

プロフィールシート（事前評価）

研究課題名：階層的な地球システムモデリングに関する研究

（副課題1）短期から長期予測課題に応用可能な地球システムモデルの開発に関する研究

（副課題2）海洋予測技術の開発及び海洋現象の機構解明に関する研究

（副課題3）海洋及び大気海洋結合系のデータ同化に関する研究

（副課題4）週間から季節予報のための予測システム開発に関する研究

（副課題5）大気微量成分の監視予測技術と気象・気候影響に関する研究

研究期間：2024年度～2028年度（5年間）

研究代表者：山中吾郎（全球大気海洋研究部長）

研究担当者：（副課題代表）石井正好、中野英之、石川一郎、吉村裕正、眞木貴史

1. 研究の背景・意義

（社会的背景・意義）

近年、地球温暖化の進行を背景として、集中豪雨・台風等の災害をもたらす顕著な現象が激甚化しており、大気や海洋の長期変化の予測の重要性が増大している。

「国土強靱化基本計画」では、自然災害に強い国づくりを目指す取り組みの一環として、気候変動の影響を踏まえた治水対策が求められている。「海洋基本計画」では、長期的な気候変動リスクの低減のため、予測情報の高精度化のための研究計画を推進することが施策に盛り込まれている。

また、温室効果ガスや汚染物質の排出増加にともない、地球環境の監視・予測技術の重要性が増大している。文部科学省の第9期地球観測推進部会が令和5年2月に発表した「地球観測・予測データの利活用による持続可能な開発目標（SDGs）への貢献に向けて」においても、気候変動等のメカニズム解明には、地球観測の更なる充実や観測データ等との組み合わせによる気候モデル等の高度化が必要であるとしている。

国際的にも、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第7次評価報告書（AR7）のサイクルに向けて、地球システムモデルによる第7期結合モデル相互比較計画（CMIP7）への参画を通じた貢献が求められている。世界気象機関（WMO）の戦略計画（2020-2023）では、未来に向けた技術基盤を高めるために、地球システムの観測と予測を強化することが謳われている。また、国連とIOC/UNESCOは「国連持続的発展のための海洋科学10年（国連海洋科学10年）」を策定し、海洋の持続的な開発に必要な科学的知識や基盤、協力体制を構築する取り組みを2021-2030年の10年間に集中的に実施することとしている。

そのため、地球システムを構成する大気、海洋、波浪、陸面、雪氷、物質輸送等の多様な要素とそれらの相互作用を適切に取り扱いながら数値解析予測モデルの研究を進めることは、「気候変動適応」の法制化に対応する高精度の温暖化予測と

気候変動が全球から地域までのそれぞれにもたらす影響の評価に大きく資する。

(学術的背景・意義)

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については未解明な点が多い。特に、地球温暖化予測における雲・エアロゾル相互作用や海氷・エアロゾル相互作用、季節予測における大気・波浪相互作用やオゾン等大気微量成分の効果、台風予測における大気・海洋相互作用、漂流予測における海流・波浪相互作用などの諸過程を適切にモデルに組み込む必要がある。

地球システムにおける現象の発生機構を解明するためには、対象とする現象の予測に重要な各地球システム要素のモデルを組み込み、目的ごとに必要とされる複雑さと精密さで地球の諸現象をより正確に再現するためのモデル(「階層的な地球システムモデル」と呼ぶ)を用いることが必要である。現象の発生機構の理解を通じて、予測精度向上に繋がる指針を得ることができる。

加えて、階層的な地球システムモデルによって作成された膨大なデータを、産学官連携や国際連携を通じて、SDGs も含む様々な社会経済活動における基盤情報として利活用するための研究が求められている。

(気象業務での意義)

気象庁では平成 30 年交通政策審議会気象分科会提言「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」、及びそれを受けた「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」が策定され、2030 年を見据え、数日先の台風・集中豪雨の予測から数十年以上先の地球温暖化予測まで精度向上が求められている。一方で、近年 CPU (中央演算装置) の性能向上ペースが鈍化しており、スーパーコンピュータの演算能力の見通しに懸念が生じている。そのため、限られた計算機資源を活用して効率的に計算を行う数値予報技術の開発が求められている。

このような社会や気象業務へのニーズに応えるために、「地球システムモデル」の成果が気象庁の現業モデルで最大限利用できるように研究を進める。利用方法としては、ひとつの同じモデルを多業務に適用するのではなく、「階層的な地球システムモデル」の考え方に基づいたモデルを開発し、それを構成する「コンポーネント」をできるだけ共有できるようにして各現業モデルで利用する形で貢献することを想定する。これにより、地球温暖化を背景とする台風・集中豪雨などの顕著現象、季節予報、海況監視予測、物質循環等の予測に貢献する。また、「気候変動適応法」に対応するための温暖化予測情報に高い精度を持つ情報を提供する。

(気象研究所の実績)

(副課題 1)

- ・ 二重フーリエ級数を採用した全球大気モデルを開発し、高速化を図るとともに、非静力学モデルへの拡張を進めた。また、大気モデルに新しい物理スキームの導入等を行い、気候と化学物質の相互作用を含む、次期地球システムモデル (MRI-ESM3) の開発を進めた。

- ・ 高解像度非静力学全球大気スペクトルモデルに低解像度の海洋モデルを結合した実験を実施し、現実的な台風示度や降水分布を再現できる可能性が高いことを示した。また第 6 期結合モデル相互比較計画 (CMIP6) 実験の解析から、現行地球システムモデル (MRI-ESM2) は気候値とともに ENSO、成層圏突然昇温等の自然変動の再現性が向上していることを示した。MRI-ESM2 は気象庁・文科省合同で進める国内の温暖化予測実験にも活用された。
- ・ モデル検証や各種実験実施のために開発した海面水温解析と表層水温解析システムは、気候情報課や環境・海洋気象課の現業で活用されている。
(副課題 2)
- ・ 海洋モデルに高精度の時間積分スキームを導入し高速化を図るとともに、観測データを基に海氷モデルの最適なパラメータを決定し、海氷速度の再現性向上を実現した。また、短期予報への適用を視野に入れた高分解能大気海洋結合モデルや大気波浪結合モデルの開発を進めた。
- ・ 20 世紀を通じた日本沿岸の海面水位の長期変動を調査し、気候変動に関わる外洋の変動と沿岸捕捉波の重要性を明らかにした。また、高分解能大気海洋結合モデル (大気 10km、海洋 10km) を用いた 10 日予報を実施し、大気単体モデルに比べて、熱帯域を中心に大気場の予測精度が改善することを示した。
(副課題 3)
- ・ 衛星海面水温データの直接同化など新たな海洋同化手法の開発を進めるとともに、現業システムに見られる海氷分布の系統誤差の改良を行った。また、大気海洋結合モデルの初期値作成に資する大気海洋結合同化システムの再現性評価や第 3 世代季節予測システム (CPS3) をベースとした高度化を進めた。
- ・ 日本沿岸海況監視予測システムを用いて、日本沿岸の海況特性の取りまとめや急潮の予測可能性を評価し、1971 年と 2011 年に日本南岸で発生した異常潮位の発生メカニズムを明らかにした。また、海洋観測データの同化に対するインパクトについて評価した。
(副課題 4)
- ・ CPS3 の開発と性能評価を進め、熱帯の渦活動や ENSO, MJO の再現性など全体として性能の向上が見られた。また、海洋高解像度化のインパクト、大気海洋結合同化の結合プロセス再現性への影響、アンサンブル構成の予測精度への影響といった将来の季節予測システムの改善につながる研究を行った。
- ・ 第 2 世代季節予測システム (CPS2) を用い、異常天候のメカニズム解明や予測可能性に関する研究を実施した。
(副課題 5)
- ・ 全球化学輸送モデル (エーロゾル、オゾン) の改良を行い、CMIP6 実験や関連する国際モデル相互比較 (AerChemMIP, DAMIPj, Covid-MIP など) や各種国際共同プロジェクトに貢献した。全球化学輸送モデルは、本庁の黄砂予測業務、紫外線予測業務、大気汚染業務に活用されると共に、気象庁長期再解析 (JRA-3Q) のオゾン境界値を作成するために用いられている。
- ・ 領域化学輸送モデル (NHM-Chem) の改良を進め、大気汚染気象業務に導入され

るとともに、高解像度版（asuca-Chem）の業務運用に貢献した。また、エーロゾルから雲微物理過程・大気放射過程を通じた気象へのフィードバック過程を導入し、モデルの検証をおこなった。深層学習を用いた気象場のダウンスケーリング手法の開発を行った。

- ・ ひまわり 8 号を用いたエーロゾルデータ同化システムを開発し、その成果が本庁黄砂予測業務に導入された。また温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）観測データの二酸化炭素逆解析技術を開発し、本庁の二酸化炭素分布情報用として提供した。

2. 研究の目的

（全体）

気象研究所における数値予報モデル開発関連の研究について、地球の大気、海洋、陸面・雪氷、大気微量成分など地球システムを構成する各要素を総合的に扱う「階層的な地球システムモデル」の考え方に基づいて研究を進める。これにより、地球温暖化予測、季節予報、海況監視予測、大気微量成分の監視予測、台風や集中豪雨等の顕著現象等に用いられる数値予報モデルの予測精度を向上させる。

（副課題 1）

幅広い時間・空間スケールの現象を高精度に表現可能な地球システムモデルを開発することにより、モデル気候値と過去気候変動の再現性の向上を図り、気象・気候予測の精度向上と不確実性低減に貢献する。上記に加えてモデル利活用の裾野拡大を図り、地球システム要素の影響が適切に評価可能なモデルの構築を目指す。

（副課題 2）

様々な時空間スケールに対応した海洋予測技術を開発することにより、日本周辺海域の極端現象や長期変動の機構を解明するとともに、将来の現業システムの高度化及び気候変動予測や日本周辺の海洋環境に係る情報の高度化に貢献する。

（副課題 3）

地球システムの重要な構成要素である海洋及び大気海洋結合系のデータ同化システムの改良を通じて、海況監視予測情報や大気海洋結合モデルを用いた気象予報、及び気候データ同化（長期再解析）の精度向上に貢献する。

（副課題 4）

将来の現業予測システムのための技術開発とフィジビリティ研究を行うことにより、週間から季節予報の精度向上に貢献する。

（副課題 5）

化学輸送モデルの改良を通じて地球システムモデルの放射収支や雲・降水過程等を高精度化し、地球温暖化予測等の改善に繋げると共に、気象業務（数値予報、環境気象等）の精度向上を目指す。大気微量成分の各種観測データを用いて化学輸送モデルを検証・改良すると共に、データ同化技術を改良しつつ、深層学習等も導入して大気微量成分の監視・予測精度の向上を図る。

3. 研究の目標

(全体) 地球システムの構成要素の関連性とそれらの相互作用を適切に扱い、地球システムの様々な時間・空間スケールの現象の予測への影響を評価するとともに、高解像度化や初期値化について利用可能性を検討する。また、地球システム要素のコンポーネント化や計算の効率化を図ることにより、現業数値予報モデルを改善するとともに、次世代の現業数値予報モデルの仕様に係る指針を得る。

(副課題 1)

- ① モデル気候値と過去気候変動の再現性の向上・検証、および国際モデル相互比較
 - ・ 確信度の高い気候予測を行うために、必要なモデル開発を通じて、地球システムモデル (ESM) における現在気候の再現精度を高める。CMIP7 等の国際プロジェクトへの参画等を通じて、気候変動予測の不確実性の低減と信頼性の高い科学的評価を目指す国際的な取り組みに貢献する。
- ② 詳細な地域気候と顕著な地球環境イベントを再現する高解像度 ESM 開発
 - ・ 高解像度モデルを用いた気候実験を通して、地域規模の気候予測にも利用可能なプロダクト作成に向けた開発課題の整理を行う。
- ③ 短期～10 年規模変動を高精度に再現する多圏間相互作用の導入と評価
 - ・ 地球システムモデルの各構成要素とそれらの相互作用を高精度に実現するモデルを構築する上で必要な開発を行う。モデル利活用の裾野拡大を図るため、地球システム各要素からの影響が適切に評価可能なモデルの構築を目指す。

(副課題 2)

- ① 将来の現業業務等に資する海洋予測技術の開発
 - ・ 気象庁次期スパコンシステムにおける現業システム (季節予測システム及び日本沿岸海況監視予測システム) の更新に向けて、全球海洋モデルおよび日本沿岸海況監視予測システムの改良を行う。
 - ・ ダウンスケーリング等の手法により、様々な時空間スケールや極端現象の情報提供を可能にする海洋予測技術を開発する。
 - ・ 大気海洋結合モデルを用いた、大気および海洋の短期予報等への結合効果の影響調査のための研究を実施する。
- ② 海洋モデルの安定性、利便性、精度、および速度の向上
 - ・ 水塊等の保存性の向上や、海氷の精緻化などによりバイアスを低減するとともに、より現実的な海洋物理過程を再現可能にするために、物理プロセス及びパラメタリゼーションを改良する。
 - ・ 多様なユーザーによる海洋モデルの円滑な実行、活用のために、前処理・後処理・解析環境の整備や出力の拡充等の利便性向上を行う。
 - ・ 海洋モデルの開発効率を向上させるため、他機関および本庁との連携も見据えた海洋モデル開発基盤の強化を行う。
 - ・ CPU の速度向上に頼らない高速化技法を取り入れて海洋モデルの高速化を図る。
- ③ 海洋熱波等の極端現象や長期変動の機構解明
 - ・ 気候変動に関わる海洋循環や海面水位等の変動プロセスを解明する。
 - ・ 海洋熱波等の様々な時空間スケールの極端現象の検出、同定、メカニズム評価を行う。

(副課題3)

- ① マルチスケールに対応する新たな海洋データ同化手法の開発
 - ・ 弱拘束条件の導入や高解像度衛星観測データの有効活用などにより、日本近海から全球海洋および大気海洋結合系に適応できる統合的なデータ同化システムを開発する。
- ② 大気海洋結合系のデータ同化と数値予測に関する研究
 - ・ 大気海洋結合同化システムについて、海面水温変動の再現性向上等を目指した改良を行い、解析性能を評価して、気候データ同化（長期再解析）への利用可能性、および、初期値作成手法としての結合予測へのインパクトを評価する。
- ③ 海洋観測の活用と海洋変動のメカニズム研究
 - ・ 海洋観測の効率化や最適化に向け、海洋観測データのインパクト評価を実施すると共に、観測システムの評価に関する国際協力を継続し、国連海洋科学の10年プロジェクト SynObs に貢献する。
 - ・ 海洋長期再解析データなどを用いて、海洋変動のメカニズムを明らかにする。
- ④ 現業海洋同化システムの共同開発
 - ・ 気象庁次期スパコンシステムにおける現業システム（季節予測システム及び日本沿岸海況監視予測システム）の更新に向けて、全球海洋データ同化システム並びに日本沿岸海況監視予測システムの改良を行う。

(副課題4)

- ① 地球システム要素を含む週間・季節予測システムの技術開発とフィジビリティ研究
 - ・ 地球システムモデルを使用した週間から季節予測システムの構築・開発を行う。
 - ・ オゾン・エアロゾル・波浪等の地球システム要素の週間から季節予測での利用に向けたフィジビリティ研究を行う。
- ② 週間から季節スケールの台風・極端現象の予測可能性評価と予測改善のための開発・研究
 - ・ 台風・極端現象の予測可能性の評価を行う。
 - ・ アンサンブル予測、確率予測の改善に資する研究を行う。
 - ・ モデル高解像度化による、予測への影響評価を行う。
- ③ 海洋観測・初期値の週間から季節予測への影響評価
 - ・ 海洋同化システム、大気海洋結合同化システム、海洋観測システムの予測への影響評価を行う。

(副課題5)

- ① 化学輸送モデルの精緻化及び統合化
 - ・ エアロゾル、オゾン、温室効果ガス等（大気微量成分）の動態をシミュレートする化学輸送モデルを高度化するとともに、地球システムモデルの構築を進めつつ、大気化学統合モデルの開発を継続する。
 - ・ 季節予報モデルに導入するためのオゾン簡易モデルの開発を進める
 - ・ 領域化学輸送モデルの改良を継続すると共に、エアロゾルと降水とのフィードバック過程の解明を進める。

② 大気微量成分データ同化システムの精緻化

- ・ エアロゾルデータ同化システムの改良を行い、複数衛星観測データの導入などエアロゾルの監視・予測精度を向上させる。
- ・ 深層学習を用いた応用研究(オゾン代理モデル、ダウンスケーリング等)を行う。
- ・ 複数衛星観測データの導入など大気微量成分再解析(エアロゾル、二酸化炭素)の精度向上を目指す。

4. 研究体制

研究代表者：山中吾郎

担当研究者：

- | | | |
|--------|------------|-------------|
| (副課題1) | サブ代表者：石井正好 | 担当研究者：10名程度 |
| (副課題2) | サブ代表者：中野英之 | 担当研究者：5名程度 |
| (副課題3) | サブ代表者：石川一郎 | 担当研究者：5名程度 |
| (副課題4) | サブ代表者：吉村裕正 | 担当研究者：5名程度 |
| (副課題5) | サブ代表者：眞木貴史 | 担当研究者：5名程度 |

研究協力者：併任者として本庁数値予報課、気候情報課、環境・海洋気象課、海洋気象情報室から20名程度、客員研究員として、九州大学、国立環境研究所からの2名程度参加を想定。

5. 研究計画・方法

(副課題1)

- ① モデル気候値と過去気候変動の再現性の向上・検証、および国際モデル相互比較
 - ・ MRI-ESM3 をベースに、各モデルコンポーネントの改良を進め、MRI-ESM3 のトータルな性能向上を図る。各モデルコンポーネントに新しい計算スキームを導入することも検討する。
 - ・ 気候予測においてとりわけ不確実性の高い雲・エアロゾル相互作用については、**モデル実験物理スキームの改良**を通して、不確実性の低減を図る。開発したモデルで気候実験(長期積分)を行い、これまでに開発を進めてきたモデル評価ツールに依拠して全球スケールでの現象再現性を評価する。
 - ・ 安定した動作が確認された地球システムモデルでCMIP7等の国際相互比較プロジェクトなどの国際共同研究に参加し、気候変動に関する信頼性の高い科学的評価を目指す国際的な取り組み(IPCC等)にも貢献する。
 - ・ 国際共同研究によるモデル検証結果を踏まえてモデルの開発課題を整理し、モデル改善の指針を得る。
- ② 詳細な地域気候と顕著な地球環境イベントを再現する高解像度ESM開発
 - ・ **大気10km、海洋10km程度の高解像度モデルを構築**し、長期積分実験を行う。地域規模気候に重要な熱帯低気圧や梅雨前線などの現象に焦点を当てた初期評価を行い、海洋モデルと大気モデルそれぞれの高解像度化が地域規模の気候変動再現性に及ぼす影響を系統的に調査し、開発課題を整理する。

- ・ 海洋の水塊形成や変質過程は、地域的な海洋変動や気候変動を再現する上で重要であるため、改良された海洋物理スキームによってどの程度改善されたかについて検証を行う。
 - ・ **GPU等の活用**など将来的な計算プラットフォームの変革が想定されていることから、地球システムモデルへの対応について検討する。部外の関連機関との情報交換を進め、当該研究計画期間内に技術開発の指針を得る。
- ③ 短期～10年規模変動を高精度に再現する多圏間相互作用の導入と評価
- ・ コンポーネント間相互作用を高精度に実現するために、特に、大気化学、陸面、植生、物質循環についてのモデル開発を進める。まず、オフライン化した陸面モデルをそれらの実験プラットフォームとして活用できるようにする。その上で、他コンポーネントとの間での動作確認とモデル評価を実施する。必要に応じて、他機関で開発されたスキームの導入も検討する。
 - ・ 実用性の高まった開発成果を地球システムモデルに組み入れて、**火山噴火による気象・気候影響を評価**するための実験を行う。他課題と連携して火山噴火影響評価研究を展開する。
 - ・ 累積炭素排出量に対する過渡的気候応答の不確実性低減に向けて、**生物地球化学循環場の精度を改善**する。短期～季節スケールの変動再現に適したオゾン簡易モデル及び大気物理過程の開発についても実施する。

(副課題2)

- ① 将来の現業業務等に資する海洋予測技術の開発
- ・ 気象庁次期スパコンシステムにおける現業システム（季節予測システム及び日本沿岸海況監視予測システム）の更新に向けて、新しいスキームやパラメタリゼーション等を導入することにより、全球海洋モデルおよび日本沿岸海況監視予測システムの改良を図る。この開発は関係課室（気候情報課、海洋気象情報室、数値予報課地球システムモデル技術開発室）および M3, M4 課題と協力して実施する。
 - ・ ネスティングによる港湾スケールのモデルの構築や **AIの利用等によるダウンスケーリング等の手法**により、様々な時空間スケールや極端現象の将来の情報提供に資する海洋予測技術の開発を行う。
 - ・ 高解像度大気海洋結合モデルおよび、大気、海洋単体モデルの比較等から、大気および海洋の短期予報等への結合効果の影響調査のための研究を行う。これは、関係各室（数値予報課全球モデルチーム）および M4 課題と連携して行う。
- ② 海洋モデルの安定性、利便性、精度、および速度の向上
- ・ **鉛直座標の抜本的見直し**により海洋内部でのラグランジュ的な水塊移動をより適切に表現することで数値拡散が小さいスキームを使うことができるオプションを開発し、海洋内部のバイアス低減を図る。
 - ・ 数値拡散の影響が小さいモデルに、近年の混合過程の知見を取り込んで評価する。
 - ・ **ブラックカーボン**の表現を含めた海水モデルの表現を精緻化する。
 - ・ 波浪の影響を海洋モデルに取り入れることで海面過程の精緻化を行う。
 - ・ 本庁と協力して **GPU等の活用**により、海洋モデルの高速化を図る。

- ・ 前処理、後処理における共用ツールの拡充等により利便性向上を図る。
- ・ **GitHub, Redmine** 等の継続した利用により、他機関や関係各室との連携を強化する。
- ③ 海洋熱波等の極端現象や長期変動機構の解明
 - ・ 感度実験の実施により、日本近海の気候変動や黒潮変動のメカニズムを調査する。
 - ・ モデル結果及び観測データ等から**海洋熱波等**の様々な時空間スケールの**極端現象**の検出、同定、およびメカニズムの評価を行う。

(副課題3)

- ① マルチスケールに対応する新たな海洋データ同化手法の開発
 - ・ 日本近海から全球海洋および結合システムに利用可能な統合的同化システムの構築を進める。そのために以下の開発を行う。
 - 弱拘束条件の利用、同化サイクル長の短縮、力学バランスに関する拘束条件の導入等による、**幅広い時間スケールの変動に対応**した同化手法
 - **高解像度衛星データ** (ひまわり SST, SWOT など)、及び**沿岸観測データ** (HFレーダの海流など) の有効利用を図るための同化手法
 - 背景誤差統計量算出方法や海洋初期擾乱生成法の改良、計算の効率化
- ② 大気海洋結合系のデータ同化と数値予測に関する研究
 - ・ **結合同化システムの開発** (海面過程の再現性の高度化、及び、衛星放射計等を用いた大気と海面水温の同時解析手法の組み込み) を進め、再解析実験を行なって性能評価を行うとともに、大気海洋結合モデルによる気象予測における、結合同化のインパクトを評価する。
- ③ 海洋観測の活用と海洋変動のメカニズム研究
 - ・ 海洋アジョイントモデルを活用した**観測システム評価手法**の開発を行う。
 - ・ 国連海洋科学の10年プロジェクト SynObs の計画に従い、**観測システム実験等**を実施し、他機関の実験結果と合わせて検討することにより、今後の海洋観測システムの拡充や効率化についての提言をとりまとめる。
 - ・ 海洋長期再解析データを用いて、海洋変動のメカニズムを明らかにする。
 - 日本周辺海域における**水温の長期変動**と黒潮・親潮・対馬暖流の関係
 - **黒潮大蛇行**と黒潮流量、北太平洋の風の変化との対応
 - **急潮**など沿岸域での極端現象の再現性検討と発生メカニズムの解明
- ④ 現業海洋同化システムの共同開発
 - ・ 気象庁で運用中の全球海洋データ同化システム及び**日本沿岸海況監視予測システム**について、精度評価と改良を担当課室と協力して行う。
 - ・ 将来の季節予測システムのための全球海洋データ同化システムの開発 (**渦許容海洋モデルでの四次元変分法**の実施、同化サイクル長の短縮、海面水温データ同化手法の高度化) を行う。
 - ・ 日本近海モデルに変分法同化を導入するなどして、解析・予測精度を向上させ、日本沿岸海況監視予測システムの海洋貯熱量(TCHP)を利用した台風強度予報ガイダンスの精度向上を図るとともに、同システムの海面水温情報を気象予報モデルの下部境界条件として用いることの有効性検討に資する。

- ・ 上記の開発は関係課室（気候情報課、海洋気象情報室、数値予報課地球システムモデル技術開発室）および M2, M4 課題と協力して実施し、M3 課題は海洋同化と結合同化の改良を通じて貢献する。

（副課題 4）

- ① 地球システム要素を含む週間・季節予測システムの技術開発とフィジビリティ研究
 - ・ **MRI-ESM3** を使用した週間から季節予測システムの構築・開発を行う。モデル開発（大気、陸面、大気波浪結合（A3 課題と連携）等）、初期値化整備、予測実験環境整備を行う。
 - ・ **オゾン・エアロゾル・波浪等の地球システム要素の週間から季節予報での利用**に向けたフィジビリティ研究を行う。大気・海洋・陸面等の要素についても、予測への影響評価を行う。
- ② 週間から季節スケールの台風・極端現象の予測可能性評価と予測改善のための開発・研究
 - ・ 現業季節予測システム（CPS3 等）や **MRI-ESM3** を使用した予測改善のための研究を行う。
 - ・ 極端現象の予測可能性の評価を行う。大気・海洋場の違いによる予測可能性への影響評価とプロセス理解を進める（C1 課題と連携）。
 - ・ 台風の予測可能性の評価を行う。
 - ・ アンサンブル予測、確率予測の改善に資する研究を行う。予測システムデザイン（アンサンブル構成等）の開発を行う。
 - ・ 大気海洋結合モデルの高解像度化による予測への影響評価を行う。
 - ・ **高解像度非静力学全球大気モデルの開発・高速化と、短期から週間予測のフィジビリティ研究**を行う。
- ③ 海洋観測・初期値の週間から季節予測への影響評価
 - ・ 海洋同化システム・大気海洋結合同化システムによる初期値の予測への影響評価を行う。
 - ・ 海洋観測システムの予測への影響評価を行う。

（副課題 5）

- ① 化学輸送モデルの精緻化
 - ・ M1 課題等と連携しつつ観測データとの比較検証等を行い、MRI-ESM3 におけるエアロゾル、オゾン等の化学輸送モデルを精緻化する。
 - ・ エアロゾル、オゾン等大気微量気体をシームレスに取り扱う**全球化学統合モデル**の開発を進める。
 - ・ 領域化学輸送モデルを高度化すると共に、**降水とのフィードバック過程**を改善する。
 - ・ 短期～季節スケールの変動再現に適した**オゾン簡易モデル**を開発する（M1 課題と共同）。

- ・ MRI-ESM3 ベースの物質輸送モデルを開発する。
- ② 大気微量成分データ同化システムの高度化
 - ・ 大気微量成分のデータ同化システムにおいて**複数衛星の活用**を図るなどして、本庁での業務高度化を支援する。
 - ・ エーロゾル・オゾン・二酸化炭素に関する再解析システムを改良する。
 - ・ 数値予報課地球システムモデル開発室が行っている大気化学モデルおよびそのデータ同化システム維持管理への協力を行う。
 - ・ **深層学習を用いたオゾン代理モデル**（注：オゾン簡易モデルとは別）やダウンスケーリング等に関する技術開発を進める。

6. 研究年次計画（研究フロー図を添付）

（副課題 1）

<中間評価時の到達目標>

- ① モデル気候値と過去気候変動の再現性の向上・検証、および国際モデル相互比較
 - ・ 新地球システムモデルの再現精度検証を行い、成果物として取りまとめる。また、CMIP7 の実験が可能となるように、モデル調整や実験環境を整備する。さらに各モデルコンポーネントにおける物理スキームの改良を進めて、現在気候の再現性向上を目指す。
- ② 詳細な地域気候と顕著な地球環境イベントを再現する高解像度 ESM 開発
 - ・ 地球システムモデルを 10km 程度に高解像度化した長期積分実験を行い、今後のモデル開発課題を整理する。また、モデルコードの高速化の作業とこれに関する情報収集を行い、今後のモデル開発方針の見通しを得る。
- ③ 短期～10 年規模変動を高精度に再現する多圏間相互作用の導入と評価
 - ・ 大気化学、陸面、植生、物質循環に係るモデルコンポーネントを、気候実験において安定的に動作できるように開発し、シームレスな時間スケールでの現象再現性を評価する。また、気象・気候影響を評価するためのモデル開発を行い、火山噴火の影響を含む各種応用実験を実施する。

（副課題 2）

<中間評価時の到達目標>

- ① 将来の現業業務等に資する海洋予測技術の開発
 - ・ 日本沿岸海況監視予測システム (JPN システム)に海洋モデルの安定化や高速化の成果を反映させる。
 - ・ JPN システムからさらなるダウンスケーリングを行うモデルを構築し、新たな情報発信の基礎となり得るシステム開発を行う。
 - ・ 全球大気モデルの海洋結合の影響を評価できるシステムを数値予報課と共同で開発し、感度実験等を行う。
- ② 海洋モデルの安定性、利便性、精度、および速度の向上
 - ・ 任意の鉛直座標を可能とするスキームを導入し、基本的な設定を確定する。
 - ・ 海氷モデルにメルトポンド過程を導入する。

- ・ GPU 等を用いた海洋モデルの速度向上の評価を行う。
- ③ 海洋熱波等の極端現象や長期変動の機構解明
- ・ 気候変動先端予測プログラムで作成する大アンサンブル将来予測データを活用して、海洋熱波の基礎的な統計データを作成するとともに、海洋現象の長期変動プロセスを調査する。
 - ・ 統計的手法等に基づいて将来予測情報の高度化に資する技術を開発する。

(副課題 3)

<中間評価時の到達目標>

- ① マルチスケールに対応する新たな海洋データ同化手法の開発
- ・ 同化サイクル長を短縮した再解析実験を実施し、その影響を検証するとともに、精度を保つために力学バランスに関する拘束条件の導入を検討する。
 - ・ ひまわり SST データや SWOT 海面高度データの同化手法を開発する。
 - ・ 海洋同化システム内の計算の効率化を実施する。
- ② 大気海洋結合系のデータ同化と数値予測に関する研究
- ・ CPS3 をベースとした大気海洋結合同化システムの開発・改良を進め、気候データ同化への利用可能性を評価できるよう再解析実験と基本的な検証を実施する。再解析実験では、結合予測実験のための初期値を作成する。
- ③ 海洋観測の活用と海洋変動のメカニズム研究
- ・ 海況予測及び季節内～季節予報に対する海洋観測のインパクトを評価するため、気象庁の現業システムを用いた観測システム実験を実施し、国際比較を含む解析に着手する。
 - ・ 海洋アジョイントモデルを活用した観測システム評価手法を開発する。
 - ・ 海洋長期再解析データを用いて日本周辺海域の長期変動について調査する。...
 - ・ 急潮等極端現象の事例について日本沿岸海況監視予測システムにおける再現性を検証し、気象条件や海洋循環との関係を調査する。
- ④ 現業海洋同化システムの共同開発
- ・ 将来の気象庁季節予測システムへの導入に向けて、全球海洋データ同化(4次元変分法)の高解像度化を含む改良を実施し、性能評価を行う。
 - ・ 気象庁の海況監視予測システムの更新に向けて、浅海域の同化手法の改良、ならびに日本近海モデルの変分法同化の開発などに取り組み、性能評価を行う。

(副課題 4)

<中間評価時の到達目標>

- ① 地球システム要素を含む週間・季節予測システムの技術開発とフィジビリティ研究
- ・ 地球システムモデルを使用した予測システムの構築・開発を行う。
 - ・ オゾン要素やエアロゾル要素を含むモデルでの予測実験を行い、フィジビリティ研究を進める。
- ② 週間から季節スケールの台風・極端現象の予測可能性評価と予測改善のための開

発・研究

- ・ 複数の解像度でアンサンブル季節予測実験を行う。
 - ・ 台風や極端現象の予測可能性評価を進める。
 - ・ 高解像度化による予測への影響評価を進める。
- ③ 海洋観測・初期値の週間から季節予測への影響
- ・ 海洋観測システムの影響評価のための予測実験を設計し、実施する。

(副課題5)

<中間評価時の到達目標>

① 化学輸送モデルの精緻化

- ・ M1 課題と連携して、MRI-ESM3 の性能評価・改善等を行う。
- ・ M4、M1 課題と連携してエアロゾルやオゾンの季節予報へのインパクトを調査するためにこれらの境界値等を提供する。
- ・ 領域化学輸送モデルを高度化すると共に降水とのフィードバック過程に関する事例研究を実施する。
- ・ MRI-ESM3 ベースの物質輸送モデル（温室効果ガス等）のプロトタイプを構築する。
- ・ M1 課題と連携して大気化学統合モデルの開発を進める。

② 大気微量成分データ同化システムの精緻化

- ・ エアロゾルデータ同化手法の高度化（複数衛星観測データの導入等）を行う。
- ・ 深層学習を用いた気象場ダウンスケーリング研究の取り纏めを行うと共に、季節予報システムに導入するためのオゾンの代理モデル開発に着手する。
- ・ エアロゾル再解析（JRAero）の解析期間延長等の改良を行う。
- ・ 二酸化炭素逆解析システムの高度化（複数衛星の導入など）を行う。

7. 研究の有効性（気象業務への貢献、学術的貢献、社会的貢献など）

(気象業務への貢献)

- ・ 本課題で開発される「階層的な地球システムモデル」は、気象庁の季節予測、日本近海の海況監視予測、大気微量成分の監視予測に用いられる現業システムの高度化に貢献する。
- ・ 「気候変動適応」の法制化に対応する高精度の温暖化予測と気候変動が全球から地域までのそれぞれにもたらす影響の評価に大きく資する。
- ・ 気象庁の週間から季節予報の将来の改善に資する。
- ・ 集中豪雨・台風等の災害をもたらす顕著な現象の今後の激甚化の可能性予測、地球温暖化の進行を背景として大気や海洋の長期変化の予測、温室効果ガスや汚染物質の排出増加にともなう地球環境の監視・予測に貢献する。
- ・ 「地球システムモデル」の成果は、モデルを様々な業務にそのまま適用することに加えて、「階層的な地球システムモデル」の考え方に基づき、モデルを構成する「コンポーネント」を各現業モデルに適した形で利用する方法で貢献する。

(学術的貢献)

- ・ 大気、海洋、波浪、陸面、雪氷、大気微量成分等の地球システムを構成する多様な地球システムの各構成要素とそれらの相互作用を「地球システムモデル」として総合的に扱うことにより、各構成要素を精緻に解析・予測できる最先端の数値解析予測システムを構築することが可能になる。
- ・ 台風・集中豪雨などの顕著現象における海洋の役割の解明が進展する。
- ・ 国際的な海洋観測網の維持発展に寄与し、国連海洋科学 10 年に貢献する。
- ・ 大気微量成分の再解析データの高度化により、気象、気候、社会研究等に貢献する。

(社会的貢献)

- ・ 本課題で得られる日本周辺の海況の将来予測に関する知見は、気候変動に伴う海面上昇量の検討など、「国土強靱化基本計画」で実施されている、気候変動の影響を踏まえた治水対策に係る基盤情報を与える。
- ・ 日本周辺海域の監視・予測能力の向上に資する海洋モデルや海洋データ同化システムの研究を進めることは、「海洋基本計画」が推進する海洋状況把握 (MDA) の強化や総合的な海洋の安全保障と持続可能な海洋の構築に大きく資する。
- ・ 大気微量成分に関する監視・予測情報の高度化は、運輸、産業、エネルギー、社会、疫学等の場面において持続可能な社会の実現に貢献することができる。

※ 添付資料

- ・ 課題説明図及び研究フロー図等