next 50 to 100 years. However, in recent years, there has been a growing demand for natural disaster response that considers climate change risks together. Local governments are increasingly aware of the need to predict weeks, months, years, or even decades ahead to plan and take measures for climate change mitigation/adaptation and disaster prevention/mitigation (Figure ES-1). The need for a similar time scale is seen in the industrial sector as well. Private companies are required to understand and disclose the financial impact of climate-related risks in response to the recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosure (TCFD).

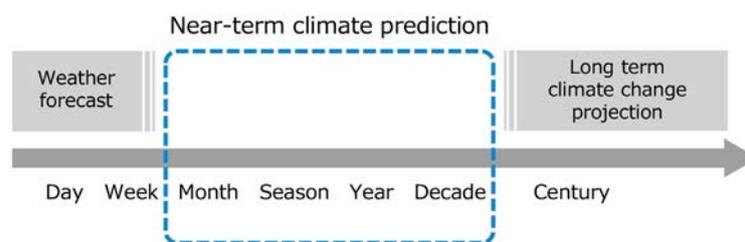


Figure ES-1 Prediction on the scales ranging from weeks to decades is attracting attention

Under these circumstances, the R&Ds of climate modelling for scales ranging from weeks to decades and assessment of the impacts of natural disaster and climate change on natural environment and human society has become more active in recent years. To accelerate these movements and connect the R&D and social applications, effective and systematic governmental supports are required. Therefore, this report proposes the R&D strategy aiming at the advancement of "prediction" (i.e., climate modelling) and "impact assessment" for time scales ranging from weeks to decades, and the promotion of their social utilization.

The R&D agenda consists of three pillars: "prediction," "impact assessment," and "data and analysis infrastructure" (Figure ES-2). The followings are some of the measures that should be taken to address these R&D issues. Common to all these measures is the importance of building a certain system or network and making efforts that transcend existing fields and sectors.

- (1) Strengthening cooperation between "prediction" and "impact assessment"
- (2) Establishment of a cross-disciplinary research environment
- (3) Concurrent promotion of multi research programs and projects
- (4) Strengthening collaboration between research and operations
- (5) Coevolution of R&D with data and analysis infrastructure
- (6) Strengthening collaboration with the fields of mathematical science and information science and technology
- (7) Encourage young researchers

Building a cross-disciplinary and mission-oriented network of scientists would be desirable to make predictions over a wide range of time scales. Collaboration with scientists and practitioners in the fields of "impact assessment" and social application is also essential to effectively connect the R&D of "prediction" and social applications. Individual relevant research programs and projects should be interlinked with each other. The Center for Climate System Research (CCSR) at the University of Tokyo established in 1991 has raised the level of Japan's R&D in climate change prediction to that of leading countries in this field. It would be useful to learn from these past experiences.

Reducing the risk of climate change and natural disasters is an urgent social and environmental issue. Since all citizens are involved it, collaboration with multi-stakeholders across the process of R&D, from its planning and social application. Planned R&D from a medium- to long-term perspectives is required as well as producing short-term results. When these can be promoted in a well-balanced manner, R&D of prediction on a scale of weeks to decades, which is the target of this proposal, can be effectively promoted.

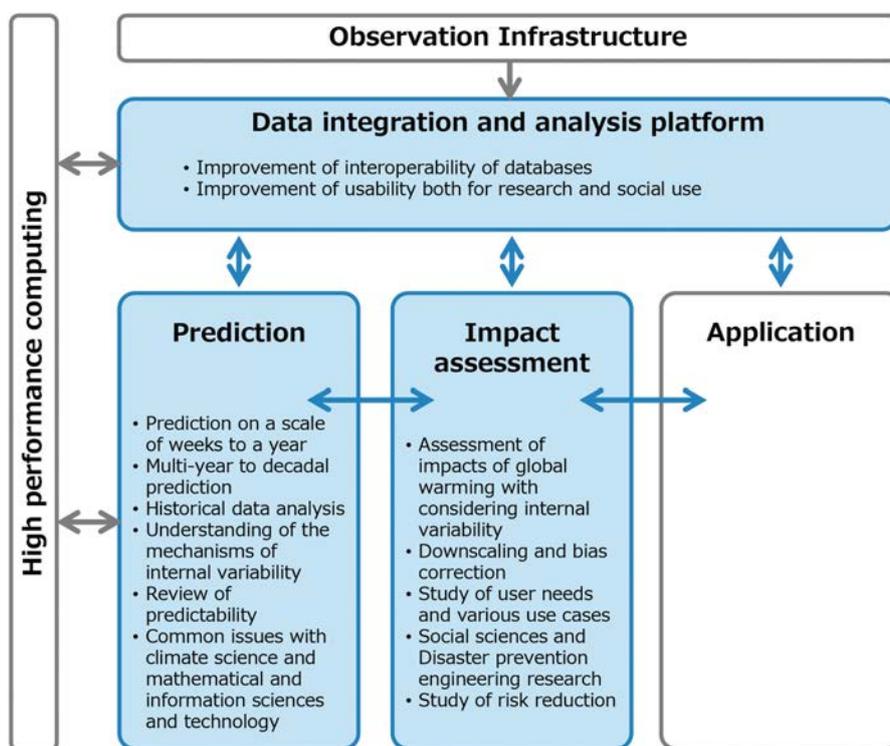


Figure ES-2 Structural illustration of R&D issues

目次

1	研究開発の内容	1
	ビジョン・ターゲット.....	1
	研究開発課題.....	1
	推進方策.....	2
2	研究開発を実施する意義	4
	2.1 現状認識と問題点.....	4
	2.1.1 現状認識.....	4
	2.1.2 問題点.....	17
	2.2 社会・経済的効果.....	19
	2.3 科学技術上の効果.....	21
3	具体的な研究開発課題	24
	3.1 各研究開発課題の位置づけ.....	24
	3.2 予測.....	25
	3.2.1 気候モデル.....	25
	3.2.2 考えられる2つのアプローチ.....	26
	3.2.3 分野横断的な研究.....	26
	3.2.4 研究開発課題.....	27
	3.3 影響評価.....	29
	3.3.1 データセットの作成・解析.....	29
	3.3.2 ハザードの予測.....	30
	3.3.3 ばく露と脆弱性の定量化、リスク低減.....	30
	3.3.4 様々なセクターとの協同.....	30
	3.3.5 研究開発課題.....	31
	3.4 データ・解析基盤.....	31
	3.4.1 地球環境データ統合.....	31
	3.4.2 研究開発課題.....	32

4	研究開発の推進方法および時間軸	34
4.1	予測と影響評価の連携強化	34
4.2	国内研究開発体制の強化	35
4.2.1	分野横断的な研究体制の構築	35
4.2.2	プログラム・プロジェクトレベルでの複線的な気候予測研究の推進	36
4.2.3	現業と研究の連携強化	37
4.2.4	データ・解析基盤との共進化	37
4.2.5	気象・気候分野と数理科学・情報科学技術分野の交流促進	38
4.2.6	若手の積極登用	39
4.3	時間軸イメージ	39
付録 A	検討の経緯	41
A.1	気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー	41
A.2	科学技術未来戦略ワークショップ 「中長期の自然災害・気候変動リスクに対応する気象・気候予測の今後」	42

1 | 研究開発の内容

ビジョン・ターゲット

豪雨、洪水、熱波や寒波などの自然災害をもたらす極端気象は気候変動の影響により一部で頻発化、激甚化する可能性が指摘されている。これは自然災害に見舞われる機会の多い我が国にとって深刻な問題であるばかりでなく、世界にとってもSDGsの達成に向けた大きな障害となる。今後はこうした状況変化に適切に対処していくことのできる、これまで以上に適応的かつ強靱な社会を構築していく必要がある。

そこで本プロポーザルでは、あらゆる時間的・空間的スケールでの地球環境変化の「予測」、およびその変化をもたらす自然や社会への「影響評価」を「対策」の準備・実践に積極的に活用できる社会の実現に向け、今後取り組むべき研究開発の方向性を検討した。具体的には、従来の気象予報と気候変動予測の間にある、数週間から十年規模までの時間スケールをターゲットとした近未来の予測の高度化、およびその社会利用の促進を目指した研究開発戦略を検討した。

研究開発課題

本プロポーザルで提案する研究開発課題は「予測」「影響評価」「データ・解析基盤」で構成される（表1）。

第一に「予測」の高度化に向けた研究開発が必要である。モデリング研究では「数週間から1年スケールの予測」と「数年から十年スケールの予測」を並行させ、全体として幅広い時間スケールをカバーできるよう進めていく方針が妥当と考えられる。また予測モデルの高度化以外に過去データの解析（再解析）や大規模アンサンブル数値実験、予測可能性の体系的レビュー等、「影響評価」に有用なデータセットや情報創出のための検討を進める。これらを通じて「予測」と「影響評価」の連携を深める必要がある。さらに数理科学・情報科学技術分野との連携強化も図る。カオス、統計、偏微分方程式等、双方の分野にとって共通的な課題の下での研究を促進することにより、従来とは異なる視点・アプローチから新たな発見や展開がもたらされることが期待できる。

第二に「影響評価」に係る研究開発では、数週間から十年規模までの時間スケールの予測情報が現時点では十分そろっていないことを前提に課題設定を行う必要がある。例えば先に挙げた過去データの解析等、現在入手可能なデータを使った研究がまず想定される。その他には地球システムが元来持つ揺らぎ（例：季節変動、年々変動、十年規模変動）を考慮したハザード予測モデルの開発、リスクコミュニケーションに係る社会科学的・防災工学的研究等、数週間から十年スケールを対象とすることで新たに対応が必要になる課題への取組みを進める必要もある。

第三に「データ・解析基盤」は、データの利活用促進の観点からの技術開発が必要である。数週間から十年スケールの予測に関連する観測・予測等のデータが一元的に収集・蓄積され、大学・公的研究機関による研究や自治体・民間事業者による実務に利活用しやすい形で提供される環境を整備する必要がある。そのためにはデータベース間の相互運用性やユーザーインタフェース等に係る技術・システム開発が必要になる。

表1 取り組むべき研究開発課題

予測	影響評価	データ・解析基盤
①数週間から1年スケールの予測 ②数年から十年スケールの予測 ③過去データの解析・予測 ④内部変動の理解や「影響評価」に利用可能な大規模アンサンブル数値実験 ⑤予測可能性の体系的レビュー ⑥カオス、統計、偏微分方程式等の数理科学・情報科学技術との共通課題研究	①内部変動を考慮したハザード予測モデルの開発 ②ダウンスケールやバイアス補正に係る新規技術開発 ③社会活動起点（利用者視点）からの予測ニーズ・社会利用手法の深掘り ④十年スケールの予測を前提とした社会科学的・防災工学的研究 ⑤リスク低減方策に関する研究開発	①データベース間の相互運用性向上のための技術・システム開発 ②研究利用と社会利用を前提とした使いやすさ向上のための技術・システム開発

推進方策

上に示した種々の研究開発課題には研究開発プログラムやプロジェクト、あるいはその他の仕組み作り等を通じて複線的に取り組んでいくことが求められる。また既存の分野・セクターを超えた分野横断の体制作りや幅広いステークホルダーが関与する国内体制を構築して推進していくことが必要である。

推進方策の柱として、一つには、「予測」と「影響評価」の連携強化が挙げられる。「予測」の情報が「影響評価」やその先の社会での利用に十分繋がっていないことは日本に限らず他国でも問題と認識されている。様々な要因が指摘されているが、その根本には「予測」と「影響評価」の間の相互理解やコミュニケーションがまだ十分でないという点がある。これを解消するためにはプログラムやプロジェクトレベルでの連携促進や、双方の間の「つなぎ」になるような仕掛け作りが有益と考えられる。ここで「つなぎ」とは、例えば過去データの解析・予測から得られる基盤的なデータセットの生成や予測ニーズの調査研究といったプロダクト志向のもの、あるいは研究者だけでなく予測情報を使うユーザー側と一緒にしたステークホルダー会議のような場の創出やネットワークの構築が考えられる。これらを通じて双方向なコミュニケーションや協同を生み出していくことを目指す。

もう一つは、国内研究開発体制の強化が必要である。「予測」と「影響評価」の連携をはじめ、気象・気候予測の研究開発には、従来の分野・領域の枠を超えた総合的な取組みが求められている。科学研究としても、地球システムの理解が深まるにつれてその構成要素および要素間の相互作用を総合的に扱う必要性が一層強まっている。高度化・複雑化する研究開発の潮流の中で本分野の研究力を高めていくためには多様な方策を通じてその強化に取り組んでいく必要がある。本プロポーザルで提案する推進方策を以下に示す。

- ・ 分野横断的な研究体制の構築
- ・ プログラム・プロジェクトレベルでの複線的な気候予測研究の推進
- ・ 現業機関と研究機関の連携強化
- ・ データ・解析基盤との共進化
- ・ 気象・気候分野と数理科学・情報科学技術分野の連携強化
- ・ 若手の積極登用

気候予測研究は科学的探究と並行して社会利用への接続を考えることが常に求められる。とりわけ気候変動の緩和・適応や防災・減災のための具体方策の創出は喫緊の課題となっている。そこではマルチステークホルダーとの協同・連携を通じて研究の計画段階から成果創出までを共に進める共創体制を構築することも必要になるだろう。また短中期的に成果を狙っていくような研究開発と並行して、中長期的に必要な研究開発を計画的に進めていくことも必要である。これらがバランス良く進められ、相互に影響しあう関係性や体制を

国内に作り上げていくことができれば、本プロポーザルが対象とする数週間から十年スケールの予測の研究開発は効果的に推進されると期待される。

2 | 研究開発を実施する意義

2.1 現状認識と問題点

2.1.1 現状認識

自然災害と気候変動リスクへの対応強化の必要性

IPCCの第6次評価報告書第1作業部会報告書(自然科学的根拠)(2021年)¹では「人為起源の気候変動は、世界中の全ての地域で、多くの気象及び気候の極端現象に既に影響を及ぼしている」(A.3)と述べられている。また「気候システムの多くの変化は、地球温暖化の進行に直接関係して拡大する。この気候システムの変化には、極端な高温、海洋熱波、大雨、いくつかの地域における農業及び生態学的干ばつの頻度と強度、強い熱帯低気圧の割合、並びに北極域の海氷、積雪及び永久凍土の縮小を含む」(B.2)と指摘している。

実際に国連防災機関(UNDRR)と災害疫学研究センター(CRED)のレポート²によれば、1980年～1999年の20年間と2000年～2019年の20年間を比較すると、世界で報告された自然災害の数は4,212件から7,348件へと1.7倍増加した。災害種別に見ると最も大きく増加したのは「熱波」(3.3倍)で、次いで「洪水」(2.3倍)だった。その後には「野火」(1.5倍)、「土砂崩れ」(1.5倍)、「暴風雨」(1.4倍)、「干ばつ」(1.3倍)が続いた。気候変動による影響を受けない「地震」と「噴火」は1.2倍の増加に留まった。またこうした自然災害による被害は、死者数には変化がほぼ見られず、影響を受けた人数も1.2倍の増加に留まった。この間に世界人口は50億人から69億人へと1.4倍増えている。一方で経済的被害は1.6兆USドルから3兆USドルへ1.8倍増加した。

自然災害に気候変動リスクが加わる状況を国連も深刻に捉えている。自然災害および気候変動は社会のあらゆる側面に影響を及ぼし得るため持続可能な開発目標(SDGs)の達成の障害になりうると考えている。そしてこれに対応するためにはまずはあらゆるステークホルダーにとってのリスクを具体的に把握することが重要であるとし、リスクの可視化による開発「climate- and disaster risk-informed development」という考え方を提案している³。

さらに、気候変動への金融機関の対応を検討するために設置された気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD)が気候変動リスクの特定・評価や低減への取組み、それらの企業経営への反映等を情報開示すべきと提言した。それを受けて産業界の対応が本格化しつつある。しかしこれは同時に自然災害や気候変動に関連する新たなサービス創出の機会とも捉えられている。

日本でも同様の状況がある。日本の年平均気温は変動を繰り返しながらも有意に上昇しており、今後、降水量、積雪・降雪、海水温等への影響の顕在化が懸念されている⁴。自然災害による被害として、年間の死者数が200人を超えるような風水害は近年ほとんどない一方で、経済被害は増えている。損害保険会社が支払った自然災害(風水害)の保険金支払額は2018年、2019年と連続して1兆円を超え、過去最高水準となった。行政にはこうした状況を踏まえた気候変動の緩和・適応への対応や防災・減災のための備えが求められ、

1 文部科学省&気象庁(2021) IPCC 第6次評価報告書 第1作業部会報告書(自然科学的根拠) ヘッドライン・ステートメント(HS) 暫定訳

2 UNDRR & CRED (2020) The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000–2019)

3 UNDRR (2020) Integrating Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation in the UN Sustainable Development Cooperation Framework

4 環境省(2020) 気候変動影響評価報告書 総説

企業にはTCFDへの対応も求められている。自然災害と気候変動リスクへの対応を強化する必要性はこれまで以上に強く認識されている。

世界気候研究計画が目指す方向性

世界気候研究計画（WCRP）は世界気象機関（WMO）と国際科学会議（ICSU、当時）によって1980年に設立された国際的なイニシアチブである。気候の予測可能性および気候に人間活動が及ぼす影響を明らかにするために、気候のシステムおよびプロセスの科学的理解を発展させることを目的とし、国際的な気候研究の調整を行っている。そのWCRPの最近の取組みを表2に示す。

WCRPが2021年に始めた「Lighthouse Activities」は、重要な進展を早期に目指すべき科学技術テーマや制度的テーマを、社会ニーズに応える観点から検討したものである。すなわち昨今の社会的状況を踏まえて気候研究が今後目指すべき方向性を示したものであると言える。今後はこれに沿った研究の計画や潮流作りがWCRP主導で進められると予想される。

特定された5つのテーマを見ると、総じて言えば、あらゆる時間スケールをカバーし、そこから得られる予測情報をユーザーが利用しやすい形で地域レベルにまで詳細化することを可能にするような科学技術基盤の構築を目指していると捉えることができる。また5つのうち「Digital Earth」「Explaining and Predicting Earth System Change」「MyClimate Risk」は、後段で示す本プロポーザルの視点と重複するテーマ群であり、日本においても対応する動きが見られる。

表2 WCRPのLighthouse Activitiesで設定された5つのテーマ

名称	補足
Digital Earth	ハイパフォーマンスコンピューティング・ビッグデータ・AI手法を取り入れたデジタル技術を活用することで、高解像度の地球システムモデルの開発と膨大な観測データの最大活用を同時に発展させる。4つの柱を設定：①全球規模の超高解像度モデリング、②気候のためのデータ同化、③地域規模のデジタルアースシステム、④先進デジタル技術。
Explaining and Predicting Earth System Change	全球もしくは地域スケールの、特に数年から十年規模の時間スケールでの地球システム変化に関する定量的な観測、機構解明、早期警戒、予測の能力を総合的に向上させる。3つの柱を設定：①地球システム変化の観測とモデリング、②要因分析と予測の統合的な推進（早期警戒や急激な変化の予測も含む）、③現在および将来的なハザードの評価。
My Climate Risk	観測、再解析、モデルシミュレーション、現象理解等の利用可能なあらゆる気候情報を用いて地域スケールの気候リスクの解明・評価を行うための新しい枠組みを構築する。世界各地のケーススタディを活用するボトムアップなアプローチをとる。必然的に各々は地域特有のものとなるが、枠組み自体が汎用的であることで多くの地域タイプ（大規模地域、都市、気候変動に関連する災害リスクの高い典型的な地域など）に柔軟に適用可能、かつ気候サービスの開発にとって必要な支援となる。
Safe Landing Climates	人間社会と自然にとって「安全な着地点」を探る。危険な気候変動の回避をはじめSDGsに貢献する未来の道筋を数十年から数千年規模の時間スケールで探索する。5つのテーマを設定：①ハイリスクイベント、②炭素循環の乱れ、③水資源、④海面水位、⑤安全な着地への経路。
WCRP Academy	現在および未来の気候研究者の教育・研究支援を目的としたトレーニング機会をオンラインで提供する。

主要国の関連政策動向

米国は、前・現政権ともに地球環境の観測・予測に係る研究開発を国の優先事項と位置付けている。トランプ政権はパリ協定からの離脱を実行したが、地球環境の観測・予測は安全保障の観点から重要視していた。大統領府が毎年発表する次年度予算に関する「研究開発予算優先項目」において、トランプ政権は「地球システムの予測可能性」の向上に資する観測、プロセス解明、予測に関する研究開発を2021年度・2022年度政府予算の優先項目に挙げていた。関係府省・機関に対して国家戦略策定も指示しており、その結果、大統領府と各省庁の間で政策調整を行う国家科学技術会議（NSTC）の下に委員会が設置され、「Earth System Predictability Research and Development Strategic Framework and Roadmap」（2020年10月）が策定された。

その後のバイデン政権も2021年8月に公表した2023年度予算に関する「研究開発予算優先項目」では気候変動の観測・予測・影響評価およびそれらに関する情報へのアクセシビリティ向上等に係る研究開発を進める「気候科学」、科学的知見と社会の意思決定の間をつなぐ研究開発を進める「適応・レジリエンス」、自然資本を活用した解決方策の研究開発を推進する「緩和・適応のための自然を基盤とした解決策」を優先項目に挙げています。

また、昨今はAI研究の推進にも国を挙げて力を入れており、その流れの中にも気象・気候分野や地球科学分野が取り込まれている。全米科学財団（NSF）、エネルギー省（DOE）、海洋大気庁（NOAA）が研究開発でAIを活用するための戦略をそれぞれ策定している。

欧州は重要政策の中でグリーン化とデジタル移行を重視しており、予算配分においても重点化の方針を示している。それは科学技術・イノベーション関連でも同様である。EUの研究・イノベーション枠組みである「Horizon Europe」（2021年～2027年）では全体予算の35%（約334億ユーロ）を気候変動対策に充てるとしている。

注目動向は「Destination Earth Initiative（DestinE）」である。これは「欧州グリーンディール」と「デジタル戦略」の一環として2020年11月に採択されたイニシアチブである。同イニシアチブは、あらゆる時間的・空間的スケールをカバーする複数のモデル（デジタルツイン）の開発とそれらの統合に関する研究開発をHorizon Europe期間中に実施する計画としている。また、これらをクラウド上の地球環境関連のプラットフォームで公開し、自然環境や人間活動の観測・シミュレーション、将来社会シナリオの検証、各種政策的意思決定への貢献等を行うことを目指すとしている。EUが長年推進している地球観測データの利活用を促進する「コペルニクスプログラム」とも連携し、統合的なデータ・解析基盤の構築を目指している。DestinEは、日本の気象庁に相当する現業兼研究機関である欧州中期予報センター（ECMWF）が欧州宇宙機関（ESA）および欧州気象衛星開発機構（EUMESTAST）と連携して進める予定である。

季節内から十年規模の予測への関心の高まり

WCRPや米国、欧州の動向のポイントは、次の3点である。まず、地球環境の変化をあらゆる時間的・空間的スケールで予測可能にすること。そして、その予測情報を最大限に活用して自然災害や気候変動リスクが自然や人間社会に及ぼす影響を評価すること。さらに、予測と評価に基づき効果的な対策を準備・実践できるようにすることである。これらは地球規模の課題であると同時に、各国・地域の安全保障上の課題でもあると認識されている。

その実現に向けて、昨今、関心が高まっているのは「季節内から十年規模」の時間スケールの予測である^{5,6}。

5 Merryfield *et al.* (2020) Current and Emerging Developments in Subseasonal to Decadal Prediction, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vo.101, pp. E869–E896

6 Ruti *et al.* (2020) Advancing Research for Seamless Earth System prediction, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vo.101, pp. E23–E35

天気予報と気候変動予測のはざまにある時間スケール、すなわち数週間（季節内）から十年規模の時間スケールの予測に対するニーズが高まっている（図1）。これはアカデミアにおける議論だけではなく予測情報を利用するユーザー側のニーズとしても現れてきている。例えば環境省と国立環境研究所が中心となり実施した国内調査でも、行政や事業者等の予測情報を利用する側のニーズとして「季節予報・10年予測」が挙げられている（他には「高い解像度の予測」「気温・降水以外の要素の予測」「確率情報を含む極端現象予測」等がある）⁷。この時間スケールの現象は、社会、経済、環境の様々な側面に影響を与えると考えられている。例えば、通常の予報や予測の洪水対策や水資源管理、台風対策、農作物の栽培管理・収量予測、漁場探索、熱中症対策、気候変動リスクを踏まえた経営戦略策定等である。これらより、季節内から十年規模の時間スケールの予測精度の向上を可能とする研究開発への期待の高さをうかがい知ることができる。



図1 ニーズが高まっている予測エリア（数週間から十年スケール）

コラム

予測の違い

対象とする時間スケールによって「予測」の意味合いは異なる。ここでは天気予報、季節予報、気候変動予測の違いを説明する。

そもそも天気とは、ある地域における気温や湿度、風や雨などの物理現象（気象）に関係する大気の総合的な状態をいう。一般的に数時間から数日程度の期間で用いられる。数日から1か月程度の平均的な天気の状態は天候という。さらに長い期間にわたって現れる気温や降水量などの大気の状態は気候という。向こう1か月や3か月の気温や降水量などの予報である季節予報は気候情報に関する予報と位置付けられ現在も気象庁から発表されている⁸。

予報は基本的に気象庁から、気象業務支援センターを介して提供される。民間気象事業者はその情報を独自に加工、可視化して一般に提供するサービスを行う。気象業務支援センターによると同センターの配信サービスの利用者数は年々増加

7 高数ら（2021）気候変動の予測情報を利用者まで届けるには、水文・水資源学会誌 Vol.34 No.6, pp. 263-271

8 気象庁HP 天気予報と季節予報の違い
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kisetsu_riyou/difference/index.html（2022年2月アクセス）

しており、気象情報へのニーズが高まっているという。なお民間気象事業者が天気、気温、降水、降雪など大気現象の予測結果を独自に第三者に提供するためには気象庁長官の許可を得て予報業務許可事業者になる必要がある。

私たちが日常的に接する天気予報は「明日は晴れ」や「明日の最高気温は25℃」といった断定的な予報である。こうした予報に用いられる予測を決定論的予測と呼ぶ。比較的予測期間が短いと不確実性が小さいため、決定論的予測が可能になる。現在は1週間後の日別の天気まではある程度予測可能である。

一方、予測期間が長くなると不確実性が大きくなる。これは大気を持つカオス性と呼ばれる性質による。これにより観測や予測に含まれる僅かな誤差は時間が進むにつれて急速に増大する。この性質があるため、例えば1か月後の日別の天気を決定論的に予測することは不可能である。

そこで季節予報では、1週間や1か月間を平均した大まかな天候の予測を行っている。「今後1か月の気温が『高い』となる確率は50%」といった表現での予報になる。空間的にも、局地的な予測が困難になるため地域レベルの平均的な天候を予測している。こうした予測は確率的予測と呼ばれる。具体的には、決定論的予測で使われる初期値に僅かなゆらぎを与える等により複数の予測を行い、得られた複数の予測結果を基に確率的な予測を行う。こうして行われる予報はアンサンブル予報とも呼ばれる。

気候変動予測に関しては、国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）から公表されるものが世界的に利用されている。そこでは人間活動に伴う温室効果ガス等の排出に係るシナリオ（排出シナリオ）を前提にした、2100年を見た予測が行われる。2021年に公表された第6次評価報告書第1作業部会報告書では、将来の社会経済の発展の傾向を仮定した「共有社会経済経路（SSP）シナリオ」に基づく気温や降水量等の予測結果が示された。気候変動予測ではシナリオにも不確実性があるが、予測自体にも不確実性が当然ながら含まれている。そのため先のアンサンブル予報と同様、複数の予測結果を基にした結果の提示が行われている。

従来から最も利用されている予測情報は天気予報である。現在のような数値計算に基づく予測は1922年のリチャードソンによる試みに始まり、1950年代に各国で予報業務に導入されていった。その後は観測データの増加・品質改善や予測モデルの精緻化、解析手法の高度化、計算機の性能向上によって予測の精度は向上し、予測可能な時間も延びてきた。例えば台風の進路予報は1990年代前半の3日予報より現在の5日予報のほうが誤差が小さくなっている⁹。時間スケールに関しては、2週間先までの気温予測は熱波や寒波等の事前対策に活用される等、既に実用に供するものになっている。

しかし、2週間より先の数週間から数か月先の予測は、現業機関である気象庁から季節予報として既に公

9 気象庁HP 数値予報の精度向上 天気予報と季節予報の違い
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-9.html>（2022年2月アクセス）

表されているものの、利用者側に期待される予測精度には達しておらず、利用は進んでいない¹⁰。数週間から数か月先のスケールは一般的に「季節内から季節」スケールと言われるが、この時間スケールはかつて「予測可能性の砂漠」とも呼ばれていた。これは大気のカオスの性質により数値計算に用いる初期値のわずかな誤差が時間とともに急激に成長し、予測不可能な状態になってしまうためである。これをいかに克服するかが課題となっている。

気候変動予測の情報も気候変動対策に不可欠な情報として社会の中で多いに利用されている。2021年にノーベル物理学賞を受賞した眞鍋淑郎氏が1969年に発表した大気海洋結合モデルは地球温暖化を予測するモデル（気候モデル）の基礎となった。これを用い、大気中の温室効果ガスやエアロゾル等の濃度の推移を仮定し、そのシナリオの下で気候がどのような平衡状態に落ち着いていくかを計算する。時間スケールはある程度長く、2100年頃に設定する場合が多い。

前提となるシナリオの不確実性やモデルの不完全性、気候システムの揺らぎ（内部変動）等によって予測結果には一定の不確実性が含まれる。これに対して気候を構成する大気や海、陸面等の物理プロセスやエアロゾル等の化学的な現象の理解を深めてモデルに反映させたり、モデルによる予測を観測データによって統計的に修正する手法（データ同化）を利用したりして不確実性を低減させる努力が重ねられてきた。その結果として不確実性は少しずつ低減されている。例えばサイエンス誌が選ぶ2020年ブレイクスルー・オブ・ザ・イヤーの1つに「気候感度の不確実性幅の低減」が選出された。これは、産業革命以前と比べて大気中CO₂濃度が2倍になった場合の気温上昇幅（気候感度）が、従来は1.5℃～4.5℃の幅だったものが、物理プロセス理解を深めるなどの結果、2.6℃～3.9℃の幅にまで狭めることができたことが成果として評価されたものである。

気候変動予測の結果は更に気候変動が自然生態系や人間社会に与える影響の評価にも用いられている。気候変動による実社会への影響は気候変動予測の結果だけでは明確ではないため、予想される影響を可視化することにより対策立案や行動変容に役立てることが狙いである。しかしながら、そうした科学的知見の積み上げが進められる一方で、実社会の動きはそれほど敏感ではない。その理由は様々に考えられるが、予測の観点からは時間スケールと空間スケールの問題があると考えられている。

時間スケールとして2100年というのは、現在の人からすると“遠い未来のこと”と受け止められがちである。その頃の社会でどのような影響があるかが示されても実感がわかず、それゆえ対策や意思決定、行動変容になかなか繋がらないのではないかという問題意識が科学者コミュニティの中で強まっていた。同様に空間スケールに関しても、市区町村のレベルで違いが見えてくるような、数km～数十km程度の解像度での予測でなければやはり実感がわきにくいのではないかと考えられている。

そこでもう少し手前の“近い未来”の予測情報が必要ではないかとの認識が強まり、十年規模の時間スケールの予測の検討が本格化した。十年規模予測はIPCCの第5次評価報告書（2013～2014年）への導入を契機に世界的に研究が進められ、最新の第6次評価報告書（2021～2022年）でも採用されている。複数の機関による予測結果を世界気象機関（WMO）とイギリス気象局がとりまとめて公表する取組みも行われている。しかし現状はまだ予測の精度は十分とは言えず、異常気象の発生頻度や強度がどう変わるのかの予測も難しく、多様な利用ニーズに応えられる水準には到達していない。空間スケールも数百～数十kmスケールと粗く、市区町村のレベルで使う情報としては不十分である。こうした状況のため現在も研究開発が進められている。

10 数値予報モデル開発懇談会（第3回）資料1 気象庁における現業数値予報モデル開発の方向性～気候分野の目標設定と課題～
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi_model_kondankai/part3/gaiyou.html（2022年2月アクセス）

コラム

予測モデル

ここでは気象・気候分野の予測で用いられる予測モデルについて紹介する。

数値予報モデル

天気予報で用いられる予測モデルは数値予報モデルと呼ばれる。数値予報モデルでは地球を覆う大気を格子状に区切り、各々の格子に気温や湿度、気圧といった状態を数値として与えている（図2）。地球全体の大気を連続的に計算することは事実上不可能であるため、格子に区切って（数学的には離散化させ）、その区画の代表値のみを計算している。時々刻々と変わる風や雨といった気象は、物理法則に従う大気の現象である。それらの物理法則を表す方程式に、ある時刻での大気の状態を初期値として与え、次の時刻の気象状態をシミュレーションする。これを繰り返すことで客観的根拠に基づく予測を実施している。各国の気象機関では、数値予報モデルの初期値を客観的観測で常に求め、最先端のスパコンで将来の気象を高速にシミュレーションしている。

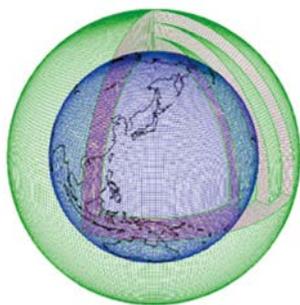


図2 地球を覆う格子の模式図¹¹

気候モデル

長期間にわたる気候変化の予測に用いられるのが全球気候モデルである（略して気候モデルと呼ばれることが多い）。格子で区切って計算するなど天気予報で用いられる数値予報モデルと共通点は多いが、考慮する物理現象などで異なる点がある。

当初は「大気の大循環モデル」が開発された。しかし、より長い時間の気候を予測する場合、地球表面の7割を覆う海が大気に作用する熱交換などの大気・海洋相互作用を取り入れる必要がある。そのため大気大循環モデルに海洋の平均状態を再現する海洋大循環モデルを結合させた「大気・海洋結合モデル」がその後開発された。更に現在は、大気・海洋結合モデルに陸面過程も結合されており、「大

11 図出所 気象庁予報部（2012）第45巻（平成24年度）数値予報研修テキスト 数値予報の基礎知識と最新の数値予報システム <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwptext/45/contents.pdf>（2022年2月アクセス）

気・海洋・陸面結合大循環モデル」とも呼ばれるものになっている。我が国独自の気候モデルとしては東京大学・JAMSTEC・国立環境研究所によるMIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) と気象庁気象研究所によるMRI-CGCM (Meteorological Research Institute - Coupled General Circulation Model) がIPCC等への貢献により国際的に良く知られている。

地球システムモデル

地球温暖化による環境変化を包括的に予測するためには大気・海洋結合モデルに含まれていない過程も考慮する必要があるとの認識が高まり、気候モデルを更に発展させたモデルの開発も進められた。エアロゾルモデル、炭素循環モデル、植生モデル、大気化学モデル、海洋生態・化学モデル、陸氷モデルなど、地球システムの中の多様な過程と相互フィードバックを気候モデルに取り入れる研究が進んだ。こうして開発されたモデルは、総称として地球システムモデル (Earth System Model、ESM) と呼ばれた。我が国ではJAMSTEC・国立環境研究所・東京大学によるMIROC-ESMが国際的に良く知られている。

雲解像モデル

従来の大気大循環モデルは水平解像度が数十km以上に留まるため、大気大循環の駆動源として重要な熱帯の積雲対流が直接解像できないという問題があった。半経験的な手法である積雲パラメタリゼーションが導入されており、予測結果に不確実性をもたらしていた。そこでこれを克服するために、一様性に優れる正20面体格子を用いた大気モデルNICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model、非静力学正20面体格子大気モデル) が東京大学と理化学研究所が中心になり開発された。NICAMは各辺3.5kmの解像度や各辺870mの解像度で全球の雲の生成の表現や台風の生成の再現が可能になるという特長があるため、雲解像モデルとも呼ばれている。

統合評価モデル

人為起源の温室効果ガス排出や大気汚染物質の排出が地球温暖化にどう影響するかを予測するモデルは統合評価モデルと呼ばれている。マクロ経済モデルやエネルギーシステムモデルを用いて社会経済シナリオに基づく人為起源の温室効果ガス排出量等を予測し、その結果を気候モデルの入力値にする。統合評価モデルを用いることで社会経済シナリオに応じた温室効果ガス排出の将来推計、排出削減対策の効果分析、技術オプションの相互比較等を行うことができる。

統合評価モデルの中では簡易気候モデルが用いられることが多い。しかし最近では地球システムモデルと統合評価モデルをリンクさせるための研究も進められている。国内では地球環境産業技術研究機構 (RITE) のDNE21、日本エネルギー経済研究所 (IEEJ) のIEEJ、エネルギー総合工学研究所のTIMES-Japan、国立環境研究所のAIM等が主要な統合評価モデルとして知られている。

季節内から十年規模の予測に関する研究動向

数週間（季節内）から十年規模の時間スケールの予測の現状を図3に示す。季節内から季節、季節から数年、数年から十年規模の時間スケールの予測がそれぞれ取り組まれている。しかし現状これらは時間的にも空間的にも予測の精度や解像度で利用ニーズに応えられる水準には到達できていない。そのためこれを克服するべく予測の高度化に向けた研究開発が精力的に行われている。

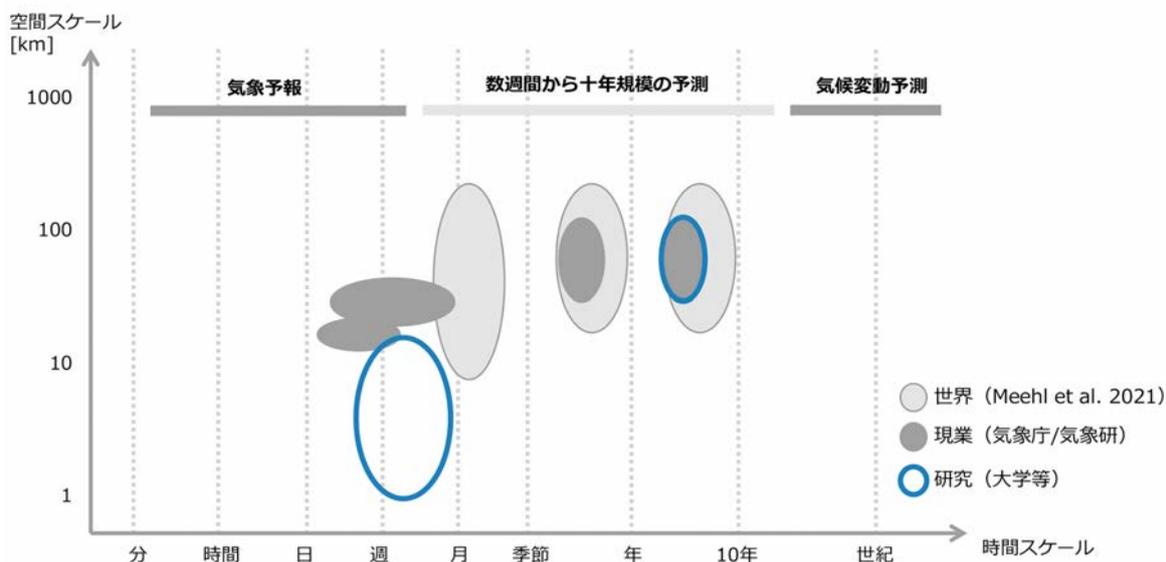


図3 数週間から十年規模の予測の現状¹²

まず季節内から季節スケールの予測において重要な現象であるマッデン・ジュリアン振動（MJO）は、エルニーニョ現象の発生・終息や日本を含む中緯度域を襲う熱帯低気圧の発生に関係する。MJOの予測精度が良いと日本を含む中高緯度域の予測精度も向上すると期待されている。そのため1か月予報や季節予報の予測対象として重要な大気現象であるとされ、盛んに研究が行われている。近年は国際的な研究プロジェクト「S2S」も進められており、各国の既存のモデルでは3週間～4週間先までのMJOの予測が可能になっている¹³。高解像度のモデルを用いた研究では30日あるいはそれ以上先までの予測も可能になりつつある¹⁴。

MJOの予測の改善にはMJOそのものの理解の深化が不可欠である。日本でも精力的に研究が行われており多数の成果が出ている。例えば最近では観測データの解析とシミュレーションの比較から、インド洋のはるか上空を伝播する「混合ロスビー重力波」の増幅がMJO発生の引き金になっているという、これまでにない新しい視点からの発見が報告された¹⁵。

モデルを使った研究も活発で、例えば富岳を活用した高解像度モデルによる大規模アンサンブル実験を通

12 Meehl *et al.* (2021) Initialized Earth System prediction from subseasonal to decadal timescales, *Nat. Rev. Earth Environ.* Vol.2, pp.340-357 等の各種情報を基にJST-CRDSにて図作成

13 Vitart (2017) Madden-Julian oscillation prediction and teleconnections in the S2S database, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* Vol.143, pp. 2210-2220

14 Miyakawa *et al.* (2014) Madden-Julian oscillation prediction skill of a new-generation global model demonstrated using a supercomputer, *Nat. Commun.* Vol.5, 3769

15 JAMSTEC プレスリリース (2021年10月13日) “マッデン・ジュリアン振動”の「引き金」を特定—世界の天候に影響する巨大雲群発生の鍵は赤道上空の大気波動—
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20211013/ (2022年2月アクセス)

じて、週～季節スケールでの極端気象現象（台風等）の確率的な予測を試みる研究が進行中である。また異なる時間スケールで用いられるモデルを組み合わせることにより、従来困難だった時間スケールの予測を可能にしようとする挑戦的な取り組みもある。科学研究費助成事業の学術変革領域研究（B）で実施されている「Deep Numerical Analysis 気候学への挑戦」では、気候変動予測で用いられる気候モデルと季節内スケールの予測で利用される高解像度モデルを互いに参照するような仕組みを構築し、両者が苦手としていた季節スケールの精度の高い予測の実現を目指している。こうしたあらゆる時間スケールをシームレスに繋ぐような予測システムの構築は世界的な潮流になりつつある。

数年から十年規模の予測では、海面水温の変動によって駆動される大気と海洋の間の様々な相互作用が重要となる。中でも十年、二十年のスパンで変動する「十年規模変動」の予測は重要テーマとして活発に研究が行われている。日本ではJAMSTECで海洋研究が精力的に行われている。例えば南インド洋の海面水温に見られる十年規模変動を観測データに基づき約十年先まで予測可能だと報告されている¹⁶。この南インド洋の十年規模変動はアフリカ南部の降水量の十年規模変動と強く関係しており、同地域の降水量予測への貢献が期待されている。一方で陸域の予測は海洋ほどにはできておらず、重要な因子とされる土壌水分や植生等の影響をどうモデルに組み込むかが課題となっている。また従来の気候モデルを使った予測ではなく、地球システムモデルを使った予測も研究として活発化しつつある。これにより気温や海水温以外にCO₂濃度の予測等、生物地球化学的な予測も可能になるため注目されている。

計算手法の高度化も進められている。予測精度向上に用いられるデータ同化手法は大気、海洋それぞれのモデルで個別に行われている。しかし大気海洋結合モデルでデータ同化を行おうとすれば相互の不一致が生じるため調整が必要になっていた。そこで「大気海洋結合データ同化」という新しい同化手法アイデアが提案され、そのための研究開発が各国で活発に進められている¹⁷。データ同化とAI（機械学習）を組み合わせた手法の開発も進められている。

AIの活用は気象・気候分野で様々に試みられており、各研究機関も積極的に研究開発を行っている。とりわけ画像認識等で深層ニューラルネットワークを用いた機械学習手法は強力なツールとなっている。一方、物理プロセスに基づいて作られる従来の気候モデルに対し、深層学習を利用して作るモデルは“ブラックボックス化”する懸念がある。そのため「Physics-guided Machine Learning」や「Physics-Based Modelling with Machine Learning」といった両者の融合を図るアプローチも検討されている。

予測研究は現状では季節内から季節スケールと数年から十年規模スケールに大きく分かれて研究が進められることが多いが、先述のとおりシームレスな予測システムの構築は昨今の潮流の一つである。それは時間的・空間的にあらゆるスケールを繋ぐことを狙うものである。またシームレス化と並ぶ大きな潮流は地球システムモデル化である。気温や海水温、降水等の予測にとどまらず、化学プロセスや炭素循環等、多様な社会ニーズを想定した予測の実現がもう1つの目指すべき方向性となっている。両者はいずれも挑戦的なテーマであり、この二つの大目標に向かって研究開発が進む流れが今後強まるとみられる。

季節内から十年規模スケールの予測に関する近年の国際的な研究プロジェクトを表3に示す。これらのプロジェクト間で共通的に見られる特徴は、自らのモデルを使って実施した予測の結果（データ）をそれぞれ持ち寄って相互に比較分析するという方法論である。互いの結果を共有・比較分析することによって各モデルの特徴を明らかにするとともに、共通的な課題の検討等を通じた予測技術の全体的な向上を目指しており、国際プロジェクトならではの作りとなっている。なお日本は自国の気候モデルを使ってプロジェクトに精力的に参

16 JAMSTECプレスリリース（2018年1月26日）海面水温データで南インド洋の十年規模変動が予測可能に～アフリカ南部の防災や農業、感染症分野へ応用の可能性～
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20180126/（2022年2月アクセス）

17 Penny *et al.* (2017) Coupled data assimilation for integrated Earth system analysis and prediction, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol.98, pp. E5169-E5172

画している。国際的な潮流の中で日本の存在感を示すことができるという意味で重要であり、同時にそこで得られた成果をモデル開発に活かすことができるメリットがある。一方、国際プロジェクトは計画から実施までに長い時間を要する場合も多く、必ずしも機動的に動けるとは限らない。対象を自国に区切った検討はやはり自国で行う必要がある。これらを踏まえると国際プロジェクトへの参画は重要であるものの国内プロジェクトを代替するものではなく、相補的な関係にあると位置づけられる。

表3 季節内から十年規模予測に関する国際的な研究プロジェクト例

プロジェクト名	概要
Sub-seasonal to Seasonal Prediction Project (S2S)	世界気象研究計画(WWRP)と世界気候研究計画(WCRP)が共同実施する国際共同研究プロジェクト。2週間先から2か月先の予測技術の向上に資する研究の促進を目的とする。2015年からの第1期5年間は主要な気象機関の季節内予報のデータの収集・アーカイブに注力。2019年からの第2期5年間はアンサンブル実験結果のデータベース構築、潜在的な予測可能性の評価研究、具体的な極端気象を事例にした実証プロジェクト等に注力。
Decadal Climate Prediction Project (DCPP)	WCRPが主導する国際共同研究プロジェクト。1年先から10年先の気候変動の予測技術向上に資する過去気候再現研究を推進。準リアルタイムの予測も実施する。火山等の擾乱が予測にどのような影響を与えるか、過去事例研究から気候変動の支配因子に関するどのような新知見が得られるかも研究。
Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change (CLIVAR)	WCRPが推進する世界的な研究コミュニティ構築事業「コアプロジェクト」のテーマの1つ。海洋大気結合システムの力学、相互作用、予測可能性の解明を目的とする。季節・経年・十年・百年規模の気候に変動(variability)、変化(change)、予測可能性をもたらす過程を明らかにするために観測データの収集・解析、数値モデルの開発・適用を進める。
Earth System Modelling and Observations (ESMO)	WCRPの「コアプロジェクト」に2020年に追加されたテーマ。WCRP内のモデリング・観測関連活動の連携・調整を目的とし、S2S、DCPP、CLIVARも構成要素に含む。数値モデル開発の最適化、新しい予測システムの構築、観測システムの革新、気候データのエコシステムやデータ連携の改良、データ同化やデジタルツイン枠組みの高度化を目指す。

なお、予測された気象・気候に関する気温や降水等の情報から自然環境や人間社会への影響(米の収量がどうなるか、水資源や洪水がどうなるか等)やそのリスクを評価し、その結果を対策立案や意思決定、行動変容に活用していく部分の研究に関しては、季節内から十年規模スケールでは本格的な取組みは未だそれほど多くは見られない。例えば数週間から数か月先の予測は日本では季節予報として既に気象庁から発表されているものの、利用者側から期待される予測精度には達しておらず、利用が進んでいない。数年から十年先の予測も国際連携による試みとして予測情報の提供が始められているが、空間解像度が数十km~百km超にもなるため地域レベルに落とし込むにはまだ情報が粗い。前述のとおり上流側の予測研究が現在進行形で進められているため、そこからの情報を必要とする下流側の影響評価の研究は今後進展が期待される分野である。ただし上流側の予測の成熟を待つのではなく、原理原則に照らして予測可能な現象や対象は何なのか、ユーザーはどのような情報を必要としているか、使いやすい情報利活用のインターフェースはどのようなものか等、下流側で検討すべき事項は複数ある。予測研究と並行してそれらを深掘りしていくための研究が求められる。

2 研究開発を実施する
意義

コラム

影響評価

本プロポーザルでは、気温、海水温、降水量や降水パターン等の気象・気候的要素の将来変化の定量化を「予測」、その将来変化が人間社会や自然生態系に及ぼす影響の可視化・定量化を「影響評価」と呼ぶ。

「影響評価」の対象には人間社会や自然生態系のあらゆる側面が含まれる。一般的には農林水産業、水環境・水資源、自然生態系（海洋、陸域）、自然災害・沿岸域、健康、産業・経済活動、国民生活・都市生活といった分類で整理されている。各々の分野において何に対してどのようなメカニズムでどのような影響が生じ得るか、またそのリスクはどの程度かを明らかにするのが「影響評価」に係る研究開発である。例えば気温の上昇が農作物に生理障害をもたらし収量が変化する、海水温の上昇が強い台風の発生割合を増加させるといったことを可視化・定量化する（図4）。

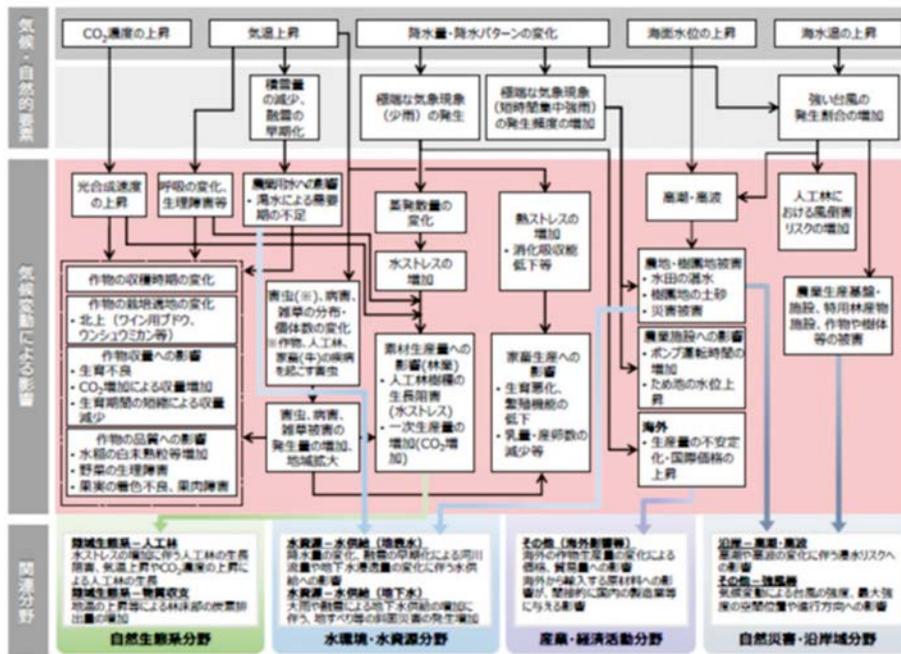


図4 気候変動に関する「影響評価」の概略図例¹⁸

影響の大きさはリスクとして表現される。一般的に気候変動のリスクは「ハザード」、「ばく露」、「脆弱性」の3つの要素のバランスによって定量化される¹⁹。ハザード

18 図出所 環境省（2020年）気候変動影響評価報告書（概説）「図3-3 気候変動により想定される影響の概略図（農業・林業・水産業分野（農業・林業）」

19 IPCC（2014）Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability

ドとは猛暑、台風、豪雨の頻度や強度等である。ばく露は被害を受ける可能性のある人や資産、自然資本等の状況、脆弱性はハザードに対する感受性の高さや適応能力の低さを指す。

「影響評価」を行うためには「予測」の情報が必要になる。気候モデルからの出力値を力学的もしくは統計的なダウンスケーリングにより空間的に高解像度化する。そうして作られるデータセットを使って「影響評価」の研究に取り組む。従来は気候変動に伴う長期的な変化や影響を調べることに主眼が置かれており、2100年頃を想定した比較的長期の時間スケールが一般的である。また将来予測のデータを使わないアプローチもある。過去の観測データと最新の予測モデルを使って当時の状況を再現する「再解析」や過去事例の分析等である。これらも「影響評価」に必要な情報を提供する重要な研究アプローチとして積極的に活用されている。

2

研究開発を実施する
意義

国内状況

自然災害と気候変動リスクへの対応は政府としても喫緊の課題と捉えている。気候変動適応計画や地球温暖化対策計画等の気候変動関連政策、あるいは第6期科学技術・イノベーション基本計画や革新的環境イノベーション戦略のような科学技術関連政策においてその必要性が指摘されている。また2020年6月30日には小泉環境大臣と武田内閣府特命担当大臣（いずれも当時）の共同メッセージとして「気候危機時代の『気候変動×防災』戦略」が公表された。現在は気候変動リスクを踏まえた抜本的な防災・減災対策が必要な時代であり、それぞれの対策を効果的に連携させて取り組むべきとしている。

こうした政策ニーズに応えるための国内研究体制は、プログラムレベルでは文科省の気候変動研究プログラム「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017年度～2021年度）が代表的なものとなる。文科省の気候変動研究プログラムは2002年度にスタートした「人・自然・地球共生プロジェクト」（2002年度～2006年度）を皮切りに、5年ごとにプログラムが刷新されて現在に至っている。その時々的情勢に沿った課題設定がなされてきており、IPCCの取組みに対応した十年規模予測もこの中で2007年度から取り組まれてきた。

最新の「統合的気候モデル高度化研究プログラム」は気候モデル、地球システムモデル、領域気候モデル、ハザード予測の4つのサブテーマで構成されている。2021年度で終了となることを踏まえ、今後の気候変動研究のあり方が文科省にて議論されたところ、気候変動の緩和・適応のための対応の一環として「近未来予測データ」の必要性が指摘された²⁰。近未来予測が必要とされた理由は前述と同様であり、50年先、100年先ではなくもう少し近い未来の予測の必要性が関連省庁や民間企業からニーズとして挙げられたためである。

また文科省では上記と相補関係にあるプログラムとして「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム」（2016年度～2020年度）を推進してきた。地球環境情報に関するデータ・解析基盤であるDIASのプログラムであり、2021年度からはJAMSTECが運営機関になっている。地球環境関連のデータ、特に気候変動予測に関する中心的なデータを保管・公開している。現状は数週間から十年規模の予測に係るデータは保管されていないが、今後、当該テーマの研究開発を推進するにあたっては、DIASをデータ・解析基盤とすることが妥当と考えられる。体制が変更されたDIASはこれまで以上に開かれたプラットフォームとして改良されて

20 第11期 環境エネルギー科学技術委員会（第1回）資料5-4-1 気候変動研究に関する検討会概要
https://www.mext.go.jp/content/20210812-mxt-kankyoku-000017252_11.pdf（2022年2月アクセス）

いくと期待されるため、そうした動きとの連携強化が望まれる。

気象・気候分野の研究においてスーパーコンピュータは不可欠な研究基盤である。「富岳」成果創出加速プログラムでは「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」(2020年度～2022年度)が進行中である。短時間領域スケール予測、全球スケール予測、先進的大規模データ同化の3テーマで構成されている。そのうち全球スケール予測では週～数か月先までの極端気象現象(台風等)の確率予測に取り組むとしている。

ボトムアップの動きとしては科学研究費助成事業の学術変革領域研究(B)で実施されている「Deep Numerical Analysis 気候学への挑戦」(2020年度～2022年度)が、気候変動予測で用いられる気候モデルと数週間スケールの予測で利用される高解像度モデルを互いに参照するような仕組みを構築する新たな試みにより数週間から1年先の予測に挑戦している。その他に新学術領域研究の「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」(2019年度～2023年度)や「海洋混合学の創設～物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」(2015年度～2019年度)は数年から十年先の予測に関連する幅広い基礎研究を展開している。これらを通じて得られる科学的知見や技術、あるいは研究コミュニティは数週間から十年スケールの予測を支える基盤となり得るものである。

さらに予測情報の利活用に関しても動きが見られる。環境省と国立環境研究所が中心となり実施した国内調査で行政や事業者等の予測情報を利用する側のニーズとして「季節予報・10年予測」が挙げられた(他には「高い解像度の予測」「気温・降水以外の要素の予測」「確率情報を含む極端現象予測」等がある)²¹。これらニーズを踏まえ、「適応策推進のための気候変動予測・影響評価に係る連携ワーキンググループ」(2021年度～2022年度)が設置され、予測情報を自治体や民間事業者等のユーザーに届けるための社会に開かれた仕組みづくりに関する議論が行われている。

なお予測に関する研究の主体は公的研究機関や大学が中心である。観測機器やデータ解析技術など個別機器・技術の開発では当然ながら民間事業者も中心的な主体の一つとなるが、気候モデルの開発など基幹的な予測技術の研究開発は日本に限らず世界でも公的機関を中心に行われている。ただし予測情報を利用して影響評価や対策立案等を行う部分では、ユーザー側の視点が必要なため産学官の連携が重視されている。特に昨今は気候変動リスクへの対応が喫緊の課題となり、また新たなビジネス機会ととらえる動きもあるため活発化している。

以上、ここでは主要な動向を取り上げたが、これら以外にも関連する研究開発の動きは複数散見される。従って今後の数週間から十年スケールの予測の素地は国内に十二分にある状況と考えられる。ただし、現状ではこれらは個々の問題意識に沿って別々に展開されている面もあり、国として大きな方向性が共有されているとは言えない。とりわけ行政側ではニーズは把握できているものの、研究開発現場の実態や科学技術上の課題等との照らし合わせは必ずしも十分に行われていない。本プロポーザルはそのような状況の解消に貢献することも意図している。

2.1.2 問題点

自然災害と気候変動リスクへの対応強化に向け、数週間(季節内)から十年規模の時間スケールの予測への期待が高まっている。しかしそのための研究開発を今後国として推進するにあたっては以下の3つの問題がある。

21 高数ら(2021)気候変動の予測情報を利用者まで届けるには、水文・水資源学会誌 Vol.34 No.6, pp. 263-271

① 初期値・境界値からの情報量が少なく、予測困難な内部変動の影響が大きい

大気の運動を記述する流体方程式は非線形で、初期値の僅かな違いが時間発展に従って拡大する性質を持つ。そのため、初期値をもとにして時間発展を追い精度良い予測が得られるのは、ある時間スケールまでに限られる（第1種予測可能性）。1ヶ月を超える予測では、初期値ではなく境界値が支配的となる。例えば、時定数の長い海面水温、海氷、土壌水分等の海面や陸面の状態などからの強制力を用いる（第2種予測可能性）。

しかし、さらに時間スケールを大きくするとこれらの境界値や外力からの情報量が減り、予測困難な内部変動が予測の支配要因となってしまう。より長期の保存則を用いるような静的な方法では、この内部変動を適切に取り扱えない。そのため、数週間から十年スケールの予測は極めて困難となる。

② 支配的な物理過程が予測モデルに十分取り込まれていない

予測モデルは多数の物理過程を取り込むことで精緻化され、予測精度を向上してきた。しかし、現状の予測モデルには数週間から十年のスケールで支配的な変動要因は十分取り込まれていない。そのため、高解像度モデルと気候モデルのどちらを出発点にしても、この時間スケールでの予測精度は向上しない。

数週間から十年のスケールの予測の高度化には、予測精度の向上に寄与すると考えられる支配的な変動要因の理解から始める必要がある。例えば数週間から数か月のスケールではマッデン・ジュリアン振動が、十年規模では中緯度海洋の変動が挙げられよう。これらの現象を観測や実験などを通して適切にモデリングし、必要十分な精度で予測モデルに取り入れることが必要である。もちろん、予測モデルにすべての物理過程を高精度に取り込むことは非現実的であり、一般にはさまざまな近似や仮定を置く。この近似やパラメータ化の適切さの判断は、やはり物理過程の理解に基づくと考えられる。これに加えて、モデルによる予測を観測データによって統計的に修正する手法（データ同化）等、計算手法の高度化も重要になる。

更に予測モデルにはそれぞれ得意分野があり、普遍的なモデルは今のところ存在しない。計算の単位である格子間隔や、大気、海洋といった扱うコンポーネントに違いがあり、それに計算機資源の制約が加わることによって、比較的短期間であれば高解像度に予測できるモデルや、解像度は高くないが温暖化のような長期のトレンドが予測できるモデルといった違いが生じる。これまでのモデル開発で数週間から十年の間のスケールはメインのターゲットではなかったため、全く新しいモデルをゼロから開発するのか、既存のモデルを駆使して挑戦するのかという問題も生じる。

③ コミュニティー間にギャップがある

自然災害と気候変動リスクへの対応強化に予測の情報を最大限活用していくためには、まず自然災害を引き起こす極端気象等の将来変化に関する「予測」の情報が必要になる。続いて、予想される将来変化が社会や自然にどのような影響を与え得るかという「影響評価」が行われる。その後、影響評価から得られた情報や知見が自治体や民間事業者による「対策」の立案や意思決定、行動変容等に利用されるよう繋がっていかなければならない。しかし、この一連のプロセスにおいて、これまでの気候変動予測研究では「予測」と「影響評価」の研究者・関係者（コミュニティー）の間にギャップがあり、両者の間のコミュニケーションが必ずしも十分ではなかった²²。背景には研究対象・研究目的の違いやそれぞれが依拠する学術分野の違いがあると考えられている。また研究者と予測情報の利用者との間のコミュニケーションも不足していた。その結果、気候変動対策の意思決定等に資する情報として予測情報が国や地方自治体、民間事業者に十分活用されてこなかった。このような状況を改善するため気候変動予測分野ではここ数年にわたって「予測」・「影響評価」・「対策」のコミュニティー間の連携強化のための議論が重ねられ、改善に向けた具体的な検

22 高数ら（2021）気候変動の予測情報を利用者まで届けるには、水文・水資源学会誌 Vol.34, pp. 263-271

討が行われている。同様の状況は今後取り組む数週間から十年のスケールの予測でも起こり得る。そのため「予測」と「影響評価」の連携強化や、「対策」に供する予測情報の創出という観点から研究開発課題を検討する必要がある。

2.2 社会・経済的効果

予測情報に基づく対策による被害や損失の軽減

数週間から十年スケールの予測の潜在的な応用先には図5に示すように幅広い分野が想定される。例えば数週間から数年スケールの予測は洪水に対する貯水池操作、湯水に向けた事前対策、海流の経年変動を踏まえた漁業計画等への活用が期待される。また、台風や冬の低気圧の強度は気候変動による長期トレンドだけでなく数年から十年スケールの内部変動による変化も幅が大きいため、その予測は沿岸災害への対応で重要になると考えられている。

日本損害保険協会の調べによると2020年度に発生した「令和2年7月豪雨」に対する支払保険金額は1,055億円で、「令和2年台風10号」に対しては981億円だった²³。2014年2月に関東で発生した「平成26年2月雪害」は3,224億円だった。こうした大規模な風水害や雪害が向こう数年から十年程度の間でどの程度の頻度で発生しうるかに関する情報は保険業界のみならず他の業界や私たち一般市民にとっても重要な情報になり得る。

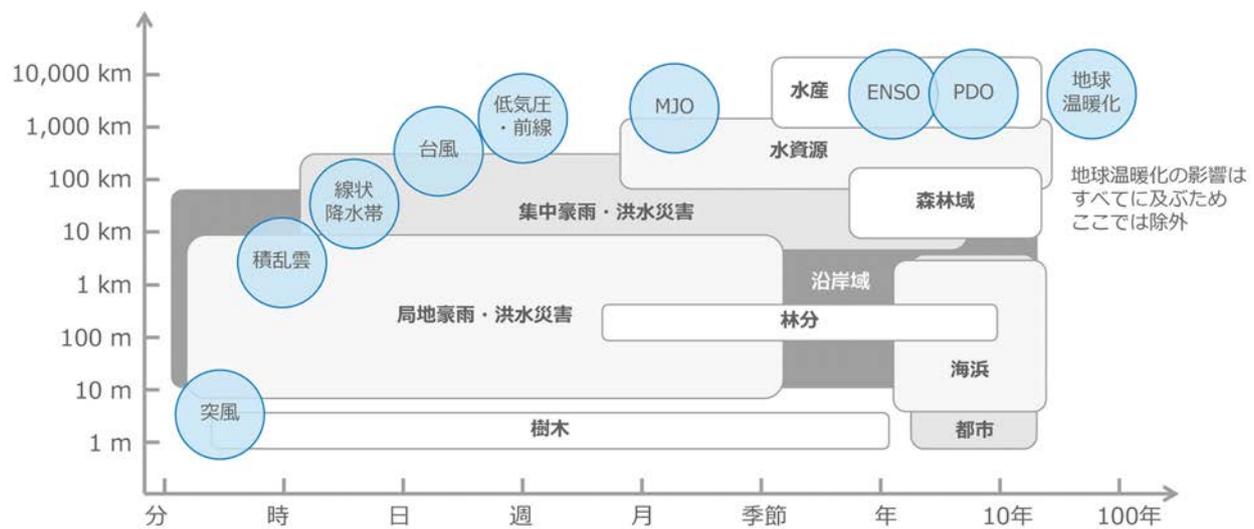


図5 数週間から十年スケールで想定される影響評価対象の時間的・空間的な広がり²⁴

新たなビジネスの創出

気象や気候変動のリスクは公共部門のみならず民間の幅広い業種にも影響を及ぼし得る。従来は気象を中

23 日本損害保険協会（2021）日本損害保険協会ファクトブック2021

24 JST-CRDS（2021）科学技術未来戦略ワークショップ報告書「中長期の自然災害・気候変動リスクに対応する気象・気候予測の今後」から京都大学 防災研究所 竹見哲也教授ご発表資料を基にJST-CRDSにて図作成

心に考えられていたが、今後は気候変動の影響によりこれまでとは異なるパターンで発生するかもしれない自然災害や環境変化を考慮した対応が求められることになる。加えて民間事業者はTCFDへの対応として気候変動リスクに関する情報開示が新たな喫緊課題となっている。例えば各地に存在する工場が今後どういった気候変動リスクに晒される可能性が高いのか、それを踏まえてどのような経営戦略を立てるのか等が求められることになる。我が国では東京証券取引所の市場再編により新たに設置されるプライム市場でTCFDに基づく情報開示が求められる予定にもなっている。

こうした背景から、従来の比較的短期の予測のみならず、より長期の予測や影響評価ニーズが急速に高まっている。またその結果として「気象・気候サービス産業」とも言える領域の動きが活発化している。特徴的なのは、予測や影響評価に関する最新の科学技術に基づくサービスを提供する新興企業が多数出現している点である。大学発ベンチャーもあり、大企業による買収、出資・提携等も行われている。一例を以下に示す。

- **Gaia Vision²⁵**：2021年創業の東京大学発ベンチャー。洪水シミュレーション技術と気候学・水文学の知見に基づくサービスを提供
- **RisQ²⁶**：2016年創業のノース・イースタン大学発ベンチャー。全米科学財団（NSF）の助成（SBIRフェーズI、フェーズII）を活用して創業・製品開発。降水予測モデルをベースにした地域スケールの気候リスク評価と気候学・経済学・防災工学等の知見に基づくサービスを提供
- **Jupiter Intelligence²⁷**：2018年創業のベンチャー企業。当初はNSFや米国航空宇宙局（NASA）の助成を受けた研究開発も実施。地球システムモデルとダウンスケーリング技術を使って数時間～50年超の時間スケールをカバーした地域レベルの気候変動リスク分析サービスを提供

数週間から十年スケールの予測や影響評価に関する科学的知見や技術は、こうした新産業創出の基盤となり得る。モデルそのもののみならず、モデルの高度化に繋がる個別の物理プロセスの解明やモデルへの反映、新規計算手法、データ同化技術やダウンスケーリング技術等、各種要素科学技術も重要なパーツとなり得る。

また多様な観測データや、作成されるデータセット（例えばd4PDFのような気候予測データセット）、データ解析基盤や解析ソフト等も重要な共通資産となる。計算機や情報処理機器の性能が大幅に向上したことにより、個別の機関や研究室でも大量のデータを扱った研究が可能になっている。しかし大規模または高精度な予測や解析を行おうとすればやはり膨大な計算資源が必要になる。また有用な解析ツールを有しなければ豊富なデータを十分に活用できない。これらが律速とならないよう、データ利活用のための環境整備も新たな産業創出に不可欠な要素と認識する必要がある。

Society 5.0 実現への貢献

日本政府は第6期科学技術・イノベーション基本計画においてSociety5.0の実現を掲げている。「人間中心の社会」という価値観の下、社会のあらゆる側面で「サイバー空間とフィジカル空間の融合」を目指すとしているが、本プロポーザルはまさにこの考え方に合致するものである。

本プロポーザルが目指すのは、観測から得られたフィジカル空間のデータを使って、サイバー空間におけるシミュレーションを通じて予測や影響評価を行い、その結果を再びフィジカル空間に戻して実際の対策に活かそうというものである。予測情報を最大限活用して、自然災害と気候変動リスクに適応的に対応する持続可能で強靱な社会の実現に貢献する。

25 <https://www.gaia-vision.co.jp/>（2021年2月アクセス）

26 <https://www.risq.io/>（2021年2月アクセス）

27 <https://jupiterintel.com/>（2021年2月アクセス）

EUは「Destination Earth Initiative (DestinE)」というイニシアチブを通して今後数年間で気候変動、自然災害、エネルギー、農業分野を想定した予測と影響評価のためのモデル（デジタルツイン）開発に取り組むとしている。更にデジタルツインをデータ利活用プラットフォーム（クラウド環境、データベース、ハイパフォーマンス・コンピューティング）と連結させることで幅広いユーザーが使える共通資産にすることを目指している。この取組みは極めて野心的かつ魅力的だが、当然ながらEUへの貢献を念頭に置いている。例えば観測データは欧州の気象・気候に重要な影響を及ぼす現象に関するものが充実している。そのため日本がこのシステムをそのまま利用するという考え方は妥当性に乏しい。EUとの連携・協力やノウハウの共有等は全面的・積極的に行う必要があることに疑いの余地はないものの、DestinEを日本のプラットフォームにするという考え方は現実的ではない。自国のためのプラットフォームはやはり自国で構築する必要がある。

アジア太平洋地域における日本の貢献

気候変動適応計画（平成30年11月）には気候変動等に関する国際連携の確保および国際協力の促進が記されている。具体的には科学的知見に基づく適応計画策定のための情報提供、日本の事業者による適応ビジネス国際展開支援、多様な国際協力スキームの活用による技術協力推進が挙げられている。これに基づき各種の取組みが行われているが、ここで重要な基盤となるのが科学的知見、すなわち予測と影響評価である。とりわけアジア太平洋地域では予測と影響評価に関する十分な技術やノウハウを有しない国もあり、我が国から積極的に支援が行われている。こうした支援のベースには気候変動に関する予測と影響評価があるが、時間的・空間的スケールにはギャップがあり、現状の技術や解像度の範囲で対応しているのが現状である。こうした中、今後、数週間から十年スケールの予測が実現し、その情報がローカルなスケールの影響評価や対策立案に繋がっていくようになれば、これまで以上に信頼度の高い情報に基づく協力が可能になり、結果としてアジア太平洋地域への日本の貢献がこれまで以上に強まると期待される。

2.3 科学技術上の効果

地球システム科学の進展

数週間から十年スケールの予測精度向上のためには当該時間スケールで支配的な変動要因の理解を深め、モデルに適切に取り込む必要がある。例えば数週間から数か月のスケールではマッデン・ジュリアン振動、十年規模では中緯度海洋の変動などが対象になる。観測や実験などを通してこれらの現象の理解を深め、必要十分な精度で予測モデルに取り入れることにより、複雑な地球システムの理解が一層深まることになる。

2021年のノーベル物理学賞が眞鍋淑郎氏に授与されたように、予測モデルは今や人類にとって不可欠な基盤技術となっている。地球システムという複雑なシステムを熱力学や流体力学といった基本原理を基に再現することで、地球温暖化のような人類の生存にとって重要な現象の将来変化に関する定量的な情報や知識を生み出す。予測に必要な科学的知見や技術を予測モデルという形で総合化していく地球システム科学はいまや現代社会に不可欠な学問分野となっている。このとき重要なこととして、基本的な物理法則だけではなく、自然現象の多角的な理解や数理学・計算科学技術的な探究が信頼度の高い予測を支えているという点がある。日本で開発された気候モデルMIROCの正式名称は「Model for Interdisciplinary Research On Climate」であり、予測モデルが学際的な研究によって成り立っていることを端的に表している。

また予測情報は利用されて初めてその社会的意義が認められる。しかし気象予報や気候変動予測はそのままでは専門性の高い情報に過ぎず、それを変換するプロセスが必要になる。そこで必要になるのが影響評価や対策立案に係る研究開発である。よって影響評価や対策立案に係る研究開発も広義の地球システム科学の一部である。影響評価や対策立案に係る研究開発は、モデルに基づく予測情報を社会で利用可能な情報へと

変換するプロセスを担うため、理工学的な研究だけではなく人文・社会科学的な研究も重要になる。例えば水文学は中心的な研究領域の1つだが、その水文学では「Sociohydrology」という言葉が最近注目されている²⁸。自然と人間社会の間の共進化関係を重視した学問が育ちつつあるという。

次世代予測モデルの開発

本プロポーザルには次世代予測モデル開発への挑戦も含まれる。1つの方向性は地球システムモデル化である。一般的に予測モデルは大気もしくは大気と海洋を結合したモデルが中心だが、これに地球化学的なプロセスや海洋・陸域生態系の状況等を加えたものが地球システムモデルである。扱う地球システムのコンポーネントが増えるため一層複雑なモデルになるが、多様なユーザーニーズに応えるため、地球システムモデル化が世界的な潮流の1つになっている。もう1つは高解像度モデルの気候モデル化である。従来、高解像度モデルは数週間先までの予測が中心である。それは計算機資源の制約の他、より長期の予測に重要となってくる雲の生成・発達・衰退・消滅の時間変化がモデルで十分表現できていないことが課題の1つとなっている。こうした課題を克服することによって従来の気候モデルを超える高解像度で、かつより長期の予測が可能になると期待されており、欧米でも積極的な研究開発が展開されつつある。

数理学・情報科学技術と気象・気候分野の連携強化による相乗効果

1960年代以降でカオス研究において数理学と気象学の相互交流が行われ、数理学と気象学それぞれの分野で科学的進展が見られた時期があった。同様の数理学ならびに情報科学技術と気象・気候分野の連携強化の余地は各所にある。地球システムという複雑なシステムを物理現象として要素還元的に理解していくだけでは全てを解き明かすことは困難である。一方、数理学の研究者にとって気象・気候分野は魅力的な対象になり得るものの、気象・気候に関する知識が必要になるため容易に取り組むことはできない。この両者の連携強化を進めることができれば、双方の分野にとってメリットのある相乗効果が生まれると期待される。

日本の気象・気候研究の強化

日本は、本プロポーザルが対象とする数週間から十年スケールの予測において、世界と伍する研究を行うポテンシャルを十二分に有している。効果的な推進によって研究を大きく飛躍させ、次世代研究者を育成していくことができれば、気象・気候分野の研究の中長期的発展に繋げていくことができる。しかし各国が気候変動リスクへの懸念から本分野の研究開発に投資を行い研究を活発化させている状況下では、国による強力な後押しがなければ、徐々に世界に差を作られてしまいかねない。

日本は気候変動予測分野の研究開発に強みがある²⁹。大学や公的研究機関による気候モデル・地球システムモデルの開発は90年代以降で急速に進んだ。過去約20年の累積文献数では欧米中に続き上位10か国に含まれる。予測精度向上に影響を及ぼす大気や海洋の現象の機構解明に関しても精力的に研究が行われている。IPCCの評価報告書作成にも貢献している。最近では防災分野など気候変動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も盛んになってきており、気候変動予測に関する科学的知見を適応策や緩和策の立案に活用する素地もできつつある。

2000年代には世界に先駆けて高解像度モデルの開発も行われた。数週間から数か月スケールの予測で重要な現象であるマッデン・ジュリアン振動の詳細な再現等が可能になり、この分野で世界をリードしていた。

28 Di Baldassarre *et al.* (2019) Sociohydrology: Scientific Challenges in Addressing the Sustainable Development Goals, *Water Resources Research* Vol.55, pp. 6327–6355

29 JST-CRDS (2021) 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野 (2021年)「気候変動予測」領域 JST-CRDS (2021)

しかし近年は欧米で活発に研究開発が行われつつあり追い上げが懸念されている。

応用分野別で言えば水循環（水資源・水防災）分野で世界的にも優位な立ち位置にある³⁰。水文モデルの地域社会や経済活動への利用等が急速に進んでいる。地方自治体と大学・国研との学官民連携や気象分野との連携で水防災のための応用研究も行われている。ダム有効活用に関する基礎研究、柔軟運用や連携運用では世界をリードしている。

2

意義
研究開発を実施する

30 JST-CRDS（2021）研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2021年）「水循環（水資源・水防災）」領域

3 | 具体的な研究開発課題

この章では、数週間から十年規模のスケールの予測の実現に向けて今後取り組むべき研究開発課題の詳細を説明する。はじめに各研究開発課題の位置づけを説明し、その後、個々の課題を説明する。研究開発課題は「予測」「影響評価」「データ・解析基盤」の3つの柱で構成される（図6）。

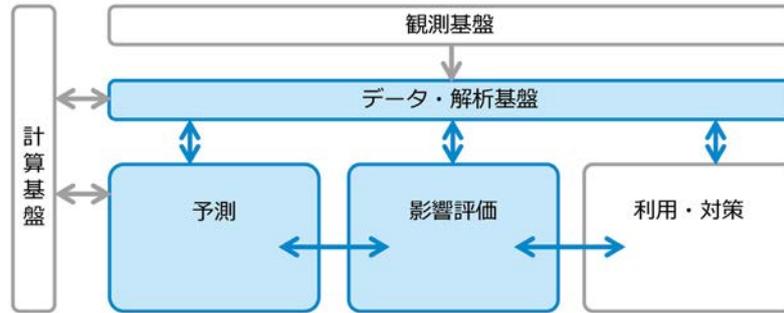


図6 研究開発課題間の関係性

3.1 各研究開発課題の位置づけ

「影響評価」や「対策」を行うためには「予測」からの情報が必要になる。そのためまずは「予測」の研究を進め情報を充実させる必要がある。2章で述べたようなこれまでの蓄積を基にして研究開発を展開していくことが妥当と考えられる。一方で全体としては「予測」「影響評価」「対策」それぞれが連動するよう研究を進めていくことが望ましい。すなわち「影響評価」に関しても、十分な予測情報がまだないことを前提に、先を見通した研究開発課題の設定が必要になる。具体的には、どのようなデータが必要になるのか、どのような評価ができるのか、どう「対策」に繋げていくかといった検討をまずは深掘り・発展させていく必要がある。これまで「影響評価」の研究は防災・減災を目的とした直近の極端気象に対する準リアルタイムなハザード予測やリスク評価、もしくは50～100年先の気候変動影響の予測・評価が主な対象だった。これらを通じて培われた技術や知見を活かすことにより、新たな時間スケールを対象とした研究にも効果的・効率的に取り組むことが可能と期待される。

なおこれら一連の研究開発を進めるためには、それを支える「観測基盤」、「データ・解析基盤」、「計算基盤」の存在も不可欠である。

「観測基盤」とは衛星観測、地上観測、海洋観測等の観測インフラである。日本独自の観測インフラもあれば国際連携によるものも含まれる。観測により得られるデータは人類の共通資産であり、他国の観測インフラによるデータも一部はオープン化されており利用可能である。観測技術の高度化や観測網の強化によって観測データは増加の一途をたどり、予測の向上にも大きく貢献している。しかしそもそも観測対象である地球は大きく、観測すべき項目も多様であるため、地球環境の状態把握や将来予測に必要な観測データは依然として十分ではない。その一方で衛星観測や海洋観測となれば費用も膨大になり機会は限られる。地上観測の拡充も面的に展開しようとするならば容易ではない。従って観測インフラの構築・維持には国際連携の枠組みも活用しながら国が計画的かつ継続的に関与することが不可欠である。

「データ・解析基盤」には、観測や予測等から得られるデータを収集・蓄積する大容量のストレージと解析空間、さらに各地のデータセンターやスーパーコンピュータと高速にデータ通信を行うネットワークが含まれる。我が国の地球環境に関するデータ・解析基盤として代表的なものには「データ統合・解析システム（Data Integration and Analysis System、DIAS）や気候変動適応関連の「気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）」がある。

「予測」や「影響評価」では膨大な観測データや予測データを必要とするため、高度なデータ・解析基盤が不可欠である。しかし既存のデータ・解析基盤には様々な種類のデータがそれぞれ異なるデータ設定で保管されており、それらデータの利用に習熟していないユーザーにはこれらを使いこなすことが困難であるとの指摘もある。従ってデータ・解析基盤の使い勝手を向上させ幅広いユーザーにとって使いやすい基盤に改善する必要がある。また今後新たに数週間から十年スケールの予測を実施することになれば、膨大な予測データが新たに創出されることとなり、それらを保管する大容量ストレージの確保も必要になる。予測データや影響評価の情報を活用する自治体や事業者等の多様なユーザーにとっても使いやすいインターフェースや解析用アプリケーション等を提供することも求められている。こうしたデータ・解析基盤のデジタルトランスフォーメーション化は「予測」や「影響評価」と並んで重要課題である。実際に欧州ではコペルニクスプログラムという長期にわたって続けられている地球観測プログラムの一環としてデータ・解析基盤の高度化を目指す取り組みが進められている。これを通じて汎欧州的なデータ利活用プラットフォームの構築を目指している。こうした状況を踏まえ、本プロポーザルでもデータ・解析基盤に取り組むべき研究開発課題の1つに取り上げることとする。

「計算基盤」にはデータセンターやスーパーコンピュータ等が含まれる。予測では膨大な量の計算を行う必要があり計算基盤が不可欠である。我が国では世界最高性能の「富岳」が稼働し、先代の「京」と同じく気象・気候分野の研究にも大きく貢献している。大学や研究機関にもスーパーコンピュータが導入されつつあり、国として計算基盤の底上げが進んでいるともいえる。計算基盤の開発・整備と予測研究の推進は連携させることが不可欠である。実際に米エネルギー省ではEnergy Exascale Earth System Model(E3SM)プロジェクトにて2027年稼働予定のエクサスケールの計算機を前提とした新しい気候モデル開発を推進中である。同プロジェクトは100億円規模であり米国内の気候モデル関連プロジェクトの中でも群を抜いている。

3.2 予測

3.2.1 気候モデル

数週間から十年スケールの「予測」を行う上で気候モデルの開発は重要課題の1つである。我が国では1990年代から2000年代にかけて大学と公的研究機関が中心となって気候モデル開発が集中的に行われた。当時開発されたモデルには、数km程度の高解像度で全球の大気大循環を表現する大気モデル（例：全球雲解像モデルNICAM）、数百kmの解像度で全球の気候システムを表現する大気海洋結合気候モデル（例：MIROC）、大気海洋結合モデルに炭素循環やそれに関わる生物・化学的過程等を統合した地球システムモデル（例：ESM）、エアロゾル・気候モデル（例：SPRINTARS）、化学・気候結合モデル（例：CHASER）等がある。

世界最高性能（当時）の計算機である地球シミュレータを原動力にしてモデルの開発・高度化やモデルを使った気候研究が行われた結果、わが国の気候分野の研究は世界に伍するレベルへと飛躍的に発展した。現在もこれらを用いた予測や気候研究はIPCCをはじめ国際的な取組みに大きく貢献している。またこれらのモデルの高度化のための研究開発は現在も精力的に行われている。本プロポーザルが着目する数週間から十年規模のスケールの予測でもこの技術基盤を最大限活用することが効果的な研究開発の推進に必要である。

なおモデル開発はモデルそのものの高度化だけで完結するものではなく、観測や実験、現象解明、データ同化、その他のデータ解析手法等に係る研究開発と相互に連携して進められる。本プロポーザルではそれら全てに係る課題を網羅的に示すことはせず、代わりに技術の総体としてのモデル開発を中心に課題を整理することとする。

3.2.2 考えられる2つのアプローチ

数週間から十年規模のスケールの予測へのアプローチは、マルチモデルでカバーする形が想定される。すなわち、対象とする時間スケールをある程度区切って複数のモデルを用意し、全体として幅広い時間スケールをカバーするという方向である。具体的には「数週間から1年スケールの予測」と「数年から十年スケールの予測」の検討を並行して進める形が考えられる。

「数週間から1年スケールの予測」は水資源、漁業、猛暑対策等への応用が期待される。現業機関におけるこのスケールの予測は比較的解像度の高い場合（約20km）で10日程度であり、予測期間が1か月～数か月程度に延びると計算機リソースの制約から解像度は粗くなる（約40～55km）。しかし高解像度のまま予測期間を延ばすことができれば、地域レベルでよりきめの細かい対策検討に予測情報を活かすことが可能になると期待される。計算機リソースは重要な制約要因だが、米国エネルギー省がエクサスケールの計算機を前提としたモデル開発を進めているように、中長期的観点からはその制約にとらわれない挑戦的な研究開発を進めておくことが国として重要な対応であると考えられる。

高解像度の予測には高性能計算機が必要であり、実用化（現業化）を見据えるならば計算コスト軽減のための計算科学技術的検討も必要となる。また、長期的にはより複雑なモデルである地球システムモデルへの発展も見据える必要がある。その場合、大気に限らず、地球システムの他のコンポーネント（海洋、海氷、エアロゾル等）のモデル開発や、シミュレーションと観測の統合（データ同化）の検討も望まれる。

「数年から十年スケールの予測」は集中豪雨や降雨災害、漁業等への応用が期待される。十年規模予測に関する研究開発は文部科学省の気候変動研究のプログラムを通じて15年ほどの蓄積がある。予測精度や予測期間を着実に延ばしており、数年先の予測が可能になってきている。今後はその予測期間や精度を更に延ばしていく必要がある。ただし水平解像度が100kmのオーダーであり、地域スケールの具体的な対策等につなげていくための情報としてはまだ粗いと言わざるをえない。ダウンスケーリングを行う等、予測情報の利活用の観点からの検討も今後は重要になる。

またこのスケールの予測では長期トレンドとしての気候変動に加えて地球システムが持つ揺らぎ（内部変動）を考慮することが重要になる。気候変動は着実に進むものの緩やかな変化であり、10年程度では顕著な変化が見えにくい。むしろ内部変動による変化幅のほうが大きい場合もある。従って予測に対する内部変動の重要性の理解を深め、予測に反映させることが重要になる。更に、こちらにおいても、気候モデルから地球システムモデルへの発展による予測項目の多様化が検討されている。特に気候変動緩和への貢献としてCO₂濃度やエアロゾル等の短寿命気候強制因子（SLCFs）等の予測は近年ニーズが高まっている。

3.2.3 分野横断的な研究

「予測」と「影響評価」の連携強化は複数の取組みを通じて進めていく必要がある。研究を通じて実施すべきものとしては、予測可能性の体系的レビューが挙げられる。まず、現在の予測モデルでどのようなことがどの位の精度や解像度で予測可能か、将来的にはどこまで可能となるか等の整理が求められる。更にそれらをどう「影響評価」に利用できるか、あるいは社会利用までつなげられるのかを体系的にレビューする研究が必要である。また3.3で後述するように「影響評価」に有用なデータセットの作成も必要な研究開発課題である。これらは「予測」と「影響評価」の双方にとって有益な取組みになるのみならず、相互理解や意思

疎通の促進にも繋がると期待される。

数理学・情報科学技術分野との連携強化のための取組みも必要である。地球システムという複雑なシステムを気象・気候分野の観点からのみで全て解き明かそうとするのは困難である。膨大な観測データや予測データの中に潜む複雑な数理構造を明らかにするような、数理学・情報科学技術的なアプローチが必要である。しかし数理学・情報科学技術分野の研究者にとっては気象・気候に関する専門知識の不足が当該分野への参入障壁になっている。これらを解消するためには、双方の分野の研究者が参加可能な共通の研究課題設定を行うことが有効であろう。例えばデータ同化に関する研究では気象・気候分野と数理学分野の連携が近年顕著である。AI応用でも共同研究事例が散見される。こうしたいくつかの共通課題領域を対象に連携強化の実績を積み上げていくことが当面は必要な方策と考えられる。その上で中長期的には、より大きな挑戦的な共通課題を設定し、その下で連携研究を推進していくことができれば、両者の連携はより持続的な関係性に成熟していくと期待される。

3.2.4 研究開発課題

以上を踏まえ、今後取り組むべき研究開発課題例を示す。

〈数週間から1年スケールの予測〉

- ・雲解像モデルの高度化（例：雲微物理スキームの高度化、山岳表現の精緻化や陸面モデルの精緻化、放射スキームの高度化）
- ・異なる時間スケールのモデルの相互乗り入れによる予測（例：気候モデルのグリッドの中の物理過程を高分解能な雲解像モデルに置き換えるスーパーパラメタリゼーション、大気中の粒子系（エアロゾル・雲）をシームレスに表現するモデルの開発）
- ・地球システムモデル化（例：季節内～季節スケールの予測に用いる陸・海洋・海氷・エアロゾル等の地球システムコンポーネントのモデルの精緻化、各コンポーネントにおけるデータ同化手法の開発）

〈数年から十年スケールの予測〉

- ・気候モデルの高度化（例：衛星データの活用、陸面モデルの精緻化）
- ・観測データの収集・解析と数値実験による、地球システムが持つ揺らぎ（内部変動）の機構解明と予測への反映（例：エアロゾルの排出量変化、土地利用に伴って変化する砂じんダスト、太平洋十年規模変動や大西洋数十年規模変動）
- ・気温や海水温等だけでなく多様な地球システム変数の予測（地球システム予測）（例：炭素循環に関する観測データ収集、モデルにおける生物地球化学的過程の改善、CO₂排出量ベースの予測）

〈「影響評価」との連携強化〉

- ・過去データの解析・予測（例：領域再解析、過去の変動の予測実験（ハインドキャスト））
- ・内部変動の理解や影響評価に利用可能な大規模アンサンブル数値実験
- ・予測可能性の体系的レビュー（例：現在の予測モデルの性能俯瞰、既存の予測データ・予測技術と利用ニーズのマッチング・実用性検証、利用視点からの予測データ要件の抽出・定義）

〈数理学・情報科学技術と気象・気候研究の連携強化〉

- ・カオス、統計、偏微分方程式等の共通課題研究（例：トポロジカルデータ解析、確率微分方程式による流体乱流統計法則の解明、多重スケール現象の縮約、突発性現象の予測、レアイベントの数理、AI技術の活用）

コラム

欧米で進められている予測モデルの研究開発プロジェクト

本プロポーザルが対象とする数週間から十年スケールを含む、幅広い時間的・空間的スケールをカバーする予測モデルの開発は欧米を中心に精力的に進められている。関連するプロジェクト例を以下に示す。

Destination Earth Initiative (2021年～)

EUが欧州グリーンディールとデジタル戦略の一環として推進するイニシアチブ。複数のデジタルツインから構成される地球システムモデルの開発を目指す。自然環境や人間活動のモニタリングやシミュレーション、将来社会シナリオの検証、各種政策的意思決定への活用等を想定。地球観測データの収集・蓄積・利活用に係るコペルニクスプログラムとも連携し、統合的な基盤を構築する。2024年までに「自然災害」と「気候変動適応」に関するデジタルツインの開発とデジタルプラットフォームの構築、2027年までに「海洋」、「生物多様性」、「スマートシティ」等のユースケースに対応するデジタルツインの開発、2030年までにそれらを統合した完全なデジタルレプリカの構築を目指す。

NextGEMSプロジェクト(2021～2024年)

EUの研究開発・イノベーション枠組みプログラムHorizon2020(2014～2020年)の採択課題。独マックスプランク気象研究所と欧州中期予報センターが中心となり欧州内の26機関が参加する研究コンソーシアム。十年スケール(30年)の予測を高解像度かつ全球規模で行う地球システムモデルの開発を目指す。

Energy Exascale Earth System Model、E3SM(2019～2022年)

米エネルギー省(DOE)のプロジェクト。DOE傘下の複数の国立研究所が参加。十年から世紀スケールの予測を高解像度かつ全球規模で行う地球システムモデルの開発を目指す。2027年稼働予定のエクサFLOPSの計算機を使って動かすことを目指す。現在は第二期。

Cooperative Institute for Modelling the Earth System、CIMES(2018～2023年)

米海洋大気庁(NOAA)が行う、アカデミアや非営利機関との連携枠組みNOAA Cooperative Institutesの採択課題。プリンストン大とNOAA地球物理流体力学研究所が連携して実施。数日から世紀スケールまでの予測を高解像度かつ全球規模で行う地球システムモデルの開発を目指す。研究開発のみならず教育やアウトリーチにも注力する。

EarthWorksプロジェクト（2021～2025年）

全米科学財団（NSF）のCyberinfrastructure for Sustained Scientific Innovation（CSSI）プログラムの採択課題。コロラド州立大とアメリカ大気研究センターの共同研究。数年から十年スケールの予測を高解像度かつ全球規模で行う地球システムモデルの開発を目指す。

3.3 影響評価

3.3.1 データセットの作成・解析

「影響評価」を行うためには「予測」の情報が必要になる。それらは気候予測データセット（または気候シナリオ）と呼ばれる。例えば「日本全国1km地域気候予測シナリオデータセット（農研機構地域気候シナリオ2017）」や「CMIP5をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ」が環境省の気候変動適応に関する研究プログラムで活用されている。文科省の気候変動リスク情報創生プログラム（2012～2016年度）で作成された「d4PDF（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）」は集中豪雨や台風などの極端現象の将来変化を、確率的に、かつ高精度に評価することを可能にするものとして自然災害、水文、都市計画、農業、健康、保険等の様々な分野へ浸透しつつある。気候予測データセットは温室効果ガス排出シナリオの世界的な標準であるRCPシナリオ（代表的濃度経路）に基づく未来、もしくは全球平均気温が産業革命以降2°Cまたは4°C上昇した未来の気候状態についてのシミュレーション結果である。ただし全球規模のシミュレーション結果のためメッシュが比較的粗い。そのため地域スケールの影響評価に利用できるよう、力学的もしくは統計的なダウンスケーリングの手法を使って空間的に高解像度化される。こうして作成された気候予測データセットは「影響評価」を行うにあたって今や欠かせない共有データ資産となっている。

一方、既存の気候予測データセットは気候変動に伴う長期的な変化や影響を調べることを目的として作成されているため、より近い未来を対象としたデータセットはまだ存在しない。しかし気候変動リスク、特に物理的リスクを定量的に把握し経営戦略に組み込む必要が今後生じる産業界からは、数年先あるいは十年規模の気候予測データセットが必要とのニーズが提示されている。これは地方自治体にとっても同様の関心事項であると考えられる。こうしたニーズに応えるべく、近い未来を対象とした「影響評価」に利用可能なデータセットを新たに作成することが望まれる。しかしそのためにはまずどのようなデータセットを作成すべきかの検討が必要である。近い未来では長期トレンドである気候変化のシグナルが弱いという問題が指摘されており、その考慮も必要である。従って「予測」の側の研究者との連携により進めていくことが望まれる。またその際にはダウンスケーリングやシミュレーション結果のバイアス補正等も含めた全体的な検討が求められる。

気候予測データセットは基本的に将来変化についてのデータセットだが、過去データに基づくデータセットの作成・利用も「影響評価」を行う際の有用な手段となっている。過去の観測データを最新の予測モデルとデータ同化システムを使って解析し直したものを「再解析データ」と呼ぶ。再解析データを使うことで過去に起きた気象現象とそれによる社会や自然への影響を詳細に分析することが可能になり、将来に向けた対策検討等にも活用できる。従って今後は数週間から十年スケールの変化に関しても再解析データの作成、解析を進める必要がある。

3.3.2 ハザードの予測

自然災害や気候変動のリスクの大小は「ハザード」、「ばく露」、「脆弱性」の3つの要素によって決まる³¹。これらのバランスを定量的に評価し対策立案や意思決定に繋げることが「影響評価」の目的である。

このうち「ハザード」の予測にはモデルが利用される。例えば洪水流出予測モデル、河川氾濫モデル、土砂災害予測モデル、高潮・波浪モデル等のハザード予測モデルがある。これらは物理プロセスに基づいているため、対象とする現象（災害メカニズム）の理解等に基づくモデルの精緻化・高度化が課題になる。その際、50～100年先の予測と比べると数週間から十年規模のスケールは近未来であり、長期トレンドである気候変動のシグナルは弱くなる。その代わりに地球システムが持つ揺らぎ（内部変動）の影響が強まる。そのため気温や水温の上昇等の平均的な変化に加えて内部変動による影響も考慮したハザード予測の検討が必要となる。

具体的な応用先としては、例えば季節スケールの変動では漁業に影響を与える海面水温や生物化学過程（海洋酸性化に影響）、水資源管理、猛暑による農業や健康（熱中症）への影響等が考えられている。また数年から十年規模の変動では集中豪雨や降雨災害に関連して梅雨前線の北上、梅雨集中豪雨の規模や頻度、台風の規模や頻度、台風による高潮、高波、平均波高、平均海面等への影響、さらに漁業に影響を与える海面水温などへの影響が考えられている。

3.3.3 ばく露と脆弱性の定量化、リスク低減

「影響評価」にはハザードのみならず「ばく露」の大きさ（人口や建造物の数等）と「脆弱性」の大きさ（災害対策のためのインフラ整備有無等）の定量化も必要である。例えば洪水、河川氾濫、土砂災害等のリスクの定量化では人口減少の進展や居住の変化等の考慮が必要になる。また現存の物理資産（建造物）のデータも必要になる。こうした社会構造の現状や将来変化を踏まえた評価を実施できるようデータ整備や研究開発を進めていくことが求められる。

人間活動の変化は巡り巡って気象・気候にも変化をもたらす。代表的なものは温室効果ガスや大気汚染物質の排出、あるいは土地利用の変化である。これらは人為起源の気候変化をもたらす主要因であり、長期的には「予測」の結果にも一定の影響をもたらす可能性がある。気候変動リスクへの対応が喫緊の課題となるなか社会の動きは活発化しており、その社会変化を「予測」や「影響評価」に組み込むための検討は今後重要性が増すと予想される。

なお「ばく露」や「脆弱性」の把握はリスク低減方策にも生かすことができる。例えばハザードマップと関連づけた規制・制度をインセンティブにしたばく露低減方策や、生態系を活用した防災・減災（Ecosystem-based disaster risk reduction、EcoDRR）あるいは流域治水による脆弱性の回避等がある。これらに係る手法開発や期待される効果の推定等を研究として深めていくとともに、社会実装に向けた検討が必要になる。

3.3.4 様々なセクターとの協同

数週間から十年スケールの予測に対する社会からのニーズは高い反面、研究者とユーザーの間には認識の違いがある³²。研究者が考える有意義・有用な予測情報とユーザーが真に必要とする情報は必ずしも一致していない。科学と社会のはざまにある本分野ならではの課題とも言えるが、今後はこうしたギャップをいかに埋めていくかを研究者側の問題としても考えていくことが必要である。

31 IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability

32 高数ら (2021) 気候変動の予測情報を利用者まで届けるには, 水文・水資源学会誌 Vo.34 No.6, pp. 263–271

具体的には、数週間から十年スケールの予測に対する社会活動視点（利用者視点）からの期待やニーズの深掘りを進める必要がある。研究者側が提供可能あるいは科学的に意味があると考えられる情報は必ずしも利用者にとって必要または有用な情報ではない。一方で利用者自身も実際にどのような情報が必要なのか必ずしも明確になっていない。こうした両者の間のギャップを埋める方策が必要である。数週間から十年スケールの予測について、どのようなことが予測でき、どのような情報が提供できそうなのか、またその情報はどのように社会利用できるのか、といったことを明らかにしていく取組みが必要である。また、天気予報のような決定論的な予測ではなく確率論的な予測になることに注意を払う必要がある。予測情報を社会にどう伝え（リスクコミュニケーション）、どう利用するか（適応アプローチ）を学問的にも深掘りしていくことが必要である。個々のケーススタディを超えた体系化も必要になろう。これらを通じて予測の意義、限界や困難等を明らかにしていくことが、予測情報を最大限活かしていく上では必要になる。

3.3.5 研究開発課題

〈気候予測データの解析〉

- ・ 過去データの解析・予測（例：領域再解析、過去の変動の予測実験（ハインドキャスト））
- ・ 内部変動の理解や影響評価に利用可能な大規模アンサンブル数値実験
- ・ ダウンスケールやバイアス補正に係る新規技術開発（例：AIを活用した新たなダウンスケール技術の開発）

〈ハザード予測〉

- ・ 内部変動を考慮したハザード予測モデルの開発（例：季節変動、年々変動、十年規模変動）

〈影響評価、リスク低減〉

- ・ ばく露、脆弱性に関する基礎データの収集・解析、社会経済シナリオの開発
- ・ リスク低減方策に関する研究開発（例：インセンティブ設計、EcoDRR、流域治水）

〈多様なセクターとの協同〉

- ・ 予測可能性の体系的レビュー（例：現在の予測モデルの性能俯瞰、既存の予測データ・予測技術と利用ニーズのマッチング・実用性検証、利用視点からの予測データ要件の抽出・定義）【再掲】
- ・ 数週間から十年スケールの予測を前提とした社会科学的・防災工学的研究（例：リスクコミュニケーション）

3.4 データ・解析基盤

3.4.1 地球環境データ統合

地球環境に関する代表的なデータ・解析基盤である DIAS には最新の気候モデルによる予測結果や気候予測データセット（d4PDF）、ダウンスケールデータ、衛星観測や地上観測、海洋観測のデータ、再解析データ等の様々な種類のデータが保管されている。しかしそれぞれのデータが異なる設定で格納されており、新規ユーザーや自治体担当者、事業者等のデータの扱いに不慣れなユーザーにとっては必ずしも使いやすい状況ではない。このような問題を解決するため、今後は、異なる設定で格納されたデータを統一的形式で利用可能にするインターフェースの開発等を通じたデータへのアクセシビリティ改善の取組みが求められる。データを統一的に利用することができれば、例えば地球システムモデルの高度化にも貢献しうる生態系・生物多様

性関連データを追加する等、データベースの拡張も容易になると期待される。加えて、単にデータ形式を統一するにとどまらず、ユーザー層の拡大のため、データ活用を促進する汎用的な解析サポートツールや技術の開発も進める必要がある。これらを通じて、ユーザーの多様な取組みを積極的に支援できる基盤への更新が必要である。

データ利活用に関する取組みは欧米でも活発である。特に欧州ではコペルニクスプログラムという地球観測プログラムの一環としてデータ・解析基盤の高度化を目指す取組みを進めており、それを通じて汎欧州的なデータ利活用プラットフォームの構築を目指している。米国では大手IT企業も関与したクラウド環境の整備・普及が進んでいる。こうした動きを見つつ、日本としてもデータ・解析基盤の高度化を進める必要がある。

3.4.2 研究開発課題

- ・データベース間の相互運用性向上のための技術・システム開発（例：データを統一的な形式で利用可能にするインターフェースや汎用解析サポートツールの開発）
- ・研究利用と社会利用を前提とした使いやすさ向上のための技術・システム開発（例：データ連携やデータ利活用促進のための調査研究、技術開発）

コラム

欧州のデータ利活用プラットフォーム

EUは地球観測プログラム「コペルニクス（Copernicus）」を運営しており、その中で6つのデータサービスプラットフォームを無償提供している：気候変動（C3S）、大気（CAMS）、地上モニタリング（CLMS）、海洋（CMEMS）、危機管理（CEMS）、セキュリティ（CSS）。EU加盟国とその公的機関、自治体、民間セクターはこれらを介して地球観測データを利用可能である。一般利用者也各プラットフォームが提供するデータをネット上から閲覧することができる。

一方、このプラットフォームに関してはコペルニクスプログラムが保有するデータが膨大なため、処理・分析に使えるツールがなければデータをダウンロードしても十分に使いこなすことができない点が問題とされていた。そこでユーザー視点からより使いやすいデータプラットフォームを構築するためData and Information Access Services（DIAS）事業を2018年から新たに開始した。日本にもDIAS（Data Integration and Analysis System）と呼ばれるデータ統合・解析システムが2006年度から運用されているが、EUのDIASはこれとは別物である。EUのDIASは民間利用者が大量のデータをダウンロードし、自ら処理・計算等を行わずに済むよう、クラウド機能を提供している。サービスを提供する事業者は現在のところ公募で選ばれた5つの産学連携国際コンソーシアムである：CREODIAS（ポーランド、スロヴェニア）、SOBLOO（仏、ベルギー）、MUNDI（仏、独、伊、スロヴェニア）、ONDA（英、伊、仏、スロヴェニア）、WEKEO（仏、スロヴェニア）（表4）。

EUはDIASを通じて地球観測データの利用拡大の加速化、イノベーションの促進、

新しいビジネスモデルの創出を目指している。事業は2019年に開始しているがクラウド機能やサービス内容、特にクラウドを活用したサービス内容の改善は引き続き取り組むべき課題と認識されている。

表4 EUのDIAS概要

事業者	参加主体	利用するデータサービス
CREODIAS	Creotech Instruments S.A. (ポーランド人工衛星機器メーカー)、CloudFerro (ポーランドクラウドサービスプロバイダー)、Wroclaw Institute of Spatial Information and Artificial Intelligence (ポーランドデータ解析・人工知能技術研究機関)、Geomatys (仏地理空間情報処理サービスプロバイダー)、Eversis (ポーランド企業)、Sinergise (スロヴェニア企業)	CAMS (大気) CMEMS (海洋) CLMS (地上) CEMS (危機管理)
SOBLOO	ORANGE (仏通信大手)、AIRBUS (大手航空宇宙機器メーカー)、CAPGEMINI (仏IT大手)、CLS (仏国立宇宙研究センターCNES子会社)、VITO (ベルギー・フランダース技術研究所)	CMEMS (海洋) CLMS (地上) CAMS (大気) CEMS (危機管理) C3S (気候変動)
MUNDI	Atos (仏IT大手)、T-Systems (独デジタル関連企業)、Thales Alenia Space (仏人工衛星機器メーカー)、DLR (独航空宇宙センター)、e-GEOS (伊地理空間情報処理サービスプロバイダー)、GAF AG (地理空間情報処理サービスプロバイダー)、Sinergise (スロヴェニアGISソフトウェア企業)	CLMS (地上) CEMS (危機管理) CAMS (大気) CMEMS (海洋) C3S (気候変動)
ONDA	Serco Italia S.p.A. (英SERCOグループ宇宙関連製造サービスプロバイダー)、OVHcloud (仏クラウド企業)、GAEL Systems (仏データアクセス企業)、Sinergise (スロヴェニアGISソフトウェア企業)	CMEMS (海洋) CLMS (地上) CAMS (大気)
WEKEO	EUMETSAT (欧州気象衛星開発機構)、ECMWF (ヨーロッパ中期予報センター)、Mercator Ocean International (仏CNRS・FREMER・IRD・Meteo-France・フランス海軍が共同で設立した非営利法人)、Thales Alenia Space (仏人工衛星機器メーカー)、CloudFerro (ポーランドクラウドサービスプロバイダー)	CMEMS (海洋) CLMS (地上) CAMS (大気) C3S (気候変動)

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

4.1 予測と影響評価の連携強化

「予測」の情報が「影響評価」やその先の社会での利用に十分繋がっていないことは日本に限らず他国でも同様に問題と認識されている³³。自然を理解し予測できるようにするための科学研究としての探究は思いもよらない発見や気づきを与える一方で、それに基づき提供される予測情報は必ずしもユーザーにとって都合のよい形式ではない場合も多い。時空間分解能が粗かったり専門性が高い情報で理解が難しかったりするために、意思決定や合意形成に使えないとしばしば指摘されている。反面、原理的に困難であったり科学的には意味がないと思われるような予測ニーズがユーザー側から提示されたりすることもある。そこでは相互理解やコミュニケーションがうまくいっていないという問題が指摘されている。

こうした問題を解決するためには「予測」と「影響評価」の連携を強める必要がある。そのためには、従来のように“「予測」から「影響評価」へ”という一方向的な情報の流れではなく、双方向に情報、知見、アイデア等がやりとりされるような状況に変えていく必要がある（図7）。特に「予測」の側は「何がどの程度まで予測でき、どのような情報が創出できるのか」を整理し、「影響評価」の側は「どのようなニーズがあり、どのような予測情報があると使えるか」を整理することで、双方向的なコミュニケーションや協同が生まれやすくなると期待される。



図7 「予測」と「影響評価」の連携強化が必要

国が主導する研究開発プログラムを仮定すると、「予測」と「影響評価」の課題を同一プログラム内もしくは同一プロジェクト内で設定し、相互の連携を図るような働きかけが1つの方策としてあり得る。同一プログラム/プロジェクトであれば計画段階から共通的な課題設定を検討することができるという利点もある。

一方、単一のプログラム/プロジェクト内だけでは規模が限られてしまうという問題もある。連携強化を国内に広く浸透させるためには、「つなぎ」になるような仕掛けを複数展開していく必要もある。例えば気候予測データセットの創出は重要なつなぎである。過去データの解析・予測も基盤的なデータセットになる。シーズとニーズのマッチングを調査研究するような試みも新しい仕掛けとして考えられる。後述するような「予測」や「影響評価」に総合的に取り組む国内体制の構築も効果的と期待される。さらに、研究そのものではなくとも、ステークホルダー会議のような場の創出も有意義であろう。「予測」と「影響評価」にはそれぞれ研究

33 Porter & Dessai (2017) Mini-me: Why do climate scientists' misunderstand users and their needs?, Environ. Sci. Policy Vol.77, pp.9-14

コミュニティがあり、時間をかけて両者をつないでいくような仕組みづくりは中長期的な観点から極めて重要である。またステークホルダーには研究者だけではなくコアユーザーである自治体や事業者等も含まれる。防災、産業、都市計画等、多様なセクターどうしの相互理解やコミュニケーションを深める場あるいはネットワークを構築・成長させていくための息の長い取組みが望まれる。

4.2 国内研究開発体制の強化

「予測」と「影響評価」の連携をはじめ、気象・気候予測の研究開発には、従来の分野・領域の枠を超えた総合的な取組みが求められている。科学研究としても、地球システムの理解が深まるにつれて地球システムを構成する多様な要素とそれらの相互作用を総合的に扱う必要性が一層強まっている。高度化・複雑化する研究開発の潮流の中で我が国の研究力を一層高めていくためには、国内研究開発体制の抜本的な強化が必要である。本節ではそのための方策として以下に示す六項目を提案する。

- 分野横断的な研究体制の構築
- プログラム・プロジェクトレベルでの複線的な気候予測研究の推進
- 現業と研究の連携強化
- データ・解析基盤との共進化
- 気象・気候分野と数理科学・情報科学技術分野の交流促進
- 若手の積極登用

4.2.1 分野横断的な研究体制の構築

国内研究開発体制の強化方策として、「予測」と「影響評価」、それに基づく対応（適応）に関する研究開発に総合的に取り組む分野横断的な研究体制の構築が望まれる。気候予測の中では時間スケールを幾つかに区切って研究が行われている。一方、新たな挑戦として互いの知見や技術を持ち寄って相互乗り入れする形で研究開発を進めようとする動きも出始めている。「予測」と「影響評価」の連携を強化するための動きも拡大しつつある。こうした動きを更に後押しするためには、個々の研究プログラムやプロジェクトの枠組みを超えて知見やノウハウを共有し、研究成果の橋渡しや研究者どうしの連携等を深められるような組織的体制を作ることが効果的と考えられる。関連省庁による研究開発推進・支援がこれまで以上に有機的に繋がっていくための傘、あるいはハブ（結節点）を作る仕掛けとなることを目指す。その中では予測対象が異なる研究者が互いに知見や技術を持ち寄ることで、実質的にシームレスな気候予測の研究開発が可能になる。結果として我が国の気象・気候研究や気候変動適応研究に新たな展開をもたらすことができる。

かつて我が国では1990年代から2000年代にかけて大学と公的研究機関が中心となって気候モデル開発が集中的に行われた。それまで気候モデルの研究開発は現業機関である気象庁の気象研究所で行われていたが、文科省の測地学審議会（当時）での建議を基に1991年に全国共同利用研究施設として東京大学気候システム研究センター（CCSR）が発足し、大学と公的研究機関の連携による気候モデル開発が一気に進んだ。同時期に世界最高性能（当時）の計算機である地球シミュレータが稼働し、その利用との相乗効果もあった。結果として開発された気候モデルMIROCは気象庁の気候モデルと並んで日本を代表するモデルにまで成長し、現在もIPCCの評価報告書に貢献している。同様にエアロゾルを扱うモデルSPRINTARSもアジアを代表するモデルとしてIPCCの評価報告書に貢献している。気候モデルよりも格段に高解像度の大気モデルである全球雲解像モデルNICAMもこの時期に開発された。これらを通じて日本の気候研究は世界の中でも急速に存在

感を強めていった。また大学院生や若手研究者として当時研究開発を実質的に推進していた人材は現在は教授クラス、センター長クラスになり、日本における同分野の研究をけん引する立場になって活躍している。

CCSRが大きな成功を収めたのは、優れた人材が集まっていたことに加えて、気候モデルを作る研究組織という明確な目的意識や動機があったことが要因と思われる。具体的なミッションを志向する組織を作ることで、個々の研究者どうしの草の根的な繋がりを越えた推進力を組織に持たせることができたと考えられる。こうした過去の事例を参考に、国内の研究者や研究機関が一つの方向性に向かって効果的・効率的に研究開発を強力に進めていく体制の構築を模索することが必要である。

4.2.2 プログラム・プロジェクトレベルでの複線的な気候予測研究の推進

数週間から十年スケールまでの時間スケールの気候予測を研究開発プログラムやプロジェクトを通じて複線的に推進していく必要がある。方向性としては2種類考えられる。1つは横断的なテーマの下で自由な発想に基づく挑戦的な基礎研究を推進していく方向性である。もう1つはプログラムレベルで個別具体的な目標（プロダクト）を設定しその達成に向けた研究開発を推進していく方向性である。

以下に挙げる課題は3章で示した研究開発課題からの抽出である。これらは前者の方向性で優れた成果の創出を狙う形が望ましいと考えられる。

- 内部変動（地球システムが持つ揺らぎ）の気候解明と予測への反映
- シームレスな気候予測を可能にするモデリング技術の開発
- 時間スケールを跨いだ現象理解と予測への応用（例：雲、エアロゾル）
- 数理科学・情報科学技術と気象・気候分野の連携（例：トポロジカルデータ解析、確率微分方程式による流体乱流統計法則の解明、多重スケール現象の縮約、突発性現象の予測、レアイベントの数理、AI技術の活用）

後者の具体的な目標（プロダクト）を設定しその達成に向けた研究開発を行うものとしては、文科省の「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017～2021年度）（以下、「統合プログラム」と呼ぶ。）を具体事例として挙げるができる。気候モデル研究のナショナルフラッグシッププログラムとも言える同プログラムでは、「予測」のための気候モデルや地球システムモデルの高度化、ならびに「影響評価」のための技術開発等を進めてきた。またその一環として、十年規模予測の国際プロジェクト（DCPP）に対応した研究も進められてきた。統合プログラムは2021年度が終了年度となるが、今後の研究の方向性について議論される中において、十年スケールの予測をターゲットとした「近未来予測」が重要課題の1つに取り上げられている³⁴。こうした状況を踏まえ、数年～十年スケールの予測の一部は統合プログラムの後継での実施が可能性の一つとして考えられる。

ただしプログラムの規模等を勘案すると統合プログラムで数週間から十年スケールの予測に関連する研究開発の全てを賄うことは難しいと予想される。そのため他のプログラムも重要な政策ツールとなる。例えば以下に示すような研究開発テーマに取り組む必要がある。

34 第11期 環境エネルギー科学技術委員会（第1回）資料5-4-1 気候変動に関する検討会概要
https://www.mext.go.jp/content/20210812-mxt-kankyoku-000017252_11.pdf（2022年2月アクセス）

- 予測可能性の体系的レビュー
- 過去データの解析・予測（例：再解析、ハインドキャスト）
- 新規ダウンスケーリングやバイアス補正技術の開発（例：AIを活用したダウンスケーリング）
- 新しいハザード予測モデル、リスク評価モデルの開発
- 適応方策の研究
- 予測情報を前提とした社会科学的・防災工学的研究
- データ形式を統一化するインターフェースや汎用解析サポートツールの開発

4.2.3 現業と研究の連携強化

気象・気候分野の研究開発の出口の1つは現業化である。すなわち現業機関である気象庁の予報業務等への導入如何が研究開発の方向性を検討する上で重要な判断材料になる。現業機関としても、技術開発において世界の研究コミュニティと連携しつつ日本として高い技術水準を達成することを目指しており、「2030年に向けた数値予報技術開発計画」（2018年）に基づき技術開発を推進している。大学等の研究機関との連携も必要と認識しており、予測に関しては「数値予報モデル開発懇談会」を2017年度から開催している。同懇談会では現業数値予報モデルの開発や出力データの研究での利活用に関して意見交換等を行うほか、気象庁と大学や公的研究機関との連携の在り方についても議論を行っている。

現業と研究の連携強化を促進する上でファンディングは有効な手段になる。欧米でも現業機関と大学等の共同研究を支援する仕組みがある。例えば米国の海洋大気庁にはNOAA Climate Test Bed (CTB) という研究開発の成果を現業に繋げることをミッションとする部署があり、ファンディングプログラムを運営したり、実装のための開発環境（研究インフラ）を提供したりしている。CTBの現在の優先テーマは（1）季節内～季節モデリング、（2）統合予測システム（複数の地球システムコンポーネントの結合）、（3）季節内～季節予測のためのツールおよびデータセット、（4）再解析と観測の4つである³⁵。この下でCTBはModelling, Analysis, Prediction and Projections (MAPP) Programを運営している。2016年度には季節内予測をターゲットにしたSubseasonal Experiment (SubX)が進められた。翻って日本の状況は、気象庁には直接の研究費助成制度はなく、先述の連携による共同研究も基本的には外部資金獲得を前提としていると思われる。研究テーマにおける整合のみならず、本来は共同研究支援のための実質的なサポートがあることが望ましい。

なお気象・気候分野の研究開発の出口の1つは現業化であるが、民間気象事業者が気象庁から提供される情報を基にして多様な顧客ニーズに対応した情報に加工し発信したりもしている。こうした業務は気象庁長官の許可を得た事業者に限られるものの、事業者の中には大学や公的研究機関の名前も散見される³⁶。気候変動リスクへの対応の必要性が高まっていることを背景に気象ビジネス活性化に向けた機運の高まりも見られることから、研究開発成果の社会実装には多様なルートを想定することも可能になりつつある。

4.2.4 データ・解析基盤との共進化

データ・解析基盤が提供する基本的な機能・サービスは、大容量ストレージ、大規模解析空間、高速計算・通信の3つである。その上で、多様かつ豊富な地球環境データをそろえ、快適で使いやすいインターフェース

35 NOAA Climate Test Bed
<https://www.nws.noaa.gov/ost/CTB/ov.htm>（2022年2月アクセス）

36 気象庁 予報業務の許可事業者一覧（気象・波浪）
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/minkan.html>（2022年2月アクセス）

や便利な解析ツール・技術を提供することが求められている。本プロポーザルでは、後者のソフト面の強化を提案している。

EUには地球観測衛星の運用とそれら衛星が取得した画像の提供を行うプログラムであるコペルニクスプログラムがある。従来、オープン&フリーを基本理念にして大気観測や海域観測など6つの分野に分けたデータサービスを提供していたが、研究者向けのためインターフェースが専門的で分かりづらい、膨大なデータ量のためダウンロードだけでも時間がかかる、ダウンロードしても処理・分析するツールやソフトが手元にない等の問題が認識されていた。そこで新たにDIAS(注:日本のDIASとは別物である。)という、利用しやすさにフォーカスした新たなデータプラットフォーム事業を2017年に開始した。同事業は民間への委託事業として展開している。非営利機関や企業が中心となった複数のコンソーシアムにプラットフォームを独自に開発させ、民間サービスとして運営させることにより、競争原理によるサービス向上を目指している。日本ではEUほどに多くの受託主体を見積もることは容易ではないと思われるが、民間が参画する形でユーザー視点の開発を行うという点は参考にすべきと思われる。また民間主導となっていくことで一部のサービスが有償になる方向で進められており、経済的に持続可能な仕組み作りという面も1つの参考として見ていくべきと考えられる。

データ・解析基盤構築の重要なポイントは3つある。1つ目はユーザー目線の開発、2つ目は情報科学技術分野の研究者や技術者の参画促進、3つ目は持続可能な仕組み作りである。

ユーザー目線の開発は、研究利用と民間利用の両方を見据えて使いやすさを追求することを意味する。自然災害や気候変動リスクへの対応が喫緊の課題となる中、地球環境データを利用してリスクを定量的に把握・評価したいというニーズは自治体のみならず産業界でも高まりつつある。そうしたニーズに応えられるようなデータ・解析基盤を目指す必要がある。一方で、先述のとおり予測情報の社会利用はまだ十分に進んでいない状況である。予測情報を提供する研究者側がユーザーニーズを十分に理解できていない場合がある反面、ユーザー側もニーズが漠然としており具体化できていない場合がある。ニーズが明確でも原理的に実現困難であったり、意味のある情報にならないといった場合もある。従ってデータ利活用促進のための調査研究や技術開発などを基盤構築と並行して進めることが必要と考えられる。これらを通じてニーズとシーズのマッチングを図ることが、結果としてデータ・解析基盤構築における研究者・技術者とユーザーの共創関係をより良いものにする期待される。

統一的なデータ形式の開発では欧米の状況も考慮しつつ、利用に適したものを検討する必要がある。そのためには気象・気候分野のみならず情報科学技術分野の研究者や技術者の協力を得る必要がある。これまでデータ・解析基盤の構築は気象・気候分野の研究者の中で賄う形で対応されてきたが、今後は分野連携による検討が必要である。欧米では情報科学技術分野の研究者や技術者が一時的に気象・気候分野に身を置いてシステム構築に参加するような流動的な頭脳循環があると言われている。膨大なデータを扱うため、情報処理についての高い専門性を持つ人材が関わるのが肝要である。そのためには異分野の人材も参加しやすい環境を作ることが必要になる。情報系の研究者や技術者のためのポストを確保したり、プロジェクトに参加することによって一定の評価が得られるような工夫が必要である。

またシステムを維持・管理していくための人材や予算の確保も必要になる。そうした持続可能な仕組み作りについても検討が必要である。

4.2.5 気象・気候分野と数理科学・情報科学技術分野の交流促進

気象・気候分野の研究において数理科学や情報科学技術は重要な近隣分野である。例えばカオス研究では気象分野と数理科学の間に1960年代からの交流がある。一時期は下火になったが、機械学習を用いた研究等で再び交流が見られるようになってきている。複雑数理現象が豊富にある研究分野だが、巨大自由度、多重スケールで、なおかつ現象理解には種々の物理的考察が必要とされるため、何もない状態で数理科学や情報科学技術分野の研究者が気象・気候分野に参入するのはハードルが高い面もある。他方、気象・気候分野の

研究者にとっては現象には興味があるものの数理科学的な研究は必ずしも得意でないという場合も少なくない。双方の興味・関心や得意分野は相補的であり、共同研究を促進することは気象・気候分野の更なる発展に極めて有効であると期待され、同時に数理科学とりわけ応用数学分野にとっても気象・気候分野が挑戦的かつ社会的に注目度の高い研究フィールドの1つになりうる。

以上を踏まえると、両分野の連携強化のための方策としては、共同研究を通じた交流促進が有効と考えられる。ボトムアップで提案される多様な連携研究をサポートするところから実績を積み上げ、交流が深まればより大きな普遍的テーマを設定してその解決に向けた個別研究を戦略的に推進するようなことも考えられる。なお連携研究の実績は既に顕在化しつつある。例えばJSTの戦略的創造研究推進事業（CREST、さきがけ）の中でも複数の事例が見られる。両分野の橋渡しとなり得るのは流体力学や力学系分野で、カオス、統計、偏微分方程式等の研究がまず考えられる。

そのほかにも前述のとおりデータ・解析基盤の構築においても数理科学や情報科学技術分野との連携・協同は重要な位置づけにある。

4.2.6 若手の積極登用

人材の育成・確保が喫緊の課題となっている状況は気象・気候分野も他の様々な分野と同様である。社会的に注目度の高い分野であるため潜在的に幅広い裾野があると期待されるが、研究者として残る人材は限られている。大学や研究機関で安定した身分になれる年齢は年々上がっており、最近では40歳以上とも言われる。優秀な若手人材がアカデミアでの研究職をあきらめて民間へ流出する事例も出ている。現在、モデルの基幹技術を保持しているのは40～50代であり、早急にその権限や技術を次世代に継承していく動きを始めなければならない。各機関において若手研究者を然るべきポジションへ積極的に登用するとともに、大型の研究開発プログラムやプロジェクトでも積極的に若手研究者を支援することが必要である。

4.3 時間軸イメージ

極端気象災害と気候変動リスクへの対応強化は喫緊の課題である。これに応えるためには本プロポーザルが提案する数週間から十年スケールの予測に関する研究開発はスピード感をもって進めていく必要がある。そのためには5～10年程度の期間のプログラムやプロジェクトが複線的に進み、各取組みが相互に影響を及ぼし合いながら同時並行的に推進されていく形が望ましい。例えば気候モデル開発や新規データセットの作成・解析、データ・解析基盤構築等を中心的なプログラムやプロジェクトにおいて進める。同時に気象・気候分野と数理科学・情報科学技術分野の連携強化に向けた横断的基礎研究や多様なセクターとの協同等を別のプログラムやプロジェクトで進めていくといった国内体制が考えられる。

また本テーマは社会利用に迅速に繋げていくことが肝要であり、研究開発を進める初期段階から多様なセクターが互いに協力して取り組むことが求められる。しかし異なる興味・関心や目的意識、専門的背景を持つコミュニティ間の連携は容易に進まない場合も多い。そのため、相互理解を深め、協力関係を構築し、自立した1つのコミュニティに成長・成熟していくことそのものを支援するような仕組み作りも必要になる。例えば研究プロジェクトレベルであればフィージビリティスタディ期間を1年ほど設ける等、相互理解や入念な計画作りを支援するような仕組みを作ることによって連携しやすい環境を提供することができる。その他にも議論や相互理解そのものを目的とした場作りのためのプロジェクトもあり得る。これらを通じて成功事例を積み上げていきながら、“連携の文化”を醸成していくことが重要である。そのため時間的にはやはり5～10年程度の期間を見た支援が必要である。

以上を踏まえ、本プロポーザルでは当面5年を「基盤強化期間」、続く5年を「本格期間」と位置付け、全体で10年程度の期間を見た推進方策を提案する。前半の5年で必要な技術の開発・高度化、知見の蓄積、データセットの作成・解析、連携強化等を進め、後半の5年はそれらの社会実装を本格化する期間とする。もちろん前半の5年でも可能なものについては社会の中での利用を試みるべきである。例えば過去データの解析・予測は、現在入手可能なデータを利用するため、将来予測と比較すると取り組みやすいと見ることもできる。また予測可能性の体系的レビューは、異なるコミュニティ間の連携強化に貢献するコミュニケーションツールにもなり得る。複線的にプログラムやプロジェクトを進めることができれば、こうした多様な試みを同時的に推進することができ、短期間で多様な成果を得ることが期待できる。

4

研究開発の推進方法
および時間軸

付録A 検討の経緯

国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、2021年度の戦略スコープ策定委員会において、本テーマを戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補に選定し検討チームを発足させた。検討チームは2021年4月から活動を開始し、約1年にわたって検討を行った。

戦略プロポーザル作成にあたっては、多数の有識者へのインタビューを始めとする調査分析に加え、セミナーおよびワークショップを実施した。これらを通じて多くの情報や知見、プロポーザル作成への示唆を得ることができた。ここでは「気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー」および「科学技術未来戦略ワークショップ『中長期の自然災害・気候変動リスクに対応する気象・気候予測の今後』」の概要を検討の経緯として記す。

A.1 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー

本セミナーシリーズは環境・エネルギーユニットの活動の一環として実施したものの、本プロポーザル作成とも関連の深い気象・気候分野の研究開発に関するものであり、本セミナーシリーズを通じて得られた情報や知見の一部は本プロポーザル作成にも多いに役立つものであったためここに概要を示す。なお本セミナーシリーズの詳細は報告書として取りまとめ、公開している³⁷。

■実施期間：2021年5月～9月

■セミナー概要：下表のとおり

	タイトル・講演者（所属） ※敬称略
気象・気候システム研究の発展と展望	
	IPCCにおける議論の動向と気候変動研究の課題 三村信男（茨城大学）
	地球をめぐる温室効果ガス 三枝信子（国立環境研究所）
	カーボンニュートラル指向時代の短寿命気候強制因子（SLCFs）に関する研究 竹村俊彦（九州大学）
	気候に関わる海洋研究 ―全球海洋観測に着目して― 須賀利雄（東北大学）
	大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による中層大気階層構造の解明 佐藤薫（東京大学）
	地球環境システムの進化・変動史 田近英一（東京大学）
防災・減災に資する気象研究開発の最前線	
	気候変動・異常気象・大気海洋相互作用分野の研究プロジェクトとの関わり―回顧と将来展望― 中村尚（東京大学）
	防災・減災のための雲科学研究 荒木健太郎（気象庁気象研究所）
	降水をセンシングする技術 牛尾知雄（大阪大学）
	台風・豪雨の航空機を用いた研究 坪木和久（名古屋大学）

37 JST-CRDS（2022年）俯瞰ワークショップ報告書「気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー」

衛星で知る地球環境変化	
	JAXAの地球観測衛星-ALOSシリーズを中心として- 祖父江真一 (JAXA)
	GCOM衛星による地球環境の観測 田中一広 (JAXA)
超学際や異分野協働の気象・気候関連研究開発	
	洪水予測、AI、歴史 芳村圭 (東京大学/JAXA)
	情報社会における気象データとその利活用 越塚登 (東京大学、WXBC)
	熱帯泥炭生態系の炭素動態に与える人為攪乱の影響 平野高司 (北海道大学)
	熱中症をサイエンスする 永島計 (早稲田大学)

A.2 科学技術未来戦略ワークショップ「中長期の自然災害・気候変動リスクに対応する気象・気候予測の今後」

プロポーザル作成の一環として実施した科学技術未来戦略ワークショップの概要を以下に示す。ワークショップは「気候予測」「影響予測・評価」「基盤・横断」の三部構成とし、数週間から十年スケールの予測に関する国内外の研究開発の状況、今後進むべき方向性、取り組むべき課題、望ましい推進方策等について議論を行った。なおワークショップの詳細は報告書として取りまとめ、公開している³⁸。

■日時：2021年11月2日（火）13：00～18：00

■形式：オンライン

■招聘有識者（敬称略・五十音順）：

- 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
- 沖 大幹 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
- 河宮 未知生 海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター センター長
- 小坂 優 東京大学 先端科学技術研究センター グローバル気候力学分野 准教授
- 齊木 吉隆 一橋大学 大学院経営管理研究科 経営管理専攻 教授
- 澁谷 亮輔 三井住友海上火災保険株式会社 ビジネスイノベーション部 課長代理
- 高谷 祐平 気象庁 気象研究所 全球大気海洋研究部 第二研究室 主任研究官
- 竹之内 健介 香川大学 創造工学部 講師
- 竹見 哲也 京都大学 防災研究所 気象・水象災害研究部門 教授
- 竹村 俊彦 九州大学 応用力学研究所 大気海洋環境研究センター 気候変動科学分野 主幹教授
- 花崎 直太 国立環境研究所 気候変動適応センター 気候変動影響評価研究室 室長
- 三浦 裕亮 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 准教授
- 渡部 雅浩 東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系 教授

■プログラム（敬称略）

13：00-13：20 開会挨拶・趣旨説明・事務連絡（20分）

13：20-14：55 第1部 気候予測セッション（95分）

38 JST-CRDS（2022年）科学技術未来戦略ワークショップ報告書「中長期の自然災害・気候変動リスクに対応する気象・気候予測の今後」

- ・話題提供・質疑応答：渡部（15分）、高谷（10分）、三浦（10分）、竹村（10分）
- ・議論（50分）※最後5分程度でラップアップ

14：55-15：00 休憩（5分）

15：00-16：35 第2部 影響予測・評価セッション（95分）

- ・話題提供・質疑応答：沖（15分）、竹見（10分）、花崎（10分）、竹之内（10分）
- ・議論（50分）※最後5分程度でラップアップ

16：35-16：45 休憩（10分）

16：45-17：55 第3部 基盤・横断セッション（70分）

- ・話題提供・質疑応答：河宮（10分）、齊木（10分）、浦嶋（10分）
- ・議論（40分）※最後5分程度でラップアップ

17：55-18：00 閉会挨拶

作成メンバー

総括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	環境・エネルギーユニット
リーダー	中村 亮二	フェロー	環境・エネルギーユニット
メンバー	有本 建男	上席フェロー	科学技術イノベーション政策ユニット
	上野 伸子	フェロー	連携担当、環境・エネルギーユニット兼務
	嶋田 義皓	フェロー	システム・情報科学技術ユニット
	勝田 博志	主任調査員	戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ
	松村 郷史	フェロー	環境・エネルギーユニット
	八木岡 しおり	フェロー	海外動向ユニット

戦略プロポーザル

CRDS-FY2021-SP-08

極端気象災害と気候変動リスクへの対応強化に向けた近未来予測

STRATEGIC PROPOSAL

Climate modelling for near future: to deliver reliable navigation in the era of climate change

令和 4 年 3 月 March 2022

ISBN 978-4-88890-789-7

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>